

# これまでの議論を踏まえ 今後重点的に取り組むべき 技術課題等（中間整理）

令和6年3月

研究開発局環境エネルギー課

# アカデミアにおける半導体研究の重要性

- 半導体は、5G・ビッグデータ・AI・IoT・自動運転・ロボティクス・スマートシティ・DX等の**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**。
- 各国・地域では半導体企業への大規模支援と併せて大学等における研究開発への支援を強化**。他方、**日本では半導体産業への支援に比べアカデミアへの支援は限定的**。
- 半導体が牽引する成長を持続可能にするためには、**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**する必要があり、産学連携のもとで総合的かつ戦略的に施策を推進していくことが重要。

アメリカ	CHIPSおよび科学法がNSF（国立科学財団）の予算を倍増することを承認。DARPA（国防高等研究計画局）は民間団体であるSRC（Semiconductor Research Corporation）と共同で大学の研究拠点に5年間で約3.3億ドル支援。また、集積回路のプロトタイプ試作を支援する地域ハブを大学等が構築するため5年間で総額20億ドルを支援。
EU	研究開発プログラムであるHorizon Europeにおいて「デジタル、産業、宇宙」分野を重点支援することを計画。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に総額81億ユーロ公的支援することを承認。
イギリス	2023年5月に半導体戦略を策定。The Compound Semiconductor Applications Catapult（CSA Catapult）が次世代半導体の研究開発に向けた産学連携を促進。また、半導体技術に関するイノベーション・知識センター（IKC）を設立する大学等を支援。
韓国	2022年半導体超大国達成戦略を策定し、次世代のシステム半導体における先進技術確保を目指すことを発表。また、2030年までに15万人の半導体専門人材を育成するため半導体特化大学の指定や財政支援を強化し、研究人材の養成を強化。
台湾	台湾大学、清華大学、陽明交通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。2021～2025に年間7.6億元を支援し、サブnmレベルの半導体量産に必要な技術（デバイス、回路、材料、プロセス、検査）の探索を支援。また、GaNなどのパワー半導体技術の研究開発計画も2022年から開始。

# 検討会での議論を踏まえた施策の方向性

- 地球規模課題は知識集約型社会の成長機会創出の要諦であり、それを我が国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。
- 文科省・経産省・産業界・アカデミアが緊密な連携のもとで、収穫期となる2030年代以降に備えて、高度人材の育成、基礎的・基盤的な研究開発や研究基盤整備に対し、アカデミアへの支援を抜本的に強化。
- 我が国の強み・弱みを踏まえて“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。その際、異分野・海外人材の引込や若手人材の育成、大型施設の活用を含めた設計・試作環境の整備などを一体的に推進。

## “オールジャパンによる半導体研究開発・人材育成”



### 半導体研究開発

- AI・ロボット等のユースケース（活用事例）開拓に資する研究開発を推進。
- 次世代のエッジ用AI半導体（フィジカルインテリジェンス半導体）の実現に向けて取り組むべきコア技術（重点項目）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。
- 半導体産業が抱える基礎・基盤的な技術課題や革新的な研究開発課題（推進項目）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。

### 半導体研究基盤

- アカデミアの研究開発を産業界につなぐための設計・試作・検証環境の整備
- 大型研究施設（放射光、計算機等）の整備・高度化や積極活用

### 半導体人材育成

- 半導体分野に研究者を集めるための積極投資、将来の道筋の提示
- 全国的なカリキュラム整備・連携や環境整備
- 高専・大学のシームレスな人材育成、海外や産業界との人材交流・招聘

# これまでの検討会での主な意見（今後重点的に取り組むべき研究開発課題）



今後10年以上にわたり半導体は国家戦略上重要な技術分野。先端ロジック半導体はラピダスが2027年に量産を開始することを計画しているが、その後も先端半導体分野で日本が勝ち続けるには、10年後を見据えて今から基礎的・基盤的な研究開発や人材育成に着手することが必要。その際、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、集中して国として取り組むことが必要。その際、日本の弱みを補いつつ強みを活かす戦略が必要。

未来社会	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>AIを搭載したロボティクスの活用が拡大。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産業分野を自動化しGXを推進することが可能。</u>半導体分野では、半導体の研究開発や設計、製造をAIにより自動化・高度化・省エネ化することが可能。</li><li>✓ AIを搭載するエッジ側の半導体の重要性が高まる中、一部の半導体は水平分業型から日本が得意とする垂直統合型に移行する可能性。既にTesla、マイクロソフトなど非半導体企業が半導体設計を開始。</li></ul>
地球規模課題	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 人類の活動により、地球の温暖化、生物多様性の破壊、化学物質による汚染が進展。今後AIの利用拡大等によりコンピューティングに必要な電力が増加し、<u>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恐れがあり、エッジAI半導体の性能向上が必要。</u></li></ul>
日本の課題	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 2030年には、人口の約1/3が高齢者になり、労働力人口が減少する見込み。<u>特にサービス、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。</u></li></ul>
日本の弱み	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 設計、先端ロジックの研究開発力やアプリケーションから半導体まで落とし込むシステム化が弱い。</li><li>✓ <u>2030年以降（Rapidusが量産に成功した後）に必要な次世代の先端ロジック技術を支えるアカデミアの研究開発や人材育成体制を国内に整備できていない。</u></li></ul>
日本の強み	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>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。材料や分析技術等、アカデミアの強みを活かせる分野もある。</u></li><li>✓ <u>自動車・ロボット産業が一定の世界シェアを保持。</u>全体としてAIの研究開発力は米国に劣後しているものの、少数のAIスタートアップ（PFN等）が存在。</li></ul>

# 今後重点的に取り組むべき研究開発課題（重点項目）

これまでの検討会での議論を踏まえ、2030年代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、エネルギー効率を抜本的に向上する次世代のエッジ用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的に取り組んでいただく。

## 重点項目（超低消費電力の次世代エッジAI半導体創出に向けて、アカデミアで集中的に取り組むべきコア技術）

### 方向性①

ロボティクス等が普及する未来社会を見据え、ユースケースを想定した次世代エッジAI半導体開発を推進

### 方向性②

将来の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の確立に注力

### 方向性③

産業界等と緊密に連携し、アカデミアの総力を結集した統合的な研究開発を推進

2030年代

産業界  
主体

### 超低消費電力な次世代エッジAI半導体（フィジカルインテリジェンス半導体） 創出に向けたアカデミア主体の基礎・基盤技術

#### 【アカデミアが重点化すべきコア技術例】

- ✓ AIを活用した高効率半導体システム設計
- ✓ 次世代AI回路（次世代3D半導体、in memory等）
- ✓ サブナノ世代CMOS（新チャネル、配線材料等）
- ✓ 環境技術（PFAS対応、使用水量削減等）

研究開発と並行して具体的なユースケースを検討する体制を構築  
設計・プロセス・デバイス・材料・分析等の統合的な研究開発を推進

- ・強力なマネージャーの下、研究開発の進展やユースケースに応じて、目標や計画を柔軟に変更
- ・産業界、LSTCとの緊密な連携により、タイムリーに成果を橋渡し

産業界、LSTC

# 今後重点的に取り組むべき研究開発課題の例①

## <アカデミアが重点化すべきコア技術例>

次世代エッジAI半導体を実現するために不可欠であり、①将来（2030年代以降）にどんな課題が顕在化するか、②アカデミアの投資が必要／有効か（勝ち筋）、③重点化して統合的な研究開発を行うことが必要か、などの観点から、アカデミアが強みを発揮できるコア技術を検討

### AIを活用した高効率半導体システム設計

#### ①将来(2030年代以降)の課題

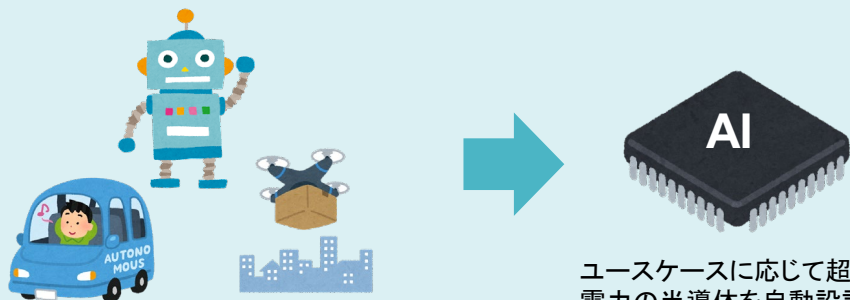
深刻化する世界のエネルギー問題を解決するため**超低消費電力の半導体**を設計する技術が必須。その際、半導体の3D集積や微細化の進展に伴い設計・検証コストが爆発的に急増することが予想されており、**AI等を駆使した自動設計（No human in the loop）**や**アーキテクチャ・回路・デバイスをつなぐ統合シミュレーション**が必要。

#### ②アカデミアの強み/勝ち筋

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。

#### ③統合的な研究開発

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。



### 超低消費電力な次世代AI回路

#### ①将来(2030年代以降)の課題

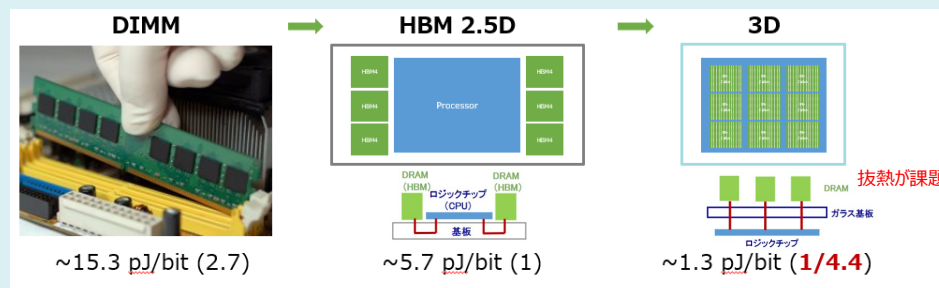
AI処理による消費電力増大が喫緊の課題となる中、**フォン・ノイマン・ボトルネック（ロジック・メモリ間の通信による処理速度や消費電力の限界）**を解消する**次世代AI回路**が不可欠。

#### ②アカデミアの強み/勝ち筋

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。

#### ③統合的な研究開発

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。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。



# 今後重点的に取り組むべき研究開発課題の例②

## <アカデミアが重点化すべきコア技術例>

次世代エッジAI半導体を実現するために不可欠であり、①将来（2030年代以降）にどんな課題が顕在化する  
か、②アカデミアの投資が必要／有効か（勝ち筋）、③重点化して統合的な研究開発を行うことが必要か、など  
の観点から、アカデミアが強みを発揮できるコア技術を検討

### サブナノ世代CMOSに向けたデバイス・プロセス・集積化技術

#### ①将来(2030年代以降)の課題

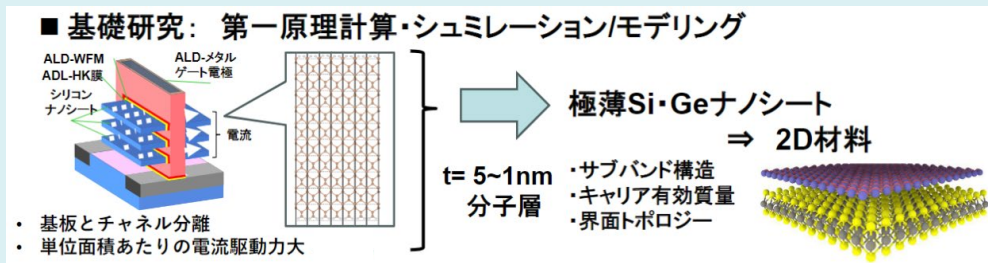
2030年代以降必要となる超低消費電力のサブナノ世代のCMOSを実現するには、**チャンネル周辺の物理特性の解明や解析技術、低電圧化を可能にする新規チャンネル材料・配線材料、プロセス技術の開発等**、多くの研究開発課題を解決することが必要。

#### ②アカデミアの強み/勝ち筋

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**。

#### ③統合的な研究開発

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必要**。



### 環境負荷の少ない製造技術・材料（PFAS、水等）

#### ①将来(2030年代以降)の課題

**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。

#### ②アカデミアの強み/勝ち筋

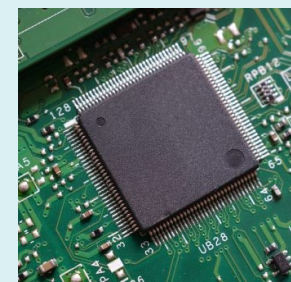
我が国が高いシェアを持つ製造装置・材料分野における共通課題となっており、**アカデミアの材料研究等への期待は大**。

#### ③統合的な研究開発

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**。

半導体産業で使用されるPFAS

フォトレジスト
エッチングチャンバーガス
配管システム
プリント基板
樹脂パッケージ



※PFAS:フッ素化されたメチルまたはメチレン炭素原子を含むフッ素化合物。

## 今後推進すべき研究開発課題（推進項目）

他方、半導体産業が抱える基礎・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、アカデミアのシーズ創出や産学連携支援を強化してはどうか。

### 推進項目（基礎的・基盤的な研究開発課題の解決に向け、アカデミアでのシーズ創出・産学連携を支援）

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。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、設計・試作・検証環境（半導体研究開発コリドー（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。

	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	新原理センサ、マルチモーダル化、知能化
パワーレ	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



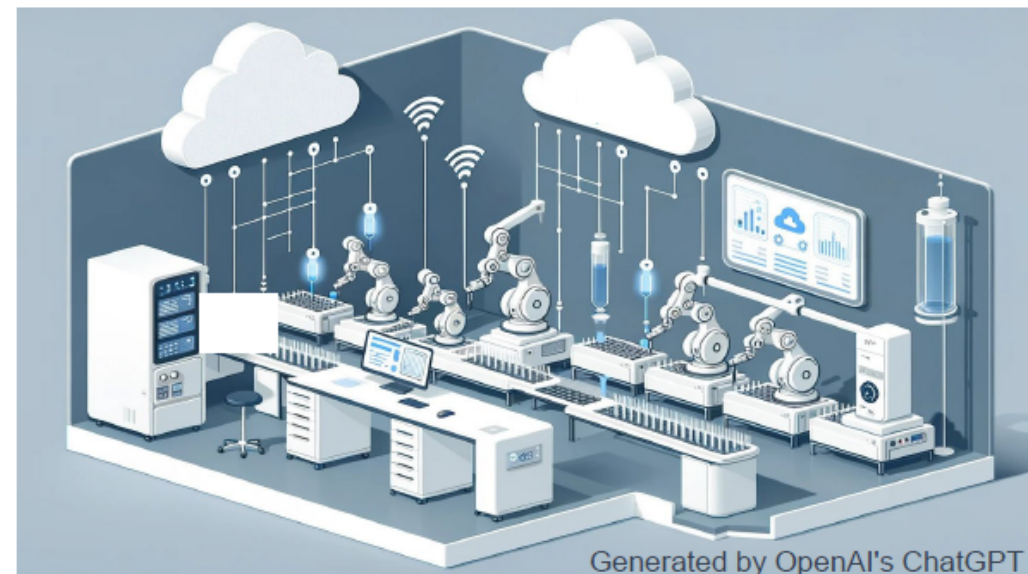
# 参考資料 (エッジAI関係)

# 推論計算の高度化が鍵

- 生成AIの大規模化により推論計算の負荷も激増  
 学習は飽和するが、推論計算はリニアに増大  
 2023年、各社が推論計算チップを相次いで発表
- 高度な推論専用チップはエッジの智能化に繋がる  
 →専用ASICは短TATでの生産によるRapidusに期待
- エッジの智能化=フィジカルインテリジェンス**

半導体後工程の完全自動化、  
創薬ライフサイエンス実験の  
自動化などエッジの智能化

→研究開発・生産の自動化  
が一気に進みGXに貢献



# デバイスとアプリの相乗的发展

- 新デバイスが新アプリを生み、新市場が发展
- AIチップによってロボティクスの再发明  
孫正義: ガラボからスマホへの転換
- AI搭載ロボティクスが新市場を牽引
- データセンタ分野はNVIDIAなど米勢強い

クラウド  
データセンタ

ロボティクス

AIチップ

スマホ

SoC

PC

マイコン

家電品

トランジスタ・IC

軍需・コンピュータ

トランジスタ・IC

半導体

アプリなければ  
ただの石

<半導体は中間生産物>

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

# 半導体企業等による未来予測の例

2030年以降に向けた半導体企業等による未来予測は以下の通り。

Intel	半導体が中心となる経済（Siliconomy:シリコミー）が今後10年で15倍になり、AI、5Gの進展により、クラウド及びエッジにおける高速データ通信、保存、処理の需要が拡大することを予測。AI、自動運転、クラウド、エッジ、サイバーセキュリティ、半導体設計・製造分野における企業買収・出資・提携を実施。
IBM	あらゆる産業でAIの活用が拡大することを予測。工場の自動化、医療AI、マテリアルズ・インフォマティクス、インフラ管理や物流の自動化など11業種におけるユースケースを分析。AI半導体や量子コンピュータの研究開発に投資。
NVIDIA	AIと5Gの組み合わせにより工場や物流システム、自動車の自動化、会話型AIツールの拡大が進展することを予測。また、天体物理学や創薬、気候科学、エネルギー探査など科学研究におけるAIの活用が拡大することを予測。
AMD	現在の速度で技術が進展すれば、2030年台にスパコン1台の処理速度が現在の1,000倍になるものの、消費電力が原発1基分に近づくことを予測。このため、デバイスレベルからシステムレベルの効率化に資する研究開発に投資。

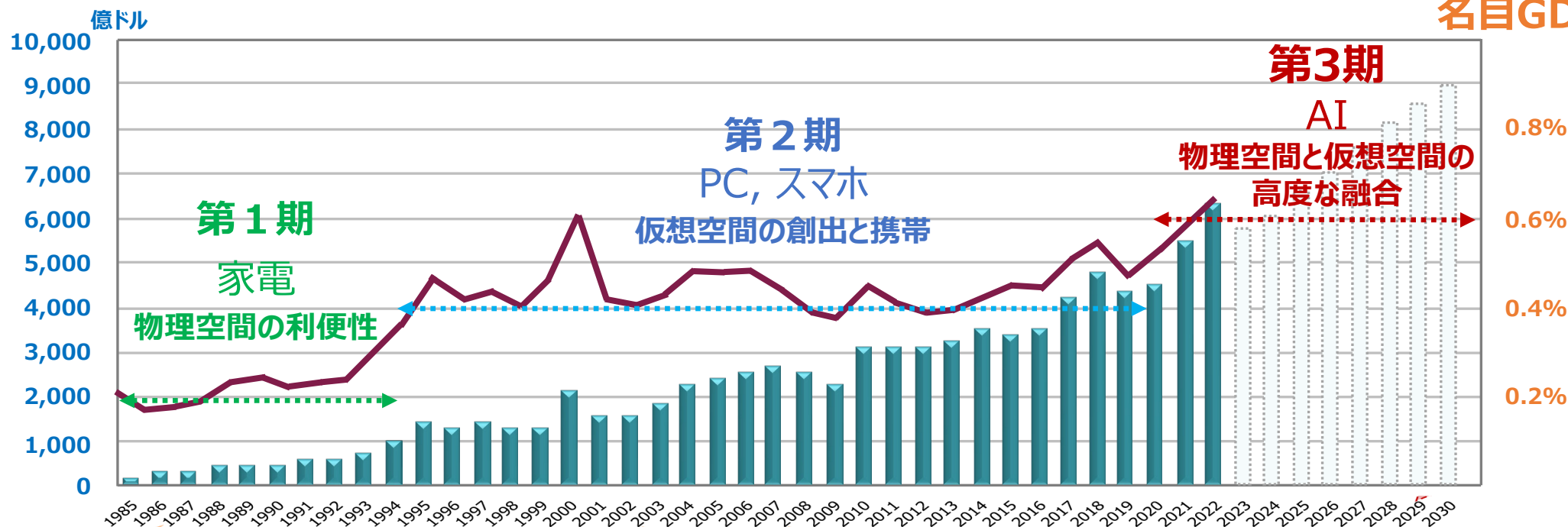
# AIが半導体需要を生むと共にエネルギー危機を招く

- 第3期成長期を迎え、物理空間と仮想空間の高度な融合で価値を創る
- AIが半導体の需要を創出し、2030年には市場の70%(760B\$)がAI半導体になる<sup>(1)</sup>
- 2030年には現在の総電力の2倍、2050年には200倍もの電力をIT機器だけで消費<sup>(2)</sup>
- 大型火力発電換算で2030年に28基、2050年に4,500基が必要<sup>(3)</sup>

出典 (1) IBS Inc.  
 (2) 経済産業省『半導体・デジタル産業戦略』  
 (3) 経済産業省第5回半導体・デジタル産業戦略からSoftBankが試算

## 半導体市場

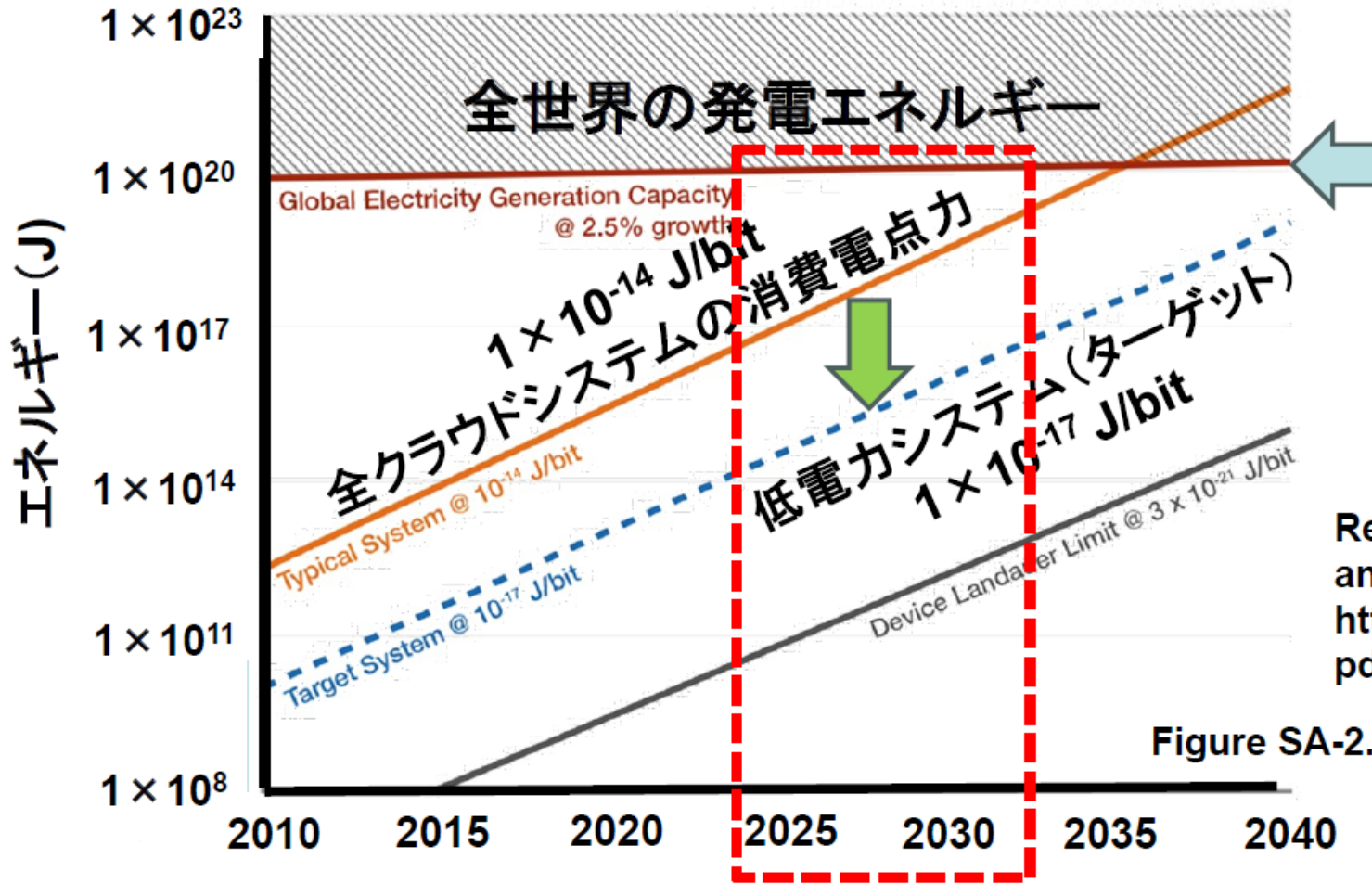
## 半導体市場 名目GDP



出典：WSTS他

# 電力供給量とシステム消費電力

演算システム(bit/J)の3桁効率化が必要!、Green System!



2022年の電力供給量は、前年比2.2%増の2万8,847 TWh ( $\Rightarrow 1 \times 10^{20}$  J)

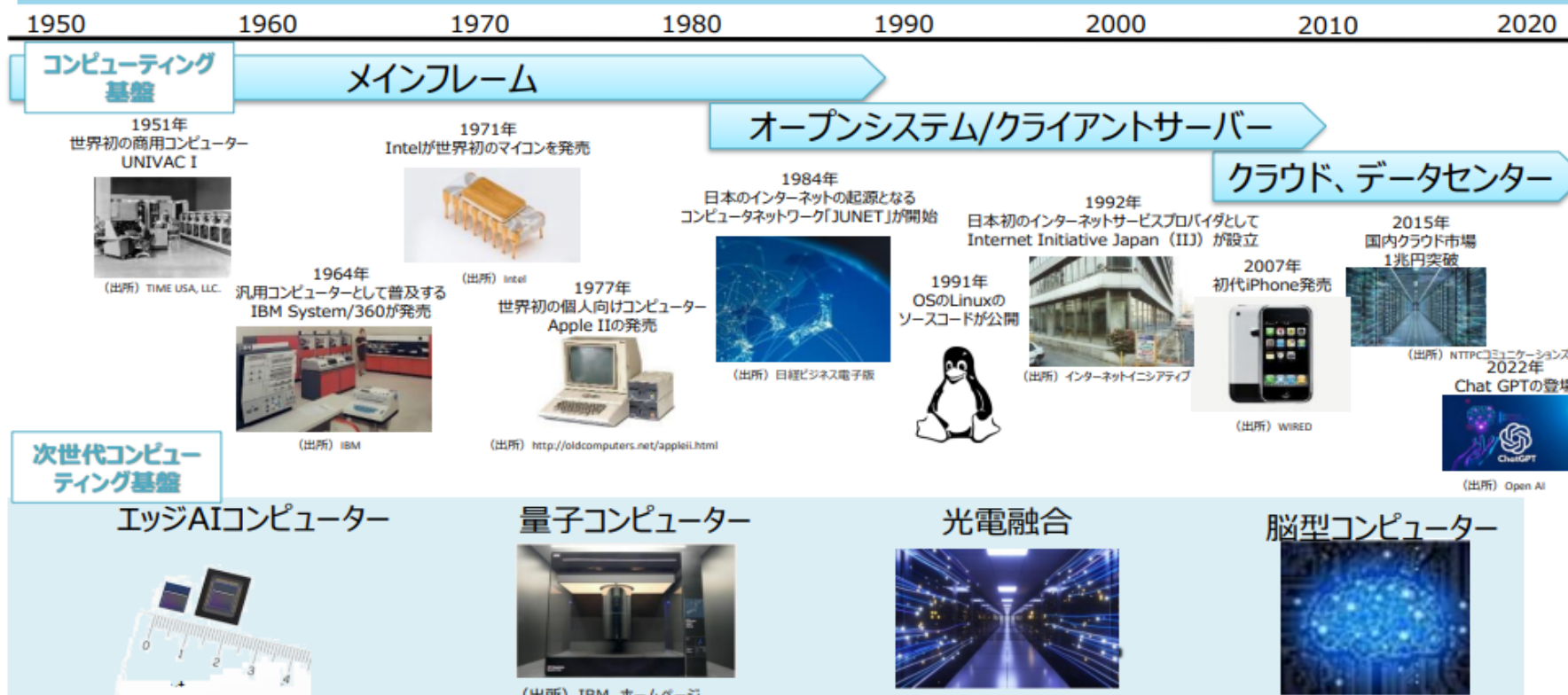
Ref) IEEE IRDS™ 2023 System and Architecture (SA)  
[https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2023/2023IRDS\\_SA.pdf](https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2023/2023IRDS_SA.pdf)

System Device Roadmap committee of Japan, The Japan Society of Applied Physics

# 経済安全保障に係る産業・技術基盤強化アクションプラン

経済産業省が2023年10月に公表した「経済安全保障に係る産業・技術基盤強化アクションプラン」では、次世代コンピューティング基盤として、エッジAIコンピューター、量子コンピューター、光電融合、脳型コンピューターが位置づけられている。

- コンピューティング（情報処理）を支える産業・技術基盤は、技術要素（半導体／電子部品）、計算基盤（データセンター／エッジ）、ソフトウェア（ファウンデーション／アプリケーション）等から構成される。さらに、足下では生成AIや脳型コンピュータ、将来的には量子・光電融合といった、産業・技術基盤全体に影響を与える破壊的な技術革新が進行している。コンピューティング基盤は、通信基盤や電力基盤とも、技術的・インフラ的に融合化が進み、一体的・戦略的な取組が必要とされる。
- 「半導体・デジタル産業戦略」に基づき、必要な措置を迅速に講じていく。



米国の大学における半導体研究や人材育成を支援するSRC(Semiconductor Research Corporation)ではロードマップ (Microelectronics and Advanced Packaging Technologies Roadmap) を策定し、将来のエッジ分野でのユースケースを予測。

Application requirements for emerging IoT and edge use cases.

	Home automation	Agriculture	Industrial automation	Infrastructure
Low-power operation, standby, and energy harvesting	Access to power infrastructure; may consume high power	Requires battery operation; must consume low power; requires drone integration and must allow for multiple energy inputs	Access to power infrastructure; may consume high power	Requires mixture of power sources and levels; need inter-network interoperability between low- and high-power components
Power requirements	< 1W standby power; 10W active power	< 10uW standby; 1mW-100mW active	< 1W standby power; 10 W operation range	N/A
Packaging and environmental integration	Integration for consumer applications; PMU and HSP for the home	Integration and packaging for continuous exposure of liquids or biological samples to sensor in integrated package	Integration and packaging for wide variety of sensors, including optics, electromagnetics, temperature, pressure, and chemicals	Integration and packaging for wide variety of sensors, including optics, electromagnetics, temperature, pressure, and chemicals
Security	High: Protection against criminal activities targeting individuals, including theft and malware; desire for privacy enabled by confidential computing	Medium: Protection against industrial espionage and hijacking	High: Protection against industrial espionage and nuisance threats, including information theft and malware	Extremely High: Protection against industrial espionage and state actors, including information theft, misuse, and malware
Cost constraints	Potential premium market-2023-2027	Extremely low-cost but high-volume systems	Low-cost, high-volume systems required	Extremely low-cost, high-volume systems
Timing	2023-2027	2028-2031	2028-2031	2032-2036



# 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



文部科学省

## 背景

- 令和5年6月に半導体・デジタル産業戦略が改定されたことを受け、文部科学省が推進すべき研究開発や人材育成について検討を行うもの。
- 地球規模課題の解決や未来社会の創造に資する半導体技術の創出に向けて、産学官の現在の取組、課題、文部科学省への要望事項等を確認し、技術的ボトルネックや必要な人材像などについて議論。

## 検討事項

- 国内外の施策動向、優先的に取り組むべき課題
- 未来社会での先端半導体の活用領域
- 産業界のニーズ
- アカデミアの強みを活かして、重点的に取り組むべき技術課題
- 研究基盤、高度人材育成、産学連携施策 **等**

## 委員一覧

### 石内 秀美

元 先端ナノプロセス基盤開発センター 代表取締役社長

### 石丸 一成

Rapidus株式会社 専務執行役員

### 大森 達夫

三菱電機株式会社 開発本部主席技監

### 金丸 正剛

技術研究組合最先端半導体技術センター (LSTC)  
専務理事

### 黒田 忠広

東京大学 教授

### 五神 真

理化学研究所 理事長

### 橋本 和仁

科学技術振興機構 理事長、内閣官房 科学技術顧問

### 林 喜宏

応用物理学会システムデバイスロードマップ産学連携委員会 (SDRJ) 委員長、慶應義塾大学 訪問教授、産業技術総合研究所先端半導体研究センター 招聘研究員

### 日高 秀人

ルネサスエレクトロニクス株式会社 フェロー

### 平本 俊郎 ※主査

応用物理学会 会長、東京大学 教授

### 宝野 和博

物質・材料研究機構 理事長

### 三井 豊興

一般社団法人電子情報技術産業協会半導体部会政策提言TF主査

### 渡部 潔

一般社団法人日本半導体製造装置協会 専務理事