

量子ビーム研究開発作業部会報告書（中間取りまとめ）
「横断的利用の促進と先端基盤研究開発の推進」
（平成19年6月 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力分野の研究開発に関する委員会量子ビーム研究開発作業部会）
概 要

（中間取りまとめのポイント）

- 量子ビームは複数のビームを相補的に利用することでさらに質の高い成果が得られることから、産業利用を中心として一元的な窓口（量子ビーム利用プラットフォーム）の構築を目指すことが重要であり、段階的に体制を構築していくことが適当。
- 量子ビームに係る基盤技術開発については、汎用性・革新性と応用性が広く、5年程度で実現できる研究テーマを実施すべき。オールジャパンの体制で研究開発を実施するネットワークを構築するとともに、イノベーションの主体である産業界や量子ビーム施設利用者との円滑な情報交換を図ることが適当。
- コーディネータの役割は重要であり、幅広い知識と経験を有する人材や若手研究者を積極的に登用するとともに、関係機関はその処遇に十分配慮すべき。
- 優秀な若手研究者を確保し、最先端の技術開発に一定期間従事させることで人材育成を図るとともに、その後の活躍の場を増やしていくための努力が必要。

1. はじめに（量子ビーム研究開発をめぐる現状）

現在運用中の大型放射光施設(SPring-8)をはじめとして、大強度陽子加速器施設(J-PARC)、RIビームファクトリー(RIBF)、X線自由電子レーザー(XFEL)装置などが運転開始を予定しており、これらの施設により量子ビームの基本的なラインアップはそろい、今後は量子ビームの本格的利用期に入っていくこととなる。

このため、今後は、これら施設を活用した量子ビームの利用促進策と、高度化を目指した先端的な基盤技術開発を着実に実施し、我が国の技術レベルの維持・向上と人材育成を目指した施策が必要である。

2. 量子ビームの横断的利用の促進について

量子ビーム技術は産業への応用可能性が非常に高い技術であるにもかかわらず、これまで産業界における利用が浸透しているわけではない。特に中性子利用分野において、全国的な利用体制を構築し、潜在的なユーザーを開拓していくことが必要である。

量子ビームはビーム種ごとに特徴があることから、複数の量子ビームを使い分け、あるいは相補的に利用していくことによる効果は非常に大きいと期待されている。このため、複数のビーム利用を簡便な手続で可能とするワンストップサービスの提供等が求められる。

これを実現する量子ビーム利用プラットフォームについては、当面は機能の一部分について試行的に実施していくことが適当である。この試行的取組みが一定の成果を得られれば、機能を充実させる等、段階的に体制を構築していくことが適当である。

量子ビーム利用プラットフォームのコーディネータは、複数ビームの利用に関する幅広い知識と経験を有する人材を配置することが望ましい。また、若手研究者を積極的に登用し、イノベーション創出を担う人材として育成することも期待される。関係機関はコーディネータの処遇に十分配慮すべきである。

量子ビーム施設設置者には、プラットフォームとの円滑な連携を図るとともに、施設自体の利便性を高めてゆく努力が期待される。

3. 量子ビーム先端基盤研究開発について

先進的・革新的な加速器技術、計測技術は非常に汎用性が高く、「みる」、「つくる」、「なおす」といった視点からの応用可能性や利用可能性の幅の広い共通的な基盤技術として、開発する意義は極めて高い。

この先端基盤研究開発は、ネットワークの下で必要な情報交換を行いつつ進めることが適当である。全国の関連研究機関が参画し、これらの連携を全国的かつ組織的に行う共通基盤技術プラットフォームを構築することにより、オールジャパンの体制で研究開発を実施することが期待される。

この際、我が国の社会システムを変革するような成果を早急に創出することが求められており、今後10年程度で革新的計測・加工システム等を構築することを考えれば、当該要素技術は5年程度で実現できる研究テーマを実施すべきである。

イノベーションの主体である産業界からのニーズを汲み取り、技術開発目標に反映させていくと同時に、成果も含む研究機関が有するシーズについて不断の情報発信が重要であることから、このような活動を仲立ちする研究推進委員会のような組織を設置することが必要である。研究推進委員会は、産業界を含む利用者との円滑な情報交換を図るため、利用プラットフォームを担う組織内に置き、実際の利用から出てくるニーズを汲み取り、それを研究開発の中にも的確に反映させることが望ましい。

このような体制の下で創出された要素技術は、共通基盤技術プラットフォームにおいてメニュー化し、産業界・研究機関の誰もが利用可能なものにすることが期待される。

本研究開発の中で優秀な若手研究者を確保し、最先端の技術開発に一定の期間従事させることで、量子ビームの最先端のスキルを身につけることが期待されるとともに、研究期間終了後の活躍の場を増やしていくために関係者一同が努力することが必要である。

基盤技術として実施すべき課題として幅広いニーズに応えられる技術は

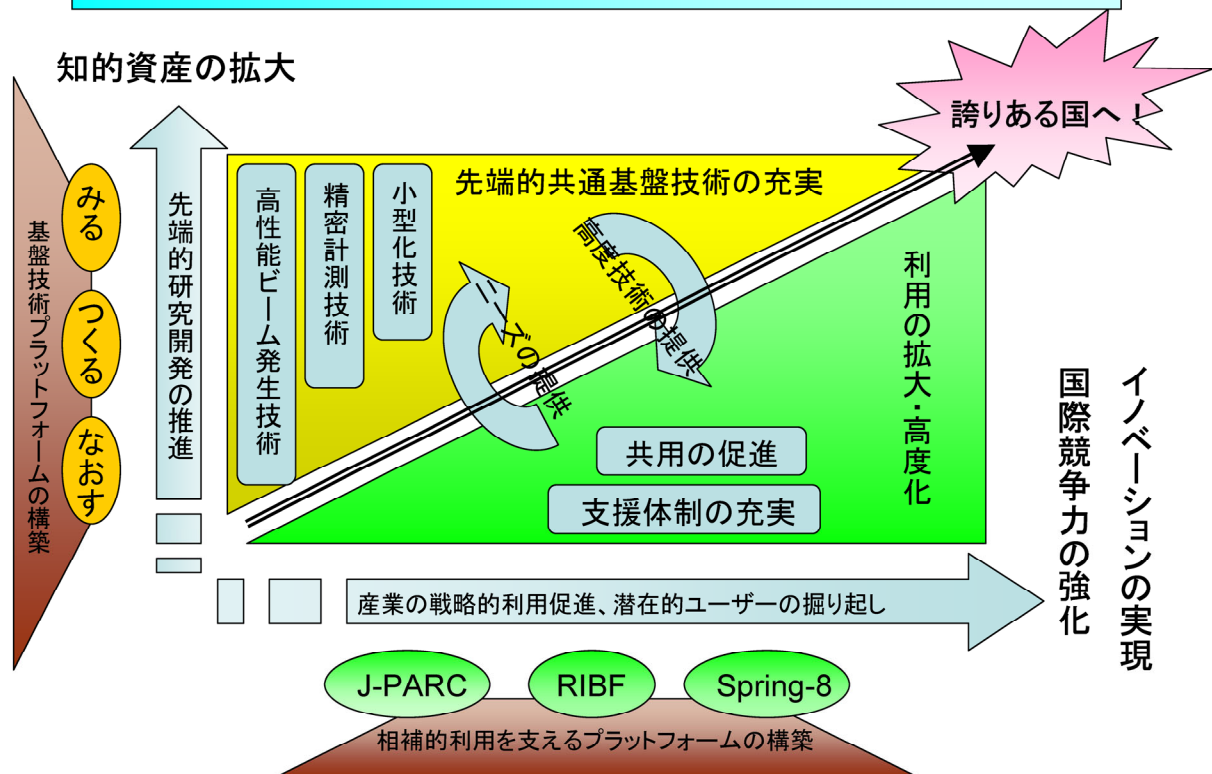
- (i) ビームの質と強度の向上のための技術開発
- (ii) スピンなどビームの新しい性質を利用するための技術開発
- (iii) 汎用性・普及を目指した小型化のための技術開発
- (iv) 精密加工を可能とする技術開発
- (v) 測定の信頼性向上のための技術開発
- (vi) エネルギー低消費型のシステムを目指した技術開発

といった類型に分類される。ここで取り上げるべき技術開発課題は、汎用性・革新性のある技術として、応用先の広さに蓋然性があり、今後5年程度で実現可能性のあるものである。

4. おわりに

本報告の提言を実行に移し、利用の拡大と先端基盤技術の開発という車の両輪とも言うべき2つの軸を強化していくことにより知的資産の充実と国際競争力の強化を図り、もって我が国が世界に対して存在感のある国になることを期待する。

量子ビーム利用の総合的な推進に向けて

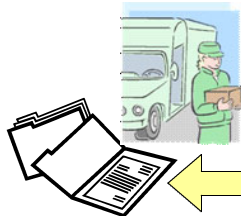


量子ビーム利用プラットフォームにより、利用者はどうなるか？

企業・研究機関



相談



試料の送付

(将来的に)
Mail-inサービスの実施

分析結果

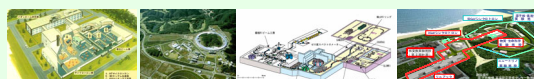
量子ビーム利用プラットフォーム



- 課題の整理・研究計画の立案
- 課題の解決に適切な量子ビーム施設の紹介
- 実際の量子ビーム利用における技術支援
- 利用に際する事務手続の代行

送付

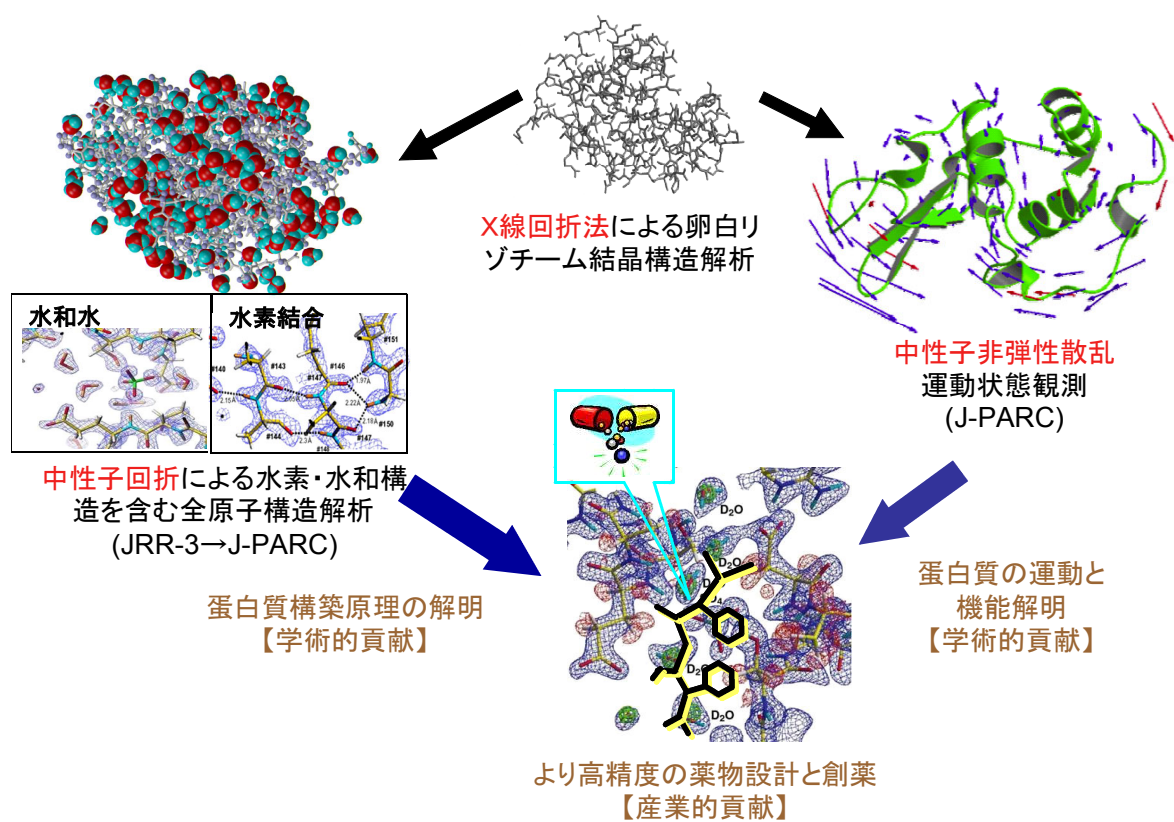
量子ビーム施設



従来、企業等の研究者が自分自身で量子ビーム施設にアプローチし、利用計画を立て、利用の手続をとる必要があったところ、これらの作業をプラットフォームがサポート・代行。**量子ビーム利用に固有の高度な技術的知識を持っていなくても、量子ビーム施設を利用することができるようになる。**

量子ビームの相補的利用の例

中性子・X線回折を用いてタンパク質の分子認識と化学反応を理解する



(要素技術課題例) 中性子集光・整形デバイスの高度化

概要 ビームの集光・整形による中性子実効強度の向上

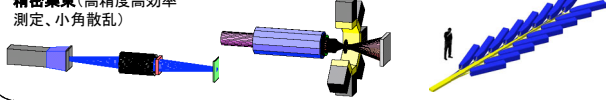
中性子実験の特性(エネルギー、ビーム分散、偏極)に応じた中性子集光光学系の開発

- 中性子スーパーミラー(KBミラー、多重ミラー、楕円ミラー)
- 中性子レンズ(磁気レンズ、物質レンズ)

精密集束(高精度高効率測定、小角散乱)

強集束(微小試料測定)

ビーム分岐(並列ビーム利用)



効果

- 精密集光による高精度高効率測定
- 強集束による微小試料測定
- ビーム分岐による測定装置数の増加
- 中性子源の高強度化に匹敵

【波及効果】

- 水素等軽元素の高感度検出によるエネルギー貯蔵材料の創製
- 局所構造解析等による革新的エレクトロニクス材料・高機能材料の開発
- 蛋白機能解析、特に溶液蛋白会合状態の直接観察による蛋白機能解明
- 磁石内磁区構造の三次元解析によるジスプロシウムのような特に稀少な金属元素を用いない高性能磁石生産技術開発
- 中性子光学の産業化の確立

要求されるスペック

中性子スーパーミラー

- 熱中性子(波長 $\sim 1\text{\AA}$)の集光(高臨界角)
- 開口率の増加(多重鏡)

- 低バックグラウンド(急峻界面・低散乱散乱)
- 曲面精密加工技術

中性子レンズ

- 精密集束性能(小角散乱等に利用)
- 強集束性能(微小試料測定等に利用)
- 熱中性子偏極ビームの集光
- 白色ビームの集光
- 大口径化($\phi 50\text{mm}$)
- 短尺化(熱中性子に対して5m以下)

現在の技術レベル

中性子スーパーミラー

- 大面積・高臨界角スーパーミラー(Niミラーの6.7倍の臨界角)の開発に成功
- 平面スーパーミラーによるビーム輸送系・集束系の実用化
- 単一鏡素子の開発
- 自由曲面加工の表面粗さに課題

中性子レンズ

- 磁気レンズによる精密集光の実用化
- 物質レンズによる強集束の実証
- 冷中性子偏極ビームの集光
- 単色ビームの集光
- レンズ口径 $\phi 30\text{mm}$
- 長尺レンズ(熱中性子に対して10m以上)

今後必要な技術開発

中性子スーパーミラー

- 数1000層にわたる急峻界面多層膜の創成技術の開発
- 超精密形状創成技術の開発(表面粗さの低減と形状精度の向上)
- 大量生産技術開発

中性子レンズ

- 小型スピニングリッパの開発
- 広波長帯域用偏極素子の開発
- より強い磁場発生を実現する磁石材料及びレンズ開発
- 磁気レンズの作成技術改良による価格の低減
- 極薄肉物質レンズの作成技術改良による強集束の実用化

備考・国際的な優位性:

- ・ 1990年代末から現在に至るまで、我が国は、大面積・高臨界角スーパーミラー開発、磁気光学技術等の中性子光学分野において、我が国発の技術革新に基づいて世界を先導
- ・ JRR-3、J-PARCなど幅広い適用が可能

(要素技術課題例) 電子ビームの短バンチ化(ピコ秒以下)技術の開発

レーザーパルスの分割

レーザープラズマカソードによる電子ビーム生成

電子ビームによる放射線誘起反応

プロンプト光パルスによる時間分割測定

電子ビーム(ポンプパルス)

レーザーパルス(プローブパルス)

試料

ガスジェット

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

電子ビーム(プローブパルス)

同一レーザーを現象誘起(ポンプ)と分析(プローブ)に使用

- ポンプ・プローブ間に時間的ずれ(ジッター)はないはず

- 高時間分解能測定

- しかし!

- 電子のエネルギー(速度)のばらつきに起因するジッターが存在

- 時間分解能の悪化

- 高時間分解能の達成には

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- キャピラリー放電管を用いたレーザープラズマ加速により単色電子を短バンチで発生可能に

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

- 短バンチ電子ビームの安定生成が必要

波及効果

高時間分解能時間分割測定

- 時間分解能500fs以下の放射線化学分析システムによるレジスト開発
- タンパク質動的構造解析
- X線DDS+PDT(Photo-Dynamic Therapy、光線力学療法)のための生体水放射線化学分析
- 半導体デバイス動作中の動的な解析により、半導体デバイスの高度化を実現

要求されるスペック

- 100fs(半値幅(rms)の2.4倍)電子バンチの安定生成
- 100fs電子・レーザーとの時間的なずれを500fs以下に抑える
- 1nC/バンチの強度

現在の技術レベル

- 長プラズマチャンネルによる準単色電子ビーム発生
- 外部磁場印可による発生電子ビームの安定化・低エミッタンス化
- ショット毎のエネルギースペクトルが一定でないため、バンチ波形と到達時間にばらつき。数百fs以上の不定な時間的ずれが発生。

今後必要な技術開発

- キャピラリー放電管を用いた単色電子の安定発生技術
- 外部磁場印可によるキャピラリー放電管への電子ビーム入射技術
- シングルショット電子バンチ波形計測技術

備考・国際的な優位性:

- ・ 我が国が準単色電子ビームを最初に生成・計測
- ・ 外部磁場を用いた電子ビーム発生安定化は我が国独自の技術
- ・ 高時間分解能放射線化学分析は我が国が優位