

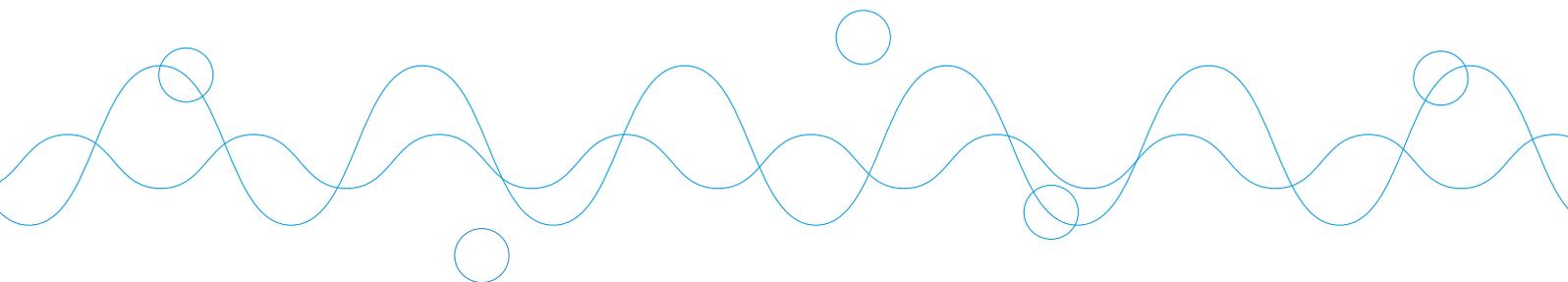
CRDS-FY2009-CR-01

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC T CTCAGACC

G-TeC報告書
【ナノシステム】

G-TeC Report
【Nanosystem】

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



エグゼクティブサマリー

我が国では、第2期科学技術基本計画において「ナノテク・材料」が重点四分野の一つに指定され、第2期、第3期基本計画の下で研究投資が行われてきた。

横断的基盤となるナノテクに重点投資を行う動きは、2000年以降の欧米でも共通して見られる。世界が科学基盤としてのナノテクに期待し、投資を継続してまもなく10年を迎えることになり、研究成果の社会還元を促すべき段階に入る。そして、その際の有力な方向として「社会課題を解決するためのナノテク」という位置付けが浮かび上がる。

第3期基本計画の中で「課題解決のための科学」の重要性が指摘された。日本の将来に向けた課題を設定し、課題解決の戦略を策定・推進していく必要がある、この戦略実行においてナノテクは重要な役割を果たし得る。我が国の強みであるナノテクを核とした研究を、社会のイノベーションに結びつけていく動きが期待される。

実際に今、世界では地球環境問題の解決が急務となった。「環境・エネルギーの課題を解決するためのナノテク」が強く求められている。

これらの背景を受けて、「“ナノテク”の“環境・エネルギー”への展開」をテーマとする「G-TeC (Global Technology Comparison)」を行った。G-TeCは、重要な科学技術領域や研究システムに焦点を当て、海外の状況を調査分析することで、日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

調査には、公開情報に基づく基礎調査、国内外での現地会合などの手法を用いた。「環境・エネルギーのためのナノテク研究」に関する海外動向を分析し、これらの中から「課題解決のためのナノテク研究」に関わる動きを抽出した。その上で「ナノテクを環境・エネルギーの課題に展開していく方策」を検討した。

得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 欧米において、「ナノテク」を「環境・エネルギー」に展開する動きが高まりを見せている。低炭素社会実現に向け、新たな環境・エネルギーシステムを構築しなければならないこと、そのためにナノテクが鍵を握ることが背景としてある。
- 2) 米国では、オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、環境・エネルギーに対する研究が強化された。この中で、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化している。
- 3) 欧州では、ナノテク研究コミュニティの代表的国際会議である「ユーロ・ナノフォーラム」や「ナノテク・ヨーロッパ」において、2008年以降、環境・エネルギーへの展開が主要テーマとして位置付けられてきた。
- 4) 2009年6月開催のユーロ・ナノフォーラムでは、「持続的経済社会のためのナノテク」がメインテーマに選ばれ、「エネルギー」「グリーン製造プロセス」「健康&環境」などの多様な視点に基づく討議が行われている。

- 5) より顕著な変化が見られる米国の現状を分析すると、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤としてナノテクが明確に位置付けられていることが確認できる。
- 6) エネルギー省のスティーブン・チュウ長官は、2009年5月に開催された次年度予算の公聴会で、米国がエネルギー戦略を展開していく基盤として「3つの研究イニシアチブ」を示した。
- 7) 第一が、「エネルギーフロンティア研究センター」である。米国内に46の研究拠点を整備するもので、5年間で7億7,700万ドルの資金を投ずる。基礎研究が目的であり、応用研究は対象としない。そのために、大学を中心とした研究体制を組む。
- 8) 第二が、「エネルギー高等研究計画局」である。基礎ではなく応用を対象とするもので、革新的エネルギー技術を開発するために、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが大きな成果が期待される研究」への資金助成を行う。米国再生・再投資法から4億ドルの資金が充当された。
- 9) そして第三が「エネルギーイノベーション・ハブ」になる。ここでは、基礎や応用に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の研究活動が行われる。緊密に連携した「アンダー・ワンルーフな仕組み」を築き、多様な分野のトップ人材を糾合していく。いわゆる「エネルギー分野の“ベル研究所”」を作り出すことを目指す。一つのハブに5年間で1億ドル以上の資金を投入する。
- 10) 3つのイニシアチブの先頭を切り、2009年4月にエネルギーフロンティア研究センターの採択結果が発表され、最終公募に残った約260件の提案の中から46のセンターが選定された。センターの内訳を見ると、その多くが科学的ブレークスルーをもたらす基盤としてナノテクを位置付けており、エネルギー研究の中でナノテクコミュニティが重要な役割を担っていくことが分かる。
- 11) 今後は、これらのイニシアチブの下で米国におけるエネルギー研究がさらに強化されることになり、その中でナノテクの環境・エネルギーへの展開が促進されていく。
- 12) ナノテクを環境・エネルギーに展開する仕組みとして、米国は「課題解決型基礎研究」を重視している。エネルギーフロンティア研究センターへのファンディングを分析すると、そのことが良く分かる。
- 13) エネルギーフロンティア研究センターの場合、まず未来のエネルギーシステムを描き出し、その上で、システム実現に向けた基礎研究に取り組む46のセンターに資金提供を行っている。この点が、従来のファンディング制度と大きく異なる。

- 14) すなわち、「最初に“社会が求める用途 (Social Use)”を提示し」、その上で「用途実現に必要な基礎研究 (Fundamental Research) を特定し、支援を行う」、いわゆる「課題解決型基礎研究 (Use-Inspired Fundamental Research)」の枠組みとして機能している。
- 15) 米国が課題解決型基礎研究に着目する理由は、「従来の基礎研究からは、ネイチャーなどのトップジャーナルに掲載される論文は輩出されるものの、イノベーションを促すような研究成果が生まれにくかった」ことにある。
- 16) つまり、特定のゴールを持たない「原理探求型 (Curiosity-Driven) 基礎研究」に加え、目指すべきゴールを掲げた「課題解決型基礎研究」への支援をバランス良く強化することで、ナノテクによるエネルギーのイノベーションを促すことを狙っている。
- 17) こうした課題解決型基礎研究の仕組みを創りだすため、エネルギー省は事前に一連のワークショップを行っている。未来のシステムとして「社会が求める複数の用途 (例えば、“水素エネルギーを活かした経済社会”や“太陽エネルギーの高効率利用”など)」を示し、これらの用途を実現するための基礎研究をワークショップで特定していった。そのために、全米のトップクラス研究者を招聘し、基礎と応用両面からの横断的議論を実施している。
- 18) ワークショップの結論として、「複雑で巨大なエネルギー問題には、特定の科学グループだけでは取り組めないこと」、「エネルギーの課題解決には、新たな科学基盤の構築が求められること」、具体的には「“素子”レベルではなく、“原子”レベルの探求が必要になること」、したがって「ナノテク研究を強化することが、課題の本質的解決につながること」など、エネルギーにイノベーションをもたらすための基本要件が明らかになった。
- 19) これらの要件に基づき創出された仕組みが、エネルギーフロンティア研究センターになる。選定されたセンターの多くがナノテクを研究対象に取り上げているが、「ナノテクで解決可能なエネルギーの課題を見つけ出そうとした」ものではなく、「エネルギーの課題解決方策を探求する中で、結果としてナノテクが選出された」ものであることが分かる。
- 20) 「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」「気候変動枠組条約締結会議 (COP)」などでの議論を通じ、世界が協働で解決すべき国際課題として、地球温暖化が明確に位置付けられた。低炭素社会実現に向け、「2020年の中期目標」及び「2050年の長期目標」という形で、各国・地域が果たす役割の具体化が進む。
- 21) 今後は、それぞれの目標達成に向け、生活様式を含む経済や社会全般について「目指すべき未来のシステム」を定めた上で、システム構築に必要な科学的ブレークスルー、そのために求められる基礎研究を特定していくことになる。

- 22) これらの背景の下、低炭素社会構築を目指し、欧州及び米国では「ナノテク」を「環境・エネルギー」に展開する動きが広がっている。特に、米国は、科学的ブレークスルーをもたらす基盤としてナノテクを明確に位置付け、ナノテクを環境・エネルギーに展開する基礎研究を本格化した。
- 23) 米国の取り組みとして、「課題解決型基礎研究」を重視する点も注目される。イニシアチブとして立ち上げた「エネルギーフロンティア研究センター」の中で、最初に目指すべきシステムを明示した上で、システム実現に必要な基礎研究を特定し、支援する手法を取った。基礎研究の成果を社会のイノベーションにつなげることを狙いとす。
- 24) こうした欧米の動向を踏まえると、今後取るべきナノテク研究戦略として、「ナノテク固有の優れた機能や現象をシステムの中に組み込む」、その上で「ナノテクを組み込んだ高機能・高効率システムを環境・エネルギーにおいて活かす」ことが有望な選択肢として浮かび上がってくる。そして、その際には「課題解決につながる基礎研究を強化していく」ことが重要な条件となる。

Executive Summary

G-TeC (Global Technology Comparison) was done on the theme of “nanotechnologies”. G-TeC has the mission to contribute for creating R&D Strategies and/or Science & Technology Policies, by gathering various evidences through surveys. In principle, for gathering evidences, we use three-stepped approaches consisting of basic surveys and site visits.

- At the first step, through basic surveys, we investigate trends and movements of “policies & funding” and “institutes & human resources”, both at academia-sides and industry-sides.
- At the second step, through site visits, we have meetings with top-class research institutes, funding agencies, and other related organizations in the world, and extract important issues for selected research themes.
- Then, at the third step, we evaluate our findings gathered through basic surveys and site visits, and to identify priorities as evidences for creating R&D Strategies and/or Science & Technology Policies.

In this G-TeC, we set two objectives. First, we investigated trends & movements of nanotechnologies globally. And second, we considered their promising R&D scenarios to apply into energy & environment.

Main results are as follows.

- 1) In US and EU, movements to apply nanotechnologies into energy & environment have been enhanced. This is because, for realizing low-carbon societies, it is essential to develop new energy & environmental systems with less carbon emissions, where nanotechnologies should take key roles for creating such an innovation.
- 2) In US, researches for energy & environment have been strengthened, supported by new science & technology policies under President Obama (so called “green new deal”). According to this, nanotech researches for energy & environment have also been activated remarkably.
- 3) In EU, since 2008, nanotech research communities have put their priorities on application into energy & environment, at major international meetings such as “EuroNanoForum” and “Nanotech Europe”.
- 4) At the EuroNanoForum 2009, held in June of 2009, “nanotechnology for sustainable

economy” was selected as a main topic, and concentrated discussions were done from various viewpoints, such as nanotechnology for energy, nanotechnology for eco & energy-efficient industry production, nanotechnology for health & environment, and so on.

- 5) Among these movements, the change in US is outstanding. That is, nanotechnologies are well-positioned as scientific bases for energy innovation, at the new research initiative called “Energy Frontier Research Centers”
- 6) Dr. Steven Chu, secretary of US Department of Energy, announced “three new research initiatives for energy”, at the senate committee on appropriations held in May of 2009.
- 7) The first initiative is “Energy Frontier Research Centers”, where 46 energy research centers are created in US, with the budget of approximately 777 million dollars covering 5 years. This is a supportive mechanism for fundamental researches, not for application. And mainly, funding for research teams at universities.
- 8) The second initiative is “Advanced Research Projects Agency-Energy”, where high-risk & high-reward researches are promoted for creating innovative technologies. This is a supportive mechanism for application researches, not for fundamental. And the budget of approximately 400 million dollars has been prepared from American Recovery and Reinvestment Act.
- 9) The third initiative is “Energy Innovation Hubs”, where a series of researches are promoted not only for fundamental but application and engineering aspects. This is a supportive mechanism to create “under one roof” structures, attracting various top research talents from multidisciplinary fields in a same place. So, hubs can be called “Bell Laboratories for Energy”. More than 100 million dollars are invested to each hub covering 5 years.
- 10) At the beginning of three initiatives, in April of 2009, the award result of Energy Frontier Research Centers was announced, and 46 centers were selected from about 260 final proposals. Reviewing research plans of these centers, it is clear that nanotechnologies are considered as scientific bases for energy innovation in most centers. It means that nanotech research communities should take key roles at energy researches from now on.
- 11) Based on these initiatives, energy researches in US will be enhanced continuously, and nanotech application into energy & environment will also be promoted.

- 12) To evaluate Energy Frontier Research Centers on their characters as funding schemes, it is found that they take importance on the mechanism of “Use-Inspired Fundamental Researches”, for promoting nanotech application to energy & environment.
- 13) In the case of Energy Frontier Research Centers, at first, they envisioned future energy systems for US, and then, selected 46 centers to engage fundamental researches for realizing their visions. This is very different from former funding schemes.
- 14) In other words, firstly, social uses were envisioned, and secondly, fundamental researches for social uses were identified. That means, Energy Frontier Research Centers is just a funding scheme for use-inspired fundamental researches.
- 15) Why they take importance on use-inspired fundamental researches are : Former fundamental researches in energy fields were mostly curiosity-driven researches. As the result, high quality papers published in top journals like “Nature” were often created. But, research outcomes enabling to be a trigger for energy innovation were rarely found.
- 16) Therefore, in addition to curiosity-driven fundamental researches, they enhanced use-inspired fundamental researches, and made well-balanced funding portfolios with two types. Based on these funding portfolios, they are aiming to promote energy innovation derived from fundamental researches.
- 17) In order to design funding schemes for use-inspired fundamental researches, US Department of Energy held a series of workshops before establishment of Energy Frontier Research Centers. At these workshops, firstly, they envisioned multiple social uses in energy fields (economic society utilizing hydrogen energy, high efficient utilization of solar energy, and so on), and then, fundamental researches for these social uses were identified through workshops. Top research talents from multidisciplinary fields were invited all over the US, and crosscutting discussions were done both on fundamental and application aspects.
- 18) As the result, key issues were identified. First, energy problems are too enormous and too complicated. Second, therefore, it is impossible to solve these problems by small research communities covering limited research areas. Third, in order to solve problems, it is indispensable to create new scientific knowledge bases. Forth, especially, it is important to explore scientific disciplines on atomic levels, instead of device levels. Fifth, that means, it is essential to strengthen nanotech researches for energy innovation.

- 19) Based on these assumptions, the funding scheme for Energy Frontier Research Centers was designed. Therefore, the reason why most centers took importance on nanotechnologies was ; It was not the result to find energy problems nanotechnologies can solve, but the result to explore appropriate solutions for energy problems.
- 20) Through discussions at IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), COP (Conference of The Parties) and others, “Global Warming” has been defined as a international problem to be solved all over the world. For realizing low-carbon societies, roles of each country and/or area are being identified with targets of 2020 and 2050.
- 21) Therefore, each country and/or area should envision their future energy & environmental systems with various aspects, including life styles and economic & social conditions. And, based on these targets, they should identify fundamental researches necessary for their targeted systems.
- 22) Because of these backgrounds, in US and EU, efforts to apply nanotechnologies into energy & environment are expanding. Especially, in US, nanotechnologies are well-positioned as scientific bases for energy innovation, and nanotech researches for energy & environment have been activated.
- 23) In US, they take importance on use-inspired fundamental researches. With the new research initiative of Energy Frontier Research Centers, firstly, they envisioned targeted future systems, and secondly, identified fundamental researches for their targeted systems. They aim to increase research outcomes enabling to promote energy innovation.
- 24) Considering these trends in US and EU, it would be a promising R&D scenario for nanotechnologies. That is, firstly, unique and superior functions and/or phenomena derived by nanotechnologies are implemented as systems. Secondly, these nanosystems are utilized as solutions for energy & environmental problems. And thirdly, in this scenario, use-inspired fundamental researches are enhanced in order to maximize research outcomes towards energy innovation.

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 目的及び方法	1
2. 調査結果	2
2.1 国内外でのナノテク実用化状況	3
2.2 環境・エネルギーを巡る欧米のナノテク研究	8
2.2.1 欧州における注目動向	9
a) ナノテク・ヨーロッパ&ユーロ・ナノフォーラム	
b) ケンブリッジ大学	
2.2.2 米国における注目動向	13
a) 米国科学財団	
b) 米国環境保護庁	
c) 米国エネルギー省	
d) カリフォルニアナノシステム研究所	
2.3 米国のエネルギーフロンティア研究センター	23
2.3.1 エネルギー省のイニシアチブ	24
2.3.2 研究現場の反応と評価	27
a) カリフォルニア工科大学	
b) 南カリフォルニア大学	
2.3.3 センターの設立経緯	31
2.3.4 センターの選定方法	34
2.3.5 センターの研究活動	38
2.3.6 領域毎の課題解決型基礎研究	48
a) 水素の製造・貯蔵・利用	
b) 太陽エネルギーの利用	
c) 超伝導	
d) 固体素子照明	
e) 先端原子力システム	
f) 運輸燃料の無公害・高効率燃焼	
g) エネルギーシステムのための地球科学	
h) 電気エネルギーの貯蔵	
i) 極限環境下の材料	
j) エネルギーのための触媒	
3. 調査結果の総括	73
参 考	79

1. 目的及び方法

我が国では、第2期科学技術基本計画（2001年～2005年）において「ナノテク・材料（以下、ナノテクと略記）」が重点四分野の一つに指定され、第2期、第3期基本計画（2006年～2010年）の下で研究投資が行われてきた。

横断的基盤となるナノテクに重点投資を行う動きは、2000年以降の欧米でも共通して見られる。世界が科学基盤としてのナノテクに期待し、投資を継続してまもなく10年を迎えることになり、研究成果の社会還元を促すべき段階に入る。そして、その際の有力な方向として「社会課題を解決するためのナノテク」という位置付けが浮かび上がる。

第3期基本計画の中で「課題解決のための科学」の重要性が指摘された。日本の将来に向けた課題を設定し、課題解決の戦略を策定・推進していく必要があり、この戦略実行においてナノテクは重要な役割を果たし得る。我が国の強みであるナノテクを核とした研究を、社会のイノベーションに結びつけていく動きが期待される。

実際に今、世界では地球環境問題の解決が急務となった。「環境・エネルギーの課題を解決するためのナノテク」が強く求められている。

これらの背景を受けて、「“ナノテク”の“環境・エネルギー”への展開」をテーマとする「G-TeC (Global Technology Comparison)」を行った。

G-TeCは、重要な科学技術領域や研究システムに焦点を当て、海外の状況を調査分析することで、日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

本調査では、G-TeCの目的を次のように定めた。

- ・海外における「環境・エネルギーのためのナノテク研究動向」の分析
- ・上記の中の「課題解決のためのナノテク研究動向」の分析
- ・これらに基づく「ナノテクを環境・エネルギーの課題に展開していく方策」の検討

調査方法については、「基礎調査（各種公開情報に基づく国内外における“政策・資金”“機関・人材”の動向分析など）」「国内現地会合（産業分野別関係者ヒヤリングなど）」「海外現地会合（研究拠点、ファンディング機関との討議など）」に重点を置いた上で、目的に応じ、適宜「有識者会合」などの他の手法を組み合わせた。

海外現地会合を持った主な機関として、「ケンブリッジ大学」「米国科学財団」「カリフォルニアナノシステム研究所」「カリフォルニア工科大学」「南カリフォルニア大学」が挙げられる。

得られた結果を、以下にまとめる。

2. 調査結果

最初に、ナノテクの実用化状況を把握するため、国内外の関連調査動向を調べた。その結果、米国やアジアの調査機関などが「公開情報に基づくナノテク実用化事例」を抽出していることが分かった。

これらの調査は、2000年以降の各国・地域での継続的研究投資を受けて、ナノテクの成果が社会でどの程度実用化されているのかを分析、推定することを大きな目的としている。情報誌や企業ウェブなどの公開情報に基づくため、用いた情報ソースにより抽出事例の用途や地域区分に偏りは見られが、いずれの結果も、ナノテクがすでに産業の多様な用途に展開されている実態を示唆している。

そこで次に、これらのポイントを踏まえ、本調査の重点対象として設定した「環境・エネルギー」の領域において、ナノテクを巡る世界の動向を調べた。

その結果、欧州ではナノテク研究コミュニティ全体として環境・エネルギーへの展開を強める動きが見られることが分かった。

こうしたコミュニティ全体の動きに加え、個々の研究現場においても、ナノテクを環境・エネルギーに展開する動きが見つかる。

その上で、欧州の動きと比較しながら、米国における動向を調べた。

その結果、米国ではより明瞭な動きが見られ、オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化していることが分かった。

具体的には、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤として、ナノテクが明確に位置付けられている。

今後は、これらのイニシアチブの下で米国におけるエネルギー研究がさらに強化されることになり、その中でナノテクの環境・エネルギーへの展開が促進されていく。

以下に、実施した調査内容及び得られた結果を、項目毎にまとめて示す。

2.1 国内外でのナノテク実用化状況

ナノテクの実用化状況を把握するため、最初に、国内外の関連調査動向を調べた。その結果、米国やアジアの調査機関などが「公開情報に基づくナノテク実用化事例」を抽出していることが分かった。これらの調査は、2000年以降の各国・地域での継続的研究投資を受けて、ナノテクの成果が社会でどの程度実用化されているのかを分析、推定することを大きな目的とする。

代表例として、図表1に米国シンクタンクのウッドロー・ウィルソンによる調査結果を、図表2に科学技術振興機構・研究開発戦略センターが行った分析を示した。情報誌や企業ウェブなどの公開情報に基づくため、用いた情報ソースにより抽出事例の用途や地域区分に偏りは見られが、いずれの結果も、ナノテクがすでに産業の多様な用途に展開されている実態を示唆している。

そこで、本調査ではより詳細な現状を把握するため、産業界への直接ヒヤリグを試みた。具体的には分析対象を“有機部材”と“無機部材”に大別した上で、「化学」「電気・電子」「繊維」などの複数の関係者との討議を持ち、ナノテクの適用実態を追跡した。

参考として、有機部材と無機部材のそれぞれについて、代表的ヒヤリング結果をまとめて示した。

▽「有機部材」の関係者ヒヤリング例

- a) 「商品」や「製造プロセス」の形でナノテクの実用化は進んでいる。
- b) 実用化されているナノテクの多くは、ナノテクをテーマとした研究から生まれたものではない（商品開発の過程で生まれた研究成果の中に、ナノテクに区分できる成果が相当数含まれているという趣旨）。
- c) 企業はナノレベルの物性に着目し製品化を急ぐ傾向が高く、基本原理や機能メカニズムまで解明していないケースが多い。
- d) 大学や公的機関が担うナノテク研究として、「作用の発現機構などの基本原理や基本データ」に関する研究を求めている。
- e) 企業内部では、「基本原理や基本データ」をテーマとする研究には取り組みにくく、取り組めた場合でも商品開発が終了した段階で、研究がストップしてしまう。
- f) 大学や公的機関がナノテクの基本原理や基本データを対象とする研究を提案すれば、企業側が“出口としての実用領域”を提示する可能性はある。

▽「無機部材」の関係者ヒヤリング例

- a) 「商品」や「製造プロセス」の形でナノテクの実用化は進んでいる。

- b) ただし、実用化されているナノテクは、これまでは企業内部で生まれた研究成果が中心だった。
- c) しかし、ここ2～3年で「大学や公的研究機関で生まれた研究成果を導入する」、あるいは「これらの成果を企業内の研究開発に活かす」動きが増えてきている。
- d) これまでのナノテクの研究成果を国内外で比較すると、「産業界での今後の実用可能性」、すなわち「これまでに蓄積されたナノテクの研究インフラ（データ、知識、ノウハウなど）としての質や量」の面では、日本が一番充実しているのではないか。
- e) この意味で、今後は「国や公的研究機関によるナノテク研究」を「産業界での実用化の動き」につなげる方策が重要になる。
- f) 「ナノテクの研究成果を実用に活かす」ための流れは、「“数ナノ”レベルの領域で発現する材料表面や界面の機能」を発見し、「発見した新たな機能を量産レベルで安定して再現するための“数十ナノ”レベルでの粒子制御プロセス」を見いだす、という形に整理できる。
- g) このため、第一に「材料表面や界面での現象を理解する」ための科学が求められる。
- h) 第二に、「粒子特性を設計、制御する（つまり、数ナノレベルの粒子が凝集して数十ナノレベルの粒子になるプロセスを設計、制御する）」ための技術が必要になる。
- i) ナノテクの実用化用途を見ると、企業にとって事業規模が「100～1,000億円台」となるものは少なく、「5～10億程度」のものが主流を占める。したがって、ナノテクの研究成果を実用化する主体は、「大企業」よりも「中堅企業」になる。
- j) 実際に日本の中堅企業の中には、製造プロセスにナノテクを応用して成功しているケースがかなり見られる。ただし、これら企業の多くは「粒子を設計・制御するための技術」を開発する力は強いが、「表面・界面現象を理解するための科学」を研究する力は弱い。
- k) 以上から、今後のナノテク実用化を促進するには、「中堅企業が開発する“ナノテク技術”」と「大学や公的研究機関が研究する“ナノテク科学”」を結びつける戦略として、「重点対象とすべき領域」と「そのための仕組み」を具体化していくことが有効な方策となるのではないか。

これらのヒヤリング結果をもとにナノテクの実用化状況を推定すると、以下の特徴が導き出される。

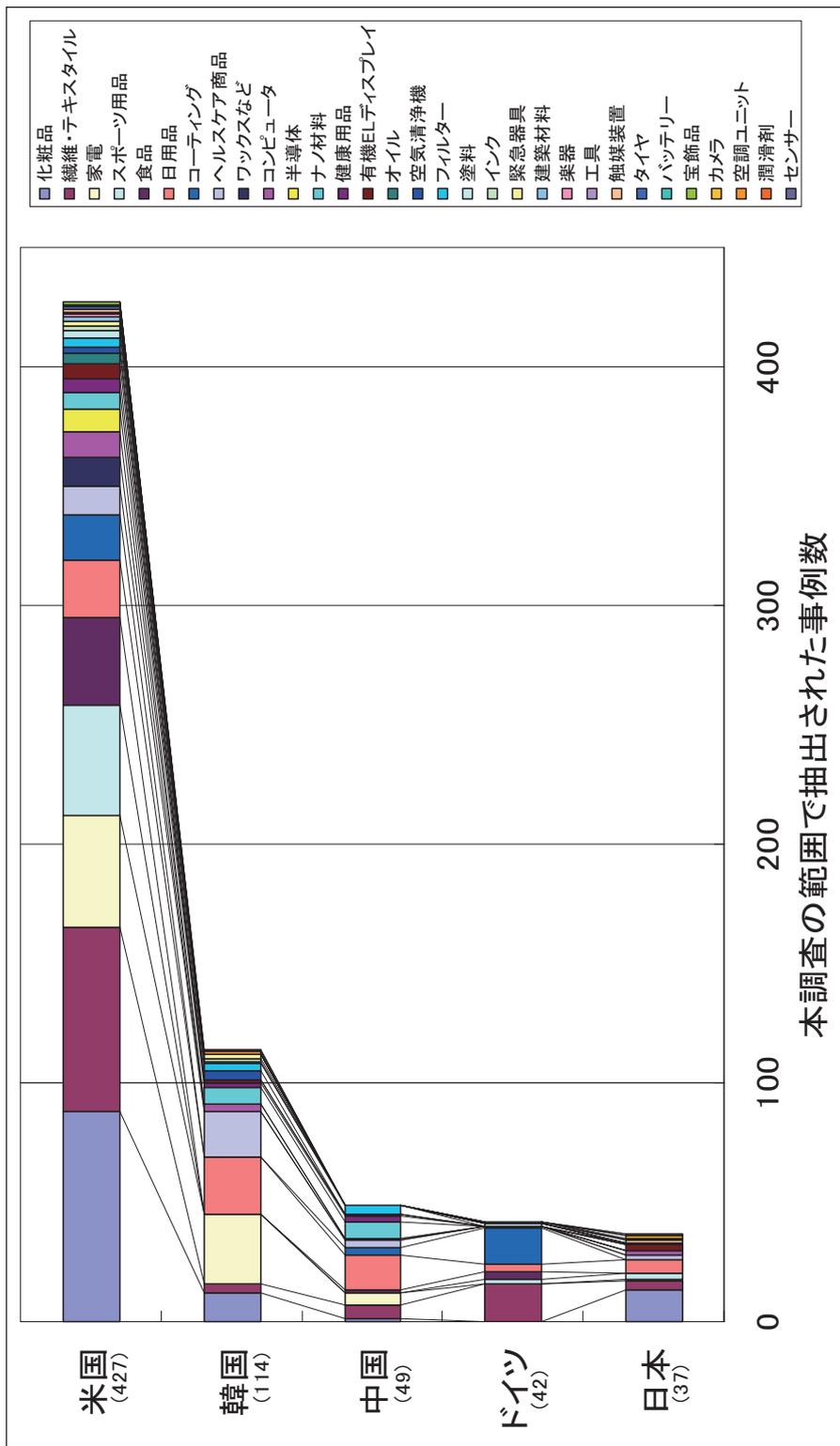
- 1) 産業界の多様な分野において、「商品」や「製造プロセス」の形でナノテクの実用化が進んでいる。
- 2) 企業ではナノテクの応用が中心に据えられており、基礎研究はあまり行われていない。
- 3) 商品化の課題解決を目的に基礎研究に取り組む場合はあるが、開発が完了した段階で研究がストップしてしまう。
- 4) したがって企業は、「大学が取り組むナノテクの基礎研究」に期待しており、商品化の課題解決に資する（企業の技術ニーズに合致した）ナノテクを求めている。

上記想定に従えば、「大学の基礎研究」と「企業の技術ニーズ」の結びつきを深めることで、ナノテクの実用化が一層促進されることになる。そのために、二つの融合に適した研究領域を具体化していくことが必要になる。

そこで以下はこれらのポイントを踏まえ、本調査の重点対象として設定した「環境・エネルギー」の領域において、ナノテクを巡る世界の動向を調べた。

図表1 ウッドロー・ウィルソンによるナノテク実用化事例の調査

各国・地域における実用化事例／市販品



※「化粧品」「繊維・テキスタイル」等の品名区分は、報告書データをもとにJST・CRDSにて実施

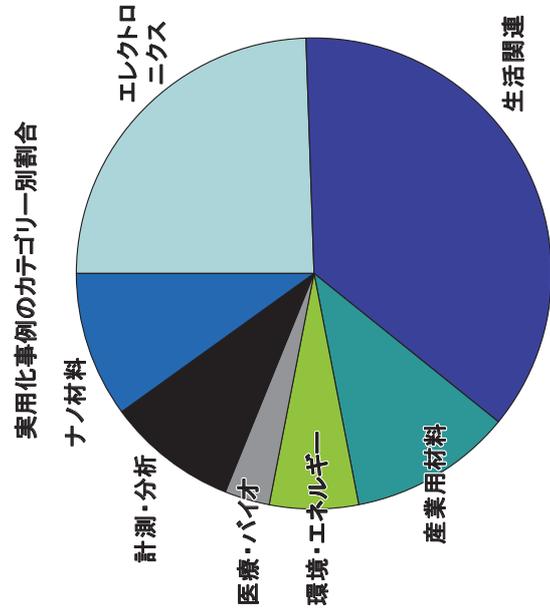
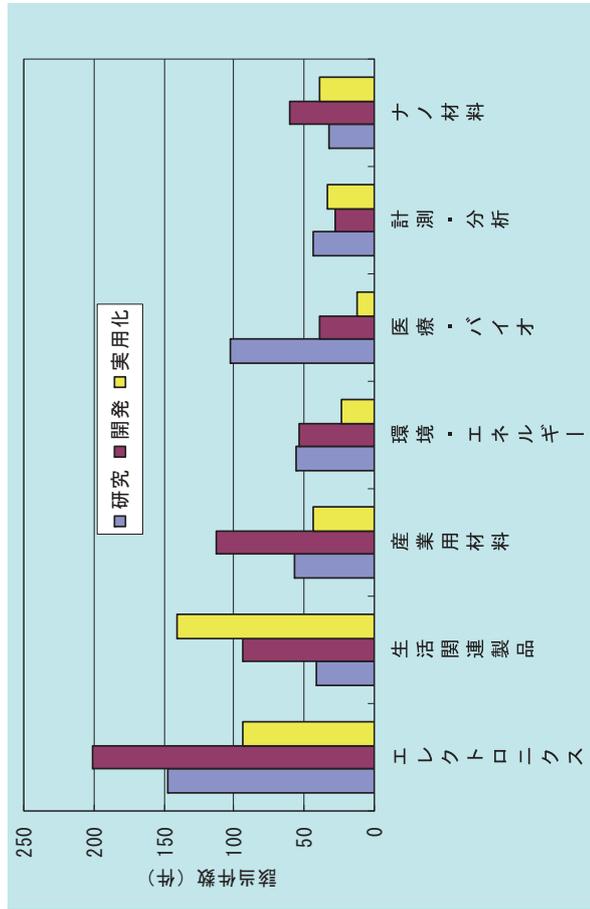
(出典) Woodrow Wilson International Center for Scholars「Consumer Products Inventory of Nanotechnology Products」に基づきJST・CRDSにて編集

図表2 科学技術振興機構・研究開発センターによるナノテク実用化事例の調査

ナノテクノロジーの事例を調査し、「研究段階」、「開発段階」、「実用化段階」に分類。事例数は約1,400件。2004～2007まで集積。情報元は、日経先端技術、日経ナノビジネス、週刊ナノテク等の雑誌、新聞、主なファンディング、インターネット検索など。日経先端技術、日経ナノビジネス、週間ナノテクは全情報を網羅的に抽出、その他は適宜抽出。

事例の整理(件数)

	エレクトロニクス	生活関連製品	産業用材料	環境エネルギー	医療バイオ	計測分析	ナノ材料	合計
研究	147	41	57	56	103	43	32	479
開発	201	94	113	54	39	28	60	589
実用化	94	141	43	23	12	34	39	386
合計	442	276	213	133	154	105	131	1,454



2008.12 JST研究開発戦略センター(CRDS)調べ

2.2 環境・エネルギーを巡る欧米のナノテク研究

環境・エネルギーの領域でナノテクを巡る世界動向を概観した結果、「環境・エネルギー」「ナノテク」のいずれも分野横断的特徴を持つため、関連する多様かつ多数の動きが見られることが確認された。

そこで、本調査の趣旨を踏まえ、「ナノテクの環境・エネルギーへの展開」という形で明確に区分できる動きにのみ対象を絞り、各国・地域の状況を比較した。その結果、欧州及び米国において、注目すべき動きが見られることが分かった。

欧州については、EU全体、及び英国、ドイツ、フランスなど各国での動きを概観した結果、ナノテク研究コミュニティ全体として環境・エネルギーへの展開を強めようとする動きが確認された。こうしたコミュニティ全体の動きに加え、個々の研究現場においても、ナノテクを環境・エネルギーに展開する動きが見つかる。

一方、米国では、「米国科学財団」「米国エネルギー省」「米国環境保護庁」などを核とした動きに加え、米国全体としての活動の高まりが見られた。

オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化している。具体的には、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤として、ナノテクが明確に位置付けられている。

欧州、米国のそれぞれについて、注目動向をまとめて示した。

2.2.1 欧州における注目動向

欧州については、EU全体、及び英国、ドイツ、フランスなど各国での動きを概観した結果、ナノテク研究コミュニティ全体として環境・エネルギーへの展開を強めようとする動きが確認された。

具体的には、代表的国際会議である「ユーロ・ナノフォーラム」や「ナノテク・ヨーロッパ」において、2008年以降、ナノテクの環境・エネルギーへの展開が主要テーマとして位置付けられている。

2009年6月開催のユーロ・ナノフォーラムでは、「持続的経済社会のためのナノテク」がメインテーマに選ばれ、「エネルギー」「グリーン製造プロセス」「健康&環境」などの多様な視点に基づく討議が行われた。

こうしたコミュニティ全体の動きに加え、個々の研究現場においても、ナノテクを環境・エネルギーに展開する動きが見つかる。

ナノテクのトップクラス研究拠点の代表として現地会合を持ったケンブリッジ大学の材料科学・冶金部門では、有機と無機をハイブリッド化したナノコンポジットを環境・エネルギーに用いる研究が進められている。

「無機材料の特性（例えば、熱的安定性や機械的強度）」と「有機材料の特性（例えば、光学特性や導電特性）」を合わせ持つ機能材料を創出することで、「環境センサーや二次電池向けの新材料」「希少物質の代替」「グリーン製造法（製造温度の低下、製造工程の簡素化）」などに適用することを狙っている。

得られた調査結果を、以下にまとめる。

a) ナノテク・ヨーロッパ&ユーロ・ナノフォーラム

ナノテク・ヨーロッパ及びユーロ・ナノフォーラムについては、環境・エネルギーに関わる動きとして、以下の事項が抽出された。

- 1) 2008年9月開催のナノテク・ノーザンヨーロッパ (Nanotech Northern Europe) では、「環境・エネルギー問題の持続的解決策 (Sustainable Solutions for Energy and Environment)」「地球規模の水資源問題へのナノテクによる挑戦(Nanotechnology and Global Challenge of Access to Clean Water)」「環境調和型建築のためのナノテク (Nanotechnology for Environmentally-Friendly Construction)」などがメインテーマに選ばれている。
- 2) 2009年9月開催のナノテク・ヨーロッパでは、「エネルギー」のセッションが設けられ、本セッションにて「量子ドットや色素増感を用いた太陽電池」「有機と無機をハイブリッド化した太陽電池」「水素や二酸化炭素を分離、精製、圧縮するためのナノテク及びナノ科学」などが議論されている。
- 3) さらに、2009年6月開催のユーロ・ナノフォーラムでは、「持続的経済社会のためのナノテク (Nanotechnology for Sustainable Economy)」がメインテーマに選ばれ、「エネルギー (Nanotechnology for Energy)」「グリーン製造プロセス (Nanotechnology in Eco- & Energy-Efficient Industry Production)」「健康&環境 (Nanotechnology for Health & Environment)」などの多様な視点に基づく討議が行われている。

- ・エネルギーのセッションでは、「太陽電池」「二次電池」「水素生産&貯蔵」「熱電変換 (Thermoelectricity)」などが取り上げられている。
- ・グリーン製造プロセスのセッションでは、化学、建設、運輸、製薬、繊維、食品、肥料などを対象に、「持続的製造 (Sustainable Production)」や「ナノテクを基盤とする製造 (Nanomanufacturing)」などが検討されている。
- ・健康&環境のセッションでは、「汚染計測&修復 (Pollution Monitoring & Remediation)」「水処理&廃棄物処理 (Water Treatment & Waste Management)」などが検討されている。

以上から、欧州の研究コミュニティは、2008年以降、代表的国際会議である「ユーロ・ナノフォーラム」や「ナノテク・ヨーロッパ」において、ナノテクを環境・エネルギーに展開するための検討を主要テーマとして位置付けてきたことが分かる。

b) ケンブリッジ大学

トップクラス研究拠点として注目したケンブリッジ大学については、中核機関の一つである材料科学&冶金部門のアンソニー・チータム (Anthony Cheetham) 教授との現地会合を持った。

会合を通じ把握した主な事項をまとめると、次のようになる。

- 1) チータム教授は、「無機-有機ハイブリッドフレームワーク材料 (Hybrid Inorganic-Organic Framework Materials)」などを中核テーマとする研究グループを率いている。
- 2) 無機-有機ハイブリッドフレームワーク材料は、「無機材料の骨格 (inorganic structural elements)」と「有機材料の機能部分 (organic structural elements)」より成る「結晶材料 (completely ordered crystalline materials)」であり、分子レベルのナノコンポジットに相当する。
- 3) 「無機材料の特性 (例えば、熱的安定性や機械的強度)」と「有機材料の特性 (例えば、光学特性や導電特性)」を合わせ持つ「新規機能材料 (emerging functional materials)」の創出を基本コンセプトとするため、広範な用途に展開できる。
- 4) 「環境・エネルギー」への応用においても、「環境センサーや二次電池向けの新規材料開発」に加え、「希少物質の代替」「製造温度の低下」などの多様な可能性がある。
- 5) 具体的テーマとして、例えば、「二酸化炭素の固定」や「水素の吸蔵」などに応用可能な「吸着用の多孔質材料」の研究が挙げられる。ハイブリッドフレームワーク材料は、「他のナノポーラス材料と比較し、“空隙の大きさ、配置、吸着力”を高精度に制御することが可能」「ニッケル系水素吸蔵合金などと比較し、金属を置き換えることで、大幅な軽量化が可能」などの差異性を持つ。
- 6) 「環境センサー」への応用については、「メソポーラスシリカ-酵素系」の発展型として、「ハイブリッドフレームワーク材料-酵素系」を用いたセンシングが期待される。
- 7) 「二次電池」への応用については、「電解質用のハイブリッドフレームワーク材料」の研究を開始している。
- 8) 「希少物質の代替」については、「燐光体用のハイブリッドフレームワーク材料」として、「希土類元素をカルシウムやストロンチウムで置き換えた新規材料」の開発に取り組んでいる。
- 9) 上記研究の中で、従来材料と比較し、「材料の製造温度を下げる効果が得られる」ことも確認されている。ハイブリッドフレームワーク材料は、「材料の製造温度を下げる」「製造工程を簡素化する」などの「グリーン製造法 (Green Manufacturing) の実現」においても大きな可能性を持つ。

10) チータム教授は、特定テーマを対象とした場合の「ハイブリッドフレームワーク材料の研究から実用化までに要する期間」を、15年～20年と想定している。

以上から、欧州のトップクラス研究拠点であるケンブリッジ大学においても、推進する先端研究領域の中に、ナノテクを環境・エネルギーに展開する動きが組み込まれている様子が見て取れる。

2.2.2 米国における注目動向

欧州で見られた「ナノテク研究コミュニティ全体として環境・エネルギーへの展開を強めようとする動き」を踏まえ、米国についても全体の動きを概観した上で、以下の機関を巡る注目動向などを調べた。

- ・ 米国科学財団
ナノテクに関する世界のビジョナリー・リーダーの一人であるマイク・ロコ博士との現地会合を実施。
- ・ 米国環境保護庁
2007年発行の「ナノテク白書」のポイントを抽出。
- ・ 米国エネルギー省
「重点研究領域」「研究拠点活動」「ファンディング制度」などのポイントを抽出。
- ・ カリフォルニアナノシステム研究所
ナノテクのトップクラス研究拠点として現地会合を実施。
- ・ エネルギーフロンティア研究センター
ナノテクを環境・エネルギーに展開するための「研究イニシアチブ」としてのポイント抽出。

その結果、米国ではより明瞭な動きが見られ、オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化していることが分かった。

具体的には、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤として、ナノテクが明確に位置付けられている。

調査対象毎に、得られた結果を以下にまとめる。

a) 米国科学財団

米国科学財団については、ナノテクに関する世界のビジョナリー・リーダーの一人であるマイク・ロコ博士との現地会合を持った。

会合を通じ把握した主な事項をまとめると、次のようになる。

1) マイク・ロコ博士は、「環境・エネルギー問題において“ナノテクがもたらす社会的価値”」を、次のように位置付けている。

- ・ ナノテクは、「ナノ領域固有の現象や機能」を用いた「新たな科学原理や技術」を生み出す。
- ・ この科学原理や技術を活かすことにより、「環境・エネルギー問題を“経済効率を維持しながら解決する”」ことがはじめて可能になる。
- ・ すなわち、ナノテクは、環境・エネルギー問題が抱える「“技術面”と“経済面”」の二つの課題を同時に解決する」ための画期的ツールである。

2) また、ナノテクの研究から実用に至るまでのプロセスを、次の3段階に区分している。

- ・ 第一が、「ナノ領域固有の新たな現象・機能を発見していく」段階。
- ・ 第二が、これらの現象・機能を「装置・システムの形で発現させる（つまり、ナノテクを用いた“性能の高い”装置やシステムを開発する）」段階。
- ・ 第三が、これらの現象・機能を「装置・システムとして制御する（つまり、“性能の高さ”“性能の再現性”及び“妥当な価格”の全てを満たした装置やシステムを開発する）」段階。

3) マイク・ロコ博士は、2000年から本格化したナノテクの研究投資は、現在、上記区分の「第二段階」にあり、2015年～2020年に「第三段階」を迎えるものと想定している。

4) つまり、「15～20年にわたり、ナノテクへの研究投資を続ける」ことが、環境・エネルギー問題が抱える“技術面”と“経済面”の課題を同時に解決できる「ナノテク装置・システムの実用化」につながると主張している。

5) 実際に、エネルギー問題を巡るナノテクの動きを整理すると、次のような状況が見取れる。

- ・ エネルギー問題の解決には「“化石エネルギー”から、太陽光などの“再生可能エネルギー”への転換」が必要であり、そのために「再生可能エネルギーを利用するための“ナノテクを用いた高性能な装置・システム”」が研究されている。

- ・これらの研究の中から、例えば、米国が軍事・防衛用として開発した「変換効率が50%に達する太陽電池」などが生まれている。
 - ・“技術面”に限れば、根本的解決を可能にする装置・システムが出現するようになっており、ナノテク発展の第二段階である「ナノ領域固有の現象・機能を装置・システムの形で発現するレベル」には至っている。
 - ・しかしながら、「これまでに見出されたナノテクの科学原理や技術」の範囲では、上記の高効率太陽電池を含め、“性能の高さ”は実現できても、“性能の再現性”や“妥当な価格”を同時に満たすことはできない。
- 6) 以上の現状を踏まえると、エネルギー問題が抱える“技術面”と“経済面”の課題を同時に解決するには、ナノテク発展の第三段階につながる「新たな科学原理や技術」を探索していかなければならない。
- 7) 探索の結果として「ナノ領域固有の現象・機能を装置・システムとして制御する」ことが可能になれば、環境・エネルギー問題を根本的に解決する以下のシナリオが実現できることになる。
- ・短期的には、「現行の装置・システムが持つ“外部不経済性（つまり、市場原理に委ねた場合、価格が高すぎて普及しない）”を「各種の政策的支援（補助金や環境規制など）で内部化する」ことにより導入を促し、当面の対応を図っていく。
 - ・これらの対応により、エネルギー問題の深刻化は緩和されるが、一方で、過大な資金負担などの蓄積が続けば、国家財政が疲弊していくことになる。
 - ・そこで、中長期の戦略として、上記対応と平行し、「“性能の高さ”“性能の再現性”及び“妥当な価格”の全てを満たした装置・システム」の開発につながる「“ナノテク発展の第三段階”の研究」を継続・強化していく。
 - ・こうした取り組みが「“技術面”と“経済面”の課題を同時に解決できる装置・システムの実用化」に結びついた段階で、新たなエネルギー産業の流れが拡大し、ナノテクによる社会イノベーションがもたらされる。
- 8) 上記方向を目指す具体的動きの一つとして、米国科学財団はカリフォルニア工科大学のハリー・グレー教授率いる研究拠点（Chemical Bonding Center in the Direct Conversion of Sunlight into Chemical Fuel）への支援を行っている。太陽からの化学燃料生成をテーマに、ナノテクの科学原理が研究されている。

以上から、ナノテクは環境・エネルギー問題の根本的解決を可能にする優れた技術基盤であり、「ナノ領域固有の現象・機能を装置・システムとして制御する」ための科学原理を探索していくことが、今後の求められる研究方向となることが示唆される。

b) 米国環境保護庁

米国環境保護庁については、ナノテクに関わる動きとして、以下の事項が抽出された。

- 1) 2007年2月に、米国環境保護庁は「ナノテク白書 (Nanotechnology White Paper)」を発行している。
- 2) 白書の中で、ナノテクの「環境分野への応用 (Environmental Benefits of Nanotechnology)」と「環境影響の評価 (Risk Assessment of Nanomaterials)」について言及している。
- 3) この内、ナノテクの環境分野への応用については、次の4つの柱を提示している。
 - ・ 低環境負荷の製造 (Green Manufacturing)；製造プロセスの省資源化、効率化など
 - ・ 環境に優しいエネルギー (Green Energy)；太陽光、水素、エネルギー伝送、汚染防止、照明など
 - ・ 環境修復及び対策 (Environmental Remediation/Treatment)；オフサイト型の地下水汲み上げ浄化方式の代替、ナノ吸着材料、ナノコーティング酵素など
 - ・ 環境センシング (Sensors)；化学汚染や生物汚染の計測、ナノスケールのセンシングシステムなど

以上から、環境分野の政策サイドにおいても、ナノテクを環境・エネルギーに展開するための検討が進められていることが分かる。

c) 米国エネルギー省

米国エネルギー省は、ナノテクを環境・エネルギーに展開するための多面的な活動を行っている。具体的には、以下の動きなどが抽出された。

- 1) 環境分野のトップクラス研究機関である米国エネルギー省のパシフィックノースウェスト国立研究所は、「メソポーラスシリカ（数ナノ～数十ナノの大きさの均一で規則的な細孔を持つ二酸化ケイ素の粉体）」と「酵素」を結び付けた「環境センシングシステム、環境修復システム、燃料電池システム」などを研究している。
- 2) 米国エネルギー省の国立再生可能エネルギー研究所は2008年7月に、「Nano Renewable Energy Summit」を開催し、サミットにて「先端ナノテクノロジーを対象に、再生可能エネルギー分野での実用化や経済波及効果」などを討議している。
- 3) ナノテクのトップクラス研究機関として、米国エネルギー省傘下の6つの国立研究所が、以下の5拠点を核としたナノテク研究を展開している。

- ・ Center for Nanoscale Materials、アルゴンヌ国立研究所
- ・ Center for Functional Nanomaterials、ブルックヘブン国立研究所
- ・ Molecular Foundry、ローレンスバークレー国立研究所
- ・ Center for Nanophase Materials Sciences、オークリッジ国立研究所
- ・ Center for Integrated Nanotechnologies、サンディア国立研究所、ロスアラモス国立研究所

- 4) 2008年7月に、米国エネルギー省の Under Secretary of Science（当時）であるレイモンド・オーバック（Raymond Orbach）博士が、「Assuring a Secure Energy Future」と題する講演の中で、「今後のナノテク戦略（Nanotechnology：The New Generation）」について言及し、ナノテクをエネルギーに展開するための9つの柱を提示している。

- ・ 太陽光による水資源からの水素製造（Scalable methods to split water with sunlight for hydrogen production）
- ・ 常温で動作する水素吸蔵材料（Reversible hydrogen storage materials operating at ambient temperatures）
- ・ 太陽エネルギーを20%の効率、かつ百分の一のコストで利用する方策（Harvesting of solar energy with 20 percent power efficiency and 100 times lower cost）

- ・エネルギー効率を二倍に高めた固体素子照明 (Solid-state lighting at 50 percent of present power consumption)
 - ・無公害かつ高効率な製造を可能にする触媒 (Highly selective catalysts for clean and energy-efficient manufacturing)
 - ・輸送機器等に用いる高強度かつ軽量な材料 (Super-strong light-weight materials to improve efficiency of cars, airplanes, etc.)
 - ・ギガワット級の電力伝送系 (Power transmission lines capable of 1 gigawatt transmission)
 - ・ナノ材料を基盤とする低コスト燃料電池、二次電池、熱電変換素子、キャパシター等 (Low-cost fuel cells, batteries, thermoelectrics, and ultra-capacitors built from nanostructured materials)
 - ・バイオを基盤とする効率的かつ選択的な材料合成及びエネルギー獲得方法 (Materials synthesis and energy harvesting based on the efficient and selective mechanisms of biology)
- 5) その中で、今後の注目すべき動きとして、一つの研究拠点に対し年間200～500万ドル規模の資金を5年間提供する枠組みとなる「エネルギーフロンティア研究センター (Energy Frontier Research Centers、ナノテクを直接対象とした研究プログラムではない)」を紹介している。

以上から、重点領域の研究、研究拠点の活動、ファンディング制度の創設などの多様な取り組みを通じ、環境・エネルギーへの展開を図る動きが見て取れる。

d) カリフォルニアナノシステム研究所

カリフォルニアナノシステム研究所については、最初に所長のレオナルド・ローム (Leonard Rome) 博士との会合を持ち、組織の設立経緯や特徴などについて以下の事項を明らかにした。

- 1) カリフォルニアナノシステム研究所 (CNSI ; California NanoSystems Institute) の設立は、「2000年に、カリフォルニア州知事が大学と産業界との連携強化を提唱し、そのための拠点設立資金を予算化した」ことを契機としている。
- 2) カリフォルニア州内の大学から拠点設立の提案が集められ、「カリフォルニア大学ロサンゼルス校」と「カリフォルニア大学サンタバーバラ校」の共同提案による「“ナノテク”を対象としたCNSI」が拠点構想の一つに選ばれた。
- 3) カリフォルニア州から1億ドルの拠点設立資金が提供され、この内、6,500万ドルがカリフォルニア大学ロサンゼルス校に、3,500万ドルがカリフォルニア大学サンタバーバラ校に分配された。カリフォルニア大学ロサンゼルス校に設立された拠点が、CNSIの本部として位置付けられている。
- 4) カリフォルニア大学ロサンゼルス校は、拠点設立に際し、1億1,000万ドルの独自予算を追加出資し、総額で1億7,500万ドルをかけて本拠点を設立した。
- 5) 追加予算が必要になった理由として、拠点に参画する「医学系部門」「工学系部門」「物理学、化学、生物学などを専門とする各カレッジ」の融合を促進する目的で、「これらの部門からほぼ等距離にある“建設単価が非常に高いキャンパス区画”」での拠点設立にこだわったことなどが挙げられている。
- 6) CNSIは、学際的研究に取り組む「学内の融合拠点」として機能を発揮している。拠点として、次のような特徴を持っている。
 - ・ CNSIは、「時限付き」ではなく、「パーマナントな拠点」として位置付けられている。
 - ・ CNSIがサラリーを支払う研究者は、「拠点設立後にCNSIが直接採用した人材」に限定されている。現在、CNSIには95名の研究者が参画しているが、この内の85名は拠点設立前から各部門に所属していた人材であり、CNSI参画後も、サラリーは各部門が継続して支払っている。
 - ・ CNSIが直接採用した10名の人材についても、上記85名が所属する各部門の中で研究を行える体制が整っている。
 - ・ CNSIが提供する「学際的研究の場 (Nano and Pico Characterization等のコア施

設、CNSI所属の研究者との協働など)」が、上記85名の研究者が「キャリアアップしていく場」として十分な魅力を持っている。

- ・助教授 (Assistant Professor)、準教授 (Associate Professor)、教授 (Full Professor) のいずれのポジションに就いても、研究活動の面で「ほぼ同等の権利と責任」が付与されている。

7) 「研究活動の面で、若手研究者とシニア研究者が、ほぼ同等の権利と責任を持つ」ことは、「かつては、“大学トップが定めたポリシー”」であったが、「今では、大学の研究活動に必須の“若手を活性化するためのカルチャー”」となっている。

8) パーマネントな拠点として位置付けられているため、CNSIは「ナノテク研究のアンブレラ (ビジョンを掲げる場)」としての役割を果たすことができ、取り組むプログラムは変わっても、研究インフラとしての機能は維持されていく。

9) CNSIのビジョンとして4つの研究イニシアチブを掲げており、この内の3領域が「環境・エネルギー」関連となっている。

- ・ 再生可能エネルギー (Renewable Energy)
- ・ 環境分野のナノテク (Environmental Nanotechnology)
- ・ ナノの安全性&環境性 (Nanotoxicology)
- ・ ナノ医療 (NanoMedicine)

その上で、副所長のカン・ワン (Kang Wang) 博士との会合を持ち、研究所及び米国全体として見られるナノテクを環境・エネルギーに展開する動きについて討議した。

会合を通じ把握した主な事項をまとめると、次のようになる。

10) 米国エネルギー省傘下の研究機関は、「国立再生可能エネルギー研究所 (NREL ; National Renewable Energy Laboratory)」を除き、これまで主として「軍事・防衛」に関連する分野でのエネルギー研究に取り組んできた。

11) オバマ大統領が掲げたエネルギー問題に対する基本方針を受けて、エネルギー省は新たな研究イニシアチブの検討を開始しており、今後は、軍事・防衛関連以外の分野でのエネルギー研究が拡大することが予想されている。

12) 例えば、エネルギー省の基礎エネルギー科学局 (Office of Basic Energy Science) は、「エネルギーフロンティア研究センター (Energy Frontier Research Centers)」と呼ばれる研究イニシアチブを立ち上げている。本プログラムの下で、エネルギー分

野の個々の研究拠点に対し、年間200～500万ドルの資金が5年以上提供されることになっている。

13) すでに、大学、国立研究所、非営利機関などからの提案が集められており、これらの多くが「太陽エネルギー関連の研究提案」となっている。CNSIは「太陽エネルギーと貯蔵 (Solar Energy and Storage)」について提案した。エネルギー貯蔵用のシステム・材料を主要研究課題として掲げており、「表面や界面制御のための“ナノテク”」を重要技術として位置付けている。

14) CNSIにおけるナノを環境・エネルギーに展開するための研究として、以下の取り組みなどが挙げられる。

- ・ 米国科学財団と米国環境保護庁からの資金（5年間の研究資金として2,000万ドルを支援）をもとに、2008年に関連研究センター（Affiliate Research Center）の形で「CEIN；Center for Environmental Implication of Nanotechnology」を設置し、「ナノ材料の安全性」の研究に取り組んでいる。
- ・ 上記に加え、環境・エネルギーのための関連研究センターとして、「CNRT；Center for NanoSafety Research and Testing」「CRC；Center for Reticular Chemistry」「NREC；Nano Renewable Energy Center」が活動している。
- ・ CNRTは、CEINと同様に、「ナノ材料の安全性」の研究に取り組んでいる。
- ・ CRCは、「網目構造の化学（Reticular Chemistry）」の研究に取り組んでいる。「網目構造の化学」は1990年代にCRCのオマア・ヤジ（Omar Yaghi）教授が提唱した科学領域であり、多様な新材料の創出をもたらす可能性を持つ。
- ・ 上記領域において、CRCは「金属－有機フレームワーク材料（Metal-Organic Framework Materials）」などの「有機物質を用いて機能を付与したナノサイズのポア」より成る多孔質結晶材料」の研究を先導している。
- ・ 金属－有機フレームワーク材料の研究成果として、すでに世界各国・地域で多くの新材料が発表されており、環境・エネルギーへの応用においても「二酸化炭素の固定」「水素の貯蔵」「各種重合用の触媒」「気層や液層での分離」などの様々な用途が検討されている。
- ・ NRECは、「ナノテクの再生可能エネルギーへの応用」の研究に取り組んでいる。
- ・ 重点研究領域として「エネルギーの獲得（Energy Harvesting）」「エネルギーの貯蔵（Energy Storage）」「エネルギーの管理（Energy Management）」の3つを掲げている。

- ・「高分子複合体 (Conjugated Polymers)」 「無機ナノ粒子 (Inorganic Nano Particles)」 及び 「有機－無機ハイブリッド材料 (Organic-Inorganic Hybrid Materials)」 を用いた 「高効率で低価格なフレキシブル太陽電池」 の研究に注力しており、「ハイブリッド化により、有機系太陽電池の変換効率を20%まで向上可能」と想定している。

15) さらに、CNSIは、「環境モニタリングなどを目的にした“大規模ネットワーク型センシングの半永久的な運用”を可能にする“超低消費電力型センサー” 「環境モニタリングなどに有効に働く“ナノテクを応用したマイクロバッテリー”」などの研究にも注力している。

以上から、米国のトップクラス研究拠点であるカルフォルニアナノシステム研究所においても、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が進められていることが分かる。

合わせて、米国の環境・エネルギー研究に大きな影響をもたらす以下の動きが特に注目された。

- ・オバマ大統領が掲げた基本方針を受けて、エネルギー省が新たな研究イニシアチブを立ち上げた。
- ・基礎エネルギー科学局が所掌する「エネルギーフロンティア研究センター」が、該当のイニシアチブになる。
- ・本イニシアチブの下で、複数のエネルギー研究拠点に対し、拠点当たり年間200～500万ドルの資金が5年以上提供されることになる。
- ・これからの米国では、軍事・防衛関連以外のエネルギー研究が拡大していく。

エネルギーフロンティア研究センターは、2008年7月に米国エネルギー省のオーバック博士が「今後のナノテク戦略」に言及した際にも、注目すべき動きとして紹介されている。本イニシアチブが、「ナノテクを環境・エネルギーに展開する」ための重要な枠組みとなることが示唆される。

そこで以下、米国で導入が進む「エネルギーフロンティア研究センター」について、その内容を詳細に調べた。

2.3 米国のエネルギーフロンティア研究センター

詳細調査の結果、エネルギーフロンティア研究センターは「ナノテクを環境・エネルギーに展開する」ための重要な枠組みとして機能していることが分かった。

ポイントを整理すると、次のようになる。

- 1) 米国では、オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、環境・エネルギーに対する研究が強化された。この中で、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化している。
- 2) 具体的には、新たな研究イニシアチブである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤としてナノテクが明確に位置付けられた。
- 3) 2009年4月にエネルギーフロンティア研究センターの採択結果が発表され、最終公募に残った約260件の提案の中から46のセンターが選定された。センターの内訳を見ると、その多くが科学的ブレークスルーをもたらす基盤としてナノテクを位置付けており、エネルギー研究の中でナノテクコミュニティが重要な役割を担っていくことが分かる。
- 4) 今後は、米国におけるエネルギー研究がさらに強化されることになり、その中でナノテクの環境・エネルギーへの展開が促進されていく。
- 5) ナノテクを環境・エネルギーに展開する仕組みとして、米国は「課題解決型基礎研究」を重視している。エネルギーフロンティア研究センターへのファンディングを分析すると、そのことが良く分かる。
- 6) エネルギーフロンティア研究センターの場合、まず未来のエネルギーシステムを描き出し、その上で、システム実現に向けた基礎研究に取り組む46のセンターに資金提供を行っている。この点が、従来のファンディング制度と大きく異なる。
- 7) すなわち、「最初に“社会が求める用途”を提示し」、その上で「用途実現に必要な基礎研究を特定し、支援を行う」、いわゆる「課題解決型基礎研究」の枠組みとして機能している。

「エネルギー省のイニシアチブ」「研究現場の反応と評価」「センターの設立経緯」「センターの選定方法」「センターの研究活動」「領域毎の課題解決型基礎研究」の6項目に分けて、調査結果を以下にまとめる。

2.3.1 エネルギー省のイニシアチブ

米国のエネルギー研究は大きな転換点を迎えている。オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、戦略の抜本的見直しが進められている。

具体的には、これまでは軍事・防衛に関する研究が重視されてきたが、今後は軍事・防衛以外のエネルギー研究が拡大していく。こうした変化の中で、「化石から非化石への転換」及び「エネルギーのクリーン化」を柱とした大きな流れが生まれてくることになる。

そのために現在、エネルギー省による新たな研究イニシアチブの導入が進められている。

イニシアチブの概要、政策的位置付け、これらに基づくファンディング状況などをまとめると、次のようになる。

- 1) エネルギー省のステーブン・チュウ長官は2009年5月に開催された次年度予算の上院公聴会において、エネルギー戦略を展開する基盤となる3つの研究イニシアチブを提示している。
- 2) 第一が、「エネルギーフロンティア研究センター (EFRCs ; Energy Frontier Research Centers)」である。米国内に46の研究拠点を整備するもので、5年間で7億7,700万ドルの資金が投じられる。
- 3) 「化石から非化石への転換」及び「エネルギーのクリーン化」を促す基礎研究を行うことが目的であり、応用研究は対象としない。そのために、大学を中心とした研究体制を組む。
- 4) 米国再生・再投資法から2億7,700万ドルが充当され、残りは各年度歳出予算として手当する。2009年度予算からは1億ドルを支出することが決まった。
- 5) 第二が、「エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E ; Advanced Research Projects Agency-Energy)」である。基礎ではなく応用を対象とするもので、革新的エネルギー技術を開発するために、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが大きな成果が期待される研究」への資金助成を行う。
- 6) 助成期間は最長3年間に設定されており、2年以内の研究完了が期待されている。1件当たりの投資総額は通常200~500万ドル、最大で2,000万ドルとなっている。米国再生・再投資法からは4億ドルの資金が充当された。
- 7) 第三が、「エネルギーイノベーション・ハブ」になる。ここでは、基礎研究や応用研究に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の活動が行われる。
- 8) 一つのハブの中に緊密に連携した「アンダー・ワンルーフな仕組み」を築き、多様な分野のトップ人材を糾合していく。いわゆる「エネルギー分野の“ベル研究所”」を作り出すことを目指す。

9) 以下のテーマに基づく8つのハブ創設が計画されている（8つのハブ全てが実現するかどうかは、現時点では未定）。

- ・ 太陽光発電 (Solar Electricity)
- ・ 太陽光からの燃料 (Fuel from Sunlight)
- ・ バッテリー、及びエネルギーの貯蔵 (Batteries and Energy Storage)
- ・ 二酸化炭素の回収、及び貯蔵 (Carbon Capture and Storage)
- ・ グリッド材料、装置、及びシステム (Grid Materials, Devices and Systems)
- ・ エネルギー高効率ビルディングシステム (Energy Efficient Building Systems Design)
- ・ 極限材料 (Extreme Materials)
- ・ モデリング、及びシミュレーション (Modeling and Simulation)

10) 個々のハブに対し、1年目は3,500万ドル、2年目以降は2,500万ドル／年の規模で投資を行うことを基本構想とする。

11) 3つのイニシアチブの先頭を切り、2009年4月に、エネルギーフロンティア研究センターの採択結果が発表された。最終公募に残った約260件の提案の中から46のセンターが選定されている。

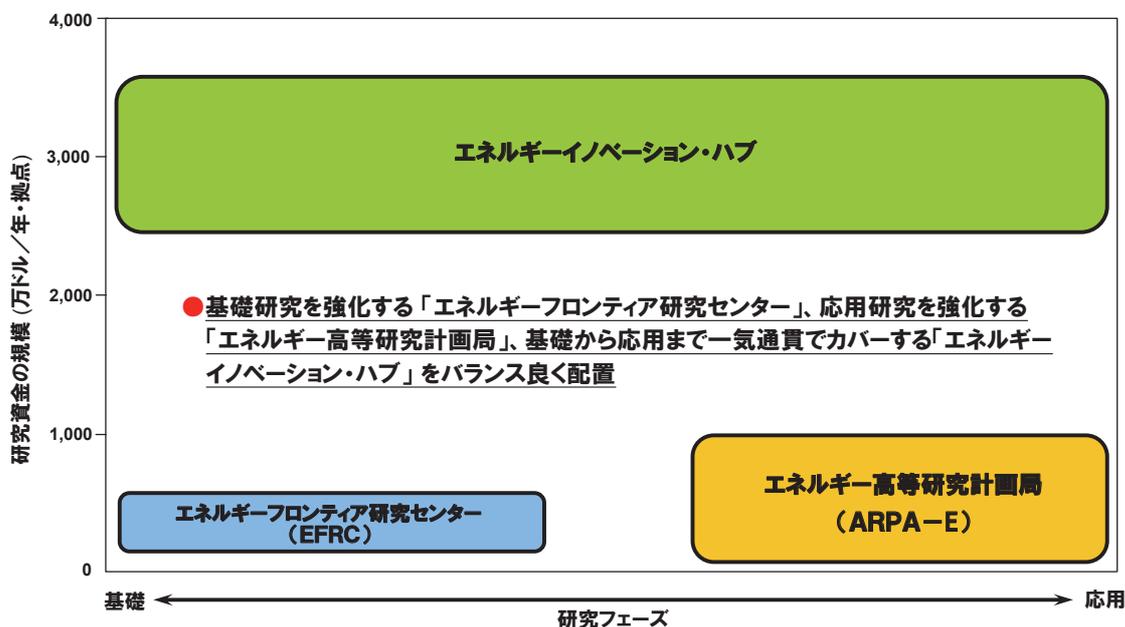
12) 2009年10月には、1億5,100万ドルの予算総額にて、エネルギー高等研究計画局の第一回公募結果が発表された。37のプロジェクトが選定され、この内の23プロジェクトは企業が主導する研究となっている。

13) 続いて2009年12月には、1億ドルの予算総額にて、エネルギー高等研究計画局の第二回公募が開始されている。

14) さらに、同時期の2009年12月に、1億2,200万ドルの予算総額にて、8つのエネルギーイノベーション・ハブの内、「太陽光からの燃料」をテーマとするハブの公募（採択予定件数は1件）も開始されている。

新たなエネルギー戦略の基盤である3つの研究イニシアチブが、着実かつ迅速に推進されている状況が見て取れる。

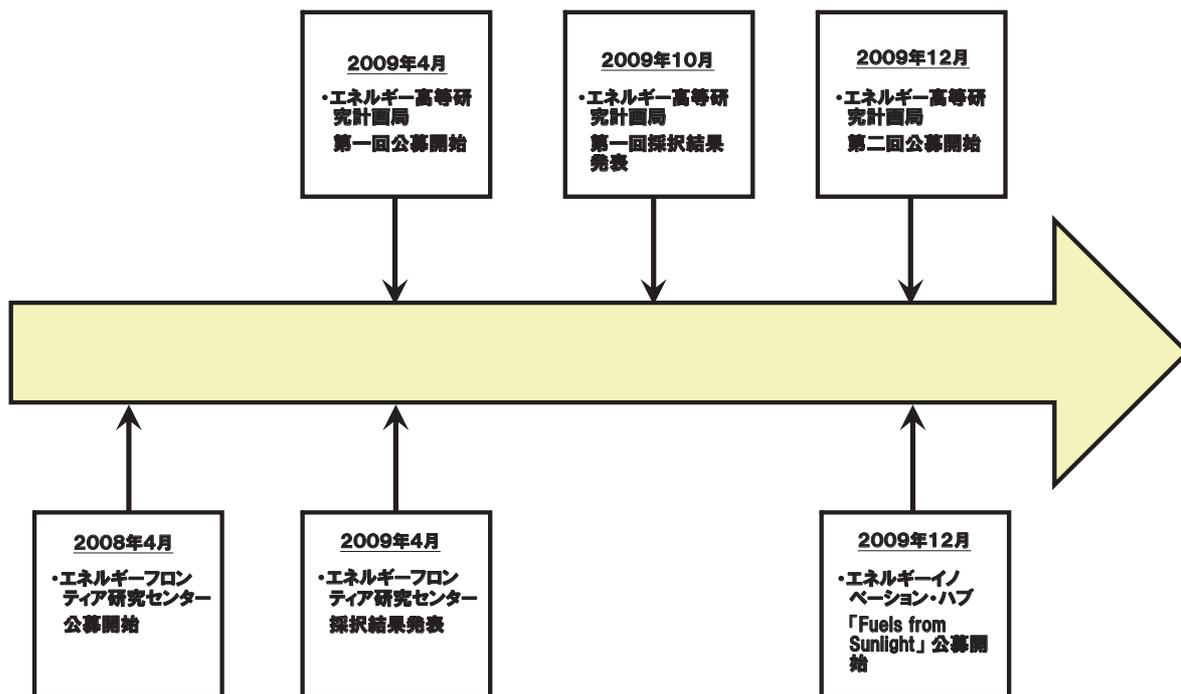
図表3 3つの研究イニシアチブの政策的な位置付け



- ・縦軸を「研究資金の規模」、横軸を「研究フェーズ」とし、米国エネルギー省が掲げた3つの研究イニシアチブの関係を示した。
- ・エネルギーフロンティア研究センターは全米46ヶ所に設置されており、5年間の研究投資総額として7億7,700万ドルが予定されている。
- ・エネルギーイノベーション・ハブについては8ヶ所に設置することが議論されており、全て整備された場合、5年間の研究投資総額は10億8,000万ドルとなる。

(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報等に基づきJST・CRDSが作成

図表4 3つの研究イニシアチブに基づくファンディング状況



(出典) 米国エネルギー省の各種公開情報等に基づきJST・CRDSが作成

2.3.2 研究現場の反応と評価

エネルギーフロンティア研究センターに選ばれた研究現場に入ると、オバマ大統領のリーダーシップ、エネルギー省チュウ長官の呼びかけに応え、新たなエネルギー研究を積極的に展開する様子が見て取れる。

研究拠点を率いる複数のリーダーと現地会合を持った結果、エネルギーフロンティア研究センターを巡る動向として、以下の事項などが明らかになった。

- 1) エネルギーフロンティア研究センターは、課題解決型基礎研究の仕組みである。
- 2) この仕組みを創りだすため、エネルギー省は事前の一連のワークショップを行っている。未来のエネルギーシステムとして「社会が求める複数の用途」を示し、「これらの用途を実現するために必要な基礎研究」をワークショップで特定していった。そのために、全米のトップクラス研究者を招聘し、基礎と応用両面からの横断的議論を実施している。
- 3) ワークショップの結論として、「複雑で巨大なエネルギー問題には、特定の科学グループだけでは取り組めないこと」、「エネルギーの課題解決には、新たな科学基盤の構築が求められること」、具体的には「“素子”レベルではなく、“原子”レベルの探求が必要になること」、したがって「ナノテク研究を強化することが、課題の本質的解決につながること」など、エネルギーにイノベーションをもたらすための基本要件が明らかになった。
- 4) これらの要件に基づき創出された仕組みが、エネルギーフロンティア研究センターになる。選定されたセンターの多くがナノテクを研究対象に取り上げているが、「ナノテクで解決可能なエネルギーの課題を見つけ出そうとした」ものではなく、「エネルギーの課題解決方策を探求する中で、結果としてナノテクが選り出された」ものとなっている。

現地会合で把握した主なポイントを、以下にまとめて示した。

a) カリフォルニア工科大学

カリフォルニア工科大学には、「光や熱の流れを制御するための研究拠点（名称；Light-Material Interactions in Energy Conversion）」が設置された。ナノテクを基盤にプラズモンやメタマテリアルなどを用い、光や熱の流れを高精度に制御する研究を行う。ローレンスバークレー国立研究所、イリノイ大学との連携が構築されている。

このセンターを率いるハリー・アトウォーター（Harry Atwater）教授との現地会合を持った。会合を通じ把握した主な事項をまとめると、次のようになる。

- 1) 選定されたエネルギーフロンティア研究センターの多くが、ナノテクを基盤とした研究に取り組んでいる。
- 2) すでにナノテクが十分に応用されているエレクトロニクス分野などと異なり、エネルギー分野では、これまではナノテクではなく、マイクロテクが主として使われてきた。したがって、ナノテクをエネルギーに展開するために探求すべき事項は多い。
- 3) 例えば、現状では、エネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの割合はまだ少ない。したがって今後、再生可能エネルギーの割合が増大していけば、当然、そのための材料が大量に必要となる事態が生ずる。
- 4) その際、システムとしての効率性や経済性を高めるために、材料使用量の最小化が求められるようになってくる。機能発現に必要な材料は、少なければ少ないほど良い。ナノテクを活かし材料使用量を削減する、「エネルギー分野のレスマテリアル（less material）」を実現することが大きなポイントになってくる。
- 5) このセンターは、将来のターゲットとして、再生可能エネルギーのコストを化石燃料並に引き下げることを目指している。ナノテクによるレスマテリアルを実現するため、例えば、エネルギー用途で使用されている希少元素をナノテク材料で置き換えていくことなどを狙っている。
- 6) オバマ政権では、エネルギー分野の基礎研究が重視されている。大きな背景として、エネルギー省のトップマネジメントによる理解が挙げられる。
- 7) 現在のエネルギー省は、長官のスティーブン・チュー（Steven Chu）博士、次官のスティーブン・クーン（Steven Koonin）博士、そしてクリスティーナ・ジョンソン（Kristina Johnson）博士のいずれも理工系出身であり、研究現場を熟知している。これらのトップが基礎研究の価値を十分に理解していることが、現場の活力を大いに高めている。
- 8) エネルギーフロンティア研究センターに関する検討は、ブッシュ前政権の時代に始まっている。設立のための活動において中心的役割を果たしたのが、エネルギー省のパトリシア・ダーマー博士（科学局傘下の基礎エネルギー科学局の当時の局長。2008

年に科学局の次長に昇進)になる。センター設立の論拠となる検討が行われた一連のワークショップについても、ダーマー博士が組織している。

- 9) ワークショップで得られた結論として「複雑で巨大なエネルギー問題には、一つの科学グループだけでは取り組めないこと」を政府に示したことが、センター設立の合意形成において大きな効果をもたらした。
- 10) センターの設立及び予算支出に対する最終決断はオバマ大統領が下しているが、ワークショップの成果として「エネルギー分野における基礎研究の重要性」が明示されていなければ、大統領の決断を得ることは困難となった事態が想起される。
- 11) ダーマー博士が一連のワークショップを行った理由は、「従来の基礎研究からは、ネイチャーなどのトップジャーナルに掲載される論文は輩出されるものの、エネルギーに関する新たな科学、さらにはイノベーションを促すような研究成果が生まれにくかった」ことにある。
- 12) そのためワークショップでは、最初に「目指すべき未来のエネルギーシステム」を提示し、その上で「システム（例えば、化石から非化石への転換など）の実現に必要な基礎研究」を抽出していくアプローチを取った。具体的には、エネルギー省内の専門家との議論などを通じ、まず米国が目指すトータルシステムを描き出し、その上でワークショップでの議論を展開していった。

エネルギーフロンティア研究センターに関する指摘として、「パトリア・ダーマー博士を中心に、一連のワークショップを通じ、未来のエネルギーシステムを実現するための基礎研究を抽出していった動き」などが特に注目される。

b) 南カリフォルニア大学

南カリフォルニア大学には、「光の吸収と放散を高めるための研究拠点（名称：Emerging Materials for Solar Energy Conversion and Solid State Lighting）」が設置された。有機と無機を複合した新たなハイブリッド材料を用い、「光から電気」そして「電気から光」への二つの変換を対象とした研究に取り組む。イリノイ大学、ミシガン大学、バージニア大学との連携が構築されている。

このセンターを率いるダニエル・ダプカス（Daniel Dapkus）教授との現地会合を持った。会合を通じ把握した主な事項をまとめると、次のようになる。

- 1) エネルギーフロンティア研究センターの設立に向け、エネルギー省が一連のワークショップを実施し、非常に質の高い検討が行われた。基礎と応用の両分野に渡る研究者が参加し、横断的議論が交わされている。
- 2) その結果、「エネルギーの課題解決には新たな科学基盤の構築が求められること」、具体的には「“素子”レベルではなく、“原子”レベルの探求が必要になること」など、研究センターとして備えるべき基本要件が明らかになった。
- 3) このように、ワークショップで展開された議論は「ナノテクで解決可能なエネルギーの課題を見つけ出そうとした」ものではなく、「エネルギーの課題解決方策を探求する中で、結果としてナノテクが選り出された」ものとなっている。
- 4) こうした「課題解決型ワークショップ」を活用する手法は、ニーズ志向が強い「国防高等研究計画局（DARPA；Defense Advanced Research Projects Agency）」が取るアプローチと類似している。
- 5) 国防高等研究計画局が新たなファンドなどを構築する場合も、より小規模ではあるが、設定領域毎に「課題解決に有効なソリューションを抽出するためのワークショップ」が実施されている。
- 6) このセンターは、「光を電気に換えること」と「電気を光（照明）に換えること」を同一領域として位置付けた研究を進めている。それぞれ用いる材料は異なるが、取り組むべき基礎研究は共通していることが大きな理由である。
- 7) 「再生可能エネルギーのコストを化石燃料並みに引き下げること」をターゲットに掲げ、「5年間の研究で、コストを十分の一にするための基本原理や革新手法を見つけること」を狙っている。

エネルギーフロンティア研究センターに関する指摘として、「一連のワークショップを通じ、エネルギーの課題を解決するための基礎研究を抽出していった動き」などが特に注目される。

2.3.3 センターの設立経緯

エネルギーフロンティア研究センターの設立経緯は、センターを率いるリーダーとの現地会合、及びエネルギー省関連資料（「Basic Energy Sciences／Energy Frontier Research Centers」 「Basic Energy Sciences／Workshop Reports」 など）に基づく分析から、次のように整理することができる。

- 1) エネルギーフロンティア研究センターは、米国エネルギー省の科学局（Office of Science）に属する「基礎エネルギー科学局（Office of Basic Energy Sciences）」が、次のようなプロセスを経て立ち上げたものである。
- 2) 米国エネルギー省「基礎エネルギー科学諮問委員会（Basic Energy Sciences Advisory Committee）」の下で、基礎エネルギー科学局が、まず、2001年～2003年の約3年をかけて、「今後数十年、特に2050年」を見据えた場合の「米国がエネルギー供給システムを確保し、かつ低炭素社会を実現していく（reduced environmental impacts of energy production and use）」ために克服すべき課題を検討。
- 3) 具体的には、2002年10月、2003年1月に開催した2回に渡るワークショップ（大学、産業界、研究所などから100人以上が参画）での討議を経て、未来のエネルギーシステムを構築するために“目指すべき37の研究方向（Research Directions）”を提示。「Basic Research Needs To Assure A Secure Energy Future」という報告書にまとめ、発表。
- 4) その上で、提示した“37の研究方向”に対応する“10の重点研究領域”について、取り組むべき基礎研究群を抽出。具体的には、2003年～2007年の5年間に、10回に渡るシリーズの形で「基礎研究ニーズワークショップ（Basic Research Needs Workshop）」を開催。
- 5) これらのワークショップには、大学、産業界、研究所などから、合わせて1,500人以上が参画。ワークショップ毎に、抽出された基礎研究群を報告書にまとめ、発表。各ワークショップのテーマ及び実施時期は、次の通り。
 - ・「水素の製造・貯蔵・利用」に対する基礎研究ニーズ（Basic Research Needs for the Hydrogen Economy）、2003年5月13日～5月15日
 - ・「太陽エネルギーの利用」に対する基礎研究ニーズ（Basic Research Needs for Solar Energy Utilization）、2005年4月18日～4月21日
 - ・「超伝導」に対する基礎研究ニーズ（Basic Research Needs for Superconductivity）、2006年5月8日～5月10日

- ・「固体素子照明」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Solid-State Lighting)、2006年5月22日～5月24日
 - ・「先端原子力システム」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Advanced Nuclear Energy Systems)、2006年7月31日～8月3日
 - ・「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels)、2006年10月29日～11月1日
 - ・「エネルギーシステムのための地球科学 (二酸化炭素、放射性廃棄物の長期貯蔵など)」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Geosciences : Facilitating 21st Century Energy Systems)、2007年2月21日～2月23日
 - ・「電気エネルギーの貯蔵」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Electrical Energy Storage)、2007年4月2日～4月4日
 - ・「極限環境下の材料」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Materials under Extreme Environments)、2007年6月11日～6月13日
 - ・「エネルギーのための触媒」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs : Catalysis for Energy)、2007年8月6日～8月8日
- 6) 10回に渡るワークショップでの検討成果をもとに、基礎エネルギー科学諮問委員会に属する「グランドチャレンジ分科会 (Grand Challenges Subcommittee)」が、未来のエネルギーシステム構築に向け“挑戦すべき5つの科学原理”を特定。2007年12月に、「Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination」という報告書にまとめ、発表。特定された科学原理は、以下の通り。
- a) 材料プロセスを電子レベルでいかに制御するか (How do we control materials processes at the level of electrons)
 - b) 必要な特性を発現する新規構造をいかに設計し、原子やエネルギー効率の面で最適な方法でいかに形成するか (How do we design and perfect atom- and energy-efficient syntheses of revolutionary new forms of matter with tailored properties)
 - c) 原子や電子などの構成因子の複雑な相互作用から生まれる優れた特性を見い出し、これをいかに制御するか (How do remarkable properties of matter emerge from the complex correlations of atomic or electronic constituents and how can we control these properties)

- d) 生物や植物が行っているようなナノスケールでのエネルギーや情報の操作を可能にする新技術をいかに創出するか (How can we master energy and information on the nanoscale to create new technologies with capabilities rivaling those of living things)
- e) 関係する事象を、特に非平衡下において、いかに評価し、そして制御するか (How do we characterize and control matter away - especially very far away - from equilibrium)
- 7) 以上の“12の報告書”で示した検討成果をもとに、エネルギーフロンティア研究センターを立ち上げ。2008年4月からファンディングのための公募活動を開始。2009年4月に、最終公募に残った約260件の提案の中から46のエネルギーフロンティア研究センターを選定。
- 8) 選定された46のセンターは、全て、未来のエネルギーシステム構築に有効な「次の2つの要件を満たした研究組織」となっている。
- ・センターの研究プログラムが、「基礎研究ニーズワークショップ」で取り上げられた“10の重点研究領域”の内、一つまたは複数を対象としている。
 - ・センターの研究プログラムが、「Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination」で提示された“挑戦すべき5つの科学原理”の内、一つまたは複数をカバーしている。

2.3.4 センターの選定方法

エネルギーフロンティア研究センターの公募要綱は、以下の8部から構成されている。

- I. 公募に関する説明 (Funding Opportunity Description)
- II. 助成金に関する情報 (Award Information)
- III. 適格性に関する情報 (Eligibility Information)
- IV. 申請及び提出に関する情報 (Application and Submission Information)
- V. 申請の審査に関する情報 (Application Review Information)
- VI. 助成金の管理に関する情報 (Award Administration Information)
- VII. 公募機関との接触等 (Question/Agency Contacts)
- VIII. その他に関する情報 (Other Information)

選定された46のセンターは、一連のワークショップで導き出された「エネルギーフロンティア研究センターに必要となる次の2つの要件」を満たした組織となっている。

- ・センターの研究が、「基礎研究ニーズワークショップ」で取り上げられた“10の重点研究領域”の内、一つまたは複数を対象としている。
- ・センターの研究が、「Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination」で提示された“挑戦すべき5つの科学原理”の内、一つまたは複数をカバーしている。

そのために、公募要綱には以下の事項が明記された。

まず「I. 公募に関する説明」の「A. 概要」において、本公募が「エネルギー分野での科学的ブレークスルーの創出を加速していく」ため、「エネルギーフロンティア研究センターを立ち上げる」ものであることを示した。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART I – FUNDING OPPORTUNITY DESCRIPTION

A. SUMMARY

The Department of Energy’s Office of Science, Office of Basic Energy Sciences announces the initiation of Energy Frontier Research Centers (EFRCs) to accelerate the rate of scientific breakthroughs needed to create advanced energy

technologies for the 21st century. The EFRCs will pursue the fundamental understanding necessary to meet the global need for abundant, clean, and economical energy.

次に「E. 目的及び目標」において、エネルギーフロンティア研究センターは「ワークショップ等をもとにエネルギー省が取りまとめた“12の報告書”で示された科学的方向を目指す」もので、そのために「複数の研究者の力を結集し、単独では取り組むことが困難な基礎研究に挑戦する」ことが述べられている。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART I – FUNDING OPPORTUNITY DESCRIPTION

E. PURPOSE AND OBJECTIVES

Energy Frontier Research Centers

To implement the collective scientific recommendations of these 12 reports and to stimulate frontier energy research in a new era of science, the Office of Basic Energy Sciences is seeking applications for the establishment of Energy Frontier Research Centers (EFRCs). EFRCs will bring together the skills and talents of multiple investigators to enable fundamental research of a scope and complexity that would not be possible with the standard individual investigator or small group research project. As such, the EFRCs will strengthen and complement the existing portfolio of the single Principal Investigator and small group research projects currently supported within BES core research areas. The EFRC awards are expected to be in the \$2–5 million range annually for an initial five-year project period. It is anticipated that approximately \$100 million will be available annually for multiple EFRC awards starting in FY 2009.

その上で「IV. 申請及び提出に関する情報」の「C. 申請の内容と書式」の「I. 運営計画」において、運営するセンターが「“基礎研究ニーズワークショップ”で取り上げられた“10の重点研究領域”の内、一つまたは複数を対象とすること」及び「“Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination”で示された“挑戦すべき5つの科学原理”の内、一つまたは複数カバーすること」を明確に説明することが求められている。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART IV – APPLICATION AND SUBMISSION INFORMATION

C. CONTENT AND FORM OF APPLICATION

I. EFRC Management Plan

This section must provide a clear, substantive overview of the vision, management, and organization of the proposed EFRC, including:

- How the research proposed for the EFRC is at the scientific forefront of one or more of the challenges described in the BESAC report Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination
- How the research proposed for the EFRC addresses one or more of the energy challenges described in the ten BES workshop reports in the Basic Research Needs series

さらに「II. 提案研究」において、推進する研究についても、「基礎研究ニーズワークショップ」で取り上げられた“10の重点研究領域”の内、一つまたは複数を対象とすること」及び「“Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination”で示された“挑戦すべき5つの科学原理”の内、一つまたは複数を対象とすること」を明確に説明することが求められている。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART IV – APPLICATION AND SUBMISSION INFORMATION

C. CONTENT AND FORM OF APPLICATION

II. Proposed Research

Applicants must provide detailed information regarding the research proposed for the EFRC. This section, which may be organized in the subtasks, must clearly describe the proposed research and :

- Briefly sketch the background leading to the application, critically evaluate existing knowledge, and specifically identify the gaps that the project is intended to fill
- State concisely the importance of the research described in the application
- Explain the relevance of the proposed research to the needs and opportunities identified in BESAC report Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination and one or more of the Basic Research Needs reports

以上に対応し、「V. 申請の審査に関する情報」の「2. メリット審査基準」の「a. プロジェクトの科学的／技術的メリット」では、提案された研究が「基礎研究ニーズワークショップ」で取り上げられた“10の重点研究領域”の内、対象とする一つまたは複数について「効果的かつインパクトの強い内容となっていること」、さらには「“Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination”で示された“挑戦すべき5つの科学原理”の内、対象とする一つまたは複数」について「科学的最先端に位置付けられること」が評価基準となっている。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART V – APPLICATION REVIEW INFORMATION

2. Merit Review Criteria

a. Scientific and/or technical merit of the project

- Does the research proposed for the EFRC lie at the scientific forefront of one or more of the challenges described in the BESAC report Directing Matter and Energy : Five Challenges for Science and the Imagination ?
- Does the research proposed for the EFRC address one or more of the energy challenges described in the ten BES workshop reports in the Basic Research Needs series in an effective and impactful manner ?

なお、「Ⅷ. その他に関する情報」の「K. 資金の入手可能性」として、「本公募の開始段階では、助成金に充当する資金が得られていないこと」「助成金を得られるまでは、いかなる公募結果も実現されないこと」が付記されている。

本条項に基づき、2008年4月の段階で公募が開始され、その後誕生したオバマ政権が予算支出の決断を下した後、2009年4月に採択結果が発表された。

英文該当箇所を、以下に抜粋する。

PART Ⅷ – OTHER INFORMATION

K. AVAILABILITY OF FUNDS

Funds are not presently available for this award. The Government's obligation under this award is contingent upon the availability of appropriated funds from which payment for award purposes can be made. No legal liability on the part of the Government for any payment may arise until funds are made available to the Contracting Officer for this award and until the awardee receives notice of such availability, to be confirmed in writing by the Contracting Officer.

2.3.5 センターの研究活動

採択された46のエネルギーフロンティア研究センターの内訳を見ると、大学が31機関、エネルギー省の国立研究所が12機関、非営利組織が2機関、企業の研究所が1機関となっている。各センターが連携する研究機関を含めると、110以上の機関が参加した一大研究ネットワークが構築されている。

本ネットワークの下で、約700名のシニア研究者と約1,100名の若手研究者（ポスドク、大学院生など）や技術支援者が一体となり、エネルギー分野の基礎研究が展開される。

研究領域については、エネルギー省の区分に従えば「再生可能エネルギー&カーボンニュートラルエネルギー」が20件、「エネルギー効率」が6件、「エネルギー貯蔵」が6件、「横断的科学」が14件となっている。全体として、太陽エネルギーに関する研究が相当数を占める。

さらに、多くの研究が科学的ブレークスルーをもたらす基盤として「ナノテク」を取り上げている点が注目される。

個別テーマを見ると、「燃料電池・蓄電池」の研究では、「コーネル大学」や「ニューヨーク州立大学ストーニブルック校」に加え、民間から「ゼネラルエレクトリック・グローバルリサーチ」の提案が採択されている。

「バイオマス」に関する研究も複数見られる。例えば、遺伝子組み換え植物の研究をリードする「ドナルドダンフォース植物科学研究センター」では、藻類や種子植物を対象に「エネルギー収率の高い植物の生産性を向上するための科学原理」が研究される。

また、「プリンストン大学」は他の提案と異なり、「輸送機関向けの非石油系燃料を対象とした燃焼モデル」の研究に取り組む。

さらに、「国立再生可能エネルギー研究所」では、太陽エネルギー転換材料を設計するための理論計算として、「求める特性を有する新たな材料を描き出す、いわゆる“材料開発の逆問題”を解くための計算科学」が研究される。

エネルギーフロンティア研究センターという新たなイニシアチブの下で、エネルギー問題の裾野を幅広くカバーしながら、米国のトップクラス研究者の活力を結集した基礎研究が展開されていることが分かる。

図表5には、センター毎の「推進組織（運営機関、連携機関）」「リーダー」「5年間の資金助成額」「研究概要」を一覧にまとめて示した。46のセンターがそれぞれ複数の機関と連携することで、全米をカバーするエネルギー研究の一大ネットワークが構築されている状況が確認できる（図表6）。

図表5-1 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
1	EFR Center for Bio-Inspired Solar Fuel Production	アリゾナ州立大学	無し	Dr. Devens Gust	\$14,020,000	太陽光の水素や各種燃料への転換
2	Center for Interface Science: Hybrid Solar-Electric Materials (CIS:HSEM)	アリゾナ大学	ジョージア工科大学 プリンストン大学 ワシントン大学 (ワシントン州) 国立再生可能エネルギー研究所 サンディア国立研究所	Dr. Neal Armstrong	\$15,000,000	無機-有機ハイブリッド材料を用いた太陽エネルギーへの電気への転換
3	Light-Material Interactions in Energy Conversion	カリフォルニア工科大学	ローレンスバークレー国立研究所 イリノイ大学	Dr. Harry Atwater	\$15,000,000	太陽エネルギーや熱の流れを制御する材料
4	Molecularly Assembled Material Architectures for Solar Energy Production, Storage, and Carbon Capture	カリフォルニア大学ロサンゼルス校	国立再生可能エネルギー研究所 イースタンワシントン大学 カンザス大学 カルフォルニア大学デービス校	Dr. Vidvuds Ozolins	\$11,500,000	太陽エネルギーの電気への転換、電気エネルギーの貯蔵、及び温暖化ガスの分離・捕捉のためのナノスケール材料
5	Center on Materials for Energy Efficiency Applications	カリフォルニア大学サンタバーバラ校	国立再生可能エネルギー研究所 ロスアラモス国立研究所 カリフォルニア大学サンタクルーズ校 ミシガン大学	Dr. John Bowers	\$19,000,000	太陽エネルギーの転換、固体照明、及び熱から電気への転換のためのナノスケール制御材料
6	Emerging Materials for Solar Energy Conversion and Solid State Lighting	南カリフォルニア大学	イリノイ大学 ミシガン大学 バージニア大学	Dr. Daniel Dapkus	\$12,500,000	太陽エネルギーの転換や固体照明のための無機-有機ハイブリッド材料
7	Center for Inverse Design	国立再生可能エネルギー研究所	ノースウェスタン大学 スタンフォード大学 オレゴン州立大学	Dr. Alex Zunger	\$20,000,000	太陽エネルギー転換材料を設計するための理論計算手法
8	Argonne-Northwestern Solar Energy Research (ANSER) Center	ノースウェスタン大学	アルゴンヌ国立研究所 シカゴ大学 イリノイ大学 エール大学	Dr. Michael Wasielewski	\$19,000,000	太陽光を電気や燃料に転換するための材料及びプロセス

(出典)米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST-CRDSが作成

図表5-2 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
9	Center for Integrated Training in Far-From-Equilibrium and Adaptive Materials (CITFAM)	ノースウェスタン大学	ミシガン大学 ハーバード大学	Dr. Bartosz Grzybowski	\$19,000,000	太陽エネルギーの転換、電気や水素の貯蔵、及び触媒用の材料
10	Solid-State Solar-thermal Energy Conversion Center (S3TEC CENTER)	マサチューセッツ工科大学	ポス頓ンカレッジ オークリッジ国立研究所	Dr. Gang Chen	\$17,500,000	太陽光や熱を電気に転換するための材料
11	Center for Excitonics	マサチューセッツ工科大学	ハーバード大学 ブルックヘブン国立研究所	Dr. Marc Baldo	\$19,000,000	太陽エネルギーの電気への転換、及び電気エネルギーの貯蔵のための材料
12	Polymer-Based Materials for Harvesting Solar Energy	マサチューセッツ大学	国立再生可能エネルギー研究所 ピッツバーク大学 ペンシルバニア州立大学 韓国、日本及びドイツの研究機関	Dr. Thomas Russell	\$16,000,000	太陽光からの電気への転換システムに用いる高分子材料
13	Solar Energy Conversion in Complex Materials (SECCM)	ミシガン大学	無し	Dr. Peter Green	\$19,500,000	太陽エネルギーや熱を電気に転換するためのナノスケール材料
14	Photosynthetic Antenna Research Center	ワシントン大学セントルイス校	ドナルドダンフォース植物科学研究センター ロスアラモス国立研究所 ノースカロライナ州立大学 オークリッジ国立研究所 サンディア国立研究所 カリフォルニア大学リバーサイド校 ペンシルバニア大学 グラスゴー大学(英国) シェフィールド大学(英国)	Dr. Robert Blankenship	\$19,999,592	太陽光を燃料に転換するための科学原理

(出典)米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST・CRDSが作成

図表5-3 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
15	Solar Fuels and Next Generation Photovoltaics	ノースカロライナ大学チャペルヒル校	デューク大学 フロリダ大学 ノースカロライナセントラル大学 ノースカロライナ州立大学 国立再生可能エネルギー研究所 ミネソタ大学 ノースカロライナ大学 カリフォルニア大学アーバイン校 ライス大学 コロラド鉱山大学 コロラド大学 ミネソタ大学 バーデュー大学 アーカンソー大学 ブルックヘブン国立研究所 ゼネラルエレクトリック	Dr. Thomas Meyer	\$17,500,000	太陽光を燃料や電気に転換するためのナノスケール材料
16	The Center for Advanced Solar Photophysics	ロスアラモス国立研究所	同上	Dr. Victor Klimov	\$19,000,000	太陽光を電気に転換するためのナノ材料
17	Re-Defining Photovoltaic Efficiency Through Molecule-Scale Control	コロンビア大学	同上	Dr. James Yardley	\$16,000,000	ナノサイズの薄膜中で太陽光を電気エネルギーに転換するための科学原理
18	Understanding Charge Separation and Transfer at Interfaces in Energy Materials and Devices (CST)	テキサス大学オースチン校	サンディア国立研究所	Dr. Paul Barbara	\$15,000,000	太陽電池や電気エネルギー貯蔵用の分子材料
19	Rational Design of Innovative Catalytic Technologies for Biomass Derivative Utilization	デラウェア大学	リーハイ大学 カリフォルニア工科大学 マサチューセッツ工科大学 ミネソタ大学 ペンシルバニア大学 南カリフォルニア大学 ニューヨーク州立ストーブルック校	Dr. Dionisios Vlachos	\$17,500,000	バイオマスからの化学素材や燃料の生成などを対象とした複合分子を効率的に転換する触媒

(出典)米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRGs Awards」に基づきJST-CRDSが作成

図表5-4 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
20	Institute for Atom-Efficient Chemical Transformations (IACT)	アルゴンヌ国立研究所	ノースウェスタン大学 ハーヴェー大学 ウィスコンシン大学マディソン校	Dr. Christopher Marshall	\$19,000,000	石炭やバイオマスを化学素材や燃料に転換するための化学手法
21	Center for Direct Catalytic Conversion of Biomass to Biofuels (C3Bio)	パデュー大学	テネシー大学 国立再生可能エネルギー研究所 アルゴンヌ国立研究所	Dr. Maureen McCann	\$20,000,000	バイオマスをエネルギー、燃料または化学素材に転換するためのプロセス
22	Center for Advanced Biofuels Systems	ドナルドダンフォース植物科学研究センター	ネブラスカ大学 ミズーリ大学セントルイス校 アリゾナ大学 ミシガン州立大学	Dr. Richard Sayre	\$15,000,000	エネルギー収率の高い植物分子の生産性を向上するための科学原理
23	Center for Lignocellulose Structure and Formation	ペンシルバニア州立大学	ノースカロライナ州立大学 バージニア工科大学	Dr. Daniel Cosgrove	\$21,000,000	バイオマスを燃料に転換するための基本原理
24	Center for Nanoscale Control of Geologic CO2	ローレンスバークレー国立研究所	ローレンスリバモア国立研究所 オークリッジ国立研究所 マサチューセッツ工科大学 カルフォルニア大学デービス校	Dr. Donald DePaolo	\$20,000,000	二酸化炭素の地中貯蔵のための科学基盤
25	Center for Gas Separations Relevant to Clean Energy Technologies	カリフォルニア大学バークレー校	ローレンスバークレー国立研究所 テキサス A&M 大学 カリフォルニア大学ロサンゼルス校 アムステルダム大学 (デンマーク) ノルウェー科学技術大学 (ノルウェー)	Dr. Berend Smit	\$10,000,000	炭素の捕捉・隔離への応用などを対象としたガス分離
26	Frontiers of Subsurface Energy Security	テキサス大学オースチン校	サンディア国立研究所	Dr. Gary Pope	\$15,500,000	二酸化炭素の地中隔離などのための地中流体輸送の科学原理

(出典) 米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST・CRDSが作成

図表5-5 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
27	Center for Materials Science of Nuclear Fuel	アイダホ国立研究所	コロラド鉱山大学 フロリダ州立大学 ノースカロライナ州立大学 フロリダ大学 ワシントン州立大学 ウイスコンシン大学 オークリッジ国立研究所 ミシガン大学	Dr. Dieter Wolf	\$10,000,000	核燃料の熱的・機械的挙動に関する疑似実験に有効な予測計算モデル
28	Materials Science of Actinides	ノートルダム大学	カリフォルニア大学デービス校 パシフィックノースウェスト国立研究所 サバンナリバー国立研究所 サンディア国立研究所 マサチューセッツ工科大学 ローレンスリバモア国立研究所 イリノイ大学	Dr. Peter Burns	\$18,500,000	核エネルギーシステム用のアクチニドを含むナノスケール材料
29	Extreme Environment-Tolerant Materials via Atomic Scale Design of Interfaces	ロスアラモス国立研究所	マサチューセッツ工科大学 ローレンスリバモア国立研究所 イリノイ大学 テネシー大学	Dr. Michael Nastasi	\$19,000,000	極度の放射線照射や機械的負荷の下での材料挙動
30	Energy Frontier Center for Defect Physics in Structural Materials (CDP)	オークリッジ国立研究所	イリノイ大学 オハイオ州立大学 ブラウン大学 カリフォルニア大学バークレー校 ノースカロライナ州立大学 ローレンスリバモア国立研究所	Dr. Malcolm Stocks	\$19,000,000	極度の放射線環境下での合金中の欠陥挙動等の分析
31	Center on Nanostructuring for Efficient Energy Conversion	スタンフォード大学	カーネギー研究所 HRL 研究所 デンマーク工科大学 (デンマーク)	Dr. Fritz Prinz	\$20,000,000	各種エネルギー用途向けのナノスケール材料
32	Center for Energy Frontier Research in Extreme Environments (Efree)	ワシントンカーネギー協会	9つの米国大学 6つのエネルギー省国立研究所	Dr. Ho-Kwang Mao	\$15,000,000	圧力や温度の局時変化への耐久性に優れたエネルギー関連材料

(出典)米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST・CRDSが作成

図表5-6 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
33	Center for Electrical Energy Storage: Tailored Interfaces	アルゴンヌ国立研究所	ノースウェスタン大学 伊利ノイ大学アーバナシャンペーン校 チュレーン大学 オークリッジ国立研究所 テキサスA&M大学 フロリダ大学 クレムソン大学 ジョージア工科大学 グランプリング大学 ルイジアナ工科大学 ペンシルバニア州立大学 ユトレヒト大学 (オランダ) フロリダ大学	Dr. Michael Thackeray	\$19,000,000	電気エネルギー貯蔵のための電気化学反応
34	Computational Catalysis and Atomic-Level Synthesis of Materials: Building Effective Catalysts from First Principles	ルイジアナ州立大学	オークリッジ国立研究所 テキサスA&M大学 フロリダ大学 クレムソン大学 ジョージア工科大学 グランプリング大学 ルイジアナ工科大学 ペンシルバニア州立大学 ユトレヒト大学 (オランダ) フロリダ大学	Dr. James Spivey	\$12,500,000	触媒設計用の計算ツール
35	Science of Precision Multifunctional Nanostructures for Electrical Energy Storage	メリーランド大学	エール大学 カリフォルニア大学アーバイン校 サンディエゴ国立研究所 ロスアラモス国立研究所	Dr. Gary Rubloff	\$14,000,000	電気エネルギーを貯蔵するためのナノ構造を有する電極
36	Revolutionary Materials for Solid State Energy Conversion	ミンガン州立大学	ノースウェスタン大学 オハイオ州立大学 ミシガン大学 カリフォルニア大学ロサンゼルス校 ウェイン州立大学 オークリッジ国立研究所 ケースウェスタンリザーブ大学 コーネル大学 マサチューセッツ工科大学 ミネソタ大学 南カリフォルニア大学 サンディエゴ国立研究所 スタンフォード大学	Dr. Donald Morelli	\$12,500,000	熱を電気に転換するための材料
37	Energy Frontier Research Center for Combustion Science	プリンストン大学	プリンストン大学	Dr. Chung Law	\$20,000,000	輸送機関向け非石油系燃料の燃焼モデル

(出典) 米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST・CRDSが作成

図表5-7 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
38	EFRC for Solid State Lighting Science	サンディア国立研究所	レンセラー工科大学 ニューメキシコ大学 カリフォルニア工科大学 ロスアラモス国立研究所 エール大学 ノースウェスタン大学 マサチューセッツ大学ローウェル校 フィリップスミレックスライティング アルゴンヌ国立研究所 イリノイ大学	Dr. Jerry Simmons	\$18,000,000	固体照明のためのナノ構造
39	Center for Emergent Superconductivity	ブルックヘブン国立研究所	アルゴンヌ国立研究所 イリノイ大学	Dr. Seamus Davis	\$22,500,000	高温超伝導材料
40	Nanostructured Interfaces for Energy Generation, Conversion, and Storage	コーネル大学	ローレンスバークレー国立研究所	Dr. Hector Abruña	\$17,500,000	燃料電池、蓄電池、太陽電池、及び触媒における電極での反応制御
41	Center for Electrocatalysis, Transport Phenomena and Materials for Innovative Energy Storage	ゼネラルエレクトリックグロバルリサーチ	エール大学 スタンフォード大学 ローレンスバークレー国立研究所	Dr. Grigori Solovchik	\$15,000,001	燃料電池とフロー電池を組み合わせたエネルギー貯蔵
42	Northeastern Chemical Energy Storage Center (NOCESC)	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校	ラトガース大学 ニューヨーク州立大学ビンガムトン校 マサチューセッツ工科大学 ローレンスバークレー国立研究所 ミシガン大学 アルゴンヌ国立研究所 ブルックヘブン国立研究所 フロリダ大学	Dr. Clare Grey	\$17,000,000	蓄電池の電極反応に関わる基本原理

(出典) 米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST・CRDSが作成

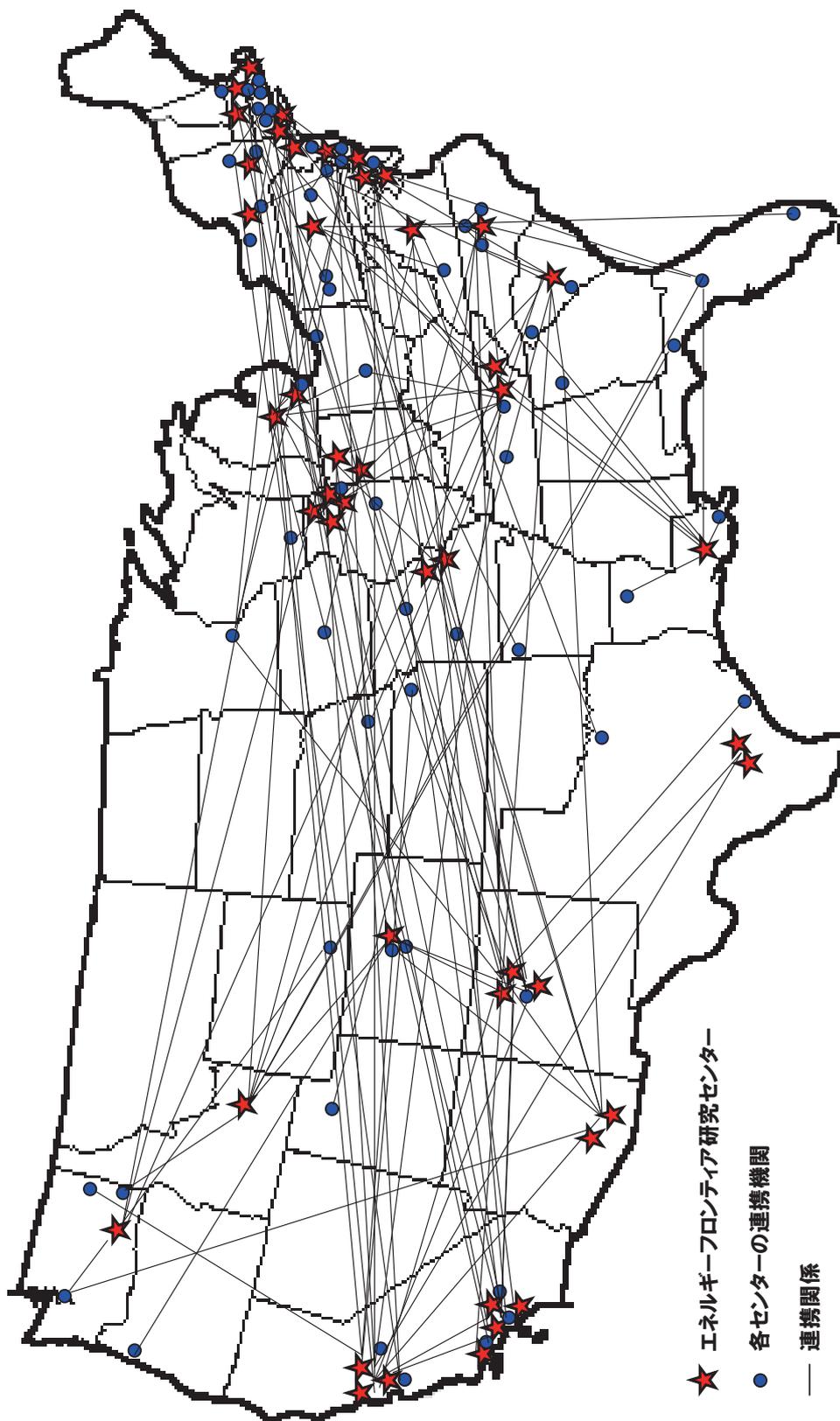
図表5-8 米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」の採択案件

No.	拠点名 (プロジェクト名)	推進組織		リーダー	5年間の 資金助成額	研究概要
		運営機関	連携機関			
43	Science Based Nano-Structure Design and Synthesis of Heterogeneous Functional Materials for Energy Systems	サウスカロライナ大学	ジョージア工科大学 ノースカロライナ州立大学 プリンストン大学 ペンシルバニア大学 ユタ大学 カリフォルニア大学サンタバーバラ校 コネカット大学 パシフィックノースウエスタン国立研究所 オークリッジ国立研究所 サバンナリバー国立研究所 アルゴンヌ国立研究所 アルゴンヌ国立研究所 ノースウェスタン大学 ドレクセル大学 テネシー大学 ノースカロライナ大学 バージニア大学 カリフォルニア工科大学 プリンストン大学 カリフォルニア大学バークレー校 メリーランド大学 アイオワ州立大学 ノースカロライナ大学 ノーステキサス大学 エール大学 スクリプス研究所	Dr. Kenneth Reifsnider	\$12,500,000	エネルギー用途向けのナノ構造材料
44	Fluid Interface Reactions, Structures and Transport (FIRST) Center	オークリッジ国立研究所	アルゴンヌ国立研究所 ノースウェスタン大学 ドレクセル大学 テネシー大学 ノースカロライナ大学 バージニア大学 カリフォルニア工科大学 プリンストン大学 カリフォルニア大学バークレー校 メリーランド大学 アイオワ州立大学 ノースカロライナ大学 ノーステキサス大学 エール大学 スクリプス研究所	Dr. David Wesolowski	\$19,000,000	電気エネルギーの貯蔵、太陽光の燃料への転換、二酸化炭素の地中隔離などの各種先端エネルギーシステムの基本原理
45	Center for Catalytic Hydrocarbon Functionalization	バージニア大学	カリフォルニア工科大学 プリンストン大学 カリフォルニア大学バークレー校 メリーランド大学 アイオワ州立大学 ノースカロライナ大学 ノーステキサス大学 エール大学 スクリプス研究所	Dr. Brent Gunnoe	\$11,000,000	水素ガスを液体燃料化するための触媒
46	Center for Molecular Electrocatalysis	パシフィックノースウエスタン国立研究所	ワシントン大学 (ワシントン州) ペンシルバニア州立大学 ワイオミング大学	Dr. Morris Bullock	\$22,500,000	化学エネルギーや電気エネルギーの変換及び貯蔵

(出典)米国エネルギー省「Synopsis of The 46 EFRCs Awards」に基づきJST-CRDSが作成

図表6 エネルギーフロンティア研究センターの分布

● 一つのセンターが平均で4機関以上と連携し、全米をカバーするネットワークの中で、約700名のシニア研究者と約1,100名の若手研究者や技術支援者が一体となり、エネルギー分野の基礎研究を展開していく。



(出典) 米国エネルギー省「Synopses of The 46 EFRC Awards」に基づき編集

2.3.6 領域毎の課題解決型基礎研究

46のエネルギーフロンティア研究センターが取り組む「10の重点研究領域における基礎研究群」は、一連のワークショップを通じ、以下の方法により抽出された。

a) 水素の製造・貯蔵・利用

1) 水素の製造、2) 水素の貯蔵・供給、3) 燃料電池・燃料電池向け先端材料、の3つのパネルでの討議が行われ、「水素の製造・貯蔵・利用」において優先的に取り組むべき基礎研究として11の方向が特定された。

b) 太陽エネルギーの利用

1) 太陽エネルギーからの電気、2) 太陽エネルギーからの燃料、3) 太陽エネルギーの横断領域、の3つのパネルでの討議が行われ、「太陽エネルギーの利用」において優先的に取り組むべき基礎研究として13の方向が特定された。

c) 超伝導

1) 高度合成技術、2) 新規超伝導体、3) 電磁気スペクトル、4) 熱力学・磁性、5) ボルテックス現象、6) メカニズム・その他の基盤、7) 超伝導の理論計算と設計、8) 超伝導の界面現象／ナノスケールの超伝導体、9) 超伝導特性、10) 超伝導体の用途探索、11) 超伝導体のエネルギー利用、12) 未踏領域への展開、13) 材料・現象・理論・応用、の13のパネルでの討議が行われ、「超伝導」において優先的に取り組むべき基礎研究として7つの方向が特定された。

d) 固体素子照明

1) 発光ダイオード等の科学、2) 有機発光ダイオード等の科学、3) 横断領域・新規材料／光物理学、の3つのパネルでの討議が行われ、「固体素子照明」において優先的に取り組むべき基礎研究として7つの方向が特定された。

e) 先端原子カシステム

1) 極限環境下の材料、2) 極限環境下の化学、3) 分離科学、4) 新規のアクチニド系燃料、5) 新規の廃棄物形態、6) 予測モデリング・シミュレーション、の6つのパネルでの討議が行われ、「先端原子カシステム」において優先的に取り組むべき基礎研究として9つの方向が特定された。

f) 運輸燃料の無公害・高効率燃焼

1) 新規の燃料、2) 燃料の利用、3) 横断的科学、の3つのパネルでの討議が行われ、「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」において優先的に取り組むべき基礎研究として8つの方向が特定された。

g) エネルギーシステムのための地球科学

1) 地質層における多相間の流体移送、2) 地質層における化学的移行過程、3) 副次界面のキャラクタリゼーション、4) 地質系のモデリング・シミュレーション、の

4つのパネルでの討議が行われ、「エネルギーシステムのための地球科学」において優先的に取り組むべき基礎研究として6つの方向が特定された。

h) 電気エネルギーの貯蔵

1) 化学的貯蔵のための科学、2) 容量性貯蔵のための科学、3) 横断領域のための科学、の3つのパネルでの討議が行われ、「電気エネルギーの貯蔵」において優先的に取り組むべき基礎研究として6つの方向が特定された。

i) 極限環境下の材料

1) エネルギー流束による極限環境、2) 化学反応による極限環境、3) 熱的・機械的な極限環境、4) 電氣的・磁氣的な極限環境、の4つのパネルでの討議が行われ、「極限環境下の材料」において優先的に取り組むべき基礎研究として8つの方向が特定された。

j) エネルギーのための触媒

1) 触媒のための科学と理論、2) 重質化石燃料を転換するための触媒、3) 生物学的転換のための触媒、4) 二酸化炭素及び水の光学的・電子的転換のための触媒、5) 横断領域、の5つのパネルでの討議が行われ、「エネルギーのための触媒」において優先的に取り組むべき基礎研究として3つの方向が特定された。

研究領域毎の検討経緯を、以下にまとめて示す。

a) 水素の製造・貯蔵・利用

10の重点研究領域の内、「水素の製造・貯蔵・利用」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2003年5月13日～5月15日に実施された。

議長をマサチューセッツ工科大学のミルドレッド・ドレッセルハウス (Mildred Dresselhaus) 博士、副議長をアルゴンヌ国立研究所のジョージ・クラブツリー (George Crabtree) 博士、オークリッジ国立研究所のマイケル・ブキャナン (Michelle Buchanan) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びドレッセルハウス議長による冒頭挨拶の後、一日目の全体会合 (Plenary Session) において、ワークショップで取り上げる次の3テーマの動向俯瞰が行われた。

- ・「水素の製造」に関する動向俯瞰 (Overview of Hydrogen Production)
- ・「水素の貯蔵・供給」に関する動向俯瞰 (Overview of Hydrogen Storage and Distribution)
- ・「燃料電池・燃料電池向け先端材料」に関する動向俯瞰 (Overview of Fuel Cells and Novel Fuel Cell Materials)

二日目以降はテーマ別パネルに分かれ、個々のテーマについて、それぞれ以下の事項などに基づく討議が実施された。

1) 「水素の製造」パネルでの討議事項

- ・ Solar Production
- ・ Biological and Biomimetic Production
- ・ Bio/Inorganic Interfaces
- ・ Fossil Production
- ・ Nuclear Production

2) 「水素の貯蔵・供給」パネルでの討議事項

- ・ Metal and Compound Hydrides
- ・ Theory and Computation

- Nanostructured Hydrides
- Carbon-Related Materials

3) 「燃料電池・燃料電池向け先端材料」パネルでの討議事項

- Bio-Fuel Cells
- Solid Oxide Fuel Cells
- Fuel Processing
- Electrocatalysis and Automobile Needs
- Polymers in Fuel Cells
- Theory for Fuel Cell Processes

その上で三日目に、3つのパネルの討議結果を総括するための全体会合が行われ、「水素の製造・貯蔵・利用」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の11の方向が特定されている。

-
- ①Low-Cost and Efficient Solar Energy Production of Hydrogen
 - ②Nanoscale Catalyst Design
 - ③Biological, Biomimetic, and Bio-Inspired Materials and Processes
 - ④Complex, Hydride Materials for Hydrogen Storage
 - ⑤Nanostructured and Other Novel Hydrogen Storage Materials
 - ⑥Theory, Modeling, and Simulation of Materials and Molecular Processes
 - ⑦Low-Cost, Highly Active, Durable Cathodes for Low-Temperature Fuel Cells
 - ⑧Membranes and Separation Processes for Hydrogen Production and Fuel Cells
 - ⑨Analytical and Measurement Technologies

⑩Impact of The Hydrogen Economy on The Environment

⑪Safety in The Hydrogen Economy

ワークショップの出席者は全て招聘者で構成されており、議長、副議長を含め、全体で63名が参加している。パネル別の参加者は、次のようになっている。

- ・「水素の製造」パネル；18名
産業界からは2名、米国外については「デンマーク」から1名が参加した。
- ・「水素の貯蔵・供給」パネル；15名
産業界からは2名、米国外については「日本」「ドイツ」「スウェーデン」から各1名が参加した。
- ・「燃料電池・燃料電池向け先端材料」パネル；19名
産業界から3名が参加した。

b) 太陽エネルギーの利用

「太陽エネルギーの利用」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2005年4月18日～4月21日に実施された。

議長をカリフォルニア工科大学のネーサン・ルイス (Nathan Lewis) 博士、共同議長をアルゴンヌ国立研究所のジョージ・クラブツリー (George Crabtree) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びルイス議長による冒頭挨拶の後、一日目の全体会合 (Plenary Session) において、ワークショップで取り上げる次の3テーマの動向俯瞰が行われた。

- ・「太陽エネルギーからの電気」に関する動向俯瞰 (Overview of Solar Electricity)
- ・「太陽エネルギーからの燃料」に関する動向俯瞰 (Overview of Solar Fuels)
- ・「太陽エネルギーの横断領域」に関する動向俯瞰 (Overview of Cross-Cutting)

二日目以降はテーマ別パネルに分かれ、個々のテーマについて、それぞれ以下の事項などに基づく討議が実施された。

1) 「太陽エネルギーからの電気」パネルでの討議事項

- ・ Thermodynamics Limits and Approaches to 3rd Generation Photovoltaics
- ・ New Concepts in Photovoltaics for Widespread Use
- ・ Nanocrystals and Solar Photon Conversion
- ・ Very-High-Efficiency III-V Multijunction Cells
- ・ Small Molecular Weight Organic Solar Cells
- ・ Excitonic Solar Cells
- ・ Fundamental Processes of Charge Injection, Transport, and Charge Separation in Organic Materials
- ・ Polymer and Hybrid Solar Cells
- ・ The Past, Present, and Future of Photoelectrochemistry

- Mesoscopic Injection Solar Cells
- Photoelectrolysis
- Industry Aspects of Photoelectrochemical Energy Conversion

2) 「太陽エネルギーからの燃料」 パネルでの討議事項

- Light-Collecting Supramolecular Assemblies based on Coordination Chemistry
- Beyond The Single Electron : Coupled Electron Transfers in Artificial Photosynthesis
- Realizing Long-lived Charge Separation in Artificial Photosynthetic Systems
- Protein Design for Stabilization of Electron and Proton Transfer Reactions
- Light-Harvesting and Charge Separation in Photosystem
- The Oxygen-Evolving Complex of Photosystem
- Water-Splitting to Form Hydrogen and Oxygen
- Proton-Coupled Electron Transfer / Multiple Electron Transfer
- Collecting Multiple Electrons into A Single Subunit of A Multicomponent Species
- Molecular Chemistry of Renewable Energy
- Advantages and Disadvantages of The Nitrogenase / Hydrogenase System for Biohydrogen Production
- Biological Methane Production
- Direct Biohydrogen Production from Oxygenic Photosynthetic Microorganisms
- Biomass to Ethanol

3) 「太陽エネルギーの横断領域」 パネルでの討議事項

- Solar Hot Water Systems
- Concentrated Solar Thermal Processes for Power Generation
- Concentrated Solar Thermochemical Processes
- Concentrated Photovoltaics
- New Materials for Direct Heat to Electric Energy Conversion – The Thermoelectric Option
- Thermophotovoltaic Generation of Electricity

その上で三日目に、3つのパネルの討議結果を総括するための全体会合が行われ、「太陽エネルギーの利用」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の13の方向が特定されている。

-
- ①Revolutionary Photovoltaic Devices : 50% Efficient Solar Cells
 - ②Maximum Energy from Solar Photons at Low Cost : Designed Plastic Photovoltaic Structures
 - ③Nanostructures for Solar Energy Conversion : Low Cost and High Efficiencies
 - ④Fuels from Water and Sunlight : New Photoelectrodes for Efficient Photoelectrolysis
 - ⑤Leveraging Photosynthesis for Sustainable Solar Production of Biofuels
 - ⑥Using A Bio-Inspired Smart Matrix to Optimize Energy Landscapes for Solar Fuels Production
 - ⑦Solar-Powered Catalysts for Energy-Rich Fuels Formation
 - ⑧Bio-Inspired Molecular Assemblies for Integrating Photon-To-Fuels Pathways
 - ⑨Achieving Defect-Tolerant and Self-Repairing Solar Conversion Systems
 - ⑩Solar Thermochemical Fuel Production

⑪New Experimental and Theoretical Tools to Enable Transformational Research

⑫Solar Energy Conversion Materials by Design

⑬Materials Architectures for Solar Energy : Assembling Complex Structures

ワークショップには、全体で155名が参加している。

産業界からは6名、米国外については「英国」「ドイツ」から各6名、「フランス」「スウェーデン」「イスラエル」から各3名、「日本」「イタリア」「オランダ」「スペイン」から各2名、「スイス」から1名が参加した。

c) 超伝導

「超伝導」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2006年5月8日～5月10日に実施された。

議長をロスアラモス国立研究所のジョン・サラオ (John Sarrao) 博士、共同議長をアルゴンヌ国立研究所のワイクォン・クウォ (Wai-Kwong Kwok) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びサラオ議長による冒頭挨拶の後、一日目から次の13パネルに分かれた討議が展開された。

- 1) 高度合成技術 (Advanced Synthesis of Known Superconductors)
- 2) 新規超伝導体 (Discovery of New Superconductors)
- 3) 電磁気スペクトル (Electromagnetic Spectroscopy)
- 4) 熱力学・磁性 (Thermodynamics and Magnetism)
- 5) ボルテックス現象 (Vortex Phenomena)
- 6) メカニズム・その他の基盤 (Mechanisms and Other Fundamental Issues)
- 7) 超伝導の理論計算と設計 (Computational Superconductivity and Design)
- 8) 超伝導の界面現象／ナノスケールの超伝導体 (Theory of Superconductor Interface Phenomena／Nanoscale Superconductors)
- 9) 超伝導特性 (Superconductor Properties)
- 10) 超伝導体の用途探索 (Making Superconductors Useful)
- 11) 超伝導体のエネルギー利用 (Energy Considerations of Superconductors)
- 12) 未踏領域への展開 (Future Utilization and Functionality)
- 13) 材料・現象・理論・応用 (Materials, Phenomena, Theory, and Applications)

その上で二日目の後半から、13のパネルの討議結果を総括するための全体会合が行われ、「超伝導」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の7つの方向が特定されている。

- ① Pursue Directed Search and Discovery of New Superconductors

- ②Control Structure and Properties of Superconductors Down to The Atomic Scale
 - ③Maximize Current-Carrying Ability of Superconductors with Scalable Fabrication Techniques
 - ④Understand and Exploit Competing Electronic Phases
 - ⑤Develop A Comprehensive and Predictive Theory of Superconductivity and Superconductors
 - ⑥Identify The Essential Interactions that Give Rise to High Tc Superconductivity
 - ⑦Advance The Science of Vortex Matter
-

ワークショップには、全体で90名が参加している。
産業界からは5名、米国外については「日本」から3名、「英国」「ドイツ」から各2名、「カナダ」「ベルギー」「スペイン」から各1名が参加した。

d) 固体素子照明

「固体素子照明」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2006年5月22日～5月24日に実施された。

議長をサンディア国立研究所のジュリア・フィリップス (Julia Phillips) 博士、及びパシフィックノースウェスト国立研究所のポール・バロウズ (Paul Burrows) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長による冒頭挨拶の後、一日目の全体会合 (Plenary Session) において、ワークショップで取り上げる次の3テーマの動向俯瞰が行われた。

- ・「発光ダイオード等の科学」に関する動向俯瞰 (Overview of LED Science)
- ・「有機発光ダイオード等の科学」に関する動向俯瞰 (Overview of OLED Science)
- ・「横断領域・新規材料/光物理学」に関する動向俯瞰 (Overview of Cross-Cutting and Novel Materials Science/Optical Physics)

一日目後半からはテーマ別パネルに分かれ、個々のテーマについて、それぞれ以下の事項などに基づく討議が実施された。

1) 「発光ダイオード等の科学」パネルでの討議事項

- ・ Photon Manipulation and Extraction
- ・ In Situ Epi Characterization
- ・ Nitride Materials and Synthesis
- ・ Defect and Recombination Processes in GaN-Based Materials
- ・ Polarization and Piezoelectronic Phenomena
- ・ InN and In-Rich InGaN
- ・ Influence of In on InGaN Materials Synthesis and Properties
- ・ Alternative Inorganic Semiconductor Materials
- ・ Doping and Charge Transport in Wide Bandgap Semiconductors

- Novel Device Physics and Architectures
- Photon and Exciton Conversion Materials
- Low-Dimensional Light-Emitting Structures

2) 「有機発光ダイオード等の科学」 パネルでの討議事項

- Science of Small Molecule Devices
- Science of Polymer Devices
- Amorphous Molecular Materials
- Conjugated Polymers
- Phosphorescent Emitters
- Purity Issues
- Energetics
- Interface, Doping
- Spin Statistics
- Exciton Dynamics
- Energy Transfer
- Charge Injection
- Charge Transport

3) 「横断領域・新規材料／光物理学」 パネルでの討議事項

- Hybrid Light Emitters
- Nanowire Optoelectronics
- Nanowire Arrays for Solid-State Lighting

- Adaptive Quantum Design for Photon Creation and Manipulation
- Electronic Theory for Nanocomposite Materials
- Enhancing Light Emission with Optical Antennas
- Efficient White Light Sources with Colloidal Quantum Dot Lumophores
- Photon Manipulation
- Scalable Photonic Bandgap Structure
- Optics in a New Light : Inspired by Nature, Enabled by Chemistry
- Resonant Organic-Inorganic Nanostructures for Optoelectronics
- Organic-Inorganic Hybrids

その上で三日目に、3つのパネルの討議結果を総括するための全体会合が行われ、「固体素子照明」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の7つの方向が特定されている。

-
- ①Unconventional Light-Emitting Semiconductors
 - ②Photon Conversion Materials
 - ③Polar Materials and Heterostructures
 - ④Luminescence Efficiency of InGaN Structures
 - ⑤Managing and Exploiting Disorder in Organic Films
 - ⑥Understanding Purity and Degradation in OLEDs
 - ⑦Integrated Approach to OLED Design
-

ワークショップには、全体で80名が参加している。
産業界からは7名、米国外については「日本」「英国」「ドイツ」から各1名が参加した。

e) 先端原子カシステム

「先端原子カシステム」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2006年7月31日～8月3日に実施された。

共同議長をオークリッジ国立研究所のジム・ロベルト (Jim Roberto) 博士、及びローレンスリバモア国立研究所のトーマス・ルビア (Thomas Rubia) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びロベルト議長による冒頭挨拶の後、一日目の後半から次の6つのパネルによる討議が展開された。

- 1) 極限環境下の材料 (Material under Extreme Conditions)
- 2) 極限環境下の化学 (Chemistry under Extreme Conditions)
- 3) 分離科学 (Separations Science)
- 4) 新規のアクチニド系燃料 (Advanced Actinide Fuels)
- 5) 新規の廃棄物形態 (Advanced Waste Forms)
- 6) 予測モデリング・シミュレーション (Predictive Modeling and Simulation)

その上で二日目からは、6つのパネルでの討議結果を総括していく全体会合が開催され、「先端原子カシステム」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の9つの方向が特定されている。

-
- ①Nanoscale Design of Materials and Interfaces that Radically Extend Performance Limits in Extreme Radiation Environments
 - ②Physics and Chemistry of Actinide-Bearing Materials and The *f*-Electron Challenge
 - ③Microstructure and Property Stability under Extreme Conditions
 - ④Mastering Actinide and Fission Product Chemistry under All Chemical Conditions
 - ⑤Exploiting Organization to Achieve Selectivity at Multiple Length Scales
 - ⑥Adaptive Material-Environment Interfaces for Extreme Chemical Conditions
 - ⑦Fundamental Effects of Radiation and Radiolysis in Chemical Processes

⑧Fundamental Thermodynamic and Kinetic Processes in Complex Multi-Component Systems for Fuel Fabrication and Performance

⑨Predictive Multiscale Modeling of Materials and Chemical Phenomena in Multi-Component Systems under Extreme Conditions

本ワークショップには、10の重点研究領域を対象としたワークショップの中で最大規模の235名が参加している。

f) 運輸燃料の無公害・高効率燃焼

「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2006年10月29日～11月1日に実施された。

共同議長をサンディア国立研究所のアンドリュー・マクロイ (Andrew McIlroy) 博士、及びマサチューセッツ工科大学のグレッグ・マクロー (Greg McRae) 博士が務めている。

一日目の予備会合を経て、二日目からはエネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及び両議長による冒頭挨拶の後、次の3つのパネルに分かれた討議が展開された。

- 1) 新規の燃焼 (Novel Combustion)
- 2) 燃料の利用 (Fuel Utilization)
- 3) 横断科学 (Cross Cutting Science)

その上で三日目の後半から、3つのパネルの討議結果を総括するための会合が行われ、「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の8つの方向が特定されている。

-
- ① Combustion Under Extreme Pressure
 - ② Understanding and Exploiting Surface Chemistry in Transportation Systems
 - ③ Breakthrough Discovery Tools
 - ④ Multiscale Modeling
 - ⑤ Basic Research Needs for Smart Engines
 - ⑥ Physical and Chemical Properties for Combustion of 21st Century Transportation Fuels
 - ⑦ Automated Discovery of Fuel Chemistry Kinetics
 - ⑧ Spray Dynamics and Chemistry for New Fuels
-

ワークショップには、全体で102名が参加している。パネル別の参加者は、次のようになっている。

- ・「新規の燃焼」パネル；23名
産業界から2名、米国外については「ドイツ」から1名が参加した。
- ・「燃料の利用」パネル；22名
産業界から4名が参加した。
- ・「横断科学」パネル；26名
産業界、米国外からは参加していない。

g) エネルギーシステムのための地球科学

「エネルギーシステムのための地球科学」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2007年2月21日～2月23日に実施された。

議長をカリフォルニア大学バークレー校のドナルド・デパオロ (Donald DePaolo) 博士、共同議長をスタンフォード大学のフランクリン・オール (Franklin Orr) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及び両議長による冒頭挨拶の後、一日目から次の4つのパネルに分かれた討議が展開された。

- 1) 地質層における多相間の流体移送 (Multiphase Fluid Transport in Geologic Media)
- 2) 地質層における化学的移行過程 (Chemical Migration Processes in Geologic Media)
- 3) 副次界面のキャラクタリゼーション (Subsurface Characterization)
- 4) 地質系のモデリング・シミュレーション (Modeling and Simulation of Geologic Systems)

その上で二日目から、3つのパネルの討議結果を総括するための会合が行われ、「エネルギーシステムのための地球科学」において優先的に取り組むべき基礎研究として、以下の6つの方向が特定されている。

-
- ①Mineral-Water Interface Complexity and Dynamics
 - ②Nanoparticulate and Colloid Chemistry and Physics
 - ③Dynamic Imaging of Flow and Transport
 - ④Transport Properties and In Situ Characterization of Fluid Trapping, Isolation, and Immobilization
 - ⑤Fluid-Induced Rock Deformation
 - ⑥Biogeochemistry in Extreme Subsurface Environments
-

ワークショップには、全体で132名が参加している。

産業界からは1名、米国外については「ノルウェー」から2名、「英国」「ドイツ」「フランス」「イタリア」「スイス」「スペイン」「オーストラリア」から各1名が参加した。

h) 電気エネルギーの貯蔵

「電気エネルギーの貯蔵」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2007年4月2日～4月4日に実施された。

議長をテキサス大学オースチン校のジョン・グッドイナフ (John Goodenough) 博士、共同議長をコーネル大学のヘクター・アブルナ (Héctor Abruña) 博士及びオークリッジ国立研究所のマイケル・ブキャナン (Michelle Buchanan) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びグッドイナフ議長による冒頭挨拶の後、一日目の後半から個々のパネルによる討議が展開された。パネル構成は、以下の3つとなっている。

1) 化学的貯蔵のための科学 (Chemical Storage Sciences)

パネルでの主な討議事項は、以下の通り。

- Systems
- Cathodes
- Anodes and Electrolytes
- Theory and Modeling
- Characterization

2) 容量性貯蔵のための科学 (Capacitive Storage Sciences)

パネルでの主な討議事項は、以下の通り。

- Capacitive Devices and Systems
- Materials for Electrical Double Layer Capacitors
- Pseudocapacitor Materials
- Electrolytes
- Theory and Modeling

3) 横断領域のための科学 (Crosscutting Sciences)

その上で、二日目の終盤から「電気エネルギーの貯蔵」において優先的に取り組むべき基礎研究についての討議が行われ、最終的に以下の6つの方向が特定されている。

-
- ① Novel Designs and Strategies for Chemical Energy Storage
 - ② Solid-Electrolyte Interfaces and Interphases in Chemical Energy Storage
 - ③ Capacitive Energy Storage Materials by Design
 - ④ Electrolyte Interactions in Capacitive Energy Storage
 - ⑤ Multifunctional Materials for Pseudocapacitors and Hybrid Devices
 - ⑥ Rational Materials Design Through Theory and Modeling
-

ワークショップには、全体で128名が参加している。パネル別の参加者は、次のようになっている。

- ・「化学的貯蔵のための科学」パネル；17名
米国外として、「日本」「ドイツ」「カナダ」「スペイン」から各1名が参加した。
- ・「容量性貯蔵のための科学」パネル；16名
産業界からは2名、米国外については「フランス」から2名、「日本」「イタリア」「カナダ」から各1名が参加した。
- ・「横断領域のための科学」パネル；10名
米国外として、「フランス」から1名が参加した。

i) 極限環境下の材料

「極限環境下の材料」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2007年6月11日～6月13日に実施された。

議長をオークリッジ国立研究所のジェフリー・ワズワース (Jeffrey Wadsworth) 博士、共同議長をアルゴンヌ国立研究所のジョージ・クラブツリー (George Crabtree) 博士、ワシントン・カーネギー協会のラッセル・ヘムレー (Russell Hemley) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及びワズワース議長による冒頭挨拶の後、一日目の全体会合 (Plenary Session) において、ワークショップで取り上げる次の4テーマの動向俯瞰が行われた。

- ・「エネルギー流束による極限環境の科学」に関する動向俯瞰 (Energetic Fluxes Extremes Science Perspective)
- ・「化学反応による極限環境の科学」に関する動向俯瞰 (Chemical Extremes Science Perspective)
- ・「熱的・機械的な極限環境の科学」に関する動向俯瞰 (Thermomechanical Extremes Science Perspective)
- ・「電氣的・磁氣的な極限環境の科学」に関する動向俯瞰 (Electromagnetic Extremes Science Perspective)

一日目後半からはテーマ別パネルに分かれ、個々のテーマについて、それぞれ以下の事項などに基づく討議が実施された。

1) 「エネルギー流束による極限環境」パネルでの討議事項

- ・ Surface in Interactions
- ・ Swift Heavy Ion Effects
- ・ Fusion Materials
- ・ Simulations and Modeling of Ion Effects in Solids

2) 「化学反応による極限環境」パネルでの討議事項

- ・ Extreme Aqueous Environments
- ・ High-Temperature Electrochemistry

- Geochemical Environments
- High-Temperature Reactive Gases
- Environmental Reactions of Materials at Extremely High Temperatures
- Other Extreme Reactive Environments (e.g. Radiation, Liquid Metals, Erosion)

3) 「熱的・機械的な極限環境」パネルでの討議事項

- Static Overview Ideas

4) 「電氣的・磁氣的な極限環境」パネルでの討議事項

- High Electric Field Ideas
- High Magnetic Field Ideas

その上で二日目の終盤から「極限環境下の材料」において優先的に取り組むべき基礎研究についての討議が行われ、最終的に以下の8つの方向が特定されている。

- ① Design of Materials with Revolutionary Tolerance to Extreme Photon and Particle Fluxes
 - ② Nonequilibrium Synthesis and Processing with Energetic Particle and Photon Beams
 - ③ Toward Ideal Surface Stability
 - ④ Fundamental Reaction Dynamics at Extremes
 - ⑤ Novel Materials by Design
 - ⑥ Disordered, Nanophase, and Composite Materials
 - ⑦ Exploring Thermomechanical Limits of Materials
 - ⑧ High-Performance Electric and Magnetic Materials
-

ワークショップには、全体で128名が参加している。パネル別の参加者は、次のようになっている。

- ・「エネルギー流束による極限環境」パネル；28名
米国外として、「英国」「ドイツ」から各1名が参加した。
- ・「化学反応による極限環境」パネル；12名
産業界から1名が参加した。
- ・「熱的・機械的な極限環境」パネル；22名
米国外として、「英国」「ロシア」「カナダ」から各1名が参加した。
- ・「電氣的・磁氣的な極限環境」パネル；23名
産業界からは2名、米国外については「英国」から1名が参加した。

j) エネルギーのための触媒

「エネルギーのための触媒」を未来のエネルギーシステム実現に向けた課題として位置付け、課題を解決するための基礎研究を抽出したワークショップは、2007年8月6日～8月8日に実施された。

共同議長をカリフォルニア大学バークレー校のアレクシス・ベル (Alexis Bell) 博士、カリフォルニア大学デービス校のブルース・ゲーツ (Bruce Gates) 博士、及びパシフィックノースウェスト国立研究所のダグラス・レイ (Douglas Ray) 博士が務めている。

エネルギー省基礎エネルギー科学局のパトリシア・ダーマー局長、及び議長による冒頭挨拶の後、一日目後半から次の5つのパネルに分かれた討議が展開された。

- 1) 触媒のための科学と理論 (Catalysis as a Multidisciplinary Science and Theory)
- 2) 重質化石燃料を転換するための触媒 (Advanced Catalysts for the Conversion of Heavy Fossil Energy Feedstocks)
- 3) 生物学的転換のための触媒 (Advanced Catalysts for Conversion of Biologically Derived Feedstocks)
- 4) 二酸化炭素及び水の光学的・電子的転換のための触媒 (Advanced Catalysts for the Photo- and Electro-Driven Conversion of Carbon Dioxide and Water)
- 5) 横断領域 (Crosscutting Challenges)
[Characterization of Solid Catalysts with Enhanced Spatial, Temporal, and Energy Resolution] [Theory and Computation for Catalysis]などを討議。

その上で二日目から、「エネルギーのための触媒」において優先的に取り組むべき基礎研究についての討議が行われ、以下の3つの方向が特定されている。

-
- ① Selective Catalytic Conversion of Fossil Feedstocks
 - ② Chemistry of Lignocellulosic Biomass : Deconstruction and Catalytic Conversion to Fuels
 - ③ Photo- and Electro-Driven Conversion of Carbon Dioxide and Water
-

ワークショップには、全体で130名が参加している。

産業界からは11名、米国外については「ドイツ」「オランダ」から各1名が参加した。

3. 調査結果の総括

我が国では、第2期科学技術基本計画において「ナノテク・材料」が重点四分野の一つに指定され、第2期、第3期基本計画の下で研究投資が行われてきた。

横断的基盤となるナノテクに重点投資を行う動きは、2000年以降の欧米でも共通して見られる。世界が科学基盤としてのナノテクに期待し、投資を継続してまもなく10年を迎えることになり、研究成果の社会還元を促すべき段階に入る。そして、その際の有力な方向として「社会課題を解決するためのナノテク」という位置付けが浮かび上がる。

第3期基本計画の中で「課題解決のための科学」の重要性が指摘された。日本の将来に向けた課題を設定し、課題解決の戦略を策定・推進していく必要がある、この戦略実行においてナノテクは重要な役割を果たし得る。我が国の強みであるナノテクを核とした研究を、社会のイノベーションに結びつけていく動きが期待される。

実際に今、世界では地球環境問題の解決が急務となった。「環境・エネルギーの課題を解決するためのナノテク」が強く求められている。

これらの背景を受けて、「“ナノテク”の“環境・エネルギー”への展開」をテーマとする「G-TeC (Global Technology Comparison)」を行った。G-TeCは、重要な科学技術領域や研究システムに焦点を当て、海外の状況を調査分析することで、日本のポジションを確認し、今後取るべき戦略の立案に貢献することをミッションとする。

調査には、公開情報に基づく基礎調査、国内外での現地会合などの手法を用いた。これらをもとに「環境・エネルギーのためのナノテク研究」及び「課題解決のためのナノテク研究」に関する海外動向を分析し、その上で「ナノテクを環境・エネルギーの課題に展開していく方策」を検討した。

a) 基礎調査、国内現地会合等に基づく調査

最初に、ナノテクの実用化状況を把握するため、国内外の関連調査動向を調べた。その結果、米国やアジアの調査機関などが「公開情報に基づくナノテク実用化事例」を抽出していることが分かった。

これらの調査は、2000年以降の各国・地域での継続的研究投資を受けて、ナノテクの成果が社会でどの程度実用化されているのかを分析、推定することを大きな目的としている。情報誌や企業ウェブなどの公開情報に基づくため、用いた情報ソースにより抽出事例の用途や地域区分に偏りは見られが、いずれの結果も、ナノテクがすでに産業の多様な用途に展開されている実態を示唆している。

そこで、より詳細な現状を把握するため、産業界への直接ヒヤリングを試みた。具体的には分析対象を“有機部材”と“無機部材”に大別した上で、「化学」「電気・電子」「繊維」などの複数の関係者との討議を持ち、ナノテクの適用実態を追跡した。ヒヤリング結果をもとにナノテクの実用化状況を推定すると、以下の特徴が導き出される。

- ・産業界の多様な分野において、「商品」や「製造プロセス」の形でナノテクの実用化が進んでいる。

- ・企業ではナノテクの応用が中心に据えられており、基礎研究はあまり行われていない。
- ・商品化の課題解決を目的に基礎研究に取り組む場合はあるが、開発が完了した段階で研究がストップしてしまう。
- ・したがって企業は、「大学が取り組むナノテクの基礎研究」に期待しており、商品化の課題解決に資する（企業の技術ニーズに合致した）ナノテクを求めている。

上記想定に従えば、「大学の基礎研究」と「企業の技術ニーズ」の結びつきを深めることで、ナノテクの実用化が一層促進されることになる。そのために、二つの融合に適した研究領域を具体化していくが必要になる。

そこで以下はこれらのポイントを踏まえ、本調査の重点対象として設定した「環境・エネルギー」の領域において、ナノテクを巡る世界の動向を調べた。

b) 海外現地会合等に基づく調査

環境・エネルギーの領域でナノテクを巡る世界動向を概観した結果、「環境・エネルギー」「ナノテク」のいずれも分野横断的特徴を持つため、関連する多様かつ多数の動きが見られることが確認された。

そこで、本調査の趣旨を踏まえ、「ナノテクの環境・エネルギーへの展開」という形で明確に区分できる動きにのみ対象を絞り、各国・地域の状況を比較した。その結果、欧州及び米国において、注目すべき動きが見られることが分かった。

欧州については、EU全体、及び英国、ドイツ、フランスなど各国での動きを概観した結果、ナノテク研究コミュニティ全体として環境・エネルギーへの展開を強めようとする動きが確認された。こうしたコミュニティ全体の動きに加え、個々の研究現場においても、ナノテクを環境・エネルギーに展開する動きが見つかる。

一方、米国では、より明瞭な動きが見られ、オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化していることが分かった。具体的には、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤として、ナノテクが明確に位置付けられている。

そこで以下、米国で導入が進む「エネルギーフロンティア研究センター」について、その内容を詳細に調べた。研究拠点を率いる複数のリーダーとの現地会合を持ち、仕組みとしての特徴や導入実態を把握した。さらに関連資料などをもとに、「センターの設立経緯」「センターの選定方法」「センターの研究活動」などを分析した。

c) 調査結果等に基づく総合的検討

以上の経緯に基づき「環境・エネルギーのためのナノテク研究」及び「課題解決のためのナノテク研究」に関する海外動向を分析し、「ナノテクを環境・エネルギーの課題に展開していく方策」を総合的に検討した。その際、ナノテクを巡る世界全体の動向を十分に把握するため、研究開発戦略センターが取りまとめた報告書「『ナノテクノロジー』グランドデザイン（CRDS-FY2009-SP-07）」を参考とした。

得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 欧米において、「ナノテク」を「環境・エネルギー」に展開する動きが高まりを見せている。低炭素社会実現に向け、新たな環境・エネルギーシステムを構築しなければならないこと、そのためにナノテクが鍵を握ることが背景としてある。
- 2) 欧州では、ナノテク研究コミュニティの代表的国際会議である「ユーロ・ナノフォーラム」や「ナノテク・ヨーロッパ」において、2008年以降、環境・エネルギーへの展開が主要テーマとして位置付けられてきた。
- 3) 2009年6月開催のユーロ・ナノフォーラムでは、「持続的経済社会のためのナノテク」がメインテーマに選ばれ、「エネルギー」「グリーン製造プロセス」「健康&環境」などの多様な視点に基づく討議が行われている。
- 4) 米国では、より明瞭な動きが見られる。オバマ大統領のグリーン・ニューディール政策を受けて、環境・エネルギーに対する研究が強化された。この中で、ナノテクを環境・エネルギーに展開する研究が活発化している。
- 5) 具体的には、新たな研究イニシアチブの一つである「エネルギーフロンティア研究センター」において、エネルギーにイノベーションをもたらす科学基盤として、ナノテクが明確に位置付けられた。
- 6) エネルギー省のステーブン・チュウ長官は、2009年5月に開催された次年度予算の公聴会で、米国がエネルギー戦略を展開していく基盤として「3つの研究イニシアチブ」を示している。
- 7) 第一が、「エネルギーフロンティア研究センター」である。米国内に46の研究拠点を整備するもので、5年間で7億7,700万ドルの資金を投ずる。基礎研究が目的であり、応用研究は対象としない。そのために、大学を中心とした研究体制を組む。
- 8) 第二が、「エネルギー高等研究計画局」である。基礎ではなく応用を対象とするもので、革新的エネルギー技術を開発するために、産業界では取り組むことが困難な「リスクは高いが大きな成果が期待される研究」への資金助成を行う。米国再生・再投資法から4億ドルの資金が充当された。
- 9) そして第三が「エネルギーイノベーション・ハブ」になる。ここでは、基礎や応用に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の研究活動が行われる。緊密に連携した「アンダー・ワンルーフな仕組み」を築き、多様な分野のトップ人材を糾合していく。いわゆる「エネルギー分野の“ベル研究所”」を作り出すことを目指す。一つのハブに5年間で1億ドル以上の資金を投入する。

- 10) 3つのイニシアチブの先頭を切り、2009年4月にエネルギーフロンティア研究センターの採択結果が発表され、最終公募に残った約260件の提案の中から46のセンターが選定された。センターの内訳を見ると、その多くが科学的ブレークスルーをもたらす基盤としてナノテクを位置付けており、エネルギー研究の中でナノテクコミュニティが重要な役割を担っていくことが分かる。
- 11) 今後は、これらのイニシアチブの下で米国におけるエネルギー研究がさらに強化されることになり、その中でナノテクの環境・エネルギーへの展開が促進されていく。
- 12) ナノテクを環境・エネルギーに展開する仕組みとして、米国は「課題解決型基礎研究」を重視している。エネルギーフロンティア研究センターへのファンディングを分析すると、そのことが良く分かる。
- 13) エネルギーフロンティア研究センターの場合、まず未来のエネルギーシステムを描き出し、その上で、システム実現に向けた基礎研究に取り組む46のセンターに資金提供を行っている。この点が、従来のファンディング制度と大きく異なる。
- 14) すなわち、「最初に“社会が求める用途 (Social Use)”を提示し」、その上で「用途実現に必要な基礎研究 (Fundamental Research) を特定し、支援を行う」、いわゆる「課題解決型基礎研究 (Use-Inspired Fundamental Research)」の枠組みとして機能している。
- 15) 米国が課題解決型基礎研究に着目する理由は、「従来の基礎研究からは、ネイチャーなどのトップジャーナルに掲載される論文は輩出されるものの、イノベーションを促すような研究成果が生まれにくかった」ことにある。
- 16) つまり、特定のゴールを持たない「原理探求型 (Curiosity-Driven) 基礎研究」に加え、目指すべきゴールを掲げた「課題解決型基礎研究」への支援をバランス良く強化することで、ナノテクによるエネルギーのイノベーションを促すことを狙っている。
- 17) こうした課題解決型基礎研究の仕組みを創りだすため、エネルギー省は事前に一連のワークショップを行っている。未来のシステムとして「社会が求める複数の用途 (例えば、“水素エネルギーを活かした経済社会”や“太陽エネルギーの高効率利用”など)」を示し、これらの用途を実現するための基礎研究をワークショップで特定していった。そのために、全米のトップクラス研究者を招聘し、基礎と応用両面からの横断的議論を実施している。
- 18) ワークショップの結論として、「複雑で巨大なエネルギー問題には、特定の科学グループだけでは取り組めないこと」、「エネルギーの課題解決には、新たな科学基盤の構築が求められること」、具体的には「“素子”レベルではなく、“原子”レベルの探求

が必要になること」、したがって「ナノテク研究を強化することが、課題の本質的解決につながること」など、エネルギーにイノベーションをもたらすための基本要件が明らかになった。

- 19) これらの要件に基づき創出された仕組みが、エネルギーフロンティア研究センターになる。選定されたセンターの多くがナノテクを研究対象に取り上げているが、「ナノテクで解決可能なエネルギーの課題を見つけ出そうとした」ものではなく、「エネルギーの課題解決方策を探求する中で、結果としてナノテクが選出された」ものであることが分かる。
- 20) 「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」「気候変動枠組条約締結会議（COP）」などでの議論を通じ、世界が協働で解決すべき国際課題として、地球温暖化が明確に位置付けられた。低炭素社会実現に向け、「2020年の中期目標」及び「2050年の長期目標」という形で、各国・地域が果たす役割の具体化が進む。
- 21) 今後は、それぞれの目標達成に向け、生活様式を含む経済や社会全般について「目指すべき未来のシステム」を定めた上で、システム構築に必要となる科学的ブレークスルー、そのために求められる基礎研究を特定していくことになる。
- 22) これらの背景の下、低炭素社会構築を目指し、欧州及び米国では「ナノテク」を「環境・エネルギー」に展開する動きが広がっている。特に、米国は、科学的ブレークスルーをもたらす基盤としてナノテクを明確に位置付け、ナノテクを環境・エネルギーに展開する基礎研究を本格化した。
- 23) 米国の取り組みとして、「課題解決型基礎研究」を重視する点も注目される。イニシアチブとして立ち上げた「エネルギーフロンティア研究センター」の中で、最初に目指すべきシステムを明示した上で、システム実現に必要な基礎研究を特定し、支援する手法を取った。基礎研究の成果を社会のイノベーションにつなげることを狙いとする。
- 24) こうした欧米の動向を踏まえると、今後取るべきナノテク研究戦略として、「ナノテク固有の優れた機能や現象をシステムの中に組み込む」、その上で「ナノテクを組み込んだ高機能・高効率システムを環境・エネルギーにおいて活かす」ことが有望な選択肢として浮かび上がってくる。そして、その際には「課題解決につながる基礎研究を強化していく」ことが重要な条件となる。

【謝 辞】

本調査のために、「ナノテク・材料」に関わる国内有識者として、以下の3名の方々からご協力をいただいた。

・魚崎浩平 氏 北海道大学 教授 大学院理学研究院化学部門

- ・片岡一則氏 東京大学 教授 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻／大学院医学系研究科疾患生命工学センター
- ・田畑 仁氏 東京大学 教授 工学系研究科バイオエンジニアリング専攻／電気系工学専攻

また、研究開発戦略センター内部では、G-TeCユニットに加え、物質・材料ユニット／ナノテクノロジーユニットから以下の3名が調査に参画した。

- ・田中一宜 研究開発戦略センター 上席フェロー
- ・曾根純一 研究開発戦略センター シニアフェロー
- ・中山智弘 研究開発戦略センター フェロー

これらの有識者等から、ナノテク・材料を巡る国内外の先端動向、G-TeC調査で得られた分析結果などについて、多岐に渡る識見を提示いただいた。

合わせて、魚崎浩平氏、田畑仁氏、田中、曾根、中山には、欧米において実施した「ケンブリッジ大学」「米国科学財団」「カリフォルニアナノシステム研究所」との現地会合に出席いただいた（図表7に主な海外現地会合機関を記載）。

ここに記して、謝意を表する。

図表7 主な海外現地会合機関

会合機関			対象者	役職	会合日
地域	名称／日本語	名称／英語等			
米国	米国科学財団	National Science Foundation	Dr. Mihail Roco	Senior Advisor	2009.03.18
米国	カリフォルニアナノシステム研究所	California NanoSystems Institute	Dr. Leonard Rome	Director	2009.03.20
			Dr. Kang Wang	Associate Director	
米国	カリフォルニア大学・エネルギーフロンティア研究センター	Light-Material Interactions in Energy Conversion, One of Energy Frontier Research Centers at California Institute of Technology	Dr. Harry Atwater	Director	2009.09.30
米国	南カリフォルニア大学・エネルギーフロンティア研究センター	Emerging Materials for Solar Energy Conversion and Solid State Lighting, One of Energy Frontier Research Centers at University of Southern California	Dr. Daniel Dapkus	Director	2009.09.30
英国	ケンブリッジ大学・材料科学&冶金部門	Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge	Dr. Anthony Cheetham	Professor	2009.03.16

参 考

本調査では、「環境・エネルギーのためのナノテク研究」及び「課題解決のためのナノテク研究」の注目事例として米国エネルギー省「エネルギーフロンティア研究センター」を取り上げ、重点的な分析を行った。

センター設立の基盤となったエネルギー省による一連のワークショップの詳細が、下記ウェブサイトの報告書に記載されている。

- ・「水素の製造・貯蔵・利用」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for the Hydrogen Economy)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/NHE_rpt.pdf
- ・「太陽エネルギーの利用」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Solar Energy Utilization)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf
- ・「超伝導」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Superconductivity)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SC_rpt.pdf
- ・「固体素子照明」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Solid-State Lighting)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SSL_rpt.pdf
- ・「先端原子力システム」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Advanced Nuclear Energy Systems)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/ANES_rpt.pdf
- ・「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/CTF_rpt.pdf
- ・「エネルギーシステムのための地球科学」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Geosciences : Facilitating 21st Century Energy Systems)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/GEO_rpt.pdf
- ・「電気エネルギーの貯蔵」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Electrical Energy Storage)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/EES_rpt.pdf
- ・「極限環境下の材料」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs for Materials under Extreme Environments)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/MUEE_rpt.pdf
- ・「エネルギーのための触媒」に対する基礎研究ニーズ (Basic Research Needs : Catalysis for Energy)、http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/CAT_rpt.pdf

報告書から「各ワークショップでのリーダー構成等」を抜粋し、以下にまとめて示した。

1) 「水素の製造・貯蔵・利用」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR THE HYDROGEN ECONOMY

Chair :	Mildred Dresselhaus, Massachusetts Institute of Technology
Associate Chairs :	George Crabtree, Argonne National Laboratory Michelle Buchanan, Oak Ridge National Laboratory
Panel Chairs :	Production Tom Mallouk, Pennsylvania State University Laurie Mets, The University of Chicago Storage Kathy Taylor, General Motors (retired) Puru Jena, Virginia Commonwealth University Fuel Cells Frank DiSalvo, Cornell University Tom Zawodzinski, Case Western Reserve University
Office of Basic Energy Sciences Contact	Harriet Kung, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Special Assistance	
Technical	Ian S. Anderson, Oak Ridge National Laboratory Phil Britt, Oak Ridge National Laboratory Larry Curtiss, Argonne National Laboratory Jay Keller, Sandia National Laboratory Romesh Kumar, Argonne National Laboratory Wai Kwok, Argonne National Laboratory John Taylor, Argonne National Laboratory
Administrative	Janice Allgood, Oak Ridge National Laboratory Brenda Campbell, Oak Ridge National Laboratory Karen Talamini, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy

2) 「太陽エネルギーの利用」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR SOLAR ENERGY UTILIZATION

Chair	Nathan S. Lewis, California Institute of Technology
Co-Chair	George Crabtree, Argonne National Laboratory
Panel Chairs	
Solar Electric	Arthur J. Nozik, National Renewable Energy Laboratory
Solar Fuels	Michael R. Wasielewski, Northwestern University
Cross-Cutting	Paul Alivisatos, Lawrence Berkeley National Laboratory
Office of Basic Energy Sciences Contact	Harriet Kung, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Special Assistance	
Technical	Jeffrey Tsao, Sandia National Laboratories Elaine Chandler, Lawrence Berkeley National Laboratory Wladek Walukiewicz, Lawrence Berkeley National Laboratory Mark Spitler, National Renewable Energy Laboratory Randy Ellingson, National Renewable Energy Laboratory Ralph Overend, National Renewable Energy Laboratory Jeffrey Mazer, Solar Energy Technologies, U.S. Department of Energy Mary Gress, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy James Horwitz, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Administrative	Christie Ashton, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy Brian Herndon, Oak Ridge Institute for Science and Education Leslie Shapard, Oak Ridge Institute for Science and Education
Publication	Renée M. Nault, Argonne National Laboratory

3) 「超伝導」に対する基礎研究ニーズ/ ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR SUPERCONDUCTIVITY

Chair	John Sarrao, Los Alamos National Laboratory
Co-chair	Wai-Kwong Kwok, Argonne National Laboratory
Panel Chairs	
Materials	Ivan Bozovic, Brookhaven National Laboratory
Theory	Igor Mazin, Naval Research Laboratory
Phenomena	J.C. Seamus Davis, Cornell University Leonardo Civale, Los Alamos National Laboratory
Applications	David Christen, Oak Ridge National Laboratory
Office of Basic Energy Sciences Contact	James Horwitz, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Special Assistance	
Technical	Gary Kellogg, Sandia National Laboratories Douglas Finnemore, Ames Laboratory George Crabtree, Argonne National Laboratory Ulrich Welp, Argonne National Laboratory
Administrative	Christie Ashton, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy Brian Herndon, Oak Ridge Institute for Science and Education Leslie Shapard, Oak Ridge Institute for Science and Education
Publication	Renée M. Nault, Argonne National Laboratory

4) 「固体素子照明」に対する基礎研究ニーズ/ ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR SOLID-STATE LIGHTING

Chair	Julia M. Phillips, Sandia National Laboratories
Co-Chair	Paul E. Burrows, Pacific Northwest National Laboratory
Panel Chairs	
LED Science	Robert F. Davis, Carnegie Mellon University Jerry A. Simmons, Sandia National Laboratories
OLED Science	George G. Malliaras, Cornell University Franky So, University of Florida
Cross-Cutting Science	James A. Misewich, Brookhaven National Laboratory Arto V. Nurmikko, Brown University Darryl L. Smith, Los Alamos National Laboratory
Workshop Coordinator	Jeffrey Y. Tsao, Sandia National Laboratories, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Office of Basic Energy Sciences Contact	Harriet Kung, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Special Assistance	
Technical	Mary H. Crawford, Sandia National Laboratories Michael E. Coltrin, Sandia National Laboratories Timothy J. Fitzsimmons, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy Aravinda Kini, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Administrative	Christie Ashton, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy Brian Herndon, Oak Ridge Institute for Science and Education Sophia Kitts, Oak Ridge Institute for Science and Education Leslie Shapard, Oak Ridge Institute for Science and Education
Publication	Phillip W. Brittenham, Sandia National Laboratories Michael P. Vittitow, Sandia National Laboratories

5) 「先端原子力システム」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR ADVANCED NUCLEAR ENERGY SYSTEMS

Co-Chairs	Jim Roberto, Oak Ridge National Laboratory Tomas Diaz de la Rubia, Lawrence Livermore National Laboratory
Panel Leads	
Materials under Extreme Conditions	Ron Gibala, University of Michigan Steve Zinkle, Oak Ridge National Laboratory
Chemistry under Extreme Conditions	John R. Miller, Brookhaven National Laboratory Simon Pimblott, University of Notre Dame
Separations Science	Carol Burns, Los Alamos National Laboratory Ken Raymond, University of California, Berkeley
Advanced Actinide Fuels	Robin Grimes, Imperial College, UK Kemal Pasamehmetoglu, Idaho National Laboratory
Advanced Waste Forms	Sue Clark, Washington State University Rodney Ewing, University of Michigan
Predictive Modeling and Simulation	Al Wagner, Argonne National Laboratory Sidney Yip, Massachusetts Institute of Technology
Crosscutting Research Themes	Michelle Buchanan, Oak Ridge National Laboratory George Crabtree, Argonne National Laboratory John Hemminger, University of California, Irvine John Poate, Colorado School of Mines
BES lead	John C. Miller, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy
Technical	Norm Edelstein, Lawrence Berkeley National Laboratory Tim Fitzsimmons, Department of Energy Greg Gruzalski, Oak Ridge National Laboratory Gordon Michaels, Oak Ridge National Laboratory Lester Morss, Department of Energy Mark Peters, Argonne National Laboratory
Administrative	Karen Talamini, Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy

6) 「運輸燃料の無公害・高効率燃焼」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

**BASIC RESEARCH NEEDS FOR CLEAN AND EFFICIENT
COMBUSTION OF 21st CENTURY TRANSPORTATION FUELS**

Co-Chairs	Andrew McIlroy, Sandia National Laboratories Greg McRae, Massachusetts Institute of Technology
Panel Leads	
Novel Combustion	Volker Sick, University of Michigan Dennis L. Siebers, Sandia National Laboratories
Fuel Utilization	Charles K. Westbrook, Lawrence Livermore National Laboratory Philip J. Smith, The University of Utah
Cross-Cutting Science	Craig Taatjes, Sandia National Laboratories Arnaud Trouve, University of Maryland Albert F. Wagner, Argonne National Laboratory
Office of Basic Energy Sciences Contact	Eric Rohlfing, Department of Energy
Special Assistance	
Technical	Dawn Manley, Sandia National Laboratories Frank Tully, Department of Energy Richard Hilderbrandt, Department of Energy William Green, Massachusetts Institute of Technology
Administrative	Diane Marceau, Department of Energy Joree O'Neal, Oak Ridge Institute for Science and Education Margaret Lyday, Oak Ridge Institute for Science and Education
Publication	Frank Cebulski, Sandia National Laboratories Tracy R. Garcia, Sandia National Laboratories Daniel Strong, Sandia National Laboratories

7) 「エネルギーシステムのための地球科学」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

**BASIC RESEARCH NEEDS FOR GEOSCIENCES :
FACILITATING 21st CENTURY ENERGY SYSTEMS**

Chair, Organizing Committee	Donald J. DePaolo, University of California Berkeley
Co-Chair, Organizing Committee	Franklin M. Orr Jr., Stanford University
Co-Lead, Multiphase Fluid Transport	Sally M. Benson, Lawrence Berkeley National Laboratory and Stanford University
Co-Lead, Multiphase Fluid Transport	Michael Celia, Princeton University
Co-Lead, Chemical Migration Panel	Andy Felmy, Pacific Northwest National Laboratory
Co-Lead, Chemical Migration Panel	Kathryn L. Nagy, University of Illinois at Chicago
Co-Lead, Characterization Panel	Graham E. Fogg, University of California Davis
Co-Lead, Characterization Panel	Roel Snieder, Colorado School of Mines
Co-Lead, Modeling Panel	James Davis, U.S. Geological Survey
Co-Lead, Modeling Panel	Karsten Pruess, Lawrence Berkeley National Laboratory
Co-Lead, Technical Perspectives Factual Document	Julio Friedmann, Lawrence Livermore National Laboratory
Co-Lead, Technical Perspectives Factual Document	Mark Peters, Argonne National Laboratory
BES Lead	Nicholas B. Woodward, U.S. Department of Energy Office of Basic Energy Sciences
BES Contact	Patrick Dobson, U.S. Department of Energy Office of Basic Energy Sciences
BES Administrative Contact	Karen Talamini, U.S. Department of Energy Office of Basic Energy Sciences

8) 「電気エネルギーの貯蔵」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS FOR ELECTRICAL ENERGY STORAGE

Chair	John B. Goodenough, University of Texas, Austin
Co-Chairs	Héctor D. Abruña, Cornell University Michelle V. Buchanan, Oak Ridge National Laboratory
Panel Leads	
Chemical Storage Science	Steven Visco, Lawrence Berkeley National Laboratory M. Stanley Whittingham, Binghamton University
Capacitive Storage Science	Bruce Dunn, University of California, Los Angeles Yury Gogotsi, Drexel University
Cross-Cutting Science	Andrew Gewirth, University of Illinois Daniel Nocera, Massachusetts Institute of Technology
Basic Energy Sciences Leads	Richard (Dick) Kelley, Office of Science, Department of Energy John S. Vetrano, Office of Science, Department of Energy
Administrative	Christie L. Ashton, Basic Energy Sciences, Department of Energy Karen Chitwood, Oak Ridge Institute for Science and Education Sophia Kitts, Oak Ridge Institute for Science and Education
Communications/Web/Publications	Brenda Campbell, Oak Ridge National Laboratory Deborah Counce, Oak Ridge National Laboratory Jeanne Dole, Oak Ridge National Laboratory Greg Gruzalski, Oak Ridge National Laboratory Sandi Lyttle, Oak Ridge National Laboratory Virgie Jo Sapp, Oak Ridge National Laboratory Brenda Smith, Oak Ridge National Laboratory Debbie Stevens, Oak Ridge National Laboratory

9) 「極限環境下の材料」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

**BASIC RESEARCH NEEDS FOR MATERIALS
UNDER EXTREME ENVIRONMENTS**

Chair	Jeffrey Wadsworth, Oak Ridge National Laboratory
Co-Chairs	George W. Crabtree, Argonne National Laboratory Russell J. Hemley, Carnegie Institution of Washington
Technical Coordinator	Michelle Buchanan, Oak Ridge National Laboratory
Panel Leads	
Energetic Flux Extremes	Roger Falcone, Lawrence Berkeley National Laboratory Ian Robertson, University of Illinois at Urbana-Champaign
Chemical Extremes	John Stringer, EPRI [retired] Pete Tortorelli, Oak Ridge National Laboratory
Thermomechanical Extremes	George T. (Rusty) Gray, Los Alamos National Laboratory Malcolm Nicol, University of Nevada, Las Vegas
Electromagnetic Extremes	Jane Lehr, Sandia National Laboratories Stanley W. Tozer, National High Magnetic Field Laboratory
Cross-Cutting Science	Tomás Diaz de la Rubia, Lawrence Livermore National Laboratory
Basic Energy Sciences Leads	Timothy Fitzsimmons, Office of Science, Department of Energy John S. Vetrano, Office of Science, Department of Energy
Administrative	Christie L. Ashton, Basic Energy Sciences, Department of Energy Sophia Kitts, Oak Ridge Institute for Science and Education Connie Landson, Oak Ridge Institute for Science and Education
Communications/Web/Publications	Brenda Campbell, Oak Ridge National Laboratory Greg Gruzalski, Oak Ridge National Laboratory Deborah Stevens, Oak Ridge National Laboratory

10) 「エネルギーのための触媒」に対する基礎研究ニーズ/
ワークショップのリーダー構成等

BASIC RESEARCH NEEDS : CATALYSIS FOR ENERGY

Co-Chairs	Alexis T. Bell, University of California – Berkeley Bruce C. Gates, University of California – Davis Douglas Ray, Pacific Northwest National Laboratory
Panel Leads	
Grand Challenges	Mark Barteau, University of Delaware Daniel G. Nocera, Massachusetts Institute of Technology
Conversion of Heavy Fossil Energy Feedstocks	Marvin Johnson, Phillips Petroleum Company (retired) Johannes Lercher, Technical University of Munich
Biologically Derived Feedstocks	Harvey W. Blanch, University of California – Berkeley George W. Huber, University of Massachusetts at Amherst
Photo- and Electro- Driven Conversion	Michael Henderson, Pacific Northwest National Laboratory Peter C. Stair, Northwestern University
Crosscutting Challenges	Jingguang Chen, University of Delaware Bruce Garrett, Pacific Northwest National Laboratory Victor S. Y. Lin, Iowa State University T. Don Tilley, University of California – Berkeley
Office of Basic Energy Sciences Contacts	John Miller Raul Miranda
Special Assistance	
Technical	Christopher Marshall, Argonne National Laboratory Phillip Ross, Lawrence Berkeley National Laboratory Jeffrey Sirola, Eastman Chemical Company Michael R. Thompson, Pacific Northwest National Laboratory Yong Wang, Pacific Northwest National Laboratory
Administrative	Margaret Lyday, Oak Ridge Institute for Science and Education Diane Marceau, U.S. Department of Energy, Basic Energy Sciences
Web/Publication	Nikki Avery, Denice Carrothers, Patricia Cleavenger, Kathryn Lang, Kristin Manke, Tomiann Parker, Michael Perkins, Rick Riensche, Elaine Schneider, Erich Vorpagel, Barbara Wilson, all of Pacific Northwest National Laboratory

CRDS-FY2009-CR-01

G-Tec 報告書 ナノシステム

G-TeC Report 【Nanosystem】

平成22年3月 March 2010

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

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電 話 03-5214-7487

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

©2010 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 CCTAACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA CCTAACT CTCAGACC

0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

