

広範囲調査分析

Project Manager

齊藤 孝祐 上智大学総合グローバル学部准教授

Project Member

岩城 洋子 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

大村 崇 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

奥田 将洋 科学技術振興機構研究開発戦略センター 研究員

上砂 考廣 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

川井 大介 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

近藤 賢郎 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

佐藤 真央 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

滋野井 宏記 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

土屋 貴裕 京都先端科学大学経済経営学部 准教授

中山 衣美子 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー

部谷 直亮 慶應 SFC 研究所 上席所員

村野 将 ハドソン研究所 研究員

目次

第1章 概要	2
第2章 重要新興技術 20分野	8
第1節 コンピューティング技術 (Advanced Computing)	8
第2節 次世代工業材料 (Advanced Manufacturing Materials)	28
第3節 高度ガスタービン技術 (Advanced Gas Turbine Technology)	54
第4節 先進製造技術 (Advanced Manufacturing)	66
第5節 高度センシング・ネットワークセンシング・ステルス技術 (Advanced and Networked Sensing and Signature Management)	75
第6節 原子力エネルギー技術 (Nuclear Energy Technologies)	104
第7節 AI 技術 (Artificial Intelligence)	124
第8節 自律型システムとロボット (Autonomous Systems and Robotics)	133
第9節 バイオテクノロジー (Biotechnologies)	157
第10節 通信・ネットワーク技術 (Communication and Networking Technologies)	172
第11節 指向性エネルギー技術 (Directed Energy)	190
第12節 フィンテック (Financial Technology)	202
第13節 ヒューマンマシンインターフェース (Human-Machine Interface)	223
第14節 極超音速技術 (Hypersonics)	231
第15節 量子情報技術 (Quantum Information Technologies)	247
第16節 再生可能エネルギーの生成と貯蓄 (Renewable Energy Generation and Storage)	253
第17節 半導体とマイクロエレクトロニクス (Semiconductors and Microelectronics)	279
第18節 宇宙技術とシステム (Space Technologies and Systems)	304
第19節 サイバーセキュリティ	326
第20節 医療・公衆衛生	334
第3章 まとめと示唆	344
参考文献	359

第1章 概要

第1節 調査の目的

米中対立の激化によりグローバルな相互依存状況が経済安全保障上のリスクとして認識されるようになり、各国は政策的な対応を急速に進めてきた。と同時に、2022年度にはじまったロシアのウクライナ侵略を受けて、経済安全保障上の課題として対ロシア関係を考慮することへの問題意識も高まっている。とりわけ、科学知の生産や技術開発のための能力を確保することは、今日の先端技術競争においてその重要性を高めている。

経済安全保障が、単に経済や科学技術といった分野における競争を意味するのではなく、その発展による国際的な地位の維持・向上や、あるいは逆にその喪失をつうじた社会的・経済的・軍事的価値への悪影響を意味するのだとすれば、①そもそも問題となっている新たな科学知や技術群はいったいどのような用途が想定されるものなのか、そのうえで、②当該技術が喪失する、ないしそれを梃子に外国からの影響力が行使されるリスクをいかに見積もるか、ということ考察する作業が必要となろう。

このような問題意識を踏まえ、広範囲調査では深掘調査と異なるかたちで、オープンソースに基づく調査を中心に重要とされる新興技術群の全体像をつかみ、そのなかで各技術分野における国内外の動向やそこでの日本の立ち位置について検討した。加えて、広範囲調査では各技術領域に閉じた分析だけでなく、可能な限り技術領域間の相互関係をつかむことも視野に入れた分析を実施した。このような分析は、現在の技術の多くが単独で存在しておらず、複数技術の組み合わせ＝技術パッケージとして実用化されていく側面に着目することを重視する立場に基づく。具体的な作業実施項目は以下のとおりである。

(1) 対象技術に関する用途・社会的影響・リスクシナリオ分析

経済安全保障、また、それと密接に関連する軍事安全保障における重要技術は数多く存在するが、戦略的なインプリケーションを考察するに際しては、まずこれらの技術がいかなる用途またはその想定のもとで開発・利用されてきたのかを把握する必要がある。本項目では、今年度の特定科学技術について、下記の点に注目した現状の記述を行った。主な検討項目は以下の通りだが、資料の公開状況や技術の特徴等によって記載にやや濃淡があることは留意されたい。

- 1 当該技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）
- 2 軍事・国防上のインプリケーション
 - (1) 想定・想像される用途

- (2) 実用化に伴う戦術・戦略レベルの影響
- 3 経済産業・民生上のインプリケーション
 - (1) 想定・想像される用途
 - (2) 実用化に伴う社会への影響・変化
- 4 日本において当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／強みを持つことで国際競争力を高める可能性／見通し、展望、可能性
- 5 その他（上記以外に、各技術に固有の特筆すべき点など）

(2) 対象技術の国内外における分布：強み（厚み）、弱み、連携関係の分析

2022 年度広範囲調査において対象とする一連の特定科学技術について経済安全保障上のインプリケーションを把握するひとつのポイントとして、(1) で把握した用途・社会的影響に加えて、それらの科学技術知を生産する能力が日本の国内外にいかなるかたちで分布しているのか、また、その分布状況が日本の経済安全保障にいかなるリスクをもたらすのかを併せて把握する必要がある。このような観点から、下記の調査を実施した。

- 1 調査対象技術の個別分布調査：個別の調査対象技術およびその生産に関わっている研究機関（研究者）の国内外における所在・分布について、論文データベース等をもとに把握する。各調査対象技術についての日本および各国の a) 「強み」（＝特定国への技術・研究者の集積度）を測定する（これらの強みの程度が低いまたは存在しない技術分野が、相対的に b) 「弱み」のある分野と推定される）。またこの際、領域横断的な研究が行われている事例にも注目し、日本に強みのある横断研究分野の可能性を探る取り組みを実施している。
- 2 日本を基準とした調査対象技術の分布状況の指標化：①で測定した調査対象技術の分布状況それぞれについて、日本と海外に所在する研究生産能力のバランスを数値化し、とりわけ懸念国とのバランスに留意した分析を行う。
- 3 研究者の所属・移動・連携情報に基づくリスク調査：対象技術分野の論文生産にかかわる研究者について、懸念国研究機関等への所属および連携の履歴を可能な限り洗い出すことで、経済安全保障上のリスクを高めるような技術流出および対外技術依存の問題を抱えたネットワークを析出する。

(3) 日本の経済安全保障政策に対するインプリケーションの分析・提言

これらの分析結果をかけあわせ、最後に特定科学技術の日本の軍事・産業・社会における戦

略的意味合いと、それを実現するために必要な知の集積度／分散度との関係を総合的に考察することで、重要技術の対外依存によって生じるリスクとその解消のための施策の優先度について考察を行い、政策的含意を導出することを試みている。

なお、最後に、これまでの調査・検討過程で得られた知見に基づき、継続的な観測のためのポイントや調査体制のあり方についても検討した。これは、今後のシンクタンク機能の構築やインテリジェンス機能の強化、さらに経済安全保障上の技術リスク緩和のための取り組み推進を念頭に置き、国際安全保障環境と技術開発動向の変化を踏まえて、定期的に技術リストおよび用途記述を更新し、さらにそれらの技術に係る知識分布状況の変容を年単位で追っていくことを想定したものである。年単位の情報更新作業の効果を高め、かつ、そのためのコストを下げ体制を追求することは、シンクタンク機能を成立させるにあたり重要な検討事項となろう。

第 2 節 分析対象とする科学技術分野の特定

2021 年度の事業においては、内閣府より指定された 20 技術分野について広範囲調査を実施したが、これらは米国の「輸出管理改革法（ECRA）」、および「重要・新興技術戦略」を参考に、日本独自の関心を加味してリスト化されたものと思われる。本年度の調査においては、指定の技術分野の解像度をある程度高めることで分析を具体化し、また、データベース等から関連情報の抽出を行う際の助けとするために、各技術分野についてサブカテゴリーを設定し、よりきめの細かい分析を行うことを目指した。

この作業は、第一に、ホワイトハウスが 2022 年に発表した「重要・新興技術戦略」の更新リストに記載されている重要・新興技術 18 分野をもとに行った¹。しかし、本リストは、あくまでも米国の安全保障上の関心を反映したものであることは言うまでもない。経済安全保障の仕組みを検討するに際しても、米国の政策動向を注すること自体は日本の政策分析に際しても極めて重要であり、その意味でのリストを用いること自体にも意味はあるものの、同時に、日本の政策形成に向けた含意を導き出すにあたっては、日本独自の利害関心に基づいたリストの策定も必要になってくる。そこで、第二に、上述の「重要・新興技術戦略」の更新リストでカバーされていない医療・公衆衛生分野、およびサイバー技術分野について、独自のサブカテゴリーを設定し、同様に調査の具体化を目指した。なお、今後、対象技術のリストはその時々の安全保障上の関心、技術開発動向を踏まえて定期的にアップデートされることを想定している。

¹ White House, *Critical and Emerging Technologies List Update*, A Report by the Fast Track Action Subcommittee on Critical and Emerging Technologies of the National Science and Technology Council, February 2022. ただし、このリスト自体は政策形成や予算編成の際の優先順位を示すものではないとの断りがついており、その点留意する必要がある。

表 1-2-1 2022 年度の調査対象とする特定科学技術リスト

カテゴリー	サブカテゴリー
Advanced Computing	・Supercomputing ・ Edge computing ・ Cloud computing ・ Data storage ・ Computing architectures ・ Data processing and analysis techniques
Advanced Engineering Materials	・Materials by design and material genomics ・ Materials with new properties ・ Materials with substantial improvements to existing properties ・ Material property characterization and lifecycle assessment
Advanced Gas Turbine Engine Technologies	・ Aerospace, maritime, and industrial development and production technologies ・ Full-authority digital engine control, hot-section manufacturing, and associated technologies
Advanced Manufacturing	・ Additive manufacturing ・ Clean, sustainable manufacturing ・ Smart manufacturing ・ Nanomanufacturing
Advanced and Networked Sensing and Signature Management	・ Payloads, sensors, and instruments ・ Sensor processing and data fusion ・ Adaptive optics ・ Remote sensing of the Earth ・ Signature management ・ Nuclear materials detection and characterization ・ Chemical weapons detection and characterization ・ Biological weapons detection and characterization ・ Emerging pathogens detection and characterization ・ Transportation-sector sensing ・ Security-sector sensing ・ Health-sector sensing ・ Energy-sector sensing ・ Building-sector sensing ・ Environmental-sector sensing
Advanced Nuclear Energy Technologies	・ Nuclear energy systems ・ Fusion energy ・ Space nuclear power and propulsion systems
Artificial Intelligence (AI)	・ Machine learning ・ Deep learning ・ Reinforcement learning ・ Sensory perception and recognition ・ Next-generation AI ・ Planning, reasoning, and decision making ・ Safe and/or secure AI
Autonomous Systems and Robotics	・ Surfaces ・ Air ・ Maritime ・ Space
Biotechnologies	・ Nucleic acid and protein synthesis ・ Genome and protein engineering including design tools ・ Multi-omics and other biometrology, bioinformatics, predictive modeling, and analytical tools for functional phenotypes ・ Engineering of multicellular systems ・ Engineering of viral and viral delivery systems ・ Biomanufacturing and bioprocessing technologies
Communication and Networking Technologies	・ Radio-frequency (RF) and mixed-signal circuits, antennas, filters, and components ・ Spectrum management technologies ・ Next-generation wireless networks, including 5G and 6G ・ Optical links and fiber technologies ・ Terrestrial/undersea cables ・ Satellite-based communications ・ Hardware, firmware, and software ・ Communications and network security ・ Mesh networks/infrastructure independent communication technologies

Directed Energy	<ul style="list-style-type: none"> Lasers High-power microwaves Particle beams
Financial Technologies	<ul style="list-style-type: none"> Distributed ledger technologies Digital assets Digital payment technologies Digital identity infrastructure
Human-Machine Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> Augmented reality Virtual reality Brain-computer interfaces Human-machine teaming
Hypersonics	<ul style="list-style-type: none"> Propulsion Aerodynamics and control Materials Detection, tracking, and characterization Defense
Quantum Information Technologies	<ul style="list-style-type: none"> Quantum computing Materials, isotopes, and fabrication techniques for quantum devices Post-quantum cryptography Quantum sensing Quantum networking
Renewable Energy Generation and Storage	<ul style="list-style-type: none"> Renewable generation Renewable and sustainable fuels Energy storage Electric and hybrid engines Batteries Grid integration technologies Energy-efficiency technologies
Semiconductors and Microelectronics	<ul style="list-style-type: none"> Design and electronic design automation tools Manufacturing process technologies and manufacturing equipment Beyond complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology Heterogeneous integration and advanced packaging Specialized/tailored hardware components for artificial intelligence, natural and hostile radiation environments, RF and optical components, high-power devices, and other critical applications Novel materials for advanced microelectronics Wide-bandgap and ultra-wide-bandgap technologies for power management, distribution, and transmission
Space Technologies and Systems	<ul style="list-style-type: none"> On-orbit servicing, assembly, and manufacturing Commoditized satellite buses Low-cost launch vehicles Sensors for local and wide-field imaging Space propulsion Resilient positioning, navigation, and timing (PNT) Cryogenic fluid management Entry, descent, and landing
Cyber Security*	<ul style="list-style-type: none"> Dark web crawling OSINT: social media sites Threat Intelligence Platform Information Sharing and Analysis Center (ISAC) Monitoring Platforms Internal Security Tools / Appliances Deception Tools National Collection Means CTI Frameworks
Medical Technology and Pandemic Preparedness*	<ul style="list-style-type: none"> Vaccine Precision Medicine Cell and Gene Therapies Monoclonal Antibodies Contact tracing E-health Telemedicine Smart healthcare Virtual Meeting Medical Consultation Medical drone Essential Robot Worker Medical Robot Nutri-genomics 3D food printing Food bioactive ingredients Food Allergies and Intolerances Omics Techniques Next Generation Sequencing, Digitized Clinical Trial Monoclonal Antibodies and Biosimilars Cell and Gene Therapies Personalized Treatment Cytogenetics Biobank Biomechatronic Biotherapeutic Biomedicine Bioinformatics Diagnostic kit Bioprinting “In-Silico” Testing Microscopic Robot 3D Pathology Imaging 3D Radiology Imaging

	Physiotherapy · Smart Neural Interfaces · Neuromodulation · Brain-Computer Interfaces · Wearable Health(care) · Medical Regulatory Technology (“MedRegTech”) · Virtual Reality in health(care) · Augmented Reality in Health(care) · Cyber Security Mesh (Architecture) in health(care) · Cloud Computing in health(care) · Blockchain in Health(care) · Artificial Intelligence in Health(care) · Next-Generation Computing in Health(care) · 3D printing in health(care) · Machine Learning Algorithm in Health(care)
--	---

第3節 体制

2022年度は、昨年度の実施体制に若干の外部協力者を追加し、下記の体制で調査を実施した。

- 齊藤 孝祐 上智大学総合グローバル学部 准教授／とりまとめ
- 岩城 洋子 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 大村 崇 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 奥田 将洋 科学技術振興機構研究開発戦略センター 研究員
- 上砂 考廣 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 川井 大介 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 近藤 賢郎 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 佐藤 真央 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 滋野井 宏記 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 土屋 貴裕 京都先端科学大学経済経営学部 准教授
- 中山 衣美子 政策研究大学院大学 政策研究院リサーチ・フェロー
- 部谷 直亮 慶應 SFC 研究所 上席所員
- 村野 将 ハドソン研究所 研究員

監修協力

- 古谷 知之 慶應義塾大学総合政策学部 教授

第2章 重要新興技術 20 分野

第1節 コンピューティング技術 (Advanced Computing)

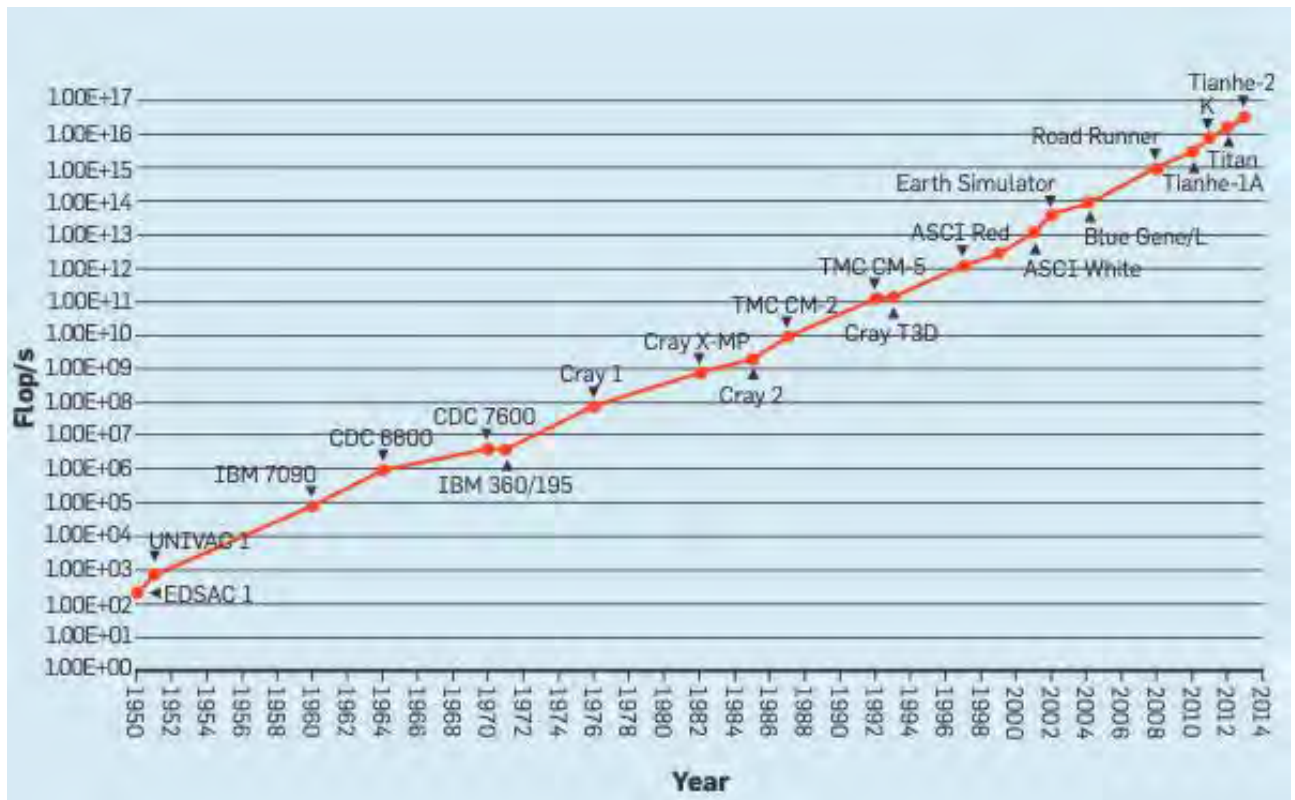
20 世紀後半を通して、コンピューター技術は急速かつ革新的な発展を遂げてきた。諸説あるにせよ先進コンピューティング技術の原点は往々にして 1960 年代に遡る。米国の天才電気工学者シーモン・クレイが一般的に世界初と言われるスーパーコンピューターである「CDC 6600」を開発したのは 1964 年であり、翌年には後にインテルの創設者となるゴートン・ムーア博士が「24 ヶ月毎にトランジスタの集積密度が倍増する」という「ムーアの法則」を唱え、その後半世紀に渡る先端コンピューティングそして半導体産業の「普遍」原則として圧倒的な影響力を持つようになる²。そうしたムーアの法則も 21 世紀のビックデータ革命を機に終焉を迎えるという議論が台頭し、例えば米国のヒューレットパッカー社のメモリ集積型コンピューティング「The Machine」は高度科学計算分野のハイパフォーマンス・コンピューティング (High-Performance Computing: HPC) に最適な高速かつ効率的な科学計算技術を齎し、ビックデータ時代の到来を象徴付けたことは我々の記憶にもそう遠くはない³。

2010 年以降の 10 年間を見ても世界の先進コンピューティング技術は目まぐるしい発展を見せており、米国はもちろん中国も急速に技術革新を遂げてきた(図 1 参考)。特に、先端素材や半導体、エネルギー技術等々、そのほかの新興科学技術の技術革新にも多大な影響を与える先端コンピューティングは各国政府の技術戦略の中でも重要領域として位置づけられ、単なる技術革新のみならず、そのアプリケーションを含めたより分野横断そして複合的な研究が進められるようになってきた。

先進コンピューティング分野におけるこうした技術発展を踏まえて、本節ではその技術動向を主に米国そして中国に力点を置きながら解説する。先端コンピューティングそれ自体の技術開発はもちろん、それに関わる官民のステークホルダそしてそれらの技術開発のプルファクターとなる他領域へのアプリケーションは社会実装を含めて分析する。

² Moore, Gordon, "Cramming more components onto integrated circuits." *Electronics*, 38 (8)(1965).

³ 大原雄介「The Machine で再び業界に衝撃を与えた HP 業界に多大な影響を与えた現存メーカー」*ASCII*. <https://ascii.jp/elem/000/004/003/4003089/>



(図 1-1 先進コンピューティング技術における飛躍的な性能向上⁴⁾)

1. 先進コンピューティング技術とその発展と応用

(1) CPU 主導型からメモリ主導型コンピューティング

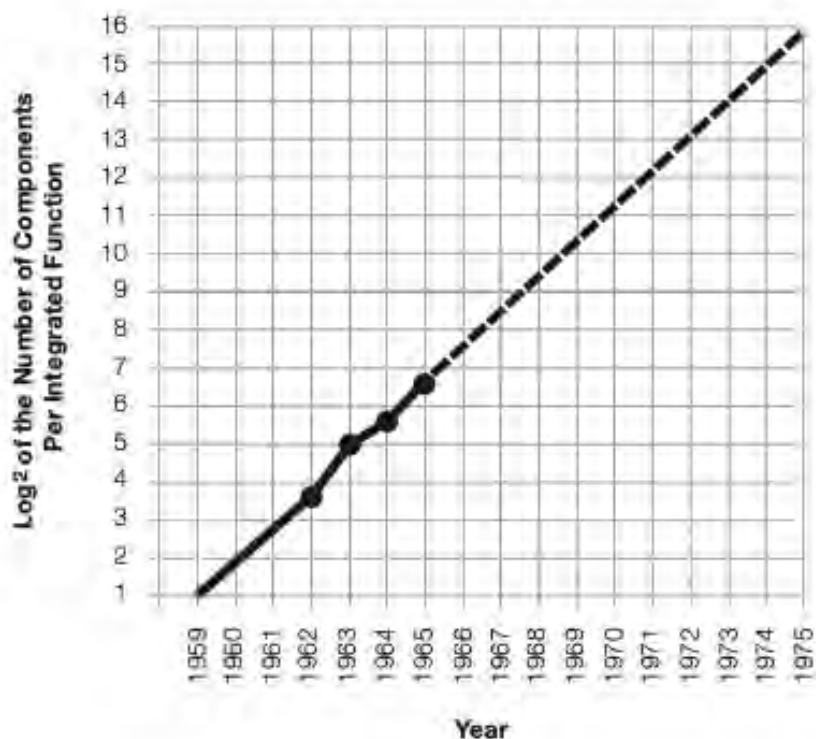
先進コンピューティング技術における技術革新は、1960年代のスーパーコンピューター(スパコン)の開発そして「ムーアの法則」の提唱といった革新的な技術開発と画期的な発展原則の提示によって始まったと言っても過言ではない。スパコン業界では教科書的法則として扱われる「ムーアの法則」は、ゴートン・ムーア博士が1965年に”Cramming more components onto integrated circuits”と題した論文の中で提唱したものである⁵⁾。この法則は、図2の片対数グラフが示すように、「集積回路の製造コストを最小化する集積回路搭載部品点数は、技術の進歩とともに、つまり時代とともに、急速に増えていくだろう」というものである⁶⁾。1962年から1965年までのわずか4点の経験的観察にのみ基づいて大胆にも向こう10年の直線的な発展経

⁴⁾ Reed, Daniel & Dongarra, Jack, “Exascale computing and big data.” *Communications of the ACM* (July 2015), p. 59.

⁵⁾ Moore, Gordon, “Cramming more components onto integrated circuits.” また「ムーアの法則」そしてポスト・ムーアの法則の最新の議論に関しては、井上敬介「『ムーアの法則』の進化についての一考察」『研究技術計画』35巻2号(2020)<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsrpm/35/2/35_263/_pdf/-char/ja>が詳しい。

⁶⁾ 服部毅「半導体産業発展を支える「ムーアの法則」の過去・現在・未来」*Telescope Magazine* (2021年6月2日) <https://www.tel.co.jp/museum/magazine/report/202106/>

路を提示した当該法則は、その後半世紀近く半導体産業そして先進コンピューティング産業の「普遍」法則としての地位を築くことになる。

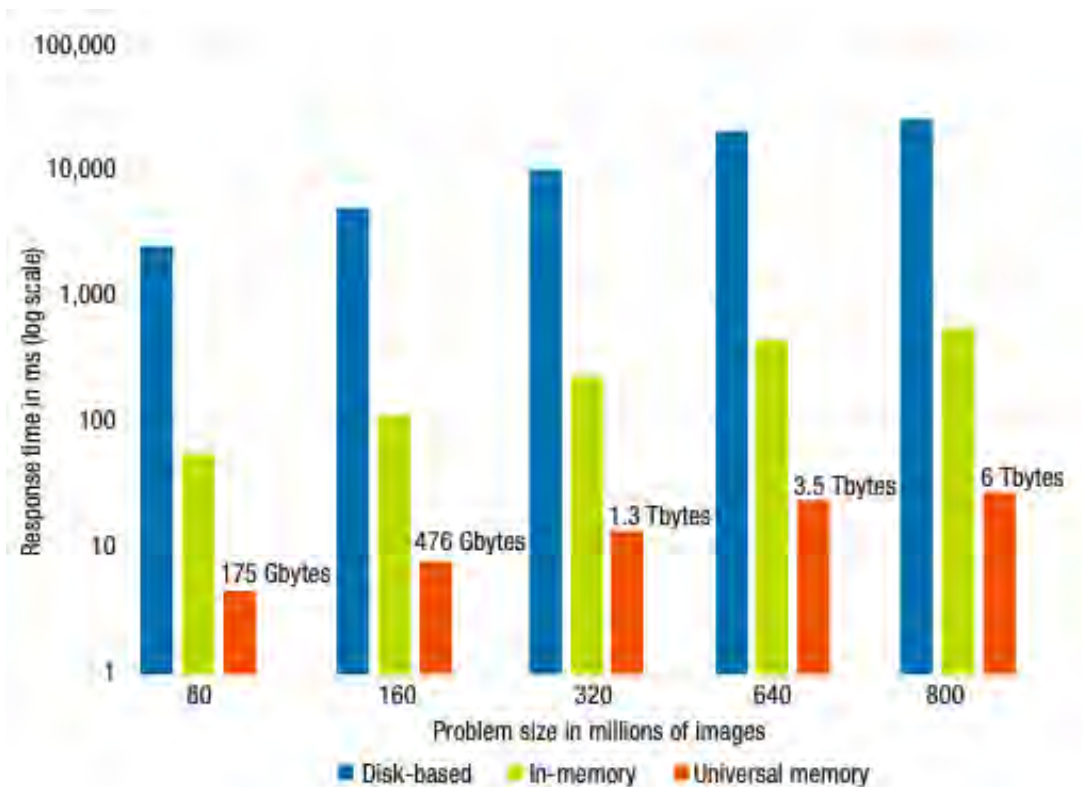


(図 1-2 ムーアの法則 片対数グラフ)

一方で、ビックデータ革命の到来以降、新たな革新技術が先進コンピューティング産業を取り巻くこととなる。例えば、冒頭で紹介したヒューレットパッカード社のメモリ主導型コンピューティング「The Machine」は、従来の CPU 主導型コンピューティングの限界を打破する画期的なアーキテクチャを提供することが期待されている。従来のコンピューター的能力は日進月歩の研究開発のおかげで大量のデータの処理にも耐え得るようになってきた。理論的には、コンピューターの処理能力が増加するにつれて、一度に実行できる計算は指数関数的に増加する。しかしここでメモリが問題となる。いかに優れたコンピューターであってもこうした増大するデータの計算を実行するための十分なメモリを有していない。ここに増加するデータとメモリの速度そしてそれらを取り巻くコストのトレードオフが存在し、既存のコンピューティング技術ではこの制約を乗り越えることが困難であった。この問題について、米国ジョージア工科大学の David Bader 教授は「制限を受けるのは、アルゴリズムを分析して実行するために一度にメモリに格納できるデータの量」であるという見解を示しており⁷、従来のコンピューティング・

⁷ Slater, Derek, 「まったく新しいコンピューティングのアプローチが、がんの治療、不正の検出、交通渋滞の防止に役立つ可能性があります」 *Enterprise.nxt*. (Hewlett Packard Enterprise)
<https://www.hpe.com/jp/ja/japan/insights/reports/mdc.html>

アーキテクチャの限界を指摘する。この点で、メモリ主導型アーキテクチャは、各メモリブロックが光子によって相互に接続されており、これにより(電子ではなく)光子によるより高速なデータ転送が可能となる。こうした Universal memory の構想は、従来のアーキテクチャと比較してデータ処理をより低コストかつ効率的なものにすることができる(図 1-3)。



(図 1-3 各メモリー構造と処理速度の比較⁸⁾)

こうしたメモリ主導型コンピューティングは、そのアプリケーション上の制限を取り払い、より多くの技術・産業ドメインにおける応用が可能となる。従来の CPU 主導型コンピューティングが階層化された各メモリからデータを中央集権的に受信し、処理を実行していたのに対して、メモリ主導型のアーキテクチャでは、各々のセンサーが収集したデータをその個別の要求に応じて計算を実行することができるため、より大量かつ複雑化した計算処理に対応することができる。例えば、時系列が異なる複数の事業状況を把握するためのデータ分析で、異なる時間軸のデータグラフを統合したいとしよう。今日のデータ処理技術では、別々のユニットやデータベースから得られた情報を大容量プロセッサで処理している。この仕組みでは、定期的にシステムが停止しと調整を繰り返すことで、個別の事業状況を把握することになるが、分析結果を取得するまでに時間を要する。またそれぞれの分析は各データの一面のみ切り取ったスナツ

⁸ Bresniker, Kirk M., Sharad Singhal, and R. Stanley Williams. "Adapting to thrive in a new economy of memory abundance." *Computer* 48(12) (2015), p. 50.

プッシュ的な情報であり、その正確さや再生産性の点で信頼に欠ける。こうした問題に対して、「時間」の要素を加えることで、特定の時間毎に微分して導関数を取ることができ、重要となる指標を加速させるような要素を抽出して観察することが可能になる。さらに、測定の尺度を年から四半期、特定の日時という形でスケールダウンすることで、多岐に複雑化する市場状況の中でも事業パフォーマンスに影響を与えるファクターの因果関係を検証することができる⁹。データ主導型コンピューティング技術は、こうした複雑化するデータの網羅的な処理を高速で実行することを可能にするわけである。

(2) エクサスケール・コンピューティング(Exascale Computing)の発展

メモリ主導型コンピューティングの実現の過程で注目されてきたのが、エクサスケール・コンピューティングという新たな先進コンピューティング技術である¹⁰。この先進コンピューティング技術により、メモリ、ストレージそしてコンピューティング能力を急激に加速させることができる。こうした技術革新は、エネルギー分野での生産や貯蓄そして移行、さらには素材科学、3D プリンティング技術を含むアディティブ・マニュファクチャリング(Additive Manufacturing)、真相学習やマシンラーニング、癌の医療研究・治療等々様々な新興科学技術分野での応用が期待されている¹¹。したがって、エクサスケール・コンピューティングは、国家安全保障、経済安全保障、エネルギー安全保障や新素材の研究そしてヘルスケアという多様な社会課題分野での革新的な技術革新を可能にする潜在力のある先端コンピューティング技術といえることができる。一般にエクサスケール・コンピューティングは以下のような性能を持つ HPC と定義される¹²。

- ピーク時のパフォーマンス : Exaflops (浮動小数点演算を 1 秒間に 100 京回行う)
- Linpack 性能 : >60%
- メモリ容量: 10 petabytes
- ストレージ : エクサバイト規模のストレージが可能
- エネルギー効率: 30 GF/w.
- インターコネクタ帯域幅(bandwidth) : > 500 Gbps.

⁹ Bresnaker, Kirk M., et. al., "Adapting to thrive in a new economy of memory abundance."

¹⁰ Hewlett Packard Enterprise, 「エクサスケール: 未来の HPC をめぐる競争 コンピューティングの新時代」(テクニカルホワイトペーパー)
<https://www.hpe.com/content/dam/hpe/japan-office-locations/pdf/servers/exascale-hpc-next-generation-jpn.pdf?cc=jp&ll=ja>

¹¹ "Overview of the ECP." *Exascale Computing Project*. Retrieved from
<https://www.exascaleproject.org/about/>

¹² Qian, Depei, and Zhongzhi Luan. "High performance computing development in china: A brief review and perspectives." *Computing in Science & Engineering* 21(1) (2018): 6-16.

エクサスケールシステムは、大容量のシステムマネージメントとリソーススケジューリング、パラレルなプログラミング環境、システムモニタリング、フォルトトレランス (fault tolerance) そして大規模かつ多様なアプリケーションのサポートを提供し得るものと一般には解説される。

メモリ主導型コンピューティングとの関連で言えば、エクサスケール・コンピューティングは、ビッグデータの発展と合わせて理解されるべきだという見解が Daniel Reed と Jack Dongarra らが 2015 年に発表した論文 “Exascale Computing and Big Data” でも強調されている。したがって、実際のドメイン毎の実装においては、コンピューティング技術とデータアナリティクス技術の統合が不可欠であり、データ移行や複雑なコンピューター計算の実装が技術的課題とされてきた。こうしたエクサスケール・コンピューティング技術に欧米はいち早く注目しており、米国は国防省やエネルギー省そして国立科学財団が中心となり技術開発に着手。また欧州でも欧州連合 (EU) 内で the Collaborative Research into Exascale Systemware, Tools and Applications (CRESTA) や Dynamical Exascale Entry Platform (DEEP) といった先進的なプロジェクトが進められてきた¹³。2018 年までに「Big Data and Exascale Computing (BDEC) プロジェクト」の下で、ビッグデータとエクサスケール・コンピューティングに関する技術研究ワークショップが米国、EU そして日本が連携する形で複数回実施され、国際社会における新たな技術トレンドとなりつつある。また、本プロジェクトで執筆された論文でも、より大規模かつ多様化するデータとそれら进行分析するメソッドが科学コンピューティングの世界を一新するという見解が示されており、ビッグデータ時代におけるエクサスケール・コンピューティングへの注目が高まっていることがわかる¹⁴。

2. 先進コンピューティング技術のマルチユース

エクサスケール・コンピューティングに代表される先進コンピューティング技術は、極めてマルチユース性が高い先端科学技術であり、製造技術、工学分野や医療分野そして金融に加えて、エネルギー分野や交通輸送分野に至るまで官民を横断する幅広い技術・産業分野で活躍している (図 1-4)。例えば、先端素材分野では、新たな素材の発見にエクサスケール・コンピューティング技術が貢献している。後述するが米国では「科学における新発見」(Science discovery) のためにエクサスケール・コンピューティング技術を利用する例が顕著に増えており、エネルギー省とテック企業が協力することで、新素材の発見にエクサスケール・コンピューティング技術を利用

¹³ Reed, Daniel et. al., “Exascale computing and big data.”

¹⁴ Asch, Mark, et al. “Big data and data ecosystem for scientific inquiry.” *The International Journal of High Performance Computing Applications* 32.4 (2018): 435-479.

用する Exascale Computing Project (ECP)が進められてきた¹⁵。これは再生可能エネルギー分野で利用価値のある新たな素材を発見することも目的としている研究であり、先進コンピューティング技術の貢献が期待されている。医療分野では、特に癌治療の研究においてこのエクサスケール・コンピューティング技術の利用が期待されている¹⁶。製造業でもエクサスケール・コンピューティング技術が利用されつつある。特にアダプティブ・マニュファチャリング (Adaptive manufacturing: AM)技術分野において、エクサスケール・コンピュータを用いたより高度でかつ高速のシミュレーションを行うことが可能になる¹⁷。

Industry	Average Revenue per HPC Dollar Invested	Average Profit or Cost Savings per HPC Dollar Invested
Defense	\$75.00	\$18.80
Financial	\$641.70	\$47.40
Insurance	\$175.70	\$280.00
Life Sciences	\$205.60	\$40.90
Manufacturing	\$216.50	\$28.40
Oil and Gas	\$416.00	\$53.70
Telecommunications	\$210.70	\$30.40
Transportation	\$1,804.30	\$15.60
TOTAL	\$452.10	\$37.60

(図 1-4 先進コンピューティング投資における産業毎のリターン¹⁸)

図 1-4 でも明らかな通り、交通運輸産業での先端コンピュータへの投資は特に高い収益を上げている。特にとりわけ航空宇宙産業では、エクサスケール・コンピューティング技術を用いた AM 技術が大きな技術革新を齎している。ボーイング社をはじめとした米国の航空機メーカーはすで

¹⁵ Turczyn, Coury, “Discovering and extreme-scale computing: Pathways to convergence-toward a shaping strategy for a future software new materials at exascale speed.” *Exascale Computing Project*. August 11, 2022. <https://www.exascaleproject.org/qmcpack/>

¹⁶ Bhattacharya, Tanmoy, et al. “AI meets exascale computing: Advancing cancer research with large-scale high performance computing.” *Frontiers in oncology* 9 (2019): 984.

¹⁷ “EXAAM.” *Exascale Computing Project*. <https://www.exascaleproject.org/research-project/exaam/>

¹⁸ *ibid.*, p. 11.

に先進コンピューティング技術とAM技術を導入が進められており、短時間かつ低コストで飛行機のパーツを製造することに貢献してきた¹⁹。米国航空宇宙局(NASA)も High-End Computing (HEC) プログラムを立ち上げ、極めて性能の高い先進コンピューティング技術が宇宙ミッションの遂行をサポートしている。最近では、米国GEに代表されるエンジンメーカーが次世代ジェットエンジンの開発に先進コンピューティング技術を利用している。これによりより燃費の良いジェットエンジンの開発に成功しており、二酸化炭素の排出量低減にも貢献している。このように、先進コンピューティング技術は、幅広い分野でマルチユースが可能な技術であり、経済安全保障上重要なエネルギーや航空宇宙分野はもちろん、医療や製造業に至るまで極めて広範囲な産業技術分野に革新を齎している。



図 1-5 GE のジェットエンジンの開発²⁰

3. 米国におけるエクサスケール・コンピューティング技術とその開発動向

米国は近年注目されているエクサスケール・コンピューティング(Exascale Computing)分野で国家主導の研究開発を進めてきた。米国の先進コンピューティング技術開発で大変興味深いのは、従来こうした情報科学やコンピューター技術開発に携わってきた国立科学財団(National Science Foundation)や国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)のみならず、エネルギー省(Department of Energy: DoE)や国防省(Department of Defense: DoD)といった軍事・経済安全保障の問題に直接携わる政府機関がその研究開発においても主導的な地位にあるということである。

¹⁹ Nossokoff, Mark, Sorensen, Bob and Joseph, Earl, *To out-compute is to out-compete: Competitive threats and opportunities relative to U.S. government HPC leadership*. (Hyperion Research, 2022).

²⁰ *ibid.*, p. 19.

こうした他省庁や研究機関との連携を可能にしたのは、2015年の7月に施行された大統領令 (Executive Order) 13702号「Creating a National Strategic Computing Initiative」である²¹。この法令では、経済的競争力と「科学における新発見」(Science discovery)を加速させるためのHPCの発展を最大限可能にするために米国政府がHPC研究における連邦政府としての戦略を策定することが定められている。これを政策根拠として、米国政府は政府機関全体を巻き込んだ包括的アプローチに基づいて、官民そして学の多様なステークホルダが連携した研究開発体制の構築を推進してきた。前述の通り、ここではDoE、DoDおよび国立科学財団がリーダーシップを発揮することが規定されており、各機関の役割は以下のように定められている。

エネルギー省 (DoE): エネルギー省科学局 (DoD Office of Science) 及び国家核安全保障局 (National Nuclear Security Administration: NNSA) は、エクサスケール・コンピューティングの研究プログラムを通じて、高度シミュレーションにフォーカスしたジョイント・プログラムを計画し実行する。

国立科学財団: 国立科学財団は「科学における新発見」(Science discovery) 及びそのためのHPCのエコシステムの構築そして人材育成において中心的な役割を担う。

国防省 (DoD): 国防省はデータ・アナリティクス・コンピューティングに注力し、当該研究ミッションをサポートする。

上記3つのリーディング機関はHPCのフロンティアの開拓を推し進め、米国をこの戦略的に重要な技術領域で常に最先端の地位を維持することを可能にする。これらの機関は基礎研究とも密接に連携しながら、開発に携わる機関やその技術展開に関わる関係機関とも連携を図り、革新的なコンピューティング技術の開発を支援する。この3つの機関と連携を取る形で、国立標準技術研究所 (NIST) や国土安全保障省 (Department of Homeland Security)、NASA (National Aeronautics and Space Administration) といった各応用分野の専門省庁や研究機関が基礎研究ならびにその技術展開を推進するという枠組みが取られている(図 1-6)。

²¹ Executive Order 13702 of July 29, 2015 Creating a National Strategic Computing Initiative (Federal Register Vol. 80, No. 148).

Table 1: National Strategic Computing Initiative Agency Roles

Type of agency	Agency
Lead	Department of Defense Department of Energy National Science Foundation
Foundational research and development	Intelligence Advanced Research Projects Activity National Institute of Standards and Technology
Deployment	Department of Homeland Security Federal Bureau of Investigation National Aeronautics and Space Administration National Institutes of Health National Oceanic and Atmospheric Administration

(図 1-6 National Strategic Computing Initiative における関係政府機関の役割²²⁾)

その上で米国政府は、近年 2020 年度の戦略計画「Pioneering the Future Advanced Computing Ecosystem: A Strategic Plan (the 2020 Strategic Plan)」を策定しており、以下 5 つの戦略目標を提示している。

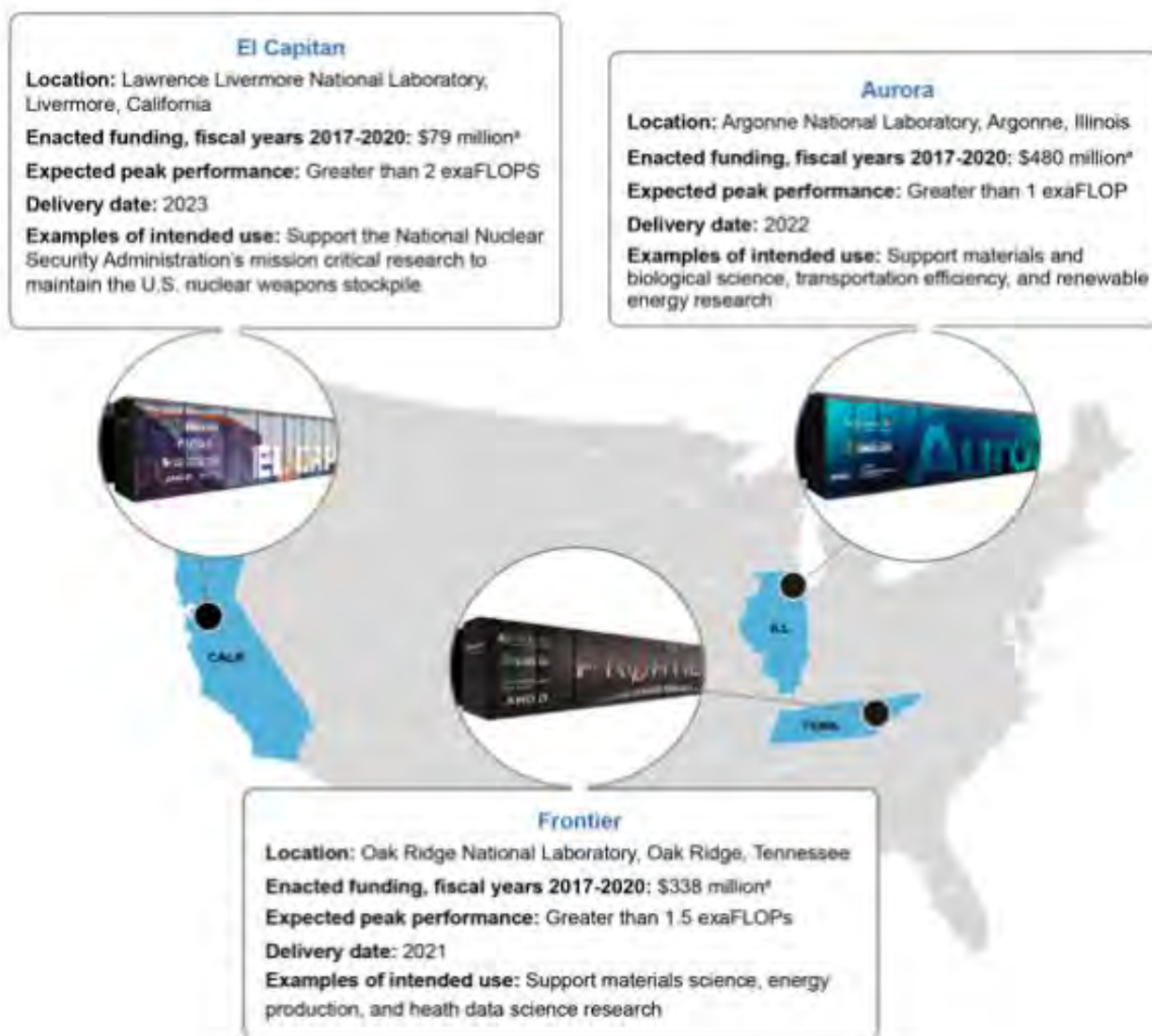
(1) 高度エクサスケール・コンピューティング開発のためのイニシアティブ

この戦略目標の達成にはエネルギー省が中核的な役割を担うことが期待されている。特に当該ミッションでは HPC のアプリケーションとソフトウェアの開発に主眼が置かれており、こうした技術開発は先端素材研究における「エネルギー省 基礎エネルギー科学プログラム」と地球科学分野における「エネルギー省 生物環境学研究プログラム」を支えることを目指している。エネルギー省は 2017 年から 2020 年にかけて、エクサスケール・コンピューターの開発に合計 897 百万ドルもの予算を投じており、革新的な HPC の研究開発に注力してきた。

こうした目標を定めた上で、エネルギー省は自らが主管する研究所において Frontier, Aurora そして El Capitan の 3 つのエクサスケール・コンピューティングシステムの開発を進めてきた (図 1-7)。Frontier は 2021 年の実装を目指して、テネシー州のオークリッジ国立研究所で 2019 年から Clay 社との契約の下本格的に研究開発が進められてきた。Frontier は現行のパソコンの 50 倍もの速さの計算速度を実現することで、「科学における新発見」やエネルギーレ

²² Government Accountability Office (GAO), *High-Performing Computing: Advances Made Towards Implementing the National Strategy, but Better Reporting and a More Detailed Plan Are Needed.* (United States Government Accountability Office, September 2021), p. 3

ジリエンス、経済競争力そして国家安全保障等の重要国家領域でのイノベーションを実現する²³。Aurora は 2022 年の実装を目指してイリノイ州のアルゴンヌ国立研究所で開発が進められてきたエクサスケール・コンピューターであり、素材科学や生物学、輸送技術そして再生可能エネルギーの研究への応用が想定されている。El Capitan は、同じくエネルギー省が所有するカリフォルニア州のローレンス・リバモア国立研究所で 2023 年の実装を目指して開発が進められている、こちらは主に核兵器の備蓄を維持するための核安全保障の研究開発に用いられることが期待されている。



(図 1-7 エネルギー省が研究開発を進める 3 つのエクサスケール・コンピューティング²⁴)

²³ Oak Ridge “National laboratory, U.S. Department of Energy and Cray to Deliver Record-Setting Frontier Supercomputer at ORNL” (May 7, 2019). Retrieved from <https://www.ornl.gov/news/us-department-energy-and-cray-deliver-record-setting-frontier-supercomputer-ornl>

²⁴ GAO., *High-Performing Computing*, p. 14.

(2) 技術コヒーレンス (Coherence)

エクサスケール・コンピューターの技術コヒーレンスは、主に国防省と国立科学財団がリーダーシップを発揮し、NASA、国立衛生研究所 (NIH) そして海洋大気庁 (NOAA) が技術展開を担う (図 1-8)。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Defense	Funded 18 research, development, test, and evaluation projects, which provided competitively selected projects with high amounts of high-performance computing resources, such as increased hours, that would otherwise not be available to meet mission needs as demand for high-performance computing exceeds resources
Lead: National Science Foundation	Invested in software and data analytics systems at the academic campus, regional, and national levels which led to the deployment of the Frontera high-performance computer at the University of Texas at Austin's Texas Advanced Computing Center in October 2019
Deployment: National Aeronautics and Space Administration	Engineered a cloud computing solution for its user community that lowers the barriers to large scale computing and storage and enhances capabilities in Earth science, including weather and climate prediction
Deployment: National Institutes of Health	Issued funding opportunity announcements for grants and small business awards—including 418 grants, or supplements to grants, to support sustainable and scalable biomedical research software tools resulting in seven patents and more than 3,400 publications
Deployment: National Oceanic and Atmospheric Administration	Increased the availability of datasets to the public by moving over 130 datasets, such as historical weather and lightning observation data, to industry partners' cloud-based systems

(図 1-8 技術コヒーレンスを担保するための各政府機関役割²⁵⁾)

(3) 次世代コンピューティング技術の開発

現行の半導体技術の発展が限界を迎え、新たな大規模技術が台頭する、来るべき次世代の HPC 技術開発のために、国防省、エネルギー省そして国立科学財団がここでも主導的な役割を担う。その上で、例えば、R&D を担う IARPA (Intelligence Advanced Research Projects Activity) や NIST 更には、技術展開を担う NASA は量子技術といったポスト半導体技術の技術開発を推進している (図 1-9)。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Energy (DOE)	NSF and DOE signed a memorandum of understanding in 2019 to coordinate NSF's Quantum Leap Challenge Institutes and the DOE's National Quantum Information Science Research Centers in support of the National Quantum Initiative Act
Lead: National Science Foundation (NSF)	Supported a program that applies machine learning and artificial intelligence to better understand the impacts of urbanization, natural disasters, and climate change on natural ecosystems and city infrastructure
Foundational R&D agencies: Intelligence Advanced Research Projects Activity	Conducted research across three programs, one of which explored ways to reduce the physical footprint, power, and cost required for conventional computing storage technologies
Foundational R&D agencies: National Institute of Standards and Technology	Established a consortium of federal, academic, and industry partners to enable and grow a robust commercial quantum-based industry and associated supply chain in the United States
Deployment agencies: National Aeronautics and Space Administration	Used quantum computing and other technologies with the potential to improve astronauts' ability to perform activities on the International Space Station and to support communication with unmanned aircraft systems

(図 1-9 次世代コンピューティング技術における各政府機関の活動例²⁶⁾)

²⁵ GAO., *High-Performing Computing*, p. 16

²⁶ *ibid.*, p. 17

(4) 半永久的な HPC エコシステムの構築

ここでもエネルギー省、国防省そして国立科学財団が連携して研究を主導する。その上で3つの技術展開を担う政府機関である NASA, NIH そして NOAA が HPC のエコシステムのキャパシティビルディングを実行する(図 1-10)。こうした機関は、R&D 分野におけるソフトウェア開発の加速やデータやそのデータツールの普及等に努めている。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Defense (DOD)	Funded the development, use, and maintenance of software to support its mission needs, which had impact on 100 air, land, and sea weapon system classes
Lead: Department of Energy (DOE)	Supported 34 projects to develop a new high-performance computing software ecosystem under its Exascale Computing Project, some of which is also used by the NSF-supported Texas Advanced Computer Center
Lead: National Science Foundation (NSF)	Launched a training program in fiscal year 2017 to prepare and grow the workforce for careers in cyberinfrastructure and, by fiscal year 2020, made 75 awards in addition to providing support for early career faculty and undergraduate researchers
Deployment: National Aeronautics and Space Administration (NASA)	Collaborated with other agencies, such as DOE, NSF, and NOAA, on software ecosystem development to identify solutions that allow earth scientists to analyze and visualize large datasets associated with climate model outputs
Deployment: National Institutes of Health (NIH)	Made publicly available the data, computational models, and software developed in partnership between NIH's National Cancer Institute and DOE, which led to the development of an open-source software platform that provides deep learning methodologies to accelerate cancer research, among other things
Deployment: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	Identified short and long-term needs to meet high-performance computing requirements and provided the high-performance computing infrastructure to meet its mission goals

(図 1-10 ハイパフォーマンス・コンピューティングのエコシステムを確立するための各政府機関の活動例²⁷⁾)

(5) 官民連携の強化

最後に官民連携の強化が戦略目標として掲げられている。ここではエクサスケール・コンピューティングの研究開発に携わる全ての機関の参画が規定されており、関係省庁や研究所間の相互連携や情報の共有等が促進される(図 1-11)。

Lead Agency	Example of efforts
Department of Defense	Created a suite of software tools for teaching the concepts of design and computational aerodynamic analysis, which over 120 companies and 20 academic institutions used as of 2021
Department of Energy	Partnered with National Institutes of Health's National Cancer Institute on a program to use high-performance computing and artificial intelligence to accelerate specific areas of cancer research, and participated in a public-private partnership that uses computational approaches to reduce the time needed to discover and develop new cancer medicines
National Science Foundation	Awarded graduate research students with internships to acquire the professional competencies and skills needed for careers in science, technology, engineering and mathematics

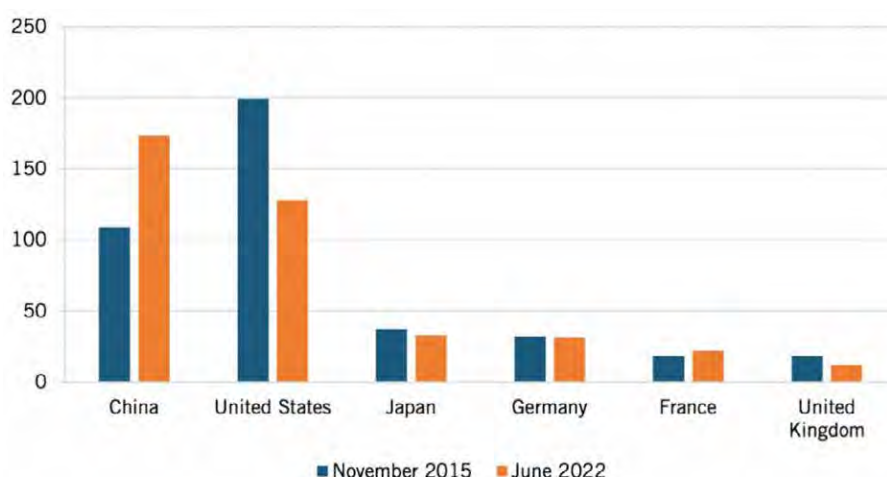
(図 1-11 官民連携における関係省庁の役割²⁸⁾)

²⁷ GAO., *High-Performing Computing*, p. 18

²⁸ 同上。

4. 中国におけるエクサスケール・コンピューティング技術とその開発動向

中国の先進コンピューティング技術はここ 10 年程で目覚ましい発展を遂げた。世界トップ 500 にランクインするスーパーコンピュータの数を見ると、中国のみこの 7 年でその数が飛躍的に増加している(図 1-12)。近年では「天河二号」(Tianhe-2)は 2013 年にスーパーコンピュータトップ 500 で 1 位を獲得する等、革新的な技術発展を見せている²⁹。中国では市場経済移行を目指した 1980 年代の改革開放政策の一環として 1986 年に「国家高技術研究発展計画」(通称「863 計画」)が策定され、2000 年代に入ると HPC もこの枠組みの中で技術開発のロードマップが明確に提示されるようになった。2002 年から 2005 年の間に「ハイパフォーマンス・コンピューティングとコアソフトウェア」というプロジェクトが始動し、HPC 発展のための技術・社会環境を担保する中国のグリッド CNGrid (China National Grid) を進める等 HPC の開発環境への政府が大きく舵を切るようになった³⁰。2006 年から 2010 年には、「高性能コンピューターとグリッドサービス環境」というプログラムが新たに掲げられ、こうした枠組みの中で 2011 年には「天河一号」(Tianhe-1A)が中国で初めてスパコン世界トップ 500 で 1 位の座を獲得することとなる。着実な技術力の進歩を背景に 2011 年から 2017 年には 3 番目のプロジェクトとなる「高性能コンピューターとアプリケーションサービス環境」が開始され、その枠組みで「天河二号」(Tianhe-2)といたさらなる高性能なスパコンが開発されることとなった³¹。



(図 1-12 国別世界トップ 500 のスパコン数³²)

²⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2016. *Future Directions for NSF Advanced Computing Infrastructure to Support U.S. Science and Engineering in 2017-2020*. (Washington, DC: The National Academies Press).

³⁰ Depei, Qian. "CNGrid: A test-bed for grid technologies in China." *Proceedings. 10th IEEE International Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems, 2004*. (IEEE, 2004).

³¹ Qian, Depei, et al., "High performance computing development in china."

³² Nossokoff, Mark, Sorensen, Bob and Joseph, Earl, *To out-compute is to out-compete: Competitive threats and opportunities relative to U.S. government HPC leadership*. (Hyperion Research, 2022), p.

こうした中で、エクサスケール・コンピューティングやそのアプリケーションにさらに特化した開発も進められてきた。2015 年には「ハイパフォーマンス・コンピューティング」という新たなプロジェクトが採択され、2016 年から 5 年計画で研究開発が始動した。具体的には 3 つのメーカーが主導するプロトコールが始動し、それぞれの強みを生かしてエクサスケール・コンピューティングの開発に着手してきた。以下でその 3 つのスパコンメーカーと研究機関によるエクサスケール・コンピューターのプロトコール製造における活動をまとめている。

表 中国のスパコンメーカー及び研究機関の活動³⁴

<p>曙光 (Sugon)</p> 	<p>曙光は 1996 年に中国で設立されたスパコンメーカーである。同社は特に、液浸冷却という技術を用いたエクサスケール・コンピューターのエネルギー効率に研究開発の力点を置いており、低温でも蒸発する冷却剤の原理を利用して従来のポンプを用いないより省エネな冷却を実現する。</p>
<p>中国人民解放軍国防科学技術大学 (NUDT) 「天河」チーム</p> 	<p>中国のスパコン「天河」(1号・2号)を開発した人民解放軍直轄の研究大学も今回のプロジェクトに参画している。天河2号でも使用 Matrix 2000 と類似したプロセッサを用いて試作品を作成。現在はエクサスケール・コンピューター向けのより高度な次世代プロセッサの開発にも着手。またインターコネクトサブシステムにおける膨大なエネルギー消費量も課題となっており、光電子コミュニケーションを利用した消費電力の削減にも尽力してきた。</p>
<p>国家並列計算機工学技術研究センター「神威」(Sunway)チーム</p> 	<p>2017 年まで世界最速を誇っていたスパコン「神威・太湖之光」(Sunway TaihuLight)を開発した国家並列計算機工学技術研究センターのチーム。高い性能とエネルギー要件を満たすために、「神威・太湖之光」で使用した SW26010 プロセッサをのエネルギー効率をさらに改善するとともに、エクサスケール・コンピューター仕様の次世代プロセッサの開発にも着手。特に工学技術領域での技術を一新させ、より効率的な冷却システムや高密度のアセンブリーそしてより効率の高いエネルギー共有システム等を今回のプロトコールで実現させた。</p>

このように、今年の中国における先進コンピューター開発は目覚ましい発展を遂げてきた。特に「天河2号」や「神威・太湖之光」は5年もの期間に渡り世界スパコントップ500で一位を

³⁴ Qian, Depei, et al., "High performance computing development in china." を元に執筆者作成。

維持してきた実績を誇り、その技術力の高さを世界に示した³⁵。同時に「CNGrid」に代表されるように、中国独自のグリッド環境の構築にも努めており、米国や欧州のグリッドが科学研究そのものに力点を置いているのに対して、中国のグリッドは、技術ドメインへのアプリケーションと HPC エコロジー環境に焦点が当てられている³⁶。

ここ 10 年で飛躍的な技術革新を実現した中国の先進コンピューティングであるが、幾つか課題も指摘されている。スパコンの世界ランキングでは世界首位を獲得するに至ったものの、その技術アプリケーションにおいては他国より秀でていたとは言えない。こうした問題は政府側の研究開発体制にも起因する。米国のスパコン研究がエネルギー省や国防省といった具体的な政策ニーズに取り組む行政機関が主導してきたのに対して、中国のそれは主に科学技術部や地方政府そして各スパコン製造メーカーに任されることが多かった。さらに、中国国内でのソフトウェア開発での弱さも指摘されている。図 11 が示す通り、最新の HPC のソフトウェアの多くは中国以外の技術先進諸国で開発されたものが多く、現状中国こうした諸外国の仕様に依拠した技術開発を余儀なくされている。素材科学やライフサイエンス、大気科学といった新興科学技術分野のドメインでも中国で実装されているソフトウェアは海外のオープンソースのものや商業用のソフトウェアを使用しているのが現状である。さらに、国内技術人材の海外流出等も懸念されており³⁷、国内でのエクサスケール・コンピューティング技術の内製化にはまだまだ課題も多い。

³⁵ Chi, Xuebin, “The ecology of high-performance computing.” In *China’s e-Science Blue Book 2020* (Springer, 2021).

³⁶ i b i d.

³⁷ 张云泉「中国造出顶级超算但软件跟不上发展」『环球时报』（2018 年 7 月 2 日）

Application domain	Name of software	Developed by	Started year
Atmospheric science	WRF	US	1999
Computational chemistry	Gaussian	US	1970
	ADF	Netherlands	1995
	MOLPRO	UK and Germany	1996
Fluid dynamics	Fluent	US	1983
	LS-Dyna	US	1996
Molecular simulation	GROMACS	Sweden	1991
Materials computation	VASP	Austria	2004
Basic mathematics library	Matlab	US	1984
	BLAS	US	1979
	LAPACK	US	1995
	FFTW	US	1997

(図 1-13 最新 HPC のソフトウェア一覧³⁸⁾)

5. 日本の先進コンピューティング技術：その動向と課題

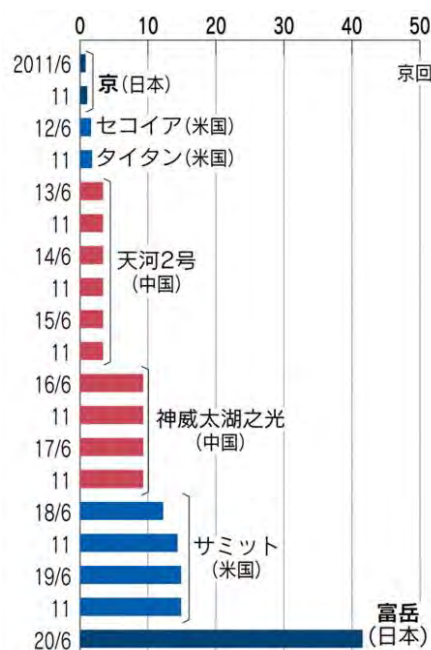
1990 年以降日本ではスパコン開発が一大産業となり、2000 年以降はスーパーコンピューター「京」のように世界トップレベルの計算速度と性能を兼ね備えたスパコンを生み出してきた。最近では、新型のスーパーコンピューター「富岳」が 8 年半ぶりに世界一を奪還し、中国の「神威・太湖之光」や米国の「サミット」を遥かに凌ぐ計算速度を叩き出したことはメディアでも話題を呼んだ(図 12)。こうした技術革新には、NEC や富士通、日立といった日本の民間製造業の貢献が大きく、我が国の先進コンピューティング技術は企業の高い研究力なくして発展することとはなかっただろう。

一方で政府も先進コンピューティング技術の革新に向けた明確なロードマップを掲げ、近年では Society5.0 を見据えた革新的コンピューティング技術の開発を進めている。文部科学省は「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術の創出」という戦略目標を掲げ、高速処理、低消費電力化、低コスト化等による情報システム全体の高効率化に向けて、従来性能を圧

³⁸ Chi, Xuebin, “The ecology of high-performance computing,” p. 227.

倒的に凌駕する革新的コンピューティングの基盤技術の創出を目指している³⁹。こうした戦略目標に基づき、文科省所管の科学技術振興機構(JST)は「情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出」と「アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の研究開発」を推進している⁴⁰。また経済産業省もこうした先進コンピューティングの開発に前向きである。2019年には「次世代コンピューターが実現する革新的ビジネス」と題したシンポジウムを開催し、AI及び量子コンピューターの可能性や金融分野でのその応用可能性等について、官民学それぞれの専門家が意見を交わした⁴¹。

研究者数を世界と比較しても日本は比較的高い位置にあることがわかる。組織毎の研究者数を見ると、1位は米国のカリフォルニア大学、2位が中国の中国科学院となり続いて3位に東京大学がランクインしている⁴²。さらに、先進コンピューティングと他の科学技術分野との複合領域における研究者数を見てみると、日本は先進コンピューティングとAI技術で世界3位となっている。しかし、全体的な研究者数を見れば、米国と中国が圧倒的に多い傾向にあり、特に中国における研究者数の増加は近年極めて顕著である。



(図 1-14 歴代世界一のスパコンとの1秒間の計算回数比較⁴³)

³⁹ 文部科学省「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」

https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/30/03/attach/1402603.htm

⁴⁰ 科学技術振興機構(CREST)、「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」

https://www.jst.go.jp/ki_soken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-4.html
https://www.jst.go.jp/ki_soken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-4.html

⁴¹ 経済産業省「次世代コンピューターが実現する革新的ビジネス」(2019年7月4日)

<https://www.meti.go.jp/press/2019/07/20190704002/20190704002.html>

⁴² アスタミューゼ社への再委託報告書。

⁴³ 「日本のスパコン『富岳』、8年半ぶり世界一奪還」『日本経済新聞』(2020年6月23日)

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ06065390S0A620C2MM8000/>

HPC のアプリケーションについても比較的重点的に政策議論が展開されている。文部科学省は「健康長寿社会の実現」、「防災・環境問題」、「エネルギー問題」、「産業競争力の強化」「基礎科学の発展」といった5つの重点分野を策定、各専門の研究機関や大学そして民間企業と協力してスーパーコンピューター「富岳」の社会実装を試みている⁴⁵。ここではスーパーコンピューターの高い計算能力や速度、一般的な科学技術への重要なインプリケーション等が強調されている(図 1-15)。

スーパーコンピューターの開発・利用の意義

◆ 科学技術の3つの方法

理論、実験、そして、シミュレーション

- ・スーパーコンピューターによるシミュレーションは、多くの分野で理論、実験と並ぶ重要な方法
- ・実験が困難な現象の解明や実験に時間がかかりすぎる場合、コンピュータを用いて仮想的に実験
- ・スーパーコンピューターを用いたシミュレーションの規模及び対象分野は、研究開発の進展と共に絶えず拡大

◆ 高性能計算機(スパコン)とシミュレーション

先端科学技術の実験に高度な実験装置が必要であるのと同様、より高精度なシミュレーションにより、世界に先駆けて、結果を出すためには、世界最高性能のスパコンが必要



(図 1-15 文科省資料 スーパーコンピューターの開発・利用の意義⁴⁶)

しかしながら、日本の先進コンピューティング技術開発は、その高い性能と技術力とは裏腹に、そのアプリケーション面で、米国に劣る点が多い。米国の先進コンピューティング技術政策と比較した場合に明らかなのは、文部科学省が所管する5つの重点分野のステークホルダの中に他の関係省庁が含まれていないという点である。米国場合は、国防省やエネルギー省といった政策ニーズにより近い関係省庁が先導を切って、先進コンピューターの技術開発を牽引してきたことはすでに述べた。日本の場合は、官民学の連携は強調される一方で、こうした政策が省庁の縦割り行政の中で完結してしまい、より政策や社会にニーズに沿った形での技術開発をする体制が構築されていない。明確な政策課題な社会・技術ニーズを満たすための先進コン

⁴⁵ 文部科学省「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) について」

https://www.mext.go.jp/a_menu/kai_hatu/jouhou/hpci/1307375.htm

⁴⁶ i b i d.

ピューティング技術の開発というようなムーンショット的な思考で科学技術政策が施行されるのではなく、むしろ高い性能を誇る先進コンピューターをどのような政策・社会ニーズの解決に用いようかという技術ありきの議論が先行してしまっている。こうした問題は中国の技術課題と共通するところもあるが、日本の場合は技術立国として世界の技術開発を牽引してきたが故に、こうしたムーンショット的な思考による技術開発戦略の策定が十分になされてこなかったと言える。今後経済安全保障の確保を主眼に置き、日本の国際競争力を高めるためにも、長期的な政策課題や社会・技術ニーズに沿った科学技術の基礎研究が先進コンピューティング分野でもなされる必要があるだろう。

第2節 次世代工業材料 (Advanced Manufacturing Materials)

今日の先端科学技術の発展と技術革新において素材科学が果たしてきた役割は極めて大きい。例えば、3D プリンターに代表されるアディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing: AM) 等の先端科学技術分野でも先端素材が技術革新を左右する重要な要素技術となっており、先端素材における技術革新は多種多様な分野で技術革新をもたらすことが期待されてきた⁴⁷。また先端素材技術はAI やマシーンラーニングさらには量子技術等の関連分野との関連性も極めて強く、素材分野一般はもちろん広く先端科学技術の発展に付与することが多くの研究からも指摘されてきた⁴⁸。

こうした中で、本章では特に先端素材科学の技術革新が目覚ましい分野の一つでもある「先端エンジニアリング素材」に焦点を当てて、マルチユースの観点からこうした素材技術がどのようにして、異なる用途や文脈で開発され実装・応用されてきたのかを分析する。特に**新素材の開発、既存素材における技術革新**について分析したのち、そうした先端科学素材が持つ経済安全保障上のインプリケーションについて、軍事・民生用途の両面から解説する。最後に主要各国の素材戦略について概観するとともに、日本の素材戦略に対してマルチユースの観点から政策提言をする。

1. 新素材開発

これまでにない新たな性質 (Property) を備えた新素材の開発が世界で進められてきた。特に米国の大学や研究機関を中心に研究が進められており、こうした新たな素材は、3D プリンターや半導体、ロボティクス等幅広い分野での技術革新にも貢献してきた。ここでは新素材の中でも特にマルチユースの観点から汎用性が高い新素材開発について解説する。

<ナノスケール3D プリンティング素材>

⁴⁷ Edward Wakefield, Stanford engineers develop new nanoscale 3D printing material. *3D Printing Media Network*, November 28, 2022. <https://www.3dprintingmedia.network/stanford-engineers-develop-new-nanoscale-3d-printing-material/>

⁴⁸ 例えば, Elton, D. C., Z. Boukouvalas, M. D. Fuge, and P. W. Chung, Deep Learning for molecular design—a review of the state of the art. *Molecular Systems Design & Engineering* 4(4): 828-849 (2019) 及び Mazurka, Łukasz, Agnieszka Pocha, Jan Kaczmarczyk, Krzysztof Rataj, Tomasz Danel, and Michał Warchoł. "Mol-CycleGAN: a generative model for molecular optimization." *Journal of Cheminformatics* 12 (1) (2020): 1-18, Thedford, R. Paxton, et al. The Promise of Soft Matter Enabled Quantum Materials. *Advanced Materials* (2022): 2203908. 等の研究を参照。

2022 年には、スタンフォード大学の研究チームがナノスケールの構造物を生成できる新たな素材を開発した。このナノスケール素材は 3D プリンターでナノスケールの構造物を作り出すために用いられるもので、様々な用途や目的に応じて極小の立体構造物を作り出すことができる**と期待されている**。この技術は、複数のポリマーで形成されるプリントする媒体に「**メタル・ナノクラスター**」(metal nanoclusters)を組み込むことで実現したものであり、**メタル・ナノクラスターが 3D プリンターのレーザーに触れた際に生じる化学反応を利用している**。これにより**近い将来、人工衛星やドローン、マイクロエレクトロニクス の内部を保護するより軽量なプロテクターの開発が可能となる**⁴⁹。

(1) 可変性ナノ素材

カリフォルニア工科大学、ジョージア工科大学そしてチューリッヒ工科大学の研究チームは、電気化学におけるシリコンとリチウム合金の化学反応を利用して、形状が変化する新たなナノ素材を開発している。形状変化が可能な素材はすでに存在しているが、例えば、水に濡れた時はある形状になり、乾いた時にはその形状が変化するといった具合にある形状から別の形状に変形しその状態を維持することしかできない。一方で今回の新素材は、その「中間状態」(‘in-between states’)を維持することも可能で、より柔軟に形状を変形させることができるようになる⁵⁰。こうした新素材技術は、**エネルギー貯蔵システムにおけるバッテリーの軽量化や安全性の向上、寿命の向上等々への応用が期待されている**。

(2) 高強度軽量素材

米国マサチューセッツ工科大学は、プラスチックほどの軽さで鉄よりも強固な新素材の開発に成功した。特殊な重合技術を用いて作られたこの新素材は、従来の一面性でスパゲティのような螺旋状の形状をした素材とは異なり、**2 重合体(two-dimensional Polymer)素材であり、軽量化と強度の両方を兼ね備えている**⁵¹。この素材は**車両の外部パーツや携帯電話、橋やその他の**

⁴⁹ Stanford University, New nanoscale 3D printing material designed by Stanford engineers could offer better structural protection for satellites, drones, and microelectronics. Stanford News, November 17, 2022. <https://news.stanford.edu/press-releases/2022/11/17/new-nanoscale-3d-structural-protection/>

⁵⁰ Caltech. New Metamaterial Morphs into New Shapes, Taking on New Properties. The Caltech Weekly. September 11, 2019.

⁵¹ Anne Trafton, New lightweight material is stronger than steel. MIT News. February 2, 2023. <https://news.mit.edu/2022/polymer-lightweight-material-2d-0202>

構造物の建築素材に用いられることが想定されており、多種多様な産業分野でのマルチユースが期待されている。

2. 先端素材における技術革新—先端セラミック素材

新素材の開発が進む一方で、従来の先端素材における技術革新は飛躍的に進んでいる。ここでは中でも、高温環境に適応できる先端素材を取り上げ、その技術革新について分析する。各産業分野の技術革新が高まるにつれて、その材料となる素材への温度要件も高まっている。例えば、極超音速ミサイルの保護素材やガスタービンの素材等強度とともに極めて高い温度条件を満たすことが求められる素材分野においては、こうしたニーズを満たすために飛躍的な技術革新が進んでいる。

(1) 先端セラミック素材

マイクロ波誘電体素材(Microwave Dielectric Materials)

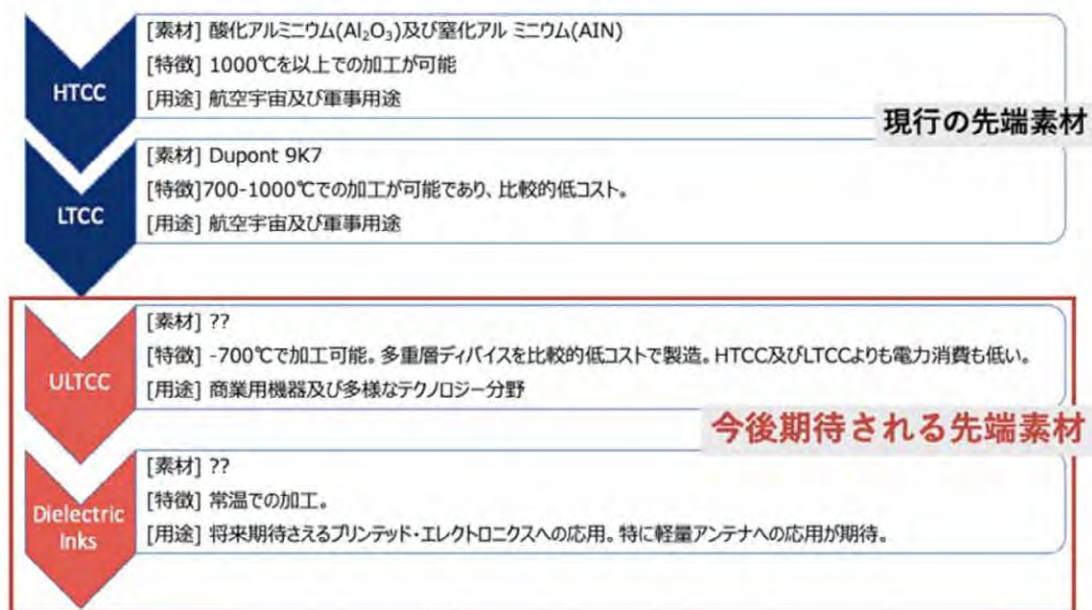
マイクロ波誘電体素材はセラミック素材であり、誘電体共振器(Dielectric Resonators)、レドーム(Radome)及び電磁シールド(Electromagnetic Shield)等に用いられる素材であり、軍事やエアロスペース分野でも応用がされてきた素材である。マイクロ波誘電体素材はこれまで、その求められる温度環境に応じて、高温同時焼成セラミック(High-Temperature Co-fired Ceramics: HTCC)、低温同時焼成セラミック(Low-Temperature Co-fired Ceramics: LTCC)と開発が進められてきた。ここ20年を概観する限り、高温環境でも高い誘電パフォーマンスを発揮する酸化アルミニウム(Al_2O_3)由来の高温同時焼成セラミックが軍事技術分野のマイクロ波電子通信に用いられてきた⁵²。

近年では、高温同時焼成セラミック(HTCC)と低温同時焼成セラミック(LTCC)の折衷素材とも言える極低温同時焼成セラミック(Ultralow Temperature Ceramics: ULTCC)が注目を浴びている。合わせて、誘電インク(Dielectric Inks)のさらなる開発に期待が高まっている⁵³(図 2-1)。こうした技術が近い将来軍事技術に転用される可能性が高い。事実、イスラエル企業がすでに

⁵² Shen, Liang-Yu, Philip G. Neudeck, David J. Spry, Glenn M. Beheim, and Gary W. Hunter. Electrical performance of a high temperature 32-I/O HTCC alumina package. Additional Papers and Presentations 2016.

⁵³ Sebastian, Mailadil T., Rick Ubiç, and Heli Jantunen, eds. *Microwave materials and applications*. (John Wiley & Sons, 2017).

誘電インクを用いた 3D プリンティング技術の特許を取得する等⁵⁴、すでに軍事技術への応用の可能性が示唆されている。



(図 2-1 セラミック加工素材の発展⁵⁵)

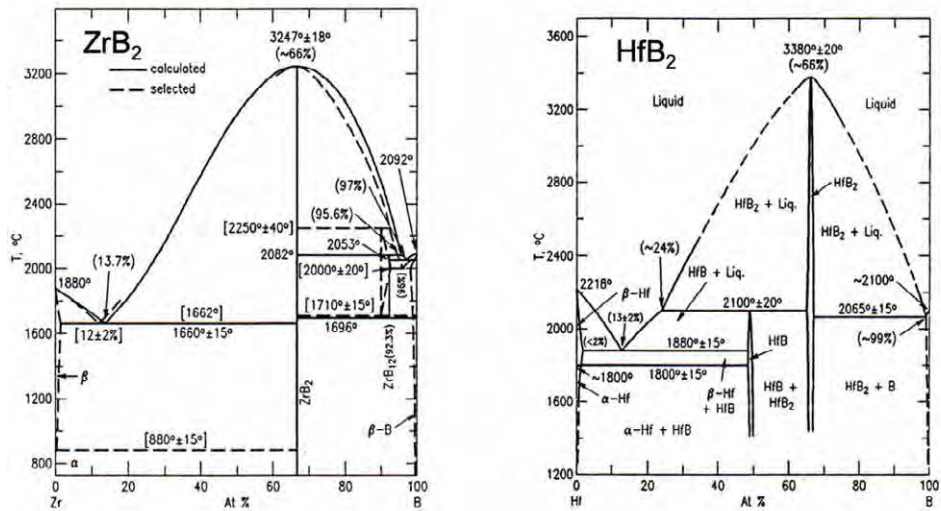
(2) 極高温同時焼成セラミック (Ultra-high Temperature Ceramics: UHTCs)

極高温に対応できるセラミック素材として、UHTCs がある。UHTCs は非酸化物素材であり、その融点は 3000℃以上と極めて高いことから、極度高温環境での素材として応用が期待されている。UHTCs は、ニホウ化ハフニウム (HfB_2) とニホウ化ジルコニウム (ZrB_2) といった融点が極めて高い元素を含む素材であり、1950 年台に原子炉の素材として研究が進められた (図 2-2)。その後、米航空宇宙局 (NASA) 及び米国空軍による研究が 1990 年代を通じて進められるようになり、弾道飛行試験等も実施された。UHTCs はその高い融点から、スペースシャトルやロケット等の先端部分に使用できる唯一の素材として期待されている (図 2-3)。また近年ではシリコンを混合させることで融点を高めることができることがわかっており、実証研究が進められている⁵⁶。UHTCs の研究は、米国やその同盟国に加えて中国でも盛んに行われてきた。

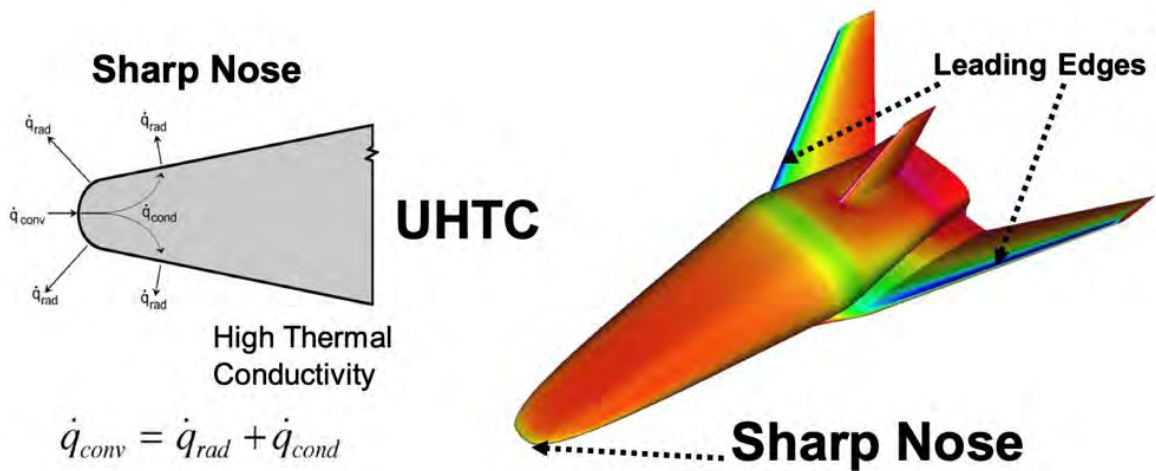
⁵⁴ Iftikhar, Umair. Nano dimension granted patent for dielectric ink. 3D Printing Industry. (February 26, 2019). Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/news/nano-dimension-granted-patent-for-dielectric-ink-149841/>

⁵⁵ Mahajan et. al. *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*, p.173 を元に著者作成。

⁵⁶ Thimmappa, Sravan Kumar, and Brahma Raju Golla. "Oxidation Behavior of Silicon-Based Ceramics Reinforced Diboride UHTC: a Review." *Silicon* (2022): 1-26.



(図 2-2 HfB₂ と ZrB₂ の融点⁵⁷)



(図 2-3 UHTCs の用途例⁵⁸)

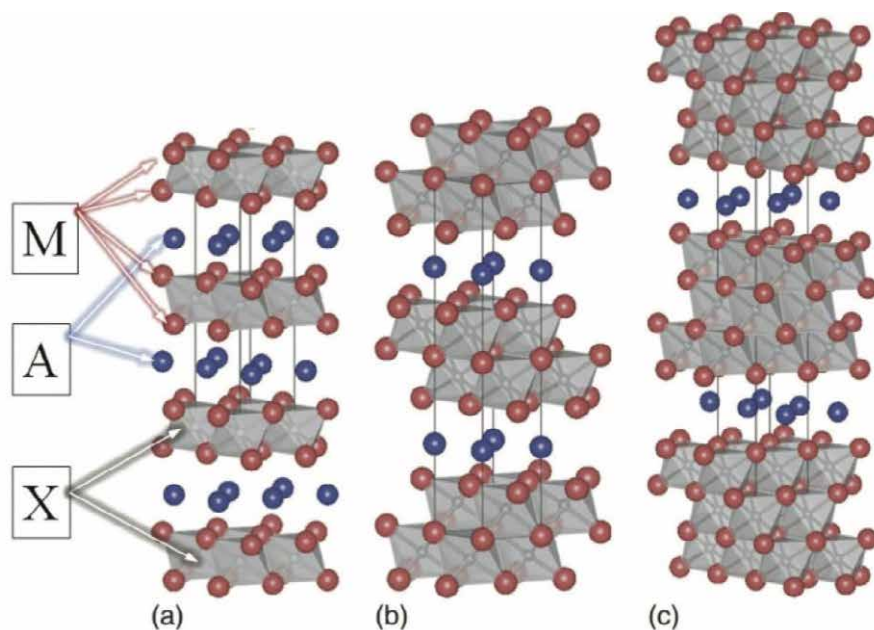
合わせて、炭化ケイ素(SiC)の複合素材(SiC-SiC, SiC-W等)も高温対応可能な素材として研究が進められている。特にガスタービンや原子力発電システムにおける有用性が認められており、極度に高温な環境に耐え得る先端素材としてエネルギー分野や航空宇宙分野での応用が期待されている⁵⁹。さらに、MAX phase materials と呼ばれる炭化物と窒化物によって六角形状の層で

⁵⁷ Sylvia M. Johnson, “Ultra High Temperature Ceramics UHTCs.” Langley Research Center. (September 29-30, 2015, NASA). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150022996/downloads/20150022996.pdf>

⁵⁸ i b i d.

⁵⁹ Chamberland, A., and Lane. J., “SiC/SiC ceramic matrix composites: A turbine engine perspective”. May 14, 2014. *Engineering Conferences International ECI* (Proceedings); Naslain, R., and F. Christin. “SiC-matrix composite materials for advanced jet engines.” *MRS Bulletin* 28(9) (2003): 654-658.

形成される新素材がある (図 2-4)。MAX の M は Transition Metal (遷移金属)、A は Si, Sn, Al といった IIIA や IVA エレメント、そして X は B, C, or N を意味する (図 2-5 の元素周期表を参照)。この過去 25 年間にわたりこの素材の研究が進められてきており、1400° C までの高温に耐え得るほか、他のセラミック素材と比較しても強固であり、放射線に対する耐久性も持ち合わせている等、極度環境に適した素材として研究がされてきた⁶⁰。また、1100 度で 2 時間加熱された場合に、素材そのもののキズへの自己治癒力 (self-healing) を発揮することが最新の研究で明らかになっている⁶¹。MXenes という 2 面状の無機化合物の素材も極度に高温な環境でも耐え得る素材として有力視されている (図 2-6)。2011 年に発見された新しい素材であり、MAX phase 素材同様に極度高温環境での適応が期待されている。また高度スループットコンピューティングを用いた 2017 年の研究で、100 万以上の安定した MXenes 素材がまだ未発見の状態にあることが明らかにされており、今後の更なる研究が期待されている⁶²。



(図 2-4 MAX Phase 構造のイメージ⁶³)

⁶⁰ Gonzalez-Julian, Jesus. "Processing of MAX phases: From synthesis to applications." *Journal of the American Ceramic Society* 104(2) (2021): 659-90.

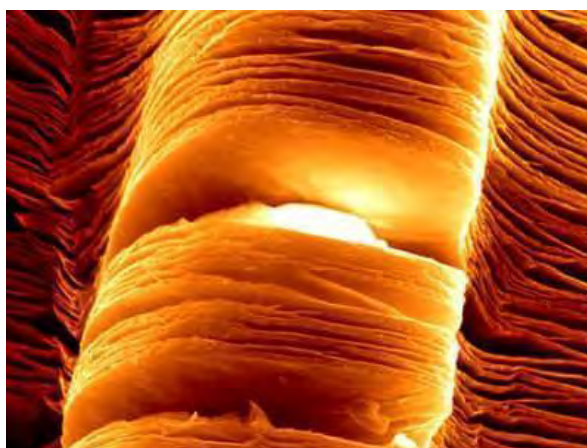
⁶¹ Ibid.

⁶² Tan, Teck Leong, et al. "High-throughput survey of ordering configurations in MXene alloys across compositions and temperatures." *ACS Nano* 11.5 (2017): 4407-18.

⁶³ Wozniak, Jaroslaw, Agnieszka Jastrzębska, and Andrzej Olszyna. "Challenges and opportunities in tailoring MAX phases as a starting materials for MXenes development." *Materials Technology* 37(11) (2022): 1639-50.

IA												VIII A									
1	H											2	He								
		Atomic number																			
		Symbol																			
		M A X																			
												5	6	7	8	9	10				
												B	C	N	O	F	Ne				
												13	14	15	16	17	18				
												Al	Si	P	S	Cl	Ar				
3	Li	4	Be																		
11	Na	12	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B		IB	II B									
19	K	20	Ca	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
				Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
				Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	Cs	56	Ba	La	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
				Ac	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	Fr	88	Ra																		
Lathanide				57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinide				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
				Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

(図 2-5 MAX の構成元素⁶⁵)



(図 2-6 MXenes のイメージ⁶⁶)

3. 公的利用・安全保障における利用

(1) 極度高温耐久素材と極超音速ミサイル

前述の極高温同時焼成セラミック(UHTCs)は米国や英国において主に軍事技術の要素技術として研究開発が進められてきた経緯があり、近年では特に極超音速技術への応用が期待されてきた。特に、極超音速ミサイルのレーダーを保護するためのレドーム(Radome)の素材に用いられる素材は、飛行中の高温やその他の環境変化に耐え得る必要がある。極超音速巡航ミサイルの

⁶⁵ i b i d.

⁶⁶ <https://www.nanowerk.com/mxene.php>

温度は 1000° C から 1500° C に及ぶとされており、また雨や風及び急速な温度変化等々その他の外部環境にも適用できる高い仕様が求められる⁶⁷。高い温度要件と環境適応要件が求められる。しかしながら、製品化されている現行のレドーム素材では、極超音速の飛行・巡航における耐久要件を十分満たし得ない⁶⁸。

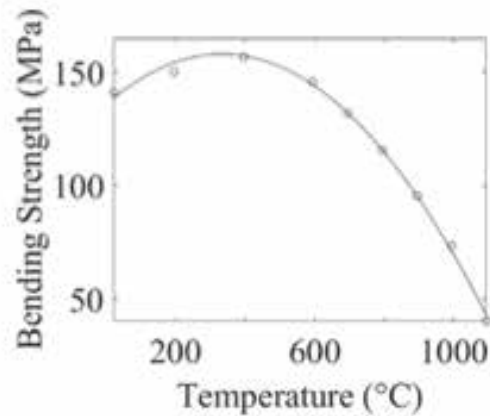
現行で商品化されているレドーム素材としては、米国 Corning 社の Pyroceram 9606 や Slip Cast Fused Silica (SCFS) や Raytheon 社の Rayceram 8 等がある。しかし、これらは高温環境で十分な曲げ強さ (Flexural Strength) を発揮できていない。例えば、米国 Corning 社が開発した Pyroceram 9606 は、1000° C を越える環境下で機能せず、1349° C で溶け出すことがわかっている。図 7 が示す通り、Pyroceram 9606 は 400° C 前後で最大の曲げ強さ (Bending Strength) を示し、600° C を超えたあたりから急激にそのパフォーマンスが落ちることがわかる。2018 年には、韓国の空軍で Pyroceram 9606 を使用したレドームで相次いで不良が発生したことが報告されている。リー (2018) らの研究によると、不良の原因は大気中の湿気への過度な露出による腐食であることわかった⁶⁹。このように現行の素材では極超音速ミサイルの外部環境に十分適応できないという課題が共有されてきた。こうした中で、1000° C を越える高温環境でも常温と変わらない強度・耐久パフォーマンスを発揮できる革新的な素材への関心が高まっている。こうした中で、様々な加工が可能なスプリットリング共振器 (Split-ring Resonator: SRR) 構造というメタマテリアルの構造への期待が高まっている (図 2-8)。SSR 構造が極度高温環境でどれほどのパフォーマンスを発揮するかという実験も行われており、様々な構造のメタマテリアルの有用性が科学者たちによって検証されている⁷⁰。

⁶⁷ Van Wie, David, D' Alessio, Stephen, White, Micheal, "Hypersonic airbreathing propulsion." *JHU APL Technical Digest*, 26(4) (2005).

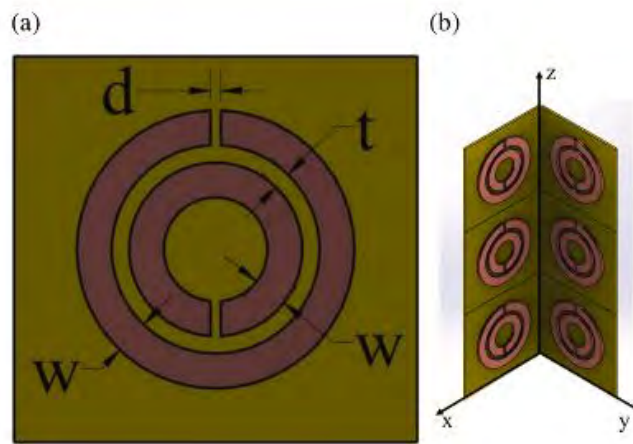
⁶⁸ Kenion, Taylor, Ni Yang, and Chengying Xu. "Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: A review." *Journal of the European Ceramic Society* 42 (1) (2022): 1- 17.

⁶⁹ Lee, Changmin, Ik-Sik Kim, and Bokwon Lee. "Slow crack growth in a cordierite-based glass-ceramic missile radome due to stress corrosion." *Engineering Failure Analysis* 93 (2018): 76-86.

⁷⁰ Kenion, Taylor, Ni Yang, and Chengying Xu. "Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: A review." *Journal of the European Ceramic Society* 42(1) (2022): 1-17.



(図 2-7 Pyrocera 9606 の曲げ強さ⁷¹⁾)



(図 2-8 SSR の構造⁷²⁾)

(2) 半導体と素材科学

本報告書の 1 項を構成する半導体技術も先端素材の発見とその開発に大きく依存している。特に半導体素材では、その素材の極限までの純度の高さや微細な変化に対する高い感度さらには環境負荷に配慮した素材選定等が重要視される。半導体の技術開発のこうした技術要件満たすべく、これまで多数の新素材が発見されてきた(図 9)。特に高純度要件は、技術的にもチャレンジングな課題とされ、ppt (1 兆分の一)の領域に達するほどの非常に極度な純度が求められる。こうした高い純度の確保のために、品質保証及び工程管理技術としてよく用いられる PAT(Process Analytical Technology)や補完的な統計手法等が用いられている。

⁷¹ Ibid., p. 3

⁷² Ibid., p. 10

Manufacturing Process Step	Type of Processing	General Material Classes	Current Material Challenges	Related Chemical Engineering Processes
Deposition	<ul style="list-style-type: none"> • Plasma-enhanced • Chemical vapor • Atomic layer • Spin-on • Electroplating • Physical vapor 	<ul style="list-style-type: none"> • Organosilane • Silicon-containing polymers • Organometallics • Metal-containing formulations 	<ul style="list-style-type: none"> • Safe handling • Environmental and purity 	<ul style="list-style-type: none"> • Synthesis • Purification • Packaging • Chemical distribution
Etching and dopant gases	<ul style="list-style-type: none"> • Plasma-assisted etching 	<ul style="list-style-type: none"> • Inert and reactive gases • Halogenated gases • Mixed specialty gas blends 	<ul style="list-style-type: none"> • Safe handling • Environmental and purity • Packaging technology 	<ul style="list-style-type: none"> • Synthesis • Purification • Packaging
Lithography	<ul style="list-style-type: none"> • Spin coating 	<ul style="list-style-type: none"> • Formulated-polymer blends • Solvents • Metal-containing polymeric blends 	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental and purity 	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer synthesis • Distillation • Purification
Wet cleaning	<ul style="list-style-type: none"> • Spin coating • Immersion bath 	<ul style="list-style-type: none"> • Aqueous, semiaqueous, and solvent-based formulations • Acids, bases • Solvent 	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental and purity 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemical mixing • Purification • Filtration • Packaging
Chemical mechanical planarization	<ul style="list-style-type: none"> • Spin coating 	<ul style="list-style-type: none"> • Particle-containing aqueous formulations 	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental and purity 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemical mixing • Purification • Filtration • Packaging

(図 2-9 半導体関連素材一覧⁷³⁾)

(3) 素材技術とリチウムイオン蓄電池

リチウムイオン蓄電池における技術革新にもナノテクノロジーが重要な役割を果たしてきた。蓄電池の電極に極小のナノマテリアルを用いることで、蓄電時と放電時に生じるストレスを低減させ、より効率的なバッテリー技術を実現する。LiMn_{1.5}Ni_{0.5}O₄ や LiCoPO₄ が次世代リチウムイオン蓄電池の電極 素材として注目されてきた⁷⁴。米国ジョージア工科大学の研究チームは、Al₂O₃ でコーティングされた電極が従来の電極よりも 2.5 倍のエネルギーを保持することを実証している⁷⁵。またリチウムメタルを用いた陽極が従来のリチウムイオン蓄電池のパフォーマンス

⁷³ National Academies of Sciences, *Engineering, and Medicine. New Directions for Chemical Engineering.* (Washington, DC: the National Academies Press, 2022), p. 181.

⁷⁴ Venugopal, Ganesh, Andrew Hunt, and Faisal Alangir. "Nanomaterials for energy storage in lithium-ion battery applications." *Material Matters* 5, (2) (2010): 42-5.

⁷⁵ Waller, Gordon Henry, Philip D. Brooke, Ben Harris Rainwater, S. Y. Lai, Renzhong Hu, Yong Ding, Faisal M. Alangir, Kenneth H. Sandhage, and M. L. Liu. "Structure and surface chemistry of Al₂O₃

スを大きく向上させることも最新の研究で明らかになった⁷⁶。さらに MIT の研究者らは、半固体状の水銀合金が両方の電極の感覚を埋めてしまう樹状突起(Dendrite)を自ら減少させることで、バッテリーの機能低下を防止することを発見している⁷⁷。このように、先端素材による蓄電池の技術革新の研究は学術雑誌でも多く掲載されており枚挙にいとまがない。しかし、重要なことはナノテクノロジーの発展により蓄電池技術における従来の課題が克服されたり、あるいは従来のリチウムイオン蓄電池を遥かに凌駕する機能性を実証したりとその汎用性が極めて高いということだろう。

(4) 素材科学と AI 技術

最近では、マシンラーニングや AI 技術等の革新技术も素材の発見や開発や実証に盛んに用いられるようになった⁷⁸。特に AI 技術ベースにした識別モデルによって、新素材を仮説的に創り出すといった革新的な技術も台頭しつつある⁷⁹。例えば、ポーランドの科学者たちは、2020 年

coated LiMn₂O₄ nanostructured electrodes with improved lifetime." *Journal of Power Sources* 306 (2016): 162-170.

⁷⁶ Albertus, Paul, Venkataramani Anandan, Chunmei Ban, Nitash Balsara, Ilias Belharouak, Josh Buehner-Garrett, Zonghai Chen et al. "Challenges for and pathways toward Li-metal-based all-solid-state batteries." (2021): 1399-1404.

⁷⁷ Park, Richard J.-Y., Christopher M. Eschler, Cole D. Fincher, Andres F. Badel, Pinwen Guan, Matt Pharr, Brian W. Sheldon, W. Craig Carter, Venkatasubramanian Viswanathan, and Yet-Ming Chiang. "Semi-solid alkali metal electrodes enabling high critical current densities in solid electrolyte batteries." *Nature Energy* 6 (3) (2021): 314-322.

⁷⁸ より最新の研究としては、Liu, Zhaocheng, Lakshmi Raju, Dayu Zhu, and Wenshan Cai. "A hybrid strategy for the discovery and design of photonic structures." *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* 10, no. 1 (2020): 126-135; Loke, Gabriel, Tural Khudiyev, Brian Wang, Stephanie Fu, Syamantak Payra, Yorai Shaoul, Johnny Fung et al. "Digital electronics in fibres enable fabric-based machine-learning inference." *Nature communications* 12, no. 1 (2021): 1-9; Long, Xu, Ming-hui Mao, Tian-xiong Su, Yu-tai Su, and Meng-ke Tian. "Machine learning method to predict dynamic compressive response of concrete-like material at high strain rates." *Defence Technology* (2022)等を参照。

⁷⁹ Elton, D. C., Z. Boukouvalas, M. D. Fuge, and P. W. Chung, Deep learning for molecular design—a review of the state of the art. *Molecular Systems Design & Engineering* 4(4):828-849 (2019).

に Mol-CycleGAN モデルという独自のモデルに基づき、本物と類似した性質を有する擬似素材を生成することに成功している⁸⁰。こうした傾向は近い将来、素材科学の手法に大きなパラダイムシフトを起こすことになるだろう。これまでは、ラボでの実験による試行錯誤で新素材の発見や開発に挑んできた科学者たちが、原子や分子構造体のデータに基づき、最適な素材を発見あるいは人工的に開発するということが常識になる日もそう遠くない。この意味で AI やデータ科学が素材研究に与える影響は大きく、今後もこうした分野横断的な研究動向に注目する必要がある。

4. 各国の素材戦略

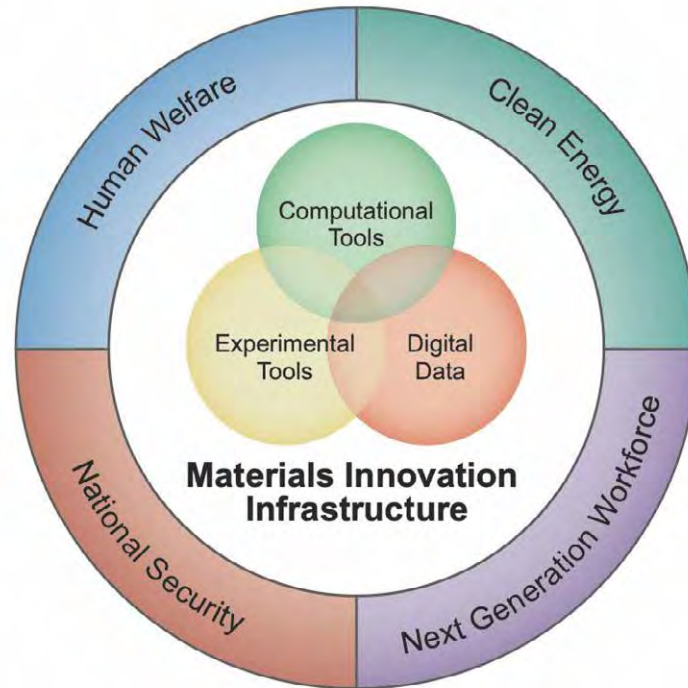
ここでは米国、中国そして日本に焦点を当てて、各国の素材研究開発戦略と枠組みを分析する。

(1) 米国

米国の科学技術政策は様々な技術領域と関係を持つ先端素材研究における重要な舵取りを担ってきた。近年経済安全保障の文脈で注目を集めてきた 3D プリンティング技術や量子技術といった技術に用いられる先端素材の研究は、米国は国防省やエネルギー省等の関連省庁や国立の研究機関が政策面でのイニシアティブを発揮して、新素材の発見と開発に貢献してきた。米国の先端素材研究開発において近年重要な役割を果たしてきた政策的枠組みとして Materials Genome Initiative (MGI)がある。MGI は 2011 年のオバマ政権下で、先端素材の発見、製造そしてその応用を加速させることを目的に発足された組織であり、新素材の発見からその開発、統合、標準化そして応用に至るまでの一連のサイクルを管理・実装する仕組みを確立している⁸¹。この MGI の枠組みには、米国エネルギー省と国防省をはじめ、国立科学財団(NSF)や国立標準技術研究所(NIST)等も参画している。MGI は、先端素材の開発をその他の先端科学技術との関連性を意識しながら、広義の安全保障と社会保障の基盤として位置づけている点にその特徴が読み取れる。図 2-10 が示す通り、AI やマシンラーニングを含むコンピューター技術等が、先端素材研究における革新を後押しするインフラとして整備されており、その波及領域は国家安全保障、クリーンエネルギー、社会保障と多岐にわたる。

⁸⁰ Maziarka, Łukasz, Agnieszka Pocha, Jan Kaczmarczyk, Krzysztof Rataj, Tomasz Danel, and Michał Warchoń. "Mol-CycleGAN: a generative model for molecular optimization." *Journal of Cheminformatics* 12, no. 1 (2020): 1-18.

⁸¹ Office of Science and Technology Policy, *Materials Genome Initiative for Global Competitiveness*, (Washington, DC, June, 2011).

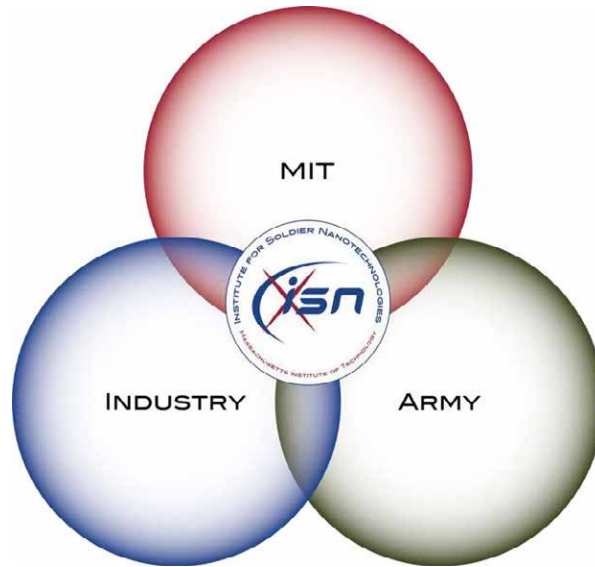


(図 2-10 MGI の概念⁸²⁾)

米国の素材研究は、大学の研究機関と政府との連携に特徴がある。例えば、マサチューセッツ工科大学(MIT)では、Institute for Soldier Nanotechnologies(ISN)という研究機関が2002年に設立され、米国陸軍そして産業界と連携して、軍事技術に資する素材研究を進めてきた(図2-11)。ISNはナノテクノロジーの根幹に関わる基礎研究に従事するとともに、そうした技術を戦闘員の生命保護とその戦闘能力の向上に結びつける役割を担っている⁸³。MIT物理学部のJohn Joannopoulos教授は、ISNとそのナノテクノロジー分野におけるイノベーションが産業技術そして軍事技術に多大な影響を与えてきたことを強調する。また、ISNの研究に携わった学生たちは自らスタートアップ企業を立ち上げることも珍しくなく、テキサスA&M大学教授で元ISNのディレクターを務めたNed Thomas博士は、MITの企業家精神相まって、米国の多くのスタートアップ企業がISNから生まれたことを説明している。

⁸² Ibid., p. 8.

⁸³ National Academies of Sciences, *Engineering, and Medicine. Materials Science and Engineering in a Post-Pandemic World: A DoD Perspective: Proceedings of a Workshop.* (2022).

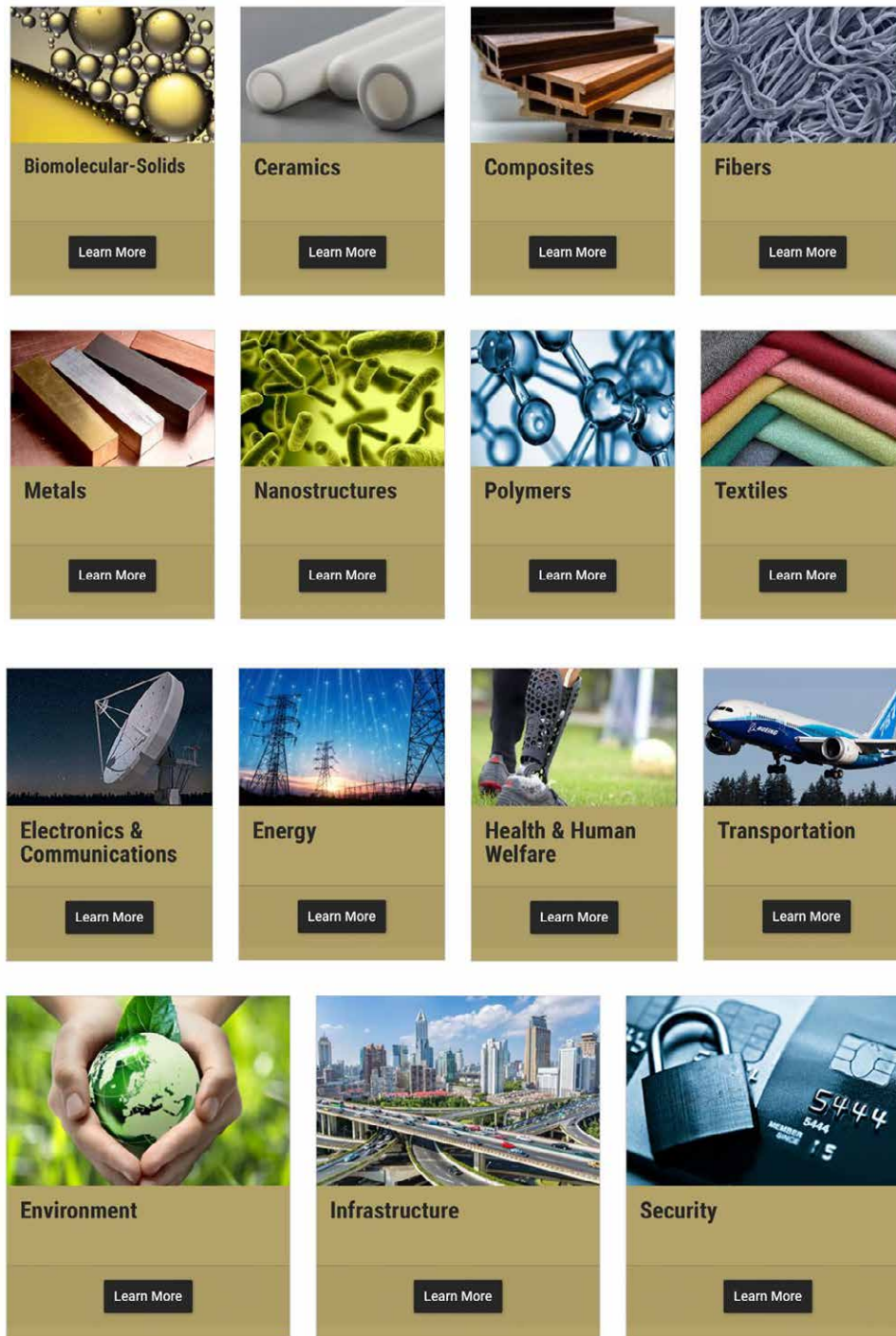


(図 2-11 ISN の概念⁸⁴)

また、リチウムイオン蓄電池の研究に代表されるように、素材の基礎研究と応用技術のニーズとをうまくマッチングさせる仕組みは大学の組織体制とも関連しているように思われる。例えば、ジョージア工科大学の素材科学工学部の HP では、基礎となる素材に関する研究と合わせて、“Challenges”と題した社会における技術課題項目が列挙されている(図 2-12)。このように米国の大学研究機関では、素材の基礎研究と特定の技術ニーズとを一つのつながりとして研究するという体制が構築されており、それゆえに革新的な素材技術が即座に実際の応用技術や社会実装に結びつく仕組みが形成されているとあって良いだろう。近年、米国エネルギー省が Critical Materials Institute という重要素材研究の官民学連携プラットフォームを形成しているのも、こうした素材の基礎研究と技術ニーズそして社会実装が関連していることの証左である⁸⁵。

⁸⁴ MIT, “What is ISN?” <https://isn.mit.edu/what-isn>

⁸⁵ CMI, <https://www.ameslab.gov/cmi/>



(図 2-12 ジョージア工科大学素材科学工学部の HP。上が素材研究、下が技術課題⁸⁶⁾)

(2) 中国

中国の素材開発戦略

⁸⁶⁾ <https://www.mse.gatech.edu/materials>

中国は 2015 年に国家産業マスタープラン「中国製造 2025」を掲げて以来、先端素材を含む 10 の先端科学技術項目を挙げて急速な研究開発を進めてきた。特に先端素材は、10 つのうちの他の産業項目である情報科学技術やロボティクス、新エネルギー技術といった先端科学技術の基礎をなすものでもあり、中国政府も先端素材の発見及びその開発にこの 10 年あまり巨額の研究資金を投じてきた。他国と比較した場合、中国の素材研究開発は包括的に様々な素材分野で論文発行数と特許数を増やそうという狙いが見受けられる。例えば、中国科学技術部は 2016 年から 2020 年の期間で 3 億ドルもの予算を電子素材、バイオ・メディカル マテリアル、ナノテクノロジー、及び素材遺伝子工学の分野等に投じている。これに加えて、中国国家自然科学基金は、640 百万ドルの研究費を確保し、メタルマテリアル、無機非金属素材、有機ポリマー素材といった分野の研究開発を助成している⁸⁷。先端素材研究へのこうした多額の国家投資の背景には、独自のサプライチェーンを構築することで、外国のサプライヤーへの依存を軽減するという中国政府の意図がある。また、研究者数を見ても、他国の研究者数が比較的横ばいに推移しているのに対して、中国における先端工業素材研究の研究者数はここ数年で増加傾向にある⁸⁸。

2011 年に米国で設立された MGI を模倣する形で、中国政府は Materials Genome Engineering (MGE) を 2016 年に設立。素材科学研究に資するデータベースの構築ビッグデータ科学の活用を推進してきた。MGE は、製鉄企業や自動車製造企業のような素材科学に関連する民間企業にタイムリーなナレッジ提供を行うため、データマイニングソフトウェアのプラットフォームを集権化させることをその目的としており、政府主導でより効率的で低コストの先端素材の生産に着手してきた⁸⁹。こうした国家産業戦略 は次期マスタープランとなる「中国標準 2035」でも踏襲されることとなる⁹⁰。「中国標準 2035」では 従来の重要科学技術のみならず、農業や製造業分野での技術革新にも焦点が置かれている点で、先端素材の重要性もより一層増していると言って良い。「中国標準 2035」戦略がある種の「技術の冷戦」(Technological

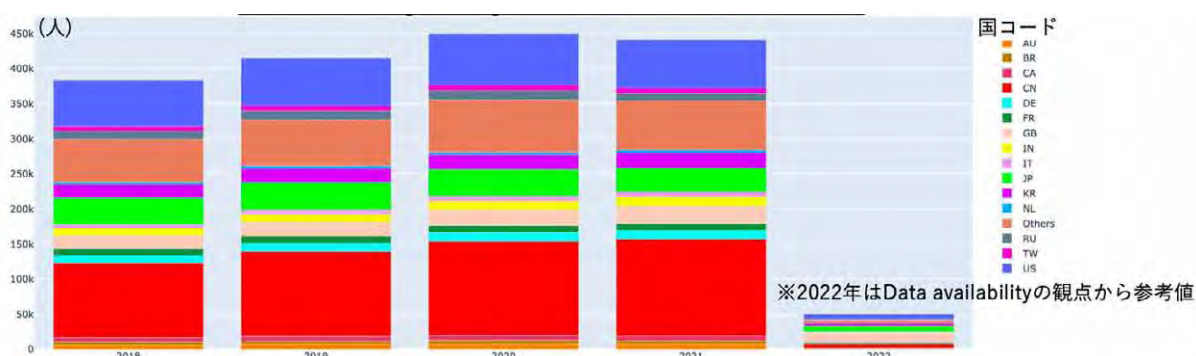
⁸⁷ National Academies of Sciences, *Engineering, and Medicine, frontiers of materials research: A decadal survey*. (Washington DC: National Academies Press, 2019).

⁸⁸ アスタミューゼ、『令和 4 年度 「我が国が戦略的に育てるべき安全・安心の確保に係る重要技術等の検討業務」 内閣府が指定する 20 の技術分野の広範囲調査に関する業務委託 最終報告書』(GRIPS 向けの再委託調査報告書)(2023 年 2 月 16 日)(以下、アスタミューゼ社再委託レポート), p. 34 頁

⁸⁹ O' mera, Sabah, The materials reality of China. *Nature* 567 (2019).

⁹⁰ Bruyère, Emily de La & Picarsic, Nathan, *China Standard 2035: Beijing' s Platform Geopolitics and "Standardization Work in 2020*. (Horizon Advisory, April, 2020).

Cold War) 的状況を作り出すことで、国内製造バリューチェーンの根幹を担う先端素材とそれに付随する科学技術の重要性が増している⁹¹。



(図 2-13 Advanced Engineering Materials 領域の国別研究者数推移⁹²)

ナノテクノロジー

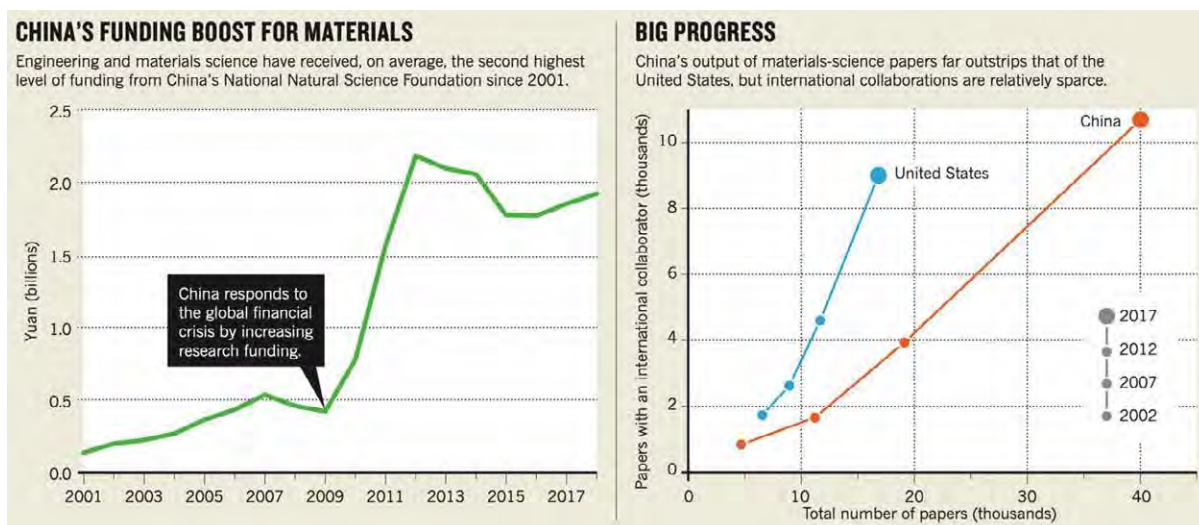
中国が素材研究を包括的に支援する中でも、特に注力している素材分野がいくつかある。まず、近年ナノテクノロジー分野での発展が目覚ましい。2000 年から 2015 年の間に 10 億ドル以上もの予算がナノテクノロジー研究に費やされ、政府の中長期技術開発計画でも重要領域の一つとして認識されてきた⁹³。国家自然科学基金委員会は 2018 年に 20 億元を超える国家予算をナノテクノロジーを含む 701 の研究プロジェクトに提供した上に、同年中国科学技術部は、16 億元をナノテクノロジーを含む 6 つの特別研究プロジェクトに投じることを発表した。近年の研究資金の推移と研究成果を見てもその傾向は顕著である(参考: 図 2-14)。中国は素材科学が関連するバッテリー(蓄電池)、半導体、先端素材、バイオテクノロジーを含む 23 の分野や世界トップの研究水準を維持している。特にリチウムイオン蓄電池の研究は、中国科学院主導の下、盛んに行われており、2018 年 11 月には清華大学発のスタートアップである Qing Tao

⁹¹ Gargeyas, Arjun, “China’s ‘Standards 2035’ project could result in a Technological Cold War.” *The Diplomat* (September 18, 2021). Retrieved from <https://thediplomat.com/2021/09/chinas-standards-2035-project-could-result-in-a-technological-cold-war/>

⁹² アスタミューゼ社再委託レポート, p. 34.

⁹³ Qiu, Jane, “Nanotechnology development in China: challenges and opportunities.” *National Science Review*, 3 (2016), 148-152.

Energy Development が中国初となる全固体蓄電池を開発し、2020 年を目処に電気自動車向けの実装を目指し研究が進められてきた⁹⁴。



(図 2-14 中国における素材研究資金と論文発表数の推移⁹⁵)

極高温耐熱素材

中国は極度高温にも耐える耐熱素材 UHTCs の研究でもその論文出版数と特許申請数で他国を凌駕している。特に、高エントロピー合金(high-entropy alloys)、MAX materials, そして MXenes における論文出版数と特許申請数は 2010 年以降右肩上がりに上昇しており、2011 年の段階では中国のそれは米国や日本と同じかそれ以下の数であったのに対して、この 10 年で 5-8 倍近い数の論文出版と特許が申請されている⁹⁶。米国や日本と比較してもその量は圧倒的である。

中国の素材戦略の限界

量の面で他国を圧倒する中国の先端素材研究であるが、中国の科学者の間では限界も指摘されている。ナノテクノロジーや構造素材の分野では世界をリードする論文出版数とともに質

⁹⁴ Freist, Roland, "China manufactures solid state batteries in series". *Hannover Messe* (December 13, 2018). Retrieved from <https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/china-manufactures-solid-state-batteries-in-series>

⁹⁵ O' meara, Sabah, "The materials reality of China."

⁹⁶ Priem, Jason, Heather Piwowar, and Richard Orr. *OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts*. (ArXiv, 2022).

を誇るものの、素材科学全体としては依然として、米国や欧州に劣る⁹⁷。また研究そのものの質においても幾つか懸念が示されている。中国の素材科学技術政策は非常に短期間での商業化と製品化に重きが置かれており、長期的視野に立った基礎研究が疎かになっている。また、こうした短絡的な視野は研究者そのものの姿勢にも影響を与えており、大学院生らもトップジャーナルへの査読付き論文の投稿が修了要件となっていることも多く、学会全体としてリスクが伴うイノベティブな研究が限られてしまうという弊害が生じている。研究者たちの間ではより長期的視野になった革新的な研究に取り組むべきという声もあり、急速に科学技術の発展を目指す中国政府当局の目論見の裏で、真に革新的な研究がどれほどあるのかと疑問を呈する国内科学者も少なくない⁹⁸。

(3) 日本

日本はこれまで、民間企業での技術開発を中心に、世界の素材科学の研究をリードしてきた。中でも化学産業が素材産業全体の6-8割を占めており、収益構造を見ても化学素材の製造で大きな利益を上げてきた⁹⁹。ここ半世紀近くの素材研究におけるノーベル賞受賞者数を見てもその研究の質の高さは明らかである(図 2-15)。また素材技術の実装においても、その可能は極めて高い。近年注目されているリチウムイオン蓄電池や炭素繊維に関わる研究でも今後多様な領域で社会実装が期待される技術が多数存在する(図 2-16)。

近年では様々な先端科学技術の開発に関わる先端科学素材のさらなる技術革新のために、「統合イノベーション戦略 2020」の枠組みの中で、「マテリアル革新力強化のための戦略」策定を目指し、産官学が一体となって総合的なマテリアル・イノベーションの実現に取り組んでいる。特に、素材研究は日本企業が大学等で生み出されたナレッジの実装に比較的成功している分野である。博士号取得者が企業で活躍する機会も他の技術領域と比較しても多い傾向にある¹⁰⁰。こうした民学のシナジーが発揮されやすい分野であるが故に、リチウムイオン電池や青色LED、ネオジム磁石等 20 世紀後半に様々な革新素材が日本初で生み出され、世界からも高い評価を受けてきた。

⁹⁷ O' mera, Sabah, "The materials reality of China."

⁹⁸ i b i d.

⁹⁹ 経済産業省「素材産業におけるイノベーションの役割と期待」(2018年1月)

¹⁰⁰ 経済産業省「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて(戦略準備会合取りまとめ)」マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合(2021年6月2日)。

受賞年	氏名 (受賞時年齢)	部門	対象研究
1949	湯川 秀樹 (42)	物理学賞	核力の理論的研究に基づく中間子の存在の予想
1965	朝永 振一郎 (59)	物理学賞	量子電磁力学の分野における基礎研究と素粒子物理学についての深い結論
1973	江崎 玲於奈 (48)	物理学賞	半導体内および超伝導体内の各々におけるトンネル効果の実験的発見
1981	福井 謙一 (63)	化学賞	化学反応過程の理論的研究
1987	利根川 進 (48)	生理学・医学賞	抗体の多様性に関する遺伝的原理の発見
2000	白川 英樹 (64)	化学賞	導電性高分子の発見と発展
2001	野依 良治 (63)	化学賞	キラル触媒による不斉反応の研究
2002	小柴 昌俊 (76)	物理学賞	天文物理学、特に宇宙ニュートリノの検出に対するバイオニクス的貢献
2002	田中 耕一 (43)	化学賞	生体高分子の同定および構造解析のための手法の開発
2008	南部 陽一郎 (87)	物理学賞	素粒子物理学における自発的対称性の破れの発見
2008	小林 誠 (64)	物理学賞	小林・益川理論とCP対称性の破れの起源の発見による素粒子物理学への貢献
2008	益川 敏英 (68)	物理学賞	小林・益川理論とCP対称性の破れの起源の発見による素粒子物理学への貢献
2008	下村 脩 (80)	化学賞	緑色蛍光タンパク質 (GFP) の発見と生命科学への貢献
2010	根岸 英一 (75)	化学賞	有機合成におけるパラジウム触媒クロスカップリング反応の開発
2010	鈴木 章 (80)	化学賞	有機合成におけるパラジウム触媒クロスカップリング反応の開発
2012	山中 伸弥 (50)	生理学・医学賞	成熟細胞が、初期化され多能性を獲得し得ることの発見
2014	赤崎 勇 (85)	物理学賞	明るく省エネルギーの白色光源を可能にした効率的な青色発光ダイオードの発明
2014	天野 浩 (54)	物理学賞	明るく省エネルギーの白色光源を可能にした効率的な青色発光ダイオードの発明
2014	中村 修二 (60)	物理学賞	明るく省エネルギーの白色光源を可能にした効率的な青色発光ダイオードの発明
2015	大村 智 (80)	生理学・医学賞	線虫の寄生によって生じる感染症に対する画期的治療法の発見
2015	梶田 隆章 (56)	物理学賞	ニュートリノが質量を持つことの証拠であるニュートリノ振動の発見
2016	大隅 良典 (71)	生理学・医学賞	オートファジー (自食作用) のメカニズムの解明
2018	本庶 佑 (76)	生理学・医学賞	負の免疫制御の抑制によるがん治療の発見
2019	吉野 彰 (72)	化学賞	リチウムイオン電池の開発

(図 2-15 日本の素材研究におけるノーベル賞受賞者一覧(赤字が素材研究での受賞者¹⁰¹⁾)

磁石 本多光太郎 (世界初合成磁石@1917) 佐川真人 (世界最強の永久磁石@1984) → モーター、電気自動車、風力発電、HDD	リチウムイオン電池 水島公一 (正極材料の提案@1980) 吉野彰 (負極材料・構造提案@1980年代) → スマートフォン電子機器、自動車電源
炭素繊維強化複合材料 進藤昭男 (PAN系炭素繊維@1961) → 航空機・自動車用CFRP	超伝導材料 前田弘 (Bi系110K、線材応用@1988) 秋光純 (40K金属系@2000) 細野秀雄 (32K鉄系@2008) → 超電導線材、超高磁場NMR
光触媒 本多健一、藤嶋昭 (TiO ₂ 光触媒@1968) 橋本和仁 (@1994) → 光触媒コーティング、環境浄化	青色LED, LD 赤崎勇、天野浩 (GaN単結晶、p型@1989) 中村修二 (高輝度青色LED, LD@1993) → LED照明、ディスプレイのバックライト、信号機
触媒 (有機合成) 根岸英一、鈴木章 (クロスカップリング @1970年代) 野依良治 (不斉合成反応@1986) → 創薬、農薬、香料、アミノ酸	カーボンナノチューブ 飯島澄男 (カーボンナノチューブ発見@1991) 遠藤守信 (CVDによる大量合成@1988) → Liイオン電池材料、各種材料
スピントロニクス 岩崎俊一 (垂直磁気記録方式@1977) 宮崎照宣 (TMR素子室温動作@1995) 湯浅新治 (MgOバリアで巨大MR@2004) → 超高密度磁気ストレージ、MRAM	酸化物材料 細野秀雄 (IGZO材料、TFT動作@2004) → 透明電極、LCD・OLEDディスプレイ駆動TFT

(図 2-16 社会を変えた我が国発の研究成果¹⁰²⁾)

¹⁰¹ ibid., p. 49.

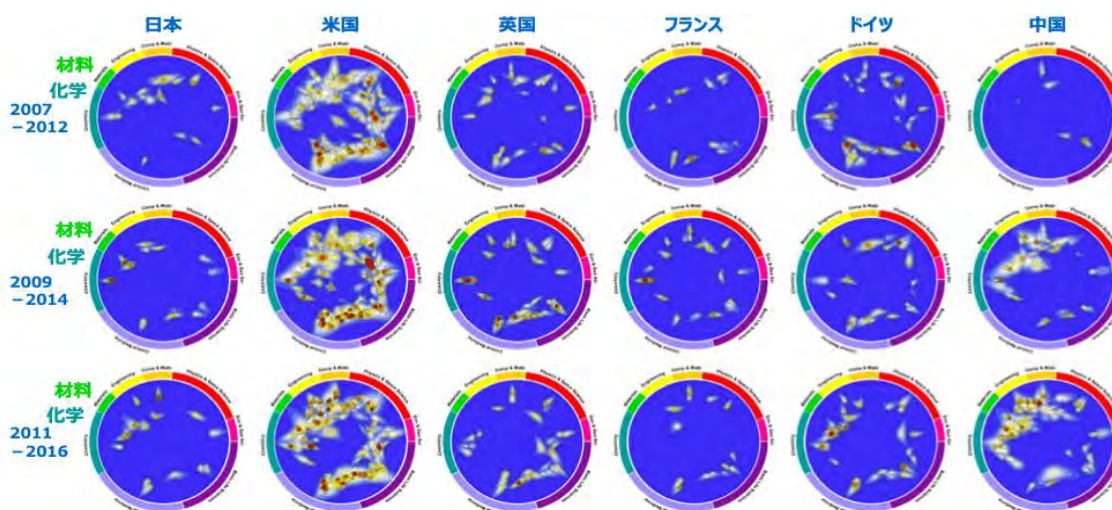
¹⁰² 経済産業省「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて」 p. 50.

5. 日本の先端素材技術政策への提言：学際的でデータドリブンなアプローチと選択と集中型の研究支援

(1) 学際性と関連新興科学技術の積極的な活用

素材研究で日本人研究者の活躍が目立つ一方で、中国同様に現場の研究者からは幾つかの危機感の声もある。例えば、融合・新領域の開拓が諸外国と比較して極めて弱いことが図 2-17 から明らかである。特に中国はここ 10 年ほどでその融合・新領域の開拓を進めてきたのに対して、日本のトレンドはここ 10 年でほぼ変化していないことがわかる。本項でも見てきた通り、米国の産業技術政策が新興科学技術や関連する素材研究とのシナジー利用した学際的なアプローチを盛んに用いてきたのに対して、日本の科学技術研究は各ディシプリンのセクショナリズムが強く相互の研究交流や人材交流の機会が少ないこと等が原因として推察される。今後は、自然科学分野におけるより学際的な研究プログラムの醸成が課題となるだろう。

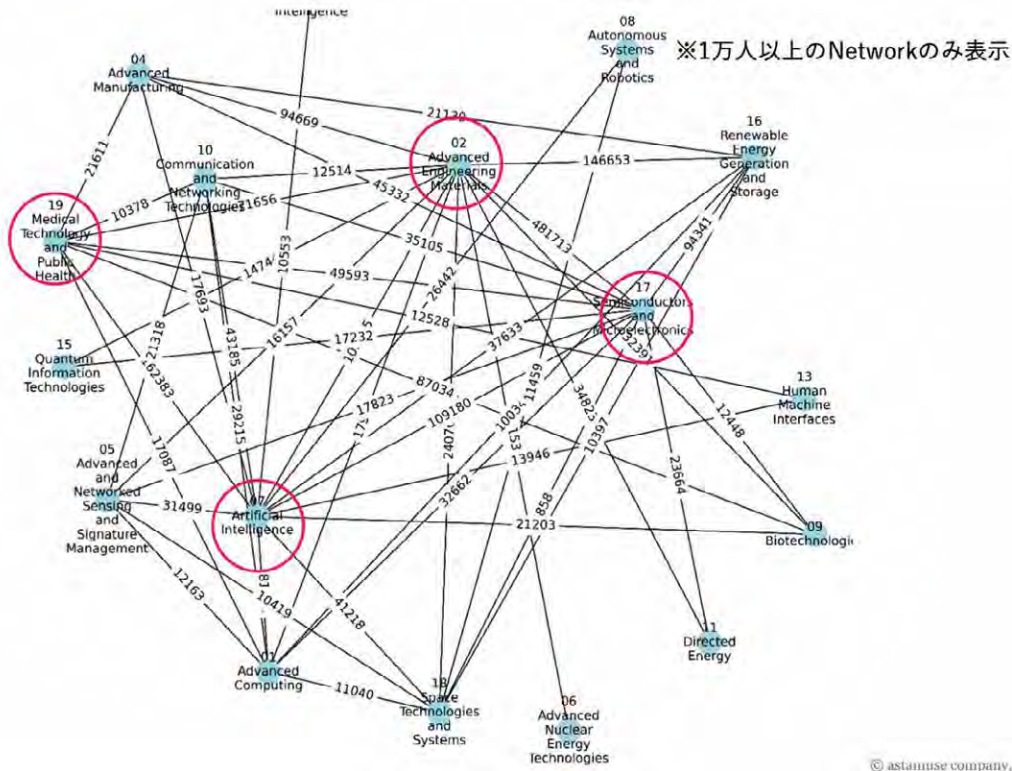
また、応用及び基礎研究でも課題が残る。例えば、特に、AI やシミュレーション、マシーンラーニング等関連する先端技術の素材研究分野への応用において海外から遅れを取る傾向にある。例えば、アスタミューゼ社の調査によると、複数領域にまたがって研究をしている研究者のデータを分析した結果、先端素材と半導体との組み合わせが最も多いということがわかった。また先端素材、半導体、AI 技術や医療技術、公衆衛生との間のシナジーも極めて高くこうした分野で分野横断的な研究をしていくことが重要であることがわかる (図 2-18)¹⁰³。



(図 2-17 各国が高い存在感を持つ研究領域の分布(円の中心部ほど分野融合度が高い¹⁰⁴)

¹⁰³ アスタミューゼ, 『令和 4 年度 「我が国が戦略的に育てるべき安全・安心の確保に係る重要技術等の検討業務」 内閣府が指定する 20 の技術分野の広範囲調査に関する業務委託 最終報告書』(GRIPS 向けの再委託調査報告書)(2023 年 2 月 16 日) (以下、アスタミューゼ社再委託レポート)。

¹⁰⁴ 経済産業省「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて」, 52 頁.



(図 2-18 複数領域に属する研究者のネットワーク¹⁰⁵)

こうした傾向は、米国の先端素材技術政策と比較した場合にその点が顕著に見出せる。例えば、2012年に米国のMGIは、日本の研究者が2011年に発表した電池材料の論文情報を基に、コンピューターシミュレーションを実施し、日本企業の未公開特許と同様の材料を開発することに成功している¹⁰⁶。日本がラボでの実験に基づいた素材研究を重視してきた一方で、**米国をはじめとした先進諸国ではインフォマティクスな手法を素材開発に用いることで既存のデータのみで実験をせずに先端素材を生み出すという手法が確立されつつある。**

確かに、日本の科学者の間でもAI等の新興科学技術を用いて科学そのものにイノベーションを起こそうとする「高次元科学」という概念が広まりつつある¹⁰⁷。特に深層学習の発達以降、こうした技術が科学の多様な側面で革新をもたらしてきたことは紛れもない事実であり、新素材の発見や開発もこうした技術から恩恵を受け得ることは想像に容易い。国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)の福島俊一博士も、日本は科学者の間で「高次

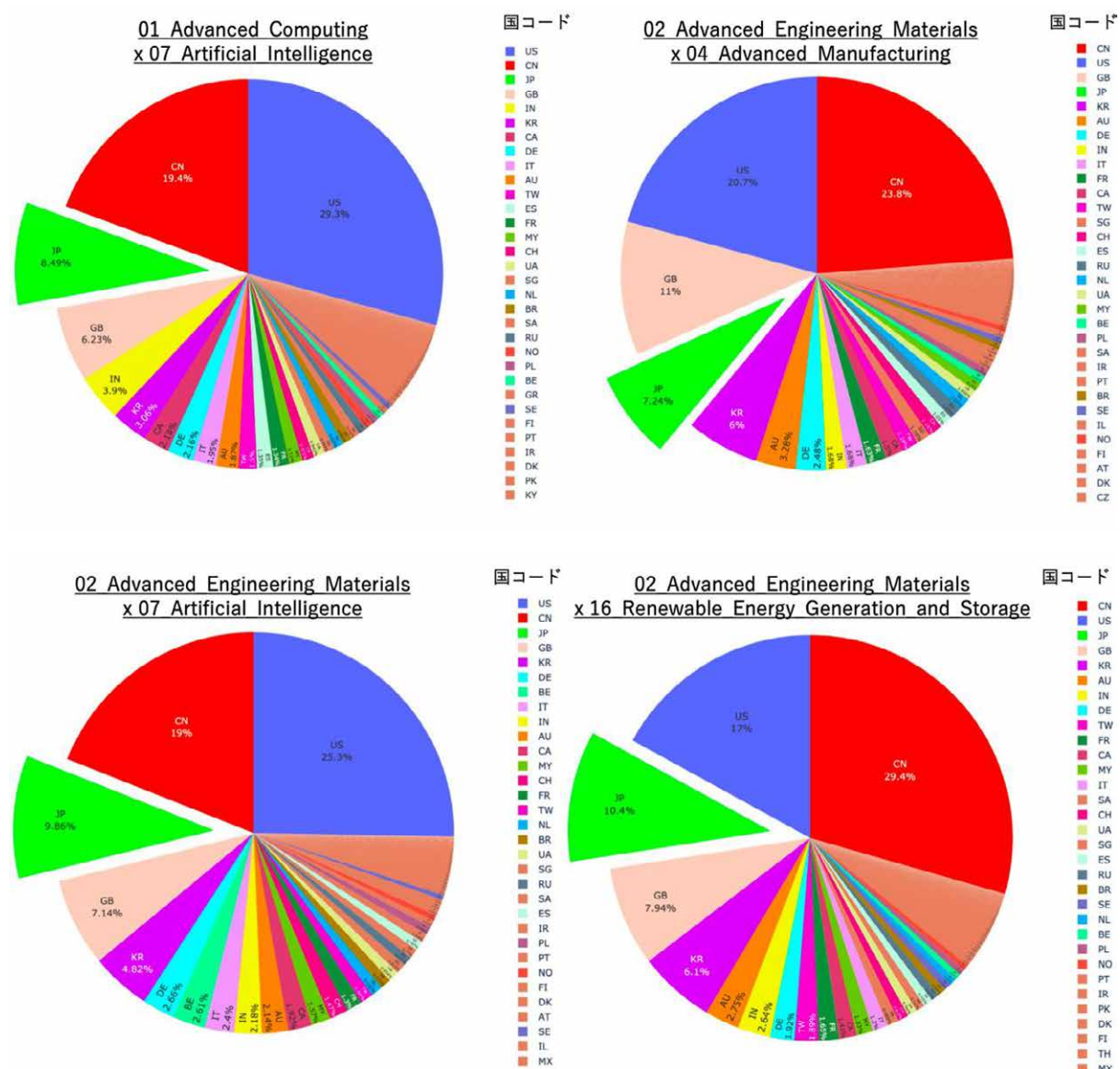
¹⁰⁵ アスタミューゼ社再委託レポート, p. 20.

¹⁰⁶ 経済産業省「素材産業におけるイノベーションの役割と期待」

¹⁰⁷ 丸山宏「高次元科学への誘い」CNET Japan ブログ (2019年5月1日)

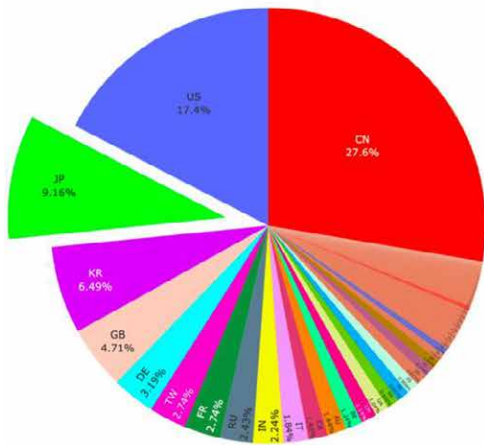
https://japan.cnet.com/blog/maruyama/2019/05/01/entry_30022958/

元科学」のような新興科学技術を科学イノベーションに活用しようという議論が早い段階から存在する一方で、政府の科学技術政策の中ではそうした議論がまだ少ないことを指摘する¹⁰⁸。アスタミューゼ社の調査によると、日本は、複数の領域にまたがって学際的に研究をしている研究者の数において、「先端工業素材×高度製造技術(Advanced Manufacturing)」で世界4位、「先端工業素材×AI」及び「先端工業素材×再生可能エネルギー」で世界3位、さらには、「バイオテクノロジー×医療・公衆衛生」では2位との結果が出ているが、大半の複合分野において中国と米国が圧倒的なシェアを有している(その他の詳細な集計結果を含めて図2-19を参照)。

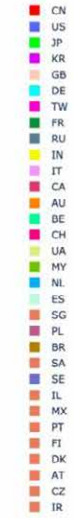


¹⁰⁸ JST CRDS システム・情報科学技術ユニット 福島俊一博士との意見交換 (2022年1月18日)

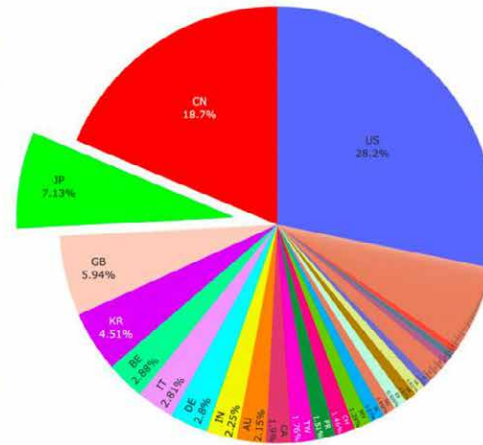
02 Advanced Engineering Materials
x 17 Semiconductors and Microelectronics



国コード



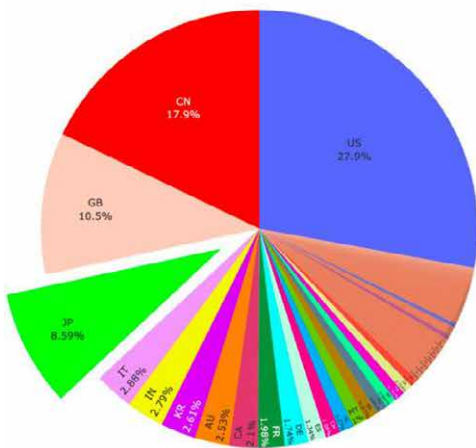
07 Artificial Intelligence
x 17 Semiconductors and Microelectronics



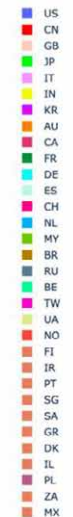
国コード



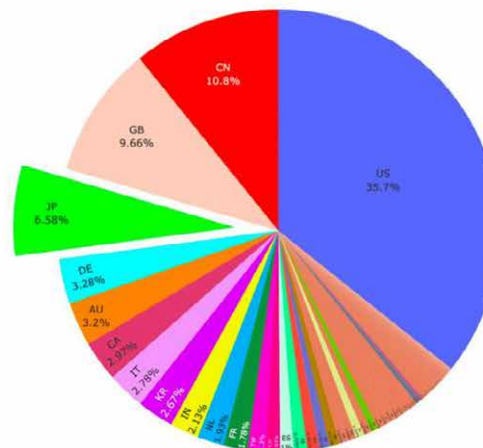
07 Artificial Intelligence
x 18 Space Technologies and Systems



国コード



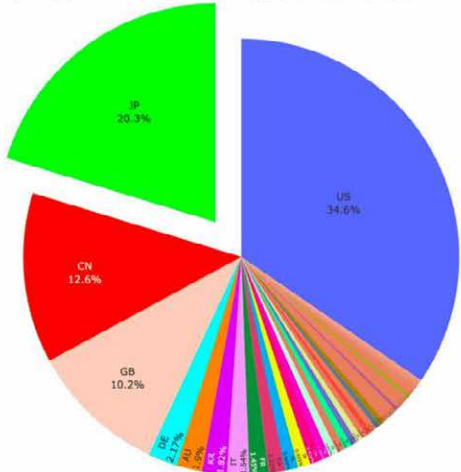
07 Artificial Intelligence
x 19 Medical Technology and Public Health



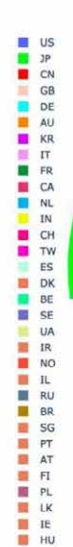
国コード



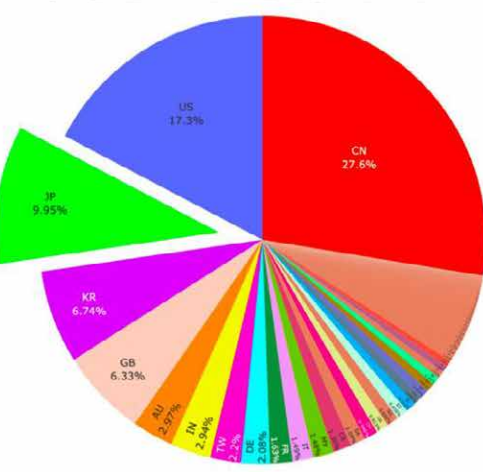
07 Biotechnologies
x 19 Medical Technology and Public Health



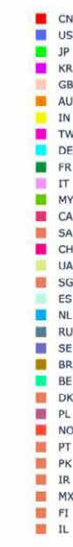
国コード



16 Renewable Energy Generation and Storage
x 17 Semiconductors and Microelectronics



国コード



(図 2-19 複数領域に属する研究者世界トップ 10¹⁰⁹)

一方で、米国の先端科学技術政策では深層学習やマシンラーニングを積極的に素材研究に取り入れようという動きが早い段階から議論されてきた。国防高等研究計画局(DARPA)は近年深層学習やマシンラーニングといった新興科学技術を先端素材の発見や開発に導入している¹¹⁰。同様の試みは米国の大学研究機関でも顕著である。例えば、コーネル大学の研究者たちは、分野横断研究プロジェクト SARA(the Scientific Autonomous Reasoning Agent)を立ち上げ、AI 技術を用いた新たな素材の発見を進めている¹¹¹。ジョンズ・ホプキンス大学の研究機関 Hopkins Extreme Materials Institute は、米国陸軍 Army Combat Capabilities Development Command (DEVCOM) Army Research Laboratory と共同で AI 技術を用いて、極限環境での軍事オペレーションを可能にする先端素材の設計をより効率的かつ迅速に行える体制を構築している¹¹²。米国では急速に変化する軍事オペレーションのニーズに対応すべく、関連する新興科学技術を駆使した素材開発が急速に進められてきた。AI やマシンラーニングは従来のラボ実験に要した膨大な時間を短縮しより効率的かつ迅速に先端素材の発見及び開発を可能にすることで、こうした軍のニーズを満たす画期的な研究手法の実現を可能にしてきた。我が国も、各省庁がそれぞれ管轄する技術領域内で主体的にイニシアティブを発揮し、新興科学技術をツールとして先端科学技術研究やその他の関連技術領域に応用していくという学際的な試みが必要であろう。科学者の中で既に「高次元科学」という概念が共有されつつあることを考慮すれば、従来の質の高い基礎研究と社会ニーズに即した応用研究とを関連する技術領域毎にマッチングさせる機能が政府内に設立することも検討の余地があるだろう。

これまで我が国で培われてきた素材研究の高い技術力と研究力を生かしつつ、AI 等の新たな革新技術をうまく融合させる形であらゆる分野の素材研究を我が国が世界でリードできれば、あらゆる新興技術のサプライチェーン上で有利な地位を築くことができる。こうした高い技術

¹⁰⁹ アスタミューゼ社再委託レポート, pp. 21-5.

¹¹⁰ DARPA, “DARPA opens door to producing ‘unimaginable’ Designs for DoD.” Retrieved from <https://www.darpa.mil/news-events/2021-01-15a>

¹¹¹ Cornell University, “How AI helps to advance new materials discovery.” *Cornell Research*. Retrieved from <https://research.cornell.edu/research/how-ai-helps-advance-new-materials-discovery>

¹¹² The U.S. Army, “Army teams with Johns Hopkins to advance materials research.” (November 16, 2021) Retrieved from https://www.army.mil/article/240874/army_teams_with_johns_hopkins_to_advance_materials_research

力がサプライチェーンレジリエンスと結びつくことで、特定の国々への輸出規制等が政策として可能になり、外交交渉においても我が国もプレゼンスがより発揮されるだろう。逆に言えば、他の革新技術とのシナジーなくして、20世紀のような革新的な素材研究を世界に送り出していくことは今後益々難しくなっていく。従来の「ラボ型」研究を脱して AI やマシーンラーニング等を駆使したデータドリブンな素材研究開発を早急に進めていく必要がある。

(2) 選択と集中による素材研究開発で「質」の面で他国を牽引

先端素材研究において、中国が量とその対象範囲で他国を凌駕する中で、量で中国を含む他国と競争するには、時間的にも予算的にも限界があるだろう。より効果的なのは、今後より重要となると予想される先端科学素材に注力して、集中的に研究開発を支援することである。特に他の先端科学技術との親和性や関係性に着目して、注力すべき分野を選定していくことが効果的だろう。また、UHTCs 等の耐熱素材に関して、以下のような当該素材の製造や評価に関わる先端技術にも注力することが効果的である。

- 耐熱素材の製造と開発のための 3D プリンティング技術及びその他新素材の開発に関連する製造技術等。
- 極度環境で使用される素材の評価メソッド
- 核融合・核分裂研究への耐熱素材の利用
- 航空宇宙エンジンの設計に関わる耐熱素材の研究の統合及び民間航空機、宇宙・軍事技術への応用。

日本にはすでに、京都大学の檜木達也教授らが航空宇宙産業への応用に関して、耐環境性 SiC 基複合材料に関するデザイン、コスト、サプライチェーン、そして産学協同の枠組みに関する研究をしており¹¹³、今後こうした研究により多くの研究資金を投じていくことが必要となるだろう。

¹¹³京都大学エネルギー理工研究所、「経済産業省『戦略的基盤技術高度化支援事業』高効率航空機エンジン向け SiC/SiC 複合材料製造工法の開発」 http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/new-iae/ResearchProjects/JP/Project/post_3.html

第3節 高度ガスタービン技術(Advanced Gas Turbine Technology)

高度ガスタービン技術(Advanced Gas Turbine Technology)は、高温高圧のガスを原動力として、タービンを動かすことでエネルギーを生み出す内燃機関の一つである。ディーゼルエンジンやガソリンエンジンがシリンダとピストンによる往復運動でエネルギーを生み出すのに対して、ガスタービンは回転運動によってエネルギーを生み出す¹¹⁴。巨大なエネルギーを生み出すことができるガスタービンの用途は陸海空の輸送機器のエンジンとして役割を担う一方で、発電所の動力源としても重要な機能を担っている。それ故に、ガスタービンの技術革新は、電力エネルギー、ロジスティックさらには陸海空の軍事用途に至るまで幅広く影響を与える。

気候変動に対応すべく、世界は化石燃料から再生可能エネルギーへの移行を進めてきたことは周知の事実である。火力発電に主に用いられるガスタービンは、こうした流れに逆行するように見受けられるが、近年では熱効率を最大限に高め、より効率的にエネルギーを創出できるコンバインド・サイクル・ガスタービン(CCGT)が開発され、環境負荷が軽減されたことに加え、水素燃料をはじめとした再生可能エネルギー燃料にも対応できるガスタービン技術の開発が進められてきた。こうした背景から、ガスタービン技術は少なく見積もっても 2050 年までは極めて重要な先端技術として認識されている¹¹⁵。

本章では、ガスタービン技術の概要を解説した上で、マルチユースの観点から民間用途と軍事用途のそれぞれでどのような技術革新をもたらしてきたのかを説明する。その上で、高度ガスタービン技術分野における近年の技術革新及びその要素技術について概観する。



図 3-1 ガスタービン (三菱重工製 M701F)¹¹⁶

¹¹⁴ 川崎重工業「ガスタービンとは」https://www.khi.co.jp/energy/gas_turbines/outline.html

¹¹⁵ Emine Bakana, Daniel E. Macka, Georg Mauera, Robert VaBena, Jacques Lamontb, Nitin P. Padturec, “High-temperature materials for 1 power generation in gas turbines.” In Olivier Guillon (ed.), *Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage* (Elsevier, 2020).

¹¹⁶ <https://power.mhi.com/jp/products/gasturbines/lineup/m701f>

1. 高度ガスタービン技術の用途

ガスタービン技術は民間および軍事用途の両方で極めて重要な技術として認識されてきた。しかし、いくつかの先端科学技術が軍事用途から派生したのに対して、ガスタービン技術に限って言えば、その投資の傾向や市場規模は圧倒的に民間用途が優っており、多くの技術革新が民間企業を中心に行われてきたことがわかる。中でも航空機エンジンへの投資が最も多い。2004年のデータではあるが、ガスタービンの全体の生産額 219 億米ドル (USD21.9 billion)のうち、航空機向けのガスタービン事業が 149 億ドル(USD14.9 billion)にのぼり、全体の 2/3 近くの生産額を占めていることがわかる。またそのうち、37 億ドル(USD3.7 billion)が軍事用途の航空機、112 億ドル(USD11.2 billion)が民生用途の航空機向けであり、ここからも明らかに民間向けのガスタービンが主な比重を占めていることがわかる¹¹⁷。

また 2009 年以降のガスタービンの世界市場を概観すると、圧倒的に航空機用のガスタービン、その中でも民間機用のものがその市場の大半を占めることがわかる(図 23)。航空機用途以外のガスタービンは全体の 1/5 以下の市場規模であり、軍用機向けのものに限っては、1/10 程の市場規模でかつこの 10 年で市場規模の推移もほぼ横ばいである。一方で民間航空機向けのガスタービン市場は 2009 年からのこの 10 年で倍近く拡大しており、この先 10 年も拡大していくことが予想されている。

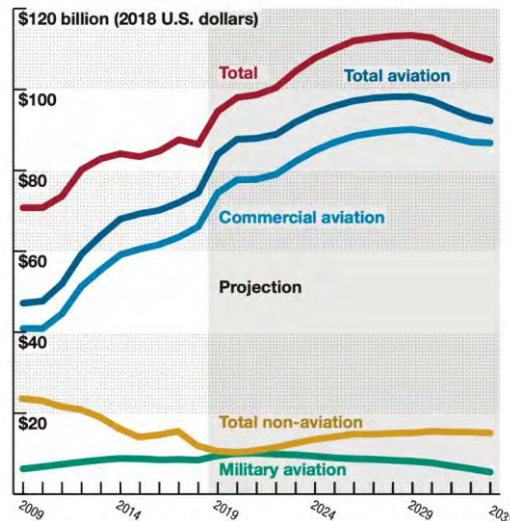


図 3-2 ガスタービン世界市場の推移¹¹⁸

¹¹⁷ Tony Giampaolo, *Gas turbine handbook: Principles and practice, Fifth Edition*. (London and New York: Routledge, 2014): 327.

¹¹⁸ Committee on Advanced Technologies for Gas Turbines Aeronautics and Space Engineering Board Division on Engineering and Physical Sciences, *Advanced technologies for gas turbines*. (Washington, DC.: The national Academies Press, 2020): 13.

(1) 公的利用・安全保障における利用

一般軍用機

軍事用途に用いられるガスタービン技術は、主に戦闘機や戦艦等のエンジン向けのもが多い。例えば米国空軍が保有する F35 統合打撃戦闘機(ロッキード・マーチン製)に搭載されたプラット・アンド・ホイットニー社製造の F135 エンジンがその典型である¹¹⁹。プラット・アンド・ホイットニー社は米国の GE アビエーション社と英国のロールスロイス社に次ぐ、航空機用エンジンの最大手であり、軍事用途から民生用途に至るまで幅広い種類のガスタービンエンジンの製造を手掛けている¹²⁰。F135 ジェットエンジンは、F35 戦闘機の異なる種類の形態に対応している。滑走路からの離着陸(CTOL)をする F-35A、短い滑走路から離着陸する(STOVL)F-35B および空母からの離着陸(CV)をする F-35C 等様々な機体に対応できるようになっている¹²¹。

また英国ロールスロイス社は戦艦や空母向けのガスタービンエンジンを開発・販売している。中でも MT30 Marine Gas Turbine は同等クラスにおける従来のモデルの半分の部品で構成されていることからメンテナンスコストを最小限に抑えることに成功したモデルである。40kn を超えるトップクラスのスピードを誇り、2008 年から米国海軍の沿海域戦闘艦(LCS)のエンジンとしても採用されている。このように軍事産業におけるガスタービン技術開発においては民間企業における技術開発が大きな比重を占めていることがわかる。

一方で、こうした大手ガスタービン企業と政府との関係性にも注目しておく必要があるだろう。確かに、ガスタービンの市場は民生用途を中心に発展してきたが、(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)をはじめ、米国政府の政府系研究機関もこうした先端ガスタービン技術の投資を積極的に実施してきた。DARPA は「バルカン高度推進エンジンプログラム」(Vulcan Advanced Propulsion Program)を進めており、2010 年にはこのプログラムのフェーズ 2 として、プラット・アンド・ホイットニー社が Constant Volume Combustion (CVC) engine technology の開発のために、DARPA から 3,380 万ドル(USD33.8 million)もの契約を獲得している¹²²。CVC エンジンサイクルは従来のブレイトンサイクルよりも格段に効率的に燃料の燃焼を継

¹¹⁹ Pratt &Whitney, “F135: The world’s most advanced flight engine.”

<https://prattwhitney.com/products-and-services/products/military-engines/f135>

¹²⁰ Pratt &Whitney HP, <https://prattwhitney.com>

¹²¹ Giampaolo, *Gas turbine handbook*: 327.

¹²² *Cision PR Newswire*, P&W awarded \$33.8 million DARPA contract for new engine technology development. October 12 2010. <https://www.prnewswire.com/news-releases/pw-awarded-338-million-darpa-contract-for-new-engine-technology-development-104762719.html>

続的に行える技術であり、戦闘機のジェットエンジンや戦艦のエンジン向けの展開が期待されている¹²³。



図 3-3 左 : F35 戦闘機向け F135 エンジン(Pratt & Whitney 製)



図 3-4 右 : MT30 Marine Gas Turbine (Rolls Royce 製)

原子力潜水艦

大半の軍事用途のガスタービンは、戦闘機や戦艦・空母向けに製造される一方で、潜水艦の中でも原子力潜水艦に限って高度なガスタービン技術が要求されることも重要なポイントである。従来の潜水艦はディーゼルエンジンを用いて推進するが¹²⁴、核エネルギーを利用して推進する原子力潜水艦では原子力発電同様ガスタービンが搭載されている。この従来の潜水艦と原子力潜水艦との間の仕様の違いは、ガスタービン技術の安全保障上の重要性を極めて高いものにしてきた。

¹²³ Bechtel, “Constant volume combustion: the ultimate gas turbine cycle.” *Gas Turbine World* (Nov. - Dec. 2013).

¹²⁴ Rolls Royce, mtu submarine engines. <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/defense/marine-defense-solutions/submarines.html>

こうした中で、英国や米国は原子力潜水艦の製造と運用にとりわけ力を入れてきた。例えば、英国ロールスロイス社は長年に渡って、英国海軍の原子力潜水艦の製造を担ってきた歴史がある¹²⁵。また米国では、ジェネラル・ダイナミクス社 (General Dynamics)の子会社であるジェネラル・ダイナミクス社・エレクトリック・ボート社(General Dynamics Electric Boat)が米国海軍への潜水艦納入で100年以上の歴史を有しており、原子力潜水艦の設計・製造も手掛けている¹²⁶。

また2021年には英米豪の3カ国の間で軍事同盟AUKUS締結され、英国と米国がオーストラリアの原子力潜水艦の開発を支援することとなった。AUKUSの枠組みはインド太平洋地域への関与を深めたい英国と既存の当該地域においてリベラルな国際秩序を維持したい米国とオーストラリアとの間で結ばれた同盟であり、英国の全面的な支援によるオーストラリアの原子力潜水艦開発は当該地域のパワーバランスに大きな影響を与える可能性が高いと示唆されてきた¹²⁷。

AUKUSの締結とオーストラリアの原子力潜水艦開発におけるガスタービン技術の重要性はメディアではあまりフォーカスされてこなかったが、経済安全保障及び軍事安全保障の両面で重要なインプリケーションをもたらす可能性が高い。前述の通り、原子力潜水艦の場合は、原子炉を搭載し、ガスタービンを用いてそのエネルギーを創出する点において、ディーゼルエンジンで駆動する従来の潜水艦とは異なる。この意味でも、原子炉技術に加えて、ガスタービン技術の安全保障上の重要性も益々高まっていくことが予想される。憶測の域をこえないが、2022年8月に米国がガスタービン技術を含む「新興根幹技術」の輸出規制強化が発表された背景には、こうした原子力潜水艦とそれにつながるガスタービン技術の重要性が増したことがあるようにも思われる¹²⁸。

(2) 民生利用

航空機向けガスタービンエンジン

¹²⁵ Rolls Royce, We power the UK Royal Navy's nuclear submarine fleet. <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/submarines.aspx>

¹²⁶ General Dynamics Electric Boat, Our submarines. <https://www.gdeb.com/about/oursubmarines/>

¹²⁷ 朝日新聞「米英、豪の原子力潜水艦保有を支援へ 中国念頭に新たな安保の枠組み」(2021年9月16日)
<https://www.asahi.com/articles/ASP9J32W1P9JUHB1002.html>

¹²⁸ David Shepardson, U.S. tightens export controls on advanced chip, gas turbine engine tech. *Reuters*. August 12, 2022. <https://www.reuters.com/markets/us/us-heightens-export-controls-advanced-chip-gas-turbine-engine-technologies-2022-08-12/>

航空機向けのガスタービン技術の研究開発及び製造は、主に米国の GE アビエーション社、プラット・アンド・ホイットニー社(Pratt & Whitney)そして英国のロールスロイス社の 3 社が中心となって担ってきた。陸海空の輸送運搬技術の中でも特に空輸は最も多くエネルギーを有する(図 24)。航空機向けのガスタービン技術開発では、主に燃料燃焼の効率性の向上が課題とされてきた。過去半世紀を見ても民間航空機向けのエンジンの燃焼効率は飛躍的に改善されていることがわかる(図 25)。近年では、従来のターボファンエンジンと比較して 25%の燃費向上が米国を中心に業界の開発目標とされてきた¹²⁹。ジェットエンジンの推進効率は理論上 FPR(Fan Pressure Ratio)によって決まると理解されており、FPR が低い程高い推進効率を発揮する。そのため、航空機向けのガスタービン技術においてはより低い FPR を実現するためのタービンの設計が次なる技術開発の目標とされてきた¹³⁰。

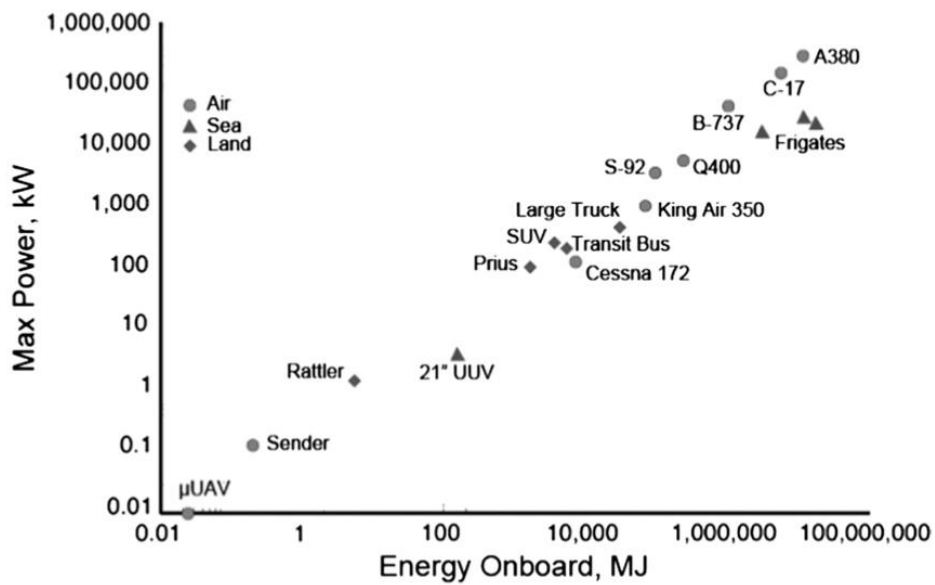
民間航空機向けのガスタービンのもう一つの重要な課題は、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減である。気候変動がグローバルな課題として世界各国で認識される中、我々の生活で国境を超えて人やモノを輸送する航空機が排出する CO₂ の量は無視できるものではない。2019 年のデータによると、世界中の航空機が 1 年間で排出した CO₂ の量は、915 百万トンに及び、これは陸海空すべての交通輸送において排出された全体 CO₂ の 12%に相当する¹³¹。こうした中で、ガスタービンそのものの燃焼効率とともに、ここ 10 年の間に二酸化炭素排出量の削減に向けた技術革新も求められるようになった¹³²。

¹²⁹ *ibid.*

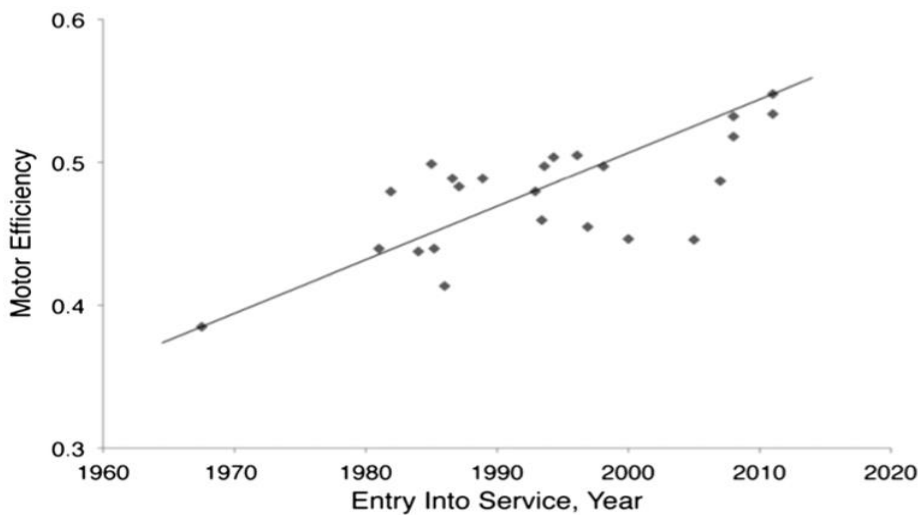
¹³⁰ Alan H. Epstein, “Aeropropulsion for Commercial Aviation in the Twenty-First Century and Research Directions Needed.” *AIAA Journal* 52(5) (2014).

¹³¹ Air Transport Action Group, “Fact & Figures.” <https://www.atag.org/facts-figures.html>

¹³² Epstein, “Aeropropulsion for Commercial Aviation.”



(図 3-5 陸海空輸送におけるエネルギー出力¹³³)



(図 3-6 民間用ターボファンモーターの効率性¹³⁴)

発電用ガスタービン技術

ガスタービン技術のもう一つの大きな民間用途は、電力発電所向けの大型ガスタービンである。ガスタービン国際市場の予測によると、この先 2030 年までにガスタービンを用いた電力発電事業は、合計 USD107,705.00 規模にのぼると予想されている。発電用ガスタービン事業の大手 3 社である GE(米国)、シーメンス(ドイツ)、三菱パワー(日本)は、コスト削減と生産プロセスの

¹³³ ibid.: p. 902.

¹³⁴ Ibid.

最適化を図るべく大幅な構造再編を進めており、各社とも今後更なる技術革新に向けた準備を進めている¹³⁵。

発電用のガスタービン開発において、発電の効率性は歴史的にも重要な課題とされてきた。1939年に開発された最初のガスタービンの熱効率は18%程度であったが、その後コンバインド・サイクルガスタービン(CCGT)が開発されて以降、2010年には熱効率60%超を達成した¹³⁶。この10年でさらに効率化が進められ、CCGTで70%の熱効率を達成することが目標とされてきた¹³⁷。また、熱効率の向上と共にCO₂排出量の削減も大きな課題とされ、特に、再生可能エネルギー資源を含む多様な燃料に対応できるようにタービンを設計することが要求されてきた。例えば、CO₂排出量の削減が期待されている水素燃料を含む気体燃料を燃焼できるタービンの設計が進められる等、多様な燃料資源に対応したガスタービンのデザインが進められている¹³⁸。中でも従来の天然ガス等の燃料に水素を混合させることで、CO₂排出量を大幅に削減できることが実証されており(図3-7)、ガスタービンメーカー大手もこうした水素燃料に対応したガスタービンの設計と製造に着手してきた。例えば、独シーメンス・エナジー社はすでに米国や欧州、中国、アフリカを含む世界各国で、水素燃料を含むガスタービンの運転を開始しており、CO₂の効果を実証してきた¹³⁹。

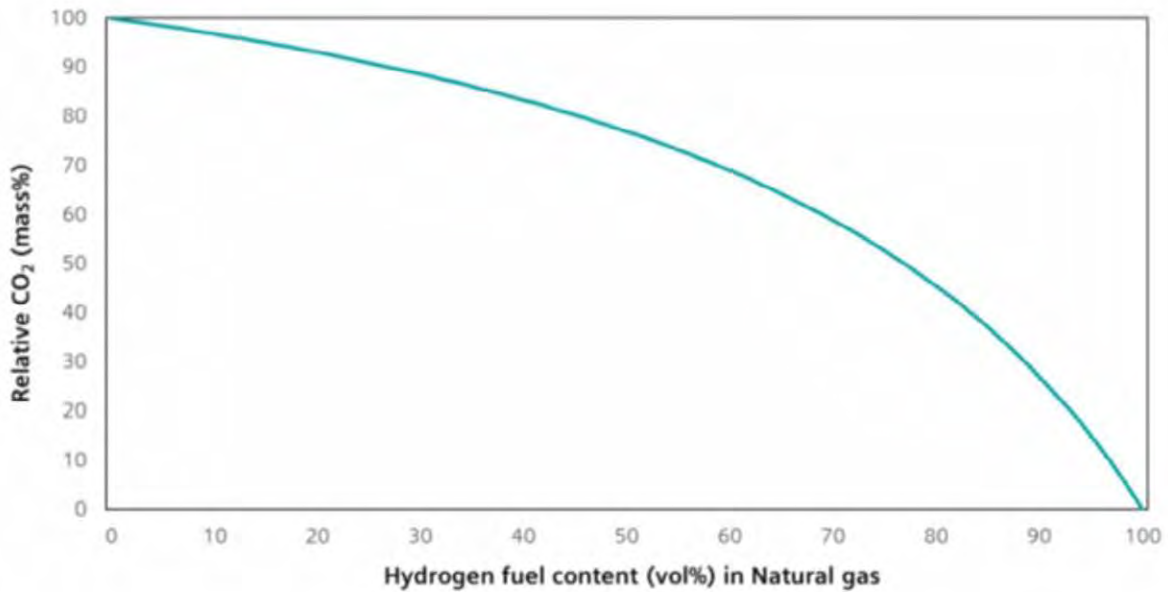
¹³⁵ Carter Palmer, “World Market Report: Gas turbine sales forecast for the coming decade.” *The Global Journal of Energy Equipment: Turbomachinery International (Handbook 2022)*, 62 (6). (2022). <https://cdn.sanity.io/files/0vv8moc6/turbomag/43c4c7f7f10572fbb07cfd74b3a596bf6bc9307d.pdf/TRB%20handbook%202022.pdf>

¹³⁶ *Power Engineering International*, Gas Turbines breaking the 60% efficiency barrier. May 1st 2010. <https://www.powerengineeringint.com/coal-fired/equipment-coal-fired/gas-turbines-breaking/>

¹³⁷ Committee on Advanced Technologies for Gas Turbines Aeronautics and Space Engineering Board Division on Engineering and Physical Sciences, *Advanced technologies for gas turbines*.

¹³⁸ *ibid.*

¹³⁹ Siemens Energy, *Hydrogen power and heat with Siemens Energy gas turbines*. (Siemens Energy, 2022):



(図 3-7 天然ガスへの水素の混合割合と CO₂ 排出量との相関関係¹⁴⁰⁾

ガスタービン市場を取り巻く地政学

2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻は、ガスタービン市場にも大きな打撃を与えている。エネルギー市場における「脱ロシア化」の影響は、ガスタービン大手 3 社にも及んでおり、例えば、シーメンスの子会社であるシーメンス・エナジー(Siemens Energy)は、2022 年 10 月にロシアでのガスタービン事業のジョイント・ベンチャー(JV) Siemens Gas Turbine Technologies (SGTT)を地方政府が所有する企業 InterRAO 社に売却することを発表。事業の脱ロシア化に大きく舵を切り始めた¹⁴¹⁾。

ロシアに親和的な国の中には継続してガスタービンを供給している国もある。欧米による対ロシア経済制裁の中、イランはモスクワに対して 40 基のガスタービンを供給することを発表している¹⁴²⁾。また、いくつかの欧米各国の中でも対ロシアのガスタービン分野における投資を経済制裁の対象から例外的に除外するケースも見られている。例えば、カナダは欧州のエネルギー

¹⁴⁰ *ibid.*: 4.

¹⁴¹ *Reuters*, “Siemens Energy sells Russia-based gas turbine JV to local state firm.” October 12th, 2022. <https://www.reuters.com/markets/deals/siemens-energy-sells-majority-stake-russia-based-joint-venture-2022-10-14/>

¹⁴² *Iran International*, “Iran to provide Russia with 40 turbines to Help its gas sector.” October 24th 2022. <https://www.iranintl.com/en/202210244570>

危機を背景に、「欧州へのエネルギーの安定供給の維持」のためにロシアに対するガスタービン供給を例外的に認める措置を講じた¹⁴³。

西側諸国がロシアへの経済制裁とガスタービン事業の撤退を進める中で、エネルギー供給における欧州のロシア依存は、ガスタービン市場におけるアンビバレントな地政学環境を生み出している。このように、電力発電向けのガスタービン技術そのものが軍事転用される可能性は低いものの、ガスタービン供給が持つ政治的そして外交上の影響力は極めて大きいものであり、こうしたガスタービン事業のステークホルダーは、各国の地政学的利害と国境を超えたエネルギー共有の安定という複雑性の狭間で、極めて慎重な意思決定を迫られていると言えるだろう。

2. 要素技術

熱効率向上、CO₂ 排出量そしてメンテナンスコスト削減等を実現していく上で、ガスタービン開発には様々な技術要求が求められてきた。こうした技術要求に応じるために、様々なサブカテゴリの先端技術が応用されてきた。最後にガスタービンの技術開発に貢献が期待されてきた先端科学技術について解説する。

先端素材科学

ガスタービンに用いられる素材はその要求に応じて多様である。例えば、ガスタービンのファン・ブレードだけを見ても、航空機向けのブレードには「合成ポリマー」が用いられる一方で、極度に高温な環境での耐久性が求められる高圧ガスタービンのブレードには、「単結晶ニッケル合金」が用いられる¹⁴⁴。また物質・材料研究機構と横浜国立大学の研究チームは高速で亀裂を修復する「自己治癒セラミックス」を航空機のガスタービン向けに開発しており、航空機のエンジンが作動する 1000°C で、最速 1 分で亀裂を修復することが実証されている¹⁴⁵。

このように、ガスタービンの技術革新が進む中で、そうした極度環境でも耐え得る素材の供給が重要となる。電力発電向けのガスタービンを見ても 1990 年代には 540°C の要求仕様だった温度要件が、熱効率が向上するのと同時に上昇し、2010 年代には 600°C を超える温度要件が仕様

¹⁴³ *The Guardian*, “Canada exempts Russian gas turbine from sanctions amid Europe energy crisis.” July 10th, 2022. <https://www.theguardian.com/world/2022/jul/10/canada-exempts-russian-gas-turbine-from-sanctions-amid-europe-energy-crisis>

¹⁴⁴ Bakana, et al., “High-temperature materials for power generation in gas turbines.” I

¹⁴⁵ 物質・材料研究機構・横浜国立大学・科学技術振興機構「高速で亀裂が完治する自己治癒セラミックスを開発 ～骨の治癒がヒントに！フライト中にヒビを治す航空機エンジン用部材の実現へ大きな一歩～」(平成 29 年 12 月 21 日) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171221/index.html>

に盛り込まれるようになってきた¹⁴⁶。こうした温度要件に対してはより融点の高いチタン合金が用いられる等、タービンそれ自体の技術革新に応じて、用いられる先端素材も変化してきた¹⁴⁷。

しかしながら、タービンそれ自体の機能が高度化するのに対して、それらの要件を十分満たし得る素材の発見は未だ困難を極めている¹⁴⁸。こうした中で、テキサス A&M 大学の素材科学工学部の研究チームは、米国エネルギー省傘下の Ames National Laboratory¹⁴⁹と共同で、AI を用いて、極度の高温環境でも適応できる「高エントロピー合金」(High-Entropy alloys: HEAs) を推定するフレームワークを開発している。この AI 技術によって高度ガスタービン開発に適した素材を発見・特定するためのコストと時間を大幅に削減できると期待されている¹⁵⁰。

AM 技術(Additive Manufacturing)

3D プリンティング技術に代表されるアディティブ・マニュファクチュアリング(AM)技術もガスタービンの設計思想とその製造に革新をもたらしてきた。AM 技術の発展によってガスタービンの製造に要する工程とコストが格段に減少したことが報告されており、ガスタービンを製造する企業の多くは、ファンブレードの製造を目的とした 3D プリンターの導入を進めている¹⁵¹。例えば、独シーメンス社は AM 技術のプロバイダーである EOS 社との共同プロジェクトで 3D プリンター技術によってガスタービンの部品を製造できることを実証済みであり¹⁵²、AM 技術を用いた

¹⁴⁶ Power Engineering International, “Gas Turbines breaking the 60% efficiency barrier.”

¹⁴⁷ Young-Won Kim and Dennis M. Dimiduk. “Progress in the understanding of gamma titanium aluminides.” *JOM* 43(8) (1991): 40-47.

¹⁴⁸ Michelle Revels, “Discovering materials for gas turbine engines through efficient predictive frameworks.” *Wevolver* (August 22nd, 2022). <https://www.wevolver.com/article/discovering-materials-for-gas-turbine-engines-through-efficient-predictive-frameworks>

¹⁴⁹ <https://www.ameslab.gov>

¹⁵⁰ Saucedo, Daniel, et al. “High throughput exploration of the oxidation landscape in high entropy alloys.” *Materials Horizons* 9(10) (2022): 2644-2663.

¹⁵¹ Michael Aller, “Advanced materials and processes of generation of gas turbine design.” *Power Engineering* (September 21st, 2016). <https://www.power-eng.com/coal/advanced-materials-and-processes-for-the-next-generation-of-gas-turbine-design/#gref>

¹⁵² EOS, “Success story siemens3D printing for gas turbine blade.” <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/production-and-industry/turbomachinery-turbines>

ガスタービンの製造を進めている¹⁵³。英ロールスロイス社も航空機向けのガスタービン事業で3Dプリンターによってガスタービンの部品を製造することを進めている¹⁵⁴。このように、AM技術は発電所用及び航空機用の両方で、ガスタービン製造技術の向上とコスト削減に大きく貢献することが今後ますます期待されていると言って良いだろう。

3. まとめ

ガスタービン技術は、電力発電や潜水艦といった我が国の広義の安全保障の根幹に関わる極めて重要な技術である。一方で市場規模を見れば、航空機産業におけるガスタービン市場が大きなパイを占めており、民生技術としても極めて有益な技術であることがわかる。日本のガスタービン技術は、三菱重工業を始めとした重電メーカーの技術開発が功を奏して、かなり高い技術レベルを維持していると言って良いだろう。また、アスタミューゼ社の調査から、大半の技術領域において、研究者数が増加傾向にあるのに対して、ガスタービン技術の研究者が世界的に減少傾向にあるということがわかった。こうしたことから、今後日本が当該技術領域で質と量の両面で強いイニシアティブを発揮する余地があるように思われる。特に米国はもちろん、優れた民間技術を有する英国等との技術パートナーシップを積極的に進めていくことが重要になるだろう。

¹⁵³ Siemens, “Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines.” December 13th 2018. <https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>

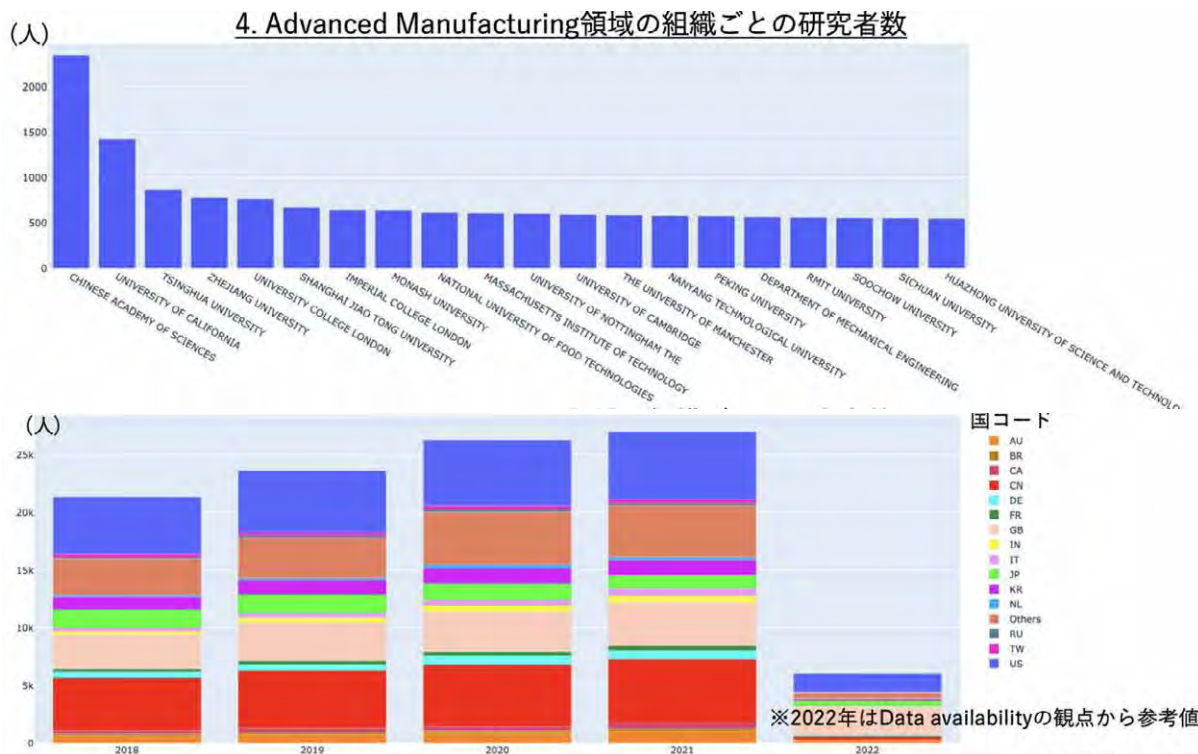
¹⁵⁴ Rolls Royce, “3-D printed parts and new materials help Rolls-Royce to engine test success”. October 11st, 2018. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/11-10-2018-3-d-printed-parts-and-new-materials-help-rolls-royce-to-engine-test-success.aspx>

第4節 先進製造技術 (Advanced Manufacturing)

米国のオバマ元大統領は、2011年に先進製造技術の開発を重視する方針を示し、産官学の一体となった連携が必要であるとして Advanced Manufacturing Partnership (AMP: 先進製造技術パートナーシップ) を立ち上げた。ここでいう「先進製造」とは、「情報・オートメーション・コンピュータ計算・ソフトウェア・センシング・ネットワーキング等の利用と調整に基づき、物理学・ナノテクノロジー・化学・生物学による成果と最先端材料を活用する一連の活動」を指し、既存製品の新方法による製造と新技術による新製品の製造の両方を含む。AMP が立ち上げられた背景には、国際的な競争力を失いつつある米国の製造業事情があった。ロボット工学ではアジア諸国が勢いを強め、スマート製造やナノ製造などの先進技術の国際競争は日に日に高まるばかりだ。

日本においても先進製造技術の開発は大きな課題となっている。労働人口が減少していくなか、製造業のスマート化や効率の向上は必至だ。また、安全保障に関わるインフラから日常利用にいたるまで、生活に欠かせない存在となっている半導体についても、極小のナノ半導体チップの開発が進むなど、先進製造技術によって新しい局面を迎えている。

先端製造技術 (Advanced manufacturing) は、アディティブ・マニュファクチャリング (Additive Manufacturing: 以下 AM 技術) あるいは 3D プリンティング技術に代表される先端科学技術である。特に航空機やロケットのエンジン、ガスタービンの製造、近年では軍事分野における武器製造等、緻密で高度なデザインの製品をより効率的に低コストで製造することに長けた技術である。また、先端製造技術は、他の先端科学技術領域と極めて親和性が高い技術分野であり、米国や英国、そして近年では中国を中心に研究開発が進められてきた分野である。全体として、当該領域の研究者数は世界レベルで見ると増加傾向にあり、特に米国と中国での研究者数の伸びが顕著である。組織別の在籍者数で見ると、中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) が圧倒的に多いことがわかる(図 4-1)。本章では、主に AM 技術とその複合領域とのシナジーに加え、ナノマニュファクチャリング技術 (Nanomanufacturing) について分析・解説をする。



(図 4-1 Advanced Manufacturing 領域の組織ごとの研究者数¹⁵⁵⁾

1. アディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing: AM)

アディティブ・マニファクチャリング (AM) は、素材となる金属を積層することで、さまざまな形状を作り出す加工技術である。一般的に 3D プリンティング技術と呼ばれるこの技術は、様々な製造分野で技術革新を齎している先端科学技術である。AM 技術は自由自在に金属を加工切断できるのみならず、製品内部の複雑な設計構造を再現できるため、一品ものの製品の製造に利用されることが多い。製造時間やコストが大幅に短縮されるほかことから各種製造分野で実用化が進んでい

2014 年にコンサルティング会社のプライスウォーターハウスクーパース (PwC) がまとめた調査によれば、実に米製造業の 66.7% が試作や最終製品の製造を問わず、何らかの形で 3D プリンタを活用しているという報告がされている。現在、この趨勢はさらに加速し、2017 年の調査では、2023 年までにスペア部品供給業者の 85% が 3D プリントをビジネスに組み込む予定となると予想されている。米政権の姿勢と軌を一にした産業構造の転換が起きているのである。世界的にもコロナ禍や米中経済摩擦による輸出の減少により、3D プリント産業は興隆しており、Reports and Data 社の 2020 年の調査報告書によれば、3D プリンタの材料市場は 2019 年の 4.5 億ドルから 2027 年に 27 億ドルまで急増すると見込んでいる。

¹⁵⁵ アスタミューゼ社再委託レポート

3D プリンタの産業面での活用も、ジェットエンジン、ロケットエンジン、住宅、自動車、航空機、ガスタービンといったものから、食品・靴・医療用人工骨・タイヤ等の試作・最終製品までありとあらゆる分野で展開されている。その印刷する材料も鉄・銅・ガラス・セラミック・チタン合金・アルミ・ステンレス・砂糖・プラスチックなど多種多様である。また、実験室のレベルでは、電子部品（バラクタ）・多種細胞・インコネル・Wi-Fi デバイスの製造も可能となっている。さらに、いわゆる 4D プリンタのように時間経過や加水等によって変質する素材技術も出てきている。特に注目すべきは、その可能な材料の範囲と強度や変性について、日々拡大を続ける一方で、印刷時間とコストも短縮を続けていることである。

このように多種多様な拡大と深化を続ける 3D プリンタだが、「NextTec」責任者であり、近年の技術革新と軍事の在り方を専門とする、シンガー（Peter Singer）によれば、3D プリンタが全ての産業の中でも、もっとも大きな影響を与えるのは軍事関連の産業であるという。

こうした観点は実務レベルでも共有されており、当時のネラー（Robert Neller）海兵隊司令官は「3D プリンタの軍事転用はまさしく兵站に関するすべての常識を崩壊させるが、私はどちらもクールなことだと思っている」と発言している。米四軍の中でもっとも消極的とされる海兵隊がこのような認識を示しているのは注目に値する。

このような認識は日本を除く、米国、中国、ロシアのような大国、英国、台湾、韓国、ポーランド、イスラエルのようなミドルパワー国家等では共有されており、軍事転用が積極的に実施されている。

2. AM 技術のマルチユース

AM 技術は極めてマルチユースの性格が強い科学技術である。その用途は、航空宇宙産業はもちろん、医療技術そして軍事技術と多種多様な産業領域で革新を生み出している。例えば、ドイツのシーメンス社は AM 技術を用いてガスタービンの製造に着手しており、極めて複雑な構造を短時間で効率的に製造することで、特殊な技術ニーズにあったソリューションを提供している¹⁵⁶。さらに、持続可能性の観点からもこの AM 技術が注目されている。例えば、温度管理のた

¹⁵⁶ Siemens, “Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines.

<https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>”

めのパーツの製造に AM 技術が利用されているほか、素材やパーツの数量を減らすことにも貢献している¹⁵⁷。

米国や中国では方向性が異なるものの、AM 技術の軍事転用が盛んに行われている。例えば、3D プリンタは、兵站、兵器、作戦と戦場のすべてにおいて大きな変化をもたらす可能性を秘めている。なぜなら リソースに接続できるコンピューターは、そのすべてが生産プラントになりうるからだ。加えて、3D プリンタは、社会がリアルタイムで「社会的製造」することができる「産業及び設備の革命」であり、必要に応じて軍事製造にも利用できる能力がある。

米陸軍は、陸軍、NASA、アラバマ大学との共同プロジェクトとして、ミサイル等を 3D プリンタで製造する研究チームを創設し、既に 2013 年夏、ロケットエンジン噴射器の製造に成功した。しかも、従来工法よりもはるかに短期間・低予算かつ同性能で作成できたという。従来の製品が、6 カ月をかけて、4 つの部品を作り、5 つの溶接と精密な機械加工を行い、それぞれ 1 万ドルかかったのに対し、3D プリンタではわずか 3 週間、それも 5000 ドルの製造費用だけで済んだとされる。他方、装備品の最終製品製造に生かす動きもみられる。2017 年 7 月には、オークリッジ国立研究所と米海軍の技術研究機関 NDTL が共同で、世界初の 3D プリント潜水艇を作成した。作成したのは特殊部隊の隠密裏の展開に使用する SEAL 小型潜水艇 (SDV) である。これまでの SDV のコストは最大 80 万ドルと 3~5 カ月かかっていたが、新設計にもかかわらず僅か 6 万ドルと設計から生産まで数週間で作成できたとしており、米海軍によれば 2019 年にプロトタイプが実運用を開始するという。2020 年には、MH-60S シーホーク 200 機以上を対象とする追加装備であるアンテナマウント—電子戦対策用の機器を格納する—の開発を行い生産した。これは従来の金型を作り直しながら開発し生産するよりも、遥かに時間的にも費用的にも低コストで済んだと評価されている。部品ではあるが、新規開発から量産までを 3D プリンタで済ませようとしている。

¹⁵⁷ Maw, Isaac, "How additive manufacturing drives sustainable manufacturing." *Engineering.com*.

August 21st 2019. <https://www.engineering.com/story/how-additive-manufacturing-drives-sustainable-manufacturing>



(図 4-2 米エネルギー省：3D プリントされた SDV)

中国の 3D プリンタの軍事転用は、研究開発における試作品の作成はもちろんのこと、実任務や最新装備の量産にも活かされており、通常の装備品の一つとして使われている。実際、『解放軍報』の報道によれば、中国軍は 3D プリンタ技術の適用を承認し、軍の装備品の維持・整備・生産で促進する計画を立てている他、ほとんどの金属部品を製造可能な特殊な 3D プリンタの開発研究も成功・実施しているという。特に、航空機部門での活用は著しく、中国軍の空母艦載機である J-15 戦闘機はそのプロトタイプの開発時の試作・製品の生産時に際して、着陸装置を含むチタン合金製重要部品の試作・製造に使用した他、訓練飛行で損耗した小部品交換用に 3D プリンタが使用されているという。着陸装置は要するに航空機の車輪であり、もっとも荷重がかかる大事な機構であることから、中国軍の 3D プリンタに対する評価が伺える。さらに、Y-20 戦略輸送機、J-16 戦闘爆撃機、J-20 ステルス戦闘機、J-31 ステルス戦闘機の生産に際しても、3D プリンタ製のチタン合金製部品が組み込まれているとの情報もある。

3. AM 技術と経済安全保障

上記のように、軍事転用が極めて容易で安価にできてしまう 3D プリンタ等の AM 技術はその技術的特性からも経済安全保障上のリスクが極めて高いといえる。例えば、機器や部品を貿易を通じて輸入することなく、3D プリンタで製造できてしまうと、経済制裁がそもそも効力を発揮しなくなる¹⁵⁸。これは、例えば軍事用途の武器に関してもそうであるし、例えばエネルギー

¹⁵⁸ Johnston, Smith, Troy D., and Irwin, J. Luke, *Additive manufacturing in 2040: Powerful enabler, disruptive threat*. RAND Corporation.

ギー分野では発電所のガスタービン等重要社会インフラの部品の製造においても当てはまる。こうしたことから、AM 技術の経済安全保障上の重要性は極めて高いものだろう。

さらに、3D プリンタは既存のグローバルサプライチェーンにも多大な影響を与えることが指摘されている¹⁵⁹。3D プリンタ技術は製品のサプライチェーンの上流から下流に至る様々な製造工程において技術革新をもたらすものであり、製造コストを大幅に低減させるのみならず、既存のサプライチェーンにおける工程を低減させ、他国の製品や技術に頼ることなく複雑な機器を製造することを可能にする。例えば、米国 GE の航空部門である GE Aviation は、通常であれば 850 ものパーツが必要なターボプロエンジンを 3D プリンタではわずか 12 パーツで製造できることを明らかにした。こうした 3D プリンタの技術革新により輸入品の品目はここ数年でも激減することが予想されており、世界のグローバルサプライチェーンにおけるゲームチェンジャーになり得ることが指摘されている¹⁶⁰。このように、3D プリンタに代表される AM 技術は、軍事転用の危険性はもちろんのことサプライチェーンの構造を大きく変革させる潜在性を有する技術であり、経済安全保障上の影響も極めて高いことがわかる。

4. AM 技術と関連先端科学技術とのシナジー

AM 技術のもう一つの重要な特徴は、他の先端科学技術との強い関係性である。特に先端コンピューティング技術や AI 技術、マシンラーニング技術の技術革新が進んだことで、アディティブ・マニュファクチャリングの能力も格段に進歩してきた。アスタミューゼ社の調査によると、研究者数で見た場合、日本は先端製造技術 (Advanced Manufacturing) と先端工業素材 (Advanced Engineering Materials) で世界 4 位であった。一方で、AI 技術等との複合分野での研究者の数はまだ少ないことが推察される。

AI と AM 技術

AI 技術の発展はアディティブ・マニュファクチャリング技術にも革新的な進歩を齎してきた。例えば、昨年にはカリフォルニア工科大学 (Cal Tech) の研究者らは AI を用いて 3D プリンターの加工をリアルタイムで修正できる仕組みを発明している。AI 技術と AM 技術の複合的な技術革新

¹⁵⁹ Kite-Powell, Jennifer, "Can 3D printing solve Supply chain issues In 2022?" *Forbes* December 29th 2021. <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2021/12/29/can-3d-printing-solve-supply-chain-issues-in-2022/?sh=f3bfe8520957>

¹⁶⁰ Supply chain consulting group, "How 3D printing is changing supply chains." <https://www.sccgltd.com/featured-articles/how-3d-printing-is-changing-supply-chains/>

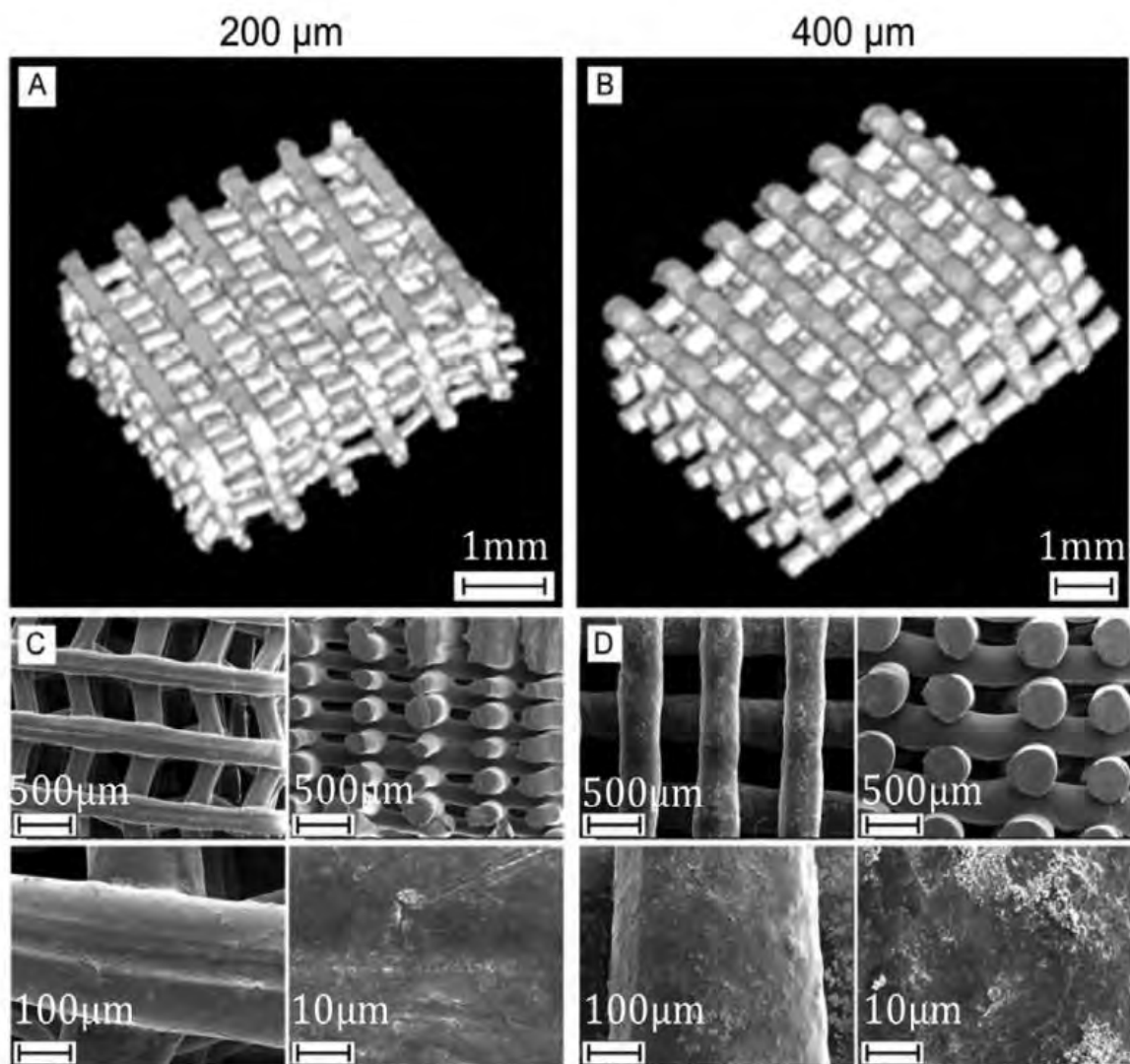
により例えば、歯の治療技術において個々人にあった治療プランを提供できるようになったほか、航空宇宙分野では飛行機のパーツ製造等にこうしたAI と AM の複合技術が用いられている。

先端工業素材と AM 技術：メタマテリアル

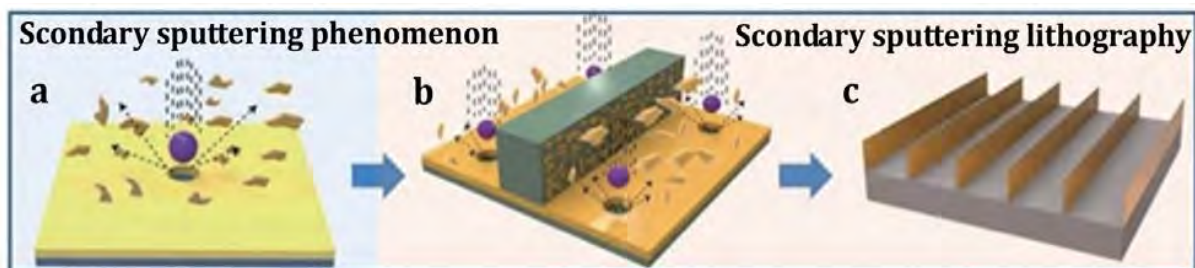
メタマテリアルは近年科学者の中でも注目を集める新素材として知られている。メタマテリアルは、電磁気学と光学が絡む非常に複雑な素材概念であるが、端的に言えば、素材そのものの性質を人工的に変化させた物質ということができる。2000 年代のこの新素材の発明により、センシング技術や 3D プリンティング分野では飛躍的な発展が進んでいる。例えば昨年 2021 年 9 月にはマサチューセッツ工科大学の研究チームがメカニカル・メタマテリアルとセンシングを融合した 3D プリント技術を開発し話題を呼んだ。国内では 2009 年に日本電気（株）（NEC）がメタマテリアルを利用した電子基板の開発に成功する等、比較的早い段階からメタマテリアルの産業利用の議論がされてきた。

ナノマニュファクチャリング技術(Nanomanufacturing)

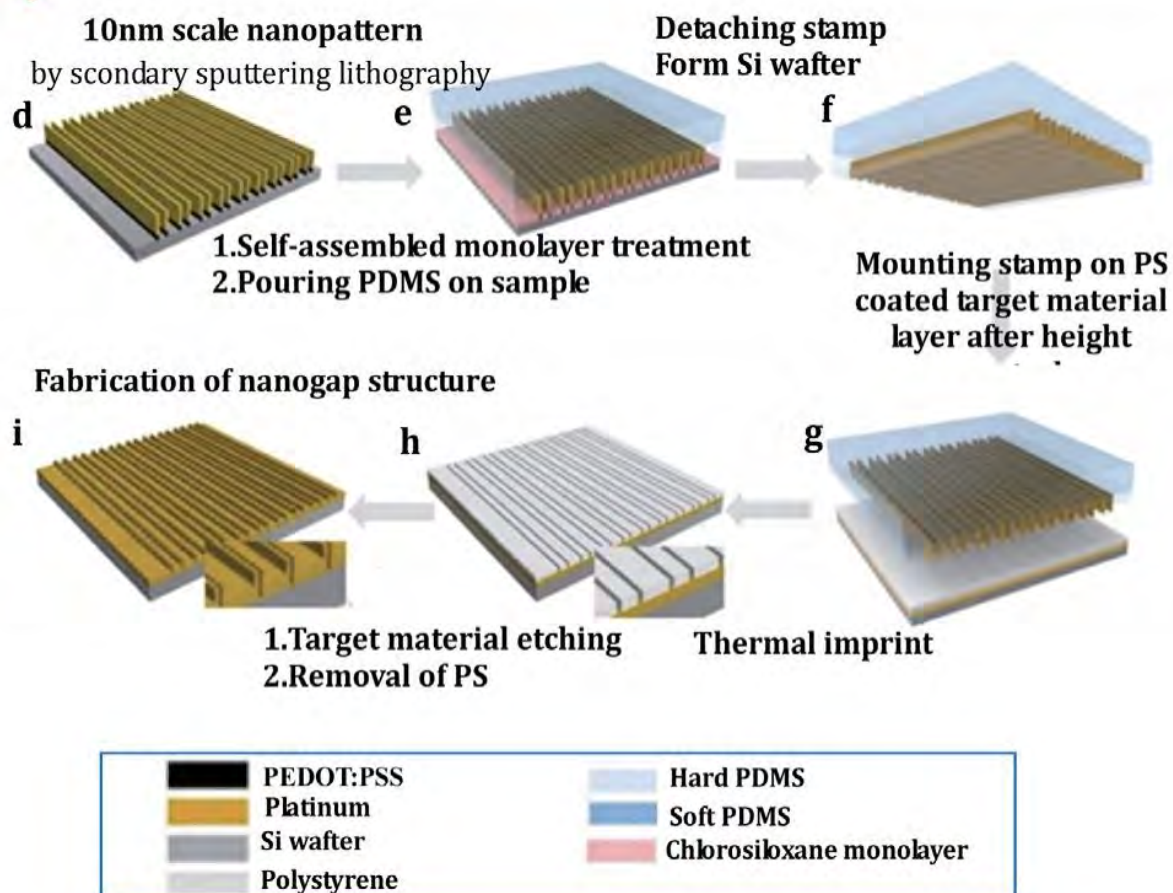
ナノマニュファクチャリング技術は、1 nm から 100 nm 規模のナノサイズの素材や構造、機器等を利用した製造技術である。ナノマニュファクチャリングには、ナノスケールの素材を利用するものはもちろん、ナノレベルでの加工を可能にする技術が使われることから、先端素材科学はもちろん、バイオ技術等との親和性も極めて高い分野である(図 4-3)。例えば、近年では、3D リトグラフ(Lithography)という新たな概念が登場し、高度な 3D ナノ構造のプリンティングが可能になりつつある(図 4-4)。ナノプリンティング技術の革新によって、微小で複雑な立体構造物の加工がより効率的に行えるようになったこともこの技術の特徴である。このようなナノレベルの加工技術は AM 技術の応用範囲を従来の製造業から医療やバイオ技術等まで広げることに大きく貢献してきた。



(図 4-3 ナノプリンティング技術によって製造されたナノバイオ素材)



Experimental Scheme



(図 4-4 3D リトグラフによるナノ構造の加工過程¹⁶¹⁾)

¹⁶¹ Jeon HJ, Lee EH, Yoo HW, Kim KH, Jung HT, Fabrication of Sub-20 nm Nano-gap Structures Through the Elastomeric Nano-stamp Assisted Secondary Sputtering Phenomenon. *Nanoscale* 6(11) (2014):5953-5959.

第5節 高度センシング・ネットワークセンシング・ステルス技術 (Advanced and Networked Sensing and Signature Management)

高度センシング・ネットワークセンシング・ステルス技術は自動運転や物流ロジスティクスに至るまで我々の生活と密接に関わるであろう幅広い分野での技術革新が期待される領域である。近年では自動運転技術の発展と共に交通分野でのセンシング技術の議論が日本国内でも活発になっているほか、よりシームレスなロジスティックの実現に向けたセンシング技術の開発も本格化してきている。例えば、衛星からのシグナルを利用した測位システムである Global Navigation Satellite System (GNSS)は、陸海はもちろん民生そして軍事用途でもその応用が期待される極めてセンシティブな技術領域だといえる。本章では、軍民を含めてあらゆる分野で応用が期待されるセンシング技術に焦点を当て、技術のマルチユースの観点からこれまでの技術発展の動向や今後益々重要となる技術領域について分析していく。

1. センサー、センサー処理、ペイロード、計測法、データ統合

(1) 技術の概要

センサー (sensor) とは、知覚できる物理量を検知・検出して別媒体の信号に置き換える装置の総称である。センサーが測定できるものは、機械量や熱、光・放射線、電気、磁気、化学 (においや濃度など)、位置、距離、変位、速度、回転角・回転数、角速度、画像、液体、硬度、湿度、流量、傾斜、地震などさまざまである (センサーによる測定をセンシングという)。ただし、センサーが測定したものはただの数値データである。そこで、被測定量を回路類を通して信号に変換する必要があり、それを解析するためには処理したデータをコンピューターやサーバーに伝送する必要がある。すなわち、物理的・化学的現象を電気的変化に変換して「ただの数値データ」を「情報」に変換・抽出しなければ、取得した情報を利用することはできない。これをセンサー処理 (Sensor processing) といい、センサーが検出したデータをコンピューターやサーバーに伝送する際の「伝送データ」を「ペイロード (payloads)」という。このように収集された (さまざまな) データを統合して幅広く活用する「データ統合 (data integration/data fusion)」を行うためには、データ収集の手段や収集用のフォーマット、結果の採点、分析、解釈の方法を定めなければならない。これを計測法 (instruments) という。なお、データ統合は、一般的に、データを場合分けし (統合対象選定)、対象データを加工し、データを集積するといったステップから構成される。

基本的なセンサーは、単一の物理量 (例えば熱) を検出・処理する。しかし、近年では、スマートセンサー (インテリジェントセンサー) と呼ばれる解析・情報処理能力を搭載したセン

サーの開発が進んでいる。スマートセンサーは、複数のセンサーで一度に複数の測定量を取得し、（自動校正機能を備えている場合は異常値や例外値などのノイズを排除した上で）データを処理して蓄積することができる。

また、センサーを複数組み合わせることで測定した感覚情報を統合してセンシングするセンサー融合（sensor fusion）という技術も発展している。センサー融合は、複合（multi-sensor）、統合（integration）、融合（fusion）、連合（association）と4つの技術に類型化することができる。各技術の概要は以下の表にある通りである。

複合的処理	複数のセンサーから得られた情報を並列的・相補的に組み合わせた出力を得ること
統合的処理	それぞれのセンサーから得られた情報に演算処理を行い、まとめた情報を得ること
融合的処理	ある現象に対して、それを測定する複数のセンサーの出力から、データ同士の処理を行い、1つの知覚を得ること
連合的処理	センサーから得た情報間の関係を調べ、出力を得ること

（図 5-1 センサー融合の類型）

他方、センサーをネットワークとして運用するセンサーネットワーク（sensor networks/networked sensors）と呼ばれる技術については、第 15 節で詳述する。

（2）公的利用・安全保障における利用

センサー処理とデータ統合は、商用利用のみならず軍事領域で活用されている。例えば、敵のロケットを解析するレーダー技術や、地上からの信号伝達を監視する航空機やドローンに搭載するシグントツールなどがある¹⁶²。レーダーは例えばドローンの脅威に対抗する際に最も信頼性の高い技術である。対無人機用の最先端のレーダーは、高精度の 3D 位置情報と高速のスキヤニング（通常は数秒かかる更新速度が 0.5 秒）を誇る。敵機を検知すると位置を継続的に監視し、高解像度のカメラ（昼夜問わず使える）で視覚的に捉え、ドローンの回転翼を検出するマイクロ・ドップラー・レーダー技術と高度な AI による画像解析により敵機を詳細に分析することができる。また高精度な 3D 位置情報の即時更新により、敵機を撃退する際に高精度で攻撃することができる。

センサーとデータを用いたシグントツールの一例としては、敵対者の通信を傍受、データ伝

¹⁶² 以下は英 Qi net i Q 社の事例を中心とした

送を取得し、方向検知・距離測定・追跡機能などを組み合わせることで相手の送信機の位置を特定する技術が挙げられる。アナログ、デジタル、携帯電話、無線機（衛星携帯電話等）などをトラックすることで、広大な作戦区域で敵を瞬時に検知し、検出した情報を地図上にプロットすることで作戦状況の把握に寄与する。

ペイロードの事例としては、ドローンと地上ビーコンを連携した空中でのペイロードの利用がある。例えば特殊部隊がターゲットの車両にビーコンを設置すると、空中のペイロードを介してビーコンを制御することで、スタンドオフ・トラッキングを実現できる技術がある。GPS タイムスタンプ、位置・加速度計の状態をセンシングすることで、標的の動きを詳細に分析することができる。

また、敵の通信やその他の電磁信号を広い範囲をスキャン、高周波エネルギーを検出して指定された周波数範囲内のすべての信号を表示、さらに探査するために特定の信号を探し出す技術もある。こうした技術を用いたシステム複数をネットワーク化することで、関心のある信号の位置固定や、完全な情報画像のための情報の共有が可能になり、より大きなシステムの一部として統合や相互運用を可能にすることができる。

(3) 小括 — 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスク

監視と偵察のデータ統合は、攻撃手段の多様化を背景に、脅威の検出と防衛の緊急性から生じている¹⁶³。センサー／処理、測定法、ペイロード、データ統合技術の軍事利用は大幅に進展している。当該技術は、わが国でも民生利用上広く用いられているため喪失・窃取されることはないが、当該技術の軍事利用の面ではすでに劣位が生じている。現在の戦闘はミサイルやドローンなどを用いた形態に進化しているため、当該技術の軍事上の劣位は安全保障上のリスクであると評価できる。

2. 補償光学

(1) 技術の概要

補償光学 (adaptive optics) は、光波の歪みを実時間で計測して補正する技術であり、天体を撮影する際に問題となる大気のゆらぎを解決するために開発された光学技術である。この補償光学技術は、1953年のバブコック (Horace Babcock) のアイディアに始まり、1990年代に天

¹⁶³ Robert K. Ackerman, “Surveillance Data Fusion Defines Future Army Systems,” *SIGNAL*,

<https://www.afcea.org/signal-media/surveillance-data-fusion-defines-future-army-systems>

文学で実現し始め、現在では医療や工業、軍事・防衛分野などに幅広く応用されている¹⁶⁴。

原理的には、大気ゆらぎなどの外乱の影響を受けると点物体の像は広がり歪みをもった分布になってしまうため、ぼやけた点の集合として像が形成され、物体の細部が再現されず不鮮明な像となる。例えば天文観測では、外乱の影響により歪んだ光波面が平面波として望遠鏡に入る。そこで、点物体からの光波面が常に平面波として望遠鏡に入るように光の波面を制御すると、外乱の影響によって劣化した像を改善することができる。これを実現するために、補償光学系は、光波の歪みを計測する「波面センサー」、その歪みを補正する「波面補正素子」、波面センサーからの情報に基づき波面補正素子を制御するための信号を作る「制御装置」から構成される¹⁶⁵。

ではこの技術はどのように他分野に応用されているのだろうか。医療分野では、例えば眼底イメージング機器に応用されている。眼底イメージング機器は、眼球を外部から照射して眼球光学系を通して眼底を観察する。そのため、角膜や水晶体に存在する複雑な歪み（高次収差）の影響が避けられず、イメージング機器の性能が制限されていた。ここで、眼底を天体と考え、角膜と水晶体を大気層と考えると、補償光学を利用することで、鮮明な眼底像を得ることがわかる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

この補償光学技術を軍事転用したものがレーザー兵器である¹⁶⁶。従来、レーザー光線は乱流に散乱されるだけでなく、大気中を通過することで熱ブルーミングを引き起こしていた。強力なレーザー光線が大気中を伝播すると、空気はレーザー光線を吸収して高温になり、エネルギーが散逸することでレーザー光線が拡散してしまう。そこで、補償光学技術を用いて、鏡を使って乱流の影響を打ち消すようにレーザー光線を自動的に歪ませることで、レーザー光線が大気中を通過する際に大気を整えて首尾よく標的に到達することができるようになる。こうしたレーザー兵器はすでに実用化されつつある。

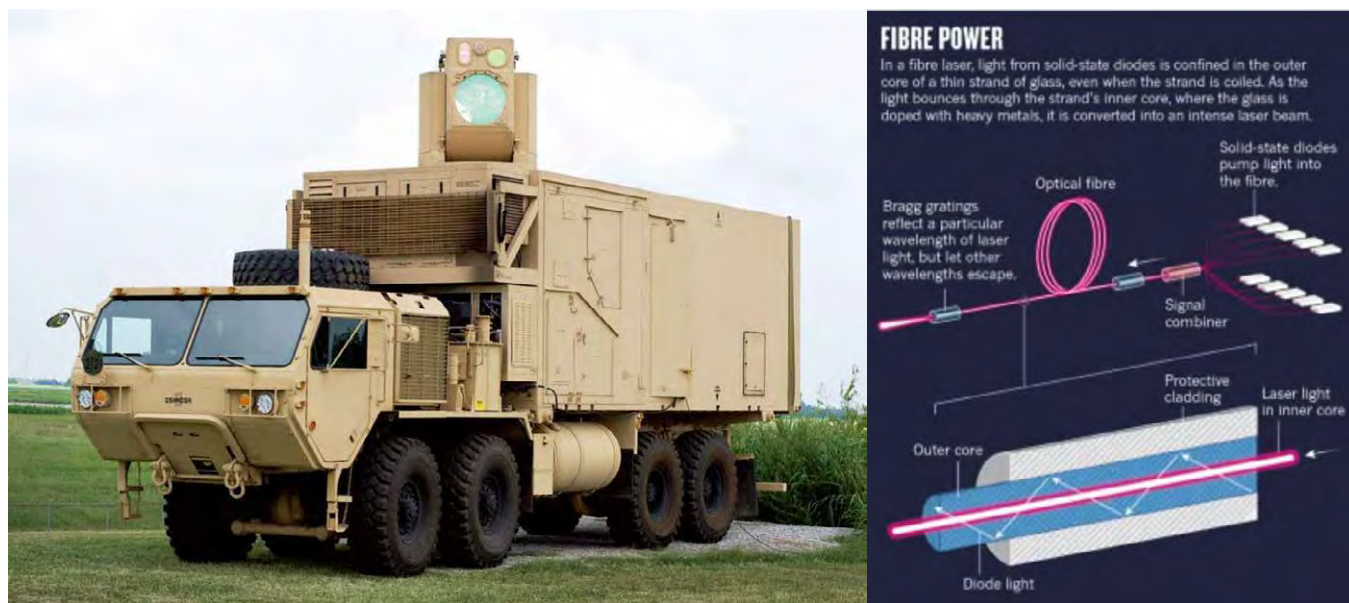
この実用化を支える技術の一つがファイバーレーザーである。光ファイバーは、安価なレー

¹⁶⁴ 家正則「ボケを直す補償光学」東京大学大学院理学系研究科・理学部 (<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/takumi/04.html>)

¹⁶⁵ 白井智宏「補償光学」『映像情報メディア学会誌』65巻5号(2011) : 648-653.

¹⁶⁶ “Defense Adaptive Optics Market Report Summaries Detailed Information By Top Key players and Active Optical Systems, LLC (Israel), Adaptica S.r.l. (Italy), Boston Micromachines Corporation (The U.S.), among others,” <https://www.fortunebusinessinsights.com/defense-adaptive-optics-market-105210>

レーザーダイオードから光学エネルギーを集め、それを増幅して高い出力を得るため、電気光変換率が30%以上となる。この効率は典型的な固体レーザーの2倍以上で、COILなどの化学レーザーに近い。また、光ファイバーは細長いため体積に対する表面積の比率が大きく、排熱の効率が高いことから寿命が長い特徴を持つ（図5-2）。



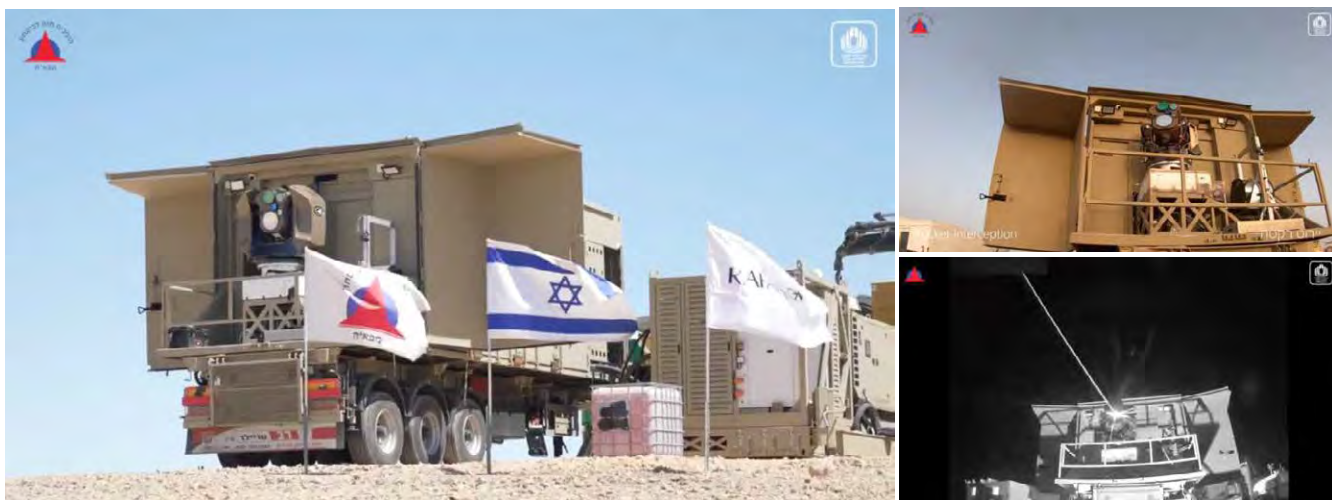
（図5-2 ボーイング社のレーザー兵器 HEL MD（左）とファイバーレーザーの原理（右））

しかし、課題もある。現在のレーザー兵器は天候の影響を受け、曇りや霧がある状況では効果を発揮しない。また、出力レベルの問題もある。ボーイング HEL MD は出力10kWであり、これはレーザー兵器として利用できる下限値である（冷戦時代に目標としていたメガワット級に比べる桁が違う小ささである）。高出力になると光ファイバーの中を大量の光子が通るためにエネルギーの放射熱により光ファイバーが損傷してしまうため、レーザー光線の出力が制限されている。この問題を解決するために、現在は複数のレーザー出力を結合する技術の開発が進められている¹⁶⁷。

加えて、通常の対空ミサイルによるミサイル迎撃システム（例：アイアンドーム）と異なり、レーザー光線は1つの標的を迎撃してから次の標的に標準を合わせるため、複数の脅威備えるには多くのシステム配備を必要とする。そのため、アイアンドームの迎撃費用が1発あたり数万ドルなのに対してレーザー兵器のアイアンビーム（図5-3）が1発約3.5ドルと安価であるにもかかわらず、配備コストがまだ高い開発段階にある。現在イスラエルは雲上の脅威を迎撃できる

¹⁶⁷ Andy Extance, “Military technology: Laser weapons get real,” *Nature* 521 (2015): 408-410.

空中高出力レーザーの開発に取り組んでいるが、開発には何年もかかるとされている¹⁶⁸。



(図 5-3 イスラエル製アイアンビーム)

(3) 小括 — 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスク

補償光学の技術は、経済領域では医療や工学、軍事領域ではレーザー兵器に応用されている。その日本は経済領域での当該技術の研究開発は進んでいるが、軍事領域（レーザー兵器開発）では劣っている。ただし、補償光学とレーザー兵器開発は最終的に現在の兵器体系を代替するレベルにまでは至っておらず、実践配備には時間もかかると思われる。したがって、リソースが限られている中、本技術を選択し集中するという判断には慎重な姿勢が求められている。

3. 地球観測リモートセンシング

(1) 技術の概要

リモートセンシングとは、遠隔（リモート）から対象物に触れることなく物体の形状や性質などを観測する（センシングする）技術である。地球観測リモートセンシング（remote sensing of the earth）とは、すなわち、地球観測衛星を用いた地球のセンシングのことを指す。地球観測リモートセンシングは、主に地球から放射されるさまざまな波長域の電磁波を観測することで、大気や地表面近くの状態や自然現象を測定している（図 5-4）。

¹⁶⁸ Isabel Kershner, “Israel Builds a Laser Weapon to Zap Threats Out of the Sky” New York Times, June 3, 2022. <https://www.nytimes.com/2022/06/03/world/middleeast/israel-laser-rockets.html>



(図 5-4 さまざまな波長域の電磁波を観測する衛星 (出典：JAXA))

技術的に見ると、地球観測リモートセンシングには、地球の表面で反射した電磁波を観測する方法（可視光・近赤外）や、地球放射を観測する（熱赤外・マイクロ波）方法などがある。可視光・近赤外の波長帯の光は太陽光に多く含まれ、地表面の状態（植物、土、水など）によって反射される電磁波の波長が変化するため、その特性を利用することで地表面の土地被覆情報（都市か森、及び植生の種類等）などが衛星データから得られる。一方で、熱赤外・マイクロ波の波長帯の光は、地球（地表面や大気）が放射する光に多く含まれており、地球放射を観測することで、地表面の温度や大気に含まれる水蒸気量などの状態を測定することができる。

このような放射光・電磁波を受け取るセンサーを「受動型センサー」と呼ぶのに対して、能動的に電磁波を照射し、その反射・散乱光を観測する「能動型センサー」を搭載した地球観測衛星もある。能動型センサーの応用事例としては、レーザー光を使用したライダーや、マイクロ波を利用したレーダーがある。ライダーはセンサーからレーザー光を照射し、対象物から反射して戻ってくるまでの時間を観測することで対象物までの距離を測定できる。また、反射強度や反射波を記録することで対象物の特徴を分析することができる。レーダーは、衛星から照射したマイクロ波に対する対象物の散乱の強度（後方散乱係数）を測定できる。地球観測衛星に搭載した合成開口レーダーを用いた測定により地表面の状態や地形、森林、災害の状況などの把握に使用されている。

(2) 公的利用・安全保障における利用・民生利用

地球観測衛星はそれまで高軌道の上に大きな衛星を配置するのが基本であったが、再利用可能なロケットと小型衛星の技術進歩によって、一回の打ち上げでより多くの衛星を使用できるようになり、衛星の大規模なコンステレーションが実現した。民間企業は、マイクロエレクトロニクスの進化、小型衛星、軌道投入コストの低下により、低軌道観測衛星コンステレーションを急増させた。

こうした商業的進歩と、合成開口レーダー（SAR）や無線周波数（RF）マッピングによる可視および赤外線スペクトルの感知能力の組み合わせにより、移動目標の表示から妨害電波の迅速な位置特定に至るまで、新しい商用および安全保障上の用途が創出された。

商業的 SAR や RF 衛星から得られるデータは、光学画像の補正に寄与し、敵部隊の動きや活動の特徴をより機微に捉えることを可能にした。このような商用の宇宙センシング能力の進歩と同時にデータの保存（e.g. クラウド）と解析の方法論にも進歩があった。データ分析については本節の主題から外れるためここでは措くが、地球観測リモートセンシングシステムから得られるデータや画像を、人工知能による高度な解析・補正によってより精度が高まっている。例えば、AI は、数日、数週間、数ヶ月にわたる数百枚の画像の集合体から作戦、集団行動、部隊態勢のパターンを判断し始めることができるようになっている。AI は、人間の認知能力では検知できない何百もの一見異なる変数の微妙な変化を検出することができる。機械は宇宙から観測されるすべての領域、活動場所、情報源から同時にデータを収集し、アルゴリズムに情報を提供することで絶えず精度を高めていける¹⁶⁹。

(3) 小括 — 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスク

地球観測リモートセンシングは、センサーや衛星の進歩によって民生上・軍事上その利用用途が大きく拡大している。ただし、小型衛星のコンステレーションは米 Starlink や Blue origin のみならず、中国や各国も大規模な構想を発表している中、利用可能な低軌道宇宙空間は限られており、また国際的に法的拘束力のある統一的な規制が存在しないなど、さまざまな課題を抱えている。

こうした技術の重要性が増し、民間・軍事双方での利用用途が拡大し、世界的に競争が激化

¹⁶⁹ 当該技術の軍事上の含意については、例えば Todd Harrison and Matthew Strohmeyer, “Commercial Space Remote Sensing and Its Role in National Security,” *CSIS*, February 2, 2022

(<https://www.csis.org/analysis/commercial-space-remote-sensing-and-its-role-national-security>) を参照。

する中で、当該技術の劣位は、大きな損失をもたらす。そのみならず、空間の奪い合いの側面もあるため、一度遅れを取ったら劣位を取り返せない時間との戦いという側面もある。

4. 新興病原体検出・特性評価技術および健康セクターのセンシング技術

(1) 技術の概要

2019年に始まり世界的なパンデミックとなり多くの死者や経済社会的損失をもたらした新型コロナウイルス感染禍から4年が経った。疾病の流行が世界のあらゆる領域に及ぼす影響の大きさから、新興病原体の検出・特性評価技術やヘルス領域のセンシングの重要性は極めて高いと考えられる。

病原体の検出・特性評価は病原体に応じてさまざまな方法によって行われる。例えば Covi d-19 では、遺伝子検査（PCR や LAMP 法等）と抗原検査・抗体検査などが実施されている。病原体ごとの細かい検出マニュアルは、わが国では感染症法に基づいて標準化のために国立感染症研究所と全国の地方衛生研究所が共同で策定している。それらは極めて重いエボラ出血熱やペストなどの1類感染症から、ノロウイルスやインフルエンザなどの5類感染症まで類型化されて整理されている。病原体検出・特性評価の技術・方法の詳細については、国立感染症研究所のマニュアルを参照されたい¹⁷⁰。図5-5は病原体検査技術をまとめたものである。

	一粒子検出法 (本提案技術)	免疫クロマト法 (簡易検査)	培養法	血清学診断 (抗体価)	PCR法	ELISA法
要する時間	◎ 3分程度	○ 30分	× 数日～数10日	× 10～14日	△ 数時間	△ 数時間
感度	○ 1000粒子 (目標100粒子)	× 5000～ 50000粒子	◎ 30粒子	△ 不明(対象者の 体質による)	◎ 3～30粒子	○～△ 100～5000 粒子 (抗体による)
ランニングコスト	○ 数100円 (予定)	△ 1000円程度	× 数1000円	△ 1000円程度	○ 数100円	○ 数100円
機器の必要性(価格)	△ 必要 (6000千)	◎ 不要	△ 培養設備 (5000千)	△ プレートリーダー	△ PCR反応装置	△ プレートリーダー

¹⁷⁰ 国立感染症研究所「病原体検出マニュアル」<https://www.niid.go.jp/niid/ja/labo-manual.html#class1>

	円)		円)	(2000 千円)	(3000 千円)	(2000 千円)
簡便さ	◎ 採取試料の前処理なし	○ 検体採取に技術必要	× 熟練が必要	△ ある程度の熟練が必要	△ 採取試料の前処理必要	△ ある程度の熟練が必要

(図 5-5 病原体検査技術の比較表¹⁷¹⁾)

このように医療分野において病原体の検出・特性評価といった医化学・生理学的な技術の開発が進んでいる一方、同医療・健康領域でテクノロジーの進化・応用も進んでいる。その一つがセンシングである。

そもそも医療業界では従来からセンサー機器が利用されてきた。代表的なものだと X 線や CT、MRI などの検査・医療画像やペースメーカーでは生体情報を数値化するためにセンシングが活用されてきた。これに加え、近年では、ヘルスケア領域におけるセンシングの中で「生体情報センシング」や「行動情報センシング」といった技術がトレンドとなっている。

生体情報センシングは、例えばスマートウォッチのようなウェアラブルデバイスに搭載されたセンサーを用いて、心拍数や脳波、酸素飽和度、体温、血圧、血糖値などのバイタルデータを取得し、そのデータを解析することで対象の健康状態を把握するのに利用されている。こうした健康状態の把握は、身体のみならず精神にまで及び、唾液や心拍などからストレスを計測することができ、メンタルヘルスにも応用されている。対して、行動情報センシングは、姿勢や動作、位置、移動軌跡などの情報を、加速度センサーや GPS などを用いて取得し、動的なデータを得ることができる。このようなリアルタイムで生体データを取得して解析できる技術は、ヘルスケア DX と呼ばれている。

(2) 公的利用・安全保障における利用

パンデミックは、民生・国防を横断する事態である。新型コロナウイルスに関しては武漢の研究所流出説が提唱されたことなどから、改めてバイオテロへの注意も喚起した。病原体検出・特性評価技術は、こうした脅威に対抗する上で鍵となる技術の一つである。

他方で、医療領域における技術的なトレンドとして、ヘルスケア領域におけるセンシングの進歩と活用が挙げられる。とりわけ最近では、電子デバイスの小型化やモノのインターネット化 (IoT) の進歩により、ウェアラブルデバイスを通してヘルスケアのセンシングをする「スマ

¹⁷¹ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「空港検疫、バイオテロ対策向け高感度病原体検出法を開発—5分で感染直後の微量ウイルス等の有無を診断」

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0504A.html

ートセンシング」が民生利用上のトレンドとなっている。

軍事上の利用としては、兵士の身体や精神状態の把握、改善にこのヘルスケアセンシングの技術が利活用される。また裏を返せば、バイタル情報は対象の健康状態や今後の体調を予測する重要な示唆を与えるデータが含まれているため、そのデータの取り扱いが肝要となる。すなわち、要人のバイタルデータが敵陣営に取得・悪用されないような対策が求められる。

(3)小括 — 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスク

新型コロナパンデミックを契機に、従来より新興病原体の検出・特性評価の重要性が増している。各国は医療体制や感染症対策、検疫、病原体検査などの法制・現場体制を整え、次の医療的危機への備えを進めている。

5. 生物兵器検出・特性評価技術と先端・ネットワークセンシング、シグネチャマネジメント

(1) 技術の概要

背景

化学兵器とは、化学物質の持つ毒性を用いて人や動物、環境に損害を与える兵器である。国際的な枠組みとして、化学兵器禁止条約が発効しており、化学兵器の使用や開発・生産・保有等が禁止されているものの、北朝鮮やシリアなどが未加盟となっている。

2020年7月に米国陸軍本部が公表した北朝鮮の戦術に係る報告書では、北朝鮮は約20種類、2,500から5,000トンの化学兵器を保有する世界第3位の化学兵器保有国であるとしている¹⁷²。シリアは国内の反体制派に対して度々化学兵器や化学物質を攻撃に用いている。

また、国家ではなくテロリスト等による使用も懸念されている。我が国における事例として、オウム真理教により実行された1994年の松本サリン事件、翌年の地下鉄サリン事件がある。こうした市中での事例は、CBRN攻撃として、生物兵器や放射性物質を用いた兵器(ダーティ・ボム)と同様に対策がなされている。一方、上述のシリアの事例のように、化学兵器は平時の市中だけでなく戦場での使用実績もあることから、戦場等の過酷な状況下での生物剤検知を目指した技術開発も行われている。

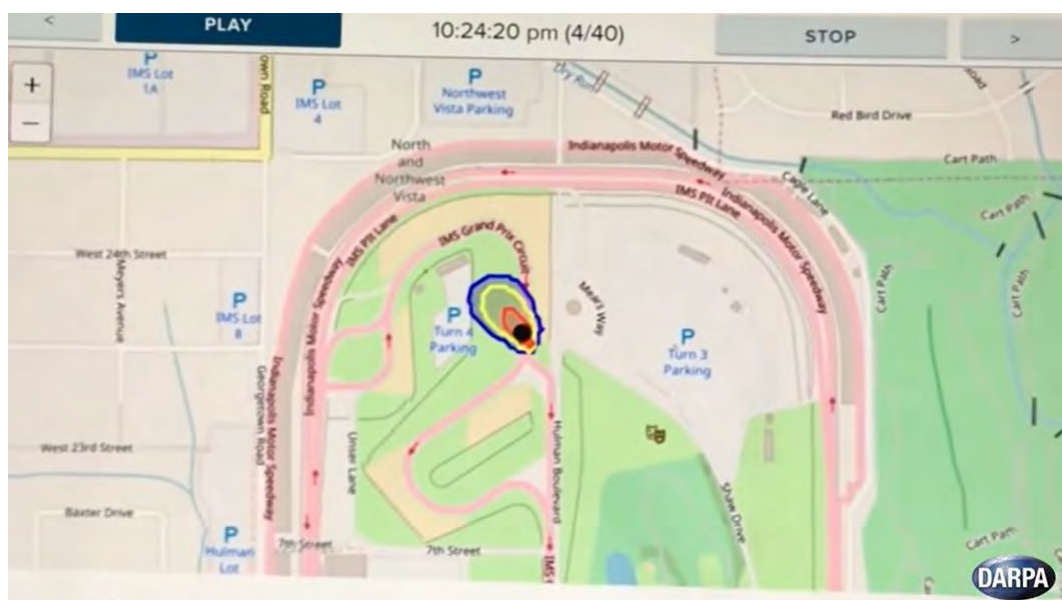
研究開発動向

市中の化学兵器検知・動態モニタリング技術

¹⁷² “North Korea Tactics” Headquarter, Department of Army, page.1-11.

ネットワークセンシングに係る事例として、米国 DARPA の SIGMA+(シグマプラス)プロジェクトがある。これ以前に DARPA は都市規模での核物質・放射性物質検出をめざした SIGMA¹⁷³というプロジェクトを実施していた。その後継プロジェクトである SIGMA+では生物、化学をも検知対象とすることを試みている。各種検知センサーをネットワーク化させることで、より広域な地域規模の CBRN 脅威を早期検知することが可能になる。

また、SIGMA+の一環として、2018 年から先進的な化学センサーの開発プロジェクト、ChemSIGMA も行われている。このプロジェクトで開発されている化学センサーは、単独の化学物質センサーというよりは、同じ筐体に化学物質センサーと風速センサーを搭載し、この情報を中央のクラウドに送信し、アルゴリズムを通じて処理することで化学兵器や前駆物質の拡散状況のシミュレーションや化学的脅威の動態把握を行うものである¹⁷⁴。



(図 5-6 : ChemSIGMA による化学物質動態シミュレーションの様子¹⁷⁵)

2019 年 7 月に開催されたモータースポーツイベント、インディ 500 では、DHS が運用する既存

¹⁷³ <https://www.darpa.mil/program/sigma>

¹⁷⁴ ChemSIGMA およびその実験については以下を参照した。

“DARPA Tests Advanced Chemical Sensors

Next-generation sensors for detecting chemical threats put through their paces in SIGMA+ program,”

April 30, 2019. DARPA. < <https://www.darpa.mil/news-events/2019-04-30> >

DARPAtv “ChamSIGMA”, Youtube, April 30, 2019. < <https://youtu.be/95vqUNiIZKc> >

¹⁷⁵ DARPAtv <https://youtu.be/95vqUNiIZKc>

の生物・放射性物質センサー(検出器)と合わせて ChemSIGMA の実験も行われた。この実験では、煙を伴う無害なガスを放出し、その動態をセンサーが正確に測定しているかを確認した¹⁷⁶。

このプロジェクトに参加しているマサチューセッツ州の Physical Science Inc(PSI)は、ChemSIGMA による成果については、SIGMA Chemical Recon and Meteorology: SCRAM として、その利用方法やより詳細な仕様を公表している。SCRAM に用いられている化学センサーは日本でも流通している Smith Detection 社製の携帯用化学兵器・有害工業化学物質の検知・識別器、LCD3.3 である。PSI は、個々の測定器を分散型ネットワークで接続することにより検知能力の向上や、こうしたセンサーの課題である誤報の減少も実現できるとしている¹⁷⁷。

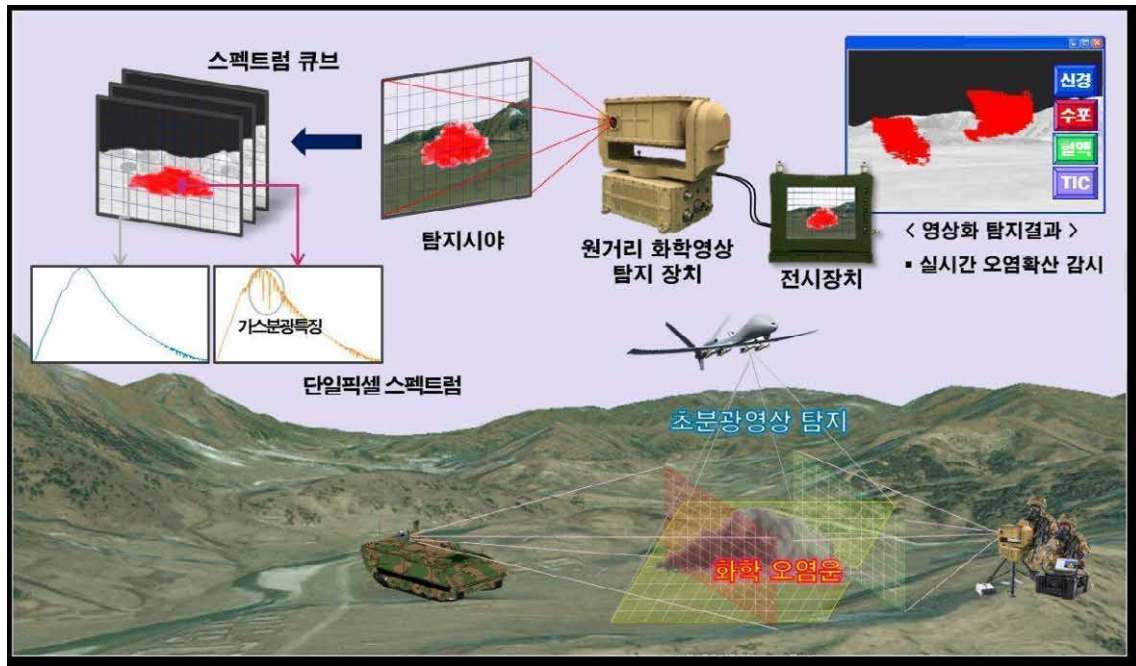
韓国国防開発庁(ADD)は 2021 年 12 月に 2012 年から開発を続けてきた化学兵器による汚染状況を遠隔で検知・監視する「ハイパースペクトル画像スタンドオフ化学検知システム」を公表した。これは、化学攻撃が発生した現場の画像と赤外線のスペクトル情報を分析することで、化学兵器による汚染の広がりを可視化、リアルタイムで監視するものである¹⁷⁸。ADD では、ハイパースペクトル画像技術を化学兵器検知以外の分野にも応用することを試みており、軍事的には隠ぺい、迷彩などの識別による標的検知能力の向上などの効果が期待されている。また、民生用途としては、癌や眼球異常診断といった医療用途、環境モニタリング、農産物の収穫状況把握や森林管理に活用可能であるとしている¹⁷⁹。

¹⁷⁶ <https://www.darpa.mil/news-events/2019-07-02a>

¹⁷⁷ <<http://www.psi.corp.com/products/passive-sensors/sigma-chemical-recon-and-meteorology-scrampersistent-wide-area-networked>>

¹⁷⁸ “S.Korea develops real-time, standoff chemical warfare agent detector,” The Korea Herald, December 8, 2021. Accessed on January 21, 2023.
< <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20211208000645>>

¹⁷⁹ “Hyperspectral Image Equipment,” Agency for Defense Development,
< <https://www.add.re.kr/board?menuId=MENU02359>>



(图 5-7 하이퍼스펙트럴画像スタンドオフ化学検知システム¹⁸⁰⁾)

로봇을 이용한 화학兵器検知等

英国では、国防省の科学技術研究所(Defence Science and Technology Laboratory: Dstl)が2016年から化学兵器の検知機器をロボットに搭載し運用するための研究開発プロジェクトであるミネルヴァ(Project Minerva)を行っている。Dstlは国家安全保障に係る研究開発資金配分を行う国防・安全保障アクセラレーター(Defence and Security Accelerator: DASA)を通じ大学や企業に資金提供を行うことでプロジェクトを遂行している。化学脅威発生後の汚染された現場における検出、識別、モニタリング、サンプル採取はファーストレスポンドの要員によって実施される。ロボットがこれを代替することで、現場の状況の効果的な評価や、ファーストレスポンドの要員が受ける潜在的な危険を回避することができる。また、ファーストレスポンド以外の専門家や現場指揮者が事件発生と同時に得られる情報の量・質の向上も目標とされている¹⁸¹。

このプロジェクトの出資を受けたラフバラ大学は、現場に展開されたドローンに搭載され

¹⁸⁰ Agency of Defense Development

¹⁸¹ “Competition document: autonomy in hazardous scene assessment,” Defence and Security Accelerator, 25 October 2016.

<<https://www.gov.uk/government/publications/cde-themed-competition-autonomy-in-hazardous-scene-assessment/competition-document-autonomous-systems-to-detect-hazardous-materials>>

たセンサーの情報から化学物質の放出源を特定するアルゴリズムを開発した¹⁸²。

また、このプロジェクトで開発されるドローン搭載型の化学兵器検知システムは平時の市中だけでなく戦場において使用することも想定されている¹⁸³。

(2) 公的利用・安全保障における利用

特に CBRN 兵器とされる生物兵器と対比した化学兵器攻撃による疫学的な特徴として、類似する症状の患者がほぼ同時期に出現するというものがある。こうした特徴から、何らかの被害が発生していることの認知は可能であるが、これがどのような化学剤によるものなのかを早期に特定することは、その後の被害管理や現場管理の前提となる情報として重要である¹⁸⁴。DARPA の ChemSIGMA で行われているようなモニタリングの例でいえば、平時なり、大規模イベントにおいてネットワーク化された検知システムを構築しておくことにより、化学脅威発生時の迅速な情報収集が行えるほか、化学剤の動態シミュレーションを行うようなアルゴリズムと組み合わせることで、その拡散を予測し避難を呼びかけるなど、さらなる被害の拡大を防ぐことができる。

また、ロボットを用いた化学兵器検知技術について戦災下や災害下の過酷環境における化学兵器検知能力向上に貢献すると考えられる。たとえば、化学兵器が弾道ミサイルに搭載されて使用された場合、現場は生物剤の汚染だけでなく、瓦礫の散乱や建造物の倒壊といった作業安全上のリスクが高まっている可能性がある。人員に代わりロボットによる検知が行われることで、二次的な被害の低減が期待される。

また、紛争地域への派兵のような国外の展開先での活動では、ChemSIGMA のような設置型の化学物質検知器を使用することが困難になると考えられる。こうした場合、常設の必要のないロボット・ドローンによる検知、また韓国が開発したような画像認識による技術も有効であり、これらを用いて化学的な安全を確認した上での要員の展開を可能にすることができる。こうした技術を有していることにより紛争後の平和構築活動等、不安定な情勢下の活動能力の向上に貢献することも考えられる。

¹⁸² “Life-saving chemical detection drone developed at Loughborough flies through first test stage,” Loughborough University, 19 September 2018. <<https://www.lboro.ac.uk/news-events/news/2018/september/mi-nerva-drone-chemical-detection-life-saving/>>

¹⁸³ “UK tests life-saving chemical detection robots and drones,” UK.gov, <<https://www.gov.uk/government/news/uk-tests-life-saving-chemical-detection-robots-and-drones>>

¹⁸⁴ 世界保健機関『WHO ガイダンス：生物・化学兵器への公衆生成対策 第2版』2004年。

(3) 民生利用

化学剤による脅威という点では、化学兵器による攻撃だけでなく、化学工場の事故等による化学物質の飛散も社会への脅威となる。米国の ChemSIGMA や韓国のハイパースペクトル画像を用いた技術は、こうした事象が発生した際、工場周辺の住民の避難や被害管理において役立つことが考えられる¹⁸⁵。同様のケースにおいて、ロボットの利用も被災した工場内において、発生源となっている区画や設備の特定に役立つことが想定される。

(4) 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ

上記技術の開発の目的として、現在ファーストレスポnder等々の要員により実施される現場管理の実施やサンプリング、サンプルの輸送等のプロセスを機械化し、攻撃発生後の対応の迅速化や要員の安全向上を図ることが挙げられていることから、当該技術の劣位は特に我が国の CBRN 対応を行う要員の安全性を向上させる機会の喪失につながる。人口減少が続く中、対応要員の確保も課題になっている現状もあり、他の分野と同様に化学兵器検知についても一定の省力化がなされる必要がある。

また、化学兵器による攻撃事態と化学工場事故のような災害対応に共通する部分として住民避難における情報提供という側面がある。ChemSIGMA や画像処理技術は、飛散している化学物質の動態を可視化することができる。事案発生や事態の推移を説明するにあたり、このような可視的な情報が提供されることは、事態発生を受けて避難等を強いられる住民等の安心や納得を醸成することにも貢献すると考えられる。

(5) 日本の文脈におけるリスク分析

化学脅威発生の可能性という点において、北朝鮮が多種、大量の化学兵器を保有しているという分析等を鑑みると、わが国においても化学兵器攻撃発生への備えが必要であることが認識できる。前述の米国陸軍の報告書の中では、北朝鮮による化学兵器使用の方法についても想定されている。記述した弾道ミサイルの想定その他、テロ等で想定される市中での散布等様々な用途が想定されていることから、化学兵器の種類、使用・散布のされ方、被害の範囲等、個々の使用のケースを想定し、それぞれに適合する技術や手法が備えられていることが望ましい。

こうした多様な化学脅威のケースに備える中では、省力化や、住民避難のための対応の迅速化、状況の可視化といった技術能力が必須であろう。現状、こうした技術開発は米国や英国、韓国といった我が国と安全保障上のつながりが強い国で進んでいる状況にある。これらの国と

¹⁸⁵ PSI は SCRAM の紹介の中で有毒な工業化学物質の広域監視の用途にも言及している。

協力しつつ、技術やその運用について知見を高めていく必要があると考えられる。

また、バイオテクノロジー分野では、米国が質と量の面で優勢ではあるが、中国も年々研究者の数を増やしており、東京大学から中国の天津大学への研究者の移動も見られる。中国において当該分野の研究がより拡大するのと並行して、日本からの人材流出にも留意する必要があるだろう¹⁸⁶。

(6) その他（上記のフォーマットにのらないが特筆すべき点など）

本調査は生物化学兵器検知・特定への先端センシング技術の活用を対象としたものである。他方、化学兵器攻撃による被害低減のためには、他にも活用可能な技術がある。たとえば大規模な化学兵器・化学剤の散布がなされた場合、物質の特性によってはこれが大気等によって広範囲に拡散する可能性がある。WHO はこうした事態において活用しうる技術としてコンピュータシミュレーションを挙げている。

6. エネルギーセクターセンサー(Energy-sector sensing)

センサー技術はエネルギー分野でも活躍の場を広げており、特にそのコスト削減と省エネに貢献している。リアルタイムでデータを分析し伝達することで、エネルギー供給のあらゆる工程において、より効率的なシステムを構築・運用することができる。ここでは、センサー技術がエネルギー分野にどのような技術革新をもたらしてきたのかを分析する。

エネルギーセクターにおけるセンサーの導入は、そのほかのデジタル技術の発展と連動して進められてきた。特に IoT(Internet of Things)の概念がエネルギーセクターに導入され、あらゆる工程をデータによって管理して共有するという仕組みが確立される中で、センサー技術が担う役割がさらに大きくなった。例えば、IoT が導入される以前は、高度センサーは1台毎に\$1000 もしたのに対して、IoT が導入されて以降現在では1台あたりの価格が\$10 以下となっている¹⁸⁷。このことから IoT の導入によりセンサーの商業化が急速に加速したことがわかる。

「インダストリー4.0」はこうした流れをさらに加速させてきた。IoT によりデータを通じてあらゆる工程が可視化されることで、それらの変化や異常を検知するためのセンサーの導入が急激に進むようになったのである。既存の火力発電や原子力発電はもちろんのこと再生可能エネルギーの発電においてもセンサーが導入されることで、これまでバラバラに管理されていた

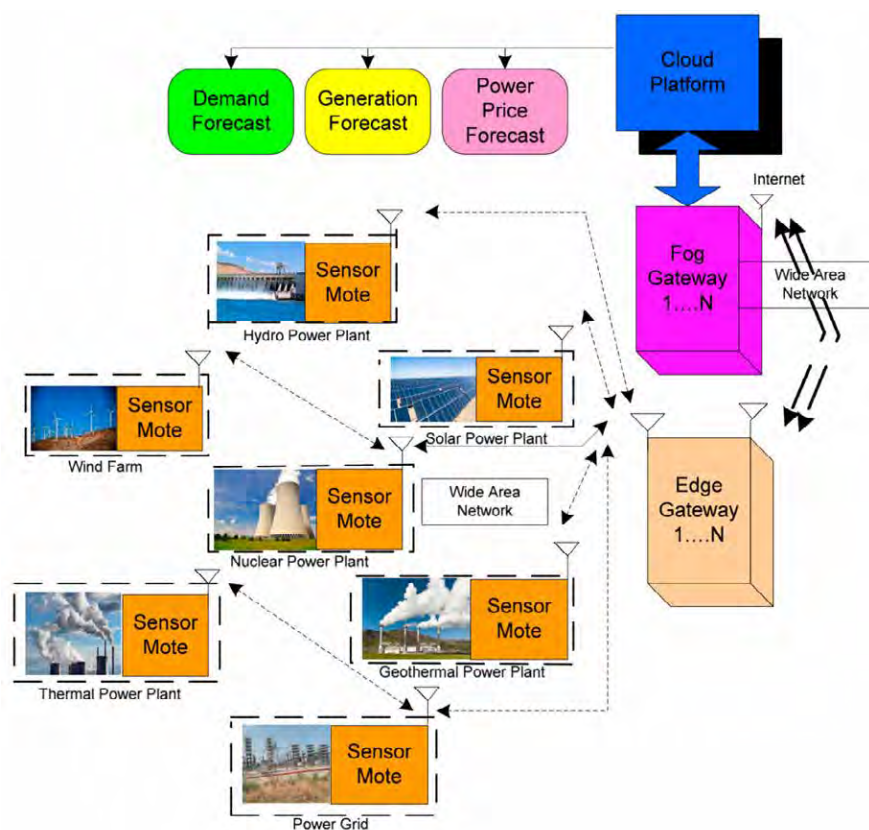
¹⁸⁶ アスタミューゼ社への再委託レポート, 73 頁。

¹⁸⁷ Critchley, Liam. *The development of sensors within the energy sector*. (May 4, 2018).

エネルギー供給の工程が一元的に管理統制されるようになる(図 5-8)。これにより電力の需要と共有のバランスがより一層可視化され、より効率的な電力供給が可能になるのである。

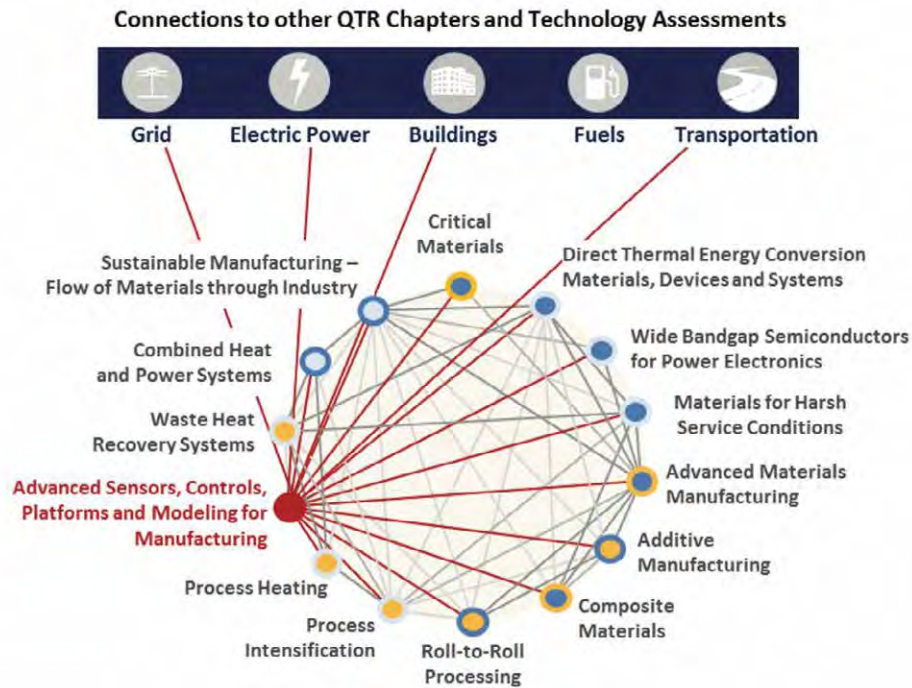
さらに、センサー技術は、発電所システムがそのほかの生活インフラとデータで文字通り繋がることで更なる効果を発揮する。図 2 のようにセンサー技術を通じて、電力とグリッドさらにはその供給先となるビルや交通インフラをデータで繋ぐことができる。こうしたネットワークはその他の先端科学技術と相まって更なるネットワークを広げて図のようなネットワーク網を形成するのである。

このようにセンサー技術はリアルタイムのデータ取得とその送信を実現する重要なツールであり、こうしてリアルタイムのエネルギー需給モニタリングが可能となることで、より低コストでかつ効率的なエネルギー供給が可能になる。センサー技術は、このように IoT 技術全般の発展とともに進化を遂げてきたのである。



(図 5-8 IoT ベースのリアルタイムモニタリング発電システムの仕組み¹⁸⁸⁾

¹⁸⁸ Singh, Rajesh, et al. "Energy System 4.0: Digitalization of the energy sector with inclination towards sustainability." *Sensors* 22(17) (2022): 6619.



(図 5-9 高度センサーとエネルギーセクターの情報ネットワーク網の概念図¹⁸⁹⁾)

7. 環境セクターセンサー (Environment-sector Sensing)

環境セクターにおけるセンサー技術の応用

エネルギーセクターと同様に環境セクターにおいてもセンサー技術は幅広く活用されている。その用途は極めて広範囲にわたり、火山活動や海洋状況をリアルタイムでモニタリングするためのセンサーや大気汚染のモニタリングセンサー、さらには、森林火災や地震の検知センサー等々幅広い分野と用途でセンサー技術が用いられている¹⁹⁰。特に近年では、気候変動対策の観点からセンサー技術への注目が高まっており、地球環境や生態系の変化のデータ取得を目的にセンサー技術が使われるケースが多い¹⁹¹。また宇宙衛星から地表の湿度や海面水位等を計測す

¹⁸⁹ The United States Department of Energy, *An assessment of energy technologies and research opportunities*. (Quadrennial Technology Review). September 2015.

¹⁹⁰ Bokare, Madhav, and Anagha Ralegaonkar. "Wireless sensor network: A promising approach for distributed sensing tasks." *Excel Journal of Engineering Technology and Management Science* 1.1 (2012): 1-9; Galar, Diego, and Udar Kumar. *Maintenance: Essential electronic tools for efficiency* (Academic Press, 2017).

¹⁹¹ Cai, Danlu, et al. "Remote Sensing Greenness and Urbanization in Ecohydrological Model Analysis: Asia and Australasia (1982-2015)." *Sensors* 19.21 (2019): 4693.

るセンサー技術も開発されており、衛星技術とのシナジーも大いに期待される分野である¹⁹²。例えば、米国航空宇宙局(NASA)は、地球上のメタンの量を測定するセンサーを開発しており、リアルタイムのデータ収集を通じて、包括的なカーボンマッピングが実現されつつある¹⁹³。

衛星技術とセンサー

地球上の環境変化に関するデータを取得する際に、衛星から地表の状況を観測するという方法が取られることが多い。これは、例えば海上状況把握(MDA)においても同様であるが、海洋状況のみならず、地表やその他あらゆる環境状況の観測にセンサー技術が使われている。例えば、NASAは、北極圏から放出される放射エネルギー(Polar Radiant Energy)を観測するセンサーを衛星に搭載することで、なぜ北極圏の他の地域よりも温暖化が進んでいるのかということ を明らかにしようとしている¹⁹⁴。また、日本でも地球上の水循環を観測する衛星「しずく」(GCOM-W1)が活躍しており、衛星に搭載された「高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)」というセンサーによって、地球上の水の循環をリアルタイムで計測している。



① 太陽電池パドル

軌道上において太陽光を電池エネルギーに変換し、衛星に必要となる電力を供給します。

② 高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)

地表や海面、大気などから自然に放射されるマイクロ波を観測するセンサです。

(図 5-10 第一期水循環変動観測衛星「しずく」(JAXA)¹⁹⁵)

¹⁹² Althen Sensors & Controls, “Eddy current sensors for measuring climate change.”

<https://www.althensensors.com/case-studies/eddy-current-sensors-for-measuring-climate-change/>

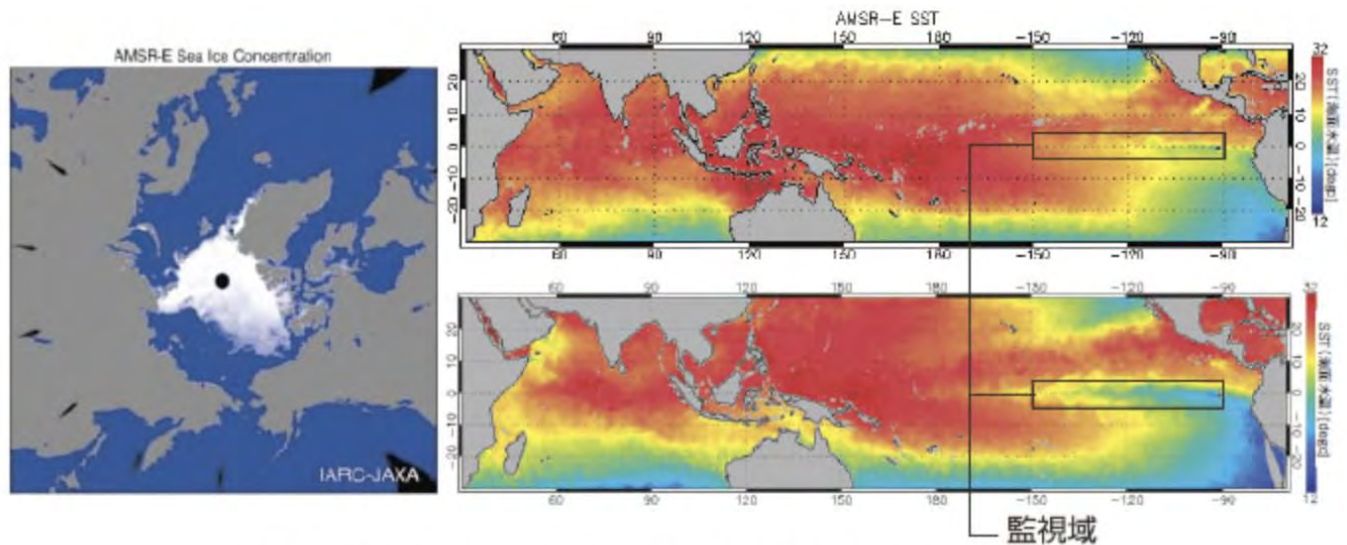
¹⁹³ NASA, “NASA Sensors to Help Detect Methane Emitted by Landfills”. December 14, 2022.

<https://climate.nasa.gov/news/3241/nasa-sensors-to-help-detect-methane-emitted-by-landfills/>

¹⁹⁴ NASA, “New NASA space sensors to address key Earth science questions.” February 5, 2018.

<https://climate.nasa.gov/news/2678/new-nasa-space-sensors-to-address-key-earth-science-questions/>

¹⁹⁵ https://www.jaxa.jp/countdown/f21/overview/shizuku_j.html



左図：北極海の海氷 右図：エルニーニョ（上）およびラニーニャ（下）

（図 5-11 衛星「しずく」による観測の例¹⁹⁶）

8. 交通分野センシング技術（Transportation-sector Sensing）

自動運転の実用化は、現時点で国際自動車技術会（SAE）が定義する自動運転6段階のうちレベル3の段階にある¹⁹⁷。日本政府は、日本が抱える課題のうち、交通事故・交通渋滞等の削減¹⁹⁸、過疎地域や高齢者向けの移動手段の確保や、物流業界における人手不足、これらの課題を自動運転の実用化によって解消し、ひいては国民の安全・安心に寄与するもの¹⁹⁹ ²⁰⁰として2030年を目処にレベル4の達成を目標に掲げている²⁰¹。

¹⁹⁶ ibid.

¹⁹⁷ 定義の詳細は、令和3年度広範囲調査分析報告書第15節参照。

¹⁹⁸ 内閣府「平成30年交通安全白書」

https://www8.cao.go.jp/koutu/tai_saku/h30kou_haku/zenbun/genkyo/feature/feature_01.html

¹⁹⁹ 国土交通省「自動運転に関する主な政府方針等について」<https://www.mlit.go.jp/common/001266402.pdf>

²⁰⁰ 経済産業省「自動走行ビジネス検討会：

https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/Automated-driving/automated-driving.html

²⁰¹ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所「自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト（RoAD to the L4）」

https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/topics/to2021/to20210610/basic.pdf

上記の政策を受けて、自動運転に関するセンシング技術に関しては、既に関係府省・機関が連携して推進する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）的イノベーション創造プログラム（SIP）²⁰²にて基盤技術の研究開発や実証実験が進められている²⁰³。

(1) 技術の概要

自動運転で必要とされるシステムは、4つの運転動作「認知」「予測」「判断」「行動」を運転者に代わって連続して行うことができるものとされている。運転者の視覚や聴覚による「認知」、脳での「予測」及び「判断」、ハンドルやアクセル、ブレーキなどの「行動」という一連の過程を運転者に代わってシステムが実行する。このシステムを実現させるための構成要素のうち、「認知」と「予測」にあたる部分、すなわち車体に搭載されたカメラやセンサー、位置情報システムをここで取り上げるセンシング技術とする。

GNSS

衛星からの信号を利用する測位システムである。車体に据え付けられた GPS アンテナで信号を受信して高度測位し、自車位置を認識するもので、誤差は 10 メートルから最小で 6 センチメートル程度とされている。ただし GNSS は電波を用いた技術であるゆえトンネル内や高層ビル街などの遮蔽環境では受信精度が極端に低下する。このため多くの異なる衛星システムから異なる帯域の信号を受信できるマルチ GNSS が測位精度を向上させる。現在米国の GPS 以外に世界で数々の準天頂衛星（ロシアの GLONASS、中国の Bei Dou（北斗）、EU の Galileo、日本のみちびき²⁰⁴等）が運用されているが、これらの衛星は各国それぞれ違う周波数を持つため、マルチ GNSS によって捕捉衛星数が増やし、異なる周波数帯の信号を同時に受信することによって自動運転の「認識」を妨げる妨害波に対するロバスト性も向上することとなる²⁰⁵。

²⁰² 内閣府「戦略的イノベーション推進プログラム（SIP）「自動運転」<https://www.sip-adus.go.jp/rd/>

このほか、関係する省庁（内閣官房、警察庁、総務省、経済産業省、国土交通省）や国立研究法人にも情報掲載あり。

²⁰³ SIP 自動運転推進委員会「【SIP 第 2 期】「自動運転」 2021 年度～2022 年度施策 施策一覧」

https://www8.cao.go.jp/cstp/qaiyo/sip/iinkai2/jidosoko_18/sanko1.pdf

²⁰⁴ 科学技術振興機構「日本版 GPS「みちびき初号機後継機」打ち上げ成功 高精度測位に貢献」

https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20211027_n01/

²⁰⁵ Xingzeng, Li, et al. (2022). Multi-GNSS PPP/INS/Vision/LiDAR tightly integrated system for precise navigation in urban environments. *Information Fusion*. Feb2023, Vol. 90, p218-232. P. 15.

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ²⁰⁶²⁰⁷

GNSS は地球上の位置を示す絶対位置となる座標を得ることができる一方、SLAM は自らの位置の特定と地図作成を同時に行うことができる技術である。車体にセンサーを搭載し、移動しながら周囲の環境をマッピングしていく。また、センサー画像などから任意の基準点を設け、この基準点をベースに車体の移動量を計算したり、車体に搭載した慣性計測装置 (IMU) などから移動量を算出したりすることで自らの相対的な位置を特定することができる。

SLAM に用いられる外界センサには大きく3つの種類 (LiDAR、カメラ、距離画像カメラ) があるが、それぞれの特性から単一での運用は難しい。LiDAR は点群による測距を行うが解像度は期待できず、カメラは解像度が高いものの単独での距離計算はできないため不安定要素となり、距離画像カメラは太陽光に弱く室内環境に限定される。結果としてデータの信頼性を高めるためには、複数のセンサデータを融合することとなり、この最適解を導くための技術のひとつが、CT-SLAM (Continuous Time SLAM) と言われている。

SLAM 開発事例

このほか、Deep Learning を応用した DNN (Deep Neural Network) を SLAM に展開する研究も急速に発達している。継続して移動する車体が捉える画像は視差が生まれにくいという特徴から、学習を用いて距離を推定できるようにする²⁰⁸。DNN の応用はカメラ SLAM が先行しているものの、3D 地図を作成できる LiDAR や距離画像カメラ SLAM への応用技術²⁰⁹²¹⁰はまだ研究が待たれるところである。

6. センサネットワーク／センシング (Networked Sensors and Sensing)

(1) 当該技術の概要

²⁰⁶ 田崎 勇一 「LiDAR を用いた SLAM 技術の現状と展望」 システム／制御／情報 64-42, pp. 51-56.

²⁰⁷ 友納 正裕、原 祥堯 「SLAM の現状と今後の展望」 システム／制御／情報 64-42 pp. 45-50

²⁰⁸ Sobczak, Łukasz et al. (2022). Finding the best hardware configuration for 2D SLAM in indoor environments via simulation based on Google Cartographer. Scientific Reports. 11/5/2022, Vol. 12 Issue 1, p1-21. 21p

²⁰⁹ Jian, Yang. Et al. (2020) A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR. Remote Sensing. Jun2022, Vol. 14 Issue 12, pN.PAG-N. PAG. 27p.

²¹⁰ Al di baja, Mohammad, Suganuma, Naoki (2021). Graph SLAM-Based 2.5D LIDAR Mapping Module for Autonomous Vehicles. Remote Sensing. Dec2021, Vol. 13 Issue 24, p5066-N. PAG. 1p.

センサネットワーク (networked sensors) とは、センサノード (sensor node) と呼ばれる無線機能と簡易なデータ処理機能を搭載した超小型のコンピュータデバイス群によって構成される無線ネットワークシステムである (膨大な数の小型人工衛星を「群」で運用する衛星コンステレーションシステムをイメージされたい)。センサネットワークは、センサを搭載した超小型のコンピュータが相互に通信を行いながら実空間上の情報を取り込むため、単体のコンピュータと比較して圧倒的な数と種類のインプットが可能となる。多数のセンサによる膨大なデータのインプットとコンピュータが持つ蓄積・解析能力が組み合わさることで新たな価値を生み出すことができるのが当該技術の特徴である。

一般的なセンサノードは、センサ、処理部 (マイクロプロセッサ、メモリ)、電源ユニット (バッテリー)、通信部 (無線通信デバイス) から構成される (ただし電源部を持たない超小型ノードもある)。また機器を制御するアクチュエータを備えたノードも存在する。センサノードは他のセンサノードから中継ノードへデータを送るためのルーティング機能を持ち、センサノード間で通信障害が発生した場合に別の中継経路を自律的に再構築して中枢ノードへのデータ送信を確保するといった機能もある。

センサネットワークはすでに様々なところで実用化されているが、適用領域と移動範囲ごとに類型化することができる²¹¹。①狭域・固定 (住宅・店舗などの室内環境の計測やセキュリティなどに利用)、②狭域・移動量小 (ウェアラブル端末や放射線可視化システムなどに利用)、③中域・固定 (圃場や森林観測などに利用)、④中域・移動 (自律移動支援システムなどに利用)、⑤広域・固定 (気象データや交通渋滞・事故情報システムなどに利用)。

(2) 分野

半導体技術の進歩により、超小型・低消費電力の CPU モジュール、無線通信モジュール、センサモジュールが開発され、こうしたモジュールの出現によってセンサネットワークが生み出された。センサネットワークに関する研究は、センサノードを構成するデバイスに始まり、バッテリー、通信プロトコル、システム/ソフトウェア、データ処理方法/セキュアデータ、センサデータによる行動認識、物体追跡・監視など、ハードウェアからアプリケーションの研究開発まで幅広い分野にわたって研究開発されている。

(3) 注目された経緯

センサとネットワークの関係は科学技術の発展と共に変化してきた。まずは単純なセンサ単

²¹¹ 井家上哲史「センサネットワーク概観」『電学論』128 巻 10 号 (2008) 1499f.

体の研究から出発し、ネットワークに繋がったセンサネットワークシステムに進展し、センサをオープンネットワーク化するオープン型センサネットワークが実現、そしてあらゆるモノがインターネットに接続され（IoT）センサ機器が至るところに偏在するユビキタスセンサネットワークの実現に向けて、センサネットワークの技術開発は進展している。このユビキタスネットワークは 2000 年代に提唱され、IoT のトレンドと共にセンサネットワークが注目される大きなきっかけとなった。

また、半導体の MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術の発展によって、センサノードの構成要素デバイスの小型化、省電力化、低価格化が進展し、小サイズ・低価格での製造が可能となったことから、センサネットワークが実用化・普及した。すでにセンサネットワークはわれわれの実社会に溶け込んでおり、「IoT」や「ユビキタスセンサネットワーク社会の実現」という趨勢は、今後も加速していくと思われる。

(4) 研究開発状況

従来、センサネットワーク、あるいは IoT やユビキタスネットワークにおいて、センサノードは着用（ウェアラブル）・搭載可能な小型・計量のサイズ、そして長時間駆動するバッテリーの省電力性能が求められてきた。この点における研究開発は 2000 年代初頭から大幅に進展し、現在センサネットワークは広く実用化・普及するに至った。一方、バイタルセンシングや監視、モノの管理に用いられる電子タグには、第三者による悪用に対するセキュリティ対策が求められる。具体的には、①情報漏えいリスクに対するリード制限、データ暗号化・無効化、②偽造・複製の脅威に対する改ざん検出、複製防止措置、③データ改ざんに対するロック機能、④通信妨害に対する対応などが挙げられる。このあたりは情報通信分野、特にネットワークセキュリティ分野の研究開発とオーバーラップしており、同分野や隣接分野の研究開発がセンサネットワークの発展にフィードバックされる形となっている（例えば暗号化技術における秘密計算など）。

こうしたセンサネットワークのセキュリティ面の重要性は、米「連邦サイバーセキュリティ研究開発戦略計画」（2019）でも明確に述べられている。「IoT デバイスは、演算能力、データストレージ、通信、利用可能な電力などのリソースが制限されていることが多々あり（…）デスクトップやサーバー環境では有効な認証、暗号化、セキュリティポリシー適用のアプローチはリソースに制約のあるデバイスには展開できない。（…）一般消費者向けデバイスのユーザーはサイバーセキュリティの訓練を受けておらず、セキュリティとプライバシーに関して確実

に正しい判断を下すことができない可能性がある²¹²」。このような問題意識に基づき、同戦略計画は、「低コストのIoTデバイスやセンサネットワークのデバイスからサーバーコンピュータに至るまで、様々なハードウェアのコストと、脅威に比例する統合されたルートオプトラストの代替手段を開発する。ハードウェア層からアプリケーション層まで、保証された、認証済みセキュアブート、認証済みセキュアソフトウェア更新、認証済みセキュアソフトウェア実行のための技術を開発する」ことを研究開発目標に掲げ、開発を支援・推進している。

センサネットワークのこのようなセキュリティ面での課題に加えて、無論のことながら技術面でも研究開発が進んでいる。例えば、欧米では政府が科学技術政策の柱の一つとして支援・推進してきた。例えば、アメリカの科学技術推進施策である「NITRD 計画 (Networking and Information Technology Research & Development)」に基づいて、全米科学財団 (NSF) や国防総省高等研究計画局 (DARPA) などの政府機関が先端技術の開発を支援する体制を構築している。NSF はセンサネットワーク領域で「新しいセンサのコンセプトとデザイン (concepts and designs for new sensors)」、「分散環境下におけるセンサネットワーク (networked sensor systems in a distributed environment)」などに予算をつけて推進してきた。

プロジェクト名	概要
Integrated Smart-Sensor Networks for Monitoring Aqueous Environments	水中で動作するネットワーク接続されたセンサーのデザインと開発。環境モニタ、産業のプロセス制御、セキュリティ等に応用。
Architectures and Design Methodologies for Secure Low-Power Embedded Systems	センサーネットワークでのセキュリティ確保に必要な、ローパワーでセキュアな組み込み型機器の研究 (暗号アルゴリズム等含む)。
Toward a Petabyte Storage Infrastructure	センサーで収集した膨大な情報を保持するための記憶装置の開発。
Ad Hoc Wireless Networks Utilizing Multi-Rate and Power-Save Capabilities	アドホックネットワーク実現に必要なマルチレート、省電力の MAC プロトコル、各レイヤー間の相互作用と効率の関連性の研究。
MAC Protocols Specific for Sensor Networks	センサーネットワークにおける MAC 層プロトコルの研究及びユニークなアプリケーションの開発。
Technologies for Sensor-based Wireless Networks of Toys for Smart Developmental Problem-solving Environments	動的な無線ネットワークの形成、オブジェクトの自動認識と追跡、リアルタイムのセンサーデータの解釈、音声自動認識等の研究開発。
Collaborative Information Processing of Distributed Sensor Networks for Manufacturing Quality Improvement	分散型センサーネットワークによる製造業での品質管理の実現。センサーの協調動作による失敗分析、自己診断、最適配置等の研究。

²¹² “Federal Cybersecurity Research and Development Strategy Plan,” December 2019, p. 16,

<https://www.nitrd.gov/pubs/Federal-Cybersecurity-RD-Strategic-Plan-2019.pdf>.

Intelligent Sensor Motes for Vertical Seismic Arrays	3次元加速度センサー、ジャイロ스코プ、磁力センサー、気圧センサーを備えた、多くのMOTEの連携による地震波観測システムの開発。
A Simulation-Based Test Bed for Networked Sensors in Surface Transportation Systems	ITS分野に用いるセンサーネットワークを迅速に評価するテストベッド及びそれを用いたデータ処理のアーキテクチャの研究開発。
A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research	GPSを用いてリアルタイムに大気観測をするために、センサーネットワークとリアルタイムデータ配信の仕組みを活用。
Ocean Observing System Instrument Network Infrastructure	海洋観測システムにおいてセンサーネットワークからの情報を効率的に処理するための分散オブジェクト技術、XML技術、APIの開発。
Secure Data Distribution and Access in Large Sensor Networks	センサーネットに必要なセキュリティ確保、ノード間のデータアクセス時の省電力化をゲーム理論を活用して分析、フレームワーク開発。
Network Support for Distributed Sensing Applications	アプリの視点で、センサーネットから得られる情報の評価及びリクワイアメント、ネットワークの特性、センサーの処理能力等を研究。
Distributed Learning in Sensor Networks	センサーネットワークにおける無線通信や集めた情報の活用方法、情報処理をどのレベルで行うか、等の課題の解決及び適応方策の研究。
Water Security Networks: Sensors and Control	水質汚染を防ぐためのシステムとして、リスク評価、最適センサー配置、水中ネットワークの品質管理等の研究。

(図 5-12 NSF 支援のセンサネットワーク関連プロジェクト²¹³)

(5) 軍事・国防上のインプリケーション

想定・想像される用途／実用化に伴う戦術・戦略レベルの影響

センサネットワークは、すでに敵戦力の追跡や自軍兵力の保護などの軍事用途で幅広く利用されている。戦場にセンサネットワークを張り巡らせることで多くのことが実現できる。米軍の将来の戦闘システム（FCS）は、戦場で少ない装甲保護で任務を実行するために、敵ターゲットを検出、位置確認、識別するためのセンサネットワークの使用に大きく依存することになると指摘されている²¹⁴。最新の国土安全保障（HLS）・テロ対策も、重要な民間インフラに対する

²¹³ 総務省「ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて最終報告」2004年7月

(https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu_c/040730_2_s3.html)

を基に筆者作成。

²¹⁴ J. Nemeroff, L. Garcia, D. Hampel, S. DiPierro (2003), “Networked sensor communications,”

MILCOM 2002 Proceedings, Vol. 2.

テロ攻撃を検知、位置確認、特定するためにセンサネットワークに大きく依存している²¹⁵。Jain と Hussain が指摘するように、「軍事作戦において無線センサノードを使用することで、リスクを減らし、作戦効率を向上させ、何よりも死傷者数を最小にする²¹⁶」ことができる。また、それゆえに軍事作戦におけるセンサノードの使用・展開において、センサーノードのセキュリティは不可欠であり極めて重要である。なぜなら、戦場においてセンサネットワークは、リプレイ攻撃、なりすまし攻撃、前方秘匿・後方秘匿、計算・通信オーバーヘッドの削減、バッテリー消費量の削減など、様々な攻撃や課題に直面しているからである。

戦術レベルでは、こうしたセンサネットワーク活用によって新たな戦術・作戦が可能となるプラスの影響に加えて、センサネットワークへの攻撃や敵陣に悪用されることによるマイナスの影響も考えられる。

戦略レベルでは、センサネットワーク技術の進展が、戦力や装備の見直しにつながっていくと考えられる。実際にセンサネットワーク技術に関連する無人機や監視・追跡システムの発展により、戦場（特に陸）での兵力の運用と体制は大きく変わった。それにより、通常の兵器体系や部隊の編成にも影響が出ているため、センサネットワーク技術は、戦略レベルで大きな影響をもたらしていると言える。

なおセンサネットワークの軍事用途の研究開発は、例えば、無人車両ナビゲーションシステムや²¹⁷、真正性の認証、5G通信との連関²¹⁸など多岐にわたる。今後技術の発展に応じて新たな利用方法が編み出されるかもしれない。

(6) 経済産業・民生上のインプリケーション

本章第1節で述べたように、センサネットワークはすでに経済産業・民間で広く普及し、さまざまなサービスで利用されている。センサとネットワークの発達により、利用機会も拡大していき、市場規模や経済産業上の重要性も今以上に増していくものと見られる。

²¹⁵ Ibid.

²¹⁶ Usha Jain and Muzzammil Hussain, “Securing Wireless Sensors in Military Applications through Resilient Authentication Mechanism,” *Procedia Computer Science* 171 (2020): 719-728.

²¹⁷ Arun Madhu, and A. Sreekumar, “Wireless Sensor Network Security in Military Application using Unmanned Vehicle,” *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering* (August 2014): 51-58.

²¹⁸ Lt Col Anthony Tingle, “The Coming 5G Evolution in Network Centric Warfare: The Sensor Saturation Theory,” *The Mitchell Forum* No. 5 (November 2020): 1-11.

(7) 日本の文脈におけるリスク分析

リスクシナリオとしては、①研究開発面での劣位（窃取によるリスク含む）から②市場での国産センサネットワークの敗退、③海外製センサネットワークの市場寡占／独占によるリスクの顕在化、というシナリオが想定される。海外製のノードセンサによるセンサネットワークがこの点で、提言があるとすれば、上述のような状況が生じた際に、国内企業によるセンサネットワークの供給を保護する措置を講じる想定した準備をしておくべきという点であろう。

(8) 小括

以上の議論を踏まえて、本章の結論として次の4つの点について要点を整理したい。①当該技術の遍在性または遍在化する可能性、②社会的・軍事的重要性、③国内における代替手段の有無、④海外における代替手段利用の容易さ。

①当該技術の遍在性または遍在化する可能性

本章で見てきたように、センサネットワークの技術はすでに広く実用化・普及している。

②社会的・軍事的重要性

センサネットワークの社会的重要性は（すでに十分高いが）年々増しており、IoT やユビキタスネットワークとともにその流れは今後も加速していくと考えられる。またその影響は軍事的領域でも無視できるものではなく、各種センシング技術と同様に、小型センサノードを群で運用するセンサネットワークは、今後軍事領域での応用事例も増えていくと思われる。

③国内における代替手段の有無

「センサネットワーク」はネットワークシステムであり運用方法のことを指すため「代替」という設問が成り立たない。一方、センサネットワークの技術的コアであるセンサノードについては、開発している日系企業が複数社あるため、数社の代替は可能である。ただ、こうした日系企業が軒並み市場から撤退するような事態が生じた場合には大きな第4節で述べたようなリスクが表面化するため、対策が求められる。

④海外における代替手段利用の容易さ

外国企業においても開発提供している企業は数多くある。日本の友好国・同志国の企業も開発しているため、そうした国の企業から代替的に輸入して利活用することは可能である。

第6節 原子力エネルギー技術 (Nuclear Energy Technologies)

原子力エネルギーは人類が手にした最も強力なエネルギー源と言っても過言ではない。ウランという放射性物質の核分裂を利用して膨大なエネルギーを半永久的に作り出すことができるこの技術は、我々の生活や産業発展のエネルギー源として経済発展や科学技術の進歩に大きく貢献してきた。近年では原子力エネルギー技術の安全性の向上とより高度な効率化を目指し技術開発が進められているとともに、原子炉の小型化やモジュール化も積極的に研究が進められている。また、従来のウランの核分裂によるエネルギー生成とは別に水素の「核融合」を利用してエネルギー生成する新たな技術の研究も進められており、これが実現すれば人類のエネルギー供給の問題が解決されると大きな期待が寄せられている。

原子力エネルギー技術はまた、民間でのエネルギー供給の他に軍事技術とも密接に関わってきた領域である。そもそも原子力エネルギー技術と核兵器技術とは技術的な共通点も多く、それゆえに「核の平和利用」の名の下に核エネルギーを兵器ではなくて、エネルギー源に用いようという試みが20世紀後半を通じて行われてきたことは言うまでもない。しかし、近年ではエネルギー源としての原子力エネルギーを軍事領域に展開しようという動きも米国を中心に進められている。特に、小型モジュール炉の開発が進められる中で、民間の電源に依存することなく軍事オペレーションにおける安定したエネルギー共有を確立しようという動きが見られる。

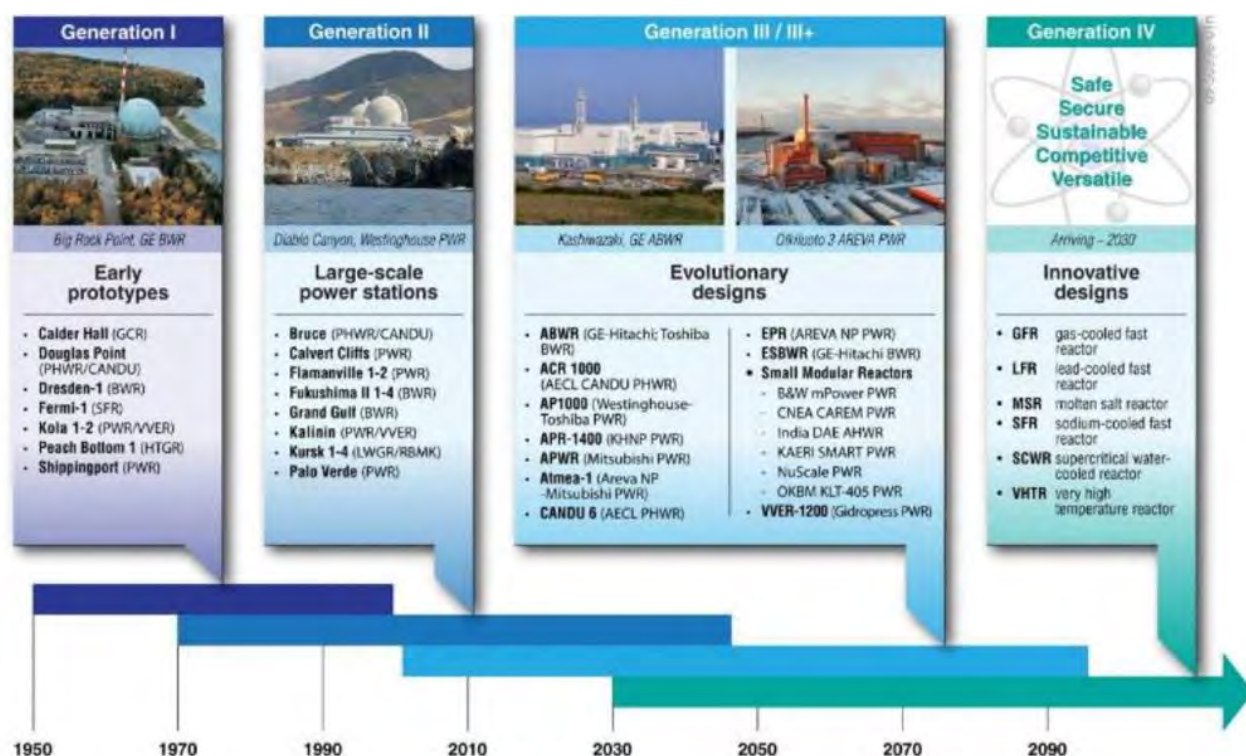
本章では、エネルギー電源技術としての原子力エネルギー技術に焦点を当てながら、民生分野と軍事分野の両方でどのような技術開発や転用がされてきたのかを概観する。特に、近年注目されている「小型モジュール炉」の開発やエネルギー技術に革命的転換をもたらすと期待されている「核融合」を中心に近年の技術動向を解説する。その上で、こうした技術開発が宇宙開発や軍事技術領域にどのように用いられようとしているのか、あるいは国防省等の安全保障アクターがどのような分野に関心を示してきたのかを明らかにする。

1. 原子力エネルギー技術のこれまで

1950年代に原子力発電所が実用化されて以来、21世紀に至るまで革新的な発展を遂げてきた。原子炉技術に関して、初代の「第1世代炉」から1970年代には「第2世代炉」にあたる現行の軽水炉が実用化された。スリーマイル島原発とチェルノブイリ原発での事故を契機に技術改良がさらに進められ、1990年代にはさらに改良が進んだ軽水炉である第3世代炉²¹⁹が台頭するよ

²¹⁹ 第3世代炉の中でもさらに改良が進み高い安全性を確保した原子炉を「第3+世代」と呼ぶこともある。

うになった²²⁰。1990年代から2000年代にかけての原発への回帰が見られたが、2011年の福島第一原発の事故の後、各国で改めて原子力発電への方針が議論された(図6-1)。こうした中でより高い燃料効率と安全性を誇る「第4世代炉」が2030年頃の実用化を目標に2001年に設立された「第4世代原子力システム国際フォーラム²²¹」(GIF: Generation IV International Forum)の枠組みの中で研究開発が進められてきた。今年にはカーボンニュートラルの実現を目標に中国が第3世代炉6基の建設を許可する等、各国でも実用化が進められようとしている²²²。



(図6-1 原子炉開発の軌跡²²³)

²²⁰ 資源エネルギー庁「世界の原子力技術の動向を追う」(2018年4月25日)

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nucl ear/nucl eartechology.html>

²²¹ GIFには米国やEU、中国、日本を含む13ヶ国と1機関で構成されている。当該枠組みの詳細は以下のHPを参照。<https://www.gen-4.org/gif/>

²²² 東洋経済「中国政府が「第3世代原子炉」6基の建設を認可」(2022年5月12日)

<https://toyokeizai.net/articles/-/585515>

²²³ 小野清「第4世代原子炉の開発目標と展望」(日本原子力研究開発機構, 平成30年3月26日)

[http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG\(1\).pdf](http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2018S-SDG(1).pdf)

2. 小型モジュール炉への期待

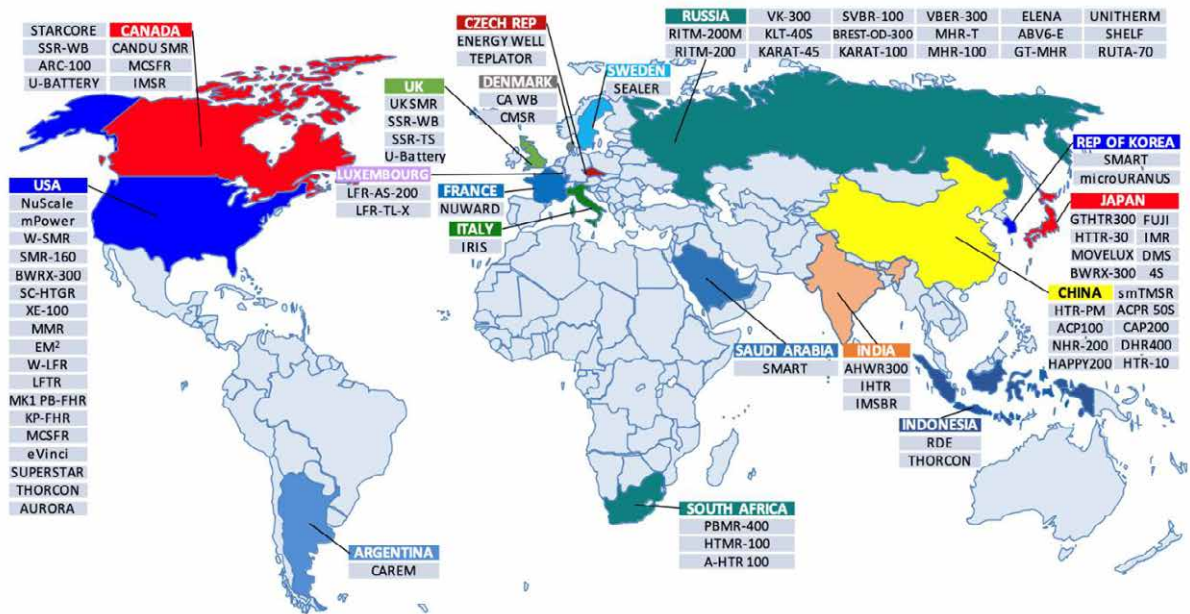
発電所規模の原子力発電技術と並行して、より小型で移動が可能な小型モジュール炉 (Small Module Reactor: SMR) も持続可能なエネルギー供給を実現する技術として注目されてきた。SMR は、従来の第2世代炉や第3世代炉の軽水炉型の原子力発電技術の派生型であるが²²⁴、従来の1,000 MWe 超を誇る発電所規模の原子力発電とは異なり、1基毎の出力を300Mwe 以下と小さくすることで、原子炉の冷却を容易にし、安全性を高めた小型原子炉である。文字通り、工場ユニット(モジュール)を製造し、現地で組み立てることができるため、通常の大規模電源では供給が難しい僻地にも十分な電力供給を行うことができる²²⁵。日本では三菱重工業や日立(米国GEとの合弁会社)といった重電メーカーが研究開発を手がけている²²⁶。世界各国でもSMRの研究は進んでおり(図6-2)、例えば、2020年5月にはロシアの国営民生用原子力発電公社ロスエネルギーアトム社が、SMRの一種である世界で唯一の海上浮揚式原子力発電所(FNPP)「アカデミック・ロモノソフ号」の営業運転を開始している²²⁷。

²²⁴ OECD, *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. (Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development, 2021)

²²⁵ 日本原子力研究開発機構「海外におけるSMRの開発・導入動向」(2021年10月14日)
<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/ordinary/2021/20211014.html>

²²⁶ 日本経済新聞「小型モジュール炉とは 次世代電源として期待」(2021年10月13日)
<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UA129210S1A011C2000000/>

²²⁷ Rosenergoatom Rosatom, *Rosatom: World's Only Floating Nuclear Power Plant Enters Full Commercial Exploitation*. (22nd May 2020) Retrieved from <https://www.rosenergoatom.ru/en/journalists/highlights/35050/>



(图 6-2 SMR 各国の開発状況(上)とステークホルダ(下)²²⁸⁾

3. 核融合技術(Nuclear Fusion technology)の展望

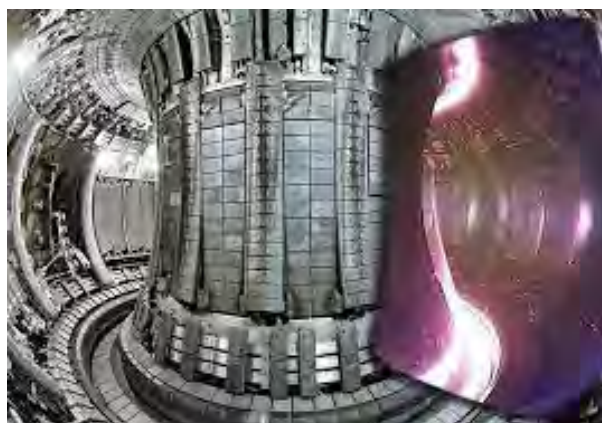
従来の「核分裂」をそのエネルギー源とする原子力発電所の設計や機能の他に、全く新しいメカニズムである「核融合」に関する研究も次世代原子力発電技術として進められてきた。核融合とは、重水素(D)と三重水素(T)とが合体することで、より軽量のヘリウムと中性子に変化することで、エネルギーを生み出すメカニズムである(図 3)。これは宇宙空間で太陽がエネルギー

²²⁸⁾ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (Austria: IAEA, 2020).

一を生み出すのと同じ仕組みであり、これによりこれまでのエネルギー技術では創り出すことができなかった非常に大きなエネルギーを創出させることができる。これは、原子炉内の温度を1.5億度(150 million °C)という超高音にまで上昇させ、物質をプラズマ化させることで、炉内にプラズマ状態を創り出し、核融合が人工的に起こさせることでエネルギーを創り出すというものである(図 6-4)²²⁹。この技術を実現させる過程で「プラズマ物理学」という新興学問が核融合研究と並行して発展し、核融合科学を超えた他分野でも革新的な知見を提供してきた。



(図 6-3 D-T 核融合反応²³⁰)



(図 6-4 原子炉内のプラズマ²³¹)

²²⁹ Fusion for Energy, Delivering Fusion Energy. Retrieved from

<https://fusionforenergy.europa.eu/what-is-fusion/>

²³⁰ 漁師科学技術研究開発機構「誰でも分かる核融合のしくみ | 核融合とは?」(2021年10月1日更新)

<https://www.qst.go.jp/site/jt60/4930.html>

²³¹ ITER, Making it Work. Retrieved from <https://www.iter.org/in/sci/makingitwork>

こうした核融合技術の国際的発展のために 1986 年にソ連を筆頭に米国、欧州連盟(EC)そして日本が参画する形で、「国際熱核融合実験炉」(ITER)の計画が始動した。これは冷戦真っ只中だった 1985 年にソ連のゴルバチョフ書記長と米国のレーガン大統領との間で「核の平和利用」のために行われた歴史的米ソ首脳会談「ジュネーヴ・サミット」(Geneva Superpower Summit)で交わされたアイデアであり、ソビエト連邦と西側諸国との対立構造を超えたこの歴史的枠組みの中で、核融合技術の国際的発展が進められることとなった²³²。しかしながら、ITER の設計計画は予想以上に年月を有することとなり、米国は徐々にこの ITER に対して消極的になってゆく。1990 年代半ばには共和党議員の大半が公共事業投資に難色を示したことから、ワシントン内部でも ITER への出資に批判的なムードが続いた²³³。結果的に米国の ITER への出資は全体の僅か 5%に留まり、他の参加国からの批判を浴びることとなる²³⁴。米国は 2001 年に ITER の最終的なデザインが参加国で合意された時点では ITER から脱退していたものの、2003 年には復帰し現在に至る。

このように、民主主義体制においては、国際的な研究開発プロジェクトの遂行において国内政治が国際的な枠組みに大きな影響を及ぼすことが多々ある。ITER のケースは原子力技術で世界をリードしてきた米国でさえもその国内政治の動向によって、国際的な技術協力へのコミットメントを弱めざるを得ないことの証左であり、トランプ政権後より一層国内政治が国際協調よりも優先される今日の米国政治を鑑みるに、21 世紀の国際技術協力においても大国の国内政治が及ぼす影響を考慮することは重要となるだろう。

4. 宇宙探索における原子力エネルギー技術の応用

原子力エネルギーは他のエネルギー技術が生み出すよりもはるかに大きなエネルギーを半永久的に作り出すことができる。こうしたことから、その技術応用は宇宙探索分野でも検討されてきた。2002 年に(NASA)が宇宙探索技術への原子力技術の応用に関する検討を開始、NASA は米国の国立研究会議(National Research Council: NRC)に 2 つの課題を与えた。一つは、宇宙探索における原子力技術の利用において優先的に重要となる宇宙科学技術の特定すること。もう一

²³² ITER, The ITER History. <https://www.iter.org/proj/ITERHistory>

²³³ Michel Claessens, *ITER: The Giant Fusion Reactor: Bringing a Sun to Earth* (Springer Nature, 2020).

²³⁴ Malcolm W. Browne, Money Shortage Jeopardizes Fusion Reactor. *The New York Times* (20th May 1997). Retrieved from <https://www.nytimes.com/1997/05/20/science/money-shortage-jeopardizes-fusion-reactor.html>

つが、将来の原子力エネルギーを用いた宇宙ミッションにおける新興科学技術に関する提案である。これを受けて、10年調査(Decadal Survey)から優先的に技術投資がされるべき新興科学技術として「ラジオアイソトープ電源 (Radioisotope Power Systems: RPS)と NEP (Nuclear-Electric Propulsion)が位置付けられた²³⁵。ブッシュ政権下の2004年にこうした新たな宇宙探索計画が「プロメテウス計画」として策定され、宇宙探索をより広範囲にかつ効率的に進めるためのエネルギー開発が本格始動した。

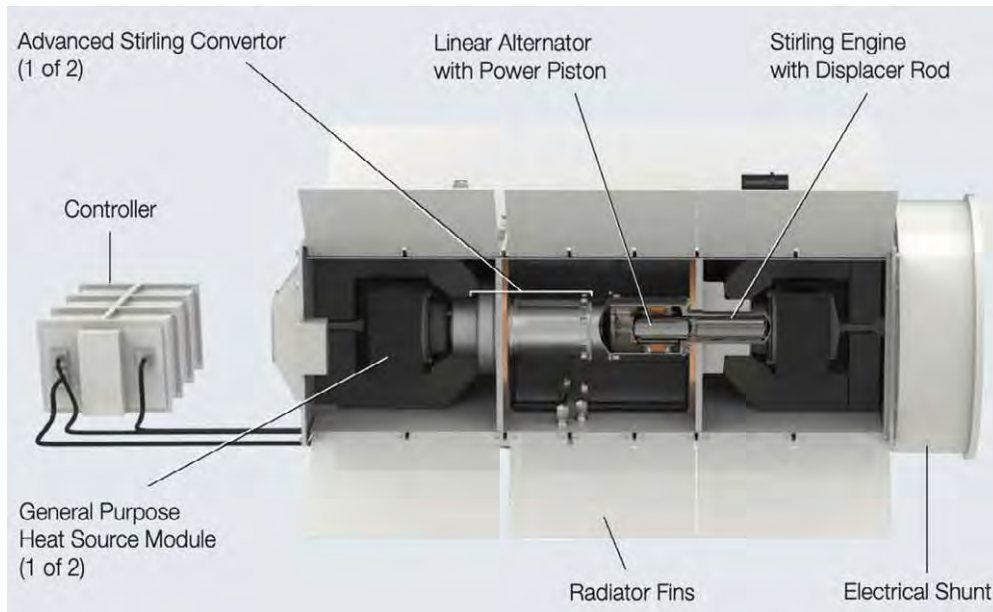
ラジオアイソトープ電源(RPS)

RPSはRTG(Radioisotope Thermoelectric Generator)の代表的電源システムであり、1961年にTransit IV-AにSNAP-3B7が初めて搭載されて打ち上げられて以来、特に米国において導入が進められてきた²³⁶。RPSは比較的低い電力や熱エネルギーを長期間にわたって生み出すのに適しており、コストが低いことでも宇宙探索に利用されてきた²³⁷。2000年以降は、NASAやエネルギー省を中心に、電池寿命等の信頼性を確保したまま、性能を向上させるとともに多様なミッションへの応用を可能にしたMM(Multi Mission)RTGやASRG(Advanced Stirling Radioisotope Generator)(図6-5)の研究開発が行われてきた。ASRGは火星のような他の惑星や真空の宇宙空間で稼働するように設計されており、今後も更なる小型化等が検討されている。

²³⁵ National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2006).

²³⁶ 星野健「宇宙探査とエネルギー 原子力エネルギー利用の歴史・現状・将来」『日本原子力学会誌』51巻3号(2009).

²³⁷ National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*.



(図 6-5 ASRG の構造²³⁸⁾)

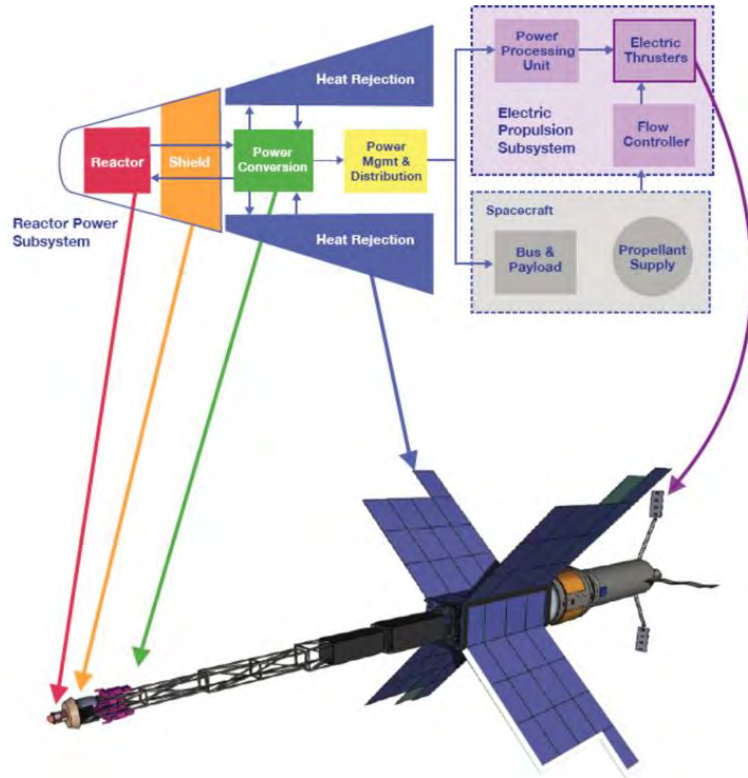
NEP

NEP 地上での原子力発電所のように炉内(Reactor)の核分裂(Fission)によって生じた熱を電力に変換する電源システムである(図 6-6)²³⁹。2004 年の「プロメテウス計画」では、太陽系の外縁部まで探索が可能となり、将来的に人類を地球以外の惑星に送り出すことを目標に、原子力を利用した推進エンジンを開発が始められた。例えば、電気出力 50-250 kWe, 比出力 25-35 kg/kWe で 10 年以上の寿命を有する NEP が木星の衛星を探索する JIMO(Jupiter Icy Moon Orbiter)計画への搭載を目指して開発される等、野心的な研究開発プロジェクトが開始した。しかし、JIMO 計画はその実現性と巨額の費用面から米国国内でも波紋を呼び、2005 年に一旦中止となり、原子力推進から月面等での原子力発電の検討に変更された²⁴⁰。NEP は RPS と比較して非常に大きなエネルギーを生み出すことができる一方で、そのコスト低減が課題とされてきた(図 7)。尚、プロメテウス計画以後の RPS 及び NEP の研究開発の展望について Appendix のフローチャートが参考になる。

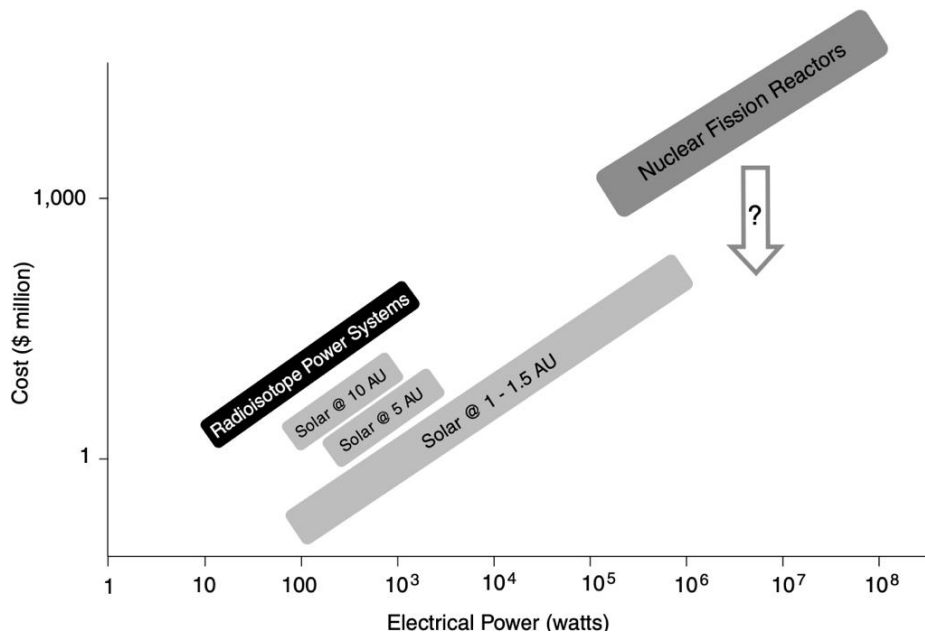
²³⁸ NASA, Advanced Stirling Radioisotope Generator (ASRG). Retrieved from <https://rps.nasa.gov/resources/65/archival-content-advanced-stirling-radioisotope-generator-asrg/>

²³⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2021).

²⁴⁰ The National Academy of Sciences, *Launching Science: Science Opportunities Provided by NASA's Constellation System*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2009).



(図 6-6 NEP システムの仕組み²⁴¹)



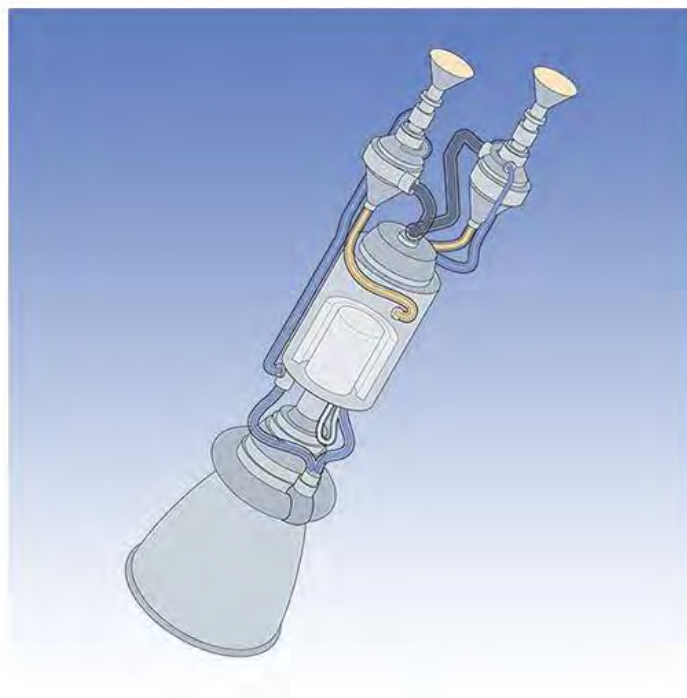
(図 6-7 RPS と NEP (Nuclear Fission Reactor) とのコスト及びエネルギーの比較²⁴²)

²⁴¹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*. p. 31

²⁴² National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*. p. 10.

近年の研究開発動向

米国プロメテウス計画がその膨大なコスト要求から頓挫したものの、原子力エネルギーが宇宙探索技術に革新的な技術をもたらすという見解は IAEA でも近年再確認されている。特に、JIMO 計画で検討された NEP に加えて、同じく核分裂によってエネルギーを生み出す Nuclear Thermal Propulsion (NTP) も新興科学技術として注目されている(図 6-8)。NEP が核分裂で生じた熱を電力に変換するのに対して、NTP は核分裂で生じた熱をそのまま熱エネルギーとして動力に利用する。NEP に比較すると生成できるエネルギー量は少ないものの、NTP は従来の化学燃料と比較しても効率性が高く例えば火星までの到達時間が従来のエンジンよりも 25%短縮されると言われている²⁴³。



(図 6-8 Nuclear Thermal Propulsion (NTP) のイメージ)

²⁴³ IAEA, Nuclear Technology Set to Propel and Power Future Space Missions, IAEA Panel Says. (22nd February 2022) Retrieved from <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-technology-set-to-propel-and-power-future-space-missions-iaea-panel-says>; Department of Energy, 6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion. (10th December 2021). Retrieved from <https://www.energy.gov/ne/articles/6-things-you-should-know-about-nuclear-thermal-propulsion>

また軍事技術領域においても、原子力エネルギーの宇宙探索への利用が盛んに議論されている。米国国防高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)は、Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO)プログラムを掲げ、地球と月を結ぶスペースクラフトの推進エンジンとして NTP の実装を進めてきた²⁴⁴。当該案件で DARPA は NTP が従来の推進エンジンが抱える推力重比率と推進燃料の効率性の問題を解決できると考えており、すでに General Atomics, Blue Origin そして Lockheed Martin の 3 社への発注を決めている²⁴⁵。2026 年度に NTP の実証を目標としており、安全保障的観点からも宇宙探索における技術開発競争が激化しつつあることがわかる²⁴⁶。

5. 中国の原子力発電技術

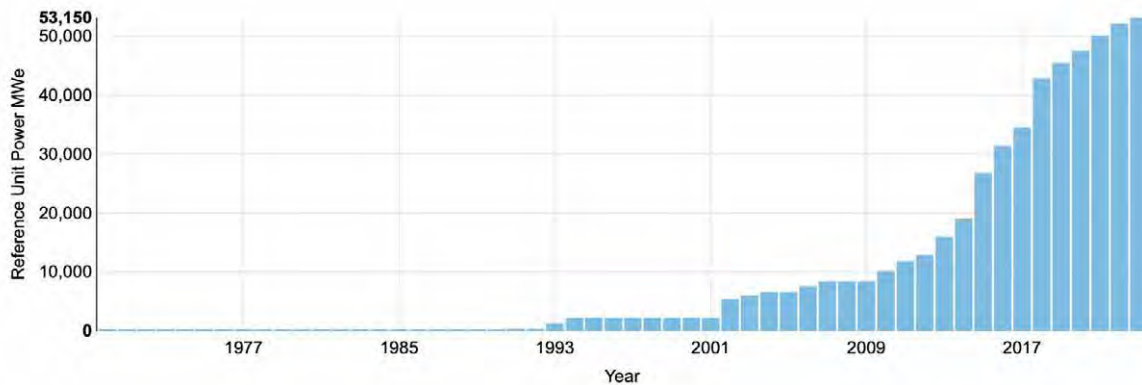
ここまで主に米国の事例を取り上げて、原子力エネルギー技術の発展について分析してきたが、中国も近年急速に原子力発電所の新設に着手しており、技術革新を進めている。こうした背景には化石燃料による大気汚染が深刻な社会問題となる中で、よりクリーンな原子力発電に舵を切ったことが背景にあるわけであるが、2000 年以降急激にその発電量を増やしていることが、図 6-9 から明らかである。また他国との比較においても 2021 年のデータでは米国に次いで世界 2 位の発電量を誇っており、欧米の先進国と比較しても膨大な電力を原子力発電で賄っていることがわかる(図 6-10)。このようにそのスケールから見ても、ここ 20 年で中国の原子力産業が急成長してきたことがわかる。研究者の在籍数を見ても中国科学院が世界一の研究者数を誇り、2 位のドイツのマックスプランク協会に大きく差をつけて 1300 人も研究者を抱えていることがわかる(図 6-11)²⁴⁷。一方で、所属機関国籍別シェアを見ると、日本、米国、中国の順に多く、日本の研究者もそれなりにプレゼンスを発揮していることがわかる。

²⁴⁴ Elizabeth Howell, US Military Wants to Demonstrate New power Systems in Space by 2027. *Space.Com* (29th May 2022). Retrieved from <https://www.space.com/nuclear-power-propulsion-space-defense-innovation-unit-contracts>

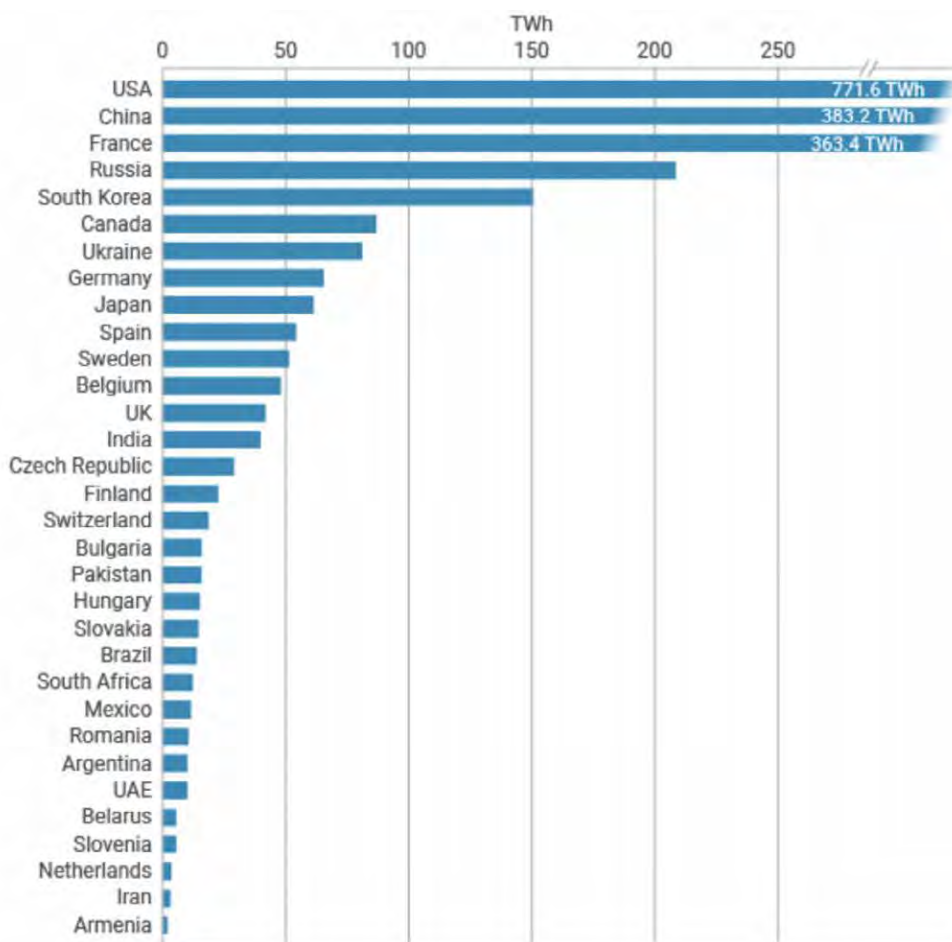
²⁴⁵ Elizabeth Howell, US Military Picks 3 Companies to Test Nuclear Propulsion in Cislunar Space *Space.Com* (21st April 2021). Retrieved from <https://www.space.com/darpa-contracts-nuclear-propulsion-cislunar-space>

²⁴⁶ Sandra Erwin, DARPA Moving Forward with Development of Nuclear Powered Spacecraft. *Space News* (4th May 2022). Retrieved from <https://spacenews.com/darpa-moving-forward-with-development-of-nuclear-powered-spacecraft/>

²⁴⁷ アスタミューゼ再委託レポート, p. 54。



(図 6-9 中国の原子力発電 発電量の推移²⁴⁸⁾)

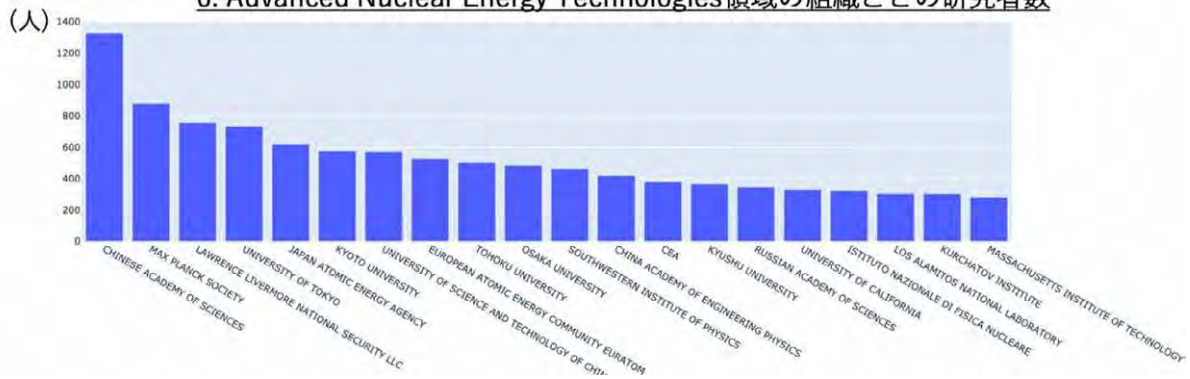


(図 6-10 原子力発電 発電量の各国比較ランキング 2021年²⁴⁹⁾)

²⁴⁸ World Nuclear Association, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>

²⁴⁹ World Nuclear Association, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>

6. Advanced Nuclear Energy Technologies領域の組織ごとの研究者数



(図 6-11 原子力エネルギー技術領域の組織ごとの研究者数²⁵⁰)

中国が拡大させているのは、原子力発電所の数だけではない。核融合技術開発においても研究を進めており、日本に先行するとの見解もある(図 6-12)。2022 年 10 月には、四川省にある核融合原子炉 HL-2M で、稼働に必要な十分なエネルギーを発電することができたとの報道がなされている²⁵¹。「実験的超伝導トカマク」(Experimental Advanced Superconducting Tokamak: EAST)は、通称「人工太陽」と呼ばれる商業の核融合炉で使用される世界初の超伝導トカマクであり、2021 年には摂氏約 7000 万度という高温のプラズマを 1056 秒間持続することに成功している²⁵²(図 6-13)。さらに、「中国の発電実証に向けた原子炉計画」(CFETR)は、2007 年に ITER への参画で得た知見をもとに実現可能な比較的大きな核融合炉を建設してきた²⁵³。これは、米英が計画している小型核融合炉に比較すると技術的にもその実現可能性が高いもので、着々に成果を出しながら技術革新を進めたいという中国の意図が窺える。CFETR は、2017 年に設計が開始されたが、これは 2025 年の設計開始を目指す日本の核融合炉 Japan-DEMO

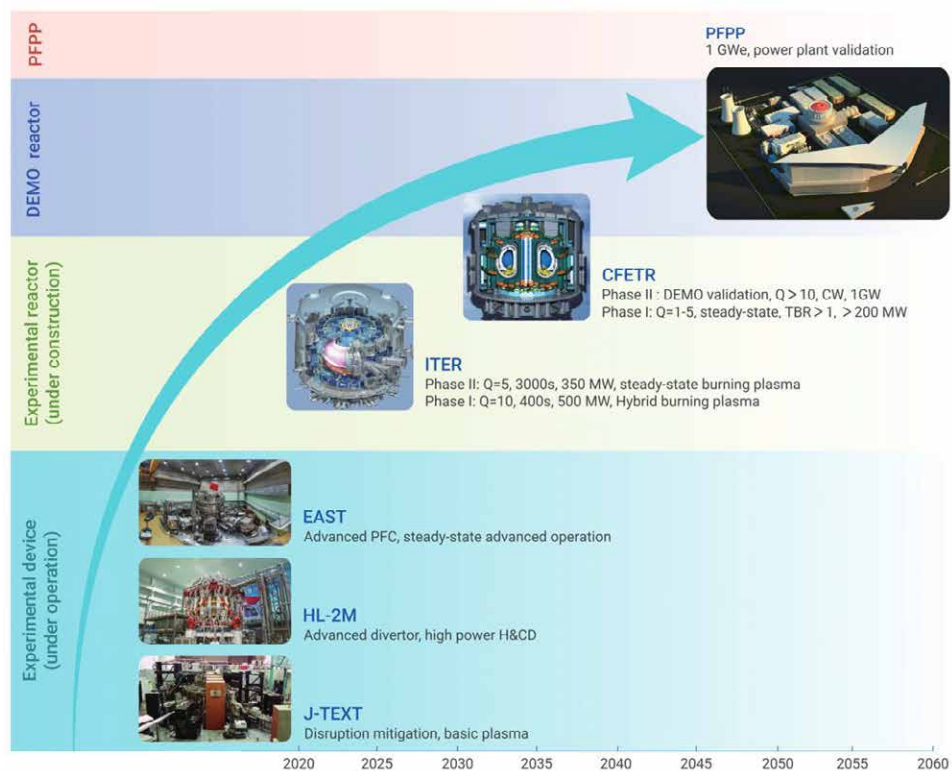
²⁵⁰ アスタミューゼ再委託レポート, 54 頁。

²⁵¹ Chik, Holly, “Chinese scientists hail ‘important step’ towards nuclear fusion from ‘artificial sun.’ ” *South China Morning Post*. (October 21st 2022)
<https://www.scmp.com/news/china/science/article/3196825/chinese-scientists-hail-important-step-towards-nuclear-fusion-artificial-sun>; また詳細な技術情報については以下を参照。Zhuang, Ge, et al. “Progress of the CFETR design.” *Nuclear Fusion* 59.11 (2019): 112010.

²⁵² Institute Of Plasma Physics Chinese Academy Of Sciences, “1,056 Seconds, another world record for EAST.” December 31, 2021. http://english.ipp.cas.cn/sywx/202112/t20211231_295485.html

²⁵³ 岡野邦彦「中国が核融合炉開発で先行する—日本が勝つために必要なことは」(国際環境経済研究所, 2022 年 10 月 11 日) <https://ieei.or.jp/2022/10/expl221011/>

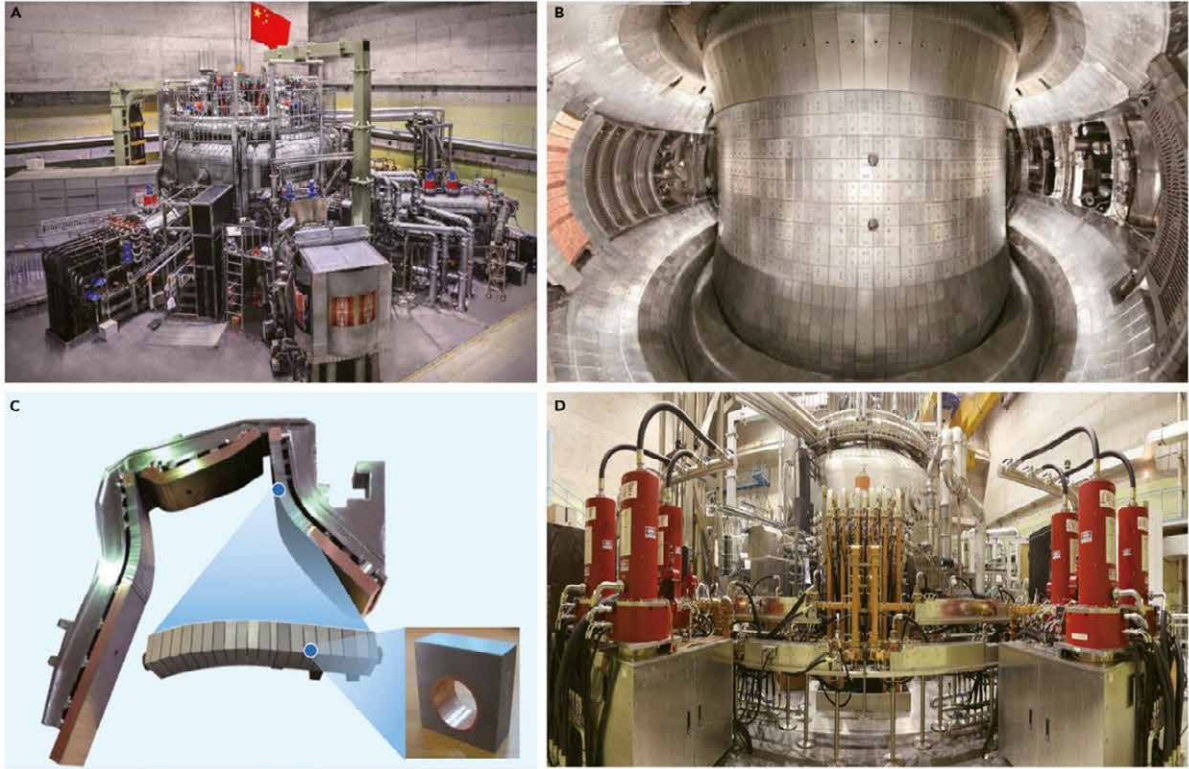
よりも実に 8 年先行するスケジュールである²⁵⁴。2030 年の稼働を目指し現在も研究開発が進められている。



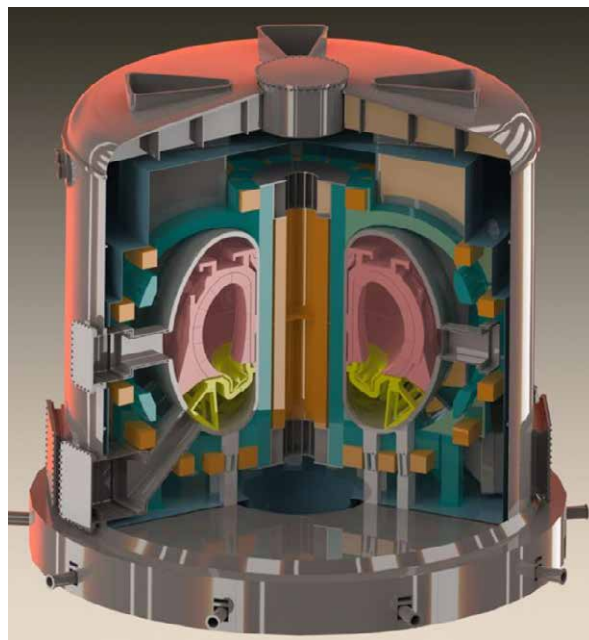
(図 6-12 中国の核融合開発のロードマップ²⁵⁵)

²⁵⁴ Zheng, Jinxing, et al. "Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration." *The Innovation* (2022): 100269.

²⁵⁵ Wan, Yuanxi, et al. "Overview of the present progress and activities on the CFETR." *Nuclear Fusion* 57(10)(2017): 102009.



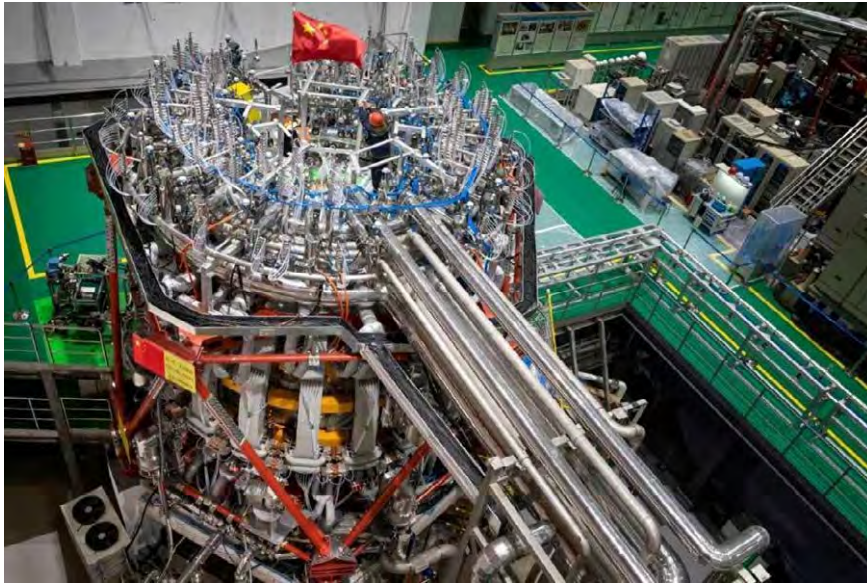
(図 6-13 EAST トカマク²⁵⁶)



(図 6-14 CFETR の構造イメージ²⁵⁷)

²⁵⁶ Zheng, Jinxing, et al. "Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration."

²⁵⁷ Wan, Yuanxi, et al. "Overview of the present progress and activities on the CFETR." *Nuclear Fusion* 57(10)(2017): 102009.



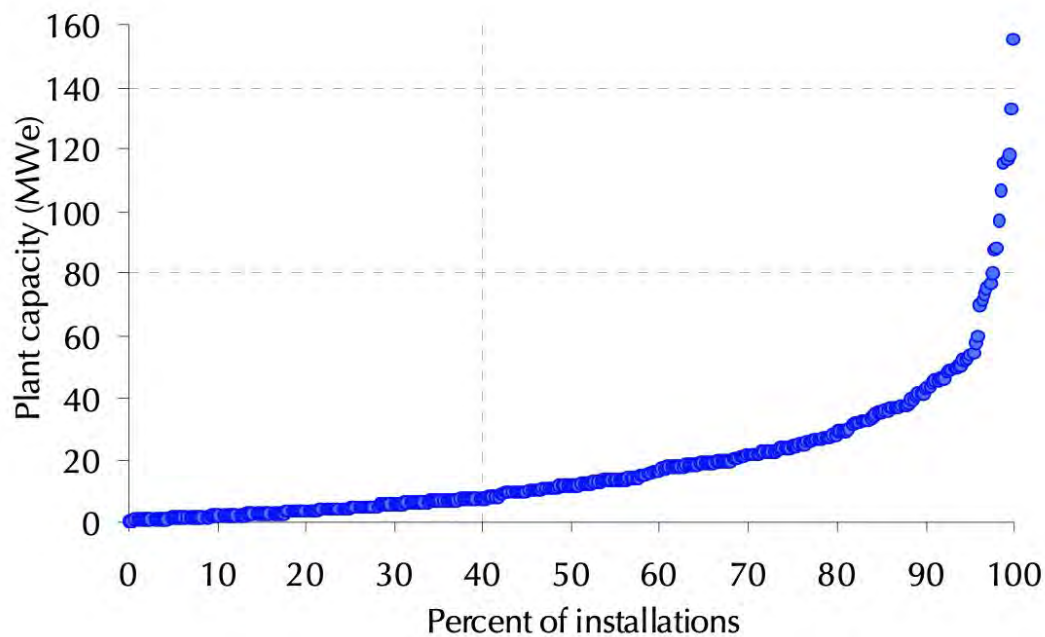
(図 6-15 四川省にある核融合原子炉 HL-2M²⁵⁸)

このように、中国では 2000 年以降極めて早いスケジュールで原子力発電所の増設と核融合炉の設計・建設が進められてきた。2007 年に初めて中国が ITER に参画したことを考えるとこの 10 年間の技術革新のスピードは驚くべきものである。日本はそのほかの民主主義国と国際協調を進めながら、引き続き核融合開発を進める一方で、中国の研究動向を一つのベンチマークとして注視しておく必要があるだろう。日本からの人材流出の懸念もある。具体的な研究テーマや役割等は定かではないが、日本から中国の研究機関に人材が流出している可能性もあり、今後こうした懸念国への研究者の移動にも引き続き、注意が必要となるだろう。

6. 公的利用・安全保障における利用

基地の稼働や軍事オペレーションにおけるエネルギー供給は、米国を中心に国防省や軍の中で大きな検討事項として認識されてきた。軍事技術の発展とオペレーションの複雑化に伴い必要となるエネルギーも増大していることは国防省や軍関係者にとっても大きな懸案事項となってきた。図 9 は 2008-2009 年における米軍の基地のオペレーションとそれに伴って必要になるエネルギーを示している(図 6-16)。これを見ると基地をフル稼働させるために必要なエネルギーは 90-100%の段階に至ると指数関数的増加することがわかる。

²⁵⁸ Ibid.



(図 6-16 基地の稼働とエネルギー需要 FY2008-2009²⁶⁰)

こうした膨大なエネルギー需要を満たすために、民間の電源だけに依存してしまうのは、有事の対応が求められる軍にとって大きなリスクとなる。それゆえに、米国は国防省を中心に独自で電源を確保するための技術革新を模索してきた。特に国防省は、小型モジュール炉 (Small Module Reactor: SMR) やマイクロモジュール炉 (Micro Module Reactor: SMR) の調達を積極的に進めてきた。特に発電向けのマイクロモジュール炉は長期的には米国海軍の基地のエネルギー供給を安定化させることが期待されている²⁶¹。最近では、米国国防省が小型で移動が可能な原子炉の設計と開発を目指す 'Project Pele' を進めており、2022年3月にはアイダホ国立研究所 (Idaho National Laboratory) で Mobile Microreactor の実証実験を行うことを発表した²⁶²。

²⁶⁰ Marcus King, LaVar Huntzinger & Thoi Nguyen, *Feasibility of Nuclear Power on U.S. Military Installations*. (CAN, 2011): 23.

²⁶¹ Robert F. Ichord, Jr. and Jennifer T. Gordon, *Innovation in Nuclear Energy Technologies: Implications for US National Defense*. (Washington, DC: Atlantic Council, 2020).

²⁶² The U.S. Department of Defense, DoD to Build Project Pele Mobile Microreactor and Perform Demonstration at Idaho National Laboratory. Immediate Release on April 13, 2022. Retrieved from <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2998460/dod-to-build-project-pele-mobile-microreactor-and-perform-demonstration-at-idaho/>

そもそも原子力エネルギー技術の開発というのは、その黎明期においては民間企業が背負うには高すぎるコストから国防省を中心に国がその技術開発をリードしてきたという背景がある。しかし、こうした技術開発は一旦民間の市場ベースに乗ってしまうと商業目的に展開されることがほとんどで、軍事技術の発展に対しては必ずしも有益なフィードバックを与えてはこなかった²⁶³。こうした歴史的背景もあり、近年では国防省や軍が原子力エネルギーの技術を軍事のオペレーションに積極的に展開していこうという動きがかなり顕在化してみられる。例えば、国防省は2018年度予算に34億ドルもの予算を機材システムや車両等のエネルギーに費やして、エネルギーの確保のプライオリティが軍部においても増加していることがわかる²⁶⁴。また研究開発であれば、国防省は、2018年度に16億ドルもの予算をエネルギー関連の研究開発や試験、評価に費やしたことが報告されており、エネルギー省と並んで、国防省もこうしたエネルギー分野の技術開発でイニシアティブを発揮していることが明確であろう²⁶⁵。

また兵器開発においても原子力エネルギーは新たな技術開発の可能性を後押ししてきた。特に弾道ミサイルや巡航ミサイルの迎撃を目的に用いられる指向性エネルギー兵器開発において、膨大なエネルギーを創出できる核エネルギーの利用が積極的に検討されてきた時期もあった²⁶⁶。レーザーを放射して対象物を破壊ないし無力化させる指向性エネルギー兵器には、これまでの兵器以上の膨大なエネルギーが必要となるため、原子力エネルギーによるレーザーの創出が検討されてきたわけである。しかしながら近年では、原子力エネルギーによるレーザーではなく、個体電子によるエネルギー兵器の開発にシフトしつつある傾向がある²⁶⁷。

7. まとめ

原子力エネルギー技術開発は、従来の電源技術としての発展過程とその他の先端科学技術分野への応用研究が同時並行的に進められてきた。電源技術としての原子力エネルギー技術は、「第

²⁶³ Ichord et al., *Innovation in Nuclear Energy Technologies*.

²⁶⁴ The Department of Defence, Energy Action Month Puts Spotlight on DOD Efforts. (October 1, 2019). Retrieved from <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/1972916/energy-action-month-puts-spotlight-on-dod-efforts/>

²⁶⁵ Dorothy Robyn and Jeffrey Marqusee, *The Clean Energy Dividend: Military Investment in Energy Technology and What It Means for Civilian Energy Innovation* (Information Technology and Innovation Foundation, 2019).

²⁶⁶ Mark Prelas, *Nuclear-Pumped Lasers*. (Springer, 2016).

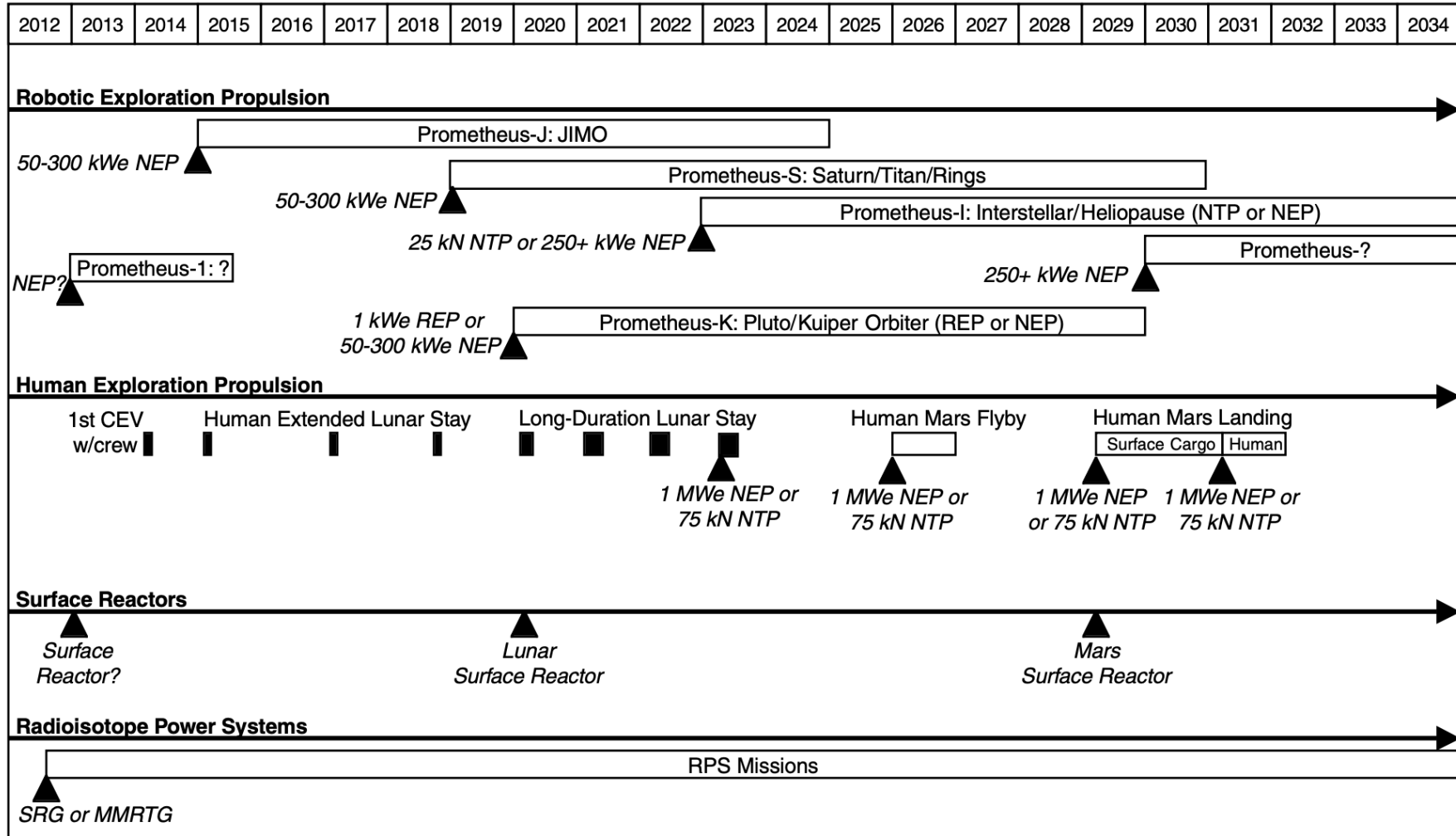
²⁶⁷ Ichord et al., *Innovation in Nuclear Energy Technologies*.

4世代」原子炉のより効率的で安全な原子炉の開発が進められると同時に、より柔軟にエネルギー需要に対応できる小型モジュール炉の開発が進められてきた。その一方では、宇宙探索分野で半永久的にエネルギーを生み出す仕組みとして原子力発電の応用が期待されてきた。米国のプロメテウス計画に代表されるように、多額の資金が投じられる宇宙探索プロジェクトにおいて、原子力エネルギー技術が果たす役割は極めて重要であり、今後も原子力エネルギー分野と宇宙科学との相関性には注目すべきであろう。また、核融合技術のような原子力エネルギー発電技術そのものを革新させる技術開発が進められようとしていることは、従来の原子力エネルギー技術と宇宙探索のようなその応用分野の両方で大きな期待をもたらすものである。特に、核融合技術開発から宇宙科学でも応用可能なプラズマ物理学のような学際的研究領域が生み出されたことを考えれば、今後原子力技術と宇宙科学とのより強固なシナジーが期待されるだろう。

こうした民生分野での技術革新と並行して、国防省や軍も電源技術としての原子力エネルギーに強い関心を寄せてきた。民間のエネルギー電源に頼ることは有事対応を含めた軍の安全保障上の役割を考えると好ましくないこともあり、軍は独自でエネルギーを調達できる技術として小型モジュール炉やマイクロ・モジュール炉といった技術の開発を進めてきた。エネルギーの安定供給は民生分野のみならず、軍事技術分野においても重要な問題であり、米国を中心に原子力電源技術開発に国防省や軍部が積極的に関与しているケースが見受けられる。

日本は今後米英仏といった同じく民主主義の理念を共有する国々との更なる技術協力を促進する一方で、中国の技術動向にも引き続き特に留意をしてゆく必要がある。特に2007年から中国がイーターに参画したことを考えると、同じくアジアの国として原子力技術分野における技術交流を可能な範囲で維持しておくことが我が国そして他国にとっても重要となるかもしれない。

Appendix x: 宇宙探索における推進エンジンの開発展望(2012~2034年)



第7節 AI 技術 (Artificial Intelligence)

AI (人工知能) という言葉は、1956 年にダートマス大学の教授であったジョン・マッカーシーが「人間のように考える機械」を「Artificial Intelligence」と名付けたのが始まりだとされる。以来、AI は 1950 年代後半～1960 年代の第一次ブーム (パズルや簡単なゲームを解く能力)、1980 年代の第二次ブーム (知識をインプットすることで問題解決を図る能力: エキスパートシステム)、そして 2010 年代以降の第三次ブーム (機械学習をする能力: ディープ・ラーニング) と進化を遂げてきた。特に近年のディープ・ラーニングは、コンピューターの性能向上とビッグデータ利用によって、様々なサービス・技術への応用が期待され、実用化を大きく促進させている。

AI 技術はただ高性能な知能を開発するだけでなく、衛星センシングの画像処理やハザードマップに利用される災害予想、医療や介護、あるいは金融など、多方面への応用が可能な技術でもある。そういう意味では軍事だけでなく民生においても活用が期待される分野である。本節では、AI の基本技術に重きを置きつつ、そのような応用技術も念頭に入れてインプリケーションを示したい。

1. Machine Learning

(1) 技術の概要 (分野、注目された経緯、研究開発状況等)

人工知能の歴史は古く、1950 年代には機械を一定の計算式に従って動かす方式が想定されている。計算式はアルゴリズムと呼ばれ、機械を法則性に従って自律的に動かすことを可能にした。機械学習 (machine learning) は 1980 年代に登場した人工知能の一部であり、データの供給を受けて機械自体が学習しながら、事前にプログラムされた作動内容以上の機能を発揮するものをいう。アルゴリズムと統計モデルを活用し、データのパターンを分析し、未確認のデータパターンを予想する機能となる。

機械学習には、管理学習、非管理学習、強化学習の三種類があり。その活用範囲は、将来予測を活用する分野全てに及び、特に健康や医療分野における疾病予想、金融取引における顧客の行動予想など幅広い。今日では IBM のワトソンや OpenAI の ChatGPT などのように、既に一般的に利用されるようになったものも存在する。

(2) 公的・安全保障における利用

機械学習の活用分野として、公共政策分野が知られる。機械学習の特徴として、供給されるデータの量が多ければそれだけ予測能力が上昇するため、Big Data を提供することが可能な政府機関などが機械学習の機能を向上させることが可能になる。機械学習の活用分野は、複雑な相互関係のデザインや、将来予測に基づく政策形成など、広範に及ぶことが知られ、難民予測、災害予測と対応、再犯リスク

予測（仮釈放の決定に影響）などが活用分野として知られるが、将来予測が必要な政策分野において活用が展望される。

機械学習の軍事や国防上の活用可能領域は広い。「戦場の霧」と呼ばれる不確定要素は多いが、敵対勢力の行動予測において機械学習の効用は高い。防衛分野では、兵器システムやサイバーセキュリティなど、将来の活用可能性が指摘されている領域があるが、既の実現しているのは、米陸軍がIBMのワトソンを利用して、ストライカー旅団の兵站の事前予測と集積に利用しているものが知られる。それ以外にも、標的認識（選別）と追跡、あるいは戦場医療など、軍の作戦の多くの分野での活用が想定される。

(3) 民生利用

機械学習の民生上の活用領域は大きい。民生分野で活用が進む領域で代表的なものは、自然言語認識と処理、そして自動運転分野での機械学習の利用である。OpenAI の ChatGPT や Google の Bard などは、会話型 AI として利用機会を拡大してデータを収集している段階であり、欧米では爆発的に利用者の拡大が知られる（日本でも ChatGPT は無料使用期間が設けられた）。このように知られる機械学習の利用に加え、テキスト認識、画像認識、ロボティクスと自律化、交通予測、提案型広告など、日常生活のさまざまな局面で利用が拡大している。

機械学習の実用化は、社会を大きく変革する。ChatGPT の導入にしても、「インターネットに続く」と評されるように、社会に大きな影響を与えている。OSINT（公開情報によるインテリジェンス）は軍事面で使用される用語ではあるが、公開情報の検索については、画像や IP アドレスの検索なども含めたサービスが提供されており、Maltego など複数のプラットフォームが存在する。

(4) 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ

機械学習の発展では、アルゴリズムと共に、Big Data の利用が密接に連動する。アルゴリズムや統計モデルについて、国内で開発者を育成することは可能であると予想されるが、そのような STEMA 人材の発掘と確保は長期的な取り組みを必要とする。ただし、機械学習のプログラムを組む人材が国内で不足する場合は、海外に依存する必要があるが、機械学習の普及に伴う世界的な人材獲得競争の中では、日本の所得水準で確保しうる人材は限定的なる。さらに、確保した人材の安全保障上のリスク管理の問題は深刻である。

民生分野を中心として、機械学習に関する日本の技術水準は低くないと評される。しかし、その軍事適用においては、防衛省自衛隊が独自に機械学習を活用したプログラムを採用しているとの情報はなく、実際に防衛装備庁を含めたアルゴリズムや統計モデルを組むスキルがある内部人材の数は少ない

と推察される。そのような状況で、国際社会で機械学習の活用が進む場合、国外よりプログラムを導入することを余儀なくされることになる。

(5) 日本の文脈におけるリスク分析

機械学習では、隠された因果関係を予想して結論を出すという特性から、予想外の損失を出す可能性がある。また、過去のデータの学習から、人種や民族などに関する、データやアルゴリズム内に潜むバイアスを永続化する可能性が指摘されると共に、過去の行動パターンの延長上に将来を予想するため、新たな現実や変化のプログラムへの反映が遅れるという点も指摘される。もし反映が遅れた場合、間違った判断が固定化されるリスクがある。

COVID-19 の際にも見られたように、日本社会では一種の「科学的」なものに対する信仰があり、データ科学においても、さまざまな要素の変動可能性を社会的に受容することが困難である。そのような社会において、機械学習に対する過剰な信頼が、問題を引き起こすことが予想されている。

2. Deep Learning

(1) 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

深層学習は 2010 年代より開発が進んだ、人間の神経系を模した多層（狭義には 4 層以上）の人工ニューラルネットワークによる機械学習手法である。深層学習は機械学習の「サブフィールド」と表記されるが、一つの階層での判断を次の階層での処理に進めるなど、より人間の思考や認識に近い状態での判断を可能にしようとするものである。米国やロシアはその軍事適用の可能性に注目し、米国は 2018 年に統合人工知能センター（JAIC）を設立し、研究を進めている。ただし、深層学習の研究開発は民間企業を中心に進んでいる。

深層学習による情報の処理では、画像認識、顔認証、不正検知、自然言語処理などで人間を上回る結果を出しているとされる。深層学習では、オートエンコーダーなどの研究開発、計算機能力、学習データなどの活用により学習が可能になったものとされる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

深層学習の軍事面への適用は、合成開口レーダーによる二次元もしくは三次元のイメージ形成や軍事通信インテリジェンス（SIGINT）などが想定され、それら機器等への高性能計算機との接合により、大量のデータを利用しながら、より正確な分析結果が得られると考えられている。

深層学習のもう一つの適用分野は、意思決定システムの適用とされる。既存の情報収集手段によるデータを、サイバー空間で交信される SNS などに含まれるデータと組み合わせ、テロリストや敵対勢力

の行動予測をより正確にし、意思決定の迅速化が図れるとされる。これは、領域横断作戦を円滑に実施するために必要な技術と考えられている。意思決定の迅速化と情報収集の多元化、さらには相手の行動予測の高速化により、自律兵器がより人道的な決定を下せるものになると考えられており、この兵器の開発にとっては必要不可欠な技術と考えられている。

深層学習の軍事適用では、戦闘管制システムに加え、戦闘シミュレーション、訓練など、戦場の複雑な環境での意思決定に最適な機能を発揮するとされている。しかし、深層学習自体には、人工知能が特定の判断を行った理由の解析が困難であるとの指摘もあり、それが「説明可能な AI」研究が進む契機となった。

(3) 民生利用

深層学習を利用し、分類（管理された学習による、ラベル化されたデータとの近似性の解析）と情報のクラスター化（管理されていない学習による、一致、不一致の判断）などを行い、顧客の関心に焦点を当てた広告や商品提示が可能になる。2010年代の中盤には、バーバリ社が深層学習を利用した販売を行い、売上が50%上昇したことが知られる。また、ディズニー社が、Magi cbandにより顧客の動向を把握し、園内のスタッフの配置などのサービス向上に繋げたことも有名な活用例である。

深層学習に提供するデータの特徴により、民生上はさまざまな可能性が指摘されている。そこには、工場の操業管理（ラインロボットと人間の共同作業の最適化）、品質管理、予防的メンテナンス（部品等の消耗状況の把握と整備時期の判断）など、既に実用化が進んでいるものも多い。今後発展が見込まれる領域として、バーチャル・アシスタント（Amazon Alexa, Siri, Google Assistant など）の能力向上、チャットボット、健康分野、画像の色彩化、イメージ・キャプションなどが指摘されることが多い。

(4) 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ

深層学習の軍事適用は、その初期段階にあるため、将来的には民生分野で発展した商品が軍事分野へと活用される可能性が高い。したがって、民間分野での技術開発の遅れと、その適用の遅れは、軍事面での劣位につながることは間違いない。

深層学習は機械学習と同様に、アルゴリズムと高性能計算機、そしてデータの存在が重要になる。その際、高性能計算機の開発とポータビリティ、その電源の確実性など、ハードウェアの重要性には留意すべきである。それに加え、データの分析による学習能力の向上が重要な意味を持つため、データへのアクセスとその利用の幅を拡大する必要がある。

ただし、各国ごとに利用可能なデータの質と量には大きな差が存在する。このため、深層学習の発展と共に、データガバナンスが重要になると共に、自国が管理する以外のデータ（第三国データと言われる）へのアクセス問題が発生するだろう。

(5) 日本の文脈におけるリスク分析

日本にとって、データガバナンス問題は最重要な課題として取り組む必要がある。日本社会は DX 化が遅れていると指摘されるように、企業や政府が効率的に使用できるデータが少ない。Yahoo や Rakuten など、データ収集を進める企業は多いが、GAFA 等と匹敵するデータ企業は少ない。同時に、日本では政府がマイナンバーの普及に苦勞しているように、国内でデータ化に対する抵抗感が強い。この抵抗感を払拭することが、優先度が高い取り組みになるだろう。

3. Reinforcement Learning

(1) 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

強化学習は機械学習の種類の一つで、環境とエージェントの関係において、エージェントが特定の環境（マルコフ決定過程）のもとで行動を取り、それによって得られる報酬を最大化する方策を学習してゆくものである。強化学習は、管理された学習と、管理されていない学習と共に機械学習の一つの形になるが、アルゴリズムとしては Q 学習、Sarsa、モンテカルロ法などを用いる。

強化学習と深層学習は、学習対象のデータのインプットの方法に差がある。近年では、両者を組み合わせた深層強化学習も導入されている。さらに、強化学習においてはマルチエージェントシステムの開発が進んでいる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

強化学習は軍事的シミュレーションや、それに関連する兵器選択の分野での活用が検討されていた。そこでは、意思決定者のもとに集まる多数の情報を、どのように処理し、最適な結果に繋げるかが重要なテーマであった。

マルチエージェントな強化学習の必要性は、スウォーム兵器の開発や、ロボットと人間の協働作業において特に認識されている。DEVCOM のシャーマ氏によると、マルチエージェントシステムにおける集中学習においては、情報共有方式が中核的な役割を果たすと主張している。ただし、現状ではマルチエージェントが集中学習の過程で、どのように報酬に関わる情報交換を行い、最適化された方策を選択するのかに関するメカニズムは解明されていない。DEVCOM の論文では、どのように情報交換を行うのかではなく、どのような情報交換を行うかに注目することにより、強化学習のメカニズムの解明に至るのではないかとするものである。

(3) 民生利用

強化学習は、試行錯誤 (Try and Error) の繰り返しで最適解を発見する学習方法なので、民生分野への適用事例は多い。もっとも典型的とされるのが、自律走行の自動車の実験では、強化学習が使用されている例である。それ以外でも、産業用途として、データセンターの冷却 (Google のデータセンターの冷却事例が知られる) によるエネルギー利用の抑制、在庫管理 (最適化された貨物の収納)、自動診療 (患者個人に最適化された薬物選択と投薬方法の解析)、信号管理などがあげられる。

- ① 当該技術の喪失・窃取・劣位が発生することで生じる問題／リスクシナリオ
- ② 日本の文脈におけるリスク分析
- ③ その他 (上記のフォーマットにのらないが特筆すべき点など)

4. Sensory Perception and Recognition

(1) 技術の概要 (分野、注目された経緯、研究開発状況等)

人工知能の応用として、感覚増強装置 (Sensory Augmentation Devices) の開発が注目されている。この装置は機器 (レーザー感覚杖、光学インプラント、磁気ベルト等) を利用して、人間の視覚や感覚では感知・理解し得ない状況を「画像化」するものである。増強装置自体は、単体の機能の向上に使用されている。それらは、嗅覚解析装置、暗視装置、音波画像変換装置などが知られる。

これら単体の感覚増強は、人間の感覚の補強と位置付けられる。たとえば、身体障害者などが喪失した身体機能を、神経信号を利用して感覚補強 (Sensory Substitution Device: SSD) する装置などは、保険医療分野でも活用されている。これら装置は入力認識とそれに合わせた出力を基本とするもので、複数の感覚信号の入力に対する出力には、十分に対応できていない。

当該技術の可能性は、複数の感覚信号の順序に関する定義と、その分析過程における取捨選択のあり方が、重要な意味を持つ。これはインテリジェント感覚増強 (Intelligent Sensory Augmentation: ISA) と呼ばれる。伝統的な感覚増強が、目的を明確にすることでこれらプロセスが機能するのに対し、ISA では音声を含めた感覚信号 (画像や遺伝情報等の相互作用も含む) が入力され結果が出る前に予想し、その機能向上を図るものとされる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

インテリジェントな SSD は、非線形な関係の分析も可能なため、軍事的には敵対勢力の軍事行動開始前に、相手側の行動を把握することが可能になる。これは市街地作戦などで、周辺の状況把握や、暴動鎮圧作戦などにおいて効果を持つ。これまでの陸軍の個人装備にも単独の感覚補強や向上した情報

通信装置などは備え付けられてきたが、インテリジェントな SSD では複数の感覚信号の総合的な分析が可能になる。従来の特に情報のオーバーロードと分析機器の活用方法には課題があったが、インテリジェントな SSD ではその課題を克服することが可能になる。

この人工知能の活用により、兵士の訓練期間の大幅な短縮が可能になる。兵士の訓練では、特定の環境における条件（物価的行動など）や、そこで果たすべき作戦活動の特徴などを、事前に教育教育し、動きや判断などを訓練することで、実際の作戦活動において問題が生じないようにしていた。しかし、インテリジェントな SSD では、兵士個人の資質や訓練状況に依存しない要員配置が可能になる。

(3) 民生利用

単体の感覚増強装置は、スマートウォッチを含め、すでに実用化されているものが多い。複数の感覚信号を人工知能で処理することで、身体障害者の社会参加に大きな可能性が出てくるであろう。さらに、コンピューターが人間の感覚や感情を再現することが可能になれば、事前にセットされた目標を忠実に実行するという人工知能の欠点と指摘される部分が補正され、人工知能の民生利用にも大きな利益が生まれる。

5. Next-generation AI

(1) 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

次世代の人工知能は、その定義者によって内容が異なる。AI 自体が発展過程にあるため、それぞれの発展の先に次世代の AI が展望される。しかし、2022 年には深層学習のような認識系／識別系 AI に代わり、生成系（Generative）AI が一つの可能性として注目されている。生成系 AI は、GAN、VAE、GPT-3などが知られ、ここれらを利用したシステムとして、画像生成の Stable Diffusion や Midjourney、テキスト生成の ChatGPT などが知られる。これら AI 技術は 2020 年頃には技術的可能性が指摘されていた。これは 2018 年に DARPA が「AI Next」で指摘したように、ルールに基づく統計モデルから派生コンテキストの説明モデルへの転換の方向性が、次世代の AI の開発のトレンドになっていることを意味する。

次世代の AI への転換を可能にするものとして、計算の高速化の必要性が指摘される。その際、想定されうる計算方法として、クラウド、フォグ、エッジ、サーバーレス、量子などが紹介される。同時に、ルールや統計などを集中的に計算する方式ではなく、データは分散化したシステムのもとで解釈されるため、コミュニケーションの方式が重要な意味を持つようになる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

DARPA は 2018 年 9 月に複数年プロジェクトで約 20 億ドルに及ぶ「AI Next」を開始している。これは約 50 のプロジェクトの総称であり、セキュリティ・クリアランスのベッティングなどの自動化、説明可能な AI の構築（アルゴリズムとアプリケーション）、AI をめぐる効率化などが含まれる。この AI Next は、機械学習や深層学習の欠点を補完することを目的としている。深層学習は理解性（interpretability）に欠け、その判断の基準が不明である。医療などでも同じ課題を抱えるが、軍事において判断の根拠が不明な決定は、大きな国際法上の問題を引き起こす可能性がある。このため、深層学習を用いた軍事作戦には、法的な安定性が欠ける面がある。

DARPA が説明可能な AI の開発を進める政策的な背景として、米国の国防総省指令 3000.09 が存在する。この指令はオバマ政権期に発表されたが、トランプ政権とバイデン政権も引き継いでいる。この指令は、信頼性に欠ける自動兵器システムの採用を禁じており、米国としては国際社会で進む AI の軍事適用のトレンドにおいて優越性を維持するためには、既存の AI ではなく、次世代の AI への投資を進める必要があった。

今後 AI Next の研究成果が軍事適用されることは予想できるが、現時点では、不正検知や敵対的 AI の開発によるシステムの強靱性の向上などに使用されることが予想される。

(3) 民生利用

生成系 AI は、既に商業化されている。前述したシステムに加え、姿勢推定を 3D で行う VisionPose など知られる。これらに共通するのは、言語認識やコンピュータビジョンに加え、音楽や絵画など、創造的な分野での活用が図られていることである。さらに、単純に繰り返されるタスクや、効率性や生産性の向上など、問題解決に使用される例が知られる。

このため、次世代の AI の中でも生成系 AI では、画像情報の活用が必要な分野での適用が知られる。たとえば、旅行業界（空港での顔認証技術の高度化）、健康医療（X-RAY や CT スキャン画像のイメージ化）、マーケティングの効率化などが考えられる。さらに、姿勢推定などでは、スポーツ科学などへの適用が考えられる。

6. Planning, Reasoning, and Decision making

(1) 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

人工知能を利用した計画・推論・意思決定は、民間分野で最も活発に利用されている。1980 年代より活用されている方法は、予想モデル化（predictive modeling）であり、データと統計を組み合わせる結果を推論するものである。人工知能の機械学習を活用することでリプロセス・マイニング

(process mining) が可能になり、目標に対して最適なプロセスを変化する状況の中で特定することが可能になる。

その意味で、人工知能を意思決定に活用する場合、その条件の設定が重要になる。たとえば、人的資源の生産性は業務や作業の効率性に影響するが、個人の CV などをデータ化して分析することで、予め生産性の向上の度合いを測定することが可能になる。これは、人事や採用計画などに活用される。さらに、複雑な問題解決、顧客の行動予想、戦略の変更などにおいて、人工知能技術の活用は軍民に限らず多くの場面で見ることができる。

この領域における新技術の動向は、収集するデータの質と量に左右される。Project Maven は国防総省が収集した各種データを、人工知能に活用することを目的として民間技術を利用しようとしたものであるが、このプロジェクトおよびその後継プログラムの進展によっては、訓練や演習、兵器開発の最適化が図られることになると期待されている。

(2) 公的利用・安全保障における利用

当該技術の軍事面での適用は、軍事的意思決定に影響する条件の一つである、戦闘空間の可視化 (visualization) がある。古典的な意思決定では、戦闘空間は二次元で再現され、その条件のもとで実施されていたが、人工知能を活用し実際の戦闘空間に近い三次元での可視化が可能になる。日米などが、多領域作戦の実施を想定し、将来的には自動化部隊（あるいは半自律化部隊）の導入が検討される中で、人間が時間的制約の中で情報処理を行うことが困難になっており、米陸軍などは戦場での意思決定を人工知能に依存した計画立案などを進めている。

複雑な環境での意思決定については、陸軍に限らず、海軍でも必要とされている。これは仮想現実 (augmented reality) と呼ばれ、戦闘空間の三次元での再現により、軍の作戦計画の策定と意思決定を大きく変化させている。このように、意思決定の迅速化と最適化、コンピューターを利用した意思決定、意思決定空間の再現（戦争シミュレーションにおいて）が、この領域で注目される変化である。

ただし、人工知能が作り出した擬似空間は、人間が与えた条件によって左右される。このため、戦争計画策定のための情報処理過程に多様な情報を付与すること、システム自体が機能不全に陥る可能性がある。さらには、予想ができない状況の勃発等にデータと統計をベースにした予想モデルは活用できない。必然的に機械学習の導入が必要になるが、その際に既存のインターネット空間のデータと軍が保有する分析および解析手法を組み合わせ、パフォーマンス・サービス・フレームワーク (PSF) や、三次元の仮想映像を組み合わせ、意思決定を支援する人間と機械のチームングなどが重要になる。

これら技術はすでに存在する技術の活用が中心であり、人工知能の技術そのものではなく、活用に合わせて軍側の対応の変化と理解することが可能かもしれない。

日本の自衛隊においても、意思決定支援のための人工知能利用が求められており、その方式についての検討を進めるべきであろう。

第8節 自律型システムとロボット (Autonomous Systems and Robotics)

自律型システムならびに自律型ロボットとは、人間の操作に頼らずに行動するシステムないしはロボットのことである。最初の自律型ロボット環境は、1940年代後半に W.Gray Walter によって作られた Elmer と Elsie として知られている。エルマーとエルシーは、その形状や動きから、しばしばカメラと呼ばれることもあった²⁶⁸。歴史的な例としては、宇宙探査機などがある。現代では、自動運転する掃除機や自動車などがある。工場内の組み立てラインで働く産業用ロボットアームも自律型ロボットと言えるが、高度に構造化された環境と移動ができないため、自律性は制限されている。そのため Automated (自動化) と Autonomous (自律型) の差異が技術特異点 (シンギュラリティ) の重要なポイントであると言える。

自律システム及びロボット技術に関する概要としては、スマートフォンの延長としての民生技術が、第二次大戦以降に生まれたラジコンとして軍用技術を飲み込む形で発展している。航空宇宙、防衛、セキュリティにおけるロボティクスについての Global Data のレポートによれば、過去3年間だけで、航空宇宙および防衛産業で174,000件を超える特許が申請・承認されているが、その多くがドローンに代表される自律システム及びロボット技術であり、ほとんどが民生技術である²⁶⁹。史上初の航空無人兵器は、米西戦争における気球にカメラを取り付けたものとされ、これは自律でもロボットでもない。いわゆるドローンもしくは UAV(Unmanned Air Vehicle) とされるものは、第二次大戦以降に登場してくことになるが、これはいわゆるラジコンの延長であり、人間の操作が必要な機体となる。

航空における自律システム及びロボット技術としての本格的な登場は、2010年代における中国・DJI社をはじめとする企業群による小型ドローンの発売を待たねばならなかった。これがいわゆるドローンと現在表現されるものだ。この2010年以降に急成長したドローン技術とは、基本的にクリス・アンダーソンが「空飛ぶスマホ」と評したように、スマートフォンの大量生産によるセンサー・プロセッサ・それらを統合するシステムの技術の発展と低廉化によるものである。

すなわち数十個ものセンサー、数十ものプロセッサ、長距離ワイヤレスブロードバンドで構成される自動車以外のコンシューマーデバイスのなかで、最も複雑なつくりと評されるシステムであるが

²⁶⁸ Ingalls-Arkell, Esther "The Very First Robot Brains Were Made of Old Alarm Clocks", 7 March 2012.

²⁶⁹ <https://www.globaldata.com/store/report/uav-swarm-control-robotics-in-aerospace-defence-and-security-innovation-and-trend-analysis/>

ゆえにドローンは必要最小限の操作で飛行し、ミッションを完遂するものとなっている。その為、ドローンを扱う人間は、“操縦者”というよりも“運航者”という表現が適切となっている。

注目された経緯としては、民生用としては2点ある。まず慶應義塾大学総合政策学部教授の古谷知之が指摘するように、これまで鳥や虫や電波しか利用してこなかった、低位空域をドローンが利用することで新たな社会を描けるのではないかという展望である。古谷らはこれを“ドローン前提社会”とし「ドローン前提社会とは、誰もが空中・地上・水中を自律制御された無操縦の車両・航空機・船舶を使いこなすということではない。あくまでも社会課題の解決手段として、これらの技術を選択できる社会」と説明している。

つまり低空域を様々なセンサーを積載し、運搬なども可能なきわめて汎用性の高いアセットであるドローンを活用して、これまで解決できなかった、もしくは解決コストの高い課題を解決できるようになるということだ。具体的には、測量・インフラ点検・警備・航空機整備・物流・観光・農業・災害時の捜索救難などに既に使用され、解決コストの大幅な引き下げや解決に役立っている。

注目された経緯の第二は、これが優れてサイバーフィジカルシステム（CPS）を代表するものとなっていることだ。CPSとは、センサーが収集した現実世界の情報をサイバー空間に取り込み、それをAIなどが分析し現実に反映していくシステムだ。

例えば自動運転では、自動車に積載されたセンサーが現実空間の様々な情報を収集し、AIが分析したうえで、現実の駆動系を動かすとされる。自動運転車のみならずドローンなども同様とされる。農業であればドローンが収集した生育状況をサイバー空間に集約・分析し、今度はサイバー空間がドローンで農薬・肥料散布を行ったり、UGVが収穫を行ったりする営為があてはまる。

つまり現実のフィジカルな空間の情報がサイバー空間に集約され、それがサイバー空間からの指令によって現実空間で作動するシステムがCPSなのだ。クリス・アンダーソンが「（ドローンは）インターネットを応用し、インターネットの力を物質的な領域にまで拡張する」と評するように、この一翼を担っているのがドローンとして注目しているわけだ。ドローンは、インターネットというサイバー空間が初めて現実の物理空間に直接影響を及ぼせるアセットとして注目されている。

軍事面においては、これらがそのまま反映される結果となっている。すなわち軍事的にも活用されてこなかった1000m以下の低位空域がドローンを中心とするアセットの独壇場となり、有効活用されている。また軍事におけるサイバーフィジカルシステムとして、戦術レベル・作戦レベル・戦略レベルで活用もされ、2020年のナゴルノ・カラバフ紛争、そして2022年に開始されたウクライナ戦争で有効性を発揮している。

本稿では、航空、海洋、宇宙における状況の外観と評価を行っていく。

1. 技術の概要（分野、注目された経緯、研究開発状況等）

（1）ロボット

安全保障用の自律型ロボット

自律型致死性兵器システム（LAWS）は、プログラムされた制約と記述に基づいてターゲットを独立して探索し、従事(Engage)することができる軍事用の自律ロボットシステムの一つである²⁷⁰。LAWS は、自律型致死性兵器システム（LAWS）、自律兵器システム（AWS）、ロボット兵器、キラーロボットとしても知られている²⁷¹。LAWS は空、陸、水上、水中または宇宙で使用されるのを想定されている。2022年時点の現行システムの自律性は、人間が最終的な攻撃命令を出すという意味で制限されている。しかし、特定の「防御的」システムで例外はある。

・UGV Interoperability Profile (UGV IOP) : Robotics and Autonomous Systems - Ground IOP (RAS-G IOP) は、もともとアメリカ国防総省 (DoD) が無人地上車両 (UGV) のオープンアーキテクチャ相互運用基準を整理・維持するために始めた研究プログラムである²⁷²。

IOP は当初アメリカ軍ロボットシステム共同プロジェクト局 (RS JPO) で作成されていたものであったが、2019年10月、Textron と Howe & Howe は Ripsaw M5 車両を発表し²⁷⁶、2020年1月9日に米陸軍は Robotic Combat Vehicle-Medium (RCV-M) プログラムを発注した。4台の Ripsaw M5 プロトタイプが納入され、2021年後半に無人車両の地上戦闘作戦への統合の実現性を判断するための中隊レベルで使

²⁷⁰ Crotoft, Rebecca (2015). "The Killer Robots Are Here: Legal and Policy Implications". 36 Cardozo L. Rev: 1837. heinonline.org.

²⁷¹ ohnson, Khari (31 January 2020). "Andrew Yang warns against 'slaughterbots' and urges global ban on autonomous weaponry". venturebeat.com

²⁷² Robotics and Autonomous Systems - Ground (RAS-G) Interoperability Profile (IOP) (Version 2.0 ed.). Warren, MI, USA: US Army Project Manager, Force Projection (PM FP). 2016.

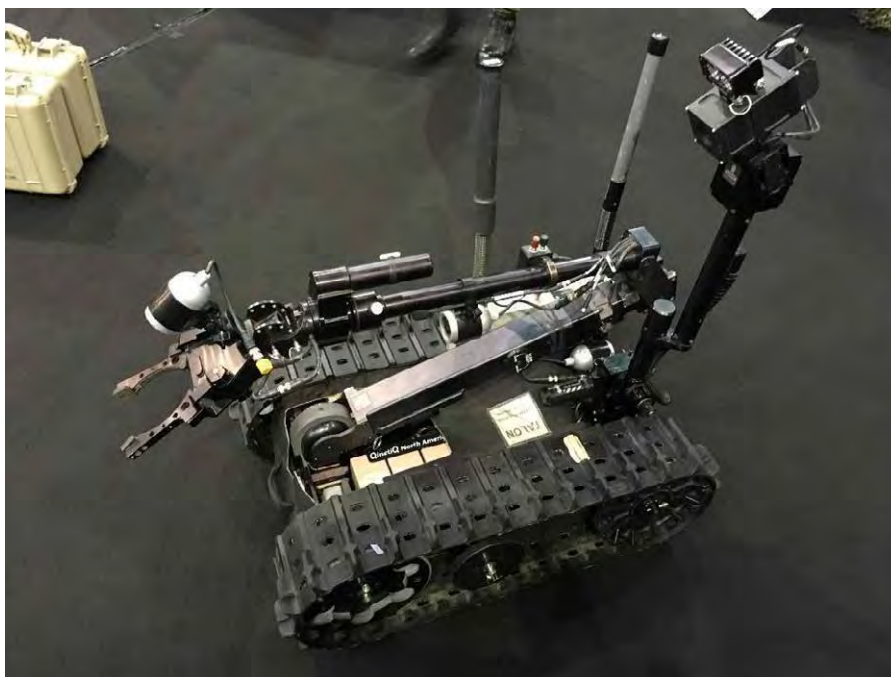
²⁷³ "U.S. Army Unveils Common UGV Standards". Aviation Week Network. Penton. 10 January 2012. Retrieved 25 April 2017.

²⁷⁴ Serbu, Jared (14 August 2014). "Army turns to open architecture to plot its future in robotics". Federal News Radio. Retrieved 28 April 2017.

²⁷⁵ Demaitre, Eugene. "Military Robots Use Interoperability Profile for Mobile Arms". Robolliance News. Robotics Business Review. Retrieved 28 April 2017.

²⁷⁶ Textron Rolls Out Ripsaw Robot For RCV-Light ... And RCV-Medium. Breaking Defense. 14 October 2019.

用されはじめた^{277,278,279}。40mph (64 km/h) 以上の速度に達し、戦闘重量 10.5 トン、積載量 8000lb (3,600 kg) である²⁸⁰。RCV-M には 30mm 自動砲と 2 基の対戦車ミサイルが装備される。標準の装甲パッケージは 12.7×108mm 弾に耐えることができ、オプションの追加装甲で重量を最大 20 トンまで増加させることができる。ジャミングや信号を無効化されても射撃能力は維持され、センサーと無線アップリンクは主要機能として送信を続けるよう優先される作りとなっている²⁸¹。



(図 8-1 UGV Interoperability Profile (UGV IOP)²⁸²)

・Crusher はカーネギーメロン大学の国立ロボット工学センターの研究者が DARPA のために開発した 13,200 ポンド (6,000 kg)²⁸³の自律型オフロード無人地上戦闘車であり、前作スピナーに続く車両であ

²⁷⁷ US Army picks winners to build light and medium robotic combat vehicles. Defense News. 9 January 2020.

²⁷⁸ GVSC, NGCV CFT announces RCV Light and Medium award selections. Army.mil. 10 January 2020.

²⁷⁹ Army Picks 2 Firms to Build Light and Medium Robotic Combat Vehicles. Military.com. 14 January 2020.

²⁸⁰ Army Setting Stage for New Unmanned Platforms. National Defense Magazine. 10 April 2020.

²⁸¹ Meet The Army's Future Family Of Robot Tanks: RCV. Breaking Defense. 9 November 2020.

²⁸² Robotics and Autonomous Systems - Ground IOP (RAS-G IOP)(UGV TALON Gen. IV. Future Forces Forum 2018

²⁸³ "UPI: UGCV PerceptOR Integration" . Carnegie Mellon University. 16 December 2013.

る²⁸⁴。 DARPA による Crusher の技術名称は Unmanned Ground Combat Vehicle and Perceptor Integration System であり²⁸⁵、プロジェクト全体は Unmanned Ground Combat Vehicle PerceptOR Integration の略語である UPI で知られている。



(図 8-2 Crusher²⁸⁶)

・CATS Warrior は陸上と空母からの海上での離着陸が可能な自律型ウイングマン・ドローンとなり、Tejas、Su-30 MKI、Jaguar といった IAF の既存の戦闘機プラットフォームと組み、その母船のような役割を果たすことになる²⁸⁷。Warrior は主にインド空軍の使用のために想定されており、同様の小型版がインド海軍のために設計される予定である。母艦によって制御され、偵察、敵の砲火の吸収、必要

²⁸⁴ Carnegie Mellon's National Robotics Engineering Center Unveils Futuristic Unmanned Ground Combat Vehicles"

²⁸⁵ Carnegie Mellon's National Robotics Engineering Center Unveils Futuristic Unmanned Ground Combat Vehicles"

²⁸⁶ カーネギメロン大学の研究室 Retrieved from; <https://www.nrec.ri.cmu.edu/solutions/defense/other-projects/crusher.html>

²⁸⁷

に応じて内部および外部パイロン兵器による目標への攻撃、目標に衝突することによる自己犠牲などのタスクを達成することになる。



(図 8-3 HAL CATS Warrior UAV²⁸⁸)

・SGR-A1 は、韓国非武装地帯で韓国軍を支援するためにサムスンテックウィン（現ハンファ・エアロスペース）と高麗大学が共同開発した自律型セントリーガン的一种である。監視、追跡、射撃、音声認識を含む統合システムを持つこの種の最初のユニットとして広く考えられている²⁸⁹。SGR-A1のユニットは配備されたと報告されているが、プロジェクトが「高度に機密化」されているため、その数は不明である²⁹⁰。

²⁸⁸Retrieved from; <https://www.nrec.ri.cmu.edu/solutions/defense/other-projects/crusher.html>

"Strikes from 700km away to drones replacing mules for ration at 15,000ft, India gears up for unmanned warfare - India News". indiatoday.in. Retrieved 22 February 2021

India gears up for unmanned warfare - India News". indiatoday.in. Retrieved 22 February 2021.

²⁹⁰ Rabi roff, Jon (July 12, 2010). "Machine Gun Toting Robots Deployed On DMZ". Stars and Stripes. on April 6, 2018.