

The Beyond Disciplines Collection

研究機器・ 装置開発の諸課題

— 新たな研究を拓く機器開発とその実装・
エコシステム形成へ向けて —
(市場動向・海外政策動向アップデート版)

Issues in the Development of Advanced Research Tools and Equipment;

Towards a New Research Paradigm:
Implementation and Ecosystem Formation

エグゼクティブサマリー

JST 研究開発戦略センター (CRDS) ではこれまで、科学技術・イノベーション推進における必須の基盤ともいえる、研究開発に用いる機器・装置に関する報告書「研究機器・装置開発の諸課題 — 新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて — (—The Beyond Disciplines Collection—) ¹」を 2021 年 3 月に発行した。発行から 3 年が経過し、国内外の環境も大きく変容していることから、今回特に「研究機器の市場動向」と「諸外国における研究機器の開発・整備・共用促進に関する政策動向」を中心にアップデートをおこなった。2021 年の報告書で掲げた課題認識や整理は、現時点においてもより重要性を増す状況にあると考えられることから、変わらない部分は再掲しつつ、市場動向と海外の関連政策動向の更新情報を踏まえた現時点の認識として改めて書き下している。

問題意識の出発点は、わが国が研究力向上を掲げながらも、明日を拓く先端研究のニーズに応え得るような研究機器の多くを、産学官が自ら生み出すことが困難になっていることにある。同時に研究開発の現場では、多くの機器およびそれに伴うソフトウェアや交換部品・消耗品等の大半を海外からの輸入に頼らざるを得ない状況が深刻化していることにある。そこで本報告書では、新たな研究ニーズに応え、明日の研究を拓くような機器・装置の開発と、その導入・エコシステム形成へ向けた論点整理・提起をおこなう。

研究開発の DX (デジタルトランスフォーメーション) が進むなか、研究に用いる機器や計算機・ソフトウェア・データツールは高度化・複雑化が進み、研究現場ではその導入と活用が先端領域での成果創出やスピードに決定的な差をもたらすようになった。こうした先端研究基盤は、科学技術イノベーションにとって欠かせないドライバーの一つである。次々に生じる社会課題や、科学技術の進展に伴い、これら研究機器に対してより多様で高度な性能が求められるようになってきているが、わが国では充実した研究基盤環境の整備にはいくつかの課題がある。

輸入に頼る機器の場合、それが最先端機であればあるほどに、研究現場への導入は年単位の遅れが生じ、価格・調達コストも生産国でのインフレや円安の影響が相まって高額化している。メーカーや装置の技術世代によって違いがあるため一概には言えないが、この 10 年あまりで主要機器の価格は概ね 1.5～2 倍ほどとなった。すなわち、日本で研究を行う場合、先端機器を伴う研究環境の整備の遅れから研究成果創出は数年単位で遅れ、さらに整備と研究実施に要するコストが近年大幅に上昇している。日本全体の研究開発投資の微増では対応しきれないコスト上昇に直面しており、機器類のみならず、光熱水費や物件費など含め、世界と伍して先端研究を実施できる機関はいよいよ限られる状況となり、喫緊の問題といえる。

本報告書で扱う機器・装置の観点では、特にミドルレンジの先端機器 (価格が数千万～20 億円規模) に、この傾向は顕著である。結果、競争の激しい先端研究領域や、新たな研究領域の創出・開拓において、十分な研究活動の実施が難しくなっている。独創的な研究開発には、研究者が自ら開発した技術や装置を用いることが鍵となる場合も多いが、現在わが国では、そうした新技術・新装置を開発する環境や仕組みは限られており、高度化・複雑化する先端研究機器においては一層難しくなっている。

これまでわが国では、JST の先端計測分析技術・機器開発プログラム (2004～2020 年度) や未来社会創造事業 (2017 年度～)、さらに最近では経済安全保障重要技術育成プログラム (K Program) 等を通じて、

1 CRDS「研究機器・装置開発の諸課題 — 新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて — (—The Beyond Disciplines Collection—)」(2021 年 3 月) <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2020-RR-07.html>

新技術・新装置の開発を促進してきた。とりわけ先端計測分析技術・機器開発プログラムでは、様々な新技術を創出し、装置開発を実現してきた実績がある。しかし、開発に成功したケースもある一方で、開発成果が広く研究開発の現場へ普及するには至っていないものが多い。普及・利活用によって新たな先端研究成果を創出したり、次なる新技術へとつながる好循環を構築したりすることには課題が残されている。開発した研究機器のビジネスとしての成立要件が満たされる必要があるなか、市場形成の見通しが立てにくい先端研究機器に特有の課題を孕んでいる。

先端研究機器を用いて実施する研究開発の進展と、そのような機器の利用が研究現場に普及・拡大していく機器ビジネスの成長には相関関係がある。例えば、2017年にノーベル化学賞の受賞対象となったクライオ電子顕微鏡の登場は、膜タンパク質の立体構造解析研究にゲームチェンジをもたらした。今では一台10億円近い高額機器であるにもかかわらず、世界の先端研究現場に普及し、機器市場としても成長している。このようなイノベティブな機器は、生まれ続ける新たな研究ニーズに導かれる技術開発と、新技術が搭載された機器を利用することによる先端研究成果の創出、その研究成果を用いることで実現される社会課題の解決とが、長期的に作用し合うことに寄与する。そのためには、長期の相互フィードバックループがスパイラルアップしていくような、イノベーションエコシステムの構築が鍵になる。

先端研究機器が関係するイノベーションエコシステムの構築には、未解決の研究ニーズを持つ研究者と、そのニーズに応える技術シーズを持つ研究者・技術者、そしてその技術を利用可能な機器として開発・具現化するポテンシャルを持つ機器メーカーとの、連携・融合による取り組みが重要である。その際、互いのニーズとシーズの状態を継続的に共有し理解し合えるような、機能・仕組みの構築が必要であり、両者にとって価値認識可能な問題と目標を設定することがその一歩となる。本報告書では、この仕組みを実現するためのモデルとして、研究機器開発のイノベーションエコシステムの構築を提起している。

今回アップデートした、研究機器産業の規模感や傾向を与える基礎情報としての市場動向は、一言でいえば世界的に成長基調にあるなかで、日本市場および日本企業は世界の成長に十分追従できていない。過去3年で、世界の計測・分析機器市場は21%成長、加工・プロセス機器市場は約53%成長している。一方日本市場はそれぞれ、計測・分析機器が18%、加工・プロセス機器が8%の成長であった。日本企業の海外売上高は世界の市場成長に近い伸びを示すものの、海外のグローバル企業がより強く大きくなっていくなかで、軒並み規模の小さな日本企業は世界市場での戦いが厳しさを増している。

海外における研究機器開発に関する政策的取組としては、米国、EU、ドイツ、中国の動向を紹介している。諸外国では、国の科学技術力を支える研究基盤環境を戦略的に充実させるべく、様々な施策を実施し、産学官の連携体制の構築が進む。機器開発に限らず、その事業化を担うスタートアップの支援や、国が戦略的に資金を投じ開発を支援した先端研究機器の普及を促進する「イノベーション促進型公共調達」の制度整備といった、開発成果をいち早く研究現場に導入し普及を促す仕組みづくりに、積極的に取り組んでいる。

独創的な研究開発を切り拓く新たな機器を、わが国が今後も創出し続けることができるかどうかは、科学技術・イノベーションの促進に欠かせない観点である。本報告書が、産・学・官・社会の幅広い関係者間での議論を活性化し、日本の先端研究を拓く機器・研究基盤が、新たな研究開発のエコシステムとして育つことの契機となることを期待するものである。

Executive Summary

The JST-CRDS has released a report on research equipment and devices, which is crucial for advancing science, technology, and innovation. The report, titled "Issues in the Development of Advanced Research Tools and Equipment; Towards a New Research Paradigm: Implementation and Ecosystem Formation" (The Beyond Disciplines Collection), was published in 2021. Three years have passed since its publication, and significant changes have occurred in both domestic and international environments. The report requires several updates, particularly relating to 'Market Trends in advanced research tools and equipment' and 'Policy Trends in foreign countries on the development and maintenance of research equipment and the promotion of equipment sharing'. The issues previously identified and organized by the CRDS in the initial report are now deemed increasingly important. Therefore, we have reiterated the vital content and have comprehensively revised the report based on our current understanding of market trends and updated information on relevant policy developments abroad.

Our awareness of this issue stems from the following points. While Japan is dedicated to enhancing its research capabilities, it is facing challenges in producing many of the necessary research instruments to meet the demands of cutting-edge research that will lead the way in the future. Additionally, research institutes and universities are compelled to depend on imports for a significant portion of the equipment, associated software, as well as replacement parts and consumables. Consequently, this report outlines a series of issues and proposals for establishing an ecosystem that fosters the generation of new research results through the development of advanced research tools and equipment and devices that address new research needs, introduce developed equipment to research sites, and facilitate their utilization.

As digital transformation (DX) in research and development advances worldwide, the equipment, computers, software, and data tools used for research are becoming increasingly sophisticated and complex. The timely introduction and utilization of these advanced research tools significantly impact the speed and production of results in advanced research fields. These advanced research tools and infrastructures are crucial drivers for scientific and technological innovation. The evolving global social challenges and the rapid progress of science and technology demand more diverse and advanced performance from these tools. Japan's research environment presents various challenges in terms of developing a well-established research base and research infrastructure.

Regarding imported equipment, the more advanced it is, the more likely there will be a delay of several years in its introduction to research sites. Additionally, procurement costs are escalating due to a combination of inflation in the producing countries and the impact of the weakened yen. Although it is challenging to generalize, the prices of major research equipment have generally increased by a factor of 1.5 to 2 over the past decade. Simply slightly increasing public investment in research and development is insufficient to address these circumstances.

Urgent action is needed to build and sustainably develop a research environment that enables advanced research on par with the rest of the world.

This report focuses on so-called middle-range advanced equipment, with prices ranging from approximately hundreds of thousands of US dollars to twenty million US dollars. This equipment category holds significant importance in the country's research environment, as it has a broad impact on the creation and development of new research areas and internationally competitive cutting-edge research areas. The utilization of technologies and equipment developed by researchers themselves often plays a pivotal role in generating original research and development results. However, the environment and mechanisms for developing such new technologies and equipment are declining in Japan, making the development of increasingly sophisticated and complex advanced research equipment increasingly challenging.

In the past, Japan has promoted the development of new technologies and equipment through various programs, such as the JST-Programme for the Development of advanced measurement and analysis systems (2004-2020), the JST-Mirai Programme (from 2017), and the K-Programme for Economic Security (from 2022). While these programs have successfully created various new technologies and realized equipment development, many of the development results have not been widely disseminated to the research and development field. Challenges persist in creating new advanced research results and establishing a virtuous circle leading to the next new technology through the dissemination and utilization of developed equipment. Fulfilling the business feasibility requirements for developed research equipment is crucial, but the formation of a market, which is a specific problem for advanced research equipment, is difficult to foresee.

The progress of research and development using advanced research equipment is correlated with the growth of the equipment business as the use of such equipment expands in research settings. For instance, the introduction of Cryo-electron microscopy, which was awarded the Nobel Prize in Chemistry in 2017, revolutionized research into the conformational analysis of membrane proteins. Despite being expensive instruments, costing around USD 1 billion each, they have spread to advanced research sites worldwide and are flourishing as an instrument market. Such innovative equipment contributes to the long-term interaction between technological development guided by emerging research needs worldwide, the creation of research results through the use of equipment equipped with new technology, and the resolution of social issues realized through those research results. The key to this is the construction of an innovation ecosystem in which long-term mutual feedback loops spiral up.

The establishment of an innovation ecosystem in which advanced research instruments play a crucial role necessitates the presence of researchers with unmet research needs, researchers and engineers with technological seeds that can meet those needs, and equipment manufacturers with the potential to develop and realize these technologies as actual equipment that can be used by researchers. It is essential for these parties to collaborate and integrate their efforts, continuously share and understand each other's needs and the state of the seeds, and set common goals and problems that both parties recognize as valuable. This report proposes the

construction of an innovation ecosystem for research equipment development as a model for realizing this mechanism.

The first half of this update presents market trends as basic information that provides a sense of the scale and trends of the research equipment industry. Over the past three years, the global measurement and analysis equipment market has grown by 21%, while the processing and process equipment market has grown by approximately 53%. Sales of Japanese companies abroad have grown close to global market growth, but as global companies abroad grow stronger and larger, Japanese companies, which are smaller across the board, are facing a challenging situation in the global market.

Regarding policy initiatives in other countries, the report provides examples from the US, the EU, Germany, and China. These countries have implemented various measures to strategically enhance the research infrastructure environment that supports their scientific and technological capabilities, as well as to promote cooperation between industry, academia, and government. They are actively creating systems that encourage the rapid introduction and dissemination of development results to research sites, including measures to support start-ups responsible not only for equipment development but also for its commercialization, and the development of an 'innovation-promoting public procurement' system to promote the dissemination of advanced research equipment that the government has strategically supported in its development.

For the promotion of science, technology, and innovation, it is imperative that Japan continues to create new instruments that pioneer original research and development. It is our hope that this report will stimulate discussions among a wide range of stakeholders in industry, academia, government, and society, and provide an opportunity for the instruments and research platforms that pioneer advanced research in Japan to grow into a new R&D ecosystem.

目次

1	研究活動における施設・機器設備・ツールの役割	1
1.1	研究に用いる機器・設備・ツール.....	1
1.2	日本における研究機器の開発・普及・導入に関する現状と課題.....	3
2	研究機器の市場動向に関する調査	6
2.1	調査について.....	6
2.2	世界市場の動向.....	9
3	日本における研究機器開発および共用に関する取組	38
3.1	研究基盤としての機器・装置の開発に関する取組.....	38
3.2	先端計測分析技術・機器開発プログラムの振り返り.....	40
3.3	イノベーティブな機器の登場によって先端研究にゲームチェンジが起きたケース.....	52
4	科学の未解決問題への研究ニーズに対応する機器開発課題	60
4.1	科学の未解決問題への研究ニーズ.....	60
4.2	研究ニーズに対応する機器開発の課題.....	64
5	研究機器開発のイノベーションエコシステム形成へ向けて	66
5.1	新たな機器開発とそれを利用する先端研究成果創出は、win-winの両立が要る.....	66
5.2	技術のポッド：不安定で活性化エネルギーの高い開発拠点がイノベーションを生む.....	67
5.3	中長期にスパイラルアップする、成長するイノベーションエコシステムへ向けて.....	71
6	海外動向	73
6.1	米国.....	73
6.2	ドイツ.....	82

6.2.1	参考	ドイツにおける研究棟・機器の整備	88
6.3		欧州連合 (EU)	89
6.4		中国	93
6.4.1	付録	中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」 2023年度対象プロジェクト	95
	参考文献		97

1 | 研究活動における施設・機器設備・ツールの役割

1.1 研究に用いる機器・設備・ツール

研究開発活動における基盤（以下、研究基盤）は、ヒト（人材）、モノ（施設・設備）、カネ（資金）、チエ（情報・知識・データ）から構成されるが、本報告書では特にモノのうち研究機器・装置（以下、研究機器）にまつわる諸課題を扱う。科学技術の進展に伴い、また、より複雑化する社会課題の顕在化に伴い、研究の分野・テーマは多様で高度なものとなり、同時にそこで必要とされる研究機器も先端化が進んでいる。研究機器は、科学技術の新たな地平を切り拓くものとして欠かさない存在になっているが、さらに今、研究開発のDX（デジタルトランスフォーメーション）が進み、計算・ソフト・データツールの使用環境も含めた意味での研究基盤は、科学技術イノベーションを育む研究開発環境においてとりわけ重要な意味を持つ。例えば、AIやロボットに駆動される新たな科学研究を実現する基盤として、実験の操作を遠隔化するシステムや、自動化機能を搭載した機器の開発・導入は、世界的な潮流となっている。CRDSではこれまで、「研究機器・装置開発の諸課題 - 新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて - (The Beyond Disciplines Collection)」を2021年3月に発行したが、発行から3年が経過し、この間の変化・差分を概観することが今般の報告書である。この数年で国内外の環境も大きく変化していることから、特に「研究機器の市場動向」と「諸外国における研究機器の開発・整備・共用促進に関する政策動向」を中心にアップデートをおこなった。2021年の報告書で掲げた課題認識や整理は、現時点においてさらに重要性を増す状況にあると考えられることから、必要に応じ再掲しつつ、市場動向と海外の関連政策動向の更新情報を踏まえた現在の認識として改めて述べていく。また、関連するCRDSの報告書として以下があり、それぞれ必要に応じ参照いただきたい。

【本報告書に関連するCRDS報告書】

- デジタルトランスフォーメーションに伴う科学技術・イノベーションの変容 (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-01
- AI×バイオ DX時代のライフサイエンス・バイオメディカル研究 (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-03
- リサーチトランスフォーメーション (RX) ポスト/withコロナ時代、これからの研究開発の姿へ向けて (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-06
- 戦略プロポーザル 人工知能と科学 ～AI・データ駆動科学による発見と理解～ CRDS-FY2021-SP-03
- JST-CRDS/IRIS共催シンポジウム@JASIS WebExpo® 報告書 これからの先端研究機器 - 新たな機器開発エコシステム形成へ向けて - CRDS-FY2022-SY-01

これまでも研究機器は、大学・国研等公的研究機関や企業を通じて技術開発が行われ、製品化の後、研究現場へ普及し利活用をすすめる様々な取り組みがあった。しかし今、これまでと同じやり方では新たな先端研究ニーズに応える研究機器を実現・実装していくことが、より困難になってきている。諸外国では、国の科学技術力を支える研究基盤環境を戦略的に充実させるべく、様々な施策を実施し、産学官の連携体制の構築が進む。機器の開発に限らず、その機器産業を担うスタートアップの支援や、国が戦略的に資金を投げ開発を支援した先端研究機器を公共調達するなど、開発機器をいち早く研究現場に導入し普及を促す仕組みづくりに積極的に取り組む動きがある。いわゆるイノベーション促進型の公共調達制度であり、欧州・米国・韓国が法制度を整えている。結果、新たな研究ニーズに応える研究機器の導入に先行した機関は、それを利用した研究成果創出においても先行する。わが国においても、関連施策による研究開発投資が過去様々な実施されてきたが、利用側研究者の研究テーマが高度で複雑なものとなり、それに依りて年々高難度化する機器

開発との関係、進め方を抜本的に検討すべき時期にあると考えられる。本報告書が取り扱う研究機器開発とそのエコシステム形成に関する主題はここにある。

一概に研究機器といっても、規模や分野・種類は様々あり、本報告書では次の三分類に区分する(図1-1)。規模とその価格帯において、①大型施設(建設費数百億円規模)、②ミドルレンジの先端機器(主として単価1,000万円~20億円程度)、③汎用機器(主として単価数十万円~1,000万円以下程度)、である(図1-1)。①の大型施設については、日本では主に「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」に基づき建設され、放射光施設 NanoTerasu(2024年度運用開始)やスーパーコンピュータ「富岳」等、世界最高レベルの性能を有した機器の開発に成功し、産学の利用者に公開・活用されている。②のミドルレンジに分類される先端機器類は、例えば電子顕微鏡やNMRといった計測分析機器、リソグラフィ・描画装置、成膜装置といった加工・プロセス機器があり、その広範な製品種類から、研究機器市場の主要部分を形成するものである。③の汎用機器は①②以外の機器であり、規模や価格帯においてより小さなものを指す。

「機器・設備」の規模、価格帯による分類			
規模	① 超大型施設	② ミドルレンジの先端機器	③ 少額の汎用機器・備品類
価格帯	建設費数百億円~	1,000万円~20億円	~1,000万円
設備図(例)	SPring-8、  富岳  (出典: 理化学研究所)  NanoTerasu (QST, JASRI) SLAC (米)  DESY (独) 	計測・分析機器 電子顕微鏡 (TEM, SEM等)  NMR クロマトグラフ XRD  加工・プロセス機器 EB描画装置 ステッパー露光 ALD装置   	卓上SEM  デスクトップXRD  赤外分光光度計 蛍光分光装置   示差走査熱量計 リアルタイムPCR  

図出典: https://www-ssrf.slac.stanford.edu/content/sites/default/files/documents/ssrf_strategic_plan_2019-2023.pdf
<https://www.slac.stanford.edu/about/contact-slac>
https://www.desy.de/contact/index_eng.html
<https://www.jaimadirectory.jp/>
 ©2024 CRDS

図1-1 「機器・設備」の規模、価格帯による分類

本報告書では、多様化・複雑化する研究ニーズの拡がりへの対応において広範に影響すると考えられる②のミドルレンジの先端機器類を中心に扱う。その理由は3つあり、まず①の大型施設に関しては、建設に数百億円、その運用においても一基当たり毎年数十億円規模の財源を伴う、重要な政治マターでもある。その規模ゆえに、国際的に協力国間で財政負担を分担するものもあり、科学技術・イノベーション政策において議論の土台がある程度構築されている。現在も建設や改造・更新、運用の改革などの議論が進行していることから、本報告書では取り扱わない。次に②のミドルレンジの先端機器については、その種類の多様性や研究開発活動のまさに最先端を担うものであること、しかし各地の研究現場においては高額化が進む製品群にあってなかなか導入・更新・修繕等が進められていないといった課題がある。また要素技術開発を担う大学・国研や、開発・製造・普及を担うわが国の機器産業の将来を考えた際、これらに関するイノベーションエコシステムの形成が重要であると考えられること。そして③の汎用機器に関しては、研究室単位や研究者個

人の持つ研究費財源で購入するものが殆どで、企業主導で性能向上やマーケット開拓が進む。これらも研究開発に必要であることに変わりないが、開発や調達に関する諸問題はミドルレンジの先端機器と比較して小さいことから、本報告書で詳しく扱うことはしない。

ミドルレンジの先端研究機器は、国際的な研究開発競争においては一早く導入してその利用分野における研究成果を積み上げることが、研究力向上の観点ではとりわけ重要となる。しかし、わが国では導入においても、技術・機器開発においても、そのシステムが十分に形成されていないことから課題がある。次節以降、CRDSの調査分析にもとづく様々な観点からこれらを検討し、新たな研究ニーズに導かれる、研究機器開発の課題と、その社会実装・イノベーションエコシステム形成へ向けた諸課題を挙げる。

1.2 日本における研究機器の開発・普及・導入に関する現状と課題

研究を実行しようとする際、実験系の研究であればそれを実現するための機器が必要となることは自明だが、研究テーマの先端性に伴い、より高度な先端機器を要する傾向は年々高まっている。必要な先端機器が市場に存在して且つ研究機関やチームで購入できるだけの財源があれば、それを調達して利用すればよいとなる。または共用の研究インフラとして整備されているものであれば、それを使用すればよい。しかし、海外企業からの輸入に先端研究機器の多くを依存するわが国では、そもそもの調達が開発国の研究機関よりも数年単位で遅れ、さらに調達・整備コストも高コスト化するという不利な状況がある。それならば、自国開発の選択肢はどうか。日本の研究機関で技術開発をし、企業が装置開発と販売を担い、それを研究機関がいち早く導入することができるならば、新たな研究成果をより早く創出することもでき、この問題は解消されるだろうか。残念ながら、現在のわが国では研究機器およびそこに搭載される新技術を「開発」する環境や仕組みは非常に限られている。

もちろん、これまで様々な施策・事業によって研究機器の開発は行われてきた。それらにおいていくつかの成功例は見られるものの、多くは開発成果たる機器が広く研究現場に普及するには至らず、限られた範囲までしか開発や事業化、研究現場への導入・利用が進まないケースが大半である。機器開発は、新たな研究ニーズに導かれると同時に、それを利用する研究需要を喚起し、ビジネスとしても成立しなければ普及には至らない。新たな機器を利用しなければ、新たな先端研究成果も創出されない。結果、当該機器にまつわる技術を次世代技術へと発展させることが叶わず、一代限りの開発テーマとして終了してしまうものが多い。

例えば計測分析機器に関しては、JST「先端計測分析技術・機器開発プログラム」が2004年から実施されてきたが、本事業は2020年度をもって終了した。その後、一部は同じくJSTの未来社会創造事業の共通基盤領域でより発展的なスキームに展開するも、財源上の制約で一部の課題しか課題しか取り組むことができていない。加工・プロセス機器に関しては、上記JST事業のような広範囲をカバーする開発プログラムは存在しない。過去、通商産業省（当時）主導の官民大型プロジェクト、超LSI技術研究組合（1976-）において、電子ビーム描画装置や光学ステッパーの開発が行われたといった例がある。これが契機となってその後様々な事業を経て開発された日本企業発の半導体微細加工装置類には、一時は世界トップシェアを獲得するに至ったものもある。しかし、後のITバブル崩壊を経て21世紀の前半を過ぎた今では、最先端の半導体露光装置等では欧州企業の寡占を許すかたちとなり、現在は最先端機器の開発は、一部の要素技術を除いておこなえていない。

わが国において研究機器の開発・販売を担う企業の規模と資金力は、欧米の競合と比較して相対的に小さい。大手といわれる機器メーカーであっても、海外の大手企業と比較すると売上高にして数倍の差がある。技術開発力のみならず、規模・資金力の差や経営力の差が現在の状況に至る一因とも考えられる。また、欧米

企業は優れた技術を持つベンチャー企業へのM&Aによって新技術・新装置開発事業を獲得し、企業規模を拡大させているが、日本の機器メーカーではこのような動きがほとんど見られない。さらにその背景には、公的研究開発投資をきっかけとして生まれた大学・国研の成果をもとに創出されるスタートアップの存在がある。わが国では大学発ベンチャー創出の重要性が掲げられて久しいが、資金調達や、国内外の販路開拓、経営人材の確保等の課題が指摘されており、改善の兆しや関連する施策はとられているものの、機器開発のように資金と時間の特にかかる。一方でスケールの難しいビジネスでは、その打開が難しい。

分野や業種による違いはあるものの、わが国における研究機器は、海外メーカーへの輸入依存度が高まっている。なかでもライフサイエンス関連の研究機器において、その傾向は特に顕著である。先端機器を海外メーカーから購入する場合、その機器が登場してから実際に日本で購入して研究使用できる状態になるまでには、メーカー現地国の研究機関での導入と比較して数年単位の遅れを生じる場合が多い。結果として、特に新分野や先端研究の成果創出においては、構造的に遅れてしまう。同時に、海外メーカー品の購入には価格差も生じることがままあり、現地と比較して1.5～2倍程度の購入価格になるなど、日本において先端機器を用いる研究は構造的に高コストになっている。

一方ここ10数年ほどで、文部科学省における各種の研究インフラ共用事業が進み、「研究設備・機器の共用推進に向けたガイドライン」(令和4年3月文部科学省)の策定などを背景に、「先端機器は買わずとも共用機器を利用する」との考えは、わが国の研究現場でも一定程度浸透してきた。研究者が各所属機関において研究室ごとに研究機器を調達しようとする時代から、ようやく変わってきたといえる。2000年代の前半から先端機器共用を進める必要性は提起され始めたが、単に限られた財源の効率使用の観点だけではなく、「新しい先端研究に取り組むためには、高度な先端装置群を介し異分野の人材が集結する連携・融合の場が必要である」との考えが、当時の世界的なナノテクノロジーの勃興などに伴い進展してきた経緯がある。単独の研究者・研究室の知見やリソースだけでは取り組むことが困難な新たなテーマへのアプローチとして、共用機器を中核とする研究開発プラットフォームを構築し発展させることが有効だが、このようなプラットフォームは、新たな研究機器とその導入・普及のサイクルにおいても重要な役割を果たすものである。



図1-2 研究機器・設備共用政策の流れ

わが国における研究機器の共用に関する政策・事業と、またその背景にある基本法や法律の制定を時系列で並べたものが図1-2である。共用に関する政策は、その規模ごとに「最先端大型施設」「研究設備のプラットフォーム化」「機関単位の共用システム構築」と分類することがあるが、図1-2では大型施設以外の研究機器・設備について、分野ごとに進む事業と基盤的に進む事業を分類した。

研究機器・設備の共用を基盤的に進めてきた事業は、2023年度現在「先端研究基盤共用促進事業」として進行している。先端研究基盤促進事業の中で、さらに2016～2020年度に「新たな共用システム導入支援プログラム」と「共用プラットフォーム形成支援プログラム」が立ち上がり、それぞれのプログラムは、各研究組織でのマネジメントによる戦略的な共用システムの確立と、施設・設備同士のネットワーク化を目的とした。これらは2021年度以降、「コアファシリティ構築支援プログラム」と「先端研究設備プラットフォームプログラム」に引き継ぎ、2025年度まで継続予定である。

これらのプログラムは、共用可能な施設や研究機器・設備を保有していることや、各装置の技術に知見をもった研究者が所属している等、各機関が有するリソースを活用することを前提としている。この特徴は大学共同利用機関法人にも共通するところがあり、採択機関が自身の研究成果創出を目指しながら、外部への共同利用や共同研究を推進している。

対して、マテリアル先端リサーチインフラ（ARIM）や創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム（BINDS）等の分野ごとに進む共用事業は、各分野の研究推進を目的に、事業予算に加えて補正予算等で研究機器・設備の導入も進め、外部ユーザーのニーズにより広く対応するための技術支援も手厚く実施している。ユーザー受入や試料の受託解析など、共用事業への参画に一定の-effortを割く研究者・技術スタッフを適切に評価する仕組みの構築は道半ばの状況にある。

2 | 研究機器の市場動向に関する調査

2.1 調査について

CRDSにおいて機器の市場動向調査を実施した。本報告書では先端研究ニーズに応える研究機器の開発とその普及を主なイシューとしているが、研究機器産業の市場動向から、現在の産業の規模感や傾向を把握し、本検討の前提として基礎情報を与えるものである。特に、海外企業からの輸入に依存する傾向など、研究機器に関して日本の実態を把握する。前回調査における2018年のデータに基づいた内容から、今回は2021年のデータで再調査をおこない、この3年間での比較を行った。

調査方法

- 研究開発に用いる主要な「計測・分析機器」「加工・プロセス機器」「一部の実験・ラボ用ソフトウェア」について、既存の市場調査データをCRDSによる機器分類でデータを捉えなおして抽出・分析した。
- 日・米・欧・亜の主要国における機器の売上高（販売額）推計から集計、各種データのグラフ化・可視化をおこない、動向を把握した。その上で、産業界の識者にヒアリングをおこない、解釈や実感との乖離を検証し、とりまとめた。

調査手順

- ①調査対象機器の分類・選定※
- ②既存の市場調査データを用いた、データ抽出と再構成
- ③集計分析・可視化（国・地域別市場規模・成長率、企業国籍別売上高シェア、日本企業シェア等）
- ④識者ヒアリングにもとづく解釈と検証

※調査対象機器の分類・選定：

- 「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」とで大きく分類したうえで、研究開発に用いる主要機器を対象とした。
- 計測・分析機器のうち、ライフサイエンス研究に用いるものは、技術・原理のみに基づく分類が困難な機器が多いため、その用途によってある程度の範囲を「ライフサイエンス関連装置」としてまとめて取り扱うこととした。
- 「加工・プロセス機器」は、主に半導体・エレクトロニクス研究に用いるものを主対象とし、その他の機械加工設備やプラント設備等は、研究用途を認識できる適切な市場データが存在しないことから、本調査では対象外とした。
- 研究開発においてとりわけ重要とされる、価格帯として単価1,000万円以上（20億円以下）を主対象とし、比較的少額の備品類や、市場として存在しない一点ものの大型施設等は除外した。

対象機器の分類・選定では「研究開発に用いる主要機器」として対象を選択したが、いずれの機器も研究開発の用途以外に、産業用途として企業における工場等製造・検査の現場、医療機関の臨床目的で用いられる割合が存在する。これらは用途別に厳密にデータを切り分けることが困難であり、産業用途のデータを含んでいる。以下では、使用の範囲・用途を問わない場合を「機器」と表記し、研究開発に用いる場合を「研究機器」と表記する。

調査対象機器

計測分析機器

分類	機器
クロマトグラフ	分析用高速液体クロマトグラフ、超臨界流体クロマトグラフ
質量分析装置	四重極 LC/MS、タイムオブフライト LC/MS、GC/MS、携帯型及び室内型 MS、イオントラップ LC/MS & FT/MS、MALDI-TOF MS、磁気セクタ MS
原子分光装置	X線回折装置 (XRD)、蛍光 X 線分析装置 (XRF)、誘導結合プラズマ MS (ICP-MS)、誘導結合プラズマ発光分析装置 (ICP-OES)、元素分析装置、アーク/スパーク光放出分光装置、全有機炭素 (TOC) & その他 SUM パラメータ
分子分光装置	核磁気共鳴分光装置 (NMR)、赤外分光装置、ラマン分光装置、近赤外分光装置、エリプソメーター
表面分析装置	光学顕微鏡、電子顕微鏡、共焦点及び高度顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡、表面分析計
材料評価装置	物理特性評価装置、熱特性評価装置、熱量測定装置、粒子特性評価装置
ライフサイエンス関連装置 (分析機器)	シーケンサー、フローサイトメーター、電気泳動装置、マイクロアレイ、in-vivo アニマルイメージング装置、高含量分析/細胞イメージング装置、SPR 及びラベルフリー検出装置、毛細管電気泳動装置、電気生理学分析装置、マイクロプレートリーダー、多重ハイスループット ELISA 分析装置、PCR 装置、核酸サンプルの調製装置、細胞分離装置
自動制御装置	自動分注機、ラボオートメーションシステム (ロボティクス)、遠心分離機、抽出装置、超音波分散機

加工・プロセス機器

分類	機器
合成・反応装置	マイクロ波アシスト合成装置、自動合成装置、バイオリアクター/発酵槽
リソグラフィ・露光・描画装置	i 線露光装置、KrF エキシマレーザスキャン、ArF エキシマレーザスキャン装置、ArF エキシマレーザ液浸、EUV、電子ビームマスク描画装置、電子ビーム直描装置、後工程向けステッパー、後工程向け DI
成膜・膜堆積装置	常圧/SACVD 装置、縦型 CVD 装置、プラズマ CVD 装置、エピタキシャル成長装置、原子層堆積 (ALD) 装置、スパッタリング装置、Cuめっき装置
膜加工・エッチング装置	アッシング装置、絶縁膜エッチング装置、ゲートエッチング装置、メタルエッチング装置
熱処理、ドーピング装置	縦型酸化拡散炉、中電流イオン打ち込み装置、大電流イオン打ち込み装置、高エネルギーイオン打ち込み装置
切削、研磨、接合装置	CMP 装置、ダイシングソー、ダイボンディング装置、フリップチップボンディング装置

実験・ラボ用ソフトウェア (参考情報としての取扱)

分類	機器
ソフトウェア	バイオ及びケムインフォマティクス関連製品、LIMS/ELN/SDMS (ラボ用情報管理システム)

2018年と2021年のデータの比較を行うため、調査対象機器は2018年時とほぼ同様としているが、最近の動向として重要と考えられる一部機器を対象に追加している。計測・分析機器では、「細胞・分離装置」と

「超音波分散機」を追加した。これらの機器は、近年自動化技術の進展により性能が大幅に向上し、それに伴いバイオプロセス研究などの分野も発展したことから需要が高まり、市場が拡大している。加工・プロセス機器では、半導体製造プロセスの後工程での技術的発展が急速に進んだことから、「後工程向けステッパー」「後工程向けDI (ダイレクト露光装置)」を加えた。また、前回調査ではダイボンディング装置として分類していた機器を、ダイボンディング装置とフリップチップボンディング装置とに分けている。

市場調査の元データ

本調査の元となる市場データの抽出には、以下の2報を用いている。いずれも幅広い機器の市場データを取り扱っていることや、調査対象国および業界での認知・評価から、一定の信頼性が認められるものとして選択した。2報のデータには、一部の対象機器においてデータの重複や集計方法の違いがあることから、それらを考慮したうえでCRDSが分類・抽出・再集計をおこなっている。

1. SDi Global Assessment Report 2022 The Laboratory Analytical and Life Science Instrumentation Industry

(Strategic Directions International社/2022年)(以下、SDiレポートと表記)

分析機器の市場調査に定評のある、米Strategic Directions International社が作成している市場データ集。データは、各社における売上高(販売額)をベースに調査を重ねて推計をおこなっているものであるが、日米欧の主要な機器メーカー間で、信頼性の高いデータとして広く認知されている。本調査では、主に計測・分析機器のデータ抽出に用いた。なお、「実験・ラボ用ソフトウェア」については、その市場全体を把握することが困難であることから、SDiレポートから抽出可能な特定ソフトウェアに関する市場データを参考として示すこととした。

2. 世界半導体製造装置 試験・検査装置市場年鑑2022

(グローバルネット株式会社/2022年)(以下、半導体製造装置年鑑と表記)

半導体製造装置および関連の試験・検査装置について、日米欧亜の地域別の市場動向をとりまとめている。一般社団法人日本半導体製造装置協会とSEMIジャパンの協力のもと作成される本データは、業界において一定の信頼性が認識されている。本調査では、主に加工・プロセス機器のデータ抽出に用いた。

いずれもデータの抽出を行うにあたっては、2021年市場時点での為替相場に合わせ、換算レートを1USD=110円としている。

2.2 世界市場の動向

■機器全体の市場規模

本調査が対象とする機器に関して、2021年の世界市場における市場規模は、計測・分析機器が6.3兆円、加工・プロセス機器が7.2兆円で、これらを合計すると13.5兆円である(図2-1)。いずれの機器分類も2018年と比較して市場は拡大しており、特に加工・プロセス機器の市場成長が顕著である²。ただし、加工・プロセス機器に分類した機器の多くは半導体製造装置であり、産業の現場における製造利用を多く含んでいることに留意が要る。

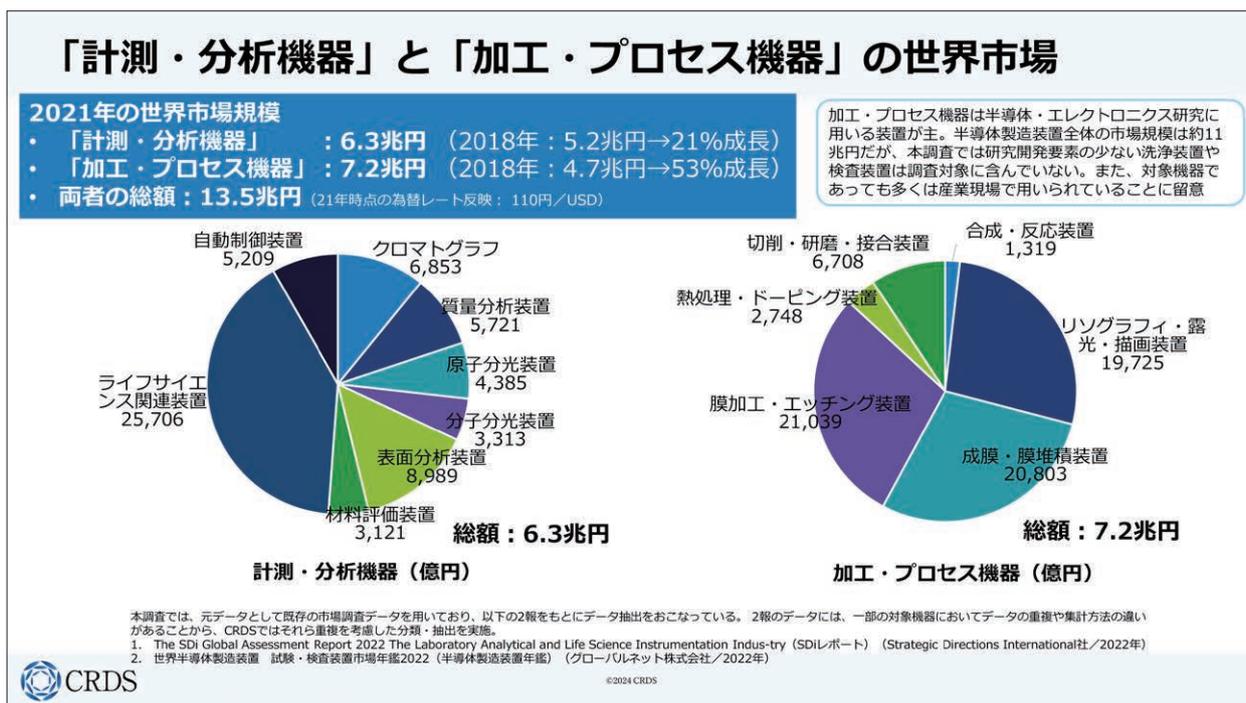


図2-2-1 「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」の世界市場

機器分類別に見ると、市場規模が最も大きいのは計測分析機器のうち「ライフサイエンス関連装置」であり、約2.6兆円である。さらにライフサイエンス関連装置の中では、シーケンサーやPCR装置といった、需要が高く製品サイクルも短い機器の市場規模が大きい。ライフサイエンス関連装置の他には、クロマトグラフに分類される分析用高速液体クロマトグラフや、表面分析装置に分類される光学顕微鏡が大きな市場を形成している。

加工・プロセス機器については、成膜・膜堆積装置と膜加工・エッチング装置、リソグラフィ・露光・描画装置の市場がいずれも約2兆円規模である。リソグラフィ装置については、特に最先端微細加工に用いるEUV装置が拡大している。なお、加工・プロセス機器は、工場・製造ラインで用いられているものが多数であり、研究開発用途との識別が困難であることに留意を要する。

2 調査では研究用途に用いられることがある機器に限定してデータを抽出し市場規模を算出している。世界の半導体サプライチェーンに関わる3,000の企業が参画する業界団体であるSEMIによれば、2021年の世界の半導体製造装置の販売額は1,026億ドル(約11兆3,000億円)と報告されている。SEMI「2021年世界半導体製造装置販売額、前年比44%増の1,026億ドルで過去最高を記録」<https://www.semi.org/jp/news-resources/press/20220413> (2023年10月12日アクセス)

以下では、これら計測・分析機器市場と、加工・プロセス機器市場の範囲において、様々な角度からの分析結果を紹介する。

計測・分析機器は、市場全体のうち72%が研究開発用途に用いられている。一方、加工・プロセス機器については明確に研究開発用途の市場割合を特定することは出来ないが、CRDSが補完的におこなったインタビュー調査等から、最大でも11%程度であると推計している(図2-2-2)。

研究開発に用いる「機器」の市場

- 調査では、研究開発に用いる主要機器を調査対象機器としてデータを抽出しているが、いずれの機器も研究開発の用途以外に、企業における製造現場や、医療機関の臨床目的で用いられる割合が存在する(調査対象機器の選定段階で、産業・臨床現場でのみ使用する機器は除外)。
- 計測・分析機器では、市場に流通する機器のうち72%が研究用途に用いられており、市場動向と研究動向には相関性がある。
- 加工・プロセス機器市場では研究開発以外の利用用途の割合が大きく、半導体製造の産業用途が大半であることに留意。
- 元データとして用いたSDIレポートにおいて、「基礎研究」「応用研究」「技術開発」「その他(教育等)」の各市場と、「分析サービス」市場のうち50%、を合計したものを、本調査では「研究開発用途」の市場規模とした。また、半導体年鑑のデータに関しては研究目的かどうかを区別することができないため、各対象機器に関するヒアリングを踏まえ、研究開発用途の割合を全体として10%相当とすることが妥当としたうえで、SDIレポートとの重複を計算上考慮し、11%と推計している。

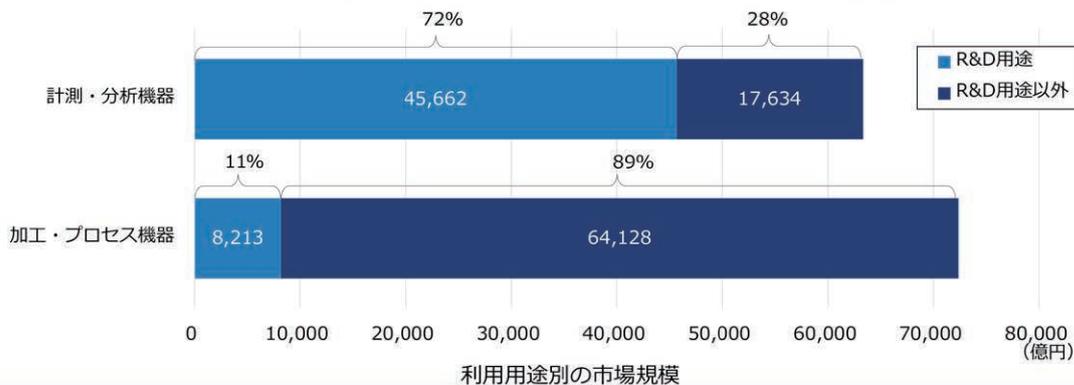


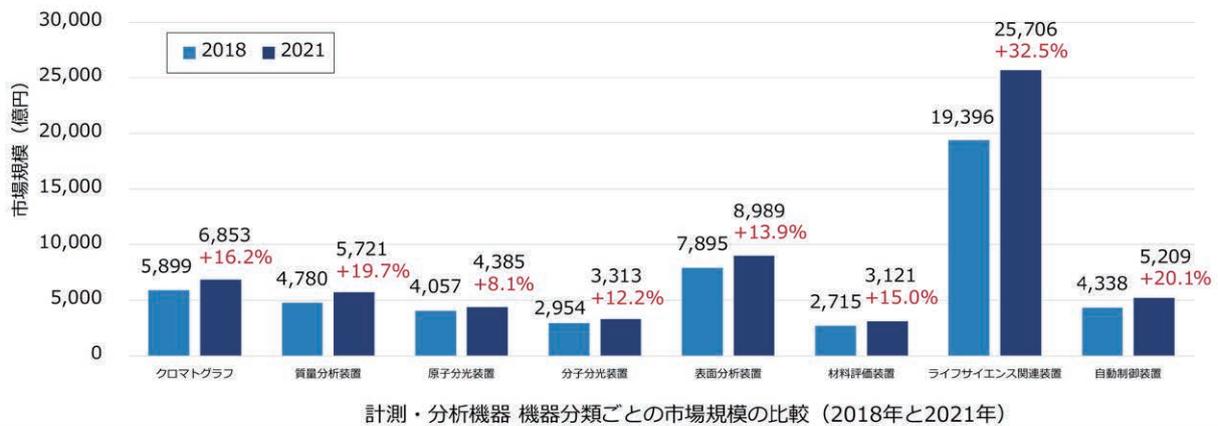
図2-2-2 研究開発に用いる「機器」の規模

計測・分析機器および加工・プロセス機器それぞれについて2018年と2021年を比較し、各年の市場規模と成長率を示す。成長率については、2018年から一定割合で市場拡大しているわけではないため、今後の変化を単純予測できるものではないが、全体として拡大していることや、機器分類別での拡大度合いの違いを把握する。

計測・分析機器全体の市場規模は、2018年に比して2021年はおよそ1.2倍に拡大している。3年間での成長率は、ライフサイエンス関連装置：32.5%、自動制御装置：20.1%、質量分析装置：19.7%、クロマトグラフ：16.2%、材料評価装置：15.0%、表面分析装置：13.9%、分子分光装置：12.2%、原子分光装置：8.1%である。ライフサイエンス関連装置の成長が、機器市場全体の成長を牽引していることがわかる。(図2-2-3)。

計測・分析機器の世界市場 2018年と2021年の比較

- 2018年から2021年の計測・分析機器全体の市場規模の推移は、2020年の上半期に縮小し、以降は拡大を続けている。
- 機器分類別の市場規模動向を比較すると、ライフサイエンス関連装置の成長率が大きいですが、機器市場に占める割合は2018年と2021年でほぼ同じ。
- 1台あたりの価格帯は、クロマトグラフ：約200～1,300万円、質量分析装置：300万円～1.5億円、分子分光装置：100万円～15億円と、同分類の機器でもグレードが多様で価格帯が幅広い。



計測・分析機器 機器分類ごとの市場規模の比較 (2018年と2021年)



©2024 CRDS

図2-2-3 計測・分析機器の世界市場 (2018年と2021年の比較)

また、加工・プロセス機器の市場成長は半導体産業の動向を表すものとして見る事ができる。COVID-19以降のITシステム需要拡大による、半導体への旺盛な需要に対応すべく、主要企業が設備投資を拡大した。2021年の市場規模は過去最大となり、2018年比で1.5倍となった。機器分類別では、リソグラフィ装置が成長率70.4%と大幅に拡大したことを筆頭に、一連のプロセスで用いる成膜・堆積装置や膜加工・エッチング装置が規模・成長率の面でもこれら市場の軸を形成している。また、市場規模としては大きくなくとも、切削・研磨・接合装置などは63.9%と高い成長率を示している (図2-2-4)。

加工・プロセス機器の世界市場 2018年と2021年の比較

- 2021年は加工・プロセス機器の世界市場規模が過去最大となった。各年の前年比は、2019年は-8.8%、2020年は+19.0%、2021年は+40.9%。
- 加工・プロセス機器は半導体産業や政策の動向が市場に大きく影響。2021年の市場規模拡大は、2020年の半導体不足による需要の増加から、主要半導体メーカーが大規模な設備投資を行ったことが背景にある。
- 特に市場が拡大しているのは露光装置。プロセスの微細化を牽引する技術の高度化とともに、装置価格も高額化している（EUV:196億円/台、ArF液浸:60~80億円/台、ArFエキシマレーザスキャン:20億円/台、KrFエキシマレーザスキャン:15~25億円/台、等）。
- 今後も、生成AIの導入やそれに伴うデータセンターの拡大などで半導体需要は継続し、半導体製造装置の世界市場も拡大する見込みだが、対中輸出規制などもあり、成長予測には不確実要因多数。



加工・プロセス機器 機器分類別の市場規模の比較 (2018年と2021年)



©2024 CRDS

図 2-2-4 加工・プロセス機器の世界市場 (2018年と2021年の比較)

■国・地域別の市場規模

本調査において対象とした計測・分析機器および加工・プロセス機器の全体の市場規模を、国・地域別に図 2-2-5 に示した。規模の大きい順に韓国・台湾・他アジア地域：約 4.1 兆円、北米：約 3.1 兆円、中国：約 2.7 兆円、欧州：約 2.1 兆円、日本：約 1.4 兆円、と並ぶ。このように設備投資による機器調達が進んで市場としても最大なのは、韓国や台湾を含むアジア地域（日本と中国を除く「その他アジア」）である。アジア地域市場は、4.1 兆円のうち 3.5 兆円を加工・プロセス機器が占めており、韓国・台湾の半導体製造拠点の多さが市場に表れている。一方、北米や欧州では機器市場の 7～8 割が計測・分析機器であり、計測・分析が重要となる研究開発の規模は北米・欧州圏が牽引する。

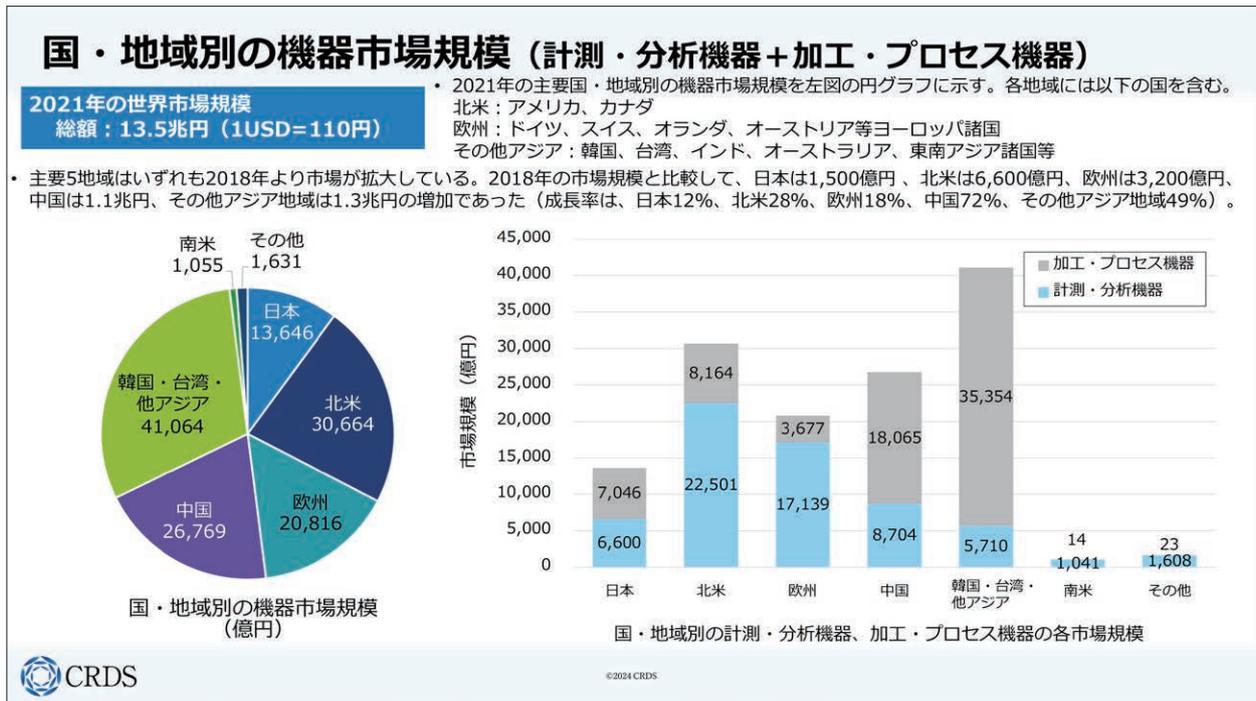


図 2-2-5 国・地域別の機器市場規模 (計測・分析機器+加工・プロセス機器)

計測・分析機器の国・地域別市場規模について、2018年と2021年の比較を行った (図2-2-6)。2021年市場では、北米と欧州の市場規模がそれぞれ2.2兆円と1.7兆円であり、この2地域で世界市場の約6割を占めている。中国：8,700億円、日本：6,600億円、韓国・台湾・他アジア：5,700億円と続く。日本、北米、欧州圏の市場成長が20%に満たないなか、中国、韓国・台湾・他アジア地域は30%超の成長をしている。なお、これらの国・地域別の市場規模は、企業ごとの精緻な実データが公表されているわけではなく、一部は過去の売上動向から傾向・成長率を予測した外挿によって算出したデータを含む。そのため、近年急速な市場拡大傾向にある中国に関しては、実態がデータに十分に反映されていないと考えられる。中国の機器市場規模の実態は、本調査が示す以上に成長していると推測される。

計測・分析機器の国・地域別市場規模

- 計測・分析機器の市場規模6.3兆円について、国・地域別の機器市場規模を左図の円グラフに示す。同データについて2018年と比較したものが右図である。
- 2018年と2021年で国・地域別の市場規模の割合に大きな変化はなく、北米と欧州が多くを占めている。欧米では政策による大学・公的研究機関への研究機器の導入や、研究コミュニティの機器の購入を促進するプログラムも多く、市場にもその動向が現れている。



図2-2-6 計測・分析機器の国・地域別の市場規模

国・地域別の市場規模をより詳しくみると、各地域とも計測・分析機器全体の市場規模に概ね比例している(図2-2-7)。北米だけで1兆円規模になるライフサイエンス関連装置市場の米国内での内訳をみると、シーケンサー、PCR装置、分析用高速液体クロマトグラフがいずれも約2,000億円であり、これらが市場形成の柱となっている。日本に関しては、他地域と比較すると表面分析装置の市場割合が大きい。表面分析装置市場は電子顕微鏡や光学顕微鏡を含み、それぞれ約700億円と約600億円である。一方、ライフサイエンス関連装置の市場が他地域での割合と比較して日本は小さく26%である。

計測・分析機器の2021年の国・地域別市場規模の内訳

計測・分析機器の国・地域別市場規模の内訳について、機器分類別の市場規模と割合をグラフで示す。

- いずれの国・地域も、機器分類ごとの市場規模は計測・分析機器全体の市場規模に概ね比例している。
- 市場規模の割合を見ると、日本では各国と比較して表面分析装置が大きく、ライフサイエンス関連装置が小さい、という特徴がある。
 - 各国・地域における表面分析装置の市場規模の割合は、日本：25%、北米：12%、欧州：12%、中国：14%。
 - 同様にライフサイエンス装置の市場規模の割合は、日本：26%、北米：46%、欧州：41%、中国：44%。
- 機器別の市場規模で見ると、日本では、分析用高速液体クロマトグラフ（約840億円）、電子顕微鏡装置（約700億円）、光学顕微鏡（約600億円）の市場が大きい。北米では、シーケンサやPCR装置（いずれも約2,000億円）が大きな市場をもつ。

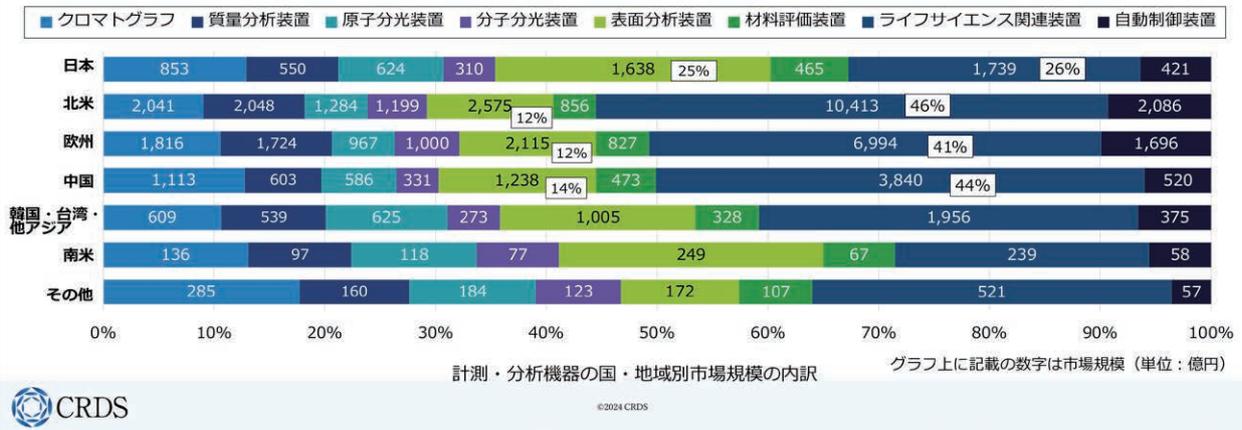


図2-2-7 計測・分析機器の2021年の国・地域別市場規模の内訳

また、これらの国・地域別市場規模の内訳を2018年と2021年で比較すると、全ての国・地域において、いずれの機器分類の市場規模も拡大した（図2-2-8）。図2-2-3で世界市場における計測・分析機器の2018年と2021年の市場動向の変化を示したとおり、ライフサイエンス関連装置の成長が市場全体の伸びを牽引している。ライフサイエンス関連装置の市場規模の変化をみると、北米は約2,000億円増、欧州と中国はそれぞれ約1,500億円の増であった。同様に成長率では、中国が69%、韓国・台湾・他アジアが55%と大きく、ライフサイエンス関連装置の導入が増えている。

日本は他地域と比較するとライフサイエンス関連装置の導入拡大が少ないといえるが、国内としてみれば市場規模の増加と成長率はライフサイエンス関連装置が最大である。この3年間の日本における機器分類別市場規模の増加額および成長率は、ライフサイエンス関連装置：411億円（成長率31%）、表面分析装置：169億円（成長率12%）クロマトグラフ：136億円（成長率19%）、質量分析装置：107億円（成長率24%）、自動制御装置：61億円（成長率17%）、材料評価装置：61億円（成長率15%）、分子分光装置：44億円（成長率17%）、原子分光装置：40億円（成長率7%）である（表2-1）。

表2-1 日本の機器分類別の市場規模の増加額と成長率

	ライフ	表面分析	クロマト	質量分析	自動制御	材料評価	分子分光	原子分光
増加額	411	169	136	107	61	61	44	40
成長率	31%	12%	19%	24%	17%	15%	17%	7%

増加額単位：億円

計測・分析機器の国・地域別市場規模の内訳 2018と2021の比較

- 計測・分析機器の国・地域別市場規模の内訳について、2018年と2021年のデータを比較する（南米とその他地域は除いている）。
- 2018年から2021年にかけて市場が拡大しているのはライフサイエンス関連装置である。
- 日本市場でも規模及び成長率をもっとも拡大したのはライフサイエンス関連装置で、市場規模は約400億円の増加、成長率は31%である。
- 規模で比較すると、北米は約2,000億円、欧州と中国は約1,500億円の増加であった。成長率は、中国が69%、その他アジアが55%（北米と欧州のライフサイエンス関連装置の市場規模の成長率は、それぞれ123%と27%）。



図 2-2-8 計測・分析機器の国・地域別市場規模の内訳（2018年と2021年の比較）

欧・米・中における市場成長は、大学・公的機関が高性能・最先端機器の導入を政策的に進めていることが背景にもある。研究機器を導入した機関が企業等との共同研究を通じて、技術・ノウハウの蓄積および知見を持った技術者・研究者の育成も同時に行っている。中国に関しては近年、研究用途の計測・分析機器の導入が急増している。日本の研究機関が自機関に十分な設備環境がなく、計測・分析結果を急ぎ必要とするような場合に、中国の研究機関に計測・分析を委託するケースもあり、その計測・分析データが中国の研究機関に蓄積されていくことに対する懸念の指摘もある。さらに、中国は研究機器に関する技術開発力の向上を積極的に進めており、これまで最先端機は欧米・日本からの輸入に頼っていたが、本国技術・本国開発による国産への転換を図っている。一例として2020年2月には、DNAシーケンサーの開発企業であるBGI社から、1人のゲノム解析を100ドル以下のコストで可能にするシーケンシングシステムが発表されている³。中国市場は海外の機器メーカーにとって今後も重要市場であるが、今後は本国開発・国産の成功に伴い、中国市場は海外企業からすれば厳しさを増していくと予想される。

対して日本では、大学・公的機関が有する研究機器の老朽化が問題となっており、先端機器への更新・導入がなかなか戦略的に進まず、一部の限られた有力研究機関に集中するなど、機関間の研究環境の格差が懸念されている。また、計測・分析技術に携わる研究者の減少傾向や、研究開発に必要な計測・分析を受託分析企業等が担う割合の高さも指摘されており、知見やノウハウの確実な継承への懸念も年々高まっている。研究インフラの共用政策においては、それぞれの事業開始時に一定の機器更新がおこなわれる場合もあるが、補正予算の編成に依存する状況があり、全国最適を考えた戦略的な更新ができていないといった課題が残る。事業開始後の計画的な更新や高度化、次世代技術が搭載された新機種を適時に導入することは、特に価格帯の上がるミドルレンジの先端機器に関して、競争的資金や運営費交付金等の基盤的経費では近年難しい。計測・分析機器の技術世代は平均的に5年程度で新たな技術が搭載され、それに応じて新たな利用研究が花

3 Antonio Regalado, "China's BGI says it can sequence a genome for just \$100," *MIT Technology Review*, February 26, 2020 <https://www.technologyreview.com/2020/02/26/905658/china-bgi-100-dollar-genome/>

開くことが多い。しかしこうした技術進歩を前に、日本の研究現場はタイムリーな更新ができておらず、スピードが重要となる国際的な研究競争においては厳しい状況にある。

加工・プロセス機器に関しても、国・地域別市場規模について2018年と2021年の比較を行った(図2-2-9)。本調査が対象とする加工・プロセス機器の市場規模7.2兆円のうち、約半分を韓国・台湾・他アジアが占め、約4分の1を中国が占めている。ここで目を見張るのは中国市場の拡大である。この3年間での成長率は94.5%と、市場規模は倍増している。政策的な半導体開発の積極支援とともに⁴、半導体製造装置の輸入が拡大した。2024年現在は、米国による貿易規制の影響で最先端機の輸入ができない状態にあるが、半導体製造は最先端機だけでなく、従来技術世代の製造装置群のラインナップが市場の中心にある。また、半導体製造装置の開発を担う中国企業も登場しており、経済安全保障上、極めて重要視されている。

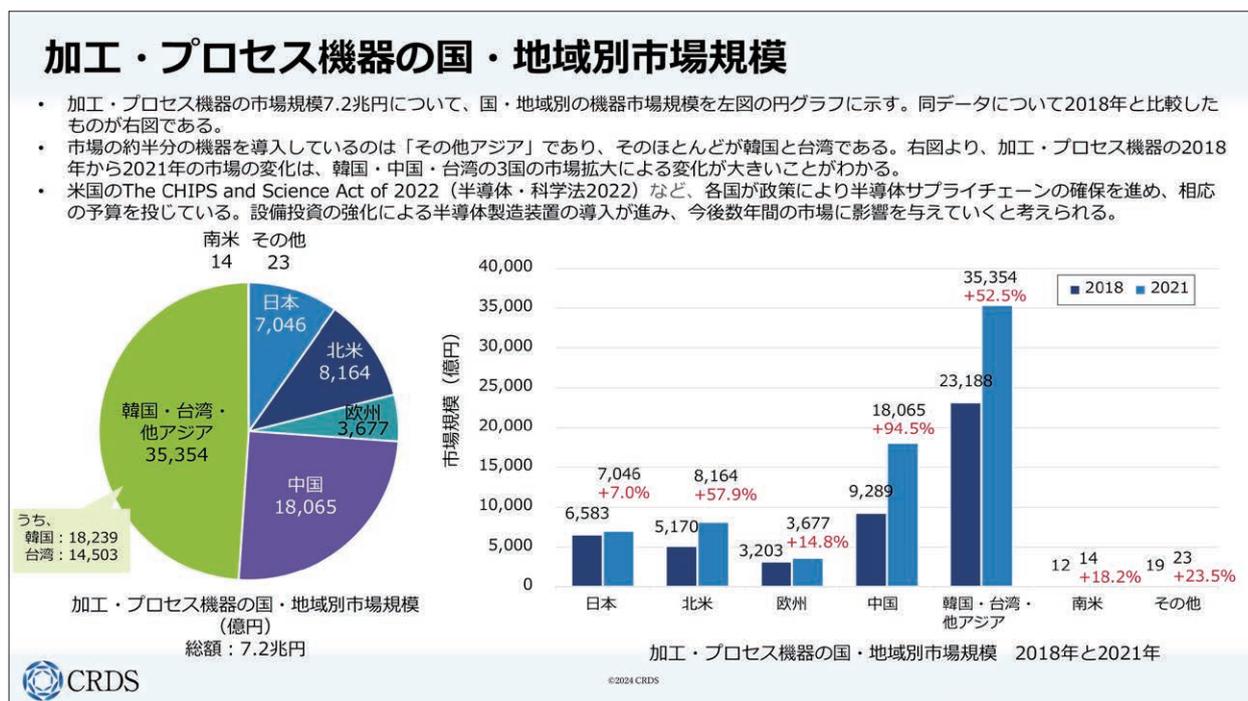


図2-2-9 加工・プロセス機器の国・地域別市場規模比較

日本では2022年に経済産業省が「半導体戦略」を策定し、その後熊本県にTSMCの工場誘致、さらに国際連携による先端半導体の国内量産体制を確立すべく設立されたRapidus株式会社など、積極的な投資が進む。研究開発に関しても、技術研究組合最先端半導体技術センター(Leading-edge Semiconductor Technology Center: LSTC)の開設や、半導体技術に関する先行研究と人材育成を目的として文部科学省が2022年に開始した「次世代X-nics半導体創生拠点形成事業」など、半導体が国家戦略上の最重要マターとなっている。

米国は、国内半導体製造を復活させ、研究開発に資金を拠出して技術サプライチェーンを確保することを

4 「第十四次五ヵ年計画」では集積回路を重要な先端科学技術分野に指定している。
CRDS「主要国の研究開発戦略(2022年)」(2022年3月)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-FR-02.html>

目指し、The CHIPS and Science Act of 2022 (半導体・科学法2022) を制定している。米国が将来にわたって競争し勝利するため、新たに527億ドルの投資を行うものである。直接的な半導体だけでなく、幅広い科学技術分野が対象に含まれている。企業における半導体・関連機器の製造にかかる資本支出に対しての25%の投資税額控除や、既存事業・プログラムの継続・増加分なども含めると、総額で2,500億ドル規模の予算措置を見込む⁵。

加工・プロセス機器の2021年の国・地域別市場規模を、機器分類別に示した(図2-2-10)。本調査では主に半導体・エレクトロニクス研究に用いられる機器を対象としていることから、韓国、台湾、中国のような、半導体関連企業の製造拠点が集中している国で市場の過半を占める。市場の特徴としては、リソグラフィ・露光・描画装置に代表される微細加工装置の高額化傾向が顕著であり、台数よりも装置自体の高価格化が市場拡大の背景にある。最先端機の代表である極端紫外線(EUV)露光装置の価格は200億円規模で、2021年時点で台湾の市場規模・納入数はそれぞれ約3,700億円・19台、同様に韓国は約3,300億円・17台である。日本市場については、CMOSイメージセンサーや車載用センサー等、高度な製造技術が必要とされる特定市場向け製品に強みがある。ただし、これらの多く(約9割)は研究用途ではなく産業用途であり、経済情勢の影響を受けやすいことに留意が要る。AIおよびデータセンターの需要は今後も堅調であることから、中長期的にはさらなる成長が予測されている。

2 研究機器の市場動向に関する調査

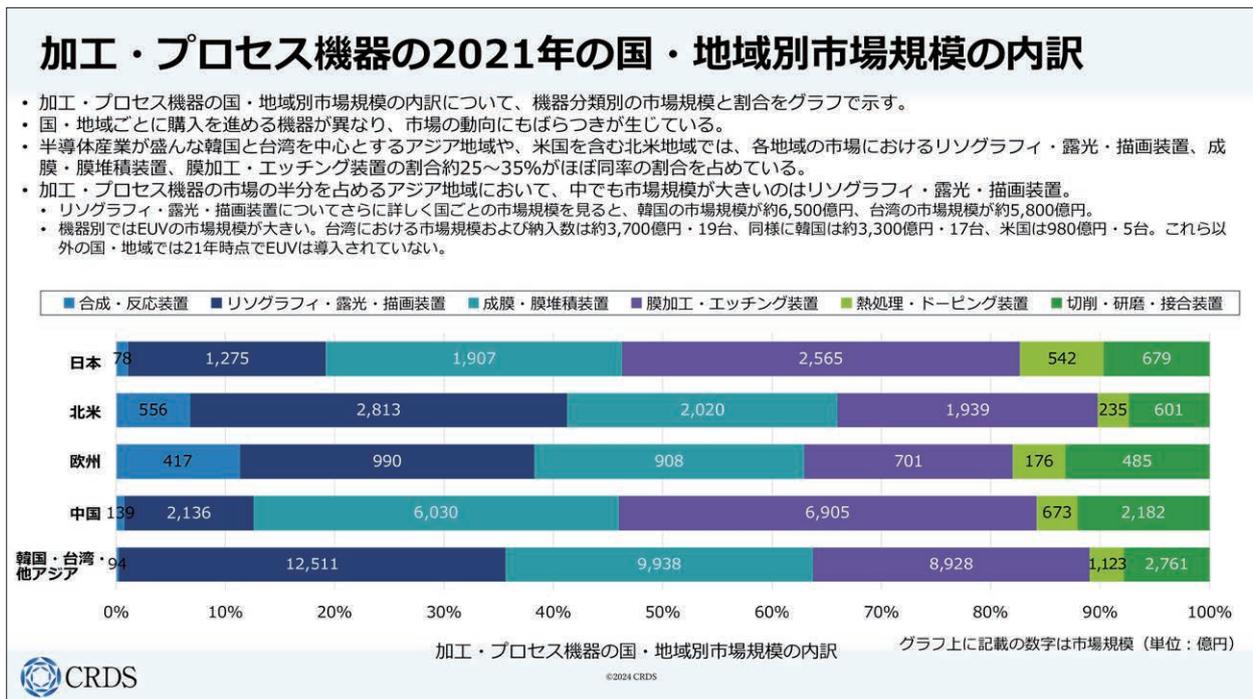


図2-2-10 加工・プロセス機器の2021年の国・地域別市場規模較の内訳

国・地域別市場規模の内訳を2018年と2021年で比較した(図2-2-11)。韓国・台湾・中国を中心とするアジア地域の市場拡大が、欧米日と比較して極めて大きいことがわかる。

5 CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2023年)」
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-FR-05.html>

加工・プロセス機器の国・地域別市場規模の内訳 2018と2021の比較

- 加工・プロセス機器の国・地域別市場規模の内訳について、2018年と2021年のデータを比較する。
- 日本は2018年と比較して成膜・膜堆積装置と膜加工・エッチング装置の市場が縮小している。欧州でも同様の傾向が見られる。
- アジア地域と中国の市場規模拡大が顕著。
 - 韓国や台湾などのアジア地域におけるリソグラフィ・露光・描画装置の市場規模は2018年と比較して約2倍に拡大し、約6,000億円増加した。
 - 中国の市場成長率は、成膜・膜堆積装置が105%、膜加工・エッチング装置が153%、切削・研磨・接合装置が104%。

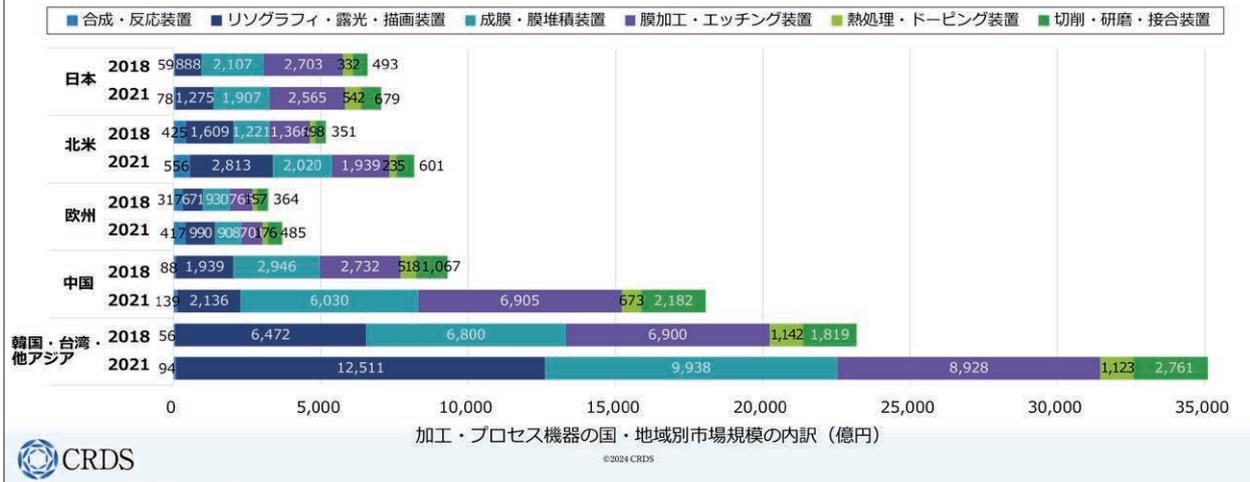


図2-2-11 加工・プロセス機器の国・地域別市場規模較の内訳（2018年と2021年の比較）

■ 機器市場における企業国籍別シェア

世界市場における、企業国籍別シェアについて調査した。企業の国籍は、世界市場でシェアを有する企業の本社所在地とし、所在地が同じ国にある企業の売上高を合計して各国シェアを算出している。本調査が対象とする計測・分析機器と加工・プロセス機器を合わせた、総額13.5兆円の機器全体の市場における企業国籍別シェアと、各国企業の機器分類別の売上高を図2-2-12に示した。世界市場で最も大きなシェアを獲得しているのは米国企業であり、約6.4兆円、47%のシェアを持つ。日本企業は、約2.2兆円・17%である。欧州圏は、英・独・仏と、機器に強いスイスを各個別に調査している。「その他欧州」に含まれるのは、オランダ・オーストリア・デンマーク・スウェーデン・イタリア・ハンガリー・チェコである。これらを足した欧州諸国11カ国に本社を持つ企業の売上高は合計約3.0兆円である。

「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」を合わせた際の 世界市場における企業国籍別シェアおよびその内訳 (2021年)

2021年の世界市場規模

総額：13.5兆円 (1USD=110円)

- ・ 米国企業のシェアが市場の約半分を占める。
- ・ 日本と欧州の企業がほぼ同じ売上額・シェアをもち、次にドイツ企業が続く。

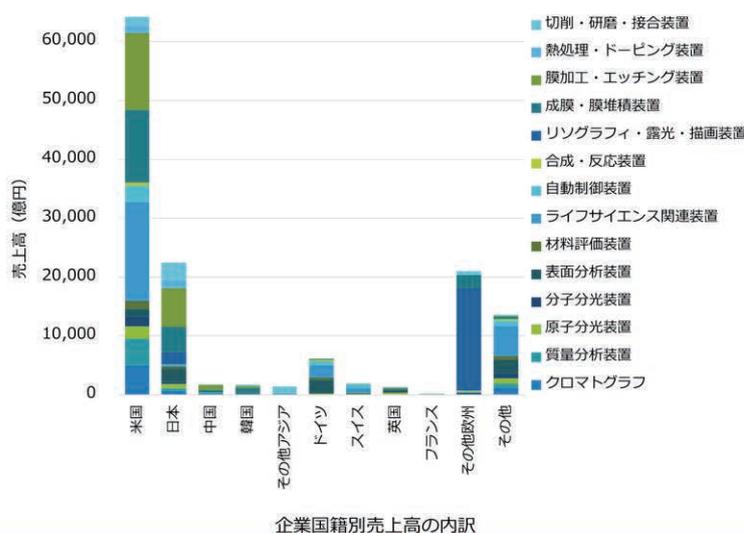
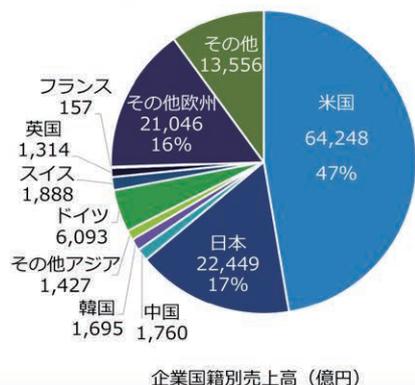


図 2-2-12 「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」を合わせた際の世界市場における企業国籍別シェアおよびその内訳

次に、計測・分析機器の2021年における企業国籍別シェアと企業国籍別売上高の内訳を示した(図2-2-13)。計測・分析機器の売上高およびシェアは、米国企業：3.5兆円・56%、ドイツ企業：5,700億円・9%、日本企業：5,200億円・8%である。圧倒的なシェアをもつ米国企業、次いでドイツ企業と日本企業がほぼ同じシェアで並び、その後にスイス企業や英国企業等が続く。各国企業における内訳を機器分類別にみると、米国企業が特にシェアを持つのはライフサイエンス関連装置であり、規模にして約1.7兆円。米国企業はその他、クロマトグラフや質量分析装置のシェアが高く、いずれも売上高にして5,000億円ほどである。ドイツ企業が特に大きなシェアをもつのは表面分析装置とライフサイエンス関連装置で、それぞれ、表面分析装置が2,314億円、ライフサイエンス関連装置が2,109億円の規模である。計測・分析機器市場において圧倒的に大きいライフサイエンス関連装置市場は、その多くを米国企業、次いでドイツ企業が獲得している。世界に流通するライフサイエンス関連装置のうち約75%はが米国企業とドイツ企業によるものである。

日本企業は、表面分析装置に強さをドイツと二分する。シェアとしては、ドイツ企業が26%、日本企業が25%で、米国企業が16%である。日本企業は、クロマトグラフ・質量分析装置・原子分光装置・分子分光装置・材料評価装置では世界市場で約10~20%のシェアを持ち、これは米国に次ぐ状況にある。ただし、ライフサイエンス関連装置のシェアは約1%と極めて低く、日本の研究開発におけるライフサイエンス装置のほぼすべては米国またはドイツ企業の製品となっている。

なお本データは、計測・分析機器の世界市場で一定のシェアをもつ企業の本社所在地をもとに、企業国籍と見なして算出している。技術開発の拠点と本社所在地が異なる場合があることに留意する必要がある。例えば、世界最大の計測・分析機器メーカーである米Thermo Fisher Scientific社や、ライフサイエンス機器に強いDanaher社によって買収された企業には、多数のドイツ企業が含まれているが、集計上これらはすべて米国籍企業のシェアとして表現している。よって、ドイツを始めとした従来の欧州企業のシェアは、実態よりも小さく表現されている可能性がある。

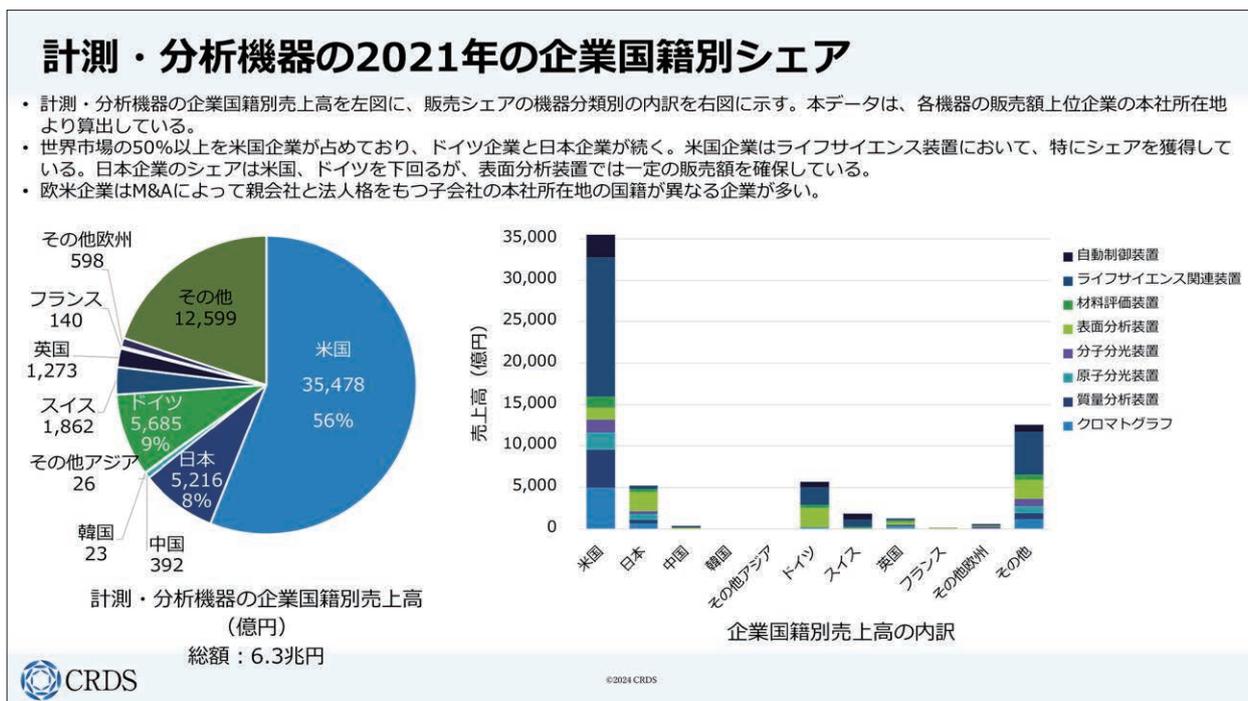


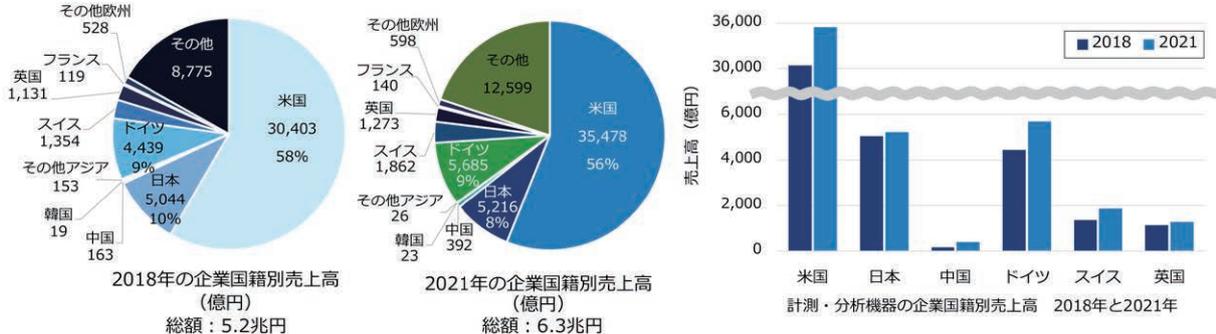
図2-2-13 計測・分析機器の2021年の企業国籍別シェア

企業国籍別シェアを2018年と2021年で比較すると、日本企業の伸び悩みが顕著に表れている。あくまでこの期間に限った比較であるため単一の指標だけで判断すべきものではないが、主要国・地域の中で売上高成長が最も低いことは、事業の効率性の観点で課題があると考えられる。

日本・米国・ドイツ企業を比較すると、特にシェアを拡大しているのはドイツ企業であり、売上高では約1,200億円の増加があった。2018年には日本企業がドイツ企業のシェアを僅かに上回っていたが、2021年には逆転している。ドイツ企業の成長は、ライフサイエンス関連装置の売上増が効いている。その他、スイスや中国のように、2021年時点でまだ規模は小さくても、3年間で高い成長を示す企業を抱える国もあり、今後の動向を注視していく必要がある。また、すでに大きな規模を有する米国企業や、欧州、韓国も15%程成長していることに対し、日本企業の成長は3%にとどまっている (図2-2-14)。

計測・分析機器の企業国籍別シェア 2018年と2021年の比較

- 2018年と2021年の企業国籍別売上高を比較すると、割合に大きな変化は見られないものの、ドイツ・スイス・中国の企業が特に成長率が高い傾向にある。
- ドイツ企業は、2018年に既にシェアを獲得していた表面分析装置をはじめとした機器の売上額を堅調に拡大しつつ、PCRや細胞分離装置などのライフ関連装置で新たに市場を拡げている。
- 米国・英国・フランス企業の売上額は15%前後の成長率で拡大している。一方、日本企業は微増で、成長率は3%にとどまる。
- 「その他」の国はカナダやイスラエルが該当するが、一定のシェアを満たさないことからデータとして算出できない各国企業も含んでいる。



企業国籍別の2018年から2021年の売上増加額 (億円) と成長率

	米国	日本	中国	ドイツ	スイス	英国	フランス	その他欧州	韓国
増加額	5,075	172	229	1,246	508	142	20	69	4
成長率	17%	3%	140%	28%	37%	13%	17%	13%	19%

図 2-2-14 計測・分析機器の企業国籍別シェア (2018年と2021年の比較)

日本企業に関して、計測・分析機器の世界市場におけるシェアを一覧として示した (図 2-2-15)。電子顕微鏡・分析用高速液体クロマトグラフ・NMRは、いずれも2021年時点において1,000億円以上の市場がある機器だが、日本企業の売上高は低下している。いずれの機器も、2018年から2021年で市場規模は拡大している中、日本企業はシェア・売上高が低下している。

計測・分析機器の世界市場における日本企業シェア

- 2018年と2021年の計測・分析機器の世界市場における、日本企業のシェアを一覧表で示した。一覧表は2018年もしくは2021年の世界市場において、日本企業が10%以上のシェアをもつ機器を中心に抜粋し、機器ごとの日本企業シェア・日本企業の販売額・世界市場規模をまとめている。
- 2021年の日本企業の販売額が、2018年を下回る機器を表中に青文字で示している。世界市場規模について、2021年が2018年を下回る機器は網掛けしている。
- 「日本企業シェア増減」の欄に、世界市場における市場規模の成長率に対する日本企業販売額の成長率が、5%以上、上回る場合に「↑」、下回る場合に「↓」を記入している。

機器中分類	機器名	2018			2021			日本企業シェア増減
		日本企業シェア	日本企業販売額 (億円)	世界市場規模 (億円)	日本企業シェア	日本企業販売額 (億円)	世界市場規模 (億円)	
表面分析装置	表面分析計 (AugerやESCA等)	40.8%	172	423	40.6%	186	459	→
表面分析装置	光学顕微鏡	32.0%	1,177	3,678	30.5%	1,228	4,031	↓
表面分析装置	電子顕微鏡	32.0%	888	2,774	22.3%	736	3,302	↓
原子分光装置	X線回折装置 (XRD)	31.0%	253	815	32.4%	294	907	↑
質量分析装置	MALDI-TOF MS	31.0%	133	429	34.8%	144	413	↑
原子分光装置	全有機炭素 (TOC) & その他SUMパラメータ	30.0%	49	163	28.5%	51	179	↓
材料評価装置	熱特性評価装置	22.2%	164	737	19.6%	169	863	↓
原子分光装置	蛍光X線分析装置 (XRF)	19.0%	233	1,225	19.5%	246	1,263	→
原子分光装置	アーク/スパーク光放出分光装置	17.0%	54	320	15.2%	48	317	↓
クロマトグラフ	分析用高速液体クロマトグラフ	13.0%	749	5,763	9.8%	657	6,703	↓
クロマトグラフ	超臨界流体クロマトグラフ	13.0%	18	136	13.3%	20	150	→
分子分光装置	赤外分光装置	13.0%	133	1,025	11.4%	130	1,136	↓
表面分析装置	共焦点及び高度顕微鏡	13.0%	80	616	11.1%	81	725	↓
表面分析装置	走査型プローブ顕微鏡	13.0%	54	416	13.8%	65	470	↑
質量分析装置	GC/MS	11.0%	93	847	12.1%	114	941	↑
原子分光装置	誘導結合プラズマ発光分析装置 (ICP-OES)	10.0%	61	605	8.1%	53	658	↓
材料評価装置	物理特性評価装置	10.0%	92	919	10.7%	106	991	↑
材料評価装置	粒子特性評価装置	10.0%	81	813	10.1%	100	991	→
分子分光装置	核磁気共鳴分光装置 (NMR)	8.9%	87	975	8.1%	83	1,026	↓
分子分光装置	エリブソメーター	8.0%	8	101	20.6%	25	123	↑
分子分光装置	ラマン分光装置	8.0%	35	443	16.7%	91	543	↑
ライフサイエンス関連装置	PCR装置	3.0%	105	3,493	2.6%	137	5,284	↓
ライフサイエンス関連装置	シーケンサー	0%	0	4,115	0%	0	4,583	↓
ライフサイエンス関連装置	フローサイトメーター	0%	0	2,223	1.4%	39	2,769	↓
ライフサイエンス関連装置	マイクロアレイ	0%	0	1,310	1.5%	19	1,246	↓

図 2-2-15 計測・分析機器の世界市場における日本企業シェア (2018年と2021年の比較)

その他、光学顕微鏡・熱特性評価装置・共焦点及び高度顕微鏡などは、売上高は増加しているものの、市場全体の成長に対し日本企業の成長は追い付いておらず、シェアが低下している。日本企業がほぼ参入できていないライフサイエンス関連装置に関しては、僅かにシェアを伸ばした機器分類もあるものの、総体として日本企業の立ち位置は変わらず、世界市場における存在感はほぼ無い。

日本企業が世界市場において高いシェアをもつ表面分析計をはじめ、蛍光X線分析装置(XRF)や超臨界流体クロマトグラフなど、シェアを変わず維持している機器もある。また、X線回折装置(XRD)・走査型プローブ顕微鏡・ガスクロマトグラフ質量分析計(GS/MS)などはシェアを拡大しており、個別には良い兆しもある。

過去、NMRのように日本で技術開発がなされてきたものや、原理の発見に大きな貢献があった機器であっても、市場シェアとして見れば海外企業に後塵を拝する状況にある。例えば、田中耕一氏のノーベル化学賞受賞対象となった技術「ソフトレーザー脱離イオン化法」をもとに島津製作所が開発した質量分析装置は、当時の性能では分解能が低く実用化に至らず、ビジネスとしては成立しなかった。その後、この技術を参考にドイツで開発された「MALDI-TOF MS」は、より高分解能の解析が可能であるとして世界に広く普及するようになった。現在のMALDI-TOF MSの市場において島津製作所は3割を獲得しているものの、Bruker社に次ぐ2位である。

次に、加工・プロセス機器の2021年における企業国籍別シェアと企業国籍別売上高の内訳を示した(図2-2-16)。

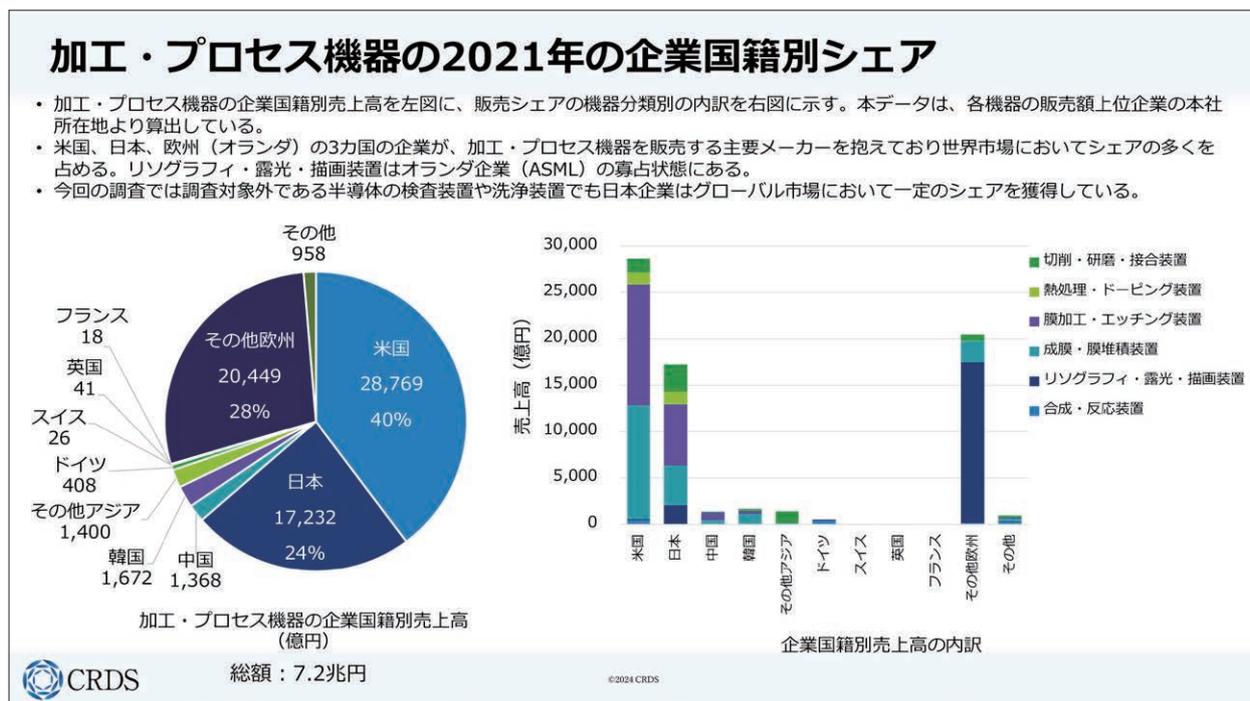


図2-2-16 加工・プロセス機器の2021年の企業国籍別シェア

加工・プロセス機器では、米国・その他欧州(オランダ・オーストリア・イタリア)・日本の、3つの国・地域の企業でシェアのほとんどを占めている。なお「その他欧州」の中で抜きん出てシェアを獲得しているのは、ASMLに代表されるオランダ企業である。企業国籍別売上高の内訳をみると、米国企業と日本企業は主に成膜・膜堆積装置と膜加工・エッチング装置の売上が高く、リソグラフィ・露光・描画装置はオランダ企業が

圧倒的な地位を築いている。日本企業は東京エレクトロン社を始めとした製造装置メーカーが強く、多数の機器で米国企業と競合する。しかし、最先端のリソグラフィ・露光装置は、ASML社の独占状態にあるなど、機器によって状況が全く異なる。リソグラフィ・露光装置は、90年代から2000年代の初頭にかけては日本企業が大きなシェアを持っていたが、その後のオランダやベルギーにおける急速な技術開発と特許網の構築によって、最先端機に関しては撤退を余儀なくされた経緯がある。今後、他の加工・プロセス機器についても同様のことが起こるか、中国企業の台頭も予想される。中国は国を挙げて開発体制の整備を進めており、投資ファンドを利用した機器開発の資金源の確保や、旺盛な政策投資の状況を見ると、日本企業がその世界的位置をキープするには、一層厳しい競争となる。

リソグラフィ・露光装置は、半導体の高性能化の鍵を握る微細化技術の代表である。光源波長が最も短く、極小のパターン形成を可能とするEUV装置はASML社が独占するが、光源にi線、クリプトン・フッ素 (KrF)、フッ化アルゴン (ArF) を用いるものでは、日本企業は現在もシェアを維持している。また、本調査では調査対象とはしていないものの、EUV装置に対応した欠陥検査装置などでも日本企業はトップシェアを獲得しており、加工・プロセス機器の多様な技術・製品群の国際分業のなかで、日本の製造装置やプロセスに用いる素材は極めて重要な役割を担っている。

加工・プロセス機器の企業国籍別シェアについて、2018年と2021年を比較すると(図2-2-17)、米国企業、日本企業の成長とともに、その他欧州に分類するASML社に代表されるオランダ企業の成長が著しい(114%成長)。また、2018年当時にはデータとして顕在化していなかった中国企業が統計上有意となってきた。前述の「国・地域別市場規模」でも触れたように、中国はまずは装置輸入を経て技術を導入し、その後の自国開発への転換を図っている。

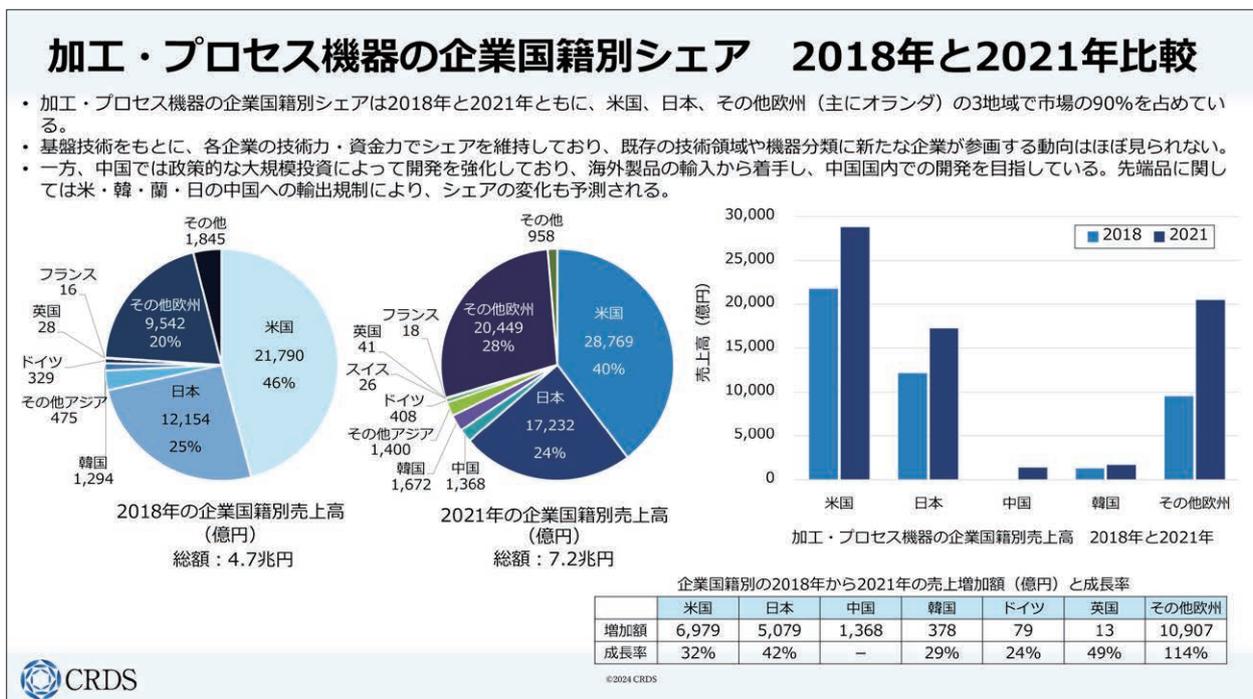


図2-2-17 加工・プロセス機器の企業国籍別シェア (2018年と2021年の比較)

加工・プロセス機器の日本企業の売上高成長を見ると、ダイシングソーや、CMP装置、ゲートエッチング装置が増加している。これらは市場として1,000億円に満たないものの、縦型酸化拡散炉・i線露光装置・中電流イオン打ち込み装置などが額・シェア共に伸びている。

一方で、i線露光装置を除くリソグラフィ・露光・描画装置に関しては日本企業の売上が減少している。欧米企業がシェアを拡大させるなか、日本企業は厳しい状況にある (図2-2-18)。

加工・プロセス器の世界市場における日本企業シェア

- 2018年と2021年の加工・プロセス機器のグローバル市場における、日本企業のシェアを一覧表で示した。一覧表は2018年もしくは2021年のグローバル市場において、日本企業が20%以上のシェアをもつ機器を中心に抜粋し、機器ごとの日本企業シェア・日本企業の販売額・世界市場規模をまとめている。
- 2021年の日本企業の販売額が、2018年を下回る機器を表中に青文字で示している。世界市場規模について、2021年が2018年を下回る機器は網掛けしている。
- 「日本企業シェア増減」の欄に、グローバル市場における市場規模の成長率に対する日本企業販売額の成長率が、5%以上、上回る場合に「↑」、下回る場合に「↓」を記入している。

機器中分類	機器名	2018			2021			日本企業シェア増減
		日本企業シェア	日本企業販売額 (億円)	世界市場規模 (億円)	日本企業シェア	日本企業販売額 (億円)	世界市場規模 (億円)	
リソグラフィ・露光・描画装置	電子ビームマスク描画装置	93.0%	553	595	34.2%	337	985	↓
成膜・膜堆積装置	縦型CVD装置	90.4%	1,732	1,916	92.7%	2,523	2,722	→
切削・研磨・接合装置	ダイヤモンドソー	89.2%	711	797	97.9%	1,242	1,268	↑
熱処理・ドーピング装置	縦型酸化拡散炉	79.0%	610	772	94.2%	929	986	↑
リソグラフィ・露光・描画装置	i線露光装置	61.8%	490	792	79.1%	663	837	↑
リソグラフィ・露光・描画装置	後工程向けDI	—	—	—	72.7%	188	259	
リソグラフィ・露光・描画装置	後工程向けステッパ	—	—	—	61.2%	165	269	
膜加工・エッチング装置	絶縁膜エッチング装置	54.3%	3,442	6,341	49.2%	4,790	9,731	↓
リソグラフィ・露光・描画装置	電子ビーム直描装置	50.8%	67	132	38.9%	50	128	↓
切削・研磨・接合装置	CMP装置	35.9%	730	2,036	39.1%	1,095	2,801	↑
リソグラフィ・露光・描画装置	KrFエキシマレーザスキャン	34.7%	525	1,514	16.5%	345	2,093	↓
リソグラフィ・露光・描画装置	ArFエキシマレーザスキャン	31.3%	144	459	10.3%	60	584	↓
成膜・膜堆積装置	原子層堆積 (ALD) 装置	28.5%	610	2,138	25.6%	1,178	4,596	↓
熱処理・ドーピング装置	高エネルギーイオン打ち込み装置	25.1%	120	479	13.5%	75	559	↓
切削・研磨・接合装置	ダイヤモンドチップ装置	23.5%	296	1,261	—	—	—	
切削・研磨・接合装置	ダイヤモンドチップ装置	—	—	—	22.5%	398	1,771	
膜加工・エッチング装置	ゲートエッチング装置	21.3%	982	4,611	22.3%	1,614	7,229	↑
熱処理・ドーピング装置	中電流イオン打ち込み装置	20.3%	101	496	28.8%	160	556	↑
切削・研磨・接合装置	フリップチップボンディング装置	—	—	—	19.8%	172	867	
合成・反応装置	マイクロ波アシスト合成装置	0%	0	212	0%	0	231	
合成・反応装置	自動合成装置	0%	0	367	0%	0	454	
合成・反応装置	バイオリアクター/発酵槽	0%	0	404	0%	0	634	
リソグラフィ・露光・描画装置	EUV	0%	0	2,162	0%	0	8,039	
成膜・膜堆積装置	プラズマCVD装置	0%	0	4,798	0%	0	6,901	
成膜・膜堆積装置	Cuめっき装置	0%	0	1,081	0%	0	1,430	



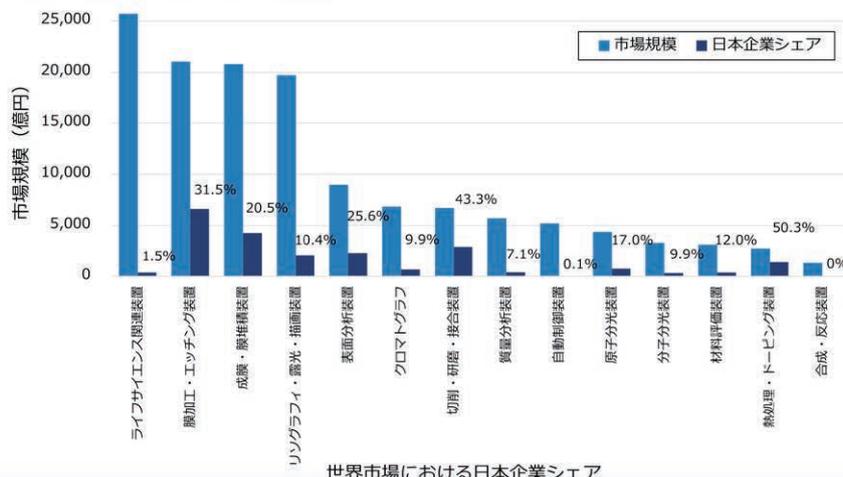
©2024 CRDS

図2-2-18 加工・プロセス器の世界市場における日本企業シェア (2018年と2021年の比較)

2 研究機器の市場動向に関する調査

世界市場における日本企業のシェア

- 機器中分類別に日本企業のシェアと世界市場規模をグラフに示した。このグラフから、日本企業が一定のシェア (10%以上) を有している機器を、市場規模が5千億円以上であるものと5千億円以下であるものに分け、表に示した。
- 世界市場における市場規模が大きく、かつ日本企業がシェアを有している機器は表面分析機器、膜加工・エッチング装置、成膜・膜堆積装置、リソグラフィ・露光・描画装置、切削・研磨・接合装置。



世界市場における日本企業のシェアが10%以上であり、市場規模が5千億円以上の機器

機器大分類	機器中分類
計測・分析機器	表面分析装置
加工・プロセス機器	膜加工・エッチング装置
	成膜・膜堆積装置
	リソグラフィ・露光・描画装置
	切削・研磨・接合装置

世界市場における日本企業のシェアが10%以上であり、市場規模が5千億円以下の機器

機器大分類	機器中分類
計測・分析機器	原子分光装置 材料評価装置
加工・プロセス機器	熱処理・ドーピング装置



©2024 CRDS

図2-2-19 世界市場における日本企業のシェア

■日米市場

世界市場の動向から、日本と米国それぞれの市場の動向を推計した(図2-2-20①、②)。計測・分析機器と加工・プロセス機器を合わせると、日本は1.3兆円、米国は3.0兆円の市場がある。この日本市場に関する企業国籍別のシェアを推計すると、米国企業：44%、日本企業：32%、ドイツ企業：5%、その他欧州企業(ドイツを除く)：8%、である。つまり日本はこれら機器の約7割を、外国企業から購入している。一方、同じように米国市場を見てみると、そのシェアは米国企業：52%、日本企業：11%、ドイツ企業：7%、その他欧州企業：15%である。このことから、米国は半分以上の機器を、自国企業から購入していることがわかる。

日本市場と米国市場のそれぞれにおける企業国籍別シェア

- 2021年の日本市場と米国市場のそれぞれについて、企業国籍別販売額およびシェアをグラフに示す。
 - 日本市場における日本企業のシェアは30%で、米国企業のシェア43.6%を下回る。
 - 米国では、市場の約半分のシェアを米国企業が獲得しており、米国ユーザーは機器の多くを国内企業から購入していることが分かる。
- ※本データは、各国ごとの市場規模 × 企業国籍毎の企業シェアの和を世界市場におけるシェアと仮想的に同等と見なし、推計している。

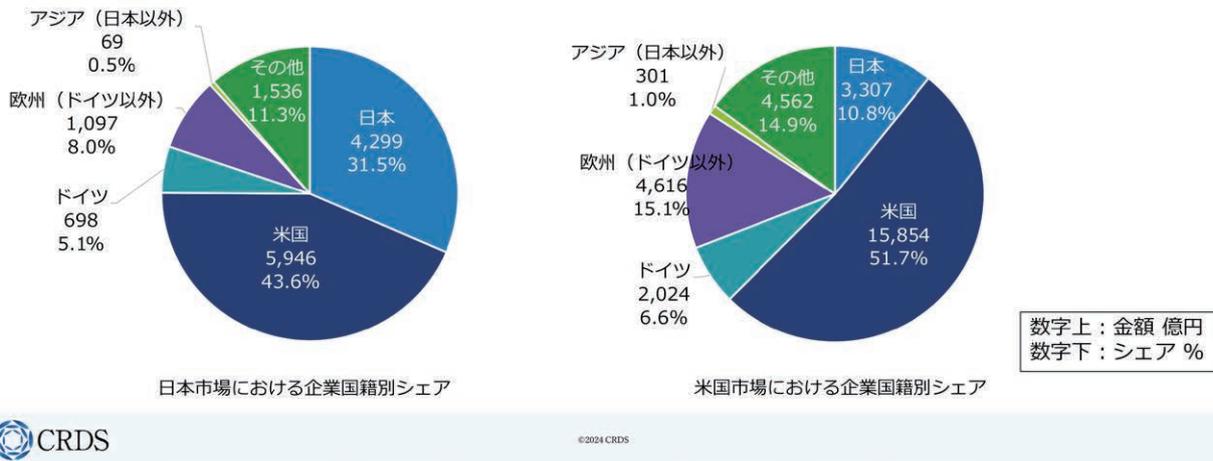


図2-2-20① 日本市場と米国市場のそれぞれにおける企業国籍別シェア

企業国籍別シェア：2021年の日本市場と米国市場の、「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」の各内訳

- ・各国市場における企業国籍別販売額・シェアを日本・米国市場に着目して機器の大分類別に示した。
- ・日本市場において、計測・分析機器では米国企業のシェアが最も大きい。対して加工・プロセス機器では、日本企業のシェアが50%、米国企業が37%である。加工・プロセス機器の売上では世界市場においても一定のシェアをもつ日本企業の強みが、自国市場で活かされている。
- ・米国市場では、計測・分析機器のシェアの約60%を自国企業が持つ。加工・プロセス機器ではリソグラフィ・露光・描画装置の最先端機を積極的に導入していることから、欧州企業のシェアが大きい。

※本データは、各国における企業国籍別シェアをグローバル市場におけるシェアと仮想的に同等とみなし、推計している。

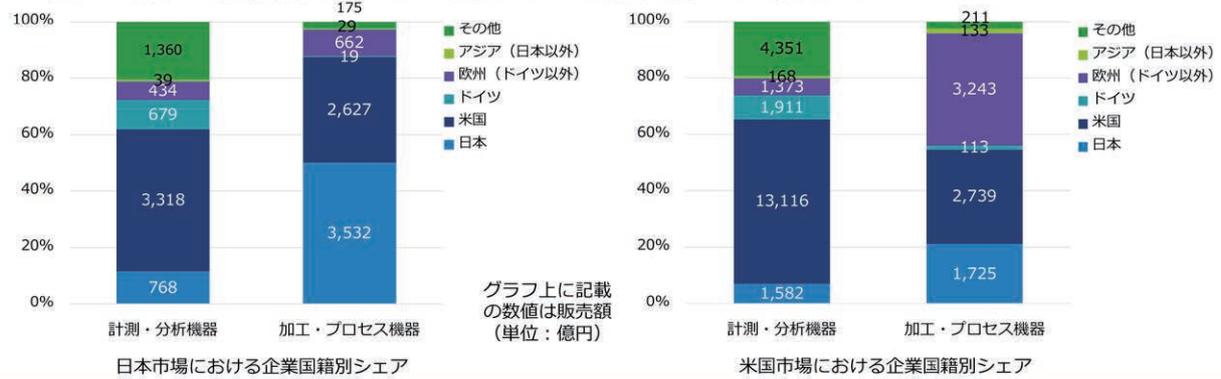


図 2-2-20② 企業国籍別シェア：2021年の日本市場と米国市場の、「計測・分析機器」と「加工・プロセス機器」の各内訳

日本市場における日本企業のシェア32%の多くは、加工・プロセス機器である。機器分類別にシェアを見た場合、日本企業シェアの高い代表的なものは、切削・研磨・接合装置：約70%、熱処理・ドーピング装置：約65%、リソグラフィ・露光・描画装置：約60%、などである。例えばリソグラフィ装置は、米国市場においては欧州企業がシェアの多くを占めているが、日本市場においては日本企業が現在もシェアを維持している。これは日本国内に最先端機がほぼ入ってきていないことや、旧世代の機器も使用目的によって旺盛な需要があること、加工・プロセス工程上の機器更新におけるスイッチングコストが高いことなど、いくつかの要因が考えられる。日本は自国企業のシェアよりも米国企業のシェアが大きく、機器の購入を輸入に頼っている状況にあることがわかる。一方、米国では52%のシェアを米国企業が持つことから、米国ユーザーは国内企業から購入していることがわかる。

日本国内の市場について、2018年のデータと比較すると、2021年は日本企業のシェアが拡大しているが、これは加工・プロセス機器の国内における日本企業からの調達が増加していることによる。同様に米国市場のデータを見ると、日本企業による売上高は増加しているものの、日本企業のシェアには変化が見られない。その一方で欧州企業の米国市場でのシェアが大幅に増加している (図 2-2-21 ①②)。

日本市場と米国市場における企業国籍別シェア 2018と2021の比較

- 日本と米国の各市場の企業国籍別販売額およびシェアについて、2018年と2021年を比較した。
- 日本市場では、3年間で日本企業の売上額とシェアの両方が伸びている。日本市場において2018年と比較してシェアと売上額が低下したのは、米国企業のみである。
- 米国市場では、欧州企業のシェアと売上額が特に拡大している。その他の企業は、売上額は増加しているがシェアは変化なし、もしくは低下している傾向がある。米国市場における日本企業のシェアは3年間で変わっておらず、日本国内でのビジネス展開が進む一方、2021年時点で米国市場ではシェアの拡大が進んでいない状況にある。

※本データは、各国ごとの市場規模 × 企業国籍毎の企業シェアの和をグローバル市場におけるシェアと仮想的に同等と見なし、推計している。



図2-2-21 ① 日本市場と米国市場における企業国籍別シェア (2018と2021の比較)

日本市場と米国市場における企業国籍別シェア 2018と2021の比較

- 日本と米国の各市場の企業国籍別販売額およびシェアについて、計測・分析機器と加工・プロセス機器それぞれの2018年と2021年のデータを示す。
- 日本市場に関して、計測・分析機器では日本企業の売上額に変化はなく、シェアは3年間で低下している。2021年の日本市場における日本企業のシェア拡大の背景には、加工・プロセス機器の売上額の増加とシェア拡大の影響があることが分かる。
- 米国市場においては、計測・分析機器ではドイツ企業が、加工・プロセス機器では欧州企業の売上額及びシェアが3年間で拡大している。

※本データは、各国ごとの市場規模 × 企業国籍毎の企業シェアの和をグローバル市場におけるシェアと仮想的に同等と見なし、推計している。

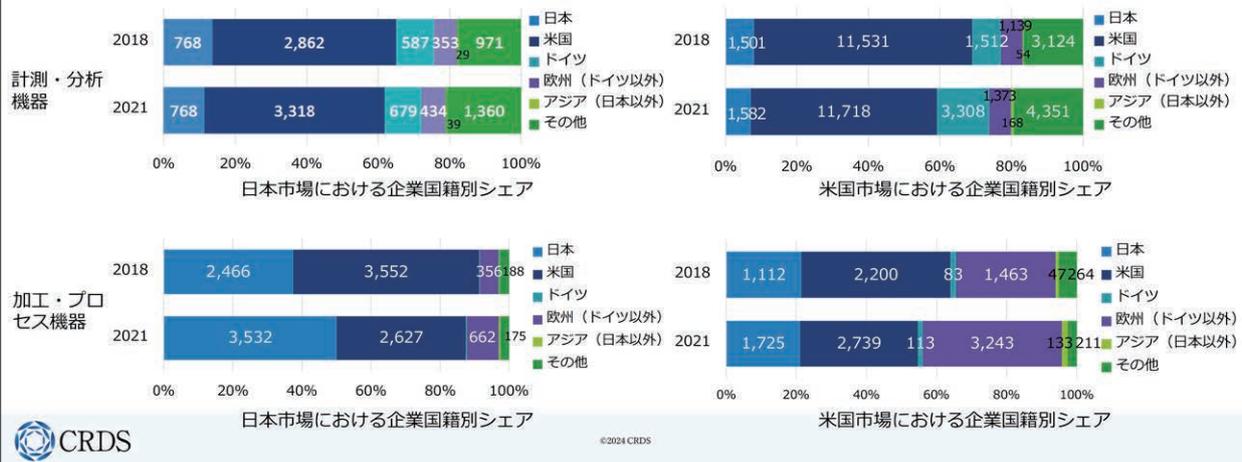


図2-2-21 ② 日本市場と米国市場における企業国籍別シェア (2018と2021の比較)

■ 企業動向

個々の企業動向に関しても、特徴が見られる部分に触れておく。本調査で調査対象とした計測・分析機器について、2021年の世界市場で売上高が上位にある企業を図2-2-22に示した。計測・分析機器のグローバル市場において最大の規模を有するのは、Thermo Fisher Scientific社である。同社はM&Aによって企業規模を拡大してきた経緯があり、現在では技術的に直接のシナジーがない製品セグメントも含めて、多角的に科学機器事業を保有・展開している。グローバルで規模が上位の企業には類似の傾向が見られ、Danaher

社、Agilent Technologies社、Waters社（いずれも本社国籍は米国）ではいずれもライフサイエンス関連装置、質量分析装置、クロマトグラフ、等を含めた複数種の製品事業を取り扱っている。

トップ企業であるThermo Fiser Scientific社は、電子顕微鏡メーカーのFEI社、シーケンサーメーカーのApplied Biosystems社（かつて日立製作所と共同でシーケンサーの製造販売を行った）をはじめ、コア技術を持つ企業を買収して事業規模を拡大してきた。Danaher社とSpectris社も同様にM&Aを積極的に進めているが、この2社は買収した多数の企業を傘下に持つグループ企業のトップとして存在し、自らは機器の製造販売は行っていない。売上高上位25社に入る日本企業は、島津製作所・JEOL・Nikon・Olympusの4社である。各機器分類で一定シェアを持つものの、Thermo Fisher社やDanaer社などの米国企業とは規模の面で大きく差をつけられている。

同データについて、2018年と2021年を比較したものが図2-2-23である。この売上高はあくまで本調査における調査対象機器に限定して示したものであるが、規模として最も増加したのはThermo Fiser Scientific社、成長率が最も高いのはDanaher社である。この2社はいずれもライフサイエンス関連装置が成長の柱となっている。

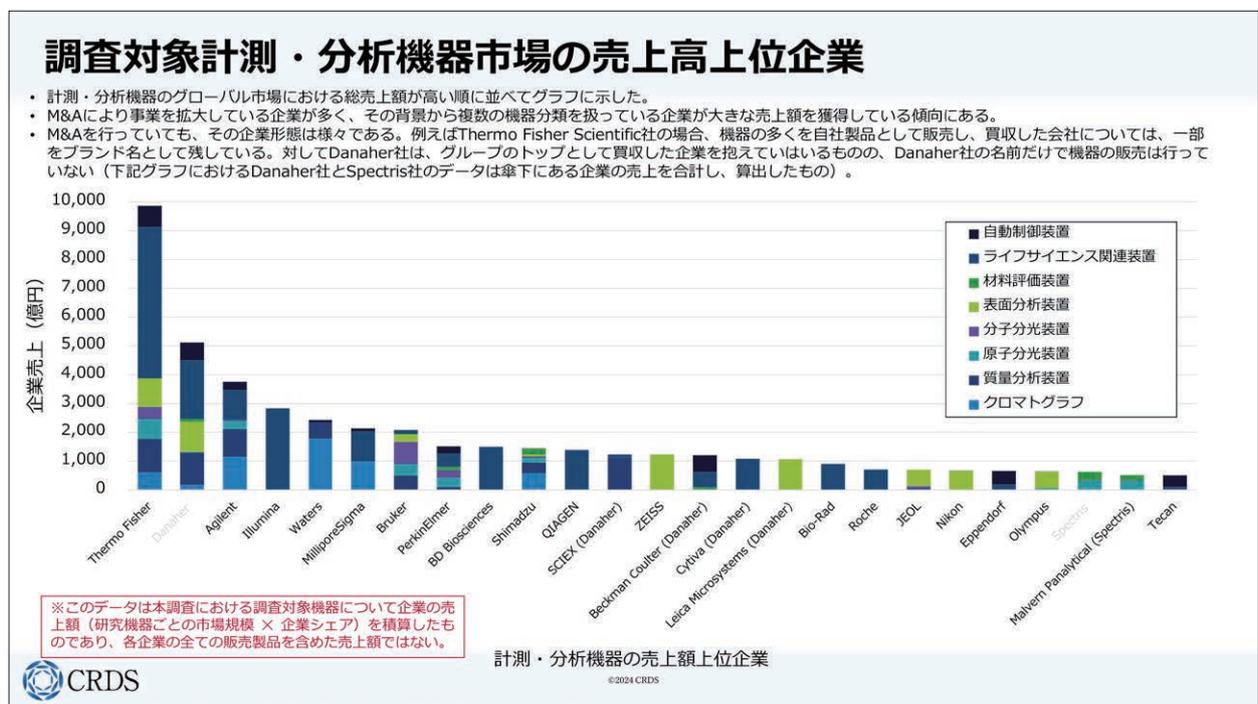


図2-2-22 調査対象計測・分析機器市場の売上高上位企業

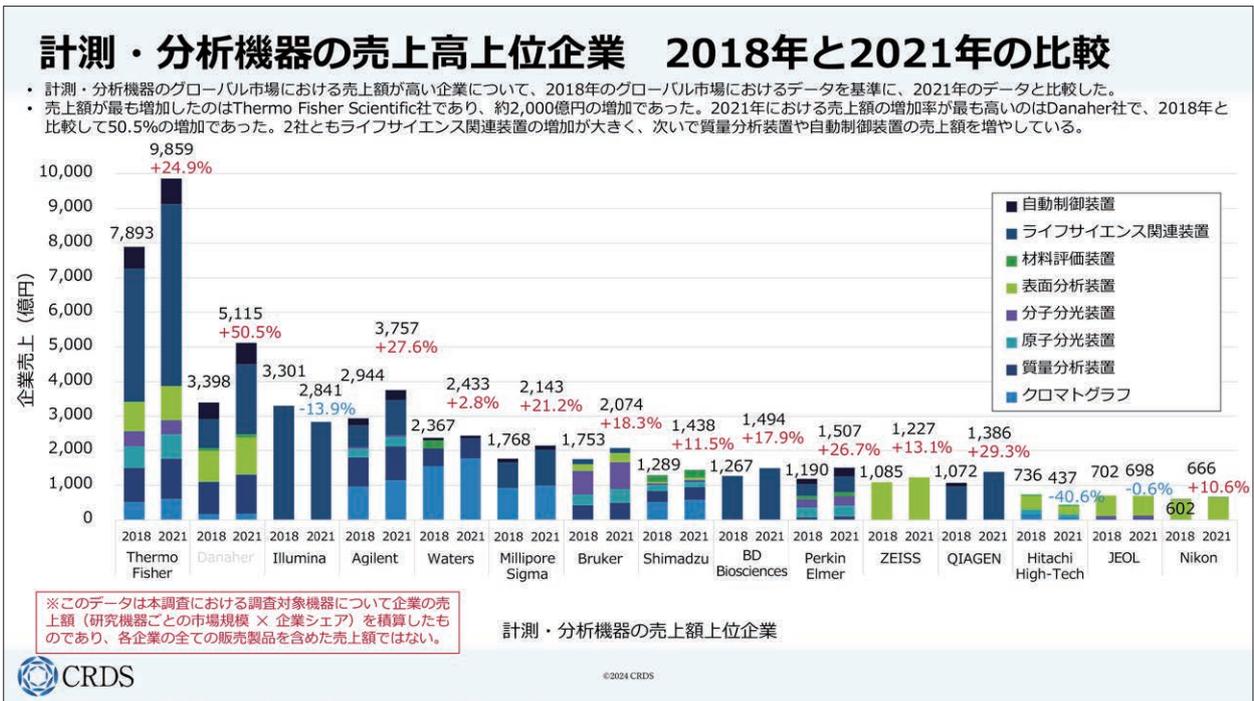


図2-2-23 計測・分析機器の売上高上位企業 (2018年と2021年の比較)

計測・分析機器産業のビジネスモデルには、「機器本体の製品ビジネス」「アフターマーケット (試薬やカラム等の消耗品等)」「サービス (保守サポート、故障による部品交換等)」がそれぞれあり、ライフサイエンス関連装置やクロマトグラフは、機器本体よりもアフターマーケット市場のほうが大きい。これらの市場規模について、2018年と2021年を比較し、図2-2-24の円グラフに示した。2018年の各市場規模は、機器本体が2.3兆円、アフターマーケットが2.2兆円、サービスが7,000億円であった。2021年には、機器本体が2.7兆円、アフターマーケットが2.8兆円、サービスが8,100億円となり、アフターマーケットの市場規模が機器本体の市場規模を僅かに上回った。2021年の市場においてアフターマーケットとサービスを合わせた市場規模は3.6兆円で、計測・分析機器の市場に占める割合は57%である。複数分類の機器事業を展開する企業は、アフターマーケット市場で長期的・継続的に利益を生むビジネスを構築していることが、企業規模の維持・成長に繋がっている。

一方、Illumina社やBD Biosciences社のように一つの機器分類に特化して成長した企業もある。Illumina社のDNAシーケンサーのグローバルシェアは5割、BD Biosciences社のフローサイトメーターシェアも5割超である。これは、単一機器分類の市場成長が見込まれて且つ技術的な競争優位性を長期に保持することができて初めて成立するモデルである。

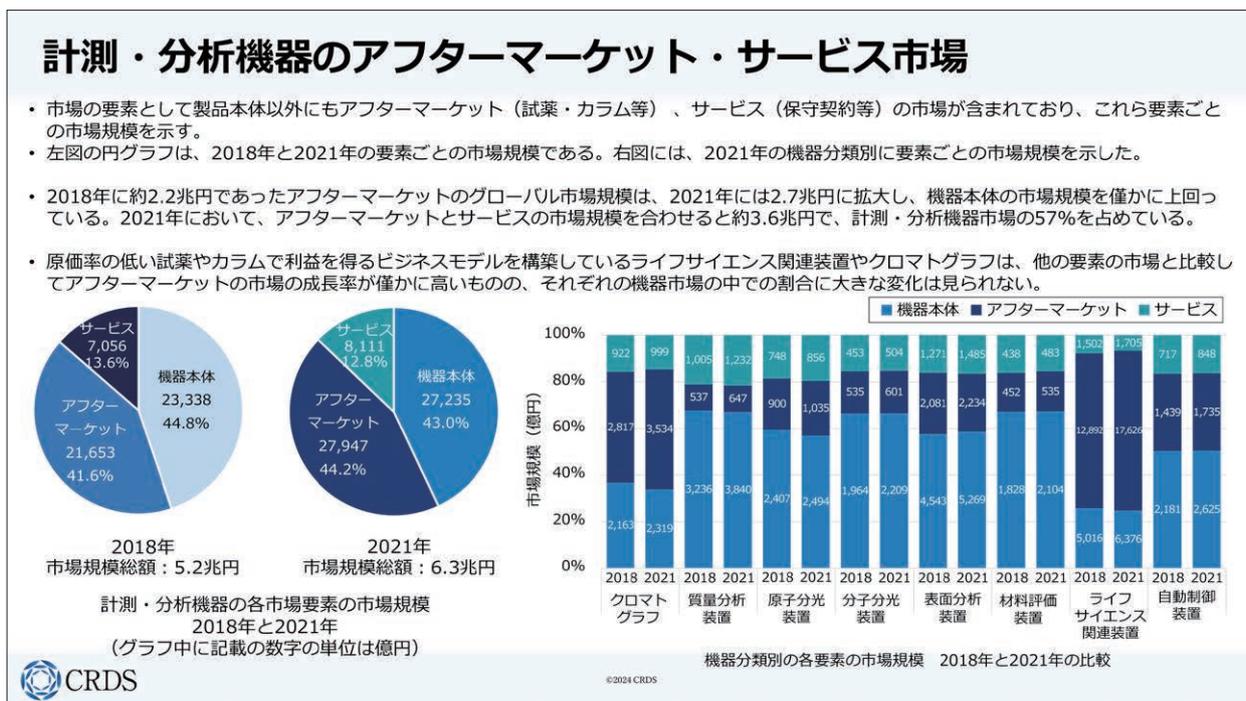


図2-2-24 計測・分析機器のアフターマーケット・サービス市場

加工・プロセス機器では、ASML、Applied Materials (AMAT)、Lam Research、東京エレクトロンの4社が突出して売上が大きく、4社を合わせると市場の約7割におよぶ(図2-2-25)。本調査が対象とした半導体関連装置の場合、各企業で特定の機器分類を取り扱っている企業が多い。また、開発には長期間且つ大規模な投資が必要となることから、寡占状態が生じやすい傾向にある。2013年に東京エレクトロンとAMATが進めていた両社合意による経営統合も、独占禁止法に抵触する懸念から関係当局の承認を得られず成立しなかった。売上が最も大きいASML社は、最先端のEUV露光装置の開発・製造・販売をする唯一の企業であり、それが強みとなってシェアを拡大している。

同データについて2018年と2021年を比較すると、売上高・成長率でもAMAT社とASML社が上位にある(図2-2-26)。3年間で、AMAT社は約6,500億円・67.7%増、ASML社は約7,700億円・84.2%増であった。

これらの機器の多くは産業用途として利用されていることには留意がある。研究目的で微細な加工技術が必要とされる分野においては、日本のCRESTEC、ELIONIX、JEOLの描画装置が多く導入されていることは、特筆すべき点である。また、半導体製造プロセスにおける洗浄工程や、検査に利用される機器では、日本のSCREENセミコンダクターソリューションズやADVANTESTが高いシェアを維持している。

調査対象加工・プロセス機器市場の売上高上位企業

- 加工・プロセス機器のグローバル市場における総売上額が高い順に並べてグラフに示した。
- ASML, Applied Materials (AMAT), Lam Research, 東京エレクトロンの4社が、加工・プロセス機器のグローバル市場の約7割を担っている。
- 本データはCRDS調査に基づいて算出したものであり、売上高や企業の売上高順位は実際の市場動向と異なるものの、実データもASMLとAMATが上位2社、Lam Researchと東京エレクトロンがそれに続いており、4社が加工・プロセス機器販売の主要メーカーであることに変わりはない。



※このデータは本調査における調査対象機器について企業の売上額（研究機器ごとの市場規模 × 企業シェア）を積算したものであり、各企業の全ての販売製品を含めた売上額ではない。

加工・プロセス機器の売上高上位企業

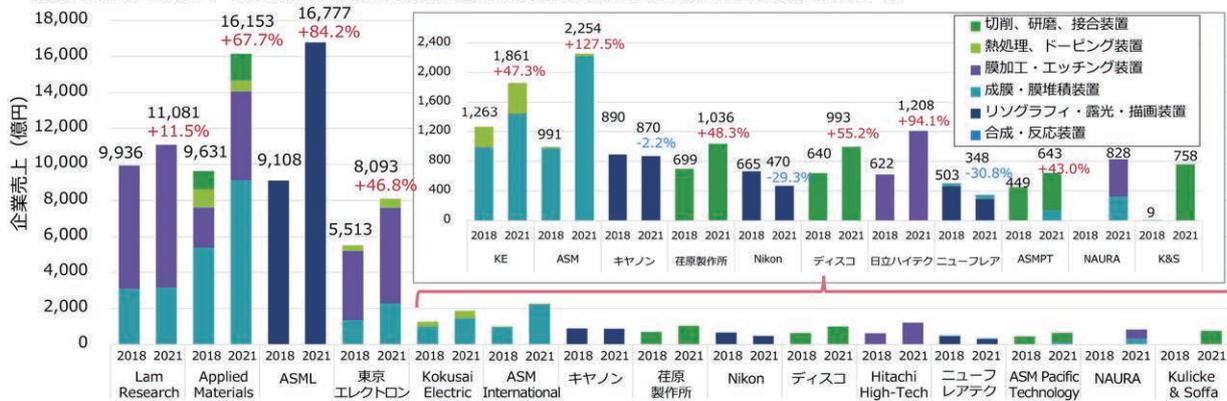


©2024 CRDS

図 2-2-25 調査対象加工・プロセス機器市場の売上高上位企業

加工・プロセス機器の売上額上位企業 2018年と2021年の比較

- 加工・プロセス機器のグローバル市場における売上額が高い企業について、2018年のグローバル市場におけるデータを基準に、2021年のデータと比較した。
- 売上の増加額、売上額の増加率、ともにAMAT社とASML社が高く、AMATは約6,500億円の増加で2018年と比較して67.7%増、ASMLは約7,700億円の増加で84.2%増であった。AMAT社は、熱処理・ドーピング装置の売上額が低下しているものの、その他の機器で売上を伸ばしている。
- ASML社の独占状態にある極端紫外線 (EUV) 露光装置をはじめ、少数企業による寡占状態にある機器が多い。開発に巨額の投資を必要とする技術分野が多く、自社で基盤技術を持ち、十分なリソースを確保できる企業だけが製造販売に参入できる状態にあることが、寡占化を加速させている。



※このデータは本調査における調査対象機器について企業の売上額（研究機器ごとの市場規模 × 企業シェア）を積算したものであり、各企業の全ての販売製品を含めた売上額ではない。

加工・プロセス機器の売上額上位企業



©2024 CRDS

図 2-2-26 加工・プロセス機器の売上高上位企業 (2018年と2021年の比較)

■実験・ラボ用ソフトウェアの動向

ラボで用いるソフトウェアには様々なものがあり、機器メーカー各社でも開発されているが、参照可能なデータが少なく市場範囲を機器と同様に定義することが難しい。そこで本調査では、SDiレポートから抽出可能な一部の実験・ラボ用ソフトウェアを参考データとして集計した。

調査対象としたソフトウェアは、バイオ及びケムインフォマティクス関連製品とラボ用情報管理システム (LIMS/ELN/SDMS) の2種である。バイオ及びケムインフォマティクス関連製品は、化合物の結晶構造デー

タや、3次元構造、化学合成反応に関するデータベースと、それに基づくモデリング・シミュレーションを提供するもので、製品によっては赤外・UV-Vis・ラマン・NMRといった光学技術に分類されるスペクトルデータベースが含まれるものもある。ラボ用情報管理システムは、LIMS : Laboratory Information Management System, ELN : Electronic Laboratory Notebook, LES : Laboratory Execution System, SDMS : Scientific Data Management System を含んでいる。これらは主に医薬品の研究開発工程で用いられる。ELNでは主に実験データを、LESでは装置や実験のプロセス管理、SDMSでは科学データの入力・共有・管理を行う。これらを円滑に接続するようにLIMSは装置管理、実験データのレポートと分析、消耗品の在庫管理等のラボにおけるワークフローを一括管理するものである。

これら2種の2021年の市場規模は、バイオ及びケムインフォマティクス関連製品が1,126億円、ラボ用情報管理システムが743億円である。2製品合わせて、2018年からの3年間で市場規模は約300億円拡大している。国・地域別の市場規模は北米と欧州で二分しており、これら製品は、BIOVIA社、Certara社、Thermo Fisher Scientific社、Agilent社といった米国企業が市場の6割以上を占めている。市場の分布に大きな変化はないものの、成長率ではアジア地域が高く、また、この期間において日本と中国の市場規模は逆転している。

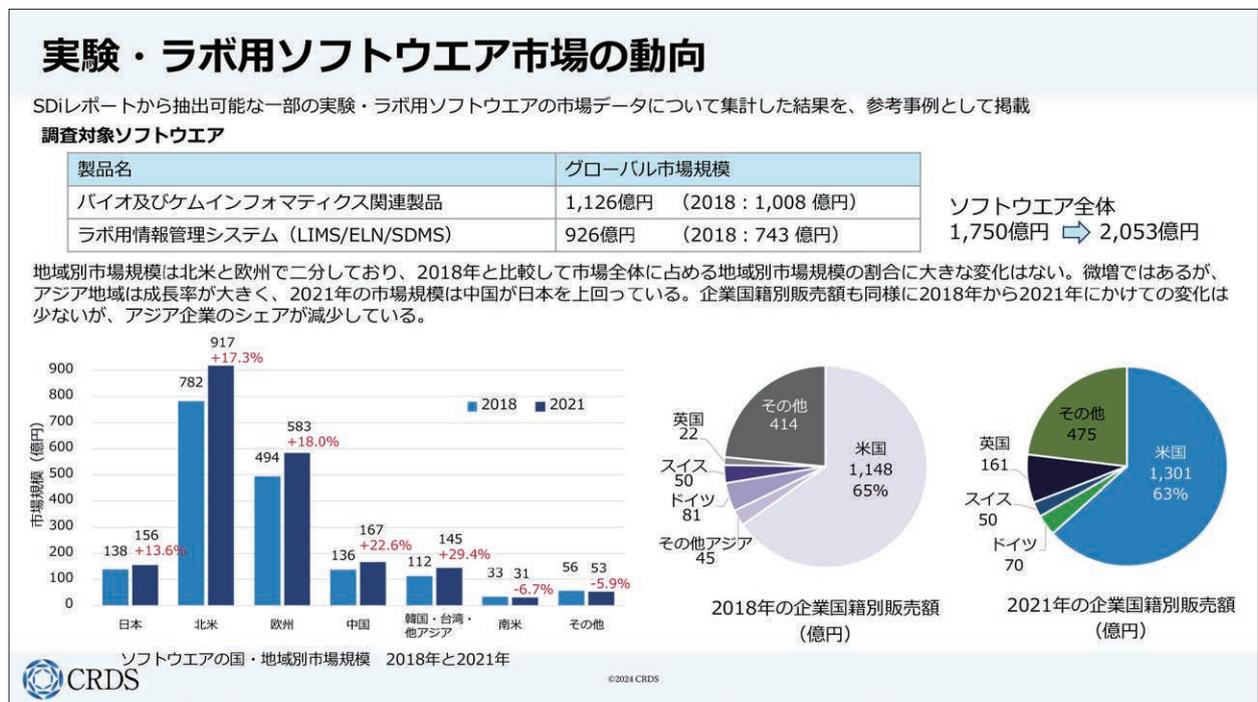


図2-27 実験・ラボ用ソフトウェア市場の動向

寡占化の進む機器 (2021年)

研究機器分類	研究機器名称	機器市場規模 (億円)	シェアトップ企業 (シェア)
質量分析装置	イオントラップ LC/MS & FT/MS	1,024	Thermo Fisher (83%)
	磁気セクタ MS	124	Thermo Fisher (66%)
	GC/MS	941	Agilent (56%)
分子分光装置	核磁気共鳴分光装置 (NMR)	1,026	Bruker (59%)
	SPR及びラベルフリー検出装置	631	Cytiva (Danaher) (56%)
ライフサイエンス関連装置	シーケンサ	4,583	Illumina (54%)
	フローサイトメーター	2,767	BD Biosciences (53%)
合成・反応装置	マイクロ波アシスト合成装置	231	CEM Corporation (53%)
	EUV	8,039	ASML (100%)
リソグラフィ・露光・描画装置	ArFエキシマレーザ液浸	6,531	ASML (96%)
	ArFエキシマレーザスキャン	584	ASML (90%)
	KrFエキシマレーザスキャン	2,093	ASML (84%)
	i線露光装置	837	キヤノン (68%)
	電子ビーム直描装置	128	Vistec Electron Beam (61%)
	電子ビームマスク描画装置	985	IMS Nanofabrication (60%)
	スパッタリング装置	3,768	Applied Materials (87%)
成膜・膜堆積装置	常圧/SACVD装置	578	Applied Materials (66%)
	Cuめっき装置	1,430	Lam Research (63%)
	プラズマCVD装置	6,901	Applied Materials (55%)
	縦型CVD装置	2,722	東京エレクトロン (53%)
	ダイシングソー	1,268	ディスコ (78%)
切削、研磨、接合装置	CMP装置	2,801	Applied Materials (52%)
	高エネルギーイオン打ち込み装置	559	Axcelis Technologies (72%)
熱処理、ドーピング装置	大電流イオン打ち込み装置	647	Applied Materials (59%)
	縦型酸化拡散炉	986	東京エレクトロン (50%)
膜加工・エッチング装置	アッシング装置	650	PSK (54%)
	メタルエッチング装置	3,428	Lam Research (52%)



図 2-2-28 寡占化の進む機器 (2021年)

寡占化の進む機器 2018年と2021年 (計測・分析機器)

研究機器分類	研究機器名称	2018		2021	
		機器市場規模 (億円)	シェアトップ企業 (シェア)	機器市場規模 (億円)	シェアトップ企業 (シェア)
質量分析装置	イオントラップ LC/MS & FT/MS	869	Thermo Fisher(83%)	1,024	Thermo Fisher (83%)
	磁気セクタ MS	116	Thermo Fisher(67%)	124	Thermo Fisher (66%)
	GC/MS	847	Agilent (58%)	941	Agilent (56%)
分子分光装置	核磁気共鳴分光装置 (NMR)	966	Bruker (56%)	1,026	Bruker (59%)
	SPR及びラベルフリー検出装置	259	Molecular Devices (16%)	631	Cytiva (Danaher) (56%)
ライフサイエンス関連装置	シーケンサ	4,115	Illumina (58%)	4,583	Illumina (54%)
	フローサイトメーター	2,223	BD Biosciences (57%)	2,767	BD Biosciences (53%)



©2024 CRDS

図 2-2-29 寡占化の進む機器 2018年と2021年 (計測・分析機器)

寡占化の進む機器 2018年と2021年（加工・プロセス機器）

研究機器分類	研究機器名称	2018		2021	
		機器市場規模 (億円)	シェアトップ企業 (シェア)	機器市場規模 (億円)	シェアトップ企業 (シェア)
合成・反応装置	マイクロ波アシスト合成装置	206	CEM Corporation (58%)	231	CEM Corporation (53%)
リソグラフィ・露光・ 描画装置	EUV	2,182	ASML (100%)	8,039	ASML (100%)
	ArFエキシマレーザ液浸	5,978	ASML (93%)	6,531	ASML (96%)
	電子ビームマスク描画装置	600	ニューフレアテクノロジー (78%)	985	IMS Nanofabrication (60%)
	ArFエキシマレーザスキャン装置	464	ASML (69%)	584	ASML (90%)
	KrFエキシマレーザスキャン	1,528	ASML (65%)	2,093	ASML (84%)
	i線露光装置	800	キヤノン (52%)	837	キヤノン (68%)
	電子ビーム直描装置	133	JEOL (51%)	128	Vistec Electron Beam (61%)
成膜・膜堆積装置	常圧/SACVD装置	552	Applied Materials (92%)	578	Applied Materials (66%)
	Cuめっき装置	1,091	Lam Research (77%)	1,430	Lam Research (63%)
	スパッタリング装置	3,049	Applied Materials (73%)	3,768	Applied Materials (87%)
	縦型CVD装置	1,934	東京エレクトロン (51%)	2,722	東京エレクトロン (53%)
	プラズマCVD装置			6,901	Applied Materials (55%)
切削、研磨、接合装置	ダイシングソー	804	ディスコ (80%)	1,268	ディスコ (78%)
	CMP装置			2,801	Applied Materials (53%)
熱処理、ドーピング装置	大電流イオン打ち込み装置	606	Applied Materials (84%)	647	Applied Materials (59%)
	高エネルギーイオン打ち込み装置	483	Applied Materials (52%)	559	Axcelis Technologies (72%)
	中電流イオン打ち込み装置	500	Applied Materials (51%)		
	縦型酸化拡散炉			986	東京エレクトロン (50%)
膜加工・エッチング装置	メタルエッチング装置	2,968	Lam Research (71%)	3,428	Lam Research (52%)
	ゲートエッチング装置	4,653	Lam Research (56%)		
	絶縁膜エッチング装置	6,399	東京エレクトロン (54%)		
	アッシング装置			650	PSK (54%)



©2024 CRDS

図 2-2-30 寡占化の進む機器 2018年と2021年（加工・プロセス機器）

■ 研究機器の市場動向調査からの考察

ここまでの市場動向調査から、日本の研究機器の現状に関して言えることはごく限られてはいるものの、本報告書で取り上げる「研究ニーズに導かれる機器開発とその社会実装・エコシステム形成」を検討するうえでの認識を、考察を含めて以下に整理する。まず、2018年時のデータを2021年のデータとして更新しつつ、この3年間での比較から変化を見た。わが国における研究機器の海外企業への輸入依存について問題意識を持ちつつ、本調査ではマクロな市場動向から一定の把握を試みたものである。機器の市場動向から研究現場の実態を直接的に把握できるものではないが、高まる輸入傾向は、海外企業の旺盛な活動の結果として認識することができる。

計測・分析機器

➡市場全体の72%の機器が研究用途であり、機器産業が研究開発活動に及ぼす影響は大である。研究機器の需要サイド、すなわち研究機関における機器に関するコストは、調達コストと維持管理コストで構成されるが、海外メーカーに研究機器の多くを依存するわが国では、研究活動が高コスト構造になっていると考えられる。国内に製造拠点が無い海外企業から輸入する場合、製品価格が割高になると同時に、故障・トラブル時の対応・サポートも、ユニット毎の交換を行う方式となる場合が多く、メンテナンスに高額な費用と数か月単位の時間を要する傾向がある。今回のデータは2021年時点の市場だが、2024年現在はさらに円安の影響により、日本市場は海外企業からの高価格での輸入が拡大する厳しい状況にある。

➡日本の機器メーカーの動向としては、光学顕微鏡や電子顕微鏡などの表面分析装置や、XRDやXRFといった原子分光装置では国際的に一定のシェアを有している。しかし、米国やドイツ企業のシェア拡大に日本企業は見舞われている。企業国籍別シェアは、欧米企業におけるM&Aによるグループ展開が活況であることを表しているが、日本企業は国際的にみても小規模であり、資本力・企業規模の点で、開発力や国際的なマーケティング展開において劣勢にある。これらの機器は「物質構造を明らかにする」「分子レベルで起こる事象を観察する」といった目的で用いられ、計測・分析手法の中核をなす一つである。研究者

を始めとしたユーザーニーズと、計測技術を持つ開発者のアイデアに基づいた機器開発、そして開発を担う企業との間での連携構造が重要と考えられる。

- 世界の研究現場に開発機器が普及していくには、①資本力・企業規模を背景とした開発力や国際的なマーケティング力、②M&Aによるスタートアップおよび新技術の取り込み、が世界の流れといえる。例えば、米Thermo Fisher Scientific社は世界的なリーディングカンパニーとしての地位を確立しているが、自社で新技術を開発し続ける資本力とともに、イノベティブなシーズを持つ外部の組織・事業をM&Aにより取り込むことに積極的である。世界には同様の取り組みでシェアを拡大している企業が複数存在する。大学・スタートアップで開発された技術をもとにした先端機器を、世界に普及させるうえではこうした企業の存在が重要となる。自国にそれだけの力を持つ企業がない場合、技術・事業が海外企業に買収されたり傘下に加わったりすることで、世界展開することは一つの道である。その一方で、今後の経済安全保障環境を考慮すると、グローバル企業と伍していく国内企業の成長も重要な方向性の一つである。

加工・プロセス機器

- 加工・プロセス機器は計測・分析機器とは異なり、半導体関連企業が産業用途に用いる機器が多いことから、各国の半導体産業の動向が加工・プロセス機器市場を反映している。ムーアの法則が限界を迎えつつあるなか、今後のAI、データセンター、6G、IoT技術の進歩とともに半導体製品の需要も伸びていくことが予測され、半導体製造に利用される加工・プロセス機器の市場規模も維持・拡大するとの見方が大勢である。
- 日本企業は、加工・プロセス機器のグローバル市場において25%程度のシェアを持つ。半導体製造の前工程で用いる機器を網羅して販売している東京エレクトロンをはじめ、電子ビーム描画装置、テスタ、洗浄装置等の機器で大きなシェアを有する企業が多数あり、それぞれの企業に独自の基盤技術がある。国際競争上の勝機は、強みを持つこれらの研究開発とビジネスにおいて次の展開を見出し続けることが欠かせないと考えられる。
- 一方で、電子ビームマスク描画装置など、2018年には日本企業がシェアの大半を有していた機器が、2021年には外国企業にシェアを逆転されているドメインもある。また、最先端のリソグラフィのように、製品市場としてはASLM社が独占し、日本企業としては敗退したのものもある。しかし、部品・要素技術、検査機器では日本企業が技術的優位性を保持しながら重要なポジションを獲得しており、今後の最先端市場における、より戦略的な対応策の検討が重要と考えられる。
- 加工・プロセス機器は、最新技術の開発を迅速に行い、より速く特許を確保した企業が急速にシェアを拡大する。また、半導体製造は、ウエットプロセスとドライプロセスが存在することによる液体の取り扱い技術や、耐薬品性や耐熱性についての課題をクリアするための技術、といった各技術において参入障壁がある。企業とアカデミアの長期的な連携を構築することで、次世代技術に関する模倣困難性を築くことが重要と考えられる。

ここまで、機器の市場動向から国内外の関連産業の傾向を把握することで、日本の研究開発活動との間にもどのような関係や影響があるのか、その一部を考察してきた。日本企業は計測・分析機器、加工・プロセス機器のいずれにおいても、独自技術を活かした事業展開をしており、世界市場で一定のシェアを有している。しかし、それを利用する研究機関の研究活動との関係を考えると、日本の研究機関は海外企業からの輸入に機器を依存する部分が大きく、機器産業との間の関係を再検討・再構築する必要がある。日本の機器産業に

おける国際競争の勝機は、需要側が強みを持つ研究開発領域が何であるかを、関連のビジネスにおいて見出し続けることが基本であろうが、海外のトップ企業と比較して特に規模の面で大きな差があり、開発資金・開発力の差にも影響している。今後さらに技術の先端化・高度化が進み、機器開発により大きな投資が必要となっていく傾向が一段と強まるなか、日本の機器開発は一層厳しい競争環境に置かれることになる。結果、機器開発がままならないことが、それを利用する研究現場への導入においても、諸外国からの遅れや高コスト構造の主要因となり、需要側・利用側の研究開発活動の成果においても遅れていく悪循環となる。これを払拭するための対策が必要だが、開発資金だけでない、構造的な問題と長期間の時間軸を捉えた大局的な方策が求められる。新たな研究を拓く機器についての、産学連携の新しいエコシステムを模索する必要があるだろう。以降の章ではこの観点での検討をさらに深めていく。

3 | 日本における研究機器開発および共用に関する取組

3.1 研究基盤としての機器・装置の開発に関する取組

現在、わが国では研究機器の開発を十分に行うことができておらず、その環境は不足している。これまで、科研費やJST事業、その他の国家プロジェクトも存在し、相応の規模で投資と開発は実施されてきた経緯がある。本章ではそれらのうちいくつかの経緯や成果事例を確認していく。なかには開発成果として高い評価を得て、その後の企業における実用化・事業化に成功し、主力製品として成長した研究機器もいくつかは存在する。しかし多くは、技術開発のある所定段階までの評価しか行われぬ。その後の開発投資・事業化投資には相応する売上を見込めないなどの理由から、機器開発投資を機器ビジネスへと繋げ、その利益をさらなる次世代技術の開発投資へとサイクルさせることがうまく出来ていない。

研究機器開発を担う公的事業の代表としては、JSTの未来社会創造事業と先端計測分析技術・機器開発プログラムがある。未来社会創造事業は、組織や国の競争力を大きく左右する新しい知識やアイデアに果敢に挑戦し、ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を推進していく重要性が高まっている現状をふまえ、2017年度に開始した。経済・社会的なインパクトが出口であることを明確に見据えたチャレンジングな技術について、実用化が可能かどうか見極められる段階を目指した研究開発を実施している。この事業には「探索加速型」と「大規模プロジェクト型」の2つのスキームがあり、さらに「探索加速型」の中には5つの領域が設置されている。この領域の1つ「共通基盤領域」が、研究用途を想定した機器および関連する基盤技術開発に対応している。共通基盤領域の概要は以下である。

<JST未来社会創造事業「共通基盤」領域 領域概要>

新たな学際領域を切り拓き、世界最先端の研究成果をもたらす基盤として我が国の基礎科学力を支え、持続的な科学技術イノベーションの創出に貢献する、広範で多様な研究開発活動を支える共通基盤技術や先端的な研究機器などを対象。(文部科学省「重点公募テーマの設定に当たっての領域について」)

共通基盤領域では、開始の2018年度に13課題、2019年度に9課題、2020年度に6課題、2021年度に7課題、2022年度に5課題をそれぞれ採択し、新規採択を終了している。開発期間として「探索研究期間」と「本格研究期間」があり、その期間と開発費は概ね以下のように設定している。

□探索研究【通常タイプ】：最大2年半、期間中開発費総額3,500万円～4,500万円

□探索研究【要素技術タイプ】：最大2年半、期間中開発費総額2,300万円～3,000万円

□本格研究：最大5年、期間中最大開発費総額7.5億円程度

(開発費はいずれも直接経費)

探索研究の採択課題の中から移行審査を通過した課題のみ、本格研究に進むことが出来、現在までに40課題中、8課題が本格研究に移行している。要素技術タイプ単独で本格研究に移行はせず、本格研究へ移行する際には複数の探索研究が統廃合することを想定した仕組みとなっている。また、本格研究期間中にも課題評価があり、さらなる課題の絞り込みが行われる。枠組みとして、①ハイリスク、ハイインパクトで先端的

な計測分析技術・機器等の開発、②データ解析処理技術等アプリケーション開発やシステム化、③研究現場の生産性向上等に資する技術の開発、の3つがあり、数理解析の高度化を追求するといった課題も公募対象とする等、特定の出口（ターゲット）に向けて成果を最大化する建て付けとなっている。一方で、本領域の開始とともに新規採択を終了した「先端計測分析技術・機器開発プログラム」と比較して、年度あたりの採択課題数および総予算見込み額は小規模であり、研究基盤の開発事業としては限られた課題しか採択することができず、面的な投資は難しい状況にある。

「先端計測分析技術・機器開発プログラム」は2004～2020年度に渡って実施した事業であり、2002年の田中耕一氏のノーベル化学賞受賞などを契機に開始した。詳細は次節に記述するが、事業期間中に科学技術および社会・経済的状況の変化とともに、その事業方針・運営にも変更を加えながら実施してきた。

一方、加工・プロセス機器に関しては、上記のような広範な開発課題を対象とするような事業・プログラムはこれまで実施されていないが、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトにおいて実施された装置開発が多数存在する。他、上述のJST「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の以前には、科研費においても研究機器の開発は行われてきたが、現在は明示的には行われていない。

また、近年は経済安全保障環境の変化に対応するため、「経済安全保障重要技術育成プログラム（Kプログラム）」が推進されているが、同プログラムにおいても一部の課題が機器開発に対応している。

表3-1 研究機器開発に関するこれまでの公的制度・プログラム

JSPS	科学研究費助成事業「試験研究」(1965-1996)
JST	先端計測分析技術・機器開発プログラム（2004-2020）
	未来社会創造事業「共通基盤」領域（2018-）および「大規模プロジェクト型」の内数課題が該当
	NexTEP 産学共同実用化開発事業（の内一部）
AMED	先端計測分析技術・機器開発プログラムからの移行分他
NEDO	各種事業の内一部が該当
内閣府	最先端研究開発支援プログラム（FIRST）
	経済安全保障重要技術育成プログラム（Kプログラム）

3.2 先端計測分析技術・機器開発プログラムの振り返り

本節では、先端計測分析技術・機器開発プログラム（以下、先端計測事業と表記）で行われたこれまでの開発成果や、事業の枠組みについての振り返り・整理を行う。以下の内容は、文部科学省の先端計測分析技術・システム開発小委員会にて2014年7月29日に報告された「先端計測分析技術・機器開発プログラム-10年の成果と今後の展望-」および、研究基盤整備・高度化委員会にて2018年3月15日に報告された「研究機器・共通基盤技術の開発について 先端計測分析技術・機器開発プログラムの成果」の内容を引用しながらCRDSにおける検討を交えて記載する。

先端計測事業は、2004～2020年度に渡る事業であり、2016年度の新規採択を最後に、事業としても2020年度末をもって終了した。事業開始当時の背景としては、2001年の第2期科学技術基本計画に「計測標準、計測・分析・試験評価方法及びそれらに係る先端機器等の戦略的体系的な整備を促進する」ことが示されたこと、2002年に「マトリクス支援レーザーイオン化質量分析法の開発」で田中 耕一氏がノーベル化学賞を受賞したことなどが挙げられる。また、過去長きに渡って、計測分析技術・機器開発を支えていたのは、1965年から1996年まで科学研究費助成事業で実施していた「試験研究」およびその流れを汲む研究種目であったが、2001年をもって公募は停止された。事業設計当時、先端的計測分析技術や機器に関する海外依存度の高さに対する危機感から、既存の技術/機器に頼るのではなく、オリジナルの計測分析技術・機器から、世界最先端の、独創的・創造的な研究成果を創出する必要性も指摘されていた。これらの状況から、2003年6月から文部科学省研究振興局審議会にて「先端計測分析技術・機器開発に関する検討会」が開催され、計測分析技術・機器開発の現状と問題点について整理し、中期・短期的な対応として、今後早急に着手すべき先端計測分析技術・機器の開発領域、及び、計測分析技術・機器開発事業の進め方について議論がなされた。その中で検討された内容が同年8月27日に「先端計測分析技術・機器開発の進め方について - 早急に着手すべき開発領域とその開発戦略-」として報告書にまとめられた。本報告書には“早急に着手すべき開発領域の選定基準”、“今後開発が期待される計測分析技術・機器”、等に関する指標が示されており、2003年当時は、表面分析、分光分析、質量分析等、種々の原理に基づく多くの分析装置を対象とすることが示された。これらの内容に基づき先端計測事業は開始に至り、事業目的・目標として以下を掲げた。

〈先端計測分析技術・機器開発プログラムの目的・目標〉

- わが国の将来の創造的・独創的な研究基盤を強化するため、新しいサイエンスの潮流を創出するオンリーワン・ナンバーワンの革新的な計測分析技術・機器・システムを開発すること。
- 計測分析を行う現場等でのニーズが明確（将来的にユーザーとなることが想定される者との連携体制が開発段階から十分に構築されている）であり、先行して市場を形成している既存の機器に対する優位性が明確（既存の機器との比較が詳細に行われ、開発戦略が十分に検討されている）である技術・機器・システムの開発に投資。
- 戦略創造研究推進事業等他のJST事業研究と連携する機器を優先的に開発することにより、開発途中の最新の機器を研究者（ユーザー）が使用できるようにするとともに、最先端の研究者（ユーザー）からフィードバックを受けながら機器開発を進める。

JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム (2020年度末に事業終了)

2004～2020年度実施(終了)。「最先端研究基盤領域」「環境問題解決領域」「グリーンイノベーション領域」「ライフイノベーション領域」「放射線研究領域」の領域ごとに、以下タイプを公募。

- 要素技術タイプ (開発期間 3.5年以内)
- 機器開発タイプ (開発期間 5.5年以内) → 2015年度以降「先端機器開発タイプ」に合併
- 実証・実用化タイプ (開発期間 2.5年以内) ※2008年度～2014年度
- 開発成果の活用・普及促進 ※2011年度～2014年度
- ソフトウェア開発タイプ ※2009年度～2011年度 2011年度以降は「機器開発」「実証・実用化」タイプと併合された。

ライフイノベーション領域における課題は平成24年度開始課題よりAMED(日本医療研究開発機構)に移行
一般領域「主として研究開発現場で使われる機器」に加え、平成19年度からは応用領域「主にもものづくり現場で使われる機器」も公募

支援対象機関
大学、国立研究開発法人および民間企業等(産と学・官との共同研究開発体制が要件)

事業規模と各課題実施期間
要素技術タイプ: 約2千万円/課題・年 原則4年
先端機器開発タイプ: 約5千万円/課題・年 原則6年

予算規模

2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度
33億円	40億円	42億円	48億円	55億円	63億円	50億円	42億円	37億円 [50億円]*	35億円 [51億円]*	31億円 [47億円]*

※[*]は放射線計測領域の予算を含めた額

文科省担当課
第1期 研究振興局 研究環境・産業連携課(2004年4月～)
第2期 研究振興局 基盤研究課(2011年4月～)
第3期 科学技術学術政策局 研究開発基盤課(2013年7月～)

参考資料
・文部科学省 研究開発プラットフォーム委員会 先端計測分析技術・システム開発小委員会「先端計測分析技術・機器開発プログラム-10年後の成果と今後の展望-」
・文部科学省 研究基盤整備・高度化委員会資料(第2回) 資料1-2「研究機器・共通基盤技術の開発について 先端計測分析技術・機器開発プログラムの成果」

©2024 CRDS

図3-2-1 JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム (2020年度末に事業終了)

先端計測事業における開発タイプのうち「実証・実用化タイプ」および「開発成果の活用・普及促進」は、目的・目標の3つ目に相当する「ユーザーからのフィードバックを受けながら機器開発を進める」に対応するものであり、要素技術タイプおよび機器開発タイプの開発成果を搭載したプロトタイプ機の開発、ユーザーへの展開、性能の実証・最適化・高度化を行うことを目的とした。「実証・実用化タイプ」は、開発中もしくは開発後概ね3年以内の、製品化された実績の無い先端的計測分析機器のプロトタイプ機をメーカーが所有していること等を条件に公募が実施されたが、「開発成果の活用・普及促進」は、要素技術タイプおよび機器開発タイプで開発された課題のみ参加することを原則していた。なお、「実証・実用化タイプ」と「開発成果の活用・普及促進」の実施方針は、2015年度以降機器開発タイプに盛り込まれることとなり、「機器開発タイプ」は「先端機器開発タイプ」と名称が変更された。

先端計測事業は、評価委員会およびPD・POの事前評価により採択課題が決定され、採択後2年目に中間評価、終了時に事後評価が実施された。また、公募領域として設定した各領域「最先端研究基盤領域」「環境問題解決領域」「グリーンイノベーション領域」「ライフイノベーション領域」「放射線研究領域」の目的に基づき採択課題が選定された。これらの実施課題のなかから、“特筆すべき研究成果”として報告されている49件について、機器・技術の特徴や方法論の進歩により分類、評価された結果を公開している。さらに、開発成果が製品化に至り市販された技術・装置の累計売上額は2009年に50億円を超え、事業開始10年目の2013年には、本事業としての投資額の累計総額に相当する約450億円に達した。

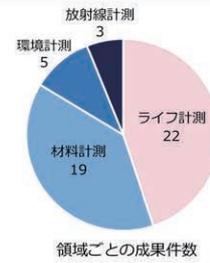
3 日本における研究機器
取組 開発および共用に関する

「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果

(機器・技術の特徴による分類)

各分野において特筆すべき研究開発成果として報告されている49件(採択年度H16~H24)の成果は、特徴と評価項目を以下の基準により分類されている。

- (1) 各領域の事業目標に対応した分類
- 1) 医療・生命科学計測のための機器(ライフ計測)
 - 2) 材料計測のための機器
 - 3) 環境計測のための機器
 - 4) 放射線計測のための機器



- (2) 実用化に際してのイメージ等による分類
- 1) 高額装置(数千万円以上の価格) 10件
 - 2) 大型装置(卓上設置不可) 11件
 - 3) 小~中型装置(卓上設置可能) 17件
 - 4) キット・要素技術 20件
- ※1)と2)、1)と3)は重複あり



参考資料：
・文部科学省 研究開発プラットフォーム委員会 先端計測分析技術・システム開発小委員会「先端計測分析技術・機器開発プログラム-10年後の成果と今後の展望-」



図3-2-2① 「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果(機器・技術の特徴による分類)

「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果

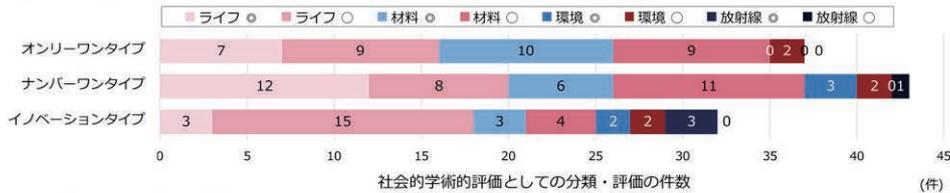
(機器・技術の特徴による分類)

- (3) カタログ製品化された販売されている装置 19件

例) イメージング質量分析 iMScope
リアルタイムステレオSEM SU3500



- (4) 社会的学術的評価としての分類・評価 ※重複あり
- 1) オンリーワンタイプ: 革新性、新規性、独創性が高くオリジナルの技術ないしは機器 ○17件 ○20件
 - 2) ナンバーワンタイプ: 類似技術・機器よりも格段に高性能、高機能な技術ないしは機器 ○21件 ○22件
 - 3) イノベーションタイプ: 特にニーズ志向が強く、市場性が高い技術ないしは機器 ○11件 ○21件



- (5) 開発成果の普及・活用事業の対象
開発成果の普及・活用のための共用事業の対象となっている機器 8件(うち、ライフ:4件 材料:4件)

参考資料：
・文部科学省 研究開発プラットフォーム委員会 先端計測分析技術・システム開発小委員会「先端計測分析技術・機器開発プログラム-10年後の成果と今後の展望-」



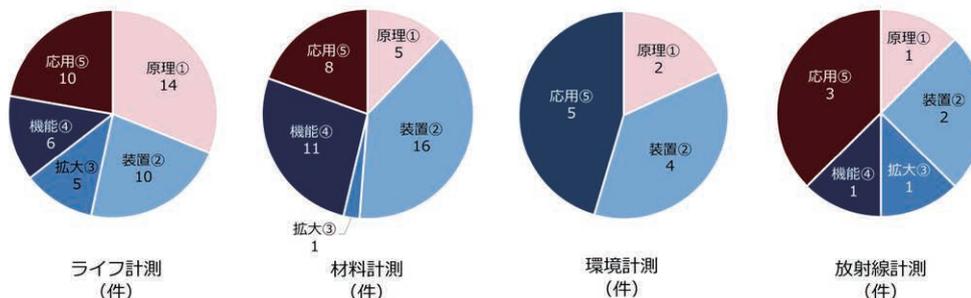
図3-2-2② 「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果(機器・技術の特徴による分類)

「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果

(方法論の進歩による分類)

49件の成果の各種計測・分析法について、方法論の進歩という観点より抽出した評価すべき特徴とその具体的な内容について検討がなされた。方法論の進歩は、「原理的な進歩」「装置的な進歩」「測定対象の拡大」「新しく生み出された機能」「新しく開拓された応用」等により具体的に評価されている。

このような評価結果を、「原理①」「装置②」「拡大③」「機能④」「応用⑤」と分類すると、各件数は以下のようになる。(重複あり)



参考資料：
・文部科学省 研究開発プラットフォーム委員会 先端計測分析技術・システム開発小委員会「先端計測分析技術・機器開発プログラム -10年後の成果と今後の展望-」



©2024 CRDS

図3-2-2③ 「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の成果 (方法論の進歩による分類)

続いて、個々の開発成果として公開されているものの内いくつかを紹介する。以下の5事例は、その開発成果(機器)が、JSTの研究事業(ERATO・CREST・さきがけ等)の研究課題実施において活用されたケースである。

・イメージング質量顕微鏡 iMScope (製品化企業：株式会社島津製作所)

参画機関：浜松医科大学、(株)島津製作所、大阪大学、癌研究会

「顕微質量分析装置の実用化開発」

機器開発タイプ(2004-2008)、プロトタイプ実証・実用化タイプ(2009-2011)

生体試料(がん細胞等の病変組織切片)を高性能光学顕微鏡で観察し、かつ大気圧下で指定領域のイメージング質量分析画像が得られる。⁶

ERATO「末松ガスバイオロジープロジェクト」、CREST「人工多能性幹細胞(iPS細胞)作成・制御等の医療基盤技術」、さきがけ「脳情報の解読と制御」等で活用

・全自動2次元電気泳動装置 Auto2D (製品化企業：シャープ株式会社)

参画機関：シャープ株式会社、熊本大学

「全自動2次元電気泳動装置の実用化および新規プロットング装置の開発」

プロトタイプ実証・実用化タイプ(2009-2011)

高速・高感度・高分解能をもつタンパク質解析ツール。従来不可能であった2次元電気泳動と電氣的膜転

6 JST事業成果「イメージング質量顕微鏡」<https://www.jst.go.jp/seika/bt45-46.html>

写工程を完全自動化したプロトタイプ機は既に開発されており、本開発で自動免疫反応工程の付加、動作安定化、分解能・再現性・簡易性の向上等のレベルアップを図った実用機を開発した。⁷

CREST「人工多能性幹細胞（iPS細胞）作製・制御等の医療基盤技術」等の7領域で活用

• Raman Imaging System model CPRIS-II（製品化企業：株式会社エス・ティ・ジャパン）

参画機関：(株) エス・ティ・ジャパン、埼玉大学、人間文化研究機構、国立民族博物館

「文化財等複合材料等評価用ラマンイメージング装置の開発」

プロトタイプ実証・実用化タイプ（2009-2011）

次元圧縮型イメージファイバーと小型透過型分散素子を使用した分光器を用いることにより、イメージ測定領域すべての点のフルラマンスペクトルを「同時」に「短時間」（試料にもよるがおおよそのイメージ測定時間は数秒～1分程度）で取得できるようになった。また、同時に測定箇所の見視像も保存されることで、データベースへも測定箇所が明確に登録される。⁸

CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」等の4領域で活用

• 高分解能走査型プローブ顕微鏡 SPM-8000FM（製品化企業：株式会社島津製作所）

参画機関：(株) 島津製作所、金沢大学、北陸先端科学技術大学院大学、大阪大学、神戸大学

「大気中・液中で動作する原子分解能分析顕微鏡」

機器開発タイプ（2005-2010）

熱ドリフトの影響を補正するアトムトラッキング技術や試料表面の特定位置の電子状態を分析するバイアス・フォースカーブ技術等の要素技術を開発し、原子・分子分解能での表面原子・分子の組成、電荷移動、結合状態などに関する知見を与える分析顕微鏡を実現。⁹

CREST「エネルギー高効率利用のための相界面科学」等の2領域で活用

• 高感度生物発光測定装置 CL24、CL96（製品化企業：株式会社中立電気）

参画機関：名古屋大学、(株) 中立電気、浜松ホトニクス (株)

「生物発光リアルタイム測定システム」

機器開発タイプ（2005-2009）、ソフトウェア開発タイプ（2009-2012）

遺伝子発現を生物発光として生きたままの細胞で連続的に自動測定し、高い感度・精度・時間分解能で詳

7 先端計測分析技術・機器開発プログラム 開発成果 成果集 2012
「全自動2次元電気泳動装置の実用化および新規プロットング装置の試作完了」

8 先端計測分析技術・機器開発プログラム 開発成果 成果集 2012
「次元圧縮型イメージファイバーによる携帯側ラマンイメージ装置」

9 研究成果展開事業（先端計測分析技術・機器開発プログラム）(旧・産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器】)
における平成22年度終了開発課題の事後評価結果について
<https://www.jst.go.jp/sentan/hyouka/h22jigo/4kokawa.html>

細にリアルタイム解析が可能。¹⁰

CREST「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」等の4領域で活用

上記のようにJST事業において利活用された機器開発成果5事例の他にも、開発成果には次のような特徴を持つものがある。「研究開発や産業用途に広く利用されたケース」、「未知の構造の科学的解明に寄与したケース」、「最先端機器として利用され、研究基盤強化に繋がったケース」、「新たな診断技術となり、社会実装が進んだケース」等である。これらの特徴を持つ成果事例に関して、以下にそれぞれ紹介する。

超臨界流体抽出/超臨界流体クロマトグラフシステム

島津製作所社ではLCビジネスを開始してから約40年が経過している中で、近年のクロマトグラフへの要望のキーワードは「分析の操作性」「分析感度の向上」「超臨界流体を用いた新しい分離」であると考えられていた。そこで先端計測事業にて開発に着手したのが、「超臨界流体抽出/超臨界流体クロマトグラフシステム“Nexera™ UC オンラインSFE-SFCシステム”」である。

粘性が低い・拡散性が高い、という特性を持つ超臨界流体を移動相に用いた「超臨界流体クロマトグラフ(SFC)」は高速液体クロマトグラフィーと比較して高速で分離を行うことが可能である。また、この性質を活かし、超臨界流体を抽出溶媒として用いて目的成分の抽出操作を行うのが「超臨界流体抽出(SFE)」である。これらの両装置を質量分析装置(MS)と結合したものが、SFE-SFC-MSシステム「超臨界流体抽出/超臨界流体クロマトグラフシステム」である。SFE-SFCで高速かつ高度な分離、MSで高感度分析が可能となり、また、SFEとSFCをオンラインで接続したことで、幅広い化合物の同時分析、不安定化合物の分析、試料の前処理操作の効率化といった従来のLC/MSやGC/MSにおける課題の解決に貢献した。医薬品開発を始め、食品分析や環境成分分析などで活用される機器である。

先端計測事業における開発の後、同社は米製薬企業との共同装置開発を行い「セミ分取 超臨界流体クロマトグラフ Nexera™ UC Prep」を製品化、2019年10月から販売している。

10 科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発プログラム 開発成果データベース
https://www.jst.go.jp/sentan/result/products/sentandb_009.html

開発成果が研究開発や産業用途に広く利用されたケース 超臨界流体抽出/超臨界流体クロマトグラフシステム

「質量分析用超臨界流体抽出分離装置の開発」
 チームリーダー：大阪大学 馬場健史 サブリーダー：株式会社島津製作所 富田 真巳
 開発期間：2012年度～2014年度 機器開発タイプ
 参画機関：宮崎県総合農業試験場、神戸大学

超臨界流体抽出 (SFE) 装置と超臨界流体クロマトグラフィー (SFC) を一体化することで、従来の LC/MS や GC/MS が抱えていた課題解決に貢献する。目的成分の抽出から分析までの自動化や、酸化されにくい遮光環境における自動抽出、高感度の全量 MS 分析等が可能になった。

従来の (QuEChERS) オフライン前処理

試薬添加 → 攪拌 → 遠心分離 → 試薬添加 → 攪拌 → 遠心分離 → 試薬添加 → 攪拌 → 遠心分離 → 移し替え

35min

Nexera UC オンラインSFE-SFC-MSシステム

- 前処理操作の時間短縮、幅広い化合物の一斉分析
- SFEの抽出溶媒にCO₂を用いることで、濃縮工程で分解してしまうような不安定成分も試料中の状態を保ったまま分析可能。
- 微量液体サンプルの成分の抽出が可能

通常1週間程度かかっていた500種の残留農薬検査検出を50分で測定可能とした

主な適用分野
 医療分野 バイオマーカーの探索、薬品分析、毒性評価
 食品分野 機能性成分の分析
 環境分野 汚染物質分析

2015年 十大新製品賞 受賞
 R&D Magazine 2015 R&D 100 Awardに選出
 Pittcon Editors' Award 2015 金賞受賞
 2019年 「第1回日本オープンイノベーション大賞 農林水産大臣賞」を受賞

約30分の時間短縮
 Nexera UC 約5 min
 オフライン前処理 vs オンライン抽出+分析

参考資料・島津製作所 製品情報 https://www.an.shimadzu.co.jp/hplc/nexera_uc/index.htm (2021年2月1日アクセス)
 ・文部科学省 研究基盤整備・高度化委員会資料(第2回) 資料1-2 「研究機器・共通基盤技術の開発について 先端計測分析技術・機器開発プログラムの成果」
 ©2024 CRDS

図 3-2-3 開発成果が研究開発や産業用途に広く利用されたケース「超臨界流体抽出/超臨界流体クロマトグラフシステム」

3

日本における研究機器
開発および共有に関する
取組

宇宙線ミュオンラジオグラフィ

「原子核乾板」を用い、地球に降り注ぐ宇宙線が大気中の原子核と衝突する際に生成するミュオン粒子 (ミュオン) の測定システムを開発。原子核乾板は、ミュオンなどの荷電粒子の飛跡を立体的に記録する特殊な写真フィルムである。名古屋大学における原子核乾板を用いた研究は、1971年に宇宙線から新粒子 (後のチャームクォーク) を発見したことで、CP対称性の破れから自然界に第3世代のクォークが存在することを予言した「小林・増川理論 (1973年)」に影響を与えた。当時の乾板は記録された飛跡データの読み取り効率が悪いという課題を抱えていた。そこで、名古屋大学では原子核乾板の課題である読み取り効率の改善に着手、「乾板の自動飛跡読み取り装置」の考案を開始した。

1990年代に顕微鏡やCCDカメラを組み合わせ開発した「高速読み取り装置 (New Track Selector・Ultra Track Selector)」は、2000年のタウニュートリノの発見に繋がった。フィルムメーカーが原子核乾板の生産から撤退した以降、研究室内に乾板製造装置を作製し、現在まで製造を続けている。また、製造方法を工夫することで観察対象が広がり、火山調査やピラミッド探査が可能となった。2015年10月から「スキャンピラミッド」計画を開始している。宇宙線ミュオンはX線より遙かに透過力があり、ピラミッドを透過したミュオンを原子核乾板の画像で調べることで、内部構造を類推することが可能である。先端計測事業では、原子核乾板に均一に乳剤を塗布する塗布装置の開発や、飛跡読み取りの高速化、シミュレータを活用した予測ツールによる原子核乾板の性能向上、といった原子核乾板の乳剤製造・乾板塗布・照射・現像・読み取り・解析のトータルシステムの開発に成功。クフ王のピラミッド内部の未知の巨大空間の発見に貢献した。

開発成果が未知の構造の科学的解明に寄与したケース 宇宙線ミュオンラジオグラフィ

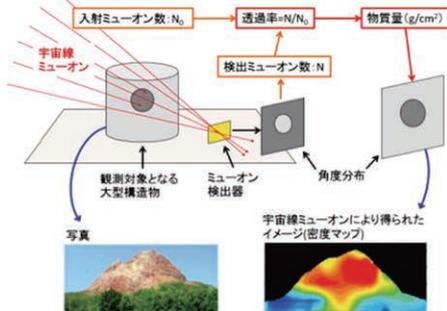
「原子核乾板を用いた高精度宇宙線ラジオグラフィシステム」

チームリーダー：名古屋大学 中村 光廣 サブリーダー：川崎地質株式会社 鈴木 敬一

開発期間：2016年度～2020年度 先端機器開発タイプ

参画機関：富士フイルム株式会社、株式会社サイエンスインパクト

宇宙線による最新の透視技術を用いた高精度宇宙線ラジオグラフィシステムにより、火山、空洞調査、密度測定、老朽化診断など、内部の透視が不可能と思われていた大型建造物の内部構造の解明が可能になる。



原子核乾板は、ミュオンなどの電荷を持つ素粒子の軌跡を1 μ m以下の精度で立体的に記録する特殊な写真フィルムであり、薄く、かつ軽量で電源を必要としない。

ピラミッド中心部に設置した原子核乾板に蓄積した計1100万本の宇宙線ミュオンの情報を分析した結果、ピラミッド内に未知の巨大な空間があることを発見した。

実験の様子はNHKとの共同研究により実施され、2017年11月NHKスペシャル「大ピラミッド 発見！謎の巨大空間」にて放映された。

成果はnatureに掲載

“Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons”, *Nature*, volume 552, pages 386-390, 2017

今後の適用

富士山内部の探査、すべり断層の調査、溶鉱炉内部の耐火壁厚測定

宇宙線ラジオグラフィの原理
(宇宙線ミュオンのイメージはH. K. M. Tanaka, T. Nakano, et. Al., 2007より)

参考資料

- ・ 科学技術振興機構、名古屋大学共同発表「宇宙線の観測（ミュオンラジオグラフィ）によりエジプト・クフ王のピラミッドの中心部に未知の巨大空間を発見！」
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171106/index.html> (2020年9月9日アクセス)
- ・ 文部科学省 研究基盤整備・高度化委員会資料(第2回) 資料1-2 「研究機器・共通基盤技術の開発について 先端計測分析技術・機器開発プログラムの成果」



©2024 CRDS

図3-2-4 開発成果が未知の構造の科学的解明に寄与したケース「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」

固体 NMR

わが国で国産の NMR が初めて発売されたのは 1956 年で、JEOL 社（当時の日本電子光学研究所）によって開発された。1956 年当時 32MHz であった最大周波数は、今や 1,000MHz を超えている。先端計測事業では、2004 年当時主流であった溶液試料用ではなく固体試料用の「固体 NMR」の開発に取組み、複数の課題・実施タイプ（要素技術タイプ/機器開発タイプ/開発成果の活用・普及促進）で発展的に課題を実施した。そこでまず開発されたものが、「超微量用固体 NMR プローブ」である。固体 NMR は、溶媒に溶けにくい、もしくは溶けると性質が変わってしまうような物質を固体状態で測定できるが、液体よりも原子核間の相互作用が強く、原理的に低感度である。この相互作用を消去するため、試料管を磁場方向に対して特定の角度に傾け高速回転させる方法が用いられていたが、低感度であるため多量の試料が必要であった。この回転速度が高速であるほど相互作用の影響が少なくなって感度が上昇することから、微小円筒の試料管を高速回転させる技術の開発に取組んだ。2010 年には外径 1mm の試料管を備え、当時の世界最高速である 80kHz（1 秒間に 80,000 回転）での測定を可能とする試料回転システムの開発および NMR 検出器への組み込みに成功した。さらに、常温試料を極低温の検出器を用いて測定することでノイズを低減し、検出感度を 4.5 倍に向上、測定時間を 20 分の 1 に短縮した「クライオコイル MAS-NMR プローブ」の開発や、世界最高磁場強度 1,020MHz の NMR システムの開発に成功している。



図 3-2-5 開発成果が最先端機器として利用され、研究基盤強化に繋がったケース「固体NMR」

3次元眼底像撮影装置

筑波大学と富士フィルム社が開発した「生体計測用超高速フーリエ光レーダー顕微鏡」は、生体表層組織からの反射光を標準参照光と干渉させて得られたスペクトルをフーリエ変換することで、3次元断層画像を非侵襲で高速に撮影することを可能にし、従来にない眼球の観察法を医療現場に提供した。消化器や循環器分野での利用や、皮膚組織の新評価手法としての確立が期待されている。

本課題では、(1) 高速度測定試作機、(2) 光ファイバー試作機、(3) 偏光感受型試作機、といった装置を試作・評価し、測定速度およびデータ転送速度の向上と計測感度の上昇を達成したことで生体組織の3次元断層画像を無侵襲で高速に取得することを可能にした。技術の一部が技術移転されたことで、トプコン社から3次元眼底計測装置として市販された。本装置は高速・高分解能・低コスト・高い操作性の光断層撮像装置(OCT)として医療現場の診断技術向上に貢献し、世界的な製品となった。

本課題はその後「実証・実用化タイプ」にてトメーカーコーポレーション社に引き継がれ、前眼部計測への応用に取り組んだ。前課題で開発されたプロトタイプ機をもとに、装置の高機能化や、医療サイドとの協力による臨床研究により、前眼部光干渉断層計(CAS-OCT)として実用化が早期に実現した。高速スキャンにより0.3~2.4秒でヒト前眼部の3次元トモグラフィーを取得することが可能であり、任意の方向からの断層観察が可能となった。

3

日本における研究機器
開発および共有に関する
取組

開発成果が新たな診断技術となり、社会実装が進んだケース 3次元眼底像撮影装置

「生体計測用超高速フーリエ光レーザー顕微鏡」

チームリーダー：筑波大学 谷田 豊彦 サブリーダー：富士フイルム株式会社 戸井田 昌宏

開発期間：2004年度～2007年度 機器開発タイプ

参画機関：富士フイルム株式会社

生体試料からの反射光を基準参照光と干渉させ、そのスペクトルをフーリエ変換することにより、非接触・非破壊・無侵襲で生体組織の断面映像を高速に取得する。眼球の観察や皮膚組織の評価はもちろんのこと、内視鏡にこの顕微鏡を組み込むと、胃や肺の表層組織の観測、あるいは、ガン組織の評価・診断なども可能になる。



Topcon 3D OCT-1000装置外観

医療診断を目的として、生体試料の実時間 in vivo 計測を実現するため、

(1) 高速度測定試作機、(2) 光ファイバー試作機、(3) 偏光感受型試作機の装置、などを試作・評価し、データ転送速度の向上のための方式的検討した。また、位相シフト法の実装およびこれを利用した複素データの効率的な処理法の開発を行った結果、世界記録の計測時間を実現した。この技術の一部を技術移転して作成されたのが、左図の3次元眼底計測装置である。

Topcon社製 3D OCT-1000は、世界で初めてOCT (Optical Coherence Tomography、光干渉断層計) と無散瞳眼底カメラを融合した3次元眼底像撮影装置である。(発売日：2006年07月07日)



3D OCT-1000 MARK II
(2008年3月発売)

発売目標：初年度500台以上
価格：1,690.5万円 (消費税込)



3D OCT-1 Maestro
(2013年1月発売)

価格：997.5万円
(消費税込)

2006年6月に導入された世界初のスペクトラドメインOCT(3D OCT-1000シリーズ)は、それまでの眼科診断にとってまさに画期的なイノベーションであり、OCTという診断機器が第一線の研究者から眼科臨床医やオプトメトリストまで広く普及するきっかけとなった。

2016年には、3D OCTシリーズの販売台数は10,000台を突破し、世界シェアの約1/3を占めるまでに成長。

- ・ 科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発事業成果集2008 「生きたままの生体の三次元内部構造を実時間で可視化する」
- ・ 株式会社トプコン 2006年度ニュースリリース 「3次元眼底像撮影装置 3D OCT-1000」 <https://www.topcon.co.jp/news/20060707-260.html> (2021年2月1日アクセス)
- ・ 株式会社トプコン 2007年度ニュースリリース 「3次元眼底像撮影装置 3D OCT-1000 MARK II」 <https://www.topcon.co.jp/news/20080331-286.html> (2021年2月1日アクセス)
- ・ 2016年度トピックス 「OCT販売台数10,000台突破」 <https://www.topcon.co.jp/topics/20160819-22262.html> (2021年2月1日アクセス)



図3-2-6 開発成果が新たな診断技術となり、社会実装が進んだケース「3次元眼底像撮影装置」

原子分解能磁場フリー電子顕微鏡

磁性材料の観察を可能とする「原子分解能磁場フリー電子顕微鏡 (MARS: Magnetic-field-free Atomic Resolution STEM)」が東京大学とJEOL社との共同により2019年に開発された。

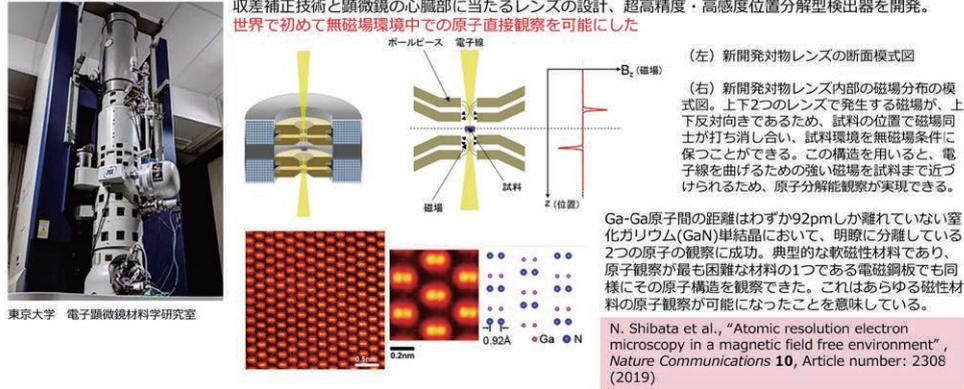
従来の電子顕微鏡は、2～3テスラもの強磁場中に試料を挿入し、試料の上下にある磁極をレンズとして作用させる(磁場レンズ)ことで像を拡大、ミクロの世界を観察している。この強磁場の対物レンズが分解能を決定するが、試料は強磁場にさらされるため、鉄鋼材料やスピンドバイスなど、材料が持つ磁性とレンズの磁場が強く相互作用してしまう試料の場合は、元々の構造が変化・破壊されてしまうといった問題があった。レンズの磁場を弱めることなく、原子レベルの構造評価が可能な分解能で磁性材料を観察することは、電気自動車に使われる永久磁石、高密度な磁気記録媒体など、急速に進歩する磁性材料開発におけるキーテクノロジーとして切望されていた。開発されたMARSは、磁場フリー環境で試料観察可能な全く新しい対物レンズおよび最新の収差補正装置(DELTA型コレクター)を組み合わせることで、磁性材料を原子分解能で観察することを可能とした。MARSは、通常、試料の上下にある1つずつセットされていた対物レンズを2つずつセットしており、この2つのレンズで発生する磁場が反対向きであることから、磁場同士が打ち消し合い、試料環境を無磁場条件に保っている。窒化ガリウム(GaN)単結晶や、軟磁性材料である電磁鋼板の原子構造観察に成功している。90年近い電子顕微鏡開発の歴史において、初めて磁場フリー環境での原子分解能観察を実現した。

未知の構造の科学的解明に寄与したケース 原子分解能磁場フリー電子顕微鏡 (MARS)

「原子分解能磁場フリー電子顕微鏡の開発」

チームリーダー：東京大学 柴田 直哉 サブリーダー：日本電子株式会社 河野 祐二 EM事業ユニット 主務
開発期間：2014年度～2020年度(予定) 先端機器開発タイプ

電子顕微鏡での高分解能観察が不可能であるとされていた磁性材料を、磁気・磁区構造を保ったまま原子レベルで観察する原子分解能磁場フリー電子顕微鏡を実現。磁石、鉄鋼材料、磁気デバイス、トポロジカル材料など、さまざまな材料やデバイスの研究開発を格段に向上させる契機となると期待される。



・ 科学技術振興機構、東京大学、日本電子株式会社共同発表「88年の常識を覆す画期的な電子顕微鏡を開発～磁石や鉄鋼などの磁性材料の原子が直接見える～」
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190524/index.html> (2020年12月21日アクセス)



©2024 CRDS

図3-2-7 未知の構造の科学的解明に寄与したケース「原子分解能磁場フリー電子顕微鏡 (MARS)」

以上、先端計測事業を通じて開発された装置およびその実用化・製品化に至ったケースの好例を紹介したが、本事業は2020年度をもって終了した。事業開始時に掲げた「目的・目標」に照らしてみると、文部科学省 先端計測分析技術・システム開発小委員会の報告書「先端計測分析技術・機器開発プログラム -10年の成果と今後の展望-」では、以下のように「効果・達成されたこと」が確認できる一方、「残された問題」についても触れている。

先端計測分析技術・機器開発プログラムの効果・達成と残された問題

事業目的

- ・ 先端研究基盤を強力に支えるオンリーワン・ナンバーワンの革新的な計測分析技術・機器・システムを開発
- ・ 先端研究基盤強化による科学技術イノベーション創出支援

効果・達成されたこと

- ・ 産学官が協同で行った研究開発で、世界に先駆けたオンリーワン・ナンバーワン技術・装置の開発を行った。
- ・ 「先端研究基盤強化による科学技術イノベーション創出支援」に貢献する多くの成果を創出した。
- ・ 計測技術、分析技術の分野における「装置化」研究を支える研究環境の復活に貢献した。
- ・ 企業に属する技術者に共同研究を行うチャンスを提供した。
- ・ 若い研究者ならびに技術者に対する「ものづくりマインド」の喚起と奨励を行う契機を与えた。
- ・ 国家的課題である「グリーンイノベーション」「放射線計測」「ライフイノベーション」領域に対する直接的なイノベーション創出を支援した。

残された問題

- ・ 諸外国(米、ヨーロッパ、中国)と比較した場合、**計測分析技術インフラの構築やプラットフォーム形成が不足**している。
- ・ **世界市場への展開が不足**しており、先端計測分析分野の**世界市場及び真の現場ニーズの調査を行う必要がある**。
- ・ 事業の科学的・社会的波及効果の一部としての成果を評価することはできたが、教育・研究・産業に連関した広域の波及効果に対する評価手法が未確立である。
- ・ 開発の第2段階でプロトタイプ機を製作し、第3段階で実証・検証、複数プロトタイプ機により共同利用や性能向上、世界標準を指向する方針であったが、第3段階で**プロトタイプを複数台作成することはほとんど実行できなかった**

参考資料：

・ 研究開発プラットフォーム委員会 先端計測分析技術・システム開発小委員会 先端計測分析技術・機器開発プログラム -10年後の成果と今後の展望-



©2024 CRDS

図3-2-8 先端計測分析技術・機器開発プログラムの効果・達成と残された問題

先端計測事業を通じ実施された課題約323課題（AMED移行分を除く）のうち、製品化に至った課題は84件である（2021年度末時点。事業終了後の未把握分を含まない）。また、製品化には至らずとも「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」のように学術的成果として評価される課題も多数ある。しかし、その多くはユーザー層が特定領域から広がらず、企業における事業化または事業継続には至っていない。学術研究用途におけるチャンピオンデータの測定とその論文化を達成したのち、先端技術の操作性を向上させることや、測定対象の拡大、ソフトウェア開発の推進など、技術を実用化・製品化し、他の研究者の使用ニーズに応えるレベルに上げることが課題である。開発から普及に至る諸方策は、評価委員会等でも深く検討されてきたことが伺えるが、事業全体として見ると、これらは残された課題であろう。

先端計測分析技術・機器開発プログラムの実施に見る示唆

- 技術は、オンリーワンよりナンバーワンである必要
- 製品は、ナンバーワン技術だけでなく利用上の付加価値としての優位性・差別化構築が必要
- **利用研究ニーズ**の規模的ポテンシャルや広がり・発展性がないと、製品・サービスへ移行せず
- 製品化するものは、ビジネスで勝つ前提が必要であり、開発投資のリスクを下げる必要がある
- 製品化して世界に広がるものを先駆けないと、先端研究が発展せず、科学研究でのリードを構築できない
- 高度な要素技術だけでは、普及する製品には載らない。システムとして実現する必要
- これらの可能性を想定して、デファクトやデジュールスタンダードの戦略的構築が必要
- 「この人しかできない」より「ここから始まって広がった」を促進することが必要
- これらが満たされないと、技術は繋がっていかない。途切れたままの技術は失われてしまう
- 一度途切れた技術を取り戻すことは、ディープな最先端技術の場合はほぼ不可能となる
- **開発技術が製品展開され研究現場の普及に繋がっていく仕掛け、長期サイクルのエコシステム構築が必要**



©2024 CRDS

図3-2-9 先端計測分析技術・機器開発プログラムの実施に見る示唆

参考資料

- 科学技術振興機構 産学連携展開部 先端計測グループ成果パンフレット vol.1 「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」
- 科学技術振興機構 産学連携展開部 先端計測グループ成果パンフレット vol.2 「固体NMR」

3.3 イノベティブな機器の登場によって先端研究にゲームチェンジが起きたケース

各研究分野には、一般的な研究の手法や用いる装置が存在するが、イノベティブな研究機器の登場によってその分野の研究にゲームチェンジが起こることがある。過去、幾度もそうしたゲームチェンジが起き、そのたびに研究が大きく進展した。本節ではその事例として、「①クライオ電子顕微鏡」「②DNAシーケンサー」「③電子ビーム描画装置」の3つのケースを紹介する。これらの研究機器は、今では各利用研究分野において世界的に普及している。その結果、装置を販売する機器メーカーはビジネス戦略上の好循環を生み出しており、また、当該企業を擁する国においては、機器事業が重要産業として位置付けられている。①クライオ電子顕微鏡と②DNAシーケンサーは、米国企業が世界シェアの大半を有し、③電子ビーム描画装置は、日本企業がビジネスをグローバルに展開しているケースである。以下ではそれぞれの機器について、

- 技術開発の歴史（技術そのもの、関わった人・組織）
- 普及の契機となった技術
- 技術開発の歴史における日本および海外の動向

をまとめ、わが国で産業として成長させることが出来た/出来なかった要因等について考察する。

クライオ電子顕微鏡

2017年にノーベル化学賞の受賞対象となったクライオ電子顕微鏡は、生命機能解明のための生体分子、細胞、細胞内小器官等の複合体の立体構造の解析を目的とした利用をはじめ、創薬のための薬剤やターゲット分子の構造解析を行う一般的な手法としてその立ち位置を確立している。近年ではソフトマテリアルの構造解析へ応用され、今後もユーザーおよび研究機器としての需要の拡大が予測されている。歴史的に正確には、電子顕微鏡を用いて生体分子試料を観察する手法のことを総称した「クライオ電子顕微鏡法」が先に開発され、装置名を示すものではなかったが、クライオ電子顕微鏡法による観察に特化した仕様の装置が開発・販売されたことで、後に「クライオ電子顕微鏡」という研究機器としての名称が広まった。つまりクライオ電子顕微鏡の歴史においては、手法の開発が大きな役割を担った一節があるが、本稿ではこれら手法も総じて「クライオ電子顕微鏡」と表記して扱う。

生体分子試料の三次元構造を電子線により解析する試みは1970年頃から開始され、当初は電子線トモグラフィ法による測定が検討されていたが、先に確立されたのは単粒子解析法による構造解析であった。さらに、試料を急速凍結し非晶質層の氷の中に包埋する「氷包埋法」技術が開発されたことで、1990年に初めて原子レベルの解像度で膜たんぱく質の構造を観察することに成功した。これらの成果により、2017年には、複数画像の分類・平均化から生体分子の3次元構造を決定する「単粒子解析法」を生み出したヨアヒム・フランク氏、試料の結晶化を行わずに生体環境に近い状態で試料観察可能な「氷包埋法」を開発したジャック・デュボシェ氏、これらの技術をもとに、電子顕微鏡で膜たんぱく質の高解像度観察に成功したリチャード・ヘンダーソン氏の3氏がノーベル化学賞を受賞した。クライオ電子顕微鏡が生体機能の解明に大きく貢献し、研究開発に大きなインパクトを与える技術として認定された功績である。しかし、現在のように多くのユーザーに普及するに至った背景を探ってみると、また別のキーテクノロジーの存在が見えてくる。当時、氷包埋法のような優れた技術が開発されたことを受け、日本でもクライオ電子顕微鏡の開発が進み、世界に先駆けて1986年には第1号機が販売されていた。そこから現状に至るまでの進展を分けた要因として、主に3つのキーテクノロジーが影響していることが考えられる。

1つ目は、高性能検出器である。従来、電子顕微鏡に用いられていた検出器はCCD (Charge-coupled device) カメラで、シンチレーターを介して電子を光子に変換し、さらにこれが光ファイバーを通過してCCD素子へと伝わるため、読み出しが遅く、電子・光子変換時や光ファイバー通過時にシグナルが劣化して

しまう問題があった。そこに、2013年に米国Gatan社からCMOS (Complementary metal oxide semiconductor) 素子によって電子を直接検出することが可能な検出器、K2 Summitが登場した。電子直接検出機能により読み取りが高速に行えるようになり、また、電子線照射量を十分小さくすることで単一入射電子のカウントが可能となった。このように検出器の性能が向上したことで、画像がぼやけることが少なく、ノイズが一挙に減少した。K2 Summitは撮影モードも様々な設定が可能であったことから、クライオ電子顕微鏡における電子線照射、特に観察開始時の電子線照射時に試料が大きく動いてしまう現象「試料微動」が画像データに及ぼす問題を、初期撮影分の画像を捨てて補正を行う設定により解決することが出来た。このK2 Summitを用いて、2013年に10nmサイズの膜タンパク質の高分解能撮影に成功したことが契機となり、クライオ電子顕微鏡による構造解析結果が次々と報告されるようになった。

2つ目はソフトウェアである。単粒子解析法という手法の特性や、高性能検出器の登場により、得られた大量の撮影画像を処理するデータ解析プログラムの重要性も高まり、RELION・EMAN・FREALIGNといった様々なソフトウェアが活用された。単粒子解析法は単分散した試料中の分子をあらゆる方向から見ることで、同一の分子を三次元方向から観察したと仮定して構造を構成するが、RELIONではベイズ推定に基づくアルゴリズムを用いて、正確には全ての分子の構造が均一ではないことを組み込み、意図的な仮定を減らして構造解析を行う。これらのソフトウェアはフリーソフトとして公開され、多くの研究者に利用されるとともに継続的に更新がなされている。

3つ目は利便性を重視した仕様のハードウェアである。クライオ電子顕微鏡用として仕様を特化し2005年から販売を開始した製品が、FEI社 (現 Thermo Fisher Scientific 社) のTitan™である。セットできる試料数を1個から12個に増やし、測定試料は制御用コンピューター上でクリックするだけで交換できる。また、従来は手動で数時間おきに充填していた液体窒素を自動で供給できるようにもなった。撮影も自動で行うことができ、測定者が装置に張り付いている必要が無いため、一晩の間に例えば500枚等、データを得ることができる。これらの仕様により、同じ測定時間内で得られる画像数は1~3万枚から100万枚へと増加した。操作性・効率性がともに向上することで、クライオ電子顕微鏡は多くのユーザーに必要とされる装置へと成長した。

このように、生体分子の3次元構造を、電子線を用いて観察することに成功したノーベル賞受賞者3氏の功績を基盤とし、その技術が幅広いユーザーの手に届く研究機器として普及するに至った背景には、①高性能検出器、②ソフトウェア (データ解析プログラム)、③利便性を重視した仕様のハードウェア、の各開発が大きな影響を及ぼしている。2008年頃までは日本のJEOL社も検出器開発においてFEI社と競合し、現在も十分な先端技術力を有しているが、当時は開発段階での特許戦略と、世界で普及させるためのユーザー研究機関を巻き込んだ利便性の追求、ソフトウェアを含めた総合システムとしての開発・マーケティング戦略において、及ばなかったとする見方がある。

ケーススタディ クライオ電子顕微鏡

クライオ電子顕微鏡とは

主に生体分子複合体の構造解析の手法として利用されている。細胞やインフルエンザウイルス等の立体構造を解析でき、測定対象はこれまで解析が困難・不可能と思われていた膜タンパク質や巨大な超分子へ大幅に広がっている。顕微鏡観察で撮影された画像をもとに、三次元立体構造を得ることを目的とした観察に利用されている。

1970年代
生体分子の3次元構造の解析法としてX線回折法が確立されていたが、試料の作製法や状態の保持等に課題があった。
→ 電子線を用いて原子そのものを観察する手法として、電子線トモグラフィー法による構造解析法の検討が開始された。

1975年 ヨアヒム・フランク (米・コロンビア大学)	1984年 ジャック・デュボシェ (スイス・ローザンヌ大)	1990年 リチャード・ヘンダーソン (英・MRC分子生物学研究所)	2013年 ユイファンチェン (米・カリフォルニア大)
溶液中で単分散している試料の電子顕微鏡画像から構造解析を行う「単粒子解析法」が誕生した。後にコンピュータプログラムSPIDERを発表(1981)。 "Averaging of low exposure electron micrographs of non-periodic objects," <i>Ultramicroscopy</i> 1, 159-162	生体分子を急冷し、非晶質層の水に包埋する「氷包埋法」により、電子線による試料の損傷を低減させることが可能となった。 試料の結晶化が不要で、生体中の環境に近い状態で観察できる。 "Cryo-electron microscopy of viruses," <i>Nature</i> 308, 32-36	グルコースで保護した試料を弱い電子線で観察し、TEMを用いた原子レベルの膜タンパク質の構造解析に成功した。 "Model for the structure of bacteriorhodopsin based on high-resolution electron cryo-microscopy," <i>J. Mol. Biol.</i> 213(4), 899-929	電子線直接検知型COMSカメラを用いて、膜タンパク質受容体イオンチャネルTRPV1の立体構造を単粒子解析法で明らかにした。 "Structure of the TRPV1 ion channel determined by electron cryo-microscopy," <i>Nature</i> 504, 107-112

2005年 FEI(現在のThermo Fischer Scientific)社がクライオTEM販売

2013年 ・Gatan社(米国) 電子線直接検知型COMSカメラの販売開始

- ・画像解析ソフトウェアの開発
RELION (英国 MRC, Sjor Scheres)
EMAN (米国 Baylor College of Medicine, Stephen Ludtke)
Frealign (米国 University of Massachusetts Medical School, Grigorieff)
- ・マイクロED法の開発 (米国 UCLA, Tamir Gonen)

2017年 リチャード・ヘンダーソン、ジャック・デュボシェ、ヨアヒム・フランクの3氏が2017年にノーベル賞を受賞

1986 藤吉好則(日本・東京医科歯科大学) JEOLとの共同開発でクライオTEMの第1号機を世界に先駆けて販売

現在
EM Data Bankの9割以上がThermo Fischer Scientific社の電子顕微鏡によって得られている。

1位	米国	約150台
2位	中国	約60台
3位	ドイツ	約40台
4位	イギリス	約30台
5位	日本 スイス	約10台

2019年10月時点

©2024 CRDS

図 3-3-1 ① ケース1 クライオ電子顕微鏡

ケーススタディ クライオ電子顕微鏡

普及の鍵となった技術

- ① 電子直接検出器 + カウンティング機能
- ② アルゴリズム搭載のデータ解析プログラム
- ③ コンピュータ制御と高性能ステージによる操作性の向上

〈ハード〉 Titan Krios

- ・凍結試料を12個セット可能
- ・PC操作による試料交換
- ・測定後の凍結試料の回収

・検出器、データ解析ソフトウェア

Titan Krios™

〈測定手法〉

- ・単粒子解析法: 2020年現在、ユーザーの90%が利用
- ・電子線トモグラフィー法
- ・マイクロED法

同じマシンで出来る場合もあるが、それぞれの特性に適合したマシンがあると、より良い。

〈検出器 (カメラ)〉

- ・K2, K3
- ・Falcon 3EC Direct Electron Detector

Gatan K3カメラ

K2カメラ: COMSカメラによる直接検出器では、光-電子変換がないので画像がぼやけることが少なく、読み取り速度も格段に速くなった。

さらに、個々の電子をリアルタイムで認識・カウントする機能が付いたことで、記録装置が像にくわえるノイズが一挙に減少した

〈ハード〉 Krios™ G4

- ・超高輝度電界放射型電子銃 (X-FEG)
- ・Gatan BioQuantum エネルギーフィルター

自動測定: 高分解能データを取得するために、内蔵型自己診断機能 (APM) で顕微鏡のアライメントを評価

Krios™ G4

〈ハード〉 CRYO ARM

- ・冷陰極電界放出型電子銃 (Cold-FEG)
- ・インカラム型エネルギーフィルター
- ・ホールフリー位相板

・自動試料交換機構
・サイドエントリー液体窒素冷却ステージ

CRYO ARM™ 300

〈ソフトウェア〉

- ・RELION
- ・ParallEM

RELION: 英国MRC Sjors Scheresらによって開発された。ヘイズ統計をアルゴリズムに組み込み、個々の撮影像から粒子の方位を推定し画像を補正することで構造解析を行う。均一な構造をした粒子のグループから高分解能で解析を行うことが可能。

ParallEM: 理研米倉グループにて開発された。電子線3次元結晶構造解析 (マイクロED法) 用自動測定システムに対応したソフトウェアで、既成のクライオ電子顕微鏡や汎用の電子顕微鏡で利用可能。

©2024 CRDS

図 3-3-1 ② ケース1 クライオ電子顕微鏡

DNAシーケンサー

DNAシーケンサーは塩基配列を読み取り、ゲノム解析を行う装置であるが、ヒトゲノムの解読が完了した後の「ポストゲノム時代」と呼ばれる2003年以降に開発・販売されたDNAシーケンサーが一般に「次世代シーケンサー」と呼ばれ、現在でも名称として使用されることが多い。次世代シーケンサーは様々な手法を利用した機種が短期間に開発されており、幹細胞研究や感染症研究、創薬企業等、広く普及している。次世代シー

ケンサーの原理となる初期 DNA 分析技術は、日米を中心に1970年代から開発への取り組みが開始された。しかし、1990年に米国主導で開始した「ヒトゲノム計画」におけるヒトゲノム解読完了時に公表された日本の貢献度はわずか6%に留まった。この結果は、当時わが国が知的財産戦略において米国に遅れをとっていたことが要因の一つに挙げられ、その影響は現在のシーケンサー装置の製造販売シェアにまで及ぶ。

世界で初めて DNA 分析の手法として認知された技術は、1975年に開発されたサンガー法とギルバート法であるが、これらは読み取りに放射線を用いており、工程が複雑で膨大な作業を要する難点があった。DNA 解読への黎明期にあった当時、わが国でもこの煩雑な作業を自動化することを目的とした国家プロジェクト「DNAの抽出・解析・合成技術の開発に関する研究（通称：和田プロジェクト）」が始動し、シーケンサーの開発に着手した。

プロジェクトにおいてまず注目されたのは、DNAを構成する4種の塩基配列 A, T, G, C に蛍光試薬を用いて色素識別を可能とすることで、レーザーにより DNA 分析をおこなう手法である。放射線を利用せず読み取りを行えるため、DNA 分析の自動化・高速化へのキーテクノロジーとして構想されていたもので、当時日本では、埼玉大学の伏見譲氏が「四色蛍光標識法」として開発に着手していた。1982年の10月には「DNAの蛍光標識と実時間蛍光検出ゲル電気泳動法の開発」というテーマで学会発表を行い、論文投稿、特許出願の準備が進められていた。しかし、当時の日本では公的資金利用による発明の特許を受ける権利は原則として国が継承することが規定されていたことなどの背景に起因し、国では特許出願の判断に至らなかった。結果として、わが国では本プロジェクトの発明を権利化することができなかったが、その後、この蛍光試薬を用いる分析法は DNA シーケンサーの基幹技術となった。さらに1993年には日立製作所の神原秀記氏が「キャピラリーゲルアレー DNA シーケンサー」を開発した。このシーケンサーは、蛍光着色した DNA をゲルの中で電気泳動して分離し、切り込みを入れたキャピラリーに流し込むことで読み取りの精度を向上させた装置である。キャピラリーを用いた DNA 分析装置の開発は海外でも行われていたものの、ガラスレーザーを乱反射してしまい、DNA 蛍光体からの反射を正確に読み取ることが出来ない、という欠点を抱えていた。その欠点を改良すべく開発されたのが「キャピラリーゲルアレー DNA シーケンサー」である。キャピラリーに切り込みを入れ、切り込み部分に横からレーザーを当てることで乱反射を防ぐ「シースフロー方式」を取り入れたシーケンサーは、読み取り能力を従来の10倍まで向上させ、シーケンサー開発におけるブレークスルーとなった。

その後、日本と入れ違いで蛍光試薬を用いた分析法の特許を獲得していた ABI (アプライド・バイオシステムズ) 社とライセンス交渉が行われた結果、シーケンサーのハードの性能を大きく向上させた本技術は、ABI 社から販売されるシーケンサーに採用されるに至った。これは、蛍光試薬を用いた分析技術に関する特許を取得していたが、読み取り能力を向上させるためのハードに関する技術を所有していなかった ABI 社と、ハード開発技術はあるものの、読み取りには試薬が必要不可欠であった日立製作所、両者が相互に技術を必要とした結果であり、クロスライセンス契約が結ばれたが、市場において名が広まったのは ABI 社であった。現在、ABI 社の技術は Thermo Fisher Scientific 社に移行され、グローバル市場において19%のシェアを獲得している。

一方、現在世界で最も普及している次世代シーケンサーは、ケンブリッジ大学で開発された技術をもとに開発されたものである。SBS (Sequencing By Synthesis) 法と呼ばれる手法で DNA を合成し、蛍光識別により読み取りを行うことで、解析能力を格段に向上させた。ケンブリッジ大学は1998年に Solexa 社を設立し、2006年には Solexa 社より本技術を採用したシーケンサーの販売を開始した。また、ヒトゲノム計画終了後に米国 NIH (National Institutes of Health ; 国立衛生研究所) 傘下の NHGRI (National Human Genome Research Institute ; 国立ヒトゲノム研究所) が開始した Grant 「Advanced Sequencing Technology awards」も、次世代シーケンサーの開発を大きく進めた。本 Grant で技術開発を行った多くの企業や、Solexa 社は、現在 Illumina 社に買収されており、Illumina 社が販売する DNA シーケンサーは

世界市場において5割のトップシェアを獲得している。

ケーススタディ DNAシーケンサー

DNAシーケンサーとは

DNAの塩基配列を自動で読み取り、解析を行う装置で、iPS細胞研究や感染症研究に用いられている。illumina社、Thermo Fisher Scientific社、Roche社といった各社から、あらゆるシーケンシング原理を採用した機種が販売されており、性能もハイスベックな大型タイプ、ランニングコストを抑えた小型タイプがある。現在普及しているシーケンサーでは、1回のランで約20人分の全ゲノムデータを1,000ドルで読み取れる性能をもつ。

1953年 DNAの二重らせん構造の発見 } ゲノム解明研究・遺伝子工学のはじまり
1972年 遺伝子組み換え実験に成功

1975年 フレデリック・サンガー (英・ケンブリッジ大学)	1975年 ウォルター・ギルバート (米・ハーバード大学)	1981年 和田昭允 (日本・東京大学)	1982-1983年 伏見謙 (日本・埼玉大学)	1988年-1993年 神原秀記 (日本・日立製作所)
DNA解読の画期的な手法として1980年にノーベル化学賞を受賞 いずれも末端を放射性同位体で標識したDNA断片を用いる。鎖長の異なるDNAが得られた後、放射線検出により配列を読み取る。	DNAを特定の塩基部位で切断 した後、電気泳動によって鎖長別に分離する。	株式会社日立製作所、セイ コーフツ株式会社、富士 フィルム株式会社などと共同 し、DNA高速自動解読を行う 国家プロジェクト、通称「和 田プロジェクト」を始動。科 学技術振興調整費にて運営。	82年10月、日本生物物理学会 にて蛍光識別を用いてDNA分 析を行う手法を発表。半年後 の83年4月に「四色蛍光標識 法」として特許を出願。 → 84年1月に特許取り下げ。	1982年頃から開発を進めてい たDNA蛍光シーケンサーの自社 1号機を発売。当初開発は自社 内で実施していたが、1984年 に和田プロジェクトに参画。93 年には キャピラリーゲルアレ ーDNAシーケンサー のプロトタイ プ機を開発。

1990年
「国際ヒトゲノム計画」の開始
米国主導のもと、日本、イギリス、フランス、ドイツ、中国の6カ国24機関が参画
蛍光試薬分析技術の特許の都合上、キャピラリーゲルアレーDNAシーケンサーはABI社から販売。
ヒトゲノム計画でも多く活用された。

2003年
ヒトゲノム解読完了。30億の塩基配列からなるヒトゲノムのドラフトを完成させた。
各国の解読の貢献度は以下のように発表された。
アメリカ：59% イギリス：31% 日本：6% フランス：3% ドイツ：1% 中国：1%

以降、「次世代シーケンサー」としてあらゆる技術に基づいたDNA分析装置が開発されているが、そのシェアの多くは米国社が獲得している。

【ゲノム解読に関する予算比較】

日本	米国
和田プロジェクト※	DOE
81-83年 9億1000万円	87年 80億円
84-89年 25億7000万円	DOEおよびNIH
ヒトゲノムプログラムの推進 に関する研究（松原 謙一）	89年 69億円
89-90年度 4億円	NIH
	90年 140億円

※和田プロジェクト ©2024 CRDS
81年-83年「DNAの抽出・解析・合成技術の開発に関する研究」 84年-89年「がん研究を支える共通基盤技術の開発に関する研究」

図3-3-2① ケース2 DNAシーケンサー

ケーススタディ DNAシーケンサー

普及の鍵となった技術

①四色蛍光標識法：DNAの塩基配列読み取りの自動化を大きく進展させた（試薬）
②キャピラリーアレー型分析装置：測定時間を短縮、レーザーの乱反射を防ぐことで読み取り精度が向上した（ハード）

いずれも黎明期に日本で開発に着手

特許出願の経緯
1984年1月 埼玉大学理工学部 伏見謙 助教が四色蛍光標識法の特許出願 → 科技厅から取り下げ要請
1984年1月 カリフォルニア工科大 リロイ・フッド教授・ABI社四色蛍光色素法の特許出願
1984年2月 日立製作所 四色蛍光色素法および遺伝子解析システム高速処理、全自動化技術の特許出願

1986年 米国ABI社 スラプゲルを用いた四色蛍光標識法DNA分析によるシーケンサーの開発に成功、世界初めてシーケンサーを販売
1日あたりの読み取り能力は**1万5000塩基程度**

1993年 日立製作所 **キャピラリーゲルアレーDNAシーケンサーの開発に成功**

ABIの技術：蛍光試薬を用いてDNAを識別する四色蛍光標識法
日立の技術：ガラス管の一部を切り取ったゲルキャピラリーを並べ、切り取った部分にゲルに対して横から光を通すシースフロー方式

1991年 ABI社と日立のライセンス交渉開始
日立：キャピラリーアレー型DNA分析装置（ハード+キャピラリー）製造 **クロスライセンス契約**

↓ 全量OEM製造

ABI社：キャピラリーアレー型DNA分析装置に四色蛍光の試薬をセットし、販売
一日あたりの読み取り能力が**50万塩基まで向上**

2006年 Solexa社（現；illumina） 初代次世代シーケンサーの開発。1回のランで10億塩基

©2024 CRDS

図3-3-2② ケース2 DNAシーケンサー

電子ビーム描画装置

上述の2事例は、現在世界に普及している研究機器としては欧米で開発されたものが多く、日本も技術開

3 日本における研究機器
取組 開発および共有に関する

発では競合していたものの、産業として発展させることが出来なかったケースである。そのような中でも、日本で開発され、それが世界に広く普及している研究機器が存在する。その1つが「電子ビーム描画装置」である。電子ビーム描画装置は、半導体デバイスに回路パターンを描画する「加工・プロセス機器」の一つであり、市場に出ている加工・プロセス機器の多くが産業用途に利用されているが、その中でも研究開発用に特化した技術開発を進めたことで、常に最先端の技術を開拓し続けてきたケースである。研究開発に用いられる電子ビーム描画装置は「電子ビーム“直描”装置」で、パターンを露光する際にフォトマスクを作製することなく直接電子ビームを露光することが出来るため、少数のチップを作製する場合には大幅に時間・費用を削減できる。2018年のグローバル市場において、電子ビーム直描装置の市場規模は67億円と規模は大きくないが、そのうち日本企業が占めるシェアは51%である。以降、この電子ビーム直描装置について紹介するが、表記は「電子ビーム描画装置」を用いる。

日本を含めた各国の大学・公的研究機関には日本製の電子ビーム描画装置が数多く導入されており、CRESTEC社、ELIONIX社、JEOL社等の企業名が多く見られる。例えば、米国のナノテクノロジーインフラネットワークであるNNCI (National Nanotechnology Coordinated Infrastructure) では、公開されている全24台の電子ビーム描画装置のうち12台が上記の日本メーカー製であり、共用機器として広く利用されていることがわかる。これは日本の主要大学・研究拠点でも同様である。

電子ビーム描画装置の性能決定には、電子ビーム出力源が鍵を握っている。出力される電子ビームの加速電圧が高い程、微細な加工を行うことが可能となる一方で、電磁波ノイズといった外乱要因の影響を受けやすくなる。加速電圧が高くてもノイズが抑えられる安定性を持った出力源およびそれを納める鏡筒部分の開発が必要となる。この電子ビーム出力源の加速電圧が30kVであった1975年当時に創業し、電子ビーム描画装置の開発を開始したのがELIONIX社である。当時から研究機器メーカーとしてSEM等の開発を行っていたJEOL社から、暖簾分けのような形で独立した技術者により設立され、そこで培われた技術を活かして技術開発に取り組んだのが始まりである。その後、着実かつ挑戦的に先端技術開発を続け、高精度加工が可能な微細加工装置の開発を続けた結果、2012年には電子ビーム出力源の加速電圧は125kVにまで到達した(当時世界最高性能)。この電子ビーム描画装置が開発されたことを契機に、ELIONIX社は販売先をグローバルに展開、マサチューセッツ工科大、ハーバード大を始め、現在の販売先は米国、欧州、アジアの各大学・研究機関へ拡大している。

また、ELIONIX社における技術開発やユーザーニーズ探索法の特色として、産学連携に積極的であることが挙げられる。大学・研究機関等の研究者が利用可能な装置を社内に設置することで、ユーザーからのニーズが高まっているような領域における研究開発ニーズを、早期に拾い出せたことも普及拡大に繋がった。

また、公的ファンディングを利用した共同研究においても成果が生まれており、2016年～2018年にNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の戦略的基盤技術高度化支援事業により実施した「ウェハーサイズ3次元ナノインプリントモールド用超高速電子ビーム加工装置の研究開発」では、微細加工における電子ビーム制御の技術を持つELIONIX社と、低コストナノインプリント技術を持つ産業技術総合研究所の共同開発により、超高スループット電子ビーム加工装置が開発された。8インチサイズのウェハー全面を24時間以内に加工することが可能となった。

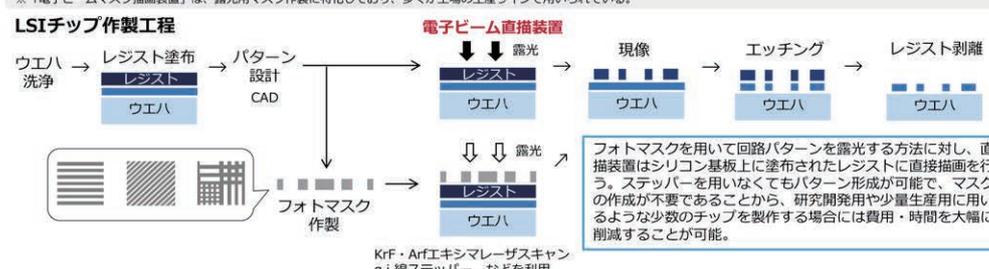
ケーススタディ 電子ビーム描画装置

電子ビーム直描装置

半導体集積回路 (LSI) にnmスケールの回路パターンを精度良く描画する。加速電圧が高い程、微細な加工を行うことができる。一般的には「電子ビーム描画装置」とはパターン形成を行う装置の総称であり、このうち「電子ビーム直描装置」はパターンニングの自由度が高く、主に研究開発および少量生産用途に用いられている。電子ビーム直描装置の2018年のグローバル市場における市場規模は67億円であり、日本企業のシェアは50.8%、売上額は34億円を占めている。

※「電子ビームマスク描画装置」は、露光用マスク作製に特化しており、多くが工場の生産ラインで用いられている。

LSIチップ作製工程



フォトマスクを用いて回路パターンを露光する方法に対し、直描装置はシリコン基板上に塗布されたレジストに直接描画を行う。ステッパーを用いなくてもパターン形成が可能で、マスクの作成が不要であることから、研究開発用や少量生産用を用いるような少数のチップを製作する場合には費用・時間を大幅に削減することが可能。

各国の大学・公的研究機関では、CRESTEC・ELIONIX・JEOLといった日本メーカー製の電子ビーム描画 (直描) 装置が多く利用されている実績がある。例えば、米国のナノテクノロジーインフラネットワークであるNNCI (National Nanotechnology Coordinated Infrastructure) では、設置されている全24台の電子ビーム描画装置のうち、半数の12台は日本製が占めている。また、同様に日本国内の主要大学・研究拠点にも同製品は多く設置されている。

装置名	設置大学
電子ビーム描画装置 (ELS-F125/ELS-G100/ELS-HS50) などの ELIONIX製品	Harvard University, Georgia Tech, University of Pennsylvania, Duke University など
電子ビーム描画装置 (JBX6300FS) などの JEOL製品	University of Washington, Stanford University など

©2024 CRDS

参照: National Nanotechnology Coordinated Infrastructure <https://www.nnci.net/search/tools>

図3-3-3① ケース3 電子ビーム描画装置

ケーススタディ 電子ビーム描画装置

技術開発と普及拡大のポイント

- ① 電子ビーム出力源の加速電圧の高加速化技術
- ② ユーザーニーズに沿った技術開発

【電子ビーム出力源の開発】

1975年 標準加速電圧は約30kV

電子ビームを「いかに細く絞れるか」「加速電圧を高められるか」

電磁波ノイズ等の外乱要因にも影響されない安定性、高加速化による微細加工が求められていた

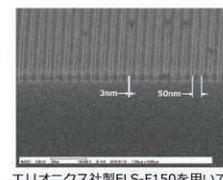
2012年 125 kVのEB装置がエリオニクス社から販売される

【当時の最高性能】 MIT, Harvard大への積極的な売り込みを皮切りに、販売先が海外大学にまで拡大。

2020年現在 同社装置で世界最高の加速電圧150kVでの微細加工が可能

- ・ 光束径 最小はφ1.5nm
- ・ 4nm以下の超微細加工

【主な利用用途】 量子ドットの作製、ラフネス評価など



エリオニクス社製ELS-F150を用いて描いた線幅3nm、ピッチ50nmのL&Sパターン

【ユーザーニーズ探索】

エリオニクス社では、社内スペースに大学・研究機関等の研究者が常に利用可能な装置を設置している。大学・研究機関で研究開発用途として機器を利用するユーザーのニーズを常に仕様・機能にフィードバックすることで、先端技術の開発に取り組んでいる。自力で形成したネットワークからニーズを探索することで、量子デバイス研究のような、近年の重点領域に携わる研究者が持つニーズを早く掴むことが出来たことも、電子ビーム描画装置が広く普及した要因の1つである。

【エリオニクス社が大学・研究機関と共同で実施した機器開発】

NEDO戦略的基盤技術高度化支援事業

「ウェハーサイズ3次元ナノインプリント用超高速電子ビーム加工装置の研究開発」(2016年~2018年)

産業技術総合研究所と共同で、半導体製造用の微細加工「ナノインプリント」を低コストでできる高速描画装置UHSEBを開発した。描画高速化では描画に使う電子ビームの電流を大きくしながら、光束の方向を制御する偏向器を独自に工夫して露光範囲を拡大。回路を描く速度を従来の装置より40~100倍にした。2週間かかっていた原版の描画を3時間程度に短縮でき、モールドを効率よくつくれるようになる。4月から産総研集積マイクロシステム研究センターにデモ機を展示し、メーカーや研究機関が試用できるようにする。12月から実用に販売を始め、年間2台の受注を目指す。(2019/01/30 日本経済新聞(東京・首都圏経済 35面))



©2024 CRDS

参照: 株式会社エリオニクスHP トピックス 新聞・雑誌記事 <https://www.elionix.co.jp/topics/index.html>

図3-3-3② ケース3 電子ビーム描画装置

参考資料

- THE NOBEL PRIZE, “Cool microscope technology revolutionizes biochemistry,” Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2017, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2017/press-release/> (2021年2月2日アクセス)
- 「創薬の未来を拓くクライオ電子顕微鏡」JST news September 2019

- 日本電子株式会社「クライオ電子顕微鏡法の技術開発と生命科学への貢献」日本電子news Vol.50 No.1
- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野 (2019)」(CRDS-FY2018-FR-04)
- 岩崎憲治「電子顕微鏡技術の進展と相関解析」日本結晶学会誌 **57**,66-71 (2015)
- 岩崎憲治「新時代:クライオ電子顕微鏡による近原子分解能での解析」領域融合レビュー, **5**, e010(2016)
DOI: 10.7875/leading.author.5.e010
- 理化学研究所プレスリリース「タンパク質やその複合体の高分解能・高精度解析に成功」2019年5月21日
- 理化学研究所プレスリリース「電子線回折の自動測定システムを開発—微小結晶の構造解析のハイスループット化を実現—」2020年6月26日
- 岸宣仁『ゲノム敗北』(ダイヤモンド社, 2004)
- Illumina「イルミナの装置を強化する次世代シーケンサーテクノロジーの進化」
<https://jp.illumina.com/science/technology/next-generation-sequencing/illumina-sequencing-history.html> (2021年2月2日アクセス)
- 株式会社シード・プランニング「次世代シーケンサーの利用現状と将来展望～医学研究から臨床応用に向けたゲノム研究の最新状況～」(2012年11月30日)
- 藤川昇「株式会社エリオニクス 超微細加工で世界トップ目指す 設備開放し研究者と連携」産学官連携ジャーナル2007年7月号, 産学官の道しるべ, 科学技術振興機構
https://sangakukan.jst.go.jp/journal/journal_contents/2007/07/articles/0707-04/0707-04_article.html (2021年2月2日アクセス)

4 | 科学の未解決問題への研究ニーズに対応する機器開発課題

4.1 科学の未解決問題への研究ニーズ

多様な分野・領域・テーマのなかで、科学の未解決問題たる重要研究ニーズにアプローチしようとするには、研究の対象を計測・分析・解析するニーズや、加工・プロセッシングするニーズがいくつもある。CRDSでは、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス・臨床医学、環境・エネルギーの各分野の幅広い研究開発動向の俯瞰調査を行うなかから、それらの研究ニーズを広く探ってきた。

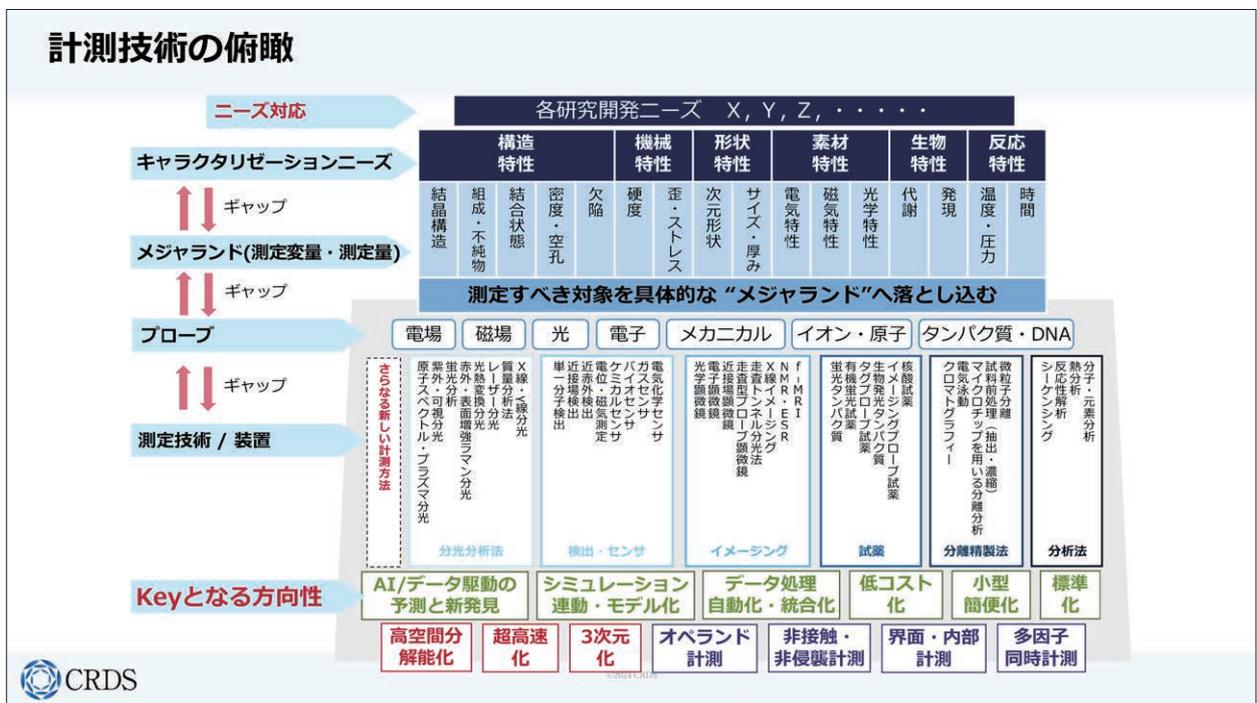


図 4-1-1 計測技術の俯瞰図

過去CRDSは、2018年に発行した調査報告書「計測の俯瞰と新潮流」において、計測ニーズを俯瞰的に把握・整理した。そこでは「計測は科学の母」、マザー・オブ・サイエンスと言われるにもかかわらず、わが国の現在の計測・分析機器開発は順風満帆とはいえない状況を踏まえつつ、分野を越えてシーズを結びつけながら計測技術の全体像を捉えようとの前提に立った。研究ニーズと計測技術シーズとの接続は、ニーズから紐解こうとしても、具体的に何を測りたいのか、どのような物理量の表現によってキャラクター化をしたいのかということまで同定して、俯瞰的に構造化することは容易ではない。メジャメントにおけるメジャランド（測定変数）へと落とし込むところと、それを測定可能なプローブ等が実際に何であるか、どのようなシーズが応え得るのかということまで、俯瞰的に明らかにするところまでは至らなかった。ニーズとシーズの両者の議論が噛み合えばよいが、用いる専門用語には相違とギャップがあり、お互いわかりえないということがすぐに起きてしまう。社会・産業または研究開発において、ある計測技術をどう活用するのか、さらにどのようなかたちで未解明の科学に迫るのかということまで、踏み出して計測技術を俯瞰しようとした。その際、

CRDS が構造化した計測技術の俯瞰図が図 4-1-1 である。

本図で用いている「ニーズ」とは、一義的に研究開発に求められる計測のニーズであり、そのニーズに応える計測とは、対象をキャラクタライズするニーズと同義である。すなわち、上位概念のニーズに呼応して、キャラクタリゼーションニーズが生じるという構図である。そこで問題となったのが、何を測るとキャラクタリゼーションニーズを満たすことができるのかという、メジャランドを特定することの難しさである。メジャランドが決まれば、具体的な計測技術や装置レベルの検討に落とし込めるわけだが、この間に存在するギャップは非常に大きい。逆にいえば、このギャップを埋めていくような研究開発戦略を検討しようとするのが、一つの示唆になる。もう一つの重要なことが、「key となる方向性」である。研究ニーズをベースとした計測技術の進展の方向性は、各研究分野におけるいわゆる“流れ”や“潮流”に深く関係すると考えた。そこには、研究ニーズから惹起される方向性と、技術シーズそのものの潮流とがある。例えば、研究対象における、より複雑な現実の過程を直接観察したいという研究ニーズの高まりと、それとは対称的に、ある特定の測定技術の分解能などの性能を、徹底的に高めて極限化を追求する流れも確実に存在する。さらに、シミュレーションとの連動や、膨大な計測データのデータ科学・機械学習による高速処理とそれに基づく予測、これらの自動化・解析など、日進月歩で進歩する情報科学技術との融合によって実現する計測技術の流れが存在する。また、ユーザーインターフェースを高めたデスクトップ型機器など、小型化技術・汎用化技術、標準化に代表されるユーザーニーズへの対応等がある。これからの計測技術の具体的な流れを明らかにするために、各分野の計測ニーズを検討し、その結果をまとめたものが次の図である。

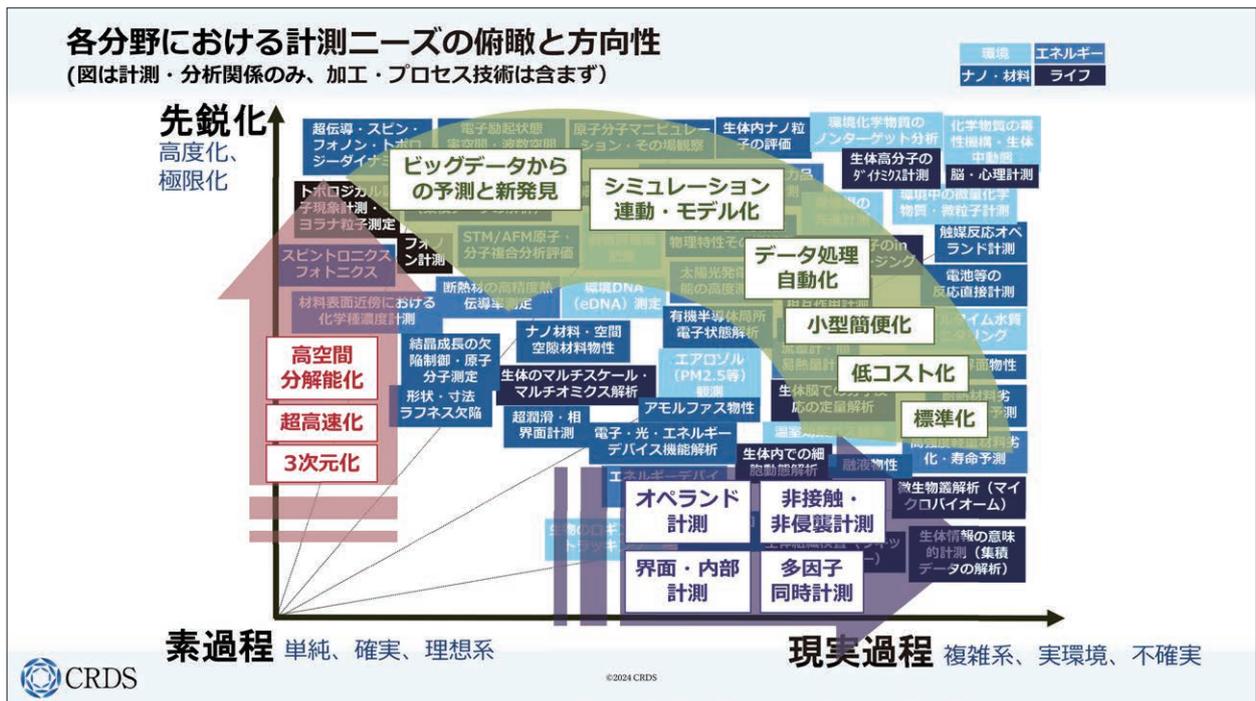


図 4-1-2 各分野における計測ニーズの俯瞰と方向性

横軸は各分野の研究ニーズとして概ね共通項として捉えられるような、より現実の過程を計測しようとする流れであり、これはすなわち、より複雑な、実際の測定対象が置かれた環境に近く、不確実な系をそのまま計測しようというニーズの方向性である。この流れにおける具体的な計測技術のキーワードは、「オペラント計測」「非接触・非侵襲計測」「界面・内部計測」「多因子同時計測」等である。縦軸は、技術そのものをより先鋭化していく流れ、すなわち高度化・極限化追求の流れである。この方向性は研究ニーズと決して無縁で

4 科学の未解決問題への
研究ニーズに対応する
機器開発課題

はなく、縦軸のテクノロジーの進歩が、横軸側の研究ニーズに対して、決定的な解決策をもたらす可能性があり、それは歴史を振り返っても過去何度も起こったことである。この流れにおける計測技術のキーワードは、「高空間分解能化」「超高速化」「三次元化」等である。そして、全体にかかる部分として描いている「計測技術革新を牽引するICT」は、もはやどの研究ニーズ・技術シーズとの関係においても、その効力は極めて大きな存在となっている。計測データが膨大になり、データ空間から新知見を予測し発見しようとするのが多分野で現実化している。これまでは計測対象の実空間から新知見を見出すことが研究開発のベースであったが、膨大なデータ空間から新知見を見出す割合は増加している。このことは、研究開発におけるデータ空間活用のウェイトが増していることを意味している。また、計算科学にもとづくシミュレーションやモデル化を実測に連動させる技術、計測データの処理を如何に自動化するかといったデータツールの開発、そして新技術の普及に決定打をもたらすことが、ユーザーインターフェースである。より小型・簡便な装置、誰もが測定・使用できる環境を構築・提供することが、計測機器ビジネスでは勝敗を左右する。このように、計測技術はややもすると技術・装置ごとに細分化され分けられた世界があるかのように認識されがちだが、観察・測定対象への研究ニーズや、情報ツールの活用・浸透によって切り拓くデータ空間の世界は、計測技術全体の潮流である。

なお、こうした膨大な研究データを処理することに関しても、相応の計算資源が必要となることが課題として挙がる。日本の場合、特に大学において計算資源が不足していることから、研究データの処理やシミュレーションを行う際に支障が生じることが多い。アクセス環境の限られる特定の大型スパコンだけでなく、各地の大学・研究機関で必要となる計算資源の配備や共用のスキームが未発達であることから、研究者は個々の企業との共同研究等の枠組みを通じて計算環境を企業に頼らざるを得ないが増えている。本報告書ではこの詳細を扱わないが、十分な計算資源の存在とアクセス性は、研究の進展・発展への影響のみならず、目的とする研究を実行できるかどうかに関わることから、研究人材の進路選択にまで影響しているとの声がある。研究機器の一つでもある計算資源の不足の問題への対応は、重要な課題として認識すべきである。

以上のような検討の蓄積をもとに、今回のCRDSの検討では、計測・分析に関する研究ニーズに加え、加工・プロセスに関する研究ニーズと、それらを実現する可能性を持つ新たな研究機器の開発課題を整理することにした。もちろんその後の研究機器の研究現場への導入・普及、そして研究ニーズに応えることのできた結果として、研究成果創出が実現し、且つそれを満たした研究機器が産業としても成立し成長する、この両者が中長期的に相互フィードバックサイクルすることが必要であると考え。こうした問題意識を持ちながら各分野の動向俯瞰をベースに調査したところ、いくつかの必要条件が見えてきた。

必要条件の一つ目は、各研究分野における当該研究ニーズの本質性である。「その研究ニーズは、どの程度の重要性を持つと考えるべきなのか」、これに定量的に答えることは不可能である。そこでCRDSにおける主要研究開発分野の動向俯瞰のなかから見出された研究ニーズのうち、その研究ニーズを満たすうえで、今は実現していない計測・分析技術または加工・プロセス技術が必要なものについて、緊急性と重要性の二軸で定性的にマッピングすることにした。ここでいう緊急性とは、各分野の研究において一日も早い実現が待たれるという文字通りの意味であり、対応の可能性を持つ計測・分析技術や加工・プロセス技術において、性能が足りていない、またはまだ確立していない技術について、緊急性が高いとCRDSが考える研究ニーズを、研究開発動向の俯瞰調査のなかから抽出している。一概に緊急性といっても、当該研究ニーズそのものの進展・発展度合いや、対応可能性のある技術シーズサイドの成熟度合いによっても見方は当然変わってくるだろう。ここでは大まかにいって、一日も早い研究成果創出が求められている研究ニーズと、中長期的に時間がかかっても存在し続けていると考えられる研究ニーズとを大きく分類しマッピングしている。一方、重要性についてはさらに整理を付けることが困難である。時間的意味にもとづく緊急性とはまた異なる観点として、その研究ニーズを満たした結果として得ることが期待される研究成果そのものの重要性の程度を想定する。重要性の程度は、異なる研究分野にあって異なる研究ニーズがあるなか、その研究成果が求められる程度と考え

ることができるが、指標は多岐にわたる。当該研究成果を用いることによって、それを応用し、将来実現の期待される社会・経済的効果の大小や広がり、各々の相関関係、各研究開発分野における学術的観点での科学技術上の効果、わが国における科学技術界のヒト・モノ・カネ・チエのリソース状態からみたときの違いもある。CRDSの各研究分野における動向俯瞰ではこれらを、現在の進展・発展度合いや、各々の将来性、インパクト、ポテンシャルなどから総合的に検討していることから、これを踏まえてのマッピングを試みた。何をもって本質と考えるのかは、一つ一つを個別に検討していけば、いずれにも重要性は認められるし、いずれもいち早く成果がほしいという意味では緊急ともいえる。しかしここではあえて「緊急性×重要性」を総合的且つ相対的に分布させて可視化することの必要性を考え、図のようなマッピングをおこなった。なお、研究ニーズの観点では、計測・分析技術への要請があるものも、加工・プロセス技術への要請があるものも等しく存在すると考え、ここでは両者を同じ二次元平面上で俯瞰的に一覧することを重視した。



図4-1-3 計測・分析技術と加工・プロセス技術に関わる研究ニーズマップ

参考資料

- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「計測横断チーム調査報告書 計測の俯瞰と新潮流」(CRDS-FY2018-RR-03) (2018年12月)

4.2 研究ニーズに対応する機器開発の課題

もう一つの必要条件が、計測・分析技術および加工・プロセス技術に関わる研究ニーズを満たし得る可能性のある、新技術・新装置の開発課題の同定である。図4-1-3のマッピングに対し、それぞれの研究実行に解決策を提示する技術を見出し、それが実装された具体的な機器・装置の開発候補課題を検討した。検討のプロセスは次の二段階でおこなった。まずは、研究ニーズのマッピングにおける個々について、一つ一つ、従来の技術ではどこまでのことができるのか/できていないのかを検討した。その上で、目的の研究に取り組むためにはどんな技術が必要になるのか、従来技術との違いは何かの比較をおこなった。新たな開発技術・開発機器を用いることで、研究ニーズに応じた研究を実行した結果として期待される研究成果が、具体的にどのようなものであるかを、一つ一つ簡易的に描き出している。ここでも、各研究開発分野の動向俯瞰調査のなかから開発候補課題を抽出していった。

(一つ一つの機器開発候補課題を、一枚/課題の資料として、全36件について表現したものは、2021年発行の元の報告書「研究機器・装置開発の諸課題 - 新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて - (The Beyond Disciplines Collection)」を参照)。

まず認識すべきは、これだけの期待開発課題が存在することである。そして、これらは、現在の競争的資金制度等では、ほとんどが機器開発の実現が難しい。それはなぜか、この点に関する認識とその対応策は5章で詳細を述べる。

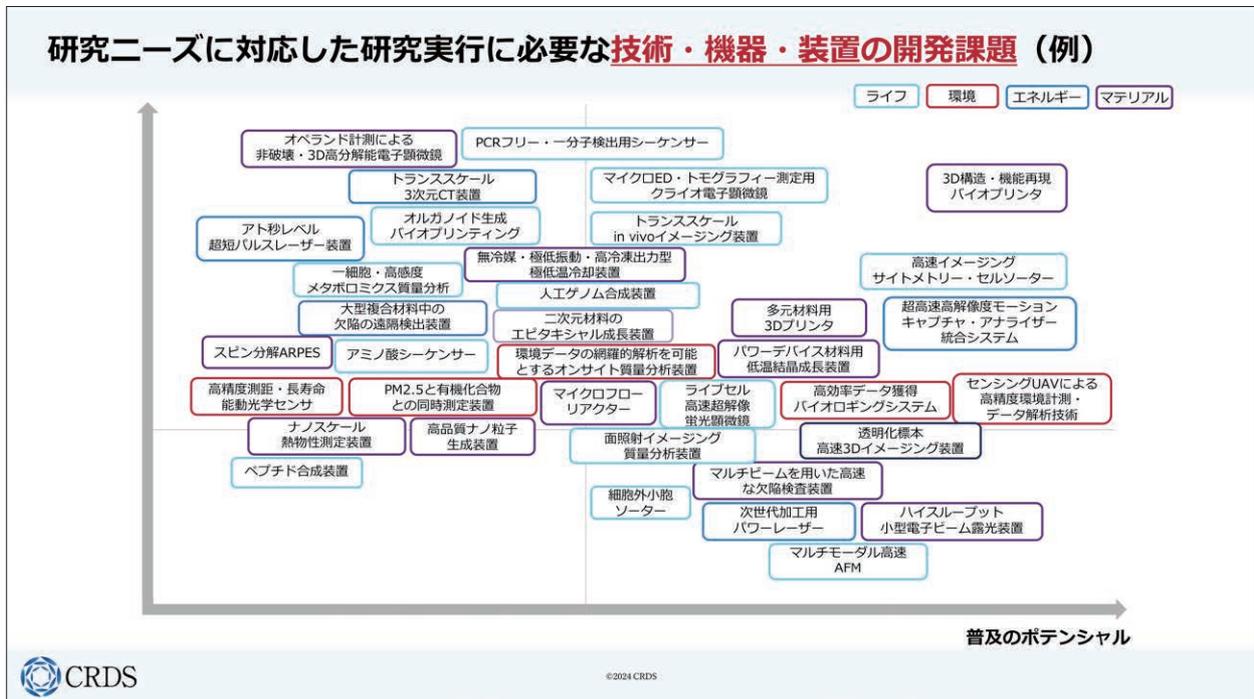


図 4-2-1 研究ニーズに対応した研究実施のために必要な技術・機器・装置の開発課題 (例)

各機器開発候補課題は多様である。従来技術・従来装置の性能向上を目指すものもあれば、複数技術を組み合わせて搭載することによるマルチプローブ計測を実現するもの、これまでは作製が不可能であった構造体を作製する装置などである。現在の技術状態から考えたときの、技術の発展段階・成熟度合い、開発の実

現性や、開発に必要な期間や規模、わが国における研究者・研究機関・企業等における、開発ポテンシャルなども一定考慮してはいるものの、さらなるフィージビリティの検討を要するだろう。しかし、各開発候補課題を一つ一つ深掘して技術的な検討を行うことは本報告書の目的ではない。こうした開発候補課題群があるなかで、その全体をどのように認識し、表現し、これだけの研究ニーズとそれに対応する開発候補課題があるなかで、適切なタイミングと仕組みをもって戦略的に機器開発を実行すべく検討することにある。その実現によって開発機器が使用され、研究成果を創出し成果を活用する側の価値へと結びつけるかが重要である。同時に、開発装置が研究現場において幅広く普及し、機器産業としても成立しないかぎりには、中長期のフィードバックループを持ったイノベーションのエコシステムは機能しえない。本節ではこの点を次の第5章でより具体的に検討することに先立ち、まず、機器開発候補課題群を「研究開発上のインパクト」と「普及のポテンシャル」の二軸によってマッピングした(図4-2-1)。縦軸の研究開発上のインパクトは、二つの意味を包含する。一つは、当該機器開発を実現することの技術的ハードルを越えること自体のインパクトである(アウトプット)。もう一つは、機器開発が実現し、その使用によって研究ニーズに対応した研究が実行されての研究成果創出を想定した際のインパクトである(アウトカム)。多様な研究ニーズがあるなかで、研究開発上のインパクトはいずれも定性的な扱いだが、CRDSにおけるユニット横断の検討を経て、インパクトの高低を判別した。横軸の普及のポテンシャルは、幅広い研究ニーズに対応するものであるかどうかや、研究ニーズのパイが大きく、それだけ多数の研究機関において導入が期待されるものであるか、開発企業が当該機器をビジネスとして成立させ、グローバルにビジネス展開することで将来的なスタンダード機となる可能性を持つかどうかといった観点から検討した。

5 | 研究機器開発のイノベーションエコシステム形成へ向けて

5.1 新たな機器開発とそれを利用する先端研究成果創出は、win-winの両立が要る

第4章では、各分野の幅広い研究ニーズとその研究実施に応え得る新技術を搭載した装置・機器の開発候補課題を俯瞰的に見てきた。本章では、どうすれば研究ニーズに導かれる新たな機器開発が成功し、研究現場に普及し、その社会実装・エコシステムを機能させることができるのかを検討する。第3章において、JSTの未来社会創造事業や先端計測分析技術・機器開発プログラム（先端計測事業）のこれまでの取り組みや実績を検討してきた。先端計測事業のように、個々の機器開発課題として見れば技術開発に成功したと高評価を受けるテーマはいくつもあるが、それが機器メーカーにおけるビジネスとして成立するほどに研究現場に広く導入され普及しなければ、本来のアウトカムとして求められる研究成果創出には至らない。他方、利用ニーズが産業用途を主とする機器に関しては、利用側産業の潜在市場規模の存在、そして潜在利用ニーズを顕在化させ安定的に満たすことによってビジネスが成立する。生み出された付加価値にもとづく利益を、次世代機への開発投資にまわし、さらなる利用ニーズに向かうといった好循環を生み出すことにつながる。技術開発もその多くは機器メーカー側が中心となる。しかし、新たな研究ニーズへの対応、それが特に先端研究であればあるほど、同じようにはいかない。新技術が搭載された研究機器なくしては実行不可能な新たな研究テーマに関して、その機器の市場を事前に予測することは困難で、機器メーカーにとって極めてハイリスクとなることから、開発投資が難しくなってしまう。また、特に高度で先端な研究ニーズを、具体的な計測・分析や加工・プロセスの必要技術に落とし込むことは容易ではない。以下では、大学や国研等に所属する新たな研究ニーズを持つ利用研究者、同じく大学や国研等に所属する機器開発・技術シーズを持つ研究者、機器メーカーの三者がどのような連携構造を持つことが望ましいのかを検討する。

複数のステップを考える必要があるだろう。ニーズが先かシーズが先かといった議論は、本質的にはどちらの場合もあるはずであるから、その後先を問うことはしない。研究ニーズと新技術のシーズは両方が必要になる。研究ニーズとしてここで想定するのは、ある任意の研究テーマにおいて、解明の必要があることや、物質やデバイスなどの何らかの構造物を構築する必要があること、それらが現在のアクセス可能な技術によってでは解決不可能なものである。研究ニーズはその起源は別にして、実際上は研究者の内在的な思考過程から生じる。その研究ニーズへ対応しうる技術が存在しないときに、選択肢は絞られる。技術が開発されて使用できるようになるのを待つか、そのようなシーズを持つ側に技術開発を依頼するか、自ら開発して自ら使用できるようにするか。しかし、このほとんどは実現しない。待っていてもそのニーズは認識されないし、シーズサイドに依頼するにも機器ビジネスの見通しが立たなければ開発されない。自ら開発しようにも技術を持っていないし、技術の着想を持っていたとしても研究使用できるところまでは多くは到達不可能である（どれほどかかわからない!）。そこで必要なことは、技術シーズを持つか、または技術シーズを創出する可能性のある研究者・技術者と、それを使用可能な機器として具現化するポテンシャルを持つ機器メーカーとの協力が必要になってくる。技術シーズのPOCが確立すれば、ベンチャーを起こす道も選択肢ではあるが、その場合、将来的に大手機器メーカーとの間で提携することや、M&AによるEXITを狙うことも考えられるが、現在の日本の資本市場ではこのスキームは未成熟で発展段階にある。

技術シーズを持つか、または創出する可能性のある研究者・技術者の視点に立って考えてみる必要がある。

大学や国研（あるいは企業）でもそうだが、新技術開発や機器開発に携わる研究者・技術者は、常に現在の到達技術水準と、自ら（の組織）が有する技術との比較、そして今後それをさらに超えるか、新たな方向性やアプローチを与える技術的着想、それらの実現を構想する。しかし構想の実現に向けたアクションは簡単に起こせない。アクションに必要な条件が揃わないからである。アクションの条件は、構想を実現するために必要な協力者と資金の調達、それらを動かすに足るニーズの存在が、いずれのステークホルダーにも行動に結びつくレベルで認識されることである。認識を共有するためには、新たな研究ニーズへの深い理解のために、ニーズ研究者の問題意識に触れ続ける必要があるし、シーズを持つか生み出す可能性のある研究者・技術者としても、ニーズとシーズとの間にある技術的ギャップを具体的且つ正確に認識する時間のかかる行為が必要となる。これは単なるニーズとシーズの出会いというよりも、より日常的にニーズとシーズの相互の状態を、互いに理解したり伝えあったりすることを継続的におこなう関係性や機能が要る。それは場を持つことかもしれないし、頻繁なコミュニケーションを可能とするコミュニティ形成であるかもしれない。技術シーズを持つか生み出す可能性のある研究者・技術者は、当然のことながらその技術への深い洞察と共に、良くも悪くも技術的なこだわりを持つ場合が多い。既存の技術水準やアプローチを超える新たな技術開発は、繰り返しの試行や失敗の積み重ねの上にしか成功し得ないので、匠/職人的な一面は非常にプラスである。その一方で、本来の目的に対して、自らの技術に囚われて気付かぬうちに思考に制限をかけてしまうこともある。こうした思考の無意識な制限に陥らないだけの、目的の存在とその共有を、研究ニーズサイドとの間でおこなう機能・仕組みを構築することがまず必要である。さらに、自らの技術シーズだけでは大抵の場合は不足する。装置に実装する段階の技術開発までには、複数種の技術が不足するため、必要な技術を持つ人や機関を集め、連携して取り組み、最終的には技術を統合させていく共同関係の構築も必要となる。

この関係において求められるのは、ニーズ側研究者にとっても、シーズ側研究者・技術者にとっても、両者にとっても価値認識可能な問題と目標の設定である。言い換えれば、両者にとってその解決がwin-winとなる問題と目標の特定である。従属関係にあたり、依頼を請け負ったりする関係ではなく、どちらにとっても重要な成果だといえるだけの価値認識可能な問題と目標を設定することが、最初のステップとなる。

5.2 技術のポッド：不安定で活性化エネルギーの高い開発拠点がイノベーションを生む

問題と目標の特定が出来たとして、現実にコトを動かすには大きく分けて二つのリソースが要る。一つは無形資産としての技術的・人的な蓄積、もう一つが資金である。技術的な蓄積（技術知識、ノウハウ、スキル、データ含む）は、大学でも国研でも、企業であっても、バランスシートにその実態を表現することのできない無形資産である。例えば、ある技術・機器を想定したときに、計測装置でも加工装置でもなんでもよいが、その技術に関して「あの大学のあの研究チームはいつも新技術を考案・創出している」、といったような技術的蓄積と人材が輩出し続けている場として評価や認識されているところが、世界には存在する。他と何が違うのか。その技術に関する計測や加工の技術を連綿と積み上げ世代を越えて継承し、極めることに挑み続けていることに特徴がある。競争の激しい領域に関して、世界最先端の技術レベルと常に向き合い続けているような、外部から新しい技術を取り入れることにも貪欲で、ニーズに対するアンテナも高い。自らの技術も研ぎ続ける、新たな技術的構想も持つ、次なる新技術が生まれるとしたらあの場からではないかと目されるような、そうした技術と人材を集積していることに特徴がある。扱う技術の規模や広がりによって、場の大きさには多様性があるが、技術的な知を中核とする無形資産の蓄積と、それを備えた人材の集積および育成を少なくとも20～30年といったスパンで継続的に行っていることに特徴がある。ある種の技術的な“ポッド”とも呼ぶことができるこうした場は、技術の改良や新技術の考案、そのアイデアの試作など自体を研究テーマとして取り

扱っている。生まれてくる技術がどのようなものであるかを外部から正確に予測することは難しく、不確実で不安定で、常に揺らぎを持つような、例えるなら“沸々としたマグマだまり”のごとく不安定で活性化エネルギーの高い場を、いつもキープしている。新たな技術が生まれるポテンシャルを失わないようにすることは、実は技術が確立していくより前の、何かが出るかもしれない不安定な状態を持ち、意図的に不安定であり続けるような場ではないか。このようなエネルギーの高い場は、実は開発投資や新事業の可能性を検討する企業にとっても、無視できない存在である。技術ベースのビジネスモデルを持つ企業では、既存技術による既存ビジネスを運営する一方で、そのビジネスの次の姿は何か、あるいは別のビジネスによって代替される競合リスクに対応するため、常にその可能性を孕むような新技術をフォローしたいと考えている。その技術は従来技術の性能向上なのか、ディスラプティブな技術なのか、どちらが次の市場を形成するほどに広く普及し利用されるようになるのか。今、企業にとって自前で研究開発部門を抱え続けることは、その技術が最先端であればあるほどコストセンターとなることから、過去と同規模で維持することは年々難しくなっている傾向がある。この流れは20年以上続くオープンイノベーションへの流れの一因でもあるが、研究開発部門をフルに維持するのではなく、より川上や次世代技術のタネは、大学や国研または複数企業間（垂直/水平含む）でのアライアンスを組んで、拠点を形成し、先端技術開発のリスクを分散しヘッジすることが様々な領域で主流になっている。そこでは、各社にとっての次のコア技術に成長する可能性のある技術に、揺籃期の段階からアクセスし見極めをおこなうことや、人材の獲得、複数企業間にとって市場形成上の共通的なビジネスエコシステムを構築する見通しなど、後の連携も見越して川上から活動を開始する意味がある。したがって、このような場に対し企業サイドとしても長期的に関与しつづけることが、リスク分散の意味でもコスト分散の意味でも重要になり、そのための投資であれば企業としても続ける価値を認識しやすいと考えられる。

以上のような、新提案・新技術の揺籃期にあるような、不安定でエネルギーの高い場から始まって、研究ニーズに導かれる技術開発から実際にイノベーション創出に至り、それが装置に実装され研究機器として使用可能な機器ビジネスとして成立するまでの、ステップをモデルとして考える（図5-2-1）。ここでは大学や国研の場をその最初の舞台として想定し、次いで企業の開発現場、そしてアーリーユーザーを獲得するために新機器を共用する場と、三つの場の受け渡しとして考える。最初の舞台に必要なことはすでに述べてきた、研究ニーズとそれに対応し得る新技術を持つか、またはその着想を持つシーズ側研究者・開発者との共同研究・共同開発であるが、投資の母体は競争的資金等の公的研究開発資金を主に想定する。企業が投資主体となるにはまだリスクが高過ぎるフェーズであり、民間投資で賄うことが難しい段階にある。例えば数年～5年程度の期間で要素技術を具現化し、初号機としての「 α 機」の開発を目指す活動となる。過去、先端計測事業等における中心的な投資対象だったともいえる。技術を先鋭化して追及し、制限された機能で、その開発に直接携わった限られた者しか操作のできないような複雑な使用方法の、プリミティブな機器である。特定のサンプルでの計測や加工の実証を、特定の条件下でおこなうことができる、その条件においてはナンバーワンのチャンピオンデータを示す。しかし、サンプルや測定・加工条件等の研究対象の広がりはおく限られ、当人しか操作し得ないものであることが多いため、その付加価値を広く訴求することが難しい。機器メーカーとしても、将来の市場が見込めないかぎり開発投資の判断に踏み出せないような、それが α 機の状態である。ハイリスクゆえに公的研究開発投資が主体となるが、この α 機までは到達できるのである。先端計測事業等の様々なプロジェクトの経験からも、 α 機の開発は可能であるし、初期に必要なステップである。本来、 α 機開発は通過点のはずだが、ここで投資が継続できないことや、開発の当事者としても次のかたちを戦略的に構想できない等の難点があった。この段階での問題は、次の「 β 機」の開発を、今後は企業の開発現場で実現するところまで結びつけることが、投資においても人材（組織）においても、シフトが上手くいかないことにある。 α 機と β 機の間にあるのは、一般にいう「魔の川」である。過去多数のプロジェクトがここで終わっていた。 β 機の特徴は、後の普及・量産モデルにおける仕様を確定させていくための運転データ取得期間であり、アーリーユーザーの獲得期間でもある。長いものではこの期間が10年に及ぶものもあるが、3年程度をまずは初

期設定として置く。装置としての安定性を実現するために必要な技術開発や、製造ラインの想定・設計、ユーザーインターフェースおよびそのソフトウェアを作り上げるといった、完成品の製造・販売に必要な機能・諸条件の特定などを、一つ一つ満たしていくための期間となる。α機が一点ものであるのに対し、β機は製造ラインこそまだないものの、アーリーユーザーを取り入れたテスト使用に供するレベルの試作機である。α機は研究機関の手作り機であることが多いが、β機は核となる要素技術を大学等研究機関から機器メーカーへ移転して、企業の開発現場で技術者集団が作り上げるイメージを一つの形として想定する。しかし、β機開発の難点は、β機自体の開発・製造に要する投資コストにある。まだ市場を十分に見通すことが困難なフェーズにあるため、企業において開発投資の確保は非常に難しく、製造ラインがあるわけでもないのに、β機一台の製造に要するコストは、製造方法の確立した普及・量産モデルよりも、非常に高がついてしまう。研究機器開発における魔の川を乗り越えるためには、さらにその先に待つ死の谷をも考慮に入れた、以下の道筋を講ずることを提案したい。

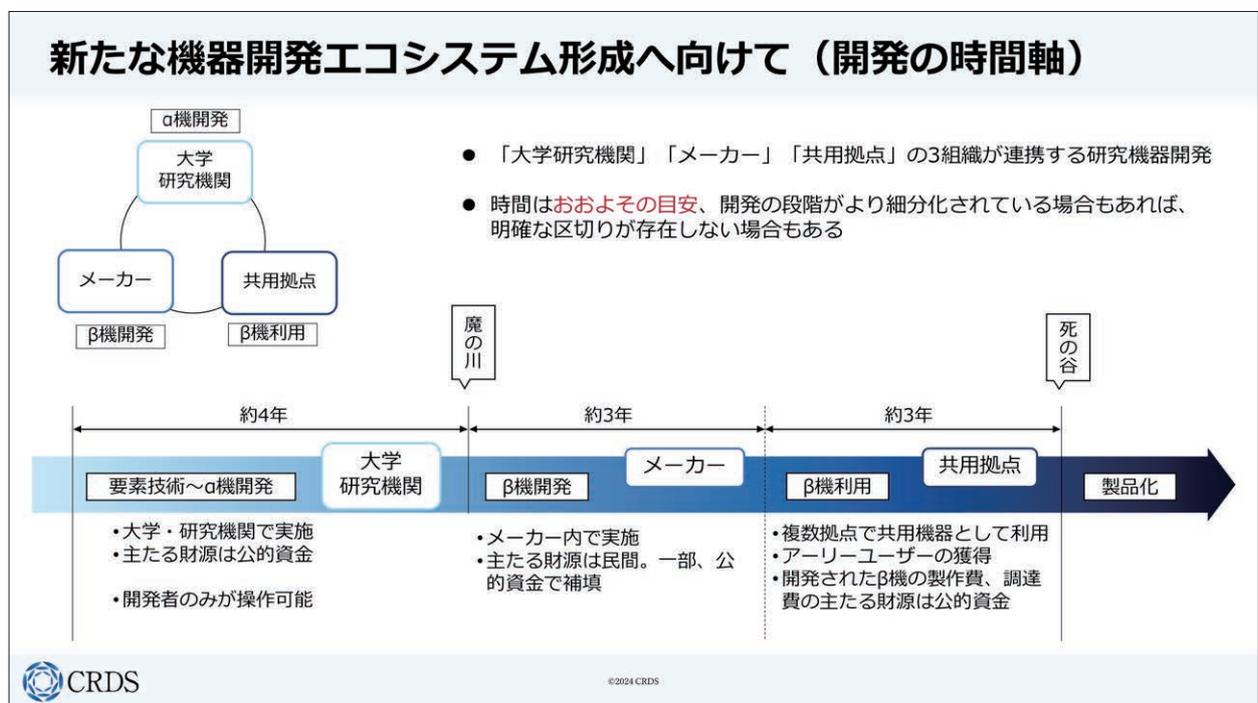


図5-2-1 新たな機器開発エコシステム形成へ向けて（機器開発の時間軸）

β機開発の問題は、技術移転がスムーズに行かないことと、β機の調達コストにある。さらに、β機から普及・量産モデルの間には死の谷が待つ。「α機→（魔の川）→β機→（死の谷）→普及・量産モデル→（ダーウィンの海）→ビジネス成長」。これは決してリニアに進展できるものではなく何度もフィードバックループを繰り返すものだが、技術開発の成熟のために、このステップにおいて開発拠点と共用拠点の隣接型の拠点を考える。①開発拠点としての大学・研究機関、②機器メーカー（またはベンチャー）、さらに③共用拠点としての大学・研究機関のうち、①と③が場として隣接し、企業がそこに参画するモデルである。ここでは、図5-2-2のように新技術の研究開発を担う拠点に、企業も共同研究や共同開発の形で参画する。すでに述べた、新技術が生まれる不安定なポッドとしての機能と、α機開発の機能、そして企業がそれらをウォッチし技術移転に手を挙げたり、実際に共同開発に参画したりすることができるような場として設計する。企業も一定の投資を担う。選択肢は様々に考えられるが、企業から人材を派遣したり、拠点の人材を後に企業が採用したりすることも考えられるだろう。ここでα機開発に漕ぎつけたものは、機器メーカーへ技術を移転してβ機開発

をおこなう。その際、 α 機開発に最初から関与またウォッチしてきた機器メーカーのメリットを技術移転に活かすことと、将来のアーリーユーザーに早期試用してもらうとき、共用拠点の場を使うことを最初から想定することがポイントとなる。 β 機の調達・導入は共用拠点でおこない、その調達コストは、利用者が大学等の先端研究・基礎研究一定割合であることを前提に、公的資金を一部または全部に用いるかたちが望ましい。元々の開発投資が公的資金によるものであり、且つそれが装置として完成した場合は恩恵を受けるのが利用研究者であって、その研究成果創出を国としても目指すものであるからこそ、 β 機の導入に公的資金を組み入れることが一つの論理として成立し得る。ドイツや米国では、SBIR ファンドやミドルレンジ機器の研究用途調達に関する公的施策が存在し、これを担う（第6章）。 β 機の開発コストを企業において回収することが、 β 機を共用拠点へ導入する段階でおこなうことができれば、 β 機開発投資の判断が企業において格段にしやすくなる。例えば、技術や装置の規模にもよるが、数台の β 機を共用拠点に導入して、アーリーユーザーに使ってもらう前提であれば、その数台分の回収資金を頼りに β 機開発に機器メーカーが踏み出せる可能性が上がる。もし、普及・量産モデルのビジネスによる回収だけを前提とするならば、不確実性が高すぎて β 機の段階で開発投資のリスクを許容することがほとんどの企業において難しくなってしまう。そのハードルを下げる機能を、共用拠点への導入・早期試用が担うのである。共用拠点へ導入された β 機は、 β 機から普及・量産モデルへの間を埋めるための様々なテスト期間となるが、いわゆるテストベッドとしての機能を担い、ユーザーに対するショーケース機能、テストマーケティングの機能を持たせることも兼ねる。大学や研究機関における共用拠点は、他の様々な機器をすでに共用しているような研究インフラ・プラットフォームの場を一つの形態として想定する。そのような場は、こうした β 機の導入以前から幅広い研究者をユーザーとして抱えており、試作段階にある新機器としての利用スキームを追加して設けることで、死の谷を乗り越えるために必要なデータ取得や仕様決定へ向けた様々な使い方、サンプルなどを試す期間となる。

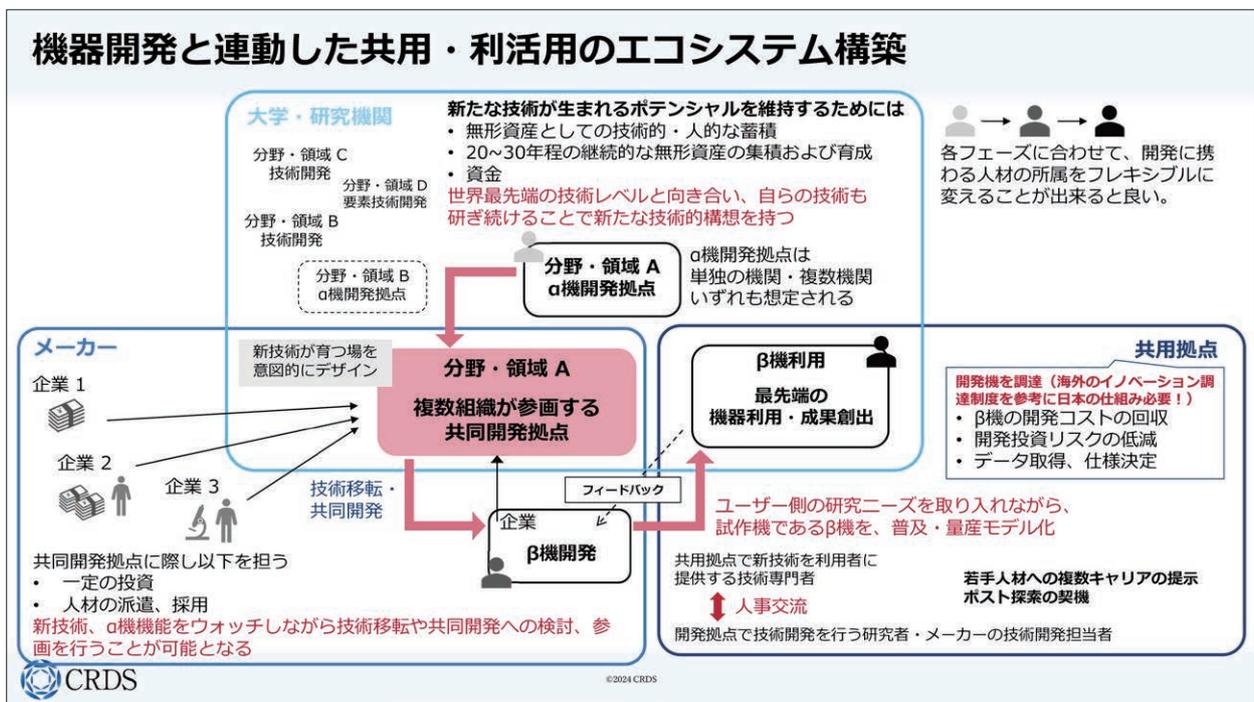


図 5-2-2 機器開発と連動した共用・利活用のエコシステム構築

共用拠点において、開発途上の β 機を運用することは投資効率の面でも技術蓄積の面でも、プラスが大きい。この期間は機器によって様々であるが、一つの目安はやはり初期設定として3年程度であろう。本来、最初の

技術移転以降は企業の役割であるとして、民間投資だけでやっていこうとしても、市場形成の予測が難しいことから投資がもたないことがほとんどであることは既に述べた。そこに共用拠点を組み入れることで、テスト期間の運用とユーザー獲得の面で投資効率に寄与する。また、開発拠点と隣接していることで、技術的な蓄積を開発拠点へのフィードバックをするなかでおこない、さらに技術者を育成することも実現可能となる。開発拠点において研究者として技術開発を担う仕事と、共用拠点において新技術を利用者に提供する技術専門職としての仕事は、本質的に異なる。その仕事を兼任したり、行き来するなかで、研究者としてのキャリアと技術者としてのキャリアの、複線的なコースを若手に提供することも可能になるだろう。技術者として、共用にかかる業務だけでなく、一部は β 機の開発にも携わるような経験を共用拠点において経験することで、後に機器メーカーへ就職することや、人事交流することなども想定しうる。あるいは、開発拠点に移って開発型研究者の道を目指すことも考えられるだろう。このようにして、開発拠点、機器メーカー、共用拠点を、開発の各フェーズに応じて携わる人材が相互に交流することや、フレキシブルに所属を変えて活躍することも視野に入れることができるだろう。

5.3 中長期にスパイラルアップする、成長するイノベーションエコシステムへ向けて

β 機の共用期間を経て、研究利用において価値を認められるかどうか、その機器の利用市場を見込む段階に立つことができるかどうかは極めて重要な岐路となる。普及・量産モデルの製造までたどり着くことができれば、そこからのダーウィンの海を越えられるかどうかは企業の競争戦略にかかってくる。このフェーズの投資主体は民間であり、大手機器メーカーの自己資金や資本市場からのさらなる調達など、様々である。しかしここで肝心なことが三点あり、一つは、開発拠点での α 機開発、機器メーカーでの β 機開発、共用拠点の利用期間を経て育った様々な技術やその利用時の課題を、開発拠点における次なる新技術の課題・創出へフィードバックすることが求められる。二点目は、データの創出・蓄積・共有・利活用の仕組みを構築すること（後述）。三点目は、最終的に企業がダーウィンの海を越えてビジネスを成長させることに結びついた暁には、その利益を開発拠点や共用拠点へと還元し、次なる新技術の原資とする仕組みにしておくことが求められる。それが研究開発の観点でも、企業におけるビジネスの観点でも、ひいてはその利用成果をもとに将来的に創出される社会的価値の観点でも、相互にフィードバックし合ってスパイラルアップする、成長するイノベーションエコシステム成立の必要条件となる。

二点目に挙げたデータの創出・蓄積・共有・利活用は、計測・分析装置であれば計測データ、加工・プロセス装置であれば加工レシピやプロセス条件のデータである。開発拠点、機器メーカー、共用拠点、いずれにおいても今後わが国は、専門人材が極めて不足してくることが予想される。しかし、計測・分析や加工・プロセスに関わる高度技術を失えば、わが国が如何に研究に力を入れようとも、研究に必要な機器を海外からの輸入に大きく依存し、自国にはその技術を持たない、先端技術を持たない状態に陥るだろう。すでにいくつかの分野では実際に持っていない先端技術が生じている。全てを持つべきというわけではなく、競争力を失ってはならない技術というものが、必ずあるということである。第2章に記載した研究機器市場の調査からも明らかだが、すでにわが国は、ライフサイエンス関連装置のほとんどは、世界において市場シェアがほぼゼロであり、国内にそれを担う機器メーカーがほぼ存在しない状況にある。また、半導体の最先端微細加工装置なども事業としては持てなくなった。これらを一から創出することは現実的ではないが、開発拠点や共用拠点を通じて、研究利用データを創出し、蓄積し、利活用につなげることは、高度人材や先端技術が不足するわが国においては、限られたリソースのなか科学技術イノベーションを創出していくために、必須ではないだろうか。データを研究においてどう創出し、活かし、新たな発見や創造につなげるのか、その方向性が一層大きな流

れとなっていくことは想像に難くない。計測データや加工データは、例えばデータを創出する機器が海外メーカーの先端機器である場合、契約によりブラックボックス化されていたり、機器メーカーが自動的に利用データを取得・保持したりするなどの、様々な扱いが起きているようである。どの分野のどの研究で、どの技術に関して、研究データや技術データを創出して蓄積するかは、それを利用する側において将来生まれる産業など、国家の科学技術イノベーション戦略や産業政策とも深く関わる部分である。特に、計測・分析や加工・プロセスに関わる研究・技術データは、ある事象に対して何が起きているかを正確に解明したり、産業上の鍵となる部品やデバイスを製造したりするために欠かせないものであるからこそ、産・学・官・社会の幅広いステークホルダーとの議論をもとに、認識作りをしなければならないだろう。科学技術イノベーションおよび研究力向上を掲げながらも、先端研究機器の開発が現状では難しい状態にあるわが国において、残されている時間は限られている。本報告書で述べてきた新たな研究開発環境の構築、その構造・関係性を築くことが課題である。

5

研究機器開発の
イノベーションエコシステム
形成へ向けて

6 | 海外動向

米国・欧州（ドイツ）・中国における関連政策の動向について、ファンディング事業やプログラムの継続状況を確認しつつ、整理をおこなった。

6.1 米国

米国における研究機器の調達・開発に関する政策的取組として、NSF（National Science Foundation；国立科学財団）およびNIH（National Institutes of Health；国立衛生研究所）傘下のNIGMS（National Institute of General Medical Sciences；国立総合医科学研究所）が実施するプログラムを紹介する。いずれも研究機器と研究インフラ整備を並行して進められるようなプログラム設計がなされている。

NSFでは、最先端・高性能の研究ツールの利用環境が研究開発活動全般の将来を決定づけるという理念に基づき、研究施設や機器設備、研究インフラの整備のためのサポートを実施している。予算規模や目的が異なる4つの主要プログラムをもとに研究機器・設備の支援についてのポートフォリオを策定し、開発と利用の促進に取り組んでいる。

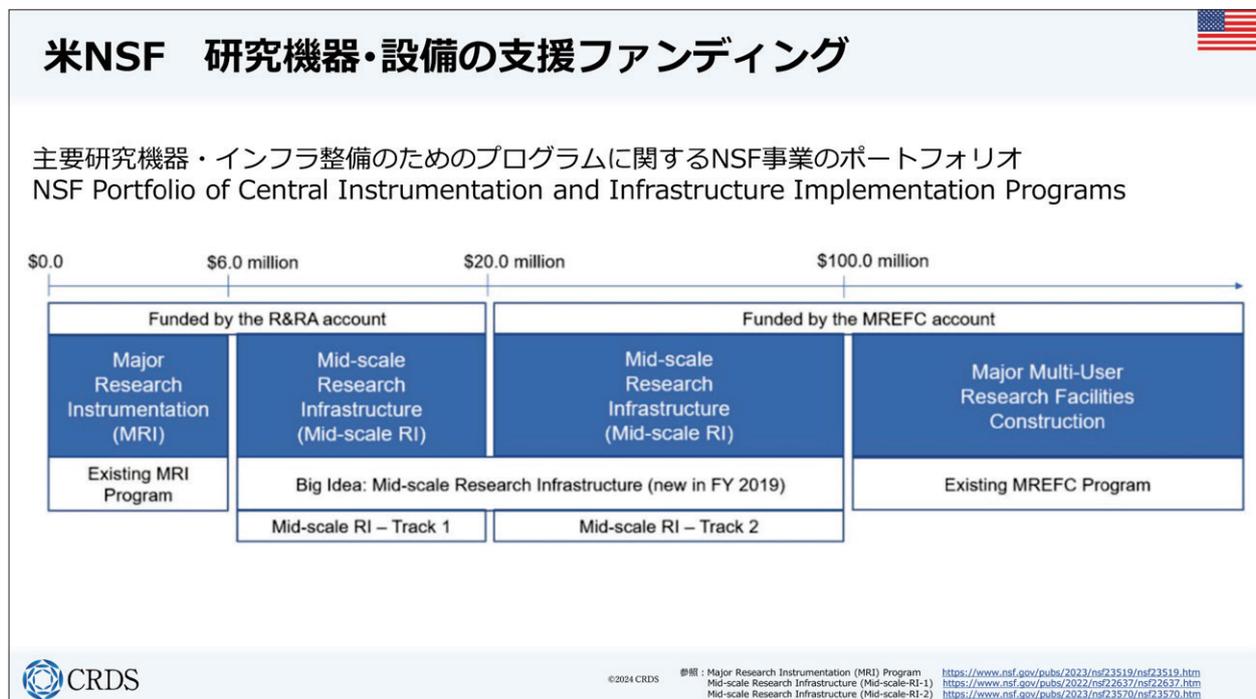


図6-1-1① 米NSF研究機器・インフラ整備プログラムのポートフォリオ¹¹

11 NSF Major Research Equipment and Facilities Construction Overview
https://nsf.gov-resources.nsf.gov/about/budget/fy2023/pdf/33_fy2023.pdf

プログラムは、「Major Research Instrumentation Program (MRI) ; 主要研究機器プログラム」、 「Mid-scale Research Infrastructure-1 (Mid-scale RI-1) ; 中規模研究インフラ」 および 「Mid-scale RI-2」 並びに 「Major Research Equipment and Facilities Construction (MREFC) ; 主要研究設備・施設建設」 の4つで構成される。それぞれ、規模に応じた段階的な支援を実施している。2021年での募集の締め切りが提示されていたプログラムもあるが、2024年現在も継続実施中である。

主要研究機器プログラム (MRI Program)	Mid-scale Research Infrastructure		主要研究設備・施設建設 (MREFC Program)
	中規模研究インフラ-1 (Mid-scale RI-1)	中規模研究インフラ-2 (Mid-scale RI-2)	
共用の研究施設・機器の ・取得 (acquisition) ・開発 (development)	研究インフラの ・実装(implementation) : 取得、建設等 ・設計(design) : 実装のための準備	研究インフラの実装 既存の研究インフラのアップグレード ⇒ 既に十分な開発投資がなされている前提。 実装後の研究、運用、保守への支援はない。	より大型の研究インフラの 取得、建設、試運転
1課題あたり Track 1: 10万※~140万ドル Track 2: 140万~400万ドル Track 3: 10万※~400万ドル 「取得」の場合、支援期間は最長36ヶ月 「開発」の場合、支援期間は最長60ヶ月 (予算配分開始日は、最短で提案書提出日から半年)	600万*~2,000万ドル/最長5年間 *「設計」は60万ドル~2,000万ドル 募集期間は2021年4月にて締切り → 継続中 1課題あたり 40万~2,000万ドル 「実装」400万ドル~2,000万ドル 「設計」40万ドル~2,000万ドル 支援期間は最長5年間	2,000万~7,000万*ドル/最長5年間 *制度設計上は1億ドルまで想定 募集期間は2021年9月にて締切り → 継続中 1課題あたり 2,000万~1億ドル 支援期間は最長5年間	総額1億8,000万ドル 初期開発、設計 および建設 後の運営と保守費用についてはR&RA accountより支援

参照: Major Research Instrumentation (MRI) Program <https://www.nsf.gov/pubs/2023/nsf23519/nsf23519.htm>
 Mid-scale Research Infrastructure (Mid-scale-RI-1) <https://www.nsf.gov/pubs/2022/nsf22637/nsf22637.htm>
 Mid-scale Research Infrastructure (Mid-scale-RI-2) <https://www.nsf.gov/pubs/2023/nsf23570/nsf23570.htm>

図6-1-1② 米NSF研究機器・インフラ整備プログラムのポートフォリオ

主要研究機器プログラム (MRI : Major Research Instrumentation Program)

(概要)

多様な人材の育成と次世代機器の開発を促進する研究環境を実現し、産学のパートナーシップを促進する。他のNSFプログラムでの購入が適さない・高額で購入できない研究機器について、共同利用を目的とした取得と開発に取り組む組織を対象に資金提供する。

自然科学・工学の多様な分野のユーザーのために、研究機器利用のトレーニングの提供と機器の共用促進に取り組むことで、各研究機関の多様な研究開発能力を確立させることを目的としている。実施にあたっては、メーカーから販売されているものだけではなく、研究機関が独自に開発した機器を共用することで、最先端の研究機器を共用できる仕組みとなっている。参画する機関に対しては、必要な最先端研究機器を取得もしくは開発するための支援を行っており、その規模はTrack 1 : 10万~100万ドル、Track 2 : 100万~400万ドル、と2段階に設定している。参画機関は、Track1は2回、Track2は1回限り、の範囲で申請を行うことが可能となっている。

(予算)

年間あたりの総予算額 : 7,500万~1億1,500万ドル

年間あたりの採択課題数 : 100~300

1課題あたりの支援額 : 10万※~400万ドル

※以下のいずれかに該当する場合に限り、10万ドル未満のプロポーザルが受理される

- a) 数学、社会科学、行動科学、経済科学分野の研究に用いる機器の取得を申請する場合
- b) 非博士号学位授与機関の高等教育機関が、NSFの支援対象である研究分野で用いる機器の取得を申請する場合

(目的)

- 主要研究機器の開発と共用の支援によって産学連携を促進し、複数の分野や組織を横断する共同研究の実現、研究トレーニングの機会の提供を目指す。
- 国の科学者や技術者への最先端の研究機器の提供により、新たな知識や発見の触媒として機能する。
- 最新の主要機器の購入を支援し、科学者、技術者、大学院生、学部生など多様な人材による最新の研究・研究トレーニング機器へのアクセスを改善する。
- 次世代装置の開発に取り組むことで、より広く利用される新しい研究機器を生み出し、研究および研究トレーニングの新分野を開拓する。
- 異分野融合や学際研究等、複数の組織による共同研究を促進する研究環境を構築する。

(採択プログラム)

2023年8月1日時点でNSFのデータベースに登録されているプログラム数は461件である。

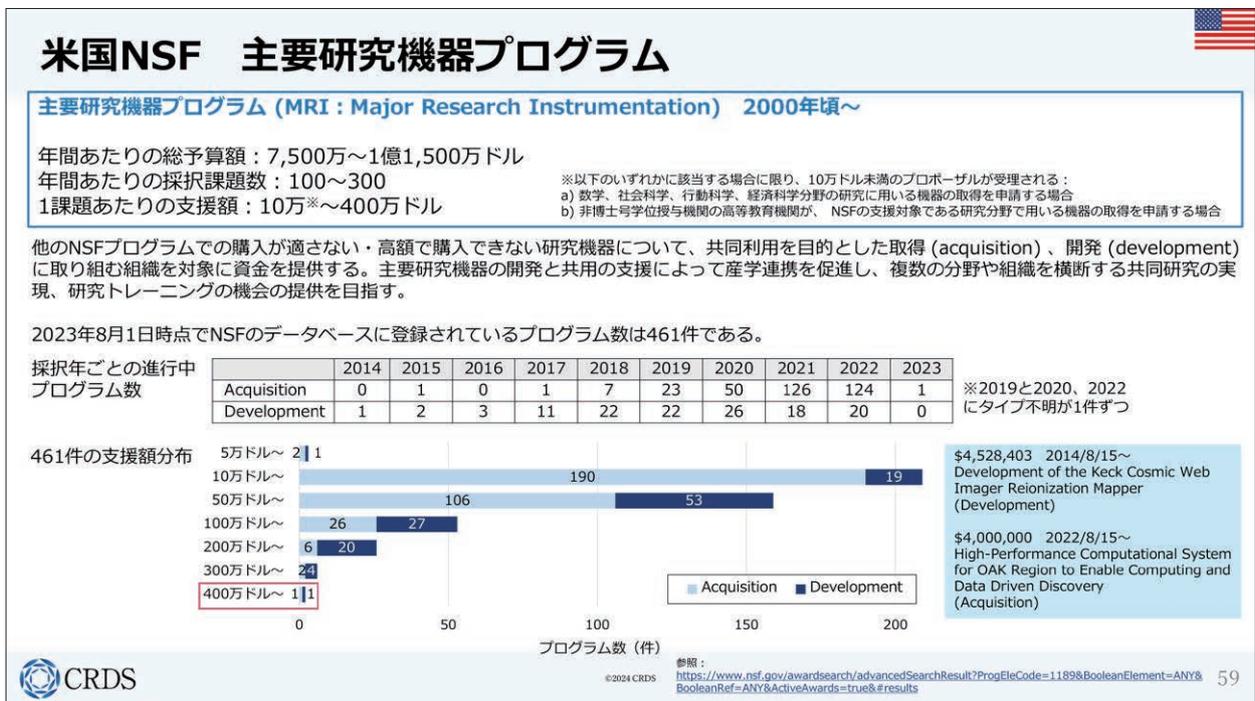


図 6-1-2 採択年ごとの進行中課題数

1プログラムあたりの支援額は最大400万ドルであるが、10～100万ドルの助成を受けているプログラムが多い。データベースに登録されているプログラム461件のうち、助成額が400万ドルを超えるプログラムは2課題のみである。

その他、主要研究機器プログラムに採択されているプログラムを一部抜粋し図4-1-4に示した。全461件のプログラムの支援額の合計は約370億円である。

プログラム名	開始日	州/地域	組織	これまでの支援額
Development of a Next Gen 9.4T Magnetic Resonance system for Translational Neuroscience	09/01/2021	NY	Nathan S Kline Institute for Psychiatric Research	\$3,740,073
Comprehensive Study of Alzheimer's Disease: Multimodal Imaging, Visualization, Machine Learning and Therapeutic Brain Stimulation	10/01/2019	FL	Florida International University	\$3,423,641
Scripps Ocean Atmosphere Research Simulator (SOARS)	09/01/2017	CA	University of California-San Diego Scripps Inst of Oceanography	\$3,143,165
Terahertz Measurement Facility for Wireless Communications, Electronics and Materials	10/01/2022	NY	New York University	\$3,000,000
frequency agile multistatic radio system for geospace imaging	09/01/2022	TX	University of Texas at Dallas	\$2,836,466
Deep Learning Research	10/01/2017	IL	University of Illinois at Urbana-Champaign	\$2,721,983
Gemini Planet Imager Upgrade	09/01/2019	IN	University of Notre Dame	\$2,613,959
Student and Faculty Research on Multimodal Environmental Observations	10/01/2020	FL	Florida International University	\$2,610,307
Experiential Supercomputing: Transdisciplinary Research and Innovation Holodeck	09/15/2016	NY	New York University	\$2,589,624
Tristatic Network of Ground-based Aeronomic Observatories to Operate in Synergy with the EISCAT-3D Facility	11/01/2020	AK	University of Alaska Fairbanks Campus	\$2,518,484
PARAGON: Control Instrument for Post NISQ Quantum Computing	10/01/2022	CT	Yale University	\$2,516,000
Fiber-Linked Mobile Telescope Facility for the CHARA Array	09/01/2020	GA	Georgia State University Research Foundation, Inc.	\$2,505,889
High-Performance Low-Field MRI for Dynamic Imaging	10/01/2018	CA	University of Southern California	\$2,482,272
Exoplanet Imaging Spectrograph for Keck Observatory	09/01/2022	CA	University of California-Irvine	\$2,449,643
next-generation MALDI ion mobility mass spectrometry platform for molecular imaging and training	09/01/2018	TN	Vanderbilt University	\$2,426,379
Visible Wavelength Extreme Adaptive Optics Coronagraphic Imager for the 6.5 meter Magellan Telescope	09/15/2016	AZ	University of Arizona	\$2,422,670
Mees Massively-multiplexed Coronal Spectropolarimetric Magnetometer (mxCSM) for Ground and Space Coronal Magnetometry	09/01/2017	HI	University of Hawaii	\$2,372,968
Wide Field-of-View Camera for the Schwarzschild-Couder Gamma Ray Telescope	09/01/2018	NY	Barnard College	\$2,365,719
the OVRO-LWA - A Low Frequency Radio Interferometric All-Sky Telescope	10/01/2019	CA	California Institute of Technology	\$2,340,402
Hybrid Photon-Electron Microscopy System for Functional Imaging of Multi-Scale Materials	10/01/2018	CO	University of Colorado at Boulder	\$2,246,000
Agile Free-Electron-Laser-Powered Pulsed Electron Magnetic Resonance (FEL-EMR) Spectrometer	09/01/2021	CA	University of California-Santa Barbara	\$2,160,000
X-Milli: An Open, Programmable Platform to Conquer the 5G and 6G Wireless Spectrum	10/01/2021	MA	Northeastern University	\$2,077,596
MRI Consortium: Dynamic PicoProbe for Multi-Modal, Multi-Dimensional HyperSpectral Imaging of Soft/Hard Matter and Interfaces in Environmental Media	09/01/2021	IL	University of Chicago	\$2,021,603
MRI Consortium: Room-Temperature Apparatus to Measure the Electric Dipole Moment of the Neutron, for a fast-track ten-fold improvement in sensitivity	09/01/2018	IN	Indiana University	\$2,020,610

全課題支援額合計 \$337,962,065 ≒ 約370億円 (1USD=110円で換算)

参照: <https://www.nsf.gov/awardsearch/advancedSearchResult?ProgEleCode=1189&BooleanElement=ANY&BooleanRef=ANY&ActiveAwards=true&#results> ©2024 CRDS

図6-1-3 主要研究機器プログラム 採択プログラム (一部抜粋)

主要研究機器プログラムに加えて、「中規模研究インフラ-1 (Mid-scale RI-1: Mid-scale Research Infrastructure-1)」、「中規模研究インフラ-2 (Mid-scale RI-2: Mid-scale Research Infrastructure-2)」では、中規模研究インフラの実装を目的とした助成を行っている。中規模研究インフラストラクチャには、施設、計測・分析機器、計算用ハード・ソフトウェア、およびそれらをサポートするために必要な人材配置を含む。

「Mid-scale RI-1」および「Mid-scale RI-2」は、NSFが2016年に発表した「NSFが未来に向けて投資すべき10のビッグアイデア¹²⁾」を発端に開始したプロジェクトである。研究活動に必要な研究インフラの多様化に対する整備状況のギャップを解消すべく、中規模研究インフラ支援をビッグアイデアに盛り込んだ。観測所、全国規模のセンサーネットワーク、計算ソフトウェア・ハードウェア、小規模実験施設などの開発支援を行うのが「Mid-scale RI-1」であり、実装支援を行うのが「Mid-scale RI-2」である。

中規模研究インフラ支援では、助成対象となった機関や研究代表者のネットワーク拡大も目的としている。NSFでは対象地域(州、準州、連邦)の研究競争力を高めることを目的とした「競争的研究活性化実験プログラム (Experimental Program to Stimulate Competitive Research: EPSCoR)」を実施中で、EPSCoRからも助成を受けている機関については、特に積極的にネットワーク拡大を進めることを推奨している。「Mid-scale RI-1」に採択され、助成を受けている機関の所在地と助成額は図3-1-5①に示した。

12 National Science Foundation, NSF'S 10 BIG IDEAS
https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/infrastructure.jsp

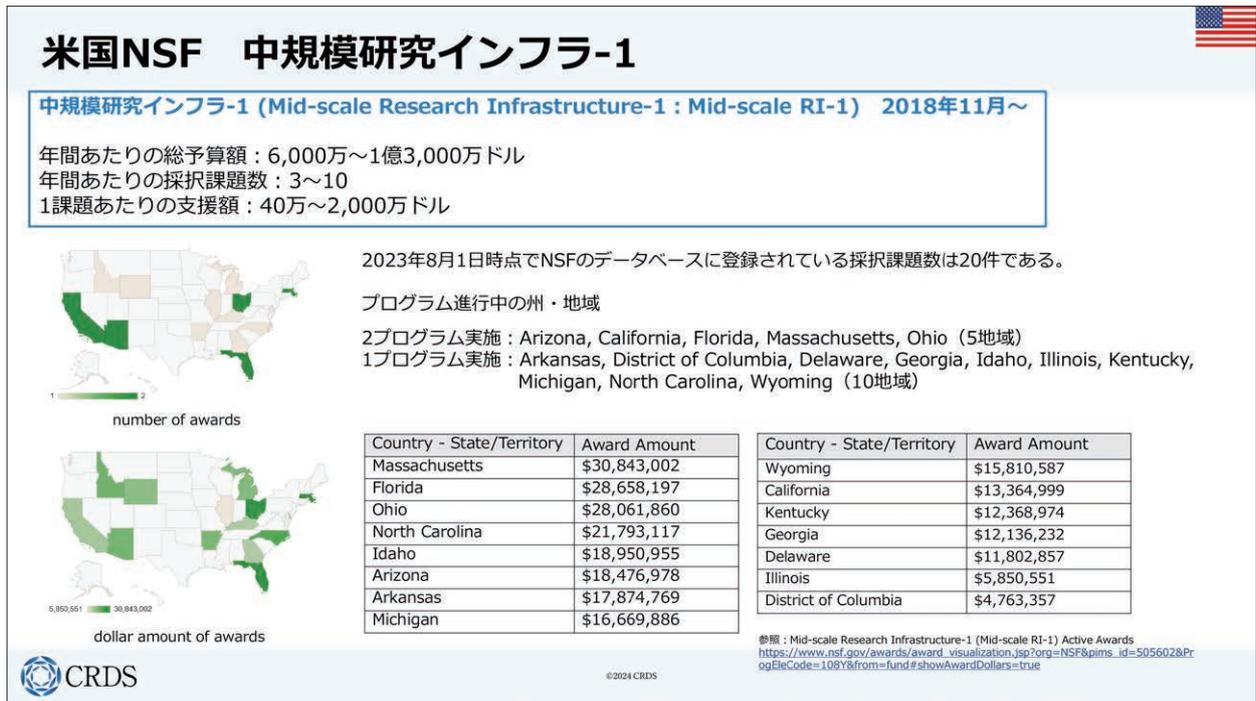


図6-1-4① 米国NSF 中規模研究インフラ-1

「Mid-scale RI-1」は、20件のプログラムに合計約280億円、「Mid-scale RI-2」は、5件のプログラムに合計220億円の助成を行っている。



図6-1-4② 米国NSF 中規模研究インフラ-1 プログラム一覧

米国NSF 中規模研究インフラ-2



中規模研究インフラ-2 (Mid-scale Research Infrastructure-2 : Mid-scale RI-2) 2018年12月～

年間あたりの総予算額：1億5,000万～2億ドル
 年間あたりの採択課題数：2～6
 1課題あたりの支援額：2,000万～1億ドル

2023年8月1日時点でNSFのデータベースに登録されているプログラム（採択課題）数は8件である。

プログラム名	開始日	州/地域	組織	これまでの支援額
Grid-Connected Testing Infrastructure for Networked Control of Distributed Energy Resources	11/01/2020	CA	University of California-San Diego	\$39,147,281
Consortium: Network for Advanced NMR	07/01/2021	CT	University of Connecticut Health Center	\$37,028,611
Compact X-ray Free-Electron Laser Project (CXFEL)	03/15/2023	AZ	Arizona State University	\$31,627,021
Consortium: Biogeochemical-Argo: A global robotic network to observe changing ocean chemistry and biology	11/01/2020	CA	Monterey Bay Aquarium Research Institute	\$29,146,013
A first-of-its-kind X-ray facility for new science at the high magnetic field frontier	01/01/2021	NY	Cornell University	\$23,899,174
The Research Data Ecosystem (RDE), a National Resource for Reproducible, Robust, and Transparent Social Science Research in the 21st Century	02/15/2022	MI	Regents of the University of Michigan - Ann Arbor	\$14,326,756
Advanced Millimeter Survey Instrumentation in Chile	05/15/2023	PA	University of Pennsylvania	\$14,004,179
Airborne Phased Array Radar (APAR)	06/01/2023	CO	University Corporation For Atmospheric Res	\$12,398,000

支援額合計 \$201,577,035 ㇿ 約220億円 (1USD=110円で換算)



©2024 CRDS

図 6-1-5 米国 NSF 中規模研究インフラ-2

続いてNIHのNIGMS (National Institute of General Medical Sciences : 国立総合医科学研究所) における、技術開発支援のためのプログラムを紹介する。本プログラムでは、生物学的プロセスの理解を深め、病気の診断・治療・予防の進歩に資する基礎研究および技術開発について、フェーズに応じた支援を実施している。

米NIH/NIGMS 技術開発プログラム

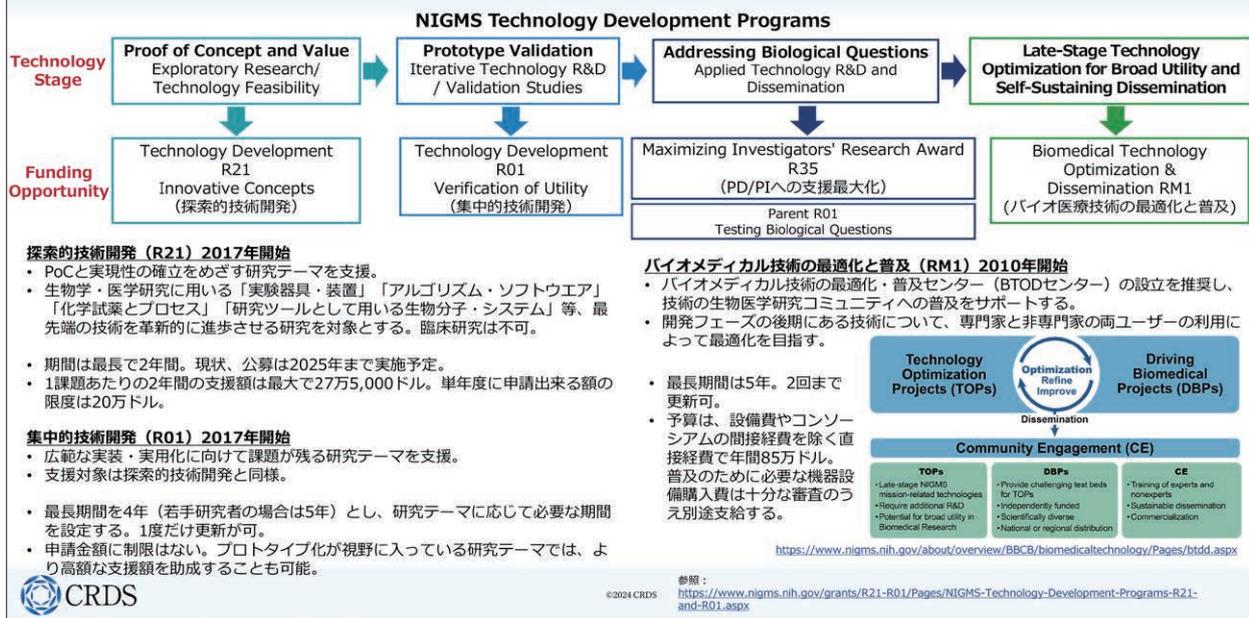


図 6-1-6 NIGMS Technology Development Programs

探索的技術開発 (R21) 2017年～

- PoCと実現性の確立をめざす研究テーマを支援。
- 生物学・医学研究に用いる「実験器具・装置」「アルゴリズム・ソフトウェア」「化学試薬とプロセス」「研究ツールとして用いる生物分子・システム」等、最先端の技術を革新的に進歩させる研究を対象とする。臨床研究は不可。
- 期間は最長で2年間。現状、公募は2025年まで実施予定。
- 1課題あたりの2年間の支援額は最大で27万5,000ドル。単年度に申請出来る額の限度は20万ドル。

集中的技術開発 (R01) 2017年～

- 広範な実装・実用化に向けて課題が残る研究テーマを支援。
- 支援対象は探索的技術開発と同様。
- 最長期間を4年（若手研究者の場合は5年）とし、研究テーマに応じて必要な期間を設定する。1度だけ更新が可。
- 申請金額に制限はない。プロトタイプ化が視野に入っている研究テーマでは、より高額な支援額を助成することも可能。

Maximizing Investigators' Research Award PD/PIへの支援最大化 (R35) 2015年～

- プロジェクトごとに資金を助成するのではなく、NIGMS関連の資金を一元化することで研究助成の効率化を図る仕組み。

(目的)

- 申請書作成などの時間を削減し、管理負担を軽減することで研究時間を増やす
- PD/PIが若手研究者の指導により多くの時間・労力を費やす など
- 期間は最長で5年間。75万ドル以下の範囲で、過去数年間にNIGMSが対象の研究者に支援した資金の平均額が助成される。新人PIへの支援額は年間25万ドル。

バイオメディカル技術の最適化と普及 (RM1) 2010年～

- バイオメディカル技術の最適化・普及センター (BTODセンター) の設立を推奨し、技術の生物医学研究コミュニティへの普及をサポートする。
- 開発フェーズの後期にある技術について、専門家と非専門家の両ユーザーの利用によって最適化を目指す。
- 最長期間は5年。2回まで更新可。
- 予算は、設備費やコンソーシアムの間接経費を除く直接経費で年間85万ドル。普及のために必要な機器設備購入費は十分な審査のうえ別途支給する。



図 6-1-7 バイオメディカル技術の最適化と普及の2つの目的¹³

米国NIH/NIGMS 技術開発プログラム

探索的技術開発 プロジェクト (採択課題) 一部抜粋

Project Title	Start Date	End Date	Organization Name	State	Total Cost	Direct Cost IC	InDirect Cost IC	Total Cost IC
Establishment of a Cell-Based Screening Platform for DNA Encoded Libraries	4/1/2023	3/31/2025	UNIVERSITY OF FLORIDA	FL	338,100	175,000	163,100	338,100
A universal approach for determining three-dimensional RNA structures	9/1/2023	8/31/2025	NEW YORK UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE	NY	296,625	175,000	121,625	296,625
Defining single-channel paracellular (tight junction) conductances using nanotechnology	2/1/2023	1/31/2025	BRIGHAM AND WOMEN'S HOSPITAL	MA	263,400	152,800	110,600	263,400
Early Toxicity Detection Technologies via Exosomal Signatures in 3D Hepatic Tissues	8/2/2022	9/30/2024	MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL	MA	252,000	150,000	102,000	252,000
Controlled Protein Translocation in Nanopores for Sequencing Applications	7/1/2023	6/30/2025	ELECTRONIC BIOSCIENCES, INC.	CA	250,744	150,000	100,744	250,744
An all-in-one web server for RNA structure prediction using evolutionary information	1/1/2023	12/31/2024	HARVARD UNIVERSITY	MA	249,901	167,631	82,270	249,901
Optimization of a rapid assay to quantify circulating glycosaminoglycans and identify vascular endotypes of sepsis	7/14/2023	6/30/2025	MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL	MA	248,285	169,049	79,236	248,285
High-resolution flexible mobility analyzer for point-of-care diagnostics	9/10/2022	8/31/2024	BATTELLE PACIFIC NORTHWEST LABORATORIES	WA	246,416	125,000	121,416	246,416
Leveraging multi-omics to maximize the scientific value of pediatric sepsis biorepository and advance patient endotyping	8/5/2023	6/30/2025	CINCINNATI CHILDRENS HOSP MED CTR	OH	241,604	161,452	80,152	241,604
Developing electron transfer from chiral circularly polarized luminescence-based photocatalysts towards selective radical cross-coupling reactions	8/1/2022	7/31/2024	UNIVERSITY OF CONNECTICUT STORRS	CT	241,500	150,000	91,500	241,500
Combining Absolute Quantitative Cross-Linking Mass Spectrometry and Molecular Modeling for Probing PROTAC-Mediated Ternary Complex Structures	3/1/2023	2/28/2025	NEW JERSEY INSTITUTE OF TECHNOLOGY	NJ	239,990	183,401	56,589	239,990
Multimic, mass spectrometry-based analysis of dried blood for deep phenotyping of sepsis	4/1/2022	3/31/2024	DUKE UNIVERSITY	NC	237,615	147,587	90,028	237,615
A novel method to characterize cis-regulatory complexes during development	9/20/2022	8/31/2024	CITY COLLEGE OF NEW YORK	NY	235,500	179,447	56,053	235,500

全プロジェクト(105件)支援額合計 \$21,273,211 約23億円 (1USD=110円で換算)

CRDS ©2024 CRDS

図 6-1-8 米国NIH/NIGMS 技術開発プログラム 探索的技術開発プロジェクト (採択課題) 一覧

13 NIH Biomedical Technology Optimization and Dissemination (BTOD) Centers (RM1)
<https://www.nigms.nih.gov/about/overview/BBCB/biomedicaltechnology/Pages/btdd.aspx>

米国NIH/NIGMS 技術開発プログラム

集中的技術開発 プロジェクト (採択課題) 一部抜粋

Project Title	Start Date	End Date	Organization Name	State	Total Cost	Direct Cost IC	InDirect Cost IC	Total Cost IC
Combining native protein mass spectrometry with serial electron diffraction to solve atomic structures of mass selected macromolecules	8/11/2023	7/31/2027	OREGON STATE UNIVERSITY	OR	824,645	719,040	105,605	824,645
Ultra-High Resolution Gas Phase Separation and Analysis Platform for Metabolomics	3/1/2019	2/29/2024	BATTELLE PACIFIC NORTHWEST LABORATORIES	WA	637,313	371,306	266,007	637,313
High throughput sample delivery method for time resolved studies of enzyme reactions with X-ray and complementary techniques	9/16/2017	5/31/2026	UNIVERSITY OF CALIF-LAWRENC BERKELEY LAB	CA	614,074	322,247	291,827	614,074
Open data-driven infrastructure for building biomolecular force fields for predictive biophysics and drug design	3/1/2020	2/29/2024	UNIVERSITY OF COLORADO	CO	601,611	560,000	41,611	601,611
Regulation of eDHFR-tagged proteins with trimethoprim PROTACS	9/1/2023	6/30/2027	UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA	PA	594,898	376,900	217,998	594,898
Development of LED-Assisted NMR Technologies for the Atomic-Resolution Analysis of Medically Relevant Biomolecules in Solution at Submicromolar Concentration	9/8/2018	8/31/2027	UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON	WI	568,967	451,276	117,691	568,967
Development of a Structurally Interacting RNA (sxRNA) technology	1/1/2018	12/31/2023	SUNY POLYTECHNIC INSTITUTE	NY	567,247	369,542	197,705	567,247
Automated, optimized, intelligent data collection for cryo-EM	9/22/2021	6/30/2025	SCRIPPS RESEARCH INSTITUTE, THE	CA	553,534	447,446	106,088	553,534
Development of Cryo-EM/TEM Technologies for Small Protein and RNA Systems	1/1/2018	12/31/2023	PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, THE	PA	539,971	356,975	182,996	539,971
Development of Technologies for Efficient In Vivo Prime Editing	4/1/2021	2/28/2025	UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN	IL	536,345	358,030	178,315	536,345
Development of approaches to apply CRISPR/Cas9-mediated gene conversion to model complex genetic traits in mice	2/1/2023	1/31/2027	UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO	CA	521,400	330,000	191,400	521,400
Tools to probe the biophysical properties of cells	7/1/2019	3/31/2024	NEW YORK UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE	NY	508,500	300,000	208,500	508,500


©2024 CRDS 全プロジェクト支援額(183件)合計 \$65,582,640≒約72億円 (1USD=110円で換算)

図 6-1-9 米国 NIH/NIGMS 技術開発プログラム 集中的技術開発プロジェクト (採択課題) 一覧

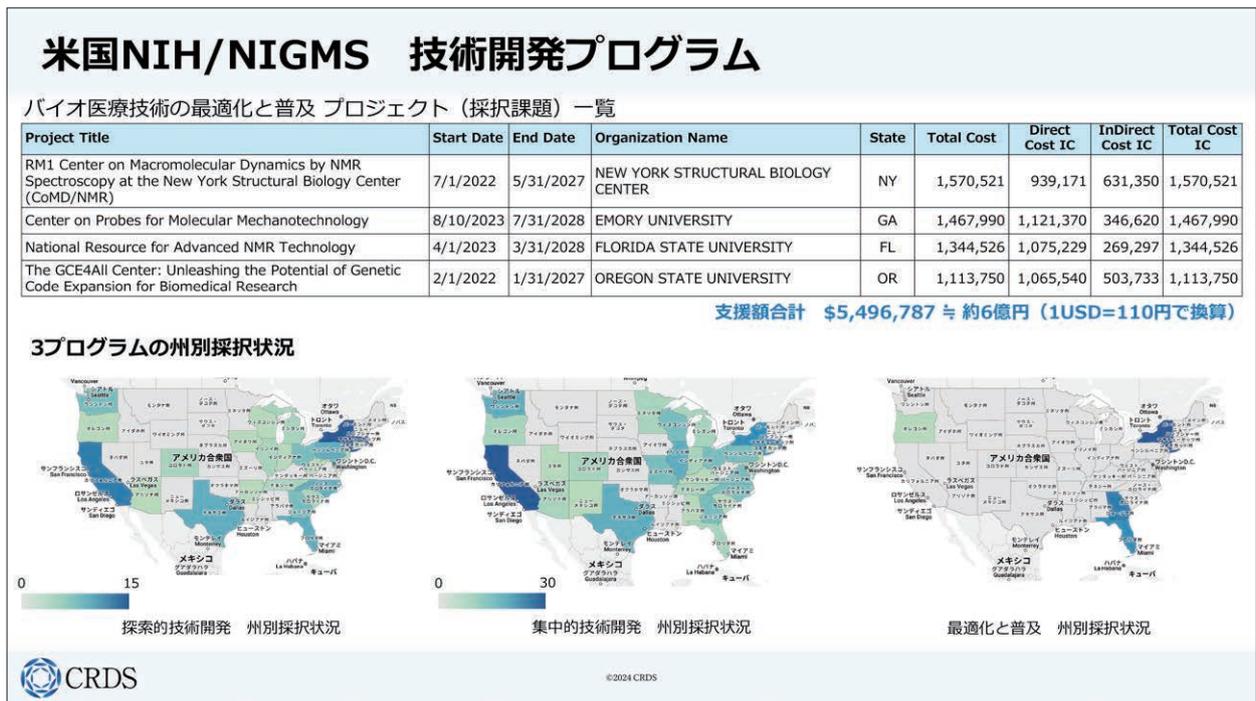


図 6-1-10 米国 NIH/NIGMS 技術開発プログラム バイオ医療技術の最適化と普及

6.2 ドイツ

ドイツでは、ドイツでの憲法にあたる連邦基本法（Grundgesetz/GG）において外交や防衛等を除き特に定めのない限り、権限の行使と任務の遂行は州の所管としている。教育と研究に関しても、原則として州が所掌するが、2014年末に連邦政府の権限を制限していた基本法第91b条¹⁴が改正された。これにより、州との合意によって連邦政府が各州と共同で若手研究者の支援等の新しい様々な措置を展開している¹⁵。

大学等における科学機器や情報技術の研究での利活用を目的としたプログラムも同様に、ドイツ研究振興協会（DFG）の「プログラム・インフラサポート部門 科学機器・情報技術グループ（WGI）」を中心に、DFG独自で実施するもののみならず、合同科学会議（GWK）や連邦政府・州政府と連携しながら複数のプログラムを実施している。

〈研究機器開発のためのプログラム〉

New Instrumentation for Research：新しい研究機器プログラム¹⁶

基礎研究で利用する新しい研究機器の開発を支援する。実験室での技術開発およびプロトタイプ開発と、新技術を研究現場へ応用していくプロセス支援という、技術・プロセスの両面での有効性を証明する”proof-of-principle”を理念としている。DFGは、本プログラムを、既存の特定研究分野を容易に対象としない、学際的プロジェクトとして焦点を当てている。

ドイツDFG 研究機器の開発・調達・利用促進ファンディング

ドイツでは合同科学会議（GWK）やDFGが、研究機器と情報技術を研究現場に導入するための資金提供プログラムを複数実施している。DFGで研究機器関連のプログラムを担当するのは主に「プログラム・インフラサポート部門 科学機器・情報技術グループ（WGI）」であり、GWKや連邦政府・州政府と共同で大学等における研究機器開発・利用促進を進めている。DFGと州政府・連邦政府の研究機器関連の予算は約4億8,000万€。

研究機器開発のためのファンディング（個人提案）

New Instrumentation for Research：新しい研究機器プログラム 2017年～

2022年度は申請数8件のうち、4件を承認。継続して実施しているものを含めると、25件のプログラムが進行中。
2022年度における総予算は研究機器調達・利用促進のプログラム（Major Instrumentation Initiatives, Core Facilities）と合わせて4,300万€。（2023年6月時点）

基礎研究で利用する新しい研究機器の開発を支援する。技術・プロセスの両面で有効性を証明する”proof-of-principle”を掲げている。助成資金は技術開発を行うための研究機器の購入、研究現場での利用をテストするデモ機の設置に活用が可能で、実施期間は3年間であるが延長も可能である。

近年の採択課題

プログラム名	開始年	大学・機関
フローサイトメトリーのパルス形状分析とマイクロバイオータサイトメトリーによるソーティング Flow cytometric pulse form analysis and sorting for microbiota cytometry	2022	リウマチ研究センター（DRFZ）（ライプニッツ協会）
野外での14CH4測定のための共振器内分光計の開発 Development of a miniturized intra-cavity spectrometer to determine 14CH4 in the field	2022	ドルトムント工科大学
NAIR-APREXIS：赤外線学のための天文フォトニック・リフォーマッター実験 NAIR-APREXIS：Astronomical Photonic Reformatter Experiment for Infrared Science	2022	マックス・プランク天文学研究所（MPIA）、ケルン大学、ポツダム天体物理天文台
ヒト皮質集団スパイクのマルチチャンネルシングルトライアルMEG - SPIKE MEG Multichannel single trial MEG of cortical population spikes - SPIKE MEG	2023	物理工学研究所（PTB）、ヘルリン医科大学シャリテ
レーザーアブレーションを用いた画像生成による3次元サンプリング装置の開発とマイクロ流体工学による生体分子のオミクス研究 Development of an instrument for image-guided 3-dimensional sampling of tissues via laser ablation for subsequent omics of biomolecules supported by microfluidics	2023	ハンブルク大学

DFG Scientific Instrumentation and Information Technology
Major Research Instrumentation Programme
©2024 CRDS
https://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/infrastructure/scientific_instrumentation/funding_opportunities/major_research_instrumentation/index.html

図 6-2-1 ドイツ DFG 研究機器の開発・調達・利用促進ファンディング

14 ドイツ基本法 91b 条 https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_91b.html（2023年9月アクセス）

15 CRDS 海外調査報告書「科学技術・イノベーション動向報告書 ドイツ編」（2023年3月）

16 DFG New Instrumentation for Research
https://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/infrastructure/scientific_instrumentation/funding_opportunities/new_instrumentation/index.html（2023年11月アクセス）

DFGから提供した資金は、新技術を開発・テストするためのパイロット機（直訳：機能モデル）設置費用、新技術を研究現場で利用した場合の有効性を証明するための実験費用として活用することが定められている。実験が成功すれば、新しく開発した研究機器を実用可能なデモンストレーター機として設置し、ユーザー利用により初期成果を得るためのパイロット・プロジェクトとフォローアッププロジェクト実施に向けて資金を要求することができる。実用可能なデモンストレーター機をすでに開発している場合は、開発した新技術を研究に使用するための実用試験を目的としたプロジェクトに直接申請することも可能である。

2022年度は、申請数8件のうち4件を承認した。

(目的)

- 研究コミュニティ全体に利益をもたらす全国的な機器ベースの研究インフラの改善を達成すること。
- ある分野の研究機器を、別の研究分野での使用を目指して開発・構築することで分野を超えた新しいアプローチを進め、その試みにより新たな研究分野を見出すこと。
- 分野横断的なアプローチを検証することで、研究上の未解決の疑問に答えるための探索的な方法を見出すこと。

(対象者)

- ドイツ国内の研究者、または博士号を修了したドイツの研究機関に所属する海外在住の研究者。
- マックス・プランク協会、フラウンホーファー協会、ヘルムホルツ協会、ゴットフリート・ヴィルヘルム・ライブニッツ協会の研究所および会員機関の職員、公的資金による基礎研究を受けているこれらの団体に関連する研究機関のメンバー、ドイツ国内の国際的な研究基盤施設のメンバー。
- 営利法人や、研究成果を一般にアクセス可能な形で直ちに公表できない機関に勤務している者は、プロジェクトに応募する資格はない。

(助成期間)

- 当初最長3年間。申請は随時受付。
- プロジェクトが進めば、更新を申請することが可能。

(プロジェクト申請のための要件)

- 本プロジェクトで開発する機器の規模を考慮のうえ、学内で一定の作業場・実験施設・ラボスペース等が確保可能であること。
- 大学以外の、民間企業・サービスプロバイダー等の第三者機関への業務委託は、正当な理由がある場合にのみ例外的に許可する。

(プロジェクトで得た成果の取扱い)

- プロジェクト実施やデモンストレーター機の利用を通じて得たすべての知見・知識は、申請者の自己負担での特許申請により保護できる。
- ただし、開発した機器は科学コミュニティがアクセスできる状態を整えておく必要がある。公的資金によって研究活動に取り組んでいる第三者が、無料で利用できる環境を整えること。
- pre-competitive フェーズにおいて、産業界等（共同開発の資金源が公的資金以外の協力者）との連携によってデモンストレーション機からプロトタイプ機へと発展的に開発を進める場合、知識移転を目的としたDFGのプログラムへの申請が可能である。

(提案書への記載事項)

- 開発する研究機器によって、将来どのような新しい研究アプローチが可能になるか、また、その使用によってどのような新しい科学的知識が得られるか。
- 新しい研究機器のアイデアは市販されている既存の機器と一線を画すものでなければならない。既存技術との違いは何か。
- 精度・感度・分解能・エネルギー効率・使いやすさ等、既存の技術・装置の高度化に関する申請は原則受け付けない。
- 開発する研究機器の基盤となる方法または技術について、新規性は何か。
- 新しい研究機器は、研究のどこで、どのように使用されるのか。
- 開発する研究機器の利用によって、研究課題はどのような新たな答えを得られるか。
- 研究上の疑問に対してどのような新たな答えが得られると期待され、もたらされるか。
- デモンストレーターの開発および試験、あるいは研究室での主要な実験の実施によって、すでに新しい科学的結果が生まれているか？
- キャリアの初期段階にある研究者がプロジェクトに参画する場合、研究機器開発に携わることでどのような恩恵を受けるか。

(助成の対象)

- 人件費
- 研究機器開発に必要な部品、コンポーネント、消耗品、デモンストレーター機の設置、開発、試験費
- 各プロジェクト特有のニーズに合わせて実験室を拡張するための特別な部品や補助装置、それを拡張するための特別な部品や補助装置
- ワークショップおよび製造費用（材料および部品）
- プロジェクトに特に必要なソフトウェアまたはソフトウェア開発のための費用
- 申請者自身のラボでは設計・製作できない特殊部品の設計・製作を外部に依頼する場合の費用
- 申請者自身のラボや施設（直訳：ワークショップ）で設計または製作できない場合
- 開発プロジェクト参加者間の会合のためのワークショップ・イベントおよび旅費
- 開発プロジェクト参加者間の会合または新しい研究用デモンストレーター機の試験
- プロジェクト関連の出版費用
- 中核支援（中核機器の交換または保守を含む）
- コンピューターまたは関連ITコンポーネント（装置の操作に必要な場合を除く）
- 営利企業に委託された設計研究または開発作業

(自主資源の確保) (自己資金拠出)

- 申請者または申請者が所属する研究機関は、人的・物的資源・工作室（ワークショップ）や実験施設など、研究機器開発プロジェクトの実施にあたり必要な基本的設備を提供する必要がある。
- 各研究機関は、自組織が所有するリソースが提供可能であることを提案書で示す必要がある。
- 開発する機器が、機器による長期的・地域的な研究基盤の確立を目的に含む場合、開発の継続と研究基盤の持続を実現できる機関を共同機関もしくは後援機関として提案できると良い。

(2022年・2023年に開始したプログラム)

- フローサイトメトリーのパルス形状分析とマイクロバイオータサイトメトリーによるソーティング（ライブニッツ協会 リウマチ研究センター）
- 野外での14CH4測定のための共振器内分光計の開発（ドルトムント工科大学）

- NAIR-APREXIS : 赤外線学のための天文フォトニック・リフォーマッター実験 (マックス・プランク天文学研究所、ケルン大学、ポツダム天体物理天文台)
- ヒト皮質集団スパイクのマルチチャンネルシングルトライアルMEG : SPIKE MEG (物理工学研究所、ベルリン医科大学シャリテ)
- レーザーアブレーションを用いた画像生成による3次元サンプリング装置の開発とマイクロ流体工学による生体分子のオミクス研究 (ハンブルク大学)

2021年度以前より継続して実施しているものを含めると、計25件のプログラムが進行中である。

開発課題例

ドイツDFG 新しい研究機器プログラム

進行中プログラム

プログラム名	開始年	大学
Development of an ion beam sputtering process for 2 meter optics in astronomy - IBS2000	2021	レーザーセンターハノーバー
Next Generation OH Suppression Fiber Bragg Gratings: towards Operation on Sky	2021	フリードリヒ・シラー大学イエーナ、ポツダム天体物理天文台
Follow-up proposal 2nd phase: Mobile Magnetic Resonance Sensor utilizing a superconductive coil for prepolarisation in the near subsurface (MORE SPIN)	2021	ドイツ連邦地球科学天然資源研究所、ライプニッツ応用地球物理学研究所、ライプニッツ光技術研究所
HELIOS - Developing a HELium Imaging Oncology Scanner for Range Guided Radiotherapy (RGRT) for Non-Small Cell Lung Carcinoma (NSCLC)	2021	ドイツがん研究センター(DKFZ)
High-frequency four-tip scanning tunneling microscope in ultrahigh vacuum	2021	アーヘン工科大学、ユーリヒ総合研究機構ペーター・グリュンベルク研究所
An Open Source Next-Generation Maskless Array Synthesizer for Biological Photolithography and Applications in Ultra-Large-Scale Nucleic Acid Synthesis	2021	ライプニッツ食品システム生物学研究所
Development of a high-energy-, high-spatial-, and high-momentum-resolution electron energy loss spectrometer with liquid-Helium cooling stage (HR3-EEL spectrometer)	2021	ライプニッツ固体・材料研究所
High-Power Diffusion Probe for Human Breast MRI - Phase 2	2021	ドイツがん研究センター(DKFZ)、フライブルク大学医療センター
Fiber-coupled Raman spectroscopy for efficient vapor-liquid equilibria characterization: RaceVLE	2021	アーヘン工科大学
Design and Development of an Unconventional Roller Test-rig for the Investigation of Rolling Contact Fatigue and Wear Phenomena in Railway Wheels and Rails	2021	アーヘン工科大学

©2024 CRDS

図6-2-2① ドイツDFG 新しい研究機器プログラム 進行中プログラム

ドイツDFG 新しい研究機器プログラム 		
進行中プログラム		
プログラム名	開始年	大学
From proton to deuteron relaxometry: The next generation of field-cycling NMR relaxometers	2019	バイロイト大学
Neues Forschungsgerät zur Untersuchung der Zahnradchadensart Zahnflankenbruch im Analogieversuch	2018	アーヘン工科大学
Vollspektroskopisches Timepix3 CT-System für Untersuchungen von Materialien auf mesoskopischer Skala	2020	アルベルト・ルートヴィヒ大学フライブルク、 フラウンホーファーエルンスト・マッハ研究所
Laser microscope for investigating the elasticity of cells using the stimulated scattering of acoustic and optical waves	2019	ドレスデン工科大学
New approach for an optical biopsy in melanoma diagnostics	2020	ロストック大学、ハノーファー大学
Construction of a Fiber-Scanning Tunneling Microscope for an Optical Investigation of Surfaces at Atomic Length Scales	2020	カール・フォン・オシエツキー大学オルデンブルク
Brushalyze - Understanding the tooth brushing process all along: New research device for multi-sensorial detection and intelligent analysis of tooth brushing	2020	コストゥス・リービヒ大学ギーゼン、 カッセル大学、 ギーゼン・フリードバーク専門大学
Endoscopic laser-based 3D imaging for clinical real-time analysis of the human larynx	2020	エアランゲン大学病院 フリードリヒ・アレクサンダー大学エアランゲン=ニュルンベルク
Compact, deadtime-free, stray-field NMR sensor	2021	シュツットガルト大学 材料試験研究所
Nanosecond Ultra-Rapid Freeze Quenching for Time-resolved Structural Biology	2021	ヨハン・ヴォルフガング・ゲーテ大学フランクフルト・アム・マイン
2020年に新しい研究機器プログラムに採択されていた High-throughput Alloy Development for Additive Manufacturing via 3D-Extreme High-speed Laser Material Deposition (3D-EHLA) 3D超高速レーザー蒸着溶接(3D-EHLA)を使用した積層造形(AM)プロセス用のハイスループット合金素材開発 は、Major Instrumentation Initiativesに移行。  CRDS ©2024 CRDS		

図 6-2-2 ② ドイツDFG 新しい研究機器プログラム 進行中プログラム

新しい研究機器プログラムでの開発に加え、利用促進のためのファンディングを複数実施している。

Major Research Instrumentation Programme (主要研究機器助成プログラム)(研究機器プログラム)

基本法第91条b項にもとづき、大学における研究設備の購入費用の50%をDFGが負担する。対象機器は、合同科学会議(GWK)で採択された「研究棟、大規模施設、国立高性能計算機に関する実施協定(AV-FGH)」を基準とする。

State Major Instrumentation (州の主要機器)

(概要)

DFGが州政府の代理で大学および大学病院における主要な装置に関する提案を審査する。対象は、州または大学が資金を提供する、研究・トレーニング・教育・臨床・またはそれらを組み合わせた使用を目的とする主要機器である。本プログラムではITシステムも対象機器に含み、直接的または間接的に、同様の使用目的で利用される場合に申請が可能である。DFGの評価結果が良好であることが、調達の前提条件となる。なおDFGは、このプログラムにおける機器の資金調達には関与しない。

このプログラムにおける「主要な機器」の定義

- 「主要な機器」には、アプリケーション機能を保持するための付属品など、構成品の全てを含む。付属品は、ソフトウェアを含む機器の基本設備一式に接続されるものである必要があるが、操作に直接必要でない方法論や、測定技術の拡張・補足を含むことは可能。
- 建設工事や改修工事は設備の一部とみなされず、審査の対象外となる。
- 一般的なITコンセプトは、具体的な投資を含む場合に審査の対象となる。ITネットワークに関する提案は、純粋なインフラ投資でないものに限り審査の対象となる。

Equipment in DFG Programmes (DFGプログラムにおける機器の購入)

研究プロジェクトの遂行のために必要で、各機関が所有していない(各機関のコアサポートには含まれない)機器を購入するための資金を提供する。DFGの研究費への申請は毎年数百件あり、その中には機器購入に関する要望が含まれているものもある。機器購入が必要な研究プロジェクトを申請する場合、機器の科学的必要性に加えて、申請者の所属機関が機器の設置・運用に必要な環境を整えられることを示す必要がある。本枠組みは、機器の購入のみを要求する申請は受け付けない。

Major Instrumentation in Research Grant Proposals (大型機材)

機器購入申請の対象は、5万ユーロ以上の機器。各助成プログラムの通常審査を経て、審査を通過すれば、科学機器・情報技術委員会(Committee on Scientific Instrumentation and Information Technology)によって、機器の方法論や技術的側面から機器購入について審査する。DFGの合同委員会が最終決定する。

Purchasing of Research Equipment (科学機器の調達)

1万ユーロ以上の機器は全て、申請者と協議のうえ、DFGの中央調達事務所(ZBS)が購入する。購入した機器は申請者に貸与する、もしくは機関に所有権を譲渡する。申請者が所属を別機関に移す場合には、機器も同様に移転可能である。

Repair of Equipment on Loan (貸与品の修理)

DFGから貸与した機器を利用する場合、購入時の保守契約では対応出来ない大規模な修理が必要となれば、修理費用を申請できる。小規模の修理の場合は、研究費用から振り替えることも可能である。いずれも事前にDFGの承認を得る必要があるが、費用が600ユーロ未満の修理であれば、承認は不要。

Major Instrumentation in Research Buildings (研究棟の機器整備) ドイツ基本法第91条b項

一律なインフラとして大学の研究に欠かせない研究棟の新築・改築・増築も含めた整備について、基本法第91条b項にもとづき州政府と連邦政府が共同で資金を提供する。州から科学審議会(Wissenschaftsrat)に申請を行い、審査に通過した提案を科学審議会が合同科学会議(GWK)に推薦するフローで支援先を決定する。2024年は、以下6件のプロジェクトに対し研究棟整備の共同助成を行うことを決定した。

表6-2-1 Major Instrumentation in Research Buildingsプログラムの2024年助成対象

助成先	交付額
アーヘン工科大学 Zentrum zur Erforschung von Phasenübergängen Chronischer Erkrankungen (ZPCE) 慢性疾患の病理的転移研究センター	
ベルリン・シャリテ医科大学/ベルリン自由大学 Berlin Center for the Biology of Health (BC-BH)	5,440万€
クリスティアン・アルブレヒト大学キール Archaeological Research Centre of Past Lived Worlds (ARCWorlds)	
ハイデルベルク大学 分子システム工学・先端材料研究所 Life-inspired Engineering Molecular Systems (LEMS)	6,840万€
ミュンヘン工科大学 ロボット工学・機械知能研究所(MIRMI) TUM Center for Embodied Laboratory Intelligence (ELI)	5,100万€
フリードリヒ・アレクサンダー大学 エアランゲン=ニュルンベルク AI-based Real-time Medical Diagnostics and Therapy (CARE-MED)	4,200万€

ドイツDFG 研究機器の開発・調達・利用促進ファンディング

研究機器調達・利用促進のためのファンディング (共同提案)

プログラム名	プログラム概要	支援額	2022年度の予算実績・採択件数
Major Research Instrumentation Programme: 研究機器プログラム	大学 (Hochschulen) の主要な研究機器の購入費用のうち50%をDFGが負担し、残りの50%は、連邦政府と州政府の予算から提出。	大学の場合20万~750万€ 応用科学大学の場合10万~750万€	総額 1億8,060万 (うちDFGは9,500万€を負担) 264件
State Major Instrumentation : 州の主要機器	public universitiesや大学病院が、研究・トレーニング・教育・臨床等に用いる機器を調達する際、連邦州の代わりにDFGが購入機器の審査を行う仕組み。	総合大学 (Universitäten) および大学病院が20万€以上 その他の高等教育機関が10万€以上	総額 2億4,680万€ 195件
Major Instrumentation in Research Buildings: 研究棟の機器整備	研究棟の新築・改築・増築も含めた整備について、州政府と連邦政府が共同で資金を提供する。プログラムの中核はGWK。DFGは審査を担う。	研究棟の支援 : 年間4億100万€ 大規模機器支援 : 年間1億7,000万€ が利用可能 → GWKの「科学と研究のための共用設備」	総額 840万€ 8件
Major Instrumentation Initiatives : 研究機器イニシアティブ	研究コミュニティからの提案に基づき、新しいコンセプトや技術をもつ機器の整備を進めるための資金を提供する。		15件 申請数は 71件 New Instrumentation for Research (新しい研究機器プログラム) と合わせて
Core Facilities : コアファシリティプログラム	コアファシリティの運営・管理体制を強化し、安定した利用体制の形成を支援するためのプログラム。	実施期間は最長5年間 年間最大15万€	5件 申請数は 7件 総額 4,300万€ 24件
Equipment in DFG Programmes : DFGプログラムにおける機器の購入	DFGから助成を受ける研究の実施にあたり必要な機器について、各機関での共有化を目指す場合、その購入資金を提供する。	補助金: 総購入額が5万€を超える機器 調達資金助成もしくは貸与: 購入資金が1万€以上の機器	
Other Funding Programmes	計測・情報技術について議論するネットワーク形成のための (円卓会議の実施にあたり) 旅費・宿泊費・コーディネート支援等の資金を助成。	WGIが扱う全プログラムで助成可能	

参考資料: DFG Scientific Instrumentation and Information Technology
https://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/infrastructure/scientific_instrumentation/funding_opportunities/major_research_instrumentation/index.html
 DFG 年次報告書2022 P.173, P.203
https://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/geschaeftsstelle/publikationen/dfg_ib2022.pdf

(2023年6月時点)

©2024 CRDS

図6-2-3 ドイツDFG 研究機器の開発・調達・利用促進ファンディング

6.2.1 参考 ドイツにおける研究棟・機器の整備

ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

Gemeinsam für Wissenschaft und Forschung (Together for science and research) (科学と研究のために共に)

ドイツ連邦政府と州政府は、2007年より共同で大学の研究設備への投資を行っており、これまでに計200件、総額約66億€の資金提供を実施している。2018年の11月には、GWKが「大学における研究棟、大型設備、ハイパフォーマンスコンピュータへの共同資金提供に関する実施協定(AV-FGH)」を定め、大規模研究投資プロジェクトとして、研究棟には年間4億100万€、大型設備には1億7,000万€の支援を継続することを決定した。

2024年には、質の高い研究を促進するための各地域の重要な大学(研究棟)として、下記の研究施設への支援を行う予定である。

アーヘン工科大学
Zentrum zur Erforschung von Phasenübergängen Chronischer Erkrankungen (ZPCE)
 慢性疾患の病理的相転移研究センター

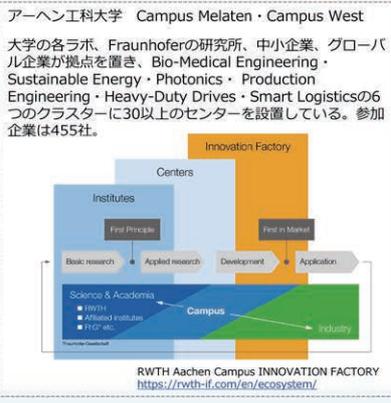
延床面積約8,600m²の研究棟をメラテンキャンパスに設立予定。施設としての使用可能エリアは約4,000m²で、うちウェット実験室スペースが40%、計算科学・バイオインフォマティクス用ラボを含むオフィススペースが60%となる見込み。計220人の研究者・学生が入居予定で、2025年末に完成予定。

バイオハイブリッド医療システムセンター(CBMS)やバイオメディカル・エンジニアリング・センター(ZBMT)とも隣接しており、生体工学に関する研究のさらなる発展を目指して建設する。

RWTH Aachen Campus
<https://www.rwth-campus.com/aktuelles/pressemitteilungen/weiterer-meilenstein-in-der-medizinischen-forschung-und-ausbildung/>
https://ausschreibungen-deutschland.de/1043485_Tragerwerksplanung_fuer_Neubau_Zentrum_zur_Erforschung_von_Phasenuebergaengen_Chronischer_2023_Aachen



生体工学クラスターに建設中の研究・科学・トレーニング用施設。建設費総額は5,000万€ (連邦州からの支援額は不明)



アーヘン工科大学 Campus Melaten・Campus West
 大学の各ラボ、Fraunhoferの研究所、中小企業、グローバル企業が拠点を置き、Bio-Medical Engineering・Sustainable Energy・Photonics・Production Engineering・Heavy-Duty Drives・Smart Logisticsの6つのクラスターに30以上のセンターを設置している。参加企業は455社。

RWTH Aachen Campus INNOVATION FACTORY
<https://rwth-if.com/en/ecosystem/>

©2024 CRDS

図6-2-4① ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

ベルリン・シャリテ医科大学/ベルリン自由大学
Berlin Center for the Biology of Health (BC-BH)
ベルリン健康生物学センター

2024年から2028年にかけて旧衛生微生物研究所を改修し設立する。改修によって分野を超えた生命科学の再考を実践する。研究棟エリアは約3,200㎡で、初期セットアップと主要機器を含めた**設立コストは5,440万€**である。**建設費はベルリン州と連邦政府が半半ずつ出資**。運営費は使用割合に応じて、シャリテ大学が約70%、FUベルリンが約30%を負担する。



旧衛生微生物研究所
@ベルリン・シャリテ医科大学



改修後の施設には、17のワーキンググループと8つのジュニア研究グループに所属する約150人の研究者・職員が入居可能。

Charité – Universitätsmedizin Berlin Press release 21.04.2023
https://www.charite.de/service/pressemitteilung/artikel/detail/der_gesunde_mensch_berlin_centre_for_the_biology_of_health/

クリスティアン・アルブレヒト大学キール
Archaeological Research Centre of Past Lived Worlds (ARCWorlds)
過去世考古学研究センター

市・州・大学合同の都市開発計画を発端とした“Kiel.Science.City”プログラムの一環で、大学の**新キャンパス**を設立する。その敷地内に同センターを設立予定。

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel University news
<https://www.uni-kiel.de/de/detailansicht/news/193-bremerkamp>



©2024 CRDS

ハイデルベルク大学 分子システム工学・先端材料研究所
Life-inspired Engineering Molecular Systems (LEMS)
生命触発分子工学システム

生命にインスパイアされた分子システムに基づく革新的な工学科学戦略と技術を開発し、工学科学、自然科学、生命科学の接点となる革新的研究プログラムを実行するための場として、約3400㎡の敷地に**新棟**を設立。

(研究課題)

- ✓ 生細胞を用いた新しい機能的構造のモデル化技術の開発と実装
- ✓ マイクロ・ナノレベルでの細胞と合成材料との相互作用の実現
- ✓ ポリマーをベースにした活性材料の開発
- ✓ 3次元オルガノイドの工学的制御による改変免疫細胞や合成細胞の生産

また、高分子・合成DNA・人工ゲノム製造のためのプラットフォーム細胞や物質特性を極小スケールで可視化するイメージング・プラットフォーム個々の細胞のプロテオームを解読するためのプラットフォームの整備も予定しており、その他さまざまな大型装置も設置予定。

建設と設備にかかるコストは約6,840万€。半分は連邦政府が、残りの半分はバーデン・ヴュルテンベルク州が負担する。2024年着工予定。

Universität Heidelberg Newsroom
<https://www.uni-heidelberg.de/de/newsroom/neuer-forschungsbau-fuer-das-engineering-von-lebensinspirierten-molekularen-systemen>

Universität Heidelberg Institute for Molecular Systems Engineering and Advanced Materials
<https://www.imseam.uni-heidelberg.de/>

図6-2-4② ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

ミュンヘン工科大学 ロボット工学・機械知能研究所 (MIRMI)
TUM Center for Embodied Laboratory Intelligence (ELI)
ラボIntelligence統合センター

「ELI AI」が実験者とコミュニケーションをとることで科学研究のプロセスを提案し、実験の設計と実行の自動化を目指す。研究課題に対するソリューション提供とともに、ラボのプロセスを自動化し、AIによる新たな知識創造に取り組む。

(構想中の研究課題)

- ✓ ナノ/マイクロスケールのロボット工学により人の体内の組織粒子の切り出しと分析を可能とするマイクロマシンの実現
- ✓ 走査電子顕微鏡やナノプリンタ等の実験機器を操作可能なマクロロボットによる、試料セッティングや顕微鏡観察といった研究者のタスク軽減

センター設立にあたり州が約5,100万€を提供。

2024年にセンターの建設を開始し、完成および稼働は2028年の予定。新棟はカーヒングキャンパスに設立し、50~60人の研究者を含む約70~80人を採用する見込み。



Munich Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI) Technical University of Munich News 04.05.2023
<https://www.mirmi.tum.de/en/mirmi/news/article/neues-tum-center-tum-eli-erster-ki-experimentierraum-fuer-automatische-wissensgenerierung/>



©2024 CRDS

フリードリヒ・アレクサンダー大学 エアランゲン=ニュルンベルク
AI-based Real-time Medical Diagnostics and Therapy
AIによるリアルタイム診断・治療センター (CARE-MED)

CARE-MED (別名トランスレーショナル・リサーチ・センター；TRC III)により、画像診断、センサー技術、医療データサイエンス、先進的なAIが、患者の治療や協力研究機関と空間的に直結する。マルチモーダルAIによるヘルスケア研究に取り組む世界初の統合拠点となる。

5階建て、約1500㎡の研究棟に約100人の研究者が入居可能。2028年までに完成予定で、州に承認された建設費用は約4,200万€。

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg News May 2, 2023
<https://www.fau.eu/2023/05/02/news/42-million-euros-approved-to-fund-new-research-building-on-fau-campus-erlangen-north/>

2大学に対し**バイエルン州科学・芸術省より合計9,360万€**を措置

バイエルン州の2大学でAI研究を基盤とした研究棟の整備が進み、連邦州から資金提供を受ける地域としてはドイツ内でトップにある。Markus Blume科学相は、イノベーション創出拠点の中心地としてミッションに取り組んでいく方針を示している。

Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst. Pressemitteilung Nr. 35 vom 27.04.2023
<https://www.stmwk.bayern.de/pressemitteilung/12650/nr-35-vom-27-04-2023.html>

図6-2-4③ ドイツGWK 研究インフラ整備のための支援

6.3 欧州連合 (EU)

欧州では各国単位の施策のほかに、EUにおいて研究機器の開発・導入・利用を促進するプロジェクトや助成を行っている。これらの取り組みを支える主要政策が、7年単位の研究枠組みプログラムである Horizon

Europeである¹⁷。Horizon Europeは、EU加盟国を対象に複数年にわたり研究助成を行う枠組みプログラム (Framework Programme : FP) において、2021年より2027年までの計画で推進中。予算は第一の柱：最先端研究、第二の柱：社会的課題解決と欧州の産業競争力強化、第三の柱：市場創出、の三本の柱を軸に構成している¹⁸。

Horizon Europeの全体構成と予算内訳 (予算単位：€)						
第一の柱 (最先端研究) 「卓越した科学」	250億	第二の柱 (社会課題解決) 「グローバルチャレンジ・欧州の産業競争力」	535億	第三の柱 (市場創出支援) 「イノベーション・ヨーロッパ」	136億	
欧州研究会議 (ERC)	160億	6つの社会課題群 (クラスター) ・健康 ・文化、創造性、包摂的な社会 ・社会のための市民安全 ・デジタル、産業、宇宙 ・気候、エネルギー、モビリティ ・食料、バイオエコノミー、資源、農業、環境	515億 (82億) (23億) (16億) (153億) (151億) (90億)	欧州イノベーション会議 (EIC)	101億	
マリー・スクウォッドフスカ・ キュリー・アクション (MSCA)	66億		欧州イノベーション・エコシステム	5億		
研究インフラ	24億		共同研究センター (JRC)	20億	欧州イノベーション・技術機構 (EIT)	30億
参加拡大と欧州研究圏 (ERA) 強化					34億	
参加拡大とエクセレンス普及			30億	欧州研究・イノベーション (R&I) システムの改革・強化		4億
合計					955億	

CRDS 海外調査報告書「EUの研究・イノベーション枠組みプログラム Horizon Europe」(2021年3月)
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/OR/CRDS-FY2021-OR-02.pdf>

©2024 CRDS

図 6-3-1 Horizon Europeの構成と予算内訳

ここでは主に第一の柱「卓越した科学」の、ERCと研究インフラのプログラムからの助成によって実施しているプロジェクトを取り上げる。FPの第8期 (FP8：2014年～2020年) に実施していた Horizon 2020 から継続中のものも含めて、特定の研究機器の開発に特化したプロジェクトや、研究機器の技術開発課題を広く公募するプロジェクト等により、研究機器開発と利用の促進を幅広くサポートしている。下記はその一例で、産学で電子顕微鏡開発とその利用促進に取り組んでいるプロジェクトである。

MORE-TEM¹⁹

(MOmentum and position REsolved mapping Transmission Electron energy loss Microscope)

測定対象をマクロ～ナノスケールで観察し、熱的・弾性的・電氣的・磁氣的・光学的特性の解明など、物

17 欧州委員会の傘下には日本の省庁に相当する「総局」があり、立法・政策提案、政策の執行・実施監督、予算案の策定・執行などを担当する。科学技術・イノベーション政策を担うのは研究・イノベーション総局 (DG RTD) で、Horizon Europe の策定・実施においても主軸を担っている。また、欧州委員会の傘下に執行機関 (Executive Agencies) と呼ばれる機関が複数あり、DG RTDを始めとする各総局と連携して Horizon Europe の個別プログラムを実施している。

18 CRDS 海外調査報告書「EUの研究・イノベーション枠組みプログラム Horizon Europe」(2021年3月)
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-OR-02.html>

19 European Commission CORDIS EU research results
<https://cordis.europa.eu/project/id/951215> (2023年11月29日アクセス)

質の機能の追求により発展する物性物理学において、計測の分解能の向上は新たな発見のための鍵であり、最大の課題である。本プロジェクトでは、電子顕微鏡・光電子分光法・実験および理論科学の研究グループを結集し、電子エネルギー損失分光（EELS）法との併用による世界初の分解能をもち、700Kから4Kの温度領域で運動量・位置分解マッピングが可能な透過型電子顕微鏡（TEM）の開発に取り組む。より低価格の研究機器として提供できるよう技術を実装することで、物理学だけでなく材料科学・環境科学など広範な分野での利用を見込んでいる。

表 6-3-1 透過型電子顕微鏡 MORE-TEM プロジェクト（Horizon Europe）の概要

実施期間	1 May 2021 - 30 April 2027		
予算額	€13,999,105.95 (約18億円 ※1ユーロ129円で換算) (2021年9月時点)		
プログラム	H2020-EU.1.1. - EXCELLENT SCIENCE - European Research Council (ERC)		
参画機関・国・European Commissionからの助成額	ウィーン大学 ※ホスト機関	オーストリア	€ 8,204,403
	ローマ大学 ラ・サピエンツァ	イタリア	€ 1,935,113
	大阪大学	日本	€ 1,827,116
	CEOS GmbH	ドイツ	€ 2,032,473

IMPRESS^{20,21}

(Interoperable electron Microscopy Platform for advanced REsearch and Services)

相互運用可能なハードウェアとソフトウェアを開発し、最先端TEMのオープンプラットフォームを構築する。革新的なTEMプラットフォームによる、利用者層の拡大・シームレスな利用環境の構築・企業のビジネスチャンス創出を目的としたプロジェクトである。例えば、標準化様式に基づいたカートリッジを開発すれば、TEM装置内部の試料の移動が自動化できる。そのカートリッジを全メーカーのTEMで利用可能な仕様とし、さらにTEM以外の試料調製装置・特性評価装置にもセット出来るのであれば、ユーザーはより効率的に実験を行えるようになる。IMPRESSは、研究者のニーズに応じた、多様な実験環境に柔軟に適応するTEMの開発と、利用環境の構築を目指している。

表 6-3-2 電子顕微鏡プラットフォーム IMPRESS（Horizon Europe）の概要

実施期間	1 February 2023 - 31 January 2027		
予算額	€ 9,633,918.75 (約14億円 ※1ユーロ149円で換算) (2023年5月時点)		
プログラム	HORIZON.1.3 - Research infrastructures HORIZON.1.3.3 - The innovation potential of European Research Infrastructures and activities for Innovation and Training		
参画機関・国・European Commissionからの助成額			

20 European Commission CORDIS EU research results
<https://cordis.europa.eu/project/id/101094299> (2023年11月29日アクセス)

21 impress <https://e-impress.eu/> (2023年11月29日アクセス)

Research and Technology Organisations	イタリア学術会議 (CNR) ※Coordinator	イタリア	€ 1,033,572
	ユーリッヒ研究センター (FZJ)	ドイツ	€ 3,751,460
	フランス国立科学研究センタ (CNRS)	フランス	€ 860,556
	Area Science Park	イタリア	€ 622,207
	ライプニッツ 固体・材料研究所 (IFW Dresden)	ドイツ	€ 509,676
	カタロニア ナノサイエンスおよびナノテクノロジー研究所 (ICN2)	スペイン	€ 210,000
Universities	アントウェルペン大学	ベルギー	€ 552,373
	マーストリヒト大学	オランダ	€ 224,105
	ノルウェー科学技術大学 (NTNU)	ノルウェー	€ 174,530
	グラーツ工科大学	オーストリア	€ 106,635
	The Chancellor Masters & Scholars of The University of Oxford	英国	€ 0
Research Infrastructures	欧州極限光科学拠点 (ELI ERIC)	チェコ	€ 172,000
	Synchrotron SOLEIL	フランス	€ 169,229
	Central European Research Infrastructure Consortium (CERIC-ERIC)	イタリア	€ 131,938
	シンクロトロン光科学コンソーシアム (CELLS) ALBA	スペイン	€ 128,750
	Euro-Bioimaging	フィンランド	€ 53,125
Small and Medium-Sized Enterprises	Promoscience s.r.l.	イタリア	€ 220,625
	Corvers Procurement Services	オランダ	€ 203,750
	CEOS GmbH	ドイツ	€ 145,500

Third Partyとして、上記に加えて5機関が参画している。

欧州における研究機器関連施策は多岐に渡り、特に研究インフラの構築は Horizon Europe の取り組みだけでなく多様な活動が存在する。一方で、欧州一体での研究インフラの開発や運用は、各国の予算を圧迫するとの問題提起もあり、長期的な持続可能性の担保が課題とされる。

世界クラスの持続可能な欧州研究インフラに向け、ECはEU諸国やFP参加諸国との連携により、戦略を定義・評価・実践する役割を担っている。重複する業務の削減・資源のプール・プロセスの標準化など、欧州一体の研究インフラに関する戦略的な目標が、ESFRI Roadmapの策定プロセスの確立といった、中長期的に科学コミュニティのニーズに応える仕組みづくりに貢献している。

研究インフラ欧州戦略フォーラム (ESFRI) は、EU加盟国・準加盟国が参画する研究インフラのフォーラムであり、欧州の10～20年後の研究活動を見据え、それに必要な研究開発施設の整備のためのロードマップを策定している。2006年にロードマップの初版として「ESFRI Roadmap 2006」を発表し、35プロジェクトを提案した。その後、2008年、2010年、2016年、2018年と継続的に更新・発表しており、2021年に第6版を公開している。

6.4 中国

中国における研究機器開発に関連する政策としては、第13次五カ年計画（十三五）のもと、2016年より科学技術部（MOST）が『「主要科学機器開発」重点特別プロジェクト』を実施してきた。そして2021年度以降は国家重点プロジェクト「基礎研究環境および主要科学機器開発」として実施している。

MOSTにおける「科学機器は、科学研究と技術革新の基礎であり、経済的・社会的発展と国防・安全保障のための重要な保証である。」との前提のもと、科学機器の自国開発能力と技術レベルを戦略的に強化し、イノベーション主導の開発を行うことを掲げている。

プロジェクトの目的は、全国的な科学機器開発の発展のための「機器原理の検証→主要技術開発（ソフトウェアとハードウェア）→システム統合→応用実証→産業化」のシステムの構築による、研究活動と産業展開の活性化である。

国家重点プロジェクト「基礎研究環境および主要科学機器開発」^{22,23}

(概要)

研究環境の構築およびそのための主要科学機器の機能向上を目的に、科学機器の開発に取り組む。科学機器、試薬、実験動物、科学データなどの科学研究設備・手法・ツール等を自ら開発し、イノベーション創出を強化する。2025年まで公募予定。各テーマの実施期間は原則3～5年としている。2021年度の推定予算総額は5億3,900万元である。

(対象とするテーマと目標数)

2021年度から2023年度までは、科学機器・科学研究試薬・実験動物・科学データの4分野を指針とした公募を行っており、以下のようなテーマが対象となっている。

表6-4-1 中国国家重点プロジェクト「基礎研究環境および主要科学機器開発」の対象課題

分析機器、分光装置、物性測定機器、電子測定機器等のハイエンド科学機器全般	80種類以上
光源、検出器、プローブ、ソフトウェアプラットフォームやデータベース等の、科学機器の要素技術や周辺機器	80種類以上
ハイエンド化学試薬調製技術	100種類以上
独立した知的財産権を持つハイエンド生化学試薬	20-30種類
重要ライフサイエンス分野の精密測定技術	40-60種類
新品種の実験動物・モデル動物の確立、品質基準の制定、標準品と特殊設備の開発	1000種類以上
実験動物・モデル動物の準備と試験、実験動物福祉の倫理決定と代替の評価方法	100種類以上
加工から分析までの全チェーンの形成	
科学データ分析ソフトウェアと分野プラットフォームの処理から分析までの全連鎖の形成、および国家科学データセンターへの応用	10以上

22 中国21世紀議程（アジェンダ21）管理センター 国家重点研究開発計画「基礎研究環境および主要科学機器開発」
<https://www.acca21.org.cn/trs/000100320016/jichukeydakebeiyangfa/zhuangxianggaikuang/>

23 基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项2021年度项目申报指南

(候補プロジェクト)

科学機器・研究用試薬・実験動物・科学データの主要4分野を指針とし、2021年度から2023年度に124のプロジェクトを候補に公募を行っている。候補プロジェクトと、そのうち科学機器については達成すべき性能も併せ、公募要領に具体的に示している（付録）。

(事例など)

- 2021年に基礎研究環境および主要科学機器開発プロジェクトに採択されたプロジェクトの一つが、西安交通大学が主導している「高分解能グロー放電質量分析計（GD-MS）の開発」である。北方工業大学、中国計量科学研究院、中国科学院上海珪酸盐研究所、中国科学院、鋼鉄研究総院（CISRI）が参画しており、国から550万円の助成を受けている。イオン源、質量分析器計、マルチモードイオン検出器やその他重要コンポーネントの開発と、これらの統合による最先端の磁気質量分析計の開発に取り組む²⁴。

中国では、自国での生産能力の向上を掲げており、研究開発機器に関しては産業政策としても強化している。半導体の研究開発はその代表的な位置づけで、半導体製造装置の輸入は2018年からの3年間で急速に拡大している。輸入強化や外国企業の買収等により技術力を強化したことで、一部機器の開発販売においては、すでに中国企業は世界市場に展開しており、急成長している様子が伺える。2018年時の調査では顕在化していなかったものの、一定のシェアを獲得したことで2021年市場データで取り上げられている中国企業の一例として、下記の企業が挙げられる。

北方華創科技集団 Beijing NAURA Microelectronics Equipment Co.,Ltd. (NAURA)

2001年設立。NAURA社の成膜・膜堆積装置の2021年の売上高は約320億円であった。世界市場でのシェアは1.6%であるが、拡大が予測される。主力製品はCVD装置やALD装置で、加えて2017年8月には米国の洗浄装置メーカー、Akrion Systems社の買収を発表しており、取扱い製品を拡大している²⁵。

Piotech, Inc.

2010年4月設立。プラズマCVD装置・原子層堆積（ALD）装置・常圧/SACVD装置を主要製品として取り扱う。このうち、2021年市場におけるプラズマCVD装置の売上高は約120億円である。

中微半導体設備 Advanced Micro-Fabrication Equipment Inc. China (AMEC)

膜加工・エッチング装置は、米Lam Research、東京エレクトロン、米AMATの3社で約90%を占めているが、それに続くのが日立ハイテク社と中国AMEC社である。日立ハイテクの同装置売上高1,200億円・シェア5.8%、に対し、AMECは売上高約340億円・シェア2.4%と、迫っている。

Hwatsing Technology Co., Ltd

国家戦略「京津冀一体化（北京市、天津市、河北省）」のもと、天津市政府と清華大学によって設立した企業で、中国のCMP技術と設備の産業化を推進している²⁶。2013年設立。2021年時点で、グローバル市場でのCMP装置の販売額は68億円、切削・研磨・接合装置の機器分類におけるシェアは1.3%である。

24 北方工業大学電気与控制工程学院 大学ニュース「我校获批国家重点研发计划“基础科研条件和重大科学仪器设备研发专项”课题」2021年12月14日 <https://dqgc.ncut.edu.cn/info/1124/3941.htm>

25 NAURAプレスリリース「北方華創微电子与美国Akrion公司正式签署并收购协议」2017年8月7日

26 清華大学天津高端裝備研究院 Incubated Enterprises Tianjin Hwatsing Technology Co.,Ltd <https://en.tsinghua-tj.org/intro/130.html>

6.4.1 付録 中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」 2023年度対象プロジェクト^{27,28}

中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」2023年度対象プロジェクト

【科学機器】

1. ハイエンド一般科学機器のエンジニアリングと応用開発

1.1 超高分解能静電イオントラップ型フーリエ変換質量分析計	1.29 高エネルギーレーザー放射光圧パワーメーター
1.2 超高分解能質量分析装置 (深圳省市連携プロジェクト)	1.30 光ファイバー周波数領域反射率計
1.3 高スループット核酸質量分析装置	1.31 超高分解能光ファイバスペクトラムアナライザ
1.4 超高性能液体クロマトグラフ (UHPLC)	1.32 電界放出形走査電子顕微鏡
1.5 ナノリットル液体クロマトグラフ (安徽省省間共同プロジェクト)	1.33 陽電子放出コンピュータ断層撮影・磁気共鳴デュアルモードイメージングアナライザ (深圳省市連携プロジェクト)
1.6 電子常磁性共鳴スペクトル分析装置	1.34 X線吸収微細構造解析装置
1.7 低磁場核磁気共鳴広帯域測定装置	1.35 三次元アトムプローブ精密測定装置
1.8 磁気共鳴直接神経電気イメージャー (深圳省市共同プロジェクト)	1.36 大気中放射性希ガス検出器
1.9 高スループット生体分子間相互作用測定装置	1.37 高動的燃焼場温度場・生成物分子濃度場イメージャー
1.10 ハイスループット細胞マルチパラメータイメージングアナライザ	1.38 超音波顕微鏡
1.11 ハイスループット核酸断片分析装置	1.39 磁歪アレイ超音波ガイド波検出器
1.12 循環腫瘍細胞濃縮・染色全自動検出分析装置 (青島市・省連携プロジェクト)	1.40 遠隔過渡振動計測分析装置
1.13 超高速遠心分離機	1.41 高ひずみ速度マイクロ・ナノ衝撃力学試験機
1.14 タンパク質クロマトグラフィ-精製システム	1.42 長距離レーザードップラー振動計 (深圳省市連携プロジェクト)
1.15 高感度オゾン層破壊物質連続検出装置	1.43 高精度物質内部構造・元素結合中性子分析装置 (青島市・省連携プロジェクト)
1.16 高感度・高分解能赤外線レーザー分光器 (安徽省省間共同プロジェクト)	1.44 X線光電子分光分析装置 (青島市・省連携プロジェクト)
1.17 暗・弱ターゲット高分解能紫外分光器	1.45 広範囲高真空測定器
1.18 超高分解能走査型マイクロ検出器	1.46 高性能レーザー信号シミュレーター
1.19 超高分解能レーザートムソング分光器	1.47 広帯域電磁波パノラマ受信・リアルタイム検出分析装置
1.20 超広帯域トランジェントスペクトルアナライザ	1.48 高性能テラヘルツチップテスト
1.21 空間微細孔三次元形態非接触スキャニング測定装置	1.49 超高速データ・ネットワーク・テスター
1.22 高速ハイバースペクトル蛍光顕微鏡画像分析装置 (青島省市連携プロジェクト)	1.50 多チャネルスターネットワークチェーンシミュレーションエミュレータ
1.23 大視野2光子顕微鏡 (深圳省市連携プロジェクト)	1.51 インテリジェント・ネットワーク端末用マルチパラメータ総合テスト
1.24 超高分解能光音響イメージングアナライザ (深圳省市連携プロジェクト)	1.52 半導体デバイス動的ポルトランドメトリック特性テスト
1.25 長時間・空間分解能光学・分光マイクロCTデュアルモダリティイメージャー	1.53 電磁波マルチパラメータアレイ測定器
1.26 大口径複雑表面形状高精度測定器	1.54 独立イノベーション科学機器
1.27 高分解能三次元欠陥検出器 (安徽省省連プロジェクト)	1.55 若手自主革新プロジェクト
1.28 高エネルギーレーザーマイクロスポット動特性測定機	

CRDS ©2024 CRDS

図 6-4-1 ① 中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」2023年度対象プロジェクト

【科学機器】

2. 基幹コンポーネントの開発と応用

2.1 ファインフォーカスアルゴンイオン源	2.26 超低雑音スペクトル検出器
2.2 超短パルス中性子発生装置	2.27 広視野走査型蛍光微小焦点検出器
2.3 大気圧エレクトロスプレー・アークプラズマイオン源	2.28 スペクトル干渉式膜厚測定モジュール
2.4 紫外-可視-赤外広帯域光源	2.29 小型光学拡大内視鏡プローブ
2.5 中赤外線一周波固体レーザー光源	2.30 低消費電力高温超電導量子干渉磁界検出器 (青島省市共同プロジェクト)
2.6 電子・フォノン結合超広帯域レーザー (青島省・市共同プロジェクト)	2.31 超高感度動磁力検出器
2.7 真空深紫外全固体レーザー光源 (青島省市共同プロジェクト)	2.32 広視野同軸三次元測定モジュール
2.8 200kV電界放出電子銃	2.33 高温高圧音響変換器
2.9 高安定X線源	2.34 容量性マイクロメカニカル超音波トランスデューサ・アレイ (安徽省省間共同プロジェクト)
2.10 マイクロ集光ダイヤモンド複合ターゲットX線源	2.35 超音波ドップラー三次元流れ検出器
2.11 多回路広帯域高安定高圧電源装置	2.36 多重解離反応イオントラップ
2.12 テラヘルツ帯広帯域放射線源	2.37 低リーク磁気イオンポンプ
2.13 テラヘルツ高出力ソース	2.38 低温顕微鏡
2.14 調整可能テラヘルツ放射源 (安徽省省連プロジェクト)	2.39 液体ヘリウム温度帯低振動高冷却量パルス管冷凍機
2.15 光ファイバー結合間接電子検出器	2.40 光デジタルマイクロミラーデバイス
2.16 一次元リアアレイX線検出器	2.41 高精度波長可変光学フィルター
2.17 ガンマ線飛行時間アレイ検出器	2.42 極限環境用圧電ナノプローブステージ
2.18 低消費電力・低雑音の超高速半導体検出器	2.43 電気化学流体チャンネル電極
2.19 新しい ³ He置換中性子検出器	2.44 高フラックスマイクロ流体精密ピペット
2.20 超高分解能全天球露光冷却高速度カメラ	2.45 長寿命高温プラズマ質量分析インターフェースコーン
2.21 高精度電子後方散乱回折検出器	2.46 生物学的全組織3Dイメージング前処理装置
2.22 パルス電子捕獲検出器	2.47 固体サンプリングダイレクトフィーダー
2.23 ヘリウム放電イオン化検出器	2.48 超平滑特殊反射素子
2.24 水中高圧溶存ガス検出器	
2.25 高感度デュアルチャンネルパルス式蛍光光度検出器	

CRDS ©2024 CRDS

図 6-4-1 ② 中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」2023年度対象プロジェクト

- 27 2023年度国家重点研发计划“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项
<https://opt.cas.cn/ggjszx/notice/202304/P020230420679163201081.pdf>
- 28 仪器信息网“重大科学仪器设备开发”重点专项2023项目申报指南征求意见稿发布
<https://www.instrument.com.cn/news/20230329/657928.shtml>

【研究用試薬】	【実験動物】
<p>3. ハイエンド化学試薬の開発</p> <p>3.1 ハイエンド有機元素試薬</p> <p>3.2 フロンティアハイテク高分子材料研究開発のための主要モノマー試薬</p> <p>3.3 ハイエンドマイクロエレクトロニクス産業向け超高純度配合有機試薬</p> <p>4. 主要疾患診断のためのバイオメディカル試薬の創製と応用</p> <p>4.1 多素子磁気共鳴造影剤とイメージング技術の応用</p> <p>4.2 単一細胞シーケンス関連試薬の研究開発</p> <p>4.3 高効率ドラッグデリバリーと遺伝子導入試薬</p> <p>4.4 ラマン分光法、光・音響駆動型疾患診断・治療試薬の研究開発</p> <p>4.5 X線/蛍光CT造影剤の標準化</p>	<p>6. 実験動物資源の創出と評価</p> <p>6.1 特徴的モデル動物の実験動物化に関する研究</p> <p>6.2 心臓・腎臓移植用ブタ源ドナーの標準化システムに関する研究 (海南省連携プロジェクト)</p> <p>6.3 医薬品評価モデル動物の作製と応用に関する研究</p> <p>7. 実験動物申請保証システムの構築</p> <p>7.1 実験動物福祉指標の定量化・評価技術に関する研究</p>
<p>5. 標準物質</p> <p>5.1 環境モニタリングの主要分野で緊急に必要とされる標準物質および主要技術の研究</p> <p>5.2 ヒトおよび動物の主な新型・突発疾患の診断、予防、管理評価のための標準物質に関する研究</p>	<p>【科学データ】</p> <p>8. 科学的データ分析・マイニング技術と統合プラットフォーム</p> <p>8.1 知識主導型科学データインテリジェント分析手法とシステム</p> <p>8.2 データ駆動型森林・草地科学データインテリジェント分析の主要技術と応用</p> <p>8.3 材料腐食データ分析マイニング技術とデジタルツインシステム</p> <p>8.4 科学技術文献の知的処理ソフトウェアシステムの研究開発と応用</p> <p>9. 科学データの自律的応用ソフトウェア (若手研究者プログラム)</p> <p>9.1 科学データ解析・マイニングのための主要コアソフトウェア</p> <p>9.2 科学データ解析・マイニングのための革新的技術とソフトウェア</p> <p>9.3 科学技術文献のテキスト内容の客観化された知識表現と推論のためのキーテクノロジーとソフトウェアシステム</p>



©2024 CRDS

図6-4-1③ 中国における「基礎研究環境および主要科学機器開発」2023年度対象プロジェクト

参考文献

- 1) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター デジタルトランスフォーメーションに伴う科学技術・イノベーションの変容 (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-01
- 2) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター AI×バイオ DX時代のライフサイエンス・バイオメディカル研究 (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-03
- 3) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター リサーチトランスフォーメーション (RX) ポスト/with コロナ時代、これからの研究開発の姿へ向けて (-The Beyond Disciplines Collection-) CRDS-FY2020-RR-06
- 4) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 戦略プロポーザル 人工知能と科学 ～AI・データ駆動科学による発見と理解～ CRDS-FY2021-SP-03
- 5) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター JST-CRDS/IRIS 共催シンポジウム@JASIS WebExpo® 報告書 これからの先端研究機器 -新たな機器開発エコシステム形成へ向けて- CRDS-FY2022-SY-01
- 6) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2019) CRDS-FY2018-FR-03
- 7) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野(2019) CRDS-FY2018-FR-04
- 8) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 計測横断チーム調査報告書 計測の俯瞰と新潮流 CRDS-FY2018-RR-03
- 9) The SDi Global Assessment Report 2022 The Laboratory Analytical and Life Science Instrumentation Industry (SDiレポート)(Strategic Directions International社/2022年)
- 10) 世界半導体製造装置 試験・検査装置市場年鑑2022 (半導体製造装置年鑑)(グローバルネット株式会社/2022年)
- 11) SEMI 「2021年世界半導体製造装置販売額」
<https://www.semi.org/jp/news-resources/press/20220413> (2024年6月13日アクセス)
- 12) Antonio Regalado, "China's BGI says it can sequence a genome for just \$100," MIT Technology Review, February 26, 2020
<https://www.technologyreview.com/2020/02/26/905658/china-bgi-100-dollar-genome/> (2024年6月13日アクセス)
- 13) 科学技術振興機構 産学連携展開部 先端計測グループ成果パンフレット vol.1 「宇宙線ミュオンラジオグラフィ」
- 14) 科学技術振興機構 産学連携展開部 先端計測グループ成果パンフレット vol.2 「固体NMR」
- 15) JST 事業成果 「イメージング質量顕微鏡」
<https://www.jst.go.jp/seika/bt45-46.html> (2024年6月13日アクセス)
- 16) 科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発プログラム 開発成果 成果集
- 17) 科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発プログラム 開発成果データベース
- 18) THE NOBEL PRIZE, "Cool microscope technology revolutionizes biochemistry," Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2017,
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2017/press-release/> (2024年6月13日アクセス)

- 19) 創薬の未来を拓くクライオ電子顕微鏡 JST news September 2019
- 20) 日本電子株式会社「クライオ電子顕微鏡法の技術開発と生命科学への貢献」日本電子 news Vol.50 No.1
- 21) 岩崎憲治「電子顕微鏡技術の進展と相関解析」日本結晶学会誌 57,66-71 (2015)
- 22) 岩崎憲治「新時代：クライオ電子顕微鏡による近原子分解能での解析」領域融合レビュー, 5, e010 (2016) DOI: 10.7875/leading.author.5.e010
- 23) 理化学研究所プレスリリース「タンパク質やその複合体の高分解能・高精度解析に成功－国産クライオ電子顕微鏡の巻き返しと創薬研究への本格的応用に貢献」2019年5月21日
- 24) 理化学研究所プレスリリース「電子線回折の自動測定システムを開発－微小結晶の構造解析のハイスループット化を実現－」2020年6月26日
- 25) 岸宣仁『ゲノム敗北』,ダイヤモンド社,2004
- 26) Illumina「合成によるシーケンスの歴史 イルミナの機器を支える次世代シーケンステクノロジーの進化」<https://jp.illumina.com/science/technology/next-generation-sequencing/illumina-sequencing-history.html> (2024年6月13日アクセス)
- 27) 株式会社シード・プランニング「次世代シーケンサーの利用現状と将来展望～医学研究から臨床応用に向けたゲノム研究の最新状況～」(2012年11月30日)
- 28) 藤川昇「株式会社エリオニクス 超微細加工で世界トップ目指す 設備開放し研究者と連携」産学官連携ジャーナル2007年7月号,産学官の道しるべ,科学技術振興機構
- 29) NIH Biomedical Technology Optimization and Dissemination (BTOD) Centers (RM1)
<https://www.nigms.nih.gov/about/overview/BBCB/biomedicaltechnology/Pages/btdd.aspx> (2024年6月13日アクセス)
- 30) DFG New Instrumentation for Research
https://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/infrastructure/scientific_instrumentation/funding_opportunities/new_instrumentation/index.html (2024年6月13日アクセス)
- 31) ドイツ基本法 91b条 https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_91b.html (2024年6月13日アクセス)
- 32) European Commission CORDIS EU research results
<https://cordis.europa.eu/project/id/101094299> (2024年6月13日アクセス)
- 33) impress <https://e-impress.eu/> (2024年6月13日アクセス)
- 34) 中国21世紀議程(アジェンダ21)管理センター 国家重点研究開発計画「基礎研究環境および主要科学機器開発」
<https://www.acca21.org.cn/trs/000100320016/jichukeydakebeiyanf/zhuaxianggaikuang/> (2024年6月13日アクセス)
- 35) 北方工業大学電気与控制工程学院 大学ニュース「我校获批国家重点研发计划“基础科研条件和重大科学仪器设备研发专项”课题」2021年12月14日
<https://dqgc.ncut.edu.cn/info/1124/3941.htm> (2024年6月13日アクセス)
- 36) 2023年度国家重点研发计划“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项
<https://opt.cas.cn/ggjszx/notice/202304/P020230420679163201081.pdf> (2024年6月13日アクセス)
- 37) 仪器信息网 “重大科学仪器设备开发”重点专项2023项目申报指南征求意见稿发布
<https://www.instrument.com.cn/news/20230329/657928.shtml> (2024年6月13日アクセス)

作成メンバー

リーダー	永野 智己	総括ユニットリーダー・グループリーダー	横断・融合グループ
メンバー	魚住 まどか	フェロー	横断・融合グループ (2024年3月まで)
メンバー	阪口 幸駿	フェロー	横断・融合グループ

The Beyond Disciplines Collection

CRDS-FY2024-RR-03

研究機器・装置開発の諸課題

— 新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて —
(市場動向・海外政策動向アップデート版)

Issues in the Development of Advanced Research Tools and Equipment;

Towards a New Research Paradigm: Implementation and Ecosystem Formation

令和 6 年 7 月 July 2024

ISBN 978-4-88890-925-9

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・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。
なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。
上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.
Any quotations must be appropriately acknowledged.
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.
Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.
CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>

