

# 今後の光・量子ビーム研究開発の 推進方策について（案）

平成25年1月 日

科学技術・学術審議会

先端研究基盤部会



## 目 次

1. はじめに	1
2. 光・量子ビーム分野の推進の意義について	2
3. 施設・装置・技術等の開発・高度化とその有効利活用について	4
4. 課題解決型の研究開発・利用研究の推進について	7
5. 開発成果の利用促進・社会への還元等について	9
6. 人材育成について	10
7. 国際的な取組について	13
8. 今後5年程度に集中して取り組むべき課題等について	14
9. おわりに	21
○ 参考資料	22



## 1. はじめに

### (光科学技術及び量子ビーム技術)

- 我が国では、電波に近いテラヘルツ光から可視光、X線にわたる広い波長領域の電磁波である光を利用した「光科学技術」や、放射光、電子、ミュオン、中性子、イオンなどのビームを利用する「量子ビーム技術」は、新しい原理・現象の解明にとどまらず、新素材の開発や品種改良、創薬などに活用されており、産業分野を高度化し、国際競争力を強化していくために非常に重要な基盤技術となっている。
- 光科学技術については、特に半導体エレクトロニクス技術、光ファイバー技術といった我が国の得意技術をベースとしたレーザー技術の高度化が近年加速している。最先端レーザーは高精度、非接触、高いエネルギー集中性、高効率エネルギー変換性等の特徴を持ち、幅広い分野の先端科学技術分野を大きく先導する基盤技術である。このような光科学技術の先端研究は、国立大学法人大阪大学のレーザーエネルギー学研究センターや光科学センター、国立大学法人電気通信大学のレーザー新世代研究センター、国立大学法人東京大学の光量子科学研究センターや物性研究所、独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）関西光科学研究所、大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所、独立行政法人理化学研究所（理研）など多くの研究拠点で、様々な基礎分野の技術革新を支える研究インフラストラクチャーとしての光源開発や新しい利用技術の先端研究として活発に進められている。一方、産業技術への応用についても、情報通信、太陽電池、加工や製品評価技術等の分野において、我が国は国際競争力が極めて高い状況にある。
- 量子ビーム技術については、「観る」「創る」「治す」という機能を利用することにより、基礎科学から産業応用まで幅広い分野を支える基盤技術となっている。例えば、我が国にはSPRING-8やフォトンファクトリー（PF）等の放射光施設、RIビームファクトリーやTIARA等のイオンビーム照射施設、JRR-3等の中性子利用施設などの多様な量子ビーム施設がある。加えて、X線自由電子レーザー施設SACLAや大強度陽子加速器施設J-PARCの特定中性子線施設が平成23年度末に共用を開始したところであり、量子ビームを利用した研究開発がいよいよ次の新しい時代に突入し、多様なビームを選んで使える本格的な利用期に入ろうとしている状況にある。特に、SACLAは量子ビーム技術が生み出したコヒーレント光源技術であり、これが光科学技術との融合によって高度化されることが期待され、今後飛躍的な発展が見込まれる重要技術となっている。

### **(本報告書の位置付け及び目的)**

- これまで、光科学技術及び量子ビーム技術（以下「光・量子ビーム技術」という。）については、それぞれが別々の観点から研究開発の推進方策が検討され、それに基づく事業が実施されてきた。しかしながら、最近の技術や理論の進展によりこれらの利用研究の領域が重なりを持つようになってきた。例えば、これまでは放射光施設を利用して行われてきた軟X線による計測が、レーザーによる高次高調波で発生可能になるなど、光科学技術の利用分野と量子ビーム技術の利用分野が近接する領域が出現し、その研究が活況を呈している。
- また、光・量子ビーム技術は、産業技術や社会基盤技術としての利用も含め広範な分野の技術革新を支える重要なものであり、科学技術の基盤とみなすことができる。しかし、この先端技術を牽引する施設は、その整備・運営に多額の経費を要するものが多く、施設・設備等の効率的な運営や効果的な環境整備とその活用、着実な人材育成・確保等の推進を計画的に行うことが不可欠である。
- 光・量子ビーム技術は、物理学、化学、生物学、天文学などの理学分野から、材料工学、応用化学、電気電子工学、機械工学、エネルギー工学、原子力工学、土木建築工学など多岐にわたる応用分野に広がりを持つ。このような分野横断的性格により、既存の分野を超えた俯瞰力を育てる分野融合的な人材育成の場として最適であることが注目されている。
- こうした光・量子ビーム技術分野を取り巻く環境の変化等を踏まえ、平成23年12月、科学技術・学術審議会先端研究基盤部会の下に「光・量子ビーム研究開発作業部会」を設置し、研究開発の現状や国内外の状況等を踏まえつつ、現在の課題と今後の推進方策等について、またこれまでの成果や日本の強みなどを活かしつつ、今後、重点的・戦略的に推進する方策の在り方等について、検討を行った。
- 本報告書は、本作業部会でのこれまでの検討を整理し、特に来年度以降早急に取り組むべきことを中心にまとめたものである。

## **2. 光・量子ビーム分野の推進の意義について**

### **(政策的位置付けと意義)**

- 第4期科学技術基本計画（平成23年8月、閣議決定）においては、これまでの分野別の重点化科学技術から問題解決型あるいは課題対応型で科学技術を進め、更にイノベーションを推進することが示されている。特に、分野融合やイノベーションの促進に向け、飛躍的な技術革新をもたらし、幅広い研

究開発課題に共通して用いられる基盤技術の高度化や施設及び設備のネットワーク化、研究開発の促進、相互補完性の向上等が指摘されている。

- 特に、光・量子科学技術については、「領域横断的な科学技術の強化」として、「複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術に関する研究開発を推進する」ことが明記されている。
- 光・量子ビーム技術は、このような基礎科学から産業応用に至るまで共通基盤としてのキーテクノロジーであり、イノベーションを支える基盤技術としてその重要性が益々高まっている状況にある。また、これまでも新しい光がノーベル賞に代表される新しい科学の発見や画期的な成果を生み出してきたように、我が国の科学技術全体を支える基盤技術として、先導的な技術開発や利用研究を推進するとともに、様々な可能性にチャレンジし、分野融合や境界領域を開拓していくことが期待されている。
- また、震災後、これまで以上に科学技術の安全・安心への貢献、課題解決への取組の強化等が求められており、微量なビームの検出や微細なイメージングなど光・量子ビーム技術が展開するイノベーションの創出や分野融合等への取組が、セキュリティや安全性などの課題にも資することが期待される。
- 基礎研究から産業応用に至る国際競争が激しさを増す中、光・量子ビーム技術の果たす役割は極めて高い。特に我が国は光学機器などのイメージング・ビジョン技術において先導的な産業技術を多数生み出してきた。最先端の研究開発を推進しつつ、この分野の持続的な発展を支える人材育成を促進し、我が国の優位性を更に確固とする仕組みを構築していくことが必要となっている。

#### **(必要性・有効性・効率性)**

- 将来にわたって経済的な発展を促し、国民生活を豊かにしていくためには、基礎科学を振興し、その成果を社会に還元していくことはもちろん、我が国が有する最先端の研究基盤施設を有効かつ効率的に活用し、優位性のある光・量子ビーム技術の関連産業技術をグリーン・ライフイノベーションにつなげ、技術革新により産業の国際競争力を向上させることが重要である。
- 放射光施設等の先端研究基盤施設は、最先端の基礎研究から製品に直結する技術開発まで広い範囲で活用されており、産業界自身あるいは共同研究による利活用を通して、国内産業界にも計り知れない恩恵をもたらしている。これに加えて、光・量子ビーム技術それ自体が産業界による製品化を通じて、我が国の国際競争力の向上に大きく寄与することが可能となっており、有効性の高いものである。
- 一方で、最先端の科学技術である光・量子ビーム技術の推進においては、大

型の最先端装置の開発が不可欠である。その初期投資の規模の増大や、成果が社会に還元されるまで一定の期間が必要となることから、産業界による先行投資だけではまかなうことが期待できず、国の投資が有効であり必要不可欠である。

- この分野における先端技術の研究開発は、世界のトップレベルに位置しているだけでなく、我が国のもつ高い製造技術力を活用することで、今後の日本の成長を支える大きな柱とすることが強く期待できる。従って、国として集中的・戦略的な投資を行うことが効率的・効果的であり必要である。

### **3. 施設・装置・技術等の開発・高度化とその有効利活用について**

#### **(1) 現状と課題**

- 我が国においては、光・量子ビーム技術に関連する様々な施設・装置等が存在し、研究開発の多様化が進むとともに、世界トップレベルの要素技術も生まれている。

#### **(光科学技術)**

- 光科学技術については、平成20年度から10年間の計画で「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」によるネットワーク拠点型研究開発（光拠点事業）が進められている。プログラム開始後5年を経て光科学技術の研究機関のネットワーク化は大きく進み、基盤的な要素技術の開発における研究機関相互の連携や人材育成が進展してきた。一方で、今後は更なる進展に向けて課題解決の核となる長期的視点に立った総合的・戦略的なプロジェクトが求められている。また、これまでに整備した共同利用施設を十二分に活用し、若手や女性研究者の国際的な交流を促す頭脳循環の拠点とし、グリーン・ライフイノベーションを先導する人類社会の課題解決に向かう研究を活発に進めることが求められている。

#### **(量子ビーム技術)**

- 量子ビーム技術については、例えば平成24年度で終了する「量子ビーム基盤技術開発プログラム」による装置等を高度化し供用へ繋げる取組が行われ、また、放射光施設等においては試料の自動測定装置などのユーザーフレンドリーな装置や測定技術の導入、トライアルユースの実施などにより産業界をはじめ広い分野で利活用が進められてきた。一方で、今後は将来を見据えた新たな加速器技術の開発や施設・装置等が連携した研究開発及び人材育成、

更なる利用研究の開拓と利便性向上等の取組が求められている。

- 特に、中性子分野については、JRR-3やJ-PARCをはじめとした大型施設において、利用の拡大や応用分野の開拓等が取り込まれるとともに、小回りが利き個人の発想を重視した萌芽的研究や、長時間の継続実験を想定したオンデマンド研究、学生などが実物に触れ工夫をしながら研究・測定などを簡便に行うことができる環境の整備が求められている。
- 量子ビームにより生成される放射性同位元素（RI）は、線源やトレーサーとして、医療、農業、工業、学術研究など多様な分野で利用されている。例えば、がん診査等の医療応用を目指したRI標準薬剤の研究開発や、セシウムの土壌から植物への移行動態をイメージング解析するなどポジトロンを利用したイメージング技術開発等が行われている。

### **（施設の連携、利便性の向上等）**

- この分野の研究開発及び施設整備の進展により、複数施設を利用した研究開発や、融合領域・境界領域・分野横断的な研究開発が進み始めてきており、技術革新が施設間の相補利用を一層推進する状況となっている。
- また、施設・組織間の連携を更に緊密化することにより、単独の施設を利用するだけでは得られないイノベーションが創出される余地がある。さらに、J-PARCとSPRING-8の登録施設利用促進機関が連携し、合同研究会の開催等が始められているが、異なる専門分野の学会等の連携を行っていく機運がより醸成されていけば、円滑な相補利用を推進することに繋がるとの指摘がある。
- 産業界を含めた利用者の拡大のために、試料を持って行きさえすれば測定ができるようにするなど、一層ユーザーフレンドリーな環境を整備する努力が行われている。一方で、利便性の向上により利用者が装置に深く関わる機会が減少し、将来の装置開発を支える人材が育つ場が減少しているという指摘がある。

## **（2）推進方策の方向性**

- 我が国の光・量子ビーム技術を次代の人材とイノベーションを生み出す源泉として、産業利用も見据えつつ先端技術を更に発展させ、国家プロジェクトへの貢献と我が国の成長に資する活動として定着させていくべきである。そのためには、限りある資源を最大限有効に活用していくことが必要である。

### **（連携強化・高度化促進）**

- 施設・組織間での情報共有や人事交流等による連携・協力の強化をはじめ、

互いの施設等の特長を最大限活かすために、機関や分野の違いを問わず関連施設の中から利用者に最適な施設とその利用方法を選定するなどの支援を行い、また、施設の連携利用による新たな研究開発を提案するなど相乗効果による更なる成果の創出を促進するコーディネーターやアドバイザー等の配置による利用者への支援等を強化することが必要である。

- また、様々な光・量子ビーム施設の垣根を越えるような利用者の育成は、施設側だけで考えることは難しく、利用者を交えた自由な議論が重要である。
- 新たな研究分野の開拓や利用研究の発展と、施設等の開発・高度化は、科学技術の発展において両輪を成すものであり、施設側と利用者が一体となった取組が必要である。両者が明確な目標を共有した上で連携・協力して課題に取り組むとともに、必要に応じて施設・装置等の開発・高度化を進め、これら革新的な施設・装置等を使いこなし利用研究を開拓していくパワーユーザーが必要である。そうした利用者を育てていくことも念頭に置いた上で、研究開発をより強化していくことが必要である。
- 光・量子ビーム施設間の垣根を越えた取組が、新しい科学を生み出すキーワードとなっており、先導的な取組等を通じて、光・量子ビーム技術におけるプラットフォーム化を更に推進していくことが重要である。両者の相補的な活用について、最新の科学技術知見をもとに最適化していくことが必要である。
- 光・量子ビームで同じターゲットを目指している場合も出てきていることから、両者が相補的な研究体制になるような統合的な議論や、研究のすみわけを学術的に明確にしていくことも効率的な科学研究推進のために必要とされている。こうした背景をうけ、例えば現行の「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」と「量子ビーム基盤技術開発プログラム」のPD・POでそれぞれのプロジェクトに関する情報共有や人事交流等による連携・協力の強化を検討することが重要となっている。また、この取組の更なる推進のために、プロジェクト運営についての方策を検討すべきである。
- さらに、ビームタイムの効率性（スループット）向上を進めるため、例えば、装置や技術の効率化・高度化や計算科学（シミュレーション）との連携による高速解析の実現などに取り組んでいくことが必要である。

### **（光科学技術の更なる進展）**

- 光科学技術については、ネットワーク拠点型研究開発の成果として、構築されつつあるオールジャパンの連携による技術基盤の強化を今後も手を緩めることなく進め、さらに産業展開も視野に入れて進めるべきである。これまでの事業の成果として生み出された「繰り返しレーザー増幅技術」や「スーパ

「一コヒーレント制御技術」などの革新技术については、更なる発展を目指した技術開発・利用研究を一層推進していくことが必要である。

- そのため、それぞれの研究機関の垣根を越えて、多くの光科学技術・量子ビーム技術の研究者が参画した研究開発・利用研究を行うことで、要素技術の集約を目指すことが必要である。

### **(量子ビーム技術の更なる進展)**

- 量子ビーム分野については、産業応用の更なる開拓とともに、高度に制御されたイオンビームやミュオンなどの有用性が十分に周知されていないため、こうした分野の潜在的な利用者の掘り起こしが重要である。
- また、量子ビームの利用者の拡大のみならず、萌芽的研究や教育・人材育成の場を設けるためには、小型で維持管理の容易なビーム光源等をはじめとした次世代の加速技術の開発が必要である。
- 例えば中性子分野については、X線のように研究室規模で使用できる小型線源がないため、その利用が大型施設に限られている。装置の小型化とともに、学生やメーカー等産業界の研究者にも簡便に利用できる解析ソフト等を備えたシステムを構築し、中性子を活用できる人材や中性子装置を開発できる人材の育成、応用分野の開拓や潜在的利用者の掘り起こし等に貢献することが重要であり、中性子科学を支える研究基盤の整備が必要である。

## **4. 課題解決型の研究開発・利用研究の推進について**

### **(1) 現状と課題**

- 課題解決型の研究開発・利用研究を進めるに当たって、施設・装置等の高度化につながる要素技術開発については、産業界をはじめとした課題を抱える利用者のニーズを踏まえた取組がこれまで以上に重要となっている。
- 光科学技術の更なる高度化には、高強度の光を制御操作するため欠かせない光学素子の材料劣化など本質的な課題がある。これらの課題を産業界及び研究の現場から効果的に抽出することと、解決に向けた研究の成果を広く共有する仕組みを構築することが重要である。
- これまで行われてきた量子ビーム施設におけるトライアルユースでは、間口を広げることで業種に関わらず多くの取組が行われ目覚ましい成果を出す事例が見られた。様々な分野で潜在的な利用者は多いものの、マッチングを更に強化することにより、新規の利用者を更に掘り起こす余地がある。特に、ミュオンなどの新しいビームについては、利用開拓の強化が課題である。

- 課題解決型の研究開発を推進するためには、計測システムを含め周辺技術の高度化への取組の強化が必要である。また、ハードウェアのみならず解析ソフトウェアも含めた総合的な利用環境の高度化への取組が重要となっている。
- さらに、加速器等における超伝導技術等の我が国が優れている分野では最先端技術が実用化されているものがあるが、一方で超高速の検出器や分析装置など海外からの輸入に頼っている分野等もある。

## **(2) 推進方策の方向性**

- 課題解決型の研究開発の推進には、産業界を含め課題を抱える利用者のニーズに即した装置開発や技術開発の推進が必要である。
- また、利用者がニーズに即した施設・装置等を選択できるようにするためには、施設側のコーディネート機能の強化が必要であり、利用支援の更なる強化が必要である。
- さらに、機関や分野の違いを問わず、利用者側から見て窓口が一つになっている組織体制により、様々な分野にわたる利用者の利便性を向上させることが必要である。
- 新たな課題への対応や潜在的利用者の掘り起こしを進めるためには、例えば、分野融合の促進、境界領域や中間領域の開拓、複数施設の相補的・統合的利用の推進、高度に制御されたイオンビームやミュオンなど、今後、応用利用と利用者増大が期待される分野の開拓などの先導的事例研究の推進が必要である。
- また、トライアルユースは産業利用の拡大に非常に有効であり、このような取組を強化することが重要である。こうした成果も参考に、施設側では利用者の掘り起こしや分野の開拓に向けた取組を積極的に進める必要がある。
- 併せて、失敗事例を含め取組事例について広報を強化するなど、光・量子ビーム技術に対する理解を増進することが必要である。
- さらに、原子・分子レベルの解析等においては、検出器の開発とともに、実験から膨大なデータが生じるため、計算科学・計算機科学の融合による高度な実験・解析の実現、そのため解析手法の開拓などソフト面の強化が必要である。
- 近年は、自由電子レーザーに加え、レーザーベースの高輝度軟エックス線ビームは新しいコヒーレント光源として、開発フェーズから利用フェーズへと大きく展開しつつある。このような高度なコヒーレント光源施設の共同利用を拡大するために、検出分析技術の利用技術の開発を進めるとともに、施設共用促進の支援を行うことが必要である。

## 5. 開発成果の利用促進・社会への還元等について

### (1) 現状と課題

- 我が国においては、産業面で活用可能な先端研究の成果が必ずしも産業利用に活かされていない状況があった。
- そのため、開発・整備・高度化された施設・装置等を効果的に活用し、その成果を技術移転や産業応用へと展開していくことが課題となっている。
- 例えば、S P r i n g - 8においては、産業界がコンソーシアムを形成し、共同でビームラインを運用している成功事例がある。
- 一方で、産業界にとって、独立行政法人や大学等が所有する一部の先端研究施設については、まだ利用機会が少ないため製品開発や品質保証に使えずらく、また、施設利用の公募時期や知的財産の制約などにより、製品開発に近づくほど使いにくい仕組みになっているとの指摘がある。
- また、レーザー技術をベースとするテラヘルツから軟X線におよぶコヒーレント光源技術とそれを利用する計測技術は、産業技術としても高いポテンシャルを持つものである。その基礎となる高強度半導体レーザー技術、光学部品開発、高耐性素子技術など、産業展開を視野にいたした戦略的な開発体制を整えていくことが重要である。
- 先端的な加速器や中性子の装置などについては、産業界とも連携しながら戦略的な研究開発に取り組むことにより、開発の成果を輸出できるような技術として育てることが可能である。例えば、J - P A R C中性子源は世界最高性能を達成しており、新規に提案される海外の中性子源のモデルとなっているが、国内の中性子線施設は限られているため、国内で産業に活かされる機会は極めて限られている。
- また、研究開発の成果が社会に還元されていることが見えづらいとの指摘があり、要素技術の開発がどのように基礎科学に展開され、産業利用に進展していくのかを積極的に国民に説明する取組が求められている。

### (2) 推進方策の方向性

- 成果や出口までの産業応用へと繋ぐ基礎的研究が重要であり、具体的成果を示すとともに、要素技術開発とサイエンスの目的のバランスをとることも重要である。
- また、大学や研究機関で行われている研究開発を、実際の実用化・製品化ま

で切れ目無く繋いでいくには、産業界との連携が欠かせない。役割分担と各開発段階での問題解決のためには、基礎的な段階へのフィードバックが重要であり、それぞれが役割を意識しつつ連携して研究を進めることが必要である。

- 光科学技術の技術開発は国境を越えてグローバルに進められている。そのため、グローバルかつオープンイノベーションの促進に資する知財の確保・活用を考慮した新しい形の産学連携の仕組みを構築していくことが必要である。さらに、光科学技術分野での取組が他の分野の先例となり、我が国の産業の革新を導く新しいモデルを提示するものとなることが望まれる。
- 出口を見据えた研究開発の推進には、大学や研究機関がコーディネーターとなり、大学教育や研究開発の段階から、企業が参画し共同で実施するプロジェクト等の推進が必要である。
- 産業界においても、現状行われている基礎研究や要素技術開発を調査・検討し、大学や研究機関における研究開発に参画していくことで、製品開発につながることも求められる。同時に、大学や研究機関において産業界等のニーズを吸い上げる仕組みを構築することが必要であり、先行事例も参考にしつつ、両者のコミュニケーションの場を多く設けていくことが必要である。
- 新たな加速器技術や小型中性子源の研究開発を進めるとともに、その成果を産業界へ移転し、我が国の産業競争力の強化につなげる取組が重要である。
- さらに、シミュレーション技術の高度化や小型線源の開発、遠隔地からの実験操作などによる施設・装置等の使いやすい仕組みの導入も必要である。
- 装置の巨大化による経費の拡大や、成果まで長期間がかかりリスクが大きいことなどから、先端基礎科学分野では、国が先行投資をして基礎科学を振興し、技術への波及を通じて産業の活性化を促し、生まれた利潤を税金と雇用の拡大によって国民に還元するスキームが重要である。
- また、光・量子ビーム技術は、幅広い分野の基盤技術であり、出口を見据えた研究開発には、省庁連携や関係機関の協力のもと進めることが必要である。
- 限られた資源を有効に活用するため、課題の優先順位を戦略的に検討するとともに、得られた研究成果を強くアピールしていくことが必要である。

## **6. 人材育成について**

### **(1) 現状と課題**

- 光科学技術の分野横断的な性質を利用した、俯瞰力のある高度科学技術人材の育成や起業のモデルトレーニングを行う教育の舞台として、これまでの取

組は成果を上げつつある。この成果を生かし、次代を担う人材育成の場として一層活用していくことが課題である。

- 一方、量子ビーム施設では、装置等の大型化と集中化が進み、大学の学部等では維持管理できなくなってきたために学生が装置に直接触れる機会が減り、装置がブラックボックス化してしまう傾向がある。その結果、装置開発そのものの魅力を学生が感じる機会が減少している。
- さらに、大学や研究機関等における技術職員の減少、測定装置であるビームラインの維持管理や高度化を行うビームラインサイエンティスト、テクニシャンなどの施設や装置を支える人材の安定的な受け入れ先が十分ではない状況がある。
- そのため、測定原理まで踏み込んだ要素技術開発を発展させられる人材の育成を継続的に行っていく必要があることから、今後、大型施設側と大学の連携が一層求められる状況にある。
- これは、光・量子ビーム技術の中核装置である加速器において、特に大切である。SACLAが世界で最もコンパクトなXFELとして実現できたのは、加速器技術に関して世界トップレベルの専門家がいたからこそであり、我が国の優位性を保持し発展させていくためには、次々世代まで見据えた、人材育成の取組が重要となっている。
- 我が国がこれまで培ってきた高度な技術の資源を活用しそれを発展させることを戦略的に進めるという視点をもって、人材育成を大学や研究機関、産業界の連携のもとで計画的に進めることが求められている。

## **(2) 推進方策の方向性**

- 光・量子ビーム技術のような幅広い分野を支える基盤分野の人材育成においては、広く産業界や様々な基礎科学の世界で活躍できる人材の育成を図るべきである。
- 本分野を担っていく若手の人材育成には、学生を含め若手を惹きつける魅力ある最先端研究を推進することに加え、産業界や産業技術を研究する機関を巻き込んで、具体的な出口や成果を提示していくことが重要である。
- また、若手が先端の施設・装置等に直接触れる機会を増やすことが重要であり、リーディング大学院などの先行事例のように研究施設と大学が連携した先導的なプロジェクトや産学連携の共同研究と一体となって、例えば大型施設における長期滞在型の育成と人事交流により、若手人材の育成を推進していくことが必要である。
- 継続的な人材育成の観点からも、今後検討が望まれる次世代研究炉や次期放射光施設などの最先端施設の場においても、積極的な人材育成の取組が行わ

れることが重要である。

- 特に、加速器については人材育成機能が大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（KEK）に集中してきた現状も踏まえ、例えば、国立大学法人総合研究大学院大学による大学院生の受入れ、大学や研究機関等が協力した連携講座の開設などを更に進めることにより、先端加速器に係る専門家の育成を推進することが必要である。さらに、産業分野との連携による社会人の受け入れなども含め、人材育成について検討するべきである。
- また、我が国の最先端施設・装置等を持続的に維持・発展させ、利用研究を拡充していくためにも、専門の技術者の育成とそのキャリアパスを確保するシステムを構築することが必要である。
- 利用を促進するためには、きめ細かい利用支援が不可欠であり、コーディネーターやアドバイザーを育て、ワンストップサービスで対応できる体制づくりが必要である。そのための人材は、利用者コミュニティから育成していくことが最適であり、利用者との連携を密にして人材の発掘と積極的な登用を行うべきと考える。
- さらに、当該分野への新規参入者や利用者の掘り起こしによる裾野の拡大という観点から、トライアルユースなどの活用による利用機会の提供も必要である。
- 特に、若手については、研究の場や触れる機会だけではなく、大学教育の場や研究機関において、例えば企業との共同講座を開設することなどによりキャリアの展開をイメージさせることが有効である。
- また、光科学技術と量子ビーム技術が、本格的な利用期になってきたことを踏まえると、光や量子ビームを総合的に使った技術開発や基盤技術開発を行うことで、広く光や量子ビームを活用できる人材を育成すべきであり、また、学際的に応用可能性を重視して取り組んでいくことも重要である。
- 光拠点事業においては、「光科学」を題材にして、真に新しいものを生み出すことを目的とした研究活動を行える人材、基礎科学から産業界まで幅広く活躍できる人材を育てる取組を行っており、こうしたことも参考にしつつ、産業界とも連携した人材育成により、国全体の課題解決や日本の成長につなげていくことが必要である。
- 光・量子ビーム技術は、あらゆる科学技術の基盤的要素として利用されている。これらの利用する研究者・技術者が、単なる利用者ではなく、光・量子ビーム技術そのものを理解し、さらに高い要求を光・量子ビーム技術分野にフィードバックすることが、新しい分野を生み出すためにも重要である。そのためには、これら利用者に対する教育も推進すべき課題となる。
- また、国際的な共同研究、欧米やアジアの研究者が集う研究集会を主導して

開催することにより、次世代の光・量子科学を支える優秀で国際的な人材を我が国から多く輩出することを目指すことが重要である。

## **7. 国際的な取組について**

### **(1) 現状と課題**

- 光・量子ビーム技術の研究開発は、欧米を中心とした各国においてもイノベーションの源泉として積極的に進められている。大規模施策やプロジェクトの推進においては、一国では人も資源も限られているため、今後、大型施設の建設や関連する設備等の設計・製作等については、一国で整備しなければならない施設と、アジア地域をはじめとした国外との共同プロジェクトで進めていける可能性のある施設を精査するなど、戦略的な国際協力が重要となってきている。
- 我が国においては、各研究機関において二国間協力や多国間協力により研究開発や人材交流が個々に進めているが、我が国全体としての戦略的な取組は図られていない。特に、アジア・オセアニア地域については、これまでもアジア・オセアニア放射光フォーラム（AOF SRR）やアジア・オセアニア中性子散乱協会（AONSA）などに積極的に参画しているところであるが、我が国のプレゼンスの向上、国際競争力の強化に向けて、一層の連携や主導的な取組の強化を図っていくことが課題である。
- また、研究開発の着実な高度化のためには、施設間の相補・融合利用によるサイエンスのピークを引き上げ新たな研究分野を切り開く技術開発の推進が必要であり、そのためにも主要な海外の研究機関との積極的な連携・協力の更なる推進が重要である。
- 中国、台湾、韓国、シンガポールなどアジア諸地域において、光・量子ビーム技術に積極的な投資が進められ、めざましい成果が上げられている。このような状況を踏まえ、我が国でも戦略的な連携体制をとっていくことで、アジア地域における我が国の優位性を維持することが急務である。一方で、アジア諸地域の量子ビーム施設では我が国が開発した最先端技術を活用していることも多く、我が国が常に最先端の技術開発を推進することにより、この地域全体の裾野の拡大に貢献していくことも重要である。

### **(2) 推進方策の方向性**

- 光・量子ビーム技術分野における国際協力を戦略的に進めていくためには、いくつかの研究開発領域ごとに国内関係機関をネットワーク化し、国際協力

の進め方や各機関の果たすべき役割について、検討し調整できる仕組みの構築が必要である。

- また、国際的取組については、我が国の強みを活かした国際競争の観点から、知的財産権の扱いや他国の情勢などを考慮しつつ、常に国際競争力を維持向上していけるよう、先端施設の戦略的な活用が必要である
- 一方、日本の先端施設で研究した多くの外国人が母国で中核的研究者として活躍していることや、大型施設や大型プロジェクトにおいては一国のみではできない状況になってきていることも踏まえ、特にアジアでの連携・協力やネットワークの構築、国際共同プロジェクトの推進を通じて頭脳循環の拠点を形成していくことが必要である。

## **8. 今後5年程度に集中して取り組むべき課題等について**

### **(1) 重点的な取組事項**

- 光科学技術及び量子科学技術は、ナノテクノロジー、ライフサイエンス、IT、環境等の広範な科学技術や産業応用に必要不可欠な基盤技術であり、新しい原理・現象の解明に留まらず、既存の産業分野を高度化すると共に、新たな産業を生み出し、我が国の国際競争力を強化するキーテクノロジーである。
- 基盤技術として横断的・統合的利用に供される光・量子ビーム技術は、最先端の技術であり続ける必要がある。新規アイデアに基づく先端的な基盤技術開発を継続し、将来の利用研究の礎とするとともに、課題解決に向けた研究開発を強化し、開発の成果を社会に還元していくことが重要である。
- そのため、今後の研究開発に関しては、これまで注力した研究開発の成果を最大限に活用し、課題解決に向けた先導的な取組として今後5年程度で一定の成果が出るものを重点的に支援していくべきである。
- 具体的には、我が国の光・量子ビーム研究開発における融合・連携を促進させ、産学官の多様な研究者が参画できる研究環境を形成し、基礎研究から産業応用・基盤技術開発にいたる幅広い新たなアプローチによる、他国の追随を許さない世界トップレベルの研究開発を先導する必要がある。
- これにより、これまでの優位性を活用し、開発開始から5～10年程度の間で、開発された技術を活用した世界トップクラスの研究が行われることによる、ものづくり力をはじめとした我が国の強みを活かした産業の強化、イノベーションの創出を目指すことが重要である。
- なお、光・量子ビーム技術では、光源や検出手段の高度化に伴い、複数の手

法が利用可能となっており、一部の研究分野では連携利用が進んでいる。しかしながら、光源それぞれの目的や性質等は異なり、技術課題が共通する課題がある一方で、個別の課題もある。このことに留意した連携体制を整え、相乗効果と相補性を最大限に活用できるようにすることが必要である。

○以上を踏まえ、今後の当面の光・量子ビーム研究開発においては、下記の事項を重点的に推進することが必要である。

#### ■産業競争力の強化を実現する先導的研究開発によるイノベーションの促進

我が国の国際競争力の強化には、我が国の強みである光・量子ビーム技術における先端研究等を、様々な産業分野での融合的かつ横断的な利用に繋げていくこと、課題解決に向けて大学、研究機関、企業等が垣根を越えて連携し、様々な知恵と技術を積極的に持ち寄って、新たな価値を創造していくなどのオープンイノベーションが必要である。そのため、課題を持つ企業等を巻き込みながら、従来の経験則や網羅的解析に基づくものづくりから、我が国の先端装置・技術等の強みを活かした原理の解明に基づくものづくりへ「ものづくり力」を革新し、それを支える技術開発・研究開発を推進する。これにより、他国の追随を許さない技術と世界トップレベルの先導的研究開発によるイノベーションの実現を図る。

#### ■横断的利用の成功事例となる利用研究とその実現に向けた技術開発の推進

光科学技術と量子ビーム技術が融合する分野では、特に先導的な研究開発・利用研究を期待できるものが多い。そのため、光科学技術と量子ビーム技術の連携を促進し、複数の光源・施設等を統合的・複合的に活用した先導的利用研究とそれを支える技術開発を推進する。これにより、分野融合や境界領域の開拓の推進、横断的利用を行う研究者数の増加、コーディネーターの資質を有した研究者等の育成を図る。

#### ■産業界を含めた利用者の裾野を大きく広げる研究開発等の推進

光・量子ビーム技術は、基礎科学から産業応用まで広範囲の分野を支える基盤技術であり、多様な研究開発を支えるキーテクノロジーとして利用の更なる拡大が必要である。そのため、産業界との連携促進、光・量子ビーム技術を支える革新的な加速器技術等の開発、施設の利便性の向上や利用機会の提供等を通じて、潜在的利用者の掘り起こしや利用分野の開拓等を推進する。これにより、産業応用化と産業利用を含めた利用者層の拡大を図る。

## ■ 研究開発と一体的な若手研究者等の育成の推進

基盤技術である光・量子ビーム技術は常に最先端の技術であり続ける必要があり、その維持・発展には、要素技術開発を発展させられる人材や、幅広い分野で活躍できる人材が必要不可欠である。そのため、研究開発等の取組と一体となって、若手研究者等が先端施設・設備・技術等に触れる機会を設ける取組や産学が連携・協力した取組等により、人材の育成を推進する。これにより、将来の当該分野を担う高度な科学技術人材や、施設等を支える人材の育成を図る。

## (2) 取り組むべき課題解決型研究開発のテーマ

- 上記の重点的推進事項を具体的に実現していくものとして、今後5年程度に集中して取り組むべき課題解決型の研究開発テーマは、「光・量子ビーム融合により基礎研究から産業応用・基盤技術開発にいたる幅広い新たなアプローチによる、グリーン・ライフイノベーションへの貢献」である。
- 例えば、以下のような研究開発が考えられる。

### <グリーンイノベーション>

#### ・ **新エネルギー変換等を目指した光反応ダイナミクスの解明**

グリーンイノベーションの鍵となる化学反応として注目されている光合成や光触媒反応については、分子が吸収した太陽光エネルギーを化学エネルギーに変換するメカニズムの解明が課題となっており、変換過程における物質構造ダイナミクスや電子移動過程を明らかにすることが求められる。

現在、光合成のエネルギー変換過程における膜タンパク質複合体の動的構造等については、主に放射光を利用した解析が進められているところであるが、超高速の化学反応である光合成の初期過程の理解には、フェムト秒からピコ秒の時間分解能が必要である。また、太陽光エネルギーの利用において注目されている、光触媒反応の高効率化の為に、固体と液体の界面で生じる電子移動を伴う化学反応過程の解明が不可欠である。これらは、現行の技術で解析することは不可能である。

そのため、放射光、レーザーに加えてコンパクト ERL のそれぞれの特性（波長、パルス幅など）を利用し、幅広い波長領域でピコからフェムトに至る超高速分光技を駆使して、物質構造の超高速ダイナミクスや固体-液体界面での電子移動過程の研究を進めることにより、光合成の初期過程や光触媒における光電変換過程を明らかにする。

これにより、電子状態変化等も含んだ構造変化を分析することで、新規

触媒開発、エネルギー変換・貯蔵素子等のナノデバイス開発研究等への展開が期待される。

**→ コンパクトERL、放射光、レーザー連携利用**

**・省エネルギー社会の実現を目指した「摩擦」ダイナミクスの解明**

自動車をはじめ様々な工業製品の中で起こる摩擦によるエネルギー損失はGDPの3%とも言われ、これを低減させることがエネルギーの効率的利用のために強く求められている。しかしながら、メカニズム解明のために重要な電子レベルでの解明については、解析プローブのスペックが十分でなかったことから、これまで解析があまり進んでいなかった。

そのため、近年、装置や利用技術が進展してきた中性子（低エネルギー）とミュオン（高エネルギー）を相互に活用して、自動車のエンジン内などで摩擦等によって起こる事象（Tribology）の電子レベルでの解明を目指す研究を推進する。

これにより、航空・宇宙機器、自動車、半導体、ハードディスク分野をはじめとした機械や部品の低摩擦、低摩耗、表面損傷の低減を実現し、省エネルギー社会実現に貢献する。

**→ 中性子とミュオンビーム連携利用**

**・分散エネルギーシステムの実現を目指した電池用電解質膜の高性能化**

分散エネルギーシステムによる安定的なエネルギーの供給と低炭素化の実現で重要な燃料電池の高性能化に対して、燃料電池の心臓部である電解質膜の開発に、量子ビームの「創る」「観る」の機能を活かして貢献する。 $\gamma$ 線、電子線照射によるグラフト重合や放射線架橋を利用して合成されたメタノール用電解質膜は、既にメーカーへ技術移転が行なわれ、携帯電話用の製品化技術として確立されている。

そのため、グラフト重合技術や重イオンビームによる高分子膜の穿孔技術を高度化し、高温作動かつ高耐久性が要求される自動車や家庭用の水素を燃料とする燃料電池に利用可能な固体高分子型電解質膜や触媒電極の研究開発に貢献する。試作された電解質膜の内部でのミクロスケールでの水と水素の動きを、中性子小角散乱装置を使った構造・機能解析により解明し、スーパーコンピュータ等による計算機シミュレーションと対応付けることにより、さらに高性能な電解質膜の設計を行なう。複数の量子ビームとシミュレーションにより製品等のハイレベルな高性能化を可能とする。

これにより、自動車や家庭用の燃料電池やリチウム電池等の研究開発を促進し、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現に貢献することが期待

される。

**→ イオンビーム、 $\gamma$ 線、電子線の「創る」機能と中性子の「観る」機能の連携利用**

**・新物質材料の創出を目指した高エネルギー密度現象の解明と制御**

パワーレーザーで初めて実現できる数百万～1000 万気圧以上の超高圧状態は、従来の物質固有の性質に依存した反応・相転移による構造とは全く異なる新しい物質の生成が期待される新たな反応場である。しかし、超高圧構造相転移の時間スケールはフェムト秒からピコ秒と考えられており、この相転移を駆動する圧縮波面での反応過程は全く未解明である。一方、新しい物質材料の設計や開発には物質状態を理解し制御する必要があるため、数ナノメートルのミクロな高圧構造の核形成過程のフェムト秒単位での解析や、波面とその内部に広がるマクロな相転移の過程のピコ秒単位での解析などが必要不可欠である。

そのため、新たな反応場を生み出すパワーレーザーを使用した超高圧生成技術と、構造相転移の詳細を直接的に観測できるX線自由電子レーザーによるイメージング技術の融合に関する研究開発及び技術開発を推進する。

これにより、材料硬化・長寿命化などの省エネルギー材料開発や、全く新しい省エネルギー加工材料となり得るダイヤモンドより硬い物質をはじめとした従来の技術では実現できない物質材料科学技術に関わるイノベーションに貢献することが期待される。さらに、高エネルギー密度科学研究を展開し、新たな物質科学の開拓を図る。

**→ パワーレーザーとXFEL連携利用**

**<ライフイノベーション>**

**・光触媒反応等の応用を目指した生命の電子構造ダイナミクスの解明**

光触媒反応等をはじめとした化学反応プロセスの解析については、これまで光電子分光法を用いた電子構造の解析が行われてきたが、放射光とレーザーを用いた解析手法がそれぞれ独自に開発され、その知見が統合されることはなかった。また、こうしたことから、材料開発の指針となるような計測データを十分に得ることができなかった。

そのため、これまでの放射光、レーザーに、さらにFELを加えて、これらプローブの融合連携によってはじめて可能となる「超高速分光」を実現し、化学反応における電子構造ダイナミクスの総合的解析がはじめて可能となる研究を推進する。

これにより、超高速分光による化学反応の解析が可能となり、タンパク質の視神経、視覚における構造と機能の解明、表面の触媒反応などの解明を図る。

→ XFEL、放射光、レーザーによる軟X線利用

・ **創薬や機能性材料開発への貢献を目指したタンパク質の化学反応プロセスの解明**

タンパク質の構造情報を基にした創薬や生体機能材料の設計を行う際に、タンパク質の水素原子や外殻電子を含めた分子全体の高精度な構造の解明が必要であるが、従来の結晶構造解析技術でこれらの構造情報を実験的に決定するのは非常に困難であり、既存の化学的常識に依存した議論に終始している状況となっている。

そのため、中性子と放射光のそれぞれの特性（構造解析は放射光、水、水素の挙動は中性子）を利用できる環境を整備し、相補的に利用することにより、生体反応を決定づける水素原子や外殻電子についての構造情報を明らかにする。

これにより、光合成反応や呼吸における反応の化学プロセスの解明や、薬剤等がタンパク質に結合する際の分子論的な理解の進展を図る。生命分子システムの機能発現メカニズムの解明により、新しい方法論による創薬や機能性材料の早期実現が期待される。

→ 中性子と放射光連携利用

＜基盤技術開発＞

・ **光・量子ビーム科学を支える加速器等の高度化・小型化を目指した研究開発の推進**

先端施設・装置・技術等の利用拡大には、小型で維持管理の容易なビーム光源等をはじめとした次世代の加速器技術等の開発が必要である。例えば、中性子分野については、X線のように研究室規模で使用できる小型線源がないため、その利用が大型施設に限られている。また、量子ビーム技術の中核である加速器技術については、これまでの我が国の優位性を更に高めていくことが必要である。装置の小型化とともに、学生やメーカー等産業界の研究者にも簡便に利用できる解析ソフト等を備えたシステムを構築し、人材の育成、応用分野の開拓や潜在的利用者の掘り起こし等に貢献することが重要である。

そのため、大学や研究機関、ものづくり分野の企業等が連携し、装置・機器・技術の高度化・小型化、多様化、施設・装置の省エネ化・低コスト

化を推進する。例えば、レーザーによる粒子加速を含め、加速器技術の更なる高度化、省エネ化を目指し、入射部、出射部、加速部、ガントリー等の小型化・高度化を図る。また、小型陽子加速器を用いた中性子源を構築し、主にもものづくり分野の企業（自動車・航空産業）や大学・研究機関と共同で中性子イメージングに関する研究開発を行い、その有用性を実証する。あわせて、コヒーレント加算技術、先進レーザー増幅技術、高性能光学素子開発やプラズマデバイスなど新規デバイス・材料等の基盤技術開発を推進し、高性能・小型パワーレーザーやそれによる高輝度量子ビーム源の開発を推進する。

これら技術開発の実現により、大型施設等のコンパクト化・低コスト化の実現が期待される。また、自動車のエンジンや燃料電池、飛行機の機体材料など高機能材料の研究開発のスピードアップ、大型構造物の内部の直接可視化等に貢献し、高品位な製品開発や品質保証等に広く活用が期待され、世界トップレベルの研究開発のための基盤を強化し、イノベーションの創出と産業競争力の強化を図る。

#### **→ 装置の高度化・小型化等による光量子ビーム融合連携促進**

- 融合・連携によるイノベーションを創出するため、卓越したリーダーが研究グループを率い、先導的な研究開発を推進するとともに、第一線の研究現場において若手人材の育成を図る。
- また、光・量子ビーム科学に係る戦略的創造研究推進事業などの他の研究開発プロジェクトと積極的に連携し、相乗効果を生み出していくことも期待される。
- 研究開発を強力に推進し、着実に成果へと繋げていくために、PD・POによるプロジェクトマネジメント、情報共有や研究人材の交流等による連携・協力を強化するとともに、例えば学会や産業界等の有識者からなる会議等により、プロジェクト全体の進捗管理や評価等を行っていく体制の構築が必要である。
- また、事業の推進に際しては、毎年度進捗を確認するとともに、中間評価を実施し、内外の研究動向や諸状況も踏まえつつ、計画の見直しや必要に応じた改廃を行って行くことも重要である。
- これら先導的研究開発については、国の公募型研究費により実施することが適切である。

## 9. おわりに

- 光・量子ビーム技術は、先端科学を支える重要な基盤技術であり、持続的な発展と裾野の拡大が必要であるが、成果の創出にはある程度の時間を要するものである。同様に、人材育成等については、中・長期的な観点で戦略的な取組が必要である。
- また、先端科学の発展には、意欲的な若手研究者の育成が不可欠であり、そのためには若手研究者の参画による新しい研究課題・研究分野の開拓を、光・量子ビーム技術分野の全体として重点的に進める必要がある。
- 一方で、国際競争が激しく、研究開発の動向は日夜進捗しており、そうした状況の変化に柔軟に対応していくことも重要である。特に、アジア諸地域の情勢について配慮するべきである。
- そのため、施策の断絶を行うことなく、当該分野の研究開発を推進するとともに、中長期的な課題や国内外の状況の変化等を踏まえ、更なる検討を進める必要がある。
- また、パワーレーザーや大強度連続ビーム中性子源、大型放射光施設等については、世界的な動向も踏まえつつ、我が国全体としての在り方と今後の戦略等について検討していくことが必要な時期になってきている。
- 先導的な取組とその成果の蓄積により、光・量子ビーム研究開発に関連する分野でのプラットフォームの構築、多種光源の利用に通じた研究コーディネーターの育成、また施設の研究開発を担うことのできる人材育成、これまで光・量子ビーム施設を利用したことのない若手人材を含めた新たな利用者・研究者の掘り起こし、さらには施設の申請審査システムなど、光・量子ビーム研究開発の推進における多くの課題が解決され、光・量子ビーム技術が我が国のイノベーションの源泉としての先端研究基盤となることを強く期待する。
- 今後、本報告書を踏まえつつ、光・量子ビーム研究開発の更なる推進に向け取り組んで行くことを期待する。