



令和元年度  
研究評価委員会  
(エレクトロニクス・製造領域)  
評価報告書

令和2年6月



## 評価報告書 目次

1. 評価委員会議事次第	1
2. 評価委員	3
3. 評価資料（委員会開催時 <sup>1</sup> ）	5
4. 説明資料（委員会開催時 <sup>1</sup> ）	41
5. 主な指標の情報（委員会開催時 <sup>1</sup> ）	107
6. 評価委員コメント及び評点	109

---

<sup>1</sup> 令和2年3月27日



**国立研究開発法人 産業技術総合研究所**  
**令和元年度 研究評価委員会（エレクトロニクス・製造領域）**  
**議事次第**

日時：令和2年3月27日（金） 10:00-17:10

場所：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 つくば中央第二事業所 2-1D棟 8階大会議室(814室)

開会挨拶	理事・評価部長	加藤 一実	10:00-10:05
委員等紹介・資料確認	評価部研究評価室	山路 俊樹	10:05-10:10

領域による説明（質疑含む）（議事進行：前川 禎通 評価委員長）

1. 領域の概要と研究開発マネジメント 10:10-10:55  
（説明20分、質疑・評価記入25分） 理事／エレクトロニクス・製造領域長 金丸 正剛

現場見学会（60分） 10:55-11:55

- ①「絶縁基板上グラフェン低温直接合成技術を用いた超高効率グラフェン平面電子源の開発と水素製造応用」  
ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員 村上 勝久
- ②「光パズネットワークの完全自動化に向けた、サイバーフォトリックプラットフォームコンソーシアム活動紹介」  
電子光技術研究部門 副研究部門長 並木 周
- ③「フレキシブル電子デバイスの研究」  
センシングシステム研究センター長 鎌田 俊英

昼食・休憩（45分） 11:55-12:40

2. 「橋渡し」のための研究開発  
(1) 第4期中長期目標期間の実績成果のまとめ 12:40-13:20  
（説明20分、質疑・評価記入20分）  
エレクトロニクス・製造領域 研究戦略部長 安田 哲二

(2) 「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究） 13:20-14:16  
（説明26分、質疑・評価記入30分）

- ①「絶縁基板上グラフェン直接合成技術を用いた超高効率グラフェン平面電子源の開発」  
ナノエレクトロニクス研究部門長 中野 隆志
- ②「スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック・コンピューティングの基盤技術開発」  
スピントロニクス研究センター長 湯浅 新治

(3) 「橋渡し」研究前期における研究開発 14:16-15:12  
（説明26分、質疑・評価記入30分）

- ①「センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発」  
製造技術研究部門 首席研究員 秋山 守人
- ②「センサ・センシング技術の開発」  
センシングシステム研究センター長 鎌田 俊英

(4) 「橋渡し」研究後期における研究開発 15:12-15:40  
（説明13分、質疑・評価記入15分）

- ①「MPWによるシリコンフォトリックデバイス R&D ファブ機能提供」  
電子光技術研究部門長 森 雅彦

休憩（15分）		15:40-15:55
総合討論・評価委員討議・講評	（議事進行：前川 禎通 評価委員長）	
総合討論（領域等への質疑を含む）	（25分）	15:55-16:20
評価委員討議（領域等役職員 退席）	（20分）	16:20-16:40
評価記入（領域等役職員 退席）	（20分）	16:40-17:00
・第4期中長期目標期間の実績・成果		
・令和元年度の実績・成果		
委員長講評（領域等役職員 着席）	（5分）	17:00-17:05
閉会挨拶	理事・評価部長 加藤 一実	17:05-17:10

## 評価委員

エレクトロニクス・製造領域

委員長	氏名	所属	役職名
○	前川 禎通	理化学研究所 創発物性科学研究センター	特別顧問
	大柴 小枝子	京都工芸繊維大学 電気電子工学系	教授
	小浦 節子	千葉工業大学 工学部 応用化学科	教授
	安井 公治	三菱電機株式会社 FAシステム事業本部 産業メカトロニクス事業部	技師長
	渡辺 美代子	科学技術振興機構	副理事

所属・役職名は委員会開催時



# 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

## 令和元年度 研究評価委員会（エレクトロニクス・製造領域）

### 評価資料

#### 1. 領域の概要と研究開発マネジメント

##### (1) 領域全体の概要・戦略

###### 【背景・実績・成果】

第5期科学技術基本計画に基づいた「Society5.0」の実現に向けて、我が国が「超スマート社会」を世界に先駆けて実現するための研究開発が求められている。エレクトロニクス・製造領域は、第4期中長期目標期間（以降、「第4期」）において、あらゆるモノがインターネットにつながるIoT（Internet of Things）時代に必要とされるサイバー（仮想：Cyber）空間とフィジカル（現実：Physical）空間を高度に融合させたCPS（Cyber Physical System）の基盤を創出する研究開発に取り組んだ。すなわち、(1) 膨大なデータ処理と通信に対応した高性能で省エネルギーなハードウェア、(2) あらゆるモノをサイバー空間につなげるためのセンシングシステム、及び(3) CPSを活用して高生産性で高付加価値なものづくりを実現するスマート製造に関する研究を「目的基礎」、「橋渡し前期」、「橋渡し後期」のフェーズで展開した。

当領域では、研究資金の割合を「運営費交付金：公的外部資金：民間資金=1:1:1」のバランスを意識し、公的資金については国の政策的予算や科研費等の競争的資金を獲得し、民間資金については技術コンサルティングや研究シーズを活用した共同研究等を主とした橋渡し研究を展開することにより研究予算を獲得した。運営費交付金は、研究現場が外部資金を獲得するモチベーションを高めるように外部資金獲得額に応じたインセンティブ予算として配分するとともに、研究現場からのボトムアップ提案による基礎研究テーマに対しても予算を配分し、両者のベストミックスを心掛けた。PDCA（Plan-Do-Check-Action）のための評価指標である外部資金獲得と論文執筆の実績を研究ユニットに展開・共有し、現場が強み弱みを自覚した上で基礎と応用の両方でパフォーマンスを最大化するマネジメントを実践した。第4期開始時点と比較して、当領域が係わるエレクトロニクス産業分野の状況は、アジア勢など海外企業との競争が熾烈さを増し、世界市場における日本企業のシェアは低下するとともに、製品のコモディティ化により日本企業の競争力が低下している。このような状況の中、民間資金獲得額の目標達成に向けて、以下のような取組を行った。

民間資金獲得額の目標達成に向けては、現場のリソースが有限であることを考慮し、件数を増やすよりも規模の大型化を図った。具体的には、必要に応じてイノベーションコーディネータ（IC）がサポートを行うとともに、平成30年度後期から、月毎に計画中及び交渉中の連携案件の進捗状況を調査することで現場の意識を高め、第4期の最終年度である令和元年度の目標達成に向けてさらなる獲得額の増加を図った。また、領域戦略部に連携主幹を平成30年度に3名、令和元年度に更に2名を増員し、組織としての橋渡し機能の強化を図った。その結果、民間資金の獲得額は、第4期に入り着実に増加し、平成27年度の民間資金獲得額は6.5億円で所内交付金の3分の1程度だったところを、平成30年度には15.4億円（平成27年度比約237%）となり、令和元年度は20.3億円（12月末現在）に達し、所内交付金と同程度になった。また、当領域の研究者が有する専門知識や技術的知見を活用した技術コンサルティングや、産総研が組織として保有する知的財産のライセンス（実施契約）を通じて、我が国の産業競争力を強化する活動を推進した。技術コンサルティングは、技術相談や展示会等をきっかけに企業から舞い込む技術課題に対して、知的財産が発生しないものについて実施しており、平成27年度の368万円から右肩

上がりで増加し、平成 28 年度は 2,534 万円と約 7 倍、平成 29 年度はさらにほぼ倍増の 4,710 万円を記録した。平成 30 年度は平成 29 年度と同程度の 4,867 万円であったが、令和元年度は 9,162 万円（12 月末現在）と大幅に増加した。

論文発表数及び合計被引用数の目標達成に向けた当領域の取組として、平成 30 年度には毎月のユニット長連絡会にて、論文発表促進に関する各研究ユニットの問題意識やマネジメント例を互いに共有して議論することを通じて、論文発表の量と質の向上策をより有効なものとした。その結果、平成 30 年度は、発表論文数が第 4 期中で最高値となる 400 報（平成 27 年度比で 116%）となり、目標値 400 報を達成した。令和元年度は 12 月末時点で 252 報であるが、昨年度の同時期よりも 15%増となっている。また、顕著な成果を挙げた研究成果が採択される高インパクトファクター（IF>10）論文誌への掲載は、平成 30 年度が 16 報（IF 未確定の Nature 姉妹誌 Nature Electronics 掲載 1 件を含む）、令和元年度も 12 月末時点で 10 報である。合計被引用数については、平成 30 年度は目標値の 6800 回を若干下回る 6528 回であったが、令和元年度は 7028 回（12 月末現在）となり、目標を達成した。

知財の量的状況については、研究者自らの活動に加えて IC 等の貢献により、実施契約等件数が平成 27 年度の 167 件（目標値 173 件）から着実に増加し、平成 30 年度は目標値の 180 件を超える 222 件となり、令和元年度も目標値を上回る 218 件（12 月末現在）である。技術移転収入については、令和元年度は 3 億 6532 万円（12 月末現在）と、第 4 期中で最も多い金額となり、第 4 期中の平均は約 1 億 5,536 万円/年（12 月末時点）である。特許出願については出願内容を精査するとともに権利化された知財についても「IP（Intellectual Property）実用化加速プロジェクト」を領域内で実施し、展示会出展可能なレベルの試作品までの具現化をサポートして、当該技術のポテンシャルユーザへのアピール効果を高めた。また、多様な専門性を持つ個々の研究者らで研究ユニットの壁を越えた研究チームを編成することにより、連携研究の促進に取り組んだ。具体的には、領域間連携には企画本部の「戦略予算」を活用するとともに、領域独自の「フュージビリティスタディ（FS）連携制度」により領域内外の連携を加速した。また、平成 30 年度はとくに二次電池について、所内で進行中の研究テーマを集めたシンポジウムを当領域がシンポジウム事務局の主力となって開催することで、領域間の連携を促進するとともに、対外的にも産総研全体としての研究の取組をアピールした。さらに、令和元年度は 4 月にセンシングシステム研究センターが設立されたのを機に、全領域とイノベーション推進本部の IC、連携主幹、企画主幹、及びセンシングシステム研究センターの研究チーム長等をメンバーとするセンシング技術連絡会の活動を開始し、①産総研が有するセンサ・センシング技術のデータベース構築、②企業等からの問い合わせに対するワンストップサービス提供、③国家プロジェクトや業界動向等に関する情報の所内共有などに取り組んだ。

組織内外の若手雇用・育成については、卓越研究員事業を活用して優秀な若手研究員を平成 28 年度から平成 30 年度にかけて 5 名を採用するとともに、リサーチアシスタント（RA）制度を活用し、平成 27 年度に 13 名、平成 28 年度に 23 名、平成 29 年度に 33 名、平成 30 年度に 45 名、令和元年度に 47 名の大学院生を RA として雇用し、最先端の研究開発を経験させることにより、基礎研究だけでなく橋渡しも担える人材を育成した。シニア世代の能力・経験の最大活用については、研究やマネジメントの経験を豊富に有する当領域のシニア世代の研究者 9 名（平成 27 年度から令和元年度までののべ人数）が TIA 推進センターに異動し、同センターが所掌する共用施設の運営や他機関との連携活動の推進等に貢献した。また、上記のように研究戦略部の連携主幹を平成 30 年度に 3 名、令和元年度に 2 名増員して橋渡し機能を強化したことも、シニア世代活用の取組の一つである。

第 4 期の特筆すべき研究実績に関して以下に列記する。

【「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究）の特筆すべき成果】

・量子コンピュータに関して、シリコン量子コンピュータの基本素子であるスピン量子ビットを産総研のトンネル電界効果トランジスタ（Tunnel Field-Effect Transistor: TFET）技術により開発し、その動作温度を従来技術の 100 倍向上させた。また超伝導量子アニーリングチップの大規模化向けアーキテクチャを開発し、アニーリングの基本動作を実証した。

・4個の微小スピントルク発信素子 (Spin-torque oscillator: STO) を用いたニューロモルフィック回路を構築し、7種の母音の音声識別に成功し、Nature 誌に論文を発表した。また、フィードバック回路の遅延効果を利用することで過去の入力情報を記憶する機能が向上し、さらに、異なる遅延時間を有するフィードバック回路を仮想的に用いることで、実用化に向けた指標となる短期記憶容量 10 以上を実現した。

・電圧書込み型 MRAM (Magnetic Random Access Memory) 高度化のため、Ir 希薄ドーパ Fe 電極を用いた磁気トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction: MTJ) により、世界最高値の「電圧異方性変化率」と強い垂直磁気異方性の両立を達成、さらに電圧パルス波形最適化により、世界最小の  $10^{-6}$  (エラー訂正なし) 以下の書込みエラー率を、量産用スパッタ装置で成膜した素子で達成した。また、実用的な多結晶 MTJ 素子を用いてエラー訂正の導入を検討し、1 回のエラー訂正プロセスにより  $10^{-12}$  台のエラー率を確認した。

・複合アニオン化などを導入した新しい高温超伝導材料の合成手法を開発し、約 20 年ぶりに 100 K を越える高い  $T_c$  を有する新銅酸化物系物質群を発見した。

・プラズマ励起ラジカルの強制対流により、高品質単層グラフェンの低温成長に成功した (Nano Letters [IF=12.1] 掲載)。また、グラフェン (G) を電子透過電極に用いた平面型電子源を開発し、現在最もエネルギー単色性の高い電子源であるタングステン冷陰極 (0.3 eV) を凌駕するエネルギー単色性 (0.18 eV) 及び、更に 10 倍以上の放出電流密度を達成した。

#### 【「橋渡し」研究前期における研究開発の特筆すべき成果】

・ポストムーア時代の新たな情報通信インフラとして、超低消費電力・大容量・超低遅延などを特長とするダイナミック光パズネットワークを開発した。要素技術として、従来技術の電気スイッチに代替する光スイッチの自動制御体系を構築し、都内商用実フィールドで運用した。さらに、企業から「世界最高峰」と評された産総研シリコンフォトニクス技術により、実用的なシリコンフォトニクス光スイッチの開発に成功した。

・応力発光検出による航空機用炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) 実構造部材の接着強度むらを可視化し、世界で初めて非接着領域 (ウイークボンド) の検出に成功した。

・道路インフラ状態モニタリング用センサシステム構築にむけ、従来技術の 1/100 の低消費電力でセンシング可能な高密度印刷歪アレイと自立電源無線センサシステムを開発した。ひび割れの 8 か月間監視やストップホール周囲の亀裂進展モニタリングを実運用中橋梁で実施した。

・高安全・高信頼性の酸化物型全固体電池の開発において、固体電解質の大型単結晶の開発により、実用的な電流密度を達成、電極形成に AD 法を活用し、理論容量の 95% の容量を達成した。

・ナノ表面改質層を介した常温接合法により、単結晶ダイヤモンド基板と GaN の直接接合を実現し、この技術により、三菱電機株式会社との共同研究において、単結晶ダイヤモンドを放熱基板に用いるマルチセル構造の GaN-HEMT (高電子移動度トランジスタ) を世界で初めて開発し、出力密度と電力効率の大幅向上を実現した。

・フレキシブル大面積印刷デバイス製造技術を高度化し、サブマイクロメートルに至る配線形成分解能、フレキシブル基板上への 150 °C 以下の低温・低損傷でのデバイス実装、伸縮性・耐久性に優れた電極の開発などを達成した。これら基盤技術により、安全安心見守りセンサ、ロボット等に装着し、接触感を検出できるタッチセンサスキンなどを開発した。さらにネットワーク MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) など他技術融合を図り、ウェアラブル心電計測デバイスなど、印刷デバイスの用途を拡大した。

・第一原理計算を用いた窒化物圧電材料の探索手法を開発し、これを用いて新規圧電材料の薄膜を作製し、従来の ScAlN と同等の圧電性能を得ることに成功した。

#### 【「橋渡し」研究後期における研究開発の特筆すべき成果】

・半導体デバイスの多品種少量生産システム・ミニマルファブを具現化した。クリーンルーム不要の局所クリーン化搬送システムをコア技術に、1/2 インチウエハと幅 30cm 製造装置を用い、CMOS NAND (Complementary Metal Oxide Semiconductor Not AND) ゲートや MEMS センサを開発

した。29社で計51機種が商用販売された。

・多品種変量生産に対応できるオンデマンド積層造形技術として、世界最速10万cc/hで造形でき、従来技術では不可能であった中空薄肉構造も鋳造可能な砂型3Dプリンタを開発、技術移転した企業が市販化した。

・産総研塗工技術のエアロゾルデポジション法(Aerosol Deposition Method: AD法)により、色素増感型太陽電池などを実用化し、橋渡しを促進した。プラズマ援用ハイブリッドAD法を開発、高速成膜(従来の10倍以上)と3次元部材への適用を実現した。光有機金属分解法(Photo-Metal Organic Decomposition Method: 光MOD法)により、新規高輝度蓄光膜コーティングの量産化技術を確立した。

・抗体で磁気ビーズと標識ビーズを修飾することで、様々なウイルスを、外部磁場による動きとして光学的に超高感度検出できる「外力支援近接場照明バイオセンサ」を開発し、夾雑物を含む都市下水二次処理水100μl中の僅か40個のノロウイルス様粒子の検出に成功した。

・民間企業や大学等が簡便に産総研設備を使って光デバイスの試作が行えるシリコンフォトリソの研究開発用試作体制を整備した。これにより、産総研コンソーシアムであるシリコンフォトリソコンソーシアムの参加企業や大学をユーザーとした一回目の相乗り(マルチプロジェクトウエハ:MPW)試作を実施し、構築した研究開発用試作体制が良好に機能することを確認した。

#### ●民間資金獲得額

目標値:22.1億円(令和元年度)

- ・平成27年度:6.5億円
- ・平成28年度:9.9億円
- ・平成29年度:11.9億円
- ・平成30年度:15.4億円
- ・令和元年度:20.3億円(12月末現在)

#### ●公的外部資金の直接経費(再委託費を控除)

- ・平成27年度:17.5億円
- ・平成28年度:53.7億円
- ・平成29年度:35.5億円
- ・平成30年度:19.4億円
- ・令和元年度:18.9億円(12月末現在)

#### ●中堅・中小企業の研究契約件数の全体の比率

- ・平成27年度:29.9%
- ・平成28年度:28.6%
- ・平成29年度:29.7%
- ・平成30年度:33.3%
- ・令和元年度:32.6%(12月末現在)

#### ●大企業の研究契約件数

- ・平成27年度:117件
- ・平成28年度:137件
- ・平成29年度:147件
- ・平成30年度:142件
- ・令和元年度:126件(12月末現在)

#### ●中堅・中小企業の研究契約件数

- ・平成27年度:50件
- ・平成28年度:55件

- ・平成 29 年度：62 件
- ・平成 30 年度：71 件
- ・令和元年度：61 件（12 月末現在）

●知的財産の実施契約等件数

目標値：200 件（令和元年度）

- ・平成 27 年度：167 件
- ・平成 28 年度：161 件
- ・平成 29 年度：176 件
- ・平成 30 年度：222 件
- ・令和元年度：221 件（12 月末現在）

●論文発表数

目標値：400 報（令和元年度）

- ・平成 27 年度：345 報
- ・平成 28 年度：313 報
- ・平成 29 年度：333 報
- ・平成 30 年度：400 報
- ・令和元年度：252 報（12 月末現在）

●論文の合計被引用数

目標値：6,800 回（令和元年度）

- ・平成 27 年度：6,699 回
- ・平成 28 年度：6,780 回
- ・平成 29 年度：6,676 回
- ・平成 30 年度：6,528 回
- ・令和元年度：7,028 回（12 月末現在）

●その他

「国際標準化活動の取組状況」

・経済産業省委託事業「スマートマニュファクチャリングに関する国際標準化・普及基盤構築」を受託し、生産管理・機器制御システムと生産機器をつなぎ、情報を共有する場としての「プラットフォーム」を活用した連携方法についての国際標準化活動を推進した。

・スマートマニュファクチャリング国際標準化専門委員会に参加し、ロボット革命イニシアティブ協議会への委員参加、200 社余りの会員企業を持つ一般社団法人インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ（IVI）との連携を強固に継続した。

・ISO（International Organization for Standardization）、IEC（International Electrotechnical Commission）などに議長、プロジェクトリーダー、エキスパートとして平成 29 年度はのべ 30 名、平成 30 年度はのべ 39 名、令和元年度はのべ 49 人を派遣した。

第 4 期中長期目標期間の累計として、1,000 万円以上の橋渡し研究を企業と実施した件数は 84 件（うち令和元年度年（令和元年 4 月 1 日から令和元年 12 月 31 日まで）実施の件数：17 件）であり、これらの事業化の実績として、知的財産の譲渡契約及び実施契約は 4 件で令和元年度は 2 件、製品化は 7 件で、その内令和元年度は 2 件（12 月末現在）である。

【成果の意義・アウトカム】

当領域では、IoT 時代を支える CPS 基盤としての情報処理ハードウェア技術及びセンシングシステムの研究開発と、CPS を活用した新たなサービスの代表例となるスマートものづくり技術の具現化の 2 つのテーマを第 4 期中長期目標期間の戦略課題と位置づけた。これらの先進的な CPS 基盤技術及び CPS 活用サービスに関する研究開発成果は、あらゆるモノがインターネットにつな

がる IoT、さらには全てがつながる IoE (Internet of Everything) を通じてイノベーション創出や競争力強化をもたらし、「Society5.0」の実現に資するものである。

当領域を構成する3つの研究部門、4つの研究センターの計7つの研究ユニットに所属する300名余りの様々な専門性を持つ研究者が、所内外との連携や共同研究によって成果を最大化に取り組んだ結果、異分野融合によるシナジー効果をもたらし、目的基礎から橋渡しまでの先進的な研究を効率的に推進できた。特筆すべき成果として、目的基礎では、電圧書き込み型 MRAM の実現に向けて世界最高値の「電圧異方性変化率」と強い垂直磁気異方性の両立をできる Ir 希薄ドーピング Fe 電極を用いた MTJ を開発し、さらに電圧パルス波形の最適化により世界最小の  $10^{-6}$  以下の書き込みエラー率を、量産用スパッタ装置で成膜した素子で達成した。この成果は超低消費電力の IoT 用メモリの開発につながるものであり、これにより IoT 機器の省電力化とバッテリー寿命の向上が期待される。発表論文数は、平成 28 年度以降増加しており、平成 30 年度は目標値の 400 報に達し、平成 28 年度比で 128% となった。令和元年度は 12 月末現在で 252 報であるが、この値は前年度同時期に対して 15% 増である。顕著な成果を挙げた研究結果が掲載される IF 値が 10 を超える論文誌に掲載された論文数も、平成 28 年度は 8 報、平成 29 年度は 11 報、平成 30 年度は 16 報と増加しており、令和元年度も 12 月末現在で 10 報が掲載されている。発表論文誌の平均 IF 値も、平成 28 年度は 2.33、平成 29 年度は 2.80、平成 30 年度は 3.70、令和元年度は 4.13 (12 月末現在) と大幅増加するなど、質・量ともに向上傾向が顕著である。橋渡し前期では、ポストムーア時代の新たな情報通信インフラとして、超低消費電力・大容量・超低遅延などを特長とするダイナミック光パズネットワークを開発した。さらに、都内商用実フィールドで運用し、4K 非圧縮映像による「テレセッション」の実運用に世界で初めて成功した。また、橋渡し後期では、多品種変量生産に対応できるオンデマンド積層造形技術として、従来技術では不可能であった中空薄肉構造も鋳造可能な砂型 3D プリントを開発し、この技術を移転した企業が市販化した。クリーンルーム不要の局所クリーン化搬送システムをコア技術としたミニマルファブ装置、計 51 機種を技術移転先企業 29 社から商用販売した。また、産総研開発コーティング技術の AD 法により、色素増感型太陽電池などを実用化し、橋渡しを促進した。このように目的基礎から橋渡し研究後期まですべてのステージで世界的に評価される顕著な成果を得ている。これらの先進的なデバイス・材料・製造技術の開発は、当領域の戦略課題で掲げる超スマート社会の実現への着実な貢献が期待される。

領域のマネジメントに基づき実施した業務に関しては、次のような顕著な成果を挙げた。民間への橋渡し加速のために実施した技術コンサルティングは、平成 27 年度 368 万円から着実に増加し、平成 28 年度は 2,534 万円と約 7 倍、平成 29 年度はさらにほぼ倍増の 4,710 万円を記録した。平成 30 年度は平成 29 年度と同程度の 4,867 万円であったが、令和元年度は 9,162 万円 (12 月末現在) と大幅に増加した。大学や他の研究機関との連携については、TIA 共用施設である世界トップレベルの超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (CRAVITY)、及び MEMS 研究開発拠点の運営に大いに貢献し、顕著な成果を得た。CRAVITY は、平成 29 年度の外部機関の利用課題数、利用料収入額がそれぞれ平成 27 年度比で 138%、260% と大幅に増加し、平成 30 年度と令和元年度 (12 月末現在) も利用課題数が平成 29 年度を上回った。また、国内の公的研究機関だけでなく、企業や海外機関の利用も増加しており、幅広いユーザの開拓を推進し、先端共用施設として活性化することは国内企業、研究機関等の研究開発を大いに加速するものと期待される。MEMS 研究開発拠点も利用課題数、利用料収入額ともに順調に増加しており、平成 29 年度は平成 27 年度比でそれぞれ 186%、190% と大幅に増加した。平成 30 年度及び令和元年度 (12 月末現在) 共に、平成 29 年度の利用課題数を上回った。大学連携については、平成 30 年度に、半導体設計の教育において実績のある東京大学大規模集積システム設計教育センター (VDEC) (現：東京大学工学系研究科附属システムデザイン研究センター) と連携する「AI チップ設計ラボ」を設置し、新規人工知能チップの開発と社会実装の取組を開始した。令和元年度は、この AI チップ設計ラボを発展させて「産総研・東大 AI チップデザインオープンイノベーションラボラトリ (Open Innovation Laboratory: OIL) : AIDL」を設立し、企業と連携した AI チップ設計を推進した。

研究人材の拡充、流動化、育成に関して、企業との連携研究室 (冠ラボ) 計 4 件が平成 29 年度から令和元年度の間に活動を開始し、高度な研究スキルを有する企業研究者が産総研へ出向す

る形で産総研研究者と緊密な連携を行い、橋渡しへ向け効果的、効率的な共同研究を行った。産総研イノベーションスクール事業及びリサーチアシスタント制度では、平成 27 年度の 17 名から着実に増加し、平成 28 年度は 33 名、平成 29 年度は 40 名、平成 30 年度は 61 名、令和元年度は目標値の 40 名を上回る 58 名（12 月末現在）を採用し、人材育成を強力に推進した。女性職員採用については、平成 30 年度までに 10 名を採用し、令和元年度も 2 名を採用した。また、外国人研究者は平成 30 年度までに 9 名を採用し、令和元年度も 3 名を採用したことは、当領域の積極的なダイバーシティ・マネジメントの成果である。

#### 【課題と対応】

次世代 IoT/CPS 時代に向けての課題は、IoT、ビッグデータ、AI (Artificial Intelligence) 等に関連する基盤技術の新規創出と高度化に取り組みつつ、サイバー空間とフィジカル空間を融合する技術開発を進め、その成果を社会実装していくことである。研究成果の創出を通じて新たな価値の創造に貢献していくために、産総研が目指す未来像の発信力を高めるとともに、産業界との密接な連携を通じて信頼関係を強化していくことも求められる。

第 5 期中長期目標期間は、これらの課題の対応策として、まず各技術課題についてサイバーフィジカルシステムの中での位置付けと開発フェーズを明確化した上で、研究体制や研究リソース投入の重点化をマネジメントしていく。サイバー空間とフィジカル空間の融合に関しては、平成 30 年度に設置された人工知能に関するグローバル研究開発拠点 (Global Open Innovation Laboratory; GOIL) の模擬環境を活用して、「つながる工場」等に関してユーザや関連企業を巻き込んだ実証実験を実施する。そのために、令和 2 年度には情報・人間工学領域と当領域とが中心となって新たな研究センターを設立し、生産性向上に資する研究開発を重点的に実施し、その成果を積極的に発信していく予定である。

産業界との信頼関係の強化については、技術コンサルティング制度や共同研究などの個々の技術課題レベルの連携に加えて、組織同士で将来像や目指すべき方向を共有した包括的な大型連携の推進するとともに、各種コンソーシアムの運営等を通じて産学官の多数のプレーヤーを巻き込んだエコシステムを構築していく。

### (2) 技術的ポテンシャルを活かした指導助言等の実施

#### 【背景・実績・成果】

当領域の研究者が有する専門知識や技術的知見を活用した技術コンサルティングや、産総研が組織として保有する知的財産の実施契約を通じて、我が国産業の競争力を強化する活動を推進した。技術コンサルティングは、技術相談や展示会等をきっかけに企業から舞い込む技術課題に対して、知的財産が発生しないものについて実施しており、その収入は平成 27 年度 368 万円から右肩上がり増加した。平成 28 年度は 2,534 万円と約 7 倍、平成 29 年度はさらにほぼ倍増の 4,710 万円を記録した。平成 30 年度は平成 29 年度と同程度の 4,867 万円であったが、令和元年度は 9,162 万円（12 月末現在）と大幅に増加した。

知財等の技術移転については、研究者自らの活動に加えて IC 等の貢献により、第 4 期中は平均約 1 億 5,536 万円/年の技術移転収入を得た。平成 28 年度は、スカンジウムを含有する窒化アルミニウム (ScAlN) 圧電材料の実施契約等による技術移転収入が加わり、例年の 3 倍近い結果であったが、令和元年度は実施契約等による収入が増えたことにより、平成 28 年度を大きく上回る 3 億 6,532 万円（12 月末現在）となった。

つくば地域を中心に他機関と共同で運営するオープンイノベーション拠点 TIA においては、組織内外のユーザが利用する共用施設運営等について、当領域から TIA 推進センターへ異動した複数の研究者が貢献した。CRAVITY や MEMS 研究開発拠点では、現場の研究者もその経験や技術を活かして装置の維持管理や人材育成の面から協力した。

グローバル化により国際的な技術競争が激しくなり、その優位関係を左右する国際標準の重要性が増している。国内及び国際標準化活動に対しても、当領域から多くの人材を派遣し、専門的

知見を活かした規格文書の提案や策定に貢献した。一例としては、IoT時代のものづくり「スマートマニュファクチャリング」に関しては、経済産業省の委託事業を主体的に実施した。この活動を含め、平成30年度はISO/TC(International Standard Organization/ Technical Committee)及びIEC/TC(International Electrotechnical Commission/ Technical Committee)に議長、プロジェクトリーダー、エキスパートとしてのべ39名、令和元年度は49名を派遣し、国内の関係団体と連携して規格の審議や提案などを行うなど、多くのISOやIECの技術委員会において国際標準化活動を展開した。これらの貢献が認められ、平成29年度、及び平成30年度には当領域のICがIEC1906賞を受賞した。

●技術コンサルティング収入

- ・平成27年度：368万円
- ・平成28年度：2,534万円
- ・平成29年度：4,710万円
- ・平成30年度：4,867万円
- ・令和元年度：9,162万円（12月末現在）

●技術移転収入

- ・平成27年度：6,530万円
- ・平成28年度：1億5,747万円
- ・平成29年度：6,669万円
- ・平成30年度：1億2,200万円
- ・令和元年度：3億6,532万円（12月末現在）

●その他

- ・国際標準化活動の取組として、経済産業省委託事業「スマートマニュファクチャリングに関する国際標準化・普及基盤構築」を受託し、生産管理レベル、機器制御システム及び生産機器のレイヤ（層）をつなぎ、生産に関する情報を共有する場としての「IoTプラットフォーム」の活用とレイヤ間の連携方法についての国際標準化活動を推進した。
- ・スマートマニュファクチャリングに関する国際標準化専門委員会の国内審議団体の運営に主体的に協力し、ロボット革命イニシアティブ協議会への委員として、また200社余りの会員企業を持つ一般社団法人インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ（IVI）と包括協定により関連団体との強固な連携関係を継続した。
- ・平成28年度末に設立され産総研技術移転ベンチャーとして認定された一般社団法人ミニマルファブ推進機構では、平成29年度より、技術開発、標準化推進、規格認証、国内外の関連機関との交流、普及啓発等の活動を開始し、平成30年度も同活動を継続して実施した。
- ・ミニマルファブの展開として、平成30年度に半導体デバイスの試作と生産のための実用プラットフォームを臨海副都心センターに開設し、また地域向け半導体デバイス実装拠点を九州センターに展開した。つくばセンターを合わせた3拠点を活用し、設計情報やプロセスレシピをユーザに提供して実用デバイスを試作する体制を整備した。

【成果の意義・アウトカム】

技術的指導助言などの取組では、指導助言の入り口（技術相談、展示会問合せ、等）から技術コンサルティングを実施することで、企業等の競争力の向上に資するのみならず、市場が要求する新たな研究開発テーマを掘り出すきっかけともなった。コンサルティングの検討内容が深化するにつれて知財を生じるレベルに発展し、産総研のシーズを活用する共同研究として大型化して契約に至るケースも生まれており、外部資金獲得額の増加に貢献している。また、技術移転収入は、令和元年度は第4期中で最も多い3億6,532万円（12月末現在）となり、第4期中は平均で1億5,536万円/年の技術移転収入を得た。

国際標準化の活動については、産総研の研究員が率先して国際標準化を適切に推進することで、

産総研のポテンシャルを活用し、企業のコア技術を効率的に市場に展開する環境を整えることに貢献した。スマートマニュファクチャリングの国際標準化活動では、国内関連団体とも連携して諸外国の動向を適切に把握し、我が国の技術レベルを踏まえた戦略を持って規格を策定することで、我が国の経済活動を活性化する道を拓いた。

#### 【課題と対応】

国際標準化活動については、産業界からの声を集めて規格策定に反映し、迅速に提案まで進めることが求められる。その活動の重要性は理解されていても、スキルが要求されるうえに研究者個人としての業績として認知され難いため、活動への参加が消極的になり、業務の優先順位が低くなりがちであるという課題がある。

これに対しては、第5期中長期目標期間は、組織的に標準化人材を育成し、その活動を個人評価において適切に評価していくことを通じて、現場の研究者レベルでも高いモチベーションで積極的に参画できる体制を整える。また、知財のライセンスに関しては、国内外の企業との交渉等を担当する知財人材の量の不足という課題があり、必要に応じて外部人材の登用等による対応を検討する。

### (3) マーケティング力の強化

#### 【背景・実績・成果】

社会の変化が早まるとともに技術の進展速度と複雑性が高まる中、情報を幅広く集め技術潮流を見通す取組は、産総研のみならず企業においても重要度を増している。当領域では、産総研が保有する技術情報や基盤技術を核として、企業や大学等から会員を募り当領域の研究ユニット等が運営するコンソーシアム等（令和元年度12月末現在、7つのコンソーシアム等が活動中）を通じて、マーケティング、ロードマップ共有、社会実装等に取り組んだ。

研究成果を広報し、新たなユーザを呼び込むために、第4期開始以降、展示会等での出展に積極的に取り組んで出展数を増やし、令和元年度は、産総研が主催するテクノブリッジフェアの他、国際電子回路産業展（JPCA Show）、JASIS（Japan Analytical Scientific Instruments Show）、セミコンジャパン等において計25件の展示を行った。

マーケティング戦略の基盤となる知財強化施策に関しては、当領域独自の取組として、特許出願前に内容の妥当性をチェックしブラッシュアップする「ユニット知財検討会」開催を原則として出願の必要条件とし、平成27年度以降、年間40～50回開催した。知財を核とした原理実証やプロトタイプ試作を支援する領域独自の「IP実用化加速プロジェクト」により、毎年10件程度のテーマを採択し、知財やコア技術を展示会等で分かりやすくアピールするための「見える化」を推進した。同じく領域独自の「フィージビリティスタディ（FS）連携制度」においては、領域の研究戦略部と研究者との間の議論を通じてブラッシュアップしたテーマに対して、毎年10件程度の予算支援を行い、領域内及び領域を超えた連携を促進した。また、令和元年度は4月にセンシングシステム研究センターが設立されたのを機に、全領域とイノベーション推進本部のIC、連携主幹、企画主幹、及びセンシングシステム研究センターの研究チーム長等をメンバーとするセンシング技術連絡会の活動を開始した。同連絡会では、産総研全領域の有するセンサ・センシング技術のデータベースを構築することにより、企業等からの問い合わせに対するワンストップサービス提供し、連携活動の効率化を図った。また、国家プロジェクトや業界動向等に関する情報の所内共有などに取り組んだ。

平成27年度以降の民間資金の獲得額の増加に伴い、研究戦略部における企業連携関連業務が急増したことから、これを担当するイノベーションコーディネータと連携主幹を、平成29年度までは3名であったところ、令和元年度までに8名へ増員し、マーケティングや技術セールスの体制を強化した。

#### ●その他

「マーケティングの取組状況」

・令和元年度までに以下に示すのべ8つのコンソーシアムを運営し、マーケティングの取組として、ロードマップ共有、社会実装等に取り組んだ。

次世代プリンテッドエレクトロニクスコンソーシアム (JAPEC)

構想設計コンソーシアム

応力発光技術コンソーシアム (MLTC)

IMPULSE コンソーシアム (IMPULSE：高電力効率大規模データ処理イニシアティブ)

外力支援型バイオアッセイ技術コンソーシアム

サイバーフォトリックプラットフォームコンソーシアム

シリコンフォトリクスコンソーシアム

FIoT コンソーシアム (FIoT：フレキシブル IoT)

・先進コーティング技術について、平成 28 年度に一般社団法人日本ファインセラミックス協会と連携して設立した先進コーティングアライアンスでは、平成 29 年度、産総研とアライアンス参加企業により、半導体装置部材やエネルギー関連部材等の明確な出口戦略を持った共同研究を開始した。その内 2 件で技術移転につながる成果が得られ、アライアンスを活用した商品化を検討した。このように川上産業から川下産業までを繋ぐバリューチェーンの構築を実現し、参画企業も設立当初（平成 28 年度）の 28 社から令和元年度は 46 社まで拡大した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

マーケティングの取組では、企業連携戦略と知財戦略を柱に得られた成果の最大化を進めた。9つのコンソーシアム等の活動、展示会への積極的な出展、知財強化施策、研究戦略部の体制強化といった取組を積み重ねた結果、企業等が産総研に資金を提供して推進するに値すると判断する橋渡し研究テーマの数と魅力が高まった。そのエビデンスとして、当領域の民間資金獲得額は、令和元年度（12 月末現在）には第 4 期中長期目標期間前（平成 23 年度から 25 年度の平均）の 3 倍を上回る値まで伸びた。

#### 【課題と対応】

民間資金獲得額の増加に向けた課題は、大型の共同研究の件数を増やしていくことである。その対応の一つとして、第 5 期中長期目標期間においても、引き続き新規の冠ラボの複数設立に向けて、IC を中心とした企業の研究開発ニーズ把握の取組を強化する。また、当領域が有する技術のうち、産業応用上の価値が高いが企業連携につながっていないものについて、ワークショップ開催等を通じて企業連携の促進を図る。

中長期的な課題としては、IoT の進展に伴いセンシング技術への社会・産業ニーズが急拡大しており、当領域及び産総研内に散在するセンサ及びセンシング関連の研究ポテンシャルを糾合することが求められている。これに適時に対応するために、産業を先導する高性能センシング技術開発とセンシング技術基盤整備を目的とした「センシングシステム研究センター」を令和元年度に設立し、センシング関連のデバイス・システムの開発から、柏センター等での社会実装までを一貫して実施する体制を整えた。第 5 期中長期目標期間では、令和元年度から開始したセンシング技術連絡会の活動を本格化させ、産総研の有するセンサ・センシング技術の企業等への橋渡し、企業ニーズの把握とニーズに沿った研究開発テーマの立案などを実施して行く。

もう一つの中長期的な課題である知財強化に関しては、研究現場の知財リテラシーの不足から、効果的な特許出願が出来ていない事例やノウハウとして秘匿すべき情報を公開してしまう事例がいまだに散見される。その対応として、平成 27 年度から研究者を領域戦略部に兼務させ、知財関連の研修を受講するとともに、領域の知財戦略検討会に参加させる等により、研究現場の知財リテラシーを向上させる取組を行ってきた。第 5 期中長期目標期間においても、この取組を継続するとともに、領域内の全ユニットで特許出願前の知財検討会の実施を目指す。

#### （4）大学や他の研究機関との連携強化

#### 【背景・実績・成果】

大学等のシーズ技術の産業界への橋渡しを担うオープンイノベーションラボラトリ（Open Innovation Laboratory: OIL）について、平成 28 年 4 月に名古屋大学内に設置された「窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ」（GaN-OIL）は、パワーデバイスと光デバイスに関する研究を行ってきた。後者の光デバイスに関する研究をより重点的に推進するため、平成 30 年 8 月にエネルギー・環境領域のマネジメント下にあった GaN-OIL を当領域へ移管した。

令和元年より一般社団法人 GaN コンソーシアム（21 大学、2 国立研究開発法人、48 企業等で構成）に参画し、大学や企業との連携強化、並びに大型の研究開発プロジェクトの受け入れ態勢の強化を行った。

また、平成 30 年 8 月には、半導体設計の教育において実績のある東京大学大規模集積システム設計教育センター（VDEC）（現：東京大学工学系研究科附属システムデザイン研究センター）と連携する「AI チップ設計ラボ」を設置し、新規人工知能チップの開発と社会実装の取組を開始した。令和元年度は、この AI チップ設計ラボを発展させて「産総研・東大 AI チップデザインオープンイノベーションラボラトリ（Open Innovation Laboratory: OIL）: AIDL」を設立し、企業と連携した AI チップ設計を推進した。

人工知能に関するグローバル研究拠点（GOIL）として、東京大学の柏Ⅱキャンパスの中に産総研の柏センターが平成 30 年 11 月に設立され、ここに新設された人間拡張研究センターにおいて、当領域の研究者からなるスマートセンシング研究チームが活動を開始した。

令和元年より高効率レーザープロセッシング推進コンソーシアム（Consortium for Technological Approaches toward Cool laser Manufacturing with Intelligence: TACMI コンソーシアム）に参画し、43 社会員企業を含む参画 65 機関とプロジェクト成果の社会実装に向けた試行、データベース運用等について協議を行い、2 社以上と連携構築に向けた取組を実施した。また令和 2 年 1 月に産総研でシンポジウムを開催し、企業連携強化に寄与した。

ミニマルファブ技術に関して、産総研つくばセンター、臨海副都心センター、九州センターのミニマル BGA（Ball Grid Array）パッケージング試作ライン（平成 30 年度に稼働）の 3 拠点体制で技術の高度化と普及を進めるとともに、豊橋技術科学大学（TUT）に平成 27 年に設置された「AIST-TUT 先端センサ共同研究ラボラトリー」において生体感応センサなどのセンサ開発における学術研究と実用化の促進を図った。

公的資金によるプロジェクトを実施する技術研究組合への参加については、5 つの組合（ミニマルファブ技術研究組合、次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合（JAPER））、技術研究組合 NMEMS 技術研究機構（NMEMS）、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）に参加し、プロジェクトの成果創出に貢献するとともに、メンバー企業との連携を強化した。ミニマルファブ技術研究組合と JAPER については、産総研研究者が研究開発部長を務めた。

平成 28-29 年度に実施した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）プロジェクト「IoT 技術開発加速のためのオープンイノベーション推進事業」（総額 約 63 億円）では、TIA 推進センターが整備したスーパークリーンルーム（SCR）のウェハレベル 3 次元実装装置群等を活用して、企業等との連携した IoT デバイス開発を進めた。

産総研とともに特定国立研究開発法人に指定された理化学研究所（理研）とは、平成 27 年から毎年、「理研－産総研量子技術イノベーションコアワークショップ」を開催し、次世代量子技術の方向性を継続的に議論した。令和元年度は、ワークショップでの議論から生まれた理研－産総研の共同研究提案 2 件（有機材料の誘電性及び光電変換機能に関する課題）に対して領域予算を措置し、両機関のシナジー効果を活かした連携を具体化した。

海外の研究機関との国際連携については、ドイツブラウンホーファー、フランス原子力・代替エネルギー庁 電子情報技術研究所（CEA-Leti）、台湾 Nanodevice Laboratories 等と連携を進めた。また、当領域の若手研究員の在外研究を領域が補助する取組を平成 29 年度から開始し、これまでに 7 人の研究員がアメリカ、イギリス、スウェーデン、ドイツで在外研究を行った。

## ●その他

- ・共同研究数

平成 27 年度：国内：大学 121 件、研究機関 33 件、国外：大学 7 件、研究機関 3 件  
平成 28 年度：国内：大学 158 件、研究機関 47 件、国外：大学 10 件、研究機関 3 件  
平成 29 年度：国内：大学 171 件、研究機関 56 件、国外：大学 10 件、研究機関 4 件  
平成 30 年度：国内：大学 176 件、研究機関 54 件、国外：大学 8 件、研究機関 7 件  
令和元年度：国内：大学 196 件、研究独法 58 件、国外：大学 11 件、研究機関 9 件（12 月末現在）

#### 【成果の意義・アウトカム】

大学や他の研究機関との連携では、OIL や GOIL などの仕組みを利用し、また産総研の地域センター（九州センター）と連携して研究拠点を開設した。これは、第 4 期中長期目標期間における当領域の特徴的な取組である。GaN 材料の世界的拠点である名古屋大学、集積回路設計の研究と教育について多大な蓄積を有する東京大学、人工知能研究の拠点でありその成果の社会実装に取り組む柏センターと臨海副都心センター、そして半導体を始めとする製造業と密に連携する九州センターに当領域の拠点を持ったことの意義は、基礎研究の成果を社会実装にまでつなげる橋渡しを切れ目なく実行する体制が構築されたことにあり、大学や他の研究機関との連携による橋渡し機能の強化につながるものである。今後、連携先を増やしてこの体制を拡充していくことで、産総研をハブとしたイノベーション創出の加速が期待される。また、技術研究組合や大学が主催するコンソーシアムへ参加する中で、会員企業と産総研との間に信頼関係を築いたことは、技術の実用化や普及等に取り組む動きにつながった。

#### 【課題と対応】

大学・研究機関との連携強化の一つの方法として、名古屋大学と東京大学の OIL、臨海副都心センターと柏センターの GOIL 等の拠点を通じて、それら拠点の研究者だけでなく、つくばセンター及び九州センターの研究者と大学・研究機関の研究者の連携を進めることがあげられる。そのためには、OIL、GOIL 等の拠点に常駐する研究者と、つくばセンター及び九州センターの研究者との間で十分なコミュニケーションが取れるようにしていくことが課題である。これに対応するために、第 5 期中長期目標期間では、それぞれの拠点で行われる研究開発を所内外へ積極的に発信していくとともに、各拠点の活動に関わる研究者を兼務発令等により増やしていく。

令和 2 年 1 月に公表された内閣府の量子技術イノベーション戦略においては、産総研が量子デバイス開発拠点としての役割を果たすことが期待されている。平成 27 年度から実施している理研との量子技術に関する連携を第 5 期中長期目標期間も継続するとともに、TIA・SCR や CAVITY 等の施設を活用した大学・研究機関との連携を進めて行く。

### （5）研究人材の拡充、流動化、育成

#### 【背景・実績・成果】

冠ラボ制度による企業との大型連携の実施においては、当該企業の研究者を特定集中研究専門員（在籍出向）として産総研に受け入れ、研究人材を拡充して研究開発を推進した。平成 29 年度には東京エレクトロン株式会社（TEL）と「TEL-産総研 先端材料・プロセス開発連携研究室（TEL 冠ラボ）」を設立し、超高集積化と低消費電力化を実現するための次世代半導体デバイスに必要な新材料やプロセス技術の開発、及びその量産化技術の開発を進めた。平成 31 年 3 月には日本電気株式会社（NEC）と「NEC-産総研量子活用テクノロジー連携研究室」を設立した。令和元年度には、この冠ラボにて量子アニーリングを始めとする量子性に基づいた先端技術領域の研究を実施した。令和元年度には株式会社ジェイテクトと「ジェイテクト-産総研スマートファクトリー連携研究ラボ」を設立し、加工機・生産ラインのスマート化（知能化、自律化）及びその要素技術の研究開発を実施した。さらに、材料・化学領域とともに、株式会社バルカーと「バルカー-産総研先端機能材料開発連携研究ラボ」を設立し、九州センターにおいてシール部材の診断技術について研究開発を実施した。令和元年度末で、これら 4 つの冠ラボ全体で、特定集中研究

専門員は 24 名、外来研究員は 9 名である。

大学等との人材交流については、平成 27 年度に開始したクロスアポイントメント制度により、毎年 3 名から 6 名の大学教員が産総研の特定フェローとして研究に貢献した。また、同制度により平成 29 年度と平成 30 年度に産総研の研究員 2 名、令和元年度には 1 名が大学での研究等に従事した。

人材の流動性を高める採用制度である年俸制及びプロジェクト型での任期付き研究員職員採用については、平成 27 年度から令和元年度までに 12 名を採用した。これは第 4 期中期計画の 5 年間で採用した研究員の約 15%にあたる。また、文部科学省の卓越研究員事業に採択された卓越研究員を、事業が開始された平成 28 年度から 3 年間で 5 名採用した。また、ダイバーシティ推進の一環として、平成 27 年度から令和元年度までに女性研究者 12 名、外国人研究者 12 名を採用した。

人材育成について、産総研イノベーションスクールにおいて受け入れた博士研究員及びリサーチアシスタント制度により受け入れた大学院生の人数は、平成 27 年度からの 5 年間で、当領域は延べ 209 名に達した。これらの博士研究員と大学院生を、公的資金による研究開発や民間企業との共同研究等に参加させ、企業をはじめ社会の様々な重要な場で即戦力として活躍できる人材育成に貢献した。

半導体デバイス及びプロセスの統合シミュレータである TCAD (Technology Computer Aided Design) の初級者及び中級者向けの実習コースを TIA と連携して開催した。平成 30 年度は合計 14 名、令和元年度は合計 9 名の参加者があり、講義と実習を通じて半導体デバイス設計の研究者、技術者の育成に貢献した。

#### ●産総研イノベーションスクール事業及びリサーチアシスタント制度に採用された人数

目標値：40 名（令和元年度）

- ・平成 27 年度：17 名
- ・平成 28 年度：33 名
- ・平成 29 年度：40 名
- ・平成 30 年度：61 名
- ・令和元年度：58 名（12 月末現在）

#### ●その他

・ダイバーシティ推進室が令和元年 11 月に産総研つくばセンターで開催した「女子大学院生・ポスドクのための産総研所内紹介と在職女性研究者との懇談会」において、31 名を超える女子大学院生・博士研究員との懇談及び研究室見学に領域として協力した。

・TIA 推進センターが開催した「TIA 連携大学院サマー・オープン・フェスティバル」及び「ナノテクキャリアアップアライアンス (Nanotech CUPAL)」活動のセミナーコースにおいて、令和元年度は延べ 13 名の当領域の研究員が、マイクロマシン (MEMS)、半導体シミュレーター (TCAD)、及び産総研スーパークリーンルーム (SCR) に関する講義の講師を務めた。

#### 【成果の意義・アウトカム】

研究人材の拡充、流動化、育成では、冠ラボ制度を用いた研究人材を拡充した研究開発の促進、クロスアポイントメント制度を用いた大学などとの人材交流、人材の流動性を高める年俸制任期付き職員の採用、博士研究員や大学院生を対象としてイノベーションスクールや研究活動を通じた育成に取り組んだ。企業との冠ラボ制度により、令和元年度には特定集中研究専門員と外来研究員を合わせて概ね 33 名の企業研究者が産総研で研究活動を行った。この研究者数は、当領域の産総研研究者数 (300 名強) の約 11%に相当する。この冠ラボ制度による研究人材の拡充は、当領域の研究活動に参加する研究者数を増やすという量的な効果のみならず、企業と産総研がそれぞれ有する人材の強みの組み合わせによるシナジー効果を生み、次世代半導体デバイス量産技術、量子アニーリング技術、スマート製造技術などの研究開発を大きく加速するものである。

冠ラボ制度、クロスアポイントメント制度、年俸制任期付き研究員採用、リサーチアシスタン

ト制度、女性研究者採用数の目標設定等の取組を積み重ね、研究現場の人材多様性を確保していくことにより、産総研を活力が高く変化への対応力ある組織としていくことができると期待される。

#### 【課題と対応】

冠ラボに関する課題として、特定集中研究専門員等の立場として産総研で研究を行う企業研究者が、産総研の事務手続きや安全管理等のルールに戸惑い、研究開発が非効率となる事例が散見されることが挙げられる。冠ラボでの研究実施のスピードが企業に比べて劣ることがないように、第5期中長期目標期間では、事務処理等をサポートするスタッフを配置する等の対応を行う。

中長期的には、冠ラボが更に増えていくことが予想されるため、それぞれの研究室で行われている研究内容の守秘と、産総研に集う多様な人材の間での情報交換や技術融合とのバランスをどのように取り、産総研を魅力あるオープンイノベーションの場としていくのかも組織マネジメント上の重要な課題である。これについては、第5期中長期目標期間においても、引き続き産総研に冠ラボを置いたことを各企業がどのように評価しているかを聴き取る機会を定期的に設け、イノベーション推進本部やTIA推進センターとも連携しつつ、冠ラボ制度の改善を図る。

研究人材育成の課題の一つは、大学院生、博士研究員等の若手研究者に充実した研究環境の提供である。その対応として、大学院生、博士研究員等に産総研の施設・設備を活用した研究が行える機会を与えるため、第5期中長期目標期間においても、引き続きリサーチアシスタント、産総研イノベーションスクール生を積極的に受け入れる。第4期中長期目標期間は、平均41名/年以上を受け入れて来たが、第5期中長期目標期間も同等数以上を受け入れて、公的資金による研究開発や民間企業との共同研究等に参加させ、企業等で即戦力として活躍できる人材を育成して行く。

## 2. 「橋渡し」のための研究開発

### (1) 「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究）

#### 【背景・実績・成果】

目的基礎研究においては、機器の性能・機能、及び製造技術の効率性（低コスト、高レジリエント）を格段に向上させ、概ね10年後（令和12年度）以降に実用化や普及が進み、スマート社会実現への貢献が期待される、新デバイス・新材料について研究テーマ設定を行い、以下に述べる研究成果を得た。

#### 【成果の意義・アウトカム】

高温動作シリコン量子ビットの開発、世界第2位の集積度50量子ビットの超伝導量子アニーリングマシンの作製、スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路の開発、バイポーラ動作の超格子型相変化メモリの開発、実用レベルの低書き込みエラー率の電圧書き込み型MTJ素子の開発など、非ノイマン型コンピューティングや超省エネルギーデバイスの基盤技術開発において大きなブレークスルーとなる研究結果を創出することに成功した。また、コンビナトリアルケミストリーや複合アニオン化などを導入した機能性材料の新たな合成手法を開発し、約20年ぶりに100 K以上の高い超伝導転移温度を有する新銅酸化物超伝導体物質群を発見した。論文については、第4期の2年目となる平成28年度以降、量的な増加傾向及び質的な向上傾向が続き、平成30年度に目標値の400報を達成した。令和元年度は12月末現在で252報であるが、この値は平成30年度同時期の15%増である。発表論文誌の平均IF値は、平成28年度の2.33から毎年度増加し、令和元年度には4.13（12月末現在）となり、論文の量・質ともに向上した。また、科学技術の発展に寄与する顕著な成果に対し贈られる文部科学大臣表彰 科学技術賞（平成27年度、平成28年度）、本多フロンティア賞（平成28年度）、市村学術賞（平成29年

度)、公益財団訪印発明協会 21 世紀発明奨励賞 (平成 30 年度)、文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (平成 31 年度) などを受賞した。

量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの基盤技術開発：

**【背景・実績・成果】**

Society5.0 社会の実現には、大規模データの高速度処理が可能な、非ノイマン型コンピュータの実用化が急務である。超伝導量子アニーリングマシン、超伝導量子コンピュータ、シリコンプラットフォーム上での集積化に有利なシリコン量子コンピュータは、その有力候補として注目されており、産総研独自に開発を進めた。

平成 27-29 年度は、シリコン量子コンピュータにおける安定なスピン量子ビット実現のため、トンネルトランジスタ (Tunnel Field-Effect Transistor: TFET) とシリコンへのドーピング技術を開発し、シリコンスピン量子ビットの動作温度の世界最高値を 100 倍更新する 10 K という高温での量子ビット動作に成功した。超伝導量子アニーリングマシンに関しては、大規模集積に適した新規アーキテクチャを開発した。平成 30 年度は、シリコン量子コンピュータの TFET 量子ビットを構成する 2 つの量子ドットの独立制御に成功し、量子計算技術の将来の大規模化を見込んだ要素技術の開発を推進した。超伝導量子アニーリングマシンでは、日本初、かつ先行する-DWave Systems 社 (2000 量子ビット) に次ぐ世界 2 位の集積度 (50 量子ビット) を有するチップの製造に成功した。令和元年度は、量子アニーリング計算で解くことのできる問題の規模を向上させるための技術として、複数チップを接続して集積度を向上する超伝導量子回路 3 次元実装技術の開発を行った。その結果、重ねたチップ同士を超伝導バンプ材料で電気接続する超伝導フリップチップ接続を約 16,000 個のバンプ数 (世界最高記録) で実現し、超伝導量子アニーリングマシン向け 3 次元実装基盤技術を確立した。また、TFET 量子ビットの実用性能項目の 1 つである量子ビットが情報を保持している時間 (コヒーレンス時間) の評価実験が実施できる集積素子の開発に成功した。量子計算の実現可能性を検証するため、TFET 量子ビットの特性を模擬するシミュレータの開発も進め、静電特性を再現する技術も確立した。

**【成果の意義・アウトカム】**

シリコン量子コンピュータに関して、独自技術であるトンネルトランジスタを利用したシリコンスピン量子ビットを開発し、量子ビットの最高動作温度を従来の 0.1 K から 10 K という高温まで引き上げることに成功した。この成果は、大型の希釈冷凍機を必要としない小型高集積可能なシリコン量子コンピュータ開発に向けての第一歩と位置付けられ、量子計算技術の社会実装につながると期待される。また、静電特性シミュレータの開発は量子ビットの設計手法を与える第一歩であり、量子集積回路設計技術の確立に貢献するものと期待される。超伝導量子アニーリングマシンに関しては、大規模集積化のために必須の超伝導量子回路の 3 次元実装を実現し、大規模な超伝導量子アニーリングマシンのための製造基盤技術を確立した。これにより、今後、大規模超伝導量子アニーリングマシンの実現によって、従来の非ノイマン型コンピュータでは処理不可能であった大規模データに対する組合せ最適化問題が低消費電力かつ高効率で処理できるようになり、製造・エネルギー・創薬・医療・自動運転・農林水産業・運輸・教育など、ありとあらゆる産業に対して破壊的イノベーションがもたらされると期待される。例えば、大都市における渋滞解消や大規模工場におけるオペレーションのリアルタイム自動最適化が可能となる。

スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路の基盤技術開発：

**【背景・実績・成果】**

磁気トンネル接合素子 (MTJ 素子) に直流電流を流すと、磁性電極層の強磁性共鳴 (マイクロ波帯域の磁化歳差運動) によるマイクロ波発振機能 (スピントルク発振素子 Spin-Torque Oscillator; STO) が得られる。STO は共振回路を必要としないナノサイズの発振素子であり、超微細かつ LSI (Large Scale Integration) 集積化が容易、広帯域で周波数可変など、半導体を用いた従来型発振素子にはない特徴を有するため、通信機器や車載レーダーへの応用が期待されている。実用化を目指して STO の高性能化に取り組むとともに、STO を用いた新しいタイプのニュー

ーロモルフィック回路（脳活動の仕組みをヒントとして作られる超低省費電力の演算回路）を開発した。

平成 27 年度は、STO の周波数安定化に不可欠な位相同期回路（Phase-Locked Loop; PLL）を世界に先駆けて実現した。平成 28 年度は、世界最高値かつ STO 実用化の目途となる 10  $\mu$ W の発振出力を達成した。平成 29 年度は、STO を人工ニューロン素子として用いたニューロモルフィック回路を考案し、これを用いた音声認識に成功した。平成 30 年度は、ニューロモルフィックコンピューティング（脳の活動を模倣した演算手法）の基盤となる STO のショートタームメモリ（短時間記憶）特性の評価に世界で初めて成功し、単一の発振素子で短時間記憶容量 3.6 を実現した。STO は先行技術であるフィードバック回路を有する光学振動子と比べ、短時間記憶容量は同等以上の性能を有し、集積度の面で数桁優れている。

さらに、4 個の STO からなるニューラルネットワークを用いて 7 つの母音の音声認識を行い、90% という高い認識率を実現した。これら一連の研究成果について Nature 及び Nature 姉妹誌に 5 報の論文を掲載した。令和元年度は、発振素子の出力信号を再注入するフィードバック回路を用いて STO の人工ニューロンとしての性質を向上することに成功した。フィードバック回路の遅延効果により、過去の入力情報を記憶する機能が高まり、波形認識のタスクで高い認識率を得ることに成功した。さらに、異なる遅延時間を有するフィードバック回路を仮想的に用いることで、実用化に向けた指標となる短期記憶容量 10 以上を実現した。また、単一の STO から発生する高周波信号を測定し、その信号を任意波形発生器によって STO に再注入する擬似フィードフォワードネットワークを考案した。この擬似ネットワークでは、STO が次段の STO と同期することで情報を伝搬していく。10 個の発振素子からなる擬似ネットワークによって、単一素子に対して 3 倍の記憶容量を達成することに成功し、STO からなる振動子ネットワークを構成する基盤技術を確立した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

STO を用いたニューロモルフィック回路の基盤技術開発については、不可欠な要素である位相同期回路の実現、実用化に必要な 10  $\mu$ W の発振出力の実現に続き、4 個の STO からなるニューラルネットワークを用いて 7 つの母音の音声認識を行い、90% という高い認識率を実現した。さらに、短時間記憶特性の評価の実現と、単一素子の短時間記憶容量 3.6 を実現し、先行技術である光学振動子と同等以上の短時間記憶容量を実現した。STO は先行技術である光学振動子と比べて圧倒的に高集積化が可能であり、従来技術より数桁小さい直径 30 nm の演算器を実現できる可能性を有している。STO を用いた人工ニューロンと人工シナプスの開発で得られた成果により、将来は超低消費電力の脳型情報処理システムの実現が期待される。これにより日常生活への大規模な人工知能等の導入が進展し、個人の嗜好の判断や環境の認識等がオンサイトで可能となり、カスタマイズされた生活環境の実現や安全・安心な社会の構築に寄与する。

相変化/トポロジカル材料による不揮発メモリ、新奇デバイスの開発：

#### 【背景・実績・成果】

数多くのハードディスクドライブから構築された従来のデータセンターは、ドライブモーターの回転に大電力を必要とし、大手 IT 企業等のデータセンターではすでに原子力発電炉 1 基分にも達していると言われる。IoT による大量データ「ビッグデータ」の蓄積問題と、これらを利用する新規ビジネスやサービスは電力消費問題ともはや無縁ではない。またそれらの活用と解析には、大量のデータを瞬時にハードディスクから取り出す必要があるが、ハードディスクドライブに依存するデータセンターは処理速度が限界に来ている。このため、データセンターの省エネ化と、蓄積されたビッグデータの高速解析を可能にする不揮発性メモリの開発が加速し、相変化メモリは市場規模が急速に拡大している。平成 23 年に発表した「超格子型相変化メモリ (interface Phase Change Memory: iPCM)」すなわち相変化メモリに利用されている相変化合金 (GeSbTe) を、GeTe と Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の薄膜を交互に積層して作製したメモリにおいては、従来比で消費電力を 1/10 から 1/100 に低減することが可能である。本技術は産総研が基本特許をもつ独自のコア技術であり、企業との共同研究が実施されてきた。

平成 27-29 年度は、100 nm 以細の iPCM セルを作製し、低電圧（1 V 以下）スイッチング、及び従来型の相変化メモリでは実現不可能であった電圧極性を変えてもスイッチングする「バイポーラ動作」を実現した。また平成 30 年度には大手企業との共同研究において、産総研のスーパークリーンルームを用いて、300 mm スケールでの iPCM デバイス製造に成功した。令和元年度は、相変化メモリの超高密度化と高速動作をサポートするセクターと呼ばれるメモリセル選別素子について、従来材料で問題となっていた毒性の Se を用いない方針でマテリアルデザインをおこない、Se フリーのセクター用化合物を初めて見出した。また、iPCM は本来非磁性材料が用いられているが、室温で大きな磁気抵抗変化が発見されたことから、この新規物性の応用に向けた研究開発として、JST-CREST（平成 26-31 年度）に採択され iPCM の基礎物性解明にも取り組んだ。その結果、「トポロジカル相転移」と呼ばれる、積層薄膜内に形成された特殊な電子バンド構造が磁気特性を誘起することを見出した。平成 30 年度は、この現象を応用した「電子スピン蓄積デバイス」の開発を進めた（誌上発表 計 10 報）。CREST の最終年度となる令和元年度は、目標とした電子スピンを利用した電場と磁場の両方で機能する多機能電子デバイスを、iPCM 内に存在する Weyl 相と呼ばれる超格子層のみを選択成長させることによって実際に作製し、産総研が独自に設計したスピン注入電極配置（特許出願済）と組み合わせることで、発生するスピン流を単層膜のものと比較して 15 倍まで増幅することに室温で成功した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

相変化/トポロジカル材料による不揮発性メモリ、新規デバイスの開発について、相変化メモリの 100 nm 以細のセルの作製、低電圧（1 V 以下）スイッチング、及び従来型の相変化メモリでは不可能であった電圧により極性を変えてスイッチングする「バイポーラ動作」を実現した。また、実用化に向けて 300 mm スケールでの iPCM デバイス製造に成功した。これらの成果を基に超格子膜を採用した新たな相変化メモリ（超格子型相変化メモリ）の実現と量産プロセスの確立に向けて、複数の大手企業との実用化を目指した共同研究が令和 2 年度から開始される運びとなった。この技術が普及すれば、データセンターのさらなる低消費電力化が可能になることから、データセンターの小型化、分散化が加速されると期待される。

電圧書き込み型 MRAM の基盤技術開発：

#### 【背景・実績・成果】

IT や IoT 機器の省電力化を目指して、書き込み動作が超低消費電力かつ高速の不揮発性メモリとして期待される電圧書き込み型 MRAM (Magnetic Random Access Memory) 「電圧トルク MRAM」の基盤技術を開発した。

平成 27-29 年度は、新規開発の Ir 希薄ドーパ Fe 合金電極を用いて MTJ 素子（MRAM の記憶素子）の電圧磁気異方性変化率（電圧で磁気異方性を制御する効率 Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy: VCMA 係数）400 fJ/Vm を達成するとともに、書き込みパルス波形制御などにより書き込みエラー率  $10^{-6}$  台の安定動作を実現した（ともに世界最高性能）。平成 30 年度は、量産に適したスパッタ成膜法で Ir 希薄ドーパ Fe 合金電極を作製するプロセスを開発し、さらに  $10^{-6}$  以下の低い書き込みエラー率を達成するとともに、書き込み可能な電圧パルス幅の領域を倍増することに成功した。令和元年度は、まず  $10^{-7}$  台のエラー率評価を可能とする測定技術を確認し、従来比で 50 倍高速にエラー率を評価することに成功した。また、Ir ドーピングによる TMR (Tunnel Magneto Resistance) 特性劣化を回避するために Ir 希薄ドーパ Fe/CoFe 界面終端/MgO 構造のエピタキシャル MTJ 素子を開発し、Fe/MgO と同程度の MR 比を維持しつつ 350 fJ/Vm に達する高 VCMA 係数を有する MTJ 素子の開発に成功した。これによりエラー率  $10^{-7}$  以下を理論的に実現可能な素子を実現した。また、エピタキシャル MTJ 素子よりも実用的な多結晶 MTJ 素子を用いてエラー訂正の導入を検討し、1 回のエラー訂正プロセスにより  $10^{-12}$  台のエラー率を確認した。現在、エピタキシャル MTJ から多結晶 MTJ への技術転換、実用的な MTJ 素子でのエラー率  $10^{-7}$  の達成に向けた VCMA 特性の改善、及びエラー訂正プロセスを組み合わせることにより、エラー率  $10^{-14}$  台の書き込みの実証を始めた。

### 【成果の意義・アウトカム】

電圧書き込み型 MRAM の基盤技術開発では、新規開発の Ir 希薄ドーパ Fe 合金電極により、世界最高性能の電圧磁気異方性変化率 400 fJ/Vm、書き込みエラー率  $10^{-6}$  以下を有する素子の開発に成功した。また、書き込み可能な電圧パルス幅の領域を倍増することにも成功した。MTJ 素子は半導体チップ内の大容量キャッシュメモリの置き換えが期待されており、新規開発した世界最高性能の電圧磁気異方性と書き込みエラー率、そして直径 30 nm での長期間記憶保持性能を持つ MTJ 素子は IoT 用マイコンチップの待機電力を大幅に削減し、IoT 機器の省電力化とバッテリー寿命の向上につながると期待される。

新超伝導材料の開発：

### 【背景・実績・成果】

超伝導材料を用いた産業応用は、永久電流磁石で Magnetic Resonance Imaging (MRI) やリニアモーターなど多方面で既に実用化されており、最近では超伝導接合素子を用いた量子コンピュータの開発も進められている。これら超伝導技術は、将来の省エネルギー社会の実現に向けて大きく貢献すると期待される。そのためには、高い超伝導特性（臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度）や低コストでの生産が可能な特性を有する超伝導材料の開発が必須である。

第 4 期は、上記の超伝導特性の更なる向上を目指して、これまでに高い超伝導特性を持つと報告されている銅酸化物及び鉄系化合物を対象に、新たな結晶構造を持つ物質の開発や化学組成の最適化を行うことで、超伝導特性の向上を目指した。その結果、平成 28 年度に新たな鉄系超伝導体  $AeAFe_4As_4$  ( $Ae = Ca, Sr, A = K, Rb, Cs$ ) の合成に成功し、更に単結晶試料を用いた超伝導特性評価によって、同物質が既知の鉄系超伝導体と比べて約 10 倍もの高い臨界電流密度を有することを明らかにした。同物質は、実用材料の有力候補であり、初発表となる平成 28 年度の論文はこれまで 100 回以上引用された。また、コンビナトリアルケミストリー法により高効率で新超伝導体を探査し、複数の新規の超伝導体を発見することに成功した。平成 30 年度は、構成元素としてアルカリ土類金属を含まない一連の鉄系超伝導体  $(Ln, A)Fe_2As_2$  ( $Ln = Ce, Pr, A = Na, K, Rb, Cs$ ) や、陰イオン (P) が金属イオン (Rh) で囲まれた、ユニークなアンチペロブスカイト構造を有する新超伝導体  $Mg_2Rh_3P$  などを新たに発見した。令和元年度は、これまでに確立した手法と得られた知見に加え、複合アニオン化などの新しい手法を導入し、高い超伝導転移温度 ( $T_c$ ) 105 K を示す新銅酸化物超伝導体  $Sr_2SrCu_2O_4(O, F)_2$  の合成に成功した。また、その発展型として、ブロック層・超伝導層に Sr を含む構造を有する銅酸化物の集中的物質探索を行い、新たに  $TlSr_2SrCu_2O_{6+\delta}$  ( $T_c=75$  K)、 $(Hg, Re)(Ba, Sr)_2SrCu_2O_{6+\delta}$  ( $T_c=110$  K)、 $(B, C)Sr_2SrCu_2O_{6+\delta}$  ( $T_c=78$  K) の合成に成功するなど、約 20 年ぶりに 100 K を越える高い  $T_c$  を有する新銅酸化物超伝導体物質群を発見した。これら第 4 期中の成果は、これまでに 65 報の論文として発表した。さらに、平成 28 年度に発見した超伝導体  $CaKFe_4As_4$  を用いたバルク磁石の開発に着手した。超伝導バルク磁石は、従来の常伝導磁石や超伝導コイル磁石と比べて簡便・軽量・低コストといったメリットを有しており、ポータブル Nuclear Magnetic Resonance (NMR) システムへの応用が期待されている。令和元年度は、同物質を用いたバルク磁石を作製し、その性能が既知の鉄系超伝導体材料よりも優れていること（従来の最高値の 2 倍以上の臨界電流密度を達成）、また、大型化も可能であること（従来値の 4 倍以上の体積）を示し、同作製法の知財を確保した。

### 【成果の意義・アウトカム】

新超伝導材料の開発では、銅酸化物超伝導体よりも物理特性の異方性が小さく、多結晶でも優れた特性を示す、実用化に適した鉄系化合物に注力した。特筆すべき成果として、新規構造を有する超伝導体  $AeAFe_4As_4$  ( $Ae = Ca, Sr, A = K, Rb, Cs$ ) を発見し、その超伝導特性を明らかにした。同物質は、超伝導転移温度が比較的高く (36 K)、既知の鉄系超伝導体と比べて約 10 倍もの高い臨界電流密度を有し、銅酸化物超伝導体に比べて異方性が小さく、多結晶でも良好な特性を示す、といった多くの特長を有しており、超伝導磁石や超伝導接合素子としての応用が期待される。実際に、令和元年度に同物質を用いた超伝導バルク磁石の開発に着手し、既存材料を凌駕

する臨界電流密度の向上や大型化を実証した。鉄系化合物超伝導として、 $\text{LaFe}_2\text{As}_2$  も発見した。これは初めて  $\text{Fe}^{1.5+}$  を含む超伝導体であり、鉄系化合物における超伝導発現の可能性がさらに広がると期待できる。また、コンビナトリアルケミストリー法により、アンチペロブスカイト構造を有する  $\text{Mg}_2\text{Rh}_3\text{P}$  をはじめとした新規超伝導体を発見するとともに、複合アニオン化により Tc が 100 K を超える銅酸化物超伝導体  $\text{Sr}_2\text{SrCu}_2\text{O}_4(0, \text{F})_2$  の合成に成功した。同手法の確立により、全く新しい超伝導物質群が次々と発見されていくと期待できる。

フレキシブル強誘電体材料の開発：

#### 【背景・実績・成果】

これまで強誘電体材料の大半が環境・資源的負荷（鉛やレアメタル）に課題のあるチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）等のセラミクス材料に頼ってきた。これに対して有機強誘電材料は、有毒な鉛や希少金属を含まず低環境負荷であるとともに、デバイスのフレキシブル化が期待される。

平成 27-29 年度は、フレキシブル材料として世界最高の自発分極（外場なしで発生する分極）を有するクロコニ酸（ $20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、平成 21 年度に産総研より Nature 誌に発表）の試料の高品質化などに取り組んだ結果、さらに高い自発分極  $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  を示すことを見出した。その性能を実験及び理論計算により実証した。一方、フレキシブル有機強誘電材料を塗布法により薄膜化する技術を開発し、低電圧で駆動させることが可能な強誘電デバイスの作製法を開発した。また、高い静電エネルギーを低い損失で貯蔵できる材料として、鉛フリーの有機反強誘電体スクアリン酸などを見出した。平成 30 年度は、反強誘電相転移現象を微視的に解明することで圧電性能を向上させる要因を見出した。これにより、イミダゾール系有機反強誘電材料において、高い圧電効果を示すことで知られるフレキシブル強誘電材料である Polyvinylidenedifluoride (PVDF) の性能（圧電定数： $d_{33} = 30 \text{ pm}/\text{V}$ ）を大きく上回る電気歪み性能（ $d_{33}$  換算で  $280 \text{ pm}/\text{V}$  相当）を実現した。以上の成果は、Nature Communications、Advanced Materials などの高 IF ( $> 10$ ) の論文誌で発表した。令和元年度は、フレキシブル・高圧電性キャパシタ素子用材料として実用化に向けた材料設計基盤を確立を目指し、材料特性を決定する要因解明とデバイス特性向上に関する研究を行った。スクアリン酸を用いた静電エネルギー貯蔵デバイスの開発に向け、キャパシタデバイスのエネルギー損失をもたらす分極履歴曲線のヒステリシスの抑制指針を得るため、分極特性を詳細に評価した。その結果、スクアリン酸においてはヒステリシス抑制よりも耐圧を改善することが静電エネルギー貯蔵特性の向上に有効であることを見出した。その知見を基に、材料の高品質化により耐圧強化を図ったことで、低損失（効率 90%）を維持したまま最大貯蔵エネルギーを従来の 2 倍以上の  $3.3 \text{ J}/\text{cm}^3$  まで向上することに成功した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

フレキシブル強誘電体では、有機材料のクロコニ酸において、フレキシブル材料では世界最高で、従来型セラミクス酸化物強誘電体に匹敵する  $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  もの自発分極を実現した。またスクアリン酸において、高い静電エネルギーを低いエネルギー損失で貯蔵できる理想的な反強誘電特性を見出した。さらにイミダゾール系有機反強誘電材料において、従来の有機強誘電体材料を大きく上回る高い電気歪性能（圧電性能： $d_{33}=280 \text{ pm}/\text{V}$ ）を見出した。これらの成果は、不揮発性メモリやセンサ、アクチュエーター（静電エネルギーの物理的運動への変換）などの素子やエネルギーハーベスティング（静電エネルギーの電力への変換）をフレキシブル材料で実現できることを意味しており、既存デバイスの軽量化や生体装着型デバイスへの適用といった形で IoT 社会ならびに持続可能社会への貢献が期待できる。

高品質グラフェンの低温成長技術とデバイス機能の開発：

#### 【背景・実績・成果】

グラフェンは、一原子厚さの炭素原子シートから成る二次元材料であり、電気特性や光学特性などに優れたカーボンナノ材料である。これらを応用した電子デバイスを開発するためには、高品質グラフェンを低温で作製する技術が不可欠である。平成 27-29 年度は、独自のプラズマ CVD プロセス (Chemical Vapor Deposition) により、単層グラフェンの低温成長に取り組んだ。低温

成長では、グラフェンにおける欠陥生成や炭素原子シートの多層化がネックとなる。この解決のため、従来の100倍高い圧力下での成長技術を開発した。また、グラフェンの伝導性と透明性を活かしたデバイス機能の開拓も並行して推進し、従来の金属/SiO<sub>2</sub>/Si (MOS) 型素子に対して、グラフェン(G)/SiO<sub>2</sub>/Si (GOS) 型素子を開発した。平成30年度は、低温プラズマCVDについては、励起されたラジカルの強制対流により、マイクロメートルオーダーのグレインサイズを有する高品質単層グラフェン膜を、銅箔上に作製することに成功した。GOS型素子については、電圧印加による超高効率の電子放出現象を見出し、MOS型の従来電子放出源と比較して、一万倍の性能(電子放出効率と放出電流密度)を実現した。令和元年度は、低温CVD単層グラフェン薄膜をエレクトロニクス素材上へ直接成長させる技術の開発を進めた。その結果、誘導結合型プラズマを用いて、通常技術に比べて500℃という低温でSi基板や熱酸化膜付きSi基板に多結晶の単層グラフェンを直接成膜する技術を開発した。絶縁基板上への触媒を用いないグラフェン直接合成においては、最も低温での合成及び単層グラフェンのシート抵抗で最小レベルを実現した。また、超高効率電子放出を実現するためには、電子散乱の少ない高品質な絶縁層とグラフェンの高い電子透過率が重要であることを明らかにした。この知見からデバイス構造を最適化し、絶縁層での電子散乱を更に抑制することで、現在最もエネルギー単色性の高い電子源であるタングステン冷陰極(0.3 eV)を凌駕するエネルギー単色性(0.18 eV)及び、10倍以上の放出電流密度を達成した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

高伝導性透明電極として期待されているグラフェンの研究に関して、プラズマCVD成膜において励起ラジカルを強制対流させることにより、巨大なグレインサイズと高い平坦性を有する高品質単層グラフェンの低温合成に成功した。これによりロール・ツー・ロールによる連続量産システムによるグラフェン実用化が期待できる。誘導結合型プラズマを用いた絶縁基板上へのグラフェン低温成膜技術は、これまで銅箔上に成膜したグラフェンでは必要であった転写プロセスが不要であり、生産性や歩留まりの観点から産業応用上重要である。実際に、光学機器メーカーが開発したグラフェンを使った電子部品の量産化に向けて、当該グラフェン成膜技術の技術移転を推進している。また、グラフェン(G)を透過電極に用いた超高効率GOS(G/SiO<sub>2</sub>/Si)デバイスの実現により、低コストで高性能な電子顕微鏡、高スループット半導体検査装置などの開発が期待できる。さらに、開発した薄膜グラフェンを用いたデバイスは、低真空で液中でも電子放出することから、液体材料やガス材料に直接電子線を照射することで、分子を分解し重合させる新しい化学反応プロセスの開発など、広範な応用が期待できる。

#### 【課題と対応】

目的基礎研究における課題としては、社会や産業のニーズを的確に把握し将来の「橋渡し」の基となる革新的な技術シーズを継続的に創出することである。これら課題を解決するための対応として、第5期中長期目標期間においては、クロスアポイントメント制度等の活用により大学等の研究機関との連携を一層活性化し、独創的な研究シーズの強化に努める。また、当領域のミッションである「IoT時代を支えるCPS基盤構築」の観点から、横軸を「目的基礎から橋渡し前期、橋渡し後期」、縦軸を「サイバー空間(C)から実空間(P)」とする技術ポートフォリオ上に当領域の主要な研究テーマをプロットすると、目的基礎研究の主要な研究テーマのほとんどはサイバー空間「C」に関するものであり、実空間「P」に関する目的基礎研究が少ない傾向がみられる。そのため、10~20年後に実空間に関する橋渡し研究を展開するためには、この分野の目的基礎研究を育成することが喫緊の課題であり、第5期中長期目標期間においては、領域内の交付金予算の配分方向を見直すことで、萌芽的研究を含む目的基礎研究を推進し、革新的な技術シーズの創出に努める。

#### (2) 「橋渡し」研究前期における研究開発

### 【背景・実績・成果】

「橋渡し」研究前期では、IoT 社会実現に不可欠なネットワーク、センシング、電源など要素技術やデバイス量産化技術の実用化に向け、産業界のニーズを的確にとらえ、産総研が強みを有する技術シーズを中核とした国家プロジェクト等で産業界とともに課題解決を目指していく研究テーマを推進した。

### 【成果の意義・アウトカム】

「橋渡し」研究前期における研究を強力に推進し、情報データの処理量や通信量の増加という課題に対し、STT-MRAM (Spin Transfer Torque-MRAM) や光パスネットワーク技術の開発において顕著な成果を得た。STT-MRAM 技術に関して企業との大型連携（冠ラボ）を結び、実用化に不可欠な大口径プロセス技術を開発し、さらに 10 nm 技術世代の STT-MRAM に必要とされる基盤要素技術を確立した。光パスネットワークについてはシリコンフォトンクスによる光スイッチにおいて、世界初のサブシステムレベルで高速 (35.2 Tbit/s)、低消費電力 (0.51 pJ/bit) での完全動作を成功するなど特筆すべき顕著な研究成果を創出した。製造網コンセプトの実現に関しても、デジタルツイン及びプロセスセンシングの両輪から研究を実施するとともに、複数のつながった工作機器からなる模擬工場を準備し、日本初のテストベッドを整備するなど、産業と研究をつなぐ産総研の役割を果たした。これら「橋渡し」の取組の結果、知的財産の実施契約等件数は年々増加し、令和元年度は平成 27 年度比で 132% (12 月末現在) の増加となったほか、複数の大型の技術移転も実施した結果、技術移転収入も令和元年度には約 3.7 億円に達し、平成 27 年度の 5 倍以上となった。冠ラボについても平成 30 年度までに 2 件を設立し、令和元年度には更に 2 件を設立した。

STT-MRAM の生産プロセス及び 3 次元集積プロセスの開発：

### 【背景・実績・成果】

システム LSI 混載メモリ及び大容量メモリへの応用を目指した不揮発性メモリ STT-MRAM (Spin Transfer Torque-MRAM) の開発が世界規模で進められており、その記憶素子として産総研が開発した基本材料 (MgO トンネル障壁, CoFeB 電極) を用いた MTJ 素子が世界標準となっている。我が国の半導体関連産業の振興に向けて、STT-MRAM の高度化のための生産プロセス及び 3 次元集積プロセスの開発を行った。

平成 28 年度は、垂直磁化 MTJ 素子の参照層用に Ir スペーサー層を独自に開発し、直径 20 nm 以下の超微細 MTJ 素子に要求される記憶安定性指標値を達成した。平成 29 年度に「TEL-産総研先端材料・プロセス開発連携研究室 (TEL 冠ラボ)」を設立し、スーパークリーンルーム (TIA-SCR) の 300 mm プロセスを用いて生産技術の開発に着手した。平成 30 年度は、ArF 液浸露光などを用いて 300 mm ウェハ上にナノサイズ MTJ 素子アレイを作製し、MTJ 特性及びそのバラツキのプロセス条件依存性を詳細に評価することにより、STT-MRAM 生産プロセスの高度化に貢献した。また、平成 27-29 年度は、ウェハ貼り合わせと裏面 Si 基板剥離技術を用いた 3 次元集積プロセスを開発し、STT-MRAM 用の多結晶 MTJ 素子の 3 次元積層に成功した。平成 30 年度は、大口径 Si ウェハ上に作製した全エピタキシャル MTJ 素子の CMOS 回路上への 3 次元積層に世界で初めて成功した。令和元年度は、新規トンネル障壁 Mg-Al-O 材料を用いた全エピタキシャル MTJ 素子の生産プロセスを開発した。これにより、既存の多結晶系では作製不可能であったフルホイスラー系規則合金や Co 基垂直磁化合金、電圧駆動用 Fe 単結晶など、多彩な材料系を全エピタキシャル MTJ に取り入れる技術を実現した。同時に STT-MRAM の超微細化のために不可欠な面抵抗 10  $\Omega$  以下、磁気抵抗比 150 %以上を達成し、10 nm 技術世代の STT-MRAM に必要とされる基盤要素技術を確立した。

### 【成果の意義・アウトカム】

STT-MRAM の開発については、産総研が開発した世界標準材料 (MgO トンネル障壁, CoFeB 電極) に加え、Ir スペーサーを独自に開発し、直径 20 nm 以下の超微細 MTJ 素子に要求される記憶安定性指標値を達成した。この Ir スペーサー層技術は本格事業化が見込まれる STT-MRAM に搭載さ

れ、システム LSI 混載の不揮発性メモリとしてモバイル機器の低消費電力化と低価格化に寄与することが期待される。また、ウェハ貼り合わせと裏面 Si 基板剥離技術を用いた 3 次元集積プロセスを開発し、STT-MRAM 用の多結晶 MTJ 素子の 3 次元積層に成功し、さらに大口径 Si ウェハ上に作製した全エピタキシャル MTJ 素子の CMOS 回路上への 3 次元積層に世界で初めて成功した。開発した 3 次元積層技術は STT-MRAM の超高集積化だけでなく、様々な応用デバイス（磁気センサなど）への活用が期待され、TEL 冠ラボによる「橋渡し」の推進が期待される。生産プロセスの開発については、平成 29 年度に TEL 冠ラボを設立し、産総研スーパークリーンルームにて 300 mm ウェハ上で STT-MRAM 生産プロセスの高度化を進め、ArF 液浸露光などを用いて 300 mm ウェハ上にナノサイズ MTJ 素子アレイを作製し、MTJ 特性及びそのバラツキのプロセス条件依存性を詳細に評価することにより、STT-MRAM 生産プロセスを高度化した。これにより、TEL の MRAM 製造装置の国際競争力強化と世界シェアの向上に貢献すると期待される。TEL 冠ラボは、TEL と産総研が緊密に連携して次世代 MRAM のための新材料・プロセスから量産技術までを一貫して開発する「橋渡し」の強力な推進組織であり、次世代の MRAM 製造プロセス技術の開発促進を加速化するものである。

シリコンフォトニクス技術と光パスネットワーク技術の開発：

#### 【背景・実績・成果】

超スマート社会構築に向けて、情報通信ネットワークの数桁に及ぶ低電力化を実現するダイナミック光パスネットワークの開発を進めた。その基本エンジンであるシリコンフォトニクスによる光スイッチは、すでに商用化されている MEMS などを利用した光スイッチに対して、高速・高信頼・低コスト・小型などの優位性がある。

平成 27-29 年度は、光スイッチのポート数増大を目指し、低損失・低クロストーク・広帯域化などの要素技術を構築、実用化に目処を付ける水準となる 32 ポートの光スイッチを実現した。また、ダイナミック光パスネットワークについて、その運用に不可欠なディスアグリゲーション方式（ハードウェアの構成要素を機能別にモジュール化し、制御ソフトウェアとの連動によって構成や用途を自由に変更可能とするプラットフォーム）の導入を提唱し、国際会議で動態展示を行い、さらに、都内の商用フィールドで実運用を開始した。平成 30 年度は、光スイッチの構造やプロセス条件を最適化し、8 ポートスイッチにおいて、世界で初めてサブシステムレベルで 35.2 Tbit/s のスループットをわずか 0.51 pJ/bit の低消費電力で完全動作させることに成功した。これは、同スループットの電気スイッチの電力の 1/1000 程度である。また、32 ポートでサブシステム動作可能な偏波ダイバーシティ構造スイッチ、すなわち入力波がどのように偏光していても同様に動作するスイッチを試作、評価した。令和元年度は、まず広帯域構造を導入し、次に時間スロットスイッチングのシステム実験を行った。広帯域化では、従来比 4 倍の広帯域化に成功し、その成果は主要国際会議にて最優秀論文賞を受賞した。時間スロットスイッチング実験では、トリガに同期して全パスの同時スイッチングを行い、部分的な評価ではあるが光信号が劣化なくスイッチングできていることを実証した。産総研の特許技術である高速化制御を組み込むことで、ガード時間 5  $\mu$ s での高速時間スロットスイッチングを達成した。全パス光信号を通した切り替え実験は現在進行中であるが、システム実証実験を行うことで、32 ポート光スイッチを複数段接続し大規模化する際に課題となる帯域劣化を解決し、また必要となる同期制御を実現したことで、500 ポート以上の大規模化の見通しを得た。令和元年度末までには、全パスに光信号を通した切り替え実験を開始する。

#### 【成果の意義・アウトカム】

超消費電力・大容量の次世代光情報通信技術として、シリコンフォトニクス技術と光パスネットワーク技術の開発を推進した。シリコンフォトニクスによる光スイッチでは、低損失・低クロストーク・広帯域化に取り組んだ。また、ダイナミック光パスネットワークについて、その運用に不可欠なディスアグリゲーション方式の導入を提唱し、東京都内の商用フィールドで実運用を開始した。8 ポートスイッチにおいて、世界で初めてサブシステムレベルで 35.2 Tbit/s のスループットをわずか 0.51 pJ/bit の低消費電力で完全動作させることに成功した。一方、電気スイ

ツチのエネルギー効率は、数 nJ/bit のオーダーが限界と言われている。したがって本成果により、開発した光スイッチを用いることで、同スループットの電気スイッチとくらべ消費電力を1/1000 程度にできると期待される。現在の公衆ネットワーク網は、構成に大きな無駄があり、やがてネットワーク消費エネルギーは情報量に比例して増大し、特に電気スイッチであるルータのエネルギーが突出すると予測されている。したがって本技術により、ネットワーク全体を同程度に低消費電力化できると期待される。また、従来のインターネット技術では不可能な広帯域と低遅延を低コストで両立した。これら技術は、4K/8K による遠隔医療や自動運転などのアプリケーションを実現するインフラを実現するものとして期待される。

製造網コンセプト：スマート製造モデル化（デジタルツイン）技術の開発：

#### 【背景・実績・成果】

分散した生産リソースを柔軟かつ効率的に活用するためにネットワーク化して高い付加価値を創出する「製造網（Web of Manufacturing）」のコンセプト実現を目指し、製造設備や生産システム全体を自動化、自律化するスマート製造のモデル化技術開発に取り組んだ。製造現場で用いられる設備や、その構成などは、企業毎、工場毎で大きく異なることから、製造網コンセプトの実現のためには、さらに複雑なシステムから得られるデータや設計・運用知識等を用いて製造システムの振る舞いをモデル化する技術に加え、モデルをつなげて相互にデータを流用するための標準化が求められる。

平成 27-29 年度は、センサやコントローラ等から取得される様々なデータをモデルのパラメータとして抽象化し、生産ラインや制御モデルとの関係構造を可視化した。その結果、製造システムのデジタルツインを構築するためには、センサデータや制御データ（例えば、主軸 Z の回転司令値）に加え、機械の状態を抽象化した「機能」レベルの表現（例えば、主軸が停止しているかどうか）も不可欠であることを明らかにした。平成 30 年度は、熟練技術者が重要視している暗黙知を、センサデータと制御データを機能レベルの表現へ接続する情報入出力モデルを開発し、産総研オリジナルの IT 化支援データ可視化ソフト（MZ Platform）上に雛型を自動生成するツールを試作した。令和元年度は、情報入出力モデルの振る舞いを評価するシミュレーションモデルの構築手順の汎用化と、サイバーフィジカル生産システム（Cyber Physical Production System: CPPS）運用において必要となる標準的な機能をモデル化することで、CPPS 設計支援技術の高度化及び汎用化を行った。特に前者については、企業共同研究を通じて、生産ラインを動作させるうえでの様々なロジック（例えば、寸法精度が十分でないときには、当該ワークの加工を停止したあと、どのように復旧作業を行うかなど）の表現に汎用的なプロセス記述手法（シーケンス図）を適用した。この記述手法を用いて、一連のロジックに対応するシミュレーションモデルを容易に構築可能とするようなライブラリの整備を行い、手法の適用範囲を拡充した。上記の記述手法の整備を通じ、雛型自動生成ツールへの入力情報を標準化することで、同ツールの高機能化を図ることが出来た。

#### 【成果の意義・アウトカム】

センサやコントローラ等から取得される様々なデータから機械の状態を抽象化した「機能」レベルの表現をすることがデジタルツインを構築するために重要であることを明らかにした。さらに、熟練技術者が重要視している暗黙知を、センサデータと制御データから機能として表現するための情報入出力モデルを記述する手法を開発し、IT 化支援データ可視化ソフト（MZ Platform）に雛型を自動生成するツールを試作した。この様に、様々な方法で実装されている多様な製造設備に共通した CPPS 設計解を自動で生成する技術を確立することが出来た。これにより、企業毎、工場毎で大きく異なる現場の状況やニーズに対応した様々な CPPS の設計案を一から考えるのではなく、共通 CPPS 設計解と自社の設備を接続する方法を考えるだけで、CPPS を設計することができるようになる。この効率的な CPPS 設計技術は CPPS の実現に必要不可欠であり、日本の製造業の生産性及び競争力向上に大きく貢献する。

製造網コンセプト：プロセスセンシング技術の開発：

### 【背景・実績・成果】

プロセスセンシング技術は、製造網の中で、「生産設備、ライン、製品」の「劣化、障害、品質情報」を取得し、予防保全や予測の効率向上を目指す位置づけと考えている。従来技術では計測が困難であった内部亀裂の進展や接着部材の剥離などの計測を実現する新規センシング材料の開発、多様な情報を活用する生産システムや製品などの状態を機械学習等も用いながら分析・評価する技術の開発、これらを統合して現場への実装するための技術の開発を行った。

平成 27-29 年度は、製造現場の静電気分布や応力発光を用いた炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) 部材の損傷評価の可視化に成功した。また、抜取り検査のような教示データとなるサンプルの少ない現場での品質判定性能向上のために、見做し判定されたサンプルを有効な教示データ用サンプルとして活用する方法を開発した。平成 30 年度は、より実証に近いフェーズの研究として、接着内部の剥離発生、更に民間航空機認定 CFRP 実構造部材の初期損傷発生を応力発光技術を用いることでリアルタイムにモニタリングすることに成功した。その他のセンシング技術開発では、めっき工程において、外観検査により良品判定を行う装置を開発した。センサデータを活用するシステム構築では、生産システムの稼動状況を機械学習により診断できるモニタリングシステムを構築し、企業での実証実験により複数の情報から目的変数を見出し、結果を推定する手法の有効性を確認した。さらにディープラーニングやベイズ推定などにより現場データを解析することで、勘に頼る作業のうち 2 割程度の「予測できる無駄」を発見し、収益性向上や労働者の負担軽減を生産現場にもたらす可能性が示された。

令和元年度は、連携企業の製造現場等での実証試験を行った。応力発光を用いて、製造インフラ締結部の圧力変動を可視化し、その圧力変動情報と周辺情報との相関を解析することで、製造インフラの維持管理の指針を得た。また、応力発光により、航空機用 CFRP 実構造部材の接着強度のむらを可視化し、世界で初めてウイークボンドの検出に成功した。機械学習の生産現場のデータへの適用については、切削工具にかかる負荷の変化のデータを確率相関で網羅解析し、着目項目を洗い出して折損の前兆を見つけた。この技術を用いた工具の寿命や最適メンテナンス間隔などの予測方法を、現場に実装可能な方法として企業に提案した。さらに、プレス加工において、現場での試行錯誤の記録の確率相関を基にした、プレス後の鋼板の立体形状の予測方法を新たに開発するなど、開発した技術の実環境での有効性を示した。

### 【成果の意義・アウトカム】

次世代製造の接合技術と期待されている接着において、接着内部の剥離発生、更に民間航空機認定 CFRP 実構造部材の初期損傷発生を、応力発光技術を用いることでリアルタイムにモニタリングすることに成功した。この技術は高い評価を受け、欧州接着学会において Euradh2018 を受賞した。これは製造業において従来取得困難であった情報が可視化出来ることを示したという点で、産業界だけでなく学术界でも大きなインパクトをもって評価された事を示している。さらに、めっき工程における外観検査による良品判定装置の開発、生産システムの稼動状況を機械学習により診断できるモニタリングシステムの構築、ディープラーニングやベイズ推定などを適用した収益性向上や労働者の負担軽減などについて成果をあげた。これは企業ニーズに基づくものであり、製品ライフサイクルアセスメント、製造現場モニタリング、機器モニタリングについて企業と共同研究を通じて現場導入を進めている。従来取得困難であった情報の直接的な可視化ができるようになるとともに、人工知能技術を活用した間接・拡張モニタリング技術の開発が進むにつれ、複数の作業者の熟練度合いなどの定量化も可能になると期待される。これらはいずれも、製造業の生産性及び競争力向上に大きく貢献する。

MEMS センサネットワークの開発：

### 【背景・実績・成果】

無線センサネットワークを活用して、高速道路等の社会インフラの状態を常時・継続的・網羅的に把握することを可能とするインフラモニタリングシステムの実現が求められている。

NEDO 事業「フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発」(平成 26-30 年度)では、橋梁における亀裂等の検出・監視の自動化を目的として、フレキシブルシート上に

極薄シリコン MEMS 及び印刷グラフィート抵抗体による歪みセンサが高密度に配置され、貼るだけで構造物の歪み分布を計測可能なフレキシブル面パターンセンサを開発した。さらに、フレキシブル面パターンセンサと通信モジュール・受信機・エッジデバイス・小型太陽光発電パネルからなる橋梁センシングシステムを実現した。平成 29 年度は、開発した面パターン歪みセンサが市販の一般的な箔歪みゲージの 1/100 以下の低消費電力を達成し、太陽光発電のみでシステム全体を長期間動作させることに成功した。平成 30 年度は、8 か月以上の長期にわたって実際の高速道路橋で橋梁センシングシステムの実証試験を行い、コンクリートのクラックや鋼橋の亀裂周辺の歪み異常分布の変化から亀裂の進展をモニタリングすることに成功した。令和元年度は、開発した薄膜歪みセンサ技術の実用化に向けて、インフラモニタリングデバイスや、健康管理計測デバイス、製造装置用部品デバイス等をそれぞれ企業に技術移転した。また、センサ技術のみならずアクチュエータ技術への展開を図り、振動で触感を伝達する触覚提示デバイスや、音響信号を発信するフィルム状スピーカーを実現した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

MEMS センサネットワークの開発では、平成 26-30 年度に実施された NEDO 事業「フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発」において、フレキシブル面パターンセンサ及び、太陽光発電のみでシステム全体を動作させることのできる橋梁センシングシステムを開発し、高速道路鋼橋の亀裂進展を対象とした実証実験に成功した。亀裂進展モニタリングに適した歪みセンサアレイを設計・試作し、実橋で歪み分布異常がモニタリングできることを示すという NEDO プロジェクト目標を達成した。これにより、高速道路鋼橋に対する従来の点検手法を補完する無人常時モニタリングが実現し、道路インフラの効率的な維持管理が可能となる。さらに、開発したシステムはダムなどの大型コンクリート構造物全般の健全性モニタリングへの展開が可能であり、増え続ける老朽化大規模インフラという社会課題の解決に向けた貢献が期待される。

IoT デバイス用全固体電池の開発：

#### 【背景・実績・成果】

新たなサービスの創生を可能とする IoT デバイスの普及のためには、電力の継続的供給が課題となっている。高い安全性と信頼性を持つ全固体電池は、IoT センサデバイスと相性が良く、その実現と実証は今後の応用分野の拡大につながる。そこで、先進コーティングアライアンスを活用した企業連携により、素材開発からデバイス実装技術までの研究開発を行った。

平成 29 年度は、液体電解質並みのイオン伝導率の単結晶固体電解質について、品質安定化技術と加工技術を開発し、実用レベルの電流密度でも特性の劣化を招く金属リチウムの dendrite 成長が起こらないことを実証した。平成 30 年度は、AD 法を用いて電解質と活物質の複合層からなる電極形成に成功し、理論容量の 90 % 程度の容量で安定した電池動作が可能となった。また、単結晶を用いた固体電解質中の dendrite 成長のメカニズム解明のための評価・解析を行った。電極面積の拡大のために、工業的に単結晶の大型化が容易な引き上げ法での単結晶育成に成功した。さらに、新規 SiO 電極構造の開発により、従来の黒鉛電極と比べて 5 倍以上の高容量を達成した。令和元年度は、これらの部材化技術を用いた全固体電池を試作して、耐環境性、安全性の実証実験を行った。その結果、有機系電解液を使用している現行リチウム二次電池では不可能な高温環境下での安定した電池動作を確認すると共に、熱分析によって 300 °C 以下で顕著な発熱反応が起こらない熱的安定性を明らかにした。

#### 【成果の意義・アウトカム】

IoT デバイス用全固体電池の開発では、固体電解質、負極を主とした材料開発から、加工技術開発、新しい電極形成技術の開発、実用化に向けた電極の大型化技術の開発を行い、これらの部材化技術を用いた電池試作による耐環境性、安全性の実証実験につなげた。耐環境性・安全性に優れた酸化物型全固体電池の実現により、IoT センサの応用分野が拡大し、新たなサービスの創生につながることを期待される。また、dendrite 成長のメカニズム解明は、より高エネルギー

一密度が期待される全固体リチウム硫黄電池などの革新的な電池の開発を促進する。

ダイヤモンド基板の接合技術の開発：

【背景・実績・成果】

半導体デバイスの高電力効率化・高出力化やモジュールの小型軽量化のため、従来の半導体材料よりも熱伝導率や絶縁破壊電界に優れるダイヤモンドが注目されている。ダイヤモンドを半導体デバイスの放熱基板や新規活性層材料として実用化するため、ダイヤモンド基板とシリコン（Si）や窒化ガリウム（GaN）などの半導体基板との接合技術の開発に取り組んだ。ナノ表面改質層を介した常温接合法により、単結晶ダイヤモンド基板と GaN の直接接合を実現する技術を開発した。令和元年度は、この技術により、三菱電機株式会社との共同研究において、単結晶ダイヤモンドを放熱基板に用いるマルチセル構造の GaN-HEMT（高電子移動度トランジスタ）を世界で初めて開発し、出力密度と電力効率の大幅向上に貢献した。また、高温や超高真空プロセスを必要としない低コストな接合技術として、ダイヤモンド基板表面を洗浄と同時に水酸基修飾することにより Si 基板と直接接合する手法を開発した。この手法で得られた接合界面はアモルファス化がほとんど発生せず、従来手法と比べて高品質な接合界面の形成に成功した。

【成果の意義・アウトカム】

本技術により、「究極の材料」と期待されているダイヤモンドを用いた半導体デバイスの実用化が加速し、パワー半導体の変換効率や入出力電力の向上、冷却機能効率化や小型軽量化などが進むことによって、移動体通信基地局や衛星通信システム等に搭載される高周波電力増幅器の低消費電力化や、車両を含む電動機器の高性能化に貢献するものと期待される。

印刷フレキシブルデバイス（ウェアラブルセンサ、ストレッチャブルデバイス）の開発：

【背景・実績・成果】

大面積の情報入出力デバイスの幅広い普及を目指し、省エネかつ高効率で変量多品種生産を可能にする、常温大気下での高精細印刷デバイス製造技術の開発を行った。令和元年度は、開発技術の実用化に向けて、被服に装着したウェアラブル生体情報素子による心電計測の高信頼性、繊維上にセンサアレイを製造した寝具・建材等向け温湿度モニタリング機器の動作、フィルム状高集積センサ素子技術を用いた福祉ヘルスケア用機器等を実証した。また、これらの技術の実用化を実現するための素子実装技術の開発を行い、はんだ接合や金属接合等、低耐熱性フレキシブル基板上での多種多様な部品の実装を実現する、低温低損傷局所デバイス接合技術の開発に成功した。

【成果の意義・アウトカム】

印刷フレキシブルデバイスの開発について、常温大気下で世界屈指の高精細印刷デバイス製造を実現し、その配線形成分解能は、従来技術よりも一桁小さいサブマイクロメートルに達した。また、汎用プラスチックフィルムや繊維などのフレキシブル基板上に損傷なく、低温でデバイス実装する技術の確立に成功したほか、伸縮性電子材料など、フレキシブルデバイスに適した電極形成技術の確立に成功した。これらの要素技術により、触覚により物流の効率的管理を実現させる触覚ディスプレイ、筋音計測により筋肉疲労を評価するウェアラブルセンサ、などをはじめとした多様な実用フェーズのデバイス製造に成功した。これらの成果は、大面積の情報入出力デバイス、及び形状自由度を有する情報入出力デバイスの高効率製造を可能にし、情報入出力機器の幅広い普及を促進させると期待できる。またフレキシブルデバイスの実装自由度が広がり、情報端末入出力機器を設置させることができる場所の大幅な拡充が可能になる。これらの普及や社会実装を通じて、IoT 社会の高度化が進展すると期待される。

センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発：

【背景・実績・成果】

圧電センサは IoT 機器のキーデバイスの一つであり、高感度化や小型化などの特性向上が求め

られている。その対応として、圧電センサ材料として期待されている窒化物薄膜の特性向上に関する研究を行い、第3期に、高い圧電性を示すスカンジウム添加窒化アルミニウム (ScAlN) 薄膜などの開発に成功した。第4期は、IoT デバイス開発への貢献を目指し、AlN 及び GaN を主なベース材料とした窒化物薄膜の圧電性などの特性向上に関する研究開発を行った。令和元年度は、平成30年度に理論計算により予測した新規窒化物圧電薄膜を作製し、マグネシウムとタンタルを同時添加した AlN の低濃度領域で ScAlN と同等の圧電性能を得ることに成功した。また、産総研外の他の研究グループにより、Yb を AlN に添加した場合、圧電特性の向上が示されていたため、それを検証するために YbAlN 薄膜を作製し、その特性を評価した結果、単元素添加としては ScAlN に次ぐ高い圧電性を示すことを確認した。さらに平成30年度に引き続き、計算機シミュレーションによる材料探索を進めた結果、これまでに誰も提唱していない新しい材料設計指針として複数の遷移金属の組合せにより AlN の圧電性能が飛躍的に向上する可能性を示した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

IoT を支える多くの圧電デバイスには酸化物系圧電薄膜が使われているが、半導体プロセスとの親和性の観点から高い圧電性を有する窒化物系圧電薄膜の開発が産業界から期待されている。マグネシウムやニオブ等の調達が容易な金属元素で構成され、ScAlN 薄膜と同等以上の高い圧電性を示す複合窒化物圧電薄膜を発見した。この複合窒化物圧電薄膜は、これまで窒化物系圧電薄膜が使われてきたセンサや移動通信用高周波フィルタへの利用はもちろんのこと、その他の酸化物圧電薄膜が使われているデバイスへの適用も想定されることから、IoT を支える多様な基幹デバイスの革新が期待される。なお窒化物圧電薄膜の開発については、プレス発表2件、材料系では最大級の国際会議 Materials Research Society Meeting での表彰1件、平成30年度全国発明表彰・21世紀発明奨励賞及び21世紀発明貢献、平成30年度岡崎清賞を受賞するなど高い評価を得た。

#### 【課題と対応】

「橋渡し」研究前期における課題としては、革新的な技術シーズを橋渡しに繋げていくため強い知財の創出（量及び質）及び橋渡しのための効果的な研究開発テーマ設定が挙げられる。これに対応するため、第5期中長期目標期間の初年度である令和2年度に、研究戦略部に新たに連携推進室を設置し、拠点環境整備や知財の取り扱いを専門とする部署と協力して、産業界のニーズを的確にとらえた研究開発テーマを設定し、橋渡し先の企業とともに、技術シーズを中核とした国家プロジェクト等を実施する。また、引き続き企業との大型連携による冠ラボの設立数を増やし、産総研の技術シーズを効果的に橋渡しする。

### (3) 「橋渡し」研究後期における研究開発

#### 【背景・実績・成果】

「橋渡し」研究後期では、高度化したデバイス・材料・製造要素技術に関して企業への技術コンサルティングやコンソーシアム運営を通じて産業界のニーズを的確に把握することにより、成果の橋渡しを効率的かつ効果的に推進できる研究テーマ設定を行った。

#### 【成果の意義・アウトカム】

「橋渡し」研究後期における研究開発では、コンソーシアム等の運営や国家プロジェクト、ニーズ調査等を通じた産業界のニーズの的確な把握と、実施する研究開発に対応した適切なバリューチェーンやエコシステムの構築を並行して進めながら研究開発を行い、技術移転として、令和元年度(12月末現在)までに知的財産の譲渡契約及び実施件数を4件、製品化は7件実現した。また、ミニマルファブ及びスマート製造ツールキットの開発では、今後の連携拡大を図るため、臨海副都心センター内に研究成果の実証拠点を整備した。民間資金獲得額は、平成27年度の6.4億円から令和元年度の20.3億円(12月末現在)となり、目標達成率は約92%と未達ではあるが、

第4期中長期目標期間前（平成23年度から25年度の平均；約6.3億円）の3倍を上回る値まで伸びた。

変量多品種IoTデバイス生産を実現するミニマルファブの開発と普及：

**【背景・実績・成果】**

産総研が提案し開発を進めている半導体デバイスの多品種少量生産システム・ミニマルファブを具現化し、社会実装する活動を展開した。ミニマルファブは、少量生産に適するよう、300mmウェハを使う既存のメガファブと比較して、ウェハ面積が約1/1000の1/2インチウェハと幅30cmの超小型製造装置を用いた。

ミニマルファブを実現するため、平成27-29年度は、前工程装置群及びMEMS向け深掘りエッチング装置の人サイズ（H1440mm×W294mm×D450mm）への超小型化（メガファブ向け装置の一般的な大きさはH2500mm×W2000mm×D5000mm程度）と実動装置開発に成功し、これらを動作させてアルミゲートCMOSプロセスと、世界最高レベルの高精細微細化立体構造の形成を実現した。平成30年度は、遠隔操作の際にウイルスの侵入を防ぐために必須となる装置セキュリティ機能を有する遠隔操作可能な「世界最先端装置駆動システムμFIX」を開発し、μFIXを実機搭載するとともに、0.5μmの微細寸法（ゲート長は3μm以上）で、集積回路を実用化するために必須の基本演算素子（NANDゲート）動作と基本演算回路（SOI（Silicon On Insulator）-CMOSで加算器動作）を実現した。さらに九州センターにミニマルIoTデバイス実証ラボを、臨海副都心センターには試作拠点を設立し、ミニマルファブ技術の産業展開を進めた。令和元年度は、上記CMOSプロセスを実用集積回路生産に向けて、プロセス安定化技術を開発し、200素子レベルの集積回路動作を実証した。また、離れた地域にあるミニマル装置を、PC及びスマートフォンから遠隔操作する基礎システム構築に成功した。この成果は、多くのミニマル装置メーカーの装置監視による装置改良及びアップデート手段として、直ちに実用に供した。

**【成果の意義・アウトカム】**

生産のグローバル化が進む中、多様化する顧客ニーズに応じて高付加価値の製品やサービスを創出していくことは、我が国の産業界の最重要テーマの一つである。多様化する顧客ニーズへの対応は、変量多品種システムの必要性を意味する。ミニマルファブは、半導体製造においてこの変量多品種生産を実現する。これまでの半導体産業における資金力を競争力の源泉とするメガ競争とは一線を画し、誰もが参入できるハイテク産業のスマールビジネスを実現するシステムである。ミニマルファブが実現すると、(1)設計などの準備を含め、これまで2-6か月かかっていたデバイスの製造を、1週間以内で実行できるようになり、(2)宇宙開発機器で使用するデバイスなどにおいて、例えばデバイス1個だけをテーラードする場合、従来技術では1-10億円の費用を必要とするところ、100万円程度で製造できるようになる。ミニマルファブにより、新事業創出のアイデアと意思があれば、大きな資金を集めずともハイテクビジネスを起こすことができるようになり、多くの人々がその恩恵を享受できる産業システムが構築される。前工程装置群及びMEMS向け深掘りエッチング装置などプロセス装置を開発し、ミニマルファブによるCMOSデバイスやMEMSデバイスの作製を実現したことや、ミニマルIoTデバイス実証ラボ（九州センター）と試作拠点（臨海副都心センター）を設立し、ミニマルファブ技術の産業展開を進めたことは、ミニマルファブの実現に大きく貢献するものであり、低コストで高速な変量多品種IoTデバイス開発の実現が期待される。特に、半導体をはじめとする製造業と密に連携する九州センターに設置したミニマルIoTデバイス実証ラボは、九州地方の地域イノベーションに貢献するものと期待される。ミニマルファブはこれまでに51機種が商品発売され実用化段階に入っている。また、これらの実用化開発の成果を認められ、これに貢献した中心研究者が電気科学奨励賞（旧オーム賞）を受賞した。さらに、パッケージング技術では企業への技術移転を行い、実際にパッケージングに関するミニマルファウンダリ事業が立ち上がった。

製造プロセスの高度化と複合化技術の開発：

**【背景・実績・成果】**

ものづくりにおける産業競争力強化に資するため、積層造形技術の高度化と、鋳造、塑性加工、切削、プレス、電解加工など、基盤的な加工技術の高度化と体系化、さらに相互の複合化により、加工速度の高速化と加工形状の複雑化などを可能にする加工プロセス技術の開発を進めた。

この技術開発における代表的な研究テーマとして、鋳造用砂型の積層造形では、平成 27-29 年度は、経済産業省からの受託事業「超精密三次元造形システム技術開発」のプロジェクトリーダーとして装置の開発を主導し、材料の乾体化、高速硬化のための要素技術とシステム化の開発などにより、 $1.8 \times 1 \times 0.75 \text{ m}^3$  の造形空間を持ち、その空間内にプロジェクト目標である 10 万 cc/h で造形可能な大型積層造形装置を開発した。同サイズの海外製装置に比較して約 2 倍という世界最速の造形速度を実現し、造形装置 1 台で自動車部品など月産数千～数万台の鋳造品への適用も可能となった。令和元年度は、造形材料の開発による積層造形鋳型の高強度化と新たに無機材料の適用について研究開発を行った。積層造形鋳型の高強度化により、より薄く、より細い形状の鋳型の造形を実現し、鋳造メーカーに技術移転した。当該技術により作製した鋳造品は、従来の鋳造品より複雑な内部構造、薄いフィン形状等が可能となり、航空機部材、自動車部材等の薄肉・コンパクト・軽量化、熱交換性能向上などの性能向上が実現可能となった。また、無機材料の適用により、鋳造時に発生する有機ガスを削減することが可能となり、鋳造品の品質向上、作業環境改善を実現した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

機械部品に要求される、高剛性かつ軽量化、複雑形状化、表面微細加工、マルチマテリアル（材料の新規性や多様性）化などの様々なニーズに応える砂型積層造形技術を開発し連携企業による事業化が開始された。平成 27 年度に株式会社シーメットより先行上市された  $0.8 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$  の造形空間を有する小型積層造形装置（SCM-800）は秋田県、兵庫県、三重県の公設試験所をはじめ、各地の企業へ 10 台を超える装置が導入され、普及が進んでいる。平成 30 年度には、広い造形空間（ $1.8 \times 1 \times 0.75 \text{ m}^3$ ）を有し、世界最速の造形速度（10 万 cc/h）を実現した大型高速積層造形装置（SCM-1800）が上市され、1 号機がポンプメーカーに納入されてポンプケース、インペラ等の鋳造部品製造への活用が開始された。この大型積層造形装置並びにその開発技術について、日刊工業新聞社が主催する令和元年度第 48 回日本産業技術大賞の審査委員会特別賞、令和元年度日本鋳造工学会豊田賞並びに論文賞を受賞するなど学会、産業界において高い評価を受けた。本技術は、国内約 2 兆円の産業規模の鋳造部材の高度化、高付加価値化に寄与するものである。従来は不可能であった薄肉中空構造、複雑形状の鋳造品を製造できる砂型積層造形技術は装置を導入した企業において、航空宇宙部材、自動車部材、産業機械部材への活用が進んでいる。エンジン、モーター等の自動車部材の形状最適化による自動車の省燃費、性能向上など鋳造品を利用する産業全般に及ぶ寄与が期待される。特に航空宇宙部材、自動車部材の高品質複雑形状砂型鋳造品を実現した成果では、装置導入企業の谷田合金株式会社、石川県工業試験場とともに令和元年度の第 8 回ものづくり日本大賞「優秀賞」を受賞するなど高い評価を受けた。経済産業省からの受託事業完了後においても、装置を上市した企業との要素技術に関する共同研究だけでなく、装置導入企業との共同研究契約も締結されており、要素技術から応用まで実用化を目指した研究を展開している。

社会で活躍する先進コーティング技術の開発：

#### 【背景・実績・成果】

第 4 期は、AD 法や、光 MOD 法などの産総研が世界を先導するコーティング技術を核に、橋渡しを進め、さらに多事業分野での民間企業への展開を目指した材料開発や成膜メカニズム解明に基づいたプロセスの高度化を行った。

産総研独自の技術である AD 法については、樹脂フィルム上へのポーラス  $\text{TiO}_2$  膜のロール・ツー・ロール形成（真空中で成膜し連続的に大気中へ取り出し巻き取る）手法を企業に技術移転し、生産能力 2 万  $\text{m}^2$ /年のフレキシブル色素増感型太陽電池（Dyesensitized Solar Cell: DSC）のパイロット量産機を積水化学工業株式会社が開発及び導入し、平成 29 年度に「低照度でも発電（500 ルクス以下）・薄い（1 mm 以下）・軽い（ガラスの 1/10 以下）・曲がる・貼れる」という特

徴を有する製品を同社が上市した。また、AD法や光MOD法を多用途に適用するために設立した先進コーティングアライアンス(ADCAL)は、平成28年2月の設立当初の28社から現在46社に参画企業を拡大した。これに伴う参画企業の要望に応え、原料粒子の特性改善やプラズマ照射による表面活性化法(プラズマ援用AD法)などのハイブリッドAD法の導入により、様々な酸化物材料に対し成膜効率を10倍以上に向上することに成功し、コストダウンの目途を得た。令和元年度は、エネルギー関連部材応用や歯科部材応用、調湿材料応用など、各々の材料に対し用途に応じた膜質と機能の検証、及び特性改善を行った。その結果、歯科部材応用については、義歯インプラントの機械的強度(曲げ試験:曲率半径5mm以上で剥離無し)ならびに白色度( $L^* > 80$ )を達成し、技術移転先企業で臨床テストを開始した。調湿材料コーティングではロール・ツー・ロール量産装置での被膜を実証し、共同研究先企業にて量産実証を開始した。また、発電用ガスタービンブレードの耐食防止コーティングでは機能実証に成功して、技術移転を完了した。さらに、紫外線照射による表面化学修飾法により5G向け高周波回路基板用の超平滑・銅/ポリマー接合技術の開発に成功し、プレス発表を行った。

光MOD法の蛍光体コーティングでは、平成27年に新規LED(Light Emitting Diode)用の高輝度蛍光材料開発を行い、資金提供型共同研究に繋がった。平成28年度は、LEDに対応した新規高輝度・蓄光材料とフレキシブル高輝度蓄光膜の開発に成功した(従来比3倍の輝度:平成29年2月6日プレス発表)。平成29年度は、ADCALを活用した出口企業とのバリューチェーンを構築し、蓄光材料の応用仕様に基いた開発方針を明確化した。この方針に沿って、室外応用に対応した高輝度・長残光材料を産総研が主体となって共同開発した。平成30年度は、材料の量産化技術の確立とともに、蛍光体部材の信頼性評価を行い、耐久性を確認した(高温高湿環境下1000時間の加速劣化評価にて輝度変化率が1.7%)。令和元年度は、企業とのバリューチェーン(材料メーカー、建築メーカー、高速道路、鉄道等)を活用し、コンクリート、鋼材、樹脂部材性能の実証試験を行った。PET(Polyethyleneterephthalate)樹脂上のフレキシブル蓄光膜について鉛筆硬度試験を行い、5Hを達成した。また、励起LEDのブルーライトの低減効果を明らかにし、LED照明用のカバー部材性能の実証試験を行うなど、応用展開が拡大した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

先進コーティング技術開発では、第4期は、AD法や光MOD法などの産総研が世界を先導するコーティング技術を核に橋渡しを進め、さらに多事業分野での民間企業への展開を目指した材料開発や成膜メカニズム解明に基いたプロセスの高度化を行った。AD法の技術移転をTOTO株式会社へ進めた結果、当該企業が低発塵半導体部材の事業化に成功し、第6回(平成27年度)ものづくり大賞「内閣総理大臣賞」、第49回(平成30年度)大倉和親記念財団表彰を受賞した。現在同部材は、先端ロジックチップやメモリチップなどの半導体製造における歩留まり維持に不可欠になっており、同部材の世界シェアは70%以上になり、世界の半導体製造を支える重要技術に成長した。また、AD法によるフレキシブルDSCの実用化に関しては、薄い・軽い・曲がる・貼れるという特徴を利用して窓へ設置する「防犯センサ」やドアや家電などに設置する「見守りセンサ」として製品販売が企業から予定されており、この他にも電子広告、IoTセンサ向けの独立電源としての利用が期待される。また、AD法の全固体電池適用性を示したことで、国内外での電池研究の専門家や専門機関にも注目され、全固体電池開発でのAD法活用の動きが活発化してきている。光MOD法による高輝度蓄光膜の開発に関しては、日中の太陽光励起を活用した部材の発光性能向上により、屋内のみならず屋外での適用が可能となり、高速道路の夜間走行や風雪などの視程不良時の発光が必須な各種インフラへの安全性向上に資する道路標示版やラインなどの新規部材へ応用されることで、安全、安心社会の構築に貢献するとも期待できる。また、JAICAプロジェクトにおいて企業が実施した、夜間照明のないネパールの道路視線誘導での実証実験に進展しており、さらに、他のアジア地域における道路インフラ及び建築整備計画での展開が検討されている。これらの成果は、産総研独自技術として、平成29年度のセラミックス協会学術賞、21世紀記念倉田元治賞などを受賞した。

極微量ウイルスの検出が可能な外力支援近接場照明バイオセンサの開発:

### 【背景・実績・成果】

インフルエンザウイルスやノロウイルスなどによる感染症予防を実現するために、環境中に放出された極微量のウイルス粒子を検出可能なバイオセンサの開発を行った。

平成 29 年度までに、抗体を修飾した磁気ビーズと標識ビーズによって対象のウイルスをサンドイッチして外部磁場によって動かすことができる光点を作り出し、この動く光点をシグナルとして検出することを原理とする外力支援近接場照明バイオセンサを開発した。本手法により、都市下水の二次処理水 100  $\mu$ l 中に 40 個程度混合したノロウイルス様粒子の検出に成功するとともに、夾雑物が多く含まれる自然環境試料中からの極微量ウイルス検出を実証した。平成 30 年度は、インフルエンザウイルスや、環境水のヒト糞便汚染の指標ウイルスとして有効な植物ウイルスであるトウガラシマイルドモットルウイルスを測定対象として用いた検出試験を行い、これらのウイルスへの適応も可能であることを示した。また、ウイルス粒子そのものではなく、ウイルスを溶解して得られるたんぱく質を標的として本手法を用いることにより、さらに 1~2 桁程度の高感度検出が見込めることも明らかにした。さらには、本技術の実用化に向け、複数の企業と共同研究を実施するとともに、「外力支援型バイオアッセイ技術コンソーシアム」を設立し、技術の社会実装を推進した。令和元年度は、センサの実際の利用シーンとして、ウイルス感染予防に対する要請が著しく高い、高齢者施設や食品工場へのウイルス持ち込み防止を想定したセンサの開発を行った。施設に出入りする人全員に対して、見落としなくウイルス保有の有無を検査するためには、高い感度に加えて、高速（短時間検出）で、操作が簡便な検出技術であることが求められる。検出速度の向上化技術の開発に注力し、使用する抗体の選定、標識試薬や磁気ビーズの濃度や粒径の最適化、磁場印加機構の改善により、高い感度を保持したまま、従来の 3 倍の高速化（検出時間 10 分以内）を実現した。最終目標として令和 3 年度までに 1 分以内での検出を実現することを目指して研究を実施中である。また、測定方法を見直すことで、装置に使用する磁石の削減、及びそれに付随するパーツの削減が可能となり、更なる装置の小型化及び制御性の向上を実現した。また、連携企業と共同で、この新しい磁場印加機構を採用した試作機を開発し、第 20 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議（nano tech 2020）に出展した。

### 【成果の意義・アウトカム】

バイオセンサの開発に関する特筆すべき成果として、抗体を修飾した磁気ビーズと標識ビーズによって対象のウイルスをサンドイッチして外部磁場によって動かすことができる光点を作り出し、この動く光点をシグナルとして検出することを原理とする外力支援近接場照明バイオセンサを開発した。極微量ウイルスの検出には、一般にポリメラーゼ連鎖反応（Polymerase Chain Reaction: PCR）法が用いられるが、実験室の清浄な環境でしか使えない。またイムノアッセイは、極微量のウイルスを検知するには感度不足である。酵素結合免疫吸着法などの高感度なイムノアッセイは夾雑物が検出の妨げになるため、環境水などの試料では感度不足のうえ、操作が複雑になる。本技術により、夾雑物が多く含まれる自然環境試料中からの簡便な極微量ウイルス検出が可能となり、「外力支援型バイオアッセイ技術」による極微量ウイルス検出技術の社会実装が進むと期待される。これにより目に見えないウイルスを可視化し、容易に検出することによって、より確実な感染防止・ウイルス汚染監視が可能になると期待される。

スマート製造ツールキットの開発：

### 【背景・実績・成果】

製造業の生産現場に IT や IoT を導入して、各種情報の収集、処理、分析、通知までの自動化（スマート製造化）を促進することは、生産性向上と競争力向上に必要である。産総研オリジナルの製造業 IT 化ツール「MZ Platform」を拡張し、製造業事業者が独自に IT 化のみならず、IoT 化の実施を可能とするスマート製造ツールキットを開発した。スマート製造化の促進には、IT や IoT の専門家に依頼して市販のツールやプラットフォームを導入する選択肢があるが、スマート製造ツールキットを用いることで IT や IoT の非専門家である製造業事業者が独自に取り組める点が優れている。

平成 27-29 年度は、IoT 化に必要な自動データ収集と可視化、分析、通知に関するニーズ調査

と、既存の機器設備を IoT 化する実験を行い、機能拡張の範囲を決定して自動データ収集と可視化、分析、通知の機能を開発した。平成 30 年度は、安価なセンサやマイコンを用いて既存の機器設備を IoT 化するための資料等をコンテンツ集としてまとめた。コンテンツ集は、平成 30 年 12 月から一般に配布を開始し、スマート製造ツールキットを用いた企業や大学等でのシステム化事例を蓄積してきた。平成 31 年 2 月時点で 3 件の事例があり、具体例の 1 つとしては企業の生産現場で既存のプレス加工機から稼働実績データを自動収集して可視化と分析を実現し、それによって生産のサイクルタイムのバラツキを明らかにし、改善活動や人材育成の必要性を示したことが挙げられる。令和元年度は、産総研臨海副都心センターに設置した「つながる工場モデルラボ」において実証展示等を行い広報活動を展開し、技術移転と人材育成を実施した。実証展示としては、臨海副都心センターとつくば東事業所に設置された工作機械等の稼働状況と稼働実績を相互に可視化するシステムを構築し、のちに中国センターと九州センターの機械も可視化対象に追加した。さらに、その可視化用の端末を中国センター、九州センター、四国センターの 3 か所に設置し、地域センターでの実証展示も可能とした。人材育成については、配布中の IoT 化用コンテンツ集を用いた実技講習を地域センター 3 か所と公設試験所 2 か所で開催した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

産総研オリジナルの製造業 IT 化ツール「MZ Platform」に、既存の機器設備を IoT 化し、自動データ収集と可視化、分析、通知する機能を拡張した。さらに、安価なセンサやマイコンを用いて既存の機器設備を IoT 化するための資料をまとめたコンテンツ集の一般配布を開始し、スマート製造ツールキットの普及を進めている。このスマート製造ツールキットの普及により、中小企業を含めた製造業事業者が独自に生産現場の IT 化や IoT 化を推進するための強力な手段を手にすることが期待される。これは我が国の製造業の生産性向上と競争力向上に大きく貢献するものと期待される。

シリコンフォトニクス技術開発に関するエコシステムの構築：

#### 【背景・実績・成果】

産総研が有する世界最高レベルのシリコンフォトニクス設計加工技術の社会への橋渡しが期待されている。令和元年度は、これまで開発してきたシリコンフォトニクスのデバイス設計基本情報や標準デバイスメニューをまとめたプロセスデザインキット (PDK) を整備し、ユーザーによるデバイス設計を容易にし、産総研コンソーシアムであるシリコンフォトニクスコンソーシアムの参加企業や大学をユーザーとした、初めての相乗り (マルチプロジェクトウエハ:MPW) 試作を成功裏に完了した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

本成果により、産総研がシリコンフォトニクスの先端技術開発拠点として貢献できる体制を整備できた。今後、光デバイスが益々シリコンフォトニクスを用いるようになり、ファブレスモデルが主流となっていく中で、民間企業や大学等の外部ユーザーがシリコンフォトニクスの研究開発試作を簡便に行えるようにしたことの意義は大きい。これにより、光デバイス産業エコシステムが国内で構築され、国際競争力の維持・増強が期待される。

印刷フレキシブルデバイス (ウェアラブルセンサ、ストレッチャブルデバイス) の開発：

#### 【背景・実績・成果】

大面積の情報入出力デバイスの幅広い普及を目指し、省エネかつ高効率で変量多品種生産を可能にする、常温大気下での高精細印刷デバイス製造技術の開発を行った。平成 28 年度までに、世界屈指の高精細印刷デバイス製造を実現した。その配線形成分解能は、サブマイクロメートルに達し、印刷製法では従来マイクロメートル台であった分解能を大きく改善した。また、平成 29 年度までに、汎用プラスチックフィルムや繊維などのフレキシブル基板上に損傷なくデバイスを製造する技術として、150℃以下の加工温度で、デバイス製造、実装、接合などを可能にする印刷製造技術の開発に成功した。平成 30 年度は、これらの低損傷大面積デバイス製造技術と別途

開発した伸縮性電子材料を組み合わせるストレッチャブルハイブリッド化技術を確立し、触覚により物流の効率的管理を実現させる触覚ディスプレイ、筋音計測により筋肉疲労を評価するウェアラブルセンサ、音が鳴る生地という独創的な特徴を有するファブリックスピーカー、車両の運転制御に用いる気流センサシートなど、フレキシブルセンサを中心とした多様な実用フェーズにあるデバイスの製造を実現した。これらは、製品化に向け企業への橋渡しを進めてきた。

平成 30 年度末にフレキシブルエレクトロニクス研究センターが終了したのを機に、同センターと電子光技術研究部門、集積マイクロシステム研究センターの 3 研究ユニットでセンサおよびセンシングシステムの研究開発を行って研究者を集め、令和元年度にセンシングシステム研究センターを新たに設立した。新研究センターでは、「安全・安心で心身ともに健康で豊かな暮らしに貢献する高性能センシング技術の開発」という目標に向け、これまでに開発してきたフレキシブルデバイス技術を発展させて、新たなセンサ・センシングシステムを開発するため、令和元年度は「橋渡し」前期研究に立ち返って研究を進めた。そのため、令和元年度の実績、成果の意義等は「橋渡し」前期研究の欄に記載した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

印刷フレキシブルデバイスの開発について、常温大気下で世界屈指の高精細印刷デバイス製造を実現し、その配線形成分解能は、従来技術よりも一桁小さいサブマイクロメートルに達した。また、汎用プラスチックフィルムや繊維などのフレキシブル基板上に損傷なく、低温でデバイス実装する技術の確立に成功したほか、伸縮性電子材料など、フレキシブルデバイスに適した電極形成技術の確立に成功した。これらの要素技術により、触覚により物流の効率的管理を実現させる触覚ディスプレイ、筋音計測により筋肉疲労を評価するウェアラブルセンサ、などをはじめとした多様な実用フェーズのデバイス製造に成功した。これらの成果は、大面積の情報入出力デバイス、及び形状自由度を有する情報入出力デバイスの高効率製造を可能にし、情報入出力機器の幅広い普及を促進させると期待できる。またフレキシブルデバイスの実装自由度が広がり、情報端末入出力機器を設置させることができる場所の大幅な拡充が可能になる。これらの普及や社会実装を通じて、IoT 社会の高度化が進展すると期待される。

センサ用高圧電性材料の開発：

#### 【背景・実績・成果】

圧電センサは IoT 機器のキーデバイスの一つであり、高感度化や小型化などの特性向上が求められている。その対応として、圧電センサ材料として期待されている窒化物薄膜の特性向上に関する研究を行い、第 3 期に、高い圧電性を示すスカンジウム添加窒化アルミニウム (ScAlN) 薄膜などの開発に成功した。第 4 期は、IoT デバイス開発への貢献を目指し、AlN 及び GaN を主なベース材料とした窒化物薄膜の圧電性などの特性向上に関する研究開発を行った。

平成 27-29 年度は、レアアースを使わずに安価なマグネシウムとニオブを AlN に同時添加することにより ScAlN と同等の圧電性能を実現した。また、ハフニウムやモリブデンの金属配向層の利用で単結晶と同等の圧電性を示す高品質な GaN 配向薄膜をスパッタ法で作製する技術を開発するなど、産業界に貢献する成果を挙げた。とくに、企業との共同研究等を通して開発した ScAlN 圧電薄膜については、平成 29 年度には特許実施契約締結による技術移転収入に結び付くとともに、最新型スマートフォンの高周波フィルタに搭載されている。平成 30 年度は、新しいセンサ材料開発を目指して第一原理計算などを用いて材料探索を行い、マグネシウムと複数の遷移金属元素の組み合わせによって、ScAlN を超える圧電性能を示す新規の窒化物を予測した。

開発した ScAlN が高周波フィルタに実用化されるなど、橋渡しが完了したことから、令和元年度は「橋渡し」前期研究に立ち返って、ScAlN よりも安価で、高い圧電性を示す新しい圧電材料の研究開発を進めた。そのため、令和元年度の実績、成果の意義等は「橋渡し」前期研究の欄に記載した。

#### 【成果の意義・アウトカム】

IoT を支える多くの圧電デバイスには酸化物系圧電薄膜が使われているが、半導体プロセスと

の親和性の観点から高い圧電性を有する窒化物系圧電薄膜の開発が産業界から期待されている。マグネシウムやニオブ等の調達が容易な金属元素で構成され、ScAlN 薄膜と同等以上の高い圧電性を示す複合窒化物圧電薄膜を発見した。この複合窒化物圧電薄膜は、これまで窒化物系圧電薄膜が使われてきたセンサや移動通信用高周波フィルタへの利用はもちろんのこと、その他の酸化物圧電薄膜が使われているデバイスへの適用も想定されることから、IoTを支える多様な基幹デバイスの革新が期待される。なお窒化物圧電薄膜の開発については、プレス発表2件、材料系では最大級の国際会議 Materials Research Society Meeting での表彰1件、平成30年度全国発明表彰・21世紀発明奨励賞及び21世紀発明貢献、平成30年度岡崎清賞を受賞するなど高い評価を得た。

#### 【課題と対応】

「橋渡し」研究後期における課題としては、醸成された開発技術に対して最大の効果を得るため、多様なアプリケーションの開拓、及びそれを効果的、効率的に実用化に繋げるためのバリューチェーンやエコシステムの構築が挙げられる。これには試作環境やプラットフォームの整備を通じた技術移転環境の整備、及び技術コンソーシアム等の形成によって川上産業から川下産業までを効果的につなぐことが対応策となる。そのため、第5期中長期目標期間では、平成30年度に整備した産総研臨海副都心センターの「つながる工場モデルラボ」と「ミニマルファブ」における実証展示等により、広報活動を積極的に展開することで技術移転につなげる。さらに、東京大学と連携する「産総研・東大 AI チップデザインオープンイノベーションラボラトリ (AIDL)」を通じて、新規人工知能チップの開発と社会実装に取り組むことで、ベンチャー企業等への技術の橋渡しを進める。IoTの進展に伴い社会・産業ニーズが急拡大しているセンサ・センシング技術の橋渡しについては、第5期中長期目標期間は、センシング技術連絡会の活動を通じて、これまで領域毎またはイノベーションコーディネータ毎にバラバラに収集していた企業ニーズ情報を産総研全体で集約することにより、産総研のセンサ・センシング技術の効果的かつ効率的な企業等への橋渡しを進める。

#### 4. 前年度評価コメントへの対応

委員コメント1：最重要目標の民間資金獲得額については、全体資金におけるその他の資金との比率のバランスを取ることが重要であり、その観点ではほぼバランスよく獲得できているが、目標額を達成することは難しく、現在の延長線で達成するためには相当な努力が必要と思われる。一方で、民間資金獲得額を伸ばすためには、それに伴う人的資源や設備・スペースなどのリソースが必要となる。その点についてのマネジメントも検討いただきたい。

対応) 限られたリソースの中で、民間資金獲得額を伸ばすために、当領域では企業連携を担当するIC、連携主幹の人員の増強を行うとともに、それら連携担当者の活動により、共同研究の大型化を進めてきました。その際、大型連携を実施しやすいようにまとまったスペースを領域として確保する等の取組も並行して行いました。その結果、平成30年度までに大型共同研究である冠ラボを2件設置し、令和元年度も2件設置しました。このような活動により、令和元年度は12月末現在で民間資金は20.3億円まで増加し、第4期中長期目標期間前（平成23年度から25年度の平均）の3倍以上となり、目標額（22.1億円）の92%になりました。第5期中長期目標期間も、このような活動を通じて、民間資金の継続的な獲得を目指します。

委員コメント2：外部資金の獲得額が目標値に達していないが、技術的にはポテンシャルを持っていると感じる。いかに資金を得ていくのか、発想の転換が必要ではないか？

対応) 第4期中長期目標期間は、民間資金の獲得が第一の目標となっていたため、当領域でも民間資金の獲得額増に向け、共同研究の大型化等を行ってきました。その結果、民間資金の獲得額は今年度12月末現在で目標額の約92%（令和元年度目標額22.1億円）となり、昨年度の達成率約81%（平成30年度目標額19.0億円）を大きく上回っています。一方、民間資金を増やすため

には連携の基となる技術シーズを産み出す必要があることから、当領域では研究予算のバランスも重視しており、運営交付金、公的資金、民間資金の比率が1:1:1になることを目指しています。特に、NEDO 事業等の公的資金は、企業と連携して技術開発を進め、事業化を目指すための予算であり、このような公的資金による研究開発を増やすことは、将来、資金提供型共同研究へと発展して行くものと考えられます。そのため、民間資金獲得増に向けた共同研究の大型化等の活動を継続しつつ、民間企業と連携した公的資金の獲得も進めていきます。

委員コメント3：目的基礎研究は長期的展望が必要で、次期につながっていくものである。また国際競争の激しい分野であることから、どこに焦点を置いて研究するかを明確に示す必要がある。

対応) 近年、AI や量子コンピューティングの技術開発が急速に進んでいますが、10年前にはこれらの分野が花開くとは考えられていませんでした。一方、当領域は、30年以上にわたり超伝導デバイスの研究開発を継続し、また量子コンピューティングの研究開発も実施してきた結果、それら技術・知見の蓄積・継承により、現在、日本における量子デバイス開発の拠点となっています。今後は、このような長期的な技術開発を戦略的に行うための研究マネジメント人材の育成・確保にも努めていきます。

委員コメント4：成果は、少なくともオープンイノベーションに投資しているグローバル投資には強くアピールできる内容と思いますが最終国内企業を橋渡しの対象として限定しているためか、十分な資金が確保できておらず改善が必要と考えます。

対応) ご指摘の通り、橋渡し先を国内企業だけに限定してしまうと、民間資金の確保が難しく、また、半導体デバイスのように製造する国内企業が減少している産業分野では、産総研が開発した技術を社会に普及されることも難しくなってしまう。一方、近年では外国資本の入った国内企業も増え、国内企業と外国企業の分類が難しい状況となっています。そのような背景もあり、産総研では外国資本の企業も含めて企業連携の可否判断の基準見直しを進めています。当領域としても、今後、関係部署と調整しながら、外資系企業、外国企業との連携も積極的に取り組んでいきます。

委員コメント5：・NEDO や NICT のナショプロが始まっており、NII の SINET や NICT の JGN との、所属省庁を超えた全日本的なネットワーク事業への展開・ネットワーク構築のけん引力への展開を期待している。

対応) 平成30年度から産総研コンソーシアム「サイバーフォトリックプラットフォームコンソーシアム」を NEC・富士通と共同運営しており、そこに、NICT と NII の研究者も参加しています。同コンソーシアムの活動成果として、Society5.0 を支える新しい光ネットワークアーキテクチャの議論を提案白書として出版したり、共同で原理実証実験を実施したり、同提案について国際ワークショップを開催したりしています。現在は、SINET と産総研ダイナミック光パスネットワークを相互接続しNICTのオーケストレータで統合的制御を行う実験などを行っています。一方、産総研は NICT の委託研究開発事業にも参加しており、第4期の最終年度には JGN を活用した光伝送実験を行う予定です。今後のこのような所属省庁を超えた連携を推進して参ります。

委員コメント6：スマート製造キットを無料配布しているということで、中小企業の IoT 化の加速が期待され、新たなビジネスモデルへの展開が期待される。つながる工場モデルラボは、データの蓄積が進むことで Industry5.0 などの展開も期待される。標準化についても戦略的に進めていただきたい。

対応) 第五期は情報人間領域と当領域とで「インダストリアル CPS 研究センター」を新設し、スマート製造技術の普及や、つながる工場のモデルラボを活用したデータ蓄積に取り組んでいく計画となっております。標準化については、IEC/SC65E/ISO/TC184/SC5 の Joint Working Group (JWG5) ならびに JWG5 への規格原案提案を受け持っている ISA95 のメンバーとして活動しており、令和元年度より日本で唯一、ISA95 への投票権を持つこととなりました。システム構成における

情報伝達のインターフェース規格を検討する会議で、IEC/TC65（IEC側のスマート製造のメインの委員会）の委員長が、スマート製造の骨子の規格がJWG5が管理するIEC62264シリーズであるとの認識を示しています。また、ISO/TC184も同様の位置づけですが、ISO側はその他の規格や新たな規格にも強い関心を持っています。

評価委員コメント 7: 領域内の成果はそれぞれあげているものの、他領域との連携による大型研究が見当たらなかった。社会を動かすような研究は研究領域を超える発想と取り組みが必要なため、より大きな成果を目指していただきたい。

対応) 領域をまたいで産総研全体に点在するセンサ関連技術を集約する”センシング技術連絡会”を立ち上げ、産総研全体で保有するセンサ関連技術をまとめて企業に売り込み、大型連携に結びつけるための体制を構築しました。加えて、集約したセンサ関連技術をデータベース化し、公開することで、さらなる外部連携の促進を行う予定です。

また、第5期中長期計画では、ゼロエミッションや少子高齢化等の社会課題に対応する研究課題を設定し、複数の領域が参加する研究センターや研究ラボが、これらの研究課題に取り組むことになっています。当領域としても、このような領域融合に積極的に参加しています。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
令和元年度 研究評価委員会  
(エレクトロニクス・製造領域)

## 説明資料

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
エレクトロニクス・製造領域

## 目次

1. 領域の概要と研究開発マネジメント
  - (1) 領域全体の概要・戦略
  - (2) 技術的ポテンシャルを活かした指導助言等の実施
  - (3) マーケティング力の強化
  - (4) 大学や他の研究機関との連携強化
  - (5) 研究人材の拡充、流動化、育成
- 前年度コメントへの対応
2. 「橋渡し」のための研究開発
  - (1) 第4期中長期目標期間の実績成果のまとめ
  - (2) 「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究）
  - (3) 「橋渡し」研究前期における研究開発
  - (4) 「橋渡し」研究後期における研究開発

# 1. 領域の概要と研究開発マネジメント

※機密情報を含む

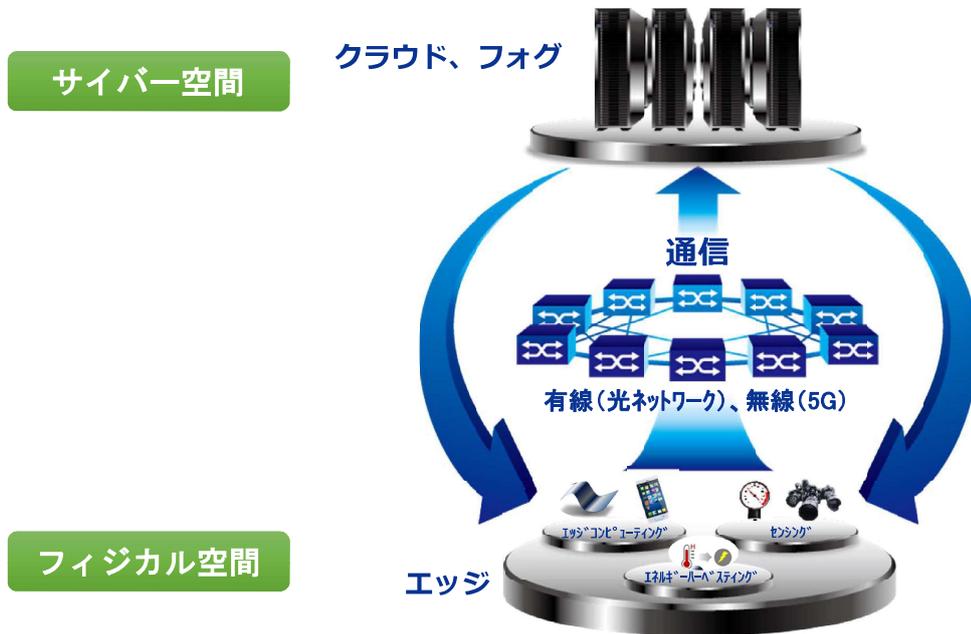
理事／エレクトロニクス・製造領域長  
金丸 正剛

(1) 領域全体の概要・戦略

## 超情報化とモノづくりの新潮流

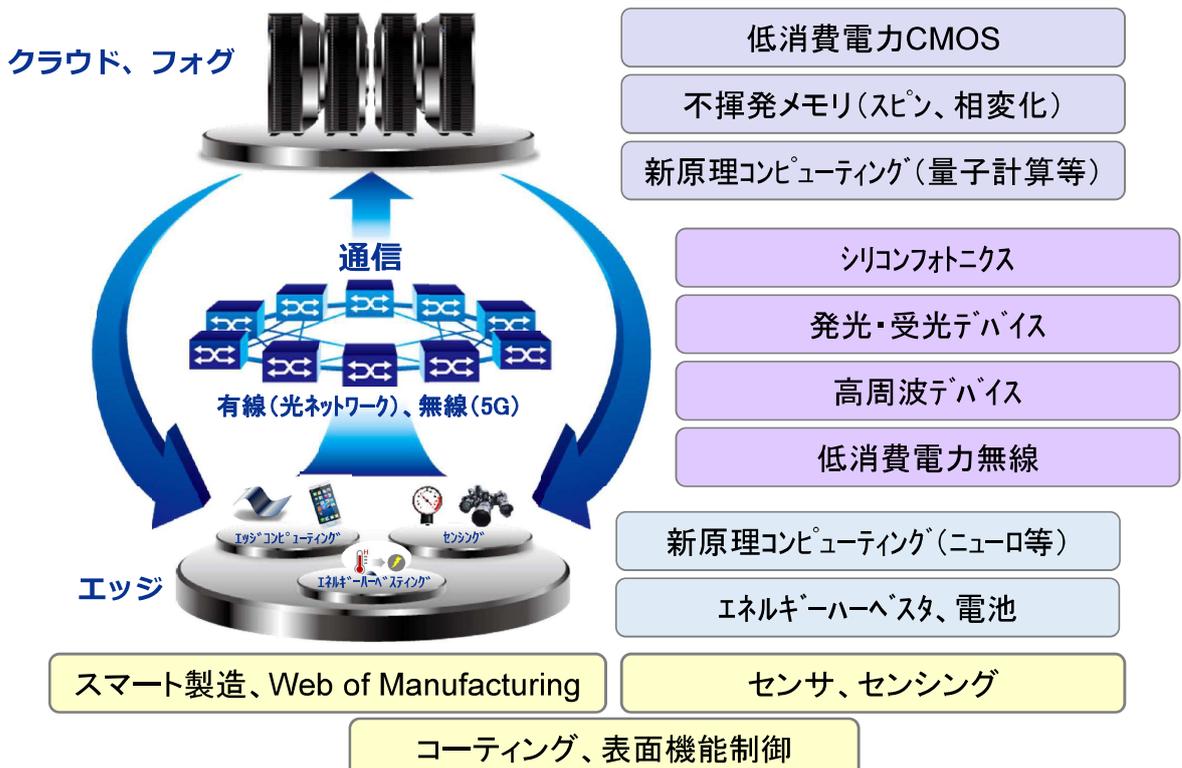


# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造

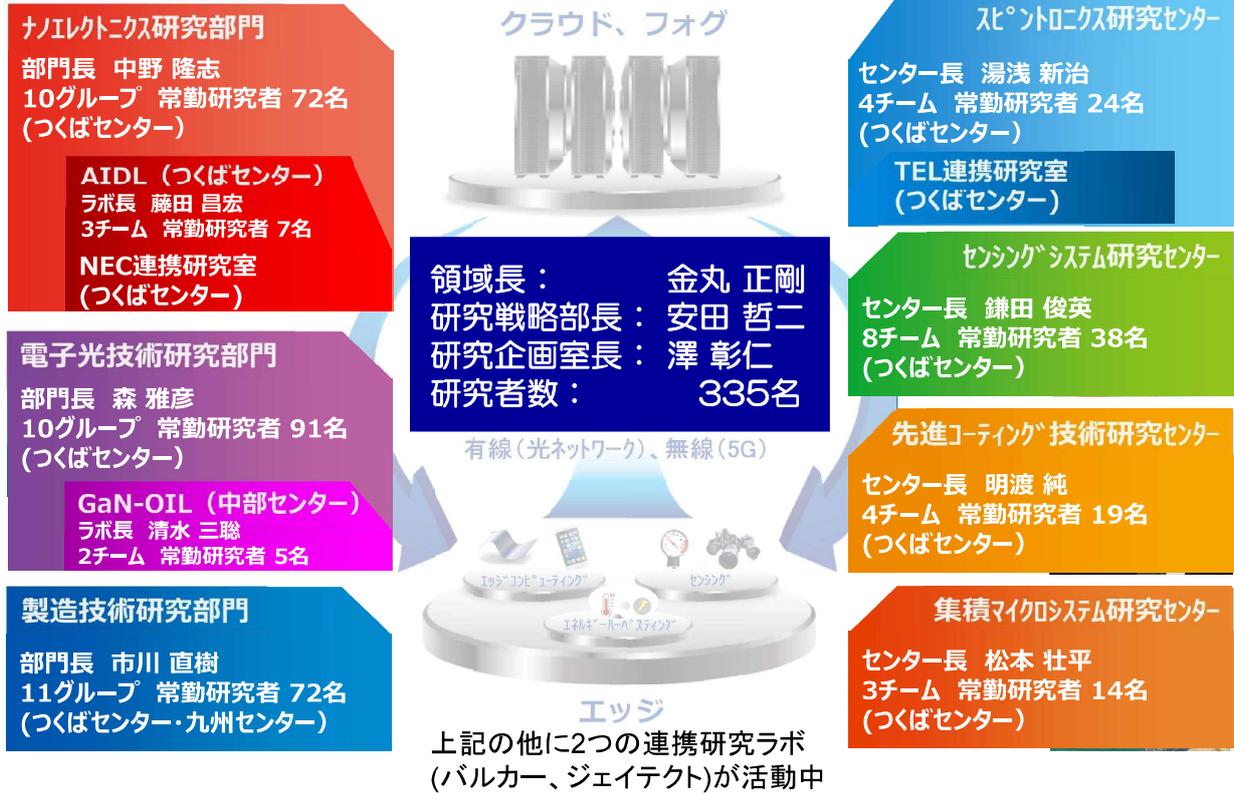


- 社会のあらゆるモノがインターネットに接続され、現場情報のリアルタイム把握が可能に
- 取得データを解析・処理してフィードバックすることにより、新しいサービス・価値を創出

# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造



## 人員・組織



## 第4期の重点化課題と目標

### ① 情報通信システムの高性能化 および超低消費電力化技術の開発

- ✓ 情報データの処理量や通信量の増加に対応するため、省電力で高性能なIT機器を実現する情報処理・記憶デバイス技術とその集積化技術、あるいはフォトニクス関連技術等を開発
- ✓ 更なる高性能化に向けたポストスケーリング集積化技術の確立や新しい情報処理技術を創出

### ② IoT化に対応する製造 および センシング技術

- ✓ 製造レジリエンス強化と産業競争力強化を目指した製造網 (Web of Manufacturing) を実現
- ✓ 社会インフラの維持管理を効率化・高度化を可能とする新たなセンシング技術、センサネットワーク技術、収集データ利用技術などを開発

### ③ ものづくりにおける産業競争力強化 のための設計・製造技術

- ✓ 産業や社会の多様なニーズに対応した製品を省エネ、省資源、低コストで製造するために、設計マネジメント技術、印刷デバイス技術、ミニマルファブ技術、積層加工技術などを開発

### ④ 多様な産業用部材に適用可能な 表面機能付与技術

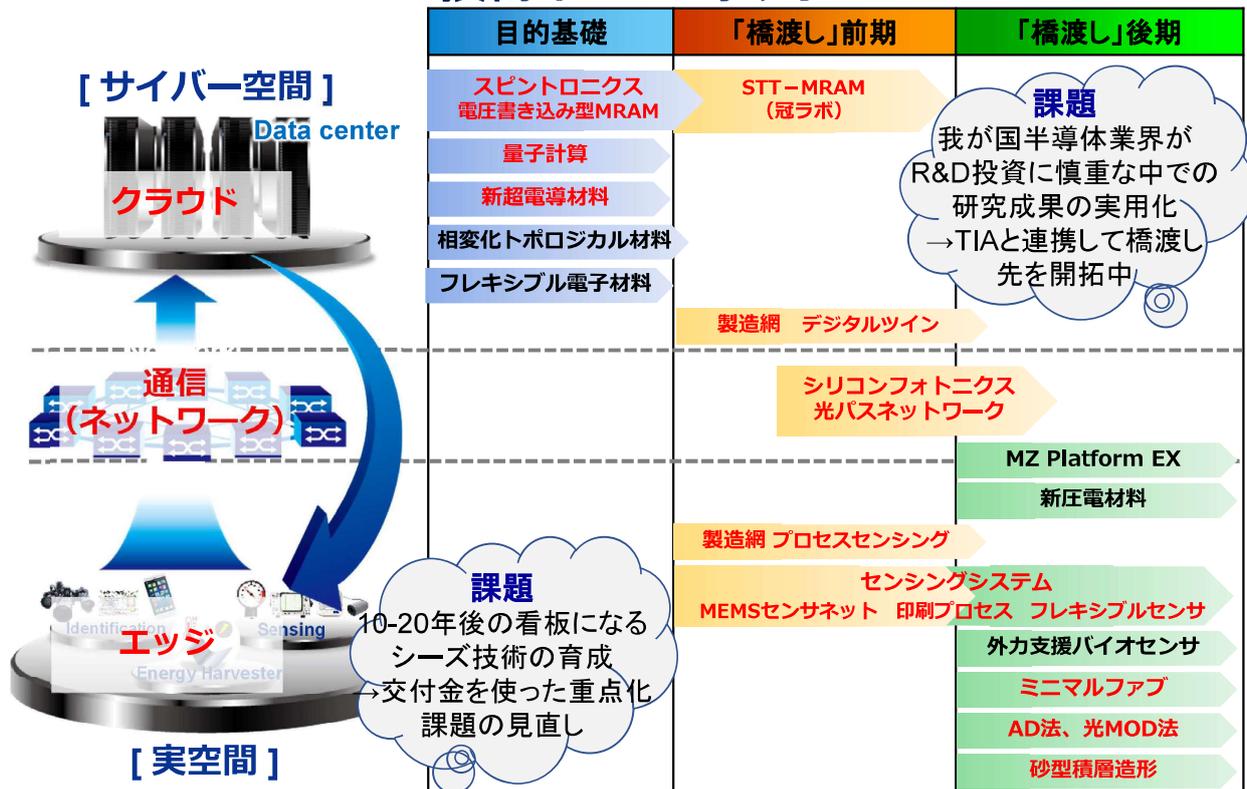
- ✓ 製品の更なる高付加価値化を目指し、高機能フレキシブル電子材料等の新材料、機能発現形成型技術等を開発
- ✓ パワーモジュール、燃料電池、構造材料等、種々の産業用部材、基材に対し自在なコーティングを可能とするために、コーティング技術を高度化

### 第4期の技術ポートフォリオ

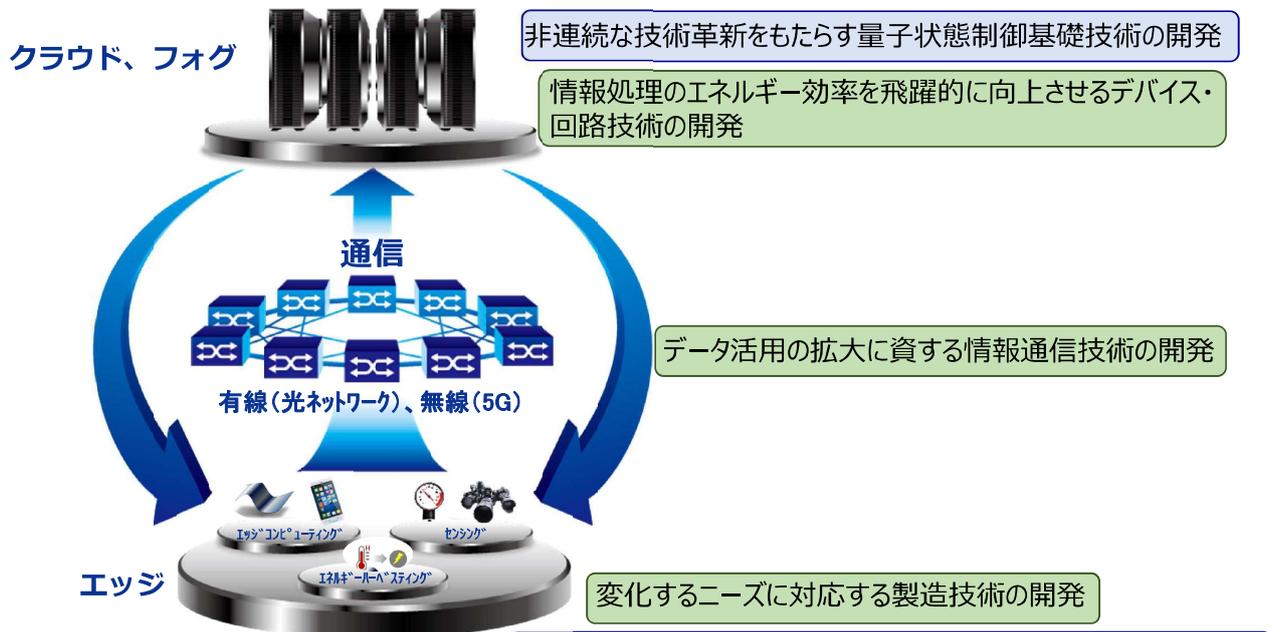
赤字：評価資料に主な成果として記載

第4期 重点化課題	目的基礎	「橋渡し」前期	「橋渡し」後期
①	<b>スピントロニクス</b> ・電圧書き込み型MRAM ・人工ニューロン ・3次元積層 ロジックデバイス・新材料 ・深層学習チップアーキテクチャ ・超伝導量子アニーリングマシン ・半導体量子ビット GST (Ge-Sb-Te) テラヘルツ検出 強相関デバイス 新規材料・構造発光デバイス 不揮発性アナログ型抵抗変化素子 新超伝導材料 高品質グラフェンの低温成長技術	<b>光情報技術</b> ・シリコンフォトニクス・光実装 ・光バスネットワーク 偽造防止PUF 超伝導検出器アレイ化・多重読み出し技術 ウエハレベル3D実装 超格子型相変化メモリ 高移動度チャネルFET シリコントンネルFET フィールドエミッタアレイ技術 次世代TCAD 東京エレクトロン・産総研 連携研究室(冠ラボ)設立 NEC・産総研 連携研究室(冠ラボ)設立	STT-MRAM カーボンナノチューブ・透明電極 FPGA評価ボード 強誘電体FET SQUID搭載回路 小型電圧標準システム
②	製造網コンセプト(トリリオンセンサ) 超低周波振動検出・環境発電	布への電極パターンニング法 異種材料・デバイス集積化技術 凝縮性ガス導入光ナノインプリント技術 封止回路の非接触電力伝送・故障診断技術 無線pHセンサ 製造網コンセプト(モデリング・情報可視化) ウェアラブル生体情報センサ ペーパー電子回路	プラズモン・導波モードセンサ 高感度分光センサ 低消費電力水素センサ 製造網コンセプト(実証テストベッド) ネットワークMEMS フレキシブルセンサ(量産化) 超高感度ウイルスセンサ センサ用高圧電性材料
③	真空中レーザー積層造形技術 複層デポジション技術 フレキシブル強誘電体 応力発光材料 印刷形成メモリ素子	上流設計マネージメント オンデマンド加工(3Dスピニング) 電解・レーザー複合加工技術 高効率フローリアクタ 導電性伸縮性ラップフィルム	ミニマルファブ マイクロ・ナノ微細形成技術 印刷プロセス(高精細、低温低損傷) オンデマンド加工(3D積層砂型造形) スマート製造ツールキット
④	常温衝撃強化現象&常温接合メカニズムの 解明 全固体電池材料	ハイブリッドAD法 LIJ法	光MOD法 AD法

### 技術ポートフォリオ



## 第4期から第5期に向けた研究展開



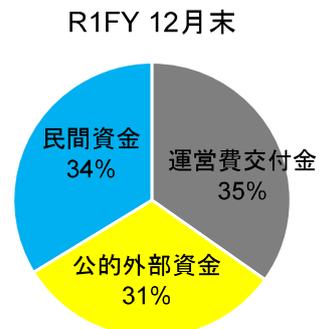
緑: 産業競争力の強化に向けて各領域で重点的に取り組む研究開発  
 青: イノベーション・エコシステムを支える基盤整備

多種多様なデータを収集可能にするセンシングシステム技術の開発

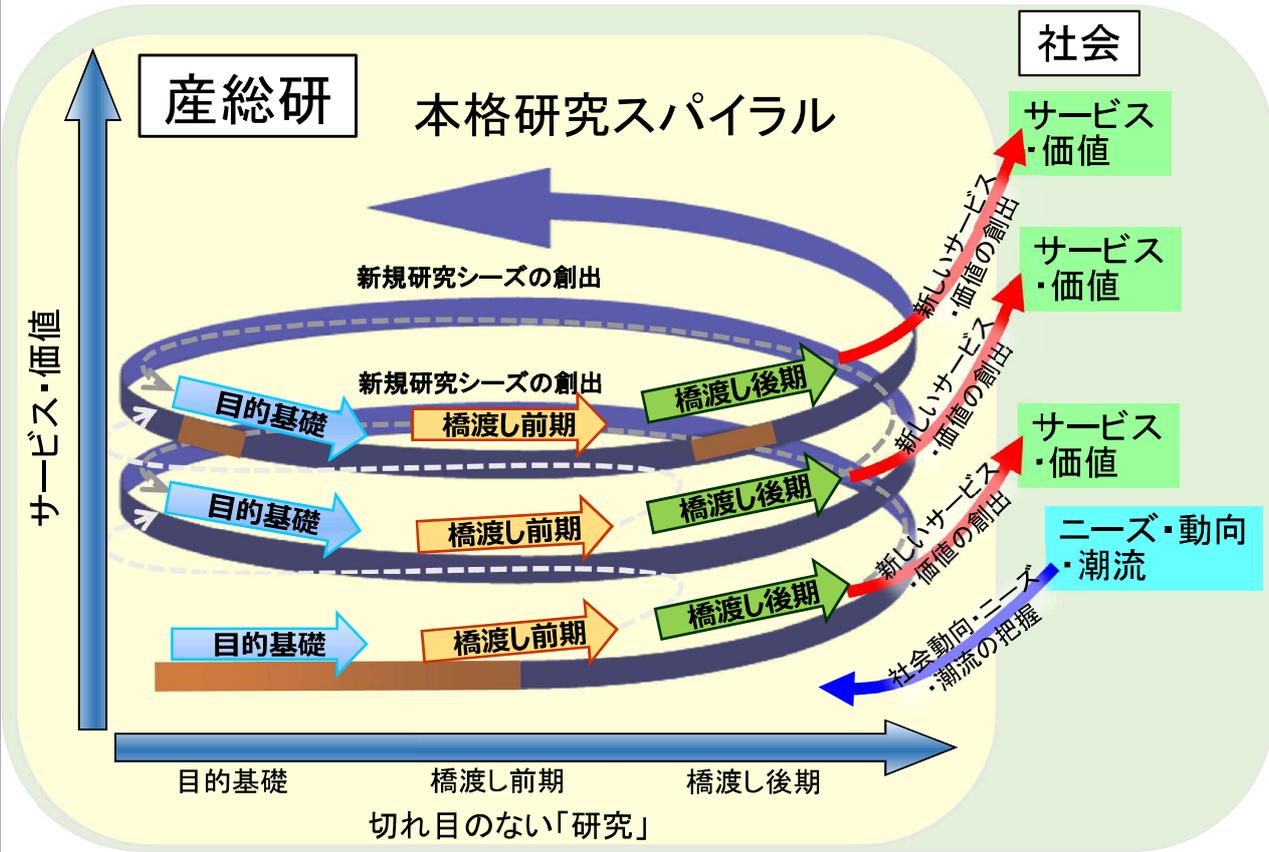
## H27~R1FYの資金推移

	H27FY	H28FY	H29FY	H30FY	R1FY
運営費交付金	2,020	1,990	2,000	2,070	2,090
公的外部資金	1,748	5,373	3,548	1,951	1,887
民間資金	651	990	1,191	1,544	2,030
合計	4,419	8,353	6,739	5,565	6,007

単位: 百万円  
 ※R1FY: 12月末実績



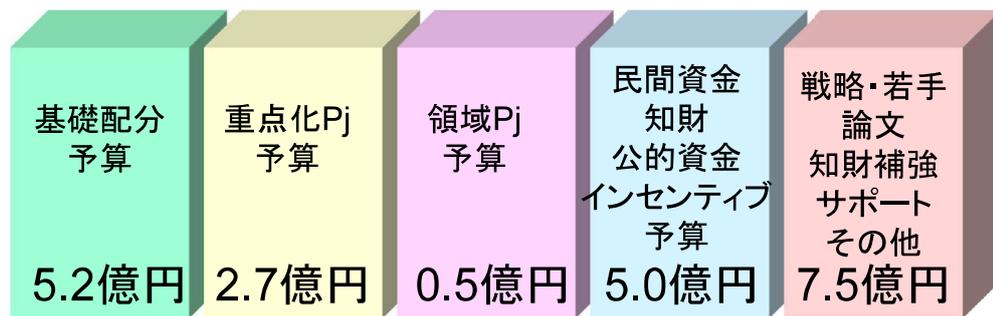
\* 第4期中長期目標期間前(平成23年度から25年度の平均: 6.3億円)の3倍以上



### 運営費交付金配賦方針

R1FY領域予算(運営費交付金) 20.9億円

※R1FY: 12月末実績



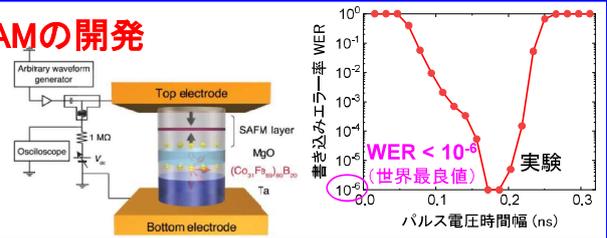
	経常研究費	ユニット裁量の研究推進	連携強化、領域推進課題	橋渡しの推進 国プロ運営の潤滑油	戦略・インフラ	
H30FY	20.7億	5.0億	2.7億	0.4億	7.2億	5.4億
H29FY	20.0億	5.9億	2.7億	0.5億	7.2億	3.7億
H28FY	19.9億	4.0億	2.4億	0.3億	8.4億	4.8億
H27FY	20.2億	7.1億	5.1億	2.1億	4.4億	1.5億

## 第4期における特筆すべき研究成果

### 目的基礎

#### 電圧書き込み型MRAMの開発

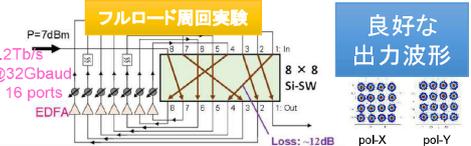
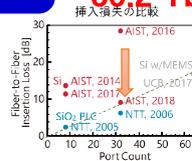
電圧書き込み型MRAMにおいて、書き込みエラー率 WER <  $10^{-6}$  (**世界最良値**) を達成し、物理機構の解明にも成功



### 橋渡し前期

#### シリコンフォトニクスによる光パスネットワーク: 35.2 Tbpsをわずか0.5 pJ/bitの電力効率で完全動作

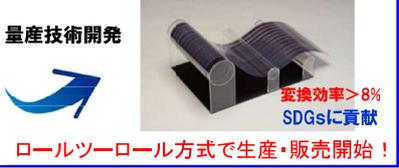
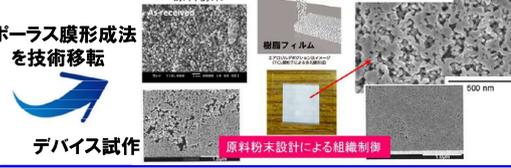
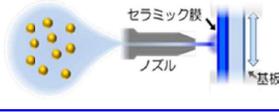
世界初



### 橋渡し後期

#### 世界初 “AD法” で軽くて曲がる太陽電池が製品化

産総研独自技術“AD法”による室温ボース膜形成法を技術移転



## 第4期における主な受賞

#### H27FY

平成27年度 文部科学大臣表彰 科学技術賞(開発部門)  
先進コーティング技術研究センター 秋本 順二、片岡 邦光 他  
「次世代リチウムイオン電池用 チタン酸化物負極材料の開発」

#### H28FY

平成28年度 文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)  
スピントロニクス研究センター 湯浅 新治  
「巨大トンネル磁気抵抗効果の研究」

#### 第13回本多フロンティア賞

ナノエレクトロニクス研究部門 富永 淳二  
「低消費電力型超格子相変化メモリの開発と、そのトポロジカル物性の発見」

#### H29FY

第50回 市村学術賞 功績賞  
スピントロニクス研究センター 野崎 隆行  
「超省電カスピン制御技術の開拓と応用展開」

#### H30FY

公益社団法人発明協会 21世紀発明奨励賞(平成30年度全国発明表彰)  
製造技術研究部門 秋山 守人  
「高圧電性窒化スカンジウムアルミニウム薄膜の発明」

#### R1FY

第8回 ものづくり日本大賞 優秀賞(製造・生産プロセス部門)  
製造技術研究部門 岡根 利光  
「差圧鋳造と3D積層造形の活用による高品質複雑形状砂型鋳物製造プロセスの開発」

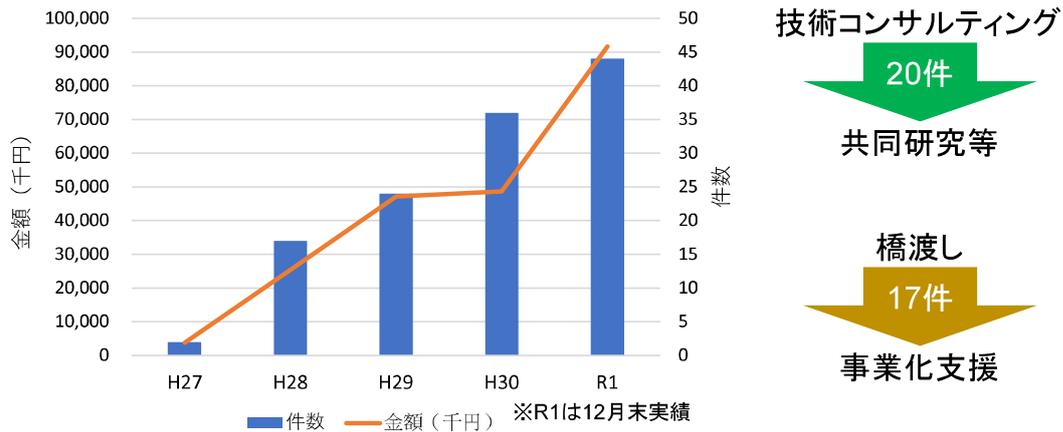
その他、浅田榮一賞、グッドデザイン賞、つくば奨励賞、電気科学技術奨励賞、日本セラミックス協会賞 学術賞、日本物理学会論文賞、丸文学術賞、日本産業技術大賞などを受賞



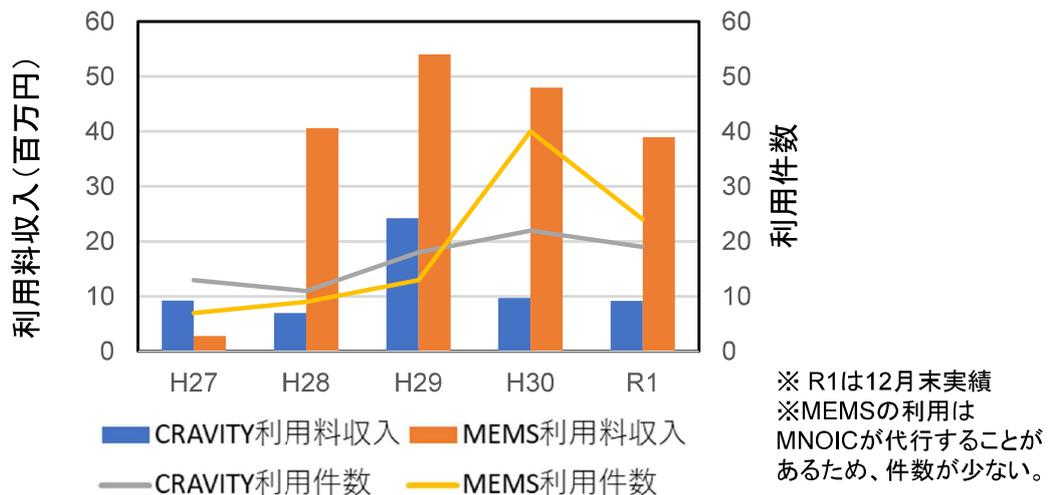
## 技術コンサルティング⇔共同研究の相互実施

- 産総研第4期から始まった新制度「技術コンサルティング」を積極的に活用し、毎年契約件数、契約金額が上昇
- 技術コンサルティングから共同研究等への連携発展と、逆に橋渡し終了後の事業化段階での技術コンサルティング実施の両者事例が存在

技術コンサルティング件数と金額

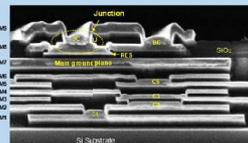


## オープンイノベーション拠点TIA共用施設における成果普及



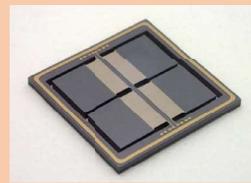
### 超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (CRAVITY)

標準プロセスによりユーザーに提供している超伝導回路の例 (9層配線構造断面)



### MEMS研究開発拠点 (MEMS)

共用施設利用により試作されたMEMSデバイス例 (振動発電用圧電カンチレバー)



## ISO/IEC等国際標準関連機関 (R1FY)

役職者(延べ数) 49人

議長等・プロジェクトリーダー・エキスパート

ISO : 9名、IEC : 10名

参加者

ISO : 15名、IEC : 18名

ISO/IEC/JTC1 (情報セキュリティ) : 1名

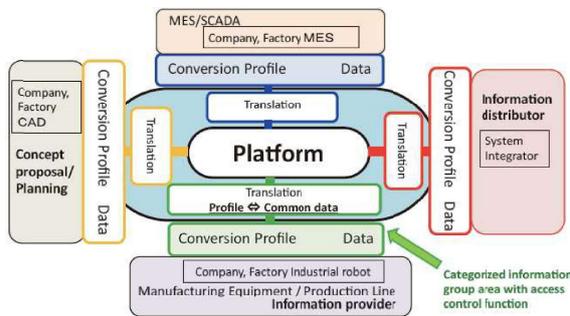
JWG5 (Enterprise-control system integration) : 1名

SEMI (3D Packaging & Integration Global Technical Committee) : 1名

経済産業省 工業標準化推進事業

## 「スマートマニュファクチャリングに関する国際標準化・普及基盤構築」

(H28~R1FY)



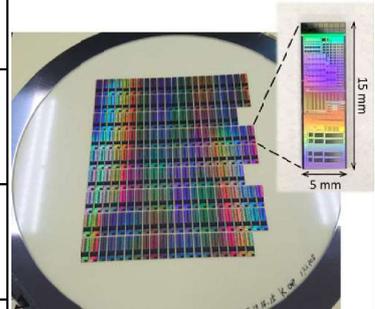
製造機器に対する指示情報のみの流通から、サービスに転換可能な製造データを加えた情報の流通が実現する。

## 産総研が運営するコンソーシアム等を通じたマーケティング・成果普及

名称	設置	企業等 会員数	活動内容
構想設計 コンソーシアム	H26年8 月1日	7	構想設計に関する企業の共通課題と研究開発の仮説構築と実証を繋ぐ場。ゲスト参加の協議会合(毎月)と議論合宿(年1回)で構成。
応力発光技術 コンソーシアム	H28年3 月18日	15	応力発光技術の成果普及と市場形成に向けた情報共有、意見交換、共同実証試験。
先進コーティング アライアンス	H28年4 月13日	46	AD法・光MOD法を基軸に川上から川下まで幅広いアライアンスを組織し市場の発展を図る。
IMPULSEコンソー シアム	H29年4 月1日	8	大規模データを高効率に処理するデータセンターの将来像の調査。
シリコンフォトニクス コンソーシアム	H30年3 月5日	11	産総研SCRのR&Dファンドリーとしての活用推進、およびシリコンフォトニクス応用に関連する交流の場を提供し市場の発展を目指す。
サイバーフォニック プラットフォームコン ソーシアム	H30年3 月5日	12	将来ネットワークの可用性・低コスト性を劇的に向上する光レイヤーのユニバーサルな自動化の推進および新市場創出の促進。
FloTコンソーシアム	H31年4 月1日	63	フレキシブルハイブリッドエレクトロニクス技術に関する情報収集及び提供 <b>R1年度成果</b>



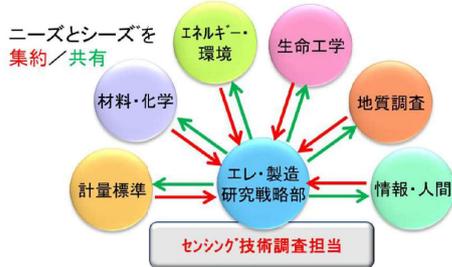
63社が参加するFloT  
コンソーシアム活動開始



相乗り試作MPWIによる  
シリフォト普及

## センシング技術の所内連携促進

- Society 5.0実現に向け、社会・産業ニーズが高まっているセンシングの実現とプラットフォームの確立を目指す。
- 産総研が強みを有する要素技術を統合。
  - ・フレキシブルデバイス
  - ・MEMSデバイス
  - ・光センシング
- エレクトロニクス・製造領域がハブとなって技術融合を推進。



### R1年度成果

各研究者からアンケート提出(160件)

アンケートをもとに技術担当者、企業連携担当が個別にヒアリング



- ・内部との連携紹介
- ・企業への売り込み
- ・検索システムの構築
  - 企業担当者へ公開
  - 外部組織への公開

内部、外部との連携加速、技術融合



その場即時ネットワーク情報化を実現させるセンシング基盤及びシステムプラットフォーム

## マーケティング・ツールとしての知的財産の構築

### IP 実用化加速制度

採択件数 R1FY : 10件

H27FY : 10件、H28FY : 14件、  
H29FY : 10件 H30FY : 9件

### ユニット知財検討会

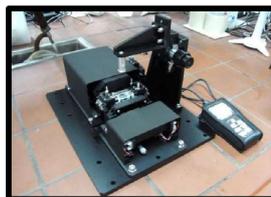


- ・出願意義
- ・先行技術との対比
- ・発明の本質
- ・権利範囲
- ・実施例の状況

発明



- ・原理実証
- ・プロトタイプ試作



試作例

磁場印加導波モードセンサ



試作例

静電気スキャナ  
(展示会出展)

引き合い

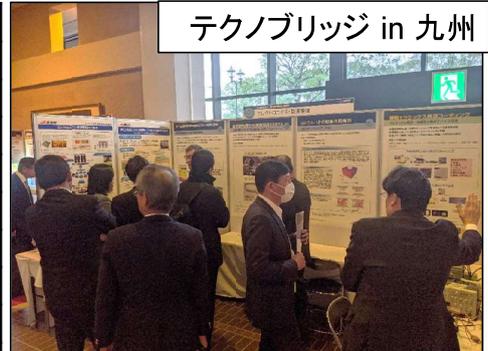
ライセンス



## 展示会等へ積極的に出展

R1年度成果

	イベント名	開催日
1	JPCA Show 2019	R1年6月5-7日
2	中国センター 材料診断フェア	R1年7月2日
3	産業技術支援フェア in 関西	R1年7月17
4	JASIS2019	R1年9月4-6日
5	九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー	R1年9月26日
6	モノづくりフェア2019	R1年10月16-18日
7	テクノブリッジフェア in つくば	R1年10月24-25日
8	テクノブリッジフェア in 函館	R1年11月12日
9	アグリビジネス創出フェア	R1年11月20-22日
10	セミコンジャパン2019	R1年12月11-13日
11	テクノブリッジフェア in 中部	R1年12月9-10日
12	テクノブリッジフェア in 九州	R1年12月16日
13	MEMSセンシング & ネットワークシステム展 2020	R2年1月29-31日
14	interOpto 2020	R2年1月29-31日
15	テクノブリッジ in 東北	R2年2月14日

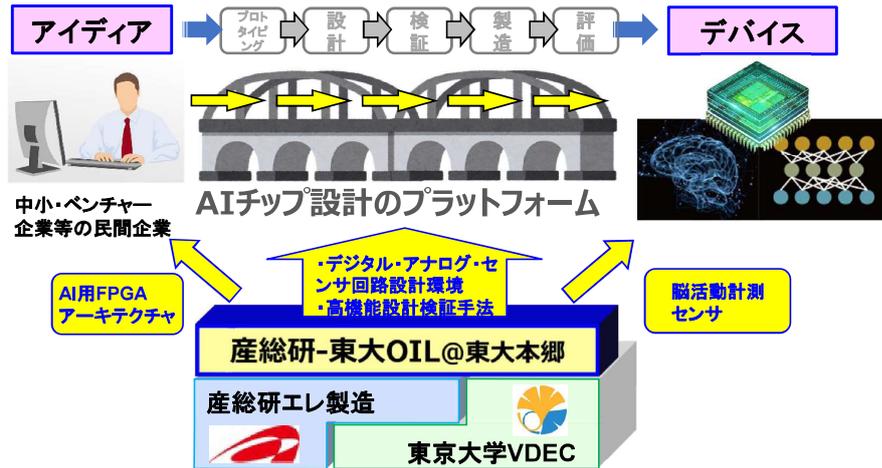


## 連携拠点の広域展開



**R1年度成果** **産総研-東大AIチップ設計OIL**  
**AI chip Design open innovation Lab(AIDL)**

- ✓ AIチップ開発には、回路設計・検証などに関する高度な技術が必要であり、これらがビジネス化に向けた高いハードルとなっている。
- ✓ 産総研-東大AIチップ設計OIL設立により、産総研と東大がタッグを組み、AI機能付デジタル・アナログ・センサ統合システム開発に必要な設計・検証・評価・計測環境を構築し、AIチップ開発を加速する。



**技術研究組合**

略称	正式名称	期間	協働会社数
MINIMAL	ミニマルファブ技術研究組合	H24年5月～H29年3月	124社, 14大学, 12その他法人
JAPER A	次世代プリントエレクトロニクス技術研究組合	H23年3月～H31年3月	14社, 1国研
NMEMS	技術研究組合NMEMS 技術研究機構	H23年7月～	20社, 1国研, 2大学等
PETRA	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所	H21年8月～	13社, 1国研
TRAFAM	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構	H26年4月～	31社, 2大学, 2国研

一般社団法人 ミニマルファブ推進機構  
 ファブシステム研究会(2010年結成)とミニマルファブ技術研究組合(2012年設立)を統合し、これまでの成果の承継と「ミニマルファブ」の更なる発展と普及を支援するプラットフォームとして2017年2月に設立。





## 産総研-理研 連携



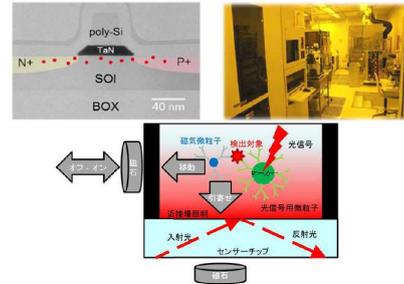
両機関が協力して初めて実現できる2050年の社会課題解決を目指した共同研究(チャレンジ研究)および量子技術分野で連携を進めている

### 理研-産総研チャレンジ研究テーマ

量子熱エンジンの応用に向けて:2050年の量子熱マネジメント技術と量子太陽光発電技術

モバイル人工知能機器実現に向けた室温動作量子計算機の開発

2050年感染症の完全制圧に向けた感染症保有ウイルスセンサーの開発



### 理研-産総研 量子技術イノベーションコアワークショップ

R1年度ワークショップ

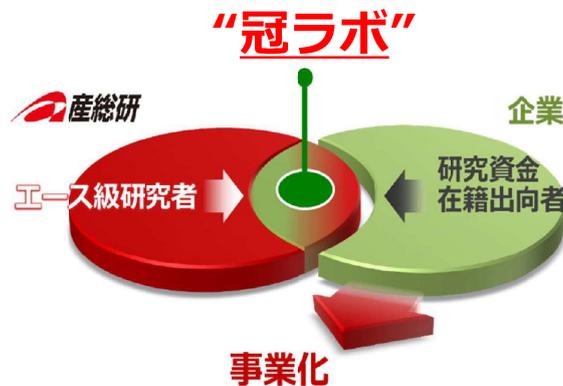
- ▶ 次世代の量子技術を先導するために、両機関の最新の研究成果を紹介するとともに今後の研究開発の方向性を議論。
- ▶ H27年度より毎年開催
- ▶ H30年度よりWSでの議論から生まれた理研-産総研の共同研究提案3件に領域予算を措置し、シナジー効果を活かした連携を具体化。



## 産総研への企業研究室の設置(冠ラボ) ⇔ 研究人材拡充、育成

・大型企業連携制度「冠ラボ(連携研究室)」と、人材流動化制度(特専・在籍出向)を積極的に活用し、産総研内に企業研究室を設置して研究人材拡充・育成

・当領域の冠ラボは、毎年1件以上が新設され、既存冠ラボと合計した研究員数も年度毎に増加



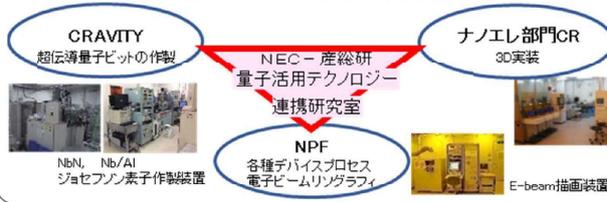
**企業からの在籍出向者が冠ラボ長又は副ラボ長に就任し、研究開発をマネジメント**

## 産総研への企業研究室の設置(冠ラボ) ⇔ 研究人材拡充、育成

**H29年度設置 TEL-産総研**  
先端材料・プロセス開発連携研究室



**H30年度設置 NEC-産総研**  
量子活用テクノロジー連携研究室  
特定集中研究専門員33名



**R1年6月 ジェイテクト-産総研**  
スマートファクトリー連携研究ラボ



**R1年6月 バルカー-産総研**  
先端機能材料開発連携研究ラボ



**特定集中研究専門員 計40名**

## 人材流動

### 採用者数

	H27FY	H28FY	H29FY	H30FY	R1FY
クロスアポイントメント					
大学から産総研へ	3	4	5	4	6
産総研から大学へ	0	0	2	2	1
年俸制およびプロジェクト型の任期付採用数	2	4	2	1	4
文科省・卓越研究員採用数	-	2	1	2	0

### 転出者数

	H27FY	H28FY	H29FY	H30FY	R1FY
大学・公的機関への転出	3	2	1	2	1
企業への転出	1	1	1	1	2

※産総研ポスドクの転出数を含まない

## 人材育成とダイバーシティ推進の取組み

		H27FY	H28FY	H29FY	H30FY	R1FY (12月末)
イノベーションスクール		2	10	7	16	11
産総研リサーチアシスタント制度		13	23	33	45	47
女子大学院生懇談会		-	65	58	46	31
研究職員採用におけるダイバーシティ推進	採用者数	15	17	19	14	14
	女性	3	3	4	0	2
	外国人	1	3	3	2	3

単位：人



女子大学院生懇談会の様子

この他、TIA主催の人材育成活動に  
毎年15人程度の講師を派遣

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(第4期全体(見込を含む)に対して:見込評価)

最重要目標の民間資金獲得額については、全体資金におけるその他の資金との比率のバランスを取ることが重要であり、その観点ではほぼバランスよく獲得できているが、目標額を達成することは難しく、現在の延長線で達成するためには相当な努力が必要と思われる。

一方で、民間資金獲得額を伸ばすためには、それに伴う人的資源や設備・スペースなどのリソースが必要となる。その点についてのマネジメントも検討いただきたい。

### 対応状況

限られたリソースの中で、民間資金獲得額を伸ばすために、当領域では企業連携を担当するイノベーションコーディネーター、連携主幹の人員の増強を行うとともに、それら連携担当者の活動により、共同研究の大型化を進めてきました。その際、大型連携を実施しやすいようにまとまったスペースを領域として確保する等の取組みも並行して行いました。その結果、平成30年度までに大型共同研究である冠ラボを2件設置し、令和元年度も2件設置しました。このような活動により、令和元年度は12月末現在で民間資金は20.3億円まで増加し、第4期中長期目標期間前(平成23年度から25年度の平均)の3倍以上となり、目標額(22.1億円)の92%になりました。第5期中長期目標期間も、このような活動を通じて、民間資金の継続的な獲得を目指します。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(第4期全体(見込を含む)に対して:見込評価)

外部資金の獲得額が目標値に達していないが、技術的にはポテンシャルを持っていると感じる。いかに資金を得ていくのか、発想の転換が必要ではないか？

### 対応状況

第4期中長期目標期間は、民間資金の獲得が第一の目標となっていたため、当領域でも民間資金の獲得額増に向け、共同研究の大型化等を行ってきました。その結果、民間資金の獲得額は今年度12月末現在で目標額の約92%(令和元年度目標額22.1億円)となり、昨年度の達成率約81%(平成30年度目標額19.0億円)を大きく上回っています。一方、当領域では持続的な研究開発を推進するため、研究予算のバランスも重視しており、運営交付金、公的資金、民間資金の比率が1:1:1になることを目指しています。今年度は、民間資金の額が運営交付金と同程度となった一方で、公的資金が若干少なくなっています。NEDO事業等の公的資金は、企業と連携して技術開発を進め、事業化を目指すための予算であり、このような公的資金による研究開発を増やすことは、将来、資金提供型共同研究へと発展して行くものと考えられます。そのため、今後は、民間資金獲得に向けた活動を継続しつつ、民間企業と連携した公的資金の獲得に向けた活動も注力して行きます。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(目的基礎研究における研究開発)

目的基礎研究は長期的展望が必要で、次期につながっていくものである。また国際競争の激しい分野であることから、どこに焦点を置いて研究するかを明確に示す必要がある。

### 対応状況

近年、AIや量子コンピューティングの技術開発が急速に進んでいますが、10年前にはこれらの分野が花開くとは考えられていませんでした。一方、当領域は、30年以上にわたり超伝導デバイスの研究開発を継続し、また量子コンピューティングの研究開発も実施してきた結果、それら技術・知見の蓄積・継承により、現在、日本における量子デバイス開発の拠点となっています。今後は、このような長期的な技術開発を戦略的に行うための研究マネジメント人材の育成・確保にも努めていきます。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(目的基礎研究における研究開発)

成果は、少なくともオープンイノベーションに投資しているグローバル投資には強くアピールできる内容と思いますが最終国内企業を橋渡しの対象として限定しているためか、十分な資金が確保できておらず改善が必要と考えます。

### 対応状況

ご指摘の通り、橋渡し先を国内企業だけに限定してしまうと、民間資金の確保が難しく、また、半導体デバイスのように製造する国内企業が減少している産業分野では、産総研が開発した技術を社会に普及されることも難しくなってしまう。一方、近年では外国資本のに入った国内企業も増え、国内企業と外国企業の分類が難しい状況となっています。そのような背景もあり、当領域では国内に生産拠点を有する外国資本の企業外資系企業とも共同研究を実施しており、その数も増加傾向にあります。今後も、関係部署と調整しながら、外資系企業、外国企業との連携を増やし、民間資金の確保に努めて行きます。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(「橋渡し」研究前期における研究開発)

NEDO や NICT のナショプロが始まっており、NII の SINET や NICT の JGN との、所属省庁を超えた全日本的なネットワーク事業への展開・ネットワーク構築のけん引力への展開を期待している。

### 対応状況

平成30年度から産総研コンソーシアム「サイバーフォトリックプラットフォームコンソーシアム」を NEC・富士通と共同運営しており、そこに、NICTとNIIの研究者も参加しています。同コンソーシアムの活動成果として、Society5.0を支える新しい光ネットワークアーキテクチャの議論を提案白書として出版したり、共同で原理実証実験を実施したり、同提案について国際ワークショップを開催したりしています。現在は、SINETと産総研ダイナミック光パスネットワークを相互接続しNICTのオーケストレータで統合的制御を行う実験などを行っています。一方、産総研はNICTの委託研究開発事業にも参加しており、第4期の最終年度にはJGNを活用した光伝送実験を行う予定です。今後のこのような所属省庁を超えた連携を推進して参ります。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(「橋渡し」研究前期における研究開発)

スマート製造キットを無料配布しているということで、中小企業の IoT 化の加速が期待され、新たなビジネスモデルへの展開が期待される。つながる工場モデルラボは、データの蓄積が進むことでIndustry5.0 などの展開も期待される。標準化についても戦略的に進めていただきたい。

### 対応状況

第五期は情報人間領域と当領域とで「インダストリアルCPS研究センター」を新設し、スマート製造技術の普及や、つながる工場のモデルラボを活用したデータ蓄積に取り組んでいく計画となっております。標準化については、IEC/SC65E/ISO/TC184/SC5のJoint Working Group (JWG5)ならびにJWG5への規格原案提案を受け持っているISA95のメンバーとして活動しており、令和元年度より日本で唯一、ISA95への投票権を持つこととなりました。システム構成における情報伝達のインターフェース規格を検討する会議で、IEC/TC65(IEC側のスマート製造のメインの委員会)の委員長が、スマート製造の骨子の規格がJWG5が管理するIEC62264シリーズであるとの認識を示しています。また、ISO/TC184も同様の位置づけですが、ISO側はその他の規格や新たな規格にも強い関心を持っています。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(領域全体の総合評価)

領域内の成果はそれぞれあげているものの、他領域との連携による大型研究が見当たらなかった。社会を動かすような研究は研究領域を超える発想と取り組みが必要なため、より大きな成果を目指していただきたい。

### 対応状況

領域をまたいで産総研全体に点在するセンサ関連技術を集約する”センシング技術連絡会”を立ち上げ、産総研全体で保有するセンサ関連技術をまとめて企業に売り込み、大型連携に結びつけるための体制を構築しました。加えて、集約したセンサ関連技術をデータベース化し、公開することで、さらなる外部連携の促進を行う予定です。

また、第5期中長期計画では、ゼロエミッションや少子高齢化等の社会課題に対応する研究課題を設定し、複数の領域が参加する研究センターや研究ラボが、これらの研究課題に取り組むことになっています。当領域としても、このような領域融合に積極的に参加しています

## 2. 橋渡しのための研究開発

### (1) 第4期中長期目標期間の実績成果のまとめ

エレクトロニクス・製造領域 研究戦略部長  
安田哲二

●印： 1. (1)に「第4期の特筆すべき研究実績」として記載した項目

## (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

- 量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの基盤技術開発
- スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路の基盤技術開発 **【本日プレゼン】**
- 相変化/トポロジカル材料による不揮発メモリ、新奇デバイスの開発
- 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発
- 新超伝導材料の開発
- フレキシブル強誘電体材料の開発
- 高品質グラフェンの低温成長技術とデバイス機能の開発 **【本日プレゼン、現場見学】**

## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

- STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発
- シリコンフォトニクス技術と光パスネットワーク技術の開発
- 製造網コンセプト: スマート製造モデル化
- 製造網コンセプト: プロセスセンシング技術の開発
- MEMSセンサネットワークの開発
- IoTデバイス用全固体電池の開発
- ダイヤモンド基板の接合技術の開発
- 印刷フレキシブルデバイスの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン、現場見学】**
- センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発 **【本日プレゼン】**

## (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

- 変量多品種IoTデバイス生産を実現するミニマルファブの開発と普及
- 製造プロセスの高度化と複合化技術の開発
- 社会で活躍する先進コーティング技術の開発
- 極微量ウイルスの検出が可能な外力支援近接場照明バイオセンサの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン】**
- スマート製造ツールキットの開発
- シリコンフォトニクス技術開発に関するエコシステムの構築 **【本日プレゼン、現場見学】**

# 超伝導量子アニーリングマシンの基盤技術開発

### 回路・プロセス開発

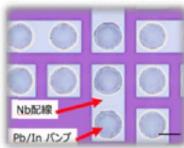


50量子ビット級の量子アニーリングチップを作製

令和元年度成果



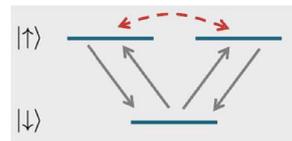
大規模化に必要な3次元実装技術を開発。  
16,000個の超伝導パンプが完全動作(世界トップ)。



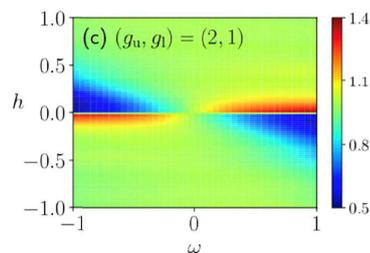
### 量子ビットの高性能化

令和元年度成果

多準位系を用いた量子アニーリング理論を確立  
[Scientific Reports, 2020/1]

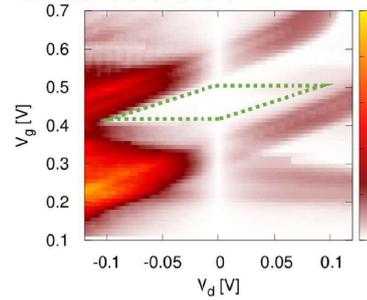
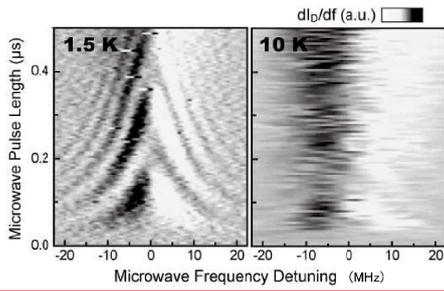


多準位系を  
スピンとして利用



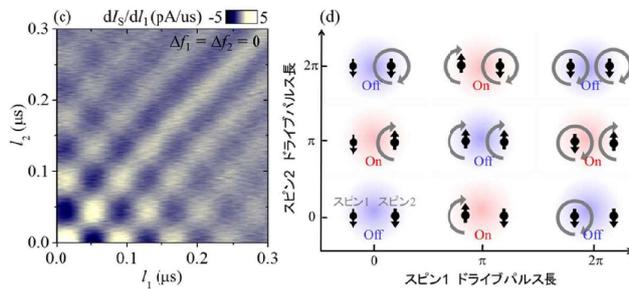
量子アニーリングの性能(正答率)が大幅に改善することを数値的に実証。

# シリコン量子コンピュータの基盤技術開発



等電子トラップ援用トンネルFETを量子ビットに応用し、10Kでの動作を確認(Si量子ビットとして最高温度)。

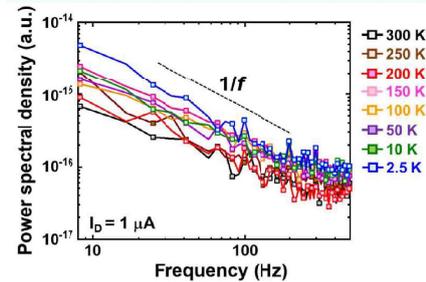
K. Ono, T. Mori & S. Moriyama, Scientific Reports 9 (2019) 469  
Scientific Reports誌の2019年物理分野ダウンロード数ランキング15位



2つのビットを異なる周波数で操作し、独立に|0>、|1>を反転させる動作に成功

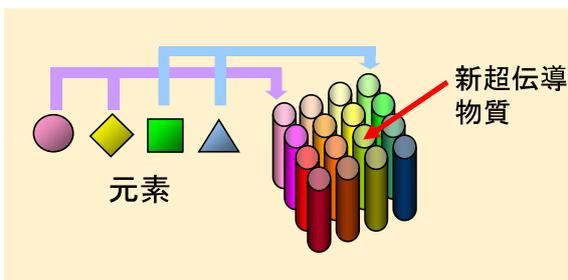
令和元年度成果

世界初の量子ビット素子シミュレータ開発(上)、コヒーレンス時間に影響を与えるノイズ源の同定(下)。

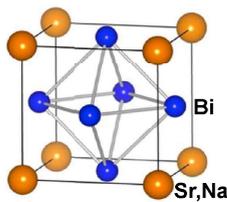


絶縁膜近傍の欠陥がノイズ源であることを示唆

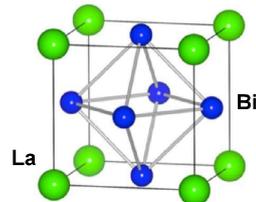
# 新超伝導材料開発: アプローチ②: コンビナトリアルケミストリによる新物質群の発見



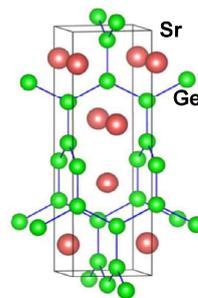
既存物質から類推困難な特徴的な結晶構造(空間反転対称性の欠如)を持つ新物質を発見



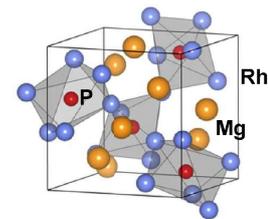
**(Sr,Na)Bi<sub>3</sub>**  
 $T_c = 9.0 \text{ K}$



**LaBi<sub>3</sub>**  
 $T_c = 7.4 \text{ K}$



**SrGe<sub>2</sub>**  
 $T_c = 7.4 \text{ K}$



**Mg<sub>2</sub>Rh<sub>3</sub>P**  
 $T_c = 3.7 \text{ K}$

# 新超伝導材料開発：多数の高被引用数論文

## 代表的論文

- New-Structure-Type Fe-Based Superconductors:  $\text{CaAFe}_4\text{As}_4$  ( $A = \text{K, Rb, Cs}$ ) and  $\text{SrAFe}_4\text{As}_4$  ( $A = \text{Rb, Cs}$ ), A. Iyo *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **138**, 3410-3415 (2016) **令和元年度産総研論文賞** 被引用回数 102
- Superconductivity in Fe-Based Compound  $\text{EuAFe}_4\text{As}_4$  ( $A = \text{Rb and Cs}$ ), K. Kawashima *et al.*, J.Phys. Soc. Jpn. **85**, 064710 (2016) 被引用回数 36
- Doping-dependent critical current properties in K, Co, and P-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  single crystals., S. Ishida *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 014517 (2017) 被引用回数 21

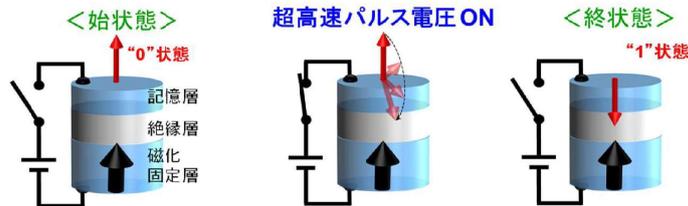
## その他の論文 (共同研究を含む)

• Nature	2
• Nature Physics	3
• Nature Materials	2
• Nature Communications	2
• NPJ Quantum Materials	2
• Scientific Reports	5
• Science Advances	2
• Science	4
• Proc. Natl. Acad. Sci. USA	2
• J. Am. Chem. Soc.	1
• Phys. Rev. Lett.	7
• Phys. Rev. B	26
• Phys. Rev. Materials	1
• Phys. Rev. Applied	3
• J.Phys.Soc. Jpn.	6
• Supercond Sci Technol.	5 等

## 外部表彰

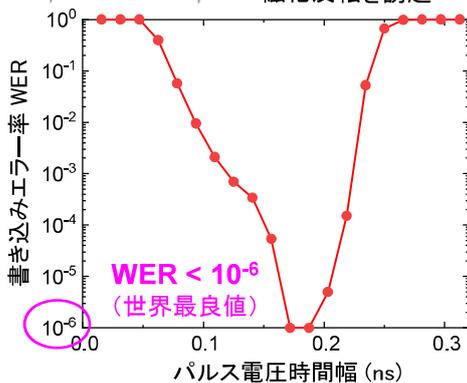
2016	低温工学・超電導学会 優良発表賞	(石田)
2017	第20回超伝導科学技術賞	(荻野)
2017	Highly Cited Researcher (Clarivate Analytics)	(永崎)
2018	日本応用物理学会 第43回講演奨励賞	(石田)

# 電圧制御MRAM



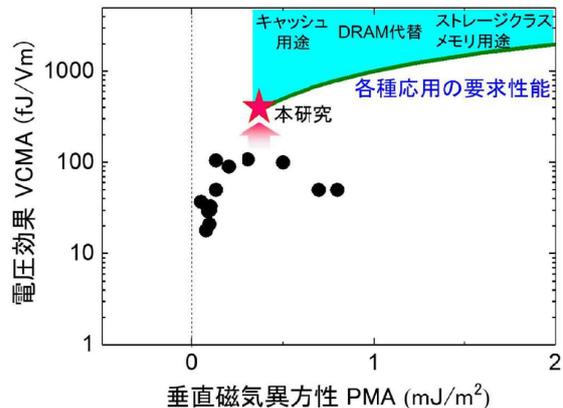
## 電圧書き込みエラー率WER < 10<sup>-6</sup>を達成

**書き込み成功** **書き込みエラー** パルス形状を工夫することにより、熱揺らぎの影響を受けにくい軌道を経由して磁化反転を誘起



## 各種応用に求められる要求性能を達成

生産に適したスパッタ成膜を用いてFe-Ir合金電極を作製し、大きなPMAとVCMAを実現



(以下2項目は後ほど詳しくプレゼン)

## スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路

4個の微小スピントルク発信素子(Spin-torque oscillator: STO)を用いたニューロモルフィック回路を構築し、7種の母音の音声識別に成功し、Nature誌に論文を発表した。また、フィードバック回路の遅延効果を利用することで過去の入力情報を記憶する機能が向上し、さらに、異なる遅延時間を有するフィードバック回路を仮想的に用いることで、実用化に向けた指標となる短期記憶容量10以上を実現した。

## 高品質グラフェンの低温成長技術とデバイス機能の開発

プラズマ励起ラジカルの強制対流により、高品質単層グラフェンの低温成長に成功した(Nano Letters[IF=12.1]掲載)。また、グラフェン(G)を電子透過電極に用いた平面型電子源を開発し、現在最もエネルギー単色性の高い電子源であるタングステン冷陰極(0.3 eV)を凌駕するエネルギー単色性(0.18 eV)及び、更に10倍以上の放出電流密度を達成した。

## 『「橋渡し」のための研究開発』として記載した項目リスト

●印: 1. (1)に「第4期の特筆すべき研究実績」として記載した項目

### (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

- 量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの基盤技術開発
- スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路の基盤技術開発 **【本日プレゼン】**
- 相変化トポロジカル材料による不揮発メモリ、新奇デバイスの開発
- 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発
- 新超伝導材料の開発
- フレキシブル強誘電体材料の開発
- 高品質グラフェンの低温成長技術とデバイス機能の開発 **【本日プレゼン、現場見学】**

### (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

- STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発
- シリコンフォトリソ技術と光パスネットワーク技術の開発
- 製造網コンセプト: スマート製造モデル化
- 製造網コンセプト: プロセスセンシング技術の開発
- MEMSセンサネットワークの開発
- IoTデバイス用全固体電池の開発
- ダイヤモンド基板の接合技術の開発
- 印刷フレキシブルデバイスの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン、現場見学】**
- センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発 **【本日プレゼン】**

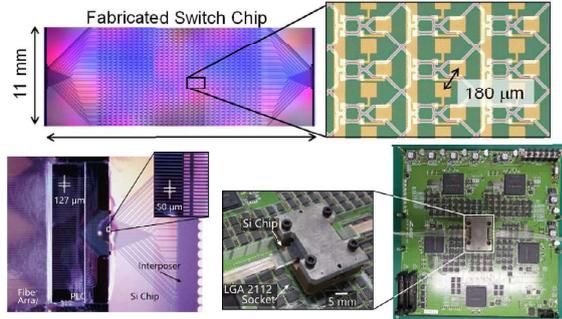
### (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

- 変量多品種IoTデバイス生産を実現するミニマルファブの開発と普及
- 製造プロセスの高度化と複合化技術の開発
- 社会で活躍する先進コーティング技術の開発
- 極微量ウイルスの検出が可能な外力支援近接場照明バイオセンサの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン】**
- スマート製造ツールキットの開発
- シリコンフォトリソ技術開発に関するエコシステムの構築 **【本日プレゼン、現場見学】**

# 「橋渡し」研究前期における研究開発 シリコンフォトニクススイッチ技術

## 低損失32x32光スイッチの全経路動作

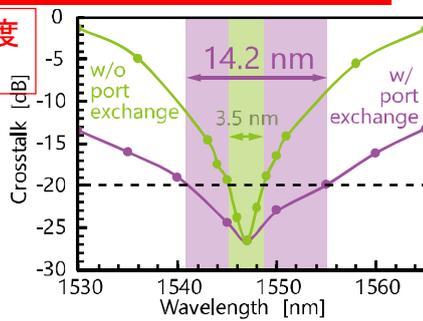
低損失チップ設計、ファイバ接続技術、制御技術を確立



OFC2018にてPostdeadline Paperとして採択

従来比4倍の広帯域化に成功

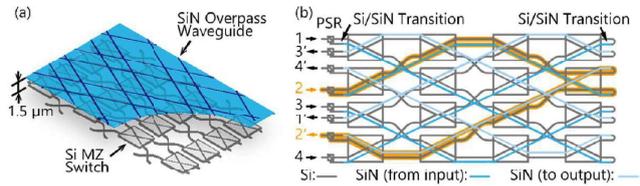
令和元年度  
成果



## 「橋渡し」研究前期における研究開発

## 偏波無依存32x32光スイッチの実証

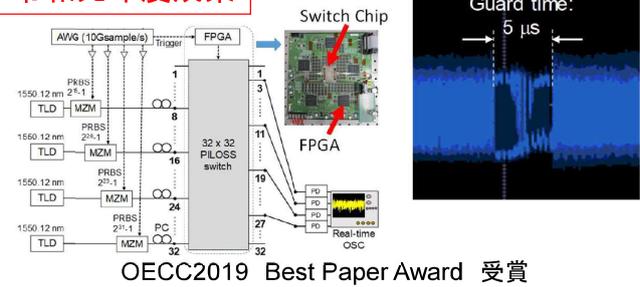
独自の偏波無依存光回路をSiN/Si二層回路で実現



OFC2019にてTop-Scored Paperとして採択

## ダイナミック制御: 時間スロットスイッチを実現

令和元年度成果



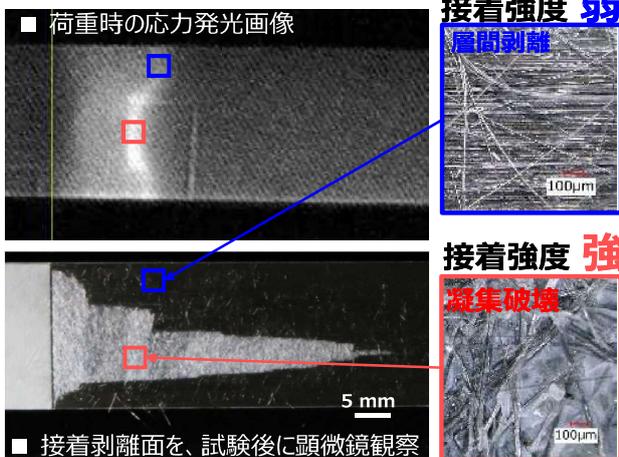
OECC2019 Best Paper Award 受賞

# 「橋渡し」研究後期における研究開発 プロセスセンシング技術の開発

令和元年度成果

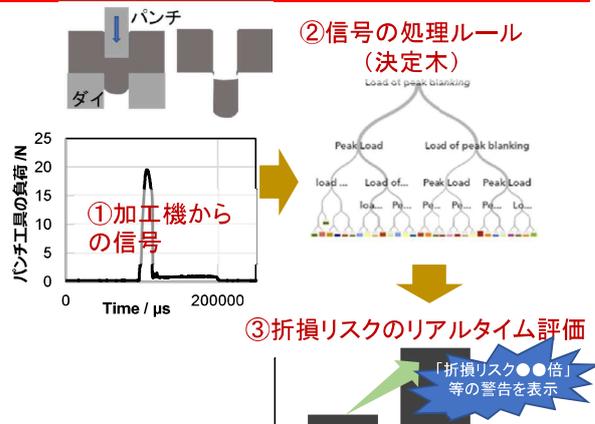
応力発光により、航空機用の炭素繊維強化プラスチック実構造部材の非接着領域(ウイークボンド)検出に成功

航空機用 CFRP: T800/3900-2B [0]<sub>10</sub> 接着剤: FM309-1M  
接着構造物作製: 三菱重工



- ✓ 層間剥離は凝集破壊より、低い接着強度(G値)。
- ✓ 弱い層間剥離部では、弱い発光輝度 → 判別可能

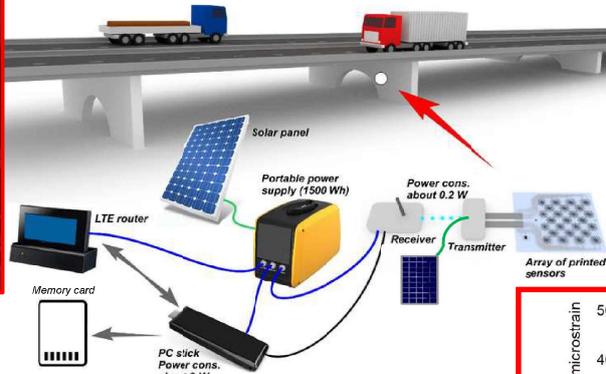
計測データをもとにした生産現場での異常検知アルゴリズムを開発。企業共同研究での実証試験実施



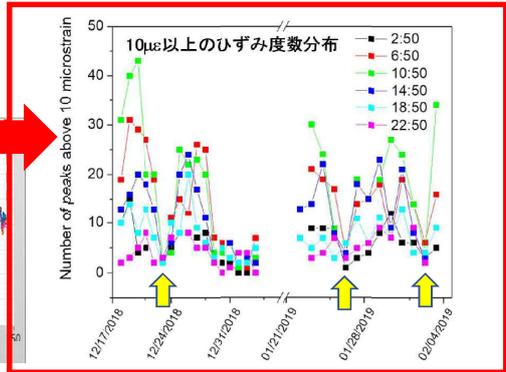
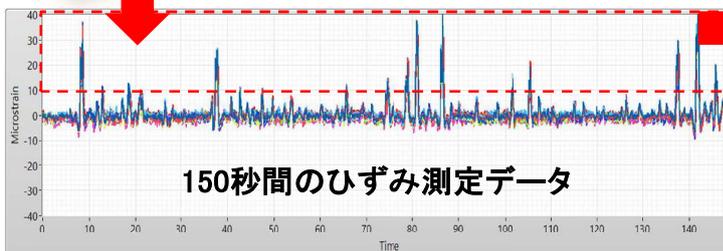
- ✓ パンチ打ち抜き加工のビッグデータ解析
- ✓ 不良を出さない現場のデータから不良予測を実現
- ✓ 加工機のセンサーデータの処理ルールに集約。工具折損のリスクをリアルタイム表示

# MEMSセンサネットワークによる道路インフラモニタリング

ひび割れ監視(8か月間)や亀裂進展モニタリングを実運用中の橋梁で実施



- ✓ 従来技術の1/100の低消費電力でセンシング可能な高密度印刷歪アレイ
- ✓ 自立電源無線センサシステム



## ダイヤモンド基板の接合技術

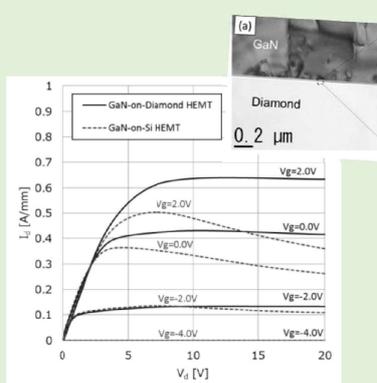
- 単結晶ダイヤモンドを放熱基板に用いるGaN-HEMTを世界で初めて開発し、出力密度と電力効率の大幅向上を実現(三菱電機(株)との共同研究)
- 大気中でダイヤモンド基板の原子レベル接合を可能にする新技術を開発

ナノ表面改質層を介した常温接合法を開発



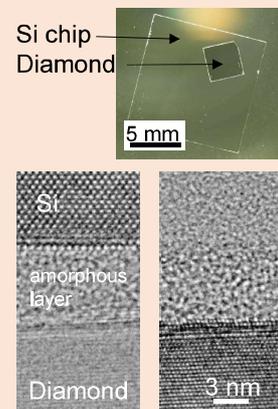
GaN-on-Diamond HEMTs

Hiza, et al., Proc. SSDM 2019, (2019) 467.



Si-Diamond Direct Bonding

Matsumae, et al., Scripta Mater., 175(2020) 24.



(以下2項目は後ほど詳しくプレゼン)

## 印刷フレキシブルデバイスの開発

フレキシブル大面積印刷デバイス製造技術を高度化し、サブマイクロメートルに至る配線形成分解能、フレキシブル基板上への150℃以下の低温・低損傷でのデバイス実装、伸縮性・耐久性に優れた電極の開発などを達成した。これら基盤技術により、安全安心見守りセンサ、ロボット等に装着し、接触感を検出できるタッチセンサスキンなどを開発した。さらにネットワークMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) など他技術融合を図り、ウェアラブル心電計測デバイスなど、印刷デバイスの用途を拡大した。

## センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発

第一原理計算を用いた窒化物圧電材料の探索手法を開発し、これを用いて新規圧電材料の薄膜を作製し、従来のScAlNと同等の圧電性能を得ることに成功した。

## 『「橋渡し」のための研究開発』として記載した項目リスト

●印: 1. (1)に「第4期の特筆すべき研究実績」として記載した項目

### (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

- 量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの基盤技術開発
- スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路の基盤技術開発 **【本日プレゼン】**
- 相変化トポロジカル材料による不揮発メモリ、新奇デバイスの開発
- 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発
- 新超伝導材料の開発
- フレキシブル強誘電体材料の開発
- 高品質グラフェンの低温成長技術とデバイス機能の開発 **【本日プレゼン、現場見学】**

### (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

- STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発
- シリコンフォトリソ技術と光パスネットワーク技術の開発
- 製造網コンセプト: スマート製造モデル化
- 製造網コンセプト: プロセスセンシング技術の開発
- MEMSセンサネットワークの開発
- IoTデバイス用全固体電池の開発
- ダイヤモンド基板の接合技術の開発
- 印刷フレキシブルデバイスの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン、現場見学】**
- センサ及び高周波フィルタ用高圧電性材料の開発 **【本日プレゼン】**

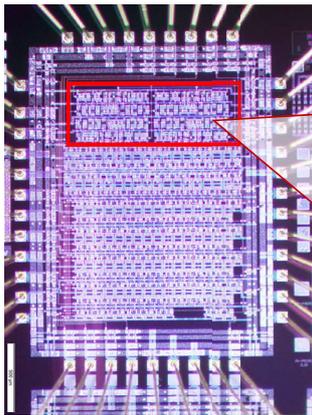
### (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

- 変量多品種IoTデバイス生産を実現するミニマルファブの開発と普及
- 製造プロセスの高度化と複合化技術の開発
- 社会で活躍する先進コーティング技術の開発
- 極微量ウイルスの検出が可能な外力支援近接場照明バイオセンサの開発 **【センサ・センシング技術として本日プレゼン】**
- スマート製造ツールキットの開発
- シリコンフォトリソ技術開発に関するエコシステムの構築 **【本日プレゼン、現場見学】**

# ミニマルファブによるIC回路試作

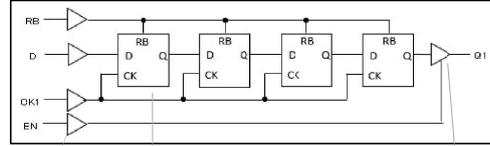
令和元年度成果

334個のトランジスタからなるシフトレジスタ回路が正常に動作

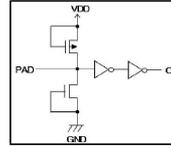


Courtesy of JAXA

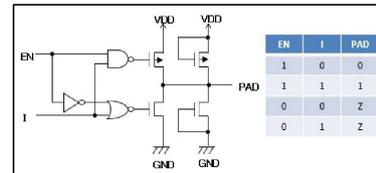
■4-bit Shift Resistor



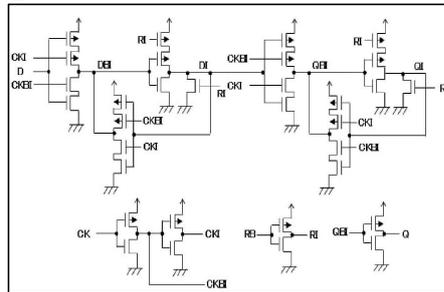
■Input Buffer



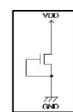
■Output Buffer (Tri-state)



■DFB



■Protector for Power supply



# 変量多品種デバイス生産に向けたミニマルファブ普及活動



# 鋳造用砂型積層造型装置の実用化

高速大型の鋳造用砂型積層造型装置を開発、上市・事業化へ

世界最速の3Dプリンタ:自動車部品等の量産に対応する速度で鋳造用砂型を造形

- ✓ 速度10万cc/hの高速大型積層造形装置 (1.8×1.0×0.75m)
- ✓ ターボチャージャー中子:12時間で650個を造形可能
- ✓ 中空薄肉構造も形成可能



**TRAFAM**  
Technology Research Association for  
Future Additive Manufacturing



750×300×150mm、最薄肉部5mm以下



高速・大型積層造形例:  
航空機エンジン用ギャボックス  
3Dプリント鋳型(上)と鋳造品(下)

日本産業技術大賞 審査委員会特別賞(2019.4)  
日本鋳造工学会 豊田賞(2019.5)、論文賞(2019.5)  
ものづくり日本大賞優秀賞(2020.3)

# AD法の高効率成膜化(HAD法)

SIP 戦略的イノベーション創造プログラム (FY2014~FY2017)  
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

**ハイブリッドAD法**

**AD法モード (圧力効果)**  
常温・高密度コーティング

高速でエアロゾルを噴射

溶射用粒子より微細なハイブリッド原料微粒子を搬送ガスに分散し使用

ノズル

硬質層 散乱層 着色層 密着層 基材

高密着コンポジット、傾斜構造被膜

3D造形物

**溶射法モード (熱効果)**  
中温・超高速コーティング

誘導コイル 高周波誘導プラズマ等による熱援用

金属、樹脂、セラミックス材

3D造形物

モード切替  
・誘導加熱調整  
・成膜圧力調整

成膜効率は最大で50倍、  
成膜速度は38倍を達成

従来溶射より非常に緻密・均一な皮膜

Deposition rate

HAD層 速度 V: 200 m/s 温度 T: 200~300°C (参考温度)

HADコーティング 厚(約25 μm)

基材

3.0kV x1000 5μm 17.4.19

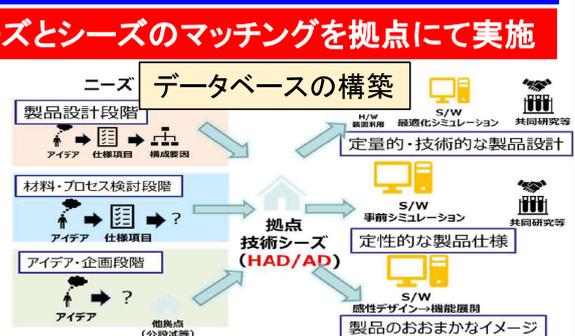
Efficiency

\*based on plasma off (HAD)

RF power [kW]	Efficiency
0	0
0.5	~10
1.0	~25
1.5	~35
2.0	~50

RF power [kW]

内閣府SIP「革新設計生産技術」  
産総研・国際コーティング拠点の整備



## スマート製造ツールキット

R元年度成果

つながる工場モデルラボの  
稼働実績可視化適用

- ✓ ユーザー毎にカスタマイズしたIoT化（計測・可視化・通知）を可能とするツールキット MZ Platform EXを開発し一般配布を開始。
- ✓ 製造現場のIoT活用事例として「つながる工場モデルラボ」の稼働実績可視化システムを、臨海副都心センターCPS棟を中心に構築。
- ✓ 産総研の地域センターを含めた複数拠点でデータ収集と可視化を実現。
- ✓ 公設研などのチャンネルを生かし、企業での活用や共同研究および技術移転を目指す。



（以下2項目は後ほど詳しくプレゼン）

## 極微量ウイルスの検出が可能な外力支援近接場照明バイオセンサの開発

抗体で磁気ビーズと標識ビーズを修飾することで、様々なウイルスを、外部磁場による動きとして光学的に超高感度検出できる「外力支援近接場照明バイオセンサ」を開発し、夾雑物を含む都市下水二次処理水100 μl中の僅か40個のノロウイルス様粒子の検出に成功した。

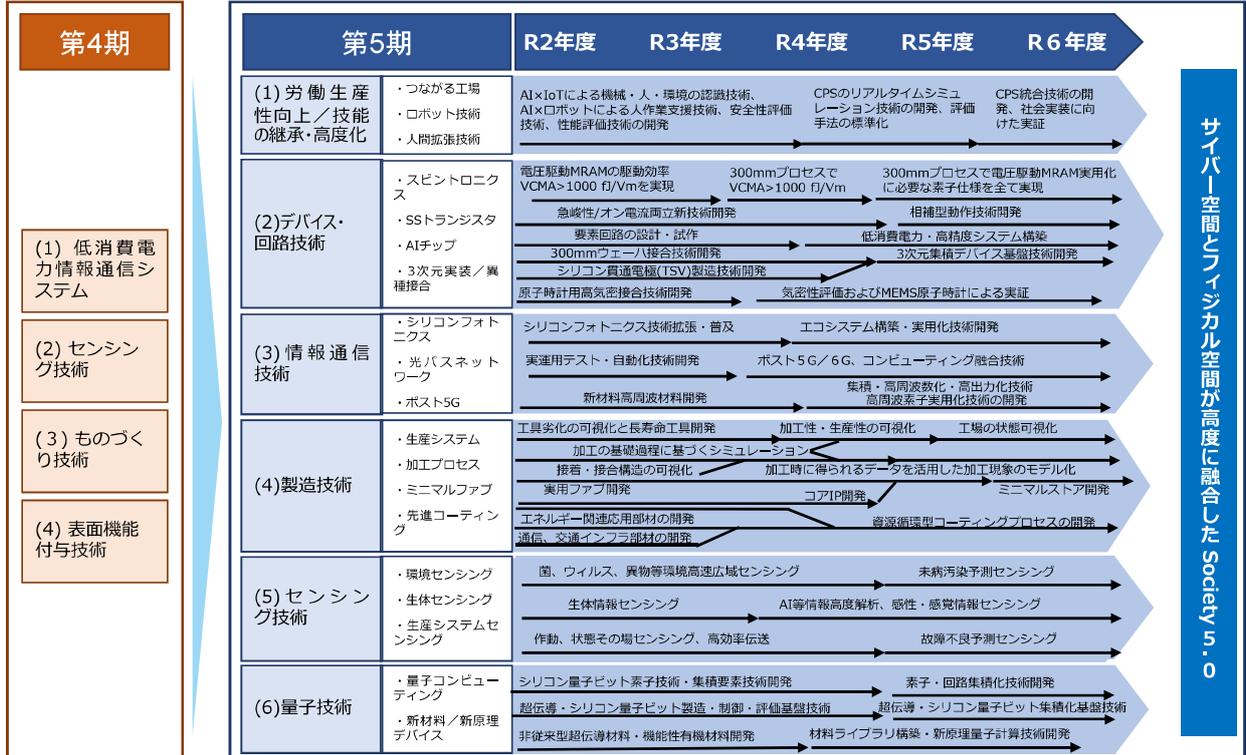
## シリコンフォトニクス技術開発に関するエコシステムの構築

民間企業や大学等が簡単に産総研設備を使って光デバイスの試作が行えるシリコンフォトニクスの研究開発用試作体制を整備した。これにより、産総研コンソーシアムであるシリコンフォトニクスコンソーシアムの参加企業や大学をユーザーとした一回目の相乗り(マルチプロジェクトウエハ:MPW)試作を実施し、構築した研究開発用試作体制が良好に機能することを確認した。

# エレクトロニクス・製造領域



## 第5期中長期目標期間のロードマップ



サイバースペースとフィジカル空間が高度に融合した Society 5.0

## (2) 「橋渡し」につながる基礎研究 (目的基礎研究)

## 絶縁基板上グラフェン直接合成技術を用いた 超高効率グラフェン平面電子源の開発

ナノエレクトロニクス研究部門  
研究部門長  
中野 隆志

## グラフェンの優れた特性と期待される応用

グラフェン・・・原子一層の厚みのsp<sup>2</sup>結合の炭素の2次元シート

主な特徴	期待される応用例
高い電荷移動度 (Si の100倍, 200000 cm <sup>2</sup> /Vs)	高周波アナログ素子
軽量・薄層・光透過性	フレキシブル透明電極
高い比表面積 (~2500 m <sup>2</sup> /g)	電池・キャパシタ
高電流密度耐性 (Cuの約100倍)	LSI配線
物質不透過性	メンブレン
機械的強度 (ヤング率1 TPa以上)	MEMS
高い熱伝導度 (ダイヤモンド以上、5000 W/mk)	放熱材料

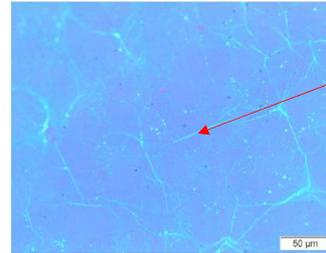
しかし、エレクトロニクスへの応用はなかなか進んでいない。。

## エレクトロニクス応用での課題

### 課題1: 触媒Cu箔上へ合成したグラフェンの絶縁基板上への転写

- 複雑・繊細なプロセス
- 汚染・欠陥・皺の発生
- 触媒Cuの溶解

基板に転写した多層グラフェンの光学顕微鏡像



皺などが多数発生



低生産性・低歩留まり、高コスト

→絶縁基板上へのグラフェン直接合成

### 課題2: 面内方向での高い電子移動度を利用したデバイス応用の提案が多く、高結晶性や原子レベルでの構造制御が要求される。

提案されているデバイス例

- 原子レベルでエッジ構造を制御したグラフェンナノリボンを用いた高速FET
- 高電子移動度を活用した高感度バイオセンサ
- 高結晶性多層グラフェンを用いたLSIの配線



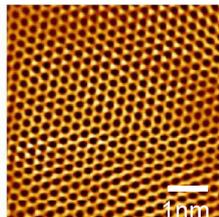
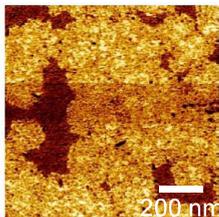
原子レベル構造制御やウェハースケールでの高結晶性グラフェンの成膜等、産業応用には技術的課題が山積している

→低結晶性でもグラフェンの特性を十分に活用できるエレクトロニクスデバイスの提案

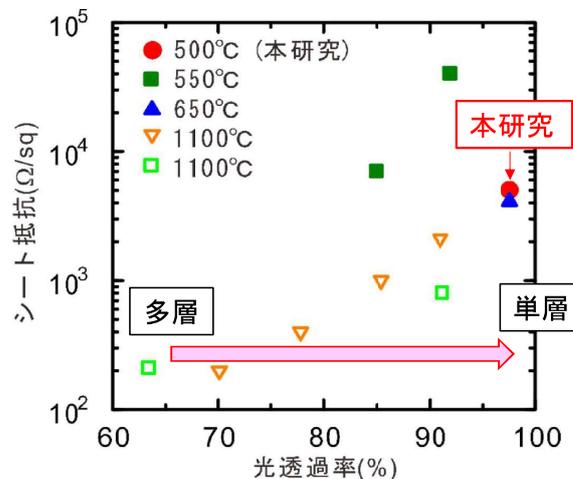
## 絶縁基板上へのグラフェン直接合成

- 500度の低温(通常1000度程度必要)
- 絶縁基板上へ直接成長(金属触媒不要)
- 単層で成長が止まる
- 比較的高い結晶性

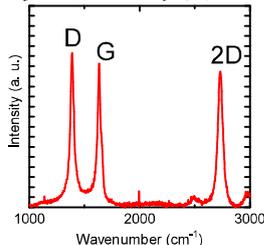
石英基板上に500度で直接合成したグラフェン  
成長過程のAFM像 成膜グラフェンの格子像



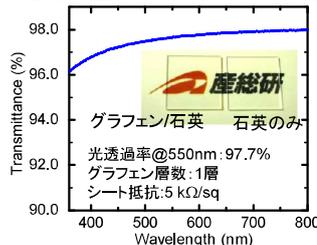
石英基板上に直接合成した  
グラフェンの光透過率とシート抵抗



ラマンスペクトル



光透過率の波長依存性

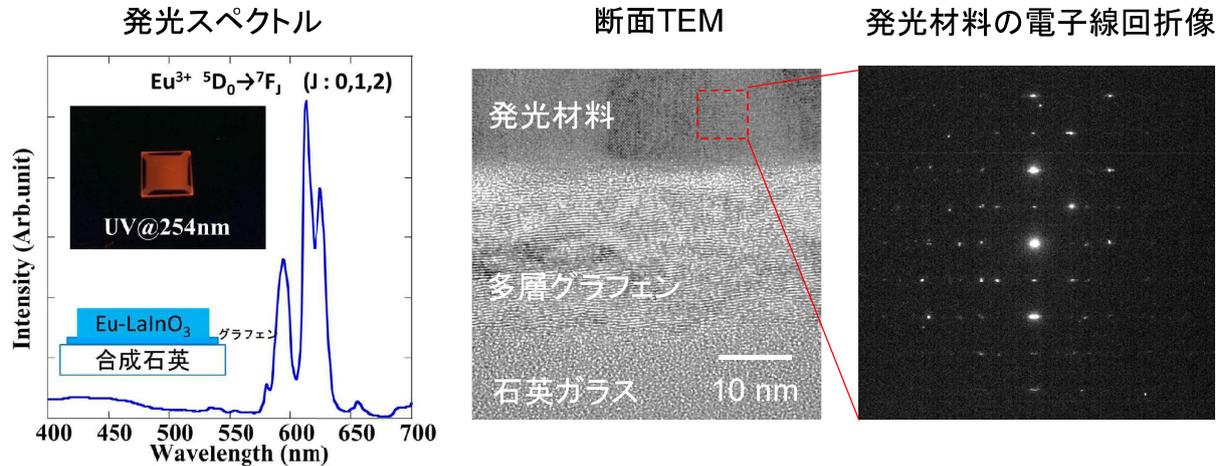


絶縁基板上へのグラフェン直接合成において、

最も低温での合成、単層グラフェンのシート抵抗で最小レベルを実現。

## グラフェン上への発光材料の直接成膜

- 層状物質であるグラフェンは表面にダングリングボンドが存在せず、表面吸着物質に対する強い結合が発生しないため、物質自身の固有の結晶構造・格子定数で薄膜成長が可能



- 従来単結晶 $\text{LaInO}_3$ 基板上にしか成膜できなかったペロブスカイト型酸化物発光材料を、グラフェンをバッファ層に用いることで、**石英ガラス基板に直接成膜可能**
- GaN等の他の発光材料への応用の可能性大

## 超高効率グラフェン平面電子源

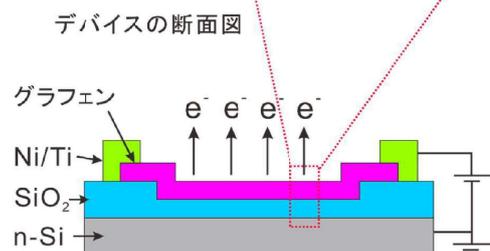
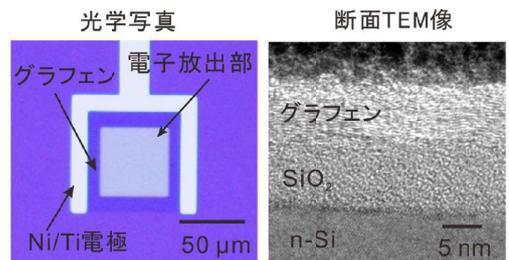
- 従来からの発想を転換。**グラフェン平面に垂直での高い電子透過率に着目したデバイス**
- デバイス特性に高い電子移動度や高結晶性は必要としない

### 主な特徴

- 平面からの電子放出
- 低電圧動作(20V以下)
- 大気圧ガス中・液体中動作
- 超高効率(30%以上, 従来の1万倍)
- 高電流密度(100 mA/cm<sup>2</sup>, 従来の1万倍)

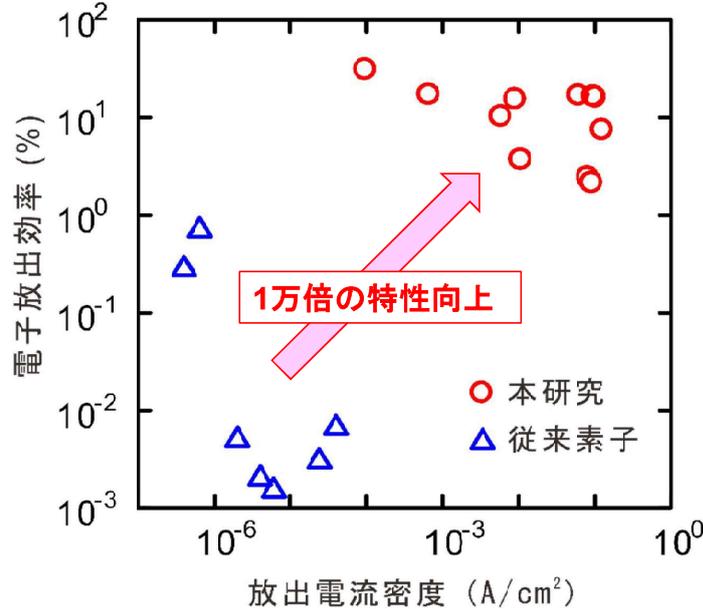
### 期待されるアプリケーション

- 電子顕微鏡応用(半導体検査、リソグラフィ)
- 液体・ガス材料改質(環境・エネルギー応用)
- 宇宙応用(小型人工衛星用推進機、デブリ除去)
- 超高感度イメージセンサ(セキュリティ・医療)
- 平面型X線源・除電装置(医療・製造・検査)



## 超高効率グラフェン平面電子源の電子放出特性

- 金属電極を用いた従来素子と比較して**1万倍の電子放出効率(48%)**と**放出電流密度(100mA/cm<sup>2</sup>)**を実現。**世界最高記録**

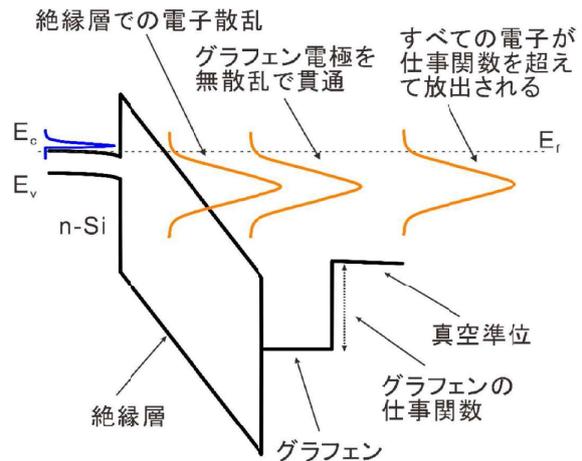
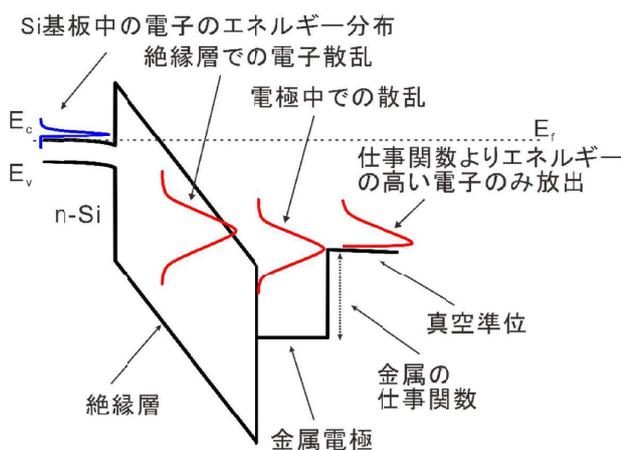


K. Murakami et al., Appl. Phys. Lett. 114, 213501 (2019) (IF:3.521)

## 高効率電子放出のメカニズムの解明

従来考えられていた動作モデル

本研究で明らかになった動作メカニズム

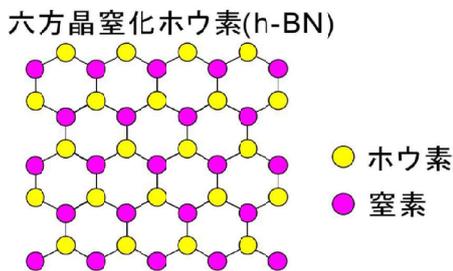
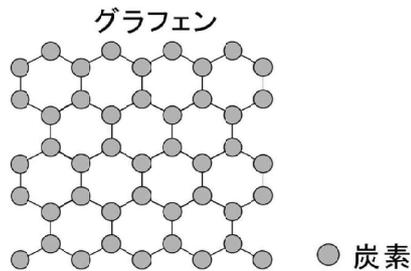


- 従来、低放出効率の要因は絶縁層での電子散乱による電子エネルギー低下と電極の仕事関数による影響と考えられていた。
- 本研究での放出電子のエネルギー分析により、**低放出効率の要因は電極中での電子散乱であることを明らかにした。**
- 更に絶縁層での散乱を抑制するとエネルギー単色性が向上できると予測**

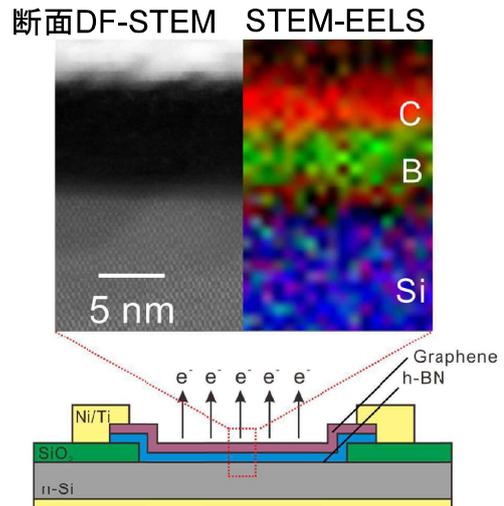
## h-BN絶縁層を用いたグラフェン平面型電子源

六方晶窒化ホウ素 (h-BN)

- グラフェンとほぼ同じ結晶構造を持つ層状の絶縁物質。
- SiO<sub>2</sub>よりも軽元素である窒素とホウ素で構成されている。
- SiO<sub>2</sub>よりも電子散乱が抑制できると予測



グラフェン/h-BN/Siヘテロ構造デバイス



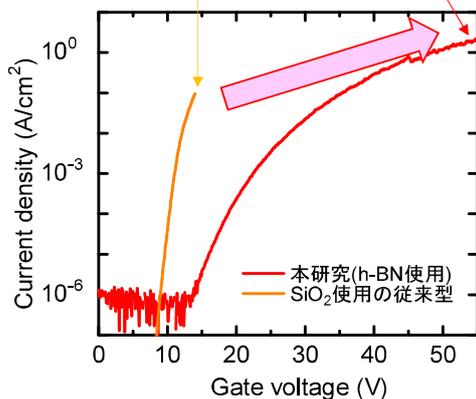
K. Murakami et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 4061 (2020) (IF:8.456)

## h-BN絶縁層によるエネルギー単色化

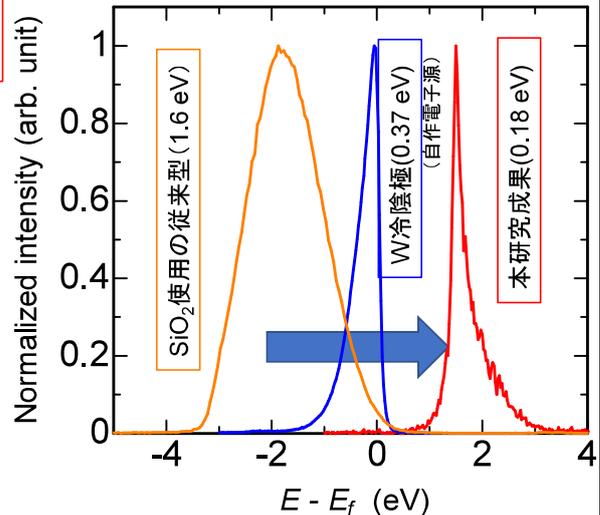
- **電流密度6A/cm<sup>2</sup>達成**(さらに60倍向上させることに成功)
- 絶縁層での電子散乱の抑制により**W冷陰極を上回るエネルギー単色化を実現**
- 40年以上にわたり、W冷陰極を凌駕するエネルギー単色性の高い電子源は存在しない
- 電子ビーム産業へのインパクト大

グラフェン/SiO<sub>2</sub>/Si構造  
電流密度0.1 A/cm<sup>2</sup>  
低絶縁耐圧のためこれ以上高い電圧を印加できない

グラフェン/h-BN/Si構造  
電流密度6 A/cm<sup>2</sup>  
従来の60倍



放出電子のエネルギースペクトル



# スピントルク発振素子を用いた ニューロモルフィック・コンピューティングの 基盤技術開発

スピントロニクス研究センター  
研究センター長  
湯浅 新治

## 発表内容

- ➡ 1. MgO-MTJ素子の特許ライセンスング
- 2. スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック・コンピューティング
  - (2-1) 背景とこれまでの成果
  - (2-2) H30-R1年度の成果
    - ① 人工ニューロン素子の性能の評価と向上
    - ② 4個の発振素子を用いた母音認識

## 発表内容

### 1. MgO-MTJ素子の特許ライセンシング

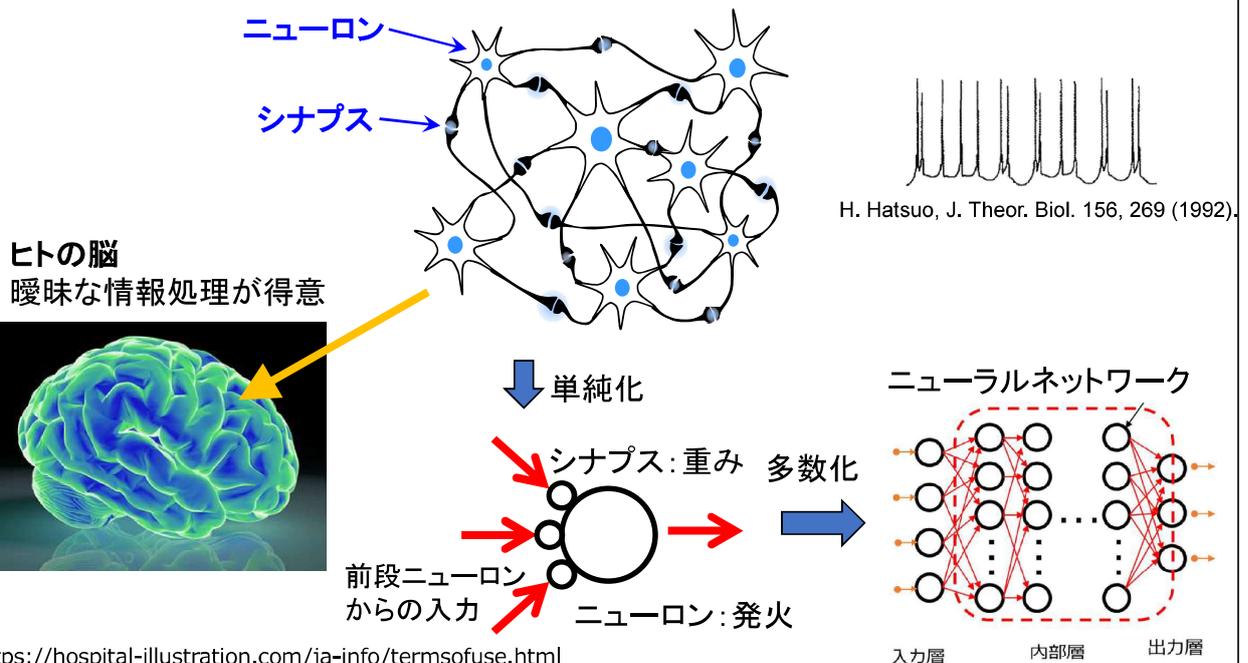
### 2. スピントルク発振素子を用いたニューロモロフィック・コンピューティング

#### ➡ (2-1) 背景とこれまでの成果

#### (2-2) H30-R1年度の成果

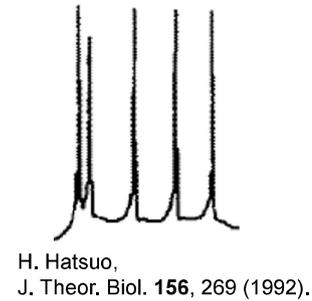
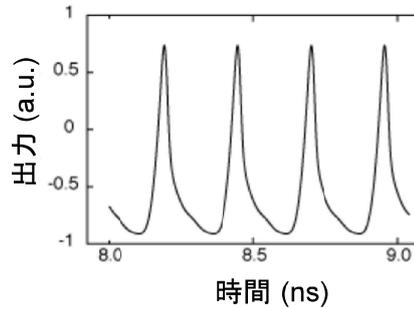
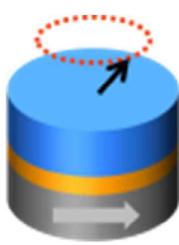
- ① 人工ニューロン素子の性能の評価と向上
- ② 4個の発振素子を用いた母音認識

## ニューロモロフィックコンピューティングの研究背景



情報伝達を担うニューロンと、情報保持を行うシナプスの働きを人工的なデバイスで模倣し、ヒトが行う高度な演算処理(ニューラルネットワーク)をハードウェアで再現する研究が活発化

## ニューロモルフィックコンピューティング：研究目的



スピントルク発振素子はニューロンの発火信号や相互結合などの類似点が多い  
(高い非線形性、緩和時間、位相同期現象など)

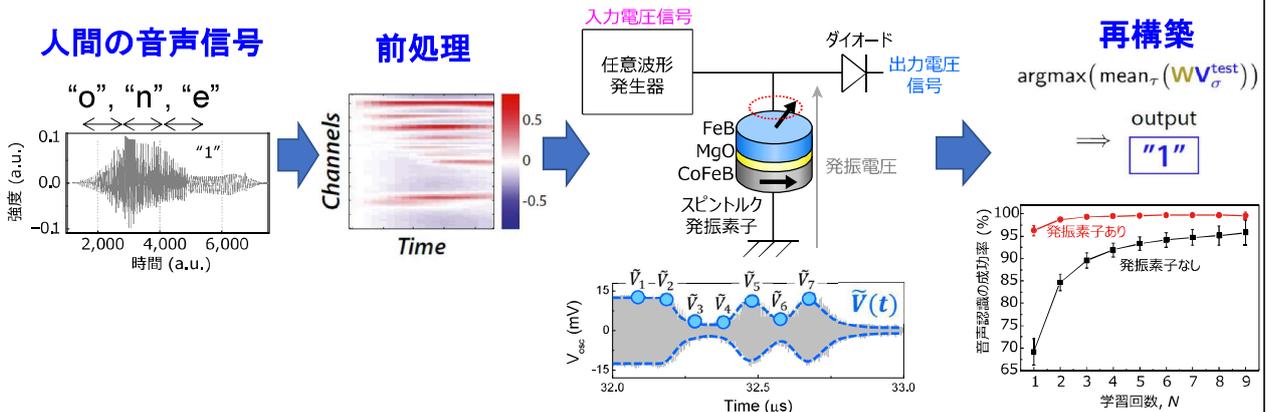


スピントルク発振素子を“人工ニューロン”として用いたニューロモルフィック回路

<目的>

スピントルク発振素子でニューラルネットワークを形成し、省電力の新規演算回路を開発する。

## 音声認識の実演 (H29年度報告)



ナノサイズ振動子のダイナミクスを用いて音声認識に成功(世界初)

仏CNRS-Thalesとの共同研究 Nature 547, 428 (2017).

残された課題

スピントルク発振素子の計算能力が明らかになっていなかった。



時系列データ処理に必須の記憶機能(計算能力)はどの程度か？

## 発表内容

### 1. MgO-MTJ素子の特許ライセンス

### 2. スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック・コンピューティング

#### (2-1) 背景とこれまでの成果

#### (2-2) H30-R1年度の成果

- ➡ ① 人工ニューロン素子の性能の評価と向上
- ② 4個の発振素子を用いた母音認識

## 計算能力の性能指数

音声認識などの時系列データ処理には記憶の機能を定量的に表す短時間記憶容量が特に重要

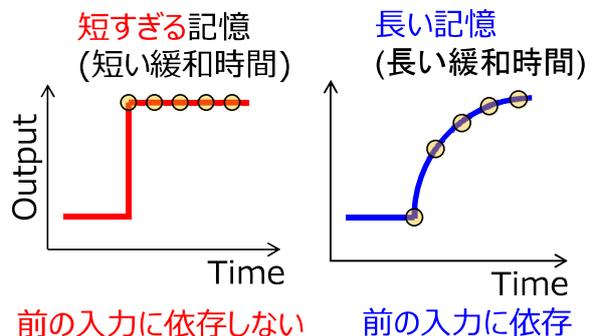
### 短時間記憶のイメージ



音声信号：時々刻々と入力  
 “H” “E” “L” “L” “O”  
 ⇒ 意味不明  
 “HELLO”  
 ⇒ 「挨拶」

途中の情報が消えてしまうと、  
 全体の意味が消失してしまう

### 短時間記憶の物理的なイメージ



### 性能評価に用いられるタスク

短時間記憶タスク、パリティ検査タスク、NARMAタスク など

(性能指数) 短時間記憶容量：ノイズ除去タスク<sup>[1]</sup>可能なシステムでは 8-10  
 センサデータ予測タスク<sup>[2]</sup>可能なシステムでは 10-12

[1] H. Jaeger, Science **304**, 78 (2004); [2] J. Fonollosa, SENS ACTUATORS B **215**, 618 (2015).

### 計算能力のベンチマーク

	開発環境	サイズ	温度	記憶容量
計算モデル (エコーステートネット)	シミュレーション	-	0 K	3 (#neuron=10) 12 (#neuron=100) <sup>[1]</sup>
光フィードバック回路	実験	~m	R.T.	>10 (#neuron=1) <sup>[2]</sup>
		~ mm	R.T.	~1 (#neuron=1) <sup>[3]</sup>
量子ビットネットワーク	シミュレーション	-	0 K	>10 (#neuron=4) <sup>[1]</sup>
	実験	m (冷凍機)	~mK	No report
ソフトロボット	実験	m	R.T.	>3 <sup>[4]</sup>
スピントルク発振素子	実験	~100 nm	R.T.	No report
	シミュレーション (相互作用なし)	-	0 K	>6 (#neuron=7) <sup>[5]</sup>
	シミュレーション (相互作用なし)	-	0 K	>12(#neuron=80) <sup>[6]</sup>

[1] K. Fujii *et al.*, Phys. Rev. Appl. **8**, 024030 (2017)

[2] C. Sugano *et al.*, 66<sup>th</sup> JSAP spring meeting 12p-W933-3 (2019)

[3] K. Nakajima *et al.*, J. R. Soc. Interface **11**, 20140437 (2014)

[4] A. Uchida *et al.*, 学振151委員会 研究会 (2020)

[5] T. Furuta *et al.*, Phys. Rev. Appl. **10**, 034063 (2018)

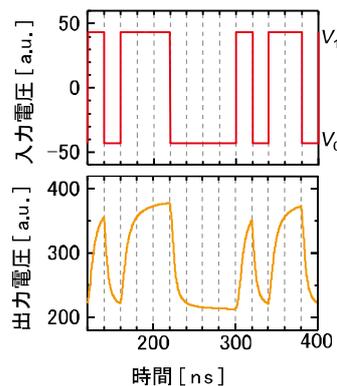
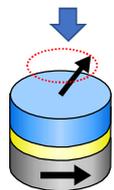
[6] T. Kanao *et al.*, Phys. Rev. Appl. **12**, 024052 (2019)

### 計算能力の定量的な評価

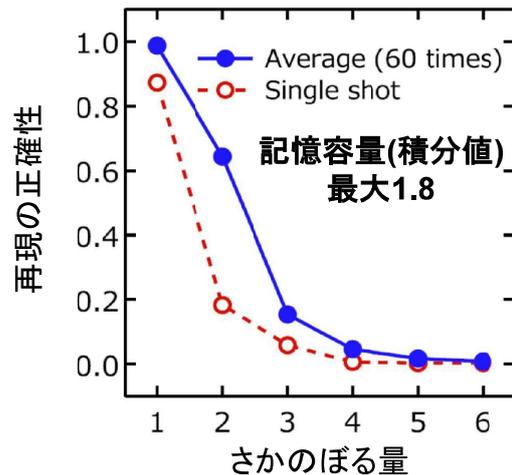
H30年度成果

#### 短時間記憶容量タスク

ランダムビットの入力



ダイナミクスから過去に遡って入力を再現



記憶の機能の定量評価化に成功  
(スピンドバイスの実験は初)

2つ前の入力信号の再現で精一杯  
磁気ノイズによる性能の悪化

*Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 12307 (2018).  
*Phys. Rev. Appl.* **10**, 034063 (2018).

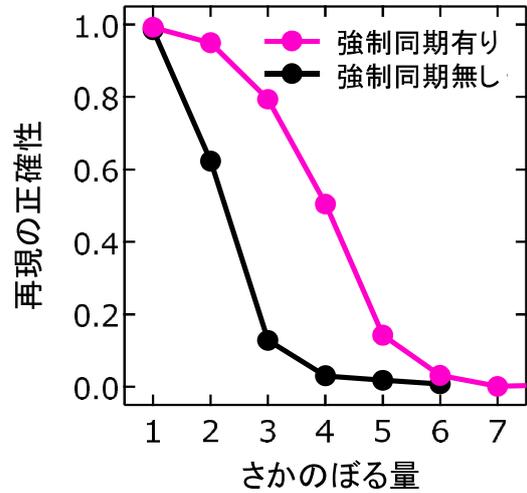
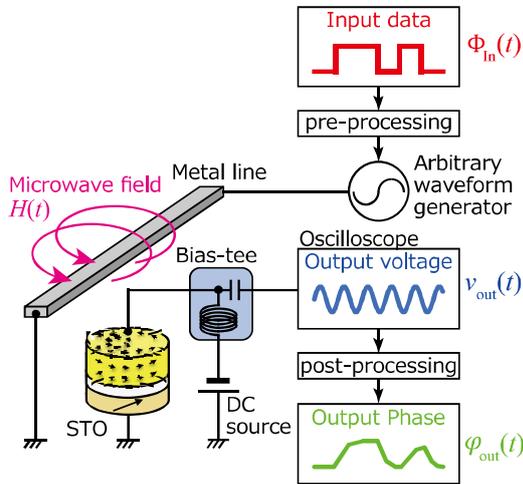
## 計算能力の向上(強制同期)

R1年度成果

高周波磁界、高周波電流による強制同期

短時間記憶容量タスク評価結果

\* 平均化を利用



強制同期の利用により  
記憶容量3.6を達成(2倍の改善)

強制同期により、磁気ノイズを低減

Appl. Phys. Lett. 114, 012409 (2019).  
Appl. Phys. Lett. 114, 164101 (2019).

## 計算能力のベンチマーク

	開発環境	サイズ	温度	記憶容量
計算モデル (エコーステートネット)	シミュレーション	-	0 K	3 (#neuron=10) 12 (#neuron=100) <sup>[1]</sup>
光フィードバック回路	実験	~m	R.T.	>10 (#neuron=1) <sup>[2]</sup>
		~mm	R.T.	~1 (#neuron=1) <sup>[3]</sup>
量子ビットネットワーク	シミュレーション	-	0 K	>10 (#neuron=4) <sup>[1]</sup>
	実験	m (冷凍機)	~mK	No report
ソフトロボット	実験	M	R.T.	>3 <sup>[4]</sup>
スピントルク発振素子	強制同期 フィードバック 疑似ネットワーク	~100 nm	R.T.	3.6 (平均化)      2倍
				>12 (平均化)      3倍
				3.6 (平均化なし)      2倍
	シミュレーション (相互作用なし)	-	0 K	>6 (#neuron=7) <sup>[5]</sup>
	シミュレーション (相互作用なし)	-	0 K	>12 (#neuron=80) <sup>[6]</sup>

## 発表内容

1. MgO-MTJ素子の特許ライセンス
2. スピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック・コンピューティング

(2-1) 背景とこれまでの成果

(2-2) H30 – R1年度の成果

- ① 人工ニューロン素子の性能の評価と向上
- ➡ ② 4個の発振素子を用いた母音認識

## 母音認識の実証実験の概要

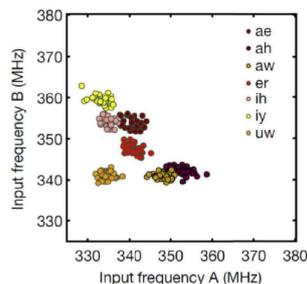
H30年度成果

音声信号

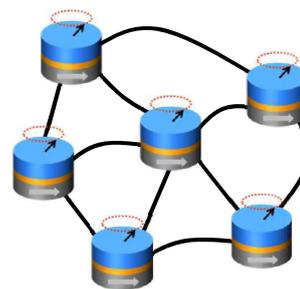


7つの母音

2変数化



振動子ネットワーク



認識結果

「母音」  
“ae”  
“ah”  
.  
.

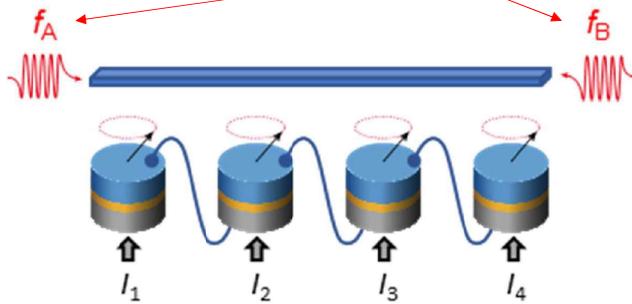
スピントルク発振素子の電気的な結合をシナプス結合とみなし、  
発振状態を発火状態とみなすことで、ニューラルネットワークを構築

4つの発振素子を用いて、7つの母音を認識に成功

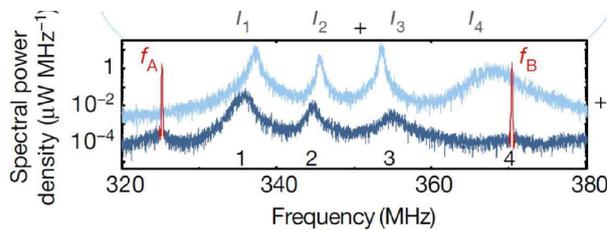
仏CNRS-Thalesとの共同研究 *Nature* **563**, 230 (2018).

## 母音認識の実験方法

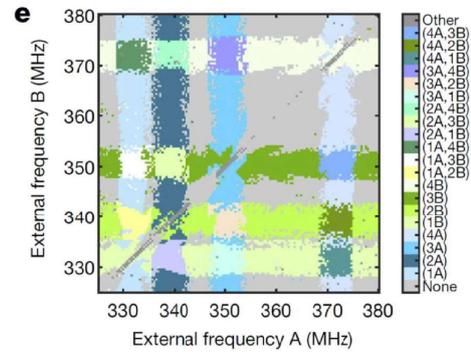
音声信号から抽出した2変数の入力信号



4つのスピントルク発振素子からなるネットワーク

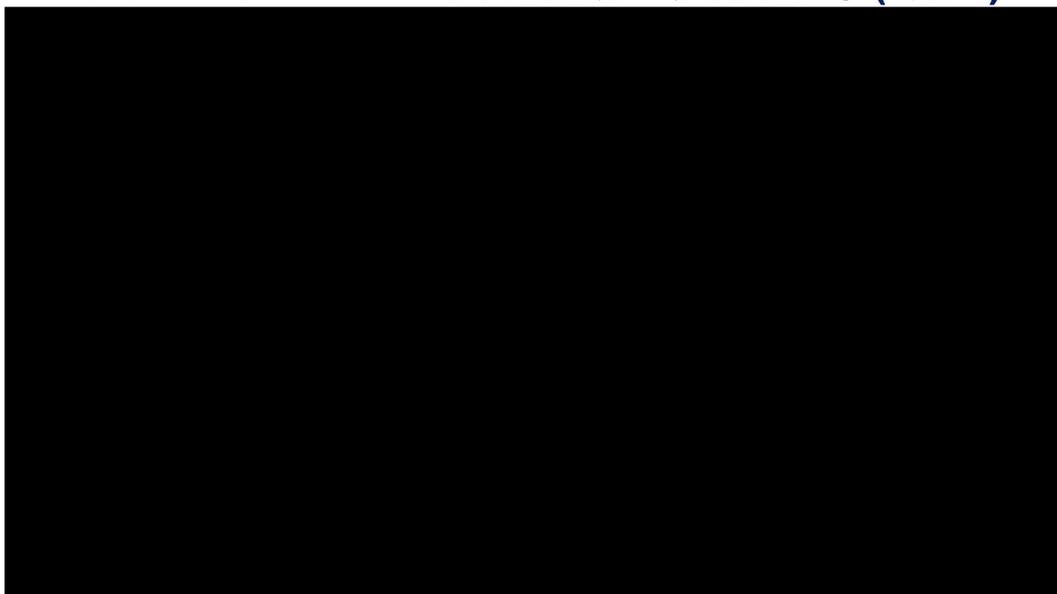


4つの発振素子の出力信号の一例



**\*ポイント1**  
同期状態で場合分け  
 $4 \times 4 + 8 = 24$ 個の場合  
に分類可能

## 人工シナプス：母音認識の実験結果(動画)



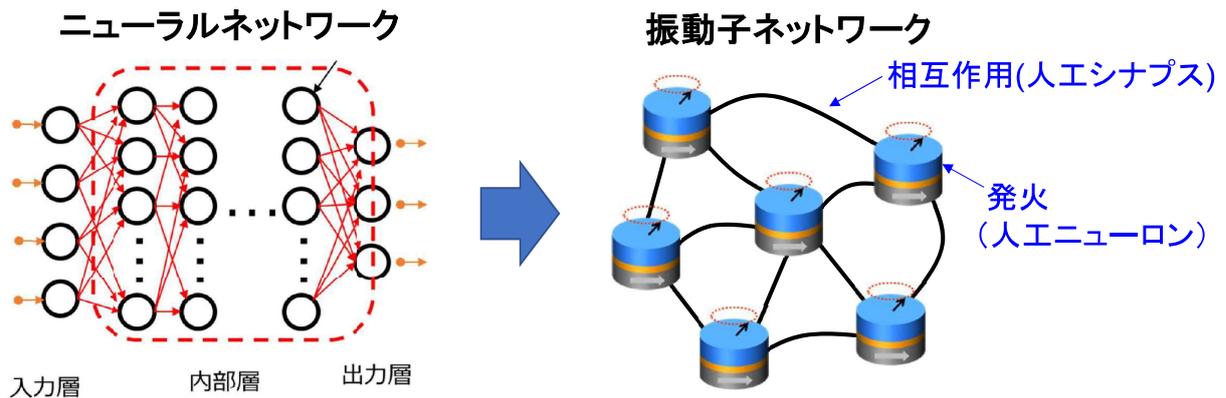
**\*ポイント2**  
学習(電流制御)により、  
同期状態のマッピングを最適化

ナノサイズ振動子のネットワークを  
用いて母音認識(認識率:89%)に  
成功(世界初)

Nature 563, 230 (2018).

## H30 – R1年度の成果のまとめ

- ① スピントルク発振素子を用いた人工ニューロンの性能指数の評価と向上に成功  
 (H30年度) *Phys. Rev. Appl.* 1報, *Appl. Phys. Lett.* 1報, *Jpn. J. Appl. Phys.* 1報  
 (R1年度) *Sci. Rep.* 1報, *Phys. Rev. Appl.* 1報, *Appl. Phys. Lett.* 1報
- ② 4個の発振素子を用いた母音認識のデモンストレーションに成功、その他  
 (H30年度) *Nature* 1報, *Phys. Rev. B* 2報  
 (R1年度) *Phys. Rev. B* 2報, *JMMM* 1報, *AIP Adv.* 1報, *IEEE Trans. Mag.* 1報



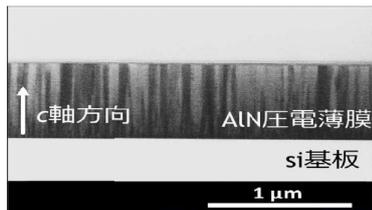
## (3)「橋渡し」研究前期における研究開発

# 「センサ及び高周波フィルタ用 高圧電性材料の開発」

製造技術研究部門  
秋山 守人

## 窒化物圧電性材料が使われているデバイス

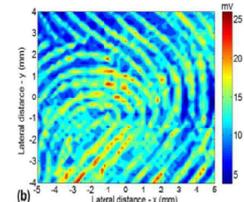
窒化アルミニウム (AlN)



振動センサ  
(マイクロフォン)  
Vesper Technologies co. のHPより抜粋



振動発電機  
UCoMS資料より抜粋



超音波指紋センサ  
D.A. Horsley et. al. Appl. Phys. Lett., 106, 263503 (2015).

従来型AE  
(φ20x20)  
薄型AE  
(12x20x1)  
燃焼圧  
(φ6検出面)

**AE・燃焼圧センサ**

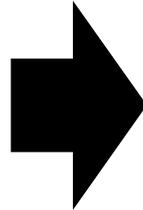
**スマホ用  
高周波フィルタ**

東北大学  
田中秀治資料より

**超音波距離センサ**  
マクニカ HPより

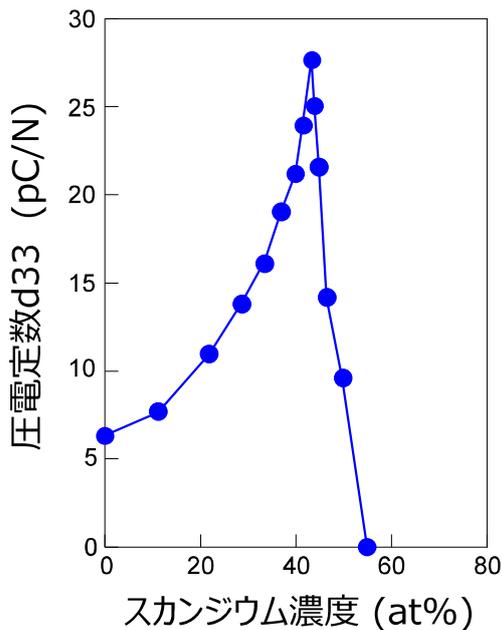
# センサ・フィルタに求められていること

1. 高感度化
2. 広帯域化
3. 小型化
4. 省電力化



AINの圧電性の  
向上

# 2009年にSc添加による圧電性の向上



AIN: 6.7 pC/N



ScAIN: 28 pC/N



2017年に  
フィルタ材料に採用



スマートフォンに搭載

## 研究の課題、目標、達成手段

### ①課題

AlN薄膜の圧電性を向上させる、Sc以外の元素を探す。

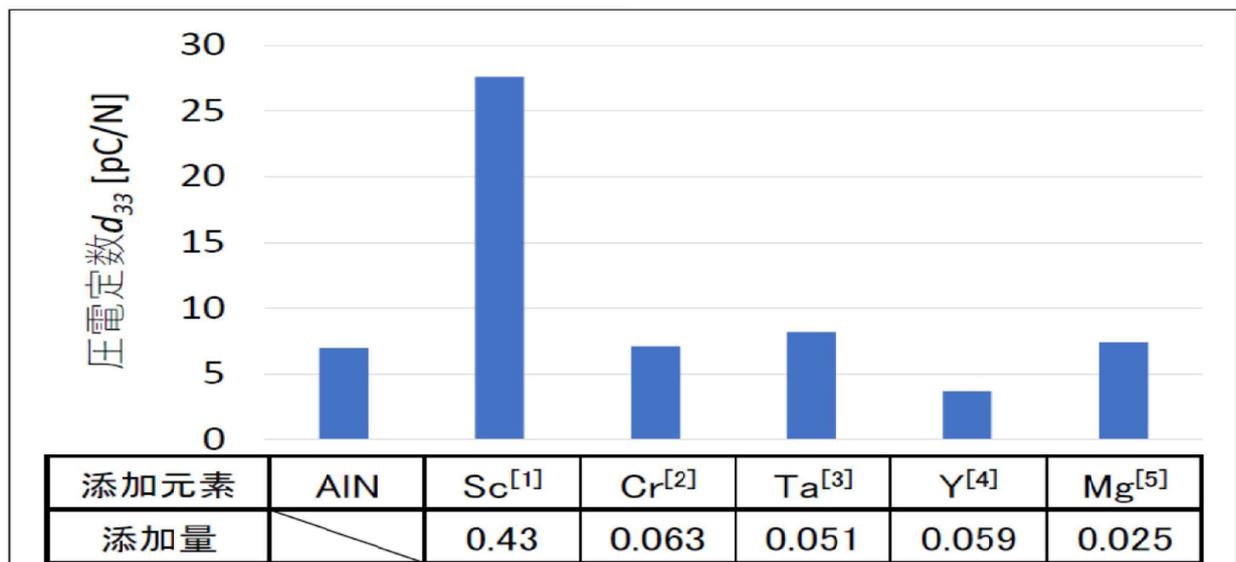
### ②目標

AlN薄膜の圧電定数 $d_{33}$ が10pC/N以上に増加させる。

### ③目標を達成するための手段

三価の有望な元素を中心に添加効果を調べていく。  
第一原理計算などを用いて論理的に候補元素を絞り込む。

## 他元素添加による圧電性の向上



[1] Akiyama et al., Appl. Phys. Lett., 95, 162107 (2009)

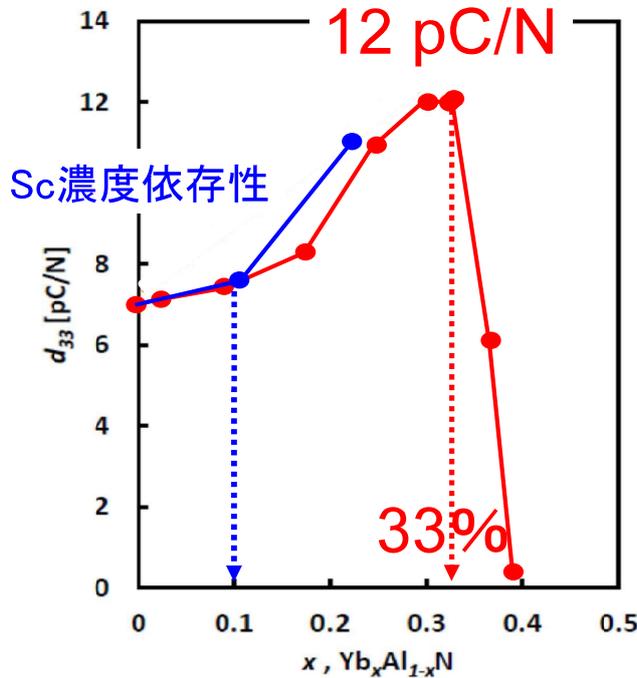
[2] J.T. Luo et al., J. Phys. D, 42, 235406 (2009)

[3] H. Liu et al., Appl. Surf. Sci., 270, 225–230 (2013)

[4] P.M. Mayrhofer et al., Acta Mater., 100, 81–89 (2015)

[5] S.A. Anggraini et al., Mater. Lett., 219, 247–250 (2018)

# Yb添加による圧電性の向上



現在実用化されている  
ScAlNのSc濃度は  
6~12%

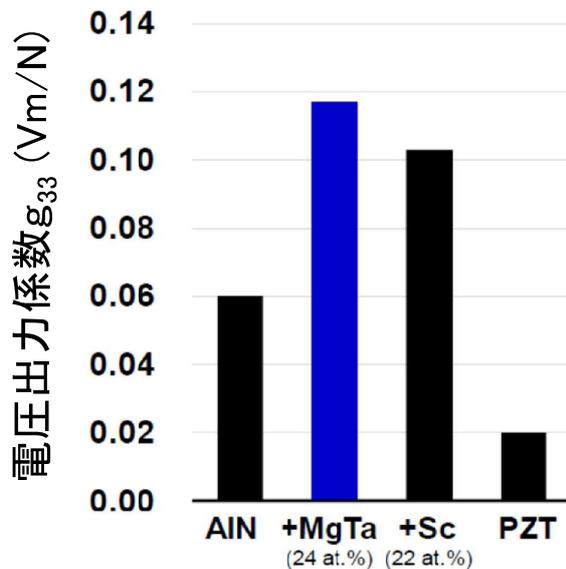
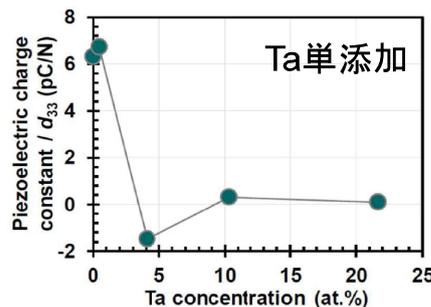
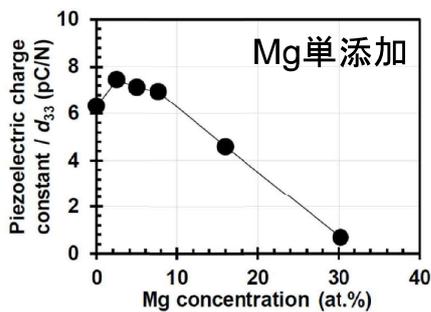
↓  
価格は約1/4

↓  
Ybは  
有望な代替元素

MRS 2019 fall

# MgTa添加による圧電性の向上

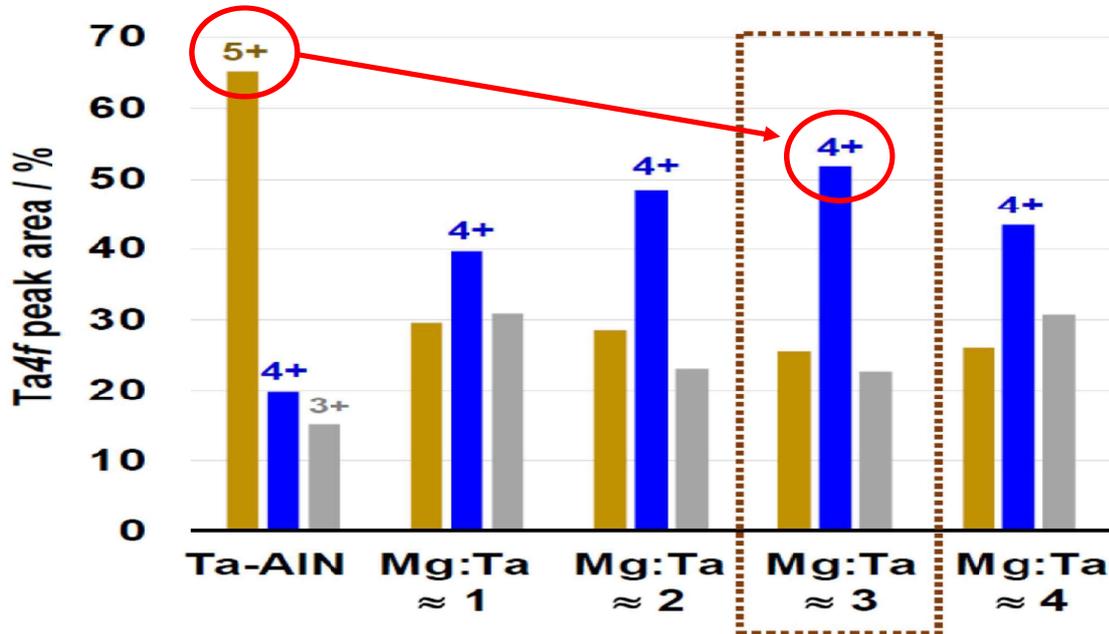
単添加(効果なし) → 共添加(効果あり)



応用物理学会(2019年秋)

# 組成→Taの価数変化

Mgが増加すると4価のTaが増加する

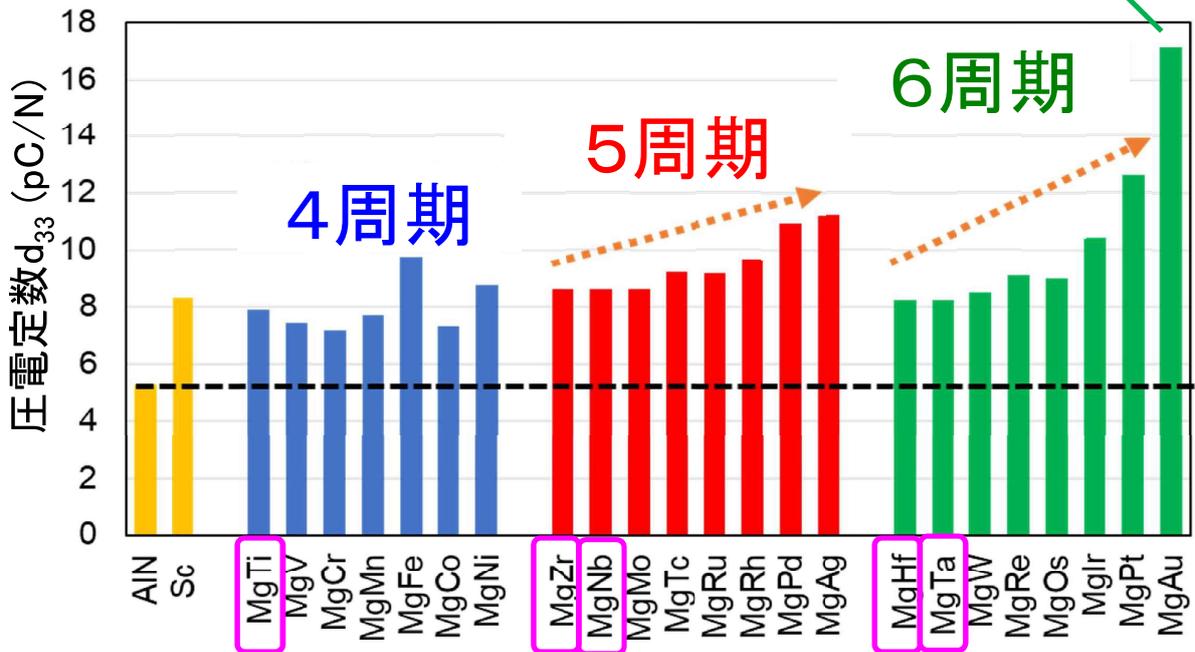


応用物理学会(2019年秋)

# 計算による探索結果

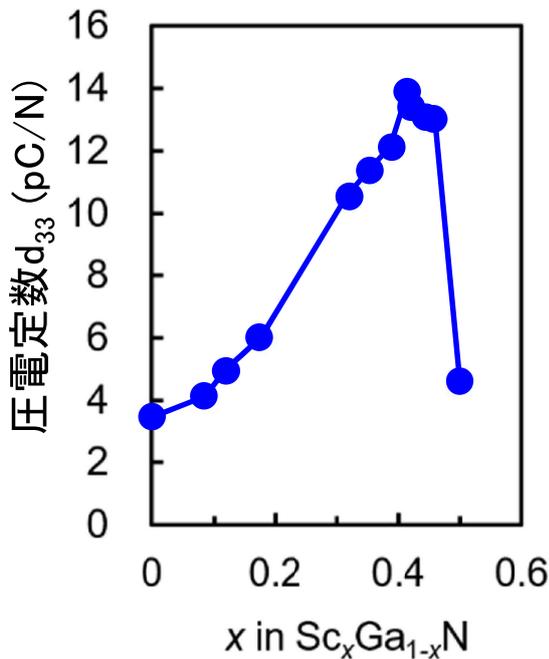
MgAuAlN

Mg+X=12.5% Simple codoped model(2×2×1)

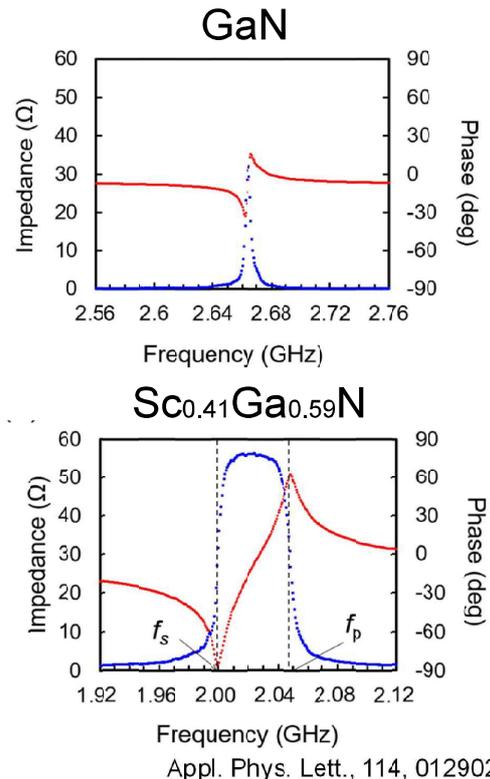


PACRIM 13 (2019,Okinawa)

## GaNへのSc添加効果



絶縁性を高めるために、カーボンや鉄を添加する必要がない



## 研究成果のまとめ

- Ybによる添加効果を確認した。  
また、圧電性の向上の原因には、計算によって、圧電性の向上と弾性の低下が効いていると思われる。  
Ybは価格が低く、低濃度領域では同程度の性能を示すことから代替元素として有望である。
- MgTaAlNの $g_{33}$ は20%付近ではScAlNを超える値を示す。  
したがって、MgTa共添加はScの代替として期待される。
- GaNにおいてもSc添加効果を確認し、フィルタを試作し広帯域化を実証することができ、新しい可能性を示した。

## 今後の展開

### ①計算結果の実証

計算で、Sc添加を超える結果が出ている、MgAuやMgFeなどの添加効果を調べる。

### ②計算と実験結果との差の解明

計算では、YbAlNは120pC/Nを、ScAlNは100pC/Nを示す可能性が示されているが、この差の原因を調べる。

### ③複合窒化物薄膜の強誘電性の確認

ScAlN薄膜が強誘電性を示すことが報告された。  
他の複合窒化物薄膜も強誘電性を示すのか確かめる。

## 第四期中の、表彰、特許、誌上発表のリスト

### ①表彰

- ・発明協会より「21世紀発明奨励賞」を受賞(2018年6月)
  - ・フルラスー岡崎記念会より「岡崎清賞」を受賞(2019年6月)
  - ・産総研より「理事長賞-研究-」を受賞(2019年4月)
- その他「真空進歩賞」など3件

### ②特許出願

「強誘電性薄膜およびそれを用いた電子素子」  
「窒化物圧電体およびそれを用いたMEMSデバイス」  
など12件

### ③誌上発表

Effects of different divalent cations in mTi-based codopants on  
The piezoelectric properties of AlN thin films, Cerm. Intern. 46, 4015 (2020).  
など15報

# 「センサ・センシング技術の開発」

センシングシステム研究センター  
センター長  
鎌田 俊英

## 内容

- (1) 課題の背景と目的
- (2) 第4期の研究開発ロードマップ
- (3) 主な成果、進捗
  - ①IoT触覚シートセンサ技術
  - ②ウェアラブルセンサ技術
  - ③超微小量センシング技術
  - ④フレキシブル実装技術
- (4) 今後の展開

## 課題の背景と目的

**フレキシブルエレクトロニクス技術・MEMSデバイス技術**  
IoT端末デバイスと革新的デバイス製造技術(オンデマンド変量多品種生産)の確立  
デバイス・プロセス技術

**センサ・センシングシステム技術**  
自動化推進、情報格差の解消を実現するためのセンサ、センシング技術の開発  
用途・価値中心技術

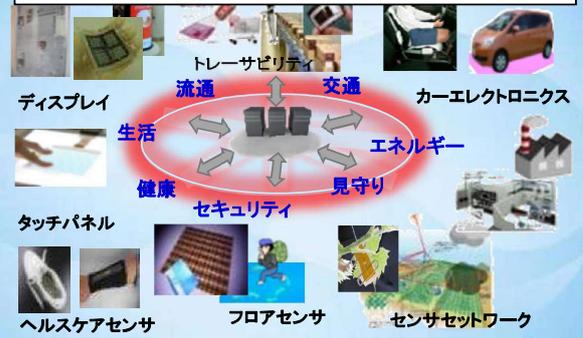
### 目的

**スマート社会の推進 (いつでもどこでもセンシング)**

オンサイトリアルタイム情報取得を実現する革新的な情報端末機器の開拓普及を目指した技術開発  
→ いつでもどこでも情報取得端末デバイスの開発

**省エネ高効率情報取得・システム化**  
市場要求に迅速にこたえられる革新的な省エネ省資源製造プロセスの開拓普及を目指した技術開発  
→ 材料・製造・回路・通信基盤技術開発

### スマート社会構築に向けたIoT技術推進



## IoTセンシングの技術課題

**IoT時代の情報端末デバイス**  
あらゆるものから情報発信

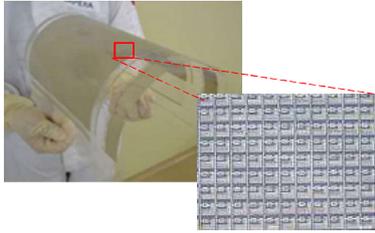
センサ性能 高感度、高信頼性、評価基盤

- ▶ **どこでもセンサ** → **形状・設置** 小型、変形
- ▶ **何時でも情報発信** → **時間** リアルタイム
- ▶ **超低消費電力デバイス** → **データ処理** 回路、電源
- ▶ **新たな価値情報** → **ヒト・感覚情報** AI処理
- ▶ **高生産性多品種変量生産** → **製造** 変量多品種生産、高生産性
- ▶ **セキュリティー** → **メンテナンス** デバイスセキュリティー

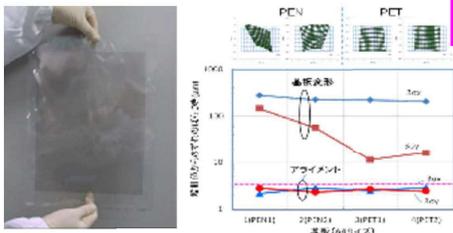
## ① IoT触覚シートセンサ技術

「高精細フレキシブルフィルムデバイス製造技術」、「機能材料低損傷高精細塗り分け技術」等を活用してモノの動きや状態を管理するフレキシブル触覚センサ(触覚ディスプレイ)を創出

### 新規開発デバイス・プロセス基盤技術



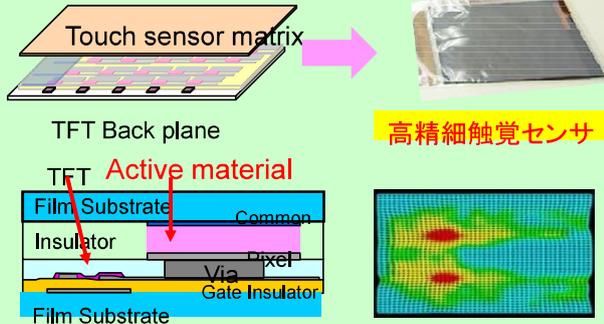
### ◆フィルムデバイス高精細印刷製造技術



### ◆フレキシブルアライメント技術： 高精細大面積フィルムデバイス製造

### 触覚ディスプレイ

接触情報を画像情報化する  
高精細触覚センサ

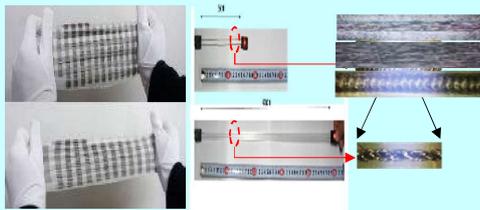


### 高精細触覚センサ

- ・圧力分布計測を可能にするフレキシブルシートセンサを開発
- ・圧力感度 0.5~10kN
- ・シートセンサ精細度最高150ppi
- ・温度圧力複合検出センサ

## ② ウェアラブルセンサ技術

### 新規開発デバイス・プロセス基盤技術 フレキシブルハイブリッド技術

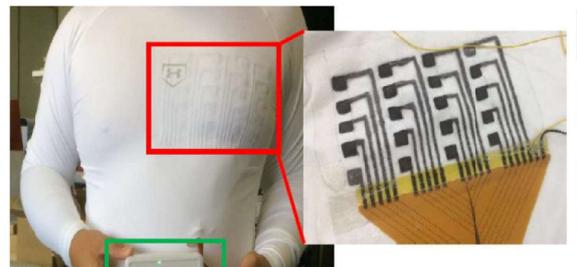


### ◆伸縮性デバイス・材料技術



### ◆極薄MEMSチップ技術

### ウェアラブル心電計を開発



### ウェアラブル筋電計を開発



H30年度成果

### 筋肉疲労度検出センサ

ウェアラブルセンサ技術：企業連携実用化検討

■ ウェアラブル生体情報センサ技術 (日常生活環境下での生体情報取得化実現)

機器メーカー及び大学病院等との連携によるウェアラブルセンサの実用化検討



技術更新

R元年度成果

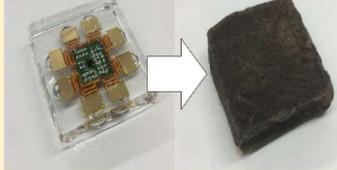


医療診断による生体情報取得



ウェアラブルセンサによる生体情報取得

(a)アンプ回路埋め込み起毛電極



着脱式センサヘッドを実現

配線レスフレキシブル集積センサ回路(通信機能付)を新たに開発

- ・コンパクトウェアラブル素子化(使用利便性)
- ・装着違和感軽減

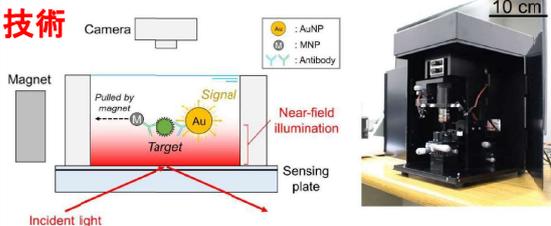


③超微量センシング技術

超微量ウィルスセンシング

外力支援近接場照明バイオセンサ技術

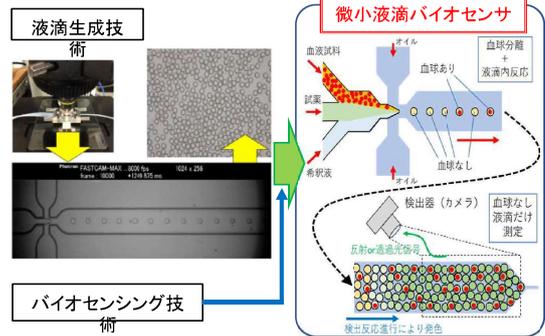
EFANI技術



環境中に存在するごく微量ウィルスの迅速検出を目標に、高感度ウィルスセンサを開発。

我々のオリジナル技術“外力支援近接場照明バイオセンサ”をベースとした研究開発を展開。

超微量バイオセンシング



検出速度の向上化技術の開発

→高い感度を保持したまま、従来の3倍の高速化(検出時間10分以内)を実現  
最終目標:検出時間1分以内(その場リアルタイム検出)

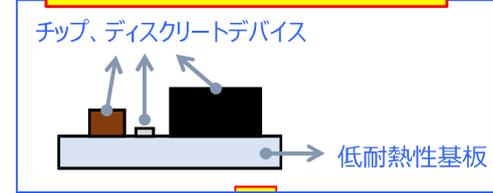
EFANI法(本開発技術:達成値) 検出感度:  $4 \times 10^2$  個/ml 検出速度: 10分以内

PCR法(現汎用活用技術) 検出感度:  $6 \times 10^2$  個/ml 検出速度: 約30分

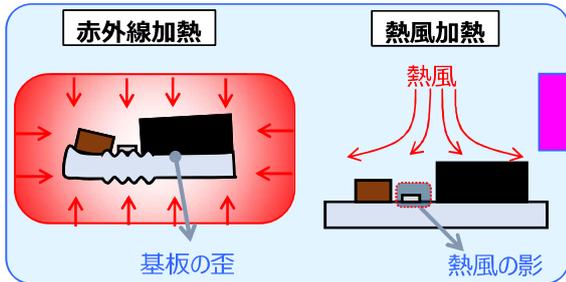
### ④フレキシブル実装技術

- 低温低損傷実装技術を開発  
基板にダメージを与えない実装技術を開発

従来の熱を用いたセンサチップ  
実装プロセスにおける課題



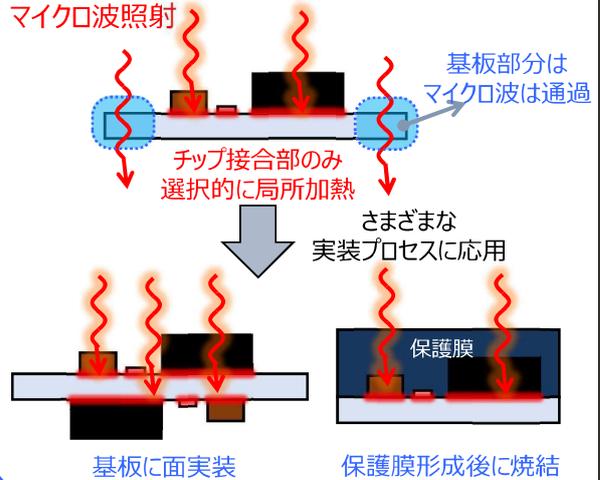
熱圧による実装



既存実装技術

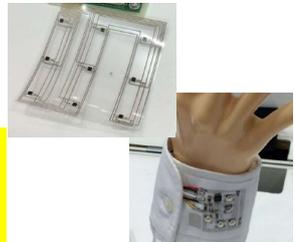
低温実装技術: 100°C加熱、10分超プロセス

### マイクロ波を用いたフレキシブル実装技術



新規開発実装技術

常温雰囲気下、10秒以内で、フィルム基板上へのチップ実装を実現



### (4) 今後の展開

#### 【第4期】

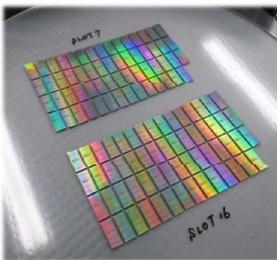
- ・IoTデバイス・製造基盤技術(フレキシブル・MEMSエレクトロニクス技術)を開発
- ・高生産性製造基盤技術(印刷製造、MEMS加工技術)を開発
- ・社会実装により、デバイス技術の実用化への道筋をつけた。

#### 【第5期】

- ・スマート社会構築のための社会課題解決型技術として、用途中心技術として開発。
- ・情報活用の社会普及のためのシステム化技術に重点を置いた技術開発の展開

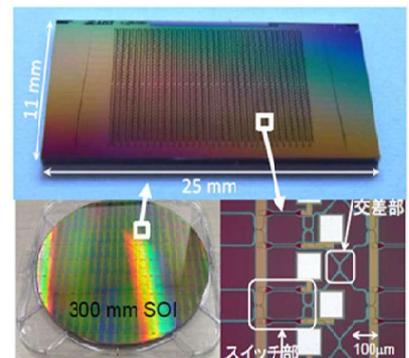
自動化推進 情報格差解消 危険異常の未然予知

## (4)「橋渡し」研究後期における 研究開発



## 「MPWによるシリコンフォトニクスデバイス R&Dファブ機能提供」

電子光技術研究部門  
研究部門長  
森 雅彦



## 発表内容

1. 背景
  - ① ネットワーク設備の市場動向
  - ② シリコンフォトニクスとは
  - ③ シリコンフォトニクスデバイスの市場
2. 産総研におけるシリコンフォトニクス研究
3. SCRの先進リソグラフィーによるSiフォトニクス
4. 産業化へのシナリオ
  - ① シリコンフォトニクスR&Dファブの必要性
  - ② ベンチマーク
5. R&Dファブ活動
  - ① シリコンフォトニクスコンソーシアム
  - ② シリコンフォトニクスPDK(Process Design Kit)
  - ③ 産総研シリコンフォトニクスエコシステム
  - ④ MPW(Multi Project Wafer)活動実績
6. プレスリリース (2/27)
7. 課題と今後の予定

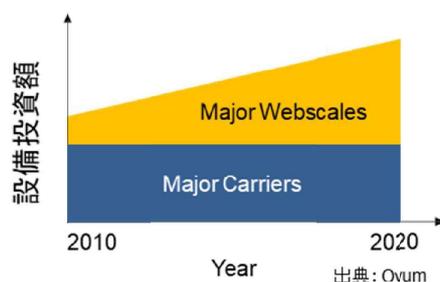
## 背景(ネットワーク設備の市場動向)

### ウェブ事業者 (Google, Facebook, Amazon, MS他) :

- ・ 巨額の資金力による独自インフラの整備(2019年頃には、キャリアとほぼ同額の投資)
- ・ データセンターを中心とするネットワークを構築し、世界のほとんどのデータを収容
- ・ 強力なソフトウェア力で、低コストインフラを構築し、非常に強いコスト競争力を獲得
- ・ クラウドを通じて、ネットワークサービス市場を席捲?

### キャリア:

- ・ 増え続ける帯域への要求に対して、増えない収入
- ・ AT&T Domain 2.0を発表し、対抗措置を講じようとしている
- ・ 5G用インフラを、どうやって構築するのか、思案中。

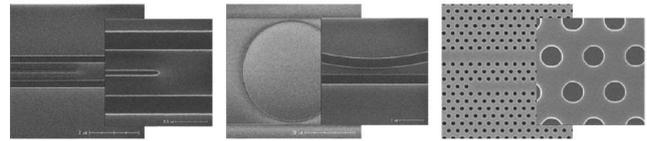


## 背景(シリコンフォトニクスとは)

- ・シリコン電子回路の製造プロセスを利用した光デバイス技術
- ・光回路の大規模集積化と低消費電力化を両立する 唯一の光デバイス量産技術

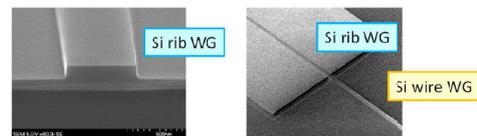
**光学的: 高屈折率材料**

光デバイスの超小型化 高密度光デバイス集積



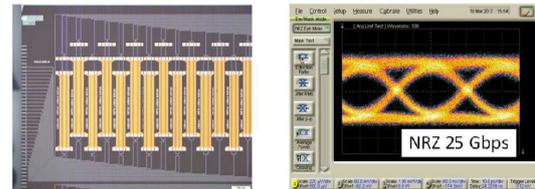
**電氣的: 半導体**

アクティブ機能の導入 電子回路との集積



**物理的: ロバスト**

異種デバイス集積に耐え 高信頼性



**経済的: 成熟した製造技術**

低コスト大量生産

## 背景(シリコンフォトニクスデバイスの市場)

大規模データセンター事業者がメインユーザー

- ・ニーズ
  - 超大容量通信(大規模集積)
  - 低消費エネルギー
  - 低コスト



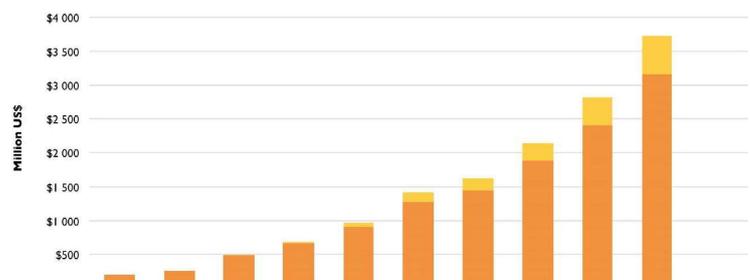
シリコンフォトニクス  
集積デバイス

2025年には、  
4,000億円に成長



Silicon photonics transceivers market forecast

(Source: Silicon Photonics 2018 report, Yole Développement, January 2018)



	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	CAGR
200G/400G Si photonics transceivers	\$ 0	\$ 0	\$ 5	\$ 21	\$ 68	\$ 142	\$ 179	\$ 257	\$ 424	\$ 555	95.9%
100G Si photonics transceivers	\$ 191	\$ 251	\$ 475	\$ 651	\$ 900	\$ 1,278	\$ 1,448	\$ 1,984	\$ 2,401	\$ 3,169	37.3%
40G Si photonics transceivers	\$ 11	\$ 9	\$ 12	\$ 9	\$ 4	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	<1%

# 産総研におけるシリコンフォトニクス研究(1)

## 大規模集積光スイッチ

スポット電子ビーム (内製プロセス)      液浸ArFリソグラフィ (CMOSパイロットライン：産総研SCR)

2012      2013      2015      2016      2017      2018

4×4      8×8      32×32      偏波ダイバーシティ4×4      偏波ダイバーシティ広帯域8×8      低損失32×32

SOA集積4×4

# 産総研におけるシリコンフォトニクス研究(2)

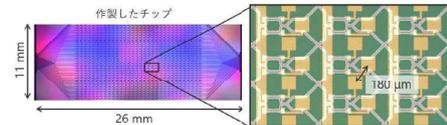
・ VICTORIESプロジェクト拠点最終年度末(2018年3月)、主要国際会議OFCの最難関ポストデッドラインペーパーに、**VICTORIES拠点成果が3件採択**された。

- ・ 世界トップのホットな成果のみが投稿される
- ・ その中で、採択率が20~30%という難易度
- ・ 全体約30件の10%を産総研が占めた
- ・ 国際英文誌Journal of Lightwave Technologyの招待論文へ



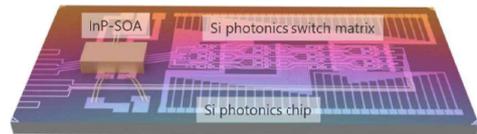
**Low Insertion Loss and Power Efficient 32 × 32 Silicon Photonics Switch with Extremely-High-Δ PLC Connector**  
 Keijiro Suzuki\*, Ryojaro Komikae\*, Junichi Hasegawa\*, Satoshi Suda\*, Hiroyuki Matsumura\*, Kazuhiko Ikeda\*, Shu Namiki\* and Hiroshi Kawashima\*  
\* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8565, Japan  
 \* Telecommunications Energy Laboratory, Furukawa Electric Co., Ltd., 6, Torino-Koganei, Ichihara, Chiba, 290-8535, Japan  
 k.suzuki@aist.go.jp

古河電気工業株式会社との共同研究

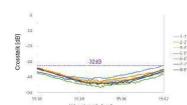


**Lossless Operation of SOA-Integrated Silicon Photonics Switch for 8 × 32-Gbaud 16-QAM WDM Signals**  
 R. Komikae\*, K. Suzuki\*, T. Inoue\*, T. Matsumoto\*, T. Kurahashi\*, A. Uetake\*, K. Takabayashi\*, S. Akiyama\*, S. Sekiguchi\*, K. Ikeda\*, S. Namiki\*, and H. Kawashima\*  
\* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8565, Japan  
 \* Fujitsu Laboratories Ltd., 1-1-1, Morishima-Echizen, Atsugi, Kanagawa, Japan  
 \* Current: with Fujitsu Optical Components Limited  
 k.komikae@fujitsu.com

(株)富士通研究所との共同研究



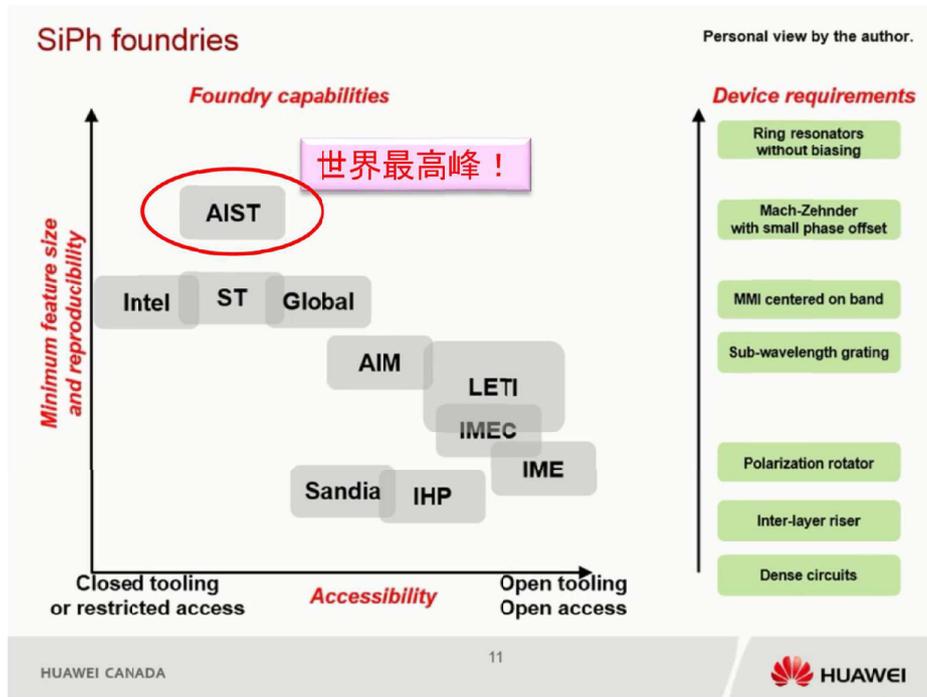
**Fully-Loaded and Cascaded Operation of Polarization-Diversity 8 × 8 Silicon Photonics Optical Switch with 11-ch × 32/44-Gbaud DP-16QAM WDM Transmission**  
 Takayuki Kurusu, Takashi Inoue, Keijiro Suzuki, Satoshi Suda, and Shu Namiki  
\* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Higashi, Central 2, Tsukuba, 305-8565, Japan. Email: t.kurusu@aist.go.jp



- ・ Prof. M.Glick, MIT (米600億円シリコンフォトニクスプロジェクト「AIM Photonics」)
  - ・ 「VICTORIESは、我々の遥か先を進んでいる。最終成果を3件のOFCポストデッドラインペーパーで締めくくるとのマネジメントカ・リーダーシップは称賛に値する。」

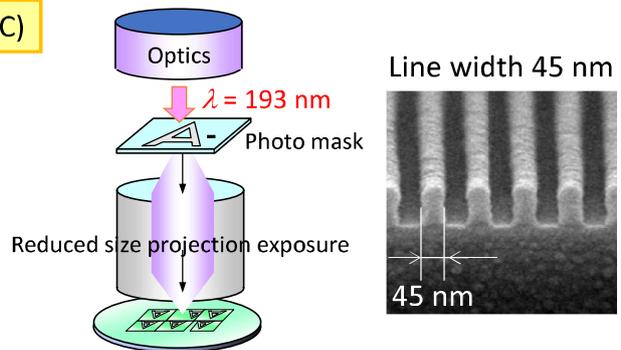
# 産総研におけるシリコンフォトニクス研究(3)

Dominic Goodwill, Senior Principal Engineer at Huawei Canada:  
OFC2017 Symposium M2B2, "Overcoming the Challenges in Large-Scale Integrated Photonics"



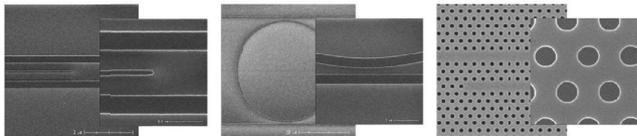
# 産総研SCRの先進リソグラフィーによるSiフォトニクス

ArF immersion lithography (Nikon NSR-S610C)



Si-wire waveguides, Ring resonators, Photonic crystals

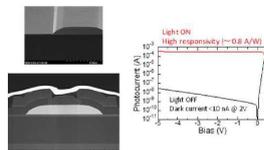
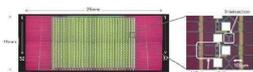
ArF immersion lithography can realize various fine patterns.



Ge photodetectors (Inverted PN junction)

large-scale optical matrix switch 32x32

ArF Immersion lithography guarantees a good performance of large-scale photonic integrated circuits.



Super Clean Room (SCR) since 2002

## シリコンフォトニクスR&Dファブの必要性

### Si-CMOS同様のファブレスモデル構築

- 高性能シリコンフォトニクスデバイス開発、製造には大規模シリコン CMOS 製造ファブに匹敵する設備が必要(液浸ArF等の 45~65nm ノード技術)
- 自らシリコンファブを持つ光デバイスベンダーはほぼ存在しない

### Si-CMOSとの差異

- シリコンフォトニクス技術はCMOSほど一般化された技術ではない
- 量産ファブを用いた開発等の大規模投資に見合うマーケットがまだ見えない
- デバイス構造に競争力を持たせる必要があるが、プロセス調整が必須
- MPW (Multi Project Wafer) 等の効率的な開発が必要

## シリコンフォトニクスR&D-MPWのベンチマーク

運営機関	Wafer	Litho.	デバイスライブラリ	性能	特徴
AIST-SCR	300mm	i-ArF	Channel, deep slab waveguides MZI modulator 25GHz BW 50:50 Power splitter Polarisation manipulation devices Grating coupler and edge coupler Heaters	28Gbps	・ロス、均一性等世界最高性能 ・日本国内から良好なアクセス
AMF (シンガポール) IBIME	200mm	KrF	Channel, shallow slab and deep slab waveguides Ge PD 25GHz and 50GHz BW MZI modulator 25GHz BW 50:50 Power splitter Polarisation manipulation devices 90 degree mixer Grating coupler and suspended edge coupler Heaters VOA	25GHz	・高い実績 ・グローバルファウンドリーと連携?
IMEC (ベルギー)	200mm	KrF	Strip, shallow rib and deep rib waveguides High-speed MZI modulators High-speed Ge photodiode High-speed Ge EAM Thermo-optic tuning 2 levels of metal interconnect Edge coupler	56Gbps	・仕組み作りが巧み ・納期?
AIM Photonics (米国)	300mm	i-ArF	Silicon and silicon nitride waveguides (strip and rib) Waveguide transitions, crossings and terminations Splitters, y-junctions, power taps Grating and edge couplers Polarisation handling MZI modulators Microdisk modulators		・大規模プロジェクト ・多数の米国企業がメンバー

## シリコンフォトニクスコンソーシアム(1)

### 必要性

- 光デバイス産業のエコシステム再構築
- 光デバイス産業に携わる単独一社では、初期設備投資が大きすぎ、産総研のSCRのようなR&D設備の利用が適当
- 産総研のSCRを使ったSiフォトニクス技術は、世界的にも最先端であり、利用促進が望まれる

### 効果

- コンソーシアムメンバー間の協業やユースケース構築による市場の活性化
- 国内光デバイス産業の競争力維持強化
- 国内光デバイス技術者の育成、能力強化
- 大容量、小型、安価、低消費電力の光コンポーネントの量産化による、超広帯域・超低遅延・超低電力・超高セキュアなネットワークの普及
- R&D Siファンドリーによる新しいビジネスモデル模索

## シリコンフォトニクスコンソーシアム(2)

### 目的

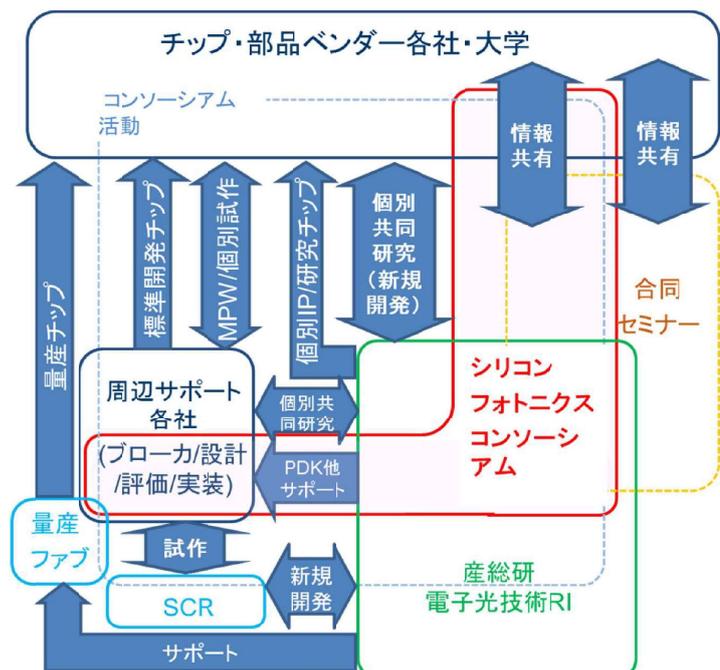
- 産総研SCRでの、シリコンフォトニクス・R&Dファンドリサービス運営
- 量産ファブとの橋渡しを推進

### 運営

- MPW試作を行う企業・大学は、原則本コンソーシアムに入会
- ユーザ窓口組織(ブローカ)を経由して、産総研PDKをベースに、SCRでのMPWシャトルや個別試作を、全体スケジュールに従って進める
- PDKにない試作を行う場合は、産総研電子光技術研究部門とプロセス開発および所望の試作を行う

### 活動内容

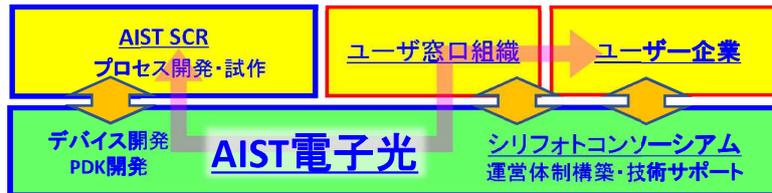
- 全体運営、スケジュール調整、共通試作や量産ファブ検討に関する意見交換
- 合同セミナー開催



## 産総研シリコンフォトニクスエコシステム

- ・標準プロセス/デバイスの開発 ⇒ PDK化
- ・運用体制の構築: コンソーシアム+ユーザ窓口組織

### MPW試作の体制図



### スケジュール

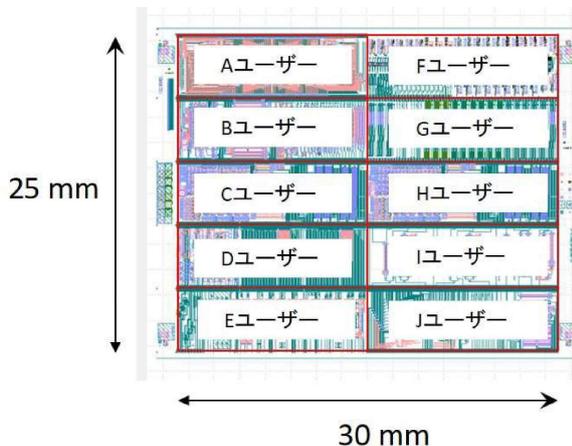
FY	2017	2018	2019	2020
Devices	Passive/Mod.	Passive/Mod_v2	SiN-WG PD	
PDK	Passive/Mod.	Passive/Mod_v2	Passive-SiN/Mod.	
MPW	Passive/Mod. (Technical trial)	Passive/Mod_v2 (Service trial)	Passive/Mod_v2	

## プレスリリース(1) (2020/2/27)

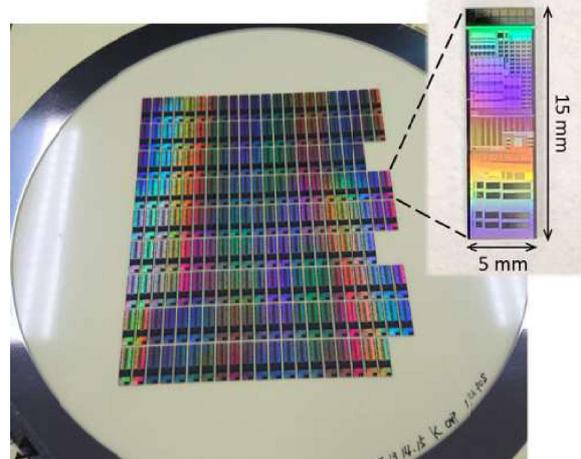
シリコンフォトニクスデバイスの研究開発試作体制を構築  
 —民間企業・大学などが利用可能に—

### ポイント

- ・プロセスデザインキット(PDK)を整備し、ユーザーによるデバイス設計が容易に
- ・将来の光デバイス製造の研究開発エコシステムを構築
- ・シリコンフォトニクスデバイスの多様な応用にむけた開発を加速



25 x 30 mmのユーザー試作領域の中にユーザーごとに5 x 15 mmサイズの専用チップを配置して、まとめて一括製造した。



2019年度相乗り試作においてユーザーに提供したシリコンフォトニクスチップ

### 概要

国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】(以下「産総研」という)電子光技術研究部門【研究部門長 森 雅彦】とTIA推進センター【センター長 金丸 正剛】は、産総研で開発した世界最先端のシリコンフォトニクス技術を普及させるため、産総研以外の幅広いユーザーが利用可能な国内初のシリコンフォトニクスデバイスの試作体制を構築した。この試作体制は、加工精度に優れる300 mmウエハープロセスを利用した研究開発用公的シリコンフォトニクス試作体制としては世界で唯一である。

技術面では、これまで産総研で独自に開発してきたシリコンフォトニクス技術を基に「デバイス設計基本情報」や「標準デバイスメニュー」をまとめた「プロセスデザインキット(PDK)」を整備し、ユーザーによるデバイス設計を容易にした。また、運用面としては、産総研コンソーシアムであるシリコンフォトニクスコンソーシアムの活動の一環として、設計情報の集約や試作デバイスの分配などを行うユーザー窓口機能を設置し、利便性の良い試作体制を構築した。2019年10月には、コンソーシアムの参加企業や大学をユーザーとした1回目の「相乗り試作」を完了し、今回構築した研究開発試作体制の良好な機能が確認された。今後、国内外の民間企業・大学などに研究開発試作を幅広く提供し、開発技術の普及に努めていく。

### 掲載紙

光デバイス試作体制構築 シリコンフォトニクス技術 産総研が民間向け

▼日刊工業新聞 2020年02月28日 朝刊 25面

産総研 シリコンフォトニクス技術 デバイス試作体制構築

▼化学工業日報 2020年03月09日 朝刊 4面

シリコンフォトニクスデバイスの研究開発試作体制を構築 産総研とTIA推進センター

▼科学新聞2020年03月06日 2面

(WEB)

OE Times Japan 3月2日

シリコンフォトニクスデバイスの試作体制を構築 <https://eetimes.jp/ee/articles/2003/02/news030.html>

他: Laser Focus World JAPAN, fabcross for エンジニア,電波新聞デジタル等

### 課題と今後の予定

- Geエピ(フォトディテクタに必要)技術の提供
  - PDK作成
  - Geエピ装置の安定的な運用
- ユーザーの拡大
  - 光デバイス企業 ⇒ センシングデバイス開発等
  - 海外ユーザーの取り込み(アカデミア、企業?)
- SCRの安定的な製造ラインの確保
  - 短納期化
  - 老朽装置対策(シングルライン)
  - プロセス人材確保
- 量産ファブへの橋渡し
  - 国内外ファブとの連携

## 主な指標の情報

	平成 27年度 実績	平成 28年度 実績	平成 29年度 実績	平成 30年度 実績	令和元年度 12月末 実績	令和元年度	
						3月末 見込	目標値
民間資金獲得額（億円）	6.5	9.9	11.9	15.4	20.3	21.9	22.1
論文の合計被引用数（回）	6,699	6,780	6,676	6,528	7,028	7,100	6,800
論文発表数（報）	345	313	333	400	252	400	400
リサーチアシスタント採用数（名）	13	23	33	45	47	47	40
イノベーションスクール採用数（名）	4	10	7	16	11	11	
知的財産の実施契約等件数（件）	167	161	176	222	221	221	200



## 評価委員コメント及び評点

### 1. 領域の概要と研究開発マネジメント

#### 【第4期全体に対して：期間実績評価】

(評価できる点)

- ・当領域は国の第5期科学技術基本計画での Society 5.0 を牽引している。今後ともその役目を期待したい。また、これからは海外との連携が益々重要になってくると思われる。この委員会ではこの点はあまり議論されなかったが、十分な対応をお願いしたい。
- ・技術的には、世界最良値、世界初のものがそれぞれのフェーズで存在する。また、各年度に受賞があり、各業界での評価が高い。ホームラン特許あり。
- ・新制度の技術コンサルティングやコンソーシアム等を通じたマーケティング力の強化、冠ラボなど外部機関との連携を着実に推進しており、R&D から事業化までの技術支援を幅広く行うことで橋渡し機能を確実に強化したと評価する。
- ・IoT 技術で重要となる横断的な技術融合を目指した所内連携を進め、さらに中小・ベンチャー企業支援も含めた IoT オープンイノベーション研究開発拠点として重要な役割を果たしている。
- ・計画通りの進捗が見られます。
- ・目標を達成するために着実なマネジメントが実施されていることが確認できました。
- ・民間資金の獲得も目標通りであり、かつ1件あたりの金額の増大も着実に見られ、顕著な成果を創出されていると判断します。
- ・新しい情報処理技術を創出するための要素技術の開発を進め、その結果量子コンピューターやニューロモルフィック回路の構築や有力特許取得などの成果をあげた。

(改善すべき点及び助言)

- ・大学との連携により産総研の施設と人的資源を人材育成に生かす努力がなされていることは評価したい。出来ればもっと広く地方大学や海外の大学からも学生を受け入れ、人材育成をお願いしたい。
- ・全体の運営について、よく工夫されていたと思う。ただ、もっと中では自由に議論する雰囲気があるとよかった。
- ・前年度に比べて技術コンサルティングや技術移転収入は大きく増加し、民間資金の獲得額は3倍以上に増加しているが、研究契約件数は、ほぼ横ばいであり、前年度比では減っている。
- ・橋渡し前期の研究を磨くのに重要な資金である公的・外部資金の獲得も H28 年度をピークに減っている。
- ・このことは、第5期以降の将来における橋渡しの基となる新たな目的基礎研究への取組や育成がなされているか懸念される。将来の産業ニーズを踏まえつつ、革新的な技術シーズを生み出す基礎研究への着手を第5期で確実に実施されることを強くお願いしたい。
- ・5年前にゴールとして目指した姿が結果的に、現在、産業界が投資を加速している「旬」な市場対応ではないのが残念であり、次の5年へ向けて改善が必要です(量子計算機は立ち上がり始めましたので今後の期待はあります)。
- ・今後、民間資金は、大手は1件あたりの高額化を、中堅・中小はパートナーを活用するなどの省力化の検討もするべきです。
- ・激動する時代の中で、次の中計期間の未来予測を領域として検討してもよいのではないかと。

#### 【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

(評価できる点)

- ・産総研—理研連携が順調に行われている。他の国研との連携も期待したい。
- ・民間企業からの獲得資金が特に大きくなっており、研究者の努力がうかがえる。
- ・橋渡し機能を確実に強化し、さらに研究者をサポートする体制(イノベーションコーディネータ)の拡充、人的資源・設備スペースに関する的確なマネジメントにより、領域としての民間資金獲得額を R 元年度は H27 年度の3倍以上に大幅に伸ばすことに成功した。
- ・新たな冠ラボ(2件)と AIDL を設置するなど外部との連携強化を進めており、それに伴う優秀かつ多様な研究人材の拡充・育成を実施していると評価できる。
- ・上記の内容について、最新の状況変化に対応した適切なマネジメントが実施されています。

- ・新たにセンシングシステム研究センターを立ち上げ、今後必要となる社会システムの基盤を開発できる体制を整備した。

(改善すべき点及び助言)

- ・冠ラボは企業との連携に寄与している。さらに増やす努力を期待したい。
- ・次の組織の在り方は、今までと同じではいけないと思う。新たな社会に向けた技術を実現していくために、どのように人材を育て、後押しするのかをしっかりと考えて運営して頂きたい。
- ・Society5.0ではイノベーションにつながる研究開発には多様性が重要である。クロスアポイントメント制度の積極的な活用や女性や外国人など、特にグローバルな視点を持った人材の獲得・育成など、人材流動についてはさらなる一層の推進を期待する。
- ・センサーの新しい動きは見られますが、5年後の旬な市場対応への準備活動の運営があるべきでした。
- ・今後、スマート製造などのスマート化への取り組みはもっと強調する必要があります。
- ・成果はよく発表できているが、未達成に基づいた課題の把握や反省はもっとできてよいのではないかと。「多様性」の組み込みなど、まだできることはあるように考えられる。

## 2. 「橋渡し」のための研究開発

### (1) 「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

【第4期全体に対して：期間実績評価】

(評価できる点)

- ・MgO-MTJやScAlNの特許ライセンスは日本の誇るべき成果であると高く評価したい。さらなるホームラン特許を期待する。
- ・特に、新超伝導材料として、100K超の高T<sub>c</sub>の材料を発見したことはすばらしい。また、基礎研究での特許収入の高さに驚いた。世界初の技術は、高収入につながることを示された例といえる。
- ・発表研究論文数、世界的なインパクトなど、目標を超える成果が達成されており、世界レベルの研究開発が行われている。
- ・スピントロニクスの研究では、第4期において多くの革新的な技術シーズの創出と、スピード感を持った橋渡しに成功しており、特に、STT-MRAMの事業化、MgO-MTJの特許ライセンスなど高く評価できる。
- ・研究成果として得られた革新的な技術シーズを新たな展開へとつなげ、将来の橋渡しの芽を多く生み出している点が高く評価できる。
- ・科学的に高いレベルの成果を創出しており、企業との接点も適度に設定し、方向性を失わないマネジメントが見られます。
- ・グラフェン成長と性能確認、及び平面電子源のデバイス応用まで、統一的に研究を進め成果をあげている。
- ・スピントルク発振素子の研究では、フランスとの共同研究を進め、母音認識実証実験でニューラルネットワークを構築するという大きな成果を出した。

(改善すべき点及び助言)

- ・量子コンピュータ、超伝導材料開発など、息の長い研究開発を進めていることは評価したい。これらの分野での産総研の指導力を期待したい。
- ・第4期の基礎研究は、バラエティーに富んだ研究がなされていた。これらの個人のアイデアを上手く育てるようにバックアップをお願いしたい。
- ・量子テクノロジーにおいては、理研との連携など、日本をけん引する研究拠点として大きく期待されるが、将来の橋渡しを目指して、研究戦略・知財の獲得、標準化活動などを進める必要がある。
- ・基礎研究の段階から、世界的な研究水準と比べてときに、日本がどう勝つのかを見据えて、戦略的に取り組んでいただきたい。
- ・ターゲットなど当初の計画自体に課題があったと思います。途中での変更をかける仕組みを導入しての仕切り直しが必要でした。

【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

(評価できる点)

- ・競争の激しいグラフェンの分野において、グラフェン平面電子源の開発は大きな成果である。今後の発展を期待したい。
- ・グラフェンにしる、ニューロモルフィックにしる、正に次の Society 5.0につながる、思いもよらなかった技術がでてきたと感心される。
- ・発表研究論文数、世界的なインパクトなど、目標を超える成果が達成されており、多くの世界レベルの成果が得られた。
- ・新たな展開としてスピントルク発振素子を用いたニューロモルフィック回路による母音認識に世界で初めて成功したことが特に評価できる。
- ・産業界が期待する研究ニーズに答える動きとしては、高品質グラフェンの絶縁基板上への直接合成技術の成功と、その技術の独創的な応用により産業界の課題解決に対応する共同研究につなげている点が挙げられる。
- ・世界初、世界最良などの顕著な成果が見られています。学術的に高い成果が生み出されていると判断できます。
- ・特許収入の顕著な成果も見られています。
- ・目的基礎研究として模範となるような成果を出し、論文成果をしっかりと出している。

(改善すべき点及び助言)

- ・STT-MRAM からニューロモルフィック・コンピューティングへの発展は当を得た展開である。産総研のイニシアチブを期待したい。
- ・次の期にかけて、思いもよらなかった点を理論的に説明できるようにしていただきたい。期待している。
- ・橋渡し研究のステージへの移行に必要な公的な外部資金の獲得が減少している点がやや懸念されるが、獲得には社会や産業のニーズを的確にとらえることが重要である。
- ・多くの素晴らしい最先端の技術成果を挙げられており、外部との連携や技術交流の機会を広げることで社会や産業のニーズを的確にとらえ、将来の融合的研究へ繋げていただくことを期待する。
- ・「橋渡し先」の具体像が見えないのが残念です。当日紹介いただいたものは、このままでは大学に移管すべき内容と考えます。橋渡しを標榜する以上、少なくとも事業化までのストーリーは語るべきです。

## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

【第4期全体に対して：期間実績評価】

(評価できる点)

- ・MTJ素子の集積化が順調に進んでいることは高く評価したい。
- ・今後、量子ビットや擬似量子ビットでMTJ素子は益々重要になってくると思われる。産総研のイニシアチブを期待したい。
- ・圧電：製品化に向けて、自分の弱みを企業の技術の力を借りるという形でなんとか実用化しようという姿勢が評価できる。
- ・橋渡し前期の研究開発では、積極的な民間との連携を進めており、企業への技術移管や更なる展開を進めている点が評価できる。
- ・シリコンフォトニクス光スイッチを核として光パズネットワークの研究開発では高い研究成果を挙げられており、デバイスだけでなくネットワークシステムの研究が産総研で行われたことは高く評価できる。
- ・NEDO や NICT のナショプロが始まっており、NII の SINET、NICT の JGN との、所属省庁を超えた全日本的なネットワークコンソーシアムを設立したことは画期的である。
- ・領域全体の中ではあまり大きく取り上げていませんが、この部分のテーマ設定は比較的市場の要求に沿っていると判断できます。
- ・高齢化社会を視野に入れ、様々なセンサー技術とその要素技術について重要な開発を進め、成果をあげてきた。

(改善すべき点及び助言)

- ・「橋渡し」機能をより効果的にするため、社会のニーズ等の調査とそれを研究者・技術者に橋渡しをするような仕組みがあっても良いのではないか。
- ・圧電：計算結果と実測の大きな差を埋めるよう、検討して頂きたい。
- ・日本の中小企業との技術協力のIoT化の加速が期待され、新たなビジネスモデルへの展開が期待される

が、センサのインターフェースも標準化に対応する必要があり、企業からのコミットメントを十分に得て開発を進めていただき、標準化についても戦略的に進めていただきたい。

- ・橋渡しすべき市場、顧客開発の調査活動が弱かったのではと思います。今後、産総研全体として応援すべきです。
- ・取り組んでいるセンシング技術は今後ますます重要になるが、その応用データについては、対象とする人の多様性（性別、年齢、地域等）に配慮し、さらには個人情報も考慮したデータの取得と共有の仕組みを今の段階から考えておく必要がある。これは誰も答を持っていない難しい課題であるが、世界のモデルとなるやり方を考え、実行いただきたい。

#### 【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

（評価できる点）

- ・材料研究の分野でマテリアル・インフォマテックスの活用はこれから益々重要になると思われる。AIN 圧電材料の開発への応用も期待したい。
- ・フレキシブル：いろいろなアイデアで技術の具現化をして製品イメージを明確にしているところが良い。
- ・スマート社会構築に向けた IoT 技術の中で特に産業界からのニーズの高いセンサ・センシング技術を加速するため、第 5 期に向けてセンシングシステム研究センターを立ち上げ、高生産性製造技術を展開することで、多くの企業と連携し実用化に向けた研究開発を進めている点が高く評価できる。
- ・具体的なターゲット市場も把握しており、安心できる活動が推進されています。グローバルの市場に広く展開すべき成果と考えます。

（改善すべき点及び助言）

- ・フレキシブル：ウィルス検出は、早く実現してほしい。スピードアップをお願いしたい。
- ・素晴らしい成果を挙げているが、IoT の世界では、プロトタイプ後の実用化はスピード感が必要である。ものづくりの時流はラピッドプロトotypingやアジャイル開発で、とりあえず市場投入してユーザーズを取り込んで改良を重ねていくことが行われており、技術が新鮮なうちに実用化することが必要である。
- ・着実な成果を正しい市場、顧客と結合できていないことが最大の課題です。今後、領域内での位置づけを上げて、グローバルの顧客への展開、パートナーを開拓する活動を強化すべきです。
- ・センシング技術の応用データは、対象とする人の多様性（性別、年齢、地域等）に配慮し、さらには個人情報も考慮したデータの取得と共有の仕組みを今の段階から考えておく必要がある。

#### （3）「橋渡し」研究後期における研究開発

##### 【第 4 期全体に対して：期間実績評価】

（評価できる点）

- ・シリコンフォトニクスコンソーシアムは日本の光デバイス産業にとって重要な柱となっている。このようなコンソーシアムを様々な分野で期待したい。
- ・全体として、実用化された実績はいくつかあるので、成果は得られたと思う。
- ・産総研が日本社会の産業に貢献をするために、従前の産総研から大きく変革していく『動き』が認められる。
- ・技術移転やコンソーシアムを設立することで民間企業のコミットメントにより実用化につなげる動きが拡大した。
- ・先進コーティング技術では多くの事業化を実現するなど成果を挙げている。
- ・世界初や世界最高の実用化にむけて、着実な成果が見られています。
- ・社会の求める事業に対し、該当研究が持つ独自技術を強みとして開発し、成果をあげている。

（改善すべき点及び助言）

- ・産総研のコンソーシアムは日本の技術発展にとって重要な使命を果たしているが、グローバル化の中で、海外の企業の参入も今後は考えていく必要があると思われる。
- ・技術はすばらしいので、出口イメージを明確にして、手を離していくことを考える時期にきているのでは？
- ・橋渡し後期で事業化まで産総研で実施しようとしているが、事業化ではコストが一番重要であり、戦略的・組織的・ビジネスマーケティング的な検討が重要である。

- ・海外では、新しい技術から多くのベンチャーが生まれ、その中でも成功するのはわずかであるがそこからイノベーションが生まれる。失敗を許し、多くのチャレンジを許すような産総研ベンチャーを生むことで、新たな日本のイノベーションや社会システムの変革を期待する。
- ・国内企業のみを出口と設定しており、グローバル市場でのわが国の存在感を高めることにより、結果的にわが国の産業力の向上、産業規模の拡大という思考が見られません。
- ・橋渡し後期としては、市場とのリンクが必須であるが、その点には課題がある。少なくとも、海外を含めたマーケティング情報と海外連携の戦略を明確にさせていただくと成果の価値がよりわかりやすくなる。

#### 【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

(評価できる点)

- ・フレキシブルエレクトロニクス技術は IoT の基盤技術の一つとして今後とも益々重要になってくると思われる。社会のニーズをしっかりと把握していただくことを期待する。
- ・実用化が民間資金獲得につながっていると評価できる。
- ・感染症予防を実現するためのバイオセンサの開発に成功し、実用化に向けたコンソーシアムを設立した。
- ・光デバイス製造技術の将来のブレークスルーとなる高いレベルのシリコンフォトニクス技術を確立し、外部との連携拠点として期待される R&D ファブを実現した。
- ・光デバイスやスマート製造などで企業を巻き込んだ活動にも着手しており、橋渡し後期にふさわしい活動が進められていると判断できます。
- ・シリコンフォトニクスの施策体制を整備した。これは今後の展開において重要な成果である。

(改善すべき点及び助言)

- ・IoT 社会の推進にとって、センサやアクチュエータの開発に加えてそれらを支える電源も重要である。これを Power of Things (PoT) と呼ぶが、この委員会ではあまり議論がなされなかった課題である。こちらの開発も期待したい。
- ・次の第5期にどのように発展させるのか、あるいは新たな技術にシフトしていくのか分からない。
- ・シリコンフォトニクスは光デバイス製造技術の将来のブレークスルーとなる重要なキー技術であり、高密度集積 AI チップなど、この技術をベースとしたシステムレベルでの新たな研究の展開が重要である。すでに、インテルがシリコンフォトニクス技術でデータセンターイノベーションを掲げるなど世界的な競争が激化しており、日本企業だけのコンソーシアムでこれに対抗するのは難しい。海外資本の誘致や、例えば、海外メーカに日本法人を設立してもらって日本企業と連携させるなど、様々なグローバル戦略が考えられる。世界にイノベーションを起こし、かつ、日本が利益を得られる戦略を真剣に検討していただきたい。
- ・特に当日プレゼンいただいた半導体系は、特に上記と同じで、今後、グローバル市場での戦略を明確にするべきです。

### 3. 領域全体の総合評価

#### 【第4期全体に対して：期間実績評価】

(評価できる点)

- ・当領域は間違いなく日本の「エレクトロニクス・製造」を牽引している。日本の製造業が細っている状況で、当領域の役割は大きい。
- ・基礎研究は、いくつかの新しい材料やプロセスが見いだされているので、次のステップに上がるテーマは多く存在していると思われる。
- ・Society5.0につながるサイバー空間と物理空間の融合のための R&D を目標とし、所内連携、産業界との連携を精力的に進め、日本における産業技術の R&D 基盤、ハブとして産総研が日本社会の産業に貢献するために、従前の産総研から大きく変革していく『動き』を感じる。
- ・ゴールイメージを領域内で共有しながら領域の特徴をよく咀嚼して、着実な成果を創出する進捗が見られます。
- ・基礎研究分野において、フランスとの共同研究で大きな成果をあげた。海外との積極的な共同研究の有効性が示される結果であり、他の研究機関にも参考となる。

(改善すべき点及び助言)

- ・国のプロジェクトと連携し多くの重要な研究開発が行われている。一方で、国の今後の方向を指し示すような研究も期待したい。そのためには、はみ出した研究をサポートする仕組みが必要であろう。
- ・成果が得られたことの報告だけだったので、反省すべき点は何だったのか、領域内で良く議論して、次の第5期の方向性を考えていただきたい。
- ・第4期は、民間資金の獲得を第一の目標としていたが、応用研究だけでなく、産総研には日本のシーズの創出という大きな役割がある。第4期中期計画にも記されているが、現在の日本では、5年以上先の研究は民間企業では自前でできない。日本の産業技術の牽引機関として、20年くらい先を見越したロードマップを示し世界No.1の研究を進めることを期待する。
- ・正しいゴールを設定し毎年見直すべきでした。加えて、今後、ミッション、橋渡し先を、例えば産業界の最前線が理解できるように記述するべきです。例えば、①世界が旬な分野で投資している中での困りごとを解決する技術ソリューションを提供するのか、②民間企業では行えないが社会的には意義がある公共的な開発をするのか、③まったく新しい市場を生み出す開発を行うのかに分類して説明すべきです。
- ・第4期の当初に作成したロードマップに対する成果が記述できているが、すべて成果の記述だけで、未達成の記述がない。未達成は必ずしも悪いことではなく、その理由を理解することが次へのステップに繋がる。反省を含めた成果の確認と、本領域全体での共有が望ましい。

【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

(評価できる点)

- ・超伝導材料開発、量子コンピュータ開発など息の長い研究をしっかりと支えている。途切れないようにお願いしたい。
- ・基礎研究は、次の時代のSociety 5.0に向けて、しっかり芽が出ていると思う。思いもよらない技術、思いもよらない社会を築きあげて、日本をリードして頂きたい。
- ・研究については、世界的最先端の質を持って基礎から事業応用まで幅広く高いレベルの研究が進められている。研究者個人を見ても基礎研究から応用やアプリまで幅広い研究へ対応されている点が素晴らしい。
- ・多様な発想を生かし研究を推進できる組織運営、人材育成を目指している点は大いに評価できる。
- ・新しいセンターの立ち上げ、旬なテーマへの対応も着実に見られます。
- ・新たにセンシングシステム研究センターを立ち上げ、今後必要となる社会システムの基盤を開発できる体制を整備したことは高く評価できる。今後期待したい。

(改善すべき点及び助言)

- ・研究開発がますます大規模になり、米国や中国と全ての領域で競争していくことが厳しくなっている。そのため、日本はどこに重点をおくか、という議論がますます重要になっていくと思われる。産総研のイニシアチブを期待したい。
- ・橋渡し後期のテーマについては、技術は同じで対象が違うことを続けるのではなく、新たな展開につなげてほしい。
- ・第5期中期計画では資金をバランス良く獲得し、グローバルな多様性の視点で戦略的な連携拠点づくりを期待する。新しいシーズ作りから産業界をリードする産総研発ベンチャーを生み出されることを期待する。
- ・次の5年計画へ向けての年度であり、そういった準備、仕込みの視点での活動をするべきでした。
- ・第5期を始めるにあたり、時代の要求するマーケティング情報を共有する仕組みや、アドミニストレーターが研究者を支援する仕組みがあると、もっと今の技術が活きるはずである。

#### 4. 評点一覧

【第4期全体に対して：期間実績評価】

評価委員 (P, Q, R, S, T) による評価

評価項目	P	Q	R	S	T
領域の概要と研究開発マネジメント	A	A	A/B	A	A/B
「橋渡し」のための研究開発					
「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究）	S/A	A	S	B	S/A
「橋渡し」研究前期における研究開発	S/A	A	S	A	A
「橋渡し」研究後期における研究開発	A	A	A/B	B	B
領域全体の総合評価	A	A	A	A	A

【とくに令和元年度に対して：令和元年度評価】

評価委員 (P, Q, R, S, T) による評価

評価項目	P	Q	R	S	T
領域の概要と研究開発マネジメント	A	S/A	A	A	A/B
「橋渡し」のための研究開発					
「橋渡し」につながる基礎研究（目的基礎研究）	S/A	S/A	S	B	S/A
「橋渡し」研究前期における研究開発	S/A	S/A	A	A	A
「橋渡し」研究後期における研究開発	A	A	A/B	B	B
領域全体の総合評価	A	S/A	A	A	A



**令和元年度 研究評価委員会（エレクトロニクス・製造領域） 評価報告書**

令和2年6月26日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 評価部

〒305-8561 茨城県つくば市東1-1-1 中央第1

つくば中央1-2棟

電話 029-862-6096

<https://unit.aist.go.jp/eval/ci/>

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

