戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術

研究開発計画

令和４年５月２０日

内閣府

科学技術・イノベーション推進事務局

目次

研究開発計画の概要 1
1. 意義・目標等 2
(1) 背景・国内外の状況 2
(2) 意義・政策的な重要性 2
(3) 目標・狙い 3
①Society 5.0 実現に向けて 3
②社会面の目標 4
③産業的目標 4
④技術的目標 4
⑤制度面等での目標 5
⑥グローバルベンチマーク 5
⑦自治体等との連携 8
2. 研究開発等の内容 9
(1) レーザー加工 11
①CPS 型レーザー加工機システム研究開発 12
②空間光制御技術に係る研究開発 16
③フォトニック結晶レーザーに係る研究開発 19
(2) 光・量子通信 24
①量子暗号技術 25
(3) 光電子情報処理 29
①次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発 30
(4) 社会実装加速プロジェクト 35
①CPS 化プラットフォーム 35
②CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成 36
3. 実施体制 38
(1) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の活用 38
(2) 研究責任者の選定 39

(3) 研究体制を最適化する工夫 39
(4) 府省連携 39
(5) 産業界からの貢献 39
4. 知財に関する事項 40
(1) 知財委員会 40
(2) 知財権に関する取り決め 41
(3) バックグラウンド知財権の実施許諾 41
(4) フォアグラウンド知財権の取扱い 41
(5) フォアグラウンド知財権の実施許諾 41
(6) フォアグラウンド知財権の移転、専用実施権の設定・移転の承諾について 41
(7) 終了時の知財権取扱いについて 42
(8) 国外機関等（外国籍の企業、大学、研究者等）の参加について 42
5. 評価に関する事項 42
(1) 評価主体 42
(2) 実施時期 42
(3) 評価項目・評価基準 42
(4) 評価結果の反映方法 43
(5) 結果の公開 43
(6) 自己点検 43
①研究責任者による自己点検 43
②PD による自己点検 43
③量研による自己点検 43
(7) ピアレビュー 43
6. 出口戦略 44
(1) 出口指向の研究推進 44
(2) 普及のための方策 45
7. その他の重要事項 45
(1) 根拠法令等 45
(2) 弾力的な計画変更 46

(3) PD 及び担当の履歴 47

＜添付資料＞

〇資金計画及び積算

〇本課題における TRL の定義

〇工程表

研究開発計画の概要

1. 意義・目標等

経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会となる Society 5.0 実現には、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させるサイバーフィジカルシステム（CPS）の構築が鍵。現在、IoT／AI からスマート製造へと投資が開始されているが、社会・産業界共通の投資を阻むボトルネックが存在。これらのボトルネックを解消するため、我が国が強みを有す光・量子技術を活用。当該技術の中から、重要かつ優先度の高い、レーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理を選定して研究開発を実施することにより、Society 5.0 実現を加速度的に進展させる。

2. 研究内容等

主な研究開発項目を以下に記す。

（1） レーザー加工（レーザー加工市場におけるシェア奪還のための CPS 型レーザー加工機等の実現）

（2） 光・量子通信（絶対に破られない暗号技術をサービスとして社会実装）

（3） 光電子情報処理（従来計算機の処理性能を凌駕する最適化問題等の適用分野での先行実証と社会実装）

また、本課題成果の社会実装を加速するため以下を実施する。

（4） 社会実装加速プロジェクト（ものづくりの CPS 応用の起点となるひな形システムの構築）

3. 実施体制

西田プログラムディレクター（以下「PD」という。）は、研究開発計画の策定や推進を担う。PD が議長、内閣府が事務局を務め、関係府省や専門家で構成する推進委員会が総合調整を行う。文部科学省所管法人である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構運営費交付金を活用し、研究責任者の公募等を実施する。同法人のマネジメントにより、研究開発の進捗を管理する。

4. 知財管理

知財委員会を国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の下に設置し、発明者や産業化を進める者のインセンティブを確保し、かつ、国民の利益の増大を図るべく、適切な知財管理を行う。

5. 評価

ガバニングボードによる毎年度末の評価前に、研究責任者及び PD による自己点検を実施し、自律的にも改善可能な体制とする。

6. 出口戦略

研究開発成果を確実に社会実装につなげるため、可能な限り、国内外の企業ネットワークに情報を開示したり、テストプラットフォームを提供して技術データを収集したりすることで、企業による評価例・採用実例等を、研究開発にフィードバックし事業化を目指す。

同時に、研究成果の積極的・戦略的な広報も実施し、企業等に限らず社会全般へ向けて成果の浸透を図る。

1. 意義・目標等

(1) 背景・国内外の状況

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、CPS 構築を推進する動きは進んでいる。

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脅威は増加の一途を辿り、一旦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。

さらに、国外においても、米国では Industrial Internet、ドイツでは Industrie 4.0、中国では中国製造 2025 等、上記懸念材料を解消するため、国を挙げて IoT 社会や CPS の実現を強力に進めており、我が国の競争力の低下が懸念されている。

(2) 意義・政策的な重要性

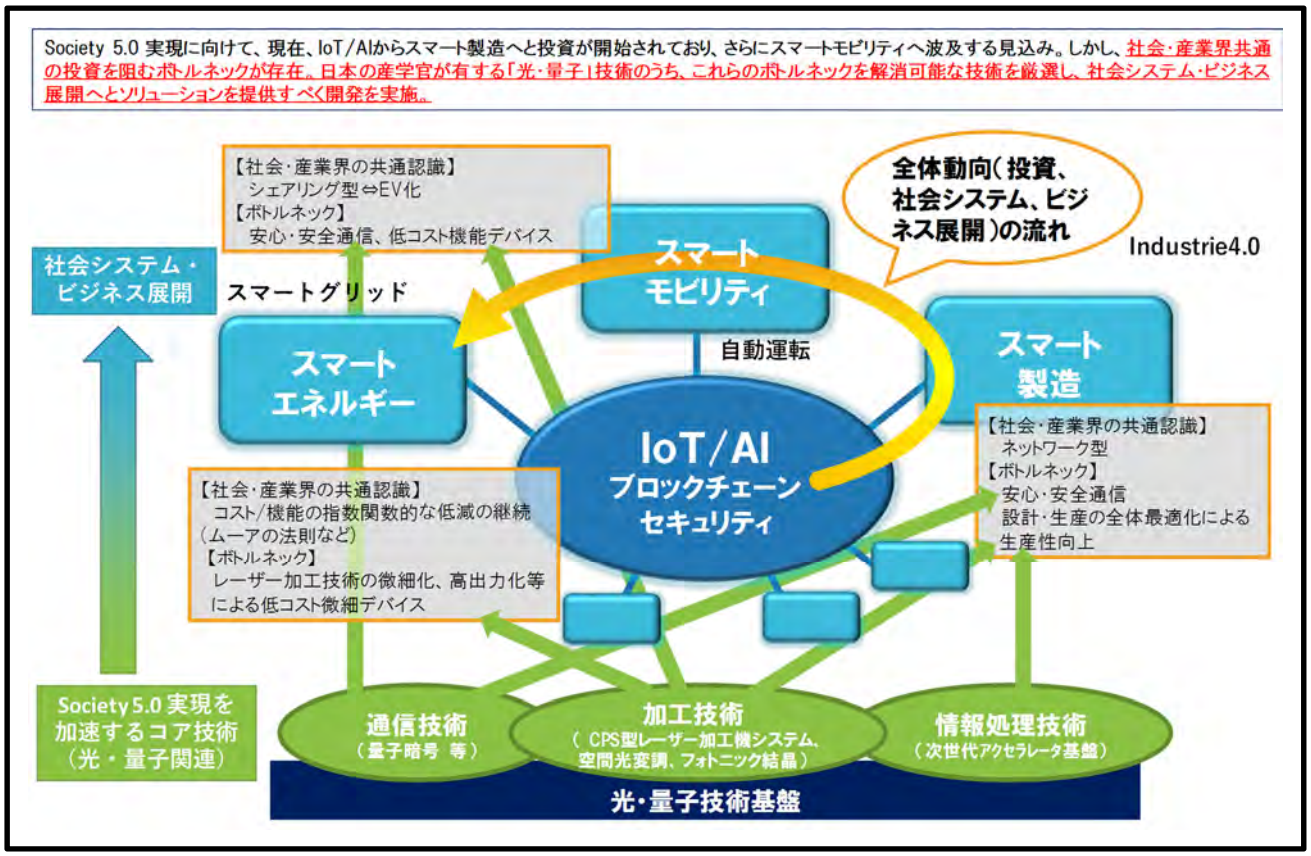
光・量子技術は、第 5 期科学技術基本計画において、「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」として位置づけられており、我が国が強みを有する分野である。この強みを活かし、上述で説明した Society 5.0 実現に向けた投資を阻むボトルネックを解消することで、民間企業の投資を促し、関連分野における国際的な競争力を高めることが重要である。

そのため、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する。

例えば、スマート製造において実現要求が高いが、複雑な物理現象を伴うため物理モデルの構築が最も困難な工程の代表例であるレーザー加工の CPS 化の実現により、ほとんどの製造装置のスマート化が可能であることを先導実証することを目指す。これにより、スマート製造への投資を加速させることが期待され、生産現場における生産性の飛躍的な向上が達成されることになる。

また、Society 5.0 においては、スマート製造の他、スマートモビリティ、スマートエネルギー、スマート医療等の分野で秘匿性の高い個人情報やビジネス価値の高い企業情報等が産み出されるため、これらを安全に流通させバックアップ保管する必要がある。絶対に解読できない量子暗号通信技術と秘密分散バックアップ技術を統合し量子セキュアクラウド技術を整備することにより、企業やユーザーが様々な重要情報を安心して保管・共有し活用できるようになることは、Society 5.0 実現に向けて重要である。

このように、投資を阻むボトルネックを光・量子技術等の研究開発によって解消し続けていくことで、日本の Society 5.0 社会実現に向けた投資を加速するとともに、我が国の競争力強化に大きく貢献する。



図表１－１．光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術の全体背景

(3) 目標・狙い

①Society 5.0 実現に向けて

我が国が強みをもつ光・量子技術を活用し、Society 5.0 の実現に向けた投資のボトルネックをレーザー加工技術、光・量子通信技術、光電子情報処理技術によって解消する。例えば、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 CPS 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・量子セキュアクラウド技術（10km~100km 圏量子暗号ネットワーク上での数 10Mbps 級の秘密分散処理）の実装、イジング型コンピュータや NISQ コンピュータ（Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer）、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利活用することで構成され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）等を行い、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ことを目標とする。このようなボトルネックを取り除くことにより、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への潮流（投資、社会システム、ビジネス展開）を引き起こし、もって、Society 5.0 の実現を加速する。

②社会面の目標

Society 5.0 実現のために重要である CPS の構築に向け、レーザー加工、光・量子通信及び光電子情報処理に係る研究開発を実施し、CPS 型レーザー加工によるネットワーク型製造システムの構築の実現に貢献する。また、量子暗号の研究開発を実施し、将来暗号解読技術やサイバー攻撃技術が高度化しても秘匿性の高い個人情報等がどんな計算機でも解読や不正改竄ができない、安全なデータバックアップ保管や高秘匿なデータ 2 次利用を可能にする量子セキュアクラウドサービスを実現する。イジング型コンピュータ（アニーリング型量子コンピュータマシンや古典技術を用いたアニーリングマシン）や NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等を広く次世代アクセラレータとして活用可能なシステム基盤を構築し、これらの計算資源を最適活用することで、Society5.0 実現のためのボトルネックを解消する。

これらにより、我が国の産業の持続的な競争力の強化に寄与するスマート製造分野をはじめとする Society 5.0 実現に向けた民間の投資を加速させ、経済の発展並びに我が国及び国民の安全・安心を確保し、豊かで質の高い社会の実現を目指す。

③産業的目標

上述のとおり、レーザー加工、光・量子通信及び光電子情報処理に関する研究開発により、スマート製造分野の投資のボトルネックを解消することで、CPS 型レーザー加工によるネットワーク型製造システムを実現し、ものづくり産業の生産性の向上に貢献する。

また、加えて個別の技術においても、例えば、フォトニック結晶レーザーのさらなる高輝度・高性能化による超小型レーザー加工システムに向けた要素技術開発を通じて生み出される、直近の応用展開（例えば、センシング、医療、生命科学への応用等）や、量子セキュアクラウドシステムの実用化による医療機関の保有する医療検査データなどの秘匿性の高い個人情報等のやり取り・管理の安全性向上の実現により、自動車産業、医療産業等の各分野における我が国の競争力を高めることを目指す。

④技術的目標

【レーザー加工】

高精度かつ高スループット、さらには材料に応じた複雑な制御が求められるものづくりにおける製造装置に適用可能な CPS 型レーザー加工機システムの開発を行う。具体的には、加工工程の実績や計測によるリアルタイムでの高度光制御を達成し、まずは電子部品製造分野における難加工材料など電子機器の製造工程に実装する。

また、高機能空間光制御デバイス（高耐光性、高速かつ高集積化）の開発を行い、非熱レーザー加工等の高精度かつ高スループットな加工技術を実用化する。さらに、フォトニック結晶レーザーのさらなる高輝度・高性能化により、直近の出口の一つとしてセンシング光源としての展開を実証するとともに、超小型直接加工システムに向けた要素技術の開発へと展開する。

【光・量子通信】

量子セキュアクラウドシステムの開発により、暗号解読技術やサイバー攻撃技術が高度化してもセキュリティが危殆化する恐れのないデータ流通・保管・利活用のネットワーク基盤を整備し、まずは医療分野等（電子カルテ・ゲノム解析情報・スマート製造分野）における適用に向けた実証を行う。

【光電子情報処理】

アプリケーション領域ごとに GPU（Graphics Processing Unit）等の古典アクセラレータや、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等の次世代アクセラレータを最適に活用することを可能とする次世代アクセラレータ基盤を開発し、スマート製造、物流、材料、エネルギー・環境産業等における適用に向けた実証を行う。

⑤制度面等での目標

量子暗号について、企業が安心して装置の製造・サービスの提供を行うことができる環境整備に向け、物理乱数源と量子暗号技術に関する標準化活動を推進し、安全性保証基準・評価手法に関する文書を作成、国内外の標準化機関に提案する。

併せて、将来において評価・検定・認定を運用するためのエコシステムのモデルを構築、制度設計提案書の取りまとめを行い、関係省庁や諮問委員会等へ提案することを目指す。

⑥グローバルベンチマーク

【レーザー加工】

- CPS 型レーザー加工機システムに搭載予定の「光源」として、レーザー加工の今後の需要を想定し紫外～近赤外までの範囲を導入し、欧州と比較して、我が国で先んじて研究開発が進められている、量子物理モデル等をベースとした特定の加工方式に対応する準汎用の加工モデルも受け入れ可能なシステムの構築を達成する。（図表１－２）
- 空間光制御デバイスの開発において重要となる「有感エリア」「光利用効率」「平面度」といった高精度な位相変調特性の点について、欧米に対する現在の優位性を保ちつつ、さらなる光耐性（有感エリアの拡大）や対応波長域の広域化（紫外光まで）を達成する。（図表１－３）
- フォトニック結晶レーザーは、半導体レーザーの中で既に世界最高レベルの輝度（図表１－４)を実現しているが、将来の超小型加工用システムにおける活用を目指して、大型のファイバーレーザーや CO_2 レーザーに迫る輝度の実現のため、高輝度フォトニック結晶レーザーを開発（注：その成果は、加工のみならず、様々な波及効果をもつ）していく。また、欧米に先駆け、他の光源に無い高出力・狭出射角・高い波長安定性という特長を有した光源を実現（図表１－５)し、機械駆動方式（数 kHz）より高速なスキャン（MHz）が可能な光源技術を欧米に先駆けて実現する。（図表１－５、６）

中心開発機関	国内機関	独国機関
主要光源（一例）	紫外～近赤外	近赤外
特徴	量子物理モデルと蓄積データベース、人工知能技術をベースとした特定の加工方式に対応する準汎用の加工モデルを構築し、短時間で機器の能力をサイバー側に回答	古典物理モデルと蓄積データーベースを中心とした特定専用用途の加工モデルを加工対象ごとに構築し、高速に機器の能力をサイバー側に回答
開発フェーズ	開発中	開発構築中

図表１－２　CPS 型レーザー加工機システム開発

製品（メーカー）	国内企業	独国企業	米国企業
有感エリア（mm）	16 x 12	15.4 x 8.6	7.68 x 7.68
有感エリア率（%）	98	87	83.4
光利用効率（%）	87-95	59-63	62
平面度（λ）	1/20	1/10	1/7~1/12
DACビット数	12	8	8
線形性	高	中	低
対応波長域	可視～赤外	可視～赤外	可視～赤外

図表１－３　空間光制御技術の開発

開発機関、参画企業	国内機関	米国企業等	米国企業等	（参考） 米国企業等	（参考） 国内企業等
レーザー種類	フォトニック結晶レーザー（PCSEL）単一ブロードエリアデバイス	垂直共振器面発光レーザー（VCSEL）アレイデバイス	半導体レーザー（ファブリーペロー型）単一ブロードエリアデバイス	ファイバーレーザー	ガスレーザー
出力	5~10W	5~10W	5~10W	>1kW	>1kW
ビーム品質	M^2~2	M^2=数10	M^2=数10	M^2~10	M^2=1
集光輝度	~300MW/cm²sr	~5MW/cm²sr	~5MW/cm²sr	~1000MW/cm²sr	~1000MW/cm²sr
特徴	・小型・光分布集中 ・面積増で出力増（ビーム品質維持）	・小型・光発散 ・面積増で出力増（ビーム品質劣化）	・小型 ・単独低出力（ビーム品質悪）	・比較的大・高出力 ・部品寿命~数年 ・システムが大型	・大型・高出力 ・部品寿命~数年 ・発振器が大型

図表１－４　半導体レーザー（加工）開発

開発機関、参画企業	国内機関		独国企業等
種類	フォトニック結晶レーザー（PCSEL）		半導体レーザー（ファブリーペロー型）
発光形態	一方向面発光 （第一目標技術）	スキャン可 （将来技術）	端面発光
出力（ピークパワー）	30W以上 （可能性）	数W～10W以上 （可能性）	75W
拡がり角	0.2°以下	0.5°以下	10～30°
波長安定性	0.08nm/℃		0.27-0.28nm/℃
集光輝度	・狭いビーム拡がりで高出力動作可 ・ビームを平行にするための外部光学系不要	・電子的に2次元ビーム走査可能 ・ビームを平行にするための外部光学系不要	・ビームを平行にするための複雑な外部光学系が不可欠 ・自身でのビームスキャン不可 ・スタックが可能でスロープ効率高い
駆動方式	機械式	電子式	機械式
駆動用外部光学系	有	無	有

図表１－５　フォトニック結晶レーザー開発

開発機関、参画企業	国内機関	米国企業等	独国企業等	独国企業等	米国企業等
種類	PCSEL スキャン方式 （将来技術）	光フェーズドアレイ方式 （課題多い）	受光素子分割方式	MEMS方式	モーター駆動メカ方式
画角	±50°以上 （可能性）	120°	140°	60～210°	360°
駆動方式	電子式	熱式	-	機械式	機械式
スキャン速度	MHz以上 （可能性）	×（数十kHz）	- （走査なし）	×（数十kHz）	×（数kHz）

図表１－６　フォトニック結晶レーザー駆動方式開発

【光・量子通信】

- 安全な通信に加え、我が国独自の機能である安全なデータ保存を可能とする都市圏規模のネットワークカバレージを持つ量子セキュアクラウド技術を開発する。（図表１－７、８）

開発機関	国内企業①	国内企業①	瑞西企業 ①	瑞西企業 ②	米国企業
最大通信距離	~90km	~100km	~50km	~100km	~140km
鍵配送速度（一例）	0.3~1Mbps @50km	10Mbps @10km	~1kbps @20km	>3kbps @50km	~100bps @~140km

図表１－７　量子暗号開発　　※　光ファイバーによる暗号通信のベンチマーク

開発機関、参画企業	国内企業等	英国企業等	中国企業等
システム	Tokyo QKD Network (2010~)	Quantum Communication Hub (構築中)	Quantum Backbone (2017~)
ﾈｯﾄﾜｰｸｶﾊﾞﾚｰｼﾞ範囲	100 km圏/6~8ノード	200 km圏/10ノード	2,000 km圏/32ノード
鍵配送速度	300 kbps/リンク	300 kbps/リンク	20 kbps/リンク
機能	安全な通信＋**安全なデータ保存**	安全な通信	安全な通信
特徴	**安全性の危殆化しないデータ分散バックアップ機能を試験運用中**	最新の光通信網制御(ネットワーク仮想化)技術による量子暗号網を構築中	世界最大規模(2,000km)の量子暗号ネットワークを構築

図表１－８　量子ネットワークサービスに向けた動向

【光電子情報処理】

- 特定の次世代アクセラレータ・古典アクセラレータを対象に、特定の問題を対象としたアクセラレーション技術が開発されている（図表１－９）。これらの上位層として、アプリケーションプログラムにとって最適なアクセラレーションを活用することを可能とする次世代アクセラレータ基盤技術を実現する。

開発機関	国内機関	国内企業①	国内企業②	米国機関等 ①	米国機関等 ②	加国企業
対象アクセラレータ	次世代アクセラレータ（将来技術）	複数のイジング型コンピュータ	複数のイジング型コンピュータ	古典アクセラレータ	古典アクセラレータ・一部次世代アクセラレータ	特定のイジング型コンピュータ
自動/手動	自動（将来技術）	手動	一部自動	一部自動	一部自動	一部自動
対象問題	汎用	組合せ最適化問題	組合せ最適化問題	汎用	汎用	組合せ最適化問題

図表１－９ 国内外の次世代アクセラレーション技術

⑦自治体等との連携

地方自治体の産業振興施策とも連携し、当事業の成果の技術移転等を通じて産業の高度化・高付加価値化に貢献する。

2. 研究開発等の内容

Society 5.0 実現のために重要である CPS の構築に向けて、光・量子技術を活用した、レーザー加工、光・量子通信及び光電子情報処理に係る研究開発を実施し、レーザー加工によるネットワーク型製造システムの構築の実現に貢献する。具体的には、①シミュレーションによって最適な加工条件を導出し加工を実施する CPS 型レーザー加工機システムの開発、②高品質なレーザー加工を高スループットで行うための空間光制御技術、③センシング光源等にも応用可能な高ビーム品質・小型・省エネなフォトニック結晶レーザーの開発、④ネットワーク型製造システムにおける安全・安心な通信を実現するための量子暗号技術、⑤ネットワーク型製造システムにおけるプロセス等の高速最適化を行う次世代アクセラレータ基盤の開発などの研究開発等を行う。

なお、研究開発においては、上述のネットワーク型製造システムの構築を目指すと同時に、各研究課題においても、個々の技術の特性を生かし、社会実装に向けた取り組みを実施していく。

社会実装を進めるためには、実装される側の「要求仕様の具体的な把握」と、それをビジネスベースで社会実装先に提供するための具体的な「実装スキームの整備」が必須となることを念頭に進める。

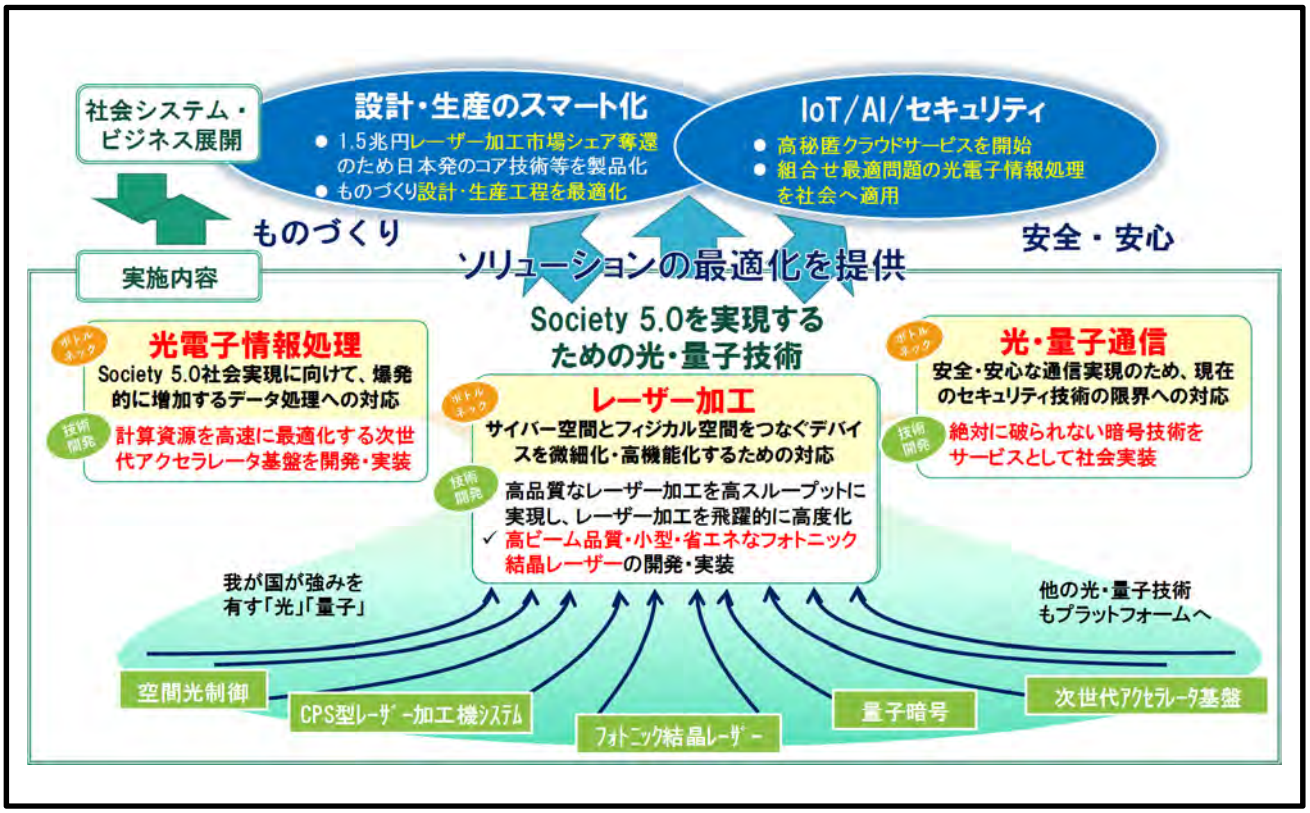
前者の「要求仕様の具体的な把握」のためには、業界にもっとも大きなインパクトを与える技術成果の提示により集まる、もっとも社会実装効果の大きな要求ニーズ、具体的には、その技術成果をベースに、総合的に、もっとも大きな産業規模が創出できる要求ニーズについて、優先的に、適切な社会実装先の組み合わせにより対応する。このために、コンソーシアムやweb、書籍による情報展開も進め、技術成果を企業、大学、研究機関などに周知するための活動にも注力する。

後者の「実装スキームの整備」については、まずは、実装される側の要求仕様を満たす技術ソリューションの開発を成功させることはもちろんとして、その実用性の評価に協力いただける具体的な社会実装先で POC (Proof of Concept)活動を進める。さらに、その技術ソリューションの事業としての成立性を確認するために、小規模の擬似的な事業を行うパイロットプログラムの一部試行も進める。

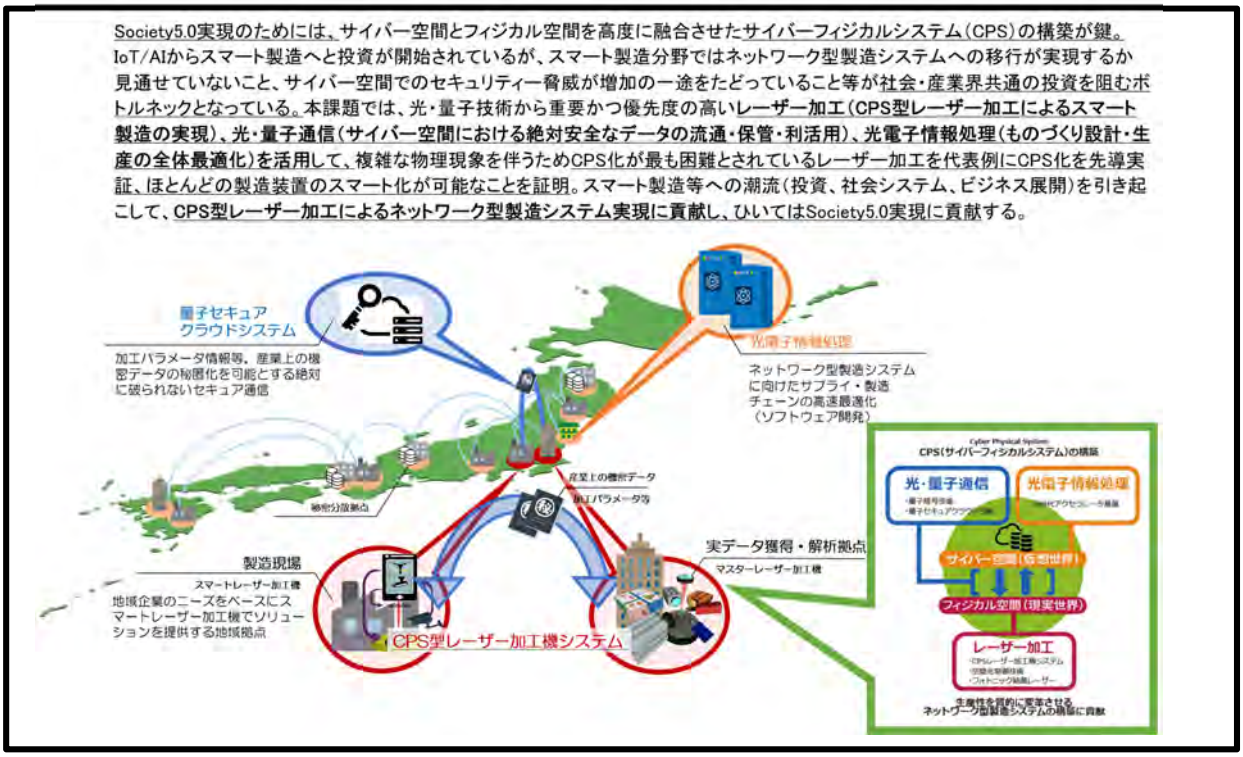
そして、具体的な社会実装先に対して整備すべき「実装スキーム」を抽出し、これを進める。例えば、大手企業が社会実装先であり、かつ企業の R&D 部門への技術橋渡しが可能な場合は、企業内の R&D 部門への技術の橋渡しが用意すべきスキームとなる。しかし、同じ、大手企業相手としても、企業内の R&D 部門が当該技術を受け取れない、もしくは、事業部門が直接受け取り、顧客への展開を希望する場合は、企業外部の研究請負型の研究機関を活用可能なスキームとして準備する必要がある。

さらに、もともと社内の R&D リソースが潤沢でない中小・中堅企業などが社会実装を希望した場合には、開発した技術ソリューションの橋渡しのために、研究請負型の研究機関に加え、直接、最終製品の形態で提供できるベンチャーやスタートアップの整備が必要となることも想定される。

加えて、社会実装先は、企業のみではなく、上記の研究請負型の研究機関・会社、大学なども想定されるため、社会へのインパクトの大きさでの優先度を考慮しつつ、最大の社会実装効果が得られるための必要な「実装スキームの整備」を進める。今後はこうした方針を軸に、SIP 終了時の姿からバックキャストして社会実装を確実に進める。



図表２－１．光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術の研究開発の概要



図表２－２．研究開発項目とその関係性

(1) レーザー加工

担当サブ PD：安井　公治（三菱電機株式会社 FA システム事業本部産業メカトロニクス事業部　主席技監）

参 画 機 関：東京大学、パナソニック株式会社、浜松ホトニクス株式会社、宇都宮大学、京都大学、三菱電機株式会社、ローム株式会社

Society 5.0 実現のためスマート製造において実現要求が高いが、複雑な物理現象を伴うため物理モデルの構築が最も困難な工程の代表例であるレーザー加工の CPS 化の実現により、ほとんどの製造装置のスマート化が可能であることを先導実証することを目指す。これにより、スマート製造への投資を加速させることが期待され、生産現場における生産性の飛躍的な向上が達成されることになる。

実施にあたっては、以下の研究各項目で詳細説明する、「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」のシステムインテグレーションを中核として、CPS を搭載するレーザー加工機のシステム化を促進する拠点を整備することを狙いとする。

拠点の社会実証に必要な要素技術やデータ通信技術、データ保護技術、データ解析技術などについては、プログラム内の他の研究開発項目（光・量子通信、光電子情報処理）の成果や市場で入手して整備する。

また、要素技術として早期の切り出しが可能なテーマ、例えばフォトニック結晶における LiDAR 光源などについては、早期の社会実装を目指す。

①CPS 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）

参 画 機 関 : 東京大学、パナソニック株式会社

研究開発の全体像:

最先端の電子機器に搭載される電子デバイスの製造分野では、半導体の露光、半導体素子の基板加工のほか、レーザーを代表とするビーム加工が多用されてきている。また、最先端製造ラインではレーザー加工なくしては成立しない状況も生まれつつあり、さらに広範囲な用途へのレーザー加工適用の要望が高い。一方で、これらの加工において、所望の加工を実現するための加工パラメータの抽出は、人間の経験と勘に頼る部分が依然として大きく、要望されている速度で新たなプロセスが開発されているとはいえない。本研究課題では、このパラメータ抽出に要する時間を大幅に短縮することを目的とした CPS 型レーザー加工機システムの実証を行う。具体的には、最新の光源技術、光学素子技術、光操作技術、加工システム技術、計測・評価技術、演算技術などを組み込んだ自動的にパラメータを変更可能なレーザー加工システム（自動パラメータ可変レーザー加工システム）、実績収集・学習用レーザー加工・計測システム、パラメータ抽出システムをそれぞれ構築する。初期の加工対象としては、Society 5.0 推進におけるキーデバイスである電子デバイス部品の高度化・低製造コスト化におけるボトルネックの解消に資する材料を対象に選定して実証を行う（電子部品製造分野における難加工材料など）。その後、さらに他の材料・加工へと対象を拡大するために必要な基盤を整備する。また、レーザー加工の CPS 化の実現と進展を支える、加工の物理モデルの構築および検証の手法の深化にも取り組む。

より具体的には、実績収集・学習用レーザー加工・計測システムとして、多機能・高速・その場観察機能を備えた「マイスターデータジェネレーター」を構築する。現場での加工を行う自動パラメータ可変レーザー加工システムとしては、「スマートレーザー加工機」を構築する。パラメータ抽出システムは上記 2 者を連携させてレーザー加工に必要なパラメータを抽出するシステムであり、本研究課題では「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」の両者のシステムインテグレーションとして実現し、これを中核として、CPS を搭載するレーザー加工機のシステム化を促進する拠点を形成する。

また、上記過程で開発集積する、CPS 化を推進するための拠点形成のノウハウを、産業的に CPS 化のニーズを持つ他のレーザー加工プロセスの基盤要素技術を持つ機関へ展開（POC）することで、そのレーザー加工による CPS 化拠点の形成（社会実装）を効率化し、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す。

具体的な実施内容:

CPS 型レーザー加工機システムの基盤として、物理モデルや AI 技術などに基づく、パラメータ探索プログラムを導入する。このために、パラメータ変更、加工、観察、記録を自動で行うベースマシンを構築する。当装置は、パラメータ可変の光源、パラメータ可変域が大きな加工操作ユニット、各種の詳細観察・評価ユニット、リアルタイム観察ユニットおよび全体を一元的にコンピューター制御するシステムによって構成される。

光源としては、経済産業省・NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」事業（NEDOレーザー事業）等関連するプロジェクトによって実用化された最新技術の動向も考慮の元、非線形光学素子などを用いた波長変換方式も含め、レーザー加工において今後需要が高まることが想定されていて、日本が強みを持つ、短波長領域の光源を重要なターゲットに見据えつつ、赤外から紫外までの範囲で、実用稼動可能な範囲で広く動的にパラメータ変更できるシステムを評価・導入する。光源パラメータとしては、波長、輝度※、パルス幅、繰り返し周波数、などを基本とし、パルス内波形、パルスバーストパターンなど、評価の進展に応じて、検討の幅を広げる。加工操作ユニットとしては、光操作系として高輝度・短パルス化・短波長化する光源に対応する最新の技術を導入するとともに、スキャン速度、スキャンパターンなどについて制御範囲を広く取り、機械学習などに適した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。上記について、基盤部分をモジュラーな設計とし、運用・評価に基づき、複数の有望な光源、詳細観察・評価ユニットおよびリアルタイム観察ユニットの組み合わせについて順次評価実証機を構築し、その全体によって「実績収集・学習用レーザー加工システム・パラメータ抽出システム」として「マイスターデータジェネレーター」を構成する。本システムの運用成果を後述の、可用性を重視する実証機に展開するためには、リアルタイム観察ユニットから得られる簡便な情報を詳細観察・評価ユニットから得られる詳細な情報と結びつけることが重要となる。これは、相互の相関情報のみでは必ずしも十分ではないことが予想されるが、文部科学省「Q-LEAP」等のプロジェクトによって得られる、基盤的物性研究に基づく光と物質の相互作用の学理と情報を活用して解決できるよう、連携体制を整備して進める。

上記システムを運用し、ターゲット材料・ターゲット加工（電子部品製造分野における難加工材料など、市場インパクトの大きいものを選定）について、広範なパラメータ領域における、加工データ取得を行い、機械学習などの手法により、加工パラメータと結果の相関が取れるデータベースの構築を行う。市場需要の高い特定のアプリケーションについては、CPS 化のために必要な物理モデルの構築を目的とした、光-材料相互作用の定量化に必要な研究開発にも取り組む。

さらに、取得した知見を元に、学習ではなく、想定される実際の加工にチューンした実証用のサブセット構成のユニット設計を行い、「自動パラメータ可変レーザー加工システム」として「スマートレーザー加工機」を実装する。本システムは、光源や加工操作ユニットのパラメータ可変範囲について必要十分な範囲に限定し、一方で可用性、安定性などを重視した構成とする。また、必要なリアルタイム観察システムのデータに基づいて、学習用システムにて加工対象に応じて学習・構築されたデータベースとアルゴリズムを用いて、自動で最適化されたパラメータによる加工ができる構成となることを目指す。

より具体的なターゲット材料・ターゲット加工の選定としては、まずは IoT 時代の超高速・高密度電子回路基板として有望視されているガラスに着目する。基板用ガラスのスルーホール（TGV）は加工によるクラックが適用のボトルネックとなっている。また、同じく電子回路に用いられるセラミックや、EV 用電池の電極材料、CFRP、複合材への展開も評価・検討を行う。その他、需要が見込まれるアルミニウム、ステンレススチール、銅、チタン等から早期に対象材料を選定することを目指す。

また、更なる適用範囲の拡大として、脱炭素/カーボンニュートラルに向けた EV 用二次電池等に用いられるレーザー溶接加工にも着目する。EV 用二次電池の製造においては、電極と集電板の接合工程やモジュール化工程にレーザー溶接が用いられているが、安全性を確保するために、高速・高品質な溶接が求められており、材料や形状に応じた加工条件の最適化が必要である。そこで、溶接加工で用いられるパラメー

タ領域における加工データを取得できるシステムを構築し、機械学習などの手法により加工パラメータと結果の相関が取れるデータベースの構築を行い適切な CPS 化手法の開拓につなげる。

また、本研究課題ではまずは穴あけ CPS を搭載するシステムを研究開発し、その後の展開として溶接 CPS、さらには切断 CPS を搭載するシステムを目指す。

以上を実施する上でのより具体的な体制として、本研究課題の成果の社会実装と、将来のネットワーク型製造システムの構築検討への基盤としての活用を想定し、マイスターデータジェネレーターを東京大学の柏キャンパスに、スマートレーザー加工機を本郷キャンパスに導入し、両者をネットワーク回線にて接続することとする。(**図2－(1)－①**)この中で、拠点のフィジカルシステムには「空間光制御」、「フォトニック結晶レーザー」で開発する技術を糾合していくこととし、拠点の全体システムには「光・量子通信」、「光電子情報処理」で開発する技術と接続するよう取り組んでいくこととする。同時に、耐量子－公開鍵暗号技術を用いた通信の可用性評価についても検討を進める。

※ 輝度 ： 単位面積、単位立体角あたりの光出力

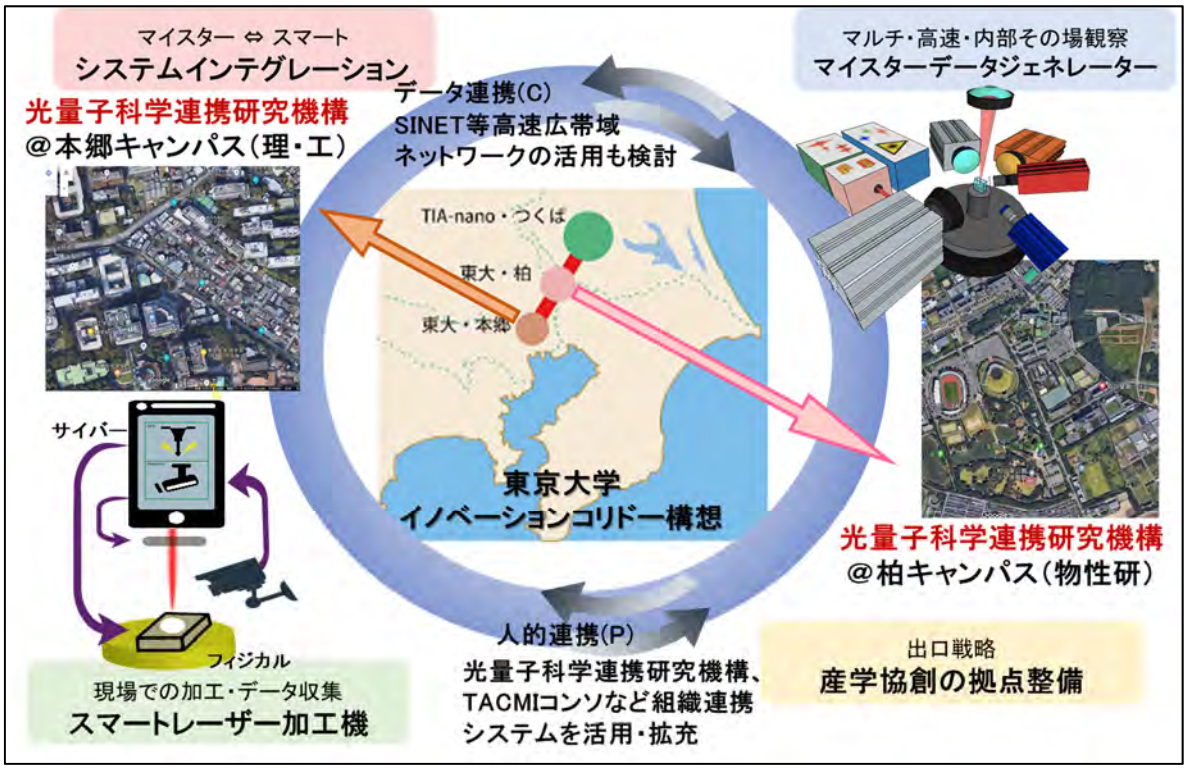


図2－(1)－①: スマート製造推進拠点全体構成

社会実装:

社会実装にあたっては、NEDO レーザー事業等とも連携する。具体的には、同事業参画法人が中心となって設立した TACMI コンソーシアム等、広くユーザー企業との連携を図るために構築されたコミュニティー等との連携を推進する。そこに本研究課題で開発したシステムを提供し、ユーザー企業等に試用してもらい、加工パラメータ抽出等の評価を開発にフィードバックする。この過程でこれにかかわる人・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て、いち早く成果を提示しつつマーケティング活動を加速する。

一方、「Q-LEAP」等とも連携し、加工実績データを提供することにより、産業ニーズの高い加工に対する最適パラメータ推定のアルゴリズムの開発の推進に寄与する。「Q-LEAP」等の成果に基づき、本システムのソフトウェアも更新できる体制を構築することで、ニーズに対応しつづける体制を整備する。

このほか、文部科学省・科学技術振興機構「COI-STREAM」事業等の先行して実施されている産学連携事業における関連するテーマを実施している拠点との連携についても検討し、重要課題の抽出、社会実装や出口戦略の立案などの共有と、成果のシナジー効果が得られるよう留意する。

モノづくり工程全体の CPS 化のボトルネックであるレーザー加工において CPS 型システムを実証することで、スマート製造全体への投資を喚起するかたちで本成果の社会での認知を図る。具体的には、CPS 化の要望が強く今後の成長分野とみなせる分野において、従来のレーザー加工では最も実現が困難でありながら、レーザー加工の高速性、フレキシブル性からレーザー適用の要望が強く、従って産業界へのインパクトが大きな、例えば電子部品製造分野での難加工材料の加工を台湾ITRIとの協働により実証する。また、市場として大幅な成長が見込まれる EV 用二次電池のレーザー溶接に対する導入に向けた検証及び課題整理を通じて、溶接分野への社会実装を目指す。ターゲットプロセスを除去加工以外へと広げることで、CPS 化技術の展開活動を加速し、CPS 化拠点の波及展開能力の拡充を図る。併せて持続的運営を可能とするために、拠点活用を拡大する事業開発を IT ベースで強化する人的体制や営業的な窓口機能を拡充する。さらに、従来の産業分野で応用されている切断などの分野や、今後市場の立ち上がりが期待される 3D プリンタや表面改質などの新用途についても関連プロジェクトと連携して本プログラムの成果を適宜提供することにより、レーザー加工を要求する産業全体の底上げに貢献するよう展開に取り組む。

公的機関が開発する技術のスムーズな産業界への受け渡しを実現するための方策として、より具体的には、既存の民間企業やベンチャー企業（大学や研究機関から生まれるスタートアップ企業）等をパートナー企業としてビジネスベースで活用する。本研究課題において設計・実証する主要なモジュールをあらかじめパートナー企業に業務委託して実装しておくことにより、成果のユーザーとなる企業がコンソーシアムなどの場で本研究課題の成果技術の評価を実施した後に、そのまま同じ技術を商品として受け取ることができる体制の構築を推進し、中小企業も含め研究成果の普及を展開していく。

本研究課題で蓄積した“CPS 化拠点構築のノウハウ”は社会実装を見据え、九州大学が持つ半導体材料のレーザー改質プロセスへ展開し、CPS 化されたシステムへと発展させることで CPS 化ノウハウの効果を検証する。ユーザーニーズに対応するレーザー改質プロセスの拠点化を推進することで、CPS 化における課題の抽出と解消に向けた活動を拡充するとともに、東京大学の拠点と連携することで、Society 5.0 におけるモノづくりのあるべき姿としての、モノづくり全体がスマート化されたネットワーク型製造システムの構築の加速に貢献する。これにより、レーザーを用いるモノづくり技術の CPS 化を複数のプロセスに対して実証し、スマート製造への民間の投資誘起を加速することで、本研究開発成果の社会実装を加速する。

研究目標:

2022 年度までの最終目標

- スマートレーザー加工機の実証として TRL7 を目指すとともに、マイスターデータジェネレーターの実証

として TRL5 を目指し、当システムで収集したデータを基に、さらに加工性能を向上させるシステムの検証を実施。これらの成果により、パラメータ抽出に要する時間を大幅に短縮し、加工方式の初期選定時におけるリードタイムを 9 割削減することを目指す。溶接工程対応拡張の開発においては、リードタイムの 9 割削減に目途を付けることを目指す。

項目ごとの担当機関・担当研究者とその実施内容:

(A)項目名:マイスターデータジェネレーターの開発(実施代表者:東京大学　小林　洋平・田丸　博晴)

システム、装置開発等で教職員18名、大学院生5名、追加採用者若干名により従事。

実施内容A1:試作機の開発

実施内容A2:実証機の開発

実施内容A3:溶接工程対応拡張の開発

(B)項目名:スマートレーザー加工機の開発(実施代表者:東京大学　小林　洋平・田丸　博晴)

システム、装置開発等で教職員18名、大学院生5名、追加採用者若干名により従事。

実施内容B1:試作機の開発

実施内容B2:実証機の開発

(C)項目名:CPS 化拠点の構築(実施代表者:東京大学　田丸　博晴・小林　洋平)

連携体制整備、システム開発で教職員18名、大学院生5名、追加採用者若干名により従事。

実施内容 C1:拠点整備

実施内容 C2:拠点運営

実施内容 C3:システム開発

②空間光制御技術に係る研究開発

研究責任者: 豊田　晴義(浜松ホトニクス株式会社　中央研究所　所長)

参 画 機 関 : 浜松ホトニクス株式会社、宇都宮大学

研究開発の全体像:

我が国の産業を支えてきた「ものづくり」技術において、レーザー加工技術は科学技術立国である日本の蓄積してきた「材料」「レーザー」「光制御」「光計測」「システムインテグレーション」によって構築される融合技術である。このレーザー加工技術は、サイバー空間とフィジカル空間をつなぐデバイスの高機能化や加工が難しいが高機能である材料の高精度な加工等を実現する技術であり、スマート製造やスマートモビリティ等への寄与を通じて、Society 5.0 を実現する技術となりうる。そのため、レーザー加工におけるボトルネックを克服する技術の実現が望まれている。

具体的には、軽さと剛性を兼備する新規材料の加工、曲面を多用した複雑なデザインの導入や新製品の投入時期の短縮化などに対応するための、高精度かつ高スループットな加工技術の実現があげられる。

特に、輸送機械などで注目される軽量・高剛性な材料である CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、その素材の持つ非常に硬い特性から、現技術では、きれいに切断するための十分な加工精度が得られない、加工形状に制限がある等の課題があり、高精度かつ高スループットなレーザー加工への期待が大きい。また、5G/6G に代表される高速通信機器や AI/IoT 応用機器、さらには、電動化の進む車などにおいても、高集積・高機能半導体デバイスの需要は大幅に増加しており、その構造の微細化・複雑化・多層化とともに材料の多様化などに伴って、加工技術への要求精度とスループット向上への要求が顕在化している。

本研究開発は、光の２次元位相分布を高精度に制御可能な空間光制御デバイス（Spatial light modulator：SLM）とその応用技術を発展させ、高精度かつ高スループットな加工を実現する空間光制御技術の実用化（10～100 倍の高速化）等を行い、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ことを目標とする。具体的には、従来のレーザー加工の概念を凌駕する多点同時加工や型抜き加工を高精度かつ高速に実現するためのキーデバイスとなる次世代 SLM の高精度化（大面積化、紫外光対応、高速化、高集積化）、および、それを用いた加工と計測を一体化した高精度レーザー加工モジュールを産学官の力を結集して実用化し社会実装することを目標としている。

具体的な実施内容:

以下に、2つの主要な開発項目を記す。これらの実現により、高精度かつ高スループットな次世代レーザー加工技術の実用化を目指す。

A） 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

液晶型 SLM において高い平均出力をもつ加工用レーザーの利用に十分耐えることができる耐光強度を持たせるために、SLM を構成する主な要素について、反射ミラーの最適設計、透明導電膜の最適な成膜技術、液晶材料の最適化を行い、十分な耐光性デバイスを実現する。また、光変調材料・構成要素（ミラー、透明導電膜、無反射ミラー）の最適化により、レーザー加工に用いられる近赤外光から紫外光までの波長帯に、それぞれ対応するための SLM の開発を行い、多点同時加工を実証する。加えて、耐光性向上を目指した大面積化、平面度向上による高精度化、半導体微細加工技術を用いた高速・高集積化などにより、さらに高精度な位相変調機能を有する空間光制御デバイスを開発し、高スループットの高出力レーザー加工を目指す。例として、難加工物のレーザー加工で注目される非熱加工を実現するための超短パルスレーザーや、微細加工に特長を持つ紫外光レーザーに対応する SLM の開発を行う。

B） 産業応用を加速する光・量子制御モジュール（高精度レーザー加工モジュール）の構築

平均出力 100W 級の CW レーザー光源や平均出力 10W 級の短パルスレーザー光源と SLM を用いてレーザー光のビームパターン制御時の集光特性および材料加工性能を評価する。次のステップとして、一般的な産業用途に必要な出力レベルに増強したレーザー光源を用いて、同種のデータを取得する。このレーザー光源と SLM により、レーザー加工機を構築し、ホログラフィック光学エンジンを活用したリアルタイムモニタリングによるフィードバック制御と自動でレーザー光のビームパターンを生成し、加工形状や加工対象に応じて制御し、パラメータを最適化することにより、スループットが従来手法に比べて 1～2 桁向上できることを確認する。さらに、最終段階においては実用化に向けて加工機メーカー等への技術移転を視野に「実

用化試験用プラットフォーム」等を構築し、東大や海外研究開発機関との連携をスムースに進めるために浜松・宇都宮の拠点組織も強化し、国内外のユーザー等と連携した加工試験を実施し実用化を目指す。

社会実装:

光ビームの空間制御による高機能加工技術を確立し、熱／非熱加工の自在な切り替え、同時3次元多点加工を実現させ、一例として、製造工程における高精度加工処理の高速化（現在の 10～100 倍程度）を目指す。本研究開発が最終目標をクリアすると、自動車産業・半導体産業からのニーズに応えるレベルの加工が実現できる。ユーザー連携の拠点として宇都宮大学オプティクス教育研究センター(CORE)および浜松ホトニクス中央研究所（HPK）に「実用化試験用プラットフォーム」(PF)を整備し、広くユーザー企業からのニーズを集約し、レーザー加工サンプル試験・評価を開始し、競争領域・協調領域ともにユーザー連携による実用化・事業化の道を開拓する。また技術の普及に向けて、CORE が主催するシンポジウム・ワークショップや Web サイトなどの媒体を通じて研究成果の発信や PF の宣伝などを行い、技術者養成や人材育成のためのセミナー・講習会を研究開発機関やユーザー企業に向けて実施する。

研究目標:

A) 産業に適用可能な光・量子制御デバイス（空間光制御デバイス）の高性能化

2022 年度までの最終目標

- 数倍大きな光制御面積かつ高耐光性の広波長領域 SLM、及び 3 桁以上の高速応答性を持つ SLM を実現（これらにより、高出力レーザー加工の高性能化に必要な SLM 製造技術を獲得し、並列同時加工機能などを用いた 100～1,000 倍程度の生産性向上を実証する）(TRL7) 。TRL7レベルの実現により、実際の使用条件に近い状態での使用のための種々のツールも用意され、ユーザーにおけるレーザー加工装置において、SLM の持つ機能を十分に活用するための光源、光制御系、計測系の一体化技術とともに供給を行う。
- 高スループットでのレーザー加工の実現。「実用化試験用プラットフォーム」における、ニーズに連動した加工試験の実施（これらにより、高出力レーザー加工の実用化推進）(TRL5)

B) 産業応用を加速する光・量子制御モジュール（高精度レーザー加工モジュール）の構築

2022 年度までの最終目標

- 東大等との外部連携を拡大し、レーザー加工実証実験とユーザビリティ向上(TRL3)。「実用化試験用プラットフォーム（浜松拠点・宇都宮拠点）」での外部ユーザとのレーザー加工試験実施により、加工ニーズの取り込みや最適な加工のためのホログラムデータベースを構築する。

項目ごとの担当機関・担当研究者とその実施内容:

具体的な研究開発の内容（概要）と実施体制を図2－（1）－②に示す。

（A）項目名：産業に適用可能な空間光制御デバイス）の高性能化（実施代表者：浜松ホトニクス　豊田晴義）

実施内容A1：耐光性デバイスの実現（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　豊田晴義）

① 反射ミラーの材料選定および最適設計

② 透明導電膜の最適条件による製膜

③ 液晶材料の最適化

実施内容A2：有効波長領域拡大（特に紫外光領域）（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　豊田晴義）

実施内容A3：大面積 SLM の開発（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　豊田晴義）

実施内容A4：高速集積化（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　豊田晴義）

実施内容A5：SLM 評価方法確立と評価（具体的な実施担当者：宇都宮大学　早崎芳夫）

（B）項目名：産業応用を加速する高精度レーザー加工モジュールの構築（実施代表者：浜松ホトニクス　加藤義則）

実施内容B1：高精度レーザー加工の計測手法の構築（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　加藤義則）

実施内容B2：高精度レーザー加工モジュールの構築（具体的な実施担当者：浜松ホトニクス　加藤義則）

実施内容B3：実用化試験用プラットフォームの構築（具体的な実施担当者：宇都宮大学　早崎芳夫）

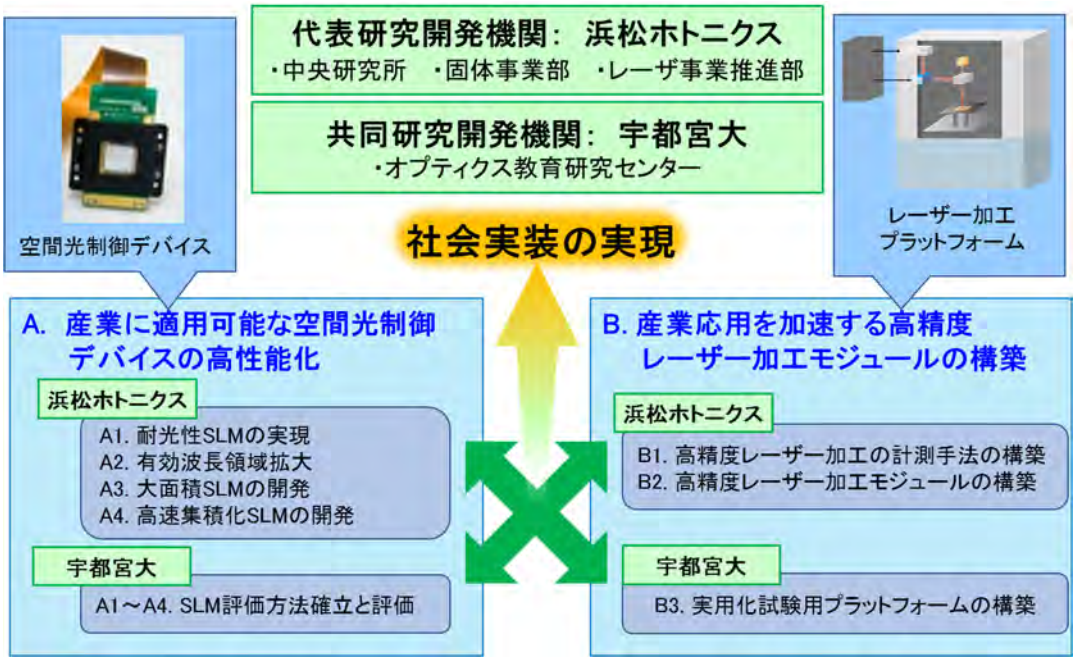


図2－（1）－②：研究開発の概要と実施体制

③フォトニック結晶レーザーに係る研究開発

研究責任者：野田　進（京都大学工学研究科　教授）

参 画 機 関：京都大学、三菱電機株式会社、ローム株式会社

協 力 機 関：北陽電機株式会社、株式会社ブルックマンテクノロジ、フラウンホーファー研究機構 IMS 研

究所等

研究開発の全体像:

半導体レーザーは、小型・安価・低消費電力・高制御性という優れた特徴を有するものの、輝度において、他の大型レーザーの 10 分の一程度以下（～100 $MWcm^{-2}sr^{-1}$）に留まっており、スマート製造を支える半導体レーザー（LD）単体での小型・高効率加工の実現や、スマートモビリティを支えるセンシング技術の発展、健康社会を支える医療、生命科学への応用を困難としてきた。この限界を打破するためには、大面積でのコヒーレント動作が不可欠であり、この実現が期待される唯一の半導体レーザーが「フォトニック結晶レーザー」である。このレーザーは、我が国発の半導体レーザーであり、2018 年 3 月に世界で初めて、上記の輝度の壁、100 $MWcm^{-2}sr^{-1}$ を 3 倍も上回る 300 $MWcm^{-2}sr^{-1}$ を達成し、直接レーザー加工やセンシングへの応用に必要な輝度である 1 $GWcm^{-2}sr^{-1}$ がターゲットに入ってきている段階にある。

本研究開発では、この進展著しいフォトニック結晶レーザー技術を発展させ、一層の高輝度化（＝高ビーム品質・高出力化）を図っていく。具体的には、将来のスマート加工への応用を見据え、輝度 1$GWcm^{-2}sr^{-1}$ をCW（＝連続）状態で実現可能なデバイス基盤技術の確立を目指していく。また、その開発過程において、得られる光源技術は、センシングを始め、医療や生命科学などの様々な分野へと応用展開可能と考えられる。直近の出口として、ここでは、輝度 1$GWcm^{-2}sr^{-1}$ 動作をナノ秒パルス状態で実現し、Society 5.0 の実現に重要なスマートモビリティを支えるセンシング光源の実現を目標とする。さらに、電子的ビーム走査機能の付加や機械学習との融合などフォトニック結晶レーザーそのもののスマート化の実現を、より将来技術の目標として推進していく。

具体的な実施内容:

フォトニック結晶レーザーの高輝度化を図り、Society 5.0 を支える将来的なスマート加工（レーザー加工）への展開を可能とする要素技術開発として、高輝度（1 $GWcm^{-2}sr^{-1}$: ビーム品質(M^2)～2、出力 10 W 超級）・CW 動作のためのデバイス基盤技術開発と、その合波技術（100 W 超級）の開発を実施する。

併せて、直近の様々な出口の1つとして、スマートモビリティへの応用が可能なセンシング光源のための高輝度（1 $GWcm^{-2}sr^{-1}$: ビーム品質(M^2)～2、出力 10 W 超級）・ナノ秒パルス光源の開発を実施する。

さらに、フォトニック結晶レーザーのスマート化（電子的ビーム走査やビームパターンの最適化）も行い、我が国の独創レーザーのさらなる高度化の基礎を築いていく。

より具体的な研究開発の内容（概要）と実施体制を図２－（１）－③に示す。研究開発においては、

（A）フォトニック結晶レーザーの高輝度化（CW およびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発）として、

A1：高輝度化に向けたデバイス基盤技術の構築

① 大面積で高出力かつ高ビーム品質動作を可能とするフォトニック結晶構造（＝2 重格子点構造）の深化・最適化

② 安定した高ビーム品質動作のための電流注入分布制御

③ 高効率動作のための上方への光取り出し効率の向上および不要な吸収損失の抑制

A2：将来的なスマート加工（レーザー加工）への展開に向けた、実装・放熱・合波技術の確立、大面積

ワンチップ高出力デバイス技術等の要素技術の構築

A3：LiDAR 等のセンシングシステム応用に向けた、ナノ秒動作技術の確立

等の要素技術の開発を行い、それによる高輝度フォトニック結晶レーザー光源の実現、さらに、（直近の出口の 1 つとして）LiDAR 等のセンシング光源の実現を目指す。また、

（B）フォトニック結晶レーザーのスマート化に関しては、

B1：2 次元全面に渡る電子的ビーム走査に向けた、望む方向へのビーム出射を可能とするフォトニック結晶デバイスの構造設計・作製法の構築、および 2 次元マトリクス駆動技術の開発

B2：機械学習（AI）によるビーム形状のオンデマンドな制御に向けた、面内電流注入分布を制御可能なデバイス技術の構築、機械学習による電流分布とビーム形状の相関などの学習の検討、および機械学習や高度な数値解析技術をもとにした、フォトニック結晶レーザーの製造の CPS 化の検討

等の技術開発を行い、フォトニック結晶レーザーのスマート化を図っていく。

研究開発の実施体制としては、京都大学（代表研究開発機関）が全体の取りまとめを行うとともに、高輝度フォトニック結晶レーザーの設計・試作・評価とそのスマート化研究を行い、三菱電機（共同研究開発機関（1））が高輝度フォトニック結晶レーザー技術開発（特に CW 動作デバイス）およびその合波技術開発を、ローム（共同研究開発機関（2））が高輝度フォトニック結晶レーザー技術開発（特にパルス動作デバイス）および短パルス駆動技術開発を、それぞれ中心となって行う。また、京都大学に、参画機関が集結した、フォトニック結晶レーザーを広く社会実装していくための拠点を形成する。

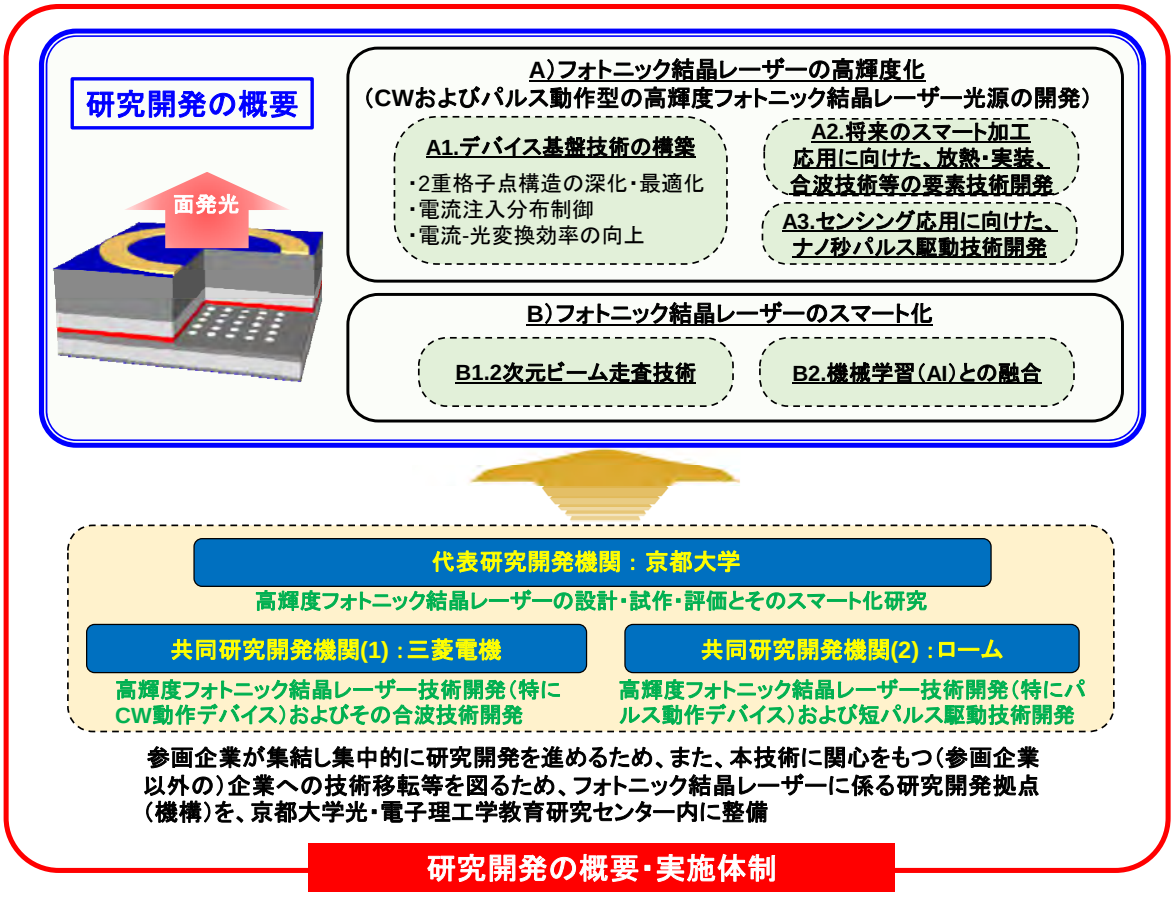


図2－（1）－③：研究開発の概要と実施体制

社会実装：

本研究開発により、研究開発の直近の出口の 1 つとして、高輝度ナノ秒パルス光源（フォトニック結晶レーザー）が実現されるために、高指向性かつ高い安定性をもつセンシングシステムに向けた社会実装が期待される。これにより、先行品が抱える課題（サイズ、コスト、信頼性）を根本的に克服されるものと期待される。また、フォトニック結晶レーザーの高輝度 CW 動作のためのデバイス基盤技術が確立されるため、終了後数年以内に、高効率・高スループット対応が可能な、コンパクトで安価な加工システムとしての社会実装、さらには将来のオンデマンドなスマート加工への展開が期待される。さらに、フォトニック結晶レーザーのスマート化により電子的走査技術の付加や、機械学習との融合、フォトニック結晶レーザー製造の CPS 化を推進することで、将来にわたって持続可能な市場優位性を確保することが可能になる。

以上述べたフォトニック結晶レーザーその「モノ」に関する社会実装においては、SIP 推進中に、拠点から各種のユーザー企業・機関へと MTA に基づくデバイスの提供を行い、様々なフィードバックを得ていく。SIP 終了後には、参画企業であるローム、三菱電機、さらには他の技術移転先企業から、フォトニック結晶レーザーを社会実装していくことを目指す。

上記に加え、研究開発を通じて生み出されるデータ・ノウハウ・インテリジェンス、所謂、「コト」をも社会実装のターゲットとする。「コト」の社会実装に関しては、SIP 推進中に、フォトニック結晶レーザー製造の CPS

化（ディジタルツインの形成）を通じて製造に不可欠なデータ・ノウハウ・インテリジェンスを蓄積する。SIP 終了後には、蓄積した高付加価値の「コト」を製造企業へと提供し、大規模な共同研究へと展開していくことを目指す。

以上のような社会実装活動のために、京都大学に拠点、すなわち、多くのユーザー企業・製造企業との連携を推進する核を形成する。そのための窓口体制や、試作・評価デバイス提供体制の強化を図っていくほか、拠点から社会実装を戦略的に拡大していくための議論も並行して進める。

さらに、社会実装の加速度的波及の先行検証のために、フォトニック結晶レーザーを活用することを希望するユーザー企業（LiDAR システムやビーム走査システム等の開発企業・機関）をパートナーとして、開発の成果をその先のユーザーへと展開していく活動をも推進し、PCSEL の有用性をより広め、その優位性を明快にしていく取り組みを行う。また、このような拠点を通じて広く事業化していく時に障害とならないように、知財権のオープン化等の戦略をも検討する。

開発目標:

（A）フォトニック結晶レーザーの高輝度化（CW およびパルス動作型の高輝度フォトニック結晶レーザー光源の開発）

2022 年度までの最終目標

以上の研究開発成果を総合して、以下の目標の達成を目指す。

- フォトニック結晶レーザーの高輝度（1 $GWcm^{-2}$ sr^{-1}：ビーム品質(M^2)～2、出力 10 W 超級)CW 動作のための基盤技術およびその合波技術に目途をつける（TRL5）。また、大面積ワンチップ高出力デバイスの有効性を明らかにする。
- フォトニック結晶レーザーの高輝度（1 $GWcm^{-2}sr^{-1}$)ナノ秒パルス動作を達成し、ビーム整形光学系不要、かつ高い SN 比、高い環境変化耐性を有するフォトニック結晶レーザーを実現（TRL7）。

（B）フォトニック結晶レーザーのスマート化

2022 年度までの最終目標

以上の研究開発成果を総合して、以下の目標の達成を目指す。

- フォトニック結晶レーザーのスマート化（電子的ビーム走査や機械学習との融合）により、電子的制御による狙った方向へのビーム出射、及び機械学習によるビーム形状制御の開発完了（TRL4）。

項目ごとの担当機関・担当研究者とその実施内容:

（A）フォトニック結晶レーザーの高輝度化

（実施代表者：京都大学　野田　進　　共同研究者：三菱電機　柳生栄治、ローム　中原　健）

実施内容A1：高輝度化のためのデバイス基盤技術の確立

（実施機関：京都大学、三菱電機、ローム　　具体的な実施担当者：京都大学　石崎賢司・吉田昌宏・井上卓也、三菱電機　山向幹雄・秋山浩一、ローム　國師渡・宮井英次他 8 名）

実施内容A2：将来的なスマート加工（レーザー加工）への展開に向けた放熱・実装、合波技術等の要

素技術の開発

（実施機関：三菱電機、京都大学　　具体的な実施担当者：三菱電機　久場一樹・出尾晋一、京都大学　メーナカ デ ゾイサ・吉田昌宏　他 11 名）

実施内容A3：LiDAR 等センシング応用に向けたナノ秒パルス動作技術の開発

（実施機関：ローム、京都大学　　具体的な実施担当者：ローム　國師渡・宮井英次、京都大学　メーナカ デ ゾイサ・石崎賢司　他 5 名）

（B）フォトニック結晶レーザーのスマート化

（実施代表者：京都大学　野田　進　　共同研究者：三菱電機　柳生栄治、ローム　中原　健）

実施内容B1：電子的ビーム走査技術

（実施機関：京都大学、ローム　　具体的な実施担当者：京都大学　石崎賢司・坂田諒一・メーナカ デ ゾイサ、ローム　國師渡・宮井英次　他 5 名）

実施内容B2：AI（機械学習法）との融合

（実施機関：京都大学　　具体的な実施担当者：京都大学　メーナカ デ ゾイサ、吉田昌宏、三菱電機　久場一樹・新倉栄二　他 5 名）

(2) 光・量子通信

担当サブ PD： 佐々木　雅英

（国立研究開発法人情報通信研究機構　量子 ICT 協創センター　研究センター長）

現代社会では、計算技術や AI、監視カメラやセンシング技術、医療技術の進展などにより、今後、ビジネス価値が高く、機密性確保が必要となる重要デジタル情報（ゲノム・医療情報等）が次々と生み出されている。それらの二次利用で生み出される情報は、一度漏洩すれば複数の家系・世代にわたり永続的に生命や社会生活を脅かすリスクが高く、実際に被害が出た際、訴訟リスク・被害補償額が莫大になる恐れがあるため、世紀単位の超長期間にわたって機密性と改竄耐性（完全性）を確保する必要がある。

そのような中、現在のインターネットセキュリティを支える公開鍵暗号技術（RSA 暗号や楕円曲線暗号）を解読可能な量子コンピューターが 2030 年頃に登場する可能性があると言われている。そこで、世界各国で量子コンピュータでも解読が困難と期待される新しい公開鍵暗号（耐量子−公開鍵暗号）への移行準備が進められている。ただ、耐量子−公開鍵暗号でも対処できない脅威が存在する。すなわち、今はまだ解読できなくても、一旦暗号化されたデータを傍受し保存しておき、将来高度な計算機が登場したときに過去に遡って全データを解読する『“Store now, decrypt later”−攻撃』であり、主要国の諜報機関はすでに行っているとされる。この脅威に対抗するためには、『どんな計算機でも解読できないこと』（情報理論的安全性）を証明できる方式が必要である。

本研究開発では、Society 5.0 を支えるサイバー空間の超長期セキュリティを確保し、将来にわたりサイバーセキュリティ脅威に晒されることのない安全なデータの流通・保管・利活用を実現するための新技術を開発し社会実装することを目標とする。社会実装は、高度な秘密情報を取り扱っていることが認識されている医療情報分野や企業・国家等の重要インフラ分野の潜在ユーザー開拓から着手し、さらにプログラム内の

レーザー加工および光電子情報処理のチームとも密接に連携しながらスマート製造分野への応用にも取り組む。

①量子暗号技術

研究責任者: 藤原　幹生（国立研究開発法人情報通信研究機構　未来ICT研究所 小金井フロンティア研究センター 量子 ICT 研究室 室長）

参 画 機 関 : 国立研究開発法人情報通信研究機構、日本電気株式会社、株式会社東芝、学習院大学、北海道大学、東京大学、株式会社 ZenmuTech

研究開発の全体像:

量子暗号は、どんな計算機でも解読できないことを証明できる現在唯一の暗号通信技術であり、重要デジタル情報の通信を保護する手段として期待される。しかし、既存の暗号技術に比べて割高であり暗号装置市場競争力が低かったり、推奨標準の整備が遅れているなどの課題がある。また、量子暗号自体は通信の安全性を保証するものでデータ保存の安全性までは保証できない。そこで、市場競争力のある装置開発や標準化の取り組みを進めるとともに、量子暗号技術と従来から利用されている重要デジタル情報を安全に保管する手段としての秘密分散手法を組み合わせることで、理論上、将来にわたり機密漏洩を完全に防ぐデータ保管を初めて実現する。

具体的な実施内容:

A）量子暗号技術

量子暗号には、使う検出器のタイプに応じて、BB84 方式※1 と CV-QKD 方式※2 という2つの方式があり、本研究開発では、両方式を使用して研究開発を行う。

BB84 方式は、現在、一部の部品を海外から調達して製造しているため、部品から装置製造までの国産化を目的として、高い鍵配送性能を維持した上で、部品の集約、モジュール化、ソフト化及び市販品の活用等により、市場競争力のある量子暗号装置を開発する。 BB84 方式については令和 2 年度までに事業化の目途を得たことで、GB より SIP の最終年度を待たずに目標を達成したと判断されたため、小型化・低コスト化に関する項目については本プロジェクトの所掌範囲外とする。

CV-QKD 方式を使用しての研究開発では、大学－企業間連携により、企業へ CV-QKD 技術の移転を図るとともに、雑音耐性と光多重度を向上させ、さらにユーザー環境で安定かつ高信頼動作させるための技術開発を行い、研究試作品を完成させる。

また、両方式に共通の課題となっている下記の事項についても、研究開発を進める。

i） 安全性保証技術の標準化

量子暗号の情報理論的安全性を実環境で保証するために、基礎理論、実験、対策実装、検証のサイクルを継続的に実施し、耐タンパー対策やサイドチャネル攻撃対策を実装する。これらの取組みを着実に実施し、安全性保証技術の継続的な高度化を行い、順次標準化する。

ii） 物理乱数源の小型化

量子暗号の鍵生成の根幹となる物理乱数源について、高速化するとともに、量子暗号装置内での占有

体積を従来比 2 分の 1 まで小型化する。

iii） 検定基準・推奨方式リストの整備

メーカーが適正な物理乱数源、量子暗号装置を製造・販売し、ユーザーがそれらを安心して利用するためには、検定基準や推奨方式リストの整備が必要となる。我が国には、まだその体制が無いため、将来の運用に向けた予備調査と運用に必要な基礎データの蓄積、エコシステムとして機能する制度設計提案を取りまとめる。

※1 BB84 方式

光の粒である光子を検出するための単一光子検出器を用いる量子暗号の代表的なプロトコル。物理法則が許すあらゆる盗聴攻撃、あらゆる計算能力を持つ計算機でも解読不可能なことが証明されている。以前より最も研究開発されてきており、現在、企業が試験稼動させている方式である。あらゆる盗聴の可能性を完全に排除する必要がある安全保障分野等のハイエンド用途が想定される。

※2 CV-QKD 方式

光の位相・振幅を検出するホモダイン検出器を用いる量子暗号のプロトコル。通信路への攻撃手法があるクラスの物理操作に限定されるが、その攻撃も当面の技術では実装が極めて困難であり、かつあらゆる計算能力を持つ計算機でも解読できないことが証明されている。光通信用の光ファイバ内でも、共存して動作可能であるため、既存光通信インフラへの適用が期待できるというメリットがある。BB84 方式よりも低コストでの開発が可能であるため、主に民生のハイエンド用途が想定される。

B）量子セキュアクラウド技術

量子セキュアクラウド機能を実現するため、秘密分散技術、物理乱数源・量子暗号技術、電子署名・認証技術、秘匿計算技術を統合する。その際、量子セキュアクラウド機能を実現するためには、処理量の爆発的増加への対処と暗号鍵の非可逆性の担保が不可欠である。これらの解決に向けて、高速かつ軽量の秘密分散・秘匿計算技術と暗号鍵管理を統合運用するための最適なミドルウェアアプリケーションインターフェースを開発する。

C）社会実装

代表的なアプリケーションとして、医療情報ストレージネットワークや企業・国家等重要インフラ網などを想定し、これらの分野の潜在ユーザーと連携しながら、社会実装を進める。

特に、それぞれの用途で扱うべき情報資産を、機密性の度合い、データサイズ、利活用の頻度等の観点から分類・優先付けし、ユーザーが必要とするデータに適時にアクセスし必要な処理やデータ復元が可能なアプリケーションを開発する。また、データ保管の際には、異なる組織間でもデータを相互参照できるよう、共通のデータフォーマットに変換するゲートウェイ機能も開発する。

国家等重要インフラ網を扱う潜在ユーザーとの連携を強化し、量子暗号装置の安全性・信頼性を向上させて国際市場競争力・ブランド力を高める。

民生分野でのビジネス拡大に向け、国民一人一人に係る医療情報分野や生体認証分野において、潜在ユーザーとの連携による量子セキュアクラウド技術の実証試験を加速する。特に、医療情報分野での POC

では、量子暗号の要素技術と組み合わせた共通鍵暗号と、量子暗号をニーズ/導入コスト要件に応じて選択できるシステム設計や医療従事者のアクセス制御・管理機能の実装などを進め、現場ニーズへの適応性を高めつつ高秘匿通信サービスの導入モデルを確立する。「国家レジリエンスの強化」など SIP の他課題とも連携し、社会実装の多様化を図る。

これらの成果をもとに、プログラム内のレーザー加工および光電子情報処理のチームと連携しながらスマート製造分野への適用試験を進めビジネスモデルを構築する。特に、既存のアクセス系の光ファイバを利用した実装が可能で、光ファイバ利用料や装置コストの低減を可能とする CV-QKD 装置を用いて POC に取り組む。

さらに、金融分野の潜在ユーザーと共同で調査研究を進めユースケースを設定し、ユーザーと共同で実証環境を構築して金融アプリケーションによる POC を実施し、量子暗号の導入による金融セキュリティの強化モデルの導出と有効性確認を実施する。

上記の社会実装の取り組みをさらに広範な用途へ普及させてゆくために、本格的なインフラ化に向けて通信事業者とも連携を強化し、コンソーシアム活動なども活用しながらビジネスエコシステムのモデルを提案する。

研究目標:

より具体的な研究開発の目標と実施体制を図2－(2)に示す。

A)量子暗号技術

2022 年度までの最終目標 (TRL6)

- CV-QKD 方式装置に関して、企業による準製品化(ユーザー環境で稼動可能な研究試作品)を完了し、100 波の古典光が多重化された同一ファイバ内での鍵生成を実証する。
- 安全性保証技術に関し、実装安全性評価や鍵管理など主要な作業項目について、量子 ICT フォーラム/量子鍵配送技術推進委員会や ITU-T、ISO/IEC や ETSI 等の国際標準化組織から勧告を発行する。
- 物理乱数源に関して、現状比 10 倍の高速化(生成速度～数 Gbps)かつ従来比の 2 分の1の小型化(量子暗号装置内での占有体積を半減化)を実現し、企業へ技術移転を達成する。
- 量子暗号の運用ガイドライン及びセキュリティ設計仕様案を完成する。
- 物理乱数源、量子暗号技術の安全性保証、検定基準、推奨方式リストの策定と更新を継続的に行うための制度設計提案書を取りまとめ、標準化関係省庁へ提案を実施する。

B)量子セキュアクラウド技術

2022 年度までの最終目標 (TRL7)

- 秘密分散・秘匿計算の軽量化技術、鍵管理・運用技術、ユーザー権限に基づくアクセス権管理技術を統合するアプリケーションをフィールドテストベッド上にプログラム実装するとともに、データの属性(種類・意味、機密性の度合い、データサイズ、利活用頻度等)に応じた安全なデータ二次利用技術を開発し、80 GB 程度のゲノムデータ解析に適用して有効性を検証する。
- 電子カルテの日々のトランザクションストレージ、長期間の標準化ストレージ、異なる病院間での安全なデータ相互参照を可能とするシステムを開発する。災害時等、ネットワーク品質の劣化を想定し、1 Mbps

程度の比較的低容量の回線が含まれるネットワーク環境でも迅速なデータ復元・相互参照機能を支障なく実行するアプリケーションを開発し、H-LINCOS 上で動作を検証。開発したアプリケーションをフィールドテストベッド上でオープンリソース化する。

C)社会実装

2022 年度までの最終目標 (TRL7)

- 医療情報ストレージネットワーク分野と企業・国家等重要インフラ分野において、都市圏スケールの分散ストレージネットワークにおいて想定ユーザーと共に実施した POC の成果を反映し、運用ユーザー拡大のためのビジネスエコシステムのモデル構築を完了する。

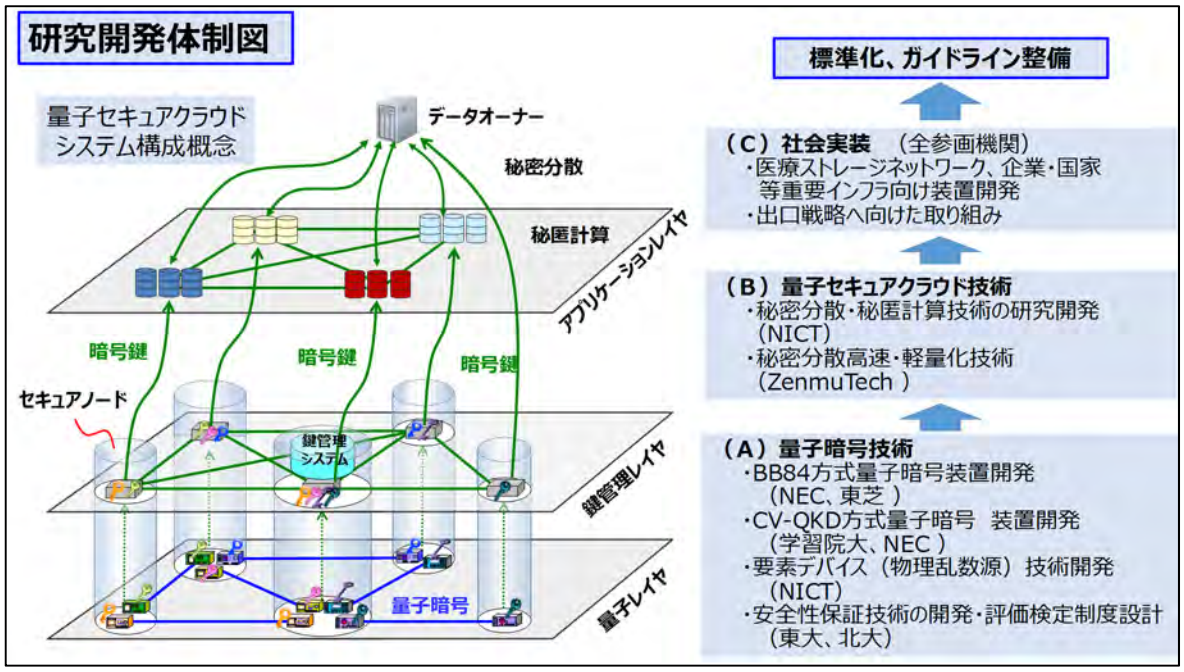


図2－(2): 研究開発の概要と実施体制

項目ごとの担当機関・担当研究者とその実施内容:

(A)項目名:量子暗号技術(情報通信研究機構(NICT)、株式会社東芝(東芝)、
日本電気株式会社(NEC)、学習院大学(学習院大)、東京大学(東大)、北海道大学(北大))

実施内容A1:BB84 方式量子暗号装置開発(NEC 飯塚浩巳、東芝 馬場伸一)

実施内容A2:CV-QKD 方式量子暗号 装置開発(学習院大 平野琢也、NEC 飯塚浩巳)

実施内容A3:要素デバイス(物理乱数源)技術開発(NICT 藤原幹生)

実施内容A4:安全性保証技術の開発・評価検定制度確立(東大 小芦雅斗、北大 富田章久)

(B)項目名:量子セキュアクラウド技術(NICT、株式会社 ZenmuTech(ZenmuTech))

実施内容B1:秘密分散・秘密計算技術の研究開発(NICT 藤原幹生)

実施内容B2：秘密分散高速・軽量化技術（ZenmuTech 石田祐介）

（C）項目名：社会実装（東芝、NEC、NICT、学習院大、東大、北大、ZenmuTech）

実施内容C1：医療ストレージネットワーク、企業・国家等重要インフラ向け装置開発

（NEC 兼保圭介、NICT 藤原幹生、NEC 飯塚浩巳、東芝 馬場伸一、
学習院大 平野琢也、東大 小芦雅斗、北大 富田章久、ZenmuTech 石田祐介）

実施内容C2：出口戦略へ向けた取り組み

（東芝 佐藤英昭、NICT 藤原幹生、NEC 飯塚浩巳、東芝 馬場伸一、
学習院大 平野琢也、東大 小芦雅斗、北大 富田章久、ZenmuTech 石田祐介）

実施内容C3：出口戦略へ向けた取り組み

（東芝 佐藤英昭、NICT 藤原幹生、NEC 飯塚浩巳、東芝 馬場伸一）

実施内容C4：出口戦略へ向けた取り組み

（NEC 兼保圭介、NICT 藤原幹生、NEC 飯塚浩巳、学習院大 平野琢也）

(3) 光電子情報処理

担当サブ PD： 佐々木 雅英
（国立研究開発法人情報通信研究機構 量子 ICT 協創センター 研究センター長）
安井 公治
（三菱電機株式会社 FA システム事業本部産業メカトロニクス事業部 主席技監）

Society 5.0 では、スマート製造や自動車産業、物流、材料など多様な産業分野において、フィジカル空間から膨大な情報をサイバー空間に集積し、これらを瞬時かつ自在に操作し、フィジカル空間にフィードバックすることが求められる。また、フィジカル空間の状態をサイバー空間上のモデルで再現し、そのモデルを用いてシミュレーションを行うことで、フィジカル空間の性能改善・故障予測などを可能にすることが求められる。膨大なビッグデータ・事象を人間の能力を超えた人工知能や新たな原理で動く計算機が解析し、その結果がロボットなどを通して人間にフィードバックされることで、これまでには不可能とされた新たな価値が産業や社会の至るところにもたらされることになる。

これらを実現するための一つの手法として、これまでイジング型コンピュータ（アニーリング型量子コンピュータや古典技術を用いたイジングマシン）、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等による提案・開発への期待が高まり、現在、我が国でも各々網羅的・技術横断的に研究開発が進められている。これらの計算資源を最適に活用することによって、従来の計算方法に比較して、格段に処理や解析の高速化や高度化ができると期待される。

本研究開発では、イジング型コンピュータ（量子および古典を含む）、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等を広く計算アクセラレータとみなし、これらを Society 5.0 に資するアプリケーション分野において、アプリケーションプログラム開発者が活用可能とするシステムプラットフォームを構築する。既存のさまざまなプラットフォームと協調することも視野に入れる。またこれらの計算資源を最適活用することで、

Society 5.0 実現のためのボトルネック解消に貢献することを目標とする。ユーザによる API 活用をはじめ、ユーザエクスペリエンスを向上させながら社会実装を進める。

①次世代アクセラレータ基盤に係る研究開発

研究責任者: 戸川 望(早稲田大学 理工学術院 教授)

参画機関: 早稲田大学、株式会社フィックスターズ、株式会社 QunaSys、慶應義塾大学

研究開発の全体像:

Society 5.0 の実現にはサイバー空間とフィジカル空間の高度な融合が不可欠であり、これを達成するには大規模かつ困難なデータ処理等、多くの計算ボトルネックが存在する。例えば、天文学的な多数の選択肢の中から「最適な答え」あるいは「準最適な答え」を瞬時に見つけ出すことが必要となる(組合せ最適化問題)。組合せ最適化問題は、ネットワーク型製造システムをはじめ自動運転、MaaS(Mobility as a Service:サービスとしての移動分野)等、Society 5.0 の実現に必要な多くの社会課題の解決にとって重要である。また、Society 5.0 の実現には、膨大なデータを高速・高精度に学習し、なおかつ学習結果に基づき、膨大なデータから実時間で推論する必要があり、機械学習の高速化・高度化も Society 5.0 の実現のために不可欠な構成要素となる。さらに、材料やエネルギーの領域においても、単純な性能追求だけでなく、環境負荷や資源枯渇などの社会課題への対応も求められており、トレードオフの関係にある場合には、これらの要求を高度に両立させることが必要となる。この実現のためには、これまでのような実験偏重・職人芸に頼った開発から脱却し、対象となるミクロな物理系をサイバー空間上でモデル化し、シミュレーションを通じて最適な解(分子構造や反応条件など)を導き出す必要性が高まっている。

こうした数多くの Society 5.0 実現に不可欠な計算ボトルネックの解決に期待されるのが、(1)イジング型コンピュータ(量子アニーリングマシンや古典技術を用いたアニーリングマシン)、(2)NISQ コンピュータ、(3)誤り耐性ゲート型量子コンピュータと呼ばれる「次世代アクセラレータ」である。(1)～(3)の次世代アクセラレータは、既存の古典計算機と組み合わせることで、上述のような組合せ最適化問題の解法や機械学習、量子化学計算など古典計算機の計算ボトルネックを解消し、極めて高速・高精度にアプリケーションプログラムの実行が可能になると期待される。次世代アクセラレータを効果的に利活用することで、Society 5.0 の実現が加速する。

一方、Society 5.0 を実現するアプリケーションプログラムの特定部分に次世代アクセラレータを適用するには、(ア)アプリケーションプログラムから次世代アクセラレーションを呼び出すための入力データの準備、(イ)次世代アクセラレーションの実行、(ウ)次世代アクセラレーションからアプリケーションプログラムへの結果の受取り、の 3 段階より構成される。つまり、次世代アクセラレータの適用が優位となるのは、(イ)に要する時間に比較して、(ア)・(ウ)の時間が相対的に短く、また(イ)による効果(高速化や解の高精度化等)が期待される場合である。しかも、アプリケーションプログラムの特定部分の「動作」と、適用される次世代アクセラレータの組合せによって、(ア)・(イ)・(ウ)の時間ならびに動作全体の精度は動的に変化する。

入力データの準備や出力データの取出しがいかに最適かつ効率的にできるかによって、次世代アクセラレータの適用の可否が変化することになる(次世代アクセラレータインタフェース技術)。Society 5.0 の実現

には、アプリケーションプログラムと次世代アクセラレータの集合が与えられたとき、古典計算機による解法ならびに各種次世代アクセラレータの解法を同時に考慮した上で、アプリケーションプログラムを最適に実行するしくみの構築が不可欠である（次世代アクセラレータ・コデザイン技術）。

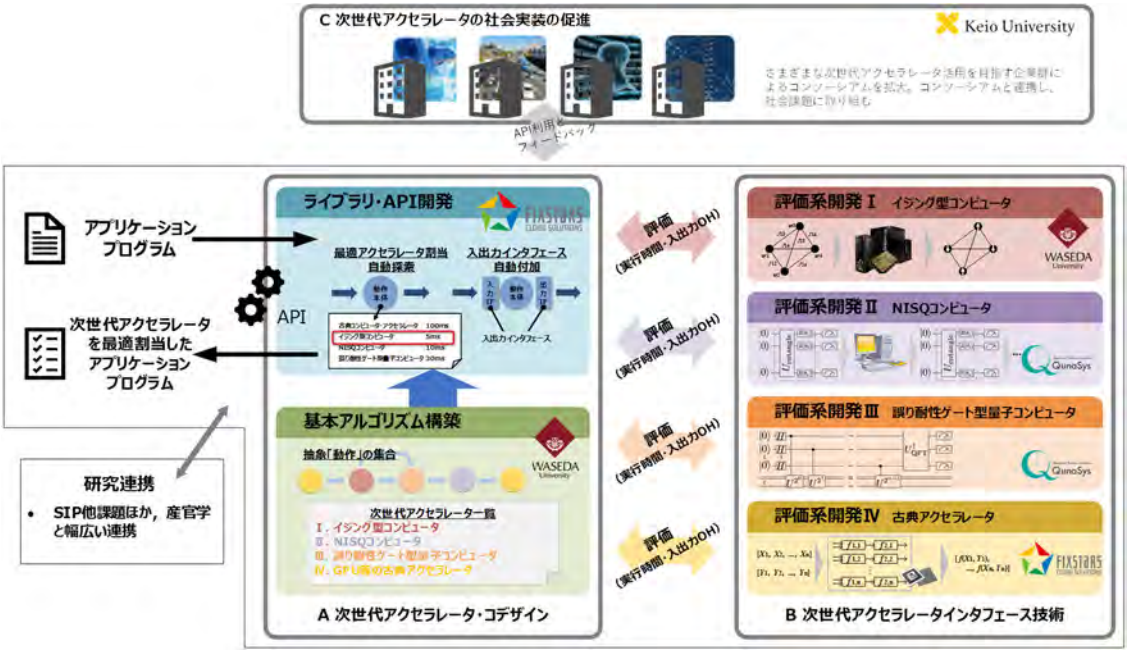


図２－（３）： 研究開発の概要と実施体制

以上の背景のもと、本研究開発では(1)イジング型コンピュータ、(2)NISQ コンピュータ、(3)誤り耐性ゲート型量子コンピュータを次世代アクセラレータとし、これらを適材適所で利活用することで、Society 5.0 に資するアプリケーションプログラム全体を高速化・高度化し、従来の計算方法と比較し格段に処理や解析を高速化・高度化する次世代アクセラレータ基盤の研究開発を目的とする（図２－（３））。すなわち、アプリケーションプログラムと次世代アクセラレータの集合が与えられたとき、適材適所に次世代アクセラレータを利活用し、アプリケーションプログラム全体を高速・高精度処理するソフトウェア群（最適化ライブラリ・API（Application Programming Interface）、次世代アクセラレータ評価系等）を構築する。研究開発全体を（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に分け、これらを同時並行して進めることで効率的・効果的に研究開発を進める。

具体的な実施内容:

（A） 次世代アクセラレータ・コデザイン技術

Society 5.0 では、膨大なデータを高速かつ高精度に計算する必要があり、これを実現するための次世代アクセラレータとして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ等が研究開発されている。これらは、それぞれ得意・不得意な分野を持ち、またアクセラレータを活用するためには、アプリケーションプログラムによって、アクセラレータに投入するデータを準備し、これをアクセラレータに投入、アクセラレータによる処理の後、計算結果を取り出し、これをもとに、元のアプリケーションプログラムの実

行を継続する必要がある。アクセラレータの成否は、アクセラレータの処理時間だけでなく、アクセラレータへの入力データ準備・入力データ投入、さらに出力データ取り出し・出力データの解釈等、一連の処理全体で決まると言っていい。さらに、最適な出力結果を得るために、パラメータや条件を適宜変化させながら、入力データの準備・投入や出力データの取り出し・解釈が複数回必要になる場合も考えられる。

アプリケーションプログラム全体を高速化・高度化するためには、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性量子コンピュータ、これらに加え GPU などの古典アクセラレータを前提に、プログラム中のどの部分に対して、どのようなアクセラレーションが適切か、また実際にアクセラレータとして何を使うべきかを考え、アプリケーションプログラムの最適化と、アクセラレータの最適化を同時に実行することが不可欠になる（次世代アクセラレータ・コデザイン）。上記を踏まえ、本研究開発では、次世代アクセラレータ基盤技術として次世代アクセラレータ・コデザイン問題を定式化し、これを最適解法するしくみを研究開発する。

具体的な研究開発事項として以下のものを取り上げる：

実施内容A1： 次世代アクセラレータ・コデザインの基本アルゴリズムの研究開発

アプリケーションプログラムの動作を抽象化し「動作」の集合とする。そして、イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、GPU 等の古典アクセラレータのうち、動作集合を構成するどの動作に対して、どのようなアクセラレーションが適切か、また実際に次世代アクセラレータとして何を使うべきかを考え、アプリケーションプログラムの最適化と、次世代ならびに古典アクセラレータの最適化を同時に実行する基本アルゴリズムを研究開発する。

実施内容A2： 次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API の研究開発

次世代アクセラレータと既存コンピュータとを相互にやり取りするための共通インタフェースを設計・開発し、次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API を研究開発する。特に、共通インタフェースを抽象化し、アクセラレータ間の差異を意識させない相互利用を可能とすることにより、次世代アクセラレター・コデザイン基盤を用いたアプリケーション開発エコシステムの構築を実現する。

（B） 次世代アクセラレータインタフェース技術

イジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ、量子コンピュータ、GPU を使った古典アクセラレータなど、各種アクセラレータについて、アプリケーションプログラムに対するインタフェース技術を研究開発する。

まず入出力データに関して調査し、これを最適化する技術を開発する。さまざまなアプリケーションプログラムにおいて、アプリケーションプログラムに必要なデータの実量を評価し、データ準備・データ入力・データ出力・原問題の解取出しのすべての工程において、これらの最適化を図る。その上で入出力オーバヘッドを評価する。

また各種アクセラレータと、これを利用して解く問題の関係性を評価し、実施内容（A）による次世代アクセラレータ・コデザインに適用する。アクセラレータと諸問題との性質を調査した上で、問題を次世代アクセラレータで解く際の実行時間を評価する実行時間評価系を構築し、実施内容（A）による次世代アクセラレータ・コデザインに適用する。

最終的に入出力オーバヘッド、実行時間評価を次世代アクセラレータ・コデザイン技術にフィードバックすることで次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現する。

また上記と合わせて、各種次世代アクセラレータについて、実施内容（A）と連携しながら、対象とする問

題やこれらに対する入出力形式等を定義するものとする。

具体的な研究開発事項として以下の 4 つを取り上げる:

実施内容B1: イジング型コンピュータのインタフェース技術の研究開発

イジング型コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、イジング型コンピュータを対象に、入出力オーバヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容B2: NISQ コンピュータのインタフェース技術の研究開発

NISQ コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、NISQ コンピュータを対象に、入出力オーバヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容B3: 誤り耐性ゲート型量子コンピュータのインタフェース技術の研究開発

誤り耐性ゲート型量子コンピュータと諸問題との性質を調査した上で、誤り耐性ゲート型量子コンピュータを対象に、高速シミュレータ等を利用して入出力オーバヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

実施内容B4: GPU 等古典アクセラレータのインタフェース技術の研究開発

GPU 等古典アクセラレータと諸問題との性質を調査した上で、GPU 等古典アクセラレータを対象に、入出力オーバヘッド、実行時間の評価系を研究開発する。

(C) 次世代アクセラレータの社会実装の促進

次世代アクセラレータの社会実装の促進の研究開発では、以下の二点を実施する。

第一に、CPS スマート製造領域における次世代アクセラレータ活用の加速を行う。CPS スマート製造領域におけるボトルネック要因を定式化し、これを次世代アクセラレータで解法可能な形式に変換した上で、プロトタイププログラムを開発する。これをもとに CPS スマート製造領域のステークホルダーからフィードバックを得て、産業側ニーズを反映する。

第二に、さまざまな次世代アクセラレータの活用を検討する企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。昨今、さまざまな次世代アクセラレータを利用できるようになりつつあるため、イジング型コンピュータ、NISQ 型コンピュータ、誤り耐性ゲート型量子コンピュータ、GPU 等古典アクセラレータのどれか一種類のみに注目している企業は少なく、いずれの次世代アクセラレータについても注目している企業が多い。そのため、複数種の次世代アクセラレータの組合せ活用のプロトタイププログラムを開発し、それをもとに企業からフィードバックを得て、産業側ニーズを反映する。複数種の次世代アクセラレータの組合せ活用のプロトタイププログラムを基に産業界ニーズを汲み上げることで、イジング型コンピュータ並びに NISQ コンピュータの社会課題活用を目指す企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。

上記を受け、実施内容 C は以下の通りである:

実施内容C: 次世代アクセラレータの社会実装の促進の研究開発

CPS スマート製造領域における次世代アクセラレータ活用を加速し、さまざまな次世代アクセラレータの活用を検討する企業群からなる社会実装コンソーシアムを拡大する。

社会実装:

本研究開発の社会実装に向けた戦略と取組みとして、以下のような段階的な戦略を想定する。まずオー

プン戦略として、研究開発の最終段階あるいは研究開発終了後間もなくの時期に、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公開することにより、世界でデファクトスタンダードを目指す。システムインテグレータがより迅速に社会実装を展開し、事業化のために本研究開発技術を利活用することが期待される。 そしてその後、順次クローズ戦略として、本研究開発を主体的に進める産業界を中心に、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、研究開発されたソフトウェア群のライセンシングなど競争領域にて事業展開を図る。

本研究開発では、社会実装の姿として、NEDO 事業や Q-LEAP 事業等と連携し、ネットワーク型製造システムや物流、材料、エネルギー・環境産業等からいくつかを想定し、これらの潜在ユーザーと、社会問題の抽出ならびに定式化／最適解法について連携しながら社会実装を進めるものとする。一部の次世代アクセラレータを用いた研究開発を既に行っているアーリーアダプター層の企業群との強力な連携だけでなく、アーリーマジョリティ層となり得る企業群に対し、次世代アクセラレータの価値を明確化することにより、アーリーマジョリティ層の早期取り込みを行い、次世代アクセラレータ活用の早期拡大を目指す。また、量子計算を実ビジネスに利用する要望は益々高まっており、今後は早稲田大学の量子計算アプリケーション拠点を核に、慶応義塾大学はじめ他大学とも連携して企業コンソーシアムに有償での量子計算サービスの提供を行う体制構築を進める。課題内連携としてレーザ加工分野においても、ネットワーク型製造システムに関するアプリケーションプログラムを想定し、研究開発技術を社会実装することを目指す。これらの研究開発成果のもと、企業による準製品化を完了し、社会実装コンソーシアムで活用する。

開発目標:

2022 年度までの最終目標

- 次世代アクセラレータ・コデザイン基盤を実現するソフトウェアを実装完了し、オープンテストベッド化を完了する（TRL7）。
- 代表的なアプリケーションについて、次世代アクセレラレータ基盤により、古典アクセラレータのみを活用した従来技術に比較して 10 倍～100 倍高速化を達成し、企業による準製品化を完了し、社会実装コンソーシアムで活用する（TRL7）。

項目ごとの担当機関・担当研究者とその実施内容:

（A） 次世代アクセラレータ・コデザイン技術（早稲田大学、フィックスターズ）

実施内容A1：次世代アクセラレータ・コデザインの基本アルゴリズムの研究開発（早稲田大学　戸川望）

実施内容A2：次世代アクセラレータ・コデザインのライブラリ・API の研究開発（フィックスターズ　松田佳希）

（B） 次世代アクセラレータインタフェース技術（早稲田大学、フィックスターズ、QunaSys）

実施内容B1：イジング型コンピュータのインタフェース技術の研究開発（早稲田大学　戸川望）

実施内容B2：NISQ コンピュータのインタフェース技術の研究開発（QunaSys　楊天任）

実施内容B3：誤り耐性ゲート型量子コンピュータのインタフェース技術の研究開発（QunaSys　楊天任）

実施内容B4：GPU 等古典アクセラレータのインタフェース技術の研究開発（フィックスターズ 松田佳希）

（C） 次世代アクセラレータの社会実装の促進（慶應義塾大学）

実施内容C：次世代アクセラレータの社会実装の促進の研究開発（慶應義塾大学 田中宗）

（4） 社会実装加速プロジェクト

本課題では、Society 5.0 の実現に重要かつ優先度の高いレーザー加工、光・量子通信、光電子情報処理を選定して研究開発を実施しており、Society 5.0 実現を加速度的に進展させるためには、本課題の研究開発成果の大規模社会実装が必要不可欠。そのために、社会実装加速プロジェクトとして、国内外の企業ネットワークやテストプラットフォーム等を活用し、より多くの企業や機関を巻き込む取り組みを開始する。

社会実装を進めるためには、実装される側の「要求仕様の具体的な把握」と、それをビジネスベースで社会実装先に提供するための具体的な「実装スキームの整備」が必須となることを念頭に進める。

前者の「要求仕様の具体的な把握」のためには、業界にもっとも大きなインパクトを与える技術成果の提示により集まる、もっとも社会実装効果の大きな要求ニーズ、具体的には、その技術成果をベースに、総合的に、もっとも大きな産業規模が創出できる要求ニーズについて、優先的に、適切な社会実装先の組み合わせにより対応する。そのための、①CPS プラットフォームの整備、ならびに、「実装スキームの整備」の具体像をより明確にするために、②CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成を行う。

① CPS 化プラットフォーム

担当サブ PD： 安井 公治（レーザー加工担当）

業務実施機関： 三菱UFJリサーチアンドコンサルティング株式会社

本課題では、各研究課題の研究開発成果や拠点を活用し、Society 5.0 実現の鍵である CPS 実現のためのボトルネック解消を目指している。そのボトルネック解消技術は、CPS 構築を推進する産業界からの求めに対応するものであり、このボトルネック解消を安心材料として、社会実装先での CPS 実現のための投資を拡大し、それにより、加速度的に Society 5.0 を実現させるものである。

そこで本課題では、CPS 化によるスマート製造実現に必要な、本課題の研究成果であるボトルネック解消技術をコア技術として、社会実装先が CPS 化実現に必要なモノやサービスなどのリソースがワンストップで、しかもビジネスベースで入手できる CPS プラットフォームを構築し、投資決断のためのハードルを下げることが必要である。本プラットフォーム設計は産業用プラットフォームとして、これにアクセスすれば、ユーザーが容易且つインスタントに必要なモノやサービスをビジネスベースで入手できる体制構築のシナリオ作りを目指す。

本プラットフォーム設計では、他 SIP 課題及び国の各種施策の成果や、この SIP での調査研究で開拓した海外企業向けの社会実装で活用できるフラウンホーファー(独)、ITRI(台)、TNO（蘭)等の海外研究機関の参画も包含することも視野に入れており、ユーザーが CPS 化を実現するために必要な幅広い技術・サービスの選択肢を用意できる設計とする。また、プラットフォーム設計では社会実装先向け市販書籍等の発刊、

国際シンポジウムの開催等を行う。

実施目標:

2022 年度までの最終目標

- 国際シンポジウム・書籍・調査報告書等でプラットフォーム設計内容を公開

②CPS 化戦略の波及加速パイロット拠点の形成

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

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

パイロットプロジェクトの全体像:

モノづくりの CPS 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「CPS 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 CPS 化を実現することで、モノづくり全体に CPS 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、連携研究課題において蓄積した CPS 化拠点構築のノウハウの提供を受けて、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 CPS 化に取り組み、CPS 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。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い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、CPS 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、CPS 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 CPS 化のノウハウである、「プロセスを CPS 化するための基盤技術群」と「CPS 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 CPS 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・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 CPS 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、シミュレーター開発などを、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 CPS 化を実施する。また、「CPS 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、CPS を搭載するレーザー改質プロセスのシステム化を促進し、CPS 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 CPS 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 CPS 化戦略を効率的に社会に展開することを目指す。

具体的な実施内容:

半導体材料のレーザー改質プロセスの CPS 化として、「プロセスを CPS 化するための基盤技術群」のノウハウ提供を受けて CPS 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。CPS 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 CPS 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、シミュレーター開発を実施し、CPS 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)ディスプレイ用多結晶 Si 薄膜半導体のレーザーアニール (3)イメージセンサのレーザードーピング等を選定し、CPS 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 CPS 化された機能実証機(α機※)を構築することで、パートナー企業が CPS 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(β機※※)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(KILA)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を供給を実施する。半導体製造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ー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。

※　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。

※※　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。

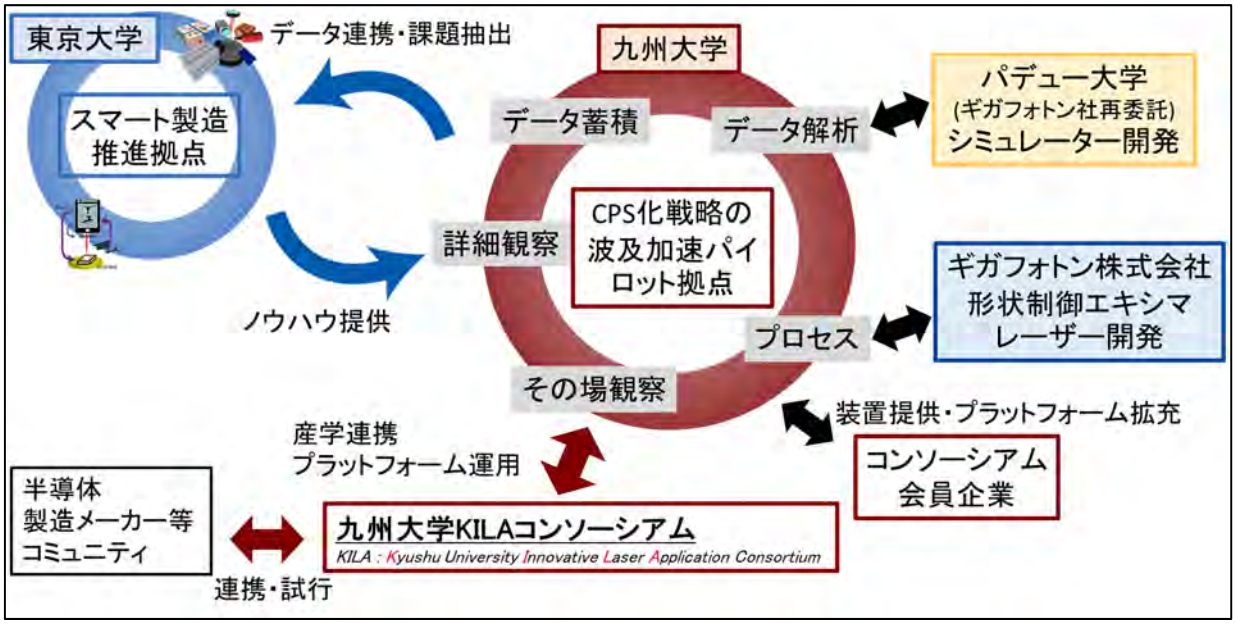


図2－(4)－①：パイロット拠点実施体制図

実施目標：

2022 年度までの最終目標

- 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）の投資判断を実施可能な拠点として、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の持続可能な拠点を実現し、CPS 化戦略の持続的な波及に貢献する。

3. 実施体制

(1) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の活用

本件は、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「量研」という。）への運営費交付金を活用し、

図表３－１のような体制で実施する。量研は、PD や推進委員会を補佐し、研究責任者の公募、契約の締結、資金の管理、研究開発の進捗管理、PD 等への自己点検結果の報告、関連する調査・分析などを行う。

(2) 研究責任者の選定

量研は、本研究開発計画に基づき、研究責任者を公募等により選定する。

審査基準等の審査の進め方は、内閣府等と相談し量研に設置した公募審査委員会が決定する。研究責任者、研究責任者の共同研究予定者、研究責任者からの委託（量研からみると再委託）予定者等の利害関係者及び、PD、サブ PD は、当該研究責任者等の審査に参加しない。利害関係者の定義は、量研が定めている規定等に準じ、必要に応じ PD 及び内閣府等に相談し、変更する。

選定の結果は、PD 及び内閣府の了承をもって量研が決定する。

(3) 研究体制を最適化する工夫

PD は、研究開発項目ごとに置くサブ PD を統括し、各サブ PD との協議を踏まえ、研究課題や研究責任者の変更・入替・追加など研究体制を決定する。

研究開発項目ごとに、当該分野の技術の全体像を客観的に把握し、研究責任者と議論を行えるサブ PD を配置する。サブ PD は、担当する研究開発項目の責任者として、研究開発マネジメント行い、可能な限り定量的な目標を設定の上、各研究課題の研究を推進する。また、サブ PD は、研究課題の進捗状況、関係機関等で実施する技術調査等の結果や社会情勢の変化に応じ、研究課題の研究内容・研究目標・必要経費・研究体制（変更・入替・追加を含む）、他の関連プロジェクトの成果の導入・統合など出口戦略の案を検討し、マネジメント会議に提案、PD の承認を得る。

PD の意思決定を補佐するため、量研にマネジメント会議を設置する。マネジメント会議では、本研究開発の全体方針の決定及び目標の設定、研究開発の進捗管理、各研究課題の研究内容、研究目標、必要経費、研究体制の変更・入替・追加等サブ PD から提案された内容の検討を行う。

研究開発項目 1 レーザー加工及び、研究開発項目2光・量子通信に係る国内外の社会・産業動向や研究開発動向の変化を常に把握し、最適な出口戦略での研究開発を進めるため、マネジメント会議の下に、担当サブPDを議長とし、研究責任者及び外部有識者等で構成された出口戦略検討分科会をそれぞれ設置した。

なお、研究開発項目 1 レーザー加工については、SIP 終了後の社会実装状態を具体化し、その時点からバックキャストして今後取り組むべき具体的事項の抽出を行う「社会実装バックキャスト検討分科会」を令和 2 年度より設置する。

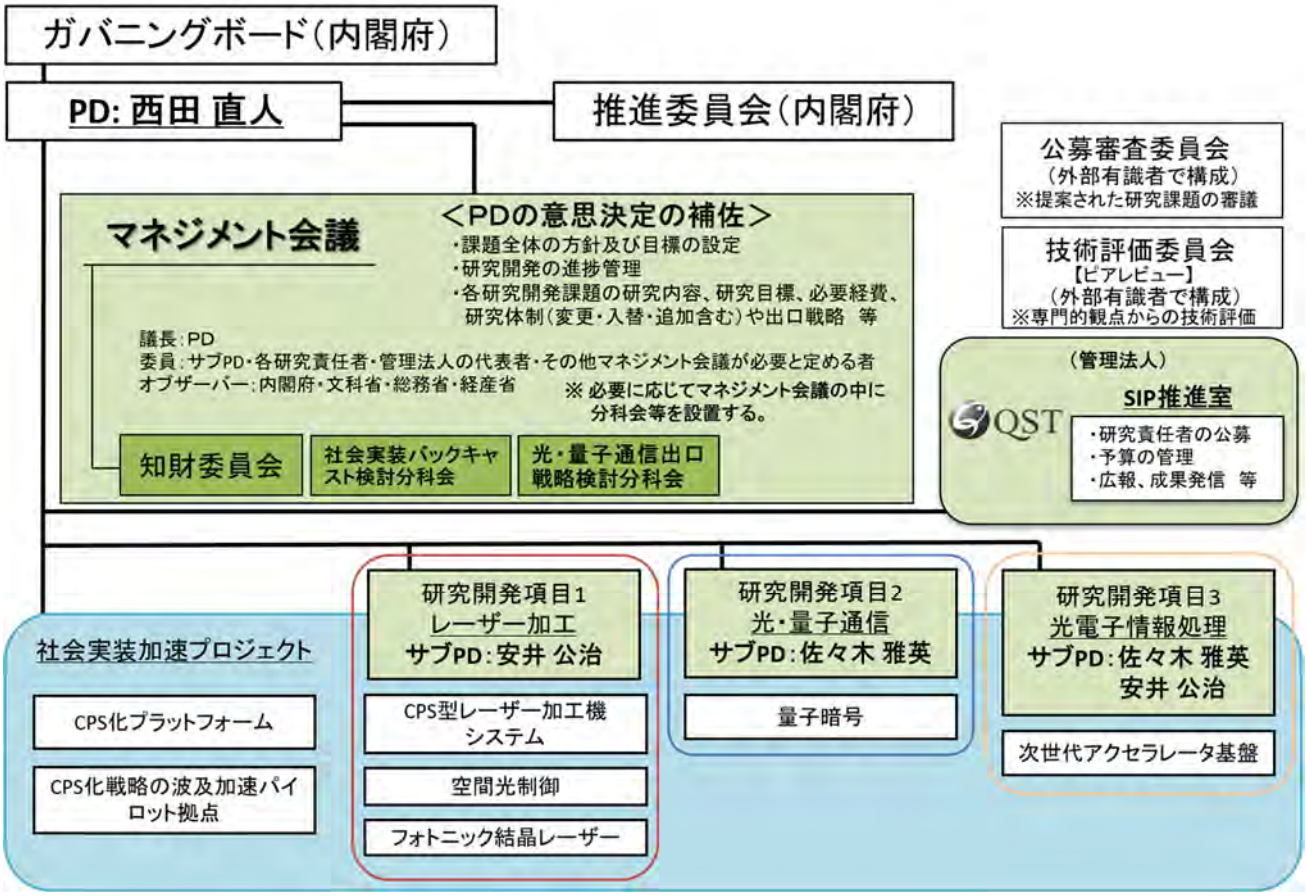
(4) 府省連携

PD、サブPDの研究開発マネジメントの下、内閣府・総務省・文部科学省・経済産業省はマネジメント会議等にオブザーバーとして参加し密接に本課題の進捗等について把握すると共に、各府省で実施している関連する事業で開発された技術を SIP で活用するなど、社会実装に向けて、緊密に連携する。

(5) 産業界からの貢献

今後の産業界からの貢献（人的、物的貢献を含む。）は、社会実装を見据える 2021 年度 2022 年度につい

ては、研究開発費の総額（国と産業界からの貢献との合計）の 50%以上を見込む。また 2022 年度は既に実施している PD、サブ PD による企業幹部訪問（Web 会議含む）を強化する。



図表3-1　実施体制

4. 知財に関する事項

研究開発の成功と成果の実用化・事業化による国益の実現を確実にするため、優れた人材・機関の参加を促すためのインセンティブを確保するとともに、知的財産等について適切な管理を行う。

(1) 知財委員会

知財委員会を量研に置く。また、知財部会を、原則として研究課題毎に研究責任者の所属機関に置く。

知財委員会は、課題全体及び研究課題を跨る研究開発成果に関する特許等知財権の方針決定、並びに知財部会での未決となった知財権対応事案の調整・調停等を行う。 知財部会はそれぞれの研究項目における研究開発成果に関する論文発表及び特許等知財権の出願・維持等方針決定、調整等を行う。

知財委員会は、PD、サブ PD、研究責任者、管理法人の代表者及び主要な関係者、弁理士などの専門家等から構成する。

知財委員会及び知財部会の詳細な運営方法等は、設置する各機関において定める。

(2) 知財権に関する取り決め

量研は、秘密保持、バックグラウンド知財権（研究責任者やその所属機関等が、プログラム参加前から保有していた知財権及びプログラム参加後に SIP の事業費によらず取得した知財権）、フォアグラウンド知財権（プログラムの中で SIP の事業費により発生した知財権）の扱い等について、予め委託先との契約等により定めておく。

(3) バックグラウンド知財権の実施許諾

他のプログラム参加者へのバックグラウンド知財権の実施許諾は、知財権者が定める条件に従い（あるいは、「プログラム参加者間の合意に従い」）、知財権者が許諾可能とする。

当該条件などの知財権者の対応が、SIP の推進（研究開発のみならず、成果の実用化・事業化を含む）に支障を及ぼすおそれがある場合、知財委員会において調整し、合理的な解決策を得る。

(4) フォアグラウンド知財権の取扱い

フォアグラウンド知財権は、原則として産業技術力強化法第 17 条第 1 項を適用し、発明者である研究責任者の所属機関（委託先）に帰属させる。

再委託先等が発明し、再委託先等に知財権を帰属させる時は、知財委員会による承諾を必要とする。その際、知財委員会は条件を付すことができる。

知財権者に事業化の意志が乏しい場合、知財委員会は、積極的に事業化を目指す者による知財権の保有、積極的に事業化を目指す者への実施権の設定を推奨する。

参加期間中に脱退する者に対しては、当該参加期間中に SIP の事業費により得た成果（複数年度参加の場合は、参加当初からの全ての成果）の全部または一部に関して、脱退時に量研が無償譲渡させること及び実施権を設定できることとする。

知財権の出願・維持等にかかる費用は、原則として知財権者による負担とする。共同出願の場合は、持ち分比率、費用負担は、共同出願者による協議によって定める。

(5) フォアグラウンド知財権の実施許諾

他のプログラム参加者へのフォアグラウンド知財権の実施許諾は、知財権者が定める条件に従い（あるいは、「プログラム参加者間の合意に従い」）、知財権者が許諾可能とする。

第三者へのフォアグラウンド知財権の実施許諾は、プログラム参加者よりも有利な条件にはしない範囲で知財権者が定める条件に従い、知財権者が許諾可能とする。

当該条件などの知財権者の対応が SIP の推進（研究開発のみならず、成果の実用化・事業化を含む）に支障を及ぼすおそれがある場合、知財委員会において調整し、合理的な解決策を得る。

(6) フォアグラウンド知財権の移転、専用実施権の設定・移転の承諾について

産業技術力強化法第 17 条第 1 項第 4 号に基づき、フォアグラウンド知財権の移転、専用実施権の設定・

移転には、合併・分割による移転の場合や子会社・親会社への知財権の移転、専用実施権の設定・移転の場合等（以下「合併等に伴う知財権の移転等の場合等」という。）を除き、量研の承認を必要とする。

合併等に伴う知財権の移転等の場合等には、知財権者は量研との契約に基づき、量研の承認を必要とする。

合併等に伴う知財権の移転等の後であっても量研は当該知財権にかかる再実施権付実施権を保有可能とする。当該条件を受け入れられない場合、移転を認めない。

(7) 終了時の知財権取扱いについて

研究開発終了時に、保有希望者がいない知財権等については、知財委員会において対応（放棄、あるいは、量研による承継）を協議する。

(8) 国外機関等（外国籍の企業、大学、研究者等）の参加について

当該国外機関等の参加が課題推進上必要な場合、参加を可能とする。

適切な執行管理の観点から、研究開発の受託等にかかる事務処理が可能な窓口または代理人が国内に存在することを原則とする。

国外機関等については、知財権は量研と国外機関等の共有とする。

5. 評価に関する事項

(1) 評価主体

PD と量研等が行う自己点検結果の報告及び、量研が実施するピアレビューの結果を参考に、ガバニングボードが外部の専門家等を招いて行う。この際、ガバニングボードは分野または課題ごとに開催することもできる。

(2) 実施時期

事前評価、毎年度末の評価、最終評価とする。

終了後、一定の時間（原則として 3 年）が経過した後、必要に応じて追跡評価を行う。

上記のほか、必要に応じて年度途中等に評価を行うことも可能とする。

(3) 評価項目・評価基準

「国の研究開発評価に関する大綱的指針（平成 28 年 12 月 21 日、内閣総理大臣決定）」を踏まえ、必要性、効率性、有効性等を評価する観点から、評価項目・評価基準は以下のとおりとする。評価は、達成・未達の判定のみに終わらず、その原因・要因等の分析や改善方策の提案等も行う。

① 意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性。
② 目標（特にアウトカム目標）の妥当性、目標達成に向けた工程表の達成度合い。
③ 適切なマネジメントがなされているか。特に府省連携の効果がどのように発揮されているか。
④ 実用化・事業化への戦略性、達成度合い。

⑤ 最終評価の際には、見込まれる効果あるいは波及効果。終了後のフォローアップの方法等が適切かつ明確に設定されているか。

(4) 評価結果の反映方法

事前評価は、次年度以降の計画に関して行い、次年度以降の計画等に反映させる。

年度末の評価は、当該年度までの実績と次年度以降の計画等に関して行い、次年度以降の計画等に反映させる。

最終評価は、最終年度までの実績に関して行い、終了後のフォローアップ等に反映させる。

追跡評価は、各課題の成果の実用化・事業化の進捗に関して行い、改善方策の提案等を行う。

(5) 結果の公開

評価結果は原則として公開する。

評価を行うガバニングボードは、非公開の研究開発情報等も扱うため、非公開とする。

(6) 自己点検

①研究責任者による自己点検

PD は研究責任者に自己点検を行うよう指示する。

研究責任者は、5.(3)の評価項目・評価基準を準用し、前回の評価後の実績及び今後の計画の双方について点検を行い、達成・未達の判定のみならず、その原因・要因等の分析や改善方策等を取りまとめる。

②PD による自己点検

PD が研究責任者による自己点検の結果を見ながら、5.(3)の評価項目・評価基準を準用し、PD 自身、量研及び各研究責任者の実績及び今後の計画の双方に関して点検を行い、達成・未達の判定のみならず、その原因・要因等の分析や改善方策等を取りまとめる。その結果をもって各研究責任者等の研究継続の是非等を決めるとともに、研究責任者等に対して必要な助言を与える。これにより、自律的にも改善可能な体制とする。

これらの結果を基に、PD は量研の支援を得て、ガバニングボードに向けた資料を作成する。

③量研による自己点検

量研による自己点検は、予算執行上の事務手続を適正に実施しているかどうか等について行う。

(7) ピアレビュー

専門的観点からの技術評価（以下「ピアレビュー」という。）を実施するため、量研は、内閣府で確認を受けた総勢 16 名の外部有識者で構成された技術評価委員会とその分科会を研究開発項目毎に設置し、より技術的専門性の高いピアレビューが可能な体制とする。また、技術評価委員会では研究成果を活用する事業領域の委員も加わり、コストなどを含めた商用化による社会実装に向けた出口戦略も含め、グローバルで客観的な評価を実施するべく体制を強化し、ピアレビューの結果は社会実装の取組強化に活用する。加えて、適

切なピアレビューを行うため、技術評価委員と PD、サブ PD、研究責任者が深い議論を行えるよう、議論の機会も増やす。技術評価委員によるピアレビューの結果については、量研がとりまとめてガバニングボードに報告する。

また、本課題が選定した3分野は既に国際的にトップクラスの技術的優位性を持っているが、本課題が計画している社会実装の戦略が世の中のトレンドや市場要求等に則しているかを、グローバルな視点からも把握し、自らの戦略にフィードバックすることも重要である。このため、2022 年度は、この分野に強みを持つ海外の有力な調査・研究機関と連携して、現地での成果の試用・評価等も開始する。

6. 出口戦略

我が国の強みである光・量子技術を活用して、レーザー加工技術、光・量子通信技術、光電子情報処理技術の研究開発を行い、スマート製造、スマートモビリティ（自動運転）、スマートエネルギーを実現することにより、民間投資を促し、我が国の産業競争力を確保・発展させていく。

(1) 出口指向の研究推進

①企業ネットワークの活用連携

本研究開発成果を広く市場に普及するためには、市場支配力を有する企業群からの評価を早い段階で獲得する事が必須であるため、可能な限り、国内外の企業ネットワーク（例えば、電子機器分野）に研究開発成果を開示した上で、各企業での実装に向けての議論を行い、具体的な評価例・採用実例をもって、実際に社会実装が可能な成果であるか早期に判断し、研究開発にフィードバックする。例えば、CPS 型レーザー加工機システム研究開発で構築するマイスターデータジェネレーターやスマートレーザー加工機システムを、スマート製造の「知」の集積拠点として運用することで、ニーズの収集、試作加工による技術データの収集、加工評価フィードバック、アウトリーチ、パートナーシップ構築等を実施する。また、それにより、広くステークホルダーが使用できる環境を整え、システム性能の向上に役立てる。

また、出口戦略検討分科会等を利用して、必要に応じて法務、営業、経営の専門家の意見も踏まえながら、成果の最適な社会実装の方策を検討する中で、ベンチャー企業の参加や設立も選択肢として検討する。さらに、研究責任者が海外の有力機関の拠点運営のレビューを受けて海外における社会実装の先導例への知見を深めるほか、ドイツにおける技術紹介拠点の運用、ドイツやオランダとの連携を強化しフィールドテストに向けてデモ品展示を実施するなど、現状を客観的に捉える、国際競争力の強化するなどの取組を推進する。

②関連する他の課題との連携

・CPS 型レーザー加工機システムに係る研究開発については、文部科学省「Q-LEAP」や経済産業省・NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」等の研究成果を本 SIP 事業に糾合することで研究開発を加速していく。

・量子暗号については、内閣府「ImPACT 量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の「超長期セキュア秘密分散保管技術」と秘匿計算技術等を組み合わせることで、量子セキュアクラウド技術を実現する。また、第 2 期 SIP の他課題に対し、超長期セキュリティを確保するための先端的なコア技術

の提供等を行い、本技術の普及を図っていくことを模索していく。
・光電子情報処理については、内閣府「ImPACT」、文部科学省「Q-LEAP」、経済産業省・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事業」等と内容が重複しないよう留意しつつ、適切な場合にはこれらの事業の研究成果と本課題の研究成果を組み合わせることで、研究開発を加速していく。

③SIP で行う範囲と研究成果の引き取り先
・各研究課題において、その基盤技術や研究開発の進展度によっては技術成熟度は異なるが、それぞれ TRL7 の実現を目指す。
・各研究課題に参画する企業や、知財等のライセンスを受けた企業により、研究成果を市場に製品・サービスとして投入を行う。具体的な研究成果の出口戦略については、別添工程表を参照のこと。

④参画企業からの人的、物的、資金的貢献
・参画企業は、人材・設備・ノウハウ等を提供し、研究開発の推進に貢献する。また研究開発や事業化の見通しの進展に伴い、製品化に向けた研究開発等のための資金を拠出する。なお、具体的な資金の見通しについては、別添工程表を参照のこと。

(2) 普及のための方策

上述の企業ネットワークの利用による成果の普及・展開を行うとともに、社会実装のリソースとして、既存の民間企業やベンチャー企業（大学や研究機関から生まれるスタートアップ企業）等をビジネスベースで活用し、中小企業も含め研究成果の普及を展開していく。特に、CPS 型レーザー加工機システムについては、連携する事業や、関係するコンソーシアム等の枠組み等を活用し、普及を図っていく。

また、Society 5.0 の加速度的な実現を見据え、社会実装加速プロジェクトによる本課題の研究成果の大規模社会実装を目指す。

さらに、海外の研究機関による本 SIP 課題へのベンチマーク等を通じて得る情報を元に、海外研究機関との国際連携も開始し、本課題成果の現地での試験、海外機関の提案技術の日本での試験など、現場での実証評価へステップをあげる。また、研究開発成果の積極的・戦略的な広報活動を実施し、海外有力科学誌を活用して世界の多数の最先端研究者等にも情報発信する。さらに、国内外の企業の事業部門等への研究開発成果のアウトリーチを図り、世界シェアの拡大を行い、関連業界のフラッグシップを目指す。加えて、国内外のビジネス会合や展示会への参加や成果をバーチャルで展示する等を実施するほか、国際シンポジウムも開催しマスメディアに積極的に成果を露出することも念頭に活動を進めていく。そのため、初年度より、管理法人に広報（プロモーション）強化のための専任人員を雇用した。

7. その他の重要事項

(1) 根拠法令等

本件は、内閣府設置法（平成 11 年法律第 89 号）第 4 条第 3 項第 7 号の 3、科学技術イノベーション創造

推進費に関する基本方針（平成 26 年 5 月 23 日、総合科学技術・イノベーション会議）、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期（平成 29 年度補正予算措置分）の実施方針（平成 30 年 3 月 29 日、総合科学技術・イノベーション会議）、戦略的イノベーション創造プログラム運用指針（平成 26 年 5 月 23 日、総合科学技術・イノベーション会議ガバニングボード）に基づき実施する。

(2) 弾力的な計画変更

本計画は、成果を最速かつ最大化させる観点から、臨機応変に見直すこととする。

全ての研究課題に関して、プロジェクトを一律 5 年とせず、当該時点での新たな需要向けのテーマを他の関連事業での成果を踏まえて追加するなど、柔軟に研究課題を編成する。

(3) PD 及び担当の履歴

① PD

西田　直人（2018 年 6 月～）

② 担当参事官（企画官）

千嶋　博
（2018 年 4 月～10 月）

西山　崇志
（2018 年 4 月～10 月）

登内　敏夫
（2018 年 10 月～
2020 年 12 月）

奥　篤史
（2018 年 10 月～
2020 年 8 月）

増田　幸一郎
（2021 年 1 月～）

河原　卓
（2020 年 8 月～
2021 年 8 月）

迫田　健吉
（2021年 8 月～）

③　担当

龍　政彦
（2018 年 4 月～
2020 年 3 月）

宮松　利行
（2020 年 4 月～）

添付資料1　資金計画及び積算

2018 年度　合計 2,500 百万円

（内訳）

1. 研究費等（一般管理費・間接経費を含む）	**2,360 百万円**
（研究開発項目毎内訳）	
（1）レーザー加工	1,940 百万円
（2）光・量子通信	419 百万円
（3）光電子情報処理	1 百万円
2. 事業推進費（人件費、評価費、会議費等）	**140 百万円**
計	**2,500 百万円**

2019 年度　合計 2,280 百万円

（内訳）

1. 研究費等（一般管理費・間接経費を含む）	**2,100 百万円**
（研究開発項目毎内訳）	
（1）レーザー加工	1,291 百万円
（2）光・量子通信	559 百万円
（3）光電子情報処理	150 百万円
2. 事業推進費（人件費、評価費、会議費等）	180 百万円
3. PD 裁量経費	100 百万円
計	2,280 百万円

2020 年度　合計 2,394 百万円

（内訳）

1. 研究費等（一般管理費・間接経費を含む）	**2,234 百万円**
（研究開発項目毎内訳）	
（1）レーザー加工	1,348 百万円
（2）光・量子通信	529 百万円
（3）光電子情報処理	250 百万円
（4）社会実装加速プロジェクト	106 百万円
2. 事業推進費（人件費、評価費、会議費等）	140 百万円
3. PD 裁量経費	20 百万円
計	2,394 百万円

2021 年度　合計 2,454 百万円

（内訳）

1．研究費等（一般管理費・間接経費を含む）	**2,296 百万円**
（研究開発項目毎内訳）	
（1）レーザー加工	1,231 百万円
（2）光・量子通信	526 百万円
（3）光電子情報処理	425 百万円
（4）社会実装加速プロジェクト	114 百万円
2．事業推進費（人件費、評価費、会議費等）	130 百万円
3．グローバルベンチマークアドバンスト	28 百万円
計	2,454 百万円

2022 年度　合計 2,189 百万円

（内訳）

1．研究費等（一般管理費・間接経費を含む）	**2,034 百万円**
（研究開発項目毎内訳）	
（1）レーザー加工	1,185 百万円
（2）光・量子通信	418 百万円
（3）光電子情報処理	362 百万円
（4）社会実装加速プロジェクト	69 百万円
2．事業推進費（人件費、評価費、会議費等）	155 百万円
計	2,189 百万円

※四捨五入の関係で、合計が合わない場合がある

添付資料2　本課題における TRL の定義

TRL #	Definition
TRL1	Basic principles observed and reported
TRL2	Technology concept and/or application formulated
TRL3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept
TRL4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment
TRL5	Component and/or breadboard validation in relevant environment
TRL6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)
TRL7	System prototype demonstration in a space environment
TRL8	Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)
TRL9	Actual system “flight proven” through successful mission operations

本 SIP 課題では上表 NASA の TRL に準じる。