

| | | Bidirectional Energy Storage | | | | | | | Other Technologies | | |
|---|---|------------------------------|------------------------|---------------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| | | Batteries | | | | Pumped storage hydropower | Compressed air | Flywheels | Electrochemical capacitors | Thermal storage | Demand response |
| | | Li-ion batteries | Sodium-based batteries | Lead-acid batteries | Flow batteries | | | | | | |
| Bulk Energy Services | Electric Energy Time shift (Arbitrage) | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Electric Supply Capacity | ● | ○ | ○ | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Ancillary Services | Frequency Regulation | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | |
| | Spinning, Non-Spinning, and Supplemental Reserves | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | |
| | Voltage Support | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Black Start | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Load Following/Ramping Support for Renewables | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Transmission Infrastructure Applications | Transmission Upgrade Deferral | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Transmission Congestion Relief | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Distribution Infrastructure Applications | Distribution Upgrade Deferral | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Customer Energy Management Applications | Power Quality | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ○ | |
| | Power Reliability | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Retail Energy Time shift | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | Demand Charge Management | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |

Key:

- - Technology is highly suitable for the application.
- - Technology may be limited or non-optimized for the application.
- - Technology is not well-suited for the application.

Note: For a more quantitative view of the relationship between storage technologies and grid applications, see the DOE/EPRI Energy Storage Handbook.³⁶

⁵⁴² Department of Energy, *Potential benefits of high-power, high-capacity batteries*, p. 8.

第 17 節 半導体とマイクロエレクトロニクス (Semi conductors and Microelectronics)

半導体の技術開発は、全てのテクノロジー革新の基幹である。とりわけ、資源が限られた日本経済にとって、半導体産業を再燃させることは喫緊の課題である。半導体は、特に米中間においても経済安全保障に直結する重要産業である。近年においては、パンデミックの影響でオンライン化が進んだことや、さらなるグローバル社会の実現に向けて世界的に半導体が不足していることを鑑み、各国で国内量産に向けた技術開発が進められている。中でも、脱炭素化や自動運転、メタバース等の仮想空間の実現のためのセンシング技術の開発にも期待が高まっている⁵⁴³。こうした次世代のテクノロジー産業を可能とするためには、より高性能な 2nm ノード以下の次世代半導体が不可欠であり、そのための研究開発が活発に行われている。

本項においては、2022 年に米国務省が掲げた技術項目リストに基づき、最先端の半導体を開発するための以下 7 項目について、現状の動向や鍵となる事項をまとめる。

- 1) デザイン設計 (EDA)
- 2) 半導体製造装置
- 3) CMOS の次
- 4) 異種統合と先端パッケージング
- 5) AI チップ
- 6) 先端マイクロエレクトロニクスの新材料
- 7) ワイドバンドギャップ・ウルトラワイドバンドギャップ半導体

1. デザイン設計 (EDA)

(1) 技術の概要

1980 年代頃から半導体の集積度が高まるにつれて人手で設計することが難しくなると、コンピューターが自動的に半導体の設計を行うことが主流となった。EDA (electronic design automation) や DA (design automation) は、集積回路やプリント基盤を自動設計することを総称した用語であり、半導体の設計、検証、実装、および試行するための機器を設計することを意味する⁵⁴⁴。

⁵⁴³ 日本経済団体連合会「産業技術立国への再挑戦」2022 年 10 月 11 日。

https://www.keidanren.or.jp/policy/2022/089_honbun.html#s1

⁵⁴⁴ “Electronic Design Automation,” semiconductor engineering, last access on 24.10.2022.

https://semiconductorengineering.com/knowledge_centers/eda-design/definitions/electronic-design-automation/

現在、最先端チップの設計に必要な EDA の世界市場の約 85%は、米国の企業が占めている⁵⁴⁵。特に業界大手 3 社であるシノプシス社、ケイデンス・デザイン・システムズ社、そして（独）シーメンス EDA 社（旧（米）メンター・グラフィックス社）が世界シェアを占める。現状では、この大手 3 社の半導体 EDA 設計ツールなしでは、最先端の 5-7nm のシステム・オン・チップ（System on Chip: SoC）を設計することはできない。さらに、FinFET 量産製品の 90%がシノプシス社の EDA を使用して設計されている（FinFET については CMOS の次技術を参照）⁵⁴⁶。

最新の EDA 技術の開発傾向では、AI 技術を導入してマシン・ラーニング（ML）やディープ・ラーニング（DL）機能を EDA に搭載して効率を高めている。中でも、シノプシス社はいち早く AI 技術を EDA に導入し、2018 年時点で解析ツールである「PrimeTime」を発表している。この解析ツールは、ECO（Engineering Change of Order）に ML 機能を実装することで、解析速度を大幅に向上させたものであり、韓国のサムスン・エレクトロニクス社や台湾の TSMC 社等のデバイス設計に使用されている⁵⁴⁷。さらにシノプシス社は、2020 年 3 月には半導体設計プロセスに自律 AI を搭載した DSO.ai（Design Space Optimization AI）技術を発表し、膨大なデータの中から最適な候補を自律的に探索する AI の推論エンジン機能を用いることで、意思決定を最小化することに成功した⁵⁴⁸。同様に、ケイデンス・デザイン・システムズ社やシーメンス EDA 社でも ML 機能を EDA に適用し、より効率の良い設計を実現している。例えば、ケイデンス社が開発したソリューションでは、大規模集積回路（Large Scale Integration: LSI）のブロック設計を行うエンジニアが目標値を設定するだけで、自動的にパワー・パフォーマンス・エリア（PPA）の目標を満たし、複数ブロックのフローを同時に最適化することができる⁵⁴⁹。米エヌビディア社は、さらに進化した GPU を開発することで DL 技術が実用化され、その DL 技術が EDA をさらに進化させることで、より最適な設計が可能となるとの研究結果を発表しており、具体的に商品化した GPU 「A100」（従来品より 8 ビット整数演算の処理能力が 317 倍に向上）をサムスン等に

⁵⁴⁵ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022. <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>

⁵⁴⁶ Synopsys 「FinFET 設計の 90%を支えるテクノロジー」 <https://www.synopsys.com/ja-jp/implementation-and-si-gnoff.html>

⁵⁴⁷ 「AI 応用設計技術と EDA ツール」 Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。<https://semi-net.com/feature/posts/eda>

⁵⁴⁸ I b i d

⁵⁴⁹ I b i d.

提供している⁵⁵⁰。こうした EDA 技術の発展により、5G や最先端の携帯電話、ハイレベルなコンピューティングなど、さらなる次世代製品の開発が可能となる。

(2) 公的利用・安全保障における利用

EDA 設計ツールは主に先述した米国企業 3 社が市場を独占しており、この傾向は今後も継続することが予想される。一方で、製造業は主に台湾や韓国に分業されているため、こうした分業におけるサプライチェーンのリスクや、EDA 技術の流出が問題視されている。米国は、半導体技術に関連する知的財産の盗難の可能性、偽造デバイスの導入、自然災害または紛争によるチップサプライチェーンの混乱などは国家安全保障に直結するリスクであると位置付け、特に人工知能（AI）の製作に不可欠な半導体の生産に脆弱性が見られることは深刻な問題であると認識している⁵⁵¹。

さらに 2022 年 8 月 14 日、米国商務省産業安全保障局（BIS）は主に中国等に対して新たに輸出管理の対象として EDA ツールに関連する GAA（Gate All Around）FET⁵⁵²搭載の集積回路（IC）開発に使用される電子コンピューター支援設計（Electronic Computer-Aided Design: ECAD）用ソフトウェアを加えた⁵⁵³。BIS によると、ECAD ソフトウェアは複雑な集積回路を設計するため、軍事および航空宇宙防衛産業の様々なアプリケーションで使用される重要な技術である⁵⁵⁴。特に、GAAFET 回路の設計に適した ECAD は最先端の LSI 設計用の CAD ツールであり、米国が圧倒的に強い分野であるため、この分野での規制は主に中国のファブレスメーカーが最先端のロジック半導体を開発することを防ぐための対策であると考えられている。現状では、米国の上述した 3 社が中国の EDA 市場の 95%のシェアを獲得しており、中国国内で EDA を開発し国産品へ置き換えるには時間がかかる⁵⁵⁵。また、現在の中国の半導体製

⁵⁵⁰ 小島郁太郎「NVIDIA が半導体設計に AI 適用 GPU 活用で設計者を超越」日経エレクトロニクス、2022 年 1 月 7 日。
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/06432/>

⁵⁵¹ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022. <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>

⁵⁵² GAAFET については CMOS の次で説明。

⁵⁵³ 甲斐野裕之「米商務省、半導体関連技術などを輸出管理対象に追加、「ワッセナー・アレンジメント」での合意を反映」JETRO、2022 年 8 月 15 日。<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/60bb3ad37d14bce5.html>

⁵⁵⁴ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220816-2426578/>

⁵⁵⁵ 川尻「米国が EDA の供給断つ、中国の半導体産業が再び「首を絞められる」ことに—独メディア」、dmenu、2022 年 8 月 17 日。https://topics.smt.docomo.ne.jp/article/recordchina/world/recordchina-RC_899572

品は 28-90nm のマチュアなプロセスが主流であるため、この制裁による短期的な影響は少ないが、将来的に GAAFET が主流となる際に制約が生まれることを期待した措置となっている。

一方で、EDA 関連技術の開発は日本が遅れをとっている分野である。上述したような国際情勢に鑑み、2022 年 11 月 10 日にトヨタ、ソニーなど 8 社が共同で設立を発表した Rapi dus 社は、2nm ノード以下の最先端の半導体の量産に向けて日米が共同研究開発することを期待しており、特に EDA 分野での日米の連携が期待できる。

2. 半導体製造装置

(1) 技術の概要

半導体製造装置 (Semiconductor Manufacturing Equipment: SME) 業界は、前工程と後工程に分類される。前工程の SME は、研磨・研削装置、リソグラフィシステム、化学蒸着装置、および計測システムなどのシリコンウェーハ上で機能するチップを作成する製品を指す⁵⁵⁶。後工程の SME は、プローブ、電圧テスター、マシン・ビジョン・システムやオシロスコープなど、最終製品に組み込まれる前にチップの機能を組み立ててパッケージ化し、試行する製品である⁵⁵⁷。SME のメーカートップ 3 社は米国に本社を構えているアプライド・マテリアル社、ラムリサーチ・コーポレーション、KLA コーポレーションであり、オランダの ASML 社と日本の東京エレクトロニクス社を合わせた 5 社が世界の市場の 6.5 割を占めている⁵⁵⁸。中でもオランダの ASML は、5nm 以下の微細化開発を可能とするための EUV 露光技術を採用した半導体製造装置を製造する、世界で唯一の企業である⁵⁵⁹。

SME 関連の技術で現在最も注目され、急成長しているのは、同じ基板上により多くのチップを集積させる 3 次元実装 (3DIC) のための SME である。3 次元実装とは、電子回路を形成して薄片化した半導体ウェーハを 3 次元に積層化して実装する技術のことを指し、この技術を用いることで実装面積を減らして電子回路の層間を貫通電極を使って通電させることで、半導体の小型化・高密度化・省電力化、

⁵⁵⁶ John VerWeij, What's Causing U.S. Semiconductor Equipment Production and Exports to Grow?, U.S.

International Trade Commission, January 2019, pp1.

https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_john_verwey_semi_manufacturing_equipment_pdf.pdf

⁵⁵⁷ Ibid.

⁵⁵⁸ Congressional Research Service, "Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy," October 26, 2020, pp.15. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46581>

⁵⁵⁹ NEDO 「TSC トレンド グローバルな半導体競争」2021 年、20 頁。

<https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

さらに信号伝送と処理速度の高速化など、数多くのメリットを生む⁵⁶⁰。チップを3次元方向に集積させて動かすのは後工程の作業であり、日本の企業が得意とする主にチップを切り分けて基板に装着してパッケージする工程を指す⁵⁶¹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

上述した2022年8月の米国による中国への輸出規制は、今後DUV（深紫外線）リソグラフィ装置の輸出を含むように規制範囲を拡大する可能性が示唆されている。前述した通り、現在オランダのASML社が業界で唯一の極紫外線（EUV）・深紫外線（DUV）リソグラフィ装置メーカーである。そのため、米国のアプライド・マテリアル社やラムリサーチ・コーポレーション社の売上げが中国の市場に頼っていることに対する懸念等を背景に、今後米国政府が中国国内の新しいファウンドリーが3nm以下の半導体製造に必要な最先端のリソグラフィ装置を開発できないように、さらなる規制をかけるのではないかという見方がある⁵⁶²。一方で、米国のラムリサーチ・コーポレーション社は自社の売上高の31%を中国が占めていると報告しているため、こうした輸出規制措置が米国企業に及ぼす影響も同時に危惧されている⁵⁶³。

(3) 日本における技術開発の現状

上述した通り、SMEは日本の企業が現在も競争力を維持する分野である。2021年の経済産業省による『半導体戦略（概略）』では、「次々世代の先端半導体製造に必要となる装置・材料等の先導的な研究開発（次世代のEUV向け装置・材料技術、層間・配線間絶縁・放熱・接合材料、三次元接合・張り合わせ技術や評価技術等）を支援する」⁵⁶⁴と具体的な項目が掲げられ、特にポスト5G情報通信システム

⁵⁶⁰ 東京応化工業株式会社「3次元実装分野」アクセス日2022年10月24日。<https://www.tok.co.jp/products/3d>

⁵⁶¹ 田嶋智太郎「次の半導体トレンド「3次元化」で躍進する日本企業5社とは？“技術の日本”に商機到来」、Money Voice、

2022年2月22日。<https://www.mag2.com/p/money/1160478>

⁵⁶² Alan Patterson「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022年9月1日。

https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2209/01/news074_2.html

⁵⁶³ Ibid.

⁵⁶⁴ 経済産業省「半導体戦略（概略）」2021年6月、15頁。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210603008-4.pdf>

強化のため、2nm ノード世代以降（特に新構造トランジスタ、GAA ナノシート等）において必要となる新しい製造プロセスの開発に注力している。

3DIC の実現には基板やパッケージの新しい装置と素材が必要となるため、日本の SME や素材メーカーにとっても好機となる。3DIC 技術に力を入れている日本の企業の例として、ディスコ社のパッケージや封止樹脂を薄く削るための研削装置「グラインダー」や加工品、東京応化工業や JSR 社の感光材（フォトレジスト）、TOWA 社の 3 次元積層向けの封止技術等がある⁵⁶⁵。東京応化工業は長年にわたり本分野の研究を進めてきた企業であり、接着剤やキャリア基板といった材料のほか、半導体ウェーハのキャリア基板への貼付・分離を行うプロセス機器を開発し、独自のウェーハ・ハンドリング・システム「Zero Newton」の開発に成功している⁵⁶⁶。この技術は、3 次元実装プロセスの大幅な効率化とハイコスト・パフォーマンスを可能とするため、半導体のさらなる高性能化に応える最新のプロセス技術として注目されている⁵⁶⁷。この他にも、東京精密社のポリッシュ・グラインダーやプロービングマシン、岡本工作機械製作所の平面研削盤、メイコー社のプリント配線板製造、キョウデン社のプリント配線基板製造、住友ベークライト社のパッケージ材料などが挙げられる⁵⁶⁸。また、茨城県つくば市に設立した台湾の TSMC 社と日本の装置・素材メーカーや研究機関の共同研究センターでは、半導体を樹脂などでパッケージングし、基板上に搭載する等の 3DIC 技術の研究が行われている⁵⁶⁹。この技術を活用した商品開発の研究も進んでおり、例えば東北マイクロテック社は学習機能を備えたチップをセンサー等の端末デバイスと一体化した三次元積層型エッジ AI チップの製品化に成功し、さらに時系列情報や音声認識の機能を高めるためのソフトウェア開発も展開している⁵⁷⁰。（3DIC については先端パッケージングを参照。）

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）によると、省エネルギー化の需要が高まる中で、パワー半導体や SME 分野への各国の参入は著しく、今後国内での安定的な供給を確保す

⁵⁶⁵ Alan Patterson「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022 年 9 月 1 日。

⁵⁶⁶ 東京応化工業株式会社「3次元実装分野」（アクセス日 2022 年 10 月 24 日）。

⁵⁶⁷ 同上。

⁵⁶⁸ 田嶋智太郎「次の半導体トレンド「3次元化」で躍進する日本企業 5 社とは？“技術の日本”に商機到来」、Money Voice、2022 年 2 月 22 日。<https://www.mag2.com/p/money/1160478>

⁵⁶⁹ 「半導体に 3 次元化の波 インテルら「性能向上のカギ」」日本経済新聞、2021 年 12 月 16 日。<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UC14DMI0U1A211C2000000/>

⁵⁷⁰ 東北マイクロテック株式会社「世界初の三次元積層型 AI チップの製品開発に成功」2022 年 2 月 16 日。<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000009.000096007.html>

ることが難しくなるため、更なる省エネエレクトロニクス技術の開発が求められる⁵⁷¹。革新素材分野等と連携しながら半導体エコシステム全体での改善を必要としている。例えば、NEDO が 2025 年までを事業期間として公募している研究には、新世代パワー半導体の開発として酸化ガリウムパワー半導体と大口径インテリジェント・シリコンパワー半導体の開発、ならびに半導体製造装置の高度化に向けた開発等⁵⁷²が含まれており、こうした幅広い分野を網羅した研究開発を活発化させていくことが競争力を高めることに繋がる。また、NEDO における 3100 億円の資金をかけた「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」⁵⁷³も採択されており、ポスト 5G で使用される最先端の半導体開発、特に前工程で使用されるための技術開発が支援対象となっている。

3. CMOS の次

(1) 技術の概要

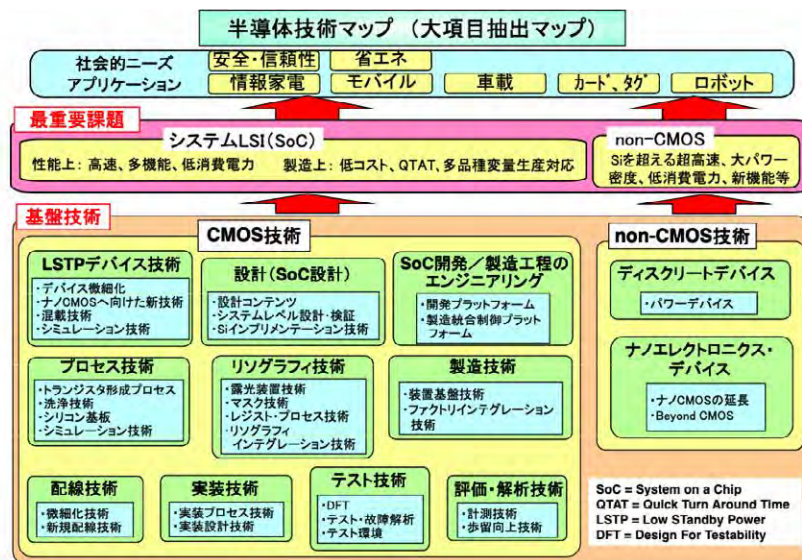
CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) とは、相補型・金属・酸化膜・半導体を指す。これは、n 型 FET と p 型 FET という、オンオフ動作が相互に逆転するタイプのトランジスタを直列につないだ素子のことであり、低消費電力で集積回路の信号処理を行う上で最も基本的なデバイスである⁵⁷⁴。CMOS においてもムーアの法則に基づきナノ技術を用いて微細化されてきたが、シリコン技術には限界が見られるため、元来の CMOS とは異なる CMOS の次 (Beyond CMOS) となる基礎研究が活発化している。一般的に CMOS の次と呼ばれる技術は、ムーアの法則に部分的に沿った形で長期的に開発される新しい素材、構造、デバイスやアーキテクチャを指し、より大きな記憶容量を持つサーキット (回路) を製造するために、磁気デバイス、MEMS、2 次元の材料に基づくデバイスや応答エレクトロニクスなどが研究されている。

⁵⁷¹ NEDO 「省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業」追加公募に係る実施体制の決定について」2022 年 7 月 12 日。 https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100240.html

⁵⁷² 同上。

⁵⁷³ NEDO 「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」2022 年 5 月 18 日。 https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100172.html

⁵⁷⁴ 産総研 「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」2020 年 12 月 8 日。 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20201208/pr20201208.html



(図 17-1 NEDO による半導体技術マップ⁵⁷⁵⁾)

CMOS の次技術の開発は、さらなる低消費電力化や長時間のモバイル機器の駆動を可能とすることを目的としている。例えば、回路とアーキテクチャにおいては、新興デバイスやハイブリッド回路に基づくものがあり、画像処理やパターン認識、無線周波数システムの回路などがある⁵⁷⁶。磁気ロジックでは、新しい磁気デバイスに基づいて提案されている mLogi c 等があり、論理ゲートを独自の不揮発性記憶素子に変換することで 100mV の低電圧で駆動することができる⁵⁷⁷。MEMS はマイクロスケールの微小電気機械システムであり、機械要素部品やセンサー、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に集積化したデバイスを指す⁵⁷⁸。MEMS はナノ化が進み、カーボンナノチューブ等のナノスケール技術を用いたものは NEMS と呼ばれる。また、磁気をもたらずスピンの性質も利用するエレクトロニクスの分野は「スピントロニクス」といい、巨大磁気抵抗効果 (GMR)、トンネル磁気抵抗効果 (TMR)、MRAM、スピン注入磁化反転などの技術が開発されてきた⁵⁷⁹。スピントロニクスは、電子のスピン特性を電磁場で操作することでスピン偏極電流を生成し、電

⁵⁷⁵ NEDO 「半導体技術マップ」 <https://www.nedo.go.jp/content/100085072.pdf>

⁵⁷⁶ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information." International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482., pp.3479. https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n16_02.pdf

⁵⁷⁷ i bi d.

⁵⁷⁸ 株式会社 MEMSCORE 「MEMS とは？」 アクセス日 2022 年 10 月 24 日。 <https://www.memsc-core.com/service/mems.html>

⁵⁷⁹ 佐藤勝昭 「スピントロニクス」 って何？ (その 1) 」 つくばサイエンスニュース

荷のみでは得られない高いデータ転送速度、記憶容量、メモリ密度、処理能力の実現を可能とする⁵⁸⁰。スピントロニクスは CMOS の次の開発で最も使用される技術であり、主にトランジスタの密度と消費電力の問題を解決するために使用されている⁵⁸¹。

情報処理を担う電界効果トランジスタは FET と呼ばれ、平面型の CMOS 構造は、FET を微細化することによって高性能化と低消費電力化を図ってきた。しかし、現在は 2 次元の発展が限界に達し、3 次元の FET 構造が注目されている。現在実用化されているのはヒレ (Fin) 状のゲート構造を持つ FinFET であり、それよりもさらに発展したものが、ゲートをチャネルの上下・左右を完全に覆う GAA (Gate All Around) 構造である⁵⁸²。GAAFET は、2nm ノードの半導体を実現する上で重要な技術である。GAAFET よりもさらに進化した FET 構造は CFET 構造と呼ばれ、n 型 FET と p 型 FET を上下に積層することで従来の単一 FET 素子の寸法で CMOS を構成でき、大幅な面積縮小と高速化を図ることができる⁵⁸³。また、ゲルマニウムはシリコンに比べてホール移動度 (半導体に電場をかけたときの電子や正孔の半導体での動きやすさを示す値) が高く、低電圧動作が可能となり、シリコンプロセスとの親和性が高いことから、n 型 FET は従来のシリコンで、p 型 FET はゲルマニウムで作成できる異種チャネル集積プラットフォームが、FET の高速化技術として期待されている⁵⁸⁴。

2019 年 11 月 01 日。 [https://www.tsukuba-](https://www.tsukuba-sci.com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89)

[sci . com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89](https://www.tsukuba-sci.com/?col umn01=%E3%80%8C%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%80%8D%E3%81%A3%E3%81%A6%E4%BD%95%EF%BC%9F%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%91%EF%BC%89)

⁵⁸⁰ Merck 「マイクロ・ナノエレクトロニクス」 (アクセス日 : 2022 年 11 月 30 日) 。

<https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/applications/materials-science-and-engineering/microelectronics-and-nanoelectronics>

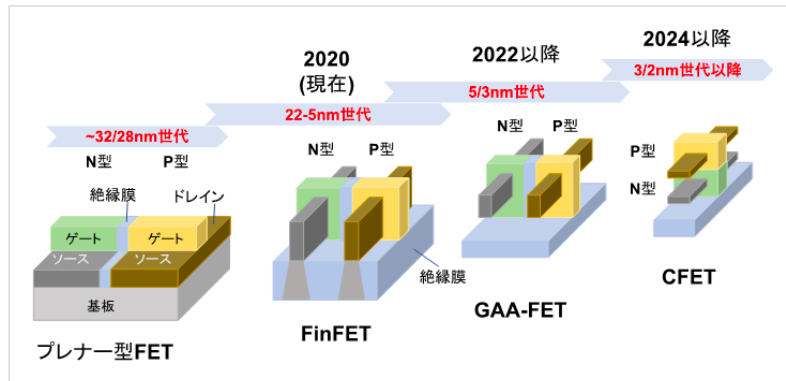
⁵⁸¹ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information." International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482. , pp.3479.

⁵⁸² 産総研 「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」 2020 年 12 月 8 日。

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20201208/pr20201208.html

⁵⁸³ i b i d.

⁵⁸⁴ i b i d.



(図 17-2 FET 構造のロードマップ⁵⁸⁵⁾)

2020 年に、産業技術総合研究所（産総研）と東北大学ならびに台湾の大学チームからなる日本と台湾の国際共同研究グループは、2nm 世代の電界効果トランジスタとされるシリコンとゲルマニウムの異種チャンネル相補型電界効果トランジスタ hCFET（heterogeneous Complementary-Field Effect Transistor）を共同開発している⁵⁸⁶。この研究では、シリコンとゲルマニウムのチャンネル薄膜を上下に集積させる技術を開発し、Si-n 型 FET と Ge-p 型 FET を最短距離で連結する hCFET 構造を実電することで、大幅な集積化の向上とさらなる高速化が期待される⁵⁸⁷。こうした CFET の研究は 2nm ノードの半導体を実現する上で重要であり、今後より技術開発が活発化する分野である。

(2) 公的利用・安全保障における利用

上述したとおり、2022 年 8 月に米国商務省産業安全保障局（BIS）が新たに主に中国への輸出管理対象に加えた半導体技術に、GAAFET 搭載の集積回路（IC）開発に使用される電子コンピューター支援設計（ECAD）用ソフトウェアが含まれた。BIS は、GAAFET 技術は 3nm 以下の最先端の技術ノードを実現するための鍵となる技術であり、商用目的だけでなく、防衛および通信衛星を含む多くの軍事用途を前進させるために重要である⁵⁸⁸と、軍事利用に言及して説明している。こうした輸出規制の措置は、韓国の SK hynix 社が中国にある既存の工業で GAA 技術を拡充する計画を立てていることに対して見直し

⁵⁸⁵ i b i d.

⁵⁸⁶ 産総研「2nm 世代向けの新構造トランジスタの開発」2020 年 12 月 8 日。

⁵⁸⁷ i b i d.

⁵⁸⁸ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220816-2426578/>

を強いるなど、中国以外でも影響を及ぼしている⁵⁸⁹。米国は特に中国共産党が最先端の技術を採用して軍事開発する軍事融合（MCF：Military Civil Fusion）イニシアチブに注目しており、TSMC 社やサムスン・エレクトロニクス社が GAAFET 技術を使って 3-2nm ノードの商用化を実現するにあたり、中国を牽制している⁵⁹⁰。

また、2022 年には CMOS のイメージセンサの成長率は 16%減少したと報告されており、その主な原因として世界的なインフレによる原材料価格の上昇、スマートフォン消費の低下、パンデミックによるサプライチェーンへの悪影響などが挙げられている⁵⁹¹。

4. 異種統合と先端パッケージング

(1) 技術の概要

半導体の後工程の生産過程では、完成した半導体をスマートフォンなどの最終製品にパッケージングする前に、正常に機能するかを試行する。この作業は ATP（assembly, testing, packaging）と呼ばれ、最も労力を要するため、比較的賃金の低いマレーシア、ベトナム、フィリピンなどに外注されてきた⁵⁹²。元来、ATP の作業は最も付加価値が低いとみられ分業されてきたが、チップに組み込まれる機能が増加することに伴い、近年はより重要視される傾向にある。

異種統合（Heterogeneous integration）とは、個別に製造されたコンポーネントをより高いレベルのアセンブリ（システム・イン・パッケージ：SiP）に統合することであり、そうすることで全体の機能が強化されて、動作が改善される⁵⁹³。組み合わせるコンポーネントは様々で、例えばシステムレベル（組み立て済みのパッケージやサブシステムなど）での統合、または機能性（専用プロセッサ、DRAM、フラッシュメモリ、表面実装デバイス、抵抗器・コンデンサ・インダクタ、フィルター、コネクタ、MEMS、センサーなど）や技術性（例えば、ダイサイズ用に最適化されたものと、低電力用に

⁵⁸⁹ Alan Patterson 「米国の新たな対中国半導体規制、効果に疑問の声」、EETimes、2022 年 9 月 1 日。

https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2209/01/news074_2.html

⁵⁹⁰ *ibid.*

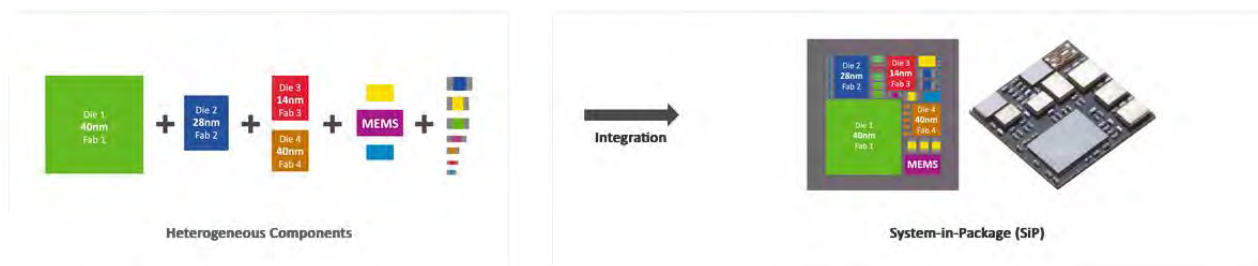
⁵⁹¹ 服部毅「半導体企業売り上げランキング 2022 年第 1 四半期版、Samsung が首位を堅持」マイナビ・ニュース 2022 年 6 月 30 日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220630-2384665/>

⁵⁹² Congressional Research Service, “Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy,” October 26, 2020, pp.17. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46581>

⁵⁹³ ASE, “Heterogeneous Integration (HI)”, last access on 24 October 2022.

https://ase.aseglobal.com/en/heterogeneous_integration

最適化されたもの)での統合などがある⁵⁹⁴。複数のダイを同じパッケージに統合することで、小さなフォームでより高度な機能を実行することができるようになる。



(図 17-3 異種統合とは⁵⁹⁵)

異種統合には高度なパッケージング能力が必要である。米国では、バイデン大統領による『就任 100 日間の報告』で半導体政策が見直されたが、先端パッケージング分野は長きにわたりアジア諸国に分業してきたため、米国の半導体企業が改善すべき項目と報告されている。また、米エネルギー省が 2021 年に発表した『半導体-サプライチェーンの詳細な評価-』でも同様に、最先端でエネルギー効率の高い半導体製品を米国内で製造するためには、パッケージング能力の向上に力を入れるべきである⁵⁹⁶と明記されている。一方で、米国内でも異種統合の技術開発は活発に行われている。例えば、米サンディヤ国立研究所は、国家安全保障用に向けた MEMS マイクロ、ハイパフォーマンス電子やオプトエレクトロニクスなどのプロトタイプ製造を可能とするため、最先端のハイブリッド機能を開発している⁵⁹⁷。この技術により、異種材料を緊密に統合することで、コンポーネント全体のサイズや重さ、パフォーマンス等を改善しながら、最適化されたフォトニックデバイス、光学素子、MEMS センサー・アクチュエーター、電子回路等に活用することができる⁵⁹⁸。さらに、2022 年 3 月には Advanced Semiconductor Engineering、AMD、Arm、Google Cloud、インテル、メタ、マイクロソフト、クアルコ

⁵⁹⁴ ASE, “Heterogeneous Integration (HI)”, last access on 24 October 2022.

⁵⁹⁵ ibid.

⁵⁹⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-”, US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, p.19 .

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Semiconductor%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>

⁵⁹⁷ Trujillo, Irene, and Jennifer Rose Lake. *Heterogeneous Integration/Advanced Packaging*. No. SAND2015-0712C. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015.

https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/145/2021/10/heterogeneous-integration_SAND-2.pdf

⁵⁹⁸ ibid.

ム、サムスン、TSMC（台湾積体回路製造）の10社でUniversal Chiplet Interconnect Express（通称UCIe）を共同設立し、異なる設計や製造のダイであっても相互接続できる業界標準のチップレットを開発した⁵⁹⁹。チップレットは異なる企業が共通に利用できるため、半導体の市場投入までの時間の短縮やコスト低減が期待されている⁶⁰⁰。

小型・低消費電力化が求められるスマートフォンや高速、高性能化が必要とされるハイ・パフォーマンス・コンピューティング（HPC）分野では、新しい先端パッケージング技術の導入が進められている。特にスマートフォンなどのモバイル情報機器の小型化・省電力化を達成するためには、従来のウェーハレベルパッケージ（WLP）では不可能であり、ファンアウト（FO）構造を採用するFOWLPの需要が高まった⁶⁰¹。FOWLPの手法では、ポリイミド樹脂、金属箔、樹脂材料などを用いてダイをシリコン・ウェーハなどの基板上に再配置し、再配線層を形成して樹脂封止を行った後に、個別のチップに切り分けていく⁶⁰²。日本では、昭和電工マテリアルズ社（旧：日立化成）の製品がポリイミド樹脂のシェアを占め、樹脂封止で使用するエポキシ系樹脂はナガセケムテックスがシェアを占めている⁶⁰³。

数々の研究開発が進められている中で、今後も半導体産業ではシリコンが主流となり、その後は集積回路を積み重ねて三次元構造にした3DIC（3次元集積化）が性能のスケールリングを牽引するとの見方が多い。AIや量子コンピュータならびにポスト5G・6G社会への適応など、新しい半導体システムへの要求が高まるにつれ、研究開発競争が激化し、その中心となる技術に3DICがある。3DIC実装とは、LSIチップの基盤内に貫通するシリコン貫通電極（Through-Si-Via：TSV）を形成することで三次元的にLSIチップを積層する技術である⁶⁰⁴。TSVをもつチップを縦方向に積み重ねることでLSIを立体的に集積できるため、微細加工や集積度を向上することができる⁶⁰⁵。3DICの実現に、TSV技術の開発は不可

⁵⁹⁹ iMagazine「半導体「チップレット」時代の本格到来を告げる業界団体「UCIe」設立、インテル・AMDなど10社、標準仕様「UCIe 1.0」を発表 ～「ムーアの法則を拡張するのはチップレット」」2022年3月7日。

<https://www.imagazine.co.jp/ucie202203/>

⁶⁰⁰ i bid.

⁶⁰¹ 「先端パッケージング材料」SEMI-NET（アクセス日2022年10月30日）。<https://semi-net.com/feature/posts/package-material>

⁶⁰² 「先端パッケージング材料」SEMI-NET（アクセス日2022年10月30日）。<https://semi-net.com/feature/posts/package-material>

⁶⁰³ i bid.

⁶⁰⁴ 菊地克弥. "AI・IoT時代に向けた三次元集積実装技術の研究開発." *表面と真空* 62.11 (2019): 666-671. p. 8

⁶⁰⁵ 傳田精一. "3次元チップ積層のためのシリコン貫通電極（TSV）の開発動向." *表面技術* 58.12 (2007): 712-712, p. 712. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/58/12/58_12_712/pdf/-char/ja

欠である。これらの技術開発により、CPU、メモリ、ロジック等においては、デバイスの高周波特性が大きく改善することが期待される⁶⁰⁶。

(2) 日本における技術開発

2021年に経済産業省が発表した『半導体・デジタル産業戦略』においても、ロジックやメモリ、センサー等の複数チップを三次積層して一つにパッケージ化する3D化プロセスの技術開発⁶⁰⁷を個別戦略の一つとして掲げている。特に、微細化プロセスと3D化プロセスの技術開発を促進するため、産総研を中心にTIA構成機関⁶⁰⁸が立ち上げられ、海外のR&D組織との共同研究などに励んでいる。また同年3月に茨城県つくば市に設立された、TSMC ジャパン三次元積層型集積回路(3DIC)研究開発センターはこの実例であり、産学官が連携して5nmノードで製造したチップを3D積層する研究を行うことで、より安い初期投資で優れた機能を実現できると期待されている。さらに、東北大学は「東北大学半導体テクノロジー共創体」としてスピントロニクス省電力ロジック半導体の開発、ならびに半導体製造プロセス・部素材・イメージセンサ開発実証、MEMS設計・プロセス開発実証のため、産学官の共創を図っている⁶⁰⁹。その一環として東北大学内に3DICの研究開発拠点となる「GINTI」が設立され、シリコントランジスタに代わる技術としてのスピントロニクス、メモリスタ、カーボンナノチューブ、DNAコンピューティング、分子エレクトロニクス⁶¹⁰等の研究が行われている。本分野は米国が弱みと認識しているため、さらなる日米間での企業連携や共同技術開発等が期待できる。

5. AI チップ

(1) 技術の概要

AIチップとは、AIハードウェアやAIアクセラレータとも呼ばれ、人工ニューラル・ネットワーク(Artificial neural network: ANN)というディープ・ラーニング(DL)機能用に特別に設計された

⁶⁰⁶ ibid.

⁶⁰⁷ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021年6月、14-15頁。

https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semi_con_digital/20210603008-1.pdf

⁶⁰⁸ TIAについて <https://www.tia-nano.jp/page/page000095.html>

⁶⁰⁹ 東北大学産学連携機構 総合連携推進部「東北大学半導体テクノロジー共創体の設置 ー東北大学が強みを持つ半導体分野で産学官共創を進め、日本の半導体産業戦略の実行に寄与するー」2021年6月8日。

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/06/press20210608-01-clean.html>

⁶¹⁰ MIT Technology Review, “10 Breakthrough technologies” last access on 24 October 2022.

<https://www.technologyreview.jp/s/273083/10-breakthrough-technologies-2022/>

アクセラレータを指す⁶¹¹。こうした AI を活用した次世代のアクセラレータ・アーキテクチャの開発により、コンピューションの効率を高めたり、メモリやストレージに大規模なデータセットを転送することができるようになる。AI チップは、これまでの CPU と比較して劇的に機能を改善させることが可能なため、高度なセキュリティ関連に AI システムを導入したり、低コストで製品を提供するために不可欠である。

2025 年までに、AI チップ関連は全半導体需要のほぼ 20%（約 670 億ドルの収益）を占めると予測されている⁶¹²。例えばコンピューティングの分野では、中央処理装置（CPU）とアクセラレータ（GPU）、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ（field programmable gate arrays : FPGA）、特定用途向け集積回路（application-specific integrated circuits : ASIC）などの機能によって、パフォーマンスが決まるとされる⁶¹³。今後コンピューティング市場は特定の用途に向けて作られる ASIC が主流になるとみられ、GPU は DL アプリケーションの需要に見合うようにカスタマイズされるようになる⁶¹⁴。米エヌビディア社はすでに GPU 分野で AI を導入しており、半導体企業でも特定の業界のためのソリューションを可能にする AI ハードウェアの開発に焦点が当てられている。また、米国の Mythic 社のように、医療・軍事産業の画像や音声認識アプリケーションのエッジ推論をサポートする ASIC を開発したスタートアップ企業も存在する⁶¹⁵。将来的には、システム・オン・チップ（SoC）に組み込まれた ASIC がエッジアプリケーション需要の 70%、FPGA が同需要の約 20%を占めるといわれる⁶¹⁶。経済産業省の半導体戦略においても、次世代コンピューティング技術開発のうち、具体的に車

⁶¹¹ Gem Dilmegani, "AI chips: A guide to cost-efficient AI training & inference in 2022," AI Multiple, August 24, 2022. <https://research.aimultiple.com/ai-chip/>

⁶¹² Allen, "Understanding China's AI strategy: Clues to Chinese strategic thinking on artificial intelligence and national security," pp. 17.

Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, "Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies," McKinsey and Company, January 2, 2019.

⁶¹³ *ibid.*

⁶¹⁴ *ibid.*

⁶¹⁵ Mythic, <https://mythic.ai/company/>

⁶¹⁶ Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, "Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies," McKinsey and Company, January 2, 2019.

載コンピューティング技術を例に挙げ、最適化するソフトウェア設計、ならびに半導体設計技術や車載光エレクトロニクス技術の研究開発を検討している⁶¹⁷。

メモリの分野では、メモリ上のデータに基づいたアルゴリズム分析によって画像認証が行われること等から、メモリ市場のAI化は2025年には120億ドルに増加すると予想されている⁶¹⁸。現在のメモリは主にCPU向けに最適化されているが、新たなソリューションとして開発が進むのは、TSVを介してメモリの3次元スタックにアクセスすることで大規模なデータセットを最大速度で処理できる高帯域幅メモリ（HBM）と、DLコンピューティング・プロセッサへの対応を見越してチップ上に直接データを保存するに十分なメモリ機能を設計したオン・チップ・メモリである⁶¹⁹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

台湾のTSMC社は、米国のF-35戦闘機で使用される半導体や米防衛システムに使用されるデュアルユース機能のFPGAなど、米国防省で使用される様々な軍事グレードの機器を製造している⁶²⁰。例えば、FPGAを発明した米国のザイリンクス社は、その半導体ウェーハのほとんどをTSMCと台湾のユニテッド・マイクロエレクトロニクス社にて製造している⁶²¹。そのため、米国にとって台湾を含むサプライチェーンの問題は深刻な安全保障問題である。さらには、AIチップの製造は半導体の設計とAIソフトウェアを組み合わせるため最先端の半導体製造技術を用いる必要がなく、最先端のチップ製造に成功していない中国にとっては、低コストのAIチップを使用して様々な製品を製造することでより広範な市場シェアと競争力を拡大する転機とされる⁶²²。清華大学が近年発表した『AIチップテクノロジーに関する白書』でも、AIチップに関連するあらゆる技術と市場について深い理解を示しており、パ

⁶¹⁷ 経済産業省「半導体戦略（概略）」2021年6月、26頁。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210603008-4.pdf>

⁶¹⁸ Gaurav Batra, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, and Nick Santhanam, “Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies,” McKinsey and Company, January 2, 2019.

⁶¹⁹ *ibid.*

⁶²⁰ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022.

⁶²¹ Sujai Shivakumar and Charles Wessner, “Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes?,” CSIS, June 8, 2022.

⁶²² Allen, “Understanding China's AI strategy: Clues to Chinese strategic thinking on artificial intelligence and national security,” pp. 18

イドゥ、アリババ、ファウエイ等の中国企業は、AI チップの開発に焦点を当てた半導体設計部門を設立している⁶²³。

こうした背景から、2021年バイデン政権は、半導体業界のサプライチェーンを監視するための早期警戒システムとタスクフォースを設立し、同年9月、米商務省は半導体のサプライチェーンに関する情報要請（RFI）を開始して、150を超える回答を得ている⁶²⁴。さらに2022年8月10日、バイデン大統領は、米国の半導体生産と研究に527億ドルの補助金を提供する法案に署名し、中国の科学技術の取り組みに対して米国の競争力を高めるための取り組みを後押しする姿勢を強調した⁶²⁵。加えて、上述した2022年8月の米国商務省産業安全保障局（BIS）による主に中国への輸出管理対象に半導体機器や材料が加えられたことは、中国がパワーエレクトロニクスに向けた次世代ワイドバンドギャップ技術や最先端ロジックを開発することを阻止する狙いがあるとみられている。

また欧米では、半導体の資源の調達や製造する際に使用される電力等が、人権や環境問題に配慮しているのか等の側面が、本産業の成長にとって重要であると捉えている。例えば米国エネルギー省では、エネルギー使用率の増加や半導体の使用に関係する炭素排出の増加等のため、半導体を使用する際のエネルギー効率を倍増させること、ならびにインメモリ・コンピューティング等のデータをメモリに通信する際の損失を削減または排除する機能を加えること、先端パッケージングによる正確なコントロール能力を構築すること、アナログや3D画像機能による超エネルギー効率のためのASICの異種統合、自然にインスパイアされたコンピューティング、材料、デバイス、およびアルゴリズム/ソフトウェアの開発などに注目している⁶²⁶。こうした民主主義的な観点を半導体製造に加えることは、中国の生産方式との差別化を図る上で重要であろう。

(3) 日本における技術開発

日本においても多くの中小・ベンチャー企業などがAIチップの開発に取り組んでいるが、必要機材の不足が問題であった。そのため、NEDO、産総研、東京大学が共同で整備した「AIチップ設計拠点」

⁶²³ *ibid.*

⁶²⁴ US Department of Commerce, “Results from Semiconductor Supply Chain Request for Information,” January 25, 2022. [h](#)

⁶²⁵ David Shepardson and Jeff Mason, “Biden signs bill to boost U.S. chips, compete with China,” Reuters, August 10, 2022.

[https://www.reuters.com/technology/biden-sign-bill-boost-us-chips-compete-with-china-2022-08-09/](https://www.reuters.com/technology/biden-signs-bill-boost-us-chips-compete-with-china-2022-08-09/)

⁶²⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, pp.15

では、AI チップの設計に必要な EDA ツールやハードウェアエミュレータ、標準 IP コアなどの設計環境を整えて、2021 年 6 月から試験運用を開始している⁶²⁷。さらに東京大学では、2019 年に東京大学大学院工学系研究科附属システムデザイン研究センター（d.lab）を、2020 年 8 月には産学連携の半導体技術開発拠点「先端システム技術研究組合（RaaS）」を発足させ、d.lab は半導体設計技術開発を行うアカデミズム側の拠点として、RaaS は d.lab の研究成果を実用化し、企業が参加して事業として展開することを支援する場を設けている⁶²⁸。この事業には、凸版印刷、パナソニック、日立製作所、ミライズテクノロジーズ、SCREEN ホールディングス、ダイキン、富士フイルム、パナソニック スマートファクトリーソリューションズなどの企業が参加し、効率を高めた設計技術の開発を目標としている⁶²⁹。産総研は次世代コンピューティング基盤の開発拠点⁶³⁰として、産学官が連携した戦略に基づいた 2030 年を見据えた基礎開発研究を推進している。経済産業省も AI チップの開発を加速するために必要な技術基盤を提供することを提案しており、こうした産学官の連携は AI チップ開発において不可欠である。

6. 先端マイクロエレクトロニクスの新材料

(1) 技術の概要

マイクロエレクトロニクスおよびナノエレクトロニクスとは、電子コンポーネントの標準的な形状サイズが、100-0.1 マイクロメートル（マイクロエレクトロニクス）または 100 ナノメートル以下（ナノエレクトロニクス）のエレクトロニクスを指す⁶³¹。マイクロチップの密度を高めることで、電子機器のメモリストレージ性能がより高度なものになる。さらに、電界効果トランジスタを小型化することで、より多くの部品を集積回路に組み込むことが可能となり、より強力でエネルギー効率の高い、軽量の製品を低消費電力で実現する⁶³²。こうした微細化に欠かせないのが、カーボンナノチューブ、窒化ホウ素ナノチューブ、量子ドット、グラフェンといった革新的な新材料であり、こうした材料を

⁶²⁷ NEDO「AI チップ開発加速のための「AI チップ設計拠点」が稼働開始」2019 年 10 月 7 日。

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101211.html

⁶²⁸ 「AI 応用設計技術と EDA ツール」、Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。

⁶²⁹ AI 応用設計技術と EDA ツール」、Semi-NET（アクセス日：2022 年 10 月 30 日）。

⁶³⁰ 産総研「次世代コンピューティング基盤戦略 第一版」2022 年 6 月 17 日。 <https://unit.aist.go.jp/rp-el/eman2022/NGCI/assets/ngcp-strategy2022.pdf>

⁶³¹ Merck「マイクロ・ナノエレクトロニクス」（アクセス日：2022 年 11 月 30 日）。

⁶³² Ibid.

使用することで極めて高い精度で成形や操作し、原子レベルの精密さで電子材料を堆積・積層することができる⁶³³。

カーボンナノチューブは炭素原子の連なりが中空の円筒状になった材料であり、直径が0.4～2nmであることから、非常に高い密度の集積回路を作ることができる⁶³⁴。例えば、2013年に名古屋大学とフィンランドのアールト大学の共同研究により、世界初の全カーボン集積回路（IC）の共同開発が成功を収め、電子デバイスに熟成型を施すことでプラスチック製品に電子機能を実装してデザイン性を広げることに成功した⁶³⁵。次世代の半導体材料として注目されるカーボンナノチューブを使用したICは、現在は大規模集積回路（LSI）への使用に発展しており、これまで主流だったシリコンと比べてキャリアの移動度と速度が約10倍に達することが期待されている⁶³⁶。

さらに最近では、ナノテクノロジーと量子力学的効果における新しいアプローチが注目されており、たとえば分子エレクトロニクスでは、バルクサイズの電極との電気的接触を確立するために、単一分子が電子部品として使用されている⁶³⁷。CMOS技術に重要な次世代のスピンロニクス機器においても、低消費電力化の実現のため、より小さな電圧で磁化方向を制御する界面マルチフェロイク材料の基礎研究が実施されている⁶³⁸。日本においても、2022年5月に東京工業大学が強磁性体として高いスピン偏極率を有するホイスラー合金磁石の Co_2FeSi と高い圧電性能を有する圧電体の $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ （PMN-PT）を組み合わせ、新しい界面マルチフェロイク構造を作成することに成功し、世界で初めて電界印加による不揮発メモリ状態の繰り返しスイッチングを実証している⁶³⁹。さらに抵抗スイッチングエレクトロニクスの分野では、メモリーセル、非線形二端子選択デバイス、RF信号スイッチ、発振器の緩和、サージ保護装置など、従来のCMOSに新しい機能を提供するため、金属酸化物や相変化カルコゲナイド等の材料が注目されている⁶⁴⁰。2次元の材料に基づく機器にお

⁶³³ I b i d.

⁶³⁴ 福田昭「大規模集積回路の時代に突入したカーボンナノチューブ【前編】」PCWatch、2019年6月20日。

<https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/semi-con/1191481.html>

⁶³⁵ 名古屋大学「世界で初めてカーボンナノチューブのみで集積回路を実現」https://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20130809_engg.pdf

⁶³⁶ 福田昭「大規模集積回路の時代に突入したカーボンナノチューブ【前編】」PCWatch、2019年6月20日。

⁶³⁷ Merck「マイクロ・ナノエレクトロニクス」（アクセス日：2022年11月30日）。

⁶³⁸ 東京工業大学「世界最高性能のスピンロニクス界面マルチフェロイク構造を実証」2022年5月23日。

https://educ.titech.ac.jp/mat/news/2022_05/062540.html

⁶³⁹ 東京工業大学「世界最高性能のスピンロニクス界面マルチフェロイク構造を実証」2022年5月23日。

⁶⁴⁰ 株式会社 MEMSCORE「MEMSとは？」アクセス日2022年10月24日。<https://www.mems-core.com/service/mems.html>

いては、独自の電気・光学的機能を作り出すグラフィンが注目され、ニューラルネットワークやフォロニクスなどに使用されている⁶⁴¹。

(2) 公的利用・安全保障における利用

中国共産党の第19回中央委員会第5回全体会議にて、半導体の新材料の開発強化が支持され、中でもSiCやGaNベースのウエハ開発を優先的に強化する指示がなされたという報道があった⁶⁴²。こうした新材料は次世代パワー半導体に活用されるため、中国企業がこの市場にいかに関与するか注視する必要がある。また、米国内で使用されているガリウムはほぼ全て輸入に頼っており、世界で使用されているガリウムの90%以上は中国で生産されているため、欧米ではガリウムを使用しないSiCパワー半導体の開発に注力すると同時に、ガリウムをサプライチェーンの中で最もリスクが高い材料と特定している⁶⁴³（SiCパワー半導体については次項を参照）。

また、一般的な半導体の材料において、ロシアとウクライナは、ニッケル、パラジウム、ネオンなどの半導体製造に重要な資材を提供する国であるため、ロシアのウクライナ侵略が長期化することで、世界の半導体サプライチェーンはさらに混乱する可能性が高い⁶⁴⁴。一方で、ロシアの半導体消費は世界の1%にも満たないとされ、JSC ミクロンやMCST、バイカル・エレクトロニクスなどのロシア産半導体メーカーが存在しているものの、従来は中国のSMIC、米インテル、独インフィニオン等から完成品を輸入したり、自社で設計した半導体の製造を台湾や欧州のファウンダリー企業に委託することに頼ってきたため、欧米による輸出規制がロシア国内の市場に与える影響の方が大きい⁶⁴⁵。

⁶⁴¹ Muñoz, Alexander, and Lilia Edith Pico Aparicio. "Beyond-Cmos: The near future of information."

International Journal of Applied Engineering Research 14.16 (2019): 3478-3482., pp.3479.

⁶⁴² NEDO「TSCトレンド グローバルな半導体競争」2021年、p.21. <https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

⁶⁴³ US Department of Energy, "Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-," US Department of Energy response to Executive Order 14017 "America's Supply Chains," Feb 24, 2022, p.14

⁶⁴⁴ Sarah Kreps, Richard Clark and Adi Rao, "A holistic approach to strengthening the semiconductor supply chain," Brookings, 7 April 2022. <https://www.brookings.edu/techstream/a-holistic-approach-to-strengthening-the-semiconductor-supply-chain/>

⁶⁴⁵ Anna Gross and Max Seddon「半導体が足りない ロシア企業に制裁の直撃」日本経済新聞 2022年6月3日（2022年6月2日付 英フィナンシャル・タイムズ電子版 <https://www.ft.com/>）

<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00CB0313Z0T00C22A6000000/?unlock=1>

(3) 日本における技術開発

半導体材料は日本企業が強みとする分野である。従来の半導体の製造過程で必要な材料として、成膜工程の洗浄液や材料ガス、露光工程のレジスト（感光材）やフォトリソマスク、エッチング工程のエッチングガスなどがあり、日本企業が約5割のシェアを占めると言われている⁶⁴⁶。シリコンは半導体が製造される上で依然として最も広く使用されている基本材料であり、世界のシリコンウェーハ生産の60%を日本の信越社とサムコ社が占めている⁶⁴⁷。5Gの実用のために、住友化学や昭和電工なども関連材料の増産投資を行っている⁶⁴⁸。また、新材料であるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）も日本ベンチャーが先行している⁶⁴⁹。カーボンナノチューブはアジア諸国が強い分野であり、昭和電工やナノシル社等が市場のトップに位置し、日本国内ではF-35A次世代戦闘機や航空宇宙産業で使用されている⁶⁵⁰。しかし前述した通り、中国企業も新材料の開発を強化していることから、経済安全保障の観点から日本企業を守る仕組みづくりがより一層重要となる。

2021年に経済産業省が発表した『半導体・デジタル産業戦略』では、次世代の先端半導体に必要な装置や材料の研究開発への支援を優先事項として掲げており、特に「先端半導体デバイスの前工程に用いられる材料のナノシート等の半導体材料、配線材料、絶縁材料等及び、先端半導体デバイスの後工程に用いられる素材である封止材、バンプ材、三次元パッケージ基板等や、カーボンナノチューブを活用した次世代革新メモリに関する技術等」⁶⁵¹の開発に向けて、半導体装置・製造メーカーとすり合わせて実現するとしている。2022年11月に発表された国内8社の出資によって設立されたRapidus株式会社においても、日米間の共同研究を通じて、日本の強みである半導体装置や材料を担う企業がサプライチェーンを構築することにより、国内で2nm以下の最先端の半導体を製造する体制を強化することを目的としている⁶⁵²。

⁶⁴⁶ 「半導体材料とは 日本企業、シェア5割との試算も」日本経済新聞、2019年7月2日。
<https://www.nikkei.com/article/DGXXKZ046830830S9A700C1EA2000/>

⁶⁴⁷ Congressional Research Service, “Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy,” October 26, 2020, pp.10.

⁶⁴⁸ *ibid.*

⁶⁴⁹ NEDO「TSCトレンド グローバルな半導体競争」2021年、p.10. <https://www.nedo.go.jp/content/100931733.pdf>

⁶⁵⁰ PR Times「カーボンナノチューブ（CNT）のビジネスチャンス、状況、地域の見通し、2028年までの世界予測」2022年2月24日。 <https://japan.zdnet.com/release/30650621/>

⁶⁵¹ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021年6月、16頁。

⁶⁵² NHK「トヨタ・ソニーなど国内8社出資 先端半導体の国産化へ新会社」2022年11月10日。
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20221110/k10013886691000.html>

7. ワイドバンドギャップ・ウルトラワイドバンドギャップ半導体

(1) 技術の概要

現在の半導体の始まりである 1950 年台のトランジスタはゲルマニウムを用いてきたが、その後はシリコンが主流となり、今日まで進化を遂げてきた。シリコンウェーハ自体は、アメリカ、日本、台湾、マレーシア、英国など多くの国で生産されている。これに対し、特にパワー半導体の分野においてシリコンを大きく上回る化合物半導体の材料として注目されているのが、SiC（シリコンカーバイド・炭化ケイ素）や GaN（ガリウムナイトライド・窒化ガリウム）である。ガリウム砒素(GaAs)、炭化ケイ素(SiC)、窒化ガリウム(GaN) などのグループ III から V からそれぞれ 1 つ以上の要素を組み合わせで作られたウェーハから切断される半導体は「III-V 半導体」と呼ばれ、太陽光発電、発光ダイオード(LED)、センサー、オプトエレクトロニクス等の製造に使用される⁶⁵³。また、SiC や GaN はシリコンと比較してバンドギャップが広いいため、ワイドバンドギャップ半導体とも呼ばれ、シリコンよりも大幅に薄い耐圧層で同等の耐圧を実現している⁶⁵⁴。

| 物性 | | Si | SiC | GaN |
|---------|---------------------|------|-----|------|
| バンドギャップ | eV | 1.1 | 3.3 | 3.4 |
| 電子移動度 | cm ² /Vs | 1350 | 700 | 1500 |
| 破壊電界 | MV/cm | 0.3 | 3.0 | 3.3 |
| 性能指数 | sqeEc ³ | 1 | 440 | 1130 |

SiC・GaNはシリコンに比べて・・・

- 高耐圧 ~10倍
- 高耐熱 ~1000℃
- 小型化 ~1/1000
- 高速 ~100MHz

(図 17-4 シリコン、SiC、GaN の特性⁶⁵⁵)

パワー半導体は、高品質のエピタキシャル層で製造される。SiC および GaN エピタキシャルウェーハの多くはウルフスピード社 や II-VI 社のような米国企業で生産されており、米国が市場を占める分野である⁶⁵⁶。半導体のチップ加工に必要な SiC エピウェーハ製造も同様に、米国のウルフスピード社と II-VI 社、そして日本の昭和電工が強い⁶⁵⁷。一方で、GaN ウェーハのほとんどは台湾で生産されてお

⁶⁵³ サンケン「Part 1. 化合物半導体 SiC、GaN とは？」。 <https://www.semi-con.sanken-el.e.co.jp/guide/GaNSiC.html>

⁶⁵⁴ 同上。

⁶⁵⁵ 同上。

⁶⁵⁶ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, p.10

⁶⁵⁷ i bi d.

り、世界の GaN パワーファウンドリーの 50%以上が台湾によって保有されている⁶⁵⁸。現在、GaN パワー半導体の生産は低電圧セグメントに限定されており、少量のガリウムしか消費しないが、将来的にはバルク GaN 基板の開発に伴いガリウム消費が増すことが予想される⁶⁵⁹。前述したとおり、ガリウムは主に中国により生産される材料であるため、高電圧 SiC パワー半導体の開発は、重要な材料を中国に依存しないという利点をもたらすことから、米国のサプライチェーンにおいて重要な項目となっている。

SiC や GaN よりもさらに絶縁破壊電界の大きな半導体をウルトラワイドバンドギャップ半導体といい、AlN（窒化アルミニウム）、ダイヤモンド、酸化ガリウム（Ga₂O₃）等の材料が使用される⁶⁶⁰。こうした新しい材料が開発されることは、パワーデバイスの性能がより向上することにつながる。

ウルトラワイドバンドギャップ半導体

| | Si | 4H-SiC | GaN | β-Ga ₂ O ₃ | Diamond | AlN |
|----------------|-----|--------|-----|----------------------------------|---------|-----|
| バンドギャップ (eV) | 1.1 | 3.26 | 3.4 | 4.5 | 5.5 | 6.0 |
| 絶縁破壊電界 (MV/cm) | 0.3 | 2.5 | 3.3 | 8.0 | 10 | 12 |

表1. 半導体材料のバンドギャップと絶縁破壊電界。

(図 17-5 ウルトラワイドバンドギャップ半導体の種類⁶⁶¹)

(2) 公的利用・安全保障における利用

前述したとおり、2022 年 8 月に国商務省産業安全保障局（BIS）が新たに中国に対して輸出管理対象として加えた半導体技術には、ウルトラワイドバンドギャップ半導体の製造に使用される酸化ガリウム（Ga₂O₃）とダイヤモンドが含まれた⁶⁶²。BIS によると、酸化ガリウムとダイヤモンドはより高い電圧

⁶⁵⁸ i b i d . , p. 11

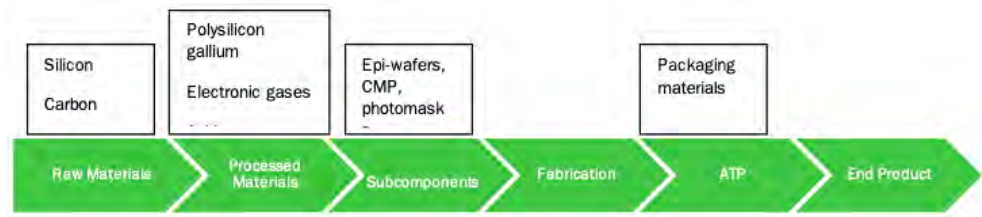
⁶⁵⁹ i b i d . , p. 14

⁶⁶⁰ NTT「世界初、窒化アルミニウムトランジスタを実現～カーボンニュートラルに貢献する次世代パワーデバイスの本命登場～」2022 年 4 月 22 日。https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html

⁶⁶¹ 同上。

⁶⁶² 甲斐野裕之「米商務省、半導体関連技術などを輸出管理対象に追加、「ワッセナー・アレンジメント」での合意を反映」JETRO、2022 年 8 月 15 日。https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/60bb3ad37d14bce5.html

や高温などの条件下で機能することが可能なため、軍事的な可能性を大幅に高めるために重要な技術である⁶⁶³。



(図 17-6 WBG 半導体のサプライチェーン⁶⁶⁴)

(3) 日本における技術開発

2021 年の経済産業省による『半導体・デジタル産業戦略』においても、革新素材である SiC、GaN、Ga₂O₃ による省エネ・低消費電力化は、グリーン・イノベーションを促進するため及び国内産業の強みを維持、強化するために重要である⁶⁶⁵と認識されており、製造基盤強化への支援が掲げられている。こうした政策に伴い、日本の様々な企業や研究機関がウルトラワイドバンドギャップ関連の技術開発に注力している。例えば、日本電信電話株式会社（NTT）は、2002 年に世界で初めて AlN の半導体化に成功し、2022 年には AlN を用いたトランジスタ動作に成功した⁶⁶⁶。この技術により、高品質の AlN が作成され、良好なオーミック特性を有する電極形成や理想的なショットキーが実現できる⁶⁶⁷。また、産総研は 2016 年に世界で初めてダイヤモンド半導体を用いた反転層チャネル MOSFET の動作実証に成功している⁶⁶⁸。さらに 2020 年より、産総研と名古屋大学が連携して研究プラットフォームである「GaN-

⁶⁶³ 服部毅「米国政府が酸化ガリウムとダイヤモンドの基板と GAAFET 向け ECAD 技術を輸出規制」、マイナビニュース、2022 年 8 月 16 日。

⁶⁶⁴ US Department of Energy, “Semiconductor - Supply Chain Deep Dive Assessment-,” US Department of Energy response to Executive Order 14017 “America’s Supply Chains,” Feb 24, 2022, pp. 9.

⁶⁶⁵ 経済産業省「半導体・デジタル産業戦略」2021 年 6 月、18-19 頁。

⁶⁶⁶ NTT「世界初、窒化アルミニウムトランジスタを実現～カーボンニュートラルに貢献する次世代パワーデバイスの本命登場～」2022 年 4 月 22 日。 <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html>

⁶⁶⁷ Ibid.

⁶⁶⁸ 産総研「世界初！反転層型ダイヤモンド MOSFET の動作実証に成功」2016 年 8 月 22 日。

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20160822/pr20160822.html

01L」を立ち上げ、窒化物半導体を用いたパワーデバイス技術と発光デバイスの開発に注力している⁶⁶⁹。2022年6月にはNEDO、名古屋大学、Mipoxが連携し、非破壊・低コストで半導体結晶ウェーハ内部の結晶欠陥を可視化し、製品の耐圧特性を劣化させる「キラークラック」を自動検査するシステムの共同研究を行った⁶⁷⁰。この技術は、SiCやGaNなどのパワー半導体の検査コストを低減し、業務効率を向上するために役立つとされ、シリコンウェーハの他に単結晶試料（SiC、GaN、ダイヤモンド、AlN、サファイアなど）の内部の転位、ウェーハ内部のひずみ、エピウェーハ内部の転位などの観察における活用が可能となる⁶⁷¹。

まとめ

脱炭素化社会からメタバースの実現に至るまで、次世代半導体の技術開発はデュアルユース全ての技術革新の鍵となっている。現状では、米国企業がEDA、GAAFET、AIチップ、ウルトラワイドバンドギャップ等の技術開発をリードしているが、日本企業も3DICのための半導体装置やマイクロエレクトロニクスの新材料の開発において重要な地位を占める。今後、2nmノード以下の次世代半導体の国内量産に成功できるかは、産学官が連携し、米国や台湾等の諸外国から最先端技術を学びながら、共同で半導体エコシステム全体の競争力を高めていくことが必須である。

⁶⁶⁹ GaN-O1L 「GaN-O1Lについて」（アクセス日2022年11月11日）。<https://unit.aist.go.jp/gan-oil/information/index.html>

⁶⁷⁰ 波留久泉「NEDOなど、半導体ウェーハ面内の転移分布やひずみ分布を可視化する技術を実用化」マイナビニュースTECH、2022年7月1日。<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220701-2385564/>

⁶⁷¹ Ibid.

第18節 宇宙技術とシステム (Space Technologies and Systems)

第二次世界大戦の末期に初めて使用された弾道ミサイルは、ローンチ・ヴィークルの開発につながり、戦後米国とソ連の宇宙開発競争を促進させた⁶⁷²。1957年にはソ連が初めての衛星であるスプートニク1号を打上げ、「スプートニク・ショック」が世界を駆け巡り、1969年には米国がアポロ11号の月面着陸に成功させた。この時代、宇宙での技術開発競争は、国の威信に直結していたのである。冷戦後、宇宙開発は競争から協調へと転じ、2011年には国際宇宙ステーションが完成する。国際宇宙ステーションでは、日本を含め多くの国々によって運営され、現在に至るまで様々な観測・実験が行われている⁶⁷³。他方、宇宙技術を巡る競争は近年再燃している。米国を筆頭に、各国は衛星コンステレーションの形成を目指し、いまだかつてない量の衛星が打ち上げられている。軍事・民生ともに、宇宙技術の影響を今まで以上に受けることは免れないだろう。

本稿では、現在とこれまでの宇宙技術と宇宙システムの各技術を簡潔に紹介し、その展望を示したうえで、軍事・国防／民用的利用のインプリケーションを提示する。各技術の利用用途はまだ実現されていないものも含め、包括的に取り上げ、各技術の重要性を判断する材料としたい。また、近年は政府主導のプロジェクトだけでなく、民間のスタートアップが主導するなどの新しい挑戦が増えてきている。特に米国では民間の宇宙ビジネスの拡大は目覚ましい。これらアクターの変化についても留意しながら、今後の方針や優先順位を踏まえ、政策提言としたい。

1. 軌道上の保守・組み立て・製造サービス (OSAM: On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing)

(1) 技術の概要

On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing (OSAM) とは、軌道上における衛星等の機器の保守・組み立て・製造のサービスを指す⁶⁷⁴。地球上から打ち上げられる衛星や探査機には、サイズ・重量・アップグレードの限界等、数々の制約があり、それらが自ずと宇宙空間における活動を制限し

⁶⁷² Aerospace, *A Brief History of Space Exploration*

[https://aerospace.org/article/brief-history-space-](https://aerospace.org/article/brief-history-space-exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20(about%20202%20miles).)

[exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20\(about%20202%20miles\).](https://aerospace.org/article/brief-history-space-exploration#:~:text=4%2C%201957%2C%20the%20Soviets%20launched,kilometers%20(about%20202%20miles).)

⁶⁷³ JAXA 国際宇宙ステーション(ISS)とは. Retrieved from: <https://humans-in-space.jaxa.jp/iss/about/>

⁶⁷⁴ 2022年4月、米国の国家科学技術会議はISAM (In-Space Servicing, Assembly, Manufacturing) に関する戦略を発表している。ISAMは軌道上だけでなく、月面を含む宇宙空間における活動を指す。対して、本節はあくまで軌道上におけるサービスについて取り上げていることを留意されたい。 [https://www.whitehouse.gov/wp-](https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf)

[content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf](https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf)