



平成30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

令和元年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> ）	33
5. 評価資料（年度末確定値）	123
6. 評価委員コメント及び評点	125

---

<sup>1</sup> 平成 31 年 3 月 19 日



**平成 30 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：平成 31 年 3 月 19 日（火） 10:00-17:30

場 所：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 つくばセンター つくば東事業所 4G 棟 1111 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	森下 雄一郎	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 （説明 15 分、質疑・評価記入 15 分）	理事／エレクトロニクス・製造領域長	金丸 正剛	10:10-10:40
---	-------------------	-------	-------------

- ・ 第 4 期中長期目標期間中に見込まれる実績・成果
- ・ 平成 30 年度の実績・成果

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） （説明 26 分、質疑・評価記入 24 分）			10:40-11:30
--	--	--	-------------

- |                                 |                 |       |  |
|---------------------------------|-----------------|-------|--|
| ① 「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」 | ナノエレクトロニクス研究部門長 | 中野 隆志 |  |
| ② 「新超伝導材料の開発」                   | 電子光技術研究部門 首席研究員 | 永崎 洋  |  |

- ・ 第 4 期中長期目標期間中に見込まれる実績・成果
- ・ 平成 30 年度の実績・成果

昼食・休憩（50 分）			11:30-12:20
-------------	--	--	-------------

現場見学会（60 分）			12:20-13:20
-------------	--	--	-------------

- |   |                   |        |  |
|---|-------------------|--------|--|
| ① SIP コーティング拠点ハイブリッド AD 法によるセラミックコーティング<br>先進コーティング技術研究センター 主任研究員 |                   | 篠田 健太郎 |  |
| ② 高速砂型造形 3D プリンターの開発  | 製造技術研究部門 総括研究主幹   | 岡根 利光  |  |
| ③ インフラ状態モニタリング用センサシステムの開発   | 集積マイクロシステム研究センター長 | 松本 壮平  |  |

(2) 「橋渡し」研究前期における研究開発 （説明 39 分、質疑・評価記入 41 分）			13:20-14:40
---	--	--	-------------

- |                                      |                 |       |  |
|--------------------------------------|-----------------|-------|--|
| ① 「スピントロニクス技術による次世代不揮発性メモリ MRAM の開発」 | スピントロニクス研究センター長 | 湯浅 新治 |  |
| ② 「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」      | 電子光技術研究部門 副部門長  | 並木 周  |  |
| ③ 「製造網コンセプト：スマート製造モデル化＋プロセスセンシング」    | 製造技術研究部門長       | 市川 直樹 |  |

- ・ 第 4 期中長期目標期間中に見込まれる実績・成果
- ・ 平成 30 年度の実績・成果

(3)「橋渡し」研究後期における研究開発 (説明 39 分、質疑・評価記入 41 分)			14:40-16:00
①「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」	ナノエレクトロニクス研究部門 首席研究員	原 史朗	
②「社会で活躍する先進コーティング技術」	先進コーティング技術研究センター長	明渡 純	
③「フレキシブルエレクトロニクスデバイス」	フレキシブルエレクトロニクス研究センター長	鎌田 俊英	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 第 4 期中長期目標期間中に見込まれる実績・成果</li> <li>・ 平成 30 年度の実績・成果</li> </ul>			
休憩 (15 分)			16:00-16:15
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)		16:15-16:40
評価委員討議 (領域等役職員 退席)	(20 分)		16:40-17:00
評価記入 (領域等役職員 退席)	(20 分)		17:00-17:20
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 第 4 期中長期目標期間中に見込まれる実績・成果</li> <li>・ 平成 30 年度の実績・成果</li> </ul>			
委員長講評 (領域等役職員 着席)	(5 分)		17:20-17:25
閉会挨拶	理事／評価部長	加藤 一実	17:25-17:30

## 評価委員

エレクトロニクス・製造領域

	氏名	所属	役職名
委員長	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	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



## 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、および (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（技術コンサル）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。

とくに共同研究等による民間資金獲得につい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。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 29 年度には 11.9 億円となり、平成 30 年度は 12 月時点で 14 億円近くに達した。民間資金獲得額の目標達成に向けて、とくに民間企業との共同研究については、必要に応じてイノベーションコーディネータ（IC）がサポートを行い、規模の大型化を促進した。平成 30 年度後期には、月毎に計画中およ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、最終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。

論文発表数および合計被引用数の目標達成に向けた領域の取り組みとして、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。知財については、特許出願の内容を精査するとともに、権利化された知財については IP（Intellectual Property）実用化プロジェクトを領域内で実施し、展示会展出可能なレベルの試作品レベル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。

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「フィ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り組みをアピールした。

●民間資金獲得額

- ・目標値：19.0 億円（平成 30 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：13.7 億円（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：22.1 億円（見込み）

●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：18.6 億円（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：18.0 億円（見込み）

●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：32.0%（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：33.0%（見込み）

●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：132 件（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：140 件（見込み）

●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：62 件（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：70 件（見込み）

●知的財産の実施契約等件数

- ・目標値：180 件
- ・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：199 件（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：200 件（見込み）

●論文発表数

- ・目標値：400 報
- ・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：219 報（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：370 報（見込み）

●論文の合計被引用数

- ・目標値：6,800 回
- ・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：6,177 回（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：6,800 回（見込み）

●単年度あたり 1,000 万円以上の「橋渡し」研究を企業と実施した案件

- ・平成 27 年度：11 件
- ・平成 28 年度：24 件
- ・平成 29 年度：26 件
- ・平成 30 年度：35 件（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：40 件（見込み）

●単年度あたり 1,000 万円以上の「橋渡し」研究の相手先企業との知的財産(第 4 期中長期目標期間中に願出されたもの)の譲渡契約及び実施契約の案件

- ・平成 27 年度：0 件
- ・平成 27 年度：0 件
- ・平成 28 年度：0 件
- ・平成 29 年度：0 件
- ・平成 30 年度：0 件（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：1 件（見込み）

【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 つのテーマを中長期的な戦略課題と位置づけている。これらの先進的な CPS 基盤技術および 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 名余りの多分野の研究者が、所内外との連携や共同研究によって成果を最大化するマネジメントを実践した結果、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。

【課題と対応】

今後 20 年間の次世代 IoT/CPS 時代に向けて、IoT、ビッグデータ、AI 等に関連する基盤技術開発とその社会実装には、サイバー空間とフィジカル空間の融合を試行できる研究環境の構築が課題となる。また、研究成果の創出を通じて新たな価値の創造にどのように貢献できるかという点で、産総研が目指す未来像の発信力を高めるとともに、産業界と密接に関わるだけでなく信頼される関係を構築することが必要である。

これらの課題の対応策としては、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 (GOIL : Global Open Innovation Laboratory) の模擬環境を活用して、ユーザや関連企業を巻き込んだ実証実験を実施して、その成果を積極的に発信する。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研究テーマ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連携強化を推し進める。

## (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 (知財) のライセンス (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が増加している。平成 28 年度は 2,543 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 年度は前年度並みが見込まれている。知財等の技術移転については、平成 30 年度は前年度並みが見込まれている。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 6,500 万円/年の知財収入を得た。とくに平成 28 年度には、スカンジウムを含有する窒化アルミニウム (ScAlN) 圧電材料のライセンス等による知財収入も加わり、例年の 3 倍近い結果となった。平成 31 年度は、実施契約等により、さらなる増収を見込んでいる。

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。超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (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。国内およ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、ISO/TC (International Standard Organization/ Technical Committee) および IEC/TC (International Electrotechnical Commission/ Technical Committee) のエキスパートとして国内の関係団体と連携して規格の審議や提案などを行ったことを含めて、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 : 4,669 万円 (平成 30 年 12 月)
- ・平成 31 年度 : 5,500 万円 (見込み)

### ●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 : 4,878 万円 (平成 30 年 12 月)
- ・平成 31 年度 : 2 億 5,000 万円 (見込み)

## ●その他

特筆すべき実績を下に示す。

国際標準化活動の取り組みとして、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、機器制御システムおよ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。

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。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た。

### 【成果の意義・アウトカム】

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が増えており、外部資金獲得額の増加に貢献している。

産総研の研究者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、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。

知財のライセンスングに関しては、国内外の企業との交渉等を担当する知財人材の量が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り組みは、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（平成 30 年度末現在、8 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、平成 30 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 19 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、当領域独自の取り組みとして、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「知財実用化加速制度」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、領域内および領域を超えた連携を促進した。

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ーと連携主幹を、平成 29 年度まで 3 名であったところ、平成 30 年度に 6 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り組み状況については、平成 30 年度末現在、活動しているコンソーシアムは、次世代プリント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）、先進コーティングアライアンス、IMPULSE コンソーシアム、外力支援型バイオアッセイ技術コンソーシアム、シリコンフォトニクスコンソーシアム、サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアムの 8 つである。

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 社から平成 30 年度は 46 社まで拡大した。

「表面機能化プロセス」の技術動向調査に基づいた SWOT（Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats）分析、「フレキシブルハイブリッドエレクトロニクス」の市場動向を睨んだ技術動向調査（国内外の特許と論文に対する調査とテキストマイニング分析）を実施した。

### 【成果の意義・アウトカム】

8 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り組みを積み重ねた結果、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、平成 30 年度には第 4 期中長期計画期間前（平成 23 年度から 25 年度の平均）の 2 倍を超える水準まで伸びた。

### 【課題と対応】

第 4 期中長期計画の民間資金獲得額に関する目標を達成するためには、大型の共同研究の件数を増やしていくことが課題である。その対応の一つとして、新規の冠ラボの複数設立に向け、IC を中心とした企業の研究開発ニーズ把握の取り組みを強化する。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、当領域および産総研内に散在するセンサおよ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。これにタイムリーに対応するために、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」を平成 31 年度に設立し、センシング関連のマーケティングからデバイスと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る。

もう一つの中長期的な課題として、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、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り組みを継続していく。

#### (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 (OIL) については、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 をエレクトロニクス・製造領域へ移管した。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) 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り組みを開始した。

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。もう一つの GOIL が産総研臨海副都心センターの人工知能研究センター内に置かれ、ここに当領域の研究者が参加して、「つながる工場」と「ミニマルファブ」における人工知能の活用についての研究開発を平成 30 年 12 月に開始した。

ミニマルファブ技術に関して、産総研つくばセンター、上記の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、豊橋技科大に平成 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 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) のウエハレベル 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とは、平成 27 年から毎年、「理研ー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ている。平成 31 年度は、ワークショップでの議論から生まれた理研ー産総研の共同研究提案 2 件 (有機材料の誘電性およ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する。

海外の研究機関との国際連携については、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り組みを平成 29 年度から開始し、これまでに 5 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 237 件、研究独法 31 件、国外：大学 7 件、研究機関 5 件

平成 28 年度：国内：大学 224 件、研究独法 31 件、国外：大学 9 件、研究機関 5 件

平成 29 年度：国内：大学 228 件、研究独法 43 件、国外：大学 10 件、研究機関 4 件

平成 30 年度：国内：大学 239 件、研究独法 41 件、国外：大学 7 件、研究機関 6 件

平成 31 年度：国内：大学 240 件、研究独法 45 件、国外：大学 10 件、研究機関 8 件）（見込み）

### 【成果の意義・アウトカム】

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、上記 5 か所の研究拠点を開設したことは、第 4 期中長期計画期間における当領域の特徴的な取り組みである。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臨海副都心センターと柏センター、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、技術研究組合への参加しプロジェクトを共に遂行する中で、会員企業と産総研との間に深い信頼関係を築いたことは、プロジェクト終了後も当該企業との資金提供型共同研究等により、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】

第 4 期中長期計画期間内の課題としては、平成 28-29 年度に NEDO 「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」で整備された装置群を活用して、IoT デバイスを用いたイノベーションが継続的に創出される仕組み作りが急務である。これについては、3 次元実装技術の開発・利用に関心を持つ企業を会員とするコンソーシアムを立ち上げ、ロードマップや実用化シナリオを共有するとともに、幅広いユーザが装置の維持費を十分に負担する体制を構築する。

中長期的な課題としては、名古屋大学の OIL、東京大学の AI チップ設計ラボ、臨海副都心センターと柏センターの GOIL 等の拠点に常駐する研究者とつくばセンターおよ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、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数を兼務発令等により増やしていく。

### （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、およ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。平成 31 年度には、この連携研究室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加速する。平成 31 年度にはさらに 3 社と連携研究室を設立する計画であり、既設の冠ラボと合わせると特定集中研究専門員は 15 名程度、外来研究員は 30 名を超える見込みである。

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 5 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、平成 29

年度と平成 30 年度には同制度により産総研の研究者 2 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任期付き職員採用については、平成 27 年度から平成 30 年度までに 8 名を採用した。平成 31 年度は 3 名を採用予定であり、第 4 期中期計画の 5 年間で採用した研究者の約 15%が年俸制任期付きとなる見込みである。また、文部科学省の卓越研究者事業に採択された卓越研究者を、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 年度から平成 30 年度までに女性研究者 10 名、外国人研究者 9 名を採用した。平成 31 年度は女性研究者 2 名、外国人研究者 3 名を採用予定である。

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者（ポスドク）およ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 4 年間で、当領域は延べ 145 名に達した。平成 31 年度にはさらに 40 名の受け入れが見込まれる。これらの博士研究者と大学院生を、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。

#### ●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：30 名（平成 30 年度）
- ・平成 27 年度：15 名
- ・平成 28 年度：33 名
- ・平成 29 年度：40 名
- ・平成 30 年度：57 名（平成 30 年 12 月）
- ・平成 31 年度：40 名（見込み）

#### ●その他

研究人材の拡充、流動化、育成については、ダイバーシティ推進室が平成 30 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、40 人を超える女子大学院生・博士研究者との懇談および研究室見学につき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」および「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、平成 30 年度は当領域の研究者が、マイクロマシン（MEMS）、半導体シミュレーター（TCAD）、およ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】

企業との連携研究室制度により、平成 31 年度には特定集中研究専門員と外来研究者を合わせて概ね 50 名の企業研究者が産総研で研究活動を行うことが見込まれている。この研究者数は、当領域の産総研研究者数（300 名強）の約 15%に相当する。この連携研究室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や量子アニーリング技術などの研究開発を大きく加速するものである。

連携研究室制度、クロスアポイントメント制度、年俸制任期付き採用、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り組みを積み重ね、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】

第 4 期中長期計画期間中に解決すべき課題として、連携研究室に関しては、特定集中研究専門員等の立場で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。連携研究室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、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、連携研究室がさら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、産総研に連携研究室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、連携研究室制度の改善を図る。

## 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）

#### 【背景・実績・成果】

目的基礎研究においては、2030年以降の社会や産業における情報処理の将来像を見通し、そこで求められるハードウェアの高性能化と高効率化を目指すテーマを中心として研究を推進した。

#### ●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

Society5.0社会の実現には、大規模データの高速処理が可能な、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10K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D-Wave 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)を有するチップの作製に成功した。平成31年度は、複数チップを接続するため、超伝導材料によるバンプを用いた実装技術である超伝導フリップチップ接続を実現し、超伝導量子アニーリングマシン向け3次元実装技術の基盤を確立する。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であるコヒーレンス時間の評価実験を実現し、同素子による量子計算の実現可能性を明らかにする。

#### ●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

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10μW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 および Nature 姉妹誌に 5 報の論文を掲載した。平成 31 年度は、複数の STO の同期現象を活用し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を確立する。

#### ●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

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、Google など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ている。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きている。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 に低減でき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) スイッチング、およ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ている。平成 31 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レクターと呼ばれるメモリセル選別素子の開発を進める。

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 の最終年度となる平成 31 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実証する。

#### ●電圧書き込み型 MRAM の基盤技術開発

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<sup>-6</sup> 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<sup>-6</sup> 未満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。平成 31 年度末は、量産プロセスに適合した実用 MTJ 素子を用いて書き込みエラー率 ≤ 10<sup>-7</sup> (エラー訂正なし)、および、≤ 10<sup>-14</sup> (エラー訂正あり) を実現し、電圧トルク MRAM の基盤技術を確立する。

#### ●新超伝導材料の開発

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およ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70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索し、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。第4期中の成果は、これまで53報の論文として発表した。平成31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、実用レベルの特性を目指し、さらなる高い温度での超伝導材料の開発を推進する。

#### ●フレキシブル強誘電体材料の開発

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） $30 \mu C/cm^2$ を示す有機強誘電材料クロコニ酸を見出し、その性能を実験およ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 Polyvinylidene difluoride (PVDF) の性能（圧電定数： $d_{33} = 30 \text{ pm/V}$ ）を大きく上回る電気歪み性能（ $d_{33}$ 換算で  $280 \text{ pm/V}$ 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。平成31年度は、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要因を解明し、フレキシブル素子用材料として実用化をもたらすための材料設計基盤を確立する見込みである。

#### ●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

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、電圧印加により、従来では考えられなかった超高効率での電子放

出現象を見出し、MOS 型の従来電子放出源に比して、一万倍の性能（電子放出効率と放出電流密度）を実現した。平成 31 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する。GOS 型電子放出源については、超高効率電子放出のメカニズムを解明する。

#### 【成果の意義・アウトカム】

##### ●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

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第 4 期に確立した。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・高効率で処理できるようになるため、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。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。また、高い動作温度を有する Si-TFET 型量子ビットにおける 1 ビット操作（2 量子ドットで 1 ビットを構成）の成功は、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成果である。

##### ●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

STO のニューロモルフィックコンピューティングへの応用は、従来技術に比べて数桁小さい直径 30 nm の演算器を実現できる可能性を有していることから、高集積化が可能となる。

##### ●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

超格子膜を採用した新たな相変化メモリの実現によって、データセンターのさらに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。超格子膜の量産プロセスの確立によって超格子型相変化メモリが実用化されれば、データセンターのメモリを一気に iPCM で席卷することが期待できる。また超格子で発現するトポロジカル絶縁体という新しい量子物理現象を応用したスピン蓄積装置などの新機能デバイスにつながる可能性がある。

##### ●電圧書き込み型 MRAM の基盤技術開発

新規開発した MTJ 素子は直径 30 nm まで微細化しても長期間記憶を保持できる基本性能を有しており、半導体チップ内の大容量キャッシュメモリ（LLC: Last Level Cash）の置き換えに適している。LLC を不揮発性メモリで置き換えることができれば IoT 用マイコンチップの待機電力の大幅な削減が可能となり、IoT 機器の省電力化とバッテリー寿命の向上につながる期待される。一連の研究成果により、文部科学大臣表彰、市村学術賞、丸文学術賞、船井学術賞、つくば奨励賞、応用物理学会優秀論文賞などを受賞した。

##### ●新超伝導材料の開発

超伝導の社会実装を考える場合、高い超伝導転移温度とともに臨界電流などの超伝導特性の異方性が小さく、加工が容易な特性をもつ超伝導材料を開発することは低コストでの製造の上で極めて重要である。本研究で開発した新超伝導材料  $\text{AeAFe}_4\text{As}_4$  は、銅酸化物超伝導体に比べ超伝導特性の異方性が小さく、合成の容易な多結晶試料でも良好な特性が得られるという利点があり、大量のヘリウムを使用しない冷凍機で冷却可能な中温度域（20-30 K）で使用可能な超伝導磁石、超伝導接合素子の開発につながると期待できる。これらの成果により、これまで超伝導科学技術賞、日本応用物理学会講演奨励賞、Highly Cited Resesrcher 等を受賞した

##### ●フレキシブル強誘電体材料の開発

新規に見出した有機強誘電体材料は、従来型 PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）に匹敵する分極や圧電特性を有し、フレキシブルな不揮発性メモリやセンサ、アクチュエーターなど各種強誘電、圧電デバイスに適用可能である。これは、生体情報を装着感なく計測できる超低消費電力・貼付型情報入出力端末デバイスやエナジーハーベスティングの要素技術として、IoT 社会の実現に貢

献する。また、低環境負荷の非鉛系・軽量キャパシタなどへの応用により持続可能な社会の実現にも貢献する。

#### ●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

高品質単層グラフェンの低温合成については、Nano Letters 誌(IF=12.1)に論文が掲載され、アメリカ化学会の Chemical & Engineering News の weekly newsletters に研究紹介記事が掲載されるなど、注目を集めた。本成膜プロセスは大面積化も可能であり、従来の低温合成法の限界を乗り越えたブレークスルー技術として、グラフェン材料の早期産業化が期待される。GOS 型電子放出源は、従来の電子放出源の置き換えのみならず、低真空・液中でも動作するメリットもあることから、従来法では不可能な化学品の合成プロセス開拓など、幅広い用途が期待される。

#### 【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、クロスアポイント制度等を活用し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。下記、各研究テーマに関する課題と対応についても列記する。

#### ●量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの基盤開発

超伝導量子アニーリングマシンの計算処理能力を商用化レベルまで向上させるためには、量子力学的コヒーレンス性能のさらなる改善にむけたデバイス製造におけるプロセス技術の改良といった基礎研究が必須となる。また、シリコン量子コンピュータについては、現在は要素技術開発の段階であり、基本素子である量子ビットデバイス技術の他にも、ビット間結合技術、ゲート制御技術、読み出し技術、回路化技術といった周辺技術においても研究開発すべき事項が多数存在している。今後は、他の公的研究機関、大学、企業と連携し、これら要素技術開発も併せて実施していく。

#### ●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

第4期中は、より複雑な演算に向けてニューロモルフィック回路の段階的な規模拡大が課題となる。その対応として、複数の STO の同期現象を活用したニューロモルフィックコンピューティングの原理実証に取り組む。中長期的には、ニューロモルフィック回路の性能向上やより複雑な演算を行うための回路の大規模化など、課題は多数存在する。その対応として、STO の同期現象やカオスを用いたニューロモルフィック回路の実現、より複雑な音声認識などの実タスクの実証、STO のニューロモルフィックコンピューティング専用的高速駆動・読み出し回路の設計などに取り組む。

#### ●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

元来 iPCM は相変化メモリの省エネ化を目的として開発されたものであるが、トポロジカル相転移を誘起することで室温でも磁性特性が発現する。そのため、メモリ応用の他にトポロジカルなスピン量子デバイスの可能性を視野に入れた研究テーマ設定を適切に行うことが課題である。そのために、その特性を活用する具体的なアプリケーションの選定や、それに向けたデバイス化技術（超格子構造の最適化、加工プロセス、他技術とのインテグレーション、集積化等）の開発を今後進めていく。

#### ●電圧書き込み型 MRAM の基盤技術開発

第4期中は、実用構造の MTJ 素子において書き込みエラー率をさらに低減することが課題となる。その対応として、量産プロセスに適合した実用 MTJ 素子を用いて書き込みエラー率  $\leq 10^{-7}$ （エラー訂正なし）、および、 $\leq 10^{-14}$ （エラー訂正あり）の実現に取り組む。中長期的には、電圧書き込み型 MRAM 実用化のために、MTJ 素子のさらなる高性能化、量産プロセス技術の確立、集積化などの課題が存在する。その対応として、量産用のスパッタ成膜装置を用いて大径 Si 基板

上に電圧トルク MRAM 用 MTJ 素子を作製し、高効率の電圧書き込みを実証、および電圧トルク MRAM 専用の高速駆動回路の設計などを試みる。

#### ●新超伝導材料の開発

高温超伝導材料の社会実装には、より高い臨界温度 (TC) を有する新超伝導体の開発に加え、新超伝導体の薄膜化、線材化の技術開発などが不可欠である。今後、理論計算を援用した新超伝導体材料の開発を進めるとともに、新超伝導材料に適した薄膜作製技術、線材作製技術などの開発を推進する。

#### ●フレキシブル強誘電体材料の開発

デバイス毎の要求仕様に合わせて圧電性や焦電性などの材料物性パラメータの調整を可能にすることが、広く普及を図るための課題である。これについて、実測定とシミュレーションの検証を積み上げて高性能化を図る。また、簡易デバイス製造法としての塗布製造技術への適用性やデバイスの高耐久性化なども両立できるようにすることが課題である。この問題の解決に向けて、結晶構造－物性相関のほか、ドメイン構造とそのダイナミクスを調べるなど、微視的動作機構の解明に取り組む。

#### ●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

高品質単層グラフェンの低温成長については、エレクトロニクス素材 (Si、SiO<sub>2</sub>、ポリマーなど) に直接成長することが課題であり、低温成長メカニズムの解明とラジカル反応の高度な制御を達成することにより対応する。中長期的課題は、この技術を次世代エレクトロニクス産業へ適用することであり、半導体デバイス等への合成、及び量産システムを実現するための橋渡し研究を強化する予定である。GOS 型電子放出源については、大面積化に伴う絶縁膜の欠陥密度が課題であり、絶縁膜の高品質化をシリコン LSI 分野で蓄積された知見を活かして実現することでこの課題に対応する。中長期的課題は放出電子のエネルギー分散であり、絶縁膜材料の最適化とグラフェンの結晶性向上により対応する予定である。

### (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設定した。

#### ●STT-MRAM の生産プロセスおよび 3 次元集積プロセスの開発

システム LSI 混載メモリおよ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 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および 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 素子の要求性能を達成した。平成 29 年度に 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 特性およ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。平成 31 年度は、新規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、10 nm 技術世代の STT-MRAM の基盤技術を確立する。

●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

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を試作、評価した。平成 31 年度は、上記光スイッチの全パスに光信号を通し、切り替えを行う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使用し 500 ポート以上の大規模化の見通しを得る。

●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

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、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）上にソフトウェアの雛型を自動生成するツールを試作した。さらに、情報入出力モデルの振る舞いの妥当性を検証するためのシミュレーションモデルを開発した。平成 31 年度は、雛形自動生成ツールを高度化し、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を汎用化することで、サイバーフィジカル生産システム（Cyber Physical Production System: CPPS）設計支援技術を確立し、その有効性を検証する

●製造網コンセプト：プロセスセンシング技術の開発

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。従来の計測困難を克服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 (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。また、めっき工程における、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。平成 31 年度は、共同研究先の製造環境等での実証試験を行い、開発技術の実環境での適用効果を検証する。

#### ●MEMS センサネットワークの開発

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 及び印刷グラファイ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 カ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ひず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。平成 31 年度は、実用化に向けて技術移転する。

#### ●IoT デバイス用全固体電池の開発

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金属リチウムのデンドライト成長が起こらないことを実証した。平成 30 年度は、AD (Aerosol Deposition) 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、実効容量の 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デンドライト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。平成 31 年度は、これらの部材化技術を用いた電池試作により、耐環境性、安全性の実証を行う。

#### 【成果の意義・アウトカム】

#### ●STT-MRAM の生産プロセスおよび 3 次元集積プロセスの開発

平成 28 年度に開発した Ir スペーサー層は、すでに世界標準になりつつある。産総研オリジナルの MgO 障壁、CoFeB 電極と併せて、平成 31 年中の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期待される。

TEL 冠ラボは、産総研と TEL 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。

MTJ 薄膜の 3 次元積層および大径 Si 基板上への全エピタキシャル素子の作製は、磁気工学・スピントロニクス分野において初めての成果である。これらのプロセス技術は 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）にも活用できる重要な基盤技術である。

#### ●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

シリコンフォトニクスによる光スイッチについては実用レベルまで技術を高め、国際会議で非常に高い評価を得た。ディスアグリゲーション方式によるダイナミック光パスネットワークについては従来のインターネット技術では不可能であった広帯域と低遅延を低コストで両立した。これら技術には、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大きな期待がかかる。

#### ●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

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認することにより、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およ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

次世代製造の接合技術と期待されている接着における内部剥離をリアルタイムで検出する技術は、学会で受賞（欧州接着学会 Euradh2018 受賞）し評価された。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。外観検査の自動検出、判定技術、in-situ 評価、予測技術、機器稼働状況診断のための組込みシステムは、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、製造業の生産性およ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

開発したフレキシブル面パターンセンサを用いて高速道路鋼橋の亀裂進展のモニタリングに成功したことは、道路などのインフラ健全性の無人常時モニタリングを実現し、増え続ける老朽化したインフラ全般の効率的な維持管理に貢献する。

#### ●IoT デバイス用全固体電池の開発

耐環境性・安全性に優れる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事が期待される。また、デンドライト成長のメカニズム解明は、より高エネルギー密度が期待される全固体リチウム硫黄電池などの革新電池の開発を促進する。

#### 【課題と対応】

「橋渡し前期」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。このため研究開発を加速する拠点環境整備や知財の取り扱いを専門とする専門部署と協力して産業界のニーズを的確にとらえ、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の実施によって対応する。下記、各研究テーマについて課題と対応を列記する。

●STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発

第4期中は、MTJ素子のさらなる性能向上と微細化が課題となる。その対応として、新規材料を用いた全エピタキシャルMTJ素子のプロセス技術を高度化する。中長期的には、1X nm世代のMRAMのための材料・製造プロセス技術の確立が課題となる。その対応として、産総研スピントロニクス研究センター、TIA-SCR、TEL冠ラボの3拠点を活用し、円滑で効率的な技術開発を進める。

●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

Google、Microsoft、Facebookなどの、いわゆるプラットフォームと呼ばれる巨大ウェブ事業者により、シリコンフォトニクスによる光トランシーバ市場が本格的に立ち上がり、化合物系光デバイスで優位を保ってきた国内ベンダの対応が迫られている。さらに、データセンター向け光スイッチにもシリコンフォトニクスが注目され始めているが、シリコンフォトニクス産業が持続発展するためには、ファブレス化を可能とするエコシステムの構築が必要である。これらの課題に対応すべく、シリコンフォトニクスコンソーシアムを立ち上げ、産総研の世界最高峰シリコンフォトニクス技術をR&Dファブとして活用できる体制の構築を進めている。ダイナミック光パスネットワークのディスプレイゲーションには、アーキテクチャの構築と標準化が不可欠であり、サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアムを立ち上げ有識者の間で議論を行い、ダイナミック光パスネットワークのディスプレイゲーションに関する提案書を編纂し、国内外のさまざまな関連標準団体やオープン活動団体に同提案書を頒布している。

●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

多様な設備からCPPSを構築するためには、スマート製造モデル化手法の共通化、標準化が不可欠である。欧米で整備されているスマート製造モデル化のためのガイドライン、モデリング規約等と産総研で開発しているスマート製造モデル化手法との間の相互接続性、融通性を確保するための辞書、モデル変換手法（例えば、情報入出力モデルにおける設備間での情報のやり取りを、サービスレベルでの記述へと変換するなど）を開発する。

●製造網コンセプト：プロセスセンシング技術の開発

今後は、スマート製造モデル化での研究とも連携し、誰からどの知恵を拝借するのかを戦略的に決定したり、記録から判断の深層知識を掘り起こすことなどが重要になってくると考えられる。その対応として、臨海副都心センターに設置された「つながる工場モデルラボ」を要素検証の実証フィールドとして活用しながら、プロセスセンシング技術の開発を進めていく。

●MEMSセンサネットワークの開発

開発した橋梁センシングシステムを点検・補修作業のどの段階で誰が活用するのか、また橋梁の劣化状態判定の閾値をどこに設定するのか、といった課題について、今後、高速道路会社や点検・補修業者などの想定ユーザを交えて明らかにする。

●IoTデバイス用全固体電池の開発

酸化物型全固体電池のデンドライト成長抑制のためのメカニズム解明と電極-電解質の複合化技術の課題に対して、単結晶固体電解質を用いた基礎物性の解明を大学等との連携により行う。また、電源技術として必要となる電流値、容量などの用途毎の仕様や、耐熱性などの耐環境性について、IoTセンサデバイスの開発に取り組んでいる研究者、想定ユーザを交えて明らかにする。

(3)「橋渡し」研究後期における研究開発

【背景・実績・成果】

橋渡し研究後期については、主にサイバーフィジカルシステム（CPS）におけるエッジや製造

現場等において、高度化したデバイス・材料・製造要素技術が最大の効果を発揮するアプリケーションを想定し、社会実装と普及のためのバリューチェーンやエコシステムの構築にも目配りしつつ、スピード感のある橋渡し研究を推進した。

#### ●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

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、300 mm 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 1/1,000 のハーフインチウェハと幅 30 cm の超小型製造装置を用いる。

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 (H1440 mm×W294 mm×D450 mm) への超小型化(メガファブの通常の大さは W2 m×H2.5 m×D5 m 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、0.5 μm の微細寸法(ゲート長は 3 μm 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 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。平成 31 年度は、実用集積回路生産に必要なデバイスプロセスと装置遠隔操作の実用技術を開発する。

#### ●製造プロセスの高度化と複合化技術の開発

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、国プロ「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、1.8×1×0.75 m<sup>3</sup> 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。平成 31 年度は、造形材料の高強度化、無機材料の適用により、複雑形状の部材の加工を実現し、高温材料への適用を進めることで橋渡しを進めるとともに、新たな材料への適用や次のシーズ技術の発掘を行う。

#### ●社会で活躍する先進コーティング技術の開発

第 4 期は、エアロゾルデポジション法 (AD 法) や、光有機金属分解法 (Photo-Metal Organic Decomposition Method: 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 TiO<sub>2</sub> 膜のロール to 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 m<sup>2</sup>/年のフレキシブル色素増感型太陽電池 (DSC; Dye-sensitized Solar Cell) のパイロット量産機を積水化学工業株式会社が開発および導入し、平成 29 年度に「低照度でも発電 (50 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 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。平成 31 年度は、エネルギー関連部材応用や歯科部材応用、調質材料応用など、各々の材料に対し用途に応じた膜質・機能の検証、特性改善を行う。

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、先進コーティングアライアンス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づいた開発方針を明確化した。これより、室外応用に対応した高輝度・長残光材料を産総研で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 1,000 時間の加速劣化評価にて輝度変化率が 1.7%）。平成 31 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）を活用した部材性能の実証試験を行うことで課題を抽出し、光 MOD 法の用途拡大を図る。

●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  
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 °C 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、輸血や点滴時の不具合の早期発見のためのウェアラブルシート漏血センサ、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いる。平成 31 年度は、企業との連携の基、開発デバイスの社会実装試験を実施し、実用仕様を満たすための設計とその実証を行う。

●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  
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 μl 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、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、会員企業 13 社から構成される「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。平成 31 年度は、センサの実際の利用シーンや測定対象物質毎に実用化に向けた課題を見極め、装置性能の最適化を図るとともに、連携企業と協力してプロトタイプ開発を実施する予定である。

●センサ用高圧電性材料の開発  
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および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Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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知財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。平成31年度は、この計算結果を実証実験により検証する。

#### ●スマート製造ツールキットの開発

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いる。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ばらつきを明らかにし、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。平成31年度は、「つながる工場モデルラボ」における実証展示等で広報活動を展開し、技術移転と人材育成を実施する。

#### 【成果の意義・アウトカム】

##### ●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

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。半導体でこれまで重要だった資金力だけが競争の源泉であるメガ競争ではなく、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ヶ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個だけをテーラーメイドする場合、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。これにより、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、多くの人々はその恩恵を享受できる産業システムが構築される。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。

##### ●製造プロセスの高度化と複合化技術の開発

開発した砂型積層造形技術は、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ものである。平成30年度は、当該国プロ開発成果の大型高速積層造形装置(SCM-1800)が株式会社シーメットより上市され、ポンプメーカーに1号機が納入、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。平成27年度に株式会社シーメットより先行上市された0.8×0.4×0.4 m<sup>3</sup>の造形空間を有する小型積層造形装置(SCM-800)は平成30年度に三重県工業研究所に納品されるなど各地の企業への普及も進んでいる。本技術は、国内約1兆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。従来は不可能であった薄肉中空構造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。中でも、高速な造形を実現したことにより月産数千～数万台に達するエンジン、モーター等の自動車部材への量産適用も可能となり、形状最適化による性能向上から自動車の省燃費、性能向上にも寄与が期待される。要素技術に関する企業との共同研究だけでなく、装置を上市した企業、装置導入企業との共同研究契約も締結されており、実用化を目指した研究が展開されている。

#### ●社会で活躍する先進コーティング技術の開発

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、平成27年度に第6回ものづくり大賞「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製造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、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。

#### ●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

常温大気下での高精細印刷デバイス製造技術の提供は、大面積の情報入出力デバイス、および形状自由度を有するフレキシブル情報入出力デバイスの高効率な製造を可能にする。これにより、情報入出力機器の製造時間および製造にかかる消費エネルギーを大幅に削減することが可能となり、その結果、情報入出力機器の市場への幅広い普及を促進させる。また、製造プロセスにおける加工温度の低温化、高速製造化は、製造するデバイスに対して加工工程中に損傷を与えてしまう可能性を下げるため、プラスチック基板などプロセス負荷に弱いデバイスの製造も容易にする。これは、フレキシブルデバイスなどのデバイス実装自由度を上げ、IoT社会向け情報端末デバイスを設置させることができる場所を大幅に拡充させる。これにより、社会生活における身近なセンサやタグなどの情報端末機器の普及に貢献し、物流の高効率化などに大きく貢献するものと期待できる。

#### ●極微量ウイルスの検出が可能な外力支援接場照明バイオセンサの開発

現在の感染症予防対策は、マスクの着用やうがい・手洗いといったものから、空気清浄機や不活化効果のある薬剤を散布するものまでさまざまであるが、いずれも見えないウイルスを相手にしているため、感染を十分に防ぐには至っていない。この課題に対し、我々の開発した外力支援接場照明バイオセンサにより、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が可能になると考えている。アウトカムとして、インフルエンザ予防のための感染チェ

ック装置、ノロウイルス感染予防のための食品工場での従業員の感染チェック装置、室内のウイルス汚染監視装置などの実現が期待される。

#### ●センサ用高圧電性材料の開発

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。産総研が開発した複合窒化物圧電薄膜は、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ことから、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期待され、IoTを支える多様な基幹デバイスへ大きなインパクトを与える。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世紀発明貢献賞を受賞するなど高い評価を得た。

#### ●スマート製造ツールキットの開発

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になる。これは日本の製造業の生産性向上と競争力向上に大きく貢献する。

#### 【課題と対応】

「橋渡し後期」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。下記、各研究テーマに関する課題と対応についても列記する。

#### ●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

ミニマルファブは既にデバイス試作向けの実用が始まっており、装置の販売実績も積み上がり始めている。今後は、実用デバイスを生産する製造工場としての普及を進め、産業システムへ組み込んでいくことになる。ここで課題となるのは、次の点である。(1) 開発を継続中のイオン注入装置とCVD装置の開発、(2) 数十から数百台のミニマル装置の間を自動でウェア搬送容器を移動させる自動搬送システム開発、(3) これらの装置と搬送容器の動作を統一し、一元管理する生産システムソフトウェアの開発、(4) 超小型装置の優位性を生かした装置の移動（作るデバイスごとに装置の順番を入れ替えるシステム）と、ミニマルファブ間（製造工場間）での搬送容器移動や制御（すなわち「つながる工場」）に欠かせない遠隔操作システムの開発、(5) 少量生産では不可欠な開発コストシェアのためのデバイスプロセス開発（いわばレシピ開発）の有料化ビジネスモデルの開発。以上(1)～(5)の課題について、既に開発に着手した。

#### ●製造プロセスの高度化と複合化技術の開発

加工技術の高度化と複合加工技術の開発により、これまでの加工限界及び材料適用範囲の拡大が実現し、製品や部材への加工法の適用範囲拡大にも寄与している。これまでは金属部材が主であったが、今後はセラミックス及びこれらの複合材等への適用範囲の拡大が課題であり、砂型積層造形技術の応用技術として対応を進めている。部材の高付加価値化に対して複合材、複雑形状、高信頼性等などが課題であり、高速シミュレーション等との連携によりデジタルマニュファクチャリングを実現し、設計技術と制御技術を連携してCPSの一部として加工プロセスの高度化と高効率化を進めていく。

#### ●社会で活躍する先進コーティング技術の開発

AD法によるフレキシブルDSCの実用化に関して、事業規模拡大のため、DSCデバイス製品の用途

開発が課題であり、産総研ではIoTセンサ応用などの用途開発に協力することを検討する。また、用途展開を広げるにはコーティングコストの低減に課題があり、これには、産総研は成膜メカニズムの詳細な解析に取り組み、先進コーティングアライアンスを活用してこれらの知見を粉体メーカーに展開し、複数社連携の実用化開発に取り組む。光MOD法による高輝度蓄光膜の開発では、風雨や紫外環境下での信頼性試験が必要不可欠であるため、建物や高速道路での実証試験を行うことで信頼性評価、課題抽出を行う。

●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  
印刷フレキシブルデバイスを商品として市場に展開させるためには、製造コスト削減が課題となっている。とくに、新規開発材料に基づく新製品は、材料コストが大きく、普及の壁となっている。その対応として、多様な用途のデバイスの製造プラットフォーム化や、デバイスの基本仕様の標準化、カスタマイズ製品の共通仕様化を推進することで、製造コスト削減を実現する。

●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  
外力支援近接場照明バイオセンサは、その性能を高感度検出に特化していることから、機能面で、定量性向上と広ダイナミックレンジ化が課題となっている。現状の性能でも、検出そのものは問題ないが、これらの性能向上により、装置の信頼性向上が実現でき、さらには、環境中のウイルス検知センサとしてだけでなく、感染患者の発症前診断を可能にする診断装置、がんや認知症などの早期診断が可能な在宅医療機器などとしての利用シーン拡大が期待される。いずれの課題も、ビーズの大きさや濃度、試料セル形状の改良や最適化によって改善できる見込みである。また、実用化に向けては、利用シーンに応じた、消耗品の補給機構やウイルス廃液の処理機構なども検討しなければならない。これらの実装関連の課題に関しては、連携先企業と議論しながら開発を進める。

●センサ用高圧電性材料の開発  
新規の窒化物薄膜は計算によって予測されたもので、実際に作製可能かどうか大きな課題である。その対応として、統計学的手法である実験計画法などを用いて、作製プロセスの制御因子の詳細に検討する。

●スマート製造ツールキットの開発  
スマート製造ツールキットを用いて企業が独自のスマート製造化に取り組むことが可能となったが、一方で専門家に依頼して市販のツールおよびプラットフォームでスマート製造化を進める企業も存在する。それぞれの取り組みの効果を最大化するためには、それぞれが扱う情報に関する相互接続性が重要である。データ標準化に対応することで相互接続性を確保する。

### 3. 前年度評価コメントへの対応

#### （1）領域の対応状況

コメント（領域の研究開発マネジメント）

・当該領域が対応する市場での顧客要求レベルは高く、産総研全体のマネジメントへの準拠のみでは対応不足の懸念がある。一部すでに試みもみられるが、独自の対応を特区的にでも一部試行し、市場関係者をさらに引き付ける活動を推進するべきである。

対応状況

実験室での試作レベルから実用化に至るまでの道は険しく、産総研単独で乗り越えることは困難であることは自覚している。平成30年11月に開設した「人工知能に関するグローバル研究拠点（GOIL）」は、社会実装に向けた実証試験を行える模擬環境を備えており、企業等を巻き込んで社会ニーズに応える研究開発を推進する拠点となると期待されている。GOILが所在する柏の葉エリアは、スマートシティ社会実験を推進しており、自治体や住民も参加できる実証実験を行う

ことができる。このような環境を最大限に活用し、当領域の研究成果を社会へ橋渡す活動を展開する所存である。

## (2) ユニット毎の対応状況

コメント（目的基礎研究における研究開発）

・長期的な視点で、量子コンピューティングの研究を進めていることは高く評価したい。ただ、この分野は競争が激しいため、方向性を見極めて独自の視点を持った研究を期待したい。

対応状況

臨超伝導量子ビットにおいては、産総研の強みである (1) 世界トップ級の超伝導ファブ&超伝導 3次元実装技術、(2) 基礎理論、材料、デバイス、回路、プロセス、アーキテクチャ、アプリケーションの人材を使い、(3) 3次元実装技術を利用した超伝導量子アニーリングの製造、(4) 特定最適化問題に特化した独自アーキテクチャの採用を出して、研究を進める。

海外の研究機関に伍するスピードで開発を進めるために、大学、企業と連携したオールジャパン体制を構築した。とくに、超伝導量子ビットを世界で初めて開発し、その量子コンピューティング応用を継続的に研究してきた NEC と、冠ラボ（NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室）を 2019 年 3 月に設立して共同研究を進める。

シリコン量子ビットの研究開発では、産総研が有する微細 CMOS デバイス、集積化、回路設計技術の強みを生かし、5 年を目処に集積可能な量子ビット技術の開発、回路、システムの構築も視野に入れた研究方針を立て、国内他機関のシリコン量子ビット研究チームを束ねる形での文科省 Q-LEAP 基礎基盤研究テーマ受託につなげている。また、大規模集積化では、SCR の 300 mm ラインの活用も視野において、世界に先駆けての成果を目指す。

コメント（「橋渡し」研究前期における研究開発）

・IoT 時代のスマートものづくりについては、臨海都市センターとの協力をもっと活用されることを期待する。  
・臨海モデル工場でのデモシステム構築を期待したい。

臨海副都心センターのモデル工場は、情報系の研究ユニットである人工知能研究センター（同センター内の研究ユニット）と密に協力して進める。一部研究員はセンターに兼務し人工知能研究センターの研究員としても関わります。また、隣接する東京都産業技術研究センターとの連携も計画しており、双方の装置の見える化の連携テストを準備している。

・応力発光塗料の開発は重要な成果である。今後、センサグループとの連携などで破壊予兆の分野でのより大きな貢献を期待したい。

対応状況

次世代製造の接合と期待の高い「接着」の内部剥離（破壊予兆）を、応力発光によりリアルタイム検出に成功し、学会での受賞（欧州接着学会 Euradh2018 受賞）につなげるなど、大きなインパクトを与えた。また、航空機メーカーとの実構造部材での初期軽微損傷検出、自動車メーカーとの破壊予兆検知、シミュレーション（予測）の高度化に貢献するなど、学会から産業分野にわたり、大きな社会貢献を生み出した。

・MEMS について、ひずみセンサー一つとっても、産総研内にいろんな技術が存在していると思います。それらの情報交換をもっと密に行うことによって、より良い手法に仕上がっていくものと思います。

対応状況

所内連携による技術シーズの融合は重要と考えている。所内技術の融合についての全所的な取り組みとして、平成 30 年 12 月 17 日には、産総研主催のコネクトシンポ「インフラ点検」を御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンターで開催した。

エレクトロニクス・製造領域内では、九州センター（製造技術研究部門）の技術である圧電材料を用いたインフラ監視センサ用エネルギーハーベスタや、フレキシブルエレクトロニクス研究センターの技術である印刷配線技術を用いたウェアラブルセンシングデバイス等、いくつかの研究テーマにおいて、所内連携を通じた成果が出つつある。

コメント（「橋渡し」研究後期における研究開発）

・フレキシブルプリントド技術については、いろんな展開があるとわかりましたが、今後の展開については、産総研の組織としてどのようにフォローしていくべきか、是非議論して頂きたいと思います。

対応状況

実用展開としては、個別製品の対応に向かざるをえない技術となっているが、その状況にあっても、生産の効率化をもたらすため、共通化できる技術の抽出とプラットフォーム化を図っていく。そのためのアクションとして、個別多様な製品を活用するユーザ企業群と、製造企業群とを一堂に集結させたコンソーシアムを形成し、個別多種製品の製造共通技術の抽出及びその強化支援を行っていく。



国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
平成30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
- 特筆すべき研究成果
  
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）
  - (2) 「橋渡し」研究前期における研究開発
  - (3) 「橋渡し」研究後期における研究開発

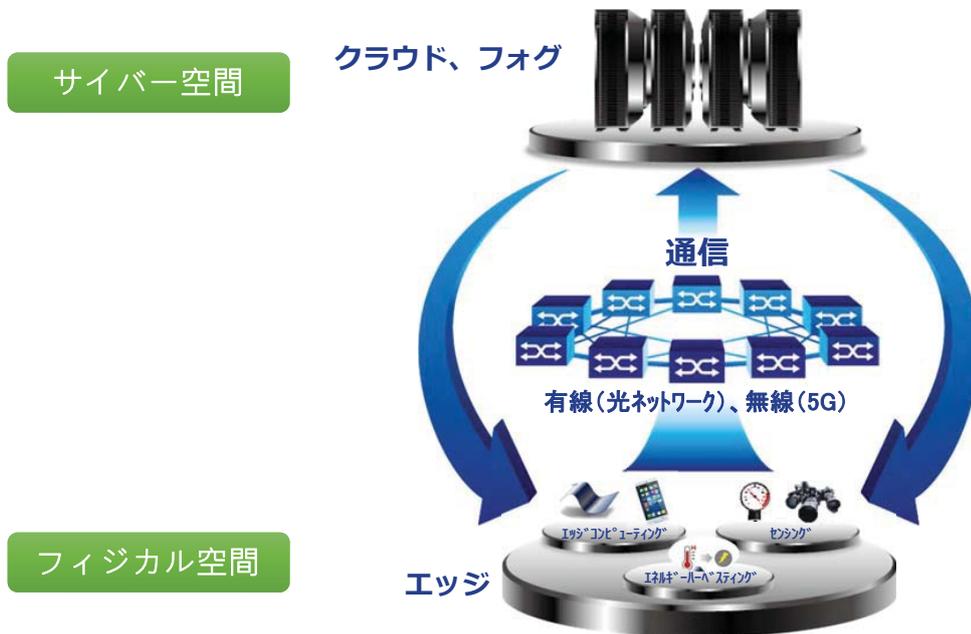
# 1. 領域の概要と研究開発マネジメント

## (1) 領域全体の概要・戦略

### 超情報化とモノづくりの新潮流

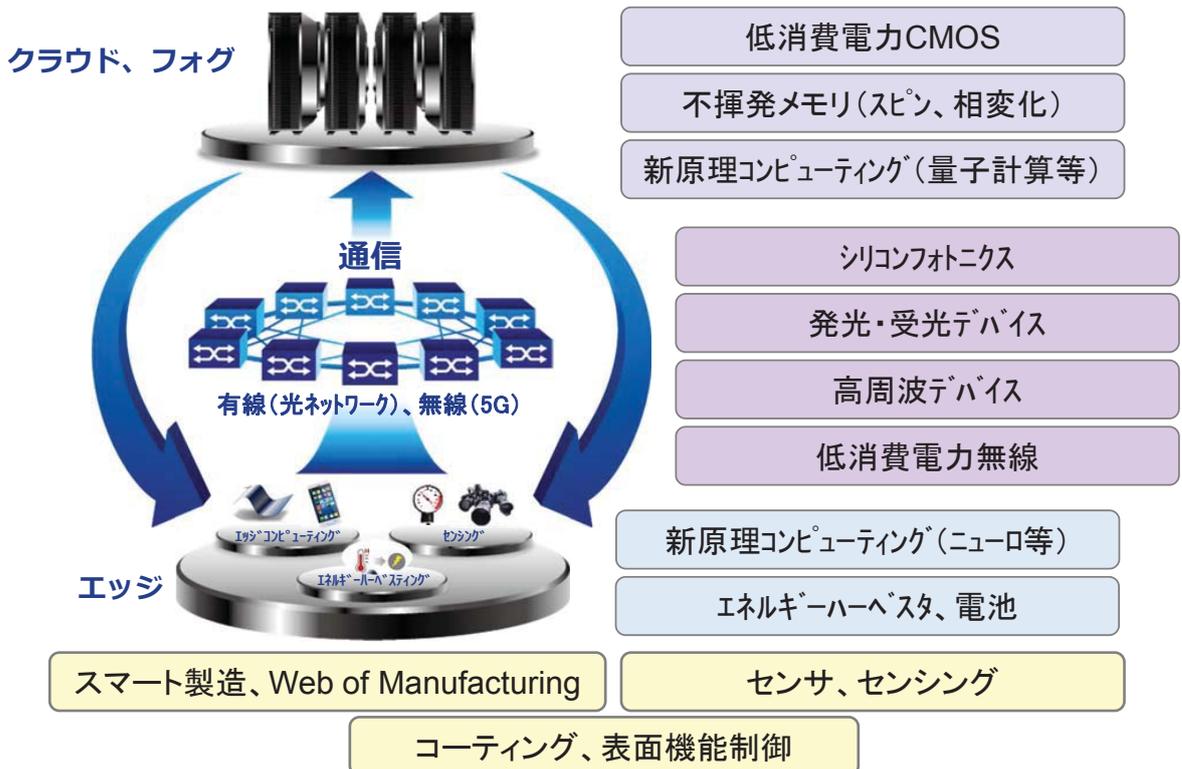


# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造

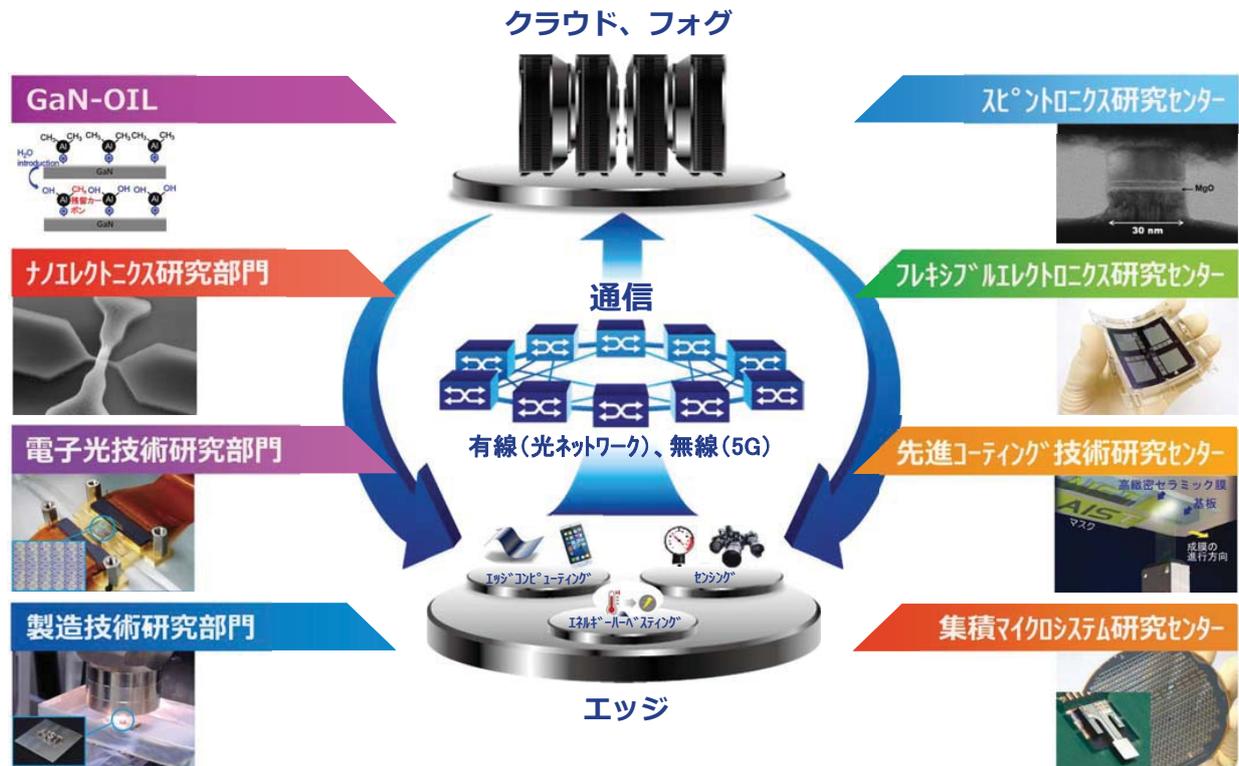


- 社会のあらゆるモノがインターネットに接続され、現場情報のリアルタイム把握が可能に
- 取得データを解析・処理してフィードバックすることにより、新しいサービス・価値を創出

# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造



# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造



# Internet of Things (IoT)時代の新たな価値の創造



## 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期の重点化課題と主な成果の関係

### 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

- ✓ 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
- ✓ 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ズネットワーク技術の開発
- ✓ 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
- ✓ 新超伝導材料の開発 ✓ 電圧書き込み型MRAM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
- ✓ 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

### ② IoT化に対応する製造 および センシング技術

- ✓ 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)と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 ✓ センサ用高圧電性材料の開発
- ✓ 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

### 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

- ✓ スマート製造ツールキットの開発
- ✓ 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

### ④多様な産業用部材に適用可能な 表面機能付与技術

- ✓ 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
- ✓ IoTデバイス用全固体電池の開発

### 第4期の技術ポートフォリオ

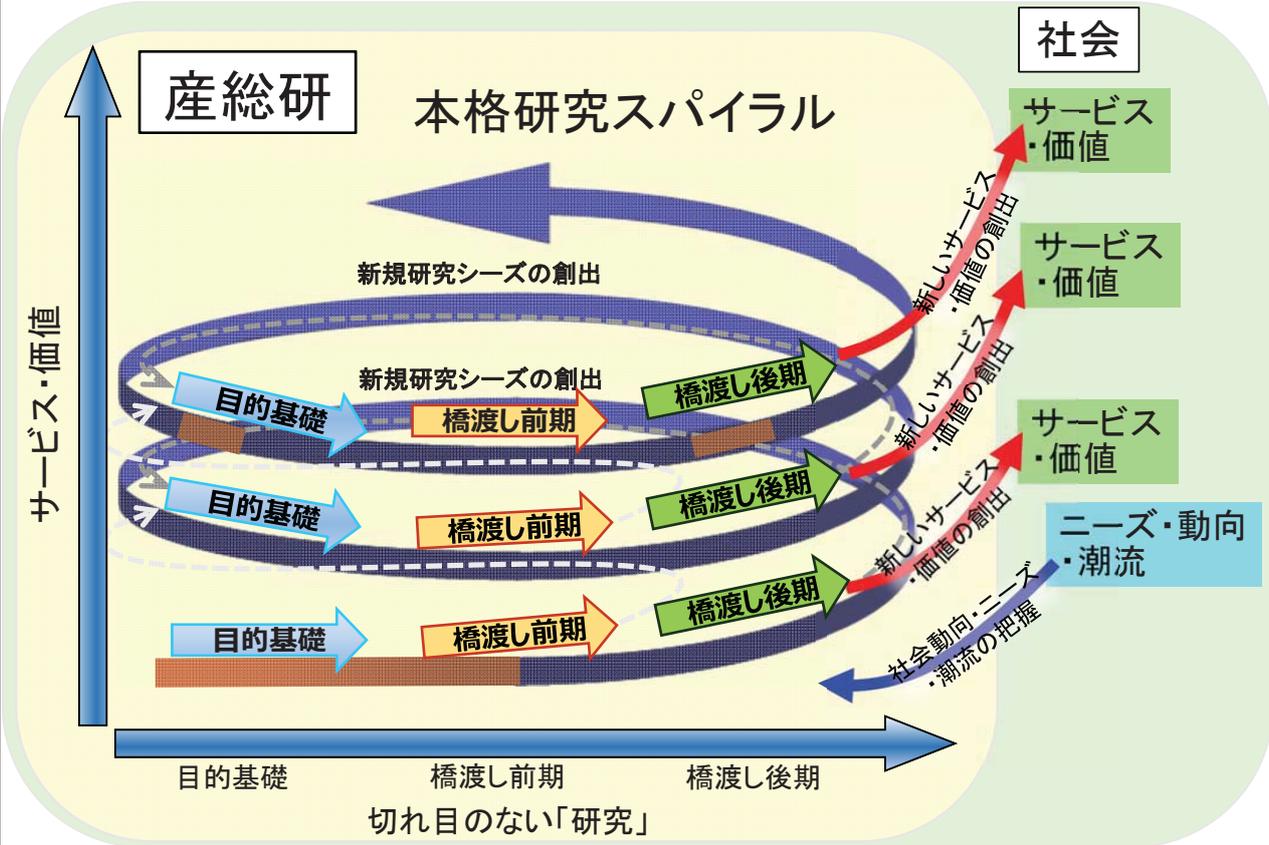
赤字: プレゼントピック  
青字: 評価資料記載

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 <b>ロジックデバイス・新材料</b> ・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 <b>新超伝導材料</b> 高品質グラフェンの低温成長技術 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	<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 ウェハレベル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 <b>STT-MRAM</b> 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	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 <b>製造網コンセプト(モデリング・情報可視化)</b> 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 <b>製造網コンセプト(実証テストベッド)</b> ネットワークMEMS <b>フレキシブルセンサ(量産化)</b> 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	<b>ミニマルファブ</b> マイクロ・ナノ微細形成技術 <b>印刷プロセス</b> (高精細、低温低損傷) オンデマンド加工(3D積層) <b>スマート製造ツールキット</b>
④	常温衝撃固化現象&常温接合メカニズムの 解明 <b>全固体電池材料</b>	ハイブリッドAD法 LIJ 法	<b>光MOD法</b> <b>AD法</b>

### 技術ポートフォリオ



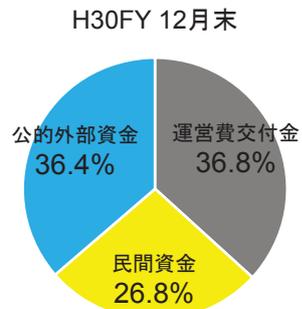
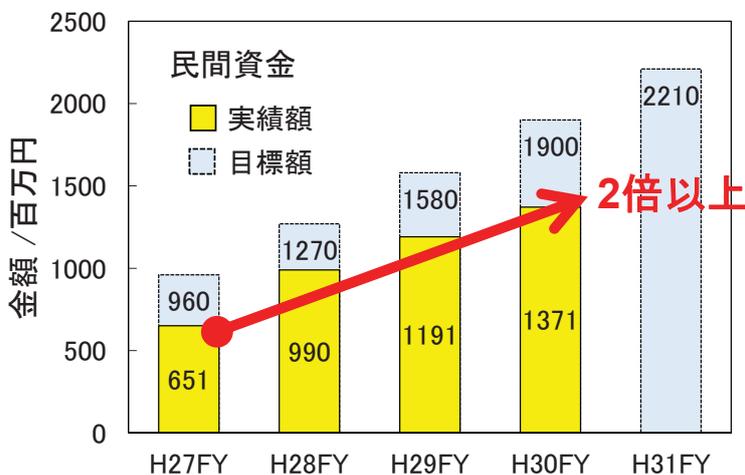
目的基礎	「橋渡し」前期	「橋渡し」後期
<b>スピントロニクス</b> 電圧書き込み型MRAM 量子計算 新超伝導材料 相変化トポロジカル材料 フレキシブル電子材料	<b>STT-MRAM</b> (冠ラボ)	
	<b>製造網 デジタルツイン</b>	
	<b>シリコンフォトニクス</b> 光バスネットワーク	<b>MZ Platform EX</b> <b>新圧電材料</b>
	<b>製造網 プロセスセンシング</b> <b>センシングシステム</b> MEMSセンサネット 印刷プロセス フレキシブルセンサ	<b>外力支援バイオセンサ</b> <b>ミニマルファブ</b> <b>AD法、光MOD法</b> <b>砂型積層造形</b>



### H27~30FYの資金推移

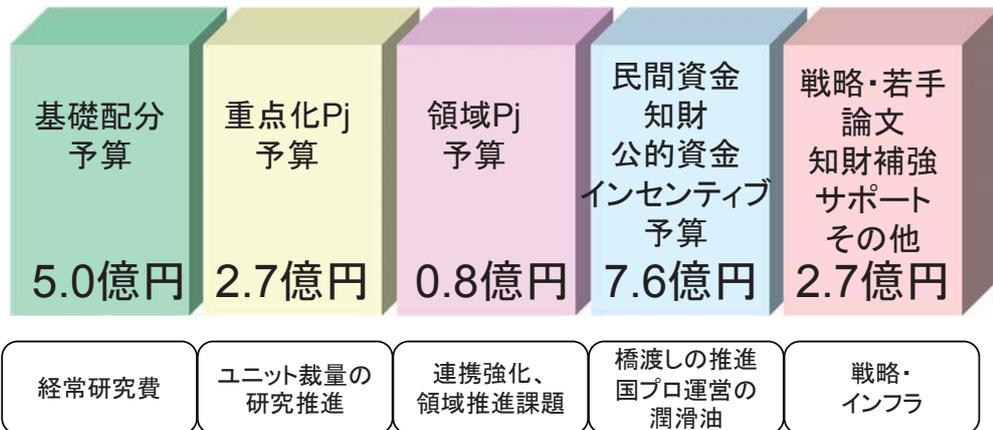
	H27FY	H28FY	H29FY	H30FY
運営費交付金	2,020	1,990	2,000	1,880
公的外部資金	1,748	5,373	3,548	1,858
民間資金	651	990	1,191	1,371
合計	4,419	8,353	6,739	5,109

単位: 百万円  
※H30FY: 12月末実績



## 運営費交付金配賦方針

H30FY領域予算(運営費交付金) 18.8億円



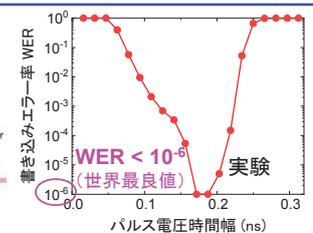
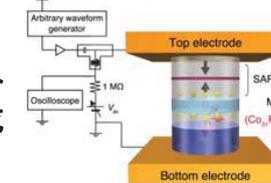
H29FY	20.0億	5.9億	2.7億	0.5億	7.2億	3.7億
H28FY	19.9億	4.0億	2.4億	0.3億	8.4億	4.8億
H27FY	20.2億	7.1億	5.1億	2.1億	4.4億	1.5億

## 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において、書き込みエラー率 WER < 10<sup>-6</sup> (**世界最良値**)を達成し、物理機構の解明にも成功

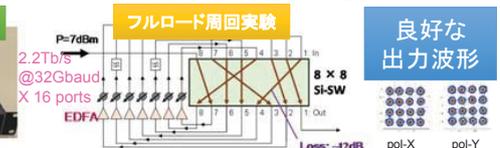
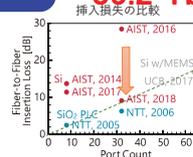
### 電圧書き込み型MRAMの開発



### 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

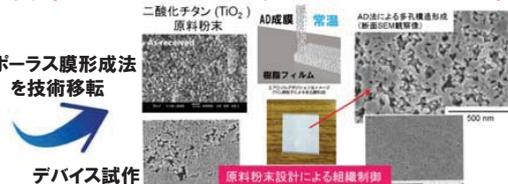
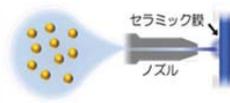
世界初



### 橋渡し後期

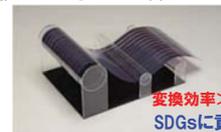
世界初 “AD法”で軽くて曲がる太陽電池が製品化

産総研独自技術“AD法”による室温ポーラス膜形成法を技術移転



量産技術開発

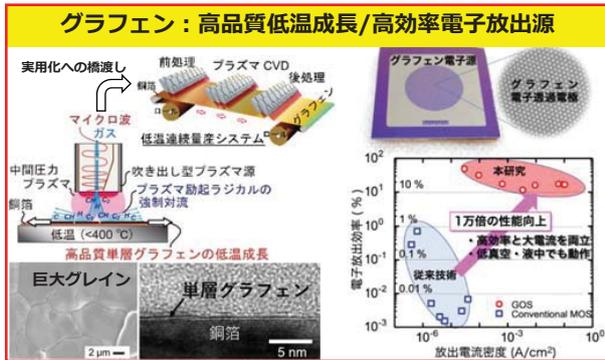
積水化学工業株式会社



変換効率>8%  
SDGsに貢献

ロールツーロール方式で生産・販売開始!

## 平成30年度の特筆すべき研究成果



**【目的基礎】**

- ・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GOS(G/SiO<sub>2</sub>/Si)デバイスにより、金属(M)電極を用いた従来MOS型の1万倍の性能をもつ電子放出源を開発した。
- ・微小スピントルク発振素子(STO)を用いたニューロモルフィック回路を4個のSTOから構築し、7種の母音の音声識別に成功した(Nature掲載)。また、STOの強制同期現象を用い、回路の性能決定因子である短時間記憶容量の評価と増大にも成功した。

**【橋渡し前期】**

- ・超低消費電力情報通信を目指したダイナミック光バスネットワークの主要要素技術である、シリコンフォトニクス光スイッチの開発で、サブシステムレベルで35.2Tb/sのスループットをわずか0.51pJ/bitで完全動作に成功した(世界初)。
- ・大容量・高耐久性のリチウム電池の開発において、蒸着法で作製した一酸化ケイ素(SiO)のナノ薄膜を負極に用いることにより、理論容量に近い大容量(黒鉛電極や従来SiO電極の5倍以上)、充放電の繰り返しに対する高安定性を実現した(企業と連携予定)。
- ・応力発光検出による航空機用CFRPの損傷発生時の可視化を、実構造部材を用いたリアルタイム検出に発展させた(世界初)。

**【橋渡し後期】**

- ・筋肉状態の定量的センシングに向け、インプットとしてEMS(電気筋肉刺激)、アウトプットとして、筋収縮の際に筋肉から発生する機械的信号「筋音」の有効性を実証した。定量的評価のため、着用するだけで筋音をモニタリングできる「EMSスマートウェア」を開発した。
- ・大面積フレキシブルデバイス製造技術と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、音が鳴る生地という独創的な特徴を有するフアブリックスピーカーなど、多様な実用フェースデバイスを製造、企業への橋渡しを達成した。

## 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  
「超省電力スピントロニクス制御技術の開拓と応用展開」

**H30FY**

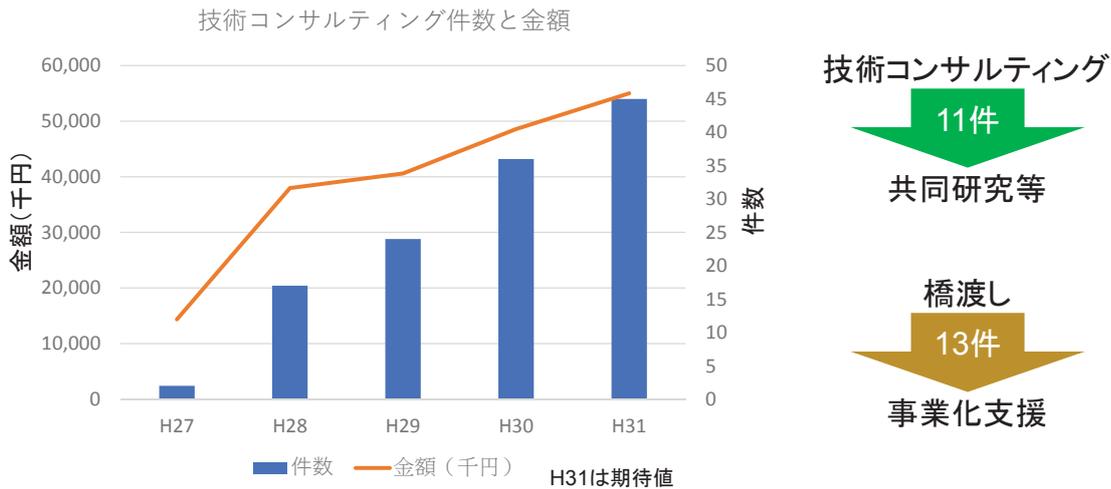
公益社団法人発明協会 21世紀発明奨励賞(平成30年度全国発明表彰)  
製造技術研究部門 秋山 守人  
「高圧電性窒化スカンジウムアルミニウム薄膜の発明」



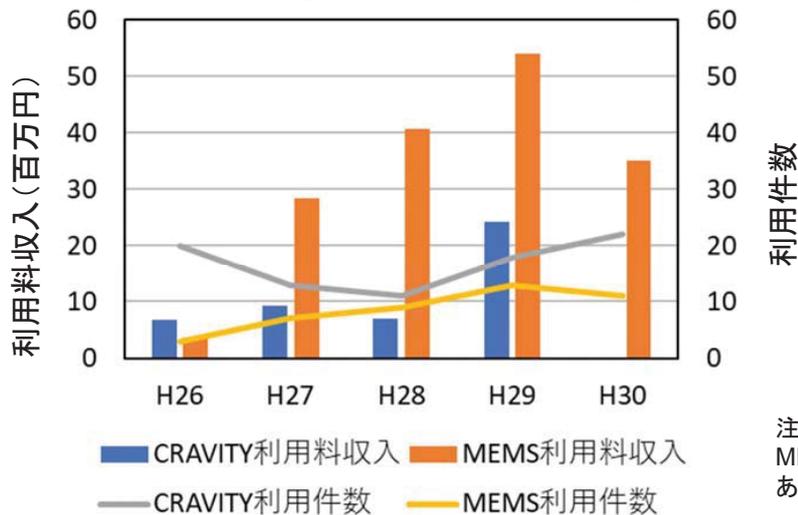
その他、浅田栄一賞、グッドデザイン賞、つくば奨励賞、電気科学技術奨励賞、日本セラミックス協会賞 学術賞、日本物理学会論文賞、丸文学術賞、日本産業技術大賞などを受賞

## 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



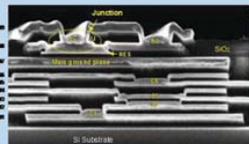
## オープンイノベーション拠点TIA共用施設における成果普及



注: MEMSの利用はMNOICが代行することがあるため、件数が少ない。

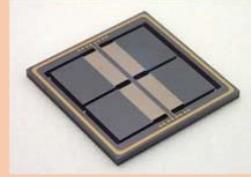
### 超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (CRAVITY)

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 (H29FY)

役職者・プロジェクトリーダー

ISO : 3名、IEC : 3名

参加者

ISO : 15名、IEC : 15名

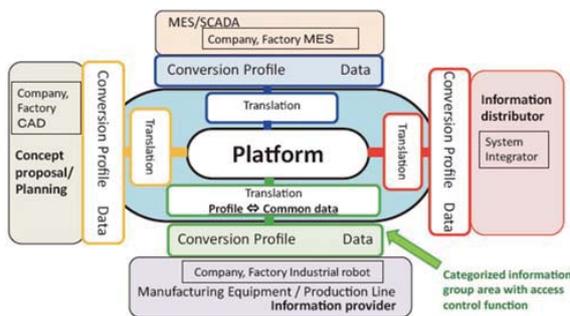
ISO/IEC/JTC1 (情報技術) : 1名

IEC&ISO JWG21 (Smart Manufacturing Reference Model(s)) : 1名

SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) : 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」 (H28~30FY)



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

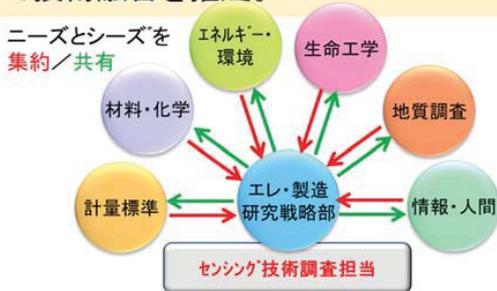
名称	設置	企業等 会員数	活動内容
次世代プリントエレクトロニクスコンソーシアム	H24年4月1日	72	印刷エレクトロニクスに関する情報集約と技術要求の発信を通じ技術統合と基盤技術確立を加速。
構想設計コンソーシアム	H26年8月1日	7	構想設計に関する企業の共通課題と研究開発の仮説構築と実証を繋ぐ場。ゲスト参加の議論会合(毎月)と議論合宿(年1回)で構成。
応力発光技術コンソーシアム	H28年3月18日	11	応力発光技術の成果普及と市場形成に向けた情報共有、意見交換、共同実証試験。
先進コーティングアライアンス	H28年4月13日	46	AD法・光MOD法を基軸に川上から川下まで幅広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。

以下はH30年度活動本格化

外力支援型バイオアッセイ技術コンソーシアム	H30年2月16日	13	ウイルス等を超高感度に検出できるEFANI技術に関する課題やソリューションの共有、事業化に向けた情報収集と企業間連携強化。
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。
サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアム	H30年3月5日	10	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。

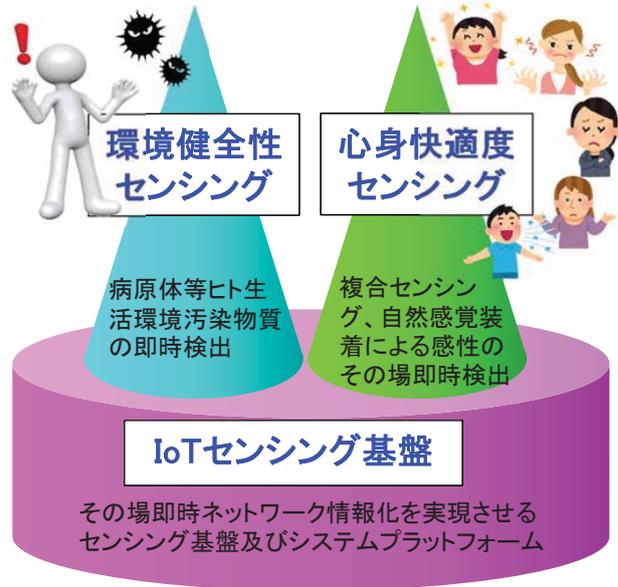
## センシングシステム研究センター設立(H31.4)による 技術融合の加速と産総研ポテンシャルの見える化

- 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。

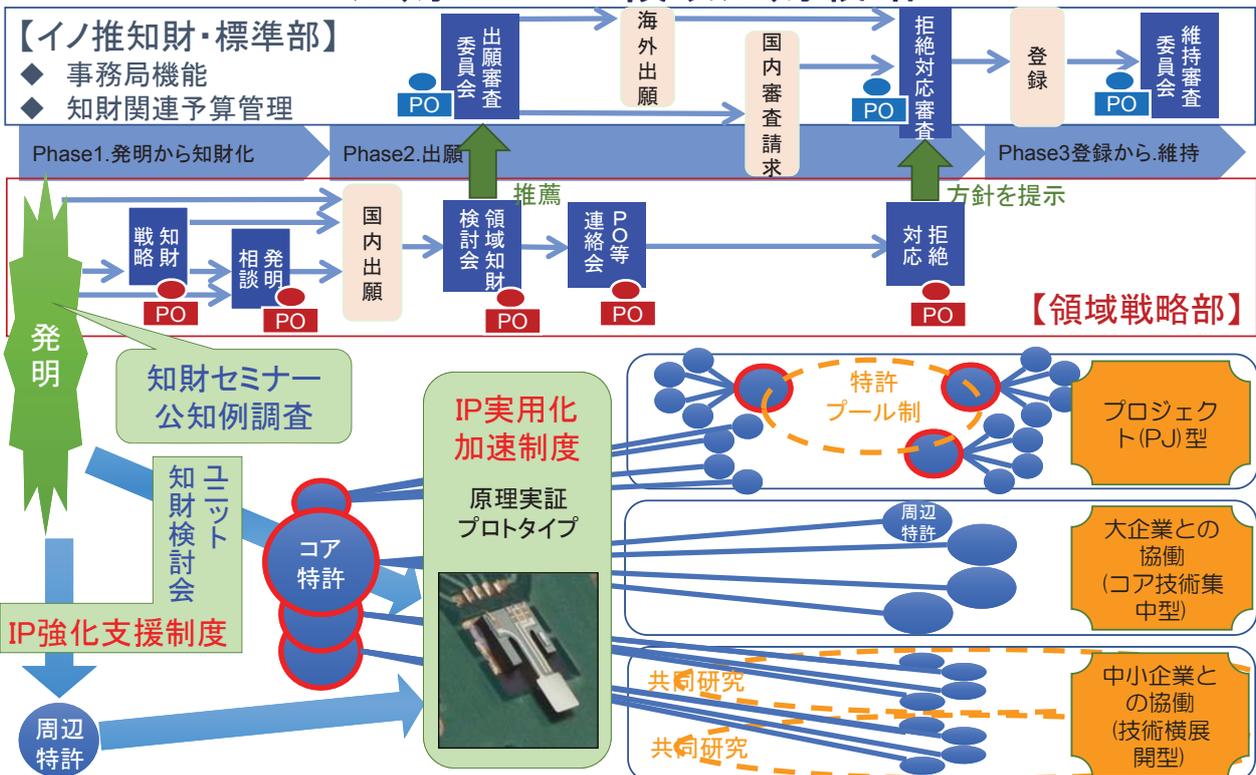


領域内で議論を進め、  
新規研究センターの設立を実現した。

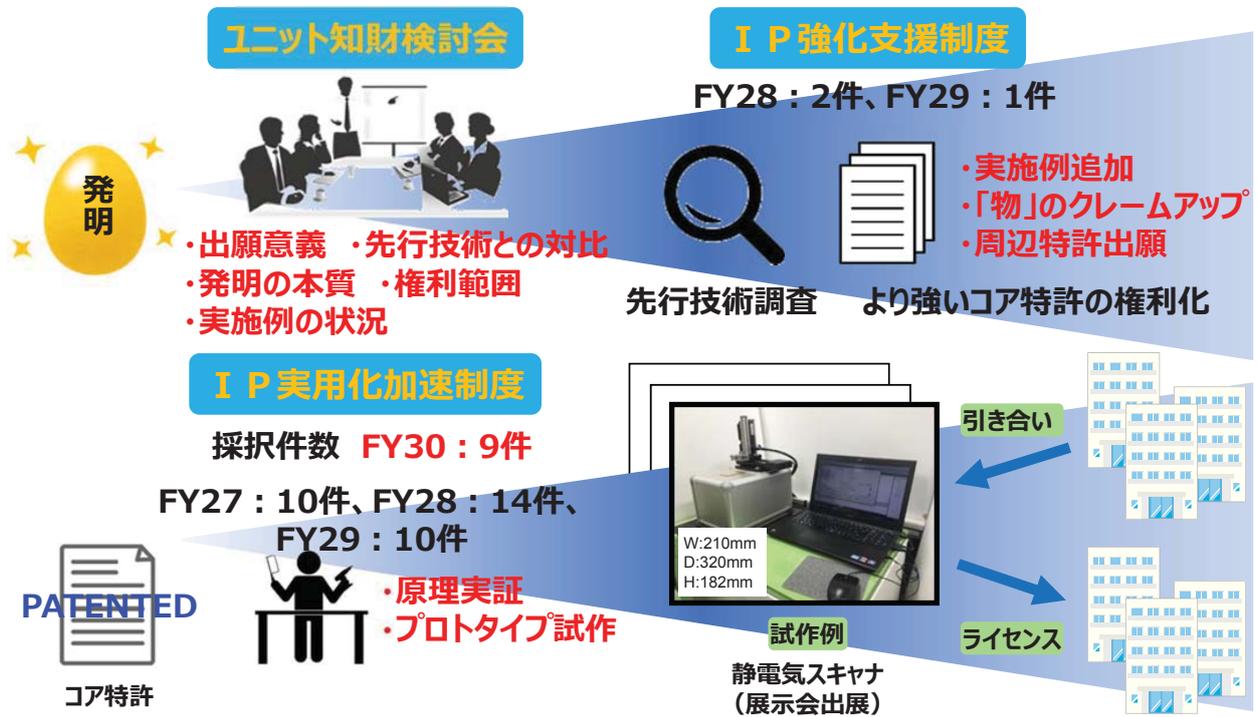
H30年度成果



## 知財フローと領域知財戦略



## マーケティング・ツールとしての知的財産の構築



## 展示会等へ積極的に出展

H30年度成果

	イベント名	開催日
1	産総研2次電池材料・反応分析シンポジウム	H30年4月26日
2	東北センター 新技術セミナー 180529	H30年5月29日
3	JPCA Show 2018	H30/年6月6-8日
4	みやぎ工業会	H30年6月26日
5	テクノブリッジフェア in 茨城	H30年8月28日
6	テクノブリッジフェア in 九州	H30年9月3-6日
7	CEATEC JAPAN 2018	H30年10月16-19日
8	MEMSセンシング&ネットワークシステム展 2018	H30年10月17-19日
9	All about Photonics展 (InterOpto2018)	H30年10月17-19日
10	テクノブリッジフェア in つくば	H30年10月25-26日
11	JASIS 2018	H30年9月4-7日
12	九州・沖縄オープンイノベーションデー	H30年11月16-17日
13	フロンティア材料フェア in 中部	H30年12月3日
14	オープンイノベーションワークショップ in 徳島	H30年12月5日
15	高機能セラミックス展 2018	H30年12月5-7日
16	豊田自動織機社内展示会	H30年12月6-7日
17	セミコンジャパン2018	H30年12月12-14日
18	Jflex 2019	H31年1月30日-2月1日
19	テクノブリッジフェア in 熊本	H31年2月27日



＜展示会等への出展補助＞

- ・各研究ユニットが出展する展示会等への出展費用を領域から補助
- ・各研究ユニット、年度当たり1展示会だけ。
- ・補助金額の上限：100万円
- ・領域として出展：  
JPCA Show & JASIS展

## 連携拠点の広域展開

赤枠は平成30年度活動開始

ミニマルIoTデバイス実証ラボ  
(産総研九州センター)

産総研・名大  
GaN-OIL

豊橋技科大先端センサ  
共同研究ラボラトリー  
・ミニマルファブ

産総研GOIL臨海  
・ミニマルファブ  
・つながる工場

産総研つくば  
・MEMS(MNOIC)  
・超伝導(CRAVITY)  
・ミニマルファブ

産総研GOIL柏  
・フレキシブルセンサ

東大 VDEC  
・AIチップ設計拠点

## 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	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



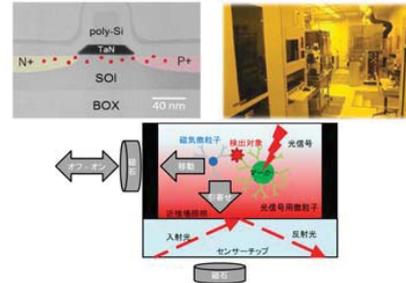
両機関が協力して初めて実現できる2050年の社会課題解決を目指した共同研究(チャレンジ研究)および量子技術分野分で連携を進めている

### 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

- ▶ 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。
- ▶ H30FY WSでの議論から生まれた理研-産総研の共同研究提案2件(有機材料の誘電性および光電変換機能に関する課題)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。

- 第1回 H27年6月1日
- 第2回 H28年11月22日
- 第3回 H29年11月13日
- 第4回 H30年11月12日

## 国際連携



在外研究

国際共同研究

国際LOI

国際  
インターンシップ

試料提供  
請負研究、他

研究員  
出身国

## 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**

✓ H29年度成果

### TEL-産総研 先端材料・プロセス開発連携研究室



保有技術の連携とプロセスインテグレーション技術の開発を行い、次世代半導体デバイスに必要な先端材料・プロセス技術の実現を目指す  
特専6名、外来8名、産総研6名 計20名

✓ H30年度成果

### NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室



□ H31年度設立予定(交渉中) 3件

※特専研究員(在籍出向), 外来研究員

## 人材流動

### 採用者数

	H27FY	H28FY	H29FY	H30FY
クロスアポイントメント総数 (内 産総研から外部へ)	3 (0)	3 (0)	7 (2)	6 (2)
年俸制任期付き採用数	2	3	2	1
文科省・卓越研究員採用数	-	2	1	2

### 転出者数 ※産総研ポスドクの転出数を含まない

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

## イノベーションスクール、RA、TIA人材育成事業への貢献

		H27FY	H28FY	H29FY	H30FY 12月末	H31FY (目標値)
イノベーションスクール		2	10	7	16	40
産総研リサーチアシスタント制度		13	23	33	41	
女子大学院生懇談会		-	65	58	46	-
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

### (1) 領域の対応状況

#### コメント(領域の研究開発マネジメント)

当該領域が対応する市場での顧客要求レベルは高く、産総研全体のマネジメントへの準拠のみでは対応不足の懸念がある。一部すでに試みもみられるが、独自の対応を特区的にでも一部試行し、市場関係者をさらに引き付ける活動を推進するべきである。

#### 対応状況

実験室での試作レベルから実用化に至るまでの道は険しく、産総研単独で乗り越えることは困難であることは自覚している。平成30年11月に開設した「人工知能に関するグローバル研究拠点(GOIL)」は、社会実装に向けた実証試験を行える模擬環境を備えており、企業等を巻き込んで社会ニーズに応える研究開発を推進する拠点となると期待されている。GOILが所在する柏の葉エリアは、スマートシティ社会実験を推進しており、自治体や住民も参加できる実証実験を行うことができる。このような環境を最大限に活用し、当該領域の研究成果を社会へ橋渡す活動を展開する所存である。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### (2) ユニット毎の対応状況

#### コメント(目的基礎研究における研究開発)

長期的な視点で、量子コンピューティングの研究を進めていることは高く評価したい。ただ、この分野は競争が激しいため、方向性を見極めて独自の視点を持った研究を期待したい。

#### 対応状況

超伝導量子ビットにおいては、産総研の強みである①世界トップ級の超伝導ファブ & 超伝導三次元実装技術、②基礎理論、材料、デバイス、回路、プロセス、アーキテクチャ、アプリケーションの人材を使い、産総研の新しさ、三次元実装技術を利用した超伝導量子アニーリングの製造、④特定最適化問題に特化した独自アーキテクチャの採用を出して、研究を進める。

海外の研究機関に伍するスピードで開発を進めるために、大学、企業と連携したオールジャパン体制を構築した。とくに、超伝導量子ビットを世界で初めて開発し、その量子コンピューティング応用を継続的に研究してきたNECと、冠ラボ(NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室)を2019年3月に設立して共同研究を進める。

Si量子ビットの研究開発では、産総研が有する微細CMOSデバイス・集積化・回路設計技術の強みを生かし、5年を目処に集積可能な量子ビット技術の開発、回路・システムの構築も視野に入れた研究方針を立て、国内他機関のSi量子ビット研究チームを束ねる形での文科省Q-LEAP基礎基盤研究テーマ受託につなげている。また、大規模集積化では、SCRの300mmラインの活用も視野において、世界に先駆けての成果を目指す。

## 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)

- ・IoT時代のスマートものづくりについては、臨海都市センターとの協力をもっと活用されることを期待する。
- ・臨海モデル工場でのデモシステム構築を期待したい。

#### 対応状況

臨海モデル工場は、情報系の研究ユニットである人工知能研究センター(臨海副都心センター内の研究ユニット)と密に協力して進めている。一部研究員はセンターに兼務し人工知能研究センターの研究員としても関わる。また、隣接する東京都産業技術研究センターとの連携も計画しており、双方の装置の見える化の連携テストを準備している。

#### コメント(「橋渡し」研究前期における研究開発)

応力発光塗料の開発は重要な成果である。今後、センサグループとの連携などで破壊予兆の分野でのより大きな貢献を期待したい。

#### 対応状況

次世代製造の接合と期待の高い「接着」の内部剥離(破壊予兆)を、応力発光によりリアルタイム検出に成功し、学会での受賞(欧州接着学会Euradh2018受賞)につなげるなど、大きなインパクトを与えた。また、航空機メーカーとの実構造部材での初期軽微損傷検出、自動車メーカーとの破壊予兆検知・シミュレーション(予測)の高度化に貢献するなど、学会から産業分野にわたり、大きな社会貢献を生み出した。

## 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)

MEMSについて、ひずみセンサー一つとっても、産総研内にいろんな技術が存在していると思います。それらの情報交換をもっと密に行うことによって、より良い手法に仕上がっていくものと思います。

### 対応状況

所内連携による技術シーズの融合は重要と考えている。所内技術の融合についての全所的な取り組みとして、2018年12月17日には、産総研主催のコネクトシンポ「インフラ点検」を御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンターで開催した。

エレクトロニクス・製造領域内では、九州センター(製造技術研究部門)の技術である圧電材料を用いたインフラ監視センサ用エネルギーハーベスタや、フレキシブルエレクトロニクス研究センターの技術である印刷配線技術を用いたウェアラブルセンシングデバイス等、いくつかの研究テーマにおいて、所内連携を通じた成果が出つつある。

## 前年度評価コメントへの対応状況

### コメント(「橋渡し」研究後期における研究開発)

フレキシブルプリント技術については、いろんな展開があるとわかりましたが、今後の展開については、産総研の組織としてどのようにフォローしていくべきか、是非議論して頂きたいと思います。

### 対応状況

実用展開としては、個別製品の対応に向かざるをえない技術となっているが、その状況にあっても、生産の効率化をもたらすため、共通化できる技術の抽出とプラットフォーム化を図っていく。そのためのアクションとして、個別多様な製品を活用するユーザ企業群と、製造企業群とを一堂に集結させたコンソーシアムを形成し、個別多種製品の製造共通技術の抽出及びその強化支援を行っていく。

### コメント(「橋渡し」研究後期における研究開発)

AD法は電池分野でもっと知れ渡るようにPR活動が必要と感じました。キャパも大きいので、生産性をいかに上げるかの検討を進め、今後の展開について戦略を練る必要があると思います。

### 対応状況

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、設立当初の28社から46社に参画企業を拡大する。これに伴って参画企業の要望に応え、平成30年度は、原料粒子の特性改善やプラズマ援用(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倍以上まで向上することに成功し、コストダウンの目途を得た。また、AD法の全個体電池応用への可能性を示すことで、国内外での電池研究の専門家、専門機関からも取り上げられ、AD法活用の動きが活発化してきている。



## 1. 第4期中長期目標期間の計画とロードマップ

### (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する。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の創出を目指す。

### (2) ものインターネット化に対応する製造およびセンシング技術の開発

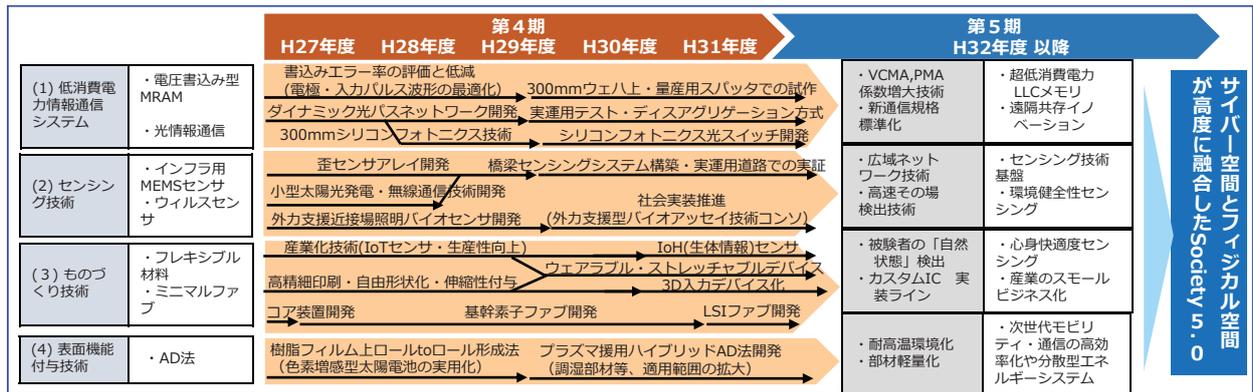
製造レジリエンス強化と産業競争力強化を目指した製造網（Web of Manufacturing）の実現と社会インフラの維持管理を効率化・高度化を可能とする新たなセンシング技術、センサネットワーク技術、収集データ利用技術などを開発する。

### (3) ものづくりにおける産業競争力強化のための設計・製造技術の開発

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、複合加工技術などを開発する。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する。

### (4) 多様な産業用部材に適用可能な表面機能付与技術の開発

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する。



## 2. 第4期中長期目標期間の特筆すべき成果（見込みを含む）

### 【目的基礎】

- 電圧書き込み型MRAM高度化のため、Ir希薄ドープFe電極を用いた磁気トンネル接合(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、世界最高 $10^{-6}$ （エラー訂正なし）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。
- 量子コンピュータに関して、シリコン量子コンピュータを産総研TFET技術により開発、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新規アーキテクチャを開発し、大規模集積チップを具現化した。

### 【橋渡し前期】

- 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バス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性能を実用レベルとし、都内商用実フィールドで運用した。さらに、「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。
- 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。
- 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製造可能な砂型3Dプリンタを開発、技術移転した企業が市販化した。

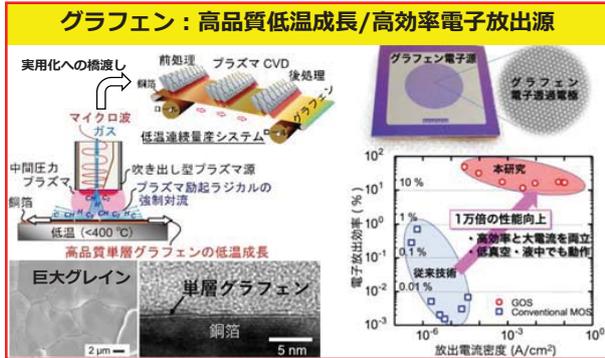
### 【橋渡し後期】

- 抗体で磁気ビーズと標識ビーズを修飾することで、様々なウィルスを、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。
- 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μm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、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。
- 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インチウェハと幅30cm製造装置を用い、CMOS NANDゲートやMEMSセンサーを開発した。52社で計80機種が商用販売された。
- 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等、実用化・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）と三次元部材への適用を実現した。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。

# エレクトロニクス・製造領域



## 3. 平成30年度の代表的成果と特筆すべき成果



**【目的基礎】**

- ・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GOS(G/SiO<sub>2</sub>/Si)デバイスにより、金属(M)電極を用いた従来MOS型の1万倍の性能をもつ電子放出源を開発した。
- ・微小スピントルク発振素子(STO)を用いたニューロモルフィック回路を4個のSTOから構築し、7種の母音の音声識別に成功した (*Nature*掲載)。また、STOの強制同期現象を用い、回路の性能決定因子である短時間記憶容量の評価と増大にも成功した。

**【橋渡し前期】**

- ・超低消費電力情報通信を目指したダイナミック光バスネットワークの主要要素技術である、シリコンフォトニクス光スイッチの開発で、サブシステムレベルで35.2Tb/sのスループットをわずか0.51pJ/bitで完全動作に成功した (世界初)。
- ・高容量・高耐久性のリチウム電池の開発において、蒸着法で作製した一酸化ケイ素 (SiO) のナノ薄膜を負極に用いることにより、理論容量に近い高容量 (黒鉛電極や従来SiO電極の5倍以上)、充放電の繰り返しに対する高安定性を実現した (企業と連携予定)。
- ・応力発光検出による航空機用CFRPの損傷発生の可視化を、実構造部材を用いたリアルタイム検出に発展させた (世界初)。

**【橋渡し後期】**

- ・筋肉状態の定量的センシングに向け、インプットとしてEMS (電気筋肉刺激)、アウトプットとして、筋収縮の際に筋肉から発生する機械的信号「筋音」の有効性を実証した。定量的評価のため、着用するだけで筋音をモニタリングできる「EMSスマートウェア」を開発した。
- ・大面積フレキシブルデバイス製造技術と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、音が鳴る生地という独創的な特徴を有するファブリスピーカーなど、多様な実用フェースデバイスを製造、企業への橋渡しを達成した。

## 2. 橋渡しのための研究開発

# 成果トピックス一覧

## (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
- 新超伝導材料の開発
- 電圧書き込み型MRAM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
- 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
- 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

## (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
- IoTデバイス用全固体電池の開発
- 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(デジタルツイン)と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

## (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
- 社会で活躍する先進コーティング技術の開発
- 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
- センサ用高压電性材料の開発
- スマート製造ツールキットの開発
- 製造プロセスの高度化と複合化技術の開発
- 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

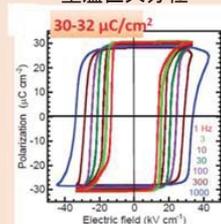
# (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

## 第4期中長期期間中の代表的成果

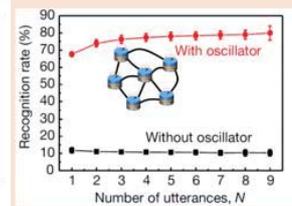
### 発表トピック

- 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  
→「①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」で紹介
- 新超伝導材料の開発  
→「②新超伝導材料の開発」で紹介
- 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発  
→「橋渡し」研究前期で紹介
- フレキシブル強誘電体材料の開発
- 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設計
- 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
- 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 (H30年度特筆成果)

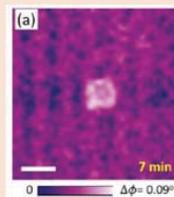
- クロコン酸の室温巨大分極



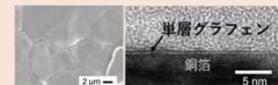
- スピントルク発振素子を用いた数字音声認識



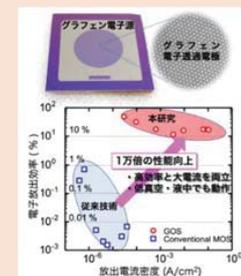
- Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/GeTe 超格子の局所磁化



- 高品質低温合成グラフェン



- グラフェン電子放出源



## (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

# ①「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」

ナノエレクトロニクス研究部門

研究部門長

中野 隆志

## 量子力学原理に基づく新しいコンピュータ

### 量子アニーリングマシン

組合せ最適化問題(例:巡回セールスマン問題)に特化した専用計算機

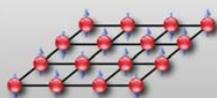
既に商用化(D-Wave Systems)

企業: D-Wave Systems・Google・Northrop Grumman・MDR・NECなど

想定市場: 自動運転・製造・運輸・農業・医療・広告...



<http://www.dwavesys.com>



### 量子コンピュータ

古典コンピュータや量子アニーリングマシンなどあらゆるコンピュータの上位互換:汎用計算機

特定の問題(素因数分解・量子化学計算・機械学習など)を超高速に処理

しかし、商用化は2030年頃?

企業: Google・Microsoft・IBM・Intel・日立・NTTなど

想定市場: 人工知能・創薬・農業・新素材・セキュリティ...



<https://www.engadget.com/2018/01/08/intel-s-quantum-computing-efforts-take-a-major-step-forward/>

## 量子テクノロジー研究開発拠点としてのナノエレ部門

第4期中長期計画5-(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

通常のCMOS集積回路では実現できない新規の情報処理技術を創出するために必要となる新材料技術および新原理デバイス技術を開発する。



### 超伝導量子アニーリングマシン

**NEDO IoT推進のための横断技術開発プロジェクト**  
 “組合せ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発”

**NEDO 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発**  
 “超伝導パラメロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発”

**超伝導量子コンピュータ**  
**NEDO 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発**  
 “イジングマシン共通ソフトウェア基盤の研究開発”

**CREST 量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出**  
 “超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理”

**Q-LEAP 光・量子飛躍フラッグシッププログラム**  
 “超伝導量子コンピュータの研究開発”

**シリコン量子コンピュータ**  
**Q-LEAP 光・量子飛躍フラッグシッププログラム**  
 “シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現”

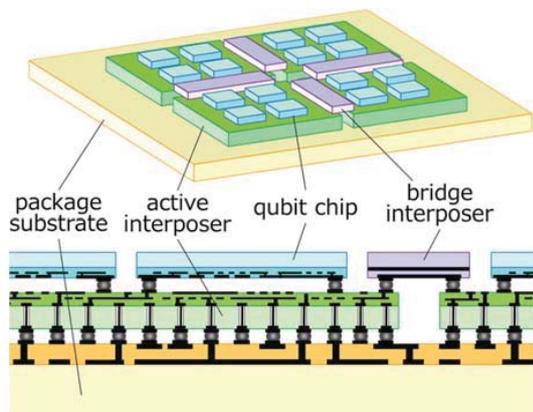
**CREST 量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出**  
 “シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット”

## 超伝導量子アニーリングマシン

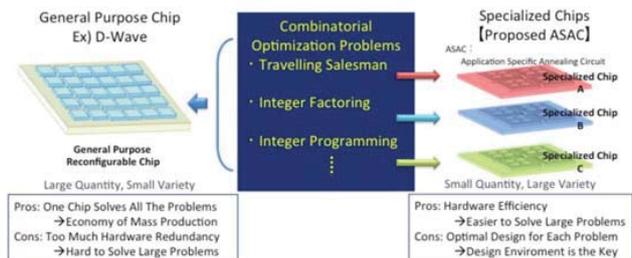
### NEDO IoT推進のための横断技術開発プロジェクト “組合せ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発”

参画機関: 日立(代表)・産総研・理研・NII・早稲田大

コア技術である超伝導集積回路製造技術、三次元実装技術、計算機アーキテクチャ技術、量子情報理論の知見を活かして**大規模な超伝導量子アニーリングマシン**の開発を行う。



三次元実装技術QUIP

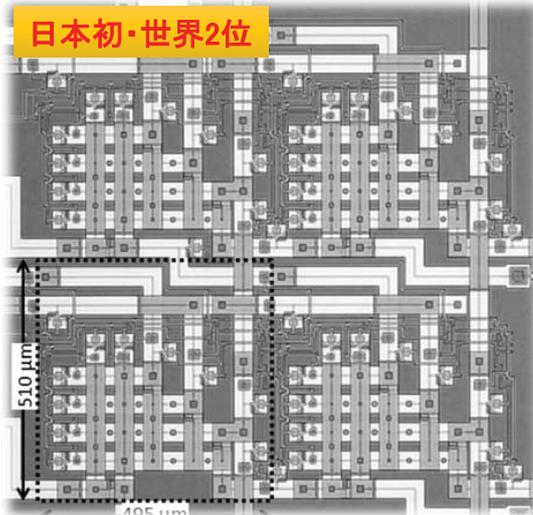


特定最適化問題専用アーキテクチャASAC

## 超伝導量子アニーリングマシン

**NEDO IoT推進のための横断技術開発プロジェクト**  
**“組合せ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発”**

**50量子ビット級量子アニーリングチップAQUA1.0の製造に成功**



H30年度成果

**集積度ランキング**

1位	D-Wave	2048
2位	産総研	50
3位	Google	9
4位	MIT	2

産総研の量子アニーリングに関する取り組みは、日経エレクトロニクス、ニュートン、日刊工業新聞、MITテクノロジーレビュー、JB Press等多くのメディアで取り上げられた。

## 超伝導量子アニーリングマシン

H30年度取組み

### 「NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室」を設立

#### ニュース

2018/11/21

**「NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室」を設立**

—量子性に基いた先端技術領域の研究開発を強化—

日本電気株式会社(代表取締役 執行役員社長 兼CEO: 新野 隆、以下 NEC)と国立研究開発法人 産業技術総合研究所(理事長: 中鉢 良治、以下 産総研)は、産総研 ナノエレクトロニクス研究部門内に「NEC-産総研 量子活用テクノロジー連携研究室」を設立することに合意しました。

今回新たに設立する研究室では、NECと産総研の研究開発力の融合を図り、量子アニーリングを始めとする量子性に基いた先端技術領域の研究に注力し、量子コンピュータの研究開発を加速します。研究室は産総研 つくばセンター内に、2019年3月1日に設置する計画です。

NECは1999年に超伝導固体素子を用いた量子ビットの動作実証に世界で初めて成功して以来、量子ビットや量子状態を制御するデバイス・回路の研究を継続してきました(注1)。現在は、従来技術をはるかに上回るスピードで組合せ最適化問題を計算できる量子アニーリングマシンの研究開発を進めています。本年10月には国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構による新規事業採択を受け(注2)、量子アニーリングマシンに関して産総研を含む幅広い機関と共同で開発を進める体制を整えました。今回、産総研と設立する研究室は、こうした動きをさらに加速するものです(注3)。

産総研は、超電導デバイスの開発や量子物理学などの蓄積を有しており、低温超電導デバイス作製用機器と関連するノウハウを統合・集約した世界トップレベルの共用研究開発施設、超電導アナログ・デジタル開発施設(CRAVITY)を運営しています。自らの各種超電導デバイスの作製、研究開発に利用するとともに企業、大学などに提供し、超電導デバイスの研究開発に貢献してきました。

産総研の大型連携のための制度である連携研究室(注4)では、企業の研究者をグループ単位で受け入れることが可能です。産総研は、この連携研究室などの取り組みにより、基礎研究の成果をイノベーションにつなげる「橋渡し」を推進しています。

### NECとの産学連携に基づいて量子アニーリングマシンの研究開発を推進

## 新たに大型量子プロジェクト3件に採択(超伝導量子ビット)

H30年度取組み

### 超伝導量子アニーリングマシン

NEDO 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発  
 “超電導パラメロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発”

参画機関: NEC(代表)・産総研・東工大・早稲田大・横国大・京大

NEDO 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発  
 “イジングマシン共通ソフトウェア基盤の研究開発”

参画機関: 早稲田大(代表)・産総研・NII・東工大・豊田通商・フィックスターズ

### 超伝導量子コンピュータ

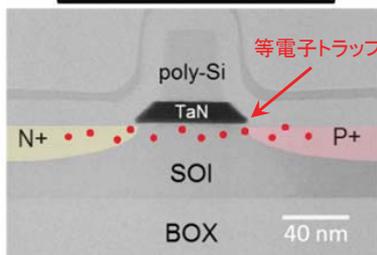
文科省 Q-LEAP 光・量子飛躍フラッグシッププログラム  
 “超伝導量子コンピュータの研究開発”

参画機関: 理研(代表)・産総研・東大

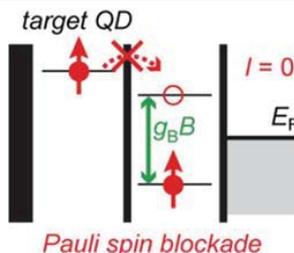
## シリコン量子コンピュータ コア技術: 高温動作TFET量子ビット

- ・ 集積化に有利な半導体素子を用いた量子コンピュータの基本素子として、シリコンスピン量子ビットの開発を実施
- ・ これまでに等電子トラップ援用トンネルFETの量子ビット応用を開拓、高温動作の実験実証に成功
- ・ 大型冷凍機不要、実用的な動作温度の量子計算機実現を目指す

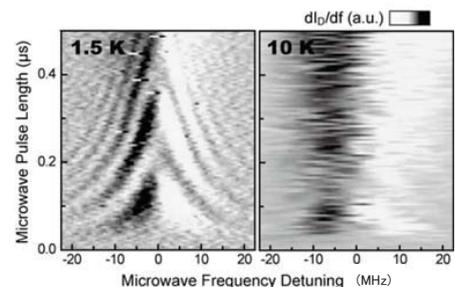
等電子トラップの強い閉じ込めを利用



スピン閉塞を用いたダブルドット型量子ビット



10Kでのラビ振動観測



- 産総研・理研・物材機構 特定研発3法人の共同研究
- Si量子ビット動作温度として世界最高の10Kでの動作を確認

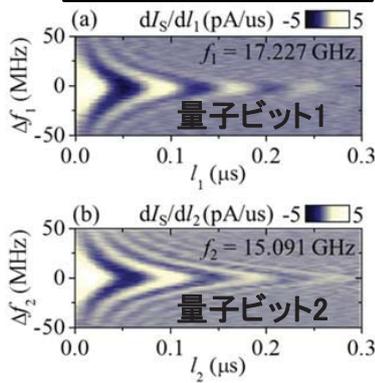
Scientific Reports オンライン版 2019/1/24

## シリコン量子コンピュータ 2量子ビット独立制御に成功

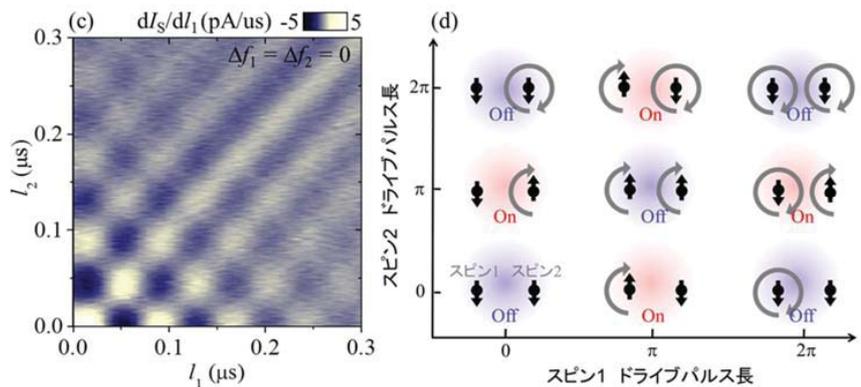
H30年度成果

- ・ 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
- ・ 2量子ビットの独立制御に成功
- ・ 将来の多量子ビット同時操作に向けた準備が完了

2つのビットを異なる周波数で操作



それぞれ独立に|0>、|1>を反転させる動作に成功



## シリコン量子コンピュータ 大型プロジェクトへの展開

H30年度取組み

- ・ 産総研が代表機関となる大型プロジェクト予算(Q-LEAP)を獲得
- ・ シリコン量子ビットの大規模集積化に向けた研究開発をH30年11月より開始

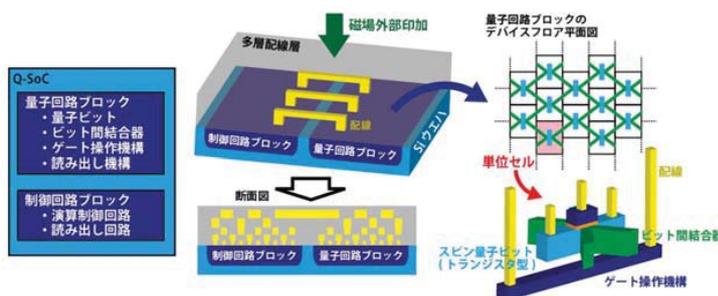
文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

量子情報処理領域 PD: 伊藤公平(慶應大教授)

基礎基盤研究「シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現」

予算額: 9000万円/年(間接経費込) 実施期間: 10年

参画機関: 産総研(代表)・理研・物材機構・東京工業大・名古屋大



集積化を指向した研究展開

SCR300mmラインの積極活用

## 今後の展開: 第5期に向けて

ナノエレ部門のコア技術

理論・デバイス・回路・実装・アーキテクチャ・ソフト・アプリに跨がる総合開発力



日本を代表する量子研究開発拠点として量子テクノロジーの社会への橋渡しを目指す。

## (1)「橋渡し」につながる基礎研究(目的基礎研究)

### ②「新超伝導材料の開発」

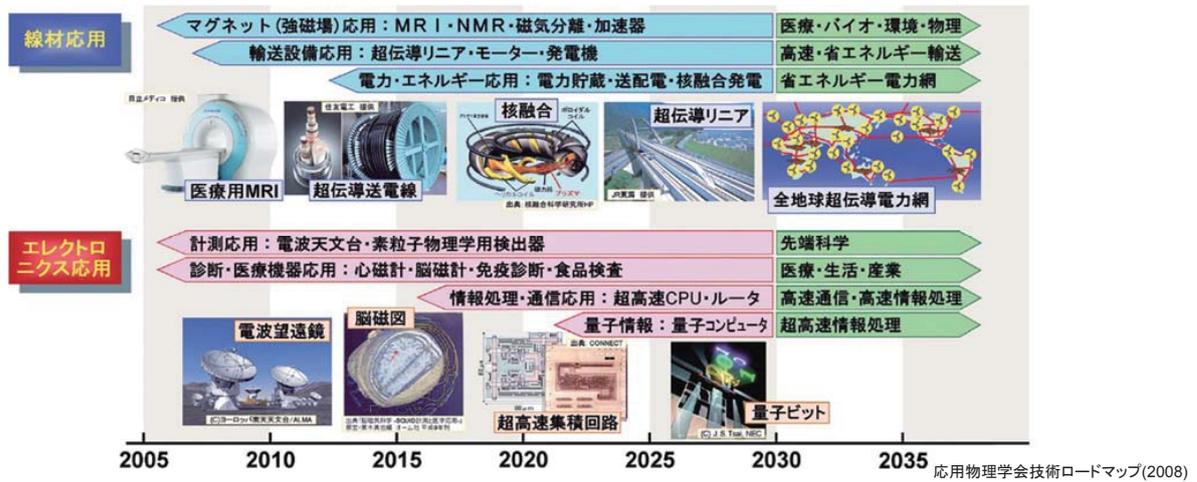
電子光技術研究部門

首席研究員

永崎 洋

## 超伝導の特徴と技術ロードマップ

- 電気抵抗がゼロ
- 完全反磁性 (マイスナー効果)
- 磁束の量子化 (ジョセフソン効果)



## 求められる新超伝導材料とは？

◎線材応用としては:

✓ 高い臨界温度 ( $T_c$ )、臨界磁場 ( $H_{c2}$ )、臨界電流密度 ( $J_c$ )

- ◆ 銅酸化物超伝導体(1986~)
- ◆  $MgB_2$  (2001~)
- ◆ 鉄系高温超伝導体(2008~)

特性、加工性、コスト、安全性等の向上が求められている

◎エレクトロニクス応用としては

✓ 次世代量子計算を可能とする“トポロジカル”超伝導体

- ◆  $Sr_2RuO_4$  (1994~)
- ◆  $Cu_xBi_2Se_3$  (2010~)

未だ標準物質は見つかっていない

超伝導物質の開発 : 第一原理に基づく特性予測・物質設計が困難



燃料電池  
磁性材料  
発光材料  
熱電材料 etc.

どのような指針で超伝導体を開発するか？

## 新超伝導体の開発指針

- ◆既存の高温超伝導体(銅酸化物、鉄系)の超伝導メカニズムを解明し、それを指導原理として新物質を開発する。

純良単結晶試料を用いた多面的物性評価

- ◆既知の超伝導物質を改変し、実用に適した特性を付与する。

高温超伝導体の新バリエーション創出

- ◆従来にない全く新しい物質群を探索する。

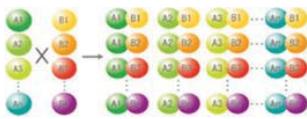
コンビナトリアルケミストリーの適用

## コンビナトリアルケミストリーを用いた新超伝導体開発

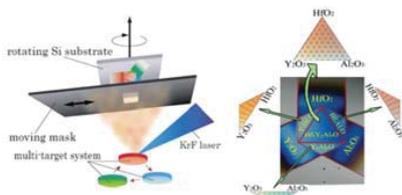
新超伝導体開発への適用:

### コンビナトリアルケミストリー

単一のプロセスで多数(数十から数千または数百万)の化合物を調製することを可能にする化学合成法



Combinatorial Chemistry and New Drugs (SCIENTIFIC AMERICAN April 1997)



高誘電率ゲート絶縁膜

[http://www.nims.go.jp/group/g\\_advanced-device/](http://www.nims.go.jp/group/g_advanced-device/)

### 多品種の合成

7-8種の出発原料(単体もしくは化合物)の混合物

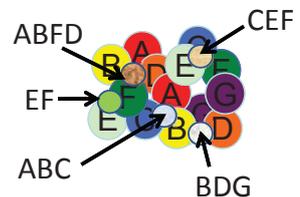


高压合成



極限環境下  
高スピード  
化学反応

高压下(~6万気圧)で短時間(1-2分)反応させ、多数の化合物を含むライブラリを作製



### 迅速評価

超伝導体は「完全」反磁性:



<https://ja.wikipedia.org/wiki/超伝導>

ライブラリ中に0.01%の超伝導成分が含まれていれば負の磁化として検出可能

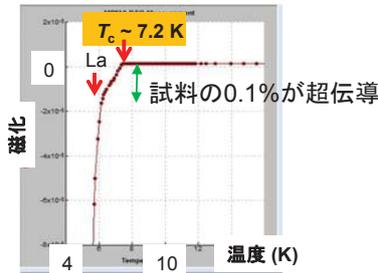
超伝導の徴候が見えたら出発元素数を減らして試料合成と評価を繰り返し、超伝導出現に必須となる元素の組み合わせを割り出す。

# コンビナトリアルケミストリーを用いた新超伝導体開発

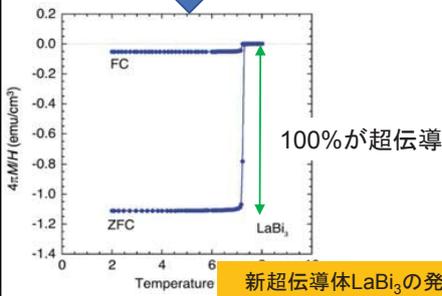
新超伝導体開発への適用:

実施例:

La, Bi, Ru, Te, Mg, Ir, In, Agからなるライブラリ



試料は  $T_c = 7.2\text{K}$  の未知の超伝導物質を0.1%含む。  
( $T_c = 7.2\text{K}$  の超伝導体は、使用元素の組合せで生じる物質には存在しない。)



新超伝導体LaBi<sub>3</sub>の発見

## 多品種の合成

7-8種の出発原料  
(単体もしくは化合物)の  
混合物

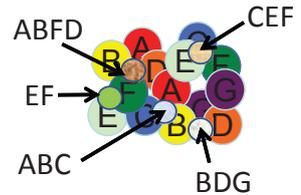


高压合成



極限環境下  
高スピード  
化学反応

高压下(~6万気圧)で短時間(1-2分)  
反応させ、多数の化合物を含むライブラリ  
を作成



## 迅速評価

超伝導体は「完全」  
反磁性:



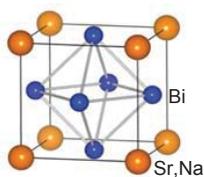
<https://ja.wikipedia.org/wiki/超伝導>

ライブラリ中に0.01%の超  
伝導成分が含まれていれ  
ば負の磁化として検出可  
能

超伝導の徴候が見え  
たら出発元素数を減  
らして試料合成と評  
価を繰り返し、超伝  
導出現に必須となる  
元素の組み合わせを  
割り出す。

# コンビナトリアルケミストリー法で発見された新超伝導物質

H27年度成果

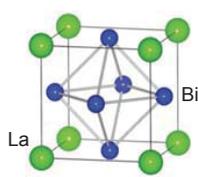


(Sr,Na)Bi<sub>3</sub>

$T_c = 9.0\text{ K}$

Iyo et al. Sci. Rep. 2015

H27年度成果

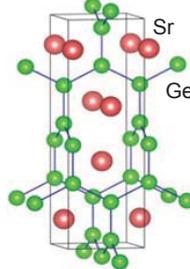


LaBi<sub>3</sub>

$T_c = 7.4\text{ K}$

Kinjo et al. SUST 2015

H29年度成果

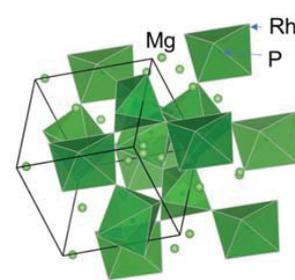


SrGe<sub>2</sub>

$T_c = 7.4\text{ K}$

Iyo et al.  
Inorganic Chemistry 2017

H30年度成果



Mg<sub>2</sub>Rh<sub>3</sub>P

$T_c = 3.7\text{ K}$

## Mg<sub>2</sub>Rh<sub>3</sub>Pの特徴

✓アンチペロブスカイト構造 陽イオン(Rh)の形成する八面体の中心に陰イオン(P)が配置。

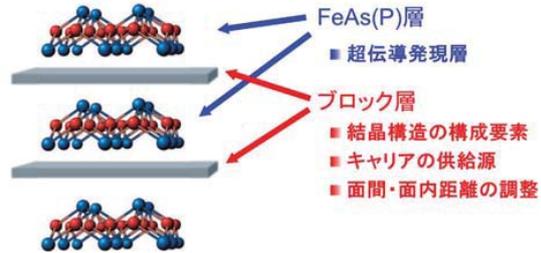
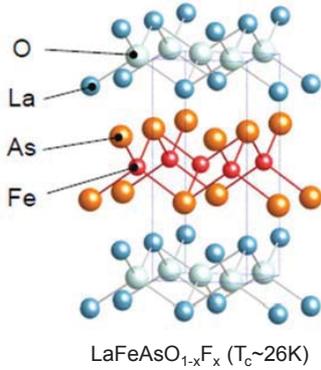
アンチペロブスカイト物質群は近年、面白い物質、物性が見つかった (ディラック半金属  $A_3BO$  ( $A = \text{Ca, Sr, Ba}$ ;  $B = \text{Sn, Pb}$ ), 超伝導体  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ,  $\text{CdCNi}_3$ ,  $\text{ZnN}_y\text{Ni}_3$ ,  $\text{SrPPt}_3$ ,  $\text{CuNNi}_3$ ), 負熱膨張材料  $\text{Mn}_3\text{XN}$  ( $X = \text{Ni, Zn, Ga, Ag}$ ) 等。)

✓空間反転対称性の欠如

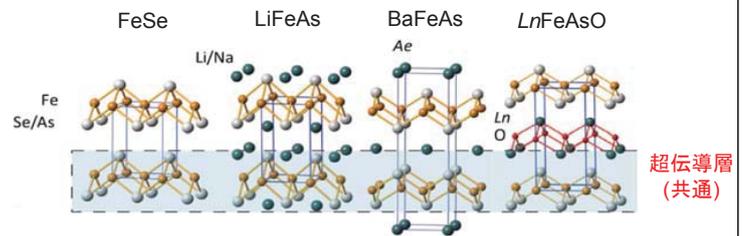
同じ結晶構造を有する超伝導体  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  ではスピン3重項超伝導が出現しており、類似物質群で非自明な超伝導状態が期待される。

# 既知物質をベースとしたバリエーションの多様化、特性向上

鉄系高温超伝導体 (2008~)



同じ超伝導発現層を持つ様々な物質群が見つかった

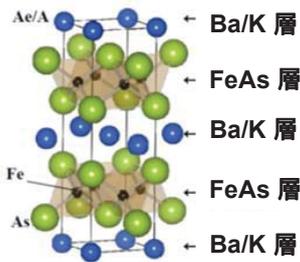


第4期の目標: 新たなブロック層の創成により、応用に適した鉄系超伝導体を開発する

# 新しい鉄系高温超伝導体: LaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>

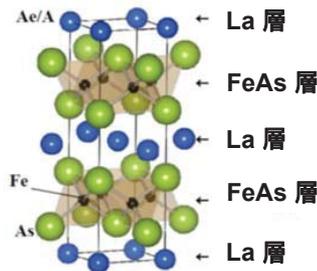
H30年度成果

(Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>



- 2008年ミュンヘン工科大学で発見
- 結晶構造が単純で比較的作製容易  
最も応用開発が進む
- Baを一部Kで置換することで超伝導  
発現
- 超伝導転移温度(T<sub>c</sub>)はK濃度に依  
存し、x = 0.4で最高38K  
(濃度ゆらぎによる特性ゆらぎ)

LaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>: La122

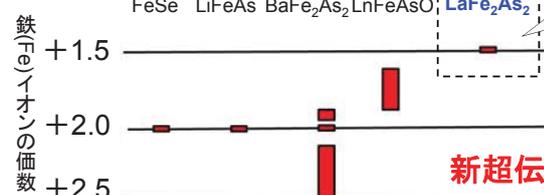
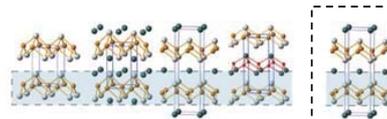


➢ 2018年産総研で発見

J. Phys. Chem. Lett. (2019), 10, 1018-1023

➢ 転移温度 T<sub>c</sub> = 12 K, 臨界磁場 H<sub>c2</sub> ~ 12 T

➢ Feイオンの価数が+1.5価(電子のオー  
バードーピング)で超伝導となる初めての物  
質



Fe<sup>+1.5</sup>化合物で  
新超伝導体発  
見の可能性が  
出てきた

新超伝導探索の範囲の拡大

## 第4期中長期計画中的実績と成果まとめ

3つの開発指針の基での超伝導材料開発を遂行し、特筆すべき成果として以下の結果を得た。

- **コンビナトリアルケミストリー**法を超伝導体探索に適用し、特徴的な結晶構造を有する $Mg_2Rh_3P$ をはじめとする複数の**新超伝導体**を発見した。
- $CaKFe_4As_4$ をはじめとする新構造・新組成の鉄系超伝導体を発見した。これらの物質は**既知の鉄系超伝導体を凌ぐ応用ポテンシャル**を有することを実証した。

### 成果エビデンス

- ◆ 誌上发表 : 78件、工業所有権: 3件
- ◆ 公的資金 : JSPS科研費 新学術領域研究、基盤 (A),(B)、JSPS二国間交流事業 等
- ◆ 民間資金 : (株)イムラ材料開発研究所
- ◆ 受賞 : 低温工学・超電導学会 優良発表賞 (2016)、超伝導科学技術賞 (2017, 2019)、日本応用物理学会 講演奨励賞 (2018)、Highly Cited Researcher (2015-2018) 等

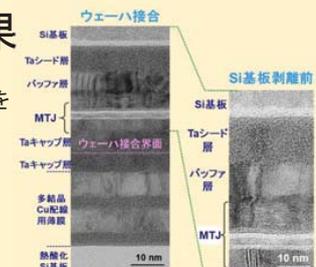
## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

### 第4期中長期期間中の代表的成果

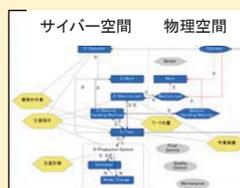
#### 発表トピック

- STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発  
→ 「①スピントロニクス技術による次世代不揮発性メモリMRAMの開発」で紹介
- 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  
→ 「②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(デジタルツイン)とプロセスセンシング技術の開発  
→ 「③製造網コンセプト:スマート製造モデル化+プロセスセンシング」で紹介
- IoTデバイス用全固体電池の開発  
→ 「橋渡し」研究後期で紹介
- MEMSセンサネットワークの開発  
→ 「橋渡し」研究後期で紹介

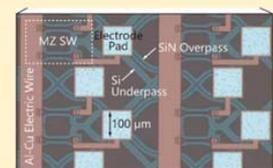
- 単結晶MTJ素子をSTT-MRAMに集積化



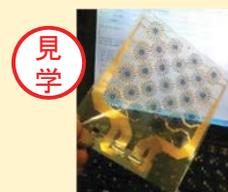
- 製造網コンセプト



- オンチップ偏波ダイバーシティ32×32スイッチ

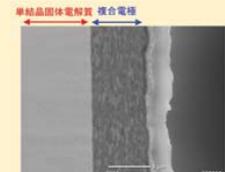


- 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム



見学

- 電解質・正極の複合層の開発



## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

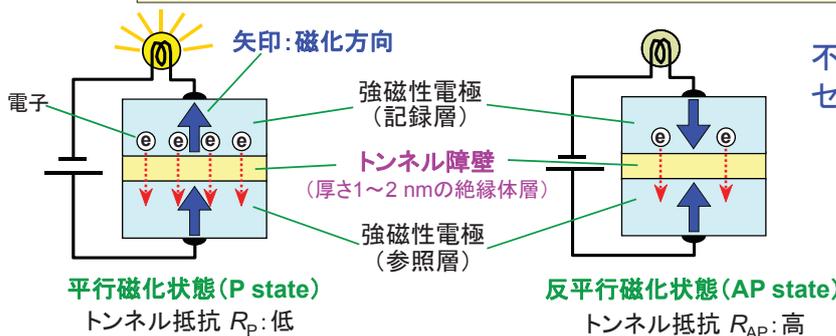
# ①スピントロニクス技術による 次世代不揮発性メモリMRAMの開発

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

※ 関連する「目的基礎研究」の成果も合わせて紹介

## 用語説明

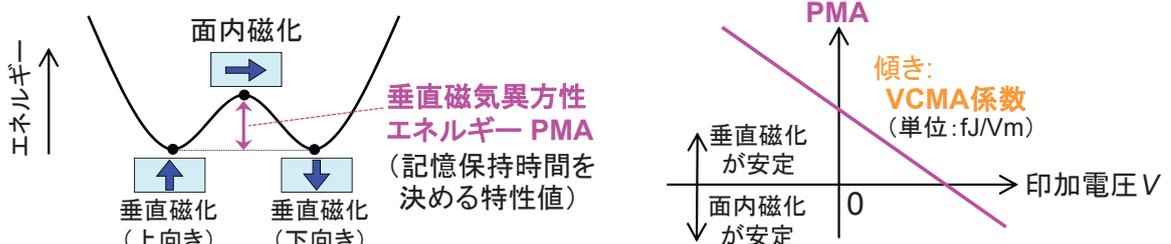
磁気トンネル接合素子 (Magnetic Tunnel Junction: **MTJ**素子)  
トンネル磁気抵抗効果 (Tunnel Magneto-Resistance: **TMR**効果)

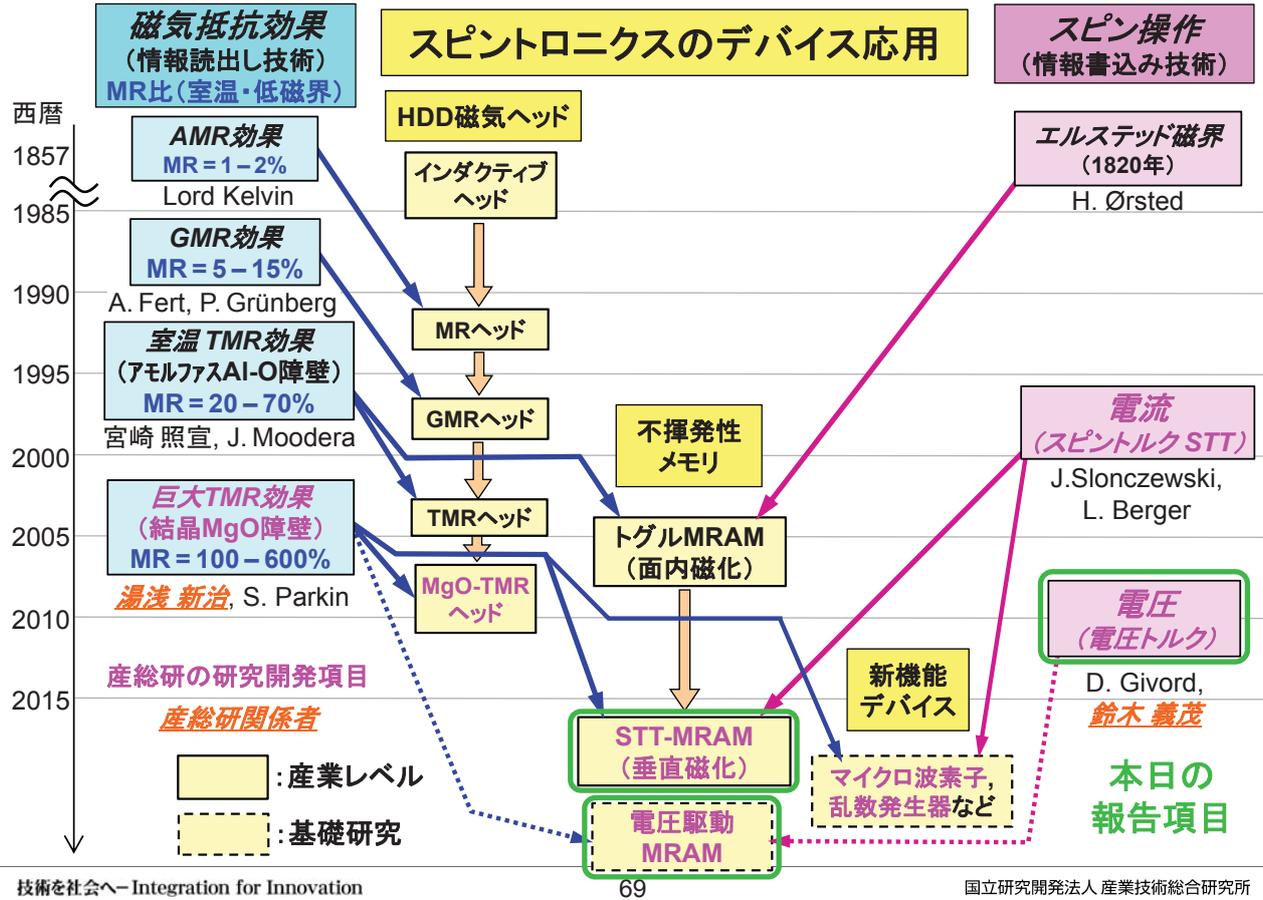


不揮発メモリMRAMや磁気センサーなどの中核技術

<TMR効果の大きさ>  
 $MR比 \equiv (R_{AP} - R_P) / R_P \times 100 (\%)$

垂直磁気異方性エネルギー (Perpendicular Magnetic Anisotropy: **PMA**)  
電圧による磁気異方性制御 (Voltage Control of Magnetic Anisotropy: **VCMA**)





### 発表内容

- ➡ STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発(「橋渡し」研究前期)
- 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発(目的基礎研究)

# 東京エレクトロン(TEL)-産総研連携研究室(冠ラボ)を設立

産総研 スピントロニクス研究センター



2017年5月  
産総研スピントロニクス  
研究センター内に設立

↓7名参加

## TEL-産総研 連携研究室

- ◆ 300 mmウェーハを用いた次世代MRAMの生産技術の開発
- ◆ 超高集積MRAMのための新材料・新プロセスの開発



300 mm  
後工程プロセス



6名出向

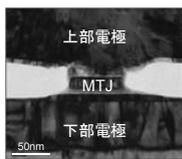
産総研スーパークリーンルーム(TIA-SCR)

東京エレクトロン事業部

## TEL-産総研連携研究室の研究開発の一例

H30年度成果

MTJ素子  
( $< 80 \text{ nm}$ )



断面構造

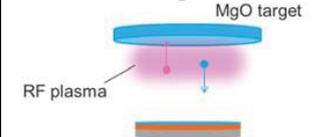


TIA-SCRのArF液浸露光を用いて  
300mmウェーハ上に素子を作製

MgOトンネル障壁層の形成法

MgO直接形成(従来技術)

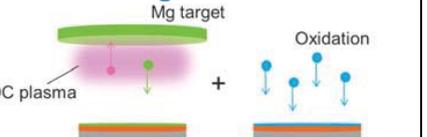
RFスパッタ(MgOターゲット)



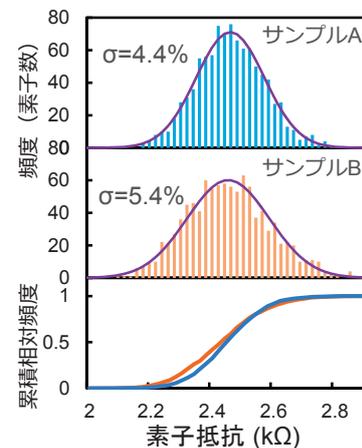
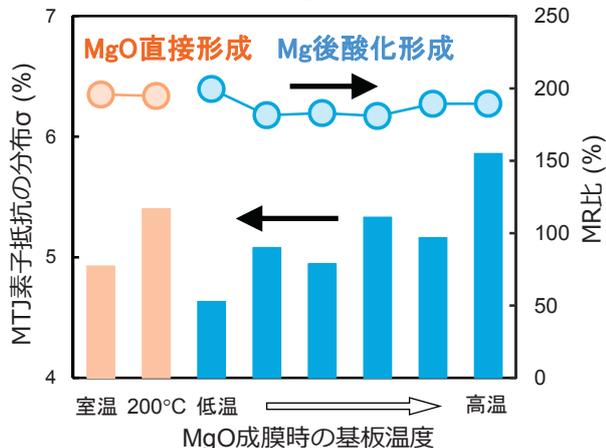
- ・酸化物ターゲット  
⇒パーティクル汚染:多
- ・シンプル成膜(膜質制御性:小)

Mg酸化形成(新規開発技術)

DCスパッタ(Mgターゲット)+ 後酸化

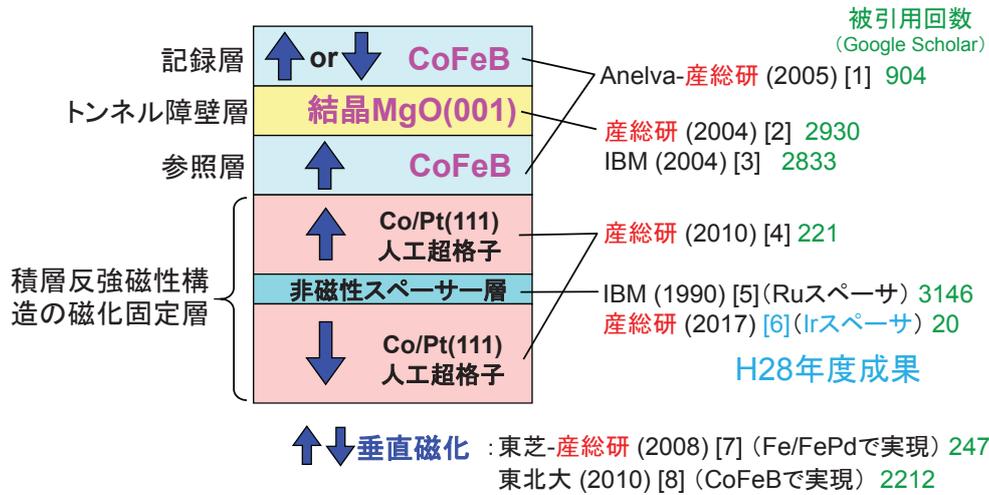


- ・金属ターゲット⇒パーティクル汚染:少
- ・成膜プロセス:やや複雑  
⇒加熱、酸化方法等でMgO膜質制御可能



素子特性とその分布  
(~10kbit)のプロセス  
条件依存性を詳細に  
評価

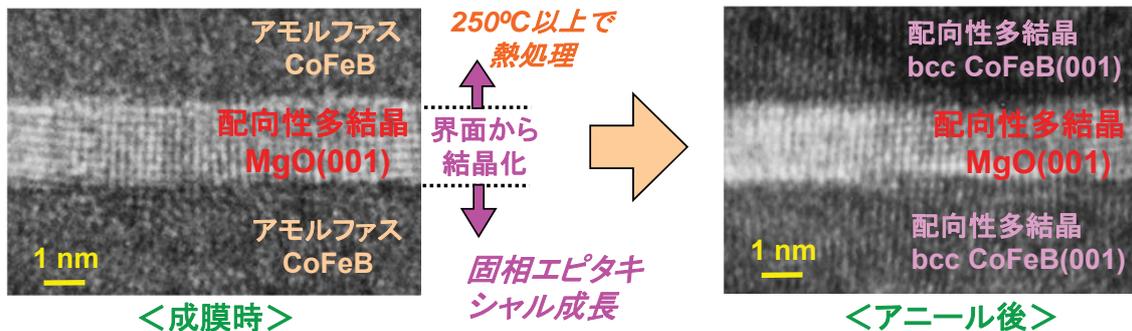
## STT-MRAM用MTJ素子の実用構造(現在)



- [1] Djayaprawira *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 092502 (2005). [2] Yuasa *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).  
 [3] Parkin *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004). [4] Yakushiji *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 232508 (2010).  
 [5] Parkin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990). [6] Yakushiji *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 092406 (2017).  
 [7] Kishi *et al.*, *IEDM Tech. Dig.* 12.6 (2008). [8] Ikeda *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 721 (2010).

STT-MRAM(垂直磁化)でも HDD磁気ヘッド(面内磁化)でも、  
CoFeB/MgO/CoFeB構造が世界標準となっている

## CoFeB/MgO/CoFeBの利点と課題、新材料の必要性



- ◆どんな下地層の上にも室温スパッタ成膜(量産技術)で作製でき、優れた性能を示す
- ◆ただし、極めて特殊な作製法のため、新材料の導入が困難。材料選択の足かせでもある

将来的に10 nm世代のSTT-MRAMなどの次世代デバイスを実現するには、高MR比(>300%)、高PMA、適切な $\alpha$ 、低 $M_s$ などの諸特性を高いレベルで両立できる新材料の開発が必要

今後の発展が期待されるスピネル系トンネル障壁やホイスラー合金などの新材料MTJ素子は、エピタキシャル(単結晶)素子でないと性能がでない

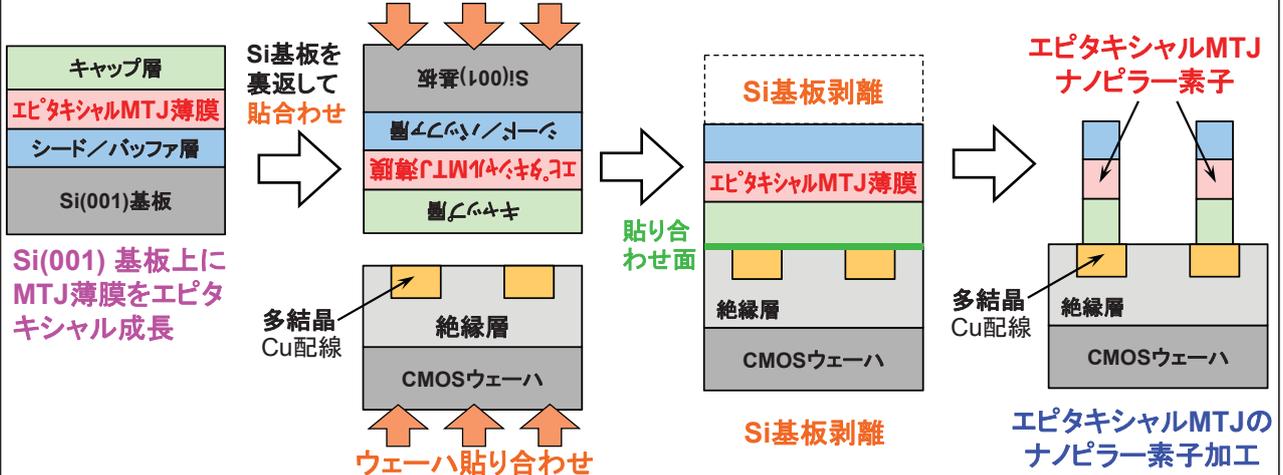
## エピタキシャルMTJ素子の3次元積層プロセスの開発

### (1) 新材料系MTJ薄膜を Si(001) 基板上にエピタキシャル成長

エピタキシャル成長を活用して、トンネル障壁と強磁性電極に新材料を導入する

### (2) ウェーハ貼り合わせ/Si剥離プロセスを用いたエピタキシャル素子の集積化

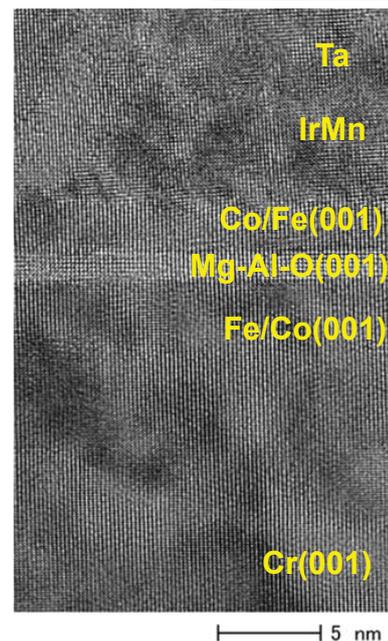
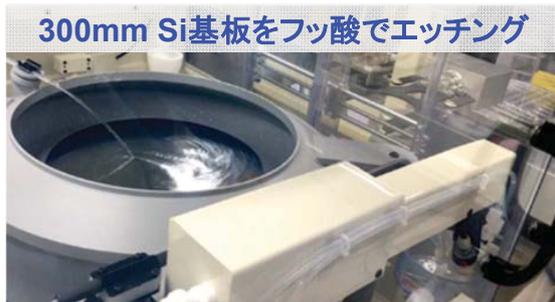
エピタキシャルMTJナノピラー素子をLSI上に集積。多層化も可能



<課題> ・厚さが1 nmしかない極めてデリケートなトンネル障壁は、3次元積層プロセスにより劣化する(壊れる)可能性が大きい。トンネル素子での実績は皆無  
 ・大径Siウェーハ上へのMTJエピタキシャル成長の実績も皆無

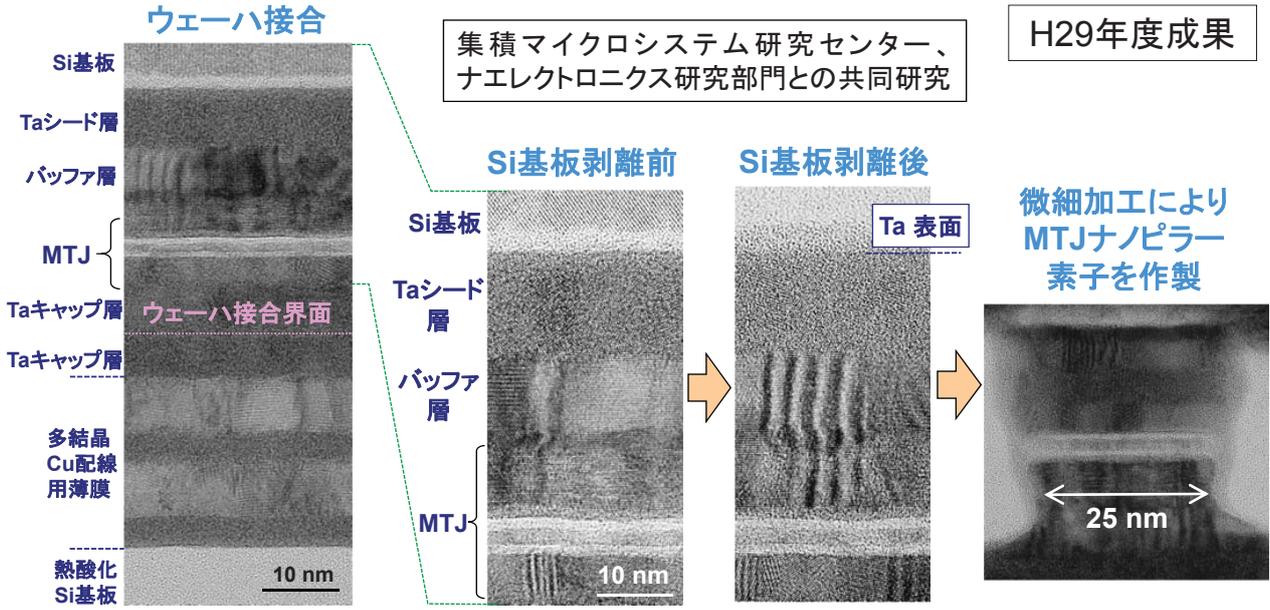
## 300mm Siウェーハ上のMTJ薄膜のエピタキシャル成長

H30年度成果



新材料のスピネルMg-Al-Oトンネル障壁を用いた全エピタキシャルMTJ薄膜を作製

## STT-MRAM用の多結晶MTJ素子の3次元積層



集積マイクロシステム研究センター、  
ナエレクトロニクス研究部門との共同研究

H29年度成果

TEM像では接合界面が確認  
できないほど良好な貼り合わせ

K. Yakushiji et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 063002 (2017).

- ◆3次元積層プロセスによるMTJ素子の特性劣化は皆無
- ◆トンネル素子の3次元積層は世界初。今後、様々な波及効果が期待できる

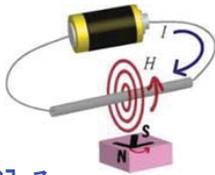
## 発表内容

- STT-MRAMの生産プロセスおよび3次元集積プロセスの開発(「橋渡し」研究前期)
- ➡ 電圧書き込み型MRAMの基盤技術開発(目的基礎研究)

## スピン操作技術の変遷と電圧書き込みの狙い

### エルステッド磁界

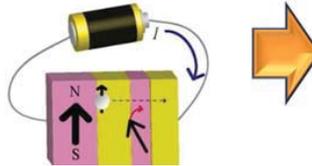
1820年: Ørsted



1ビット書き込みの消費電力  $\sim 100$  pJ

### 電流(STT書き込み)

1996年: Slonczewski, Berger



$\sim 100$  fJ

### 電圧

電圧書き込み型の  
“電圧トルクMRAM”

$\sim 1$  fJ が可能

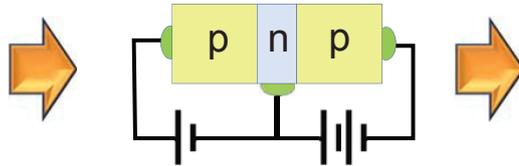


エレクトロニクス分野との対比

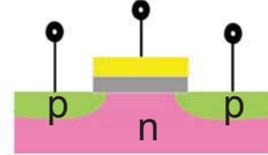
真空管



バイポーラトランジスタ

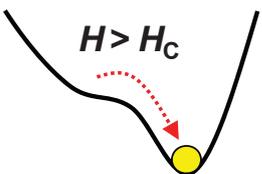
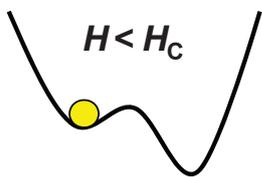
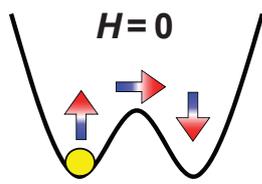


FET (CMOS)



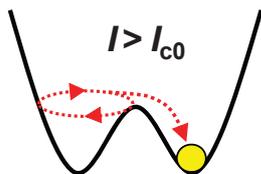
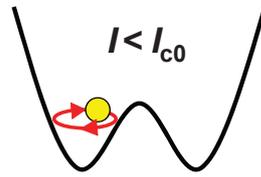
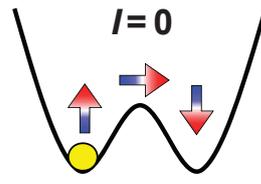
## 不揮発性メモリMRAMの書き換え原理と特徴

### トグルMRAM



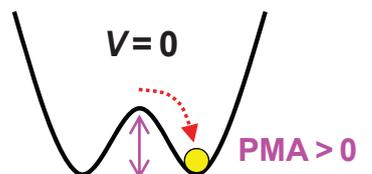
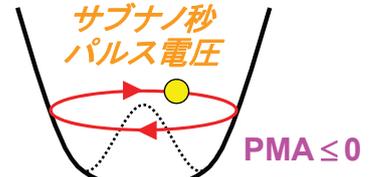
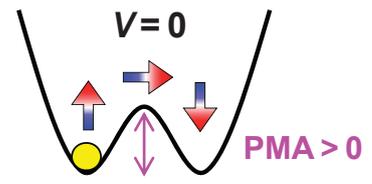
- ⊗ エネルギー損失が特大
- ☺ 産業レベル

### STT-MRAM



- ☹ ジュール損失が不可避
- ☺ ほぼ産業レベル

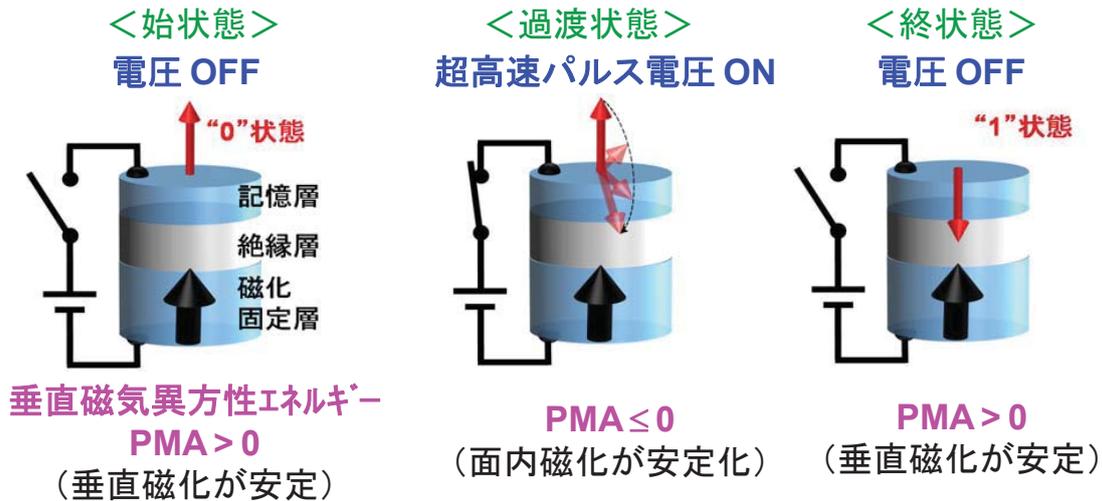
### 電圧トルクMRAM



- ☺ ジュール損失が少ない
- ⊗ 基礎研究レベル

## 電圧書き込み技術の課題

- 書き込みエラー率 (Write Error Rate: WER) が高い  
(従来は、WERの詳細な評価さえ行われていなかった)
- 応用に必要な諸特性(大きなMR比、PMA、VCMA)の両立が未達



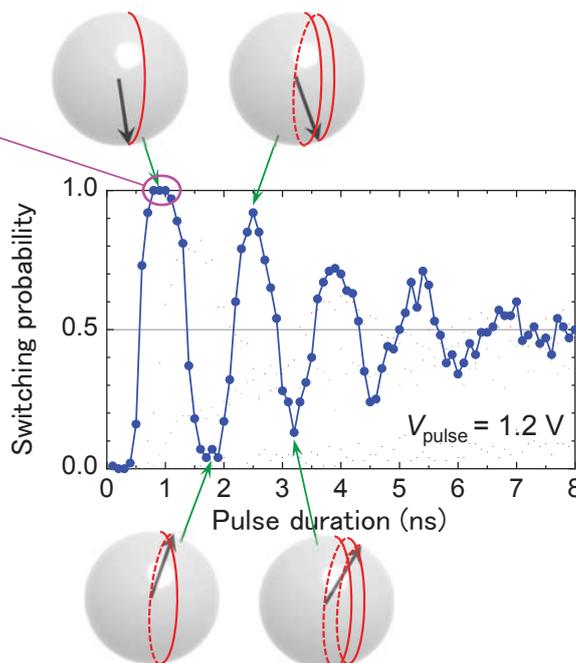
## 電圧書き込みエラー率WERの評価と低減に成功

Y. Shiota et al., *Appl. Phys. Express* **9**, 013001 (2016).

Y. Shiota et al., *Appl. Phys. Lett.* **111**, 022408 (2017).

H27-29年度成果

書き込みエラー率  
 $WER = 10^{-3} - 10^{-5}$   
 を実現



書き込みエラー率WER  
 のパルス幅依存性

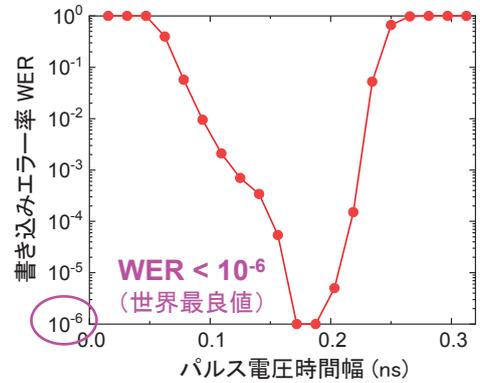
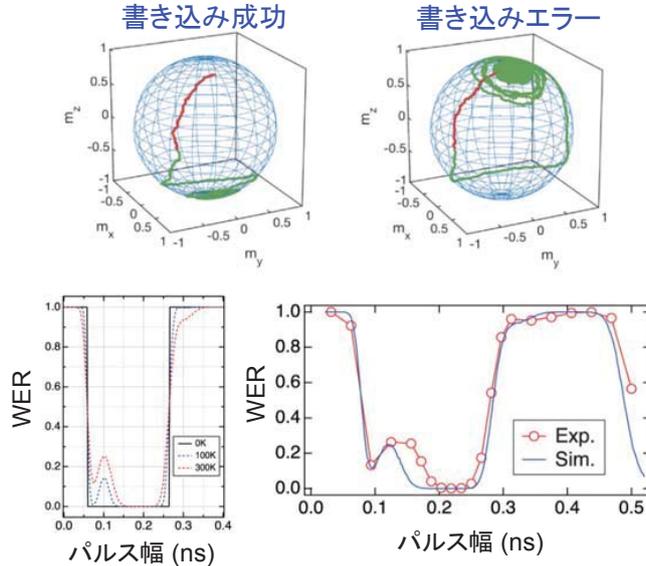
## 電圧書き込みエラー率WER < 10<sup>-6</sup>を達成

T. Yamamoto et al., Phys. Rev. Appl. 10, 024004 (2018).

T. Yamamoto et al., Phys. Rev. Appl. 11, 014013 (2019).

T. Yamamoto et al., J. Phys. D 52, 164001 (2019).

H30年度成果



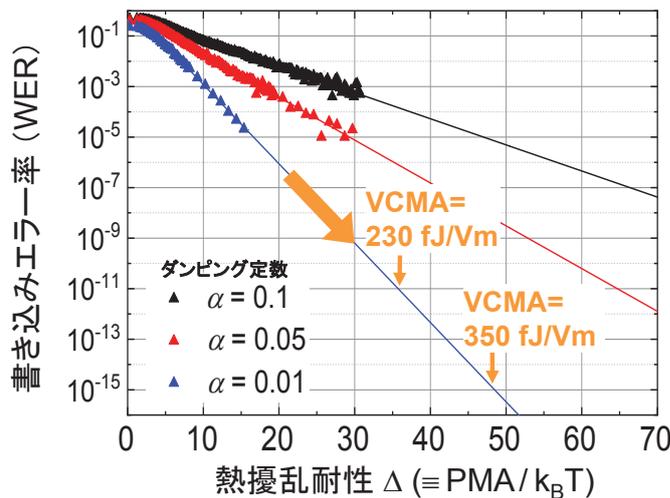
### 最新の実験結果

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した結果

### 磁化反転ダイナミクスのシミュレーション結果

熱揺らぎの影響を受けやすい特定の軌道があることを発見

## 電圧書き込みエラー率WERのさらなる低減のための指針



### シミュレーション結果

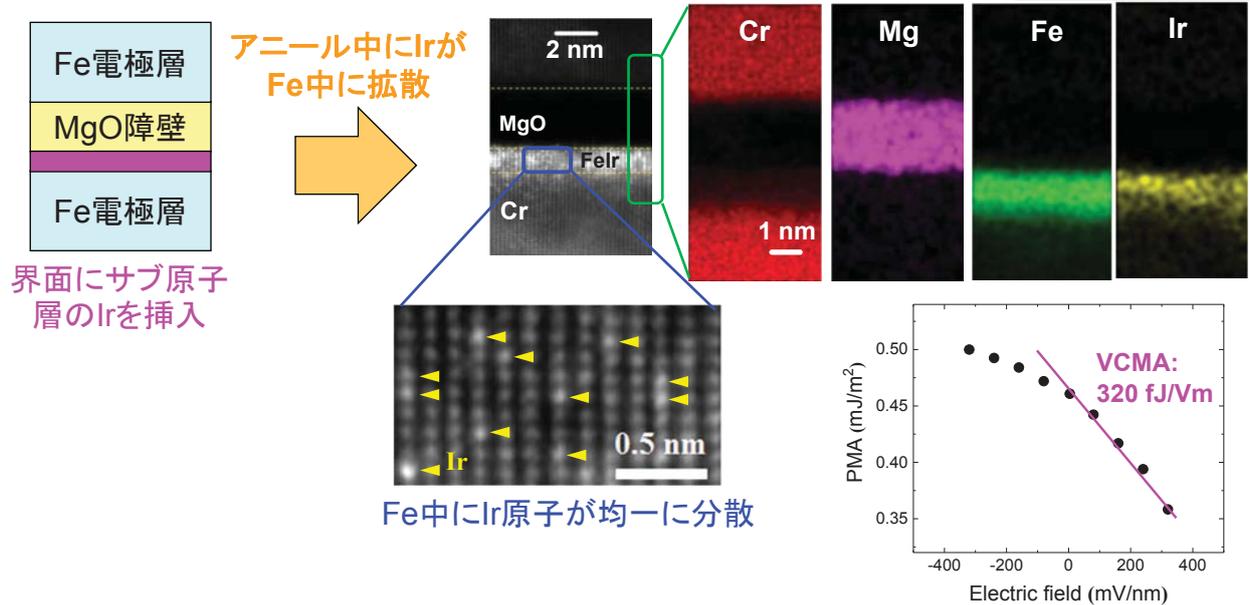
#### <WERを低減するためのキーポイント>

- ・ 記録層のダンピング定数 $\alpha$ を下げる
- ・ MTJの熱擾乱耐性 $\Delta$ ( $\propto$ PMA)を増大させる
- ・  $\Delta$ の増大だけなら比較的容易だが、VCMAも同時に増大させないと書き込めなくなる
- ・ つまり、**VCMAの増大(300 fJ/Vm 級)が鍵**

# 大きなVCMAを示すIr希薄ドーパFe合金の合成に偶然成功

T. Nozaki et al., *NPG Asia Materials* 9, e451 (2017).

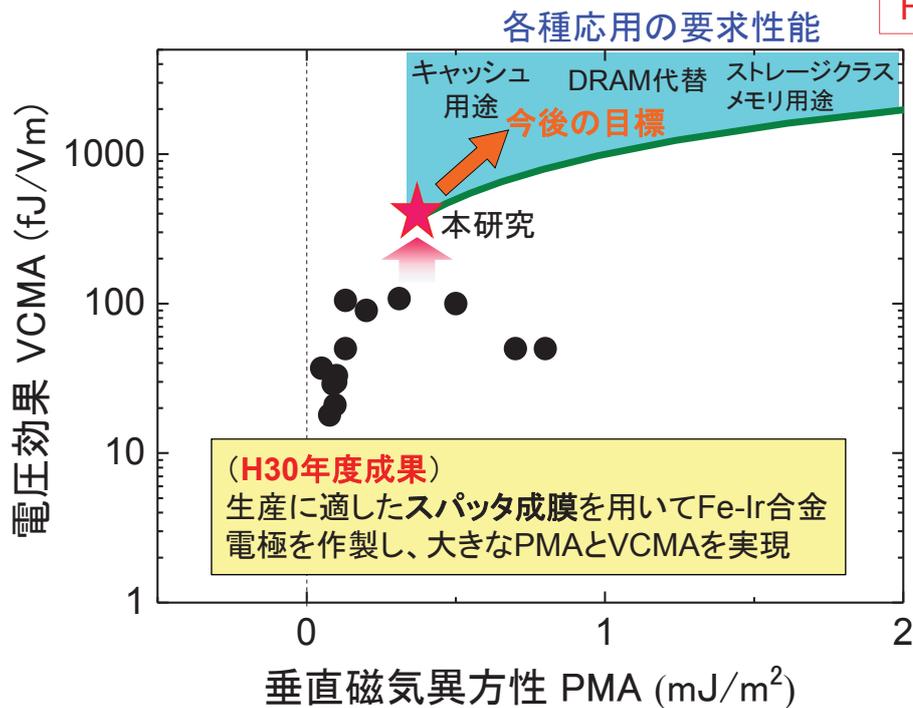
H29年度成果



- ・VCMA = 320 fJ/Vmは、高速応答性を示すMTJ素子では世界最高値
- ・界面のIr濃度が低いため、MR比の低下を最小限に抑えられる。量産可能な材料

# MRAM応用の(最低限の)要求性能を初めて達成

H30年度成果



## まとめ

### (STT-MRAM)

- ・TEL-産総研連携研究室を設立し、TIA-SCRを活用した300mmプロセス開発を開始 (H29-30年度)
- ・300mmウェーハ上へのエピタキシャルMTJ素子の作製と3次元積層(世界初)(H30年度)

### (電圧トルクMRAM)

- ・書き込みエラー率WER <  $10^{-6}$  を達成(世界最良値)(H30年度)
- ・Fe-Ir合金電極を合成し、電圧効果VCMA > 300 fJ/Vmを達成(世界最高値)(H29年度)

### (その他と研究開発項目)

- ・スピントルク発振素子STOの実用化の鍵となる位相同期回路(PLL)を開発(H27年度)
- ・STO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を考案し、音声認識に成功(H29-30年度)

### <第4期の代表的な成果エビデンス>

- ・Nature・Nature姉妹誌に7報の論文を掲載  
(Nature × 2, Nature Nanotech., Nature Electronics, Nature Comm. × 3)
- ・文部科学大臣 科学技術賞、市村学術賞、丸文学術賞、つくば奨励賞などを受賞
- ・純民間資金 1億2700万円を獲得(H30年度)。職員一人当たり約600万円

## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

# ②「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」

電子光技術研究部門

副研究部門長

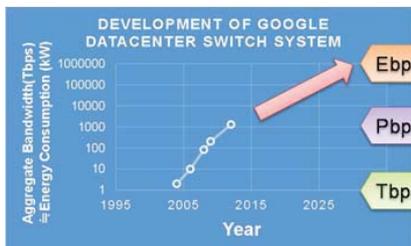
並木 周

## 電子光技術研究部門 光情報課題 ミッション

- デバイスからアプリケーションまでを見据え、ポストムーア時代を支えるフォトニクス技術を創出する
- ポストムーア時代の情報通信産業を持続発展可能とするエコシステム構築に貢献する

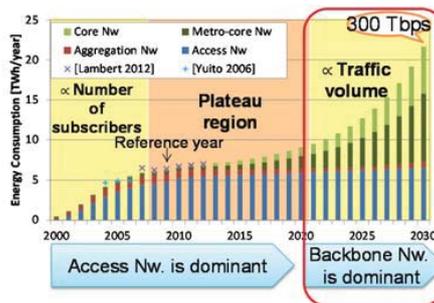
## ポストムーア時代の幕開け： 情報インフラを支える電気スイッチは間もなく破たんする

- Google Data Center
  - 2030年にはエクサスケール
  - **10Tbps x 100,000 nodes**
  - スイッチのエネルギー効率nJ/bitの大幅な改善は期待できない
- 公衆網:産総研 石井らによるネットワーク消費エネルギー予想(2015)
  - ネットワーク構成に大きな無駄
  - やがてエネルギーは**情報量に比例して増大**
  - ルータ(電気スイッチ)のエネルギーが突出

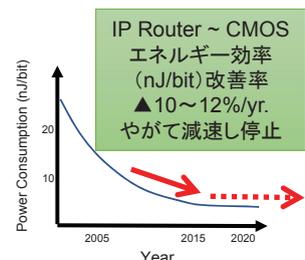


<http://www.theplatform.net/2015/06/19/inside-a-decade-of-google-homegrown-datacenter-networks/>

1 nJ/bit × 1 Ebps = 1 GW  
一つのデータセンターに原子炉1基

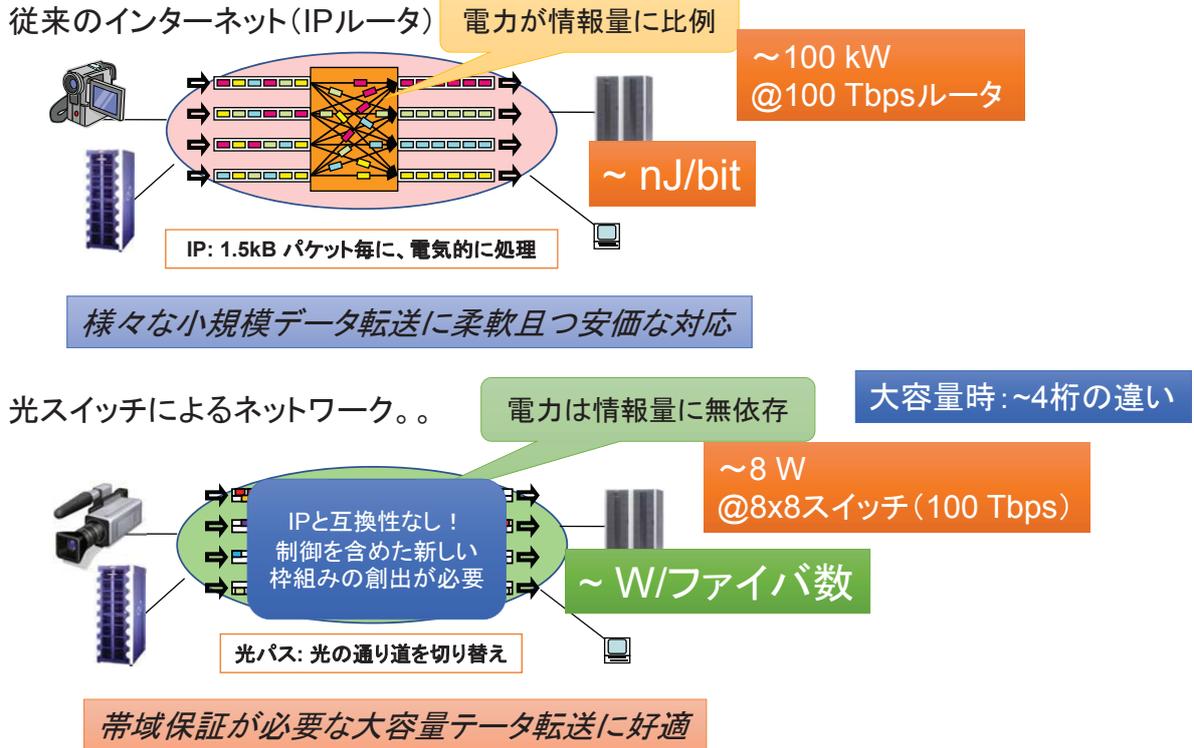


K. Ishii, et al., J. Lightwave Technol. 33, 21, 4395-4405 (2015).

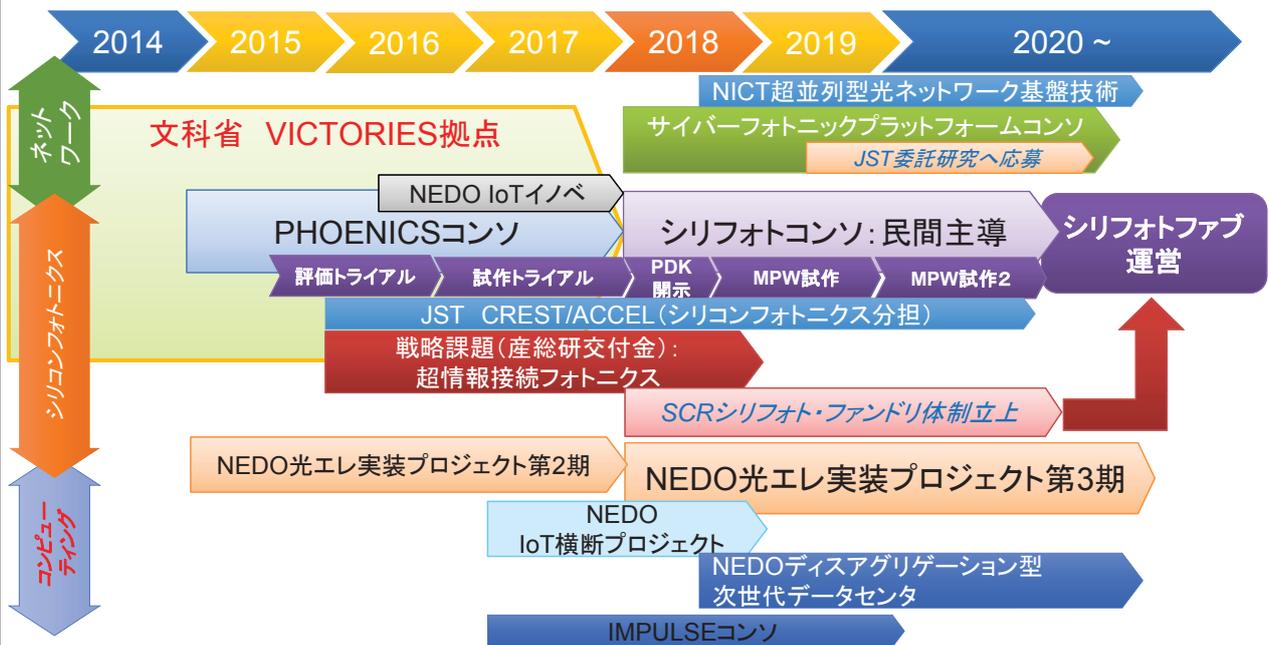


C. Lange, et al., IEEE JSTQE, vol. 17, no.2, pp. 285-295, 2011

### 消費エネルギーが、データ量と共に増大しない光スイッチに着目



### 電子光技術研究部門 光情報課題 研究ロードマップ



## 報告内容

- シリコンフォトニクス光スイッチの開発
- 光レイヤーのディスアグリゲーションの提案

## 様々な光スイッチ技術

### Space optics MEMS or Piezoelectric beam-steering



<http://www.glimmerglass.com/>



<http://www.polatis.com/index.asp>

- ☺ Port count: ~ 384x384
- ☹ Physical size: can be large
- ☺ Low insertion loss and crosstalk
- ☹ Switching speed: 10 ms ~

### AWG router



K. Ueda, et al., OFC2015, W3D.1

- ☺ Port count: ~ 2000x2000
- ☹ Tunable laser required
- ☺ Tradeoff between the port count and the per port bandwidth

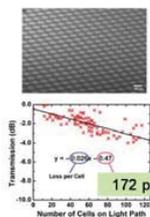
### WSS



<https://jp.finisar.com/>

- LCOS or MEMS
- ☺ Port count: ~ 1x20
- ☹ Switching speed: 10s ~ 100s ms
- ☺ Insertion loss: ~6dB
- ☺ Wavelength routing

### MEMS + Si-ph.



T. J. Seok, et al., Optica, 3, 64-70, 2016.

- ☺ Port count: ~ 64x64
- ☺ Physical size: very small
- ☺ Insertion loss, crosstalk, and PDL
- ☺ Switching speed: < us
- ☹ Packaging: Yet unknown..

### Silicon Photonics



K. Tanizawa, et al., OFC2015, M2B.5

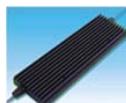
- ☺ Port count: ~ 32x32
- ☺ Physical size: can be very small
- ☹ Insertion loss, crosstalk, and PDL
- ☺ Switching speed: ns ~ 30 us
- ☺ Packaging: Very good

### Fast switch

InP, PLZT, SOA, LN, DLP WSS...

- ☹ Some are yet very research stage...
- ☺ Switching speed: 10 ns ~
- ☹ Port count: ~ 4x4
- ☹ Insertion loss, crosstalk, and PDL

### PLC



<http://www.ntt-electronics.com/index.htm>

- ☹ Port count: < 32x32
- ☹ Physical size: Large
- ☹ Insertion loss, crosstalk, and PDL
- ☹ Switching speed: > 10 ms
- ☺ Packaging: Very good

## 産総研におけるPILOSSスイッチ開発の進展



スポット電子ビーム  
(内製プロセス)

8x8  
Heater Driving Cable  
Optical Fiber Array  
Si Chip  
10 mm  
2013

4x4  
2012

液浸ArFリソグラフィ  
(CMOSパイロットライン：産総研SCR)

32x32

2015

偏波ダイバーシティ広帯域8x8

2017

偏波ダイバーシティ4x4

2016

低損失32x32

Si Chip  
LGA 2112 Socket  
5 mm  
2018

SOA集積4x4

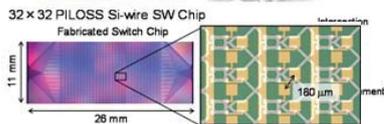
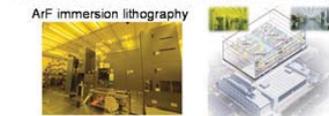
4ch SOA  
4 x 4 silicon photonic switch  
2018

## 32x32スイッチブレードの完全動作に成功

～H29年度成果

- Compact, fast, and low energy 32x32 strictly non-blocking Switches

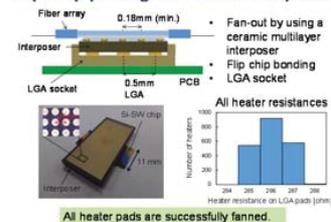
Advanced CMOS process facilities (TIA-SCR in AIST)



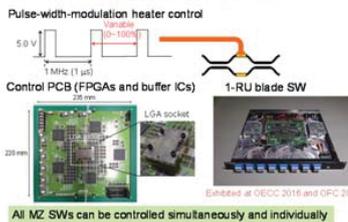
(K. Suzuki, *et al.*, OFC 2018, PDP.)

Total power consumption < 2 W

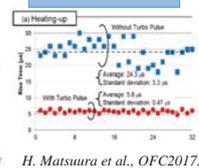
Flip-chip package with LGA interposer



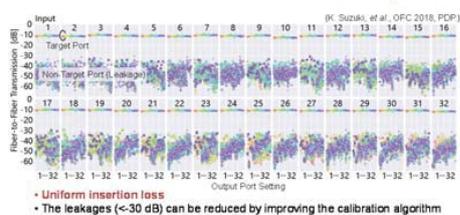
PWM heater control circuit



Switching time ~ 5 usec



Fiber-to-Fiber Insertion Loss of All Paths and Leakages



## 性能改善活動(主に平成29-30年度)

### H29年度成果

1. チップの損失・クロストーク改善
2. ファイバとの接続損失改善

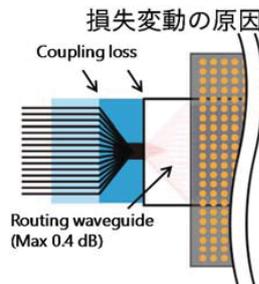
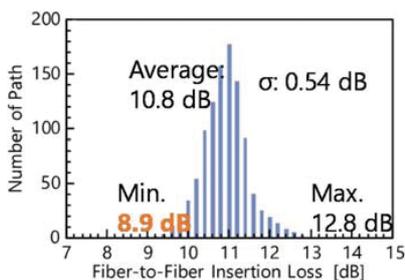
### H30年度成果

3. 偏波ダイバーシティ・クロストーク評価
4. 半導体光増幅器(SOA)のハイブリッド集積

## 挿入損失の分布と他技術との比較



### H30年度成果



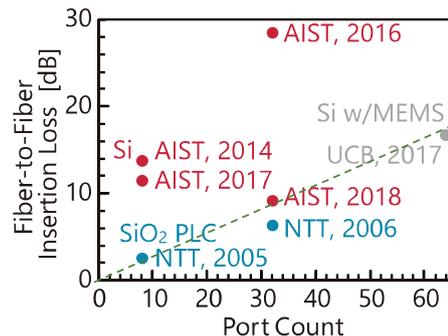
最小損失の内訳

SMF/Si	Routing WG	MZ Switches	Intersections	Routing WG	Si/SMF	Fiber-to-Fiber
1.4 dB	0.70 dB	0.13 dB × 32 ≈ 4.0 dB	0.024 dB × 31 = 0.74 dB	0.63 dB	1.4 dB	8.9 dB

On-Chip: 6.1

实用レベルが見えてきた!

挿入損失の比較



Si

AIST, 2014: Opt. Express, 22 (2014) 3887.  
AIST, 2016: OECC 2016, PD2-3.  
AIST, 2017: ECOC 2017, Tu.1.C.2.  
AIST, 2018: JLT, DOI: 10.1109/JLT.2018.2867575.

SiO<sub>2</sub>

NTT, 2005: ECOC 2005, 991.  
NTT, 2006: ECOC 2006, Tu.4.4.3.

Si w/ MEMS

UCB, 2017: OFC 2017 PDP, Th5D.7.

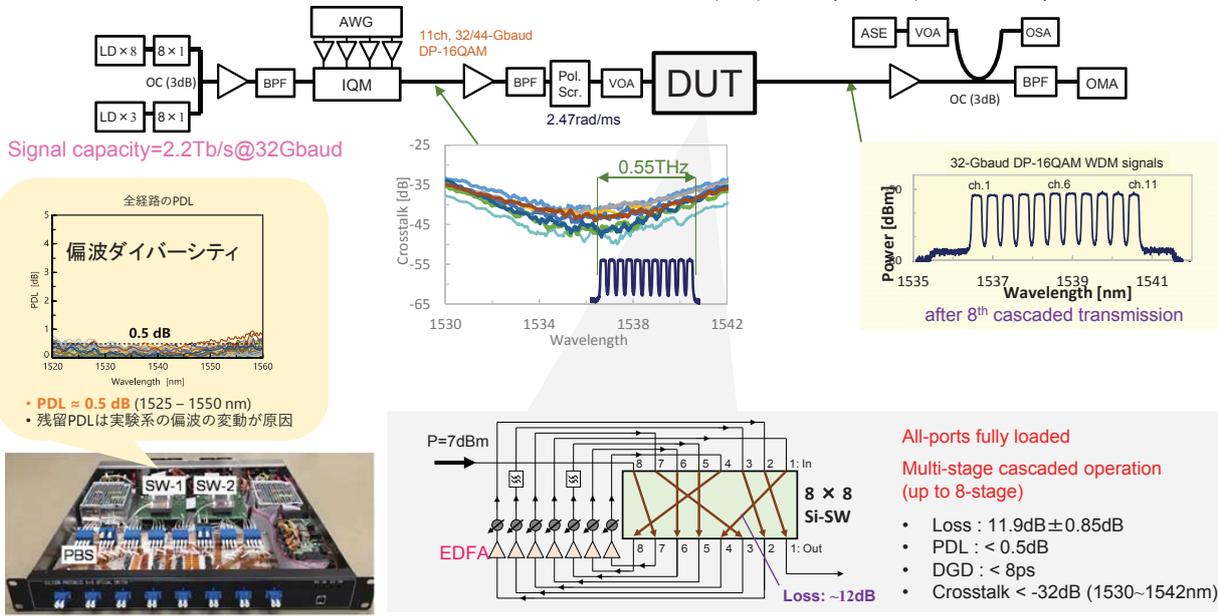
H30年度成果

### 3. クロストーク評価： 偏波ダイバーシティ・フルロード状態での伝送特性評価



T. Kurosu, et al, OFC2018 PDP.

AWG: Arbitrary waveform generator, BPF: Bandpass filter, VOA: Variable optical attenuator  
OSA: Optical spectrum analyzer, OMA: Optical modulation analyzer.

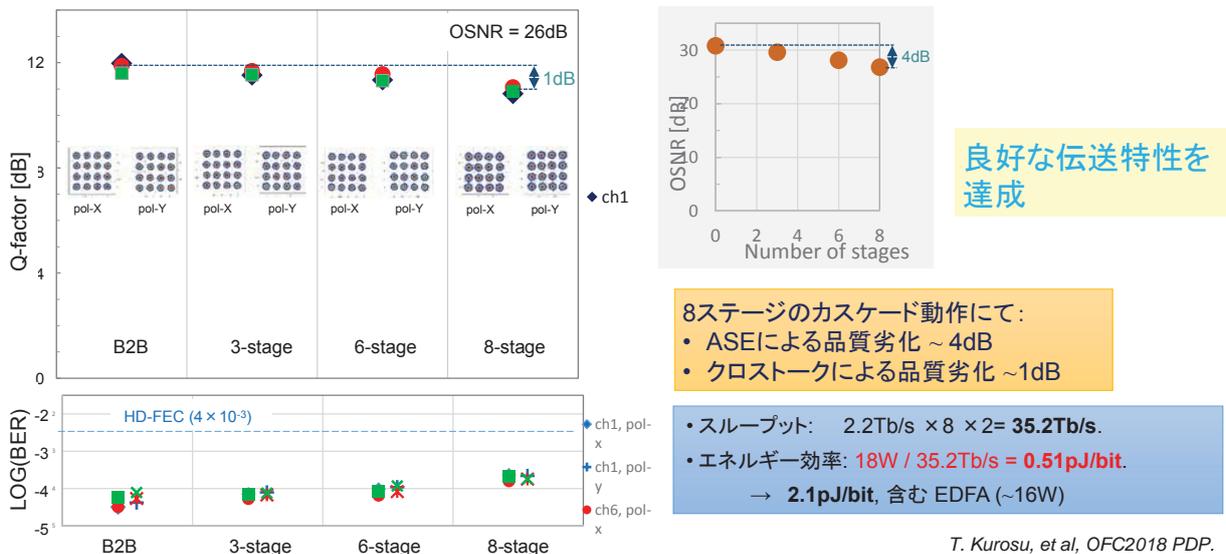


H30年度成果

### 3. クロストーク評価： 偏波ダイバーシティ・フルロード状態での伝送特性評価



スループット35.2Tbps実測定で0.51pJ/bitを達成！

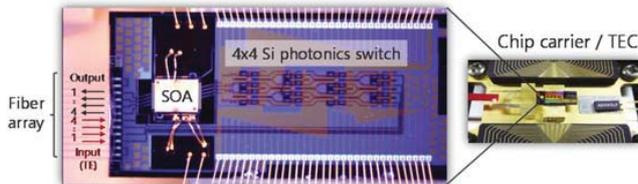


# 4. SOA集積シリコンフォトニクス光スイッチ

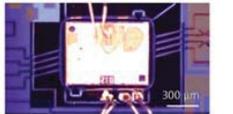


H30年度成果

R. Konoike, et al., "Lossless Operation of SOA-Integrated Silicon Photonics Switch for 8 × 32-Gbaud 16-QAM WDM Signals," OFC2018 PDP Th4B.6.



Flip-chip bonded InP-SOA [1]:



[1] T. Matsumoto, et al., OFC 2018, Tu2A.4.

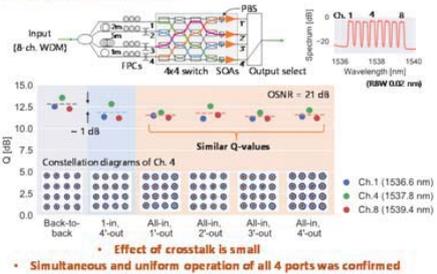
Double-MZI Si PILOSS switch [2]:



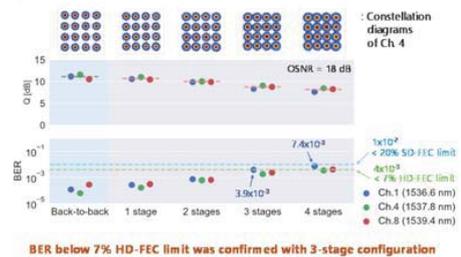
[2] K. Suzuki, et al., Opt. Express 25, 7538 (2017).

(株)富士通研究所との共同研究

Simultaneous all 4-port transmission



Multi-stage transmission



H29-30年度成果

## 主要国際会議での高い評価



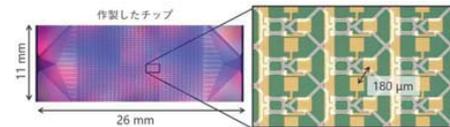
- ・ 拠点最終年度末(2018年3月)、主要国際会議OFCの**最難関**ポストデッドラインペーパーに、**VICTORIES拠点成果が3件採択**された。
  - ・ 世界トップのホットな成果のみが投稿される
  - ・ その中で、採択率が20~30%という難易度
  - ・ 全体約30件の10%を産総研が占めた
  - ・ 国際英文誌Journal of Lightwave Technologyの招待論文へ



Low Insertion Loss and Power Efficient 32 × 32 Silicon Photonics Switch with Extremely-High-Δ PLC Connector

Keijiro Suzuki<sup>1</sup>, Ryojaro Konoike<sup>2</sup>, Junichi Hasegawa<sup>3</sup>, Satoshi Suda<sup>4</sup>, Hiroyuki Matsumura<sup>5</sup>, Kazuhiko Ikeda<sup>6</sup>, Shin Namiki<sup>7</sup> and Hiroshi Kawashima<sup>8</sup>

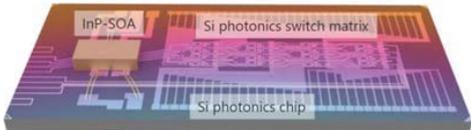
古河電気工業株式会社との共同研究



Lossless Operation of SOA-Integrated Silicon Photonics Switch for 8 × 32-Gbaud 16-QAM WDM Signals

R. Konoike<sup>1</sup>, K. Suzuki<sup>2</sup>, T. Inoue<sup>3</sup>, T. Matsumoto<sup>4</sup>, T. Karahashi<sup>5</sup>, A. Uetake<sup>6</sup>, K. Takabayashi<sup>7</sup>, S. Akiyama<sup>8</sup>, S. Sekiguchi<sup>9</sup>, K. Ikeda<sup>10</sup>, S. Namiki<sup>11</sup>, and H. Kawashima<sup>12</sup>

(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 Kurosu, Takashi Inoue, Keijiro Suzuki, Satoshi Suda, and Shin Namiki



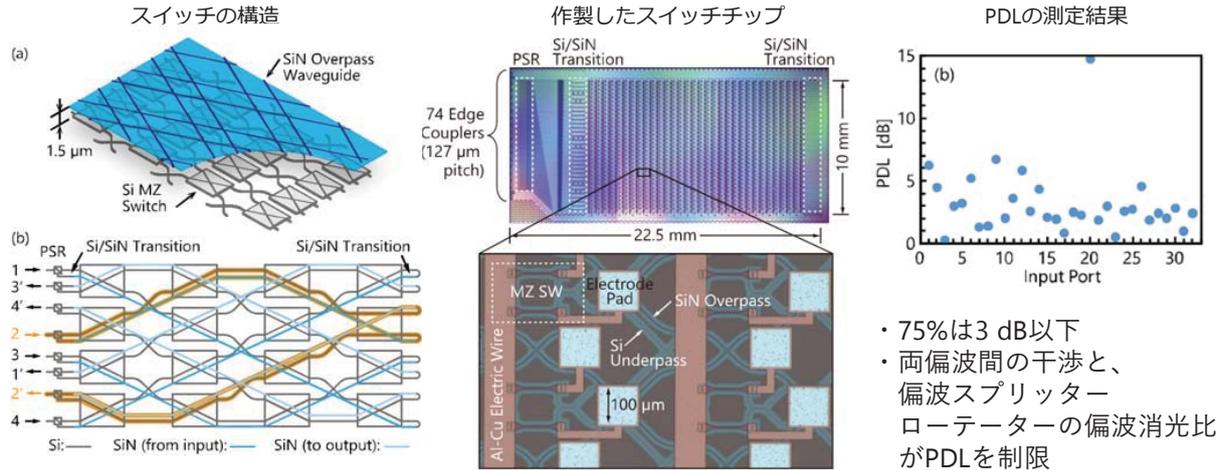
- ・ Dr. M.Glick, MIT/Columbia Univ. (米600億円シリコンフォトニクスプロジェクト「AIM Photonics」)
  - ・ 「VICTORIESは、我々の遙か先を進んでいる。最終成果を3件のOFCポストデッドラインペーパーで締めくくるとのマネジメントカ・リーダシップは称賛に値する。」

# オンチップ偏波ダイバーシティ 32 × 32 スイッチ

H31年度成果見込み

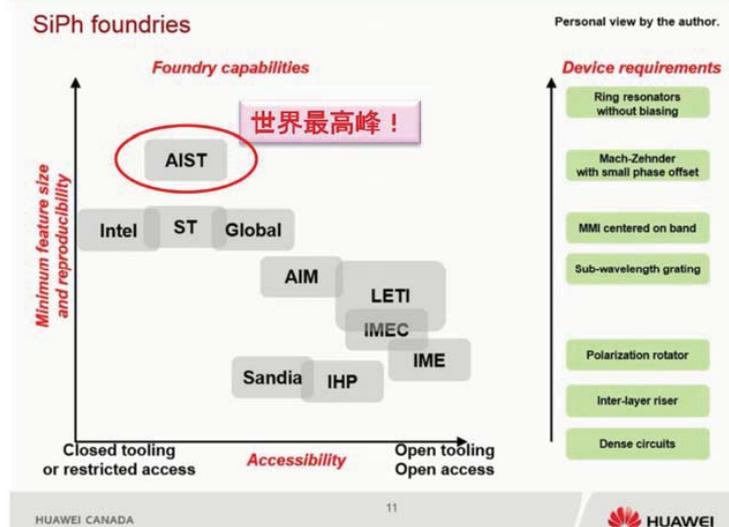
(K. Suzuki, et al., OFC 2019, Th1E.2, TopScored)

- PILOSS スイッチの全てのポートを使用し、1つのPILOSSスイッチで偏波ダイバーシティ化
- Si / SiNの2層構造で、配線を単純化



# 産総研のシリコンフォトニクス: 世界最高峰と評価

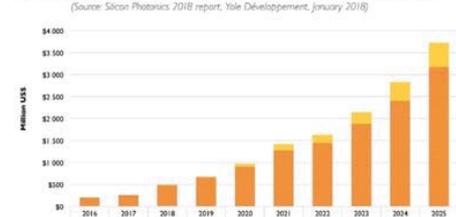
Dominic Goodwill, Senior Principal Engineer at Huawei Canada:  
OFC2017 Symposium M2B2, "Overcoming the Challenges in Large-Scale Integrated Photonics"



シリコンフォトニクス  
市場 急拡大

2025年には、  
4,000億円に成長

silicon photonics transceivers market forecast



R&Dファブ市場規模 ~20億円 (2017) → ~140億円 (2025)

産総研を世界最高のR&Dファブへ

2018年度シリコンフォトニクスコンソーシアム新設

# 報告内容

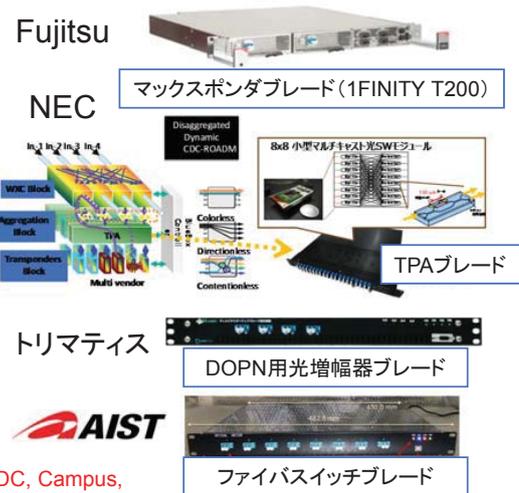
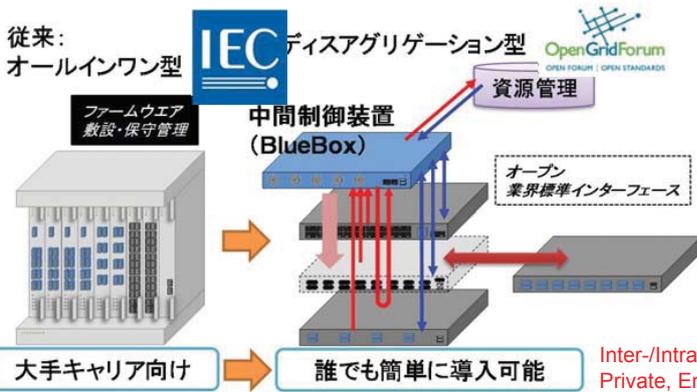
・シリコンフォトニクス光スイッチの開発

・光レイヤーのディスアグリゲーションの提案

## 産総研による光レイヤーのディスアグリゲーションの提案

- ★光ネットワークを「レゴブロック化」
- ★USBデバイスのように「プラグアンドプレイ」できるプラットフォーム
- ★新技術へのマイグレーションパスを提供

VICTORIES標準ブレード制定・製品化



\*仮想化が困難 \*様々な規模・用途からシームレスに拡張可能\*

国際標準化を推進 今後の継続的取り組みが期待される

2018年度サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアム新設



H29年度成果

## ディスアグリゲート・シリコンフォトニクス光スイッチ： 商用フィールド・テストベッドでの長期安定動作実証

- ・ 都内某電話局内の商用フィールドにテストベッドを構築、実運用を実施



### 実学・現場主義を実践

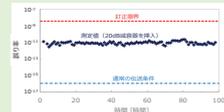


2017年9月にプレス発表



分散制御器  
BlueBox  
光増幅器  
光スイッチ-1  
光スイッチ-2

敷設したディスアグリゲート・  
ノード(左)と  
シリコンフォトニクス・スイッチの  
安定動作(右)



長期安定動作を確認

OFC2018で量子暗号  
伝送を発表  
(玉川大との共著)

この経験によるノウハウを基にベンチャーを起業：



## 商用フィールドテストベッドでのアウトリーチ活動

1. 遠隔医療：8K非圧縮リアルタイム映像を活用
  - ・ メディカルイメージングコンソーシアム／カイロス(株)との連携
2. 「つながる窓」：4Kテレセッションの利用促進・普及
  1. 産業： 製造メーカーの企画・設計・開発間の遠隔CAD・テレオフィス
  2. 教育： 人口減少地における遠隔合同授業
  3. 文化： 劇場間やカラオケ店間の遠隔合奏
  4. IT： VR・ARなどによる、訓練・介護・認知症予防への貢献など
  5. 情報セキュリティ： 量子暗号による高セキュリティ実証

VR/ARによる遠隔存在



教育

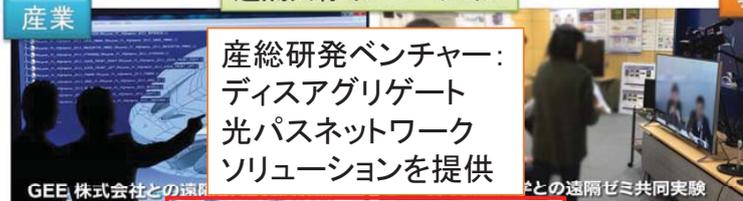
顕微鏡などを活用した遠隔授業デモ(千歳  
科学技術大学、(株)内田洋行との共同)

8K-image assisted surgery



医療

産業



遠隔共存イノベーション

産総研発ベンチャー：  
ディスアグリゲート  
光パスネットワーク  
ソリューションを提供



Musical Tele-Session



文化

4Kテレセッション、株式会社光パスコミュニケーションズ  
www.youtube.com/watch?v=MVlxqG89YIU&t=28s  
プロ奏者との遠隔合奏実験

8K遠隔合奏実験(NHK放送技研との共同)  
www.youtube.com/watch?v=Eh61X3HwMlg

カイロス株式会社との8K内視鏡映像伝送の共同実験

## まとめ

- ・ポストムーア時代のインフラを支える「ダイナミック光パスネットワーク」開発活動について報告した
- ・シリコンフォトニクス光スイッチ開発
  - ・ 35.2Tb/sのスループットをわずか0.51pJ/bitで完全動作に成功し、実用レベルの目途を立てた
  - ・ シリコンフォトニクス製造技術を、世界最高峰にまで高めた
  - ・ シリコンフォトニクス・コンソーシアムを開設し、MPW試作を開始した
- ・ 光レイヤーのディスアグリゲーション提案
  - ・ 標準化の基礎検討を行い、国際会議で動態展示を行った
  - ・ サイバーフォトニックプラットフォームコンソーシアムを開設し、白書を編纂した
- ・ 今後は、
  - ・ 世界最高峰シリコンフォトニクス技術をR&Dファブとして運営できるようにしていく
  - ・ ディスアグリゲーションの標準化を進め、ダイナミック光パスネットワークを普及し、遠隔共存イノベーションを創出していく

## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

### ③「製造網コンセプト:スマート製造モデル化+プロセスセンシング」

製造技術研究部門

研究部門長

市川 直樹

## 製造網(Web of Manufacturing)とは

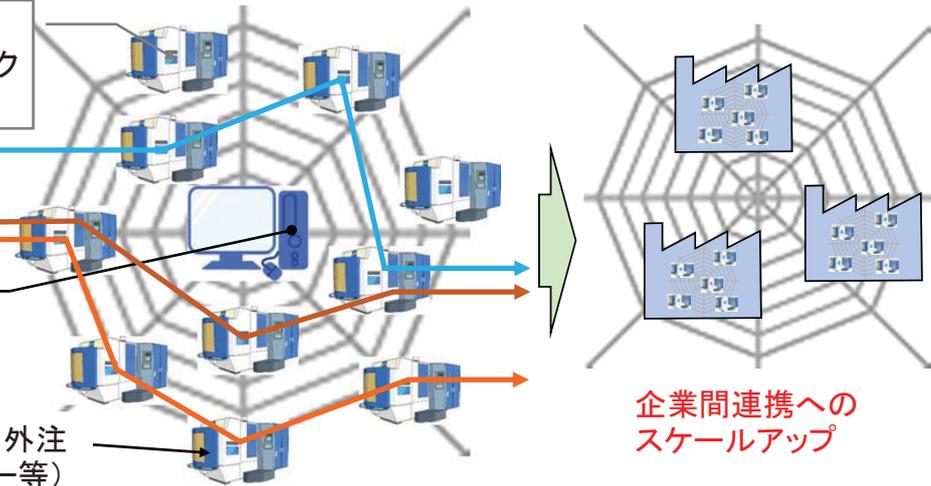
複雑化する製造環境のもと、製造に大きな影響を与える**情報が本質的に不可知あるいは不確実な状況下**において、**間接情報からそれらの情報を導出し、広範囲に分散した製造設備や労働力を柔軟かつ効率的に活用して、製造設備ネットワーク全体として高い付加価値を創出**することを目指す**製造パラダイム**

- ・生産設備ネットワーク
- ・モニタリングネットワーク
- ・搬送ネットワーク

製品、ロット規模、  
設備状況に応じた  
柔軟なライン編成

- ・ライン編成管理
- ・ラインモニタリング
- ・搬送制御

生産設備(工作機械、外注  
業者、クラウドワーカー等)



企業間連携への  
スケールアップ

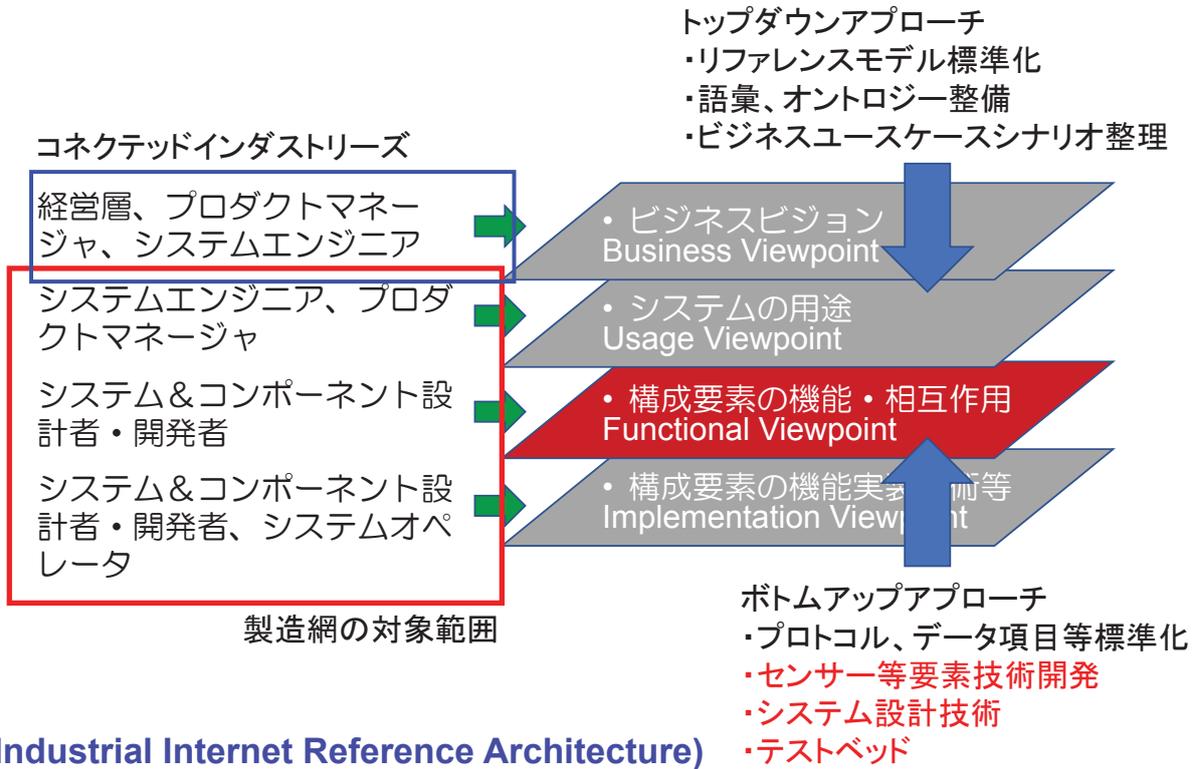
## 製造網の目指すところ

- ・ **生産ラインの多面的な評価と柔軟かつ迅速な再構成**  
生産効率のみならず、メンテナンス性や復旧性など様々な観点から生産ラインを評価するとともに、障害発生／予兆検知時等には利用可能な設備を速やかに同定し、生産ラインを再構成する。
- ・ **スケーラビリティ**  
工場内の工作機械から、外注業者、個人事業者が保有する設備までも、利用可能な生産設備として統合的に取り扱う。生産設備を1つの製造企業、生産ラインをサプライチェーンと置き換えることなどにより、様々な規模の産業活動を同様の枠組で取り扱うことを可能とする。

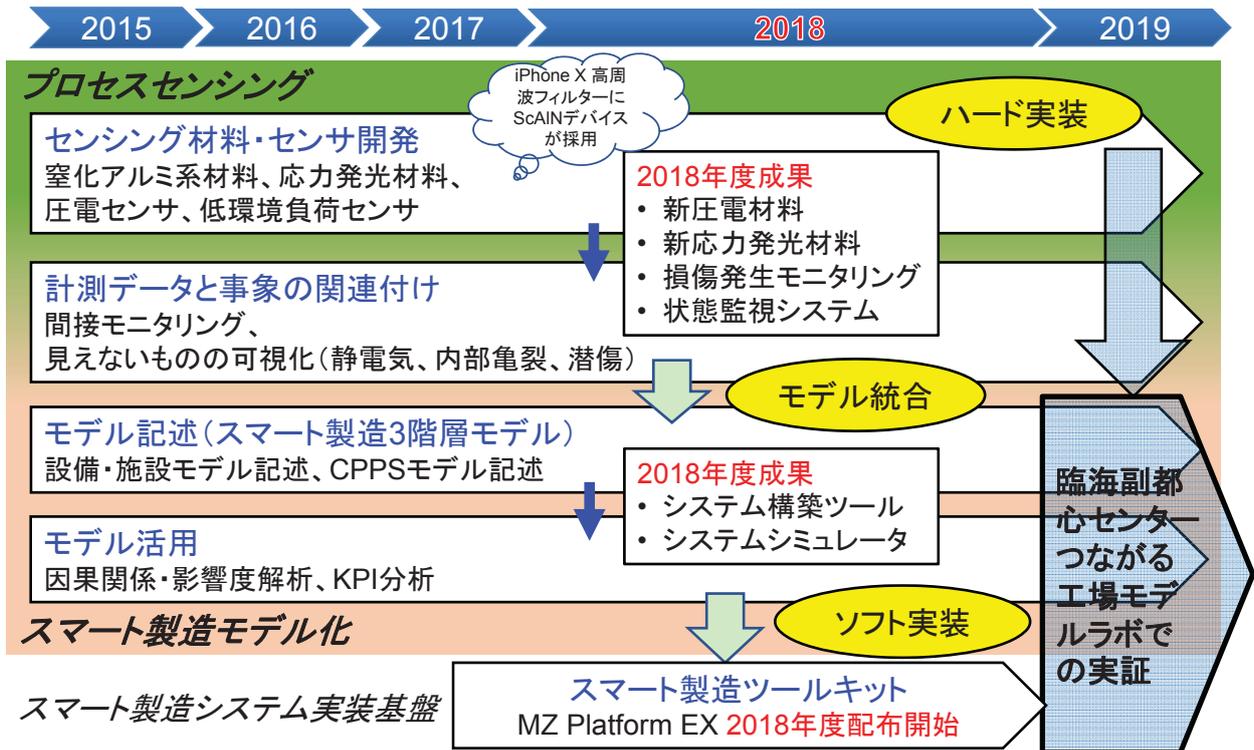
### 技術課題

- ・ **プロセスセンシング**  
製造物や現場の状況を把握するために必要なデータを取得するためのセンシング材料・センサの開発およびセンシングシステムの技術
- ・ **モデル化技術**  
製品設計や生産ラインの運用に関わる知識、設備の機能や状態に関わるデータ等、生産活動に関わる要素や因子の関係を整理し可視化する技術

### 製造網の対象範囲



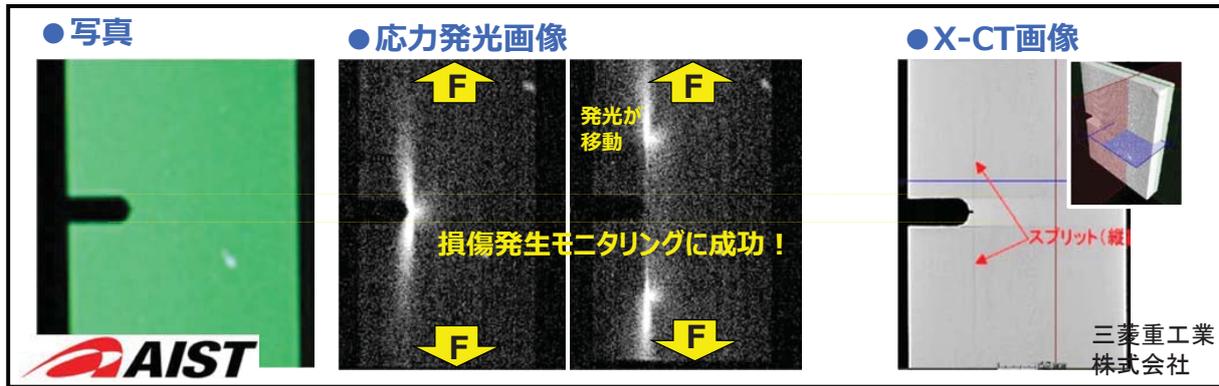
### 製造網ロードマップ



## 計測データと事象の関連付け — 損傷発生モニタリング —

H30年度成果

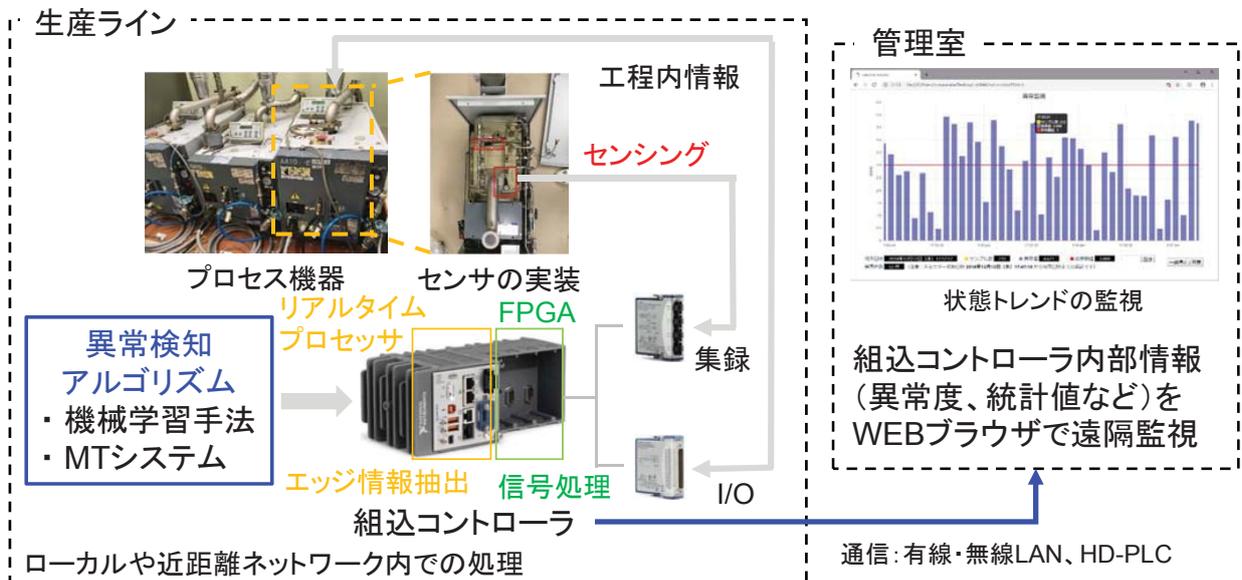
- 民間航空機適用CFRPであるT800S/3900-2B (TORAY)の損傷発生に応力発光検出に成功(実構造部材検査への適用)
- 従来の検査法であるX-CTにより検出の正確さを確認  
⇒ 応力発光の実用性を証明



## 計測データと事象の関連付け — 損傷発生モニタリング —

H30年度成果

- 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の開発
- 高サンプリングデータのリアルタイム処理・長期運用可能な状態監視システムの開発と企業共同研究での実証試験実施

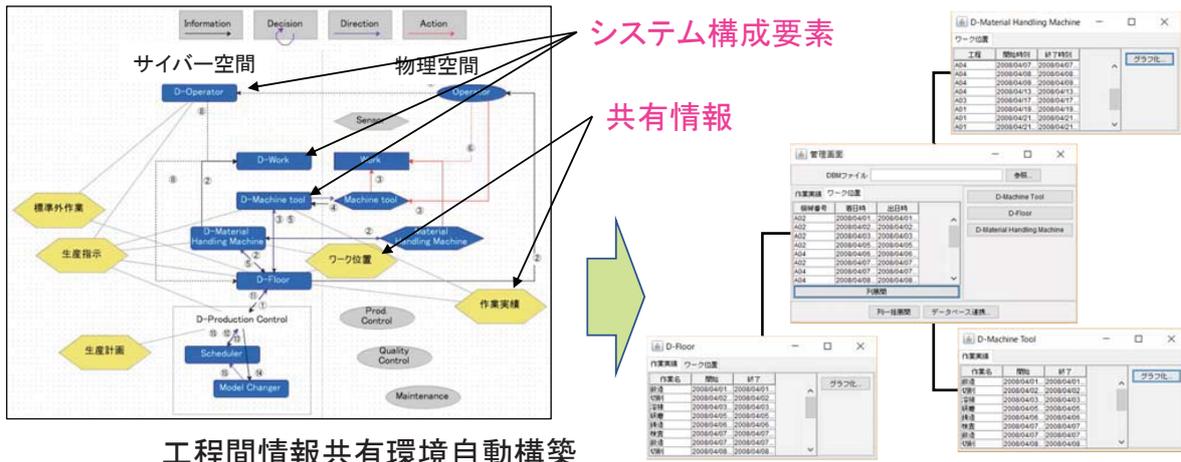


## モデル記述・活用 —システム構築ツール—

H30年度成果

- 生産システムを表すパラメータネットワークモデルに基づいて、工程間情報共有システムを自動構築(物理空間とサイバー空間の構成要素間の線をつなぐだけでその状態などの共有情報取得可能に)
- スマート製造ツールキットにおける簡便なデータ取得ツールとして統合(予定)

生産システムパラメータネットワークモデル

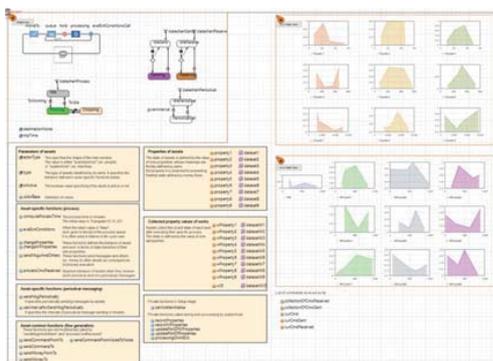


工程間情報共有環境自動構築

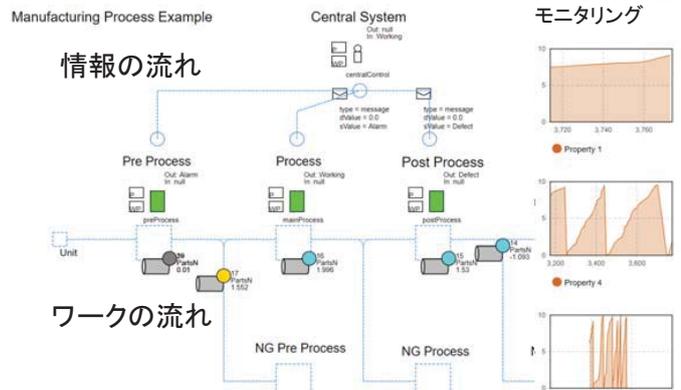
## モデル記述・活用 —システムシミュレーター—

H30年度成果

- 現場生産ラインの多様な加工機と加工物の関連性のモデル化のためのデータ構造を設計・構築
- 企業共同研究により、一部ラインのデジタルツイン化に着手
- 工具交換頻度・加工速度・ライン混雑度・耐環境性・加工品質などの最適化への展開をはかる



モデル共通のシミュレーション  
設定画面



シミュレーションの実行画面

## スマート製造ツールキット — MZ Platform EX —

H30年度成果

- 独自のIoT化(計測・可視化・通知)を可能とするツールキットを開発し、一般配布を開始
- 企業や大学等でのシステム化事例を構築



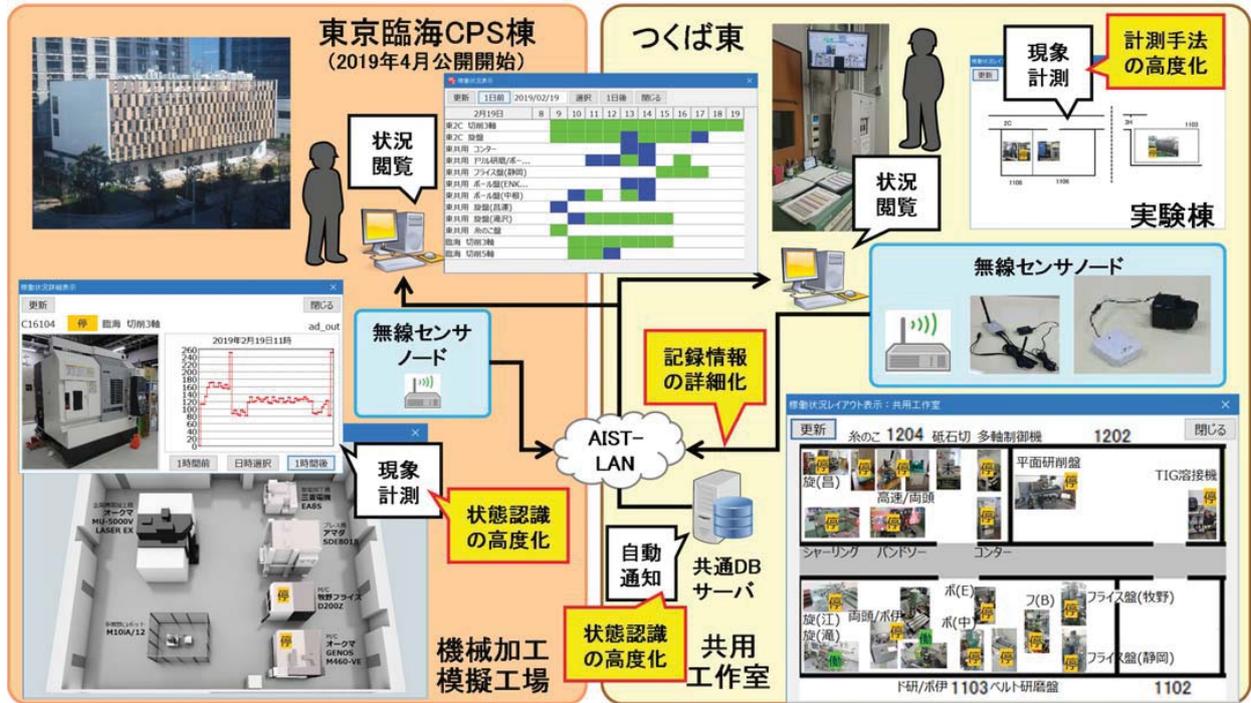
## 臨海副都心センターつながる工場モデルラボ

- サイバー空間を活用したものづくりの先読み
- 製造機器の相互交換性ともものづくり情報の接続
- AIを活用したものづくり関連データの蓄積と活用

- 複数技法の活用
- 個差および集合知の分析



スマート製造ツールキット適用事例  
つながる工場モデルラボ



(3)「橋渡し」研究後期における研究開発

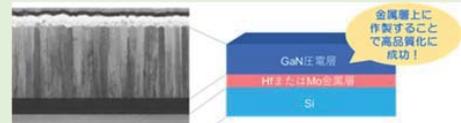
第4期中長期期間中の代表的成果

発表トピック

- 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  
→ 「①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」で紹介
- 社会で活躍する先進コーティング技術の開発  
→ 「②社会で活躍する先進コーティング技術の開発」で紹介
- 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  
→ 「③フレキシブルエレクトロニクス」で紹介
- スマート製造ツールキットの開発  
→ 「橋渡し」研究前期で紹介
- センサ用高圧電性材料の開発
- 製造プロセスの高度化と複合化技術の開発
- 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

見学

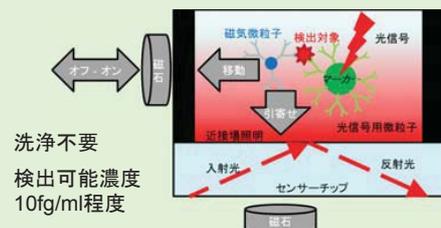
- 世界最高性能の窒化ガリウム圧電薄膜



- 砂型積層造形技術



- 外力支援近接場照明バイオセンサ



洗浄不要  
検出可能濃度  
10fg/ml程度

## (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

# ①「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」

ナノエレクトロニクス研究部門

首席研究員

原 史朗

## 一般的なRDP 1:10:100モデル



## RDP 1:1:1モデルの構築



[1] ウェーハサイズを研究者サイズに。

→ ハーフインチウェハ

[2] 100回やって100回成功する。

→ 局所クリーン化搬送システム

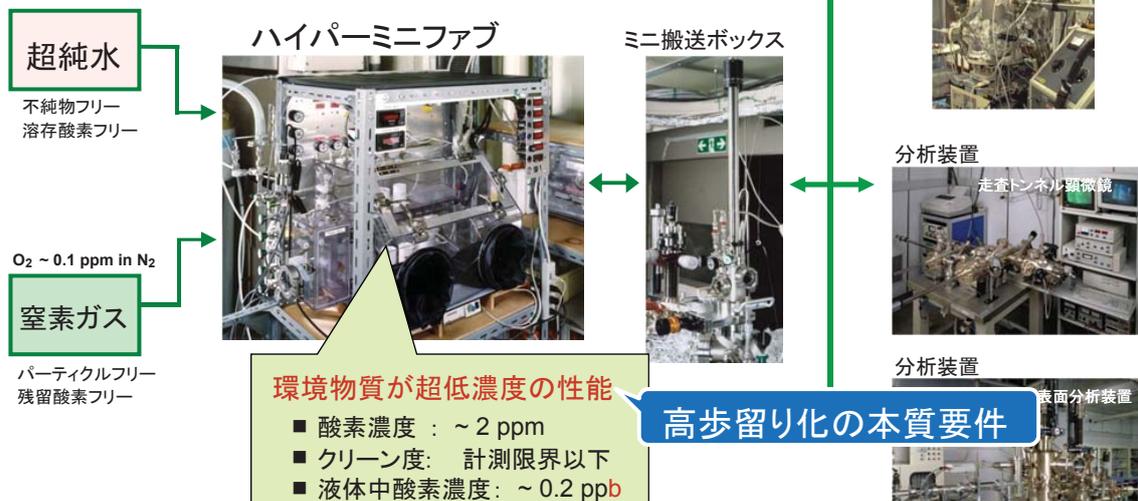
## 局所クリーン化: 原理実証システム@1996

「生産技術を基礎科学する！」

「製品の善し悪しを最終的に左右するのは何？」

ガス遮断型

ハイパーミニ・プロセスシステムを開発



重要な発見: 擦ると>0.1μmの微粒子が2万~3万個発生。  
縦に衝突すると、僅か1個に減少。

# PLAD: 実用サイズヘシュリンク@2011

Particle Lock Air-tight Docking

(微粒子とガス分子の両方を遮断するドッキングシステム)

## PLAD 1

## PLAD 2

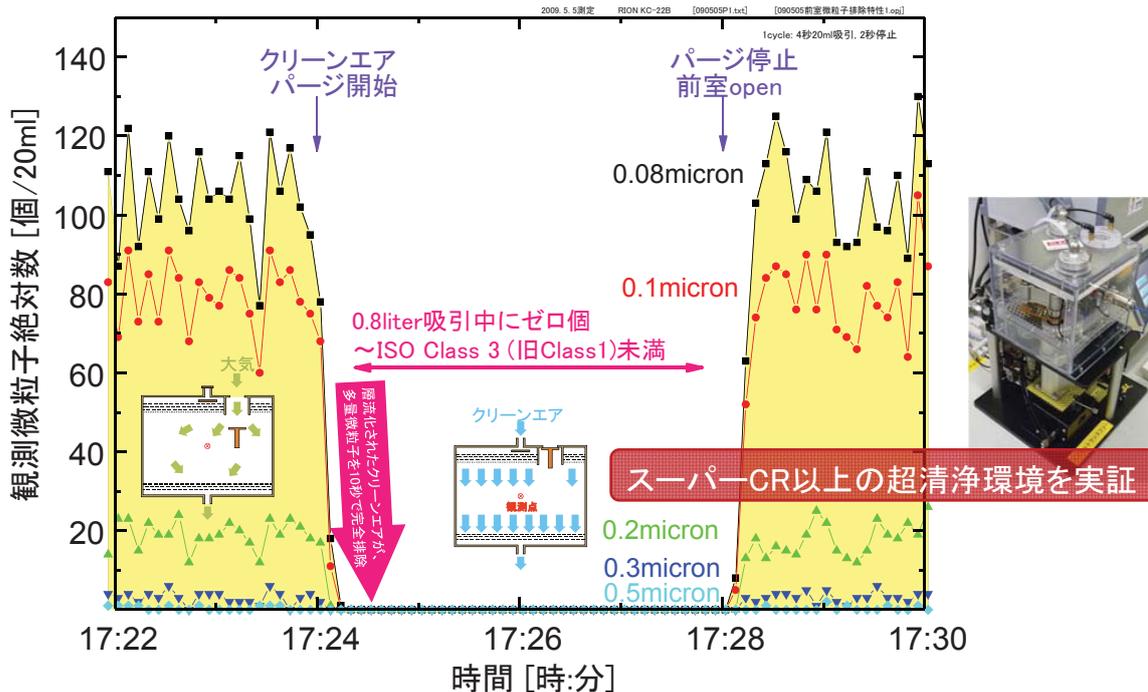


PLAD: Particle Lock Air-tight Docking  
微粒子とガス分子を同時遮断する局所クリーン化前室システム

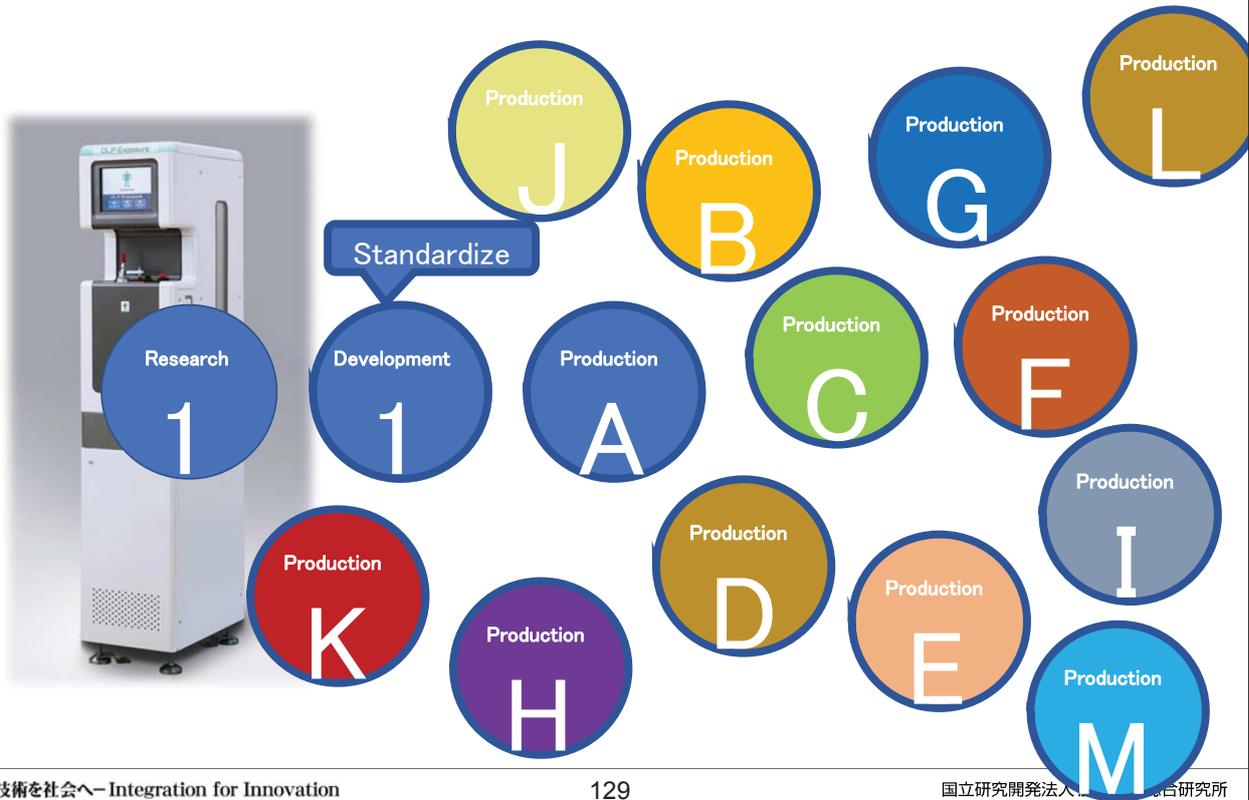
自長80mm・トラベルレングス240mmで、  
0.05mm精度 & 超小型  
→ 機械システムとして最高レベルの精度

新開発 超小型・直線搬送メカ

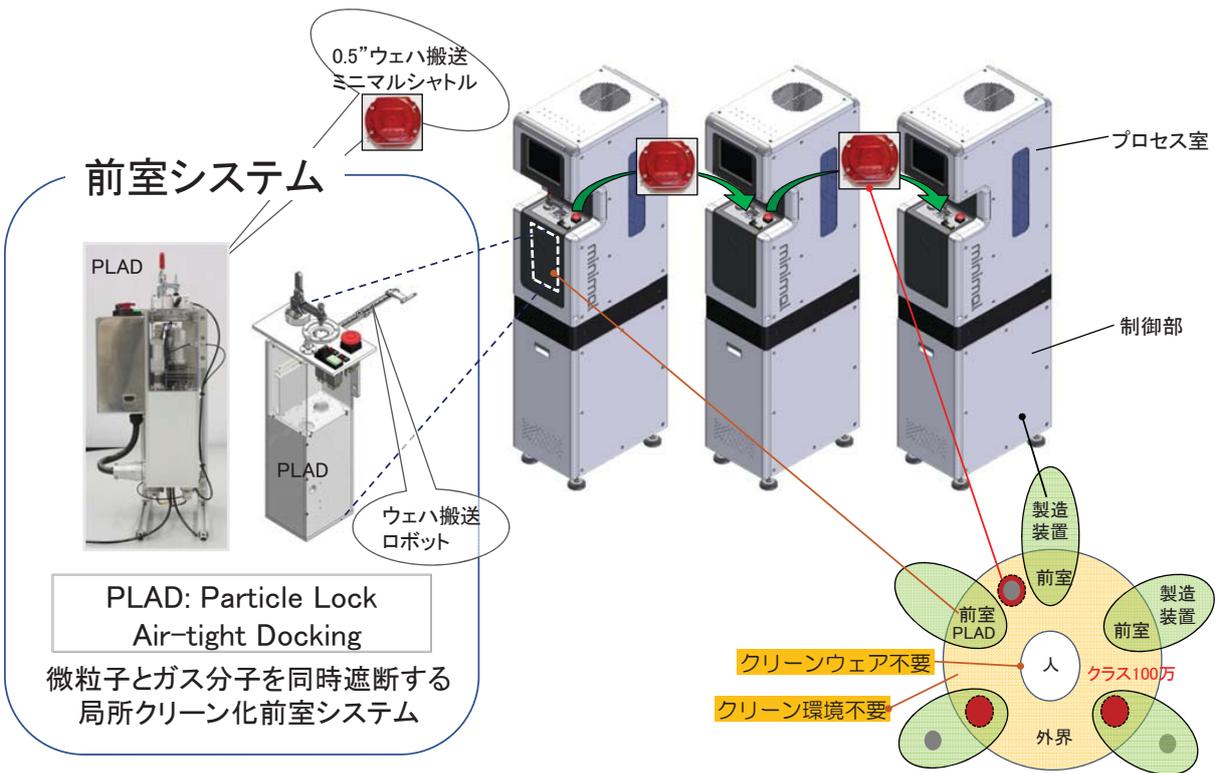
# PLADの清浄度試験



開発段階で標準化する。



標準化: 搬送系の統一



## 標準化: UIと制御機器

### 統一は世界初

ユーザー  
インターフェース

エラーの出方も統一！

### H30年度成果

プロセス情報の  
暗号化対応

### 世界初

### H30年度成果

### 世界最先端仕様

機器制御システム

- ・Windows10 embedded
- ・RealtimeOS
- ・PLCopen
- ・最新Atom chip
- ・タッチパネル+PLC一体型
- ・EtherCAT

世界初の内部EtherCAT化



日本でやってこなかった

## 包括的権利確保戦略

### 暗号化

- 製造情報 (回路設計, プロセス) の暗号化

### 認証

- ロゴの発行
- ファブシステム研究会 という組織
- 「minimal®」商標
- 「ミニマル®」商標
- ミニマルプロダクト認証

### ブランド

- 高いデザイン性
- ミニマルファブ構想という 21世紀型メッセージ性

### デファクト標準

- 搬送系の規格化
- ウェハの規格化
- 装置筐体の規格化
- 制御システム・UIの規格化
- 工場システムの規格化

### 知財

国内出願96件  
基本特許登録済

FYH29まで52件既登録、  
FYH30: 9件登録。

- クリーンルーム  
局所クリーン

### H30年度成果

- 工場システム管理技術
- 装置毎の知財

1. 日本で生み出す
2. 日本の得意な小型化技術開発+包括戦略
3. 世界へ



# SEMICON Japan 2018

H30年度成果



FYH29: 23社から29機種を商用販売実現。

FYH30: 29社から51機種を商用販売実現。

# SEMICON Japan 2018

H30年度成果



局所クリーン化で、リソグラフィをイベント会場で実証。  
CMOSTランジスタ全工程も会場で2015年12月に製造実証済。

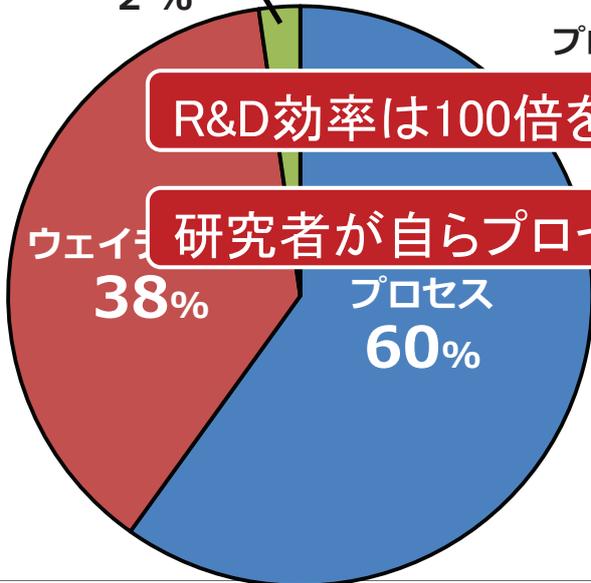
### プロセス稼働率@セミコン2013

- MOSFET作製ウェハ 7枚
- 30工程（アライメントマーク形成除く）



- 平均プロセス完了時間 10時間25分
- 平均プロセス稼働率 60%

装置間搬送  
2%



$$\text{プロセス稼働率(\%)} = \frac{\text{プロセスロータイム}}{\text{プロセス完了時間}}$$

R&D効率は100倍を超える。

研究者が自らプロセッシングできる。

装置間搬送30秒  
ウェハ回転時間37秒

H30年度成果

→ 応物学会誌

- 普通の試作ライン
- ・トランジスタ試作 1ヶ月
  - ・プロセス稼働率 ~1%

### 外部からのR&D受注

- 特殊高周波ダイオード (ディスクリートの高周波化トレンド: 基地局応用)
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>リソグラフィ (新材料)
- GaAsダブルヘテロレーザ (ミニマルは非Siで使えるのか?)
- 圧力センサ
- 歪みセンサx2 (MEMS系)
- ダイヤモンドデバイス試作 (新材料)
- オーミック電極形成技術 (新プロセス技術)
- SOI-TiN gate-CMOS集積回路
- ISFET(ion sensitive FET)

H30年度取組み

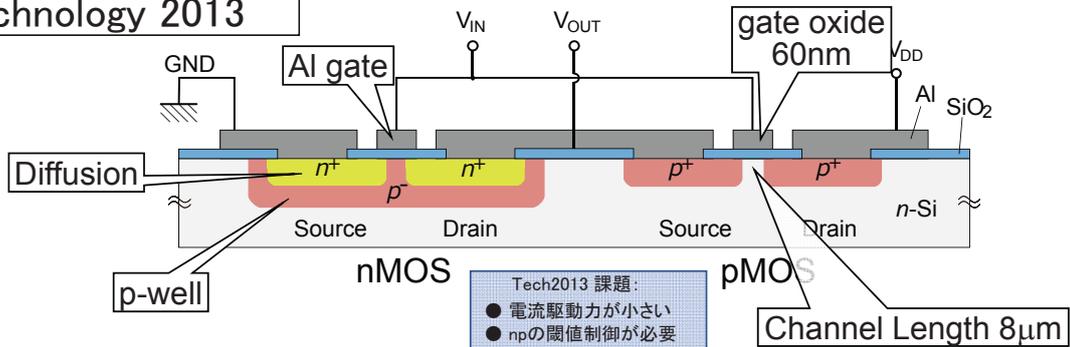
ミニマルファブは、メガシステムで受け付けられない、多くのニーズに応える。

# 実用CMOS開発

H30年度成果

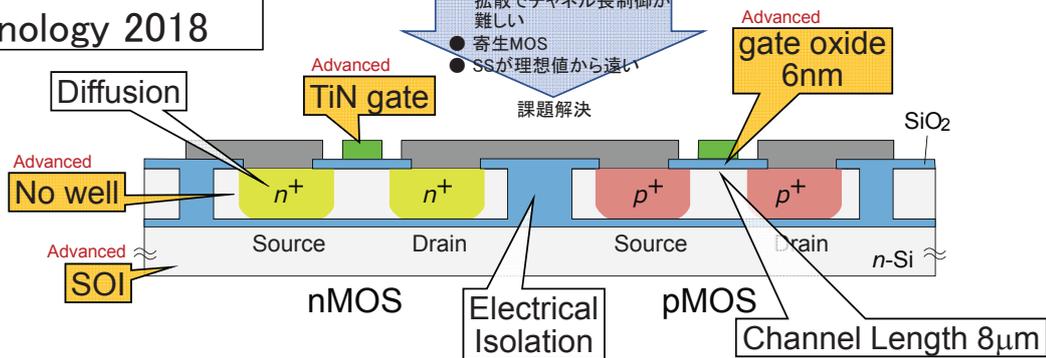
初期試作CMOS技術

Technology 2013



- Tech2013 課題:
- 電流駆動力が小さい
  - npの閾値制御が必要
  - 高温処理が多く、横方向拡散でチャネル長制御が難しい
  - 寄生MOS
  - SSが理想値から遠い
- 課題解決

Technology 2018

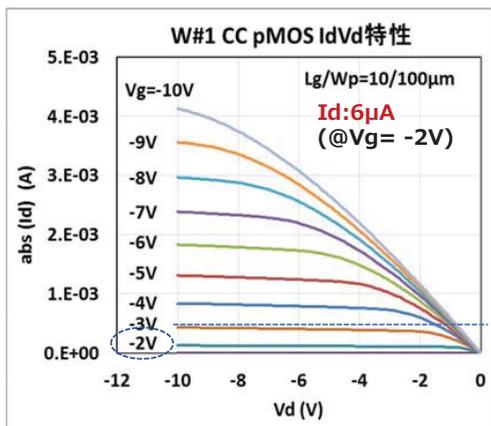


# Tech 2013 → 2018 : 性能向上

H30年度成果

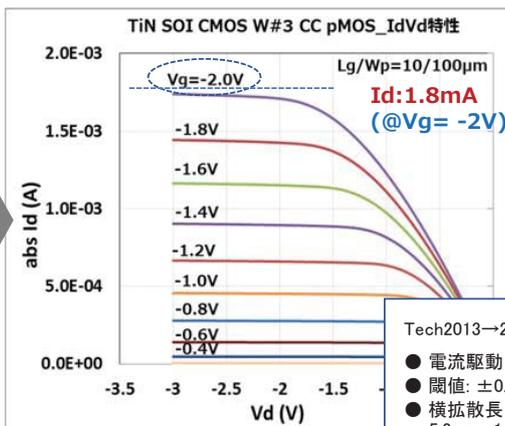
Technology 2013

バルク基板・Alゲート・ $T_{ox}$ : 60nm



Technology 2018

SOI基板・TiNゲート・ $T_{ox}$ : 6nm



ドレイン電流が300倍 ( $6\mu A \rightarrow 1.8mA$ ) に増大し駆動力がUP

残りの課題は、TiNとTEOS膜質改善、多層配線技術開発

- Tech2013→2018
- 電流駆動力: 300倍
  - 閾値:  $\pm 0.5V \rightarrow \pm 0.13V$
  - 横拡散長 (p):  $5.2\mu m \rightarrow 1.1\mu m$
  - $T_r$ 間寄生MOS: ゼロ
  - SS (p):  $110mV/dec \rightarrow 70mV/dec$
- ※ SS: Subthreshold Swing OFF  $\rightarrow$  ONへの遷移の急峻性

# ミニマルファブ マスタオペレータ 認定プログラム(MF MOAP)

目的: 研究者・エンジニアが自ら【完全自動化装置】をオペレートする。

人の1:10:100モデル → 1:1:1化



講義1時間/装置、テスト30分/装置

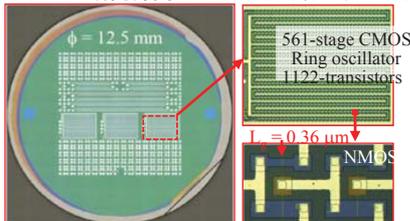
合格者実績  
FYH28-29: 29名  
FYH30: 21名

2019年3月13日

## 産総研内部連携

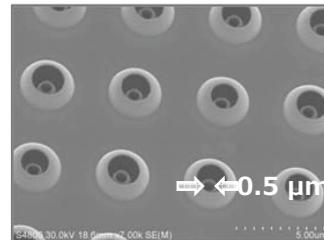
H30年度成果

- ナノエレクトロニクス研究部門: 1k-Tr CMOSリングオシレータ

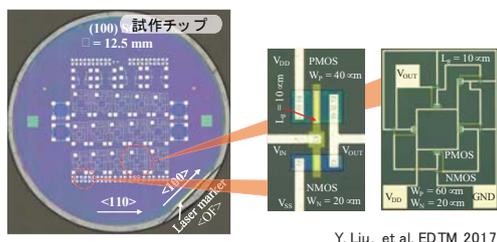


世界初の  
CMOS-MEMS  
融合デバイス

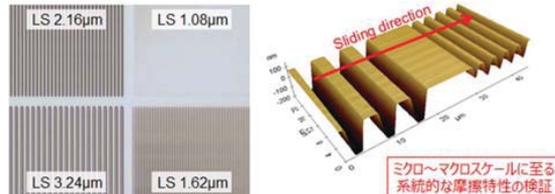
- ナノエレクトロニクス研究部門: 宇宙ロケットエンジン開発



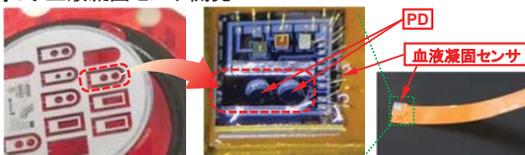
- ナノエレクトロニクス研究部門: CMOS-MEMS融合センサ



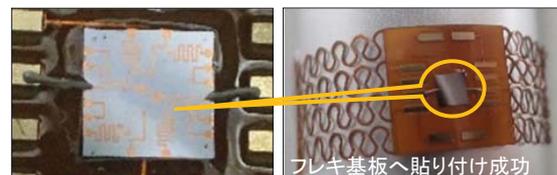
- 製造技術研究部門: トライボロジー研究



- 製造技術研究部門, 健康工学研究部門  
光学式 血液凝固センサ開発



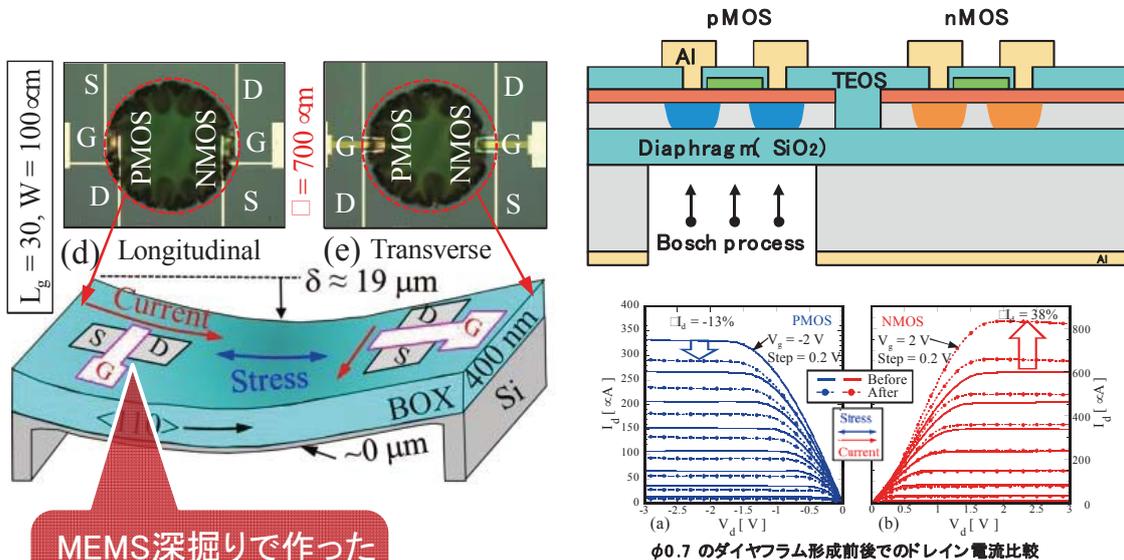
- フレキシブルエレクトロニクスRC&集積マイクロシステムRC: FHE試作



# CMOS-MEMS融合センサ

H30年度成果

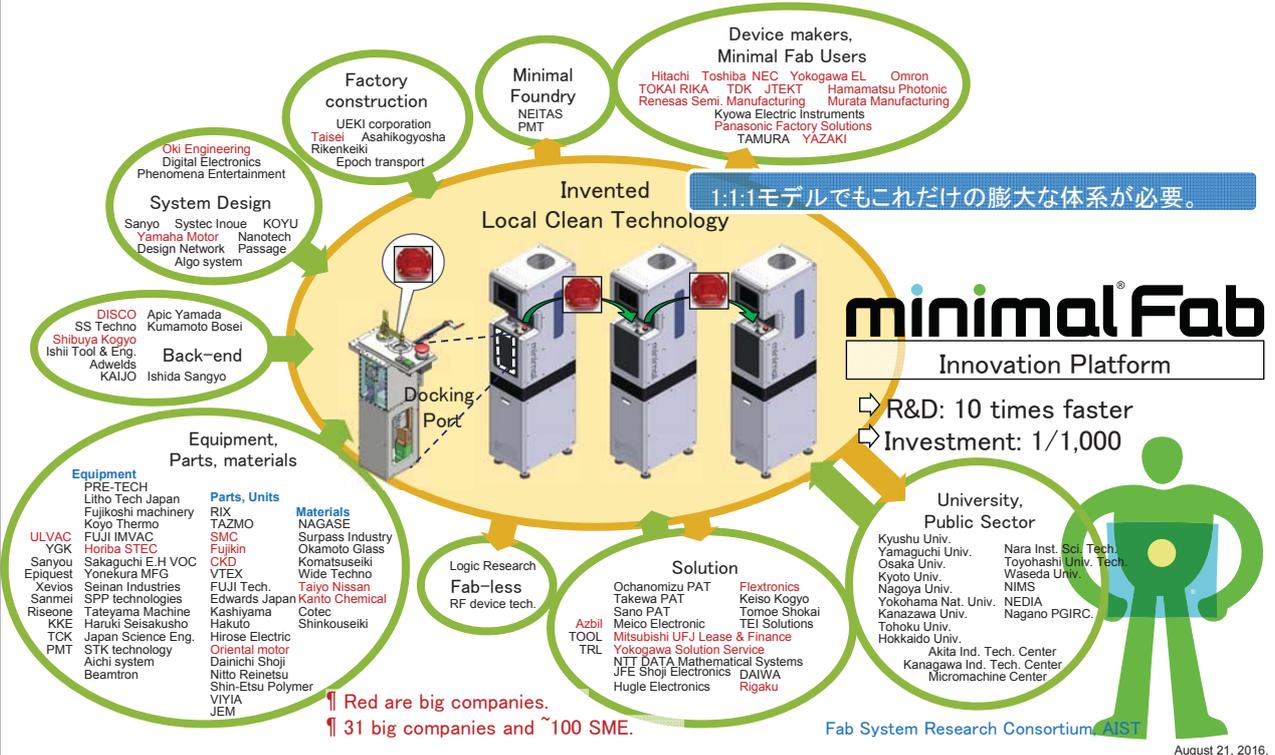
柳永勛 @カスタムデバイスG



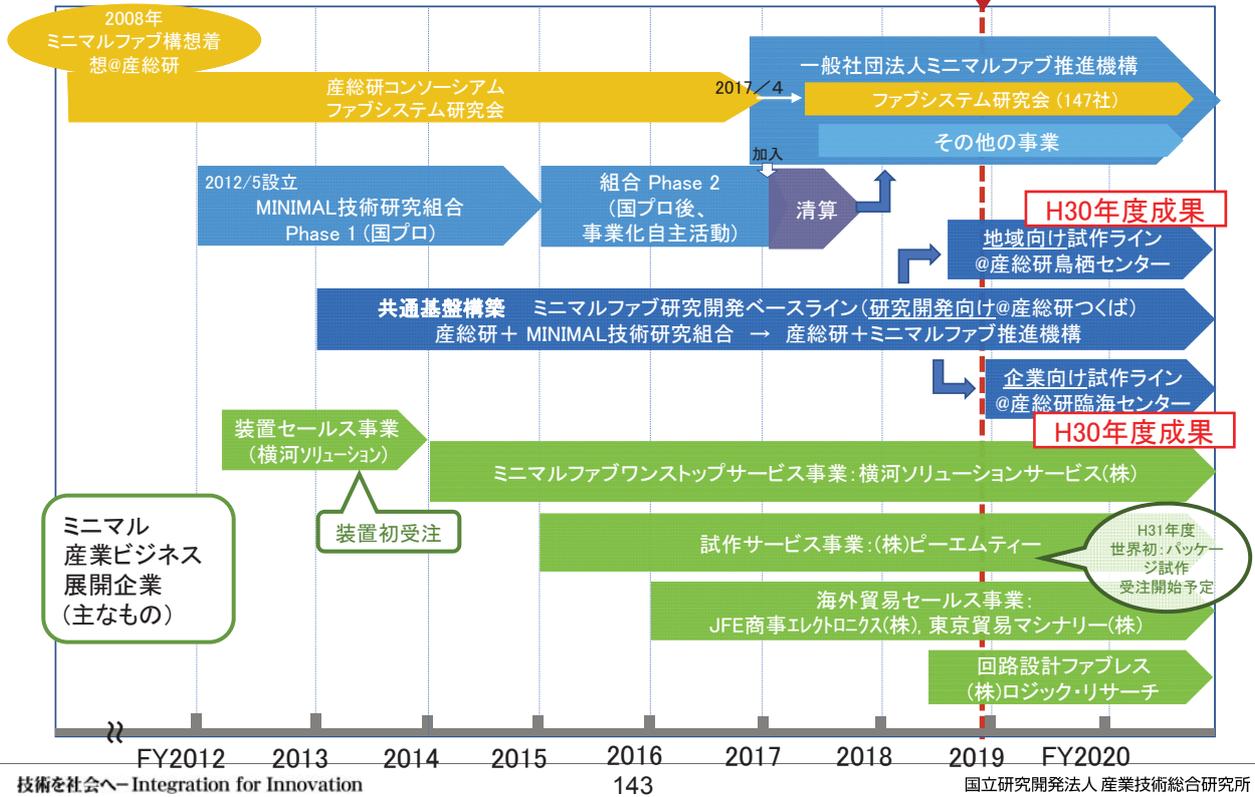
MEMS深掘りで作った  
メンブレン上に  
CMOSを形成。

ミニマルでは、  
本当にMEMSとCMOSラインを一体化できる。

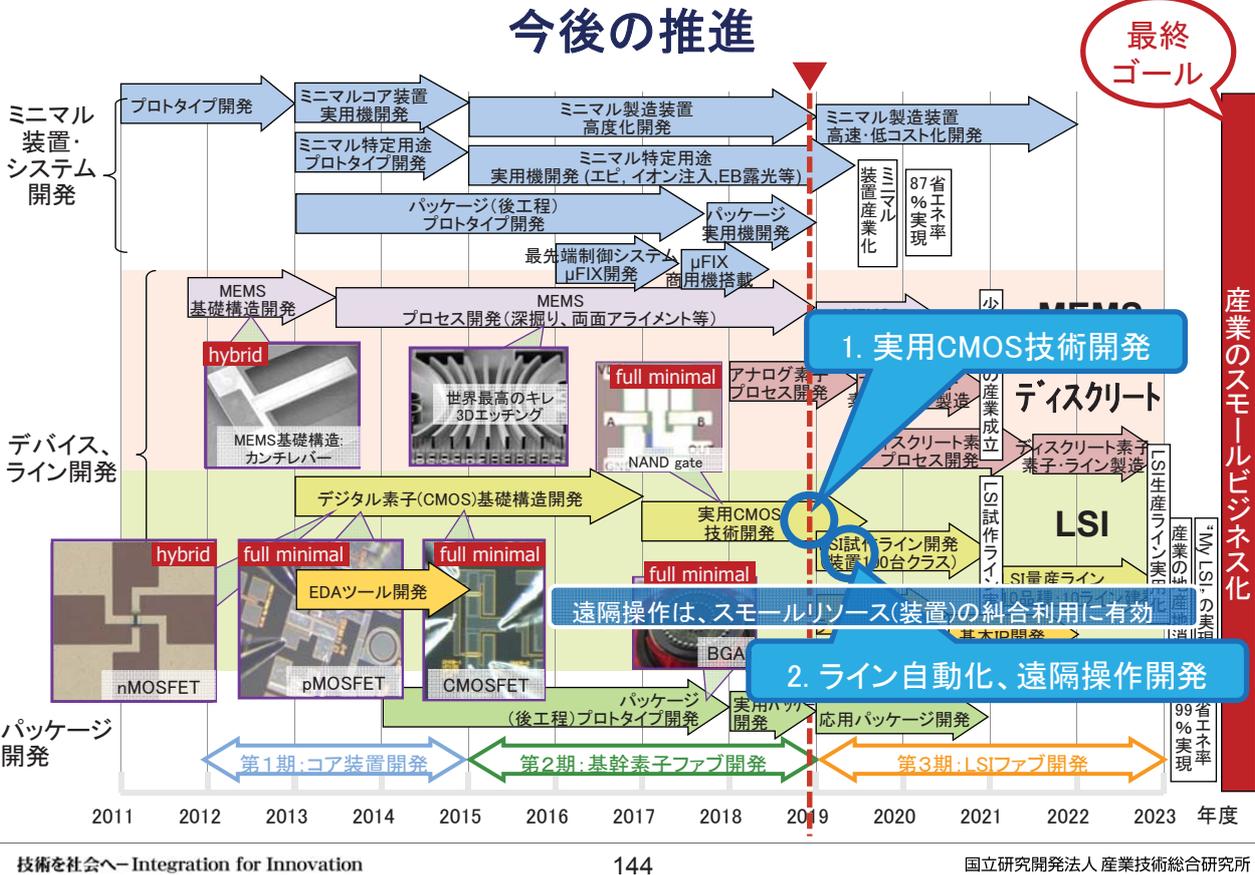
# Eco-system in Minimal Fab



### 関連組織・ビジネスの発展



### 今後の推進



# minimal

## (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

### ②「社会で活躍する先進コーティング技術」

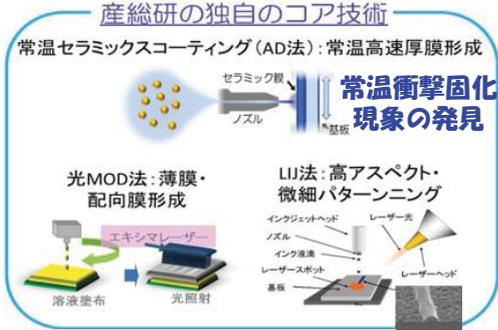
先進コーティング技術研究センター

研究センター長

明渡 純

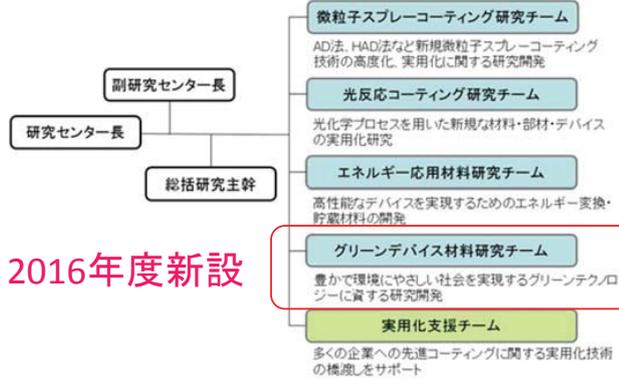
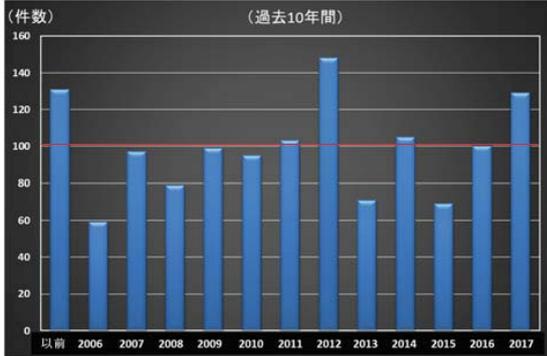
## 課題の概要(背景、目的)

### 第4期ユニット・ミッション



AD(エアロゾルデポジション)法や、光MOD(金属有機化合物分解)法、LIJ(レーザー援用インクジェット)法などの産総研が世界を先導する先進コーティング技術を核に、産総研の基礎研究ポテンシャルを活かし成膜メカニズム解明に基づくプロセスの高度化と、それを基にした多事業分野での民間企業への橋渡しを実現する。

### AD法、光MOD法、LIJ法の技術相談件数推移

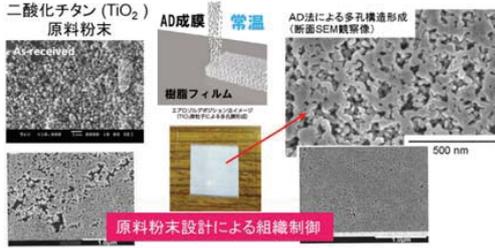


## AD法&光MOD法 ロードマップ



# AD法による色素増感型太陽電池の実用化事例

(共同研究先: 積水化学工業株)

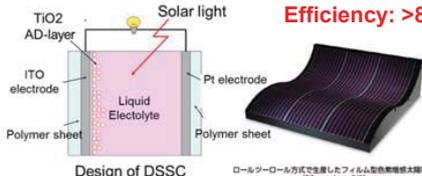


JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP)  
ハイスルック挑戦タイプ/シ  
ーズ育成タイプ 活用

<特長>	<おもな利点>
低照度発電 (500ルクス以下)	・陰にも設置できる (屋内、地下街など)
薄い (1mm以下)	・場所をとらない (狭小スペース活用)
軽い (ガラス1/10以下)	・持ち運びが楽 (取付フレームレス)
曲がる	・曲面に設置できる (意匠を損なわない)
貼れる (テープ加工可能)	・取付が簡単にできる (どこにも使える)

プレスリリース: 2017/3/29

Efficiency: >8%



https://www.sekisui.co.jp/news/2017/1302064\_29186.html

室温ロールtoロール・パイロット生産機  
【2万㎡/年の生産能力】



## 先進コーティング技術・橋渡しを如何に加速するか?

### 先進コーティングアライアンスの設立 Advanced Coating Alliance

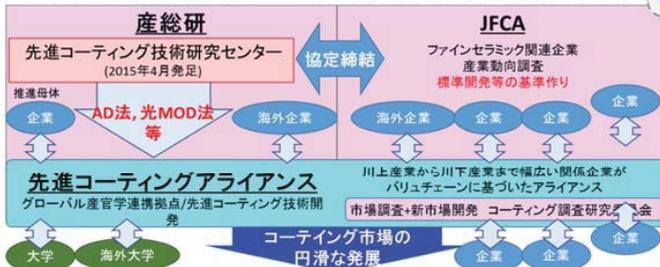
クローズド・オープン・イノベーション

【一橋大学・西野和美 准教授 提唱】



会員企業46社 (現在)

- 国際競争力のある日本独自のコーティング技術 (AD法, 光MOD法) の実用化支援
- バリューチェーンを統合的に見渡した国際的・戦略的なアライアンスの創出
- 先進コーティングに関するグローバル産官連携拠点の形成と国際競争力強化



入会のメリット

- ★ネットワークの構築
- ★最新技術動向へのアクセス
- ★セミナー、ワークショップ、見学会等への各種優待
- ★国際会議の参加, 海外情報の入手
- ★政府機関, 国立研究所等との連携
- ★会員企業との広報 など

最終製品仕様に合わせて、上流側の材料・プロセスを研究開発



### リスクシェアとベネフィットシェア検討の場

(カリフォルニア大学バークレー校・ヘンリー・チェスブロウが指摘)

AD、光MOD用の原材料製造メーカーの確立と部材応用メーカー、製品セットメーカー間のビジネスアライアンスを構築

# IoTデバイス用全固体電池狙いと開発ロードマップ

**高齢化社会対応**  
ひとのモニタリング  
洗濯・乾燥機で耐える電源技術  
パッケージ・耐高温環境

**GADCAL**  
Advanced Coating Alliance

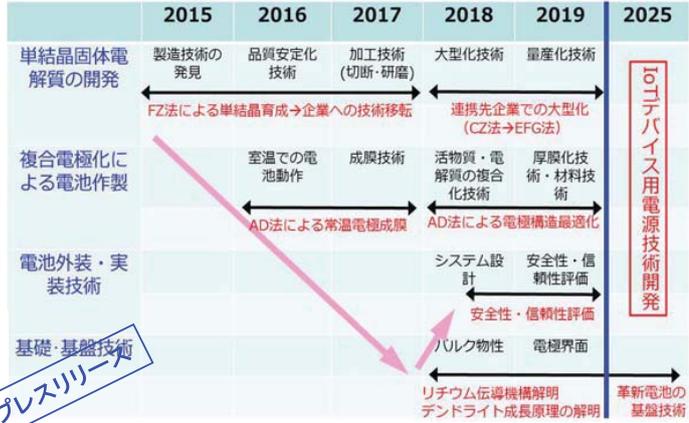
**極低温環境下**  
冷凍・冷蔵庫の在庫管理  
-60℃で動作可能

新たなサービスの創生を可能とする  
**IoTデバイス用電源技術**

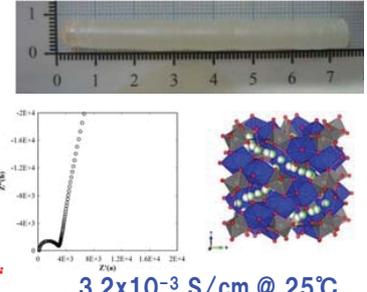
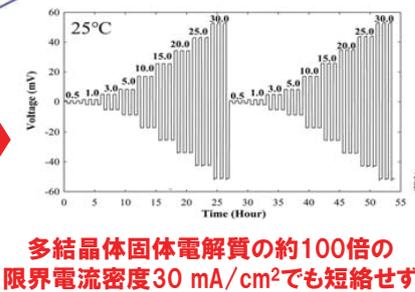
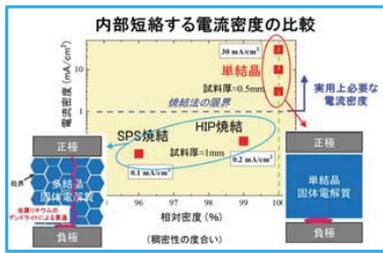
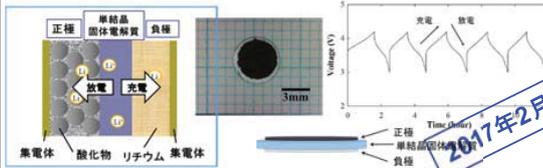
**医療分野**  
ペースメーカー  
固体電池の二次電池化  
電池交換不要

**補聴器**  
高い安全性  
電池交換不要

**携帯型デバイス**  
イヤホン  
高い安全性



## IoT、医療デバイス用のAD法による全固体電池の試作



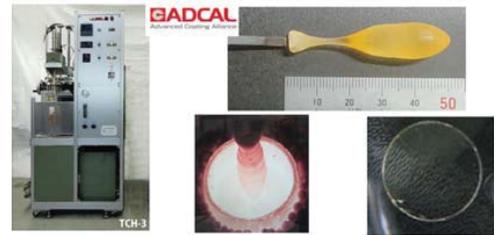
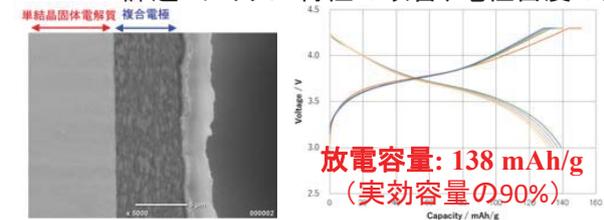
# IoTデバイス用全固体電池の開発:H30年度トピック

## ①電解質・正極の複合層の開発

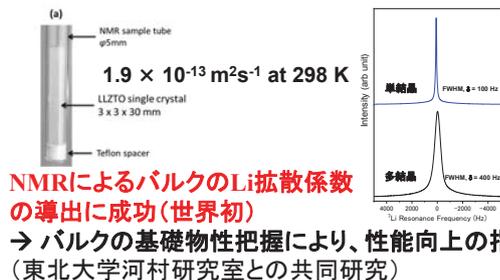
AD法によるLi蓄電池プロトタイプ試作(橋渡し前期)  
(無線送信可能な電池容量4mAh Cf: 0.1mAh(村田製作所、TDK))  
良好な界面・電極内部構造の形成 → 安定した電池動作が可能に  
→ 課題: サイクル特性の改善、電極密度の向上

## ②単結晶固体電解質の品質安定化・大型化

CZ法での大型単結晶育成に成功  
→ 連携先(アダムス並木宝石)で部材化検討



## ③固体電解質中でのデンドライト成長のメカニズム解明(目的基礎)



## ④新規電極構造による高容量SiO負極

蒸着法 → 理論容量に近い2000 mA/gまで特性改善



## AD法の全固体電池応用国内大学関係のキャッチアップ

●首都大学東京 金村研究室は、LLZペレット表面にエアロゾルデポジション(AD)法で正極を成膜することで、焼成温度を低下させ、正極材量の分極や変性を抑制することに成功

source:日経エレクトロニクス, 1月号P42(2018)

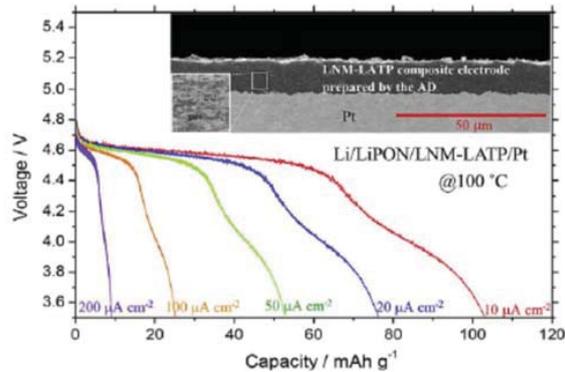
●AD法の全固体電池応用についての研究開発が国内外で広く行われていることを報告される

source: D. Harft et al., Journal of Ceramic Science and Technology, vol.6, No.3.



韓国材料科学研究所 (Korea Institute of Materials Science, KIMS)が、AD法を精力的に研究開発(電池材料では、正極、負極、固体電解質etc.)

●名古屋大学 入山研究室にてNEDOプロジェクトで本格的に研究開発予定



source: Yasutoshi Iriyama et al., "5V-class bulk-type all-solid-state rechargeable lithium batteries with electrode-solid electrolyte composite electrodes prepared by aerosol deposition" Journal of Power Sources, 385(2018), 55-61.

## 光MOD法による高輝度蛍光体膜の開発



①白色蛍光体:フィルムメーカーとの高輝度化(特許出願)⇒フィルムメーカー試作、改良

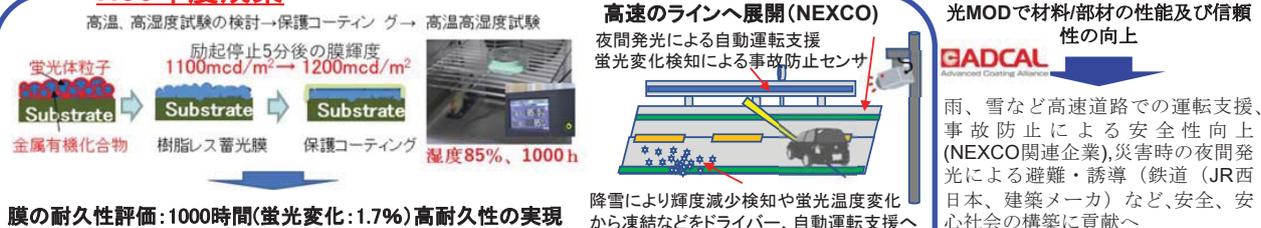


テントメーカーとの連携『光×膜で新しい外壁へ』

②蓄光膜高輝度コーティングの信頼性評価

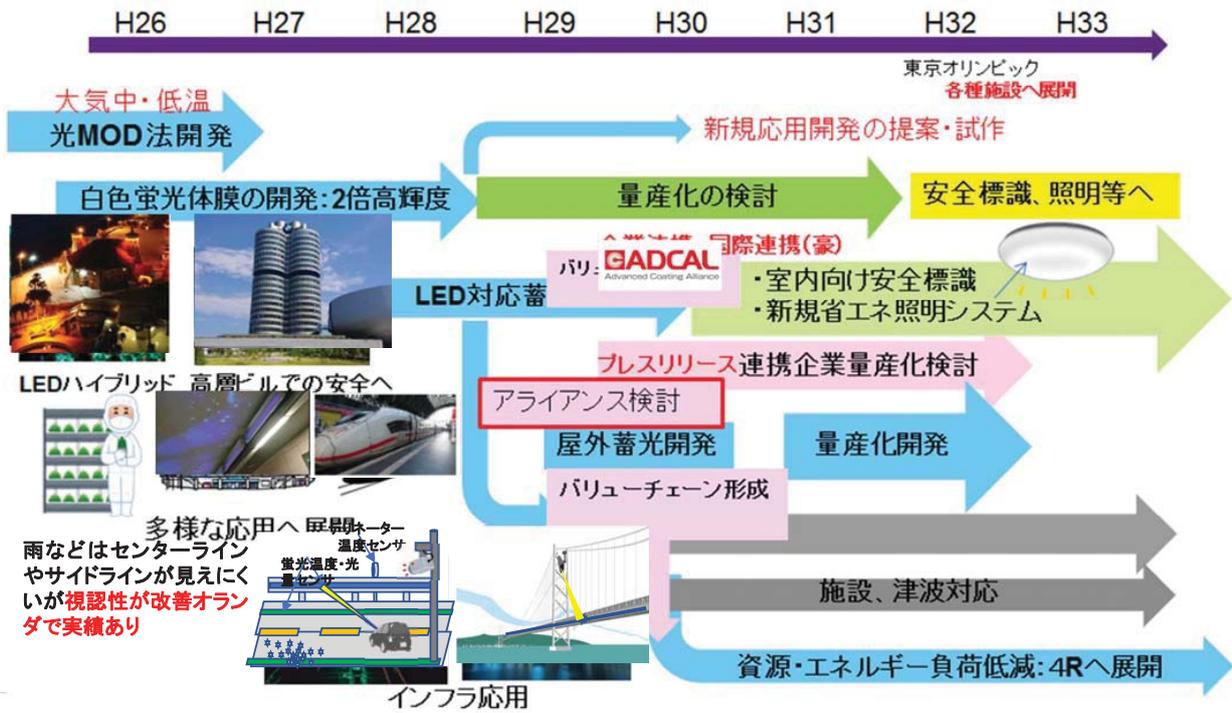
2016~17年:新規蓄光材料・膜開発: 460nm励起停止5分後の残光輝度1250mcd/m² (従来材料:464mcd/m²)  
2018年:耐水処理、企業量産化に向けたプロセスの最適化 連携: 高速道路へ展開:NEXCO、構造建築、鉄道等へ

### H30年度成果

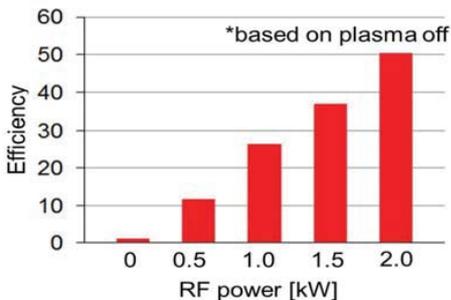


光MODによる材料・部材性能及び信頼性向上による安全・安心社会の構築へ

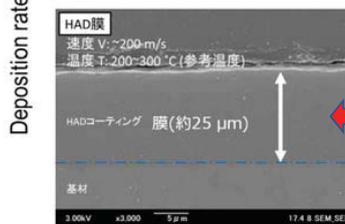
## 光MOD法を用いた蛍光体部材・デバイス応用



## ハイブリッド・エアロゾルデポジション(HAD)法/ 社会実装に向けて



成膜効率は最大で50倍, 成膜速度は38倍を達成



非常に緻密  
均一な皮膜

溶射分野における国際的連携  
Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 25, Issue 8, pp 1376-1440  
(Armelle Vardelle, Christian Moreau, Jun Akedo, et. al.)に  
AD法、HAD法も含めた国際技術ロードマップ(The 2016 Thermal Spray Roadmap)を発表

# 内閣府SIP「革新設計生産技術」産総研・コーティング拠点の設置



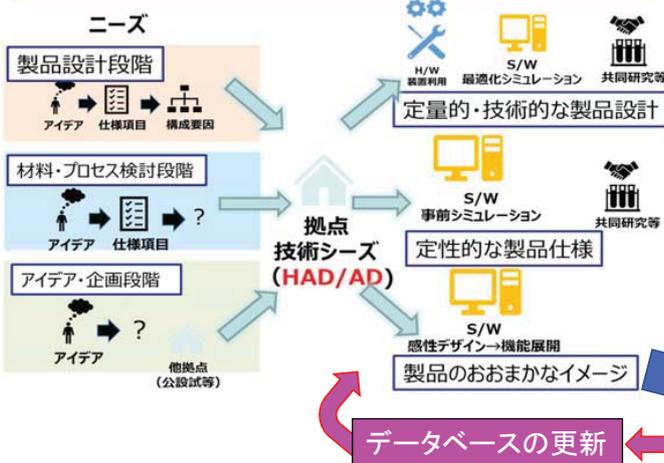
①大手歯科部材加工機メーカー  
高速ミリング加工 (企業独自技術) オンデマンドな義歯の提供  
ZrO<sub>2</sub>・高速3Dコーティング

②地方の中堅企業  
国内最大の材料供給メーカー  
吸湿率、密着力は製品レベルを確認  
①高湿度環境での劣化防止 (油等不侵) ②薬剤の/インテグレーション  
アロフェンのバインダーレス 高効率成膜

③中堅樹脂材料メーカー ユーザー試供サンプル  
AD法でアルミコート ハイブリッドの応用  
POCKET素材 硬度、密着性

④家庭用品デザイナー  
製品のおおまかなイメージ

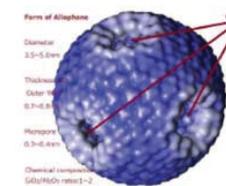
## 拠点を通したニーズとシーズのマッチング



# SIP 産総研・コーティング拠点利用・地方創生貢献事例

(吸湿部材応用) 共同研究先: 品川ゼネラル(株)

H30年度成果

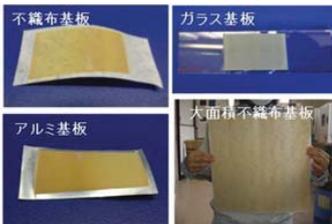


品川化成 株式会社

アロフェン分子(粘土材料)

拠点利用

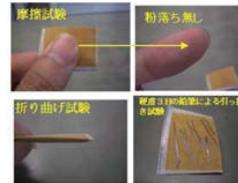
地方公設試(栃木県)と地域中小企業との共同研究連携



各種基板に製膜したアロフェン膜

膜密着強度について

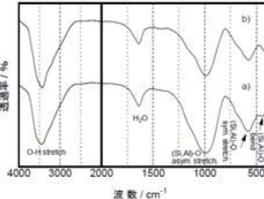
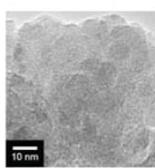
項目	結果
硬度 (鉛筆硬度)	H以上
密着力 (テープ剥離)	4N / 10mm 以上
曲げ剥離 (90°)	剥離なし



## AD法によるバインダーレス・常温成膜



アロフェン微構造維持



各種想定応用製品



今後の取り組み: 実際の製品基材、部材に応じたコーティング材や厚みのプロセス設計、コスト試算  
⇒顧客企業からの基材へのコーティングと商材としての性能試験を開始 (H31年度)

# 樹脂基材上へのセラミックハードコート

H30年度成果

各種出口イメージ



荒川化学工業㈱ (JSTプロジェクト共同研究)  
AD法でアルミナコート



硬度、密着性

JST 研究成果最速展開支援プログラム (A-STEP) シーズ育成タイプS 活用

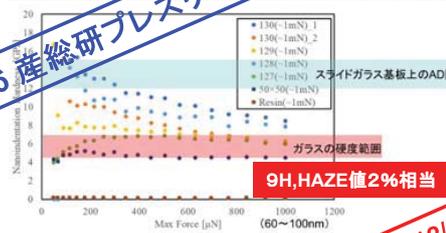
項目	AD膜層体
基材	圧延化学製タテクイ(CO001) メタクリル樹脂/ポリカーボネート樹脂 二層シート (ポリカーボネート側に保護層)
中間層絶交	有機導電/ハイブリッド層
AD膜層体	アルミナ

荒川化学工業株式会社



[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2017/pr20170616\\_2/pr20170616\\_2.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170616_2/pr20170616_2.html)

2017/6/16 産総研プレスリリース



2018/12/26 化学工業日報 2面掲載

GADCAL Advanced Coating Alliance

日本ペイントホールディングス

(資金提供型共同研究)  
第1回 高機能塗料展での発表 12/5~12/7

M<sub>2</sub>O<sub>y</sub> 衛る 次世代塗料 -AD法- セラミックコーティング 開発中

透明セラミックコーティング

高硬度 透明

粉「こ」のまま成膜

設計のポイント -AD法- クラウド設計による成膜技術

透明セラミックコーティング

プラスチック

プラスチックに成膜を実現!!

自動で成膜

産総研

今後の取り組み: 実際の製品基材、部材に応じたコーティング材や厚みのプロセス設計  
⇒ GADCAL 5G用スマートフォン筐体、カーウインドウ&ライトカバー、デバイス保護など

## (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

### ③「フレキシブルエレクトロニクス」

フレキシブルエレクトロニクス研究センター

センター長

鎌田 俊英

## 内容

- (1) 課題の背景と目的
- (2) 研究開発ロードマップ
- (3) 主な成果、進捗
  - ①フレキシブル触覚センサ技術
  - ②ウェアラブルセンサ技術
  - ③インフラモニタリングセンサ技術
- (4) 外部連携関係

## 課題の背景と目的

### 目的

#### IoT社会の推進 (自由形状デバイス)

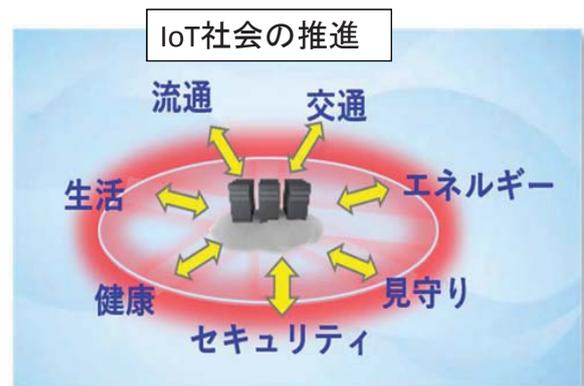
ユザビリティの高い革新的な情報端末機器の開拓普及を目指した技術開発

→ フレキシブルデバイス開発

#### 省エネ省資源プロセス (スマートマニュファクチャリング)

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

→ 印刷デバイス製造技術開発



#### フレキシブルデバイス技術

センサ、アクチュエータ、回路、配線、高使用感、人間感覚適合性、非装着違和感、デザイン自由度

#### 印刷デバイス製造技術

自由形状設置、高生産性、低温低損傷、大面積、高材料使用効率、高精度、高精細、高速、コンパクト、レジリエント

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

## 主要ターゲットデバイスと要求技術

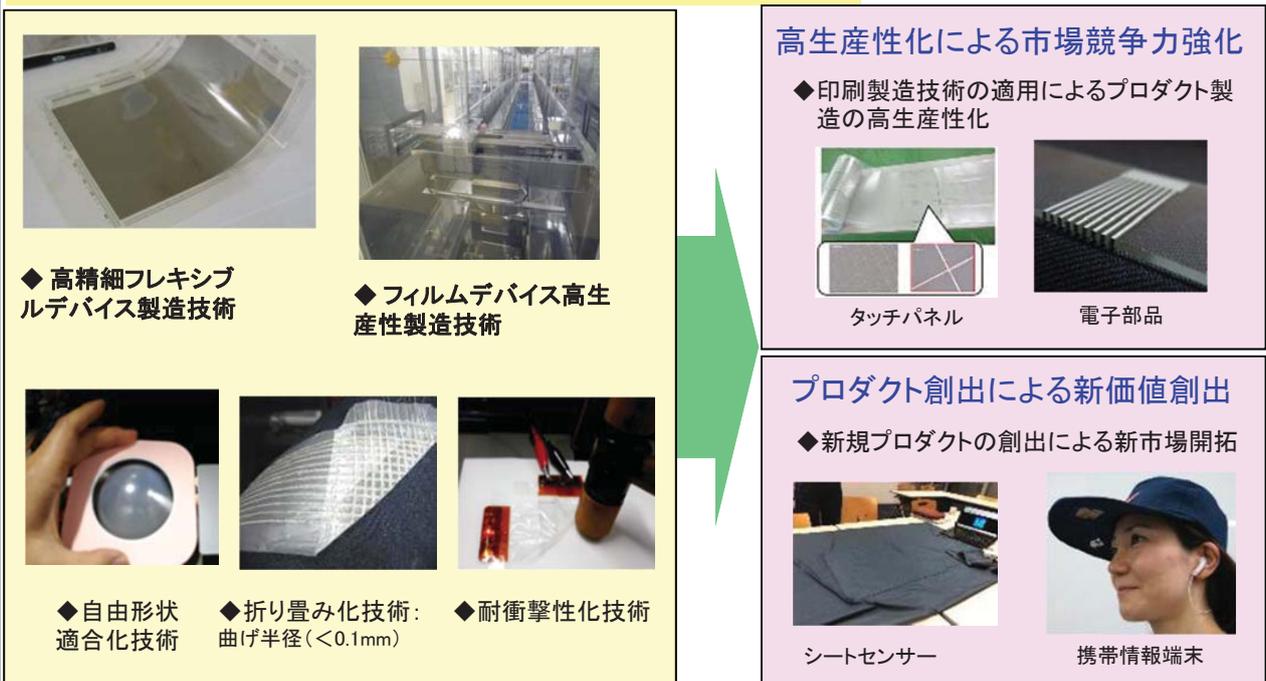
フレキシブルデバイス → 情報端末デバイス・電子部品



橋渡し後期技術： 新規製品市場化の加速、製造国際競争力強化

## フレキシブルデバイス技術

自由形状・形状可変フレキシブルデバイス形成要素基盤技術を開発

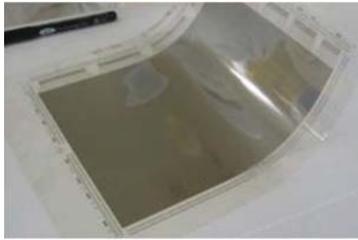


【橋渡し前期開発技術】

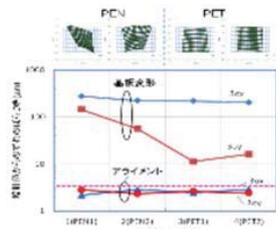
【橋渡し後期技術開発】

# ①フレキシブル触覚センサ技術

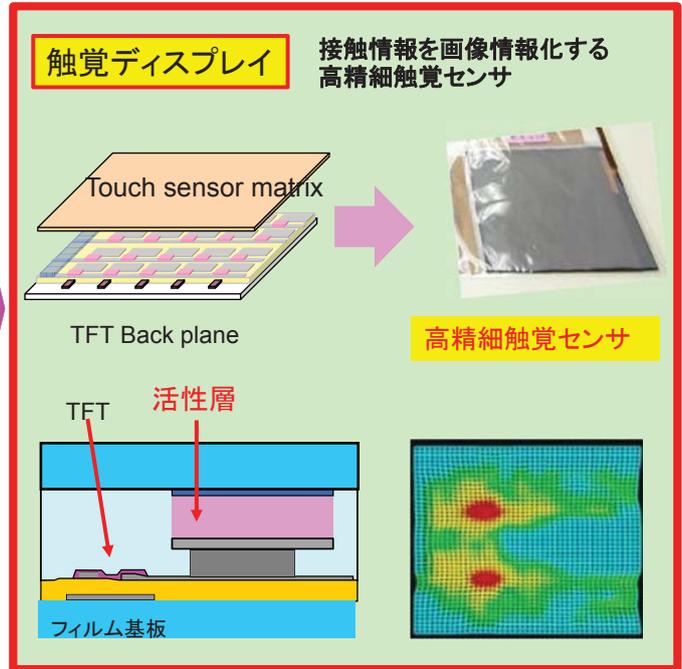
「高精細フレキシブルフィルムデバイス製造技術」、「機能材料低損傷高精細塗り分け技術」等を活用してモノの動きや状態を管理するフレキシブル触覚センサ(触覚ディスプレイ)を創出



◆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



# ①フレキシブル触覚センサ技術

◆ 取得情報種の多様化  
(非接触情報 + 接触情報)  
情報処理の高効率化  
→ 特定箇所の情報抽出

非接触情報



画像映像



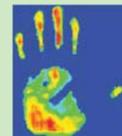
音声

接触情報



圧、ずり、反応、温度

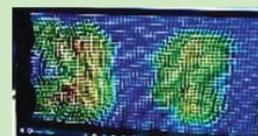
◆ 高精細センシング  
(シグナルイメージング)  
取得データの画像情報化  
→ 情報処理プラットフォーム適応化



手圧イメージ

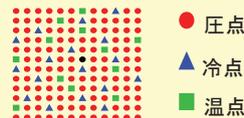


圧軌跡イメージ



座圧イメージ

◆ マルチモーダルセンシング  
(複合情報解析)  
複数種データの同期的取得と複合化高効率処理  
→ 情報処理プラットフォームの活用



五感センシング



温度圧力パターン同時検出

◆ 位置形状に依存しない情報センシング  
(環境融合化)  
伸縮柔軟センサ → 人生活環境に融合した情報取得  
ウェアラブル、ナチュラル

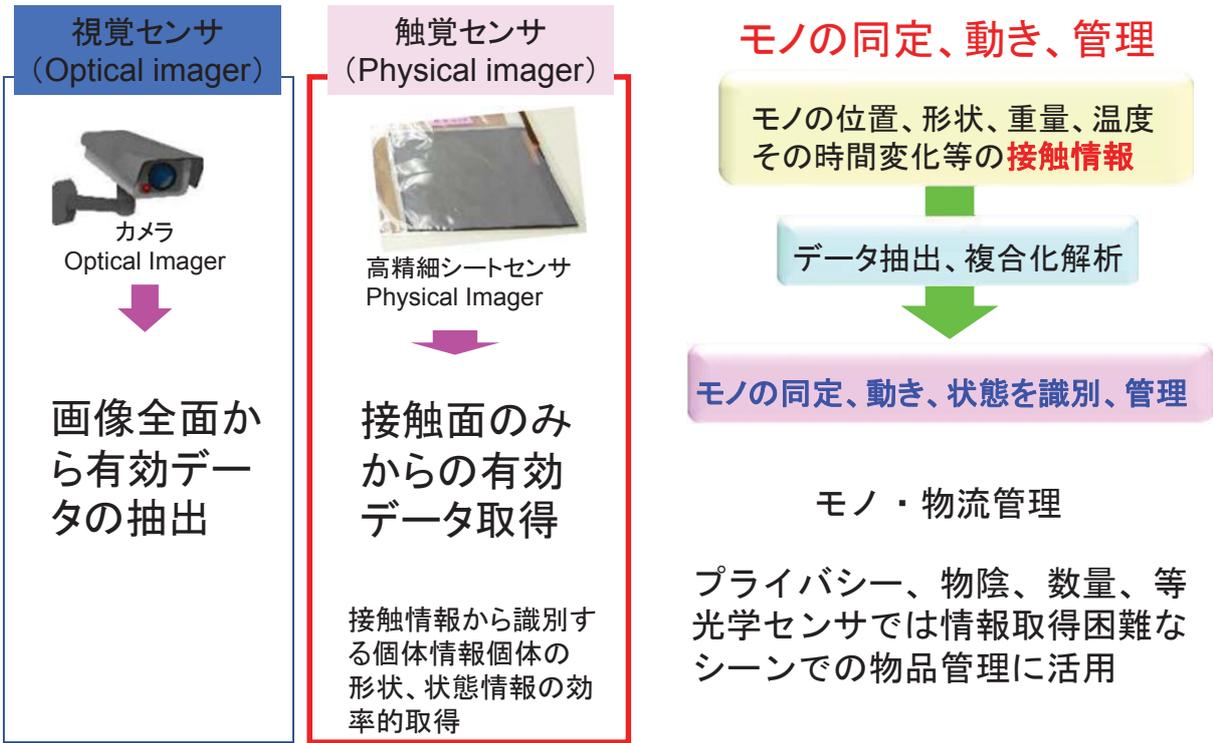
自由形状設置



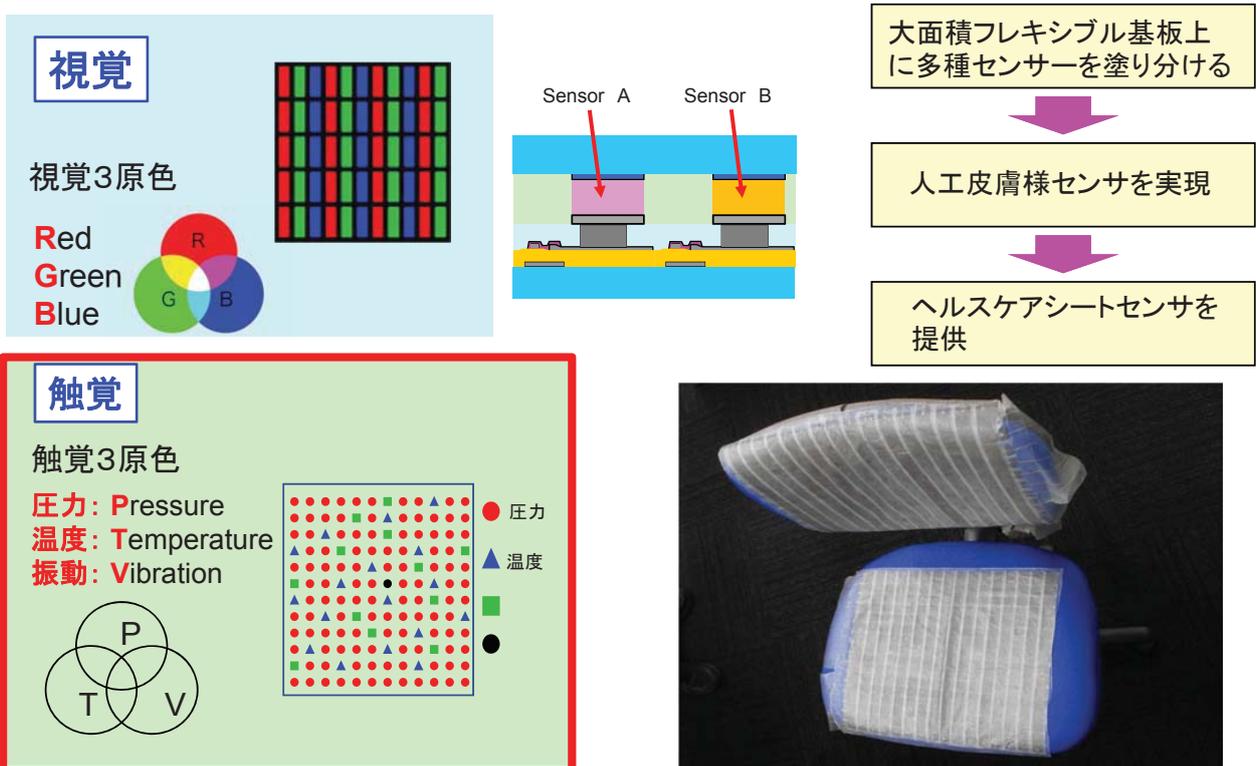
ウェアラブル



### ①フレキシブル触覚センサ技術

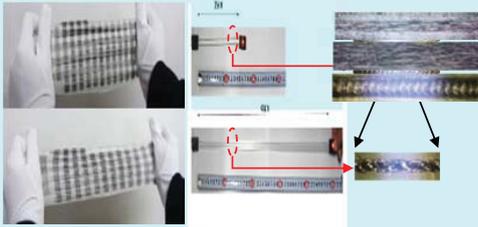


### ①フレキシブル触覚センサ技術



## ②伸縮性デバイス技術によるウェアラブルセンサ

### フレキシブルハイブリッド技術

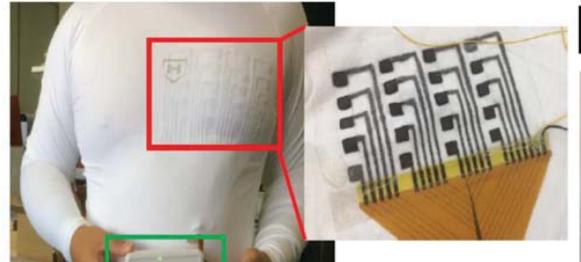


◆ 伸縮性デバイス・材料技術



◆ 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

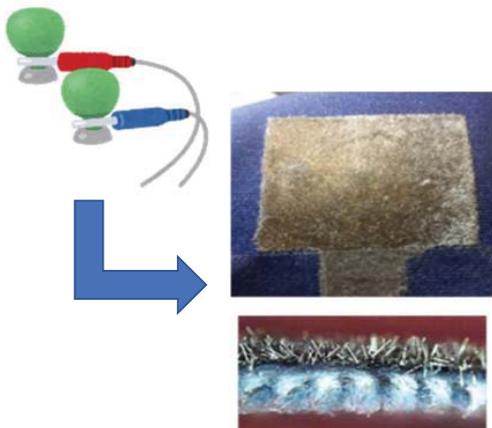
筋肉疲労度検出センサ

## ②伸縮性デバイス技術によるウェアラブルセンサ

### バックキャストिंग

◆ 接触状態不良による信号不安定性

☞ 日常生活体位で良好な電極接触性を確保するため「起毛電極技術」を開発



高機能接触電極を実現

高接触性



メタル電極

接触抵抗  
45.5kΩ



起毛電極

3.3kΩ

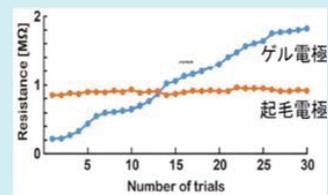


ゲル電極

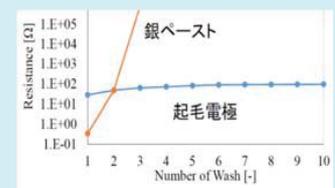
(ドライでは作動しない)

3.7kΩ

高着脱耐性

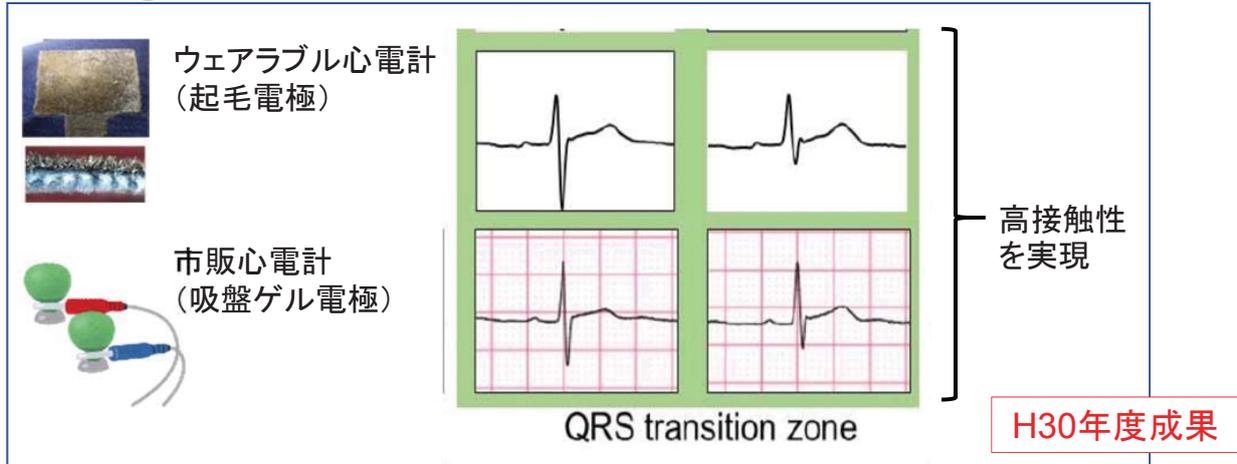


高洗濯耐性

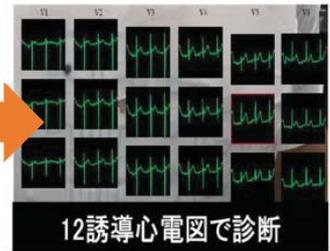


H30年度成果

### ②伸縮性デバイス技術によるウェアラブルセンサ



臥位計測から  
自然体位計測へ



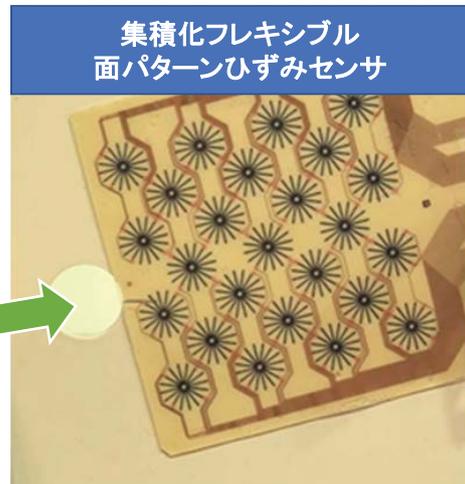
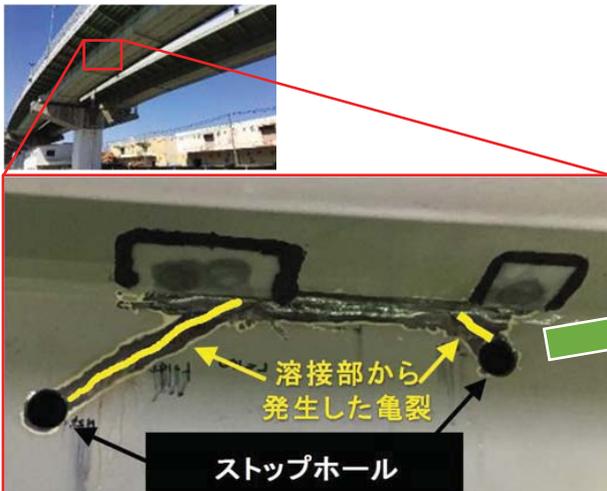
### ③道路インフラ状態モニタリング用センサシステム

目的

老朽化道路インフラ(50年経過道路橋)の補修コストの低減  
橋梁の健全性を適切に評価し、低コストでの保全を図る

手法

ひずみセンサアレイ集積化フレキシブル面パターンセンサによる  
ひずみ分布測定システムによる橋梁の常時モニタリング

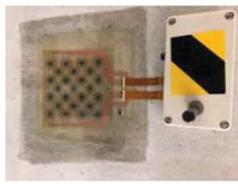


### ③道路インフラ状態モニタリング用センサシステム

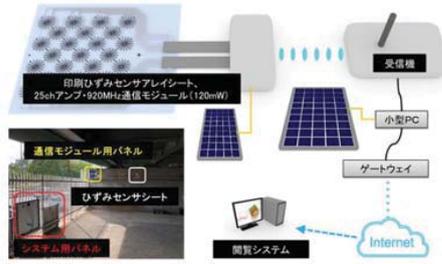


■ 研究開発内容

- 高密度印刷ひずみセンサレイ 印刷で高密度にひずみセンサ素子を配置することで亀裂進展を確実に検知、低コスト化も実現
- 自立電源無線センサシステム センサ端末、無線センサシステムの低電力化によりシステム全体の電力を太陽光発電で供給
- 高耐久・簡単施工接着シート 屋外使用10年以上の接着耐久性と貼るだけの簡単施工を実現



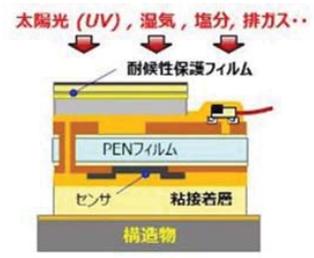
印刷ひずみセンサレイ



自立電源無線センサシステム



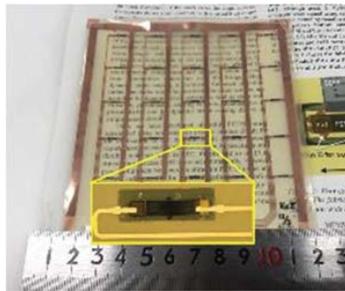
貼るだけ簡単施工



高耐候性保護フィルム

### ③道路インフラ状態モニタリング用センサシステム

H29年度までの成果

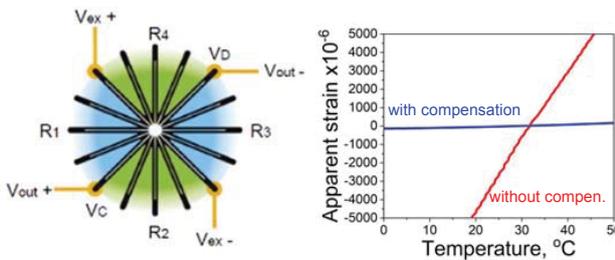


極薄MEMS-PZT/Siタイプ



グラファイト印刷タイプ

- ✓ 高密度・大面積ひずみセンサレイ 圧電MEMS / グラファイト印刷の2タイプ
- ✓ 低コスト 同面積の箔ひずみセンサの1/20
- ✓ 低消費電力 3mW / 25センサ 箔ひずみセンサの1/100以下
- ✓ 温度ドリフト低減  $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  フルブリッジ構造による温度補償

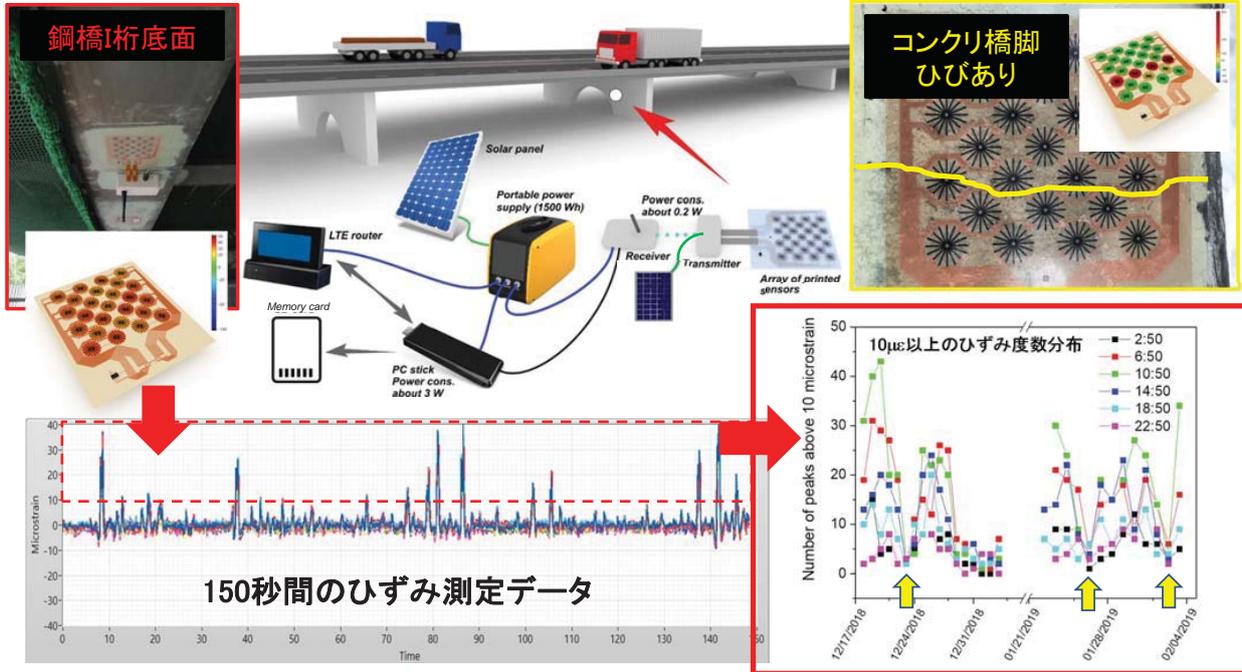


	大面積化 高密度化	25センサ 電力	温度 ドリフト	感度
箔エッチング (市販)	△	800mW	○	1 $\mu\text{e}$
PZT/Si MEMS	○	0W	◎	1 $\mu\text{e}$
グラファイト印刷	◎	3mW	○	10 $\mu\text{e}$

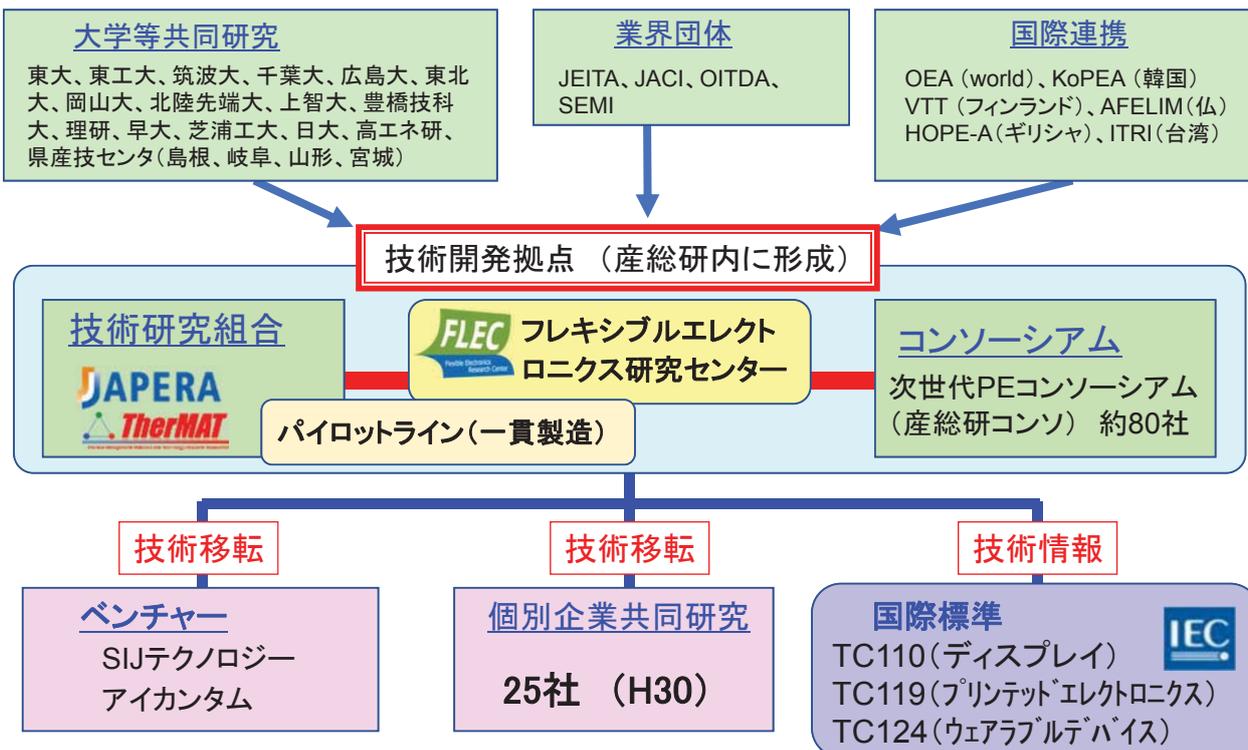
### ③道路インフラ状態モニタリング用センサシステム

自立電源無線センサシステムの実橋長期動作実証(8カ月)

H30年度成果



### 産学・国際連携:イノベーションハブ機能



## まとめ

- フレキシブルIoTセンサを開発  
→ プロダクト化、試作・機能実証ののち、橋渡しにより物品管理用センサとして実用化検討。
- 伸縮性ウェアラブルセンサを開発  
→ 心電、筋電等生体情報取得機能を実証、橋渡しによりヘルスケアセンサとして実用化検討。
- フレキシブルハイブリッドデバイス技術を開発  
→ 道路インフラモニタリング用センサとして、道路劣化状態解析として機能実証、橋渡しにより製品化検討中。
- 橋渡しのための拠点事業を推進



評価資料（年度末確定値）

1. 領域の概要と研究開発マネジメント

各種指標（単位）	委員会説明	年度実績（確定値）	備考
民間資金獲得額（億円）	13.7	15.4	
民間受託研究費（万円）	16,650	17,435	
技術コンサルティング収入（万円）	4,669	4,867	
リサーチアシスタント制度に採用された人数（名）	41	45	
産総研イノベーションスクール事業に採用された人数（名）	16	16	
一定額規模以上の「橋渡し」研究を企業と実施した案件（件）	35	36	
一定額規模以上の「橋渡し」研究の相手先企業との知的財産（第4期中長期目標期間中に出願されたもの）の譲渡契約及び実施契約の案件（件）	0	1	

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）

各種指標（単位）	委員会説明	年度実績（確定値）	備考
論文発表数（報）	219	400	
論文被引用数（回）	6,177	6,528	

(2) 「橋渡し」研究前期における研究開発

各種指標（単位）	委員会説明	年度実績（確定値）	備考
公的外部資金の直接経費（億円）	18.6	19.4	
知的財産の実施契約件数（件）	199	222	

(3) 「橋渡し」研究後期における研究開発

各種指標（単位）	委員会説明	年度実績（確定値）	備考
民間資金獲得額（億円）	13.7	15.4	再掲
技術移転収入（万円）	4,878	12,200	
中堅・中小企業の契約件数の比率（%）	32.0	33.3	

【総括表】

（一部再掲、目的基礎、「橋渡し」前期、「橋渡し」後期の重複なし）

評価指標/モニタリング指標	年度実績（確定値）	領域としての目標値
民間からの資金獲得額（億円）	15.4	19.0
論文の合計被引用数（回）	6,528	6,800
論文発表数（報）	400	400
リサーチアシスタント採用数（名）	45	30
イノベーションスクール採用数（名）	16	
知的財産の実施契約等件数（件）	222	180



## 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（見込を含む）に対して：見込評価】

（評価できる点）

- ・当領域は、今後とも、日本の「エレクトロニクス・製造」を牽引する役目を担ってほしい。
- ・IoT時代の新たな価値創造に向けて、技術コンサルの実施など、共同研究への連携発展を目指した活動を積極的に行っており、民間資金の獲得目標の達成に向けて加速することが期待される。
- ・きめ細かい計画に基づき、きめ細かな組織マネジメントが実行され、着実な運営が図られています。
- ・全体にバランスよく研究を進めてきた。運営費交付金が減少する中、民間資金の増額を目的に沿って進めてきた。
- ・基礎研究、橋渡し前期、橋渡し後期のいずれも優れた成果が得られている。第4期全体を通じて、非常に速いピッチで研究から実用化へと進んでいると思われる。ホームラン特許も出ており、領域全体として優れた実績が得られている。

（改善すべき点及び助言）

- ・日本のエレクトロニクス業界の元気が感じられない中、当領域の元気を日本全体に広げてほしい。
- ・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。
- ・5年の中長期計画自体は、しっかり練られ、それに基づいてのマネジメントも上記のように良好ですが、計画のベースとなった入力情報に弱みがあったのではと推測します。次の第5期中長期計画へ向けて、この状況を改善するために以下の提案をさせていただきます。

#### 1. 海外研究機関のベンチマーキング

日本企業が、1件当たり国内向けと比較して桁違いに多い資金を提供して活用を活発化させている海外研究機関に対して、共同研究という対等の立場ではなく、産総研自らが顧客として資金を提供して活用し、海外研究機関が顧客である日本企業に対してどのような種類のサービスを提供しているかをベンチマーキングして海外研究機関のスキルを学習する機会を設ける。

#### 2. マーケティング・営業窓口の強化

このエレクトロニクス・製造分野ではBtoBでの大きな投資が行われており、グローバルで活躍する企業・研究機関同士では、中長期ロードマップの共有が十分行われています。

次の中長期計画の策定に向けては、この情報の入手強化が必須と考えます。例えばGAFABATの実務会談等も想定してはどうでしょうか。

- ・橋渡し先が海外のケースについては、グローバルの大きな投資に対して、そのバリューチェーンの一翼を担うというミッションを設定し、既存の日本企業では対応できない場合、ベンチャー企業への橋渡しを行い、結果として、グローバルの大きな投資に基づく受注を国内にもたらすことも想定できます。
- ・目的基礎、橋渡し前期、橋渡し後期がリニアモデルでないと認識している点は現実に即しているが、むしろ目的基礎から直接事業になるなどの時代感覚を研究者と共有いただきたい。また、そのような方針を明確に示すことが望ましい。
- ・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？

#### 【とくに平成30年度に対して：平成30年度評価】

（評価できる点）

- ・冠ラボは企業との共同研究にとって重要な意味がある。これからももっと増やしてほしい。
- ・社会実装や事業展開を考えると、協力連携先との密な研究推進が望ましい、連携拠点の広域展開を図っている点は大いに評価できる。新センターの設立など、次のIoT時代の新たな価値の創造に向けても実質的な研究推進を行っている。
- ・本年度も、きめ細かい計画に基づき、きめ細かな組織マネジメントが実行され、着実な運営が図られて

います。

- ・新しいセンシングシステム研究センター設立に向け、将来を見据えた取り組みを実施した。バラン  
ス良く研究・開発・生産と良く実績を出していると思われる。

(改善すべき点及び助言)

- ・最重要目標の民間資金獲得額の伸び率が、過去最大の H28 を超え、H30 が最大の伸び率を達成しており  
研究開発マネジメントの成果が現れている。是非、この流れを第 5 期につないでいただきたい。民間へ  
の橋渡し研究における民間の負担率をもっとふやしてよいと感じた。さらに第 5 期へのつながりを見越  
して、研究スパイラルをうまく回し、研究のステージの進行がうまく進んでいくように研究マネジメン  
トを続けていただきたい。
- ・IoT および関連するエレクトロニクス分野は、特に半導体分野が平成 29 年から大きな変化を起こして  
おり、平成 30 年度はこのトレンドに対応した計画変更をもっと大胆に実施すべきであったと思いま  
す。
- ・資金獲得の目標値に達していないが、新たな手法（クラウドファンディングなど）を試してみる必要が  
あると思われる。

## 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（見込を含む）に対して：見込評価】

(評価できる点)

- ・超伝導材料開発は時間かかり大学や企業ではやりにくい研究である。産総研で引き続き研究をお願いし  
たい。
- ・スピントロニクスの研究等で、目的基礎と橋渡し前期の研究とが連携し、うまく研究ステージスパイ  
ラルが動いている。
- ・発表研究論文数や、世界的なインパクトの面で、目標を超える成果が期待される。
- ・特に、オープンイノベーションでは、知財の獲得が重要であり、基本特許の戦略的な獲得を目指して  
おり評価できる。
- ・学術界での高い評価を得る成果を着実に積み上げ実績を上げています。グローバルのオープンイノ  
ベーション対応のニーズ把握にもチャレンジしています。
- ・計画に沿って着実に研究を進めてきた。基礎研究は継続が重要であり、資金を含めた継続のための工夫  
をすることが必要であるが、それを実行してきた。
- ・さすがに産総研の研究開発力はすばらしいと感じられる。いずれも世界一を目指して頑張っていってほ  
しい。

(改善すべき点及び助言)

- ・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ろう。
- ・日本をけん引する研究拠点であり、民間との技術協力、橋渡しを目指し研究戦略・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たときに、日本がどう勝  
つのかを見据えて、戦略的に取り組む必要がある。また、オープンイノベーションでは、知財の獲得が  
重要であり、戦略的に進めていただきたい。
- ・オープンイノベーション対応の社外技術に対して日本企業も資金提供を開始しており、その傾向への対  
応が後手に回っており、改善が必要と考えます。
- ・世界のベンチマークが十分にはできていない。何をもって成果とすべきか、AIST としての考えを明確に  
して研究者と共有してほしい。要求されなくても成果の最初にベンチマークを出すような状態を実現し  
ていただきたい。
- ・基礎研究については、各自資質を持っている人が集まっているので、評価に値する実績が得られてい  
るが、それらの知の結集を図る試みがあると良い。

【とくに平成 30 年度に対して：平成 30 年度評価】

(評価できる点)

- ・量子コンピュータの研究は NEDO や Q-LEAP などの国のプロジェクトと一緒に進められている。国際

競争の激しいこの分野で産総研が指導力を発揮してほしい。

- ・量子テクノロジー研究拠点として世界的に大きな成果を挙げ、大型プロジェクトを開始するなど、日本の将来を担う質の高い基礎研究が実施されている。
- ・超電導材料の研究では、2つのアプローチで進めており、特に、コンビナトリアルケミストリー法という新しい方式で新物質が発見されるなど、学術的なインパクトが高く社会的にも大きな波及効果がある成果が挙げられている。
- ・超電導を利用した磁石など実用プロトタイプの試作なども進めており、是非、産総研発ベンチャーなどが生まれることが期待される。
- ・オープンイノベーションで世界中から技術を集積させているグローバル投資家には、大変魅力的な活動が進められていると思います。
- ・様々な外部資金を獲得し、外部研究機関と連携しながら研究を進めてきた。
- ・量子コンピュータ、新たな超電導も、開発手法や解析手法ともに良い観点で進められていると評価される。

(改善すべき点及び助言)

- ・大型研究計画では、大学等の研究機関との連携で獲得しているが、各研究プロジェクトに評価委員会等を設け、民間企業からの意見を取り入れるなどの活動を行う必要がある。
- ・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。
- ・従来の上で研究が行われているものが多く、より新たな発想が求められる。
- ・異分野交流を産総研の中ですすめてはどうか？

## (2)「橋渡し」研究前期における研究開発

【第4期全体（見込を含む）に対して：見込評価】

(評価できる点)

- ・独自の開発を積み重ね、STT-MRAM を「橋渡し」の段階まで持っていったことに敬意を表したい。「橋渡し」後期と判断しても良い段階であると思われる。
- ・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いる点が評価できる。
- ・スピントロニクスの研究では、目的基礎と橋渡し前期の研究とが連携し、うまく研究ステージパイプラインが動いている。
- ・数年先の市場を見据えて方針変更を繰り返しながら、着実な成果創出へ向けた活動が展開されてきたものと評価できます。
- ・基礎研究から橋渡し前期に移り量産技術のポイントを押さえながら研究を進める等、研究の位置づけを明確にしながら進めている。
- ・Nature レベルの論文も多く、橋渡しにつながる基礎研究としての実績は優れている。

(改善すべき点及び助言)

- ・シリコンフォトニクス光スイッチを核として光パス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 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。
- ・個別の説明で、5G、スマート製造などのキーワードが出てきたため安心しましたが、キーワードがやや古く思えます。先駆者のプライドもあるかとは思いますが、業界で理解がしやすいキーワードへの置き換えも検討されれば良かったかと思えます。
- ・冠ラボはもっと企業の資金提供がされるような工夫が望まれる。それができる研究内容があるため、提供企業との交渉が必要であり、産総研全体で工夫しながら領域としても考える必要がある。
- ・国内企業にこだわらなければいけない立場は理解できるが、海外へのアプローチについては具体的に議論すべきと考える。

【とくに平成30年度に対して：平成30年度評価】

(評価できる点)

- ・シリコンフォトニクス・コンソーシアムで企業間のコミュニケーションが進んでいることは、国の研究所として理想的な運営であると評価したい。
- ・シリコンフォトニクスコンソーシアムでは、民間企業との連携による新しい産総研ファブを立ち上げるなど、第5期での民間資金獲得に向けて、大いに期待される。さらに、産総研ベンチャーを立ち上げており先駆的でありとても期待できる。
- ・STT-MRAMは冠ラボを開始し、人・予算を民間から導入して製造技術の研究開発ステージを開始している点が評価できる。
- ・紹介いただいたSTT-MRAM、光スイッチ、製造網とも、時代にあった成果であり、着実に実用化へ向けた活動が見られます。
- ・説明のあった研究では、確実に世界トップレベルの研究成果をあげている。
- ・シリコンフォトニクスの技術に対する外部評価は高く、優れた技術であることは明らかである。

(改善すべき点及び助言)

- ・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。
- ・成果のマネタイズというか、例えば民間からの資金提供への結実が弱いのではと思います。これだけの成果であれば、もっと入金出来るはずであり、産総研本部の支援を仰いでの活動が望ましいと思います。
- ・国際標準でイニシアチブをとれるよう、活動して頂きたい。

### (3)「橋渡し」研究後期における研究開発

【第4期全体(見込を含む)に対して：見込評価】

(評価できる点)

- ・個々の技術は素晴らしく、企業化を期待したい。一方で、これらの技術が国際的にどのように位置付けられているか、という点も知りたいところである。
- ・実用化研究から、製品化まで戦略的に行われてきており、このような「橋渡しスキル」が産総研の中で成功モデルとして蓄積されていくことは素晴らしい。最先端の研究から新たな価値創造に結び付けており期待される。
- ・結果として実用化が可能な革新的な技術を生み出されていると判断できます。
- ・市場へ投入されるためのポイントを探索しながら、橋渡し後期としての役割を十分に果たしている。ミニマルファブは時代に即した技術であり、もっと社会に普及されるべき技術である。
- ・研究開発の技術観点から新しいサービス・価値を生み出すというところまで進めていると感じられた。高く評価する。

(改善すべき点及び助言)

- ・社会のニーズをどのように見つけるか、またそれを必要とする企業をどのように見つけていくか、が大切であると思われる。コンソーシアムや拠点事業を進め、広く社会のニーズを受け止めていただきたい。
- ・本日報告いただいた橋渡しの成果を受けて、社会実装へ結びつく技術移転ベンチャーの動きがもっと広がることを期待する。産総研の周りにもっと多くの企業の研究所を集める研究拠点的な戦略を採ってもよいのではないか。
- ・領域の概要と研究開発マネジメントでも記したが、民間資金獲得額を伸ばすとそれに伴う人的資源や設備・スペースなどのリソースがそちらに必要となることについてマネジメントが必要である。
- ・個別の説明で、5G、スマート製造などのキーワードが出てきたため安心しましたが、キーワードがややく古く思えます。先駆者のプライドもあるかとは思いますが、業界で理解がしやすいキーワードへの置き換えも検討されれば良かったかと思えます。
- ・今の産業界が求めている技術の開発を進めているため、もっと多くの産業界に周知することが望ましい。産業界は従来の大企業だけではなく、ベンチャー企業も含めて周知、連携することが重要である。
- ・これだけ技術的にすばらしく、新しいサービス・価値を明確に示しているのに、なぜ広がらないのか疑問である。

#### 【とくに平成30年度に対して：平成30年度評価】

(評価できる点)

- ・材料の劣化や構造物の寿命の診断は喫緊の課題であり、様々な努力がなされている。今回開発されたセンシングシステムの製品化を期待したい。
- ・昨年の助言も取り入れて、産総研の取り組みのアピールも広く行われている。その結果、多くの企業の認知・アライアンスへ参加も拡大しており、実用化に向けた共同研究へつながるなど成果が挙がっている。
- ・橋渡し先を明確に意識しての対応が進められていると認められます。
- ・ゴールをより明確にしながら、ゴールに近づく成果を着実にあげてきた。現場感覚を持ちながら研究を進めていることが、橋渡しの確率を高めている。
- ・IoT というキーワードだけでイメージがつかめなかったのが、今回明確に示して頂いた。非常に評価される。

(改善すべき点及び助言)

- ・サービスビジネスまで見せない、モノづくり企業への技術移転ができないというのは、これが日本企業の課題であると感じた。
- ・橋渡し後期研究は、技術移転だけでなく、量産化技術の研究まで行うのであれば、戦略的・組織的・ビジネスマーケティング的な検討まで行う必要が生じる。そのために研究者をサポートする体制の整備が必要である。
- ・成果のマネタイズというか、例えば民間からの資金提供への結実が弱いのではと思えます。これだけの成果であれば、もっと入金出来るはずであり、産総研本部の支援を仰いでの活動が望ましいと思います。
- ・どの企業とどのように繋いでいくのか、産総研の企画部門が加わって議論すべきと考える。

### 3. 領域全体の総合評価

#### 【第4期全体（見込を含む）に対して：見込評価】

(評価できる点)

- ・当領域はまさに日本の「エレクトロニクス・製造」を牽引していく立場にある。日本の今後を指し示す施策を進めていってほしい。
- ・基礎研究から実用化研究まで幅広く、レベルの高い研究が行われており素晴らしい。将来につながる多くの価値創造の拠点として、日本の産業界のIoT化・モノづくりにおける産業競争力強化に貢献している。
- ・橋渡しを最重要課題と認識し、領域全体での運営を咀嚼して着実な成果を創出していると評価します。
- ・優れた研究者個人が社会の本質的ニーズを探索しながら、最先端研究を牽引できている。これをさらに社会の力にするため、技術の本質がわかる産業界のキーパーソンを見つけて連携することが望まれる。
- ・基礎研究での成果、橋渡し前期・後期の成果はいずれもすばらしい。社会にどのように新たなサービス・価値を提供するかのイメージも明確にいただいた。領域全体でもがいて、いかに社会に貢献しているかと考えている様子がうかがえた。第4期の初期に比べて終了に向けて、かなり社会への展開が明確になってきたと思われる。

(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が、時にはそれに背を向けた産総研独自のプロジェクトもあって良いのではないだろうか。日本と世界を見据えた研究の方向性についての議論も期待したい。
- ・第4次産業革命を受けて、IoT、AIが中心となり大きな産業構造の変化が起こっており、ベンチャーや新しい産業の創出が急速に起こっている。その中で、エレクトロニクス・モノづくりへの期待は大きい。そのベースを支える産総研が研究や技術をけん引されることを期待する。
- ・着実な成果が創出されている一方、最重要の経営課題と中長期計画で位置づけられている橋渡しについては、KPI(Key Performance Indicator)である民間からの資金獲得が常に目標を下回るなど橋渡し先との整合性に課題があるかと思います。
- ・日本企業への展開という制限があるのであれば、5年先に日本企業が最優先で取り組めるテーマ、例えば5Gの加速や、EUVの立ち上がりによるスケーリング則の延長、SIP(System In Package)によるエッ

ジデバイスなどを設定されているべきであったと思います。

- ・結果として橋渡し先の国内企業がない場合、海外企業からの受注を行う日本の既存企業・ベンチャー企業への橋渡しを進めたり、海外へも知財権などで制限しながらの展開などを進めるなど知恵を絞り、資金の回収を進めるべきであると思います。
- ・次の第5期中長期計画へ向けて、この状況を改善するために以下の提案をさせていただきます。
  1. 海外研究機関のベンチマーキング  
日本企業が、1件当たり国内向けと比較して桁違いに多い資金を提供して活用を活性化させている海外研究機関に対して、共同研究という対等の立場ではなく、産総研自らが顧客として資金を提供して活用し、海外研究機関が顧客である日本企業に対してどのような種類のサービスを提供しているかをベンチマーキングして海外研究機関のスキルを学習する機会を設ける。  
(狙い)日本企業が開始した海外への資金提供を国内に回帰させることを狙っていただきたいと思います。
  2. マーケティング・営業窓口の強化  
このエレクトロニクス・製造分野ではBtoBでの大きな投資が行われており、グローバルで活躍する企業・研究機関同士では、中長期ロードマップの共有が十分行われています。  
次の中長期計画の策定に向けては、この情報の入手強化が必須と考えます。例えばGAF+BATとの実務会談等も想定してはどうでしょうか。  
そして、橋渡し先が海外のケースについては、グローバルの大きな投資に対して、そのバリューチェーンの一翼を担うというミッションを設定し、既存の日本企業では対応できない場合、ベンチャー企業への橋渡しを行い、結果として、グローバルの大きな投資に基づく受注を国内にもたらすことも想定できます。  
(狙い)グローバルトレンドを十分把握し、日本の産業がその中で、どこに強みを発揮するかを提言・実行する力を備えていただきたいと思います。
- ・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。
- ・やはり外部資金獲得が目標値に達していないことが唯一の課題と思われる。クラウドファンディングなどの利用など検討して頂きたい。

【とくに平成30年度に対して：平成30年度評価】

(評価できる点)

- ・第4期の目標達成だけでなく、第5期以降にも繋がる多くの取り組みをされていると感じた。
- ・橋渡しの重要指標である民間資金について着実に増加させた実績が見られます。
- ・橋渡し研究を中心に、産業化に向けて大きな進展があった。
- ・基礎研究は、まだ将来がどのようになるのかイメージがつかめないかもしれないが、自分たちでこの先に何かとてつもない社会にしていくという意気込みが感じられた。
- ・橋渡し前期においては、つい数年前には基礎研究だったのにプロセスの検討まで進んでいて、次に期待が持てる。
- ・橋渡し後期においては、いよいよ新たな展開につながる期待がもてる。

(改善すべき点及び助言)

- ・人材流動化など、人材育成への取り組みを実施されているが、まだ、十分とはいえない。グローバル化や企業との連携強化に向けて、研究人材の拡充、流動化、育成について期待する。
- ・効果のある成果が出ていますが、企業がもろ手を挙げて賛同するメインテーマではなく、ロングテール対応であるため、国内企業で受け入れ先が見られなかったり、資金提供が難しい状況に見えます。国立研究機関としての知恵を絞り、ベンチャー企業を活用するなどして海外ニーズにも対応する方策を再度検討いただければと思います。
- ・基礎研究についてはベンチマークを進めて、研究者とマネージャーが共有することが望ましい。
- ・領域内プロジェクトをもう少し進めてもよいのではないかと思う。

#### 4. 評点一覧

【第4期全体（見込を含む）に対して：見込評価】

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	S/A	A	A/B	A	A
「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）	A	S	A/B	A	A
「橋渡し」研究前期における研究開発	S/A	S	A/B	S/A	S
「橋渡し」研究後期における研究開発	A	A	A/B	S/A	S
領域全体の総合評価	S/A	A	A/B	S/A	A

【とくに平成30年度に対して：平成30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	S/A	S/A	A/B	A	A
「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）	A	S	A	A	A
「橋渡し」研究前期における研究開発	S/A	S	A	S/A	S
「橋渡し」研究後期における研究開発	A	A	A	S/A	S
領域全体の総合評価	S/A	S/A	A/B	S/A	A



**平成30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**

令和元年6月14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

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

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

