

次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関する検討会報告書（案）

次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関する検討会報告書（案）	1
1. はじめに	3
2. 現在の取り組み	4
2.1. 文部科学省における取組	4
2.2. 経済産業省における取組	4
3. 国内外における研究開発動向	6
3.1. 海外政府による研究開発支援策	6
3.2. 国内外における研究開発動向	6
4. 現状認識・課題	8
4.1. 技術課題	8
4.2. 研究推進方策	9
4.3. 研究施設・設備	9
4.4. 産学連携	10
4.5. 人材育成	11
5. 地球規模課題の解決や未来社会の実現に向けて必要となる半導体技術	11
6. 産業界が抱える中長期的な技術課題、現在の事業を進めるうえでボトルネックとなる基礎的な研究課題等	14
6.1. 半導体	14
6.1.1. ロジック	14
6.1.2. メモリ	14
6.1.3. センサー	14
6.1.4. アナログ・マイコン	15
6.1.5. パワー半導体	15
6.1.6. 環境技術	15
6.1.7. その他基盤技術	15
6.2. 半導体製造装置	16
6.3. 人材育成・確保	16
7. アカデミアが強みを活かせる技術領域	16
7.1. ロジック	17
7.2. メモリ	17
7.3. センサー	18

7.4.	パワーエレクトロニクス	19
7.5.	設計	19
7.6.	材料・分析	20
7.7.	環境技術・ファクトリーインテグレーション	21
8.	重点的に取り組むべき施策	21
8.1.	今後重点的に取り組むべき研究開発課題（重点項目）	22
8.1.1.	AI を活用した高効率半導体システム設計	23
8.1.2.	超低消費電力な次世代 AI 回路	23
8.1.3.	Beyond 1 ナノ世代の CMOS に向けた新材料・デバイス・プロセス・ 集積化技術	24
8.1.4.	環境負荷の少ない製造技術・材料	24
8.2.	今後推進すべき研究開発課題（推進項目）	24
8.3.	研究施設・設備の整備	25
8.3.1.	世界最高水準の放射光施設による Beyond 1 ナノ世代のデバイス・プロセス・集 積化技術の確立への貢献	26
8.3.2.	「富岳」の次世代となる新たなフラッグシップシステムの開発・整備をはじめと する計算科学の推進による半導体研究開発への貢献	26
8.4.	人材等の育成・確保	27

1. はじめに

半導体は、グリーントランスフォーメーション、デジタルトランスフォーメーションを実現する上で欠かせない技術であり、経済安全保障上の重要性もかつてないほどに高まっている。半導体分野は日本にとって最重要の研究開発分野の一つであり、AIをはじめとする先進技術の高度化には、半導体の研究開発を欠かすことはできない。デジタルトランスフォーメーションを実現する鍵は、次世代半導体の研究開発や社会実装・産業化にあるものの、日本の半導体産業は、かつて約 50% もあった世界シェアが 10% 以下まで低下している。世界の半導体市場は 2030 年までに 160 兆円¹を超えると予測されており、日本の経済を成長させ賃金を持続的に向上させていくためには、半導体を含めた次世代の成長産業を創出し、経済産業の生産性の向上、さらに高付加価値型の成長を実現していくことが極めて重要である。そのためには、世界をリードする次世代半導体技術を創出するとともに、先端半導体のユースケースを日本から生み出していくことが必要である。

世界各国が半導体の研究開発や人材育成に大規模な支援等を講じる中、日本においても半導体の研究開発や人材育成を強化していく必要がある。特に文部科学省は、アカデミアにおける研究開発や人材育成を支援する重要な役割を担っており、今後、次世代半導体に関する施策を効果的に推進していくためには、経済産業省と連携しつつ、国内外の研究動向や産業界のニーズ、アカデミアの強みを生かせる研究領域、産業界への成果の橋渡し方策などを議論し、総合的かつ戦略的に施策を推進することが必要である。そのため、「次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関する検討会（以下、「検討会」という。）」を設置し、文部科学省が今後取り組むべき課題などについてアカデミア及び産業界の有識者が議論を行った。

検討会では、地球規模課題の解決や未来社会の実現に向けて必要となる半導体技術やユースケースからバックキャストする議論を行い、次に、「アカデミアが重点的に取り組むべき技術課題」を議論するため、産業界が抱える中長期的な技術課題や現在の事業を進める上でボトルネックとなる基礎的な研究課題について産業界からヒアリングを行った。また日本のアカデミアが強みを生かせる技術領域について大学等の研究者からヒアリングを行った。その後、「研究基盤、産学連携方策、高度人材の育成方策」を議論するため、技術課題に対してアカデミアが取り組むために必要な研究施設・設備、半導体産業とアカデミアの連携を強化するために必要な方策、研究開発に従事する高度人材等を育成・確保するために必要な方策について関係者からヒアリングを行った。世界をリードする次世代半導体技術を創出するとともに、先端半導体のユースケースを日本から生み出していくためには、産学官が連携し、研究開発や人材

¹ SEMI ジャパンの予測によれば、2030 年までに世界の半導体市場規模が 1 兆ドル（160 兆円）規模になると予測されている。（2023 年の市場規模は約 5 千億ドル（80 兆円）。

1 ドル＝160 円で計算。）

育成を進めていくことが必要であり、上記ヒアリングにおける議論等を踏まえ、次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関し文部科学省が取り組むべき方策を本報告書にまとめた。

2. 現在の取り組み

2.1. 文部科学省における取組

令和3年6月に策定された「半導体・デジタル産業戦略」に基づき、これまでStep1、2、3で構成される3段階で経済産業省を中心に施策が進められており、Step1では生産基盤の強化、Step2ではラピダスにおける先端半導体の開発、Step3では、長期的に必要な次世代半導体の研究開発に取り組んでいる。文部科学省は、日本の半導体の復活に向けてStep2のラピダス、技術研究組合最先端半導体技術センター(LSTC)の取組と連携しつつ、Step3の2030年代以降に向けた取組としてグローバル連携による将来技術の基盤、ゲームチェンジャーとなり得る将来技術の開発に取り組んでいる。令和5年6月には、この半導体・デジタル産業戦略が改定され、アカデミアの中核となる拠点における先端技術開発、大学等における半導体の研究開発を通じた将来の研究者・技術者の育成等の取組を強化する方針が示された。また、同年5月には、G7が開催された広島にて半導体分野における日米の大学等の協力に向けた覚書に永岡文部科学大臣とプリンケン国務長官が署名した。このような中、文部科学省では、「次世代X-nics半導体創生拠点形成事業」や「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業(INNOPEL)」といった半導体研究開発に関するアカデミア拠点の形成、科学技術振興機構(JST)による技術シーズ創出に向けた基礎研究、国内外の研究者交流の促進、理化学研究所、物質・材料研究機構(NIMS)等の国研における国として重要な将来の半導体基礎技術の開発、半導体を含む成長分野を牽引する高度専門人材育成に向けた大学・高専への支援などに取り組んでいるが、現状では、各部局や法人が個別に取り組んでいるものであり、総合的な戦略の下で進める形にはなっていない。

2.2. 経済産業省における取組

経済産業省では半導体・デジタル産業戦略に基づき、国内生産基盤の強化(Step1)、ラピダスペースにおける先端半導体の開発(Step2)、長期的に必要な次世代半導体の研究開発(Step3)に取り組んでいる。

Step1ではTSMCをはじめとする大規模プロジェクトを国内へ誘致するとともに、経済安保の観点から既存の国内の生産基盤を強化するための支援を行っている。大規模プロジェクトについては、熊本のTSMC(JASM)を皮切りに種々支援しており、JASMの1号棟では28nmから12nmプロセスに対応した半導体の生産設備を整備している。2号棟では、シングルナノのプロセスに対応した半導体の生産設備を整備

することが計画されている。半導体そのものに対する効果に加え、経済対策という観点でも様々投資効果あるいは賃上げ効果が期待されており、JASM による熊本県への経済波及効果は 2022 年から 10 年間で約 4.3 兆円²になると試算されている。また、5～10 年後の日本の経済安全保障体制を強固にするため、日本各地にある半導体のチップの製造、それから製造装置、部素材を産業基盤として残すための投資を支援している。

Step2 ではラピダスと LSTC の立ち上げを支援した。ラピダスでは先端半導体の量産体制の構築に向け取り組んでおり、これまでのラピダスに対する支援として、700 億円、2,600 億円の予算を確保した。令和 5 年度の補正予算でも相応の額の予算が計上されており、今後も継続的な支援が検討されている。ラピダスでは、2023 年 9 月 1 日に千歳市で生産体制の整備に向けた起工式が行われ、2027 年に量産を開始することを目指している。経済産業省ではラピダスへの直接的な支援に加え、海外の学術研究機関や企業との連携を推進している。特にアメリカの NSTC と連携し、ラピダスを含め日本の半導体産業が海外の開発人材と連携するためのプラットフォームとして LSTC の立ち上げを支援した。今後、文部科学省との連携を含め具体的な実施計画が検討される。

Step3 では光チップレット、光電融合など中長期的な半導体の技術開発を支援している。主に経済産業省では NEDO を通じて民間企業における技術開発を支援しているものの、長期的または基礎的な研究課題についてはアカデミアにおける研究開発や人材育成を支援する必要がある。そのため、アカデミアにおける研究開発や人材育成を所掌とする文部科学省や JST との連携が重要である。

人材育成については、各地域で半導体人材育成等コンソーシアムの形成が進展しており、例えば九州では、熊本大学、九州大学、九州地区の高専等の教育機関が参画し、学習コンテンツや半導体業界の魅力発信等の取組が進んでいる。さらに、九州大学や熊本大学では、TSMC と連携した研究開発・人材育成の取組が検討されている。九州以外の地域でも、企業によるインターンシップの受入れ等が行われており、産業界とアカデミアの連携を人材育成の面でも拡大していくことが計画されている。

国際協力については、令和 5 年 11 月に日米経済版「2+2」が開催され、LSTC とアメリカの NSTC との間での研究協力を具体化していくことが合意された。今後アカデミアを巻き込んだ人材育成をどう進めていくかが日米間でも大きな課題として認識されている。経済産業省では、主に産業界との連携を進めていくことが検討され

² 九州ファイナンシャルグループによる試算では、JASM による熊本県への経済波及効果が 2022 年から 10 年間で約 4.3 兆円あると試算されている。また、電子デバイス産業全体（JASM、ソニー、三菱電機等）による熊本県への経済波及効果は 2022 から 10 年間で約 6.9 兆円あると試算されている。

ているが、基礎的な研究開発や研究開発人材の育成については文部科学省やアカデミアの役割が期待されている。

3. 国内外における研究開発動向

3.1. 海外政府による研究開発支援策

半導体はデジタル社会を支える重要基盤であり、経済安全保障にも直結する重要な戦略技術となっている。このため、各国・地域では半導体企業への大規模な支援と併せて、大学等における研究開発への支援を強化している。アメリカでは CHIPS 及び科学法が NSF の予算を倍増することを承認した。また、DARPA は民間団体と共同で大学の研究拠点を支援している。EU では研究開発プログラムである Horizon Europe においてデジタル分野を含む分野について重点に支援している。また EU 加盟国が連携し、革新的なマイクロエレクトロニクス技術等の確立を目指すプログラムを承認した。イギリスでは CSA Catapult というプログラムで次世代半導体の研究開発に向けた産学連携を促進している。韓国では「半導体超大国達成戦略」を策定し、先進技術の確保、半導体専門人材の育成を強化することを決定した。台湾では主要大学などが参加する「先端半導体技術プロジェクト」を立ち上げ、また窒化ガリウム (GaN) などのパワー半導体技術の研究開発計画も開始した。他方、日本では半導体産業への支援に比べてアカデミアへの支援は限定的であり、半導体が牽引する成長を持続可能とするためには、日本においてもアカデミアにおける半導体の研究開発、人材育成、研究基盤の整備を抜本的に強化する必要がある、産学連携のもとで総合的かつ戦略的に推進していくことが重要である。

3.2. 国内外における研究開発動向

先端ロジック半導体に関しては、2nm 世代の研究開発が各国で拡大している。長期的には従来の Si だけでは十分な性能を確保することが不可能になる可能性があり、新しい材料として 2 次元材料、カーボンナノチューブなどの研究開発が注目されている。特に、2 次元半導体はチャネル厚が薄くなった場合でもトランジスタの性能を測る移動度を高くすることが可能である。他方、新しい材料を Si のプロセスの中に導入するには非常に難易度が高い技術課題があり、成膜技術、プロセス化技術を確立する必要がある。

日本では 40nm 世代以降のプロセス技術がなくなり、アカデミアの先端半導体の研究開発力も低下している。材料開発では日本が高い研究開発力を有するものの、新たな材料をデバイスやプロセスに適用・応用して実用化につなげるスピードが遅く、他国にリードされている。また、製造装置については、日本は洗浄装置やスパッタ装置で強みを持つが、EDA ツールや露光装置、ゲートスタック周りの競争力が低い。さらに、研究開発人材が質・量ともに低下しており、国際的な学会で日本の存在感が低下している。

AI 用半導体については、AI 処理に必要な消費電力が課題となっており、低電力化を進めるため、低電力の AI アクセラレータ、インメモリコンピューティング、リザーバーコンピューティング、ニューロモルフィニクスといった新しいアーキテクチャ、アルゴリズムを使ったコンピューティング技術に関する研究が世界的に増加している。インメモリコンピューティングやリザーバーコンピューティングについては、新しい不揮発メモリ（ReRAM や MRAM 等）を活用する技術が重要になると考えられている。更に長期的には、現在の Si デジタル回路だけではなく、脳科学から得られる知見を活かし脳の様々な機能を模擬するデバイスに関する研究が重要になる可能性がある。以上のような AI 用半導体の研究開発を推進するには、デバイス材料関係だけではなく、回路、アルゴリズムを統合的に推進できる体制が必要となる。

通信用半導体・光半導体については、次世代通信用にオールフォトニックネットワークの実現やテラヘルツを利用した次世代無線通信に向けた研究開発が活発化しており、6G や 7G につながる技術として注目されている。また、シリコンフォトニクス技術をベースに光回路と電気回路を同時集積する光電融合集積技術や光集積回路を用いた AI アクセラレータへの注目が高まっており、光電融合に必要なシリコンフォトニクスチップと様々な機能材料やデバイスを集積する技術が重要になると考えられている。さらに、2 次元材料、トポロジカル絶縁体といった新しい機能を維持するような材料が注目されつつあり、これら新材料に関する研究開発を積極的に進め、日本が優位性を有する光技術に対してもしっかりとサポートすることが必要である。

パワー半導体は現在 Si が主流であるものの、さらに性能を高くするためワイドギャップ半導体が盛んに研究されている。既に SiC や GaN の開発が進展しており、実際に製品化されるレベルに達している。国外の研究機関では、 Ga_2O_3 や AlN といった「ウルトラワイドバンドギャップ半導体」と呼ばれるものが注目されている。我が国は、ワイドギャップ半導体に関しても昔から強い技術を有しており、ダイヤモンド技術、ガリウムオキサイドに関する技術をさらに強化していくことが必要である。このため、パワー半導体に関しても新しい材料を活用できるようなプラットフォームを整備するなど研究体制を強化することが必要である。

日本はスピントロニクス、パワー半導体、光デバイスで国際的な優位性を一定程度保持しているものの、先端半導体については研究開発の強化が必要である。アメリカ、欧州等では全般的に研究開発を強化しており、特に NSF と日本の科研費の研究動向を比較した場合、NSF では計算機、AI、計算科学、ロジック・メモリ半導体、通信に関する研究が活発に行われている。他方、窒化物半導体やダイヤモンドといったパワー半導体やスピントロニクスに関する研究の比率が日本の科研費では大きい。近年中国は AI チップ等で競争力を伸ばしており、韓国、台湾は製造技術で国際的な優位性を有している。特に、先端半導体、AI チップ、パワー半導体は世界的に非常に注目され、国際的な競争が激化している。このため、2030 年代以降に必要とされる将来技

術を創出するため、研究開発インフラを整備するとともに研究開発と人材育成を強化する必要がある。短期的な研究開発のみならず長期的な研究開発においても、産業政策と歩調を合わせた形でやっていく必要があり、産学官が連携して研究開発に取り組んでいく必要がある。

4. 現状認識・課題

日本を含む各国政府が半導体分野に数兆円規模の国費を投資しており、半導体は国家の命運をかけて投資をしていく最重要分野になっている。しかし、製造装置等日本が世界をリードしている部分はあるものの、先端半導体の分野で日本は後塵を拝している。この状況を打破するためには、全方位ではなく、限られた資源を一定の多様性を許容しつつ戦略的に重点投資していく必要がある。そのため、5年、10年先に実施すべき事項を文部科学省と経済産業省で共有し、国、産業界、アカデミアが一体的に取り組むことが必要である。研究開発課題の設定に当たっては、国での検討に産業界やアカデミアが議論に参画し、日本が世界のトップに入るために今何に取り組むべきなのか明確にする必要がある。海外の主要国がかつてない規模の半導体分野への投資を進める中で、産業界への支援と併せてアカデミアへの支援を強化している。日本においても同志国との連携の下、大規模な開発が始まっているが、産業界への大規模投資と比べてアカデミアへの投資の桁は2桁から3桁小さく極めてアンバランスになっており、この状態を放置すれば、2030年代以降の半導体産業を支える研究や人材が枯渇し、現在の産業界への大規模投資による成長が持続不可能になってしまう恐れがある。特に研究開発人材の育成については2030年代以降を見据え、可及的速やかに取り組む必要がある。日本の半導体産業の衰退を受けて、アカデミアにおいても半導体分野への支援が希薄となっていたため、研究者層が薄くなっているが、日本の半導体産業が反転攻勢を開始した今、文部科学省もアカデミアとして取り組むべき技術課題を特定して、半導体研究開発や研究基盤整備、人材育成への支援を強化する必要がある。

4.1. 技術課題

生成 AI の誕生により、大規模マトリクスを計算できるチップの需要が拡大し、今後推論計算の需要が拡大する。これにより、ロボティクスが革新され、多数の智能ロボットが協調する群制御にシフトしていくと考えられる。この動向は、半導体製造、科学実験の自動化、創薬開発の自動化など、広範な分野に影響を及ぼし、大きな市場を生み出す可能性がある。これらの進歩を支えるためには、3次元のメモリチップや量子・古典のハイブリッドなど、チョークポイントとなる技術の基礎研究に取り組むことが必要である。しかしながら、過去20年間、回路・デバイスに関する国際学会（国際固体素子回路会議（ISSCC）、国際電子デバイス会議（IEDM）等）での日本人の発表数が低下している一方で、中国が存在感を増大させており、回路分野では米国

を上回っている。国際的な日本の存在感が低下しており、半導体分野の研究開発に投資することで今後上向きに反転させなければならない。

これから四半世紀先を見通した場合、半導体をドライブするのは明らかに AI である。AI 半導体は桁違いの計算を繰り返すため、エネルギーの消費が課題となり、エネルギー効率をいかに高めるかが重要となる。エネルギー効率を高めるには、何か一つの要素技術に取り組むだけではなく、関連する技術の研究開発に統合的に取り組む必要がある。特に、Beyond2nm では新たな材料の探索や現象解明が必要であり、大学が得意とするナノデバイスの欠陥構造や電子構造等を解析することが求められる。基礎的な理論、モデリングやシミュレーションはアカデミアが得意とする分野であり、アカデミアが研究に集中できる環境を整備することが必要である。さらに、半導体の製造過程で使用されているものの環境や生態系へ悪影響を及ぼす可能性があることから規制が議論されているフッ素化合物（PFAS）に関する問題を解決できる材料と機器を開発することが必要である。これらは新材料の開発など、アカデミアが集中的に取り組むべき課題である。

4.2. 研究推進方策

研究開発を推進するにあたっては、技術の応用先を明確にする必要がある。そのためには、技術だけでなく社会的な視点で統合的な機能をデザインすることが重要である。その際、共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT）や先端的低炭素化技術開発・次世代蓄電池（ALCA-SPRING）などバックキャスト型で成功した事業を参考に、将来必要とされるアプリケーションを実現するための研究開発をマネジメントするプログラム・ディレクター（PD）を置くことが有効である。

企業の研究開発は、5 年先に製品化するものに対する研究開発に注力している。一方、10 年以上先に実現したいと考えている技術については、アカデミアが主導して研究を進めていく必要がある。特に半導体分野での技術開発競争は激しいため、状況の変化に応じて柔軟に目標や計画を修正しながらフレキシブルに研究開発を進める必要がある。また、半導体分野では、アカデミア（Lab）から産業界（Fab）へ技術移転する際の技術的なギャップが大きいことが課題となっている。そのため、産業界や LSTC で開発される薄膜を大学が分析できるような連携を強化するためのシステムを構築する必要がある。

4.3. 研究施設・設備

10 年以上先を見通した次世代の半導体技術の研究をアカデミアが取り組むにあたり、幅広い新材料の探索を可能とする研究基盤や、設計・試作・評価といった環境を整備し半導体エンジニアリング能力を向上することが必要である。アカデミアの総力の結集のためには、全国の研究者が次世代半導体関連研究に参画できる環境（分散・ネットワーク型の先端共用設備）や、新材料のデバイス実証のための共用設備の整備が重要な課題であり、例えば、新しい 2 次元材料の開発を進める際には、その材料を

簡単に導入できるクリーンルームが必要となる。また、そのような施設を整備し、多くの研究者が利用できるようにすることが求められる。その際、文科省が進めているマテリアル先端リサーチインフラ（ARIM）との連携を通じて、分散・ネットワーク型の先端共用設備を活用した全国の実験者による多様な研究シーズの育成・確保と、集中型拠点における重点研究との両輪で基礎研究から応用研究までを一貫して行うことが重要である。また、アカデミアの成果を企業にシームレスに繋げる仕組みの構築が必要であり、産学が利用できる共用化された微細加工・新材料のデバイス実証のための施設が必要である。

また、試作デバイスの開発だけでなく、プロトタイプの回路検証が可能な環境の整備も必要である。さらに、研究における実証実験が可能な場所や建物などの環境も整備することが必要である。加えて、試作設備の維持管理や保守については、国のプロジェクトが終了した後も継続的に行われる必要があり、大規模な試作ラインを活用し続けるための維持管理体制の構築が必要である。この他、半導体の研究開発において産学官の実験者が利用可能な大型研究施設の整備も重要である。

また、こうした先端共用施設・設備に関しては、人材育成の観点からも、若手研究者や大学院生等が新しい研究を行う際や半導体に関する理解を深める際にも非常に有効となる。多くの作業が共用設備で行える環境を整備することにより、ISSCC やIEDM の論文の質の改善につなげることができる。

4.4. 産学連携

日本の半導体産業が絶頂期であった 1980 年代後半以降、日本の半導体産業が凋落する中、日本の総合電機メーカーは中央研究機能を解体し基礎研究は企業では行わないこととし実用化研究への重点化を進めた。かつては、企業の中で基礎研究を行っていた基礎研究部門は、それを応用する開発部門、社会実装を考える部門、そして最終的に製品化を行う事業部、工場と、社内で密に連携していた。その中で、社内の基礎研究部門がアカデミアと連携し、どのようなシーズ技術があるのか、どのような部分をアカデミアに依頼するかという点が明らかになっていた。しかし、基礎研究機能がなくなったことにより、企業における応用研究、社会実装を行う部門とアカデミアの連携が希薄化した。アカデミアと企業が個々に行動し、企業から依頼研究という形で特定の領域で共同研究することはあるものの、中長期的に産業界とアカデミアが熱心に意見交換をしながら継続的に協力する体制が消失した。

このような状況を打破し、半導体分野における産学連携を強化するには、企業とアカデミアの人材交流を活発化することが解決策の一つであると考えられる。学生がインターンシップ等で企業に行くのは現在も行われているが、それだけではなく、学生指導を行う教員が海外の大学のように 2 年程度企業に行き、企業がどのようなことを行っていて何が求められているのかを知ることが必要である。これは情報の機密管理

の観点から障害がある可能性があるものの、その障害を解決する方策を産学が議論し実現すべきである。

4.5. 人材育成

世界中で経済安全保障や国家安全保障等の観点から半導体に大規模な支援が行われており、各国において様々な半導体の Fab 等の立ち上げが計画されているが、こうした動きに伴い人材不足が深刻な問題となっている。必要とされる人材には、製造工場における品質管理等を行う実践的人材と半導体の設計・研究開発等に従事する高度人材、次世代半導体の創生や新たなユースケースの開拓、半導体の事業戦略や研究戦略の立案に携わるトップ人材があり、基盤人材は経済産業省を中心に文部科学省も連携して議論され取組が進められつつあるが、特に後者の高度人材やトップ人材については十分な議論がなされていない。ファンディングがあれば、優秀な研究者が集まり、そのもとに優秀な学生が集まる。それが 5 年後、10 年後に育ち産学で活躍するという好循環が生まれるが、半導体分野では今までそういったファンディングが十分に行われてこなかった結果、研究者や学生の層が非常に薄くなっている。特に目的基礎研究を推進する JST のファンディングは重要であり、国家的に重要な半導体分野の将来の基盤となる研究開発への支援を強化する必要がある。その際、産業界との連携が極めて重要であり、ファンディングを行う際の研究開発テーマまで深く議論することが重要である。

半導体の研究者を増やすためには、研究の魅力を伝えることが重要である。半導体は AI を支える総合的な学問分野であり、数学、化学、物理等の知識を生かすことができる。学生は夢のありそうな研究室を選ぶ傾向があり、より多くの学生を惹きつけるため、「半導体が世の中を変える」といった夢を語るができる分野にすることが重要である。また、大学における半導体の研究環境の充実も急務である。大学において様々なデバイスを開発することができるよう、最先端の設計ツールの確保や大学のクリーンルームの拡張等が必要である。

5. 地球規模課題の解決や未来社会の実現に向けて必要となる半導体技術

世界が直面している地球環境問題等の地球規模課題を解決するためには、科学的なアプローチが必須である。科学は普遍的なものであり、科学的なデータに基づいて行動を起こすことで、地球環境の改善につなげることができる一方で、個々の利益を追求することで、共有資源が破壊されるという「コモンズの悲劇」が生じる可能性がある。地球という共有資源を守り、地球環境の保護に貢献するためには DX は不可欠であり、デジタル技術を正しく効果的に活用するための戦略が必要である。そのため、日本は「Society5.0」を目指し、デジタルとフィジカルの融合により、共感性を高め、行動変容を促す社会を目指すべきである。例えば、先端的な通信技術やスーパーコンピュータ、量子技術などを活用し、全国の学校と連携することで、世界にない「スマ

ートアイランド」を実現することができる。そのためには、量子コンピュータや AI、半導体などの最先端技術が必要である。

また、AI は大量の電力を消費するが、その消費電力をどのように圧縮し、どのように活用するかが重要である。そのためには、先進的なアルゴリズムや量子・古典ハイブリッドなどの新たな技術が必要となる。日本が有する「富岳」はロジックとメモリを直結させることの重要性を示している。このような新しい構造を作るためには、新しい技術が必要であり、その開発には日本が大きな役割を果たすことが期待されている。スーパーコンピュータは、半導体技術の進化を牽引する重要な役割を果たしており、スーパーコンピュータの開発は、半導体技術の進化を促進するための重要な戦略である。

AI の発展は計算資源の増加に大きく依存している。最先端の AI モデルの学習に必要な計算資源は指数的に増加しており、その規模は既にスーパーコンピュータに匹敵するレベルに達している。しかし、多量の計算資源を集めるだけではスーパーコンピュータを作ることはいできない。データセンターやネットワーク帯域など、スーパーコンピュータの性能を最大限に引き出すための最適統合が必要になる。今後 10 年間は、半導体性能の向上に伴って AI が進化し、AI の応用領域が拡大することが予想されており、必要な電力量も増え続ける。他方、電力生産量を大きく増やすことは困難であり、単位電力当たりの計算量やデータ転送量を桁違いに改善できる技術の開発が必要である。現在の AI の発展を支えているスーパーコンピュータの性能は既に上限に達しつつあり、今後の発展のためには根本的な改良が必要と考えられる。

製造業を含む様々な分野に生成 AI が活用される試みが開始されており、研究、開発、分析、製造の各分野で、単なるテキスト解析だけでなく、実験結果の理解やまとめ、シミュレーションなど、様々な分野での補助を通じて、製造業の競争力や研究開発力を加速させることが今後可能になる。例えば、AI を使った原子レベルのシミュレーションは、かつてはスーパーコンピュータを作らなければ難しいと言われていたものが、AI により 1,000 万倍ほど高速化ができ、かつての第一原理計算がほぼリアルタイムでできるぐらいのものができている。この技術は既に商用化され、世界の企業が電池や半導体などのグリーン触媒の研究に利用している。

近年、シミュレーション技術と AI の融合が注目されており、特に、LSI 設計の分野では、この融合が新たな可能性を開くと考えられている。「AlphaGo」や将棋の AI など、最初は人の手で学習していたものが、最終的にはシミュレーションで全て自動的に学習し、人間を超える能力を持つまでになった。これは、シミュレーション技術と AI の融合がもたらす大きな可能性を示している。また、ロボットの二足歩行や物を持つといった動作も、シミュレーションで完結するようになってきている。このような進化を考えた場合、データを集めることが必要であるものの、それにも限界があるため、シミュレーション技術との融合が必要となる。そして、シミュレーションが

一度手に入った途端に、性能がデータに依存せずに急上昇するという現象が見られる。これは、LSI 設計の分野で特に起きやすいと考えられており、シミュレーションにより、データを生成し、学習や検証を行うことが可能になる。このような手法は、一つの勝ち筋となり得る。シミュレーションにより、データを固有知識として保持する必要がなくなり、広く展開できるようになる。公開データの影響力が強くなることで、1 社が固有で持っていたデータに競争力がなくなるという状況が生まれる可能性がある。また、この進化は、新しいビジネスチャンスを生み出し、新たな力を巻き込むことで、産業全体を育てていく可能性を秘めている。

また、大規模な学習計算が注目される一方で推論計算の需要が急拡大しており、半導体各社が生成 AI に対応した半導体を開発している。今後、エッジ側において知能化が急速に進む可能性があり、この知能化の進展はロボティクスの加速につながる。例えば、掃除ロボットがごみかそうでないかを見極めながら掃除ができるようになる。また、周りにいる人の気配を感じながらも邪魔しないような掃除の仕方も可能となる。さらに今後は多数の高度な知能機械が相互に更新しながら連携し、極めて知的な作業を行う群制御が高度化する「フィジカルインテリジェンス」³が加速していく。自動運転車だけではなく半導体の製造や科学実験の自動化をも加速する。例えば、半導体の後工程は非常に複雑で人が介在する必要があるが、フィジカルインテリジェンスにより完全自動化することが期待される。また、科学研究では例えば創薬開発の複雑な実験が自動化する。これら技術は開發生産の無人化であり、GX に大きく貢献するとともに大きな市場を見込むことができる。

他方、日本では、半導体を使いこなし自分たちの事業に生かそうという企業がアメリカに比べて出てきていない。そのため、ベンチャーも含めて、半導体を使用し、半導体で差別化を図ろうとする意欲のある人たちが、日本において出てくるようにするため、産業界でしっかり成功事例を作っていくことが必要である。また、教育も重要であり、半導体産業の魅力を中高生や大学生に伝えることが必要である。そして、新しいビジネスを始めたり、半導体分野に参入してくる者を手助けする仕組みが必要である。今ある産業を育てるだけでなく、新しい力を巻き込みながら新たなユースケースを開拓していく観点が重要である。

³ フィジカルインテリジェンス：エッジの知能化等により、AI（知能システム）と機械（ロボット、IoT 等）が高度に融合することで実現する、AI が物理的動作を行うためのシステム。これにより、AI の利活用が現実世界（Real World）に広がることで、リアルタイムに高付加価値を還元することを目指す。

6. 産業界が抱える中長期的な技術課題、現在の事業を進めるうえでボトルネックとなる基礎的な研究課題等

6.1. 半導体

6.1.1. ロジック

先端半導体の 2 次元のスケーリングは限界に近づいており、フラッシュメモリや DRAM は 3 次元化が進んでいる。トランジスタも 3 次元構造になっており、デバイス構造やチップの積層技術により 3 次元化が進んでいるものの、トランジスタ同士を接続する配線の実現にはまだ課題がある。これらの素子を有効に接続し、伝送を効率的に行うためには、新たなブレークスルーが必要と考えられる。また、産業界で参照されている材料の物性値はバルクベースで評価されているが、ナノスケールになるとその値を使用することができない。そのため、ナノスケールで最適な性能を発揮する新しい材料の創出等の研究開発が必要である。その際、エネルギーの低減できる先端ロジックを目指すことが必要である。

Rapidus における先端ロジック半導体の製造は 2nm だけをやって終わりではなく、その先まで継続して取り組む必要がある。そのため、2nm 以降にも拡張可能なデバイス、プロセス、材料の要素技術開発を一部 LSTC が担っているが、長期的な課題に着手することができていない。それには、半導体に限らず広い分野にも適用可能な要素技術である分析技術等が含まれる。これら基盤的技術については、経済産業省に加えて、文部科学省によるロングタームでの基礎的研究開発が必要である。

6.1.2. メモリ

DRAM は、高速演算を支える短期記憶メモリとして、データセンターやクラウドサービス、プロセッシングサービスなどで重要な役割を果たしている。微細化や 3D 化が可能な超低サブスレッショルドトランジスタの開発や、半導体材料内の放射同位体の接合リーク、閾値への影響についての研究が企業からアカデミアへの期待が大きい。一方、NAND フラッシュメモリは、データの保存に必要不可欠で、大容量かつ高性能なメモリデバイスとして、高速データ処理システムの中心的な役割を果たしている。回路設計技術や、環境、省エネ、リサイクルに通じるサステナビリティ技術が研究開発課題となっている。

6.1.3. センサー

特に CMOS イメージセンサーはカメラの機能において極めて重要な役割を果たしている。近い将来、自動運転などの技術が普及すると、センサーはさまざまなセンシングを行う重要なデバイスとなる。そのため、エッジ AI やエッジコンピューティングに関する基礎研究、社会実装の応用研究、無人移動体やロボティクスの実現に向けた周辺認知システムに関する基礎研究などが産業界からアカデミアへの要望が強い。

6.1.4. アナログ・マイコン

アナログ、マイコンについては、バッテリーの残存価値評価や故障予知、ポスト量子暗号技術に関する研究が産業界からアカデミアへの期待が大きい。

6.1.5. パワー半導体

パワー半導体は電気自動車や鉄道、その他の産業機器の電源部分で広く使用されており、エネルギー損失を最小限に抑えるための重要な技術である。特に、我が国がカーボンニュートラルを目指す上で、パワー半導体は欠かせないデバイスであり、この分野の研究開発の推進は必要不可欠である。

次世代のパワー半導体としては SiC や GaN、酸化ガリウム、ダイヤモンド系のデバイス要素技術は、これからますます重要になることが予想されている。これらの要素技術、そして耐環境性や宇宙線耐量に関わる評価技術と理論構築の開発は長期的な課題として産業界からアカデミアへの期待が大きい。

6.1.6. 環境技術

半導体が社会インフラとしての活用範囲が広がる中で、環境への配慮が必要となっている。特に、資源の有効活用と排出生成物の削減が求められており、使用電力や水の削減も重要な課題となっている。例えば、先端ロジック半導体の製造に不可欠な ALD という原子レベル成膜プロセス用装置ではゲート絶縁膜などを成膜する過程で、材料ガスの 99% が廃棄されている。このような状況下で、資源を有効に活用する方法を模索することが重要である。また、先端の 2nm プロセスでは、EUV 露光装置が使用されているが、使用電力が非常に大きく電力の削減が半導体製造における重要な課題となっている。排出物についても問題となっており、特に、PFAS や PFOS といった化学物質の削減が必要となっている。これらの削減に向けた技術開発が進められているものの完全に除去することは難しい状況であり、代替技術の開発が求められている。特に PFAS は大きな問題となっており、半導体の製造工程で多く使用されている。各国において PFAS の規制が始まっていることから、代替物質や新たな化学物質の研究が必要となっている。

また、水を全く使わない技術など革新的な洗浄技術の開発が必要とされている。半導体の製造工程では大量の水を使用することが問題とされており、今後、水の使用量を削減する技術開発に取り組むことが必要となっている。

6.1.7. その他基盤技術

その他、量子コンピューティングに関する研究、光電融合関係、無線通信融合技術に関する研究などについて産業界からアカデミアへの要望が大きい。また、AI を活用して半導体の生産効率を上げることが必要となっており、例えば、技術者の頭の中にあるノウハウや経験を、デバイス製造の過程で得られるビッグデータと組み合わせて

AI 化するなど製造工程を効率化する手法の開発について産業界からアカデミアへの期待が大きい。

6.2. 半導体製造装置

製造装置は、多くの技術の集合体でありデバイスの種類に応じて必要とされる要素技術が異なっているものの、メカエレキ、ソフトウェア、計測、プロセスなど、これらを複合化する技術で成り立っている。特に共通する基盤技術としては DX 技術の重要性が拡大しており、半導体の開発から量産までの各段階で必要とされる DX 技術を開発することが必要となっている。また、半導体の製造工程では検査や測定が全体の約 2 割を占めており、これらの工程は非常に重要になっている。検査測定機器は、特定の検査装置や測定装置を使って取得したデータをもとに、互いに情報を共有するため、デバイスメーカーと装置メーカーの間で共通言語化する傾向がある。日本が検査や測定技術で先行することにより、世界中の人々が日本の技術を使って情報を共有する状況をつくる必要がある。また、環境問題については、製造エネルギー、製造コスト、使用する水などを削減していくことが求められている。ドライエッチングなど製造装置による CO₂ 排出量の削減も課題となっており、産学の連携を拡大することが必要である。

6.3. 人材育成・確保

前述の各地域での半導体人材育成等コンソーシアムを中心として、地域の半導体業界や大学・高専、教育委員会等が連携して、小・中学校向けの短いビデオの制作など、小中学生から半導体に関心を持ってもらうための取組が進みつつあり、半導体業界における人手不足感を踏まえれば更に取組を強化する必要がある。他方、大学では様々なデバイスの開発が必要となる中、既存の大学のクリーンルーム等の施設・設備を拡張する必要がある。また、設計についても最先端の設計ツールを大学で利用できる環境を構築する必要がある。また、産業界からは、他産業からの転職者への対応も含めた大学等における社会人のリスクリングに関するニーズも高く、継続的な環境整備による取組の強化が必要である。

半導体製造装置企業からは先端技術にチャレンジできる人材、海外業務ができる人材、装置特有の技術に精通した人材、女性のエンジニアやデータサイエンティストなどの需要が大きい。

7. アカデミアが強みを活かせる技術領域

検討会では、今後アカデミアが重点的に取り組むべき研究開発課題について、複数のアカデミアの有識者からヒアリングを行った。半導体に関する研究開発課題は広範囲にわたり、全分野を網羅することは困難であるが、特に有識者から挙げられた研究開発課題は以下の通り。

7.1. ロジック

社会インフラ全体ではリアルタイムコンピューティングが重要となっており、人間が遅延を知覚できない領域である 1ms 以下にデータ遅延を低減することが必要になる。このようなシステム全体を社会インフラとして整備することが求められており、特にエッジ側の性能向上が必要とされている。また、データトラフィックの増加が予想されており、2024 年から 2035 年ぐらいにかけてデータトラフィックが約 45 倍に増加することが予想されている。これに伴い、通信データ速度を高速化するとともにデータ処理性能を向上させる必要がある。特にデジタルプロセッサは高集積化が進んでおり、1 チップ当たりのトランジスタの数が 1 兆個レベルに達している。

また、情報処理におけるエネルギー消費量の増加も課題になっている。2035 年には、情報システムによる消費量が全世界の発電エネルギーを超えると試算されており、半導体だけではなく情報システム全体において低消費電力で演算が可能なインフラを目指す必要がある。特に AI 処理においてはメモリ帯域の幅と遅延による制約がボトルネックとなっている。また、これまで AI プロセッサの開発が進められてきているものの、演算速度とともに消費電力が増加する傾向にあり低消費電力化に向けた革新的なアーキテクチャやデバイスが求められている。

現在の最先端ロジック半導体ではデバイス構造が 3 次元構造になっており、CFET 構造に向けた研究開発が必要となっている。これには、新しいチャネル構造やゲートスタックの構造、また新しい材料が研究課題となっている。先端材料・プロセスの研究で日本は強みを有しており、特に EUV 用のレジストに関して日本の大学が高い研究力を有している。また、選択 ALD や低ダメージのプラズマ源、それを用いたエッチングプロセスに関しても大学が一定の研究力を有している。今後、先端ロジック半導体においては極薄のチャネルの半導体デバイスが主力になることは明らかであり、その構造は 2030 年以降も継続して使用される可能性が高い。それには、量産技術だけでなく、第 1 原理やシミュレーションやモデリングを主体とした基礎的な半導体デバイスの研究が必要である。また、GAAFET 構造の特性を活かした差別化の回路応用技術も重要である。RF ミックスシグナルの応用や、パルス系の自律・神経回路系のアーキテクチャ、スパコンと QC の連携を行うクライオ CMOS のデバイス回路において、GAAFET を使用した場合の影響についての基礎研究が必要である。

7.2. メモリ

様々な情報システムを支えるためには、様々な性能のメモリが必要である。ビッグデータや AI の利用拡大に伴いメモリ市場は大きく拡大している。日本は世界のメモリ市場の 20%を保有しているものの、半導体メモリ技術は変革期にあり判断を誤ると、日本が今持っている市場を一瞬にして失う可能性がある。これは他の半導体分野でも過去見られた現象であり、アカデミアが力を結集して取り組む必要がある。半導体ロジックでは水平分業が進展しているものの、半導体メモリの分野では、新しいメ

メモリセルに使われる材料や物理によってパフォーマンスが大きく異なり、それを使いこなすための回路システム技術が必要となるため、システム設計とものづくりが一体的に行われる必要がある。そのため、アカデミアにおける半導体メモリの研究開発や人材育成では、材料プロセス、デバイス回路実装の総合力を強化することが重要である。

現在半導体を支える重要な SRAM、DRAM、NAND、3D NAND などの技術はすべて微細化で頭打ちになってきている。そのため、新しい材料や新しい物理を使った新しいメモリを模索する必要がある、アカデミアが貢献できる技術領域である。特に AI 分野ではメモリとロジックのバンドの狭さの課題を解決するために、**Computing Near/In Memory** の研究開発が拡大しつつある。ロジックとメモリを近づけることが必要であり、また、高速度かつ大容量・低消費電力な不揮発性の新しいメモリが求められている。DRAM はデバイスレベルでの 3 次元化が進んでおり。微細な構造、材料、検査技術などアカデミアが長期的に取り組むべき課題が多く存在する。ストレージメモリである NAND は先行して 3 次元化が進んでいるものの、新材料の導入が求められている。また、CPU メモリと演算の性能ギャップの解消や低消費電力化を実現するため NAND と DRAM の中間の性能を持つような大容量の 3 次元不揮発性 RAM が求められており材料プロセス技術の革新が必要である。これらの候補となる強誘電体やスピントロニクスといった新しい物理材料においては日本のアカデミアが強みを有している。FinFET 世代、GAA 時代に適用できる新しい混載メモリについては、特に AI や車載といった特殊な技術や耐環境性を求められる。これらの分野で日本のアカデミアは強みを有しており貢献することができる。

半導体メモリは、メインメモリからストレージメモリ、AI 特化のストレージクラスメモリ、混載メモリと多種多様であり、それぞれに必要な新しい材料、物理が存在する。しかし、異種材料を導入するとコンタミネーションが起り性能が出なくなるという課題があり、個別企業のクリーンルームでは試作することは困難である。国が整備したクリーンルーム、評価分析設備などの強化と多様化を進め、それを連結して活用する仕組みを作ることが必要である。

7.3. センサー

世界的に自然環境、食環境、生活環境の保全が重要となっており、エネルギー循環、環境、人・衣食住・情報といった様々な要素に関する多角的なセンシングが求められている。センサー分野では複数機能を結合する視点が重要であり、それを実現するためには複数のチップが入るチップレット技術が必要となる。例えば CMOS イメージセンサーでは上側に CMOS イメージセンサーがあり、下側にロジックが搭載されておりセンサーとロジックが一体化している。また、バンドギャップの小さい材料と Si を使った赤外線センサーを積層することにより、可視光と IR 光を重ね合わせるなど多機能化が図られている。また、東京工業大学では牛につけるカラーにモーションセ

ンサーを取り付け、畜産牛の行動履歴を大学からリアルタイムで確認できるシステムを開発するなど、モーションセンサー、Multi-modal、エッジ AI、低消費電力通信、クラウド AI を組み合わせる研究が行われている。今後アカデミアにおいてユースケースに応じた多種多様なセンサーを開発することが必要である。

7.4. パワーエレクトロニクス

電力消費が増加し電力の安定化とロバスト化を実現するためのパワーエレクトロニクスの重要性が増している。また、小型軽量のドローンや電気自動車 (EV) のような新しいアプリケーションが生まれている。パワー半導体は Si を用いたパワー MOSFET、IGBT、バイポーラ系のデバイスが進化を遂げ、構造を変えながら損失を減らしてきた。近年は SiC が出現し次世代の半導体として期待されており、SiC の移動度などの性能を向上させることが最大の課題となっている。また、GaN、酸化ガリウム、ダイヤモンドは移動度は上がってきているが、信頼性の向上などの課題がある。パワーエレクトロニクスでは、パワー半導体の性能を上げるだけでなく、それに関連する機器、受動素子、材料、実装も向上させる必要があり統合的な研究が必要である。パワエレ機器の全体を理解し、ソリューションを結びつける必要があり、システム全体を取り扱う人材の育成が必要である。

7.5. 設計

2030 年には半導体市場の 70%が何らかの形で AI 半導体になることが予想されている。他方、AI は半導体需要を創出する一方で、エネルギー危機を引き起こす恐れがある。AI 処理によって消費される半分のエネルギーが DRAM のアクセスに消費されており、大部分がデータの移動によって消費されている。具体的には、GPU と DRAM 間のデータ転送に 20%、積層された DRAM 内のデータ移動に 20%のエネルギーが消費されている。これはフォン・ノイマン・ボトルネックとして従来から知られていた問題であるものの AI 時代に突入したことで、このボトルネックを移動するデータの量が爆発的に増加しデータの行き来の回数が急増した結果、この問題はより深刻なものとなっている。このボトルネックを解消する有力な手段として、3D 集積が挙げられる。現在の HBM (High Bandwidth Memory) は 2.5D 集積であり、まだ 3D 集積への技術課題は多い。将来的に 3D 集積が進んでいくことにより、AI 処理に伴うエネルギー消費を効果的に削減できる可能性がある。3D 集積は熱密度の増加に伴う冷却が課題となっており、排熱することができる材料と構造を研究し、それを実際に製造できるようにする製造装置を開発することが必要になる。これらに関する技術については日本が強みを有している。

3D 集積に加えエネルギー効率を高めるもう一つ的手段として、専用チップの開発がある。消費電力は電源電圧の 2 乗に比例するため、電源電圧を下げる設計技術がこれからの勝敗を分けることになる。低電圧を実現する 3D 集積設計は、設計からデバ

イス、そして製造までをトータルに考えた最適化（DMCO（Design Manufacturing Co Optimization））が必要になる。

また、集積回路の微細化とともに設計コストが指数関数的に増大していることが課題となっており、これを削減することが急務である。そのために AI を駆使した設計自動化がこれから必須になると考えられる。他方、日本国内では自動設計にかかわる EDA 人材が絶滅危惧種になっており、EDA 人材の保護と育成が急務である。特にチップレットの時代はパッケージ設計もチップ設計と同様かそれ以上に複雑になる。このパッケージ設計では、電氣的な設計に加え、熱設計と機械設計も求められ、アカデミアが取り組むべき研究課題である。我が国ではこれらを全て米国に依存しており、これらに関する研究開発は安全保障上の面からも極めて重要な問題である。

また、今後、AI が半導体需要を創出することが予測されており、半導体のユースケースを開拓する人材が必要となる。例えば、ハードウェアとソフトウェアのリソースをどのように最適に配分するのかなど、広大な空間、物理と情報、デバイスとシステム、ハードウェアとソフトウェアといった全体を俯瞰する力を備えた人材を育成する必要がある。大学を知価社会の社会インフラとして認識し、設計プラットフォームを大学に整備することが必要である。

7.6. 材料・分析

省電力化と高性能化を両立する AI アクセラレータが各半導体企業から発表されているが、その次のステップとしてエッジ AI、ニューロモーフィック、量子デバイスなどが注目されており、材料、解析技術、計算科学の融合が必要である。IMEC が出している微細トランジスタのロードマップによると 2034 年からはデバイスと材料のイノベーションが必要とされている。新しいデバイスや材料を社会に実装するためには、量産技術の開発よりも先に材料を決定しておく必要がある。このため、今後 5 年間は材料開発が非常に重要となる。

微細トランジスタ、特に GAAFET における大きな問題は仕事関数制御であり界面を適切に制御する必要があり、ALD 用ガス源の開発も重要となる。このようなトランジスタの開発の傾向は今後も続くと考えられ、2D 材料は界面での電子散乱が少ないことから移動度があまり落ちないとされているため、それら材料の開発が必要となる。また、酸化物チャネルもゲート酸化物との界面反応が少ないために移動度の低下は抑制される。また、微細配線においても新材料の開発が必要となる。

材料開発には必ず分析が必要であり、それを計算科学やデータ科学を活用して加速することが有効である。例えば、仕事関数の計測、界面の構造制御、特性制御、データ駆動型の評価技術が非常に重要となる。日本では NIMS が 2 次元材料へのドーピング技術を発表し、東京大学や東京工業大学からは、モリブデンダイサルファイドに関する論文が発表されており、日本には材料研究の基礎が存在している。低消費電力を実現するための脳型コンピューティングに必要となるニューロモーフィックデバ

イスにおいても新材料の開発が必要になる。ニューロモロフィックデバイスの構成要素は多岐にわたっており、例えばイオニクス材料である強誘電体素子については既に産総研が、またスピントロニクス素子については東北大学が研究を発表している。これらの要素技術は日本国内に豊富に存在し、日本のアカデミアが強みを有する分野である。今後、これらの要素技術をどのように統合していくかが課題であり、各技術の性能を比較し、最適な組み合わせを見つけ出すための研究開発が必要である。

7.7. 環境技術・ファクトリーインテグレーション

今後、製造過程において計測されるデータと Fab を連携させスマートファクトリー化を進めることが必要である。ファクトリーインテグレーションは海外で研究が精力的に進められており、日本のアカデミアにおいても活性化することが必要である。

半導体としてこれらの技術を実装することにより解決すべき問題は、エネルギー消費と CO₂ 排出である。これらの問題を解決するためには、様々なモデリングが必要となる。例えば、サムスン環境負荷の軽減を目指しており、Fab の空調のシミュレーションから始まり、デバイスそのもの、ウエハ内部、パッケージ、さらには Fab 全体までをシミュレーションすることを提案している。TSMC では開発を効率化するために、原子レベルから上層レベル、さらにはチップレットの全体像、ウエハ内部、パッケージ内部まで全てを視野に入れ、プロセスツール内部まで見ることで、様々なシミュレーション環境を立ち上げている。日本においても、半導体集積回路産業全体のデジタルツイン化を推進することにより、ウエハ内部、パッケージ内部、Fab だけでなく、社会的インパクト、社会システムの運用、サプライチェーンのモデリング、環境負荷のモデリング、人材育成のモデリングなど、様々な要素をモデリングし、開発環境の負荷を軽減するとともに全体を最適化することが必要である。

また、PFAS・PFOS 問題が産業界で注目されており、従来の材料開発のペースを超えるアプローチでアカデミアが研究に取り組む必要がある。日本が成功するための鍵は、従来の開発方法を超える新たな手法を開発できるかどうかにかかっており、産業界とアカデミアが結束して取り組む必要がある。

8. 重点的に取り組むべき施策

各国・地域では半導体企業への大規模な支援と併せて大学等アカデミアにおける研究開発・人材育成への支援を強化している中、日本では半導体産業への支援に比べてアカデミアへの支援は限定的である。半導体が牽引する成長を持続可能にするためには、日本においてもアカデミアへの支援を抜本的に強化する必要がある、産学連携の下で総合的かつ戦略的に施策を推進していくことが重要である。

地球規模課題は知識集約型社会における成長機会創出の要諦であり、これを日本が先導するためには、先端科学・産業の競争力の全般を支える次世代半導体の創出やそのユースケースの開拓に向けて、産業界のみならずアカデミアの総力を結集すること

が不可欠である。文部科学省・経済産業省・産業界・アカデミアが緊密な連携の下で、2030 年代以降に備えて研究開発、研究基盤整備、人材育成を三位一体としてアカデミアへの支援を抜本的に強化する必要がある。具体的には、我が国の強み、弱みを踏まえ、勝ち筋となり得るコア技術を特定し、アカデミアの総力を結集した統合的な研究開発に重点投資をすることが必要であり、その際、異分野、海外人材の引き込みや若手人材の育成、大型施設や分散・ネットワーク型先端共用設備の活用を含めた新規材料探索から設計試作環境の整備などを一体的に推進するといった方向で進めていくことが重要である。

また、これらを推進するにあたっては、文部科学省と経済産業省が課題や推進方を共有する場を設置し、研究開発事業や人材育成、国際拠点の在り方について、具体的な方針を検討することが必要である。

8.1. 今後重点的に取り組むべき研究開発課題（重点項目）

未来社会を予測しつつ、今後進展する地球規模課題や日本の課題の解決に必要な技術を特定し、国として集中的に取り組むことが重要である。未来社会では、AI を搭載したロボティクスの活用が拡大し、エッジの知能化（フィジカルインテリジェンス）により、科学研究を含む様々な分野を自動化し、GX を推進することが可能となる。地球規模課題として、2030 年代には全クラウドシステムの消費電力が全世界の発電エネルギーを超えるおそれがあり、エッジ AI 半導体の性能向上が必要である。日本ではサービス、医療・福祉、製造、運輸などの労働力が不足するため、ロボティクス等による自動化が必要である。

現在、日本は装置・材料メーカーやメモリ・センサ等の分野において国際的な競争力を保持しており、材料や分析技術等アカデミアの強みを生かせる分野がある。また、産業としても自動車・ロボット産業が一定の世界シェアを保持しており、それらとつながる半導体の開発が重要である。

こうした未来社会予測や日本の強みを踏まえ、2030 年以降に向けてフィジカルインテリジェンス（エッジの知能化）を加速し、エネルギー問題など地球規模課題の解決に貢献するため、今後重点的に取り組むべき研究開発課題（重点項目）として次世代のエッジ用 AI 半導体実現に向けたコア技術について、アカデミアとして集中して取り組むべきである。その際、次世代エッジ AI 半導体のユースケースを日本から生み出すことを目指し、半導体開発とユースケース開発を一体的に行うことが必要である。GX や労働力不足等の社会課題に貢献する AI ロボット等を想定した次世代エッジ AI 半導体開発と AI ロボット開発を一体的に行い、電力消費激増を見据えたエネルギー効率改善等国家として必要な技術確立するため、産業界と緊密に連携し、アカデミアの総力を結集した統合的な研究開発を行うことが必要である。これを進めるにあたっては、文部科学省、経済産業省、ファンディングエージェンシー等が強固なガバナンス体制を構築し、強力なマネージャーの下、研究開発の進展に応じて目標や

計画を柔軟に変更しつつ、アカデミアから産業界や LSTC へのタイムリーな成果の橋渡し等を実現していくことが重要である。

また、こうした次世代半導体の研究開発においては、有志国を始めとする国際連携が極めて重要であり、学生や研究者の国際研究プロジェクトへの参画を拡大することにより、国際的な視野を持つ人材を育成することができる。他方、G7 や OECD 等において、研究セキュリティ・インテグリティの確保の必要性が指摘されている。特に半導体が現代社会の GX や DX を支える基盤技術であり、経済安全保障上重要な技術であることに鑑みれば、特に将来の産業化及び国力の強化に直結する重要性の高い研究開発の推進に当たっては、国内外の取組の状況やアカデミアの特性も踏まえつつ、適切な技術流出防止方策を講じることが必要である。

先端半導体のユースケース開拓については、能動的に学習・進化する革新的な AI を搭載し、エッジの知能化により、エコで知能と身体機能のリアルタイム性を有する AI ロボット（フィジカル・インテリジェンス）の実現に向けた研究開発をすることが必要である。また、次世代のエッジ用 AI 半導体実現に向けてアカデミアが重点すべきコア技術例としては、次の 4 つが挙げられる。

8.1.1. AI を活用した高効率半導体システム設計

深刻化する世界のエネルギー問題を解決するため超低消費電力の半導体を設計する技術が必須である。その際、半導体の 3D 集積や微細化の進展に伴い設計・検証コストが爆発的に急増することが予想されており、AI 等を駆使した自動設計（No human in the loop）やアーキテクチャ・回路・デバイスをつなぐ統合シミュレーションが必要である。設計技術・シミュレーション技術は先端半導体を様々なユースケースで活用する上でハブとなる不可欠な技術であり、我が国には全国の大学や産業界が繋がった独自の設計デザイン環境が存在している。こうした環境を基盤としつつ、海外機関や AI 等情報系の研究者と連携して設計技術等の高度化に取り組み、具体的なユースケースを想定した最適設計を検討することが必要である。

8.1.2. 超低消費電力な次世代 AI 回路

AI 処理による消費電力増大が喫緊の課題となる中、フォン・ノイマン・ボトルネック（ロジック・メモリ間の通信による処理速度や消費電力の限界）を解消する次世代 AI 回路が不可欠である。エネルギー効率の抜本的な改善に必須の超低電圧回路や in memory 回路、脳型回路など次世代 AI 回路を実現するためには、我が国が強みを持つ 3D 集積技術や材料、メモリ技術が鍵になる。次世代 AI 回路の実現に向けて、AI・ロボティクスの研究者と連携し、システム化を見据えた回路、デバイス、材料開発を統合的に推進することが必要である。その際、熱マネジメントや光・量子・物性科学などの技術シーズを活用することが必要である。

8.1.3. Beyond 1 ナノ世代の CMOS に向けた新材料・デバイス・プロセス・集積化技術

2030 年代以降必要となる超低消費電力の Beyond 1 ナノ世代の CMOS を実現するには、チャネル周辺の物理特性の解明や解析技術、低電圧化を可能にする新規チャネル材料・配線材料、プロセス技術の開発等、多くの研究開発課題を解決することが必要である。我が国アカデミアには、新材料開発、解析技術において強みを有しており、多種多様な新材料・新技術を開発・導入しつつ、産業界と密接に連携し、実用化に向けたプロトタイピングのためにデバイス・集積化技術の研究開発を統合的に行うことが必要である。2030 年代以降に必要となる 2 ナノ、1 ナノの先の Beyond 1 ナノ世代の CMOS を実現するには、チャネル周辺の物理特性の解明や、配線材料、プロセス技術の開発といった多くの研究開発課題を解決することが必要となる。我が国のアカデミアが強みを持つ新材料開発解析技術を用いて、実用化に向けたプロトタイピングのためのデバイス集積化技術の研究開発を統合的に行う必要がある。

8.1.4. 環境負荷の少ない製造技術・材料

有機フッ素化合物（PFAS）等の有害物質規制の厳格化や、生産工場における水・電力不足の深刻化など、半導体製造工程のグリーン化は今後避けては通れない課題である。我が国が高いシェアを持つ製造装置・材料分野における共通課題となっており、アカデミアの材料研究等への期待は大きい。規制に対応した次世代半導体プロセスを構築するためには、製造プロセス全体の最適化を目指して、企業等とも密に連携した上で人文社会系の研究者を取り込みつつ新材料の開発・導入やプロセス開発、LCA の研究を統合的に推進することが必要である。PFAS を減らす、または使用するものの、プロセス工場の中に閉じ込めるといったことが必要となってくるため、製造プロセス全体の最適化を目指して新材料の開発や導入、プロセス開発、LCA の研究を統合的に推進することが必要である。

8.2. 今後推進すべき研究開発課題（推進項目）

半導体産業が抱える基礎的・基盤的な技術課題の解決や革新的な研究開発課題に取り組むため、アカデミアでのシーズ創出・産学連携を支援することが必要である。様々な基礎的・基盤的研究や産学連携を支援するとともに、材料探索、設計・試作・検証環境（半導体基盤プラットフォーム（仮称））を整備し、アカデミアの研究成果を速やかに産業界へつなげることを目指すことが必要である。そのため、ロジック、メモリ、センサー、パワエレ、設計、材料、製造装置、ファクトリーインテグレーション、ユースケースなど将来の重点項目になる可能性のある基礎・基盤的な研究開発課題にアカデミアが取り組むことができるよう文部科学省として継続支援すべきである。

表 1 推進項目

	研究開発課題例
ロジック	差異化回路応用技術（次世代通信、クライオ CMOS、シリコンフォトニクス等）
メモリ	大容量化、高速化、省電力化に必要な新規材料（スピントロニクス等）、 評価分析、新原理メモリ
センサー	新原理センサー、マルチモーダル化、知能化
パワエレ	酸化ガリウム、ダイヤモンドなど次世代材料の開発、 GaN、SiC の品質向上に必要な学理解明、 回路や受動素子を含めた全体システムの最適化
設計	自動設計技術、シミュレーション技術、検証技術
材料	マテリアルズ・インフォマティクス等による新奇材料開発
製造装置	プラズマ制御、化学反応プロセス、計測・分析技術、シミュレーション技術 等
ファクトリー インテグレーション	製造ラインの GX に必要なデジタルツイン技術
ユースケース	新たな半導体のユースケースの開発

8.3. 研究施設・設備の整備

アカデミアの研究開発成果を産業界へと橋渡しを加速するため、大学や国立研究所での研究ステージから、産業界の事業ステージへと移行する過程において、いわゆる「魔の川」や「死の谷」を越えることを支援する環境を整備することが必要である。アカデミアで生まれたシーズを産業界に橋渡しするため、実証に必要な設備や環境を強化する必要がある。新規材料技術の統合やデバイスでの動作実証を可能にする微細加工・解析評価環境の整備、産学・国研の結節点となる施設の整備、産総研のスーパークリーンルームの活用を強化する必要がある。また、革新的なアイデア・シーズの創出を促進するため、全国研究者による多様な研究シーズを育成するとともに、産学連携を支援する設備（半導体基盤プラットフォーム（仮称））の整備が不可欠である。例えば、マテリアル先端リサーチインフラ ARIM では、既に全国の大学に 1,000 台近い半導体関連機器が配備されている。これらの施設・設備をさらに充実させることで、革新的なアイデアの創出を促進することができる。

また、将来的にはベルギーの IMEC や米国のアルバニーのように国内外のトップ研究者を引きつける国際研究拠点の形成についても視野に入れるべきである。今後、半導体集積回路の設計から試作・動作までを更に最適化するには一貫した 300mm ラインを備えた研究開発拠点が必要となることも考えられ、日本の産業界、

アカデミアはもとより、有志国と連携しつつ検討すべきである。さらに、以下に述べる世界最高レベルの先端大型研究施設である SPring-8、NanoTerasu、富岳などを整備・活用・高度化し、半導体研究に積極的に取り組むことが必要である。

8.3.1. 世界最高水準の放射光施設による Beyond 1 ナノ世代のデバイス・プロセス・集積化技術の確立への貢献

放射光は、半導体の研究開発において、主に、結晶中の欠陥構造やメカニズムの解明、非破壊による動作中の特性評価などに極めて有用なツールであり、産業界、アカデミアともに幅広く利用されている。我が国においては、大型放射光施設 SPring-8 が約 30 年にわたり産学の研究者に広く利用されているほか、3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu が令和 6 年度より運用を開始したところである。

大型放射光施設の優位性は、高輝度・高分解能、非破壊性、その場測定オペランド測定が可能である点である。高輝度・高分解能の放射光によりラボレベルの X 線分析装置に比べて迅速かつ大量の高分解能データが得られ、非破壊測定により三次元構造を精密に解明でき、動作中デバイスの特性を容易に得ることができる。

SPring-8 については、施設の老朽化が課題となっているほか、世界では同種の放射光施設のアップグレード等が急速に進んでおり、実用空間分解能は 50 ナノメートルであるなど、性能の面でも遅れを取りつつある。また、NanoTerasu については、合計 28 本ビームラインが設置できる中で、現時点でビームラインは 10 本（うち共用ビームライン 3 本）であるなど、施設を十分活用するには早期の増設が望まれている。

これらを踏まえて、現行の 100 倍の性能（実用空間分解能 1 ナノメートル）をもつ世界最高峰の放射光施設 SPring-8-II の実現や NanoTerasu のビームラインの増設を早急に進めていくことが必要である。

8.3.2. 「富岳」の次世代となる新たなフラッグシップシステムの開発・整備をはじめとする計算科学の推進による半導体研究開発への貢献

スーパーコンピュータをはじめとする計算基盤は、計算科学研究が半導体の研究開発の方向性の検討に資すること、シミュレーションや AI により半導体開発を効率化できる可能性があること、我が国で開発された半導体技術を先駆けて導入できることなどから、さらなる整備・高度化が不可欠である。具体的には、先端的な計算科学研究を振興し、新たな半導体の利用の可能性を開拓することで、その動向を適切に半導体研究にフィードバックする必要がある。また、原子や電子の振る舞いを高精度にシミュレーションするとともに、最先端の AI と組み合わせることで高性能半導体デバイスの開発に寄与することも期待されており、計算科学分野において世界をリードすることは我が国の半導体研究開発に資する。

その時代の先端的な半導体技術の導入先の一つとして、スーパーコンピュータが挙げられる。例えば、我が国のフラッグシップシステムであるスーパーコンピュータ「富

岳」のために開発された半導体である国産 CPU(A64FX)は、当時としては先進的な製造技術を用いた 3 次元積層メモリ(HBM2)を搭載し、Arm アーキテクチャの採用などを通じて、幅広い汎用性、高い省電力・計算性能を有しており、共用開始から 3 年以上が経過しているものの、実際のアプリケーションに近い性能を示すランキングである「HPCG」やビッグデータ処理に関する性能のランキングである「Graph500」において、「富岳」は 9 期連続の世界第 1 位を維持し続けている。引き続き、優れた計算科学研究が実施できる環境整備を進めるため、「富岳」を中核とした国内の最先端の計算資源を提供している HPCI(革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ)を着実に発展させるべきである。また、データサイエンスの進展や生成 AI に係る技術革新等により、研究開発に必要な計算資源の需要が急拡大・多様化していることを踏まえ、「富岳」の次世代となる新たなフラッグシップシステムの開発・整備に着手し、国内の計算科学研究を先導することが必要である。

8.4. 人材等の育成・確保

我が国の研究力を国際的に競争力のあるレベルに引き上げるため、優秀な研究者を育成し、質の高い研究を推進することが重要である。新しい技術や知識の創出は、経済成長や社会の発展に不可欠であり、これを担うトップ研究者の存在が必要であり、日本の人口減少が進む中で、限られた人材から独創的な成果を創出する研究者を育てることが国の持続可能な発展につながる。また、環境問題やエネルギー問題など、グローバルな課題に対する解決策を研究することで、世界に貢献する研究者を育成することが必要である。大学をはじめとするアカデミアは優秀な研究者の育成において重要な役割を担っている。革新的なアイデアや技術を創出し社会全体の発展に寄与する研究者を育成するため、創造的かつ挑戦的な研究に取り組める環境を整備することが必要である。このため、8.1 で述べた統合的な研究開発課題（重点項目）に取り組むことができる研究開発プロジェクトを創設するとともに8.2 及び8.3 で述べた材料探索、設計・試作・検証環境を整備し、日本のアカデミアが世界トップレベルの研究開発に取り組むことができる環境を整備することが必要である。また、学会等など研究者が議論し共創する場を活性化することが必要である。

我が国の半導体産業を支える人材不足が指摘されている中で、将来を担う高度人材や基盤人材（ボリュームゾーン人材）の育成に関する取組を一層進めるためには、各大学・高等専門学校等が、それぞれの特色を生かしつつ、地域の産業特性等を踏まえて、産業界と連携した教育体制の強化を図ることが重要である。具体的には、地域の枠を越えて半導体教育に強みを持つ大学が連携することで、それぞれの強みを活かした教育を全国に展開するとともに、各地域においては、拠点となる大学を核として地域内の大学・高専等が連携して、教育の普及・展開、産業界・自治体との連携、中学校・高校へのアプローチ、社会人を対象としたリスキリング等の取組を推進できる体制を各地域の半導体人材育成等コンソーシアムと連携しつつ整備することが必要で

ある。特に半導体教育に強みを持つ大学が連携した教育の展開を図る上では、研究施設・設備の活用も必要であることから、8.3 で述べた半導体基盤プラットフォーム（仮称）と有機的な連携を実現することにより、我が国のアカデミア全体で半導体産業を支える人材を養成する必要がある。

加えて、半導体に関するアカデミアの研究開発においては、国際連携が極めて重要であり、それによって技術革新を促進し、グローバルな競争力を高めることが可能である。そのため、アカデミアにおける半導体の研究開発では、異なる国々の専門知識とリソースを組み合わせることで、技術開発のスピードとイノベーションを加速させる取組が必要である。また、国際連携への学生や研究者の参画を拡大することにより、国際的な視野を持つ人材を育成することが必要である。具体的には、半導体の国際共同研究を通じて日本と科学技術先進国・地域のトップ研究者を結び付けるとともに、日本の研究者が世界のトップ研究サークルに参加し、継続的に活躍するための支援を行うことが重要である。そのため、競争的資金を通じて国際共同研究を支援し、国際的な研究協力の枠組みを強化していくことが必要である。また、成長著しく豊富な人材を抱える ASEAN 諸国との研究協力関係をさらに強化することも重要である。具体的には、研究人材交流を通じて、優秀な研究者を確保・育成し、国際的な研究ネットワークを構築し、新たなイノベーションを共創していく関係へと発展させることを目指すことが必要である。