CRDS-FY2012-FR-06

研究開発の俯瞰報告書

ナノテクノロジー・材料分野(2013年)

Panoramic View of the Nanotechnology/
Materials Field (2013)

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

21 世紀に入って科学技術と社会の距離は急速に縮まり、科学技術には新たな産業や社会的価値の創出ばかりでなく自らが生み出したグローバル課題の解決に対しても大きな貢献が求められている。そのような「社会的期待」に迅速に応える「課題解決型」科学技術基盤の一つとして注目されているのがナノテクノロジーである。本報告書は、世界各国のナノテクノロジー・材料分野における国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化そして企業化動向を含むナノテクノロジー・材料分野全体を俯瞰した結果を記述したものであり、その結果をベースにして今後の日本の諸課題について言及している。

ナノテクノロジーは、物理学、化学、生物学を横断して、原子分子レベルの微小世界を扱う最先端の科学技術分野であり、物質科学や材料技術と不可分の領域である。事実、現在、欧米亜数十カ国が国の重点施策としてナノテクノロジーに国家予算を投入し続けている。その理由は、ナノテクノロジーが最先端の科学技術そのものであるというばかりでなく、異分野の融合を促進しつつ進化する技術分野だからである。融合による従来にない価値（知見、概念）の創造は競争力の源泉であり、産業創出に向けてナノのシステム化が進む。今回の俯瞰では、学際的・工学的融合を通じてのナノテクノロジーそのものの発展を「システム化過程Ⅰ」、また、既存技術も巻き込んでイノベーションへと進化する過程を「システム化過程Ⅱ」と定義している。とくに後者では、タコツボから飛び出して既存技術と結びつくナノテクノロジーの融合・統合化（Technology Convergence）が主役である。

本俯瞰を貫く思想は、ナノテクノロジーの「システム化」である。まず、「システム化」が求められる以前の「ナノの先鋭化」および「ナノの融合化」が過去 10 年にわたって重層的に進み、我が国が優位を誇ってきたこと、そして、ナノテクノロジー分野に莫大な成果と知見が蓄積された結果、「システム化」の機が熟し、「社会的期待」に応える技術のデザインが必要な時期であることが記述される。有識者による議論および研究開発戦略センターに蓄積された知見を元に、少なくとも今後 10 年間、定常的に注視すべきであろう分野として、30 の領域が選ばれ、それらが「システム化」の視点からグリーンナノテクノロジー、バイオナノテクノロジー、ナノエレクトロニクスと整理されて、俯瞰図が与えられる。このような視点で俯瞰した結果、ナノテクノロジーの 3 領域は、第四期科学技術基本計画の 3 つの目標、「グリーンイノベーション」、「ライフイノベーション」、「復興・再生」と良い対応が得られることも示される。また、「システム化」を進めるために、それを支援する制度として、融合や効率化のための共用施設・拠点の構築、融合・連携のインセンティブを付与するファンディング制度や体制の整備、ナノテクノロジー関連産業を支える人材育成策、標準化や環境・健康・安全の課題に対応する体制構築などの必要性が記述される。

上記「システム化過程Ⅱ」が求める Needs-driven 研究開発を進めるためには、「社会的期待」を科学技術的要求機能に展開し、機能を満たす構造や材料を、様々な制約条件のもと設計しなくてはならない。言い換えれば「デザイン型」研究開発の強化が今後の科学技術政策の根幹であり、「社会的期待」に具体的に応えつつ、設計の技術と能力を高めることが肝要である。一方、引き続き科学技術そのものの深化は必須であり、したがって科学技術コミュニティ側からの発想である「アナリシス型」研究開発も不可欠であるが、イノベーションへの距離を短縮するためには、「デザイン型」がより強調されるべきと論じ

られる。実際、今回の俯瞰で抽出された 30 領域で実施した現状分析において、「デザイン型」研究開発の端緒や可能性が多数、見出されている。

以上の主張の根拠となる国際比較を含む現状分析の結果概要を、グリーンナノテクノロジー、バイオナノテクノロジー、ナノエレクトロニクス、およびそれらを支える共通基盤技術の順で以下にまとめる。

グリーンナノテクノロジーは世界的に高い関心を集めており、基礎研究から産業化に向けて各国が精力的に取り組んでいる。全体的に見ると、我が国は基礎研究から産業化までのいずれの段階でも、欧米と肩を並べてこの領域を先導してきた。しかし、グローバル化が進んだ現在、ビジネスの速度は政治や科学技術の速度をはるかに上回り、意思決定の遅れから、太陽電池や二次電池のトップシェアは中国と韓国に奪われ、基礎研究や応用研究・開発においても急激な追い上げを受けている。このような状況の打開には、例えば、従来の 1/10 のコストで 10 倍の容量をもつ次世代二次電池のような競争力ある製品をいち早く実用化するなど、ビジネスと研究開発の好循環を生み出す必要がある。このことは、人工光合成、パワー半導体デバイス、グリーンプロセス触媒など日本が先行してきた基礎研究分野に対する警告にもなっている。基礎研究で先行しても、産学連携の大型プロジェクト、研究開発拠点の形成、および層の厚い人材育成などの支援策で遅れを取ると、システム化、産業化で容易に逆転される。今回の国際比較では、急速に進む欧米や中国の研究開発拠点構築に比較して日本の遅れが指摘され、懸念材料になっている。その一方で、元素戦略・希少元素代替技術のように、我が国が基礎研究から産業化まで圧倒的優位を保って

いるものもある。同技術については、米国で DOE の研究拠点が始動し、ドイツで計算科学の積極的活用が進み、また、中国と韓国は追い上げに力を入れているが、我が国でも大型プロジェクトが進行し、理論・材料開発・評価の密な連携によって研究の加速が図られている。

バイオナノテクノロジーの基礎研究と応用研究・開発では、日米欧が拮抗しているが、ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）やバイオイメージングについては、我が国が独自性・優位性の高い研究を進めている。一方、産業化では、生体材料（バイオマテリアル）のうち市場規模の大きな応用で日本の競争力は低く、その結果、応用研究開発力も低下傾向にある。これらの背景には、法制度整備の遅れやベンチャー企業環境の未成熟さが原因として存在する。中国と韓国は、基礎研究、応用研究・開発の全般的水準で日米欧には及ばないものの、特定分野では公的支援によって急速に力を付けつつある。半導体デバイス産業の競争力を背景にした韓国のバイオナノデバイスのように、産業化で日本を凌駕しつつある分野もある。

ナノエレクトロニクスでは、我が国は総じて高い技術水準を保つが、半導体分野で研究開発の拠点化とアライアンスが世界規模で進んでいる状況を見ると、将来はまったく楽観できない。特に主戦場となっている超低費消費電力ロジック・メモリについては、研究開発段階から既に欧米の後塵を拝しており、韓国と中国の追い上げも急である。その原因としては、我が国の半導体関連産業の競争力低下によるところが大きい。この状況を打破するためには、産学共同体制の抜本的な見直しと、根治療法として中長期的な視野での人材育成策が必須である。More than Moore の中心技術、具体的には異種機能三次元集積チップ、センシングデバイス・システムなどについては、我が国の基礎研究水準は世界的に見て高く、いくつかの大型プロジェクトも進行している。問題は今後の実用化段階であり、鍵となる回路・システムの設計技術に代表される上位技術の開発に日本の弱点があることを認識すべきである。

ナノテクノロジー・材料技術の共通基盤となるプロセス、計測、計算などについても、我が国の基礎研究の水準は世界的に見て高いが、やはり産業化で欧米のリードを許している。高分解能・高機能原子間力顕微鏡など、我が国が欧米に先んじて製品化しているものもあるが､研究室に設置された計測機器やシミュレーションソフトの多くが海外製である。このことは明瞭に深刻な日本の現実を物語っている。欧州の研究者が新しい計測技術を長い時間をかけて生み育てるのに対して、我が国の研究者は論文にしやすい基礎研究に止まる傾向にあるという指摘もある。

ナノテクノロジー分野への官民併せた世界の総投資額は 2010 年時点までで 1 兆 5 千億円を超えている（NSF の調査）。2015 年時点のナノテクノロジー産業の市場規模については、各種予測が発表されていて、85 兆円～ 270 兆円の範囲に収まっている。本報告書では、これらに関連して、世界各国で進められてきたナノテクノロジーに関する各種取組の推移および将来計画について詳細に記述され、日本の今後の課題が示唆される。要約を以下に示す。

（1）2001 年に、米国、日本、韓国、次いで台湾、中国、EU がそれぞれ独自のナノテクノロジー国家計画を立ち上げた。日本と中国を除き、2011 年以降もナノテクノロジー国家計画が更新・継続されている。米国と韓国は､”Technology

Convergence”（技術の融合･統合）を前面に出し、システム化の加速を狙う。中国は、北京に国際的なナノテクノロジー学術拠点、蘇州に広大な産官学工業園区を構築、台湾はナノテクノロジー製品の認証制度に成功している。

(2) 2006 年以降、アジア諸国、BRICs など、多くの新興国がイノベーションを目指して先端科学技術に国家投資を開始した。その象徴がナノテクノロジー国家計画である。マレーシア、ベトナム、タイ、イランも参入して世界で数十か国に達している。タイは本格的にナノテクノロジーに国家投資を開始、イランも中東ではトップの高い学術成果を生み出している。ロシアはナノテクノロジー公社を設立し、海外の拠点に資金を投入している。

(3) スピードが要求されるグローバル競争下で、発見・発案から産業化までの時間を短縮するため、異分野融合と産学連携を効率よく促進する共用施設ネットワークの構築が重要であるが、米国、EU、中国、韓国、台湾は投資を戦略的に行い、かなり充実している。日本は 2012 年度以降の共用施設新事業で追い上げを図っている。

(4) ナノサイエンス・ナノテクノロジーをベースにして理系の小・中・高一貫教育（K-12) システムの構築を図り、そのための教科書作成、教員養成プログラムなどを促進した（米国、台湾）。韓国はナノテクノロジーをベースにした高等教育用英文テキストを作成した。米国、韓国ではナノテクノロジー学部を設置した大学もある。

(5) 新産業の社会受容に向けて EHS（環境・健康・安全）や ELSI（倫理・規制・社会上の課題）、それにかかわる国際標準・規格（ISO、IEC）に関する議論が活発化している。米国、EU、韓国、台湾、タイは国策として重点化を公表している。

日本の動向と課題については、研究開発拠点、教育･人材育成、産学官連携、府省連携、ファンディング制度、社会受容に関する環境・健康・安全（EHS）課題、国際協働・標準化などに関して個別に論じられ、施策の功罪が指摘される。とくに、共用施設などのインフラ構築、教育･人材育成プログラムについては、米国、韓国、台湾が、ナノテクノロジー全体計画予算からの配分比率を決めて投資することにより長期の投資目標を達成しているのに対し、日本の科学技術基本計画にはそのような定量的な配算目標が設定されなかったために、戦略として脆弱にならざるを得なかった。ナノテクノロジーに限らず、今後の施策上の課題として早急に手が打たれるべき案件である。

融合と連携を促進する共用施設・研究拠点ネットワークは、今後の科学技術政策において投資効率を上げるための最重要インフラであるので、2012 年度に新たに発進したナノテクノロジー・プラットフォームの状況を常に注視し、その運用を継続・発展させる必要がある。また、光量子科学研究拠点、X 線自由電子レーザー（XFEL）のような大型施設、およびスーパーコンピューターも含む形で、ワンストップの共用制度の導入の是非を検討する時期に来ている。そのためには、我が国の研究大学および中核・共同研究拠点の国際化は喫緊の課題である。事務部門を含む現場の英語公用語化を進め、アジア諸国を含む世界から人材を吸引し、また、他国のネットワークと接続する環境を整える必要がある。また、そのような国際的環境で、異分野知識の吸収・融合、グローバル視点での社会ニーズの把握、急変する環境に対応した状況判断などを涵養する高等教育を行っていく必要がある。「システム化」を目指すナノテクノロジーは、そのためのよい土俵であり、環境の整

備に向けて、政府だけでなく、アカデミア側の自主努力が強く求められるところである。

以上、ナノテクノロジー・材料分野の少なからぬ領域で、日本は「システム化」と産業化で欧米に遅れをとっていること、さらに一部の分野では、アジア諸国の急進にも脅かされていることが、一定のエビデンスをもって定量的に記述されている。同時に、ナノテクノロジー・材料分野は、学術的にも産業技術的にも我が国が先導してきた歴史を有し、他の分野と比較して日本の強みを代表する分野であることも強調される。大きな課題として指摘されていることは、研究成果を素早く社会に実装していくための推進方策の未熟であり、システム化に向かう産官の仕組みの問題であり、科学技術に関わる人々のマインドセットの問題である。

Executive Summary

Since we entered the 21st century, the distance between science and society has rapidly shrunk. Not only is science, and technology as well, expected to produce new innovation, but it also has the significant role of solving global issues created by science itself. Nanotechnology is attracting attention as one of the bases of "issue-solving type" science and technology which can promptly meet such "social wishes". This report describes the results of the entire overview of the nanotechnology/ materials field including national R&D projects, relevant investment strategy, research potential, technological evolution and commercialization trends of each country in the world. The future issues of Japan are also referred to in this report based on such results.

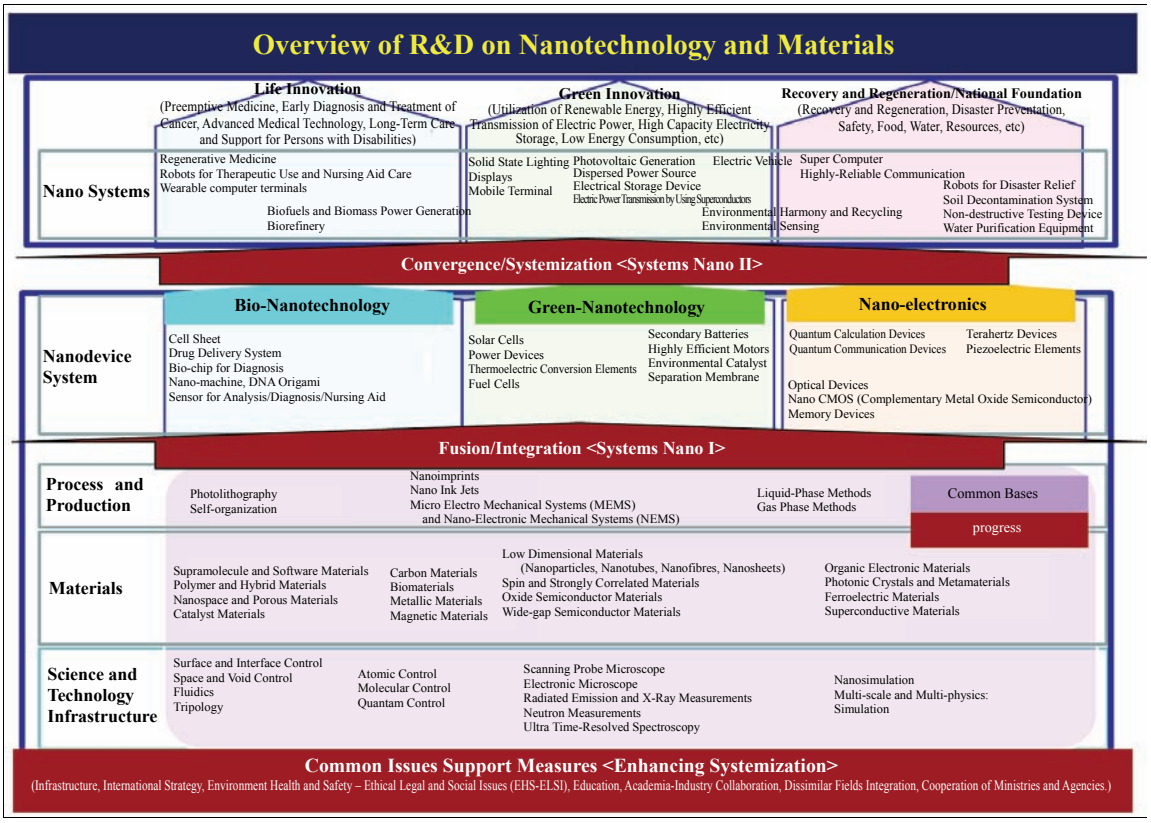
Nanotechnology is a cutting-edge field of science and technology dealing with the microscopic world of the atomic and molecule scale in physics, chemistry and biology, which is inseparable from the field of materials science and engineering. Presently dozens of countries in Europe, America and Asia are all allocating national budgets to prioritize nanotechnology as their intensive strategic measures. The reason for this is, not only is nanotechnology itself the state of the art in science and technology, but it is also an evolving technical field which accelerates the fusion of various fields. The fusion is the source of competitive power and enhancing the integration of nanotechnology towards creating new industry. In this report, the development of nanotechnology itself through the interdisciplinary and engineering fusion is defined as "Systems-Nano I", while the process evolving into innovation by involving existing technologies will be defined as "Systems-Nano II". Especially in the latter case, fusion and technology convergence of nanotechnology jumps out of the "foxhole" with existing technologies will take the leading role.

The consistent concept behind this report is "Systems Nano". Japan has predominated in nanotechnology by making multi-layered progress for the past ten years with the "Progress Nano" and "Fusion Nano" of which are preliminary steps before "Systems Nano" was desired. Now that we have accumulated vast results and knowledge in the nanotechnology area, the time is ripe for "Systems Nano" and it is necessary to design technologies meeting "social wishes". Based on expert discussion in addition to the knowledge accumulated by the Center for Research and Developmental Strategy (CRDS), 30 areas were selected as fields which we should pay close and constant attention for at least the next ten years. These areas have been organized into green nanotechnology, bio-nanotechnology and nano-electronics from the "Systems Nano" viewpoint, and summarized in the form of overview charts. From overviewing these areas with such viewpoints, the three areas of nanotechnology matches well the three goals of "Green Innovation", "Life Innovation" and "Reconstruction/ Recovery" mentioned in the 4th Science and Technology Basic Plan for the five years of FY2011-2015. In order to support the "Systems Nano", the necessity for the

following measures are described, i.e., the construction of common user facilities and bases for the fusion and streamlining, the establishment of a funding system and framework to provide incentives for the coordination and fusion, measures to develop human resources to support the future nanotechnology industry, and construction of frameworks corresponding to the issues of environment, health and safety (EHS) and standardization.

In order to proceed with the needs-driven R & D sought in the previously mentioned "Systems-Nano II", it is necessary to unfold "social wishes" into requested functions in terms of science and technology and then design structures and materials meeting the requested functions under various constraints. In other words, the enhancement of a "design based" R & D is the key of future science and technology policy. It is also important to improve skills for design while responding actually to "social wishes". On the other hand, the further upgrading of science and technology itself remain crucial. Thus, needless to say, the "analysis based" R & D, which originates from the ideas of the scientific community, is also indispensable. However, in order to shorten the time span reaching innovation, emphasis should be placed more on the "design based" R & D. Actually, many clues and possibilities of "design based" R & D have been found when analyzing the present state of the 30 prioritized areas extracted from the overview.

As the basis of the previously described assertion, the results of the analyses of present state including international comparisons are outlined below in the order of green nanotechnology, bio-nanotechnology and nano-electronics.



Green nanotechnology is drawing a lot of attention worldwide, and each country is vigorously engaged in this technology from basic research to industrialization. On the whole, Japan has taken the lead in every stage from the basic research to industrialization in this area, neck and neck with Europe and America. However, in today's drastic advancement of globalization, the speed of business excels the speed of science and technology by far. For example, from the delay in decision making, Japan lost its leading position in the share of solar batteries and secondary (rechargeable) batteries to China and Korea, which countries are also rapidly catching up Japan in the basic and applied research and development areas. In order to overcome such situations, Japan needs to create a positive cycle with business and R & D, for example, to quickly realize the practical application of a competitive product such as a secondary battery of the next generation that has ten times the present capacity costing only one tenth of the conventional product. This can be taken as a warning to the basic research areas such as artificial photosynthesis, power semiconductor devices, green process catalysts, etc., where Japan has been staying ahead of other countries. Even if Japan takes a lead in the basic research stage, it is easily outrun in the systemization and industrialization process if it lags behind in implementing supportive measures such as large-scale industry-academia collaboration projects, establishing R & D hubs, and developing abundant human resources. In the international comparisons carried out in the report, Japan's delay in the construction of R & D hubs compared to the rapid progress of Europe, USA and China has been indicated, which is a matter of concern. On the other hand, there are areas in which Japan maintains overwhelming predominance such as the inter-ministry collaborative program of the "Elements Strategy / Alternative Technology for rare earth elements", from basic research to industrialization. Regarding this technology, U.S DOE has initiated a center of excellence and Germany is proceeding with its active utilization of computational science, while China and Korea are trying hard to catch up. Nevertheless, there are on-going large-scale projects in Japan, and research is making solid progress under the collaboration of theory, materials development and characterization.

In the basic and applied R & D of bio-nanotechnology, Japan, Europe and USA are competing neck to neck. In the nano drug delivery system (Nano DDS) and bio imaging, Japan is proceeding with unique and competitive R & Ds. On the other hand, in industrialization, Japan's competitiveness is weak, in applications of biomaterials with large market size and as a result, there is a tendency in further lowering the applied research development capability. The delay in enacting necessary legislations and immatured venture companies are the back ground behind the weak competitiveness. China and Korea fall short of the general levels of Europe, USA and Japan in the basic and applied research and development, but are rapidly gaining strength in limited areas taking advantage of public support. Korea's bio-nanodevices using the technologies in their competitive semiconductor devices is about to surpass Japan in the industrialization of this field.

In the field of nano-electronics, Japan maintains generally high technical levels, but considering the global progress in the consolidation of R & D facilities and alliance in a global scale in the semiconductor area, we cannot be too optimistic about the future. Especially regarding the area of ultra-low power logic and memory, which is the main battlefield, Japan is already lagging behind Europe and the USA from the R & D stage, but now must face Korea and China quickly catching up. This is mainly caused by the decline in Japan's competitiveness in the semiconductor industry. In order to overcome this situation, Japan needs to drastically revise the academic-industrial collaboration system and develop and secure human resources from a mid-and-long term perspective as a basic remedy. As for the core technology of "More than Moore", such as the 3D integration chip for heterogeneous advanced devices and sensing device and systems, Japan's basic research level is high from a global standard, and several large-scale projects are under way. The problem also lies in the future practical application, where Japan should recognize its weakness in the development of its higher layer as represented by the design of the crucial circuits and systems.

The similar could be said for the processing technology, measuring technology and computational technology etc, which form the common base of nanotechnology and materials technology, where Japan's level of basic research is high from a global standard, yet it allows Europe and the USA to lead when industrialized. There are some cases in which Japan commercialized products ahead of Europe and USA, such as for the high resolution sophisticated atomic force microscope. However, it is needed to seriously accept the fact that many of the measurement devices and simulation software in the laboratory are foreign products. It is also indicated that while the European researchers tend to take a long time to create and develop measuring technology, Japanese researchers tend to remain in basic research, in which scientific papers are easier to be compiled for publication.

The total amount invested in the nanotechnology field on a global scale including both public and private sectors exceeds 1.5 trillion yen as of 2010 (according to a survey by NSF). Various predictions have been announced on the market size for nanotechnology in 2015, which fall within the range of 85 trillion to 270 trillion yen. In this regard, this report describes in detail the transition and future plans of the various approaches conducted around the world on nanotechnology, thus showing the future issues of Japan. The essential points are shown below.

(1) In 2001, USA, Japan and Korea followed by Taiwan, China, EU all set up national initiatives for nanotechnology. With the exception of Japan and China, all nations renewed or continued their national initiatives for nanotechnology even after 2011. The USA and Korea highlighted "Technology Convergence" and aimed at speeding up the "Systems Nano". China established an international nanotechnology academic base in Beijing, and a huge industry-government-academic techno-park

in Suzhou (Souzhou Industrial Park: SIP), while Taiwan succeeded in establishing a certification system called "Nano Mark" for nanotechnology products.

(2) Since 2006, many emerging nations including Asian countries, Brazil, Russia, India and China (BRICs) aimed at innovation by governmental funding to advanced science and technology. The national nanotechnology initiative of each country symbolizes this. Now Malaysia, Vietnam, Thailand and Iran have also entried, making the total to several dozens of countries throughout the world. Thailand has started to seriously invest its budget into nanotechnology. Iran has begun producing high academic results, and is top class in the Middle East region. Russia has set up a public corporation for nanotechnology and is investing in research organizations abroad.

(3) In global competition where speed is necessary, in order to reduce the time span from discovery and invention to commercialization, it is important to construct open user facility networks for effectively promoting the integration of dissimilar fields and academic-industry collaboration. USA, EU, China, Korea and Taiwan have made substantial strategic investments to user facilities for the last decade. Japan is aiming to catch up with the new project for user facilities named "Nanotechnology Platform" since 2012.

(4) To establish the scientific education system of a unified school program from kindergarten to high school known as K-12 with nano science and technology as the core, the preparation of text books and teacher training programs for this purpose were promoted in USA and Taiwan. Korea made English texts for higher education based on nanotechnology. Some universities in the USA and Korea even established nanotechnology faculties.

(5) EHS, ELSI (Ethical, Legal and Social Issues) and relating international standards and specifications (ISO, IEC) for the public engagement are actively discussed. Emphasis is made officially as the nation's measure in the countries of USA, EU, Korea, Taiwan and Thailand.

This report deals with the trend and issues of Japan regarding each of the following items separately and indicates the merits and demerits of the measures. They are: the hubs of R & D, education and human resource development, cooperation between industry, academia and government, coordination between ministries and agencies, funding systems, EHS issues related to societal acceptance, international collaboration and standardization. Especially in the case of constructing the infrastructure for user facilities and the programs for human resource development, USA, Korea and Taiwan have already achieved their initial purpose by allocating a certain quota share from the overall planned budget for nanotechnology. There is no such quantitative quota set in the Science and Technology Basic Plan of Japan, which is the reason why it did not function as a strategy. Not only in the case of nanotechnology, as future policy issues, we should also take measures to improve such problems immediately. The previously mentioned EHS issues are a good example for future budget allocations using this method.

User facilities and centers of excellence (COE) networks which enhance integration and fusion is the most important infrastructure for increasing investment efficiency. So, we always need to keep watching the state of the new program entitled "Nanotechnology Platform" which have just started from fiscal year 2012, and make sure its operation is continued and expanded. We are also in the phase of considering whether to introduce a common "one-stop" service for users, not only for nanotechnology user facilities but also for photon science research bases and large scale facilities such as for X-ray Free Electron Laser (XFEL) including super computers. To realize this, more rapid globalization of research universities and collaborative research centers is a pressing issue. It will become necessary to progress with adopting English as an official language for those working on-site, including administrative staff, attract human resources from throughout the world, including the Asian countries and also create an environment that can connect with networks of other countries. It will also become necessary to absorb and integrate knowledge of dissimilar fields, grasp the social wishes from a global perspective and provide higher education that cultivates situational judgment adaptable to sudden environmental changes. Nanotechnology aiming at "Systems Nano" would be a good stage for this purpose, and it is strongly hoped that not only the government but also the academia will make voluntary efforts to improve the environment.

As it can be seen, statistical data shows quantitatively, that Japan is lagging behind Europe and USA in the "systemization and industrialization in many areas in the nanotechnology/materials S&T field, and is also being threatened by the Asian countries in some of the areas. At the same time, it can be emphasized that the nanotechnology and materials field is a field which Japan has been leading academically and industrially from a historic point of view, and which represents Japan's advantage compared to other fields. The following are indicated as the major issues, which are, the lack of measures to promote the prompt implementation of research results to society, problem in the mechanism of government and industry moving toward technology convergence, and a problem set in the minds of those involved in science and technology.

目　　次

エグゼクティブサマリー

1．目的と構成 …… 1
1.1　俯瞰報告書作成の目的 …… 1
1.2　構成 …… 1

2．俯瞰対象分野の全体像 …… 2
2.1　分野の範囲と構造 …… 2
2.1.1　ナノテクノロジーの特徴と進化 …… 2
2.1.1.1　ナノテクノロジーとは …… 2
－ナノテクノロジーの定義 …… 2
－ナノテクノロジーの範囲 …… 2
－技術の進化過程　～先鋭化・融合化・システム化～ …… 4
2.1.1.2　課題解決の道筋 …… 5
－ナノテクノロジーのシステム化 …… 5
－機能設計から技術の統合へ …… 6
2.1.2　研究開発の俯瞰 …… 9
2.1.2.1　ナノテクノロジーの社会貢献シナリオ～第四期科学技術基本計画～ …… 9
2.1.2.2　研究開発領域の俯瞰 …… 10
－ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図 …… 10
－ナノテクノロジー応用三分野の俯瞰 …… 12
－基盤となる研究開発分野 …… 15

2.2　分野の歴史、現状、及び今後の方向性 …… 18
2.2.1　国際動向から見る分野の変遷 …… 18
2.2.1.1　ナノテクノロジーをめぐる世界の動き …… 18
－全体的な推移と状況変化 …… 18
－ナノテクノロジーの商業化の兆し …… 20
－各国のナノテクノロジー国家計画 …… 21
2.2.1.2　日本におけるナノテクノロジー　～前史と国家計画～ …… 32
－学術・技術・産業におけるナノテクノロジー前史 …… 32
－世界に先駆けたナノテクノロジー国家プロジェクト …… 33
－第三期科学技術基本計画の功罪 …… 34
－第四期科学技術基本計画における課題解決型政策 …… 35
2.2.2　今後の展望と日本の課題 …… 36
2.2.2.1　日本における問題意識 …… 36
－産学官が直面する現状 …… 36

2.2.2.2　日本の動向と課題 …… 38
－公的投資の配算構造化について…… 38
－関連施策の動向と今後の戦略…… 39

（付録 1）　２章参考資料
1．課題解決型科学技術政策～米国エネルギー省の例から～…… 49
2．物質・材料科学分野の技術開発俯瞰図（2008 年版）…… 50
3．科学技術ポテンシャルの国際比較概要）…… 51

3．研究開発領域…… 54
3.1　グリーンナノテクノロジー…… 54
3.1.1　エネルギーを創る …… 54
3.1.1.1　太陽電池 …… 54
3.1.1.2　人工光合成 …… 63
3.1.1.3　燃料電池 …… 69
3.1.1.4　熱電変換 …… 76
3.1.2　エネルギーを運ぶ・貯める …… 81
3.1.2.1　蓄電デバイス …… 81
3.1.2.2　パワー半導体デバイス …… 87
3.1.2.3　高温超伝導送電 …… 94
3.1.3　エネルギーを節約する …… 101
3.1.3.1　グリーンプロセス触媒 …… 101
3.1.3.2　ナノ組織構造制御材料 …… 106
3.1.4　環境を守る …… 113
3.1.4.1　元素戦略・希少元素代替技術 …… 113
3.1.4.2　分離機能材料による水処理 …… 121
3.1.4.3　放射性物質除染、減容化などの基盤的技術 …… 126

3.2　バイオナノテクノロジー…… 132
3.2.1　生体材料（バイオマテリアル） …… 132
3.2.2　ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）…… 138
3.2.3　ナノ計測・診断デバイス …… 144
3.2.4　バイオイメージング …… 151

3.3　ナノエレクトロニクス…… 157
3.3.1　超低消費電力ナノエレクトロニクスデバイス …… 157
3.3.2　異種機能三次元集積チップ …… 168
3.3.3　センシングデバイス・システム …… 176

3.4　ナノテクノロジー・材料科学技術基盤 …… 183
3.4.1　超微細加工技術 …… 183
3.4.2　ＭＥＭＳ／ＮＥＭＳ …… 191
3.4.3　ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化） …… 197
3.4.4　分子技術 …… 206
3.4.5　界面制御 …… 212
3.4.6　空間・空隙構造制御 …… 222
3.4.7　バイオミメティクス …… 231
3.4.8　ナノ計測 …… 239
3.4.9　物質・材料シミュレーション …… 257
3.4.10　リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容 …… 265

（付録 2）　国際比較表まとめ …… 282
（付録 3）　執筆協力者一覧 …… 284
（付録 4）　研究開発の俯瞰報告書　（2013 年）
全分野で対象としている研究開発領域一覧 …… 288

1. 目的と構成

1.1　俯瞰報告書作成の目的

この報告書は、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰結果を取りまとめたものであり、JST研究開発戦略センター（CRDS）が作成する俯瞰報告書（全7冊）の一部をなすものである。

俯瞰報告書は、CRDSが政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握している研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS独自の視点でまとめたものである。

俯瞰報告書は、各分野における研究開発の方向性や主要な研究開発領域、さらに国際的なわが国のポジションを把握するのに役立つ。また、複数分野の報告書を使うことで、複数分野にまたがる新しい切り口からの研究開発戦略を立案することにも役立つ。俯瞰報告書は、一義的には、CRDSにおける研究開発戦略立案に活用されるが、当該分野の動向を深く知りたいと考える政策決定者、行政官、企業人、大学・独法関係者、学生などに大いに役立つはずである。また、研究者にとっても、自身の専門分野を超えた範囲の状況を知る上で有益である。

1.2　構成

社会ビジョンの実現および科学技術の基盤充実とフロンティアの拡大を目指した研究開発戦略を提案するためには、科学技術に関する様々な研究開発全体の俯瞰が必要である。CRDSでは､研究開発が行われているコミュニティ全体を便宜的にいくつかの分野に分け、その分野ごとの研究開発状況を整理し可視化した俯瞰報告書を作成した。

具体的には、①環境・エネルギー分野、②ライフサイエンス・臨床医学分野、③電子情報通信分野、④ナノテクノロジー・材料分野、⑤システム科学技術分野、以上の5分野である。これらは、CRDSの内部組織であるユニットに対応している。「システム科学技術分野」は、これまで、わが国の科学技術政策において、特に重視されてこなかったが、CRDSとしてその重要性に着目し、1分野としてとりあげた。

俯瞰報告書本編は、上記5分野別に作成される。さらに、本編のほか、データ編として「データで見る俯瞰対象分野」、「主要国の研究開発戦略」が付随し、合計で7冊からなる。

以下、本報告書の「2．俯瞰対象分野の全体像」では、CRDSが俯瞰の対象とする分野をどのように設定し、俯瞰の枠組をどう設定しているかの構造を示し、そこから当該分野の主要研究開発領域をどう導出したかを説明しており､いわば我々の活動の土俵を定め、それに対する認識を明らかにしている。また、対象分野の歴史、現状、および今後の方向性についていくつかの観点から全体像を明らかにしている。この章は、その後の章のコンテンツ全ての総括としての位置づけを持つ。

「3．研究開発領域」では、俯瞰対象分野に存在する研究開発領域の現状を網羅的にリストアップして概説する。専門家との意見交換やワークショップを通じて、研究開発現場で共有されている情報をできるだけ具体的に記録する。また、研究開発領域ごとに主要国（原則、日本、米国、欧州、中国、韓国）を対象とした国際比較も行っている。

2　俯瞰対象分野の全体像

2. 1　分野の範囲と構造

2. 1. 1　ナノテクノロジーの特徴と進化

地球規模の現象は複雑系の極致であり、われわれに突きつけられた技術課題は、多様かつ革新的な進展を必要とするものである。特に、環境やエネルギーに関わる技術課題は、ある特定の学術領域や技術分野のみでは解決され得ないことが多く、必然的に学際的なアプローチと技術分野の連携および工学的融合が必須である。このような観点から、ナノサイエンスあるいはナノテクノロジーの学術上、技術上の特徴を明らかにし、グローバル課題解決への道筋を示す。

2. 1. 1. 1　ナノテクノロジーとは

＜ナノテクノロジーの定義＞

ナノメートルは、1 メートルの 10 億分の 1 で、物質中の最小構成単位の原子が数個並んだくらいの長さである。一般的にナノサイエンスあるいはナノテクノロジーは、1 ナノメートルから 100 ナノメートル程度の範囲の世界を対象としている。したがって、三次元の世界で考えれば、原子が数個から数万個集まった分子はこの領域に入る。人間の目で観察できる巨視的な世界では、全く異質でつなぎようの無い人工物と自然物（生体など）であっても、ナノの世界に入ると共通の原子が見え、類似の分子が確認できるようになる。つまり、人工物と生体との融合はナノの視点を以ってはじめて可能であり、事実、バイオナノテクノロジーという融合分野が開かれている。異分野の融合はナノテクノロジーの最も大きな特徴といえる。

融合によって新しい技術領域が生まれるナノテクノロジーの特徴を明確に表現するため、ナノテクノロジーを以下のように定義する。

［ナノテクノロジー］
1 ナノメートルから 100 ナノメートルの領域において物質を成長させ、加工し、そしてそのサイズのバルク・表面・界面の構造や、そこで生ずる諸物性現象を原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせて応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることにより、新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。

上記の定義にかかわる学術領域はすべてナノテクノロジーとして融合の対象となるが、中心になるのは物理学や化学を基本とする物質科学であり、それと分子生物学、構造生物学など生物学との接点が模索されている。また、正確には、学術的領域をナノサイエンス、技術的領域をナノテクノロジーと呼ぶべきであるが、一般的に、両方をあわせてナノテクノロジーと称することが多く、本報告書でもこの考え方を採用する。

＜ナノテクノロジーの範囲＞

ナノテクノロジーの各要素概念と含まれる内容の具体例を表 1-1 に示す。

「ナノ形成・加工」には、代表的な二つのプロセスがある。一つは、超 LSI（大規模集積回路）などの基本的な微細加工技術であり、バルク材料や薄膜材料を削り込んで所望のナノ構造を得る ” top-down ナノ加工 ”、もう一つは、原子や低分子あるいはカーボンナノチューブや微粒子などのナノ材料から出発して所望のナノ構造を自己組織的に形成する ” bottom-up ナノ形成 ” である。後者こそ、それが実現できれば、ナノテクノロジーの究極の形成・加工プロセスであり、“自己組織化” は前者の限界を克服、あるいは前者を補完する後者の鍵となる概念である。最近の成果では、超 LSI の世界で、ブロックコポリマーを使って自己組織化で低誘電率（low-k）材料を形成した例がある。これと ” top-down ナノ加工 ” である光リソグラフィーが組み合わされ、高速伝送が可能な多層配線層が形成される。このように二つのプロセスの融合も重要である。

表 1-1　ナノテクノロジー／各要素概念とその内容

要素概念	含まれる内容の具体例
ナノ形成・加工	top-down ナノ加工、bottom-up ナノ形成、自己組織化
ナノ構造	次元性、周期性、空間・空隙、粒子、超分子
ナノ界面・表面	物理的構造、化学的修飾、有機・無機・生体接合、固液界面、ホモ／ヘテロ接合
ナノ物性	量子効果、触媒効果、電子・光・熱物性、力学特性、輸送現象
ナノ計測	原子分解能、動的計測、三次元描画、単分子・孤立細胞計測
構造設計・機能設計	超分子設計、計算機シミュレーション、自己組織化論
ナノシステム	ナノテク・材料分野の要素概念・要素技術や他の概念・技術を集積（統合・融合）し、全体として重要課題の解決に資する高度な機能を提供し社会的に認知される部品・装置・システム

「ナノ構造」の具体例としては、金属や半導体の超微粒子、デンドリマーなどの超分子、ゼオライトなどナノ空間・空隙を利用した複合材料、そして、零次元、一次元、二次元の炭素ナノ構造体としてのそれぞれ C_{60}（フラーレン分子）、CNT（カーボンナノチューブ）、グラフェンがある。また、バイオの世界では、細胞は様々な「ナノ構造」で構成され、その機能は「ナノ構造」自体や「ナノ構造」間の複雑な相互作用を介して発現している。

ナノスケールの物質構造の最大の特徴は、①サイズ効果としての量子効果、②原子より 10 ～ 100 倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③表面・界面の原子の数が物質内部の原子の数に比較して無視できないほどに相対的に増えることから生じる「ナノ界面・表面」効果などにあり、これらが通常に見える物性とは全く異なる「ナノ物性」を生み出す。たとえば、多様な触媒効果や、物質定数から解放されて自在に変化する電子的・光学的・機械的・熱的特性である。今後、上述のグローバル課題に関連して注目されるのは、物質内にデザインして作りこむナノ空間・空隙内を利用した電子、イオン、分子の多様な輸送現象であり、その制御法や実現法は、エネルギー・環境分野において必須の技術と期待される。

「ナノ計測」と「構造設計・機能設計」は、ナノテクノロジー全体に必要不可欠な共通の実験観測手段と理論的設計手法を与える。この二つの要素概念の極限化と成熟がナノテクノロジー分野全体の進展を保証し、かつ、加速する。

「ナノシステム」は、ナノテクノロジー・材料分野の要素概念・要素技術と他の概念・技術とを集積（統合・融合）し、全体として重要課題の解決に資する高度な機能を提供する社会的に認知される部品・装置・システムとして定義される。ナノテクノロジーの要素概念ではなく、要素が集積されてひとつのシステムとしての機能を持つに至る過程と結果を含む概念なので、表中では他と区別されている。今後、ナノテクノロジーが現実のイノベーションに発展していく際に必要な概念である。

＜技術の進化過程　～先鋭化・融合化・システム化～＞

20 世紀初頭に現れた量子力学という全く新しいパラダイムに基づく固体科学（物理学）は 1947 年にトランジスタを生み出し、それがナノテクノロジーの前史となった。その後、半導体デバイス技術およびそれをベースとした半導体産業が興り、わずか半世紀の間に人々の生活スタイルを変えるほどに発展した。そのナノテクノロジーとしての象徴は CMOS トランジスタを高密度に集積した超 LSI であり、その微細加工技術は 20 世紀の終わりに 100 ナノメートルを切る分解能を確保している。並行して、真のナノサイエンスが現実の学術領域として市民権を得たのは、1980 年代の走査型トンネル顕微鏡、それに続く原子間力顕微鏡の発明によって、個別原子や個別分子を観察し操作する基本技術が実現した頃であろう。観察手段が利用可能になると同時に、超 LSI の進化によって演算能力が飛躍的に向上したコンピュータが原子や分子のダイナミックスを厳密に解く第一原理計算を可能とし、1990 年代にはナノサイエンスの理論計算の環境が整い始めた。その結果、ナノサイエンスとナノテクノロジーとが合体し、物理学、化学、生物学をベースとして、電子工学、バイオテクノロジー、材料工学などを横断する新しい学術・技術領域が誕生した。これが、前節で定義したナノテクノロジーである。

このように、ナノテクノロジーは、20 世紀に急速に発展した科学技術群に直結しているため日進月歩の進展が特徴であり、しかも、以下にナノエレクトロニクスを中心にして例示するように、技術は階層的に進化する。ナノテクの進化は、先鋭化→融合化→システム化のように進み、それらは重層的かつ階層的な世代推移を見せる。

ナノテクノロジー進化の第一は、「ナノの先鋭化」で、ナノレベルの微小化極限に向かう要素技術の先鋭化である。計測技術であれば、結晶を対象とする電子顕微鏡から個別原子・分子を対象とする走査型プローブ顕微鏡や単分子分光技術への進化であり、LSI における素子の微小化であれば、可視光から紫外光を使ったリソグラフィへの進化である。薄膜形成技術については、分子線エピタキシー技術により早くからナノの領域に入っていたので、「ナノの先鋭化」は 1980 年代に始まり、その後絶え間なく各種要素技術において進展していると考えられる。

第二は、「ナノの融合化」で、極限にまで先鋭化された要素技術同士の学際的な研究を通して異分野融合が惹起され、他の技術と結合して新機能を有する新しい融合ナノ技術に進化する段階である。LSI 素子の 100 ナノメートルを切る微小化を例に取れば、リソグラフィにおける紫外光の短波長化（つまり先鋭化）だけでは対応不可能となり、層間絶縁膜の誘電率を低下させるための材料技術（low-k 材料）やゲート絶縁膜の誘電率を上げるための材料技術（high-k 材料）が不可欠となった。つまり、微小加工技術と材料設計技術とが合体した融合技術への進化が起こった。事実、1990 年代の LSI（0.8 μ m）に使われていた元素は 11 種類であったが、2000 年代に入って 15 元素に増えている。「ナノ

の融合化」は、2000 年代の欧米亜の主要国におけるナノテク国家戦略の中で重点的に促進・加速が図られ、それ自体が戦略の中心をなし、より新しい産業を目指して現在も多様な進化を続けている。

第三は、「ナノのシステム化」で、先鋭化した諸々の要素技術やそれらが融合して新しく生まれた融合ナノ技術をシステムへと統合的に構成していく進化の段階である。LSI 素子の例においては、現在、デザインルールは 32nm を切って 22nm に向けて開発が進んでいるが、リソグラフィや low-k 材料、high-k 材料の進化と同時に、素子の三次元化、ハイブリッド化、ヘテロ集積化などを通して新しいナノエレクトロニクスのシステムを目指す段階にきている。使用される元素数は 60 種類に達すると予想されている。

ナノエレクトロニクスばかりでなく、再生可能エネルギーに関連しても、ナノテクノロジーを駆使した太陽電池、燃料電池、分離膜技術などが新しいエネルギーシステムを生み出し、また、バイオテクノロジーにおいては材料科学も捲き込んだ再生医療技術、DDS（薬物送達システム）技術、細胞シート技術などが医療システムに組み入れられ、臨床応用が進んでいる。これらをさらに発展させるためには、それぞれについて「ナノのシステム化」が今後の最終ステージとして重要である。

2. 1. 1. 2　課題解決の道筋

前節の議論から明らかなように、ナノテクノロジーは、「ナノの先鋭化」、「ナノの融合化」、「ナノのシステム化」、という三つの技術世代がそれぞれ重なり合いながら階層的かつ多様に進化し、他技術と工学的な融合を経て産業への出口へと向かう技術領域である。2011 年以降の日本の科学技術政策（第 4 期科学技術基本計画）は、「課題解決型」あるいは「課題達成型」と称されるように、持続可能な社会を実現する必要性が社会的期待としてグローバル課題の解決を科学技術に希求し、科学技術がそれに応えることを基本構成とするシナリオである。そのような政策下の戦略には、ナノのシステム化を通じて関連技術を工学的に統合することにより、課題を解決できる技術に仕上げる役割が求められるだろう。米国 NNI（National Nanotechnology Initiative, 国家ナノテクノロジーイニシアティブ）の実質的推進者である NSF（米国国立科学財団）の M.C.Roco の表現を借りれば、Converging Technology（統合化技術）がその役割を担うだろう。その関係が図 1-1 に示されている。

以下に、ナノのシステム化について分析を加え、ナノテクノロジーを科学技術全般と社会との関係の中で俯瞰的に位置づける。

＜ナノテクノロジーのシステム化＞

社会的課題を解決するために必要とされる機能は、単一の材料や単一のナノテクノロジーによって与えられるものではなく、多くの場合、異なる知識・技術が融合し、既存技術と連携し、1 つのシステムを構成することによって初めて発現される。前述のナノテクノロジーの進化過程全体を、拡張化されたシステム化という形で再整理してみよう。図 1-1 において、二つの過程に分けで考える。

システム化過程 I は、科学技術サイドから進行する進化で、「分析（アナリシス）」の科学が主役である。別の表現を借りれば、”Seeds-pushing “ Evolution である。各学術分野、技術分野において要素概念、要素技術が自発的に発展進化し、先鋭化する。その過程にお

いて他概念や他技術との融合も同時に進行し、新しい複雑な概念や複合技術も生まれる。この過程は、前節で論じた「ナノの先鋭化」、「ナノの融合化」に相当する。

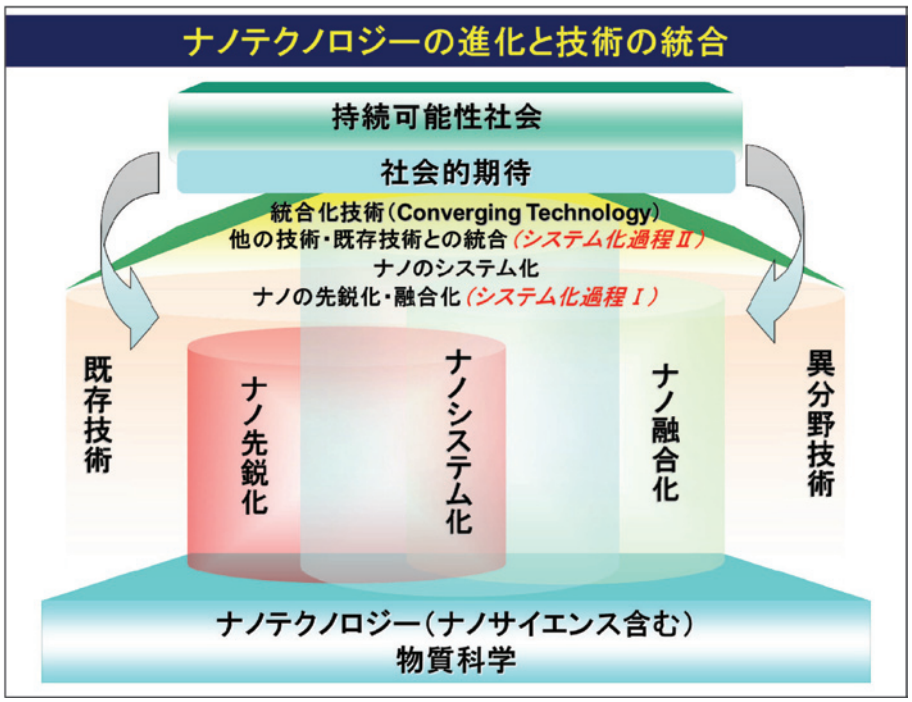


図 1-1　ナノテクノロジーの進化と技術の統合

システム化過程Ⅱは、社会的期待（課題）に応える技術を合目的的に具現化するような進化を意味し、ここでは、社会ニーズとしての課題を解決するための機能を概念的・技術的に設計する手段、つまり「設計（デザイン）」の科学が不可欠である。この過程は“Needs-driven” Evolution とも表現でき、ナノの先鋭化や融合化で生まれた新技術・新概念ばかりでなく、既存概念や既存技術も含めて、工学的に最適な組み合わせによって「ナノシステム」を構築し、課題解決の機能を実現する過程である。前節の「ナノのシステム化」に相当し、真の工学（Engineering）の舞台でもある。

上記二つの過程を促進し、加速するための支援策が必要である。支援策としては、学術的技術的な異分野融合、基礎と応用を結ぶ産学連携など、異なるセクター間のコミュニケーションの増進や機器類の効率的な使用を企図した共用施設ネットワークの充実、あるいは、国家プロジェクトにおける府省連携のしくみの改革、自治体を含む各セクターの自主努力やセクター間の協力などが挙げられる。グローバル競争ではあらゆる場面でスピードが要求される。そのためシステム化支援策の早期立案・実施は本質的に重要である。

＜機能設計から技術の統合へ＞

グローバル課題解決に貢献するツールとしてのナノテクノロジーを、社会と科学技術コミュニティ全体の中で俯瞰的に位置づけてみる。それを説明するための簡略化した二次元図を図 1-2 に示す。

図 1-2 において、最上部にはビジョンとして実現されるべき社会があり、ここでは「安全で健康な持続可能性社会」と表現され、底辺には、「科学技術コミュニティ」がある。

上部のグローバル課題を含む社会の要請「社会的期待」に対応して科学技術、とくにナノテクノロジーがどのような道筋で貢献していくのか、キーワードと矢印による簡略化されたフローとして示している。

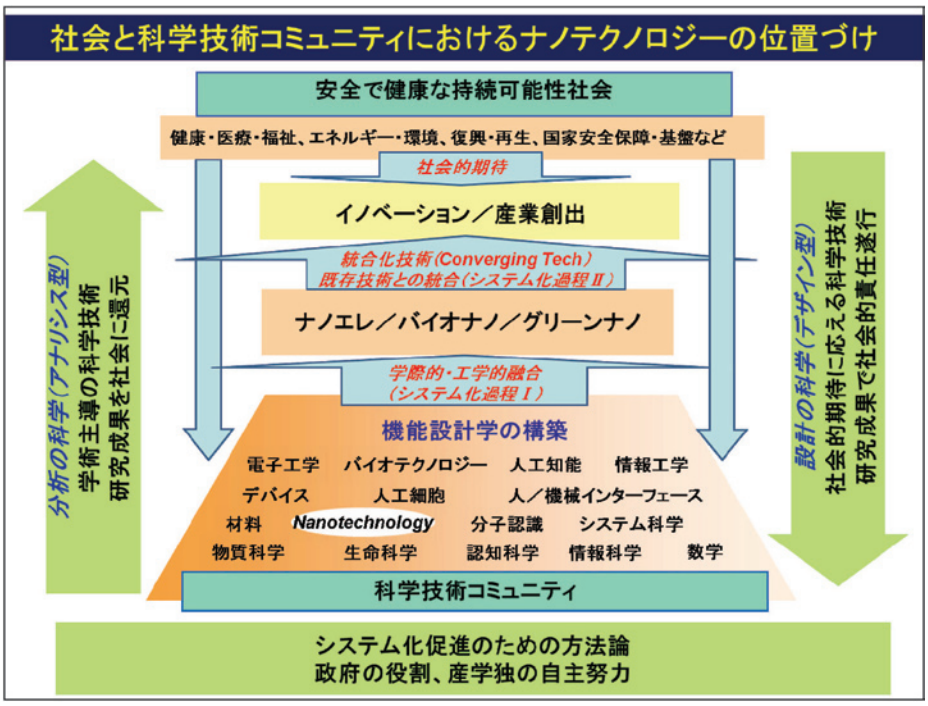


図 1-2　社会と科学技術コミュニティ／ナノテクノロジーの位置づけ

底辺の「科学技術コミュニティ」から見ていこう。ナノテクノロジーの定義でも記したように、ナノサイエンスは、物質を形成している最小単位の原子や分子が織りなすミクロの具象世界が舞台である。したがって、基本となる学術領域としては、横軸上左に位置する物質科学や生命科学が中心となる。言い換えれば、物理学、化学、生物学（分子生物学、構造生物学など）がコアとなるだろう。物質・材料あるいは生体に関わる対象は、単純系（原子、分子）から出発してさらに高次構造を目指して「先鋭化」やお互いの「融合化」を経ながらより複雑な系へと進化する。物質・材料を取り扱う科学技術領域は、多元系や超分子材料、新現象を利用した微小な機能デバイスからシステムを含むナノ電子工学へ、生体を扱う科学技術領域は生体分子から細胞へと対象を広げ、システム生物学（物理学や情報学を融合した生物学）、ケミカルバイオロジー（化学と融合した生物学）を巻き込んで広義のバイオテクノロジーに発展する。一方、横軸上右に位置する認知科学、情報科学は独自の進化を遂げて人工知能学や情報工学としてソフトのシステムを提供しているが、たとえば、シリコンナノ柱を使った電子回路による脳活動の三次元的な信号解析から人の夢を解析する試みがあり、ナノテクノロジーと認知科学の融合が一部で始まっている。あたらしい太陽電池や次々世代蓄電池用の新材料、省エネルギーのための固体照明など、エネルギー・環境技術への貢献が期待されるナノテクノロジーは枚挙にいとまがない。このような広範な学際的・工学的融合を通じて、ナノテクノロジーを真に吸収した新しい技術領域であるバイオナノテクノロジー、グリーンナノテクノロジー、ナノエレクトロニクスが生み出される。

以上の進化プロセスは、ほぼ、科学技術コミュニティ側の学術的なインセンティブで進行する。必ずしも社会のニーズに立脚して進むわけではないので、たとえ学術的な成果の質が高くても研究成果が社会に実装されるとは限らない。これは、「分析の科学」からスタートする「アナリシス型（あるいは Seeds-pushing）」研究開発の特徴である。

一方、2011 年以降の第四期科学技術基本計画においては、「課題解決（あるいは課題達成）型」戦略が基本になっているので、研究開発のインセンティブは、図 1-2 の上に位置する「安全で健康な持続可能性社会」から、「社会的期待」として「科学技術コミュニティ」に提示される社会ニーズによって与えられる。そこでは、低炭素社会を実現するエネルギー技術、生物多様性を維持する環境技術、健康・医療・福祉を充足する高齢化社会、原発事故を含む東日本大震災からの復興・再生、そして社会インフラを含む国家基盤の整備・保全、安全保障など、現在の日本の課題を含むグローバル課題が「社会的期待」の具体的な表現として仮に採用されている。このように、日本の緊急課題あるいはグローバル課題という形で「社会的期待」の内容が機能目標として示されれば、「ナノの先鋭化」や「ナノの融合化」によるナノ技術の進化、それらと認知科学や情報科学との学際的・工学的融合（システム化過程Ⅰ）を通してバイオナノテクノロジー、グリーンナノテクノロジー、ナノエレクトロニクスといった新領域が生まれ、目標達成に向けてナノのシステム化が進行する。ここでは、（1）ナノテクノロジーを既存のあらゆる技術とも融合・統合化（Technology Convergence）を図り、（2）全体を俯瞰して最適の知識と技術の組み合わせによって機能目標を達成する、といったプロセスが必要である（システム化過程Ⅱ）。以上のような「ナノのシステム化（システム化過程Ⅱ）」によって、社会的期待に対応した新しい「統合化技術（Converging Technologies）」がナノの世界に生まれ、それらがイノベーションそして産業創出につながっていくことが期待される。社会から課題として与えられた具体的な機能を設計し実現するこのような研究開発は、「設計の科学」（広義の工学）をベースにした「デザイン型（Needs-driven）」研究開発と表現できるだろう。

上述のように、本来、「工学」はあらゆる学術領域からの知識体系を最適に組み合わせ、目的の機能を持つ材料、デバイス、システムを生み出すための技術設計体系である。しかしながら、この半世紀ほどの間に、物質科学、情報科学の進展も含めて科学技術の裾野の拡大と成熟が進む一方、全体を見通すことが困難になっている。学術領域の融合は「工学」の本質でありながら、大学においてさえ工学部の各学科への専門細分化が進み、アカデミアのタコツボ化は一向に解消されていない。実はこのような状況を打破する学術・技術領域がナノテクノロジーであり、ナノの「先鋭化」、「融合化」、「システム化」を通して、「設計の科学」、あるいは「デザイン型（Needs-driven）」研究開発への貢献が期待されている。

以上の二つのタイプの研究開発アプローチは、どちらに偏っても問題が生じると考えられ、適当なバランスが必要である。ただし、グローバル競争に打ち勝つためには、科学技術の成果を素早く社会に実装する必要があり、そのスピードを上げるためにも、また、設計のための俯瞰的な視野を養成する意味からも、社会的期待に対応する「デザイン型 Needs-driven）」研究開発の進展が望まれるが、その度合は不十分である。第四期の科学技術基本計画において科学技術・イノベーションの一体化政策が謳われている所以である。

ところで、「デザイン型（Needs-driven）」研究開発を推進する際の大きな問題は、「社会的期待」に応えるための具体的な技術目標や定量的な目標機能をどう設定するか、とい

うことである。第四期基本計画の三本の戦略課題にしても、本来この課題をどう具体化して、どう定量化していくかが本質的な問題なのである。世界各国でも、先端科学技術政策において、このアプローチがとられた例は極めて少ない。米国エネルギー省の 46 のエネルギー・フロンティア研究センター（EFRC）のテーマ設定に際してこの手法が採用され、5 ～ 6 年の年月を要したという例があるのみである（付録「課題解決型科学技術政策～米国エネルギー省の例から～」を参照）。今後の重要政策課題のひとつである。

2. 1. 2　研究開発の俯瞰

本章においては、ナノテクノロジー・材料分野においてどのような科学技術領域が存在し、それぞれどのような構造を有しているのかについて、今後の第四期技術基本計画との整合性を意識しながら、有識者へのアンケートやワークショップを通じて現時点で得られている研究開発の俯瞰の結果を記述する。

2. 1. 2. 1　ナノテクノロジーの社会貢献シナリオ～第四期科学技術基本計画～

科学技術プログラムの研究成果からイノベーションを生み出し、新しい産業創出までどう導いていくのか、そのプロセスに要する時間をどう短縮するのか。これは、ますます激化するグローバル競争を勝ち抜くために世界各国の政府が共有する最大関心事である。日本政府の選択は、前節で論じたように、課題解決型（課題達成型）と称する新しい戦略を第四期科学技術基本計画に導入したことである。

これは、第三期科学技術基本計画における四つの重点科学技術領域（ライフ、情報通信、環境、ナノテク・材料）を柱とする重点化戦略から、社会的期待とそれを具体化した課題に応える戦略に切り替えたことを意味する。

その具体的な課題とは、エネルギーの安定供給と低炭素社会実現の両立を図る「グリーンイノベーションの推進」、高齢化社会に向けて医療・介護・健康を対象とする「ライフイノベーションの推進」、そして「震災からの復興、再生の実現」である。これらが戦略の三本柱であり、ナノテクノロジー・材料、および情報通信技術（ICT）は、三本柱を横串にして貫く共通基盤技術として位置づけられた。また、課題解決型の政策を効率的に進めるために、「科学技術」政策から一歩踏み込んで、「科学技術とイノベーションの一体化」政策を標榜している。

したがって、第四期基本計画においては、ナノテクノロジー・材料領域は、独立したイニシアティブとしては設定されていない。これは、後述するように、2011 年以降も省間横断の重要イニシアティブとして戦略化されている米国の NNI と事情が大きく異なるところである。そのため、日本の第四期基本計画においては、横断的な基盤科学技術が三つの戦略政策課題ごとに個別に貼り付けられることによって過去 10 年に亘って形成されてきた学術・技術分野のネットワークが分断される恐れがあり、その恐れは融合の途上にあるナノテク・材料分野において最も大きい。各政策課題と、それらを解決するためのツールとしての学術・技術分野群とをマトリックスとしてどうバランスよく結合させ、全体を推進していくのか、この課題に対して、連携と融合を継続して促進し、「ナノのシステム化」が実現するよう施策として具体化していくことが肝要である。

2. 1. 2. 2　研究開発領域の俯瞰

本項では、今後の科学技術・イノベーション政策におけるナノテクノロジー・材料の果たすべき役割を見据え、この領域の研究開発を課題解決型政策の中にどのように組み込むべきかを具体的に議論し、研究開発領域の俯瞰の結果を概括する。

＜課題解決型政策に対応した俯瞰図の作成＞

従来は、図 1-1 および図 1-2 に示されているように、「科学技術コミュニティ」側から「アナリシス型」の視点で学術要素、技術要素が細部にわたって整理され、戦略策定上必要な戦略キーワードが抽出されて研究開発俯瞰図が作成された。このような俯瞰図は、課題解決型政策においても不可欠であり、特にナノテクノロジーのように広い学術領域を包含する分野においては必須のものである。CRDS で作成したものの中で、2008 年版の物質・材料分野研究俯瞰図（CRDS-FY2008-WR-05）を若干改編したものを付属参考資料として後掲する（付録「物質・材料科学分野の技術開発俯瞰図（2008 年版）」参照）。これは、以下に論じる課題解決型政策における俯瞰図と相補的な関係にあり、課題解決を意図した重要研究領域の抽出過程やその合理性を理解するうえで重要な役割を果たす。

第四期基本計画に解決されるべき課題として掲げられたのが、「グリーンイノベーション」、「ライフイノベーション」、「復興・再生」の政策課題の三本柱である。課題解決型の政策においては、これら三大政策課題を社会的期待として演繹的に重要研究課題を決定する（「デザイン型」）ことになるが、そのような重要研究課題の抽出方法は、第一章に記したごとく、概念実証段階にあって未完である。以下の俯瞰図については「グリーンイノベーション」、「ライフイノベーション」、「復興・再生」の三大政策課題の代わりに、基本的には、図 1-2 に示されている統合化技術のベースである「グリーンナノテクノロジー」、「バイオナノテクノロジー」、「ナノエレクトロニクス」という形で出口を整理し、要素技術と交差させた上で、重要研究課題およびキーワードを抽出することにする。

＜ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図＞

これまでの蓄積やワークショップなどの結果を含めて総合的に議論し、要素技術やキーワードを整理して作成したのが、図 1-3 のナノテクノロジー・材料分野の技術俯瞰図である。これは、既刊の物質・材料分野の技術俯瞰図（付録参考資料 2 参照）、さらに「ナノテクノロジー・グランドデザイン」（CRDS-FY2009-SP-07）中のナノテクノロジー・材料分野の重要課題図などとの整合性を考慮した上で作成されている。

図中、ナノテクの応用分野として、「グリーンナノテクノロジー」、「バイオナノテクノロジー」、「ナノエレクトロニクス」を横に並べ、それに交差させて、下から要素技術を「ナノ・材料科学技術基盤」、「材料」、「プロセス・基盤」、「ナノデバイス・ナノシステム」と順に配置している。この二次元マトリックス上に抽出された具体的な技術課題が俯瞰的にまとめられている。また、戦略を進める上での、融合連携促進策やインフラ、人材育成策、EHS（環境・健康・安全）および ELSI（倫理的・法的・社会的課題）などの共通課題は、マトリックス下段に整理されている。

一方、最上層の「ナノシステム」は、システムとしての機能が合目的的に設計されるはずであるから、課題解決のための「グリーンイノベーション」、「ライフイノベーション」、「復興・再生」の三大政策課題に対応させて整理しておくべきと判断して、図 1-3 の最上段に

図 1-3　ナノテクノロジー・材料分野の技術俯瞰図

単独で示すようなまとめとした。

地球規模の問題解決に対しては、物質・材料のイノベーションが必要であるとして「グリーンナノテクノロジー」への期待が高まっている。米国のオバマ政権が打ち出したグリーン・ニューディール政策をはじめ、各国の様々なエネルギー・環境政策には、多くのナノテクノロジーをベースとした技術開発が含まれていることは、2.1.1 で記した通りである。太陽電池から断熱材、軽量輸送材、環境浄化膜、そして、長期的な技術としては人工光合成に至るまで、極めて広い材料技術群が含まれている。

また、「バイオナノテクノロジー」は、再生医療材料などの革新医療技術、患部を狙い撃ちするナノテク利用のナノ DDS（薬物送達システム）、生体に適合する新材料などの生体への応用、将来の細胞内ナノサージェリーなどが含まれている。

さらに、「ナノエレクトロニクス」は、基幹産業であるエレクトロニクスの国際競争力維持のために必須であり、微小化の極限（ナノの先鋭化）から、光・スピン・バイオ・MEMS との結合による多機能化（ナノの融合化）、高精細ディスプレイやウェアラブル情報端末への応用によるナノのシステム化へと移行していくだろう。同時に、新材料のエレクトロニクスへの応用がますます進むと思われるが、実際、ナノテクノロジー・材料分野から生み出された CNT（カーボンナノチューブ）、TAOS（透明アモルファス酸化物半導体）、IGZO（In-Ga-Zn-O）などの新材料が汎用ディスプレイ製品に組み込まれ始めている。

第四期科学技術基本計画においては、ナノテクノロジー・材料や情報通信技術は、前述のように、政策課題の三本柱を横串として貫く共通基盤技術の位置づけになっている。と

くに、「震災からの復興・再生」という緊急の政策課題に対しては、「グリーンナノテクノロジー」や「バイオナノテクノロジー」だけでなく、共通基盤技術としての「ナノエレクトロニクス」および既存技術も含めて統合的な技術集積を図る「ナノデバイス・ナノシステム」が大きく貢献するものと期待される。具体例としては、放射能汚染状況の広域的なモニタリングシステム、関連する環境センシングシステム、災害救助ロボット、土壌除染システムなどが挙げられる。ライフサイエンスの視点からの環境問題へのアプローチ、バイオテクノロジーを応用した電子デバイス、新エネルギー創出に資する情報通信技術、情報通信技術と医療技術の融合など、ナノの「システム化」によってどれだけ出口に近い成果を多く生み出すことができるかが、今後のわが国産業の国際的優位性確保の分かれ目になる。

上記のようなナノテクノロジーの進化を加速するために政府が用意すべき施策としては、異分野の研究者同士の融合や産学官の連携を促進･加速する共用施設インフラの整備、インセンティブを与え続ける戦略的なファンディング制度などである。また、個別政策課題ごとにナノテクノロジー分野のネットワークが分断される事態を防ぐために、前述したように、政策課題と直交させて全体をマトリックスとして運営することが重要と考えられる。

＜ナノテクノロジー応用三分野の俯瞰＞

図 1-4 は、「グリーンナノテクノロジー」、「バイオナノテクノロジー」、「ナノエレクトロニクス」における分野別の諸重要課題について、実用水準に達するであろう時期を 20 年先まで時間軸上に示したものである。これらの結果も、前述の有識者に対するアンケートや、ワークショップでの議論をもとに、当センターの責任でまとめたものである。詳細な説明は以下の各論で与えられる。

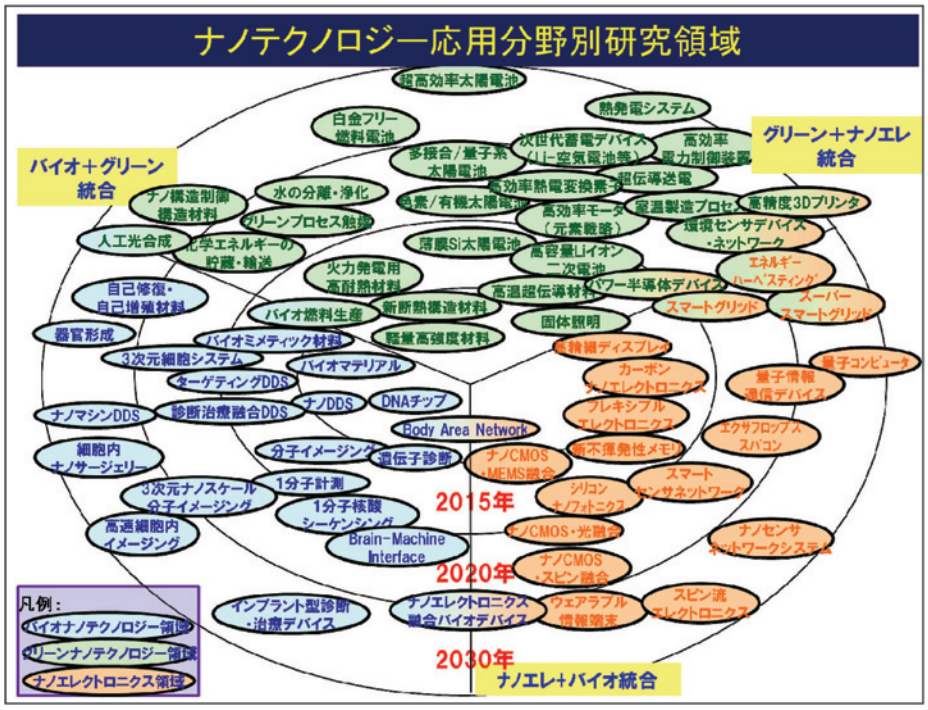


図 1-4　時間軸上に整理したナノテクノロジー応用分野別研究領域

グリーンナノテクノロジー

図 1-5 のグリーンナノテクノロジーとは、クリーンエネルギーの安定確保（再生可能エネルギー拡大、発電効率向上）、分散型エネルギーシステムの拡充（エネルギー変換・貯蔵・輸送）、エネルギー利用の革新（省電力、エネルギーの高効率利用）、社会インフラのグリーン化（地球環境情報プラットフォーム構築、エネルギー・環境先進まちづくり）などのグリーンイノベーションに貢献するナノテクノロジー・材料を意味している。太陽電池・燃料電池・二次電池や熱電変換素子などの電気エネルギー生成・貯蔵に関する技術開発では、いずれも高効率化・低コスト化が大きな課題であり、それに向けた材料・技術開発が進められている。エネルギー変換に関しては、人工的な光合成反応による光水分解からの水素生成などが注目されている。エネルギー輸送に関しては、高温超伝導材料を利用する送電網や数種類の発電システムを有機的に連携することにより、低損失で安定な電力供給を実現する検討も行われている。エネルギーの高効率利用に関連するものとしては、機能分子材料の適用や微細構造制御による断熱軽量化材料などの研究も盛んである。

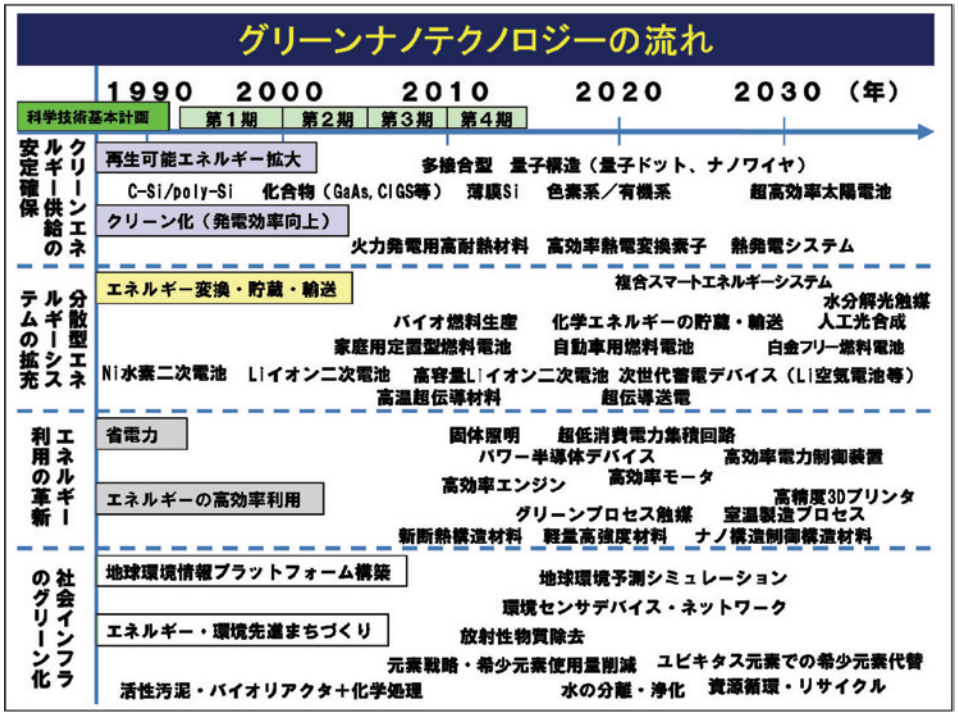


図 1-5　グリーンナノテクノロジーの流れ

また、製造プロセスにおけるグリーンサステイナブルケミストリー、バイオリファイナリー、革新的触媒技術なども研究開発されている。社会インフラのグリーン化に関連しては、レアアースなどの希少金属や希少元素の使用量削減や代替を目指した府省連携プロジェクト、水の分離・浄化を効率的に行う研究開発が強力に推進されている。

バイオナノテクノロジー

従来のライフサイエンスやバイオテクノロジーとナノテクノロジーや物質・材料科学とが融合して生まれた分野を、バイオナノテクノロジーと呼ぶ。図 1-6 に示されているよう

に、ナノテクノロジーの最大の特徴である異分野融合の典型例として今後も発展するものと期待されている。例えば､疾病の早期診断などで必要となる１分子計測や１分子核酸シーケンシングは原子や分子を直接観察し制御できるナノの領域ではじめて可能になる。社会からの強い期待がある再生医療では、組織工学で必要とされる足場材料の開発・高機能化が不可欠である。将来的には三次元細胞システムの構築に向け、細胞のマニピュレーションや細胞状態の計測・制御にナノテクノロジーが活用されるものと予想される。生体適合／代替材料やナノ薬物送達システム（ナノ DDS）などにより、バイオナノは、安全・安心な社会の基盤となる医療・健康分野におけるさまざまな課題の解決に寄与する。また、生体機能と情報通信技術の融合などを通じて高齢者や障害者の QOL の向上に貢献するとともに、新しい産業の創出の核となる可能性を持つ。

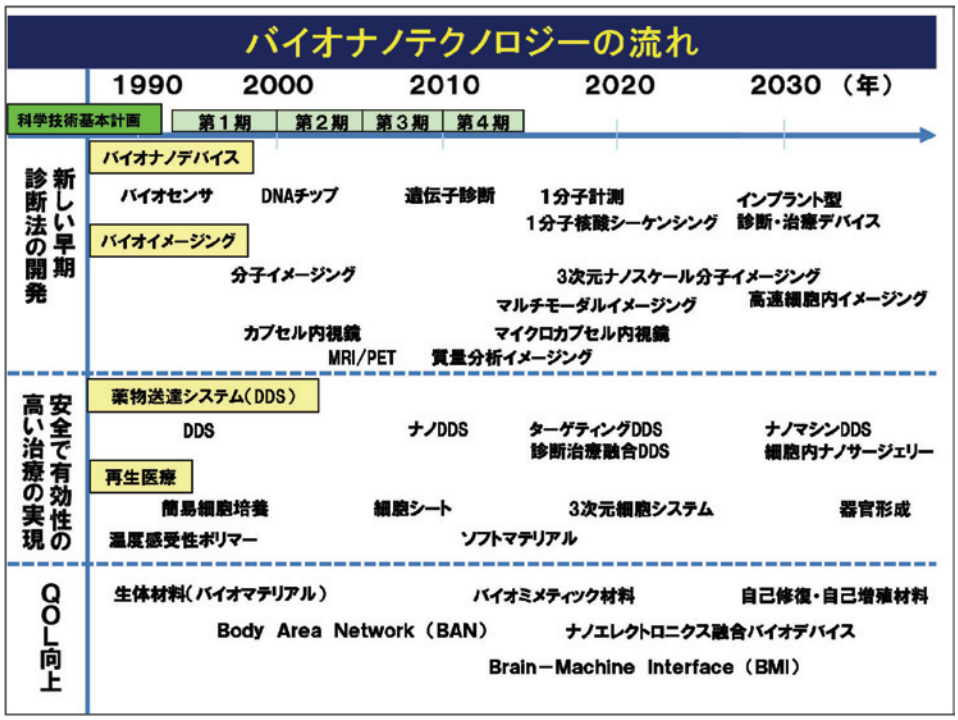


図 1-6　バイオナノテクノロジーの流れ

ナノエレクトロニクス

低炭素社会や快適・便利・ユビキタス社会の実現に向けて鍵となるのが、図 1-7 のナノエレクトロニクスである。高度情報通信社会の基盤をなすエレクトロニクスデバイスのさらなる高性能化（高機能化）へのニーズはあるが、一方で、社会の要請として低消費電力の流れはますます強くなる。現状の CMOS デバイスは、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大、素子の消費電力増大などが見え始めている。この限界を突破する方策として、ナノ CMOS とスピンデバイス、光デバイス、MEMS、バイオセンサ、パワーデバイスなどを組み合わせて融合した、ハイブリッドナノデバイスの実現が期待されている。このようにナノテクノロジーを駆使して、従来の CMOS デバイスだけでは実現できない新しい機能を持ったデバイス・システムを開発することが可能になる。また、これらのナノ CMOS 融合技術は、将来のエクサフロップス・スパコンの心臓部の LSI 開発の基盤技術にもなる。また、コンピューティング以外では、MEMS ／ NEMS、無線デバイス、マイ

クロエネルギーデバイスなどの融合を経て、最終的にはナノセンサーネットワークの実現につながる。また、パワーデバイスと各種エレクトロニクスの融合で、低炭素社会実現の鍵となるスーパースマートグリッドの実現へとつながっていく。現在、ナノ CMOS を中心とするナノエレクトロニクスの融合は、将来の様々なアプリケーションを睨みながら、世界的に競争が激化している分野である。

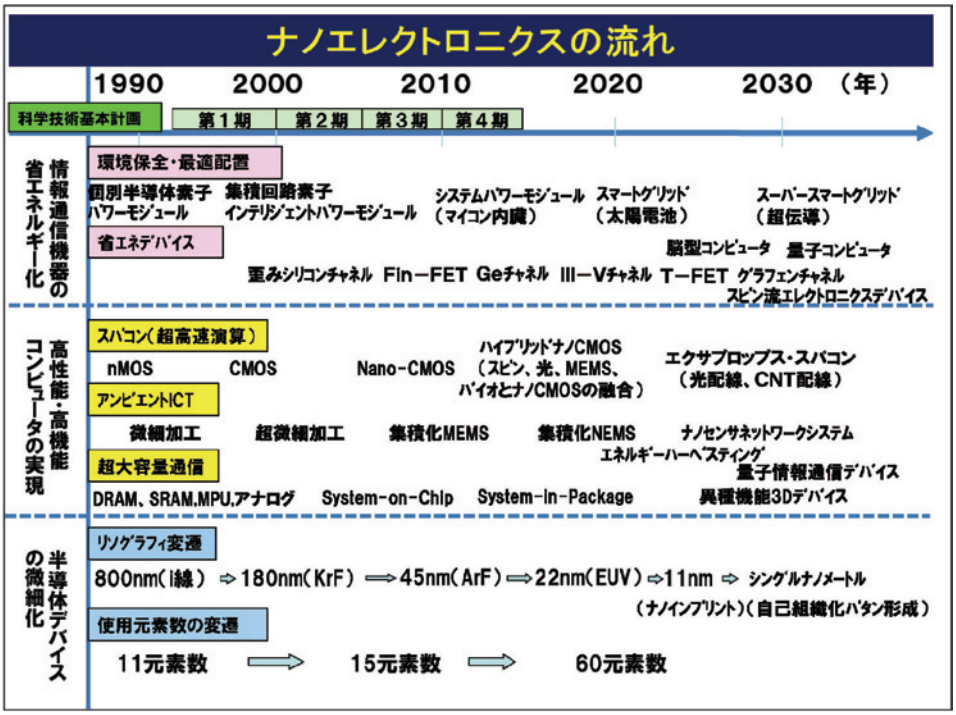


図 1-7　ナノエレクトロニクスの流れ

＜基盤となる研究開発分野＞

グリーンナノテクノロジー、バイオナノテクノロジー、ナノエレクトロニクスの三応用分野を支えるとともに、それぞれの領域の最先端研究を牽引するのが、材料、プロセスを含む「ナノ共通基盤技術」である。

今後の物質材料研究の大きな方向性として、前述のグローバル課題解決に貢献する物質材料の機能設計がある。これは、与えられた元素組成や構造から物質の性質を計算で求めるという順方向の手順とは異なり、社会の要請としてニーズ側から突きつけられた特定機能を有する材料を設計あるいは探索する技術（逆設計と称される）を総称しており、工学の立場からは究極の技術である。量子力学、固体物理学、量子化学などを横断して構造化された形式知、豊富な経験と鋭い物質観に裏打ちされた属人的な暗黙知、理論モデリングと超高速コンピューティングによる最先端のシミュレーション技術、および実験、計算などの結果を統合したデータベース、これらを総合的に駆使して、グローバル課題に対応した材料機能を探索し、設計するというのが冒頭の方向性である。日本が最も高い国際優位を保っているのはこの学術・技術領域である。これは、解析的なアプローチが不可能なことから、いわゆる「逆問題」（逆設計と同義）への挑戦を意味しており、そのために上記のような総合的なアプローチが不可欠なのである。

制御や設計の対象としては、結晶格子や分子・配向の制御（格子設計や固溶・欠陥導入

による局在性・周期性の実現、圧電材料の欠陥制御、超分子電荷移動体のエントロピー制御、磁性材料のアモルファス構造の制御など）、表面構造の制御（表面加工、イオンビーム照射、表面アルケミーによる機能性表面の実現）、空間・空隙構造の制御（ナノ、マイクロ、ミリのマルチスケールのポーラス構造などで、高比強度、高靭性、選択透過性・反応性などを実現）など、広範にわたる。さらに、これら形態制御や構造制御の技術を、先端計測技術、物性理論モデリングや計算機シミュレーションと組み合わせて、新機能の実現や、希少元素を代替する革新的材料の実現を目指す。これらを支えるツールとして、網羅性と運用性を兼ね備えた物質・材料データベースの構築・維持が重要である。第三期にスタートした「元素戦略」プロジェクト、第四期の「元素戦略／研究拠点形成型」プログラム（2013 年度から 10 年間）は、上記の好例である。

さらに、磨き続けておくべき「共通基盤技術」としては、先端の計測・解析技術、あるいはナノ加工プロセス、計算科学がある。

「加工プロセス」については、トップダウン・プロセスの典型である超 LSI 微細加工技術に対して、ボトムアップ・プロセスの典型として自己組織化がある。原子・分子から出発して材料やデバイスを逐次積み上げていくことを想定した場合、「自己組織化」はスループット（単位当たりのプロセス速度）の視点からは欠かすことのできない概念である。生体では、DNA（分子）→蛋白質→細胞→組織→個体へと自律的かつ階層的に構造形成が進む点で、「階層的自己組織化」が実現されている。このプロセスの理解と応用がナノテクノロジーにおけるボトムアップアプローチの究極の目的の一つとなる。生体内における階層的自己組織化の学術的な理解だけでなく、新しい材料として、デンドリマー、有機ナノチューブなどのナノ・マクロの空間をデザインした超分子材料、カーボンナノチューブ、スライドリングゲル、フォトニックゲルなどの機能性ゲル、DNA 折り紙、前述のブロックコポリマーを利用した次世代半導体集積回路用の低誘電率材料が開発されてきた。しかしながら、ナノテクノロジーとしてその成果を総体的に見ると、応用への展開は未熟と言わざるを得ない。自己集合の階層的発展の理論、非平衡開放系における時間・空間上の散逸構造の解明、平衡論と速度論の使い分け、ゆらぎの効果などサイエンスを巻きこんだ基本課題についても、出口からの位置付けが必須となろう。

「ナノ計測・解析」については、三次元計測、動的・リアルタイム計測、界面および内部計測などが、今後のナノ領域における科学（ナノサイエンス）に必須であり、また、プロセスの微視的解明のためには、使用環境下でのその場計測技術が必要である。事実、複雑な使用環境下や生体を生きたままでその場計測する技術には非常に高いニーズが存在する。例えば、生体の細胞表面や究極的には細胞内部を三次元的にその場観測するためにも、触媒や燃料電池の内部反応状態を解明するためにも、その場観察技術が必要である。他にも高温、ガス環境、電場、磁場、応力などの「環境下」の問題があり、また、応力に代表される機械的な特性のナノ計測はこれまでほとんど未着手である。これら実環境下におけるその場計測のためには、空間と時間の解像度を極限まで高めたナノ計測技術が不可欠であり、その極限技術の代表として日本政府は国家基幹技術として X 線自由電子レーザ（XFEL）に投資し、平成 24 年、播磨に SACLA として完成を見た。これは、米国に次いで世界で二つ目の拠点である。

「計算科学」も、今後、ナノテクノロジーの基盤的技術として本質的に重要な役割を果

たす。特に目的機能を持つ新材料を創成するために必要となる動的過程のシミュレーション技術などには不可欠の武器である。大きな役割を果たす計算手法のひとつは、量子力学を考慮した第一原理計算による分子動力学で、10 ペタフロップスの演算能力を誇るスーパーコンピュータ「京」の完成により（平成 23 年）、現状では原子数が数十万個程度の系を対象にできるようになり、存在感が急激に増している。今後は、理論モデルと計算を合わせたハイブリッドな方法で現実の複雑な系を追い込んでいくこと、特に非平衡開放系の現象をどう表現するかが重要な課題となる。これは、ナノの進化過程で言えば「ナノのシステム化」に相当する。計算科学の真髄は、より複雑なシステムに向かってその能力を拡大していけることである。例えば細胞はナノスケールにおける複雑なシステムであるが、演算能力の向上とともに分子レベルで仮想的な細胞をコンピュータ内で自己組織的に再構築できる可能性がある。また、システム自身は、ナノスケールばかりでなく人間社会の現象、地球規模の現象などマクロスケールのより複雑な系にも拡大し、データベースやインフォマティクスと結合したマクロ複雑系のシミュレーションによる現象解析に向けて、計算科学への期待は益々高まりつつある。

スーパーコンピュータの開発競争は、依然、終息の気配を見せておらず、実際、日本の「京」が開発当時に世界一の計算速度（平成 23 年 6 月、11 月）を誇ったものの、平成 24 年 11 月時点では米国の二社に追い抜かれて第三位に落ちた。より高い性能を目指して開発の継続が必要である。

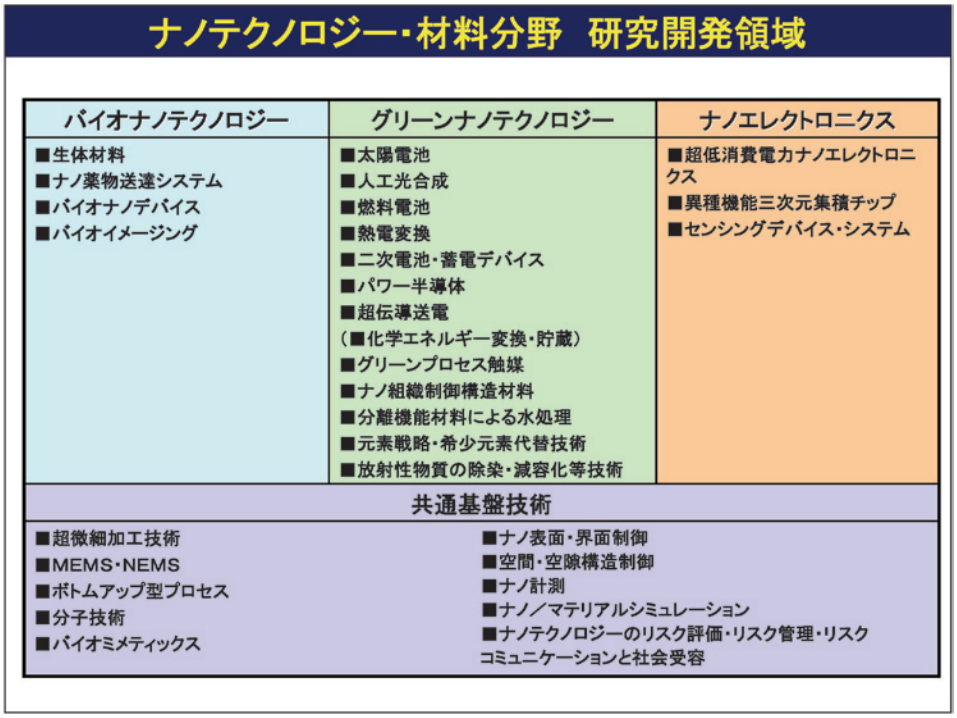


図 1-8　ナノテクノロジー・材料分野の研究開発領域

以上に記載した動向を踏まえ、今回の報告書では、ナノテクノロジー・材料分野において少なくとも今後 10 年間定常的に注視すべきであろう領域として、30 の領域を抽出した。それぞれについて、図 1-8 に示す。個別の領域の現状や国際比較について 3 章で記載する。

2. 2　分野の歴史、現状と今後の方向性

2. 2. 1　国際動向からみる分野の変遷

本章では、2000 年以降、ナノテクノロジー国家計画への戦略投資を継続している欧米亜の主要国を中心に、世界各国のこの 10 年間の動きを、戦略の構成、研究拠点・共用施設ネットワーク、教育・人材育成、イノベーション推進、技術の社会受容などの視点で概観し、世界における日本の立ち位置を確認する。

2. 2. 1. 1　ナノテクノロジーを巡る世界の動き

＜全体的な推移と状況変化＞

2010 年に、米国 NSF の主導で、10 年間の世界的な国家投資の経済への効果を評価分析すべく、関連する国際的な社会・経済状況の変化および今後の展望を含め、日米欧亜に亘る国際的な規模での議論があった [1]。日本は、平成 22 年 5 月に開かれた日米韓台国際共同ワークショップを、CRDS が中心となりホスト国として開催し、この国際的な規模での議論の枠組みに主導的に参加した（CRDS-FY2010-WR-06）。その際の議論をベースにして、以下、この 2、3 年に見え始めたナノテクノロジーの世代進化も含め、10 年の総括と状況の変化を概観する。

まず、2001 年以降の 10 年間、世界各国で進められてきたナノテクノロジーに関する各種取組の推移を概括的にまとめておく。

2001 年に、米国、日本、韓国、次いで台湾、中国、EU がそれぞれ独自のナノテク国家計画を立ち上げた。米国ではイノベーションのエンジンとして位置付けた。

2006 年以降、アジア諸国、BRICs など、多くの新興国が同様にイノベーションを目指して先端科学技術に国家投資を開始した。その象徴がナノテク国家計画である。マレーシア、ベトナム、タイ、イランも参入して数十か国に達している。

スピードが要求されるグローバル競争下で、発見・発案から産業化までの時間を短縮するため、異分野融合と産学連携を促進する共用施設・研究拠点ネットワークをインフラとして構築した。米国、EU、中国、韓国、台湾は投資を戦略的に行い、かなり充実している。

ナノサイエンス・ナノテクノロジーをベースにして理系の小・中・高一貫教育（K-12）システムの構築目指す。教科書作成、教員養成プログラムを促進した。米国（K-12）、台湾（K-12）、韓国（高等教育用英文テキスト）は系統的に進めている。

新産業の社会受容に向けて EHS（環境・健康・安全）や ELSI（倫理・規制・社会上の課題）、それにかかわる国際標準・規格（ISO、IEC）に関する議論が活発化している。

ナノテクノロジーへの国家投資額の推移を図 2-1 に示す。米国の NNI を契機に投資が増え始め 2006 年以降に、アジア諸国や BRICs の参入で急増し、また、この時点で民間の投資が公的投資を上回っている。

投資額の単純な比較は、各国のナノテクノロジーの定義やデータ集計法が異なるので避けるべきであるが、図 2-1 は年次推移の状況把握には好適である。米国 NSF の調べによれば、2000 年における世界のナノテクノロジーへの総投資額（民間投資を含む）は約 $1.2B（～ 1000 億円）、それが 2010 年には約 $18B（～ 1 兆 5000 億円）に達していて、

1　Roco, M. C. et al. eds. Nonotechnology Research Directions foe Societal Needs in 2020. Springer, 2010, 548p.

年平均成長率は 31% と非常に高い。日本の国家投資は相対的に飽和傾向にあるが、人口当たりの投資額ではトップであること、また、他の国に比べて民間の投資が国家投資をはるかに上回っているという特徴を有する。

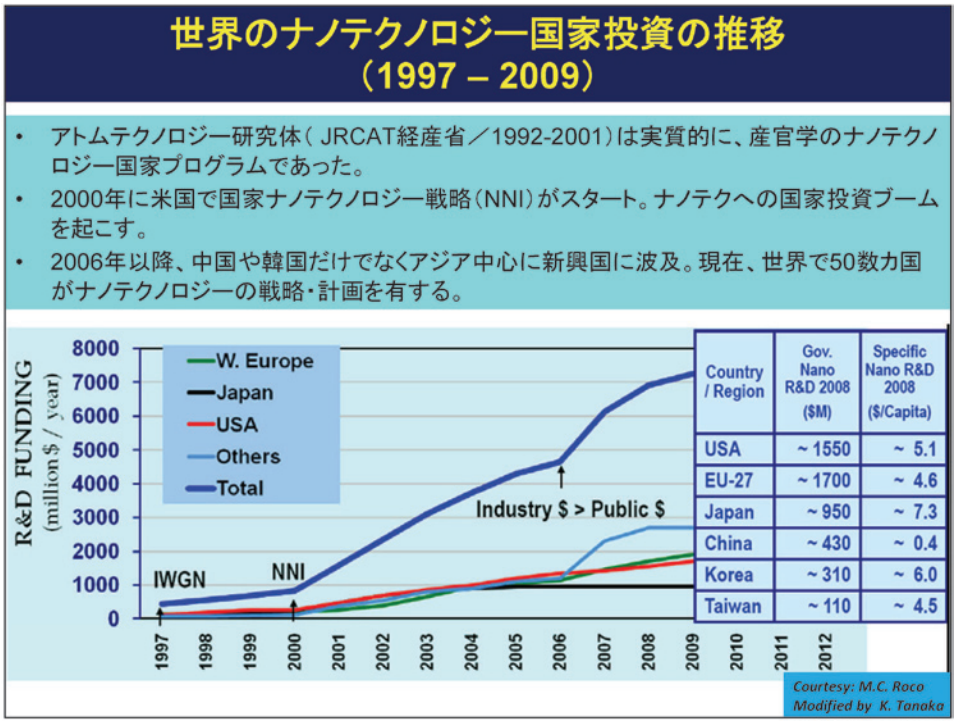


図 2-1 世界各国のナノテクノロジー国家投資の推移（1997-2009）

以上のような世界各国の投資の結果として、この 10 年、ナノテクノロジーは技術的にどの程度進んだのだろうか。進化過程の技術をその途上で評価するのは難しいが、少なくとも期待または計画通りであったかどうかのチェックは必要である。概括すると、まず成果（Outcomes）は以下の通りである。

（1）めざましい学術上の発見や新材料の開発がナノデバイスやナノシステム設計の可能性を拡大し、一部は事業化された。単層グラフェンとそのエピタキシャル成長膜、ブロックコポリマーによる低誘電率薄膜材料、透明アモルファス酸化物半導体（TAOS）、透明導電膜（IGZO）、鉄系超電導体、細胞シート（再生医療）など。

（2）新しい科学技術領域の台頭があった。スピントロニクス、プラズモニクス、炭素系ナノエレクトロニクス、メタマテリアル、ナノメディシン、デンドリマーや DNA 折り紙を含む分子設計、ナノ流体力学、ナノ製造など。

（3）技術的なブレイク・スルー（先進材料におけるナノシート、二次電池における新触媒、フラーレン分子 C60 導入による有機薄膜太陽電池の進展など）が、資源・エネルギー分野、水浄化などの環境技術分野に大きく波及し、また、情報科学、認知科学、合成生物学、システム生物学などの新しい分野とナノテクノロジーとの融合が始まった。

一方、期待ほど進まなかったナノテノロジーの課題は、以下の通りである。

（1）社会が要請する課題に対応して必要な機能を設計する手法の、いわゆる「材料設

計学」は道半ばである。

(2) ナノ製造については、ナノインク印刷技術や 3 次元集積化技術を用いたエレクトロニクスなどに進展は見られるが、原子・分子や超微粒子から出発して自己組織的にナノ構造を作り上げる「ボトムアップ型」プロセスは、実用的には未だ先が見えない。

(3) エネルギープロジェクトへの貢献に比較して、気候変動問題に対するナノテクノロジーの貢献度が少ない。

(4) ナノテクノロジーの一般市民レベルの認知度が低い。一種のブームが去って真のイノベーションを目指して努力を継続するべき技術蓄積期に入っているとの見方もある。

＜ナノテクノロジーの商業化の兆し＞

2001 年に米国の NNI がスタートして以後、日本、韓国、英国をはじめ世界の主要数十カ国が相次いで独自のナノテク国家計画を発表し、公的な研究開発投資額は毎年上昇している。2005 年度時点では、民間を含む世界の年間総投資額は 8600 億円（95 億ドル）であったが、2007 年度は 1.2 兆円（135 億ドル）に達し、2008 年度は約 1.35 兆円（149 億ドル）と予測されていた（米国 Lux Research 社）。特にこの 2、3 年は、①米国や EU 諸国を中心とした政府投資の継続的強化、②新興国（ロシア、アジア、中近東）の新たな参入、③ナノテク市場形成の兆しなどが相乗して政府投資および民間投資（ベンチャーキャピタル含む）が共に急増の傾向を見せている。また、2007 年以降は、民間投資が政府投資を上回っている。

米国や日本では、2001 年度以降の集中的な投資に対して産業へのリターンが期待され始めていたが、それに関して信頼できるデータがなかった。最近、ウッドロー・ウィルソンセンターの Project of Emerging Nanotechnology（PEN）の一つの成果としてようやくナノテク関連商品の調査結果が出始めた。それによれば、世界のナノテク関連製品数は 2005 年以降に急に増え始め、2006 年 3 月の 210 から 2010 年 8 月には 1317 となっており、毎週、世界でナノテク新製品が 3 ～ 4 種類も産み出されている。米国では、2008 年時点でナノテク企業数が 2500 を超え、約 6 兆円（700 億ドル）のナノ部品を含む製品が市場に出ている（M.C. Roco ／ NSF）。日本国内でも、ナノテクプロセスまで含めて 2007 年 12 月時点ですでに 386 の市場製品が確認され（JST-CRDS 調査）、台湾では、2012 年現在、34 社、1150 製品のナノマーク製品が公的に認定されている。

ナノテクノロジーが経済に影響する度合いは、依然として評価するのが非常に難しい。これまでの NSF やコンサルタントによる予測は、ナノテクノロジーによって可能となった製品についての市場全体の大きさからの見通しによる経済的インパクトを予測するものであった。そのような共通の切り口であっても、なおかつ nanotechnology-enabled products の多様性や予測時期に起因して、たとえば調査会社の Lux Research は 2015 年の市場を US$3,100B（約 280 兆円）と予測し、米国 NSF は US$1,000B（約 90 兆円）という予測数字を発表している。まして、手法が異なれば、さらに結果は異なるものになる。しかしながら全体として見ると、そのような予測結果のばらつきはあっても、2015 年までに米国ドル 1 兆から 3.1 兆（85 ～ 270 兆円）の範囲で非常に急速な成長を予測していることでは一致している。表 2-1 に、各コンサルタント会社や銀行などによるナノテクノ

ロジー製品についての市場規模予測結果がまとめられている。2007 年に OECD のナノテクノロジー作業部会（WPN）でカナダ、スイスが中心となって進めた「ナノテクノロジーの企業へのインパクト」プロジェクトの報告書から引用したものである。

表 2-1　ナノテクによって可能となった製品の地球市場規模での予測の選定（10 億米国ドル）

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2011	2012	2013	2014	2015
LuxResearch（2006, 2008）	30		147								2600	3100
BCC（2008）			12	13			27					
Cientifica（2008）				167				263				1500
RNCOS（2006）						1000						
Wintergreen（2004）												750
EvolutionCapital（2001）	105					700						
NSF（2001）	54											1000

出典：OECD（2010）, *The Impacts of Nanotechnology on Companies*

＜各国のナノテクノロジー国家計画＞

前節前項までに記した世界主要国のナノテク概況から、国家投資、学術論文数、特許出願数について、それぞれの順位が表 2-2 に示されている。国家投資額について、欧米各国は、ナノテクノロジー・材料分野における商業化の兆しや、エネルギー・環境分野への浸透を期待して、2006 年から 2010 年にかけて、公的投資を強化してきた。特に、米国においてその傾向は顕著であった。しかし、この数年は、表に示されているように、中国を中心としてアジア諸国や新興国の急伸が目立つ。

表 2-2　世界主要国のナノテクノロジー国家投資推移と研究アウトプット

主要国のナノテク国家投資と研究アウトプットの推移

	年間投資額（購買力平価比較/順位）			学術論文数（2010/順位）		特許出願数（2008/順位）	
	2001	2006	2011	量	質（被引用トップ1%）	出願件数	PCT
日本	1	3	4	4	4	1	2
米国	3	1	1	2	1	2	1
EU27	2	2	2	3	2	3	3
中国	5	4	3	1	2	4	4
韓国	4	5	5	4	4	5	5
コメント	アジア：最大投資 BRICs：急増 イラン：強化			中国：質・量とも急進 日本：存在感低下		中国は特に国内特許多し	

※投資額については国によって含まれる項目が異なることに注意

投資額：Lux Reserch「Nanotechnology Funding」,Cientifica「Global Funding of Nanotechnology」等を元にJST・CRDSが作成
論文数：トムソン・ロイター社の「Web of Science」を基にJSTが集計
特許数：トムソン・ロイター社の「Derwent World Patents Index」を基にJSTが集計

一方、日本の公的投資が飽和の傾向を見せ、相対的には減少に転じている。上記のような国家の姿勢が反映して、中国は学術論文数が急伸、2011 年時点で、質、量ともに米国を追い抜きトップに立っている。特許については、日本の存在感があり、出願数に対する登録件数の割合が高い（後掲参考資料参照）など、質も高いと判断される。日本の各技術領域の特許による分析については後述する。また、主要各国の関連科学技術ポテンシャルについては、付録の参考資料「科学技術ポテンシャルの国際比較概要」を参照していただきたい。

ナノテクノロジー分野の国家計画においては、前述したように、融合化・システム化を加速的に促進する仕組みとして機器の効率的な利用や異分野融合・産学連携のための共用施設ネットワークや研究拠点の構築が、中長期的にみて重要である。加えて、将来の持続発展性を保障する人材育成策や教育プログラムが必要である。過去 10 年の主要各国の関連施策が表 2-3 にまとめられている。

表 2-3　世界主要国のナノテクノロジー共用施設・研究拠点と教育・人材育成策

ナノテク共用施設・研究拠点と教育・人材育成策

国	ナノテク共用拠点		教育・人材育成	
日	•文科省ナノ・ネット事業（2007～11） **ナノテク・プラット（25機関／2012~2021）。** **•TIA-nano（2009-）** **•学生少ない、国際的に開かれていない。**	○/△	•10大学ほどでナノテク関連の学際領域専攻が開設 •TIAの即戦力先端人材養成 **•長期の根幹プログラムは不在**	△
米	•インフラ整備はNNIの8重点領域の一つ •NSF/NNIN、DOE /NSRCをはじめ様々な形で拠点・ネットワーク化 •Albany NanoTech (ANT) ／産官学州の連携研究拠点（IBM、NY州、ナノエレ）	◎	•国家戦略としてNNIで明確化NNIN-REU、インターンシップ実施 •K-12・STMの教師育成を推進、　教科書作り、外国語翻訳実施 •CNSE（ナノ科学技術カレッジ）	◎
欧	•独KIT-KMNF　オープンプラットフォーム •英MNT-Network　中小企業からアクセス、全国24の共用施設を整備。 •仏RTB (National Network of Large Technological Facilities）施設設備、CNRS/LETI連携強化。 •IMEC（集中型研究拠点）, MINATEC	◎	•Nanoforum主導のナノテク高等教育綱領に基づく大学院ナノテク学位コースが修士・博士課程で多数有。 •教育により、市民参加によるリテラシー向上策を積極推進	○
中	•ナノ科学技術センター（NCNST）が北京（2003-）、天津、上海に設置、（2005-） •産学連携研究拠点（蘇州工業団地SIP）	○	•共用施設でサマースクール開催 •台湾の教育プログラムは世界有数、米国と同様にK-12 を推進	○
韓	•ナノテク国家計画の3本柱の1つ •教育科学技術部（MEST）2センター、知識経済部（MKE）が3センター。 •NNFC　ユーザー支援を主。自主運営。	○	•ナノテク専修コースが多くの大学でスタート／英文ナノテク教科書 •長期の予算確保 •研究者数は8年間で4倍	◎

共用施設ネットワークについては、米国、韓国、台湾が計画的に政府予算を投入してかなり充実したネットワークを構築した。特に、米国の NNIN や NCN（NSF）、韓国の 6 センター（MEST の 2 センター、MKE の 4 センター）は共用インフラとして課金制や国際対応が完成している。欧州、台湾も一応のネットワークが形成されている。日本は、過去 10 年、後述されるが、投資に計画性が欠落していたため、課金制や国際対応についても他国に後れを取った。しかし 2012 年度に後継として立ちあがった文部科学省のナノテクノロジー・プラットフォーム事業は、25 の大学・国立研究所を含み、運営についても課金制の導入、コーディネーターの配置など、早急に改善が進みつつある。一方、国家プロジェクトなどを産学官連携で実施するナノエレクトロニクスを中心とする研究拠点については、米国のアルバニー・ナノテク（ANT）、欧州の IMEC（ベルギー）、MINATEC（フ

ランス）、中国の蘇州工業園区 SIP（蘇州）が、規模についても、出入りする学生数についても世界の有数の拠点になりつつある。日本は、つくばに TIA（つくばイノベーションアリーナ）が 2009 年からスタートしたが、上記に比較して大学院学生の出入りが少なく、将来にかけての人材再育成あるいは労働力確保の意味からも持続的運営について不安が残る。

表 2-3 の右側は、教育・人材育成策についての比較である。米国は、ナノテクノロジーを科学技術の小中高一貫教育（K-12）の軸に据える計画で、カリキュラムや教科書の作成、教員の養成プログラムを NNIN などの共用施設を優先的に使用して実施している。この K-12 を米国よりも早く進めているのが台湾で、すでに教科書（中国語版、英語版）の作成がほぼ終了している。韓国でも大学院学生・若手研究者向けのナノサイエンスをベースとした物理（Introduction to Physics of Nano-Science）、化学（Nanochemistry）、電子デバイス（Nanoelectronic Devices）などの英文版の教科書（後述 KoNTRS の責任編集）が作成されている。日本は、人材育成プログラムは総じて一過性で、教育についてはほとんど長期的・系統的なプログラムは存在しない。

表 2-4 に、世界主要国の 2011 年以降のナノテクノロジー国家計画が簡単にまとめられている。米国は、今後も NNI を国家重点施策に指定し、他の主要国もほぼ、ナノテクノロジーに関する国家計画を発表している。中国は、ナノテクノロジーを特定していないものの、「新材料技術」の中でナノテクノロジーを強化していくとしている。北京のナノ科学技術ナショナルセンター（NCNST）はナノサイエンスの基礎科学を強化するための国際戦略の中心になっている。欧州でも主要国は新たなナノテクノロジー国家計画を立ち上げている。日本は主要国中唯一、2011 年後のナノテクノロジーの独立した国家イニシアティブを持っていない。

以下に、各国個別にナノテクノロジー分野の研究開発・産業化の動向、現状を概括する。

表 2-4　世界主要国の今後（2011 年以降）のナノテクノロジー国家戦略

主要国のナノテク国家政策

国		ナノテク国家戦略（基本政策）	トレンド
日本		•「第三期科学技術基本計画」（2006-2010）では重点推進4分野の一つ。分野別推進戦略「ナノテクノロジー・材料分野」 •（2011以降）共通基盤に変更／特化したイニシアティブは無し	?
米国		•National Nanotechnology Initiative（2001-） -2011 年2月第3期新戦略プラン発表。NNI継続して重点施策に決定(2012)。	→
欧州	独	•Nano Initiative – Action Plan2015(2005-) -ハイテク戦略の一環としてBMBFを中心に7省が連携して策定。 -2010年に5カ年計画として更新。	→
	英	•UK Nanotechnologies Strategy (2010-) -BISが中心となって省庁横断の国家ナノテクノロジー戦略を公表。	→
	仏	•国家研究・イノベーション計画における重点3分野の1つ Nano-INNOV計画(2010-) ナノテクによるイノベーション創出に向け産学官連携・協力を加速	↗
中国		•国家中長期科学技術発展計画綱要(2006-2020) 先端技術8分野の一つ「新材料技術」でナノテク強化。第12次5か年計画／新材料	↗
韓国		•ナノテクノロジー総合発展計画（2001-） -研究開発、教育・人材育成、インフラ整備の3つの柱。 -5年ごとに見直し。2011年から3期目に突入（ナノ融合2020）。	→

米国

米国では、2001 ～ 2005 年度の第 1 次 NNI 戦略プラン、2006 ～ 2008 年度の第 2 次プラン、2009 ～ 2011 年度の第 3 次プランを経て、2012 年度からスタートする新たな NNI 戦略プランが議会を通過している。戦略目標は一貫して、①世界トップの知識・技術創出、②産業への技術移転支援、③教育、将来の熟練労働力の確保、インフラ整備、④ EHS・ELSI 対策、であり、それらへの投資は 8 つのプログラム構成エリア（Program Component Areas ／ 2008 年以前は 7 つ）への戦略的な配分比率に従って実施されてきた。この間、PCAST（大統領科学技術諮問委員会）による 3 年に 1 回の NNI に対する評価レポート（第 3 次評価報告書／ 2010 年 3 月、第 4 次評価報告書／ 2012 年 4 月）が発表されている。PCAST による NNI 第 4 次評価報告書によれば、（1）過去 10 年余は計画通りに成果が挙がっていて、今後のナノテク計画を継続して支援すること、（2）今後は戦略性を高め、プログラム管理に注力し、ナノテクノロジーの産業へのインパクトを評価測定する基準を明確にし、かつ不可欠の EHS を重視すべきこと、が指摘されている。NNI の 2013 年度予算は約 $1800M（要求額／ 26 省庁・部局）で前年度実績の 4.1%増であるが、2001 年度の $464M（～ 375 億円）から予算は伸び続けており、積算すると 2010 年度の $1781M（～ 1460 億円）まで積算すると、連邦政府の総投資額は 120 億ドル（約 1 兆円）に達している。とくに、グリーン・ニューディールでエネルギー関係に大きな予算が組まれた 2010、2011 年度（要求レベル）においては、NNI は 17 億 5000 万ドル前後の予算レベルになっている。

NNI 発進後、80 の研究センター、共用施設 NNIN（14 拠点／ NSF）および NCN（ナノテク計算機ネットワーク）が充実して、連携、融合、教育などの活動、あるいは新たな国家プロジェクトに有益に利用されている。その典型例は、SRC（Semiconductor Research Corporation）と NSF の共同プロジェクト NRI（Nanoelectronics Research Initiative）である。2020 年にゴールを置いて 35 大学、21 州が参加し、NNIN にアクセスしている。また、DOE の 5 つの研究拠点 NSRC（Nano-scale Science Research Centers）を有効利用したエネルギープログラムとしては、46 の EFRC（Energy Frontier Research Centers）が 2009 年度から 5 年間総額 $777M でスタートしている。USPTO（米国特許商標局）のナノテクノロジー関係の特許が 4,800 に達していて、多くが NNI のサポートを受けたものである。今後のナノテクセンターは、2007 年に開所した CNSI（California NanoSystems Institute）に象徴されるシステム化（第 3 世代のナノの組織化）に向かうが、2012 年時点で、新たなナノシステムセンター 3 箇所の設置が予算的に認められている。

10 年単位で見た戦略面での変化は、上述のように、NNI の戦略構成要素として従来 7 項目であった PCA（Program Component Area）の中で EHS（環境、健康、安全）を独立させて 8 項目にしたことである（2009 年度）。ナノテク産業の成長を確信して社会受容を加速するため安全性評価に重点を置くとする国の意思のあらわれである。また、産業へのインパクトを測定評価する基準を明確にすることが求められている。これは米国だけの問題ではなく、各国政府が抱える課題である。

関連重要施策として二つ、MGI（Materials Genome Initiative）と NSI（Nanotechnology Signature Initiative）がある。材料・ゲノム・イニシアティブ MGI は、NSTC（国家科学技術会議）／ OSTP（科学技術政策局）に向けて大統領補佐官ジョン・ホルドレン

から提案されたもので（2011 年 6 月）、国際競争力強化のための新しい材料戦略であり、DOE、NSF、DOD、NIST が参加を求められている。材料の基礎研究から社会への実装および普及にいたるまでの開発期間を二分の一に短縮し、しかも低コスト化することを目的とし、そのためのインフラとトレーニングの機会を提供しようとするものである。2012 年度予算では＄100M が手当てされた。

一方、ナノテク覚書イニシアティブ（NSI）は、同様にジョン・ホルドレンから 2009 年 8 月 4 日に NSTC 責任者に宛てた「ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、情報テクノロジーにおける NSTC の重点項目」と題するメモをベースに構築され、その後改定が加えられて、現在、以下の 5 つの戦略にまとめられている。（1）太陽光エネルギーの収集と変換のためのナノテクノロジー（将来のエネルギー問題解決に貢献する）、（2）持続可能なナノ製造（将来の産業を創る）、（3）2020 年以降のナノエレクトロニクス、（4）ナノテクノロジー知識インフラ（NKI）（工業ナノ材料の持続的設計でリーダーシップを執る）、（5）センサー用ナノテクノロジーおよびナノテクノロジー用センサー（健康、安全、環境を改善し保護する）。2012 年 6 月、OMB-OSTP の 2014 年度予算覚書は、NNI の EHS 戦略と上記 NSI を優先的に実施・支援するとしている。

欧州／ EU-27

欧州では、1990 年代中期からナノ科学プログラムを走らせていたが、2000 年以降は、EU のフレームワークプログラム（FP6、FP7）の中でナノテクノロジーを重要戦略と位置付けて具体的な計画を実行している。特に EU 第 7 次欧州研究開発フレームワークプログラム（FP7：2007 ～ 2013 年）においては、ナノ科学から新生産技術にいたるまで、FP6（2001 ～ 2006 年）の 2 倍近い年間予算 5 億ユーロが 7 年間投入されている。もう少し詳細に見ると、2003 ～ 2006 年の 4 年間は計 14 億ユーロであったが、2007 ～ 2008 年（FP7）の 2 年間で計 11 億ユーロに増え、これに加盟国の公的投資 25 億ユーロが加算されるので、年間に換算すると 2007 年度当時で米国の政府投資を上回っていた。ただし、日米に比較して欧州の弱点を言えば、産業界のナノテクノロジーへの投資が公的投資に追いついていないことである。

欧州のナノテクノロジー戦略の目標には、（1）計画と戦略投資／ EU 諸国横断で産学共働、（2）イノベーションと大中小企業の競争力強化のための知財、規制緩和、標準化、（3）新しいナノ科学教育とナノテクトレーニング、（4）EHS など社会受容に向けて情報共有、リスク評価、官民の信頼関係確立、が主に挙げられていて、これらは「EU ナノテクノロジー政策（2004 年 5 月）」、「ナノ粒子の健康および環境への影響に関する欧州ナノテク研究開発（2008 年 1 月）」などの報告書で述べられている。産業界からは、環境リスクを重視するあまり研究基盤開発に後れをとるのではないかとの不安も指摘されている。一方、ナノテクノロジー分野についての欧州外との国際協働プログラムには多くの予算を充当し、多様な戦略が実施されている。

共用施設インフラとして欧州全体に 142 の N&N Network があり、そのうち 58 は欧州内国際協力に使われている。ナノエレクトロニクスについては、IMEC（大学間マイクロエレクトロニクスセンター／ベルギー）と MINATEC（マイクロ・ナノテクイノベーションセンター／フランス）の 2 大研究拠点がある。IMEC は規模の拡大と充実が著しく、最近では iPS も対象としたバイオナノのセンターも発進させて、ナノエレクトロニクス

の国際的な研究請負機関に成長している。MINATEC もグルノーブルの産学独集積クラスターの中心として、多くの人材を育成しつつある。米国アルバニー・ナノテク（ANT）拠点とともに、世界の企業の研究開発チームを吸引しつつある。

EU は、環境分野に最も大きな公的投資してきているので、ナノテクノロジーへの関連投資が今後増加していくことは間違いない。事実、上述のように、2007 年度は EU 全体としてナノテクノロジー投資額が米国を追い越している。社会受容への関心は米国と同様に高く、EU はリスク評価と管理の研究に 2007 ～ 2008 年の 2 年間で 5,000 万ユーロを投入したが、これはナノテクノロジーへの全投資額の 5%にも相当している。

欧州各国についても以下に若干記しておく。実態として EU のファンドの 4 割は独に分配されるといわれる。各国は独自の国家計画を走らせていて、日米よりは少ないものの、独、仏、英、蘭、伊の順でナノテクへの大きな国家投資が行われている。EU 非加盟国のスイスは、ナノテクノロジーの先進国として欧州のナノ展示会などを毎年主催している。

欧州／ドイツ

ドイツは、連邦教育研究省（BMBF）を中心に、1990 年代からナノテクノロジーへの投資を実施している。しかし当時に比較して、2010 年は約 100 倍の 2 億ユーロ、連邦政府全体では 4 億ユーロを投資した。NanoMobil（自動車）、NanoLux（光学）、NanoFab（電気電子）、Nano for Life（ライフ）などの BMBF プロジェクトが実施された。省横断プログラム「ナノイニシアティブ行動計画 2010」そして、今後の新たな「ナノテクノロジー行動計画 2015（Action Plan Nanotechnology 2015）」が発表されている。ナノテクノロジーは、将来の市場に重要な影響を及ぼす分野と位置付け、気候変動、分散エネルギー、環境、リサイクル、高品質先端材料、および再生医療・バイオ材料でのイノベーションを目指して、建材、水フィルター、分子イメージ技術などについて、研究／教育／経済／政治が総合的にポテンシャルを上げるように協力すべきとしている。また、ナノテクノロジー分野の国際協力強化を図っていて、人材確保のため中国との具体的かつ最適の交流方法を探っている（総合報告「Nano De reports 2011」参照）。

欧州／英国

英国は、近代科学の基礎を築いてきたナノサイエンスの先進国である。政府機関としては、旧貿易産業省からの「製造の新しい方向性：英国のナノテクノロジーのための戦略」（2002 年）、そしてビジネス・イノベーション・技能省（BIS）からの「英国ナノテクノロジー戦略」（2010 年）、この二つの報告が英国のナノテクノロジー戦略の基盤になっている。この戦略の対象には、医療技術、製造技術、設計技術、機器・機械技術、構造材料などが広範に含まれ、また、他の環境・エネルギー、電子情報、ライフ分野の独立した国家戦略中にもナノテクノロジー研究課題が多く含まれている。この間、王立協会および王立工学アカデミーの「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：機会と不確実」（2004 年）、それに応える形での科学技術会議（CST）の「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：政策公約に関する政府の進捗状況の評価」（2007 年）という報告は、革新的な技術が持つ便益とリスクを科学技術コミュニティとして冷静かつ合理的に判断しようとする姿勢の具体的な表象であり、その後の社会受容に関する世界各国の活動に一つの方向を与えた。重要な拠点としては、BIS の国立複合材料センター（National Composites Center ／ 2011 年）

があり、また、ガイムとノヴォセリョフのノーベル物理学賞受賞（2010 年）を契機に、同じく BIS がグラフェン・グローバル研究技術拠点（Graphene Global Research and Technology Hub）に向けて 5000 万ポンドの支出を決定している。

欧州／フランス

フランスは、2008 年、当時のヴァレリー・ペクレス高等教育・研究省大臣の提唱に基づきイノベーションに関する統一的な国家戦略の策定や優先分野についての検討が開始され、2009 年 6 月に「国家研究・イノベーション戦略（SNRI）」として取りまとめられた。同戦略 2009 年から 2012 年までの 4 年間にわたる国としての研究・イノベーションの方向性を規定するもので、共通原則に加え、三つの優先分野（「保健・福祉・食糧・バイオテクノロジー」、「環境への緊急対策とエコテクノロジー」、「情報・通信・ナノテクノロジー」）が定められている。同戦略は、今後 4 年ごとに改定される予定である（CRDS-FY2012-FR-02 参照）。同戦略中におけるナノテクノロジー関連の具体的な課題は、電子工学、材料、医療用技術、再生可能エネルギー分野におけるナノテクノロジー革命の成功である。関連して、2009 年、ナノテクノロジーによるイノベーションを推進するため、「Nano-INNOV」イニシアティブが策定・実施された。ナノテクノロジーの産業化を加速するため、グルノーブル、サクレ、トゥルーズにナノテクノロジーの統合センターを設立し、2009 年に 7000 万ユーロが配算されている。フランス初の独立したファンディング・エージェンシーとして 2005 年に設立された ANR は競争的研究資金の配分を主たる役割としているが、そのプログラムの中に、「MatetPro ／高品質製品のための材料とプロセス」、「P2N：ナノテクノロジーとナノシステム」などが含まれている。

欧州／オランダ

オランダ政府のナノテクノロジー研究開発イニシアティブ“NanoNed”は、2005 年 4 月にスタートし、8 つの CEO（7 大学＋ TNO）と Philips によるコンソーシアム、および“Flagship”と呼ばれる 400 人の研究者が参加する 11 の共同プログラムに対して、政府から 9500 万ユーロのグラント（2005 － 2009 年末）が、また、コンソーシアムパートナーなどから 2 億 3500 万ユーロの資金が提供された。

次いで 2011 年、“NanoNextNL”が後継の国家計画として立ち上がり、コンソーシアムに対して 2 億 5000 万ユーロが配算される。50％が政府負担であり、残りの 50％は企業 100 社、各大学、知識研究所、大学医療センターなどが負担する。2016 年度までに達成すべき目標は、（1）マイクロ・ナノテクノロジー技術分野での基礎・応用を含めた質の高いイノベーション力の維持する、（2）マイクロ・ナノ製品のイノベーションで世界のリーダーになる、（3）社会からの支持を得つつ社会的要請に対してハイテクで応えるリーダーになる、（4）マイクロ・ナノテクノロジー技術領域で、持続性ある知のリーダーになること、が挙げられている。インフラの共用施設としては、“NanoLabNL”が充実していて、また MESA+NanoLab Twente、KavliNanoLab Delft、Zernike NanoLab Groningen、NanoLab@TU/e、TNO NanoLab Delft、Philips Innovation Services が参加している。

アジア／アジア・ナノ・フォーラム（15 経済圏）

アジア各国のナノテクノロジー政策については、2004 年 5 月に産総研／経済産業省／ NEDO ／ NIMS が起案して創立されたアジア・ナノ・フォーラム ANF（Asia Nano Forum ／ asia-anf.org）が、毎年のサミット会議（ANFoS）で情報の更新を行っている。ANF のメンバーは、アジア・太平洋地域の 15 経済圏で、日本、中国、韓国、台湾、香港、インド、インドネシア、タイ、ベトナム、マレーシア、シンガポール、オーストラリア、ニュージーランド、イラン、UAE を含む。ANF は 2007 年 10 月に NPO として独立し、現在、シンガポールの IMRE 内にオフィスを構えている。主要な活動としては、各経済圏から募った優秀な大学院学生を対象とした教育交流プログラム「Asia Nanotech Camp（ANC）」（2008 ～）、2013 年からスタートしたナノリスクの定例シンポジウム「Asia Nano Safe（ANS）」がある。ANF の調査によれば、2006 － 2010 年度の 5 年間のナノテクノロジーへの政府投資額は、米国（US$7936M）、EU-27（US$7500M）、アジア（ANF 会員、US$8586M）となっていて、ナノテクノロジーへの公的投資の重心は急速にアジアに移動しつつあるといえる。以下、アジア主要経済圏について個別に概要を記す。

アジア／中国

中国の科学・イノベーション政策の基本方針は、2006 年に国務院から発表された「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006 － 2020）」に記載されている（以下、中長期計画）。これに沿って、直近の計画は、国全体の 5 か年計画によって与えられる。事実、第 11 次 5 ヵ年計画（2006 ～ 2010 年）では、科学技術投資額を GDP 比で 2%に、第 12 次 5 ヵ年計画（2011 ～ 2015 年）では科学技術投資額を GDP 比で 2.2%に、そして中長期計画の 2020 年までに GDP 比で 2.5% に上げることを目指している。この計画は、中国を 2020 年までに世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることを目標としている。中長期計画の中では、新材料技術（先端技術）、ナノ研究（重大科学研究計画）がナノテクノロジー・材料分野に直接関係した重要課題になっている。

中国のナノテクノロジー政策をけん引してきた白春礼は、2011 年 3 月に中国科学院（CAS）の院長に就任した。それ以前、2003 年に北京のナノ科学の拠点として設立された国立ナノ科学技術センター（NCSNT）の理事長としても、継続して NCNST をナノ科学の国際拠点に育成する諸活動を指導している。その象徴は、2 年に一回北京で開催される NCNST 主催のナノ科学・技術国際会議（通称 China NANO）であり、2012 年 9 月の第 4 回会議ではノーベル賞科学者をはじめ世界 40 か国からトップクラスの招待講演者 128 人を揃え、1000 人を超える参加者を集めた。中国からの参加者の 95%が大学院生である。この間、NCSNT は米国 NSF と共同ワークショップ開催などで関係を深め、また、英国 Royal Society of Chemistry とは共同で “Nanoscale” という国際学術誌を発刊した。同誌では、白春礼がアジアの regional editor になり、最初の公式インパクト・ファクターは 4.11 という高い数字を記録している。北京はアジアのナノ科学国際拠点になりつつある。

上述のように、北京が基礎科学、大学の企業モデル構築などの中国全体戦略の知の中心とすれば、上海や蘇州は技術開発や起業拠点の中心と言える。特に、1994 年に建設がスタートした蘇州工業園区（Suzhou Industrial Park: SIP）はナノテク（Nanopolis）やバイオテク（Biobay）を中心とする 50 万～ 70 万人のハイテク都市 に成長した。各大学の

技術センターや CAS 傘下のナノテク・ナノバイオ蘇州研究所（SINANO）が産学ナノ拠点として工業園区の中心にあり、蘇州市、江蘇省、国の各レベルで、世界各国から誘致された企業集団や起業家のイノベーションを目指す活動に効率的なサービスを提供している。フィンランドは、ナノテクノロジーの新しいバリュー・チェインを模索して、100 社規模の企業オフィスを SIP にオープンしている。

中国の科学技術行政の特徴は、欧米に後れを取っているサイエンスに重点を置いていることで、「世界の工場」から「自主イノベーション」に国家科学技術戦略を転換しつつある（JST-CRDS 中国総合研究センター：平成 21 年版中国の科学技術力について [ビッグプロジェクト編]）。特に、先端科学技術インフラの建設が計画的に進められ、重イオン加速器（蘭州 CAS）、シンクロトロン放射光施設（上海）、スーパーコンピューター「天河 1 号」（天津 2009 年 10 月、世界 5 位の性能）、次世代 DNA シーケンサー（北京他、日本を凌駕）、核融合施設（ITER にも参加）など、急速に充実してきている。これらは、ナノサイエンスの研究の質を押し上げる上で大きな効果を持つだろう。

アジア／韓国

韓国の科学・イノベーション政策の基本である第 2 次科学技術基本計画（2008 ～ 2012 年）は、生命、素材、ナノなど 8 大分野、100 重点科学技術を含み、科学技術 5 大強国（米、日、EU、中、韓）を目標にして、2017 年までに官民合わせて GDP 比で 5% の研究開発投資を目指している。ナノテクについては、韓国ナノテクノロジー・イニシアティブ（KNI）が第 1 期の 5 年間を終了して、「第 2 期ナノ技術総合発展計画（2006 ～ 2015 年）」が実施されていて、ナノテクノロジー技術競争力について 2015 年までに Global Top Three になる、言い換えれば、米日に次いで世界 3 位の地位を占めることを目標としている。2001-2011 年の 11 年間で US$2.3B が 7 省庁に配算され、学術成果として SCI の韓国ナノテク論文数は、2011 年に中国、米国に次いで第 3 位に浮上し、また、被引用論文数も 2009-2011 の積算で第 3 位になった。（ただし、発表論文あたりの被引用率では、米、独、仏、日、中、韓の順）。

第 3 期 KNI（2011-2020）においては、さらにナノテクノロジー戦略の目標が強化され、（1）2020 年までに米国のナノテクノロジー技術水準の 90% にまで追い上げ、ナノテクノロジー先導国家となること、（2）統合（convergence）およびグリーン産業への波及効果の大きいナノ統合基幹技術を 30 件以上確保し、新未来産業を創出すること、（3）ナノテクノロジー関連の優秀な人材を 2020 年までに 2 万人育成すること、（4）EHS 予算をナノテク国家投資全体の 7% に引き上げること、などが掲げられている。

ナノを支援する政府組織として、韓国ナノ科学技術協会（KoNTRS）がナノテク科学・ネットワーク・教育の促進に貢献してきたが、2010 年にあらたに国立ナノテク政策センター（NNPC）が設立され、戦略面での貢献が期待されている。並行して注目される関連プログラムとして、ナノ統合 2020 プログラム（Nanoconvergence 2020 Program ／ 2012-2020 年）が MEST と MKE の合同プログラムとしてスタートし、IT、BT、ET と NT との統合（convergence）によるナノ統合技術と商品化を促進して新しい産業の創出を狙い、約 US$440M（政府 370M、企業 70M）の投資を決めている。政策推進のため、Technology Convergence Policy Center の設置が決定されている。

巨額の投資でナノテクノロジー共用施設（ナノ・ファブ・センター）が 6 か所設置されている（MEST が 2 センター、MKE が 4 センター）。2010 年時点で、ナノテクノロジー学科の創設は大学 36、大学院 40 に達し、学生 6084 人、院生 1300 人を擁している。特に、Pusan 大学が単独のナノテクノロジー学部として College of Nanoscience を設立したことは注目に値し、ニューヨーク州アルバニーの College of Nano-scale Science and Engineering（CNSE）に次いで世界の 2 例目である。ナノテクノロジー関連の企業数は 2005 年の 154 社から 2011 年には 900 社まで増加している。ナノの EHS については国として予算的にも重点化して、MEST（教育科学省）、MEL（雇用労働省）、MKE（知識経済省）、MOE（環境省）、KFDA（韓国食薬品庁）横断の 1st Comprehensive Plan for Nano-Safety Management を 2011 年 10 月に発表している。

一方、2013 年 2 月 15 日、政権が李明博（イ・ミョンパク）から新大統領の朴槿恵（パク・クネ）に移り、科学技術政策の決定構造が大きく変わる。とくに、上記 MEST は科学と教育が再び分離され、むしろ新設の未来創造科学部が科学技術を継続して重視する政権の目玉といわれている。今後の展開が注目される。

アジア／台湾

台湾は、第 1 期台湾ナノテクノロジー国家計画（2003 ～ 2008 年／ US$555M）で、ナノ産業化 63%、インフラ・コア施設 15%、先端学術研究 20%、教育 2% の配分で戦略投資を実施し、第 2 期 6 年計画（2009 ～ 2014 年）に US$595.6M を計上している。産業化振興策を含め、インフラへの計画投資（全国 10 箇所）、将来の人材育成のための小中高一貫教育（米国の K-12 相当）用教科書作り、教師の育成など、バランスの取れた計画を着実に進めている。特に、ナノテク産業の振興のために導入したナノテク利用製品の公的認定制度「ナノマーク（NanoMark）」システムが社会に浸透して、2012 年時点で、34 社、1150 製品がその認定を受けている。認定基準は、（1）利用している技術が 100 ナノメートル以下のスケールであること、（2）機能が明確であること、の二点である。

ナノマークシステムが産業の振興に有効に働くことが証明されたため、類似のシステムがイランやタイのナノテク政策の中に取り入れられ始めている。タイでは NanoQ という制度名である。

ナノリスク管理については、ISO ／ TC229、IEC ／ TC113 に、リエゾンメンバーである前述のアジアナノフォーラム（ANF）の代表（議決権はないが、積極的にコメントを提出できる）として国際標準化活動に積極参加し、また、OECD ／ WPMN、WPN での活動にも参加している。プレトリア、南アフリカ、英国、カナダとの国際協力がある。毎年、台湾ナノ展示会が開催されている。

その他の諸国

アジアでは、韓国、中国、台湾の他、香港、シンガポールが基礎から産業化までのナノ重点化を継続し、マレーシア、ベトナム、タイなどが国家プロジェクトを発進させている。

シンガポールは、2011-2015 年で S$16.1B を科学技術産業化政策に投資し、2015 年には GDP 比で 3.5% の投資を目指している。このような積極投資のもと、ナノ印刷技術などに焦点を絞った産業コンソーシアム、あるいは A*STAR、大学中心の戦略（NUSNNI）による学際研究所（NUSNNI-NanoCore）など、英語環境の下で国際的なナノ研究開発

拠点が築かれつつある。

タイは、サイエンス・パーク（TSP）内に各科学技術分野のセンターを集積した国家科学技術開発庁（NSTDA）を持ち、その中に国立ナノテクノロジー・センター（NANOTEC／研究者 100 余名）があって、政府のナノテク施策の責任を負う。国家科学技術計画（2004 － 2013）において、NANOTEC マスター計画が 2007 － 2011 年に実施され、同計画は 2012 － 2016 年にわたって継続されている。産業政策は、農業重視から、先端技術によるイノベーションを目指す政府方針に切り替わり、国家科学技術イノベーション政策（2012-2021）において今後 10 年で科学技術投資を GDP 比 0.2% から 2% にまで増やすとしている。NANOTEC の巨大な新研究棟（産官共用）がほぼ完成している。

ロシアは、2007 年に初めて 8 ヵ年の国家科学技術計画を発表したが、2010 年には 1,000 億円を投資し、2015 年までにナノ製品販売を 3 兆 2000 億円にすることを目標としている。2008 年からは、ナノテクノロジー研究やナノテク産業のためのインフラ整備事業として、RNN（Russia Nanotechnology Network）計画がスタートした。装置類の充実やネットワーク化のため、2008 ～ 2010 年の 3 年間で 8 億ユーロが投資される。ナノテクノロジーの産業化を目指して、国が投資する公社「RusNano」が誕生し、台湾を含む諸外国に連携を呼びかけている。RusNano の 2013 年予算として、383 億ルーブル（9.6 億ユーロ）がナノテク製品・製造に、126 億ルーブル（3.15 億ユーロ）が長期投資のための融資に、それぞれ配分されている。ロシアの抱える問題は、高い経済成長率にも拘わらず研究人口が減り続けていることである（付録参考資料「科学技術ポテンシャルの国際比較概要」を参照）。そのこともあって他国との共同研究に熱心であり、ヨーロッパ（EU）のプロジェクトにも積極的に資金を投入している。たとえば、X 線自由電子レーザーのような巨額の予算を必要とするプロジェクト（独ハンブルグの DESY）にも、ドイツと同レベルの資金を出していることが知られている。

インドにおいては、農業との関連でバイオテクノロジーに大きな重点が置かれているが、2007 年から材料を含む「Nano Mission」もスタートし、エネルギー、飲料水、健康などの優先応用分野を指定し、4 つの技術分野（表面コーティング／ナノ粉体技術、ナノ燐光体、ドラッグデリバリー（薬物送達）、センサ・デバイスなどナノエレクトロニクス）に政策的な焦点を絞っている。ナノテクノロジーのインフラとして、7 つのセンターが開設されている。これらのセンターによって、MEMS/NEMS、ナノデバイス、バイオセンサ、ナノエレクトロニクス、バイオシステム、光発電、ティッシュエンジニアリング（生体用人工組織工学）などがカバーされていて、さらに計算科学に関するセンターも設置予定である。

中東では、UAE とイランがナノテクの政府計画を持つ。とくに、イランは量・質ともに充実した計画を有し、最近数年の SCI 学術誌掲載のナノテクノロジー分野の論文数で世界の 10 ～ 15 位につけており、増加率にすると世界トップにいる。

2. 2. 1. 2　日本におけるナノテクノロジー　～前史と国家計画～

＜学術・技術・産業におけるナノテクノロジー前史＞

明治維新以降、近代科学を一気に受容した日本では、自然科学においてナノサイエンスの萌芽が早くから見られる。ナノの豊かな世界は原子模型を基礎とした量子力学の構築とともに開かれたが、その曙のころ、長岡半太郎は原子に関する長岡モデル（1903 年）を発表している。国際的な物理学の世界で認知された日本の科学者第 1 号である。やがて、トムソン、ラザフォード、ボーアとつながり、定着した原子模型を基礎として、1930 年代には量子力学の理論的骨格がほぼ完成した。第二次大戦後、量子力学を母体とした固体科学が、バーディーン、ブラッティン、ショックレーらによるトランジスタの発明（点接触型 1947 年、接合型 1948 年）で花開き、日本企業の先導的な努力で産業化されたエレクトロニクスを通して人々の生活に多大の影響を与え、今日に至っている。

このような先端技術の流れの中で、ナノレベルのサイズを意識した先見性のある言葉としてノーベル物理学賞を受賞した米国のファインマンのコメントが良く引用される：”There’s a plenty of room at the bottom”。1959 年、米国物理学会の講演で原子分子レベルの現象を扱う科学の可能性を予告したものである。その 3 年後、久保亮五（当時、東京大学）は金属微粒子における量子サイズ効果を理論的に計算し、ナノサイズになると通常のバルク（体積の大きな）金属とは異なる性質が現れることを示した（1962 年）。これは、ナノ効果の最初の具体的な理論予測といってよいだろう。1960 年代には、他にも日本の大きな貢献として、1960 年代には本多健一と藤嶋昭（当時、東京大学）による光触媒効果（ホンダーフジシマ効果）の発見（1968 年）、トンネルダイオードでノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈の半導体超格子の提案と実験（当時、米国 IBM 研究所、1969 年）がある。その後、数十年を経て、前者は、橋本和仁（東京大学）らによって完成させられた耐候性で汚れのつかないセルフクリーニング（光触媒コーティング）技術（特許、1994 年）につながり、1000 億円の産業を生み出した。後者は、三村高志、冷水佐寿（当時、富士通研、1980 年）らによる HEMT（光電子移動度トランジスタ）や、他に半導体レーザーなどを世に送り出してエレクトロニクス産業に貢献している。この間、1974 年、生産技術国際会議において、当時、東京理科大学の谷口紀男が初めて「ナノテクノロジー」という言葉を用いて、技術の概念提唱を行っている。

ナノ材料のシンボルとしてカーボン系ナノ材料がある。フラーレン分子（C60）は、1984 年にクロトー（英）、スモーリー（米）、カール（米）によって発見されたが、炭素の 6 員環と 5 員環によるサッカーボール構造については、1970 年、大澤映二（当時、北海道大学）が構造モデルを発表している。さらに、代表的なカーボンナノ材料として、現在、基礎研究および応用研究の熱い対象になっているカーボンナノチューブ（CNT）は、1991 年、飯島澄男（当時、NEC）によって発見され、炭素 6 員環ネットワークが筒状になった構造モデルも発表されている。また、1970 年代から炭素繊維を研究していた遠藤守信（信州大学）は、その後、CNT の成長プロセスを解明し、量産化技術の初期的成功を収めている。このように日本が主導してきたカーボン系ナノ材料は、最近話題になっている二次元カーボンナノ材料のグラフェンを含め、今後、金属あるいは半導体としての性質を利用し、高い移動度など多様な電気特性を生かした電子デバイス、スーパーキャパシタ、高い電子放出能を利用する表示デバイス、強靭な複合材料、医療・バイオ応用など、産業への多大な貢献が期待されている。

以上、概略を記したが、日本は、過去半世紀以上にわたり、ナノテクノロジー（ナノサイエンス含む）に実体を与える学術研究、技術開発、産業活動を継続的に先進国の一員として主導し、科学的知見・技術を蓄積してきた。明らかに、日本は世界の中で有数のナノテク先進国である。

＜世界に先駆けたナノテクノロジー国家プロジェクト＞

2000 年に入ってから世界の主要国でナノテクノロジーへの大規模な国家投資戦略がスタートしたが、それを先導したのは米国の NNI である。これは、21 世紀前半の技術革新にとって最も本質的な領域として戦略的に指定したものである。

表 2-5　2000 年以前の日本のナノテクノロジー国家プロジェクト例

名称	事業名	責任FA（Funding Agency）	期間（年）	備考
林超微粒子プロジェクト	創造科学技術推進事業※1	科学技術庁　新技術事業団※2	1981-1986	（1プロジェクトあたり）15億円／5年間 10～20人
黒田固体表面プロジェクト			1985-1990	
吉田ナノ機構プロジェクト			1985-1990	
宝谷超分子柔構造プロジェクト			1986-1991	
国武化学組織プロジェクト			1987-1992	
榊量子波プロジェクト			1988-1993	
青野原子制御表面プロジェクト			1989-1994	
板谷固液界面プロジェクト			1992-1997	
柳田生体運動子プロジェクト			1992-1997	
原子分子極限操作技術（アトムテクノロジー）	大型プロジェクト制度	通産省　NEDO	1992-2002	260億円／10年間 100～200人

※1　後の戦略的創造研究推進事業　ERATO型研究
※2　後の文部科学省　科学技術振興機構

しかし、それに先立ち、日本は、1980 年代から科学技術庁と通商産業省が重層的にナノテクノロジーの国家プロジェクトを走らせていた。具体的には、科学技術庁所管の新技術事業団（後に科学技術振興機構に統合）が 1981 年から創造科学技術推進事業（後に戦略的創造研究推進事業 ERATO 型研究）として始めた林超微粒子プロジェクト（1981 ～ 1986 年、15 億円／ 5 年）と他 10 件以上のプロジェクト、そして通商産業省所管の NEDO が大型プロジェクトとして 1992 年に発進させた「原子分子極限操作技術」（アトムテクノロジープロジェクト）（1992 ～ 2002 年、260 億円／ 10 年）がある。それらの一部を、表 2-5 に一覧にして示す。これらは、いずれも、日本政府が科学技術戦略を本格的に構築し始めた第 1 期科学技術基本計画策定（1996 年）以前にスタートしたプロジェクトである。

＜第三期科学技術基本計画の功罪＞

日本では上記のような経緯があったため、米国 NNI の発進とほぼ同時期にナノテクノロジー・材料の国家計画が比較的順調にスタートした。事実、内閣府に総合科学技術会議が設置されて以後、第 2 期科学技術基本計画（2001 ～ 2005 年度）と第 3 期科学技術基本計画（2006 ～ 2010 年度）においては、重点推進 4 分野および推進 4 分野が選定されたが、「ナノテクノロジー・材料」は重点推進 4 分野の一つになり、ライフサイエンス、情報通信、環境とともに、10 年にわたって優先的な資源配分を受けた。

この重点化による戦略投資が将来産業にどのようなインパクトを与え得るのかについて、JST-CRDS は外部専門家による調査委員会を組織し、評価を試みた。重点推進 4 分野および推進 4 分野、計 8 分野から出願された特許の出願数と製造業 22 業種の売上高との相関関係について元橋一之氏（東京大学）のモデルを使って分析し、それをベースにして売上高で重みづけをした特許比率という形で各分野の産業へのインパクトの評価とした。

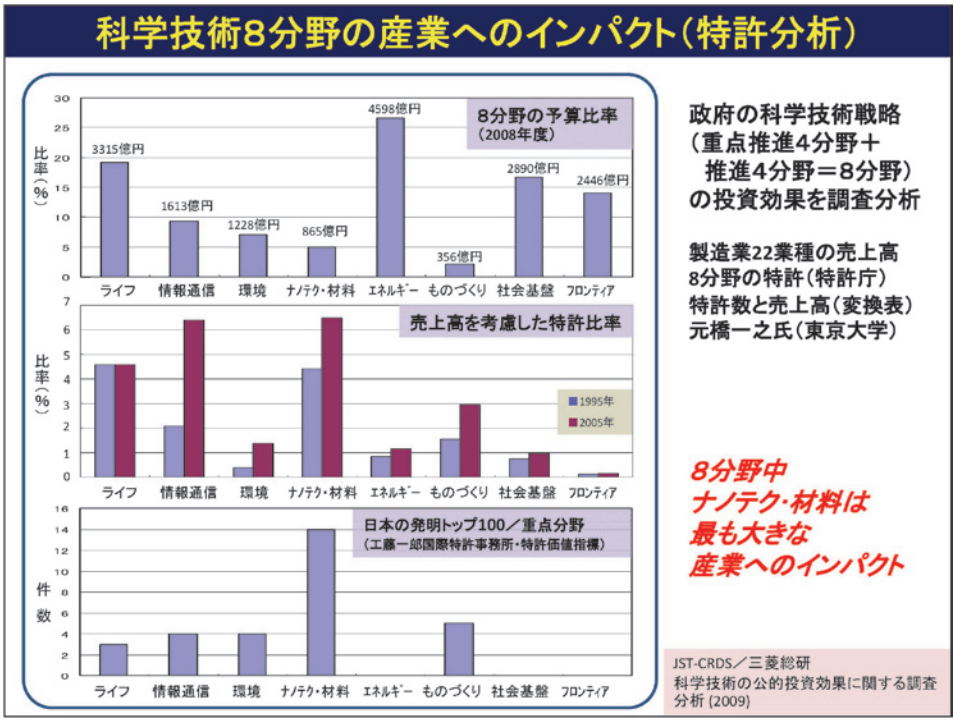


図 2-2　8 分野の特許分析による将来の産業へのインパクト

図 2-2 に 1995 年度、2005 年度の結果を示す（JST-CRDS ／三菱総研「科学技術の公的投資効果に関する調査分析」／ 2009）。図において、上段が 2008 年度の 8 分野に対する政府予算比率、中段が 1995 年および 2005 年の売上高を考慮した特許比率分析結果、下段は参考のために日本の発明トップ 100 に占める 8 分野の特許数が、それぞれ示されている。図に明らかなように、ナノテクノロジー・材料への国家投資比率は 8 分野中 7 位であるが、産業への効果は首位を占めており、また、下段のデータも大きな投資効果を期待させるものである。この分析は、産業へのインパクト予測と言う点では精度にある種の限界を抱えているものの、定量的な分析としては初めてのものである。

しかしながら、これら重点 4 分野が政策課題対応型の研究開発として重点化されていた（総合科学技術会議 HP）にもかかわらず、分野別推進戦略が強調されて、政策も分野ごとに独立に立案される弊害があった（科学技術・学術審議会基本計画特別委員会中間報告／ 2009 年 12 月 25 日）。このような縦割りを解消するための総合調整を図る機能が、行政システムとして十分に働かなかったという指摘がある。これにより、それぞれの分野別推進戦略が総合戦略化されず、このことが、第 3 期総合科学技術基本計画の 3 つの理念、6 つの大目標という政策目標を達成する上で支障をきたした可能性が高い。少なくとも、このことは、重点 4 分野としての「ナノテクノロジー・材料」戦略遂行上大きな障害となった。「ナノテクノロジー・材料」は、ライフサイエンス、情報通信、環境など、他の分野を横串的に横断する融合分野と期待されていたからである。

縦割りの弊害については、それが重点推進分野設定という基本路線に問題があったのか、推進方策や運営上の問題であったのか、あるいは府省連携や意思決定機構に本質的な原因が内包されていたのかについて、冷静かつ注意深い分析が必要である。ただ、CRDS の見解では、上記の不都合は重点推進 4 分野設定という基本路線に起因するものではなく、分野推進戦略間の調整機能設計の失敗から生じたとみるのが妥当である。分野推進戦略の縦割りという弊害にもかかわらず、上述したように、日本は連綿として継続してきたナノテクノロジーへの投資効果がようやく諸所に顔を見せ始めている。2.2.1 でも触れたが、ナノテクノロジーの産業への展開については、ナノテク関連商品が市場に出始めて急速に立ち上がる傾向が見えており、ナノの融合化、システム化が進む今後に更なる発展が期待されている。

一般的に、ナノテクノロジーはプロセスに使われたり、デバイスの一部の材料に使われたり、極めて多様な使われ方をするため、どう生かされたかを最終製品から判断することは難しく、そのため成果が見えにくいという特徴がある。評価分析に基づき、この間に得られた学術・技術上のアウトプット、今後の産業への貢献が期待されるアウトカム、経験学習で得た戦略策定上の多くの示唆など、今後に引き継がれるべき有形、無形の資産を明らかにし、遺産として今後の科学技術政策の議論に反映させるべきである。

＜第四期科学技術基本計画における課題解決型政策＞

2.1.2 で記したように、第四期基本計画（2011-2015 年度）においては、第三期の反省に立って、科学技術の重点領域型（ボトムアップ型）から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）の政策へと舵が切られた。

その中で、ナノテクノロジー・材料領域は、政策課題三本柱の横串的横断領域と位置付けられている。前項に述べたように、このことは領域の横断的な性格から考えれば妥当な位置づけであり、第三期の反省の上に立った改善になっている。しかしながら、このような横断領域は、残念ながら、第四期基本計画においては独立した戦略イニシアティブとして設定されなかった。これは、2011 年以降も省間横断イニシアティブとして戦略化されている米国 NNI や他国のナノテク国家計画と大きく異なるところである。

そのため、日本の第四期基本計画においては、横断的な基盤科学技術が三つの戦略政策課題ごとに個別に貼り付けられることによって過去 10 年にわたってイニシアティブとして形成されてきた学術・技術分野のネットワークが分断される恐れがある。各政策課題と、それらを解決するためのツールとしての学術・技術分野群とをマトリックスとしてどうバ

ランスよく結合させ、ネットワークを維持しつつ、全体を推進していくのか、関係部署での努力が必須である。

2012 年 12 月時点で民主党から自民党に政権が交代したため、今後の科学技術政策は流動的であるが、産官学独それぞれのレベルでこれまでのナノテク連携ネットワークを維持発展させる自主努力が必要で、それがイノベーションを加速する原動力になると考えられる。2012 年度に発進した文部科学省の「元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）」（10 年事業）と経済産業省の「未来開拓研究」における両省合同のガバナンス・ボードの設置は、その好例になるものと考えられる。

一方、ナノテクノロジー分野への国家投資額について見ると、前述のごとく、米国、EU、ドイツ、韓国、台湾は、2000 年代前半から後半にかけての 5 年間で、大幅に国家投資を増加させているのに対して、日本には飽和の傾向が見える。事実、2000 年代前半と後半の 4、5 年を比較すると、ナノテク投資額の増加率は、米国 73%、EU49%、ドイツ 33%、韓国 126%、台湾 24%に対して、日本は 5%である。2008 年時点で、購買力平価で比較すると、日本のナノテク国家投資額は中国、韓国にも追い抜かれている。このような公的投資の先細りは、将来にかけての懸念材料である。

2. 2. 2　今後の展望と日本の課題

本節では、今後、グローバル課題の解決を目指し、かつ、日本の持続性ある産業･経済･社会の実現に向けてナノテクノロジー・材料分野がどう貢献していくべきか、その際の日本の課題は何かについて、展望を記す。

2. 2. 2. 1　日本における問題意識

＜産学官が直面する現状＞

科学技術分野では、現在、世界の勢力地図が動きつつあり、我が国は、今後の方向を見定める上で重要かつ難しい局面に立たされている。これはナノテクノロジーの分野においても例外ではない。たとえば、ナノエレクトロニクスの研究開発拠点は、米国の Albany Nano Tech（ANT）、ベルギーの IMEC、フランスの MINATEC など、限られた拠点に絞られて、そこに先端の半導体研究開発が寡占的に集中し始め、アジアでは中国蘇州において 1994 年から建設されてきた蘇州工業園区（SIP）がつくば研究学園都市の 10 倍の規模に成長し、シンガポールにはフュージョノポリスが拠点としての第 1 期建設計画を終えている。このように、韓国、中国、台湾に加え、南アジア、東南アジアではシンガポールを中心にハブ化が進みつつあり、アジアの中でさえ相対的に日本の存在感が失われようとしている。すでに、我が国の主要企業が、国内の拠点ではなく、上記の海外拠点で自社の研究開発を大々的に行うことが増えている。技術的には、ポスト CMOS あるいは微細化路線が、近い将来、限界を迎えることになろう。今後の基本戦略について、腰をすえて議論するべき時期に来ている。

2010 年 4 月にスタートしたつくばイノベーションアリーナ（TIA）が、世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ち得るのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、産独学各セクターの自主努力にもかかわる問題である。前述したように、ANT、IMEC、MINATEC、蘇州工業園区（SIP）には、常に大学院学生が数百人規模で出入りしているが､つくばの TIA にはその光景が見られない。このことは、

諸外国に比べて現時点でも若い研究推進力の点で不利な条件となっているが、人材育成という点で中長期的に展望するときの重要な検討課題であろう。

以上は、ナノエレクトロニクス分野に象徴的に表れている日本の課題の一例である。これらも含め、以下に、JST-CRDS 主催のナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ（CRDS-FT2012-WR-05）における議論の骨子を記しておく。

（1）イノベーション戦略の構築においては個々の領域で個別の議論をしても意味がない。日本の競争力をどう考えるのか、全体的な需要と供給の関係を見極めて、時間軸上で戦略を構成することが肝要。（短期、中期、長期によって戦略は全く異なってくることに注意すべきである）。

（2）国家投資が経済競争力に必ずしもリンクしていない状況をどう打破するか。産学分断の解決法として少なくとも以下の二つは不可欠である。（イ）オープンイノベーションのスキームを産学官で構築し、研究機関がシーズ、知財、ノウハウ、先端機器などをすべてプールして企業に効率良く提供しつつ、拡大再生産できるシステムを作る、（ロ）大学、研究機関の組織としての技術トランスレーション機能を抜本的に改善する（米国の Battelle、SRI、MIT は営業に熱心である）。

（3）科学（Science）－技術（Technology）－工学（Engineering）－事業（Business）という流れの中で国の戦略上の役割を考えるべきである。とくに、Engineering 不在では事業に届かないことが多く、多くの国家プロジェクトではこれが課題である。また、研究開発自身がグローバル化していて、日本で生まれた独自技術が外国企業によって事業化される時代になってきている。基礎研究成果を事業（出口）につなげるまでの時間を徹底的に短縮するために、大学を含めた各セクター間のコミュニケーションを強力に促進するしくみが必要である。

（4）基礎研究力の維持や新技術領域創出の視点からは、アカデミアの抱える問題も大きく、とくに研究コミュニティの分断（言い換えれば専門領域のタコツボ化）は深刻な状況である。解決方法としては､共用機器の集積化･共用センター構築によって異分野の教員や学生たちのコミュニケーションの場を作るなどが考えられるが、そのためには大学側や学会の自主努力、あるいはそのようなインセンティブを与える政府の施策などが必要である。

（5）中長期で最も重要な人材育成については、かつて独自路線で人を育ててきた企業側に、その余裕と力がほとんど残されていないという現実がある。大学の責任は大きいと言わざるを得ない。海外交流事業の充実、大学教員や大学院学生の海外経験の拡大などを通じて、視野の広い柔軟な思考の国際的な人材を育成し、また、海外から優秀な人材を吸引する必要がある、そのための戦略を各セクターが総力を挙げて議論し構築する必要がある。これは焦眉の急である。

2. 2. 2. 2　日本の動向と課題

＜公的投資の重要推進方策の策定と戦略的配算比率の決定＞

日本政府の科学技術政策においては定量的な戦略構造が欠如している。以下に米国、韓国、台湾との比較で具体的に指摘する。

表 2-5 に示されているように、米国の国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（NNI）においては、7 つの「プログラム構成エリア（PCA: Program Component Area）」が設定されていて、その PCA で戦略を議論するのである（2012 年現在は、前述のように、PCA は 8 項目になっている）。表 2-5 に米国の 7 つの PCA が示されている。過去 10 年、米国が特にこだわったのは、⑥共用施設・設備（拠点含む）に全予算の 10 ～ 20%を充当してそれをナノテクノロジーのインフラとして充実させることであった。同様に、韓国では、①研究開発、②人材育成・教育、③インフラ（ナノファブセンター）の 3 項目について、台湾では、①基礎研究、②工業化、③教育、④コア施設の 4 項目について米国と類似の定量的な配算割合の目標を設け、インフラの充実に努めた。特にインフラ・コア施設については、米国とほぼ同じ 10 ～ 20%の目標設定で予算が充当され、ネットワーク構築が実施された。

表 2-5　各国ナノテク重点戦略項目と配算比率の有無

	ナノテク国家計画遂行上の重点戦略項目	コメント
米国	①ナノスケール基礎 ②ナノ技術 ③ナノデバイス・システム ④計測・標準 ⑤ナノ製造 ⑥共同利用施設 ⑦社会的影響	7 つの PCA（プログラム構成エリア）の配算比率を意識。 ⑦については議会で比率を議論、現在は、EHS が独立して 8 項目（2012 年）。
韓国	①研究開発 ②人材育成・教育 ③インフラ（共同利用ナノファブセンター）	3 つの配算比率について国家計画期間中の数値目標を公表。
台湾	①基礎 ②工業化 ③教育 ④コア施設（共同利用）	4 つの配算比率について国家計画期間中の数値目標を公表。
日本	①クリーンエネルギー ②希少資源代替 ③安心・安全 ④イノベーション中核 ⑤先端エレ ⑥ナノバイオ医療 ⑦ナノテク社会受容 ⑧イノベーション創出拠点 ⑨先端計測・加工 ⑩ X 線自由電子レーザー	戦略重点科学技術に指定するのみで目標配算比率なし。X 線自由電子レーザー（数百億円）が他予算を圧迫（欧米は別予算で建設あるいは建設中）。

日本は、2002 年度から「ナノネット」という共用施設ネットワークをスタートさせながら、定量的な投資比率の目標を全く設定しなかったため、後掲の図 2-3 に示されているように、結果的には全予算の 2 ～ 3%程度しか充当されなかった。この状況が 10 年近く続いた結果の 2010 年現在、日本は、共用施設ネットワークの充実度や海外へのオープン度、さらに研究者側の施設共用への関心度について主要国に遅れをとっている（2013 年度以降のナノテクノロジープラットフォーム事業は後述）。

第 3 期科学技術基本計画では、「戦略重点科学技術」が日本の戦略項目であり、表に示されているように、クリーンエネルギー、イノベーション創出拠点、先端エレクトロニクス、責任ある研究開発（社会受容）など、10 項目が優先投資項目として挙げられたが、投資比率を定めるなどの定量的な優先度表現がないため、中長期にわたる戦略としては今ひとつ機能しなかったと言える。その意味で、米国 NNI の PCA（プログラム構成分野）や、

韓国、台湾の重点項目とは似て非なるものと言わざるを得ない。国際的に重要視され始めた「社会受容」への投資についても、米国は 10%超の定量目標を掲げているが、日本は全くそのような設定をしていない。予算上定量的な重点化は、今後、戦略構築上の大きな問題である。逆に、X 線自由電子レーザー（XFEL）については、日本の基幹技術としてその予算が保証されていたが、その巨額の予算がナノテクノロジー・材料分野の目的基礎研究費（文部科学省）を圧迫する結果となった。米国や EU では、XFEL は別枠予算として扱われていることに注意すべきであろう。

以上の動向に鑑み、早急に対応すべき日本の課題と対策は以下の通りである。

①各推進方策への予算配算比率を決定し、基本計画中は比率を固定して継続投資を保証する（米国、韓国、台湾の例）。

②拠点ネットワークおよび共用施設インフラの構築と維持、ナノリスク評価法などの EHS、ELSI プログラムなど、数件の推進方策を重点化する。米国 NNI のに相当するものを作る。

＜関連施策の動向と今後の戦略＞

日本のナノテクノロジー・材料分野は、他の分野に比較すると、学術的にも産業技術的にも世界のトップレベルを維持しており、その意味で日本の強みを代表する分野であり、しかも、ほぼ全産業分野に関連している。特に今後、21 世紀の課題であるエネルギーや環境分野においてナノテクノロジー・材料技術に対する期待は大きい。このような状況の中で、大きな課題として指摘されているのは、異分野の融合や産学の連携、国際交流、人材育成など、将来の研究ポテンシャルを構築し、研究開発成果の創出を促進し、成果を素早く社会に実装していくための推進方策に関するものに集中している。中長期にわたってナノテクノロジー･材料分野の着実な発展を支える推進方策の充実は本質的に重要であり、戦略的投資法、ファンディング方法の最適化、インフラ構築が急がれる。

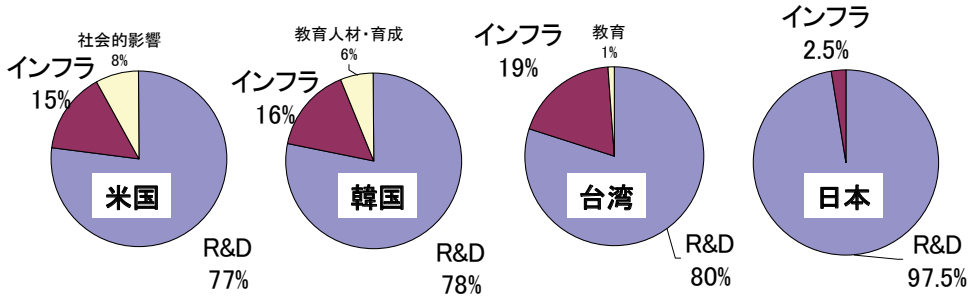
以下は、日本の諸課題に対応する解決に向けた諸方策の提案例である。第三期科学技術基本計画の中間フォローアップで議論され、指摘されたものをベースにまとめたものである。

研究開発拠点形成および共用施設ネットワーク

全ナノテクノロジー国家投資額の 10%～ 15%を共用施設ネットワーク・拠点形成に充当している他主要国（米国、EU、韓国、台湾）に比較して、日本は極めて投資額が低い。文部科学省のナノ支援（2002-2006 年度）、ナノネット（2007-2011 年度）の両プログラムにおいて、既存設備を利用して 13 拠点が運営されたものの、投資額の不足と受け入れ側の意識の低さのため、全体的に見ると実施機関の施設運転費の補填に終わり、産業界から頼られるネットワークは構築できなかった。産業界のニーズに応えられる充実した設備にはほど遠かった。2007 年以後、文部科学省は課金制度の導入を奨励し、徐々に実施されてはいるが、制度的な問題も指摘されていて、課金による継続的な運営を期待するには、まだ、解決されるべき課題が山積している。米国の充実した数十の拠点ネットワーク（NNIN ／ NSF : 14 センターによるナノテクインフラネットワーク、NCN ／ NSF : 7 つの計算機センターによるナノテクコンピュータネットワークなど）においては、共用センターの長年の経験の上で、連邦政府からの資金は全体運営費の 3 割ほどで運営が成

立している。問題は、以下に示す政府の投資戦略である。

図 2-3 に、米国、韓国、台湾、日本のナノテク国家予算に占める共用施設ネットワーク（インフラ）の割合を示す。



（※米国及び日本は、2001-2005年，韓国は2001-2007年，台湾は2003-2008年の計画）

ナノテク共同利用施設（インフラ）の運営実態／国際比較

国　名	政府インフラ投資（%）	利用者課金システム（%）	地方政府のマッチングファンド（%）	コンソーシアム・企業からの寄付・出資（%）
米国（NNIN）	30	30	40	
韓国（KANC）	30	7	58	5
英国（MNT Network）	50	50		
日本(ナノ総合支援PJ)	100	–	–	–

※表の数値は総運営費に占める割合を示す。

図 2-3　主要国の共用施設インフラへの投資割合と運営費の内容

韓国は、ナノ製造センターなどのインフラへかなりの投資を実施し、教育科学技術省（MEST）が 2 つのセンター、知識経済省（MKE）が 4 つのセンターを設立した。いずれも新しく施設を建設し、「Under one roof」を実現している。日本以外の 3 国は、インフラへの投資を全予算の 10 ～ 15%とあらかじめ配算比率を設定して確保しているのに対して、日本は枠取りをしていないために結果的に予算の割合が他国より一桁ほど低くなっている。このことは科学技術政策を戦略的かつ定量的に推進していく際の本質的な問題である。

しかし、2012 年度よりスタートした文部科学省の「ナノテクノロジー・プラットフォーム」10 年事業では 25 大学・研究機関を含む 3 プラットフォームが整備され、予算は十分とはいえないまでも、産業界とのリエゾンを受け持つコーディネーターを配したり、外部共用率の目標値の設定や課金制の積算導入など、共用の拡大とそれによる将来の自立を目指す意欲的な運営方針が設計された。共用施設ネットワークは、ナノテクノロジー分野に限らず、今後あらゆる国家プロジェクトを支え、融合や連携を促進する上で重要であり、研究開発の投資効率を上げるためにも不可欠のインフラである。

また、ナノエレクトロニクスに見るような特定プロジェクトを国際的にオープンにして産学で推進する中核的研究拠点も日本にはまだ存在しない。事実、2010 年 4 月にスタートしたつくばイノベーションアリーナ（TIA）がどの程度のナノエレクトロニクス拠点に成長するか未知数である。競争の激しいナノエレクトロニクス分野においては、主要半導体関連企業の多くが、研究リソースを国際的な拠点の ANT、CNSI、MINATEC、ある

いは IMEC に移し、先端的技術の開発競争を乗り越えようとしている。放置しておくと、中長期的には、国内の企業研究開発部門の空洞化につながりかねない危機的状況にある。人材育成策はこういった状況と連動して議論されるべきであるが、今後に向けての確たる改善策は明らかにされていない。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①拠点ネットワークおよび中核的拠点構築予算を戦略的に枠取りする（基本計画に明記）。

②平成 24 年度にスタートした「ナノテクノロジー・プラットフォーム」の継続的な自立運営のための課金制度を確立し、法人側のマッチングファンドを奨励し、政府は自立を支える最低限の継続支援を実行する。また、キャリアパスの確立したテクニシャンの常勤雇用の道を開く努力を継続する。共用施設運営側と利用者側、双方における装置共用の文化を醸成する。その他、財政・人事上の柔軟性を促進するための制度的阻害要因を可能なものから順次除去していく。（http://nanonet.mext.go.jp/　に多くの情報が公開されている）

③「ナノテクノロジー・プラットフォーム」だけでなく、「光量子科学研究拠点」および X 線自由電子レーザー（XFEL）、スーパーコンピューターも近未来にネットワークとしてリンクさせ得るかどうかについて検討する。拠点は国際的に開かれた組織とし、他国のネットワークとの接続を目指し、もってアジア諸国や世界からの人材の誘引を試みる。

教育・人材育成

ナノテクノロジーは、異分野融合と組織連携を促進させて新しい領域や産業技術を生み出すことが期待されている分野で、米国や台湾ではそのための小中高一貫教育システム（K-12）の構築に向けて諸施策が講じられているが、日本にはそうした中長期的なプログラムは存在しない。

大学・大学院教育に関しては、21 世紀 COE、グローバル COE が博士後期課程の人材育成に貢献しているもののナノテクノロジーに焦点を絞っているわけではなく、また、大学院教育改革支援プログラムなどの教育中心のプログラムも短期的かつ限定的である。そのような中で、大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センターは、文部科学省の科学技術振興調整費の新興分野人材養成プログラムによって 2004 年に設立され、5 年間に大学院学生の履修者 1100 名、修了者 700 名を数え、社会人にも多数教育訓練を施している。しかも、継続性を維持するため、別のプログラム（特別教育研究経費）で 2009 年から 4 年間延長することに成功し、社会受容まで含めたナノテクノロジー教育訓練の充実を図っている。ただし、これは現場の自主努力によるところが大きく、そのあとの継続的な運営が保証されているわけではない。文部科学省が政策的にナノネット事業の後継としてスタートさせたナノテクノロジー・プラットフォーム事業の中に、前身の事業から継続している米国 NNIN との若手人材交流プログラムが目につく程度である。一方、優秀なテクニシャン育成のための新しいキャリアパス設計や若手研究員の企業におけるインターン制度などが一部の独立行政法人で自主的に施行され始めている。

日本における問題は、若者の理科離れ、工学部志望学生の急減、若手研究者の国内志向など、ナノテクノロジー・材料分野の進展にとって大きな障害になりかねない教育・人材

育成上の諸課題に対して長期的視野に立った対応策を持っていないことである。人材育成に関するプログラムは、そのほとんどが一過性で短期的なプログラムであり、戦略の体をなしていない。これは、異分野間を横断して俯瞰的な視野を持つ人材を必要とする日本のナノテクノロジー分野にとっては、長期的に見て最大の課題と言える。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①異分野知識の吸収・融合、グローバルな視点での社会ニーズの把握、急変する環境に対応した状況判断力の養成などを促進する高等教育の抜本的な改革が必要である。そのインセンティブを国立大学法人に与える継続的な施策を実行し、短期の一過性施策は必要不可欠のものだけに限定する。求める人材像と業績評価基準の整合性の向上を図る。

②海外研究者との交流の機会を現状よりも圧倒的に増やすシステムを構築する。

③上記を実現するため、20-30 年スケールの中長期戦略シナリオを作成する常設チームを設置する（リーダーは 5 年任期）。

産学官連携

制度として注目されたのは NEDO のナノテク・先端部材実用化研究開発（ナノテクチャレンジ）である。この制度では基礎・応用の段階から大学あるいは研究開発独法に加えて企業チームが参加することが必須条件となっていて、3 年後にさらなる実用化のステージに進むか否かのレビューを受ける。つまり、基礎の段階から応用をはっきりとみつめ、途中にステージ・ゲートを設けて出口への展開を効率的に図る制度である。応募件数は極めて多く、最初に 4 分の 1 に絞られ、その次のステージへ進む際にはさらに 6 分の 1 に絞られる。実用化研究のステージが 2 ～ 3 年というのは少し短すぎるとの懸念もあるが、基礎と応用を最初から連携させ、出口を目指す新しいファンディング制度として実験中である。2009 年度から文部科学省・JST で始まった戦略的イノベーション創出推進事業は、同様の思想で最長 10 年のスパンを保証する。

また、大学における産学連携（先端融合イノベーション創出拠点／科学技術振興調整費）や異分野融合（ナノテク融合拠点／科学技術振興調整費）の拠点プロジェクトにおいては国立大学法人側が経営責任者として拠点を積極的にサポートする例がいくつか生まれつつある。一方、独立行政法人や国立大学法人には出資機能がないため、大学発ベンチャーへの投資やサイエンスパーク運営が制度的に阻まれている。日本の大学発ベンチャーの企業数は 2006 年に 1,347 社に達したが（科学技術白書）、上記事情やベンチャーキャピタル活動が貧弱であり、またベンチャーの成果に対して大企業の関心が薄いため、自立して成功する例が少ない。成長過程の技術に対する米国ベンチャーの全投資の 10%ほどがナノテクノロジーに対するものであるが、日本はその半分である。法人になった国立研や大学と産業界がどのような win-win の新しい産学関係を構築し、若い研究者を吸引していくのかが今後の大きな課題の一つである。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①産学連携を促進する現行のシステムを改善するため有識者による評価を実施し、それを踏まえた発展性あるシステムを構築する。

②研究拠点形成、人材育成と連動させた新しい国際的な産学官連携システムを府省連携で構築する。

③ベンチャーキャピタル、ベンチャー企業にインセンティブを与える政府、大学法人、独立行政法人サイドの支援制度を充実させる。

④ TIA（つくばイノヴェーション・アリーナ）の発展を目指して、産総研、NIMS、KEK、筑波大学の積極協働、および産業界の強力参加を促す。産業界の参加を誘導するため、産総研を中心とする独法は一層の努力を傾注し、内閣府、経済産業省、文部科学省の関連府省は支援体制を強化する。

府省連携

第二期科学技術基本計画の際、ナノテクノロジー・材料分野で始まった府省連携プロジェクトが他分野も巻き込んだ科学技術連携施策群（2004 年）という国レベルの政策にまで成長した。これは、総合科学技術会議が主導するもので、ナノテクノロジー・材料分野においては、エネルギー関連（水素・燃料電池）のプロジェクト、医療ナノデバイス関連のプロジェクトからスタートし、それぞれ、2008 年 3 月、2009 年 3 月に終了した。また、社会受容関連のプロジェクトがその後立ち上がったが、2012 年時点では、すべてのプロジェクトが終了している。連携施策群においては、少なくとも、関係府省が参加する毎年のシンポジウムを通して情報が共有されていた。連携施策群ではないが、府省連携プロジェクトとして当初から走っていた「革新的構造材料を用いた新構造システム建造物」は、国土交通省、文部科学省、総務省、経済産業省、内閣府の連携で成果を挙げつつ、2008 年度で研究開発を終えた。これら連携施策群についての制度としての評価は未だ行われておらず、また今後、継続あるいは見直しをするなどの方針は一切示されていない。2009 年に民主党政権に移行して以後、省間の調整を強力に行うと期待された国家戦略会議あるいは国家戦略室については、その機能が試されることなく、2012 年、ふたたび政権の交代という事態を迎えている。

他の形の府省連携活動については、この 5 年の間にいくつか試行され、定着しているものもある。具体的には、元素戦略（文部科学省）と希少金属代替材料開発（経済産業省）との合同戦略会議が継続している。一方、同じく文部科学省と経済産業省とのナノエレクトロニクス合同戦略会議が 3 年ほど活動して、合同公募説明会など事実上のオールジャパン戦略を意識した共同作業が行われたが、TIA（つくばイノベーション・アリーナ）発足とともに休止している。2012 年度は、文部科学省の元素戦略「研究拠点形成型」プログラムが 10 年事業として発足し、経済産業省の関連プロジェクト（未来開拓）との間で、両省のガバナンス・ボードが設置されている。一過性でなく、継続性をどう担保していくのかが課題である。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①連携施策群全体を統括する常設の調整部局を総合科学技術会議内に設置する。部局のヘッドとして総合コーディネータを任命し、府省連携あるいは関連プロジェクトの連携施策群化について部局内で一括審議調整する。

②府省を横断したコーディネータの権限の強化と個別プロジェクトの期間に左右されない分野全体の継続的なコーディネーション機能の担保を図る。

ファンディング制度

この数年、異分野融合を目指したトップダウン型の拠点形成プロジェクトが発足し、科

研費によるボトムアップ型のファンディングと対をなしている。徐々にではあるが、産学の連携や、大学内の学科間、学部間の交流が増え、縦割りであった大学や研究機関内でダイナミックな横の動きが増幅されつつある。戦略として考える場合、トップダウン型とボトムアップ型のバランスが必要であり、中長期的に考えた場合には、短期の大型プロジェクトだけでなく、少額でも長期的・継続的な研究プログラムも必要であろう。基盤に近い領域でのサイエンスは広いスペクトルを維持していることが重要であり、また、そのような基礎領域の研究者とニーズ側の研究者との情報交流とそのインセンティブが本質的に必要である。

今後、トップダウン型戦略的ファンディングとして、日本が高い学術ポテンシャルを有する物性物理や材料科学の卓越したリーダー達を総動員する地球規模課題の解決のためのプロジェクトも十分考慮されるべきであろう。

拠点形成や共用施設設置のためにファンディングする際には、受け入れ研究機関側の積極的なサポート（マッチングファンド含む）を求めるような方式を考えるべきである。米国では cost sharing policy としてしばしば使われ、法人となった大学を含む国立研究機関でもトップ経営者の決断で実行可能になっている。異分野融合のインセンティブを与えるために、異分野の研究者同士のチーム編成やプロジェクト提案を優先条件にするファンディング制度、異分野融合でなければ解決できない応募課題の設定も検討の価値がある。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①広い研究スペクトルを担保する基礎領域への長期的・継続的投資、および重点研究領域への加速的集中投資をバランス良く含む複眼的投資戦略シナリオを作成する。

②受け入れ研究機関（大学法人、独法）側に共同投資のインセンティブを与えるファンディング制度を構築する。

<u>責任ある研究開発（技術の社会受容）の推進</u>

国際的には、ナノ材料の計測・評価（キャラクレリゼーション）は、ISO ／ TC229 のワーキンググループ 2 で議論されているが、現実は、リスク評価・管理については各国の温度差が大きく、技術的にも、国際的な調整についても依然として課題が多い。欧州では、EC が 2008 年に「ナノ材料は REACH で規制する」との基本姿勢を示し、その後、「ナノ材料に対する REACH 実施プロジェクト」（2009 年～）、新化粧品指令（2009 年 7 月より施行）などの活動が始まっている。OECD では 2006 年に WPMN（Working Party on Manufactured Nanomaterials : ナノ材料作業部会）が立ち上がり、諸活動が継続して実施されている。米国においては、ナノテクノロジーやナノ材料の化学物質としての安全性の観点から EPA が 2007 年に有害物質管理法（TSCA）の下で、企業などに自主的なデータ提出を促すスチュワードシッププログラムをスタート、また、2010 年から製造前届出（PMN）を必要とする重要新規利用ルール（SNUR）を公布している。韓国においては、ナノテクノロジーの EHS 予算をナノ総予算の 7 %に引き上げ、関係省庁横断で施策を進めるとしている。タイにおいても EHS と ELSI（倫理問題）に関する国家戦略議案が国会を通過している。

一方、日本においては、科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容」プロジェクトが 2007 年度にスタートしたが 2010 年度に終了、その後、関連各省を横断する施策は走っていない現状がある。しかし、その間、コーディネータの中西準子

が率いる NEDO プロジェクト「ナノ粒子の特性評価手法の研究開発」（2006 ～ 2010 年度／ 20 億円）の成果が出始め、2008 年 4 月に NEDO- 産総研 -OECD 合同国際シンポジウム「工業ナノ材料のリスク評価」が開催された。2009 年 11 月には、中間報告として TiO_2、C_{60}（フラーレン）、カーボンナノチューブの作業環境での許容暴露濃度の目安値を世界で初めて公表、2011 年に最終報告書が出ている。そのアプローチと一貫した先端技術による科学的な実証手法は、OECD の WPMN での評価も高い。後継プロジェクトとしては、技術研究組合 TASC（TIA の傘下）の 1 テーマとして CNT のより簡便な安全性評価法が企業中心に進められている（2010 年～）。また、経済産業省のプロジェクトで、ナノ粒子の種類が多いことから、評価基準の簡略化とグループ化を目指す「ナノ材料の安全・安心確保のための国際先導的安全性評価技術の開発」（2011 年～）がある。ちなみに OECD の WGMN には、NEDO の結果のほか、米国 NIOSH（国立労働安全衛生研究所）、EC、デュポンや Bayer などの化学企業、からもデータが集められている。日本では、そのほか、複数の省においてナノ材料の安全性評価、リスク評価研究が行われたが、現在、省間の調整はほとんど行われていない。

将来のリスク予防などについての倫理的・社会的な側面から評価するリスクコミュニケーション（ELSI の観点）については、国際的なレベルの会議からローカルな市民パネルまで多数開かれている。国内では JST 社会技術研究開発センター（RISTEX）が「先進技術の社会影響評価（テクノロジーアセスメント）手法の開発と社会への定着」を走らせたが、これ以後の目立った施策が続かない。また、プロジェクトの成果を制度化する道筋も示されていない。

しかしながら、評価法や関連する標準化作業など国際関係機関の動きは急ピッチであり、それらへの対応が滞ることも多く、今後、質量ともに今よりも充実した人材が緊急に必要となってくる。関係府省が横断的な協議をする場としての国際コミュニティへの窓口を設定する必要があるのではないか。また、広義のナノテクノロジーのリスクガバナンスについては、社会科学者の参入が望ましい。ナノテク材料を作製する事業者が自己の努力、見識でリスク評価をし、国民に伝える能力の獲得と文化の醸成が必要である。その意味で、産総研ナノシステム研究部門のホームページに公開されている月刊の Web ジャーナル「PEN News Letter」（PEN: Public Engagement Nano-based emerging technologies）（http://unit.aist.go.jp/nri/nano-plan/index.html）は、現地情報を含め国際情勢の質の高い分析や系統的・定期的な総括があり、ナノリスクだけでなく各国の政策情報も掲載されていて日本ではユニークな情報センターと見ることができる。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①散発的な有害性評価研究ではなく、リスク評価という目的に向けた継続的な研究が可能なファンディングの仕組み、政策的な促進下で府省横断の共同研究が可能な仕組みを構築する。

②文部科学省、経済産業省、厚生労働省、環境省、農林水産省など、関連省庁を横断して協議するシステムの構築、プロジェクトの結果を制度化するプロセスを明示する。国際的な機関との定常的なコミュニケーションの窓口機能を果たす常設機関を設置し、人材を確保する。

③内外の情報収集・内外への情報発信、情報交換・コミュニケーションの場の提供、以上の機能を有するセンターを設置あるいは支援する。

国際交流プログラム

単発的な国際交流フォーラムやシンポジウムは数多く企画されるが、継続的かつ実質的な効果を狙った国際共同研究や国際人材交流は、日本においては非常に少ないのが現状である。総じて、国際交流に関しては、工業先進国の中で日本ほど遅れている国はない。

平成 21 年度版の科学技術白書には、日本の内向き志向と国際交流の遅れを示す端的なデータがある。まず、日本の留学生受け入者数は欧米主要国や中国よりも少ない。米国における米国人以外の理工系博士号取得者数は、アジアに限ってみると、中国が断然多く、韓国、インド、台湾がそれに続き、国として韓国や台湾よりも人口の多い日本は、はるかに少数になっている。つまり、米国の理工系大学院において日本はアジアのマイナリティになっている。また、全論文数に占める国際共著論文数の割合も、欧米主要国にかなわない。グローバル化の現在、内向き志向は深刻な問題である。どうやって国際交流を増やしていくのか、まずは、国レベルでの真剣な分析と対策が急がれる。

国際協調については、政府だけでなく、大学や学術コミュニティとしての学会などアカデミアの責任も大きい。一例だけデータを示しておく。

表 2-7 は、日本と米国のナノテクノロジーや材料に関連する主要学会について、国外会員数の割合、最近 10 年の全会員数の増減について示したものである。まず、自国以外の（外国人）会員数の割合については、日本の学会が 1% 前後であるのに対して、米国は 40% 前後であり、日本はほとんど比較にならないほどの差をつけられている。

表 2-7　ナノテクノロジー・材料関連学会の日米比較

2008年

	応用物理学会	日本物理学会	日本化学会	電子情報通信学会	APS	MRS	IEEE
会員総数（人）	23,209	17,169	28,636	32,964	46,269	16,000	382,400
国外会員数（人）	186[a]	169[b]	180	2,415	9,689	6,240	172,462
国外会員数割合（%）	0.8	1.0	0.6	7.3	20.9	39.0	45.1
過去10年間の会員総数の増減傾向	微増	減	減	減	増	増	増

a：2010年1月　b：2010年2月　APS: American Physical Society（アメリカ物理学会）
MRS: Materials Research Society（アメリカ材料学会）
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.（電気電子学会）

経済がグローバル化するはるか以前に、科学の世界ではグローバル化が進んでいたはずであるが、この状況を日本のアカデミアはどう説明するのであろうか。また、そのことを反映していると考えられるが、米国の学会が会員数を増やしているのに対し、日本では、表中、応用物理学会のみが若干増やしているだけで、日本化学会も日本物理学会も会員数を大幅に減らしている（日本化学会は 10 年で約 6,000 人減、日本物理学会は約 2,000 人減）。応用物理学会の特徴は、学術領域について厳しい線引きをしないで他の領域を積極的に吸収する体質と、欧文誌の工夫と運営に熱心なことであり、これが他との差になっているも

のと思われる。今後、より詳しい分析の基に抜本的な対策が望まれる。

国際交流について、この数年間の数少ない成功例をあげておこう。物質・材料研究機構の ICYS（英語を公用語とする国際若手研究者センター）が将来のテニュアトラックと結び付けて海外研究者の定着を考慮した運営を実施し、今後 10 年続く材料ナノアーキテクトニクス国際センター（MANA）につなげることに成功している。これは文部科学省のプログラムである。

一方、産総研が中心になって 2004 年に立ち上げたアジアナノフォーラム（ANF）は、アジア、オセアニアの 15 経済圏をメンバーとして非政治的な運営で活動を続け、2007 年に NPO として独立し、現在、シンガポールに本部を設置している。2008 年にスタートしたアジア・ナノテク・キャンプ（ANC）はその中でも若手研究者のネットワークを作る上で優れたプログラムである。また、国際標準機構 ISO に正式加盟できない台湾は、前述したように、リエゾンメンバーとしての ANF の代表者として ISO の標準会議に参加し、活動を続けている。

上述の材料ナノアーキテクトニクス国際センター（MANA）は WPI（World Premier International Research Center Initiative）の 1 つであるが、他に東京大学、京都大学、大阪大学、東北大学で同プログラムが走っていて、今後の進展と更なる努力に期待したい。

以上より、課題と対策をまとめると以下の通りである。

①ナノテク共同研究施設、中核研究拠点の国際オープン化を実現する。大学や研究機関において一部を国際共通語としての英語公用語化（特に事務関係）を進める。招聘外国人子女のためのインターナショナルスクールを設置する。

②大学法人トップマネジメントの奨励による大学教員（特に若手教員）の 7 年に一度のサバティカルリーブを義務化して実施する（教員自身の国際的な俯瞰視野の涵養）。

<u>標準化</u>

標準化に関しては、ナノテクノロジーが世界的な研究開発競争に入って以後、2005 年、ISO 内にナノテクに関する第 229 技術委員会（TC229）が設置された。この委員会は、用語の統一からリスク評価に至るまで検討すべき事項が山積しているので、他の技術委員会とは異なり年間 2 回も会議を開く。ワーキンググループ（WG）が 3 つ編成された。WG1 のテーマは「用語・命名法」で幹事国はカナダ、WG2 は「計量・計測」で幹事国は日本（コンビーナー：一村信吾／産総研）、WG3 は「健康・安全・環境」で幹事国は米国である。この過程で日本は最初から熱心な活動を続け、それが最も重要な WG2 の幹事国獲得に結実したといえる。その後も日本は WG2 の幹事国として活発な提案と活動を継続していて、2007 年に新しく WG4「材料規格」が誕生してそのミッションを決定する際にも、幹事国となった中国の突出した提案を妥当な線まで押し返す上で、重要な役割を果たしている。

前述の NEDO 中西プロジェクトの工業用ナノ材料に関する許容暴露濃度の発表は、初めての科学的な手法により決定したデータであるため、今後の標準化に与える影響はかなり大きいと OECD 内でも高く評価されている。ただし、日本においては関連省庁間の調整機構がないため、標準化や規制になかなかつながらないのが現状である。

一方、工業品の基準認証規格については、各国において戦略上の位置づけは多種多様であり、かつ変化し、一概に論じることはできない。EU が発した RoHS 指令（有害物質規

制）の例を挙げれば、かつて日本の大手メーカーが電子機器を輸出しようとした際に、指令で禁止されているカドミウムが含まれているというので一時、輸入を止められたことがあった。しかし、最近では、安価な太陽電池としてカドミウム・テルライド（CdTe）セルが欧州で堂々と輸入され使用されている。工業規格について日本の産官の対応は十分とはいえない。

いずれにしても、公立機関、学会、産業界が一体となって、常に世界の情報を集めて継続的に分析し、標準化や工業規格の課題に対応することが肝要である。この点、わが国の対応は、特定機関、特定企業、特定個人のややボランタリー的な活動に頼っているところがあり、今後、戦略的な仕組みを構築する必要がある。

以上より、課題と対策は以下の通りである。

①公立機関、学会、産業界が一体となった、より密接な情報交換の場を設置し、国際的な戦略を策定すべきである。

②標準化と工業規格について国際的な活動を託せる人材を育成する。

（付録 1） ２章参考資料

1. 課題解決型科学技術政策～米国エネルギー省の例から～

2009 年度からグリーン・ニューディールの一環として、エネルギー省の「三つの研究イニシアティブ」が走っているが、その中の一つが 5 年で 7 億 7700 万ドルを投入する「エネルギー・フロンティア研究センター（EFRC: Energy Frontier Research Center）」と称する 46 の基礎研究拠点であり、約 10 年近くの準備と選考プロセスを経て決定されている（CRDS-FY2009-CR-01）。

このイニシアティブは、いわゆる持続可能性社会における将来のエネルギー像の議論から出発して、それを実現するための基礎研究課題をいくつかのワークショップを通してトップダウン（バックキャスティング）的に抽出した珍しい例であり、国防省（DOD）の DARPA（高等研究計画局）方式以外では、初めての試みだという。特に基礎研究の抽出にこの方式を適用した例はないとのことである。

このような EFRC の設立は、課題解決型の科学技術政策に舵を切ろうとしている日本にとっては、その過程を含めてケーススタディーとして非常に重要な意味を持つ。設立にいたる背景、46 のセンターにおける基礎研究課題、そのプロジェクト運営方法について、以下のような特徴が指摘できる。

エネルギー省科学局傘下の基礎エネルギー科学局（BES）で 10 年間（1997 ～ 2007）局長であったパトリシア・ダーマーの哲学とリーダーシップの存在が大きい。

学術原理から出発する基礎研究が必ずしもイノベーションを創出していないことへの疑問から、ダーマーは目指すべきエネルギーシステムをまず描き出してから必要な基礎研究の議論に移行する方式を採用。

2002 年、2003 年にワークショップを通して、まず、「太陽エネルギーの利用」などを含む「10 の重点研究領域」を特定。それを解決する基礎研究を求めて 2003 ～ 2007 年の 5 年間で 10 回のワークショップを開催し、最終的に「挑戦すべき 5 つの科学原理」を決定してレポートにまとめた。

2008 年に公募を開始、約 260 件の提案の中から 46 件が選ばれ、2009 年 4 月、46 の EFRC として発表された。

46 の EFRC の研究課題を精査すると、量子ドット太陽電池、人工光合成による燃料生産、材料設計（逆問題設計）など、その 80% 以上は、ナノテクノロジーである。

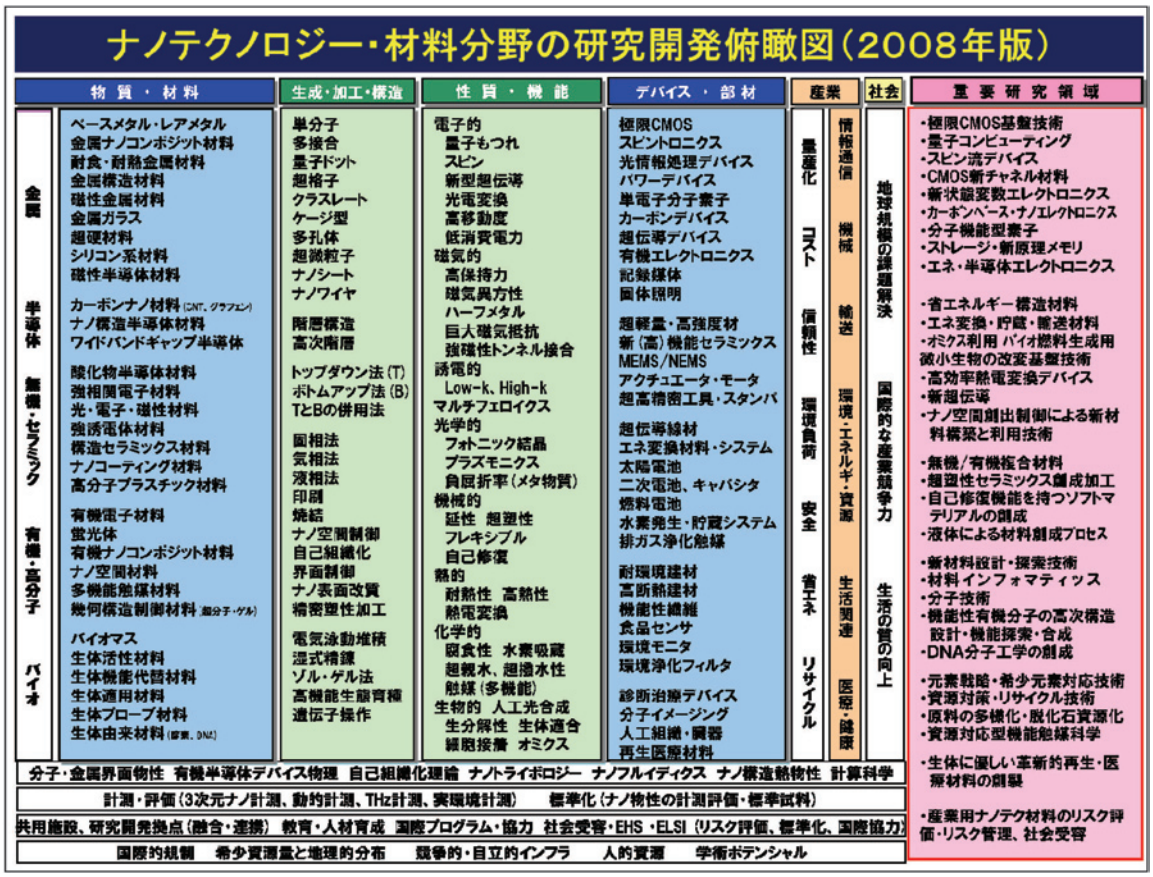
EFRC の契約条件に、多くの関連研究グループとの共同研究が連携と融合を深めて実施されるべきとされている。

以上から重要なメッセージを感受することができる。

米国エネルギー省では、目指すべきゴールを「未来のエネルギーシステム」としてまず決定し、その後、10 年近くに亘り、多くのワークショップを経て基礎研究課題が演繹的に抽出され、46 のエネルギー・フロンティア研究センターが決定された。これは、典型的な「課題解決型基礎研究」課題である。その内容を精査すると、80 パーセント以上がナノテクノロジーである。また、以上の経緯には「バックキャスティングによる課題抽出を政策として採用する場合、5 年程度の期間と一貫して全体をリードする人材が必要」との示唆が含まれている。

2. 物質・材料科学分野の技術開発俯瞰図（2008 年版）

「科学技術コミュニティ」側から整理する「アナリシス型」の方法で、研究開発俯瞰に必要な技術要素あるいは戦略キーワードを抽出し、物質材料分野の全体を俯瞰したものである。これは平成 20 年度（2008 年度）にまとめた既刊の物質・材料分野の技術俯瞰図（CRDS-FY2008-WR-05 ／ 2008 年 12 月）を若干改変して作成されたものである。



物質・材料分野の技術俯瞰図（2008 年版　横型）

図に示されているように、左サイドに科学技術コミュニティの「物質・材料」が配置され、右へ順に「生成・加工・構造」、「性質・機能」、「部材・デバイス（システム含む）」と進み、「産業」を介して「社会」につながっている。抽出された技術要素あるいはキーワードは 100 を超えている。関連基礎学術分野、計測・評価、標準化、そして国が用意すべきインフラ、諸融合連携支援策などは、図の下部に配置されている。

これらを足場にして、「地球規模の課題解決」、「国際的な産業競争力」、「生活の質の向上」という「社会」のビジョンを実現するために抽出された具体的な研究対象領域が、右端に挙げられている「重要研究領域」30 余件である。

3. 科学技術ポテンシャルの国際比較概要

まず、ナノテクノロジーに限定せず科学技術全般について、世界主要国の投資、政府予算、研究者人材などの推移と最近の状況を、各国間で比較する。世界主要国政府の科学技術予算の推移を分析すると、以下のように概括できる（文部科学省科学技術・学術政策局「科学技術要覧」および JST-CRDS「データで見る俯瞰対象分野」（CRDS-FY2012-FR-01））。

（1）各国の政府と民間企業を含む年間研究投資総額は、1990 年以降、20 年間に亘り増加傾向にあり、とくに中国の急伸とそれに次ぐ韓国が目立つ。2010 年に至り、中国は GDP で日本を抜き、米国についで世界第 2 位になった。年間研究投資総額も、2010 年時点において OECD 購買力平価で比較すると、米国、中国、日本、ドイツ、韓国、フランスの順になっている。

（2）研究投資総額を対 GDP 比で比較すると、日本は 1990 年以降首位を維持してきたが（2008 年時点では 4%近い実績）、2010 年に韓国に追い抜かれた。日韓の消長は、ほぼ産業界の消長を反映したものである。BRICs の新興国はまだ低いレベルであるが、中国は急伸して、ほぼ、EU 諸国のレベルに達している。2010 年時点で、韓国（3.74%）、日本（3.67%）、米国（2.90%、2009 年）、ドイツ（2.82%）、フランス（2.25%）、中国（1.77%）、イギリス（1.76%）の順である。

（3）一方、研究投資総額のうち政府負担分に着目すると、その割合は、主要国中日本は最低の 19.3%（2010 年）で、多くを民間の投資に依存している。中国 24%（2010 年）、韓国 26.7%（2010 年）、ドイツ 29.7%（2009 年）、米国 31.3%（2009 年）に比較して見劣りする。国防費による寄与を除いて比較しても、米国を例外として日本の位置は変わらない。また、研究費絶対額についても購買力平価で比較する限り、中国の政府負担研究投資額は 2009 年時点で日本を追い抜き、米国に次いで世界第 2 位になっている。

（4）政府負担研究投資額を GDP 比で比較すれば、2010 年時点で、韓国（1.00%）、米国（0.91%／ 2009 年）、フランス（0.89%）、ドイツ（0.84%）、ロシア（0.82%）の順になっていて、日本（0.69%）は第 6 位である。（ただし、2013 年度に関しては、安倍政権の大型補正予算によって日本は GDP 比で 1 %を超える急増である。）

上述のように、2010 年、日本は GDP で中国に追い抜かれたが、それまでの 20 年間は世界第 2 位の GDP を誇り、GDP 比の科学技術予算総額では欧米主要国中、首位を保持していた。ただし、その多くは産業界の研究開発費に頼っているのが実情で、政府の負担割合をみると、逆に主要国中、最低の 19.3%、GDP 比で 0.69% である（2010 年）。一時期、この状況を脱するため、第 3 期基本計画（2006 ～ 2010 年度）において 5 年間 25 兆円（つまり GDP 比で 1%）の科学技術投資を約束した（小泉内閣）ことがあったが、実績は上記のように推移した。日本の研究投資総額 GDP 比 4%にすることが第 4 期基本計画の目標である。より急な動きは、中国、韓国などアジアや新興国の科学技術強化策に見られる。特に、韓国の動きはダイナミックであり、2009 年 11 月には、知識経済相の談話として、当時 GDP 比 3.37%の官民科学技術投資を毎年 15%ずつ増やして、2013 年までに GDP 比 5%を達成すると発表している。（ただし、2013 年 2 月時点で、韓国は新政権パク・クネ大統領になり、5% 目標達成時期を 2017 年に設定しなおしている。）

一方、各国の科学技術予算の構成を見ると、基礎研究に関しては、日本 14.7%（2010

年度）、米国 19.0%（2009 年度）に対して、中国 4.7%（2009 年度）、台湾 10.3%（2005 年度）と割合が少ない。しかし、アジアでも韓国は基礎研究が 18.2%（2010 年）と高く、日米並みである。中国は、最近になって基礎科学に必要な巨大先端研究設備に矢継ぎ早の投資をし始めていて、基礎研究への投資割合は今後、増加することが確実である。

科学技術の別の重要な資源として、主要各国の人的資源、つまり研究者数についても若干まとめておく。

(1) 主要国の研究者数は、過去 20 年以上に亘って、米、欧、日を中心にして増加傾向にあり、21 世紀に入ってからは、中国と韓国の伸び率が目立っている。2010 年時点で、各国の研究者数は、米国（141.3 万人）、中国（121.1 万人）、日本（84.3 万人）、ロシア（44.2 万人）、ドイツ（32.7 万人）、韓国（26.4 万人）、英国（23.5 万人）の順となっている。ロシアだけは、冷戦構造崩壊（1989 年）後、例外的に年を追って研究者は減り続けていたが、その傾向はようやく止まりつつある。
(2) 人口 1 万人当たりの研究者数で比較すると、日本は世界一である。また、韓国の過去 10 年の伸びが著しい。2010 年時点で、日本（66.0 人、専従換算推定では 51.3 人／ 2011 年）、韓国（54.0 人）、米国（46.8 人／ 2007 年）、ドイツ（40.0 人）、英国（37.8 人）、フランス（36.3 人）、ロシア（31.2 人）の順位になっており、中国は 9.0 人である。
(3) 各国の研究者の割合を組織別にみると、企業研究者の割合は、米国（81.6%／ 1999 年）、韓国（76.5%／ 2010 年）、日本（74.8%／ 2011 年、専従換算）の順に高く、ヨーロッパの主要国、英国（34.2%／ 2010 年）、フランス（57.0%／ 2009 年）、ドイツ（56.8%／ 2010 年）は低めである。中国（61.1%／ 2010 年）はドイツ、フランスに近い。

若手研究者や将来の研究人材を育成する各国の教育機関への公財政支出については、GDP 比で見ると、OECD 各国平均が 1.1%であるのに対して、日本は世界 41 位の 0.5%である（2005 年）。特に、日本の大学院学生の経済環境の悪さは米国と大きな差があり、このことは、大学工学部（長期傾向）や工学系大学院（2005 年以降）への入進学志望者の減少と関連があるだろう。将来の研究者人材の供給に向けて改善が必須と考えられる。

以上の科学技術研究投資および人的資源を背景にして得られた研究成果を、論文と特許の観点から概括しておく。主としてトムソン・ロイター社のデータをもとに JST-CRDS が作成した資料から抜粋したものである。（資料番号 CRDS-FY2012-FR-01）。

まず研究論文数を見てみよう（1998 ～ 2010 年）。

(1) 世界の総論文数を共著者の分数カウントで見ると、2009 年時点で、米国が群を抜いており、EU、中国、日本の順となっている。共著者を整数カウントすると、EU、米国が突出、中国、ドイツ、英国、日本が続く。整数カウントで EU が突出しているのは、国際共著論文が多いことを意味している。
(2) 被引用数トップ 1%論文数を分数カウントで見ると、米国が群を抜いていて、EU、中国、日本の順である。整数カウントでは、EU、米国が突出、英国、ドイツ、フランス、中国が続く。
(3) 総論文数を分野間で比較すると、基礎生命科学と健康・医療を併せたライフサイエン

ス分野のシェアが圧倒的に高く、環境･エネルギー分野がそれに続く。成熟した電子･情報通信は最も少ない。

(4) ライフサイエンス分野は米国が質・量ともに他を圧倒しているが、近年、シェアを下げている。日本は中国に肉薄され、追い抜かれつつある。

(5) 電子・通信情報分野では米国の論文数が最も多い中、EU27 に次いで中国が急伸し第三極を形成している。

(6) ナノテクノロジー・材料分野については、報告書中で詳述されているように、中国が伸びて米国、EU27、日本を追い抜き、量的（論文数）に世界のトップに、また、質的（Top1% 論文）にも 2011 年時点ではトップに立った模様である。日本は 2004 年以降、論文の質・量ともに頭打ちになり、2011 年時点で韓国にも追いつかれている。

次に世界の特許出願公開総数について以下に概括する（2001 ～ 2008 年）。

(1) 特許出願公開総数を分野別に見ると情報通信分野が圧倒的に多く、全出願の 3 割近くを占める。環境･エネルギー分野の特許出願の増加傾向が目立つ。PCT 国際出願は、ライフサイエンス分野のシェアが低下している。

(2) 各分野における公開出願件数の国別比較をすると、日本は環境・エネルギー、情報通信およびナノテク・材料分野で首位にあり、米国がいずれにおいても 2 位である。環境･エネルギー分野では中国がほぼ米国にならび、電子･情報通信分野とナノテク・材料分野では韓国と中国が第 3 位を競っている。ライフサイエンス分野では、米国が圧倒的な首位である。

(3) 特許公開出願総数を国別比較すると日本は首位である。米国が長く 2 位の座を占めていたが、中国がこの数年急伸し、2008 年に米国に追い付いている。PCT 国際特許出願件数は米国が首位の座にあり、2 位が日本、3 位が EU27 である。

(4) PCT 国際特許の登録件数を見ると、日本が首位であり、しかも年々増加していて、質の高い特許出願が多いとの見方がある。

以上、科学技術への投資と研究成果について概観した。しかし、純粋科学を除く科学技術への投資については、最終的には経済への効果によって評価される必要がある。第 1 期科学技術基本計画がスタートしてから今年で 17 年目、第 1 期から第 3 期までの 15 年間にわが国はすでに総計約 60 兆円の公的資金を科学技術政策に投入してきた。それにもかかわらず、過去 15 年以上にわたって経済成長率は 2%を切る状況が続き、2010 年には GDP 世界第 2 位の座を中国に奪われた。民間の投資も含めれば､日本は世界トップグループの研究開発国である｡それがなぜ､各国に比較してGDPの伸びに結びついていないのか｡今後の推移を見ながら注意深く分析されるべきであろう。

米国エネルギー省のパトリシア・ダーマーは、課題設定型アプローチで 12 のワークショップを通して 10 年近くかけて基礎研究テーマを抽出した。その裏には、まさに類似の投資効率への疑問が動機として存在していたようである（G-TeC 成果報告書「ナノシステム」CRDS-FY2009-CR-01）。第 4 期科学技術基本計画では、前述のように、この課題に対して「科学技術とイノベーションの一体化政策」を掲げている。

3. 研究開発領域

3. 1　グリーンナノテクノロジー

3. 1. 1　エネルギーを創る

3. 1. 1. 1　太陽電池

（1）研究開発領域名

太陽電池

（2）研究開発領域の簡潔な説明

太陽電池の研究開発課題は、高効率かつ低コストをいかに実現するかである。すでに基盤技術が構築されているシリコン系太陽電池に関しては、さらなる低コスト化が課題になり、最近高効率化の進展が著しい有機系太陽電池については、分子設計、プロセス技術の構築、劣化機構の解明などを通じて、変換効率 15%以上のレベルを実現することが課題となる。さらに超高効率を目指した量子ドット系などの新構造太陽電池の開発に取り組む必要もある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

近年の地球環境・気候変動問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。この分野における研究開発の重要性が益々増大している中で、エネルギー変換分野では高効率・低コストの革新的太陽電池の開発が精力的に行われている。革新的太陽電池としては特に有機太陽電池である有機薄膜型やハイブリッド型が将来性を有する候補として考えられている。これらの分野では、有機膜の劣化機構解明、ハイブリッド接合形成技術、耐久性向上技術、界面制御技術の開発が必要になる。

一方、実用化が進んでいる、結晶 Si、薄膜 Si、CIGS［Cu（InGa）Se2］、CdTe、GaAs 集光型の太陽電池では、企業を中心により低コスト、より高効率を目指した開発が行われている。特にシリコン系では、変換効率が理論的限界に近づいているので、材料の効率的利用、薄膜化などの手段で、低コスト化の開発が盛んである。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。

〔これまでの取組み〕

これまで、有機系太陽電池においては膨大な研究が実施されており、各種の新規材料開発によって高効率化が達成されてきた。その結果、有機薄膜太陽電池では 10% 以上、色素増感太陽電池では 12% 以上の変換効率が得られている。しかし、これはシリコン系太陽電池の半分程度の変換効率であり、その向上が科学技術的に重要な課題である。

実用化が進んでいるシリコン系太陽電池や化合物半導体系太陽電池では、さらに極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面欠陥の削減、表面・界面パッシベーション技術、光マネジメントの最適化などの研究が盛んに行われてきた。

また、集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト

化のための新技術として注目され始めており、プレイヤーが増加してきている。直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。

太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の３極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。

日本は Si 薄膜、CIGS、超高効率共に高い技術を持ち、Si 太陽電池でも企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶 Si 系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。例えば中国製モジュールが圧倒的に安く、日本もコスト競争で苦戦している。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるが、いつまで優位性を維持できるか不安がある。

〔今後必要となる取組み〕

有機系太陽電池に関して、今後さらなる変換効率の向上には、新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究、一重項エキシトン解裂を用いた革新的有機太陽電池の研究、三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究などが上げられる。また、発電条件下（光・温度）での耐久性の向上も重要な課題である。したがって、実用化に至るには、太陽電池の活性層に用いる有機分子の探索やデバイス構造の改良により、上記の問題を克服しなければならない。

量子ドット太陽電池に関しては、量子ドット・ナノワイヤーを利用したもの、異なるバンドギャップを有する量子ナノ円盤構造を利用したもの、プラズモンを利用する量子ドットプラズモン太陽電池などが提案されている。ここでは量子ドット形成技術、プラズモニクスの輸送機構解明が期待される。

実用化が進んでいるシリコン系や化合物系の太陽電池に関しては、今後、さらなる効率アップと低コスト化のために、集光型太陽光発電関連技術が重要となる。現在、日本の集光型太陽光発電関連技術は、世界トップレベルであるが、近年、米国やスペインの進展が著しく、我が国においてもさらなる技術革新が必要である。この分野では、いかにコストを低減できるかが普及の鍵となる。また、アモルファスシリコン太陽電池では、高品質光吸収材料の開発とともに、界面制御技術開発、光劣化機構の解明が急務である。

シリコン系太陽電池を真の再生可能エネルギー源として普及させるには、太陽電池単体の開発だけでは不十分であり、システム技術の開発が不可欠である。例えば、太陽電池による発電量が大きくなると電力系統との連系許容限界に近づいてくる。太陽電池は発電量が天候などにより変動するため、その利用、運用にあたってはマイクロコンバーター、蓄電池、スマートグリッドなど、他の技術分野との組み合わせ、が重要となり、幅広い技術分野を結集した総合的な取り組みが必要である。市場拡大が進む欧州ではすでにこうした研究開発が活発化しているが、日本でも早い段階からのシステム技術開発の準備が必要となる。

（4）科学技術的・政策的課題

太陽電池の研究開発を進めていく上では、基礎研究段階からプロジェクト形式で産学連携を実施することが重要である。エネルギー分野では基礎は「学」、実用化は「産」という役割分担は効率的ではなく、双方の融合が必須である。そのためには、実用化研究を進めるための、プロジェクト研究拠点を構築し、ファンディングを充実させた上で、そこに産学の研究人材を投入することも有効と考えられる。

有機系太陽電池の開発は、米国、欧州はもとより、新興各国においても研究が盛んに進められている。そのため、日本の国際競争力を早期に確保するためには実用化に向けた技術開発が吃緊の課題である。新しい有機分子の開発やデバイス作製法の改良など、個々の要素技術に関する基礎研究は着実に進歩しているものの、実用化に向けた大スケール化や実証などの技術開発までは行われておらず、産官学の緊密な連携下での技術革新が求められる。民間企業にとって投資リスクが大きいため、自立的な市場参入・拡大はあまり期待できない。そのため、国が主導的な役割を果たし、資金・人材面での支援を行い、技術開発の推進を後押しすることが必要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

単結晶シリコン太陽電池では米国 Sun Power 社が 156mm 角セルで 24.2％を実現、Panasonic 社は 98μm 厚の 100mm 角セルで 23.7% を達成している。カネカは、銅プレーティング技術を利用した 6 インチのヘテロ接合型太陽電池で 23.5% を達成している。その他、多くの企業が変換効率 20% のハードルを突破している。

ルツボ内の融液成長において種結晶を利用してインゴット製造を行う、モノキャスト技術の研究開発では、仏 INES が 450kg インゴットで 95% の領域で単結晶を得ることに成功し注目を集めている。歩留まりや品質に課題はあるものの、良質な部分にヘテロ接合太陽電池を適用し、100mm 角セルで 20.2% を達成している。

薄膜 Si では、変換効率での不利を改善すべく、透明導電膜へのテクスチャ形成、透明中間層の利用、プラズモニクス、フォトニック構造など、光閉じ込め技術の進歩が近年著しい。この技術は、薄膜 Si 系に限らず、他の薄膜材料や、極薄結晶 Si においても有効であると予想され、今後の発展が期待される。また、レアメタルフリーの薄膜太陽電池である CZTS 太陽電池も最近大きく注目されている。

集光型太陽電池に使用する多接合型太陽電池において、シャープは 1 Sun（100mW/cm2）で 37.5% の世界最高効率を達成している。また、集光時の効率としても、43.5%（300-500 倍集光）の世界最高タイ効率を達成している。米国 Solar Junction 社も世界最高タイ効率である 43.5%（400-600 倍集光）を達成しており、量産レベルでも 42％の高効率を出している。モジュールについては、米国 Semprius 社が 33.9% のモジュール最高効率を達成している。

各国で太陽光発電の普及拡大が進む中、ドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統に対する連系許容限界に近づいており、特定の日を見ると風力と併せた再生可能エネルギーが半分以上の電力を供給している時間帯もある。そのため、電力系統の安定運用に向け、発電量予測技術の重要性が高まっている。翌日～リアルタイムまで予測のニーズは広く、衛星画像と地上観測データを用いて広域で正確に予測する技術の開発が進んでいる。日本

国内においても同様の取り組みは進んでいるが、地上における気象庁の日射計測地点数が減少傾向にあることや、導入済の太陽電池のアレイ構成（方位など）がデータベース化されていないことから、予測の高精度化に向けて早急に取り組むべき課題は多い。また、系統全体で見た時の余剰電力や調整力不足の問題に対しては、今後も引き続きスマートグリッド関連技術の開発が必要となる。特に家庭用から電力系統用大型設備まで、蓄電池の導入に関する研究、および蓄電池そのものの開発が各国で進んでおり，これに加えて電気自動車などの移動・流通手段の電化と需給調整などの系統安定化への利用、および建物における省エネ化とエネルギー管理技術の開発が活発に行われている。

一方、有機系太陽電池においては、有機薄膜型の進展が著しい。2012 年に三菱化学が変換効率 11.0% の有機薄膜太陽電池を開発し、世界最高の変換効率を更新した。住友化学と米カルフォルニア大学により、２種類の光電変換層を組み合わせた「タンデムセル構造」からなる、10.6% の光電変換効率が発表された。さらに、東大とオーストリアのグループと共同で、髪の毛１本にも巻ける伸縮自在な世界最薄かつ最軽量のデバイス作製に成功し、東芝は 5 cm 角サイズの有機薄膜太陽電池モジュールにおいて 7.7% の光電変換効率を実現するなど、力強い進歩が見られる。今後も新規な材料開発で、更なる高効率化が期待できる。

色素増感型太陽電池は発売に向けた地道な研究開発が各企業で実施されている。産官学多くのプレーヤーが関与しているため、今後の益々の進展が期待できる。今年度の最大のニュースは、色素増感型でこの分野を牽引してきた米国ベンチャー企業 Konarka の倒産である。ただ、同社のセルは変換効率が低く、製品としての完成度が不十分だったとの認識が一般的である。現在の色素増感型の主要なベンチャー企業は、G24i（英国）、３GSolar（イスラエル）、Dyesol（オーストラリア）の３社である。この内、G24i のセルが Logitech 製 iPad 用外部キーボード電源に採用され、市場投入が始まった。また、サムソン電子が建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源向けに発売を計画している。液晶や有機 EL、リチウムイオン電池の歴史を考えると、後発ながら脅威となる。このような状況下、日本はより高効率化を目指した研究開発が進行中である。

〔注目すべきプロジェクト〕

シリコン系太陽電池に関しては、NEDO プロジェクトで、結晶 Si 太陽電池のコスト限界を打破し、安価で高効率な結晶 Si 太陽電池を大量に供給する技術の実現を目指したコンソーシアムが形成されている。原料の製造からセルまでの一貫した産学連携の研究体制が構築され、豊田工大には、産業開発プラットフォームとして太陽電池試作ラインが導入された。また、産業技術総合研究所では、再生可能エネルギーに特化した研究施設を、福島県郡山市に開所することを 2014 年春に予定している。産業の基幹である結晶 Si 太陽電池が研究の対象となり、次世代薄型結晶 Si の研究開発が進められる。また、同じ研究所内では、「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」が実施され、ナノワイヤ太陽電池の研究開発が集中して行われる。

最近レアメタルの問題に関連して大きな注目を集めているレアメタルフリーの薄膜 CZTS 太陽電池に関しては、NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア、産業技術総合研究所と複数の大学からなる体制で一気に CZTS 太陽電池の高効率化・物性評価を

進める研究がスタートした。CZTS は、日本発の材料であり、JST の CREST でも研究が進められている。

有機系太陽電池は基礎研究段階を離陸し、より製品に近いレベルに達しており、国の後押しも盛んである。例えば NEDO では、『24 年度有機系太陽電池実用化先導技術開発』や『有機系太陽電池に関する特許動向調査』の新規プロジェクトが開始された。

（6）キーワード

シリコン系太陽電池、低コスト化、高効率化、有機系太陽電池、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明

（7） 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	無機系太陽電池の日本の基礎研究水準は、これまで個別の研究機関や企業の努力によって高い研究水準を保ってきた。しかし、研究水準の高い欧米の研究機関や、急速な追い上げを見せている新興国への対抗から、産業の主体である結晶系 Si 太陽電池や、薄膜太陽電池の分野などでは、オールジャパンのコンソーシアムを構築することにより研究体制を強化し、国際競争力を高めようとする動きがある。独 Fraunhofer 研究所、米国 NREL など、研究開発の中核となる研究機関が日本でも必要とされている。 集光型太陽電池・化合物太陽電池の研究水準は、世界トップレベルにあるが、欧米との開発競争が激化している。ナノワイヤ・量子ドットなどの新概念太陽電池を対象とするプロジェクトが、JST や NEDO の事業として行われている。 有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が加速している。大学での研究が非常に盛んになるとともに、企業においても三菱化学や住友化学が材料開発の基礎力を活かし、世界最高レベルの変換効率 10% を達成。この住友化学の成果は、カリフォルニア大学バークレー校との産学連携の結果である。一方、色素増感型は，産官学分野で地道な高効率化研究が実施されている。新しい流れとして、有機系太陽電池を人工光合成の一種として捉えた国のプロジェクトがスタートしている。
	応用研究・開発	◎	→	結晶 Si 系の技術開発は、原料技術からモジュールに至る各要素技術、実用サイズでの効率記録などの高性能化技術において世界トップレベルではあるが、新技術を続々と発表する欧州に比較すると、権威ある国際会議などでの発表件数が減少傾向にある。また、中国・台湾・韓国などの新興国にも追いつかれつつある。薄膜太陽電池では、実用サイズモジュールの効率記録や、ガラスの高いシェアの維持など、技術開発水準は高い。モジュール信頼性やシステム技術に関する技術開発は、これまで個別企業に依存してきたが、一部の技術では、コンソーシアムでの技術開発が行われている。 有機系太陽電池の応用では色素増感型が先行しており、各企業が発売に向けたセル開発を行なっている。また、有機系の特長を活かしたフィルムタイプ太陽電池の研究開発が非常に盛んである。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の中で、低価格化が進み、原料やウェハーメーカーなど撤退を余儀なくされた企業もある。業績不振のセルメーカー・装置メーカーも少なくない。結晶 Si 系の国内トップメーカーであるシャープは、標準的なセルは低価格品の輸入に踏み切り、高性能セル・モジュールの自社開発に注力することで産業技術力を堅持しようとしている。Si 系の薄膜太陽電池では、苦戦が続いている。海外他社との連携や、薄膜技術をヘテロ接合に利用した高性能結晶 Si 太陽電池の開発に活路を見出そうという動きもある。CIGS 太陽電池については、ソーラーフロンティアが世界を牽引しており、年産 1GW の生産規模は突出している。
米国	基礎研究	○	↗	多様な太陽電池に対して低コスト・高効率化を推進するプロジェクトがエネルギー省の事業として実施されている。結晶 Si 系の基礎研究は、研究人口は多くはないものの、MIT や国立再生可能エネルギー研究所（NREL）などにおいて高い水準の研究が行われている。宇宙用・集光用の多接合型太陽電池の研究は活発である。また、太陽光発電の利用技術に関する研究開発は先行している。IBM 社は、CZTS 太陽電池で 11.1% の変換効率を報告している。Dupont などの大企業も CZTS の研究を行っている。Uni-Solar 社は、小面積 3 層タンデムセルで初期変換効率 16.3% を達成しており、高い研究水準を有している。量子ドット型やプラズモン太陽電池など新しい技術への取り組みは大学を中心に活発化している。有機系太陽電池では、産官学ともに有機薄膜型の研究が非常に盛んである。高分子型ではカリフォルニア大学バークレー校など、低分子型ではミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心となって基礎研究を牽引しており、それ以外にも多数の研究拠点が存在する。一方、色素増感型の研究は非常に少なく NREL などがあるのみである。

米国	応用研究・開発	○	↗	SunPower 社は、裏面接合型の高効率結晶 Si 太陽電池で、Panasonic 社のヘテロ接合型太陽電池と結晶 Si 系の実用太陽電池における最高効率を競っている。Si 基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、新しいアイデアが生まれている。化合物系太陽電池では、多数のベンチャー企業が参入しており動向が注目される。モジュールの信頼性についてはNREL が米国内の議論をリードし、日欧などとの国際協力の下、さらなる長期信頼性の確保に向けて様々な試験方法や規格の提案が行われている。有機系太陽電池ベンチャーの草分けとして、高分子系では Solarmer、低分子系では Global Photonic Energy Corporation（GPEC）が活躍中である。Solarmer はカリフォルニア大学ロサンゼルス校、中国科学協会・化学研究所の研究成果，GPEC はプリンストン大学、ミシガン大学などの研究成果を活用している。
	産業化	△	→	集光型太陽電池や、裏面接合型の高効率結晶 Si 太陽電池などにおいて優位性がある。Si 基板材料関連や CIGS 系などで生まれた多くのベンチャー企業は、近年では目立った報告がなく足踏みしているようにみえる。First Solar 社は、CdTe 太陽電池の製造でトップ技術を有しているが、生産規模は縮小傾向にある。また、スマートグリッドなどシステム産業への注力化が顕在化している。
欧州	基礎研究	◎	→	結晶 Si 系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。独 Fraunhofer 研究所、オランダ ECN、ベルギー IMEC、仏 INES など、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。開発はどちらかというと現実路線で短期的テーマが中心だが、基礎も重視し各種太陽電池の研究を展開、超薄型や新原料などの次世代技術への取り組みも活発で研究人口も多い。Si 系薄膜においては、スイス EPFL が世界の研究開発を牽引している。 CIGS 太陽電池、CZTS 太陽電池ともに、効率自体は日米に及ばないものの、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり取り組んでおり、研究水準は着実に上がっている。 有機系太陽電池においては、色素増感型、有機薄膜型ともに非常に研究が盛んである。色素増感型では EPFL（グレッツェル研）やウプサラ大学、有機薄膜型では Imperial College が基礎研究を牽引している。また、IMEC が産学連携共同研究機構 Solliance Alliance を活用し、薄膜太陽電池の研究開発を精力的に行っており、その一つが有機系である。
	応用研究・開発	◎	→	市場拡大を背景にベンチャー企業が多く設立され、製品化を目指している。企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau 社のシリコンヘテロ接合太陽電池製造設備では、平均効率 20.7% が達成されている。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜 Si ではエリコンソーラー社により、小面積 a-Si セルの安定化効率 10% 超が初めて達成されるなど、高い技術開発水準を有している。集光型太陽電池・化合物太陽電池においても、高い技術開発水準を有している。研究機関の開発成果が人とともに移動して企業の技術開発を支えている。研究機関で企業の研究所的な研究を展開しているので実用化は早い。各研究所の成果が中国に流れているケースが散見される。有機系太陽電池でも多くのベンチャー企業が活躍中であり、代表的なものは英国の G24i。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の影響を受け、セルメーカーやウェハーメーカーなど、厳しい状況にある。過去に世界トップの生産量を記録した独 Q-cells 社も例外ではなく、2012 年 8 月には、韓国ハンファグループによる買収に合意している。装置メーカーにおいても、量産用薄膜シリコン太陽電池モジュールのターンキー製造ラインで高い実績をもつエリコンソーラー社は、東京エレクトロン社に買収された。有機系太陽電池のニッチ用途製品が発売され始めた。G24i の色素増感太陽電池が、Logitech 製 iPad の外部キーボード電源に採用されている。

中国	基礎研究	△	↗	結晶系 Si 太陽電池は、産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関などの追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。薄膜 Si、化合物太陽電池など、その他の太陽電池においても研究活動は見られるが、まだ研究水準は高くない。有機系太陽電池においても留学時に培った人脈を活かし、国際共同で基礎研究を推進。潤沢な研究資金で猛烈な進歩を遂げている。
	応用研究・開発	○	↗	企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカーなどと連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。結晶 Si 系太陽電池の大手数社の開発力拡充には注目すべきである。有機系太陽電池においては、中国、台湾ともに多くのベンチャー企業が創立されている。企業化まで後一歩の所まで来ており、来年にも発売が予定されている。
	産業化	◎	↗	急激な成長を遂げ、世界最大の太陽電池生産国に発展している。結晶 Si 系太陽電池では量的には他国を圧倒しており、Suntech Power 社、JA Solar 社、Yingli Solar 社、Trina Solar 社は、年産 1GW 以上の生産能力を保有する。原料からモジュールまでの垂直統合が行われる一方で、多くの企業が乱立した原料製造については、過剰な投資に政府が懸念を示している。また、モジュールの信頼性については、品質に問題のあるケースが指摘されており、信頼性の向上が課題である。政府は、国内導入施策を整備することで、国外市場に強く依存する企業の体質強化をはかっている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業として育成しようと研究開発を支援している。現実的な技術を中心として、原材料からセル、システムまで研究開発が進められている。次世代技術の研究も主流ではないが進められている。有機系太陽電池の研究機関は多いが、基礎研究力はまだキャッチアップ・レベルである。
	応用研究・開発	○	↗	Samsung グループ、LG グループ、Hyundai グループなど、財閥系企業が太陽電池製造に参入し、技術開発を進めている。卓越した半導体技術を背景として技術水準は着実に上昇傾向にある。LG 電子社は、大規模製造プロセスと整合する Cu プレーティングを導入したヘテロ接合型太陽電池で 20.5% の変換効率を報告している。有機系太陽電池では、色素増感型で Samsung が製品化を企画中。用途は建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源である。
	産業化	○	↗	生産量で中国に遅れを取っているが、Samsung electronics 社、LG electronics 社は、生産ラインを本格稼働させており、今後の展開が注目される。ハンファグループは独 Q-cells 社を買収し、太陽光発電業界におけるグローバルプレーヤーの仲間入りをした。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）第 38 回 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, USA, 3-8 June, 2012
2）第 27 回 EUPVSEC, Frankfurt am Main, Germany, 23-28 September 2012
3）サムソン SDI：http://samsungsdi.com/nextenergy/dssc-solar-cell-battery.jsp

4）G24i：http://www.g24i.com/
5）Heliatek：http://www.heliatek.com/?lang=en
6）NEDO：http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100135.html

3. 1. 1. 2　人工光合成

（1）研究開発領域名

人工光合成

（2）研究開発領域の簡潔な説明

光合成のプロセスを模して、太陽光エネルギーを化学エネルギー（水素やメタノールなど）へ変換する研究開発。水からの効率のよい電子の取り出し、水素生産、二酸化炭素の固定化と有用化学物質生産などの課題がある。研究開発の対象は大きく光捕集、電荷分離、エネルギー変換（触媒系）のプロセスに分けられ、最終的にはこれらの要素研究・技術をシステムとして実現することが期待される。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

地球に降り注ぐ太陽光エネルギーの総量は莫大であり、その一時間分が、人類が一年間に消費する総エネルギー量に相当することが知られている。ただし、エネルギー密度が低いことが欠点である。これを効率的に安価に利用する一つのシステムとして人工光合成が挙げられる。人工光合成は、太陽エネルギーを利用して燃料や化学原料を合成する技術として位置づけられ、化石燃料に依存した社会構造から脱却し、二酸化炭素を排出せずに、貯蔵・輸送可能な再生可能燃料を生成するための技術開発といえる。

光合成の基本的なプロセスとして、光捕集系、電荷分離、水の酸化触媒および電子受容体の還元触媒の３つの基本要素がある。実際の光合成における明反応では、チラコイド膜に埋めこまれた光捕集たんぱく質と反応中心たんぱく質が重要な役割を果たす。反応中心では、膜を横切るように複数の電子供与体、受容体が配置されており、光エネルギーを使って電子と正孔が分離した状態を作り出し、高エネルギー（高い還元力）の電子が化学エネルギーとしての NADPH を生成するとともに、チラコイド膜を介したプロトン濃度勾配を生成する。この電子移動の過程に出入りするエネルギーがうまく制御されており、重要な役割を果たしている。

人工光合成では触媒などの物質から飛び出した電子から還元生成物をつくり、電子が飛び出た正孔から水を酸化するが、この水の酸化から電子受容体の還元に至る酸化還元の各過程を如何に高効率化するかが課題の１つとなっている。

［これまでの取組み］

人工光合成には、大きく分けて半導体（光電気化学的）系を用いる手法と微粒子系あるいは錯体系を用いる手法とがある。将来の大規模応用を考えれば、微粒子系・錯体系を用いるエネルギー変換の方がコスト的に有利と言われるが、例えば水分解の場合、水素と酸素の効率的分離技術の開発が必須となり、そのような研究も並行して行う必要がある。

水の酸化については、可視光で効率良く反応を起こすシステムを開発することに成功しており、また二酸化炭素の還元については光触媒がよい働きをすることがわかっている。こうした個々の反応についてはかなり効率が上がってきているが、植物のようにそれらをまとめあげる技術がまだ生まれていない。

また、太陽光の輻射密度は希薄であるため、その実質的な有効利用を実現するためには、

紫外から可視、赤外の全ての波長域に及ぶ太陽光エネルギーを効率良く集め、触媒部位へと無駄なく導く方法論の確立と実用化技術の創出が求められている。光捕集に関連する光合成色素蛋白複合体の構造と機能との相関を明らかにするなど植物の光合成機能に学ぶことも重要である。

実際の光合成は複雑であり、そのエネルギーの変換効率は正味で１％以下と必ずしも効率が良くない。東大　堂免グループ、ハーバード大　Nocera グループによって半導体光触媒による可視光水分解が太陽エネルギー変換効率として 0.3%強まで達成されている。

各国とも両方の研究を多くの研究室で進めているのが現状である。金属錯体を用いた分野では、かつては水の酸化については米国、英国が、二酸化炭素の光還元については、フランス、米国が主導していたが、現在ではいずれも日本が主導している。光触媒分野における現在の日本の優位は間違いないが、欧米、中国において人工光合成に関する大きなプロジェクトがいくつも動き始めており、研究競争は一段と激しさを増している。

［今後必要となる取組み］

このような現状の中で、光合成に学びつつも実用に耐えるような 5 ～ 10%の効率を持つ系、概念を創出していくことが必要となり、そのための基礎的、応用的研究を両立させて進める必要がある。

1）高効率材料（光触媒など）の開発（高い量子収率、長波長応答）とそのためのナノテク材料設計指針の確立（化学・物理）
2）元素戦略的材料開発
3）高度計測法や計算科学を駆使した反応素過程・メカニズム解析（最新鋭の計測法の活用）
4）触媒など材料の大量合成プロセスの確立
5）性能を引き出す大規模光触媒反応システムのデザインとシミュレーション（化学工学・機械）

従来は、水素社会を志向した水分解水素生成の技術開発が重点的に進められてきたが、近年、エネルギー貯蔵の観点から液体燃料を合成する技術開発のニーズが高まり、水素から液体燃料の変換技術と合わせて実用化の検討が始まった。一方、人工光合成は化学原料の代替への取り組みとしても重要であり、二酸化炭素を新たな炭素源と位置付け、資源化の検討が進んでいる。

（4）科学技術的・政策的課題

本分野においては古くから日本が単独で独自に研究を継続してきたため、現時点では諸外国に比べ、材料開発を中心にリードしている部分はある。しかし、半導体光触媒や有機金属錯体などの機能性固体物質では、その物性を支配する要因やそれを制御する方法が必ずしも明らかになっていない。

また、実用化、特に大規模展開に向けてはまだ解決しなければならない課題が数多く残されている。基礎研究からエンジニアリングに至る広範な研究者を集め、かつアカデミアだけでなく関連企業とも密接に連携しながら迅速に研究開発を進めることが喫緊の課題である。また、実用化の際には、高濃度で二酸化炭素を排出している工場での実証試験が必

要なので、用地の確保や研究資金獲得のため、国の指導および援助も必要となる。

人工光合成と太陽電池の研究コミュニティの連携･協働が少ないことも指摘されている。両者には共通の技術も多く、今後一層交流を発展させていくべきである。特に本課題の主体となる光合成をモデルとした実用化研究には、生物、物理、化学、生化学、分子生物学、工学などの多岐に渡る研究者の協力が必要であるにも関わらず、各々のテリトリー意識が強すぎるため分野融合を困難にしている。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- 本領域では多くの日本人研究者が世界を牽引している。以下にいくつかの研究分野／研究者を紹介する。
- 半導体触媒を用いた水の可視光完全分解（東京大学・堂免／東京理科大学・工藤ほか）。ただし、可視光の有効利用に向けたブレークスルーが必須。水以外の不活性分子の活性化手法の確立も必須。また、学術的に不明な点がかなり多く、基礎的知見の蓄積も必要。
- 水を還元剤とした二酸化炭素の光還元（豊田中研）。可視光の有効利用や基礎的知見の蓄積が課題。
- 金属錯体触媒を用いた二酸化炭素の触媒的光還元（東工大・石谷）。水を還元剤として用いた反応系の構築が課題。また、レニウム（Re）錯体を用いた反応開発が行われているが、レアメタルを脱却し、元素戦略的視点に基づく研究開発は不可欠である。
- 水の酸化反応（新潟大・八木／分子研・正岡）。光反応系への展開・元素戦略的視点に基づく研究開発が不可欠。
- 2011年、沈（岡山大）らにより、酸素発生中心である光化学系2色素蛋白複合体のX線による構造解明が、サイエンス誌の10大ブレークスルーの一つに取り上げられた。特に、水を酸化的に分解するマンガン･カルシウムクラスターの構造が解明されて以来、酸化型触媒の開発が加速している。

人工光合成などによって生成される水素の貯蔵･輸送技術として、千代田化工建設（株）が有機ケミカルハイドライド法の熱触媒の完成度を高めている。これは水素化反応により水素をトルエンに固定し、メチルシクロヘキサン（MCH）として、常温・常圧の条件で貯蔵輸送を行い、利用場所で脱水素反応を行って水素を取り出す構想である。これら2つの物質は、地球上のあらゆる環境下で溶媒を用いずに液体状態を維持することができる組み合わせである。ミドルクラスタンカーで4万4千トンのMCH（水素キャリア）を運ぶ構想を学会などで紹介し始めている。

［注目すべきプロジェクト］

太陽光エネルギーを直接化学エネルギーへ変換するいわゆる人工光合成型光エネルギー変換が世界的に注目を集め、大型の研究プロジェクトが世界各国で始動している。

2005年には米国エネルギー省の監修のもと、米国を中心として、世界各国の著名研究者が参画して光合成を用いた次世代燃料生成に関する白書が作成されている。この白書作成には、光合成研究の現状理解と課題解決に向けた方策の英知のほぼ全てが記載されている。米国では、この提言を基に、DOEが2011年に人工光合研究拠点JCAP（Joint

Center for Artificial Photosynthesis）などをスタートさせている。最近産業界の一部が本格的に興味を持ちだした。

・ Chemical Innov. for Production of Fuel from Sunlight（NSF, All American）
・ Helios solar energy conversion center（DOE, Berkeley Lab）

欧州では、2005 年に ESF（European Science Foundation）に向けた白書提言（Harnessing Solar Energy into Clean Fuels）が提出されており、現在はこの白書に基づき、Euro Core プロジェクトに代表される大型プロジェクト研究が加速している。

・ Energy Future Lab（Imperial College, UK）
・ Photocatalytic Water Splitting（Univ. Rostock, Germany）
・ Fuels Produced Regeneratively Through Light-Driven Water Splitting（Germany）
・ International Symposium on Light –Harvesting Processes（ドイツのバイロイト大学主催）に代表される国際研究集会が頻繁に開催されており、今後プロジェクト化されていく予定。

アジア・中東でも下記のような取組みが始まっている。

・ Korean Center for Artificial Photosynthesis（NRF Korea）
・ Dalian National Laboratory for Clean Energy（China）
・ 中東での石油から太陽エネルギー利用技術開発へのシフト

日本においても、科研費新学術領域において「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」（平成 24 ～ 28 年度）がスタートした。また、経済産業省の未来開拓研究プロジェクト「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）」の一環として、二酸化炭素と水を原料に太陽エネルギーで有用化学物質の製造を狙う「人工光合成化学プロセス技術研究組合」が設立されている。

（6）キーワード

光捕集アンテナ、水の酸化的分解、CO_2 還元、光触媒、水素発生、金属錯体、メタノール生成、励起エネルギー移動、X 線結晶構造解析、高分解能原子間力顕微鏡、超高速レーザー分光、Synthetic Biology

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	文科省科研費（新学術領域など）、JST、NEDO などによる光触媒分野への継続的な投資により、人工光合成技術を構成する要素技術は世界最高レベルにある。人工光合成に関連したプロジェクトも、2009 年より JST（PRESTO）「光エネルギーと物質変換」、2010 年 JST（ALCA）、2012 年 JST（ACT-C）が始まり、近年欧米、中国における当該分野への積極的な研究投資に比べても遜色のない状態になりつつある。金属錯体による二酸化炭素の光還元や半導体を用いた太陽光による水素生成は世界を主導しており、また、金属錯体と半導体を組合せ、水を電子源とする二酸化炭素の固定に成功するなど、新しい技術の芽も育っている。
	応用研究・開発	◎	↗	原発停止以降、代替エネルギーの観点から人工光合成に興味を持つ企業は多いものの、積極的な研究投資には至っていない。2012 年経産省（NEDO）は「未来開拓研究」の一環として「革新的触媒」事業を開始し、新産業創成を目指して一歩を踏み出した。実用化を目指して長年蓄積してきた光触媒技術を中心に多分野からの技術参入が求められている。
	産業化	×	→	酸化チタン系光触媒の分野では世界をリードしているが、水素生成も含めて人工光合成に関しては産業化の例はない。
米国	基礎研究	◎	↗	太陽光による水素生成に対して政府機関より多くの研究援助がなされている。特に DOE の Steven Chu 長官主導で 2009 年より DOE Energy Frontier Research Center（EFRC）プログラムや 2010 年からは Joint Center for Artificial Photosynthesis（JCAP）（Caltech; 1 億 2200 万ドル /5 年）などの大型プロジェクトなど多くの施策が施されている。これらの施策により異分野の研究者が新たに共同研究を始めており、新しい技術シーズが生まれる素地ができつつある。
	応用研究・開発	○	↗	光触媒の実用化研究は遅れていたが、グリーンニューディール政策に基づいた再生可能エネルギーの産業化を図っている。大学教授が興すベンチャーも産業化への重要な推進力となっており、D. Nocera（Harvard）の Sun Catalytix（1）や A. Bocarsky（Princeton）の Liquid Light（2）などがある。基礎研究から生まれた優れたシーズをベースに実用化する取り組みは日本よりも進んでいる。
	産業化	×	→	産業化を目指した取り組みは進むものの、実例はまだない。
欧州	基礎研究	○	→	環境浄化用の光触媒の研究が進む中、2004 年から S. Styring（Uppsala, Sweden）が中心となり EU プロジェクト Solar H、それに続く Solar H2 を展開、太陽光による水素生成の技術開発が精力的に行われ、2011 年にプロジェクトが終了した後は、その一部が応用研究へ移りつつある。また、2009 年に設立された IASS（Institute for Advanced Sustainability Study, Potsdam, Germany）をはじめとして、再生エネルギー利用に関する各国独自の施策も多く、当該分野への積極的な研究投資が注目される。ただ、保有する光触媒材料は限らており、研究の広がりは制限されている。
	応用研究・開発	◎	↗	産業界の再生可能エネルギー利用への関心が高く、実用化研究に直接投資する事例もある。自動車メーカー Audi が再生可能エネルギーを利用した E-gas（メタン）の生成・利用システム（3）の開発に取り組むなど、「如何に利用するか」の研究が進められている。また、CO2 資源化への関心も高く、特に Solvay/Rhodia のような大手化学メーカーが新しいビジネスの視点で応用研究を展開しているなど、積極的な研究投資は特筆すべきである。
	産業化	×	→	実例は未だないが、パイロットプラントの建設の事例はいくつかみられる。

中国	基礎研究	△	↗	研究レベルは低いものの、2009 年から始まった大型プロジェクト（Chan Li、大連化学物理研究所）により研究者が増加し、研究レベルの底上げが図られている。現在は国際会議を活発に開催するなど日本や欧米の技術をキャッチアップする段階であるが、高レベルの研究が生まれる素地は十分整いつつある。また、欧米の石油メジャーや化学メーカーが積極的に研究資金を援助していることも研究活発化に拍車をかけており、日本にとって今後潜在的な脅威となりうる。
	応用研究・開発	△	↗	研究の主流は基礎研究分野ではあるものの、海外企業の積極的な関与により、再生可能エネルギー産業が起きる可能性は高い。また、豊富な資源（鉱物資源）を背景に中国独自のエネルギー産業が起きる可能性がある。
	産業化	×	→	人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。
韓国	基礎研究	○	↗	水分解水素生成の研究が盛ん。2009 年に Korean Center for Artificial Photosynthesis（KCAP）が設立され、2010 年から大型プロジェクト（5 億円 / 年、5 年）が米国のプロジェクト（Helios, JCAP）と連携する形で始まっている。
	応用研究・開発	△	→	日本の技術を導入し、環境浄化用光触媒の応用研究は盛んであるが、人工光合成に関する取り組みは基礎研究段階。
	産業化	×	→	太陽エネルギー利用の水素生成を含めて人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）Sun Catalytix; http://www.suncatalytix.com/about.html
2）Liquid Light; http://liquidlightinc.com/
3）Audi e-gas Project, http://www.audi.de/de/brand/de/unternehmen/aktuelles.detail.2011~05~audi_balanced_mobility.html
4）K. Maeda, *et. al.* Photocatalytic Overall Water Splitting Promoted by Two Different Cocatalysts for Hydrogen and Oxygen Evolution under Visible Light, *Angew. Chem. Int. Ed.* 49, 4096（2010）
5）S. Y. Reece, *et al.* Wireless Solar Water Splitting Using Silicon-Based Semiconductors and Earth-Abundant Catalysts, *Science.* 334, 645（2011）
6）日本化学会編「人工光合成と有機系太陽電池」
7）化学工業日報社「化学経済」2011.9-12

3. 1. 1. 3　燃料電池

（1）研究開発領域名

燃料電池

（2）研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池は水素などの燃料ガスと酸化剤である空気（酸素）から酸化還元反応により電気エネルギーを取り出す装置であり、燃料電池自動車および家庭用電源などにおける分散型で高効率な定置型電源として期待されている。研究開発対象としては、特に、酸素イオンの易動度を飛躍的に高めるナノハイブリッド膜などの低コスト新規材料や白金代替新触媒について、ナノ・マイクロレベルから実用構造体まで一貫して現象を制御できる理論の構築、さらに水素のみならず多種多様な化学物質から電気エネルギーを効率的に取り出すためのエネルギー変換デバイス設計技術基盤が求められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

燃料電池は、化学エネルギーから電気エネルギーへの変換途上で熱や運動エネルギーといった形態を経ないため、従来の内燃機関などに比べてエネルギー変換効率が高く、二酸化炭素の排出を大きく削減することが可能であり、今後のクリーンエネルギー時代に有効な技術といえる。

燃料電池は、セル構成部材、発電ユニット、システムなどの技術区分に分類される。セルの電解質膜の両側に燃料極（アノード）と空気極（カソード）それぞれの反応を促進させる触媒が配置されている。電解質膜の種類によってりん酸形（PAFC）、溶融炭酸塩形（MCFC）、固体高分子形（PEFC）、固体酸化物形（SOFC）、の大きく 4 種類に分類される。固体高分子形燃料電池（PEFC）は高出力密度であるため小型化可能であり、室温付近で動作することから自動車や家庭用定置電源などの生活に密着した場面において有望な電池である。800 ～ 900℃付近の高温作動の固体酸化物形燃料電池（SOFC）は、既存の複合サイクル発電と組み合わせた 70％を超える超高効率発電技術として期待される。現在、家庭用燃料電池の主流は PEFC であるが、今後は SOFC も実用化すべく開発が進められている。

［これまでの取組み］

2010 年当初より第 3 期電気自動車（EV）ブームが起こり、世界的に燃料電池開発の行方に関心が高まっていた。そのような中、日本では、電気自動車、ハイブリッド車、燃料電池車の将来市場の棲み分けの必然性が認識され始め、2011 年には国、自動車・エネルギー企業が参加する燃料電池推進協議会（FCCJ）によって 2015 年からの燃料電池車の普及に向け量産体制と水素インフラ整備を進める共同声明を発するなど取り組みが示された。2.5 ～ 3 KW/l レベルの高性能化や高耐久化、量産技術の強化に注力している。これまでに、NEDO 新エネルギー技術開発プログラム「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」（2005 ～ 2009 年度）、経産省「水素・燃料電池実証プロジェクト（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）」（2002 ～ 2010 年度）によって実証試験と水素インフラ整備が行われてきた。

家庭用発電については、。2005 ～ 2008 年 NEDO/NEF の「家庭用 PEFC の大規模設置事業」、2007 ～ 2010 年の「家庭用 SOFC の実証試験」を経て、2009 年「エネファーム」補助事業が開始され、日本で、2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始され、技術力の高さを示しているが、より一層の低コスト化が必要となっている。また、ガスメーカーが中心となって 2010 年度に数十台規模の SOFC 実証試験を開始し、2011 年度を目途に各社が市場投入を目指して開発を続けており、家庭用据え置き電源・コジェネ利用においては世界をリードしている。

NEDO では、「燃料電池・水素開発ロードマップ 2010」を策定し、燃料電池・水素技術として定置用燃料電池システム、燃料電池自動車他、水素インフラの 3 本柱で、特に PEFC、SOFC に注力し技術開発、実証研究、基準・標準化を一体化させた研究開発を実施している。

欧米では、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネ以外へのアプリケーション開発は、日本よりも活発に行われている。米国では、業務用について、米国ブルームエナジー社などが政府や地域の補助金などを受けデータセンターなど IT 分野を中心にビジネスを急展開している。しかし、先の経済不況などにより、2010 年度に水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約 60% 削減され、2012 年度予算の優先課題を見ても太陽光、バイオ燃料、蓄電などが優先されており、その影響は 1、2 年後には顕在化すると予想される。燃料電池分野から他の産業へのシフト傾向が見られそれに伴って高い水準を保っていた技術水準と産業技術力が低下傾向に転じると考えられるが、その後、予算抑制の方針を転換したことから今後の動向を見守る必要がある。欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。

中国は、著しい高度成長による国外からの技術流入と成長とともに悪化する環境への対応にともなうグリーン技術への政府援助の推進により、研究水準・技術開発水準・産業技術力のすべてにおいて上昇を示している。韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。

研究開発面では、米国の研究予算に顕著に表れているように、太陽光発電、二次電池、バイオ燃料などに優先が置かれたことのあおりを受けて、全体的にややトーンダウン、スローダウンの感が否めないが、日米が先導している状況は近年と変わりがない。

［今後必要となる取組み］

実用化・普及に必要とされる課題は、システム全体における高効率化・信頼性向上（高耐久性）・低コスト化の 3 点である。燃料局側の反応に比して空気局の反応の速度が非常に低く、これを加速するために、空気極の触媒として白金が使用されているが、実用化のネックの一つとしてこの白金のコストがある。

科学技術的な研究開発の観点でいえば、触媒の構造や電子状態の変化について構造反応解析を行うなど、材料をナノスケールから見直し、革新的な電解質および電極材料の創製とデバイス開発など上記 3 つの課題解決に資する以下のような取り組みが必要となる。

1）電解質、電極のナノ構造制御およびそのナノ界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発に向けた材料設計指針を構築する（マルチスケールで先端的な設備を用いた観察型の研究お

よび理論モデル化の研究）。

2）低コスト化を実現する非白金、低白金触媒を開発する。

3）中温作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料を開発する。

4）機動性やコンパクト化でメリットが出せる、中温（100 ～ 600℃）無加湿運転が可能な電解質を開発する。

5）超高効率発電実現に向けた高温作動（特に 800 ～ 900℃）における長時間安定性を有し、レアアースも使わない高活性な電極材料を開発する。

（4）科学技術的・政策的課題

燃料電池普及の課題は、市場で要求される低価格で機能・性能を充たす材料が未だに見出されていないことと、発電効率が高く耐久性に優れた製品の信頼性確立まで技術が追い付いていないことである。

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトでは、2015 年からの燃料電池自動車の市販に向けた近々の技術課題に集中する傾向があり、その先の革新的な次世代技術に対する支援がほとんど成されていない状況である。これらの技術開発は、ハイリスク・ハイリターンであり、一民間企業では対応は難しく、公的研究資金の投入が不可欠な領域である。

次世代を見据えた戦略として多くのシーズ技術を保有する大学・研究機関の基盤的研究強化と実用化に特化した企業研究をシームレスに橋渡しする必要がある。基礎学理に基づいた超高性能酸素イオン伝導体、水素イオン伝導体、電極触媒、改質触媒などの革新的材料開発は国内外で地道な基盤研究が行われている段階であるが、研究者ネットワークを分野横断的に構築して研究開発に取組むことで、デバイス化までの研究開発を大幅に加速できる。国内には、高度な燃料電池システム技術を有する企業が多く、これらの企業が、迅速かつ効率的に大学発の革新的デバイスのシステム化を行うことで､我が国の産業活性化、さらには、エネルギーセキュリティの問題の解決につながるものと期待される。

これまでの電解質、電極材料の研究では、個々の独立した分野の研究に限定されることが多く、電解質と電極材料の両方に着目し、さらにナノ界面を制御した材料研究に対する知見は少ない。それらを解析・検討するための新しい手法の解決が不可欠となる。ナノレベルにおいて、リアルタイムで直接観察する分光解析や SPring8 などでの放射光を用いた解析や可視化技術の確立など、次世代測定手法も重要となる。

白金についてはリサイクル技術や政策も注目される。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

家庭用燃料電池では、PEFC で総合効率が 94 ～ 95％レベルまで向上し、SOFC においては発電効率が 45 ～ 46.5％での一般販売が開始されている。PEFC では、200 万円を切る普及機の発売が決定。SOFC では 4 万時間の耐久性を見通すことができ、年間数千台規模の本格的な家庭用システムの市販が始まっている。

電極触媒の本格的普及時の燃料電池システムコストに占める割合が、非常に大きくなると予測されることから、主成分である Pt の使用量の現状からの大幅削減（<1/10）、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が世界的に実施されている。前者に関しては Pt 粒度制御、耐食性 Pt 担体利用、あるいは第二・三成分との合金化とコアシェル化などが、さらには実

用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。後者に関しては、金属酸窒化物、金属炭化物、カーボンアロイ、ポリマーアロイ、Co 担持導電性高分子などが研究されている。これらの基礎研究の正しい結果評価と効率よい研究推進には、評価技術の共有化が極めて重要である。

燃料電池用の高分子電解質膜として最も使われているのがフッ素系電解質膜であるが、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に繰り広げられている。特に、安定性と耐久性の向上に対する日本企業（旭化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位、安定剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発された。非フッ素系電解質膜として、芳香族炭化水素系電解質膜を中心に様々な材料が検討されているが、精密な分子設計と物性の正確な評価という観点から、日米の研究開発がこの分野を率いている。ブロック共重合化により低加湿対応への可能性がひらけてきたことが最近の重要な成果であり、フッ素系電解質と同程度の導電率が得られている。今後はいかに耐久性を向上させるかが開発の鍵となる。

［注目すべきプロジェクト］

欧州において、2008 年、欧州燃料電池・水素共同技術イニシアティブ（European Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative : FCHJTI）の下、欧州燃料電池・水素共同実施機構（FCH-JU: Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking）が立上げられ、技術開発を含めた広範囲な取組みが継続して進められている。例えば、開発する触媒、電解質材料を膜 / 電極接合体として、それらの材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響などの非常に多くの類似研究が実施されている。

ドイツは 2007 年に 10 年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」（NIP: National Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie）を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に当てるものとしている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育省 R&D 分野からのものである。R&D とデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42%のリソースを自動車分野にあてている。

韓国の LG 社が、研究開発を長年行ってきた英国ロールスロイス社の SOFC 開発部門を買収し、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。

中国は燃料電池自動車の研究開発を強力に推進している。PEFC 搭載バスや自動車の開発は現在実証段階である。2011 年～ 2015 年の「新 863 プログラム」では主として、PEFC 燃料電池車と関連技術、大型 SOFC スタック、PEFC と SOFC のコジェネシステムの開発に注力する予定である。

（6）キーワード

固体酸化物形燃料電池（SOFC）、電気化学、固体イオニクス、ナノ構造制御、エネルギー変換、高効率発電、XAFS などの先端計測、非白金・低白金触媒

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	NEDO などによる研究資金により、全国の複数の集中的研究拠点の研究活動も本格化し、研究水準は引き続き世界をリードしている。しかし、燃料電池導入補助金の増加や二次電池研究への重点投資などに押される形で、基礎研究や次世代技術開発への支援は、減少傾向。 触媒反応、物質輸送、などの現象解明の分野で、FC-Cubic が先端的な研究成果を挙げている。これら知見を分子や原子レベルでの構造計算とあわせてモデル化する研究も、東北大学、京都大学、九州大学などで世界的なレベルを目指した研究が行われている。スタックの小型化によるコスト低減を目指した、水やガスの物質輸送の現象解明などの基礎的研究は、東京工業大学、北海道大学などで世界的なレベルの研究が行われている。材料技術構築に向けてナノスケールでの現象解析のため、NEDO ファンドにより東京電機大学、理化学研究所、分子研究所の共同で SPring-8 を活用した専用のビームラインを建設中。これらの研究を総合的に強化促進する体制作りが課題。
	応用研究・開発	◎	→	燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持。集中研究拠点を中心とした産官学の連携強化も図られている。 Pt 量低減をめざした電極触媒の研究は、山梨大学、同志社大学、横浜国立大学、東京工業大学などで世界的なレベルの研究が行われている。低加湿で運転する低コストは炭化水素系の電解質膜の研究は、山梨大学、上智大学、東京工業大学などで世界的なレベルに近い研究が実施されている。 主に定置用の燃料電池の企業と大学の連携により、炭化水素系とフッ素系の電解質膜材料の開発が NEDO のファンドで進められている。
	産業化	◎	↗	家庭用では固体高分子形燃料電池（PEFC）に続いて石油メーカーとガスメーカーから相次いで固体酸化物形燃料電池（SOFC）の一般販売が開始され、コストダウンや高耐久化技術開発が進展中。家庭用燃料電池の年間販売台数は数万台レベルに到達し、コジェネ利用において世界をリードしている。 自動車用では、自動車用では、国内各社の実証車の効率・運転性能・走行距離・車両重量など世界を一歩リード。その性能を維持した上での、量産技術の確立による大幅なコストダウンが進行中。欧米と比較して遅れ気味であった水素インフラ整備に関しても、全国 100 か所の水素ステーション整備などを関連業界が計画して、実施予定。
米国	基礎研究	◎	→	研究資金は減少傾向。電気自動車関連研究への研究者の移動も見られ、停滞気味。2010 年度には水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約 60% 削減され、その影響は近いうちに顕在化すると予想される。また 2012 年度予算の優先課題を見てもソーラー、バイオ燃料、バッテリーなどが優先されており、トーンダウンの感は否めない。ただし、水素社会構築の重要研究テーマとして位置づけられ高いレベルを維持している。また、論文では、固体高分子形燃料電池コアシェル触媒などに関するものの伸びが大きく、全体的にはレベルアップ。
	応用研究・開発	◎	→	DOE ファンドにより、コスト低減のため、触媒 Pt 量低減のための材料技術の研究（合金触媒、コアシェル触媒、膜構造触媒、および、非白金触媒）と、低加湿度でも作動する電解質膜の研究が、強力に推進されている。研究チームは、国立研究所、大学、企業の連合により推進されている。開発されたコアシェル触媒や合金触媒などを産業化するための研究開発がベンチャー企業や大手化学会社などで進められている。 FY13 の水素燃料電池の DOE 研究開発予算は、FY12 と同レベルに（８０M ドル～１０３M ドル）。 電気自動車関連への方向転換もみられ、技術開発力は低下している。
	産業化	○	↘	フォークリフト・非常電源用途、軍事用途など、ニッチな市場への展開は進行中であるが、自動車メーカーの取り組みは停滞気味。自動車会社の FCEV の実用化開始時期は、2020 年以降に量産を見込む（GM）など、やや中長期的になっている。 PEFC に関して、バックアップ電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められている。また SOFC では、ブルームエナジー社が 100W 級発電モジュールを組み合わせて販売しており、商用化で世界トップといえる。携帯用 SOFC のベンチャー企業も活動中。

欧州	基礎研究	◎	→	FP7 の枠組みの元、大学アカデミア向けのファンドによる研究開発が進められている。これに加えて、ドイツやスイスなどでは、政府によるファンドや研究開発への税制優遇策がとられている。 フランスでは、原子力研究所（CEA）が産業化にそなえて、MEA 内の水の挙動モデリングを含めた基礎研究から材料・システムの応用研究まで手がけている。 スイスでは、原子力研究所（PSI）において、基礎研究から、プロトタイプ FCEV の試作まで手がけている。特筆すべきは、所有する中性子線源による燃料電池内の水の可視化研究であり、専門の研究家チームにより世界トップレベルを維持している。
	応用研究・開発	○	→	ドイツを中心に、自動車メーカーを含めての異業種連携により、水素社会インフラ構築を精力的に推進している。関連部材産業の技術開発も活発化しており技術水準は上昇している。オーストラリア発祥の CFCL 社やスイス HEXIS 社など各社で、SOFC の市販やそれを見据えた実証研究が行われている。
	産業化	○	↗	ドイツを中心として政府主導の環境技術への支援、各種実証事業も活発化しており、それに伴って関連産業のアクティビティ・技術力は向上している。米国同様、PEFC に関して、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められているが、SOFC の開発は同等かそれ以上のアクティビティを維持。
中国	基礎研究	○	→	FCEV の産業化は、長期的にとらえており、もっぱら基礎研究や応用研究を重視している。国家８６３プロジェクトなどに従って重点的な取り組みを、選択された機関に集中投資して実施している。 主要研究機関での環境整備も進み、研究水準が上昇。PEFC、SOFC、バイオ燃料電池などあらゆる分野で論文数の数、伸びが大きく、燃料電池全体で、論文数は世界トップレベルだが、基礎研究レベルは欧州や米国には劣る。
	応用研究・開発	△	→	政府主導の環境技術への支援が増大、産学連携によるベンチャー企業中心に燃料電池主要部品およびシステムの内製化が進められており技術開発力が向上している。 FCEV のプロトタイプ車作成とデモンストレーションは、上海汽車からのベース車両提供などのサポートの元、同済大学（乗用車）と清華大学（バス）を中心におこなわれ、北京五輪、上海万博などで実施されている。
	産業化	△	→	大学・国研の開発中心で産業技術力は高くないが、産業の高度成長およびオリンピックと上海万博での実証デモを経て、確実に向上している。上海汽車が 2015 年に 1,000 台規模の FCV（燃料電池自動車）の小規模量産を開始すると発表。
韓国	基礎研究	○	→	韓国科学技術院などを中心に、国のファンドで固体高分子形やりん酸型燃料電池、炭酸溶融塩燃料電池など、定置用と自動車用の両方の応用を意図して研究開発に取り組んでいる。中国ほどの上昇傾向は見られない。
	応用研究・開発	○	↗	自動車用では、現代でプロトタイプ FCEV が多く試作され、内製技術による日本メーカーに迫るスペックの車両開発が達成され確実な技術力向上が見られる。 定置用においても実証事業が進められ、着実に技術開発水準が向上している。LG 社がロールスロイス社の SOFC 部門を買収し、SOFC 分野の技術開発に本格参入。
	産業化	○	↗	産業としての技術力は現状維持。2010 年 4 月に POSCO が燃料電池製造工場に着工し、年間生産 100MW 規模を目指している。現代自動車が 2012 ～ 2014 年に約 2,000 台の燃料電池自動車のリース販売を計画しており、燃料電池自動車の市販に対しては、かなりアグレッシブな戦略をもって活動中。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）平成 23 年度 NEDO 研究成果報告会資料（平成 24 年 12 月開催）
http://www.nedo.go.jp/events/FF_100025.html
2）パナソニック株式会社ホームページ
http://panasonic.co.jp/ap/FC/index.htm
3）東芝燃料電池株式会社ホームページ
http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/index.htm
4）JX 日鉱日石エネルギー株式会社ホームページ
http://www.noe.jx-group.co.jp/lande/product/fuelcell/index.html
5）アイシン精機株式会社ホームページ
http://www.aisin.co.jp/cogene/index.html
6）特許庁「平成２３年度　特許出願技術動向調査報告書（概要）　燃料電池」

3. 1. 1. 4　熱電変換

（1）研究開発領域名

熱電変換

（2）研究開発領域の簡潔な説明

熱電変換の研究開発領域では、未利用の廃熱を電気として高効率に利用する技術開発を目的とする。2 種類の異なる金属または半導体を接合して、両端に温度差を生じさせると起電力が生じるゼーベック効果を利用する。具体的な研究開発課題としては、高変換効率、高耐久性、低重量、低コスト、低環境負荷を実現するために、低次元量子構造（ナノワイヤ、ナノポーラス）などの新規熱電材料の開発、それらの材料のナノ構造制御、pn 制御技術などが挙げられる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

昨年の大震災に端を発した、再生可能エネルギーの開発は焦眉の急である。ドイツの気候変動諮問会議がまとめた世界のエネルギービジョン（応用物理 78（2009）p.416）によると、エネルギー総量は 2050 年まで増大していくことが予測されている。このエネルギーは、例え原発を太陽光エネルギーに変えたとしても熱に変換される。実際、一次エネルギーの 3 分の 2 は廃熱となって捨てられており、日本の焼却炉廃熱は 3×10^{17} J／年と言われている。そのうちの 10%でも電気エネルギーとして回収できれば、そのインパクトは計り知れない。

［これまでの取組み］

熱電変換材料研究の歴史は古く 1950 年代まで遡るが、長く変換効率は数%の範囲にとどまっていた。1990 年代に入り、物質科学上の観点から 2 つの大きな進展があり、それをきっかけに 2000 年前後から熱電材料における性能指標の飛躍的な向上が実現した。一つは、超格子を初めとする低次元量子構造を導入して、人工的に電子の状態密度を変化させ、熱電現象の本質であるゼーベック係数を増大させるもので、それまでの 2 ～ 3 倍の性能指標を有する材料が開発された。熱電変換材料の効率向上のためには材料の熱伝導率を低下することと、電気伝導率を高くすることを両立させる必要があり、ドーピング濃度の制御で電気伝導率とゼーベック係数を最適化するのが基本的な指針である。もう一つのパラダイムシフトは、電子系と格子系を独立に制御するための特殊な結晶構造の研究が進んだことである。この結果、カゴ構造やナノ結晶粒界を有する特殊な高次組織構造を持つ材料が開発され、電子系と格子系を独立に制御することが可能になった。人工超格子の導入により、フォノン、すなわち格子振動を反射したり散乱したりする境界を導入することで、熱伝導率を意図的に低減する物質設計が可能となってきた。

国内外の動向に関しては、これまで米国、欧州、日本が熱電科学技術の進歩を引っ張ってきたが、ここ数年の間に中国、韓国が急速に研究人口を増やすとともに着実に実力をつけ、材料研究では日本のレベルを超える面も出てきている。産業技術力に関しては、古くから市場化しているペルチエ冷却と排熱回収・熱電発電技術を分けて考える必要がある。ペルチエ素子については日米や欧州だけでなく、中国、ロシア、ウクライナといったとこ

ろが世界へ向けて輸出をしている。他方、極めて大きな市場が期待される排熱回収技術はまだ市場化していない。現在の材料の熱電変換性能が十分でないことが、市場化を阻む一因となっている。熱電モジュールとして素子化が可能で、かつ変換効率 10%達成の目安となる無次元性能指数 ZT が 1 を大きく超える材料の開発が喫緊の課題とされ、環境意識の高まりの後押しを受けて、排熱回収を目指した技術開発が世界的な規模で活発化しつつある。その鍵を握る材料研究では、最近 15 年間で新概念・新材料の研究開発が世界中で盛んになり、発表論文数、特許出願数も急激に増加している。国によってアプローチの重点に特徴があり、米国はナノ構造化、たとえば超格子薄膜やワイヤなどのアイデアで勝負する傾向が強く、日本を含むアジアや欧州はどちらかというとバルク新材料の開発の重みが大きい。大規模な熱電産業が出現した場合、どこの国がリードすることになるのかは、今後の技術開発動向に強く依存する。

［今後必要となる取組み］

今後は、低次元量子構造である、ナノワイヤ、ナノポーラス、ナノコンポジットなどのナノ構造結晶材料を導入して、熱伝導率、電気伝導率、ゼーベック係数の 3 つのパラメータを制御し、性能指標の飛躍的な増大を目指す研究が必要となる。実際、特殊なカゴ型の結晶構造を持ったスクッテルダイトのような結晶で実験的に高い熱電性能が報告されており、また、カゴ構造中に閉じ込められた原子のラトリング振動が熱伝導を遅くするメカニズムの提案などがあり、基礎物理の観点からも、今後多くの理論的、実験的な研究が重要な研究領域となる。

また、ビスマス・テルルや鉛・テルルなど、熱電変換としては古典的な材料であっても、超格子量子ドット構造を導入することで、性能指標の著しい向上を達成しているものや、Si-Ge 系化合物のように、環境や人にやさしい材料という観点で見直されている材料系もあり、今後の研究の進展が期待される。

（4）科学技術的・政策的課題

日本では熱工学は伝統的な研究対象であるが、細分化された小規模な学会が乱立しており、この縦割り状態が、新規研究者の参入や横断的研究協力の妨げになっている。一方、欧州ではナノクケールの熱力学の研究が盛んで、非常に小さいスケール領域で熱力学の第二法則を破るレベルの研究も行われている。また米国ではナノスケールの熱計測の研究が盛んである。これらの欧米の研究は日本が弱い分野であり、今後国際協力が必要になる。日本人研究者を中心とした、欧米の研究者にも門戸を開いたグローバルな研究体制の構築が望まれる。

現在のところ、ナノ構造導入による高効率熱電変換材料の研究は、基礎基盤研究のフェーズにあるが、計算科学、実験科学両面からの原理探索も含めた基礎研究が重要な段階に来ていると言える。一方、ニーズ側から見ると、高変換効率、高耐久性、低コスト、低環境負荷など期待は大きい。日本の強みである材料研究の力を結集して、サイエンスとエンジニアリングの両輪を内包した基礎基盤研究領域を制度設計した上で、長期戦略に基づいた国家投資を行っていく必要がある。国内でも、熱電変換に関しては、NEDO において主にモジュール化を対象としたプロジェクトが実施されたことがあるが（平成 14 年から 18 年）、今後は、モジュール化、システム化など、社会実装を意識したプロジェクトと、ナ

ノ構造材料などの革新的基礎研究のバランスを兼ね備えた研究戦略と、それを実現する戦略的国家投資が必要不可欠である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

スピンゼーベック効果が日本で発見されて以来、物理学分野の新しい研究対象として基礎研究が盛んに行われてきたが、最近米国でこれが熱電発電に実質的に応用できることを示唆する報告がなされ、話題になっている。ナノ構造制御物質の開発では、「ナノブロックインテグレーション」の概念が次第に浸透してきていて、2 種類のナノブロックを交互配列することによって高効率を示す新材料の開発が活発化している。層状硫化物系や酸硫化物、酸セレン化物などの複合アニオン化合物が新たな材料候補として提案され研究されている。ビスマス・テルル、鉛テルル、ＬＡＳＴなど、テルルを含む従来型の化合物材料に取って替わる材料として、元素戦略的な考え方に基づいて材料探索・開発を行う傾向が以前に増して強くなってきた。熱電変換方式による太陽熱発電デバイス・システムの研究開発が注目される。日本、中国、スイス、米国、オランダなどにおいて太陽熱発電や太陽電池 / 熱電ハイブリッド発電デバイスなどのシステム設計、デバイス組み立て、発電評価などが進められている。

［注目すべきプロジェクト］

JST の日中共同研究（JAXA と武漢工大）では､太陽エネルギーをフルに活用するため、太陽光を波長分離して紫外・可視光をシリコン太陽電池に照射して光電変換し、赤外光を熱電モジュールに照射して熱電発電するシステムが検討されている。もう一つの JST の日中共同研究（名古屋大学と中国電子科学技術大学）では、色素増感太陽電池 / 熱電ハイブリッド発電デバイスが提案され、上記の欠点を克服するシステムが検討されている。

また、スイス EMPA では太陽炉を用いた熱電発電システムの検討と高温酸化物熱電変換材料の開発を進めている。米国 MIT ではマイクロ熱発電デバイスの設計・評価を進めている。いずれも将来の太陽エネルギー利用社会・低炭素社会の実現に資する科学・技術研究開発の一環として行われている先行研究で、今後重要性が増すと予想される。

米国 NASA を中心に宇宙開発用熱電発電機に用いる非酸化物系高効率材料の開発が地道に進められているが、それに加えて自前の宇宙開発に乗り出した中国が材料開発で米国に追随すると見られるため、今後の動きを注目したい。

（6）キーワード

余剰の熱制御・回収・変換、ナノスケールの熱力学、ナノスケールの熱計測技術、新規熱電材料・素子、新規蓄熱材料、新規熱整流材料・素子

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	新規物質開発が盛んに行われている。酸化物、シリサイド、クラスレート化合物など新しい物質の開拓での貢献は大きい。スピンゼーベック効果などの新現象発見やナノ構造化による特性向上の研究でも、活発な動きが目立つ。高 IF ジャーナルの掲載論文が増加。有名国立大学、私立大学などの研究者数も増加傾向。
	応用研究・開発	◎	↗	環境・エネルギー技術への積極的投資の一環として、大手の電機・化学・自動車などのメーカーが着実に頑張り、産学連携のチャンネルを使いながら排熱回収の熱電モジュールの開発を手掛けている。自動車、電機、材料メーカーの新規参入も増えて来つつあり、熱電モジュール、システムの用途に広がりが出てきた。
	産業化	○	→	比較的小規模の専門メーカーでペルチエ素子を扱っている。熱電発電分野で材料メーカーの参入が相次いでいる。ベンチャー企業も含めて新規材料によるデバイス、モジュールの製造が盛んになってきた。工業炉を持つ素材メーカーが注目し、熱回収装置の導入を検討し始めた。新産業起業へのサポートが必要。
米国	基礎研究	◎	→	新しいメカニズムの提唱で目立ち、特に、薄膜超格子構造やナノ構造制御などのアプローチで研究を先導している。全体的に高水準は保っているが、アクティビティが若干落ち気味で、オリジナル論文数が 2,3 年前に比べて減少傾向。
	応用研究・開発	◎	↗	従前からの小規模メーカーに加えてベンチャー企業が増えた。新材料を応用したデバイス・モジュール技術が着実に進歩している。DOE のエネルギー研究フロンティアプロジェクトで、熱電研究開発は太陽熱利用のための材料・デバイス開発へ大きくシフトしてきている。
	産業化	○	↗	ペルチエ素子では、比較的小規模の専門の製造メーカーがある。また、自動車メーカー、自動車部品メーカー、その他の輸送機械メーカーなどが DOE プロジェクトに参画して技術力をアップさせている、未だに材料開発が追いついていかないのが現状。
欧州	基礎研究	◎	↗	ロシア、ウクライナなどの東欧からドイツ、フランスなどに主役の座が移り、新材料開発のアクティビティが上がっており、日米とほぼ肩を並べている。環境技術の志向が強いドイツなどでは、今後さらにこの傾向は高まると思われる。スイス、オランダ、デンマーク、スペインなどの参入もある。
	応用研究・開発	◎	↗	日米と比べるとプロジェクトの立ち上がりが今一つと思われていたが、昨年からＥＵ内で熱電変換に関するプロジェクトが４～５件立ち上がり、材料の基礎研究からデバイス・システム応用までの多様な観点から推進され始めた。ドイツがほぼ独壇場で進めてきた自動車廃熱発電の開発も、周辺の国々を取り込んでさらに広がっていく勢いのように感じられる。
	産業化	○	↗	ペルチエ素子の分野では、ロシア、ウクライナなどのモジュールメーカーが世界市場で活躍している。最近、ドイツのフラウンホーファ研究所を軸に様々な企業が連携して技術力をアップしてきている。フラウンホーファのベンチャー企業は半導体プロセスによるマイクロモジュールで世界に市場展開している。

中国	基礎研究	◎	↗	2010 年の熱電国際会議を主催したことからもわかるように極めて活発に研究活動が行われ、大学、科学院研究所に熱電研究者が急速に増え、また米国との連携を通して研究は国際水準に達している。材料開発に強く、ますます存在感が大きくなってきている。オリジナリティに欠けるところがあるが、最近では新しい物質系の探索やナノ構造からのアプローチなどで独創性の高い研究が見られ始めた。
	応用研究・開発	○	↗	ペルチエ素子の製造会社が担い手となり、活発な基礎研究との連携も流れを加速すると予想される。CO_2 排出削減、太陽エネルギー利用などでの技術が今後さらに伸びていくであろう。また、自前で宇宙開発を行っているので、これに用いる熱電技術の開発も独自路線で進める可能性がある。
	産業化	○	→	ペルチエ素子メーカーが多く存在し世界市場で活躍しているが、今のところはまだ品質に劣る。しかし、今後は大学、研究所などと共同で製品開発を行い、急速に技術力が伸びるものと予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	大学、研究所の研究者も増え、一定の存在感を示している。理論研究もレベルが高くなり、新材料系の発見もでてきた。韓国の熱電研究の歴史は浅いが、3 年前から熱電変換材料の国家プロジェクト（9 年間）が始まり、力をつけ始めた。最近ではサムソンが InSe 系の高効率熱電材料やビスマス・テルルのナノ構造化を発表するなど企業の参入も目につくが、まだ基礎研究にとどまっている印象。
	応用研究・開発	○	→	現在進行中の国家プロジェクトの後半では、企業が中心になって実用化を目指す研究開発に移行することになるが、そこには韓国の大手有名企業の多くが参加する。かなりのスピードで熱電変換技術開発が進むであろう。
	産業化	△	→	製造・販売するメーカーはまだなく、実際の製品はほとんど輸入に頼っているようであるが、大手材料・エレクトロニクス系企業が研究参入を始めているので、いずれ育ってくるのは間違いない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）Journal of Electronic Materials　熱電特集号（ICT2011）
2）10th CMCEE, 2012.5.20-23, Dresden, Germany
3）ISIF2012, 2012.6.18-21, Hong Kong, China
4）AMEC-8, 2012.7.1-5, Penang, Malaysia
5）ICT2012, 2012.7.8-12, Aalborg, Denmark
6）C. M. Jaworski et al., Nature, 487, 210-213（2012）.
7）J. F. Li et al., Journal of the American Chemical Society, 133, 20112-20115（2011）.
8）N. Wang, K. Koumoto et al., Energy & Environmental Science, 4, 3676-3679（2011）.

3. 1. 2　エネルギーを運ぶ・貯める

3. 1. 2. 1　蓄電デバイス

（1）研究開発領域名

蓄電デバイス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

超高性能（*）蓄電デバイスを、理論的に設計・製造できる基盤技術体系を確立する。最先端解析科学と CMS など計算材料科学を融合させ、デバイス内部の複雑な反応現象を解明して理論モデルを確立、試作・評価技術に展開して目的とする性能のデバイスを自由に設計・製造できる技術基盤を確立する。

（*）現状の技術レベルに対し、容量 10 倍以上、コスト 1/10 以下で、分散電源端末としても大量に普及するレベル。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

新電池･キャパシタ分野は、エレクトロニクス用などの民生用途のみならず、環境保全･温暖化対策としての電動車両用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高出力特性などの性能向上に向け国際技術競争が激化している。さらに、開発途上国の急激な経済成長などによる石油資源価格の高騰や原子力発電の安全性への懸念などから、再生可能エネルギーの最大限の活用や非常用電源の確保などに向け大容量の定置用蓄電デバイスのニーズも顕在化してきている。こうしたなかで、我が国は高い材料技術基盤の上に産業界の経験的努力により当該分野で世界的競争力を構築してきたが、ここ５年で日本の電池売上高は世界の 70% のシェアが 40% 台に低下している。しかしながら、韓国や中国も日本からの材料供給がなければ電池を製造することはできない。最近になり米国や欧州の材料メーカーが電池材料に進出しつつあるが、電池に関する材料をすべて供給できる国は日本だけである。将来大きく伸びると考えられる市場で日本の材料技術ならびにモノづくりおよび品質管理の強みなどを活かすべく、現行リチウムイオンの高性能化における開発競争に加え、次世代の革新的二次電池の研究に備える必要がある。

［これまでの取組み］

世界各国での革新的な電池反応機構の創製、高性能電極材料の発見を目指して、基礎研究および応用研究への投資が著しく増大している。米国 DOE で EFRC や ARPA-E、エネルギー・イノベーション・ハブ構想など、基礎から応用・実証に至るまでの研究開発が戦略的に推進されている。論文数では日本は中国の後塵を拝する状況となっているなど、中韓が激しい価格競争のもとでの事業拡大を背景に研究開発レベルをも向上させつつある。これまで基礎研究面では､世界的な潮流を作る新しい電極材料の発明､インターカレーション反応や相変化型電極反応などの固体電気化学分野での新しい現象の発見などは、欧米の研究機関から出てきているものが多い。日本は基礎・応用と広いスペクトルの研究を行っており総合評価ではトップレベルと言えるが、電池および電池材料の製造企業が数多くあり、これらの企業の自助努力により研究が支えられている面がある。

［今後必要となる取組み］

ポストリチウムイオンなど次世代二次電池の研究開発には基礎研究の強化が重要である。すなわち、電池反応現象を理論的に解明し、材料の選択を含めて最適システムの設計が可能となる技術基盤を構築することが必要である。高性能化が進むとともに安全性と経済性の確保はますます難しくなるが、こうした技術基盤の存在がなければその実現は不可能といってよい。こうした基礎･基盤研究の強化は、次世代二次電池の実用化のみならず、足元のリチウムイオン電池の低コスト・高性能化にとっても重要である。そして、こうした基礎的な知見をいち早く実用化につなげるための産官学連携体制の強化が必要である。

今後の研究開発課題としては、以下のようなものが考えられるが、そのなかでは、ナノテクノロジーがひとつのキーテクノロジーとなっている。

1）新材料開発（新電極材料開発、電極材料界面近傍のナノレベルの三次元構造の最適設計・制御、安全性と高電圧化の両方のバランスを実現する新電解質材料開発、新セパレーター材料開発）
2）蓄電デバイス・システム新技術開発（新材料の組合せ技術開発、ナノ現象の解明に基づくマクロシステム設計・製造技術開発、安全システム技術開発）
3）電池反応の現象解明と理論モデル構築（電池反応の直接観察・計測技術開発、性能低下･劣化機構の解明、反応理論のモデル化、計算科学による予測･シミュレーション技術開発に大別される。

（4）科学技術的・政策的課題

海外では大学や国立研究所と企業の技術開発との連携が多いのに比べて、日本は個別の研究開発の傾向が強い。国内企業間競争よりも国際競争力の強化に力点を置く研究開発を、ポストリチウムに限らずより広い電池系で行う戦略が重要と考えられる。

こうした研究推進には、中長期の集中研究拠点を核とした異分野融合や国際連携も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な産業界での応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。

当該分野の基盤研究強化は、エレクトロニクス新デバイス創出の可能性を秘めており、新学術分野開拓ならびに将来のイノベーション誘発のきっかけとなることが期待される。人材育成も含めた幅広い研究戦略が必要となる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

<u>金属 - 空気電池</u>

ガソリン車の貯蔵エネルギー密度に匹敵する 700Wh/kg 超級の蓄電容量を有する高エネルギー密度型電池の研究開発が世界各国で急展開している。米国では金属空気電池やレドックスフロー電池などに DOE など国策で大きな研究投資が行われている。この研究投資は世界に向けて発信されており、欧・日の企業も参画している。金属空気電池に関する研究は増えており、2012 年 10 月に開催された ECS の学会では 100 件以上の発表があった。しかし、金属極および空気極の可逆性に大きな課題があるなど金属空気電池の難しさを再認識するものが多く、基礎に立ち返った研究が求められている。

Li-S 電池

硫黄は、放電電位が Li 金属基準で約 2 V と層状酸化物系に較べると低いが、1675 mAh g^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポスト LIB の正極として過去より注目されている。しかし、硫黄の放電時に生成する多硫化リチウムが有機電解液によく溶解するため、その抑制手法の開発が求められている。

全固体型電池は多硫化リチウムの溶解が起こらないため、Li-S 電池の有力電池系として検討されており、有機電解液とほぼ同等のイオン伝導特性を示す固体電解質も日本によって発見されている。ただ、充放電に伴い電極物質の体積変化があることから、長寿命の全固体電池を形成する電池構造や製造手法の開発が大きな課題となっている。

多価カチオン電池

Li の酸化還元は 1 電子反応であるが、多価のカチオンを用いた酸化還元は多電子反応が期待でき、高容量化のアプローチの一つとして注目されている。例えば、マグネシウムは資源的に豊富であり、その化合物の多くは毒性を示さない。しかも、マグネシウム金属極は、比較的低い酸化還元電位（+0.68 V vs. Li+/Li）を示し、2 電子移動により、2.21 Ah g^{-1}，3.83 Ah cm^{-3} の高容量が期待できる。ただ、マグネシウム金属は、高い還元性を示し、電解質と反応して表面にイオン伝導性、電子伝導性を持たない不動態被膜を形成してしまうため、反応性のほぼない電解質溶液を用いる必要があるが、そのような電解質溶液は比較的低い電位で酸化されてしまうため、適当な正極と組み合わせることができないという大きな課題がある。

革新リチウムイオン電池

負極材料および正極材料に関する研究が活発で、負極では Si に関する研究が多く、充放電の可逆性向上に向けた研究が行われている。また、Li 金属に関する研究も進展しており、今後 1500 mA h g^{-1} を超える容量を有する負極が開発されると思われる。一方、正極に関しては、Li リッチ系あるいは固溶体系と呼ばれる材料に関する研究が圧倒的に多く、300 mA h g^{-1} 程度の容量が期待されている。これらの材料が実用レベルに到達するとリチウムイオン電池あるいはリチウム金属電池により、500 W h kg^{-1} 近いエネルギー密度を有する電池の開発が可能となる。これらの材料動向に関しては注目するべきと考える。

［注目すべきプロジェクト］

- 韓国では、WPM（World Premium Material）と呼ばれる電池開発のプログラムが進められ、サムソンを中心に研究が進展している。大学や研究所と企業間の連携が密であり、有益なプログラムである。NEDO の RISING プロジェクトなどに比べて、韓国ではより電池システム側に立った研究開発が進展しているようで、日本のプロジェクトとは異なる面を有する。
- 米国 DOE は Energy Innovation Hub の一つとして 2012 年に battery and energy storage hub を立ち上げた。5 年間で $120M の予算であり、5 年で 5 倍の性能、5 分の 1 のコストを実現することを目標に掲げている。アルゴンヌ国立研究所を中心に、産学官の機関が加わっている。
- 文部科学省と経済産業省は合同の WG を設置し、H25 年度から両省連携による「次世代蓄電池研究加速プロジェクト」を開始。両省合同のガバニングボードで、これまでの国内関連プロジェクト全体を見ながら推進する。

（6）キーワード

二次電池、ポストリチウムイオン電池、現象解明、理論モデル化

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	リチウムイオン電池（LIB）、ポスト LIB、キャパシタとも基礎研究は世界トップレベル。独創性の高いテーマ創出の観点では、欧米などに比べ必ずしも日本に優位性があるとはいえず、中期的には楽観できない。分析や解析をはじめ、材料の新合成などの重要な研究が行われているが、電池のシステム研究などは少ない。NEDO などの研究プロジェクト、研究グループは増加したが、連携が弱く、優れた成果の共有に向けたネットワーク構築など、より効率的な研究組織が必要である。大学の研究室を中心にした複数企業間の連携は見られるが、国としてこれらの連携を強めることができるようにするべきである。
	応用研究・開発	◎	↗	電池メーカーや材料メーカーを中心に応用開発研究が行われており、世界トップレベル。基礎研究で得られた知識や知見を産業化に向けることが求められており、応用研究・開発の方法と連携組織としての位置づけについて明確な方向を示す時期であろう。
	産業化	◎	↗	定置用および電動車両用や電力貯蔵用途も含め、標準品からハイエンドに至るまで幅広い実製品化を行っており、材料メーカーの参画も含め世界的に最も産業化が進展していると言える。世界で市場が急拡大しており、今後はより高いレベルでの産業化が必要。足元の LIB の低コスト高性能化のみならず、次世代二次電池の開発・実用化についても、産官学が連携し研究成果の迅速な実用化展開が必要となるが、多くの関係組織の力の統合を促進する政策が必要となっている。
米国	基礎研究	◎	↗	DOE を中心に大きな研究費が配布されており、多くの研究者が参画している。ポスト LIB など次世代二次電池に関わる基礎研究が盛んな一方で、産業自体が国内にないこともあり電池に対する理解不足と見受けられる研究も見られる。ただし、米国国内の国立の研究所のほとんどが多かれ少なかれ研究を行っており、大きな基礎研究体を形成している。特にアルゴンヌ国立研究所は DOE と密接に関係し米国の基礎研究をマネジメントしている。
	応用研究・開発	○	↗	ベンチャー企業や国立研究者などを中心に産業界に向けて応用開発研究が行われているが、次世代電池に関する研究が多い。大学発のベンチャー企業がいくつか出てきており期待されるが、電池メーカーとして有力な企業が乏しく応用開発研究のスピードがそれほど速くない。逆に中途半端な開発を基に製品化しようとするグループも見受けられる。
	産業化	△	→	電池製造に関する産業は一次電池では存在するがリチウムイオン電池ではない。ベンチャー企業も生産は海外で行っているし、代表的な A123 社もすでにジョンソンコントロールに売却されており、産業として定着していない。化学・素材メーカーの一部が基礎素材の提供を行っているが、全体としての産業展開は不透明である。ビジネスモデルが製造モデルでなくなってきており、基本的に海外での産業化が考えられる。

欧州	基礎研究	◎	↗	LIB およびポスト LIB について、各国が協力して基礎研究を進めている。欧州共同体として強みを生かしたプロジェクトがあり、材料を中心に基礎研究が進展しているといえる。ボルドーのグループなどいくつかの研究組織で活発な研究が行われている。ドイツも最近では基礎研究に力を入れている。Goodenough の酸化物正極に関する発見も英での研究成果であり、材料および反応に関する研究ポテンシャルは高い。
	応用研究・開発	○	↗	最近ではドイツやフランスで大手化学メーカー（BASF やメルクなど）が参画し始めており、今後の動きが注目される。ただし、現時点では有力な電池メーカーが少なく、研究テーマなどは日本に求めている面もある。
	産業化	○	→	ドイツとフランスの国営的な企業を中心にリチウムイオン電池の生産が行われているが、日本に比べると規模は小さい。ベンツなどの自動車会社での電池開発が進展すれば欧州での電池製造が増えるかもしれない。材料関係の企業は欧州にあり、今後の動向が注目されるが海外に生産拠点を設ける場合が多くなるであろう。
中国	基礎研究	○	↗	中国での基礎研究への投資は増加しており、装置が充実してくれば研究も進展すると考えられる。現時点では日米欧で提案された考えに基づくものが多い。また材料研究が中心で、電池システムについてはこれからか。
	応用研究・開発	○	↗	電池製造に関する研究にしても、材料に関する応用開発にしても自国の研究は少ない。海外から企業が参画し、中国での応用開発研究を推進している。今後は、応用研究を充実させていくものと思われるが、研究体制など整備しなければならない課題が多い。
	産業化	○	↗	800 社近くの電池メーカーがあり、多くの電池を国内向けに生産している。また、海外の企業の進出も著しい。製造技術レベル、電池の安全性や性能などでは課題がある。一方、コスト面では優位に立っている。特許の問題はグレーのままであり、国際化していくための課題である。国内産業として産業化が進展しているが、国際化は不透明。
韓国	基礎研究	○	↗	ポスト LIB 系について、Li/S 系などで独創的な基礎研究が行われている例があるが、国の政策も産業化への傾斜があり、基礎研究のアクティビティ・研究者層の厚さは、必ずしも高いとはいえない。しかし、分析および解析面でも進歩しており、大学、研究機関、企業ともに活発に研究を推進しはじめているので、今後の動きを注目する必要がある。
	応用研究・開発	◎	↗	市場シェアでトップをとることに集中したリソース投入が行われている。技術開発は日本や米国で提案された手法を踏襲したものが多いが、低コスト化の可能な手法で性能・信頼性を担保するという開発が進んでおり、実用技術開発での成果はすでに日本を凌駕している部分もある。
	産業化	◎	↗	国策としての電池開発強化のもと、財閥系グループの電池メーカーが急速に成長してきており、開発水準も年々向上している。日本企業の競争力が衰えるのに従い人材流出もある。ウオン安など経済環境の効果などにより市場シェアが増大し、民生用のみならず、次の大きな市場である電動車両用途に向けても、日本の強力なライバルとなり得る。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）戦略提言「エネルギー分野研究開発の戦略性強化」
（2011.7　http://crds.jst.go.jp/domains/environment/201107010000）
2）戦略プロポーザル「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤　技術」
（2011.3　http://crds.jst.go.jp/domains/nanotech/201103012005）
3）Electrochemical Society Meeting in Hawaii, October 2012, Abstract.
4）International Lithium Battery Meeting in Cheju, June 2012, Abstract.
5）米国 DOE, http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/m/index.htms
6）王 子冬、「中国での動力用電池の安全性評価の取り組み」、日経 BP Techon セミナー「第 1 回 日中電池サミット」（2012/5/21、東京）
7）Jiqiang Wang, “R & D Activities & Some Achievements of the Battery Energy Storage Programs in China”, the 5th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications（2012/9/17-20, Istanbul）.

3. 1. 2. 2　パワー半導体デバイス

（1）研究開発領域名

パワー半導体デバイス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

高効率の電力制御用デバイスを実現する。SiC や GaN、ダイヤモンドなど Si に比べて原理的にパワーデバイスとして高効率化に優れたワイドギャップの半導体が注目されるが、それらの結晶品質向上、ウェハの大口径化、デバイス構造、作製プロセス、高精度の熱設計・パワーマネージメントなどの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

世界的な環境・エネルギー問題の克服には、今後、火力発電の高効率化や、太陽光発電や風力発電、地熱発電といった再生可能エネルギーの開発などとともに、電力網の需給バランスや効率的な電力運用を行うスマートグリッドの普及、送電ロスや電力変換ロスの低減、電気機器における省電力化が求められる。この中で、電気エネルギーの有効利用という点では、太陽光発電の直流電力を交流に変換するインバータのロスや、電車や電気自動車のようにモーターを制御するときのロスを低減させることが重要であり、高効率の電力変換・スイッチ用パワー半導体デバイスの開発・普及が重要である。また、電力網の長距離化に伴う送電損失の増大を抑えるための送電電圧の高圧化が進みつつあり、パワー半導体デバイスにはより高い耐電圧、低損失（低オン抵抗）が求められている。

現在普及しているパワー半導体は半導体にシリコン（Si）を用いたものであり、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクション MOSFET、IGBT の世代向上など）により、限界が言われながらも性能を向上させている。一方で、高耐圧化と低オン抵抗を両立させるためには、原理的に禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いるほうが有利である。このため、パワー半導体性能の飛躍的な向上のためには、炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）など Si よりもバンドギャップの広いワイドバンドギャップ系パワー半導体に関する研究開発と早期の実用化が望まれる。ワイドギャップ半導体のポテンシャルを示す研究発表は多くあるが、市場が満足するレベルにはないため、ワイドギャップ半導体の結晶品質向上、ウェハの大口径化、デバイス構造、作製プロセス、高精度の熱設計・パワーマネージメントなど多岐にわたる研究開発を行う必要がある。このような次世代パワー半導体デバイスが開発できれば、自然エネルギー発電所、電力インフラ（直流送電や系統連携）、鉄道、自動車だけでなく、工場、家電のインバータ、情報機器の電源など極めて広範囲での省電力化につながる。また、次世代パワー半導体デバイス技術を先鋭化させてコア技術とすることで日本の産業の活性化・競争力強化につながることも期待される。

［これまでの取組み］

SiC 基板は、市場を見ると Cree 社など欧米が先行し、新日鉄が量産を本格化させているなど日本が追いかけ、中韓が新規投資による競争参加という状況にある。SiC パワー半導体デバイスとしてはショットキーバリア・ダイオード（SBD）に加えて、MOSFET の

量産化が一部のメーカーで開始され、いよいよ普及を狙う段階にきているが、Si パワー半導体デバイスと比べると研究は緒に就いたばかりである。

GaN に関しては、市場から生産性が厳しく問われる領域である低耐圧から中耐圧の R&D デバイスの市場投入が始まっている。また、この領域ではパワー半導体の開発動向としてディスクリートから集積化へ移行していることもあり、欧米などにおいては、GaN バルク基板ではなく、シリコンやサファイアなどのすでに存在する大口径異種基板上でのヘテロ基板開発と、その基板を用いたデバイス開発が進んでいる。

ダイヤモンドに関しては、日本にはダイヤモンドの CVD 合成の先導的な研究、リンによるｎ型ドーピングなど当該分野での画期的な先行研究がある。また、FCT（フロンティアカーボンテクノロジー）、ADD（極限ダイヤモンドデバイス）などの経産省のプロジェクト、昨年度より始まったダイヤモンドパワーを含む CREST など関連プロジェクトが走っている。しかし、まだ基板に十分なものがないことがボトルネックとなって、ダイヤモンドパワー半導体デバイスの総合的な取り組みはなっておらず、基礎的な研究投資のレベルである。

パワー半導体の研究開発状況の指標として、材料別の論文・国際学会発表件数を ISI Web データを参考にすると、2010 年にて、Si が約 15,000 件、SiC や GaN が各々 2,500 ～ 3,000 件程度である。また、直近の 10 年でみても Si 関連の発表は大きな増加を続ける一方で、SiC や GaN の発表件数はなだらかに増えている程度であり飽和しているとも見受けられる。これは、世界的にパワー半導体の開発は、依然として Si 半導体およびその周辺で行われていることを示している。

［今後必要となる取組み］

Si パワーデバイスよりも性能的に優れるワイドギャップパワー半導体デバイスの研究開発は海外も含めて精力的に進められていることから、現在の技術優位性を継続し、早い段階での製品化・実用化に結び付けるために、SiC、GaN などワイドギャップ半導体ウェハの高品質化、大口径化や、デバイス構造の最適化、信頼性の高いデバイス作製プロセスの開発、高精度の熱設計・パワーマネージメント、周辺回路部品の開発など、総合的に研究開発を加速していくことが必要である。また、ワイドギャップ半導体の基礎物性にはまだわからないことも多いため、ナノスケールの欠陥・界面の評価や制御方法についての基礎的な研究も同時に進めていく必要がある。

SiC 基板は大口径化も進められているが、その製造法から Si ウェハと比較して生産性に難があり、この課題を克服する取り組みは重要である。また、SiC パワー半導体デバイスの作製プロセスにおいても、Si プロセス以上の高温プロセスを有するなどのため、イオン注入などによるドーピング制御、低抵抗ｎ型ドーピング、絶縁膜形成、低抵抗コンタクトなどに対する生産性を考慮した新しいプロセス装置の開発を合わせて行う必要がある。

SiC や GaN パワー半導体デバイスよりもさらに高性能化が期待できるダイヤモンドパワー半導体デバイスに関する研究開発はあまり進んでいないが、日本はダイヤモンド半導体に対する研究開発でリードしているので、世界に先駆けてダイヤモンド半導体ウェハの高品質化、ｎ型を含むドーピング制御、コンタクト、表面・界面制御などの基本課題への取り組みや、大面積化を可能にする製造技術・加工技術、絶対耐圧を出すためのデバイス

技術などの研究開発を進めていくことが重要である。

ワイドギャップパワー半導体デバイス単独の性能はかなり向上し一部は量産化に移行しつつあるが、周辺技術の研究開発が立ち後れているため、ワイドギャップパワー半導体デバイスを中心にその周辺技術（小型・高性能トランス、耐熱コンデンサ、配線、パッケージ、実装技術、新規回路設計、システム設計）の研究開発が今後必要不可欠である。例えば、高温動作に対応できる部品（コンデンサ、コイルなど）やパッケージがないことに対しては、材料科学に立ち戻った研究を行う必要がある。また、回路、システム技術においても、ワイドギャップパワー半導体の特性を積極的に活用した研究開発も重要になってくる。

（4）科学技術的・政策的課題

欧米が、集積化チップ、システム応用からのディスクリードデバイスなど、国レベルの施策としてターゲットを定め、シリコンパワー半導体を中心にして、かつワイドバンドギャップ系半導体の導入ポイントを絞りこんで研究開発を進めてきている。また、中韓が大きなシリコンパワー半導体市場への新規参加を企てている。これに対し、日本国内のパワー半導体（パワーエレクトロニクス）を称する国プロのほとんどが、今日の市場とは異なるところで、ある特定の材料を起点に全てを展開している。現在のシリコンパワー半導体の市場も含めてこれからのパワー半導体の市場に対して日本としての取り組み方針を定め、基礎から応用まで戦略的な研究開発を検討し進めていくことが必要である。

ワイドギャップ半導体パワーデバイスの研究開発では日本は先行しているが、今後の本格的なワイドギャップ半導体パワーデバイス時代が到来することを考えると、研究開発はまだ不十分であり、十分な措置をとらなければ現在の優位性を保持できない。SiC パワー MOSFET など、ある程度の研究が進み方向性が明確なものや実用化に近い部分は企業が自ら研究開発を進めることができるが、基礎研究や新規技術開発が必要なテーマについては、リスクが高く方向性も完全に定まっていないため、一般企業だけでは難しい。しかし、基礎的、挑戦的な研究をおこなってこれらについて主導権を取らなければ、これまで日本がリードしてきた次世代パワーエレクトロニクス産業において海外に主導権を握られてしまう危険性が高く、大学や国の研究機関と企業が密に連携して研究開発を進める体制を作ることが必要である。

具体的には、国内の GaN に関しては、主に企業中心で進められているが、国プロによる複数の大学を巻き込んだ形での大きな研究グループを形成して、各企業が持っている共通の課題を協力して迅速に解決する必要がある。また、SiC か GaN の二者択一ではなく、分野（家電、電気自動車、鉄道、電力インフラ）によって Si、SiC、GaN の棲み分けになることも考えられ、両方を進める必要がある。

一方、次世代パワーエレクトロニクスの人材が圧倒的に不足している現実がある。特にその根幹となるパワー半導体デバイスでは、国内で世界屈指の研究開発を進めている大学は数える程しかない。広い知識と高度な経験を積んだ学生・研究者・技術者を社会に輩出することは極めて重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

長らく続いてきた Si パワーデバイスの世界が SiC デバイスの実用化により変化しつつ

ある。GaNの参入も高周波パワーデバイスで進みつつある。これらは非Siのワイドギャップ半導体材料によるデバイスという潮流を示しており、SiC、GaNに加えワイドバンドギャップ材料系ラインナップの究極といえるダイヤモンドに至る研究開発が世界中で活発になっている。

台湾は数年前から精力的にSiCパワーデバイスの研究開発を活発化させている。韓国や中国と異なり、台湾にはSiパワーデバイス研究の経験、産業があるので、今後急速に立ち上がる可能性がある。

［注目すべきプロジェクト］

欧米で次世代パワーエレクトロニクスの研究拠点が形成されつつあり、材料、デバイス、実装、回路、システム、応用の総合的な研究開発が進められつつある。産学連携および産学の役目がはっきりしており、産業応用、実用化を見据えたプロジェクトが進行している。欧米のプロジェクトは、低耐圧系から高耐圧系にいたるまで、総じて集積化（高パワー密度化）で整理することができる。低耐圧系では、パワー半導体のみならず受動部品である磁性体、集積化統合プロセスなどが総合的にすすめられている。また高耐圧系は、パワー半導体が性能要因に占める割合は大きいが、Si、SiC、GaNなどのデバイス特性、生産性を考慮し、ある特定のパワー半導体材料に限定してプロジェクトを展開するのではなく、開発すべき応用・システムを定め、それを達成するために必要な各材料デバイスの特性向上を行うようプロジェクトが構成されている。

つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）の6つのコア研究領域の一つとしてパワーエレクトロニクスが位置づけられており、この中で、2009年度末より内閣府の最先端支援プロジェクト（FIRST）の一つとして、木本恒暢教授を中心研究者とする「低炭素社会創成へ向けた炭化珪素（SiC）革新パワーエレクトロニクスの研究開発」、2009年度より技術研究組合「次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構」（FUPET）による経済産業省の「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」などが実施されている。また、2012年4月に産業技術総合研究所と産業界と共同でパワーエレクトロニクス・オープンイノベーションの推進に向けた民活型の共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ（TPEC）」が設立されている。

ダイヤモンドの研究開発は、JSTのCRESTで産業技術総合研究所が行っているダイオードやバイポーラトランジスタなど固体半導体デバイスの研究が主であるが、ALCAでダイヤモンドの表面を使って電子を低エネルギーの状態で真空中に出す真空パワーデバイスとしての研究が進められている。

（6）キーワード

・パワーエレクトロニクス
・ワイドギャップ半導体、炭化珪素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド
・高効率インバータ、電力変換、超高圧送電、HVDC

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	Si 系パワー半導体は、すでに競争領域技術に入っているため、研究開発にたずさわる大学、国立研が乏しい。一方で、SiC や GaN は複数の国プロが走っていることもあり、大学などからも先駆的な発表がある。SiC に関して世界最高水準の研究グループが複数あるが、研究者の総数という意味では十分とは言えない。GaN/Si に関しては、企業が精力的に研究を行っている。名工大などはセンターを立ち上げ研究拠点化を進めているが、大学全体として見ると GaN/Si の研究者は少ない。ダイヤモンドに関しては、世界最高水準の基礎研究グループがあり、結晶成長、ドーピング、物性評価などで優れた成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	→	Si 系パワー半導体は、デバイス企業での開発が主である。SiC SBD/MOSFET の研究開発に関しては企業を中心に活発に行われている。世界最高性能の SiC MOSFET が試作、報告されている。ただし、デバイスとシステムを橋渡しする領域での応用研究が米国に比べると遅れており強化が必要である。GaN/Si に関しては複数の企業が精力的な研究開発を進めており、GaN/Si の分野で世界最高性能のデバイスの報告も複数なされている。ダイヤモンドに関しても上記グループが基礎研究と平行してデバイス応用の基礎的検討や、デバイス作製のためのウェハ技術など応用的な研究も進めている。
	産業化	◎	→	Si 系パワー半導体は、東芝、三菱、ルネサス、富士電機などが世界市場のなかで、高い産業技術力を有している。SiC や GaN では、デバイス／電源企業からの製品化発表（予告を含む）、電車（試験導入）や家電機器（商品）への搭載が始まっている。SiC パワーデバイスの量産を開始した企業があり、本格的な SiC デバイス普及の手前まできている。SiC ウェハ製造に関しては、新日鉄が生産を本格化している。GaN/Si に関しては複数企業が開発を進めているが、実用化の直前の状態にある。
米国	基礎研究	◎	→	ICT や民生家電を対象とする低耐圧系のパワー半導体は集積化・IC 化に向かっており、半導体とあわせて磁性体、集積化技術などを大学を中心にした産学連携コンソーシアムで推進し、世界の先駆的発表を行なっている。SiC や GaN は、大学発の技術がベンチャーを含む企業群に移行し、大学は要素技術、評価などでさらなる開発を支えている。Cree はバルク結晶成長から各種デバイス応用まで総合的に研究を進めている。GaN パワーデバイスに関しては、GaN 高周波パワーデバイスで成果を挙げたグループがパワーデバイス応用へと展開し、研究開発を進めている。ダイヤモンドについてはパワーデバイス応用を念頭においた研究はほとんどない。
	応用研究・開発	◎	→	低耐圧集積化パワーチップは開発力が高い。また高耐圧系に関しては、大学主導で米国内にあるワイドバンドギャップ系半導体企業とも連携し、次世代グリッドを見据えたシステム研究を展開している。SiC パワーデバイス自体の研究は以前に比べて減少傾向だが、逆に、最先端パワーデバイスのモジュール、システムレベルでの研究開発拠点は大幅に強化されている。GaN/Si に関しては大手パワーデバイスメーカーが市販を開始しており、また、大学発ベンチャー起業も立ち上がっており、研究が活発化している。
	産業化	◎	→	低耐圧集積化パワーチップ、特に電源は世界市場で最も強力な立場を有している。SiC ウェハ製造に関しては、Cree、ダウコーニングがあり、市場を席捲している。後発のダウコーニングは結晶サイズ、結晶品質を大幅に向上させ Cree に近づきつつある。SiC パワーデバイスに関しては複数メーカー（Cree を含め、主にベンチャー起業）が存在するが、研究開発力、実際に量産し実用化させるという意気込みでは日本のメーカーの方が先んじている印象がある。GaN/Si は大手パワーデバイスメーカーが GaN/Si を搭載した電源チップを販売開始している。

欧州	基礎研究	◎	→	Si パワーデバイスは、低耐圧、高耐圧ともに、極めて高い基礎研究力を有しており、英国、ドイツ、スイスなどから多くの先駆的発表が行われている。SiC に関してスウェーデン、ドイツなど世界水準の研究グループが数ヶ所ある。それぞれのグループが材料科学や基礎物性など得意分野を持ち、その分野に関しては高い水準にある。GaN は、IMEC を拠点としたプロジェクトがスタートし、ウェハの大口径化に関する研究を精力的に進めている。
	応用研究・開発	○	↗	SiC デバイスに関しては、スウェーデンがデバイス設計、デバイスプロセスで世界的な拠点の一つであるが、実用上重要な SiC パワー MOSFET などデバイス応用の研究は弱い。しかし、ECPE（欧州パワーエレクトロニクスセンター）の活動に見られるように、産業界を中心にした産学連携がうまく機能し、大学や国立研での要素技術・システム FS 実証を通して企業への人・技術の移転にうまくつながっている。また欧州の地域性を利用して、PV、風力、海流、原子力などの多くの電力源からなる電力ネットワークが構成されていることから、システムレベルでの次世代技術開発、実証で新しくかつ高度な成果を発表している。
	産業化	◎	→	パワー半導体、およびそれをキーコンポーネントとした電力・エネルギーシステムともに世界的競争力を有している。特に、社会インフラ系システムは圧倒的に強い。SiC SBD 製造に関しては先駆者の Infineon が世界のトップを走っており、SiC デバイス量産化に関する検討はかなり進んでいる。スイッチング素子として SiC JFET にも力を入れており、太陽電池用パワーコンディショナへの応用を狙っている。
中国	基礎研究	△	↗	欧米からの研究者招聘（自国出身、外国出身）、重点拠点化整備を行うなど、急激に強化策がすすめられている。また、盛んに国際学会誘致・開催を行なっており、情報収集も政策的に行なっている。パワー半導体は、シリコン、GaN で香港大学などが高い研究水準を構築しつつある。SiC に関して学会発表はほとんどないが、学会での聴講者が 3 年ほど前から散見され、徐々に増えている。
	応用研究・開発	×	↗	欧米の企業が中国進出を果たしていること、また昨今の情勢により日本も含めて世界中の企業の買収、研究者・技術者招聘を試みており、これらを連携させた独自技術開発の可能性がある。
	産業化	△	↗	すでに存在する Si ファウンドリがパワー半導体に注目しており、また海外企業群の進出などあわせ、今後、この分野でコスト力を武器とした展開の可能性がある。SiC ウェハ製造企業が創業しており、品質はまだまだだが改善を進めている。また、最近 SiC エピサービス企業も創業した。GaN も同様にすでに存在する LED 関連企業がパワー半導体への移行を見据えている。
韓国	基礎研究	△	↗	大学や国立研が徐々にではあるが研究水準を高めつつある。ワイドバンドギャップ系パワー半導体はいくつかの国プロが行われている。SiC に関しては学会発表はほとんどないが、学会での聴講者が徐々に増えてきている。GaN パワーデバイスに関する研究グループは少ないが、GaN LED に関する研究グループは企業、大学共に多い。
	応用研究・開発	△	↗	大学や国立研はまだ発展途上である。一方で、企業が勢力的にかつスピードを伴ってパワー半導体関連の技術開発を進めつつある。今は独自技術開発ではなく、他国からの技術導入の状況にある。
	産業化	△	↗	LSI 系では実力のある企業が存在しており、パワー半導体への展開を始めている。また、これらの企業に加え、これまで異種分野にいた企業群が、特にワイドバンドギャップ系パワー半導体へ新たに参画することを模索している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）デバイス関係の国際会議報告（ISPSD、IEDM など）
2）SiC や GaN など、材料を掲げた国際会議報告（ICSCRM、ICNS など）
3）パワーエレクトロニクス国際会議報告（APEC、ECCE、EPE など）
4）ISI Web of Science

3. 1. 2. 3　高温超伝導送電

（1）研究開発領域名

高温超伝導送電

（2）研究開発領域の簡潔な説明

高温超伝導ケーブルによる安定した無損失送電を実現する。高温超伝導材料の結晶性や化学組成、電子状態と臨界電流特性の関係など、安定利用の基本となる超伝導現象の分野横断的な理解が必要であり、これらの設計や制御、および通常電力供給システムとの効率的で安全な接続を可能とするエネルギーインターフェースに必要な要素技術などの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

1970 年代のオイルショック以来、世界的な環境・エネルギー問題の克服に向けて、自然エネルギーを積極的に利用した発電技術の導入の検討や小規模プラントの開発が進められ、風力発電、太陽光発電などが欧米と中国で急速に普及している。日本でも東日本大震災を契機に原発利用の見直しが始まり、再生可能エネルギー利用が従来に増して期待され、風力、太陽光、地熱などの発電システムが大型化し、電力インフラに接続されるようになってきている。このような状況の中で、発電した電力を無駄なく送電することが重要であるが、現状の送電線による送電では電力のおよそ 5% が送電ロス（損失）として失われており、日本全体では原発 10 基分にも相当する電力が無駄になっている。このため、送電における送電ロスの低減が強く求められる。

このような送電ロスの低減に対し、超伝導ケーブルによる送電に大きな期待が寄せられている。大容量の電力輸送において超伝導ケーブルによる送電技術は、低損失のもと高電流密度送電を実現するものであり、さらに電力の質を高める（電力の短時間の揺らぎや交流波形の乱れは超伝導体を通すことによって大きく改善）という特徴を持っている。また、超伝導技術の大規模電力インフラへの応用は、輸送電力の 5%程度の送電ロスを大幅に低減するだけでなく、現状の高電圧の送電体系を変える可能性を持つ。超伝導線材は従来の金属ケーブルの 200 倍以上の高電流密度送電が可能であり、同じ電力を送るための電圧を大きく下げることができる。

このような魅力を持つ超伝導ケーブルによる送電技術ではあるが、長期間にわたり安定した送電を実現するためには、液体窒素温度（77K）でも安定した超伝導状態が維持できる高温超伝導線材や高温超伝導材料の研究開発が重要である。超伝導臨界温度や臨界電流密度の向上など特性制御に向けた材料特性の理解や結晶性などの改善を行っていく必要がある。また、線材に加工する技術、安定した冷却技術、常温のケーブルとの接続技術などについても十分な研究開発を行う必要がある。

ここで開発される高温超伝導材料・ケーブル・送電システムにおけるさまざまな超伝導技術は、他の超伝導応用分野にも利用されると考えられ、社会への波及効果も大きい。例えば、医療用 MRI や高感度生体磁気計測診断、超伝導リニアに代表されるように高速・省エネルギー輸送技術の発展などへの寄与も期待できる。

［これまでの取組み］

超伝導に関して、その現象の基本的な機構は理解されているが、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子については未解明な点が多く、超伝導現象の発見以後 100 年を経た今日でさえも、これらの物性を予測して新超伝導体を設計することができていない。超伝導材料の特性についてもほぼ同様であり、高い臨界温度を持つ物質が出現したり、優れた特性を示す材料が発見されると、その理由を明らかにする研究がにわかに始まるような形である。また、元素、合金、金属間化合物、ホウ化物、銅酸化物、鉄ニクタイドなど数多くの超伝導物質群が存在するが、それぞれの物質群内に閉じこもった研究が多く、横断的に超伝導状態の支配因子を理解しようという具体的な研究例はほとんどない。

超伝導に関わる現象の理解や材料開発は、高度な冷却技術や計測・分析技術を必要としたこともあって主に日米欧の先進国が牽引してきた。高温超伝導材料の開発に対しては、1990 年代半ば以降、日米が毎年数十億円規模の巨大な研究費を投じてきたが、米国は 2010 年秋以降その研究費を打ち切った。一方、欧州ではそれほど巨額な材料開発に対する投資はなかったものの、今なお材料工学の基礎的な側面から材料高度化を図るプロジェクトが進行している。

近年、高温超伝導体を用いた線材の性能や量産性が大幅に改善し、送電ケーブルをはじめ各種の電力機器の研究開発が世界中で精力的に行われている。高温超伝導材料を用いた機器や設備は液体窒素冷却で運転できるため、これまで液体ヘリウム冷却を必要としていた超伝導材料に比べて、大幅に普及できるポテンシャルを備えており、線材特性とその量産性の向上およびこれらに伴う低価格化によって、現実的にその利用について検討できる段階に入ってきている。高温超伝導ケーブルに用いられている線材は、現在、日本の住友電工社製のビスマス系高温超伝導（第 1 世代、1G）線材と、米国の SuperPower 社、AMSC 社のイットリウム系薄膜超伝導高温超伝導（第 2 世代、2G）線材が主流となっている。

［今後必要となる取組み］

高温超伝導ケーブルに関わる現象を理解しその特性を制御するために、超伝導現象を物質群や学術分野間を超えて横断的に理解する研究を実施することが重要である。これにより、次世代の超伝導物質開拓、高機能超伝導材料開発に活用できる総合的な戦略を描くためのプラットフォームの構築につなげる。なお、超伝導線材の臨界電流特性の改善は、超伝導送電の高電流密度化や交流損失の低減に直接つながるものであり、超伝導送電システムの最適設計に影響することから、常に注目する必要がある。また、より効果的な材料やシステムの構成を提案するために、超伝導および周辺分野との融合的な要素技術を育むことも重要である。

ケーブル製造および冷却の技術については日欧米が先行しているが、本格的な長期、長区間の冷却システムの運転実績は少なく、また改善の余地が大きい。このため冷凍機、断熱管、端部接続法など冷却運転に関わる技術の向上を図っていく必要がある。

超伝導送電の試験・運転は世界的にそれぞれの国のプロジェクトまたは支援で行われているものがほとんどであり、交流応用の試験、運転が先行しており、直流応用では試験が始まったところである。直流送電を交流系統に接続する場合には大容量インバータなど周辺機器の設計・開発も進めていく必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

超伝導研究の裾野は広く、理論物理、物性物理、固体化学、材料工学、機械工学、電気工学、低温工学などそれぞれの学術分野には専門家が多数いるものの、互いの人材や情報の交流が少ない。実用的な高温超伝導材料･ケーブルや超伝導送電技術の確立に向けては、材料物性の支配因子を基礎的な超伝導現象にまで遡って理解する努力が必要であり、まずは超伝導現象をあらゆる角度から理解しようという意識が強い研究者を産学から集結させることが不可欠である。意図的に人的な交流の場（＝横断的研究組織）を設けることなどにより､学術分野間や基礎研究－材料開発技術間の垣根を取り除くことが重要になる｡別々に育まれてきた技術・知見の融合は双方の研究を加速させ、新規高機能超伝導物質の創製や、高機能超伝導材料・機器の開発につながることが期待される。

電力システムなどエネルギーインフラに組み込まれるような応用展開においては、そこに関連する他の技術との協調的な開発が不可欠であり、融合技術あるいはインターフェース技術として性能向上や最適化が図られる必要がある。これまで、他技術との融合技術を育てながら超伝導技術をエネルギーインフラに生かすような取り組みを行うことはほとんど行われておらず、世界的な技術展開を視野に入れ、融合技術の育成も含めた研究開発を実施する必要がある。協調的な研究体制の構築と研究実施の場の創出が不可欠でと考えられる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

高温超伝導材料を用いた電力ケーブルや変圧器、モーターなどの開発はこの 5 ～ 6 年、急速な進展を見せており、各所で試用、実用が始まっている。しかし、次世代の再生可能エネルギーと組み合わせた大規模なエネルギーインフラ改善への取り組みはほとんどなく、机上で検討が行われている段階である。中部電力が実施している直流超伝導送電試験は 200 m ではあるが直流としては世界最長のものであり、直流超伝導送電の特長や様々な課題を露わにしている。システムの改造などにより様々な場面での運転試験が行われており、これらを通じての知見は、実際の直流超伝導送電システムに有効に生かせるものである。

欧州エッセンで準備されている交流超伝導送電は、1 km とこれまでの超伝導送電システムよりも長く、かつ大都市・工業地帯での超伝導応用ということから、社会に超伝導送電の効果を知ってもらうよい機会になる。また、この送電の成功は大都市域の低圧交流送電区間への超伝導送電の有効性を示すことになり、過密都市域での変電所数減など経済的なメリットも伴った超伝導送電システム導入のきっかけにもなると考えられる。

全体的な趨勢として、自励式コンバータ（Voltage Source Converter）を中心とするパワーエレクトロニクスの進展、洋上風力を中心とする再生可能エネルギーの量的な拡大とその電力を輸送する 200km に及ぶ直流長距離送電線の拡大に伴って直流技術の進展が今後の電力技術に大きなインパクトを及ぼすと考えられる。また、直流送電線の一部に直流超電導ケーブルの適用が始まることも予想される。

［注目すべきプロジェクト］

超伝導の研究は基礎、工学両面とも、1986 年以降の銅酸化物高温超伝導体の発見以降、

一気に新しいフェーズに入り、新規高温超伝導体創出、新高温超伝導材料の開発に向けての研究が中心となった。その後四半世紀の間に日本では、ビスマス系銅酸化物（1988 年）、二ホウ化マグネシウム（2001 年）、鉄ニクタイド（2008 年）など学術的にも工学的にも世界的に大いに注目される超伝導物質が発見されてきた。また、銅酸化物高温超伝導材料の開発において日本は世界を今なおリードし続けており、特に線材を中心に材料特性、量産性の改善がこの数年顕著である。これを利用した超伝導機器・設備の開発も JST の S-イノベ（2009 年～）や ALCA（2010 年～）、NEDO のプロジェクトなどにおいて始められている。

JST の S- イノベでも課題となっている直流区間の鉄道き電線超伝導化は低損失だけでなく回生エネルギーの高効率利用や変電所の省略など様々なメリットを伴っている。この課題における電線応用の展開は長距離冷却技術を育てることになり、ほぼそのまま電力網における長距離直流送電技術に展開できる。

東京電力－住友電工－前川製作所による NEDO プロジェクト「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」において 2012 年 10 月 29 日に国内初の超伝導送電の実証試験が開始された。

海外でのケーブル試験実績はこれまでにあるものの、運転全体を日本が管理した実証試験例はなかった。1 年以上にわたるこの実証試験から生まれる様々なデータは、日本の超伝導送電技術を一層高めるため重要なものとなる。

まだ構想段階ではあるが、日本が提案しているサハラソーラーブリーダー計画、アタカマ沙漠における SOLAR-TAO 計画に超伝導送電を利用することが検討されており、このほか欧州提案の Desertec（サハラで発電し欧州に高圧直流送電）にも超伝導送電が選ばれる可能性がある。また、サウジアラビアも将来、再生可能エネルギーによる電力輸出国となることを検討しており、このなかに超伝導送電技術が組み入れられることも考えられる。

ロシアでは、交流超電導ケーブルの系統連係試験が準備されているとともに、St.Petersburg 電力網への 2,500m 直流超電導ケーブル適用の検討が始まっている。また、メキシコでは変電所構内の発電機から変圧器への引き出し線への交流超電導ケーブル適用が進められている。

（6）キーワード

・高温超伝導、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度
・超伝導材料、高温超伝導材料、高温超伝導ケーブル
・超伝導技術インターフェース、再生可能エネルギー、蓄電技術、エネルギーインフラ

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	大学や研究独立法人を中心に高温超電導線の応用基礎物性 [*1,2] などにさかのぼって地道な研究開発が進められている。ビスマス系線材（1G 線材）、イットリウム系線材（2G 線材）ともに組織。構成の観察と制御、線材特性評価技術全般的に高いレベルにあり研究者、技術者も多い。1G 線材では産官学体制で、2G 線材では大学が中心となって研究が行われている。1G 線材の住友電工社、2G 線材のフジクラ社はともに独自の製造技術を高めることによる性能改善に成功している。
	応用研究・開発	◎	↗	住友電工社の 1G 線材の生産量、特性およびケーブルコアの作製技術は世界トップである。2G 線材ではフジクラ社の製品の特性がトップであるが量産性では米国にやや劣っている。ケーブル応用の実績は独立した設備試験が行われただけであるが、東京電力などによる NEDO プロジェクトで将来の実用化を見据えた交流超電導ケーブル（66kV, 2kA, 250m）の日本で最初の系統連系実証試験（横浜）が 2012.10 月末にスタートした。また、2G 線材を用いたケーブルでは現時点で最高の 275 kV の高圧応用試験が実施されている。直流超電導ケーブルの基礎的評価や JST/S- イノベにおける鉄道用途など新しい応用について研究の進展がある。
	産業化	○	→	超電導ケーブルは未だ実証試験の段階であり、産業化へのステップには後一歩である。ビスマス系超電導線は工業製品段階に到達し世界各国に輸出されている。イットリウム系超電導線は国家プロジェクトの段階。現状では長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。超伝導送電技術の導入は基幹インフラに関わるものであり、産業化に至るかどうかは電力会社や国策によるところが大きい。外国向けのケーブル出荷といった形での産業化のほうが早い可能性がある。なお、データセンターや工場内、港湾施設などインフラと関わらない局所的な直流送電応用も有望であり、ケーブルでは超伝導磁石よりも大量の線材を必要とすることから、ニーズに応じて線材の生産設備が拡充されていくことが考えられる。
米国	基礎研究	◎	↘	2004 年以降、2G 線材開発に集約してきたが、2010 年頃より大幅に研究費が削減され、研究の活性は急速に低下した。しかし、企業、国立研究所にはそれまで 15 年間の莫大な基礎研究成果の蓄積がある。超電導臨界温度の更なる向上、ピンニング特性のメカニズムなど、やや純粋基礎研究に立ち戻った感が強い。現在、長尺 2G 線材の量産化が AMSC、SuperPower の 2 企業で進められている。
	応用研究・開発	◎	→	1990 年代後半より超伝導ケーブル試験が始まっており、2006 年に世界初の実系統接続試験を行うなど、実績が最も多い。現在も Long Island Power Authority（LIPA）プロジェクトにおいて交流超電導ケーブル実証試験が継続中で、実系統最長 600 m の運転が続けられている。直流超電導ケーブルプロジェクトとして有望視されていた Tres Amigas 計画は超電導ケーブルが不採用となった。
	産業化	○	→	日本同様に長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。イットリウム系超電導線はベンチャー 2 社が外部へ供試できる段階に来ている。ニューメキシコ州にある 3 大電力網の接点での超伝導ケーブル接続が検討されており、これが着手されれば長尺超伝導ケーブル開発技術が一歩進化する。なお、ブッシュ政権時代に提唱された全米電力網の更新を目指す GRID2030 構想においては、超伝導送電技術の導入も期待されたが、現在は構想自体、話題に上らなくなっている。

欧州	基礎研究	◎	→	2G 線材について線材性能を高めるための基礎研究は根強く続けられており、新規ピンニングセンターの導入方法の開発や、その効果に関する緻密な研究も盛んである。現在も大学を中心とした大型プロジェクトが進行中であるが、長尺線材開発への展開は見えていない。
	応用研究・開発	○	↗	1G 線材の長尺化には成功していたが、特性面で住友電工社製品にはるかに劣り、現在はほとんど研究開発の対象になっていない。電力会社 RWE を中心としてドイツ・エッセン市における世界最長 1,000m の交流超電導ケーブルの系統連係試験が 2013 年末にはスタートの予定で進行している。再生可能エネルギー用や船舶用の直流超電導ケーブルの開発も同時に進行中。2G 線材については長尺線材開発の実績が全くないといえる。ケーブル製造は Nexans 社が行っているが、試験実績は日本よりもさらに少し遅れているが、露、独では 1G 線材を用いたケーブル実用が本格化している。
	産業化	△	→	高温超電導線を一部外部へ供試できる段階であるが、日米ほど強力ではない。オランダで 6 km 長のプロジェクト計画があるが、この数年計画の段階で止まっている。このほかの欧州内の長距離超伝導ケーブルの計画は無い。フリカにおける電力生産－欧州への送電計画では欧州への直流送電に MgB_2 線材を使うことも検討されている。
中国	基礎研究	△	→	新物質探索以外の超伝導に関わる基礎研究は活発でなく、1G、2G 線材についても実績に乏しい。Innova 社が 1G 線材を開発しているが、特性面で見劣り国内で試用されたのみである。
	応用研究・開発	○	→	長尺 1G 線材については一企業が開発を行っていたが、特性面で住友電工社製品に劣り、現在生産を継続しているかどうかは不明である。長尺 2G 線材の開発実績は無い。雲南電力での交流超電導ケーブルの変電所での系統連係試験が引き続き実施されている。中国科学院によるアルミ電解精錬工場での直流超電導ケーブルの運転が 2012.9 月からスタートしている。
	産業化	△	→	中北部の白銀市にこれまでに開発してきた超伝導送電関連の設備を集約している。西方から東方への送電計画があるが、超伝導技術が採用されるかどうかは不明である。高温超電導線を一部外部へ供試できる段階であるが、国内のケーブル製造技術に乏しく、日欧米の技術の進展に頼らざるを得ないようである。
韓国	基礎研究	△	→	1G 線材に関する基礎研究は活発でなく成果もほとんどない。2G 線材については独自の手法での開発が行われており、高速生産プロセスの確立が産学共同研究で進められている。
	応用研究・開発	○	↗	産学共同研究を経て、SuNAM 社が長尺線材開発にようやく成功してきたところであるが、まだケーブル応用への展開は無い。一方、ケーブル開発は日米の線材を用い LS 社が行っている。韓国電力が強力なリーダーシップを発揮し、交流超電導ケーブルの変電所での系統連係試験を 2011 年からスタートしている。引き続いて、済州島での直流超電導ケーブル、交流超電導ケーブルの系統連係試験（それぞれ 2014､2016 スタート予定）を計画中。ただし、超伝導の電力応用に関するプロジェクトは一昨年より途絶えており、冷却技術は十分に育っていない。
	産業化	○	→	済州島でのスマートグリッド計画において超伝導送電応用（計 1.5 km）が進められている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）NEDO 高温超電導ケーブル実証プロジェクト：http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00155.html
2）JST 戦略的イノベーション創出推進“超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出”：
3）http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h21theme04.html
4）高圧直流超伝導送電に関する情報：中部大学－ JST 共同研究“高圧直流超伝導送電の社会実装に関する調査研究報告書”（2012）
5）韓国 DAPAS プロジェクトの情報：http://eng.super-kics.or.kr/infos/kor_technology
6）Desertec の情報：http://www.desertec.org/global-mission/focus-region-eu-mena/
7）サハラソーラーブリーダー計画：例えば、鯉沼秀臣 , 化学と工業 , Vol. 62, No. 8（2009）904-905.
http://www.ssb-foundation.com/j-index.html
8）SOLAR-TAO 計画：http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/SolarTAO/effect.html
9）小林慎一ほか：“実用化に動き出したビスマス系超電導線”, 電気学会論文誌 A 132（2012）387.
10）佐藤謙一：“超電導ケーブル開発の最新動向”, 工業材料 59, No.1（2011）38.
11）S. Yamaguchi et al.: “Experiment of the 200-meter superconducting DC transmission power cable in Chubu University”, Physics Procedia 36（2012）1131
12）H. Ohsaki et al.: “Application of superconducting power cables to DC electric railway systems”, Physics Procedia 36（2012）908.
13）F. Schmidt et al.: “Operation Experience and further Development of a High-Temperature Superconducting Power Cable in the Long Island Power Authority Grid”, Physics Procedia 36（2012）1137.
14）A. Breuer et al.: “Superconducting medium-voltage cables for urban power supply as an alternative scenario to 110 kV installations”, 2012 CIGRE Session（Paris）, Paper B1-301
15）M. Stemmle et al.: “Superconducting HVDC Power Cables for Voltage Source Converter Systems”, 2012 CIGRE Session（Paris）, Paper B1-302
16）X. Liang et al.: “Design of a 380 m DC HTS Power Cable”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20（2010）1259.
17）V. Hussennether et al.: “Projects BorWin2 and HelWin1 – Large Scale Multilevel Voltage-Sourced Converter Technology for Bundling of Offshore Windpower”, 2012 CIGRE Session（Paris）, Paper B4-306.

3. 1. 3　エネルギーを節約する
3. 1. 3. 1　グリーンプロセス触媒

（1）研究開発領域名
グリーンプロセス触媒

（2）研究開発領域の簡潔な説明
プロセスの環境負荷低減に配慮した化成品合成やファインケミカル合成に必要とされる触媒を対象とした研究開発領域である。化成品合成では、多段階反応を一段階にできる触媒、穏和な条件で使用できる触媒を低コストで実現する技術、ファインケミカル合成では、従来の低分子触媒では実現できない精密合成を可能とする触媒などの開発が課題となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向
［背景と意義］

触媒は、燃料や石油化学品の製造、医農薬品の中間体製造、自動車排ガス浄化、バイオマス変換、電池などに必要不可欠である。これまで反応の種類に応じて数多くの触媒が開発され、実用に供されている。

化成品の製造プロセスでは、資源の有効利用、省エネルギー、環境負荷低減が求められており、触媒にもこれらニーズに応じてさらなる高機能化が必要となっている。

医農薬品の中間体製造においては、鏡像異性体など分子式は同じでも構造が異なる分子を作り分けできるような触媒が必要である。従来型の分子触媒（数百の分子量）でも反応の種類によっては高い触媒活性と選択性を示すが、その特徴は高い反応汎用性にあり、より高度な立体化学制御を行うには限界がある。そのため、触媒分子のサイズを一回り大きくして触媒反応を 3 次元で制御できるようにするなど、新たな取り組みが求められている。

［これまでの取組み］

分離、再利用に大きなエネルギーを必要としない不均一系触媒（固体触媒）では、エネルギー消費の大きな均一系触媒と同等の触媒能を有するものが見出されており、不均一触媒を用いた反応系の構築が進められており、ゼオライトを触媒としたベックマン転位が国内企業により低環境負荷プロセスとして実用化されている。

日本は、ナノ構造体および分子・原子レベルでの触媒設計や、とくに精密有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発の研究・技術レベルは極めて高い。欠損型分子性酸化物ナノクラスターを設計し、それを“分子鋳型”として種々の金属を導入することで、機能性分子触媒を世界で初めて合成することにも成功している。米国は基礎研究、産業化の双方で先端を担っている。欧州は基礎研究から産業化まで高い能力を有している。中国は日米欧を急速に追い上げている。

［今後必要となる取組み］

大量に消費されるバルクケミカルのグリーンプロセス触媒は、低炭素化・低環境負荷化の実現と経済的観点から魅力的であるため、今後もバルクケミカルのグリーンプロセス触媒は重要な課題となるであろう。これまでの産官学の努力によって、我が国の化学・石油

化学産業におけるバルクケミカル生産のエネルギー効率は韓国、EU と並び世界のトップクラスである。しかし、いくつかのプロセスでエネルギーの高効率化がすでに限界に達している一方で、高効率化が限界に達しているプロセスと高効率化が進んでいないプロセスの二極化が目立ってきている。前者の問題では触媒の単なる性能改善では高効率化を達成することが困難なため、反応温度の大幅な低下やプロセス自体を大きく変える触媒の創出が求められている。一方、未だ高効率化が進んでいないプロセスでは選択性などの触媒性能を飛躍的に改善する触媒の創出が必要となる。このように、エネルギーの高効率化がすでに限界に達しているプロセスと未だ高効率化が進んでいないプロセスでは目標とする触媒の性格が大きく異なっており、この観点での触媒開発がグリーンプロセス実現に今後必要不可欠になるであろう。

バルクケミカル生産でのエネルギー効率をさらに向上させるためには、いくつかのステップから成る反応を一段階のプロセスで選択的に進められる反応系を構築する必要があり、高温や禁水状態といったプロセス環境を必要とせずに一段階プロセスを可能とする触媒を開発しなければならない。さらに、実用化に向けては触媒のコストにも配慮が必要で、地域偏在性が少なく豊富な原料から安価に製造できることも必要となる。最近、チタンを骨格に含むゼオライト（チタノシリケート）を触媒に水中で多段階の反応を選択的に行えるということが分かってきており、活性サイトの活性や選択性を飛躍的に高めるような基礎的な研究開発から取り組む必要がある。

ファインケミカルの分野では酵素を凌駕するテーラーメイド触媒を開発する技術の確立が産業界から求められている。この要請に応えるには、触媒分子のサイズを一回り大きくして、超分子にすることにより、触媒反応を 3 次元で制御できるようにする必要がある。このような超分子の設計技術は超原子価ヨウ素触媒などの遷移金属を用いない触媒の開発にも必要であり、ヨウ素資源有効利用（日本のヨウ素生産量は世界第 2 位）の観点からも研究開発を推進していく必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

不均一系触媒の性能は均一系触媒と同等であり、飛躍的に高い性能を有しているわけではない。このため、実用プロセスにおける均一系触媒の代替として実用化することが躊躇されている。これらの触媒の活性サイトの性能、密度を飛躍的に向上することが実用化への最大の課題となる。これを実現するには化学、化学工学、材料科学、表面科学の連携が必要不可欠となる。

ファインケミカルの分野では触媒化学の分野は成熟した感があり、大型の研究費支援が減ってきている。しかし、触媒技術は今後も化学物質の精密合成に必要な技術でなり、この技術の発展なくして製造業の発展はありえない。触媒化学に携わる研究者は現状を打破するために、小分子サイズの単分子触媒では達成困難なナノ領域に踏み込んでいく必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

日本におけるグリーンプロセス触媒の実用化が注目されている。ポリプロピレンは全ポリマー生産量のの 30% 程度を占めるバルクケミカルであり、その低環境負荷化は低炭素

化と経済性に大きな効果をもたらす。従来ポリプロピレン重合は有機溶媒を用いる方法が用いられてきた。この方法は有機溶媒の分離・再利用を含めた複数のプロセスから構成されており、エネルギー効率の改善に限界があった。しかし、グリーンプロセス触媒の開発とそれを利用した気相重合法という簡略なプロセスが可能になったため、40% 以上の大幅なエネルギー削減が実現した。このプロセスの実現によってプラントのコストも従来のものより 40% 以上削減されている。

ナイロン 6 の原料となる ε - カプロラクタムは、従来硫酸を触媒としたシクロヘキサノンオキシムのベックマン転移によって生産されてきた。しかし、この方法では均一系触媒である硫酸の分離、処理に大きなエネルギーを必要する。規則性無機酸化物ナノ多孔体をベースに開発された不均一系触媒による「気相ベックマン転移」はこの問題点を解決し、低環境負荷プロセスを可能にした。

［注目すべきプロジェクト］

文部科学省新学術領域研究において精密有機合成の分野で注目すべき研究開発が進められている。「反応集積化の合成化学 革新的手法の開拓と有機物質創成への展開」（領域代表：京都大学、吉田潤一）では、通常のバッチ反応の条件では反応制御が困難であった不安定な活性種を、マイクロフロー反応装置を用いることによって瞬時に反応を終えることにより制御できるようになりつつある。「有機分子触媒による未来型分子変換」（領域代表：東北大学、寺田眞浩）では有機分子触媒の開発から有用物質の合成までをターゲットに研究が進められている。「直裁的分子変換を可能とする分子活性化」（領域代表：大阪大学、茶谷直人）では高効率的な物質合成を実現するために、今まで有効に利用されてこなかった化学結合の新たな活性化法を開発し、従来困難と考えられていたより直截的な触媒的分子変換反応を実現しようとしている。

NEDO の「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」では、既存の化学品などの製造プロセスのグリーン化などを目標に、不均一触媒などの研究開発が進められている。また、経済産業省の未来開拓技術実現プロジェクトの中で、水素と二酸化炭素から基幹化学品を合成するための触媒開発が三菱化学、住友化学の参画により開始されている。

（6）キーワード

低環境負荷、不均一系触媒、均一系触媒、超分子触媒、ナノ触媒、不斉触媒、立体化学制御

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	触媒研究は日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究は大きく発展してきた。金属錯体触媒から有機分子触媒へと元素戦略に基づく研究成果が次々と生まれており、我が国はこの分野で世界を先導している。とくに、ブレンステッド酸触媒、求核塩基触媒、超原子価ヨウ素触媒の分野で顕著な研究成果が出ている。また、官能基化を伴わない C–H 活性化に基づく触媒反応の開発分野の展開も目覚ましい。一方、不均一系触媒に対する支援は減少の感があったが、24 年度より JST の ALCA、および ACT-C により不均一系触媒が活躍できる場が提供されたため、この分野の奮起が期待される。
	応用研究・開発	◎	→	マイクロフロー反応装置などを利用した反応制御の分野でも世界を先導している。こうした化学工学的なアプローチによる反応制御によって小規模装置による大量合成が可能になりつつある。経済事情によって民間企業における研究期間が短くなっているため、革新的な触媒プロセスの応用研究・開発が大きく発展するかどうかは微妙な状況になっている。
	産業化	○	→	民間企業は省エネ化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、経済事情などにより大幅な投資が必要な革新プロセスには大きく踏み込めない問題がある。
米国	基礎研究	◎	↘	有機分子触媒の分野、特に酸塩基触媒の開発研究では顕著な研究成果を挙げている。官能基化を伴わない C–H 活性化に基づく触媒反応の開発分野への関心は高く優れた研究成果が出ている。一方で、以前は民間企業の研究が基礎研究のレベルを大きく押し上げていたが、現在は大きな研究投資の対象となっていない。またアカデミアにおいては触媒研究者が減少し続けており、触媒の基礎研究力が低下している。
	応用研究・開発	○	→	グリーンプロセスのための技術開発は日本より遅れている。応用、実用を見据えた化学工学のプロセス研究はバイオマス変換、バイオマスリファイナリーを中心に発展しているが、注力される部分が大きく偏っている。化学工学的技術革新という意味では大きな研究成果は出ていない。
	産業化	◎	→	基礎研究から産業化への展開は早く、基礎研究を産業化するための社会システムができ上がっており、産業化の力は強い。シェールガスの実用化に伴い、今まで蓄積してきた基礎研究・応用研究の成果を昇華しつつある。しかし、あたらしい化学プロセスを構築するという傾向はみられない。
欧州	基礎研究	◎	↗	欧州各国は伝統的に省エネルギー・環境問題に対して高い意識を持っているため、広い範囲にわたってグリーンプロセス触媒の研究が進んでいる。イオン液体、マイクロフローシステムの分野での研究レベルは高い。この分野の学術誌が欧州に集中していることも当然の結果と考えられる。また各国の研究者の連携も進んでおり、欧州統合は研究の上で大きな成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	↗	応用研究・開発は産学が積極的に進めている。民間企業が多くの大学の研究者を支えており、これがよい結果を生み出している。例えばゼオライト研究のパイオニアであるスペインの Corma のグループは多くの民間企業により積極的に支援されている。
	産業化	◎	↗	多くの優れたグリーンプロセス触媒が実用化している。例えばケロッグ社のアンモニア合成プラントは最もエネルギー消費が少なく経済性の高いプロセスである。なお、このプロセスは日本の研究者が開発した触媒を用いている。

中国	基礎研究	○	↗	他分野と同様に膨大な国家予算により、基礎研究を幅広く推し進めている。以前は他研究者の研究の模倣であったが、近年では独自の優れた触媒の研究が多くなってきた。平均化すると○の評価ではあるが、◎の評価をつけることができる研究者の数は急速に増えている。特に若い世代の研究者が中国の発展を牽引しており、すでに我が国にとって、脅威であることは明らかである。例えばゼオライトの研究で優れた不均一触媒が多数現れている。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究と同様に、応用研究・開発には手厚い支援がなされており、活発な開発が推進されている。応用研究・開発力については他の先進国と肩を並べる水準に到達している。既存の化成品生産だけでなく、バイオマス変換、バイオマスリファイナリーを目標とした開発が大々的に進められている。
	産業化	△	→	優れた基礎研究、応用研究・開発が産業化に反映されているようには見えない。経済的に反映する必要がないのか、あるいは反映されつつあるのか判断できない。基礎研究の実用化は 10 年程度必要であるため、現時点で基礎研究、応用研究・開発、産業化の関係を見定めることは困難である。
韓国	基礎研究	△	→	触媒の基礎研究には大きな努力は払われていない。研究者の数も欧米、日本、中国に比べ少ない。触媒の基礎研究で活発な動きはない。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究に対して応用研究・開発の研究は目覚ましいものがある。これは民間企業が注力している結果だと予想される。
	産業化	◎	↗	上記の民間企業の努力により、韓国の化成品製造のエネルギー効率は日本に勝るとも劣らない状況になっている。韓国と日本の間で石油化学のレベルに差はない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）社団法人日本化学工業会．“化学業界の低炭素社会実行計画の検討状況”．2010-10-13．産業構造審議会環境部会地球環境小委員会政策手法 WG ヒアリング資料．www.meti.go.jp/committee/summary/0004672/006_05_00.pdf
2）社団法人日本化学工業会．“日本化学工業協会における地球温暖化対策の取り組み”2009-11-20. www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g91120a05j.pdf
3）経済産業省．“グリーン・サステイナブルケミストリー（GSC）分野”．技術戦略マップ 2010 . http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/a2_4.pdf
4）Uyanik, M; Okamoto, H.; Yasui, T.; Ishihara, K. Quaternary ammonium（hypo）iodite catalysis for enantioselective oxidative cycloetherification. Science 2010, 328（5984）, p.1376–1379. DOI: 10.1126/science.1188217.
5）Uyanik, M.; Ishihara, K. Catalysis with in situ-generated（hypo）iodite ions for oxidative coupling reactions. Chem. Cat. Chem. 2011, 4（2）, p.177–185. DOI: 10.1002/cctc.201100352
6）新学術領域研究「反応集積化の合成化学　革新的手法の開拓と有機物質創成への展開」 http://www.sbchem.kyoto-u.ac.jp/syuuseki/
7）新学術領域研究「有機分子触媒による未来型分子変換」 http://www.organocatalysis.jp/
8）新学術領域研究「直截的物質変換を目指した分子活性化法の開発」 http://www.molecular-activation.jp/inauguration/index.html

3. 1. 3. 2　ナノ組織制御構造材料

（1）研究開発領域名

ナノ組織制御構造材料

（2）研究開発領域の簡潔な説明

構造材料の高強度化、軽量化、耐熱化などを目指す研究開発領域である。劣化機構や特性の発現機構を先端計測技術、計算科学を活用してナノレベルで解明し、その知見に基づいた材料組成・ナノ構造の制御を通じて、構造材料に求められる特性の向上を目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

構造材料は主に機械的特性を機能とするもので、社会インフラを支える基本的な材料である。構造材料の高強度化、軽量化、耐熱化は、資源の有効利用、省エネルギーなどに不可欠であり、その広範な用途と使用量の多さから、社会的・経済的波及効果が大きい。

［これまでの取組み］

主要な構造材料である金属材料の多くは、異なる結晶方位をもつ多数の結晶粒が集合した多結晶体である。これまでの実用材では結晶粒径は小さくても 10 μ m 程度であったが、これを一桁以上小さくすることにより、様々な特性が現れることが近年明らかになってきた。たとえばアルミニウムの結晶粒径を制御することにより、鉄鋼と同程度の強度が得られ、さらに、強度と靭性のもある程度達成できることが示されている。鉄鋼では、ナノサイズの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンがすでに市販されている。

航空・宇宙への応用を中心として発展してきた軽量構造材料は、炭素繊維複合材料（CFRP）が航空機の主要構造部材として実用化が始まった。CFRP は接合部のない一体（成形）構造、サンドイッチ構造、接着接合といった部材の構造設計においても特徴があり、より軽量な部材の構造設計、成形研究も活発に進められている。

東日本大震災でその効果が実証された免震ゴムや超低燃費タイヤ材料など構造材料としての高分子材料は、安全・安心や省エネルギーを支える材料として地味ではあるが重要であり、ナノ組織制御によりさらなる性能向上を目指した研究開発が進められている。

日本は、鉄鋼、軽金属ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。炭素繊維は日本発の材料であり豊富な基礎知見を有している。

先端軽量構造材料は、航空産業、軽金属メジャー企業を有する欧米が依然として研究開発から産業化まで優位性を保っているが、航空機部材の製造は日本、韓国、中国などに移行している。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタン、CFRP に関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。

米国は豊富な資金力を背景にナノ構造を成業した先端材料の研究で先端に位置している。欧州も国家支援を受けた産官学連携プロジェクトを軸に、軽金属材料、CFRP の研究開発水準は高い。とくに標準化では圧倒的強さを発揮する。英国では、HVM – TIC（High Value Manufacturing – Technology Integration Center）構想の下、160 百万ポンド程度

の予算を配分し、研究開発の強化・実用化を指向している。特にコンポジット（炭素繊維強化プラスチック）は NCC（National Composite Center）をはじめ英国内にテクニカルセンターを設置し強化を進めている。フランスでは、各地に点在していた研究開発拠点を統合し、強化する IRT（テクノロジー研究所）構想が進展中である。コンポジットについては Nantes で Technocampus EMC^2 を拡張し IRT-Jules Verna 構想として強化を推進している。

中国は国家支援による研究者層の急速な増大にともない研究水準が向上している。韓国も国策により基礎研究水準は向上してきている。中国科学院（化学研究所、長春応用化学研究所）、北京化工大学、青島科技大学を中心にカーボンナノチューブ、シリカ、セルロースナノファイバなど高分子複合系のナノ組織制御材料の研究開発が盛んである。

中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。軽金属では、ロシアとカナダにおけるアルミニウムの生産量が米国を上回っており、固溶強化、析出強化型の東南アジア、インド、イランなどのアジア圏も追い上げ傾向にある。

［今後必要となる取組み］

金属構造材料の開発における大きな課題は強度と靭性の両立である。強度は通常の使用条件で加わる外力に対する耐性で、降伏強度などの指標で評価される。一方、構造材料には突発的な条件下で加わる衝撃荷重への耐性も必要で、これが靭性である。強度と靭性はトレードオフの関係にあり、一般的には両立しないとされている。

構造材料設計はこれまで経験則を中心に行われてきたが、近年特性の改善に頭打ちの傾向がみられ、しっかりとした理論に基づく指導原理が求められている。構造材料に求められる特性はマクロスケールで発現するが、特性を支配する因子はナノからマイクロスケールの微細な組織構造に関係している。これまでの材料設計はこのようなスケールで何が起きているかの解析が不十分なままに行われてきた。結晶粒径や第二相などが材料特性に大きく影響することから、今後はこういった微細組織の挙動原理を解明することが重要になる。たとえば、鉄鋼では、析出物サイズが微細化し、電子顕微鏡でも観察が難しいクラスタレベルの制御に入りつつある。クラスタの最小単位は異種単原子のペアであり、個々の元素機能を解明・制御することが大きな課題である。電子顕微鏡法や X 線散乱法、三次元アトムプローブなど、金属の超微細組織を解析するための手法は近年著しい発展を見せている。このような材料計測手法を多面的に駆使して微細組織の挙動を解明していくとともに、強度、靭性といったマクロな特性まで見据えたアプローチをとることが不可欠である。

微細組織の挙動をマクロな特性につなげていくためには計算科学の活用も必要となる。計算科学と材料計測手法を結びつけて、結晶粒界などの界面現象の理解に向けた研究開発が必要である。また、構造材料では特性が長期間維持される必要があり、クリープ、疲労、腐食といった長時間現象を解析する手段も開発していく必要がある。

複合材料における重要な課題は、界面の制御である。接合技術の開発が鍵の一つであるが、単にスケールアップのための接合から、新たな特性を生み出す接合技術の開発が望まれる。金属では、摩擦撹拌接合などの強化を兼ねた接合技術が開発されているが、異種材料でも同様の技術が開発されれば、複合材料の設計指針に大きな変革をもたらす可能性がある。

免震ゴムでは、とくに高減衰ゴムをナノ組織制御でいかに開発するかが焦点となると考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

金属構造材料に取り組む大学・公的機関の研究者の減少に伴う層の薄さ、とくに次世代若手研究者層の薄さは、今後の当研究開発領域の進展を図る上において大きな懸念材料である。また、競合関係にある同業他社が多いことから産業界からのニーズの発信が不十分であり、産学官の連携がうまく進んでいない。前競争領域、あるいは非競争領域における基礎基盤研究では、オールジャパンで推進する体制づくりが重要である。

インフラを構成する構造材料のメンテナンス技術は、地味ではあるが今後ますますその重要性が増していくと考えられる。この点に関する社会的理解は十分であるとはいえず、研究開発支援も乏しいことから、改善が必要である。

代表的な複合材料である CFRP は不均質・異方性材料であるため、金属材料とは異なる破壊挙動を呈することから、長期信頼性も含め材料特性に関する基礎的データの蓄積が必要である。また、日本は、これまでの量産化実績を新技術に展開できるかが課題である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

ナノテクノロジーの研究を通じて、原子、分子レベルからマクロ物性を統一的に理解しようとするマルチスケール・モデリングが提唱され、研究開発が世界的にスタートしている。マクロな機械物性が原子、分子レベル、ナノレベル、ミクロレベルの構造とプロセス条件で設計が可能になれば、膨大な労力とコストを要している材料の認定試験や信頼性実証といった作業を軽減できる可能性があり、大きな期待がかかる。

米国などでは、多機能材料（multi-functional material）へのナノ構造制御技術の適用の機運がみられ、航空宇宙産業などの注目も高い。一般産業向けにシリカや酸化チタンなどのナノ粒子を用いた材料改質（表面コートなど）の製品化の動きなども引き続き活発である。

積層構造材は，従来はミクロンオーダー以上のスケール制御であったが，ナノスケール制御に近づきつつあり，界面の制御がより微細化・複雑化する傾向にある。これらのハイブリッド材料が，ナノ組織制御の主要なフィールドの一つに発展する可能性がある。

構造材料の軽量化に関しては、機械物性を向上させるというアプローチ以外に、比重を下げるというアプローチも検討が行われている。フォーム材料などのポーラス材料がそれであるが、究極的なナノポーラスの実現を追求する動きもある。実用上、部材には一定以上の厚さが必要であり、低比重のアプローチは航空機などの軽量化効果の大きい分野で研究開発が先行すると考えられる。

中国では、原子力発電所（第四世代）への免震ゴムの適用を真剣に考えている

［注目すべきプロジェクト］

平成 22 年度から開始された文部科学省科学研究費新学術領域研究「バルクナノメタル」では、マトリクスを構成する結晶粒や相の大きさ が 1 μ m 以下であるバルク形状の多結晶金属を対象に研究開発が進められている。

平成 24 年度に開始された文部科学省の「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」は，希少元素を用いない全く新しい材料の開発を目指すものであるが、構造材料が材料領域の一つとして取り上げられている。拠点形成により、協働が進みにくい材料創成と電子論の連携を図ることを大きな特徴としている。

米国では 2011 年に「Materials Genome Initiative」が発表された。本イニシアティブは材料開発全般において情報科学を活用して、新材料の開発から実用化までの期間・コストの削減しようとするもので、構造材料分野にもインパクトをもたらすものとして注目する必要がある。

（6）キーワード

高強度化、軽量化、耐熱化、複合材料、CFRP、強度、靭性、免震ゴム、結晶粒界

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	超微細粒材料，周期構造 Mg 合金，微細析出組織材料などのシーズ技術の研究が，鉄鋼・軽金属ともに盛んに進められている。鉄鋼では，マルテンサイトなどの従来型ナノ組織材料の解析が進んでいる。複合材料については、大学や独法を中心に、CNT ベースのナノコンポジットによる高性能化が引き続き活発に進められている。特に CNT の大量生産技術に関する基礎技術構築が盛んである。最近、グラフェンを用いた研究も活発になってきており、フラーレン含めた炭素材料の裾野が広がってきている。これに伴い、ナノ材料の分析技術は他地域をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	カーボンナノチューブ強化型の炭素繊維複合材料など，実用化を見通した応用開発が活発に進められている。金属系の複相組織材料などは，産学連携が活発である。複合材料分野では、ナショナルコンポジットセンターが設立され、単に産学の連携に留まらず、素材から応用開発に向けた垂直型の開発への取り組みがスタートした。自動車用途への用途へ活用展開の動きが今後進むと思われる。
	産業化	◎	→	ナノサイズの析出物によって強化した鉄鋼をナノハイテンとして JFE スチールが製品化した。自動車向け高級鋼板として競争力強化に寄与している。ナノ炭素材料の大量合成技術の産業化が活発に行われているものの、これを用いた産業化は導電性などの機能材的使用が主流で、構造材料用途への展開は目立った進展が乏しい。
米国	基礎研究	◎	→	Cu ナノ双晶，ナノ単結晶などの基礎技術で世界をリードしている。背景として，ナノ組織力学解析技術が他国に比べて発達していることがあげられる。Materials Genome Initiative のもと計算材料科学による組織設計が進んでいる。DOD, DOE などから予算配分を受けた国研が大学と多様な先端材料研究を推進しており、CNT などによるナノコンポジットなどの基礎研究が引き続き活発に進められている。高分子系はナノエレクトロニクス、フォトニクス分野が中心で、構造材料の基礎研究は少ない。
	応用研究・開発	◎	→	原子力材料などの開発技術で他国をリードしている。軍需利用の開発が多く行われているとみられるが，表には出ていない。高強度・軽量構造材料だけでなく、構造材料の多機能性（multi-functionality）や自己修復性（self-healing）へのナノテクノロジーの応用開発で他地域をリードしている。
	産業化	○	→	鉄鋼企業の競争力は高くないものの，軽金属（とくにアルミニウム）企業の組織微細化技術は高い。主力の航空機は CFRP にシフトしているが，繊維の微細構造制御は日本が優位である。軍需産業のハイテク化が最も進んでおり、先進技術としてのナノテクノロジーを使用した高パフォーマンス材料の産業化の近道となっているのが特徴である。
欧州	基礎研究	◎	→	ナノスケールフェライトーマルテンサイト DP 鋼，超微細粒材料などの開発で日本と同等レベルにある。計算材料科学との融合においては，日本をややリードしている。複合材料では、政策的にナノコンポジットやナノ強化繊維強化プラスチックの研究に巨額の予算がつけられており、活発に研究が行われている。分析、評価技術のレベルも極めて高い。また、欧州内での大学間連携の動きも目立つ。
	応用研究・開発	◎	↗	NANOfutures プログラムにおいて，ポリマー基複合材料，積層構造金属材料などの開発に重点化している。また、エアバスを中心とした産学連携型のコンソーシアムが設立され、開発を加速している。その拠点には独、仏、西、英など。自動車会社が参画する例も多い。
	産業化	○	→	自動車用鋼板などの開発で高い技術を持つ。独、仏に拠点を有する企業が産業を牽引しているが、ナノ組織制御構造材料の実用化は研究の白熱ぶりと比較すると遅れを取っている。

中国	基礎研究	△	↗	第 12 次 5 カ年計画において政府としてナノ技術に関する高強度、軽量化材料の研究開発費を大幅に増加している。特にアルミニウムやマグネシウムなど航空用合金材料およびナノ高強度、軽量化材料に集中している。また、カーボンナノチューブと炭素繊維複合材料については大学や研究所で基礎研究を開始しており、研究ポテンシャルは急激に上昇している。高分子系は中国科学院を中心に基礎研究が熱心に進められている。
	応用研究・開発	△	↗	米国と同様に，軍需利用が大きなニーズの一つとなっている。自動車の国産化に対応できる微細組織鉄鋼の開発を目指している。複合材料についは、カーボンナノチューブと炭素繊維複合材料に関し応用開発を行っているほか、高強度・軽量化フィルムの開発も行っている。企業によっては共同開発パートナーを探し、複合材料（3 軸織物など）や設備の技術開発を進めようとしている。高分子系については、北京化工大学など実学系の大学で応用研究が盛んである。
	産業化	○	↗	規格化，標準化などを戦略に掲げ，自国で評価技術を確立する動きが活発化している。鉄鋼, Ni, Al, Ti, Mg などの主な金属材料の生産量は世界一である。また、第 12 次 5 カ年計画において炭素繊維、高強度ガラス、カーボンカーボン複合材料開発や、風力発電用ブレード、繊維強化圧力容器、電線 CFRP 芯材の産業育成を進めている。高分子系については、一部ベンチャービジネス化の動きがみられる。
韓国	基礎研究	△	↗	日米欧のレベルには達しないものの，超微細粒材料研究などでは高いレベルの研究が行われている。応用研究を優先して行う方針が強く，第二次科学技術基本計画により基礎研究水準は向上してきている。高分子系についてはバイオ、IT 関連にシフトしている。
	応用研究・開発	○	→	TRIP 鋼の開発研究は，日本とともに高いレベルを持っている。鉄鋼以外は，際だった新材料、新プロセスの創出は無く、現時点では追従型といえる。国家支援および民間支援金を得て、ピッチ系炭素繊維の開発が始まった。
	産業化	○	↗	自動車向け Mg 合金シートは，世界に先駆けて量産化に入った。ナノ組織制御は，日本などとの共同研究を推進している。炭素繊維の生産系列設置が進んでいる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）物質・材料研究機構．“社会インフラ材料研究の新たな展開：安全・安心な持続性社会の構築へ向けて”．2012．NIMS 調査分析室レポート．
2）NANOfutures. “European initiative for sustainable development by Nanotechnologies”. http://www.nanofutures.eu/
3）特集・鉄鋼材料を活かすナノ組織制御技術．ふぇらむ（日本鉄鋼協会会報），2007, 12（12），p.748-794.
4）Weinan, E. Principles of Multiscale Modeling. Cambridge University Press, 2011, 488p.
5）Jinghong Fan. Multiscale Analysis of Deformation and Failure of Materials. Wiley, 2011, 512p.（Wiley Microsystem and Nanotechnology）
6）Drakonakis, Vasileios. CNT reinforced epoxy foamed and electrospun nano-fiber interlayer

system for manufacturing lighter and stronger featherweight composites. The University of Texas Arlington, 2012, Ph.D thesis.

7）The National Composites Center.
http://nccuk.com/

8）Technocampus EMC^2.
http://www.technocampusemc2.fr/

9）“乗用車「超低燃費タイヤ用ゴム」の技術開発に成功”．新エネルギー・産業技術総合開発機構. 2012-10-12.
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100157. html

10）総説特集：ゴムと免震・制振．日本ゴム協会誌 , 2012, 85（4）, p.115-149.

11）International Symposium on Polymer Physics（PP' 2012）Preprints. Chengdu, China, 2012-06-04/08, State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, China; University of Massachusetts, USA; MPI for Polymer Research, Germany; Hokkaido University, Japan, http:// http://polymer.iccas.ac.cn/pp2012/PP2012_PREPRINTS.pdf

3. 1. 4　環境を守る

3. 1. 4. 1　元素戦略・希少元素代替技術

（1）研究開発領域名

元素戦略・希少元素代替技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

レアメタル・レアアースなどの希少元素に依存することなく、比較的豊富に存在する元素や有機材料などを用いての、目的とする機能を備えた材料の研究開発。物質中の元素機能の理論的解明から、新材料の創製、特性評価の諸課題がある。多様な元素の特性に着目して「電子状態」「原子配列」「分子構造」などの微視的な観点から目的機能を如何に発現させるかを検討し、計測技術や計算科学も活用して構造・機能・反応をデザインする。資源の有効活用の観点から、希少元素を循環的に利用するシステムの確立に向けた技術開発や規制戦略も重要となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

価格変動、供給制限など資源の供給リスクがここ近年かつてなく高まっており、わが国のものづくりの基礎を揺るがしかねない状態に陥っている。この現象は日本ばかりではなく、レアメタル類の持つ多様な機能を取り出して高付加価値の製品と結び付け、より豊かな持続性社会を目指す科学技術イノベーションの核として取り組んできた欧米など先進諸国にとっても、それぞれの国の戦略的物質の供給リスクに危機意識を持つに及んでいる。

わが国ではすでに 1980 年代に当時の世界では minor metal と呼ばれる生産量も少なく市場的にも不安定な特殊な金属に対して、日本の産業に欠かせないものという政策的観点からレアメタルという名称を与え、31 鉱種（Li,Be,B,Ti,V,Cr,Mn,Co,Ni,Ga,Ge,Se,Rb,Sr,Zr,Nb,Mo,Pd,In,Sb,Te,Cs,Ba,Hf,Ta,W,Re,Pt,Tl,Bi およびレアアース）を特に重要なレアメタルと指定して資源開発の促進や備蓄などの施策をとってきた。しかし、21 世紀に入って透明電極に用いられる In の高騰・供給不足が起きたのを手始めに、各種のレアメタルで価格の激しい変動や供給の不安定が起こり出し、リーマンショック直前の 2007 年には多くのレアメタル類で価格が数倍にも高騰、単に資源開発や備蓄などでは備えられない生産への影響が懸念されるようになった。

［これまでの取組み］

対するわが国政府が 2007 年に打ち出した戦略が、元素戦略・希少元素代替の方向である。これは、従来の資源問題は上流の問題であるという捉え方から脱して、資源を素材化してさらにデバイス、部材として使う立場から資源の持続可能な利用、安定な高付加価値製品生産基盤の確保を目指すものであり、“減量化”、“代替”、“循環” がその柱として取り組まれた。さらに、この元素戦略・希少元素代替は、文部科学省元素戦略プロジェクトが長期的視点からの基礎研究で学術的基盤を構築しつつ、経済産業省希少金属代替材料開発プロジェクトが 5 年を目処とする短期的取り組みで実用化のステップに載せうるテーマを推進するという、省庁連携で取り組まれた国家プロジェクトであり、その提案の募集の際には相互にその役割分担に見合ったテーマを交換して審査するなど、その以前までにはな

かった協力体制で取り組まれたプロジェクトであった。

その後、リーマンショックによる一時的な資源価格の低下はあったものの、1 年もたたないうちに価格レベルは以前の状態に戻り、資源メジャーの M&A や占有化、さらには国家資本の積極的参入が続くなかで、中国の希土類輸出制限に端を発した 30 倍以上の希土類価格の暴騰が世界を襲い、資源問題は一過的な問題ではなく構造的問題として国際的に協調して対処すべきとの風潮が一気に強まった。米国では DOE が Critical Materials Strategy を 2010 年に発表し、Li, Co, Ga,Y,In,Te,La,Ce,Pr,Nd,Sm.Eu,Tb,Dy をキーマテリアルとして戦略的に供給の安定と代替技術、循環技術を確立すべき対象として挙げ、研究プロジェクトの組織化を始めた。DOE は 2011 年版（12 月）のキーマテリアルのリストに Mn,Ni を加えている。EU でも同様に Critical Materials として Li,Co,Ga,Ge,Y,Ru,Pd,In,Te,Ta,Pt および希土類を定め、フレームワークプログラムに接続するプログラム Horizon2020 の中で、積極的なテーマの拾い上げを行っている。

このような欧米に資源問題を喚起した中国のレアアース輸出規制とそれに伴う価格高騰であったが、先行していた日本の元素戦略･希少金属代替のプロジェクトの成果はまさに、これを予見したかのように優れた成果を上げた。その一つが磁石材料におけるディスプロシウム（Dy）減量化・フリー化への技術であり、しかもこれは二つの異なったアプローチから解決の方向性が示された。一つは結晶粒微細化技術であり結晶粒合径を磁区サイズより微細にすることで Dy の担っていた保持力の低下を防ぐ技術であり、他のひとつは結晶粒界面の制御で核発生を抑制し同じく保磁力を確保するものである。前者には微細で清浄な結晶粒制御のプロセス技術、後者は原子配置を三次元で観察できる解析技術がその基礎となっていることも見逃すことはできない。量的な面では研磨材料における酸化セリウム CeO_2 の減量化技術が優れた成果を上げている。これは CeO_2 そのものを代替するのではなく、研磨剤としての CeO_2 の使用環境を見直しコントロールすることで従来の数割程度の CeO_2 量での液晶ディスプレイ用などの機能硝子の精密研磨を可能としたもので、材料開発とその使用プロセス開発とが一体となって取り組んだ成果である。これらはすでに実用化を見通す段階となっており、一時は数十倍にまで高騰したレアアース価格を鎮静化させる要因のひとつともみられ、2012 年 3 月におこなわれた日米欧三極レアメタル会議においても「技術が経済を動かした典型的な一例」という発言もなされている。また、リチウムイオン二次電池の正極活物質に使用されるコバルト酸化物は安全性や供給の面で懸念があり、それを代替する目的で有機二次電池が日本から提案されている。競争の激しい太陽電池においても、化合物太陽電池に使用されるインジウムやガリウムなどの元素機能を代替するために、有機太陽電池の研究開発が盛んである。

このような日本での前進を踏まえ、欧米、韓国などでも戦略的元素に対する研究開発の取り組みが強められようとしている。その際特徴的なことは、日本では物質開発を通じてより手に入りやすい資源から高い機能の素材を得ることが目指されるが、欧米、特に米国では、このような戦略物質に依存しないデバイスや部材という方向が強く、強い磁石を開発するよりも、弱い磁石でも性能の出るモーターを設計する。戦略元素の減量化をはかるよりもリサイクラビリティを高め、リサイクルで全体の資源利用効率を高める、などという目的志向、トータルシステム指向の発想が強い。これらお互いの得意なアプローチを生かしつつ国際協調が始まる段階に来ている。

［今後必要となる取組み］

これまでの元素戦略・希少金属代替の我が国の優れた成果は、対象を絞りそこに技術と知識を集約する集中型の成果であったが、これは Dy、CeO_2 のように、新規の素材や従来代替性があまり問題にされていなかった素材に対しては解決力を発揮できても、触媒や電池材料、半導体のよう従来から多様な競合関係の中で勝ち残ってきた素材の代替にまで同様の短期間での成果を望むのは難しいことが予想される。また、以前からの代替技術は、すでに使われているものの資源問題対応としての代替という逃げの要素が強かったが、これからは、今後使っていく元素に対してそれをよりありふれた元素（earth-abundant elements）で機能発現をさせていく創成型の抜本的代替が求められる。そのためには、既存の元素がなぜそこで機能を発揮しているのかを科学的に理解し、理論的に設計し、それを物質化、材料化していく科学と技術の力が決め手となる（戦略イニシアティブ「元素戦略」CRDS-FY2007-SP-04）。そのための物質科学の研究基盤の構築、物質化・材料化に結びつけることのできることが求められている。

構造材料を例にとると、強度特性や腐食特性などを制御するために、様々な元素が大量に含まれているが、特に鉄鋼材料は、Cr、Mo、Nb、V などのレアメタル元素を含む。鉄鋼材料への元素添加は、元素を単独で活用する固溶強化などの方法と、他の元素との化合物（炭窒化物や金属間化合物）を形成して活用する析出強化などの手法がある。これらの元素機能については、添加元素種やその量と巨視的な材料特性の関係として経験的な知見が蓄積されているが、その発現機構はほとんどが不明のままである。したがって、削減・代替指針を得るためには、それぞれの元素が存在する格子位置や微視組織、ナノスケールにおける機能などの原理が解明されることが必要である。

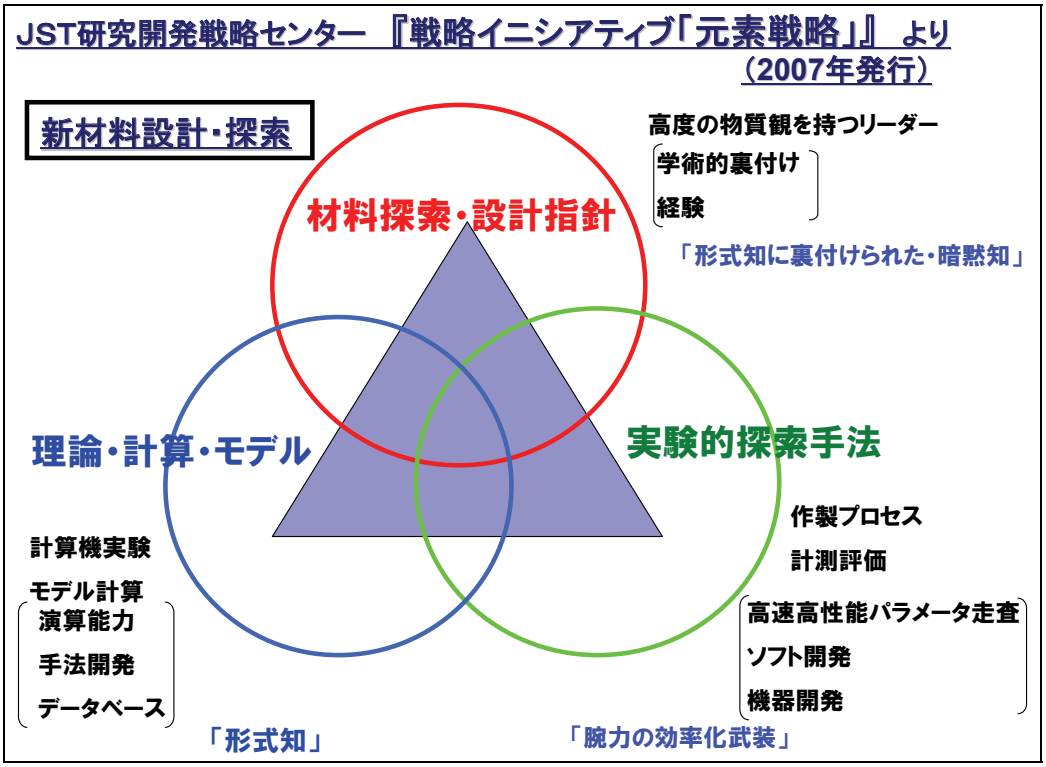
原理解明の方法として有力な手段の一つは、計算科学とナノスケール解析技術である。計算科学では、第一原理計算や分子動力学法などによって、固溶状態にある添加元素と母相の格子欠陥（転位など）との相互作用が議論されるようになってきており、個々の元素の機能解明の原動力となりつつある。また、電子顕微鏡などの先端計測・観察技術は、実際の材料中における元素の存在位置や濃度、それによる力学応答などを精密に測定することが可能になりつつあり、添加元素による巨視的特性の発現機構における素過程を捉えることができると期待される。

減量・代替と合わせて必要となる技術がリサイクルであるが、鉄鋼の場合、日本のスクラップ利用率は 25% 程度であり、欧米各国に比べて低い値である。課題の一つは、スクラップに含まれる不純物による品質の低下である。その対策としては、不純物元素を取り除く取り組みよりも、逆に不純物を積極的に特性向上に利用する研究を進めるべきとの考えがあり、一部でそのような取り組みも開始されている。

（4）科学技術的・政策的課題

こうした課題を推進する上でのポイントは、異分野の力を結集することである。元素機能の発現機構は、物理、化学、材料などにまたがる境界領域に位置し、既存の学問領域が単独で解決できるものではない。従来は経験則に基づいた材料設計指針が多かったが、これにサイエンスの視点による原理原則の指針を加えることが必要とされており、物理や化学の視点による元素機能の解明は、まさに材料挙動の原理に直結するものであり、材料の

革新につながる可能性が高い。しかし、この異分野融合は、自然発生的に進むことは一般的に期待できず、したがって、政策的に誘導される必要がある。また、この課題が「元素戦略」と呼ばれるように、元素種ごとのリスク分析を綿密に行い、優先順位と数値目標を明確に掲げた上で、効率的な取り組みを進めることが肝要である。さらには、都市鉱山などで指摘されるリサイクル技術の開発においては、製品の回収方法のシステム化などの要素も含まれており、科学技術行政のみならず、環境、総務行政とも連携が必要である。



（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［注目すべきプロジェクト］

・元素戦略をより根本的に進めるものとして注目されるのが 2012 年から動き出した、文部科学省の「元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞」（10 年間の事業）であり、材料創生、解析評価、電子論の 3 つのアプローチが手を組み、従来の材料研究期間のみならず、SPring8 や J-PARC、京コンピュータなどの基礎的・大型ファシリティーと積極的に結びついて、物質の本性を理解することで抜本的代替材料開発への道を開こうとしている。この元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞で取り上げられた対象は、磁石材料、触媒・電池材料、電子材料、構造材料であり、磁石材料では磁力発生原理を理論的に解明し、希少元素を全く使わない磁性材料を、触媒・電池材料では反応機構を電子レベルで解明し、高い触媒・電池特性をもたらす代替材料を、電子材料では電子状態の理論設計を精緻化し、汎用元素のみからなる電子部材を、そして構造材料では、原子結合・格子欠陥を理論的に解明し、日本における希少元素の総使用量を抜本的に削減できる構造部材を、それぞれ試作段階まで持って行くことを目指している。構造材料の中でも、特に主要社会インフラ分野である都市建築、交通（輸送機器）、産業機器、環境・

エネルギー、資源、航空・宇宙で使用される、いわゆる社会インフラ材料に関する研究開発が重要であり、その主要課題は“耐震化”、“軽量化”、“低温化”、“高温化”、“過酷環境化”、“長寿命化”であろう。

- より実用化に近い取り組みとして、経済産業省の「レアアース･レアメタル使用量削減･利用部品代替支援事業」があり、2012 年度は、省・脱レアアース・レアメタル技術開発のみならず、元素代替に伴って必要となる製品設計開発、実証研究、試作品製造、性能・安全性評価、および市中からの回収を見据えたリサイクルの実証を支援することにより、レアアース・レアメタルの使用量削減・代替をサプライチェーン全体で推し進めている。特に Dy を含むレアアース磁石について短期的に極限まで使用量を削減することをターゲットとした実用化事業支援を進めることを目指している。2012 年から開始した「未来開拓研究プロジェクト」において、高効率モーター用磁性材料技術開発を掲げ、レアアースフリーでネオジム磁石を超える磁石の開発をスタートさせた。これらはすなわち、米国が志向するようなシステム全体を考慮した取り組みに対応する戦略といえる。
- 新たな府省連携：上述の経済産業省「未来開拓研究プロジェクト」の希少元素関連プロジェクトは、文部科学省「元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞」との間でガバニングボードが設置され両省合同の体制で実施されることから、日本全体としての戦略的取り組みとして注目される。文部科学省「元素戦略プロジェクト」と経済産業省「希少金属代替材料開発プロジェクト」は 2007 年以降連携して運営されてきたが、この伝統はこうした形で 2012 年以降も引き継がれている。
- 他にも、「次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム」、「バルクナノメタル」、「シンクロ LPSO 相の材料科学」、JST の CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」、さきがけ「新物質科学と元素戦略」、「先端的低炭素化技術開発（ALCA）」、「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」、「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発（平成 23 年度で終了）」、「高効率石炭火力発電の適応に向けたフェライト系耐熱鋼の強度評価試験」など、関連プロジェクトが推進されてきている。
- 米国でも日本と同様のアプローチとして Energy Innovation Hub for Critical Materials が始動し、今後の動きを注目すべきである。さらに、“Materials Genome Initiative”が発表され、世界的に注目されている。これは計算、計測、データベースを組み合わせ次世代材料開発・発見のプロセスをより早く、より安価に、より予測的にすることを目的としている。
- 欧州では特にドイツが伝統的にこの分野に強く、米国同様、計算科学を積極的に活用している。
- アジアでは、産業界、学術界ともに、中国、韓国などの追い上げが著しい。
- 注目すべき研究機関として、米国：Oak Ridge National Laboratory（ORNL）、National Institute of Standards and Technology（NIST）、ドイツ：Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH（MPIE）、Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung（BAM）、Darmstadt University of Technology、スイス：Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt（EMPA）、英国：Imperial College、韓国：Korea Institute of Material Science（KIMS）、Pohang University of

Science and Technology（POSTECH）、中国：Chinese Academy of Sciences（CAS）傘下 Institute of Metal Research（IMR）、Shanghai Institute of Ceramics（SIC）が挙げられる。

・国際共同研究開発に関しての要望も国際的に高くなっており、日米欧三極レアメタル会議でも重要な話題に上っている。米国 DOE からは永久磁石の抜本的デザイン変更、レアアースフリー二次電池、蛍光体、レアメタルレス熱電素子材料、減レアアース燃料電池、レアアースの新規リサイクル / 製錬技術などが挙げられている。対欧州では JST の戦略的国際共同研究プログラムで「希少元素代替材料（Development of New Materials for the Substitution of Critical Metals）」が進められており、基礎理論や大規模コンピューターモデルを用いてナノサイズからミクロンサイズでの構造制御で、抜本的な代替機能の発現が目指されている。このような中で、アカデミアの側からも、2012 年 3 月の日米欧三極レアメタル会議を受け、国際材料学会（IU-MRS）の 2012 年大会で、「代替材料」のセッションが国際共同への準備として設けられた。そこに終結したテーマは、ITO 代替 ZnO2 材料、LiB 代替電池材料、Al2O3 ベース ReRAM 用材料、貴金属代替金属間化合物触媒、希土類蛍光体減量 SiO2 ゲル、Ba 系および V 系希土類フリー蛍光体、鉄化合物のスピン設計、水素機能材料、省希土類構造材料、格子欠陥制御、粒界すべりの分子動力学的解析、粒界集合構造の動的解析、遷移元素添加 MgH2 触媒の ab initio 解析、燃料電池中酸素挙動の第一原理解析、量子ビーム利用材料解析、元素戦略のためのデータコモン、材料科学データの電子共有化、コンピュータ・マテリアルサイエンス・イニシアティブ、多層積層膜制御技術、希土類・レアメタルリサイクル技術など具体的代替対象から、ab initio をはじめとする原理解析、量子ビームなどの解析技術、さらにそれら久データ共有、ファブリケーション、リサイクル技術と多岐にわたっており。これからの元素戦略での幅が広く奥の深い共同研究の方向を示している。

（6）キーワード

Critical material、EAE（earth abundant elements）、レアメタル、レアアース、循環、減量、代替、材料設計、組織制御、高耐震化、軽量化、長寿命化

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	これまでの元素戦略プロジェクトを進化させる形で、拠点形成型の 10 年プロジェクトが新たに動き出し、Spring8 をはじめとする基礎物性の解析・理論と結びついた取り組みが開始された。
	応用研究・開発	◎	↗	希少金属代替技術開発で短期間に多くの実用化可能な成果を上げており、現在も「レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業」など実用をターゲットにした開発が進んでいる。
	産業化	◎	↗	脱・消 Dy,、消 CeO など実用化の段階で国際的影響力を与えている。しかし、画期的な新製品には限りがある。
米国	基礎研究	○	↗	DOE が中心になって、これまでの REACT/ARPA-e program に加えてレアメタル代替に焦点を当て、EERE（Energy Efficiency & Renewable Energy）プログラムの中で、”Energy Innovation Hub for Critical Materials”のプロジェクトを 4 年間 100 万ドルで準備されており、そこでは ab initio など理論基礎科学からの代替材料開発を進めようとしている。
	応用研究・開発	◎	↗	DOE が主導で、”critical metal strategy”を 2010 年、2011 年と発表し、エネルギー戦略に係る戦略的レアメタルを、その重要性とリスクからランク付けし、14 種の Key materail を提示し開発目標を示している。なお、2011 年版では石油精製触媒関係として Ni, Mn が Key material に加えられている。また、省庁横断プログラムであるマテリアル・ゲノム・イニシアチによる計算、計測、データベースの統合的アプローチを開始。
	産業化	○	→	代替材料というよりは、クリティカルな金属に頼らない代替システムとしての開発に重点を置き、材料への依存度を低めようとする動きの方が先行している。軍事産業に支えられた開発をおこなっている。
欧州	基礎研究	○	↗	磁石、二次電池、触媒などを主たるターゲットに取り組みを強めようとしている。
	応用研究・開発	◎	↗	EU としては JRC が Scientific & Technological Report として“Critical Metals in Strategic Energy Technologies”をまとめ、SET-plan（Strategic Energy Technology plan）の中で開発対象を位置づけ、積極的に動き出しており、Horizon 2020 などの取り組みがすすんでいる。
	産業化	○	→	モーターなどの設計技術が強く、米国と同様にクリティカルメタルに依存しない設計技術で対応しようとの動きが強い。多国籍企業化を進め、また、アジアへの進出を図る。
中国	基礎研究	△	→	元素戦略的観点からの基礎研究の掘り起しとして目立った動きはまだない。
	応用研究・開発	○	↗	「納米稀土」などと一括されることが多く、代替、減量化よりは新機能開発として取り組まれているが、ナノコンポジット磁石など日本の元素戦略研究のキャッチアップとみられる研究が多数行われ出している。また、電気自動車関係ではナショナルチームを作って動き出しておりその中でレアメタル、レアアースに関する研究開発が位置づけられていく可能性が高い。
	産業化	△	→	代替、減量化などでは顕著な動きは見られなく、むしろ用途開発、環境対応などに主眼がいっている様子。

韓国	基礎研究	○	→	元素戦略的観点からの基礎研究の掘り起しとして目立った動きはまだ見えないものの、POSTECH GIFT（鉄鋼科学技術に特化した大学院）による人材育成など、特徴的な動きがある。
	応用研究・開発	○	↗	素材一般に「部品・素材競争力総合対策」を策定して企業と研究機関の結びつきを強めているが、元素戦略関係では KITEC の中に設けられた Korea Institute for Rare Metals（KIRAM）が米国の Ames 研究所と共同でレアメタル国際 WS を仁川で開催するなど意欲的な取り組みが始まっている。韓国機械・材料研究所（Korea Institute of Machinery and Materials, KIMM）の材料部門が 2007 年に独立した材料科学研究所（KIMS）が複合材料利用技術の開発をおこなっている。
	産業化	△	→	自国内の開発より日本のインジウム代替技術などを製品化の中に積極的に取り入れようとしている。独自の TWIP 鋼の開発などがある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）DOE “Critical Materials Strategy 2011”,
2）JRC Scientific & Technological Report “Critical Metals in Strategic Energy Technologies” 2011,
3）JST-CRDS 戦略イニシアティブ「元素戦略」CRDS-FY2007-SP-04

3. 1. 4. 2　分離機能材料による水処理

（1）研究開発領域名

分離機能材料による水処理

（2）研究開発領域の簡潔な説明

分離対象の性状や分離の目的に適した膜材料や吸着剤といった分離機能材料の開発を対象とした研究開発領域である。分離機能材料の工学的性能（強度、加工性、安定性、親和性）を目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

水の需要が近年世界的に増加する中、水資源の確保は喫緊の課題となっている。また、金属資源やオイルサンド、シェールガスなどの化石資源の採掘・採取は地下水汚染や汚染水の排出といった環境問題を引き起こしている。これらの課題に対応するものとして、分離機能材料による水処理技術はさらなる高度化が求められている。

［これまでの取組み］

分離機能材料としての水処理用分離膜は逆浸透膜（RO 膜）、ナノフィルタ（NF 膜）、限外ろ過膜（UF 膜）、精密ろ過膜（MF 膜）、イオン交換膜に大別され、高速で適度なコストで水浄化を可能とするものとして、すでに浄水から排水処理、生活・工業・農業用途まで幅広く活用されている。

この研究開発領域における基礎研究は米国、欧州がリードしている。米国では膜素材に関する研究や膜内部の透過現象シミュレーションなど幅広い研究が行われている。産業化においてもシステム提案力に強みをもつ欧米企業が積極的な展開を行っている。

日本ではナノテクを活用した膜素材の研究が次第に増えてきている。分離膜の技術開発水準は高いレベルを維持しているが、UF 膜、MF 膜では価格面で韓国、中国に押されている。

中国は基礎研究から産業化まで急速にレベルが向上している。排水基準の厳格化が応用研究を後押ししている。

シンガポールでは、National University of Singapore（NUS）および Nanyang Technological University（NTU）において、正浸透膜（FO 膜）やアクアポリンなどの新素材膜研究が盛んに行われている。また、NUS では、エレクトロスピニング法で作製したナノファイバーを分離膜に応用する研究が行われている。NTU では、バイオファウリングに関する基礎研究も盛んである。産業としては、Hyflux 社を中心に、海外プラントの受注が盛んである。

オーストラリアは下水再利用が先行していたが、このところ大型海水淡水化プラントが次々に稼働している。最近では、炭層メタン採掘随伴水の処理市場が立ち上がってきた。

サウジアラビアでは　King Abdullah University of Science and Technology（KAUST）が 2010 年に Water Desalination and Reuse Center を設立し、大規模な研究を進めている。世界の名だたる研究者、企業が何らかの形で関わっている。King Abdulaziz City for Science and technology（KACST）が　IBM と組んで、太陽光を利用した淡水化技術を

開発した。なお、ダウ・ケミカル社、東洋紡は、RO 膜エレメント工場をサウジアラビアで稼働させている。

［今後必要となる取組み］

既存の水処理用分離膜は、膜中のナノ細孔のサイズが不揃いで、微粒子の目詰まりを起こしやすい。バイオファウリングなど水処理膜性能を劣化させる要因への対処も完全とはいえない。また、力学的強度やオイルなど疎水性物質への耐性が低い。今後は、10 nm 以下の細孔をもつ多孔性高分子膜の製造技術を開発し、結晶化・高度架橋化・炭化などによる高強度化（数 10 ～数 100 GPa の弾性率）を実現していく必要がある。また、膜の表面構造ならびに科学的特性を制御し、バイオファウリングを抑制し、長期的に安定な水処理を可能にしなければならない。とくに、オイルサンドやシェールガスの採取に伴って排出される廃水には高濃度の油分が含まれており、浄化に必要なコストはエネルギーコストにも影響を及ぼすと想定されることから、このような廃水にも対応できる疎水性物質耐性のある水処理分離膜の開発が重要である。

油分の除去には、再利用や燃焼処理が容易である高分子ファイバー系の吸着剤、あるいは天然由来の有機物質の利用が重要となる。大量のオイル成分の除去には、活性炭がコスト面で利用できないからである。一方、水中に含まれる揮発性有機化合物（VOC）の除去には、有機溶媒に耐性をもつ選択透過膜の開発が重要となる。また、触媒などを担持した多孔性材料の開発も必要である。

近年、FO 膜を利用した水処理や発電の研究が注目されている。FO 膜法では高濃度塩溶液の浸透圧を駆動力とするため、ほぼ大気圧での水処理が可能となり、高圧ポンプや高圧配管を必要としない。そのため、低設備コスト、低エネルギーで水処理プロセスを稼動できると期待される。また、海水など高濃度塩水と河川水などの淡水間の浸透圧差を利用した浸透圧発電の研究が進められている。処理対象や発電などの目的に応じた FO 膜の新規開発が今後進むものと考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

分離機能材料は、実環境で性能と耐久性を示す必要があり、有望な材料に対して工学的な評価を行いつつ、同時に、素材の選択や形状の制御、製造プロセスの改善を行う必要がある。このような連携研究は、科学技術振興機構などでも実用化研究として実施されているが、通常、技術移転されるシーズの成熟度が低い。その結果、実用化に結びつかない開発案件が多くなっている。この問題を解決するには、ナノ多孔材料としての工学的な性能（力学的特性、加工性、安定性、親和性など）を極限まで向上し、目的に応じた実証試験を繰り返す必要がある。基礎と応用の仕分けでは研究が停滞する。

分離機能材料をはじめとする高分子材料の分野は、化学産業との連携を強めているが、高分子教育、特に物性物理学や化学工学の教育が十分に行われていない。高分子物性は、高度な基礎科学の一つであるが、材料科学としての重要性が十分に認知されておらず、その教育を企業に依存している。大学における高分子研究がサイエンスの先端研究に偏っており、技術の空洞化が起こりつつある。また、応用研究を担う人材が不足しているため、米国のような製品化と結びついた基礎研究が展開しづらい。高分子の基礎教育と同じく、実用化も企業まかせという風土を変える必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

高分子材料では、10 nm 以下の細孔を形成することが、相分離などの従来技術では困難であった。これは、ナノ細孔表面近傍の高分子鎖が高い分子運動性を有するため、溶媒の乾燥時にヤング・ラプラスの式に従って大きな収縮力が働き、ナノ細孔が消滅するからであった。しかしながら、最近の研究から、界面での高分子鎖の分子運動性や拡散現象が明らかになり、結晶化や架橋化技術の進展により、ナノ細孔の安定化が可能になりつつある。相分離技術に関しても、新しい展開が見られており、特にナノ多孔体の製造技術に進展が見られる。

市販されている水処理膜では、過去 40 年間、基本的な製造方法が変わっておらず、素材も限定されてきた。しかし、最近では、カーボンや無機多孔体、タンパク質などの新素材を利用することで、分離膜としての性能が大幅に向上している。

［注目すべきプロジェクト］

NEDO の省水型・環境調和型水循環プロジェクトにおいて、膜透過加圧エネルギーなどの削減を目指した RO 膜、NF 膜の研究開発が行われている。JST の CREST でも「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域において、過酷な条件、多様な処理対象水に使用できるロバストな RO 膜、NF 膜の研究開発が行われている。

（6）キーワード

逆浸透膜、限外ろ過膜、精密ろ過膜、イオン交換膜、正浸透膜、多孔性材料、ナノ細孔

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	ナノテクを活用した新素材の研究が次第に増えてきている。FO 膜の研究は特に活発化していない。水質評価の研究やバイオファウリングに関する研究が、大学を中心に盛んになってきている。
	応用研究・開発	○	→	RO 膜、NF 膜、MF 膜、UF 膜の技術開発水準は依然として高い。MF 膜、UF 膜は韓国、中国に押されつつある。
	産業化	○	→	RO 膜、NF 膜は産業としても優位を保っているが、MF 膜、UF 膜は、性能および品質では優れているものの、安価な韓国製、中国製にビジネスで押されている。国内の膜利用水処理施設の建設が活発ではないため、アジア各国に進出しているが、採算面は厳しいと思われる。
米国	基礎研究	◎	↗	膜素材に関する研究に参入する大学・研究機関の数が益々増えている。CNT やアクアポリンだけでなく、ポリエーテルスルホンのナノファイバー上に界面重合でポリアミドを形成するという研究も発表されている。また、RO 膜内部の透過現象のシミュレーション研究など米国ならではの研究も行われている。
	応用研究・開発	○	→	FO 膜などのベンチャー企業が相変わらず出てきているが、NanOasis 社が破綻との話もあり、事業化に壁がある。
	産業化	◎	↗	Dow Chemical 社は、傘下に収めた Omexell の UF 膜を前処理に配した RO 膜との統合生産システム提案で市場に攻勢をかけている。NanoH2O 社がポリアミド複合ＲＯ膜市場に参入し、次第に品揃えを広げている。一方で、老舗の Koch 社は水処理よりも食品・乳製品・飲料など特殊用途を中心に事業を進めている。General Electric 社は産業用水処理に軸足を置いている模様である。米国では、海水淡水化は環境問題を理由に進展が止まっているが、下水再利用は益々盛んである。
欧州	基礎研究	◎	↗	EU 全域において、分離膜・分離プロセスおよび脱塩技術の価値評価などの研究が盛んに行われている。オランダやドイツでは、UF 膜の研究やファウリングの研究が盛んである。
	応用研究・開発	○	↗	RO 膜、NF 膜の技術開発は弱いが、UF 膜、MF 膜の技術開発は盛んであり、新たな膜およびモジュールが開発されている。
	産業化	◎	↗	BASF 社が Inge 社を、Pentair 社が Norit 社を傘下に収め、巨大資本を背景にした水処理事業を展開し始めており、Siemens 社を追っている。Lanxess 社が RO 膜エレメントの工場を建設しており、Dow Chemical 社同様、イオン交換樹脂事業とのシナジー効果を狙っている模様。
中国	基礎研究	○	↗	膜研究の実力が上がってきている。水処理においては、原水の汚染が激しいため、促進酸化処理などの分解技術の研究レベルが向上している。
	応用研究・開発	○	↗	排水基準の厳格化に伴い、下水・産業廃水再利用の技術開発が盛んである。各開発区で、官学産の連携が進んでいる。
	産業化	○	↗	ヴォントロン社など、RO 膜、NF 膜の性能は向上しているものの、海外勢に追いつくところまでではない。UF 膜、MF 膜は、低価格を背景に事業拡大をしている。膜天、立昇が販売する膜は、性能も良好で、シェアを伸ばしている。下水再利用プラントが特に多く、海水淡水化プラントも増えてきている。

韓国	基礎研究	△	↗	SeaHERO プロジェクトをもとに、多くの大学が膜素材から水処理までの研究をしているが、レベルはまだ高くない。FO 膜研究、ファウリング研究など精力的に行っている。
	応用研究・開発	△	↗	技術導入が多く、自社開発は少ない。SeaHERO の海水淡水化デモプラント計画は、漁業者の反対により、うまくいっていないもようである。
	産業化	○	↗	Woojing Chemical 社が低価格を背景にシェアを伸ばしている。Koolon 社、Sumsung 社などが UF 膜で市場に参入開始。大手エンジニアリング会社 Doosan 社は、中東を中心に海水淡水化大型プラントを受注、急速に拡大している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

3. 1. 4. 3　放射性物質の除染・減容化などの基盤的技術

（1）研究開発領域名

放射性物質の除染・減容化などの基盤的技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

農地土壌や焼却灰、瓦礫、あるいは水中の放射性物質を検知・回収・安定化処理をすることで、被災した汚染地域の除染・汚染物の減容化を図ることが求められている。そのために必要となる汚染物と放射性物質の結合状態の解明や、検知・回収・安定化に必要となる吸着材などの新規開発、それらを組み合わせた除染・減容化技術に関する研究開発課題がある。物理的・化学的な放射性物質の動態・挙動解明を基盤技術とし、現地への適用までを視野に入れた除染・減容化システムの確立が重要となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

福島原発事故で飛散した放射性物質による汚染は広範囲におよび、避難住民の帰還や地元農林水産業の復興の妨げとなっている。周辺地域では、主にセシウム 137（半減期：約 30 年）が汚染核種となっており、表土の剥ぎ取りといった既存技術での除染が進められているが、剥ぎ取った汚染土の仮置き場所の確保が問題となっており、既存技術だけでの早期復旧･復興は難しい。事故現場周辺では、海水を含む大量の汚染水が存在する。また、これまでの汚染水浄化に使った放射性セシウムを吸着したゼオライト吸着塔や汚泥が敷地内に大量に一時保管されているが、それらの処理方法は技術的に未確立である。広範囲を短期間に除染でき、汚染土などの廃棄物を大量に発生しない、または発生してしまった汚染土・吸着塔などの減容化も含め、新しい効率的な除染・減容化技術が求められている。

これまで、原子炉建屋では一時的に注水した海水を含む大量の汚染水が蓄積され、継続的な冷却には汚染水浄化システムが組込まれた。当初は、放射性セシウムの除去を目的に、米国キュリオン社のゼオライト吸着塔と、フランスアレバ社の化合物によるセシウム吸着塔が設置され、現在では東芝製 SARRY（第二セシウム吸着塔）が稼動している。2012 年 9 月時点で、ドラム缶約 1,000 本（キュリオン社のセシウム吸着塔 384 本、東芝製 SARRY のセシウム吸着塔 54 本、アレバ社のセシウム吸着共沈殿物汚泥 597m^3）が敷地内に保管されているが、その処分および処理は未定である。2012 年 9 月からは新たに東芝・米メーカー製多核種除去設備「アルプス（Advanced Liquid Processing System）」を用いた Sr、Ni、Co など 62 種類の放射性核種の除去装置が稼働予定となっている（2012 年 9 月時点）。

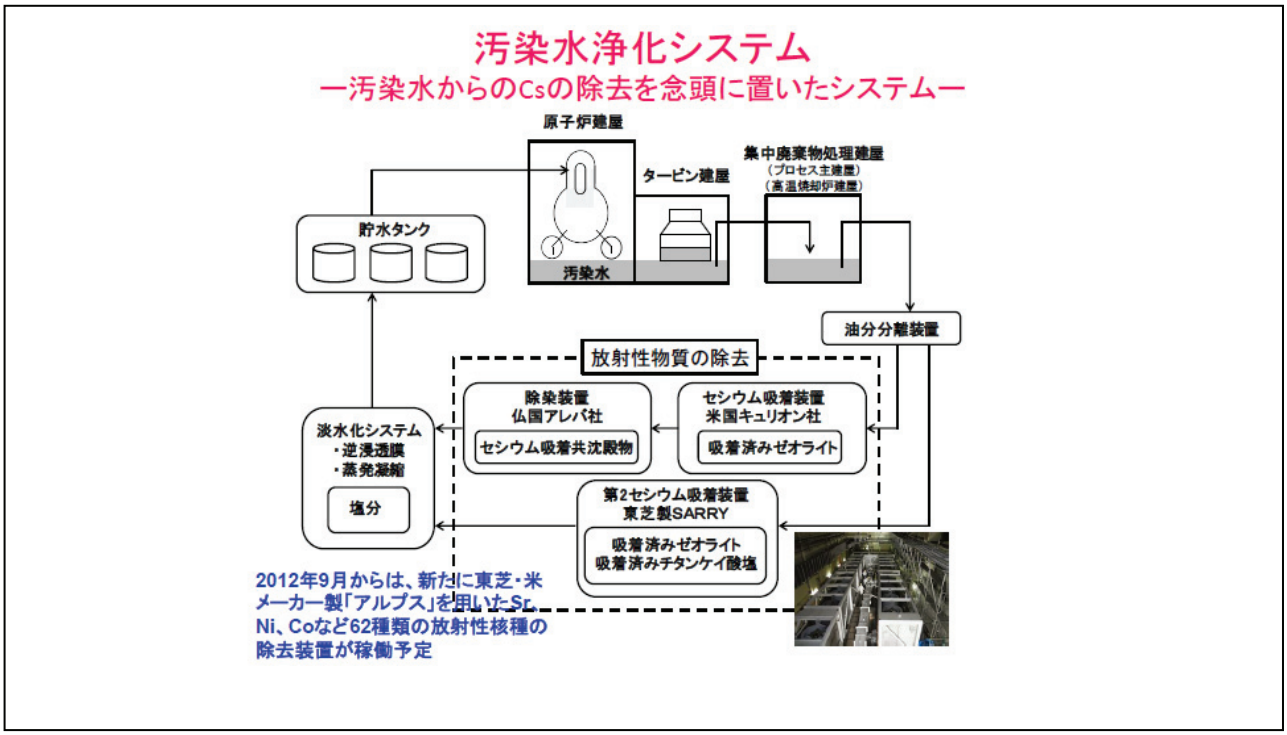


図　原子炉建屋の汚染水浄化システム

［これまでの取組み］

周辺地域では、農地・農業用水の除染による農業の早期復興を目指し、内閣府平成 23 年度科学技術戦略推進費を使い、農林水産省農林水産技術会議を中心に、関係各府省・研究機関などが参画し、農地土壌除染研究が実施された。当初は水系の汚染と、水を介した農作物への放射性セシウムの移行による農作物の汚染が懸念されていたが、現地土壌に多く含まれる微細な粘土鉱物が放射性セシウムの大半を吸着・固定していることが判明した（2012 年 1 月 16 日、平成 23 年度 科学技術戦略推進費「天然鉱物などの無機材料を利用した環境からの放射性物質回収・除去技術などの開発」プロジェクト報告会）。そのため、原子炉周辺の冷却水で実施されているような水溶化した放射性セシウムの無機鉱物などの吸着材による回収や、ファイトレメディエーションと呼ばれる放射性セシウムを選択的に吸収する植物による農作物への移行防止策は、除染方法として適当でないと考えられる。当面の除染方法としては、汚染された表土の剥ぎ取りと一時隔離･保管が最も有効であり、すぐに適用できる手段として 2011 年 12 月 14 日「除染関係ガイドライン」に反映された。また、除染対象物を土壌中の粘土鉱物に絞り込んだ放射性セシウム回収のための基礎研究が、平成 23 年度第三次補正予算（原子力災害環境修復早期確立事業費補助金）、および平成 24 年度日本原子力研究開発機構（JAEA）運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」で開始されている。

海外に関しては、米国スリーマイル島の原発事故（1979 年 3 月）対応、チェルノブイリ原発事故（1986 年 4 月）対応での経験に基づく基礎研究の記録はあるものの、それ以降の大規模な事故とそれに伴う除染の経験は皆無といえ、農地や住居地を積極的に除染・

復興するための技術開発もなされていない。

［今後必要となる取組み］

既存技術を用いた除染が進められつつあるなかで、除染の対象物としては、汚染土、特に土壌中の微細な各種粘土鉱物（放射性セシウムが選択的に固着されている）が最優先といえる。除染というよりは、むしろ除染で発生し一時保管されている汚染土の減容化が社会的な課題となっており、長期間の一時保管ではなく、早期に減容化し長期安定化できる新しい材料・技術の開発が最重要課題である。

小宮クリーンセンター　　飯館村長泥地区　　飯館村役場

図　「仮の」仮置き場

しかし、各種粘土鉱物のうちどのような化学的構造を持つ粘土鉱物に放射性セシウムが優先的・選択的に固着されているのか、またその固着状態（化学的な結合状態）はどのようになっているのかが未解明である。粘土鉱物からの離脱技術の開発を含めて、放射性セシウムの粘土鉱物との結合状態や動態の基礎的なメカニズム解明が喫緊の課題といえる。そのためには、現地の土壌に存在する各種粘土鉱物の化学的な構造解析と、放射性セシウムの結合状態解析のための各種分析技術を適用したメカニズム解明のための基礎的な実験と、理論に基づく動態予測のための計算科学に集中的に取り組む必要がある。上述のとおり、これらの最優先課題には、日本原子力研究開発機構を中心に、オールジャパンの体制（参画機関：物質・材料研究機構、国際農林水産業研究センター、産業技術総合研究所、電力技術中央研究所、北海道大学、東北大学、金沢大学、金沢工業大学、東京大学、首都大学東京、岡山大学、宮崎大学）で取り組みが開始されている。それらの基礎科学的な知見を得た上で、減容化・長期安定化のために必要な材料・技術を開発することが効率的ではあるが、地道な実験と計算科学によるメカニズム解明は短期間ですぐに成果が出るものでもない。上記のメカニズム解明と並行して、減容化・長期安定化のために必要となる材料・技術の研究開発は、すぐに着手・推進するべき課題といえる。

また、除染対象物は土壌の他に、焼却灰や瓦礫などの廃棄物にも拡張していく必要もある。土壌での研究成果を踏まえてメカニズム解明の対象を拡張しつつ、除染や減容化・長期安定化のために必要な材料・技術を研究開発することは、中期的に推進するべき課題と

いえる。さらに、原発事故現場近辺における除染や減容化・長期安定化のために必要な材料・技術の研究開発については、長期的に必要となり、対象は土壌、瓦礫などの廃棄物の他、海水を含む汚染水や、汚染水の浄化に使った吸着塔や汚泥なども除染の対象物となる。

（4）科学技術的・政策的課題

予備的な検討はセシウム試薬を用いた実験で進めていけるが、最終的な確認実験は放射性セシウムを用いて実施しなければならず、設備上の制約など、実施可能な機関が限られてしまう。そのため、オールジャパン体制での研究開発を推進しても、成果創出の速度も限られてしまうことが懸念される。

原発事故被災地の除染は、環境省が総括責任を負い、科学技術面は文部科学省が日本原子力研究開発機構を中心に全面的に支援する体制となっている。また、農地などの除染は、農林水産省が分担しており、研究開発の成果を現地で実証し、拡大していくためには、これら関係府省の緊密な連携が欠かせない。加えて、地元自治体の協力も継続して必要となってくる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

水系で唯一放射性物質による汚染が確認された現地の学校にあるプールでは、日本原子力研究機構が除染方法を確立し適用済みである。原発事故現場と同様の、放射性セシウムを選択に吸着する無機鉱物を利用した除染方法であり、日本原子力研究機構のホームページで公開されている。（http://www.jaea.go.jp/fukushima/josentebiki.html）

汚染された農作物や落ち葉、雑草などの植物の除染については、放射性セシウムを封じ込めた状態で焼却処分する装置・技術（植物残さ焼却処理技術）が日本原子力研究機構を中心に開発されている。その他、除染の実証事業については、日本原子力研究開発機構発行の報告書に記載されている。（http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report.html）

焼却技術を汚染土壌の減容化に応用する技術開発も、日本原子力研究機構と農業・食品産業技術総合研究機構との共同研究が進められている。また、土壌の剥ぎ取りを効率的かつ安全に行う方法として、食品の増粘剤などに用いられる「ポリイオン」を散布し、表土のみを固化させて回収する技術の有効性も実証されている。さらに、放射性セシウムを選択的に固着している粘土鉱物は微細粒子であるため、分級による土壌のふるい分けにより、微細粒子側に放射性セシウムを濃縮する方法や、土壌の洗浄による除染についても一定の効果が認められている。

材料技術関連では、「除染：放射性物質吸着のための鉱物データベースを構築」、「除染：汚染水中のヨウ素とストロンチウムの除去材開発」、「吸蔵：セシウムを長期間、安定的に閉じ込める」といった成果が出つつある。Vol.12 No.5 ＜ 6 月号＞「3.11 東日本大震災」2012.6.30 発行（http://www.nims.go.jp/publicity/nimsnow/vol12/201205.html）

また、物質・材料研究機構は、無数のナノ細孔（メソポーラス）を持つプルシアンブルー結晶構造体を開発しており、産業技術総合研究所でも、高選択・高効率な放射性セシウム吸着能を示すプルシアンブルーナノ粒子を開発している。これらを基に、放射性汚染物焼却灰の安全な処理法への適用を提案している。

［注目すべきプロジェクト］

平成 24 年度日本原子力研究開発機構（JAEA）運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」：日本原子力研究開発機構を中心に、オールジャパンの体制（参画機関：物質・材料研究機構、国際農林水産業研究センター、産業技術総合研究所、電力技術中央研究所、北海道大学、東北大学、金沢大学、金沢工業大学、東京大学、首都大学東京、岡山大学、宮崎大学）で取り組み中であるが、放射性セシウムの土壌などとの結合・離脱メカニズム解明により、試行錯誤的に行われている上記技術に科学的に効率のよい手法が指針として示されることとなり、除染・減容化を一気に高度化できる可能性が大きく、早期のメカニズム解明が期待される。

（6）キーワード

放射性セシウム、放射性廃棄物の長期安定化、土壌、粘土鉱物、吸着材料、プルシアンブルー

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	絶対に安全とされてきた原発の事故を想定した基礎研究は、国からは一切認められず、原発からの低レベル汚染物質の長期安定化・保管や原子炉周辺からの放射性物質漏洩防止関連で細々と基礎研究がされていたのみ。3.11 をきっかけに、急遽基礎研究が動き始めた。NIMS や AIST では、通常より高いセシウム吸着能を持つナノ構造プルシアンブルーを開発している。
	応用研究・開発	△	↗	基礎研究同様に、原発の事故を想定した応用研究・開発は国からは認められず、民間でもその必要性は認められておらず、原発からの低レベル汚染物質の長期安定化・保管や原子炉周辺からの放射性物質漏洩防止関連で細々と応用研究・開発がされていたのみ。3.11 をきっかけに、急遽応用研究・開発が動き始めた。
	産業化	△ / ○	↗	同上。除染は、汚染土壌の表皮剥ぎ取りと一時保管・隔離、高圧洗浄のような既存の技術によって対応。広範囲を効率的に除染する技術や減容化技術は、今後の研究開発次第。 水処理では、途中から東芝のシステムが第二吸着塔として組込まれ、キュリオン社やアレバ社のシステムに置き換わっている。
米国	基礎研究	△	↘	スリーマイル島の原発事故対応での記録有り。
	応用研究・開発	△	↘	同上。
	産業化	○	↘	福島現地での汚染水の除染にキュリオン社の水浄化システムが利用されている。
欧州	基礎研究	△	↘	チェルノブイリの原発事故対応での記録有り。基本的に封鎖・隔離での対応が中心であったため、生物学的な手法による農作物への放射性物質の移行防止などの受動的な対応策が中心であった。
	応用研究・開発	△	↘	同上。
	産業化	○	↘	福島現地での汚染水の除染にアレバ社の水浄化システムが当初利用されていた。
中国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	×	→	
	産業化	×	→	
韓国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	×	→	
	産業化	×	→	

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

3. 2　バイオナノテクノロジー

3. 2. 1　生体材料（バイオマテリアル）

（1）研究開発領域名

生体材料（バイオマテリアル）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

生体材料の用途に応じた生体適合性などの特性向上、生体材料と生体との相互作用を積極的に活用した新規応用分野の開拓を行う研究開発領域である。生体材料と生体との界面に起因する現象を材料物性と生体反応の双方から理解し、医療に貢献する材料を提供することを目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

我が国では急速に高齢化が進み、医療分野においても健康寿命の延伸、診断・治療の低侵襲化、医療コストの削減などさまざまな課題を達成する必要がある。生体材料には高分子、金属、セラミクスのいわゆる三大材料のほか、タンパク質や多糖類といった天然材料、さらにはこれらの材料を組み合わせた複合材料が用いられている。これらの材料は、注射器、カテーテル、手術用具、ステント、人工臓器など臨床分野のさまざまな用途に利用されており、再生医療においても重要な役割を果たしている。それぞれの用途に適した生体材料の開発は医療技術の基盤をなすものであり、優れた生体材料が医療に及ぼすインパクトは極めて大きい。

［これまでの取組み］

日本は独自の生体材料を数多く開発しており、基礎研究ではトップレベルにあるが、その成果を産業に結びつける点に問題がある。米国、欧州は研究レベルでは日本と同等かやや劣るが、産業への展開は日本より優れている。中国、韓国はまだ独創的な研究は少なく、日米欧でなされた研究の延長や焼き直しが多い。ただし、論文数は急速に増えており、さらに産業化を国を挙げて支援する仕組みを整えつつある。とくに、中国の研究発展は著しく、生体材料研究の分野でも、中国－米国、中国－欧州の枠組みでの国際会議が増えており、存在感を増している。研究者の数が多く、また国外での活躍する中国人ネットワークも充実しており、いずれ欧米に肩を並べ、我が国よりも優位に立つのも時間の問題だろう。

再生医療用材料に関しては、シンガポールでは政府が国策として力を入れ、海外から多くの研究者を招き研究開発を進めており、研究水準も高く、海外企業と連携した製品化も行われている。

近年、インド、イラン、ブラジル、アルゼンチン、チリ、南アフリカなどの新興国の研究発表も増えており、国内需要の高まりと共に、今後これらの国でも研究開発が盛んになるものと思われる。

医療用チタン合金・コバルトクロム合金の開発においては、日本の研究レベルは世界的に見て高いが、生体内分解性材料の開発では、ドイツ、カナダ、中国が先んじている。また、新たな医療用金属材料の開発と実用化の面では、米国企業が Zr-Nb 合金や Fe-Pt-Cr 合金

製製品を販売しており、実績がある。企業の開発意欲が高いこと、医工連携体制が進んでいること、医学に明るい工学者が養成されていること、などによると思われる。

［今後必要となる取組み］

生体材料は生体やその成分に直接接触させて利用されるため、可滅菌性、非毒性といった必須の特性を満たした上で、利用目的に応じた生体適合性（生体親和性）、機能性、耐久性をもつ必要がある。

生体適合性には多くの性質が含まれるが、生体材料の表面（生体との界面）の制御が重要となる界面的適合性と材料全体の力学的特性によってもたらされる力学的適合性に大別される。

界面的適合性では材料表面と生体との相互作用とその結果引き起こされる生体反応を考慮して、異物反応などを回避できる必要がある。たとえば、血液と接触するような用途では、生体材料に血液適合性（抗血栓性）が求められる。これまで血液適合性をもつ高分子材料が開発され実用に供されてきたが、血液適合性の発現機構は明確には解明されておらず、材料開発は試行錯誤で行われている。生体材料が使用される生理的な環境における材料表面の状態と界面的適合性との関係を解明し、生体材料設計の指針となる基盤を構築する必要がある。

力学的適合性は脊椎固定器具、人工骨、人工関節といった機械的強度が要求される医療器具においてとくに重要であるが、生体材料の力学的適合性に伴う不具合は全て解消されるに至っていない。例えば、脊椎固定治具として骨にかかる荷重を保持するためチタン合金が使用されているが、生体骨よりも高い弾性率のため、長期埋入に伴いしばしば周辺骨の吸収を引き起こす。近年進展が著しい金属組織の微細構造制御技術を活用して接触する生体組織との力学的特性との差を小さくし、力学的適合性を向上させる必要がある。さらに、マグネシウム合金あるいは鉄合金といった生体内分解性材料を利用した加齢に伴う患者骨組織の機械的特性変化への対応などに向けた研究開発などが必要である。

生体適合性は生体材料が生体と共存するために必要な性質であるが、今後は生体との相互作用を積極的に活用して新たな機能を生体材料に付与していくことも必要である。たとえば、血液適合性に加えてがん細胞に対して選択的接着性を示す生体材料が開発できれば、最適な治療方法の選択や診断に応用できる。幹細胞への選択的接着性を付与できれば、再生医療への応用が開ける。再生医療の分野では生体組織工学における細胞の足場材料も生体材料であるが、足場材料により細胞の増殖や分化を制御できれば、大きく欠損した部位や複雑な形態の組織や臓器の再生に貢献できる。これらを実現するためには、材料表面の化学的特性や微細形状が細胞に与える影響を考慮した材料設計が必要となる。さらに電気的性質や磁気的性質などを生体材料に付与し、細胞機能の制御に活用するとことも検討する必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

生体材料研究では、生命科学・医学や生体計測技術などの異分野が医療製品開発にベクトルを合わせて連携する必要がある。

有機化合物、高分子、生体物質による細胞の生理活性誘引については、広く研究さてきた。金属、セラミックスを用いた場合も同様の生理学的活性は誘引できると期待されてい

る。しかし、固体材料により誘引できる生理学的活性については知見が少なく、多くの基礎的な解析が必要な研究段階である。日本の企業では、この種の基礎研究に研究資金を投じることはほとんどなく、進展の遅れが課題となる。

人工骨などの開発において必要な情報である骨の圧縮強度やヤング率などは局所的には調べられているが、例えば頭蓋骨と大腿骨では、骨内部の構造も特性も違うため、体の各部位について調べ、情報を整備する必要がある。

生体内埋入材料の開発には、生物学的安全性試験や治験など、コストがかかる。生体内における材料・デバイスの生物学的安全性試験などを学術的観点から合理化する検討が必要である。同時に、生体外で、低コストで検証可能な評価系などの開発も中長期的な視点から必要になる。

全世界の医療機器市場において日本の占める割合は 10%程度であるが，基礎研究や特許出願の状況から見ると，日本はさらなる市場規模拡大が見込まれるだけの基盤技術を持っているといえる。また、生体材料の各分野において，比較的バランス良く基礎研究の知見構築がなされているので，日本がイニシアティブを取れるチャンスがまだ残されていると考えられる。このようなポテンシャルを有する技術に関して詳細かつ大規模な調査，洗い出しを行いながら，重点分野を定めていき，日本の生体材料，医療機器のさらなる海外進出を加速させる施策の立案が有効と考えられる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

生体組織は有機物質や無機物質などがナノメートルレベルから高度に組織化されながら組み上げられたボトムアップ型の高次構造を持っており，それゆえに様々な生理学的機能や優れた機械的特性を実現している。生体材料開発においても，この精緻な構造に学びつつ，成分や組成だけを生体組織に近づけるだけでなく，ナノ構造，高次構造の面でも精密に制御された新素材開発がきわめて重要である。その展開として，分子レベルで精密に制御された合成プロセスを用い，機能を発現する物質をナノメートルサイズで設計し，それをビルディングユニットとして高度に組織化することにより，種々の機能が融合した新素材を構築する技術が進展すると予測される。これらの材料設計は，品質や供給の安定化を図りやすい人工材料を基盤として高度医療を達成できることから，移植治療などの軽減をもたらし医療コストの削減にも結びつく社会的にも意義深い技術である。

工業材の中で強度に優れた PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）材の医療応用が検討されている。主として整形外科分野、中でも強度が要求される脊椎分野での適用検討が進んでいるが、他の領域への検討も広がりつつある。現在の生体材料研究の多くは表面修飾や生体活性分子の固定化、細胞との相互作用評価に主力を割かれているが、物性に優れた材料開発の重要性を示す一例である。特に我が国では、生体材料研究とバイオエンジニアリング・バイオメカニクス研究が乖離しており、材料物性・デバイスデザインの課題に取り組む研究者が少ない。米国では特にバイオメディカルエンジニアリングとして、新規治療法・デバイス開発に取り組んでおり、このような弊害がなく、新規材料・治療法開発がスムーズに進んでいると思われる。

金属材料については、生体内分解性材料として Mg 合金、純 Fe あるいは Fe 合金の適用が今世紀に入り注目を集めている。すでに Mg 合金製生体内分解性ステントについては

欧州・米国で臨床試験が実施されており、新規材料や表面処理技術開発が活性化している。元々 Mg 合金開発の盛んなドイツ、中国で非常に活発であり、次いでオーストラリア、ニュージーランド、韓国、日本と続く。骨折固定材・脊椎固定材への適用も検討されており、それに伴いベンチャー企業の活動や ISO、ASTM 規格化の動きも活発化している。

［注目すべきプロジェクト］

JST の戦略的イノベーション創出推進プログラムにおいて、平成 24 年度に「革新的医療を実現するためのバイオ機能材料の創製」が開始された。将来の革新的医療を実現するために必要なバイオ機能材料を開発し、さらに、医療デバイスのプロトタイプの作製と動物実験の評価までを目的として実施される。

（6）キーワード

医療機器、生体適合性、再生医療、足場材料、組織制御、生体内分解性材料

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	高分子材料に関する研究は世界をリードしているが、特定の疾患やデバイスを意識した研究は少なく、生物学レベルでの基礎的検討が多い。医用セラミックスや複合材料などの基盤技術研究については高い水準にある。金属材料については、合金開発に取り組む研究者が多いが、米国の開発潮流の後追いの面も否めない。医療機器デバイスメーカーが少ないため、デバイス開発に必要な材料研究が少ない。
	応用研究・開発	○	↘	高分子関係の特定技術以外では、応用を意識した研究は少ない。医療機器開発を担う企業がほとんどなく、そのため大学などで行われる研究は基礎研究の域を出ず、開発力が不足している。革新的な治療法に結びつく研究は少ない。
	産業化	△	→	高分子材料関係の大学発シーズ技術に関するベンチャー企業設立の努力が実り、幾つかの技術が実用化されつつある。しかし、循環器系生体材料や人工関節など、市場規模が高く、超高齢社会に向けて需要の増加が見込まれる分野の国内生産比率が低い。全体として革新的医療技術の実現を担う医療機器メーカーがなく、大学などで生まれた新しい技術が医療機器開発に結びつくケースは限られている。
米国	基礎研究	○	→	治療手法やデバイスに直結するアイデアを検討する動きが強い。再生医療，ドラッグデリバリ、皮膚などの軟組織修復再生を指向した研究が多く見られる。応用展開を視野に入れながらも、材料レベルから開発・改良を行う動きがあり、研究水準は高い。バイオマテリアル単独で取り組むというよりは、バイオメディカルエンジニアリングという枠組みで、材料研究者、工学研究者、医学者、生物学者の連係で取り組む研究が多い。
	応用研究・開発	◎	→	治療現場に直結するようなアイデアを提案・研究する動きが活発である。デバイス・治療法開発の観点では、オリジナルな発想・組み合わせが生まれており、この分野での研究者の層が厚い。無機材料系としては、ホウケイ酸塩ガラス系ナノファイバーを用いた新規創傷被覆材の開発が特筆される。
	産業化	◎	→	企業数や売り上げ規模は日本を大きく上回り、培養皮膚，軟骨などの再生医療材料については世界トップの位置を維持している。十数年来強力に推進されてきたバイオベンチャーのスクラップ・アンド・ビルドが最近進行しており，製品の質の維持や保証が今後の課題となりうる。
欧州	基礎研究	◎	→	現行デバイスの問題点解析や、材料と生体組織間の反応を系統的に捉え直し、in vitro レベルでのスクリーニング手法に帰結させる、というような、学問的な研究に取り組む流れがある。また、材料の基礎物性に関する研究に強みを持つ。
	応用研究・開発	○	→	感染防止材や骨組織再生関連の研究が多く行われている。また生体吸収性 Mg 合金製ステント材の臨床試験などが進められており、シーズ技術の製品展開は早い。
	産業化	◎	→	CE マークを取れば、医療者の判断で使用できるため、産業化のスピードは早い。EU 全体を市場となるため、中小・ベンチャー企業による開発が盛んである。日本の企業も、今や市場投入の最初の舞台に欧州を選んでおり、臨床試験の実施が新たな医療機器開発の活性化を促す側面もある。歯科用金属材料や高分子材料や、材料加工を扱う企業の国際競争力が高い傾向にある。ドイツでは培養皮膚、軟骨の商品化が活発に進められている。

中国	基礎研究	○	↗	独創的なコンセプトには乏しく、欧米の先行研究と酷似した研究が散見するが、研究レベルは年々上昇している。生体材料全体にわたって論文や国際会議などにおける研究報告が増加傾向にある。特に高分子、無機材料、ドラッグデリバリに関して顕著である。
	応用研究・開発	○	↗	特定デバイス・領域を想定した研究が行われており、基礎技術が速やかに製品化に繋がっていく印象があり、先端的な臨床研究が今後増加すると思われる。一方で、現行デバイスの問題点解析などの分野は弱い。
	産業化	○	↗	自国内に大きな市場を有するため、医療機器メーカーは海外展開の必要がなく、他国メーカー・研究者との連携により開発ペースが早い。単一組成の生体素材開発や供給を取り扱う企業が多いのが特徴である。高度医療機器や複合化素材については今後の進展を注視する必要がある。
韓国	基礎研究	○	→	研究の担い手が少ないため、行われている研究は限られている。しかし、分野によっては水準の高い研究も見られる。三次元組織工学用材料や金属材料、遺伝子キャリアに関する研究報告が増加傾向にあり、生体適合性向上のために表面修飾の手法を利用した研究に関する論文が多く見られる。医療機器メーカーが限られているため、基礎的な検討が多い。
	応用研究・開発	○	→	全領域をカバーするには至っていないが、特定のデバイス・疾患領域で、技術水準も高く、実用化を意識した研究も行われている。人工関節や再生医療に関する特許の比率が高い。特に皮膚再生技術に関しては 5 地域の中でも出願数がトップレベルにある。
	産業化	○	↗	特定のデバイスについて、製品化は進んでいる。特に再生医療分野での産業化に国をあげて力を入れている。国内市場だけでは採算がとれないため、海外市場展開が必須であり、ニッチ市場を目指した戦略的な開発が進められている。歯科用インプラントは国内企業が市場占有率 1 位を占めており、世界 10 位以内のメーカーも存在する。高分子製の脊椎修復材料の市場化も活発に推進している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）筏義人．生体材料学．産業図書，1994，280p.
2）厚生労働省．新医療機器・医療技術産業ビジョン，2008，39p.
3）日本能率協会総合研究所．医療機器産業の現状，2009，12p.
4）浅岡憲三．バイオマテリアル産業の問題点 - 医療用具の市場動向から -．バイオマテリアル - 生体材料 -，2004，22，p.252-257.
5）廣瀬輝夫．バイオマテリアル産業の日米比較研究．バイオマテリアル - 生体材料 -，2004，22，p.277-282.
6）European Patent Office．http://www.epo.org/
7）Wray, P．‘Cotton candy’that heals? Borate glass nanofibers look promising．Am. Ceram. Soc. Bull..．2011，90（4），p.25-31.
8）株式会社シード・プランニング平成 22 年度中小企業支援調査（再生・細胞医療の産業化に向けた基盤整備に関する調査）報告書，2011.
9）The 9th World Biomaterials Congress，Chengdu，China，2012-06-01/05．https://www.wbc2012.com/index.php

3. 2. 2　ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）

（1）研究開発領域名

ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ポリマー、シリカなどの材料で構成されるナノ粒子をキャリアとして利用し、薬物を患部などに選択的に送達することを目的とした研究開発領域である。生体との相互作用を考慮したキャリアの設計を通じ、生体中でのキャリアの空間的、時間的部分や患部における薬物の放出を制御し、患部に特異的な診断・治療技術の確立を目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

通常体内に薬物を投与すると全身に分布してしまい、その結果、副作用が現れたり、患部での薬物濃度が不十分で治療効果が十分に達成できないことがある。それに対し、ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）はキャリアを使って患部に選択的に薬物を送り届けることができ、治療効果を向上させ、副作用を軽減させることができる。多大なコストが必要となる新薬開発に比べ、既存の薬物を患部へ送達するための最適化を行うナノ DDS 医薬品の開発プロセスは低コスト化が可能であり、さらに、副作用対策費や入院費・通院費の抑制が期待できることから、総医療費の抑制にも貢献できる。このことは米国において一部の制がん剤 DDS で明らかになっている。また、近年注目されている核酸やタンパク質といったバイオ医薬品は体内では不安定であるため、これらを実用化するためにはナノ DDS 技術が必要不可欠であると考えられている。

さらに、核磁気共鳴画像法（MRI）、ポジトロン断層法（PET）といった画像診断技術で必要とされるトレーサや造影剤をナノ DDS に搭載することにより、ナノ DDS の患部への集積から治療効果までを画像診断で確認できるようになり、より精密で確実な診断・治療が実現できるものと期待される。また、生体に対して安全な光や超音波といった物理エネルギーを利用した治療法とナノ DDS とを組み合わせることにより治療効果を高めることができると考えられる。

［これまでの取組み］

薬物のキャリアとなるナノ粒子には、毒性がないことや薬物を効率よく搭載できることといった基本的な性質のほかに様々な性質・機能を付与する必要がある。ナノ粒子を血中に投与した場合、細網内皮系とよばれる異物排除機構によりナノ粒子はそのままでは異物として認識され排除されてしまう。そのためこのような認識を回避できるようナノ粒子の表面を生体適合化する必要がある。肝臓などによる捕獲、腎臓からの排せつを回避するためにはナノ粒子の粒径を適切に制御する必要がある。薬物を患部に送達するには、ナノ粒子は血管を通過し、患部組織に浸透する必要がある。腫瘍組織（固形がん）では正常組織の血管の物質透過性が高く、リンパ系が発達していないため、腫瘍組織に到達した物質は蓄積しやすい。これを EPR 効果という。EPR 効果を利用して 100 nm 程度の粒径のナノ

粒子は血管を通過して腫瘍組織に到達することができる。また、膵臓がんのように間質が多い腫瘍組織でも、粒径を精密に制御することでナノ粒子を浸透させることができる。このようにナノ粒子の粒径も重要な性質である。以上のような性質を満たすナノ粒子の実現に向けて、シリカのような無機材料、高分子材料、脂質やたんぱく質といった生体分子など多様な材料を対象に研究開発が進められてきた。

ナノ DDS 研究への関心は世界的に高まっており、各地でナノテク融合拠点が設立されて分野融合的な研究開発が行われている。日本は材料開発で高い優位性を有している。高分子ミセルのようにキャリアとして優れた性質をもつナノ粒子が開発されている。大学・公的機関における研究レベルは非常に高い。米国では国立がん研究所（National Cancer Institute）や大学に設置されたナノテク研究拠点を中心にレベルの高い研究開発が行われているが、材料開発の面ではそれほど水準は高くない。欧州も大学・公的機関における研究は高いレベルにある。遺伝子送達システムの研究開発などにおいて世界をリードしている。中国では 2003 年に設立された National Center for Nanoscience and Technology においてバイオナノテクノロジーの研究を推進しており、ナノ DDS は高い関心を集めており、関連する論文・特許数は指数的に増加している。韓国は欧米や日本に及ばないものの、材料開発に高い技術力を有しており、その研究水準は上昇している。

［今後必要となる取組み］

固形がんへの薬物送達を目的としたナノ DDS は EPR 効果を利用できるが、EPR 効果を利用できない組織を標的とするナノ DDS（ターゲティング型 DDS）では、血管を構成する細胞にナノ粒子が取り込まれ、標的組織の側に分泌される必要がある。そのためには標的組織の血管細胞に特異的な細胞外受容体の同定し、その受容体に結合するリガンドをナノ粒子の表面に導入する必要がある。

近年、高い注目を集めている siRNA や miRNA 阻害剤などの核酸医薬に関しても、実用化に向けて技術面での鍵を握っているのが、核酸分子を標的まで送達し、細胞内で効率的に機能発現させることのできるナノ DDS の開発である。現在までに世界中の公的研究機関や大手製薬企業がその開発に躍起になっているが、臨床的に未だ有用なシステムが開発されていない。核酸医薬の場合、患部組織に送達するだけでなく細胞にナノ粒子が取り込まれなければならない。ここでもナノ粒子の表面に導入されるリガンドが重要な役割を果たす。ナノ粒子を構成する高分子などの材料を精密に設計する技術を駆使して、核酸医薬を活かすナノ DDS を開発する必要がある。

さらに、薬剤を患部に到達させるだけではなく、患部組織や細胞内の環境に応じた薬物放出の制御が可能になれば、細胞中の生理活性物質の細胞内動態などを制御し、細胞死や細胞分化を誘導するといったナノ DDS の高機能化が可能になる。以上のような性質・機能をナノ粒子に付与する上でナノ粒子を構成する材料の研究開発が重要である。

（4）科学技術的・政策的課題

ターゲティング型 DDS に代表される革新的な医薬品および医療技術の実用化を加速するためには、それらの審査を効率的に行うためのガイドラインの策定などのレギュラトリーサイエンスの充実・強化が必要不可欠である。そこで世界的な動向として、国際会議でナノメディシンのレギュラトリーサイエンスが活発に議論されている。我が国において

は、医薬品、医療機器分野の革新的シーズの審査の迅速化を目的として、アカデミアと審査側の人材交流を行い、有効性・安全性の評価法の構築やガイドラインの策定を行うことを目的として、厚生労働省の革新的医薬品・医療機器・再生医療製品実用化促進事業が平成 24 年度よりスタートした。この中の革新的医薬品シーズにターゲティング型 DDS が含まれており、これらの取り組みが DDS 医薬品の実用化促進に繋がることが期待される。

なお、ナノマテリアルによる毒性に関する研究も近年増えており、これらの研究は Nanotoxicology と呼ばれているが、Nanotoxicology で対象になっているナノマテリアルには、生体内投与に適していないものが多く、これらの研究は上記の臨床開発が進められている DDS と明確に区別される必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

高分子ミセルに抗がん剤を内包させたナノ DDS 製剤で臨床試験が開始されている。日本では、パクリタキセル内包高分子ミセル製剤が臨床第Ⅱ相試験で高い奏効率と副作用の低減が確認され、第Ⅲ相試験が開始された。

2012 年度の American Society of Clinical Oncology（ASCO）Annual Meeting で抗がん剤 - 抗 Her2 抗体複合体（T-DM1）の Her2 陽性乳がんに対する第 III 相臨床治験の良好な結果が発表された。抗がん剤 - 抗体複合体は、今度も欧米を中心に臨床開発が進められていくと考えられる。

［注目すべきプロジェクト］

内閣府の最先端研究開発支援プログラム（FIRST）における「ナノバイオテクノロジーが先導する診断・治療イノベーション」において、ナノ DDS によるがんのイメージングと標的治療の研究開発が進められている。また、厚生労働省の革新的医薬品・医療機器・再生医療製品実用化促進事業において「ナノテクノロジーを基盤とした革新的医薬品に関する評価方法」が開始され、ナノ DDS を含むナノメディシンの評価手法、ガイドラインの整備が進むものと期待される。

米国では国立がん研究所の Alliance for Nanotechnology in Cancer（ANC）においてナノ DDS の研究開発が精力的に進められている。2010 年 11 月に発表された Nanotechnology Plan では Phase I の成果がまとめられ、今後 3 ～ 10 年に向けたターゲットが示されており、ターゲティング型 DDS などナノ DDS に関わる項目に多くのページが割かれている。

（6）キーワード

ナノ粒子、高分子ミセル、EPR 効果、リガンド、がん、核酸医薬

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	日本の大学・公的機関における研究レベルは欧米に劣らず非常に高い。固形がんに対するナノ DDS の基本原理でもある EPR（Enhanced permeation and retention）効果は、日本の研究者によって発見されている。ナノ DDS の開発において材料は極めて重要であり、この点において日本は高い優位性を有している。核酸医薬やイメージングのための DDS、物理エネルギーを利用した DDS などの研究開発も進行している。
	応用研究・開発	◎	↗	平成 23 年に閣議決定された第 4 期科学技術基本計画の柱の一つにライフイノベーションの推進が掲げられ、各省ではライフイノベーションのための中核技術の一つとして DDS があげられている。各省による DDS 関連のプロジェクトでは、明確な出口を示すことに加えて、企業との連携や PMDA への事前薬事相談を前提としているものも多くなってきており、基礎研究からシームレスに応用研究・開発へと移行することが必要とされている。
	産業化	○	↗	日本では、リュープリンなどの徐放型の DDS 製剤が早くから上市している。ナノ DDS に関しても、抗がん剤パクリタキセルを内包した高分子ミセルの乳がんを対象にした第 III 相治験が開始され、その他の高分子ミセルの臨床治験も着実に進んでいる。日本では、ベンチャー企業の育成が大きな課題であると言える。
米国	基礎研究	◎	→	米国の大学・公的機関における研究レベルは非常に高く、世界をリードしている。米国イノベーション戦略における 2014 年度の研究予算でも、DDS とイメージングは今後さらに加速すべき研究としてあげられている。The National Cancer Institute によるナノテクアライアンスでは、標的発見研究の手法開発、分子イメージング・早期発見、予防とコントロール、in vivo イメージング、多機能治療薬、効果判定指標の 6 分野を分野横断的に発展させることを目標としている。この他にも、多くのナノテク融合研究拠点が設立され、DDS 研究が行われている。研究水準は高いが材料開発の面ではそれほど水準は高くない。
	応用研究・開発	◎	↗	ナノ粒子の DDS として Doxil および Abraxane が FDA の承認を受けている。また、Mylotarg（抗 CD33 抗体 +calicheamycin）が急性骨髄性白血病に対して FDA の承認を受けており、アクティブターゲティング型 DDS 製剤としてすでに上市済みである。多くの DDS 医薬品が上市しているのは米国の高い技術開発水準によるものである。DDS に関する特許では、日本と比較して、核酸やタンパク質に関する技術が多く、日本では研究機関が出願人であるのに対して、米国では出願人が大手製薬企業であることも特徴的である。対象としている疾患も、がん、循環器疾患のみならず、感染症、中枢系疾患、代謝性疾患など幅広い。
	産業化	◎	→	近年、抗体、siRNA、アプタマーなどの次世代バイオ医薬の DDS 製剤の開発を目指したベンチャー企業などが多く設立されている。メガファーマによる豊富な資金力によって短期間での生産技術力の伸展にはめざましいものがある。

欧州	基礎研究	◎	↗	欧州の大学・公的機関における研究レベルは非常に高い。欧州は、高分子ー薬剤コンジュゲート、リポソーム、ナノ粒子など、第一世代の DDS の多くを世界に先駆けて開発してきた。近年も、核酸医薬のデリバリシステムの研究開発などにおいて、世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	欧州科学財団（ESF）や欧州薬品庁（EMA）でもナノメディシンは大きく取り上げられており、欧州が首尾一貫したアプローチによってナノ DDS の研究開発を進めることによって、米国や日本に対する競争力を強化している。スイスの The Swiss Nanoscience Institute（SNI）などのナノテク融合研究拠点やドイツの Nanosystems Initiative Munich（NIM）などのリサーチクラスターが設立され、活発な DDS 研究が行われている。
	産業化	◎	→	医薬品としては、PEG 化タンパク質医薬品や加齢黄斑変性に対するリポソーム製剤（Visudyne）など DDS 製剤が次々に実用化されている。欧州の製薬企業は、メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有しており、また。新薬の治験体制も整っていることから、今後も高い水準を維持するものと考えられる。
中国	基礎研究	○	↗	中国では、中国科学院と中国教育省との共同出資で、The National Center for Nanoscience and Technology（NCNST）を北京大学と清華大学の構内に 2003 年に設立し、ナノテクノロジーおよびナノバイオテクノロジー研究を推進している。特に、NCNST では、ナノマテリアル、ナノデバイス、ナノバイオロジーに重点を置き、中でもナノ DDS は高い関心を集めている。DDS に対する論文数や特許は、指数関数的に増加している。
	応用研究・開発	○	↗	科学技術人材の呼び戻し政策の継続的実施により、優秀な留学生が多数帰国しているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め応用研究と技術開発の水準が急速に上昇している。
	産業化	△	↗	医薬品開発においては、臨床研究などの法的拘束が少なく、今後 DDS の臨床治験が進む可能性が高い。また、中国ではバイオベンチャーが数多く設立されており、DDS 関連においても今後ベンチャー企業が増えていくものと思われる。
韓国	基礎研究	○	↗	1994 年にバイオナノテクノロジー促進基本計画が制定されて以来、当該分野への研究開発投資額が年に約 30% ずつ増加し、2005 年には全研究開発投資額の 10% を占めるようになった。韓国では、日本の COE プロジェクトにあたる New University for Regional Innovation（NURI）に採択されている延世大学、亜州大学、漢陽大学などが、超高感度ナノバイオセンサーによる癌と梗塞の早期診断、多機能型ナノハイブリッド材料によるナノ治療、生体内外での診断とバイオイメージングなどの研究を精力的に行っている。
	応用研究・開発	○	↗	ナノバイオに関しては、国家レベルでのインフラ整備が進められており、Seoul National University や Yonsei University などの重点的な投資により、臨床まで見据えたナノ DDS の研究プロジェクトが進められており、技術開発水準も上昇している。
	産業化	△	↗	医薬品としては、有力な製薬企業は存在しないが、サムヤン　ジェネックス社は、高分子ナノ粒子を利用した抗がん剤や siRNA の DDS 製剤の研究および臨床治験を進めており、産業技術力は着実に上昇していると言える。サムヤン　ジェネックス社のパクリタキセルを内包した高分子ミセル製剤（Genexol-PM）は、国内では上市済みである。また、ベンチャー企業の動きも要注目である。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）Matsumura, Y.; Maeda, H. A new concept for macromolecular therapeutics in cancer chemotherapy: mechanism of tumoritropic accumulation of proteins and the antitumor agent Smancs. Cancer Res. 1986, 46, p.6387-6392.
2）Matsumura, Y., Kataoka, K. Preclinical and clinical studies of anticancer agent-incorporating polymer micelles. Cancer Sci. 2009, 100, p.572-579.
3）A Strategy for American Innovation: Securing Our Economic Growth and Prosperity. http://www.whitehouse.gov/innovation/strategy
4）The National Cancer Institute, NCI Alliance for Nanotechnology. http://nano.cancer.gov/
5）Davis, M. E., Chen, Z., Shin, D. M.（2008）Nanoparticle therapeutics; an emerging treatment modality for cancer. Nature Rev. Drug Discov. 2008, 7, p.771-782.
6）特許庁．平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書：ドラッグデリバリーシステム（DDS），2011.
7）Duncan R. The dawning era of polymer therapeutics. Nature Rev. Drug Discov. 2003, 2, p.347-360.
8）The European Science Foundation, http://www.esf.org/
9）The European Medicines Agency, http://www.ema.europa.eu/ema/
10）The Swiss Nanoscience Institute, http://www.nccr-nano.org/nccr/
11）Nanosystems Initiative Munich, http://www.nano-initiative-munich.de/
12）The National Center for Nanoscience and Tehcnology, http://english.nanoctr.cas.cn/
13）BK21・NURI Committee, http://bnc.krf.or.kr/home/eng/nuri/aboutnuri.jsp
14）Editorial. Join the dialogue. 2012, Nature Nanotechnology 7, p.545
15）西山伸宏；片岡一則．先制医療のためのインテリジェント型 DDS の設計．Drug Delivery System，2011，26（1），p.29-36.

3. 2. 3　ナノ計測・診断デバイス

（1）研究開発領域名

ナノ計測・診断デバイス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ナノ・マイクロ構造を活用したデバイスによる生体由来物質の高感度検出・分析技術の確立とバイオマーカー検出などへの応用による診断デバイスの創出を目的とした研究開発領域である。微量サンプルから特定の物質や細胞を迅速かつ簡便に分離する技術、センシングデバイスの高感度化技術、デバイスシステムの高集積化・アレイ化技術の確立などの確立を目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

少子高齢化が急速に進行するわが国では、今後の医療費の高騰にどう対応するかが大きな課題となっている。経済的コストの増大に対応するためには､発症の時期を遅らせたり、発症を未然に防いだりする予防医療的アプローチが重要となる。そこでは遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物、画像などから得られる生体情報を数値化・定量化した指標（バイオマーカー）を用い、生体における生理状態や疾患の進行などを客観的に把握する必要がある。ナノ計測・診断デバイスは、微量サンプルで迅速に解析結果が得られるといった特長を生かし、バイオマーカーの検出や探索で医療分野に貢献することが期待される。

［これまでの取組み］

DNA チップ、μ TAS（micro-total analysis system、MEMS/NEMS 技術によりチップ上に作製された微小な流路や構造体により化学分析を行うシステム）、各種バイオセンサは一部で実用化され、基礎医学やライフサイエンスの発展に寄与してきた。血糖の連続測定が可能な装置が米国で実用化されるなど、臨床医学への展開も始まっている。表面プラズモンを利用した検出の高感度化などの研究も活発に進められている。

単一細胞レベル、単一分子レベルでの分析技術や再生医療用デバイスなどの新しい分野でもより高度な展開が見られる。今後、これらに付随する周辺技術・方法論など、次世代の新たな研究開発が、医療、生物学と機械・電気・化学分野などが融合しながら一層推進されると見込まれる。単一細胞・単一分子の分析では、例えば、血液中の 10 億個の細胞からたった一つのがん細胞（血液循環がん細胞、CTC）を分離・分析するデバイスの開発競争が世界中で繰り広げられている。

また、分析デバイスだけでなく、希少な医薬品などの合成への展開も見られる。例えば、PET 画像診断では放射性核種で標識した非常に高価な診断薬を投与するが、その半減期が短く短時間での合成が要求されるため、診断薬をマイクロ化学チップで合成する研究開発が世界各国で進められている。

2000 年以降の 10 年間で本領域における要素技術の開発は一定の進捗を見た。この間、日欧米が先導的な役割を果たしてきたが、近年、欧米からの帰国研究者が中心的な牽引役となり、韓国、台湾、シンガポールさらには中国などの東アジア諸国の急速な追い上げが顕著である。がんや感染症などの具体的疾患の診断デバイスや医療インフラが整っていな

いアジア、アフリカ向けの簡易診断デバイスの開発などが提唱され、蓄積されたデバイス研究の成果を実用化に結び付けるべく、医学者と工学者、さらには医療産業ビジネスの専門家が連携して総合的な企画、研究開発を行う段階に移行している。欧米でも実用化・技術移転のための施策が積極的に実施されつつある。

医療機器に特有の許認可規制の課題は各国毎に異なるが、ナノ計測・診断デバイスのように医療のコストやシステムを大きく変革しうる医療機器は大きな成長が期待でき、かつグローバルな競争が不可欠な産業分野であり、技術開発の支援・促進、新規医療技術導入の啓蒙、承認プロセス支援など多方面が有機的に連携した支援が必要である。

［今後必要となる取組み］

ナノ計測・診断デバイスではタンパク質や核酸などの生体高分子を機能性材料として利用することが多い。デバイスの用途に応じて生体高分子の機能を制御し、人為的に向上させることも本研究領域の重要な研究課題である。生体高分子の合成、機能解析を高スループットで行い、所望の機能をもった生体高分子を得るというのがひとつの方向性であるが、それを実現するためには半導体の製造技術などを活用する必要がある。

新しい学術領域としては 10-1000nm の空間である拡張ナノ空間があげられる。マイクロよりも桁違いに小さい空間であり高度な基盤技術が要求されるが、最近いくつかのグループが開発に成功している。バルク空間と同様の溶液・流体物性を示すマイクロ空間とは異なり、さまざまな特異物性が報告されつつあり、このようなマイクロフルイディクスを利用した新たなデバイスが期待される。例えば、単一細胞よりも小さな空間であることを利用して、単一細胞内の単一分子分析への応用もある。今後、マイクロと拡張ナノを組み合わせた新たな展開が期待できる。

DNA を一分子レベルでシーケンスする技術開発も引き続き大きな流れとなっている。ヒトゲノムプロジェクトによるヒトの全塩基配列解読後も、米国を中心に低価格・高速 DNA シーケンサの開発競争が激しさを増しており、従来 DNA の塩基配列解析は蛍光や生物発光を用いた光学的検出法とは異なる新しい原理に基づく DNA シーケンシング方法論の研究が進められている。バイオトランジスタを用いた DNA シーケンシング技術は米国のベンチャー企業により開発が進められていたが、最近 DNA シーケンサのリーディング企業であるライフテクノロジー社がそのベンチャー企業を買収したニュースが学術誌にも掲載され、学会・業界関係者の関心を集めている。また、ナノポアデバイスを用いた DNA シーケンシング技術は、α -Hemolysin などの膜タンパク質をナノポアに用いイオン電流計測と組み合わせたものが実用化されたが、信頼性などに疑問が残ることから、膜タンパク質といった生体由来のナノポアに代わる工学的なナノポア形成技術、DNA 断片に垂直方向に電圧を印加するトンネル電流計測方式の開発などにより、塩基識別の分解能の向上が図られている。このような中、IBM 社と診断薬メーカーのロッシュ社と共同でナノポアデバイスを基盤とする DNA トランジスタを開発することが発表された。これら最近の動きにより電気的 DNA シーケンシング技術の開発が今後加速されることが示唆され、関連したバイオデバイス･バイオチップがそれらの開発に貢献することが期待される。

（4）科学技術的・政策的課題

米国を除いては、新技術を医療応用する際の規制をはじめとした制度整備が進んでおら

ず、大学などでの研究開発が特に医療分野において実用化が進んでいない。今後は、この制度整備を進められる国が世界の覇権を握る可能性が高い。

日本では多くの企業が実用化を目指した研究開発を進めているが、これを医療デバイスにするには、臨床研究、治験をへて薬事認可を受ける必要があるが、この部分で、研究開発が停滞するというタイムラグを課題としてかかえている。今後、大学・企業の研究開発をスムーズに産業化するために、臨床研究・治験などのより体系的なシステム構築を進めることが重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

基礎研究においては、従来のマイクロデバイスの研究領域に加え、10-1000 nm の空間を取り扱うナノデバイスの研究領域が芽生えつつある。ナノ領域特有の溶液物性やその微小サイズを利用した単一細胞分析デバイスなど、これまでのマイクロデバイスではできない新たな機能デバイスが実現されてきている。この分野において、方法論・技術ともに日本が大きく先導している。応用展開においては、DNA やタンパクの分析デバイス、PET 診断用の合成デバイス、血中循環細胞（CTC）の分離･分析デバイスなど注目されている。

ヒトゲノム解析計画当時の DNA シークエンス技術研究開発では、日米欧が競っていたが､次世代シーケンサ開発において､米国のほぼ一人勝ち状態となっている。次々世代シーケンサ開発で日本が逆転するためには、新規ナノポアなど 1 分子技術の応用が鍵を握っている。日本は、1 分子解析技術では世界の最先端を進んでいるが、基礎研究への展開に限られており､今後は､1 分子解析技術のシーケンシングへの応用や医療応用をオールジャパン体制で進めることが重要である。

幹細胞研究や再生医療を目指したデバイス開発が、日米欧を中心に進展している。日本においては、iPS 細胞をはじめとした再生医療の研究開発に力を入れているが、再生医療を進展させるためにも、ナノテクノロジーの再生医療への応用についてもオールジャパンで研究開発を進めることが、再生医療分野における研究開発と産業化の加速のために重要である。

［注目すべきプロジェクト］

欧州委員会と製薬業界の官民連携プログラムである Innovative Medicine Initiative によるプロジェクトのひとつとして RAPP-ID が 2011 年に開始された。総額約 14 百万ユーロの予算のもと感染症の迅速診断を目指した研究開発が行われている。

半導体、自動車に次ぐ基幹産業の育成を目指して韓国政府は 2006 年に「Bio-Vision 2016」と称する 10 年計画を掲げており、バイオデバイス研究にも重点的な研究投資が行われている。

国内では、内閣府の最先端研究開発支援プログラム（FIRST）における「1 分子解析技術を基盤としたナノバイオデバイスの開発研究」において、単分子 DNA シークエンシング、ウィルスの高感度検知、生体分子モニタリングの研究開発が進められている。

（6）キーワード

単一細胞、単一分子、血液循環がん細胞、CTC、マイクロ化学合成チップ、マイクロフルイディクス、DNA シーケンシング、ナノポア

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	大学・独法の研究機関を中心に特に基礎的研究において高い研究水準を維持している。本分野で最も重要な国際会議であるμ TAS における日本の発表件数は 10 年来トップレベルにある。ただ、研究開発が特定大学に集中しており、全国的な広がりをもった研究開発状況となっていない。また、応用展開に関して不足感があり、全体として横ばいの状況である。
	応用研究・開発	○	↗	バイオデバイス技術の基盤となる半導体、精密機器、材料・化学などの分野において、学界、産業界ともに潜在的に高い技術開発力を有する。がんマーカー検査や免疫検査など具体的な医療応用ならびに創薬支援など具体的な実用化を目指したバイオデバイスの開発研究が増しつつある。一部実用化も進み、ナノテクノロジーの国際展示会などで展示されて注目を集めるようになってきている。
	産業化	△	↗	ベンチャー企業によるバイオデバイスの実用化が試みられているが、著しい成長には至っていない。大企業のバイオデバイスへの参入も検討されているが、未だ大きな流れになっていない。
米国	基礎研究	◎	→	μ TAS などの国際会議における採択件数では日本とトップを争っており、非常に質の高い基礎研究を推進している。１分子アッセイ、１細胞分析に加え Organ on Chip のように複雑な組織をマイクロ流体デバイス技術で再構成し、動物実験代替を目指す研究など先駆的研究を活発に行なっている。マイクロ・ナノデバイスに必要な加工設備を有する大学が多数あり、多くの大学において研究開発が進められている点は、日本と比較したときに大きな特徴である。
	応用研究・開発	◎	→	大企業およびベンチャーをはじめとした中小企業における研究開発が活発である。特に、スモールビジネスをサポートする制度が日本、欧州、中韓などより整備されており、大学の成果が中小企業にスムーズに移転されて技術開発が進展している。以前から推進されている DNA 一分子レベルでのシークエンシング技術、血中循環がん細胞（CTC）を一細胞で診断する技術などの応用研究も引き続き非常に活発であり、今後も本分野をリードすると思われる。
	産業化	◎	↗	DNA チップなどでは、産業化をリードしている。非常に多くのベンチャー企業がマイクロ・ナノ流体デバイスの実用化に取り組んでおり、産業応用開発は非常に活発である。一方、医療デバイス開発では、優れた産業化の成果は上げられていない。しかし、ナノテクなどの新規技術を医療デバイスとして認可するためのガイドライン整備、Nanotechnology Characterisation Laboratory による前臨床研究の加速、FDA 主導による新規技術のコンソーシアム形成と産業化促進などの制度などが整備されていることで、大学・企業の技術開発が産業化に結実しつつある。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツを中心として、フランス、オランダ、スイス、スウェーデンなどの各国で活発な研究が行なわれているが、先端ナノテク分野の国際的研究拠点であるベルギー IMEC、仏 MINATEC の存在は、本分野においても大きな役割を果たしはじめている。
	応用研究・開発	○	→	バイオや医療に関する技術開発のレベルは高く、特にスウェーデンを中心として、血中循環癌細胞（CTC）分析など医工連携による医療分野への技術開発が活発になされている。2008 年頃から、全欧・各国レベルで、中小・ベンチャー企業を巻き込んだ技術移転のための施策が多く実施されている。また、欧州域内で特許制度やベンチャーキャピタル関連法制を共通化する動きも続いている
	産業化	△	→	オランダ Micronit Microfluidics、ドイツ iX-factory などの企業が知られるが、ベンチャー企業への資金供給ルートが未発達であることから、バイオデバイス関連の産業化・事業化はあまり進んでいない。

中国	基礎研究	△	↗	中国科学院、精華大学、北京大学、浙江大学などの大学で、国家プロジェクトが進んでおり、多くの若手研究者が、日米欧から帰国して、研究開発を急速に活発化している。医療診断や食品検査のためのバイオデバイスは、バイオナノ研究の重要技術分野と位置付けられているが、研究費実績では、中国のバイオナノ研究全体に占める本分野の比率はまだ高くない。
	応用研究・開発	△	→	新しい応用技術展開は見られないが、従来からマイクロデバイスの応用分野であった医療診断（Point-of-care）や細胞診断などへの広がりが見られる。また、従来から食品問題に対する迅速分析法の高いニーズがあり、マイクロデバイスを用いた分離分析法に関する研究も推進されている。日欧米に比べ生体試料を用いる実験がしやすい環境があり、今後、実用化に向けた研究開発が急速に進むと考えられる。
	産業化	△	→	当該分野においては、産業化はまだ進んでいない。しかし、大学での基礎研究が進展しており、今後は、ベンチャー企業を中心に産業化が開始されると思われる。すでに、いくつかの会社が実用化の研究に取り組んでいる（MEMS やマイクロ流体をターゲットとした Jiangsu IntelliSense Technology 社や Shanghai Wen Chang chip Technology 社など）。また、精華大学、国立バイオチップ研究所などを中心に DNA チップの大規模な臨床研究が進んでおり、これらの情報に基づいた、産業化が今後進展すると思われる。
韓国	基礎研究	○	↗	韓国が得意とする半導体技術を用いた疾病診断用デバイス、特にバイオチップの研究が進められている。ソウル大学、KAIST、POSTECH、Yonsei 大学、Korea 大学、KIST などの大学あるいは研究所が医工連携により、微量の血液、尿などを利用した癌の診断に応用できるバイオチップを開発中である。
	応用研究・開発	○	→	高度な半導体や MEMS 製造技術を基盤とする研究に強みがあり、デバイスの試作開発力では日米と遜色がない。電子産業の国際的優位性を背景に、これを基盤技術とするバイオ、脳科学などとの融合研究の推進が継続して推進されている。
	産業化	○	→	大企業を中心にナノデバイスのバイオ応用を進めるための産業化が進みつつある。Korea Materials & Analysis（K-MAC）社、Macrogen 社などのベンチャー企業を中心に DNA チップなどのデバイスが実用化されている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）The 15th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science（μ TAS 2011）, Seattle, USA, 2011-10-02/06.
http://www.microtas2011.org/
2）The 16th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science（μ TAS 2012）, Okinawa, Japan, 2012-10-28/11-01.
http://www.microtas12.org/
3）国際ナノテクノロジー総合展・技術会議. http://www.nanotechexpo.jp/
4）Nanotech Conference & Expo in USA.
http://www.techconnectworld.com/Nanotech2012/
5）Nano Korea. http://www.nanokorea.or.kr/

6）CHI Nano Conference & Expo in China. http://www.chinanosz.com/
7）NanoFair in Europe. http://www.nanofair.com/index.php
8）Nanoforum in Europe. http://www.nanoforum.it/en
9）Lab on a Chip:10th Anniversary での各国動向特集記事（2010-2011）.
10）Chin, C.D.; Linder, V.; Sia, S.K. Commercialization of microfluidic point-of-care diagnostic devices. Lab Chip. 2012, 12, p. 2118-2134.
11）Innovative Medicines Initiative, RAPP-ID.
http://www.imi.europa.eu/content/rapp-id

3. 2. 4　バイオイメージング

（1）研究開発領域名

バイオイメージング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

生体におけるタンパク質などの物質分布や細胞などの活動状況を可視化し、ライフサイエンス、医療において必要となる情報を提供することを目的とした研究開発領域である。可視化に必要とされる試薬、ハードウェア、画像解析ソフトウェアなど広範囲の技術要素を総合的に確立することを目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

バイオイメージングは生命現象を分子レベルで理解するための重要なツールであり、病気の診断や治療効果の確認においても不可欠な技術となっている。バイオイメージングは、可視化に必要なイメージングプローブ、イメージングプローブからの信号を検出するハードウェア、検出された信号を生体の構造・機能と結びつけて表示するためのソフトウェアなど多くの材料、技術、方法論が必要とされる融合領域である。

［これまでの取組み］

タンパク質や核酸といった生体分子の挙動を可視化するためのイメージングプローブは、標的となる分子や反応を特異的に認識する認識ユニットと認識したことを検出可能な信号に変換する検出ユニットからなる。認識ユニットにはイメージング対象となる生体分子の種類に応じて様々な材料が用いられているが、認識の特異性を高めるためには新しい原理の開発も含めさらなる研究開発が必要とされている。検出ユニットには光学顕微鏡技術の進歩と相まって蛍光材料が汎用されている。光学顕微鏡技術は分解能の波長限界を超える超解像顕微鏡の開発が急速に進み、100 nm 以下の解像度を有するものもすでに製品化されている。超解像顕微鏡には高解像度を得るための原理が異なるものが多くあり、解像度やイメージング速度に特徴がある。超解像顕微鏡に適したイメージングプローブの開発や動物実験などへの応用が開始されており、この分野の研究が一気に加速するものと予想される。

分子レベルで生体の情報を得るという観点からは、光学顕微鏡と走査型プローブ顕微鏡のような極小局所計測技術とを組合わせたり、分光分析法をイメージングに導入することが研究開発の一つの方向性として想定される。分子振動の情報を与えるラマン分光や分子の配向状態に関する情報を与える第 2 次高調波を利用したイメージングは、イメージングプローブを用いることなく生体を観察できることから、今後の発展が期待される。

一方、生体を理解するためには、個々の分子だけでなく、細胞レベル、組織レベルにイメージング対象のスケールを拡大する必要がある。また、空間的な広がりだけでなく、時間的にもスケールを拡大し、生体の動的変化を一定時間連続的にイメージングできるようにすることも必要である。そのためには、多くの測定手法（モダリティ）で同時に同一試料の観察できる機器や、異なる計測手法から得られる膨大なデータを解析し、可視化する

ための技術が必要となる。また、イメージングプローブも複数の計測手法に共通して使用できるようにしなければならない。さらに、生体を単に観察するだけでなく、生体に一定の作用を加えてその機能を制御できるようなより能動的な計測手法の導入も、生体の分子レベルでの理解を深化させる上で必要となる。

分子レベルでのバイオイメージング分野では、日米欧が拮抗しながら熾烈な国際競争を行っている。日本は顕微鏡、カメラなどハードウェアにつては高い国際競争力を有している。米国は顕微鏡の新規技術開発に優れ、臨床応用でも最先端の研究が多く行われている。欧州も顕微鏡の新規技術開発に優れ、とくに、超解像顕微鏡の新原理の大半はドイツなどで開発されている。中国、韓国は欧米から帰国した研究者により大学で基礎的な研究が開始されているが、研究水準のレベルアップにはまだ時間が必要な状況にある。韓国ではイメージング関連製品について、いくつかのベンチャー企業がユニークな開発を行っている。

イメージングプローブの開発は米国を中心に研究が進んでおり、とくに量子ドットなどの半導体イメージング材料の分野では米国が先行している。日本は蛍光・化学発光プローブを緻密な戦略で開発することを得意としている。ソフトウェア開発では欧米が先行している。バイオイメージングの応用では、動物実験による実証が米国では進んでいるが、日本、欧州はこの点で若干遅れをとっている。

バイオイメージングに関連するフォトニクス分野での台湾の技術力が大きく向上している。細胞レベルから生体組織レベルまで、幅の広い試料を観察対象とする技術について、多くの研究者により研究が進められており、特に、国立台湾大学、国立陽明大学、アカデミアシニカより、レベルの高い研究成果が報告されている。最近、基礎研究で開発した技術を臨床応用するためのセンター、Molecular Imaging Center、が国立台湾大学に設置された。研究成果の産業化についても積極的で、新竹市の Instrument Technology Research Center は、製品化に必要な基礎技術を提供し、台湾発の新技術の育成に努めている。

［今後必要となる取組み］

多くのイメージング技術ではターゲットとなる生体分子や構造を蛍光分子などのプローブにより標識し、そのプローブの分布を画像化して必要な情報を得る。計測レンジの異なる機器で使用可能な標識技術が開発できば、現在の機器の利用価値も大きく広がる。このようなプローブには、細胞レベル、生体組織レベル、固体レベルのどのレベルにおいても生物学的に有用である必要があり、またそれを実現させる化学的な技術も必要である。

多くのモダリティの登場や空間分解能の限界の突破により、バイオイメージングに対する光学的な制約は軽減され、また観察法の選択肢も増えてきた。次世代の技術の動向としては、いかに観察対象に負担（光ダメージや、標識によるダメージ）をかけずに、必要な情報を得るかがポイントとなるであろう。また、従来の標識技術に頼るだけでなく、生体内の分子の働きを直接分析しつつ、その分布や動態を観察するという新たなアプローチ（無標識分析イメージング）を進展させる必要がある。

現在、ナノからマクロまで、非常に大きなダイナミックレンジを取り扱う機器がほとんどない。簡単な解決方法としては、ナノを得意とする機器とマクロを得意とする機器とを単純に組み合わせて各測定結果をリンクさせる方法が考えられる。しかし、通常それらの機器が測定する物理量は異なるものであるため、それぞれの機器の測定レンジを大幅に向

上するというアプローチの方が測定結果の理解をより助け、ブレークスルーにつながる。

（4）科学技術的・政策的課題

日本は研究者のポテンシャルは高いが、その専門性を発揮できる体制が急速に失われてきている。米国の活力、欧州の伝統、アジアの勢いに対抗するためには、研究者が長期的展望のもとに研究に専念できる体制を再構築する必要がある。また、研究者数、とくに技術開発の研究者が非常に少ないこともこの分野での競争力を確保する上で問題である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

光学的手法によるイメージングでは、生体試料の光透過性が低いことが問題となるが、生体試料を透明化する試薬が日本で産学連携により開発されている。脳組織などの生体試料を表面から深部 4 mm に至るまでの蛍光観察を可能とする。

異なる計測手法を連携させてイメージングを行う試み（マルチモーダルイメージング）については、世界最大規模の国際会議 Photonics West においても Multimodal Biomedical Imaging というセッションが設けられるなど、活発な研究開発が行われている。

［注目すべきプロジェクト］

米国 Marine Biological Laboratory や Cold Spring Harbor Laboratory、欧州 European Molecular Biology Laboratory の支援のもと、インド Bangalore の National Center for Biological Sciences やシンガポールに大規模なイメージング施設がつくられつつあり、世界の研究者の注目を集めている。

文部科学省の新学術領域研究「細胞機能と分子活性の多次元蛍光生体イメージング」では生体を生きたままの状態で観察し、細胞周期や分子活性などの機能情報を可視化するための研究が進められている。

（6）キーワード

超解像イメージング、分子イメージング、マルチモーダルイメージング、機能性プローブ、生体標識、ナノイメージング、ナノマッピング、医療応用、局所場計測

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	超解像イメージングや振動分光イメージングなどの光学技術の開発から、生体試料標識のための各種蛍光プローブ、試薬の開発まで、幅広い基礎研究が行われている。米国、欧州に劣らず、オリジナリティの高い研究が進められている。イメージングの対象も、細胞レベルから生体組織まで、幅広く展開されている。
	応用研究・開発	◎	↗	新しい技術を積極的に利用した応用研究が進んでいる。特に、顕微鏡メーカーが大学や研究所に研究連携拠点（例、北大ニコンイメージングセンター、理研 BSI - オリンパス連携センターなど）を設置し、最先端の生物学、医学研究に必要なイメージング技術の開発を進めている。
	産業化	◎	↗	オリンパス、ニコンが新しい顕微鏡の商品化を積極的に行っている他、商品化前の段階においても、大学、研究機関との応用研究を進め、バイオイメージング分野での新しい市場開拓に力を入れている。また、ラマン顕微鏡（Nanophoton）、高機能蛍光顕微鏡（G-Angstrom）を製品化しているベンチャー企業もある。さらに、最近では、企業と大学とでの新技術開発を支援するフォトニクスセンター（大阪大学）の設置など、研究成果の産業化を加速させる試みも見られる。
米国	基礎研究	◎	↗	超解像イメージング、三次元細胞イメージング、光音響イメージング、振動分光イメージングなどの新しい技術が毎年のように提案されており、研究の質も非常に高い。大きなパラダイムシフトをもたらすような革新的技術を開発する一方で、その実用化に向けた応用研究も着実に進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	Howard Hughes Medical Institute（HHMI）などの研究機関が、バイオイメージングの応用研究を組織的にサポートしており、うまく機能している。特に、工学系研究者、各種プローブの開発者、バイオロジストを 1 カ所の研究施設に集め、基礎研究から応用研究までを非常に速いスピードでこなしている。製品化前の技術も積極的に駆使し、新しいアプリケーションの開発が進められている。
	産業化	○	→	大型の顕微鏡システムを開発しているメーカーは無いが、超解像顕微鏡（Applied Precision 社）、ラマン顕微鏡（ChemImage 社）といった最先端顕微鏡がベンチャー企業により製品化されている。また、バイオイメージングに必要な試薬を扱う企業が多数存在（Life technologies 社 , Acti-motif 社 , Promega 社など）し、アプリケーション開発で生まれた技術が新しい製品として世の中に提供されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	超解像イメージング（ドイツ）、生体組織のライブイメージング（ドイツ）、振動分光イメージング（オランダ、ドイツ）など、様々、日本と同様に、幅広い分野での基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	Europe Molecular Biology Laboratory（EMBL）、Max Plank Institutes（MPI）などの研究所が広い分野から研究者を集め、分野融合的に技術開発から応用研究までを進めている。米国ほどのスピード感は無いが、レーザー機器、プローブ試薬関連のベンチャー企業の存在が基礎研究から応用研究までを強力にサポートしている。
	産業化	◎	↗	Carl Zeiss 社、Leica 社などの顕微鏡メーカーが積極的に新技術の市場投入を行っている。大企業だけでなく、レーザー機器（TOPTICA 社 , PicoQuant 社 , High Q laser 社 , A.P.E 社など）、プローブ試薬関連（ATTO-TEC 社 , Abberrior 社 , Dyomics 社など）の中小企業も新技術の応用展開のための足場を固めている。

中国	基礎研究	△	→	光音響イメージング、振動分光イメージングなど、最近の先端バイオイメージング技術のトレンドを取り込みながら研究を進めている。現時点ではまだ革新的な成果を得るところまでは到達していない。研究者の数は日米欧に比べて少ない。
	応用研究・開発	△	→	基礎研究と同様、研究者の数も少なく、現時点では目立つ研究成果は無い。
	産業化	×	→	光学部品、光学結晶などの部材を供給する企業は多いが、顕微鏡システムのような総合的な計測機器を開発できる企業は現時点では登場していない。
韓国	基礎研究	△	→	コヒーレンストモグラフィと非線形光学顕微鏡とにおいて、複数の研究者が成果をあげている。機器開発のレベルも上がっているが、オリジナリティはあまり高くない。
	応用研究・開発	△	→	コヒーレンストモグラフィ、非線形光学顕微鏡、およびそのコンビネーションにおけるバイオイメージング応用について、近年、複数の報告がある。
	産業化	×	→	各要素技術を開発する企業は存在するが、ひとつの装置として製品を市場に提供している企業は見受けられない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）Molecular Imaging Center, National Taiwan University, Taiwan. http://www.mic.ntu.edu.tw/en
2）Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories, Taiwan. http://www.itrc.narl.org.tw/index-e.php
3）Carl Zeiss 社（超解像度顕微鏡）. http://microscopy.zeiss.com/microscopy/en_de/products/superresolution-microscopy.html
4）Leica Microsystems 社（超解像度顕微鏡）. http://www.leica-microsystems.com/products/confocal-microscopes/details/product/leica-tcs-sted-cw-2/
5）株式会社ニコン（超解像度顕微鏡）http://www.nikon-instruments.jp/jpn/page/products/nsim.aspx
6）Segawa, H. et al. Label-free tetra-modal molecular imaging of living cells with CARS, SHG, THG and TSFG. 2012, Opt. Express, 20, p.9551.
7）Pliss, A. et al. Nonlinear Optical Imaging and Raman Microspectrometry of the Cell Nucleus throughout the Cell Cycle. 2010, Biophys. J., 99, p.3483.
8）FEI 社（Correlative Microscopy、光学顕微鏡＋電子顕微鏡）.
http://www.fei.com/applications/life-sciences/correlative-microscopy-solutions.aspx
9）T. A. Planchon, et al., " Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination," Nat. Methods, 8, 417（2011）.
9）Tomer, R. et al. Quantitative high-speed imaging of entire developing embryos with simultaneous multiview light-sheet microscopy. 2012, Nat. Methods, 9, p.755.
10）Freudiger, C. W. et al. Multicolored stain-free histopathology with coherent Raman imaging.

2012, Lab Invest, 92（10）, p.1492-1502.
11）Okada, M. et al. Label-free Raman observation of cytochrome c dynamics during apoptosis. 2012, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 109, p.28.

3. 3　ナノエレクトロニクス

3. 3. 1　超低消費電力ナノエレクトロニクス

（1）研究開発領域名

超低消費電力ナノエレクトロニクス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

従来よりも桁違いの超低消費電力を可能とするナノエレクトロニクスデバイスを実現し、集積回路への適用を検証する。グラフェンやトポロジカル絶縁体のようにバルクとは異なる物性の表面・界面を有する二次元機能性原子薄膜など新材料の特性を理論的・実験的に確認し、システム最適設計によるデバイス試作で超低消費電力動作、超高速動作、超大容量、超長期保存などの優位性を確認するなどの研究開発課題がある。また、飛躍的な消費電力削減と超高速演算を可能にする量子情報処理など新動作原理のデバイスや新回路アーキテクチャなどのデバイスレベルからシステムレベルにまたがる研究開発課題もある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

持続的な社会の実現には地球環境の保全とエネルギー問題を両立させることが必要であり、再生可能エネルギーの拡大や消費エネルギーの削減が重要になっている。特に、2011 年の東日本大震災と原発事ゆえにより電力供給量が大幅に低下したことから、社会的にも省エネルギー化の意識は高まっている。消費エネルギーについては民生、運輸、産業すべての分野において削減していく必要があるが、エネルギーとして大きな割合を占めるようになっている電気エネルギーについては、電気機器の低消費電力化技術の開発によるさらなるエネルギー消費の低減が求められている。その中でも各分野において使用量が増加している情報通信機器の省エネルギー化はモーターや照明器具の高効率化とともに重要であり、エレクトロニクスデバイスの低消費電力化が強く求められている。

情報通信機器の心臓部に当たるのがマイクロプロセッサ、メモリ、高周波回路などの集積回路であるが、これらは市場の要求から高性能化・多機能化・高集積化が進められており、これらの要求と低消費電力化を同時に進めるためには、トランジスタの材料・構造、基本的な論理回路、メモリ回路などに対して革新的な技術を導入し開発していく必要がある。例えば、電気の供給を切っても記憶した情報が消えない不揮発メモリや不揮発ロジック、光通信デバイスの小型・集積化、使っていない回路ブロックのきめ細かな電力供給制御、動作電圧の低い新原理のトランジスタ、人間の脳の動作に近い（エネルギー消費の少ない）新規デバイスや量子情報処理など新規アーキテクチャなどの検討が必要である。

これらの技術が実現できれば、オフィスにおけるパソコンやサーバーの未使用時の機器停止と瞬時起動、データセンターなどにおける大幅な電力削減、家庭における家電の待機電力削減、携帯機器の長時間使用など、消費電力化と利便性の向上とにつながる。また、消費電力を抑えながら高度な情報処理が可能になれば、従来の計算機では事実上解くことが不可能であった問題を解くことで、様々な分野における科学技術の発展を支えることが期待される。特に、一般的に多くの計算量を必要とする量子力学に関わる物理・化学・バ

イオなどの問題へのアプローチが期待される。さらには、我が国の産業競争力の源泉となってきたエレクトロニクス分野の中でも中核的な役割を担ってきた半導体集積エレクトロニクス産業の国際的な競争力回復につながることも期待される。

［これまでの取組み］

国際半導体技術ロードマップ（ITRS）で示されている基本素子（トランジスタ）としての３次元構造デバイスは、ロジック分野ではインテルや TSMC が、メモリ分野では東芝や三星がその研究開発を加速している。また、現在のトランジスタ（MOSFET）の微細化限界を超える新しい動作原理のロジック素子の研究開発においては、米国で NRI（ナノエレクトロニクス研究イニシアティブ）により４つの地域の大学で、トンネルデバイス、スピンデバイス、グラフェンなどのテーマに対して集中的な研究を行わせている。

不揮発性メモリ関係の日本における主な研究開発としては、2010 年より開始された新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト（LEAP）」があり、LSI の配線層に集積を可能とする磁性変化デバイス、相変化デバイス、原子移動型スイッチの開発が進められている。また、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」において、スピントロニクス素子を用いた待機時電力ゼロのロジック混載用不揮発性メモリ実用化技術の開発が進められている。

新たなトランジスタチャネル材料の有力候補として考えられているカーボンナノチューブやグラフェンなどカーボン系の研究については、Si-CMOS をベースとする従来からの集積・微細化技術開発の中に組み込まれる形で NEDO の MIRAI プロジェクトにおけるナノシリコンインテグレーション（NSI）や JST の CREST などで取り組みがなされてきた。しかし、その予算規模からいっても要素技術の基礎検討に留まっており、他の材料とは異なる物性を活かしつつ産業的なインテグレーションを見据えた研究開発はなされていない。一方、IBM は C（カーボン）の生態系を構築するとの理念を掲げ、情報処理デバイスを含む様々なアプリケーションを提案し、一部は実際に試作まで行っている。世界中をキャラバンして参画者を（資金的面も含めて）募っている。サムソンは、Graphene spintronics を対象とした研究部署を設立している。米国 SRC/NRI はグラフェンとスピントロニクスをともに次世代ロジックデバイスの主要技術と見なしてロードマップを提案している。

スピントロニクス技術は、その理論から応用研究まで、多くの先駆的研究が日本から生まれてきた分野であるが、大型国プロやメジャー企業の大型投資により、急速に海外での研究が活発化してきている。米国では、スピン利用の情報処理（メモリ、ロジック、コンピューティング）に対し、DARPA, NRI, NSF などの予算がついている。また、様々なスピン利用ロジックデバイスがアーキテクチャを含めて提案・検討されている。日本では、科研費特定領域研究「スピン流」（2007~2010）の中で関連する基礎研究が行われた他、FIRST の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」（2010-2013）の中で MTJ（magnetic tunnel junction）を用いた不揮発性ロジックの検討、JST の研究成果展開事業（S- イノベ）の「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」（2011 ～）の中でスピン流の新たな革新的応用可能性を探ることを目的とした研究が行れている。

超低消費電力を目指すナノエレクトロニクスの新たなアーキテクチャの研究開発の一つである脳型演算回路においては、脳型動作をする固体素子および脳型回路を実現するアーキテクチャに関する基礎研究で日本もトップ集団にいるが、応用では遅れを取っている。米国では国家プロジェクトをすでに始動させており、それらを融合して脳型コンピュータを開発しようとしている。

量子情報関係では、複数の量子ビットを組み合わせた回路で、数ビット規模の量子演算が実現している。目下の課題は、このような回路で量子誤り訂正アルゴリズムを実現し、最終的に誤り耐性を持つ演算回路を実現することである。それに向けたアーキテクチャの研究が進められている一方で、これらの量子状態制御技術の進展を他の量子系の制御・観測に応用する研究も進んできている。国内では、量子情報科学におけるまとまった研究支援が 2003 年から JST の CREST・さきがけ、2008 年から FIRST を通じて行われてきており、国内の多くの研究チームが参加している。また、新学術領域研究「量子サイバネティクス」も 2008 年から 5 年間の計画で実施されている。並行して、総務省からは NICT の委託研究や SCOPE を通じた支援が行われている。

［今後必要となる取組み］

これまでの新規デバイスや新規材料・プロセスの研究に加え、産業界による大規模メモリの実現と長期信頼性試験、大学（公的研究機関）によるメモリ機構の研究と長期信頼性モデルの構築、産業界と大学（公的研究機関）の共同開発による新材料探索（系統的・網羅的な材料探索は産業界，メモリ機構の深い理解に基づく従来の延長線では考えにくい新材料の提案・実証は大学）などが必要になる。ロジックについても同様な枠組みでの研究が必要である。また、可能な限り早い段階から産学連携の体制を構築し、小規模集積回路レベルで萌芽研究から推進することで、研究開発の正しい方向の選択、実用化への効率的な技術移転を目指していくことが望ましい。

超低消費電力を実現するメモリデバイスの研究開発という点では、DRAM や NAND フラッシュメモリの微細化限界が迫っていることもあり、抵抗変化型メモリ、相変化メモリなど不揮発メモリの研究開発を加速していく必要がある。また、ロジック用のデバイスとしては、トランジスタの高移動度チャネル材料として化合物半導体やナノカーボン材料（グラフェン、カーボンナノチューブ）などの実用化を目指した研究開発も進めていく必要があり、さらには電源電圧を大幅に減らすことができる急峻なサブスレッショルド特性（S 値 <60mV/dec）を実現するトンネル・トランジスタの研究開発も材料の視点を加えることが重要である。一方、ロジック素子の低消費電力化と低発熱化は今まで以上に重要になるため、発熱をいかに抑制するかも鍵になる。

ナノカーボン材料の応用を目指した研究開発においては、大面積化や結晶性・層数・配向などの制御など集積化を前提とした工学的なアプローチで、産･学の連携が必要になる。具体例としては、グラフェン関係では、原子レベルでのナノ構造制御（欠陥導入、グラフェンナノリボン（GNR）のエッジ制御など）、化学吸着による物性変化、プロセス誘起ダメージの回避、グラフェン内電子伝導挙動の解析、散乱の制御などが必要であり、また、デバイス構造にするためのプロセス･インテグレーションの研究開発も進めていく必要がある。

スピントロニクス関係では、基盤技術となるスピントロニクスデバイス技術、集積プロセス技術、回路技術の確立や、不揮発性ロジックなどの待機電力ゼロを実現する高度エネ

ルギーマネージメント技術の確立も必要になる。また、現在、主流の電流注入による磁化反転（スピン注入磁化反転）では、書き込み（磁化反転）に大きな電力、エネルギーを消費するため、低消費電力動作のためには電圧駆動（電界）による磁化反転（スイッチング）技術の研究開発も期待される。

脳型演算回路の研究開発においては、個々の要素技術の開発（その基本的な理解を含む）、その動作を実現し得る固体素子の開発、およびその特徴を活かした回路アーキテクチャの構築が必要である。材料・デバイス・回路関係者に加え、数学者、脳科学者などとの連携も重要になってくる。

量子情報の研究開発においては、デコヒーレンス要因の理解とコヒーレンスの改善、より堅固な人工量子系の探索、量子制御のための周辺エレクトロニクスの開発、人工量子系を用いた大規模量子演算回路へ向けたアーキテクチャの最適化、有用な量子アルゴリズムの開発、様々な量子系との融合などが必要である。

（4）科学技術的・政策的課題

超低消費電力ナノエレクトロニクスの目指すべき方向は、従来の考え方の延長・延命では無く、システムレベルから新たな枠組み・方式を構築することにあるとも考えられ、日本でも、レイヤー（アーキテクチャ、回路、デバイス、材料）間の垣根を取り払った研究プロジェクトの実現は必須である。特に、新型メモリと新型トランジスタの両方を（３次元で）混載し、両方の特徴を生かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システム（回路）の専門家とデバイスの専門家の協調が不可欠である。

デバイス試作のファウンドリ機能の強化が望まれ、このファウンドリ機能を基軸にした産学連携の仕組みについてもさらに強化していく必要がある。また、デバイス作製に関する共用設備では新規な材料やデバイスの作製が容易にできるような体制・仕組みづくりが重要である。特にナノデバイス研究の場合、微細加工プロセスのためのクリーンルームの維持や高度な装置の運転・保守が重要であり、高度な能力と経験を持った技術者の存在が必要である。

半導体エレクトロニクス分野において日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、その蓄積は急速に散逸し失われつつあるため、これを回避し人材や設備などを有効活用する仕組みが必要である。つくばのTIA-nanoの研究環境はその先導事例として期待されるが、個別ファンディングの縦割り的な運用にならないよう、注意する必要がある。また、このような産業界の人材が集まっている中で、大学の学生が加わることは人材育成の視点で大変重要であり、大学からの学生の長期派遣の仕組みづくりを行う必要がある。

まだ萌芽的段階にあり先の長い量子計算をものにするためには、産学官で研究交流・人材交流を密に行い協同していくことが重要である。大学では特に基本原理実証や基礎物理の追究を行うとともに、若い人材を育て研究分野に供給すること、国の研究機関ではじっくり腰を据えてより発展的な研究ができる環境を研究者に提供すること、産業界ではこれまでに蓄積されてきた技術的ノウハウ（特に材料技術、回路製造技術など）を新たな研究に有用に活かすことが期待される。また、長期的な視点を持って短中期の目標を説得力のある形で作成し、確実に研究を発展させていくようなプロジェクトの提案を行うとともに、優秀な研究者の国際的な循環に食い込めるような研究拠点を国内にも確立することが期待される。

（5）注目動向

［新たな技術動向］

基本素子だけでのアプローチには限界があり、集積回路レベルからの回路ネットワークの革新と情報アルゴリズムの革新の融合による新しいアプローチは、萌芽的レベルながら世界中で行われ始めている。また、「Memory on Logic」は世界的な動向になりつつある。ロジックとメモリのデバイス・システムレベルでの協調設計（デバイスの性能や信頼性にまで配慮した設計）が重要になる。

ロジック関係では発熱・消費電力を十分に抑える必要があるため、ナノワイヤトランジスタやFinFETなどの3次元構造トランジスタの開発とともに、TFET（Tunneling FET、トンネル・トランジスタ）などの急峻なサブスレッショルド特性を持つデバイスの開発が盛んになっている。

スピントロニクス関係では、強磁性体からSiへのスピン注入、スピン蓄積、およびスピン伝導が室温で確認されつつある。強磁性体からSiに高効率にスピン注入するために必要な界面構造・材料・バンドギャップエンジニアリングが具体化してきた。また、スピン注入源となる高スピン分極率の材料（ハーフメタル）が、CMOSプロセスと親和性のある製法を含めて実用化検討が進められている。

ナノカーボン関係では、グラフェンに制御された欠陥を導入することで磁化が発現することが理論･シミュレーションにより示されている。単原子（C）欠陥、線状欠陥（zigzag edge）が有効であることが示され、高密度磁気記録媒体への応用などが提案されている。また、Samsungは韓国内の多数の大学と連携し、大学側からの発表の形態でグラフェンやCNTの集積的な機能実証についての報告を始めている。グラフェンの大面積合成と転写による大面積の透明導電膜（2010年のNature）などの例のように、大面積化や大面積のロールベースでの転写プロセスなどのプロセス課題を含む取り組みで、ナノカーボン材料デバイスインテグレーションを意識している。

脳型演算回路関係では、シナプスに対する医学・生理学的理解の深耕と、抵抗変化型メモリや相変化型メモリの登場が上手くマッチしていることから、人間の脳情報処理に習った密結合型の3次元ネットワークを有する高密度メモリ技術とその集積プロセス技術、高効率な情報処理アルゴリズムとそれを具現化する回路技術などの研究開発が盛んになってきている。人間の脳では、「記憶」と「忘却」を繰り返すことで重要な情報のみ「経験」として蓄積し、新たな判断に利用しているが、この「記憶」と「忘却」を自律的に行う固体素子の動作も、最近、国内で実証された。スピントロニクス素子を用いたシナプス動作の研究なども進みつつあり、脳の情報処理の本質をまねたコンピュータの開発も視野に入れつつある。

量子情報関係では、量子ビットのコヒーレンスの改善について空洞共振器中に量子ビットを配置することで寿命が飛躍的に伸びることが2011年に示され（Yale大学）、今年には100μs近くのものが報告されている（IBM）。この進展を受けて、量子ビットの制御・観測の精度が飛躍的に高まり、今年に入り量子フィードバックの実験が立て続けに報告された（UCB、Delft大）。これは量子エラー訂正アルゴリズムの本格的な実証につながる動きであり、実際大規模な量子誤り耐性アーキテクチャを目指した研究が始まっている。また、昨年にカナダのD-Wave社は128量子ビットで構成された量子コンピュータ1号機をLockheed-Martinに納入した。

［注目すべきプロジェクト］

米国では、新規な素子を用いたコンピューターシステムの開発に関する大型の国家プロジェクトが進んでいる。また、米国や欧州では Neuromorphic Computing に関するプロジェクトが新たに立ち上がりつつある。

米国におけるマグネティック・コンピューティング研究の一環と思われる電歪と磁歪を組み合わせた磁気異方性制御手法が U.C.Berkeley から発表されている。同プログラムには DARPA、NRI、NSF などの予算がついているもようである。

量子計算関係においては米国が圧倒的な層の厚さを持っており、軍事予算を通した研究サポートもある。現在，超伝導量子ビットや半導体量子ドット、イオントラップなどいくつかの系については大きなプロジェクトが走っている。IARPA を中心に集中的な活動が行われ、2009 年より 5 年間の大規模プロジェクトである Advanced Materials and Fabrication for Coherent Superconducting Qubits Program では超伝導量子ビットのコヒーレンス時間を向上するための材料･プロセスの研究に集中している。また並行して走っている Multi-Qubit Coherent Operations（MQCO）Program ではひとつのテーマとして超伝導量子ビット集積回路が取り上げられ、IBM と BBN Technology が共同で受託している。

（6）キーワード

- リーク電流、不揮発性メモリ、不揮発ロジック、不揮発性トランジスタ、待機電力ゼロ
- インスタント・オン、ロジック・イン・メモリ、集積半導体、More Moore、More than Moore 、Beyond CMOS
- 抵抗変化メモリ、立体構造トランジスタ、トンネル・トランジスタ
- スピントロニクス、磁化反転、電圧駆動、電界誘起、スピン MOSFET、スピン伝導、スピン流、スピン注入、スピン蓄積、スピンデバイス、スピンロジック
- CNT、グラフェン（Graphene）、GNR、単原子欠陥
- 脳型コンピュータ、脳型素子、自律的学習、非ノイマン型、ニューロン、シナプス
- 量子情報処理，量子計算，量子通信，量子光学，量子計測，量子シミュレーション
- 原子物理学、超伝導、シリコン、原子レベル計算

（7-1）国際比較（ロジック、メモリ関係）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	ロジック関係では、Steep Subthreshold を目指したデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの研究開発など、重要な研究領域にしっかりとした投資が行われ、深い学術的理解に基づく研究開発が行われている。 メモリ関係では、従来の電荷蓄積型に代わり、状態変化（抵抗変化など）を動作原理とする不揮発メモリの基礎研究が盛んであり、材料、プロセスなどの分野で世界をリードする結果が報告されている。特にスピン RAM に関しては、10^{16} 回の書き換え回数が実証され、SRAM に代わる低電力不揮発キャッシュメモリへの適用が見通せるようになってきた。また、GeSbTe の相変化を用いる抵抗変化メモリでは、超格子相変化膜という新しい概念が日本から提案された。スピントロニクス関係の評価では若手を中心に多くの成果が出ている。
	応用研究・開発	○	↗	ロジック関係のデバイス技術が日本の差別化技術にならなくなりつつある。 メモリ関係では、DRAM や NAND フラッシュメモリの微細化限界が迫っており、これに代わる不揮発メモリの開発が活発に行われている。NAND フラッシュメモリを製造している東芝は、DRAM 代替としてスピン RAM を使うことを目指した開発を、韓国の DRAM および NAND フラッシュメーカーと技術的な補完関係を構築しながら共同で進めている。一方、高集積 DRAM に関しては、エルピーダメモリは新しいメモリの候補として、ReRAM の成果を発表している。 産官学連携の研究開発としては、つくば TIA を活用したウェハ試作が挙げられる。産業技術総合研究所の 300mm ウェハ試作ラインを用いて、不揮発メモリを配線工程として埋め込むための試作環境が構築され、新材料を用いたデバイスの検証を加速する環境が整ってきた。スピントロニクスによる磁気メモリや不揮発性論理回路への応用研究・開発などには国からの集中投資がなされ活発化している。
	産業化	○	→	汎用のロジックデバイスでは日本企業として儲かる道筋が描けていない。 世界で初めてパナソニックが ReRAM を不揮発メモリとして搭載した低電力マイコンを開発した。ルネサスエレクトロニクスは 40nm 世代のマイコンを発表し、高い市場占有率を持っている自動車用マイコンをさらに強固にする製品と位置付けている。プログラム格納用の不揮発メモリは、同社独自の MONOS であり、低電力高速、高信頼という特徴を有しており、他社が追随できない技術になっている。
米国	基礎研究	◎	→	HP ラボを中心としたメモリスタの研究が活発。また、トポロジカル絶縁体の研究など、新研究領域の取りかかり・立ち上がりが早い。 IBM が 12 個の Fe 原子を配列した構造で、記憶動作ができることを実証した。この報告が示すように、IBM はここ数年、磁性を使った新しいメモリを提唱し動作を実証しており、依然として基礎研究をリードする存在である。
	応用研究・開発	○	↗	シリコンフォトニクスの研究開発は猛烈なスピードで進んでいる。 新メモリとして注目される Hewlet Packard の提唱する Memristor は、現在、韓国の SK-Hynix とこの原理を使った ReRAM の開発を進めており、2014 ～ 2015 に製品化を想定している。また、CMOx と呼ぶ抵抗変化型メモリを研究開発してきた Unity Semiconductor を Rambus が買収した。Rambus はメモリの高速インターフェース技術に長けた会社であり、Unity Semiconductor のデバイスを用いて不揮発メモリ分野への進出を図ったものと予想され、今後の展開が注目される。米国ではベンチャーが応用研究・開発を加速している点が日本と異なる。
	産業化	○	↗	ロジックでは Intel、メモリでは Micron など米国内で各分野 1 社あるいは数社が生き残り、未だこの分野での産業化の意欲も高い。 Everspin Techologies の MRAM（磁場書き換え型）が、SSD ストレージの信頼性と性能を向上させるために使われ始めた。MRAM をキャッシュとして使い、電源遮断に対する耐性を高め、起動スピードの向上や、待機時・読み込み時の消費電力の低減を狙っている。また、Micron-Intel の合弁会社が、業界初の 1G ビットの相変化メモリをモバイル向けに製品化した。

欧州	基礎研究	◎	↗	グラフェンのノーベル賞受賞を契機として、英国を中心にグラフェン関係の予算が大きく出ている。また、急峻な S 係数の実現を目指した STEEPER Project（http://www.steeper-project.org）を組織するなど、機関を横断した活発な研究活動が行われている。そもそもは、More-than-Moore をはじめとした、米国の More Moore とは異なる視点での研究を指向する傾向があるが、超低消費電力ナノエレクトロニクスについては、米国と似た方向性が感じられる。
	応用研究・開発	○	↗	論文発表でベルギー IMEC の研究センターとしての存在が際立っている。（2012 年 6 月 IEEE VLSI Technology Symposium：8 件、2012 年 12 月 IEEE IEDM：9 件） また、IMEC が MRAM の開発に力を入れ始めた。STT-MRAM を、サブ-1X-nm 時代において DRAM や SRAM に代わるメモリの候補として捉え、積極的に人材確保を行っている。
	産業化	△	→	基本的には、デバイスメーカーがほとんど無いため、産業化の勢いは感じられない。 ZRAM（SOI 基板の基板浮遊効果を利用したキャパシタのない DRAM）を提案し、産業化で注目されていた Innovative Silicon が 2011 年 5 月に事業を閉じたという情報があり、新デバイスの産業化に対する期待が大きく萎んだ。
中国	基礎研究	○	↗	大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究している。幅広い領域で多くのプレーヤー（研究者）が研究開発に参加している。突出した研究者は未だ認識できないが、裾野の広がりと平均的な研究レベルの向上が目覚ましい。 国家納米（ナノ）科学中心をセンターとして、ナノテク分野の国際会議などを開いており、活発な活動を行っている。
	応用研究・開発	△	→	デバイスメーカーが育てば、応用研究・開発のアクティビティも高まるものと思われる。
	産業化	△	→	世界的に競争力のあるデバイスメーカーが無い。また、新デバイスの産業化に関する情報もない。
韓国	基礎研究	○	↗	基礎研究よりも、やや応用よりの研究が多い。しかし、大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究しており、KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）が評価を上げている。半導体関係では DNA でロジック回路機能を実現したり、たんぱく質を使ったストレージなど、半導体とバイオを融合したデバイスを発表している。
	応用研究・開発	○	↗	三星などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発が盛んに行われている。グラフェンの成長技術開発などが盛んである。 メモリに関して SK-Hynix が活発な開発を行っている。HP とは ReRAM の共同開発を行い、東芝とは DRAM 代替を狙った MRAM の研究開発を行っている。また、PCRAM に関しては IBM と共同開発することを発表した。三星も MRAM などに多くの人数を投入して研究開発を行っている。
	産業化	◎	↗	デバイスメーカーの国際競争力が高いため、産業化の意欲・力ともに高い。 三星は NAND フラッシュメモリの量産化を加速するために、中国に工場を新設すると発表した。同社初の中国工場であり、投資額は 70 億ドル（約 5600 億円）という巨額で、今後数年間にわたり段階的に投資をする。
台湾	基礎研究	○	→	ITRI（Industrial Technology Research Institute）で新メモリの研究を積極的に行っている。Nano Electronics Technology 部門で ReRAM や STT-RAM の研究開発を行っている。
	応用研究・開発	○	→	台湾の応用研究・開発では Macronix が注目される。電荷保持膜を使った不揮発性メモリなど、新デバイスを用いた製品を出してきた。Macronox は PCM に関して IBM と共同研究を行っていが、最近では、ReRAM や原子移動に似た CBRAM（Conductive Bridge）RAM などを独自に開発している。
	産業化	◎	↗	TSMC の投資が加速しており、2012 年度は 80 ～ 85 億ドル（6400 ～ 6800 億円）と巨額である。28nm ルールの製品に対応するための投資であり、20nm 以降も見込んだものである。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（7-2）国際比較（量子情報関係）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」、新学術領域研究「量子サイバネティクス」の支援を中心に、NEC / 理研、NTT の 2 グループが主になって研究を行っている。前者では近年超伝導量子ビットを人工原子として用いたマイクロ波量子光学の研究や、新しいタイプの量子ビットであるコヒーレント位相スリップ量子ビットの実証で成果を挙げている。後者では昨年ダイヤモンド中の NV 中心の持つスピンと超伝導量子ビットを結合したハイブリッド量子系の実証を行った。 大学における研究チームが少なく、海外に比べて学生・若手研究者の育成に遅れがある。 理論面では理研チームが、海外研究者と活発に交流し成果を挙げている。ただし国内他のチームへの広がりが少ない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
米国	基礎研究	◎	↗	UC Santa Barbara（UCSB）チームと Yale 大学のチームなどにより、この 10 年間に急速な発展を見せている。UCSB では位相量子ビットと超伝導共振回路を用いた量子計算のための集積化アーキテクチャを提案し、2011 年に 4 ビット＋ 5 共振器の回路で Shor のアルゴリズムの実証を行った。Yale 大学は 2004 年に回路量子電磁力学のアイデアを実証するとともに 2007 年に transmon 型量子ビットを発明した。2011 年には空洞共振器中の transmon 量子ビットが非常によいコヒーレンスを示すことを実証した。また 3 ビットの量子エラー訂正の実証も行った。Boulder の NIST と JILA では超伝導量子回路を用いたナノメカニクスの量子力学的振る舞いの制御と観測が行われ、さらにオプトナノメカニクスとの融合が図られ、マイクロ波と光の間の量子インターフェイスの実現を目指している。JILA 同様、UC Berkeley（UCB）、Princeton、Chicago、Wisconsin などの各大学に続々と UCSB、Yale の卒業生がグループを立ち上げそれぞれ新たな成果を挙げている。APS March Meeting でも発表件数が非常に多い状況が続いている。 企業では IBM が UCSB や Yale 大学の OB を中心に 15 名近くのチームを構成し、研究を進めている。IBM は BBN Technology と一緒に IARPA の Multi-qubit project を受けて超伝導量子計算回路のスケールアップを目指している。他に Northlop-Grumann も低電力消費型の単一磁束量子論理回路を量子ビット回路の制御に用いる研究を行っている。 IARPA は別のプロジェクト Coherent superconducting qubits も走らせていて、UCSB を中心として超伝導量子ビットのコヒーレンスを改善するための材料・プロセス研究を大規模に進めている。こちらは 5 年のプロジェクトの後半にかかっているが、当初 15 ぐらいあった研究チームが現在は 3 つ（UCSB、Yale、UCB）に絞り込まれている。理論研究では Yale 大学の他に、UC Riverside、Northwestern、カナダの McGill、Sherbrooke などのチームが活躍している。また IBM では量子情報理論のチームと超伝導回路のグループが密接に連携している。
	応用研究・開発	◎	↗	カナダのベンチャー企業 D-wave が、断熱量子計算システムを開発し、2011 年に米国 Lockheed-Martin 社に 128 量子ビットモデルの 1 号機を販売した。U. South California（USC）に運営を委託し研究に供している。また D-wave では Web 上で詳細を公開し、外部からの試用も推奨している。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

欧州	基礎研究	◎	→	EU のプロジェクト（例えば FP7 のもとの SOLID）およびと各国独自のプログラム、また European Research Council の研究者個人対象のプロジェクトなどでサポートされている。世代交代が進み、40 才以下の比較的若い研究リーダーが中心的役割を担うようになってきている。基礎物理的な研究が主流であり、原子物理や量子光学などとの交流も多い。 スイスの ETH Zurich にも Yale 大学 OB が研究室を構え、30 名近くの大きなグループで精力的に研究を行い、回路量子電磁力学の研究で多くの成果を挙げている。オランダの Delft 工科大学にも Yale 大学の OB が着任し、量子フィードバックや量子エラー訂正の研究を進めている。フランスの CEA Saclay 研究所はこの分野の草分け的存在であり、固体中のスピン集団を用いた量子メモリの研究など現在も高いレベルの研究を行っている。Ecole Normale Superieure にも新しいチームが立ち上がりマイクロ波量子光学、NEMS などの研究が行われている。スウェーデンの Chalmers 工科大学ではマイクロ波量子光学に関する成果として、理研の理論グループとの共同研究による dynamical Casimir 効果の観測が報告された。フィンランドの Aalto 大学は現在超伝導ナノメカニクスの量子的振る舞いの研究に力を入れている。ドイツでは Erlangen、Karlsruhe、Aachen 大学に強力な理論のグループがある。実験では Karlsruhe および Jena 大学が力を入れている。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
中国	基礎研究	△	↗	清華大学、復旦大学などに活発な理論グループあり、理研との交流が多い。 実験グループは清華大学、南京大学、浙江大学などで米国帰りの研究者が立ち上げているが、まだ独自の優れた成果を出すには至っていない。 学生層は厚く、欧米、日本へ留学している学生・ポスドクも多い。今後の伸びが予想される。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
韓国	基礎研究	×	→	目に見える活動はない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

（ロジック・メモリ関係）

1）http://www.nature.com/news/2011/110308/full/news.2011.143.html
2）http://spectrum.ieee.org/robotics/artificial-intelligence/moneta-a-mind-made-from-memristors/0
3）C. Yoshida et. al. "Demonstration of non-volatile working memory through interface engineering in STT-MRAM ," 2012 Symposium on VLSI Technology, p. 59, 2012.
4）J. Tominaga et. al., "The first principle computer simulation and real device characteristics of superlattice phase-change memory," 2010 IEEE International Electron Devices Meeting, p. 22.3.1, 2010.

5）http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_07/pr_j1306.htm.
6）http://www.elpida.com/pdfs/pr/2012-02-27j.pdf.
7）http://www.elpida.com/ja/news/2012/01-24r.html.
8）http://www.leap.or.jp/index.html.
9）http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120515-1/jn120515-1.html#1.
10）http://japan.renesas.com/edge_ol/special/01/index.jsp.
11）http://eetimes.jp/ee/articles/1202/01/news020.html.
12）http://www.kavlifoundation.org/science-spotlights/how-atomic-scale-devices-are-transforming-electronics.
13）http://www.rambus.com/us/news/press_releases/2012/120206.html.
14）http://eetimes.jp/ee/articles/1205/10/news089.html.
15）http://investors.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=692563.
16）http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imeciedm12papers.html.
17）http://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20120615_01.pdf.
18）http://thegadgetsite.com/2011/05/innovative-silicon-closing-doors-for-good/.
19）http://www.nanoctr.cn/.
20）http://www.kaist.edu/edu.html.
21）http://www.skhynix.com/en/pr_room/news-data-view.jsp?search.seq=2072&search.gubun=0014.
22）http://jp.reuters.com/article/technologyNews/idJPTYE83105F20120402.
23）http://www.itri.org.tw/eng/econtent/research/research03_01.aspx?SItem=1.
24）W. C. Chien et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, P.153.
25）F. M. Lee et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, p.67.
26）http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20120501/215675/?P=2.

（量子情報関係）

1）Quantum computing: An IBM perspective, M. Steffen *et al.*, IBM J. Res. & Dev. 55, 13（2011）.
2）European Commission: CORDIS http://qurope.eu/projects/solid
3）European Commission: CORDIS: FP7: ICT: FET http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fet-proactive/qift_en.html
4）European Research Council　http://erc.europa.eu/
5）D-wave http://www.dwavesys.com/en/dw_homepage.html
6）「実験の進展― 巨視的量子効果としての超伝導」中村泰信、日本物理学会誌 66, 762（2011）.

3. 3. 2　異種機能三次元集積チップ

（1）研究開発領域名

異種機能三次元集積チップ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

異なる機能を持つエレクトロニクス回路を効果的に集積し、集積回路チップの多機能化・小型化・低消費電力化を実現し、エレクトロニクス機器への適用を検証する。三次元的な集積を可能にするウェハの薄膜化、高信頼のウエハボンディング（接合）、熱設計などの要素レベルの研究開発課題や、低電圧ロジック、メモリ、イメージセンサ、シリコンフォトニクスなどの異なる機能を持つエレクトロニクス回路を三次元集積して特性向上の確認を行うなど機能レベルの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

エレクトロニクス機器は大規模集積回路（LSI）の微細化・高集積化とともに性能や機能が向上し、家庭における液晶テレビなどの省エネルギー家電、高画素数のデジタルカメラ・ビデオカメラ、高速なインターネット、携帯電話・スマートフォン・携帯端末などの普及を通して、社会や生活の利便性を高めてきた。このような LSI の流れは今後も続くことが期待されるが、ゲート長縮小に代表される伝統的な 2 次元的スケーリングによるトランジスタの微細化限界が現実味を帯びるようになってきた。このため、III-V 族半導体や Ge などチャネル新材料、三次元トランジスタやナノワイヤトランジスタなど新構造導入によるなど価的スケーリングとともに、機能の異なる複数のチップを積層するような三次元集積化によるシステムレベルでのスケーリングが重要になってきている。例えば、従来は別チップとして作製されていたメモリとロジックを積層して 1 つのチップにできれば、面積効率が高まるだけでなく，メモリ／ロジック間の通信速度を劇的に上げることが可能となり，低消費電力性と高速性の両方を満足することも可能になる。また、高周波の通信機能やイメージセンサ、加速度センサなどの異なる機能のチップを積層することにより、携帯端末の厚さをさらに薄くすることも可能になる。国外ファウンドリ依存が進む中で、国内の半導体メーカーが強化すべきものの一つとして三次元集積の設計・製造技術（システム / 回路 / デバイス / 材料技術を含む）のプラットフォーム化がある。デバイスレベルからシステムレベルまで、徹底した二次元集積化と共に、三次元集積化を新たな基軸に加えていくことが必要である。最終製品を企画・製造する日本だからこそ必要な研究開発テーマであると言え、スマートエネルギーシステム、基幹情報処理システム、家電機器、Mobile 機器など、情報処理を必要とするシステム全般の高度化が期待される。

ロジック、メモリ、センサ、シリコンフォトニクスなどの異なる機能を持つエレクトロニクス回路を三次元に集積させる「異種機能三次元集積チップ」は More than Moore が主戦場になると考えられるが、そこで培われる知と技術の一部、あるいは全てが CMOS 技術に取り込まれ、LSI の多機能化、小型化、低消費電力化に寄与するため、これから取り組むべき重要技術課題として認識しておく必要がある。メモリ・オン・ロジック（ロジックとメモリの融合）、スピントロニクス（スピンとエレクトロニクスの融合）、シリコンフォトニクス（フォトニクスとエレクトロニクスの融合）、イメージセンサ（CMOS センサと

CMOS 回路の融合）などが注目分野である。

［これまでの取組み］

シリコンウェハの薄化、Si 貫通ビア（TSV）、マイクロバンプによる接合技術を中核とする三次元集積化技術は、1998 年に日本の ASET が先駆けて基礎開発を展開した。その開発は、2003 年から一時中断し、2007 年に再開してドリームチッププロジェクト（2008 年～ 2012 年）に受け継がれ、熱・積層接合技術、薄ウェハ技術、3D インテグレーション技術、超ワイドバス SiP 3D 技術、デジアナ混載 3D 技術、ヘテロジーニアス 3D 技術の開発に取り組み、数多くの成果が出ている。また、東京大学を中心にディスコ、大日本印刷、富士通研究所などが参画する産学アライアンス（WoW アライアンス）が形成されており、世界に先駆けてウェハの積層に成功している。エルピーダ社が TSV によって DRAM の高容量化を図り、世界に先駆けて製品化（2011 年 6 月）に漕ぎ着けている。

欧米と東南ア諸国は 2001 年頃から巨額の研究開発資金をこの技術開発にあて、基礎と実用開発の両面から研究を本格展開している。欧州の IMEC や LETI などは自分自身で高い CMOS 技術を持ちながら、光－電子融合分野でも研究を行っているので、次を見据えて三次元集積化に対して精力的に活動している。米国では IBM や Intel がナノ材料技術、ナノデバイス技術、3D IC 形成技術、LSI 設計技術、システム設計技術を手掛け始めており、また、ベンチャー企業が積極的に投資を行っている。アジアでは、韓国 Samsung がメモリのトップメーカーとして DRAM、NAND フラッシュメモリの積層に取り組んでいる他、Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）でも TSV 技術開発が進められている。シンガポールでは Institute of Microelectronics（IME）で、台湾では Taiwan Semiconductor Manufacturing Company（TSMC）と Industrial Technology Research Institute of Taiwan（ITRI）にて TSV に関する技術開発が進められている。

三次元集積のキー技術の一つである貼り付け技術は一部ではすでに使われている。例えば、iPhone や iPad に使われているソニーの CMOS のイメージセンサには、ウェハのボンディング技術が使われている。なお、貼り付け装置としては、SOI 基板形成装置を積極的にやっていた EVG グループのものとマスクアライナ装置との連動が可能な SUSS のものがほとんどのマーケットシェアを取っている。

［今後必要となる取組み］

シリコンの三次元集積化については、基礎的な技術の第一ステージは終わりを迎え、応用開発のステージに移ったと言える。一方で、化合物半導体とシリコン CMOS、MEMS とシリコン CMOS の異種機能の集積化が新たな価値を生み出すことが期待され、ナノ材料技術、ナノデバイス技術、ウェハの常温接合や新たな封止材、真空封止法など基礎・基盤的な研究や装置開発も含め新たな技術開発が必要になってくる。

また、3D LSI 設計技術、システム設計技術、さらにそれらの融合分野の科学的知識を統合する必要がある。このためには、異種基板という大きなプラットフォームの中で、LSI プロセス関係、光関係、MEMS 関係、回路関係などの人が集まってやることが必要である。

新たな産業として期待できる応用領域としては、車載、健康医療、社会システムなどがある。また、先端領域では欧米の協力で進んでいる HEP（High Energy Physics）など

がある。このような応用を念頭に置き、それらに最適な機能の組み合わせを考慮した技術開発・知の集積が重要である。

（4）科学技術的・政策的課題

日本における異種機能三次元集積チップの研究を進める上での課題としては、最先端のCMOS 加工技術をラインとして有しているファウンドリがないことや、筑波の TIA などのファウンドリでは CMOS プロセス以外のことを実行する自由度が少ないことである。欧米の協力で進んでいる「3DIC Multi-Project Wafer Service」の様な異種機能三次元集積化デバイスの開発を手助けするファウンドリや CEA-LETI の「Open 3D ™ Initiative」にあるような研究機関の構築が日本でも必要である。産業界はすでに開発が進められている三次元実装の研究開発成果やその分野における研究開発人材を自社に抱えることなく研究開発拠点に集約し、大学あるいは研究開発独法などの中立的機関を中核として国際競争に負けない体制を構築する必要がある。

また、知識の共有と共通プラットフォーム化を行い、将来的に新たな機能を追加したいときのフレキシビリティを確保しておくことも重要である。三次元集積化技術をサイエンスとしてとらえ、基礎理工学に立脚した技術開発とそのインフラ作りを進めることも必要である。さらに、知的財産取扱いに係わる組織間の軋轢を取り除き、旧テーマの知的資産を Background として扱い、非競争領域における効率的な研究開発により新しいテーマの Foreground における多くの知的財産を生み出す仕組みも必要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

最近では、International Electron Devices Meeting（IEDM）、VLSI Symposium に代表される電子デバイス･回路に関する主要国際会議において、三次元集積に関するセッションが設けられている。カーボンナノチューブなどを用いたチップ間配線技術、光 TSV、チップ間を容量結合や誘導結合を用いた無線通信方式による三次元集積化技術などが発表されている。

ウエハボンディング技術、マイクロバンプなどを使って三次元集積をしていくという三次元貼り付け技術といわれるものが注目されている。例えば、プラズマ活性を使った表面活性化接合（SAB、Surface Activated Bonding）技術がある。銅と銅の配線をむきだした表面に対し、プラズマチャンバーの中でアルゴンを照射して表面にダングリングボンドを形成させると、全く温度を上げなくても室温で貼り付け可能となる。

Intel は、世界初となる 22nm FinFET を実用化し微細化を追求する姿勢を示していることから、主要学会での TSV に関する発表は多く見られないが、TSV のマイクロプロセッサ応用計画を早くに発表しており、開発は着実に進められていると考えられる。

［注目すべきプロジェクト］

角形のチップに対してフォトリソグラフィーによる微細加工を施し、三次元積層実装まで実現するためのプロセス・装置の共同開発が国内でスタートしようとしている。生産技術として受容されるまでには技術的課題が少なくないが、究極の少量多品種生産性を活かした異種機能集積による新たな価値と応用市場の開拓に向けて高い潜在性を持つと考えら

れる。

異種機能の三次元集積に関わる日本の主要国家プロジェクトとしては、スピントロニクス素子を用いた待機時電力ゼロのロジック混載用不揮発性メモリ実用化技術の開発が進められている最先端研究開発支援プログラム（FIRST）の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」、LSI の配線層に集積を可能とする磁性変化デバイス、相変化デバイス、原子移動型スイッチの開発が進められている新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト（LEAP）」、三次元集積化共通基盤技術と製品レベルの 3 次元化技術の研究開発を行う NEDO の「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発プロジェクト」がある。

欧州では、IMEC がサブ 22nm CMOS（sub-22nm CMOS）、ヘテロジーニアス集積（Heterogeneous integration）の研究プログラムを設定し、この中で三次元デバイス、三次元配線の他、MEMS、シリコンフォトニクス、パワーデバイスとのインテグレーションを CMORE と称して技術開発を進めている。CEA-LETI は「Open 3D」イニシアティブを発表し、TSV を用いた三次元集積デバイスの試作サービスを開始している。デザイン、信頼性試験、パッケージングなどの技術サービスもカバーしている。

（6）キーワード

- 三次元集積、異種機能集積、配線層集積、三次元実装、3D chip stack、3D-IC 設計技術、大規模 LSI 設計
- ロジック、メモリ、高周波回路、パワーデバイス
- 光電融合、シリコンフォトニクス、MEMS、イメージセンサ
- シリコン貫通ビア（TSV）、ウエハボンディング、プラズマ表面処理、熱設計

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	異種機能三次元集積化デバイスを実現する、TSV（Through Silicon Via）三次元集積化技術・非接触通信技術・MEMS 技術などの基礎研究開発が、東北大、東京大、京都大、大阪大、広島大、東工大、慶応大、産業技術総合研究所（つくばイノベーションアリーナ）など一部の大学・研究機関において、産学連携も含め活発に行われており、W/Cu ハイブリッド TSV を用いた高密度三次元 LSI プロセス技術、三次元積層再構成スピンロジック LSI などの成果もある。しかし、予算的には豊かとはいえない。 また、個々の要素技術に関する会議で、素材も含めて先端技術の発表が多い。
	応用研究・開発	○	→	三次元集積化技術開発では、2008 年度より 2012 年の予定で経済産業省・NEDO プロジェクトとして、技術研究組合　超先端電子技術開発機構（ASET）が中核となり、東京大学や東北大学なども共同して、実用化を目指した研究開発が進んできた。また、九州の三次元半導体研究センターなど地方でも研究開発が行われている。ただし、それらの間の連携は無く、グローバル化も課題である。 シリコン貫通電極配線（TSV）技術を使った異種機能の集積化技術の応用に関する情報発信がほとんど無い。化合物 j 半導体とシリコン CMOS の集積化についても産業界からの目立った情報発信はない。 デバイスや LSI の主要学会への日本企業からの投稿や発表は、極めて少なくなってきていることなど、現在日本の置かれていることへの現状認識と対応が必要である。
	産業化	△	↘	日本の半導体企業は、エルピーメモリの会社更生法適用やルネサスエレクトロニクスのリストラに代表されるように、ますます、産業の斜陽化が進んでいるために、ほとんど異種機能三次元集積化技術の産業化が進んでいない。ソニーが裏面照射（BSI）CMOS イメージセンサの量産を開始したのと、エルピーダメモリ社が TSV によって DRAM の高容量化を図り、世界に先駆けてサンプル出荷したとのニュースがある程度である。ロジックとメモリを積層したワイドバンド I/O プロセッサの開発にも出遅れ感がある。画像エンコーダの高性能化に有用であることが実証されているが、事業化に向けた動きは鈍い。今後東芝の NAND メモリが採用への期待はある。
米国	基礎研究	◎	→	SEMATECH、IBM を中心にウエハレベルでの三次元集積化に関して先端的位置を堅持している。例えば、TSV の高密度化で発生するシリコン歪みを回避するための TSV 構造など、インパクトの大きな成果を出している。また、DARPA や MIT リンカーンラボなどが中心となり多くの大学が参画し、軍事・航空宇宙産業からの研究予算をもとに、3DM3 プロジェクトのような次世代電子システム構築に向けた多くの産官学の研究・開発が進められている。その他、大学では、NCSU、Stanford 大、ジョージアテックを始め、Arkansas、Texas、PRI、UMN、Rochester 大など、多くの大学が設計から信頼性まで幅の広い研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	三次元ロジック、マルチコアまたはメニーコア型のプロセッサと TSV 三次元メモリ、積層型再構成型ゲートアレイ（FPGA）など、三次元化技術や異種機能集積化技術を積極的に応用する開発が進められている。例えば、IBM 社が TSV で 32nm DRAM 2 チップを積層した LSI を開発し、実用化に耐える性能や信頼性を実証している。また、Felmi Lab が 3D の CMC / CMP / MOSIS partnering による MPW（Multi Project Wafer）を利用して Tezzaron の協力により HEP（High Energy Physics）向けセンサの開発を行うなど、研究領域の幅が広く、欧州との共同研究体制もできている。さらに、NCSU と Tezzaron が共同で 3 D のデザインキットを提供するなど、開発のサポートも行われている。

	産業化	○	↗	IBM やインテルといった民間企業でも、高性能デバイスに向けた三次元集積化技術の実用化研究など、次世代対応の技術開発が積極的に進められている。また、Xilinx や Altera といった FPGA メーカが積極的に TSV シリコンインターポーザを使った（いわゆる 2.5 次元 LSI）異種機能三次元集積化デバイスを実現すべく動きが活発である。さらに、Qualcomm や Cisco など、特定の製品に高い世界シェアを持つファブレス企業も三次元集積化技術の採用に向け積極的に動いている。Cadence などの CAD ベンダーの開発も盛んである。一方 DRAM でも、TSV を使ってモバイル機器向けに JEDEC が Wide IO の規格の標準化を行ったり、Micron は HMC と称して、サーバーなどハイエンド向けの開発コンソーシアムを立ち上げるなど、開発競争は非常に活発化していて、DARPA が進める次世代スパコン開発の Echelon プロジェクトの候補にもなっている。
欧州	基礎研究	◎	↗	Fraunhofer IZM や IMEC、CEA-LETI といった欧州を代表するコンソーシアムや研究機関を中心として、TSV 技術、接合技術、薄化技術などの要素技術とプロセスインテグレーションに関する研究など三次元集積化技術の次世代対応の研究・開発が進められている。例えば、IMEC では、MtM（More than Moore）として MEMS、シリコンフォトニクス、パワーデバイスとのインテグレーションをする CMORE や APIC（Advanced Packaging and Interconnect Program）プログラムがあり、低コスト化を狙った新技術も多く発表されている。CEA-LETI では、300 mmの三次元集積化技術研究開発ラインが構築されている。HEP 領域では、イタリア、ドイツ、フランスなどが協力して、米国同様 3D MPW を活用した共同研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	European ICT Project は、e-CUBES に引き続き 2010-2013 の e-BRAIN 計画で、ヘテロジーニアスインテグレーションとして、Nanosensor System の開発が進んでいる。また、CEA-LETI が Open 3D ™ Initiative を立ち上げて、TSV を用いた三次元集積デバイスの試作サービスを開始し、研究開発の促進をサポートする体制を整えた。
	産業化	△	↗	STMicro が、Smart System と称し、健康、医療、自動車、社会システム向けのデバイス開発を行っている。また、MEMS センサなどの強い製品を保有しており、CMOS イメージセンサや MEMS など、製品化意欲も旺盛である。
中国	基礎研究	×	→	この種の技術に関する学会発表はほとんど無い。日本、欧米の研究の後追いの感がある精華大学の研究例が見られたり、米国の大学との共同研究が見られる程度である。
	応用研究・開発	×	→	一部でシンガポールとの共同研究開発が動きだした程度で、目立った情報はない。
	産業化	×	→	産業化事例は見えない。
韓国	基礎研究	△	→	日本、欧米の研究の後追いの感があったが、最近では国家の支援があり三次元集積化技術の開発が積極化している。Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）が TSV 技術を手掛けているが、最近目立った発表は認められない。Samsung 社や Hynix 社で三次元積層メモリ向けの技術開発が進められているが、基礎研究レベルでインパクトのある成果は必ずしも多くない。
	応用研究・開発	○	↗	KAIST は TSV 三次元集積回路技術の電気特性の評価技術に力を入れている。Samsung 社がメモリのトップメーカーとして DRAM、NAND フラッシュメモリの積層技術を開発し、実用化開発は精力的に進めている。
	産業化	○	↗	Samsung 社と Hynix 社が DRAM 向けに TSV 三次元集積回路技術の開発が行っていおり、Samsung 社が TSV によって実装した DRAM をサンプル出荷した。技術開発では、SEMATECH や IMEC に参画、DRAM の規格化でも、積極的に欧米との関係を深めている。また、ワイドバンド I/O プロセッサは携帯端末向けの低電力プロセッサとしての切り札であり、今後大きな韓国内企業の大きな事業になると見込まれる。

台湾	基礎研究	○	↗	2008 年、ITRI（Industrial Technology Research Institute：工業技術研究院）が国際的三次元集積化技術のコンソーシアム（Sd-STAC）を設立し、ウエハレベルの積層技術を進めている。現在、欧米日本を含めた 20 の企業・研究機関が参画し 200/300 ｍｍウェハの研究・試作ラインが構築され、急速なキャッチアップが行われている。
	応用研究・開発	○	↗	TSMC がチップ・オン・ウェーハ技術を軸に研究開発を進めており、相次いで TSV 技術を発表している。高アスペクト比三次元 TSV 技術、および極薄インターポーザーを用いた三次元 TSV 技術を開発した。今後ますます研究機関やファウンドリ、OSAT（後工程請負）が一体となった開発体制が強化・加速されるものと思われる。
	産業化	○	↗	TSMC 社の TSV を入れたプロセスインテグレーション技術の完成度は高く（2010 年 IEDM 発表）、従来のウェハファウンドリのみならず、2013 年初めに TSV を中心とする三次元集積化技術を含めて量産化を行うことをアナウンスしている。また、Xilinx や Altera と共同で、異種機デバイスの開発を行なっており、OSAT も量産化を目標に開発を進めている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）自己修復機能を有する三次元 VLSI システムの創製（H23 年度実績報告）CREST 研究領域 ディペンダブル VLSI システムの基盤技術
2）立体構造新機能集積回路（ﾄﾞﾘｰﾑﾁｯﾌﾟ）技術開発」中間評価報告書 平成２２年１１月 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
3）日経エレクトロニクス“すべての機器に TSV”, 2012.4.16
4）The IEEE International Solid-State Circuits Conference（ISSCC）.
5）Symposia on VLSI Technology and Circuits
6）The IEEE International Electron Devices Meeting（IEDM）
7）International Conference on Solid State Devices and Materials, JSAP.
8）The Electronic Components and Technology Conference（ECTC）
9）IEEE 3D System Integration Conference（3DIC）2009, 2010, 2011
10）The international xxth 3-D Architectures for Semiconductor Integration and Packaging Conference
11）xxth International Symposium on Microelectronics（IMAPS）
12）White Paper: Virtex-7 FPGAs Xilinx Stacked Silicon Interconnect Technology Delivers Breakthrough FPGA Capacity, Bandwidth, and Power Efficiency, October 27, 2010
13）Grzegorz Deptuch,”Vertically Integrated Circuits at Fermilab”, FERMILAB-PUB-10-314-PPD
14）Vesselin Dontchev, “Trends of Micro-and Nanoelectronicsin the European R&D Programme” Nanoelectronics Components and SystemsInformation Society & Media Directorate-GeneralEuropean Commission
15）T. Wang, K. Jeppson, N. Olofsson, E.E.B. Campbell, J. Liu ,”Through silicon vias filled with

planarized carbon nanotube bundles”, Nanotechnology 20（2009）485203
16）エルピーダ株式会社ニュースリリース「TSV 積層技術による DDR3 SDRAM（× 32）をサンプル出荷」（2011/6/27）http://www.elpida.com/ja/news/2011/06-27.html
17）IME Heterogeneous integration, http://www2.imec.be/be_en/research/eterogeneous-integration.html
18）CEA-Leti ニュースリリース「CEA-Leti Launches Open 3D ™ Initiative」（2011/1/31）http://www.businesswire.com/news/home/20120131006373/en/CEA-Leti-Launches-Open-3D%E2%84%A2-Initiative

3. 3. 3　センシングデバイス・システム

（1）研究開発領域名

センシングデバイス・システム

（2）研究開発領域の簡潔な説明

自然・環境の変化や極限環境での状態などを的確にモニタリングし、安心・安全な生活を守ることなどを目的に、各種のセンシングデバイスの利用による小型・低消費電力のセンシングシステムを実現する。測定対象や測定場所・環境に適するセンシングデバイス、およびその電源供給、通信方法、制御方法を含めたシステム設計などの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

自然環境を保全し、自然災害から地域や生活を安全に守るためには、CO_2 濃度やオゾン層破壊のフロン物質濃度、有害汚染物質濃度、温度、気圧、風力、地震、地殻変動などの各種情報を、きめ細かくモニタリングすることが望まれる。また、人間が入ることが難しい、放射線強度の高い原子力施設や高温の火事現場などで、その状態を監視できる特殊な観測装置も重要である。特に、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災以降においては、これらに対して強い要望がある。一方、電力不足に伴って、省エネルギーに対する社会の意識も高まってきており、使用していない電気機器の電源を落としたり、無駄の少ない製造・生産プロセスを実現するための各種センサの搭載・利用も必要になってきている。また、健康な生活を維持していくためには、体の異常や病気の早期発見が不可欠であり、体の組織や体内物質の日々の検査･モニタリングが望まれる。これらの要望を満足するためには、その状況にあった的確なモニタリングシステムが必要であり、それを実現するには各種のセンシングデバイス（センサ）およびその運用システムの開発が今後重要になってくる。これらのセンシングデバイス・システムを構築することにより、環境を保全すると共に災害から人や地域を守り、さらには新エネルギーや自然エネルギーの効率的な利用やその結果としての低コスト化にも貢献でき、低炭素社会の構築と脱原子力発電にもつながる。

具体的な例としては、人の活動を認識してきめ細やかに空調や照明を制御するための革新的に安価な遠赤外線センサアレイ、高温・高圧のエンジンやプラント内で使える各種センサ、資源探索のためのセンサ、インフラなどに設置して最適制御やメンテナンスタイミングを把握する無線センサなどは、それらの必要性が顕在化しているもののまだ実現できていない。

［これまでの取組み］

昨今のセンサ技術開発のキーワードは「センサネットワーク」であり、これに関して各国で様々なプロジェクトが進行している。その応用イメージは、インフラの長期維持や最適管理、ウェアラブル健康管理、携帯情報機器と連動する各種情報センサなどであったが、今後、エネルギー応用に急速に舵が切られる可能性も出てきている。

MEMS 技術を応用して小型で無線機能を有するセンサ端末を利用したセンサネットワーク技術の開発が進んできている。環境や人工物のモニタリングなどの有用な応用が検

討されているが、今後これを用いた高齢化社会の福祉に利用することが日本においては有用であると考えられる。健康管理デバイスに関しては先進各国においてそれらの検討は進んでいる。高齢化社会の到来と国民福祉の維持発展を両立するために、センサデバイスを用いた健康管理や日常活動のモニタリングを行うことは、一部で試行が行われているが、大規模な実証試験などは検討段階にとどまっている。

米国では基礎研究後の開発はベンチャー企業によって担われることが多く、大学とベンチャー企業との間は、人材や研究施設のオーバーラップによって連続的である。代表的なベンチャー企業である MEMSIC や InvenSense などが、センシングデバイス・システムのビジネスで成功を収めている。欧州では学と公的研究機関とが場所的にも人材的にも近くにあり、かなりの部分でオーバーラップし、組織的なデバイス・システムの研究開発力は高く、ゼロから実用化開発までを組織的に一気通貫で行える。公的研究機関は公的資金だけに頼らず、市場原理によって自立して発展することができており、IMEC（ベルギー）、CEA-LETI Minatec（仏）、Fraunhofer Institute（独）、CSEM（スイス）などがその典型例としてある。センシングデバイス・システム分野でのベンチャー企業やスピンオフ企業（EnOcean など）の活動も、日本よりずっと活発である。

携帯電話、スマートフォン、ゲーム機器、デジタルカメラなどに大量に利用されている慣性センサは市場がさらに拡大しているが、STMicroeletronics がその 50% 程度のシェアを有し、ボッシュが 20% 程度でそれに続く。一方、我が国では性能ではなくコスト（低コスト化技術）で負け、市場の急成長の前に撤退が相次いだ。STMicroeletronics とボッシュがともに使っている技術は、1995 年にウプサラ大学とフラウンホーファ研究所から論文発表された「エピ・ポリシリコン」である。これは、熱酸化した Si 基板上に、厚い（15 μ m 以上の）柱状ポリ Si を応力なしに高速に堆積する技術である。これによって、高価な SOI ウェハを使わずとも、静電容量センサの容量を増やすことができるようになり、その結果、センサ本体と読み出し回路を分離できるようになり、標準的な読み出し回路を用いることで低コスト化が可能になった。

我が国は、材料技術やナノテクで優位性を保っており、材料がキーとなるデバイスやその部材、例えば、あらゆる電子デバイスに用いられる圧電デバイス（クロック発振器や圧電フィルタ）では、我が国が圧倒的なシェアを維持している。

［今後必要となる取組み］

センサ用の MEMS 技術では一通りの材料シーズが出そろっており、今後は低コスト化など実用化を意識した研究開発が必要になってくる。特に、定量性よりも単純な状態の変化をモニタリングする用途では、最低限の機能を満足し低価格のものが重要になる。

分子センシング技術に関しては各種光共振器の開発や特定分子を捕捉する技術など、ナノフォトニック伝導制御に関しては、微細光回路と自由空間または光ファイバーを簡単に効率良く結合する技術、短波長／長波長光に関しては、近接場ビームの制御などがある。

我が国においては、センシングデバイス・システムの出口は大手企業が担うことが多いため、公的研究機関がこれら企業の研究開発リスクを下げて、実用化へのハードルを下げる役割をより一層担う必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

センシングデバイス・システム分野では、基礎研究と実用化開発が接近している、あるいはほとんど不可分であり、科学技術に基づく純粋な研究力だけではなく、特に、研究開発システムや産業界との関係を含む総合力によって勝敗が決まる。米国、欧州のどちらを参考にするのか、あるいはどちらとも違うやり方を見出すのか、TIA や LC Net など研究体制や施設面での充実を図るだけでなくそのやり方が問われている。また、実用化には、応用に見合ったコストにできる筋の良さと技術の高さが必須である。多くの新材料が開発されているが、このようなところが課題として残されている。

我が国の有力研究大学の研究環境やインフラが見劣りしていることはないが、その有効利用には一層の工夫と努力が必要であり、装置の使用に関する制約をできるだけ解消し、公的に導入した装置などは最大限の有効利用を図る必要がある。

これまで推進されてきた日本のナノフォトニクス、シリコンフォトニクスは国際的に見て十分高いレベルにある。その技術シーズを、データ伝送分野だけでなくセンシングにも向け、光ならではの特徴を持ったセンシング技術の研究開発を進めることが重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

環境発電（エネルギーハーベスティング）によるセンサネットワークなどを事業にしている EnOcean は、シーメンス（独）から 2001 年にスピンアウトし、環境発電による無線通信技術の特許に基づいて、照明用無線スイッチや無線センサで事業を拡大させている。規格統一のためアライアンスを組んで 250 以上のベンダーより 1000 種以上の相互運用可能なシステムを製品化し、これらは、欧米を中心に 25 万棟以上の建物に設置され運用されている。我が国でも 30 社弱の企業がこのアライアンスに参加している。

センシング分野へのナノフォトニクス技術の応用としては、表面プラズモンを用いた Biacore Life Science 社のラベルフリーバイオセンシングが独走していた。しかし最近、光インターコネクションなどで脚光を浴びているシリコンフォトニクスを利用することで、フォトニック結晶と同じような光閉じ込め／近接場光発生が極めて簡単に低コストでできることが分かってきており、欧州では表面プラズモンに代わる新しいフォトニクス技術としてシリコンフォトニクスを用いたセンシングの研究が急に盛んになってきた。

これまで、国の研究機関で製品サンプルを製造して出すことは難しかったが、一定の条件の下、産業技術総合研究所で企業が試作したデバイスを製品サンプルとして顧客に提供できるようになるなど、公的研究機関や大学における仕組みの改革も進みつつあり、多様なセンサの研究開発と市場ニーズとの適用性の検証などがやり易くなる。

［注目すべきプロジェクト］

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）において、「1 分子解析技術を基盤とした革新ナノバイオデバイスの開発研究 ― 超高速単分子 DNA シークエンシング、超低濃度ウィルス検知、極限生体分子モニタニングの実現 ―」、「ナノバイオテクノロジーが先導する診断・治療イノベーション」、および「マイクロシステム融合研究開発」が、センシングデバイス・システム関係で進行中である。いずれのプロジェクトでも、基礎研究から実用化開発までを一貫して行っており、我が国における今後のやり方のよいモデルになっている。

（6）キーワード

・MEMS、NEMS、集積回路、強誘電体、磁性体、圧電材料、ナノ材料、極限計測、実装
・光材料、ナノフォトニクス、シリコンフォトニクス
・状態計測、モニタリング、環境モニタリング、生体内計測

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	センシングデバイス・システムに関する国際学会などでの日本のプレゼンスは高く、採択率が 1/3 程度の高水準の国際学会で日本からの発表数が首位の米国に次いでいる。主要な大学の基礎研究用研究設備について、我が国が他国に劣っていることはない。バイオ関連デバイスの研究者が最大多数勢力である。 高度な光計測技術、および測定のための近接場光分野において、多くの分野でトップレベルの研究が行われている。化学センサやバイオセンサ、あるいは物理センサとしての圧電センサ材料の研究でも世界をリードしている。
	応用研究・開発	○	→	実用化を想定した試作品の開発などを行える施設として、TIA や LC Net が整備されており、大学や公的研究機関の開発環境は向上傾向にあると言える。いくつかの大型プロジェクトも進行中である。産学連携を含む研究開発のやり方について、システム改革や意識改革が進めば、これらを活用した有効な成果が出ると期待される。しかし、昨今の景気減退のため、企業における研究開発は活発とは言えない。 光センシングに関して諸外国に見られる表面プラズモン、シリコンフォトニクスのセンシング応用のプロジェクトがない。
	産業化	○	↘	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの世界市場は大きく、依然、成長しているが、我が国のシェアは電子コンパスを除いて低い。自動車用途のように高信頼性を要求されるセンサ、自社製品に組み込むセンサ、イメージセンサなどでは実力を維持している。 産業界において、ナノフォトニクスによる製品がなかなか出て来ず市場は若干縮小傾向にある、大きな売上げにつながるような革新的な光センシングデバイスが必要とされている。
米国	基礎研究	◎	→	センシングデバイス・システムに関する国際学会などでの米国のプレゼンスは、引き続き他国を寄せ付けない。バイオ関連デバイスが最も多くの研究者の興味を引き付けているが、その他のセンサ、たとえば、宇宙用、軍事用、エネルギー・資源関連のものも広く研究されている。全ての分野に共通するが、厳しい競争を勝ち抜いた米国外出身の若手研究者が新しいアイデアで多くの成果を出しており、また、そのようにできる環境が整備されている。 基礎から応用まで比較的よい連携ができており、特に表面プラズモンおよびシリコンフォトニクス分野でどこの力を入れるべきかの議論が行われた上でそれを基礎研究に結び付けているように見える。また、電子鼻に代表されるスマートセンサ、マルチセンサの研究がとりわけ進んでいる。センサに用いる材料の研究はシステム研究に牽引され進展も著しい。
	応用研究・開発	◎	→	大学などの研究成果がベンチャー企業に移管され、実用化を目指した研究開発が行われるという流れがうまく働いている。公的施設（たとえば、NNIN）と民間ファンドリ（たとえば､SVTC（Silicon Valley Technology Center））が、そのようなベンチャー企業を支えている。 また、学会のナノフォトニクスセンシングに関するセッションなどで、米国やカナダからは日本とは違い企業、特にベンチャー企業からの発表が目立ち、特にバイオセンシング応用への取り組みを目指した発表が多く見られる。
	産業化	○	→	ファブレスのベンチャー企業などが、国内外のファンドリを使って開発と生産を行うビジネスモデルが定着している。特にベンチャー企業は完成度が低い段階で市場に投入するため、新しい製品が生まれやすい環境にある。そのようなベンチャー企業が、国内外の既存企業に買収される「成功例」も多い。大手企業も実力を維持している。 新しいセンシングの市場はこれからの段階であるが、米国およびカナダではその萌芽がみられる。

欧州	基礎研究	◎	→	欧州では、1 人の教授やリーダーのもとに、多くの研究者や技術者がヒエラルキーを作って組織されていることが多く、米国のように玉石混合の新しいアイデアで次々と論文が出るわけではないので、国際学会などでの論文数だけで比較すると、基礎研究力を見誤る。デバイスやシステムを仕上げようとしたとき、基礎力や基盤技術がしっかりしており、それが随時、最新状態で進歩していると評価するのが正しい。 表面プラズモン／メタマテリアルなどの基礎的なアイデアや高度な計算、およびシリコン発光などの分野において、特に英国において優れた基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	大学も公的研究所も上記のように組織されており、目標をはっきりさせ、デバイスやシステム、あるいは製造技術を開発するとき、その速度と完成度は非常に高い。企業は研究開発を行う際、社内と外部とを成果とコストの点から比較し、多くの研究開発を公的研究所に委託している。工学分野の公的研究所の運営費のうち、5 割から 8 割程度が委託研究による収入である。重要な点は、欧州の公的研究所は、このような委託研究を全世界から集めていることで、日本の企業も多額の委託費を支払っている。その結果、強い研究所は益々成長している。 英国、フランス、ドイツ、スペイン、デンマークなどほとんどの国で表面プラズモンおよびシリコンフォトニクスによるバイオセンシングの研究が盛んである。
	産業化	◎	↗	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの最大手は、仏伊合同の STMicroelectronics であり、ドイツのボッシュが続く。両社とも欧州発の共通技術を用いており、両社でシェアの 7 割程度を占める。この技術も大学と公的研究機関との共同で実用化されたものであるが、上記の研究開発システムがうまく働いている。 表面プラズモンの産業応用への期待から実用レベルにはまだ到達していないが、FP7 でいくつかのプログラムが動いている。シリコンフォトニクスについては、Ghent 大学を中心にファブを準備しており、バイオ応用を目指すベンチャーが使いやすい環境を整えている。
中国	基礎研究	△	↗	研究水準の向上は目覚ましい。中国からのジャーナルや国際学会への論文投稿量は多い。その半数以上は採択に足らないものであるが、それでも採択絶対数は多く、また、注目すべき論文もある。センシング材料関係に注意する必要がある。 表面プラズモンやシリコンフォトニクスの研究者を、米国帰りあるいは日本帰りとして採用し、すでに高いレベルの研究も行われているがセンシングについてはまだ大きなプロジェクトはない。
	応用研究・開発	△	→	産学官連携が進む程、センシングデバイス・システム関係の企業は育っていない。 論文発表は多くなってきたが、センシングについてはまだ大きなプロジェクトはない。
	産業化	×	→	中国企業による、あるいは中国発の技術によるセンシングデバイス・システムの産業化はまだ見られない。

韓国	基礎研究	○	→	国際学会などでの論文数を見ると、韓国は、米国、日本に次ぎ 3 ～ 5 位には入り、国際学会などでのプレゼンスは低くない。人口比を考えると、センシングデバイス・システム分野での研究活動は活発と言える。ただし、最近、韓国より台湾が若干優位であるかもしれない。 2011 年には表面プラズモン光学に関する国際会議 SPP5 をアジアで初めて釜山で開催し、基礎研究にも力を入れようとしている。
	応用研究・開発	○	→	国家の集中的な投資によって、実用化開発に利用できる大規模な研究施設が整備されているが、産業化に繋がった顕著な成功例は聞かない。サムソンをはじめとする巨大企業は、ベンチャー企業などから技術を買ってきて、資金を投入して実用化しようとするが、必ずしもうまくいっていない。また、韓国の巨大企業は国内の大学や公的研究所にはあまり期待していないようにも見える。 KAIST の Nanophotonics Research Center（NPRC）における研究は、欧米をフォローするだけだった初期の段階を脱し、具体的なオリジナル応用を発表できるようになっている。
	産業化	△	↗	センシングデバイス・システムに関して独自技術が実用化された例は目立たない。今後、海外の技術を利用して産業化とビジネスで成功する可能性はある。 エレクトロニクスメーカーの支援で KAIST などが行っている研究は実用化を強く念頭においたものになっている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）田中秀治、海外拠点の現状とその比較、IC Guide Book 2、未来を創る！半導体、電子情報技術産業協会（2012）pp. 211-213
2）Nanotechnology Research Directions for Social Needs in 2020 の Chapter 9
3）Applications: Photonics and Plasmonics
4）http://www.wtec.org/nano2/Nanotechnology_Research_Directions_to_2020/chapter09.pdf

3. 4　ナノテクノロジー・材料科学技術基盤

3. 4. 1　超微細加工技術

（1）研究開発領域名

超微細加工技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

シリコンの微細加工プロセスをシングルナノメートルレベルまで高度化する。具体的には、ナノインプリントやブロックコポリマー（block copolymer）の自己組織化パターン形成などを利用して、従来リソグラフィ技術の限界を超える新たなリソグラフィ技術と関連加工技術の開発が必要になる。また、それを利用し、トランジスタ・配線作製への適用性を検証するなどの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

現在の情報化社会を支える電子機器・通信機器の高性能化・高速化は、大規模集積回路（LSI）におけるトランジスタなどの素子の微細化･高集積化によって進んできた。スーパーコンピュータなどの高性能化により各種計算処理が高速化され、大容量・超高速通信、デジタル家電、パソコン、携帯電話・携帯端末などの小型化・高性能化による利便性の向上や、シミュレーションによる天気予報の予測精度向上などが図られている。一方、世界的な環境・エネルギー問題の顕在化により、電力使用量を大幅に削減する低消費電力化の要求が近年高まっており、より低電圧・低消費電力で動作できるようにさらなる微細化および回路機能の高集積化が望まれている。

このような高集積化による LSI の高性能化や低消費電力化を可能にするのが微細加工技術である。微細加工技術の中心となる露光（リソグラフィ）技術は、縮小投影技術、使用する光の短波長化、近接効果補正、液浸技術など光学系やマスクの工夫により、数十 nm のレベルまでのパターン形成が可能になっている。しかし、現在開発が進められている極端紫外光（EUV）露光技術については、2013 年頃の導入が目標とされていたが、技術的な困難さが増大し遅延が避けられそうにない。また、加工寸法の微細化に伴い、露光装置やマスクなどのコストが急上昇しており、新たなリソグラフィ技術の検討が必要になっている。具体的には、ナノスケールの微細構造を形成したモールド（型）をスタンプのように押し付けてパターンを形成するナノインプリント、ナノレベルの規則的な相分離構造を自己組織的に形成するブロックコポリマーを用いるリソグラフィ、ナノスケールの粒子の自己凝集性を利用して規則格子構造を作製するナノ粒子リソグラフィ、アルミナの陽極酸化で形成される規則的な細孔構造を利用するアルミナ陽極酸化法、基板表面に分子が吸着する際に細密充填する現象を利用した Self-Assembled Monolayer（SAM）法などが候補としてあり、これらの手法について素子作製への適応が可能かどうかも含め研究開発を進めていくことが重要になる。

このような自己組織化を利用したリソグラフィは、微細パターン形成に高価な露光装置を必要としないため、これまでのリソグラフィ関連産業構造に変革をもたらす可能性がある。そのため、先端デバイスの開発と生産技術力の確立に成功すれば、国内リソグラフィ

関連産業（LSI メーカー、装置・材料メーカー）が技術優位性を確保し、その結果、雇用創出および新規ビジネス開発が期待される。

［これまでの取組み］

現在、波長 13.5nm の EUV リソグラフィの開発が行われているが、EUV 光源開発などが難しく遅延している。したがって、ArF を用いたリソグラフィの延命策が取られており、1 層のパターニングに 2 回露光するダブル・パターニング（DP）技術、3 回以上行うマルチパターニング（MP）技術が使われている。国際半導体ロードマップ（ITRS）によると、2021 年のリソグラフィ技術候補は EUV リソグラフィ、EUV リソグラフィのマルチパターニング、波長 6.7nm 程度の EUV リソグラフィ、電子ビーム直描などのマスクレスリソグラフィ（ML2）、ナノインプリントリソグラフィ、DSA（Directed Self Assembly: 誘導自己組織化）、および Innovation（革新的技術＝今後開発されるもの）となっている。

ITRS で 2007 年に DSA が候補になってから、米国の SEMATECH や欧州の IMEC などが、組織的にこれに取り組むようになってきた。また、韓国でも KAIST などが、本格的に取り組んでいる。特に、ブロックコポリマーリソグラフィは既存のリソグラフィとの親和性がよいため、産業界からも大きく注目されている。ブロックコポリマーは、1980 年代に主にバルクのモルフォロジーが研究されてきたが、1990 年代に原子間力顕微鏡（AFM）の普及で薄膜でもモルフォロジーの観察が容易になり、リソグラフィへの応用が始まった。ブロックコポリマーのミクロ相分離パターンをテンプレートとして基板を加工するパイオニア的研究は、プリンストン大から発表されている。初期の応用ターゲットは、ハードディスク用パターンドメディアの磁性粒子配列用テンプレート作製であり、東芝が 2002 年にデモを行っている。その後、ナノメートルの規則構造が簡単にできるため、光学とバイオ用の超微細構造作製に応用が広がっていった。2003 年にウィスコンシン大から、従来のリソグラフィ手法で作製したパターンをガイドにしてブロックコポリマーの自己組織化パターンを配列させ、任意の場所にミクロ相分離パターンを得る DSA が発表され、半導体用パターニングへの応用が注目されるようになった。

ナノインプリントは、1995 年に 10nm レベルのパターン形成が発表されて以来、ナノレベルの新たなパターニング技術、リソグラフィ技術として注目され、継続的に研究されてきた。特に、2003 年の ITRS でナノインプリントリソグラフィ（NIL）がリソグラフィ技術の候補となったことにより、その検討が本格化している。LSI 向けの NIL 装置については、米国のモレキュラ・インプリント社における開発が最も進んでいる。

［今後必要となる取組み］

リソグラフィ技術の課題は、将来のリソグラフィ技術候補見極めが難しいことである。現状でも EUV リソグラフィの最終的な実用化可否が分かっていないことは、大きな問題となっている。技術的な課題としては、EUV 光源の高出力化と無欠陥マスク製造技術の確立およびインフラ整備が挙げられている。さらに EUV リソグラフィの高解像化（高 NA 化）には、大型の露光システムと高出力の光源が必要となるが、どの世代まで適用できるのかはっきりしていない。その他の候補技術である ML2、ナノインプリントリソグラフィ、6.7nm 程度の EUV リソグラフィ、DSA についても、実用化が可能であるかの

判断ができていない。ML2 については、複数の電子ビームを用いることで処理能力を改善できるが、特に全ビームの均一性を確保することに課題がある。ナノインプリントリソグラフィではパターン欠陥低減と処理能力確保が大きな課題である。特に 6.7nm 程度の EUV リソグラフィについては、光源、光学系などの基礎研究が開始されたばかりである。DSA の現状最も懸念される課題はパターン欠陥であるが、その解決策は十分なレベルに達していない。さらなる革新的なリソグラフィ技術の出現が期待されているが、有力な候補がないのが現状である。このように、どのリソグラフィ技術が本命になるか見極めるのが難しい状況であるので、個々の技術について、原理に基づいて可能性や限界を明確にし、基本的な特性を詳細に分析するなどの基礎・基盤的な研究とスループット向上、パターン精度向上、欠陥除去などの実用面での研究開発を同時に行うことが必要である。例えば、NIL においては高価な露光装置を必要としないものの、など倍モールドの耐久性やその扱い方法、重ね合わせ精度の確保など、これまでの光リソグラフィとは異なるノウハウを必要とする。

リソグラフィ技術分野における日本の強みは、リソグラフィ用材料、塗布現像プロセス装置、検査・測定器、マスク技術、光源などにある。今後も、このような強みを維持できるような取組みが必要である。一方、日本の弱みは、リソグラフィシミュレーション技術、計算機リソグラフィ技術、OPC（Optical Proximity Correction: 光近接効果補正）技術、リソグラフィに最適なパターンレイアウト技術などがあり、次世代のリソグラフィの研究開発ではこれらもあわせて強化していく必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

リソグラフィ開発は技術的な困難さが増し、研究開発期間が長期になって多くの開発コストが必要となってきている。また、国内ロジック系 LSI メーカーの多くは自社工場による先端 SoC デバイス製造から撤退し、外部ファウンドリへの委託を進めており、リソグラフィなどの最先端製造プロセスに関する研究開発への参加意欲が衰退してきている。そのため、単独企業による研究開発が困難になってきており、世界的なコンソーシアムにおける研究開発が不可欠になっている。

日本においては、これまでの Selete、EUVA、ASET に続くリソグラフィ開発関係のコンソーシアムとして、EIDEC（EUVL 基盤開発センター）が EUV リソグラフィのマスク技術とレジスト技術の確立に集中するために設立されたが、これ以外のリソグラフィの開発コンソーシアムはない。そのため、EUV リソグラフィの次世代技術や EUV リソグラフィが実用化できなかった場合に必要となる他のリソグラフィ技術について、コンソーシアム形態の開発環境がない。日本は伝統的に材料分野の研究開発が強いため、大学や研究機関における DSA や NIL の研究開発も多く行われ、その水準は欧米に続く。しかし、LSI 向けリソグラフィ技術として DSA や NIL を扱うコンソーシアムなどの研究拠点は日本に存在しないため、特に実用化を目指した研究開発領域においては、欧米企業、あるいはコンソーシアムに参加している韓国・台湾企業に先行されてしまう恐れがある。日本での DSA や NIL の実用化開発では東芝や一部の装置･材料メーカーから発表がある程度で、さらに装置・材料メーカーの主な開発拠点は国内ではなく欧米のコンソーシアムにある。技術革新は非常に速いため、直ぐに国内での拠点立ち上げなどの対抗措置を講じないと手遅れになってしまう恐れがある。日本でも大学や研究機関での基礎研究だけでなく、その

後の実用化を見据えた研究開発への強力な促進が必要な状況である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

これまで光リソグラフィを初めとするトップダウンによる加工が主であったが、材料の自己組織的な構造形成を利用したボトムアップのアプローチが盛んになってきている。特に 2007 年に国際半導体技術ロードマップ（ITRS）に DSA が次世代リソグラフィの候補に上がってからは、20nm 以下のナノ加工手段として各国で研究が加速している。研究開発コンソーシアムであるベルギーの IMEC、米国・ニューヨークのアルバニー・ナノテク、およびフランスの CEA-Leti では世界各国の企業が参加して実用化に向けた研究開発が行われている。また、LSI 向けの DSA に関する新しい技術として必須のガイドパターン向けのリソグラフィ技術が、新しい要素開発テーマとなってくる可能性がある。DSA の基礎研究では米国が進んでおり、EIPBN（Electron, Ion, Photon Beam and Nanofabrication）2011 国際会議では DSA セッションが 3 セッションあり、半導体リソグラフィへの適用可能性について議論があった。

NIL 関係では、米国のモレキュラ・インプリント社が LSI 対応の NIL 装置を開発し、SEMATECH へ導入し様々な研究開発を行っている。さらに、ニューヨーク・アルバニーの G450C（450mm ウェハ研究開発）へも同社の NIL 装置の導入が発表されるなど、研究開発が加速している。米国のヒューレッドパッカー（HP）は、He イオンビームで作製した 4nm モールドを用いて光ナノインプリントにより 4nm パターン形成を行っており、ナノインプリントによるシングルナノパターン形成も有望である。SPIE において、IBM（27nm Fin トランジスタ）、サムソン（22nm フラシュ）、東芝（リソグラフィ）がナノインプリントリソグラフィ関係の発表を行っており、半導体メーカーの関心も高くなっている。

［注目すべきプロジェクト］

IMEC は、リソグラフィに関しては最もキーとなる露光装置開発で No.1 の ASML に地理的にも近く、最新鋭の ASML 露光装置を受け入れ、先端開発をリードしている。一方、アルバニー・ナノテクは、SEMATECH とともに所謂 IBM アライアンスの研究開発力とニューヨーク州からの公的資金を得て、さらにニューヨーク州立大（CNSE: College of Nanoscale Science and Engineering）と連携して、リソグラフィ開発に力を入れている。どちらも最新の ASML の EUV スキャナを導入し、装置メーカー、材料メーカー、EDA ベンダなどと協業を行い、効率的な開発を行っている。日本では 2011 年に EIDEC（EUVL 基盤開発センター）が設立され、EUV マスク技術と EUV レジスト技術に焦点を絞って開発を行っている。ここに海外の LSI メーカーも参加している。

IMEC の DSA プロジェクトは注目に値する。日本の東京エレクトロン、AZ エレクトロニックマテリアルズ、米国ウィスコンシン大学と共同で 300mm ファブへの適用検討を行っている。現在のところ、公的資金が注入されているプロジェクトは世界でこれだけであり、欧州の企業・大学のみならず、日米韓の大学・企業からの参加および資金提供が行われている。

米国では、IBM が中心になり、デュポン、AZ エレクトロニックマテリアルズ、アプラ

イドマテリアルズが協力し、光リソグラフィと併用し整数倍密度の配線やコンタクトホールのシュリンクなどに取り組んでおり、DSA の半導体パターニングへの実用化が現実的になってきている。

（6）キーワード

リソグラフィ、レジスト、露光装置、EUV、ArF、液浸、電子ビーム直描、マスクレスリソグラフィ（ML2）、ナノインプリントリソグラフィ（NIL）、自己組織化、誘導自己組織化材料、DSA（Directed Self Assembly）、ブロックコポリマー

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	大学や研究機関（東大、京大、東工大、東北大、早大、大阪府立大、兵庫県立大、AIST など）において自己誘導組織化（DSA）やナノインプリントリソグラフィ（NIL）の基礎研究が行われていおり、基礎研究は世界的なレベルある。ナノインプリントでは、CREST プロジェクト「超高速ナノインプリントリソグラフィ技術のプロセス科学と制御技術の開発」（H20 ～ H25 年度）では 20nm レベルのＣＭＯＳリソグラフィに対する研究成果が出ている。
	応用研究・開発	○	→	DSA に関しては、複数の装置・材料メーカー（JSR、東京エレクトロンなど）さらに、デバイスメーカー（東芝）においても研究開発が行われている。例えば、NEDO の「超高密度ナノビット磁気記録の研究開発（グリーンＩＴプロジェクト）により、周期 12nm のドットパターン形成に成功している。企業の関心は高いが、具体的な応用はこれからである。
	産業化	○	→	半導体リソグラフィとしては、極端紫外線リソグラフィ（EUVL）が 1Xnm の有力候補として国家プロジェクトで推進されており、産業化が期待される。DSA によるシングルナノパターン研究が急務である。最近デバイスメーカー（東芝）から、ビアシュリンクプロセスに DSA を適用したビア歩留まりの評価結果、および NIL を用いた配線歩留まり評価結果が発表されている。複数の企業から、自己組織化ナノ加工を用いた製品のデモが発表されている。しかし、市場が小さく、本格的な立ち上がりとはいえない。
米国	基礎研究	◎	↗	ブロックコポリマーを用いたリソグラフィの概念は 1997 年にプリンストン大から提案され、DSA の概念は 2003 年にウィスコンシン大から提案されたものであり、現在もウィスコンシン大、テキサス大、スタンフォード大、NIST など）を中心に世界の研究をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	半導体生産用ナノイプリント装置は、世界で米国の Molecular Imprint, Inc のみが開発している。IBM がナノインプリントで 27nm Fin トランジスタ試作している。DSA に関しては、複数の装置材料メーカー（アプライド・マテリアル、ダウ・ケミカルなど）、デバイスメーカー（IBM、グローバルファンドリなど）からの学会発表があり、特に最近は IBM を中心に研究開発が盛んである。また、電子デバイス、光学部品、バイオ応用に関して大学で盛んに研究されており、NSF からファンドがかなり投入されている。
	産業化	◎	↗	SEMATECH が中心となり、EUVL と共に NIL、DSA の半導体リソグラフィ応用研究が進んでいる。IBM を中心に、材料メーカーである Dow 社、レジストメーカである AZ 社、装置メーカーであるアプライドマテリアルズが協力し、トップダウンのリソグラフィとブロックコポリマーを組み合わせ DSA リソグラフィの実用化が現実的になってきており、パターン欠陥評価結果や位置精度、シミュレーション技術などの実用化に即した検討結果が多く発表されている。
欧州	基礎研究	○	↗	複数の大学や研究機関（ドイツ、オーストリア、フランス、スペインなど）において、LSI 応用分野に限らない DSA や NIL 材料の研究が行われている。また、ナノインプリントによるブロックコポリマーへの直接パターニングなどの研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	コンソーシアム（ベルギー・IMEC、フランス・CEA-Leti）において DSA の研究開発が盛んになってきた。IMEC は、東京エレクトロン、AZ エレクトニックマテリアルズ、ウィスコンシン大学との提携により、300mm ファブ互換 DSA プロセス研究開発を行っており、LETI も ArF リソグラフィおよび NIL リソグラフィによるガイドパターンを用いた DSA 研究を進めている。
	産業化	○	→	ASML が 2X，1X nm リソグラフィツールとして、半導体量産用 EUV 装置を生産している。ST マイクロやインフィニオンはコンソーシアムに参加しているが、まだデバイスメーカーによる研究開発成果や有力な応用デバイスのデモはない。

中国	基礎研究	×	↗	大学・研究機関の基礎研究は急速に立ちあがっているが、LSI 以外の用途（ロール・ツー・ロールなど）向けの発表はあるものの、LSI 向けには目立った発表はない。
	応用研究・開発	×	→	目立った活動は見られない。
	産業化	×	→	目立った活動は見られない。しかし、サムソンが西安に NAND 工場建設を決定したことから、技術移転が起こると考えられ、今後急速に成長することが予想される。
韓国	基礎研究	○	→	KAIST、POSTECH、ソウル大で 2000 年代前半から、主に米国帰りの研究者によって自己組織化を利用したナノ加工の研究がなされている。ナノインプリントでは、国立機械研究所（KIMM）およびソウル大学などにおいて、基礎研究が行われている。DSA 研究については、ハンヤン大学、KAIST などで基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	超微細構造を利用した、半導体、光学、バイオ応用に関して、盛んに発表がなされていて、近年の学会動向をみると、多くの研究機関の参入がある。サムソンが、モレキュラインプリント . の半導体装置を導入し、11nm ハーフピッチフラシュパターン作製などリソグラフィへの適用研究開発を行っている。しかし、DSA を含めてそれほど多くの成果は見えてこない。
	産業化	○	→	韓国特許の出願状況を見る限り、サムソンがこの分野で多くの研究開発を行っていると考えられ、また、大学などへの資金提供もなされている。サムソンが ASML の EUV リソグラフィ装置を導入し、半導体への適用研究を開始している。コンソーシアムに参加し欧米日の動向を注視しながら、あらゆる方向への対応に準備をしている模様。
台湾	基礎研究	△	↗	台湾国立大で、この分野の研究がなされていて、DSA 関係のプロジェクトが立ち上がる予定である。
	応用研究・開発	△	→	半導体応用を目指した研究が散見される。TSMC におけるシングルナノメーター対応のリソグラフィ技術についての活動はほとんど見えてきていないが。IMEC に加入していることから、情報収集は確実に行っているものと推測される。
	産業化	△	→	TSMC が、半導体リソグラフィへの応用分野に興味を示している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）ITRS 2011 Lithography、http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011Lithography.pdf
2）IMEC, http://www2.imec.be/
3）LETI、http://www-leti.cea.fr/en
4）SEMATECH、http://www.sematech.org/research/litho/
5）SPIE Advanced Lithography、http://spie.org/advanced-lithography.xml
6）モレキュラ・インプリント社、http://www.molecularimprints.com/technology/technical_library.

php
7）ERATO 彌田超集積材料プロジェクト , http://ierato.res.titech.ac.jp/
8）H.-S. Philip Wong et al.: Directed Self-Assembly for the Semiconductor Industry, Abstract of EIPBN 2011（5C-4）, May31-June 3, 2011. Las Vegas.
9）光ナノインプリントと光ステッパーのハイブリッド露光によりＩＢＭによって試作された 27nmFinFET：A. Fuchs, M. Bender, U. Plachetka, L. Kock, T. Wahlbrink, H. Gottlob, J. Efavi, M. Moeller, M. Schmidt, T. Mollenhauer, C. Moormann, M. Lemme, nad H. Kurz, J. Vac. Sci. Technol., 24（2006）2964.
10）Chris Bencher, et al, “Self-Assembly Patterning for sub-15nm Half-Pitch: A Transition from Lab to Fab”, Proc. of SPIE Vol. 7970 79700F（2011）.
11）Matt Malloy, et al, “Technology review and assessment of nanoimprint lithography for semiconductor and patterned media manufacturing”, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 10（3）, 032001（Jul–Sep 2011）.
12）L. Oria et al., “Guided self-assembly of block-copolymer for CMOS technology: a comparative study between graphoepitaxy and surface chemical modification”, Proc. of SPIE Vol. 7970 79700P（2011）.

3. 4. 2　MEMS ／ NEMS

（1）研究開発領域名

MEMS ／ NEMS

（2）研究開発領域の簡潔な説明

センシング、情報通信、医療・バイオなど、多岐にわたる分野の異種機能を盛り込んだ様々な複合デバイスの開発ニーズに対応し、最先端の半導体微細加工技術を応用するとともに、LSI との集積化により超小型化を実現させ、その実用化展開を図る。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景、意義とこれまでの取組み］

MEMS/NEMS 技術は半導体微細加工技術を中核とし、立体的加工技術を加えて機械的微細構造を形成し、電気信号を取り出したり化学的反応を制御したりするデバイスを製造するための技術である。社会の安全安心やエネルギーの見える化、健康モニタリングなど社会の安定化にとって重要な課題解決型技術として、センサに自立電源と通信機能を持たせたセンサネットワーク技術が期待されており、社会的実証も含め各国で取組が始まっている。LSI との複合化が進んでおり、“More than Moore” のためのキーテクノロジーとして期待されている。加速度センサなどの単機能センサから、3 次元実装によるマルチセンサに製品化が進み、さらに、アクチュエーション機能、バイオ機能、通信機能を有するデバイスの開発も進んでいる。具体的な適用先は、インクジェットプリンタヘッド、自動車用センサ、マイクロミラーアレイなどから携帯用機器とゲーム端末用のデバイスに移ってきた。今後は、高周波 MEMS スイッチ、小形ディスプレイ／ヘッドマウントディスプレイ用マイクロミラーデバイス、赤外線センサアレイ、バイオマイクロ流体デバイスなどの実用化が期待されている。

産業化については、米国の例にみられるようにトップ研究大学の成果をいち早く市場トライアルにつなげるベンチャーとファウンドリの活用、あるいは欧州のように大学と公的研究機関と企業が拠点を形成して密接な連携を可能にするといったシステム、さらにこれらを支える研究機器ビジネスの存在などが必要となる。日本では研究水準としては活発な取組が個別に進んでいるものの、産業化のための仕組みの構築は欧米に比べて遅れている。台湾はファウンドリで勝負、韓国はビジネス指向、中国は研究開発・事業化ともに力を入れ始めている。

［今後必要となる取組み］

日本ではこれまで大学における個別研究が中心であったが、NTT などのインフラ系企業や大企業から新事業に人材が流入しており、こうした人材の活用が重要である。研究開発から実用化に至るまで最先端の機器・設備が必要であり、つくばに欧州を模した産学連携拠点づくりが始まっているが、産官学の組織を超えた機関連携や共同研究の実績を早急に蓄積する必要がある。産業技術総合研究所で企業が試作したデバイスを一定の条件のもと製品として顧客に提供できるようにするなど、公的研究機関や大学における仕組みの改革も少しずつ進みつつある。我が国においては、MEMS の出口は大手企業が担うことが多いため、これら企業の研究開発リスクを下げて、実用化へのハードルを下げる役割を、

特に公的研究機関がより一層担う必要がある。

一方で、企業からの学会や講演会への参加が減少したり、新規加入が伸び悩んでいるという状況がある。MEMS 分野は特に基礎と応用とが一体化している分野であり、企業の研究開発の委縮は分野全体に大きな負の影響を及ぼす。電気学会・日本機械学会・応用物理学会の連合による MEMS・センサ・マイクロナノ技術に関するシンポジウムの開催、日本機械学会でのマイクロ・ナノ工学部門の発足などがあるが、こうしたアカデミアセクターの主体的な活動は極めて重要で、産官がこれに積極的に参画する必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

下記の注目動向に示す欧米の研究開発推進システムに比べ、日本のそれは両者中間に位置するが、若手教員の独立性を除けば、どちらかと言えば、米国のそれに近い。しかし、ベンチャー企業は少なく、また各研究室には企業からまとまった研究開発を受託する組織力はなく、実用化のメカニズムが必ずしもうまく動いていない。TIA、LC Net、ナノテクプラットフォームなど、研究施設面での充実が図られた今、今後の進め方が問われている。日本の企業でも、欧米のベンチャー企業を買収し、また、海外の研究機関にまとまった研究開発を委託することが増えており、その結果、国内の基礎研究が孤立する恐れがある。産業界のスピードを考えると改革までの時間はそれほど残されていない。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国における研究開発推進システム；大学の研究は基本的に個人プレーであり、Assistant Professor から Full Professor まで独立してそれぞれが学生やポスドクを抱えて研究を進める。公平な競争原理が機能しており、世界中から能力が高くハングリー精神に富む学生が大量に集まる。テニュア取得前の教員以下はストレスの大きい競争環境に晒されるが、そのなかから個人のアイデアに基づく玉石混合の研究成果が続々と生み出され、その中に突出して優れたものがある確率で存在する。基礎研究後の開発はベンチャー企業によって担われることが多く、大学とベンチャー企業との間は、人材や研究施設のオーバーラップによって連続的である。MEMSIC や InvenSense などが、センシングデバイス・システムのビジネスで成功を収めている代表的なベンチャー企業である。有名になる以前に既存企業に買収される成功例も多い。

欧州における研究開発推進システム；大学や公的研究機関では、1 人の教授やリーダーの下に多数のスタッフや学生がヒエラルキーを作って組織化されている。また、大学と公的研究機関とが場所的にも人材的にも近くにあり、かなりの部分でオーバーラップしている。各スタッフは組織的に役割分担させられており、米国流の個人プレーはほとんどない。組織的なデバイス・システムの研究開発力が高く、ゼロから実用化開発までを組織的に一気通貫で行える。このような特徴から、有力な大学や公的研究機関は、世界中の企業から研究開発を受託でき、その収入によって資金的に支えられている。こうした自立的な発展をしているのが、IMEC（ベルギー）, CEA-LETI Minatec（仏）, Fraunhofer Institute（独）, CSEM（スイス）などである。

東北大学では、先端融合イノベーション創出拠点の形成プログラム「マイクロシステム融合研究開発拠点」と最先端研究開発支援プログラム「マイクロシステム融合研究開発」（江刺 FIRST）とが同時進行しており、多くの企業が集結し、海外の研究機関とも連携して、

実用化を目指した研究開発が行われている。そこからは、MEMSパッケージング材料など、実用水準に達した新技術が一般にリリースされている。また、整備された研究施設が外部共用に供され、多くの企業が利用している。

産業技術総合研究所には、TIA、最先端研究開発支援プログラム、BEANS、補正予算などの資金が集中し、東事業所に 8 インチの MEMS ラインが整備されている。一連の設備は、集積マイクロシステム研究センターによって研究開発に利用される他、マイクロ・ナノ・オープンイノベーションセンター（MNOIC）として外部共用に供されている。

本年度から開始されたナノテクプラットフォームの微細加工プラットフォームには、17 機関が参加し、ネットワークを形成している。LC Net で 30 億円以上を投資して整備した京都大学のナノテクノロジーハブ拠点、産業技術総合研究所のナノデバイスセンター、東京大学の VDEC、東北大学のマイクロシステム融合研究開発センターなど、充実した研究開発設備が広く共用に供されている。

（6）キーワード

マイクロデバイス、マイクロシステム

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	MEMS に関する国際学会などでの日本のプレゼンスは高く、採択率が 1/3 程度の高水準の国際学会で日本からの発表数が首位の米国に次いでいる。主要な大学の基礎研究用研究設備について、我が国が他国に劣っていることはない。MEMS 関連設備を含む共用設備ネットワークであるナノテクプラットフォームが 2012 年度から開始された。バイオ関連 MEMS の研究者が最大多数勢力であることは他の国と同様であるが、高周波 MEMS の研究者は相対的に少ない。
	応用研究・開発	○	↗	実用化を想定した試作品の開発などを行える施設として、TIA や LC Net が整備されており、大学や公的研究機関の開発環境は向上傾向にあると言える。産学連携を含む研究開発のやり方について、システム改革や意識改革が進めば、これらを活用した有効な成果が出ると期待される。江刺 FIRST、東北大学の先端融合イノベーション創出拠点の形成プログラム、BEANS など、いくつかの大型プロジェクトが進行中である。
	産業化	○	↘	スマートフォンや携帯電話用の MEMS センサの世界市場は大きく成長が継続しているが、我が国のシェアは低い。インクジェットプリンタヘッド、自動車用 MEMS センサなどでは実力を維持している。振動ジャイロ、インクジェットプリンタヘッドなどで用いられる PZT MEMS は我が国の成功例の 1 つである。ニッチながら、医療関係の MEMS も実用化例が出てきた。MEMS ファンドリのビジネスは全体的には低調であり、ベンチャーの育成も進んでいない。
米国	基礎研究	◎	→	MEMS に関する国際学会などでの米国のプレゼンスは、引き続き他国を寄せ付けない。バイオ関連 MEMS が最も多くの研究者の興味を引き付けているが、その他のセンサ、たとえば、宇宙用、軍事用、エネルギー・資源関連の MEMS も広く研究されている。全ての分野に共通するが、厳しい競争を勝ち抜いた米国外出身の若手研究者が新しいアイデアで多くの成果を出しており、また、充実した共用設備など、彼らの研究を支える環境が充実している。
	応用研究・開発	◎	→	大学や公的研究機関の研究成果がベンチャー企業に移管され、実用化を目指した研究開発が行われるという流れがうまく働いている。公的施設（たとえば、NNIN）と民間ファウンドリ（たとえば、SVTC（Silicon Valley Technology Center））が、そのようなベンチャー企業を支えている。さらに、大学の共用設備を使って研究開発の受託サービスを行っているベンチャー企業もある。
	産業化	◎	→	ファブレスのベンチャー企業などが、国内外のファンドリを使って開発と生産を行うビジネスモデルが定着している。FBAR フィルタの Avago、MEMS 慣性センサの MEMSIC や InvenSense、MEMS タイミング発振器の SiTime、MEMS マイクロフォンの Knowles、マイクロミラーデバイスの Micro Vision などが新しい MEMS 市場を拓いたが、ベンチャー企業を中心に成功例が継続的に出ている。TI や Analog Devices といった大手企業も実力を維持しているが、従来の成功デバイスから撤退する例もある。

欧州	基礎研究	○	→	欧州では、1 人の教授やリーダーのもとに、多くの研究者や技術者がヒエラルキーを作って組織されていることが多く、米国のように玉石混合の新しいアイデアで次々と論文が出るわけではないので、国際学会などでの論文数だけで比較すると、基礎研究力を見誤る。一見地味だが、堅実でよく考えられた研究開発が多い。
	応用研究・開発	◎	→	大学も公的研究所も上記のように組織されており、目標をはっきりさせ、デバイスやシステム、あるいは製造技術を開発するとき、その速度と完成度は非常に高い。TSV のように LSI に取り入れる MEMS 的技術、LSI 上に集積化する MEMS など、大規模な研究開発については、組織力のある欧州の公的研究所が実力を発揮している。
	産業化	◎	↗	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの最大手は、仏伊合同の STMicroelectronics であり、ドイツのボッシュが続く。両社とも欧州発の共通技術を用いており、両社でシェアの 7 割程度を占める。この技術も大学と公的研究機関との共同で実用化されたものであるが、上記の研究開発システムがうまく働いている。MEMS 用製造機器では、STS（現 SPTS）、SussMicrotec などの技術力のある企業が世界的に活躍している。
中国	基礎研究	△	↗	研究水準の向上は目覚ましい。中国からのジャーナルや国際学会への論文投稿量は多い。その半数以上は採択に足らないものであるが、それでも採択絶対数は多く、また、注目すべき論文もある。高水準の国際会議が中国で開催されることも増えてきた。
	応用研究・開発	△	→	産学官連携が進むものの、MEMS 関係の企業は育っていない。
	産業化	×	→	中国企業による、あるいは中国発の技術による MEMS の産業化はまだ見られない。
韓国	基礎研究	○	→	国際学会などでの論文数を見ると、韓国は、米国、日本に次ぎ 3 ～ 5 位には入り、国際学会などでのプレゼンスは低くない。人口比を考えると、MEMS 分野での研究活動は活発と言える。ただし、最近、韓国より台湾が優位であるかもしれない。
	応用研究・開発	○	→	国家の集中的な投資によって、実用化開発に利用できる大規模な研究施設が整備されているが、産業化に繋がった顕著な成功例は聞かない。サムソンをはじめとする巨大企業は、市場規模の小さい MEMS には興味を示さず、このことは韓国内での産学連携に影響を落とす。
	産業化	△	→	MEMS に関して独自技術が実用化された例は目立たない。市場規模の大きくなった携帯電話･スマートフォン用 MEMS には､大手企業が興味を示すが､技術蓄積がなく、独自開発は難しい。今後、海外の技術を利用して、後発でも産業化とビジネスで成功する可能性はある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）江刺正喜 , マイクロシステムにおける産学連携 , 産学連携ジャーナル , Vol. 8, No. 1（2012）pp. 4-8
2）田中秀治 , 海外拠点の現状とその比較 , IC Guide Book 2, 未来を創る！半導体 , 電子情報技術産業協会（2012）pp. 211-213
3）http://www.beanspj.org/
4）http://www.mu-sic.tohoku.ac.jp/saisentan/
5）http://www.beanspj.org/kyoten/gdevice/index.html
6）http://www.micromanufacturing.com/showthread.php?t=981

3. 4. 3　ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化）

（1）研究開発領域名

ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

個々の原子や分子から設計・制御してナノ構造を作り上げることや、ナノスケールの構造がある条件下で自発的に形成する自己組織化などのボトムアップ型プロセスを利用し、革新的な機能を持つ新材料や新デバイスの創出、従来では困難なナノレベルの構造形成を可能とする。原子・分子操作手法の向上、ナノ粒子の集合状態の理解と制御・作製手法の確立、設計手法の確立、自己組織化機構の理解と構造制御性の向上などの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

半導体集積回路は微細加工技術の進歩により、トランジスタの微細化と高集積化が進み、処理スピードの向上やメモリの大容量化が進展してきた。しかし、紫外線を使う露光技術の微細化限界や、X 線露光技術開発の困難さおよび開発費用の増大などから、これらトップダウン的なプロセスに加え、ボトムアップ的に構造を形成するプロセスが求められるようになってきた。また、材料・デバイス開発において、ナノレベルで３次元的な組成や構造を精密に制御し、新たな機能を発現させることや、高価な微細加工プロセスを用いずに所望の組成・構造が形成できる自己組織化の技術が求められている。

材料の性質を決定する最小単位は、多くの場合、原子クラスタやナノワイヤ、材料内部に局在する原子が集合した状態（ナノ構造）であることが明らかにされつつある。原子を一つ一つ結合して多原子からなる構造を形成するとき、原子をどのように積み上げたらある特定の機能（例えば、強磁性や強誘電性など）が発現するのかといった、原子レベルのナノ構造と機能の間の相関についてはまだ理解が進んでいない。また、熱力学平衡における構造形成（自己集合）と平衡から離れた動的な秩序構造形成（散逸構造）の双方を包含する概念である自己組織化技術は、超真空や極低温などの環境を必要とせず、分子を自発的に秩序化して新たなナノ構造体を形成できるという利点があるが、その制御方法についての理解もまだ進んでいない。こららの理解が進むことにより、従来のトップダウンプロセスでは困難なナノレベルの精密な組成・構造制御や、プロセスの低コスト化・低エネルギー化も可能になり、集積回路などの電子デバイス、光デバイス、量子ドット太陽電池、人工光合成デバイス、超潤滑表面など、エレクトロニクスやエネルギー関係への多大な貢献が期待される。

［これまでの取組み］

原子制御は、走査型プローブ顕微鏡（SPM）などの原子スケールの分解能を持った顕微鏡開発の歴史と密接に関連している。SPM を発明した IBM を有する米国、ならびに顕微鏡メーカーの実力が高い日本がその先頭を走ってきた。また、原子・分子操作の舞台は物質の表面であることから、表面の研究が盛んな欧州においても着実な研究が進められ

てきた（この関連は【ナノ計測】も参照）。

これまで化学分野では、溶液系、表面、固液界面において、分子を共有結合のような非可逆的な結合ではなく、水素結合のように弱く、組み換え可能な力によってセルフ・アッセンブル（自己集合）させた分子集合体の研究が、超分子化学として広く発展してきた。この自己集合の概念は、近年、分子だけにとどまらず、ナノ粒子の集合化においても重要になっている。ナノ粒子は、集合することで粒子単体とは異なる光学、電気、磁気的特性を発現することがわかっている。

化学結合の形成・切断、異性化、分子認識など、分子レベルで起こる反応や現象は、有機合成化学に支えられた分子設計技術に加えて、核磁気共鳴分光法、質量分析法、X 線結晶構造解析法、クロマトグラフィーなどの分析手法の飛躍的な発展により、精密に理解できるようになってきた。

各種電子デバイスの製造はこれまで光リソグラフィを初めとするトップダウン加工によって主に行われてきたが、材料の自己組織的な構造形成を利用したボトムアップのアプローチの研究も盛んになってきている。特に 2007 年に国際半導体技術ロードマップ（ITRS）に Directed-self assembly（DSA）が次世代リソグラフィの候補にあがってからは、20nm 以下のナノ加工手段として各国で研究が加速している。自己組織化を生産技術に応用できれば、製造コストの削減と微細加工精度の向上（μm から nm）が可能になるとの期待感で一致している。しかしながら、生産技術に求められる高い歩留まりと制御性の点で、自己組織化を生産技術に持ち込むのは容易なことではないことも認識されている。精度や欠陥の許容される分野でいくつかの製品が上市され始めているが、本格的な産業化はこれからである（この関連は【超微細加工技術】も参照）。

自己組織化の応用分野として、これまではエレクトロニクス、生体医療材料への応用に注目が集まっていたが、最近では欧米を中心として、超撥水表面、防汚表面、無反射表面などの自己組織化に基づくナノ加工や自己集合を利用したバイオミメティクス材料開発への応用も進み始めた。そもそも生物に学ぶことから始まった自己組織化の研究は、生物の持つ階層性に注目し、再び生物の問題に回帰しつつあるようにも見える。構成要素の単なる秩序化にとどまらず、要素が組織化することによって新しい機能や物性を発現する、階層の創発現象に関心が寄せられるようになり、数理科学、熱力学的理論、超分子科学、材料科学、ロボティクスなど様々な分野で協働体制を模索する動きが始まっている。米国科学アカデミーは 2008 年に「Inspired by Biology: From Molecules to Materials to Machines」と題した科学技術政策提言をし、ナノテクノロジーと生物学の連携強化を強く示唆している。それに先立ち、欧州、とりわけドイツと英国では、バイオミメティクスの産業化に向けて調査や産学連携の組織化が政策的になされている（この関連は【バイオミメティクス】も参照）。

［今後必要となる取組み］

現在の半導体テクノロジーは、数多くの原子による集団効果、すなわち、統計性によって熱エネルギーに対する安定耐性が保証されている。しかし、関与する原子数が少なくなるナノデバイスでは、熱ゆらぎの影響が大きくなる。このような課題は、すでに磁性体の応用でみられる超常磁性に垣間見ることができるが、その解決にはプロセスとしても大きなブレークスルーが必要である。

ナノ粒子の集合構造によって誘起される特性は十分に理解されていはいない。それは集合状態を制御する手法が確立されていないことが一因である。ナノ粒子そのものの合成・調整法とともに、それらナノ粒子をいかに自在に配列化させるのかがナノサイエンスにおける重要なテーマとなっている。ナノ粒子のセルフ・アセンブリによる配列集積化技術を開発し､それらのナノ構造と発現する新規な機能との相関を調べることが求められている。

分子レベルの反応や現象は、分子間の相互作用、配向、階層構造などの複雑な積み重ねを経て、材料レベルの物性や機能性へとつながる。このような分子レベルから材料レベルへのボトムアップ部分を革新的手法で制御し、分子レベルで起こる反応や現象を材料レベルの物性や機能性へと効率的につなげることで、機能性材料の精密化が可能となる。例えば、分子レベルの僅かな切断を材料レベルで迅速に検知できれば、材料の寿命予知ができる。さらに分子の異性化や形状変化を材料レベルまで増幅できれば、人工筋肉のような機能性材料ができるため、医療や介護補助ロボットへの応用にも繋がる（この関連は【分子技術】も参照)。

実環境を再現できるような理論計算手法が進展して、第一原理計算を用いて種々の材料が予測されつつあり、予想された物質を、実際に合成する装置を実現化することは、数十年後の科学技術を支える基幹技術となりうると考えられる。例えば、膨大なデータベースと連携し、プローブを用いて原子・分子を個々にビルトアップしていく合成装置の実現が考えられるが、課題も多い。パルスレーザ堆積法（PLD）や化学気相堆積法（CVD)、液相からの合成技術などの進展はあるが、“望む位置に”という観点では、まだ有力な技術は存在しない。分子線制御による原子層の積層技術などを大規模に行うシステム、単原子を確実に移動させて構造を構築していく時に必要な原子のキャッチ／リリースに関する技術、原子を１格子のずれなく配置させる技術などが必要であり、物理（量子論）と表面科学とデバイス工学での融合が必要であると考えられる。それ以外にも、例えば、単原子をノズルから噴射することが、任意の位置に任意の量で実現できる機構の開発などが必要と考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

原子・分子の研究は“閉じた”研究になっている。走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）で原子操作や分子操作が実現しているが、それがよりマクロな物性研究の発展につながっていない。また、分子レベルで起こる反応や現象を人間が五感で感じることができるような材料の物性変化に繋げるためには、メカノケミストリー、自己修復などを意識した個人研究が行われているが、系統的な研究開発と情報交換はほとんど行われていないのが現状である。例えばコンソーシアムを形成して、これらの研究開発を支える機能性分子合成、高分子合成・反応、超分子化学、物理化学、解析技術、シミュレーションなどの基礎・応用化学を長期的な視点をもって学界を中心に推進し、そこから出てくるシーズに対して、ニーズ開発、スケールアップ、コストダウンなどを産業界中心に行い、一体となって相互にフィードバックを行いながら推進することが期待される。

原子・分子からナノ構造を作り上げる過程で起こる構造・物性変化も明らかにされていない。特に、分子レベルで起こる反応や現象は、膨大な分子数の材料中でランダムな方向を向いていると相殺されるため、それぞれの分子レベルの情報をマイクロサイズの材料の情報に、効果的に増幅する手法の確立が必要である。評価技術も未熟であり、数 nm オー

ダーの構造の物性を探る方法、いわゆるその場観察・測定技術が必要である。これらを包括的に把握し、構造形成技術と相互の連携をとりながら研究開発を行うことで、より効率的に研究開発が進むと期待できる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- Fe 極薄アイランド（原子数十個程度））の磁性制御が、サブマイクロメータレベルで検証され、強磁性の電界制御という流れにつながっている。この場合はサブマイクロレベルでの現象だが、ナノ領域で起きている現象に対してマクロ側からどうアプローチするのか検討していく必要がある。
- STM や AFM で原子構造を評価し、原子を操作する技術が発展している。AFM を用いた室温での元素識別と交換型水平・垂直原子操作とによる半導体原子埋め込みと文字組立や、固体電解質を用いた原子スイッチシステムの実用化を目指した開発が進められている。
- 金沢大学の安藤教授が生体分子計測研究所（RIMB）と共同で開発した水中でビデオレートスキャンできる超高速 AFM は、この分野を大いに刺激した。特に生体関連の動きをビデオレートで記録できるようになったことで、関連する研究分野に大きなインパクトを与えた。
- 原子操作で原子を並べて作った構造に対して、非弾性トンネル振動励起（STM-IETS）を用いたスピンフリップ分光を行ったり、あるいはスピン偏極 STM（SP-STM）でスピン相互作用を評価するスピン研究が始まっている。
- ナノからミクロ、さらにはマクロへの繋ぎとして、nm から μ m に到る繰り返し構造を作製するための鋳型としてブロックコポリマーの相分離構造が自己組織化の一つとして注目されている。これまでの相分離構造は二次元が主であったが、近年、3 次元の相分離構造へと展開しており、今後は粒子内の相分離構造やジャイロイド構造に注目が集まると予想される。
- 中国の Lei Jiang グループはバイオミメティクスに関して Nature などに複数の質の高い論文を発表しており、かつバイオミメティックな超撥水防汚金属表面の作製技術に関して数多くの有望な特許を所有している。

（6）キーワード

SPM、STM、AFM、透過型電子顕微鏡、収差補正技術、ナノプローブ、ナノ構造、物性評価、原子操作、量子論、量子コンピュータ、機能性分子、高分子化学、超分子化学、メカノケミストリー

（7-1）国際比較（自己組織化）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	ERATO 彌田超集積材料、科研費新学術領域「分子ナノシステムの創発化学」などにおいて、自己集合・自己組織化を利用したソフトマテリアル開発が着実に推進されている。 「創発化学」では、東大の相田グループと藤田グループが、精密に制御された超分子（例えば、ナノチューブやナノケージ）構造に関して高度で創造的な研究を行っている。 フォトニクスならびにエレクトロニクス向けのバイオミメティック材料開発が非常に盛んである。東北大の下村グループと東工大の彌田グループはバイオミメティクス分野のリーダーである。 東大の片岡グループの高分子ミセルを使った医療応用（薬物や遺伝子デリバリー）の研究は世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	電気、素材、繊維など多様な業種において自己組織化技術に対する関心は高く、陽極酸化アルミナ、ブロック共重合体、微粒子配列系などを利用した素材や素子が開発されており、技術水準は高い。 科学技術政策研究所「科学技術動向」2010 年 5 月号にに詳細がある。東北大の下村グループではトヨタとの共同研究で結露現象（breath figure）を用いた耐熱性のハニカムフィルムを開発している。
	産業化	○	↗	バイオミメティック材料の工業応用例はまだ数少ない。しかし、天然資源を応用した合成繊維工業に関する市場は伸びている。 いくつかの日本企業（例えば、ソニーや三菱）はテレビや携帯電話向けの有機 EL ディスプレイを製造している。これらのデバイスはますます長寿命、超薄型、高輝度になっていく。
米国	基礎研究	◎	↗	自己組織化・自己集合とトップダウンのプラグマティックな融合など、総合力では現在も世界をリードしている。 アリゾナ大学の Hao Yan グループでは複雑な形、曲率、次元を持った DNA 折り紙アーキテクチャを開発し、タンパク質やカーボンナノチューブ、ナノ粒子などのナノ構造体の組織化に用いている。 ノースウエスタン大の C.A. Mirkin グループでは DNA を固定化したナノ粒子を用いた自己集合（self-assembly）研究分野を牽引している。格子パラメータを制御することで異なるコロイド結晶構造を作製する設計指針を開発している。 　高度な実験環境下で樹状ナノワイヤが見出され、数理科学者との協働で成長メカニズムが解明されている。
	応用研究・開発	◎	↗	自己集合・自己組織化を含めたナノバイオ技術の展開が技術革命を担うとの認識のもとに技術開発は着実に進んでいる。また、米国では教授の多くは企業と共同研究を行っており、ナノテクを医療応用分野で商業化するのが明確なトレンドになっている。 MIT の Robert Langer は高分子、金属ナノ粒子、ナノ組織体を用いて、磁場、温度、超音波、酵素で応答する薬物デリバリーや遺伝子デリバリーなどの医療分野への応用を図っている。約 1 千の特許と数多くの医療・化学会社を持っている。
	産業化	○	↗	多くの教授が研究室で開発した技術を基に会社を興しており、基礎研究と結びついた産業技術力は柔軟性に富んでおり、将来性を感じさせる。 前出の Mirkin は数百人のパートナーとともに金ナノ粒子を用いた遺伝子やタンパク質やその他の重要なターゲットを素早く簡便に比色分析できる診断デバイスを商業化している。最近､イリノイ大学の Yi Lu の会社（ANDalyze）はターゲットによって蛍光や色が変わる DNA －金ナノ粒子を用いて携帯型水質検出器を開発した。 南カリフォルニア大の Biomimetic MicroElectronic Systems は企業と緊密に共同研究をしており医療デバイスとしてバイオミメティック・マイクロエレクトロニクスシステムの商業化に向けた開発を行っている。 例えば IBM は、ブロック共重合体のミクロ相分離を利用したエア・ギャップや DNA 折り紙構造を集積化した足場とする微細加工など、自己集合現象と現行のトップダウン・プロセスを組み合わせ、低コストで高精度微細化を実現しようとしている。

欧州	基礎研究	◎	↗	DNA 折り紙や有機分子を鋳型にした自己集合に関して、質の高い研究が多くなされている。 ドイツ・ミュンヘン大学の Center for Nanoscience の T. Liedl グループは、DNA 折り紙の上で金ナノ粒子をらせん状に配列することでキラルなプラズモンを発現するナノ構造を作製した。 基礎研究の懐が深く、移流、非線形拡散、ゆらぎなどを介したパターン形成理論や分子集合体研究などの分野でも着実な研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	ドイツの the Max-Plank institute for metals research や英国の Reeding 大学の the Centre for Biomimetic、その他の多くの研究グループでロボット工学におけるバイオミメティクス研究が盛んである。 European Space Agency では自然から学んだデザインをお手本にした宇宙探索のためのスマートマシーンの開発を行っている。例えば、エネルギーをセーブしてよじ登る動物や極限環境で生きる植物に学んでいる。 英国ではバイオチップ、DDS、バイオミメティクス材料の実用化開発が盛んである。
	産業化	○	↗	汚れない表面や摩擦低減表面などの製品開発力に依然強みを発揮。Evonik や BASF などが商品化を進めている。 2011 年にはベルリンにおいて世界で初めてのバイオミメティクスに関するコンベンションが開催されるなど、英国，ドイツを中心に政策的にも産学連携を通じた産業化に力を入れている。 欧州におけるバイオミメティクス研究のほとんどはハイテクなスマートロボットの作製を目指している。今は工業応用との融合を図っている段階である。
中国	基礎研究	○	↗	自己集合（Self-assembly）は現在も中国におけるホットなトレンドである。中国の研究者は、外国の研究トレンドの追随から、独自な研究の創造へと転換しつつある。 Chinese Academy of Science の Lei Jiang グループは階層構造を有するシリコン表面が温度に応答してぬれ性を変化することが見出した。また、蜘蛛の糸を使って水を集められることを示し、ミクロ構造を持つバイオミメティックな高分子繊維を用いて同様な性能を得られることを示した。 北京大学、清華大学、National Center for Nanoscience and Technology、中国科学技術大学は、DNA 折り紙、超分子、ナノ粒子集合体、ナノコンポジット材料の分野では中国を牽引する研究組織である。National Center for Nanoscience and Technology では近年、ナノマテリアルの安全性や毒性について注目している。 清華大学の Xi Zhang グループは、交互積層法を用いた超分子薄膜やポリマーナノ粒子の作製、またセレン錯体の作製で先駆的な研究を行っている。新機能性コポリマーミセルが医療応用（薬物デリバリー）向けに開発されている。
	応用研究・開発	○	↗	中国政府は機器の開発や研究成果の工業応用に対して多くの予算を投じている。 Chinese Academy of Science は Suzhou Institute of Nanotech and Nanobionics を新たに設立した。この組織の著しく成長し、バイオナノテクとバイオミメティクスの基礎研究と応用研究を行っている。 前出の Lei Jiang グループは、ハスの葉の構造をまねた超撥水防汚金属表面の作製技術に関して数多くの特許を持っている。これらの金属表面構造は将来有望な応用分野につながるであろう。
	産業化	△	→	中国では企業での新規開発は増加しているがまだ弱い。 精華大学の Yong Qiu は研究成果を工業製品につなげることに成功している。彼の会社（Visinox）は出荷世界第 2 位のパッシブマトリクス型有機 EL ディスプレイ（PMOLED）企業である。ソフトでかつ大面積のディスプレイ素子ならびに高分子 EL を用いたソフトな発光素子を製造している。 CHINANO は最近、プリンテッド・エレクトロニクス、ナノデバイスや関連するナノテクの商業化を促進するプラットフォームを構築している。

韓国	基礎研究	○	↗	ノーベル賞受賞者の G. Ertl の名を冠する Ertl センター（GIST（光州）は国際アドバイザーとバーチャルラボを構成し、レベルの高い研究に取り組んでいる。 KAIST、Seoul National Univ.、Yonsei Univ. では、バイオメディカルやエネルギー応用に向けて、自己集合（self-assembly）やバイオミメティック材料の分野で数多くの質の高い魅力的な研究が行われている。例えば、KAIST の Seung-Man Yang はプラズモンセンシングや反射性能を制御できる機能を持った自己組織化フォトニックパターン表面について研究を行っている。 Yonsei Univ. の Jinwoo Cheon は磁場によって構築した磁性ナノ粒子集合体を、MRI イメージングやその他の医療分野に応用している。
	応用研究・開発	○	↗	例えば、Postec の Jin Kon Kim 教授と LG Electronics が、共同研究においてブロック共重合体のバロプラスティック現象（圧力による相転移）を利用した高密度メモリの可能性を示したように、先端技術の水準は高まっている。 上記 Ertl センターでは、自己組織化理論を援用した表面科学をもとに、韓国内の企業と連携して次世代電池の開発などに取り組んでいる。 バイオミメティクスや自己組織化の分野で質の高い論文が数多く出されている。しかし、工業製品への展開は少ない。
	産業化	△	↗	ナノテクの研究成果は増え続けており、製品に結びつき始めている。 Samsung はナノ加工技術を電子製品の製造に応用している。例えば、銀ナノコーティングを携帯電話やノート PC の表面に施して、銀の抗バクテリア効果によってユーザーをバクテリアから守っている。また、51 nm に高容量（16GB）USB メモリーチップを作り込んでおり、これはメモリの大量生産品のなかで最も微細な技術である。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（7-2）国際比較（原子・分子制御）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	大阪大学の川合知二はギャップ電極のトンネル電流によって核酸の一分子検出に成功した。 筑波大学の重川秀実は超短パルスレーザーと STM を組み合わせて半導体のナノスケールでのダイナミクスを調べることのできるフェムト秒分解能 STM を開発した。
	応用研究・開発	○	↗	AFM の開発において大きな進展があった。金沢大学の安藤敏夫は RIMB と共同で、水中でもビデオレートでスキャンできる超高速 AFM を開発した。 日本では多くの研究者が PCI-AFM を用いて形状と電気的特性の同時計測を行っている。
	産業化	×	→	高速 AFM は計測時間の短縮と実時間計測によってこの分野のブレークスルーとなるポテンシャルを秘めている。 水中や大気中での STM/AFM 測定はすでに市場を確保しており、かつ増加傾向にある。しかしながら、測定装置の販売にとどまっており、原子・分子操作が製造技術には結びついていない。
米国	基礎研究	◎	↗	電子デバイスはますます複雑化、多機能化が進んでいる。ハーバード大学やアリゾナ大学では、単一分子電気抵抗測定やトランジスタを用いた細胞内の電位測定が行われている。ハーバード大学の L. Lieber グループは集積プロセッサのための複雑なナノワイヤ電子回路アレイを設計し、またナノワイヤから成る三次元 FET を作りバイオプローブに応用した。 CNT やグラフェンの合成ならびにそれらを用いた分子や半導体デバイスの作製に関する独創的で質の高い研究がますます増えている。スタンフォード大学の Hongjie Dai はパターン化された機能性グラフェンの合成を行っている。 ジョージア工科大学の Zhong Lin Wang は酸化亜鉛のナノワイヤをナノ圧電素子として用いることで、将来有望なナノ発電素子や自己発電機能を持つナノシステムを構築している。
	応用研究・開発	○	↗	カリフォルニア大学アーバイン校では STM によって単一有機分子の結合を切断したり接合したりする技術を開発した。 大学の企業の緊密な共同研究によって、ナノスケールの太陽光電池の応用研究が進んでいる。半導体ナノワイヤや CNT やグラフェンを用いたバイオセンサやトランジスタの開発に注目が集まっている。特にグラフェンは次世代電子材料として有望視されている。
	産業化	×	→	アサイラム社は高速かつ高分解能（1 nm）の AFM を販売している。その他、エネルギー関連材料や太陽光電池の開発が盛んであるが、商品化には至っていない。
欧州	基礎研究	◎	↗	欧州内での緊密な共同研究により優れた研究成果が出ている。 ドイツのチームが原子操作によって絶対零度より低温の量子気体をつくり出すことに成功した。 Max Plank 高分子研究所の Klaus Müllen は光発電能や触媒能のあるナノグラフェンやグラフェンナノリボンを化学合成している。
	応用研究・開発	○	→	フランスの IRAMIS では、分子スケールで機械的、電子的特性を同時測定できる STM-AFM 2in1 顕微鏡を開発した。
	産業化	×	→	実践的な環境下での AFM/STM 測定に関する商業的な技術は伸びている。 BRUKER 社では水中で高速スキャンできる AFM を開発し、市販している。 測定機器以外では目立った動きはない。

中国	基礎研究	○	↗	グラフェンとナノ粒子を組み合わせて、センサや電子デバイスに応用する研究は多い。 北京大学の Zhongfan Liu は化学的な手法でグラフェンを制御する手法を編み出し、酸化チタン上で光触媒による OH ラジカルの生成に成功した。 北京大学の Xuefeng Guo と東京大学の塩谷光彦は共同研究によって、DNA にリンクした CNT ギャップを用いて金属イオンやタンパク質の単一分子計測を行った。
	応用研究・開発	×	→	廈門大学の Zhog-Qun Tian は“fishing-mode” STM によって分子接合を原子レベルで作製し、単一分子電子デバイスの作製に成功した。STM を用いた研究は多いが、しかし、新規な STM や AFM の装置開発は行われていない。
	産業化	×	→	中国科学院は研究成果を工業的な製品に展開することに強い関心を示しているが、目新しい事例はない。
韓国	基礎研究	○	↗	ここ数年は基礎研究の質と量が連続して伸びている。昨年、Institute for Basic Science（IBS）を新たに立ち上げ、2017 年までに 44 億 US$ という巨額の予算がつけた。これにより、理研や Max-Plank Institute のような有名な研究センターに成長させることを目標にしている。
	応用研究・開発	△	→	The Park Systems 社は AFM や STM を製造販売している。彼らによれば、販売している AFM は研究用として最も分解能が高い、という。電気化学 AFM や電気化学 STM も販売している。測定装置以外の目立った動きはない。
	産業化	×	→	原子を操作する装置による製造はまだない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）科学技術政策研究所「科学技術動向」2010 年 5 月号
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt110j/menu.pdf
2）L. Jiang et al., Annu. Rev. Mater. Res. 2012, 42, 231-263.
http://www.biomimetik.dk/BiomimeticGroups
http://www.esa.int/gsp/ACT/bio/bio_op.htm

3. 4. 4　分子技術

（1）研究開発領域名

分子技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

分子技術は日本発の新しい研究開発コンセプトである。分子を設計・合成・制御・集積することによって、分子の特性を活かして所望の機能を創出し、応用に供するために必要な一連の技術を、「分子の設計・創成技術」、「変換・プロセスの分子技術」、「分子の電子状態制御技術」、「分子の形状・構造制御技術」、「分子集合体・複合体の制御技術」、「分子・イオンの輸送・移動制御技術」から成る 6 つの横断的技術概念で捉えなおし、研究開発を推進するものである。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

環境・エネルギー、医療・健康などに関する社会的課題を解決に貢献し、持続性社会の実現に資するために分子科学の成果を活用するためには、課題解決に必要とされる機能をもった分子を創出し、それを自在に制御できることが望まれる。分子科学が、分子および分子集合体の構造や物性を解明し、化学反応や分子の相互作用およびその本質を、理論と実験の両面から理解することを目的とする学問であるのに対し、分子技術は、分子科学がもたらす知見・理解を基盤として所望の機能・物性を創出することを目的とする、より工学的な技術概念である。解決すべき多様な課題に対し､問題点を分子レベルまで掘り下げ、所望の機能を持つ分子を設計・合成・操作・制御・集積することで、革新的かつ精密な分子や分子集合体を創出できれば、効果的な課題解決が可能になるとともに、課題解決の技術が産業化された際には圧倒的な競争力の獲得につながる。

［これまでの取組み］

従来、様々な分野で分子の設計・合成が行われてきたが、普遍的な技術として分子技術が明確に意識されることはほとんどなかった。例えば、医薬、農薬、物質・材料などの研究開発に於いて、最適または最善の化合物に到達するまで研究開発されることは稀で、一定の機能が得られた段階で商品開発のフェーズに移行するのが普通である。分子設計が最も進んでいる医薬品開発ですら、薬効や副作用の点で最適、最善といえるような新規分子設計まで行うことは珍しい。なぜなら、医薬品開発のプロセスが、急激な投資金額の激増により、先進国から開発途上国にゆるやかに移行することで、肌理の細かい開発が一層難しくなり、その結果、緻密な分子技術に至ることが難しいからである。

新規分子の設計と合成に至らない段階で開発が進んでしまった場合には、採用された分子技術は未成熟で比較的模倣されやすい。また、特許対策も十分とは言えないので、市場での成功例が明らかになる段階で、様々な後発品が上市されるようになる。新規分子の設計と合成を進めるためには、高い分子技術が必要となるが、この基盤技術の育成に十分な資金を継続的に提供できる国・企業は世界的に少なかった。

分子技術は多岐にわたる応用分野をもつことから、一般に目に見える末端の結果は簡単に比較できるものの、その比較が分子技術自体の比較には必ずしもつながらないことに留

意する必要がある。

［今後必要となる取組み］

分子技術は、精密合成技術と理論・計算科学との協働により新機能物質を自在に設計・創成する「設計・創成の分子技術」、分子の形状構造を厳密に制御することにより新たな機能の創出に繋げる「形状・構造制御の分子技術」、分子レベルでの構造設計に基づく新たな触媒・システム開発に繋げる「変換・プロセスの分子技術」、分子の電子状態を自在に制御する「電子状態制御の分子技術」、分子集合体・複合体の形成や機能解析・化学制御に関連する「集合体・複合体制御の分子技術」、膜物質を介した分子・イオンの輸送速度や選択性向上などの分子・イオンの輸送に関係する「輸送・移動制御の分子技術」の 6 つの横断的技術概念からなるものとして捉えることができる。

各技術概念について、今後必要となる取組みは以下の通りである（CRDS 戦略イニシアティブ「分子技術」（CRDS-FY2009-SP-06）より）。

1）「分子の設計・創成技術」
- 機能から分子を創出するための理論創成とシミュレーション技術の開発
- 分子構造の予測を可能にする分子デザイン手法の開拓
- 機能設計・予測に基づく精密合成法の開発
- 分子性物質の高純度精製法の開発

2）「変換・プロセスの分子技術」
- 酵素インスパイアードモレキュラーインプリンティング触媒の開発
- 金属フリー有機合成触媒の開発

・触媒・生成物の in situ キャラクタリゼーション法の開発
・マイクロ反応装置などによるシステムケミストリーの開拓
・原料転換プロセスの開発（未利用化石資源、バイオマスなどの利用）
・室温稼働化学プロセスの開発

3）「分子の電子状態制御技術」
・電極―有機分子間（電荷注入）、有機分子同士（電荷輸送）の電荷授受の機構解明
・高純度化によるキャリアトラップの解消
・分子性物質の純度測定評価技術の開発
・デバイス上での分子配列技術・階層性構築制御技術の確立
・液体半導体などによる自己修復可能なデバイスの開発
・分子性物質・分子材料の劣化機構の解明

4）「分子の形状・構造制御技術」
・自己組織化などビルドアップおよびトップダウン手法による空間空隙構造形成技術
・ナノからマクロ構造への規模拡大技術、高強度化、高速合成、低コスト化
・マクロ構造を持つ材料における物理的諸現象（貯蔵、物質・エネルギー変換など）の観測・解析技術
・計算機シミュレーションによるマクロ構造の合成および構造・機能の設計・解析

5）「分子集合体・複合体の制御技術」
・電子デバイス表面における分子集合体の精密配置技術の開発
・創薬開発を目指した分子集合体の動的構造変化と機能制御の解析
・タンパク質への非天然アミノ酸導入による人工酵素の構築
・液体分子の構造と機能制御の解析とシミュレーション

6）「分子・イオンの輸送・移動制御技術」
・電極への効率的なイオンの挿入・移動を可能にする有機蓄電材料の開発
・不純物の選択的移送と捕捉を目指した超高性能分離膜の開発
・高効率の薬物輸送を実現する高度 DDS の開発

（4）科学技術的・政策的課題

今後必要となる取り組みとして、将来を見据えたニーズと分子技術との間をシームレスに結びつける必要がある。社会的ニーズに沿って、現在の技術レベルでは達成できない「夢の目標」を掲げ、それぞれの研究テーマにおいて、従前の研究の延長とは一線を画した、まったく新規な研究プランを提案し、それを達成するための明確で独創的な分子技術の「イメージ・ストーリー」を描き、それを実現することが求められる。

これらの課題を解決するためには、以前にも増して学際的な研究推進が必須であり、また、研究チーム間の連携や共同研究が求められる。多岐にわたる応用分野、専門分野で各々活躍している比較的接点の少ない研究者が「分子技術」という共通の土台に立って互いの研究・技術を見つめ直し、新たな展開を生み出せるという研究体制が必要である。例えば、幅広い社会・産業ニーズに応える物質・材料開発にブレークスルーを起こすために、それを強く意識した分野横断型チームが、意欲的かつ挑戦的な研究課題を、次々と誕生させることが今後必要となる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

すでに、今日様々な部品や機器が、既存の半導体や金属から、分子素材である「ソフトマテリアル」に移行しつつある。これは低環境負荷、資源制約への対応、高い生体親和性といった人間社会全体の課題に対する解決策、そして低コスト化を「ソフトマテリアル」や、それを実現する分子技術が提供することを示唆している。すなわち、ライフイノベーションとグリーンイノベーションに関わる様々な革新的成果を創出するためには、個別応用課題の研究開発とは別に、多様な分野への展開が可能な分子技術を確固たる土台として築いておくことが必須であり、これによって一層異分野融合が加速され、真に有効なライフイノベーションおよびグリーンイノベーションが達成できる。

［注目すべきプロジェクト］

日本では、分子技術の概念が JST 研究開発戦略センターにおいて提案され、文部科学省がこれを平成 24 年度戦略目標として指定、同年 JST で CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」、さきがけ「分子技術と新機能創出」が開始された。

（6）キーワード

ソフトマテリアル設計、医薬品設計、農薬設計、設計・創成、形状・構造制御、変換・プロセス、電子状態制御、集合体・複合体制御、輸送・移動制御

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	分子技術に着目し、その重要性が社会的に認知されたのは、ここ数年のことである。しかし、その重要性が世界で初めて日本で認知されたことは極めて重要なことであり、今後、すでに高いレベルの研究基盤を持つが、分子技術間の連携が進めば、我が国がこの分野を世界的に牽引すると考えられる。
	応用研究・開発	◎	→	ナノテクノロジー、環境、エネルギー、ものづくり、ライフサイエンスなど、分子技術が鍵となる応用分野は多岐にわたる。我が国は、それぞれの分野での、末端技術では問題があっても、基盤となる分子技術の部分は高いレベルを維持している。
	産業化	○	→	上記のナノテクノロジー他いくつかの特定の分野で産業化が進んでいる。例えば、ナノテク材料分野では、非常に高いレベルにある。しかし、平均的には米国などに較べて、必ずしも十分な競争力がなく、韓国中国などに追い上げられている。
米国	基礎研究	◎	↘	米国でも、ここ数年分子工学の重要性が認識され始めているが、バイオ、マテリアルなどの非常に応用末端の分野に研究が集中している。つまり、化学という側面より工学の面が正面にでているので、分子レベルまで掘り下げた設計・合成へ注目した研究は少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究とは異なり、応用研究は非常に進んでいる。特に資金の集中しているライフサイエンスは圧倒的なレベルにあり、今なお向上している。
	産業化	◎	→	ベンチャーが牽引する部門は極めて迅速に対応している。特にライフサイエンスの分野では積極的に次々と新しい投資部門に展開している。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツの分子科学基礎研究は伝統的に高いレベルにあり、分子技術に於いても世界的にトップクラスである。一方、英国はライスサイエンス部門の分子技術は進んでいるが、これは米国に影響されていると思われる。フランスはフッ素化学などの限定的な分野では優れているが、一般には低調である。
	応用研究・開発	○	→	英国のライフサイエンス部門では、非常に優れているが、他は全般的には平均的レベルにある。
	産業化	○	→	一般にライフサイエンス部門は堅調であり、特に産業化を促進する制度的バックアップが優れている。しかし、特に分子技術という面からはすこし手薄い。
中国	基礎研究	○	↗	分子技術の面では、現時点では欧米を追う仕事が目立つ。しかし、ウミガメ政策以来、欧米で成功した研究者が多くの資金を持って次々と本国に招聘されており、ここ数年で大きく成長すると思われる。
	応用研究・開発	○	↗	急速に成長している。特に多くの研究費が大学や研究所に流れている。
	産業化	○	↗	米国と似た制度の下でベンチャー企業が誕生しやすい体制を取っている。
韓国	基礎研究	△	→	日本よりは米国型の研究スタイルであり、欧米からの帰国者を優遇している。その点では中国と状況は似ているが、研究レベルは中国に若干の遅れ。
	応用研究・開発	○	→	萌芽的な応用研究が進んでおり、今後の発展が見込まれる。
	産業化	○	→	比較的ダイナミックに産業化を進めている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）http://crds.jst.go.jp/type/benchmark/201106010018
2）http://molecularengineering.uchicago.edu/
3）http://provost.uchicago.edu/Pritzker%20Director%20of%20the%20Institute%20for%20Molecular%20Engineering.pdf

3. 4. 5　界面制御

（1）研究開発領域名

界面制御

（2）研究開発領域の簡潔な説明

理論解析と精密な分子設計や構造制御による界面の創成、および計測法の開発やモデリングに基づく界面の特性解析を行い、界面が関与する新奇現象･物性を解明するとともに、界面の特性を活かした新たな機能材料、デバイスの開発を対象とする領域である。本研究領域で得られた知見は、金属、粒子などのハードマテリアルをはじめ、高分子、分子集合体、ゲル、バイオ由来物質などのソフトマテリアルによる新規界面の構築に利用される。無機ー有機ハイブリッド材料における界面も大きなポテンシャルをもった応用領域である。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

材料のマクロ物性やデバイス特性は、結晶粒界、焼結体界面、ナノ・メソ構造の接合部分など、物質の複雑な界面構造と電子状態に大きく左右される。たとえば、エネルギー関連技術（太陽電池、二次電池、トライボロジーなど）の多くで界面の制御は重要な役割を担っており、材料やデバイスの特性向上を図るうえで界面の特性の解明と設計が必須である。この研究開発領域の成果によって高機能材料の開発が促進される他、以下のような効果が期待できる。

- 永久磁石、高強度構造材料など、ナノ・メソスケールの微細組織が重要な材料の特性改善
- ナノ構造デバイスのデバイス特性と安定性の改善
- フレキシブルやプリンテッドなどの低エネルギー・省資源型デバイスの実現（ナノ材料による巨大面積・精密加工のための基盤技術）
- 太陽電池、燃料電池、二次電池といったエネルギー変換デバイスの効率や寿命の向上

界面領域は、アトムプローブや走査型電子顕微鏡、高輝度放射光などの計測技術と密接に関連しており、優れた界面の創製にはその物性や構造を「原子・分子」で表現する精確な計測と評価が不可欠となっている。これらの進歩により、原子レベルでの物質構造の解明が進みつつあるが、結晶性が悪く不純物の析出が伴う界面構造の特定と物性の理解はいまだに極めて困難であり、そのために添加不純物の役割の明確化や組織制御による材料特性制御手法の開発が妨げられている。上記のニーズにこたえるため、複雑な界面を対象とし、既存の実験観測手法や理論計算手法単独では困難であった複合的な構造決定・構造予測手法の開発・確立が必要となっている。

［これまでの取り組み］

集積回路は多様な材料の集合体で、多様な界面から構成される。ナノ・メソ構造ではバルクの物性に比して界面の物性の重要性が著しく高まる。シリコン LSI 分野では、研究 - 基礎技術レベルでは、日本が界面現象の物理的理解において一歩リードしており、米韓は新材料界面開発で世界をリードしている。産業技術力においては、サムソン、Intel、IBM を背景に米韓が一歩リードしている。

有機デバイスについては日本が高い技術的競争力を有する。有機低分子の存在下でグラフェンを焼結すると、接合部位の欠陥を有機分子から提供されたカーボン原子が補い、導電性を保った接合が可能である。それ以外（特にグラフェンなど新規材料）については米国に大きく立ち後れている。

半導体を中心とする真空中の研究に加え、固－液界面の研究が、評価手法の進歩と産業界の材料ならびに製造プロセスに関するニーズから活発になっており、世界的に研究水準は上昇している。

界面は太陽電池、燃料電池、二次電池といったエネルギー変換デバイスの心臓部であり、効率や寿命の向上を目指して、これに関する研究が各国で活発に行われている。しかし、これらの反応過程は固液、固々界面などの埋もれた界面で起こっており、そのような界面の局所のみを under operation で、しかも液体や固体を通して動的にプローブすることは非常に困難である。水平分解能が非常に高い走査プローブ顕微鏡は主として最外層の情報のみが得られ、また時間分解能が低い。さらに固々界面に適用することはできない。埋もれた界面幾何構造の観察という観点からはシンクロトロン放射光（X 線）や中性子を用いた計測法などに代表去れるように、構造を反応が起こっているその場で実時間追跡する技術の開発が進んでいる。一方、界面の電子構造や分子構造の測定には非線形分光法が有効であるが、水平分解能と時間分解能が低く、それらの向上のための装置開発が行われている。

表面･界面に関する計測技術として、最近注目されているのがスピン分解電子分光装置、先端的走査プローブ装置（超低温超強磁場中で動作可能、パルス電圧印加可能、フェムトレーザー照射可能、複数プローブ型など）、低速電子顕微鏡などであるが、日欧がその技術開発に伝統的に強く、産業化も進んでいる。米国は、研究室レベルでの開発能力は極めて高いが、それを産業化する企業がない。超高感度検出器については、日本では大学での研究レベルであるのに対し､欧州ではメーカーによる試作レベル（初期段階の製品に近い）にあり、欧州がかなりと先行している感がある。電子線、X 線、光に対する光学系（光学理論や光学素子）の研究開発は、従来は日本が強い分野であったにも関わらず、ここ 20 年ほどは常に欧州に先行されている。

［今後必要となる取組み］

機能性材料の創製には、新規な分子構造の従来型の合成法と、自己組織化のような分子の特異性、物質の界面ミクロ特性、非平衡場などを利用する合成法が考えられる。界面制御は、これまでは応用ごとにプロセス技術の改良として主に行われており、分子材料と粉体（μm ～ mm）の加工技術の延長で理解されている。ナノテクノロジー・材料分野で直面している課題のひとつとして、ナノ材料の特性を活かしたままでナノ材料間をつなぐ界面層の開発がある。例えば有機デバイス（有機 EL や太陽電池など）の場合、微結晶中での電子およびホールの移動度もさることながら、微結晶バウンダリー（界面）特性がバルク電子物性を決めることから、材料の特性を活かしながら材料間をつなぎ、バルク特性として優れたものを得るための研究をさまざまな材料で横断的に行い、統一した指針を立てることが求められる。物質の界面に関する第一原理シミュレーション手法の高度化や探

索アルゴリズムの開発も必要となろう。

高機能を求めると、これからの新規材料はソフトマテリアル / ハードマテリアルからなるハイブリッド材料が重要な選択肢となる。しかしながらハイブリッドの材料開発を目的としても、そのための評価技術をまず整備しなければ、材料設計を行うことができない。例えば､ゴム / フィラーハイブリッドの無機フィラーの周りに存在すると言われている“バンドラバー相”は、フィラーの周りに厚さ約 2 nm でまとわりついていると信じられているゴム相であり、マトリクスと物質としては同じだが密度が微妙に変わるだけで力学的性質が異なるという非常に観察しにくいハイブリッド界面の典型である。このような界面の本質を明らかにする必要がある。既存の複合材料は有機成分と金属や無機成分を混ぜただけであり、機能を担う金属（無機）成分を配列制御して革新的な新機能を創製する研究は始まったばかりである。金属（無機）成分の場合はその空間配置は従来の顕微鏡技術で解析できる。しかし、その界面における特徴的な相の存在や相互作用を可視化・分析する技術を開発しないと、材料開発のブレークスルーは望めない。

界面創成と密接に関連する計測・評価技術の課題として以下のものが挙げられる。

・溶媒を含む状態での微細構造の観察技術

ナノスケールイメージングの代表的な装置である電子顕微鏡は、試料を超高真空状態に置く。しかし、ソフトマテリアルなどの材料、生物、医学分野の多くの試料は含水状態である。したがって溶媒を含む状態での微細構造の観察技術が実現できれば、応用分野は非常に広い。含水試料に対しては極低温で試料を固定（固化）し、その状態で観察する技術はすでにあるが、特殊で使いにくい。試料の構造を変化させない急速固定化の新技術が必要である。電子顕微鏡の場合、試料室のサイズが小さく、電子の透過力も小さいため、超薄膜の観察は可能であるが、変形、その他の試料環境を構築するのが難しい。高温、ガス下、低真空状態、力印加状態での電子顕微鏡法（環境 TEM）の開発が行われているが、３次元的な構造観察は実現していない。

・資料損傷の回避

電子や X 線などのプローブによる試料損傷が問題である。試料損傷の理論とそれを裏付ける基礎的実験が不備である。試料損傷を防げないのであれば、超高感度検出器を開発し、試料が損傷する前に画像を撮影する必要がある。プローブとして電子や X 線以外の可能性として、例えば He イオンあるいはその他の低ダメージのイオンビームの利用も検討する必要がある。

・イメージング技術

X 線の場合は超高速でダイナミックレンジの大きな二次元検出器が必要である。また得られた大容量の画像を高速度で転送し、３次元（立体的に見える）あるいは４次元（変形、時間などの外部条件を次元と考えると４次元）化するイメージング技術を開発する必要がある。ここではイメージングと計算機科学の連携・融合が重要となる。

・ソフトマテリアルに適用できる原子分解能観察技術

ソフトマテリアルとハードマテリアルの界面構造・機能を原子～メゾスケールの空間領域でシームレスに観察できる顕微鏡が必要である。また、高圧下、溶媒中あるいは変形下などの外部条件を試料に加えた状態で観察ができる顕微鏡あるいは微細領域の高感度分光技術が必要である。

（4）科学技術的・政策的課題

物質の界面の問題は、様々な材料（鉄鋼、非鉄金属、セラミックス、半導体、有機材料）やデバイスに共通するテーマであるが、関連研究者は各分野に細分化されており連携が難しい。また、これまでの研究は特定の材料に関するもので、散発的という印象がある。関連研究社を専門分野の壁を越えて連携させ、複合的な手法開発を行うことが求められる。

日本には多くの優れた界面科学研究者がおり、また優れたナノ材料を扱う企業があり、環境は整っている。まずは、計算物質科学研究者、理論研究者、高度な計測技術を持つ実験研究者、および材料開発を行う研究者（企業を含む）の連携協力を促す仕組みが必要である。

さまざまなナノ材料、デバイスを網羅する意味で、複数の大学研究者と複数の企業との連携体制で、基礎から出口への一貫した研究を実施することが望ましい。産業界のニーズに基づき、主として大学・国研の研究者が理論や原理、手法開発を行い、開発された手法を用いた実際の材料開発、装置試作は、主として産業界が担当する。ただし、材料開発は競争的分野でもあり、知財が絡むため、企業間の連携は難しい面がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- 走査型透過電顕（STEM）、アトムプローブ（STM, AFM など）による原子レベルでの実空間観察の解像度が向上している。
- 位相差顕微鏡法により、軽元素からなる物質（生体組織なども含む）に対するコントラストが増大している。
- 多次元空間の探査手法の開発は世界的に多くの試みがあり、日本からも複数の研究者が強力な手法を提案している。とくに日本発のレプリカ交換法は世界的に広く使われている手法である。複雑な界面構造の探査については、シリコン表面酸化膜（SiO2/Si）の構造シミュレーションの試みが IBM から報告されている。日本では比較的簡単な金属粒界の界面構造について、実験研究、理論研究が進められている。

［注目すべきプロジェクト］

- インクジェットを用いるナノプリンティングが産学で研究され、銀粒子を用いる回路描画技術の実用が目指されている。ERATO 下田プロジェクトが全体を牽引している。
- 元素戦略プロジェクトでは、二成分ナノ粒子の混合系を用いて、代替元素を創出するという成果が出ており、材料に新しい可能性を示すものとして注目される。また、界面制御によりディスプロシウム使用量を減らしたネオジム磁石など、ナノ界面制御に関連する成果も出ている。
- JST/CREST「ナノ界面技術の基盤構築」や「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」プロジェクトにおいては、基礎から応用への界面分野のプロジェクトが実施され、バイオセンサ、高分子ブラシ、半導体集積の自己組織化的な方法の開発などに、新しい成果が出ている。同「エネルギー高効率利用のための相界面科学」では、ナノテクノロジーを環境・エネルギー技術に用いるプロジェクトが推進され、ここでも界面は大きな技術要素となっている。
- SPring-8 の高輝度放射光や X 線自由電子レーザー（XFEL:SACLA）の実用化。

J-PARC の強力な中性子源、熱ミュオニウムなど、大規模実験施設の整備も進んでいる。

・2012 年には国内においてナノテクノロジー・プラットフォームが発足した。つくばにおける TIA とあわせ、国内の研究の牽引が期待される。

（6）キーワード

粒界、格子欠陥、探索手法、第一原理電子状態計算、高分解能顕微鏡、分光学、放射光、中性子、電子顕微鏡、アトムプローブ、ナノ材料、グラフェン、酸化物、金属微粒子、有機微結晶、接合、バウンダリー、エネルギーギャップ、フレキシブル、プリンタブル、ソフトマテリアル、ハイブリッド界面

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	基礎研究は活発で、国際的にリードしている分野が多い。しかし、分野間の共同研究はまだまだ不十分である。 ・半導体界面物理のレベルは世界一。グラフェン、トポロジカル絶縁体表面などの新しい話題によって研究が活況を呈している。これらは表面界面の分野だけでなくスピントロニクスやナノデバイスの分野にも関連するために研究の広がりをみせている。 ・ナノ界面･表面について機能賦与のための表面修飾、ナノ構造体創製･集積、加工などについて、大学・公的機関の研究者の層が厚く、研究成果も多い。特に、最近活発に研究されているナノ構造体としては、各種のナノシートがあり、無機層状化合物の剥離体、高分子ナノシートなど組成・調製法ともユニークなものが作られている。さらに、それを再集積することにより誘電体、ろ過膜など様々な機能材料の創成が図られている。代表的な研究機関に物材研（NIMS）がある。 ・JST/CREST の界面関連プロジェクトなどでは、物理、化学、材料・高分子など幅広い分野の界面・表面の基礎研究を推進し、これらをバイオセンサや IT デバイスなどの技術へつなぎ・展開しようという研究が活発に行われている。ユニークなものとして､エバネッセント光を用いたナノ光学（北大）がある。 ・従来からよく研究されていた真空中の表面の計測法に加え、固体中の界面（固 - 固界面）や固 - 液界面を分子レベルで研究する手法が活発に開発・利用されるようになっている。前者には 3 次元電子顕微鏡法、環境制御電子顕微鏡、2 次イオン質量分析計などがあり、固 - 液界面には和周波分光法、高速原子間力顕微鏡（高速 AFM）、界面の液体の構造観察 AFM、表面力装置などが用いられている。 ・SPring8 においても X 線回析・散乱・EXAFS などの表面・界面を見る技術が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	全体としてのレベルは高いが、分野間また産学間の連携が不十分であり、研究の展開がやや硬直的である。世界的なナノテクノロジーの研究拠点として 2009 年に発足したつくばイノベーションアリーナなど産官学の共創、協働が広がってきている。 最近のエネルギー関連技術として、太陽電池、二次電池、トライボロジーなどの技術分野での研究が進み、新しい研究のアプローチや成果が出はじめている。例えば、環境制御電子顕微鏡による触媒の研究、電池における電極界面の MRI などによる研究がある。 バイオ分野への応用として，１細胞計測・観測の試みが活発に指向されている。やはり広範な表面・界面の特性制御が必要である。 材料分野の製品・技術開発において界面・表面の課題の解決は必須であるとの認識が高まっている。例えば、ナノインプリント技術には、広範なナノ材料基盤技術が関わっている。アカデミックな研究の成果が生かされてきている。 企業の官学の基礎研究のナノテクノロジー基盤を活用するという期待は以前にも増して高まっている。化学プロセスや材料の構造の精密化から表面・界面の吸着など、現象の解明と機能・特性制御への期待が大きい。例えば、SPring8 での高分子に関するフロンティアソフトマター開発産学連合ビームライン（2010 年竣工）、JST 産学共創基礎基盤研究プログラムの中の「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」、燃料電池開発のための先端構造触媒反応「リアルタイム計測ビームライン」（2012 年）が関連分野の基礎研究の成果を踏まえ実現した。 基礎研究により開発された装置が市販されるなど、基礎から応用への橋渡しがされているが、官学で開発した装置の普及には時間がかかる状況であり、ナノテクプラットフォームでの活用など工夫が必要である。

	産業化	○	→	JST 先端計測プログラムの推進もあり、計測装置メーカーにおける先端機器の発売は増えており、特に AFM（高速 AFM、液体構造観察用 AFM）や電子顕微鏡関係が目立つ。 ナノフルイディクスのためのナノデバイスの製造技術の開発が進展しており、低コストで高品質のデバイス開発が実現されつつある。トライボロジー分野では固体潤滑膜や硬質膜を形成する製膜技術や製膜装置の開発に関して、DLC（ダイヤモンドライクカーボン）を中心として国内メーカーが積極的に取り組んでいる。また、添加剤開発に関するポテンシャルも高い。 インクジェットを用いるナノプリンティング技術が活発に研究され（JST ERATO、コンソーシアムなど）、解像度が上がり、実用化へ期待が高まっている。ナノフルディクスを用いるバイオセンサ、単一細胞センサなど、創薬研究への実用が試みられている。
米国	基礎研究	◎	↗	研究者の層が厚く、境界領域の研究に積極的に参入する傾向がある。特に SEMATECH などのコンソーシアムが材料科学分野を牽引し、グラフェン、トポロジカル絶縁体表面を中心に爆発的な研究が繰り広げられている。デバイスに向けた基礎研究も大学や企業の研究所でも活発に行われており、応用技術への展開が主要なモチベーションになっている。 ・基礎科学の力は強く、特徴あるナノテク研究センターが計画的に設置され、研究を牽引している。2008 年には、「太陽エネルギー変換技術の開発」を長期目標に掲げた HELIOS プロジェクトがスタートし、界面を含むナノサイエンスが大きな技術要素と考えられている。 ・米国化学会は雑誌の発刊に意欲的で、2009 年に新ジャーナル“Applied Materials and Interfaces”を発刊し、さらに 2011 年に ACS Catalysis が発刊されている。化学・工学・物理・生物の融合研究領域をカバーする雑誌、界面に関する学術雑誌として、Langmuir, Nano-Letters, ACS Nano を含め現在 6 誌あるが、いずれも多くの論文掲載数と高い Impact Factor を得ている。また、米国真空学会は 2006 年に Biointerphases を発刊している。 ・ハーバード大学、スタンフォード大学、UCLA、ノースウェスタン大学など多くの大学で、ナノ構造を用いたバイオ応用、センサを目指した研究開発が進んでいる。また、エバネッセント光を用いたナノ光学、さらに、ナノフルイディクスによる流体ダイオード開発のような新展開も見られる。トライボロジー分野では、SFA（表面間力測定装置）や SPM を用いた研究は盛んで、基板上の原子や分子を操作する研究が行われている。また、コンピュータシミュレーションでは、第一原理計算や MD（分子動力学）を用いた研究で世界一のレベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。電子顕微鏡および先端的走査トンネル顕微鏡（超低温超強磁場中やパルス電圧型）など先端的装置の開発が継続的に行われている。半導体分野では、SEMATECH などのコンソーシアムが材料科学分野を牽引しており、応用技術への展開が図られている。ナノ流体研究では、多くのベンチャー企業が、大学の基礎研究に基づいて、バイオ・医療応用、バイオテロ対策などを目指した研究開発が進んでいる。トライボロジー研究では、計測機器の開発をきっかけとしたベンチャー企業の設立が行われている。
	産業化	◎	→	大学などの技術をベースにしたベンチャー企業が次々と生まれ力となっている。Intel、IBM などの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上が認められる。人材の流動性により、複数の企業の共同研究が行われるなど機動力がある。 新しいインプリンティング技術などが多く開発され、低コストで高品質のデバイス製造技術が開発されている。ナノマテリアルなどの素材開発などで、技術力の高さが推察される。

欧州	基礎研究	◎	↗	・表面界面の研究は、ドイツを中心に伝統的に強い。金属表面での触媒作用に関する研究など根強いものがある。グラフェンなど新しい話題も欧州に端を発している。先端的な計測機器の開発も継続的に試みられている。欧州連合も基礎から応用までの研究支援に注力しており、IMEC・LETI などのコンソーシアムを始めとして基礎研究の十分な支援がある。 ・基礎研究については、各国に特徴的な分野や中心になる研究機関があり、世界をリードしている。例えばドイツは、マックスプランク研究所がコロイド界面研究所、高分子研究所など複数の専門の研究所を有し、ミュンヘン大学などの大学のセンター、ミュンスターの CeNTech などもある。トライボロジーはロンドンとリヨンに拠点がある。放射光施設などの国際的な存在感の大きい核になる研究機関が複数存在し、大型施設を用いる計測も含め欧州全体での研究交流・共同研究、人材育成も活発である。デンマークなどの小国でも理論（計算）科学の表面・界面への展開などユニークな国際レベルの研究が見られる。 ・英国王立化学会（RSC）や民間の出版社による関連分野の雑誌の出版も続いている。例えば RSC では Lab on a Chip（2001 ～）、Soft Matter（2005 ～）、Nanoscale（2009 ～）、民間では、Small（2005 ～、Wiley）、Nature Nanotechnology（2006 ～、NPG）、Particles（2012 ～、Elsevier）などがある。 ・ナノフルイディクス分野では、オランダ・トウェンテ大学、フランス・CNRS、スウェーデン・カロリンスカ大学・ルンド大学などの大学で基礎研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	特色のある技術開発は一部に見られるが、全面展開の状況にはいたっていない。 ドイツの低速電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡、スウェーデンの高分解能電子分光器など表面界面に関する計測機器の開発力は高い。半導体界面に関しては、IMEC、LETI を中心に高い技術開発力を誇る。官学と企業の研究の間のバリアが低く、連携がはかられている。英国においてはロンドン大学とインペリアルカレッジの連携するナノテクノロジーセンターが材料ナノテクノロジーの応用をはかり 10 程度のスピンオフ企業が生まれている。 ナノフルイディクスに関し、いくつかのベンチャー・大企業において、研究開発が行われている。トライボロジーに関しては、企業における研究開発は、全体としてあまり活発でない。しかし、新しい展開に対しての関心は高い。
	産業化	○	→	次世代半導体の開発から欧州メーカーが撤退し、日米韓と比較すると半導体関連の産業技術は弱い。一方、触媒など化学分野では伝統的に強い分野もある。表面界面に関する最先端の計測機器についてはメーカーの活躍が目立つ。大学との協力によって高い産業技術力を維持している。 化学や医療分野では国際化が進み、特定の地域のみに限定できなくなっている。欧州をベースとするトップ企業の産業技術力は高く、また新しい展開に対しての関心は高く、研究開発の世界展開が図られ、日本に研究所がある企業も多い。 ナノ微細加工の製造技術は進んでいるが、低コスト化の点で、日米に比べて遅れている。トライボロジーに関しては、製膜装置メーカー、真空機器メーカー、計測機器メーカーが伝統的に強く、産業技術力の下支えをしている。

中国	基礎研究	○	↗	表面界面の多くのトピックスに関して、質・量ともに上昇している。清華大学など複数の中核となる大学が世界的な成果を出し続け、存在感は急速に増している。国家政策として大規模な支援を受けているので、これからの発展の速度は大きいと思われる。 研究拠点は主に北京や上海に集中しており、装置設備も含め質量ともに向上している。多くの研究者がいる特徴を生かした、条件探索など活発に行われている。特に材料分野では、外国（欧米、日本）での経験を持ったレベルの高い研究者が帰国しており、今後急速な研究水準の向上が見込まれる。現に国際的研究が急増しており、関連分野の多くで、国別発表論文数の 1 位となっている。しかし、依然として応用的研究に重心があり、ナノ材料の形成など個別的なものが多い。また、既存の概念の延長上の研究がほとんどである。表面科学、固液界面、自己組織化単分子層といった分野でも存在感が高まっている。 ナノフルイディクスにおいては、北京大学、南京大学などいくつかの大学において基礎研究が開始されている。国際的に注目に値する研究はまだ少ない。トライボロジーにおいては、経済的な発展を背景に研究開発力が急速に向上している。
	応用研究・開発	△	↗	半導体分野においては国策として大学を中心とした研究開発の躍進がめざましい。半導体デバイス分野の研究開発水準の指標として知られている IEDM においても中国はその存在感を急速に増している。独自の技術開発を生み出すためには、時間が必要と思われるが、近年の向上速度は大きい。ナノフルイディクスにおいては、大学発ベンチャーにおいて、研究開発が開始されているが、日米に比較すると遅れている。トライボロジーにおいては、企業における研究開発は極めて低調であると思われる。
	産業化	△	↗	大学発のベンチャーなどが出てきているが、世界的な水準まで達していないのが現状。中国にある国外のナノテク企業が高い技術を持ち込んできている結果、人材の集積が進み、トップ企業の産業技術力は国際的レベルに到達している。ナノフルイディクスにおいては、製造技術については、ほとんど確立されていない。産業技術力は全体として向上しており、そのため、この分野における技術力にもポテンシャルは感じられる。
韓国	基礎研究	○	→	小数ながら世界的に高水準の研究成果が継続的に出ている。しかし、大半は、従来からあるテーマの研究も多い。ただし、半導体界面の研究レベルは特に高いものがある。 米国での研究経験者が多く、ナノバイオなど学際的、融合的研究が進んでいる。ナノテクに関する学科、学生数、および自国研究者による論文数は KNI が立ち上がった 2001 年から増加し続けており、今後も順調に増加していくと思われる。ナノテク特にナノバイオ関連のセンターが大学に国の支援によりいくつか設置されている。さらに引き続きエネルギー関連での研究機関（例えば GIST）の増強が進んでいる。近年の主な研究対象は、半導体、コーティング、ナノインプリントである。一方で、先端機器を用いる基礎研究のレベルは欧米に比べ低いが、放射光施設も浦項に開設され、国際的に開かれた運営に特色がある。 ナノフルイディクスにおいては、ソウル国立大学、KAIST を中心にナノテクセンターを構築し、若手教授を日米から呼び戻し、基礎研究を急速に展開しつつあり、日米を猛追している。トライボロジーにおいては、キャッチアップ的なテーマが多いように思われる。全体として活発に研究を進めている。大学や公的研究機関のポストが少ないためか、優秀な人材が国外に流出している傾向がある。

	応用研究・開発	◎	→	世界的水準の技術開発が行われている例は認められないが、多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われつつある。これから、大きな発展期を迎える可能性がある。 多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われつつある。特に、燃料電池、二次電池、バイオセンサなどの領域で産学連携研究が活発に行われている。 ナノフルイディクスにおいては、大企業を中心に、バイオ応用のための研究開発が進展している。また戦略的に研究資源を投資する土壌があるため、今後ポテンシャルが向上していく可能性が高い。SPM の草分け的なメーカーが米国から韓国に本拠地を移し、レベルの高い機器開発を行っており、関連計測機器の研究開発が活発化しつつある。
	産業化	◎	↗	サムスンを中心に、グラフェンをデバイスに実用化するための研究が盛んに行われており、世界をリードしている。基礎研究より実用化志向の技術開発が盛ん。巨大半導体産業を「てこ」にして今後もイノベーションが進むと思われる。 ナノフルイディクスにおいては、製造技術について、新たな低コスト・高精度技術開発を行い、日米を急追している。トライボロジーにおいては、自動車産業をはじめ、電子情報機器などの製造業を支えるのに必要十分な技術を保有していると推察される。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）参考文献

1）元素戦略：
H. Kobayashi, H. Morita, M. Yamauchi, R. Ikeda, H. Kitagawa, Y. Kubota, K. Kato, M. Takata, S. Toh, S. Matsumura, *J. Am. Chem. Soc.*, 2012. *134*, 12390
2）高速 AFM： T. Ando, *Nanotechnology* , 2012, *23*, 062001
3）固 - 液界面観察 AFM：
T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, *Appl. Phys. Lett.*, 2005, *86*, 193108
4）ナノインプリンティング： JST / ERATO　下田ナノ液体プロセス：http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/snp_PJ.html

3. 4. 6　空間・空隙構造制御

（1）研究開発領域名

空間・空隙構造制御

（2）研究開発領域の簡潔な説明

物質・材料中の微細な空間構造や空隙構造の形状・寸法・次元および配列などを、ナノ～メソ～マイクロで設計・制御・階層組織化することによって、これまでのバルク材料にはない革新機能を発現する材料を開発する研究開発領域である。多様な空間・空隙構造制御材料は、構造の特長と設計の自由度、そこから生まれる機能の観点から、様々な応用の可能性を持つ。マルチスケールのポーラス構造などで、高比強度、高靭性といった特性や、選択透過性、反応性、分離、吸着、触媒、貯蔵、イオン伝導、エネルギー変換などの様々な機能の実現が期待される。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

ナノ・マイクロ空間・空隙構造を制御できる材料としては、主にゼオライト、メソポーラス材料（シリカ、アルミナ、金属酸化物など）、ポーラスカーボン、多孔性金属錯体（PCP: porous coordination polymer、あるいは MOF: metal-organic framework）などを挙げることができる。

特許から類推できる多孔性材料の用途は多様であり、気体の貯蔵、センサ、触媒担体、電池部材、濾過膜、吸着材、調湿材、細胞培養、ノイズ除去、電池用セパレーター、感熱記録媒体、インクジェット吸収材、断熱材、遮音材、DDS、脱臭剤などが挙げらる。ナノ・マイクロ空間・空隙構造制御・材料で、またこれらの応用を指向した報告が多く見られる。

学術会議あるいは日本化学会のロードマップでは、CO_2 の有用物質変換、代替エネルギー、人工光合成の実現、量子ドット太陽電池、気体補足積層分子の設計などのテーマが将来有望視されており、多孔性材料の特長を生かした内容の報文も幾つか見られ、今後これらをテーマとした研究が進んでいくことが予想される。

［これまでの取組み］

多孔性材料として古くから人々に利用されてきたゼオライトは、SiO_4 四面体が頂点の酸素原子を共有して結合した 3 次元構造の結晶骨格から構成され、0.3 ～ 1.3nm 程度の細孔が結晶内に存在している。1940 年にテンプレートによる製造法が見出されて以来、多様な構造が作られ、すでに多くの用途に利用されている。メソポーラスシリカは、有機超分子を鋳型としたゾルゲル法で合成されたもので、早稲田大学の黒田らは 1990 年にメソ多孔体の空間制御に世界で初めて成功した。細孔の形状、サイズ、配列を調整できることを利用して、目的に応じた設計が可能である。メソポーラスシリカに関しては、日本ではすでに工業的な利用の段階に入っている。太陽化学は世界初のメソポーラスシリカの実証プラントを建設し、調湿材料や、Low-k 材料、触媒材料への用途開拓を行っている。

カーボン材料は青銅の原料である銅、スズ鉱石の還元に使用されて以来、1300 年もの間利用されている。細孔構造が制御されたポーラスカーボンは、メソポーラスシリカの細孔に炭素物質を充填、炭化した後にシリカを選択的に除去することで得られる。

多孔性金属錯体は、有機配位子を金属イオンによって配位結合を介して連結することで作られる無限骨格構造をもつ錯体で、1959 年に銅（I）アジポニトリル錯体が合成され、世界で初めてそのフレームワーク構造が示された。その後 Yaghi が MOF という呼称をつけ精力的に研究した。1997 年に北川らが溶媒を含むクラスレート構造ではなく、室温で多孔性をもつ安定なフレームワークを発表し、多孔性の金属錯体の概念が世界で初めて提唱された。

多孔性金属錯体は、材料設計の自由度と合成の簡便性から、気体の分離・精製・貯蔵、反応場、ゲスト分子の特性などに関して、基礎・応用の双方の立場から世界中で研究されている。日本の基礎研究では、京都大学の北川らが中心となって、新しい機能を発現させた多孔性金属錯体の研究を発展させている。この研究は、JST の ERATO 型プロジェクトにより世界に先駆けて進行した。応用研究では、NEDO の研究開発事業、「副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発」と「化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発」で、多孔性金属錯体による CO_2 の分離・精製、触媒能・反応場への応用などが展開されている。多孔性金属錯体の特許出願も逓増しており、20 社以上の企業が開発を行っている。大きな産業までには到っていないものの、商品名 ELM-11 で試薬として多孔性金属錯体が販売され始めた。

米国の基礎研究は、Yaghi、Long らを中心として独創的な展開がなされている。特に Yaghi らはハイスループットマシーンを利用して、コンビナトリアル手法によって新しい多孔性金属錯体の合成を進めている。カナダを含めて 10 大学が多孔性金属錯体の基礎研究に従事している。研究プロジェクトでは、2011 年以降、NSF により 8 件のプロジェクトが新たに開始された。そのうち 4 件が触媒関連であり、他がオレフィン / パラフィンの分離、水素貯蔵、熱分析に関するものである。応用研究では、二酸化炭素回収の実用化に向けた多孔性金属錯体の研究プロジェクトが進行している。本プロジェクトは DOE の先端研究計画庁エネルギー部門から総額 3,500 万ドルの予算で 2010 年から 3 年の期間で行われている。

欧州の基礎研究は Férey を始めとして、20 近いグループによって精力的に展開されている。多孔性金属錯体の国際会議「International Conference on Metal-Organic Frameworks and Open Framework Compounds」も続けて 3 回欧州で開催された。500 万ユーロを超える大型プロジェクト、NANOMOF（ドイツ）、MACADEMIA（フランス）が進行している他、研究助成プロジェクトとして、BIOMOFS、BIOMOF、KINPOR、COMMOF、CHIRAL-MOF が、フェローシッププロジェクトとして MULTIMOF が進められ、多方面に亘る事業が展開されている。応用研究では BASF 社が最も進んでいる。米国の Yaghi らと共同開発した材料を中心に展開し、パイロットプラントを建て事業化に向けた開発を行っている。同社は多孔性金属錯体にメタンを充填し、延べ 45,000km の燃料電池自動車走行テストに成功している。出願された特許から、BASF 社は、気体の吸着・貯蔵・分離、触媒、電子材料への応用に注力していることが覗える。BASF 社からは、商品名 Basolite として多孔性金属錯体が販売されている。BASF 社による応用開発以外には、PSA プロセスによる気体分離、天然ガスからの二酸化炭素の分離、オレフィンとパラフィンの分離、スプレードライを利用した新たな製造方法、半導体デバイス向け低誘電率材料などが注目されている。産業への応用では、BASF 社から商品名 Basolite として多孔性

金属錯体が販売されている。

中国、韓国はそれぞれ 4 つ、3 つの大学が基礎研究を行っており、今後の飛躍が期待される。韓国の応用研究としては、韓国科学技術省によるプロジェクト「21th Frontier Hydrogen Energy R&D Center Program」のなかで、多孔性金属錯体による水素関連の応用開発を行われている。産業化への動きでは両国とも特筆するものは見当たらない。

シンガポールにおける多孔性金属錯体の基礎研究では、Sum らにより吸着、触媒の研究が政府研究基金（National Research Foundation）のもとでで 2008 年から 3 年間行われた。シンガポール大学の研究プロジェクト「Molecular Design and Screening of Zeolite-like Metal-Organic Frameworks」では、2010 年から 3 年間、Yaghi のところで研鑽を積んだ Jianwen が従事している。

2011 年以降に発表されている論文数では、ゼオライトに関するものが最も多く、ついでメソポーラス材料、多孔性金属錯体、ポーラスカーボンの順となっている。ゼオライトは、主に合成、吸着、表面積、ポアサイズ、触媒機能について、ポーラス材料は、主に表面積、ポアサイズ、吸着、ポアサイズ分布について、多孔性金属錯体は、主に結晶構造、分子構造、吸着、表面積、発光、熱安定性、ポアサイズについて、ポーラスカーボンは、主に表面積、ポアサイズ、ポアサイズ分布、吸着についての論文が多い。ナノ・マイクロ空間・空隙構造を制御できる材料のなかで、特に多孔性金属錯体は構造の特徴と分子設計の自由度から他の材料とは異なる視点で研究が進められており、従来の材料にない化学的、物理的性質が発見されている。

［今後必要となる取組み］

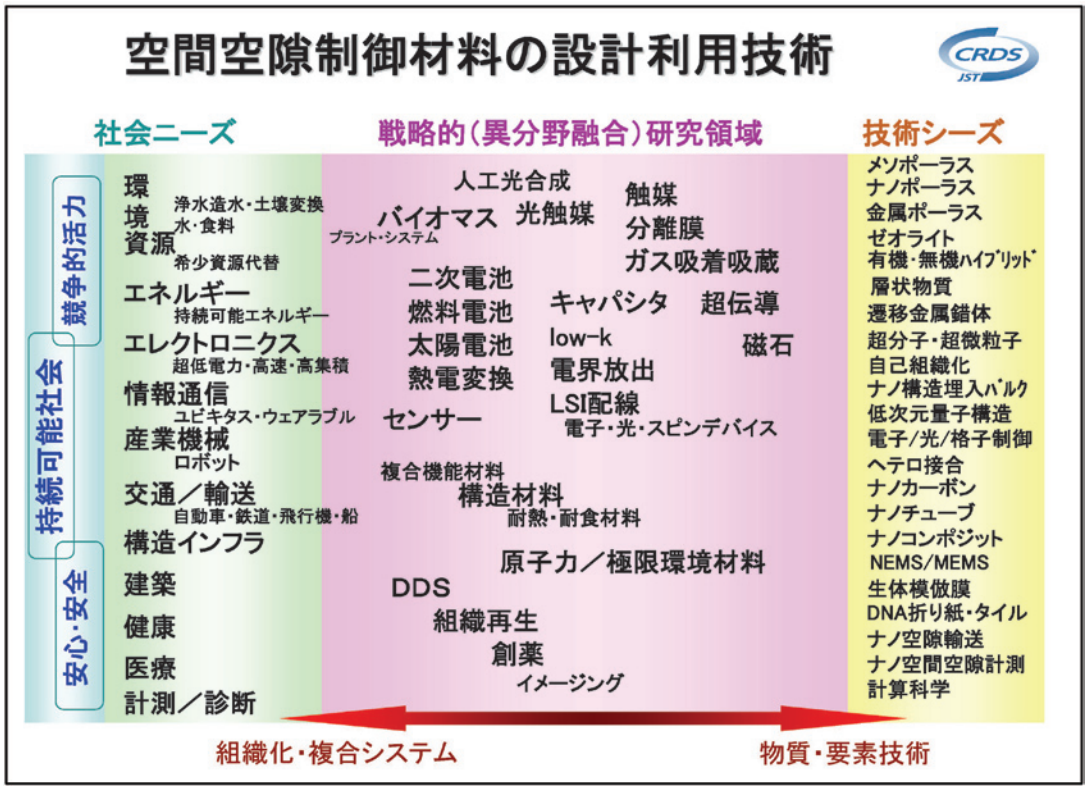
※詳細は CRDS 戦略プログラム「空間空隙制御材料の設計利用技術」（CRDS-FY2009-SP-05）を参照。

下図に示す空間空隙制御材料技術の俯瞰図を元に、想定される社会ニーズから、その実現に必要とされる機能要素を分解抽出し、さらにそれらを、物質技術におけるシーズ的要素へと翻訳することで課題が見えてくる。たとえば、「環境」というキーワードから、「浄化」「改質」「センシング」などの各機能項目が抽出され、それに対する技術要素として、「選択的分離」「吸着・吸蔵」、「分解」「触媒」などの機能要素が挙がってくる。原子・分子の選択分離には、対象となる分子がやっと通過できるほどの径を有する細孔による分子フィルタが必要である。また、触媒には、分子が 1 つ入れるほどの寸法の細孔空間の中で所望の化学反応を誘起する原子およびイオンを配した格子構造を有するゼオライトなどの細孔物質が使われる。これら典型的な空間空隙制御材料である、「ゼオライト」「メソポーラス」「規則性細孔ポリマー」「ナノチューブ」などの多孔性物質／材料群が機能を発現する原理を摘出すると、「細孔や層間の寸法、形状、次元、極性、規則性」による物理的・化学的相互作用の制御や、空間空隙制御材料と物質との相互作用性を象徴する「ホスト／ゲスト」、「鍵と鍵穴」の概念、構造形成の基本原理として「自己組織化」などを抽出することができる。

一方、技術要素の「分解」とは逆の過程として、要素技術群を統合して実用技術へ適用しようとする際には、「統合」を志向するキー概念として、ナノからマクロへの「規模拡大」、統合して拡大しても全体調和が崩れない「高強度化」、現実的な時間と資源などのリソー

スに適応する「高速大量合成」「低コスト化」などの要素を挙げることができる。これら、社会ニーズへの適応を志向する技術要素を、科学的原理に翻訳し、各シーズ技術の基本原理との関連性を明確化しておくことが重要である。それによって、ある要素技術の学術的深掘基礎研究であっても、その成果を再び水平統合、再構築して実用技術へ接続することが容易になり、従来滞りがちであった社会ニーズと技術シーズの間を自由自在に往来することを可能とする技術開発体制が確立される。このような考えにもとづく研究開発課題は、以下のように構成される。

1）空間空隙制御材料の設計と合成
　1－1）空間空隙制御材料における構造および相互作用の設計と機能発現
　1－2）空間空隙構造を有する物質の新規合成技術開拓
　　・自己組織化などビルドアップメカニズムによる空間空隙構造形成技術
　　・トップダウン手法による空間空隙構造形成技術
2）空間空隙インプリメンテーション技術
　　・ナノからマクロへの規模拡大、高強度化、高速合成、低コスト化
3）共通基盤技術
　3－1）空間空隙制御材料における物理的諸現象（物質輸送・貯蔵および物質・エネルギー変換など）の観測・解析技術
　3－2）計算機シミュレーションおよびマルチスケール・モデリングによる空間空隙構造の合成プロセスおよび構造と機能の設計・解析技術



（4）科学技術的・政策的課題

日本の多くのプロジェクトはアドホック的で短期間に結果を求めるものが多く、学術的な成果も産業利用も中途半端で終了してしまうものが少なくない。今後も引き続き新たな機能を有する材料設計、合成、新規物性の模索は続くが、学術的な研究と社会ニーズに応じた用途開発を展開する上で、基礎と応用の両者をバランスよく進めていくことが課題であろう。

経済産業省の未来開拓プロジェクトでは、基礎と応用研究を同時に進め、将来の産業の糧となる技術をつくることが掲げられているが、今後は文部科学省と経済産業省とで役割分担をし、基礎研究で見込まれる成果を応用研究で産業利用へ結びつける具体的な検討が必要であろう。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- ナノ・マイクロ空間・空隙構造制御・材料のなかでも、材料設計の自由度が高い多孔性金属錯体の研究は急発展している。Yaghi らは配位子のサイズを一定の法則を保持しながら大きくすることで、細孔径を 1 から 10nm 位の範囲で制御できることを証明した。これにより既存のマイクロ細孔、メソ細孔を完全にシームレスにカバーすることができる。例えば、タンパク質であるミオグロビンを細孔内に取り込むことに成功している。さらに、複数のビルディングユニットからなる多孔性金属錯体をつくることにより、DNA、タンパク質を模した立体規則性を有する機能性構造材料の創製を試みている。
- Long らは室温で空気中から酸素を選択的に吸着する Fe^{2+} を配位した多孔性金属錯体を合成した。これにより酸素と窒素の分離が常温でできるため、省エネルギーの観点からも有望な技術へと発展する可能性がある。また捕捉された酸素は電子を Fe^{2+} から受け取っており、吸着剤だけではなく触媒への応用も期待される。
- 北川進らは多孔性金属錯体に発光分子を導入し、ゲストの吸脱着により発光、消光を制御するスイッチング能を見出した。この機能を利用して従来の材料では実現できなかった気体に対するセンサを開発した。
- 北川進と堀毛らは、酸化亜鉛とイミダゾールとリン酸から、無加湿、１００℃以上で PMFC（燃料電池）の電解質として働く新しい多孔性金属錯体を合成した。固相で混ぜるだけで簡単に合成でき、生成物は 160℃で融解するため成形加工にも優れている。燃料電池セルに組み込んで良好な開回路電圧が得られている。
- 北川宏らは、構造が正方形の金属 - 配位子のビルティングユニットの繰り返し単位をもつ多孔性金属錯体のナノチューブを世界で初めて合成し、特異な分離能、電子構造を有することを示した。
- 近年、シェールガス革命がもたらした天然ガスの価格破壊は、世界のエネルギー事情を一変させようとしている。シェールガスはエネルギー源としての有益性だけではなく、化学工業の原料としての有用性も注目されている。ガス成分を利用する場合には、必ず分離、精製、反応が必要になり、省エネルギーでそれらの単位操作ができれば、今後の産業利用への重要な技術となる。ナノ・マイクロ空間・空隙構造を制御できる材料は、まさにこれらを具現化させる材料でもあり、今後のイノベーションに欠かせない材料となり得る可能性がある。

［注目すべきプロジェクト］

2007 ～ 2013 年の間に進められている欧州連合（EU）の第 7 次枠組み計画（FP7）では、多孔性金属錯体のプロジェクトの一つ、「MOFs as catalyst and adsorbents: Discovery and engineering of materials for industrial application（MACADEMIA）」が進行しており、ステージゲート制が採用されている。予算金額は 760 万ユーロに上る。第 1 ステージは「Discovery & Screening」、第 2 ステージは「Upscale & Optimization」、第 3 ステージは「Lab Pilot」となっている。第 1 ステージでは新材料の発見、構造決定、合成の最適化から初期評価まで行い、第 2 ステージでは第 1 ステージの候補化合物を、BASF 社と KRICT 社がキログラムスケールで製造し、その成形方法の検討、特性の評価を行う。第 3 ステージでは幾つかの選ばれた候補をラボスケールあるいはパイロットスケールで成形体を製造し、分離材料であれば PSA（Pressure Swing Adsorption）などの方法で最終評価をする。このように基礎から応用まで一貫したプロジェクトが多孔性金属錯体を対象として進められている。

（6）キーワード

メソポーラス材料、シリカ、アルミナ、金属酸化物、ポーラスカーボン、多孔性金属錯体、porous coordination polymer、PCP、metal-organic framework、MOF、かご構造、超分子

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	メソポーラスシリカは、1990 年に早稲田大学の黒田らにより世界で初めて合成された。論文数では中国系の研究者が優位であるが、日本の研究者は特に構造、形態制御の点で世界のトップを維持している。 ポーラスカーボンは、研究レベルは日本がトップクラスではある。2011 年以降では企業からの応用特許が多く出願されて、基礎研究のみならず応用研究も発展しつつある。 多孔性金属錯体は、京都大学の北川らが中心となって新たなコンセプトに挑戦しており、新しい機能を発現させた多孔性金属錯体を進展させている。また ERATO などのプロジェクトも進行し、多孔性金属錯体の貯蔵、分離、反応場、触媒、輸送、フレーム特性、ゲスト特性、光学特性、何れの分野でも世界トップの研究業績を上げている。
	応用研究・開発	◎	↗	NEDO のグリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発事業、「副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発」、「化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発」では、多孔性金属錯体の気体精製分離、触媒などの応用開発が行われている。
	産業化	○	↗	ポーラスカーボンはリチウムイオン電池負極材、電気二重層キャパシタなどの電極材料を中心とした用途が展開されている。 メソポーラスシリカは太陽化学社が世界初の実証プラントを建設し、調湿材料や Low-k 材料、触媒材料として注目されている。 多孔性金属錯体は商品名 ELM-11 で試薬として販売されている
米国	基礎研究	◎	↗	メソポーラス材料は、触媒やバイオ医学へ展開が世界トップレベルで進められている。 Yaghi、Long らを中心として独創的な展開がなされている。特に Yaghi らはハイスループットマシーンを利用して、コンビナトリアルに新しい多孔性金属錯体の合成を進めている。カナダを含めて 10 もの大学が多孔性金属錯体の基礎研究に従事している。 NSF による多孔性金属錯体に関する研究プロジェクトは、2011 年以降、8 件新たに開始された。そのうち 4 件が触媒関連、他がオレフィン / パラフィンの分離、水素貯蔵、熱分析に関する開発を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	メソポーラスシリカは多くの応用研究が展開されている。なかでもメソポーラスシリカナノ粒子が有機溶剤耐性を有する特長を利用した薬物キャリア、遺伝子導入試薬、細胞マーカーなどへの応用研究が注目されている。 実用化に向けた多孔性金属錯体の研究プロジェクトは、二酸化炭素回収に関するもので、DOE の先端研究計画庁エネルギー部門から総額 3,500 万ドルの予算で 2010 年から 3 年の期間で進められている。企業の研究開発では自動車メーカー燃料電池向けの水素貯蔵、プラントメーカーが触媒の検討を行っている。
	産業化	○	→	2011 年以降は、特筆すべき産業への応用は報じられていない。

欧州	基礎研究	◎	↗	Férey を始めとして、20 近いグループが精力的に展開している。多孔性金属錯体の国際会議「International Conference on Metal-Organic Frameworks and Open Framework Compounds」も 3 回続けて欧州で開催された。研究プロジェクトでは、500 万ユーロを超える大型プロジェクト、NANOMOF（ドイツ）、MACADEMIA（フランス）が進行している。研究助成のプロジェクトとして、BIOMOFS、BIOMOF、KINPOR、COMMOF、CHIRAL-MOF が、フェローシッププロジェクトとして MULTIMOF が進められ、多方面に亘る事業が展開されている。
	応用研究・開発	◎	↗	多孔性金属錯体の利用として、BASF 社製 MOF に充填したメタン燃料車がドイツから 40 カ国延べ 45,000km を走行する走行実験が行われ、多孔性金属錯体の充填材料としての耐性が評価された。 多孔性金属錯体の企業研究では、PSA プロセスによる気体分離、特に水素を含む混合ガスから水素を分離する開発、多孔性金属錯体を含む膜を用いた天然ガスからの二酸化炭素分離、低コストで迅速に多孔性金属錯体が得られることを目的としたスプレードライによる多孔性金属錯体の新たな製造方法、多孔性金属錯体によるオレフィンとパラフィンの分離、特にプロピレンとプロパンとの分離精製、半導体デバイスの微細化、高速化に伴う配線間容量の低減を狙った低誘電率材料などが検討されている。
	産業化	○	↗	多孔性金属錯体は BASF 社ベンチスケールからパイロットスケールの段階に入っており、商品名 Basolite として試薬が販売されている。
中国	基礎研究	○	↗	ゼオライト、メソポーラス材料および PCP/MOF いずれも論文発表数はトップクラスであるが、世界トップレベルの研究では米欧日を追う。
	応用研究・開発	△	↗	メソポーラス材料では復旦大学の Zhao が精力的に応用研究を進めている。太陽電池、光触媒、触媒担体、センサ、リチウムイオン電池などへの展開を進めている。
	産業化	△	→	産業への応用は報じられていない。
韓国	基礎研究	○	↗	メソポーラス材料、メソポーラスカーボンは、KAIST の R. Ryoo を中心に基礎から応用研究に到るまで開発が進活発にめられている。特にメソポーラス材料では、遺伝子導入試薬、分離、触媒、メソポーラスカーボンのテンプレート能などについて、メソポーラスカーボンは、触媒、水素貯蔵などについて研究がなされている。 多孔性金属錯体ではソウル国立大学のグループが CO2 分離、水素貯蔵を、KAIST、浦項工科大学のグループが分離、触媒の研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	韓国科学技術省によるプロジェクト「21th Frontier Hydrogen Energy R&D Center Program」のなかで、多孔性金属錯体による水素関連の応用開発が進められている。
	産業化	△	→	産業への応用は報じられていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）2012 年 9 月 21 日、日本経済新聞記事
2）O. yaghi, et al., Science 336 1018（2012）、ICCC40 Valencia 2012

3）J. Long, et al., J. Amer. Chem. Soc., 133, 14814（2011）
4）S. Kitagawa, et al., Nature Mater. 10, 787-79（2011）
5）S. Horike, et al., J. Amer. Chem. Soc., 134, 7612（2012）
6）H. Kitagawa, et al., Nature Mater., 10, 291（2011）
7）カーボン製品の徹底分析、シーエムシー出版、2011
8）プラスチック高機能化材料の現状と将来展望、富士キメラ総研、2011
9）http://www.ecofuel-world-tour.com/
10）MOF2012、Edinburgh

3. 4. 7　バイオミメティクス

（1）研究開発領域名

バイオミメティクス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

生物の構造と機能に関する知見を、材料、デバイス、システムの設計・製造に系統的に活用するための研究開発領域である。生物に学ぶことにより、製造・使用時のエネルギー消費が少なく、環境適合性の高い材料、デバイス、システムを実現することを目指した研究開発が進められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

バイオミメティクスは、生物進化で淘汰されてきた生物に学び、その知見を従来の工学技術と組み合わせることで新技術体系を創出し、生物多様性と生物プロセスに学ぶ材料やデバイス、システムの設計・製造法の開発を目指すものである。

生物は進化の試行錯誤の過程において、様々な構造とそれらに伴う機能を獲得してきた。例えば、昆虫の体表面に形成されるナノ・マイクロ構造は特徴的な機能を有しており、その形成過程と機能発現機構は、人間が工学的に設計・製造したものとは異なる原理に基づいている。また、生物は化石燃料や多量の希少元素を使わず、再生可能なエネルギーと再生可能な資源を利用し、環境に負荷をかけずに生存している。したがって、生物の構造・機能から得られる知識は、持続可能な社会に必要とされる新しい技術体系を構築するための指針になると期待される。

［これまでの取組み］

生物の構造・機能に学ぶことは、材料科学からロボット工学に至るまで、ものづくりの規範のひとつとなってきた。今世紀になって、ナノテクノロジーの展開によって走査電子顕微鏡が広く普及したことで、これまで未開拓であった細胞内部や表面に自己組織化的に形成される数百ナノメータから数マイクロメータの構造およびその機能が見いだされ、それらを模倣した材料の開発が注目されはじめた。とくに生物の表面構造に着目した研究開発はすでに盛んに行われており、超撥水表面、鮫肌水着、構造色繊維など、商業化まで展開されている事例がいくつか見られる。この背景には、精密合成、精密構造制御、精密加工、自己組織化などにおける最近の大幅な技術的進歩により、従来に比べはるかに精緻に生物を模倣できるようになったことがある。

米国では 2008 年に全米アカデミーズが、バイオミメティクスに関する科学技術政策の提言書でバイオミメティクスを強力に推進すべき課題として取り上げている。ドイツは政府主催のもと、産学連携および産業化を目指した本格的な国際見本市 “International Industrial Convention on Biomimetics” を開催するなどバイオミメティクスの振興に積極的に取り組んでいる。中国では材料分野を中心にバイオミメティクス関連の論文数が増加しており、近年は米国に次ぐ論文数となっている。

我が国では文部科学省の 21 世紀 COE において、生物模倣型モノつくり（平成 14 年度工学分野、名古屋大学「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」）や生物資源の新しい利

用（平成 16 年度農学分野、京都大学「昆虫科学が拓く未来型食科環境学の創生」）に関する大学院教育プログラムが採択されている。企業においても新材料デザインや生産技術革新の観点からバイオミメティクスへの関心が高まりつつある。

［今後必要となる取組み］

バイオミメティクスをさらに深化させるためには、先端技術を駆使して生物の機能発現機構や形成プロセスを明らかにし、構造と機能の相関、構造形成の原理を系統的に整理し、人間が工学的に設計・製造したものとは異なる原理の解明を飛躍的に進展させる必要がある。そのためには、自然史学、生物学、農学、材料科学、機械工学、環境科学などの幅広い分野連携・融合が必要となる。

（4）科学技術的・政策的課題

欧米におけるバイオミメティックスでは、分類学、形態学といった生物学分野が先導的役割を果たしている。また、欧州の博物館では電子顕微鏡写真なども含むデータベースを基に材料やデバイスの研究者との連携、産学連携を積極的に進めている。

我が国においても、生物模倣の基盤は生物多様性にあることを認識し、膨大な生物学データから工学的発想を導きだすための基盤を整備する必要がある。具体的には、生物学データベース（その多くは構造化されていない）と材料データベースを統合化した、従来に無い多分野統合化データベースを構築する必要がある。

生物を工学的な視点から理解するためには、自然史学・生物学と工学の対などな連携融合が不可欠である。しかし、国内では両者が議論する場が少なく、これが研究を進める上で障害となっている。生物学、博物館の自然史学の研究者と材料科学、機械学、環境科学の研究者との連携や産学連携を、拠点形成などを通じて促進するとともに、バイオミメティクスを担う人材を育成する必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

ロータス効果やゲッコーテープなど、表面ナノ・マイクロ構造制御を特徴とする材料の開発が、今世紀になってバイオミメティクス研究の新しい潮流として世界的に注目されている。ナノ・マイクロ構造制御では、ナノとミクロ・マクロとをつなぐ技術が重要であり、ナノメータからマイクロメータに至る繰り返し構造を作製するための鋳型として、ブロックコポリマーの相分離構造が注目される。これまでの相分離構造は二次元が主であったが、近年三次元の相分離構造へと展開しており、今後は粒子内の相分離構造やジャイロイド構造に注目が集まると予想される。

［注目すべきプロジェクト］

SPIE や MRS などの大きな国際会議で、バイオミメティクスのセッションが設置されはじめており、また、韓国、中国においても関連する学術集会が定期的に開催されており、学術的な注目度は年々増えている。

ドイツの標準化機関であるドイツ規格協会（DIN）から国際標準化機構（ISO）に対し、バイオミメティクスに関する技術委員会（TC）の設立提案が行われ、2012 年 10 月から

「ISO/TC266 Biomimetics」として活動が開始される。事務局は DIN が担当し、我が国を含む 7 カ国が TC266 への参加を表明している。2012 年に高分子学会の研究会として発足したバイオミメティクス研究会が国内審議機関となる。

日本では、平成 24 年度から文部科学省科学研究費新学術領域において、「生物多様性を規範とする革新的材料技術（生物規範工学）」が開始された。細胞内部や表面に見られる数百ナノメータから数マイクロメータの構造を「サブセルラー・サイズ構造」と位置づけ、この構造のもつ機能の解明を通じて、新たな技術体系の確立を目指している。

（6）キーワード

生体模倣材料、自己組織化、生物多様性、機能形態学

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	自己組織化ナノ材料や表面ナノテクノロジー、ソフトマテリアルなどの材料技術は世界的にも高く評価されており、Biomimetic Materials Processing に関する国際会議は 12 回を迎えようとしている。また、農学系ではエントモミメティクスの萌芽的研究もあったが、生物資源を有する博物学を含め、工学と生物学との連携は全くなされていなかった。2012 年度より、文部科学省科学研究費新学術領域において「生物多様性を規範とする革新的材料技術（生物規範工学）」がスタートし、自然史学、生理学、農学、情報科学、ナノテクノロジー、機械工学、環境科学、科学政策論、などの異分野連携に基づく我が国では初めての横断的研究組織が形成されたことで、基礎研究の加速が期待される。
	応用研究・開発	○	↗	材料分野における応用・開発のトレンドは、撥水・親水材料や光学材料などが中心で、建材や繊維、エレクトロニクスなど応用分野は多岐にわたる。しかし、生物多様性に基づく豊富な機能に注目されているとは言いがたく、模倣される機能は限られている感が否めない。企業は関心を示しているものの、まだ様子見的な状況にある。
	産業化	○	↗	帝人が開発した構造色繊維モルフォテックスや、日本ペイントマリンの防汚船底塗料、三菱レイヨンの陽極酸化アルミナを金型としたモスアイフィルム、カーボンナノチューブを用いた日東電工のゲッッコーテープ、LIXIL のセルフクリーニング建材など、材料分野における商品開発は実用化されている。また、白もの家電や新幹線の車体デザイン、自動車の自動運行システムなど、機械系、システム系の開発も行われており、今後は垂直連携や領域横断的な統合的開発が期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	環境、エネルギー問題の解決策としてのエコロジーに視点に立つ研究潮流と、ホームランドセキュリティーや軍事研究をニーズとする研究潮流、そして古くからある biomimetic chemistry の流れ、に整理することができる。前者は biomimicry という言葉を生み出し、中者はロボットやセンサ技術と材料技術の融合が図られつつあり、後者は DNA origami を象徴とする self-assembly nanotechnology を中心とする bio-inspired materials の再展開である。
	応用研究・開発	◎	↗	Biomimicry の提唱者である J.Benyus を中心にした Biomimicry Group では、コンサルティングや教育啓蒙活動を積極的に展開しており、いくつかの日本企業もクライアントになっている。また、SanDiego 動物園では、Biomimicry BRIDGE（Biomimicry Business, Research, Innovation, Design, Governance, and Education）活動の一環として“Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer”という経済レポートを出版、生物模倣技術が大きな経済効果をもたらすとしている。
	産業化	◎	↗	最近では、イガイに真似た水中接着剤、ヤモリテープを持つ垂直歩行ロボット、鮫肌模倣の防汚材料、など多岐の分野において活発な商品開発がなされている。

欧州	基礎研究	◎	↗	Lotus Effect（ボン大学の商標）、ゲッコーテープ、モスアイ構造、構造色、鮫肌リブレットなど、材料系バイオミメティクスの新しい研究の潮流は欧州から発信されたと言っても過言ではない。研究開発分野は、ナノ材料から機械まで幅広く、政策的にも異分野連携を強く推進しており、生物学と工学の連携が旨く機能している。さらに、FP7 などの EU 全体としての大型プロジェクトでは、biomimetic bioartificial liver（Re-Liver）などのバイオメディカル分野の課題も推進され始めた。
	応用研究・開発	◎	↗	欧州では、英国の BioTRIZ、スウェーデンの SWEDISH BIOMIMETICS 3000 など、生物模倣技術のコンサルティングやファンディングなど、基礎研究から産業化への橋渡しが着実におこなわれている。ドイツは、国内コンソーシアムであった BIOKON（Bionics Competence Network）を BIOKON International（The Biomimetics Association）にし、欧州における主導権争いでは一歩先んじた感がある。
	産業化	◎	↗	2008 年 5 月にボンで開催された国連生物多様性条約第 9 回締約国会議（COP9）において、ドイツ連邦環境・自然保護・原子炉安全省（BMU）は、ビジネス・民間部門による生物多様性保全への貢献を促す事を目的として「ビジネスと生物多様性イニシアティブ“Biodiversity in Good Company”」を設立した。これに先立つ 2007 年に発刊した“National Strategy on Biological Diversity”において BMU は“Biological diversity and its innovation potential”という項目でバイオミメティクスの産業化に言及した。さらに、2011 年 3 月に BIOKON International は、ドイツ政府の支援のもと、世界で最初の“International Industrial Convention on Biomimetics”を開催した。
中国	基礎研究	◎	↗	撥水材料に関しては中国科学院の江雷教授のグループが論文生産では世界のトップになりつつある。材料系、機械系の研究潮流が、交わること無く独自に展開している感が否めない。生物学の寄与はほとんど見られない。
	応用研究・開発	◎	↗	上海を中心にロボティクスの研究も活発である。英国との繋がりも深く、Nottingam 大学と吉林大学は、UK-China biomimetics research initiative を締結している。
	産業化	○	↗	撥水加工技術は、衣料や印刷製版へ応用されている。
韓国	基礎研究	◎	↗	International Symposium on Nature-inspired Technology を定期開催しており、その守備範囲は、材料、ロボティクス、センサ、メディカルなど幅広い。ドイツとのコネクションも強く、最近は、米国で学位をとった若手教授が水中接着剤やオプティクスの分野などで活躍している。生物学の寄与はほとんど無い。
	応用研究・開発	○	↗	KIST や KIMM、ソウル大学など複数の研究組織がタイアップして基礎から応用に向けての活動を積極的に展開しているように思われる。
	産業化	△	↗	10 回目を向かえた 2012 年の NANO KOREA でもバイオミメティクス関連の発表が増えてきており、企業の関心も高くなりつつある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）下村正嗣 . 生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流 . 科学技術動向 . 2010, 10（5）, p.9-25.
2）阿多誠文 . 国際標準化 ISO/TC266 Biomimetics が発足 . PEN News Letter. 2012, 3（1）, p.3-5.
3）李仁植 . 韓国におけるバイオミメティクス . PEN News Letter. 2011, 2（6）, p.21-23.
4）学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」. http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html
5）BIOKON International. http://www.biokon-international.com/index.html
6）Biodiversity in Good Company. http://www.business-and-biodiversity.de/jp/the-initiative.htm
7）SWEDISH BIOMIMETICS 3000. http://www.swedishbiomimetics.com/
8）BioTRIZ. http://www.biotriz.com/
9）Interdisciplinary collaboration for biomimetic bioartificial liver design. http://www.reliver.eu/
10）The Biologically Inspired Materials Institute（BIMat）. http://www.bimat.org/index.cfm
11）Gordon Research Conferences, Conference Program, Bioinspired Materials. http://www.grc.org/programs.aspx?year=2012&program=bioinsp
12）Biomimicry Group. http://biomimicry.net/
13）San Diego Zoo Global. http://www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/

3. 4. 8　ナノ計測

（1）研究開発領域名

ナノ計測

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ナノスケールの空間分解能を持つ計測技術の研究開発領域である。一般的に 100 nm 以下の空間分解能を持つ計測技術を対象とする。3 次元計測、動的・リアルタイム計測、界面および内部計測、さらに生体物質・組織の計測や、プロセスの微視的解明のための使用環境下のその場計測に向けた技術の開発が今後の方向性である。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

材料の物性は、一般に原子あるいは分子が数個から数十個程度集まった大きさ、すなわちナノスケールの構造で決まる。また、複雑に見える現象でも、ナノスケールの領域で生じる少数原子（あるいは分子）間の相互作用に起源がある場合が多い。したがって、材料の物性や様々な現象の起源を理解するためには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を直接計測できるナノ計測技術が必要である。材料の物性や物理化学現象の起源を理解できれば、それらを改善するための方向性や指針が得られる。また、その方向性、指針に応じたナノ構造制御技術を開発・改良する場合にも、構造・物性の変化を評価する技術が必要になる。このように、ナノ計測技術には、物性や現象の起源を理解し、それを制御するための方針を立て、それを実現するための手段を確立するまでのすべての過程においてニーズがある。したがって、これらのニーズに対応できるナノ計測技術の開発は、幅広い学術・産業分野の発展にとって欠かせないものである。

以下では、走査プローブ顕微鏡、透過電子顕微鏡（電子線トモグラフィーを用いた三次元形状計測）、放射光・X 線計測（自由電子レーザー、中性子、ミュオンなどを含む）、超高速時間分解分光のそれぞれについて、国内外動向を含むこれまでの取組みや今後必要となる取組みについて記載する。

<u>走査プローブ顕微鏡</u>

ナノ計測のなかでも走査型プローブ顕微鏡（SPM）は真空・気中・液中といったあらゆる環境で動作可能である点、半導体・導体・絶縁体などのあらゆる材料の原子スケール評価が可能である点、構造だけでなく様々な表面物性のナノスケール分布を計測できる点などから、代表的なナノ計測技術として研究開発が行われてきた。1981 年にスイスの IBM チューリッヒ研究所において走査型トンネル顕微鏡（STM）が発明され、ここから SPM の歴史が始まった。STM は極めて簡便な装置でありながら、原子分解能での表面構造観察が可能であったため、世界中に大きな衝撃を与えた。しかし、STM には導電性の試料しか観察できないという大きな制約があった。これを解決するために、米国の IBM の研究所と大学が協力して、原子間力顕微鏡（AFM）を開発した。これにより、絶縁体に関してもナノスケールの分解能で表面構造を計測できるようになった。STM や AFM、および、その後に開発された周辺技術を総称して走査型プローブ顕微鏡（SPM）と呼ぶ。STM や AFM の発明直後には、IBM の研究所や、そことつながりを持つ米国のグループを中心として技術開発が進められ、いくつかの研究トレンドが形成された。それらが波及

して、世界各国で研究開発が進められるようになり、今日の SPM 技術が確立されてきた。特に、米国、日本、スイス、ドイツにおいては、先駆的な成果が多く見られる。

超高真空 STM に関する基礎技術の多くは、SPM 開発の初期に米国で確立された。とりわけ米国の IBM 研究所で Eigler らが開発した極低温 STM は一種の完成形といえる。この装置により、原子操作、量子効果の検証などの基礎実験が実現された。日本では、半導体を中心とする表面科学分野での応用事例が多く見られるが、分子機能素子、生体分子などの計測に関しても世界レベルの成果が得られている。また、スイスやドイツにおいては、磁気物性計測への応用において顕著な成果が見られる。液中 STM については、日本で行われた電気化学 STM の開発と、それを利用した液中有機分子膜の計測結果が基礎技術の確立に大きく貢献した。

気相・液相で動作する汎用 AFM の開発では、米国の Hansma らのグループが先駆的な役割を果たした。特に、彼らの開発したタッピングモード AFM により、無機材料だけでなく柔らかい高分子や生体分子の観察も可能となり、AFM の応用範囲は飛躍的に拡大した。また、それをもとに世界初の SPM メーカー（旧 Digital Instruments）が起業され、SPM の普及に大きく貢献した。その後、ドイツの Engel らが膜タンパク質の液中分子分解能像を報告し、生物学分野にも大きなインパクトを与えた。最近では、日本において液中高速 AFM が開発され、タンパク質の動的挙動の直接観察が実現された。さらに、気相・液相用の周波数変調 AFM（FM-AFM）も日本で開発され、あらゆる環境において原子レベルの計測が再現性良く行えるようになった。

超高真空 AFM に関する成果は主に周波数変調 AFM（FM-AFM）という動作モードで得られてきた。この技術は、1991 年に米国の IBM で発明され、1995 年にドイツと日本でほぼ同時に世界初の原子分解能観察例が報告された。その後は、日本、ドイツ、スイスを中心に研究が進められ、米国での研究は下火になっていった。2000 年に、ドイツの Giessibl らが qPlus センサと呼ばれる新たな力検出器を提案し、それによるサブ原子分解能観察例を報告した。qPlus センサは従来の力検出器とは異なり、STM 装置に簡単に取り付け可能だったことから、それまで超高真空 STM で研究を行ってきた欧米の研究グループの多くが STM と AFM の複合機での研究に取り組み始めた。日本では、森田らが室温・超高真空 AFM の安定性を格段に向上させる技術を提案し、AFM による原子操作、原子識別などの革新的な成果を報告している。

SPM の動作を制御するコントローラについては、10 年ほど前にアナログ回路から DSP（デジタル信号処理）回路への転換期が訪れ、さらに 5 年ほど前から徐々に DSP 回路から FPGA 回路（プログラムにより再構成可能なデジタル集積回路）へと置き換わりつつある。近年、FPGA 回路技術は急速に進化しつつあり、その機能を最大限に活用できれば、従来不可能だったインテリジェントなリアルタイム計測制御法が開発できる。しかし、現在のナノ計測機器では、この急速に進歩しつつある FPGA 回路の機能を最大限に活かすための、計測制御法やそれを実装するファームウェアの開発が十分できておらず、大きな改善余地が残されている。

SPM 技術の中でも、液中 AFM 技術については特に大きな発展の余地が残されており、またそれに対するニーズも大きい。これまでに、液中での構造や力学物性の計測はある程度可能となってきた。しかし、様々な学術・産業分野で大きな需要のある電荷・電位などの電子物性分布の計測技術には、未確立の部分が大きい。また、固液界面では、水分子や

表面原子・分子の位置は固定されておらず、高速に熱揺動している。したがって、この界面の構造を従来のような 2 次元高さ分布像としてとらえることは不可能であり、3 次元密度分布として計測できる技術が本質的に必要である。日本は現在、液中 AFM 技術の開発では世界をリードする成果を残しているため、これをさらに発展させて早期に実用化し、様々な分野での研究へと応用すること目標となる。

透過電子顕微鏡（電子線トモグラフィーを用いた三次元形状計測について）

電子線トモグラフィーは、TEM（Transmission Electron Microscope）を使って材料内部の三次元構造をナノメートルスケールで得るための手法であり、ナノ材料開発での構造評価およびナノ産業における品質管理に大きく貢献すると期待されている。原理は X 線 CT（Computerized Tomography）と同じである。この手法が使われはじめて 30 年以上たつが、改善すべき点が多く残っているのが現状である。

電子線トモグラフィーでは、試料を回転させて、様々な方向から電子線を入射させた複数枚の像（通常百枚前後、以後、傾斜シリーズと呼ぶ）を撮影し、三次元再構成処理をすることによって三次元像を得る。原理的には、傾斜シリーズの各像と同等の分解能が得られる。しかし、それを実現するためには、様々な障壁がある。より分解能の高い（像質のよい）三次元像を得るために国内外で取り組まれている研究について以下に挙げる。

三次元像を得るための大きな問題の一つに missing wedge（情報欠落領域）がある。本来、完全な三次元像を得るためには、全方位方向から電子線を入射させて撮影した像が必要である。すなわち、-90 度から 90 度の角度範囲で試料を傾斜させて撮影した像が必要である。しかし、TEM の試料ホルダーが後傾斜時に TEM のポールピースに干渉するなど物理的な理由により、試料ホルダーの傾斜角度に制限があった。おおよそ -60 度から +60 度までの範囲で傾斜する場合が多い。そのため 3 次元再構成像には再現不可能な領域が現われ、分解能の異方性が見られてしまう。その対策として、直交する 2 つの傾斜軸を使って撮影された 2 つの傾斜シリーズを組み合わせることによって、missing wedge を減らすという double tilt tomography が使われている。また、通常、傾斜軸は電子線入射方向と直交するが、あえて傾斜軸を傾斜させて傾斜シリーズを撮影する conical tilt tomography[19] も使われている。どちらも、missing wedge を減らす手段として原理的に確立されているが、機械的な制約や画像処理の難しさが課題となっている。

ここ数年の間に、試料ホルダーの改良や試料加工技術の向上により -90 度から +90 度までの全方位投影が可能になり、等方的な分解能の三次元像を得られるようになった。これまでは、TEM の試料は薄膜形状試料が主流であり、それを支持する試料ホルダーは TEM のポールピースに干渉することは避けられなかったが、集束イオンビームを使った柱状形状試料の加工が可能になり、ポールピースに干渉しない試料ホルダーが販売されるようになった。しかし、柱状形状に加工することができるのは、基板内に埋め込まれた材料などである。従来のようにカーボンなどの薄膜上に観察対象物をのせた試料の方が圧倒的に多く、missing wedge を避けられないのが現状である。したがって、画像処理を使って、missing wedge を減らすという試みもなされている。

アライメント調整も課題である。試料駆動機構の回転軸上に数 nm 以下の精度で試料を設置することは機械的精度の制約で不可能であるため、試料を傾斜させる度に観察対象物がカメラの撮影視野の中心からずれてしまう。そのため、試料を回転させる度に、試料位

置を調整する必要がある。そこで、回転像シリーズの撮影の際に、試料を回転させる度にカメラの視野の中心から観察対象が逃げないように大まかな位置調整を試料駆動機構で行う。しかし、それだけでは数 nm の精度で調整を行うのは不十分であり、一連の撮影の後に、アライメントという画像処理による位置調整が必要になる。アライメントとは回転像シリーズの撮影後、各像に写っている試料の中心軸が像の中心軸と一致するように各像を回転、平行移動させる操作をいう。その回転量と平行移動量などは、試料上にのせた金の微粒子をマーカーとし、それらの相対位置を使って計算される。

通常、アライメントでマーカーとして用いる金の微粒子はそれを含む溶液の滴下と乾燥で試料上にのせる。この方法では、マーカーを適切な位置にのせることは非常に難しく、得られる三次元像の像質はマーカーの分散度合いに依存してしまう。すなわち、観察対象物の近くに適切な数のマーカーが存在すればアライメントの精度は上がるし、全く存在しなければアライメントを行うことができず、正しい三次元像を得ることができない。ある程度観察視野が広い場合（1 μm^2 前後）には、視野内に金微粒子を適度に分散させることは可能である。しかし、分解能を 1nm 以下にするためには、視野は 100 nm^2 前後にする必要があるが、その場合、視野内に金微粒子を存在させることすら難しい。これが、電子線トモグラフィーの分解能の制約になっている。マーカーを使わずに、試料形状や特徴点を使ってアライメントを行う手法の開発も進んでいるが、マーカーを使う方が確実に精度の高いアライメントを実現できる。

欧米では、トモグラフィーのソフトウェアを独自に開発してフリーで公開している研究室が多くみられる。他のユーザーが改良して使えるような開発環境を整えている研究室もある。それらの多くは生物系の研究室であり、要求される三次元像の分解能は数十 nm である。撮影される画像の視野は 1 μm^2 前後であり、傾斜シリーズ撮影の際の観察対象物の移動は少ない。さらに、撮影領域内に適度にマーカーを分散させることは困難ではない。したがって、この分野での傾斜シリーズの自動撮影や、アライメントの高精度化のためのソフトウェアは種類も多く、ある程度完成されている。上記に対して、電子デバイスの機能向上や消費電力の削減のため素子の微細化が進んでいる半導体分野では、分解能を 1nm 以下での高精度の三次元観察に対する要求が増えている。電子線トモグラフィーはそれを実現する最も有力な手法の一つと考えられてきたが、マーカーを付けることの難しさにより、応用例は未だにほとんど見られていない。近年、新たなマーカー付着方法の開発なども行われており、今後の発展が期待されている。

以上のような課題に加え、今後の課題として自動化がある。数十万倍以上の倍率で、完全に全自動化で傾斜シリーズを撮影することが困難となっている。それを実現するためには、傾斜軸の機械的なブレ自体を最小にする技術の開発や高精度で自動補正する技術の開発が必要である。さらに、アライメントにおいても、マーカー位置の完全自動検出が可能になるべきである。最も時間と労力を要するこれらの工程が自動化されれば、電子線トモグラフィーの普及が進むと期待されている。

放射光・X 線計測（自由電子レーザ、中性子、ミュオンなどを含む）

ナノ計測においては種々のビームが利用されることが多い。放射光・X 線や電子線はもちろんのこと、中性子、ミュオン、陽電子などの粒子線ビームが用いられる。放射光は構造解析や光電子分光、元素分析をはじめとする種々の用途に、中性子は重元素と軽元素が

混在している結晶の解析や磁気散乱の測定などに用いられる。ミュオンは磁性秩序や電子状態の測定あるいは元素分析などに、陽電子は格子欠陥の検出や空孔サイズの測定、あるいは結晶表面の解析などに用いられる。

わが国には、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー、SPring-8、自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設、広島大学放射光科学研究センターをはじめいくつかの放射光実験施設があり、種々の研究に利用されている。SPring-8 の X 線自由電子レーザーでは世界最短波長の X 線レーザーの発振に成功し、利用研究がスタートしている。他に産業利用を主眼とした佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターが運用されている。また、新たに中部シンクロトロン光利用施設が建設されている。

放射光以外では、中性子源、ミュオン源が J-PARC において稼働開始している。J-PARC のミュオンビームは世界トップクラスの大強度を誇る。現在、正ミュオンをエネルギー可変の超低速ビームとして取り出す装置の開発が進んでいる。陽電子は放射線管理区域さえあれば大学の研究室や企業の研究所でも使用可能で、陽電子寿命測定、2 光子角相関測定、ドップラー広がり測定、低速陽電子ビームを用いた測定などが行われている。しかし高強低速陽電子ビームを生成するためは、加速器や原子炉を用いた施設が必要である。加速器を利用した施設は、産業技術総合研究所や高エネルギー加速器研究機構で稼働している。高エネルギー加速器研究機構では反射高速陽電子線回折が実用的なレベルで実現され、物質表面の解析方法として注目されている。原子炉を用いる高強度低速陽電子ビームは現時点ではわが国には存在しない。

国外においては、欧米を中心に高輝度化のための第 3 世代の放射光施設が稼働開始、あるいはその建設が進んでいる。次のような施設がある。

- スペイン ALBA（試運転中）
- ドイツ ANKA（2002 年から稼働）
- デンマーク ASTRID/ASTRID2（ASTRID は稼働中、ASTRID2 は建設中）
- イタリア DA Φ NE（1998 年から稼働）
- 英国 Diamond（2007 年から稼働中）
- ドイツ DORIS Ⅲ（1993 年から稼働中）
- イタリア Eletta（稼働中）
- フランス ESRF（欧州最大強度、稼働中）
- スウェーデン MAXIV（稼働中、新たな施設が 2015 年から稼働予定）
- スイス SLS（稼働中）
- ポーランド SOLARIS（建設中）
- フランス SOLEIL（稼働中）
- 米国 Argonne, Advanced Photon Source（稼働中）
- 米国 Brookhaven, NSLS（稼働中）
- 米国 Brookhaven, NSLS － II（2015 年稼働予定）
- 上海放射光施設 SSRF
- 台湾 TLS（1993 年から稼働、2005 年にアップグレード）
- 台湾 TPS（2013 年稼働開始予定）
- 韓国 PLS（1995 年稼働開始）

ミュオンビームは英国のラザフォード研究所やカナダのトライアンフで利用が可能である。陽電子ビームとして世界最大強度を持つのはミュンヘン工科大学に設置された原子炉を利用するものである。それ以外に、米国のアルゴンヌで高強度低速陽電子ビームが生成されている。カナダのマクマスター大学では、原子炉を用いた高強度低速陽電子ビームが建設中である。

超高速時間分解分光

フェムト秒パルスに代表される時間的に短いパルス光を用いた分光計測によって、物質の超高速の時間変化を計測するものである。紫外～可視～赤外光領域で行われる物質の電子状態と振動状態についての分光計測を元に、テラヘルツやX線など、広範な波長領域の計測へと分光計測は拡大している。分光計測技術は、光科学の基盤であると同時にフロンティアであり続けている研究開発領域であり、生体イメージングやレーザー加工などの応用にも波及している。

超高速時間分解分光は元々、物質の時々刻々の変化を分光計測によって観測し、化学反応に代表される物質変化のメカニズムを解明しようとする学術的動機によって発展してきた分野であり、得られた知見は物質開発の知的基盤となるとともに、物理～化学～生物～工学にわたる広い分野の先端的興味を集め続けている。この分野では、光科学のフロンティアとして新しい技術が常に生み出されており、光検出技術、顕微技術、イメージング、レーザー加工などの応用分野へも波及している。ニーズ対応という観点から言えば、ニーズが生じた時にすぐにそれに応えられる技術の基盤を先んじて生み出すとともに、生まれた技術をベースに新しいニーズが生まれる可能性を触発してきた領域である。

超高速時間分解分光は、そもそもPorterとNorrishのフラッシュフォトリシスにその源流を持ち、短い光パルスによる瞬間的な励起とそれに続く瞬間的な分光測定を行うことで、短い寿命しかもたない化学種、あるいは過渡的な現象を観測しようとする研究から発祥している。レーザーの発明と発達、特にパルスレーザーの発明とその短パルス化を背景にして、時間分解計測の分解能は時代とともに著しく向上してきた。その中で超高速時間分解分光の“超高速”の定義は時代とともに変遷してきたが、現在ではフェムト秒領域から早いピコ秒領域での時間分解分光を指す場合が多い。このピコ秒・フェムト秒領域の時間分解分光計測は、モード同期のNd:YAGレーザーおよび色素レーザーの発明によって1980年代にはすでに行われていたが、これらの短パルスレーザーは取扱いが非常に難しく、長らく先端的ではあるがごく一部の専門的研究者による研究分野であると見なされていた。この状況は、1990年代に極めて安定にモード同期してフェムト秒パルスを発振するチタンサファイアレーザーの発明によって劇的に変化した。それ以降、モード同期チタンサファイアレーザーを光源とし、出力光の増幅には再生増幅器、さらなる短パルス化や波長変換には非線形光学効果を使う、という現在の超高速分光の光源の標準的形が作られてきた。これによって通常の大学研究室でもフェムト秒レーザーを比較的容易に扱えるようになり、超高速分光は広く行われるようになった。

光源の発達を追う形で新しい超高速分光計測の開発は行われる。ピコ秒・フェムト秒レーザー技術はまず可視光領域で発展したために、時間分解吸収分光がまず発達し、現在でも広く用いられている。また時間分解蛍光分光は、ピコ秒領域では短パルスレーザーによる光励起と高い時間分解能をもつ検出器の組み合わせによって、またフェムト秒領域では非

線形効果を利用した光ゲートの原理に基づくアップコンバージョン法などによって、広く行われている。これらの超高速時間分解分光では 100 フェムト秒程度の分解能で、電子スペクトル（吸収スペクトル、蛍光スペクトル）の時間変化を通じて物質変化を追跡することができ、汎用性が高い。さらには極短パルスを用いた 10 フェムト秒級の時間分解能の実験では、分子の核の運動を過渡信号の時間的変化として観測することもできる。

物質の構造情報を多く含むという点で振動分光は強力である。振動分光ではラマン分光と赤外分光が相補的な関係にあるが、ラマン散乱は可視領域の光のみを用いて測定できるので、振動スペクトルの時間変化として物質変化を追跡する超高速振動分光は、まず、ナノ秒～ピコ秒領域の時間分解ラマン分光として盛んになった。特にラマン分光では励起光の波長を調べたい分子（あるいは分子の一部）の電子遷移に共鳴させることで、その強度を著しく増大させることができる（共鳴効果）ので、短寿命の電子励起状態やタンパク質の発色団の超高速変化などを観測するのに威力を発揮する。やがて非線形光学過程を利用して赤外領域の短パルスが発生できるようになったことを受け、ピコ秒・フェムト秒領域での時間分解赤外分光測定が盛んに行われるようになった。さらに、赤外励起の時間分解赤外分光において赤外励起パルスの波長の依存性を綿密に調べることで、振動ダイナミクスを包括的に解明しようという二次元赤外分光が生まれ、この 10 年、超高速時間分解分光の一つのフロンティアとして米国を中心に極めて精力的に研究されている。時間分解ラマン分光は長らくピコ秒領域のダイナミクス研究で留まっていたが、最近、誘導ラマン効果を用いてフェムト秒精度で分子振動の時間変化を追跡することが可能になり、ビート信号として振動を観測する方法およびスペクトルとして振動を観測する方法の両方で、フェムト秒領域のラマンスペクトル変化が観測できるようになり、強い関心を集めている。

これら極めて高いフェムト秒レーザー技術と分光計測技術を用いることのできる紫外～可視～赤外領域の超高速時間分解分光では、以前では想像できなかった困難な計測が可能になってきており、生体分子に代表される複雑な分子系の研究が一層精力的に行われるようになってきている。さらには界面のような、より現実系に近い場でのダイナミクスの研究も可能になりつつある。

長波長領域への展開に関しては、テラヘルツ領域（遠赤外領域）で短パルス発生が行われ、テラヘルツ分光として活発に研究が行われている。特に最近米国において、高いパルスエネルギーをもつテラヘルツ光の発生が実現され、テラヘルツ光が観測のみならず物質の光励起にも使えるようになり、固体フォノンの研究を初め、新しい展開を見せようとしている。テラヘルツ領域はそれ以前に強力な光源が無かったこともあって未開拓の部分があり、工学的にも産業的応用の新しい可能性がある分野として注目されている。

短波長領域への展開としては、深紫外領域においてもチタンサファイアレーザーと非線形光学効果を利用して 10 フェムト秒級の光パルスが生成され、これを用いて光電子分光のフェムト秒時間分解測定が行われている。X 線領域の時間分解分光も放射光とレーザーの両方を用いて研究が進められている。特に時間分解 X 線回折は、タンパク質の時間的構造変化を直接的に観測することができるため、注目されている。他にも金属錯体などを対象にした時間分解X線吸収分光なども行われるようになっている。これらの多くは大規模の放射光施設で、パルス光である放射光とフェムト秒レーザーを同期させることでピコ秒の時間分解能を実現し、行われている。また放射光を使わず、フェムト秒レーザーを金属に集光させて発生させたパルス X 線やパルス電子線を用いた時間分解X線回折、電子

線回折の実験が試みられている。

超高速の極限への挑戦として、アト秒領域の実験が試み始められている。これまで超高速時間分解分光が主に発展してきた光学領域（近紫外～可視～赤外）ではフェムト秒が短パルス化の極限である。これは光パルスの時間幅とエネルギー幅（振動数幅）の関係はフーリエ変換で限定されており、両者を同時に狭くできないことによる。つまり、短い時間幅の光パルスを作ろうとすればそれに応じてエネルギー幅の広い光を作らなければならないが、1 フェムト秒の時間幅は約 15,000 cm^{-1} のエネルギー幅に達してしまう。光学領域では、これは領域のほぼ全帯域を使ってしまうことになるため、これ以上光パルスを短くすることはできない。この理由によってフェムト秒よりさらに短いアト秒パルスの発生、それを用いたアト秒の超高速時間分解分光の試みは、軟 X 線領域で行われている。アト秒パルスは、強力なレーザー光を原子・分子に照射し、それによってトンネルイオン化した電子の加速とコア部への再衝突によって発生させることができる。この軟 X 線高次高調波の発生によるアト秒パルスの発生、観測、高強度化は、最近のレーザー科学における最も先進的な問題の一つであった。現在、このアト秒パルスを用いてアト秒時間領域の物質の動的性質を観測しようとする研究が始まりつつある。

（4）科学技術的・政策的課題

現在、科学技術予算の申請あるいは実績評価には、必ず独創性・新規性・特色などの項目があるが、ナノ計測に関してはこれが弊害となっている場合がある。例えば、最近、液中原子間力顕微鏡（AFM）で原子分解能観察が可能になったのは、装置の感度改善の結果である。また、液中 AFM で分子動態計測が可能になったのは、装置の速度改善の結果である。また、超高真空 AFM で原子操作・識別が可能になったのは、装置の安定性向上の結果である。これらの例は最近の走査型プローブ顕微鏡（SPM）関係の技術革新の中でも代表的なものであるが、いずれも地道な性能改善の結果と言える。現在の SPM の研究開発フェーズでは、奇抜なアイデアに基づく新規技術開発よりも、堅実な方法論に基づく地道な努力の方が求められる技術革新につながる場合が多い。SPM 開発の歴史はすでに 30 年を超え、根本的な部分に関するアイデアの多くは試されている。その上でまだ達成されずに残っている課題を解決するには、SPM 技術を深く理解している研究者が、まずは正攻法で挑み、直面する問題を 1 つ 1 つ地道に解決していく研究が求められる。これまでに誰も提案したことのないアイデアを提案するよりは、誰かが過去に提案したけれども実用化できていないアイデアの実現に、地道に取り組む方が功を奏する場合が多い。今後は、分解能・安定性・動作速度・定量性などの基本性能の向上を着実におこなうとともに、その性能向上を達成するための手段に対して、一見してわかりやすい新規性や独創性を安直に問う姿勢を改める必要があると考えられる。

日本の大学における基礎技術・応用技術の研究開発レベルは世界的に見ても高いが、それに比べて SPM メーカーの国際競争力は高くない。この状況が生み出された原因はいくつかあるが、少なくとも技術的な問題については、大学と SPM メーカーが連携して研究開発に取り組む体制が必要である。これを推進するために、現在でも産学連携を支援する事業があるが、プロジェクトに対して独創性や新規性を求めすぎている上述の問題があり、必ずしもうまくいっていない。この趣旨の公的研究投資において、評価すべき点は、日本の SPM メーカーの国際競争力の向上に対する寄与であり、技術自体の新規性や独創性よ

りも優先されるものと考えられる。現在日本の大学の有する技術はすでに高く、この既存の技術を産業ベースに乗せるための地道な開発研究は担保されるべきだろう。

TEM（電子線トモグラフィー）に関しては、特にハード、ソフトの両面からの統合的なアプローチが必要である。電子顕微鏡自体だけでなく周辺機器も高価であるため、小規模な投資では装置開発は難しいであろう。例えば、米国の TEAM プロジェクトやドイツの SALVE プロジェクトのように、企業と国研と大学が一丸とならなければ実現できないと考えられる。電子線トモグラフィーはユーザー自体が少なく、基礎研究のレベルからは抜けられていない。原因として、サンプル調整、撮影、画像処理など、すべての工程において時間がかかり、しかも専門知識を要する部分が非常に多いという点が挙げられる。しかしながら、ナノレベルの分解能で 3 次元像が得られることから、欧米では生体系など様々な対象分野への応用が活発に検討されている。日本は電子線トモグラフィーに利用される電子顕微鏡の主要メーカーが 2 社存在するにもかかわらず、産業応用に向けた包括的な研究開発が行われておらず、産業利用時に単なる構成部品の供給者としかなれないことに課題がある。当該システムの開発・高度化には多額の投資が必要となることから、産官学の役割を意識した連携策が求められる。

放射光などの大型実験施設に関しては、これまで中心をなしてきた高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリーは立ち上げから相当の年数を経ており、その刷新が論点であろう。現在同施設では次期光源として ERL（Energy Recovery Linac）計画の推進を目指している。各研究施設の予算は減少傾向にあり、装置の運転時間を削る措置が取られている施設もあるようである。現状のままであれば、この分野の国際競争力の低下が懸念される。

現在の社会的要請や技術の成熟という背景を鑑みると、ナノ計測技術を企業で行われる産業技術・材料の研究開発へと応用するための実用技術開発を進める必要がある。現在、ナノ計測技術の研究を行う大学とそれを商品化したい企業の連携や、ナノ材料・デバイスの研究を行う大学とそれを製品化したい企業との連携を支援する事業は多い。しかし、ナノ計測技術の研究を行う大学のグループと、それを使って企業の製品・技術の研究開発を行いたい企業との共同研究の重点化は不十分である。先端的なナノ計測技術であればあるほど、民間企業での研究課題に対してそのまま適用することは難しくなる。しかしながら、そのギャップを埋めるための装置開発には、大学と企業の両方の研究者が協力して取り組むことが必要となる。今後は、こういった連携を重点的に支援できる体制を整える必要があると考えられる。

また、ナノ計測技術における懸念材料は、わが国の場合、特に人材育成にある。本領域のように人類の知の極限を追求することを通して、周辺分野へ大きな波及効果を持つ新しい知見や技術を創成しようとする分野においては、方法論の創出が極めて大きい研究対象である。しかし、最近の市販装置を用いた簡単で派手な研究が好まれる風潮を反映して、方法論の創出からはじまる本格的研究を行おうとする（あるいは行える）研究者は減ってきている。ナノ計測分野において、次世代の優秀な人材を供給できる拠点的研究室は減少する傾向にある。わが国が現在抱える構造的な問題に起因するところが大きいために即効薬は無いが、大学、研究機関、産業界が、それぞれの位置づけを明確にした上で、実をもって連携していくことが必須となるだろう。

その他、指摘おくべきこととして、各研究施設で用いられる装置のコンポーネントが輸

入品であることが多くなっていることがあげられる。特に真空部品など、従来は国産品が使われていたものが国外品ばかりになっているとの声がある。基礎研究を支えるわが国の企業の国際競争力が急速に低下していることを示している可能性があるが、実態との関係を捉えることは難しいが、懸念点の一つではないかと思われる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

- 超高真空 SPM の分野では、STM 技術と AFM 技術の複合化が進んでおり、これまで別々の発展を遂げていた 2 つの技術分野が統合されつつある。また、探針先端に特定の 1 分子を固定する技術や、探針と試料との間に 1 原子を介在させる技術が進展しており、1 分子内部の構造を詳細に観察できるようになってきた。これらの研究は、現在、米国やドイツが中心になって進められている。
- 気中・液中 SPM の分野では、高速液中 AFM によるタンパク質の動的挙動の直接観察技術が確立され、世界中が注目している。また、高分解能液中 AFM を応用した原子スケールの 3 次元力分布計測技術が開発され、固液界面における 3 次元水和構造や揺動構造が計測できるようになり、幅広い分野から注目されている。また、液中電位・電荷分布計測技術についても予備的な実験結果が得られつつあり、産業分野からの注目も高い。これらの技術開発においては、現在日本が中心的な役割を果たしている。一方、原子スケールの分解能には及ばないものの、ナノスケールの分解能での 3 次元力分布計測を高速に行うことにより定量的な物性計測を目指す動きが、特に米国において盛んである。例えば、peak force tapping、dual AC mode、band excitation などの技術が挙げられる。これらの開発には産学間の連携が強く見られる点が特徴的である。
- SPM の技術開発の動向として、多次元化の傾向が見られる。これまでの 2 次元高さ像ではなく、3 次元力分布像、それに時間や電位の軸を加えた 4 次元、5 次元計測が志向されている。また、これらを実現するために基本性能（高速化・高感度化・高安定化）の底上げや、高速デジタル信号処理系の開発が益々重要になりつつある。基礎技術としては、世界中で液中電位・電荷計測に対する注目が高まっている。これはナノ計測技術を社会利益に還元し、グリーンサイエンス、ライフサイエンスの発展を推進しようとする、昨今の社会的情勢とも関係がある。この技術は学術的にも産業的にも需要があり、今後の動向に注目が集まっている。SPM の製品開発動向としては、自動化と物性の定量計測技術が大きく進展している。SPM 製品を電子顕微鏡や光学顕微鏡と比べた場合、その自動化の遅れは明白であったが、欧米のメーカーではここ数年多大な開発費と労力を投じて、実用性の改善に努めてきた。また、欧米のメーカーでは計測の多次元化や高速信号処理による物性定量技術をいち早く取り入れるために、産学連携研究を推進してきた。日本のメーカーは、ここ数年の不況により技術開発への投資を抑えた影響で、これらの分野でやや出遅れている。現状では、国内市場での競争力はある程度維持しているが、減少傾向にあるため、状況を好転させることは簡単ではないだろう。
- 電子トモグラフィーに関して、Oak Ridge National Laboratory（ORNL）, Cameca, Nion, ISU and the University of Sydney を中心に行われている ATOM project[11] が 2010 年から始まり、TEM tomography と atom Probe 結びつけた方法の研究を進めて

いる。さらに、ナノ粒子の結晶構造の三次元像を原子分解能で取得することに成功している。試料の重心に基づくアライメント法を行い、金ナノ粒子の原子分解能での電子線トモグラフィーに成功した例や 2 方向から撮影した像から原子分解能で結晶ナノ粒子の三次元再構成を行うことに成功した例が発表されている。

- SPring-8 では、X 線自由電子レーザー SACLA でフェムト秒のパルス幅の実現に成功している。また、動作中のリチウムイオン電池ナノ界面の観測や新しい LED 用蛍光体の発見など、産業に直結した知見も創出されている。
- 紫外～可視～赤外領域の超高速時間分解分光では、化学反応の究極的理解につながる遷移状態へ迫ろうとする研究が最先端の研究者によって試みられている。同時に、生体系に代表される複雑分子系や、より現実に近い系に研究を展開しようとする流れがある。前者では、例えば、光合成系の光中心で極めて長い寿命をもつ電子コヒーレンスが観測され、生体系におけるコヒーレンスと効率的な光エネルギー移動の関係が極めて精力的に議論されている。後者では、特に、応用という観点からも重要な界面におけるダイナミクスを研究する界面選択的超高速時間分解分光が本格化する気配がある。これらについては日本の研究がリードしており、世界を牽引する位置に居る。界面の超高速ダイナミクスの研究は、純粋学術的な意味でも応用を見据えた基礎研究としても広がりがあり、太陽エネルギー変換や燃料電池などの重要課題研究の中で大きい意義をもってくる可能性がある。
- X 線領域の時間分解分光は今後さらに進展すると考えられる。放射光は原理的にピコ秒パルスなので、これとレーザーを同期させた X 線回折や X 線分光の研究が世界の放射光施設で進みつつある。特に第四世代放射光という位置づけのある X 線自由電子レーザー（XFEL）は、極めて高い強度を持つフェムト秒硬 X 線パルス光源であり、未知の可能性を秘めている。XFEL は米国で最初に発振し、続いて日本で発振し、数年後にはドイツでも発振が予定されており、注目を集めている。装置の性格上ストレージリングのようには多くのビームラインを建設できないため、マシンタイムの制限が厳しくユーザーが限られるが、新しい光科学を拓く可能性を持っていることは間違いないだろう。
- 時間分解能の極限としては高次高調波発生によるアト秒軟 X 線パルスの生成と利用にフロンティアがあり、サブ 100 アト秒パルスの生成も実現している。アト秒パルスの発生が確認されてから約 10 年が経ち、その間、主としてパルスの生成と計測についての研究が進んだ。今後の課題はその利用であろう。アト秒時間領域で観測されるダイナミクスは電子のダイナミクスであり、物質変化や核のダイナミクスを取り扱うフェムト秒領域までの超高速分解分光とは質的に異なる。今後、アト秒の科学がどれほどの広がりをもつ分野に発展するかは自明でないが、極限計測のフロンテイアとして注目される。

［注目すべきプロジェクト］

- 現在液中 AFM の分野では、日本が世界をリードする成果をあげている。特に、その中核を成す成果が金沢大学の安藤ら（高速 AFM）や福間ら（高分解能 AFM）によってもたらされているが、金沢大学ではこれらの研究を重点的に推進するために平成 22 年 10 月にバイオ AFM 先端研究センターを発足させた。ナノテク研究センターは国内外に数多くあるが、液中 AFM という特定の研究分野にフォーカスしたセンターは世界でも異例であり、注目が集まっている。

・2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、筑波地区、あるいは東海地区の研究施設に甚大な被害をもたらした。それにもかかわらず、いずれも地区でも早期に復旧が行われ、すでに震災以前と同レベルあるいはそれ以上の研究活動がスタートしている。特に、高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリーや J-PARC の施設は早期に復旧した。その後、高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリーでは、ピロリ菌由来の発がんたんぱく質の構造解析や、正常な細胞分裂に不可欠なたんぱく質の機能と構造の解明など、新たな知見の創出が行われている。同研究所では現在、ERL 計画が推進されており、その試作のためのコンパクト ERL の建設が進んでいる。またライナックを用いて生成する陽電子を減速して単色化しビームとして取り出す技術（低速陽電子ビーム）も完成している。最近、高エネルギー加速器研究機構で、低速陽電子ビームを利用した反射高速陽電子線回折実験がスタートした。この手法は、原子力研究所高崎研究所で放射性同位元素を陽電子線源として用いて開発されたが、高エネルギー加速器研究機構の高強度低速陽電子ビームを用いることによって、比較的短時間で測定ができるようになった。反射高速電子線回折に比べて種々の利点を有しており、今後、大きく展開していくと思われる。

（6）キーワード

走査型プローブ顕微鏡（SPM）、走査型トンネル顕微鏡（STM）、原子間力顕微鏡（AFM）、電子線トモグラフィー、近接場光学顕微鏡（SNOM）、非線形誘電率顕微鏡（SNDM）、放射光、中性子、ミュオン、陽電子、ピコ秒、フェムト秒、アト秒、分光計測、極限、ダイナミクス、時間分解、回折、パルスレーザー、コヒーレンス、X 線、紫外光、可視光、赤外光、テラヘルツ光

（7-1）国際比較（走査プローブ顕微鏡）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	世界的に競争力のある研究グループが複数あり、走査型プローブ顕微鏡（SPM）全般の基礎研究水準は高い。 特に、原子間力顕微鏡（AFM）については、超高真空中での原子操作 [*13]、液中での原子分子分解能観察 [*8]、３次元水和・揺動構造計測 [*15]、電位・電荷分布計測 [*16] など、世界をリードする基礎研究成果も多い。
	応用研究・開発	◎	↗	世界最高性能の走査型プローブ顕微鏡（SPM）を独自に開発している研究グループもあり、装置・技術開発の水準は高い。 例えば、高安定超高真空原子間力顕微鏡、高速原子間力顕微鏡、高分解能液中原子間力顕微鏡、超高真空非線形誘電率顕微鏡などが挙げられる。 また、バイオ分野、高分子分野への応用研究においても成果が見られる。
	産業化	○	↘	走査型プローブ顕微鏡メーカーの数は、世界的に見ても多い。 しかし、近年の不況により、各メーカーともに製品開発が遅れており、米国や欧州のメーカーに比べて装置の基本性能・利便性・完成度の点で劣っている。 もともと海外シェアは低かったが、国内でも海外メーカーの進出が目立つ。 ただし、島津製作所が大学の研究グループと共同で高性能な汎用原子間力顕微鏡の開発に取り組んでおり、今後の商品化が期待されている。
米国	基礎研究	◎	→	走査型プローブ顕微鏡技術全般に関する基礎研究で成果が報告されている。 特に、IBM の Almaden グループからは、世界最高レベルの安定性と分解能を持つ極低温・超高真空走査型トンネル顕微鏡による計測結果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	→	大学だけでなく、メーカーにおいても、新たな技術・装置の開発が精力的に進められている。 また、産学間の共同研究成果も多い。特に、大気・液中でのナノスケール物性計測手法の速度や定量性を改善する試みが多数報告されている。 一方で、原子・分子レベルの計測技術に関しては、IBM における基礎研究以外には画期的な成果は得られておらず、日本や欧州を追うかたち。
	産業化	◎	↗	汎用型の走査型プローブ顕微鏡メーカーが多数あり、国内外で高いシェアを誇っている。 また、バイオイメージング、半導体産業分野、高分子科学など多岐にわたる分野で使われている。

欧州	基礎研究	◎	↗	走査型プローブ顕微鏡全般において、高い研究水準を有する。 特に、ドイツの Giessibl らのグループや IBM Zurich のグループでは qPlus センサを用いた走査型トンネル顕微鏡と原子間力顕微鏡の複合技術や、１分子を探針として用いる技術が開発されている。 また、磁気交換力顕微鏡などを用いた高分解能磁気物性計測技術の開発でも世界をリードする。 一方、液中・大気中で動作する汎用的な走査型プローブ顕微鏡の基礎技術開発は日本や米国を追うかたち。
	応用研究・開発	○	→	応用に関しても超高真空タイプの走査型プローブ顕微鏡技術を用いた成果が多い。 高分解能原子間力顕微鏡技術の酸化物、磁性体研究への応用で顕著な成果が見られる。 一方、液中・大気中用の走査型プローブ顕微鏡を用いた研究では日本や米国を追うかたち。
	産業化	◎	↗	ドイツの JPK Instruments 社は、光学顕微鏡と原子間力顕微鏡の複合機のメーカーとして国内外で高いシェアを誇っている。 また、SPECS 社の走査型プローブ顕微鏡用コントローラは、世界中で高い販売実績を持つ。 スイスでは、大学発の技術の実用化やベンチャー起業の例も多く見られる。
中国	基礎研究	×	→	走査型プローブ顕微鏡技術に関する基礎研究はあまり多くみられない。
	応用研究・開発	△	↗	走査型プローブ顕微鏡を用いた応用研究に関する報告例は、有機分子系やポリマー系の評価を中心に増えてきている。 ただし、欧米の研究グループにおいて研究員として経験を積んでいる中国人も多いため、彼らが今後帰国すれば、将来的にはレベルが上がってくると考えられる。
	産業化	×	→	特筆すべき走査型プローブ顕微鏡のメーカーはみられない。
韓国	基礎研究	△	↗	走査型プローブ顕微鏡技術全般にわたって、標準レベルの研究成果は得られているが、技術革新につながる基礎研究結果は報告されていない。 ただし、米国を中心に留学経験を積む研究者が多く、技術レベルは上昇傾向にある。
	応用研究・開発	×	→	装置開発に関する目立った研究成果は報告されていない。
	産業化	○	→	世界的に認知されている走査型プローブ顕微鏡メーカーとしてパークシステムズがある。 特に、メトロロジー（計量学）への応用を意図した、高い再現性・定量性を特徴とした原子間力顕微鏡（AFM）を提供している。 ただし、超高真空用の装置や高分解能な汎用装置のメーカーはない。欧米に比べるとやや劣るか。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（7-2）国際比較（透過電子顕微鏡（電子線トモグラフィーを用いた三次元形状計測））

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	画像処理技術の高度化や 3 次元像の信頼性向上を進めている研究室がある程度。
	応用研究・開発	△	→	代表的な顕微鏡メーカーである日立と日本電子が、電子線トモグラフィー用の試料ホルダーや撮影ソフトウェアや画像処理ソフトウェアの販売がされている。
	産業化	×	－	3 次元像が得られる TEM および解析ソフトの組み合わせは販売されているが、利用は研究室レベル。
米国	基礎研究	◎	↗	コロラド大学の Mastronarde 氏の開発した iMod が無料で公開され世界的に利用されている。他にもフリーソフトを公開している研究所がいくつかある [23]。原子分解能のトモグラフィーを目指している研究室が増えはじめている。
	応用研究・開発	◎	↗	生体試料への応用に関する研究開発が多く見られる。
	産業化	×	－	3 次元像が得られる TEM および解析ソフトの組み合わせは販売されているが、利用は研究室レベル。しかし様々な対象材料への利用検討が活発に行われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	米国と同様、傾斜シリーズの撮影、アライメントのソフトウェアを独自に開発し、フリーで公開している研究所や大学がいくつかある [23]。電子回折像と電子線トモグラフィーの手法を組み合わせた Electron Diffraction Tomography の開発を行っている研究室もある。
	応用研究・開発	◎	↗	生体試料への応用が多く見られる。代表的な顕微鏡メーカーである FEI の顕微鏡の使用率が高い。
	産業化	×	－	3 次元像が得られる TEM および解析ソフトの組み合わせは販売されているが、利用は研究室レベル。しかし利用検討が活発に行われている。
中国	基礎研究	－	－	
	応用研究・開発	－	－	
	産業化	－	－	
韓国	基礎研究	－	－	
	応用研究・開発	－	－	
	産業化	－	－	

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（7-3）国際比較（放射光・X 線計測（自由電子レーザー、中性子、ミュオンなどを含む））

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	研究水準	◎	↗	放射光では数々の実績がある。放射光以外も、中性子、ミュオンで新たな施設が稼働開始している。陽電子の分野も数々の成果が上がっており、水準は高い。
	技術開発水準	◎	↗	国内の放射光源などは順調に稼働している。東日本大震災の被災地でも復興している。
	産業技術力	○	→	動作中のリチウムイオン電池ナノ界面の観測や新しい LED 用蛍光体の発見など、企業も参画した研究が発展している。産業利用を重視する佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターが稼働し、中部シンクロトロン光利用施設が建設中である。
米国	研究水準	◎	↗	2012 年度ノーベル化学賞を受賞した Brian Kobilka は米国の放射光実験施設のユーザーである。
	技術開発水準	◎	↗	新たな放射光施設を建設するなど、技術水準は高い。
	産業技術力	－	－	
欧州	研究水準	◎	↗	多くの施設があり、数多くの研究が行われている。ミュオンや陽電子の分野でも、研究水準は高い。
	技術開発水準	◎	↗	自由電子レーザーの性能の向上が図られている。
	産業技術力	－	－	
中国	研究水準	△	↗	上海放射光施設（SSRF）が稼働している。しかし国内の複数の施設が有機的に機能していないと見る研究者もいる。日本の放射光を利用する研究者が多数いる。
	技術開発水準	○	↗	生体イメージング用の X 線干渉計の開発などが行われている。
	産業技術力	－	－	
韓国	研究水準	△	↗	日本、中国の放射光施設を利用する研究者が多い。
	技術開発水準	△	→	基礎的研究が中心である。
	産業技術力	－	－	

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（7-4）国際比較（超高速時間分解分光）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	長らく米国、欧州と並んで世界のトップ集団を形成している。もともと日本人特有の質実剛健な学風で存在感を示してきたが、最近では装置やインフラストラクチャーの面でも欧米と比べて遜色がなくなった。これらを背景に、界面の超高速分光などで世界の水準を大きく超える日本独自の研究成果なども出ている。その反面、大学生・大学院生の質の低下、“わかりやすさ”を安易に求める風潮などのために、方法論や装置の開発から行える研究者や研究室が減少しつつあり、これが強く懸念される。大学、研究所、企業がそれぞれの立ち位置を明確にしつつ有機的に連携する努力が期待される。大規模施設である極短硬 X 線パルス光源である XFEL や京コンピュータなどの大型施設がどのように活用されるかが注目される。
	応用研究・開発	○	→	浜松フォトニクスのような先端企業や、三菱化学、富士フィルムなど材料に強い大企業の分析部門で、大学・研究機関で研鑽を積んだ研究者が研究を行っている。また、産業技術総合研究所は産業に直結できる形で、理研は学、官、産を結ぶユニークな立ち位置で、極めて水準の高い研究を行っている。日本の応用研究・開発を強化するためには、ポスドク一万人計画以来増加した若手研究者を学会だけでなく広く産業界においても活躍させ、人材を最大限に活用する方策が必要がある。大企業においてはそのようなパスが拓け始めているように見えるが、未だ十分でない。
	産業化	○	→	本研究領域に関連する産業としては、浜松フォトニクスが超高速分光関係を含め、光検出器一般で世界を牽引している。その他にも分光器メーカーとしては堀場製作所や、分光システムを扱う東京インスツルメンツなど様々な企業がある。光学関連産業のレベルも高く、短パルスを利用した顕微鏡に関してはオリンパス、ニコンが強い。短パルスレーザーの開発に関しては、ベンチャーが育ちにくいわが国においては難しい面があるが、産業用を中心に高まりを示している。
米国	基礎研究	◎	→	カリフォルニア大学バークレー校、MIT、カルテック、スタンフォードなどを筆頭に、全国に優れた研究者が多く、極短パルス光の発生、応用、それを用いた分光研究などにおいて世界を牽引している。米国の特徴であるプラグマティズムとライフサイエンスの偏重のため、分光のような基礎研究は一時、研究予算配分において厳しい時期があったが、最近、やや改善したように見受けられる。いずれにせよ、米国には世界最高の研究を推進するという自負があり、実際それを推進させるシステムがある。米国の特徴として時流に乗ったトピックスに研究が過度に集中する傾向があり、ダイナミックである反面、バランスが悪くなる面がある。研究内容も、超一流のものがあると同時に、内容が乏しい研究もある。良きにつけ悪しきにつけ、ダイナミズムがある。大型機器としては、フェムト秒の硬 X 線光源である XFEL を世界で初めて稼働させ、それを用いた時間分解 X 線実験が始まっている。
	応用研究・開発	○	→	レーザー開発や分光計測に関する研究は大学がリードして行っている。大学教授が企業を立ち上げる場合も多くあり、学会と産業界の垣根が他に比べて低い。（ただし、必ずしも成功するケースばかりではない。）企業はシードをいち早くとりあげて開発を進めており、先取りの精神が強い。
	産業化	◎	→	コヒーレント、スペクトラフィジックスなど、超短パルスレーザーを製造、販売する大企業があるばかりでなく、中小の企業も多くあり活発である。

欧州	基礎研究	◎	↗	ドイツが、高い技術力と堅固な研究哲学を背景に、質、量とも圧倒的に高い研究水準を誇り、マックスプランク研究所、マックスボルン研究所、ミュンヘン大学を始め、多くの大学、研究機関に優れた研究者が数多くいる。イタリア、オランダ、フランス、英国、スイスなどにも、数は多くはないがそれぞれ存在感を持つ研究者がおり、多様性を保ちつつ、連関しながら、米国と拮抗する形で質の高い研究を進めている。特に EU の中で研究者が国境を越えて移動し活躍している印象。
	応用研究・開発	○	→	やや特殊であるが性能の高い超短パルスレーザーを製造、販売するなど産業に近い技術力がある。また東欧には高い非線形光学技術がある。
	産業化	○	→	光パラメトリック増幅器は OEM によって世界市場をほぼ独占している。また短パルスを用いた顕微鏡開発ではツアイス、ライカが強い。
中国	基礎研究	△	↗	急成長する経済を背景に、有力な大学・研究所の研究環境やインフラストラクチャーは以前とは比較にならないほど良くなった。これらの研究拠点では、（主席）教授の元に海外でトレーニングを受けた若い研究者が複数准教授、助教として所属し、大きい研究グループを形成している。しかしながら、研究そのものに関しては他の国の模倣の域を出ないものがほとんどで、オリジナルな研究成果が出るまでにはまだ時間を要すると思われる。
	応用研究・開発	×	→	超高速分光自体の研究レベルが未だ高くなく、顕著な活動、成果は見えていない。
	産業化	△	→	優れた非線形結晶の供給に関して世界的に知られている。
韓国	基礎研究	○	→	過去 15 年に急速に力をつけ、ソウル大、延世大、高麗大、POSTECH、KAIST などを中心に高い水準の研究が行われている。特に超高速 X 線回折や超分子の超高速時間分解分光では世界的に見ても水準が高い研究が行われている。研究者人口が少ないためやや層が薄いこと、米国の動向に敏感すぎる面があるため、ダイナミズムがある反面、韓国独自の基礎研究が生まれるにはまだ課題がある。この問題を意識してか、基礎研究を行う優れた研究者に長期にわたって大きな予算と人員をつけるプログラム（Institute for Basic Science）がスタートし、基礎研究においても日本に追いつき追い越そうとしている。
	応用研究・開発	○	→	サムソンなどは高い技術開発力をもっていると思われるが、学会、論文などであまり知る機会がない。
	産業化	△	→	超高速分光計測関係に関する産業としては特段見るべき物はない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49: 57（1982）.
2）G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. 49: 930-933（1986）.
3）D. M. Eigler, E. K. Schweizer, Nature 344: 524-526（1990）.
4）M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler, Science 262: 218-220（1993）.
5）Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller, V. B. Elings, Surf. Sci. 290: L688（1993）.
6）D. J. Müller, F. A. Schabert, G. Büldt, A. Engel, Biophys. J. 68: 1681-1686（1995）.
7）T. Ando, N. Kodera, E. Takai, D. Maruyama, K. Saito, A. Toda, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 98:

12468（2001）.
8）T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, Appl. Phys. Lett. 87: 034101（2005）.
9）T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, D. Ruger, J. Appl. Phys. 68: 668-673（1991）.
10）S. Kitamura, M. Iwatsuki, Jpn. J. Appl. Phys. II 34: L145（1995）.
11）F. J. Giessibl, Science 267: 68（1995）.
12）F. J. Giessibl, Science 289: 422（2000）.
13）Y. Sugimoto, M. Abe, S. Hirayama, N. Oyabu, Ó. Custance, S. Morita, Nat. Mater. 4: 159（2005）.
14）Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Pérez, S. Morita, Ó. Custance, Nature 446: 64（2007）.
15）T. Fukuma, Y. Ueda, S. Yoshioka, H. Asakawa, Phys. Rev. Lett. 104, 016101（2010）.
16）N. Kobayashi, H. Asakawa, T. Fukuma, Rev. Sci. Instrum. 81: 123705（2010）.

17）J. Frank edit: Electron Tomography - Three-Dimensional Imaging with the Transmission Electron Microscope（Plenum, New York , 1992）.
18）Penczek, P., Marko, M., Buttle, K., Frank, J., 1995. Double-tilt electron tomography. Ultramicroscopy 60, 393–410.
19）S. Lanzavecchia, F. Cantelea, P.L. Bellona, L. Zampighic, M. Kremanb, E. Wrightc, G.A. Zampighib, Conical tomography of freeze-fracture replicas: a method for the study of integral membrane proteins inserted in phospholipid bilayers, Journal of Structural Biology 149（2005）87–98
20）B. Goris, W.VandenBroe, K.J.Batenburg H.HeidariMezerji, S.Bals, Electron tomography based on a total variation minimization reconstruction technique, Ultramicroscopy 113（2012）120–130
21）N. Kawase, M. Kato, H. Nishioka, and H. Jinnai, Transmission electron microtomography without the ‘‘missing wedge’’ for quantitative structural analysis, Ultramicroscopy, 107（2007）8.
22）T. Yaguchi, Y. Kuroda, M. Konno, T. Kamino, K. Kaji and M. Watanabe: Microscopy Microanalysis, 12（Suppl .2）（2006）528.
23）Brandt, S., Heikkonen, J., Engelhardt, P., 2001b. Automatic alignment of transmission, electron microscope tilt series without fiducial markers. J. Struct. Biol. 136, 201–213.
24）Jose-Jesus Fernandez Micron, Volume 43, Issue 10, October 2012, Pages 1010-1030 Computational methods for electron tomography
25）M. Hayashida, T. Iijima, T. Fujimoto and S. Ogawa, "Position-controlled marker formation by helium ion microscope for aligning a TEM tomographic tilt seriese", Micron 43, 992-995（2012）
Salve project
26）http://www.salve-project.de/home.html
27）http://ncem.lbl.gov/TEAM-project/index.html
28）http://www.google.co.jp/url?q=http://www.cameca.com/download/The-ATOM-project-oral-presentation-imc17.pdf&sa=U&ei=kFqKUL39H-PomAXmhIHYAQ&ved=0CBsQFjAB&usg=AFQjCNG-jGaEV83ZVue0OxHd4kJac988CQ
29）Thomas F. Kelly and Michael K. Miller, Atom probe tomography, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 78, 031101 _2007
30）M. C. Scott, Chien-Chun Chen, Matthew Mecklenburg, Chun Zhu, Rui Xu, Peter Ercius, Ulrich Dahmen, B. C. Regan & Jianwei Miao, Electron tomography at 2.4-ångström resolution , Nature, 2012, 483, 444-447.
31）Dirk Van Dyck1, Joerg R. Jinschek2 & Fu-Rong Chen3, ‘Big Bang’ tomography as a new route to atomic-resolution electron tomography, Nature, 2012, 243-246
32）http://pfwww.kek.jp/indexj.html

33）http://www.spring8.or.jp/ja/
34）http://www.uvsor.ims.ac.jp/
35）http://www.hsrc.hiroshima-u.ac.jp/
36）http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1321760.htm
37）http://www.saga-ls.jp/
38）http://www.astf.or.jp/knowledge/index.html
39）http://j-parc.jp/
40）http://unit.aist.go.jp/riif/adcg/
41）http://pfwww.kek.jp/slowpos/
42）http://www.wayforlight.eu/eng/synchrotrons.aspx
43）http://www.aps.anl.gov/
44）http://www.bnl.gov/ps/nsls2/about-NSLS-II.asp
45）http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20121004143000/
46）http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20120627173000/
47）http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/outline.html
48）http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2012/120920
49）http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2012/121025
50）http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2012/121017

3. 4. 9　物質・材料シミュレーション

（1）研究開発領域名

物質・材料シミュレーション

（2）研究開発領域の簡潔な説明

量子現象に関する基礎研究から生まれた数々の知見を生かし、新しい機能や優れた特性を持つ物質･材料を、計算科学的手法を用いて探索するとともに、その方法論を開発する。

材料特性の問題は、非平衡性と非線形性の強い問題であり、また、短い時間や微小空間で生じたことが、長時間や材料全体の挙動に大きな影響を与えるマルチスケール性を有している。最終的には、ミクロな組織や原子・電子レベルの現象がどのように材料特性に影響をあたえるのか、これらの現象をどのようにして制御することができるのか、また、どのように制御すべきかを明らかにし、新たな材料の設計指針を提供することが本研究開発領域の目標となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

計算機、アルゴリズムの発展により、計算機シミュレーションは大きく発展し、物質科学や生命科学などの先端科学技術における必須の研究手段となっている。第一原理計算をベースにした材料科学計算ソフトウェアの商用化が進み、専門家でなくても容易に計算を実行できることから、物理、化学、薬学など多くの分野で数値計算が活用されるようになった。今後は物質・材料設計が可能となるレベルまでシミュレーション技術を進化させることが、社会からの要請に応える上でも必要となる。例えば、触媒や電池材料などの機能発現機構を計算科学によって電子レベルで理解し、それに基づいて物質探索、構造制御を試み、材料設計を行うことは、次世代技術のキーとなる機能材料を実現する上で非常に重要な研究開発課題である。シミュレーション技術が関連する実験的手法やデータベースと融合することにより、新機能材料のスクリーニングなどにおける開発コストを大幅に下げることができ、日本の産業競争力強化にもつながる。

〔これまでの取組み〕

第一原理法による電子状態計算により、材料の電気的、磁気的、光学的、力学的、化学的性質が実験的情報なしに精確に計算できるようになってきた。近年では、未知の結晶構造と物性を理論予測する試みが数多く行われ成果が上がっているが、熱力学的な安定性、温度圧力相図の理論予測は端緒についたばかりである。また、材料のマクロ物性やデバイス特性は、結晶粒界、焼結体界面、ナノ構造の接合部分など、物質の複雑な界面構造と電子状態に大きく左右されるが、界面構造や欠陥構造の理論計算は比較的簡単なものに限定されており、それらがマクロな材料物性に及ぼす影響まで理論予測することは極めて困難である。材料の構造と特性は熱平衡条件での安定性だけでなく、温度勾配や成長速度、光や電子による励起など、様々な非平衡条件によっても左右される。そのような非平衡条件での組織制御まで含めて、定量的もしくは半定量的な材料創成の指針を得るための総合的な理論手法を確立することが求められる。さらに、これまでの経験的な法則では、取り扱うことのできる空間スケールが、原子・電子のスケールからすれば非常に粗視化されてい

るため、材料の挙動を決定づけている根本の原子・電子の挙動を知ることができない。例えば、統計力学を駆使することにより、原子や電子の振る舞いを獲得しながらも、長時間の材料変形挙動を獲得できる解析手法の構築も必要となる。

研究水準としては、米国、欧州、日本で大差がない。日本では電子状態計算では天能らのGELLAN、信定らのReal-space DFT/TD-DFT、中嶋らのNT-Chemの発展版、物性分野での押山らのreal-space DFTなどが、MDシミュレーションでは岡崎らのModylas、松林らのELMODEなどの国産ソフトが開発され、海外と肩を並べている。しかし、有償、無償の優れたソフトが海外でも多数公開されており、日本が圧倒的な優位にあるわけではない。たとえば、学術雑誌に掲載されている論文の９０％以上が、海外のプログラムによる成果となっている。

手法の開発の結果をソフトウェアとして公開あるいは市販する技術力は、米国が非常に進んでいる。大学で開発されたプログラムをベースに市販することが多いが、そのベースとしては欧州発も多い。ソフトの市販や公開という点では、日本を始めとしてアジアの国は弱い。言語の問題や大学とベンダーの距離感などに課題があると考えられる。メニューなどの英語化を進めず、国内利用者だけを対象とすることが多い日本製ソフトは、世界にユーザー層を広げることができない。そのためソフトに対する世界からの信頼が得られず、それが反映されて国内企業での利用もなかなか進展しないという現状に至っている。

ここ数年の中国の計算科学に携わる研究者数の増加と学術誌への投稿論文数の急速な増加には、目を見張るものがある。また韓国企業も、エレクトロニクス･機械分野を中心に、積極的に計算科学を産業開発に取り込みつつある。

〔今後必要となる取組み〕

今後の研究の方向性としては、複雑な構造や自由エネルギー局面の探査手法、マクロな材料特性や物質合成という遅いプロセスと原子レベルの物理とを結ぶマルチスケール・マルチフィジックス手法、いわゆる化学的精度（chemical accuracy）を結晶で実現する高精度エネルギー計算手法、磁性や超伝導特性などの材料物性をより精度よく得るための第一原理計算手法、電子励起と非断熱遷移のある構造変化のシミュレーション手法、非平衡条件下での構造・組織形成の取り扱い、データマイニング、データ同化など情報科学的手法の取込みなどが重要になっている。

また、各時空間スケールでの解析手法が確立されつつあるものの、スケール間の非線形の相互作用をどのように考慮して､各スケールをシームレスに接続していくかについては、研究者のセンスに依存している部分が多く､体系化に向けてはさらなる努力が必要である。加えて、時間スケールの問題が未だ十分に解決されていない。根本法則に基づいて現象を理解するためには、できるだけミクロな視点から理解するのが常套手段であるが、解析の空間スケールが小さくなれば同時に時間スケールも短くなってしまい、構造材料が使用される時間でおこる現象に対して見解を与えることが難しくなる。空間スケールを小さく維持したまま、時間スケールを拡張する解析手法の確立が必要である。

（4）科学技術的・政策的課題

ナノ、原子、電子レベルでの実験観察技術の発達が目覚ましく、10年前、20年前には考えられなかった精度や解像度でミクロ現象の観察が可能になりつつある。現象のエネル

ギー論的な観点からの理解、実験ではコントロールしにくい条件下での挙動の解析、材料内部のその場情報の獲得、現象の微小時間における解析などは，シミュレーションの強みである。我が国ではこれまでの経験に裏打ちされた研究の蓄積が多い一方で、必ずしも物性物理学分野などの異分野研究者との連携・融合が十分行われているとはいえない状況である。実験技術が発展してきた今こそ、実験研究と計算研究が融合した新たな材料研究体制を確立していくときである。

物質の界面の問題は、様々な材料（鉄鋼、非鉄金属、セラミックス、半導体、有機材料）やデバイスに共通するテーマである。そのため関連研究者は各分野に細分化されており、予算上からも連携が難しい。材料開発は知財が絡むため、企業間の連携も難しい。材料の実用化までを睨んで、対象とすべき現象や材料の提案については産が主導すべきであり、解決すべき産業化に必要な具体的課題をいち早く特定する仕組みが必要となる。

スーパーコンピュータの能力を活用したソフトを開発するためには、ハード・理論の双方を知る研究者・技術者が必要であるが、我が国ではそのような人材が不足している。そのため、現在のソフト開発が今後一層活発化するという状況にない。また、材料の実用化につなげるためには、大学・大学院における教育、企業に入ってからの実用開発研究がどのようなものであるかを知ってからの再教育が非常に重要と考えられる。大学院での教育レベルは欧州が確実に高い。米国や欧州（ドイツ、フランスなど）と比べると、博士課程学生と博士研究員のレベルは高いとは言えない。

もう一つの課題は、企業における理論・計算・シミュレーション研究にある。プラントの中で起こっている化学反応をそのままシミュレーションすることは不可能であり、何らかのモデル化が必要不可欠である。モデル化は合理的であり、現象の本質を捉えたものでなければならない。どのように本質を捉え、効率良く計算シミュレーションを行い、計算結果から役に立つ情報を引き出すかについての経験が、大学、企業双方の研究者に不足している。大学の理論・計算・シミュレーション研究者には、企業・大学などの実験研究者や企業での開発研究者との交流が求められるが、依然として不十分である。企業の開発力を持続的に保持し、高めるためにも、このような企業と大学間との交流が不可欠である。また、化学の実験研究や開発研究がどのようなものであるかをよく理解し、同時に、理論・計算の能力の高い研究者の育成が不可欠であろう。これにも、大学院レベルでの教育と同時に、企業入社後の理論・計算研究者の再教育が必要である。

今後さらにシミュレーションの活躍の場を広げるためには、現在障害となっている課題を数学的な手法で克服していく道を積極的に開拓していくことも考えられる。課題を整理して、数学コミュニティとの密な交流を試みることも必要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

初期原子配置が与えられれば、1,000 原子程度まで（「京」コンピュータであれば 100,000 原子）の原子を含む系の密度汎関数法による電子状態計算と構造最適化、短時間のダイナミクスシミュレーションが可能になっている。また密度汎関数法よりも精度の高い電子状態計算手法（拡散量子モンテカルロ法、第一原理に基づく格子模型の精密計算など）も、実用化されつつある。電子励起による構造変化に関しては、時間依存密度汎関数法に基づく手法が開発されている。熱伝導など長時間現象をシミュレーションする手法と

して、第一原理に基づくモデルポテンシャルの生成手法が提案されている。

自由エネルギーおよび多次元空間の安定構造探査手法としては、マルチカノニカル法、レプリカ交換法、メタダイナミクス法など、新しい計算機シミュレーション手法が提案され、タンパク質のフォールディングやナノクラスターの構造探査などで利用が始まっている。自由エネルギーを第一原理的に精度よく計算する手法として、熱力学量を計算するためのモデルポテンシャルのパラメータを第一原理的に決定する手法が提案されている。

近年、世界的にも原子レベルの解析手法（分子動力学法）の加速手法が盛んに議論され始めている。それに基づいて、限定的な条件下ではあるが、長時間での材料変形に関するいくつかの問題（転位運動や拡散）について研究された例がある。また、腐食やクリープ現象の根本的理解に重要な原子拡散に関する各種物性値も、原子・電子レベル解析において獲得されつつある。

結晶塑性理論に基づく有限要素法、組織発展や転位組織発展を可能としたフェーズフィールド法、第一原理計算に基づく高精度原子間相互作用を用いた古典分子動力学法、密度汎関数法に立脚した第一原理計算手法などの構造材料中の重要な現象が発生する各空間スケールでの計算手法の確立がなされつつある。第一原理計算、クラスター展開法を組み合わせて、フェーズフィールド法のパラメータを決定する試みもある。

最近、第一原理計算をベースにした材料科学と（簡略化した）非平衡グリーン関数法を結合させた計算手法が、不可逆反応や伝導のような動的特性の解析に活用され始めてきている。一方で、伝導特性で本質的な散逸現象が十分に考察されていないことから、このような計算手法の理論的基礎付けが曖昧な状況にあることも強く認識するべきである。

相変化型メモリ材料で知られる GeSbTe を超格子構造にすることでスイッチング温度を低減できるなどの材料設計が、計算科学主導で行われている（産業技術総合研究所などの研究成果）。またスピントロニクス材料として定着している MgO 絶縁膜についても、計算科学が先導した好例である。

〔注目すべきプロジェクト〕

米国のスーパーコンピュータのブルージーン計画は、基礎科学、応用科学双方で我が国に脅威である。ハード面ではスーパーコンピュータ「京」も追い抜かされ、ソフト面でも優秀なプログラムが開発される可能性が高い。

日本では、平成 22 年度からは科研費新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」において、計算機科学の研究者も交えた物質デザイン・シミュレーション手法の開発と応用が進められている。また平成 22 年には「計算物質科学イニシアティブ（CMSI）」が HPCI 戦略プログラムとして活動を開始し、計算科学分野で物性科学、分子科学、材料科学の研究者の連携の中で、材料シミュレーションに向けた課題が議論されている。

また、SPring8 や KEK － PF などの放射光を用いた X 線解析装置、J － PARC などでの超高分解能中性子回折装置、各所に設置が進められているサブオングストローム分解能をもつ走査透過型電子顕微鏡および電子分光装置、超高分解能表面分析装置、超高感度核磁気共鳴装置など、ナノテクノロジー・材料分野の最先端評価装置の技術革新・インフラ整備の面で世界をリードしている。これに伴い、これら評価装置の解析に計算科学を積極的に取り入れ効率を高める研究が発展しつつある。

（6）キーワード

物質探索・材料設計（マテリアルデザイン）、量子化学、第一原理電子状態計算、分子動力学法、フェーズフィールド法、自由エネルギー、相図、非平衡ダイナミクス、マルチスケール・マルチフィジックス、データベース

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	電子状態の理論的手法の開発については、米国、欧州についで成果を上げており、日本発の計算手法は FMO. ONIOM, SAC-CI, F12 法など多数に上る。MDシミュレーションでは、レプリカ交換法や自由エネルギー計算、自由エネルギー勾配法などの理論的方法や計算アルゴリズムなど日本発の手法も多い。しかし、ハードとソフトを合わせた発展では米国に劣っている。 次世代スーパーコンピュータプロジェクト、元素戦略などからの政策的反映から、シミュレーション手法の開発や計算機を用いた物質材料探索設計の社会的要請により、この分野への科学予算の投資がある程度増加したことなどの影響により大きく進展する可能性がある。しかし、新しく開発したシミュレーション手法の公開、普及活動が非常に弱い。
	応用研究・開発	○	→	我が国の、計算科学、シミュレーションが、方法論開発を重視して来た伝統があるため、物質材料の探索設計への応用では、構造活性相関、ニューラルネットなど我が国の研究レベルは高いとは言えない。欧米、中国に比べ層が薄い。最近は大学での実験科学者が理論研究の必要性を高く認識するようになっていることを受けて、企業での開発研究者、技術者も理論研究の必要性を高く認識するようになっていることは確かである。しかし、依然として、企業における技術者の数は限られている。しかも、大学での教育・研究と相当程度異なる研究開発が行われている。実際の開発研究に対応する理論・計算・シミュレーションの教育が不足している。この点を改善しないと大きく発展するとは思えない。
	産業化	○	→	開発研究の成果は出ており、理論・計算・シミュレーション手法は企業の製品開発に役立つレベルに到達していると考えているが、成果が公開されない面があるため、実情は明確でない。企業が成功事例を外に出していないことも、理論･計算化学･シミュレーション研究手法が普及しない一因と思われる。
米国	基礎研究	◎	→	優秀な研究者が次々と出てきて、新しい研究手法、理論の開発も活発である。電子状態理論では、DMRG 法、DFT 法の汎関数開発、大型計算プログラムの開発などが例として挙げられる。 MD シミュレーション関係では、最近、専用計算機の開発により、これまでに比べて、格段に長時間計算が可能になり、タンパク質のフォールディングが成功したことは、素晴らしい成果である。 最近の傾向として反応ダイナミクス研究が低調になり、その分野は我が国の方が強いと言える。プログラム開発は充実しており、Gaussain, GAMESS, MWChem などの主要プログラムが開発されている。
	応用研究・開発	○	↗	J. Am. Chem. Soc, などを見ると、理論的方法開発以外にも、大学、公的研究機関において、化学一般への応用研究の層も厚い。数多くの優れた研究者が活発に研究活動し、成果を上げている。多くの実験化学者との共同研究も盛んである。これまで、手法開発に取り組んできた研究者が、最近は応用研究にも手を広げているケースが多い。特に、エネルギー関係、材料関係に多いと感じられる。大学、研究機関での応用研究の展開の状況を見ると、企業でも研究開発に、計算化学が取り入れられていると感じている。応用研究や開発に理論・計算化学・シミュレーションの役割が大きくなってゆくのは確実であろう。
	産業化	○	↗	製品開発にどのように役立っているか、までの情報は無い。しかし、理論・計算化学・シミュレーションは基礎的に強力なので、産業に貢献できる状況に成長して行くのは時間の問題であろう。

欧州	基礎研究	◎	↗	ドイツ一国で我が国に対応できる質の高さと層の厚さを持っているが、フランス、英国、イタリアなどはとびぬけた研究者はいるが、総合力としては、我が国に劣る。電子状態理論では、CASSCF, R12 法などが、また、溶媒和理論（PCM 法）、Carr-Parrinero（CP）ダイナミクス法など、基本的な理論開発が盛んであり、成果もあげている。プログラムも CASSCF/CASPT2 法による MOLCAS, MOPPRO、周期境界条件を課した VASP や WIEN2k などが開発され、世界的に使用されている。基礎研究の基本は新しいシミュレーション手法の開発と国際標準としての公開、Psi-k, CECAM などのネットワーク型の人材育成（チュートリアル、ハンズオン・ワークショップ、奨学金）とこれらを用いた現実物質へのナノテク材料への応用で世界をリードしている。大学、研究機関との理論・計算化学研究者との共同研究も盛んである。
	応用研究・開発	○	↗	研究者の層は厚いとは言えないが、一部で非常にしっかりとした研究を行っている。特に、電子状態研究の取り込みが行われ、今後一層大きな発展を示すと考えられる。シミュレーションをベースとしたマテリアルデザインや新機能材料の開発に軸足が移行しつつあり 、最近では、欧州でも計算機マテリアルデザインをよく耳にする。企業が、大学と連携して、開発研究を行っているようである。契約に近い形での共同研究（ドイツ）もあるように聞いている。
	産業化	○	↗	企業と大学・公的研究機関との連携が、どのように産業化に結び付いたかは、情報が乏しい。しかし、産業と理論・計算・シミュレーションの接近の傾向が出ているので、将来的には産業に貢献する体制ができると考えられる。 欧州で開発された国際標準となるシミュレーション・ソフトウェアは有償で公開されている。
中国	基礎研究	○	↗	電子状態、MDシミュレーション双方とも、中国発の方法論開発は乏しい。相対論を取り入れた電子状態計算プログラム作成などのように成果は限定的である。しかし、研究者の数は多く、論文数の増加は著しい。一部の優れた研究者を除いて、模倣的な研究が多いと思われる。ただ、博士研究員の待遇改善をし、米国や日本への流失を止めようとしていることから、若い研究力は強化されるだろう。
	応用研究・開発	△	↗	現時点では、材料設計を目指した研究よりは基礎的な機構解明や分光実験を説明するための電子状態予測が主流である。欧米で開発され公開されているシミュレーション手法を用いた物性予測や材料設計を志向した基礎研究には優れたものもある。シミュレーション主導による新機能物質に関する応用開発研究に軸足が移行することが急速に進むと予測される。何人かが欧州と連携して研究を進めている。ただ、非常にレベルが高いと言う程では無いが、一部では、MD シミュレーションの結果を構造活性相関に活かすと言う、新しい研究スタイルも出てきている。 理論・計算化学・シミュレーション研究に限らず、企業の開発研究自体が、どの程度、独創性があり、独自の開発を行っているのかは不明である。
	産業化	△	→	産業化についても、応用研究・開発と同様の状況である。我が国に比べて、産業化に理論・計算化学が貢献しているとは思えない。
韓国	基礎研究	○	↗	大学・公立研究機関などでの理論・計算化学研究状況を見ると、電子状態、MDシミュレーション双方とも、韓国発の方法論開発は乏しい。中国の方が、理論開発の点では上ではないかと考える。
	応用研究・開発	○	↗	欧州などで開発され公開されているシミュレーション手法を用いた物性予測や機構解明における基礎研究には優れたものもある。Si-CMOS、スピントロニクス、次世代ナノエレクトロニクス、エネルギー関連物質の応用開発研究に実験グループと共同でシミュレーショングループが参画する研究開発の試みが見られようになった。 理論・計算化学研究に限らず、企業の開発研究自体が、どの程度、独創性があり、先進的に研究開発を行っているのかは不明である。
	産業化	△	↗	産業化についても、応用研究・開発と同様の状況と考えている。

（註 1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）Psi-k Network：http://www.psi-k.org
2）CECAM：http://www.cecam.org
3）CMD®：http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/CMD/
4）計算機ナノマテリアルデザインと実証：K. Sato et al., Rev. Mod. Phys. 82, 1633（2010）.
5）吉田博、22 世紀の物理学はどうなるか？、パリティー，２７，No.2, 48（2012）.
6）Chemical Reviews 112 巻の No. 1（1 – 672 ページ）：世界の電子状態理論の基礎的な研究状況が分かる review が１０数編程度掲載されている。
7）Practical Aspects of Computational Chemistry I and II, Ed. by J. Leszczynski, M. K. Shukla, Springer（2012）. 電子状態理論の応用面での総説集。
8）日本化学界編　CSJ Current Review「巨大分子系の計算化学」 化学同人 （2011）. 最近の電子状態理論、ＭＤ理論研究の動向が述べられている。我が国の理論化学・計算化学研究者が執筆。
9）Quantitative Structure–Property Relationship Modeling of Diverse Materials Properties, Tu Le, V. Chandana Epa, F. R. Burden, and D. A. Winkler, Chem. Rev., 112, 2889（2012）. 構造活性相関の最近の総説

3. 4. 10　リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

（1）研究開発領域名

リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ナノテクノロジー・材料科学技術によって生み出される新規物質や新製品の健康・環境への影響や安全性、新規性に伴う不確実性に関する取り組みである。リスク評価手法およびリスク管理手法の確立に関する科学的再現性の担保や医学的な評価、リスク評価結果の情報整理、社会への情報提供、コミュニケーションをおこなう仕組みの構築が求められている。環境・健康・安全面（EHS：Environment, Health and Safety）、倫理的・法的・社会的問題（ELSI：Ethical, Legal and Social Issues）の各検討がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

ナノテクノロジーは、様々な分野でのイノベーションを担う技術として期待されている一方で、新しい技術に伴う不確実性や、ナノ材料による健康や環境へのリスクの懸念も存在している。ナノ材料のリスクが適切に評価・管理されなければ、アスベストや PCB のように、後年に健康や環境への悪影響が顕在化することが懸念される一方で、食品における遺伝子組み換え技術のように、潜在的に有用な技術であるにもかかわらず、リスクへの漠然とした不安から、社会から拒絶される可能性もある。そのため、事業者、消費者、行政が、それぞれの立場から関心を寄せ、検討が行われてきている。ナノ材料の安全性に関する国際的な関心が高まって以降、各国および国際的な評価機関からは様々な意見や提言が公表されている。数年前までは、技術的な背景や推定される市場から予想されるリスクの概要が述べられ、将来的な課題解決に向けて分野横断的な技術開発や安全性データの蓄積が必要であるといった一般論に終始しているものがほとんどであった。しかし、最近になって、欧州や米国の規制当局から、より具体的なリスク評価に関する指針などが公開されるようになってきており、国際的には最終製品としての規制や管理がより具体化しつつある状況にある。

［これまでの取組み］

ナノテクノロジーおよびナノ材料への懸念は、英国王立協会によるレポートや、フラーレン（C_{60}）が魚の脳に移行し悪影響をもたらす可能性を示唆する報告が出された 2004 年頃に、一つのピークがあった。その後、ナノ材料の有害性、暴露、リスク管理の方法に関して、冷静に科学的知見を蓄積するフェーズに移行した。

ISO（国際標準化機構）では、2005 年にナノテクノロジーの技術委員会 ISO/TC229 を立ち上げ、そのうちワーキンググループ（WG）3 は、環境･安全･健康を対象としており、ナノ材料の有害性やリスクの評価や管理に関する規格を検討している。また、OECD は、2006 年に WPMN（Working Party on Manufactured Nanomaterials：ナノ材料作業部会）を立ち上げた。現在 9 つのステアリンググループ（SG）が運営されており、SG3：工業ナノ材料の代表的セットの安全性試験、SG4：工業ナノ材料とテストガイドライン、SG7：ナノ毒性学における代替試験法の役割、SG8：暴露計測と暴露抑制に関する協力、

という４つが中心的な役割を果たしている。特に、SG3 の活動は、スポンサーシッププログラムと呼ばれ、カーボンナノチューブ（CNT）などの炭素系ナノ材料、二酸化チタン（TiO_2）などの金属酸化物など、13 の代表的ナノマテリアルについて、各国がスポンサーとなり、物理化学特性、環境挙動、生態毒性、ほ乳類毒性に関する網羅的なデータが収集されている。日本は、単層 CNT、多層 CNT、C_{60} の主スポンサーとしてデータ提供を行ってきた。現在、これまで行ってきた活動をフェーズ１と位置付けて完了し、次の方向性を検討すべく、各材料について得られてきた情報を横断的に検討する試みが始まっている。

わが国でも、社会的な関心を受けて、ほぼ同時期にナノテクノロジーやナノ材料のリスクや社会受容に関する研究・検討が開始された。2005 年度には、科学技術振興調整費「ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究」において、経済産業省、文部科学省、環境省、厚生労働省傘下の研究機関の連携により、幅広い分野にわたる検討が行われ、政策提言という形の報告書が出された。また、ナノ材料のヒト健康影響に関する厚生労働科学研究は 2003 年度に開始され、現在まで複数の研究班により研究が進められている。さらに、NEDO により、ナノ材料の試料調製・計測技術開発およびリスク評価の実施を目的とした「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」が、2006 年から 2011 年まで実施された。科学的知見の蓄積や国際機関での議論などを踏まえ、大筋としては従来からの化学物質の枠組みに準じた形で、ナノ材料のリスクの規制や管理が可能であるとの合意ができてきたと考えられる。ただし、いまだナノ材料の有害性、ナノ材料への暴露の実態が十分に理解されたとは言えず、現実の管理の中で具体的にどのように管理していくべきかについては結論が出ていない。国全体としては、2007 年度から 2010 年度まで、内閣府の連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発」が省庁連携施策の枠組みで実施された。

ナノ材料を、より一般的な化学物質管理の中に位置付けることについては、今のところ、それぞれの国や地域において手探りで検討されている。ナノ材料は、そのサイズや構造によって、従来の材料とは異なる性質を有すると考えられるため、従来の化学物質と全く同様の扱いでは、法規制などで適切に扱うことはできない。まずは、どういう材料を「ナノ材料」として取り扱うのかという議論が必要な状況である。近年、欧州委員会は、「『ナノマテリアル』とは、粒子（１つ以上の次元の外寸が 1 nm から 100nm の粒子が、個数のサイズ分布として 50% 以上あるもの）を、遊離した状態あるいは凝集体として含むような、天然の材料、付随してできた材料、製造された材料である。」とするナノ材料の定義を示した。フランスは、この定義に沿ったナノ材料の性状や数量の届け出を、製造・輸入を行う業者に対して 2013 年から義務化することを決定した。

［今後必要となる取組み］

ナノ材料の有害性発現機序を解明し、物理化学的特性との関係を明らかにする必要がある。すでに、CNT などの繊維状ナノ材料の特性とアスベスト様物質で引き起こされる生体影響の関係（エジンバラ大学、名古屋大学、国立医薬品食品衛生研究所）、シリカナノ粒子のサイズや表面修飾と生体反応の関係（大阪大学）、ナノ材料の表面への生体タンパクなどの吸着（ダブリン大学）などに着目した研究が進められている。ハザード評価では、国立医薬品食品衛生研究所、国立環境研究所、バイエル（独）、BASF（独）、ロチェスター

大学（米）、エジンバラ大学（英）などが実施し、環境計測は労働安全衛生総合研究所などが実施している。これらの取り組みが成功裏に終われば、ナノ材料を一括りで危険視するのではなく、リスク評価をより的確に実施したり、より安全なナノ材料の開発を行ったりすることが可能となる。また、極めて多様なナノ材料を、特性に応じてグループ化して効率的に評価することも可能になると考えられる。

現在までのところ、対象となるリスクはほとんどの場合、工業用ナノ材料の EHS に関するものである。ナノテクノロジーの潜在的リスクは他にも考えうるが、社会科学者による倫理・法・社会的課題（ELSI）に関する取り組みはあるものの、自然科学の研究開発領域を確立しうるだけの枠組みには現時点ではまだなっていない。一方、リスクを被る対象は労働者、消費者、環境に大別される。そのリスク評価では、ハザード（有害性）の定量化とばく露に関する計測・評価を行い、両者の積としてのリスクを求める。ハザード評価に用いられる定量データは通常 *in vivo* 試験によって得られる。ナノ材料のハザードとして、一般的に免疫毒性、発がん性が最初に注目される。ハザード評価においては用量作用曲線を得ること、LOAEL（最低影響量）、NOAEL（無有害量）などを求めることが主な目的である。特に、ナノマテリアルが呼吸を通して体内に入ることを想定して、吸入ばく露試験（ナノ材料を含む空気を吸わせる）、気管内投与試験（ナノ材料を分散させた水を注射器で気管内に注入する）、がよく行われる。他に、中皮腫の可能性を想定した腹腔内投与試験、接触を想定した塗布試験（皮膚にナノ材料を塗布する）などもある。なお、生体影響評価試験としては *in vitro*（細胞・組織）試験もあり、より簡便に行うことができるが、その結果を直接ハザード評価に導入することは難しいと考える毒性学者が多い。ただし、動物愛護の観点から *in vivo* 試験の実施が難しくなりつつあり、特に欧州ではその傾向が強い。*in vitro* 試験をハザード評価に活用すべく、さらなる手法開発が課題である。いずれの試験の場合にも、供試材の調整、キャラクタリゼーション、気中・液中への分散を高い精度で行うことが極めて重要であり、技術的難易度も高い。例えば、化学成分のみならず、粒径・粒度分布、（繊維状の場合）長さやアスペクト比、表面性状を管理する必要がある。実際に、それが不十分であったために、実験結果が矛盾してしまった場合が少なくない。また、体内動態（ADME）に関してはまだ研究が足りない部分が多く、長期的に基礎研究に取り組むべきである。

ばく露計測では、実際のナノマテリアル製造現場でのナノ粒子計測が行われる。公開された計測事例はまだ少ない。また、企業がその公開をためらう可能性も指摘されている。現時点において公開された計測結果には、ナノ材料の大気中濃度が高すぎることを示すものはない。

リスク評価の指標としては、OEL（職業ばく露限界）を求めることが重要である。これは大気中濃度の限界値であるので、現行の試験の中では、大気中濃度をパラメータとする吸入ばく露試験がその導出に最も適していることになる。動物での *in vivo* 試験の結果をヒトに外挿し、加えてナノ材料の大気中への放出から吸入までの経路を把握する必要がある。ナノ材料の場合、疫学データがないために、いくつかの仮定を導入することになる。

ナノ材料のリスク管理では、リスクを許容限界値以下に維持する方法を検討する。実際にはリスク評価の結果を得るまでに長期間を要するため、ベストプラクティスとして、経験論をもとに、工場、実験室における（費用対効果も含めた）適切な工業用ナノ材料の取り扱い方法の検討を併行している。まずは、ナノ材料を製造したり取り扱ったりする作業

者の防護が重要となる。ナノ材料は一部を除き、いまだ研究開発や市場化の途上にあるため、リスクが顕在化するとすれば、まず作業環境においてと考えられるからである。作業環境管理の方策を検討する基礎となる作業環境での許容暴露濃度については、欧米では、米国 NIOSH（National Institute for Occupational Safety and Health、国立労働安全衛生研究所）や、欧州委員会、DuPont や Bayer などの化学企業、我が国では、上記 NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」から、CNT、C_{60}、TiO_2 などに関する値が提案されている。ただし、これらは、これまでのところ公的な規制値とはなっていない。

一方、最近、急速に関心が高まっているのは、ナノ材料が製品に用いられた場合の安全性である。これは消費者による漠然とした不安の高まりというよりも、むしろ、規制当局としての取り扱いの議論が本格化しているという側面が強い。現在最も議論されていると考えられる製品群は、化粧品、食品、食品包装、医療機器であり、特に、化粧品や食品については、欧米の行政当局によってガイダンスなどが作成されている。ここで重要なのはリスクコミュニケーションであり、リスクに関する情報を行政、専門家、企業、労働者、消費者などのステークホルダー間で共有し、合意形成を得ることである。これに関しては、ナノマテリアル以外にも将来のナノテクノロジーを対象とした、社会科学者による取り組みがある。

（4）科学技術的・政策的課題

ナノ材料の計測・キャラクタリゼーションに関しては、ISO/TC229 のワーキンググループ 2 で議論されているものの、現実社会のリスク評価・管理という観点からは、依然として課題が多い。欧州委員会では、2008 年に「ナノ材料は REACH で規制する」との基本姿勢を示しており、2009 年には、ナノ材料に関して REACH を適用する際の要点について具体的且つ包括的な科学技術的アドバイスを提供するために、「ナノ材料に対する REACH 実施プロジェクト」を開始した。2011 年 7 月には、ナノ材料の場合に REACH に記載すべき情報の要件（試験方法の適切さを含む）や化学的安全評価について詳細に示したガイダンスとなる報告書の最終版を公開している。また、2009 年 12 月に他地域より早く、欧州議会においてナノ材料の安全性データの届出と表示を含めた新化粧品指令（REGULATION（EC）No 1223/2009）が採択されている（施行は 2013 年 7 月より）。食品関係でも予防原則に従い、2008 年 12 月には既存の食品添加物であってもナノテクノロジーなどを用いて製法や粒子サイズを変更した場合は再評価が必要であるとの指令が出された。その後、2011 年 5 月には「食品／飼料へのナノ科学とナノテク応用から生ずる可能性のあるリスクに関するリスク評価ガイダンス」が EFSA より発表された。このガイダンスではそれまでの概論的な提言とは異なり、より具体的な評価指針が示されている。欧州委員会によるナノ材料の定義に対しては、定義を実効的に運用するための計測技術がないとする批判も少なくない。欧州では、JRC によってサイズ計測法のレビューが行われ、また、幅広い製品、生体、環境中のナノ粒子を計測する革新的で費用効果的な方法を検討する SMART-NANO プロジェクトが 2012 年に開始されるなど、計測法に関する検討が進められている。また、商品からのナノ材料の放出や暴露を測定することを目的とした Nano Release Consumer Products プロジェクトが、ILSI（International Life Sciences

Institute：国際生命科学研究機構）の元、米国とカナダの機関が中心となり 2011 年から開始されている。

米国でもナノテクノロジーやナノ材料の安全性に対する議論の必要性は早くから認識されているが、欧州のような包括的な法的規制には至っていない。化学物質管理の観点からは、2007 年に EPA が有害物質管理法（TSCA）のもとに、ナノ材料を取り扱う企業などに対し自主的なデータの提出を促すスチュワードシッププログラムを開始したが、期待したほどの情報を得られないようであった。しかし、EPA は 2010 年から、単層多層のカーボンナノチューブについて、製品毎の製造前届出（PMN）を必要とする重要新規利用ルール（SNUR：Significant New Use Rule）を公布した。しかし、この製造前届出データの範囲は、届け出会社の各製品に対応したケースバイケースの措置の結果であり、さらに化学的特性などは企業秘密として開示されていないこともあり、一般化されたナノ材料の評価指針として利用することはできない。一方、食品や化粧品を所管する FDA は、2007 年に公表されたナノテクノロジータスクフォースの報告書を受けて，2011 年 6 月と 2012 年 4 月に化粧品と食品関連物質の安全性評価に関する業界向けのガイダンスをそれぞれ公表した。しかし、ナノ材料のサイズとして定義は固定せず、物性の特性に応じた安全性評価を行うという抽象的な表現となっており、必要に応じて FDA と個別に相談することが推奨されている。

さらに、国際的な大企業は、自主的な安全性評価に関する活動を展開し、NGO などを中心とした世論に対応すると共に、欧州や米国などにおける近い将来を見据えた対応を行っているようである。国内の大手企業も米国や欧州への輸出を念頭に置き、独自に対応を行わなければならない状況となっている。さらに、直近の例では BASF がナノマテリアルの健康影響に関するプロジェクトをドイツ政府と共同立ち上げており、官民共同の国際戦略も垣間見える。

日本国内でも、経済産業省による「ナノ物質の管理に関する検討会　計測技術ワーキンググループ」が開催されている。業界団体の動きもあり、例えば、化粧品規制協力国際会議（International Cooperation on Cosmetics Regulators: ICCR）が主導して、化粧品中のナノ材料の計測技術をレビューする報告書を作成したが、一つだけで十分と言えるような方法は存在しないとされている。2007 以降は OECD のナノ材料作業グループ（WPMN）への国際貢献という形で NEDO プロジェクトや各省庁個別のプロジェクトを主な活動とした取り組みを行ってきており、その形態は現在も続いている。

このような日本の取り組みは国内施策として化審法などに反映されるべきであるが、国内的には研究レベルの域を出ているとは見なされておらず、将来的な課題として据え置かれている状況にある。だたし、2008 年にカーボンナノチューブによる中皮腫誘発の可能性が報告された時期には、国際的にも早いタイミングで労働安全に関して予防的暴露防止対策が局長通知として通達されている。その後しばらくは、リスク管理的には目立った動きはなかったが、2011 年以降は化学物質管理を所管する厚生労働省、経済産業省、環境省の各省庁において、代表的なナノ材料などを選定したリスク評価を行う検討会などが発足している。しかし、評価に必要なばく露情報が揃っているわけではなく、これまでに得られた部分的な有害性情報を用いた机上の初期的なリスク評価しか行えない状況となって

いる。すでに製品などに使用されているナノ材料による急性的で重大な有害性を示す事例が報告されない現状に於いて、大量ばく露の懸念ががある職業ばく露のケースを除いて、わが国の規制当局としては予防的な管理を行うための動機付けは働きにくい。また、消費者ばく露として最も身近なばく露源である化粧品や食品、家庭用品に対する管理規制の動きは今のところない。

以上の状況に基づけば、現在わが国で行っているプロジェクト研究成果や企業の安全性情報は、一方的に国外の規制管理に貢献している状況であり、OECD や ISO の活動を通した標準化の戦略も現時点では実効化できる体制がない。国際的に流通する商品を開発する際には安全性の確保された商品でなければ輸出できなくなるような状況も想定されることを考慮すると、国内政策としてナノ材料の安全性確保に関する政策や管理システムを構築し、さらにこの国内基準に合った安全性データを官民が共同して積極的に蓄積していくことで、日本で適合した製品を、自信を持って国際的に流通させることができるような体制に向けた取り組みを、早急に始めることが必要と考えられる。

リスク評価に関する課題は、ナノ材料に限った話ではないが、慢性的なばく露に対する影響評価である。医薬品や農薬と違って材料としての化学物質であるナノ材料に関して慢性毒性試験を課すのは、一般的な企業にとっては非常に負担であり、官民が共同で慢性影響情報を取得するための仕組みを整えることが必要であると考えられる。一方で、すべての物質について慢性毒性試験を行うことは不可能である。代替として長期的な体内蓄積性を検討しておけば、ある程度のリスクが想定できるが、現在はナノ材料を組織中で検出する手法がほとんど確立されていない。

海外では食品や環境中でのナノ材料の検出技術の検討が進められているが、わが国ではほとんどこの分野の研究者がいないことが懸念される。NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」は、カーボンナノチューブ、フラーレン、二酸化チタンの暫定 OEL の導出をもって一段落した印象がある。しかし実際には、ナノ材料の粒径、表面積、長さがハザードに及ぼす影響、体内動態（ADME）などは、ほとんどが未知であり、しかもそれらの解明には長期の研究を要するものが多い。したがって、これまで以上に大学研究者が参画すべきであろう。また、これらは必ずしもネガティブな影響の評価とは限らず、ナノ材料の医療・バイオ利用に役立つ可能性も十分にある。毒性学に限定せず、ナノ材料の生体内の挙動という、より大きな枠組みで研究開発領域を設定して、幅広いファンディングの検討が必要と考えられる。さらに、ナノマテリアルの健康影響に限らず、環境影響や将来のナノマニュファクチャリング（特にボトムアッププロセス）の安全性などにもスコープを広げるべきであろう。以上の課題に際しては、米国 NSF, NIH, NIST などの研究プロジェクトの調査が有効である。

上述のように、わが国では予防的な観点に立った規制はほぼ存在せず、各企業に自主的な判断に任せられているが、一方で欧米では規制が進みつつあるという現状を踏まえ、このような中途半端な状況はわが国における商品開発の進展に却って逆効果になりつつあるのではないかと考えられる。リスク評価には国と企業の協力が不可欠であり、特に作業環境測定などについて、産官が連携した施策が求められる。ナノ材料に限らないが、安全性

に関して第 3 者評価を必要とする欧米の価値観と、日本国内での自主的な基準による品質の高さによる価値観との間にずれが生じる可能性も高く、今後は国際的な商品を国内で開発していくうえでも国内に早急な管理システムの整備が必要であろう。一方で過剰に予防的な管理政策は、国際的には非関税障壁となる可能性もあるが、欧米で規制が先行しつつある現状を鑑みると、少なくとも最低限の安全性を評価する行政システムの構築は必要である。しかし､欧州では域内を統括する欧州化学品庁（ECHA）や食品安全機関（EFSA）が統一的に評価を行うことができ、米国では多くの人的リソースをもつ EPA や FDA のような評価機関が個別対応を行えることに比べて、わが国では、新たに評価システムを導入する財政的な余裕がないことは、制度的に最も憂慮すべき点である。

また、リスクコミュニケーションや ELSI の観点では、将来実現されうるナノテクノロジーに関して、その社会的影響を評価するテクノロジーアセスメントが重要である。その具体的な活動は多様なステークホルダーによる討論、市民パネルなどである。これまでの活動では、既存の課題、特に医療、バイオ、食品、環境に関連するものが多かった（社会科学者の関心は合成生物学にシフトしているようにも見える）。ナノテクノロジー特有の課題は見出されてはいないが、分野横断的な課題の可能性は指摘されている。国内では JST 社会技術研究開発センター（RISTEX）「先進技術の社会影響評価（テクノロジーアセスメント）手法の開発と社会への定着」の終了後は目立った活動がなく、この活動を実際に活かす施策が存在しない。ナノテクノロジーに限らず、テクノロジーアセスメント全般について、継続したファンディングが無いことが課題である。同時に人材（自然科学の素養も持つ社会科学者）の育成が必要であり、それには彼らのキャリアパスの確立も含まれる。わが国は、リスクコミュニケーションについて情報発信力が強いとは言い難く、インタラクティブでもない。海外においても、NSF が支援するナノテクノロジー＆社会センター（CNS）（アリゾナ州立大学、UCSB）があるが、設立当初と比べると活動は低調の印象を受ける。欧州においても､ケンブリッジ大学（英)､ランカスター大学（英)､トゥエンテ大学（蘭)、カールスルーエ工科大学（独）などは一時期精力的であったが、最近はあまり目立った動きは見えていない。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［注目すべきプロジェクトなど］

・OECD のナノ材料作業グループ（WPMN）の基で行われてきたスポンサーシッププログラムでは、代表的な 13 種のナノ材料について、初期評価に必要な物性データや安全性データの作成および収集作業（Phase1）が行われている。このうち、2012 年現在ではカーボン系ナノ材料や酸化チタンなどの関心の高いナノ材料について Phase1 データは揃いつつあり、次のステップとして Phase2 に向けて生体内および環境中における動態や遺伝毒性、吸入毒性など関心の高いテーマで各種のワークショップが進行中であり、さらに OECD の中で高生産量化学物質を評価しているプログラム（Cooperative Chemical Assessment Program）による初期評価も計画されている。OECD での評価結果そのものは、必ずしも加盟国や欧州域内などの規制に直結するものではないが、これらのワークショップや初期評価の判断の方向性は、今後の各国の規制手法に影響を少なからず影響を与えるものと考えられる。

- 2012 年より始まる BASF とドイツ政府による長期共同研究プロジェクトは、主に吸入暴露によるナノ材料の呼吸器系への影響を調べるための研究が主たる目的ではあるが、毒性試験としては設備投資としてのコストが極めて高い吸入毒性試験を主な対象研究とすることもあり、総額 5 百万ユーロを投じるものとなっている。この官民共同の安全性研究の成果は、その後の国際社会における受容性も含めて、今後のナノ材料の国際的開発戦略の試金石となるかも知れない。
- CNT が、アスベストと類似しているのではないかという議論（繊維仮説）は以前からあり、長い繊維状の多層 CNT の腹腔内投与による中皮腫の発生などが報告されていた。近年、吸入した CNT が中皮腫を生じる機構に関する具体的な仮説や、それを支持する報告が見られるようになってきた。Donaldson et al.（2010）は、長い CNT が胸腔に移行し、その後、その形状やサイズのために、リンパ管への排泄やマクロファージの貪食が不全となった結果、胸腔での炎症と中皮腫が生じるという仮説を提示した。Schinwald et al.（2012）は、様々な長さの銀ナノワイヤを胸腔内に投与して、繊維状ナノ材料が胸腔で病変を生じる繊維長の閾値が 4 μm であることを示した。また、Nagai et al.（2011）は、CNT の太さや硬さが、中皮への障害や発がん性を支配因子であることを示した。これらは、単に有害性の発現機序への示唆を与えているのみならず、注意を要するナノ材料の範囲を物理化学的性状から規定するものであり、研究開発と法規制の両面から、ナノ材料を一律に論じる議論から一歩踏み出したものと言える。
- 欧州では、FP7（第 7 次研究枠組み計画）のもと、多数の研究プロジェクトが進められている。ENPRA（Risk Assessment of Engineered NanoParticles）では、細胞試験、動物試験、計算機科学の最新の成果を用いて環境、安全、健康に関するリスク評価の手法を構築するプロジェクトであったが、2012 年に終了した。一方、2011 年からは、リスク管理に焦点を当て、事故時対応やモニタリングを含むツールと戦略の提供を目的とした MARINA（Managing Risks of Nanomaterials）というプロジェクトが開始されている。ナノテクノロジーに関するコミュニケーションを推進して合意形成を図ることを目的とした Nanochannels というプロジェクトも 2011 年に開始された。ここでは、幅広いステークホルダーを巻き込み、様々な媒体を用いた議論のためのイベントやキャンペーンを催すとされている。学生を対象として、これらのイベントなどの効果を計測する実験的なアプローチを含むことが特徴的な点として挙げられている。
- 日本で実施された NEDO「ナノ粒子特性評価手法に関する研究開発」（2006-2010 年度）では、ナノ材料の有害性や暴露の評価手法に関する研究開発を行いつつ、CNT、C_{60}、TiO_2 について、作業環境での許容暴露濃度の提案や、主に材料を取り扱う作業者を対象としたリスク評価書の作成を実施した。その後、ナノ材料のリスク管理には、その担い手である事業者と行政とが用いることのできる評価手法を開発すべく二つの研究プロジェクトに展開した。一つは、NEDO プロジェクト「低炭素化社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発」研究開発項目③「ナノ材料簡易自主安全管理技術の構築」（2010-2014 年度）である。事業者による自主安全管理技術の構築を目的とし、CNT などについて、in vitro（培養細胞を用いる）試験による簡易な有害性評価技術や、模擬排出試験や簡易な暴露評価手法からなる簡便な作業環境暴露評価手法を開発する。もう一つは、経済産業省プロジェクト「低炭素社会を実現する超軽量・高強度革新的融合材料プロジェクト（NEDO 交付金以外分）ナノ材料の安全・安心確保のための国際

先導的安全性評価技術の開発」（2011-2015 年度）である。行政的な観点から、評価の効率化のため類似のナノ材料を集約して評価するための判断基準（ナノ材料の同等性の判断基準）を構築するとともに、気管内投与試験を初期有害性情報を取得するための低コスト・簡便な動物試験手法として位置づけるための検討が行われている。

- FAO/WHO では、2010 年に、「食品および農業分野へのナノテクノロジーの適用に関する食品の安全性への意義付け」に関しての FAO/WHO 専門家会議レポートを公表、2012 年には、各国のリスク評価と管理の現状に関する報告書を作成した。これを受けて、2012 年 3 月、「食品と農業におけるナノテクノロジー」と題する FAO/WHO 合同会議が開催された。一方、食品に関する国際規格を策定するコーデックスではまだ具体的な動きはない。
- その他の国・地域としては、台湾がアジアの中で最も早くナノ EHS に着手し、現在もアジアナノフォーラム（ANF）のリエゾンメンバーの立場を活かして、OECD-WPMN、ISO TC229 に関与している。シンガポール、タイも限られた範囲ではあるが、この分野に積極的に関与している。タイでは、国立ナノテクノロジー研究センター（NANOTEC）が中心となり、ナノテクノロジーの研究開発および EHS、ELSI 問題にも大きい関心を寄せている。最近では、NanoQ と呼ばれるナノテクノロジー製品認証システムの運用を開始した。OECD WPMN へもオブザーバとして参加している。また、ANF ではナノ EHS に関する新たなアジアネットワークが準備されている。OECD-WPMN のスポンサーシップ・プログラムにおいて、南アフリカが金ナノ粒子のリードスポンサーを務めている。

（6）キーワード

ナノマテリアル、ハザード、カーボンナノチューブ、フラーレン、二酸化チタン、OECD WPMN、ISO/TC229、有害性、ばく露（暴露）、吸入ばく露試験、テクノロジーアセスメント、作業環境、ナノ製品、REACH、ECHA、EFSA、FDA、EPA、PMN、SNUR、FSA、WHO、FAO

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	取組み水準	△	→	・世界的にも注目度が高かった NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」（～ 2010 年度末）により、OEL など、リスク管理に関するガイドラインの作成に必要な数値がひと通り導出された。しかし、その後継となる経産省プロジェクト「ナノ材料の安全・安心確保のための国際先導的安全評価技術の開発」（2011 年～ 2016 年）」について、現時点では進捗が見えにくい。 ・厚生労働省「化学物質リスク研究事業」6 件程度の研究班が継続的に進行（2006 年～） ・バイオアッセイセンターによる CNT の慢性吸入暴露試験が進行中（2009 年～ 2014 年） ・衛生研の CNT 腹腔内投与試験について、試験方法の妥当性も含めて一時期かなり注目を集めた。 ・ELSI に関しては JST-RISTEX のテクノロジーアセスメントのプロジェクトがナノテクノロジーを扱ったが、後継プロジェクトがない。資金、人材ともに薄い。 ・2011 年末より経済産業省「ナノマテリアルの管理に関する検討会」や厚生労働省「化学物質のリスク評価検討会（職場における健康障害防止のためのナノマテリアルのリスク評価について）」において代表的なナノマテリアルについてのリスク評価を開始するものの、実質的な評価に耐える暴露データはまだ存在しない、あるいは今後（労働暴露として）収集予定。 ・いくつかの大学からはナノ材料の有害性機序や物理化学的特性に関する研究成果が上がっているが、学のアクティビティは十分とはいえない。
	実効性	△	→	・ガイドラインに関して、経産省、厚労省ともに一定の努力はしている。OECD、ISO の国際協力への貢献も大きい。ただし、日本のナノマテリアル製造業者がナノマテリアルハザード評価を海外企業に依頼するという実状もあり、国内の評価体制の整備ができていない。 ・試料調製・計測技術を基盤とした有害性試験のデータに基づいて、世界に先駆けてのリスク評価書（CNT、C_{60}、TiO_2）が実施され、事業者による自主安全管理技術や行政のための効率的な評価技術に展開している [28]。 ・OECD WPMN SG3 スポンサーシッププログラムにおいて、炭素系 3 材料の主スポンサーとしてデータの提供や文書の取りまとめを行っている。 ・作業環境での許容暴露濃度（CNT、C_{60}、TiO_2）が提案され、事業者の自主安全管理のための技術開発がなされている。 ・経済産業省「ナノ物質の管理に関する検討会」[18] など、行政的な取り組みも継続しているが、2008 年に労働安全に関して予防的暴露防止対策が局長通知として発出された以外に規制的な動きはない。

米国	取組み水準	◎	↗	・2013 年度予算案にて EHS 関連を増額した [29]。 ・NNI の Nanotechnology Signature Initiatives の持続性ナノマニュファクチャリングにおいて、EHS が重視されている。 ・NNI による環境、健康、安全の研究戦略 [30] や NRC（National Research Council、米国学術研究会議）による短期と長期の研究優先順位を付けた研究戦略 [31] など、EHS 関連の研究の方向性を示す文書が発行されている。NNI の EHS に対する投資は 105.4 百万ドル（2013 年度）であり、日本の約 10 倍と推定され、世界の中で群を抜いている。 ・ナノマテリアルリスク評価・管理に関して NIOSH による包括的な取り組みが世界をリードし続けている。NSF 支援による大学の研究、NIH、NIST の研究も裾野が広い。NSF の 2 センター（UCLA, Duke U.）がハイライトである。NSF のナノテクノロジー環境影響センター（CEIN）（UCLA、デューク大学）が、バイオ・環境ナノテクロジーセンター（CBEN）（ライス大学）に代わって、ナノテクノロジー環境影響の中核機関になりつつある。 ・有害性評価の基礎研究を支えるナノスケール標準物質を公開する動きがある（NIST）[32]。 ・ナノ材料の有害性に関する構造活性相関に関する研究も始まっている。 ・製品からの排出を想定した研究が増えてきた（例：NanoRelease プロジェクト [17]）
	実効性	○	→	・EPA（米国環境保護庁）によるナノ銀についてのケーススタディの報告書が取りまとめられるなど、リスク評価の動きがある [33]。 ・EPA は申請された CNT について重要新規利用ルールを公布（2010 年～）EPA の重要新規利用ルールは、個別企業の申請毎に作成される。 ・FDA は,「FDA 規制権限製品にナノテクノロジーが利用されているかどうかの検討」に関する業界向けガイダンス案を公表（2011 年）その後、FDA 規制関連製品に化粧品と食品材料 7）および食品接触物質（食器など）8）の安全性評価に関する業界向けのガイダンスをそれぞれ公表（2012 年）。FDA のガイダンスは、法的には事前承認の必要のないものに対する自主基準であるが、FDA との個別相談が推奨されている。 ・いずれも個別対応が主で有り、包括的なナノマテリアルの評価手法に繋がる情報は公開されない可能性が高い。 ・NIOSH（National Institute for Occupational Safety and Health：　米国国立労働安全衛生研究所）からは、個別材料の評価として、CNT[8] や TiO_2[9] の許容濃度の提案がなされるとともに、作業場での研究室での作業環境管理のガイドラインが示された [34]。 ・ICON の活動がトーンダウンして、産業界の取り組みが見えにくくなった感がある。それでも OECD、ISO に対する実質的貢献はあるものと推測される。

欧州	取組み水準	◎	→	・FP7 による欧州全体のプロジェクトが支配的になりつつある。ただし、ネットワーキングは活発であるが、実質的な研究がどれだけ進んでいるかは不明である。一方、国別に見ればドイツ、英国が進んでおり、着実に研究成果を積み上げている。 ・「ナノマテリアルは REACH で規制」（2008 年）。REACH を実施する際の要点について具体的且つ包括的な科学的並びに技術的アドバイスを提供するための「ナノマテリアルに対する REACH 実施プロジェクト」開始（2009 年）。ナノマテリアルの場合に REACH に記載すべき情報の要件などについてガイダンス報告書（2011 年）。 ・新化粧品指令により 2013 年 7 月より、ナノマテリアル成分の表示義務化。食品添加物に関する指令として既存の食品添加物であっても、ナノテクノロジーなどを用いて製法や粒子サイズを変更した場合は再評価が必要（2008 年）。 ・EFSA より「食品 / 飼料へのナノ科学とナノテク応用から生ずる可能性のあるリスクに関するリスク評価ガイダンス」が公表（2011 年） ・消費者安全科学委員会（SCCS）が化粧品中のナノマテリアルの評価ガイダンスを公表（2012 年） ・欧州委員会（EC）は規制上のナノマテリアル定義として「個数濃度のサイズ分布で 50% 以上の粒子について 1 つ以上の外径が 1 nm から 100 nm のサイズ範囲である粒子」を公表（2011 年） ・化粧品、食品、生体、環境といった複雑な基質中のナノ材料の計測方法のプロジェクト（SMART-NANO）[16] が実施され、ナノ安全のための計測・実験の共通基盤（QNANO）の整備もなされている [35]。 ・エジンバラ大学のグループは、繊維状ナノ材料の有害性の議論（繊維仮説）をリードしている。 ・FP7（第 7 次研究枠組計画）のもと、MARINA（リスク評価ツール）[26] など、新しいプロジェクトが立ち上がっている。 ・英国上院科学技術委員会が 2010 年に勧告などを含む報告書を 2010 年に提出した（House of Lords 2010）。その勧告を受けて、英国食品安全基準庁（FSA）では、Nanotechnologies and food discussion group を設置。2012 年 4 月、FSA は食品中のナノの利用についてモニタリングをすると公表し、4 つ（Fumed silica、Nanoclay、NanoSilver, Titanium nitride）について把握していると情報提供。
	実効性	◎	↗	・欧州委員会がナノ材料の定義を採択し [6]、フランスでは、ナノ材料情報の届け出が義務化される [7]。 ・製品に応用されたナノ材料のリスク評価に関心が高まる。 ・評価ツールの開発（Stoffenmanager Nano[36]、CodeMeter[37]、NanoRiskCat[38]） ・予防原則が優先しており、規制上の定義が設定される前から表示義務を行うことが設定されていたり，既存製品のナノマテリアル化に対する評価の必要性が規制として発行されていたりしている。さらに、後追いではあるが、ごく最近では食品や化粧品などの消費者製品における評価ガイダンスも作成され、実効的な規制に向けて着実に進んでいる。しかし、一方ではリスク評価を行う為の測定法が未だ確立しておらず、その後の研究の進展状況によってはナノマテリアルの規制上の定義の見直しも含めて、正確なリスク評価に基づく規制管理を伴う程の制度運用は、見通せていないと思われる。 ・REACH の動向に注目すべきであるが、研究で先んじる国（ドイツ、英国など）、労働衛生に強い国（フィンランドなど）があり、調整は必ずしもスムーズではない様子である。

中国	取り組み水準	△	↗	・第 6 回ナノトキシコロジー国際会議を誘致するなど、ナノ材料の有害性評価に関する存在感は高まってきている。 ・欧米との共同研究の成果が報告されるようになった。 ・中国科学院（CAS）のナノテクセンター（NCNST）がナノ EHS を重視し、今後国家投資が増えると報道されている。2013 年、米欧、ブラジルと共同のプロジェクト nano-solution が計画されている（約 17 百万米ドル）。 ・ナノテクノロジーの安全性に研究資金の 3%が投入されていると言われている [39]。 ・OECD WPMN のスポンサーシッププログラムで、鉄（酸化鉄）ナノ粒子の主スポンサーである。 ・台湾は、アジアの中で最も早くナノ EHS に着手し、現在もアジアナノフォーラム（ANF）のリエゾンメンバーの立場を活かして、OECD-WPMN、ISO TC229 に関与している。
	実効性	△	→	・ナノマテリアルがヒトの健康に何らかの影響を及ぼすとすれば、ナノマテリアルの生産量が大きい中国で最初に症例が発見される可能性が高い、と米欧も注目している。法規制などの政府の取り組みが急展開する可能性もある。
韓国	取組み水準	△	↗	・ナノテクノロジー研究開発予算のうち、EHS の占める割合を、現在の 3%から 2020 年までに 7%へ拡大の見込み [40]。 ・2012 年 12 月に韓国に於いて、ナノマテリアルの毒性メカニズムと体内動態に関する OECD の専門家ワークショップを開催 ・個々の研究では優れたものもある。また、政府の EHS、ELSI に対する意識も高まっている。
	実効性	○	↗	・ナノ物質リスク評価指針（2012）の策定 [41]。KoNTRS などが中心になり、取り組みが戦略的になってきている。OECD、ISO でのプレゼンスも向上しつつある。 ・韓国技術標準院の OECD WPMN スポンサーシッププログラムへの参加（銀ナノ粒子、CNT、TiO_2）[40]。 ・ナノ製品安全性総合計画の策定（2011）[40]。 ・ISO/TC229（ナノテクノロジー）での吸入暴露試験での金属ナノ粒子エアロゾルの生成（ISO10801）とキャラクタリゼーション（ISO10808）に関する国際標準化、ナノ物質安全資料作成指針（ISO TR13329）。

現状についての比較
◎　非常に進んでいる　　○　進んでいる　　△遅れている　　×　非常に遅れている
近年のトレンド
↗　上昇・積極傾向　　→　現状維持　　↘　下降傾向

（8）引用資料

1）The Royal Society（2004）Nanoscience and Nanotechnolgies: Opportunity and Uncertainty, http://www.raeng.org.uk/news/publications/list/reports/nanoscience_nanotechnologies.pdf
2）Eva Oberdörster（2004）Manufactured Nanomaterials（Fullerenes, C_{60}）Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass, Environmental Health Perspectives 112, 1058-1062.
3）ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究：報告書・政策提言 http://unit.aist.go.jp/nri/ci/nanotech_society/Si_portal_j/doc/doc_report/summary_j.pdf
4）菅野純（2012）毒性試験と評価に関する新たな課題へのアプローチ：厚生労働科学ナノマテリアル研究の展開 http://www.nies.go.jp/risk/chemsympo/image/2-abstract_kanno.pdf
5）「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」（事後評価）分科会 http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_23h_jigo_8_1_index.html.html
6）What is a "nanomaterial"? European Commission breaks new ground with a common definition

http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-1202_en.htm?locale=en
7） France publishes details for mandatory nanomaterial reporting
http://chemicalwatch.com/12055/france-publishes-details-for-mandatory-nanomaterial-reporting
8） NIOSH（2010）NIOSH Current Intelligence Bulletin, Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers. November 2010 Draft.
9） NIOSH（2011）NIOSH Current Intelligence Bulletin, 63, Occupational Exposure to Titanium Dioxide.
10） EC（European Commission）（2010）Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety（ENRHES）. Project final report.
11） DuPont（2008）DuPont AEL Documentation for Ultrafine TiO2.
12） Pauluhn J（2010）Multi-walled carbon nanotubes（Baytube）：Approach for derivation of occupational exposure limit. Regulatory Toxicology and Pharmacolgy 57: 78-89.
13） FDA issues draft guidance on nanotechnology
http://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm301125.htm
14） EFSA Scientific Committee, 2011. Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain1.
http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2140.pdf
15） Linsinger et al.（2012）Requirements on measurements for the implementation of the European Commission definition of the term "nanomaterial". JRC（Joint Research Center）Reference Report. ISSN 1831-9424, doi:10.2787/63490
16） Launch of SMART-NANO project
http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/our_activities/nanotechnology/launch-of-smart-nano-project
17） ILSI - NanoRelease Consumer Products
http://www.ilsi.org/ResearchFoundation/Pages/NanoRelease1.aspx
18） ナノ物質の管理に関する検討会 –経済産業省
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nanomaterial_kanri.html
19） Report for International Cooperation on Cosmetics Regulation - Report of the Joint Regulator - Industry Ad Hoc Working Group: Currently Available Methods for Characterization of Nanomaterials
http://ec.europa.eu/consumers/sectors/cosmetics/files/pdf/iccr5_char_nano_en.pdf
20） Poland et al.（2008）Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. Nat Nanotechnol 3: 423–8.
21） Takagi et al.（2008）Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. J Toxicol Sci 33:105–116.
22） Donaldson et al.（2010）Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma, Donaldson et al. Particle and Fibre Toxicology 2010, 7:5.
23） Schinwald et al.（2012）Graphene-Based Nanoplatelets: A New Risk to the Respiratory System as a Consequence of Their Unusual Aerodynamic Properties, ACS Nano 6（1）, 736-746.
24） Nagai et al.（2011）Diameter and rigidity of multiwalled carbon nanotubes are critical factors in mesothelial injury and carcinogenesis, doi/10.1073/pnas.1110013108
25） ENPRA.
http://www.enpra.eu/Home.aspx.
26） MARINA | Managing Risks of Nanomaterials
http://www.marina-fp7.eu
27） Nanochannels
http://cordis.europa.eu/projects/rcn/97562_en.html

28）蒲生昌志（2012）ナノマテリアルのリスク評価　−管理のための評価手法の展開
http://www.nies.go.jp/risk/chemsympo/image/3-abstract_gamo.pdf
29）The National Nanotechnology Initiative, Supplement to the President's 2013 Budget
http://nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nni_2013_budget_supplement.pdf
30）National Science and Technology Council Committee on Technology（2011）National Nanotechnology Initiative, Environmental, Health, and Safety Research Strategy.
http://nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nni_2011_ehs_research_strategy.pdf
31）National Research Council（2012）A Research Strategy for Environmental, Health, and Safety Aspects of Engineered Nanomaterials, The National Academies Press, Washington DC.
32）New NIST Reference Material Could Aid Nanomaterial Toxicity Research
http://www.nist.gov/mml/mmsd/tio2-090512.cfm
33）EPA（2012）Nanomaterial Case Study: Nanoscale Silver in Disinfectant Spray, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, EPA/600/R-10/081F
http://cfpub.epa.gov/ncea/nano/recordisplay.cfm?deid=241665
34）NIOSH（2012）General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories
http://www.cdc.gov/niosh/docs/2012-147/pdfs/2012-147.pdf
35）QNano ResearchInfrastructure - Welcome to QNANO
http://www.qnano-ri.eu
36）Stoffenmanager Nano
https://www.stoffenmanager.nl/Default.aspx
37）CodeMeter, Concept, Objectives & Application, 2011
http://www.nanocode.eu/files/NanoCode-CodeMeterToolReport.pdf
38）NanoRiskCat
http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/12/978-87-92779-11-3.pdf
39）Nano-safety studies urged in China　http://www.nature.com/news/nano-safety-studies-urged-in-china-1.11437
40）安順花（2012）韓国のナノテクノロジーの研究開発 3, 社会受容への取り組み , PEN（ISSN: 2185 - 3231）, July 2012, p.8-11.
41）PEN（ISSN: 2185 - 3231）, March 2012, p.45.
42）Hankin S.M., et al., Specific Advice on Fulfilling Information Requirements for Nanomaterials under REACH（RIP-oN 2）– Final Project Report, RNC/RIP-oN2/FPR/1/FINAL,（2011）
43）EFSA（European Food Safety Authority）, Scientific Opinion of the Scientific Committee on a request from the European Commission on the Potential Risks Arising from Nanoscience and Nanotechnologies on Food and Feed Safety. The EFSA Journal, 958, 1-39.（2009）
44）EFSA（European Food Safety Authority）, Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain, EFSA Journal, 2140, 1-36（2011）
45）SCCS（Scientific Committee on Consumer Safety）Guidance on The Safety Assessment of Nanomaterials in Cosmetics, SCCS/1484/12.（2009）Available from:　http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_s_005.pdf（Accessed August 20, 2012）
46）US.EPA, Multi-Walled Carbon Nanotubes and Single-Walled Carbon Nanotubes; Significant New Use Rules, Federal Register, 75（180）, 56880-56889.（2010）
47）US.FDA, Draft Guidance for Industry; Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology;（2011）Available from:　http://www.fda.gov/RegulatoryInformation/Guidances/ucm257698.htm（Accessed August 20, 2012）
48）US.FDA, Draft Guidance for Industry: Assessing the Effects of Significant Manufacturing

Process Changes, Including Emerging Technologies, on the Safety and Regulatory Status of Food Ingredients and Food Contact Substances, Including Food Ingredients that are Color Additives;（2012）Available from: http://www.fda.gov/downloads/Cosmetics/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/UCM300927.pdf（Accessed August 20, 2012）

49）US.FDA, Draft Guidance for Industry: Assessing the Effects of Significant Manufacturing Process Changes, Including Emerging Technologies, on the Safety and Regulatory Status of Food Ingredients and Food Contact Substances, Including Food Ingredients that are Color Additives;（2012）Available from: http://www.fda.gov/downloads/Cosmetics/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/UCM300932.pdf（Accessed August 20, 2012）

50）DE-BAuA, Forschung: Langzeitforschungsprojekt zur Sicherheit von Nanomaterialien gestartet.（http://www.baua.de/de/Presse/Pressemitteilungen/2012/05/pm025-12.html?nn=664262）（Accessed Oct 25, 2012）

51）OECD, Preliminary Guidance Notes on Sample Preparation and Dosimetry for the Safety Testing of Manufactured Nanomaterials, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 24, Environment Directorate, OECD, Paris.（http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocument/?cote=env/jm/mono（2010）25&doclanguage=en）（Accessed August, Oct. 25, 2012）（2010）.

52）OECD, Guidance Manual for the Testing of Manufactured Nanomaterials: OECD’s Sponsorship Programme; First Revision, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 25, Environment Directorate, OECD, Paris.（ http://www.oecd.org/science/safetyofmanufacturednanomaterials/guidancemanualforthetestingofmanufacturednanomaterialsoecdsponsorshipprogrammefirstrevision.htm）（Accessed August, Oct. 25, 2012）（2010）.

53）OECD, Current Developments on The Safety Of Manufactured Nanomaterials -Tour De Table, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 34, Environment Directorate, OECD, Paris.（http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf?cote=env/jm/mono（2012）13&doclanguage=en））（2012）

54）FAO/WHO, Expert meeting on the application of nanotechnologies ni the food and agriculture sectors: potential food safety implications（Meeting report）, WHO Press, World Health Organization, Geneva.（2010）. Available from: http://www.fao.org/docrep/012/i1434e/i1434e00.pdf（Accessed August 20, 2012）

55）FAO/WHO , "State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management of nanotechnologies in the food and agriculture sectors"（draft for public review）http://www.fao.org/fileadmin/templates/agns/pdf/topics/FAO_WHO_Nano_Paper_Public_Review_20120608.pdf（Accessed Oct.25, 2012）

56）EU（European Union）Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial（2011/696/EU）. Official Journal L 275, 20.10.2011, p.38,（2011）

57）経済産業省、ナノ物質の管理に関する検討について（http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nanomaterial_kanri.html）（Accessed August, Oct. 25, 2012）

58）厚生労働省、平成２３年度化学物質のリスク評価検討会 http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000000aiuu.html#shingi16 （Accessed August, Oct. 25, 2012）

59）広瀬明彦、ナノマテリアルの健康影響評価指針の国際動向、薬学雑誌 Vol. 132（in press）（2012）

60）松尾真紀子「第２章　フードナノテクをめぐる米欧の動向とガバナンス上の課題」『萌芽的科学技術をめぐるガバナンスと市民－フードナノテクからの問い－』立川雅司・三上直之編、日本経済評論社、（2013 刊行予定）。

61）松尾真紀子「食品分野に応用される新たな技術を管理する上での課題：ナノテクノロジー応用食品を事例に」『食品衛生研究』食品衛生研究　９月号　vol.61 p.15-24（2011）

62）NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」、ナノ材料リスク評価書 - 考え方と結果の概略 -（2011）.

63）National Nanotechnology Initiative Signature Initiative: Sustainable Nanomanufacturing – Creating the Industries for the Future（2010）.
64）Jane Qiu, Nano-safety studies urged in China, nature, Sept. 2012.
65）JST-RISTEX, I2TA プロジェクト、多層カーボンナノチューブに関するリスク評価・管理の最近の動向（2009）.
66）JST-RISTEX, I2TA プロジェクト、フードナノテク：食品分野へのナノテクノロジーの応用の現状と諸課題（2011）.

（付録 2）国際比較表まとめ

ナノテク・材料の応用

		グリーンナノテクノロジー																							
		太陽電池		人工光合成		燃料電池		熱電変換		蓄電デバイス		パワー半導体		高温超伝導送電		グリーンプロセス触媒		ナノ組織制御構造材料		元素戦略・希少元素代替技術		分離機能材料による水処理		放射性物質の除染・減容化	
国	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	○	↗	△	↗
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	○	→	△	↗
	産業技術力	◎	↘	×	→	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	○	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	→	△/○	↗
米国	研究水準	○	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↘	◎	↘	◎	→	○	↗	◎	↗	△	↘
	技術開発水準	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	→	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	→	△	↘
	産業技術力	△	→	×	→	○	↘	○	↗	△	→	◎	→	○	→	◎	→	○	→	○	→	◎	↗	○	↘
欧州	研究水準	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗	◎	↗	△	↘
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	○	→	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	△	↘
	産業技術力	◎	↘	×	→	○	↗	○	↗	○	→	◎	→	△	→	◎	↗	○	→	○	→	◎	↗	○	↘
中国	研究水準	△	↗	△	↗	○	→	◎	↗	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	×	→
	技術開発水準	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	○	↗	×	↗	○	→	◎	↗	△	↗	○	↗	○	↗	×	→
	産業技術力	◎	↗	×	→	△	→	○	→	○	↗	△	↗	△	→	△	→	○	↗	△	→	○	↗	×	→
韓国	研究水準	△	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	△	↗	△	→	△	→	△	↗	○	→	△	↗	×	→
	技術開発水準	○	↗	△	→	○	↗	○	→	◎	↗	△	↗	○	↗	◎	↗	○	→	○	↗	△	↗	×	→
	産業技術力	○	↗	×	→	○	↗	△	→	◎	↗	△	↗	○	→	◎	↗	○	↗	△	→	○	↗	×	→

		バイオナノテクノロジー								ナノエレクトロニクス							
		生体材料（バイオマテリアル）		ナノ薬物送達システム（ナノDDS）		バイオナノデバイス		バイオイメージング		超低消費電力ナノエレクトロニクス（ロジック、メモリ関係）		超低消費電力ナノエレクトロニクス（量子情報関係）		異種機能三次元集積チップ		センシングデバイス・システム	
国	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	→	◎	→	◎	→	◎	→
	技術開発水準	○	↘	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	×	→	○	→	○	→
	産業技術力	△	→	○	↗	△	↗	◎	↗	○	→	×	→	△	↘	○	↘
米国	研究水準	○	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→
	産業技術力	◎	→	◎	→	◎	↗	○	→	○	↗	×	→	○	↗	○	→
欧州	研究水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→
	技術開発水準	○	→	◎	→	○	→	◎	↗	○	↗	×	→	◎	→	◎	↗
	産業技術力	◎	→	◎	→	△	→	◎	↗	△	→	×	→	△	↗	◎	↗
中国	研究水準	○	↗	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	△	↗	×	→	△	↗
	技術開発水準	○	↗	○	↗	△	→	△	→	△	→	×	→	×	→	△	→
	産業技術力	○	↗	△	↗	△	→	×	→	△	→	×	→	×	→	×	→
韓国	研究水準	○	→	○	↗	○	↗	△	→	○	↗	×	→	△	→	○	→
	技術開発水準	○	→	○	↗	○	→	△	→	○	↗	×	→	○	↗	○	→
	産業技術力	○	↗	△	↗	○	→	×	→	◎	↗	×	→	○	↗	△	↗

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：　量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、
○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、
×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、
↘：下降傾向

基盤科学・技術

国	フェーズ	超微細加工技術		MEMS／MEMS		ボトムアップ型プロセス（自己組織化）		ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御）		分子技術		界面制御		空間・空隙構造制御		バイオミメティクス		ナノ計測（走査プローブ顕微鏡）		ナノ計測（透過電子顕微鏡）		ナノ計測（放射光・X線計測）		ナノ計測（超高速時間分解分光）		物質・材料シュミレーション		リスク評価・リスク管理	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	△	→
	技術開発水準	○	→	○	↗	◎	↗	○	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	△	→	◎	↗	○	→	○	→	△	→
	産業技術力	○	→	○	↘	○	↗	×	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↘	×	－	○	→	○	→	○	→		
米国	研究水準	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↘	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗
	技術開発水準	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→	○	↗	○	→
	産業技術力	◎	↗	◎	→	○	↗	×	→	◎	→	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	×	－	－	－	◎	→	○	↗		
欧州	研究水準	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→
	技術開発水準	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	→	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	○	→	○	↗	◎	↗
	産業技術力	○	→	◎	↗	○	↗	×	→	○	→	○	→	○	↗	◎	↗	◎	↗	×	－	－	－	○	→	○	↗		
中国	研究水準	×	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	×	→	－	－	△	↗	△	↗	○	↗	△	↗
	技術開発水準	×	→	△	→	○	↗	×	→	○	↗	△	↗	△	↗	◎	↗	△	↗	－	－	○	↗	×	→	△	↗	△	→
	産業技術力	×	→	×	→	△	→	×	→	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	×	→	－	－	－	－	△	→	△	→		
韓国	研究水準	○	→	○	→	○	↗	○	↗	△	→	○	－	○	↗	◎	↗	△	↗	－	－	△	↗	○	→	○	↗	△	↗
	技術開発水準	○	→	○	→	○	↗	△	→	○	→	◎	－	○	↗	○	↗	×	→	－	－	△	→	○	→	○	↗	○	↗
	産業技術力	○	→	△	→	△	→	×	→	○	→	◎	－	△	→	△	↗	○	→	－	－	－	－	△	→	△	↗		

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（付録 3）執筆協力者一覧

※五十音順、敬称略、所属・役職は執筆依頼時点

≪1. ナノテクノロジー・材料の応用≫

■ 1.1 グリーンナノテクノロジー

飯山　明裕	日産自動車株式会社 総合研究所 ＥＶシステム研究所 エキスパートリーダ
石原　一彰	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
一ノ瀬　泉	物質・材料研究機構 先端的共通技術部門 高分子材料ユニット ユニット長
井上　晴夫	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 特任教授
今西　誠之	三重大学 大学院工学研究科 教授
今堀　　博	京都大学 大学院工学研究科 教授
宇佐美徳隆	東北大学 金属材料研究所 准教授
大村　孝仁	物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 構造材料ユニット 強度設計グループ グループリーダー
折茂　慎一	東北大学 金属材料研究所 教授
梶野　　勉	株式会社豊田中央研究所 主席研究員
金村　聖志	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 教授
河西　純一	物質・材料研究機構 企画部門 企画調整室 次長
北野　彰彦	東レ株式会社 複合材料研究所 所長
工藤　昭彦	東京理科大学 理学部第一部 教授
河本　邦仁	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
佐々木一成	九州大学 大学院工学研究院 教授、 水素エネルギー国際研究センター センター長
佐藤　謙一	住友電気工業株式会社 フェロー
佐藤　　努	北海道大学 大学院工学研究院 教授
下山　淳一	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
鈴木　淳市	総合科学研究機構 東海事業センター 利用研究促進部 部長、主任研究員
須田　　淳	京都大学 大学院工学研究科 准教授
辰巳　国昭	産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門 主幹研究員
佃　　達哉	東京大学 大学院理学系研究科 教授
津崎　兼彰	物質・材料研究機構 元素戦略材料センター センター長
寺崎　一郎	名古屋大学 大学院理学研究科 教授
西　　敏夫	東京工業大学 国際室 特任教授
錦谷　禎範	JX 日鉱日石エネルギー株式会社 研究開発本部・中央技術研究所 エグゼクティブリサーチャー
西澤　伸一	産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 電力エネルギー基盤グループ グループリーダー
橋本　秀樹	大阪市立大学 大学院理学研究科 教授

原　　亨和　　東京工業大学 応用セラミック研究所 教授
原田　幸明　　物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 招聘研究員
辺見　昌弘　　東レ株式会社 地球環境研究所 所長
正岡　重行　　分子科学研究所 錯体物性研究部門 准教授
御手洗容子　　物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門 先進高温材料ユニット
構造機能融合材料グループ グループリーダー
森田　　靖　　大阪大学 大学院理学研究科 准教授
矢板　　毅　　日本原子力研究開発機構 量子ビーム反応制御・解析技術研究ユニット／
山田　裕久　　物質・材料研究機構 環境再生材料ユニット／ジオ機能材料グループ
グループリーダー
渡辺　正裕　　東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授

■ 1.2 バイオナノテクノロジー

一木　隆範　　東京大学 大学院工学研究科 准教授
大槻　主税　　名古屋大学 大学院工学研究科 教授
田中　　賢　　山形大学 大学院理工学研究科 教授
玉田　　薫　　九州大学 先導物質化学研究所 教授
西山　伸宏　　東京大学 大学院工学研究科 准教授
馬場　嘉信　　名古屋大学 大学院工学研究科 教授
藤田　克昌　　大阪大学 大学院工学研究科 准教授
馬渡　和真　　東京大学 大学院工学研究科 准教授
山本　玲子　　物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノバイオ分野 バイオメタルグループ グループリーダー

■ 1.3 ナノエレクトロニクス

秋永　広幸　　産業技術総合研究所 ナノデバイスセンター センター長
浅川　鋼児　　株式会社東芝 研究開発センター 有機材料ラボラトリー 研究主幹
浅野　種正　　九州大学 大学院システム情報科学研究院 教授
一木　正聡　　産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター 研究チーム長
伊藤　公平　　慶應義塾大学 理工学部 教授
内田　　建　　慶應義塾大学 理工学部 教授
内山　貴之　　ルネサスエレクトロニクス株式会社
プロセス技術統括部プロセス加工技術部 課長
遠藤　哲郎　　東北大学 大学院工学研究科 教授
大友　　明　　東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
大橋　啓之　　日本電気株式会社 グリーンプラットフォーム研究所 主席研究員
小野　輝男　　京都大学 化学研究所 教授
嘉田　守宏　　超先端電子技術開発機構 研究部長
河野　行雄　　東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授
木村紳一郎　　超低電圧デバイス技術研究組合 研究企画部長
木村　　剛　　大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授

酒井　真理　　セイコーエプソン株式会社 技術開発本部 生産技術センター
エキスパート
酒井　忠司　　株式会社東芝 研究開発センター 電子デバイスラボラトリー 研究主幹
笹川　崇男　　東京工業大学 応用セラミックス研究所 准教授
品田　賢宏　　産業技術総合研究所 ナノデバイスセンター集積実証室 主幹
白石　賢二　　筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授
田中　秀治　　東北大学 大学院工学研究科 准教授
中村　泰信　　東京大学 先端科学技術研究センター 教授
西山　伸彦　　東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授
長谷川　剛　　物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 主任研究者
馬場　俊彦　　横浜国立大学 大学院工学研究科 教授
廣島　　洋　　産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター
副研究センター長
屋上公二郎　　ソニー株式会社 コアデバイス開発部セミコンダクタテクノロジー開発部門
主任研究員
若林　　整　　ソニー株式会社 半導体事業本部 技術マネジメント推進室
若林　克法　　物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 独立研究者
渡部　平司　　大阪大学 大学院工学研究科 教授

≪ 2. 科学・技術基盤≫

浅川　鋼児　　株式会社東芝 研究開発センター
有機材料ラボラトリー 研究主幹（再掲）
阿部　真之　　大阪大学 大学院工学研究科　准教授
居城　邦治　　北海道大学 電子科学研究所 教授
一木　正聡　　産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 研究チーム長
伊藤　耕三　　東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
魚谷　信夫　　京都大学 細胞 - 物質統合システム拠点 特任教授
内山　貴之　　ルネサスエレクトロニクス株式会社
プロセス技術統括部プロセス加工技術部 課長（再掲）
尾方　成信　　大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
小柳津研一　　早稲田大学 理工学術院 教授
加藤　隆史　　東京大学 大学院工学系研究科 教授
加納　博文　　千葉大学 大学院理学研究科 教授
蒲生　昌志　　産業技術総合研究所 安全科学研究部門 リスク評価戦略グループ
グループ長
北川　　進　　京都大学 大学院工学研究科 教授
北川　　宏　　京都大学 大学院理学研究科 教授
久保　百司　　東北大学 大学院工学研究科 教授
栗原　和枝　　東北大学 多元物質科学研究所 教授
黒田　一幸　　早稲田大学 理工学術院 教授

酒井　真理	セイコーエプソン株式会社 富士見事業所 生産技術センター エキスパート（再掲）
榊　　茂好	京都大学 福井謙一記念研究センター 特任教授
下村　政嗣	東北大学 多元物質科学研究所／原子分子材料科学高等研究機構 教授
白石　賢二	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授
高原　　淳	九州大学 先導物質化学研究所　教授
竹村　誠洋	物質・材料研究機構 企画部調査分析室　室長
田中　　功	京都大学 大学院工学研究科 教授
田中　秀治	東北大学 大学院工学研究科 准教授（再掲）
田原　太平	理化学研究所 基幹研究所 主任研究員
玉作　賢治	理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター　専任研究員
玉田　　薫	九州大学 先導物質化学研究所 教授
常行　真司	東京大学 大学院理学系研究科 教授
寺西　利治	京都大学 化学研究所 教授
長嶋　泰之	東京理科大学 大学院理学研究科 教授
林田　美咲	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 ナノ材料計測科 研究員
一杉　太郎	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 准教授
廣島　　洋	産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 副研究センター長（再掲）
広瀬　明彦	国立医薬品食品衛生研究所 安全性生物試験研究センター 総合評価研究室 室長
福島　孝典	東京工業大学 資源化学研究所 教授
福間　剛士	金沢大学 大学院自然科学研究科 教授
藤田　大介	物質・材料研究機構 先端的共通技術部門 部門長
藤本　俊幸	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 副研究部門長
宝野　和博	物質・材料研究機構 フェロー
松井　真二	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授
松浦　和則	鳥取大学 大学院工学研究科 教授
松田亮太郎	京都大学 物質 - 細胞統合システム拠点 特任准教授 アクチノイド錯体化学研究グループ 主任研究員・グループリーダー
安田　琢麿	九州大学 未来化学創造センター 准教授
山田　啓文	京都大学 大学院工学研究科 准教授
山本　剛久	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
山本　　尚	中部大学 総合工学研究所 所長／分子性触媒研究センター センター長
吉田　　博	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授

（付録 4）研究開発の俯瞰報告書 （2013 年）全分野で対象としている研究開発領域一覧

1．環境・エネルギー分野（CRDS-FY2012-FR-03）

俯瞰区分	研究開発領域
化石資源エネルギー	低品位・未利用固体炭素資源の革新的な改質転換・輸送・利用技術（短期）
	メタンハイドレート利用技術（中長期）
	超高温材料と伝熱技術（中長期）
	革新的電気化学的反応器の基盤技術（中長期）
	超高効率固体酸化物形燃料電池（短期）
	負荷運用性に優れ CO_2 の大幅低減が可能な高効率石炭火力発電技術（短期）
	劣質・未利用固体炭素資源を使用した高度製銑技術（中長期）
	吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒（中長期）
	石油化学品の革新的製造プロセス（中長期）
	次世代型バイオ燃料（中長期）
再生可能エネルギー	浮体式洋上風力発電システムの大規模普及に向けた革新的技術（短期）
	バイオマスエネルギー増産加速化のための生物機能解析基盤技術（中長期）
	地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術（短期）
	超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術（中長期）
	未利用温泉エネルギーによるバイナリー発電システム（短期）
	高温地熱エネルギー革新的利用技術（中長期）
	太陽熱利用の革新的技術・システム（短期）
エネルギー利用技術・システム	低コスト・高効率燃料電池（短期）
	次世代二次電池（中長期）
	高効率ガソリンエンジン（短期）
	中低温熱利用基盤技術（短期）
	エネルギーキャリア基盤技術（短期および中長期）
	再生可能電力による化学品生産技術（中長期）
	次世代エネルギーネットワーク基盤技術（短期および中長期）
	電力国際ネットワーク基盤技術（中長期）

2．ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2012-FR-04）

俯瞰区分		研究開発領域
ヒトの理解につながる生物科学		ゲノム科学
		構造生物学
		分子・細胞生物学
		ケミカルバイオロジー
		発生・再生科学
		脳・神経科学
		数理情報生物学
		物理生物学（生物物理学）
医療・福祉	疾患	悪性新生物
		循環器・代謝疾患
		感染症
		免疫疾患
		精神・神経疾患
		疫学
	医療技術	医薬品創薬および医薬品開発
		医療機器開発
		再生医療
		医療 IT
		医療技術評価
ヒトと社会		ヒト由来試料
		幹細胞・再生医科学に伴う倫理的、法的、社会的課題
		脳・神経倫理
		デュアルユース、バイオセキュリティ、生物化学兵器、バイオテロ対策、など
		被験者保護
		研究不正
		リテラシー・アウトリーチ
食料・バイオマス生産		作物増産技術
		持続農業
		機能性作物
物質・エネルギー生産		バイオ燃料
		化成品原料
		医薬品・食品原料
		資源回収・リサイクル
環境保全		微生物生態・環境ゲノミクス
		動物生態
		植物生理・生態
		生物多様性

3．電子情報通信分野 （CRDS-FY2012-FR-05）

俯瞰区分	研究開発領域
デバイス／ハードウェア	アンビエント・アジャイル・プラットフォーム
	極低電力 ICT 基盤技術
	ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術
ネットワーク	エラスティックネットワーク
	グリーンネットワーク
	フィールド指向ネットワーク
ソフトウェア	ソフトウェア工学
	プログラミングモデルとランタイム
ロボティクス	リアルワールドにおける機能提供技術
	QoL を向上させるためのロボット技術（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）
	ロボット技術の社会的受容
知能 / インタラクション	ヒューマンインターフェイス・インタラクション
	データ認知科学またはソーシャル e サイエンス
	言語、メディア理解
	知能システムの基礎
データベース	モバイル・センサデータベース
	トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術
	グラフ・ストリームマイニング
	データのセキュリティとプライバシー
	ソーシャル・クラウドソース
IT アーキテクチャ	社会システムアーキテクチャ
	柔軟なアーキテクチャ
	CPS アーキテクチャ
CPS（Cyber Physical Systems）	センシング
	アクチュエーション
	プロセッシング
CHS（Cyber-Human Systems）	人間・社会のモデリング
	ソーシャルコンピューティング
	ポリシー（プライバシー）
	ポリシー（著作権）
ビッグデータ	大量データ処理プラットフォーム技術
	データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術
	ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
	天文科学分野におけるビッグデータ
	IT メディア分野におけるビッグデータ
人工知能	統合的人工知能
	強い人工知能

レジリエント ICT	レジリエント・システムソフトウェア
	レジリエントネットワーク
	レジリエントデバイス
	レジリエント情報社会

4．ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2012-FR-06）

俯瞰区分		研究開発領域
グリーンナノテクノロジー	エネルギーを創る	太陽電池
		人工光合成
		燃料電池
		熱電変換
	エネルギーを運ぶ・貯める	蓄電デバイス
		パワー半導体デバイス
		高温超伝導送電
	エネルギーを節約する	グリーンプロセス触媒
		ナノ組織構造制御材料
	環境を守る	元素戦略・希少元素代替技術
		分離機能材料による水処理
		放射性物質除染、減容化
バイオナノテクノロジー		生体材料（バイオマテリアル）
		ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）
		ナノ計測・診断デバイス
		バイオイメージング
ナノエレクトロニクス		超低消費電力ナノエレクトロニクスデバイス
		異種機能三次元集積チップ
		センシングデバイス・システム
ナノテクノロジー・材料科学技術基盤		超微細加工技術
		ＭＥＭＳ／ＮＥＭＳ
		ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化）
		分子技術
		界面制御
		空間・空隙構造制御
		バイオミメティクス
		ナノ計測
		物質・材料シミュレーション
		リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

5．システム科学技術分野 （CRDS-FY2012-FR-07）

俯瞰区分	研究開発領域
意思決定とリスクマネジメント	意思決定
	リスク概念と尺度
	統合・複合リスク・その他リスク
	市場リスク
	信用リスク
	リスクマネジメントの数値計算
モデリング	先端的数理モデリング
	エージェント・ベース・モデルとミクロ・マクロ連携
	統計モデル
	動学的経済モデルと統計整備
	データ同化：新しい戦略分野の開拓
	データマイニング・機械学習
	モデル合成による社会課題解決の展望
	モデルの正則化・最適化
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価
	モデルの評価技術
制御	学習制御／適応制御
	ロバスト制御
	最適制御／予見制御／予測制御
	分散制御／分布制御
	合意・同期・被覆制御
	大規模・ネットワーク制御
	確率システム制御
	故障検出／信頼性設計
	制御の基盤としてのシステム理論
最適化	基礎分野としての最適化
	連続的最適化
	離散的最適化
	最適化計算
	最適化モデリング
	最適化ソフトウェアと応用
ネットワーク論	複雑ネットワークおよび総論
	機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析
	ネットワークに関する離散数学
	ネットワーク解析用ソフトウェア

■研究開発の俯瞰報告書作成メンバー■

田中	一宜	上席フェロー
河村	誠一郎	フェロー／エキスパート
島津	博基	フェロー
永野	智己	フェロー
中本	信也	フェロー
中山	智弘	フェロー／エキスパート
馬場	寿夫	フェロー
宮下	永	フェロー
石原	聰	特任フェロー
魚崎	浩平	特任フェロー
川合	知二	特任フェロー
北澤	宏一	特任フェロー
曽根	純一	特任フェロー
田中	秀治	特任フェロー
村井	眞二	特任フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-FR-06

研究開発の俯瞰報告書

ナノテクノロジー・材料分野（2013年）

Panoramic View of the Nanotechnology / Materials Field (2013)

平成 25 年 3 月　March 2013

独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター　ナノテクノロジー・材料ユニット
Nanotechnology/Materialscience Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076　東京都千代田区五番町 7　K's 五番町
電　　話 03-5214-7481
ファックス 03-5214-7385
U　R　L http://crds.jst.go.jp/

© 2013　JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

CT CTC G CC AATTAATA

T AA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTC G CC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTC G CC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTC G CC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101