

次世代コンピューティング基盤戦略 第一版

(公開版)

2022年6月17日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

次世代コンピューティング基盤戦略会議委員

共同座長:	益 一哉	(東京工業大学 学長)
	金山 敏彦	(産総研 特別顧問)
主査:	星野 岳穂	(東京大学マテリアル工学科 特任教授)
メンバー:	遠藤 哲郎	(東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センター長)
	岡田 顕	(日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 所長)
	新庄 直樹	(富士通株式会社 理事)
	関口 章久	(東京エレクトロン株式会社コーポレートイノベーション本部 テクノロジー担当 GM 兼 アライアンス戦略室 室長)
	服部 健一	(元)株式会社 INCJ ペンチャー・グロース投資グループ マネージング・ディレクター)
	平本 俊郎	(東京大学生産技術研究所 教授)
	南川 明	(インフォーマインテリジェンス合同会社 シニアコンサルティングディレクター)
	安浦 寛人	(九州大学 名誉教授)
	芦ヶ原 隆之	(ソニーグループ株式会社 R&D センター 上級主幹技師)
	伊藤 智	(NEDO-TSC デジタルイノベーションユニット長)
	安田 哲二	(産総研 エレクトロニクス・製造領域長)
	森 雅彦	(産総研 エレクトロニクス・製造領域 研究戦略部長)
	堤 秀介	(元 東京エレクトロン 常務執行役員) ～2021 年 5 月
	中屋 雅夫	(元 NEDO-TSC フェロー) ～2021 年 9 月
	大村 隆司	(元 ソニーグループ株式会社 執行役員)～2022 年 1 月

オブザーバー:経済産業省

目次

■次世代コンピューティング ～集中から分散へ、クラウドから実世界へ～	4
■コンピューティング基盤技術を取り巻く状況（現状認識）	6
■戦略提言	8

はじめに

Society5.0を支えるコンピューティング技術が大きな変革期を迎えている。半世紀以上にわたってデータの爆発的な増加を支えてきたシリコン電子回路の微細化技術に限界を迎えつつある中、従来のCPU中心のコンピューティングシステムでは対応が困難になりつつある。一方では、モバイル技術や通信技術の進展に伴い、クラウドに加えてエッジコンピューティングの重要性が増している。今後は、エッジコンピューティング、およびエッジとクラウドを有機的に結び最適なコンピューティング能力を発揮するための、ネットワークとコンピューティングが一体化したシステム（分散クラウド）が重要となってくる。この新たな潮流の中で日本が重要な地位を占めるための研究開発およびビジネス化の戦略、その戦略を実現するための研究開発体制および人材育成を実現することが極めて重要である。このような観点から、次世代コンピューティング技術、その中でも特に基盤（ハード）技術に関わる産業・学術分野において日本が重要な位置を占め、また占め続けるために、1)研究開発およびビジネス化の戦略策定、2)戦略に基づいた産総研における研究開発推進、3)企業・大学などが効率的に研究開発や人材育成を進めるために活用される試作・評価機能の実現、の三点を目的とした拠点を国立研究開発法人 産業技術総合研究所内に設置（図 1）した。本戦略は活動の一環として、「次世代コンピューティング基盤戦略」をまとめるものである。

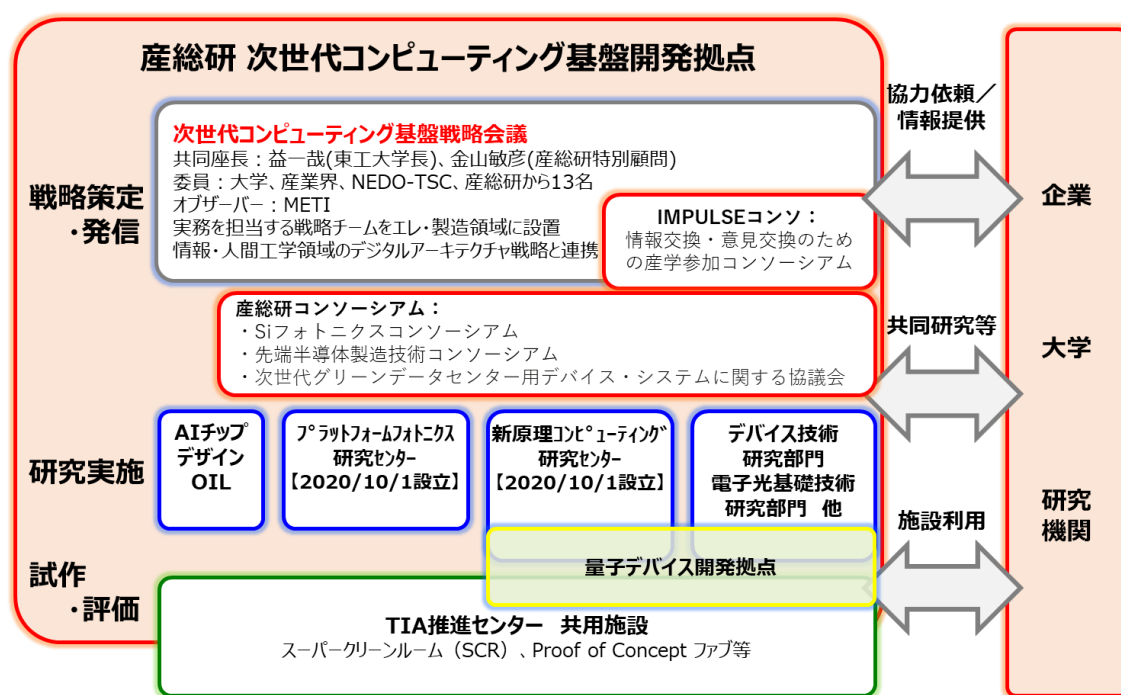


図 1 次世代コンピューティング基盤開発拠点体制

■次世代コンピューティング

～集中から分散へ、クラウドから実世界へ～

現在は、大量のデータをクラウド（データセンタ）に集約し、クラウド内での情報処理に基づいてサービスを提供するという、いわゆる集中コンピューティングが主流である。クラウドには潤沢なコンピューティングパワーがあるので AI（人工知能）をフル活用した大量のデータ処理が可能であり、また、大量なデータが集まれば集まる程、よりの確なサービスを大規模な対象（顧客）に提供できるようになる。結果として、大規模なデータセンタを保有する巨大 IT 企業（プラットフォーマー）がコンピューティングを先導し、サービスを寡占化している。

一方、これからの IoT 時代では、あらゆるモノがネットワークに繋がり、日々膨大なデータが生成されていく。また、5G 時代の超高速、超大容量通信、そしてポスト 5G 時代の超多数同時接続通信等の実現とも相まって、工場の機器や車のセンサなど様々なセンサから発生する膨大なデータが集められることになる。データ処理に基づいて、サービスの提供にとどまらず、自動車や機器の制御、災害対応やインフラの保守など、様々なアクションがとられる。データが膨大になると、処理と通信の容量およびコストが、クラウドでの集中処理で対応できる規模を超えてしまうので、処理の分散化を進めて行かざるを得ない。実世界で発生したデータは実世界近傍（エッジ）で処理を行い、かつそれらを様々な箇所に分散させ、お互いに連携を組みながら全体としての情報処理も行なっていく。すなわち、エッジコンピューティングと、それを構成要素とした超分散コンピューティングへの流れが今後進んでいく。エッジ上で処理を行う利点としては、データ通信量を削減するという点のみならず、現場で情報を処理するので高いリアルタイム性の確保が可能、個人情報やノウハウなどの情報をクラウドに上げる前に処理が可能、すなわちデータの秘匿が可能、現場に応じたきめ細やかなサービスの提供が可能、といった様々な利点がある。

この新しいコンピューティングの流れは、また、我が国の優位性を伸ばす好機でもある。エッジコンピューティングは、主として、エンドポイントデバイスと、それを統合制御するエッジサーバー（現場近傍におかれたサーバー、MEC（Multi-access Edge Computing）等）で構成されるが、いずれも電力的に制約を受けている場合が多いので、そこで使われるハードウェアには、低消費電力性が高く要求される。また、リアルタイム性を高めるために、アプリに応じた専用のハードウェアが必要となる。この低消費電力な専用ハードウェア、すなわちドメインスペシフィックなハードウェアは、そもそも、日本が得意な分野である。また、行き交うデータ通信量の爆発的な増加に伴いネットワーク自体のエネルギー消費も爆発的に増加することになるが、その解決に必要な不可欠な光ネットワーク技術も日本が得意な分野である。エッジコンピューティングを構成するハードウェアに、AI などクラウドに対抗できる高度な能力を与えて高速・高信頼データ処理を可能とし、光ネットワークによる超低遅延なデータ通信を低消費電力で実現できる様になれば、現在の集中コンピューティングでは不可能な新しいサービスを生み出すことが可能で、新たなエコシステムを生み出すことも可能である。すなわち、我が国が目指すべき方向性は、強い現場力を生かして多種多様なサービスを創造し、その多種多様なサービスを次世代コンピューティング（実世界エッジコンピューティング）によって実現していくこと、である。

少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少や多発する自然災害等、日本は様々な社会課題を世界に率先して抱える、まさに社会課題先進国である。世界的な課題である地球温暖化防止に向けたカーボンニュートラルに併せ、様々な社会課題を同時並行的に解決する技術開発の必要性・重要性が、世界の中でも圧倒的に高い。一方、少子高齢化といった課題は、必ずしも日本固有のものではなく、時差はあるものの、いずれは世界中の様々な国々が抱える。また、自然災害や地球温暖化防止に向けた対策は、大小はあるものの、万国共通の課題である。すなわち、日本ならではの次世代コンピューティングによって世界に先駆けてこれらの社会課題を解決する術を開発し、持続可能な社会モデル、産業モデルを創造し、世界に展開することができれば、世界における日本の地位を高め、産業競争力の強化を図ることが可能となる。

■コンピューティング基盤技術を取り巻く状況（現状認識）

半導体は、PCやスマートフォン、サーバーといったコンピュータ機器のみならず、自動車、産業機器（ロボットなど）、家電など、様々な機器の頭脳として使用されている。また、社会のデジタル化の進展に伴い、搭載される機器の種類が急激に拡大している。この流れにより、社会の中で飛び交うデータ量は膨大なものとなり、その結果、そのデータを処理する半導体の総消費電力量が急増している。従来半導体の低消費電力化や高性能化は、半導体集積回路を構成する素子の微細化（＝高集積化）により進められてきた。しかしながら、素子の寸法は、すでに原子レベルにまで近づきつつあり、微細化による低消費電力化・高性能化が困難になってきている。その結果として、フィン構造からナノシート構造へ、銅配線からポスト銅配線（コバルト、ルテニウム、カーボンなど）へ、2次元から3次元集積（フロントエンド3次元化技術や3次元パッケージング技術など）へ、表面配線から裏面配線へ、など、構造、材料、回路等でパラダイムシフトが進行している。これらの新構造・新材料技術の適用対象は、必ずしも最先端微細化世代に限られることはなく、アプリケーションの目的に応じて、最適な技術選択を行うことで性能向上が図れる。加えて、世界的規模で進むカーボンニュートラルへの大きな流れから、半導体そのものの低消費電力化に加え、半導体の製造プロセスにおいても省資源化、環境負荷低減化、すなわちグリーン化の要請が高くなってきている。すなわち、今後、従来以上にグリーンかつサステナブルな半導体製造プロセスを確立していく必要がある。

国内ファブに目を転ずると、メモリに関しては、グローバル競争の中でトップ集団に位置するファブが国内に存在する。ロジックに関しては、自動車や産業用ロボットといった産業機器向けのロジック、アナログ、センサの高い需要と相まって、ミドルレンジ～ローエンド（65～180nm）の国内ファブが活況を呈している。しかしながら、施設、設備の新陳代謝が進んでおらず、ファブ数は減少（集約）傾向にある。自動車や産業用ロボットなど、我が国にとって重要な産業の強靱なサプライチェーンを構築し、競争力を支えるためには、ミドルレンジ、ローエンドの国内ファブをしっかりと維持し続けることが重要である。ファウンダリ（半導体受託製造）機能としては、残念ながら、ハイエンドのみならず、ミドルレンジ、ローエンド共に、海外ファブの後塵を拝している状況である。国内に、新たなプレーヤーを次から次へと生み出すエコシステムを構築するためには、国内ファブの活性化と同時に、国内にファウンダリ機能を構築、強化することが重要である。

現在の半導体製造のエコシステムは、海外の巨大なIP（Intellectual Property）企業、ツールベンダー、ファウンダリによって構築されており、コスト面で参入障壁が極めて高いものになっている。一方、参入障壁を劇的に下げる動きとして、様々な技術レイヤーで、オープン化の波が押し寄せてきている。例えば、製造面ではオープンソースIP、オープンソースPDK（Process Design Kit）など、設計面ではオープンソースEDA、RISC-Vなど、ソフト面ではLinuxはもちろんのこと、FPGAの開発プラットフォームなどもオープン化が進んでいる。米国ではすでに、Google社が中心となって、オープンソースPDKやオープンソースEDAを活用した半導体製造の動きが進められている。まだ技術的に未成熟な階層があるものの、いずれオープンなツールによる新たなエコシステムが構築される可能性が高い。

半導体の応用としては、先端 SoC (System on a Chip) やメモリに加えて、センサやアナログも重要な応用先である。とりわけ、実世界から物理量を読み取るセンサとそれをロジックに伝えるためのアナログ回路の性能が、エッジコンピューティングの差別化に直結する。また、センサと AI の融合により、センシングしたデータから新しい価値を抽出するといった技術が、昨今の時好となってきた。センサに関しては、日本に世界的企業が多数存在し、今後の IoT 化の進展に伴い、センサ市場は大きく伸びるものと予想されている。

次世代の超分散コンピューティングでは、ネットワーク性能そのものがコンピューティングの性能を決め得るので、広帯域・低遅延・低電力・高セキュリティを固有なメリットとする光ネットワーク技術の活用が必要不可欠となっている。その中で、光ネットワーク技術の潜在性を引き出し適用範囲の拡大を可能とする光電融合技術が世界的に注目されており、その創出こそが次世代コンピューティング実現の鍵となっている。アプリケーションやソフトウェアでは海外のプラットフォームによる寡占が進んでいるものの、フォトリソを情報媒体としたハードウェア (III-V 光半導体デバイス、光トランシーバ、光伝送装置、充実したファイバインフラと局舎設備)、および光電融合に必要な実装技術に関しては、依然、日本に優位性がある。

コンピューティングの処理方式として長年活用されてきたノイマンアーキテクチャは、精緻な計算を行うには適しているものの、データ量が膨大になるとデータのやり取りに時間がかかってしまい、高速な処理が困難になる。また、ビジネスへの有用性の観点から、情報処理への要求が、従来のコンピューティングが苦手とする学習や推論など、ビッグデータの中から“大体正しい”解を“素早く”求める、といった具合に質的に変化している。ノイマンアーキテクチャに替わる新しい処理方式、ニューロモーフィック、量子といった「ポストノイマン」アーキテクチャの確立と活用が必要不可欠になってきている。

■戦略提言

上述の通り、半導体やコンピューティングを取り巻く状況は、製法から応用まで、大きな変革期を迎えている。そのような状況下において、日本が直面する社会課題、技術や産業の現状認識から2030年を見据え、次世代コンピューティング技術、中でも特に実世界エッジコンピューティングおよび超分散コンピューティングの基盤（ハード）技術に関わる産業・学術分野において日本が重要な位置を占め、また占め続けるために、以下の戦略目標を掲げる。

戦略目標1 「実世界エッジコンピューティングの総合的な強化」

少子高齢化、多発する自然災害という社会課題への対応に必要であり、また製造現場にある日本の強みを生かす観点から設定した戦略目標である。

エッジコンピューティングのエンドポイント処理に欠かせないハード（組み込みロジック、センサ、アナログ）の設計から製造までの開発力を強化する。また、国内でエンドポイント用ハード開発を容易に行えるエコシステムの構築を目指し、回路設計自動化技術の高度化やオープンなツールの活用を推進、短TAT（Turn-Around-Time）なハード設計・試作を支援する拠点の整備、および国内ファウンダリ機能の向上を行う。さらに、エンドポイント用ハードの性能向上を可能とする微細化世代追求に限定されない先端技術を開発、その中でも、日本が世界的にみて優位にある新材料、3次元集積化技術（フロントエンド3次元化技術や3次元パッケージング技術など）を先鋭化する。上記に関わるバリューチェーンの枢要な部分を抑え、この領域の発展の中核となることが目的である。

戦略目標2 「超分散コンピューティングに関わるチョークポイント技術の強化」

次世代コンピューティング、特に超分散コンピューティングの世界的なエコシステムの中で日本の強みを生かすための戦略目標である。

超分散コンピューティングの実現には、システムとしては、量子コンピュータ、スパコンなどのHPC（High Performance Computing）、データセンタ、MEC、それらのシステムを高性能に繋ぐ仮想化ネットワーク、処理方式としては、ポストノイマン、disaggregatedなどのコンピューティング、デバイス面では、ナノシートGAA（Gate All Around）や3次元フラッシュ、不揮発メモリなどの先端デバイスの開発・活用が重要となる。この領域は、熾烈な競争がグローバルに展開されており、関連するバリューチェーンを一国で抑えようとすることは現実的ではない。その中で、日本に強みのある技術を集中的に強化し、チョークポイント技術として世界をリードすることを目指す。その一つ目として、日本の強みであるフォトニクスと実装技術を武器に、光電融合技術で世界をリードする。二つ目に、これまでに培ってきた半導体プロセス技術を強みとして、次世代高性能ロジックに必要不可欠な最先端半導体デバイス（2nm世代以細）の製造プロセスを確立し世界に発信する。

近年注目を集めている量子コンピューティングは、超分散コンピューティングのシステムにおいてクラウド側のチョークポイントとなり得る技術である。我が国では、統合イノベーション戦略推進会議が令和2年1月に示した「量子技術イノベーション戦略」に基づいて8つの拠点が基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知的財産管理、人材育成等に取り組んでおり、産総研は「量子デバイス開発拠点」として活動を開始している。令和4年4月には量子関連技術の急速な進展に対応

し、社会実装に向けた戦略が策定された。この量子技術全般の戦略を踏まえて、超分散コンピューティングへの量子技術導入戦略を今後策定していく。

戦略目標3 「グリーン・サステナブル半導体製造技術の体系的構築」

地球温暖化防止や持続可能社会を目指す世界的な潮流の中で、日本が重要な位置を占めるために必要な戦略目標である。2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、また、半導体材料、製造装置メーカーの更なる国際競争力強化を後押しするため、低消費電力化（グリーン）のみならず低資源化、環境負荷低減化（サステナブル）の視点を取り入れながら半導体プロセス技術の高度化を進める新しい指標（Green Manufacturing Metrics :GMM）を世界に先駆け構築する。

上記指標に適う新規の製造技術を開発する。それは、戦略目標1、2の適用対象でもある。

上記戦略目標1～3を支える拠点整備と人材育成に関しては、以下に掲げる方向性で推進する。

拠点整備戦略

- i) 新材料デバイス開発機能と集積回路設計・試作機能が共存できる研究開発拠点の体制づくり
- ii) アイデアから PoC（=Proof of Concept）設計・試作まで、一貫性がある（開発の連続性が担保される）拠点体制の構築
- iii) 拠点を中核とした産学官連携による研究開発体制と人材育成システムの構築

人材育成戦略

- i) エレクトロニクス関連業界のイメージ向上
 - 夢のあるフラッグシップ・プロジェクトの設定
 - エレクトロニクス関連業界でキャリアを築くことの魅力のアピール
- ii) 人材育成ニーズに対応したプログラムの整備
 - 設計－製造－評価を一気通貫で体験できるプログラムの整備
 - サービスやアプリを起点としたハードウェア開発を構想できる人材の育成
 - どこでもいつでも受講できるウェブ教材の整備
- iii) 大学等における研究開発力の強化
 - 産業界からの研究開発ニーズ提示と資金提供
 - 博士課程にフォーカスした人材育成
- iv) 人材流動、中堅・シニアの活躍を支援する仕組み

戦略策定体制

本戦略を策定するにあたり、産総研の研究者をメンバーとする戦略チームを組織し、さらに、図に示す技術マップ（縦軸：コンピューティング階層、横軸：技術階層）に基づいて、五つのワーキンググループ（WG）を設置した。

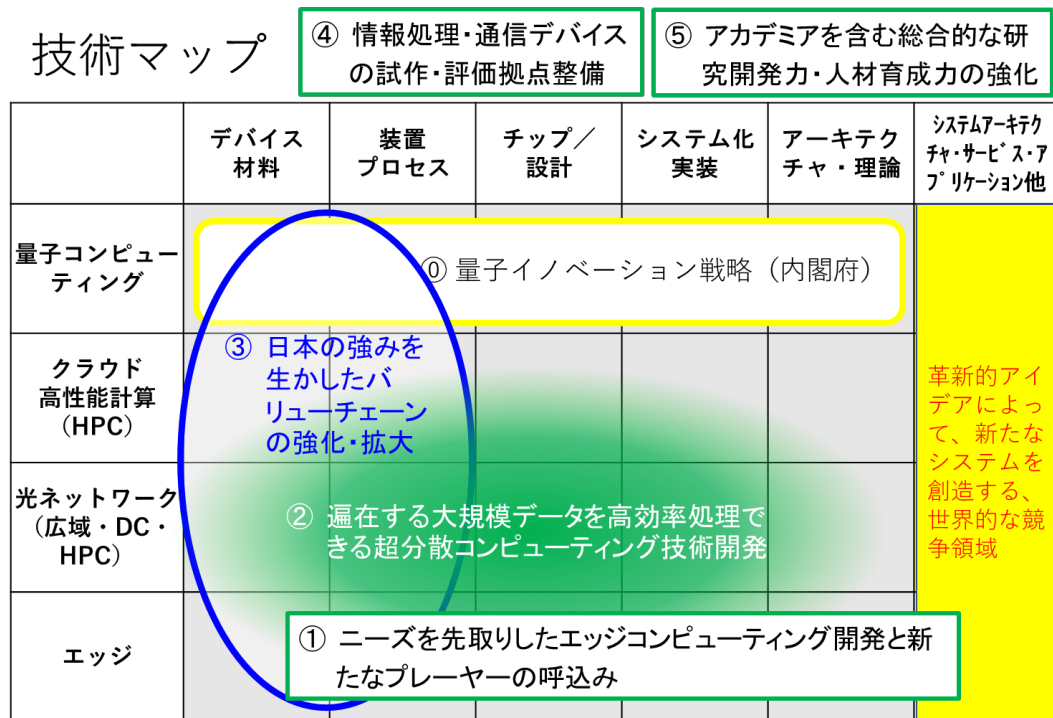


図2 コンピューティング技術マップと次世代コンピューティング基盤戦略策定に向けた視点

各WGの戦略策定方針は以下の通りである。

WG①「ニーズを先取りしたエッジコンピューティング開発と新たなプレーヤーの呼び込み」

本戦略では、先述の通り、我が国の優位性を生かすことができる実世界エッジコンピューティングを、次世代コンピューティングの中心とする。実世界エッジコンピューティングの戦略策定にあたっては、社会課題解決およびGDP向上に資する将来ニーズを先取りし、その課題解決を可能とするために必要となる基盤技術（主としてハードウェア）に関する戦略を策定する。併せて、新たなプレーヤーを呼び込むための戦略についても検討を深める。

WG②「偏在する大規模データを高効率処理できる超分散コンピューティング技術開発」

また、従来より国際競争力も高く、次世代情報基盤としてコンピューティングとネットワークが融合する超分散コンピューティング実現・普及で鍵となる、格段に低消費電力、高速・低遅延、高信頼な光ネットワークについて、デバイス、実装、および、仮想化技術の観点から、戦略の検討を進める。

WG③「日本の強みを生かしたバリューチェーンの強化・拡大」

さらに、世界的に産業競争力が高い材料や半導体製造装置が今後も高い状態を維持、あるいはますます高くなることを目指して、次世代コンピューティング用ハードウェア実現のため開発に注力すべきデバイス、プロセス、材料を明確化していく。また、デバイス製造プロセスそのもののグリーン化に向けた戦略についても策定していく。

WG④「情報処理・通信デバイスの試作・評価拠点整備」

最後に、次世代コンピューティング用ハードウェアを実現する上で必要となる新しいデバイスやセンサなどの PoC を試作・評価可能な拠点のあるべき姿、その整備の手順についても、本戦略内で検討を進める。

WG⑤「アカデミアを含む総合的な研究開発力・人材育成力の強化」

また、次世代コンピューティングを実現、社会実装する上で最も重要となる、研究開発力や人材育成力についても、現状分析に基づき、将来の方向性を策定する。

本戦略では、大きく三つの戦略目標、ならびに拠点整備および人材育成を進める上での方向性を提言したが、上記各 WG の役割分担を、以下の図に示す。



図 3 戦略目標の構成および WG 役割分担

次世代コンピューティング基盤戦略チーム

チーム長： 森 雅彦 エレクトロニクス・製造領域 [領域長補佐]

戦略作成班 班長： 昌原 明植 デバイス技術研究部門 [研究部門長]

WG1 リーダー： 内山 邦男 AI chip Design Laboratory [ラボ長]

WG2 リーダー： 並木 周 プラットフォームフォトンクス研究センター [研究センター長]

WG3 リーダー： 中野 隆志 エレクトロニクス・製造領域 [副領域長]

WG4 リーダー： 安藤 淳 T I A 推進センター 戦略連携ユニット [ユニット長]

WG5 リーダー： 安田 哲二 エレクトロニクス・製造領域 [領域長]

事務局長： 来見田 淳也 エレクトロニクス・製造領域連携推進室 [連携主幹]

メンバー： 秋田 一平、天野 建、遠藤 和彦、藤巻 真、更田 裕司、林 喜宏、平間 宏忠、
堀 洋平、五十嵐 泰史、石井 紀代、河島 整、松川 貴、松木 武雄、三坂 孝志、
乗木 暁博、荻野 拓、岡田 直也、大内 真一、齊藤 雄太、渋谷 圭介、新谷 俊通、
鈴木 健太、高木 秀樹、竹井 裕介、内田 紀行、植田 暁子、薬師寺 啓、
湯浅 新治

アドバイザー： 井上 弘基、木村 康則、岡村 淳一、杉野 貴美廣