

#### ④ API を通じた開発ライブラリの試験的な公開

本研究開発においては、インターフェースの幅広い普及と収益化の双方を実現するため、コアとなるアルゴリズムライブラリを秘匿化し、API を通じて早い段階から潜在ユーザーに提供する方針で進めている。2020 年度に試験的な提供を開始した量子化学計算クラウドサービス Qamuy™として上述の QPARC 参画企業の方々が活用することで、ユースケース探索を実施してきた。Qamuy™ は、量子化学計算のインプットを量子回路に翻訳し、シミュレータや実機上での計算をシームレスに行うことができる量子化学計算クラウドとしてパブリックベータ化も完了した（図 2-5-30. Qamuy™ の全体概要）。2022 年度には、QPARC 参加企業から Qamuy™ を活用した論文も出版された<sup>[1], [2]</sup>。

[1] Hirotooshi Hirai, et al. Molecular Structure Optimization Based on Electrons-Nuclei Quantum Dynamics Computation, ACS Omega 2022, 7, 23, 19784-19793.

[2] Yohei Ibe, et al. Calculating transition amplitudes by variational quantum deflation, Phys. Rev. Research 4, 013173 - Published 3 March 2022.



図 2-5-30. Qamuy™ の全体概要

#### ⑤ 様々なユーザー企業との協業

・ 広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発

広域ジオメトリ構造を持つ課題として周波数利用効率向上に向けた取組と位置情報解析に向けた取組の最適化ソフトウェアを開発した。

周波数利用効率向上に向けた取組は移動通信サービスにおいて、複数事業者が同一周波数帯を共用することで、限られた周波数資源の利用最大化が求められる。共用周波数帯の中に設けられた複数の周波数ブロックと数十ミリ秒程度のタイムスロット毎に、基地局間の電波干渉を避けながら、トラヒック需要に応じてそれぞれの事業者にリソースを最適割り当てする必要がある。これをアクセラレータ・コデザイン問題とみなし、リソース割り当てソフトウェアを開発している（図 2-5-31）。

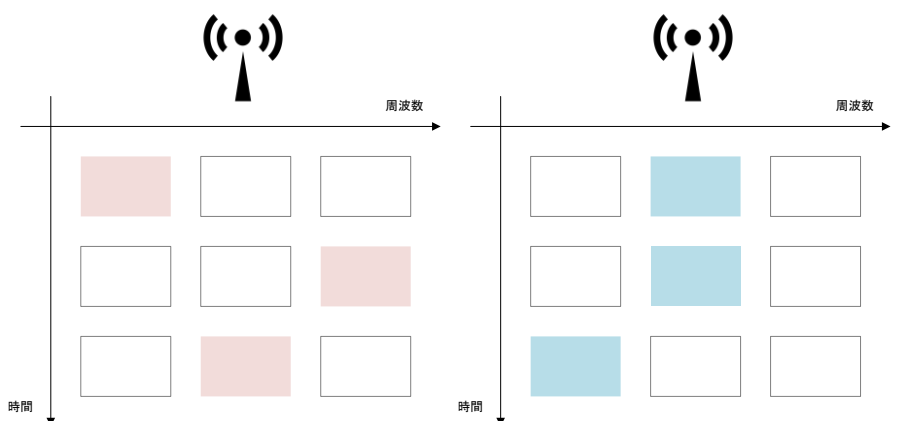


図 2-5-31. 広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発:周波数利用効率向上に向けた取組 (K社と協業)

位置情報解析に向けた取組は、モバイル端末を使い位置情報を取得する位置情報解析業者がその位置情報データから価値のある情報を取り出すことが課題となっている。その膨大な位置情報=点群データから効率よく意味のあるデータを抽出しなければならない。次世代アクセラレータ・コデザイン問題への取り組みとして位置情報解析ソフトウェアを開発している (図 2-5-32)。

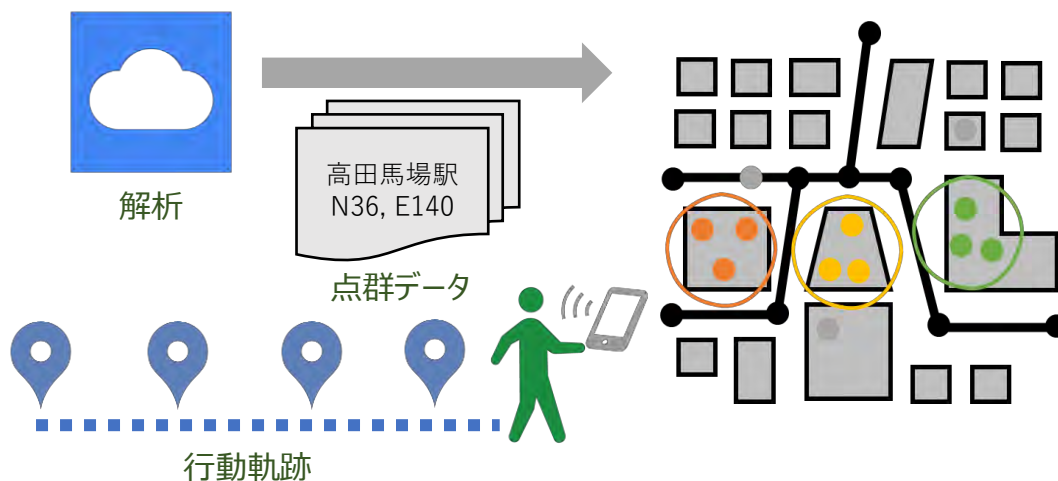


図 2-5-32. 広域ジオメトリ構造を持つ課題に対する最適化ソフトウェアの開発:位置情報解析に向けた取組 (B社と協業)

- ・ 配送事業者と連携し配送計画最適化アプリケーションを取り組み

配送事業者と連携し配送計画最適化アプリケーションを取組んでいる。配送最適化アプリケーションは配送条件の制約を満たしつつ車両の距離・使用時間コストを最小化するアプリケーションである。本取組において、目的関数は配送に必要な全車両の移動距離の最

小化と配送に必要な全車両の時間の最小化として与えられる。アプリケーションが満たすべき制約として、全ての配送地点に1回ずつ訪問、全ての配送地点は配送指定時間内に訪問、全車両の経路の始点と終点は出発地点と帰着地点であることを基本として複合的かつ実用的な制約を事業者と連携し与えている。実際の地理情報・配送情報を用いたデータセットに適用し配送計画最適化の可能性を確認した。2025年のサービスインを目指している(図2-5-33)。

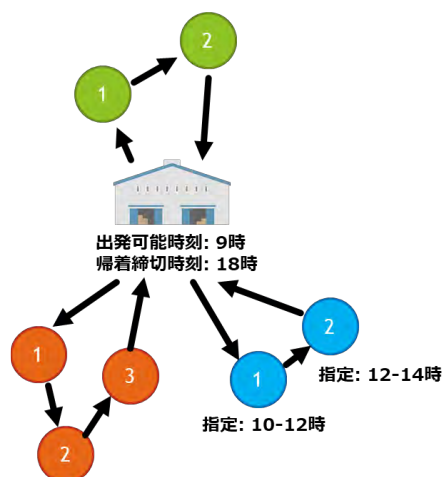


図 2-5-33. 配送計画最適化アプリケーション (S社と協業)

・住友商事(株) Quantum Transformation (QX) プロジェクトとの連携

世界にさきがけて Quantum Transformation (QX)を提唱した住友商事 QX プロジェクトと発足当時から緊密な連携を行ってきた。住友商事(株)の経営層に対する量子技術に関する講演会や、住友グループ水会(住友グループに所属する技術者からなる親睦団体)にて、量子ビジネス創出のワークショップの開催、住友商事(株)QX チーム・デロイトトーマツコンサルティング(合)・三菱地所(株)と共同で行っている「量子サークル」との連携により、先行事例紹介や事例創出のコツについて参加者と議論した。

・産学協同

・3の取り組み・既存コンソーシアム等団体との連携

次世代アクセラレータのポテンシャルユーザー企業(自動車部品メーカー、電気機器メーカー、HR・広告関連企業、化学メーカー、飲食品メーカー等)の様々な業種の企業と連携を行ってきた。また、量子 ICT フォーラムの量子コンピュータ技術推進委員会(慶應義塾大学 田中准教授が幹事)や、モバイルコンピューティング推進コンソーシアム(慶應義塾大学 田中准教授が顧問)において、次世代アクセラレータの活用を企業とともに考えるワークショップを企画した。

・アウトリーチ活動を通じた次世代アクセラレータへの興味喚起

Innovation Japan 2022 や KEIO TECHNO-MALL 2022 等の各種イベントにおいて、わかりやすい情報発信に努め、次世代アクセラレータの社会実装に取り組むパートナー探索を実

施した。アウトリーチ活動がきっかけで連携を開始した企業も出てきた（電気機器メーカー等）。

SIP 第 2 期終了後、これらの社会実装活動を継続して運営するため、社会実装の体制整備についても具体的に計画を進めている。図 2-5-34 にあるように、早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構内に量子計算アプリケーション拠点を整備し、慶應義塾大学、(株)フィックスターズ、(株)QunaSys と連携し、オープン/クローズ戦略で事業の拡大と基礎技術の確保を行い、かつ、様々な企業群を呼び込み、クローズ戦略で社会実装を促進するという仕組みである。技術コンサルティングや共同研究・事業化を拡大し、自活可能なエコシステムの形成をすすめるとともに、企業で技術を活用するのに不可欠な人財育成も並行して実施する。この仕組みにより、図 2-5-35 にあるような戦略的なユーザー獲得を狙う。すなわち、現在進行中のアーリーアダプタ層（QPARC 参画企業をはじめとした SIP 事業期間内に加入の社会実装コンソーシアム企業）との協同での社会実装実例をもとに、アーリーマジョリティ層（SIP 事業で開発したデファクトスタンダード基盤の試用企業）やレイトマジョリティ層（SIP 事業で開発したデファクトスタンダード基盤未試用企業）へのアプローチを進める。

さらに、SIP 第 2 期終了後早い段階で、早稲田大学拠点を活用しながらパートナー企業と手を結び、クライアント企業の量子関連ビジネスの促進するエコシステムを構築し、持続的に拠点を運営する（図 2-5-36）。同時に、公的資金の獲得のほか技術コンサルティングや共同研究を拡大し、また、WUV（早稲田大学ベンチャーズ）を活用した大学発ベンチャーの起業も検討し、事業財源の確保を目指す。人材確保について、大学教員ならびに大学発ベンチャー等を利用し、定常的に人材を確保することを目指す。加えて企業派遣の研究者の受け入れや、大学技術移転機関（TL0）の法律家の受け入れを行い、体制を構築すると同時に、人材教育を通じて人材確保する。

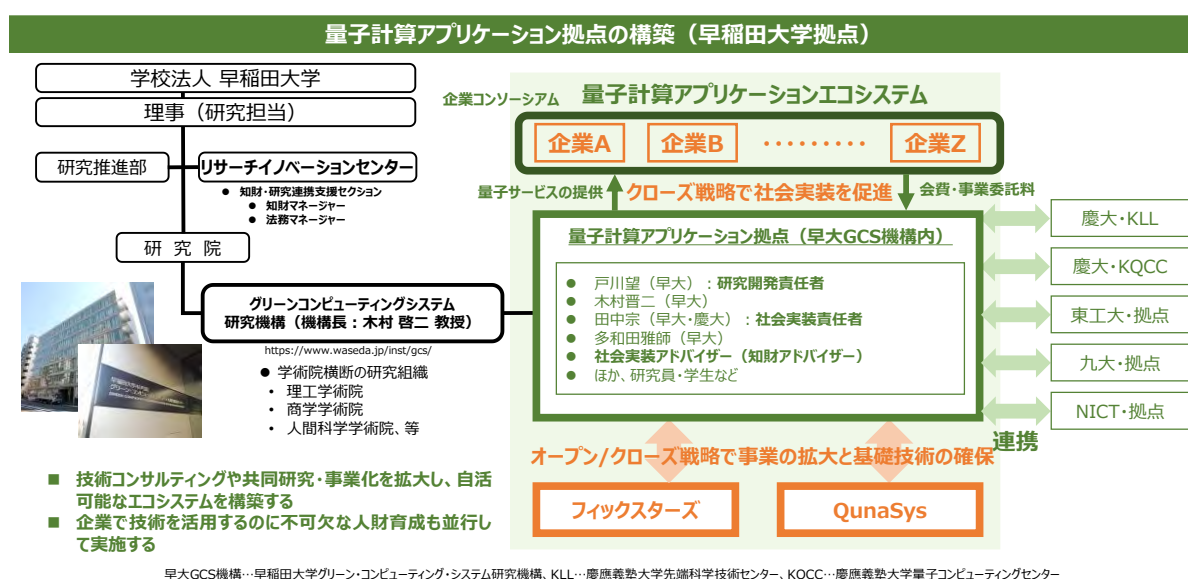


図 2-5-34. 量子計算アプリケーション拠点（早稲田大学拠点）の構築

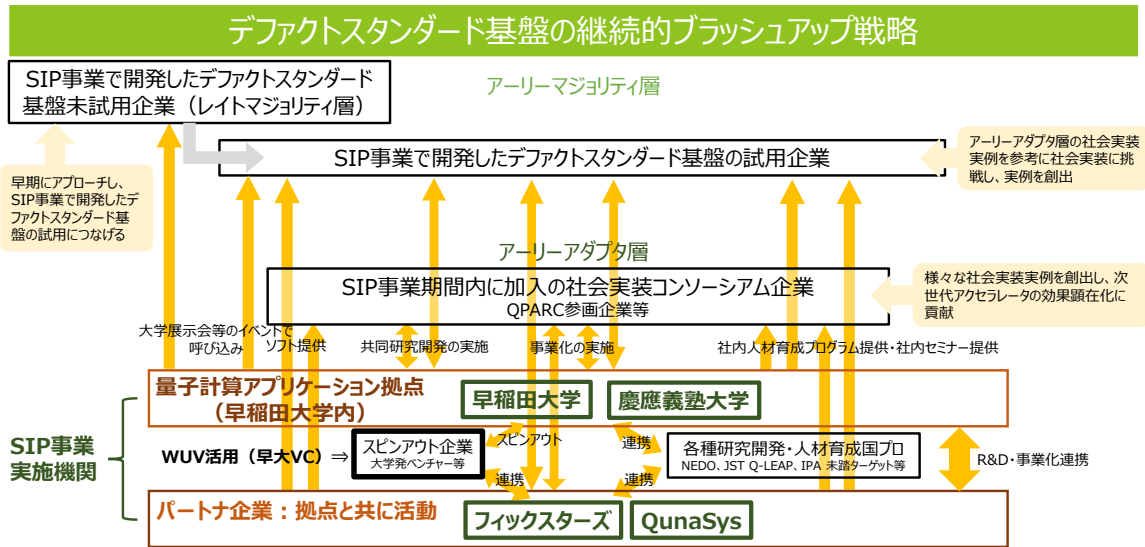


図 2-5-35. 次世代アクセラレータのデファクトスタンダード基盤の継続的ブラッシュアップ戦略

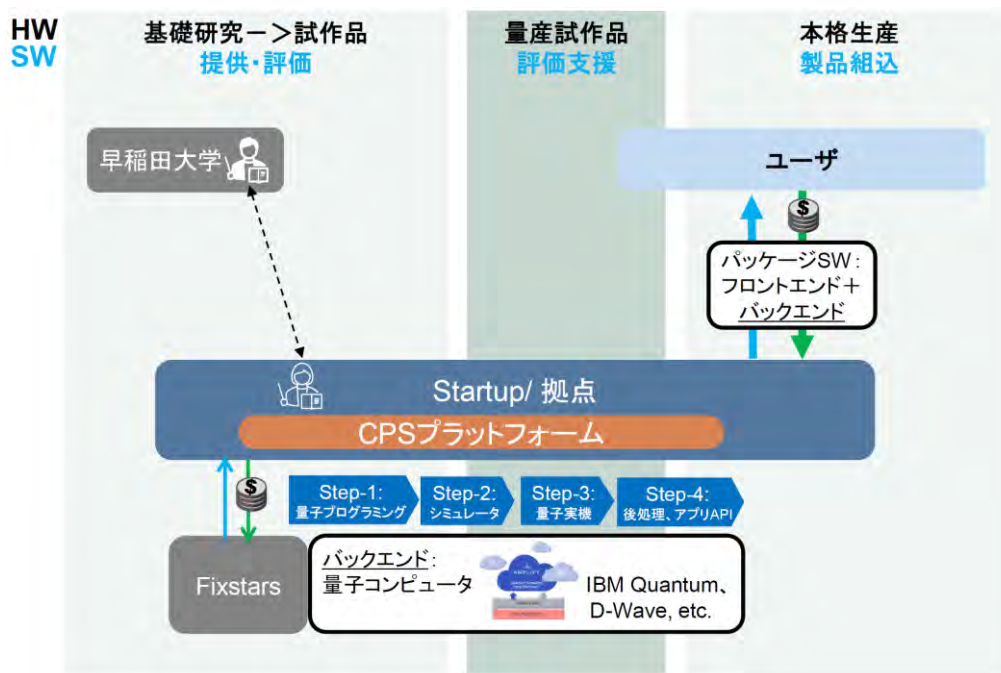


図 2-5-36. CPS プラットフォームの構築と持続可能な拠点の運営

⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

本研究開発では社会実装に向け、研究計画の提案当初より、以下のような段階的な戦略を想定している。

- 1) 研究開発の最終段階あるいは研究開発終了後まもなくの時期に、まず本研究開発によって得られた成果を部分的にもいち早くオープンソース化することによって、世界でデファクトスタンダード化する。

- 2) この際、次世代アクセラレータ開発事業者と共同し、自治体との協調を築きながら、本研究開発成果を利用したプログラムコンテストを開催する等、利用促進を図ると同時に量子ソフトウェア人材育成に取り組む。
- 3) その後、本研究開発を主体的に進める産業界ならびに関与した産業界を中心に、順次クローズ戦略として、競争領域にて事業展開を図る。

- A) 研究開発されたソフトウェア群を用いたアプリケーションプログラムの高速化・高度化サービス
- B) 研究開発されたソフトウェア群のライセンス等

上記の出口戦略は、図 2-5-37 のように、技術戦略、事業戦略、知財戦略が三位一体となり進めている。

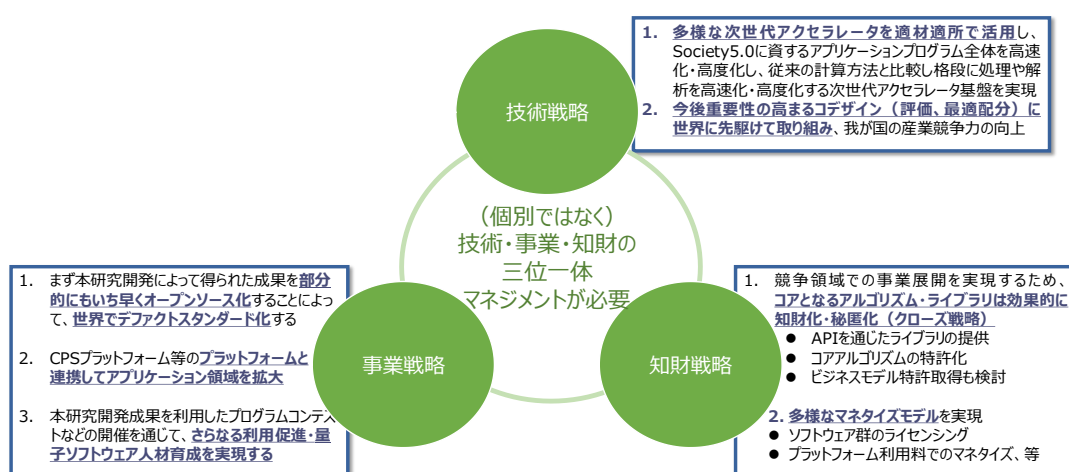


図 2-5-37. 本事業の出口戦略

2022 年度までの研究開発を通して、すでに (A) 次世代アクセラレータ・コデザイン技術ならびに (B) 次世代アクセラレータインタフェース技術、(C) 次世代アクセラレータの社会実装、の促進の成果として上記の出口戦略にもとづき、社会実装コンソーシアム向けに、量子計算クラウドサービス「QunaSys Qamuy™」を公開し、メンバー企業が活用している。量子計算クラウドサービス「QunaSys Qamuy™」では、API を公開とし、積極的にメンバー企業が活用するとともに、API の元となるライブラリやアルゴリズムはクローズとして知財やアルゴリズムを守る。このようなオープン/クローズ戦略（図 2-5-38 参照）により、本研究開発の広い普及とデファクトスタンダード化を図っている。Qamuy™は社会実装コンソーシアムでメンバー企業が計算化学領域に量子コンピュータを活用するユースケース探索に活用している。ユースケース探索プログラムは 2022 年度前期と後期の 2 タームで実施しているが、後期タームの参加企業は前期タームに比べて 2 倍近く増加しており、こうした戦略が社会実装の加速に貢献していると考えている。本研究開発では、すでに出口戦略の一部の実践を開始していることになる。

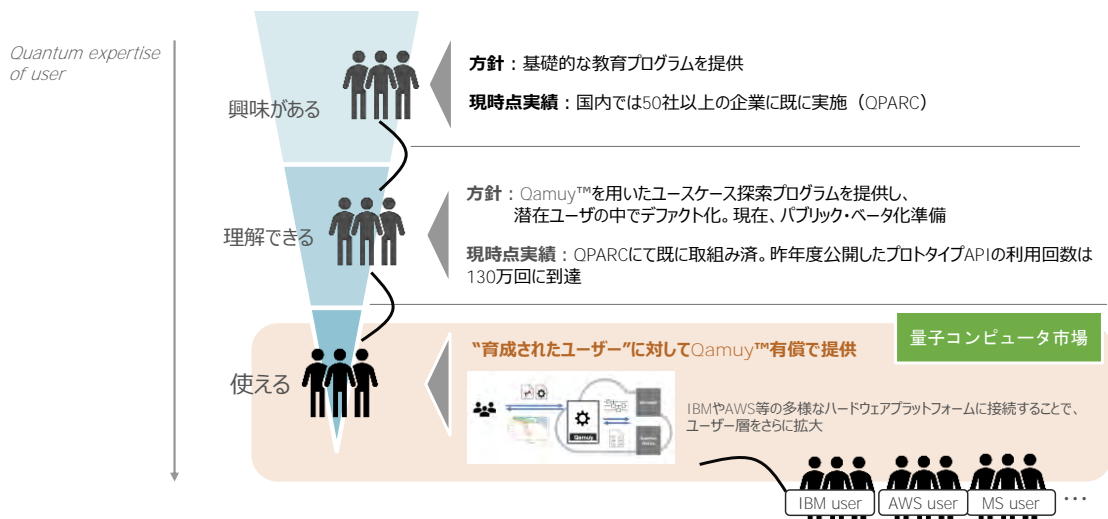


図 2-5-38. Qamuy™ を活用したオープン/クローズ戦略

さらに、(株)フィックスターズでは、NEDO 事業と連携することで Fixstars Amplify と呼ぶソフトウェア環境を構築し、さまざまなイジング型コンピュータに対応したアプリケーション開発プラットフォームをオープン展開している。次世代アクセラレータを利用して、大規模問題の入力と高速実行が可能で、POC や実問題を視野に入れたアプリケーション開発となる(図 2-5-11 参照)。開発環境と実行環境がセットで提供されるため、すぐに次世代アクセラレータの活用が開始可能であり、本 SIP 光・量子課題の出口戦略を活性化している。

## ⑥ 成果の対外的発信

本研究開発では、上述のような三位一体の出口戦略に基づき、研究開発の成果として得られた API、ソフトウェア、ライブラリを広く普及させるために、さまざまな対外的な成果発信を行っている。

量子科学技術研究開発機構の Web ページを通じて、本課題の情報発信を行っているほか (<https://www.qst.go.jp/site/sip/35680.html>)、社会実装コンソーシアム QPARC に向けてシンポジウムを開催し (2022. 8. 30 開催)、2019 年度～2022 年度にかけて、複数回のシンポジウムや国際シンポジウムを実施している (SIP「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」国際シンポジウム 2022、<https://www.qst.go.jp/site/sip/43880.html> 等を参照)。さらに各実施項目に関連して以下のような対外的な成果発信を行っている。

### (A) 次世代アクセラレータ・コーデザイン技術

次世代アクセラレータ・コーデザイン技術の成果展開の例として、物流倉庫による作業最最適配置の実証実験の成果活用事例を動画紹介している。

・動画リンク : <https://youtu.be/UyvomUej2Xw>

### (B) 次世代アクセラレータインタフェース技術

次世代アクセラレータインタフェース技術の成果展開の例として、(株)QunaSys が ENEOS と連携し NISQ デバイス実機で分子の振動数解析を実施（誤差指標が 29%⇒2%）した研究が 2022. 9. 21 に Microsoft の顧客事例として公開された。量子コンピュータの化学産業への応用に道筋をつけた事例として紹介されている\*（図 2-5-39）。

\*…<https://customers.microsoft.com/ja-jp/story/1536149625843093498-eneos-energy-azure-quantum-japanese>



図 2-5-39. Microsoft における事例紹介

### (C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

研究期間を通じてさまざまなイベントで社会実装を促進している。特に最終年度となる 2022 年度には、Innovation Japan 2022 や KEIO TECHNO-MALL 2022 等の各種イベントにおいて、わかりやすい情報発信に努め、次世代アクセラレータの社会実装に取り組むパートナー探索を実施した。アウトリーチ活動がきっかけで連携を介した企業も出てきている（電気機器メーカー等）。

## ⑦ 国際的な取組・情報発信

これまでの研究期間を通してさまざまな国際的な取り組みや情報発信を行っている。例えば、⑥成果の対外的発信でも記述したが、2022. 10. 12 には、本 SIP 光・量子課題の国際シンポジウムで本研究開発の成果や拠点から提供できるサービス内容を広く世界に向けて発信したほか、以下のような活動や取り組みを通じて、国際的な情報発信を行っている。

### 1) 国際カンファレンスの共催（2022. 7. 13-14@ウェスティンホテル東京）

(株)QunaSys は量子コンピュータのビジネス応用に関する国際会議「Q2B22 Tokyo」を共催した。量子コンピュータの国際会議 Q2B としては初の米国以外での開催となり、(株)QunaSys はイベント全体の企画と運営を実施するとともに、社会実装に向けた活動を国内外の参加者に幅広く発信した。（参考：<https://q2b.qcware.com/>）

### 2) 米国量子経済開発コンソーシアム QED-C との連携

上述の社会実装コンソーシアム QPARC の活動として、米国の量子経済開発コンソーシアム QED-C の Executive Director である Celia Merzbacher を招き、社会実装活動の紹介を行った。



- ・ (2022. 7. 13) QPARC 会員のユースケース探索活動を QED-C へ紹介
  - ・ (2022. 8. 30) QPARC にて QED-C ディレクターから QED-C のコンソーシアム活動紹介を受け、連携に向けた意見交換
- 3) IEEE でのチュートリアル実施 (2022. 9. 20)
- 量子コンピューティング教育を強化し、産業界や学界からより多くの人が量子コンピューティングの分野で活躍することを目指した、チュートリアルやパネルディスカッションを実施した。
- ・エネルギー分野における量子コンピューティング化学アプリケーションの紹介 (ハンズオンコーディング)
  - ・QPARC 量子化学ハッカソンチャレンジの取組紹介
- 4) Pistoia Alliance とのグローバルイベント実施 (2022. 7. 7)
- 製薬系非営利アライアンスである Pistoia Alliance とともに、Pistoia Alliance グローバル ナレッジ シェアリング バーチャル イベントを開催した。
- ・ヘルスケア及びライフサイエンスの領域において期待されるユースケースと、量子計算が医薬品研究開発の未来に及ぼす影響について、ユーザー企業との対話形式で講演を行い、社会実装の活動をアウトリーチした。

## (f) GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成

連携研究課題：GPS 型レーザー加工機システム研究開発（研究責任者：小林洋平 東京大学  
物性研究所 教授）

担当サブPD：安井 公治（レーザー加工担当）

実施代表者：池上 浩（九州大学 システム情報科学研究院 教授）

実施機関：九州大学、ギガフォトン株式会社

協力機関：パデュー大学

### 1) 研究内容

#### パイロットプロジェクトの全体像：

モノづくりのGPS化はSociety 5.0実現化において重要な役割を果たす。連携研究課題の「GPS型レーザー加工機システム研究開発（東京大学）」においては、スマート製造の中でも最も困難な工程の代表例であるレーザー加工においてGPS化を実現することで、モノづくり全体にGPS化技術を波及させ、ネットワーク型製造システム実現を加速することを目指している。本実施課題では、2019年度に連携研究課題において蓄積したGPS化拠点構築のノウハウの提供を受けて、「GPS型材料改質レーザー加工システムの試作と評価」として開始され、電子デバイス製造の中でも特に半導体材料のレーザー改質プロセスのGPS化に取り組んだ。2020年度以降はGPS型製造技術の社会への波及を加速するための課題を抽出し、解決策を包括的に提示する拠点を形成するためにプロジェクトを開始した。半導体材料のレーザー改質プロセスは、物質の除去や材料の劇的な形体変化を伴う切削や穴あけといった学術的な理論の整備がまだ実現していないプロセスと比べて、いまだ不足するものの一部において学術的な理論の整備も進んでおり、GPSの実用化を検証する対象として望ましい。加えて喫緊の課題として産業界からの投資が始まっている工程からの要請・ニーズも強いことから、本技術分野において、GPS化技術を広く産業界に提示し、その成功事例を産業界に提示するとともに、開発側としては成功体験を積むよい機会である。従って、このプロジェクトを推進することにより、スマート製造への民間の投資を誘起することで、研究開発成果の社会実装、ひいてはネットワーク型製造のエコシステムの構築を加速する。

具体的には連携研究課題から提供されるGPS化のノウハウである、「プロセスをGPS化するための基盤技術群」と「GPS化推進拠点を構築する枠組」等の提供を受け、これを半導体材料のレーザー改質プロセス分野に適用し、課題抽出から解決までの一貫した体制整備を進める。「プロセスをGPS化するための基盤技術群」としては、東京大学においてマイスターデータジェネレーターとスマートレーザー加工機の構築と運用における知見からGPS化に重要とされた要素技術群、例えば、その場計測、データ取得手法、シミュレータ開発などを、当該分野に適合させて開発するとともに、それらを有機的に繋げるインテグレーションを実践し、レーザー改質プロセスのGPS化を実施する。また、「GPS化推進拠点を構築する枠組」等のノウハウ提供を受け、これら基盤技術群を中核として、GPSを搭載するレーザ

一改質プロセスのシステム化を促進し、GPS 化ニーズを持つ企業群とオープン/クローズ体制で連携する拠点を形成する。

連携研究課題が最も難しいとされる技術分野における GPS 構築を行い産業界における中長期的なボトルネックの解消に取り組むのに対し、本パイロット拠点は、喫緊の課題としてすでに産業界における取組が始まっている分野に対してその方法論を展開することで、迅速な波及加速を担う。これらの相補的な取り組みにより、連携研究課題が推進する GPS 化戦略を効率的に社会に展開することを目指す。

#### 具体的な実施計画（内容）：

半導体材料のレーザー改質プロセスの GPS 化として、「プロセスを GPS 化するための基盤技術群」のノウハウ提供を受けて GPS 化に向けた加工-データ取得ループ（プロセス-その場観察-詳細観察-データ蓄積-データ解析）を構築する。レーザー光源としては、高品位な改質が期待でき、我が国に強みのあるエキシマレーザーを用いる。パルス波形やビームプロファイル、強度、スキャン速度、スキャンパターンなど広いパラメータ空間におけるデータ取得を可能とするように設計する。GPS 化に向けた加工-データ取得ループを構成する光源、レーザーによるプロセスのその場観察ユニット、改質後の電気的特性や表面の形状・組成分析など詳細観察装置はできる限りモジュラーな設計とし、運用・評価に基づき適切な組み合わせで構成できるようにする。詳細観察・評価ユニットから得られる詳細情報とその場観察ユニットから得られる簡便な情報の相関をデータ解析により見出すことが GPS 化に向けて重要である。また、本レーザー改質は、大規模な物質の離脱を伴わないプロセスであることから、固相液相相転移現象の数値モデルシミュレーションによって比較的正確に予想できる、もしくは、観察結果との比較によって現象の理解を深めることが期待できるため、シミュレータ開発を実施し、GPS 化に向けた加工-データ取得ループによって取得した結果との比較・検討を行う。

レーザー改質の具体的なプロセスとしては、産業界からのニーズの多い (1) SiC パワーデバイス半導体のレーザードーピング、(2) ディ스플레이用多結晶 Si 薄膜半導体のレーザーアニール、(3) 次世代半導体デバイスのレーザードーピング等を選定し、GPS 化によって最適なプロセスが見いだせることを実証する。また、電子デバイスメーカー等との連携によりニーズを集約し、パートナー企業のニーズを反映して適宜優先度を更新し、他のプロセスへの展開も評価・検討を行う。パートナー企業からのニーズを総括し、適切なプロセスに対して GPS 化された機能実証機 ( $\alpha$ 機<sup>\*1</sup>) を構築することで、パートナー企業が GPS 化技術を評価し、自己資金で量産へ進展するための量産実証機 ( $\beta$ 機<sup>\*2</sup>) の構築判断を可能とする体制を整備する。

上記体制の整備として、九州大学拠点では光・量子プロセス研究開発センターを核とし、センター内の社会実装推進部門である綺羅コンソーシアムを中心に技術育成・補完、必要な企業への速やかな技術供給を実施する。半導体メーカーが集まる九州地区の利点を生かし、

様々なコミュニティ等との連携を推し進め、CPS化技術の波及とネットワーク型製造システムの実現を加速していく。CPS化に向けた加工データ取得ループ及びCPS化に向けて開発した基盤技術群及びCPS化プロセスの機能実証機(α機)を綺羅コンソーシアムのプラットフォームに提供するとともに、関係企業からの提供設備等も集約し、CPS化ニーズを持つ企業等が試行・評価でき、投資判断を可能とする環境を整備する。また、これに関わる人・材料・ニーズ情報・評価情報の形で民間からの資源を広く受け入れる。これらの活動を通し、電子デバイス分野においてCPS化戦略の波及を加速する拠点としてCPS化のニーズを持つパートナー企業の課題に取り組み、民間資金により持続的な拠点として発展させ、モノづくりCPS化の社会実装を効率化することを目指す。図2-6-1にパイロット拠点実施体制図を示す。

\*1… α機：β機の製品仕様を見極めるための試作機。実際の生産ラインで必要とされる仕様に関する実証検証を行うことが可能な装置。

\*2… β機：量産機に先行して民間企業の生産ラインに導入する製品。販売を前提とする装置。

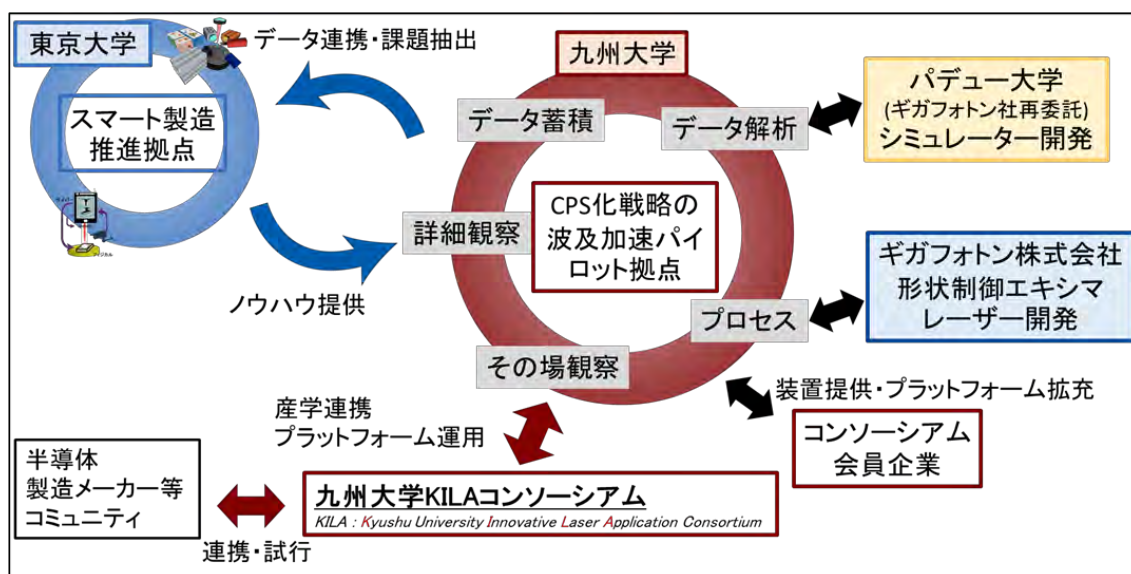


図2-6-1. パイロット拠点実施体制図

## 2) 技術的目標 (計画)

事業終了時点アウトプット目標 (2022年度の目標)

- ・AI解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置を市場投入する。
- ・企業ニーズを反映した具体的な改質プロセスに対して当該企業の投資も受け入れつつ機能実証機(α機:TRL6)を製作し、民間企業の評価ラインなどを活用して、製作した電子デバイスの評価を行う。この結果に基づき、量産実証機(β機:TRL7)の実証実施に向けた企業の投資判断を獲得する。
- ・CPS化ニーズのあるレーザー改質プロセス全般に対して、企業が量産実証機(β機:TRL7)



高性能化、信頼性、拡張性などの装置及びプロセス能力の評価に関する事項は、過去10年間の文献調査（約500件）により現状の技術的到達度と改善見込みを評価し、また特許（約300件）やプレスリリース、野村証券などのアナリストレポート及び各デバイスメーカーの技術報告書（デバイスメーカー5社、IR情報として公開）の調査により当該分野の開発動向を把握し評価に反映した。

### 【2021年度】

2021年度に行ったグローバルベンチマークの結果を表2-6-1に、これをレーダーチャートにしたものを図2-6-2に示す。

文献調査結果から、住友重機械工業(株)やLASSEなどのレーザーアニーリング加工装置は、SiC、GaNのワイドギャップ半導体に対する吸収が低い波長のレーザーを選択しているという問題、及び抵抗損失低減に必要な高濃度ドーピング加工が不可能であるという本質的な問題を抱えており、2020年度から進展はなかった。また、高温注入+ファーンেসアニール工程も、学術文献調査や特許調査においても従来を超える高濃度ドーピングが実現できたという報告は無く、技術的進展は確認できなかった。一方、本研究課題でギガフォトン(株)及びM社などとともに取り組んでいるパワーデバイスレーザードーピング加工装置においては、量産工程を想定したスキャン照射条件のチップレベル評価を実施し良好なコンタクト抵抗が再現できることを確認した。

表 2-6-1. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」のグローバルベンチマーク（2021年度）

評価軸	研究開発				備考	
	SIP-九大 波長248 nm (日本)	住友重機 波長355 nm (日本)	LASSE 波長308 nm (仏)	高温イオン注入 ファーンেসアニール (全世界)		
SiC	高性能化	◎ 0.2~0.3%	△ 5~9%	△ 5~9%	△ 5~9%	裏面コンタクト抵抗損失割合
	信頼性	○※7	○※1	—	◎※2	※7: チップレベル評価実施 ※1: 剥がれ要因(界面偏析物)あり ※2: 剥がれ要因なし
	拡張性	○※3	×	×	△※4	裏面p型コンタクト形成プロセス ※3: 低抵抗を実現 ※4: 高抵抗で適用範囲に制限あり
	プロセスコスト	○	◎	◎	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	○※8	○※8	○※8	○※8	※8: コロナ禍により上方修正 適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
GaN	性能・信頼性	○※5	×※6	×※6	△	※5: FSレベルでp型低抵抗化 ※6: 適用不可
	プロセスコスト	○	×	×	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	△	△	△	△	※8: コロナ禍により上方修正 適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
総合評価	○	△	×	△		

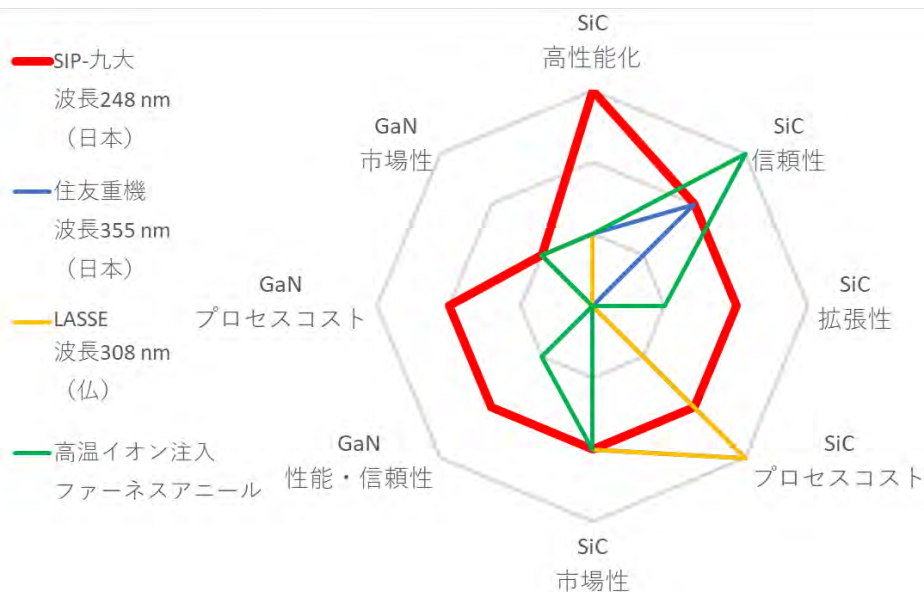


図 2-6-2. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」と競合技術との比較（2021 年度）

世界はEVの加速度的な普及や脱炭素社会実現に向けて大きく歩みだしており、これら電気インフラにて重要な役割を担っているパワーエレクトロニクスの市場予測は、2021年度のマーケットレポートから大きく上方修正されている。2021.9に発表されたGlobal Information Inc.の市場調査レポートによれば、現在のSiCパワーデバイスのCAGRは18.7%であり、2026年には2,400億円の市場規模となると予想されている。また、同レポートによれば、GaNデバイス（光デバイス、RF通信デバイス、パワーデバイス）の市場規模は、CAGR 5.4%で2026年には2兆6千億円に達すると予想されている。GaNパワーデバイスの現在の市場規模は約100億円と小さいが、CAGRは64.4%と驚異的に高く、2026年には1,200億円に達すると予想される。以上の様に、SiC及びGaNデバイスの市場性が上方修正されたことで、これらワイドギャップ半導体の製造装置として強みを持つ、パワーデバイスレーザードーピング加工装置の市場性が向上した。

【2022 年度（終了時）】

研究開発計画に基づいた開発を進めた結果、SIP終了時の比較結果は、表2-6-2、図2-6-3のように進展した。

住友重機械工業(株)やLASSEなどのレーザーアニール加工装置は、SIP終了時の2023.3には、量産ラインでの生産を続けることで現状より信頼性が向上すると見込まれる一方で、文献及び特許調査から、レーザー波長選択性や装置構成の問題で高性能化や拡張性に関しては現状より改善される見込みはなく、次世代パワーデバイス市場拡大のボトルネックとなっている抵抗損失の改善に寄与する見込みは無い。また、高温イオン注入+フェー

表 2-6-2. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」のグローバルベンチマーク (2022 年度 (SIP 終了時))

評価軸	研究開発				備考	
	SIP-九大 波長248 nm (日本)	住友重機 波長355 nm (日本)	LASSE 波長308 nm (仏)	高温イオン注入 ファーネスア ニール		
SiC	高性能化	◎ 0.2~0.3%	○ ~1%	△ 5~9%	△ 5~9%	裏面コンタクト抵抗損失割合
	信頼性	◎	◎	—	◎	
	拡張性	◎	×	×	△※1	裏面p型コンタクト形成プロセス ※1: 高抵抗で適用範囲に制限あり
	プロセスコスト	◎	◎	◎	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	○	○	○	○	適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
GaN	性能・信頼性	◎	×※2	○	△	※2: 適用不可
	プロセスコスト	○	×	○	×	◎: 1,000円/waf.以下 ○: 1,000~2,000円/waf. △: 2,000~3,000円/waf. ×: 3,000円/waf.以上
	市場性	○	○	○	○	適用可能市場規模×占有率 ◎: ~1兆円 ○: ~1000億円 △: ~100億円
総合評価	◎	○	○	△		

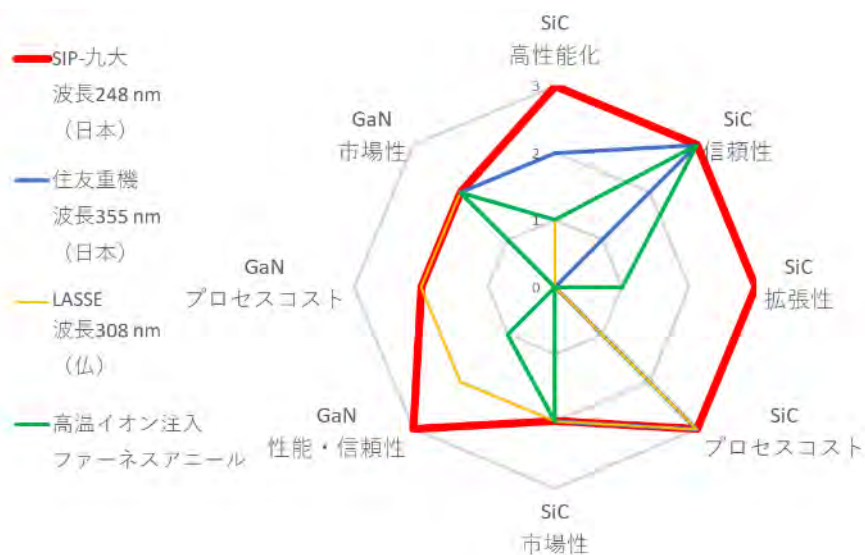


図 2-6-3. 「パワーデバイス抵抗損失低減用高濃度レーザードーピング加工装置」と競合技術との比較(2022 年度 (SIP 終了時))

ネスアニールなどの汎用性の高い一般的なプロセス技術は、現段階においても多種多様な研究開発に取り組んでおり、それら数多くの学術的知見から、GaN デバイスにおいては高性能化や信頼性向上に関し若干の進歩が期待できるものの、それ以外の項目に対する進歩は



ほとんど見込まれず、特にプロセスコスト改善が困難であることから SiC や GaN パワーデバイス市場拡大に向けたボトルネックを解消する技術とは成り得ないと分析される。本研究課題の社会実装テーマであるレーザードーピング加工装置は、2022 年度にはギガフォトン(株)と M 社において量産ライン抜き取りウエハを用いた評価を実施し、「量産実証機(β機:TRL7)の実証実施に向けた企業の投資判断の獲得」という目標を達成した。また、GaN パワーデバイスプロセスへの適用及び SiC パワーデバイスの他工程への拡張適用に関しては、複数のデバイスメーカーとフィージビリティースタディフェーズの検討を実施中であり、今後 GPS システムにより開発を加速することで、SIP 終了後にデバイスメーカー試作ライン評価を行う企業からの投資判断を獲得する。

以上の様に本研究課題の開発技術は、時空間制御に優れた短波長高出力レーザーを利用し、他の競合技術と比較して優位に立つ基本的な性質を有しており、GPS 化システムにより開発を加速することで企業設備投資の時期を逃さず量産装置の市場投入が実現できると分析される。

上記に示した本研究課題の成果を、GPS 化ニーズを持つ他の企業に示すことで GPS 化の社会波及を加速し、九州パイロット拠点に参画している様々な企業のニーズに対応した課題解決に取り組み、企業からの投資を獲得することで、SIP 終了後も持続的に社会実装を実現するパイロット拠点を継続運営する。

## ② 研究成果で期待される波及効果

九州大学では、最終年度の目標である「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模を持つ持続可能な拠点を構築(CPS 化推進半導体拠点)」として、4 センター連携体制(光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、システム LSI 研究センター、量子コンピューティングシステム研究センター)を構築した。その結果、当該拠点の主な社会実装活動基盤である綺羅コンソーシアムの参画企業は目標である 40 社に達成しており、民間企業より 2.5 億円/年の投資を誘起しつつ複数の社会実装テーマに取り組み、最終年度目標である持続可能な拠点の構築を達成している。

図 2-6-4 に、本課題目標にて構築した九州大学の CPS 化推進半導体拠点活動の概要と 30 年後までに見込まれる社会波及効果を示す。本拠点では、社会実装活動として①パワーデバイスレーザードーピング加工装置社会実装、②次世代半導体デバイス・極浅レーザードーピング加工装置社会実装、③リアルタイム観察システム市場投入、④スマートレーザー加工機市場投入に取り組んでいる。これらテーマの最終年度目標は既に達成しており、5 年後のパートナー企業の事業規模は 100 億円に到達する見込みである。

現在、より市場規模の大きな先端半導体及び高速通信デバイス分野でのボトルネックを解消する製造装置の開発を民間資金により推進しており、これら新規テーマの社会実装

を実現することで10年後のパートナー企業の事業規模は850億円を達成することを目標としている。

本SIP課題にて形成したCPS化推進半導体拠点をベースに活動規模を拡大し、10～30年後には、ドイツのフラウンホーファー研究機構(FhG)、オランダ応用科学研究機構(TNO)、台湾の工業技術研究院(ITRI)など海外の産学官共創の社会実装拠点到に匹敵する世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点(活動規模:数千億円/年)を構築する。現在、世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点到実現にむけた活動をより確かなものにするため、TNOより九州大学CPS化推進半導体拠点活動に対するレビューを受け、テーマ選定、目標設定、市場分析、サプライチェーン分析などTNO運営のノウハウの適用を目指した活動を行っている。2023.1.31～2.2には副学長の白谷主幹教授および藪田教授が三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株)と共にTNOを訪問し、本SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」の成果と課題を紹介したうえで、訪問先機関それぞれにおける産学連携形態など(特にエコシステム構築・運営方法)の説明を受け、今後の産学連携形態の方向性に関して議論し、以後も継続して議論および情報交換を行うこととした。これにより、世界屈指の半導体製造装置の社会実装拠点到実現をより確かなものとし、半導体市場全体へ波及効果の拡大(約16兆円)を目指した活動を実施する。

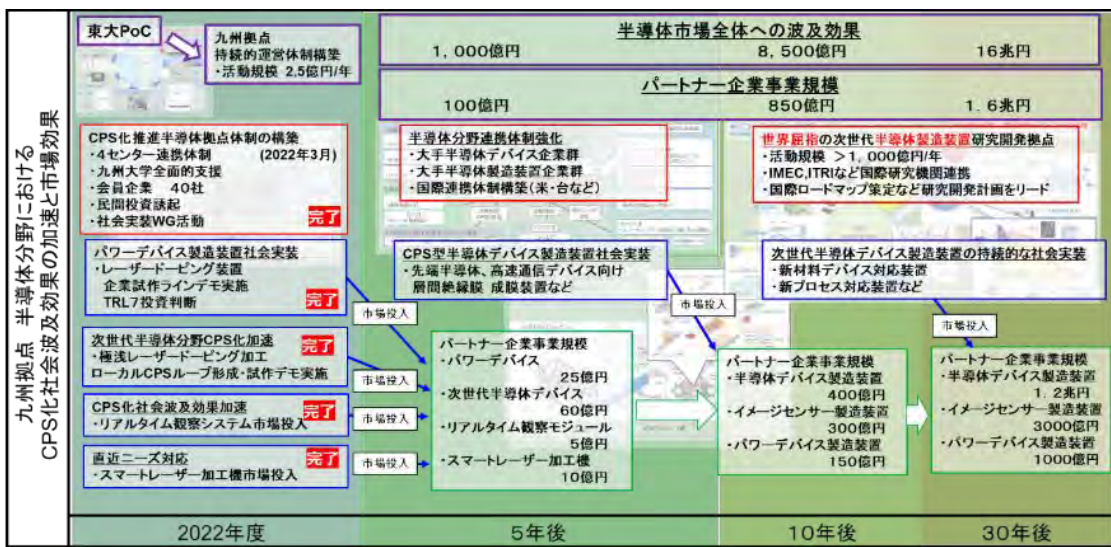


図 2-6-4. CPS 化推進半導体拠点活動の概要と 30 年後までに見込まれる社会波及効果

### ③ 達成度 (1) ※4 年間の設定目標に対する達成度

九州大学拠点における SIP 第 2 期の最終年度の目標は下記の通りである。

1. 企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能ない拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模を持つ持続可能な拠点を構築 (CPS 化推進半導体拠点) (九州大学)

2. AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置の市場投入（九州大学）
3. 2021 年度選定テーマの TRL6 実証検証に向けた企業投資判断の獲得（次世代半導体デバイス・極浅レーザードーピング加工装置）（九州大学）
4. TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得（パワーデバイスレーザードーピング加工装置）（ギガフォトン㈱・パデュー大学（再委託））

以下、各目標に対する達成状況を説明する。

1. 企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模を持つ持続可能な拠点を構築（GPS 化推進半導体拠点）（九州大学）

九州大学では、GPS 化推進半導体拠点として、光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、システム LSI 研究開発センター、量子コンピューティングシステム研究センターの 4 センター連携体制を構築した。その活動概要を図 2-6-5 に示す。本 GPS 化推進半導体拠点の目的は、国内外の半導体関連企業から生じる様々なリクエストに対し、(1)企業のボトルネックに対する解決策の提示、(2)世界中の企業、大学、研究所との共同開発を通じた新規事業開拓、(3)新規事業化への障害の見極めと橋渡し、の 3 つの価値を提供し、ワンストップでソリューションを提供することである。現在、半導体関連企業、量子計算・AI 解析、デバイス製作&評価、外部評価関連企業及び研究機関、熊本県や福岡県の地方自治体との連携や事業展開を目指した情報交換を行っており、国内外の半導体関連企業に対してワンストップでソリューションを提供できる体制を整えた。結果、綺羅コンソーシアムに入会した企業は、最終年度の目標である 40 社を超え、企業から受け入れたマッチングファンドも 70%以上を達成していることから、最終年度目標の

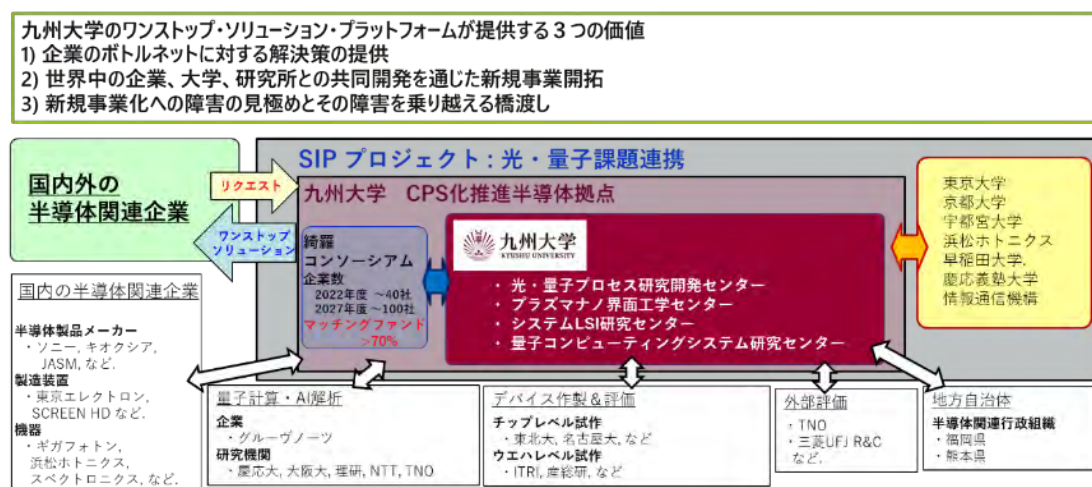


図 2-6-5. 九州大学 CPS 化推進半導体拠点の活動概要

「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模を持つ持続可能な拠点を構築」を達成した。

2. AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置の市場投入（九州大学）

「AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置」用に開発した AI アルゴリズムを図 2-6-6 に示す。学習に用いるリアルタイム観察データは、レーザー加工後の品質と相関が高く、また画像中の各ピクセルのデータに定量性を持たせた温度分布動画とした。開発した CNN 構造は、(1)温度分布動画を 3 次元マトリックスとして扱い、3 次元マトリックスから畳み込みを行う「3D-CNN」、(2)温度分布動画を 2 次元画像の集合とみなし 2 次元画像の畳み込みを行った後にニューラルネットワーク内で統合し畳み込みを行う「2D-CNN 統合型」、(3)2 次元画像の畳み込みを行い、各 2 次元画像それぞれに対して分類判定を行う「2D-CNN 不良検出型」の 3 種類であった。レーザー材料改質の制御パラメータ（パワー、スポット径、フォーカス、スキャン速度など）を変化させ、それぞれの照射条件に対する加工品質の OK、NG の分類判定の学習を行った結果、3D-CNN、2D-CNN 統合型の AI において OK/NG 判定の推定確率は 98%以上であり、判定する人物の違いによる推定精度と同等の結果が得られた。また、2D-CNN 不良検出型の CNN で分析を行った結果、不良画像と認定された 2 次元画像が多いサンプルにおいて、加工品質が良品と判定されたレーザー材料改質状態であっても、スパッタや改質形状が不安定で NG となる兆候が見られることが明らかとなった。以上の結果より 3D-CNN もしくは 2D-CNN 統合型の AI 解析に加えて 2D-CNN 不良検出型の AI 解析を組み合わせることで、OK/NG などの分類判断だけでなく、不良発生の兆候や不良発生個所を瞬時に推定可能な AI システムの構築に成功した。

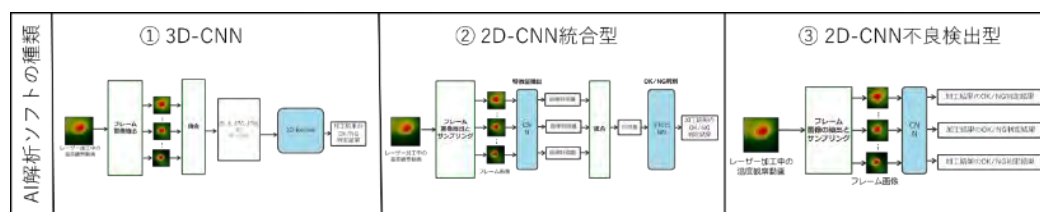


図 2-6-6. 材料改質リアルタイム観察装置搭載の AI 解析システム

現在、上記に示した「AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置」のモジュール部単体の市場投入を行うとともに、株式会社タマリ工業より投資を受けて本 AI システムを搭載した EV モーター用の平角銅線レーザー溶接加工機を製作し、2022.12 より材料メーカーより提供を受けた量産試験銅線を用いた検証に着手した。

また、ナノ秒オーダーで進展するレーザー材料改質過程のデータを取得するため、ナノ

秒オーダーで温度分布の進展の観察が可能な、高速温度分布観察カメラの開発を行った。

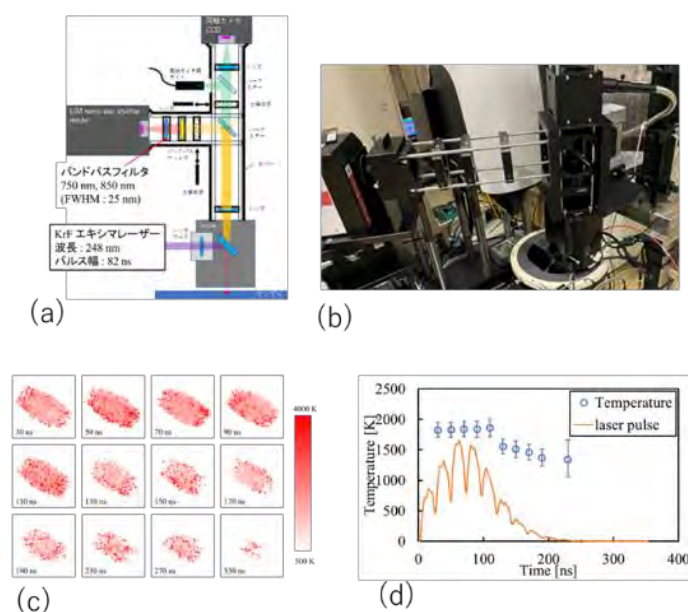


図 2-6-7. 高速温度分布観察カメラの概要。(a) 構成図、(b) レーザー材料改質装置への搭載写真、(c) 温度分布進展画像、(d) レーザーパルス波形及び画像中心温度の時間変化のグラフ

図 2-6-7 に、高速温度分布観察カメラの (a) 構成図、(b) レーザー材料改質装置への搭載写真、(c) 温度分布進展画像、(d) レーザーパルス波形及び画像中心温度の時間変化のグラフを示す。図 2-6-7(a) に示すように、本カメラには波長 750 nm 付近、及び 850 nm 付近の放射光の画像を各々測定する CCD カメラが搭載されており、2 つの画像の各ピクセルの強度比より温度分布画像を求める。各画像の観察時間は 10ns であり図 2-6-7(c) に示す様にナノ秒オーダーでの温度分布動画の観察が可能となる。Si のレーザー材料改質を行った際の温度変化を図 2-6-7(d) に示す。図 2-6-7(d) より、Si の融点近傍で潜熱を蓄えている様子が観察されたことから、本観察装置で正確な温度の測定が可能と判断した。先に示した AI 解析システムの本装置への搭載は容易であり、AI 解析システム搭載した高速温度分布観察装置の市場投入を実現した。

以上の結果より、最終年度の目標である「AI 解析システムを搭載した材料改質観察用リアルタイム観察装置の市場投入」を達成したと判断する。

### 3. 2021 年度選定テーマの TRL6 実証検証に向けた企業投資判断の獲得

(次世代半導体デバイス・極浅レーザードーピング加工装置) (九州大学)

2021 年度に新たな社会実装テーマとして次世代半導体デバイス製造用の極浅レーザードーピング加工装置の社会実装を選定し、2022 年度にはデバイスメーカー S 社との協業体制を構築し TRL6 実証実施に向けた投資判断獲得に向けた検討を行ってきた。次世代半導

体デバイスの性能向上には極浅領域での高濃度ドーピングが必要であり、従来のドーピング法では達成困難な深さ数 nm 以下の高濃度ドーピングが要求されている。

実験は p 型 Si 基板、及び n 型 Si 基板への p 型不純物 (Al) のレーザードーピング加工により行い、レーザードーピング加工領域と Si 基板の裏面に電極を形成し、IV 特性の測定を行うことで p 型活性の確認を行った。

結果、p 型 Si 基板上へのレーザードーピング加工では、照射フルエンス  $0.8 \text{ J/cm}^2$  の条件にて表面に損傷を与えることなく p 型活性を示唆するオーミックコンタクトが得られることを確認した。n 型 Si 基板へのレーザードーピング加工を施した後に pn ダイオードを形成し、IV 特性を測定した結果を図 2-6-8 に示す。図 2-6-8 は、IV 特性から求めたダイオードの理想因子  $n$  と表面粗さの照射フルエンス依存性を示す。図 2-6-8 より p 型基板上へのレーザードーピング加工とほぼ同等の照射フルエンス  $0.9 \text{ J/cm}^2$  において、表面粗さの増加を抑制しつつ、理想因子は p 型活性を示す 2 近傍となることが分かった。この時のドーピング深さと濃度を測定した結果、ドーピング深さは 3 nm 以下であり、表面近傍で Si に対する Al の固溶限界を超える  $10^{20}/\text{cm}^3$  台後半のドーピングが達成されていることが明らかとなった。

PNダイオード電気特性評価

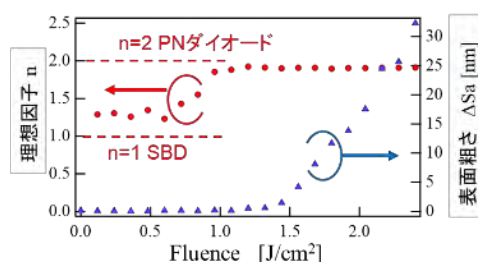


図 2-6-8. レーザードーピング加工後のダイオード理想因子  $n$  とレーザー照射領域の表面粗さの照射フルエンス依存性

上記のレーザードーピング加工特性は、従来法では達成困難な極浅・高濃度ドーピング特性であり、次世代半導体デバイス電気特性向上のためのボトルネック解消を達成し得るプロセスであると結論した。

現在、デバイスメーカー S 社より、資金の提供と試験パターン付き 300mm ウエハの提供を受けデバイス構造を用いた検討を実施している。本検討は、TRL6 実証実施に向けた投資判断獲得に相当することから、最終年度目標を達成した。

#### 4. TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得 (パワーデバイスレーザードーピング加工装置) (ギガフォトン株)・パデュー大学)

2021 年度にギガフォトン株と M 社との協業により TRL7 実証実施判断獲得に向けた要件定義と解決策の提示を行い、2022 年度は解決策の目標達成に向けた検討を行ってきた。2021

年度の時点において、レーザードーピング加工後の電気特性目標（コンタクト抵抗： $10^{-6}\Omega\text{cm}^2$  台前半）は達成しており、2022 年度には面内均一性向上に向けた検討を行った。

面内均一性の評価にあたっては、ウエハ全面において多点測定が可能な、微小 4 探針プローブを用いて行った。測定結果を図 2-6-9 に示す。結果、良好なレーザードーピング加工条件においては面内均一性の目標値を超える  $\sigma=1.3\%$  を達成できた。システムのステージ精度やビーム均一性を改善した新しいシステムが完成し、M 社より量産ライン抜き取りウエハの提供を受けて、新システムによる改善度を確認した。以上の結果は、TRL7 実証検証に向けた企業からの投資判断の獲得に相当する。

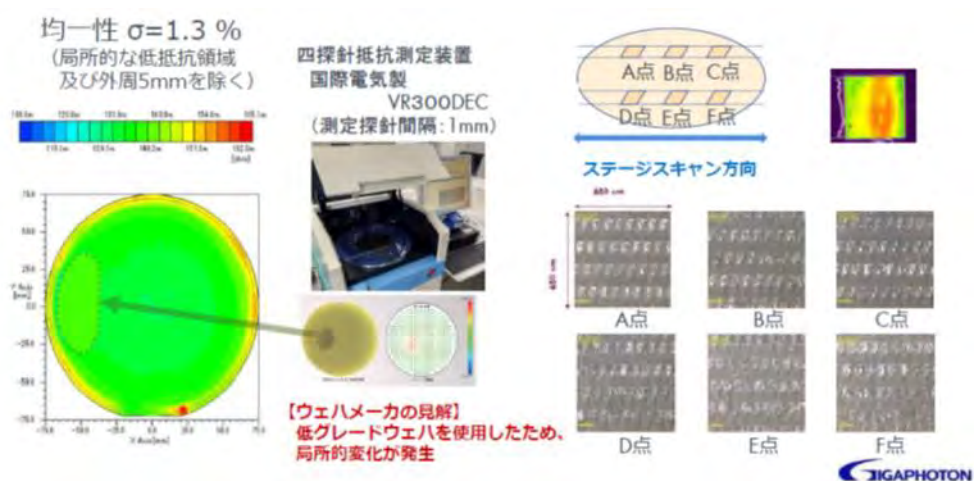


図 2-6-9. ウエハ全面ドーピング加工均一性評価結果

#### ④ 達成度（2）※社会実装の実現可能性

「企業が TRL7 の投資判断を行う実施検証が可能な拠点として、本実施課題の年額予算規模相当以上の民間資金を受け、年総事業費規模相当以上の活動規模を持つ持続可能な拠点を構築」の目標に対して構築した、九州大学 CPS 化推進半導体拠点の活動（図 2-6-5 再参照）を SIP 第 2 期終了後も持続し、さらに発展・拡充させた。具体的には、半導体関連大手企業、地方自治体、及び海外研究機関のトップに対し、九州大学の現副学長である白谷主幹教授、西田 PD、安井サブ PD など、本拠点のマネジメントや評価に携わる役職者等の協力を得て本拠点に対する意見交換を実施した。半導体拠点に関する大手半導体企業、及び在外公館・海外研究機関・メディアに対して実施した結果の概要を、それぞれ、表 2-6-3(a) 及び (b) に示す。表 2-6-3 に示すように、半導体分野における量子コンピュータ活用に対する強いニーズ、フラウンホーファー型研究拠点構築に向けた本拠点活動に対する期待、及び人材育成・供給に対する強い要望を確認した。

表 2-6-3. CPS 化推進半導体拠点構築活動に対する意見交換実施状況

(a) 大手半導体関連企業トップとの実施状況

企業名	懇談者	SIP参加者	日時	懇談形式	成果
S社	社長 他	西田PD、安井SPD 九大:白谷P、池上P、QST	4/1	オンライン	・量子コンピュータに関心
K社	執行役員CTO他	西田PD、安井SPD 九大:白谷P、池上P、QST	6/22	オンライン	・量子計算のニーズを把握
SC社	執行役員 他	九大 池上P	7/7	対面	・従来型AIに対する量子計算導入の効果に関心
T社	執行役員 他	西田PD、安井SPD、 九大 白谷P、池上P	7/28	対面	・フラウンフォーファー型拠点構築に対する要望を把握
J社	社長 他	西田PD、安井SPD 東大:小林P、田丸P、坂上 九大 白谷P、池上P 内閣府・QST	8/3	オンライン	・国際連携、人材育成に対する課題を把握

(b) 在外公館・海外研究機関・メディアなどとの意見交換実施状況

企業名	懇談者	SIP参加者	日時	懇談形式	成果
熊本県	局長他	西田PD、安井SPD、QST 九大 白谷P、池上P	8/4	対面 (熊本県庁)	九州地区内連携協力を確認
TNO	研究戦略 担当者	九大 白谷P	9/9	オンライン	量子コンピューティングに関するEU-Japan協力構想へのSIP成果などのインプットと情報交換
米国福岡領事館	科学技術 担当者	九大 白谷P、池上P、藪田P	9/27	対面(九大)	半導体に関する日米の状況の情報交換とのSIP成果などのインプット
NHK	ディレクター	九大 白谷P	10/16	オンライン	半導体人材育成など1月放送予定番組へのSIP成果などのインプット
半導体産業新聞	会長	・九大 白谷P	11/18	オンライン	半導体に関する意見交換とSIP成果などのインプット
CDRI(台湾)	局長他	九大 執行部、白谷P、池上P、藪田P	11/15	対面(九大)	人材供給体制、育成に関わるニーズを把握
ITRI(台湾)	幹部	安井SPD、九大 白谷P、池上P、藪田P	11/18	対面(九大)	研究交流、台湾企業との連携協力を確認

九州大学では、量子コンピュータ活用に対する大手半導体関連企業からのリクエストに応えるため、量子計算商用サービスの提供に世界で初めて成功した(株)グルーヴノーツと2022.6にMOUを締結し、量子計算環境の構築に着手した。2022.9には、(株)グルーヴノーツが提供する量子コンピュータのクラウドプラットフォーム(製品名: MAGELLAN BLOCKS)の試用版を九州大学に導入し、半導体製造における量子コンピュータ活用事例の提示に向けた活動に着手した。結果、半導体プロセスにおいて、処理手順の組み合わせが最も複雑で量子計算による最適化効果が最も示せるダイシング工程を題材として、計算処理時間に対する量子コンピュータの効果の提示を行った。結果の例を図2-6-10に示す。



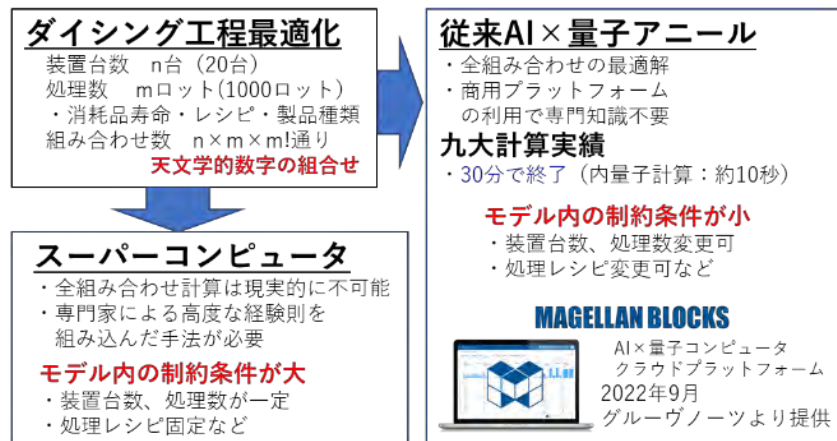


図 2-6-10. ダイシング工程を題材とした量子コンピュータ計算結果の例

結果、天文学的な組み合わせ数となる最適化問題においても、量子コンピュータを用いると僅か 30 分（内、量子計算約 10 秒）で妥当な結果が得られることを示した。現在、大手半導体企業から量子計算の要望を受け、半導体分野における量子計算活用に対する具体的な活動に着手した。

以上に示したように、必要に応じて企業とのトップ会談を実施することで半導体関連企業からのリクエストを常に把握し、ワンストップソリューションを提供する体制を随時構築することでさらに大型な企業投資を誘起し、マッチングファンド 70%以上を維持しつつ活動規模の拡大を行い、フラウンホーファー型拠点実現に向けた活動を行う。

出口戦略テーマとして選定した「パワーデバイス・レーザードーピング加工装置」及び「次世代半導体デバイス・極浅レーザードーピング加工装置」は、最終年度の目標を達成しており、SIP 終了後も企業投資を誘起し、それぞれ、2024 年度及び 2025～2026 年度の市場投入に向けた活動を持続する。

現在、GPS 型半導体拠点では、企業投資により 23 のテーマを推進している。パワーデバイスや次世代半導体デバイスに加えて、先端ロジックや 3 次元実装などの製品開発に対するボトルネック解消の技術に取り組み、持続的に社会実装を実現する組織運営を行なう。

## ⑤ 知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

九州大学 GPS 化推進半導体拠点の GPS 関係の知的財産戦略の運用方針を図 2-6-11 に示す。図 2-6-11 に示すように、オープン領域特許として綺羅コンソーシアム参画企業に対して実施権を認める GPS 関係の特許を保有し、知財実施権の対価としての企業からの投資を受けつつ GPS を活用した企業との共同開発を加速し、社会実装を目指した活動を行う。社会実装活動の中で生じた個別テーマの知的財産はクローズド領域の特許として扱い、企業投資の対価としての知的財産を確保する。以上の運用方針により、社会実装を目指すテーマに対して企業投資を誘起しつつ九州大学拠点での社会実装活動を行い、知的財産的観点から

も国際競争力の高い個別テーマの社会実装を実現する。

現在、レーザー材料改質加工に対する AI 解析の基本特許を T 社と九州大学で出願し、綺羅コンソーシアムに参画する企業に対して実施権を認めることでの合意を得た。

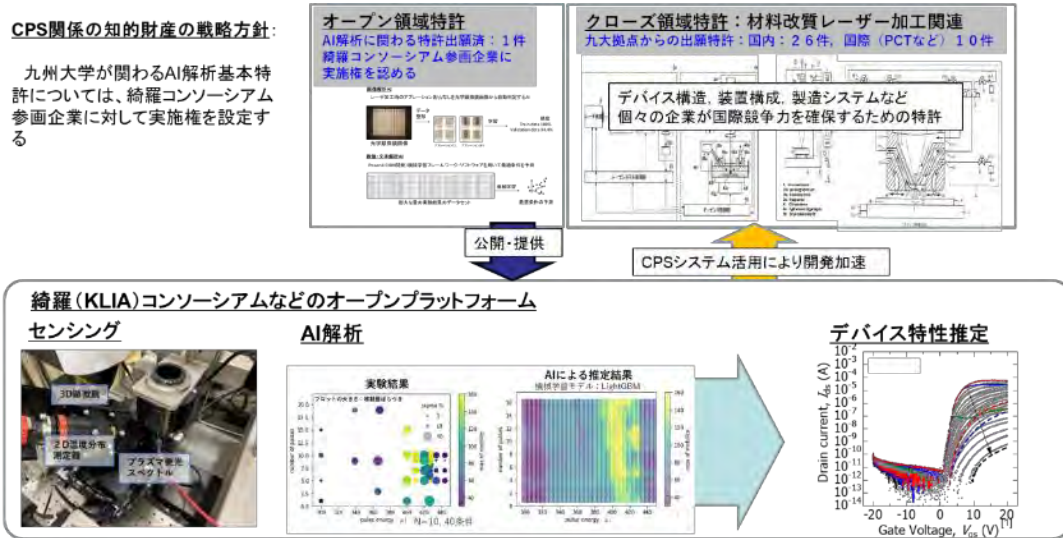


図 2-6-11. 九州大学 CPS 化関連の知的財産戦略の方針

## ⑥ 成果の対外的発信

九州大学 CPS 化推進半導体拠点の社会実装活動として企業向けに行った対外的発信の概要を図 2-6-12 に示す。企業向けの対外的発信は、主に下記の 3 つを行った。

- 1) 九州地区の半導体関連中小企業向けに行った SIIQ (九州半導体・エレクトロニクスイノベーション協議会) 交流会
  - 2) 国内企業向けへに発信した月刊オプトロニクス特集号への企業との連名による記事掲載
  - 3) 台湾の半導体関連企業、及び研究機関向けに行った SEMICON Taiwan での展示発表
- 以下、項目に分けて詳細を説明する。



図 2-6-12. 社会実装活動として企業向けに行った対外的発信の概要

1) SIIQ 交流会での対外発信

本 SIIQ 交流会は、コロナ禍以降途絶えていた現地での SIIQ 交流会再開の第一回目として 2022. 4. 22 に九州大学にて行われた。交流会には、九州地区の半導体関連の中小企業を中心に約 80 名が参加し、九州大学 GPS 化推進半導体拠点の紹介を行うとともに、九州大学総長の挨拶、安井サブ PD による「SIP プログラムの紹介と九州大学 GPS 化推進半導体拠点に対する期待」の講演も行った。結果、拠点運営に対する中小企業からの意見を得て、特に「大手企業のニーズにもとづく中小企業との共同開発の実施」に対する強い要望を得た。これら要望に応えるため、大手半導体関連企業を対象としたニーズ調査と中小企業の保有の技術、大学シーズとのマッチング活動を実施し、(株)デンケン、岩崎電気(株)、(株)東海理化など複数の中小企業との新たな共同開発を実現した。

2) 企業との連名による月刊オプトロニクス特集号への記事掲載

国内企業に向けた対外発信として、月刊オプトロニクス誌 2021. 5 号に、「高繰り返し KrF エキシマレーザー光源のアニールへの応用 (ギガフォトン(株)ー九州大学共著)」、2023. 1 月号では「半導体産業と光・レーザー技術 (キオクシア(株)ー九州大学共著)」を掲載した。

「高繰り返し KrF エキシマレーザー光源のアニールへの応用」では、九州大学 光・量子プロセス研究開発センター内に設置したギガフォトン Next GLP 共同研究部門にて開発した量産対応レーザーアニール技術の紹介であり、企業の大型資金投資による産学連携活動の成果事例として紹介した。現在、光・量子プロセス研究開発センター内には新たな共同研究部門としてタマリ工業共同研究部門が設置されており、今後もこれら共同研究部門の成果事例の発信を行うことで、企業大型投資の持続的受け入れを実現する。

「半導体産業と光・レーザー技術応用」の記事の執筆は、デバイスメーカーであるキオクシア(株)と九州大学の連携を示す目的で行った。今後も、デバイスメーカーや大手半導体製造装置メーカーとの連携を推進し、その連携活動の対外発信を行っていく。

### 3) SEMICON Taiwan での展示発表

tsmc 新工場設立にともない九州地区への進出を計画している台湾の半導体関連企業に対して、本拠点の活動の紹介と運営に対する要望を把握することを目的とし、SEMICON Taiwan での展示発表を行った。その結果、地元メディアである CTIMES、アジア経済圏ニュースを発信する NNA アジアに記事が掲載されるなどの大きな反響があり、ITRI 及び CDRI 幹部の九州大学訪問などの国際連携に向けた活動に結実した。

## ⑦ 国際的な取組・情報発信

九州大学 CPS 化推進半導体拠点では拠点活動を国際標準とするため、日米の半導体関連の国際連携として最重要なオランダ応用科学研究機構 (TNO) からの外部評価を受けている。TNO から得た中間報告の概要を図 2-6-13 に示す。図 2-6-13 に示すように、アカデミック及びビジネスパートナーとの連携体制、量子コンピュータ活用などの取組状況、九州の地の利、ビジネスコラボレーション強化に向けた量子アニーリング活用事例提示の取組など、拠点の強みに対する評価を受けるとともに、さらに改善するための提案として、本拠点の焦点の明確化、エコシステム状態の分析、パートナー活動を 1 つの物理的な場所に統合など、図 2-6-13 に示す様な具体的な提案を受けた。

これら改善に向けた提案をより具体的なものとし、拠点運営活動に反映させるため、九州大学では CPS 型プラットフォーム構想立案に携わった三菱リサーチ&コンサルティング(株)とともに、2023. 1. 31~2. 2 にかけて欧州に訪問団を派遣し、ドイツ人工知能研究センターやオランダ TNO を訪問した。訪問では、拠点運営評価の具体化に加えて、欧州のエコシステム運営方法、量子コンピュータの半導体関連分野活用等に向けて議論した。

半導体製造装置の市場規模は、アプライドマテリアルズ(米国)、ASML(和蘭)、東京エレクトロン(株)(日本)、ラムリサーチ(米国)、KLA(米国)、(株)SCREEN ホールディングス(日本)で全体の 80%を超える。九州大学 CPS 化推進半導体拠点と TNO との連携推進は、半導体製造装置のサプライチェーンの強靱化に向けた日米蘭連携推進に資すると考える。

## TNO中間報告の概要

### 九州大学半導体拠点の強み

- ・九州大学の内部、アカデミックパートナーおよびビジネスパートナーとの連携体制
- ・長期的なゲート型量子コンピューティングの開発と、現在の量子アニーリングの活用による巧妙な2段階アプローチ。  
⇒現在および将来にわたりテクノロジーの活用が可能。
- ・九州の地の利(多くのセミコン関連企業が九州に所在)。  
⇒近接性により、パートナー間の情報交換が可能。共同イノベーションに必要な相互および個人的な信頼関係を形成。
- ・最適化プロセスに最もよく使用される量子アニーリング活用法を半導体業界への提示。  
⇒ビジネスコラボレーションを強化するための賢明な活動。

### さらに改善するための提案

- ・九州大学の半導体拠点の焦点の明確化
- ・エコシステムの状態の分析
- ・製品ポートフォリオの確立
- ・パートナーの活動を1つの物理的な場所に統合
- ・ロードマップの作成
- ・バリューチェーン分析

### TNOからのアドバイス(TNOの経験から)

イノベーションの形は常に進化。伝統的には欧州でもR&Dはサイロ型(クローズド)イノベーションだったが一般的ではない。  
欧州でオープンイノベーション手法へと移行した理由は下記。

### オープンイノベーション移行の理由

- ・必要な投資コストの削減
- ・学際的なノウハウ、他のパートナーや潜在的な顧客のネットワークへのアクセスを提供
- ・イノベーション達成に対する不確実性を低減。

図 2-6-13. TNO による九州大学 CPS 化推進半導体拠点運営に対する中間評価の概要

### 第3章 課題マネジメント

#### ① Society 5.0の実現を目指すもの

**【本 SIP 光・量子課題の成果はスマート製造実現に貢献するだけでなく、スマートモビリティ、スマートエネルギー等に波及し、Society 5.0を支える様々な分野に恩恵をもたらすことを目指した。】**

光・量子技術は、第5期科学技術基本計画において、「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」として位置づけられており、我が国が強みを有する分野である。この強みを活かし、Society 5.0 実現に向けた投資を阻むボトルネックを解消することで、民間企業の投資を促し、関連分野における国際的な競争力を高める。

SIP 光・量子課題の基本コンセプトは、Society 5.0の実現というゴールイメージからバックキャストして、それに取り組む企業が市場で調達が見込めない「ボトルネック解消技術」を提供し、安心して投資活動に取り組めるようにすることである。GPS 化が困難なレーザー加工を先導実証の例題とし、GPS 化が達成可能なことを示すことで殆どの製造システムのスマート化の可能性を実証する。5つの研究課題が個別の高い目標を達成するとともに、「GPS 型レーザー加工機システム構築」へ貢献するという一つの目標を共有しており、連携による成果はスマート製造からスマートモビリティ、スマートエネルギー等に波及し、Society 5.0を支える様々な分野に恩恵をもたらす（図3-1参照）。

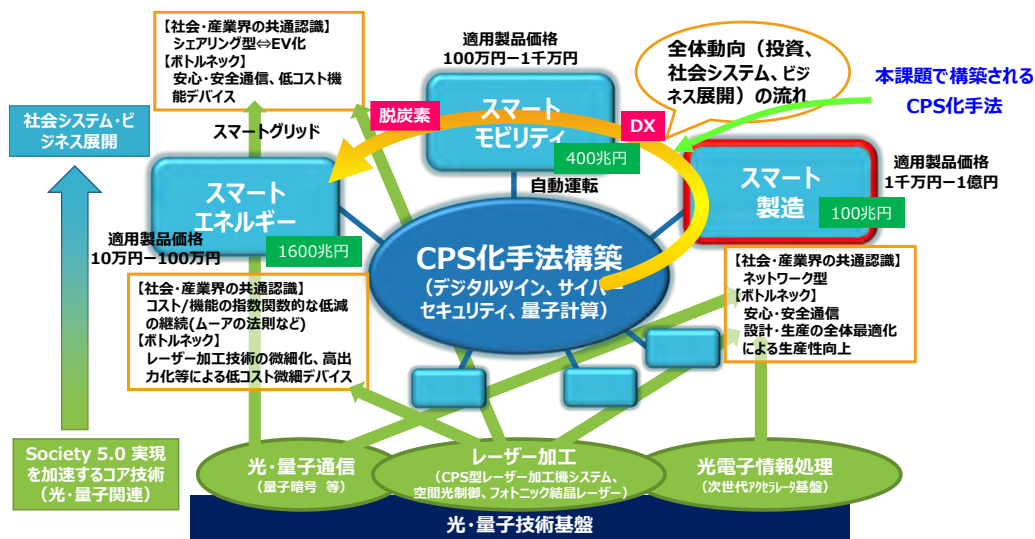


図3-1. SIP 光・量子課題の成果が Society 5.0を支える分野へ貢献 (図1-2の再掲)

経済発展と社会的課題の解決を両立し、一人一人の人間が中心となる社会である Society 5.0 実現のためには、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステム、すなわちサイバーフィジカルシステム（CPS）の構築が鍵となる。国内外の市場において、IoT/AI 関連及び IoT/AI の具体的な応用先としてのスマート製

造分野に対する積極的な投資が開始されるなど、GPS 構築を推進する動きが進んでいる。

一方で、この流れを期待通りに進める上での懸念材料も顕在化してきている。例えば、IoT/AI 関連では、市場が将来的に要求する制御、通信、AI デバイス等を搭載した電子機器の進化(コスト/性能の指数の低減)が予想通り進展するか、また、スマート製造分野では、ネットワーク型の製造システムへの移行が実現するかが見通せていない。さらに、サイバー空間におけるセキュリティの脅威は増加の一途を辿り、いったん障害が発生するとその影響はフィジカル空間において甚大な被害をもたらす懸念が高まっている。

この懸念材料がボトルネックとなって、民間企業の将来への投資マインドを低下させることが想定されるため、これらを取り除くための研究開発を国主導で加速し、関連業界が安心して投資を継続、拡大するように導いていく必要がある。

そのため、本 SIP 光・量子課題では広範囲な光・量子技術から、重要かつ優先度の高い技術として、①レーザー加工、②光・量子通信、③光電子情報処理の3項目を選定して研究開発を実施した。

レーザー加工を取り上げているのは、日本が強みを持ち、複雑な物理現象を伴うため加工条件をデジタル化するのが非常に難しく困難であるが、インパクトのある分野だからである。レーザー加工を先導例として取り組み、GPS 化が達成可能なことを示すことで、GPS 化により広い分野でスマート製造が実現可能であることを示すことができる。具体的な目標の例としては、スマート製造分野での投資のボトルネックとなっている GPS 型レーザー加工機システムの実装(レーザー加工のパラメータの初期選定のリードタイムの9割減)や、将来にわたりサイバーセキュリティへの脅威に晒されることのない安全なデータの流通・保管・利活用を実現する量子暗号技術、イジング型コンピュータやNISQコンピュータ、誤り耐性量子コンピュータなど個別の計算資源を適材適所で自動的に利活用する次世代アクセラレータ基盤によって Society 5.0 に資するアプリケーション全体を最適実装する技術の実用化(10~100倍の高速化)等を行った。これにより、製造業における生産性を質的に変革させるネットワーク型製造システムの構築に貢献する。本 SIP 光・量子課題では、このような施策によりボトルネックを取り除くことで、民間企業による、IoT/AI の具体的な応用先としてのスマート製造、スマートモビリティ、スマートエネルギー等への潮流(投資、社会システム、ビジネス展開)を引き起こし、Society 5.0 の実現を加速する。

## ② 社会実装を実現するためのマネジメント体制が構築されていたか。

【社会実装を実現するためのマネジメント体制の最終形を2021年度に整え、社会実装の確実な実現に向け、PD、サブPDが連携して各拠点の社会実装活動を支援・強化した。また、技術評価委員会や出口戦略分科会等へ活動状況を報告し、確実な社会実装等への助言を得、マネジメントに反映させた。】

本 SIP 光・量子課題は図 3-2 に示す研究開発体制で研究開発及びマネジメントを実施した。PD がリーダーシップをとるため、研究推進法人に PD を議長とする最高意思決定機関

であるマネジメント会議を設置し、重要事項を決定し、本 SIP 光・量子課題の着実な実施に向けて議論を行った。その構成員としてサブ PD、各研究責任者、研究推進法人の代表者が参画することに加え、関係府省がオブザーバーとして参加し、情報共有と意思統一を図った。また、より細やかなマネジメントを実施するため、府省も参加する定例会を原則週 1 回開催し、研究開発の推進、広報戦略の推進、光・量子分野に関する社会動向の情報共有及びそれらを踏まえた社会実装のマネジメントを実施した。また、サブ PD もリーダーシップを強化し、研究課題間や個別に参画機関との会合を不定期で多数実施し、情報・目標・方向性等の共有を綿密に行なった。さらに PD をサポートする研究推進法人も、専任 10 名、併任 1 名相当の体制で運営し、研究機関との契約や資金の利用に関する監査などを適正に行ったほか、社会実装にも関わる研究開発計画の策定、進捗管理、広報活動、知財権調整などの面で十分な体制を確保した。

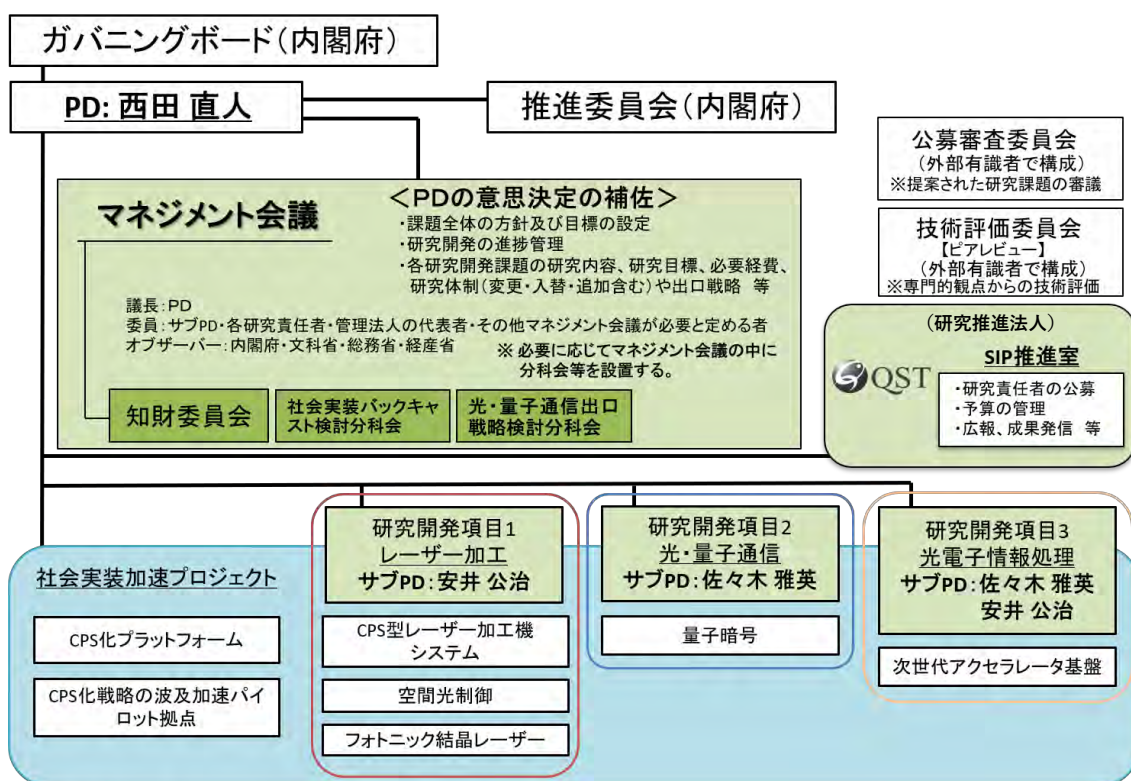


図 3-2. 研究開発体制図

本 SIP 光・量子課題の研究開発及び社会実装活動への外部有識者のレビューに関しては、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の分野に通じた技術評価委員(表 3-1 参照)にユーザー視点の委員にも参画して頂き、半期に 1 度、進捗報告を実施した。そこで得た確実な社会実装に向けた助言をマネジメントに反映させた。加えて、社会実装責任者を継続配置し、研究責任者と共に社会実装を推進した。



表 3-1. 技術評価委員会構成

氏名	所属・職名	氏名	所属・職名	氏名	所属・職名
帯川 利之	東京大学 名誉教授	本庄 利守	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所 量子光物性研究部 主幹研究員	山下 茂	立命館大学 情報理工学部 教授
加納 誠介	産業技術総合研究所 つば東事業所 所長	今井 浩	東京大学 大学院情報理工学系研究科・コンピュータ科学専攻 教授	小野寺 民也	日本アイ・ピー・エム株式会社 東京基礎研究所 副所長
菅原 充	株式会社QDレーザ 代表取締役社長	宇根 正志	日本銀行金融研究所 企画役	木原 誠司	NTTテクノクロス株式会社 デジタルツイン事業部 理事 シニアディレクター
藤崎 晃	古河電気工業株式会社 執行役員 研究開発本部長	田中 秀磨	防衛大学校 情報工学科 教授	嶋田 義皓	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
森 勇介	大阪大学 大学院工学研究科 教授	松尾 正克	デロイト・トーマツサイバー合同会社 サイバーアドバイザー ディレクター	津田 宏治	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
	レーザー加工	松本 泰	セコム株式会社 IS研究所 主席研究員		光電子情報処理
			光・量子通信		

注) 帯川氏が技術評価委員長。帯川氏、本庄氏、山下氏が各分科会座長。

2022 年度の特長として、GPS 化に貢献する研究成果を各拠点から波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）へ加速的に社会実装するため、サブ PD が積極的に社会実装戦略を立案・先導し、企業の事業部への橋渡しを行った。また、これまで社会実装をボトムアップ型で推進してきたが、トップダウン型として、PD、サブ PD が企業幹部を訪問し、各拠点の社会実装活動を後押しした。こうした活動により、各拠点は SIP 後も自律的に社会実装を継続できる組織的・財源的な基盤確立に目途が立ったことから、本 SIP 光・量子課題が構築した社会実装を実現するマネジメント体制は機能したと判断している。

レーザー加工全般は、社会実装を本 SIP 光・量子課題終了後の視点からバックキャストして推進していたが、随時サブ PD が世界レベルでの産業社会の潮流や、スマート製造や光・量子技術の活用を期待する企業の動向など、社会実装に深く関係する情報を提供した。また、サブ PD は、より影響力の大きな市場（半導体、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）に向けた社会実装を推進するため、個別の参画機関と議論を重ねたほか、本 SIP 光・量子課題の各拠点とオランダ、台湾、ドイツ等の海外研究機関や国内企業の事業部門との連携を積極的に支援すべく、関係者間の会合を実施するなど、その指導力を発揮した。

光・量子通信では、参画 7 機関の研究進捗や社会情勢などの情報共有のために、サブ PD が 2022 年度には 3 回の定期会合を持ち、ベクトルを合わせて目標達成に向けた研究開発に取り組んだ。また、2022 年度も出口戦略検討分科会を 1 度開催し、専門家による社会実装戦略のブラッシュアップを実施した。光・量子通信の社会実装は、新しい社会インフラを構築する側面を持つことから、本 SIP 光・量子課題に参画している機関だけでなく、部品メーカー、光回線プロバイダー、テレコムオペレーター、セキュリティサービスプロバイダー、そしてエンドユーザーも含んだビジネスエコシステム構築に向け、本 SIP 光・量子課題参画機関が中心となって設立した（一社）量子 ICT フォーラム等を活用した業界横断の連携で社会実装を推進している。また、研究成果の事業化を担う企業には、法律、知財、営業の専門家がおり、社会実装を実現するのに必要なサポートを得られる体制で運営された。

光電子情報処理では、社会実装推進には知財戦略、事業戦略、技術戦略が三位一体とな

ったマネジメントを遂行することが重要と考え、知財部会の下で本 SIP 光・量子課題に参画している 4 機関が緊密な連携を持ちながら社会実装の検討を行った。また、さらなる社会実装の推進に向け、早稲田大学に量子計算アプリケーション拠点を構築し、法律面では、各参画機関の法務担当者や産学官研究推進センターの担当者が適切な支援を行うほか、POC の実施や事業推進面では、本 SIP 光・量子課題に参画している 4 機関のほか、社会実装に詳しいコンサルタントや研究成果の出口を広めるために重要と考えている商社も参画し、社会実装を進める体制を整えた。また、レーザー加工同様、サブ PD が随時世界レベルの社会の潮流や、スマート製造や光・量子技術の活用を期待する企業の動向、海外の量子計算サービス提供会社の状況など、社会実装に深く関係する情報を提供したほか、半導体設計の最適化（フォトリソグラフィ結晶レーザーの性能向上）に向けた課題内連携も継続し、拠点間連携も進んだ。

### ③ 研究テーマに対する評価、マネジメントが適正に実施されていたか。

【ガバニングボードなどの指摘事項に積極的に取り組み、SIP 後も睨んだ予算配分を実施したほか、社会情勢への変化対応策、海外連携の強化策等を踏まえた上で、各テーマの取組状況を適切に把握・評価し、確実な社会実装に向けて支援するなど、機動的なマネジメントを行った。】

本 SIP 光・量子課題は、光・量子技術から重要かつ優先度の高いレーザー加工（CPS 型レーザー加工によるスマート製造の実現）、光・量子通信（サイバー空間における絶対安全なデータの流通・保管・利活用）、光電子情報処理（ものづくり設計・生産の全体最適化）を活用して、複雑な物理現象を伴うため CPS 化が最も困難とされているレーザー加工を代表例に CPS 化を先導実証し、ほとんどの製造装置のスマート化が可能なことを証明すること、またスマート製造等への潮流（投資、社会システム、ビジネス展開）を引き起こして、CPS 型レーザー加工によるネットワーク型製造システム実現に貢献し、ひいては Society 5.0 実現に貢献することを目標に、少数精鋭でスタートした。社会実装の実現に向けて本 SIP 光・量子課題では、Society 5.0 の実現というゴールイメージからバックキャストして、それに取り組む企業が市場で調達が見込めない「ボトルネック解消技術」を提供し、安心して投資活動に取り組めるように活動した。この目標達成には、それぞれの研究課題が研究開発計画書に基づいて着実に研究開発成果を挙げて社会実装を推進したことはもちろん、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の成果を糾合して、Society 5.0 の実現に貢献する CPS 型レーザー加工機システムを構築することも目指した。

本 SIP 光・量子課題では、出口指向で研究開発を進め、開発した技術を早期に社会実装（事業化・実用化を含む）するマネジメントを実行し、各研究課題もそれぞれ TRL7 の実現を目指した開発項目を研究計画に含み、各工程表でも出口戦略、製品化ターゲットを明記した。研究成果が未完成の段階でも、潜在ユーザーとの POC を行い、社会実装に向けた課題抽出を早期に行うマネジメントを実行した。この 5 年間の活動で、当初計画で目標とした TRL7

数 11 件に対し、当初計画になかった成果の展開も含めて、活動後の実績として TRL7 以上の数が 23 件になるなど、多くの研究成果を社会実装に適した技術レベルまで引き上げ、またその一部は既に実用化・事業化されるなど、社会実装を強く意識した活動成果が得られた。

この 5 年間で社会情勢は大きく変化し、特にコロナ禍への対抗手段として DX 化が高く評価され、また米中対立やロシアのウクライナ侵攻などで基幹部品のサプライチェーン確保を狙う経済安全保障問題は激化し、半導体の確保等はわが国として優先度が高い事項となっている。中でも自動車に波及した半導体については、米国が先端半導体で先頭を走る台湾を囲い込み、欧州も米国に追随するなど、日本が取り残されるリスクがある。また、量子技術も半導体と並び、わが国として経済安保に関わる優先度の高い事項となりつつあると判断している。こうした変化の中、本 SIP 光・量子課題の社会実装も加速することが必要になったと判断し、整備した各拠点を核に波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）で、企業の事業部門等へ CPS 化に貢献する研究成果を加速度的に社会実装するマネジメントを機動的に行った。

研究テーマの推進に関わる 2022 年度のマネジメントは、2021 年度のカバニングボード評価を踏まえた研究開発計画書の改訂や内閣府や技術評価委員会からのフィードバック等を織り込み、ゴールイメージを共有しながら社会実装を先行検証するため、機動的なマネジメントを推進した。特に原則毎週行われる定例会で、PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施した。また、研究責任者からも定期的に進捗報告を受け、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した。

2022 年度の機動的なマネジメントの主要な例として、以下の 9 点を挙げるができる。(1) 予算面では、最終年度は内閣府指針に基づき 12 課題が一律減額となる中でも、SIP 第 2 期終了後も自立的に社会実装を継続するため、大学への予算配分を重視した。東京大学、宇都宮大学、京都大学、九州大学、早稲田大学の各拠点が経営、法律、営業、コンサルタントなどの人材を活用できるように配慮した。(2) 原則毎週行われる定例会で、PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施した。また、研究責任者からも定期的に進捗報告を受けた。こうした活動を踏まえて社会実装の方向性や取り組み方を支援或いは修正するなど、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した。(3) 社会情勢がさらに大きく変化したことに対応し、SIP 光・量子課題の社会実装をさらに加速するため、拠点を核にパートナー企業等から波及効果が大きな市場領域（半導体製造、脱炭素（電気自動車関連含む）分野等）で、CPS 化に貢献する研究成果を加速度的に社会実装するマネジメントを行った。特に、研究成果が早期に実用化されるためには、企業の事業部門へ成果を早く移行することが重要であることから、各研究チームの拠点から企業の事業部門へのアウトリーチを積極的に働きかけた。(4) さらにこうしたボトムアップ活動に加え、PD、サブ PD が直接企業幹部を訪問するトップダウン活動を実施した。(5) 研究成果の実用化に対して市場要求が高い京都

大学、九州大学を社会実装の先行拠点として整備した。(6) 研究成果を活用したい企業と各拠点が連携し、win-winの関係となるためのプラットフォームデザインを検討した。(7) 研究成果の海外展開を推進するため、2022.6 にサブ PD がレーザー加工チームを率いて訪欧し、ドイツ(FhG)、オランダ(High Tech Campus)の幹部と懇談し、より一層の連携強化を進めることに賛同を得た。こうした活動が進展し、京都大学(PCSEL)とオランダ PhotonDelta が駐日オランダ大使及びオランダ王子同席の元での MOU を締結(2022.10.11)し、オランダ代表団の京都大学拠点への受け入れと日独蘭交流(総勢、70名以上の参加)へと繋がった。さらに浜松・宇都宮拠点及び九州大学拠点が、オランダ TNO によるコンサルテーションを受け、オランダのエコシステム形成や拠点運営ノウハウを学んだ。(8) 各拠点から企業へ提供できるサービスの紹介や海外との連携強化を意図し、本 SIP 光・量子課題独自の国際シンポジウムを、海外連携機関幹部7名を招待し、海外78機関以上(79名)を含む1,058名の参加登録、1,014名の参加を得て開催した(2022.10.12)。また、企業の経営層に向けた雑誌の発刊(日経ビジネス(2022.9.12))、世界中の科学者、技術者向けに、本 SIP 光・量子課題の取組を紹介するため Nature Focal Point を発刊(2022.8.11)、一般ビジネスパーソン向けに本 SIP 光・量子課題の成果や CPS プラットフォーム構想を知って頂くための書籍発刊(東洋経済新報社、2023.1.26)など、様々な手段を用いた情報発信を行い、社会実装を強化した。(9) 個々の研究課題の取組みに閉じず、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理の3課題が連携し、半導体デバイス設計の最適化において、量子セキュアクラウドにより高度設計情報データの高秘匿伝送、保管を担保しつつ、半導体デバイス設計最適化に活用する量子計算アルゴリズムを深化させ、PCSEL の実デバイス試作でその効果を検証することにつながった、などである。

一連の活動成果に対し、第三者機関である技術評価委員から、2021年度に引続き全課題の研究成果、社会実装への取り組みやマネジメントに対して高い評価を頂いた。こうしたことから、研究テーマに対する評価やマネジメントは適切に実施されたと評価している。

#### ④ 民間から適切な負担を求めていたか。官民の役割分担が適切になされていたか。

**【民間からの貢献を重視しており、適切な負担を求めた。また、レバレッジ視点からの波及効果も考え、SIP 光・量子課題の成果を波及効果が大きな市場領域へ早期に適用し、日本の生産性向上に貢献することを目指した。】**

研究課題への応募の際に、産業界からの貢献(人的、物的貢献を含む)は、研究開発費の総額(国と産業界からの貢献との合計)の15%~30%程度を期待していることを明示し、適切な負担を求めた。研究開発計画書に沿った適切な負担となっており、当初は4年目(2021年度)から50%のマッチング率を予定していたが、研究成果が計画以上のペースで上がっていることや、その成果の活用に関心を寄せる企業が増えていることなどもあり、2020年度に各研究課題は50%以上を達成し、2021年度は61%になり、研究開発計画を上回る負担を

得た。2022 年度も SIP 光・量子課題の優れた成果に関心のある企業数が着実に増加しており、また各拠点での社会実装活動も活発化していることから、2021 年度を上回る 66%を見込んでいる。

本 SIP 光・量子課題で取り組んだ拠点形成は、SIP（国）の支援により開発した技術を広く活用してもらうための基盤となる。レーザー加工に関する拠点形成では、GPS 型レーザー加工機システム、空間光制御技術、フォトリソグラフィ結晶レーザーの研究において、それぞれ東京大学拠点、浜松・宇都宮拠点、京都大学拠点が研究開発成果の活用や技術移転の拠点として順調に活動し、関心のある企業が、開発の早い段階から研究成果を試用することができるようになった。光・量子通信では、量子暗号技術の社会実装の拠点等を通じ、アーリーアダプタへの研究成果の受け渡しを行なった。また標準化・エコシステム構築等を継続して行った。光電子情報処理ではオープンソースソフトウェアを開発し、早稲田大学拠点において早期に潜在ユーザー企業との産学連携を通じ、世界のデファクトスタンダードを目指して活動した。完成したアルゴリズムエンジンを企業に提供し、今後のさらなる機能拡充に向けて、当該エンジンを組み込んだクラウドサービス「QunaSys Qamuy™」の試験的な提供を継続した。さらに「GPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成」を行う九州大学では、総長指示の下、GPS 化推進半導体拠点として、光・量子プロセス研究開発センター、プラズマナノ界面工学センター、システム LSI 研究開発センター、量子コンピューティングシステム研究センターの 4 センター連携体制を構築した。これにより、九州半導体アイランドの強化に向け、ワンストップで企業のボトルネックに対する解決策の提供を目指すことができるようになった。

こうした拠点の整備が進んだことで、東京大学では TACMI コンソーシアムに参画するグループ数が 2021 年度より 21 グループ増えて 110 グループに、京都大学では拠点への国内外からの引合いが 2021 年度より 27 機関増加した 83 機関以上に、九州大学では半導体製造技術の確認を目指す綺羅コンソーシアムへの参画企業数が 2021 年度より 16 企業増えて 41 企業になった。

本来民間だけで行うべきものに国費が投じられていない点については、内閣府とも緊密に協議・調査し、利益相反が疑われることのないように適切に運営した。SIP（国）が実施する部分として、本 SIP 光・量子課題の主旨であるボトルネックの解消や我が国産業界の生産性向上に資する内容であるかに基づき、官民の分担を整理している。

参画機関の浜松ホトニクス(株)の事例では、当初個社では、「高出力レーザー加工用デジタルフィードバック光制御モジュール」のテーラーメイドな多品種少量販売のビジネスを検討していたが、本 SIP 光・量子課題での活動を通じて東京大学、宇都宮大学と連携し、かつフラウンホーファー研究機構（FhG）とも連携したシナジー効果の結果、半導体や車載部品の量産ラインや海外市場への展開のほか、大学を活用した市場展開策の立案が可能になるなどが顕在化した。コストダウンと量産による市場展開の展望が開けたことで、これを活用する企業の生産性向上が期待できる。今回の本 SIP 光・量子課題での投資は、浜松ホトニ

クス(株)個社の Win、それを安価に活用できる国産生産ラインの Win、それにより、わが国の半導体産業等の競争力が強化され経済安保に貢献する政府の Win の Win-Win 構築につながる。

### ⑤ マッチング額が十分に計上されていたか。

#### 【社会実装活動が拡大中で、マッチング率 66%の計上を見込む。】

課題全体としては、2022 年度は当初の研究開発計画書の最終年度 15-30%(研究課題別)の目標値を大幅に超える 66%を課題全体で達成する見込みである (図 3-3 参照)。また、個別の研究課題別でもそれぞれで 50%を超える見込みで、本 SIP 光・量子課題における優れた研究成果に対し、企業等の関心・期待が益々高まっている。

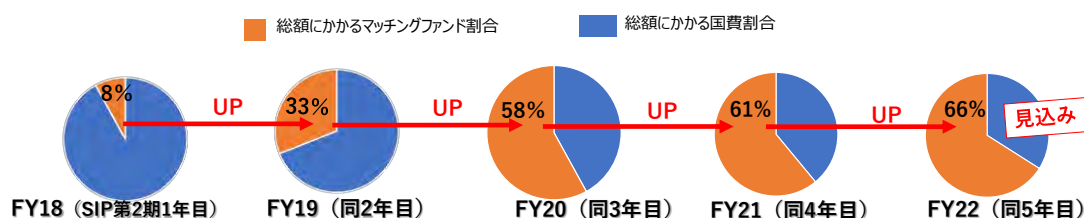


図 3-3. マッチング率の推移

GPS 型レーザー加工機システムにおいては、MDG の本格稼働に伴い、TACMI コンソーシアムに関心を寄せ、コンソーシアムに参画するグループが 2021 年度より 21 グループ増えて 110 グループになると共に、既に企業による MDG の有償利用が始まっている。空間光制御技術においては、耐光性が一桁向上したデバイスの完成を受けて、半導体製造企業等との実用化を見据えた POC が本格化しており、多層半導体の切断加工で、従来法では実現が困難であった「半導体表面にダメージを与えない」、「規定以上の機械的強度を持つこと」をクリアし、高スループットを実現する目途も立った。フォトニック結晶レーザーにおいては、参画企業である三菱電機(株)やローム(株)が、本 SIP 光・量子課題からの資金提供を受けることなく、適切な費用(労務費、機械償却費、研究費等)を負担している。またフォトニック結晶レーザーに関心を寄せる国内外企業はさらに増え、2021 年度から 27 機関増加した 83 機関から引き合い(2022.12 時点)があり、ユーザー企業・機関への MTA によるデバイスの供給やユーザー企業と連携した LiDAR 等のシステムの試作が発展し、さらに製造企業との共同研究も拡大していることが、マッチング率向上に貢献している。2021 年度、世界初の PCSEL を搭載した試作 LiDAR の体積を 1/3 に大幅に小型化したことで、連携企業による実用化検討が本格化した。量子暗号技術では、電子カルテ、ゲノム医療、生体認証技術との融合のほか、早期実需が見込める金融分野での POC を継続した。光電子情報処理では、参画機関である(株)フィクスターズやベンチャー企業である(株)QunaSys が自己負担により研究開発費用を拠出しているほか、(株)QunaSys が運営する量子コンピュータの応用検討コミュニティで 50

社が参画する「QPARC」のプログラムの中でメンバー企業が研究成果をさらに活用したことや、(株)フィックスターズは住友商事(株)などとの POC が事業化されたほか、多くの他企業と POC を実施することに発展したことから、マッチング率が拡大した。また、九州大学では拠点形成、拠点機能の拡大により、共同研究や共同開発を進める企業数も増加し、2019 年度 7 社であった綺羅コンソーシアム参画企業数は、2021 年度には 25 社、2022 年度には目標とする 40 社を超える 41 社に達し、マッチング率向上に貢献した。特に、半導体分野に関連する大手企業である東京エレクトロン(株)、(株)SCREEN ホールディングス、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング(株)、キオクシア(株)、ギガフォトン(株)からの投資を受け、社会実装に向けた活動を実施しており、半導体分野における民間企業の投資を誘起し、新技術の確立と新たな市場を創出する持続可能な拠点として活動している。

#### ⑥ 府省連携が不可欠な分野横断的な取り組みとして実施されていたか。

**【SIP 光・量子課題は、経産省 NEDO プロ、文科省 CREST、QLEAP、総務省「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」などの研究成果を活かし研究開発に取り組んでいる。】**

本 SIP 光・量子課題では、府省が実施している関連事業で開発される研究成果を本 SIP 光・量子課題に糾合し、研究開発を加速した。レーザー加工では、広範囲な事業体に成果を提供できる体制構築からバックキャストして、必要な府省・産学のプログラム(NEDO、Q-LEAP 等)の成果の糾合を推進し、光・量子通信では、本 SIP 光・量子通信のメンバーが中心となり設立された、(一社)量子 ICT フォーラムを通じて府省庁連携、産学連携を強力に推進した。光電子情報処理においては、関連する NEDO 事業、Q-LEAP 事業等と緊密に連携することにより、研究開発を効率良く、かつ最大限の効果を上げるよう進めた。個別の研究課題での取り組みは以下のとおりである。

GPS 型レーザー加工機システム研究開発においては、本 SIP 光・量子課題は NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発、Q-LEAP 次世代レーザー領域で開発された成果を活用・糾合し、府省連携で社会実装を推進する体制を構築し研究開発を実行した。

フォトリソグラフィ結晶レーザーに係る研究開発においては、NEDO、JST CREST の成果を糾合して研究開発を実行した。

量子暗号技術においては、本 SIP 光・量子課題の光・量子通信のメンバーが中心となり、(一社)量子 ICT フォーラムを設立し、府省庁連携や産学連携を強力に推進する体制を構築した。同フォーラムでは、研究開発の国家戦略やロードマップの策定、運用ガイドライン案の提言、標準化支援などについて、府省庁をオブザーバーに大学、国研、企業で検討を行う場として、本 SIP 光・量子課題の光・量子通信のメンバーが主導している。また、本 SIP 光・量子課題の参画メンバーである NICT は総務省とも緊密に連携し、総務省プロジェクト「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」に本 SIP 光・量子課題での成果も活用し、量子暗号技術のさらなる展開に結実させた。

次世代アクセラレータ基盤技術に係る研究開発においては、早稲田大学、(株)フィックス

ターズ、(株)QunaSys、慶應義塾大学の4者によって研究開発を実施したが、本SIP光・量子課題に関連があるNEDO事業\*1、Q-LEAP事業\*2等と緊密に連携することにより、研究開発を効率良く、かつ最大限の効果を上げるよう進めた。

\*1…(1) イジングマシン共通ソフトウェア基盤の研究開発(代表機関:早稲田大学)

(2) 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(代表機関:日立製作所)

(3) 超電導パラメトロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発(代表機関:日本電気)

\*2…NISQコンピュータあるいは誤り耐性ゲート型量子コンピュータに関連した3つのプロジェクト((1)超伝導量子コンピュータの研究開発、(2)量子コンピュータのための高速シミュレーション環境構築と量子ソフトウェア研究の展開、(3)量子ソフトウェア)と連携する。

## ⑦ SIP第2期で実施する他の課題との連携が適切に図られていたか。

**【SIPスタート時から、SIP国家レジリエンス(防災・減災)、SIPマテリアル革命等のプログラムとの連携を進めた。更に医療AIプラットフォーム技術研究組合(HAIP\*1)、SIPビッグデータ・AI、新たなSIP国家レジリエンス(防災・減災)との連携が進み、新しいシステム構築、POC実施、技術移転等で貢献した。】**

光・量子通信は本SIP光・量子課題チームが開発している電子カルテ保管・交換システムを災害医療支援に適用するため、2019.2より「国家レジリエンスチーム」と打合せを開始し、高知県・高知市病院企業団立高知医療センター及び連携協力機関から成るチームと、電子カルテデータのセキュアなバックアップと医療機関間での相互参照、災害時の迅速なデータ復元を可能とするシステム開発してきた。2021年度は被災地での救護活動を効率化するため、個人情報保護しながらの患者情報の統計データを使うシミュレータシステムの開発に成功している。2022年度は電子カルテ情報を匿名加工したうえで、外部機関に提供できるようにするためのシステムを開発し、それを適用してH-LINCOS\*2に保管されている秘密分散ファイルシステム上の医療情報から、地域別、年代別、病気ごとの患者数を集計し統計情報を抽出するなどの機能を追加開発した。この機能で得られる統計情報を国家レジリエンスチームが開発しているD24H\*3(災害時保健医療福祉活動支援システム)に提供することで、被災地に必要な医療支援物資の推定が可能となる。またここで開発された高速秘密分散処理及びデータ伝送技術を、SIP AIホスピタルのHAIPにも提供し、HAIP独自システムのアクセス管理に活用された。

光電子情報処理では、既にSIP課題「IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ研究開発」の「プロシージャ適格性保証による信頼の証明技術の研究開発」に本SIP光・量子課題の参画機関が関与しているほか、マテリアル革命に向けてイジングマシンを用いて自動車産業・電子情報産業等広範なスマート製造業においてニーズのある複合材料組織の構造最適化に関するphase-field modelの発展モデルによる新しい定式化方法の研究と本格的な計算を実施した。その結果、従来の手法では計算結果を得るのに100分かかっていたのが、本SIP光・量子課題の参画機関が開発したFixstars Amplifyを使って1秒で完



了するなど、計算の高速化に貢献した。また、SIP ビッグデータ・AI の分野横断的なデータ検索・連携を可能とするシステムへの接続に貢献すると共に、これをきっかけに、データ連携基盤を使い、自治体データの一部（例：ハザードデータ）を共有し、それをを用いて次世代アクセラレータが避難計画を最適化することに繋がった。具体的には、SIP 防災との連携で、SIP4D（府省庁連携防災情報共有システム）の災害対応や危険度に関する検証用ダミーデータを取得し、地図データとあわせて、SIP 光・量子課題のイジングマシンにて最適避難計画を計算するもので、長野県松本市の人口、避難所情報、浸水想定区域情報などを元に、複数のケースにおいて量子アニーリング・イジングマシンによる組合せ最適化計算用エンジンを設計し、災害時に住民が避難する最適地を推薦する計画を立てた。2022.12 まで POC を実施し、イジングマシンによる最適化計算結果が実用的な情報を導けることがわかり、災害支援データ活用への可能性を示すことに貢献した。

\*1…SIP「AI ホスpitalによる高度診断・治療システム」において、他の SIP 参画機関との共同研究により、将来的な社会実現を見据えた研究開発をする組合。

\*2…電子カルテ保管・交換システム。電子カルテデータのセキュアなバックアップ、医療機関間での電子カルテデータの相互参照及び災害時等に必要な医療データ項目の迅速な復元を実現するシステム。さらに、個人情報を取扱うため、セキュアなアクセス管理も実施。大規模災害において被災地で医療情報を提供可能なシステムとして開発、検証してきた。

\*3…災害時保健医療福祉活動支援システム。SIP 国家レジリエンス（防災・減災）が研究開発したもので、府省庁連携防災情報共有システム（SIP4D）及び被災地で支援活動を行う保健・医療・福祉チーム（DMAT、DPAT、DHEAT、日赤等）のそれぞれの独自システムと連携し、災害時の保健医療福祉支援活動に必要な情報を収集、整理統合、加工分析し、支援活動の意思決定判断に必要な情報を提供するシステム。

## ⑧ 上記以外にマネジメントの観点から評価すべきこと

### **【社会実装のゴールイメージを共有しながら機動的な研究開発・社会実装を推進する過程で、様々なマネジメント上の工夫を随時行った。】**

具体的には、第3章③でも述べたように、2022年度のマネジメントでは、(1) 予算面で SIP 後も自立的に社会実装を継続するため、大学への予算配分を重視した、(2) 原則毎週行われる定例会で PD、サブ PD が海外を含む社会情勢の変化、研究活動や社会実装の状況、諸戦略の見直し、課題内連携等の情報共有や議論を実施し、社会実装の方向性や取り組み方を支援或いは修正するなど、研究テーマに対する評価、マネジメントを適切に実施した、(3) SIP 光・量子課題の社会実装をさらに加速するため、各拠点から事業部門へのアウトリーチを積極的に働きかけた、(4) PD、サブ PD が直接企業幹部を訪問するトップダウン活動を実施した、(5) 研究成果の実用化に対して市場要求が高い京都大学、九州大学を社会実装の先行拠点として整備した、(6) 企業と拠点が連携し、win-win の関係となるためのプラットフォームデザインを検討した、(7) 成果の海外展開を推進した、(8) 各拠点から企業へ提供できるサービスの紹介や海外連携強化等を意図した情報発信を強化した、(9) レーザー加

工、光・量子通信、光電子情報処理の3課題が連携した、などのマネジメントの工夫を行ったほか、第1章(2)-⑥, ⑦でも述べた、課題全体としての成果の対外的発信、論文投稿などの推奨、国際的な取組・情報発信を進めた。

上記以外では、(a)課題評価WG委員に本SIP光・量子課題の活動への理解を深めて頂くための視察に対応(2022.10.25@東京大学)し、頂いたご意見・アドバイスをマネジメントや方針決定に活かしたほか、(b)課題内連携を推進する上で重要な、課題内の良好なコミュニケーション環境作りに取り組み、PD、サブPD、関係府省、研究推進法人による緊密な情報提供・共有及び活動指針の確認の場として、原則1回/週の定例会(2022年度は2023.3.01までに34回)を開催したのに加え、研究責任者からの定期報告(レーザー加工(4回)、光・量子通信(4回)、光電子情報処理(5回))により、研究進捗のみならず困りごとなどを共有し、課題解決に協力した。本SIP光・量子課題では、全参画機関間で秘密保持契約を締結し、研究課題内の情報共有や闊達な議論がしやすい環境を構築していることから(2023.1現在:全20参画機関)、課題チーム内、課題間の打合せも個別に多数回開催された。

## 参考情報

### 1. 知財出願/外部公表等活動状況

#### 【2022年度活動状況】

2022. 4. 1- 2023. 2. 28 までの知財出願/外部公表等活動状況を以下にまとめた。

【2022年度(状況)】

※2023.2.28現在状況

知的財産(特許(外国出願を含む)、プログラム等著作物など)

特許				他の産業財産権合計	
出願件数		登録件数		プログラム等著作物	その他(商標など)
国内	海外	国内	海外		
5	23	1		1	

- CPS型レーザー加工機システム
- 空間光制御技術
- フォトニック結晶レーザー
- 量子暗号技術
- 次世代アクセラレータ基盤
- PD・サブPD・管理法人・共通

論文など(原語論文、学位論文、プロシーディングス、総説、解説、速報など)

論文数(総数)	(内外国誌文)	(内国内誌文)
32	18	14

学会発表など(国内・国際)学会口頭発表・ポスター発表、招待講演(成果を公表したもの)

会議発表(総数)			(内国内会議発表分)			(内国際会議発表分)		
発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待	発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待	発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待
107	21	41	57		20	50	21	21

その他

書籍出版件数	プレスリリース	メディア取材	展示会参加数	表彰・受賞数	アウトリーチ数
2	16	83	8	5	89

その他アウトリーチ活動	
シンポジウム開催	SIPシンボルマーク使用歴
2	34

標準化活動		
標準化委員会参加	寄稿	標準化アクセプト
14	22	

#### 【5年間の活動結果】

本 SIP 光・量子課題の5年間の活動期間中の知財出願/外部公表等活動状況を以下にまとめた。なお、数値は2023. 2. 28 までの実績。

【SIP期間累積実績】

※2022年度は2023.2.28時点での集計値

知的財産(特許(外国出願を含む)、プログラム等著作物など)

特許				他の産業財産権合計	
出願件数		登録件数		プログラム等著作物	その他(商標など)
国内	海外	国内	海外		
30	48	2		11	

- CPS型レーザー加工機システム
- 空間光制御技術
- フォトニック結晶レーザー
- 量子暗号技術
- 次世代アクセラレータ基盤
- PD・サブPD・管理法人・共通

論文など(原語論文、学位論文、プロシーディングス、総説、解説、速報など)

論文数(総数)	(内外国誌文)	(内国内誌文)
115	69	46

学会発表など(国内・国際)学会口頭発表・ポスター発表、招待講演(成果を公表したもの)

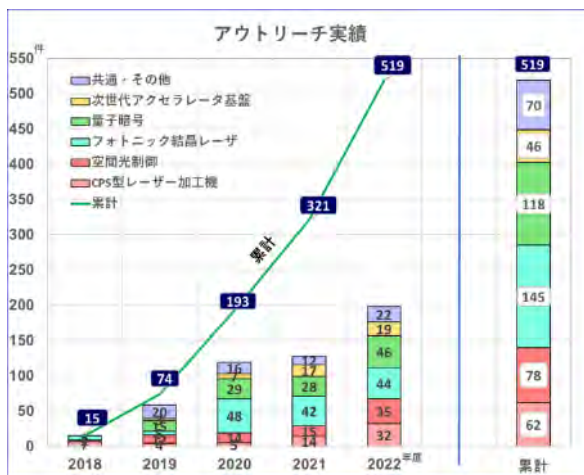
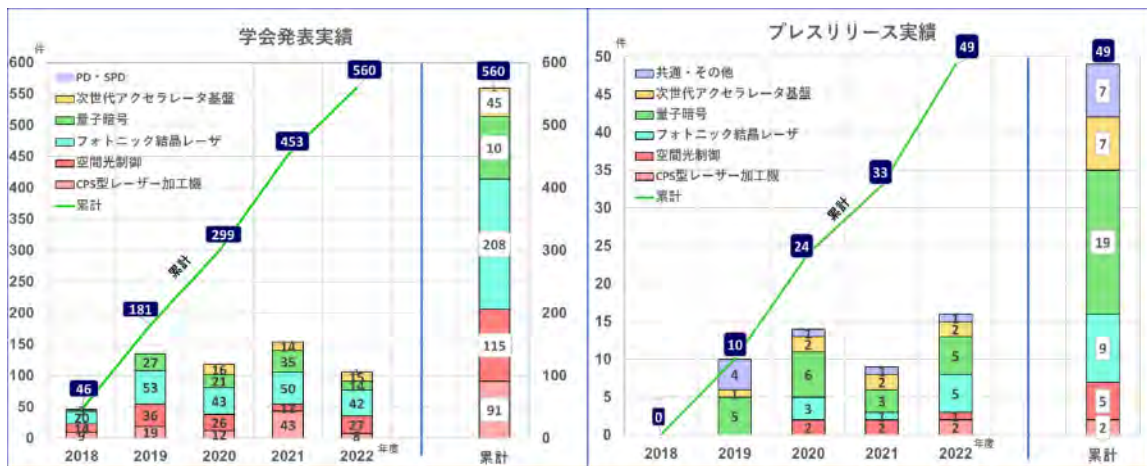
会議発表(総数)			(内国内会議発表分)			(内国際会議発表分)		
発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待	発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待	発表数	発表数の内、査読有	発表数の内、招待
560	66	213	366	2	121	194	64	92

その他

書籍出版件数	プレスリリース	メディア取材	展示会参加数	表彰・受賞数	アウトリーチ数
5	49	175	32	37	258

その他アウトリーチ活動	
シンポジウム開催	SIPシンボルマーク使用歴
8	149

標準化活動		
標準化委員会参加	寄稿	標準化アクセプト
113	179	11



※アウトリーチには、プレスリリース・取材対応・展示会参加・書籍出版を含む

## 2. SIP 光・量子課題主催のシンポジウム開催実績

	2018	2019	2020	2021	2022
シンポジウム名	公開シンポジウム2018	公開シンポジウム2019	公開シンポジウム2020	公開シンポジウム2021	国際シンポジウム2022
主な内容	キックオフ。SIP光・量子課題の活動内容紹介。	研究成果報告。有識者と光・量子技術で加速するCPSの可能性を議論。交流会では各研究グループとの幅広い交流の場を創出。	研究成果報告。CPSプラットフォームへの理解と参加を呼び掛け。	研究成果の社会実装に向けた現状の取組みを発表。社会実装トークセッションで企業による光・量子技術のビジネス化への取組を紹介。	社会実装先となるお客様に向けて、SIP後も成果を提供する拠点からのサービス内容を紹介。海外連携機関からの提案等も通じ、新規連携の構築を訴求。
開催日時	2018/12/4 13:00~17:30	2019/11/1 13:30~16:40 16:40~ NW*	2020/11/9 13:30~18:00	2021/10/25 14:15~17:00	2022/10/12 13:30~17:20 17:30~ NW*
開催方法	リアル	リアル	オンライン	オンライン	ハイブリッド
開催場所	浜離宮朝日ホール	東京大学 伊藤謝恩ホール	－	－	イノホール
参加者数	225	324	448	582	1,014 (会場143/オンライン871)

\*...Networking (交流会)