

米国防総省における超電導技術の
研究、開発、試験及び評価

Research, Development, Test and Evaluation (RDT&E)
on Superconductivity Technology
of the U.S. Department of Defense

令和6年2月

拓殖大学大学院
国際協力学研究科 安全保障専攻
G1D7512021
堀内 正隆

目 次

序章	1
第1節 問題の所在	1
第2節 先行研究	5
第3節 本論文の研究手法	7
第4節 研究の意義	8
第5節 本論文の構成	10
第1章 新興技術の研究、開発、試験及び評価	15
本章のはじめに	15
第1節 研究、開発、試験及び評価という用語	15
第2節 米国防総省が行う研究、開発、試験及び評価の対象	17
第3節 新興技術	18
1 新興技術の定義	18
2 新興技術の研究開発の特徴	20
3 新興技術のライフサイクル	22
第4節 超電導技術の事例	28
第5節 RDT&E 制度のレジリエンシー(弾力性)	32
本章のおわりに	35
第2章 米国防総省における超電導の研究、開発、試験及び評価の歴史	38
本章のはじめに	38
第1節 草創期(1940年代中盤～1980年代中盤)	40
1 米国防総省における超電導研究のはじまり	40
2 超電導の軍事応用として考えられていたこと	44
3 具体的なRDT&Eプロジェクト	46
第2節 超電導ブーム期(1986年～1990年頃)	80
1 米国の競争力の状況	80
2 米国防総省の展望	81
3 高温超電導の発見に対する政府及び議会の反応	84

4 具体的なRDT&Eプロジェクト	90
第3節 冷却期—冷戦の終焉と共に—(1990年代)	100
1 米国政府、米国議会の状況	101
2 具体的なRDT&Eプロジェクト	111
第4節 平衡期—祭りのあとの日常—(2000年代～)	119
1 米国政府、米国議会の状況	119
2 具体的なRDT&Eプロジェクト	121
本章の終わりに	128
第3章 超電導の研究開発がもたらしたRDT&E制度の推進要因	130
本章のはじめに	130
第1節 シーズとニーズのミスマッチ	130
第2節 軍事予算と科学技術	133
第3節 政治的意思の継続	137
本章の終わりに	138
第4章 新興技術で軍事利用に至った例の検証	140
本章のはじめに	140
第1節 ステルス	140
第2節 全地球測位システム(GPS)	144
第3節 インターネット	146
第4節 成功例の共通点	152
第5節 成功例の相違点	160
本章の終わりに	163
第5章 米国防総省における超電導技術の研究開発の進捗と成果	165
本章のはじめに	165
第1節 過去の計画の進捗と成果	165
第2節 電磁カタパルトを事例とする考察	170
第3節 実用化された超電導技術(超電導電磁石、SQUID)との違い	182
第4節 軍事利用された技術との比較	184
本章の終わりに	187
第6章 新興技術の遷移—超電導から量子情報科学へ—	189

本章のはじめに.....	189
第1節 量子情報科学とは.....	190
第2節 量子技術の軍事応用.....	193
第3節 量子技術の市場性.....	197
第4節 通信と安全保障の問題.....	204
第5節 軍事技術の条件からみた量子情報科学.....	210
第6節 量子情報科学における超電導.....	217
本章のおわりに.....	221
第7章 RDT&E 制度の技術「保存」機能.....	222
本章のはじめに.....	222
第1節 予算.....	222
第2節 外部へのファンディング.....	224
第3節 外国とのパートナーシップ.....	225
第4節 スピン・オフ、スピン・オン、そしてデュアルユース.....	227
第5節 技術「保存」機能とその意義.....	230
本章のおわりに.....	232
終章.....	235
第1節 まとめ.....	235
第2節 今後の課題.....	241
謝辞.....	242
参考文献目録.....	243
【一次資料(英語)】.....	243
【書籍・論文(日本語)】.....	246
【書籍・論文(英語)】.....	248
【ウェブ資料(日本語)】.....	261
【ウェブ資料(英語)】.....	263

序章

第1節 問題の所在

本稿は、米国防総省が行った超電導¹技術の研究開発を事例として分析することにより、米国防総省が、同省の制度の下で、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとしていることを明らかにしようとするものである。

研究開発では成功するものもあれば、成功しないものもあるのが現実で、すべてが計画のとおりとはいかない。公的資金による研究開発、特に軍事技術においては、達成目標を決めてプロジェクトを推進し、目標が達成できた場合は次の段階に移行することもできるが、達成できなかった場合はそれで終了となる—科学技術予算の下、大学や公的研究機関で基礎研究が継続されることはある—というのが一般的である。ところが、米国防総省においては、計画のとおりではなかった場合、あるいは、目標を達成できなかった場合でも、必ずしも終了ということはなく、研究開発が継続するものもある。

米国防総省は第二次世界大戦終了直後から超電導技術の研究開発を始めた。それから70余年、超電導技術は軍事的にはほとんど使用されていないが、米国防総省は超電導技術の研究開発を継続している。米国防総省傘下の陸軍省、海軍省、空軍省の研究担当部局や研究所、さらには国防高等研究計画局(DARPA)が、すぐには軍事利用に至らない技術を、新たな基礎研究としたり、異なる文脈での研究開発にブレンド(混ぜ込み)したりして、自ら、あるいは大学や企業などに資金提供をする形で、米国防総省の制度の枠内で研究開発を継続している。これは、米国防総省の制度が、その制度の下で研究開発を行うにあたって有する、特徴的で重要な特性であるにもかかわらず、その詳細は明らかになってはいない。

米国防総省が行う「研究、開発、試験及び評価」(Research, Development,

¹ 「Superconductivity」の訳として、理化学では「超伝導」、工学では「超電導」が用いられる。本研究では、物理現象も含めて「超電導」で統一して表記する。

Test, and Evaluation: RDT&E)』では、さまざまな技術について、その軍事利用の可能性を評価し、軍事利用につながる研究開発を実施、あるいは支援をしている。そして、米国防総省のRDT&Eの対象には新興技術も含まれる。新興技術とは、既存技術の限界を超える、あるいは既存技術では実現不可能なことを実現し得る技術である。しかし、米国防総省は、RDT&E制度をどのように運用して、新興技術のもつ可能性を軍事利用に結実させようとしているのかは明らかになってはいない。

「研究、開発、試験及び評価」については第1章で詳しく説明するが、米国の国防総省歳出法 (Department of Defense Appropriations Act) で用いられる用語であり、以下、他省との比較などのため、あるいは一般的な用語として、「研究開発」と記載することがあるが、その場合も、米国防総省において趣旨は「研究、開発、試験及び評価」である。

米国では他国を圧倒する国防費が計上されている。ストックホルム国際平和研究所 (Stockholm International Peace Research Institute: SIPRI) が2023年4月に発表した、世界の軍事支出動向を集約した報告書²によると、世界全体における軍事支出総額における米国の割合は、冷戦末期の1988年には44% (7095億ドル / 1兆6021億ドル)、冷戦終結直後の1992年は49% (6277億ドル / 1兆2879億ドル)、その後、10年ずつ見ていくと、2002年は45% (5701億ドル / 1兆2806億ドル)、2012年は46% (8559億ドル / 1兆8713億ドル)、2022年は39% (8769億ドル / 2兆2399億ドル) と4割前後を占めている。(2022年度は、当時ドル計算、2001年以前は、2021年ドル計算の数字である。)

また、国防費における研究、開発、試験及び評価のための費用も多額であって、米国議会調査局 (Congressional Research Service: CRS) の報告書によると、1996年度では352億ドルであったが、2000年度頃から急増し、2009年度には800億ドルを超えるまでになった。その後はいったん下降に転じ、2015年度には637億ドルにまで減少したが、そこから反転し、2022年度には1190億

² Nan Tian, Diego Lopes da Silva, Xiao Liang, Lorenzo Scarazzato, Lucie Béraud-Sudreau, and Ana Carolina de Oliveira Assis, "Trends in World Military Expenditure, 2022," *SIPRI Fact Sheet* (April 2023).

ドルを超えている³。米国は、この資金を使って、例えば、戦闘機やイージス艦、弾道ミサイルといった直接的なアセットから、全地球測位システム (Global Positioning System: GPS) や、後のインターネットとなるARPAネットといった間接的な支援システムまで、これまで数々の軍事技術を開発してきた。

しかし、先にも述べたように、研究開発では成功するものも、成功しないものもあり、すべてが計画のとおりとはいかない。さらに、計画のとおりではなかったとしても、必ずしも終了ということはなく、研究開発が継続するものもある。軍事的に利用されるに至った技術と、軍事利用には至っていないが研究開発が継続している技術には、どのような性質の違いがあるのでしょうか。また、軍事利用には至っていないものは、どのようにして研究開発を続けているのでしょうか。

超電導 (Superconductivity) は、20世紀になって発見された物理現象である。1911年、K. オンネス (Heike Kamerlingh Onnes) により発見された⁴。電気抵抗がゼロとなる現象を利用して大量の電流が流せる、あるいは、磁束が量子化される⁵という現象を利用して微弱な磁界が計測できるといったことを背景として、超電導技術の研究開発が行われるようになった。そして、1986年、高温超電導体が発見されると、超電導はブームとなった⁶。超電導を用いれば、電気抵抗がゼロで大量の電流を流せることを利用して大出力の発電機／モーターや、損失の少ない送電、あるいは、磁束の量子化を利用して超高感度の量子センサーが、しかもそれが超低温ではなく室温においても実現できる可能性が考えられたことで、高温超電導は夢の技術と呼ばれた⁷。そしてそれは、詳しくは第2章に記載するが、例えば、高出力の発電機／モーターと、送電ロスのない電気系統は、電動化した艦艇にとって重要なサブシステムとなり、また、超低周波 (ELF) からマイクロ波領域までの微弱な電磁信号の検出は、通信の高度化や、熱源、地雷／機雷の探知を可能とするなど、軍事的に

³ John F. Sargent Jr., “Department of Defense Research, Development, Test, and Evaluation (RDT&E): Appropriations Structure,” Congressional Research Service. Updated September 7, 2022.

⁴ 田中昭二「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」『応用物理』第69巻第8号、2000年、940-948頁。

⁵ 磁束とは、磁界の中のある垂直断面を通る磁力線の量のことである。超電導体の環を磁束が貫いているとき、磁束は離散的な(とびとびの)値しかとれない。これを磁束の量子化という。

⁶ 上之蘭博「高温超電導フィーバーを憶う」『低温工学』39巻9号、2004年、375頁。

⁷ 那野比古「セラミックス超電導のすべてがわかる本—夢の技術に産業社会は何を期待できるか」こう書房、東京都、1987年。

も夢の技術であると考えられた⁸。

しかし、米国防総省が第二次世界大戦の終結直後から超電導の研究開発を初めてから70余年が過ぎたが、米軍で超電導が多用されてはいない。軍事機密のために、事実があっても公表されないという可能性はあるものの、可能な範囲でさまざまな軍事技術が紹介されるなか、夢の技術は一体どうなったのか。

米国では、歴史的には、第二次世界大戦後に、原子力の平和利用やロケットの宇宙開発への応用、コンピューターなど、軍事技術のスピンのオフ (Spin-off) が進んだのに対し、1980年代には逆に、民生分野の半導体技術、材料技術などの発展の結果、先端技術のスピンのオン (Spin-on) の重要性が高まり、そして、冷戦終結後の1990年代以降は、ソフトウェアを含む IT の進展が速く、IT分野のスピンのオンが重要になった⁹。

高温超電導が発見された1986年は、ちょうどこの、スピンのオフからスピンのオンに転換する時期に重なる。また、高温超電導が発見されるとすぐさま米国政府は高温超電導の研究開発を進めるが、それにあたり、まず大統領がイニシアチブを発表し、それに呼応して各省庁が予算を取るという方式が採られた。

高温超電導はブームとなり、超電導の研究開発予算は拡大したが、5年もすると頭打ちとなり、その後は減少していった。そして、軍事利用された超電導技術はほとんどない。それにもかかわらず、超電導の研究開発は継続している。海軍では高温超電導を用いて艦艇の磁気的なシグニチャー¹⁰を消す、消磁システムが実装されている。また、超電導電磁石を用いた自動掃海システムの開発も相当に進んでいる。さらに詳細に調べると、「国家ナノテクノロジー・イニシアチブ」、「国家量子イニシアチブ」に含まれる形で超電導の基礎研究が継続していることが分かった。

⁸ 米国防総省が1987年に作成した調査報告書 *The Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) options*, 3-4 頁、には、「(DSRD プログラム)の目標は、高温超電導の革命的な可能性が、小規模アプリケーション(センサー、ジョセフソン接合(JJ)エレクトロニクス、超電導半導体ハイブリッド・エレクトロニクス)と大規模アプリケーション(磁石、回転機械、エネルギー貯蔵、電磁銃、指向性エネルギー兵器)の両方を含む軍事用途において、できるだけ早い機会に実現されることを保証することである。」とある。(下線は著者による。)

⁹ 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』岩波書店、第88巻第6号、2018年、647頁。

¹⁰ 鋼材でできた船体は磁気構造体であり、艦艇ごとに異なる磁気特性を持つ。

軍事的に利用されるに至った技術と、軍事利用には至っていないものの研究開発が継続している技術とでは、米国防総省のRDT&E制度はどのように活用され、そしてRDT&E制度の作用はどのように異なったのであろうか。また、RDT&E制度のどのような作用が軍事利用に至る条件となるのであろうか。米国防総省における、70余年にわたる超電導の研究開発に着目して、米国防総省が新興技術を軍事的に利用するために、どのようにRDT&Eの制度を運用し、新興技術の研究開発に影響を与えてきたのかを明らかにする。

第2節 先行研究

本研究は、「米軍と技術」に関する研究、「米国防総省の研究、開発、試験及び評価」に関する研究、「新興技術」に関する研究、そして、「超電導」に関する研究、これらの研究の流れをくむものと考えている。「米軍と技術」に関する先行研究としては、まず、トーマス・G・マーンケン(Thomas G. Mahnken)による、新技術が戦争の方法に与えた影響の研究が挙げられる。マーンケンは、新技術の導入によって米国の戦争の方法が変遷していく実態を、時代を追って示している¹¹。また、P・N・エドワーズ(Paul N. Edwards)による、冷戦期のコンピューターに関する研究が挙げられる。エドワーズは、冷戦がコンピューターを生み出した一方、コンピューターがあったからこそ冷戦期の政治文化が形成可能であったということを示している¹²。

「米国防総省の研究、開発、試験及び評価」に関する先行研究としては、まず、ジョン・F・サージェント・Jr(John F. Sargent Jr.)による、米国防総省のRDT&E制度全体の経年変化を追った研究が挙げられる¹³。また、小林信一による両用技術の研究が挙げられる。小林は、軍事技術と民生技術は明確に分けられるとは限らず、軍事技術としても民生技術としても応用できる技術を両用技術と称し、また、米国で第二次世界大戦後に行われていたスピ

¹¹ Thomas G. Mahnken, *Technology and the American Way of War* (New York: Colombia University Press, 2010).

¹² P・N・エドワーズ『クローズド・ワールド—コンピューターとアメリカの軍事戦略』深谷庄一監訳、日本評論社、2003年。

¹³ John F. Sargent Jr., “Department of Defense Research, Development, Test, and Evaluation (RDT&E): Appropriations Structure.” Congressional Research Service, Updated September 7, 2022.

ン・オフ(軍事技術を民生用に転用すること)が、1980年代には逆に、民生分野の半導体技術、材料技術などの発展の結果、先端技術のスピン・オン(民生技術を軍事技術に転用すること)の重要性が高まったことを示している¹⁴。

そのほかには、ジェームズ・ハシク(James Hasik)によるオープン・イノベーションの研究が挙げられる。ハシクは、ドローンなどを例に、起業家精神のある小規模新興企業とのアライアンスを組み、意図的かつ積極的に内部と外部の技術やアイデアなどの資源の流出入を活用するオープン・イノベーションを行うことにより軍事産業に新興技術を取り込んできたことを示している¹⁵。

「新興技術」に関する先行研究としては、米国議会調査局のケリー・M・セイラー(Kelley M. Saylor)らが、人工知能(artificial intelligence: AI)、自律型致死兵器システム(lethal autonomous weapon systems: LAWS)、極超音速兵器(hypersonic weapons)、指向性エネルギー兵器(directed energy weapons)、バイオテクノロジー(biotechnology)、量子技術(quantum technology)といった、特に軍事に関する新興技術について、その動向の調査・研究をしている¹⁶。また、技術のライフサイクルという観点では、マーケティングの分野におけるジョエル・ディーン(Joel Dean)による研究が挙げられる。ディーンは、製品が市場に投入されてから、寿命を終え衰退するまでのサイクルを体系づけたプロダクト・ライフサイクルの理論を提唱した¹⁷。

「超電導」に関する先行研究としては、主に基礎研究を中心に世界中で日々、新たな学術報告がなされており、その中には、米国防省傘下の陸軍省(Department of the Army)、海軍省(Department of the Navy)及び空軍省(Department of the Air Force)がそれぞれに持つ各種研究所が自ら、あるいは外部へのファンディングを通じて行う研究の成果も含まれる。一方で、それらの研究成果を総括するものもあり、福山秀敏らは、彼らを取りまとめた書

¹⁴ 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』岩波書店、第88巻第6号、2018年、647頁。

¹⁵ James Hasik, *Arms and Innovation Entrepreneurship and Alliances in the Twenty-First Century Defense Industry* (Chicago, IL: University of Chicago Press, 2014).

¹⁶ Kelley M. Saylor, *Defense Primer: Emerging Technologies*, Congressional Research Service, Updated November 14, 2022., Kelley M. Saylor, *Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress*, Congressional Research Service, Updated February 13, 2023., この他、個別の新興技術に関する報告書もある(巻末の参考文献目録参照)。

¹⁷ Joel Dean, "Pricing Policies for New Products," *Harvard Business Review* (November 1976).

籍において、超電導の基礎とともに、高温超電導線材や超電導デバイスの開発の状況を示している¹⁸。

しかしながら、これらの研究からは、米国防総省が、高温超伝導という新興技術を軍事的に利用するために、RDT&Eの制度をどのように運用し、最適化していったのかということは示されていない。なぜ、そのような先行研究がないかという点、これは推測になるが、米国防総省のRDT&Eの制度を研究するとすると、それは事例研究になると考えるが、事例研究の多くは成功事例によるものであって、超電導のように、いまだ成功に至らず研究開発が続いている事例を取り上げてもモデル化には適さないことから、研究の対象になっていないのではないかと考える。本研究は、先行研究の交点ともいえるこの点について明らかにするものである。

第3節 本論文の研究方法

本研究は、米国防総省が行った超電導技術の研究、開発、試験及び評価を事例として分析し、同省の研究、開発、試験及び評価の制度の機能を考察するものであり、基本的に文献調査に基づく事例研究である。本研究で取り上げる文献は、次のようなものである。まず挙げられるのは、超電導技術の研究開発に関連した連邦政府、連邦議会などの公的な報告書、米国防総省の予算資料などである。米国防総省も米国政府の機関であり、その活動のためには議会で法制化あるいは予算化される必要がある。議会での法制化・予算化には、その裏付けが必要となるが、米国防総省を含む政府、あるいは議会が、その裏付けとすべく、超電導技術について調査し、報告書にまとめており、政府や議会が超電導技術をどのように捉えていたかの手がかりとなる。次に挙げられるのが、傘下各軍を含む米国防総省が支援、あるいは自ら行った超電導の研究開発に関する理工学系の文献である。学術誌に掲載される学術論文や、軍に提出される技術報告書などがあり、いつごろ、どのような研究開発が行われていたのかの手がかりとなる。

¹⁸ 福山秀敏、秋光純[編]「超伝導ハンドブック」朝倉書店、東京都、2009年。

本研究では、まず、これらの文献を、超電導技術の研究開発において特徴のある4つの段階に分け、それぞれの時代で、米国防総省がRDT&Eの制度をどのように運用し、どのような研究開発を行っていたかを明らかにする。

4つの段階とは、(1)高温超電導が発見される前、低温超電導だけの研究開発を行っていた「草創期」(1940年代中盤～1986年代中盤)、(2)高温超電導が発見され、高温超電導の研究開発、特に基礎研究が行われた「超電導ブーム期」(1986年～1990年頃)、(3)超電導への熱が冷めていく一方で実用に向けた研究開発に重心が移っていった「冷却期」(1990年代)、(4)その他多数の研究開発なかで密かに脈々と研究開発が続く「平衡期」(2000年代～)である。それら、それぞれの段階で、米国防総省のRDT&Eの制度の作用が、軍事利用に至った技術と何が異なっていたのか明らかにし、どのような作用が軍事技術に至る成功の要因となるのかを考察する。さらに、軍事的に利用された新興技術を取り上げ、軍事利用に至った条件の仮説を立て、そしてその仮説を、かつての新興技術である超電導と、現在の新興技術で検証する。

そして最終的には、米国防総省のRDT&E制度がもつ特有の機能が超電導の研究開発にもたらした効果を、総合的に考察して明らかにする。

第4節 研究の意義

米国防総省では、軍事利用を想定した技術の研究開発を、世界一の予算規模で行っている。そして、その対象としては、既存技術の限界を超える、あるいは既存技術では実現不可能なことを実現し得る技術—いわゆる、新興技術—も含まれる。しかし、研究開発では成功するものもあれば、成功しないものもあるのが現実で、すべてが計画のとおりとはいかない。過去に研究開発の蓄積のない新興技術ともなれば、成功の予見はさらに難しいものとなる。

公的資金による研究開発、特に軍事技術においては、達成目標を決めてプロジェクトを推進し、目標が達成できた場合は次の段階に移行することもできるが、達成できなかった場合はそれで終了となる—科学技術予算の下、大学や公的研究機関で基礎研究が継続されることはある—というのが一般

的である。ところが、米国防総省においては、計画のとおりではなかった場合、あるいは、目標を達成できなかった場合でも、必ずしも終了ということはなく、研究開発が継続するものもある。米国防総省では、軍事的にはほとんど利用されていない超電導技術の研究開発を70余年にわたって行っている。これは、他国にはない、米国固有のアプローチである。

一般的に、何の研究開発をするかは、研究者個人あるいは研究者が所属する研究機関の裁量による。研究者あるいは研究機関が成果に価値を見出せなければ、その研究開発は継続されなくなる。しかし、米国防総省は、研究開発が継続するように仕掛けている。その背景には二つのことが考えられる。一つは、技術の可能性をオープンに考えているということである。技術のシーズは、米国防総省—具体的には傘下の陸・海・空各軍の研究所—が持っているもよいし、大学や企業などにあってもよいし、いずれにしてもどこかにあって使えばよいということである。もう一つは、軍事的に利用できるまでの時間を長くとらえているということである。数年の研究開発プロジェクトで期待する成果が得られなかったとしても、さらに先で軍事利用ができればよいということである。

米国防総省のRDT&E制度の資金は、米国政府の公的資金である。その成果は、軍が自ら研究開発を行って軍のものとなった場合も、あるいは研究者個人や、大学や企業などの研究機関の研究開発を支援してそれらのもとなった場合も、広い意味では国の資産である。長い時間を経たのちに結実する可能性があるとするれば、それまでその資産をいかにして生かしておくことができるであろうか。研究者の関心は常に移り変わっていくものであり、研究開発のコミュニティに任せていたのでは、研究開発が継続せず、資産が継承されないかもしれない。そこで、その資産を米国防総省あるいはその支援先に残し、いつでも再生できるようにしておくため、RDT&E制度には研究開発を継続できる仕組みが備わっていると考える。

これは、ある瞬間を見ただけでは分からないが、あとになって振り返ってみれば分かるものであり、研究開発のライフヒストリー¹⁹を見ていくと明らかにな

¹⁹ ライフヒストリー(Life history)は、自伝的歴史を記録するために社会学で使用されるインタビュー方法であるが、この場合は、個人ではなく、ある特定の研究開発を対象とした比喩的表現として用いている。

るのではないか。そこで、RDT&E制度の下で行われた超電導技術の研究開発の歴史を見ていく。研究開発へのRDT&E制度のかかわりを見ることにより、その概要を明らかにすることが、本研究の意義である。

第5節 本論文の構成

本論文は、著者がこれまでに発表した2本の紀要論文²⁰を基礎としつつ、さらに文献調査を進め、新たに考察したことを加えて作成したものである。本論文では、まず、第1章で、新興技術の研究開発がどのような特徴を有するのか、米国防総省におけるRDT&Eの制度運用が超電導の研究開発にどのように関係したのかを踏まえて考察する。軍事利用される技術のニーズといえば、究極的には、軍の軍事的なニーズである。作戦に必要なニーズから、軍事装備品や軍用サービスの技術的な仕様が決まる。一方で、シーズは、軍の研究所にある場合もあれば、大学や企業など軍の外部にある場合も、さらには複数の機関に分散して存在する場合もある。

既存技術であれば、そのシーズがどこまで適用可能であるのかという技術的な限界や制約を軍が把握した上でのニーズの掘り起こし、あるいは、ニーズに対してシーズがどこまで対応可能であるかという、現実的なすり合わせをすることが可能であるのに対し、新興技術は、技術自体が出てきたばかりであり、そのシーズがどこまで適用可能であるかもわからないまま、ニーズに対峙する、あるいは新たなニーズを掘り起こすことになる。そのため、後から考えれば過剰とも言える期待がなされ得る。そして、期待が大きければ大きいほど、期待が外れたときの落胆は大きくなる。

プロダクト・ライフサイクルとハイブ・サイクルのアイデアを参考に超電導技術のライフサイクルを考察してみたところ、ブームで注目された時期があるものの、そこでは軍事装備品や軍用サービスへの実用化には至らず、ブームが去った後も、プロジェクトを断続的に切り替えつつ、研究開発は続いていると

²⁰ 堀内正隆「超電導技術が米国の研究開発政策に与えた影響—防衛政策の転換との関連性を中心に—」『拓殖大学大学院国際協力学研究科紀要』第15号、2022年、105-122頁；堀内正隆「米国防総省における超電導技術利用に関する一考察—電磁カタパルトの事例を中心に—」『拓殖大学大学院国際協力学研究科紀要』第16号、2023年、139-160頁。

いう変遷が見られた。

第2章では、米国防総省における超電導の研究開発の歴史を、特徴的な4つの時期(草創期、超電導ブーム期、冷却期、平衡期)に分け、それぞれの時期でどのような研究開発が行われていたかを明らかにする。米国防総省は、第二次世界大戦終結直後から超電導の研究開発を始めている。海軍は、主に軍の研究所で研究開発を行い、陸軍と空軍は、主に大学や企業などの外部へのファンディングを通じて、基礎研究から軍事的な応用開発まで多種多様な研究開発を幅広く行っていた。1986年に高温超電導体が発見されると、米国防総省内にワーキング・グループを立ち上げ、翌年7月には国防総省超電導研究開発(Department of Defense Superconductivity Research and Development: DSRD)プログラムのための報告書をまとめた。11点の超電導イニシアチブの発表、1988年の国家超電導及び競争力法の成立を受け、米国防総省としては、厳しい財政状況の中、RDT&Eの予算を増やすことに成功した。

しかし、高温超電導には解明されていないことが多く、そのため基礎研究に資源が割かれた。やがて、5年もすると頭打ちの兆しが見え始める。その後、予算は減少していったが、米国防総省は基礎研究から応用開発へと重心を移し、また、DARPAの関与を顕在化させ、さらに、ナノテクノロジーや量子といった文脈に形を変えながらも、その他多数の研究開発の中で超電導技術の研究開発が継続している実態があった。

第3章では、米国防総省における超電導技術のRDT&Eで考えられる課題を、これまでの考察を踏まえ、「シーズとニーズのミスマッチ」、「軍事予算と科学技術」、「政治的意思の継続」という三つの観点で論じる。超電導技術は、ニーズ側の過剰な期待や、すり合わせる媒体の不在などにより、シーズとニーズがミスマッチを起こしていたが、長いスパンで見れば、実用化に向けて進んでいた。

さらに、超電導は、ブームが終わった後も、その軍事利用の可能性に鑑み、研究開発を継続させる必要があり、そのための方法もまた必要であった。そして、ナノテクノロジーという新たなイニシアチブの文脈で、かつてのイニシアチブである超電導の研究開発が行われていた。そして、11点の超電導イニシ

アチブにおいては、政治的意思の継続が明確ではなかったが、その後のイニシアチブにおいては、政治的意思の継続が図られていた。

この概念を拡大すると、研究開発が成功するまでに時間のかかる、重要な技術、あるいは新興技術については、シーズとニーズの適時かつ冷静なすり合わせ、そして、将来の軍事利用を見据えた継続的な研究開発が必要であり、そのためには、シーズとニーズを適合させることを目的とする媒体の存在、そして、政治的意思の継続と、予算の継続が重要であり、翻って、政治的意思の継続を作り出す仕掛けとして、また、予算の継続を作り出す仕掛けとしての断続的なイニシアチブの発動とその継続が重要であると推察する。

第4章では、米国防総省により研究開発がなされ、実際に軍事利用されたかつての新興技術として、「ステルス」、「全地球測位システム(GPS)」、「インターネット」に着目し、軍事利用に至った経緯を検証する。これらの技術には、明確な軍事的ニーズがあったこと、技術システムを構成していること、長期にわたる研究開発が行われたこと、研究開発協力企業が存在したこと、明確な競争相手がいなかったこと、調達に移行したこと、科学的原理が明快であること、代替技術が存在しなかったこと、倫理的な争点がなかったこと、欠点はあるが許容できたことといった共通点があった一方で、軍事行動における使用形態や、研究開発段階における機密性、民生利用の度合いといった相違点があった。

第5章では、超電導技術の軍事利用について、過去の研究開発の計画の進捗と成果を俯瞰するとともに、軍事利用された技術と比較し、その違いを分析して論じる。小規模なアプリケーションについては、競合技術、特に半導体技術の飛躍的な進歩により、超電導の必要性が低下している可能性がある。一方、大規模なアプリケーションについては、両用技術(デュアルユース)として、民生利用されているものもあり、また、軍事用途として研究開発が継続しているものもある。超電導技術の利用が検討されていた電磁カタパルトを事例として、その検討の過程を追ってみたが、超電導技術の採用には困難があったと推察する。

実用化されている超電導技術である超電導電磁石と超電導量子干渉計

(SQUID)²¹では低温超電導体が用いられており、高温超電導体による代替はほとんど見られない。超電導技術は、軍事的なニーズはあり、かつ倫理的な争点はないという好適な条件にあるものの、代替技術が存在する中、許容しがたい欠点をかかえ、また、民生利用の度合いの低いものを、科学的原理がよくわからないまま、機密性高く行っているという状況が浮かび上がった。

第6章では、第5章までに、かつての新興技術である超電導に焦点を当てて考察をしてきたことを、現在の新興技術である量子情報科学の軍事利用の可能性を論じることに用いることはできないか試行する。それによると、量子情報科学は、明確な競争相手がいて研究開発を急ぐ必要があるが、軍事的に利用できるものになることを確実に支持する理論はいまだ確立しておらず、また、複雑な技術システムであり、さらに、軍事以外の用途も幅広く考えられ、人工知能での利用を除けば倫理的な争点はなく、民間企業の参入意欲も高く、デュアルユースではあるが、実態は、軍事利用もできる民生技術と言える。一方で、量子コンピューターにより暗号が無力化することの脅威は、国防のみならず行政全般、さらには民間にも広く影響することが考えられ、国全体、あるいは国際社会全体での取り組みが必要である。また、量子通信については、基盤インフラとしての産業的価値と安全保障との両立が難題である。

第7章では、超電導技術をはじめ、さまざまな技術の研究開発を行ってきた、米国防総省のRDT&Eの制度の効果と、それをもたらす機能について論じる。米国防総省はRDT&E制度により、1000億ドルを超える予算で、基礎研究から実機システム開発まで幅広く行っている。その資金は、陸海空軍の研究所といった米国防総省内部での研究開発に加え、大学や企業など外部機関へのファンディングに使われる。また、米国防総省では、RDT&Eのプロジェクトを、米国内だけではなく、外国と共同で行ってもいる。

米国では、歴史的には、第二次世界大戦後に、軍事技術のスピン・オフが進んだのに対し、1980年代以降には逆に、民生分野のスピン・オンが重要になったと言われるが、1995年、デュアルユース(軍事と民生の両用技術)の概

²¹ 超電導量子干渉計(SQUID)は、超電導を用いた高感度の磁気センサーである。

念が導入され、時間の経過とともにデュアルユースが浸透し、いまやスピン・オフ、スピン・オンの概念は古くなっている。

米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれたこと、また、国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことにより、米国防総省のRDT&E制度は、超電導技術の研究開発に、支援の多様化という新たな効果を及ぼした。

軍事利用に近いところまできているものは軍が、一方で基礎研究を継続するものについてはDARPAが、それぞれ支援の得意なものに集中して支援をすることができるようになった。そして、もし、軍で、あるいは軍が支援をして行っていた研究開発で期待する成果が得られなかったが、将来の可能性は残っているという場合には、完全に中止をするのではなく、その一部を、形を変え、DARPAの新たなプロジェクトとして支援する。そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となった。これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシー（弾力性）となり、ひいては、RDT&E制度の技術「保存」機能の源になっている。

そして、終章では、米国防総省のRDT&E制度が超電導の研究開発にもたらした効果を総合的に考察し、米国防総省のRD&E制度がもつ機能を明らかにする。

米国防総省のRDT&Eの制度は、軍事予算でありながら、科学技術予算でもあり、技術が注目を集めて予算が拡大するときも、実用化に向けた研究だけではなく基礎研究に資源を割くことができ、また、軍事利用に至っていない技術であっても、他の研究開発の枠組みのなかで基礎研究を続けることができる、柔軟性のある制度であり、技術「保存」機能を有するものであると考えるに至った。

第1章 新興技術の研究、開発、試験及び評価

本章のはじめに

超電導現象は、1911年、オランダ、ライデン大学の物理学者、カマリン・オンネス(Heike Kamerlingh Onnes)により発見された²²。詳しくは第2章で述べるが、米国防総省が超電導の研究開発を開始した1940年代後半には、現象としての超電導は知られていたものの、超電導を用いた技術はまだ存在しておらず、当時、超電導技術は、現在でいうところの新興技術であった。その新興技術に、米国防総省はどのように向き合い、取り組んでいったのであろうか。本章では、新興技術の研究開発がどのような特徴を有するのか、米国防総省における研究、開発、試験及び評価(Research, Development, Test and Evaluation: RDT&E)の制度運用が超電導の研究開発にどのように関係したのか、また、RDT&E制度はいかにしてその能力を備えたのかを踏まえて考察する。

第1節 研究、開発、試験及び評価という用語

「研究開発」(Research and Development: R&D)という表現は、一般用語といって差し支えないであろうが、「研究、開発、試験及び評価」(Research, Development, Test and Evaluation: RDT&E)という表現は、一般用語とは言い難い。この表現は、国防総省歳出法(Department of Defense Appropriations Act)のタイトルIV(Title IV)で用いられている。

タイトルIVは、同法の第4条に相当し、その表題(タイトル)がResearch, Development, Test and Evaluationである。なお、この「研究、開発、試験及び評価」という表現は、1959年に成立した、1960年度の国防総省歳出法²³の

²² 田中昭二「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」『応用物理』69巻8号、2000年、940-941頁。なお、オンネスは、1913年、「とりわけ液体ヘリウムの生成につながった、低温での物質の特性に関する彼の研究」に対して、ノーベル物理学賞を受賞している。

²³ 正式な名称は、AN ACT Making appropriations for the Department of Defense for the fiscal year ending June 30, 1960,

タイトルIVで初めて用いられた²⁴。

1960年度の国防総省歳出法は、その前年度の、1959年度の国防予算歳出法²⁵から条文構成が大きく変わっていた。1959年度の国防予算歳出法では、「タイトルI 国防長官局」、「タイトルII 軍部間活動」、「タイトルIII 陸軍省」、「タイトルIV 海軍省」、「タイトルV 空軍省」、「タイトルVI 一般規定」となっており、この内、タイトルIII 陸軍省、タイトルIV 海軍省、タイトルV 空軍省のそれぞれの中に、研究開発のサブタイトル(項に相当)があった。

それに対し、1960年度の国防予算歳出法では、「タイトルI 軍人」、「タイトルII 運用と保守」、「タイトルIII 調達」、「タイトルIV 研究、開発、試験及び評価」、「タイトルV 一般規定」となっており、タイトルIV 研究、開発、試験及び評価の中に、各軍の研究、開発、試験及び評価のサブタイトルがあった。タイトルIV 研究、開発、試験及び評価のサブタイトルをより詳しく説明すると、「陸軍の研究、開発、試験及び評価」、「海軍の研究、開発、試験及び評価」、「空軍の研究、開発、試験及び評価」、「国防総省高等研究計画局の給与及び経費」、「国防総省の緊急基金」となっている。1960年度の国防総省歳出法案の作成に当たり、それまでの組織別の条文構成から、内容別の条文構成に変更していた。また、1959年度の国防総省歳出法の、タイトルII 軍部間活動の、サブタイトル 緊急基金の文中に、それまでの国防総省歳出法には用いられていなかった、「研究、開発、試験及び評価」という表現が用いられている。

これらのことから、米国防総省において研究開発と試験そして評価は一体のものであるという考え方、すなわち「研究、開発、試験及び評価」という括りは、1959年度の国防総省歳出法の条文中にて初出し、1960年度の国防総省歳出法からタイトルの名称として用いられたということが分かった。

その後、タイトルV(1970年度～1973年度)、タイトルII(1974年度)、再びタ

and for other purposes(1960年6月30日に終了する会計年度およびその他の目的のために国防総省に予算を充当する法律)。

²⁴ なお、この時は、Research, Development, Test, and Evaluation と、Test のあとにカンマ(,)が付いていた。また、現在も、国防権限法においては同様に、Research, Development, Test, and Evaluation と表記されている。

²⁵ 正式な名称は、AN ACT Making appropriations for the Department of Defense for the fiscal year ending June 30, 1959, and for other purposes(1959年6月30日に終了する会計年度およびその他の目的のために国防総省に予算を充当する法律)。

イトルV(1975年度～1984年度)で用いられ、1984年に成立した1985年度の国防総省歳出法からはタイトルIVで用いられている²⁶。

本稿において、以下、他省との比較などのため、あるいは一般的な用語として、「研究開発」と記載することがあるが、その場合も、米国防総省において趣旨は「研究、開発、試験及び評価」である。

第2節 米国防総省が行う研究、開発、試験及び評価の対象

米国防総省は国防を担う国家機関である。その活動は、毎年度、連邦議会による国防授權法²⁷により承認され、そしてその予算は、第1節にも示したように、同じく毎年度、連邦議会による国防総省予算歳出法により承認される必要がある。その結果、当然ながら、米国防総省が行う研究、開発、試験及び評価の対象となるものは、国防に関連するものになる。

例えば、戦闘機の開発であれば、国防に関連するということは分かりやすい。一方、基礎研究となると、ひとつひとつの研究課題が国防に関連するものかは、一般的には自明ではなく、米国防総省が行う研究、開発、試験及び評価の対象とするためには、それが国防に関連するものであると意図的に結び付ける必要がある。

既存の自然現象や基礎技術であれば、実現のしやすさはともかく、国防における用途を想定することができれば、国防に関連するものと位置付けることは可能である。一方、過去には知られていなかった自然現象や、過去には使われていなかった技術となると、国防における用途を想像することは一般的には困難で、それを国防に関連するものと位置付けることもまた困難である。

過去には使われていなかった技術には、存在はしたが使われていなかった技術と、新たに出現した、いわゆる新興技術があると考えられるが、これらの技術に国防と関連する可能性—それは自国に限らず、他国においても—が

²⁶ 米国防総省のウェブサイト(<https://www.congress.gov/>)を基に筆者調べ。

²⁷ 国防授權法は、国防省、エネルギー省の国防関係原子力プログラム、その他の連邦政府の国防関係組織の運営や、活動、施策等に法的根拠を与え、歳出予算法の立法を承認(授權)するものである。あわせて、予算額の上限や指標を提示し、予算の使用目的や使用額の制限等も規定する。1961 会計年度以来、毎会計年度成立してきた。“History of the NDAA: The National Defense Authorization Act (NDAA), FY1961-2017.” United States House of Representatives Committee on Armed Services.

考えられるのであれば、国防と結び付けて、研究、開発、試験及び評価の対象とする必要がある。そうすると、新興技術とはどのようなものであるかということが次の要点となる。

第3節 新興技術

1 新興技術の定義

新興技術の軍事利用を論ずる前提として、まず、新興技術とはどのようなものであるかを明確にしておく必要がある。米国における科学技術政策の基礎となったのは、第94回連邦議会（1975年～1976年）で可決された「国家科学技術政策、組織および優先法（National Science and Technology Policy, Organization, and Priorities Act）²⁸」である。この法律では、連邦政府の科学技術への投資は、「（1）自然資源と人的資源の保全と効率的な利用の促進」、「（2）海洋および沿岸地域の保護」、「（3）経済を強化し、完全雇用の促進」、「（4）食料、資材、エネルギーの適切な供給の確保」、「（5）医療の質の向上」そして「（6）国の住宅、交通、通信システムの改善」を含む国家の優先ニーズに対処しなければならないことが国家政策であると宣言している。この段階では、科学技術政策に国防の観点は入っていなかった²⁹。

同法は、第101回連邦議会（1989年～1990年）で可決された「1990・1991年度の国防権限法（National Defense Authorization Act for Fiscal Years 1990 and 1991）」において、科学技術政策局（Office of Science and Technology Policy: OSTP）に、隔年国家重要技術報告書（Biennial National Critical Technologies report）を作成するための国家重要技術委員会（National Critical Technologies Panel）」を設置するよう改正された。「1990・1991年度の国防権限法」では、あわせて、国防産業基盤局（Defense

²⁸ 正式には、An Act to establish a science and technology policy for the United States, to provide for scientific and technological advice and assistance to the President, to provide a comprehensive survey of ways and means for improving the Federal effort in scientific research and information handling, and in the use thereof, to amend the National Science Foundation Act of 1950, and for other purposes

²⁹ <https://www.congress.gov/bill/94th-congress/house-bill/10230?q=%7B%22search%22%3A%5B%22National+Science+and+Technology+Policy%2C+Organization%2C+and+Priorities+Act%22%5D%7D&s=9&r=2>

Industrial Base Office) に対し、国家安全保障のニーズを満たす米国の防衛産業基盤の能力を分析するよう要求し、また、米国の防衛産業基盤を改善するために講じられた措置について軍事委員会 (Armed Services Committees) に報告するよう、調達担当国防次官を通じて国防長官に指示している。ここから、米国の科学技術政策に国防の観点加わった³⁰。

第101回連邦議会では、並行して、「アメリカ技術優位法 (American Technology Preeminence Act)」が下院で可決されている。同法のタイトルII である「先端技術プログラム改正 (Advanced Technology Program Amendments)」は、「1990年の新興技術研究開発法 (Emerging Technology Research and Development Act of 1990)」とも呼ばれている。その目的として、「(A) 先端技術の開発並びに民生用の製品、プロセス及び役務への当該技術の汎用的な適用を広く促進し及び支援する」ことの次に、「(B) 米国の経済的福祉と国家安全保障を促進する実質的な可能性を秘めた高解像度情報システムや先端材料を含む新興技術に関する企業や学術機関による研究開発を支援することにより、米国の産業の競争力を向上させる」ことを挙げている。このことから、新興技術 (Emerging Technology) には国家安全保障を促進する可能性のある技術を含んでいることが分かる。しかし、これは上院では否決されて法律には至らなかった³¹。

そして、第102回連邦議会 (1991年～1992年) で可決された「1991年の国家重要技術法 (National Critical Technologies Act of 1991)」は、「1976年の国家科学技術政策、組織および優先法」を改正し、軍民両用重要技術 (dual-use critical technologies) の研究開発を奨励し、提供するために国防軍民共用技術パートナーシップとして知られる協力協定を結ぶよう国防長官に指示している。この法律で、重要技術 (critical technologies) は、「米国の長期的な国家安全保障または経済的繁栄を促進するために米国が発展するために不可欠 (essential for the United States to develop to further the long-term national security or economic prosperity of the United States)」な

³⁰ <https://www.congress.gov/bill/101st-congress/house-bill/2461?q=%7B%22search%22%3A%5B%22cite%3APL101-189%22%5D%7D&s=1&r=1>

³¹ <https://www.congress.gov/bill/101st-congress/house-bill/4329?q=%7B%22search%22%3A%5B%22emerging+%26+technology%22%5D%7D>

ものとして示されている³²。

2020年10月15日、ホワイトハウス(米国大統領行政府)が「重要・新興技術国家戦略(National Strategy for Critical and Emerging Technologies)」を公表した³³。それによると、「この戦略の目的上、重要・新興技術(Critical and Emerging Technologies: C&ET)は、国家安全保障会議(NSC)によって、軍事的、諜報的、経済的優位性を含む米国の国家安全保障上の優位性にとって重要である、または重要になる可能性がある」と特定および評価された技術として定義される」とあり、国家安全保障に関する技術であることが要点である。

以上のように、米国において法律や指針において「新興技術(Emerging Technology)」として定義されたものはない。しかし、「重要・新興技術」が、新興技術を含有する概念であり、また、本研究では、将来の軍事技術に着目していることから、本稿では、「新興技術」を、「軍事的、諜報的、経済的優位性を含む米国の国家安全保障上の優位性にとって重要である、または重要になる可能性がある」と特定および評価された技術の内、比較的新しいもの」と定義し、2020年の「重要・新興技術国家戦略」が発表される以前にも適用して使用することとする。

2 新興技術の研究開発の特徴

新興技術の研究開発は、既存技術の研究開発と比較して、どのような特徴があるのか。

先行研究によると、研究開発には、大きく分けて、「ニーズプル型の研究開発」と「シーズプッシュ型の研究開発」とに分けられるという。文部科学省科学技術・学術政策研究所の資料によると、「ニーズプル型の研究開発」とは、事業上のニーズや顧客ニーズなど、技術に対する特定のニーズに牽引されるような研究開発を指し、「シーズプッシュ型の研究開発」は、萌芽的な技術を発展させる場合のような、技術主導で進められる研究開発を指す、とある。

³² <https://www.congress.gov/bill/102nd-congress/senate-bill/1327?s=1&r=1>

³³ *National Strategy for Critical and Emerging Technologies*, The White House, Washington, DC (October 2020).

同研究所の調査結果によると、企業の研究開発投資では、「ニーズプル型の研究開発」は「シーズプッシュ型の研究開発」の約2.5倍となっているという³⁴。

また、新製品や新工程などのイノベーションの決定要因については、新たな技術シーズの出現を重視する「テクノロジー・プッシュ」仮説と、市場ニーズへの対応を重視する「デマンド・プル」仮説が伝統的な対立仮説として知られているが、同研究所の調査結果によると、「デマンド・プル」仮説にやや有利なエビデンスになっているという³⁵。

一方、別の先行研究で、岩間仁によると、製品開発の成功要因がデマンド・プルによるものか、あるいはテクノロジー・プッシュによるものかは、どちらか一方方向で決まるものではなく両者の相互作用が重要であり、その相互作用はシーズ側とニーズ側との対話を通じてなされるが、ニーズとシーズをマッチさせて効果的な製品コンセプトを創造するというプロセスがほとんど未開拓の状態にあるという。そこで、岩間は日本語ワープロなどを事例にして、「ニーズとシーズは相互に影響を与えながら顧客価値を創造し、また顧客価値が逆にニーズやシーズに影響を及ぼすというフィードバック関係をもつ」こと、また、「製品イノベーションを駆動する要因には、従来捉えられてきたニーズプルやシーズプッシュまたは両者の相互作用だけでなく、顧客価値としてのビジョン・製品コンセプト・モデル・製品などによる、顧客価値ドリブンと言える新たな駆動要因が存在する」こと、さらに、「斬新な製品コンセプトに伴うマイナス面が社内関係者に認識されると、その関係者による社内抵抗が発生しやすく、そしてその社内抵抗は、実物に近いモデルを見たり操作したりすることでマイナス面の認識が解消し沈静化していき、また、製品イノベーションのマクロな類型によって、社内抵抗の鎮静化の仕方が異なる」ことを発見した³⁶。シーズとニーズは技術の進展とともに徐々に融合していくものであり、その融合を促進することは可能であるが、阻害要因も存在するというを示している。

これらを踏まえ、新興技術、中でも軍事利用が想定される技術の研究開

³⁴ 「民間企業の研究活動に関する調査報告 2019」、NISTEP REPORT, No.186、文部科学省科学技術・学術政策研究所。 <http://doi.org/10.15108/nr186>

³⁵ 「民間企業の研究活動に関する調査報告 2020」、NISTEP REPORT, No.191、文部科学省科学技術・学術政策研究所、2021。 <https://doi.org/10.15108/nr191>

³⁶ 岩間仁「製品イノベーションにおける、ニーズとシーズの融合と顧客価値創造のメカニズムの研究」博士論文、横浜国立大学、2008年。

発の特徴について考察する。軍事利用される技術のニーズといえば、究極的には、軍の軍事的なニーズである。作戦に必要なニーズから、軍事装備品や軍事用サービスの技術的な仕様が決まる。

一方で、シーズは、軍の研究所にある場合もあれば、大学や企業など軍の外部にある場合も、さらには複数の機関に分散して存在する場合もある。既存技術であれば、そのシーズがどこまで適用可能であるのかという技術的な限界や制約を軍が把握した上でのニーズの掘り起こし、あるいは、ニーズに対してシーズがどこまで対応可能であるかという、現実的なすり合わせ（マッチング）が可能であるのに対し、新興技術は、技術自体が出てきたばかりであり、そのシーズの技術的な限界や制約がどこまでか、軍も、技術を提供する側もわからないまま、シーズとニーズのすり合わせ（マッチング）をする、あるいは新たなニーズを掘り起こすことになる。そのため、高温超電導体の発見が「室温超電導」の夢を見させたように、後から考えれば過剰とも言える期待がなされ得る。そして、期待が大きければ大きいほど、期待が外れたときの落胆は大きくなる。研究開発の観点からすると、どこに道があるのかも、どこまで行けるのかもわからないまま研究開発を進めることとなる。これは、自然法則を利用する「技術」ではなく、自然法則を明らかにする「科学」の領域ではなかろうか。「ステルス」、「全地球測位システム（GPS）」、「インターネット」は、かつての新興技術であり、そして、シーズとニーズが適切に折り合って実用に至ったものであると言える。それに対して、高温超電導もまた、かつての新興技術と言えるが、軍事的に多用されてはいない。それらの違いは何であったのかを、本研究で明らかにしていく。

3 新興技術のライフサイクル

技術を比較するためには、まず、それぞれの技術の特性を明らかにする必要がある。現実として、日々、さまざまな技術が生まれる一方で、一つ一つの技術はやがて消えていく。新しい技術と古い技術、あるいは、長く使われる技術とすぐに使われなく技術は、常に混在している。超電導技術の特性を考えるうえで、新興技術の特性とはいかなるものであろうか。

技術の特性を表すためのひとつの手法として、マーケティングの分野における、プロダクト・ライフサイクルと呼ばれる、製品やサービスの売上と利益の変遷を4つの段階（導入期、成長期、成熟期、衰退期）で説明するモデル³⁷が参考になる。プロダクト・ライフサイクルは、製品やサービスを対象とするモデルであるが、これを、技術を対象とするモデルに援用することにより、技術の特性を表すことができると考える

科学的な発見は、シーズとなり得る。そして、シーズは、プロダクト（製品やサービス）に導入され得る。しかし、やがて他のシーズに置き換わる、あるいはプロダクトが使われなくなってシーズも使われなくなり得る。その変遷の速さやプロダクトの市場規模は技術によって異なり、そこに技術の特性が現れる。

そこで、新興技術のライフサイクルについて考える。「高温超電導ブーム」が起きた超電導も、ブーム以前の、低温超電導の研究開発が行われていた時代を含めて考えれば、突然の出現とは言えない。新興技術のライフサイクルとはどのようなものであろうか。また、新興技術の研究開発において、米国防総省の研究、開発、試験及び評価（RDT&E）の制度運用の様式は、どのように作用するのであろうか。新興技術のライフサイクルと米国防総省のRDT&E制度との関係について考えてみる。

まず、プロダクト・ライフサイクルを詳解する。プロダクト・ライフサイクルは、マーケティングという学問の黎明期である1950年にジョエル・ディーン（Joel Dean）が提唱した理論で、製品が市場に投入されてから、寿命を終え衰退するまでのサイクルを体系づけたものである。プロダクト・ライフサイクルでは、その4つの段階を次のように説明する。

- ・ 導入期： 製品を市場に投入する段階であり、需要も小さく売上も大きくない。製品開発費がかかるだけでなく、製品認知を高め、市場拡大させることが最優先課題であり、広告宣伝費もかかるため、利益はほとんど出ない。
- ・ 成長期： 売上と利益が急拡大する段階で、競合他社も増加する。消費

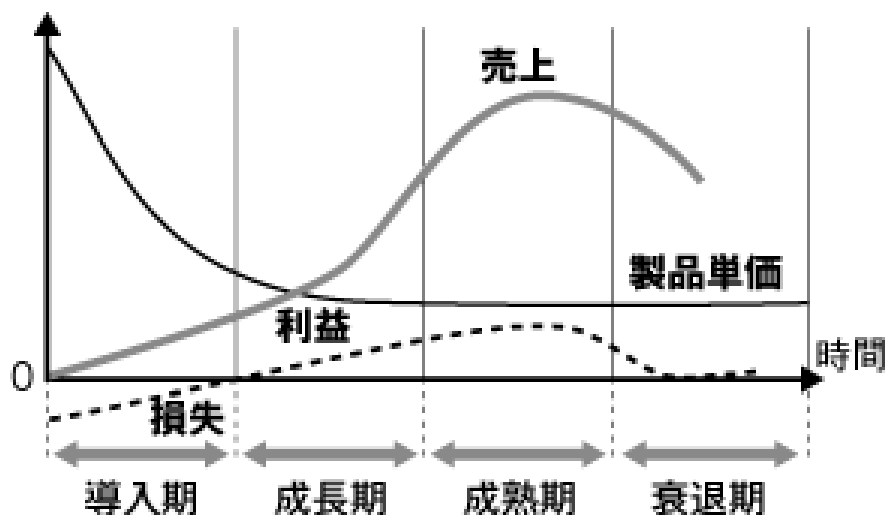
³⁷ 「プロダクト・ライフサイクル」用語解説『ナレッジ・インサイト』野村総合研究所、<https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/ha/product>（2023年8月30日閲覧）。

者ニーズも多様化するため、製品改良や差別化戦略を重視し、自社製品のブランド力を高め、市場に浸透させることが重要な戦略となる。

- ・ 成熟期： 市場の成長が鈍化し、売上、利益とも頭打ちになる段階。上位企業にとってはコスト優位性を活かしシェアを維持することが重要な課題で、下位企業にとっては生き残りをかけ、特定ターゲットをねらったニッチ戦略が重要になる。
- ・ 衰退期： 値引き競争が頻繁に行われ、売上も利益も減少する時期。投資を抑えて効率性を高めながら、既存顧客を維持することが重要な課題になる。また、ブランドの残存価値を他の製品に活用したり、撤退時期を判断することも重要である。

プロダクト・ライフサイクルの概念を図にすると図1のように表される。

図1 プロダクト・ライフサイクルの概念図



出典：野村総合研究所のウェブサイト、<https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/lst/ha/product>

これを、技術に拡張する研究³⁸もあるが、それはあくまでプロダクト・ライフサ

³⁸ 菅澤喜男「イノベーションの源泉—製品・技術のライフサイクル分析と必要なインテリジェンス—」第6回『連載 情報の価値とインテリジェンス』情報システム学会 メールマガジン、2011.1.1 No.05-09 [12]、<https://www.issj.net/mm/mm0509/mm0509-c-sg.pdf>(2023年8月30日閲覧)。

イクルの範疇にあって、4つの段階（導入期、成長期、成熟期、衰退期）の記載は、プロダクト・ライフサイクルのものとはほぼ同じである。

では、これを新興技術、特に本研究は米国防総省に焦点を絞っていることから、中でも軍事技術に援用するとどのようなものになるであろうか。まず、製品から技術に焦点を移すには、プロダクト・ライフサイクルにおいて「製品が市場に投入される」という第一段の部分を、「技術が製品・サービスに投入される」というレベルに、一段下げたところから始める必要があり、ひいては、これに伴い、全体的に一段下げる必要があると考える。また、軍事的に求められる製品・サービスは、民間で求められるものとは異なるところがあって、米国防総省のRDT&Eが対象とする軍事技術の市場とは、基本的には米軍による調達であり、それに外国への輸出（外国の軍への有償または無償の供与）が加わる。さらに、民需では、同様の製品・サービスを複数の企業が競って提供するのに対し、軍需では、基本的に、一つの製品・サービスを提供するのは一社である。これらを踏まえて、新興技術のライフサイクルと、その各段階において米国防総省のRDT&Eがどのように作用し得るかをまとめると、次のようになると考える。

- ・ 導入期： 大学、国立研究所、企業、また軍の研究所において、新興技術のシーズが散発的に発生する段階で、その研究成果は主に学術的な報告としてなされる。米国防総省のRDT&Eとしては、新興技術のシーズを持つ者に対し、主に基礎研究、一部、応用研究に対する少額の資金を提供し、シーズがどのような、軍事的に有用な装備品やサービスに適用できるか、その可能性を示させることが要点となる。並行して、軍としては、その新興技術に対する具体的な軍事的ニーズを掘り起こすとともに、その新興技術によりもたらされる具体的な脅威も研究する。
- ・ 成長期： 新興技術の具体的な性能、少なくとも軍事的なニーズを満たせる性能が見えてきて、シーズとニーズをすり合わせ、具体的な軍事装備品や軍事用サービスを想定し、技術をシステム化していく段階。米国防総省のRDT&Eとしては、資金の提供先は主に企

業となり、提供する資金の規模は高額なものとなる。複数の企業が、技術のシステム化とその実証を競う。米国防総省のRDT&Eの対象は、ここまで。

- ・ 成熟期： 新興技術が軍事装備品や軍事用サービスに取り入れられ、米軍による調達、あるいは外国の軍への提供が行われている段階。
- ・ 衰退期： 新たな技術の出現による陳腐化や、軍事予算の制約などの理由により、米軍による新たな調達、あるいは外国の軍への提供が行われなくなる段階。

プロダクト・ライフサイクルが、市場に投入されて一定の売り上げがあった、いわば、基本的には成功した製品のライフサイクルのモデルであるように、この新興技術のライフサイクルも、軍事装備品や軍事的サービスに取り入れられた、基本的には成功した技術のライフサイクルのモデルであると言える。そこで、超電導技術をこのモデルに当てはめてみようとすると、詳しくは第3章にて示すが、ここでいう新興技術の成熟期にあたる軍事装備品や軍事的サービスの実例は、ほとんど見られない。超電導技術は、軍事的なニーズを満たせていないとは言えるが、では、失敗であったと言って良いのであろうか。

ここで別のモデルを引き合いに出す。IT分野を中心とした調査・助言を行う米国の企業であるガートナー(Gartner, Inc.)は、新たに登場した技術に過剰な期待が寄せられている状況の中で、それがハイプ(hype: 過剰な期待)なのか実用化が可能なものなのか、投資を回収できるとしたらそれはいつになるのかを見極めるべく、技術とそのアプリケーションの成熟度と採用状況、および技術とそのアプリケーションが実際のビジネス課題の解決や新たな機会の開拓にどの程度関連する可能性があるかをハイプ・サイクルとして表しており、それによると、技術ライフサイクルには次の5つの重要なフェーズがあるとしている。

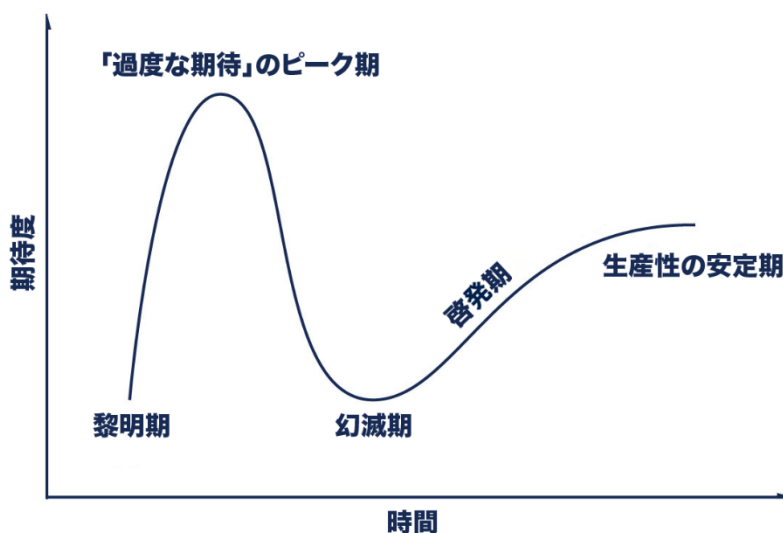
- ・ 黎明期： 潜在的技術革新によって幕が開く。初期の概念実証(POC)にまつわる話やメディア報道によって、大きな注目が集まる。多くの場合、使用可能な製品は存在せず、実用化の可能性は証明さ

れていない。

- ・ 「過度な期待」のピーク期： 初期の宣伝では、数多くのサクセスストーリーが紹介されるが、失敗を伴うものも少なくない。行動を起こす企業もあるが、多くはない。
- ・ 幻滅期： 実験や実装で成果が出ないため、関心は薄れる。技術の創造者らは再編されるか失敗する。生き残ったプロバイダーが早期採用者の満足のいくように自社製品を改善した場合に限り、投資は継続する。
- ・ 啓発期： 技術が企業にどのようなメリットをもたらすのかを示す具体的な事例が増え始め、理解が広まる。第2世代と第3世代の製品が、テクノロジー・プロバイダーから登場する。パイロットに資金提供する企業が増える。ただし、保守的な企業は慎重なままである。
- ・ 生産性の安定期： 主流採用が始まる。プロバイダーの実行存続性を評価する基準がより明確に定義される。技術の適用可能な範囲と関連性が広がり、投資は確実に回収されつつある。

ハイプ・ライフサイクルの概念を図にすると図2のように表される。

図2 ハイプ・サイクルの概念図



出典: ガートナー日本のウェブサイト、<https://www.gartner.co.jp/ja/research/methodologies/gartner-hype-cycle>

「過度な期待」や「幻滅」といった辛辣な表現もあって、特にそこに位置付けられる技術の関係者にとっては批判もあろうが、超電導技術のライフサイクルを考える上では一定の参考になると考える。

第4節 超電導技術の事例

これまでに見てきたモデルとそのアイデアを援用し、超電導技術のライフサイクルとして、序章にて示した「草創期」、「超電導ブーム期」、「冷却期」、「平衡期」のそれぞれの段階で、米国防総省のRDT&Eの制度運用がどのように関係したのかを考察する。

【草創期】

まずは草創期であるが、技術の草創期においては、ニーズがあったとしても、そのニーズを満たすことは難しく、逆に、ニーズがないとすると、ニーズの掘り起こしをしなければ、シーズを生かす用途がないという状況と言える。このとき、米国防総省のRDT&Eがすることといえば、シーズの魅力を高めること、そして、ニーズの掘り起こしと考える。ニーズの魅力を高めるということは、ニーズを持つ側にとって魅力のある用途を示すことであり、一方で、ニーズを掘り起こすということは、そのニーズを満たすシーズを作り出す布石となり、これらはコインの表裏のような関係にあるといえる。ニーズの先には、それを満たす製品を提供する企業が必要となることから、将来、製品提供で重要になる企業には、この草創期から関わっておくことが要点となろう。

超電導の場合はどうであったか、振り返って考えてみると、カマリン・オンネスが超電導を発見した1911年から、海軍が超電導の研究開発を始める1946年まで、30年以上あるが、この間、少なくとも軍事的には、関心のある対象ではなかったか、あるいは、手を出したくても戦争でできなかったのか、いずれにしても米国防総省として研究開発は行っていない。それが、第二次世界大戦の終結後、軍事的な関心事になっていくのであるが、まず特徴的なのは、海軍も陸軍も、空軍が設立されてからは空軍も、いずれも、基礎研究を行って

いるということである。

海軍は、軍の研究所、特に海軍調査研究所(NRL)において、物性研究に力を入れている。陸軍は、イリノイ大学に委託して、超電導の基礎理論、後のBCS理論の構築に寄与している。イリノイ大学やマサチューセッツ工科大学には軍が管理する研究所があり、軍と大学との関係は密接である。基礎研究を行える研究所が軍にあり、また、軍が管理する研究所が大学にあり、技術になる前の科学の段階から軍が研究開発を行うのは、米国においては自然なことであったと考える。

陸軍、海軍、空軍は、軍が管理する大学の研究所において三軍共同での研究支援を行う一方、各軍それぞれに独自で、あるいは外部の機関を支援する形で研究開発を行っていた。陸軍、海軍、空軍で異なったのは、シーズを求めるにあたっての軍の内部と外部の比重と考える。陸軍と空軍は、軍の研究所で研究を行う一方で、外部の大学や企業にもシーズを求めていたようであるのに対し、海軍は、主に海軍の研究所でシーズを持とうとしていたようである。その背景としては、海軍には、陸軍や空軍と比べて、より明確なニーズがあったためと考える。機雷の探知や、海の中の潜水艦との超長波を利用した通信には、超高感度のセンサーが必要であった。また、艦艇の電動化には大出力の発電機／モーターが必要であった。

先行研究によれば、第二次世界大戦後は、原子力の平和利用やロケットの宇宙開発への応用、コンピューターなど、軍事技術のスピンのオフが積極的に進められていた³⁹。超電導技術のスピンのオフの実例を挙げるとすると、現在、実用されている超電導電磁石と、超電導量子干渉計(SQUID)が考えられるが、それは、実用化された超電導技術のほぼすべてと言える。超電導電磁石の主要な構成要素である超電導電線にも、超電導量子干渉計(SQUID)の主要な構成要素であるジョセフソン素子にも、軍の研究開発資金が投入されていたことについては、第2章にて詳述する。

【超電導ブーム期】

³⁹ 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』第88巻第6号、2018年、647頁。

1986年に高温超電導が発見されると、超電導の研究開発の環境が一変する。各省庁が高温超電導の研究開発の予算獲得に動くが、1980年代の米国では、レーガン政権(1981年～1989年)が行ったレーガノミクスとよばれる経済政策による大規模減税と軍事費増大で財政収支が悪化していた。

米国防総省は、陸海空軍の研究所、国防高等研究計画局(DARPA)、戦略防衛構想機構(SDIO)などから人を集めてアド・ホックの作業グループを急ぎ立ち上げ、各軍で行っていた低温超電導の研究開発を寄せ集め、1987年7月には調査報告書 *Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) Options: A Study of Possible Directions for Exploitation of Superconductivity in Military Applications* (国防総省超電導研究開発(DSRD)オプション: 軍事用途における超電導利用の可能な方向性の研究)を取りまとめ、予算獲得に動いたが、各省庁が単独で動いたのでは予算獲得は難しい状況にあったと考える。

米国では、各省庁の予算は各省庁の歳出法を制定することにより定められるため、通常であれば独立して予算要求がなされるどころ、超電導の研究開発に関しては、大統領が「11点の超電導イニシアチブ」を発表し、それに基づく形で各省庁が予算を要求するという方式を取った。政府全体で特定の研究開発に取り組む、この「イニシアチブ方式」は、おそらくは超電導が初めてで、のちの「国家ナノテクノロジー・イニシアチブ」、「ブレイン・イニシアチブ」、「国家量子イニシアチブ」につながったと推察する。

米国防総省のRDT&E制度の運用の観点からすると、予算の拡大を実現できたこの時期には、それまでに培ったシーズをもとに、軍事利用に向け、ニーズを具体化して研究開発を加速する時期と考えるところである。しかし、実際のところは、新たに発見された高温超電導体はまだわからないことが多く、高温超電導体を対象とする基礎的な物性研究に資源が割かれた。

また、それまでの、いわゆる低温超電導体が合金や金属間化合物であったのに対し、高温超電導体は酸化物、つまりはセラミックスであることから、線材の加工方法も基礎研究から進めることとなった。さらには、高温超電導体が発見されるまではBCSの壁とよばれた30ケルビン程度が臨界温度(T_c)の上限と考えられ、技術的な仕様は其中で考えられていたが、高温超電導体

が断続的に発見され、臨界温度 (T_c) の記録が塗り替えられていくと、「もっと高温」、「もしかすると室温まで」という期待が高まった。

一方で、この時期には、民生技術の軍事技術へのスピンのオンが進んでおり、シーズを求め、多くの資金が大学や企業に提供された。また、バイ・ドール法により、国からの委託研究開発で生じた特許は受託者である大学や企業が所有できるようになっており、シーズの所有権 (オーナーシップ) が軍から大学、企業といった民間へと移ることにより、シーズの所有者が増えた時期でもある。

【冷却期～平衡期】

軍事予算も国会の承認を得なければならない公的資金である以上は、同じことにいつまでも資金を出し続けることは難しく、そしてそれは、投入した資源に対して期待した成果が得られなければ、なおさらである。「11点の超電導イニシアチブ」、さらには「1988年の国家超電導及び競争力法」を背景として資金を投入し、また、室温超電導の可能性まで考えられた超電導技術の研究開発が連邦議会で厳しい目にさらされたことは容易に想像される。折しも、冷戦の終結で「平和の配当」が政治的なスローガンとなっており、軍事予算は削減されていた。また、日本経済の失速で、競争力を訴える必要性が低下していた。超電導技術の研究開発のための予算は、減少していった。

そのような中、米国防総省のRDT&E制度の運用の観点からすると、シーズは大学や企業に蓄積されていることから、基礎研究を削減して、軍事的なニーズに応じたアプリケーションの開発に重点を移していった。実際に軍事装備品に用いられたことが確認できた超電導技術は、海軍艦艇の消磁システム (degaussing system) のみであるが、機雷掃海システムや高出力モーターなど、実用に近いところまで来ているものもある。

一方で、削減された超電導の基礎研究についても、「国家ナノテクノロジー・イニシアチブ」、さらには「国家量子イニシアチブ」の下、「ナノテクノロジー」や「量子」という、超電導のイニシアチブとは異なる枠組みのなかで脈々と続いている。

第5節 RDT&E制度のレジリエンシー(弾力性)

研究開発ではすべてが計画のとおりとはいかない。可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術の研究開発を継続することは、硬直的な制度運用をしていたのでは困難である。その点、米国防総省による超電導技術の研究開発は、具体的な軍事利用がほとんどなされないまま、70余年にわたって継続している。米国防総省のRDT&E制度は、研究開発の不安定性に対してどれだけ弾力的な対応ができるのか、それはどのようにして備わったのか、その歴史から推察する。

研究、開発、試験及び評価という一つのまとまった概念が導入されたのは、前述のとおり、1960年の国防総省歳出法であった。その後、1995年に、国家科学技術評議会の国家安全保障委員会が「国家安全保障科学技術戦略」を策定したことにより、RDT&E制度に転機が訪れる。同戦略の要素の一つには、「基礎研究と応用技術を両立させ、技術の進歩を追求する：今日の基礎研究は、明日の革新的な開発の基礎を築く。最大限の選択肢を可能にし、技術的なサプライズを回避するためには、基礎研究レベルでリソースを幅広く適用し、新興技術が最も期待できるペイオフの分野を明らかにするにつれて、さらなる投資決定を行う必要がある⁴⁰」とあった。同戦略により、国家安全保障に科学技術 (Science and Technology: S&T) の文脈が加わった。

また、同戦略では、国防総省科学技術プログラムを作成し、同プログラムは、「基礎研究 (basic research)」、「探索的開発 (exploratory development)」、「先端技術開発 (advanced technology development)」の三つのカテゴリーに分類されるとした。基礎研究は、「科学の知識と理解を深めようとする科学技術プログラムの要素である。それは将来の技術的優位性の基礎となる基盤である」と記載している。米国防総省の基礎研究プログラムを構成する12の研究分野を表1に示す。

⁴⁰ *The National Security Science and Technology Strategy*, Committee for National Security, The White House, Washington, DC (1995).

表1 米国防総省の基礎研究プログラムを構成する研究分野

◆大気宇宙科学 ◆生物学・医学 ◆化学 ◆認知科学・神経科学 ◆コンピューター科学
◆エレクトロニクス ◆物質科学 ◆数学 ◆機械学 ◆海洋科学 ◆物理学 ◆陸地科学

出所: *The National Security Science and Technology Strategy*, Committee for National Security, The White House, Washington, DC (1995). を基に筆者作成。

他の二つのコンポーネント、探索的開発と先端技術開発は、「防衛技術プログラム」を構成する。このプログラムは、表2にリストされている19の技術分野を中心にしている。

表2 米国防総省の防衛技術プログラムの中心となる研究分野

◆航空宇宙の推進力・動力 ◆航空機・宇宙船 ◆戦闘空間環境 ◆生物医学アプリケーション
◆化学・生物学防衛 ◆個人の生存可能性・持続可能性 ◆司令・統制・通信
◆計算・ソフトウェア ◆通常兵器 ◆エレクトロニクス ◆電子戦・指向性エネルギー兵器
◆環境品質・土木工学 ◆ヒューマン・システム・インターフェース ◆製造科学技術
◆マンパワー・人材・訓練 ◆材料・加工・構造 ◆モデリング・シミュレーション ◆センサー
◆水上艦艇／潜水艦・地上車両

出所: *The National Security Science and Technology Strategy*, Committee for National Security, The White House, Washington, DC (1995). を基に筆者作成。

探索的開発プログラムは、「モデルと実験室実験を中心に構築された概念実証実験と評価を提供」し、高度な技術開発プログラムは、「必要な軍事力を提供する上での技術的進歩の有効性を評価」する。全体として、「プログラムを構成する三つのコンポーネントは、研究開発フェーズの明確な区別がもはや適用されないため、相互に高度に関連する」と記載している⁴¹。

さらに、同戦略では、「防衛科学技術プログラムは、軍事サービスと防衛機関によって計画および実施」されるとある。陸軍、海軍、空軍の各省は、「軍隊を訓練して装備し、S&Tプログラムを使用して、サービスコンポーネントに戦闘オプションを提供する」、また、「プログラム全体の特定のサービス横断的な側面に責任があり、国家安全保障の目的を支援するために指定されたプログラムを実行する」としている。一方、高等研究計画局は、「画期的な技

⁴¹ *The National Security Science and Technology Strategy* (1995).

術の探求と、防衛と商用の両方のアプリケーションがあるため、デュアルユースと呼ばれる技術への投資を担当する」としている。そして、国防研究・工学局長は、「軍事部門やその他の国防機関と協力して、国防科学技術戦略と、目標、目的、スケジュールなど、防衛技術の取り組み全体の焦点と内容を説明する技術計画を作成する」としている⁴²。

国家安全保障科学技術戦略は、国防総省科学技術プログラムを導入するとともに、同プログラムにおける、米国防総省、陸海空の三軍、高等研究計画局の各アクターの役割を明確にした。

さらに、同戦略では、国防総省科学技術プログラムにおいて、「基礎研究の成果が技術の実証と移行を通じて軍事用途にタイムリーに活用されるようにするために、開発のあらゆる段階でバランスの取れた投資が必要である。また、研究開発実施機関も多いため、その強みを生かすために慎重に投資管理をしなければならない」とある。「防衛科学技術への投資の約15%は基礎研究に、約36%は探索的開発に、残りは先端技術開発に充てられている」、「基礎研究プログラムの作業の大部分は大学や米国防総省の研究所で行われ、残りは産業界、非営利の研究機関、その他の連邦研究所で行われている」、「防衛技術プログラムのほとんどは、業界によって実行されている」、「エネルギー省の国立研究所、米国防総省、その他の政府の研究所は、基礎研究と技術開発の両方に携わっている」と、当時の状況を記載している。また、「これらの補完的なパフォーマー間の激しい相互作用は、完全な相乗効果を実現するために不可欠である」とも記載してある⁴³。

以上のように、米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあったことが明らかになった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれたこと、また、国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことにより、米国防総省のRDT&E制度は、超電導技術の研究開発に新たな効果を及ぼしたと考えられる。それは、支援の多様化である。自動掃海システムや船舶用超電導モーターなど、軍事利用に近いところまできているものは軍が、一方で、ナノテクノロジーや量子技術

⁴² *The National Security Science and Technology Strategy* (1995).

⁴³ *The National Security Science and Technology Strategy* (1995).

など、基礎研究を継続するものについては国防高等研究計画局が、それぞれ支援することで、軍としては、ニーズに近いものや、支援の得意なものに集中して支援をすることができるようになる。

また、軍で、あるいは軍が支援をして行っていた研究開発で期待する成果が得られなかったが将来の可能性は残っているという場合には、完全に中止をするのではなく、その一部を、形を変え、国防高等研究計画局の新たなプロジェクトとして支援する。そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となる。これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシー（弾力性）となっている。

本章のおわりに

Research, Development, Test and Evaluationという表現からして、米国、少なくとも米国防総省では、Test（試験）とEvaluation（評価）は、Research（研究）及びDevelopment（開発）には含まれない独立した概念である一方、Research（研究）及びDevelopment（開発）と不可分の存在であることが分かる。日本で研究開発と言え、開発したものの試験と評価も自ずと含まれるように捉えられるが、それは自明ではない。米国防総省の研究、開発、試験及び評価という用語には、研究開発で試作したものを試験し、評価して、さらに試作を重ね、軍事利用しようとする意思が現れている。

軍事利用される技術のニーズといえ、究極的には、軍の軍事的なニーズである。作戦に必要なニーズから、軍事装備品や軍事用サービスの技術的な仕様が決まる。一方で、シーズは、軍の研究所にある場合もあれば、大学や企業など軍の外部にある場合も、さらには複数の機関に分散して存在する場合もある。

既存技術であれば、そのシーズがどこまで適用可能であるのかという技術的な限界や制約を軍が把握した上でのニーズの掘り起こし、あるいは、ニーズに対してシーズがどこまで対応可能であるかという、現実的なすり合わせをすることが可能であるのに対し、新興技術は、技術自体が出てきたばかりで

あり、そのシーズがどこまで適用可能であるかもわからないまま、ニーズに対峙する、あるいは新たなニーズを掘り起こすことになる。そのため、後から考えれば過剰とも言える期待がなされ得る。そして、期待が大きければ大きいほど、期待が外れたときの落胆は大きくなる。

プロダクト・ライフサイクルとハイブ・サイクルのアイデアを参考に超電導技術のライフサイクルを考察してみたところ、次のようなものであると考えられる。米国防総省は、第二次世界大戦の終結直後から、超電導（今でいう低温超電導）の研究開発を、基礎研究を中心に行っていた。1980年代、米国は、長引く冷戦と減税による財政悪化と、競争力の低下の克服が求められていた。そのような中、1986年の高温超電導の発見は、長引く冷戦で予算状況が厳しい中、大統領のイニシアチブの下で各省庁が予算を取る、いわば「イニシアチブ方式」により、研究費の拡大を可能とした。

高温超電導は、その革命的な可能性から、室温超電導という過剰な期待も抱かせた。高温超電導は発見直後にブームとなったため、基礎研究が追い付かず、軍事予算である米国防総省のRDT&Eの制度においても基礎研究に資源が割かれたが、軍事利用につながる成果は得られなかった。当時の米国は、冷戦の終結に伴う「平和の配当」が政治的なスローガンとなっており、米国防総省の予算は減少していた。超電導の研究開発予算も5年ほどでピークを迎え、縮小に転じた。RDT&Eの制度としては、実用に向けた研究開発に重心が移っていったが、その後、軍事利用に至ったものはわずかである。その一方で、「国家ナノテクノロジー・イニシアチブ」、さらには「国家量子イニシアチブ」の下、「ナノテクノロジー」や「量子」という枠組みのなかで超電導の基礎研究が続いていた。

米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれ、また、国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことから、米国防総省のRDT&E制度は、支援の多様化という、新興技術の研究開発に新たな効果を及ぼした。

軍事利用に近いところまできているものは軍が、一方で、基礎研究を継続するものについては国防高等研究計画局が、それぞれ支援することで、軍と

しては、ニーズに近いものや、支援の得意なものに集中して支援をすることができるようになった。また、軍で、あるいは軍が支援して行う研究開発で期待する成果が得られなかったが将来の可能性は残っているという場合には、形を変えて国防高等研究計画局の新たなプロジェクトとして支援し、そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となった。

これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシーとなり、そして、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術の研究開発を継続させ、将来の軍事利用につなげようとするRDT&E制度の機能の源になっている。

第2章 米国防総省における超電導の研究、開発、試験及び評価の歴史

本章のはじめに

本章では、米国防総省における研究、開発、試験及び評価(RDT&E)の事例として、超電導技術について、その草創期(1940年代中盤～1980年代中盤)、超電導ブーム期(1986年～1990年頃)、冷却期(1990年代)、平衡期(2000年代～)の4つの時期にわけて、どのように変化しているかを論じる。

まず、その前提として、超電導の発見から高温超電導の発見までの超電導の歴史を概観する。オランダ、ライデン大学の物理学者、カマリン・オンネス(Heike Kamerlingh Onnes)は、1908年、ヘリウム(元素記号:He)の液化に成功し、その後さまざまな物質の低温特性を調べる中、1911年、水銀(元素記号:Hg)の電気抵抗が4.15ケルビン⁴⁴(4.15 K、およそ-269 °C)で消失すること(完全導電性)を発見し、これを「超電導」と名付けた⁴⁵。

1933年、ドイツの物理学者、ヴァルター・マイスナー(Fritz Walther Meissner)とローベルト・オクセンフェルト(Robert Ochsenfeld)は、超電導状態にした超電導体の内部には磁力線が侵入しない、完全反磁性を発見した。これはマイスナー効果、または、マイスナー-オクセンフェルト効果と呼ばれ、完全導電性とならんで、超電導体の最も基本的な性質の一つである⁴⁶。

1950年、ロシアの物理学者、ヴィタリー・ギンツブルグ(Vitaly Lazarevich Ginzburg)とレフ・ランダウ(Lev Davidovich Landau)が超電導現象の基礎理論であるギンツブルグ-ランダウ理論を発表した。これにより、第2種超電導体で「磁束の量子化」が起きることが明らかにされた⁴⁷。

1957年、米国、イリノイ大学のジョン・バーディーン(John Bardeen)は、レオ

⁴⁴ ケルビンは絶対温度の単位で、表記は K。0 K は、セルシウス温度で表記すると、-273.15°C。

⁴⁵ 田中昭二「20 世紀における超伝導の歴史と将来展望」『応用物理』69 巻 8 号、2000 年、940-941 頁。なお、オンネスは、1913 年、「とりわけ液体ヘリウムの生成につながった、低温での物質の特性に関する彼の研究」に対して、ノーベル物理学賞を受賞している。

⁴⁶ 内藤方夫「マイスナー効果」『応用物理』第 59 巻、第 5 号、1990、651-652 頁。

⁴⁷ 田中「20 世紀における超伝導の歴史と将来展望」、2000 年、941 頁。なお、ギンツブルグは、2003 年、他の二人の研究者とともに、「超電導体と超流動の理論への先駆的な彼らの貢献」に対して、ノーベル物理学賞を受賞している。

ン・N・クーパー(Leon Neil Cooper)、ジョン・R・シュリーファー(John Robert Schrieffer)とともに超電導を説明するBCS理論を展開した。これによると、臨界温度(超電導状態に変わる温度)の限界は30ケルビン(30 K、およそ-243℃)程度と推定され、これを「BCSの壁」とよんだ。この壁への挑戦の中、「高温超電導」という言葉が使われるようになったが、それは実体を伴うものではなかった⁴⁸。

1962年、当時ケンブリッジ大学の大学院生であったブライアン・D・ジョセフソン(Brian David Josephson)が、二つの超電導体を非常に薄い絶縁膜を挟んで接触させたときに、印加電圧がゼロであってもトンネル電流が流れうることを理論的に証明した。後にベル研究所で実験的に証明され、ジョセフソン効果として知られることとなった⁴⁹。これが、微小磁界を検出することができる超電導量子干渉計へとつながる。

1986年、スイス、IBM研究所のヨハネス・G・ベドノルズ(Johannes Georg Bednorz)とカール・A・ミュラー(Karl Alexander Mueller)が、LaCuO₃(La:ランタン、Cu:銅、O:酸素)にBa(バリウム)を添加すると超電導になることを発見した。実際に超電導になるのは10ケルビン程度であったが、電気抵抗が30ケルビンあたりから低下し、その状況が電流密度によって変化することから、高温超電導である可能性を示唆した。同年、東京大学のグループによる追試験で、臨界温度が30ケルビン(30 K、およそ-243℃)に達することが示され、高温超電導であることが証明された⁵⁰。

以後、高い臨界温度をもつ超電導体が断続的に発見された。沸点が77ケルビン(77 K、およそ-196℃)の液体窒素は、冷却のための手間もコストも、液体ヘリウムと比べて少なく、液体窒素温度における実用化は液体ヘリウム温度に比較して実用上、格段の優位性がある⁵¹。近年では、液体窒素温度より

⁴⁸ 田中「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」、2000年、944頁。なお、バーディーン、クーパー、シュリーファーは、1972年、「BCS理論と呼ばれる、彼らの共同開発した超電導理論」に対して、ノーベル物理学賞を受賞している。

⁴⁹ 田中「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」、2000年、943頁。なお、ジョセフソンは、1973年、「トンネル障壁を通過する超電流の特性、特に一般にジョセフソン効果として知られている現象における彼の理論的予測」に対し、ノーベル物理学賞を受賞している。

⁵⁰ 田中「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」、2000年、945頁。なお、ベドノルズとミュラーは、1987年、「セラミック材料での超電導の発見における重要な彼らの躍進」に対して、ノーベル物理学賞を受賞している。

⁵¹ 田中「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」、2000年、947頁。

も高い温度で超電導状態になるものを、一般的に「高温超電導」とよんでいる⁵²。

第1節 草創期(1940年代中盤～1980年代中盤)

1 米国防総省における超電導研究のはじまり

米国防総省は、傘下各軍(陸軍、海軍、空軍)の研究所や、国防高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)の活動を通じて超電導の研究開発を独自に、または外部機関を支援する形で行ってきている。資料によると、その歴史は第二次世界大戦の終結直後にまで遡る。その中で最も早くから開始しているのは、海軍であった。

【海軍】

海軍調査研究所(Naval Research Laboratory: NRL)のドナルド・U・ガブサー(Donald U. Gubser)が1987年に編集した「Compilation of NRL Publications on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987(高温超電導に関する海軍調査研究所の発行物集 1987年1月1日～1987年7月1日)」の序文には、「海軍には、超電導材料と応用における研究開発の長く確立された歴史がある。第二次世界大戦の直後、海軍調査研究所と海軍研究局(Office of Naval Research: ONR)が超電導の研究を開始した。海軍研究局は1946年に二つの会議を後援し、超電導と低温物理学の状況を検討した。1950年までに、海軍研究局は極低温学に関する七つの会議を後援し、海軍研究局のプログラムは超電導と低温物理学の分野における我が国の努力の焦点となった。」とある⁵³。また、「超電導の巨視的見解をレビューしたフリッツ・ロンドンの有名な本の第1巻は、彼の5番目の海軍研究局技術報告書として著された。海軍調査研究所では、1946年に低温学とい

⁵² 阪本幸俊「超電導技術の将来展望」『技術レポート』三菱総研_2018年8月。

⁵³ D.U. Gubser (ed.), *Compilation of NRL Publications on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987*, Naval Research Laboratory (1987): vii (preface).

う言葉が組織図に初めて登場した。海軍調査研究所では1948年にコリンズの最初の液化装置の一つを調達し、その後すぐに超電導材料の実験研究を開始した。」とある⁵⁴。

また、ガブサーが1998年に発表した論文には、「海軍では、海軍研究局の支援を受けてプログラムが開始された1948年以来、超電導研究に積極的に関与してきた。海軍調査研究所での研究は、材料特性、理論、及びプロトタイプデバイス開発に焦点を当て、1948年から現在まで続いている。」とある⁵⁵。

海軍では、第二次世界大戦の終結直後、1948年には超電導の研究を始めていた。なお、この時期は、超電導の発見から40年近く経っている一方、超電導現象の基礎理論であるギンツブルグ-ランダウ理論もまだ発表されていない頃である。

A・M・ウォルスキー (A. M. Wolsky) らが1989年に編集した *Applied Superconductivity* には、「40年近く前、米国防総省は、省内の研究所と受託研究プログラムの両方を通じて、低温研究に幅広く資金を提供した米国の機関の中で最初の機関であった。米国防総省は、多くの大学にヘリウム液化装置を提供し、関連する研究資金を提供することにより、超電導の精力的で生産的なプログラムを追求した。今日、最も経験豊富な米国の超電導研究者は、米国防総省の超電導研究支援を受けているか、または受けた教授の第二世代または第三世代の学生である。」とある⁵⁶。

同書籍では、また、「初期の米国防総省では、赤外線を検出するための超電導ボロメータ、原始的な超電導デジタルコンピュータスイッチ、及び磁氣的に吊り下げられた超電導ジャイロスコープに取り組んでいた。基礎科学の分野では、超流動性と巨視的な超電導理論に関するF. ロンドン (F. London) の古典的研究が米国防総省の後援の下で出版された。その後まもなく、米国防総省の資金提供を受けた研究者が超電導転移温度の等方性依存に

⁵⁴ D.U. Gubser (ed.), *Compilation of NRL Publications on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987*, Naval Research Laboratory (1987): vii (preface).

⁵⁵ D.U. Gubser, “Navy Programs in Superconducting Technology.” *Journal of Superconductivity* 11 (1998): 1–4. <https://doi.org/10.1023/A:1022656620516>.

⁵⁶ A.M. Wolsky, E.J. Daniels, R.F. Giese, J.B.L. Harkness, L.R. Johnson, D.M. Rote, S.A. Zwick, R.A. Thomas, E.B. Forsyth, J.D. Rogers, J.B. Kirtley, B.W. McConnel, J.G. Desteese, J.A. Dirks, M.K. Drost, S.B. Merrik, R.M. Smith, T.A. Williams, T.A. Lipo, and Department of Defense (eds.), “*Applied Superconductivity*,” (1989): 180.

根本的な貢献をし、これは超電導の微視的理論の発展のための確固たる実験的基盤を提供した。1950年代後半、米国防総省が資金提供した超電導の微視的理論に関する研究は、有名なバーディーン・クーパー・シュリーファー理論につながり、著者らは1972年のノーベル物理学賞を受賞した。また、米国防総省は長年にわたり、超電導が観測できる最高温度の着実な進歩に大きく貢献した研究者に資金を提供した。」とある。

さらに、「1960年代初頭、米国防総省の資金提供を受けた研究者は、ジョセフソン接合(JJ)の科学と高磁界、高電流密度超電導の理解に不可欠な貢献をした。JJの研究やその他の超電導デバイスの研究は、これまでにない感度の磁気及び電磁センサーを可能にした。このようなセンサーの軍事的可能性は、潜水艦の磁気検出と、超低周波(ELF)から無線周波数(RF)を経てマイクロ波領域までの微弱な電磁信号の検出のために、米国防総省によって探求されてきた。心磁図、脳磁図、磁気地質学的探査、電波天文学の検出器において、民間部門への重要な関連技術移転があった。」とある⁵⁷。

同文献が編集された1989年の40年近く前ということで、1950年代前半頃には、「赤外線を検出するための超電導ボロメータ」、「原始的な超電導デジタルコンピュータースイッチ」、「磁氣的に吊り下げられた超電導ジャイロスコープ」の研究開発がされていた。記載はないものの、それぞれの軍事的用途として、超電導ボロメータについては熱源探知や赤外線通信、超電導デジタルコンピュータースイッチについては高速計算、超電導ジャイロスコープについては姿勢制御や精密誘導などが考えられ、それらの用途を念頭に研究開発がなされていた。

【陸軍】

本研究で調べた中で、陸軍が関係する最も古い超電導研究の文献は、1949年に米国無線学会(Institute of Radio Engineers: IRE(当時)⁵⁸)のプロシーディングスに掲載された「Detection at Radio Frequencies by

⁵⁷ A.M. Wolsky et al. (eds.), “Applied Superconductivity,” (1989): 180-181.

⁵⁸ 現在の米国電気電子学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE)の前身のひとつ。

Superconductivity (超電導による高周波数検出)」⁵⁹である。超電導窒化ニオブによる高周波電流の検出をしようというものであるが、著者のうちの一人、C・W・クラーク(C. W. Clark)が米陸軍弾道研究所(U.S. Army Ballistic Research Laboratory) 所属である。これが陸軍にとって最も初期の研究であったとすると、海軍が超電導の研究開発を始めた1948年とほぼ同時期に陸軍でも始まっていたということになる。

【空軍】

1947年に陸軍から独立して設立された空軍では、1961年から超電導技術の開発を始めたことが記されていた。ライト・パターソン空軍基地(Wright-Patterson AFB)所属のC・E・オバリー(C. E. Oberly)による1977年の論文には、「空軍は1961年以来、積極的に超電導技術を開発してきた。1960年代半ば、超電導のその原始的な技術的状态のため、初期の空軍の関与は残念なものであった。安定性理論の適用が成功した後は、超電導オルタネータ、磁気流体力学(MHD)発電機コイル、誘導エネルギー貯蔵コイルの分野におけるプログラムは生産的であった。」とある⁶⁰。

1961年といえば、海軍が1946年に超電導研究に関与を初めてから15年、また、空軍が1947年に設立されてから14年が経過しており、空軍が超電導技術の研究開発に取り組むまでにはしばらく時間がかかっていた。

【DARPA】

1957年のスプートニク・ショックを受け、1958年に設立された高等研究計画局(Advanced Research Projects Agency: ARPA)、現在の国防高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)では、1966年に米国科学アカデミー(National Academy of Sciences: NAS)の物質・材料諮問委員会(Materials Advisory Board)が作成した報告書 *Report of the Ad Hoc Committee on Principles of Research-Engineering Interaction* (研

⁵⁹ J. V. Lebacqz, C. W. Clark, M. C. Williams and D. H. Andrews, "Detection at Radio Frequencies by Superconductivity," *Proceedings of the IRE* 37, no. 10 (1949): 1147-52.

⁶⁰ C. Oberly, "Air force applications of lightweight superconducting machinery," *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no.1 (1977): 260-8.

究・工学相互作用の原理に関する臨時委員会の報告書)は、ARPAとの契約⁶¹に基づき、NASから米国防総省の防衛研究・工学局(Office of Defense Research and Engineering)に提出されたものであり、その中で、重要な歴史的事例の一つとして、超電導強磁界ソレノイドを作製するための材料の発見を挙げている⁶²。

また、1974年には、DARPAの資金提供により、ランド研究所(RAND Corporation)が報告書 *Advanced Concepts of Superconductivity: A Comparative Review of Soviet and American Research, Part I, High Temperature Super-conductivity* (超電導の先進的コンセプト:ソビエトと米国の研究の比較レビュー、Part I、高温超電導)を作成している。同報告書では、ソビエト社会主義共和国連邦(ソ連)における超電導研究の体制や動向を調査・分析しており、冷戦のさなか、超電導でもソ連に先行されてはならないとする姿勢がうかがえる⁶³。

なお、DARPAはさらに1976年には、インフォマティクス社(Informatics Inc.)に資金提供をして *Bibliography of Soviet Developments in Superconductivity: January 1975 – June 1976*(ソ連の超電導開発に関する参考文献:1975年1月～1976年6月)を作成しており、ソ連における理論から応用までの超電導研究の動向を注視している⁶⁴。

2 超電導の軍事応用として考えられていたこと

米国防総省は超電導のどのような軍事応用を考えていたであろうか。前述のランド研究所の報告書には、超電導体の応用として、まず、輸送分野での状況について、「輸送分野では、リニアモーターによる列車の推進や車両の磁気浮上など、超電導金属の磁界を使わずには考えにくいプロセスが、米国、

⁶¹ Contract No. SD-118.

⁶² *Report of the Ad Hoc Committee on Principles of Research-Engineering Interaction*, AD0636529 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966).

⁶³ Y. Ksander, and S. Singer, *Advanced Concepts of Superconductivity: A Comparative Review of Soviet and American Research. Part I. High-Temperature Superconductivity*, R-1401-ARPA (The Rand Corporation, January 1974).

⁶⁴ J. Kourilo, and S. G. Hibben, *Bibliography of Soviet Developments in Superconductivity: January 1975-June 1976*, (Informatics Inc., 1976).

英国、日本などいくつかの国で研究されている。このような車両の実験作業と設計解析は、モーターの製造とテストに進んでいる。」と報告している。次に、ソ連の状況について、「ソビエト連邦では、カピッツァの高出力、高周波電源の研究が、地下の超電導チャンネルでの伝送による、これらの電源を利用する電力ネットワークの計画を触発した。極低温システムは、将来の超電導合金で予測される動作温度である40Kのチャンネルに関係する。米国の工学研究には、超電導体を用いた発電機と送電路またはケーブルの両方の設計が含まれる。」と報告している。さらに、「これまで検討を重ねてきた用途には、高Q値マイクロ波キャビティ、スイッチングデバイス、ランダムノイズの低減が重要なコンピューターやその他の回路、周波数検出器、磁気検出器などがある。」、また、「潜在的な軍事用途には、船舶推進、オンサイト発電、ELF通信、磁気検出、及びおそらく磁気誘導装置が含まれる。」と報告している⁶⁵。

このように、1974年にはすでに、マイクロデバイスから大型装置までの幅広い超電導の応用が認識されていた。特に、「動力(モーター)」、「発電」、「通信」、「磁気検出」、「磁気誘導」という具体的な用途については、この段階ですでに進む道が見えていた。

米国防総省のG・ガモタ(G. Gamota)による1981年の論文には、軍事利用を想定した研究開発の成果が図表付きで紹介されている。水中の潜水艦との通信を目的とした超低周波(extremely low frequency, ELF)超電導量子干渉計(superconducting quantum interference device, SQUID)アンテナシステムや、高速の電子デバイスを目的とした超電導アナログ/デジタル変換回路、超電導集積回路(断面図)、300MVA超電導発電機(カットモデル)、船舶推進用の300KW超電導発電機、船舶用3,000馬力超電導モーター、空軍用400Hz交流発電機、ロスアラモス科学研究所(Los Alamos Scientific Laboratory: LASL)用の300KJエネルギー貯蔵コイル、超電導磁石を用いた実験用ジャイロトン、航空機搭載用の小型冷凍機ユニットなどが写真で紹介されている⁶⁶。

⁶⁵ Ksander, and Singer, *Advanced Concepts of Superconductivity*, 3-4.

⁶⁶ G. Gamota, "One, Two, Three - Zero Resistance! In Defense Applications," *IEEE Transactions on Magnetics* 17, no.1 (1981).

この頃には、実機まではいかないものの、すでに試作機として形になっていた。なお、この論文で、米国以外の取り組みとして唯一、日本における磁気浮上式鉄道（超電導リニア）の実験機が写真付きで紹介されている。日本では民生利用として進む超電導リニアモーターに軍事的な関心をもっていたことがうかがえる。また、日本の経済力、技術力が高まる中、民生利用であれ、超電導リニアモーターが日本に先行されていることを認識させる意図があったものとうかがえる。

3 具体的なRDT&Eプロジェクト

この時代、米国防総省は超電導技術に関して、具体的にどのような研究開発を行い、あるいは支援していたのか、学術雑誌にて発表された研究論文、及び軍に提出された技術報告書を中心に探った。前述のとおり米国防総省は、第二次世界大戦終結直後から超電導の研究開発を始めている。その頃たとえば、1911年にカマリン・オンネスが超電導を発見してからおよそ35年が過ぎているが、一方で、1986年にベドノルズとミュラーが高温超伝導体を発見するおよそ40年ほど前である。調べると、米国防総省が超電導の研究開発を始めてから、高温超電導体が発見されるまでのこのおよそ40年には、実に多様な研究開発が米国防総省により行われ、あるいは支援されていた。「対象とする物質の多様さ」、「基礎研究から実用化開発までの幅の広さ」、「陸海空三軍の特性の違い」、「軍が自ら行うか大学や企業など外部に資金を出すか」、「外部に資金を出すとして各軍から出すか共同で出すか」、「研究開発の進展に伴う年代ごとの違い」といった軸が多数ある中、本研究では、超電導技術のライフサイクルとRDT&E制度の作用を検証しようとするところから、時間軸を主たる軸とする。

なお、本研究では、大学や企業など、米国防総省の外部の機関が米国防総省の資金を得て研究開発をするときの、資金の種類についても留意する。米国では、国からの補助（grant）を受けて行った研究開発で得られた特許は、補助を受けた側に帰属する一方、国との契約（contract）により国から委託された研究開発で得られた特許は、国に帰属していた。ところが、1980年に特

許・商標改正法 (Public Law 96-517, December 12, 1980)、通称「バイ・ドール法 (Bayh-Dole Act)」が成立すると、国の委託先が特許を所有することが可能となった。これは、同法によりシーズの所有権 (Ownership) が国から民間に移ったことを意味する。本研究では、大学や企業など、米国防総省の外部の機関で行われる研究開発に関しては、そのシーズの所有権を考えるうえで、それが米国防総省あるいは各軍からの contract によるのか、あるいは grant によるのかを、可能な限り特定することとする。

本研究で調べた中で、米国防総省が行う、または支援する超電導の研究開発に関連する学術論文及び技術報告書で最も古いものは、1947年に『フィジカル・レビュー (Physical Review)』に掲載された、エール大学のロバート・T・ウェッバー (Robert T. Webber) による「The Effect of Annealing and Gas Content on the Superconducting Properties of Tantalum (タンタルの超電導特性に及ぼすアニールとガス含有量の影響)」⁶⁷である。この論文には、「この研究は、契約 N60ri-44 の下、海軍研究局により支援された。」とある。海軍が、超電導の研究開発を始めた最も早い時期から、大学に研究を委託していた。

1949年に米国無線学会 (当時) のプロシーディングスに掲載された「Detection at Radio Frequencies by Superconductivity (超電導による高周波での検出)」⁶⁸では、4人の著者のうちのひとり、C・W・クラーク (C. W. Clark) は米陸軍弾道研究所 (U.S. Army Ballistic Research Laboratory) の所属であり、残る3人のJ・V・レバクズ (J. V. Lebacqz)、M・C・ウィリアムズ (M. C. Williams)、D・H・アンドリュー (D. H. Andrews) は、ジョンズ・ホプキンス大学の所属である。陸軍もまた、海軍とほぼ同時期に超電導の研究開発を開始し、大学に研究費を出していた。

1952年に『フィジカル・レビュー』に掲載された、「Size Effects in the Superconductivity of Cadmium (カドミウムの超電導におけるサイズ効果)」⁶⁹の著者であるM・C・スティー爾 (M. C. Steele) とR・A・ヘイン (R. A. Hein)

⁶⁷ Robert T. Webber, "The Effect of Annealing and Gas Content on the Superconducting Properties of Tantalum." *Physical Review* 72, no. 12 (1947): 1241-5.

⁶⁸ J. V. Lebacqz, C. W. Clark, M. C. Williams and D. H. Andrews, "Detection at Radio Frequencies by Superconductivity," in *Proceedings of the IRE* 37, no. 10 (1949): 1147-52.

⁶⁹ M. C. Steele, and R. A. Hein, "Size Effects in the Superconductivity of Cadmium." *Physical Review* 87, no. 5 (1952): 908.

は、ともに海軍調査研究所の所属である。このふたりは、翌1953年、同じく『フィジカル・レビュー』にて「Superconductivity of Titanium (チタンの超電導)」⁷⁰を公表している。海軍調査研究所は、このあと、海軍における超電導の研究開発の中心的な存在となる。海軍調査研究所に集約されたと言ってもよいほどに、海軍による超電導の研究開発の論文は、海軍調査研究所の研究者によるものが多い。ヘインは、その中でも特に重要な一人である。

同年には、海軍調査研究所のR・L・ドレセック(R. L. Dolecek)が、オハイオ州コロンバスで5月21日に開催された米国物理学会(American Physical Society: APS)の会議で発表した「Cryogenic Research (極低温研究)」⁷¹において、1 K(ケルビン)以下、0.1 K近くまで温度を下げて行った物性実験の報告をしている。この温度域まで下げられるのは、⁴Heと³Heの混合液体を用いる希釈冷凍機(dilution refrigerator)だけであるが、希釈冷凍機は1951年にハインツ・ロンドン(Heinz London)によりその原理が提案された⁷²ことから、ほぼ同時期にその原理を実現した実験が行われていたことになる。

1956年頃から論文の数が急に増えるため、特徴的なものを抽出する。まずは、1956年に米国無線学会(当時)のプロシーディングスに掲載された「The Cryotron-A Superconductive Computer Component (クライオトロン—超電導コンピューターの構成要素)」⁷³である。著者のD・A・バック(D. A. Buck)はマサチューセッツ工科大学のリンカーン研究所(Lincoln Laboratory)の所属であるが、このリンカーン研究所は、高度な電子機器による国の防空システムの改善に重点を置き、1951年にマサチューセッツ工科大学の連邦契約研究センターとして設立されたものである。そしてこの文献には、「この文献の研究は、M.I.T.との契約に基づき、陸軍、海軍、空軍が共同で支援したものである。」とあった。私立大学の付属研究所が陸海空三軍の研究開発を集約して行う存在となっていた。

同じく1956年、米国電気学会(American Institute of Electrical Engineers:

⁷⁰ M. C. Steele, and R. A. Hein, "Superconductivity of Titanium." *Physical Review* 92, no. 2 (1953): 243-7.

⁷¹ R. L. Dolecek, *Cryogenic Research*, ADA319622 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1952).

⁷² 益田義賀「低温物理の50年」特集 日本物理学会50周年記念『日本物理学会誌』第51巻第5号、1996年、https://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_05/002.html (2023年8月13日閲覧)。

⁷³ D. A. Buck, "The Cryotron-A Superconductive Computer Component," *Proceedings of the IRE* 44, no. 4 (1956): 482-93.

AIEE(当時)⁷⁴)と米国無線学会(当時)の合同で12月10日から12日にかけて開催された学術会議「Eastern Joint Computer Conference: New Developments in Computers」において、A・E・スレイド(A. E. Slade)とH・O・マクマホン(H. O. McMahon)により発表された「A Cryotron Catalog Memory System (クライオトロン・カタログ・メモリー・システム)」⁷⁵は、超電導を用いた素子でコンピューターのメモリーを作ろうとする基礎的な研究であるが、まず、同文献に「この論文で報告された研究は、契約番号DA49-170-SC-1986に基づいて米陸軍通信部隊によって支援された。」とあり、また、著者のふたりがA・D・リトル社(A. D. Little Incorporated)の所属であることから、陸軍は、超電導の研究開発の初期から企業に対し、超電導コンピューターの研究開発を委託していた。

1957年の『フィジカル・レビュー』にて発表された、イリノイ大学のJ・バーディーン(J. Bardeen)、L・N・クーパー(L. N. Cooper)、J・R・シュリーファー(J. R. Schrieffer)による「Theory of Superconductivity (超電導の理論)」⁷⁶は、のちに三人の頭文字をとってBCS理論と呼ばれることとなるが、これには、「この研究は、米陸軍兵器研究局(Office of Ordnance Research, U.S. Army)によって部分的に支援された。」とあり、部分的とはいえ、BCS理論が米陸軍の支援で生み出されたものであることが裏付けられる。また、一つ前に記載した超電導コンピューターも合わせて考えると、米陸軍は、超電導コンピューターという超電導の応用開発と同時に、超電導の理論研究という基礎研究も支援していた。

1960年の『フィジカル・レビュー・レターズ(Physical Review Letters)』にて発表された、イリノイ大学のC・W・シャーウィン(C. W. Sherwin)らによる「Search for the Anisotropy of Inertia Using the Mössbauer Effect in Fe (鉄のメスバウアー効果を利用した慣性の異方性の探索)」⁷⁷においては、「海軍

⁷⁴ 現在の米国電気電子学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE)の前身のひとつ。

⁷⁵ Albert E. Slade, and Howard O. McMahon, "A cryotron catalog memory system," *Papers and discussions presented at the December 10-12, 1956, eastern joint computer conference: New developments in computers* (1956).

⁷⁶ J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, "Theory of Superconductivity," *Physical Review* 108, no. 5 (1957): 1175-204.

⁷⁷ C. W. Sherwin, H. Frauenfelder, E.I. Garwin, E. I uscher, S. Margulies, and R. N. Peacock, "Search for the Anisotropy of Inertia Using the Mössbauer Effect in Fe," *Physical Review Letters* 4, no. 8 (1960): 399-401.

研究局、米国原子力委員会の共同プログラム、および空軍科学研究所の共同プログラムにより、並びに空軍科学研究所 (Air Force Office of Scientific Research) を通じた空軍により、並びに米陸軍通信隊 (U.S. Army Signal Corps) が管理する連携科学研究所 (Coordinated Sciences Laboratory) との三軍契約 (tri-Service contract) を通じて部分的にサポートされている。」とある。イリノイ大学には陸軍が管理する研究所があり、そしてその研究所が陸海空三軍との一体の契約をして研究開発をしていること、その上でさらに、海軍と原子力委員会の共同プログラムによる支援、また、空軍による支援を受けていたということで、米国防総省としてイリノイ大学に相当の支援をしていた。

そして、これが、本研究で調べた中で、米空軍に関係する超電導の論文として最も古いものである。空軍は、海軍や陸軍が1940年代後半から開始していたのに対して、10年程度遅れて超電導の研究開発を開始した、また、その始まりは陸海空三軍合同契約であった。

ここからは、陸海空三軍の各軍それぞれに焦点を当て、超電導の研究開発の取り組みを詳解する。

(1) 海軍

まず、米国防総省のなかでも先んじて超電導研究を行っていた海軍に着目する。海軍での超電導の研究開発に関しては、1989年7月に海軍研究アドバイザリー委員会 (Naval Research Advisory Committee) が作成した報告書 *Superconductivity*⁷⁸ に、当時までに行われた超電導の研究開発の歴史の概要が記されている。まず、超電導における海軍研究局の活動を表3に示す。海軍研究局は、超電導量子干渉磁束計 (SQUID) などの超電導エレクトロニクスを複数の大学と行っていた。また、SQUIDを対潜戦に用いる研究開発を行っていたが、その後、それが実際に用いられたという話は聞かない。

⁷⁸ *Superconductivity*, Naval Research Advisory Committee, Office of Naval Research, U.S. Navy (July 1989).

表3 超電導における海軍研究局の活動

1965	超電導エレクトロニクスのプログラムの着手
1966-1980	超電導量子干渉磁束計(SQUID)の開発、およびバージニア大学、国立標準局 ⁷⁹ 、ハーバード大学におけるジョセフソン結合の物理の支援
1969	超電導量子干渉磁束計(SQUID)を用いた心臓の磁気特性の初計測(国立磁石研究所(National Magnet Laboratory))
1970-1980	カリフォルニア大学バークレー校、イエール大学での超電導マイクロ波およびミリ波の検出器と電子機器の開発
1968-1972	海軍沿岸システムセンター(NCSC)における超電導量子干渉磁束計(SQUID)を用いた対潜戦の開発
1972-現在	ニューヨーク大学における超電導量子干渉磁束計(SQUID)を用いた脳からの誘発反応の計測
1980-1985	カリフォルニア大学バークレー校および国立標準局での超電導デジタル信号処理コンポーネントおよび回路に関する研究の支援
1985-1987	ハイプレス社(HYPRES)における米国初の窒化ニオブ(NbN)集積回路技術の確立の支援
1980-1988	国立標準局、海軍調査研究所および産業界における、超電導量子干渉素子の応用のための低振動・低ノイズ冷凍機の開発
1967-現在	超電導、ジョセフソン接合、冷凍に関する多くの話題の会議、ミーティング、ワークショップの後援

出所: *Superconductivity*, Naval Research Advisory Committee, Office of Naval Research, U.S. Navy (July 1989): 112. を基に筆者作成

注: 現在とあるのは、1989年の意。

次に、海軍調査研究所における超電導の基礎研究の内、主要なものを表4に示す。海軍調査研究所は、理論と実験の両面で基礎研究を行っていた。なお、ここに記載されているHTS(高温超電導)は、1986年にベドノルズとミュラーによって高温超電導体が見つかる前に、当時、臨界温度(T_c)が高温と考えられていた超電導体を指している。

⁷⁹ 当時の名称(National Bureau of Standards)。1988年より、国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)。以下、同じ。

表4 海軍調査研究所における超電導の基礎研究のハイライト

1950	HTSの舞台設定に貢献した新しいクラスの超電導半導体GeTeを発見
1960	A15系の T_c における長距離原子秩序の重要性を提示
1970	V_3Ga の J_c と高電界性能の進展における開拓
1970	超電導の T_c の計算を可能にする自己無撞着なバンド構造計算を開発 第一原理計算が実際の物質の記述に使用できることを提示
1970	ジョセフソン接合の物理学における先駆的な測定
1970	粒状フィルムにおけるジョセフソン接合挙動の実証
1980	2次元超電導薄膜の特性に関する広範な研究
1980	HTS: NBS/NRL、非弾性中性子散乱によりフォノンのスペクトルが得られる HTS: NBS/NRL、X線光電子分光研究 HTS: NRL、新素材Tl/Sr/Ca/Cu/O
1975-1977	NRL、海底通信用SQUIDアンテナ試作機を開発

出所: *Superconductivity*, Naval Research Advisory Committee, Office of Naval Research, U.S. Navy (July 1989): 114. を
基に筆者作成

さらに、海軍における超電導の応用研究の内、主要なものとして、1972年から1988年にかけて海軍沿岸システムセンター(Naval Coastal Systems Center: NCSC)で行ったSQUID磁気異常検出(Magnetic Anomaly Detection: MAD)の開発を表5に、また、1970年から1988年にかけてデービッド・テイラー研究センター(David Taylor Research Center: DTRC)で行った船舶の電気推進の開発を表6に、それぞれ示す。

SQUID磁気異常検出については、開発を進めるごとに感度が向上しているが、軍事的には、魚雷誘導で-50~-70db、機雷探索で-70~-90db、対潜戦最終ローカリゼーションで-70~-90db、対潜戦浅水センサーで-100~-120db、対潜戦概要探索で-120~-160dbと、さらに高感度のものが求められていた。

船舶の電気推進に用いる超電導モーターについても、開発のたびに出力を上げてはいるものの、DTRCが提案する4万馬力(40,000HP)の超電導モーターにはまだ桁が異なっていた。

表5 海軍における超電導の応用研究のハイライト：NCSCでのSQUID磁気異常検出の開発

1975	MARK I システムの製造・試験 -40db(10 ⁻² γ/ft)稼働
1979	MARK II システムの製造・試験 -60db 稼働
1983	MARK III システムの製造・試験 ・ -80db 稼働を期待 ・ 船舶および航空機プラットフォームからの広範な展開:-60db
1983-1988	Mark III のパフォーマンスを低下させるいくつかのノイズ源を特定し、除去 改造マークII(マークIV)6.3A MADAMの開発により-80dbを期待

出所: *Superconductivity*, Naval Research Advisory Committee, Office of Naval Research, U.S. Navy (July 1989): 116. を基に筆者作成

表6 海軍における超電導の応用研究のハイライト：DTRCでの船舶の電気推進の開発

1970-1982	設計、構築、試験済みの400馬力システム(モーター、発電機、極低温システム)
1974-1984	搭載試験用に船に設置された、設計、製造、試験済みの3000馬力システム(モーター、発電機、極低温システム)
1984-1988	大型システムの継続開発

出所: *Superconductivity*, Naval Research Advisory Committee, Office of Naval Research, U.S. Navy (July 1989): 118. を基に筆者作成

海軍での超電導の研究開発に関しては、軍の研究所において多種多様な研究開発が積極的に行われていたという特徴がある。以下に詳述する。

1. 軍の研究所での研究開発

海軍の研究所、特に海軍調査研究所では、所属する研究員が自ら超電導体を用いた実験をし、論文を投稿している。海軍調査研究所において、どれくらいの数の研究者が超電導の研究に従事していたかを記載した文献は、本研究で調べた限りでは存在しなかったが、遡ることのできた1952年から、高温超電導体が発見される1986年までの間に、米国物理学会及び米国電気電子学会に投稿された論文やプロシーディングスの著者を見ると、任期のずれはあるとして60人以上はいると推察する。その中でもとりわけ重要と考える

のが、ファースト・オーサーあるいはラスト・オーサーとなっている論文の数からみて、ロバート・A・ヘイン(Robert A. Hein)、ドナルド・U・ガブサー(Donald U. Gubser)及びスチュワート・A・ウォルフ(Stuart A. Wolf)である。ヘインとガブサーは、物性研究を中心に、ウォルフは応用研究を中心にそれぞれ行っていたと推察する。

本研究で調べた中では、ヘインによる超電導研究の論文で最も古いのは、1952年に『フィジカル・レビュー』に掲載された「Size Effects in the Superconductivity of Cadmium (カドミウムの超電導におけるサイズ効果)」⁸⁰(再掲)であった。海軍調査研究所では1948年から超電導研究を始めたということであるので⁸¹、初期の研究成果であると考えられる。その後、1953年の「Superconductivity of Titanium (チタンの超電導)」⁸²、1957年の「Resistance Minimum of Magnesium: Electrical Resistivity below 1°K (マグネシウムの最小抵抗: 1ケルビン以下の電気抵抗)」⁸³、「Superconductivity of Uranium (ウランの超電導)」⁸⁴、1959年に『フィジカル・レビュー・レターズ』に掲載された「Superconductivity Versus Ferromagnetism in Lanthanum-Gadolinium Alloys (ランタン-ガドリニウム合金の超電導対強磁性)」⁸⁵と続く。ヘインは、さまざまな超電導物質の物性を調べていた。『フィジカル・レビュー』及び『フィジカル・レビュー・レターズ』は米国物理学会が発行する物理学の論文雑誌であり、主として基礎研究の論文が掲載される。

1960年代も1950年代と同様に基礎研究の報告が続く。1962年の「Superconductivity of Iridium (イリジウムの超電導)」⁸⁶、1963年の「Critical Magnetic Fields of Superconducting Molybdenum (超電導モリブデンの臨界磁界)」⁸⁷、「Superconductivity Below 20 Millidegrees (20ミリ度

⁸⁰ M. C. Steele and R. A. Hein, "Size Effects in the Superconductivity of Cadmium," *Physical Review* 87, No. 5 (1952): 908.

⁸¹ D. U. Gubser (ed.), *Compilation of NRL Publications on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 - 1 July 1987*, Naval Research Laboratory (1987): vii (preface).

⁸² M. C. Steele and R. A. Hein, "Superconductivity of Titanium," *Physical Review* 92, No. 2 (1953): 243.

⁸³ R. A. Hein and R. L. Falge, "Resistance Minimum of Magnesium: Electrical Resistivity below 1°K," *Physical Review* 105, no. 5 (1957): 1433.

⁸⁴ R. A. Hein, W. E. Henry, and N. M. Wolcott, "Superconductivity of Uranium," *Physical Review* 107, no. 6 (1957): 1517.

⁸⁵ R. A. Hein, R. L. Falge, Jr., B. T. Matthias, and C. Corenzwit, "Superconductivity Versus Ferromagnetism in Lanthanum-Gadolinium Alloys," *Physical Review Letters* 2, no. 12 (1959): 500.

⁸⁶ R. A. Hein, J. W. Gibson, B. T. Matthias, T. H. Geballe, and E. Corenzwit, "Superconductivity of Iridium," *Physical Review Letters* 8, no. 10 (1962): 408.

⁸⁷ R. A. Hein, J. W. Gibson, M. R. Pablo, and R. D. Blaugher, "Critical Magnetic Fields of Superconducting Molybdenum,"

以下の超電導)」⁸⁸、「Isotope Effect in Superconducting Osmium (超電導オスミウムの同位体効果)」⁸⁹、1964年の「Superconductivity in the NbMo System (ニオブ-モリブデン系における超電導)」⁹⁰、「Superconductivity in Germanium Telluride (テルル化ゲルマニウムの超電導)」⁹¹、「Superconductivity of Tungsten (タングステンの超電導)」⁹²、1966年の「Critical Magnetic Fields of Superconducting Ruthenium Isotopes and Search for an Isotope Effect (超電導ルテニウム同位体の臨界磁界及び同位体効果の探索)」⁹³、「Magnetic Properties of ZrZn₂ between 120°K and 0.1°K. Search for Superconductivity (120～0.1ケルビン間のZrZn₂[Zr:ジルコニウム、Zn:亜鉛]の磁気特性・超電導の探索)」⁹⁴、1969年の「Critical Magnetic Fields of Superconducting SnTe (テルル化スズの臨界磁界)」⁹⁵と、超電導体を対象とした物性研究が続く。

1970年代に入ると、ガブサー、そしてウォルフの論文が出てくる。また、米国物理学会に加え、米国電気電子学会への論文投稿もされるようになる。本研究で調べた中で、ガブサーによる超電導研究の最も古い論文は、1970年に『フィジカル・レビュー B (Physical Review B)』に掲載された「Superconductivity of Dilute Indium-Thallium Alloys (希薄インジウム-サリウム合金の超電導)」⁹⁶であった。超電導を示す合金の物性研究であり、基礎研究である。一方、本研究で調べた中で、ウォルフによる超電導研究の最も古い論文は、1974年に『IEEE トランザクション・オン・コミュニケーションズ (IEEE Transactions on Communications)』に掲載された「Superconducting

Physical Review 129, no. 1 (1963): 136-7.

⁸⁸ R. A. Hein, J. W. Gibson, and R. D. Blaugher, "Superconductivity Below 20 Millidegrees," *Physical Review Letters* 11, no. 1 (1963): 6-9.

⁸⁹ R. A. Hein and J. W. Gibson, "Isotope Effect in Superconducting Osmium," *Physical Review* 131, no. 3 (1963): 1105-10.

⁹⁰ R. A. Hein, J. W. Gibson, and R. D. Blaugher, "Superconductivity in the NbMo System," *Reviews of Modern Physics* 36, no. 1 (1964): 149-52.

⁹¹ R. A. Hein, J. W. Gibson, R. Mazelsky, R. C. Miller, and J. K. Hulm, "Superconductivity in Germanium Telluride," *Physical Review Letters* 12, no. 12 (1964): 320-2.

⁹² J. W. Gibson and R. A. Hein, "Superconductivity of Tungsten," *Physical Review Letters* 12, no. 25 (1964): 688-90.

⁹³ J. W. Gibson and R. A. Hein, "Critical Magnetic Fields of Superconducting Ruthenium Isotopes and Search for an Isotope Effect," *Physical Review* 141, no. 1 (1966): 407-11.

⁹⁴ R. L. Falge, Jr. and R. A. Hein, "Magnetic Properties of ZrZn₂ between 120°K and 0.1°K. Search for Superconductivity," *Physical Review* 148, no. 2 (1966): 940-5.

⁹⁵ R. A. Hein and P. H. E. Meijer, "Critical Magnetic Fields of Superconducting SnTe," *Physical Review* 179, no. 2 (1969): 497-511.

⁹⁶ D. U. Gubser, D. E. Mapother, and D. L. Connelly, "Superconductivity of Dilute Indium-Thallium Alloys," *Physical Review B* 2, no. 7 (1970): 2547-55.

Extremely Low Frequency (ELF) Magnetic Field Sensors for Submarine Communications (潜水艦通信用超電導超低周波(ELF)磁界センサー)」⁹⁷であった。これは、この3人にとって米国電気電子学会で掲載された初めての論文であった。ヘインやガブサーの研究とは異なり、潜水艦通信用という軍用途を想定した研究開発であった。

ヘイン、ガブサー、ウォルフは、論文によっては共著者となっている。本研究で調べた中で、ヘインとガブサーを著者に含む超電導研究の最も古い論文は、1976年の『フィジカル・レビューB』に掲載された「Electronic and superconducting properties of the Ti_3P -type compounds Nb_3As and Nb_3Si (Ti_3P 型化合物 Nb_3As [Nb:ニオブ, As:ヒ素]及び Nb_3Si [Nb:ニオブ, Si:ケイ素]の電子及び超電導特性)」⁹⁸であった。一方で、本研究で調べた中で、ガブサーとウォルフを著者に含む超電導研究の最も古い論文は、1979年の『フィジカル・レビュー・レターズ』に掲載された「Universal Current Scaling in the Critical Region of a Two-Dimensional Superconducting Phase Transition (2次元超電導相転移臨界領域におけるユニバーサル電流スケーリング)」⁹⁹であった。実用を見据えた超電導薄膜の基礎物性を調べるというものである。

ヘイン、ガブサーまたはウォルフが著者となり、米国物理学会及び米国電気電子学会にて発表された論文をまとめると、表7-1～表7-3のようになる。これらの表には、論文の掲載年、タイトル、掲載誌、著者、また、海軍調査研究所以外の機関に所属する研究者と共著の場合はその機関を記載している。これをみると、1950年代から1960年代は、ヘインによる米国物理学会の論文のみである。一方で、ベル研究所やウェスティングハウス研究所、アメリカ・カトリック大学の研究者との共著もあり、海軍調査研究所は企業や大学と共同研究を行っていたと考える。ベル研究所は、酸化物高温超電導体が発見されている現在でもなお、高い磁界を発生するために超電導磁石の線材として用いられている Nb_3Sn (ニオブ3・スズ)を1954年、同研究所のマティアス

⁹⁷ S. Wolf, J. Davis, and M. Nisenoff, "Superconducting Extremely Low Frequency (ELF) Magnetic Field Sensors for Submarine Communications," *IEEE Transactions on Communications* 22, no. 4 (1974): 549-54.

⁹⁸ D. U. Gubser, R. A. Hein, R. M. Waterstrat, and A. Junod, "Electronic and superconducting properties of the Ti_3P -type compounds Nb_3As and Nb_3Si ," *Physical Review B*, no. 14 (1976): 3856.

⁹⁹ S. A. Wolf, D. U. Gubser, and Y. Imry, "Universal Current Scaling in the Critical Region of a Two-Dimensional Superconducting Phase Transition," *Physical Review Letters* 42, no. 5 (1979): 324-7.

(Matthias)らのグループが発見¹⁰⁰した、超電導の歴史において重要な研究所である。

1970年代に入ると、ガブサー、ウォルフの論文、また、米国電気電子学会の論文誌における掲載もされるようになる。さらに、共著者の幅は広がり、オスロ大学、スイス連邦工科大学、テルアビブ大学といった外国の大学や、ロスアラモス科学研究所、国立標準局、ブルックヘブン国立研究所といった他省の国立研究所との共同研究もおこなわれた。外国の大学の研究者との共著論文は、どれも米国物理学会の学会誌であることから、その内容は基礎研究であると考えるが、基礎研究であるとしても、軍の研究所が外国の大学と共同研究をしていたというのは特徴的である。

1980年代に入ると、1970年代と比較して、米国物理学会と米国電気電子学会とに掲載される割合はあまり変わらない一方で、掲載される本数が増えている。これは、学会誌のキャパシティーが増えたということも考えられるが、それ以前には見られなかった有機超電導体 ($(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ 、 $(\text{TMTSF})_2\text{FSO}_3$) が報告内容に加わっており、常に新しい超電導体の物性研究に取り組んでいたものと推察する。

¹⁰⁰ 太刀川恭治「ニオブ 3・すず線材物語」『低温工学』第39巻第9号、2004年、377-382頁。

表7-1 APS、IEEEにおけるヘイン、ガブサー、ウォルフの発表論文（'50～'60年代）

年	論文タイトル [共著者の所属 ※ある場合]	APS / IEEE	Hein / Gubser / Wolf
1952	Size Effects in the Superconductivity of Cadmium	APS	Hein
1953	Superconductivity of Titanium	APS	Hein
1957	Size Effects in the Superconductivity of Cadmium	APS	Hein
同	Resistance Minimum of Magnesium: Electrical Resistivity below 1°K	APS	Hein
同	Superconductivity of Uranium	APS	Hein
1959	Superconductivity Versus Ferromagnetism in Lanthanum-Gadolinium Alloys [ベル研究所と]	APS	Hein
1962	Superconductivity of Iridium [ベル研究所と]	APS	Hein
1963	Critical Magnetic Fields of Superconducting Molybdenum [ウェスティングハウス研究所と]	APS	Hein
同	Superconductivity Below 20 Millidegrees [ウェスティングハウス・エア・アームと]	APS	Hein
同	Isotope Effect in Superconducting Osmium	APS	Hein
1964	Superconductivity in the NbMo System [ウェスティングハウス・エア・アームと]	APS	Hein
同	Superconductivity in Germanium Telluride [ウェスティングハウス研究所と]	APS	Hein
同	Superconductivity of Tungsten	APS	Hein
1966	Critical Magnetic Fields of Superconducting Ruthenium Isotopes and Search for an Isotope Effect	APS	Hein
同	Magnetic Properties of ZrZn ₂ between 120°K and 0.1°K. Search for Superconductivity	APS	Hein
1969	Critical Magnetic Fields of Superconducting SnTe [アメリカ・カトリック大学と]	APS	Hein

出所：米国物理学会(APS)、米国電気電子学会(IEEE)のウェブサイトを基に筆者作成

表7-2 APS、IEEEにおけるヘイン、ガブサー、ウォルフの発表論文('70年代)

年	論文タイトル [共著者の所属 ※ある場合]	APS / IEEE	Hein / Gubser / Wolf
1970	Superconductivity in TlBiTe ₂ : A Low Carrier Density (III-V) VI ₂ Compound	APS	Hein
同	Superconductivity of Dilute Indium-Thallium Alloys	APS	Gubser
1972	Anisotropy and Strong-Coupling Effects on the Critical-Magnetic-Field Curve of Elemental Superconductors	APS	Gubser
1973	Critical Magnetic Field and Energy-Gap Anisotropy of Zinc	APS	Gubser
1974	Superconducting Extremely Low Frequency (ELF) Magnetic Field Sensors for Submarine Communications	IEEE	Wolf
1975	High-Pressure Effects on the Superconducting Transition Temperature of Aluminum	APS	Gubser
同	Thermodynamic properties of superconducting β -Ga and α -Ga [オスロ大学と]	APS	Gubser
同	Limiting Flux-Passage Time in Narrow Superconductors [ロスアラモス科学研究所と]	APS	Wolf
同	Observation of sine modulated bessel behavior in microwave biased SQUIDs [ケース・ウェスタン・リザーブ大学と]	IEEE	Wolf
1976	Electronic and superconducting properties of the Ti3P-type compounds Nb ₃ As and Nb ₃ Si [国立標準局、ジュネーブ大学と]	APS	Hein, Gubser
1977	Preparation of continuous, superconducting and high strength Nb ₃ Ge composite filament [ベネット兵器研究所ウォーターヴリートと]	IEEE	Gubser
同	Critical current properties of multifilament V ₃ Ga wire at temperatures above 4.2 Kelvin	IEEE	Gubser
同	Thin film Niobium SQUIDs at 20 MHz and 9 GHz	IEEE	Wolf
同	Techniques for Ocean Bottom Measurements of Magnetic Fields with a Superconducting Magnetometer	IEEE	Wolf
1978	Superconductivity in Ti ₃ P-type compounds [国立標準局と]	APS	Hein
1979	Superconducting properties of A-15 V _{75-x} M _x Ga ₂₅ compounds: M = Ti, Cr, Mn, Fe, Co, and Ni [スイス連邦工科大学と]	APS	Gubser
同	Universal Current Scaling in the Critical Region of a Two-Dimensional Superconducting Phase Transition [テルアビブ大学と]	APS	Gubser Wolf
同	Effects of pressure on the structural and superconducting properties of Nb ₃ As, Nb ₃ Si, Nb ₃ Ge, and Nb _{0.82} Ge _{0.18} [メリーランド大学、国立標準局、ブルックヘブン国立研究所と]	APS	Hein, Gubser
同	Multifilamentary V ₃ Ga wire: A critical review	IEEE	Gubser
同	Granular niobium and high T _c niobium nitride variable thickness weak link SQUIDs	IEEE	Wolf
同	Limiting response times in a granular niobium weak link [アメリカ・カトリック大学と]	IEEE	Wolf

出所: 米国物理学会(APS)、米国電気電子学会(IEEE)のウェブサイトを基に筆者作成

表7-3 APS、IEEEにおけるヘイン、ガブサー、ウォルフの発表論文('80~'86)

年	論文タイトル [共著者の所属 ※ある場合]	APS / IEEE	Hein / Gubser / Wolf
1980	Superconducting transition temperatures in pseudobinary A15 compounds	APS	Gubser
1981	Magnetic susceptibility and resistive transitions of superconducting $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$: Critical magnetic fields [ジョンズ・ホプキンス大学、エクソン研究・工学カンパニーと]	APS	Gubser
同	Two-Dimensional Phase Transition in Granular NbN Films [オハイオ州立大学、シンシナティ大学と]	APS	Gubser Wolf
同	Superconducting materials: Ten years do make a difference	IEEE	Hein
同	Recent developments on processing and properties of V_3Ga composite wires	IEEE	Gubser
同	Fluctuations and the return to the superconducting state in granular microbridges [アメリカ・カトリック大学 / アイオワ大学と]	IEEE	Wolf
同	Superconducting properties of reactively sputtered NbCN thin films	IEEE	Wolf
1982	Critical properties of the random dipolar-coupled ferromagnet $\text{LiTb}_p\text{Y}_{1-p}\text{F}_4$ [ペンシルベニア大学と]	APS	Gubser
同	Magnetic-field-induced superconductivity [ロスアラモス国立研究所、カリフォルニア大学サンディエゴ校、東北大学と]	APS	Wolf
同	Partial Gapping of the Fermi Surface and Superconductivity in $\text{Eu}_x\text{Mo}_6\text{S}_8$ [ロスアラモス国立研究所、カリフォルニア大学サンディエゴ校と]	APS	Wolf
同	Anomalous superconducting properties of $\text{SnxEu}_{1.2-x}\text{Mo}_6\text{S}_8$ at high pressure and high magnetic field [ロスアラモス国立研究所、カリフォルニア大学サンディエゴ校、東北大学と]	APS	Wolf
1983	Far-infrared conductivity and anomalous below-gap absorption in superconducting granular NbN [エモリー大学と]	APS	Gubser Wolf
同	Metallurgical and superconducting properties of multifilamentary V_3Ga wires	IEEE	Gubser
同	Metal-insulator transitions and superconductivity in ditetramethyltetraselenafulvalenium fluorosulfonate $[(\text{TMTSF})_2\text{FSO}_3]$ [カリフォルニア大学ロサンゼルス校、バル研究所と]※WolfもUCLAとして	APS	Wolf
同	Superconducting transition temperature in anodized aluminum [カリフォルニア大学ロサンゼルス校と]	APS	Wolf
同	A novel technique for preparation of tunnel junction barriers using electrochemical anodization [カリフォルニア大学ロサンゼルス校と]	IEEE	Wolf
1984	Superconductivity of VN under pressure [カリフォルニア大学サンディエゴ校、ロスアラモス科学研究所と]	APS	Wolf
同	Phonon transport in photoexcited GaAs	APS	Wolf
1985	Fractal Aggregates in Sputter-Deposited NbGe ₂ Films [デュボンと]	APS	Gubser Wolf
同	Superconductivity in FCC $\text{Mo}_x\text{Nb}_{1-x}(\text{N}_y\text{C}_{1-y})_z$ thin films	IEEE	Gubser Wolf
同	Multilayer Nb ₃ Sn superconducting shields	IEEE	Gubser Wolf
同	Temperature and field dependence of critical currents in V_3Ga wire produced by the MJR technique	IEEE	Gubser
同	Thermal sensitivity of an rf SQUID	IEEE	Gubser Wolf
同	Tunneling $\alpha_2F(\omega)$ from sputtered thin-film NbN	APS	Wolf
同	Superconducting granular NbN bolometer for ultrafast spectroscopy	IEEE	Wolf
1986	ac magnetic susceptibility, Meissner effect, and bulk superconductivity	APS	Hein

出所: 米国物理学会(APS)、米国電気電子学会(IEEE)のウェブサイトを基に筆者作成

ここで、これらの研究開発がどのような資金でなされていたかを見る。1985年、海軍調査研究所のガブサー、ウォルフ、フランカビツラ(T. L. Francavilla)、クラスセン(J. H. Claassen)、ダス(B. N. Das)による「Multilayer Nb₃Sn Superconductivity Shields (多層ニオブ3・スズ超電導シールド)」の謝辞には、「われわれは、NAVAIRコード330に対し、契約番号N0001984WR41102を通じて、この研究をサポートしてくれたことに感謝します。」とあった。本研究開発は、海軍航空システム司令部(The Naval Air Systems Command: NAVAIR)とのcontractの上で行われていた。海軍航空システム司令と海軍調査研究所であれば、海軍内部のことであるので、この契約に基づく支援に資金の移動が伴わない可能性もある。しかしながら、これが資金の移動を伴う契約であるとする、海軍調査研究所は、独自の研究開発費に加え、海軍の各司令部から個別のプロジェクトについて研究開発費を得ていたということになる。

本研究で調べた中で、海軍調査研究所以外の研究所の研究員による論文発表や技術報告書は、2点ほどある。一つは、1973年に海軍船舶研究開発センター(Naval Ship Research and Development Center: NSRDC)のT・J・ドイル(T. J. Doyle)による報告書「Superconductive D-C Ship Drive Systems (超電導直流船舶駆動システム)」¹⁰¹で、船舶用の高出力超電導モーターを報告するものである。もう一つは、1981年にデビッド・W・テイラー海軍船舶研究開発センター(David W. Taylor Naval Research and Development Center: DTNRDC)のD・J・ウォルトマン(D. J. Waltman)らによる報告書「Stability Characteristics of Epoxy-Impregnated Superconducting Magnets (エポキシ含浸超電導磁石の安定性の特性)」¹⁰²で、超電導コイルの超電導状態が、まわりの磁界、流れる電流、流入する熱でどのように壊れるかを調べたものである。これらは、艦艇の電動化、さらにはその大型化に対する要求に、基礎研究からプロトタイプの試作までの幅広い研究開発で対応しようとしていた。

¹⁰¹ T. J. Doyle, *Superconductive D-C Ship Drive Systems*, Naval Ship Research and Development Center, MD (1973).

¹⁰² D. J. Waltman, M. J. Superczynski, and F. E. McDonald, *Stability Characteristics of Epoxy-Impregnated Superconducting Magnets*, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, MD (1981).

2. 外部へのファンディング

この時期に海軍から大学や企業など外部の機関に出されたファンディングを調べたところ、謝辞 (Acknowledgement) などに海軍からの contract や grant のことが記載されている論文はほぼ存在しなかった。一方で、海軍との contract に基づく報告書は存在した。本研究で調べた中で最も古いものは、海軍水上戦センター (Navy Surface Weapons Center: NSWC) から空軍航空推進研究所 (Air Force Aero-Propulsion Laboratory) を通じてテキサス・テック大学に行われた contract に対する 1978 年の最終報告書「A Critical Analysis and Assessment of High Power Switches (高出力スイッチの重要な分析と評価)」¹⁰³である。管型スイッチ、固体スイッチ、避雷器など多様なスイッチを分析・評価する一環で、超電導スイッチも対象になっている。

翌 1979 年には、ユナイテッド・テクノロジー社 (United Technologies) から海軍研究局に、contract に基づく報告書「Lightweight Propulsion Systems for Advanced Naval Ship Applications (先進的艦艇用軽量推進システム)」¹⁰⁴が提出されている。超電導の利用により艦艇の動力の軽量化を図ろうとしていた。また、同年、ウェスティングハウス・エレクトリック社 (Westinghouse Electric Corporation) から ONR に、contract に基づく「Compact Closed Cycle Brayton System Feasibility Study (小型閉鎖サイクル・ブレイトンシステムの実現可能性調査)」¹⁰⁵の最終報告書が提出されており、この中で、小型で軽量の艦艇推進プラントの計算にあたって超電導発電機と超電導モーターが考慮されていた。

1984 年には、ONR からの contract に基づき、マサチューセッツ工科大学から海軍調査研究所に「Survey of the State-of-the-Art of Miniature Cryocoolers for Superconductive Devices (超電導デバイス用小型極低温冷凍機の最先

¹⁰³ Tom R. Burkes, *A Critical Analysis and Assessment of High Power Switches*, Report Submitted to the Naval Surface Weapons Center (1978). 契約番号は Contract F33615-77-C-2059.

¹⁰⁴ Simion C. Kuo, *Lightweight Propulsion Systems for Advanced Naval Ship Applications*, Report Prepared for the Office of Naval Research (1979). Contract No. N00014-76-C0542, No. N00014-77-C-0735.

¹⁰⁵ R. E. Thompson, R. L. Ammon, R. Calvo, L. R. Eisenstatt, F. R. Spurrier, B. L. Pierce, G. O. Yatsko, A. Pietsch, and B. B. Heath, *Compact Closed Cycle Brayton System Feasibility Study, Volume II*, Final Report to the Office of Naval Research (1979). Contract No. N00014-76-C-0706.

端技術調査)」¹⁰⁶の最終報告書が提出されている。

(2) 陸軍

1. 外部へのファンディング

次は、陸軍に着目する。前掲した、1949年に米国無線学会(当時)のプロシーディングスに掲載された「Detection at Radio Frequencies by Superconductivity (超電導による高周波数検出)」は、4人の著者のうちのひとり、C・W・クラーク(C. W. Clark)は米陸軍弾道研究所の所属で、残る3人のJ・V・レバクス(J. V. Lebacqz)、M・C・ウィリアムズ(M. C. Williams)、D・H・アンドリュー(D. H. Andrews)は、ジョンズ・ホプキンス大学の所属である。この研究の少なくとも一部は、陸軍からジョンズ・ホプキンス大学へのファンディングにより行われていたと推察する。

1956年に『フィジカル・レビュー』に掲載された、イリノイ大学のレオン・N・クーパー(Leon N. Cooper)による「Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas(縮退フェルミ気体中の束縛電子対)」¹⁰⁷も陸軍の資金提供による研究開発に関する論文である。これは、1957年にバーディーン、シュリーファーと連名で、後にBCS理論と呼ばれる理論を発表する前、クーパー単独で、後に「クーパー対(Cooper Pair)」と呼ばれる概念を示したときの論文である。

同じく、1956年には、前述したように、米陸軍がA・D・リトル社(A. D. Little Incorporated)に対して資金提供した研究の成果が、米国電気学会(AIEE(当時))と米国無線学会(IRE(当時))の合同会議「Eastern Joint Computer Conference: New Developments in Computers」において、「A Cryotron Catalog Memory System (クライオトロン・カタログ・メモリー・システム)」として発表されている。

1961年には、『フィジカル・レビュー・レターズ』に、スタンフォード大学のバ

¹⁰⁶ J. L. Smith Jr., G. Y. Robinson, Jr., and Y. Iwasa, *Survey of the State-of-the-Art of Miniature Cryocoolers for Superconductive Devices*, NRL Memorandum Report 5490 (1984). Contract N00014-83-K-0327.

¹⁰⁷ Leon N. Cooper, "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas," *Physical Review* 104, no. 4 (1956): 1189-90.

スコム・S・ディーバー (Bascom S. Deaver) とウィリアム・M・フェアバンク (William M. Fairbank) による「Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders (超電導円筒における量子化磁束の実験的証拠)」¹⁰⁸が掲載されている。これには、「国立科学財団、兵器研究局、およびリンデ社 (Linde Company) からの補助金によって部分的に支援された研究」とある。米陸軍の支援が国立科学財団 (NSF) や企業からの支援と同列に扱われている。この研究は、量子化された磁束を円筒状の超電導体で観測できるという実験のようであるが、ジョセフソンが、後に「ジョセフソン効果」と呼ばれる現象を理論的に証明したのが1962年であり、ジョセフソンの研究に影響を与えたであろうことが想像される。そうであれば、ジョセフソン結合、さらには、それを応用する量子センサーや量子コンピューターにつながる研究が、陸軍の支援の下に行われていたとも言える。

1963年、テキサス大学の電子材料研究所から米陸軍通信研究開発研究所 (U.S. Army Signal Research and Development Laboratory) に提出された、「Superconductive Frequency Control Devices (超電導周波数制御デバイス)」の第3四半期報告書¹⁰⁹には、同研究は契約番号 DA-36-039-AMC-00036(E) の契約により行われていたことが示されている。短波 (HF)、超短波 (VHF) の通信に超電導の共振回路を用いようとする研究である。

1966年には、米陸軍航空資材研究所 (U.S. Army Aviation Materiel Laboratory) がダイナテック社 (Dynatech Corporation) に対して行った契約「Superconducting Electrical Machinery as a Means of Power Transmission in Aircraft (航空機の動力伝達手段としての超電導電気機械)」の成果報告書¹¹⁰が作成されている。すでにこの頃には航空機のトランスミッションとして超電導を利用しようとする技術開発が行われていた。また、これが空軍ではなく陸軍であったということは、三軍による調整の結果ということも考えら

¹⁰⁸ Bascom S. Deaver Jr., and William M. Fairbank, "Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders," *Physical Review Letters* 7, no. 2 (1956): 43-6.

¹⁰⁹ William H. Hartwig, *Superconductive Frequency Control Devices*, Quarterly Report no. 3, 1 January 1963 to 31 March 1963, AD0411961 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963).

¹¹⁰ Hugh A. Robinson, John R. Blutt, Henry W. Mooncai, *Superconducting Electrical Machinery as a Means of Power Transition in Aircraft*, AD0629635 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966). Contract DA 44-177-AMC-288(T).

れるが、一方で、空軍も、そして海軍も同様の技術開発を、連携することなく独自に行っていた可能性も考えられる。

同年、イリノイ大学のエリック・P・ハリス(Eric P. Harris)による報告書「Critical Field of Superconducting Aluminum as a Function of Temperature and Pressure Above 0.3°K (0.3ケルビン以上の温度と圧力の関数としての超電導アルミニウムの臨界場)」¹¹¹が米陸軍兵器研究局に提出されている。超電導アルミニウムの低温での温度依存性、圧力依存性を測定し、BCS理論を検証する基礎研究である。

1971年には、ミネソタ大学のラマスブラマニアン・ソマスンダラム(Ramasubramanian Somasundaram)とルイス・E・トス(Louis E. Toth)による報告書「Studies of Superconducting Thin Film Carbides and Nitrides (超電導薄膜炭化物・窒化物の研究)」¹¹²が米陸軍機動装備研究開発センター(U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Center)に提出されている。薄膜化することにより超電導の用途は広がると考えられるが、ミネソタ大学も、機動装備研究開発センターも、これまでには見られなかったところであり、米陸軍における超電導の研究開発に携わるアクターが増えている。

1974年には、パデュー大学のJ・A・ラファロウィッツ(J. A. Rafalowicz)による報告書「Analysis of Thermal Conductivity Data for Fourteen Elements in Normal and Superconducting States (常電導・超電導状態における14元素の熱伝導率データの解析)」¹¹³が米陸軍材料・メカニクス研究センター(Army Materials and Mechanics Research Center)に提出されている。複数の超電導体の熱伝導率を計測、解析したものである。これもまた、アクターが増えている。

1979年には、カリフォルニア大学バークレー校のT・ヴァン＝ドゥザー(T. Van Duzer)による報告書「Superconducting Weak Links for Mixing at

¹¹¹ Eric P. Harris, *Critical Field of Superconducting Aluminum as a Function of Temperature and Pressure Above 0.3°K*, AD0645738 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966).

¹¹² Ramasubramanian Somasundaram, and Louis E. Toth, *Studies of Superconducting Thin Film Carbides and Nitrides*, AD0753359 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1971). Contract No. DAAK 02-70-C-0181.

¹¹³ J. A. Rafalowicz, *Analysis of Thermal Conductivity Data for Fourteen Elements in Normal and Superconducting States*, ADA129057 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1974).

Millimeter-Wave Frequencies (ミリ波周波数でのミキシングのための超電導弱結合)」¹¹⁴が米陸軍研究局(U.S. Army Research Office)に提出されている。ジョセフソン・デバイスをミリ波のミキサーに応用しようというもののようであり、応用研究と推察するが、contractではなく、grantである。

1986年には、メリーランド大学のH・J・パイク(H. J. Paik)による報告書「Development of Electronic Control of a Superconducting Gravity Gradiometer – Phase II (超電導重力勾配計の電子制御の開発 フェーズII)」¹¹⁵が米陸軍工兵隊(U.S. Army Corp of Engineers)に提出されている。これは、アメリカ航空宇宙局(NASA)の超電導重力勾配計を開発するためのフィードバック回路の設計と製作を陸軍の資金で行うというものである。

これらをまとめると、表8のようになる。企業に対してはcontractで共通しているのに対し、大学に対しては、contractの場合とgrantの場合がある。また、イリノイ大学を除けば、報告書の提出は一度だけであり、単発の研究開発プロジェクトが散発的に行われていたと考察される。

¹¹⁴ T. Van Duzer, *Superconducting Weak Links for Mixing at Millimeter-Wave Frequencies*, ADA080571 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1979). Grants DA-ARO-D-31-124-73-G165; DAAG29-76-G-0191.

¹¹⁵ H. J. Paik, *Development of Electronic Control of a Superconducting Gravity Gradiometer – Phase II*, ADA174794 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1986). DACA72-85-C-0010.

表8 陸軍が行った外部へのファンディングに基づく文献

年	タイトル	実施機関	陸軍側	Contract /Grant
1949	Detection at Radio Frequencies by Superconductivity	ジョンズ・ホプキンス大学	弾道研究所	(不明)
1956	Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas	イリノイ大学	兵器研究局	(不明)
同	A Cryotron Catalog Memory System	A・D・リトル社	通信部隊	Contract
1957	Theory of Superconductivity	イリノイ大学	兵器研究局	(不明)
1961	Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders	スタンフォード大学	兵器研究局	Grant
1963	Superconductive Frequency Control Devices	テキサス大学	通信研究開発研究所	Contract
1966	Superconducting Electrical Machinery as a Means of Power Transmission in Aircraft	ダイナテック社	航空資材研究所	Contract
同	Critical Field of Superconducting Aluminum as a Function of Temperature and Pressure Above 0.3°K	イリノイ大学	兵器研究局、研究局	(不明)
1971	Studies of Superconducting Thin Film Carbides and Nitrides	ミネソタ大学	機動装備研究開発センター	Contract
1974	Analysis of Thermal Conductivity Data for Fourteen Elements in Normal and Superconducting States	パデュー大学	材料・メカニクス研究センター	(不明)
1979	Superconducting Weak Links for Mixing at Millimeter-Wave Frequencies	カリフォルニア大学	研究局	Grant
1986	Development of Electronic Control of a Superconducting Gravity Gradiometer – Phase II	メリーランド大学	工兵隊	Contract

出所：本研究調べ、ウェブサイト等を基に筆者作成

2. 軍の研究所での研究開発

陸軍の研究所での研究成果は、学術論文誌ではなく、研究所の技術報告書として報告されている。本研究で調べた中で最も古いものは、1963年に陸軍エレクトロニクス研究開発研究所（U.S. Army Electronics Research and Development Laboratories（当時）。現在は、U.S. Army, DEVCOM Army Research Laboratory）のジャーハート・K・ゴーレー（Gerhart K. Gaulé）による報告書「Rules for the Occurrence of Superconductivity among the Elements, Alloys, and Compounds（元素、合金、化合物における超電導の発生に関する

る規則)」¹¹⁶である。多様な超電導物質を比較し、超電導発生の規則を見出そうとする理論的な研究と推察する。これには、陸軍がイリノイ大学に委託契約をして行い、後にBCS理論として結実する超電導の理論研究が関係していると推察する。

1967年、陸軍核防衛研究所(U.S. Army Nuclear Defense Laboratory(当時))のD・B・サリバン(Donald B. Sullivan)による報告書「A Superconducting Thin-Film Nuclear-Particle Detector(超電導薄膜核粒子検出器)」¹¹⁷は、放射性元素の微粒子の検出に超電導を用いるものである。

1976年、米陸軍機動装備研究開発センター(U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Command)のJ・トーマス・ブローチ(J. Thomas Broach)による報告書「Measurements of AC Losses in Superconductors below H_{c1} (H_{c1} 以下の超電導体の交流損失の測定)」¹¹⁸では、第II種超電導体で作成したソレノイドで生じる交流損失を測定した結果を報告している。

1970年代には、米国電気電子学会における発表もなされるようになる。1977年、ベネ兵器研究所(Benét Weapons Laboratory(当時)。現在は、Benét Laboratories。米陸軍戦闘能力開発司令部兵器センターの一部で、陸軍の研究、開発及びエンジニアリングの施設である。)のI・アハマド(I. Ahmad)、W・ヘファーナン(W. Heffernan)、そして海軍調査研究所のガブサーにより『IEEEトランザクションズ・オン・マグネティクス(IEEE Transactions on Magnetics)』にて発表された「Preparation of continuous, superconducting and high strength Nb_3Ge composite filament(連続、超電導及び高強度のニオブ3・ゲルマニウム複合フィラメントの製造)」¹¹⁹は、ニオブ3・ゲルマニウムによる実用的な超電導線材の研究開発である。また、陸軍と海軍の研究者の共著でもある。

¹¹⁶ G. K. Gaulé, *Rules for the Occurrence of Superconductivity among the Elements, Alloys and Compounds*, AD0402708 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963).

¹¹⁷ Donald B. Sullivan, *A Superconducting Thin-Film Nuclear-Particle Detector*, AD0660338 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967).

¹¹⁸ J. Thomas Broach, *Measurements of AC Losses in Superconductors below H_{c1}* , ADA038393 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1976).

¹¹⁹ I. Ahmad, W. J. Heffernan, and D. U. Gubser, "Preparation of Continuous, Superconducting and High Strength Nb_3Ge Composite Filament," *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 483-6.

さらに1979年、ハリー・ダイヤモンド研究所 (Harry Diamond Laboratories。陸軍エレクトロニクス研究開発司令部の研究施設である。)のJ・D・シルバーステイン(J. D. Silverstein)、及び海軍調査研究所のM・リード(M. Read)により、米国電気電子学会 (IEEE)の、サブミリメートル波及びその応用に関する国際会議 (1979 International Conference on Submillimeter Waves and Their Applications)にて「Design Considerations for a 240-GHz Gyromonotron (240GHzジャイロモノトロン)の設計上の考慮事項」¹²⁰が発表されている。超電導体を用いたマイクロ波の発信に関する研究開発であるが、これもまた陸軍と海軍の研究者が共著となっている。

同年には、ベネ兵器研究所 (当時)のL・V・メイセル(L. V. Meisel)とP・J・コート(P. J. Cote)により『フィジカル・レビュー・B』にて「Influence of electron mean free path on superconducting transition temperature (超電導転移温度に及ぼす電子平均自由行程の影響)」¹²¹が発表されている。これは、理論研究と推察する。軍の研究所といえば、新たな装備の研究開発をするところという印象が先行しかねないが、1963年のゴーレーの報告書から連綿と、陸軍の研究所で理論研究がなされていたと言える。

1980年代には、ベネ兵器研究所 (当時)の技術報告書が複数ある。1981年5月には「Superconductivity in Pressure Quenched Cadmium Sulfide at 77 K (圧力を解放した硫化カドミウムにおける77Kでの超電導)」¹²²が報告されている。硫化カドミウムは、銅酸化物超電導体が発見されるまでは、当時のいわゆる高温超電導体の候補と考えられていたものの一つであり、陸軍が高温超電導体を探していたことが分かる。この技術報告書の内容は、1981年8月19～25日にカリフォルニア州ロサンゼルスで開催される第16回低温物理学国際会議 (XVI International Conference on Low Temperature Physics)、及び、米国物理学会の学会誌である『フィジカル・レビュー・レター』にて発表される予定であるとあった。

¹²⁰ J. D. Silverstein, and M. Read, "Design Considerations for a 240-GHz Gyromonotron," *1979 International Conference on Submillimeter Waves and Their Applications* (1979)

¹²¹ L. V. Meisel, and P. J. Cote, "Influence of Electron Mean Free Path on Superconducting Transition Temperature," *Physical Review B* 19, no. 9 (1979): 4514-7.

¹²² C. G. Homan, K. Laojindapun, and R. K. MacCrone, *Superconductivity in pressure quenched cadmium sulfide at 77 K*, ADA101265 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1981).

同年には、技術報告書「Superconductivity in Hydrogen-Charged Copper-Implanted Palladium（水素添加銅含有パラジウムにおける超電導）」¹²³が報告されている。パラジウム水素化物も、銅酸化物超電導体が発見されるまでは、当時のいわゆる高温超電導体の候補と考えられていたものの一つであった。この報告書の内容は、1981年9月にフランスのグルノーブルで開催された第3回イオンビーム国際会議（Third Ion Beam International Meeting）で発表されたものであり、また、『ジャーナル・オブ・フィジクスA（Journal of Physics A）』にて発表される予定であるとあった。

さらに、1987年には、技術報告書「Superconducting Augmented Rail Gun (SARG)（超電導拡張レールガン）」¹²⁴が報告されている。陸軍が超電導を用いたレールガンを開発しようとしていた証左である。

以上に挙げた、陸軍の研究機関の研究者が著者となっている学術論文、技術報告書をまとめると表9のようになる。陸軍においては、ベネ兵器研究所（当時）が超電導技術の研究開発の中心であったと推察する。

¹²³ A. Leiberich, W. Scholz, W. J. Standish, and C. G. Homan, *Superconductivity in Hydrogen-Charged Copper-Implanted Palladium*, ADA110133 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1981).

¹²⁴ Clarke G. Homan, and Wilfred Scholz, *Superconducting Augmented Rail Gun (SARG)*, ADA179269 (Fort Belvoir, VA: Defense Information Center, 1987).

表9 陸軍の研究所の研究者が著者である超電導の文献

<p>U.S. Army Ballistic Research Laboratory</p> <ul style="list-style-type: none"> • Detection at Radio Frequencies by Superconductivity (Proc., IRE, 1949) <p>U.S. Army Electronics Research and Development Laboratories</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rules for the Occurrence of Superconductivity among the Elements, Alloys, and Compounds (Tech. Report, 1963) <p>U.S. Army Nuclear Defense Laboratory</p> <ul style="list-style-type: none"> • A Superconducting Thin-Film Nuclear-Particle Detector (Tech. Report, 1967) <p>Benét Weapons Laboratory</p> <ul style="list-style-type: none"> • Preparation of continuous, superconducting and high strength Nb₃Ge composite filament (IEEE, 1977) • Influence of electron mean free path on superconducting transition temperature (APS, 1979) • Superconductivity in Pressure Quenched Cadmium Sulfide at 77 K (Tech. Report, 1981) • Superconductivity in Hydrogen-Charged Copper-Implanted Palladium (Tech. Report, 1981) • Superconducting Augmented Rail Gun (SARG) (Tech. Report, 1986) <p>Harry Diamond Laboratories</p> <ul style="list-style-type: none"> • Design Considerations for a 240-GHz Gyromonotron (IEEE, 1979)

出所：米国物理学会(APS)、米国電気電子学会(IEEE)のウェブサイトを基に筆者作成

注：他機関の研究者との共著を含む。

注：研究所の名称は当時のもの。

(3) 空軍

1. 外部へのファンディング

空軍に関しては、調べた文献のほとんどは外部機関へのファンディングによるもので、軍の研究所の研究者による論文や技術報告書は、ほぼ存在しなかった。まずは、外部へのファンディングを見る。

1961年、イリノイ大学のアンジェロ・バーダシス(Angelo Bardasis)が、空軍科学研究局(Air Force Office of Scientific Research)固体科学部門(Solid State Science Division)に提出した技術報告書「Part I: Excitons and Plasmons in Superconductors, Part II: Lifetime Effects in Condensed Fermion System (第1部:超電導体における励起子とプラズモン 第2部:凝縮フェルミオン系における寿命効果)」¹²⁵は、超電導の理論研究であるが、同

¹²⁵ Angelo Bardasis, *Part I: Excitons and Plasmons in Superconductors, Part II: Lifetime Effects in Condensed Fermion*

契約の研究代表者 (Principal Investigator) は、BCS理論の、J・R・シュリーファー (J. R. Schrieffer) である。イリノイ大学には陸軍が管理する研究所があり、そしてその研究所が陸海空三軍との一体の契約をして研究開発をしており、その上でさらに、海軍と原子力委員会の共同プログラムによる支援、また、空軍による支援を受けていた研究プロジェクトについてききに挙げたが、この研究もその流れの中にあるものと推察する。

1963年、ラジオ・コーポレーション・オブ・アメリカ (Radio Corporation of America) が、空軍システム司令部 (Air Force Systems Command) 航空システム部門 (Aeronautical System Division) 材料・プロセス部 (Directorate of Materials and Processes) に提出した技術報告書「Superconductivity in Metals and Alloys (金属および合金における超電導)」¹²⁶では、Nb₃Sn (ニオブ3・スズ) の作製および特性について報告している。

同年、ウェスティングハウス・エレクトリック社が、ライト・パターソン空軍基地航空システム部門 (Aeronautical Systems Division) に提出した技術報告書「Superconducting Magnet Research and Application to MHD Power Generators (超電導磁石の研究とMHD発電機への応用)」¹²⁷では、超電導磁石と電磁流体を用いたMHD発電 (MHD: magnetohydrodynamics、磁気流体力学) の宇宙での利用を目的とし、技術的な検討を始めたことが報告されている。

1967年、テキサス・インスツルメンツ社 (Texas Instruments Incorporated) が、空軍システム司令部研究・技術部門 (Research and Technology Division) ローム空軍開発センター (Rome Air Development Center) に提出した技術報告書「Fabrication and Testing of 5000 Word Cryogenic Associative Processor (5000ワードの低温アソシアティブ・プロセッサの製作と試験)」¹²⁸では、クライオトロンを用いた超電導コンピューターのプロセッサを開発していること

System, AD0271181 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1961). Contract No. AF 49(638)-882.

¹²⁶ W. H. Cherry, G. D. Cody, J. L. Cooper, G. Cullen, J. I. Gittleman, J. J. Hanak, M. Rayl, and F. D. Rosi, *Superconductivity in Metals and Alloys*, ADA280738 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963). Contract No. AF33(657)7733.

¹²⁷ *Superconducting Magnet Research and Application to MHD Power Generators*, AD0405829 (Fort Belvoir, VA: Defense Information Center, 1963). Contract No. AF 33(657)-10567.

¹²⁸ J. Paul Pritchard Jr., *Fabrication and Testing of 5000 Word Cryogenic Associative Processor*, AD0811983 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967). Contract No. AF 30(602)-3737.

が報告されている。

同年、デイトン・エレクトロニック・プロダクツ社 (Dayton Electronic Products Co., Inc.) のバーナード・M・シュミット (Bernhard M. Schmidt) が、航空宇宙研究局 (Office of Aerospace Research) 空軍ケンブリッジ研究所 (Air Force Cambridge Research Laboratories) に提出した科学報告書「Electrically-Small, Superconducting Antennas (電氣的小型超電導アンテナ)」¹²⁹では、アンテナの小型化に超電導を利用する試みが報告されている。

1971年、エアロスペース社 (Aerospace Corporation) のH・カンター (H. Kanter) らが、空軍システム司令部宇宙・ミサイル・システム機構 (Space and Missile Systems Organization) に提出した報告書「Response of Superconducting Point Contacts to High-Frequency Radiation (高周波放射に対する超電導点接触の応答)」¹³⁰では、超電導が高周波の受信機として応用できる可能性について報告している。

1973年、ウェスティングハウス・エレクトリック社が、空軍システム司令部空軍航空推進研究所 (Air Force Propulsion Laboratory) に提出した技術報告書「Short Pulse Switch for Airborne High Power Supplied (航空機搭載高出力供給用短パルス・スイッチ)」¹³¹では、超電導コイルからのエネルギーを切り替えるスイッチの開発について報告している。

1977年、エアロスペース社のマルコム・マッコール (Malcolm McColl) らが、空軍システム司令部宇宙・ミサイル・システム機構 (Space and Missile Systems Organization) に提出した報告書「Development of Millimeter-Wave Super Schottky Mixer Diodes (ミリ波スーパー・ショットキー・ミキサー・ダイオードの開発)」¹³²では、超電導を用いたミリ波のヘテロダイン・低ノイズ受信機の開発について進捗を報告している。

同年、ジェネラル・エレクトリック社 (General Electric Company) のB・B・ギ

¹²⁹ Bernhard M. Schmidt, *Electrically-Small, Superconducting Antennas*, AD0657376 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967). Contract No. AF 19(628)-5893.

¹³⁰ Helmut Kanter, and Frank L. Vernon Jr., *Response of Superconducting Point Contacts to High-Frequency Radiation*, AD0734765 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1971). Contract No. F04701-71-C-0172.

¹³¹ *Short Pulse Switch for Airborne High Power Supplied*, ADB003396 (Fort Belvoir, VA: Defense Technology Information Center, 1973). Contract No. F33615-72-C-2099.

¹³² Malcolm McColl, Michael F. Millea, and Arnold H. Silver, *Development of Millimeter-Wave Super Schottky Mixer Diodes*, ADA044276 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1977). Contract No. F0470 1-76-C-0077.

ャンブル(B. B. Gamble)らが、空軍システム司令部空軍航空推進研究所 (Air Force Aero Propulsion Laboratory) に提出した技術報告書「Superconducting Rotor Research (超電導ローターの研究)」¹³³では、20MWかつ高速の航空機搭載用超電導発電機を目的に、その第1段階 (phase I) を行ったことを報告している。

1979年、エアロスペース社のA・H・シルバー(A. H. Silver)が、空軍システム司令部宇宙・ミサイル・システム機構 (Space and Missile Systems Organization) に提出した報告書「Space Applications of Superconductivity (超電導の宇宙応用)」¹³⁴では、宇宙で超電導を利用するにあたっての、エネルギー貯蔵、デジタル処理、アナログ-デジタル変換、受信器・放射計、発振器についての考察を報告している。

1982年、コーネル大学のM・J・シエンコ(M. J. Sienko)が、空軍システム司令部空軍科学研究局 (Air Force Office of Scientific Research) に提出した科学報告書「Cluster-type Superconducting Ternaries (クラスター型超電導三元化合物)」¹³⁵では、複数の新しい超電導三元化合物を作製したことを報告している。

同年、レンセラー工科大学のエドモンド・ブラウン(Edmond Brown)が、空軍科学研究局に提出した年次報告書「Pressure Quenched Excitonic Solids (加圧冷却した励起性固体)」¹³⁶では、硫化カドミウムに見られる特異な磁気的特性の理論的説明を試みている。

1983年、イリノイ大学のジェームズ・P・ウォルフ(James P. Wolfe)が作成した技術報告書「Measurement of High Mobility and Strain Confinement of Long-lived Free Excitons in Cu_2O (Cu_2O における長寿命自由励起子の高易動度とひずみ閉じ込めの測定)」¹³⁷では、超電導体でありかつ半導体特性

¹³³ B. B. Gamble, T. A. Keim, and P. A. Rios, *Superconducting Rotor Research*, ADA053612 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1977). Contract No. F33615-76-C-2167.

¹³⁴ A. H. Silver, *Space Applications of Superconductivity*, ADA101296 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1979). Contract No. F04701-78-C-0079.

¹³⁵ M. J. Sienko, *Cluster-type Superconducting Ternaries*, ADA113899 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982). Grant No. AFOSR 80-0009.

¹³⁶ Edmond Brown, *Pressure Quenched Excitonic Solids*, ADA133817 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982). AFOSR-79-0126.

¹³⁷ James P. Wolfe, *Measurement of High Mobility and Strain Confinement of Long-lived Free Excitons in Cu_2O* , ADA 128486 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1983). Grant No. AFOSR79-0124.

を示す酸化銅(I)の高純度結晶における励起子の挙動について報告している。

同年、スタンフォード大学のT・H・ジェボール(T. H. Geballe)が、空軍科学研究局に提出した技術報告書「Film Synthesis and New Superconductors (膜合成と新しい超電導体)」¹³⁸では、Nb₃Al、Nb₃Ge(Nb:ニオブ、Al:アルミニウム、Ge:ゲルマニウム)などの薄膜の作製とその超電導特性について報告している。

1984年、北イリノイ大学のC・W・キンボール(C. W. Kimball)が、空軍科学研究局に提出した技術報告書「Studies of Structural Properties and their Relationship to Critical Parameters in Superconducting Materials (超電導物質における構造特性と臨界パラメータとの関係に関する研究)」¹³⁹では、メスバウアー分光法を用いた、Ba(Pb_{0.67}Sn_{0.03})Bi_{0.3}O₃などの超電導物質の電子特性と振動特性の実験的研究が報告されている。

同年、スタンフォード大学のウィリアム・M・フェアバンク(William M. Fairbank)らが、空軍科学研究局に報告した科学報告書「Development of a Sensitive Superconducting Accelerometer and Gravity Gradiometer (高感度超電導加速度センサーと重力勾配計の開発)」¹⁴⁰では、SQUIDを地球物理学で利用する取り組みが報告されている。

同年、マサチューセッツ工科大学のロバート・H・メザーヴェイ(Robert H. Meserve)らが、空軍科学研究局に提出した技術報告書「Synthesis and Characterization of Superconducting Electronic Materials (超電導電子材料の合成と評価)」¹⁴¹では、特別な真空蒸着装置を開発し、NbN、VN、NbTi、VTi(Nb:ニオブ、N:窒素、V:バナジウム、Ti:チタン)の高品質薄膜を作製したことを報告している。

1985年、スタンフォード大学のT・H・ジェボール(T. H. Geballe)が、空軍科

¹³⁸ T. H. Geballe, *Film Synthesis and New Superconductors*, ADA135102 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1983). Contract No. F49620-78-C-0009.

¹³⁹ C. W. Kimball, *Studies of Structural Properties and their Relationship to Critical Parameters in Superconducting Materials*, ADA143556 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984). Grant No. 80-0010.

¹⁴⁰ William M. Fairbank, and Daniel DeBra, *Development of a Sensitive Superconducting Accelerometer and Gravity Gradiometer*, ADA164061 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984). AFOSR 80-0067.

¹⁴¹ Robert H. Meserve, Paul M. Tedrow, and Terry P. Orlando, *Synthesis and Characterization of Superconducting Electronic Materials*, ADA151112 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984). F49620-82-K-0028.

学研究局に提出した技術報告書「Superconducting Thin Films, Composites and Junctions (超電導薄膜、複合材料、接合)」¹⁴²では、モリブデン-ゲルマニウム系の金属絶縁体転移、ニオブ薄膜の超電導特性、二硫化モリブデンのスパッタリングなどが報告されている。

1986年、国立標準局のR・B・ゴールドファーブ(R. B. Goldfarb)が編集し、空軍科学研究局に提出した報告書「Transient Losses in Superconductors (超電導体における過渡損失)」¹⁴³では、第2種超電導体の磁界中における複素帯磁率の損失などについて報告している。

これらをまとめると、表10のようになる。初期においては、企業へのcontractが中心であったが、1980年代以降、大学へのgrantまたはcontractが行われるようになった。

表10 空軍が行った外部へのファンディングに基づく文献

年	タイトル	実施機関	空軍側	Contract /Grant
1961	Part I: Excitons and Plasmons in Superconductors Part II: Lifetime Effects in Condensed Fermion System	イリノイ大学	空軍システム司令部 空軍科学研究局	Contract
1963	Superconductivity in Metals and Alloys	ラジオ・コーポレーション・オブ・アメリカ	空軍システム司令部 航空システム部門	Contract
同	Superconducting Magnet Research and Application to MHD Power Generators	ウェスティングハウス・エレクトリック	ライト・パターソン空軍基地 航空システム部門	Contract
1967	Fabrication and Testing of 5000 Word Cryogenic Associative Processor	テキサス・インスツルメンツ	空軍システム司令部 研究・技術部門	Contract
同	Electrically-Small, Superconducting Antennas	デイトン・エレクトロニクス・プロダクツ	航空宇宙研究局 空軍ケンブリッジ研究所	Contract
1971	Response of Superconducting Point Contacts to High-Frequency Radiation	エアロスペース	空軍システム司令部 宇宙・ミサイル・システム機構	Contract
1973	Short Pulse Switch for Airborne High Power Supplied	ウェスティングハウス・エレクトリック	空軍システム司令部 空軍航空推進研究所	Contract

¹⁴² T. H. Geballe, *Superconducting Thin Films, Composites and Junctions*, ADA223576 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1985). Contract No. F49620-83-C-0014.

¹⁴³ R. B. Goldfarb (ed), *Transient Losses in Superconductors*, ADA173204 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1986). AFOSR-SSA-82-00047.

1977	Development of Millimeter-Wave Super Schottky Mixer Diodes	エアロスペース	空軍システム司令部 宇宙・ミサイル・システム機構	Contract
1977	Superconducting Rotor Research	ジェネラル・エレクトリック	空軍システム司令部 空軍航空推進研究所	Contract
1979	Space Applications of Superconductivity	エアロスペース	空軍システム司令部 宇宙・ミサイル・システム機構	Contract
1982	Cluster-type Superconducting Ternaries	コーネル大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Grant
同	Pressure Quenched Excitonic Solids	レンセラー工科大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Grant
1983	Measurement of High Mobility and Strain Confinement of Long-lived Free Excitons in Cu ₂ O	イリノイ大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Grant
同	Film Synthesis and New Superconductors	スタンフォード大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Contract
1984	Studies of Structural Properties and their Relationship to Critical Parameters in Superconducting Materials	北イリノイ大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Grant
同	Development of a Sensitive Superconducting Accelerometer and Gravity Gradiometer	スタンフォード大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Contract
同	Synthesis and Characterization of Superconducting Electronic Materials	マサチューセッツ工科大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Contract
1985	Superconducting Thin Films, Composites and Junctions	スタンフォード大学	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Contract
1986	Transient Losses in Superconductors	国立標準局	空軍システム司令部 空軍科学研究所	Grant

出所：本研究調べ、ウェブサイト等を基に筆者作成

2. 軍の研究所での研究開発

軍の研究所の研究員による論文や技術報告書として、本研究で調べた中で最も古いものは、1977年に『IEEEトランザクションズ・オン・マグネティクス』に掲載された「Air force applications of lightweight superconducting machinery（軽量超電導機械の空軍用途）」¹⁴⁴であり、その著者は、ライト・パターソン空軍基地所属のオバリーである。オバリーはその後、1979年には同誌で「Properties and performance of fine-filament bronze-process Nb₃Sn

¹⁴⁴ C. Oberly, "Air Force Applications of Lightweight Superconducting Machinery," *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 260-8.

conductors (微細フィラメント・ブロンズ法Nb₃Sn導電体の特性と性能)」¹⁴⁵、
「System considerations for airborne, high power superconducting generators
(航空機搭載高出力超電導発電機のシステムに関する考慮事項)」¹⁴⁶、また、
1981年には同誌で「Bronze for superconducting wires: The powder
metallurgy approach (超電導線材用青銅: 粉末冶金アプローチ)」¹⁴⁷を発
表している。

1982年、空軍システム司令部フランク・J・セイラー研究所 (Frank J Seiler
Research Laboratory) 化学部 (Directorate of Chemical Science) のS・センサ
ーマ (S. Sensarma) らは、技術報告書「MNDO-Estimations of the Standard
Enthalpy of Formation of Some Binary Sulfur-Nitrogen Compounds and
Their Derivatives (二元硫黄・窒素化合物およびその誘導体の標準生成エ
ンタルピーのMNDO推定)」¹⁴⁸を作成している。

小括

草創期の具体的なRDT&Eプロジェクトを概括し、海軍、陸軍、空軍で次の
ような共通点と相違点があった。

【共通点】

共通点としては、まず、軍の研究所で研究開発を自ら行うとともに、大学や
企業など外部の機関が行う研究開発に資金を提供していたことが挙げられ
る。これは、情報の機密性のことを考えれば軍の研究所だけで、クローズドで
行うこともできたであろうが、そうはせず、むしろ積極的にシーズを外部に求
めたということである。

次に、基礎研究から応用開発まで行っていた、これは、さらに強調すれば、

¹⁴⁵ M. Walker, J. Cutro, B. Zeitlin, G. Ozeryansky, R. Schwall, C. Oberly, J. Ho, and J. Woollam, "Properties and Performance of Fine-Filament Bronze-Process NB₃Sn Conductors," *IEEE Transactions on Magnetics* 15, no. 1 (1979): 80-2.

¹⁴⁶ H. Southall, and C. Oberly, "System Considerations for Airborne, High Power Superconducting Generators," *IEEE Transactions on Magnetics* 15, no. 1 (1979): 711-4.

¹⁴⁷ D. Holmes, A. Adair, C. Oberly, J. Ho, "Bronze for Superconducting Wires: The Powder Metallurgy Approach," *IEEE Transactions on Magnetics* 17, no. 1 (1981): 1010-2.

¹⁴⁸ S. Sensarma, A. G. Turner, M. J. DeLong, L. P. Davis, *MNDO-Estimations of the Standard Enthalpy of Formation of Some Binary Sulfur-Nitrogen Compounds and Their Derivatives*, ADA111153 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982).

基礎研究を行っていたということが挙げられる。超電導を示す物質は多数あり、それぞれの物質の物性を明らかにするには基礎研究が欠かせない。また、物性が分からないことにはどのようなニーズを満たせるかもわからない。結果的に、基礎研究に資源を割かなければならなかった。

また、大学や企業など外部の機関に資金を提供する先が、徐々に増えていったということが挙げられる。初期、イリノイ大学やマサチューセッツ工科大学のように、軍が管理する研究所のある大学など、一部の機関に限られていたが、大学、企業、国立研究機関、さらには外国の大学と、シーズの提供元が増えていった。

さらに、研究開発の内容そのものが共通しているということが挙げられる。軍が管理する大学の研究所で三軍が協力して支援するものは、調整されたものであるが、それには該当しないものとして、例えば、超電導線材の研究開発は、三軍とも行っている。各軍が独自のニーズに基づいて研究開発を行っていたと推察する。

【相違点】

相違点としては、まず、軍の内部で行う研究開発と、大学や企業などの軍の外部に資金提供して行う研究開発との割合が挙げられる。海軍は、主に軍の研究所で研究開発を行い、陸軍と空軍は、主に大学や企業などの外部への資金提供を通じて、基礎研究から軍事的な応用開発まで多種多様な研究開発を幅広く行っていた。

次に、基礎研究の割合が挙げられる。海軍は、軍の研究所、とりわけ海軍調査研究所で基礎研究を精力的に行っていたのに対し、陸軍と空軍は、大学に資金提供をして基礎研究を行っていたものの、海軍ほどではなかった。

また、行う基礎研究の内容の違いが挙げられる。陸軍からイリノイ大学への資金提供が、超電導の基礎理論であるBCS理論につながっており、陸軍は基礎研究の中でも理論研究を支えたという特徴がある。それに対し、海軍の基礎研究は物性実験が中心であり、支援する基礎研究の内容にも相違点があった。

また、これらのことから、米国防総省は、超電導技術の研究開発において、

エンジニアリングに関するものについては、基礎研究などの比較的早い段階から、企業と契約（contract）し、資金を提供することにより、企業の技術を取り入れるとともに、将来のサプライヤーとしての準備をさせていたということが考えられる。

第2節 超電導ブーム期（1986年～1990年頃）

1 米国の競争力の状況

1986年にIBM研究所のベドノルズとミュラーにより高温超電導体が発見され、超電導にブームが起きるが、この時期、米国を取り巻く状況は複雑であり、超電導ブームが起きたのは、単に高温超電導体が発見されただけではないと考える。そこで、まずは、当時の米国の競争力の状況を見ておく。長引く冷戦で、政府研究開発費の相対的な低下、また、構造的な競争力の低下が見られていた。

1979年、社会学者エズラ・ヴォーゲルの著作『ジャパン・アズ・ナンバーワン』が出版された。同書では、戦後の日本経済の高度経済成長の要因を分析し、日本人の学習意欲、日本的経営、日本特有の経済・社会制度を高く評価している。

1980年代の米国では、レーガン政権（1981年～1989年）が行ったレーガノミクスとよばれる経済政策による大規模減税と軍事費増大で財政収支が悪化していた¹⁴⁹。

1985年、レーガン政権下の産業競争力委員会により作成された「ヤングレポート」¹⁵⁰では、米国の産業力の低下は製造業の競争力の低下にあるとされ、それらを改善するために「新しい技術の創造と実用化そして保護」、「資本コストの低減」、「人的資源の開発」、「通商政策の重視」が必要と提言された

¹⁴⁹ 日本大百科全書(ニッポニカ)「双子の赤字」小学館、<https://kotobank.jp/word/双子の赤字-169395>（2021年10月29日閲覧）。

¹⁵⁰ John A. Young, “Global Competition—The New Reality,” Results of the President’s Commission on Industrial Competitiveness (1985).

151。

一方で、1980年代～1990年代にかけ、米国は日本との半導体摩擦を抱えていた。1986年、「日米半導体協定」を締結したが、翌年の1987年には、1974年の通商法 301条に基づき制裁を発動した。

2 米国防総省の展望

第1節に記載してあるように、超電導技術が実用に向けて期待が高まるなか、1986年に高温超電導体が発見されると、米国防総省はいち早く反応した。米国防総省は、陸海空軍の研究所、国防高等研究計画局(DARPA)、戦略防衛構想機構(SDIO)などから人を集めてアド・ホックの作業グループを急ぎ立ち上げ、各軍で行っていた低温超電導の研究開発を寄せ集め、1987年7月には調査報告書 *Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) Options: A Study of Possible Directions for Exploitation of Superconductivity in Military Applications* を取りまとめた。同報告書は、超電導の軍事利用について展望を示し、3年間で1億5000万ドルのプログラム(DSRDプログラム)を構想した。

同報告書によると、DSRDプログラム目標は、「高温超電導の革命的な可能性が、小規模アプリケーション(センサー、ジョセフソン接合(JJ)エレクトロニクス、超電導半導体ハイブリッド・エレクトロニクス)と大規模アプリケーション(磁石、回転機械、エネルギー貯蔵、電磁銃、指向性エネルギー兵器)の両方を含む軍事用途において、できるだけ早い機会に実現されることを保証すること」であるとする¹⁵²。陸軍における高温超電導の利用可能性を表11-1、海軍における高温超電導の利用可能性を表11-2、空軍における高温超電導の利用可能性を表11-3、国家安全保障局における高温超電導の利用可能性を表11-4に、それぞれ示す。

¹⁵¹ 産学連携キーワード辞典「ヤングレポート」(株)アヴィス、<https://kotobank.jp/word/ヤングレポート-1141027> (2021年10月29日閲覧)。

¹⁵² *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987): 7-11.

表11-1 陸軍における高温超電導の利用可能性

小規模アプリケーション

1. 光学・赤外線

◆焦点面アレイ検出用センサー／信号・画像処理／ジョセフソン接合(JJ)検出器／アナログ・デジタル変換／メモリデバイス ◆超電導体・半導体光学ミラー ◆新規光変調器(空間、時間) ◆超電導・半導体ハイブリッド／接合を組み込んだ特殊な電気光学デバイス ◆ディスプレイ – 指揮統制アプリケーション用の半導体・超電導ハイブリッド ◆ホモダイン／ヘテロダイン検出システム ◆光学ビームステアリング ◆レーザー／波長シフター用Qスイッチング

2. マイクロ波・ミリ波

◆サブミリ波源 ◆ミリ波集積回路 ◆ミリ波／マイクロ波部品 - アンプ／ミキサー／検出器／プロセッサ／アナログ・デジタル変換器 ◆低損失伝送ライン ◆Qスイッチミリ波源用超伝導導波路 ◆アンテナアレイ・アンテナ構造

3. 新規超電導体・半導体超格子・量子結合デバイス

4. 磁気部品／検出器

◆地雷除去 ◆地雷検出 ◆遠隔操縦機(RPV)アプリケーション用の磁気部品 ◆RF保護(EMP)デバイス ◆磁気回路の磁気閉じ込め

5. ヒューズデバイス

◆超電導量子干渉素子(磁界検出器ヒューズ) ◆ジョセフソン接合(JJ)電子機器 ◆温度／圧カスイッチング

6. 特殊化学・生物薬剤検出材料・デバイス(予定)

7. 慣性／地磁気誘導システム

大規模アプリケーション

1. 自由電子レーザー

2. ジャイロトロン

3. フィールド電源、モーター、発電機、バッテリー

4. 航空機(ヘリコプター)発電

5. 指向性エネルギー兵器／高出力レーザー／核シミュレーション用スイッチ及びエネルギー貯蔵デバイス

6. 電磁銃／ランチャー

出所: *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987): 7-8. に基づき筆者作成

表11-2 海軍における高温超電導の利用可能性

<p>小規模アプリケーション</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 赤外線 <ul style="list-style-type: none"> ◆焦点面センサー ◆多重器 ◆アナログ・デジタル変換器 ◆信号処理 2. マイクロ波・ミリ波 <ul style="list-style-type: none"> ◆ミキサー ◆アンプ ◆移相器 ◆伝送ライン 3. 超電導干渉磁力計 <ul style="list-style-type: none"> ◆機雷探知 ◆潜水艦探知 ◆監視 ◆超低周波(ELF)通信 4. コンピューティング <ul style="list-style-type: none"> ◆大規模データ処理 ◆高性能、低消費電力の信号処理 <p>大規模アプリケーション</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 船舶推進・動力システム 2. マイクロ波・ミリ波発生器用磁石 3. 自由電子レーザー 4. エネルギー貯蔵とパルス電力
--

出所: *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987): 9. に基づき筆者作成

表11-3 空軍における高温超電導の利用可能性

<p>小規模アプリケーション</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 赤外線センサー <ul style="list-style-type: none"> ◆多重器 ◆デジタイザー ◆シグナルプロセッサ 2. ミリメートル波 <ul style="list-style-type: none"> ◆受信機 ◆アンテナ ◆広帯域プロセッサ ◆デジタル・アナログ変換 3. デジタル計算 <ul style="list-style-type: none"> ◆高性能コンピューティング 4. 磁気センシング <p>大規模アプリケーション</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 以下のための磁石: <ul style="list-style-type: none"> ◆進行波管(TWTs) ◆自由電子レーザー(FELs) ◆モーター ◆発電機 ◆エネルギー貯蔵
--

出所: *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987): 10. に基づき筆者作成

表11-4 国家安全保障局における高温超電導の利用可能性

<p>アナログ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. マイクロ波／ミリ波 <ul style="list-style-type: none"> ◆広帯域ミリ波伝送ライン ◆低ノイズミリ波検出器、ミキサー、アンプ ◆マルチGHz チャープ変換プロセッサ ◆高性能小型アンテナアレイ ◆マルチGHzアナログ・デジタル変換 2. 短波(HF)・超短波(VHF) <ul style="list-style-type: none"> ◆超大型アナログ信号多重化 ◆短波／超短波・高ダイナミックレンジ・ミキサー ◆超線形アナログ・デジタル変換 3. 分析装置 <ul style="list-style-type: none"> ◆サンプリング・オシロスコープ ◆60GHz帯域幅ネットワーク・アナライザー ◆トランジェント・イベント・レコーダー ◆マルチギガビット記録用アナログ・デジタル変換器 4. サブ短波 <ul style="list-style-type: none"> ◆広帯域、高ダイナミックレンジ超低周波(ELF)受信器 ◆全デジタル磁気センサー <p>デジタル</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 背面基板ゼロ抵抗電源バス 2. 背面基板「分散型」伝送ライン 3. 超電導・半導体クロスバー・スイッチ 4. 多センサー多重器 5. スーパーコンピューティング
--

出所: *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987): 11. に基づき筆者作成

陸軍、海軍、空軍、及び国家安全保障局で記載は多少、異なるものの、超電導の特性を踏まえたアプリケーション、例えば、小規模なものとして、赤外線、マイクロ波・ミリ波、磁気検出、超高速計算など、また、大規模なものとして、発電機、モーター、エネルギー貯蔵、自由電子レーザーなどは共通している。つまり、この時代にはすでに、超電導のアプリケーションには共通認識があったと推察される。

3 高温超電導の発見に対する政府及び議会の反応

高温超電導の発見とそれに伴う熱狂を米国はどのように見ていたか、1980年代前後の米国の研究開発、競争力、軍事技術開発の環境を踏まえ、超電

導ブームの頃の米国の反応を詳解する。

【連邦政府】

長引く冷戦で、政府研究開発費の相対的な低下、また、構造的な競争力の低下が見られていたさなかの1986年に高温超電導は発見された。

翌年、1987年の7月に、超電導の商業利用に関する連邦会議を、ホワイトハウスとエネルギー省が開催した。同会議には千人を超える科学者、政府関係者、企業経営者が集い、二日間にわたって行われた。会議に先立ち、レーガン大統領が、超電導の商業化に取り組む民間部門を支援する「11点の超電導イニシアチブ(11-point superconductivity initiative)」を発表した。また、同時期に米国防総省は、レーガン大統領の宇宙防衛イニシアチブ(Strategic Defense Initiative: SDI)から対潜水艦戦に至る範囲で超電導技術を活用するため、前述のとおり、3年間で1億5000万ドルのDSRPプログラムを構想した¹⁵³。

レーガン大統領が1988年2月、米国連邦議会に送ったメッセージによると、11点の超電導イニシアチブには三つの目的があるという。一つめは、「超電導の飛躍的進歩を達成し続けるために必要な基礎及び実用化研究において、連邦政府、学界、及びアメリカの産業間のより大きな協力を促進するため」、二つめは、「米国の民間部門が科学の進歩を、新しくかつ改善された製品やプロセスにさらに迅速に変換できるようにするため」、三つめは、「超電導で働く科学者、エンジニア、その他の専門家の知的財産権をよりよく保護するため」である¹⁵⁴。

11点の超電導イニシアチブの中身とは、3点の立法と8点の行政管理から構成されている。立法では、まず、「①共同生産事業体を認めるための国家共同研究法の改正」である。次に、「②プロセス特許保護を強化するための特許法の改正」、そして、「③連邦研究所で開発された商業的に価値のある

¹⁵³ Robert Gillette, "Superconductivity Gets Top Priority: Reagan Says 'Sky Is Limit,' Acts to Speed Commercial Uses," *Los Angeles Times*, July 29, 1987.; James Gleick, "Reagan, Citing Foreign Challenge, Outlines Superconductivity Plan," *New York Times*, July 29, 1987.; Kathy Sawyer, "Commercializing Superconductors," *Washington Post*, July 29, 1987.

¹⁵⁴ Ronald Reagan, "Message to the Congress Transmitting Proposed Legislation on Superconductivity Competitiveness," February 23, 1988, <https://www.reaganlibrary.gov/archives/speech/message-congress-transmitting-proposed-legislation-superconductivity>.

情報の情報公開法に基づく開示からの免除」である。

行政管理では、まず、「④「賢者」諮問グループ(“Wise Men” Advisory Group)(超電導に関する大統領諮問委員会)の設立」である。次いで、「⑤連邦研究所に超電導研究センターの設立」、さらに、「⑥連邦研究所からの技術移転と共同研究に関する大統領令12591の実施の加速」、「⑦特許出願の処理の加速」、「⑧国立標準技術研究所(NIST)による高温超電導の標準(standards)の開発の加速」、「⑨1987年度の資金を超電導R&Dに再プログラム;’88年度と’89年度の高温超電導を優先」、「⑩プロトタイプを含む、電子機器及びセンサー応用の軍事開発の加速」、そして、「⑪科学技術協力協定に基づく日本との共同研究開発プログラムに参加する相互機会の模索」というものである¹⁵⁵。

これらの記載には一見したところ軍事的な文脈は看取できない。この11点の超電導イニシアチブでは、産業利用での研究開発を前面に押し出していたものと推察される。

米国連邦議会の技術評価室(Office of Technology Assessment: OTA)が1990年に発表した報告書 *High-Temperature Superconductivity in Perspective* (高温超電導の見通し)では、1990年時点の11点の超電導イニシアチブの実現状況を示している。立法の、①共同生産事業体を認めるための国家共同研究法の改正については、法制化されておらず、司法省で新しい提案を検討中であった。②プロセス特許保護を強化するための特許法の改正については、1988年の包括通商競争法の一部として可決された。③連邦研究所で開発された商業的に価値のある情報の情報公開法に基づく開示からの免除については、政治的に非現実的であるとみなされ、動きはなかった。

一方、行政管理の、④賢者諮問グループの設立については、「1988年2月に結成」された。⑤連邦研究所に超電導研究センターの設立については、「4つの研究所(三つはDOEのアルゴンヌ、ローレンス・バークレー、エイムズの研究所、一つはNIST/ボルダーの研究所)に設立」された。⑥連邦研究所からの

¹⁵⁵ *High-Temperature Superconductivity in Perspective*, Office of Technology Assessment, U.S. Congress (1990): 62.

技術移転と共同研究に関する大統領令 12591 の実施の加速については、「1988年にアルゴンヌ、オークリッジ、ロスアラモスでパイロットセンターが設立」された。⑦特許出願の処理の加速については、「米国特許庁にパテント・ファスト・トラック (Patent “fast track”) が設立」された。しかし、「この手続きによってなされたのは高温超電導の特許出願の10%から15%」でしかなかった。⑧国立標準技術研究所 (NIST) による高温超電導の標準の開発の加速については、「進行中であるものの、割かれる労力は少ない」ものであった。⑨1987年度の資金を超電導 R&D に再プログラム; '88年度と'89年度の高温超電導の優先については、「事実上、高温超電導予算全体が再プログラム資金となった。低温超電導、高度セラミック、その他材料の R&D プログラムが削減」された。⑩プロトタイプを含む、電子機器及びセンサー応用の軍事開発の加速については、「進行中」であり、「国防高等研究計画局 (DARPA) と戦略防衛構想機構 (SDIO) に応用志向の開発プログラム」ができた。⑪科学技術協力協定に基づく日本との共同研究開発プログラムに参加する相互機会の模索については、「さまざまな共同プロジェクトが協議中」であった¹⁵⁶。

【連邦議会】

米国連邦議会の対応について詳解する。1988年の6月には、米国連邦議会の技術評価室が、報告書 *Commercializing High-Temperature Superconductivity* (高温超電導の商業化) を発表した¹⁵⁷。同年11月、第100回連邦議会で「1988年の国家超電導及び競争力法」を可決した¹⁵⁸。その位置づけは、合衆国法典 (United States Code) 15編 商業及び取引 (Title 15. COMMERCE AND TRADE) 78章 超電導及び競争力 (Chapter 78. SUPERCONDUCTIVITY AND COMPETITIVENESS) である。その冒頭には、「国家の経済的競争力と戦略的幸福を強化するため、またその他の目的のために、民間部門と緊密に協力して超電導の応用を可能な限り迅速に開発するための国家連邦プログラムの取り組みを確立するための法律」とある¹⁵⁹。

¹⁵⁶ *High-Temperature Superconductivity in Perspective*: 62.

¹⁵⁷ *Commercializing High-Temperature Superconductivity*, Office of Technology Assessment, U.S. Congress (1988).

¹⁵⁸ 米国連邦議会ウェブサイト, <https://www.congress.gov/bill/100th-congress/house-bill/3048> (2021年10月28日閲覧)

¹⁵⁹ Pub. L. 100-697, §2, Nov. 19, 1988, 102 Stat. 4613. U.S. House of Representatives, <https://uscode.house.gov/stat>

軍事的な文脈は見えにくいですが、1988年の国家超電導及び競争力法の5207条に米国防総省が位置付けられている。同条を表12に示す。

表12 1988年の国家超電導及び競争力法 5207条 国防総省

5207条 国防総省 (§ 5207. Department of Defense)
(a) 研究の焦点 (Focus of research)
超電導行動計画に準拠し、国防長官は、国防総省の超電導研究開発活動において、基礎研究、材料加工、及び新しい超電導材料の応用に重点を置くものとする。
(b) 追加的活動 (Additional activities)
サブセクション(a)に基づく研究を実施するにあたり、国防長官は以下を行うものとする—
(1) 高温超電導材料の工学的パラメーターを体系的に定義する；また、
(2) 国防総省の全体的な使命に適切であると考えられる、必要な開発、エンジニアリング、及び運用プロトタイプ試験を実施する。かかる運用プロトタイプ試験は、必要に応じて、国防高等研究計画局によって開発された基準を利用するものとする。
(c) 国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency)
国防高等研究計画局の局長は、超電導行動計画に従い、以下の活動を行うものとする—
(1) 必要に応じて、他の連邦政府機関及び業界で実施されている基礎的及び応用的な超電導研究を強化する；また、
(2) 国防総省内で運用プロトタイプ試験の基準を作成する。

出所： Pub. L. 100-697, §2, Nov. 19, 1988, 102 Stat. 4613. U.S. House of Representatives, <https://uscode.house.gov/statviewer.htm?volume=102&page=4613> (2021年10月30日閲覧)を基に筆者翻訳

サブセクション(a)で「基礎研究、材料加工、及び新しい超電導材料の応用」に重点を置くとしつつも、サブセクション(b)で広範な開発、試験を行うことを可能としている。

続いて、高温超電導の研究開発のための連邦予算を詳解する。表13は、米国連邦議会の技術評価室が1988年に発表した報告書 *Commercializing High-Temperature Superconductivity* を基に作成したものであり、1987年から1989年までの各省庁における高温超電導の研究開発の予算を表したものである¹⁶⁰。

[viewer.htm?volume=102&page=4613](https://uscode.house.gov/statviewer.htm?volume=102&page=4613) (2021年10月30日閲覧)。

¹⁶⁰ *Commercializing High-Temperature Superconductivity*: 87.

表13 高温超電導の研究開発のための省庁別連邦予算(1987年度～1989年度)

	年度予算(単位:100万ドル)		
	1987(実際)	1988(推計)	1989(要求)
国防総省 ^a	\$19.0	\$46.0	\$63.0
エネルギー省	12.5	27.2	38.7
国立科学財団	11.7	14.5	17.2
国立標準局(～1988の名称)	1.1	2.8 ^b	9.3
航空宇宙局	0.5	4.2	6.7
鉱物局	0.1	0.1	0.1
	\$44.9	\$94.8	\$135.0

a 作業数値、変更の可能性あり

b 関連業務の\$750,000を除く

SOURCE: Preliminary agency data and budget estimates provided to Subcommittee on Superconductivity of the Committee on Materials, May 1988

出所: 米国連邦議会Office of Technology Assessment (OTA), *Commercializing High-Temperature Superconductivity* (June 1988) を基に筆者作成

年度により実際の額、推計額、要求額と揃ってはいないものの、米国防総省の予算は、常に40%は超えている。同報告書には、1988年度における連邦政府の研究開発予算の、使命(Mission)別の内訳が示されており、それによると、「国防(National Defense) 68%」、「保健(Health) 12%」、「宇宙(Space) 6%」、「総合科学(General Science) 3.5%」、「エネルギー(Energy) 3.5%」、「環境、天然資源(Environment, Natural Resources) 2%」、「その他(Others) 5%」となっている¹⁶¹。また、米国防総省の3か年を足すと1億3000万ドル程度となり、前述した「3年間で1億5000万ドルのプログラム」がほぼ実現している。

表14は、米国連邦議会の技術評価室が1990年に発表した報告書 *High-Temperature Superconductivity in Perspective* を基に作成したものであり、1990年及び1991年の各省庁における高温超電導の研究開発の予算を表したものである。こちらにはパーセンテージも記載されており、米国防総省が全体の40%を超える状況であることが一目でわかるが、米国防総省の1991年

¹⁶¹ *Commercializing High-Temperature Superconductivity*: 25.

度の要求額が1990年度の推計額と同額になっており、米国防総省としては1990年度で予算が頭打ちになった可能性もある¹⁶²。

表14 高温超電導の研究開発のための省庁別連邦予算(1990年度、1991年度)

	年度予算(単位:100万ドル)	
	1990(推計)	1991(要求)
国防総省	\$61.8 (47%)	\$61.8 (43%)
エネルギー省	34.1 (26%)	43.3 (30%)
国立科学財団	25.8 (20%)	27.3 (19%)
航空宇宙局	5.9 (5%)	5.9 (4%)
商務省	2.8 (2%)	4.7 (3%)
	\$130.4 (100%)	\$143.0 (100%)

SOURCE: D. Allan Bromley, Director, Office of Science and Technology Policy, testimony before the Subcommittee on Transportation, Aviation, and materials, House Committee on Science, Space, and Technology, Feb. 21, 1990.

出所: 米国連邦議会Office of Technology Assessment (OTA), *High-Temperature Superconductivity in Perspective* (April 1990) を基に作成

4 具体的なRDT&Eプロジェクト

このように、高温超電導体の発見は米国の政府および議会に大きな衝撃を与え、そのため、政府も議会も強く大きく反応した。では一体、この時期の超電導の研究開発環境はどのようなものであったのであろうか、また、どのような研究開発が行われていたのだろうか。各軍で作成された報告書から読み解く。

(1) 海軍

1. 軍の研究所での研究開発

海軍調査研究所のガブサーにより1987年12月、ONRに提出された報告書

¹⁶² *High-Temperature Superconductivity in Perspective*, Office of Technology Assessment, U.S. Congress (1990): 6.

「Compilation of NRL Publications on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987(高温超電導に関する海軍調査研究所の発行物集 1987年1月1日～1987年7月1日)」¹⁶³には、同研究所で行われた高温超電導に関する30余りの発表済み、または発表前の論文が挙げられている。それらのタイトルを表15に示す。

対象とする超電導物質は、La(ランタン)系もY(イットリウム)系もあり、組成もさまざまで、X線による構造解析、磁界中の物性測定、バンド理論に基づく数値解析、プラズマを用いた資料作製法、光電子分光法を用いた研究などが行われていた。

1986年にベドノルズとミュラーが高温超電導体を発見してからわずか1年余りの内に、これだけの報告ができるほどの研究がなされた。同研究所には、高温超電導体が発見される前から、従来型の超電導を対象とした研究開発を行う、人的および物的な素地があってできたことと考えるが、そうであったとしても対応が早い。レーガン大統領が打ち出した11点の超電導イニシアチブの⑨1987年度の資金を超電導R&Dに再プログラム;’88年度と’89年度の高温超電導の優先を実現したものと言える。

¹⁶³ D. U. Gubser (ed), *Compilation of NRL Publication on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987*. Naval Research Laboratory (1987).

表15 高温超電導に関する海軍調査研究所の発行物集

- Superconducting Phase Transition in the La-M-Cu-O Layered Perovskite System, M = La, Ba, Sr, and Pb
- Temperature Dependent X-Ray Studies of the High T_c Superconductor $\text{La}_{1.9}\text{Ba}_{0.1}\text{CuO}_4$
- X-Ray Identification of the Superconducting High T_c Phase in the Y-Ba-Cu-O System
- Structural Considerations of Cu-Oxide Based High- T_c Subconductors
- Relationship Between Processing Procedure, Crystal Structure and Superconducting T_c in the Y-Ba-Cu-O System
- Processing of High T_c Ceramic Superconductors: Structure and Properties
- Processing and Properties of the High T_c Superconducting Oxide Ceramic $\text{YBa}_{\text{sub}2}\text{Cu}_3\text{O}_7$
- Domain like Defects Observed in High Temperature Superconductor of Y-Ba-Cu-O System
- Phonon Density of States and Structure of the Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
- Magnetic Field Studies of the $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$ and $\text{Ba}_2\text{Y}_1\text{Cu}_3\text{O}_7$ High T_c Superconductors
- Preparation, Structure, and Magnetic Field Studies of the High T_c Superconductors
- Evidence of conventional superconductivity in La-Ba-Cu-O Compounds
- Electric Structure, Bonding and Electron-Phonon Interaction in La-Ba-Cu-O Superconductors
- Band Structure and Electron-Phonon Interaction Calculations for Proposed High T_c Superconducting Oxides: MCuO_3 (M = La, Ba, Cs, Y) in the Perovskite Structure
- Band Theory Analysis of Anisotropic Transport in La_2CuO_4 -Based Superconductors
- High Temperature Superconductors: Electronic Structure Change Due to Replacement of La with Ba and Sr in the Cu-O-based systems
- Calculations of the Superconducting Properties of Cu-O Based Perovskite-like Structures
- Prediction of Anisotropic Thermopower of $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$
- Character of States Near the Fermi Level in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
- Effect of Low Dimensionality on the Parameters of High T_c Superconductors
- Parameters and Exotic Properties of High T_c Superconductors
- Complex Hamiltonians: Common Features of Mechanisms for High- T_c and Slow Relaxation
- Low Temperature Structure Phase Transition in La_2CuO_4
- A Coupled Structural and Electrical Transition in La_2CuO_4 Near 30 K
- Formation of the Structure of the Superconducting Phase of La-Sr-Cu-O by DC Sputtering
- Plasma Sprayed Superconducting Oxide Coatings
- Plasma Sprayed High T_c Superconductors
- Resonant Photomission Study of Superconducting Y-Ba-Cu-O
- A Photoemission Study of High T_c Oxide
- Observed Trends in the X-Ray Photoelectron and Auger Spectra of High Temperature Superconductors
- Impact of High-Temperature Superconductors on High Power, Millimeter Wave Source Technology

出所: D. U. Gubser (ed), *Compilation of NRL Publication on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 - 1 July 1987*, Naval Research Laboratory (1987). を基に筆者作成

この海軍での高温超電導の研究開発の結果も踏まえ、前掲した、海軍研究アドバイザー委員会の報告書 *Superconductivity* では、高温超電導の課題を次のようにまとめている。

まず、「高温超電導体でこれまでに達成された性能レベルは、一般に、本質的な限界であると考えられているものをはるかに下回っており、したがって、同報告書の主な結論は、「高温超電導の有用性を完全に評価する前に、かなりの研究開発努力が必要である」と指摘する。それに必要な改善には、「バルク導体の臨界電流密度 (J_c)、薄膜の高周波表面抵抗 (R_s)、材料の安定性と互換性、および機械的強度と延性」が含まれる。

また、「超電導特性は一般に $T/T_c \sim 0.5$ 以上に上昇すると急速に劣化するため、液体窒素温度 (77K) での動作は、現在知られているすべての高温酸化物 ($T_c < 125\text{K}$) で限界である可能性」を指摘している。

さらに、「高温超電導の理論的理解は大きく改善」されなければならないと主張し、理論的な指針は、「新しい材料の探索において望ましく、既知の材料で必要な性能向上を達成するために不可欠である可能性がある」と指摘している。

海軍調査研究所以外の海軍の研究所で行われていた超電導の研究開発としては、1990年、海軍水上戦センターのウィリアム・A・フェルランド (William A. Ferrando) が作成した2通の報告書「Fabrication of Composite High Temperature Superconductor Wires from Ag/YBa₂Cu₃O_x Powder produced by AgNO₃ Decomposition (硝酸銀の分解により生成したAg/YBa₂Cu₃O_x粉末からの複合高温超電導線材の作製)」¹⁶⁴と「A Silver-Bearing, High-Temperature, Superconducting (HTS) Paint (銀含有高温超電導塗料)」¹⁶⁵ はともに、銀を含んだ微小粉末を用いる酸化物高温超電導の線材の新たな作製方法の試行について報告している。なお、報告書の番号と記載から推察するに、前者 (NSWC TR 89-338) は、NSWC独立探索開発基金 (NSWC Independent Exploratory Development (IED) funds)、戦略防衛

¹⁶⁴ William A. Ferrando, *Fabrication of Composite High Temperature Superconductor Wires from Ag/YBa₂Cu₃O_x Powder produced by AgNO₃ Decomposition*, ADA221936 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990).

¹⁶⁵ William A. Ferrando, *A Silver-Bearing, High-Temperature, Superconducting (HTS) Paint*, ADA221616. (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990).

構想機構／海軍調査研究所 (SDIO/NRL) のプログラム、およびONRの共同支援で1988年(1989年度)に開始したものであり、一方、後者(NSWC TR 90-48)は、NSWC独立探索開発基金の支援で1989年(1990年度)に開始したものと推察する。前者の研究開発を行っている途中、粉末を塗料にするアイデアが出たことを受けて、機動的に独立基金で後者の追加支援をしたのではないかと推察される。

1991年、海軍海洋システムセンター(Naval Ocean Systems Center)のT・E・ジョーンズ(T. E. Jones)らが、ペンシルベニア大学のP・M・ティバド(P. M. Thibado)と共同で作成した報告書「A Review of High-Temperature Superconductivity and the Effect of Chemical Modifications on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ および $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ に対する高温超伝導と化学修飾の影響に関する一考察)」¹⁶⁶では、ビスマス系高温超電導体のCu(銅)を他の物質に置換することによる影響を報告している。

2. 外部へのファンディング

1990年、ペンシルベニア州立大学のジュリアン・D・メイナード(Julian D. Maynard)がONRに提出した報告書「Acoustic Studies of New Materials: Quasicrystals, Low-Loss Glasses, and High T_c Superconductors (新材料の音響学的研究: 準結晶、低損失ガラス、高温超電導体)」¹⁶⁷では、超音波を用いた、高温超電導体を含む新規物質の微小試料の弾性率の測定、また、光吸収の感度向上について報告している。

同年、コーネル大学のロバート・A・バーマン(Robert A. Buhrman)が、ONRに提出した報告書「Superconducting Materials and Devices (超電導材料・デバイス)」¹⁶⁸では、超電導を電子デバイスとした時の $1/f$ 雑音や、高温超電

¹⁶⁶ T. E. Jones, W.C. McGinnis, R. D. Boss, and P. M. Thibado, *A Review of High-Temperature Superconductivity and the Effect of Chemical Modifications on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$* , ADA242314 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991).

¹⁶⁷ Julian D. Maynard, *Acoustic Studies of New Materials: Quasicrystals, Low-loss Glasses, and High T_c Superconductors*, ADA225190 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990). Contract N00014-85-K-0701.

¹⁶⁸ Robert A. Buhrman, *Superconducting Materials and Devices*, ADA228950 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990). Contract N00014-85-K-0296.

導薄膜のその場 (*in-situ*) 作製の実証について報告している。

これら以外にも、高温超電導体を対象とした基礎的な研究の報告が複数存在する。基礎的な研究を重点的に行っていたことが、次の文献から推察される。1991年、『ブレッティン・オブ・マテリアルズ・サイエンス (Bulletin of Materials Science)』に掲載された、海軍調査研究所のガブサーによる論文「US Navy Superconductivity Programme (米海軍の超電導プログラム)」¹⁶⁹に、海軍の超電導プログラムについて記載している。

それによると、海軍の超電導プログラムには、高温超電導 (HTS) と低温超電導 (LTS) の研究が含まれ、五つの主要な推力領域に分かれている。それらは、「(i) 基本的な特性と材料の研究 (主に HTS)、(ii) SQUID 磁力計と勾配計 (主に LTS)、(iii) 超電導船の推進 (LTS のみ)、(iv) デジタル回路と赤外線センサーを含む電子アプリケーション (50% LTS および 50% HTS)、(v) 宇宙実験 (HTS のみ)」で、「海軍の総予算 2100 万ドルの約 2/3 は、基本的な特性/材料研究と宇宙実験との間で均等に分割」される。SQUID の研究は「予算の約 1/6」を占め、残りは電力アプリケーションと電子アプリケーションに向けられている。

また、海軍のプログラムの「ほぼ半分は、基礎研究と材料開発」に焦点を当てている。海軍は、技術が海軍システムの可能性を満たすためには、これが不可欠であると考えている。このプログラムは、「理論、材料合成 (主に薄膜)、臨界電流 (J_c) と磁束の流れの研究、表面抵抗とノイズの研究、および放射線損傷」の主要な取り組みに、広く基づいている。このプログラムには、海軍調査研究所やその他の軍研究所での強力な取り組み、および大学や産業界での契約プログラムが含まれているとのことである。

(2) 陸軍

陸軍もこの時期、超電導に関する報告としては高温超電導に関するものが多く存在する。1989年5月23日から25日にかけて、陸軍ミサイル司令部

¹⁶⁹ Donald U. Gubser, "US Navy Superconductivity Programme." *Bulletin of Materials Science* 14, no. 2 (1991): 157-9.

(MICOM)、陸軍戦略防衛司令部(USADC)、および陸軍研究局(ARO)の共同スポンサーシップにより、アラバマ大学で「Workshop on High Temperature Superconductivity (高温超電導に関するワークショップ)」を開催している。そのプロシーディングス¹⁷⁰によると、大学、国立研究所、企業の研究者らにより、基礎的な物性研究から具体的な用途を想定した応用研究まで、3日間で30を超える高温超電導に関する報告がなされている。その発表のなかで、明らかに陸軍が支援していることが記載されているものを列挙すると、次のようになる。

米陸軍電子技術・デバイス研究所(U.S. Army Electronics Technology and Devices Laboratory: LABCOM)のジェラルド・J・イアフレート(Gerald J. Iafrate)は、論文「High Temperature Superconductivity: Concepts, Issues, and Phenomenology (高温超電導: 概念、課題、現象学)」において、高温超電導と低温超電導との違いを概観し、従来のアプリケーションへの適用には課題があるとしている。

アルゴンヌ国立研究所のC・L・ボーン(C. L. Bohn)らは、論文「RF Measurements on High-T_c Superconductors (高温超電導体の高周波計測)」において、イットリウム系およびビスマス系の厚膜フィルムを作製し、その高周波特性を報告している。この研究は、エネルギー省と陸軍戦略司令部によって支援されたものである。

マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所のD・E・オーツ(D. E. Oates)は、論文「Superconducting Stripline Resonators and High-T_c Materials (超電導ストリップライン共振器と高温超電導材料)」において、高温超電導は高いQ値のマイクロ波共振器を実現する可能性があるものの、ノイズの低減が課題であることを報告している。この研究は、空軍と陸軍によって支援されたものである。

陸軍電子技術・デバイス研究所のジョージ・F・マクレーン(George F. McLane)ら、ニュージャージー工科大学のウィリアム・セイヴィン(William Savin)、ヴィトロニクス社(Vitronics, Inc.)のクリストファー・レン(Christopher

¹⁷⁰ *Proceedings of the Workshop on High Temperature Superconductivity*, GACIAC PR-89-02, GACIAC, Chicago, IL (1989).

Wrenn)は、共著論文「Triode Magnetron Sputtered Superconducting Y-Ba-Cu-O Thin Films (三極真空管マグネトロンスパッタ超電導Y-Ba-Cu-O薄膜)」において、スパッタリングによりY-Ba-Cu-O薄膜を作製するとともに、超電導特性を向上した条件を報告している。

アドバンスド・フュエル・リサーチ社(Advanced Fuel Research, Inc.)のP・W・モリソン・Jr(P.W. Morrison, Jr.)ら、ユナイテッド・テクノロジー・リサーチ・センター(United Technologies Research Center)のL・リンズ(L. Lynds)らは、共著論文「In-Situ Diagnostics of Laser Ablated Films of YBaCuO (YBaCuOのレーザーアブレーション膜のその場診断)」において、フーリエ変換赤外分光法(Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy)が成膜のその場観測に適していることを報告している。この研究は、contract DASG60-88-C-0083 の下、戦略防衛イニシアチブ(Strategic Defense Initiative: SDI)の一環で行われた。

陸軍材料技術研究所(US Army Materials Technology Laboratory)のK・T・リチャーズ(K.T. Richards)らは、論文「Processing of High Temperature Superconductors Via Hot Isostatic Pressing (熱間静水圧プレスによる高温超電導体の作製)」において、熱間静水圧プレスが高温超電導バルク体の特性を向上することを報告している。

(3) 空軍

空軍においては、以下のような文献が存在する。1988年にテキサス大学のアレックス・デ・ロザンネ(Alex de Lozanne)は、空軍科学研究所に提出した報告書「Tunneling Microscopy of Superconductors and Tunneling Barriers (超電導体のトンネル顕微鏡観察とトンネル障壁)」¹⁷¹において、チタン酸ストロンチウムの上にY-Ba-Cu-Oの薄膜を作製し、走査トンネル顕微鏡を用いて特性を調べたことを報告している。なお、この成果は、『アプライド・フィジク

¹⁷¹ Alex De Lozanne, *Tunneling Microscopy of Superconductors and Tunneling Barriers*, ADA197686 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988). Grant No. AFOSR-87-0228.

ス・レターズ』に2報¹⁷²掲載されている。

同年、カリフォルニア大学のポール・L・リチャーズ(Paul L. Richards)は、空軍科学研究所に提出した報告書「Quantum Limits of Superconducting Heterodyne Receivers (超電導ヘテロダイン受信機の量子限界)」¹⁷³において、ジョセフソン素子を用いたSISミキサの開発について報告している。

同年、ウェスティングハウス研究開発センター(Westinghouse Research and Development Center)のA・I・ブラジンスキー(A. I. Braginski)らは、空軍科学研究所に提出した報告書「Superconducting Electronic Film Structure (超電導電子膜構造)」¹⁷⁴において、薄膜の表面で観測される非超電導層を排除するため、Y-Ba-Cu-O 成長手順を多種多様に試行したことを報告している。

同年、空軍システム司令部ローム空軍開発センター(Rome Air Development Center)のケネス・P・クインラン(Kenneth P. Quinlan)らは、同センターの所内(In-House)報告書「Preparation of the Superconductor Substrate Strontium Titanate (超電導基板チタン酸ストロンチウムの作製)」¹⁷⁵において、超電導薄膜を作製するにあたっての基板となるチタン酸ストロンチウムについての報告をしている。

1989年、ウェスティングハウス研究開発センターのA・I・ブラジンスキー(A. I. Braginski)らは、空軍との契約(Contract No. F49620-88-C-0030)に基づき空軍科学研究所に提出した報告書「Superconducting Oxide Films for Multispectral Infrared Sensors (マルチスペクトル赤外線センサーのための超電導酸化膜)」¹⁷⁶において、YBa₂Cu₃O_{7-δ}薄膜を用いた赤外線検出について報告している。

¹⁷² R. M. Silver, J. Talvacchio, and A. L. de Lozanne, "Sputter Deposition of YBa₂Cu₃O_{7-γ} Thin Films," *Applied Physics Letters* 51, no. 25 (1987): 2149-51, <https://doi.org/10.1063/1.98976>; R. M. Silver, A. B. Berezin, M. Wendman, and A. L. de Lozanne, "As-Deposited Superconducting Y-Ba-Cu-O Thin Films on Si, Al₂O₃, and SrTiO₃ Substrates," *Applied Physics Letters* 52, no. 25 (1988): 2174-6, <https://doi.org/10.1063/1.99760>.

¹⁷³ Paul L. Richards, *Quantum Limits of Superconducting Heterodyne Receivers*, ADA201303 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988). Grant No. USAF-AFOSR-85-0230.

¹⁷⁴ A. I. Braginski, J. R. Gavaler, and J. Talvacchio, *Superconducting Electronic Film Structure*, ADA200534 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988). Contract No. F49620-88-C-0039.

¹⁷⁵ Kenneth P. Quinlan, Robert M. Hilton, and Joseph A. Adamski, *Preparation of the Superconductor Substrate Strontium Titanate*, ADA206800 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988).

¹⁷⁶ A. I. Braginski, and M. G. Forrester, *Superconducting Oxide Films for Multispectral Infrared Sensors*, ADA206685 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989).

同年、マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology) のM・S・ドレッセルハウス (M. S. Dresselhaus) らは、空軍のグラント (Grant No. AFOSR-88-0021) に基づき空軍科学研究所に提出した報告書「Superconductivity and Magnetism in Layered Materials (層状物質の超電導と磁性)」¹⁷⁷において、いずれも層状構造をしている酸化物高温超電導体と黒鉛間化合物の物性を報告している。

同年、メリーランド大学 (University of Maryland) のH・J・パイク (H. J. Paik) らは、空軍との契約 (Contract No. F19628-85-K-0042) に基づき空軍システム司令部 (Air Force Systems Command) 地球物理研究所 (Geophysics Laboratory) に提出した報告書「Superconducting Six-Axis Accelerometer (超電導6軸加速度計)」¹⁷⁸において、超電導6軸加速度計の理論的考察とともに、実際に作製して試験をしたことを報告している。

1990年、空軍システム司令部 (Air Force Systems Command) ローム空軍開発センター (Rome Air Development Center) のジョン・S・デロブ (John S. Derov) らは、同センターの所内 (In-House) 報告書「Measurement and Analysis of the Microwave Surface Resistance in a Mixed Phase Y-Ba-Cu-O Superconductor (混合相Y-Ba-Cu-O超電導体におけるマイクロ波表面抵抗の測定と解析)」¹⁷⁹において、16.5 GHzのマイクロ波の表面抵抗が異なる超電導相の間で不連続に変化することを報告している。

同年、クライオ・パワー・アソシエイツ社 (CryoPower Associates) のヘンリー・L・ラケル (Henry L. Laquer) らは、空軍および戦略防衛構想機構 (SDIO) との契約 (F33615-87-C-2747) に基づき空軍システム司令部 (Air Force Systems Command) ライト研究開発センター (Wright Research and Development Center) 航空推進・動力研究所 (Aero Propulsion and Power Laboratory) に提出した2通の報告書「Stability Projections for High

¹⁷⁷ M. S. Dresselhaus, and G. Dresselhaus, *Superconductivity and Magnetism in Layered Materials*, ADA208487 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989).

¹⁷⁸ Ho Jung Paik, Joel W. Parke, and Edgar R. Canavan, *Superconducting Six-Axis Accelerometer*, ADA215948 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989).

¹⁷⁹ John S. Derov, Peter J. Walsh, W. D. Cowan, C. Von Benken, and A. Drehman, *Measurement and Analysis of the Microwave Surface Resistance in a Mixed Phase Y-Ba-Cu-O Superconductor*, ADA230047 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990).

Temperature Superconductors (高温超電導体の安定性予測)¹⁸⁰、
「Superconducting Permanent Magnets (超電導永久磁石)」¹⁸¹において、超電導体に磁束をトラップさせた超電導永久磁石について報告している。

1991年、カリフォルニア大学(University of California)のJ・D・マッケンジー(J. D. Mackenzie)は、空軍および戦略防衛構想機構(SDIO)のグラント(F-49620-87-K-0011)に基づき提出した報告書「International Collaboration Program on Innovative Chemical Processing of Superior Electronic and Optical Materials (優れた電子・光学材料の革新的化学プロセスに関する国際連携プログラム)」¹⁸²において、フランス、英国、日本の研究者と連携し、BiCuSrCaO_x系の超電導および非線形光学現象の研究を行ったことを報告している。

小括

超電導ブーム期の具体的なRDT&Eプロジェクトを概括し、海軍、陸軍、空軍はいずれも、高温超電導の基礎研究を行っていた。特に海軍においては、海軍の超電導プログラムのほぼ半分を基礎研究と材料開発に焦点を当てているという点で、海軍研究アドバイザリー委員会の報告書 *Superconductivity* における「高温超電導の有用性を完全に評価する前に、かなりの研究開発努力が必要」との指摘に符合する。一方で、同報告書が同じく指摘している、「高温超電導の理論的理解」については、本研究で調べた限りでは特徴的な進展は確認されなかった。

第3節 冷却期—冷戦の終焉と共に—(1990年代)

¹⁸⁰ Henry L. Laquer, Fredrick J. Edesbuty, William V. Hassenzahl, and Stefan L. Wipf, *Stability Projections for High Temperature Superconductors*, ADA218945 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990).

¹⁸¹ Stefan L. Wipf, and Henry L. Laquer, *Superconducting Permanent Magnets*, ADA218944 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990).

¹⁸² J. D. Mackenzie, *International Collaboration Program on Innovative Chemical Processing of Superior Electronic and Optical Materials*, ADA235030 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991).

1 米国政府、米国議会の状況

1991年、東西ドイツの統合やソ連崩壊を経て冷戦が終結した。冷戦の終結で「平和の配当」が政治的なスローガンとなっており、軍事予算は削減されていた。また、日本はバブル崩壊に伴う経済の失速で、競争力を訴える必要性が低下していた。

高温超電導の発見で沸いた熱狂はいつまで続いたのか、米国防総省における超電導の研究、開発、試験及び評価を取り巻く環境の変化を詳解する。1992年2月27日から28日にかけてテキサス州ヒューストンで開催された「1992 TCSUHワークショップ」における、海軍調査研究所のガブサーによるプロシーディング「Federal Programs in Superconductivity（超電導における連邦プログラム）」¹⁸³には、超電導にかかるすべての連邦支出として、1987年度から1992年度までの、「高温超電導の研究開発(High T_c R&D)」、「低温超電導の研究開発(Low T_c R&D)」、「調達(Procurement)」の推移を表している。それによると、「高温超電導の研究開発」、「低温超電導の研究開発」、「調達」を足し合わせたものは、1987年度のおよそ9千万ドル(90 million US\$)から1992年度のおよそ3億5千万ドル(350 million US\$)まで増加を続けている。

内訳を見てみると、「高温超電導の研究開発」単独で見ると、1987年度のおよそ4千6百万ドル(46 million US\$)から1992年の1億3千5百万ドル(135 million US\$)にまで増加している一方で、「低温超電導の研究開発」単独で見ると、1987年度のおよそ4千万ドル(40 million US\$)から1991年度のおよそ1億2千7百万ドル(127 million US\$)にまで増加をするも、翌1992年度にはおよそ1億ドル(100 million US\$)にまで減少している。1991年度と1992年度において、さらに省庁の内訳を表16に示す。最大の研究開発予算を有しているのはエネルギー省(Department of Energy: DOE)である。

¹⁸³ D. U. Gubser, "Federal Programs in Superconductivity," In: C. W. Chu, W. K. Chu, P. -H. Hor, and K. Salama. (eds) *HTS Materials, Bulk Processing & Bulk Applications: Proceedings of the 1992 TCSUH Workshop, Houston, Texas, 27-28 February 1992* (World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 1992).

表16 1991年度と1992年度の各省庁における超電導のための

米国の研究開発予算

(単位:M\$)

	HTS		LTS		TOTAL	
	FY91	FY92	FY91	FY92	FY91	FY92
DOE	46	50	104	75	150	125
DOD	54	51	14	17	68	68
NSF	23	24	2	1	25	25
NIST	3.4	4.9	0.5	0.7	3.9	5.6
NASA	4.7	4.6	1.9	1.9	6.6	6.5
DOI	0.1		0.2		0.3	
NIH			3.4	3.5	3.4	3.5
DOT			0.5	1.2	0.5	1.2
TOTAL	131.2	134.5	126.5	100.3	257.7	234.8

注: DOE:エネルギー省、DOD:国防総省、NSF:国立科学財団、NIST:国立標準技術研究所、NASA:国立航空宇宙局、DOI:内務省、NIH:国立衛生研究所、DOT:運輸省

出所: D. U. Gubser, "Federal Programs in Superconductivity." In: C. W. Chu, W. K. Chu, P. -H. Hor, and K. Salama. (eds) *HTS Materials, Bulk Processing & Bulk Applications: Proceedings of the 1992 TCSUH Workshop, Houston, Texas, 27-28 February 1992* (World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 1992). を基に筆者作成

ガブサーは、まず、最大の予算を有するエネルギー省での超電導の研究開発について、それが「主に加速器用磁石の低温超電導プログラムによる」ことについて述べている。続いて、二番目に予算の大きい米国防総省での超電導の研究開発の特徴について述べている。

それによると、「資金の大半は高温超伝導」であるという。高温超電導が優勢となっているのは、「軍事システムは一般に、移動可能であり、兵站が懸念される世界のあらゆる地域で運用されなければならないから」である。「小型、軽量、悪条件下でも長寿命、そしてシンプルな兵站は、軍事作戦にとって不可欠な要素」である。これらの懸念は、「4.2K(ケルビン)ではなく77K(ケルビン)で動作する極低温システムの方がはるかに簡単に対応可能」である。

また、米国防総省の超電導プログラムには主に4つの重点分野がある。第一は「エレクトロニクス(アナログ、デジタル)」、第二は「センサー(SQUID、赤外線センサー)」、第三は「宇宙利用(フェーズド・アレイ・センサー、通信システム)」、そして第四は上記の米国防総省のニーズをサポートするための「材

料およびデバイスの関連研究開発」であるとのことである。

研究開発費としては、1991年度から1992年度にかけて9%の減である。しかし、調達が増えたことにより、超電導にかかる連邦支出全体が増加していることを同文献では示している。

1993年に、超電導の政策に関係する大きな変化が起きる。政権交代と、超電導超大型加速器 (Superconducting Super Collider: SSC) の計画の中止である。ブッシュ政権は1期4年で終わり、民主党のクリントン政権となった。ブッシュ(父)はレーガン政権での副大統領であったことから、レーガン大統領(当時)のイニシアチブを引き継ぐ理由があったと言える。しかし、政権交代をした民主党のクリントンにとって、レーガンのイニシアチブは、必ずしも引き継がなくてはならないものではなく、議会次第であったと考察する。また、当時は議会も、上下両院ともに民主党が第1党であった。

そして、1993年6月、米国会計検査院 (Government Accountability Office: GAO) が、報告書「Superconducting Super Collider's Total Estimated Cost Will Exceed \$11 Billion (超電導超大型加速器の総推定コストは110億ドルを超える)」¹⁸⁴を下院エネルギー商務委員会監視調査分科会に提出すると、連邦議会でSSCの中止が議論され、可決した。クリントン大統領(当時)は、科学への深刻な損失であるとしながらも、SSCを中止する法案に署名したという¹⁸⁵。SSCはエネルギー省の管轄であることや、SSCで使用するのは、高温超電導ではなく低温超電導であることなど、米国防総省における高温超電導の研究開発には直接、影響はなさそうにも見える事象であったが、超電導への熱い期待を冷ます一つの要因にはなつたと推察する。

それから2年後の1995年に、アプライド・スーパーコンダクティビティ (Applied Superconductivity) に掲載されたドナルド・U・ガブサーの論文「Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective (超電導研究開発:国防総省の視点)」¹⁸⁶には、1992年度から

¹⁸⁴ U.S. General Accounting Office, *Federal Research: Superconducting Super Collider's Total Estimated Cost Will Exceed \$11 Billion*, GAO/T-RCED-93-57 (June 1993).

¹⁸⁵ “Stating Regret, Clinton Signs Bill That Kills Supercollider.” *The New York Times*, October 31, 1993, <https://www.nytimes.com/1993/10/31/us/stating-regret-clinton-signs-bill-that-kills-supercollider.html>

¹⁸⁶ Donald U. Gubser, “Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective,” *Applied Superconductivity* 3, no. 1-3 (1995): 157-61.

1995年度にかけての、米国防総省における超電導の研究開発資金、用途、そして取り組みの内訳が示されている。高等研究計画局（ARPA ※当時）、海軍（Navy）、空軍（Air Force）、国家安全保障局（NSA）、弾道ミサイル防衛機構（BMDO）¹⁸⁷、陸軍（Army）の内訳を表17に引用して示す。

表17 1992年度～1995年度の米国防総省における超電導の研究開発予算
（組織別） （単位：M\$）

	FY92	FY93	FY94	FY95
ARPA	27.0	35.0	46.0	14.0
海軍	17.9	24.4	25.4	18.4
空軍	8.8	9.9	10.0	9.5
NSA	3.0	3.0	2.0	2.0
BMDO	6.2	6.8	2.8	2.0
陸軍	1.5	1.5	1.5	1.5
合計	64.4	80.6	87.7	47.4

注：超電導磁石エネルギー貯蔵プロジェクトの資金はこの表の中に含まれない。

出所：Donald U. Gubser, “Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective,” *Applied Superconductivity* 3, no. 1-3 (1995): 157-61. を基に筆者作成。

全体としては、1992年度から1993年度にかけて25%増、1993年度から1994年度にかけて9%増ときたところ、1994年度から1995年度にかけては46%減とほぼ半減している。これについてガブサーは、「短期的なシステムへの影響やスポンサーのない長期研究による一般的な欠点を反映している」と指摘している。内訳を見てみると、この頃には米国防総省のなかで高等研究計画局（ARPA）が超電導の研究開発のための最大の資金を有しており、1994年度には全体の50%を超えるまでになっていた。その分、1995年度の減額で最も大きな減額となっている。

用途別の内訳を表18に引用して示す。エレクトロニクス（Electronics）、推進力/電力（Propulsion/Power）、SQUIDのうち、最も多くの資金が投入され

¹⁸⁷ 1994年に Strategic Defense Initiative Organization (SDIO) が Ballistic Missile Defense Organization (BMDO) に改称された。なお、文献中には、Ballistic Missile Defense Office とあったが、誤記と推察する。詳しくは、現在の米国防総省ミサイル防衛局 (Missile Defense Agency: MDA) のウェブサイト (<https://www.mda.mil/about/history.html>) を参照されたい。

ているのは、エレクトロニクスである。毎年度、全体の60%以上を占め、1994年度には69%を占めるほどである。次いで、推進力/電力が10%から20%程度、最も少ないのがSQUIDで10%程度である。SQUIDは、エレクトロニクスに含まれていてもおかしくはないが、あえてエレクトロニクスから独立しているというのは、軍にとってそれだけ特別な存在であることが分かる。

表18 1992年度～1995年度の米国防総省における超電導の研究開発予算
(用途別) (単位:M\$)

	FY92	FY93	FY94	FY95
エレクトロニクス	39.4	53.6	60.7	30.0
推進力/電力	19.0	20.0	20.0	12.0
SQUIDs	6.0	7.0	7.0	5.4
合計	64.4	80.6	87.7	47.4

注: 超電導磁石エネルギー貯蔵プロジェクトの資金はこの表の中に含まれない。

出所: Donald U. Gubser, "Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective," *Applied Superconductivity* 3, no. 1-3 (1995): 157-61. を基に筆者作成。

実施内容別の内訳を表19に引用して示す。科学 基礎/材料 (Science Base/Materials)、基盤施設 (Infrastructure)、実証試験 (Demonstration) のうち、最も多くの資金が投入されているのは、実証試験である。

表19 1992年度～1995年度の米国防総省における超電導の研究開発予算
(実施内容別) (単位:M\$)

	FY92	FY93	FY94	FY95
科学 基礎/材料	20.0	20.0	20.0	15.4
基盤施設	20.0	20.0	20.0	12.0
実証試験	24.4	40.6	47.7	20.0
合計	64.4	80.6	87.7	47.4

注: 超電導磁石エネルギー貯蔵プロジェクトの資金はこの表の中に含まれていない。

出所: Donald U. Gubser, "Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective," *Applied Superconductivity* 3, no. 1-3 (1995): 157-61. を基に筆者作成。

1992年度から1994年度にかけて、科学 基礎/材料、および基盤施設は伸びないなか、実証試験は伸びていて、1992年度は全体の38%であったが、1994年度には58%にまで割合が高まっている。1991年度以前のデータがないため正確ではないが、1992年度から1994年度の傾向からすると、1991年度、あるいはその前から、徐々に基礎研究から実証試験に重点を移していたものと推察する。

当時行われていた実証試験とその実施主体を表20に引用して示す。多様な実証実験が行われているが、すべてにおいて海軍の記載があり、海軍が最も超電導技術の利用に熱心であった。

表20 実証試験とその実施主体

高温超電導宇宙実験	海軍、ARPA
推進モーター・プロジェクト	海軍、ARPA、空軍
機雷掃海	海軍
SQUID検出システム (MADOM、フィルム、高温超電導)	海軍、空軍
高温超電導多チップ・モジュール	ARPA、海軍、空軍
マイクロ波・サブシステム	ARPA、海軍、空軍
デジタル回路・スイッチ	ARPA、NSA、BMDO、海軍、空軍
アンテナ・赤外線アレイ	海軍、空軍、BMDO
レーダー	海軍、ARPA
海中音波発生機	海軍
冷凍機	ARPA、海軍、空軍
超電導磁気エネルギー貯蔵	ARPA、海軍、空軍

出所: Donald U. Gubser, "Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective," *Applied Superconductivity* 3, no. 1-3 (1995): 157-61. を基に筆者作成。

2000年に、『スーパーコンダクター・サイエンス・アンド・テクノロジー (Superconductor Science & Technology)』に掲載された空軍科学研究所のハロルド・ウェINSTOCK (Harold Weinstock) の論文「Superconductivity in

the USA (アメリカ合衆国における超電導)」¹⁸⁸には、1997年度と1999年度における、超電導の研究開発のための政府予算が示されている。表21に引用する。最大の研究開発費が配分されていたエネルギー省(DOE)は、1991年度には1億5000万ドルであったが、1994年度にはほぼ半減の7930万ドルにまで低下した。その後も減少傾向にあり、1999年度には、5500万ドルにまで低下した。一方、2番目に多く配分されている米国防総省(DOD)は、1990年度の7300万ドルから1992年度の6550万ドルに、一旦は減少したものの、翌1993年度には8060万ドル、1994年度には8770万ドルと、増額傾向にあった。

表21 1990～1999年度の超電導に対する連邦政府の資金提供の概要

省庁	FY-90	FY-91	FY-92	FY-93	FY-94 ^a	...	FY-97 ^a	...	FY-99 ^a
超電導研究開発に対する連邦政府の支援(100万ドル)									
DoE	127.8	150.0	117.7	79.3	79.4		68.9		55.0
DoD	73.0	68.5	65.5	80.6	87.7		30.1		27.0
NSF	23.2	24.8	27.2	24.4	24.0		23.3		20.0
NIST	3.3	3.9	4.6	5.5	5.8		3.5		3.0
NASA	6.7	6.6	6.5	4.0 ^b	4.0 ^b		3.0 ^b		3.0 ^b
計	234.0	253.8	221.5	193.8	200.9		128.8		108.0
超電導デバイスの購入(purchase)に対する連邦政府の支援(100万ドル)									
DoE	18.5	39.7	133.1	16.0	21.2				
DoD	18.0	30.0	NA	NA	NA				
計	36.5	69.7	133.1	16.0	21.2				

含まれないもの：他の連邦機関、SBIR、ATP、IR&D。

出典：超電導に関する連邦研究プログラム、1994年6月、および私的コミュニケーション。

a 省庁担当者による見積もり。

b 著者による推定。

出所： Harold Weinstock, "Superconductivity in the USA," *Superconductor Science and Technology* 13, no. 5 (2000): 464-7. を基に筆者作成。

1997年度には3010万ドル、1999年度には2700万ドルと減少傾向にあり、

¹⁸⁸ Harold Weinstock, "Superconductivity in the USA," *Superconductor Science and Technology* 13, no. 5 (2000): 464-7.

1994年度から1997年度の間はどこかにピークがあったと推察する。ウェINSTOCKは、これらのことについて、同論文で述べている。¹⁸⁹

それによると、当時の直近3年間の「研究開発資金の大部分は高温超電導の材料とデバイスであり、80%を超えて」いたという。対照的に、調達のはほとんどは「依然として低温超電導のデバイス用」であった。米国防総省の調達には最近の数字はないが、「間違いなくゼロではない」ことにも注意する必要がある。1992年以降のエネルギー省(DoE)資金の最大の明らかな減少は、「超電導超大型加速器(SSC)の中止」に直接関係している。実際、「エネルギー省の高温超電導開発への取り組みは、主に電気システムのための超電導プログラムを通じて、増加」していた。

それに対し、当時、米国防総省機関による資金が大幅に減少しており、それにはいくつかの理由があるという。最も重要なことは、「冷戦後の時代に米国防総省全体の予算が大幅に縮小し、ほとんどすべての米国防総省の研究開発資金が大幅に削減された」ことである。当時、基礎研究レベルでさえ、「特定の軍事的ニーズへの対応を提供すると思われるプロジェクトのみに資金を提供すること」に、より鋭い焦点が当てられていた。

この新しい軍事パラダイムは、超電導への資金提供を開始または増加させることが政治的に正しいと高官たちが考えていた、「超電導に対するあの興奮の喪失」と結びついている。超電導の資金は「1994年まで毎年追跡され、発行されていたが、その後は、タイトルに超電導が含まれることはめったになく、そのようなプログラムを特定するのがかなり困難になった」ため、必要な情報を収集できなくなった。国立科学財団(NSF)でさえ、その名前に超電導を含むプログラムはない。

要約すると、「連邦政府の超電導への資金提供は1990年代を通じて減少しているが、特定のプロジェクトへの安定した資金提供に反映されているように、高温超電導の開発への関心は依然として非常に重要」である。超電導の資金の減少の多くは、「主に高エネルギー物理学における低温超電導の資金の減少の結果」である。エネルギー省は、「電力の生成、送電、調整において、

¹⁸⁹ Weinstock, "Superconductivity in the USA." (2000): 464-7.

よりエネルギー効率の高い超電導技術」に取り組んでいる。米国防総省は、「改善された、より安全なセンサー、通信システム、信号プロセッサ、およびより効率的なモーターと発電機」に取り組んでいる。一方、「アメリカ航空宇宙局(NASA)の研究所と国立標準研究所(NIST)の小規模なプログラムは比較的安定しており、おそらくわずかな減少しかなかった」とのことである。

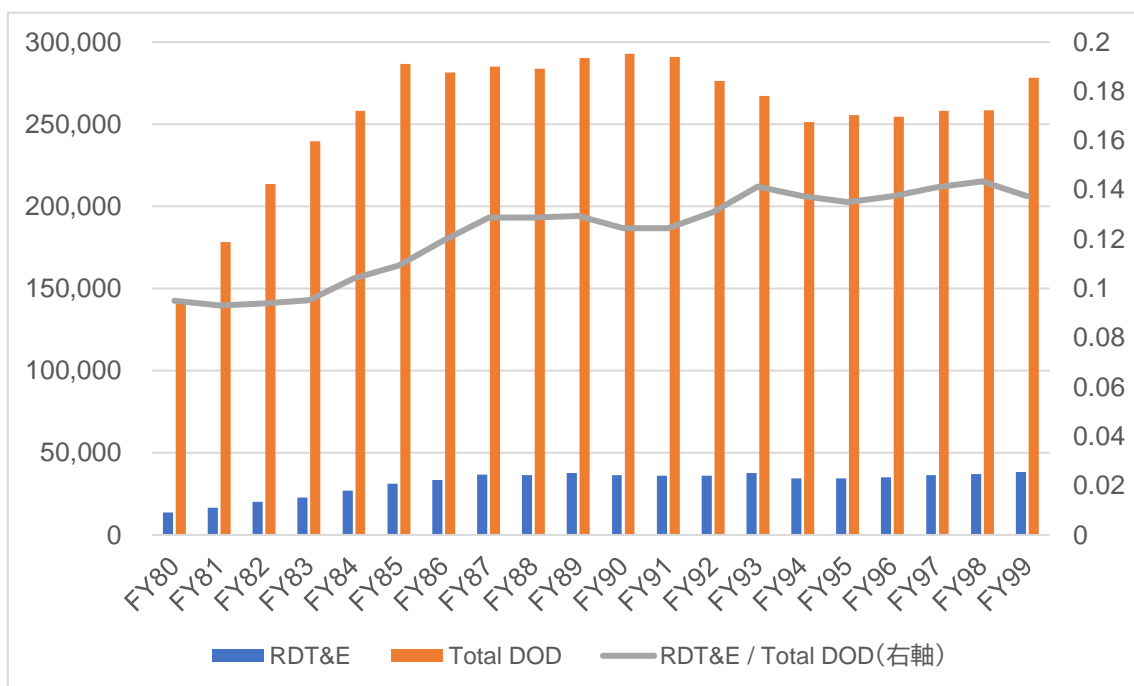
超電導ブームが終わったと言える時期を明確に表すことは難しいが、ウェインストックの分析は、そのヒントを与えてくれている。そこで、ブームを冷ましていった要因を考察してみる。まず、ブームが覚める要因として、内的要因と外的要因に分けることができると考える。内的要因とは、ブームの対象そのものの魅力が薄れるということである。これについては、ウェインストックによると、エネルギー省も米国防総省も、また、小規模ながらアメリカ航空宇宙局も国立標準研究所も、引き続き研究開発に取り組んでいるということであり、マクロな視点からすると、当てはまらないと言える。

ただし、個別のプロジェクトのレベルでは、期待する成果が得られず、終了したものもあると考える。外的要因としては、ドライビング・フォース(駆動力)が減少するということである。これは、超電導の研究開発に投入される資源、いわゆるヒト(人材)・モノ(施設、資材)・カネ(資金)が減るということである。当時、民生利用が限られていたことを考えれば、端的には、主たる需要者である政府の支出が減るということである。見てきたように、実際に政府予算は減少している。この内的要因と外的要因は、完全に独立したものではなく、部分的に相関関係にあると考えている。冷戦が終結し、米国防総省全体の予算が大幅に縮小し、ほとんどすべての米国防総省の研究開発資金が大幅に削減されたとしても、超電導に魅力があれば、予算の削減は限定的なものとなる。

しかし、表21を見ると、超電導研究開発に対する連邦政府の支援のうち、米国防総省分は、1994年度の8770万ドルから、1999年度の2700万ドルへと減少している。一方で、国防予算、特にRDT&E予算に関しては、様相は異なる。レーガン政権期(1981年～1989年)を含む、1980年度から1999年度までの、米国防総省の予算、および、それに含まれるRDT&Eの予算を、図3に示す。1989年の冷戦終結後、国防予算は、一旦は減少するものの、減少幅は1

～2割にとどまり、その後、1995年度以降は増加傾向を示している。これは、湾岸戦争（1990年～1991年）やユーゴスラビア紛争（1991年～2001年）などに米軍が関与することにより、国防予算が押し上げられたものと考えられる。RDT&E予算も同様の傾向を示している。また、国防予算に占めるRDT&E予算の割合は、1980年代から徐々に増加し、1990年代では1980年代よりも大きくなっている。

図3 国防省予算およびその内数であるRDT&E予算の推移
(1980年度～1999年度)



注：当時のBudget Authority (BA)の額。左軸の単位は100万ドル。
出所：米国防総省の予算要求資料に基づき筆者作成。

この全体的な傾向を踏まえると、超電導の研究開発予算の減少には、次の二つの可能性が考えられる。一つは、研究開発は徐々に削減する一方で、調達が増えていたということ。そして、もう一つは、内的要因として挙げた、超電導の魅力が薄れ、他の研究開発の予算に競り負けていたということである。

前者について掘り下げる。当時の米国の競争力の状況について見てみると、国立科学財団(NSF)の統計によると、連邦政府の研究開発支出は、対GDP比で、1964年の1.86%をピークに下降を始める。

その後、1980年の1.05%から緩やかな上昇が見られるものの、1987年の1.12%から再び下降し、2000年には0.66%にまで低下している。一方で、産業部門の研究開発支出は全体的に上昇基調を維持しており、1964年には0.86%であったものが、1980年には1.08%で連邦政府の研究開発支出を上回り、1987年には1.29%、2000年には1.81%と連邦政府の研究開発支出の3倍近くにまでなっている¹⁹⁰。歴史的には、第二次世界大戦後に、原子力の平和利用やロケットの宇宙開発への応用、コンピューターなど、軍事技術の民生技術への転用、いわゆるスピン・オフ(Spin-off)が進んだが、1980年代には逆に、民生分野の半導体技術、材料技術などの発展の結果、先端技術のスピン・オン(Spin-on)の重要性が高まった。この傾向は現在も続いている¹⁹¹。

米国防総省や各軍の調達情報から超電導関連を抜き出すことができれば、上記の仮説を確認できると考えるが、そのようなデータは、本研究で調べた限りでは存在しなかった。軍事機密のために、事実があっても公表されないという可能性はあるが、超電導技術が軍事的に利用されているという情報はほぼないことからすると、この仮説は棄却され、もう一つの、後者の仮説が残るといことになるのではないかと推察する。

しかし、内的要因のところ考察したように、米国防総省として、引き続き研究開発に取り組んでおり、マクロな視点からすると当てはまらないが、個別のプロジェクトのレベルでは、期待する成果が得られず、終了したものもあると考えられ、冷戦直後の予算減少と、期待する成果が得られなかったプロジェクトによる超電導への期待の減少が相俟って、熱狂は平静を取り戻し、適度な予算に落ち着いていったのではないかと推察する。

2 具体的なRDT&Eプロジェクト

超電導の応用研究や実証機開発は、超電導ブームより前から、低温超電導体を用いて行われていたものの、目立ってはいなかった。その背景としては、

¹⁹⁰ Mark Boroush, "U.S. R&D Increased by \$51 Billion in 2018, to \$606 Billion; Estimate for 2019 Indicates a Further Rise to \$656 Billion," NSF 21-324, National Center for Science and Engineering Statistics (NCSES), National Science Foundation (NSF), April 13, 2021, <https://nces.nsf.gov/pubs/nsf21324/>.

¹⁹¹ 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』岩波書店、第88巻第6号、2018年、647頁。

低温でしか超電導にならないという物理的な制約に加え、冷却技術、加工技術、計測技術といった周辺技術が追い付いていなかったこと、また、超電導自体がさほど注目されておらず、研究開発のための十分な予算が得られなかったことが考えられる。超電導ブームの頃になると、超電導に注目が集まり、研究開発のための予算は増えたものの、高温超電導体が断続的に発見され、超電導転移温度 (T_c) の記録が断続的に塗り替えられていたことや、それぞれ異なる特性を持ち、物性研究が追い付かないことから、超電導の応用研究や実証機開発は、やはり目立ってはいなかったと考える。その状況が、この1990年代前半の頃から変化していると考えられる。

(1) 海軍

1992年、『海軍技術ジャーナル(Naval Engineers Journal)』に掲載された、デービッド・テイラー研究センターのE・マイケル・ゴルダ(LCdr. E. Michael Golda)らによる論文「Applications of Superconductivity to Very Shallow Water Mine Sweeping (極めて浅い海での機雷掃海への超電導の応用)」¹⁹²では、磁気機雷の対策として、低温超電導体であるNbTi(ニオブ・チタン)またはNb₃Sn(ニオブ3・スズ)による電磁石を用いることにより、掃海システムの軽量化が図れる可能性について報告されている。

1993年、『ジャーナル・オブ・スーパーコンダクティビティ(Journal of Superconductivity)』に掲載された、ミッチェル・アソシエイツ(Mitchell Associates)のD・L・ミッチェル(D. L. Mitchell)と海軍調査研究所のガブサーによる論文「Induction-Drive Magnetohydrodynamic Propulsion (誘導駆動磁気流体力学的推進)」¹⁹³では、超電導電磁石を用いた、磁気流体のローレンツ力による船舶の推進機構(MHD推進)について、小型無人潜水艇で考えられる有効性が述べられている。

1996年、『IEEEトランザクションズ・オン・マイクロウェーブ・セオリー・アン

¹⁹² E. Michael Golda, Joseph D. Walters, Geoffrey F. Green, "Applications of Superconductivity to Very Shallow Water Mine Sweeping," *Naval Engineers Journal* 104, no. 3 (1992): 53-64, <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1992.tb02224.x>.

¹⁹³ D. L. Mitchell, and D. U. Gubser, "Induction-Drive Magnetohydrodynamic Propulsion," *Journal of Superconductivity* 6, no. 4 (1993): 227-35, <https://doi.org/10.1007/bf00626262>.

ド・テクノロジーズ (IEEE Transactions on Microwave Theory and Technologies)』に掲載された、海軍調査研究所のトーマス・G・カウェッキ (Thomas G. Kawecki) らによる論文「The High Temperature Superconductivity Space Experiment (HTSSE-II) Design (高温超電導宇宙実験 (HTSSE-II) の設計)」¹⁹⁴では、高温超電導体を人工衛星の電子機器として応用する宇宙実験 (HTSSE) の第2期について、設計と実機が報告されている。

ここでHTSSEプログラムについて補足する。同プログラムは、宇宙応用に高温超電導のコミュニティの注目を集めるため、1988年末に開始された。第1期 (HTSSE-I) は、冷凍機と、主にマイクロ波用のシンプルなデバイスを搭載して1993年に打ち上げられたが、軌道投入には失敗した¹⁹⁵。第2期 (HTSSE-II) は、当初の予定より遅れたものの1999年に打ち上げられ、プログラムが終了するまでの3年間、搭載されたデバイスはモニタリングされていた¹⁹⁶。

1997年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ (IEEE Transactions on Applied Superconductivity)』に掲載された、海軍水上戦センターのマイケル・J・スーパージンスキー (Michael J. Superczynski) らによる論文「Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings (高温超電導界磁巻線を用いたホモポラー・モーター)」¹⁹⁷と、インターマグネティクス・ゼネラル社 (Intermagetics General Corporation) のドリュー・W・ハゼルトン (Drew W. Hazelton) らによる論文「HTS Coils For The Navy's Superconducting Homopolar Motor / Generator (海軍の超電導ホモポラー・モーター/発電機用の高温超電導コイル)」¹⁹⁸はともに、ビスマス系の高温超電導体を用いたホモポラーのモーター/発

¹⁹⁴ Thomas G. Kawecki, Gerald A. Golba, George E. Price, Vincent S. Rose, and William J. Meyers, "The High Temperature Superconductivity Space Experiment (HTSSE-II) Design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44, no. 7 (1996): 1198-212, <https://doi.org/10.1109/22.508226>.

¹⁹⁵ D.U. Gubser, "Navy Programs in Superconducting Technology," *Journal of Superconductivity* 11 (1998): 1-4, <https://doi.org/10.1023/A:1022656620516>

¹⁹⁶ Donald U. Gubser, "US Navy's Superconductivity Programs Scientific Curiosity to Fleet Utility," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 931-5, <https://doi.org/10.1109/tasc.2010.2088373>.

¹⁹⁷ Michael J. Superczynski Jr., and Donald J. Waltman, "Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 513-8, <https://doi.org/10.1109/77.614554>.

¹⁹⁸ Drew W. Hazelton, Michael T. Gardner, Joseph A. Rice, Michael S. Walker, Chanra M. Trautwein, Pradeep Haldar, Donald U. Gubser, Michael Superczynski, and Donald Waltman, "HTS Coils For The Navy's Superconducting Homopolar Motor / Generator," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 664-7, <https://doi.org/10.1109/77.614591>.

電機を海軍で開発していることを報告している。

また、同誌の同じ号に掲載された、海軍調査研究所のジェフリー・M・ポンド(Jeffrey M. Pond)による論文「A Computationally Efficient Approach to Microwave Circuit Modeling of Complex High Temperature Superconductor Circuits (複雑な高温超電導回路のマイクロ波回路モデリングへの計算効率の高いアプローチ)」¹⁹⁹では、コンピューター支援設計(CAD)のソフトウェアで超電導のマイクロ波回路を設計し、実測した値がモデルにした値とよく合致したことを報告している。

1998年、『ジャーナル・オブ・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、海軍調査研究所のガブサーによる論文「Navy Program in Superconducting Technology (超電導技術における海軍のプログラム)」²⁰⁰では、海軍が行っている超電導の主な研究開発プログラムとして、「基盤、材料、作製」、「船舶推進」、「磁気計測(機雷探知)」、「宇宙実験」、「機雷除去」を行っていることを報告している。

1999年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、アメリカン・スーパーコンダクター社(American Superconductor Corporation)のG・スニッチラー(G. Snitchler)らと海軍調査研究所のフランカビッラらによる論文「High-Field Warm-bore HTS Conduction Cooled Magnet (高磁界で温かい内径の高温超電導冷却磁石)」²⁰¹では、ビスマス系の超電導線を用い、内径2インチで室温のボアに最大7.25 T(テスラ)の磁界を印加する電磁石を開発したことを報告している。

(2) 陸軍

1991年、陸軍電子技術・デバイス研究所のダグラス・J・バサラブ(Douglas

¹⁹⁹ Jeffrey M. Pond, "A Computationally Efficient Approach to Microwave Circuit Modeling of Complex High Temperature Superconductor Circuits," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 3052-5, <https://doi.org/10.1109/77.621976>.

²⁰⁰ D. U. Gubser, "Navy Programs in Superconducting Technology," *Journal of Superconductivity* 11 (1998): 1-4, <https://doi.org/10.1023/A:1022656620516>

²⁰¹ G. Snitchler, S. S. Kalsi, M. Manlief, R. E. Schwall, A. Sidi-Yekhlef, S. Ige, R. Medeiros, T. L. Francavilla, and D. U. Gubser, "High-Field Warm-Bore HTS Conduction Cooled Magnet," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 9, no. 2 (1999): 553-8, <https://doi.org/10.1109/77.783356>.

J. Basarab)らによる技術報告書「Fabrication and Characterization of Yttrium Barium Copper Oxide Superconductors for Microwave Applications (マイクロ波応用のためのイットリウム・バリウム・銅酸化物超電導体の作製と特性評価)」²⁰²では、マイクロ波の応用を想定したイットリウム系超電導の最適な焼結温度が報告されている。

1997年、『IEEEトランザクションズ・オン・マグネティクス』に掲載された、テキサス大学のイアン・R・マクナブ(Ian R. McNab)による論文「Pulsed Power for Electric Guns (電気銃のためのパルスパワー)」²⁰³には、同研究が「Contract DAAA21-93-C-0101」の下、米陸軍研究所(U.S. Army Research Laboratory)の支援で行われたことが記載されている。火薬を使わず電気で銃弾を発射する電気銃のインダクターに高温超電導が利用できる可能性を示唆している。

1998年、米陸軍研究所のR・カドッテ(R. Cadotte)らによる技術報告書「High Temperature Superconducting Inductor for Antenna Matching (アンテナ・マッチングのための高温超電導インダクター)」²⁰⁴では、高温超電導体を用いた高感度の高周波受信器により、これまでには検出のできなかった高周波信号を検出できるようになったことが報告されている。

(3) 空軍

1991年、『IEEEトランザクション・オン・マグネティクス(IEEE Transactions on Magnetics)』に掲載された、ライト研究開発センターのオバリーらによる論文「Principles of Application of High Temperature Superconductors to Electromagnetic Launch Technology (高温超電導体の電磁発射技術への応用原理)」²⁰⁵では、ビスマス系高温超電導体のフィルムを銀で覆ったリボン

²⁰² Douglas J. Basarab, Michelle A. Dornath-Mohr, Donald W. Eckart, Robert D. Finnegan, and Joseph P. Klimek, *Fabrication and Characterization of Yttrium Barium Copper Oxide Superconductors for Microwave Applications*, ADA231713 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991).

²⁰³ Ian R. McNab, "Pulsed Power for Electric Guns," *IEEE Transactions on Magnetics* 33, no. 1 (1997): 453-60, <https://doi.org/10.1109/20.560055>.

²⁰⁴ R. Cadotte, S. C. Tidrow, W. Van Meerbeke, A. DeAnni, and A. Lepore, *High temperature superconducting inductor for antenna matching*, ADA358606 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1998).

²⁰⁵ C. E. Oberly, G. Kozlowski, C. E. Gooden, R. X. Lenard, A. K. Sarkar, I. Maartense, and J. C. Ho, "Principles of

を作製し、電磁発射技術に応用する初期の研究開発を行っていることが報告されている。

(4) 高等研究計画局(ARPA)

1995年に、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された高等研究計画局(Advanced Research Projects Agency: ARPA)(当時、現在はDARPA)のフランク・W・パッテン(Frank W. Patten)らによる論文「The ARPA High Temperature Superconductivity Program」によると、ARPAは、1987年から、大学や国立研究所、企業における高温超電導の取り組みを支援するプログラムを行ってきており、そしてそれは、1996年までの間に、三つのフェーズに分けられるとある²⁰⁶。

それによると、第1フェーズは、「1987年のプログラム開始から1991年頃まで」であり、「粉末前駆体の合成プロセスが成熟し、バルクでモノリシックな試料を提供するためのさまざまな処理技術が開発され、最初の有用な薄膜が生まれた」という。また、「これらの物質の性能の限界が調査され、多種多様なコンポーネントの品質に関する予測が行われ」ていた。プログラムのこのフェーズでは、「多様な契約先で50を超えるプロジェクトがサポートされた」ということである²⁰⁷。

また、第2フェーズは、「1990年頃に開始」され、論文投稿時頃(1994年頃と見られる)が最終段階にあった。このフェーズでは、「多種多様なコンポーネントと単純なサブシステムが開発」された。高周波およびマイクロ波の分野では、「フィルタ、遅延線、ダウンコンバータ、共振器、アンテナ、アンテナ結合ネットワークなどのコンポーネント」が含まれていた。これらの多くは、「海軍の高温超電導宇宙実験HTSSE Iの打ち上げのためにパッケージ化された」という。また、システムまたはサブシステム内のこれらのコンポーネントが、多くの空軍

application of high temperature superconductors to electromagnetic launch technology,” *IEEE Transactions on Magnetics* 27, No. 1 (1991): 509-14, <https://doi.org/10.1109/20.101085>.

²⁰⁶ Frank W. Patten, and Stuart A. Wolf, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5, no. 2 (1995): 3203-7, <https://doi.org/10.1109/77.403273>.

²⁰⁷ Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

および陸軍のアプリケーションにも大きな影響を与える可能性があることも明らかであった。このフェーズでは、「配線に銅酸化物超電導体のトレースを配線に利用するマルチチップモジュール(MCM)を開発するための大規模な取り組み」も開始された。これらのモジュールの利点は、銅線では数十層も必要とされるのとは比べ、「わずか二つの配線層だけで、非常に多くのピン数を持つ非常に大きな半導体チップのアレイを接続できる」ことであるという。超電導MCMの最終実証は「1995年初頭」に予定されていた²⁰⁸。

バルク材料の分野では、単純なモーター用の磁石だけでなく、「航空機産業に適応した工具用のクランプとしての可能性を秘めたモノリシック磁束トラップ磁石」が製造された。また、このフェーズでは、海軍との共同プログラムを開始し、船舶用途のプロトタイプ・モーターで使用するために、「銀管(PIT)内のビスマス・ストロンチウム・カルシウム・銅(BSCCO)粉末をベースにした導体」を開発した²⁰⁹。

「超電導電子コンソーシアム」についても記載している。同コンソーシアムは、第2フェーズのために資金提供され、「AT&T、IBM、Conductus、CTIがMIT、コーネル、リンカーン・ラボと協力して、商用アプリケーションに重要な技術基盤を提供できるさまざまな方法を模索」してきたという。3年間の技術基盤開発を経て、当時、ARPAプログラムの最終フェーズと一致して、「無線通信用のセルラー基地局」と、「超伝導量子干渉素子(SQUID)磁力計とグラジオメータを利用した医療機器」の二つのシステム・アプリケーションを追求していたという。これらの非常に高感度の機器は、「心電計と同様に心臓や他の循環器を非侵襲的に観察」することができる²¹⁰。

プログラムの最終段階は、「1993年頃に開始され、1996年に極低温プログラムに移行するまで」である。このフェーズの最も重要な側面の一つは、「極低温システムの特定のアプリケーション向けに電気的および物理的サイズの両方を備えた、信頼性が高く低コストの冷凍機」を開発するために適用されるリソースであるという。全体として、このフェーズの目標は、「一連のシステ

²⁰⁸ Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

²⁰⁹ Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

²¹⁰ Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

ム・デモンストレーションの開発と、軍事的導入」であるとのことである²¹¹。

そして、当時の主な研究開発として、「軍民両用のフィルターバンク(バンド・パス・フィルターのアレイ)」、「レーダー用の安定発振器」、「極低温でのエレクトロニクス」、「高性能のネットワーク・スイッチ」、「低コストでの製造」を挙げている²¹²。

第1フェーズでは超電導の基礎的なことに取り組んでいた一方で、第2フェーズおよび第3フェーズでは超電導の実用的なことに取り組んでいた。また、実用については、軍事的なことの前に、商用のことに触れており、このことについては、レーガン大統領の11点の超電導イニシアチブが、米国の競争力の文脈で出てきていたことと繋がっていると考える。そして、この文脈からすると、少なくともARPAにとっての超電導プロジェクトは、フェーズ3の終期である1996年で一旦の区切りがあったものと推察する。

小括

冷却期の具体的なRDT&Eプロジェクトを概括し、次のような特徴があった。まず、この頃からDARPA(1993年～1996年のARPAの時代を含む)の関与が顕在化している。また、海軍の高温超電導宇宙実験(HTSSE)に見られるように、大型の研究開発プロジェクトが出現している。

DARPAの超電導プログラムは、1987年に第1フェーズが開始されたが、第1フェーズは基礎的な調査が中心であった。それに対し、1990年ごろに開始された第2フェーズでは、多種多様なコンポーネントと単純なサブシステムが開発され、それらの一部が海軍の大型プロジェクトである高温超電導宇宙実験(HTSSE)に使用されるといった、プロジェクト間の連携ともいえる取り組みも見られた。さらに、大手企業が参加する超電導電子コンソーシアムが形成されるというように、超電導の研究開発のフェーズが、基礎から応用、実証といった段階に上がっていた。

²¹¹ Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

²¹² Patten, and Stuart, “The ARPA High Temperature Superconductivity Program,” (1995).

第4節 平衡期—祭りのあとの日常—(2000年代～)

ここまで見てきたことからすると、米国政府が「超電導」を掲げて予算がとれた時代は、1990年代の初頭くらいまでであったと推察する。では、ブームで盛り上がった火は完全に消えてしまったのかというと、そうとは言えない。多くの研究開発が、ブームなど起きないなかで行われる。第1節でみた、超電導ブームが起きる前の、超電導の研究開発もそうであった。ブームのあとは、あたかも祭りが終わると静かに日常に戻るように、「その他、多数」のなかに、静かに溶け込んでいったと考えられる。

1 米国政府、米国議会の状況

2000年、超電導ではない新たなブームが起きた。2000年1月21日、ホワイトハウスは、ビル・クリントン大統領(当時)が2001年度の予算要求に当たり、ナノテクノロジーの研究開発を約2億ドル増額することを盛り込み、また、クリントン政権が国家ナノテクノロジー・イニシアチブ(National Nanotechnology Initiative: NNI)という新たなイニシアチブを最優先事項(a top priority)に位置付けたことを発表した²¹³。

続くジョージ・W・ブッシュ大統領(当時)は、ナノテクノロジーの研究開発の予算をさらに増額させるとともに、「21世紀のナノテクノロジー研究開発法(Public Law 108 - 153 - 21st Century Nanotechnology Research and Development Act)」²¹⁴に署名した。これに伴い、2003年度の国防権限法(Public Law 107 - 314 - Bob Stump National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2003)に、防衛ナノテクノロジー研究開発プログラム(Defense Nanotechnology Research and Development Program)が盛り込まれた。政府予算はその後も増え、一旦、2013年度から2017年度にかけての減少期があるも、持ち直し、国家ナノテクノロジー・イニシアチブは、本稿を執筆している

²¹³ “National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution.” Office of the Press Secretary, The White House, January 21, 2000, https://clintonwhitehouse4.archives.gov/WH/New/html/20000121_4.html.

²¹⁴ “An Act to Authorize Appropriations for Nanoscience, Nanoengineering, and Nanotechnology Research, and for Other Purposes,” Public Law 108-153, 108th Congress, 2003.

2023年も続いている。

2013年にもまた、別のブームが起きた。2013年4月2日、バラク・オバマ大統領は、ホワイトハウスのイベントで、人間の脳に対する理解に革命を起こすことを目的とした、大胆な新しい研究構想を発表した²¹⁵。2014年度大統領予算で約1億ドルを投入して発足したブレイン・イニシアチブ(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative)は、最終的に研究者がアルツハイマー病、てんかん、外傷性脳損傷などの脳障害を治療、治癒、さらには予防する新しい方法を見つけることの支援を目的としている。米国防総省としては、国防高等研究計画局(DARPA)がブレイン・イニシアチブに参加している。

なお、オバマ大統領(当時)の声明では述べられていないが、脳機能の解明のために開発し、応用される新技術や、研究の成果として得られる、例えばアルツハイマー病の治療薬などは、国際的な競争力になると考えられる。ブレイン・イニシアチブもまた、本稿を執筆している2023年も続いている。

2018年にもまた、別のブームが起きた。2018年12月21日、ドナルド・トランプ大統領(当時)が署名し、国家量子イニシアチブ法(National Quantum Initiative Act)が成立した。同法は、米国の経済と国家安全保障のために量子の研究開発を加速するためのものである。国家量子イニシアチブ法は当初、国立標準技術研究所(NIST)、国立科学財団(NSF)、およびエネルギー省(DOE)が、それらのプログラム、センター、コンソーシアムを強化するためのものであったが、2022年、ジョー・バイデン大統領の下、「2022年度の国防権限法(Public Law 117 - 81 - National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2022)」および「CHIPSおよび科学法(CHIPS and Science Act)」により改正され、米国防総省も国家量子イニシアチブに加わることとなった。

ブームと述べたが、ブレイン・イニシアチブについては10年、国家ナノテクノロジー・イニシアチブについては20年以上にわたって続いており、ブームと呼ぶには長い。国家ナノテクノロジー・イニシアチブ、ブレイン・イニシアチブ、国家量子イニシアチブは、おそらく、11点の超電導イニシアチブを模倣している。

²¹⁵ “Fact Sheet: BRAIN Initiative.” Office of the Press Secretary, The White House, April 2, 2013, <https://obamawhitthouse.archives.gov/the-press-office/2013/04/02/fact-sheet-brain-initiative>.

そして、11点の超電導イニシアチブでは見られなかった、以後の大統領が引き継ぐという、長期的な継続を実現している。特定の研究開発領域に政府全体で臨み、他国に対する競争力に資するというこのイニシアチブ方式は、超電導ブームがあっただけのものだと推察する。

2 具体的なRDT&Eプロジェクト

この時期、米国防総省においてどのような超電導の研究開発が行われていたか、これまでと同様、軍への報告書や学術論文などの文献から明らかにする。2003年7月にオーストラリアのシドニーで開催された「国際超電導エレクトロニクス会議 (International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2003)」における、ノースロップ・グラマン・スペース・テクノロジー社 (Northrop Grumman Space Technology) のL・アベルソン (L. Abelson) らの発表「Superconductor Electronics Technology for High End Computing (高性能コンピューティングのための超電導エレクトロニクス技術)」²¹⁶では、同研究が米国防総省 (DOD) の支援で行われたことが記されている。超電導による単一磁束量子 (single flux quantum: SFQ) 回路を基礎とする、超高性能SFQ超大型集積回路を開発し、実証しようとしていることを報告している。

2003年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、アメリカン・スーパーコンダクター社のシーガン・O・アイギ (Segun O. Ige) らとエバーソン・エレクトリック社 (Everson Electric Company) のP・ファン (P. Hwang) らによる論文「Mine Countermeasures HTS Magnet (機雷対策高温超電導磁石)」²¹⁷には、同研究が海軍研究局の支援で行われたことが記されている。海軍水上戦センターのために、ビスマス系高温超電導体による機雷対策用の電磁石を作製したことを報告している。

2004年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ

²¹⁶ L. Abelson, P. Bunyk, M. Dorojevets, Q. Herr, G. Kerber, A. Kleinsasser, A. Silver, and D. Strukov, "Superconductor Electronics Technology for High End Computing," *ISEC 2003, International Superconductive Electronics Conference: (Sydney, Australia, 7-11 July 2003)* (2003).

²¹⁷ Segun O. Ige, Dawood Aized, Andy Curda, Rick Medeiros, Chris Prum, Peter Hwang, Gregory Naumocich, and E. Michael Golda, "Mine Countermeasures HTS Magnet," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13, no. 2 (2003): 1628-31, <https://doi.org/10.1109/tasc.2003.812811>.

ティ』に掲載された、スロベニアのマリボル大学のゴラズ・スタンバーガー (Gorazd Štumberger) らによる論文「Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems (電磁航空機発射システムのための線形バルク超電導磁石同期モーターの設計)」²¹⁸には、海軍研究局の支援の下、ウィスコンシン大学で行われたことが記されている。航空機のカタパルトに用いる、超電導によるリニアモーターの基本的な設計をしたことを報告している。

2005年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、アメリカン・スーパーコンダクター社のグレッグ・スニッチラー (Greg Snitchler) らによる論文「The Performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor (5メガワット高温超電導船舶推進モーターの性能)」²¹⁹には、「Contract #N00014-02-C-0190」とあり、海軍研究局との契約に基づいていることが示されている。高温超電導体を用いた5メガワット級のモーターの製造と試験を行ったことを報告している。

同誌の同じ号に掲載された、イギリスのケンブリッジ大学のM・メイジョロス (M. Majoros) らによる論文「AC Loss in Striated YBCO Coated Conductors (縞状YBCO被覆導体の交流損失)」²²⁰には、同研究が、米空軍研究所 (U.S. Air Force Research Laboratory) により支援を受けて行われたこと、また、メイジョロスの研究には、空軍の科学研究所 (Office of Scientific Research) と航空研究開発ヨーロッパ局 (European Office of Aerospace Research and Development) の支援があったことが記されている。イットリウム系超電導体の層と銀の層を交互に重ねた導体の交流損失の特性を報告している。

同年、『クライオジェニクス (Cryogenics)』に掲載された、空軍研究所のポ

²¹⁸ Gorazd Štumberger, Mehmet Timur Aydemir, Damir Žarko, and Thomas A. Lipo, “Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14, no. 1 (2004): 54-62, <https://doi.org/10.1109/tasc.2004.824342>.

²¹⁹ Greg Snitchler, Bruce Gamble, and Swan S. Kalsi, “The Performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15, no. 2 (2005): 2206-9, <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.849613>.

²²⁰ M. Majoros, B. A. Glowacki, A. M. Campbell, G. A. Levin, P. N. Barnes, and M. Polak, “AC Losses in Striated YBCO Coated Conductors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15, no. 2 (2005): 2819-22, <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.848234>.

ール・N・バーズ(Paul N. Barnes)らによる論文「Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings (高出力密度超電導発電機の展望: YBCO巻線搭載の現状と展望)」²²¹では、空軍が行ってきた超電導発電機の歴史の概要とともに、2004年からイットリウム系超電導体を使った発電機の開発を始めたことを報告している。

同年9月にオランダのノールトウェイケルハウトで開催された「第10回国際超電導エレクトロニクス会議(10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC '05))」における、ハイプレス社のオレグ・A・ムハノフ(Oleg A. Mukhanov)による発表「Superconductor Digital-RF Electronics (超電導デジタル高周波エレクトロニクス)」²²²には、同研究が海軍研究局と米陸軍通信・電子司令部(U.S. Army Communications-Electronics Command: CECOM)の支援を受けて行われたことが記されている。高周波のアナログ-デジタル変換器と、デジタル受信器チップを作製したことを報告している。

2006年には、新たな局面が展開する。2006年1月4日、「アメリカン・スーパーコンダクター社が、第2世代(2G)高温超電導体(HTS)線材の製造規模の拡大を加速するため、米国防総省(DOD)タイトルIIIプログラムから535万ドルの後続契約を獲得した」と、EEパワー(EE Power)が報じた²²³。

また、翌日、「インターマグネティクス・ゼネラル社(Intermagnetics General Corp.)のエネルギー技術子会社であるスーパーパワー社(SuperPower, Inc.)が、米国防総省(DOD)のタイトルIIIプログラムから、第2世代(2G)高温超電導(HTS)線材開発の研究開発コストを部分的に引き受ける1070万ドルの追加契約を獲得した」と、ミリタリー・エアロスペース・エレクトロニクス(Military Aerospace Electronics)が報じた²²⁴。

²²¹ Paul N. Barnes, Michael D. Sumption, and Gregory L. Rhoads, "Review of High Power Density Superconducting Generators: Present State and Prospects for Incorporating YBCO Windings," *Cryogenics* 45, no. 10–11 (2005): 670–86, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.09.001>.

²²² Oleg A. Mukhanov, "Superconductor Digital-RF Electronics," *Extended Abstracts of 10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC '05)*, I-A1.01, 5–9 September 2005, Noordwijkerhout, The Netherlands (2005).

²²³ Jeff Shepard, "American Superconductor Gets Follow-on DoD Dollars," *EE Power*, January 4, 2006, <https://eepower.com/news/american-superconductor-gets-follow-on-dod-dollars/#>.

²²⁴ "DOD Pushes development of superconducting wire," *Military Aerospace Electronics*, January 5, 2006,

タイトルIIIプログラムは、「1950年の国防生産法 (Defense Production Act of 1950)」²²⁵に基づき、海外製造への依存を減らし、防衛産業基盤の国内不足を是正するために、回復力と強固な国内サプライチェーンを確保することに取り組むものである。「第2世代(2G)高温超電導 (HTS)」という名称は、1986年にベドノルズとミュラーが酸化物高温超電導体を発見する前に、その当時、高温と考えられてついていたものであり、現在でいうところの高温超電導 (High T_c Superconductor: HTS) とは定義が異なるが、超電導線材が国防生産法の対象になったということは、超電導の研究開発が、国防上、一定の成果を上げており、期待をされていたことの証左と言える。

同月の1月13日には、ノースロップ・グラマン社 (Northrop Grumman Corporation) がウェブサイトにて、ノースロップ・グラマン・マリン・システムズ社 (Northrop Grumman Marine Systems) が主導し、アメリカン・スーパーコンダクター社と組んだチームが、将来の海上戦闘において小型、軽量で静かな主電源を提供することを目的とした40メガワットの高温超電導体 (HTS) 発電機的设计を開始するため、海軍海洋システム司令部 (NAVSEA) により選ばれたと報じた²²⁶。超電導線材が国防生産法の対象となった理由は、ここにあったと推察する。

2007年、BBNテクノロジーズ社 (BBN Technologies) のチップ・エリオット (Chip Elliott) らが、国防高等研究計画局 (DARPA) との契約 (Contract #: F30602-01-C-0170) に基づき研究開発を行い、空軍研究所に提出した報告書「DARPA Quantum Network Testbed (DARPA量子ネットワーク実証基盤)」²²⁷では、同社が国立標準技術研究所 (NIST) およびロチェスター大学 (University of Rochester) と協力し、初の超電導単一光子検出器²²⁸を作製したことを報告している。

<https://www.militaryaerospace.com/home/article/16722407/dod-pushes-development-of-superconducting-wire>.

²²⁵ “Defense Production Act of 1950.” Chapter 55: Defense Production of 50 U.S. Code, United States of America.

²²⁶ “Northrop Grumman Team Receives Contract to Design Lighter, Quieter Power Generators for U.S. Navy Ships,” Northrop Grumman Corporation, January 13, 2006, <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-team-receives-contract-to-design-lighter-quieter-power-generators-for-u-s-navy-ships>

²²⁷ Chip Elliott, and Henry Yeh, *DARPA Quantum Network Testbed*, ADA471450 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2007).

²²⁸ 量子通信においては量子情報を保持した単一の光子(フォトン)が量子暗号の鍵となり、受信側でその単一光子を検出して通信が成立する。

2008年、空軍研究所のポール・N・バーンズ(Paul. N. Barnes)らとUES社(UES, Inc.)のジョージ・A・レヴィン(George A. Levin)によるプレプリント「Superconducting Generators for Airborne Applications and YBCO-Coated Conductors (航空機搭載用超電導発電機とYBCO被覆導体)」²²⁹では、航空機に搭載する発電機を想定し、ビスマス系超電導線材とイットリウム系超電導線材を比較した結果を報告している。

また、2009年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、GEグローバル・リサーチ(GE Global Research)のK・シヴァスブラマニウム(K. Sivasubramaniam)らによる論文「Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications (航空機搭載用高速高温超電導発電装置の開発)」²³⁰では、空軍との契約(Contract FA8650-04-G-2466)に基づき、高温超電導体を用いた1.3メガワットのホモポラー誘導交流発電機(homopolar inductor alternator: HIA)を設計、開発し、試験を行ったことを報告している。

2009年、『フィジカC(Physica C)』に掲載された、アメリカン・スーパーコンダクター社のS・フレッシュラー(S. Fleshler)らによる論文「Scale-Up of 2G wire manufacturing at American Superconductor Corporation (アメリカン・スーパーコンダクター社における第2世代(2G)線材製造の規模拡大)」²³¹では、さきに述べたタイトルIIIプログラムの成果を報告している。なお、この論文は日本の鉄道技術総合研究所の研究者との共著となっており、アメリカン・スーパーコンダクター社は日本のリニア鉄道にも関わっていたことを示すものといえる。

2010年、ジョージア工科大学のマーク・K・リチャーズ(Mark A. Richards)らが、国防高等研究計画局(DARPA)の支援を受け、空軍研究所との契約

²²⁹ Paul N. Barnes, George A. Levin, and Edward B. Durkin, *Superconducting Generators for Airborne Applications and YBCO-Coated Conductors (preprint)*, ADA489118 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2008).

²³⁰ K. Sivasubramaniam, T. Zhang, M. Lokhandwalla, E.T. Lakaris, J. W. Bray, B. Gerstler, M. R. Shah, and J. P. Alexander, "Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19, no. 3 (2009): 1656-61, <https://doi.org/10.1109/tasc.2009.2017758>.

²³¹ S. Fleshler, D. Buczek, B. Carter, P. Cedrone, K. DeMoranville, J. Gannon, J. Inch, X. Li, J. Lynch, A. Otto, E. Podburg, D. Roy, M. Rupich, S. Sathyamurthy, J. Schreiber, C. Thieme, E. Thompson, D. Tucker, K. Nagashima, and M. Ogata, "Scale-up of 2G Wire Manufacturing at American Superconductor Corporation," *Physica C: Superconductivity* 469, no. 15-20 (2009): 1316-21, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.05.234>.

(Contract FA8650-07-C-7724)に基づいて研究開発を行い、提出した報告書「Extreme Scale Computing Studies (エクストリーム・スケール・コンピューティングの研究)」²³²では、超電導コンピューターにおける高速単一磁束量子 (Rapid Single Flux Quantum: RSFQ) デバイスが高密度化してきていることを報告している。

2011年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、海軍調査研究所のガブサーによる論文「US Navy's Superconductivity Programs Scientific Curiosity to Fleet Utility (米海軍の超電導プログラム 艦隊利用への科学的好奇心)」²³³は、海軍における超電導の研究開発の歴史を凝縮した一報である。なお、これ以降、ガブサーによる文献は、本研究で調べた限りでは存在しなかった。

同誌の同じ号に掲載された、海軍海上戦センター (Naval Surface Warfare Center: NSWC) のピーター・J・フェルラーラ (Peter J. Ferrara) らによる論文「Naval Ship-to-Shore High Temperature Superconducting Power Transmission Cable Feasibility (海軍艦艇-岸間の高温度超電導送電ケーブルの実現可能性)」²³⁴では、接岸した艦艇に岸から電力を供給する送電を超電導ケーブルで行うとした場合の技術的、コスト的な検討の結果を報告している。

同年7月にオハイオ州フェアボーンで開催された2011 IEEE航空・エレクトロニクス国内会議 (National Aerospace and Electronics Conference: NAECON) で発表された、空軍研究所のチャールズ・L・A・セルニー (Charles L. A. Cerny) らのプロシーディング「Semiconductor-Tuned High-T Superconductor Filters for Ultrasensitive RF Receivers (SURF): Technology Development and Evaluation (超高感度高周波受信機 (SURF) 用半導体同調高温超電導フィルター: 技術開発と評価)」²³⁵では、半導体素子で周波数の調整が可

²³² Mark A. Richards, and Daniel P. Campbell, *Extreme Scale Computing Studies*, ADA547481 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010).

²³³ Donald U. Gubser, "US Navy's Superconductivity Programs Scientific Curiosity to Fleet Utility," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 931-5, <https://doi.org/10.1109/tasc.2010.2088373>.

²³⁴ Peter J. Ferrara, Mark A. Uva, and Jeff Nowlin, "Naval Ship-to-Shore High Temperature Superconducting Power Transmission Cable Feasibility," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 984-7, <https://doi.org/10.1109/tasc.2011.2112751>.

²³⁵ Charles L. A. Cerny, Vernie G. Fisher, James T. McCartney, and David A. Ovenshire, "Semiconductor-Tuned High-T

能な超高感度の高周波受信機を作製したことを報告している。

2014年、『ネイチャー(Nature)』に掲載された、カリフォルニア大学のR・バレンズ(R. Barends)らによる論文「Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance (誤り耐性のための表面符号閾値における超電導量子回路)」²³⁶には、同研究が陸軍研究局のグラント(W911NF-09-1-0375及びW911NF-10-1-0334)を通じて、国家情報長官官房(Office of the Director of National Intelligence: ODNI)と情報高等研究計画局(Intelligence Advanced Research Projects Activity: IARPA)の支援を受けて行われたとある。ゲート方式の量子コンピューターにおいて課題となっている誤り耐性に取り組んでいることが報告されている。

2019年、『IEEEトランザクションズ・オン・アプライド・スーパーコンダクティビティ』に掲載された、アリゾナ州立大学のA・K・シンクレア(A. K. Sinclair)らによる論文「Demonstration of Microwave Multiplexed Readout of DC-Biased Superconducting Nanowire Detectors (直流バイアス超電導ナノワイヤ検出器のマイクロ波多重読み出しの実証)」²³⁷には、同研究が契約(cooperative agreement number W911NF-16-2-0192)の下で陸軍研究局(Army Research Office)を通じてDARPA検出プログラム(DARPA Detection Program)によって部分的にサポートされたとある。直流バイアスのかけた、超電導ナノワイヤによる単一光子検出素子(Superconducting Nanowire Single Photon Detector: SNSPD)のアレイを用いて、マイクロ波の周波数多重読み出しを実証したことを報告している。

同年8月にワシントンDCで開催された2019 IEEE電気船舶技術シンポジウム(Electric Ship Technologies Symposium: ESTS)で発表された、フロリダ州立大学のチュル・H・キム(Chul H. Kim)らと海軍海上戦センターのジェイコ

Superconductor Filters for Ultrasensitive RF Receivers (SURF): Technology Development and Evaluation,” *Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)* (2011), <https://doi.org/10.1109/naecon.2011.6183131>.

²³⁶ R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, A. Veitia, D. Sank, E. Jeffrey, T. C. White, J. Mutus, A. G. Fowler, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, C. Neill, P. O’Malley, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A. N. Korotkov, A. N. Cleand, and John M. Martinis, “Superconducting Quantum Circuits at the Surface Code Threshold for Fault Tolerance.” *Nature* 508, no. 7497 (2014): 500-3, <https://doi.org/10.1038/nature13171>.

²³⁷ A. K. Sinclair, E. Schroeder, D. Zhu, M. Colangelo, J. Glasby, P. D. Mauskopf, H. Mani, and K. K. Berggren, “Demonstration of Microwave Multiplexed Readout of DC-Biased Superconducting Nanowire Detectors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 29, no. 5 (2019): 1-4, <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2899329>.

ブ・T・ケファート(Jacob T. Kephart)らのプロシーディング「Component Model Development for Ship-Level Impact of High Temperature Superconducting Power Cables (高温超電導ケーブルにおける艦艇レベルの影響に対する成分モデルの開発)」²³⁸では、艦艇の電動化に伴い高温超電導ケーブルを用いるにあたっての断熱方法とその計算モデルを開発したことを報告している。

小括

平衡期の具体的なRDT&Eプロジェクトを概括し、次のような特徴があった。まず、研究開発の目的、用途が具体的である。また、超電導では初めて国防生産法タイトルIIIプログラムが発動している。実用化に向けて超電導技術が進んでいた。その一方で、量子コンピューターや量子通信につながる研究開発が顕在化している。内容からして基礎研究と推察する。新たなシーズの形成が、実用化のフェーズにある研究開発と並行して行われていた。

本章のおわりに

米国防総省における超電導の研究、開発、試験及び評価の歴史を、特徴的な4つの時期(草創期、超電導ブーム期、冷却期、平衡期)に分け、それぞれの時期でどのような研究開発が行われていたかを明らかにした。まず、草創期としては、米国防総省は、第二次世界大戦終結直後から超電導の研究開発を始めている。海軍は、主に軍の研究所で研究開発を行い、陸軍と空軍は、主に大学や企業などの外部へのファンディングを通じて、基礎研究から軍事的な応用開発まで多種多様な研究開発を幅広く行っていた。米国防総省としては、超電導の軍事利用を模索するも、超電導には解明されていないことが多く、基礎研究から行う必要があったと考えられる。

次に超電導ブーム期においては、1986年に高温超電導体が発見されると、

²³⁸ Chul H. Kim, Isaac Leonard, Peter Cheetham, Juan Ordonez, Jacob T. Kephart, Jason D. Miller, and Sastry V. Pamidi, "Component Model Development for Ship-Level Impact of High Temperature Superconducting Power Cables," 2019 *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)* (2019), <https://doi.org/10.1109/ests.2019.8847735>.

米国防総省内にワーキング・グループを立ち上げ、翌年7月には国防総省超電導研究開発 (Department of Defense Superconductivity Research and Development: DSRD) プログラムのための報告書をまとめた。11点の超電導イニシアチブの発表、1988年の国家超電導及び競争力法の成立を受け、米国防総省としては、厳しい財政状況の中、RDT&Eの予算を増やすことに成功した。しかし、高温超電導には解明されていないことが多く、基礎研究に資源が割かれた。やがて、5年もすると頭打ちの兆しが見え始めた。

ブームが終わった後も、将来的な要素技術として、また、他国に先行されないため、研究開発を継続させる必要があり、そのための方法もまた必要であった。冷却期では、予算は減少していったが、米国防総省は基礎研究から応用開発へと重心を移し、その他多数の研究開発の中で超電導技術の研究開発が継続している実態があった。この頃からDARPA (1993年～1996年のARPAの時代を含む) の関与が顕在化してきていた。また、海軍の高温超電導宇宙実験 (HTSSE) に見られるように、大型の研究開発プロジェクトが出現してきた。

平衡期では、その方法の、少なくとも一つとして、ナノテクノロジーや量子という新たなイニシアチブの文脈で、かつてのイニシアチブである超電導の研究開発が行われていた。また、超電導では初めて国防生産法タイトルIIIプログラムが発動し、超電導技術の実用化が進められた。

これら4つの時期を通して見てみると、米国防総省は、自ら、あるいは大学や企業などを支援して、新興技術である超電導技術の研究開発を行った上で、直ぐに実用化する技術と、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術とにより分け、そして、後者については、保持し、あるいは形を変えながらも大学や企業などを支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとしていることが考えられる。

第3章 超電導の研究開発がもたらしたRDT&E制度の推進要因

本章のはじめに

米国防総省が超電導の研究開発を始めて70年以上、高温超電導だけでも35年以上が経過しているが、超電導が軍事的に多用されてはいない。しかし、米国防総省は、他の目的のプロジェクトの中に潜り込ませるという方式で、RDT&E制度の中で超電導の研究開発を継続していることが分かった。実用化の可能性はないと超電導技術を放棄する選択肢もある中、超電導の研究開発を継続するということは、意図して、超電導技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとしていると考える。そのようになっている背景には何があるのでしょうか。

本章では、超電導技術の研究開発が、米国防総省のRDT&E制度が前述のような、いわば技術を保存するような機能を持つ要因となったという仮説に基づき、「シーズとニーズのミスマッチ」、「軍事予算と科学技術」、「政治的意図の継続」という三つの観点で論じる。

第1節 シーズとニーズのミスマッチ

先行研究によると、研究開発には、大きく分けて、「ニーズプル型の研究開発」と「シーズプッシュ型の研究開発」とに分けられるという。文部科学省科学技術・学術政策研究所の資料によると、「ニーズプル型の研究開発」とは、事業上のニーズや顧客ニーズなど、技術に対する特定のニーズに牽引されるような研究開発を指し、「シーズプッシュ型の研究開発」は、萌芽的な技術を発展させる場合のような、技術主導で進められる研究開発を指す、とある。同研究所の調査結果によると、企業の研究開発投資では、「ニーズプル型の研究開発」は、「シーズプッシュ型の研究開発」の約2.5倍となっているという

また、新製品や新工程などのイノベーションの決定要因については、新たな技術シーズの出現を重視する「テクノロジー・プッシュ」仮説と、市場ニーズへの対応を重視する「デマンド・プル」仮説が伝統的な対立仮説として知られているが、同研究所の調査結果によると、「デマンド・プル」仮説にやや有利なエビデンスになっていると見る事ができるという²⁴⁰。

一方、別の先行研究で、岩間仁によると、製品開発の成功要因がデマンドプル（需要側からの引き出し）によるものか、あるいはテクノロジープッシュ（技術側からの後押し）によるものかは、どちらか一方方向で決まるものではなく両者の相互作用が重要であり、その相互作用はシーズ側とニーズ側との対話を通じてなされるが、ニーズとシーズをマッチさせて効果的な製品コンセプトを創造するというプロセスがほとんど未開拓の状態にあるといい、日本語ワープロなどを事例に、まず、ニーズとシーズは相互に影響を与えながら顧客価値を創造し、また顧客価値が逆にニーズやシーズに影響を及ぼすというフィードバック関係をもつことを明らかにした。

次に、製品イノベーションを駆動する要因には、従来捉えられてきたニーズプルやシーズプッシュまたは両者の相互作用だけでなく、「顧客価値としてのビジョン・製品コンセプト・モデル・製品などによる顧客価値ドリブンと言える新たな駆動要因が存在する」ことを発見した。

そして、「斬新な製品コンセプトに伴うマイナス面が社内関係者に認識されると、その関係者による社内抵抗が発生しやすく、そしてその社内抵抗は、実物に近いモデルを見たり操作したりすることでマイナス面の認識が解消し沈静化していく。また、製品イノベーションのマクロな類型によって、社内抵抗の鎮静化の仕方が異なる」とする仮説を提唱した²⁴¹。

シーズとニーズは技術の進展とともに徐々に融合していくものであり、その融合を促進することは可能であるが、阻害要因も存在するというを示し

²³⁹ 「民間企業の研究活動に関する調査報告 2019」、NISTEP REPORT、No.186、文部科学省科学技術・学術政策研究所。 <http://doi.org/10.15108/nr186>

²⁴⁰ 「民間企業の研究活動に関する調査報告 2020」、NISTEP REPORT、No.191、文部科学省科学技術・学術政策研究所、2021。 <https://doi.org/10.15108/nr191>

²⁴¹ 岩間仁「製品イノベーションにおける、ニーズとシーズの融合と顧客価値創造のメカニズムの研究」博士論文、横浜国立大学、2008年。

ている。

これらを踏まえ、新興技術、中でも軍事利用が想定される技術の研究開発の特徴について考察する。軍事利用される技術のニーズといえば、究極的には、軍の軍事的なニーズである。作戦に必要なニーズから、軍事装備品や軍用サービスの技術的な仕様が決まる。一方で、シーズは、軍の研究所にある場合もあれば、大学や企業など軍の外部にある場合も、さらには複数の機関に分散して存在する場合もある。

既存技術であれば、そのシーズがどこまで適用可能であるのかという技術的な限界や制約を軍が把握した上でのニーズの掘り起こし、あるいは、ニーズに対してシーズがどこまで対応可能であるかという、現実的なすり合わせをすることが可能であるのに対し、新興技術は、技術自体が出てきたばかりであり、そのシーズがどこまで適用可能であるかもわからないまま、ニーズに対峙する、あるいは新たなニーズを掘り起こすようなことになる。

高温超電導が発見される前、いまでいうところの低温超電導だけであった頃は、BCSの壁とよばれた30ケルビン程度が臨界温度(T_c)の上限と考えられ、技術的な仕様はその中で考えられていたが、高温超電導体が断続的に発見され、臨界温度(T_c)の記録が塗り替えられていくと、より高温、室温まで、という期待が高まった。高温超電導体の発見は室温超電導の夢を見させた。現在でも時折、室温超電導発見のニュースが世界を駆け巡るが、実際には見つかっていない。室温超電導というのは、いまから考えれば過剰とも言える期待であった。シーズとニーズがミスマッチを起こしていたと言える。そして、期待が大きければ大きいほど、期待が外れたときの落胆は大きくなる。

第2章で示した超電導の「冷却期」は、ハイプ・サイクルでいうところの幻滅期にあったといっても過言ではないであろう。超電導がハイプ・サイクルにあるとすれば、幻滅期のあとに啓発期、そして生産性の安定期が来るということであるが、超電導技術においては、少なくとも軍事的には、その兆候は見えていない。

シーズとニーズがミスマッチを起こしていたことには、もう一つ要因があると考えられる。軍事的なニーズと技術シーズをマッチングさせる存在としては、国防高等研究計画局(DARPA)があるが、超電導技術の研究開発において

は、本研究で調べた限りでは、この時期にDARPAの関与を示す資料は存在しない。本当にDARPAの関与がなかったか、あるいは少なかったとすれば、そのこともまた、シーズとニーズがミスマッチを起こしていたことの要因として考え得る。

このように、シーズとニーズがミスマッチを起こしてはいたものの、超電導の研究開発は完全に打ち切りにはならず、後に引き継がれている。なぜそうなったのか、その理由が記載された文献は、本研究で調べた限りでは存在しなかった。しかし、米国防総省における超電導の研究開発が連邦議会により否決されたわけではない。裏を返せば、シーズとニーズがミスマッチを起こし、期待する成果が得られてはいないものの、将来の軍事利用のために超電導技術を残しておこうとしたこと自体が、長期にわたって技術の保存を実現する機能を備える制度を構築する原点となった可能性が考えられる。

第2節 軍事予算と科学技術

1986年の高温超電導体の発見に端を発し、米国防総省のDepartment of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) 構想、レーガン大統領の11点の超電導イニシアチブ、連邦議会の1988年の国家超電導及び競争力法とあって、米国防総省における超電導技術の研究、開発、試験及び評価(RDT&E)のための予算は拡大した。米国防総省のRDT&E制度の運用の観点からすると、予算の拡大を実現できたこの時期には、それまでに培ったシーズをもとに、軍事利用に向け、ニーズを具体化して研究開発を加速する時期と考えられるところである。

しかし、実際のところは、新たに発見された高温超電導体はまだわからないことが多く、高温超電導体を対象とする基礎的な物性研究に資源が割かれた。また、それまでの、いわゆる低温超電導体が合金や金属間化合物であったのに対し、高温超電導体は酸化物、つまりセラミックスであることから、線材の加工方法も基礎研究から進めることとなった。研究開発の観点からすると、どこに道があるのかも、どこまで行けるのかもわからないまま研究開発を進めることとなる。これは、自然法則を利用する技術ではなく、自然法則

を明らかにする科学の領域である。

軍事予算も国会の承認を得なければならない公的資金である以上は、同じことにいつまでも資金を出し続けることは難しく、そしてそれは、投入した資源に対して期待した成果が得られなければ、なおさらである。軍事予算であれば、軍事的な成果につながらなければ、打ち切られることもやむを得ない。長い目で科学の研究を続けるのであれば、それは科学予算で行うところである。

国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) の予算要求資料で、超電導に関するプロジェクトを調べてみた。超電導 (superconductivity / superconductor / superconducting) をキーワードにして調べてみたところ、プロジェクトの一部に超電導が関係するのか、あるいは、予算要求をしたが予算が付かなかったのか、同じプロジェクトであっても記載がある年度とない年度があるといった状況ではあったが、超電導の研究開発が行われた可能性の高いプロジェクトを残すと、表22のようになった。

2000年代では、BA2 Applied Research (応用研究) と BA3 Advanced Technology Development (先端技術開発) で、数年の単位で断続的に別のプロジェクトに移行しながら超電導の研究開発が行われている様子が見えてくる。一方で、2010年代に入ると、BA1 Basic Research (基礎研究) に絞られている。

これらの時代は、本研究でいうところの、超電導技術の「冷却期」および「平衡期」に当たる。超電導の研究開発の予算が減少していく中で、これらのプロジェクトを行っていた背景を考えると、次のようなことが浮かび上がる。

2000年1月21日、ホワイトハウスは、ビル・クリントン大統領 (当時) が2001年度の予算要求に当たり、ナノテクノロジーの研究開発を約2億ドル増額することを盛り込み、また、クリントン政権が国家ナノテクノロジー・イニシアチブと呼ばれる新たなイニシアチブを最優先事項に位置付けたことを発表した。

続くジョージ・W・ブッシュ大統領 (当時) は、ナノテクノロジーの研究開発の予算をさらに増額させるとともに、「21世紀のナノテクノロジー研究開発法 (Public Law 108 - 153 - 21st Century Nanotechnology Research and Development Act)」に署名した。これに伴い、2003年度の国防権限法

(Public Law 107 - 314 - Bob Stump National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2003)に、防衛ナノテクノロジー研究開発プログラム(Defense Nanotechnology Research and Development Program)が盛り込まれた。

政府予算はその後も増え、一旦、2013年度から2017年度にかけての減少期があるものの、持ち直しており、国家ナノテクノロジー・イニシアチブは、現在も続いている。表22のなかに、「MT-12: MEMS and Integrated Microsystems Technology (MEMSと統合マイクロシステム技術)」とあるが、このMEMSは、Micro Electro Mechanical Systems(微小な電気機械システム)の略であり、ナノテクノロジーの用語である。また、同じく表22のなかの基礎研究、「MS-01: Materials Sciences(物質科学) / Fundamentals of Nanoscale and Emergent Effects and Engineered Devices(ナノスケールかつ新規の効果と工学的デバイスの基礎)」も、ナノスケールとあるようにナノテクノロジーの分野である。国家ナノテクノロジー・イニシアチブのもと、ナノテクノロジーの文脈で予算が取れる状況においては、ナノテクノロジーの研究予算の中で、その要素技術の一つとして、超電導技術の研究開発を行っていたと考えられる。

表22 超電導が含まれる可能性のあるDARPAのプロジェクト

	FY1999	FY2000	FY2001	FY2002	FY2003
BA2 Applied Research					
MPT-06: Cryogenic Electronics					
Multitechnology Integration in Mixed-Mode Electronics (MIME)					
Cryogenic Technologies					
Totally Agile Sensor Systems (TASS)					
TT-06: Tactical Technology					
Superconducting Generator					
MPT-01: Materials Processing Technology					
Materials for Logistics (Air, Water, Power)					
BA3 Advanced Technology Development					
SGT-02: Aerospace Surveillance Technology					
ASP-01: Advanced Aerospace Systems					
MT-04: Electronic Module Technology					
Superconducting Hybrid Power Electronics (SuperHyPE)					

	FY2004	FY2005	FY2006	FY2007	FY2008
BA2 Applied Research					
MPT-06: Cryogenic Electronics					
Cryo-power for the All Electric Ship					
MPT-01: Materials Processing Technology					
Materials for Logistics (Air, Water, Power)					
MBT-01: Materials Processing Technology					
Materials for Logistics (Air, Water, Power)					
Materials for Power					
ELT-01: Electronics Technology					
National Secure Foundry Initiative (SAFFE)					
Semiconductor-Tuned HTS Filters for Ultra-Sensitive RF Receivers (SURF)					
BA3 Advanced Technology Development					
MT-12: MEMS and Integrated Micro-systems Technology					
Low Power Micro Cryogenic Coolers					

	FY2009	FY2010	FY2011	FY2012	FY2013
BA1 Basic Research					
MS-01: Materials Sciences					
Fundamentals of Nanoscale and Emergent Effects and Engineered Devices					
Atomic Scale Materials and Devices					
BA2 Applied Research					
MBT-01: Materials Processing Technology					
Power Components					
Functional Materials and Devices					
ELT-01: Electronics Technology					
Semiconductor-Tuned HTS Filters for Ultra-Sensitive RF Receivers (SURF)					
Quantum Information Science (QIS)					
BA3 Advanced Technology Development					
MT-12: MEMS and Integrated Micro-systems Technology					
Low Power Micro Cryogenic Coolers					

	FY2014	FY2015	...	FY2020	FY2021
BA1 Basic Research					
MS-01: Materials Sciences					
Fundamentals of Nanoscale and Emergent Effects and Engineered Devices					
BA2 Applied Research					
ELT-02: Beyond Scaling Technology					
Beyond Scaling - Materials					

出所：国防高等研究計画局（DARPA）の予算見積資料²⁴²を基に筆者作成。

²⁴² FY2005～FY2024 の予算見積資料は、<https://www.darpa.mil/about-us/budget> を参照し、それ以前の資料は、https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2000/budget_justification/pdfs/03_RDT_and_E/fy00pb_darpa.pdf (FY2000/FY2001 Biennial Budget Estimates)、https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2001/budget_justification/pdfs/03_RDT_and_E/fy01pb_darpa.pdf (FY2001 Budget Estimates)、https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2002/budget_justification/pdfs/03_RDT_and_E/vol1_darpa.pdf (FY2002 Amended Budget Submission)、https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2003/budget_justification/pdfs/03_RDT_and_E/rdte_vo14b.pdf (FY2003 Budget Estimates)、

研究開発として成功はしていないが、軍事利用の可能性が残っており、また、他国に先行されることは戦略上、避けなければならないという技術については、研究開発を継続しなければならない。超電導はそれにあたりと考える。

予算が取れないときは、取れる予算に潜り込ませて取る、というのは、官僚の予算取りの手法の一つと言える。ナノテクノロジーの文脈で超電導技術の研究開発予算を取っていたとすれば、それもまた、軍事予算で超電導技術の研究開発を継続するための手法と考え得る。

第3節 政治的意思の継続

レーガン大統領(当時)が1987年に発表した11点の超電導イニシアチブ、そして、連邦議会による1988年の国家超電導及び競争力法の成立を受けて、米国防総省としては、厳しい財政状況の中、研究、開発、試験及び評価(RDT&E)の予算を増やすことに成功した。その中身は、純増ではなく、1988年と1989年に低温超電導の研究に充当しようとしていた予算を、高温超電導の研究を優先させるため、そちらに振り替えるということも含まれていた。

それでも、超電導の政府研究開発予算は順調に伸びたが、5年もすると頭打ちの兆しが見え始める。レーガン大統領(当時)の11点の超電導イニシアチブが、その後のブッシュ(父)政権(1989年1月20日～1993年1月20日)に引き継がれたかどうか、明確に記載された資料は、本研究で調べた限りでは存在しない。厳しい見方をすれば、1989年1月で任期満了となるレーガン大統領(当時)にとって、11点の超電導イニシアチブは、レガシーづくりの一つであった可能性もある。米国防総省が、調査報告書 *Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) Options: A Study of Possible Directions for Exploitation of Superconductivity in Military Applications* で5年の計画を立てつつ、「3年で1億5000万ドルの予算」を構想した背景にも、レーガン大統領(当時)の任期があったことが考えられる。

https://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2004/budget_justification/pdfs/03_RDT_and_E/DARP_A_RDTE.pdf (FY2004/FY2005 Biennial Budget Estimates) を参照した。

1988年の大統領選挙で、レーガン政権の副大統領であったブッシュが次の大統領になったが、議会は上下両院ともに民主党が第1党となった。さらに、1991年、冷戦が終結した。巨大な敵がいなくなった上に、長引く冷戦で政府予算は厳しい状況にあり、国防費には圧縮の圧力が加かった。そして、1993年、政権が交代した。ブッシュ政権は4年で終わり、民主党のクリントン政権となった。当時は議会も、上下両院ともに民主党が第1党であった。

当時の議会およびクリントン政権は、超電導超大型加速器 (Superconducting Super Collider: SSC) の計画を中止した。SSCはエネルギー省の管轄であることや、SSCで使用するのは、高温超電導ではなく低温超電導であることなど、米国防総省における高温超電導の研究開発には直接、影響はなさそうにも見える事象であったが、超電導への熱い期待を冷ます一つの要因にはなつたと推察する。

大統領のイニシアチブであるなら、大統領が変われば、政策方針の違いから、引き継がれなくてもあながち不思議ではない。おそらく、この点については、認識され、後の政策に影響したと考えられる。前節に示したように、クリントン大統領(当時)が発表したイニシアチブは、国家ナノテクノロジー・イニシアチブ(National Nanotechnology Initiative: NNI)と、国家(National)が付けてある。国家のイニシアチブであれば、大統領が変わっても引き継ぐ根拠がつけやすい。もちろん、国家ナノテクノロジー・イニシアチブが継続している要因としては、単に国家が付いているという名前だけの理由ではなく、超電導技術と比較して言えば、ナノテクノロジーは、技術の範囲も、その応用の範囲も、超電導より広いことや、超電導のように極低温が必要ではないことなども挙げられると考えられる。

しかし、振り返ってみて、11点の超電導イニシアチブが後の政権に継続されていれば、超電導技術を取り巻く状況は、いまとは違った可能性もある。

本章のおわりに

本章で考察したことをまとめると、次のようになる。まず、第1節で考察したように、超電導技術は、ニーズ側の過剰な期待や、すり合わせる媒体の不在

などにより、シーズとニーズがミスマッチを起こしていたが、長いスパンで見れば、実用化に向けて進んでいた。シーズとニーズがミスマッチを起こし、期待する成果が得られてはいないものの、将来の軍事利用のために超電導技術を残しておこうとしたこと自体が、長期にわたって技術の保存を実現する機能を備える制度を構築する原点となった可能性が考えられる。

さらに、第2節で考察したように、超電導は、ブームが終わった後も、その重要性から、研究開発を継続させる必要があり、そのための方法もまた必要であった。そして、ナノテクノロジーや量子という新たなイニシアチブの文脈で、かつてのイニシアチブである超電導の研究開発が行われていた。

そして、第3節で考察したように、11点の超電導イニシアチブにおいては、政治的意思の継続が明確ではなかったが、その後のイニシアチブにおいては、政治的意思の継続が図られていた。

この概念を拡大すると、研究開発が成功するまでに時間のかかる、重要な技術、あるいは新興技術については、シーズとニーズの適時かつ冷静なすり合わせ、そして、将来の軍事利用を見据えた継続的な研究開発が必要であり、そのためには、シーズとニーズを適合させることを目的とする媒体の存在、そして、政治的意思の継続と、予算の継続が重要であり、翻って、政治的意思の継続を作り出す仕掛けとして、また、予算の継続を作り出す仕掛けとしての断続的なイニシアチブの発動とその継続が重要であると推察する。

そして、この、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとするRDT&E制度の能力とも機能ともいえるものは、RDT&E制度に当初から備わっていたのではなく、超電導技術の研究開発を進めていく中で、RDT&E制度の中に備わってきたものと推察する。

第4章 新興技術で軍事利用に至った例の検証

本章のはじめに

夢の技術といわれ、連邦政府により大型の研究開発費が投入された超電導であるが、米軍で超電導が多用されてはいない。超電導技術の軍事利用の成否について現段階で判断するのは時期尚早かもしれないが、米国防総省が超電導の研究開発を始めてから70年余り、高温超電導体が発見されてから35年余りが過ぎており、何らかの評価はあり得ると考えられる。そこで、本章では、超電導技術との比較のため、米国防総省により研究開発がなされ、実際に軍事利用された技術について詳解する。

国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）のウェブサイトには、「厳選されたDARPAの成果（SELECTED DARPA ACHIEVEMENTS）」²⁴³として、「ステルス」、「全地球測位システム（GPS）」、「インターネット」が紹介されており、これらに着目する。

第1節 ステルス

DARPAのウェブサイトにある、ステルスについての説明によると、ステルス開発の発端は、「1970年代初頭、DARPAの調査により、新しく高度な防空ミサイルシステムを配備していた敵による検知と攻撃に対する米国の航空機とその搭載機器の脆弱性の程度が明らかになった」ことにあるという。増大する脅威を軽減するため、DARPAは、「機体の形状とレーダー吸収材料の組み合わせによるレーダー断面積の削減」、「赤外線遮蔽、排気の冷却と形、および熱放散の増進」、「視覚的特徴の削減」、「検出パターンの能動的な相殺」、「吸気口の遮蔽」、「フロントガラスのコーティング」を含む、「レーダーの検出可能性を減らすための戦略と技術を開発するプログラム」に着手した。

²⁴³ “Our Research,” Defense Advanced Research Projects Agency, accessed April 5, 2023, <https://www.darpa.mil/program/our-research/more>.

「1970年代半ば、DARPAは最初の実用的な戦闘ステルス機であるHAVE Blueの開発を監督」し、「1977年末までに最初のテスト飛行」を行った。これにより、「1983年10月に運用が開始されたF-117Aステルス戦闘機が空軍から調達」された。その後の発展である「TACIT Blue」機は、「独自の低レーダー断面積を維持しながらレーダーセンサーを操作」することができた。これは「B-2ステルス爆撃機の開発の基礎を築いた」という。

これを読むと、あたかもステルスの研究開発は、1970年代から始まったように受け止められる。しかし、1993年の『IEEEトランザクションズ・オン・エアロスペース・アンド・エレクトロニック・システムズ (IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems)』に掲載された、ウィリアム・E・バーレット (William E. Bahret) による「The Beginnings of Stealth Technology (ステルス技術の始まり)」²⁴⁴によると、1950年代の初頭には、ライト・パターソン空軍基地 (Wright-Patterson AFB) の航空電子工学研究所 (Avionics Laboratory) の前身である機関において、航空機のレーダー反射断面積 (Radar Cross Section: RCS) を正確に定義しようとする研究が行われており、そして、1955年には、レーダー吸収材料 (Radar Absorption Material: RAM) の開発のためのプログラムが始まったことが記されている。

ステルス航空機を作ろうとしたのは1970年代であったが、その基礎となる研究開発が第二次世界大戦後しばらくしてから始まっているという点で、米国防総省における技術の歴史としては超電導とそれほど変わらないといえる。

一方、ステルスと呼ばれる新技術が存在することが表に出たのは、1980年8月22日、ハロルド・ブラウン (Harold Brown) 国防長官 (当時) の発表であったという²⁴⁵。それはつまり、ステルス技術が研究開発も含めて、それまで秘密の事項であったと考えられる。

シャロン・ワインバーガー (Sharon Weinberger) の著書『The Imagineers of War: The Untold Story of DARPA, the Pentagon Agency That Changed the World』²⁴⁶は、インタビューに基づきDARPAの活動の実態を描いたものである

²⁴⁴ W. F. Bahret, “The Beginnings of Stealth Technology.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 29, no. 4 (1993): 1377-85.

²⁴⁵ John T. Correll, “History of Stealth: From Out of the Shadows.” *Air & Space Forces Magazine*, September 1, 2019.

²⁴⁶ Sharon Weinberger, *The Imagineers of War: The Untold Story of Darpa, The Pentagon Agency That Changed the World*.

が、そのなかにステルス機のことについても書いてある。その第14章には、要約すると、次のようなことが書いてある。

DARPAは独自のステルス実験を行っており、ライト・パターソン空軍基地の研究者から提案のあった、レーダー反射断面積を低減させることを目的とした、マクドネル・ダグラスの開発した小型無人機を用いたプロジェクトに資金を提供したところ、期待以上の成果が得られた。しかし、DARPAのトップの交代で、見えない航空機は終わるかもしれなかった²⁴⁷。

空軍のエンジニアがステルス機の開発に興味を持つ会社を探っていた時、戦闘機を製造していないことから声をかけていなかったロッキードは、実は長年、ステルス機の設計で密かに中央情報局（Central Intelligence Agency: CIA）と協力していた²⁴⁸。

ステルス機の開発コンペに参加したかったロッキードは、ロッキードの研究に拠出する資金は残っていないとするDARPAに1ドルでの契約を持ちかけ、開発コンペに参加を果たした²⁴⁹。

ステルス機に否定的な空軍に対し、DARPAのトップのさらに上司から空軍参謀総長に対し「もしあなたがステルス機を空軍のプログラムの一つに掲げ、一部資金を負担し、DARPAが議会に提案することを認めてくれるなら、私も議会で空軍の軽量戦闘機を全力で応援する」というカードを切り、空軍の協力を得た²⁵⁰。

ステルス性に適した設計は、飛行にはあまり適しているとはいえない。それを救ったのは数学者だった。そして、更に救ったのが、彼が偶然見つけたロシア人科学者の科学論文であった²⁵¹。

1977年に初飛行を成功させたが、1978年に墜落事故を起こし、一部でステルスのことが報道された²⁵²。

Vintage Books, a Division of Penguin Random House LLC, 2018. 邦訳は、千葉敏生訳『DARPA 秘史：世界を変えた「戦争の発明家たち」の光と闇』光文社、2018年。

²⁴⁷ ワインバーガー『DARPA 秘史』、342-350頁。

²⁴⁸ ワインバーガー『DARPA 秘史』、350-561頁

²⁴⁹ ワインバーガー『DARPA 秘史』、351-352頁

²⁵⁰ ワインバーガー『DARPA 秘史』、352-354頁

²⁵¹ ワインバーガー『DARPA 秘史』、355-357頁

²⁵² ワインバーガー『DARPA 秘史』、357-360頁

1980年には、ステルス機の存在を隠しておくことはほぼ不可避となった。ジミー・カーター大統領が二度目の大統領選の最中、B-1爆撃機の開発中止について質問攻めにあうと、当時国防長官であったハロルド・ブラウンは公然の秘密を認める決断をした²⁵³。

その後、ステルス性は爆撃機からヘリコプターまで、さまざまな航空機や兵器に取り入れられた。そのなかには、ウサマ・ビン・ラディンの急襲に使われた改良型ブラック・ホークもある²⁵⁴。

ハブ・ブルーのような巨大な技術プログラムの急成長は、DARPAの廃止を訴える反対派から組織を守った。これは、ほとんどの人が気づいていない、ハブ・ブルーのもう一つの功績である²⁵⁵。

以上のようなことが書いてある。DARPAの公式文書ではうかがうことのできない内容である。

ステルスに関して、もう一つ重要なエピソードを取り上げる。ステルス技術を初めて取り入れた偵察・攻撃用ヘリコプターRAH-66コマンチの開発である。その開発は、陸軍の老朽化した小型汎用・偵察・攻撃ヘリコプターを置き換える取り組みとして 1983 年に始まった。1983年といえば、1980年に当時のハロルド・ブラウン国防長官がステルス機について発表しており、ステルス技術はすでに軍事技術として用いられ始めているところであった。

しかし、コマンチの開発の過程で、仕様変更が重なり、開発費が膨らんだ。その背景には、冷戦の終結に伴う配備計画の削減圧力もあった。1999年8月には米国会計検査院 (Government Accountability Office: GAO) が報告書を作成し、このままでは2008年度には陸軍の航空機調達の64%をコマンチが占めかねないことを指摘した²⁵⁶。結局、陸軍は、2004年2月23日、コマンチ・プログラムの中止を発表した²⁵⁷ ²⁵⁸。しかし、コマンチ・プログラムで培われたヘリコプターへのステルス技術の応用は、改良型ブラック・ホークへと引き継が

²⁵³ ワインバーガー『DARPA 秘史』、360 頁

²⁵⁴ ワインバーガー『DARPA 秘史』、359-360 頁

²⁵⁵ ワインバーガー『DARPA 秘史』、360-361 頁

²⁵⁶ U.S. General Accounting Office. *DEFENSE ACQUISITIONS: Comanche Program Cost, Schedule, and Performance Status*, GAO/NSIAD-99-146, August 1999.

²⁵⁷ James Carafano, "Canceling Comanche: All the Right Moves." *The Heritage Foundation*, 25 February 2004.

²⁵⁸ "After 20 Years, Comanche Canceled." *Forbes*, 24 February 2004

れることとなった。

ステルス性は必ずしも最優先事項ではない。ステルス戦闘機であるF-35は、通常はミサイルを格納して飛行するが、機の火力を高める必要が生じた場合は、機外に可能な限りの武器を搭載する「ビーストモード」で飛行する。2019年、2機のF-35Aはアフガニスタンでのアメリカ軍のミッションを支援するために「ビーストモード」で任務を遂行した。しかし、ビーストモードでは主翼下の兵装搭載ステーションにも兵器を搭載することにより、機の表面積が増加し、敵のレーダーに探知されやすくなる²⁵⁹。ステルス性と攻撃能力はトレードオフの関係にあるということである。

第2節 全地球測位システム(GPS)

DARPAのウェブサイトでは簡潔な記載にとどまっているが、同サイトにリンクを貼っている資料²⁶⁰にて詳しい説明をしている。それらによると、「海軍宇宙技術センターの科学者が、ソ連が1957年に打ち上げたスプートニクを追跡しているとき、スプートニクが発する信号の周波数に与えるドップラー効果の影響に着目し、そこから、逆に、宇宙から送信される信号のドップラー効果を測定することにより地上または海上の物体の位置を追跡することができるという発想につながった」という²⁶¹。

「6基の衛星によるTRANSITシステムをジョンズ・ホプキンス大学の応用物理研究所が設計し、1959年には打ち上げるも、衛星が軌道に乗らず、1963年ようやく初の軌道投入が成功」した²⁶²。

しかし、「TRANSITが宇宙に存在するようになる前から、エアロスペース・コーポレーションの創設社長であるイヴァン・A・ゲッティング(Ivan A. Getting)やその他の研究者は、今日のGPSにつながる新しいシステムの開発に熱心に」

²⁵⁹ Ryan Pickrell, “Watch 2 F-35s Flex in ‘Beast Mode’ on a War Mission in the Middle East,” *Business Insider*, 25 May 2019.

²⁶⁰ Catherine Alexandrow, “THE STORY of GPS,” *DARPA: 50 Years of Bridging the Gap*. Faircount LLC (2008): 54-55; *Breakthrough Technologies for National Security - DARPA*, Defense Advanced Research Projects Agency (March 2015).

²⁶¹ Alexandrow, “THE STORY of GPS,” 54.

²⁶² Alexandrow, “THE STORY of GPS,” 54.

取り組んでいた²⁶³。

TRANSIT は「安定した水晶発振器を利用していたが、正確な時間を維持できず、機能的には GPS の欠点」であった。のちに、海軍のTIMATIONプログラムで「GPS 衛星に原子時計を取り付けて正確な時間を計測するというアイデア」が現実になった²⁶⁴。

「30年来、海軍と空軍は互換性のないナビゲーション・システムを開発」していたが、「1973年に米国防総省が共同プログラムを作ることを呼びかけ、できたNAVSTAR全地球測位システム(NAVSTAR Global Positioning System)は1989年に軌道投入に成功」し、その後、「さらに23基が投入」され、配置が完了した²⁶⁵。

GPSに必要な三つの構成要素である「衛星制御のための地上基地」、「原子時計を搭載した衛星」、「受信機」のうち、DARPAは兵士が使用する受信機の向上に焦点を当て、1988年から1993年までに1,400台の受信機を作製したが、50ポンド(およそ23キログラム)もあって使えるものではなかった²⁶⁶。

「デジタル化したGPS」が開発され、受信機の小型化が実現した。しかし、「ガリウムヒ素の素子によるデバイスは、1ユニット当たり5,000ドルと高価」であった。その後、「シリコン素子によるデバイスの進展により、ガリウムヒ素の素子は時代遅れ」となり、コストも重量も下がっていった²⁶⁷。

以上のように、DARPAは、GPSという大規模システムにおける受信機の小型化を担った。

軍事用に開発されたGPSであるが、民間に開放されることになる。GPSがまだ稼働していない1983年、アメリカ・ニューヨークのジョン・F・ケネディ国際空港を出発し、アラスカのアンカレッジ国際空港を経由し、大韓民国・ソウルの金浦国際空港に向かっていた大韓航空007便が、9月1日、誤ってソビエト社会主義共和国連邦(ソ連)の領空内に侵入し、ソ連の戦闘機に撃墜される事件が発生した。ホワイトハウスの当時の副報道官であるラリー・M・スピークス

²⁶³ Alexandrow, "THE STORY of GPS," 54.

²⁶⁴ Alexandrow, "THE STORY of GPS," 54.

²⁶⁵ Alexandrow, "THE STORY of GPS," 54.

²⁶⁶ Alexandrow, "THE STORY of GPS," 54.

²⁶⁷ Alexandrow, "THE STORY of GPS," 54-55.

(Larry M. Speakes) は9月16日にロナルド・レーガン大統領(当時)の声明を公表している。

声明の一部抜粋すると、「大韓航空の悲劇に関する最近の声明で、ソビエトの高官は、誤ってソビエト領空に侵入した無実の民間旅客機を撃墜する権利を主張することで世界に衝撃を与えた。269人の罪のない犠牲者が殺害されたにもかかわらず、ソビエト連邦は、民間旅客機に対する武力行使を控えるという国際法上の義務を認める準備ができていない。世界の世論は、この恐ろしい悲劇を繰り返してはならないという決意で一致している。この目的の達成への貢献として、大統領は、民間航空機が全地球測位システムの施設を、米国が1988年に運用を開始するときには、利用できるようにしておくことを決定した。このシステムは、民間旅客機の3次元位置情報を提供するものである²⁶⁸。」というものである。このようにGPSは、冷戦のさなか、民間航空機を守るという目的で、民間への開放が始まった。

民間事業者には初め、選択利用性(Selective Availability: SA)が施されており、GPS信号の一部を消して提供されることで軍よりも正確性の低い情報しか得られなかったが、2000年5月1日、当時のビル・クリントン大統領が、「選択利用性を解除するという決定は、GPSを世界中の民間および商用ユーザーにとって、より高精度にするための継続的な取り組みにおける最新の措置である。この精度の向上により、新しいGPS利用が登場し、世界中の人々の生活を向上させ続けることが可能となる²⁶⁹。」との、選択利用性を解除する声明を出した。

第3節 インターネット

DARPAは、1960年代から1980年代にかけて、インターネットの礎となるARPANET(Advanced Research Projects Agency NETwork、アーパネット)を開発した。ウェブサイトでは簡潔な記載にとどまっているが、同サイトにリンク

²⁶⁸ “Statement by Deputy Press Secretary Speakes on the Soviet Attack on a Korean Civilian Airliner,” *Ronald Reagan Presidential Library & Museum*, September 16, 1983.

²⁶⁹ “President Clinton: Improving the Civilian Global Positioning System (GPS),” *National Archives and Records Administration*, May 1, 2000.

を貼っている資料²⁷⁰にて、詳しい説明をしている。それによると、1962年、マサチューセッツ工科大学で実験心理学の教授であったジョセフ・カール・ロブネット・リックライダー(Joseph Carl Robnett Licklider)がARPAに呼ばれ、情報処理技術室(Information Processing Techniques Office: IPTO)にて「指揮統制(command and control)」についてファンディングをすることになった²⁷¹。

リックライダーは、データベース管理や高速バッチ処理といった当時の主流ではなく、新しいコンピューターの展望を追い求めていた。彼の着想の原点は、「ソ連の核爆撃機の早期警戒ネットワークであるリンカーン計画」であった。彼は同計画における「半自動式防空管制組織(Semi-Automatic Ground Environment: SAGE)システム」の開発に携わっており、1957年には、「真のSAGEシステムは、安全保障に絞られるものではなく、思考する力を増強するものになる」と述べていた²⁷²。

翌1958年には人と機械との共生(Symbiosis)ということ語り始め、1960年には彼の記念碑的な論文「人間とコンピューターの共生(Man-Computer Symbiosis)」にてそのアイデアをまとめていた²⁷³。

彼はDARPA在任中、そうそうたるコンピューター科学者に対して支援をした。コンピューター・グラフィクスや人工知能から、マウスで操作するユーザー・インターフェースまで、彼ら研究者が開発した技術は、現在のコンピューターの基礎になっている。リックライダーの特に重要な功績は、MITのMAC計画(パーソナル・コンピューティングにおける世界初の大規模実験)である。タイム・シェアリングの技術により、各ユーザーはリアルタイムでの中央コンピューターの応答を感じる事ができた。1960年代半ばまでに、MAC計画は世界初のオンライン・コミュニティへと進化した²⁷⁴。

リックライダーは、「銀河間コンピューター・ネットワークのメンバー、会員(the members and affiliates of the Intergalactic Computer Network)」(彼が支援する研究代表者らのこと)に宛てた1963年4月23日のメモにおいて、広く

²⁷⁰ Mitch Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," *DARPA: 50 Years of Bridging the Gap*, Faircount LLC (2008): 78-85.

²⁷¹ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 78.

²⁷² Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 78-79.

²⁷³ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 79.

²⁷⁴ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 79.

分散すると互換性のないマシン、言語、ソフトウェアを生み出し、その可能性を最大限に発揮することができないかもしれないという危機意識を伝えていた。そこで、彼らのコンピューターすべてを国のシステムに組み込むことにした。そして、1964年、リックライダーはARPAを去った²⁷⁵。

ARPAネットワークが開始されたのは、三人目のIPTO室長であるロバート・テイラー(Robert Taylor)のときであった。彼は、ペンタゴンのオフィスで、リックライダーが恐れていたように、ARPAがファンディングをした三つの異なるタイム・シェアリング・コンピューターの端末の設置を強いられていた。ARPAのチャールズ・ハーツフェルド(Charles Herzfeld)は、リックライダーと親しく、コンピューター・ネットワークの重要性をよく理解しており、テイラーの話を20分程度聞くとその場で100万ドルを承認した²⁷⁶。

資金を得たテイラーは、リンカーン計画の後継であるリンカーン研究所(Lincoln Laboratory)のラリー・ロバーツ(Larry Roberts)を連れてきた。ロバーツは、1967年初め、新しいネットワークのアーキテクチャを定義する三つの重要な技術的決定を下した。そしてそれは今日でもインターネットを定義している。第一は、「全国にコンピューター・ネットワークのための専用回線を設けること」、第二は、「デジタル・メッセージは固定長のセグメント(いまでいうパケット)に分割され、ネットワーク上で送られること」、第三は、「パケットを分類して宛先にルーティングする責任を負うマスター・コンピューターを一つも持たずに、ネットワークを完全に分散化すること」であった²⁷⁷。

同年の春、ロバーツはこのスキームに、各サイトにメイン・コンピューターを介して直接パケットを実行するよう依頼するのではなく、インターフェース・メッセージ・プロセッサ(Interface Message Processor: IMP)と呼ばれる、すべてのルーティング作業を処理する小さなコンピューターを各サイトに設けるという、重要な改良を加えた²⁷⁸。

1968年12月下旬、ロバーツはIMPを製造する契約をマサチューセッツ州ケンブリッジのボルト・ベラネク・アンド・ニューマン(BBN)と締結した。書籍に

²⁷⁵ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 79-80.

²⁷⁶ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 80.

²⁷⁷ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 80-83.

²⁷⁸ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 83.

記録される英雄的な取組で、BBN は最初のマシンをわずか9か月で納品した²⁷⁹。

1971年、BBN エンジニアのレイ・トムリンソン (Ray Tomlinson) が ARPANET用の電子メールのプログラムを考案すると、電子メールはすぐにネットワーク上で最も人気のあるアプリケーションとなった²⁸⁰。

1972年、ロバーツは、IPTO の新しいネットワーク構想を監督するため、BBNで当初のIMPチームのメンバーであったロバート・カーン (Robert Kahn) を雇った。カーンは、有線と無線の回線を完全に別のネットワークとした上で、一種のゲートウェイ、今でいうところのルーターを経由することにして、ARPANETで無線も衛星回線も使えるようにした²⁸¹。

カーンと協力していたスタンフォード大学のビントン・サーフ (Vinton Cerf) は、「他の言語で書かれて読めない封筒は、読める言語で書かれた新しい封筒に入れ、国が変われば封筒を変えればよい」という類推から、ネットワークにおける世界共通のプロトコルを考案した。その現在の名前が、伝送制御プロトコル/インターネット・プロトコル (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)、または TCP/IP である²⁸²。

1982年3月までに、TCP/IPバージョン4は米国防総省にとって、すべての軍用コンピューター・ネットワークの標準にするのに十分信頼できるものであると判断された。そして 1983年1月1日、ARPANET 自体が TCP/IP に切り替わった。その時点では、ARPANETはもはや孤立したものではなく、TCP/IP はパブリックドメインであり、納税者の費用で開発されていたため、他のネットワークも同様にそれを使用し始め、拡大するインターネット内で相互にリンクし始めた²⁸³。

これらの TCP/IPベースのネットワークの中で最も重要なのは、1986 年に開始された米国科学財団のNSFNetであることは明らかであった。NSFの当初の目的は、前年に発表した新しいスーパーコンピューター・センター・システ

²⁷⁹ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 83.

²⁸⁰ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 83.

²⁸¹ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 83.

²⁸² Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 84-85.

²⁸³ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 85.

ムに学術研究者を結び付けることであったが、NSFNet は米国のすべてのキャンパスのすべての研究者が利用できる最初のネットワークであったため、その使用は飛躍的に拡大し、1990年代のインターネットの爆発的な世界的成長の基礎を築いた²⁸⁴。

NSFNetは事実上、ARPANETを時代遅れにした。ARPANET は研究プロジェクトではなくなって久しく、当局は長期的な運営に資金を提供するつもりはなかった。1989年にARPANETは正式に終了した²⁸⁵。

シャロン・ワインバーガーの『The Imagineers of War: The Untold Story of DARPA, the Pentagon Agency That Changed the World』²⁸⁶の第7章にもARPANETのことについて書いてある。大枠の流れはDARPAの文献と同じであるが、次のようなエピソードが書いてある。

1950年代初頭当時、「洗脳(Brainwashing)」は新しい用語であった。冷戦中、アメリカとソ連はイデオロギーの戦争だけでなく心理的な戦争も繰り広げていた。物理学や化学と同じように行動科学も軍事に活かしたいと考えたペンタゴンは、スミソニアン協会の諮問グループに最善の行動指針を提案してもらおうと考えた。諮問グループの提言は、洗脳だけにとどまらなかった。グループ代表のチャールズ・ブレイ(Charles Bray)によると、その応用は「説明や動機づけ」から、「人間と機械、科学者とコンピューターを結びつけるシステム」としてのコンピューターの役割まで、広範囲におよんだ²⁸⁷。

1960年、リックライダーの記念碑的な論文が発表された年、ランド研究所(Rand Corporation)のアナリスト、ポール・バラン(Paul Baran)は、「信頼性の低いネットワーク・リピーター・ノードを使用した信頼性の高いデジタル通信システム(Reliable Digital Communications System Using Unreliable Network Repeater Nodes)」と題する論文を発表した。彼はこの論文で、冗長な通信ネットワークを利用し、先制攻撃を受けたあとでも米国が核兵器を発射できるようにするというアイデアを提案した。彼の記述には、リックライダーと同様、

²⁸⁴ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 85.

²⁸⁵ Waldrop, "DARPA and the Internet Revolution," 85.

²⁸⁶ Sharon Weinberger, *The Imagineers of War: The Untold Story of Darpa, The Pentagon Agency That Changed the World*. Vintage Books, a Division of Penguin Random House LLC, 2018. 邦訳は、千葉敏生訳『DARPA 秘史：世界を変えた「戦争の発明家たち」の光と闇』光文社、2018年。

²⁸⁷ ワインバーガー『DARPA 秘史』、156-157頁。

現代のインターネットの構造と多くの共通点があった。しかし、ランド研究所ではネットワークを構築できなかった。空軍の幹部はバランのアイデアに興味を持ったが、開発が始まる前、役所の組織再編によってプロジェクトは国防通信局へと委ねられた²⁸⁸。

スミソニアン協会の諮問グループは、最終的に、ペンタゴンの国防研究技術局長に対し、行動科学とコンピューター科学の両方を含めた包括的なプログラムを実施するよう提言した。この提言を受け、ペンタゴンの上層部は二つの別個の任務をARPAに課した。一つは行動科学 (behavioral sciences) に関する任務で、これには洗脳の心理学から社会の定量的モデリングまであらゆるものが含まれる。もう一つは指揮統制 (command and control) に関する任務で、こちらはコンピューターに重点を置いたものである。ペンタゴンはARPAの指揮統制と行動科学に関する任務を別個のものとして扱ったが、諮問グループは、二つの分野が密接に関連しあっていると見ていた。対話の相手が機械なのか人間なのかという点がちがうだけで、人間の行動を科学するという点では同じであった。かくして、コンピューターに興味のある心理学者のリックライダーが選ばれた²⁸⁹。

リックライダーは、ペンタゴンが核兵器の指揮統制に関心をもっていることは十分に承知していたが、彼にはもっと大きなビジョンがあり、ことあるごとにインタラクティブ・コンピューティングのアイデアと売り込んだ。ペンタゴンの幹部たちは、リックライダーの話をよく理解していなかったが、面白そうだとは感じていた。ジャック・ルイナ (Jack Ruina) 局長は彼の研究を認めていたし、細かい部分はあまり気にしていなかった。エンジニアのルイナは、行動科学研究には興味が薄かった。結局、リックライダーは、行動科学研究の予算の大部分を社会科学関連の活動ではなく、人間とコンピューターの対話の研究に費やし、そして、ルイナにとっては、それで満足だった²⁹⁰。

ARPAの予算は年々減少の一途をたどり、1960年代中盤には2億7400万ドルへとほぼ半減していた。ルイナの後任の局長となったロバート・スプロール

²⁸⁸ ワインバーガー『DARPA 秘史』、160-164 頁。

²⁸⁹ ワインバーガー『DARPA 秘史』、157-158 頁。

²⁹⁰ ワインバーガー『DARPA 秘史』、165-167 頁。

(Robert Sproull)は、この2年間であまり成果の上がないプログラムを探し始め、リックライダーのプログラムをすべて中止しかけた。リックライダーは冷静に対応し、スプロール局長を連れて主要なコンピューター・センターを三つ四つ回ったところ、スプロール局長は資金提供の継続を決めた²⁹¹。

1964年にリックライダーがARPAを去るころには、コンピューター科学研究から「指揮統制」という言葉が抜け落ち、「情報処理技術室」という新たな名称で置き換えられていた。こうして、コンピューティングという側面が強化され、旧来の核研究というアイデンティティを脱ぎ捨てることとなった²⁹²。

以上のようなことが書いてある。ARPANET開発のきっかけに、洗脳を含む行動科学が含まれていたというのは、インターネットから考えると奇異である。人と機械との共生をめざしたリックライダーの意図的な進路変更もあり、また、核兵器の指揮系統という開発の狙いも徐々に薄れ、インターネットは、DARPAの成果ではあるものの、米国防総省が当初、企図して開発したものとは異なるものになっていると言える。

第4節 成功例の共通点

本稿は、米国防総省における超電導技術の研究、開発、試験及び評価について論じようとするものであるが、それはすなわち、超電導技術を軍事利用しようとする研究、開発、試験及び評価をすることであり、抽象化すると、超電導を対象とする軍事技術開発を考察するということである。

軍事技術開発を議論する上で、まず軍事技術とは何かについて考えてみる。前章で取り上げた三つの技術、「ステルス」、「GPS」、「インターネット」は、国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) のウェブサイトにて、厳選されたDARPAの成果 (SELECTED DARPA ACHIEVEMENTS) として紹介されたものである。米国防総省傘下のDARPAが厳選して紹介しているということからして、これらが軍事技術としての成功例であるということは、DARPAも米国防総省も認めるものとする。

²⁹¹ ワインバーガー『DARPA 秘史』、170 頁。

²⁹² ワインバーガー『DARPA 秘史』、171 頁。

では、これらがどのような軍事技術であり、なぜ成功例と言えるのか。これら三つの技術の共通点と相違点を考えてみる。はじめに、共通点について考える。

1 明確な軍事的ニーズ

まず、考えられるのは、いずれの技術も、はじめから軍事的なニーズ (needs: 要求) があって研究開発が始まっているということである。「ステルス」は、防空システムの性能向上により米軍の航空機が撃墜される脅威が高まっていたことが研究開発、さらには実際の装備の原動力となっていたと考えられる。

「GPS」は、航空機、艦艇、車両などの正確な位置の把握にはじまり、途中からは誘導兵器の誘導というニーズも加わって、研究開発、さらには実際の利用の原動力となっていたと考えられる。

「インターネット」については、米国のどこかが攻撃を受けて機能を停止しても米国の他のどこかで指揮統制を維持するというニーズがあって、研究開発が始まったと考えられる。

軍事的なニーズが具体的にあり、それを満たす方法が他になかったことから、研究開発の期間中、軍事的なニーズであり続けたということが、成功の一つの要因と考えられる。

2 技術システム

次に考えられるのは、いずれの技術も、単独で用いられるものではなく、システム、極言すれば「技術システム」を構成しているということである。「ステルス」は、ステルス技術だけがあっても意味はなく、航空機、艦艇、車両あつてのステルス技術である。そして、ステルス性だけが高ければよいというものではなく、機動性や攻撃能力とのバランスの上に存在し得る。

「GPS」と「インターネット」は、それら自体がシステムである。GPSは、複数の衛星と、それらを制御する地上基地と、受信機があつて成り立つ。インター

ネットは、通信回線と、それらを網目のようにつなぐ基地局と、それにつながる端末コンピューターがあって成り立つ。DARPAもそれは認識し、GPSについては受信機の小型化、インターネットについてはその基本設計、アーキテクチャに、それぞれDARPAが貢献したということを成果として示している。

個々の要素技術を集め、トレードオフの関係にある技術どうしは適切に調整(機械の分野でいうところの「すりあわせ」)をし、技術システムを構築できたことが、成功の一つの要因と考えられる。

3 長期間にわたる研究開発

更に考えられるのは、いずれの技術も、研究を始めてから実際に軍事的に利用できるまでに相当の時間がかかっている、換言すれば、途中で中止されることなく、長期間にわたる研究開発をすることができたということである。「ステルス」は、1950年代の初頭には、ライト・パターソン空軍基地の航空電子工学研究所の前身である機関において、航空機のレーダー反射断面積を正確に定義しようとする研究が行われており、そして、1955年には、レーダー吸収材料の開発のためのプログラムが始まったということで、1955年を始まりとし、1980年にハロルド・ブラウン国防長官(当時)がステルス航空機の存在を認めたということで、1980年には実践に使い得るところまできたと考えると、25年かかったということになる。

「GPS」は、1957年のスプートニク・ショックを受け、スプートニクを追跡する中で着想を得て、軌道投入は失敗したものの、1959年にTRANSITシステムの衛星を打ち上げたということで、1959年を始まりとし、1983年、ロナルド・レーガン大統領(当時)が「GPSが運用可能となったときには民間航空機にも利用できるようにする」という声明を出したことで、1983年には運用に向けた一定の準備ができていたと考えると、24年かかったことになる。

「インターネット」は、リックライダーがDARPAに着任した1962年を起点とし、NSFNetが飛躍的に拡大し、ARPANETが正式に終了した1989年にインターネットの基礎ができたと考えると、27年かかったということになる。

実現するための関連技術が成熟するまでに時間を要した、ということが考

えられる。それまでに研究開発のための資金が途絶えることなく継続したことが、成功の要因と考えられる。

4 研究開発協力企業の存在

更に考えられるのは、いずれの技術にも、研究開発に深くかかわる企業があったということである。「ステルス」には、CIAと極秘に研究開発を進めていたロッキード(Lockheed Corporation(当時))があった。ステルス機の開発コンペに参加したかったロッキードは、ロッキードの研究に拠出する資金は残っていないとするDARPAに1ドルでの契約を持ちかけ、開発コンペに参加を果たした。ステルスの将来性を見越した、企業の大胆な判断であったと考えられる。これらのピースが一つ欠けただけでも「ステルス」は実現しなかった可能性がある。

「GPS」に関しては、結論から言うと、レイセオン(Raytheon Company)があった。DARPAの資料ではエアロスペース・コーポレーションの創設社長であるイワン・ゲッティングの尽力があったことを簡潔に書いているだけであるが、ナショナル・アカデミーズ(National Academies)のウェブサイトによると、ゲッティングは、エアロスペース・コーポレーションを創設する前はレイセオンの副社長であり、彼のレイセオンにおける、大陸間弾道ミサイルの正確な制御のためのモバイルシステムなどの、ナビゲーションと測位システムに関する仕事が、GPSの基本的なアイデアへとつながったとある²⁹³。

「インターネット」には、ボルト・ベラネク・アンド・ニューマン(Bolt Beranek and Newman: BBN)があった。BBNは、わずか9か月で最初のインターフェース・メッセージ・プロセッサ(IMP)を製造・納入したほか、ARPANETのメール・ソフトウェアを開発している。また、BBNで当初のIMPチームのメンバーであったロバート・カーン(Robert Kahn)がIPTOの新しいネットワーキング構想を監督することになり、ARPANETで無線も衛星回線も使えるようにした。

²⁹³ "Ivan A. Getting," Memorial Tributes: Volume 12, National Academy of Engineering (Washington, DC: The National Academies Press, 2008).

5 明確な競争相手の不在

更に考えられるのは、いずれの技術も、他国に明確な競争相手がいなかったということである。冷戦時代、米国とソ連は核開発を競い合った。ウラン型、プルトニウム型の核爆弾の威力を増加させ、水素爆弾を開発してさらに破壊力を増加させ、必要量をはるかに超える数の核弾頭を保有する一方で、その開発のために国力をすり減らせていた。

それに対し、「ステルス」は、ソ連の防空システムの性能の向上という脅威を発端としつつも、ソ連と「ステルス」の開発で競い合っていたわけではない。また、「GPS」も「インターネット」も、ソ連からの核攻撃という脅威を発端としつつも、ソ連と「GPS」、「インターネット」の開発で競い合っていたわけではない。

6 調達への移行

更に考えられるのは、いずれの技術も、一旦、研究開発から調達に移行しているということである。「ステルス」については、いまやステルス性を備えた装備品としては、航空機、艦艇、車両と幅広く、そして、それらは調達の対象となっている。ステルス戦闘機F-35は、2023年6月1日時点で、米国をはじめ、英国、イタリア、オランダ、カナダ、オーストラリア、デンマーク、ノルウェーの計8か国をパートナーとする共同プログラムにより調達が進みつつあり、並行して、日本をはじめ、イスラエル、韓国、ベルギー、ポーランド、シンガポール、フィンランド、スイス、ドイツの計9か国に对外有償軍事援助（Foreign Military Service: FMS）での提供が行われつつある²⁹⁴。

「GPS」について、軍事利用としては、大陸間弾道ミサイルや精密誘導兵器の誘導装置、また、軍の航空機、艦艇、車両のナビゲーション・システムの調達のなかに含まれると考えられる。

「インターネット」については、純粋に軍事的な用途としてどのような調達が

²⁹⁴ F-35 Lightning II Program Status and Fast Facts, Lockheed Martin, June 1, 2023.

行われているかは明らかにされていないが、少なくとも、軍の基盤的な機能を構築するうえで調達が行われていることに、恐らく間違いはないであろう。

そして、さらに重要と考えられることは、調達に移行したからといって、研究開発が終わってしまったわけではなく、いずれの技術も、機能や性能のさらなる向上を目指し、次世代の「ステルス」、「GPS」、「インターネット」の研究開発が進んでいるということである。冒頭にも一旦と記載したように、一旦、調達が行われることにより、研究開発の一部の成果が、米国防総省としては実用の軍事技術となり、企業としては収益となる。利潤を追求する企業にとって、いつまでも収益が見込めない中で研究開発を継続することは困難であり、断続的であれ、将来的な収益が見込めることは重要である。

7 明確な科学的原理

更に考えられるのは、いずれの技術も科学的原理が明確である、換言すれば、科学的原理はわかっていて、あとはそれを実現する、純粹に技術の問題であったということである。もちろん、研究開発の当初から科学的原理がわかっていたわけではないが、「ステルス」は、機体の形状および機体表面の物質の違いによりレーダー反射断面積が変化することがわかったことから、どのような形状にするか、どのような材質で表面を覆うか、を突き詰めることで実現できたと考えられる。

「GPS」は、宇宙を周回する人工衛星が発する電波のドップラー効果から人工衛星と移動体の速度を割り出すことにより、それから移動体の位置を割り出すことができるということがわかったことから、人工衛星側には、どのようにして人工衛星を正確に周回させるか、どのようにして正確な周波数の電波を発信し続けるかという課題が、一方で受信機側はいかにして小型化するか、を突き詰めることで実現できたと考えられる。

「インターネット」については、一つの科学的原理に基づくというのではなく、科学的原理に基づく技術の一つ一つを、どのようなアーキテクチャにするか突き詰めることで実現できたと考えられる。

8 代替技術の不在

更に考えられるのは、いずれの技術も代替技術が存在しないということである。馬車が自動車に、タイプライターがワードプロセッサに、ブラウン管がフラットパネル・ディスプレイに、それぞれ取って代わられたように、より良い代替技術が現れれば、技術は置き換わる。しかしながら、いまのところは、航空機のレーダー反射断面積を小さくする技術としては「ステルス」しかない。「ステルス」は複数の技術を組み合わせた技術システムであるので、「ステルス」の中で技術の置き変わりは進んでいるであろうが、いまだ「ステルス」を超えるものは存在しないと考える。

高精度のナビゲーションを実現する技術としては、米国が管理運用している衛星測位システム「GPS」に加え、ロシアのGLONASS、欧州委員会のGalileo、中国のBeiDou、これら4つのシステムをあわせた全地球航法衛星システム(Global Navigation Satellite System: GNSS)、さらには、GPSで行う測位精度の向上のために収集データの補強・補正することを目的に利用されている補強衛星群(SBAS)として、米国のWAAS、欧州連合のEGNOS、日本のMSAS、インドのGAGANの4つがあるほか、特定地域衛星群を使って特定の地域における測位に利用されている日本のQZSS、インドのIRNSSのように地域航法衛星システム(RNSS)と呼ばれるものも存在し、さまざまな測位衛星が発信する信号を利用した衛星測位が行われている。しかしながら、どれかがどれかを代替するというものではなく、「GPS」はいまも、衛星測位システムの中心的な位置づけにある。

また、コンピューターをネットワーク化する技術として「インターネット」を置き換え得るものがあるとは寡聞にして知らない。

だからこそ、これらの技術は現在もなお実際に使われていると言える。

9 倫理的な争点の不在

更に考えられるのは、いずれの技術も、その利用にあたり、倫理的な争点がないということである。ここでいう倫理的な争点というのは、「核兵器は、そ

の威力の大ききゆえに戦闘員と非戦闘員の区別なく殺傷してしまうことから、道徳に反する」といったものである。まず、いずれの技術も、敵の施設や装備を直接、破壊する技術ではない。そのうえで、「ステルス」は、戦闘機や爆撃機の察知を困難にし、奇襲攻撃を可能とするという側面はあるが、それは、兵士が迷彩服を着ることの延長のようなものであり、それに倫理的な争点があるとは言にくい。

「GPS」は、大陸間弾道ミサイルや誘導兵器の命中率を上げるという側面はあるが、それは、誘導用のアンテナの大型化や増設、あるいは、慣性航法を向上させることの延長のようなものであり、また、むしろ非戦闘員の被害を抑えることも可能とするものであり、それに倫理的な争点があるとは言にくい。

「インターネット」は、最近ではプライバシーの観点で倫理的な争点があるものの、技術的には電話網の延長のようなものであり、コンピューターがネットワークでつながっていること自体に倫理的な争点があるとは言にくい。

10 許容し得る欠点

更に考えられるのは、いずれの技術も欠点があり、換言すれば、完璧ではないが、それでも許容できたということである。「ステルス」は、レーダー反射断面積を小さくするが、ゼロにはできない。ステルス性を高めれば高めるほど、機体の形状を制約し、飛行性能を落としてしまう。ステルス性だけを追求することはできない。また、ステルス性能を出すための表面に装着する低可観測材料(Low Observable materials: LO materials)はデリケートで、メンテナンスによっては、一度、LO材料を取り外す必要があり、その場合は、再度、LO材料を装着したのち、シグニチャー診断(signature diagnostics: SD)をする必要がある²⁹⁵。さらに、電波を発したレーダーで反射波を観測するアクティブ・レーダーに対しては、レーダー反射断面積は小さくなるが、他のアンテナで送信された電波を受信するだけのパッシブ・レーダーにより捕捉される可能性はある²⁹⁶。

²⁹⁵ Staff Sgt. Kayla White, “Low Observable maintenance.” Whiteman Air Force Base, December 8, 2018

²⁹⁶ Arend G. Westra, “Radar versus Stealth: Passive Radar and the Future of U.S. Military Power.” *Joint Force Quarterly*,

「GPS」は、衛星からの電波を受信する必要があるため、妨害電波(jamming)により正しく使えなくなるという弱点がある。GPSに関する米国政府のウェブサイトには、「連邦法は、携帯電話およびパーソナル通信サービス(PCS)、警察レーダー、および全地球測位システム(GPS)を含む、認可された無線通信を妨害するあらゆるタイプの妨害装置の運用、マーケティング、または販売を禁止しています。」と警告している²⁹⁷。

「インターネット」には、冗長性をもたせて情報のやり取りを確実に実行しようとするため、遅延を許容しなければならないという根本的な問題がある。また、傍受が比較的容易にできてしまうことから、傍受されることを前提とした暗号化が重要となる。さらには、どこにでもつながるゆえに、どこからでもサイバー攻撃を受けるリスクがある。そのリスクを回避するためには、サイバー攻撃の起点となるセキュリティ・ホールをふさぐ必要があるが、そのためには、インターネットを構成するすべての電子デバイスの安全性が担保されており、また、インターネット上のすべてのコンピューターにおいて最新のセキュリティ・ソフトウェアが稼働している必要がある。しかし、それには多大なコストを要し、現実的ではない。

第5節 成功例の相違点

次に、これらの技術の相違点を考えてみる。そのため、多様な視点で分類してみる。

1 軍事行動における使用形態

まずは、軍事行動における使用形態、極言すれば軍事行動に直接用いられるか、それとも、軍の基盤的な機能として用いられるかという視点である。「ステルス」は、航空機、艦艇、車両と用途は広いが、はじめに採用された航

National Defense University, issue 55, 4th quarter (2009): 136-43.

²⁹⁷ “Information about GPS Jamming,” *GPS.Gov: Information About GPS Jamming*, accessed July 3, 2023, <https://www.gps.gov/spectrum/jamming/>.

空機で考えてみると、姿を隠しての偵察、攻撃に使えるということから、軍事行動に直接用いられるものと言える。

「GPS」は、航空機、艦艇、車両、部隊または隊員の位置を捕捉するために用いることについては、軍の基盤的な機能として用いられるものと言えるが、ミサイルに組み込んでミサイルの誘導に用いることについては、軍事行動に直接用いられるものと言える。

「インターネット」については、具体的に軍がどのように利用しているかが見えないため、明確に論じることは難しいが、基本的には軍の基盤的な機能として用いつつ、サイバー空間での戦争、いわゆる「サイバー戦」においては、軍事行動に直接用いられるものとも言える。

ここで、今後の議論のために、これらの類型に名称を付けることとする。「ステルス」のように、主に防衛装備品に用いられる技術システムのことを「防衛装備品用技術システム(Technology System for Defense Equipment)」と呼ぶことにする。一方で、「GPS」や「インターネット」のように、主に防衛基盤に用いられる技術システムのことを「防衛基盤用技術システム(Technology System for Defense Basis)」と呼ぶことにする。なお、例えば「GPS」を用いて兵器を誘導するといったことからわかるように、現代の防衛装備品は防衛基盤と密接に連携しており、「防衛装備品用技術システム」と「防衛基盤用技術システム」は、システムズ・オブ・システム(System-of-systems)を構成していると言える。

2 研究開発段階における機密性

次に考えられるのは、研究開発がどの程度秘密裏に行われたか、換言すれば、すべてが秘密で行われたか、あるいは、オープンな部分もあったかという視点である。「ステルス」は、はじめは中央情報局(Central Intelligence Agency: CIA)がロッキード社と研究開発を始めていた。企業が加わってはいるが、研究開発の内容からして、当然ながら守秘義務がかかっていたと推察する。その後、DARPAが、さらには空軍も加わって開発が進むが、1980年、当時国防長官であったハロルド・ブラウンがステルス技術について言及するまで

は、秘密であった。

「GPS」は、研究開発の段階でどこまで公表されていたかは定かではないが、1983年、大韓航空機がソ連に撃墜されたことを受け、ロナルド・レーガン大統領(当時)が、「GPSが運用可能となったときには民間航空機にも利用できるようにする」という声明を出すまでは、秘密であったものと推察する。

「インターネット」については、比較的早くにその一端が公開されている。DARPAのウェブサイトによると、スタンフォード研究所(Stanford Research Institute: SRI)のダグラス・エンゲルバート(Douglas Engelbert)が考案し、ARPAと空軍が共同で資金提供して10年をかけて進化した、oN-Line System(NLS)として知られる画期的なコンピューター・フレームワークを、エンゲルバートは、1968年12月9日にサンフランシスコで開催された会議(The Fall Joint Computer Conference)で大勢の聴衆の前で発表した。エンゲルバートの端末は、電話回線を介して、30マイル離れたカリフォルニア州メンロー・パークにある(複数のユーザー間でタイム・シェアリングするために特別に設計された)SDS940コンピューターに接続されていた。聴衆はエンゲルバートがマウスを操作し、メンロー・パークの彼のチームのメンバーがプレゼンテーションに参加する様子を見ることができた。

なお、1969年にSRIにARPAネットワークが導入されると、少数のユーザーでは実用的であると思われたタイム・シェアリング技術は、分散ネットワークでは実用的ではなくなった。NLSはARPANETではないが、ARPANETの研究開発において重要な存在であったと考えられる。ARPANETの研究開発の過程では、公表できる部分があった、そしてそれは、大学の研究者が主導し、かつ、軍事的な色合いが薄い部分であったと考える。

ここで、今後の議論のために、これらの類型に名称を付けることとする。「ステルス」のように、完全に非公開で秘密に行われる研究、開発、試験及び評価のことを「完全秘密型RDT&E(Completely Secret-typed RDT&E)」と呼ぶことにする。一方で、「インターネット」のように、部分的に公開をしながら行われる研究、開発、試験及び評価のことを「一部公開型RDT&E(Partly Open-typed RDT&E)」と呼ぶことにする。また、軍事技術の研究開発においてはあり得ないかもしれないが、論理的な構成のため、すべて公開しながら行われる

研究、開発、試験及び評価のことを「完全公開型RDT&E (Completely Open-typed RDT&E)」と呼ぶことにする。このように定義すると、「GPS」は、初めは「完全秘密型RDT&E」であって、途中から「一部公開型RDT&E」になった、と言える。

3 民生利用の度合い

更に考えられるのは、軍事用途を念頭に研究、開発された技術が、どれほど民生利用され得るかという視点である。「ステルス」は、レーダーに映りにくい、はじめは航空機、のちには艦艇、車両、飛翔体と、その利用範囲を広げているところであるが、それらはいずれも軍事装備品である。一方、民生利用としては、「レーダーに映りにくいこと」をメリットとする民生製品は、調べた範囲では存在しない。外部の電磁波を遮断したいというニーズはあり得るが、それであれば、導体で囲むという代替方法もある。ステルスに関しては、ほぼすべて、軍事用途であり、民生利用の度合いはほとんどないと言える。

「GPS」について、軍事利用としては、大陸間弾道ミサイルや精密誘導兵器の誘導装置、また、軍の航空機、艦艇、車両のナビゲーション・システムの調達の中に含まれると考えられるが、民間の航空機、船舶、さらにはカーナビやスマートフォンにも使われる技術となっていることから、民生利用の方が量的には多くなっているものとする。

「インターネット」については、純粹に軍事的な用途としてどのような調達が行われているかは明らかではないが、少なくとも、軍の基盤的な機能を構築するうえで調達が行われていることに、恐らく間違いはないであろう。しかし、インターネットは、世界で急速に広まっており、いまやインターネットがあることが前提の世の中になりつつある。インターネットが、もとは軍事技術であったことを知らない人も多くいよう。インターネットに関しては、圧倒的に民生利用の割合が高いと考えられる。

本章のおわりに

米国防総省により研究開発がなされ、実際に軍事利用されたかつての新興技術として、「ステルス」、「全地球測位システム(GPS)」、「インターネット」に着目し、軍事利用に至った経緯を検証した。これらの技術には、明確な軍事的ニーズがあったこと、技術システムを構成していること、長期にわたる研究開発が行われたこと、研究開発協力企業が存在したこと、明確な競争相手がいなかったこと、調達に移行したこと、科学的原理が明快であること、代替技術が存在しなかったこと、倫理的な争点が無かったこと、欠点はあるが許容できたことといった共通点があった一方で、軍事行動における使用形態や、研究開発段階における機密性、民生利用の度合いといった相違点があった。

第5章 米国防総省における超電導技術の研究開発の進捗と成果

本章のはじめに

第2章で論じたように、米国防総省では、第二次世界大戦終結直後の1940年代の後半から、超電導の研究開発を行ってきた。そして、1980年代の後半から1990年代のはじめにかけては、1986年の高温超電導体発見に端を発する超電導ブームに乗り、大型の研究開発費を獲得することに成功している。足掛け70余年の研究開発を行い、では一体、超電導技術の軍事利用はどれだけ進んでいるのであろうか。本章では、まず、超電導技術の軍事利用について、過去の研究開発の計画の進捗と成果を俯瞰する。そして、第4章で示した、軍事利用された技術と比較し、その違いを分析して論じる。

第1節 過去の計画の進捗と成果

米国防総省は多額の予算を獲得し、超電導技術の研究開発を推し進めたのであるが、それがすぐに軍事利用されたかといえば、むしろ、ほとんど利用されていないと言うほうが適当である。夢の技術と言われていたのに、夢が実現しにくいのはなぜなのだろうか。実際に軍事利用されている技術については、軍事機密に関わるようであればその詳細を知ることが困難であるが、推論を重ねるとともに、新技術が軍事技術として利用される条件とは何かという視点で、個々の用途を見ていく。

米国防総省が1987年7月にとりまとめた調査報告書 *Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) Options: A Study of Possible Directions for Exploitation of Superconductivity in Military Applications* で示唆されていた用途の状況としては、次のようなものである。

■ 小規模用途

【赤外線センサー】 赤外線は、通信や、熱源の探知、追尾、暗視などに利用可能であり、それらを目的として研究開発が行われたものと推察する。しかし、本研究で調べた限りでは、現在、軍事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は存在しない。一方で、半導体技術の飛躍的な進歩により²⁹⁸、家電のリモコンなどにおける無線通信から、スマートフォンなどによる温度計測まで、さまざまところで化合物半導体による赤外線センサーが用いられており、超電導の必要性は低下していると推察する。

【マイクロ波・ミリ波】 マイクロ波の波長は1cm～10cm、ミリ波の波長は1mm～10mmで、ともに直進性が強く、伝送できる情報量が大きいことから、通信やレーダーなどを目的として研究開発が行われたものと推察する。かつて米国で移動体通信基地局に超電導バンドフィルターが利用された報告はあるものの²⁹⁹、現在、軍事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は、本研究で調べた限りでは存在しない。一方で、半導体技術の飛躍的な進歩により、衛星放送、無線LANなどの通信、また、気象、船舶、自動車衝突防止などを用途とするレーダーに半導体デバイスが用いられており、超電導の必要性は低下していると推察する。

【磁気検出】 微弱な磁気を検出することにより、地雷や機雷の探知、また、水中でも伝わる超低周波(ELF)通信などを目的として研究開発が行われたものと推察する。現在、民生用途としては、脳の電氣的な活動や磁性材料の磁束密度を計測するSQUID(Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer)で超電導量子干渉素子として、超電導技術は磁気計測に使われている。しかし、軍事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は、本研究で調べた限りでは存在しない。一方で、2021年に海軍研究局が「磁気・音響生成次期超電導掃海(MAGNUSS)」の研究参加募集をし³⁰⁰、そして2023年3月に米国のテキストロン社と、高温超電導電磁石を用いた無人機雷掃海艇の開発を契約すると発表した³⁰¹。これらは民生

²⁹⁸ 和田英男「日本における赤外線センサ技術の開発」『日本赤外線学会誌』第14巻第2号、2005年、7-12頁。

²⁹⁹ 大嶋重利「超電体のマイクロ波デバイスの実用化と課題」2020年度第2回超電導応用研究会シンポジウム、2021年。

³⁰⁰ Special Notice N00014-21-S-SN12, Special Program Announcement for Office of Naval Research, Research Opportunity: Magnetic and Acoustic Generation Next Unmanned Superconducting Sweep (MAGNUSS)

³⁰¹ “Contracts For March 8, 2023,” U.S. Department of Defense.

利用のされにくい分野とも言え、実際に軍事的に超電導が使われる可能性が考えられるものの、恐らくは軍事機密で表には出ないと考える。なお、現在、半導体による磁気抵抗素子が飛躍的に進歩しており、超電導の必要性は低下していくと推察する。

【超高速計算】 ジョセフソン素子を用いたスイッチングで超高速の演算ができるとして超高速コンピューターを実現する目的で研究開発が行われた。超電導コンピューターについては、1969年にIBMが「超電導コンピューター・プロジェクト」を開始したものの、1983年には同プロジェクトを中止しており³⁰²、1987年当時にはすでに一定の試行錯誤が行われていたことになる。超電導コンピューティングについては、ジョセフソン素子による高速のスイッチングに対してメモリーの速度が律速になりメモリーの高速化が必要であることや、低温部と室温部という動作環境の温度差が大きく熱流入を抑えつつの大規模化が必要であるといった技術的課題があり³⁰³、そのためか、民生利用の報告は、本研究で調べた限りでは存在しない。軍事的に使われている可能性は考えられるものの、恐らくは軍議機密で表には出ないと考える。なお、現在、高速計算、大規模計算、いわゆるスーパーコンピューター（スパコン）は、半導体素子による大規模な並列計算が主流であり、超電導の必要性は低下していると推察する。

■ 大規模用途

【発電、送電、エネルギー貯蔵、動力】 超電導は電気抵抗がゼロで大量の電流が流せることから、効率的な発電、送電、エネルギー貯蔵、動力（モーター）を実現する目的で研究開発が行われたものと推察する。民生用途としては、船舶や飛行機の動力として研究開発は続いており、風力発電の発電機³⁰⁴や、小規模なエネルギー貯蔵³⁰⁵としては実用化もされている。一方、軍

³⁰² William J. Gallagher, Erik P. Harris, and Mark B. Ketchen, “Superconductivity at IBM – a Centennial Review: Part I – Superconducting Computer and Device Applications,” IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No. 21 (July 2012).

³⁰³ *Superconducting Technology Assessment*, U.S. National Security Agency, August 2005.

³⁰⁴ アメリカン・スーパーコンダクター社「HTS Generator Solutions」事業パンフレット。

³⁰⁵ Paul Breeze, “Superconducting Magnetic Energy Storage,” Chapter 5, *Power System Energy Storage Technologies* (2018): 47-52.

事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は、本研究で調べた限りでは存在しないものの、各種装備、特に艦艇の電力需要増、重量増の対策は重要であり、研究開発は続いていると推察する。

【自由電子レーザー】自由電子レーザーは、自由電子の励起状態間の遷移を用いたレーザーであり、光速に近い速度をもつ電子ビームでの光の誘導散乱を利用してレーザー光の増幅・発振を行わせるもので、一般のレーザーのように物質のもつポテンシャル場で電子が束縛されないため、発振光の波長は一定ではなく、波長可変のレーザーとなる³⁰⁶。指向性エネルギー兵器（DEW）を目的に研究開発が行われたものと推察する。現在、海軍で、指向性エネルギー兵器の候補の一つとして研究開発されているようであるが、まだ実現しておらず、また超電導方式かは不明である。

【電磁銃（レールガン）】レールガンは、電気のエネルギーを利用して弾丸を加速、発射するもので、火薬のエネルギーを利用した火砲では実現できない高初速で弾丸を発射することができ、大きな威力を持つことに加え、より遠方の目標への対処を可能とするものである³⁰⁷。当初は陸軍が可能性を示唆するも、開発をすすめたのは海軍であった。しかし、2021年に開発は中止となったと報道された³⁰⁸。なお、海軍は常電導（＝超電導ではない）方式で開発した可能性があるが、公表されておらず、定かではない。

以上のように、小規模なものについては、軍事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は、本研究で調べた限りでは存在しないが、競合技術、特に半導体技術の飛躍的な進歩により、超電導の必要性は低下していると推察する。一方、大規模なものについて、こちらも、軍事的な用途としてのそれらに超電導技術が用いられているとの文献は、本研究で調べた限りでは存在しないものの、両用技術（デュアルユース）として、民生利用されているものもあり、また、軍事用途として研究開発が継続している

³⁰⁶ 日本大百科全書(ニッポニカ)「自由電子レーザー」小学館、<https://kotobank.jp/word/自由電子レーザー-161250> (2022年10月23日閲覧)。

³⁰⁷ 防衛装備庁ホームページ、<https://www.mod.go.jp/atla/rikusouken.html> (2022年10月23日閲覧)。

³⁰⁸ David Sharp, “US Navy ditches futuristic railgun, eyes hypersonic missiles,” Defense News, July 2, 2021. ただし、米国の研究開発については、2022年1月に岸信夫防衛大臣が「研究開発を中止したとは承知していない」とコメントしている。

ものも存在する。

前述の1987年の調査報告書には示唆されていなかった用途についても研究開発は行われている。次のようなものである。

■ 小規模用途

【量子コンピューター】 量子コンピューターは、超電導体で量子ビットを形成し、量子効果を用いて高速計算をしようというものである。1999年にNECのグループが超電導量子回路を用いた量子ビットを世界に先駆けて発表して以来、量子コンピューターの研究開発は世界的な競争状態にある³⁰⁹。IBM、Google、Microsoft、Intelなどの民間企業が大規模な投資をしており、米国防総省のプレゼンスは相対的に低いように見える。また、量子コンピューターにおいては超電導以外の方式も盛んに研究開発が進行中である。限定的な用途で民生利用が始まっているものの、本格的な民生利用や、軍事利用については、まだ先のことと考える。

■ 大規模用途

【電磁カタパルト】 電磁カタパルト(EMALS: Electromagnetic Aircraft Launch System)は、航空母艦(空母)に搭載される艦載機の射出システムで、従来の蒸気式ではなく、電磁石を用いるものである。海軍は1940年代には電磁カタパルトの可能性を予見しプロトタイプを作製したようであるが³¹⁰、1987年の米国防総省の調査報告書³¹¹には超電導の用途として記載はなく、一方で、1988年に米国連邦議会の技術評価室(OTA)が取りまとめた報告書 *Commercializing High-Temperature Superconductivity* (高温超電導の商業化)には、「航空機カタパルト(aircraft catapults)」の記載がある³¹²。2017年に電磁カタパルトを搭載したCVN 78(Gerald R. Ford)が就役しており、電磁

³⁰⁹ 向井寛人、朝永顕成、蔡兆申「超電導量子コンピュータの基礎と最前線」『低温工学』第 53 巻第 5 号、2018 年、278-286 頁。

³¹⁰ Michel R. Doyle, Douglas J. Samuel, Thomas Conway, Robert R. Klimowski, “Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS,” *IEEE Transactions on Magnetics* 31, no.1 (January 1995): 528-33.

³¹¹ *Superconductivity Research and Development Options*, U.S. Department of Defense (1987), 7-11.

³¹² *Commercializing High-Temperature Superconductivity*, OTA-ITE-388, Office of Technology Assessment, U.S. Congress (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, June 1988), 155.

カタパルトは軍事的に利用されたが、経緯を調べると、超電導を用いる比較研究はなされた形跡はあるものの、採用はされていないと推察する。

超電導も数ある要素技術の一つである。要素技術は、新しい用途が見つかり、それに向けて研究開発が進むが、必ずしも実現するわけではない。前述した、1987年の調査報告書で示唆されていた方の用途開発においては、小規模用途より大規模用途の方が、研究開発が継続しているように見られたが、こちらの、1987年の調査報告書で示唆されていなかった方の用途開発においては、大規模用途より小規模用途の方が、研究開発が活発に行われているようにも見える。しかし、このことは、単に量子コンピューターだけに起きている可能性も考えられ、さらなる検証が必要である。

第2節 電磁カタパルトを事例とする考察

ここで、空母Gerald R. Fordの電磁カタパルトを事例として考察してみる。前述したように、電磁カタパルトは、超電導方式と常電導方式との比較研究がなされた形跡があるが、本研究で調べた限りでは、同空母の電磁カタパルトに超電導を利用しているということが記載されている文献は存在しない。電磁カタパルトは超電導カタパルトではないのか、超電導でないとする、なぜ超電導にならなかったのかという観点で考察する。電磁カタパルトを事例として取り上げる理由としては、電磁カタパルトは、超電導送電を除けば、最も大規模な超電導の軍事応用となりうること、また、空母は国家の一大プロジェクトであり失敗できないことから、技術的、政治的、経済的なさまざまな圧力がかかり、特別な事例となりうることゆえと考える。

まず、空母Gerald R. Fordの電磁カタパルトの開発から実装まで経緯と、それに関連する事象を合わせて調べると、次のようなものである。

1993年、海軍は新しいクラスの航空母艦の要件と利用可能な技術とシステムを調査するために空母ワーキング・グループを設立した³¹³。

³¹³ *Defense Acquisitions: Navy Faces Challenges Constructing the Aircraft Carrier Gerald R. Ford within Budget*, GAO-07-866, U.S. Government Accountability Office (August 2007), 6.

1999年、海軍は二つの異なる請負業者と技術実証契約を締結した。ゼネラル・アトミックス (General Atomics) とノースロップ・グラマン・マリン・システム (Northrop Grumman Marine Systems) は、電磁式カタパルトのプロトタイプを開発した³¹⁴。

2004年、海軍研究局のサポートを受けた、電磁カタパルト用リニアモーターの設計に関する論文が発表された。その結論は、「現在の技術では、(超電導を使わない)リニア-永久磁石同期モーターが最良の手段だが、(超電導を使う)リニア-バルク超電導磁石モーターは、長期的にはこの用途のための最良の候補となり得る」というものであった³¹⁵。

2004年、海軍はゼネラル・アトミックスによって提案されたシステムにダウンセレクトし、ニュージャージー州レイクハーストの海軍試験施設で実物大の船の代表的なプロトタイプを構築するためのシステム設計開発契約 (SDD契約) を締結した。そのプロトタイプは、2007年にテストが開始されるのに間に合うように完成するように契約され、テストは2年以内に終了することになっていた³¹⁶。

2005年、米国の防衛請負企業に勤務する中国のエージェントにより、空母のカタパルトに関する情報を含む、米国海軍の武器技術に関するデータが中国に渡っていたことが発覚した³¹⁷。

2007年8月、米国会計検査院 (Government Accountability Office: GAO) が報告書を作成した。GAOは、「米国防総省 (DOD) が、CVN 78 (Gerald R. Ford) の予算見積り現実性を改善し、海軍のコスト監視機能を改善し、デュアルバンドレーダーの空母固有のテストを計画するための措置を講じることを推奨する」とした³¹⁸。

2009年7月、第111国会第1セッション 下院軍事委員会 シーパワーと遠

³¹⁴ *Oversight of The Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*, House Hearing, 111th Congress - [H.A.S.C. No. 111-83] (July 16, 2009), 1.

³¹⁵ Gorazd Štumberger, Mehmet Timur Aydemir, Damir Žarko, and Thomas A. Lipo, “Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems.” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 1, 2004, pp. 54–62, <https://doi.org/10.1109/tasc.2004.824342>.

³¹⁶ *Oversight of The Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*, 1.

³¹⁷ “Chinese Agent Sentenced to Over 24 Years in Prison for Exporting United States Defense Articles to China,” for Immediate Release, U.S. Department of Justice, March 24, 2008, https://www.justice.gov/archive/opa/pr/2008/March/08_nsd_229.html.

³¹⁸ U.S. Government Accountability Office. *Defense Acquisitions: Navy Faces Challenges Constructing the Aircraft Carrier Gerald R. Ford within Budget*, GAO-07-866, August 2007.

征軍小委員会の前に公聴会 Oversight of the Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS) を開催した³¹⁹。

2011年11月、国防安全保障協力局は、電磁カタパルト/先進的制動装置 (EMALS/AAG) の長期リード・サブアセンブリー、および関連機器、部品、訓練、輸送サポートの英国政府への軍事援助 (FMS) の可能性について議会に通知した³²⁰。

2013年9月、米国会計検査院 (GAO) が再度、報告書を作成。GAOは、「国防長官が、フォード級空母の調達において、必要な機能と関連コストの費用便益分析の実施を含む、健全な要件と包括的なテスト戦略によってサポートされることを保証することを目的としたいくつかの行動」、「契約交渉を開始する前に、CVN 79 (John F. Kennedy) の機能とコストに関する海軍の知識を向上させるための行動」を推奨するとした³²¹。

2017年6月、米国会計検査院 (GAO) が再度、報告書を作成。GAOは、「海軍は、将来の船舶への資金提供を要求する前に、コストレビューによって検証されたCVN 79の新しい信頼できるコスト見積もりを作成し、独立したコスト見積もりを得る必要がある」とした³²²。

2017年7月、予定より1年遅れで、CVN 78 (Gerald R. Ford) が就役した。

2017年5月、ドナルド・トランプ大統領 (当時) がタイム誌のインタビューで、1億ドルを超える電磁カタパルトの経費を問題視した³²³。

2019年5月、訪日中のトランプ大統領 (当時) が「以降の空母に採用しない」旨を表明した³²⁴。

2021年12月、国務省は、電磁カタパルト (EMALS)、先進的制動装置 (AAG)、および関連機器を推定13億2100万ドルでフランス政府への軍事援

³¹⁹ *Oversight of The Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*, 1.

³²⁰ “United Kingdom – Electromagnetic Aircraft Launch System Long Lead Sub-Assemblies,” U.S. Defense Security Cooperation Agency, News Release, November 15, 2011.

³²¹ *Ford-Class Carriers: Lead Ship Testing and Reliability Shortfalls Will Limit Initial Fleet Capabilities*, GAO-13-396, U.S. Government Accountability Office, September 2013.

³²² *Ford-Class Aircraft Carrier: Follow-On Ships Need More Frequent and Accurate Cost Estimates to Avoid Pitfalls of Lead Ship*, GAO-17-575, U.S. Government Accountability Office (June 2017).

³²³ Zeke J. Miller, “Read Donald Trump’s Interview With TIME on Being President,” *Time*, May 11, 2017, <https://time.com/4775040/donald-trump-time-interview-being-president/>.

³²⁴ Ben Werner, “Experts: Navy Would Spend Billions to Answer Trump’s Call to Return Carriers to Steam Catapults,” *USNI News*, May 28, 2019, <https://news.usni.org/2019/05/28/experts-navy-would-spend-billions-to-answer-trumps-call-to-return-carriers-to-steam-catapults>.

助(FMS)する可能性を承認する決定を下した。国防安全保障協力局は、この軍事援助の可能性を議会に通知するために必要な証明書を提出した³²⁵。

これらの事実を基に、次の5つの視点[(1)方式検討の時期、(2)技術的優位性・信頼性、(3)公的支出としての妥当性、(4)民間企業にとっての採算性、(5)軍事技術の国際競争]から、超電導技術がどのように捉えられ、扱われたかを考察する。

視点(1):方式検討の時期

まず、電磁カタパルトにおいて、超電導方式が、いつからいつまで検討されたのかを考察する。

前述したように、海軍は1940年代には電磁カタパルトの可能性予見し、プロトタイプを作製していたということであり、また、1988年の米国連邦議会技術調査室(OTA)の報告書において、超電導の応用例として「航空機カタパルト(aircraft catapults)」の記載があることから、1993年に海軍に空母ワーキング・グループが設立された際、超電導方式の電磁カタパルトも選択肢に入っていたものとする。

しかしながら、「超電導の電磁カタパルト」に関する記載を探しても、本研究で調べた限りでは存在しない。米国科学財団のR・A・ヘイン(R. A. Hein)と海軍調査研究所のD・U・ガブサー(D. U. Gubser)による1981年の論文には、「超電導のその他の応用として、電磁ランチャーでは、磁気浮上、また、潜在的に最も直接的なマストライバーの適用は、地球からの宇宙貨物の打ち上げである」とあり、電磁カタパルトの記載はない³²⁶。米国防総省による1987年の調査報告書には、陸軍における応用として、「電磁銃・ランチャー(Electromagnetic Guns/Launchers)」の記載がある一方、海軍、空軍、国家安全保障局における応用として、電磁ランチャーの記載はない。空軍や米国

³²⁵ “France – Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS) and Advanced Arresting Gear (AAG),” U.S. Defense Security Cooperation Agency, News Release, December 21, 2021.

³²⁶ R. A. Hein, and D. U. Gubser, “Large-Scale Applications of Superconductivity in the United States: An Overview,” *Superconductor Materials Science: Metallurgy, Fabrication, and Applications* (New York: Plenum Press, 1981): 899-938.

防総省の研究者らによる1991年の論文には、超電導の電磁ランチャーとして、レールガンの利用可能性のみが記載されている³²⁷。このように、超電導の電磁カタパルトについて、米国連邦議会技術評価室の報告書には記載があるものの、その前後の米国防総省及びその傘下機関の作成する文献には記載がないというのは、米国防総省としては秘匿しておきたいか、少なくとも表には出たくないという意図があったのではないかと推察する。

一方、いつまで検討したかであるが、海軍研究局のサポートを受けた、電磁カタパルト用リニアモーターの設計に関する2004年の論文を詳解すると、電磁カタパルト用の三つの異なるリニアモーターの設計、(1)リニア誘導モーター(LIM)、(2)リニア・永久磁石同期モーター(LPMSM)、(3)リニア・バルク超電導磁石モーター(LBSCMM)が比較評価され、その上で、「(超電導を使わない)リニア・永久磁石同期モーター(LPMSM)が最良の手段だが、(超電導を使う)リニア・バルク超電導磁石モーターは、長期的にはこの用途のための最良の候補となり得る」というものであった³²⁸。同年に海軍がゼネラル・アトミックスによって提案されたシステムにダウンセレクトし、システム設計開発契約(SDD契約)を締結したということは、ゼネラル・アトミックスの提案が、リニア-永久磁石同期モーター(LPMSM)か、あるいは、少なくとも超電導を使わない方式であったと考えられ、そして、この段階で超電導方式は使われなくなったものと考えられる。

視点(2): 技術的優位性・信頼性

次に、電磁カタパルトにおいて、超電導方式が、技術的にどのように検討されたのかを考察する。そのために、まず、電磁カタパルトが従来の蒸気カタパルトと比較してみると、表23のようなメリット/デメリットが挙げられる³²⁹。

³²⁷ C. E. Oberly, G. Kozlowski, C. E. Gooden, R. X. Lenard, A. K. Sarkar, I. Maartense, and J. C. Ho, "Principles of application of high temperature superconductors to electromagnetic launch technology," *IEEE Transactions on Magnetics* 27, no. 1 (1991): 509-14.

³²⁸ Gorazd Štumberger, Mehmet Timur Aydemir, Damir Žarko, and Thomas A. Lipo, "Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14, no. 1, (2004): 54-62, <https://doi.org/10.1109/tasc.2004.824342>.

³²⁹ Michael R. Doyle, Douglas J. Samuel, Thomas Conway, and Robert R. Klimowski, "Electromagnetic Aircraft Launch System-EMALS," *IEEE Transactions on Magnetics* 31, no. 1 (1995): 528-33; Doyle, M., G. Sulich, and L. Lebron, "The

表23 蒸気カタパルトと比較した場合の電磁カタパルトのメリット／デメリット

■ 蒸気カタパルトと比較した場合の電磁カタパルトのメリット

- ・ 省スペース： 体積で約50%削減(ピストン、シリンダー、潤滑油が不要)
- ・ 省人員： 自動で検査・メンテナンスが可能
- ・ 射出できる航空機の幅が拡大： より重い、より軽い、無人機(UAV)も
- ・ 機体へのストレス減： なめらかな加速
- ・ 出撃率(sortie rate)の増加
- ・ 蒸気が出ない： 船の腐食を遅らす

■ 蒸気カタパルトと比較した場合の電磁カタパルトのデメリット

- ・ 人員の専門性が機械から電気・電子へシフト
- ・ 電子機器に対する電磁干渉(EMI)の影響
- ・ 海風による電気系統の腐食
- ・ 過去にないものであり、開発費が高額

出所： Michael R. Doyle, Douglas J. Samuel, Thomas Conway, and Robert R. Klimowski, “Electromagnetic Aircraft Launch System-EMALS,” *IEEE Transactions on Magnetics* 31, no. 1 (1995): 528-33; M. Doyle, G. Sulich, and L. Lebron, “The Benefits of Electromagnetically Launching Aircraft,” *Naval Engineers Journal* 112, no. 3, (2000) 77-82; LCDR Stephen D. Hartman, *Electromagnetic Aircraft Launching System: Do the Benefits Outweigh the Costs?* ADA602992 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010); “EMALS AND AAG,” Brochure, General Atomics. に基づき筆者作成。

蒸気カタパルトと比較衡量されたうえで、CVN 78(Gerald R. Ford)においては、電磁カタパルトの優位性が評価され、選択されたものと推察する。

続いて、超電導方式と常電導方式の電磁カタパルトと比較してみるが、これについては先行する文献がないため推論となる。表24のようなメリット／デメリットが挙げられると考える。

Benefits of Electromagnetically Launching Aircraft,” *Naval Engineers Journal* 112, no. 3 (2000): 77-82; LCDR Stephen D. Hartman, *Electromagnetic Aircraft Launching System: Do the Benefits Outweigh the Costs?* ADA602992 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010); “EMALS AND AAG,” Brochure, General Atomics. に基づき筆者が作成。

表24 常電導電磁カタパルトと比較した場合の電磁カタパルトの
メリット／デメリット

<p>■ 常電導電磁カタパルトと比較した場合の超電導電磁カタパルトのメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高出力で、より重い機体も射出可能 ・ 抵抗ゼロのため電力ロスが減り、射出だけに限定すれば低消費電力 <p>■ 常電導電磁カタパルトと比較した場合の超電導電磁カタパルトのデメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 冷却機構が必要で、システムが複雑になる ・ 超電導状態を維持するために冷やし続ける必要がある(何らかの理由で超電導状態から常電導状態に移るとカタパルトが使えないリスクがある)
--

出所：筆者作成

仮に、常電導方式の電磁カタパルトでは艦載機の射出ができないとなれば、電磁カタパルトには超電導方式しかないということになり、超電導方式は大きなメリットになる。しかし、1980年代には西ドイツ(当時)のエムスランド実験線で常電導方式のリニアモーターカーの試験走行が行われていた³³⁰ことからわかるように、常電導方式の電磁カタパルトでもある程度の出力は可能と考えられていたはずである。常電導方式の電磁カタパルトが可能である以上は、まずは、技術方式の比較衡量を受けなければならない。超電導方式の、電力ロスが少なく、その分、出力に回せるという点はエネルギーマネジメントの観点からはメリットがあるが、冷やし続けなければならない点、特に、超電導状態が破れて常電導になったときカタパルトが使えなくなるというリスクは、カタパルト、ひいては空母の信頼性に関わる。電磁カタパルトも兵器システムであり、信頼性が極めて重要である。米国にリニアモーターカーはないものの、すでに実用化されている常電導リニアモーターと、世界でまだ実用化されていない超電導リニアモーターでは、常電導リニアモーターの技術の方が成熟していることは間違いない。

歴史的には、海軍に空母ワーキング・グループが設立された1993年は、冷戦が終結した1991年の2年後であり、当時、米国政府は国防費を大幅に削減していた³³¹。それと並行して、米国での軍事技術開発に変化が生じていた。

³³⁰ Michael Witt, and Stefan Herzberg, "TRANSRAPID - Transport Technology for the Mobility of the Future," *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH* (2003): 441-6.

³³¹ 松村昌廣「米国—急激な縮小・再編成」第1章『軍事技術覇権と日本の防衛：標準化による米国の攻勢』芦書房、2008年。

第二次世界大戦後に、原子力の平和利用やロケットの宇宙開発への応用、コンピューターなど、軍事技術のスピンのオフが進んだのに対し、1980年代には逆に、民生分野の半導体技術、材料技術などの発展の結果、先端技術のスピンのオンが重要になり、そして、冷戦終結後の1990年代以降は、ソフトウェアを含むITの進展が速く、IT分野のスピンのオンが重要になった³³²。米軍の装備品開発において、未来の技術を生み出すより、民間にいまある技術を組み込むこと重きが置かれるのであるならば、超電導方式よりは常電導方式の方が圧倒的に有利であったと推察する。

また、一般的に、技術は他の技術と組み合わせられ、技術システムとして機能する。超電導電磁カタパルトがあったとして、その超電導は、空母というシステムの中の、電磁カタパルトというサブシステムの中の一要素技術である。技術は、上位のシステムの設計者から、常に代替技術と比較衡量される。軍事技術は信頼性が極めて重要であり、特に戦場においては技術の信頼性は兵士の命に関わる。最先端の技術より確実な技術が求められる。超電導方式が選ばれなかったであろうことの理由の一つは、技術成熟度レベルが低かったこと、また、それによって信頼性が低かったことと推察する。

なお、恐らくは常電導方式であろう空母Gerald R. Fordの電磁カタパルトにあっても、失敗の多さが指摘されている³³³。この指摘を克服できるだけの改善ができなければ、将来の空母に電磁カタパルトは採用されない可能性もある。

視点(3): 公的支出としての妥当性

国家の一大プロジェクトである空母建造の、その中でも重要な要素であり、かつ過去に例のないカタパルトの仕様選定となれば、技術の比較衡量だけで事足りるとは考えられない。兵器システムも公的支出の一つであり、議会のチェックを受けることは当然で、予算超過や納入遅延には厳しい目が向けられ

³³² 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』第88巻第6号、2018年、647頁。

³³³ *Ford-Class Aircraft Carrier: Follow-On Ships Need More Frequent and Accurate Cost Estimates to Avoid Pitfalls of Lead Ship*, GAO-17-575, U.S. Government Accountability Office (June 2017).

る。もちろん、すべての公的な研究開発が成功するわけではないが、国家の一大プロジェクトである空母建造で、その一部にでも失敗があったとなると、海軍、米国防総省、ひいては大統領の責任問題になりかねない。超電導方式となれば、常電導方式より開発の費用も時間もかかる蓋然性が高い。結果的に、海軍の空母全体の開発・調達予算が上がっていったことから、電磁カタパルトの開発費の、ある程度の増加は想定されていたのではないかと推察されるが、遅れるわけにはいかない、失敗するわけにはいかないという圧力が、政治的な要因となり、過去に例のない初めての挑戦には抑制的にはたらくのではなかろうか。これが、超電導方式が選ばれなかったであろうことの、もう一つの理由であると推察する。

視点(4)：民間企業にとっての採算性

電磁カタパルトを開発したのは、前述したように、海軍と契約した民間企業のゼネラル・アトミックスである。民間企業が開発・納入する以上、兵器システムも商品であり、その採算性は企業の存続にかかわり、重要である。現品の採算性に加え、継続受注や外国政府からの受注、何らかの民生利用(スピン・アウト)が見込める必要もある。仮に、超電導方式となれば、常電導方式よりコストがかかり、利益率が下がる蓋然性が高い。また、コストが上がれば追加受注や民生利用が低下する蓋然性が高い。また、請け負う企業を全社的に見て、民生部門で利益を十分に上げられるのであれば、軍事部門で利益が少なくてもまだよいが、それができなければ、軍事部門で着実に利益を上げなければならないし、軍事予算だけで企業を支えなければならないことも起こり得る。請け負う企業の経営の立場からは、採算が取れなければならないという圧力が、超電導方式が選ばれなかったであろうことの、もう一つの理由であると推察する。

現実として、電磁カタパルトの民生利用(スピン・アウト)は期待されるものではなく、外国政府への軍事援助(FMS)は、ゼネラル・アトミックスにとって重要な収入になると推察する。英国政府への軍事援助(FMS)は、のちに英国政府が、艦載機を当初の計画であった短距離離陸・垂直着陸機(STOVL)

のF-35Bに戻すこととしたために、クイーン・エリザベス級空母への電磁カタパルトの採用は中止³³⁴となり、ゼネラル・アトミックスの経営に影響を与えたと推察する。残る、フランス政府への軍事援助(FMS)が履行されるかどうかは、ゼネラル・アトミックスの経営だけでなく、電磁カタパルトの将来にも大きくかわると考える。

電磁カタパルトがビジネスとして見合うものであってはじめて、民間企業が開発しようとする誘因となる。ゼネラル・アトミックスの関連会社であるゼネラル・アトミックス・エアロノーティカルは、ドローンのメーカーでもあり、また、加速条件を調整できる電磁カタパルトはドローンとの相性が良く、仮に今後、ドローンと電磁カタパルトがセットになって軍事的需要が高まるとすれば、ゼネラル・アトミックスがリスクをとって超電導方式の電磁カタパルトを開発することも可能であろう。

視点(5): 軍事技術の国際競争

米国防総省が超電導の研究開発をはじめたのが第二次世界大戦終結直後の1946年であり、また、1957年のスプートニク・ショックを受けて1958年に設立された高等研究計画局(ARPA、現在の国防高等研究計画局(DARPA))がソ連における超電導の研究開発を注視していたことから、超電導開発は核開発と並ぶ開発競争の対象であり、開発の手を緩めればソ連に先行されるリスクがあったと考える。1991年に冷戦は終結するが、2005年に発覚した、中国のエージェントにより米国海軍の武器技術に関するデータが中国に渡っていたという事実は、技術には盗まれるリスク、拡散するリスクがあることを示している³³⁵。超電導方式の電磁カタパルトに関する情報も中国にわたっている可能性もある。技術、特に軍事技術については、常に国際競争にさらされており、また、常に流出のリスクがあると言っても過言ではない。

³³⁴ Nick Hopkins, and Richard Norton-Taylor. "Government forced into U-turn on Royal Navy fighter jets," *The Guardian*, May 10, 2012; *Carrier Strike: The 2012 reversion decision*, Report by the Comptroller and Auditor General, HC 63, SESSION 2013-14, National Audit Office, UK, May 10, 2013.

³³⁵ "Chinese Agent Sentenced to Over 24 Years in Prison for Exporting United States Defense Articles to China," U.S. Department of Justice, for Immediate Release, March 24, 2008. https://www.justice.gov/archive/opa/pr/2008/March/08_nsd_229.html.

しかし、そうであるとする、軍事技術の研究開発は、常に、しかも全方位で行わなければならないということになるが、公的支出および採算性として考察したことからすると、それは現実的には不可能である。競争相手が先行している、あるいは先行しそうな軍事技術については、一般的には先行されないように自国でも開発をするであろうが、本当にそれが必要なのかという検証、また、それを含めて、どの軍事技術にどれだけの資源を投入するか、さらには、それを同盟国といかに分担するかということが多面的に検討し、実行する必要があると考える。電磁カタパルトの方式選定の際、他国において超電導方式の電磁カタパルトが当面実現するような状況ではないという見立てがあって、超電導方式が選ばれなかったということも考え得る。

以上のことから、電磁カタパルトへの超電導技術の利用については、技術的な観点、政治的な観点、経済的な観点、国際的な観点で検討がなされ、結果として実現しなかったものと考えられる。

では、超電導電磁カタパルトはこれからさき、軍事的に利用されることはあるのだろうか。ここで、第4章で考察した軍事技術の条件を、超電導電磁カタパルトに当てはめてみる。

明確な軍事的ニーズについては、空母Gerald R. Fordに電磁カタパルトが搭載されたことから、電磁カタパルトのニーズはあったと言える。しかし、電磁カタパルトに超電導方式のニーズがあるかどうかに関しては、空母Gerald R. Fordの電磁カタパルトでは実現できていない軍事的なニーズと、それを満たすことのできる可能性のある技術がどれだけあるかという情報がない現時点においては不明である。

技術システムについては、超電導電磁カタパルトは、少なくとも、超電導電磁石というコアシステムに、それを冷却する冷却システムと、超電導電流を流すための電源・送電システムを含む技術システムである。常電導電磁カタパルトと比べると、冷却システムが加わる分、複雑なものになる。

研究開発の期間については、超電導電磁カタパルトの研究開発がいつから行われていたのか、あるいは、現在もおこなわれているのかという情報がない現時点においては不明である。

研究開発協力企業については、情報がなく不明である。

競争相手については、現在、電磁カタパルトを搭載した空母は、米国の Gerald R. Ford と中国の福建 (Fújiàn)³³⁶ だけである。空母福建の電磁カタパルトが超電導方式であるという報道はない。また、同空母は原子力ではなく通常動力であると推察するが、冷却システムに常時、電力を供給する必要のある超電導電磁カタパルトは通常動力空母には向かないと考えられる。これらのことから、空母福建の電磁カタパルトは常電導電磁カタパルトであると考えられる。そのため、中国は超電導電磁カタパルトの明確な競争相手とは言えないが、電磁カタパルトの搭載にまで至っていることから、潜在的な競争相手とは言えると考えられる。

調達への移行については、空母 Gerald R. Ford の電磁カタパルトが常電導電磁カタパルトであるとする、超電導電磁カタパルトは、調達には至っていない。

科学的原理については、超電導を説明するBCS理論によると、臨界温度（超電導状態に変わる温度）の限界は30ケルビン（30 K、およそ-243℃）程度と推定され、これは「BCSの壁」とよばれたが、酸化物高温超電導体は、その壁を越えている。では、高温超電導体の臨界温度はどこまで上がるのか。どうすればその臨界温度を実現できるのか。それを裏付ける理論は、現時点ではまだ知られていない。

代替技術については、常電導電磁カタパルトがある現状では、超電導電磁カタパルトでなければ実現できない何かがない限り、常電導電磁カタパルトが代替技術であり続けると考える。

倫理的な争点については、艦載機を発進させるための方式の一つであり、倫理的な争点はないと考える。

欠点については、臨界温度、臨界電流、臨界磁界のいずれかであれば超えると、超電導体は超電導相から常電導相に転移し、超電導相で実現していた性能は出なくなる。電磁カタパルトで言えば、艦載機の射出ができなくなる。これは明らかに超電導電磁カタパルトの欠点である。この欠点が許容し得る

³³⁶ “China launches third aircraft carrier,” *Xinhua*, June 17, 2022.

ものとは想像し難い。

軍事行動における使用形態については、超電導電磁カタパルトは、空母というシステムのサブシステムあり、「防衛装備品用技術システム」と言える。

研究開発段階における機密性については、現在、超電導電磁カタパルトの研究開発が行われているかどうか、公開資料からは分からない。仮に行われているとしても、「完全秘密型RDT&E(Completely Secret-typed RDT&E)」であるとする。

民生利用の度合いについては、超電導電磁カタパルトの技術は、広くとらえれば超電導リニアモーターである。日本ではリニア鉄道の開発がすすめられているところであり、超電導リニアモーターは軍事用途にも民生用途にも使える両用技術、デュアルユースと言える。しかし、リニア鉄道以外に注目されている用途は、本研究で調べた限りでは存在せず、リニア鉄道も数量の出るビジネスとはいいがたい。超電導電磁カタパルトは、事実上、軍事利用だけの「シングルユース」技術と言える。

以上のことをまとめると、仮に現在、超電導電磁カタパルトの研究開発を行っているとする、それは、軍事的なニーズはあり、かつ倫理的な争点はないという好適な条件にあるものの、代替技術が存在する中、許容しがたい欠点をかかえ、また、民生利用の度合いの低いものを、科学的原理がよくわからないまま、機密性高く行っているという状況が浮かび上がる。

第3節 実用化された超電導技術(超電導電磁石、SQUID)との違い

なぜ、超電導は軍事的に実用化されにくいのか。さらに言えば、軍事的でなく民生分野であっても、超電導はあまり実用化されていない。特に高温超電導体がそうである。医療用の核磁気共鳴イメージング(MRI)装置など高磁界を発生させる超電導電磁石は、いまだ低温超電導が主流である。超電導量子干渉計(SQUID)も、資源開発で地中の計測をするなどヘリウムを使えない状況では高温超電導体のSQUIDが使用されることもある³³⁷ようである。

³³⁷ 田邊圭一「脱炭素に貢献する高温超伝導 SQUID 磁気センサ 野外で自在に使える超高感度磁気センサ技術として成熟した高温超伝導 SQUID は GX にも貢献」応用物理学会 特別 WEB コラム GX: グリーントランスフォーメ

るが、やはり低温超電導が主流である。その背景としては、まず、高温超電導が科学的にまだよくわかっておらず、どうすれば転移温度を上げることができるか、どうすれば臨界電流を上げることができるかといった理論的な示唆がなされないまま実験を繰り返すしかないということがある。また、硬くて曲げにくく、折れやすいといった高温超電導体の物性もある。さらに、低温超電導のSQUIDの感度が、高温超電導のSQUIDよりも高く、感度を求めるのであれば液体ヘリウムのコストを払ってでも低温超電導のSQUIDを使用した方が良いということもある。高温超電導は、まだ足りないものがあり、そして、それが充足されるかは、確実にはわからないということである。さらに言えば、例えばリアモーターのように、超電導でなくても、常電導でこと足りるというものについては、高温超電導に限らず、超電導技術が入り込むことは難しそうである。

現在、超電導の研究開発には、大きく分けて、高出力発電機や高出力モーター」といった、いわば「動力系」と、量子センサーや量子デバイス、量子コンピューターといった、いわば「デバイス系」の二つの流れがある。そして、それぞれに技術的課題がある。「動力系」には、まず、熱の問題がある。発電機にしてもモーターにしても、動くものには摩擦熱が避けられないが、超電導状態を維持するためには、その熱を超電導体に伝えてはいけない。また、パワーの制御の問題がある。急激なパワーの変更は、超電導体に電氣的・磁氣的な負荷をかけ、超電導状態を維持できなくなるリスクがあるため避けなくてはならない。

一方、「デバイス系」にも、まず、熱の問題がある。超電導状態を維持するために冷却が必要であるが、たとえば、量子コンピューターを将来的に大規模化しようとしたときには、大規模な量子回路を極低温に冷やすための冷凍機と、室温部との大量の電気通信においても熱を流入させないようにしなければならない。どちらも根底には、極低温でしか現れない繊細な超電導の科学的特性によると言える。

「動力系」には、別の課題もある。超電導発電機は大きな電力を発生させるが、そのためのエネルギーは外部から投入する必要がある。超電導は、あく

までエネルギーの変換効率が良いのであって、エネルギーを生み出すものではない。結局は、一次エネルギーとして化石燃料なり核物質なりが必要となる。最近、SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) の観点から、航空機の電動化の研究開発が進められている。エアバス社によると、超電導モーターで推進力を得、そのためのエネルギーは、液体水素を燃料とし、燃焼させるか燃料電池により発電するという³³⁸。たとえ動力を失っても海に浮かんでいられる船舶とは異なり、液体水素を燃料とし、超電導モーターで空を飛ぶ航空機は、技術面もさることながら、どのような安全基準が必要か、法規制の面からも興味があるが、それは今後の研究課題としたい。

第4節 軍事利用された技術との比較

第2節では、第3章で考察した軍事技術の条件を、超電導電磁カタパルトに当てはめてみてみたが、ここでは、範囲を広げて、超電導技術に当てはめてみる。

明確な軍事的ニーズについては、第2章第2節で取り上げた、米国防総省が1987年7月にとりまとめた調査報告書 *Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) Options: A Study of Possible Directions for Exploitation of Super-conductivity in Military Applications* では、想定される限りの用途が列挙されていた。総花的ではあったと言えるが、具体的であったとは言い難い。

技術システムについては、電磁石にしても量子デバイスにしても、超電導だけでは使えるものではなく、超電導は技術システムの構成要素である。しかし、第1節で示したように、代替技術の方が実現していることが多いようである。その背景としては、技術システムとして、トレードオフの関係にある他の技術とすり合わせをしなければならないにもかかわらず、超電導状態を維持するために臨界温度以下、臨界電流以下、臨界磁界以下を徹底しなければならない

³³⁸ “Cryogenics and superconductivity for aircraft, explained: ASCEND aims for a breakthrough in electric propulsion for aircraft,” Airbus, March 29, 2021, <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-cryogenics-and-superconductivity-for-aircraft-explained>.

いという繊細過ぎる特性が、そのすり合わせの制約となっているということが考えられる。

研究開発の期間については、低温超電導に関しては長いと言えるが、高温超電導に関しては、発見されてすぐにブームになったため、ブームの際には、ほとんど期間がなかったと言える。しかし、高温超電導発見から35年以上経った現在では、高温超電導に関しても長期間と言えよう。

研究開発協力企業については、第2章でみたように、軍が研究開発を委託する企業は多数、存在した。しかし、「ステルス」で見たような、自社で持ち出しをしてまで超電導にかける企業があったかは情報がなく不明である。

明確な競争相手については、軍事的な観点からはソ連と、経済的な観点からは日本と競争していたと言えるが、冷戦の終結と日本の失速で、1990年代初頭には一人勝ちになっていた。現在は、中国が、潜在的な競争相手にはなっていると言えよう。

調達への移行について、2006年1月、アメリカン・スーパーコンダクター社が、第2世代(2G)高温超電導体(HTS)線材の製造規模の拡大を加速するため、米国防総省(DOD)タイトルIIIプログラムから535万ドルの後続契約を獲得したと発表したのとほぼ同時期に、同社が、海軍の将来のDD(X)艦に合わせた36.5メガワットの高温超電導(HTS)モーターを設計・開発する契約の最終変更をしたことを発表した³³⁹。国防生産法に基づくタイトルIIIプログラムで高温超電導線の製造能力を強化しようとした背景は、この艦艇用モーターへの安定的な大量供給という計画があったものと考えられる。しかし、DD(X)、のちのズムウォルト級駆逐艦(Zumwalt-class destroyer: DDG 1000)には、高温超電導モーターが使われているという情報は、本研究で調べた限りでは存在しない。

一方で、調達に至ったものもある。AMSCは、2018年11月28日、サン・アントニオ級強襲揚陸艦(San Antonio Class Amphibious Assault Ship)LPD 30の磁気特性を低減して機雷から守る、高温超電導体ベースの消磁システム

³³⁹ “American Superconductor designs electric motor for DD(X) warship,” *Military Aerospace Electronics*, January 10, 2006, <https://www.militaryaerospace.com/home/article/16722397/american-superconductor-designs-electric-motor-for-ddx-warship>.

(degaussing system)のための長期リード資材契約を、軍用造船会社であるハンティントン・インガルス・インダストリーズ社 (Huntington Ingalls Industries Inc.: HII)と締結したと発表した。同発表によると、高温超電導による消磁システムは、従来の常電導のものと比べて重量を90%、エネルギー消費量を半分以上削減できるという³⁴⁰。その後、AMSCの高温超電導消磁システムは、LPD 28(フォート・ローダーデール: USS Fort Lauderdale)³⁴¹、LPD 30(ハリスバーグ: USS Harrisburg)³⁴²、LPD 31(ピッツバーグ: USS Pittsburgh)³⁴³、LPD 29(リチャード・M・マクール・ジュニア: USS Richard M. McCool Jr.)³⁴⁴、LPD 32(艦名未定)³⁴⁵に供給されることとなった。このうち、フォート・ローダーデール(LPD 28)が2022年7月30日、就役している³⁴⁶。米国防総省はこれまで、超電導の研究開発に相当の資金を投入しているが、調達にまで至っていると明確に言えるものは、この事例のみであった。

科学的原理については、超電導電磁カタパルトで考察したことと重なる。超電導を説明するBCS理論によると、臨界温度(T_c)の限界は30ケルビン(30 K、およそ-243℃)程度と推定され、これは「BCSの壁」とよばれたが、酸化物高温超電導体は、その壁を越えている。では、高温超電導体の臨界温度はどこまで上がるのか。どうすればその臨界温度を実現できるのか。それを裏付ける理論は、現時点ではまだ知られていない。

代替技術については、使用条件を緩和すれば、低温超電導は高温超電導の代替技術であり、また、高磁界の発生と超精密な磁界計測を除けば、超電導の代替技術は存在する。

倫理的な争点については、超電導の用途として、「動力系」と「デバイス系」

³⁴⁰ “AMSC Awarded Long Lead Contract for Ship Protection System on LPD 30,” AMSC, November 28, 2018, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-long-lead-contract-ship-protection-system-lpd-30>.

³⁴¹ “AMSC Awarded Delivery Contract for Ship Protection System on LPD 28,” AMSC, January 30, 2019, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-delivery-contract-ship-protection-system-lpd-28>.

³⁴² “AMSC Awarded Delivery Contract for Ship Protection System on LPD 30,” AMSC, May 13, 2019, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-delivery-contract-ship-protection-system-lpd-30>.

³⁴³ “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD 31,” AMSC, July 14, 2020, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-31>.

³⁴⁴ “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD-29,” AMSC, January 25, 2021, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-29>.

³⁴⁵ “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD-32,” AMSC, December 6, 2022, <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-32>.

³⁴⁶ “Navy to Commission Amphibious Transport Dock Ship Fort Lauderdale,” U.S. Navy, 29 July 2022, <https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/3109963/navy-to-commission-amphibious-transport-dock-ship-fort-lauderdale/>.

に大きく分けて考えてみるに、どちらにしても、特にないと言えよう。

欠点については、臨界温度、臨界電流、臨界磁界のいずれかであれば超えると、超電導体は超電導相から常電導相に転移し、超電導相で実現していた性能は出なくなる。これが欠点だとすると、どのようなものであればそれを許容し得るのか、想像もつかない。

軍事行動における使用形態については、いまのところは防衛基盤用技術システムに使用されると言えようが、将来、超電導電磁カタパルトや超電導レールガンなどが出てきたときには、防衛装備品用技術システムに使用されることもあろう。

研究開発段階における機密性については、「草創期」には比較的オープンであったが、「超電導ブーム期」以降は機密性が高まったと考えられる。

民生利用の度合いについては、医療用の核磁気共鳴イメージング(MRI)装置や科学研究用の核磁気共鳴(NMR)装置に用いられる超電導電磁石、または、微弱な磁界を検出するための超電導量子干渉計(SQUID)は民生利用されているが、冷却を必要としていることから、多用されているとは言えない。

以上のことをまとめると、超電導電磁カタパルトで考察したことと重なるが、超電導技術は、軍事的なニーズはあり、かつ倫理的な争点はないという好適な条件にあるものの、代替技術が存在する中、許容しがたい欠点をかかえ、また、民生利用の度合いの低いものを、科学的原理がよくわからないまま、機密性高く行っているという状況が浮かび上がる。

本章のおわりに

超電導技術の軍事利用について、過去の研究開発の計画の進捗と成果を俯瞰するとともに、軍事利用された技術と比較し、その違いを分析して論じた。小規模なアプリケーションについては、競合技術、特に半導体技術の飛躍的な進歩により、超電導の必要性が低下している可能性がある。一方、大規模なアプリケーションについては、両用技術(デュアルユース)として、民生利用されているものもあり、また、軍事用途として研究開発が継続しているも

のもある。超電導技術の利用が検討されていた電磁カタパルトを事例として、その検討の過程を追ってみたが、超電導技術の採用には困難があったと推察する。

実用化されている超電導技術である超電導電磁石と超電導量子干渉計 (SQUID) では低温超電導体が用いられており、高温超電導体による代替はほとんど見られない。超電導技術は、軍事的なニーズはあり、かつ倫理的な争点はないという好適な条件にあるものの、代替技術が存在する中、許容しがたい欠点をかかえ、また、民生利用の度合いの低いものを、科学的原理がよくわからないまま、機密性高く行っているという状況が浮かび上がった。

第6章 新興技術の遷移—超電導から量子情報科学へ—

本章のはじめに

これまで、超電導に焦点を当て、かつての新興技術の軍事利用について考察をしてきたところであるが、これを現在の新興技術の軍事利用の可能性を論じることに用いることはできないか、試行してみることにする。まず、現在の新興技術として何を選ぶかであるが、本稿は米国防総省における超電導技術の研究、開発、試験及び評価を考察しているものであることから、現在の新興技術についても、米国の認識に依拠することとする。

現大統領のジョー・バイデン(Joe Biden)が大統領に就任した2021年の8月27日、アメリカ合衆国大統領行政府(Executive Office of the President: EOP)から、「2023年度予算のための複数機関の研究開発の優先事項(Multi-Agency Research and Development Priorities for the FY 2023 Budget)」と題された覚書(Memorandum)が作成された³⁴⁷。その中で、人工知能(AI)が1番目、量子情報科学(QIS)が2番目に、それぞれ挙げられ、また、最後に個別の言及がなされているということから、特にその重要性が認識されているものとする。なお、これらは第4章で定義した「防衛基盤型技術」に当たると考える。

また、2022年に米国防総省が作成した、国家防衛戦略2022(National Defense Strategy 2022)³⁴⁸では、指向性エネルギーが1番目、極超音速が2番目に、それぞれ挙げられていることから、特にその重要性が認識されているものとする。なお、指向性エネルギーと極超音速は、第4章で定義した「防衛装備品型技術」に当たると考える。

これらの内、第6節で詳解するが、量子情報科学については超電導との関連が深いことから、量子情報科学を取り上げる。

³⁴⁷ Shalanda D. Young, and Eric S. Lander, “Multi-Agency Research and Development Priorities for the FY 2023 Budget,” Memorandum for the Heads of Executive Departments and Agencies, Executive Office of the President, Washington, DC (2021).

³⁴⁸ 2022 National Defense Strategy of the United States of America, U.S. Department of Defense (2022).

第1節 量子情報科学とは

量子情報科学(Quantum Information Science: QIS)の軍事利用を考える前に、まず、量子情報科学がどのようなものであるかを概観する。米国では2018年に「国家量子イニシアチブ(National Quantum Initiative: NQI)」が作成され、同年、「国家量子イニシアチブ法(National Quantum Initiative Act)」が成立している。

ホワイトハウス科学技術政策局(Office of Science and Technology Policy: OSTP)の下に「国家量子調整局(National Quantum Coordination Office: NQCO)」を設けており、そのウェブサイトの詳細な説明がある。

1 概要

量子を基盤とするテクノロジーは、「すでに社会とアメリカ経済を変えて」いる。その例としては、「ナビゲーション用の全地球測位システム(GPS)」、「医用画像用の磁気共鳴画像法(MRI)」、「コンピューターチップ用の半導体」、「電気通信用のレーザー」などがある。量子情報科学は、コンピューティング、ネットワーク、センシングへの新しく、より強力なアプローチにより、テクノロジーのさらなる革命を約束している。国家量子イニシアチブは、「量子情報科学とその技術応用における米国の継続的なリーダーシップを確保するための政府全体のアプローチ」である³⁴⁹。

量子情報科学は、量子物理学(微視的レベルでの世界の説明)が情報科学(コンピューターのような実際のシステムが情報を処理する方法)にどのように影響するかについてのより深い考察から生まれる。量子情報技術は、新しい速度、精度、または機能を可能にする新しいタイプのコンピューター、センサー、およびネットワークを設計するため、これらの基本的な量子特性を利用する。「1980年代以降の量子情報科学の主要な科学的発見」、「1990年代

³⁴⁹ “About the National Quantum Initiative.” The National Quantum Coordination Office (NQCO), accessed July 9, 2023, <https://www.quantum.gov/about/>.

からの先駆的な実験」、「2000年代からの量子工学」、そして「今日の商業活動」に基づいて、世界は「第2の量子革命」の最前線にある。量子情報科学によって促進されるイノベーションの見通しは、「米国の経済的繁栄と国家安全保障」に影響を及ぼし、「米国における量子情報科学の活動を調整するための政府全体および国家全体のアプローチ」を動機付けている³⁵⁰。

2 法制

【概要】

国家量子イニシアチブは、2018年に国家量子イニシアチブ法によって設立された。そして、同法律は、2022年度の国防権限法（National Defense Authorization Act: NDAA）、および、2022年のCHIPSおよび科学法（CHIPS and Science Act）によって改正された。

さらに、2019年度、2020年度、2022年度の国防権限法、および2022年のCHIPSおよび科学法にはすべて、2018年の国家量子イニシアチブ法を改正しなかった量子情報科学関連の法律が含まれている。

国家量子イニシアチブ法は、国立標準技術研究所（NIST）、国立科学財団（NSF）、およびエネルギー省（DOE）の研究活動のみを承認しているが、国家量子イニシアチブは、これら三つの機関を超えて拡張された政府全体のアプローチである。大統領令14073は、国家量子イニシアチブが「国家科学技術評議会（NSTC）の量子情報科学小委員会（SCQIS）または量子科学の経済と安全保障への影響に関するNSTC小委員会（ESIX）のいずれかのメンバーである行政省庁によって追求される量子情報科学の研究、開発、実証、およびトレーニング活動に代表されるように、連邦政府全体からの貢献を網羅している」ことを明確にしている³⁵¹。

【国家量子イニシアチブ法】

国家量子イニシアチブ法は、「米国の経済的および国家安全保障のため

³⁵⁰ “About the National Quantum Initiative.”

³⁵¹ “About the National Quantum Initiative.”

の量子研究開発を加速する」ために2018年12月21日にトランプ大統領によって法制化された。国家量子イニシアチブ法は、国立標準技術研究所、国立科学財団、およびエネルギー省に、QISプログラム、センター、およびコンソーシアムを強化する権限を与えている。また、民間、防衛、諜報部門を含む米国政府全体の量子情報科学の研究開発の取り組みへの協調的なアプローチを求めている。

これらの行動を導くために、国家量子イニシアチブ法は、国家科学技術評議会(NSTC)の量子情報科学小委員会(SCQIS)、量子科学の経済と安全保障への影響に関するNSTC小委員会(ESIX)、国家量子調整局(NQCO)、および国家量子イニシアチブ諮問委員会(NQIAC)に対するいくつかの責任を立法化している。

量子情報科学の技術には商業的および防衛的用途があることを認識し、量子情報科学の研究開発の追加認可は国防権限法によって立法化されている。民間、防衛、諜報機関はすべて、量子情報科学への投資の長い歴史があり、将来の量子情報科学の発見と技術開発に利害関係がある。国家量子イニシアチブは現在、米国の省庁、民間セクターの産業界、および学界にわたる量子情報科学の研究開発活動を強化および調整するための包括的なフレームワークを提供している³⁵²。

【量子情報科学のための国防権限法と防衛法制】

2019年度の国防権限法と2020年度の国防権限法は、量子情報科学技術の研究開発を実施および支援するために米国防総省を法制化している。国防権限法は、米国防総省に対し、米国で開発中の量子情報科学技術の技術準備レベルを高め、量子情報科学技術の労働力の育成を支援し、量子情報科学技術の認識を高めることを承認している。また、国家量子調整局、量子情報科学賞委員会、およびその他の適切な連邦機関および民間部門の事業体との協議を含め、米国防総省内のすべての量子情報科学技術の研究開発を調整する権限を与えている。さらに、2020年度の国防権限法は、量

³⁵² “About the National Quantum Initiative.”

子情報科学研究センターの設立を承認する。2022年度の国防権限法は、国家量子イニシアチブ法を改正し、量子科学の経済と安全保障への影響に関するNSTC小委員会を含める改正をした³⁵³。

【2022年のCHIPSおよび科学法】

2022年のCHIPSおよび科学法は、量子ネットワーク・インフラストラクチャの研究開発、量子ネットワークと通信の標準の開発、競争を促進するためのプログラムの創設、米国を拠点とする量子コンピューティング資源に研究目的でアクセスするためのメリット・レビューをされた基本プロセス、およびすべての教育レベルでの科学・技術・工学・数学（STEM）カリキュラムへの量子情報科学・工学の統合を承認するために、国家量子イニシアチブ法を改正した。また、既存の連邦奨学金プログラムだけではなく、新しい国立科学財団技術・イノベーション・パートナーシップ総局にも量子情報科学が明示的に含まれている³⁵⁴。

第2節 量子技術の軍事応用

以上のように、国家量子イニシアチブは、省庁横断的な取り組みであり、防衛との関連性が深い。では、量子情報科学は、具体的にどのような軍事的な利用が考えられるのであろうか。米国議会調査局（Congressional Research Service: CRS）が作成した「Defense Primer: Quantum Technology」（2022年11月15日更新版）³⁵⁵には、量子技術の軍事応用として、「量子センシング」、「量子コンピューター」、「量子通信」が最も有力であるとし、次のように報告している。

米国防総省の科学諮問委員会である国防科学委員会（Defense Science Board: DSB）は、量子技術の三つのアプリケーション、量子センシング、量子コンピューター、量子通信が米国防総省にとって最も有望であると結論付け

³⁵³ “About the National Quantum Initiative.”

³⁵⁴ “About the National Quantum Initiative.”

³⁵⁵ Kelley M. Sayler, *Defense Primer: Quantum Technology*, Congressional Research Service, November 15, 2022.

た。国防科学委員会は、観測可能な航空機やステルス性の低い航空機を含む物体の性能特性（レーダー断面積、速度など）を識別できると仮定された量子レーダーは、「米国防総省にアップグレードされた機能を提供しない」と結論付けた³⁵⁶。

【量子センシング】

量子センシングは、センサー内における量子物理学の原理を利用する。国防科学委員会によると、これは量子技術の最も成熟した軍事的応用であり、現在「ミッションでの使用の準備ができています」。量子センシングは、多くの強化された軍事能力を提供する可能性がある。たとえば、理論的には、GPSが劣化した環境やGPSが拒否された環境で軍隊が完全なパフォーマンスで運用し続けることを可能にする代替の測位、ナビゲーション、およびタイミングの選択肢を提供し得る³⁵⁷。

さらに、量子センサーは、情報収集・警戒監視・偵察（intelligence, surveillance, and reconnaissance: ISR）の役割で使用される可能性がある。このようなセンサーの開発と配備が成功すると、潜水艦の検出が大幅に改善され、海上核抑止力の存続可能性が損なわれる可能性がある。量子センサーはまた、その期待される「環境擾乱に対する極端な感度」により兵士が地下構造物や核物質を検出することを可能にする可能性がある。量子センサーの感度は、同様に、軍隊が電磁放射を検出できるようにし、電子戦能力を強化し、隠された敵軍の位置を特定するのに役立つ可能性がある³⁵⁸。

【量子コンピューター】

全米科学アカデミー（National Academy of Sciences: NAS）によると、「量子コンピューターは、今日のコンピューターよりも指数関数的な高速化を提供できる唯一の既知のコンピューティングモデルである」。量子コンピューターは開発の比較的初期段階にあるが、進歩（その多くは商業部門によって推

³⁵⁶ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

³⁵⁷ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

³⁵⁸ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

進されている)は、人工知能(AI)、暗号化、およびその他の分野の将来に影響を与える可能性がある³⁵⁹。

たとえば、一部のアナリストは、量子コンピューターが人工知能の一分野である機械学習の進歩を可能にする可能性があることを示唆している。このような進歩は、パターン認識と機械ベースのターゲット識別の改善に拍車をかける可能性がある。これにより、より正確な自律型致死兵器システム(LAWS)、または手動の人間による制御や遠隔操作を必要とせずにターゲットを選択して交戦できる兵器の開発が可能になる。人工知能対応の量子コンピューターは、量子センサーと組み合わせて、軍隊の情報収集・警戒監視・偵察への応用をさらに強化できる可能性がある³⁶⁰。

さらに、量子コンピューターは、暗号化されたメディアに保存されている機密情報または管理された未機密情報を復号化する可能性があり、敵に米軍または諜報活動に関する機密情報へのアクセスを許しかねない。一部のアナリストは、現在の暗号化方式を破るには、量子コンピューティングの大幅な進歩が必要になる可能性が高いと指摘している。彼らの推定では、現在の暗号化方式を破るには、約2000万量子ビットの量子コンピューターが必要になることが示唆されている。しかし、今日の最先端の量子コンピューターは、一般に433量子ビット以下である³⁶¹。

量子コンピューターの実用化は、誤り率の向上と新しい量子アルゴリズム、ソフトウェアツール、ハードウェアの開発によってのみ実現される可能性が高い。全米科学アカデミーが指摘しているように、「(これらの技術的課題が)克服されるという保証はない」が、一部のアナリストは、現在の暗号化方式を破ることができる最初の量子コンピューターのプロトタイプが2030年から2040年の間に開発される可能性があると考えている。このため、全米科学アカデミーは「ポスト量子暗号の開発、標準化、展開は、潜在的なセキュリティとプライバシーの災害の可能性を最小限に抑えるために重要である」と結論付けている。

³⁵⁹ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

³⁶⁰ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

³⁶¹ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

2022年5月、バイデン政権は、脆弱な暗号化システムへのリスクを軽減しながら量子コンピューティングにおける米国のリーダーシップを促進することに関する国家安全保障覚書(NSM-10)を発表した。それは、「米国が脆弱なコンピューターシステムを量子耐性暗号に移行する複数年にわたるプロセスを開始する際に、政府機関が取るべき特定の行動を指示する」ものであった。同覚書(NSM-10)では、国立標準技術研究所の所長と国家安全保障局(NSA)の局長が量子耐性暗号の技術標準を開発しており、2024年までに公開する予定であると述べられている。2022年9月、国家安全保障局はサイバー・セキュリティ・アドバイザリーを発行し、「NSM-10に沿って、(国家安全保障システムの量子耐性)アルゴリズムへの移行が2035年までに完了することを期待している」と述べている³⁶²。

【量子通信】

量子通信は、後述する量子鍵配送(Quantum Key Distribution: QKD)を除き、開発の初期段階にある。量子通信は、理論的には、軍事用量子センサー、コンピューター、およびその他のシステムの安全なネットワークを可能にし、単一の量子システムまたは従来の通信ネットワークよりもパフォーマンスを向上させることができる。ネットワークは、そのようなシステムの堅牢性をさらに強化し、したがって、それらが展開される可能性のある環境を拡大する可能性がある。これにより、量子通信の軍事的有用性が大幅に拡大する可能性がある³⁶³。

量子鍵配送は、量子物理学の原理を用いて情報を暗号化し、従来のネットワークを介して送信される量子通信の一部である。量子鍵配送は、送信中に密かに傍受することはできない安全な通信を可能にする。(ただし、QKD通信は、現在、長距離伝送に必要な中継局で傍受することができる。)伝えられるところによると、中国はQKDに多額の投資を行っており、2016年に約1,250マイルの北京～上海量子ネットワークの建設を完了した。それにもかかわらず、国防科学委員会は、「QKDは、米国防総省のミッション用に配備するのに十

³⁶² Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

³⁶³ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

分な能力またはセキュリティを備えて実装されていない」と結論付けた³⁶⁴。

第3節 量子技術の市場性

以上のことを時間軸の観点で見ていくと、「量子センシング」は、比較的早い時期、あえて言えば、数年のオーダーで、軍事的に利用できる可能性がある。「量子コンピューティング」は、現在の暗号化方式を破ることができる最初の量子コンピューターのプロトタイプが2030年から2040年の間に開発される可能性があるということで、あえて言えば、10数年のオーダーで、軍事的に利用できる可能性がある。そして、「量子通信」は、量子鍵配送という一部については比較的早い可能性もあるが、全体としては長期、あえて言えば、数十年のオーダーで、軍事的に利用できる可能性がある。

【量子センサー】

防衛装備品も防衛基盤も、それを提供できる民間セクターがあってはじめて成り立つ。「調達があっても数十年先で、それまでは、研究開発費が得られる可能性はある」という状況は、端的に言って長くはないであろうか。そこで、民間セクターは量子技術をどのように捉えているかを見てみる。まずは、「量子センシング」を見てみる。「量子センシング」の対象は主に、光子(フォトン)と、原子の量子化された角運動量である。「量子センシング」においては量子センサーを使用する。さまざまな量子センサーが考案され、研究開発が行われているが、超電導量子干渉計(superconducting quantum interference device: SQUID)も量子センサーの一つであり、本論文で着目している超電導技術がここにつながっている。量子センサーの市場規模を予測する報告書は、インターネットを検索するだけでもいくつも出てくる。そのうちのいくつかをピックアップすると、表25のようになる。各社、調査方法が異なるため単純な比較はできないが、2020年代前半を起点として、5年から10年で市場規模は2倍程度、年間10億ドル規模になるという予測である。企業にとっては参入

³⁶⁴ Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology* (2022).

する価値のある成長市場とすることができる。

表25 量子センサーの市場規模予測

調査会社	市場規模(基準年)	市場規模(予測年)
MarketsandMarkets	\$260 million (2022)	\$565 million (2027)
Mordor Intelligence	\$608.9 million (2023)	\$1,116.9 million (2028)
Vantage Market Research	\$486.80 million (2022)	\$881.21 million (2030)
Coherent Market Insights	\$470.05 million (2021)	\$966.17 million (2030)
Straits Research	\$470 million (2021)	\$1,021 million (2030)
Emergen Research	\$290 million (2022)	\$1,128 million (2032)
Persistence Market Research	\$278.5 million (2022)	\$850.6 million (2033)

出所: 各社のウェブサイト³⁶⁵から筆者作成。

ここで技術的な留意事項を挙げておく。量子センサーには超電導を用いることも選択肢の一つになっているが、第5章で論じたように、超電導技術は、軍事的に利用するには繊細に過ぎることがある。超電導磁石やSQUIDのように、民需はある一方で、軍需はないか、あっても僅少ということにもなりかねない。新しい技術には、いわゆるシーズとニーズのマッチングの議論が付きまとうが、こと量子センサーに関しては、米軍が、現実的で具体的な世界最高のスペックと、それをアップデートし続ける調達計画を示しておくことが重要になると考えられる。結果的に技術が追い付かず、調達が遅れるとなるリスクはあるが、例えはるか先であっても、調達が見えていないと、極言すれば、軍事的な市場が見えていないと、民需があるなかで、あえて軍事利用の研究開発をする企業が現れるかどうかは予断を許さない。

【量子コンピューター】

続いては、「量子コンピューター」を見てみる。市場規模の話をする前に、

³⁶⁵ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-sensors-market-61825400.html>
<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/quantum-sensors-market>
<https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/quantum-sensors-market-1551>
<https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/quantum-sensors-market-5403>
<https://straitresearch.com/report/quantum-sensors-market>
<https://www.emergenresearch.com/industry-report/quantum-sensors-market>
<https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/quantum-sensors-market.asp>
 (いずれも2023年7月10日閲覧)

量子コンピューターについて概観する。野村総合研究所のウェブサイトにも、量子コンピューターについて解説している。

それによると、量子コンピューターには、「量子アニーリング方式」と「量子ゲート方式」とがあって、量子アニーリング方式については、すでにビジネスが始まっている一方、量子ゲート方式については、実際に用いられるまでに10年、20年かかるということである。

量子アニーリング方式では、デンソーやキューピー、三菱地所やリクルートコミュニケーションズ、BBVA銀行などが、ビジネス課題の解決にD-Wave Systemsのマシンを使う研究を行っており、一方、量子ゲート方式では、IBMやグーグル、リゲッティ・コンピューティング、IonQなどのハードウェア開発を進めるメーカーと共同で、ゴールド・マンサックスやJPモルガン・チェース、ウェルス・ファアゴ、BBVA銀行や三菱UFJ銀行などは、資産ポートフォリオの最適化やモンテカルロシミュレーションを利用した金融リスク計算などに応用できるアルゴリズムの研究を、ダイムラーや三菱ケミカルは電気自動車に応用できるバッテリー素材の研究を、そのほかにはBMWやエクソン・モービル、サムソン電子などが製造工程の管理や物資運搬の最適化への適用を研究している。

量子コンピューターが真価を発揮するためには、数多くの課題を乗り越える必要があり、基礎研究とビジネス適用研究が同時進行しているということである³⁶⁶。

このことを踏まえて市場予測を見ていく。「量子センサー」と同様に、「量子コンピューティング」の市場規模を予測する報告書は、インターネットを検索するだけでもいくつも出てくる。そのうちのいくつかをピックアップすると、表26のようになる。

³⁶⁶ 「量子コンピュータ」用語解説『ナレッジ・インサイト』野村総合研究所、https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/ls/ra/quantum_computer(2023年7月12日閲覧)

表26 量子コンピューティングの市場規模予測

調査会社	市場規模(基準年)	市場規模(予測年)
BCC Research	\$324.2 million (2020)	\$1.6 billion (2026)
MarketsandMarkets	\$866 million (2023)	\$4,375 million (2028)
Fortune Business Insights	\$554.6 million (2021)	\$4,758.0 million (2029)
P&S Intelligence	\$458 million (2021)	\$5,274 million (2030)
Vantage Market Research	\$812.6 million (2022)	\$8,229 million (2030)
Allied Market Research	\$1,370.82 million (2020)	\$18,336.45 million (2030)
Precedence Research	\$10.13 billion (2022)	\$125 billion (2030)
Emergen Research	\$604.00 million (2022)	\$8,487.60 million (2032)
Global Market Insights	\$974.1 million (2022)	\$65 billion (2032)
Persistence Market Research	\$372.9 million (2022)	\$1,505.7 million (2033)

出所: 各社のウェブサイト³⁶⁷から筆者作成。

各社は、「量子コンピューティング」の市場を予測している。それは、「量子コンピューター」そのものの市場に加え、「量子コンピューター」が計算をすることによるビジネスの市場を含んでいる。なかには、量子コンピューターが人工知能に用いられるということで、人工知能の市場を含んでいるものもある。全体を眺めてみると、同じ2020年を基準年としていても、3億ドル規模とみるところと100億ドル規模とみるところとあり、それらの間には30倍以上の差がある。また、同じ2030年を予測年としていても、50億ドル規模とみるところと、1000億ドル規模とみるところとあり、それらの間には20倍以上の差がある。これは、「量子コンピューティング」という市場は、さまざまな捉え方が可能な、未知の部分の多いものであるが、大きく成長する市場であると言える。

【量子通信】

³⁶⁷ <https://www.bccresearch.com/market-research/information-technology/quantum-computing-technologies-and-global-markets.html>
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html>
<https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-104855>
<https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/quantum-computing-market>
<https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/quantum-computing-market-2163>
<https://www.alliedmarketresearch.com/enterprise-quantum-computing-market>
<https://www.precedenceresearch.com/quantum-computing-market>
<https://www.emergenresearch.com/industry-report/quantum-computing-market>
<https://www.gminsights.com/industry-analysis/quantam-computing-market>
<https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/quantum-computing-market.asp>
(いずれも2023年7月12日閲覧)

続いては、「量子通信」を見てみる。市場規模の話をする前に、「量子通信」について概観する。日本放送協会（NHK）のウェブサイトにも、「量子暗号通信」について解説したものがある。なお、「量子通信」と「量子暗号通信」とでは、別のもののようであるが、「量子通信」の本質は、理論上、「絶対に解読できない通信」であるので、「量子通信」と「量子暗号通信」とは同義であると考えて差し支えない。

量子暗号とは、光の最小単位である光の粒＝光子のような極小の物質の動きやふるまいを示す物理学の「量子力学」を応用した技術である。量子暗号通信は、暗号化してやり取りする情報とは別に、その暗号を解くために必要な「鍵」となる情報＝暗号鍵を、分割して光子一つ一つにのせて送るというものである³⁶⁸。

光子は観測されると、その状態が変わるという性質がある。この性質を利用すれば、サイバー攻撃の主体など誰かが暗号鍵の情報を盗み見た瞬間に光子の状態が変化するので、盗み見られたことに気付くことができ。この技術では、盗み見られたことを察知した時点で、その暗号鍵を自動的に無効にして、盗み取られていない情報で、自動的に新しい鍵を作り直す仕組みになっている。つまり、暗号化された情報を解くのに使うことができる鍵は、盗み見られていないものしかありえないということになり、絶対に解読できないとされている³⁶⁹。

一般的に使われている暗号は素数の組み合わせで作られていて、暗号を解くための計算量を多くし、いわば解読するための計算に膨大な時間がかかるようにすることで、安全性を担保しているとされてきた。しかし、スーパーコンピューターをはるかに超える計算能力を持つ量子コンピューターが実用化されると簡単に暗号が破られてしまうおそれがある。そのため、理論上どんなコンピューターを使っても解読できない、量子暗号通信の需要が世界的に高まっている³⁷⁰。

日本では、政府の通信ネットワークのセキュリティ対策として、令和6年度

³⁶⁸ 「量子暗号通信って、なに？」『サクサク経済 Q&A』日本放送協会(NHK)、<https://www3.nhk.or.jp/news/special/sakusakukeizai/20201020/356/> (2023年7月12日閲覧)。

³⁶⁹ 「量子暗号通信って、なに？」

³⁷⁰ 「量子暗号通信って、なに？」

から実証事業が始まり、国内での事業化はこれが初めてとなる。特に機密性の高い情報を扱う防衛や警察の分野で、情報を守るために使われると推察する。また海外では、東芝はイギリスのブリティッシュテレコムと、アメリカのベライゾン・コミュニケーションズと提携して事業化に取り組む。それぞれの国の通信大手と組むことで、すでにある通信ネットワークを活用することができるメリットがある。日本では、東芝やNECが開発を進めている。このうち東芝は、この分野で保有する特許の数が世界1位で、特に通信の速度と安定して通信できる距離では世界トップの水準にあるとしている。そのため海外の政府機関などからも引き合いがあるということで、国内外でいち早く事業展開を進めて、世界のトップシェアを握りたいねらいがある³⁷¹。

社会での実装という面では、中国が先行している。金融や司法の分野ですでに実用化し、2025年までに量子暗号通信のネットワークを中国全土に広げようと力を入れている。また、韓国も現地の通信大手が量子暗号通信の技術を持つスイスの企業を買収して事業化し、新たな通信規格5Gにも適用させる動きも出ている。このほか、アジアやヨーロッパの国々でも導入を目指す動きが活発になってきている。東芝では2035年に世界の市場規模が2兆円を超えると見込んでいて、このうち25%を獲得することを目指している³⁷²。

いかに複雑な暗号でも解読できる量子コンピューターが現れるので、いかなる量子コンピューターでも解読できない量子通信を作ろうというのは、中国の故事「矛盾」のようである。しかし、だからこそ、この勝負は、どちらかがあきらめがつくまで延々と続くということにもなる。例示されているように、金融や司法など、絶対に解読を許すことのできないニーズが民間にあれば、軍事ニーズの有無にかかわらず、民間があきらめるまで、量子通信の発展は続くものと考えられる。

このことを踏まえて市場予測を見ていく。「量子通信」の市場規模を予測する報告書は、インターネットを検索するだけでもいくつも出てくる。そのうちのいくつかをピックアップすると、表27のようになる。

³⁷¹ 「量子暗号通信って、なに？」

³⁷² 「量子暗号通信って、なに？」

表27 量子通信の市場規模予測

調査会社	市場規模(基準年)	市場規模(予測年)
BCC Research	\$347.2 million (2019)	\$1.3 billion (2024)
Maximize Market Research	\$126.45 million (2022)	\$434.94 million (2029)
GII Research	\$1,379.53 million (2023)	\$5,441.24 million (2029)
Coherent Market Insights	\$2.07 billion (2023)	\$7.85 billion (2030)
Astute Analytica	\$420.4 million (2022)	\$1.170.6 million (2031)
We Market Research	\$105.91 million (2022)	\$506.83 million (2033)

出所: 各社のウェブサイト³⁷³から筆者作成。

量子通信(Quantum Communication)の市場予測を比較したいところであるが、実際のところ、予測する市場を量子通信としているのは、このなかではGII Researchのみであり、そのほかは、BCC Research / Maximize Market Researchは量子暗号(Quantum Cryptography)、Astute Analytica / We Market Researchは量子安全通信(Quantum Secure Communication)、Coherent Market Insightsは量子鍵配送(Quantum Key Distribution)と、表記が異なり、調べている市場も少しずつ異なっているようである。全体を眺めてみると、2022年で1.3億ドル規模とみるところと2023年度で14億ドル規模とみるところとあり、1年違うが、それらの間には10倍程度の差がある。また、2029年で4.3億ドル規模とみるところと2030年で79億ドル規模とみるところとがあり、これも1年違うが、それらの間には20倍近い差がある。「量子通信」の市場もまた、「量子コンピューティング」の市場と同様にさまざまな捉え方が可能な、未知の部分の多いものであるが、大きく成長する市場であると言えよう。

そうすると、量子情報科学(QIS)については、研究開発は主に民間に任せて、軍事を含む安全保障を担う国家は、その成果を積極的に取り込んでいく、いわゆるスピン・オン(Spin-on)をしていくのが効果的かつ効率的であるよう

³⁷³ <https://www.bccresearch.com/market-research/information-technology/global-market-of-quantum-cryptography-market-report.html>
<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-quantum-cryptography-market-key-trends/6554/>
<https://www.giiresearch.com/report/qyr1214605-global-quantum-communication-market-size-status.html>
<https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/quantum-key-distribution-market-5971>
<https://www.astuteanalytica.com/industry-report/quantum-secure-communication-market>
<https://wemarketresearch.com/reports/quantum-secure-communication-market/246/>
(いずれも2023年7月12日閲覧)

に考えられる。

第4節 通信と安全保障の問題

しかしながら、ここで一つ考えておくことがある。それは、安全保障の優位性をどこまで許容するかという問題である。参考になるのがインターネットとGPSの例である。インターネットは、その利便性から爆発的に世界中に広まったが、その裏で、インターネットを利用した米国による諜報活動が行われていたことが、いわゆる「スノーデン事件」により明るみに出た。米国はどのようなことをしていたのか。中田(2013)によると、次のようにある。

1 インターネットと安全保障

「米国のインターネット通信の大半を傍受したり、暗号通信を解読するためにソフトウェアに情報収集用の裏口(バックドア)を仕掛けたりする」など、政府主導のこうした諜報活動によって、通信の秘密だけでなく、インターネットの安全性さえも脅かされようとしていた³⁷⁴。

一連の諜報活動は、米国家安全保障局(NSA)や米中央情報局(CIA)の職員だったエドワード・スノーデン氏が、英ガーディアン紙や米ニューヨーク・タイムズ紙などに提供した秘密資料によって明るみに出た³⁷⁵。

口火を切ったのは、2013年6月に報道された「PRISM」問題であった。米国家安全保障局は、米マイクロソフトや米グーグルといった大手ネット事業者のサーバーから、電子メールなどの個人情報を入力する「PRISM」というプログラムを実施していた。だが、これは氷山の一角に過ぎない。その後の報道によって、「Stellar Wind」、「Xkeyscore」、「Bullrun」といった他の諜報活動プログラムの存在も明らかになっていった³⁷⁶。

特に深刻なのが、米英の両政府がインターネット上の暗号通信を解読して

³⁷⁴ 中田敦「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」『日経コンピュータ』2013年10月3日号、46頁。

³⁷⁵ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46頁。

³⁷⁶ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46頁。

いた「Bullrun」プログラムである。スノーデン氏がガーディアンに提供した秘密文書によれば、米国家安全保障局や英政府通信本部（GCHQ）はスーパーコンピュータを用いた総当たり型の暗号解読を行ったり、商用ソフトに設けたバックドアを使ったりして暗号通信を解読していたという³⁷⁷。

例えば米国家安全保障局は、米国内外のITベンダーに働きかけたり、公開鍵暗号などの標準化に影響力を行使したりして、「HTTPS」や「SSL」などの暗号通信に使う商用ソフトやネットワーク機器などに脆弱性を設けさせていたという。米国家安全保障局が情報を収集するためのバックドアとして使うためである。ほかにも、VPN（仮想私設網）装置などで使用する暗号化チップにバックドアを設け、暗号通信を解読していたという報道もある³⁷⁸。

実際、バックドアの痕跡は見つかっている。暗号技術の標準化を担当する米国の国立標準技術研究所は2013年9月、データの暗号化を行う際の乱数生成に使用するアルゴリズムの技術標準「Dual_EC_DRBG」（規格名は「SP 800-90A」）を使わないよう推奨する勧告を出した。Dual_EC_DRBGは2007年に乱数生成の技術標準になった当時から、セキュリティ専門家であるブルース・シュナイアー氏によって、バックドアの埋め込みに利用される恐れがあると指摘されていた。国立標準技術研究所はガーディアン紙などの報道を受け、暗号技術の専門家として米国家安全保障局の職員が暗号技術の標準化に加わっていることを認めた上で、SP 800-90A規格の見直しなどを行うと発表した³⁷⁹。

一連の暗号解読に関する報道について、米政府は否定していない。米国家情報長官室は2013年9月6日（米国時間）、「米国家安全保障局が暗号通信の解読に取り組んでいることは秘密でもニュースでもない」などとする声明を発表した。この声明では、「現在、テロリストや犯罪者集団、人身売買組織などが、その行動を隠すために暗号を使っている。これらの行動を無力化しなければ、情報機関は任務を全うできない」などと述べ、米国家安全保障局などの暗号解読を正当化している。ガーディアン紙などによれば、米国家安全

³⁷⁷ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46頁。

³⁷⁸ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46頁。

³⁷⁹ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46頁。

保障局は暗号解読の技術や解読して得た情報などを、英政府通信本部のほか、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドの情報機関と共有しているという³⁸⁰。

米国家安全保障局が暗号解読技術の開発に着手したのは2003年頃。2010年には主要な技術を完成させ、大半の暗号通信を解読可能にした。NSAは暗号解読技術の開発などに年間2億5000万ドルの予算を投じていた。米国家安全保障局は、通信事業者の光ファイバー網からインターネットを流れるデータを直接収集し、米国家安全保障局が全米に設けるデータセンターに蓄積・解析していた。米ウォールストリートジャーナル紙は2013年8月、米国家安全保障局は全米を流れるインターネットのトラフィックの75%を収集できると報じている。米Wired誌は2012年3月、米国家安全保障局が2億ドルを投じて、米ユタ州ブラフデールに総延べ床面積9万3000平方メートルの巨大DCを建設していることを明らかにした。このデータセンターは、米国家安全保障局が諜報活動で得た情報を蓄積・解析するデータセンターの一部と見られる³⁸¹。

米政府が情報を収集する目的は、テロの防止だけではなかった。米国家情報長官室は2013年9月8日（米国時間）、「情報機関が経済や金融、テロリストの資金調達に関連する情報を収集していることは秘密ではない」「これらの情報を収集することで、世界経済に悪影響を与えるような国際的な金融危機の兆候をつかむことができる」といった声明を出した。この声明は、「米国家安全保障局がブラジルのルセフ大統領や同国の石油会社であるペトロbrasなどに対して諜報活動を行っている」とする報道を受けたものである。米国家情報長官室は「収集した情報を米国の民間企業に提供するといった行為はしていない」と強調しているが、テロとは無縁の企業や民間人も監視対象となる可能性があることを示唆している³⁸²。

スノーデン氏の告発に端を発した一連の報道によって、インターネット上の通信を通じて世界中の政府や企業、個人が、NSAに監視されている可能性

³⁸⁰ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、46-47頁。

³⁸¹ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、47頁。

³⁸² 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、47頁。

があることが明らかになった。また、暗号技術そのものや、暗号技術を搭載した商用ソフトについても、その信頼性に大きな疑問が投げかけられた格好である。こうした環境下で我々はどのように情報を守っていくべきか、その解決策を導くことは容易ではなさそうである³⁸³。

なぜ、米国はこのようなことをするようになったのか。そこには基幹となるインフラストラクチャー(「基幹インフラ」)の在り方がポイントではないかと考えられる。

2 GPSと安全保障

同じく民間での利活用が進むGPSではかつて、米軍による意図的な測定誤差の導入が行われていた。それはどのようなものであったか。日本の準天頂衛星システム「みちびき」のウェブサイトには次のようにある³⁸⁴。

米国防総省の測位衛星システムのGPSは、軍用と民生用の測位信号を発信するように設計されていた。軍用コードをPコード(Precision Code)、民生用コードをC/Aコード(Clear and Acquisition Code)と言い、Pコードは暗号化されていて民間の測位機器は利用できない(干渉測位という、2基の測位機器を利用する測位には使える)。測位の精度は、Pコードで10m程度。これは真の位置を中心に半径5mの円を描くと、ほぼその中に測定値が収まるという意味である。「真の値からのずれは5m程度」と言ってもよい³⁸⁵。

本来ならば、C/Aコードでも同程度の精度が出るのだが、GPS衛星システムが部分的に稼働し始めた1980年代初頭から、米国防総省はSA(Selective Availability、選択利便性：精度劣化措置)という運用ポリシーを、C/Aコードに課していた。SAは「C/Aコードの測位精度を100mまで保証する」というもの。それ以上の精度で測位できたとしても、それは米国防総省として保証したものではないということである。100mまでしか測位精度が保証されないのなら、民生用の利用価値は大きく下がる。カーナビで自車の位置が50mずれて表

³⁸³ 中田「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」、47頁。

³⁸⁴ 松浦晋也「航法の歴史(4)SAの廃止」『みちびきを知る』みちびきウェブサイト、https://qzss.go.jp/overview/column/column04_151208.html(2023年7月13日閲覧)。

³⁸⁵ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

示されたら使いものにならない³⁸⁶。

実際問題としてC/Aコードにはどの程度の誤差が混入しているのか。米国防総省のこの態度に対して、世界中でGPSの測位精度を計測する試みが始まった。精密測量など、GPSとは別の方法で位置が精密に測定されている場所でGPSのC/Aコードを受信し、受信で得た位置情報と実際の位置とを比較することで、C/Aコードにどれぐらいの誤差が混入しているかを測定することができる。GPS衛星の数が揃い、ある程度の時間連続した測位が可能になった1980年代末、C/Aコードの測位精度は30～40m前後で推移していた。つまり、米国防総省は「100mまでしか保証しない」としつつも、30～40m程度の精度となるように誤差を加減していたらしい³⁸⁷。

1990年、パイオニアが世界初のGPS利用カーナビを発売したが、開発に当たってはSAの補正が大きな課題となった。30mもずれると、自動車は隣の道を走ったり、海沿いや川の側などでは水中を走っているかのように表示されてしまう。さまざまな修正手法が開発されたが、それでも「自分の自動車が水中を走っている」というような事態が完全に解消されることはなかった。一方で、米ジオスター(Geostar)社のように、GPSとは別の完全に民生用の衛星測位システムを構築しようとしたベンチャーも出現したが、インフラ投資が巨額になることからうまくビジネスを離陸させることはできなかった³⁸⁸。

大きな変化が起きたのは、1990年の夏から翌91年1月にかけてであった。1990年8月2日、フセイン大統領率いるイラクが隣国のクウェートに侵攻した。これに対して国連安全保障理事会は即日、無条件撤退を求める安保理決議を採択し、米軍を中心とする多国籍軍をサウジアラビアに展開した。この時、一時的にC/Aコードの測位精度はSAが保障する100mまで低下した。ところが1991年が明けた1月15日、突如としてC/Aコードの測位精度は10mにまで向上した。その48時間後の1月17日、多国籍軍はイラク領内へ侵攻する「砂漠の嵐」作戦を開始した³⁸⁹。

やがて、海外報道などから何が起きたかという情報が徐々に日本にも入っ

³⁸⁶ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁸⁷ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁸⁸ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁸⁹ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

てきた。軍用のPコード受信機の生産が間に合わず、C/Aコードを受信する民生用GPS受信機が多国籍軍に大量に納入されたのである。また、出征した兵士を案じて、家族が兵士に民間用受信機を持たせるケースも多かった³⁹⁰。

いまなお、この時にどのような意思決定があって、米国防総省が何を行ったかは明らかにされていない。しかし推測は可能である。イラクのクウェート侵攻に伴い、イラクが民生用受信機を利用することを危惧して、米国防総省はC/Aコードの測位精度を落としたのである。しかし、砂漠の嵐の実施に当たって、多国籍軍が装備した民生用受信機を無視できず、誤差の混入を一時的に停止したということである。この措置は1991年3月まで続き、事態収束とともにSAは復活した。しかし、すでに民間は、精度10mの衛星測位の利便性を十分なまでに体験していた。高精度の衛星測位が、大変便利なもので生産性を向上させるということが、一般の共通認識となった³⁹¹。

民間でSAを無効化する技術開発が急速に進展した。特に、高精度で位置が分かっている場所でGPS測位を行って誤差を測定し、その値を地上の電波で端末に伝送するディファレンシャルGPS(Differential GPS)が実用化したことで、少なくともディファレンシャルGPSのサービスが受けられる地域では、SAは無意味となった。日本でも1997年に測位機器メーカーが共同で、FMラジオ放送に多重化して補正データを送信するディファレンシャルGPSサービスを開始し、高精度化したことで、カーナビは「便利な機器」として認知されるようになり普及が進んだ³⁹²。

2000年5月2日、米クリントン政権はついにSAを解除した。この時点では、まだGPSの測位精度を必要に応じて劣化させる権利は放棄していなかったが、2007年9月には次世代のGPS衛星「ナブスター・ブロック3」(GPS Block III)にはSA機能を搭載しないと発表した³⁹³。

衛星測位システムがもたらす巨大な経済効果は、誰の目にも明らかとなった。すると世界各国は、「米国だけに、かくも便利で産業や経済に大きな影響を与える測位衛星システムを独占させておくわけにはいかない」と考えるよう

³⁹⁰ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁹¹ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁹² 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

³⁹³ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

になる。結果、民間が使える測位衛星システムは徐々に増えていくこととなった³⁹⁴。

民生用に対する軍用の優位性を保ちたい軍と、それをなんとかして精度よく利用したい民間との、ある意味での「闘い」があり、そして、ついには軍が折れたということである。

3 量子通信と安全保障

国家が基盤インフラを用意するGPSにして前述の状況である。民間が基盤インフラを整備するインターネットにおいて、国家安全保障の名目のもと、法律を作り、国家安全保障局が正式に、インターネットに流れる情報を監視することを正当化することは難しかったであろうか。それとも、法律があると法律の範囲内でしか活動ができなくなるので、あえて法律を作らなかったのであろうか。いずれにしても、国家安全保障局が持とうとしたインターネットでの民間への優位性は、非合法のものであったし、元職員の暴露によって明るみに出て、その優位性を維持することは難しくなっている。

では、量子通信は誰がどのように使うのであろうか。米軍が米軍のために使うのは分かる。しかし、米国に脅威を与える可能性がある国や団体が、この絶対に傍受できない量子通信を使うことを、自国の安全保障を第一に考える米国が許容できるのであろうか。米国と米国の同盟国以外は量子通信を使わせない、あるいは、(傍受できないのはあくまで量子通信の途中だけのことなので、それ以外のところに)何らかのバックドアを仕掛けるといった安全保障措置を米国が講じることは容易に想像できる。しかし、そのようなことをすれば、民間企業の参入意欲を削ぐことになる。社会の基盤インフラに関しては、デュアルユースの概念は成立しないのかもしれない。

第5節 軍事技術の条件からみた量子情報科学

³⁹⁴ 松浦「航法の歴史(4)SAの廃止」

量子情報科学は軍事技術として見たとき、その適性はいかなるものなのであろうか。そこで、第4章で考察した軍事技術の条件を、量子情報科学に当てはめてみる。

明確な軍事的ニーズについて、国防科学委員会によると、量子技術の三つのアプリケーション、量子センシング、量子コンピューター、量子通信が米国防総省にとって最も有望であり、量子センサーは、「GPSが使えないときの代替」、「潜水艦、埋設物、敵位置の検知」に、量子コンピューターは、「自動攻撃」、「情報収集・警戒監視・偵察（ISR）」、「暗号解読」に、量子通信は、「安全な通信」に、それぞれ役に立つ可能性を指摘している³⁹⁵。一見、さまざまな軍事的ニーズがあるようであるが、超電導のことを思い返すと、「具体性がなく総花的」という見方も可能である。また、量子コンピューターに米軍の暗号が解かれることを特に脅威にとらえている節があるが、暗号が解かれることが脅威になるのは、国防だけではない。国際テロ対策、国内治安維持、社会保障システムといった行政サイドにとどまらず、企業秘密の保護や個人情報保護といった民間サイドの脅威でもあり、軍事的な問題だけではない。この情報化社会においては、むしろ軍事的なニーズの方が小さくなっているかもしれない。

技術システムについては、量子センサーは、単体で見ても、「センサー素子」を含む「センサー・デバイス」というシステムであり、さらに、ネットワークにつなぐことにより、システム・オブ・システムズとなる。量子コンピューターは、「量子ビット」を含むハードウェアのシステムに、量子コンピューター用のミドルウェア、ソフトウェア、プログラムを合わせて構成されるシステムであり、さらに、ネットワークにつなぐことにより、システム・オブ・システムズとなる。量子通信は、量子鍵を生成し、配送するシステムである。いずれも、複雑な技術システムである。システム全体から見ると、量子現象が起きている部分、例えば、量子コンピューターにおける超電導を用いた量子ビットや、量子通信におけるもつれた光子である量子鍵の生成機構などは、ごく一部であり、ほとんどが量子現象を用いるのではない技術により構成されると言える。

³⁹⁵ Kelley M. Saylor, *Defense Primer: Quantum Technology*, Congressional Research Service, November 15, 2022.

研究開発の期間については、米国防総省が「量子センサー」、「量子コンピューティング」、「量子通信」のそれぞれの研究開発をいつごろから行っていたかを示す理療は、本研究で調べた限りでは存在しない。量子情報科学の範疇が広いためではないかと考えられる。それでも、分かったものだけでも挙げてみる。「量子センサー」に関して、超電導量子干渉計の場合は、第2章に記載したように、1970年代半ばにはすでにその用途を認識しており、長期にわたって軍事利用を想定した研究開発を行っていると考えられる。国防科学委員会が、量子センサーは量子技術の最も成熟した軍事的応用であり、現在「ミッションでの使用の準備ができている」と太鼓判を押すのも、このような背景があるものと考えられる。

量子コンピューターに関して、本研究で調べた限り最も古い文献は、マサチューセッツ工科大学のノーマン・マーゴラス(Norman Margolus)が1986年に発表した「Quantum Computation³⁹⁶」であった。量子コンピューティングに関する理論的な研究であるが、同文献には、同研究が国防高等研究計画局、国立科学財団およびエネルギー省の支援を受けて行われたことが記載されている。量子コンピューターのアイデアは、ノーベル物理学賞受賞者でもあるリチャード・ファインマン教授が登壇した、1981年の「物理学と計算」会議の基調講演に遡るといわれている³⁹⁷。それを考えれば、米国防総省は、量子コンピューターのアイデアが知られてからすぐ、遅くとも1980年代の半ばには「量子コンピューティング」の研究開発を始めていた一つの証左と言える。短く見ても30年以上にわたる研究開発の期間があると考えられる。

量子通信に関しても、研究論文を探した。空軍研究所(Air Force Research Laboratory: AFRL)が2007年に作成した「DARPA Quantum Network Testbed」の最終報告書³⁹⁸によると、空軍研究所は、国防高等研究計画局の支援の下、BBNテクノロジーズ社(BBN Technologies)とともに、2001年3月から2007年2月にかけて、DARPA量子ネットワークというプログラ

³⁹⁶ Norman H. Margolus, "Quantum Computation," *Annals of the New York Academy of Sciences* 480, no. 1 (1986): 487-97.

³⁹⁷ 古田彩「二人の悪魔と多数の宇宙—量子コンピュータの起源」『日本物理学会誌』第59巻第8号、2004年、512-519頁。

³⁹⁸ Chip Elliott, and Henry Yeh, *DARPA Quantum Network Testbed*, ADA471450 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2007).

ムで量子鍵配送の研究開発を行っていた。量子鍵配送の研究論文は、ほぼ2000年代以降に発表されていることからすると、米国防総省は、量子通信の最初期から研究開発を始め、いまや20年にわたる研究開発の期間があると考えられる。

研究開発協力企業については、米国政府全体で取り組んでいる国家量子イニシアチブのウェブサイトには、「現在、量子経済開発コンソーシアム（Quantum Economic Development Consortium: QED-C）に参加している企業の数、150社以上」との紹介がある。その量子経済開発コンソーシアムのウェブサイト³⁹⁹を見ると、参加企業が一覧化されていて、アマゾン・ウェブ・サービス、シスコ、グーグル、IBM、マイクロソフトといったIT企業や、ボーイング、ロッキード・マーチン、ノースロップ・グラマン、レイセオン・テクノロジーズといった防衛関連企業に加え、スタートアップ企業、さらには東芝や京セラなど日本の企業も参加している。

一方で、米国防総省における量子情報科学の研究開発に協力した、あるいは現在もしている企業というのは、本研究で調べた限りでは存在しない。量子情報科学という括りが大きいせい、あるいは、政府全体で国家量子イニシアチブに取り組んでいるために米国防総省だけが取り上げられないのか、その理由は不明である。前述した、量子鍵配送のBBNテクノロジーズ社のように、研究論文や研究開発プロジェクトの報告書を調べることによって明らかになる可能性はある。

軍事に関わることなので秘匿性が高いことは当然ではあるが、防衛関連企業ならば米国防総省や軍から研究開発費を受けることになればプレス発表をしている可能性もある。しかし、そういう情報も、本研究で調べた限りでは存在しない。2023年6月14日、量子を基盤とする高精度のターゲティングを追求する、4500万ドルの大型研究開発プロジェクトの採択の発表があったが、「CLAWSという名の陸軍主導のチーム」が採択されたとあり、協力する大学や企業の名は伏せられていた⁴⁰⁰。これについては、量子情報科学、特に量子

³⁹⁹ Accessed July 26, 2023, <https://quantumconsortium.org/members/>.

⁴⁰⁰ “Multi-Service Team Wins \$45 Million Research Award to Pursue Quantum-Based Precision Targeting,” U.S. Department of Defense, June 14, 2023, <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3428320/multi-service-team-wins-45-million-research-award-to-pursue-quantum-based-prec/>.

コンピューターと量子通信については、軍事的な研究開発の歴史が比較的短く、そしてそれゆえに、それまでは防衛に関わったことのない企業が研究開発に協力しているものと考えられる。軍事利用を想定した研究開発に携わっていることが知られることにより、防衛に関わることをよしとしないステークホルダーの反発や、技術の取り込みを狙った買収のリスクを考えれば、黙っておいた方が良いということであろうか。

明確な競争相手については、量子情報科学で米国防総省が競争相手として意識をしているのは、専ら中国のようである。前述したように、伝えられるところによると、中国は量子鍵配送に多額の投資を行っており、2016年に約1,250マイルの北京～上海量子ネットワークの建設を完了した。国防科学委員会は、「量子鍵配送は、米国防総省のミッション用に配備するのに十分な能力またはセキュリティを備えて実装されていない」と結論付けたというが、技術が絶え間なく進歩しているなか、果たして現在もその言葉を額面通りに受け止めてよいかはわからない。少なくとも、米国の独壇場ではない。

調達への移行については、さきに述べたように、「量子センシング」は、数年のオーダーで、「量子コンピューティング」は、10数年のオーダーで、そして「量子通信」は、数十年のオーダーで、それぞれ、軍事的に利用できる可能性があるから見られている。いずれにしても、企業の収入につながるのはまだ先である。また、企業と米国防総省あるいは軍との契約が、ノートPCの取得のような購入の形になるのか、あるいはサブスクリプションのような形になるのかは、現時点では明確ではない。量子情報科学(QIS)の軍事利用が企業にとって収益の上がるものであるかどうかは未知数である。しかし、収益の上がるものにならないければ、たとえ技術ができたとしても、調達への移行は見込めないであろう。

科学的原理については、「量子センシング」、「量子コンピューター」、「量子通信」に用いられる量子ビット、もつれた光子、超電導量子干渉素子、原子のレーザー冷却といった構成要素にはすべて量子力学が関わる。では、量子力学というのはどれほどわかっているのでしょうか。量子状態は熱や電磁波など、外乱に弱い。夢の室温超電導は、いまも夢のままである。現在の暗号化方式を破るには、約2000万量子ビットの量子コンピューターが必要になる

ことが示唆されているが、はたしてそれは技術で克服可能なのであろうか。断続的に生成するもつれた光子のすべてを、壊すことなく中継し、伝送し続けることは技術で克服可能なのであろうか。量子情報科学は本当に、少なくとも軍事的に、利用できるものになるのか。それを確実に支持する理論は、いまだ確立していないと認識している。

代替技術については、量子センサーの感度、量子コンピューターの計算速度、量子通信の絶対的な安全性は、実現したとすれば、それを代替するものは、いまもこれからも、ないと考えられる。

倫理的な争点については、量子コンピューターですべての暗号が解けるとすると、プライバシーの保護の観点から、倫理的な争点があると考えられる。また、量子コンピューターが人工知能に用いられるようになると、人工知能で考えられている倫理的な争点が量子コンピューターにもかかわってくると考えられる。

欠点については、まだ実現していないものであることから、欠点と言ってもすべては想像である。量子センシングでは、外乱に弱い量子の「繊細過ぎる点」が欠点となるかもしれない。超電導を用いるものであれば、低温を維持し、熱や振動、電磁波などを遮断する必要がある。レーザーを使うものであれば、振動や埃を遮断し、温度や湿度を管理する必要がある。戦場で使えるものとは考えにくい。

量子コンピューターでは、既存の暗号を解読するための目安である約2000万量子ビットが動くようになったとして、量子耐性暗号が実現したときには、量子コンピューターとしてさらなる進化を遂げなければならない。また、いくら暗号解読が早いとしても、有限の時間は必要であるため、解読されても何ら問題のない無駄な暗号を、そうとはわからないようにして大量に用意されてしまうと、量子コンピューターの貴重なリソースが無駄な暗号解読に割かれるということも考えられる。

量子通信では、傍受(物理的には「観測」)されると通信内容が消えてしまうから安全ということであるが、そうであるならば、傍受をされ続けた場合には通信は延々と成立しないということになる。絶対傍受されない量子通信には、同時に、絶対に傍受されない仕組みも必要になるが、それは現実的には困難

であろう。

軍事行動における使用形態については、具体的に軍がどのように利用するかがまだ見えないため、明確に論じることは難しいが、「量子センシング」は、戦場で使用されることはなく、「量子コンピューター」や「量子通信」の内部で使用されることになろう。そして、量子コンピューターは、軍の中核、例えば、米国防総省内や各軍の本部などで使用されることが考えられるが、それはサブスクリプションで行われるかもしれない。「量子通信」については、軍内部の通信に使われるであろうが、これもサブスクリプションで行われるかもしれない。いずれにしても、基本的には軍の基盤的な機能であり、「防衛基盤用技術システム」である。

研究開発段階における機密性については、再掲となるが、2023年6月14日、量子を基盤とする高精度のターゲティングを追求する、米国防総省による4500万ドルの大型研究開発プロジェクトの採択の発表では、「CLAWSという名の陸軍主導のチーム」が採択されたとあるだけで、協力する大学や企業の名は伏せられていた。軍事利用の研究開発では、やはり機密性が高い。「完全秘密型RDT&E(Completely Secret-typed RDT&E)」に近い状態であると言えるのではないであろうか。国家量子イニシアチブの量子経済開発コンソーシアムで企業名が並んでいるのとは一線を画している。しかし、米国の軍事予算は米国の税金によることから、軍事研究開発としての高い機密性と、公的支出としてのアカウントビリティとをどのように両立させていくかが課題であろう。

民生利用の度合いについては、「量子センシング」、「量子コンピューター」、「量子通信」の汎用性から考えれば、量子情報科学は軍事利用も民生利用も可能な両用技術、デュアルユースである。しかし、その市場を考えれば、民生利用の規模は圧倒的であり、軍事利用もできる民生技術と言っても過言ではない。

以上のことから考えると、量子情報科学は、明確な競争相手がいて研究開発を急ぐ必要があるが、軍事的に利用できるものになることを確実に支持する理論はいまだ確立しておらず、また、複雑な技術システムであり、さらに、軍事以外の用途も幅広く考えられ、人工知能での利用を除けば倫理的な争

点はなく、民間企業の参入意欲も高く、デュアルユースではあるが、実態は、軍事利用もできる民生技術と言える。一方で、量子コンピューターにより暗号が無力化することの脅威は、国防のみならず行政全般、さらには民間にも広く影響することが考えられ、国全体、あるいは国際社会全体での取り組みが必要である。また、量子通信については、基盤インフラとしての産業的価値と安全保障との両立が難題である。

量子情報科学が軍事利用されるためには、次の三つの要件が満たされる必要があると言える。

まずは、RDT&Eの多くは民間セクターに任せ、一方で、いまだ解明されていない科学の部分や基礎研究は、米国防総省が自ら、あるいは公的資金を提供して行うという役割分担をすることである。

さらに、米軍が、現実的で具体的な、世界最高の仕様と、それをアップデートし続ける調達計画を示しておくことである。

そして、「量子通信」については、それを構成するすべての要素について、脅威となる外国の企業からの調達をしなくとも、米国または米国のパートナー国の企業がビジネス(研究開発および製品・サービスの提供を含む)を行っていきける環境が維持できることである。

第6節 量子情報科学における超電導

国家量子イニシアチブのウェブサイトには、超電導 (superconductivity / superconductor / superconducting) という単語はほとんど現れない。エネルギー省量子情報科学研究センター (DOE QIS Research Centers) の一つとして、超電導量子材料・システムセンター (Superconducting Quantum Materials and Systems Center: SQMS) が紹介されている程度である。量子センシング、量子コンピューター、量子通信という名称からは、超電導の存在を認識することは難しい。しかし、量子情報科学において、超電導は最も有力な技術の一つである。前述のとおり、超電導量子干渉計も、超電導体を用いたジョセフソン接合素子を構成要素とする量子センサーの一つである。このジョセフソン接合素子が、量子エレクトロニクスの基礎となる。

米国会計検査院 (United States Government Accountability Office: GAO) が2021年10月に作成した技術評価報告書 *Quantum Computing and Communications* には、量子コンピューターおよび量子通信における要素技術のひとつとして超電導のことを説明している。報告書の冒頭、「量子情報技術は、自然の性質を原子スケールで利用し、既存の技術では達成できない課題を達成することを目的としている。これらのテクノロジーは、従来のコンピューター・ビットに相当する量子ビットに依存している。科学者は、原子や光子などの粒子、あるいはそれらを模倣する超電導回路などから量子ビットを作成している⁴⁰¹」と、超電導との関係を示している。

さらに、同報告書では、各種の量子ビット技術を比較(表28)し、「これらのプラットフォームは、ソフトウェアをインストールまたは実行できるハードウェアデバイスである。トラップされたイオン、光子、または超電導量子ビットを使用するノイジーなプラットフォームは、研究者や一般の人々がインターネットを介して使用することができ、一般的に最も技術的に成熟したゲートベースの量子コンピューティング・プラットフォームと見なされている。中性原子、量子ドット、結晶の色中心など、他の量子ビット技術はそれほど成熟していない⁴⁰²」と報告している。

さまざまな方式が試されているところではあるが、量子情報科学において超電導は、少なくとも現在は、最も有力な技術の一つであることが分かる。

⁴⁰¹ *Quantum Computing and Communications: Status and Prospects*, GAO-22-104422, U.S. Government Accountability Office (October 2021).

⁴⁰² *Quantum Computing and Communications: Status and Prospects*, 2021.

表28 各種の量子ビット技術の比較

量子ビット技術	動作方法	状態
トラップされたイオン	単一のイオン(荷電原子)は電場、または電場と磁場に閉じ込められ、可能な限り低い温度である絶対零度近くまでレーザー冷却される。トラップされたイオン量子ビットは、レーザーまたはマイクロ波パルスで操作される。	デモコンピューターのサイズ: 最大数十個のノイズな量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: IonQ、ハネウェル、サンディア国立研究所の量子科学コンピューティングオープンユーザーテストベッドなど。
超電導	ほぼ絶対零度まで冷却された超電導体でできた人工原子回路ループ。これらの量子ビットはマイクロ波エレクトロニクスで制御され、迅速に動作することができる。	デモコンピューターのサイズ: 最大数十個のノイズな量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: IBM、Rigetti、D-Wave、Google、およびローレンス・バークレー国立研究所の先端量子テストベッドなど。
光子	光チップまたはファイバーを通過する光で量子ビットをエンコードする。これらの量子ビット・システムは室温で動作できるが、量子ビットを検出するために絶対零度に近い温度でのテクノロジーを必要とするものもある。	デモコンピューターのサイズ: 最大数十個のノイズな量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: Xanadu。
中性原子	中性または荷電していない原子は、トラップされたイオンに似ており、レーザーまたはマイクロ波パルスによって制御される。	デモコンピューターのサイズ: 最大数十個のノイズな量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: Cold Quanta.によると、2021年後半または2022年初頭。
量子ドット	トランジスタに似た人工原子で、マイクロ波または電気信号で制御された小さな半導体結晶で構成されている。量子ドット量子ビットが動作するには、摂氏約-272度(絶対零度より1度高い)の温度が必要である。	デモコンピューターのサイズ: いくつかのノイズな量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: 2021年6月現在、計画は発表されていない。
色中心	ダイヤモンドまたは結晶の欠陥で構成される別の結晶の人工原子で、多くの場合、追加された原子または空のスペースによって作成される。色中心量子ビットは光で制御され、光学的に検出される。	デモコンピューターのサイズ: 最大 2ダースの量子ビット。 利用可能なプラットフォームを持つ機関: 2020年3月現在、計画は発表されていない。
トポロジカル	トポロジカル量子ビットは、例えば、二つの異なる物質間の境界に沿って電子をチャネリングすることによって作成され得る。トポロジカル量子ビットは、時間の「量子ブレード」で構成されている。	まだ実証されていない。

出所: Quantum Computing and Communications: Status and Prospects, GAO-22-104422, U.S. Government Accountability Office (October 2021). に基づき筆者作成。

第2章で挙げた、超電導技術のRDT&Eプロジェクトの中にも、量子情報科学に関するものが存在する。2003年7月にオーストラリアのシドニーで開催された「国際超電導エレクトロニクス会議 (International Superconductive

Electronics Conference (ISEC) 2003)」における、ノースロップ・グラマン・スペース・テクノロジー社 (Northrop Grumman Space Technology) のL・アベルソン (L. Abelson) らの発表「Superconductor Electronics Technology for High End Computing (高性能コンピューティングのための超電導エレクトロニクス技術)」では、超電導による単一磁束量子 (single flux quantum: SFQ) 回路を基礎とする、超高性能SFQ超大型集積回路を開発し、実証しようとしていることを報告しているが、この単一磁束量子回路は、量子コンピューターの基礎回路である。

2007年、BBNテクノロジーズ社 (BBN Technologies) のチップ・エリオット (Chip Elliott) らが、国防高等研究計画局 (DARPA) との契約 (Contract #: F30602-01-C-0170) に基づき研究開発を行い、空軍研究所に提出した報告書「DARPA Quantum Network Testbed (DARPA量子ネットワーク実証基盤)」では、同社が国立標準技術研究所 (NIST) およびロチェスター大学 (University of Rochester) と協力し、初の超電導単一光子検出器を作製したことを報告しているが、この超電導単一光子検出器は、量子通信において量子鍵を検出するものである。

2010年、ジョージア工科大学のマーク・K・リチャーズ (Mark A. Richards) らが、国防高等研究計画局 (DARPA) の支援を受け、空軍研究所との契約 (Contract FA8650-07-C-7724) に基づいて研究開発を行い、提出した報告書「Extreme Scale Computing Studies (エクストリーム・スケール・コンピューティングの研究)」⁴⁰³では、超電導コンピューターにおける高速単一磁束量子 (Rapid Single Flux Quantum: RSFQ) デバイスが高密度化してきていることを報告しているが、これは量子コンピューターの小型化・高密度化につながる成果である。

2014年、『ネイチャー (Nature)』に掲載された、カリフォルニア大学のR・バレンズ (R. Barends) らによる論文「Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance (誤り耐性のための表面符号閾値

⁴⁰³ Mark A. Richards, and Daniel P. Campbell, *Extreme Scale Computing Studies*, ADA547481 (Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010).

における超電導量子回路)」⁴⁰⁴では、ゲート方式の量子コンピューターにおいて課題となっている誤り耐性に取り組んでいることが報告されている。

このように、米国防総省のRDT&E制度では、国家量子イニシアチブが発表される前から、量子情報科学の分野における超電導技術の研究開発を行っていた。この動きは、国家量子イニシアチブが実動してからは、さらに加速していよう。

本章のおわりに

第5章までで、かつての新興技術である超電導に焦点を当てて考察をしてきたことを、現在の新興技術である量子情報科学の軍事利用の可能性を論じることに用いることはできないか試行した。それによると、量子情報科学は、明確な競争相手がいて研究開発を急ぐ必要があるが、軍事的に利用できるものになることを確実に支持する理論はいまだ確立しておらず、また、複雑な技術システムであり、さらに、軍事以外の用途も幅広く考えられ、人工知能での利用を除けば倫理的な争点はなく、民間企業の参入意欲も高く、デュアルユースではあるが、実態は、軍事利用もできる民生技術と言える。

一方で、量子コンピューターにより暗号が無効化することの脅威は、国防のみならず行政全般、さらには民間にも広く影響することが考えられ、国全体、あるいは国際社会全体での取り組みが必要である。また、量子通信については、基盤インフラとしての産業的価値と安全保障との両立が難題である。

量子情報科学は、軍事利用の可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術という超電導で見られた本質が重なっており、米国防総省のRDT&E制度により長期的な研究開発が行われるものと考えられる。

⁴⁰⁴ R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, A. Veitia, D. Sank, E. Jeffrey, T. C. White, J. Mutus, A. G. Fowler, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A. N. Korotkov, A. N. Cleand, and John M. Martinis, "Superconducting Quantum Circuits at the Surface Code Threshold for Fault Tolerance," *Nature* 508, no. 7497 (2014): 500-3. <https://doi.org/10.1038/nature13171>.

第7章 RDT&E制度の技術「保存」機能

本章のはじめに

ここまで述べてきたように、米国防総省の研究、開発、試験及び評価（RDT&E）の制度には、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとするRDT&E制度の能力とも機能ともいえるものが備わっていると推察する。これを、RDT&E制度の技術「保存」機能と呼ぶこととする。この技術「保存」機能は、RDT&E制度に当初から備わっていたのではなく、超電導技術の研究開発を進めていく中で、RDT&E制度の中に備わってきた。超電導技術をはじめ、さまざまな技術の研究開発を行ってきた米国防総省のRDT&E制度の全体像を俯瞰し、そして、技術「保存」機能とその意義について考察する。

第1節 予算

国防総省歳出法のタイトルIVには、陸軍、海軍、空軍、宇宙軍（空軍会計の下）、国防全体のRDT&E会計、運用試験評価部の予算が含まれる。宇宙軍は、2021年度の要求に含まれた新しい会計である。国防全体の会計には、ミサイル防衛局（Missile Defense Agency: MDA）、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）、国防長官室、及びその他の17の米国防総省組織が含まれる。これらの会計には、特定の活動に資金を提供するプログラム要素（program elements: Pes）がある。

米国防総省のタイトルIVの資金は組織によってのみ割り当てられるが、米国防総省の予算の正当化（justifications）、また、議会の歳出報告書及び説明文も、通常、行われることの性質によってこの資金を説明している。この分類は 八つのカテゴリーで構成され、それぞれに予算活動コード（6.1 から 6.8）と説明がある。表29に示す。

コード6.1から6.3のファンディングは、米国防総省によって科学技術（S&T）

予算と呼ばれている。米国防総省RDT&Eのこの部分は、将来の軍事システムの開発に必要な知識のプールと見なされている。対照的に、6.4、6.5、及び6.7のファンドは、現在または短期的な運用ニーズを満たすために、既存の科学的及び技術的知識の応用に焦点を当てている。6.6の資金は、RDT&Eのマネジメントと支援のためのものであり、他のRDT&E予算会計での作業をサポートする。米国防総省は、ソフトウェアとデジタルテクノロジーのパイロットプログラムをサポートするために、2021年度の予算要求に予算活動6.8を追加した。

表29 DODにおけるRDT&Eの予算活動コード

Code	記述
6.1	基礎研究 (Basic Research)
6.2	応用研究 (Applied Research)
6.3	先端技術開発 (Advanced Technology Development)
6.4	先端部品開発・プロトタイプ (Advanced Component Development and Prototypes)
6.5	システム開発・実証 (System Development and Demonstration)
6.6	研究、開発、試験及び評価マネジメント支援 (RDT&E Management Support)
6.7	実機システム開発 (Operational System Development)
6.8	ソフトウェア・デジタル技術実験プログラム (Software and Digital Technology Pilot Programs)

出所: U.S. Department of Defense, Financial Management Regulation (DoD 7000.14-R), Volume 2B, November 2017.
を基に筆者作成

タイトルIVの予算は、1996年度では352億ドルであったが、2000年度頃から急増し、2009年度には800億ドルをわずかに超えるまでになった。その後はいったん下降に転じ、2015年度には637億ドルにまで減少したが、そこから反転し、2022年度には1190億ドルを超えている。

表30は、2022年度のタイトルIV RDT&Eの資金提供を実施項目の特性別に示している。米国防総省の科学技術(S&T)資金(6.1~6.3)は、この資金の188億ドル(15.8%)を占めた。米国防総省の他の歳出タイトル及び補正予算で提供されるRDT&E資金は、実施項目の性質によって解析されないため、

この分析には含まれていない⁴⁰⁵。

表30 実施項目の特性別、タイトルIV RDT&Eの資金提供の割合(2022年度)

	資金の割合
6.1 基礎研究	2.3%
6.2 応用研究	5.8%
6.3 先端技術開発	7.7%
6.4 先端部品開発・プロトタイプ	27.5%
6.5 システム開発・実証	12.6%
6.6 研究、開発、試験及び評価マネジメント支援	7.0%
6.7 実機システム開発	36.4%
6.8 ソフトウェア・デジタル技術実験プログラム	0.6%

注：実機試験・評価部長への資金は6.6に含まれる。秘密研究は6.7に含まれる。

出所：米国議会調査局(CRS)による米国防総省(DOD)2023年度R-1予算の分析を基に筆者作成。

あくまで一般論ではあるが、なにかを開発するとなると、まずは要素技術の基礎研究から始めることになる。要素技術の原理や特性などがわかってくると、今度は、より実際の動作環境に近い状態での応用研究を行う。そして、良い結果の得られた要素技術を組み合わせ、小規模な実証試験、さらには実機での実証試験を経て、実機システムが完成する。この6.1から6.8の予算活動コードは、概ねそのプロセスに沿ったものと言える。また、研究開発の初期段階に比べ、実機システムの実証ともなると、ものによっては大型の実証機や、大型の試験施設が必要となることから、「6.7 実機システム開発」が最大の割合を示すことも理にかなっていると言える。本稿で着目する超電導の研究開発も、上述したようなプロセスを経たであろうことを想定し、考察を進めることとする。

第2節 外部へのファンディング

軍事利用される技術のニーズといえば、究極的には、軍の軍事的なニーズ

⁴⁰⁵ John F. Sargent Jr., “Department of Defense Research, Development, Test, and Evaluation (RDT&E): Appropriations Structure,” Congressional Research Service, Updated September 7, 2022.

である。作戦に必要なニーズから、軍事装備品や軍事用サービスの技術的な仕様が決まる。一方で、シーズは、軍の研究所にある場合もあれば、大学や企業など軍の外部にある場合も、さらには複数の機関に分散して存在する場合もある。

そのため、米国防総省は、研究、開発、試験及び評価の資金をもって、企業、大学、連邦の研究所などにファンディングをしている。科学技術プログラムの中で、基礎研究(6.1)は、特に米国内の大学によって特別な注目を集めている。米国防総省は、基礎研究予算のほぼ半分を大学に費やしている。米国防総省は、航空宇宙工学(64%)、産業・製造工学(60%)、電気・電子・通信工学(59%)、機械工学(49%)、コンピューター・情報科学(47%)、冶金・材料工学(42%)、材料科学(39%)などの分野において大学への重要な連邦研究開発資金の供給源である⁴⁰⁶。

第3節 外国とのパートナーシップ

米国防総省はこれまで、RDT&Eのプロジェクトを、米国内だけではなく、外国とも共同で行ってきている。米国防総省において、国際パートナーシップは、国防次官(調達・維持担当)(Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment)の下にある国際協力室(Office of International Cooperation)が担当し、国防長官(Secretary of Defense)の下にある防衛技術安全保障局(Defense Technology and Security Administration)が評価をする。

国際協力室のウェブサイトには、同室が、国際兵器協力協定(international armaments cooperation agreements)の承認をすること、具体的には、研究、開発、テスト、評価、生産、及び人事交流に関連する国際協定の策定と交渉のための米国防総省の方針を策定し、承認するということを記載している。また、装備共同調達(joint acquisition of equipment)の国際プログラムとして、4つの階層があり、それぞれに次のような手法があると示して

⁴⁰⁶ John F. Sargent Jr., "Defense Primer: RDT&E," Congressional Research Service, Updated November 10, 2022.

いる。まず、最も下の階層は、「ヒト・情報・モノの交換」を行うもので、手法としては、国際標準化協定、データ交換附属書、融資、防衛専門家交流といったものである。その上の階層は、「共同研究・技術」を行うもので、手法としては、研究・開発・試験・評価プロジェクト了解覚書（プロジェクト・アレンジメント）である。さらにその上の階層は、「物資ソリューション」を行うもので、手法としては、共同開発プログラム了解覚書、外国システム評価（外国比較試験）といったものである。そして、最も上の階層での手法は、共同生産了解覚書である（図4）。

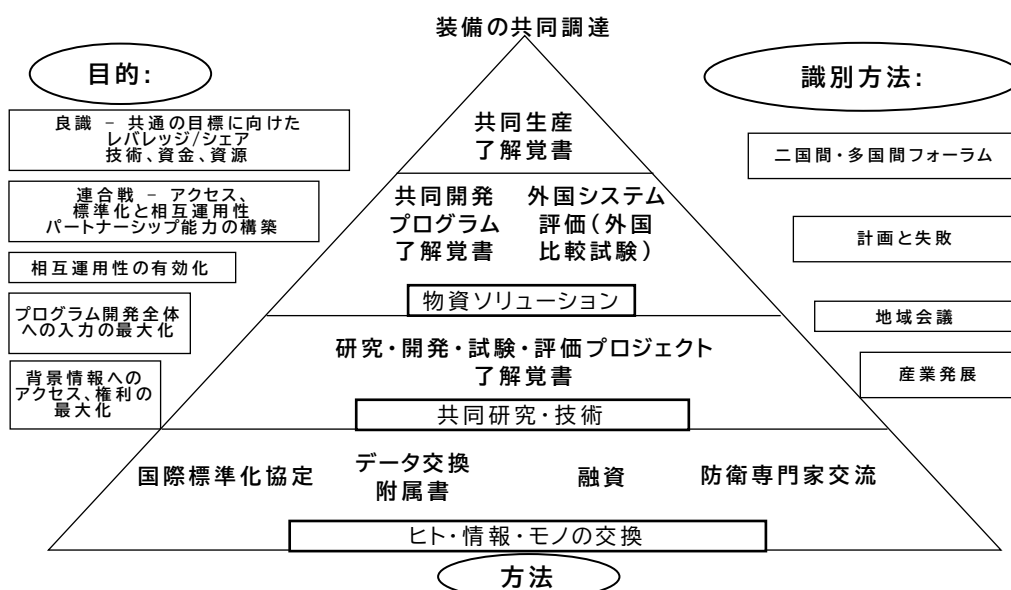


図4 国際プログラムの構成要素

出所：米国防総省国際協力室のウェブサイト⁴⁰⁷を基に筆者作成

米国防総省の国際パートナーシップには、兵器システム及び関連機器の研究、開発、生産、及び支援における米国の同盟国及び友好国との協力及び協働に関連するすべての活動が含まれる。この活動は、同盟国やパートナーと相互運用可能な防衛システムを開発し、防衛調達体系をもって緊密な関係を確立することにより、米軍が共同作戦に備える上で重要な役割を果た

⁴⁰⁷ 米国防総省国際協力室「International Cooperation in DoD Acquisition」。2023年4月5日閲覧。
<https://www.acq.osd.mil/ic/cooperative-acquisition.html>

す。主要な国防長官府レベルの相手方 (counterparties) として、表 31 の国、地域、国家グループを挙げている。

表 31 主要な国防総長官室レベルの国際調達の相手方

世界地理区分	相手方
アフリカ	南アフリカ
アメリカ大陸	アルゼンチン、ブラジル、カナダ、チリ
アジア	インド、インドネシア、日本、シンガポール、韓国、台湾
ヨーロッパ	デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ノルウェー、スペイン、スウェーデン、英国、ウクライナ
オセアニア	オーストラリア
その他	NATO、PASOLS

注：国際連合による世界地理区分を用いている。
出所：米国防総省国際協力室のウェブサイトを基に筆者作成。

米国防総省は、研究、開発、試験及び評価における外国とのパートナーシップにより、国内だけではなく、外国の大学や研究機関、企業から技術のシーズを取り込むことや、大規模な試験を共同で行うといったことが可能となっている。

第 4 節 スピン・オフ、スピン・オン、そしてデュアルユース

米国では、歴史的には、第二次世界大戦後に、原子力の平和利用やロケットの宇宙開発への応用、コンピューターなど、軍事技術のスピン・オフ (Spin-off) が進んだのに対し、1980年代には逆に、民生分野の半導体技術、材料技術などの発展の結果、先端技術のスピン・オン (Spin-on) の重要性が高まり、そして、冷戦終結後の1990年代以降は、ソフトウェアを含む IT の進展が速く、IT 分野のスピン・オンが重要になった⁴⁰⁸。

しかし、本研究で調べた限り、米国防総省の資料およびウェブサイトには、スピン・オンについての記載は、ほぼない。では、米国防総省はスピン・オンを

⁴⁰⁸ 小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』岩波書店、第 88 巻第 6 号、2018 年、647 頁。

しなくなったのかということ、そうではない。スピン・オンは、徐々にデュアルユースの概念に溶け込んでいった。

冷戦時代は、軍事産業と民生産業とが分離し、別々に存在している状態であった。そこでは、両者の相互関係は、異なるセクター間の技術移転として出現する。軍事技術を民生用に移転することをスピン・オフ (spin-off) と呼ぶ。これは、アポロ計画終了後の米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration: NASA) で、宇宙開発の過程で生まれた技術の産業界への技術移転が活発化したことに顕著に現れているように、軍や軍事産業の技術水準が民生産業を凌いでおり、軍事技術がイノベーションや経済発展をリードするという暗黙の前提に基づいている⁴⁰⁹。

1980年代を境に、民生産業、とくに民生用半導体産業、コンピューター産業の技術力が急速に伸び、また民生用であるがゆえに、いわゆる学習効果によるコスト削減が顕著であることから、軍事用の半導体産業等を凌ぐようになってきた。このように、民生用技術の水準が軍事技術のそれを上回る場合、民生技術を軍用技術に応用する方が時間的にもコスト面でも有利になる。そこで民生技術の軍事技術への転換が起きる。これがスピン・オンである⁴¹⁰。

なお、スピン・オンの場合、そのまま軍事用として利用できるわけではなく、なんらかの追加的技術開発が必要になることが多い。そのまま使える場合は、Commercial-Off-The-Shelf (COTS) という。この場合も民生用技術をそのまま転用できるわけではなく、軍事利用を前提とした詳細な仕様 (ミルスペック、MilSpec) を満たすようにするか、逆にMilSpecの緩和が必要になる⁴¹¹。

冷戦が終結すると、国防予算の減少の局面を迎えた。装備品の取得が減少した結果、軍事産業が後退し、再編も避けられず、軍用研究開発基盤を維持することが急速に困難になっていった。また、軍人が減少し、装備や技術の革新が求められることになった。その結果、米国の国防政策は大きく転換することになる⁴¹²。

⁴⁰⁹ 小林信一、細野光章「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス—日米比較から」『研究 技術 計画』第35巻第4号、2021年、450-471頁。

⁴¹⁰ 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471頁。

⁴¹¹ 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471頁。

⁴¹² 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471頁。

DODのウィリアム・ペリー(William J. Perry)長官はまず、1994年6月には、経費削減のために、国防用の納入品に適用されるMilSpecの緩和と COTSの取得を推進する方針を打ち出した。この方針は、クリントン政権下の国家安全保障委員会(Committee for National Security)の1995年の「国家安全保障科学技術戦略」(National Security Science & Technology Strategy)にも引き継がれた⁴¹³。

「国家安全保障科学技術戦略」の主要なポイントは、①防衛関連品の取得改革(COTSの活用による経費削減とMilSpecの適用緩和と民生仕様の製品の取得推進)、②民生用技術の防衛関連技術へのスピン・オンの推進、③防衛のための産業技術基盤と民生向けの産業技術基盤の共通化によるデュアルユース技術開発の推進、④経済安全保障(Economic Security)概念の導入である⁴¹⁴。

③のデュアルユース技術開発の推進は、防衛産業の業界再編が進み、縮小した産業基盤、研究開発基盤の上で、とくに半導体技術、材料技術、ITの開発に独自に対応することは困難であり、また防衛のための産業技術基盤と民生向けの民生用産業技術基盤とを別々に維持することが困難であることから提案されたものである。デュアルユース技術開発の推進が②のスピン・オンと区別されていることから理解できるように、防衛技術開発基盤と民生用技術開発基盤を別のものとして扱う伝統的なスピン・オフ、スピン・オンとは異なって、両方の技術開発基盤を共通化することで、技術開発の最初から防衛用、民生用の技術開発を迅速化する狙いがある。これが、今日的なデュアルユース概念の起源である⁴¹⁵。

ところが、この「国家安全保障科学技術戦略」の流れをくみ、2023年に米国防総省が作成した「国防科学技術戦略2023(National Defense Science and Technology 2023)」には、デュアルユースのことは記載されているが、スピン・オンのことは記載されていない。しかし、同戦略の記載をよく読むと、「過去には、科学技術における国務省のリーダーシップは、米国とその同盟国お

⁴¹³ 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471 頁。

⁴¹⁴ 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471 頁。

⁴¹⁵ 小林、細野「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス」、450-471 頁。

よびパートナーに比類のない能力を提供した。しかし、高度な科学技術は現在、世界中で利用可能である。世界中の企業は、民間資金を投入し、デュアルユースの商用および防衛アプリケーションを使用して研究開発を行っている。商業市場におけるこれらの変化は、誰が軍隊のための最先端の知識とツールを作成するか、そして、国がそれらにアクセスする方法のダイナミクスを変えた。米国防総省は、民間部門との関与をより積極的に行い、新興技術を活用するための適切な投資を行うとともに、開発サイクルの早い段階で重要な新興技術を保護することで、同じことを行う敵対者の試みを未然に防ぐ必要がある⁴¹⁶」と、スピン・オンの記載はないものの、実質的にスピン・オンをすと述べている。

1995年、デュアルユースの概念が導入されたときは、防衛技術開発基盤と民生用技術開発基盤を別のものとして扱う伝統的なスピン・オフ、スピン・オンとは異なり、デュアルユースでは両方の技術開発基盤を共通化することで、技術開発の最初から防衛用、民生用の技術開発を迅速化する狙いがあったが、時間の経過とともにデュアルユースが浸透し、いまやスピン・オフ、スピン・オンの概念が古くなっていると言える。

第5節 技術「保存」機能とその意義

第1節から第4節までに見てきたことは、米国防総省のRDT&E制度により新興技術の研究開発を行うにあたって重要な要素である。まずは予算であるが、基礎研究から実機システムやソフトウェアの開発までの幅広い用途に使えるようになっている。これは、新興技術の研究開発において、基礎研究から始めて応用研究、プロトタイプ、そして実機へと段階的に進めることもできれば、そのうち一部の要素技術をまた別の基礎研究へと切り替えて始めることも可能である。

次は、研究開発のアクターについてであるが、陸・海・空各軍の研究所だけではなく、各軍そして国防高等研究計画局が大学や国立研究機関、企業

⁴¹⁶ 2023 National Defense Science and Technology Strategy, U.S. Department of Defense, 2023.

に対して資金を提供し、研究開発が行えるようになっている。これは、米国防総省の外部からシーズを取り込むこともでき、また、米国防総省の外部に技術を蓄積しておくということも可能である。さらには、外国とのパートナーシップにより、国内だけではなく、外国の大学や研究機関、企業から技術のシーズを取り込むことや、大規模な試験を共同で行うといったことが可能となっている。

そして、デュアルユースの概念が導入されたことにより、防衛技術開発基盤と民生用技術開発基盤を別のものとして扱う伝統的なスピン・オフ、スピン・オンとは異なり、両方の技術開発基盤を共通化することで、技術開発の最初から防衛用、民生用の技術開発を迅速化している。

これらの特徴を持つ米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、第1章にて論じたように、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれたこと、また、米国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことにより、米国防総省のRDT&E制度は、新興技術の研究開発に支援の多様化という新たな効果を及ぼした。軍事利用に近いところまできているものは軍が、一方で、基礎研究を継続するものについては国防高等研究計画局が、それぞれ支援することで、軍としては、ニーズに近いものや、支援の得意なものに集中して支援をすることができるようになった。

また、軍で、あるいは軍が支援して行う研究開発で期待する成果が得られなかったが将来の可能性は残っているという場合には、完全に中止をするのではなく、その一部を、形を変え、国防高等研究計画局の新たなプロジェクトとして支援する。そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となった。

これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシーであり、そして、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術の研究開発を継続させ、将来の軍事利用につなげようとするRDT&E制度の技術「保存」機能の源になっていると考える。

では、どのような目的で技術を保存するのであろうか。ここで、技術を保存

する意義について考察する。一般的に、技術が単体で利用されるということはほとんどなく、関連する技術とともに技術システムとなって利用される。第4章で述べたように、軍事利用に至った新興技術は、いずれも技術システムとなっていた。技術システムが機能するためには、それを構成する各々の技術が、他の技術と調和すること—少なくとも、他の技術を阻害しないこと—が求められる。

技術システムを構成する、ある技術が突出した性能を有したとしても、技術システムを構成する他の技術が、その突出した性能と調和するまでに至っていない場合、技術システムとしては機能し得ない。それでもなお、その技術システムを追求するのであれば、性能が不足する構成要素の研究開発を続け、必要な性能を有するようになるまで待つことも必要となる。待つのが数年であれば、一つの研究開発プロジェクトの中で完結することも可能であるが、10年、あるいは何年か見当もつかず待つようであれば、それだけの期間にわたって一つの研究開発プロジェクトを継続することは、公的資金であれ民間資金であれ、困難である。

研究開発では成功するものもあれば、成功しないものもあるのが現実で、すべてが計画のとおりではない。しかし、計画のとおりにならなかったのは、周辺技術が不足していて技術システムとして機能しなかったという可能性もある。計画のとおりにならなかったからといって、その技術を手放してしまえば、いざ周辺技術が成熟したというとき、技術システムにすることができない。科学技術の文脈で、大学の自由な研究開発や企業の自発的な研究開発に技術の継承を委ねることも可能ではあろうが、それでは技術が必ずしも継承されるとは限らない。可能性はあるが直ぐには軍事的に実用化に至らない技術は、米国防総省が自ら保持し、または外部の大学や企業などを支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげることが重要であり、これが、技術を保存する意義であると考えられる。

本章のおわりに

超電導技術をはじめ、さまざまな技術の研究開発を行ってきた、米国防総

省のRDT&Eの制度の現在を示した。米国防総省は、1000億ドルを超える予算で、基礎研究から実機システム開発まで幅広く行っている。資金は、陸海空軍の研究所といった米国防総省内部での研究開発に加え、大学や企業など外部機関へのファンディングに使われる。また、米国防総省では、RDT&Eのプロジェクトを、米国内だけではなく、外国と共同で行ってこいる。

米国では、歴史的には、第二次世界大戦後に、軍事技術のスピンのオフが進んだのに対し、1980年代以降には逆に、民生分野のスピンのオンが重要になったと言われるが、1995年、デュアルユースの概念が導入され、時間の経過とともにデュアルユースが浸透し、いまやスピンのオフ、スピンのオンの概念が古くなっている。

米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれたこと、また、国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことにより、米国防総省のRDT&E制度は、超電導技術の研究開発に支援の多様化という新たな効果を及ぼした。

軍事利用に近いところまできているものは軍が、一方で基礎研究を継続するものについては国防高等研究計画局が、それぞれ支援の得意なものに集中して支援をすることができるようになった。また、軍で、あるいは軍が支援をして行っていた研究開発で期待する成果が得られなかったが将来の可能性は残っているという場合には、形を変え、国防高等研究計画局の新たなプロジェクトとして支援し、そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となった。これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシーとなり、ひいては、RDT&E制度の技術「保存」機能の源になっている。

研究開発ではすべてが計画のとおりとはいかない。しかし、計画のとおりにならなかったのは、周辺技術が不足していて技術システムとして機能しなかったという可能性もある。計画のとおりにならなかったからといって、その技術を手放してしまえば、いざ周辺技術が成熟したというとき、技術システムにすることができない。科学技術の文脈で、大学の自由な研究開発や企業の自発的な研究開発に技術の継承を委ねることも可能ではあろうが、それでは技

術が必ずしも継承されるとは限らない。可能性はあるが直ぐには軍事的に実用化に至らない技術は、米国防総省が自ら保持し、または外部の大学や企業などを支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげることが重要であり、これが、技術を保存する意義であると考えている。

終章

第1節 まとめ

本稿は、米国防総省が行った超電導技術の研究、開発、試験及び評価（RDT&E）を事例として分析することにより、米国防総省が、同省の制度の下、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとしていることを明らかにしたものである。

米国防総省では、軍事利用を想定した技術の研究開発を、世界最大規模の予算で行っており、そして、その対象には、既存技術の限界を超える、あるいは既存技術では実現不可能なことを実現し得る技術—いわゆる、新興技術—も含まれる。しかし、研究開発では成功するものも、成功しないものもあり、すべてが計画のとおりとはいかない。過去に研究開発の蓄積のない新興技術ともなれば、成功の予見はさらに難しいものとなる。

公的資金による研究開発、特に軍事技術においては、達成目標を決めてプロジェクトを推進し、目標が達成できた場合は次の段階に移行することもできるが、達成できなかった場合はそれで終了となるというのが一般的である。ところが、米国防総省においては、計画のとおりではなかった、あるいは、目標を達成できなかった場合でも、必ずしも終了ということはなく、研究開発が継続するものもある。米国防総省では、軍事的にはほとんど利用されていない超電導技術の研究開発を70余年にわたって行っているが、これは、他国にはない、米国固有のアプローチである。

米国防総省のRDT&E制度の資金は米国政府の公的資金であり、その成果は、軍が持つにせよ、大学や企業が持つにせよ、広い意味では国の資産である。研究者の関心は常に移り変わっていくものであり、研究開発のコミュニティに任せていたのでは、研究開発が継続せず、その資産が継承されないかもしれないが、米国防総省は研究開発が継続するように仕掛けている。その背景には二つのことが考えられる。一つは、技術の可能性をオープンに考え

ているということ。技術のシーズは、米国防総省であれ、大学や企業などであれ、どこかにあって使えればよいということである。もう一つは、軍事的に利用できるまでの時間を長くとらえているということ。数年の研究開発プロジェクトで期待する成果が得られなかったとしても、さらに先で軍事利用ができればよいということである。

国の資産である研究開発の成果を米国防総省に残し、いつでも再生できるようにしておくため、RDT&E制度には研究開発を継続できる仕組みが備わっていると考えた。これは、ある瞬間を見ただけでは分からないが、あとになって振り返ってみれば分かるものである。そこで、RDT&E制度が新興技術の研究開発にどのような影響を与えていたのか、かつての新興技術である超電導技術の研究開発の歴史を見ていった。

超電導は、1911年の発見以来、世界中で超電導技術の研究開発が行われるようになった。米国防総省としては、第二次世界大戦終結直後から超電導の研究開発を始めていた。海軍は、主に軍の研究所で研究開発を行い、陸軍と、1947年に陸軍から独立して設立された空軍は、主に大学や企業などの外部へのファンディングを通じて、基礎研究から軍事的な応用開発まで、さまざまな研究開発を幅広く行っていた。米国防総省としては、超電導の軍事利用を模索したものの、超電導には解明されていないことが多く、基礎研究から行う必要があった。

1986年に高温超電導体が発見されると、米国防総省内にワーキング・グループを立ち上げ、翌年7月には国防総省超電導研究開発 (Department of Defense Superconductivity Research and Development: DSRD) プログラムのための報告書をまとめた。11点の超電導イニシアチブの発表、1988年の国家超電導及び競争力法の成立を受け、米国防総省としては、厳しい財政状況の中、RDT&Eの予算を増やすことに成功した。しかし、高温超電導には解明されていないことが多く、基礎研究に資源が割かれた。やがて、5年もすると頭打ちの兆しが見え始めた。

米国を取り巻く環境は、レーガン大統領(当時)の任期満了に、冷戦の終結、民主党への政権交代と、大きく変わりつつあった。クリントン政権は、超電導超大型加速器(SSC)の計画を中止した。SSCはエネルギー省の管轄で

あることや、SSCで使用するのは高温超電導ではなく低温超電導であることなど、米国防総省における高温超電導の研究開発には直接、影響はなさそうにも見える事象であったが、超電導への熱い期待を冷ます一つの要因にはなつたと考えられる。しかし、超電導への熱い期待を冷ます最も大きな要因は、期待したほどの芳しい研究開発成果が出てこないということであったであろう。発見されたばかりでまだ基礎研究の段階にあった高温超電導に、わずか3年や5年で目覚ましい成果を期待したとすれば、期待が大きすぎた。

ブームが終わった後の1990年代も、将来的な要素技術として、また、他国に先行されないため、研究開発を継続させる必要があり、そのための方法もまた必要であった。予算は減少していったが、米国防総省は基礎研究から応用開発へと重心を移し、その他多数の研究開発の中で超電導技術の研究開発が継続している実態があった。この頃から国防高等研究計画局（DARPA、1993年～1996年のARPAの時代を含む）の関与が顕在化してきていた。また、海軍の高温超電導宇宙実験（HTSSE）に見られるように、大型の研究開発プロジェクトが出現してきた。

2000年代には、ナノテクノロジーや量子という新たなイニシアチブの文脈で、過去のイニシアチブである超電導の研究開発が行われた。また、超電導では初めて国防生産法タイトルIIIプログラムが発動し、超電導技術の実用化が進められた。

かつての新興技術である超電導技術は、ほとんど軍事的な利用には至っていない。その他多数の研究開発に溶け込んで、目立たなくはなつたが、研究開発は継続している。この点について、次のように考察した。

ブーム期には、ニーズ側の過剰な期待や、すり合わせる媒体の不在などにより、シーズとニーズがミスマッチを起こしていたが、長いスパンで見れば、実用化に向けて着々と進んでいた。むしろ、シーズとニーズがミスマッチを起こし、期待する成果が得られてはいないものの、将来の軍事利用のために超電導技術を残しておこうとしたこと自体が、長期にわたって技術の保存を実現する機能を備える制度を構築する原点となった可能性が考えられる。

ブームが終わった後も、将来的な要素技術として、また、他国に先行されないために、研究開発を継続させる必要があり、そのための方法もまた必要で

あった。その方法の一つとして、ナノテクノロジーや量子という新たなイニシアチブの文脈で、過去のイニシアチブである超電導の研究開発が行われていた。そして、この新たなイニシアチブにおいては、11点の超電導イニシアチブにおいて明確ではなかった政治的意思の継続が図られていた。

この概念を拡大すると、研究開発が成功するまでに時間のかかる、重要な技術、あるいは新興技術については、シーズとニーズの適時かつ冷静なすり合わせ、そして、将来の軍事利用を見据えた継続的な研究開発が必要であり、そのためには、シーズとニーズを適合させることを目的とする媒体の存在、そして、政治的意思の継続と、予算の継続が重要であり、翻って、政治的意思の継続を作り出す仕掛けとして、また、予算の継続を作り出す仕掛けとしての断続的なイニシアチブの発動とその継続が重要であると推察する。

そして、この、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとするRDT&E制度の能力とも機能ともいえるものは、RDT&E制度に当初から備わっていたのではなく、超電導技術の研究開発を進めていく中で、RDT&E制度の中に備わってきたものと推察する。

軍事利用される技術とされない技術との違いは何か、研究開発の末に軍事的に利用されることになった技術にはどのような特徴があるのか、このような視点で、軍事利用に至ったステルス、全地球測位システム(GPS)、インターネットを考察してみた。それらには、明確な軍事的ニーズが初めからあり、技術システムであり、研究開発は長期にわたっており、研究開発に協力する企業があり、明確な競争相手はおらず、代替技術はなく、倫理的な争点がなく、欠点はあったが許容できたといった共通点が見られ、一方で、軍事行動における使用形態、研究開発段階における機密性、民生利用の度合いには違いも見られた。

では、超電導技術の軍事利用についてはどうか。過去の研究開発の計画の進捗と成果を俯瞰するとともに、軍事利用された技術と比較し、その違いを分析してみた。小規模なアプリケーションについては、競合技術、特に半導体技術の飛躍的な進歩により、超電導の必要性が低下している可能性がある。一方、大規模なアプリケーションについては、両用技術(デュアルユース)

として、民生利用されているものもあり、また、軍事用途として研究開発が継続しているものもあった。超電導技術の利用が検討されていた電磁カタパルトを事例として、その検討の過程を追ってみたが、超電導技術の採用には困難があったと推察する。

実用化されている超電導技術である超電導電磁石と超電導量子干渉計(SQUID)では低温超電導体が用いられており、高温超電導体による代替はほとんど見られない。超電導技術は、軍事的なニーズはあり、かつ倫理的な争点はないという好適な条件にあるものの、代替技術が存在する中、許容しがたい欠点をかかえ、また、民生利用の度合いの低いものを、科学的原理がよくわからないまま、機密性高く行っているという状況が浮かび上がった。

さらに、かつての新興技術である超電導に焦点を当てて考察をしてきたことを、現在の新興技術である量子情報科学の軍事利用の可能性を論じることに用いることはできないか試行した。それによると、量子情報科学は、明確な競争相手がいて研究開発を急ぐ必要があるが、軍事的に利用できるものになることを確実に支持する理論はいまだ確立しておらず、また、複雑な技術システムであり、さらに、軍事以外の用途も幅広く考えられ、人工知能での利用を除けば倫理的な争点はなく、民間企業の参入意欲も高く、デュアルユースではあるが、実態は、軍事利用もできる民生技術と言える。

一方で、量子コンピューターにより暗号が無力化することの脅威は、国防のみならず行政全般、さらには民間にも広く影響することが考えられ、国全体、あるいは国際社会全体での取り組みが必要である。また、量子通信については、基盤インフラとしての産業的価値と安全保障との両立が難題である。

量子情報科学は、軍事利用の可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術という超電導で見られた本質が重なっており、米国防総省のRDT&E制度により長期的な研究開発が行われるものと考えられる。

その米国防総省のRDT&E制度の基本設計は、1995年の国家安全保障科学技術戦略にあった。国防予算の中に科学技術予算が組み込まれたこと、また、米国防総省科学技術プログラムとして各アクターの役割が明確になったことにより、米国防総省のRDT&E制度は、超電導技術の研究開発に支援の多様化という新たな効果を及ぼした。軍事利用に近いところまできている

ものは軍が、一方で、基礎研究を継続するものについてはDARPAが、それぞれ得意なものに集中して支援をすることができるようになった。また、軍での研究開発で期待する成果が得られなかったが将来の可能性は残っているという場合には、形を変え、DARPAの新たなプロジェクトとして支援し、そして、そのプロジェクトに軍事利用の可能性が見えてきたときには、軍で、あるいは軍が支援をして研究開発を行うということが可能となった。これが米国防総省のRDT&E制度のレジリエンシーとなり、ひいては、RDT&E制度の技術「保存」機能の源になっていると考える。

米国防総省が超電導の研究開発を初めてから70余年が過ぎているが、高温超電導電磁石による自動機雷掃海といった直接的なものから、量子(センシング/コンピューター/通信)といった、一見して超電導には見えないものまで、超電導技術の研究開発はいまなお続いている。そして、いまや米国防総省では、すべての技術は民生と軍事の両用技術(デュアルユース)であると見ていると言っても過言ではなく、超電導技術の民生利用が進めば、軍事利用の可能性も広がる。

研究開発ではすべてが計画のとおりとはいかない。しかし、計画のとおりにならなかったのは、周辺技術が不足していて技術システムとして機能しなかったという可能性もある。計画のとおりにならなかったからといって、その技術を手放してしまえば、いざ周辺技術が成熟したというとき、技術システムにすることができない。科学技術の文脈で、大学の自由な研究開発や企業の自発的な研究開発に技術の継承を委ねることも可能ではあろうが、それでは技術が必ずしも継承されるとは限らない。可能性はあるが直ぐには軍事的に実用化に至らない技術は、米国防総省が自ら保持し、または外部の大学や企業などを支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげることが重要である。

米国防総省のRDT&Eの制度は、軍事予算でありながら、科学技術予算でもあり、技術が注目を集めて予算が拡大するときも、実用化に向けた研究だけではなく基礎研究に資源を割くことができ、また、軍事利用に至っていない技術であっても、他の研究開発の枠組みのなかで基礎研究を続けることができる、レジリエンシーのある制度であり、技術「保存」機能を有するものであ

ると考えるに至った。

米国防総省のRDT&E制度がもつ、この技術「保存」機能が、可能性はあるが直ぐには実用化に至らない技術を、保持または支援して、徐々にでも前進させ、将来の軍事利用につなげようとする米国防総省の取り組みを強固に支え、新興技術の軍事利用に深く寄与しているものとする。

第2節 今後の課題

科学的な発見は、それを利用する技術へと発展するものもあれば、そうでないものもある。新たに生まれた技術は、技術システムに組み込まれ、それが使えるものであれば、ほとんどの場合、軍事用途にも民生用途にも使われる、両用技術(デュアルユース)となる。しかし、超電導については、いまのところ、わずかに民生利用される一方、ほとんど軍事利用されていない。

米国防総省としては、相当の研究開発費を超電導技術につぎ込んでいる。実は、公表していないだけで、水面下で着々と軍事利用を行っているのかもしれない。少なくとも超電導を利用する量子コンピューターへの投資は、超電導への投資の延長線上にあると考えている。本稿を通じて見たものは、70年以上にわたる、米国防総省における超電導技術の研究、開発、試験及び評価の、ごく一部に過ぎない。

調べられなかった文献、見落とした議論、秘密指定されているために読むことのできない資料が、まだあるはずである。それらを探して読み解くことにより、米国防総省における超電導の研究開発の全体像がより鮮明に見えてくるに違いない。そして、それにより、米国防総省のRDT&E制度における、技術「保存」機能ではない他の機能を解明することができるかもしれない。

また、本研究で考察した、米国防総省のRDT&E制度における技術「保存」機能は、超電導技術については検証したものの、他の技術においても同様のことが言えるかどうかはわからない。米国防総省が行った他の技術の研究開発についても検証し、米国防総省のRDT&E制度がもつ機能、そしてその効果について、さらなる研究の余地があるとする。

謝辞

本稿は、「なぜ科学的発見は軍事技術になるのか？」という、漠然とした、いまから考えれば未熟な問いから始まった考察を、何とか論文にまで昇華させ、まとめたものである。他大学で理学（物理学）で修士をとって、社会人となり、20数年の時を経て突然、「安全保障を科学技術の面から研究したい。」と、安全保障の博士後期課程に転がり込んだ私に、「軍事技術という技術があるのか？」、「すべての科学的発見は軍事利用されるのか？」、「軍事利用される技術とされない技術にはどのような違いがあるのか？」、「何が独立変数で、何が従属変数か？」・・・さまざまな問いかけで導いてくださった佐藤丙午教授には、最大限の感謝を申し上げたい。そのほか、一人ひとりのお名前は割愛するが、いろいろな質問や意見をいただいたゼミの皆様にも感謝を申し上げたい。社会人になって思うことは、大学・大学院というのは、夢のような時間だということである。その貴重な時間を、また与えてくれた拓殖大学に感謝を申し上げたい。この機会を必ず、これからの人生に活かしていかなければと思う。

参考文献目錄

【一次資料(英語)】

- Feickert, Andrew. *The U.S. Army's Long-Range Hypersonic Weapon (LRHW)*. Congressional Research Service. Updated March 31, 2023.
- Figliola, Patricia Moloney. *Federal Quantum Information Science: An Overview*. Congressional Research Service. July 2, 2018.
- Figliola, Patricia Moloney. *Quantum Information Science: Congressional Activity and Federal Policy Recommendations*. Congressional Research Service. April 28, 2020.
- Gallo, Marcy E. *Defense Advanced Research Projects Agency: Overview and Issues for Congress*. Congressional Research Service. August 19, 2021.
- National Audit Office, UK. *Carrier Strike: The 2012 reversion decision*. Report by the Comptroller and Auditor General, HC 63, SESSION 2013-14, 10 MAY 2013.
- Naval Research Advisory Committee. *Superconductivity*. Arlington, VA: Office of Naval Research, U.S. Navy, July 1989.
- O'Rourke, Ronald. *Navy Ford (CVN-78) Class Aircraft Carrier Program: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, July 16, 2009.
- O'Rourke, Ronald. *Navy Ford (CVN-78) Class Aircraft Carrier Program: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, August 26, 2022.
- Platzer, Michaela D., Karen M. Sutter, and John F. Sargent Jr. *Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy*. Congressional Research Service, October 26, 2020.
- Report of the Ad Hoc Committee on Principles of Research-Engineering Interaction*. AD0636529. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966.
- Sargent, John F. Jr. *Department of Defense Research, Development, Test, and Evaluation (RDT&E): Appropriations Structure*. Congressional Research Service, October 7, 2020.
- Sargent, John F. Jr., Eva Lipiec, Genevieve K. Croft, Daniel Morgan, Marcy E. Gallo, Kavya Sekar, Laurie A. Harris, and Jerry H. Yen. *Federal Research and Development (R&D) Funding: FY2022*. Congressional Research Service, September 13, 2021.
- Sargent, John F. Jr., and Marcy E. Gallo. *The Global Research and Development Landscape and Implications for the Department of Defense*. Congressional Research Service, June 28, 2021.
- Sargent, John F. Jr. *Defense Primer: RDT&E*. Congressional Research Service, November 10, 2022.
- Sargent, John F. Jr. *Department of Defense Research, Development, Test, and Evaluation (RDT&E): Appropriations Structure*. Congressional Research Service, September 7, 2022.
- Saylor, Kelley M. *Defense Primer: Quantum Technology*. Congressional Research Service, Updated

September 12, 2022.

- Sayler, Kelley M, Ronald O'Rourke, and Andrew Feickert. *Department of Defense Directed Energy Weapons: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, Updated September 13, 2022.
- Sayler, Kelley M. *Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, Updated November 1, 2022.
- Sayler, Kelley M. *Defense Primer: Emerging Technologies*. Congressional Research Service, Updated November 14, 2022.
- Sayler, Kelley M. *Defense Primer: Quantum Technology*. Congressional Research Service, Updated November 15, 2022.
- Sayler, Kelley M. *Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, Updated February 13, 2023.
- Sayler, Kelley M. *Defense Primer: Directed-Energy Weapons*. Congressional Research, Updated May 18, 2023.
- Torreón, Barbara Salazar, and Sofia Plagakis. *Defense Authorization and Appropriations Bills: FY1961-FY2021*. Congressional Research Service, July 12, 2021.
- U.S. Congress. "Defense Production Act of 1950." Chapter 55: Defense Production of 50 U.S. Code.
- U.S. Congress. "An Act to Authorize Appropriations for Nanoscience, Nanoengineering, and Nanotechnology Research, and for Other Purposes." Public Law 108-153, 108th Congress, 2003.
- U.S. Congress. House Hearing, 111th Congress - [H.A.S.C. No. 111-83] *Oversight of The Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*. July 16, 2009.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment. *Commercializing High-Temperature Superconductivity*. OTA-ITE-388. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, June 1988.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment. *High-Temperature Superconductivity in Perspective*. OTA-E-440. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, April 1990.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment. *Contributions of DOE Weapons Labs and NIST to Semiconductor Technology*. OTA-ITE-585. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, September 1993.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment. *Defense Conversion: Redirecting R&D*. OTA-ITE-552. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, May 1993.
- U.S. Defense Security Cooperation Agency. "United Kingdom – Electromagnetic Aircraft Launch System Long Lead Sub-Assemblies." News Release, November 15, 2011.
- U.S. Defense Security Cooperation Agency. "France – Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS) and Advanced Arresting Gear (AAG)." News Release, December 21, 2021.
- U.S. Department of Commerce. *Critical Technology Assessment of the U.S. Superconductivity Industry*. March 1994.
- U.S. Department of Defense. *Defense Budget Overview: United States Department of Defense Fiscal*

Year 2024 Budget Request. Office of the Under Secretary of Defense (Comptroller)/Chief Financial Officer. March 2023.

- U.S. Department of Defense. *Summary of the 2018 Department of Defense Artificial Intelligence Strategy: Harnessing AI to Advance Our Security and Prosperity*. 2018.
- U.S. Department of Defense. *The Department of Defense Superconductivity Research and Development (DSRD) options. A study of possible directions for exploitation of superconductivity in military applications*. ADA189747. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1987.
- U.S. Department of Defense. *2022 National Defense Strategy of the United States of America*. 2022.
- U.S. Department of Defense. *2023 National Defense Science and Technology Strategy*. 2023.
- U.S. Department of Justice. “Chinese Agent Sentenced to Over 24 Years in Prison for Exporting United States Defense Articles to China.” for Immediate Release, March 24, 2008.
https://www.justice.gov/archive/opa/pr/2008/March/08_nsd_229.html (Accessed October 23, 2022)
- U.S. General Accounting Office. *Federal Research: Superconducting Super Collider’s Total Estimated Cost Will Exceed \$11 Billion*. GAO/T-RCED-93-57. June 1993.
- U.S. General Accounting Office. *Defense Conversion: Status of DOD Funding and Spending*. GAO/NSIAD-94-218BR. June 1994.
- U.S. General Accounting Office. *Army Logistics: Status of Proposed Support Plan for Apache Helicopter*. GAO/NSIAD-99-140. July 1999.
- U.S. General Accounting Office. *Defense Acquisitions: Comanche Program Cost, Schedule, and Performance Status*. GAO/NSIAD-99-146. August 1999.
- U.S. Government Accountability Office. *Information on Options for Naval Surface Fire Support*. GAO-05-39R. November 2004.
- U.S. Government Accountability Office. *Defense Acquisitions: Navy Faces Challenges Constructing the Aircraft Carrier Gerald R. Ford within Budget*. GAO-07-866. August 2007.
- U.S. Government Accountability Office. *Ford-Class Carriers: Lead Ship Testing and Reliability Shortfalls Will Limit Initial Fleet Capabilities*. GAO-13-396. September 2013.
- U.S. Government Accountability Office. *Ford-Class Aircraft Carrier: Follow-On Ships Need More Frequent and Accurate Cost Estimates to Avoid Pitfalls of Lead Ship*. GAO-17-575. June 2017.
- U.S. Government Accountability Office. *Science & Tech Spotlight: Hypersonic Weapons*. GAO-19-705SP. September 16, 2019.
- U.S. Government Accountability Office. *Hypersonic Weapons: DOD Should Clarify Roles and Responsibilities to Ensure Coordination across Development Efforts*. GAO-21-378. March 2021.
- U.S. Government Accountability Office. *Quantum Computing and Communications: Status and Prospects*. GAO-22-104422. October 2021.
- U.S. Government Accountability Office. *Air Force and Navy Aviation: Action Needed to Address Persistent Sustainment Risks*. GAO-22-104533. June 2022.

U.S. Government Accountability Office. *Directed Energy Weapons: DOD Should Focus on Transition Planning*. GAO-23-105868. April 2023.

U.S. National Security Agency. *Superconducting Technology Assessment*. Fort George G. Meade, MD: NSA Office of Corporate Assessments, August 2005.

White House. *The National Security Science and Technology Strategy*. Washington, DC: Committee for National Security, 1995.

White House. *National Strategy for Critical and Emerging Technologies*. Washington, DC, October 2020.

【書籍・論文(日本語)】

岩間仁、近藤正幸「製品開発におけるニーズとシーズの融合」『研究・技術計画学会年次大会講演要旨集』第18巻、2003年、441-444頁。

岩間仁「製品イノベーションにおける、ニーズとシーズの融合と顧客価値創造のメカニズムの研究」博士論文、横浜国立大学、2008年。

江頭信正「超電導光センサ」『照明学会誌』第78巻第3号、1994年、120-125頁。

王鎮、川上彰、鶴澤佳徳「テラヘルツ帯超伝導発振器と検出器に関する研究」『情報通信研究機構季報』Vol. 50、Nos. 1/2、2004年、25-35頁。

上之蘭博「高温超電導フィーバーを憶う」『低温工学』第39巻第9号、2004年、375頁。

川辺潮「酸化物高温超電導体の素子応用」『日本金属学会会報』第26巻第10号、1987年、977-979頁。

菊池誠「半導体デバイス研究開発の歴史的な展開：トランジスタから集積回路まで」『応用物理』第69巻第8号、2000年、913-918頁。

北澤宏一「超伝導応用の新展開」『応用物理』第70巻第1号、2001年、3-13頁。

小林信一「デュアルユース・テクノロジーをめぐって」『科学』第88巻第6号、2018年、0645-0652頁。

小林信一、細野光章「大学におけるデュアルユース技術開発とガバナンス—日米比較から」『研究 技術 計画』第35巻第4号、2021年、450-471頁。

佐野正博「経営技術論的視点から見たデュアルユース」『学術の動向』第22巻第5号、2017年、30-37頁。

杉本昌弘、坪内宏和、伊井秀樹、高木亮、遠藤壮、清水仁司「ブロンズ法Nb₃Sn超電導線材の開発動向—素線の高性能化と導体化—」『低温工学』第47巻第8号、2012年、479-485頁。

鈴木克己「酸化物高温超伝導体マイクロ波デバイスの進展」『応用物理』第64巻第4

- 号、1995年、335-338頁。
- 武居秀実「超電導発電機」『電気学会誌』第124巻第7号、2004年、401-404頁。
- 太刀川恭治「ニオブ3・すず線材物語」『低温工学』第39巻第9号、2004年、377-382頁。
- 田中昭二「20世紀における超伝導の歴史と将来展望」『応用物理』第69巻第8号、2000年、940-948頁。
- 田中史郎「技術、軍事、そして資本主義—デュアルユースと戦争ビジネスをどうとらえるか」『季刊 経済理論』第55巻第3号、2018年10月、6-14頁。
- 田中雅光、藤巻朗、井上弘士「単一磁束量子回路に基づくマイクロプロセッサの動向と展望」『低温工学』第52巻第5号、2017年、323-331頁。
- 辻晃士「有償援助(FMS)調達の概要と課題」『調査と情報—ISSUE BRIEF—』国立国会図書館、No.1176、2022年3月1日。
- 内藤方夫「マيسナー効果」『応用物理』第59巻第5号、1990年、651(99)-652(100)頁。
- 中田敦「米政府が暗号を解読、崩れるネットの安全性」『日経コンピュータ』2013年10月3日号、2013年、46-47頁。
- 那野比古「セラミックス超電導のすべてがわかる本—夢の技術に産業社会は何を期待できるか」こう書房、東京都、1987年。
- 成瀬雅人、安藤友彦、久保田立記、桑田正博、田井野徹、明連広昭「超伝導共振器を用いた超高感度光子センサー —ミリ波からガンマ線まで—」『低温工学』第54巻第3号、2019年、174-180頁。
- 西山淳一「防衛技術とデュアルユース」『学術の動向』第22巻第5号、2017年、48-55頁。
- 野澤哲生「超電導コンピューターが離陸へ スパコンの電力を1/2000に：量子コンピューターの制禦にも利用」『日経エレクトロニクス』、2021年4月、18-21頁。
- 福山秀敏、秋光純[編]「超伝導ハンドブック」朝倉書店、東京都、2009年。
- 古田彩「二人の悪魔と多数の宇宙—量子コンピュータの起源」『日本物理学会誌』第59巻第8号、2004年、512-519頁。
- 堀内正隆「超電導技術が米国の研究開発政策に与えた影響—防衛政策の転換との関連性を中心に—」『拓殖大学大学院国際協力学研究科紀要』第15号、2022年、105-122頁。
- 堀内正隆「米国国防総省における超電導技術利用に関する—考察—電磁カタパルトの事例を中心に—」『拓殖大学大学院国際協力学研究科紀要』第16号、2023年、139-160頁。

牧直樹、山口潔、高橋身佳、尾杉久直、八木恭臣「超電導発電機の主要技術」『日立評論』第71巻第7号、1989年、43-48頁。

宮田由紀夫「アメリカのイノベーション政策」昭和堂、京都府、2011年。

松村昌廣「米国—急激な縮小・再編成」第1章『軍事技術覇権と日本の防衛：標準化による米国の攻勢』芦書房、2008年。

向井寛人、朝永顕成、蔡兆申「超伝導量子コンピュータの基礎と最先端」『低温工学』第53巻第5号、2018年、278-286頁。

森聡「米国の「オフセット戦略」と「国防革新イニシアティブ」」第5章『米国の対外政策に影響を与える国内的諸要因』平成27年度外務省外交・安全保障調査研究事業 国際秩序動揺期における米中の動勢と米中関係 報告書、公益財団法人日本国際問題研究所[編](2016年3月)53-67頁。

和田英男「日本における赤外線センサ技術の開発」『日本赤外線学会誌』第14巻第2号、2005年、7-12頁。

「民間企業の研究活動に関する調査報告2019」、NISTEP REPORT、No.186、文部科学省科学技術・学術政策研究所、2019。 <http://doi.org/10.15108/nr186>

「民間企業の研究活動に関する調査報告2020」、NISTEP REPORT、No.191、文部科学省科学技術・学術政策研究所、2021。 <https://doi.org/10.15108/nr191>

P・N・エドワーズ『クローズド・ワールド—コンピュータとアメリカの軍事戦略』深谷庄一監訳、日本評論社、2003年。

【書籍・論文(英語)】

Abelson, L., P. Bunyk, M. Dorojevets, Q. Herr, G. Kerber, A. Kleinsasser, A. Silver, and D. Strukov. "Superconductor Electronics Technology for High End Computing." *International Superconductive Electronics Conference: (Sydney, Australia, 7-11 July 2003)* (2003).

Ackermann, R. A., R. L. Rhodenizer, and C. O. Ward. "A Superconductive Field Winding Subsystem for a 3000 Hp Homopolar Motor." *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 772-5. <https://doi.org/10.1109/tmag.1977.1059339>.

Ahmad, I., W. J. Heffernan, and D. U. Gubser. "Preparation of Continuous, Superconducting and High Strength NB₃GE Composite Filament." *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 483-6. <https://doi.org/10.1109/tmag.1977.1059292>.

Alic, John A. "Superconductivity: A Test for U.S. Technology Policy." *Forum for Applied Research and Public Policy* (Fall 1990): 48-56.

Bahret, W.F. "The Beginnings of Stealth Technology." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 29, no. 4 (1993): 1377-85. <https://doi.org/10.1109/7.259548>.

Balachandran, U., and A. N. Iyer. "Status of High-T_c Superconductors." *Material Technology* 11, no. 4

(1996): 145-52. <https://doi.org/10.1080/10667857.1996.11752685>.

- Bardasis, Angelo. *Part I: Excitons and Plasmons in Superconductors, Part II: Lifetime Effects in Condensed Fermion System*. AD0271181. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1961.
- Barends, R., J. Kelly, A. Megrant, A. Veitia, D. Sank, E. Jeffrey, T. C. White, J. Mutus, A. G. Fowler, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A. N. Korotkov, A. N. Cleand, and John M. Martinis. "Superconducting Quantum Circuits at the Surface Code Threshold for Fault Tolerance." *Nature* 508, no. 7497 (2014): 500-3. <https://doi.org/10.1038/nature13171>.
- Barnes, Paul N., Michael D. Sumption, and Gregory L. Rhoads. "Review of High Power Density Superconducting Generators: Present State and Prospects for Incorporating YBCO Windings." *Cryogenics* 45, no. 10-11 (2005): 670-86. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.09.001>.
- Barnes, Paul N., George A. Levin, and Edward B. Durkin. *Superconducting Generators for Airborne Applications and YBCO-Coated Conductors (preprint)*. ADA489118. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2008.
- Barnett, L. R., K. R. Chu, J. M. Baird, V. L. Granatstein, and A. T. Drobot. "Gain, Saturation, and Bandwidth Measurements of the NRL Gyrotron Travelling Wave Amplifier." 1979 International Electron Devices Meeting, Washington, DC (1979): 164-7. <https://doi.org/10.1109/iedm.1979.189568>.
- Basarab, Douglas J., Michelle A. Dornath-Mohr, Donald W. Eckart, Robert D. Finnegan, and Joseph P. Klimek. *Fabrication and Characterization of Yttrium Barium Copper Oxide Superconductors for Microwave Applications*. ADA231713. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991.
- Batlogg, Bertram J., Robert Buhrman, John R. Clem, Donald Gubser, David Larbalestier, Donald Liebenberg, John Rowell, Ronert, Schwall, David T. Shaw, and Arthur W. Sleight. "New Research Opportunities in Superconductivity IV." *Journal of Superconductivity* 10, no. 6 (1997): 583-621. <https://doi.org/10.1007/bf02471924>.
- Bean, John, Paul Shebalin, and William Solitario. *Systems Engineering a Naval Railgun*. ADA476695. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2006.
- Belanich, James, Leonard Buckley, Joan Cartier, Michael Finnin, Natalie Gluck, Leon Hirsch, Jenny Holzer, Allison King, James Ralston, Pamela Rambow, Felicia Sallis-Peterson, Jeffrey Snyder, Mark Taylor, and Stuart Wolf. *DoD's Multidisciplinary University Research Initiative (MURI) Program: Impact and Highlights from 25 Years of Basic Research*. Alexandria, VA: Institute for Defense Analyses, 2014.
- Billings, Stephen. *Superconducting Magnetic Tensor Gradiometer System for Detection of Underwater Military Munitions*, Final Report, SERDP Project MR-1661. ADA579146. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, June 2012.
- Birmingham, B.W., and C.N. Smith. "A Survey of Large Scale Applications of Superconductivity in the US." *Cryogenics* 16, no. 2 (1976): 59-71. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(76\)90090-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(76)90090-4).
- Braginski, A. I., J. R. Gavaler, and J. Talvacchio. *Superconducting Electronic Film Structure*. ADA200534. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988.
- Braginski, A. I., and M. G. Forrester. *Superconducting Oxide Films for Multispectral Infrared Sensors*.

- Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989.
- Broach, J. Thomas. *Measurements of AC Losses in Superconductors below H_{c1}* . ADA038393. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1976.
- Brown, Edmond. *Pressure Quenched Excitonic Solids*. ADA133817. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982.
- Buhrman, Robert A. *Superconducting Materials and Devices*. ADA228950. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- Bullis, W. Murray, and J. Franklin Mayo-Wells. (eds) *Semiconductor Measurement Technology*, Electron Device Division, Center for Electronics and Electrical Engineering, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, 1976.
- Bushway, Richard R. "Electromagnetic Aircraft Launch System Development Considerations." *IEEE Transactions on Magnetics* 37, no. 1 (2001): 52-4. <https://doi.org/10.1109/20.911789>.
- Cadotte, R., S. C. Tidrow, W. Van Meerbeke, A. DeAnni, and A. Lepore. *High temperature superconducting inductor for antenna matching*. ADA358606. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1998.
- Cerny, Charles L. A., Vernie G. Fisher, James T. McCartney, and David A. Ovenshire. "Semiconductor-Tuned High-T Superconductor Filters for Ultrasensitive RF Receivers (SURF): Technology Development and Evaluation." *Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, 2011. <https://doi.org/10.1109/naecon.2011.6183131>.
- Cherry, W. H., G. D. Cody, J. L. Cooper, G. Cullen, J. I. Gittleman, J. J. Hanak, M. Rayl, and F. D. Rosi. *Superconductivity in Metals and Alloys*. ADA280738. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963.
- Claassen, J. H., S. A. Wolf, and D. U. Gubser, "Thermal sensitivity of an rf SQUID." *IEEE Transactions on Magnetics* 21, no. 2 (1985): 434-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1985.1063853>.
- Clem, T. R., M. J. Goldstein, J. W. Purpura, L. H. Allen, J. H. Claassen, D. U. Gubser, and S. A. Wolf. "Investigation of noise sources in SQUID electronics." *IEEE Transactions on Magnetics* 25, no. 2 (1989): 1012-7. <https://doi.org/10.1109/20.92460>.
- Cooper, Leon N. "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas." *Physical Review* 104, no. 4 (1956): 1189-90. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1189>.
- Dean, Joel. "Pricing Policies for New Products." *Harvard Business Review*, November 1976.
- Deaver, Bascom S. Jr., and William M. Fairbank, "Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders." *Physical Review Letters* 7, no. 2 (1956): 43-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.43>.
- De Lozanne, Alex. *Tunneling Microscopy of Superconductors and Tunneling Barriers*. ADA197686. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988.
- Deroy, John S., Peter J. Walsh, W. D. Cowan, C. Von Benken, and A. Drehman. *Measurement and Analysis of the Microwave Surface Resistance in a Mixed Phase Y-Ba-Cu-O Superconductor*. ADA230047. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.

- Dinger, Robert J., and Joseph Goldstein. "Motion Stability Measurements of a Submarine-Towed Extremely Low-Frequency Receiving Platform." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 1, no. 2 (1976): 62-7. <https://doi.org/10.1109/joe.1976.1145303>.
- CAPT Doerry, Norbert. "Next Generation Integrated Power Systems (NGIPS) for the Future Fleet." IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, April 21, 2009. Accessed May 22, 2023. <https://ewh.ieee.org/conf/ests09/ESTS-2009%20Capt%20Doerry.pdf>.
- Dolecek, R. L. *Cryogenic Research*. ADA319622. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1952.
- Dorojevets, M., D. Strukov, A. Silver, A. Kleinsasser, F. Bedard, P. Bunyk, Q. Herr, G. Kerver, and L. Abelson. *On the Road towards Superconductor Computers: Twenty Years Later*. ADP019943. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2004.
- Doyle, Michael R. Douglas J. Samuel, Thomas Conway, and Robert R. Klimowski. "Electromagnetic Aircraft Launch System-EMALS." *IEEE Transactions on Magnetics* 31, no. 1 (1995): 528-33.
- Doyle, M., G. Sulich, and L. Lebron. "The Benefits of Electromagnetically Launching Aircraft." *Naval Engineers Journal* 112, no. 3 (2000): 77-82. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2000.tb03306.x>.
- Dresselhaus, M. S., and G. Dresselhaus. *Superconductivity and Magnetism in Layered Materials*. ADA208487. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989.
- Elliott, Chip, and Henry Yeh. *DARPA Quantum Network Testbed*. ADA471450. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2007.
- Elwell, Ryan J., Richard W. Garman, and Michael Doyle. "Thermal Management Techniques for an Advanced Linear Motor in an Electric Aircraft Recovery System." *IEEE Transactions on Magnetics*, 37, no. 1 (2001): 476-9. <https://doi.org/10.1109/20.911881>.
- Fair, Hurry D., and Edward M. Schmidt. "The Science and Technology of Electric Launch: A U.S. Perspective." *IEEE Transactions on Magnetics* 35, no. 1 (1999): 11-8. <https://doi.org/10.1109/20.738367>.
- Fair, H.D. "Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era." *IEEE Transactions on Magnetics* 41, no. 1 (2005): 158-64. <https://doi.org/10.1109/tmag.2004.838744>.
- Fairbank, William M., and Daniel DeBra. *Development of a Sensitive Superconducting Accelerometer and Gravity Gradiometer*. ADA164061. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984.
- Ferrando, William A. *A Silver-Bearing, High-Temperature, Superconducting (HTS) Paint*. ADA221616. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- Ferrando, William A. *Fabrication of Composite High Temperature Superconductor Wires from Ag/YBa2Cu3Ox Powder produced by AgNo3 Decomposition*. ADA221936. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- Ferrara, Peter J., Mark A. Uva, and Jeff Nowlin. "Naval Ship-to-Shore High Temperature Superconducting Power Transmission Cable Feasibility." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 984-7. <https://doi.org/10.1109/tasc.2011.2112751>.

- Fleshler, S., D. Buczek, B. Carter, P. Cedrone, K. DeMoranville, J. Gannon, J. Inch, X. Li, J. Lynch, A. Otto, E. Podburg, D. Roy, M. Rupich, S. Sathyamurthy, J. Schreiber, C. Thieme, E. Thompson, D. Tucker, K. Nagashima, and M. Ogata. "Scale-up of 2G Wire Manufacturing at American Superconductor Corporation." *Physica C: Superconductivity* 469, no. 15-20 (2009): 1316-21. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.05.234>.
- Folkes, Patrick, Patrick Taylor, Charles Rong, Barbara Nichols, George de Coster, and Owen Vail. *Exploring Unique Electronic States at Topological Insulator-High-Temperature Superconductor Interfaces*. AD1054282. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2018.
- Francavilla, T. L., B. N. Das, D. U. Gubser, R. A. Meussner, and S. T. Sekula. "Neutron Irradiation and Annealing Studies of V₃Ga." *Journal of Nuclear Materials* 72, no. 1-2 (1978): 203-11. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(78\)90404-x](https://doi.org/10.1016/0022-3115(78)90404-x).
- Francavilla, T. L., D. U. Gubser, and C. S. Pande, "Temperature and field dependence of critical currents in V₃Ga wire produced by the MJR technique." *IEEE Transactions on Magnetics* 21, no. 2 (1985): 273-6. <https://doi.org/10.1109/tmag.1985.1063837>.
- Francavilla, T. L., D. L. Peebles, H. H. Nelson, J. H. Claassen, S. A. Wolf, and D. U. Gubser, "A laser quenched superconducting switch for pulsed power applications." *IEEE Transactions on Magnetics* 23, no. 2 (1987): 1397-400. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1987.1064869>.
- Francavilla, T. L., H. H. Nelson, A. P. Baronavski, S. A. Wolf, D. U. Gubser, and R. A. Hein. "Further Studies of a Laser Quenched Superconducting Opening Switch." *IEEE Transactions on Magnetics* 25, no. 2 (1989): 1996-9. <https://doi.org/10.1109/20.92700>.
- Francavilla, T. L., S. A. Wolf, and D. U. Gubser. *Superconducting switch program*. ADA185682. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989.
- Gallagher, William J., Erik P. Harris, and Mark B. Ketchen. "Superconductivity at IBM – a Centennial Review: Part I – Superconducting Computer and Device Applications." *IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum*, No. 21, July 2012.
- Gamota, G. "One, Two, Three - Zero Resistance! In Defence Applications." *IEEE Transactions on Magnetics* 17, no. 1 (1981): 19-30. <https://doi.org/10.1109/tmag.1981.1060960>.
- Gamble, B. B., T. A. Keim, and P. A. Rios. *Superconducting Rotor Research*. ADA053612. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1977.
- Gao, Guang, Konstantin K. Likharev, Paul C. Messina, and Thomas L. Sterling. "Hybrid Technology Multithreaded Architecture." *Proceedings of 6th Symposium on the Frontiers of Massively Parallel Computation (Frontiers '96)*, 1996. <https://doi.org/10.1109/fmpc.1996.558066>.
- Gaulé, G. K. *Rules for the Occurrence of Superconductivity among the Elements, Alloys and Compounds*. AD0402708. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963.
- Geballe, T. H. *Film Synthesis and New Superconductors*. ADA135102. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1983.
- Geballe, T. H. *Superconducting Thin Films, Composites and Junctions*. ADA223576. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1985.
- Golda, E. Michael, Joseph D. Walters, Geoffrey F. Green. "Applications of Superconductivity to Very Shallow Water Mine Sweeping." *Naval Engineers Journal* 104, no. 3 (1992): 53-64. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1992.tb02224.x>.

- Goldfarb, R. B. (ed). *Transient Losses in Superconductors*. ADA173204. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1986.
- Grilli, Francesco, Tara Benkel, Jens Hänisch, Mayraluna Lao, Thomas Reis, Eva Berberich, Simon Wolfstädter, Christian Schneider, Paul Miller, Chloe Palmer, Bartek Glowacki, Vicente Climente-Alarcon, Anis Smara, Lukasz Tomkow, Johannes Teigelkötter, Alexander Stock, Johannes Büdel, Loïc Jeunesse, Martin Staempfli, Guillaume Delautre, Baptiste Zimmermann, Ruud van der Woude, Ana Perez, Sergey Samoilencov, Alexander Molodyk, Enric Pardo, Milan Kapolka, Shuo Li and Anang Dadhich. "Superconducting Motors for Aircraft Propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator Project." *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1590, 012051, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1590/1/012051>.
- Gubser, D. U., and R. J. Soulen, Jr. "Thermodynamic Properties of Superconducting Iridium." *Journal of Low Temperature Physics* 13, no. 3–4 (1973): 211-26. <https://doi.org/10.1007/bf00654062>.
- Gubser, D. U., and S. A. Wolf. "Phase Transition between Incoherent and Coherent Superconducting States in Granular NBN Films." *Le Journal de Physique Colloques* 39, no. C6, 1978. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:19786261>.
- Gubser, D. U., T. L. Francavilla, D. G. Howe, R. A. Muessner, and F. T. Ormand. "Multifilamentary V₃Ga Wire: A Critical Review." *IEEE Transactions on Magnetics* 15, no. 1 (1979): 385-390. <https://doi.org/10.1109/tmag.1979.1060187>.
- Gubser, D. U., S. A. Wolf, T. L. Francavilla, J. H. Claassen, and B. N. Das, "Multilayer Nb₃Sn superconducting shields." *IEEE Transactions on Magnetics* 21, no. 2 (1985): 320-3. <https://doi.org/10.1109/tmag.1985.1063687>.
- Gubser, D. U. (ed) *Compilation of NRL Publication on High Temperature Superconductivity 1 January 1987 – 1 July 1987*. Washington, DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- Gubser, Donald U. "US Navy Superconductivity Programme." *Bulletin of Materials Science* 14, no. 2 (1991): 157-9. <https://doi.org/10.1007/bf02747307>.
- Gubser, D. U., M. M. Miler, L. Toch, R. Rayne, S. Lawrence, N. McN. Alford, and T. W. Buttons. "Superconducting current leads of YBCO and Pb-BSCCO." *IEEE Transactions on Magnetics* 27, no. 2 (1991): 1854-7. <https://doi.org/10.1109/20.133557>.
- Gubser, D. U. "Federal Programs in Superconductivity." In: C. W. Chu, W. K. Chu, P. -H. Hor, and K. Salama. (eds) *HTS Materials, Bulk Processing & Bulk Applications: Proceedings of the 1992 TCSUH Workshop, Houston, Texas, 27-28 February 1992*. World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 1992.
- Gubser, Donald U., Thomas L. Francavilla, and Robert J. Soulen. "High Temperature Superconductivity: Magnets and Applications of Naval Interest." *Journal of Electronic Materials* 22, no. 10 (1993): 1305-9. <https://doi.org/10.1007/bf02818078>.
- Gubser, Donald U. "Superconductivity Research and Development: Department of Defense Perspective." *Applied Superconductivity* 3, no. 1–3 (1995): 157-61. [https://doi.org/10.1016/0964-1807\(95\)00046-8](https://doi.org/10.1016/0964-1807(95)00046-8).
- Gubser, D.U. "Navy Programs in Superconducting Technology." *Journal of Superconductivity* 11, (1998): 1-4. <https://doi.org/10.1023/A:1022656620516>.

- Gubser, Donald U. "Superconductivity: An Emerging Power-Dense Energy-Efficient Technology." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14, no. 4 (2004): 2037-46. <https://doi.org/10.1109/tasc.2004.838318>.
- Gubser, Donald U. "US Navy's Superconductivity Programs Scientific Curiosity to Fleet Utility." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 931-5. <https://doi.org/10.1109/tasc.2010.2088373>.
- Gupta, Deepnarayan, Dmitri E. Kirichenko, Vladimir V. Dotsenko, Robert Miller, Saad Sarwana, Andrei Talalaevskii, Jean Delmas, Robert Webber, Sergei Govorkov, Alexander F. Kirichenko, Igor Vernik, and Jia Tang. "Modular, Multi-Function Digital-RF Receiver Systems." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, no. 3 (2011): 883-90. <https://doi.org/10.1109/tasc.2010.2095399>.
- Haran, Kiruba S, Kiruba S Haran, Swarn Kalsi, Tabea Arndt, Haran Karmaker, Rod Badcock, Bob Buckley, Timothy Haugan, Mitsuru Izumi, David Loder, James W Bray, Philippe Masson and Ernst Wolfgang Stautner. "High Power Density Superconducting Rotating Machines—Development Status and Technology Roadmap." *Superconductor Science and Technology* 30, no. 12 (2017): 123002. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa833e>.
- Hargreaves, T. A., M. L. Barsanti, R. P. Fischer, J. M. Burke, A. W. Fliflet, and W. M. Manheimer. "The NRL Quasi-Optical Gyrotron Experiment." *1987 Twelfth International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, 1987. <https://doi.org/10.1109/irmm.1987.9127005>.
- Harris, Eric P. *Critical Field of Superconducting Aluminum as a Function of Temperature and Pressure Above 0.3°K*. AD0645738. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966.
- Hasik, James. *Arms and Innovation Entrepreneurship and Alliances in the Twenty-First Century Defense Industry*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 2014.
- LCDR Hartman, Stephen D. *Electromagnetic Aircraft Launching System: Do the Benefits Outweigh the Costs?* ADA602992. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010.
- Hartwig, William H. *Superconductive Frequency Control Devices*, Quarterly Report no. 3, 1 January 1963 to 31 March 1963. AD0411961. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1963.
- Hazelton, Drew W., Michael T. Gadner, Joseph A. Rice, Michael S. Walker, Chanra M. Trautwein, Pradeep Haldar, Donald U. Gubser, Michael Superczynski, and Donald Waltman. "HTS Coils For The Navy's Superconducting Homopolar Motor / Generator." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 664-7. <https://doi.org/10.1109/77.614591>.
- Heath, James R. "Nanotechnology and the Department of Defense." *IDA Paper P-3531*, Paper 1, Institute for Defense Analyses, 2000.
- Hein, R. A. "Superconductivity: Large-Scale Applications." *Science* 185, no. 4147 (1974): 211-22. <https://doi.org/10.1126/science.185.4147.211>.
- Hein, R. "Superconducting Materials: Ten Years Do Make A Difference." *IEEE Transactions on Magnetics* 17, no. 1 (1981): 607-17. <https://doi.org/10.1109/tmag.1981.1061158>.
- Hein, R.A., and D.U. Gubser. "Large-Scale Applications of Superconductivity in the United States: An Overview." In: Foner, S., and B. B. Schwartz. (eds) *Superconductor materials science: metallurgy, fabrication, and applications*. NSSB. Vol. 68. NY: Springer New York, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0037-4>

- Hilal, Mohammed A. DC powered hybrid coil gun employing superconducting elements, issued October 30, 1990.
- Homan, C. G., K. Laojindapun, and R. K. MacCrone. *Superconductivity in pressure quenched cadmium sulfide at 77 K*. ADA101265. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1981.
- Homan, Clarke G., and Wilfred Scholz. *Superconducting Augmented Rail Gun (SARG)*. ADA179269. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1987.
- Hourihan, Matt, and David Parkes. "Federal R&D Budget Trends: A Short Summary." American Association for the Advancement of Science, January 2019.
- Hourihan, Matt. "Review of Research & Development in the Final FY 2021 Omnibus." American Association for the Advancement of Science, January 2021.
- Howe, D. G., T. L. Francavilla, and D. U. Gubser. "Critical Current Properties of Multifilament V₃Ga Wire at Temperatures above 4.2 Kelvin." *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 815-7. <https://doi.org/10.1109/tmag.1977.1059354>.
- Howe, D. G., D. U. Gubser, and T. L. Francavilla. "Recent Developments on Processing and Properties of V₃Ga Composite Wires." *IEEE Transactions on Magnetics* 17, no. 1 (1981): 654-7. <https://doi.org/10.1109/tmag.1981.1060996>.
- Howe, D. G., T. L. Francavilla, and D. U. Gubser. "Metallurgical and Superconducting Properties of Multifilamentary V₃Ga Wires." *IEEE Transactions on Magnetics* 19, no. 3 (1983): 923-5. <https://doi.org/10.1109/tmag.1983.1062549>.
- Humphreys, D. R., T. L. Francavilla, D. U. Gubser, S. A. Wolf. "Progress Toward A Superconducting Opening Switch." Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, June 1987.
- Ige, Segun O., Dawood Aized, Andy Curda, Rick Medeiros, Chris Prum, Peter Hwang, Gregory Naumovich, and E. Michael Golda. "Mine Countermeasures HTS Magnet." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13, no. 2 (2003): 1628-31. <https://doi.org/10.1109/tasc.2003.812811>.
- Jones, T. E., W.C. McGinnis, R. D. Boss, and P. M. Thibado. *A Review of High-Temperature Superconductivity and the Effect of Chemical Modifications on Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ and Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀*. ADA242314. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991.
- Kalsi, Swarn S. "Development Status of Superconducting Rotating Machines." *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 2002. <https://doi.org/10.1109/pesw.2002.985030>.
- Kanter, Helmut, and Frank L. Vernon Jr. *Response of Superconducting Point Contacts to High-Frequency Radiation*. AD0734765. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1971.
- Kawecki, Thomas G., Gerald A. Golba, George E. Price, Vincent S. Rose, and William J. Meyers. "The High Temperature Superconductivity Space Experiment (HTSSE-II) Design." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44, no. 7 (1996): 1198-212. <https://doi.org/10.1109/22.508226>.
- Kim, Chul H., Isaac Leonard, Peter Cheetham, Juan Ordonez, Jacob T. Kephart, Jason D. Miller, and Sastry V. Pamidi. "Component Model Development for Ship-Level Impact of High Temperature

- Superconducting Power Cables.” *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2019. <https://doi.org/10.1109/ests.2019.8847735>.
- Kim, Seog-Whan, Hyun-Kyo Jung, and Song-Yop Han. “An Optimal Design of Capacitor-Driven Coilgun.” *IEEE Transactions on Magnetics* 30, no. 2 (1994): 207-11. <https://doi.org/10.1109/20.312259>.
- Kimball, C. W. *Studies of Structural Properties and their Relationship to Critical Parameters in Superconducting Materials*. ADA143556. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984.
- Kourilo, J., and S. G. Hibben. *Bibliography of Soviet Developments in Superconductivity: January 1975-June 1976*. Informatics Inc., 1976.
- Kresin, V. Z., and S. A. Wolf. “Colloquium: Electron-Lattice Interaction and Its Impact on High T_c Superconductivity.” *Reviews of Modern Physics*. Apr. 3, 2009. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.481>.
- Ksander, Y., and S. Singer. *Advanced Concepts of Superconductivity: A Comparative Review of Soviet and American Research. Part I. High-Temperature Superconductivity*. R-1401-ARPA. (The Rand Corporation, January 1974).
- Kuseian, John. *Naval Power Systems Technology Development Roadmap PMS 320*. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2013
- Laquer, Henry L., Fredrick J. Edesbuty, William V. Hassenzahl, and Stefan L. Wipf. *Stability Projections for High Temperature Superconductors*. ADA218945. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- Larbalestier, David C. “50 Years of Applied Superconductivity.” *TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)* 50, no. 5 (2015): 214-7. <https://doi.org/10.2221/jcsj.50.214>.
- Lee, M., and Y. S. Shin. “Modal Analysis of a GA Superconducting Magnet Subsystem for ALISS.” NPS-ME-97-004, Monterey, CA: Naval Postgraduate School, April 1997.
- Leiberich, A., W. Scholz, W. J. Standish, and C. G. Homan. *Superconductivity in Hydrogen-Charged Copper-Implanted Palladium*. ADA110133. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1981.
- Lyons, W. Gregory, Duane R. Arsenault, Alfredo C. Anderson, T. C. L. Gerhard Sollner, Peter G. Murphy, Mark M. Seaver, Rene R. Boisvert, Richard L. Slattery, and Richard W. Ralson. “High Temperature Superconductive Wideband Compressive Receivers.” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44, no. 7 (1996): 1258-78. <https://doi.org/10.1109/22.508231>.
- Mackenzie, J. D. *International Collaboration Program on Innovative Chemical Processing of Superior Electronic and Optical Materials*. ADA235030. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1991.
- Mahnken, Thomas G., *Technology and the American Way of War*, NY: Colombia University Press, 2010.
- Margolus, Norman H. “Quantum Computation,” *Annals of the New York Academy of Sciences* 480, no. 1 (1986): 487-97. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1986.tb12451.x>.

- Majoros, M., B. A. Glowacki, A. M. Campbell, G. A. Levin, P. N. Barnes, and M. Polak. "AC Losses in Striated YBCO Coated Conductors." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15, no. 2 (2005): 2819-22. <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.848234>.
- Maynard, Julian D. *Acoustic Studies of New Materials: Quasicrystals, Low-loss Glasses, and High T_c Superconductors*. ADA225190. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- McColl, Malcolm, Michael F. Millea, and Arnold H. Silver. Development of Millimeter-Wave Super Schottky Mixer Diodes. ADA044276. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1977.
- McNab, Ian R. "Pulsed Power for Electric Guns." *IEEE Transactions on Magnetics* 33, no. 1 (1997): 453-60. <https://doi.org/10.1109/20.560055>.
- Meisel, L. V., and P. J. Cote. "Influence of Electron Mean Free Path on Superconducting Transition Temperature." *Physical Review B* 19, no. 9 (1979): 4514-7. <https://doi.org/10.1103/physrevb.19.4514>.
- Meservey, Robert H., Paul M. Tedrow, and Terry P. Orlando, *Synthesis and Characterization of Superconducting Electronic Materials*. ADA151112. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1984.
- Mitchell, D. L., and D. U. Gubser. "Magnetohydrodynamic Ship Propulsion with Superconducting Magnets." *Journal of Superconductivity* 1, no. 4 (1988): 349-64. <https://doi.org/10.1007/bf00618593>.
- Mitchell, D. L., and D. U. Gubser. "Induction-Drive Magnetohydrodynamic Propulsion." *Journal of Superconductivity* 6, no. 4 (1993): 227-35. <https://doi.org/10.1007/bf00626262>.
- Montgomery, D. Bruce. "The Future Prospects for Large Scale Applications of Superconductivity." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 134-45. <https://doi.org/10.1109/77.614438>.
- Mukhanov, Oleg A., "Superconductor Digital-RF Electronics." *Extended Abstracts of 10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC'05)*, I-A1.01, 5-9 September 2005, Noordwijkerhout, The Netherlands, 2005.
- Murakami, Masahide. "Applications of Superconductivity in Space." *Journal of Advanced Science* 3, no. 1 (1991): 1-5. <https://doi.org/10.2978/jsas.3.1>.
- Newman, Nathan, and W. Gregory Lyons. "High-Temperature Superconducting Microwave Devices: Fundamental Issues in Materials, Physics, and Engineering." *Journal of Superconductivity* 6, no. 3 (1993): 119-60. <https://doi.org/10.1007/bf00625741>.
- Oberly, C. "Air Force Applications of Lightweight Superconducting Machinery." *IEEE Transactions on Magnetics* 13, no. 1 (1977): 260-8. <https://doi.org/10.1109/tmag.1977.1059255>.
- Oberly, C. E., G. Kozlowski, C. E. Gooden, R. X. Lenard, A. K. Sarkar, I. Maartense, and J. C. Ho. "Principles of application of high temperature superconductors to electromagnetic launch technology." *IEEE Transactions on Magnetics* 27, No. 1 (1991): 509-14. <https://doi.org/10.1109/20.101085>.
- Paik, H. J. *Development of Electronic Control of a Superconducting Gravity Gradiometer – Phase II*. ADA174794. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1986.

- Paik, Ho Jung, Joel W. Parke, and Edgar R. Canavan. *Superconducting Six-Axis Accelerometer*. ADA215948. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1989.
- Patten, Frank W., and Stuart A. Wolf. "The ARPA High Temperature Superconductivity Program." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5, no. 2 (1995): 3203-7. <https://doi.org/10.1109/77.403273>.
- Pond, Jeffrey M. "A Computationally Efficient Approach to Microwave Circuit Modeling of Complex High Temperature Superconductor Circuits." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 3052-5. <https://doi.org/10.1109/77.621976>.
- Powell, R. L., F. R. Fickett, and B. W. Birmingham. "Programs on Large Scale Applications of Superconductivity in the United States." In: Foner, S., B.B. Schwartz. (eds) *Superconducting Machines and Devices*. NATO Advanced Study Institutes Series, vol 1. Boston, MA: Springer, 1974. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2784-4_17
- Pritchard, J. Paul, Jr. *Fabrication and Testing of 5000 Word Cryogenic Associative Processor*. AD0811983. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967.
- Proceedings of the Workshop on High Temperature Superconductivity*. GACIAC PR-89-02. Chicago, IL: GACIAC, 1989.
- Quinlan, Kenneth P., Robert M. Hilton, and Joseph A. Adamski. *Preparation of the Superconductor Substrate Strontium Titanate*. ADA206800. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988.
- Radebaugh, Ray. "Cryocoolers for Aircraft Superconducting Generators and Motors." *AIP Conference Proceedings*, 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4706918>.
- Rafalko, Valerie, Arthur Rimmele, Qing Dong, and Saroj Biswas. *Dynamic Model Based Vector Control of Linear Induction Motor*. ADA563034. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2012.
- Rafalowicz, J. A. *Analysis of Thermal Conductivity Data for Fourteen Elements in Normal and Superconducting States*. ADA129057. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1974.
- Ralston, R.W., et al. "Cooperating on Superconductivity." *IEEE Spectrum* 29, no. 8 (1992): 50-5. <https://doi.org/10.1109/6.144537>.
- Reed, R. P., R. L. Durcholz, F. R. Fickett, P. J. Giarratano, J. G. Hust, M. B. Kasen, H. M. Ledbetter, R.P. Mikesell, E. R. Naimon, R. E. Schramm, L. L. Sparks, R. L. Tobler, and W. F. Weston. *Semi-annual report on Materials Research in support of Superconducting Machinery*. Boulder, Colorado: Cryogenics Division, Institute for Basic Standards, National Bureau of Standards, 1974.
- Reed, R. P., J. G. Hust, M. B. Kasen, H. M. Ledbetter, R. P. Mikesell, R. E. Schramm, L. L. Sparks, R. L. Tobler, and W. F. Weston. *Semi-Annual Report on Materials Research in Support of Superconducting Machinery*. Cryogenics Division, Institute for Basic Standards, National Bureau of Standards, 1975.
- Richards, Paul L. *Quantum Limits of Superconducting Heterodyne Receivers*. ADA201303. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1988.

- Richards, Mark A., and Daniel P. Campbell. *Extreme Scale Computing Studies*. ADA547481. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2010.
- Robinson, Hugh A., John R. Blutt, Henry W. Mooncai. *Superconducting Electrical Machinery as a Means of Power Transition in Aircraft*. AD0629635. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1966.
- Ross, Robert., Cees G. Meijer, and Ruud Hunik. "Maritime Superconductivity Perspectives." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23, no. 3 (2013): 3601405. <https://doi.org/10.1109/tasc.2013.2241384>.
- Schmidt, Bernhard M. *Electrically-Small, Superconducting Antennas*. AD0657376. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967.
- Sensarma, S., A. G. Turner, M. J. DeLong, L. P. Davis. *MNDO-Estimations of the Standard Enthalpy of Formation of Some Binary Sulfur-Nitrogen Compounds and Their Derivatives*. ADA111153. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982.
- Sherwin, C. W., H. Frauenfelder, E.I. Garwin, E. I uscher, S. Margulies, and R. N. Peacock. "Search for the Anisotropy of Inertia Using the Mössbauer Effect in Fe." *Physical Review Letters* 4, no. 8 (1960): 399-401. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.4.399>.
- Short Pulse Switch for Airborne High Power Supplied*. ADB003396. Fort Belvoir, VA: Defense Technology Information Center, 1973.
- Sienko, M, J. *Cluster-type Superconducting Ternaries*. ADA113899. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1982.
- Silver, A. H. *Space Applications of Superconductivity*. ADA101296. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1979.
- Silver, R. M., J. Talvacchio, and A. L. de Lozanne. "Sputter Deposition of YBa₂Cu₃O_{7-y} Thin Films." *Applied Physics Letters* 51, no. 25 (1987): 2149-51. <https://doi.org/10.1063/1.98976>.
- Silverstein, J. D., and M. Read. "Design Considerations for a 240-GHz Gyromonotron." 1979 *International Conference on Submillimeter Waves and Their Applications*, 1979. <https://doi.org/10.1109/icswa.1979.9335385>.
- Sinclair, A. K., E. Schroeder, D. Zhu, M. Colangelo, J. Glasby, P. D. Mauskopf, H. Mani, and K. K. Berggren. "Demonstration of Microwave Multiplexed Readout of DC-Biased Superconducting Nanowire Detectors." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 29, no. 5 (2019): 1-4. <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2899329>.
- Sivasubramaniam, K., T. Zhang, M. Lokhandwalla, E.T. Lakaris, J. W. Bray, B. Gerstler, M. R. Shah, and J. P. Alexander. "Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19, no. 3 (2009): 1656-61. <https://doi.org/10.1109/tasc.2009.2017758>.
- Snitchler, G., S. S. Kalsi, M. Manlief, R. E. Schwall, A. Sidi-Yekhlief, S. Ige, R. Medeiros, T. L. Francavilla, and D. U. Gubser. "High-Field Warm-Bore HTS Conduction Cooled Magnet." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 9, no. 2 (1999): 553-8. <https://doi.org/10.1109/77.783356>.

- Snitchler, Greg, Bruce Gamble, and Swan S. Kalsi. "The Performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15, no. 2 (2005): 2206-9. <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.849613>.
- Somasundaram, Ramasubramanian, and Louis E. Toth. *Studies of Superconducting Thin Film Carbides and Nitrides*. AD0753359. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1971.
- Stevens, Howard O., Michel J. Superczynski, Timothy J. Doyle, John H. Harrison, and Harry Messinger. "Superconducting Machinery for Naval Ship Propulsion." *IEEE Transactions on Magnetics* MAG-13, no. 1 (January 1977): 269-74. <https://doi.org/10.1109/tmag.1977.1059460>.
- Štumberger, Gorazd., Mehmet Timur Aydemir, Damir Žarko, and Thomas A. Lipo. "Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14, no. 1 (2004): 54-62. <https://doi.org/10.1109/tasc.2004.824342>.
- Sullivan, Donald B. *A Superconducting Thin-Film Nuclear-Particle Detector*. AD0660338. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1967.
- Superconducting Magnet Research and Application to MHD Power Generators*. AD0405829. Fort Belvoir, VA: Defense Information Center, 1963.
- Superczynski, Michael J., Jr., and Donald J. Waltman. "Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, no. 2 (1997): 513-8. <https://doi.org/10.1109/77.614554>.
- Swett, D.W., and J.G. Blanche. "Flywheel Charging Module for Energy Storage Used in Electromagnetic Aircraft Launch System." *IEEE Transactions on Magnetics* 41, no. 1 (2005): 525-8. <https://doi.org/10.1109/tmag.2004.838745>.
- Tewari, Sumanta, and Chuanwei Zhang. *(DARPA) Topologically Protected Quantum Information Processing in Spin-Orbit Coupled Semiconductors*. ADA595212. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2013.
- Tian, Nan, Diego Lopes da Silva, Xiao Liang, Lorenzo Scarazzato, Lucie Béraud-Sudreau, and Ana Carolina de Oliveira Assis. "Trends in World Military Expenditure, 2022," *SIPRI Fact Sheet*, April 2023.
- Van der Laan, D. C., T. J. Haugan, and P. N. Barnes. "Effect of a Compressive Uniaxial Strain on the Critical Current Density of Grain Boundaries in Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films." *Physical Review Letters* 103, (2009): 027005. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.103.027005>.
- Van Duzer, T. *Superconducting Weak Links for Mixing at Millimeter-Wave Frequencies*. ADA080571. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1979.
- Walker, B. J. "A New Type of Superconducting Magnet for Traveling-Wave Masers." *Proceedings of the IEEE* 54, no. 1 (1966): 96-7. <https://doi.org/10.1109/proc.1966.4616>.
- Weinberger, Sharon. *The Imagineers of War: The Untold Story of Darpa, The Pentagon Agency That Changed the World*. Vintage Books, a Division of Penguin Random House LLC, NY, 2018. 邦訳は、千葉敏生訳『DARPA秘史：世界を変えた「戦争の発明家たち」の光と闇』光文社、2018年。
- Weinstock, Harold. "Superconductivity in the USA." *Superconductor Science and Technology* 13, no. 5 (2000): 464-7. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/5/306>.

- Weldon, William F. "The Potential for Application of High Temperature Superconductors to Electromagnetic Launchers." *CEM Conference Proceedings*. Center for Electromechanics, The University of Texas at Austin, TX, 1992.
- LCDR Whitcomb, Clifford A. "Commercial Superconducting Technology." *The Submarine Review*. VA: Naval Submarine League (April 2000): 62-73.
- Wipf, Stefan L., and Henry L. Laquer. *Superconducting Permanent Magnets*. ADA218944. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1990.
- Witt, Michael, and Stefan Herzberg. "TRANSRAPID - Transport Technology for the Mobility of the Future." *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH* (2003): 441-6. <https://doi.org/10.1299/jsmestech.2003.441>.
- Wolf, S. A., S. B. Qadri, K. E. Kihlstrom, R. M. Simon, W. W. Fuller, D. VanVechten, E. F. Skelton, and D. U. Gubser. "Superconducting in FCC $\text{Mo}_x\text{NB}_{1-x}(\text{N}_y\text{C}_{1-y})_z$ thin films." *IEEE Transactions on Magnetics* 21, no. 2 (1985): 839-41. <https://doi.org/10.1109/tmag.1985.1063660>.
- Wolfe, James P. *Measurement of High Mobility and Strain Confinement of Long-lived Free Excitons in Cu_2O* . ADA 128486. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1983.
- Young, Shalanda D., and Lander, Eric S. "Multi-Agency Research and Development Priorities for the FY 2023 Budget." Memorandum for the Heads of Executive Departments and Agencies, Executive Office of the President, Washington, DC, 2021.

【ウェブ資料(日本語)】

- 大嶋重利「超電体のマイクロ波デバイスの実用化と課題」低温工学・超電導学会、2020年度第2回超電導応用研究会シンポジウム、2021年3月1日、https://www.csj.or.jp/application/2020/lecture_text/2-4.pdf(2023年4月5日閲覧)。
- 阪本幸俊「超電導技術の将来展望」『技術レポート』三菱総合研究所、2018年8月7日、<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20180807.html>(2021年10月29日閲覧)。
- 菅澤喜男「イノベーションの源泉—製品・技術のライフサイクル分析と必要なインテリジェンス—」第6回『連載 情報の価値とインテリジェンス』情報システム学会 メールマガジン、2011.1.1 No.05-09 [12]、<https://www.issj.net/mm/mm0509/mm0509-c-sg.pdf>(2023年8月30日閲覧)。
- 田邊圭一「脱炭素に貢献する高温超伝導SQUID磁気センサ 野外で自在に使える超高感度磁気センサ技術として成熟した高温超伝導SQUIDはGXにも貢献」応用物理学会 特別WEBコラム GX: グリーントランスフォーメーションに挑む応用物理、<https://www.jsap.or.jp/columns/gx/k1-8>(2023年12月2日閲覧)。
- 松浦晋也「航法の歴史(4)SAの廃止」『みちびきを知る』みちびきウェブサイト、https://qzss.go.jp/overview/column/column04_151208.html(2023年7月13日閲覧)。

- 益田義賀「低温物理の50年」特集 日本物理学会50周年記念『日本物理学会誌』第51巻第5号、1996年、https://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_05/002.html (2023年8月13日閲覧)。
- 本吉健也「超電導技術の現状と将来展望」『Business & Economic Review』日本総研、1996年09月号、<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=16456> (2021年10月29日閲覧)。
- 「高精度データ計測 -GPSによる速度測定の原理」株式会社小野測器、https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/vehicle/lc8_principle.htm (2023年7月7日閲覧)。
- 「自律型致死兵器システム(LAWS)について」『通常兵器の軍縮及び過剰な蓄積禁止に関する我が国の取組』外務省、令和5年5月25日、https://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/ca/page24_001191.html (2023年7月8日閲覧)。
- 「「日露戦争以来」のロシア軍旗艦沈没、プーチン氏にも強い衝撃か…死傷者多数の可能性」読売新聞オンライン、2022/04/18 06:40 JST、<https://www.yomiuri.co.jp/world/20220417-OYT1T50110/> (2023年12月2日閲覧)。
- 「プロダクト・ライフサイクル」用語解説『ナレッジ・インサイト』野村総合研究所、<https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/lst/ha/product> (2023年8月30日閲覧)。
- 「量子コンピュータ」用語解説『ナレッジ・インサイト』野村総合研究所、https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/lst/ra/quantum_computer (2023年7月12日閲覧)。
- 「量子暗号通信って、なに？」『サクサク経済Q&A』日本放送協会(NHK)、<https://www3.nhk.or.jp/news/special/sakusakukeizai/20201020/356/> (2023年7月12日閲覧)。
- 「GPS/GNSSとは？」公益社団法人日本航海学会GPS/GNSS研究会、<https://j-nav.org/gnss/gnss.html> (2023年7月7日閲覧)。
- 「GNSSとは？ 高機能で安心・安全な社会環境を支える衛星測位システムを知ろう」『Future Stride』SoftBankビジネスブログ、<https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202203/GNSS/> (2023年7月7日閲覧)。
- 「GNSSとGPSはどう違うのか。高精度衛星測位システムの可能性について」『Future Stride』SoftBankビジネスブログ、<https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202203/GNSS-GPS/> (2023年7月7日閲覧)。

【ウェブ資料(英語)】

Airbus. “Cryogenics and superconductivity for aircraft, explained: ASCEND aims for a breakthrough in electric propulsion for aircraft.” March 29 2021.
<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-cryogenics-and-superconductivity-for-aircraft-explained>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Long Lead Contract for Ship Protection System on LPD 30.” November 28, 2018. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-long-lead-contract-ship-protection-system-lpd-30>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Delivery Contract for Ship Protection System on LPD 28.” January 30, 2019. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-delivery-contract-ship-protection-system-lpd-28>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Delivery Contract for Ship Protection System on LPD 30.” May 13, 2019. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-delivery-contract-ship-protection-system-lpd-30>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD 31.” July 14, 2020. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-31>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD-29.” January 25, 2021. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-29>.

American Superconductor. “AMSC Awarded Contract for Ship Protection System on LPD-32.” December 6, 2022. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-awarded-contract-ship-protection-system-lpd-32>.

American Superconductor. “AMSC Announces Contract from U.S. Navy for High Temperature Superconductor (HTS) Equipment.” May 19, 2015. <https://ir.amsc.com/news-releases/news-release-details/amsc-announces-contract-us-navy-high-temperature-superconductor?releaseid=913859>.

“American Superconductor designs electric motor for DD(X) warship.” *Military & Aerospace Electronics*, January 10, 2006.
<https://www.militaryaerospace.com/home/article/16722397/american-superconductor-designs-electric-motor-for-ddx-warship>.

Arie, Koichi. “Briefing Mamo: Military Applications of Quantum Technologies.” National Institute for Defense Studies. December 2021 Edition. Accessed October 2, 2022.
http://www.nids.mod.go.jp/english/publication/briefing/pdf/2021/briefing_e202112.pdf.

Boeing. “Boeing, DARPA to Develop Hypersonic Missile,” August 3, 1998.
<https://boeing.mediaroom.com/1998-08-03-Boeing-DARPA-to-Develop-Hypersonic-Missile>.

Boeing. “Boeing Receives HyFly Award for Hypersonic Missile Demonstrator,” July 24, 2002.
<https://boeing.mediaroom.com/2002-07-24-Boeing-Receives-HyFly-Award-for-Hypersonic-Missile-Demonstrator>.

- Borouh, Mark. "U.S. R&D Increased by \$51 Billion in 2018, to \$606 Billion; Estimate for 2019 Indicates a Further Rise to \$656 Billion." NSF 21-324. National Center for Science and Engineering Statistics (NCSES), National Science Foundation (NSF). April 13, 2021. <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsf21324/>.
- Brewster, Thomas. "Project Maven: Amazon And Microsoft Scored \$50 Million In Pentagon Surveillance Contracts After Google Quit," *Forbes*, September 8, 2021. <https://www.forbes.com/sites/thomasbrewster/2021/09/08/project-maven-amazon-and-microsoft-get-50-million-in-pentagon-drone-surveillance-contracts-after-google/?sh=7c5fd0ad6f1e>.
- Center for Strategic and International Studies. "What Does China Really Spend on Its Military?" Accessed May 15, 2023. [https://www.csis.org/analysis/what-does-china-really-spend-its-military#:~:text=The%20Chinese%20government%20announces%20defense,1.45%20trillion%20\(%24229.6%20billion\)](https://www.csis.org/analysis/what-does-china-really-spend-its-military#:~:text=The%20Chinese%20government%20announces%20defense,1.45%20trillion%20(%24229.6%20billion)).
- "China launches third aircraft carrier." *Xinhua*, June 17, 2022. <https://english.news.cn/20220617/9ba72721f4a249888b301db08d164ea0/c.html>.
- Coalition for the Commercial Application of Superconductors. "Military Benefits of Superconductor Based Equipment." March 2013. Accessed November 20, 2021. <http://www.ccas-web.org/pdf/MilitaryBenefitsSuperconductorBasedEquipment.pdf>.
- Conger, Kate, and Dell Cameron. "Google Is Helping the Pentagon Build AI for Drones." Gizmodo. March 6, 2018. <https://gizmodo.com/google-is-helping-the-pentagon-build-ai-for-drones-1823464533>
- Conger, Kate. "Google Employees Resign in Protest Against Pentagon Contract," Gizmodo, May 14, 2018. <https://gizmodo.com/google-employees-resign-in-protest-against-pentagon-con-1825729300>.
- "Defense Contractor Held in Spy Case." *The Washington Times*, November 29, 2005. <https://www.washingtontimes.com/news/2005/nov/29/20051129-102531-9297t/>.
- Defense Security Cooperation Agency. "United Kingdom – Electromagnetic Aircraft Launch System Long Lead Sub-Assemblies." November 15, 2011. <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/united-kingdom-electromagnetic-aircraft-launch-system-long-lead-sub>.
- Defense Security Cooperation Agency. "France – Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS) and Advanced Arresting Gear (AAG)." December 21, 2021. <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/france-electromagnetic-aircraft-launch-system-emals-and-advanced>.
- "DOD Pushes development of superconducting wire." *Military & Aerospace Electronics*, January 5, 2006. <https://www.militaryaerospace.com/home/article/16722407/dod-pushes-development-of-superconducting-wire>.
- Fanning, Eric. "China Is Incentivizing R&D Investment. Why Is America Going in the Opposite Direction?" *Breaking Defense*, March 11, 2022. <https://breakingdefense.com/2022/03/china-is-incentivizing-rd-investment-why-is-america-going-in-the-opposite-direction/>.
- Florida State University. "Florida State Center for Advanced Power Systems researchers achieve major breakthrough." December 3, 2013. <https://news.fsu.edu/news/science-technology/2013/12/03/florida-state-center-for-advanced-power-systems-researchers-achieve-major-breakthrough/>.
- Grevatt, Jon, Andrew MacDonald. "China increases 2022 defence budget by 7.1%." *Janes.com*, March 7,

2022. <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/china-increases-2022-defence-budget-by-71>.
- Hagel, Chuck. "Reagan National Defense Forum Keynote." Speech, As Delivered by Secretary of Defense Secretary of Defense, at the Ronald Reagan Presidential Library, Simi Valley, CA, November 15, 2014. <https://www.defense.gov/News/Speeches/Speech/Article/606635/>.
- Hopkins, Nick, and Richard Norton-Taylor. "Government forced into U-turn on Royal Navy fighter jets," *The Guardian*. May 10, 2012. <https://www.theguardian.com/uk/2012/may/09/government-u-turn-fighter-jets>.
- Jash, Amrita. "China's 2022 Defense Budget: Behind the Numbers." Jamestown, May 3, 2022. <https://jamestown.org/program/chinas-2022-defense-budget-behind-the-numbers/>.
- Jash, Amrita. "China's 2023 Defense Spending: Figures, Intentions and Concerns." Jamestown, April 14, 2023. <https://jamestown.org/program/chinas-2023-defense-spending-figures-intentions-and-concerns/>.
- Keller, John. "Navy eyes advanced minesweeping sensor payload using high-temperature superconducting magnetic materials." *Military & Aerospace Electronics*. September 16, 2021. <https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14210402/minesweeping-sensor-high-temperature-superconducting>.
- Lloyd, Seth, and Dirk Englund. "Future Directions of Quantum Information Processing." *A Workshop on the Emerging Science and Technology of Quantum Computation, Communication, and Measurement*, Arlington, VA, August 25-26, 2016. Accessed April 24, 2022. https://basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Future_Directions_Quantum.pdf?ver=2017-09-20-003031-450.
- Miller, Zeke J. "Read Donald Trump's Interview With TIME on Being President," *Time*, May 11, 2017. <https://time.com/4775040/donald-trump-time-interview-being-president/>.
- National Academy of Engineering. "Ivan A. Getting." 2008. Memorial Tributes: Volume 12. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12473>.
- Naval Sea Systems Command. "Naval Power and Energy Systems Technology Development Roadmap." 2019. Accessed November 20, 2021. https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/2019_NPES_TDR_Distribution_A_Approved_Final.pdf?ver=2019-06-26-132556-223.
- Northrop Grumman Corporation. "Northrop Grumman Team Receives Contract to Design Lighter, Quieter Power Generators for U.S. Navy Ships." January 13, 2006. <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-team-receives-contract-to-design-lighter-quieter-power-generators-for-u-s-navy-ships>.
- RTX. "Raytheon, Northrop Grumman Awarded Contract for Additional Hypersonic Weapon Advancements." July 17, 2023. <https://www.rtx.com/news/news-center/2023/07/17/raytheon-northrop-grumman-awarded-contract-for-additional-hypersonic-weapon-adv>.
- Shepard, Jeff. "American Superconductor Gets Follow-on DoD Dollars." *EE Power*. January 4, 2006. <https://eepower.com/news/american-superconductor-gets-follow-on-dod-dollars/#>.
- "Stating Regret, Clinton Signs Bill That Kills Supercollider." *The New York Times*, October 31, 1993. <https://www.nytimes.com/1993/10/31/us/stating-regret-clinton-signs-bill-that-kills-supercollider.html>.

- The National Quantum Coordination Office. “About the National Quantum Initiative.” Accessed July 9, 2023. <https://www.quantum.gov/about/>.
- The White House. “National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution.” January 21, 2000. https://clintonwhitehouse4.archives.gov/WH/New/html/20000121_4.html.
- The White House. “Fact Sheet: BRAIN Initiative.” April 2, 2013. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/04/02/fact-sheet-brain-initiative>.
- U.S. Department of Defense. “DOD Adopts Ethical Principles for Artificial Intelligence.” February 24, 2020. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2091996/dod-adopts-ethical-principles-for-artificial-intelligence/>.
- U.S. Department of Defense. “Contracts For July 14, 2023.” <https://www.defense.gov/News/Contracts/Contract/Article/3459164/>.
- U.S. Department of Defense. “Contracts For March 8, 2023.” <https://www.defense.gov/News/Contracts/Contract/Article/3323211/>.
- U.S. Department of Defense. “Multi-Service Team Wins \$45 Million Research Award to Pursue Quantum-Based Precision Targeting.” June 14, 2023. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3428320/multi-service-team-wins-45-million-research-award-to-pursue-quantum-based-prec/>.
- U.S. Department of Defense Responsible Artificial Intelligence Strategy and Implementation Pathway, DoD Responsible AI Working Council, June 2022. Accessed 7 July 2023.* <https://media.defense.gov/2022/Jun/22/2003022604/-1/-1/0/Department-of-Defense-Responsible-Artificial-Intelligence-Strategy-and-Implementation-Pathway.PDF>.
- U.S. Department of Energy. “Wire Making Techniques.” HTS Coated Conductors - Fact Sheet, July 2002. Accessed April 5, 2023. <https://www.energy.gov/oe/articles/wire-making-techniques-hts-coated-conductors-fact-sheet>.
- U.S. Department of Energy. “High-Temperature Superconductivity Cable Demonstration Projects.” Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Revision Date: July 14, 2009. <https://www.energy.gov/oe/articles/high-temperature-superconductivity-cable-demonstration-projects>.
- U.S. Department of Energy. “Superconductivity Program Overview.” Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Revision Date: July 14, 2009. <https://www.energy.gov/oe/articles/superconductivity-program-overview>.
- U.S. Department of Energy. “Fault Current Limiters.” Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. Revision Date: November 6, 2009. Accessed November 15, 2021. [https://www.energy.gov/oe/articles/fault-current-limiters-fcl-fact-sheet#:~:text=A%20fault%20current%20limiter%20\(FCL,current%20to%20house%2D%20hold%20devices](https://www.energy.gov/oe/articles/fault-current-limiters-fcl-fact-sheet#:~:text=A%20fault%20current%20limiter%20(FCL,current%20to%20house%2D%20hold%20devices).
- U.S. House of Representatives. “History of the NDAA: The National Defense Authorization Act (NDAA), FY1961-2017.” Accessed December 3, 2023. <https://armedservices.house.gov/ndaa/history-ndaa>.
- U.S. Navy. “Navy to Commission Amphibious Transport Dock Ship Fort Lauderdale.” July 29, 2022. <https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/3109963/navy-to-commission-amphibious-transport-dock-ship-fort-lauderdale/>.

- Warrick, Joby, and Carrie Johnson. "Chinese Spy 'Slept' In U.S. for 2 Decades." *Washington Post*, April 3, 2008. <https://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/04/02/AR2008040203952.html>.
- Werner, Ben. "Experts: Navy Would Spend Billions to Answer Trump's Call to Return Carriers to Steam Catapults," *USNI News*, May 28, 2019. <https://news.usni.org/2019/05/28/experts-navy-would-spend-billions-to-answer-trumps-call-to-return-carriers-to-steam-catapults>.
- Work, Bob. "The Third U.S. Offset Strategy and its Implications for Partners and Allies," Speech, As Delivered by Deputy Secretary of Defense Deputy Secretary of Defense, at the Willard Hotel, Washington, DC, January 28, 2015. <https://www.defense.gov/News/Speeches/Speech/Article/606641/the-third-us-offset-strategy-and-its-implications-for-partners-and-allies/>.
- "Worldwide Spending on AI-Centric Systems Will Pass \$300 Billion by 2026, According to IDC." *International Data Corporation*. Accessed 9 July 2023. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS49670322>.
- Writer, Staff. "Japan Set to Develop Railguns to Counter Hypersonic Missiles." *Nikkei Asia*, January 4, 2022. <https://asia.nikkei.com/Politics/Japan-set-to-develop-railguns-to-counter-hypersonic-missiles#:~:text=Japan%20is%20developing%20a%20railgun,parabolic%20paths%2C%20cannot%20stop%20them>.
- CAPT Ziv, Mike. "Electromagnetic Railgun." Presented at: American Society Naval Engineers (ANSE) Combat System Symposium, March 26-27, Arlington, VA, 2012. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA580993.pdf> (Accessed January 27, 2022)