

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的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

目次

| | | |
|-----------------------|-----|----|
| 1. はじめに | ・・・ | 1 |
| 2. 量子ビームの横断的利用の促進について | ・・・ | 3 |
| 3. 量子ビーム先端基盤研究開発について | ・・・ | 7 |
| 4. おわりに | ・・・ | 13 |

(参考資料)

| | | |
|-------------------------------|-----|----|
| 科学技術・学術審議会量子ビーム研究開発作業部会について | ・・・ | 15 |
| 委員名簿 | ・・・ | 17 |
| 審議経過 | ・・・ | 18 |
| 量子ビーム利用の総合的な推進に向けて | ・・・ | 19 |
| 産業利用の窓口としてのプラットフォームの構築に向けて | ・・・ | 20 |
| 量子ビーム基盤技術研究開発・人材育成体制のイメージ | ・・・ | 21 |
| プラットフォーム構想に関するコメント（日本中性子科学会） | ・・・ | 22 |
| プラットフォーム構想に関するコメント（日本放射光学会） | ・・・ | 23 |
| 技術例 | ・・・ | 24 |
| 重点課題抽出のための整理表（その1） | ・・・ | 40 |
| 重点課題抽出のための整理表（その2） | ・・・ | 58 |
| 量子ビームテクノロジーの研究開発・利用推進について（概要） | ・・・ | 60 |
| 量子ビーム研究開発・利用の推進法策について（最終報告）概要 | ・・・ | 62 |

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的基盤研究開発の推進～

1. はじめに（量子ビーム研究開発をめぐる現状）

量子ビームの研究開発とこれに伴う先端的・高度な利用は新しい原理・現象の解明だけにとどまらず、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的ツールであることは明らかである。第3期科学技術基本計画においても、「分野別推進戦略」（平成18年3月28日）の「ナノテクノロジー・材料分野」の中で、「量子ビーム高度利用計測・加工・創製技術」は、今後5年間に政府が取り組むべき「重要な研究開発課題」であると同時に、その中でも特に「ナノ領域最先端計測・加工技術」の開発は、今後5年間に集中的に資源を投入すべき「戦略重点科学技術」として位置づけられている。

また、この度閣議決定された長期戦略指針「イノベーション25」において期待される2025年の社会の変革を実現するための基盤技術として、量子ビームが果たす役割は非常に大きい。

我が国では最先端の大型量子ビーム施設として、現在運用中の大型放射光施設 SPring-8（平成9年度運用開始）をはじめとして、大強度陽子加速器施設（J-PARC）（平成20年度運用開始予定）、RIビームファクトリー（RIBF）（平成19年度運用開始予定）、X線自由電子レーザー（XFEL）装置（平成23年度運用開始予定）など次々と運転開始が予定されている。また、粒子線がん治療の分野で世界をリードする重粒子線がん治療装置（HIMAC）や、JRR-3、TIARAといった量子ビーム施設も引き続き技術革新を支えている。産業応用としての利用が期待されるビームの種類を考えれば、これらの施設により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、これら最先端量子ビーム施設を活用した量子ビームの更なる有効な利用促進策と、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・向上はもとより、継続的な人材育成にも資することを目指した施策を実施してゆくことが必要である。特に間近に迫ったJ-PARC及びRIBFの本格利用に際しては、緊急に全国的な体制を構

築する必要がある。それにはまず、SPring-8 と J-PARC を中心に世界をリードする施設の横断的利用の促進と先端的基盤技術開発の推進のための方策を検討し、中小規模施設や地域との連携にも配慮しつつ、将来的にはより広い量子ビーム技術の普及とさらなる研究開発を図るべきである。

本作業部会では、このような現状認識に基づき、これら量子ビームの利用促進、技術開発の推進及び人材育成の考え方について審議を行い、一定の方向性を得たので、ここに報告書（中間取りまとめ）として取りまとめるものである。

2. 量子ビームの横断的利用の促進について

2-1. 量子ビーム利用の現状を踏まえた課題

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、21世紀の社会が要請する課題解決のためのイノベーション創出基盤技術として大きな可能性を有し、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。これは、利用のための手続きがあまり周知されていないこともあるが、どのビームを利用するとどのような計測・加工等が可能であるか、あるいはそれらのうちどれが最も適したビームかといった点での広報活動が不十分であったことも大きな要因であると考えられる。我が国は世界最先端の量子ビーム施設を有するにもかかわらず、学術研究など特定の利用以外には未だ有効に活用されていない。

これに対しては、放射光の分野では、例えば SPring-8 においていわゆる“お試し利用制度”であるトライアルユース制度を活用し、さらに広報活動も充実させること等により、運用開始直後には低迷していた産業利用率を現在では 20% を超える段階まで引き上げてきた実績がある。一方、中性子の分野では、放射光と相補的な計測手段であるにもかかわらず、これまでほとんど産業界単独の利用はなかった。そこで、平成 18 年度には、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 及び JRR-4 を活用したトライアルユース制度を開始し、初年度には 58 課題の応募があり、52 課題を採択、実施したところである。

このように放射光の利用については産業界における利用の有効性にかかる認知度も上がってきたと考えられるが、中性子については未だ産業界も手探りの状態である。J-PARC の運用開始が間近に迫ったことを考えれば、中性子利用分野においても、地域の期待にも配慮しつつ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とともに、研究成果の一層のアピールが必要である。

2-2. 横断的利用のメリット

例えばタンパク質の構造解析を例に取れば、放射光で基本的な骨格を効率的に確定した後に、水素の配置を中性子で決定することにより全構造が解明でき、機能の解明に役立つ。また、イオンビームで改質した材料の評価を放

射光で実施するなど、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。

しかしながら、現在、ユーザーは自らがあらかじめ研究課題を解決する量子ビーム種とその利用方法を検討した上で、各量子ビーム施設の窓口個別にアプローチし、利用申請等の手続きをする必要があるという点で、初心者ユーザーにとっては非常に取り付きにくく敬遠されるものとなっている。また、これらのビーム源は地理的に離れていることもデメリットである。

これを解決するためには、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と、小型で汎用性のあるユーザーサイトに設置可能なビーム源の開発が求められる。また、初心者のユーザーに対しては、測定の目的さえ告げれば適切な測定手段・方法を提案し、実験の実施まで支援する体制の整備が求められる。

2-3. 求められる機能と当面実施すべきこと

このような横断的利用を進めていく上で、利用のしやすい体制整備、つまり量子ビーム利用プラットフォームの構築が必要である。平成18年6月にまとめられた本作業部会の報告書「量子ビームテクノロジーの研究開発・利用促進について」において、量子ビーム利用プラットフォームに必要な機能としては以下のものがあげられている。

- ① ワンストップ窓口機能
- ② 研究計画立案・実験の支援
- ③ 各種ビーム利用研究の課題公募実施
- ④ 広報・普及
- ⑤ メールインサービスなど分析代行サービスの実施
- ⑥ 人材育成機能
- ⑦ 各種量子ビーム施設の横断的連携の取りまとめ

将来的には、これら機能を全て備えたプラットフォーム組織の構築が必要であるが、ビームによって、ユーザーの成熟度が異なる現状、各施設において産業利用のための取組みが強化されつつあることを踏まえれば、ユーザーの無用な混乱を招かないという意味でも、当面は機能の一部について試行的に実施していくことが適当である。

例えば、放射光と中性子の相補的利用という観点からすれば、それぞれの

施設に応募のあった課題について、他のビームの利用可能性について検討し、有効であれば課題を融通しあう体制の構築や、相補的な利用によって生み出された成果、利用申請の仕組みについて合同で広報活動を行うことなどについてまずは取組むべきである。さらに、利用可能なビーム種を増やすという意味で、この仕組みの中でイオンビームや RI ビームについてもトライアルユースの対象に加えていくことも重要である。

このような試行的取組みが一定の成果を得られれば、ミュオンなどさらなるビーム種の拡大や、共同利用の努力がなされてはいるものの資金や制度面での困難等からこれまで産業界の利用はあまり進んでいない大学等の小型施設への展開も行うとともに、量子ビーム利用プラットフォームとしての機能を充実させるなど、段階的に体制を構築していくことが適当である。

広報活動に当たっては、放射光・中性子のみならず、ミュオン等のこれまで産業界にとって未知の技術を紹介するとともに、今まで利用が十分にはされてこなかったライフサイエンス分野等における新種発酵微生物の創造（品種改良）や原産地検知など具体的に活用可能と考えられる事例も含め、量子ビームの応用可能性の拡がりと魅力を可視的にするよう心がけるべきである。

なお、この構想が実現するかどうかは、関連する学協会の緊密な連携にかかっていることに留意すべきである。

2-4. 利用プラットフォームを担う人材（コーディネータ）について

ユーザーを支援する人材としてのコーディネータについては、複数ビーム（特に放射光及び中性子）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、幅広い分野で経験を積んできた企業の研究開発者に量子ビームの特徴を理解してもらい、コーディネータとしての役割を担ってもらうことも有効である。一方で、課題解決のポテンシャルを有する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。いずれにせよ、コーディネータは量子ビームの産業利用に関して強い意欲をもってリードする人材でなければならず、適材であれば他の定職に在職のままでも、定年退職者でも構わない。

この際、サイエンスと産業利用のコーディネータが協力体制を築くことが重要である。このため、例えば、公募により人材を集め、産業利用の知見を

有する企業等の退職者と若手研究者数名からなる、専門分野に配慮したコーディネータチームを編成することなども有効であると考えられる。

また、イノベーション創出を担うコーディネータは、その役割の重要性から、成果によって評価されるべきであり、それに伴って、十分な責任と権限を明確に付与されるべきである。関係機関は、このような人材がイノベーションを実現する重要な担い手であるとの認識をもち、その処遇については十分に配慮すべきである。

2-5. 量子ビーム施設設置者の取り組み

上記の量子ビーム利用プラットフォームの対象施設となる量子ビーム施設の設置者においては、利用プラットフォームとの円滑な連携を図るべきことは言うまでもない。さらに、利用プラットフォームを通じて量子ビームになじみの薄い者を含め幅広い分野から利用者が来訪するようになることに配慮し、施設自体の利便性を高めてゆく努力をすることが期待される。

3. 量子ビーム先端基盤研究開発について

3-1. 先端基盤研究開発の必要性

量子ビーム技術は、ビーム発生・制御技術の高度化に伴って近年大きく発展してきており、製造技術をはじめ、基礎から応用にいたるまでの幅広い分野で活用されており、革新的な成果を生み出し、イノベーションの起爆剤ともいべき存在である。このため、計測・加工技術やビーム発生技術のさらなる高度化が求められる。例えば、国家基幹技術である XFEL は極めて強い X線レーザーを発振し、産業応用の飛躍的な発展も期待される装置であるが、これに必要な技術はリニアコライダーのための要素技術開発から派生してきたものである。このように、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。

3-2. 先端基盤研究開発の進め方

このような利用・応用可能性に着目した研究開発は、これまであまり例がないが、平成13年度から5年計画で行われた先進小型加速器の実証製作・普及事業は、産業から学術まで幅広いユーザーに量子ビーム研究手段を提供するとともに関係する人材を育成すべく実施したものであり、粒子線がん治療をはじめとする放射線利用施設の小型化につながる要素技術の提供など一定の成果を挙げていることから、一つの事例として参考にすべきである。当該事業では、取りまとめ機関を中核にして参加機関がネットワークを構築しながら一つの目標達成に向けて研究開発を行った。

ここで目指している先端基盤研究開発も同様に、ネットワークの下で必要な情報交換を行いつつ、研究開発を実施することが目標を効果的に達成する上で適当であると考えられる。国公立・私立の大学や研究開発法人等を含む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、我が国が取り組むべき量子ビーム関連重点課題に集中投資することから、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年間程度で実現できる研究テーマを実施すべきである。また、当然のことであるが、「みる」、「つくる」、「なおす」というニーズに幅広く応えられるような研究課題を抽出していくことが必要である。

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の的確に反映させることが望ましい。このような、より効率的な情報交換と的確な成果の創出を目指す体制を検討すべきである。

また、開発すべき要素技術ごとに全国的なプロジェクトチームを構築し、そのチームリーダーは、ポスドク等の若手研究者の活用などにあたって、リーダーシップをもって経費の確保及び関係機関との調整等を行うことが期待される。

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なることが期待される。

3-3. 人材育成の進め方

量子ビーム利用・開発の分野において、必要な技術レベルを維持し、高度な人材を確保していくという意味でも基盤技術研究開発は重要である。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付けることが期待されるとともに、研究期間終了後には、引き続き研究を継続する、利用プラットフォームにおける高いレベルのコーディネータとして従事する、企業における指導者的な役割を果たすなど、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。

3-4. 基盤技術プラットフォーム構築に向けて当面重点的に進めるべき課題

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としては以下の類型に分類される。

- (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

現在、産業利用を目指した量子ビームの技術開発は、それぞれの分野で取り組まれているが、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とする。

この観点から、今後5年程度で重点的に進めるべき課題としては、以下のようなものが例として考えられる。(①～⑯の数字は参考資料の技術例に対応。)

(i) ビームの質と強度の向上のための技術開発

○高効率中性子発生ターゲット（参考資料①）の開発と中性子集光・整形デバイス（参考資料②）の高度化

（大強度化と精密収束等により、中性子によるタンパク質等構造解析時間の大幅な短縮や微小試料の計測を可能にするとともに、装置の小型化を実現する技術）

○マルチビームクライストロン（参考資料③）や、高周波空洞と短パルスレーザー（参考資料④）、高電界超伝導高周波加速器（参考資料⑤）等による、電子ビーム源の高品質化・大強度化技術の開発

（ピンポイントX線薬品送達がん治療や原子カプラント等のオンサイト保全に必要な技術）

○電子ビームの短バンチ化（ピコ秒以下）技術の開発（参考資料⑥）

(半導体デバイス動作中の動的な解析を実現し半導体デバイスの高度化を実現する等のために必要な技術)

○高量子効率フォトカソード RF ガンの技術開発 (参考資料⑦)

(生体での薬剤の効果を測定するために必要な装置の小型化、巨大電子加速器の電子源等に必要な技術)

○マイクロイオンビーム形成技術の高度化 (参考資料⑭) (後掲)

○レーザー蓄積装置の高度化 (参考資料⑧)

(電子ビームの高度化と並んで、小型 X 線源の大強度化のための要素技術)

等

(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

○中性子偏極デバイスの高度化 (参考資料⑨)

(中性子の特性を最大限に活用し、新機能性磁性材料の開発や、水素吸蔵材料内の水素位置情報の高精度解析などを実現するために必要な技術)

○高偏極陽電子ビームの開発 (参考資料⑩)

(半導体材料や原子力材料の構造・状態や欠陥を詳細に解析するために高品位な陽電子ビームの利用が不可欠)

等

また上記をはじめ、偏光した放射光やミュオンスピン回転などの量子ビーム特有の性質を産業応用するための技術開発が期待される。

(iii) 汎用性・普及を目指した小型化のための技術開発

○高効率中性子発生ターゲット (参考資料①) の開発と 中性子集光・整形デバイス (参考資料②) の高度化 (再掲)

- 高温超伝導コイルの長尺化等の開発（参考資料⑪）
（冷凍機を含めたシステムとしての超伝導加速器の小型化・高効率化を実現し、重イオン加速器を広く普及させるために必要な技術）

- 位相回転技術（参考資料⑫）等の、レーザー加速イオン・陽子ビームの高品位化・大強度化を可能とする技術
（加速器の小型化が可能になるレーザー加速イオン源を多方面に応用可能にするために必要な技術）

等

（iv）精密加工を可能とする技術開発

- イオン種・エネルギーの迅速な可変制御技術（参考資料⑬）
（超精密加工やイオンビーム育種の高度化を下支えする技術）

- マイクロイオンビーム形成・照射制御技術の高度化（参考資料⑭）
（超精密加工やイオンビーム育種の高度化を下支えする技術）

等

また、EUV（極端紫外線）を利用した微細加工技術の高度化についても、半導体等の製造プロセスの革新という観点から期待が大きい。

（v）測定の信頼性向上のための技術開発

- タンパク質結晶作製（参考資料⑮）、高温超伝導材料の調整などの試料調整技術の高度化
（ビーム利用に必要な試料の準備を容易にし、産業利用の拡大を下支えする技術）

- 高感度・高分解能の中性子検出技術（参考資料⑯）や2次元ガンマ線検出技術など、ビームの高度化に対応した計測技術の高度化
（これまで見えなかった元素の検出や、測定効率の向上に貢献し、利用の高度化を下支えする技術）

○標準物質作成・分析法の標準化に向けた研究開発

(ビーム利用による各種測定・分析の精密性・信頼性を高め、産業利用の拡大を下支えする技術)

等

(vi) エネルギー低消費型のシステムを目指した技術開発

上記の技術開発を進めると同時に、エネルギー消費の少ないシステムを実現することも、ランニングコスト低減などの観点から重要である。例えば、高温超伝導コイルの交流磁石への応用やサイクロトロンの高周波空洞の超伝導化など、その実現可能性について検討を行うべきである。

また、将来的に有望な技術としては、レーザー駆動による粒子加速システムや、近年その応用可能性が認識され始めてきたミュオンに係る各種技術がある。これらについても着実に次世代の技術として研究開発を推進すべきである。ミュオンに係る各種技術の例としては、ミュオンをプローブしたNMRの開発や、低速ミュオン及び尖端ミュオンビームによる微小・薄膜試料計測技術、ミュオンラジオグラフィなどがある。

3-5. 先端基盤研究開発にあたっての配慮

なお、中性子光学系など、一般に普及していないビーム種を利用するデバイスの開発に当たっては、放射光の場合のX線源のように身近に小型の線源がないために、大型ビーム施設の利用に依存しなければならない。したがって、当該ビーム施設設置者の理解と協力の下、デバイス評価を適時に行うことができるようにするなど、技術開発を効率的に進め、成果を速やかに創出できる環境を整えることが望ましい。

さらに、これらの先端基盤研究開発によって測定データの複雑化・大容量化が予想されるが、利用プラットフォームによって量子ビームになじみの薄い利用が増えることも踏まえ、ユーザーフレンドリーなデータ計測・解析システムを開発しておくことも重要である。この例としては、スペクトル解釈の物理モデルへの可視化技術、試料測定的全自動化中性子を利用したことの無い者でもわかりやすい解析結果の自動処理ソフトウェアの開発等がある。

4. おわりに

量子ビーム技術は、「みる」「つくる」「なおす」手段として、今後とも産業界の基盤を支えるとともに、先端的な科学技術・学術を先導することのできる非常に有効なツールである。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、いわば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。

参 考 资 料

科学技術・学術審議会量子ビーム研究開発作業部会について

平成19年4月26日

1. 概要

量子ビームテクノロジーは、ビーム発生・制御技術の高度化に伴って近年大きく発展しており、製造技術をはじめ、基礎から応用に至るまでの幅広い分野で活用されており、社会システムの変革とブレイクスルーに不可欠な技術となっている。

量子ビームテクノロジーにおいては特に加速器技術の寄与が大きいため、利用・応用可能性の拡がりに重点をおき、今後の我が国のイノベーション創出に必要なとされる加速器開発・利用技術を先導していくという観点から、研究開発課題の抽出、研究実施体制及び利用の促進策について議論する。

2. 議論の進め方

科学技術・学術審議会 原子力分野の研究開発に関する委員会 の下に設置された量子ビーム研究開発作業部会において、4～5月に3回程度の議論を経て、報告書とりまとめ。

3. 審議事項

- 量子ビームの応用「観る（観察）」「創る（加工）」「治す（医療）」という観点から各加速器関連技術を整理し、その現状、諸外国との比較、今後の課題等を確認する。
- その整理に基づいて、我が国として取り組むべき重点研究開発テーマを抽出し、研究体制について議論する。
- また、量子ビームの利用促進を図る「量子ビームプラットフォーム」構想について、その具体化に向けた議論を行う。

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における作業部会の設置について

平成19年2月15日
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決定

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運営規則第2条第1項に基づき、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に以下の作業部会を設置する。

| 名 称 | 調 査 検 討 事 項 |
|-------------------|--|
| 原子力研究開発作業部会 | 概算要求に先立ち行う事前評価を専門的観点から実施するとともに、原子力分野の研究開発に関する諸課題について調査検討する（他の作業部会の調査検討事項を除く。）。 |
| R I ・ 研究所等廃棄物作業部会 | 「原子力政策大綱」において、低レベル放射性廃棄物の処分方法を早急に明確にして、その実現に向けて計画的に取り組むことが重要との指摘を受けている状況などを踏まえて、R I ・ 研究所等廃棄物に関する政策課題について調査検討する。 |
| 核融合研究作業部会 | I T E R 計画の本格化や幅広いアプローチの始動等、核融合研究が新たなフェーズに入ったことを踏まえ、今後の我が国における核融合研究に関する新たな展開について調査検討する。 |
| 量子ビーム研究開発作業部会 | 我が国の基幹的な科学技術インフラである量子ビーム技術について、今後の重要な研究開発の進め方、横断的利用環境の整備等の政策課題について調査検討する。 |
| 大強度陽子加速器計画評価作業部会 | 大強度陽子加速器（J - P A R C）計画について、平成20年度の供用開始を目指して施設等の建設が順調に進捗しているところであることから、J - P A R C を円滑に活用するための適切な施設運用・利用体制等について調査検討する。 |

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
委員名簿

| | 氏名 | 所属・役職 |
|----|-------|--|
| 主査 | 井上 信 | 京都大学名誉教授 |
| | 上坂 充 | 東京大学大学院工学系研究科教授 |
| | 浦川 順治 | 高エネルギー加速器研究機構教授 / 総合研究大学院大学教授 |
| | 神谷 研二 | 広島大学原爆放射線医科学研究所教授 |
| | 神田 玲子 | 独立行政法人放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター規制科学総合研究グループ リスクコミュニケーション手法開発チームリーダー |
| | 田川 精一 | 大阪大学産業科学研究所教授 |
| | 田中 隆治 | サントリー株式会社技術監 / 財団法人サントリー生物有機化学研究所副理事長 |
| | 鳥養 映子 | 山梨大学大学院医学工学総合教育部教授 |
| | 中西 友子 | 東京大学大学院農学生命科学研究科教授 |
| | 庭野 征夫 | 株式会社東芝取締役・代表執行役副社長 |
| | 橋本 治 | 東北大学大学院理学研究科教授 |

(五十音順)
(平成19年6月現在)

審 議 経 過

○量子ビーム研究開発作業部会（第1回）

日 時 平成19年4月26日（木）16：00～18：00
場 所 文部科学省ビル10階 研究振興局会議室
議 題 （1）量子ビームプラットフォーム構想について
（2）量子ビーム基盤技術研究開発と人材育成について
（3）その他

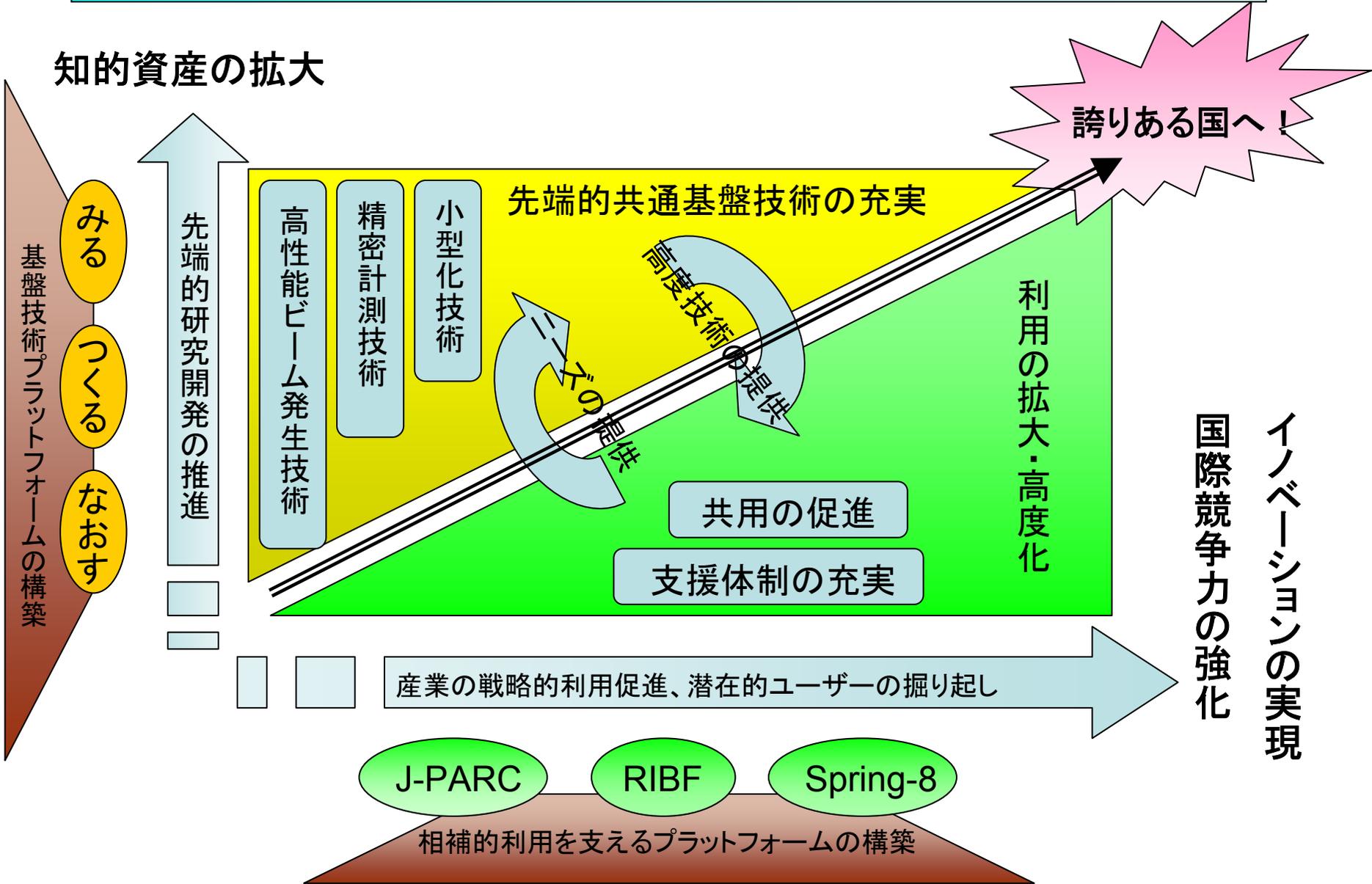
○量子ビーム研究開発作業部会（第2回）

日 時 平成19年5月16日（水）16：00～18：00
場 所 文部科学省ビル10階 研究振興局会議室
議 題 （1）量子ビームプラットフォーム構想について
（2）量子ビーム基盤技術研究開発と人材育成について
（3）報告書（中間取りまとめ）骨子（案）について

○量子ビーム研究開発作業部会（第3回）

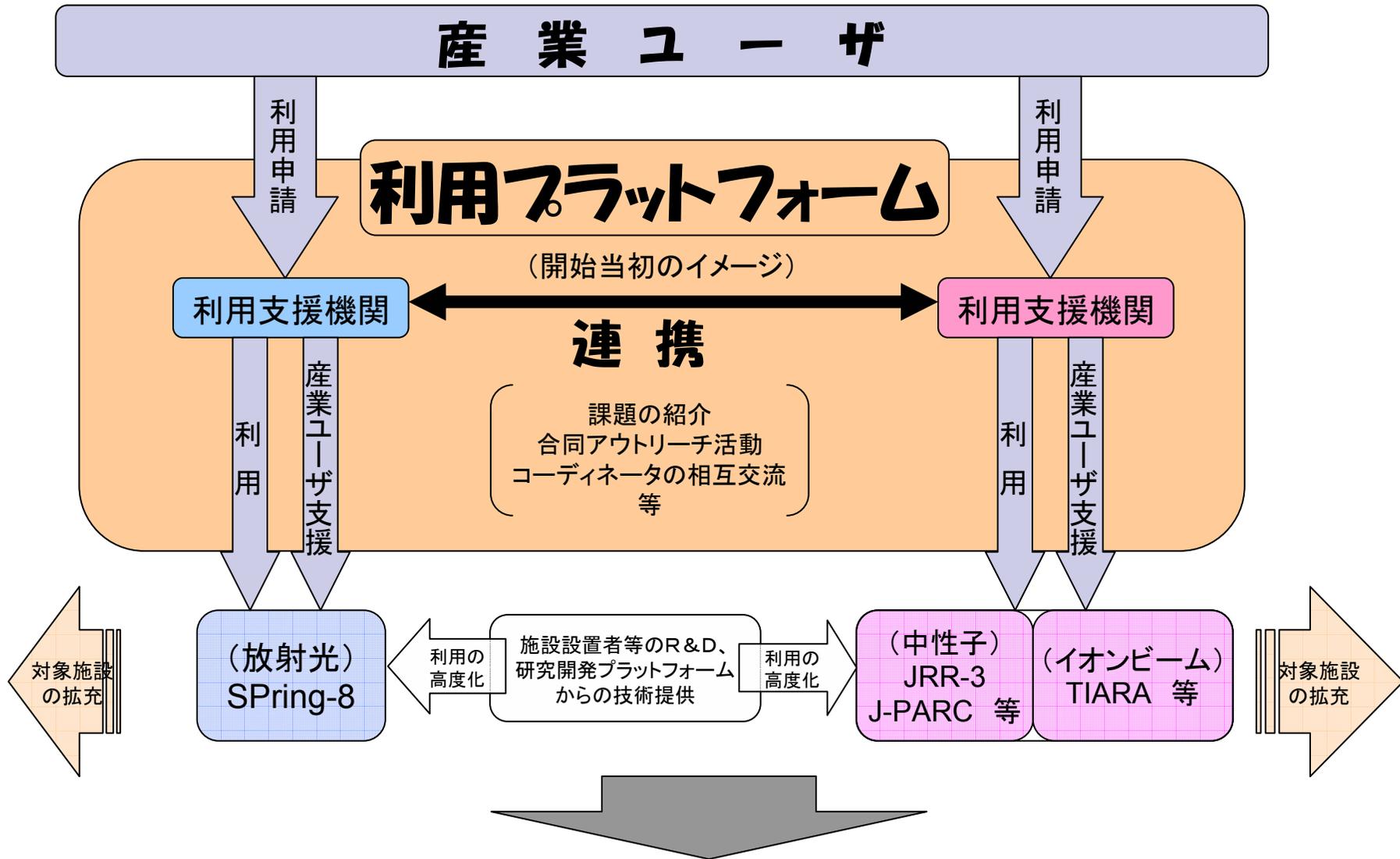
日 時 平成19年5月28日（月）16：00～18：00
場 所 文部科学省ビル10階 研究振興局会議室
議 題 （1）中間取りまとめ（案）について
（2）その他

量子ビーム利用の総合的な推進に向けて



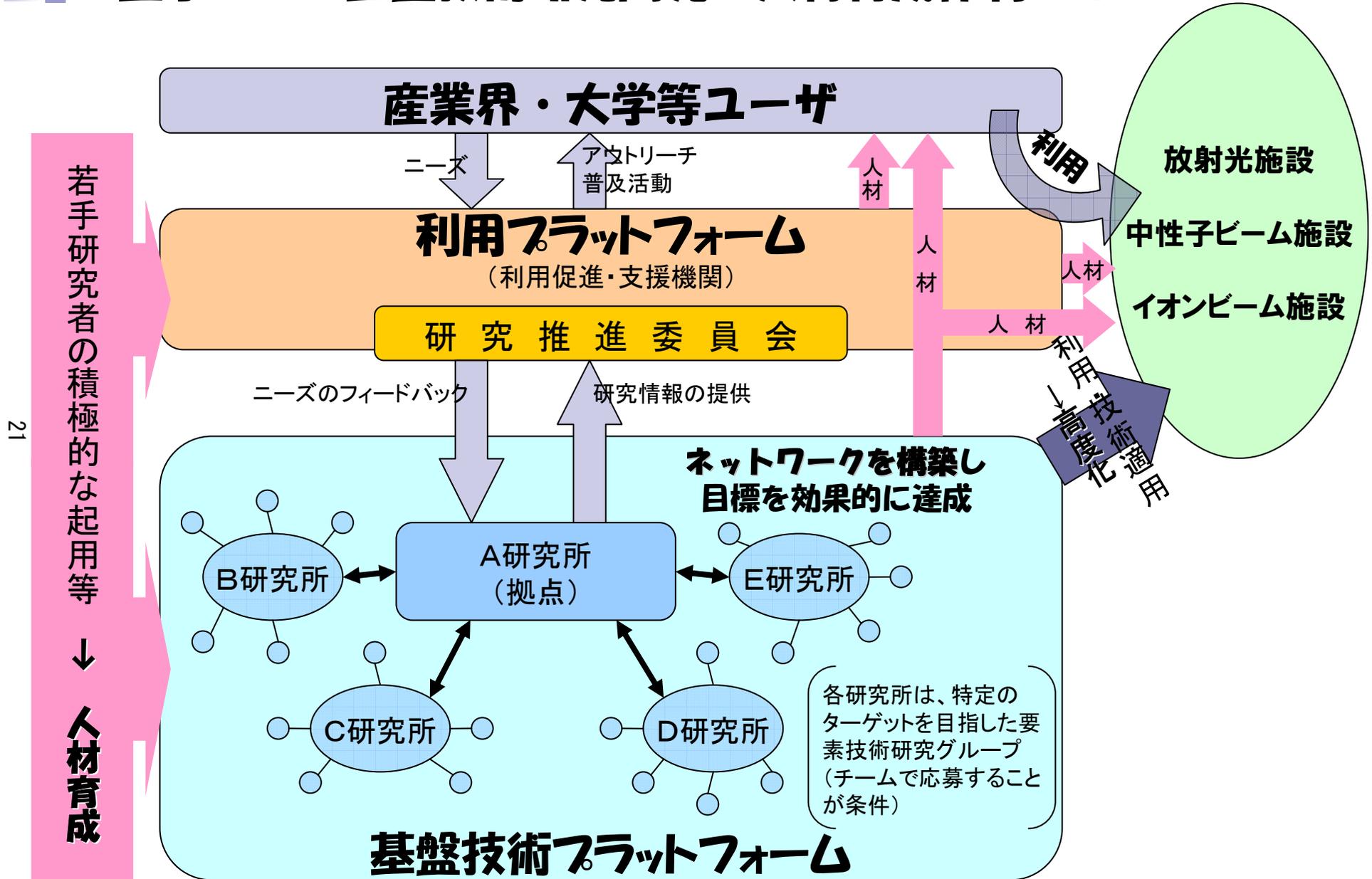
産業利用の窓口としてのプラットフォームの構築に向けて

20



まずは産業界のトライアルユース的な利用のサポートを中心として、
ユーザ層、対象施設の拡がり等をみながら、
ワンストップサービスを目指した次の段階へ移行することが適当か

量子ビーム基盤技術研究開発・人材育成体制のイメージ



21

⇒ 革新的量子ビーム技術の確立・高度人材の育成とスキルの維持 【Science から Technology へ】

プラットフォーム構想に関するコメント
(日本中性子科学会)

第8節 前期量子ビームプラットフォームの推進

前期日本中性子科学会大型施設共用問題特別委員会で、量子ビームプラットフォームに対応する種々の機能を持った中性子ビームプラットフォームの提案を行った(平成18年、日本中性子科学会大型施設共用問題特別委員会、最終報告、「包括的中性子利用のあり方について」、図表0-1参照)。将来的には、人的・経済的に独立した組織の設立が理想ではあるが、現状の組織的、経済的状况を勘案するとその実現は容易ではない。しかし、現実には2年足らずのうちにJ-PARCが稼働し、MLFにビーム供給が始まる現状を鑑み、その立ち上げは急務である。特別委員会では研究のコーディネーションを中心とする前期量子ビームプラットフォームの設立を提案する。

<前期量子ビームプラットフォーム(仮称)の設立提案>

- 1) 研究のコーディネーション、特に量子ビームについて不慣れな産業利用分野でのコーディネーションを業務の中心とする。
- 2) 当面のコーディネーションの必要性が高いと思われる放射光施設と中性子施設における研究課題のコーディネーションに重点をおくが、将来的に中間子、XFELやRIBF等の研究課題コーディネーションも視野に入れる。
- 3) 放射光施設、中性子施設の産業利用申請枠にコーディネーション枠を設ける。
- 4) 現在のSPring-8/JASRIのコーディネーターに対応する組織をJ-PARC/MLFに作り、その連携を図る組織を構築する。その際、機関横断型組織となるため、中性子科学会と放射光学会のアライアンスを構築し、その所掌にするのも一案である。
- 5) コーディネーター選定においては、中性子および放射光実験両方に造詣が深く、広い人脈を持つ人物の選択が肝要である。
- 6) コーディネーターは技術相談のみならず、課題の重要性と各施設の課題実施能力を判断し、もっとも効率的な実験計画を作成する。また、そのための権限を与える必要がある。
- 7) コーディネーターの実際の業務については、別途実務レベルも含んだ議論が必要である。

平成19年4月 日本中性子科学会大型施設共用問題特別委員会
「包括的中性子利用を支える施設運営について」より

プラットフォーム構想に関するコメント
(日本放射光学会)

- 施設の競争力維持に配慮した適切な研究課題の実施が必要
- 研究課題の相談では機械的な振分けではなく、付加価値を付けることが重要
- 相談窓口には見識（複数ビームの相補的利用についての）と人脈の両者を兼ね備えた人物の配置が必要
- 支援者のキャリアパス（施設内に適切なポストを確保するなど）を構築することが重要
- 研究支援・分析業務はアウトソースすることも考慮すべき

① 高効率中性子発生ターゲットシステムの開発

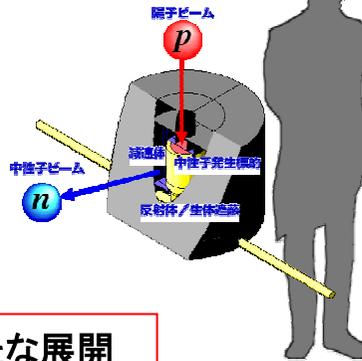
概要

小型・高信頼度・
低エネルギー陽子加速器

高効率中性子発生
ターゲットシステム

高性能中性子光学素子・検出器

量子ビーム(中性子)利用の新たな展開



波及効果

- パルス中性子イメージングによる産業プロセスの実時間モニタリング、原子炉システムの安全確保
- アルツハイマー病などの治療法を目指したタンパク質水溶液構造の研究
- 中性子崩壊などの中性子による基礎物理の展開、新たな中性子制御技術創成
- 硼素中性子捕捉療法中性子源の確立によるガン治療
- PET等核医学用放射性核種の生成
- 量子ビーム人材育成の実地教育が大学などで可能
- 小型中性子源システムの民生化による産業創成

要求されるスペック

- 中性子束
 $>3 \times 10^{13}$ n/sec(据置型)、
 $>1 \times 10^{12}$ n/sec(運搬可能型)
- ターゲットの熱除去
 (Li: >5 kW Be: >30 kW)
- 陽子エネルギーに合わせたターゲット・減速材の最適化
- 直径10mm以下の領域で格段に高い輝度
- ターゲット、減速材の自動交換装置とそれを可能にする低放射化

現在の技術レベル

- 据置型: 10^{12} オーダー(ターゲット発熱約3kW)
- 運搬可能型 10^{11} オーダー(ターゲット発熱約1kW)
- 陽子エネルギーに合わせて最適化されたターゲット・減速材は未検討
- 2cm × 10cm角程度の大きさの部分で比較的輝度が高い減速材
- 自動交換器は未開発、それに適した低放射化も未開発

今後必要な技術開発

- 約30kWのビームパワーに耐える小型加速器用Beターゲット
- 約5kWのビームパワーに耐える小型加速器用Liターゲットシステム
- ロスの少ない陽子ビーム窓材の開発
- 陽子エネルギーに応じた小型・高輝度中性子発生部・中性子減速材の開発(直径10mm以下の領域で格段に高い輝度)
- 放射化が少ないターゲット・減速材の開発
- ターゲット・減速材の自動交換装置の開発

備考・国際的な優位性: 中性子線源開発、中性子光学素子開発、検出器開発では我が国が世界をリードしている。陽子加速器ライナックでは世界最先端の技術力で、J-PARC開発で経験も豊富である。

② 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

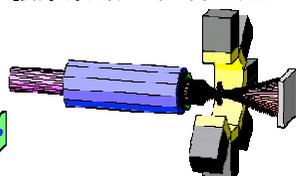
中性子実験の特性(エネルギー、ビーム分散、偏極)に応じた中性子集光光学系の開発

- 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)

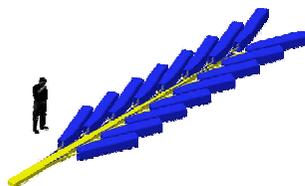
精密集束(高精度高効率測定、小角散乱)



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(多重鏡化)



- 低バックグラウンド(急峻界面・低散漫散乱)
- 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

- 小型スピンドリッパーの開発
- 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

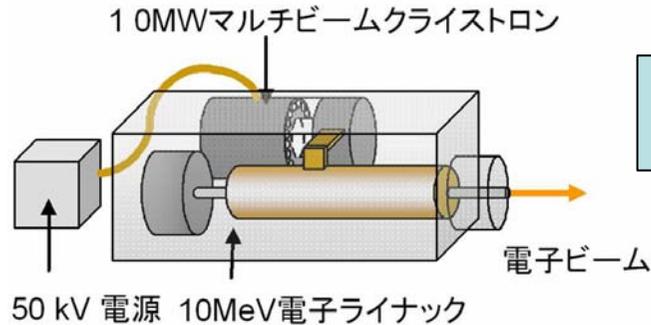
備考・国際的な優位性:

- 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

③ 電子ビーム源の高品質化・大強度化技術の開発(マルチビームクライストロンの場合)

概要

(例) Xバンドマルチビームクライストロンの開発

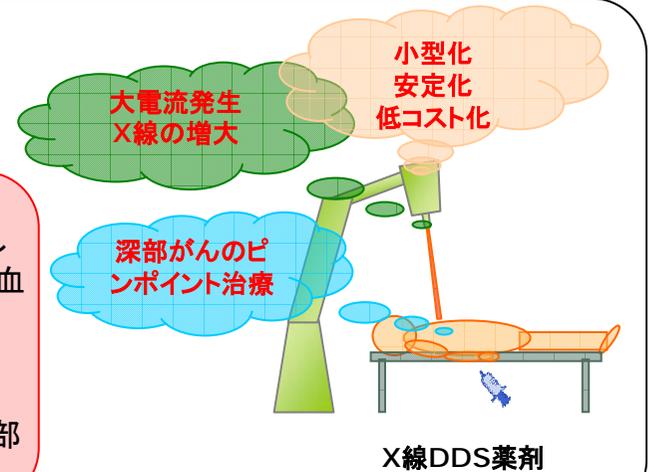


効果

- 小型化、安定化、低コスト化
- 大電流発生、X線の増大

【波及効果】

- コンプトン散乱単色X線源としてタンパク質構造解析・動的血管造影
- ピンポイントX線DDS (Drug Delivery system)の実現
- 原子カプラント等配管・溶接部非破壊検査



26

要求されるスペック

- システムサイズの小型化:
 - ・ Xバンド(11.424GHz)ライナックの採用による加速管・クライストロンの小型化
 - ・ 電子銃を多数(6個)設置する代わりに電圧を50kVに下げ、電源も小型化
- ロボットアーム駆動・可搬を実現 (0.5 m x 0.5 m x 1m)
- 3.95-10 MeVエネルギー電子ビーム
- 平均電流300mA@300pps(現状の10倍)

現在の技術レベル

- Cバンド(5.712GHz)ライナック技術はXFELにて実現しているが、Xバンドに比べて加速管もクライストロンも大きく重い。
- 950 keV Xバンドライナック(9.4 GHz マグネトロン)では可搬型が実現
- ロボットアーム駆動・可搬型では高周波源として不安定な1.5MW Xバンドマグネトロンを使用するため、6MeV, 30mAが限界
- 6MeV以上のXバンドライナックに利用可能な高周波源はリニアコライダー用50MWクライストロンしかない。電子銃・加速管・RF機器のRFエージングに数ヶ月掛かってしまう。

今後必要な技術開発

- 10MWクラス小型 X-band マルチビームクライストロン高周波源の開発(電流を上げ電圧下げることで小型化推進)による大電流安定化
- 量産可能な加速管の合理的精度仕様の見極め

備考・国際的な優位性: Cバンドライナックは我が国独自技術。我が国は950 keV可搬型Xバンドライナックを世界先駆け実現。

④ 電子ビーム源の高品質化・大強度化技術の開発 (高周波空洞と短パルスレーザーの場合)

開発すべき要素技術

高電界運転可能な**高周波空洞**と**短パルスレーザー**生成技術の融合による**高品質大強度電子ビーム**生成

電子生成

短パルスレーザー・S-band常伝導高周波空洞電子源

バンチ圧縮不要

⇒ 高品質化

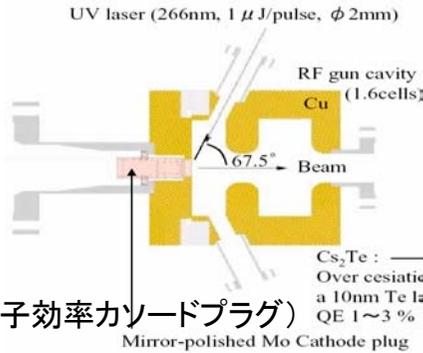
電子加速

超伝導高周波空洞
短距離で高電界加速

⇒ 小型化・大強度化・ビーム安定化

高品質大強度電子ビーム

(高量子効率カソードプラグ)



効果

- 電子ビーム線型加速器の性能向上に寄与。
- 数メートルの数十MeV線型加速器の普及。

【波及効果】

- 加速器による放射線医療の普及
- 電子ビームロスの低減による放射線防護壁コストの低減。

要求されるスペック

短パルスレーザー

- 量子効率1%以上を1年以上保証。
- 100~1000電子バンチの生成。
- 運転繰り返しは12.5Hz以上。
- 電子バンチは2nC以上。

S-band常伝導高周波空洞

- 7.5cm空洞内に130MV/m以上の高周波電界。

現在の技術レベル

短パルスレーザー

- 量子効率1%以上で半年間の運転を達成。
- 100バンチ電子ビーム生成を実現。
- 12.5Hz運転は可能。

□ 0.5nC電子バンチのビーム加速(電子バンチ生成のみなら3nC)。

S-band常伝導高周波空洞

- 120MV/mでの定常的運転が可能。

今後必要な技術開発

短パルスレーザー

- パルスレーザーの安定化。
- 高量子効率化によるレーザーシステムのコンパクト化。

S-band常伝導・超伝導高周波空洞

- 電子源用空洞の暗電流低減および放電対策。
- ビーム品質を向上するためのソレノイド磁場の改良。
- 空洞の設置技術の改善。

共通

- 低コスト化

備考・国際的な優位性: 我が国のこの電子ビーム源開発は世界の最先端にある。

⑤ 電子ビーム源の高品質化・大強度化技術の開発 (高電界超伝導高周波加速器の場合)

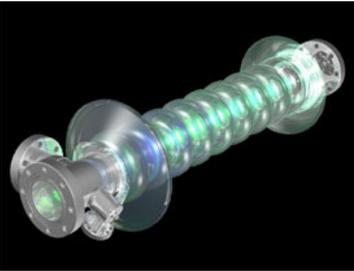
開発すべき要素技術 高電界・超安定運転可能な**小型超伝導高周波空洞**による高品質大強度電子ビーム加速および高効率加速器

電子・陽子加速
超高繰返(GHz)ビーム加速・50MV/m高電界加速 → 短バンチ化
高品質化

連続運転可能
超伝導高周波空洞 → 小型化・大強度化・ビーム安定化
短距離で高電界加速

高品質大強度ビーム加速

全長1.2m:1.3GHz 9-cell超伝導加速空洞



効果

- ビーム線型加速器の性能向上に寄与。
- 数メータの数十MeV線型加速器の普及。
- 連続運転による高品質・大強度化

【波及効果】

- 加速器による放射線医療の普及
- 電子ビームロスの低減による放射線防護壁コストの低減。

要求されるスペック

- 高品質・大強度ビーム加速**
- 1.3GHz連続ビーム加速。
- 加速ビーム電流は100mA以上。
- 高電界安定ビーム加速**
- 30cm単空洞超伝導高周波加速の場合50MV/mの高周波加速を実現。
- 1.2m, 1.3GHz 9-cell超伝導高周波空洞製作技術の普及。量産化技術。

現在の技術レベル

- サブピコ秒・ナノメートルビーム**
- 数百フェムト秒・数十マイクロメートル加速を実現。
- 3000バンチ電子ビーム加速を実現。
- 1.5msec, 5Hz運転は可能。
- 500MHz超伝導加速では連続運転。
- 3.2nC電子バンチのビーム加速運転実施。
- 超伝導高周波空洞**
- 25MV/mでの定常的運転が可能。

今後必要な技術開発

- サブピコ秒ビーム・ナノメートルビーム**
- ビーム圧縮技術の向上。
- ビーム軌道の安定化。サブマイクロメートルの軌道安定化。
- 超伝導高周波空洞**
- 空洞の暗電流低減および放電対策。
- 1.3GHz 9-cell空洞による35MV/m安定高電界加速の実現。
- 空洞の設置技術の改善。
- 共通**
- 低コスト化、小型システム化。

備考・国際的な優位性:FEL, ERL等の高品質・大強度電子ビームを必要とする加速器で本高電界超伝導高周波加速技術が一般に使用されている。我が国が実現した単空洞加速電界52MV/m発生は世界記録である。

⑥ 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

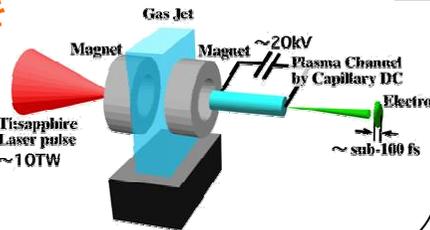
同一レーザーを現象誘起(ポンプ)と分析(プローブ)に使用

- 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



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

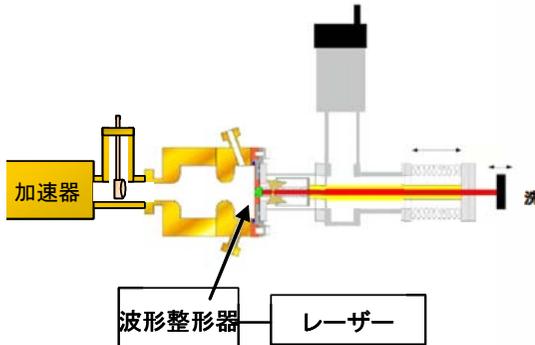
備考・国際的な優位性:

- 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

⑦ 高量子効率フォトカソードRFガンの技術開発

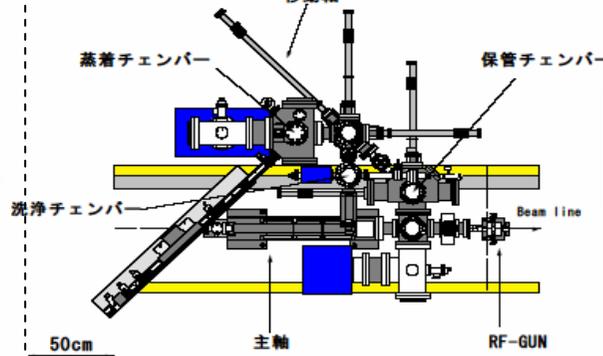
概要

カートリッジ型可視光シングル短バンチシステム



カートリッジ型にすることにより、複数の高量子効率なカソードが利用可能

Cs₂Te小型ロードロックマルチバンチシステム



マルチバンチ化による高効率化

波及効果

- 高SN比放射線化学分析
- 超高密度半導体回路製造のためのレジストの開発
- 大型電子加速器の電子源・同期系
- X線DDSのための生体水放射線化学分析
- タンパク質や半導体の動的構造解析のための時間分解電子顕微鏡

要求されるスペック

- ビーム強度揺らぎ: 1%(rms)
- ロードロック方式
- サイズ: 小型化 (1m²)
- マルチバンチ: 1nCx1000バンチ以上
- カートリッジ式
- 可視光励起
- ナノスケール尖塔形状

現在の技術レベル

- ビーム強度揺らぎ: 5%(rms)
- ロードロック方式
- サイズ: (3x3m²)
- バンチ: 100
- カートリッジ式
- Cs₂Teのみ
- 平板形状のみ

今後必要な技術開発

- ロードロック方式(マルチバンチ)
- コンポーネント化の開発
- マルチバンチ安定レーザーの開発
- カートリッジ式(シングル短バンチ)
- 時間方向・レーザー波形整形
- 小型安定低パワーレーザー
- 可視光カソード(Ag-O-Cs等)の開発
- ナノスケール尖塔形状成形

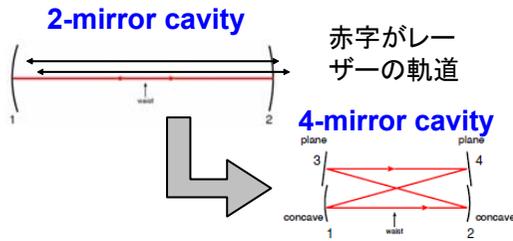
備考・国際的な優位性: ・電子シングルバンチ生成・計測・放射線化学利用で我が国が優位
・ロードロック型Cs₂Teカソードマルチバンチで世界最高電流

(注)量子効率とは、入力光子あたりの出力電子数のこと。

⑧ レーザー蓄積装置の高度化

開発すべき要素技術

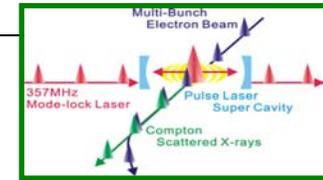
レーザー光をミラーで挟まれた空洞中に閉じこめる「光スーパーキャビティ」の高度化。



赤字がレーザーの軌道

効果

- 蓄積しているレーザーに電子ビームを打ち込むと、高輝度単色X線が発生（レーザー逆コンプトン散乱）。
- レーザーの蓄積により、電子を連続で打ち込む（マルチバンチ化する）ことが可能になり、約1000倍の強度のX線が発生。このため、小型の高輝度単色X線光源が可能に。
- 数MeV高品質大強度電子ビームとの融合により、紫外線から軟X線までの高輝度ビーム生成が研究室サイズで可能になる。



【波及効果】

- 小型化により、核燃料廃棄物診断用ガンマ線発生装置の実用化。
- 単色性の向上により、安全な（被曝線量の少ない）医療用診断硬X線源の実現。

要求されるスペック

- 蓄積装置内レーザーパルスのエネルギーは100mJ/pulse。
- 衝突点レーザー絞込みサイズは5 μ m。
- 電子ビームが通過する間、高繰り返し(357MHz)でレーザーパルスが高反射率ミラーによって行き来する。

現在の技術レベル

- 42cm蓄積装置内レーザーパルスエネルギー10 μ J/pulse。
- 衝突点レーザー絞込みサイズは4cm小型レーザースーパーキャビティで5 μ m、42cmレーザースーパーキャビティで80 μ m。

今後必要な技術開発

- 従来の同軸2ミラー方式から、共焦点4ミラー方式に。
- 従来の100倍程度のミラー位置制御技術。
- 数マイクロ秒幅で飛来する電子ビームと同期するレーザー蓄積技術。

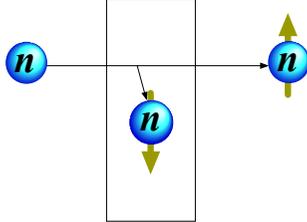
備考・国際的な優位性:レーザーパルス蓄積エネルギーの向上と絞込みサイズの極小化競争が国際的に開始されたところであるが、これらにおいて最も重要なサブナノメートルでのミラー位置制御技術で我が国が優位にある。

⑨ 中性子偏極デバイスの高度化

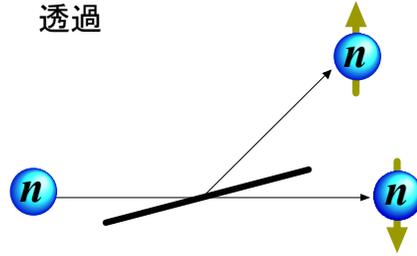
概要

先端磁性研究に不可欠な広波長領域偏極中性子の生成

フィルター型偏極デバイス
スピンの向きによって中性子を
吸収・透過



選択反射型偏極デバイス＝磁気ミラー
スピンの向きによって中性子を反射・
透過



効果

- 物質の磁気情報の高度な解析
- 超高精度スピン制御による基礎物理学研究
- 試料内水素核偏極技術への発展 → 水素に対する感度向上

【波及効果】

- 新機能性磁性材料の物性評価と開発
- 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
- 水素を大量に含むソフトマター、燃料電池、水素吸蔵材料内の水素原子位置情報の高精度解析
- 基礎物理学関連諸量の測定による初期宇宙の研究

32

要求されるスペック

- 熱外から超冷中性子領域に至る極めて広い波長領域をカバー
波長域に応じて磁気スーパーミラー、偏極³He、偏極陽子、磁気レンズが必要
- ステラジアンクラスの大立体角をカバー
- 大量供給体制の確立
- 高精度高スピン偏極($\Delta P \leq 10^{-3} - 10^{-4}$)

現在の技術レベル

- 単色または低エネルギー領域のみの中性子偏極化
- 狭い立体角範囲での偏極解析
- 我が国における磁気スーパーミラー作成技術、偏極³Heの偏極度は世界的に群を抜いているが、大量生産技術、大量供給体制が未確立
- 偏極陽子システムは技術的に確立しているが、物質研究用に向けたコンパクト化が課題
- 磁気レンズは実用レベルにあるが高価

今後必要な技術開発

- 白色中性子に対応する中性子偏極デバイスの開発
- 磁気スーパーミラーの大量生産体制の確立
- 偏極³Heデバイスの高再現性と大立体角化
- 偏極陽子システムのコンパクト化
- 磁気レンズの作成技術改良による価格の低減

備考・国際的な優位性:

- ・磁気ミラー、四極子、六極子磁気中性子デバイス開発は我が国が世界をリードしており、偏極中性子を利用した小角散乱、スピンエコー分光、三次元偏極解析等は世界的にもトップレベル。
- ・核偏極技術は、我が国が大きく貢献した分野であり、高い技術力を保っている。

⑩ 高偏極陽電子ビームの開発

概要

現状

- ・ β^+ 壊変核種のエネルギーが低いため、高スピン偏極陽電子線源が得られない
- ・陽電子ビームの強度が低いため、スピン偏極化・スピン回転制御が困難

これらの問題を
解決

効果

陽電子ビームのスピン偏極化による利用研究の進展:

- 最表面・界面磁性の解析
- 物質の電子スピン状態の観測

【波及効果】

- ユビキタス社会の実現に貢献する革新的エレクトロニクス材料(超高密度磁性半導体材料、ハーフメタルなどの高スピン偏極磁気メモリ材料)の開発

33

要求されるスペック

- 高スピン偏極率; 90% 以上
かつ
- 高強度ビーム; 毎秒 $10^8 \sim 10^{10}$ 個
- マイクロビーム; $< 1 \mu\text{m}$
- 極短パルス幅; 10 ps 以下
- 単色低速ビーム; $E < 0.01\%$, $E < 0.1\text{eV}$

現在の技術レベル

- スピン偏極率; 30% 以下
- ビーム強度; 毎秒 $10^3 \sim 10^4$ 個
- ビーム径; $\sim 1 \text{mm}$
- パルス幅; $\sim 100 \text{ps}$
- 単色度、エネルギー; $E > 1\%$, $E > 10\text{eV}$

今後必要な技術開発

- スピン偏極陽電子ビーム技術
 - ・高強度加速器(0.1mA)による高強度化・高スピン偏極 β^+ 壊変核種生成
 - ・スピン軌道相作用を利用したスピン偏極化
 - ・スピン回転制御技術
- 多段再放出によるマイクロビーム化、単色超低エネルギー化
- 超伝導キャビティによる極短パルス化

備考・国際的な優位性

我が国では、陽電子回折技術など、極めて高い陽電子ビーム技術を保有している、本技術開発により世界を大きくリードすることができる

⑪ 高温超伝導コイルの長尺化等の開発

概要

高温超伝導コイルの長尺化により、加速器の小型・高効率化を実現

従来

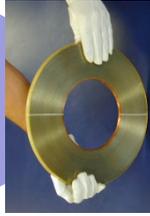
- ・小型シンクロトロンは直径20m
- ・回転ガントリーは全長25m

炭素線 400 MeV/核子

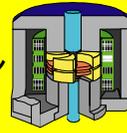


重粒子線がん治療施設(群馬大)

制御性・安定性・コンパクト性等に優れた**高温超伝導コイル**を応用

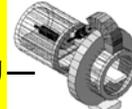


高温超伝導 AVFサイクロトロン



- ・直径6m以下
- ・重イオンビームの大強度化

高温超伝導 小型回転ガントリー



全長10m以下

波及効果

重粒子加速器を基礎科学から産業利用まで普及

- **診断・医療分野**: 粒子線がん治療技術が大幅に普及し、次世代がん治療・診断法の創成に貢献
- **エネルギー・環境分野**: 燃料電池の高耐久化によりCO₂削減等に寄与
- **食糧分野**: 育種により劣悪環境や病害に強い品種、高機能性食品を創生し、健康で安全な食生活の実現に貢献
- **基盤技術**: 超伝導応用技術の発展

34

要求されるスペック

- 高温超伝導コイル直径の大サイズ化(磁極直径3m程度)
- 高温超伝導コイル線材の高電流密度化、高温超伝導電磁石の高磁場化(4~6テスラ)
- 小型回転ガントリー用高温超伝導偏向電磁石等の交流化(0.1~20Hz)
- 大サイズ高温超伝導コイル用冷却システム(30Kで300W以上)と省メンテナンス化

現在の技術レベル

- Bi2223線材(テープ状)で長さ1.5km程度、コイル径1m前後
- 臨界電流値150~180A。0.5×1mのコイル中心で2.5テスラ、数十cmサイズで8テスラ発生
- 高温超伝導ACコイルは未開発。低温超伝導コイルのAC化は困難。
- 伝導冷却方式の小型冷凍機は実用化済み(30Kで94Wなど)

今後必要な技術開発

- Bi2223線材の長尺化(数km)と高電磁力に抗する巻線の高強度化
- 高電流密度化(200A/mm²以上)による巻数削減と臨界電流を下げないためのコイル形状等の最適化
- 大サイズ高温超伝導コイル内の交流損失の低減と冷却法の最適化
- 伝導冷却方式冷凍機の高効率化、高出力化、省メンテナンス化

備考・国際的な優位性:

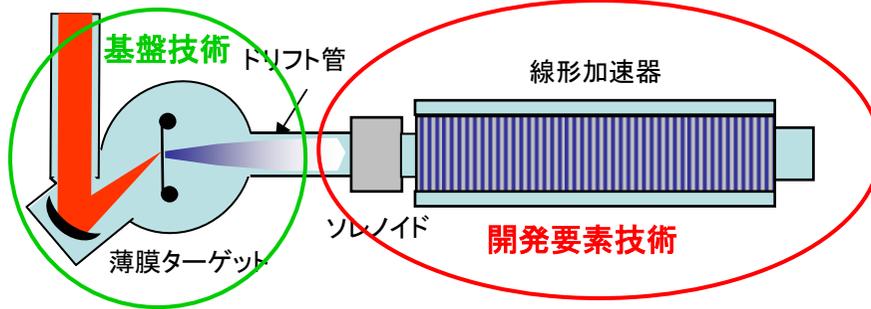
- ・コンパクトで制御性・安定性・信頼性に優れた高温超伝導AVFサイクロトロンは世界初
- ・欧米で実用化されている低温超伝導AVFサイクロトロンよりも扱いやすく、低コスト化が期待され、汎用・普及により世界の粒子線がん治療技術などを圧倒的にリード

⑫ レーザー加速イオン・陽子ビームの高品位化・大強度化(位相回転技術の場合)

概要

レーザー駆動陽子ビームの多段ギャップ位相回転を用いたモノエネルギーピーク形成と動径方向集束による高品位化・大強度化

位相回転の要素技術開発はレーザー駆動イオン(陽子)ビーム生成の基盤技術に対して適用される(密接不可分)



効果

高品位・大強度イオン・陽子源を小型化・低コスト化

- コンパクト放射化装置の実現
- シンクロトロン入射ビームエネルギーの増大

【波及効果】

- 粒子線(陽子)によるがん治療の広範な普及の実現
- 粒子線の化学利用・高密度科学への応用
- 供給可能ビーム強度の増大による呼吸同期による体幹部治療の実現
- 放射線遮蔽必要部位の減少による工業利用の促進

35

要求されるスペック

- エネルギーピーク(幅10%以下)の形成
- 動径方向集束によるレーザー生成イオン強度の増大(エネルギーピーク内に毎秒 10^9 以上)
- がん治療用シンクロトロン入射ビームとしては10MeV以上、10nA以上の入射強度の実現

現在の技術レベル

- RF空洞は2MeVまで可能な装置を製作済み
- エネルギーピークの形成は10Hz, 1MeVまで成功。3~5倍のピーク強度増大
- マルチギャップ化による高エネルギー化の検討(シミュレーションにより、1桁以上の強度増加を期待→特許出願済)

今後必要な技術開発

- マルチギャップ空洞(線形加速器)の開発・製作 → モノエネルギーピークの形成を高エネルギーイオン(陽子)(10MeV以上200MeV程度迄)まで適用可能とする

備考・国際的な優位性:

- 我国は平成13年から17年度まで実施した先進小型加速器のための要素技術の開発においてレーザー生成イオンの位相回転を~MeV領域の陽子について実証し、またその成果に基づきマルチギャップの位相回転のアイデアを打ち出し、がん治療や工業利用への適用を目標に10MeV以上の領域への拡大の特許申請(特願2007-134132)しており、実用化に向けて先頭を走っている。
- 基盤技術であるレーザー駆動イオン(陽子)生成技術に関しては我国では10Hzレーザーにて2.2MeVの陽子生成を達成。さらに10MeV以上の陽子ビーム生成技術に極めて有効なTOF法を考案(特願2006-38533)

⑬ イオン種・エネルギーの迅速な可変制御技術

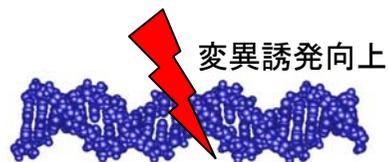
概要

イオン種・エネルギーの組合せが限定、固定

照射日程の制約が極めて厳しい

ユーザー利用拡大の障害

迅速可変制御技術の開発



イオンビーム育種技術の高度化



波及効果

- 低アレルゲン・活性酸素除去など高機能性作物の創出
- 有用発酵産業微生物・薬効成分高生産菌の創出
- 環境耐性・病害耐性付与による食糧増産
- ファイトレメディエーションによる環境浄化・環境修復

36

要求されるスペック

(ユーザーのニーズ)

- ヘリウムから鉄までのイオン種を迅速に生成できること
- MeV級からGeV級までエネルギーを変更できること
- 30分以内にイオン種・エネルギーを変更できること

現在の技術レベル

- 1台又は2台の汎用ECRイオン源でカクテルビームを生成。高多価イオン及び固体試料からの迅速なイオン生成が困難
- サイクロトロンのカクテルビーム加速技術(磁場固定)で限られたイオン種・エネルギーを迅速交換。一部イオン種に異種イオンが混入

今後必要な技術開発

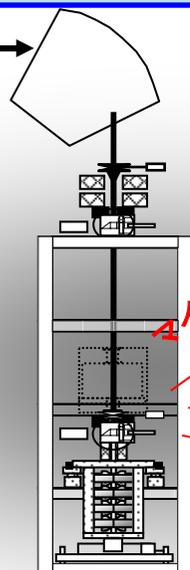
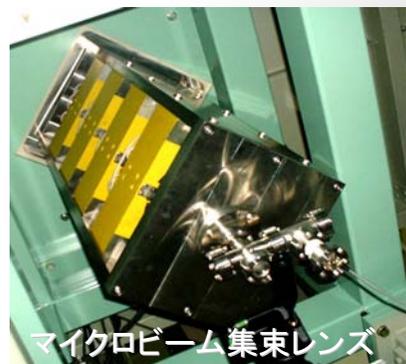
- 各イオンに特化した超小型超伝導フルストリップイオン源(イオン源を迅速交換)
- サイクロトロン等時性磁場の短時間変更技術(現在の1/10に短縮)
- フラットトップ加速を用いたビームの高純度化技術

備考・国際的な優位性

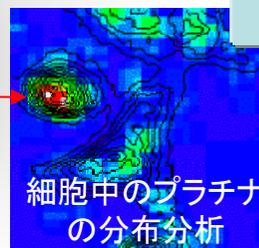
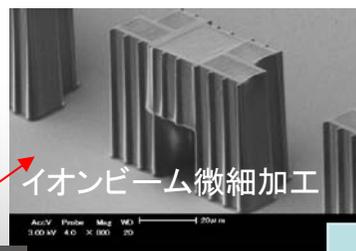
上記の技術開発によって、世界をリードしている我が国のイオンビーム育種技術の優位性を確固たるものにできる。

⑭ マイクロイオンビーム形成・照射制御技術の高度化

概要



マイクロビーム照射



波及効果

□つくる

LET・飛程の多様性を生かした微細加工技術、イオンビーム育種

□みる

微量元素分布計測技術(PIXE)、線質効果・バイスタンダー効果の解明、低線量放射線・宇宙線リスク評価、宇宙用半導体寿命信頼性評価法

□なおす

効果的な新規粒子線治療法の開発

37

要求されるスペック

- ターゲット位置(大気中)でのビーム径: $1\mu\text{m}$ 以下
- 細胞位置を識別して撃ち分けるビーム照準精度: $1\mu\text{m}$ 以下
- シングルイオンヒット: 10ヒット/秒以上
- イオン種・エネルギーの多様性: 軽イオンから重イオンまで、MeV領域からGeV領域までの迅速な立ち上げと切り替え

現在の技術レベル

- 真空中での最小ビーム径: 静電加速器では $\phi 200\text{nm}$ (3 MeV H、He)、サイクロトロンでは $1\mu\text{m}$ (260 MeV Ne)
- 照準精度とシングルヒット: 静電加速器では真空中で $1\mu\text{m}$ 精度、サイクロトロンでは大気中で $10\mu\text{m}$ 精度(1ヒット/秒以下)
- イオン種・エネルギー切替時にマイクロビームレンズ系の再調整に長時間を要する(数時間以上)

今後必要な技術開発

- ナノビーム形成技術: ビームサイズ評価精度の向上
- シングルイオンヒット技術: ヒット速度の向上(短時間多点照射)、ターゲット自動認識・ビーム自動照準
- イオン源・加速器技術: ビームの高輝度化、エネルギー・電流安定化、ビーム条件のバリエーションの拡大と高速切り替え、ビームシェアリング

備考・国際的な優位性

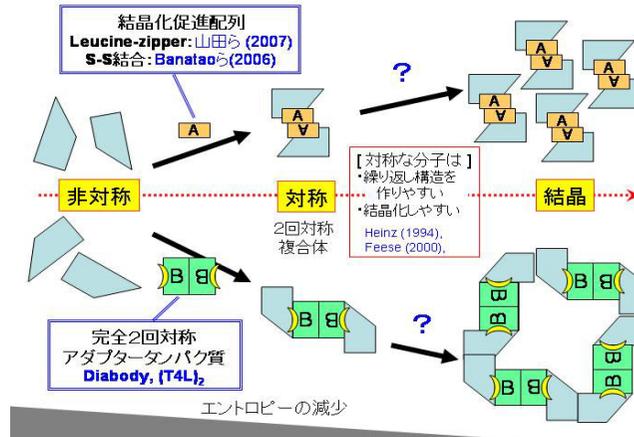
重イオンマイクロビーム形成・シングルイオンヒット技術では我が国が世界をリード、独GSIや米コロンビア大が後続。軽イオンマイクロビームの加工および分析技術においても世界のトップレベル。

⑮ 試料調整技術の高度化(タンパク質結晶作製の場合)

概要

解析対象分子の結晶化と大型化を解決する技術の開発。

- 1) 対称性の導入による結晶化促進
- 2) 分子設計による結晶成長の促進



波及効果

- 「みる」機能を最大限に発揮させる試料調製技術 ⇒ 生涯健康な社会へ
- 受容体などの膜蛋白質の立体構造解析により、生物分子の機能メカニズムの解明や医薬品作用機構の解明に寄与。
 - X線(放射光)と中性子線を相補的に用いた生物分子の全原子構造解析は高精度の医薬品設計に寄与

38

要求されるスペック

- 難結晶性タンパク質(膜タンパク質や糖タンパク質)の結晶化。(放射光: 1辺0.1mm)
- 創薬標的タンパク質や酵素の結晶大型化(中性子: 1辺1mm)
- 同上、重水素化試料の調製

現在の技術レベル

- ごく一部の膜タンパク質が結晶化された。多くの膜蛋白質が解析されていない。
- 中性子解析例はわずか18件。創薬標的タンパク質は1例のみ。
- 重水素化試料に調製については個別に検討を要する。

今後必要な技術開発

- 目的分子を対称にアSEMBLするアミノ酸配列あるいはアダプター分子(抗体等)の創製
- 分子間相互作用の改変による結晶の大型化技術
- 安価で確実な重水素化タンパク質の調製技術

備考・国際的な優位性

JRR-3およびJ-PARCを利用可能な中性子構造解析研究は国際的にきわめて優位。タンパク質分子を立体的に配向制御する研究において国際的に高い優位性あり。

⑬ ビームの高度化に対応した計測技術の高度化(中性子検出技術の場合)

概要

高速・高効率・高分解能・大面積中性子イメージ検出器
と高度信号処理技術の開発

次世代中性子実験装置の開発へ



大面積シンチ検出器



高効率ガス検出器



高分解能CCD検出器

効果

- 大面積・高効率・低バックグラウンド → 測定効率の向上。中性子源の高強度化に匹敵
- 高時間分解能 → 高速ダイナミクスの解析が可能に
- 高位置分解能 → 複雑な構造解析も可能に

【波及効果】

- 多様な用途での燃料電池利用: 中性子ラジオグラフィによる燃料電池内の水分挙動の可視化
- 建造物の安全性評価: 短時間での中性子CT技術

要求されるスペック

- 広エネルギー範囲中性子の高検出効率 (70 % 以上) 効率
- 高位置分解能 (200 μm 以下)
- 高計数率 (2 Mcps 以上)
- 高時間分解能 (100 ns 以下)
- 低ガンマ線バックグラウンド
- データ収集の高機能化 (大容量・高速化)
- 検出システムのコンパクト化

現在の技術レベル

- シンチレータイメージ検出器:
検出効率: 25 %
位置分解能: 1 mm
計数率: 200 kcps
- ^3He ガス検出器:
検出効率: 50 %
位置分解能: 0.8 mm
計数率: 200 kcps
- CCD撮像素子によるラジオグラフィ装置:
位置分解能: 100 μm
時間分解能: 16 ms

今後必要な技術開発

- 高輝度・短寿命シンチレータ
- フォトンカウンティング手法によるシンチレータイメージ検出技術
- MPGCガスイメージ検出素子技術
- 高輝度シンチレータと高速撮像素子によるイメージ検出技術
- 超高速大容量データ収集技術
- 大容量データから高速に解析・可視化・モデルあてはめ等を行い、ユーザーの利便性、データの信頼性を高める高機能解析技術・ソフトウェア
- 測定の全自動化技術・ソフトウェア

備考・国際的な優位性: 高速・高検出効率・TOF中性子イメージ検出技術において我が国は優位に立つ。J-PARC中性子実験施設の優位性を保つのに不可欠な技術。既存の原子炉中性子実験施設(JRR-3等)や粒子線イメージ計測システム(TIARA等)などの高度化も可能

重点課題抽出のための整理表（その1）

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 （一般的課題） | 一般的課題に係る現状 （技術的課題） | 技術的課題に係る現行技術の 現状 | 開発すべき要素技術、数値目 標 | 備考・海外との比較 |
|---|---|--|--|---|
| ☆生涯健康な社会 （観る） ・創薬の劇的時間短縮・低コスト化、画期的医薬品開発につながる生体高分子（タンパク質）の構造解析 | <総論> ☆文部科学省タンパク3000プロジェクトでは、SPring-8（X線結晶構造解析）等により3000を超えるタンパク質が解析された。 ☆今後の創薬高度化・コスト削減には、放射光・中性子による構造解析から得られる正確な分子構造情報（水素結合・水和構造、磁気を担う電子分布、電子軌道、原子核分布、磁気構造）の取得や、溶液中分子会合状態の解析が必要不可欠。 ☆今までに解析されたタンパク質の殆どは比較的結晶化が容易な水溶性タンパクであり、医薬品開発により重要性を持つ膜タンパクなどの脂溶性タンパクの多くは、構造決定が今後の課題として残されている。 | ・X線、中性子等様々な量子ビームを相補的に利用することが重要。一般的にX線は微小試料の解析に適し、中性子は水素原子位置の解析が得意。 ・同一結晶によるX線と中性子の相補的使用による実現が期待されるが、放射光(0.1mm角程度)に比べ、中性子では2mm角程度の大型結晶が必要であるため、同一結晶によるX線と中性子の相補的利用が困難。 ・中性子による測定のためには大型生体分子単結晶の作成が必要。 | ・現在のところ数例で5mm角超の結晶育成に成功し、中性子解析データを取得。 ・タンパク質工学技術を用いて、結晶の成長方向を制御する技術に手応え。(蛋白質1例で確認。数例の検証が必要。) ・中性子光学技術（スーパーミラー、磁気レンズ等）による、中性子ビーム利用効率の向上が可能。これまでに2～200倍の利用効率の向上を実現しており、基礎実証段階を終了。 ・これまでに研究で培われた技術をもとにベンチャー起業による産業化が始まっている。しかしながら、現状では生産能力が不足しており、普及のためには研究上の要請に応じて制作する期 | ・開発すべき要素技術、数値目標 ・生体分子単結晶化技術の高度化（生体分子の人工アセンブリ技術の開発）。 ・中性子集光光学系デバイスの普及開発。 ・大強度化については ※6（後掲）参照。 ・我が国は過去10年程度の間、中性子光学の系統的な研究を世界に先駆けて発展させ、平面スーパーミラーの格段の性能向上、曲面スーパーミラーの実現、磁気屈折光学系及び物質界面屈折光学の実現、回折光学系の格段の性能向上、画像検出器のシステム化にわたる広範な範囲で世界をリードしている。 ・我が国は過去10年程度の間、中性子光学の系統的な研究を世界に先駆けて発展させ、平面スーパーミラーの格段の性能向上、曲面スーパーミラーの実現、磁気屈折光学系及び物質界面屈折光学の実現、回折光学系の格段の性能向上、画像検出器のシステム化にわたる広範な範囲で世界をリードしている。 ・光学技術によって、空間分解能は向上するが、 |

| | | | |
|--|---|---|---|
| | 間を1年未満に抑えることが必要。 | | 運動量分解能が低下するため、タンパク構造解析では分解能の低下をもたらすおそれがある。 |
| <ul style="list-style-type: none"> タンパク質構造解析において、先駆的かつ革新的研究の初期段階では、中性子源を長期間にわたり随時利用できることが必要だが、中性子施設は数が限られている。 大学や企業の研究現場に配備可能なコンパクト中性子源が必要。 <p>※1</p> | <ul style="list-style-type: none"> コンパクト中性子源の実現のために必要な、中性子発生ターゲットの熱構造と減速体を含めたシステム化が未完成。 中性子光学の発達により、中性子利用効率は2~200倍が達成済（上記参照）。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子発生ターゲットの開発により、10kWクラスの低エネルギー中性子源及びそれをを用いたコンパクトパルス中性子解析システムを実現。 | <ul style="list-style-type: none"> 2007年より、IAEA/CRP（研究協力プログラム）において、小型パルス中性子源の開発とそれをを用いた中性子利用研究が進行中。 小型加速器中性子源に関しては、米国がインディアナポリス大学でLENSプロジェクトを進行。 中性子源開発、光学素子評価、分光器開発、イメージング、物質評価などのため北大の電子加速器施設は比較的小型の中性子源として広く使われているが、旧式であるため左記の目的のためには性能が不足。 コンパクト中性子源のシステム化・民生化により、加速器産業の活性化が期待されると同時に、コンパクト中性子システムという新規産業分野の開拓が期待される。 この成果はボロン中性子捕獲医療システム（治す）の中性子源にも新たな可能性をもたらすと期待される。 |
| <ul style="list-style-type: none"> X線構造解析に必要な生体高分子の結晶化（SPring-8では小さくとも20μm程度が必要）に長時間を要するため、現在の技術でも比較的容易に作ることができる1μm程度の微少結晶の構造解析を可能とする技術、あるいは、結晶化が不要になる単分子構造解析技術が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 既存放射光施設で1μm程度の微小結晶の解析を行うための技術開発はほぼ完了。 | <ul style="list-style-type: none"> マイクロビーム用ビームラインの整備。 | |
| <ul style="list-style-type: none"> 上記単分子構造解析技術には、高ピーク輝度高干渉性X線が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> X線自由電子レーザー装置（国家基幹技術として進行中）により実現可能。 現在、文部科学省XFEL利用推進研究課題にて実施中。 高干渉性X線による0.1nm~1nm域での分解能や100フェムト秒域での単分子解析には、試料粒子のXFELビーム照射域への導入・位置制御等の要素技術が不足。 SASE-FELは高強度のため試料の損傷が顕著。また、ビームラインが少ないため、少数ユーザの利用に限られる。 XFELの一層の小型化・低価格化。 | <ul style="list-style-type: none"> 試料損傷の問題を軽減する高品位のX線自由電子レーザーを可能とするシーディング技術の開発。 ビームラインの複線化を可能にする高速電子ビーム振り分け技術の開発。 普及型XFELプロトタイプ機の製作のための技術開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 理研ではCバンド加速管で軟X線領域での高干渉性光発生を確認。 DESY（独）では、超伝導Lバンド加速管で軟X線領域での高干渉性光発生確認。 原子力機構では科研費において「相対論工学」としてレーザー、電子、X線の相互変換技術を進め、極短パルス可干渉性X線発生に成功し、さらに強度の向上や短波長化に取り組んでいる。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> 極短パルスレーザーと電子ビームの掛け合わせによる高干渉性X線生成技術実現の可能性。 | <ul style="list-style-type: none"> 極短パルスレーザーと電子ビームの掛け合わせによる高干渉性X線生成技術の実現。 | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ERLによる干渉性向上の可能性。しかしながら、ERLのコストは常伝導FELと比較して、数倍以上。ただし、ビームラインを多数設置す | <ul style="list-style-type: none"> 低コストでの高電界超伝導空洞製作のための加速器空洞の表面処理（洗浄）技術の確立。 | <ul style="list-style-type: none"> L-band超伝導単空洞では50MV/mが達成された。 液圧成形技術は日本の提案であり、量産に優れている。 |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ることが可能。 ERLコスト低減のためには、小型化（高電界加速・減速の実現）が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 空洞制作時の溶接コスト削減（半額以下）を実現する液圧成形技術の確立。 | <ul style="list-style-type: none"> ERLはピーク輝度が低い ため、単分子構造解析 への利用は困難ではな いか。 |
| <ul style="list-style-type: none"> 大型施設でタンパク質の構造解析ができるが、ユーザーサイトでの解析が困難。普及のためには民生化が必要。 一般用X線回折装置もあるが、解析に長時間を要するため、大量の分析に向かないため、大強度化（光子数の増大）が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 一般用X線回折装置は10^8光子/秒に留まっている。 一般用X線回折装置においても電子ビームが大強度であれば、レーザースーパーキャビティと増幅器により、10^{13}光子/秒程度に増強可能。 | <ul style="list-style-type: none"> Xバンド線形加速器マルチ電子・レーザー散乱で10^9光子/秒を達成の見込み。レーザー周回システムにレーザー増幅器を導入し、10^{11}光子/秒が達成できる。ユーザーサイトでの試験を安全に行うため、永久磁石による更なる小型化と電子減速システムの付加が重要。 一般用X線回折装置においてレーザースーパーキャビティを使うための、大強度電子ビームを可能にするSバンド線形加速器の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 米国ベンチャー企業にて40 MeVシンクロトロンとレーザースーパーキャビティを検討中だが、装置はより大型でコスト高。また電子ビームは40MeVで捨てられるので重厚な放射線遮蔽設備を必要とする。 メールインサービスの一般化による対応もあり得る。 (株)光子発生技術研究所の可搬型シンクロトロン「みらくる」では2×10^{11}光子/秒を達成。 |
| <ul style="list-style-type: none"> 高性能X線源普及のための小型化が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> Sバンド線形加速器型小型コンプトン散乱単色X線源でのフォトカソード用レーザーは$1m \times 2m$、1億円規模であり、数十cmサイズへの小型化のためには、可視光駆動高効率カソードが必要。 現状はAg-0-Csなどのフォトカソードが低レーザーパワーで量子効率（光子→電子の変換効率）が数%であり、これでは分析実用レベルとしては電子発生量が少なすぎることから、レーザーパワー1μジュール程度の小型レーザーで電子バンチ$1nC$/パルスを達成することが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 低パワー光による分析装置用可視光用光電面（Ag-0-Csなど）の技術を、大電流電子ビーム発生用フォトカソードに発展。そのための光電面の直径$10mm$以上の大面積化・膜厚など光電特性の均一化。 長期運転後の交換のため、カートリッジ型交換可能カソードの実現。 | <ul style="list-style-type: none"> カートリッジ型交換可能可視光駆動カソードは、他国に競合技術のない我が国独自技術。 |
| <ul style="list-style-type: none"> タンパク質の高速反応を解析するために、フェムト秒の時間分解能を持ちユーザーサイトで使用できるタンパク質反応分析システムが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 第3世代放射光源(SPring-8等)でマイクロ秒以下の遅い時間領域の研究は盛んに行われているところ。 15～5年前に時間分解X線回折研究が実施されたが、X線の強度不足で、半導体単結晶の原子分子ダイナミクス分析に留まっている。 高い空間・時間分解能（$10nm$以下、$1ps$以下）での分析ため、X線の強度向上とビームの方向およびエネルギーの安定性向上が必要。（現状、プラズマ発光源10^9光子/mm^2/ショット [$>10ps$]。レーザープラズマカソードの、現状のビーム方向安定度は$20mrad$でエネルギー安定度は10%弱。） XFELにて5年後程度にレーザー・XFELポンプ&プローブ分析システムが立ち上がるため、化学反応の動画撮影が可能になるが、ビームタイムに制約があり、ユーザーの要求による様々な環境下での観察に迅速に対応するためには、ユーザーサイトでの分析が可能な小型システムが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> レーザープラズマカソード・レーザー散乱で指向性の向上によるX線強度の向上。（分解能の確保に必要な強度である10^8光子/mm^2/ショット [$<1ps$]程度。） 磁場印加およびプラズマ密度制御による電子加速の安定化。（方向安定度$1mrad$以下、エネルギー安定度数%以下） 安定小型卓上テラワットレーザーを使ったフェムト秒分析システムの開発と国産化（TW-kHz級高安定レーザー、変動数%未満）。 | <ul style="list-style-type: none"> 15～5年前に世界で既存のシンクロトロン、レーザープラズマX線源により時間分解X線回折研究が実施されたが、強度向上のブレイクスルーがないため、現在では下火。 小型レーザープラズマカソード生成の研究は我が国が世界的にもトップレベルにあるが、小型卓上テラワットレーザーは仏国が席巻。 |
| <ul style="list-style-type: none"> タンパク質の機能を、電子伝達と水素の移動 | <ul style="list-style-type: none"> 基礎的データのみ。 | <ul style="list-style-type: none"> 小さい結晶を対象に出来るようミュオンビー | <ul style="list-style-type: none"> 日本が開発したミュオンラベル電子法により、 |

| | | | | |
|-------------------------------|--|--|---|---|
| | の観点から調べる μ SR法が有効。 | | ムのマイクロビーム化が不可欠。 | 英国のグループが着実なデータを積み上げている。 |
| (治す) ・粒子線がん治療技術の普及・次世代技術開発 | <総論> ☆粒子線がん治療が実績を上げており、高度先進医療として認定。(平成18年度末までに3290人(放医研1077人、兵庫県立粒子線医療センター1277人、がんセンター東病院487人、静岡県立がんセンター449人)の治療実績) | | | |
| | ・粒子線がん治療施設は大型、高コストであり、普及に課題。 ・重粒子線治療用ガントリーの小型化が必要。 | ・小型化研究開発により、群馬大機でシンクロトロンリング直径20m、建屋面積45m \times 60m、125億円にまでサイズ・コストを圧縮済。 ・ガントリーは現状全長25m、総重量600トン以上。 | ・直径4m程度の高温超伝導AVFサイクロトロンを実現するため、高温超伝導コイルの長尺化や冷却システム等の要素技術を開発。 ・レーザー加速については下記参照。 ・陽子線治療用ガントリーと同サイズ(全長10m)にコンパクト化するため、高温超伝導偏向電磁石を開発。また、交流電磁石を高温超伝導化し、超小型の三次元ビームスキヤニングシステムを開発。 | ・PSI(スイス)で外径4mの陽子線治療用低温超伝導AVFサイクロトロンが実用化されているが、重粒子線治療用のサイクロトロンは未だ存在しない。 ・ハイデルベルグ大付属病院(独)で世界初の重粒子治療用ガントリーを建設中だが、全長が25m、重量は600トンを超えている。 |
| | ・レーザー加速原理の導入による粒子線がん治療装置の革新的小型化・低コスト化に期待。 | ・我が国は過去の先進小型加速器開発事業において開発された位相回転技術を有する。 ・現在の線形加速器を用いたシンクロトロンへの入射エネルギーは6~7MeV(安定な陽子の入射ビーム電流は5nA程度)であり、空間電荷効果が大きいためシンクロトロンへの入射ビーム強度が制約を受け、治療に必要な役割を果たす呼吸同期照射の実現に必要な10nAの確保が困難。 ・レーザー加速により、低コスト化のみならず、現行陽子線治療器で強度不足のため不可であった体幹部での治療に重要な呼吸同期照射の実現が期待。 ・右記第2フェーズについては、原子力研究開発機構関西光科学研究所を拠点として、科学技術振興調整費に申請中。 | ・第1フェーズではレーザー加速イオン源の開発とRF位相回転技術確立し、小型化、大強度化。 ・マルチギャップ位相回転によるレーザー生成イオンビームの高エネルギー(10MeV以上)化と高品質化。(シンクロトロンリングへの高強度電流(10nA以上)の安定入射を実現可能な高品質化(低エミッタンス、低エネルギー幅)をレーザー生成イオンビームに対して実証。) ・第2フェーズでは、フルエネルギーまでレーザー加速で達成し、完全小型化する。 | ・第1フェーズは、ドイツGSIで最近提案がなされているが、レーザー生成イオンビームの線形加速器での加速実績を有する我が国が要素技術で先行。ドイツがハイデルベルグでの重イオン治療施設の建設と並行して、レーザーイオン加速と線形加速器の結合を提案し急迫中。 ・第2フェーズは各国で提案有り。 ・第1フェーズにより30~40億円規模、第2フェーズにより10億円規模にコスト圧縮が期待される。 ・現在の入射器線形加速器が米国Axis社等外国企業に席卷されているのに対して、我が国が先行する位相回転技術を活用することにより、より高効率で低コストな国産システムが実現すると期待。 |
| | ・炭素線(短・中飛程)・陽子線(長飛程)ハイブリッド方式の導入により、加速器構成を簡略化し建設コスト・運転コストを低減できる可能性。 | ・誘導加速シンクロトロンにより大型の入射器(6~7MeV)なしで陽子、炭素イオン等を一台で加速できる。 ・KEKの12GeV陽子シンクロトロンを用いて2 \times 10 ¹² の陽子を500MeVから6GeVまで加速し完全に実証済。 ・必要な1MHz高繰り返し出力電圧2kVの誘導加速装置は自主開発済。(学術創成研究にて) | ・既存500MeV Boosterを改造して実証。 ・陽子250MeV加速・炭素線加速器(出力エネルギー300MeV/au、10 ¹² /秒、周長45m)のプロトタイプ設計と建設。 | ・誘導加速シンクロトロンの発明が2000年にKEKにおいてなされ、2006年に実証されたばかりであるので、海外に類似の計画は存在しない。米国BNLとBarianが注目している。 |
| | ・最適な治療効果を得るため重イオン細胞照射効果とその修飾要因(細胞内の修復や遺伝子型等)およびバイスタンダー効果(照射されていない周辺細胞が受ける影響)の解明が必要。 ・ヒット細胞での直接的 | ・10~20 μ m径の重イオンマイクロビームによる細胞照準照射を達成済であり、バイスタンダー効果解析の予備実験に着手。 ・撃ち分けに必要な1 μ m径レベルのマイクロビーム形成は実現しているが、調整 | ・1 μ m径以下の高品質の集束ビームを素早く形成し安定的に利用できる照射制御技術。 ・細胞照準照射用の画像認識技術および生体応答シグナルの1分子検出技術。 | ・生物用重イオンマイクロビームでは我が国が世界をリード、独GSIや米コロンビア大が後続。 ・陽子、Heイオンマイクロビームに限れば英GCIと米コロンビア大が先行。 |

| | | | | |
|--|--|---|--|---|
| | <p>な照射効果と非ヒット細胞で引き起こされるバイスタンダー効果を明確に区別して解析するためには、特定の細胞の核や細胞質を正確な個数の重イオンで撃ち分けるとともに、細胞内/細胞間シグナル伝達をリアルタイムで解析する技術が必要。</p> | <p>に長時間を要し、照射位置が安定しないため、細胞や生体を扱う生物実験や医療への利用は困難。</p> | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> 生体の放射線効果の基礎的理解の進展が必要。軽い陽子として放射線効果を起こし、そのラジカル生成と反応などを追跡できるミュオンの利用が有効。マイクロ秒以下の物理化学現象を解明できる。 | <ul style="list-style-type: none"> 実験はすぐにでも開始できる。水溶液中の蛋白などのデータがある。 | <ul style="list-style-type: none"> 人的配置と放射線医学との連携が不可欠。治療用の加速器は殆どがミュオン利用に拡張できる。 | <ul style="list-style-type: none"> 水溶液中の蛋白について、日本で先駆的な開発が行われている。 |
| <p>(治す)</p> <ul style="list-style-type: none"> 難治性腫瘍に対する効果が期待されるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)やガドリニウム中性子捕捉療法による次世代がん治療の実現 | <ul style="list-style-type: none"> 現行BNCTはJRR-4のような原子炉によるもの。 原子炉のような規制があまりなく、病院併設の治療施設ができる小型加速器駆動BNCTが期待されているところ。 加速器駆動の場合でも治療時間を10分以内にするには、中性子強度は6×10^9個/cm²/s以上が必要。このため、中性子源の高強度化が課題。 | <ul style="list-style-type: none"> 加速器中性子源の強度は現状$10^8 \sim 10^9$個/cm²/s程度。中性子を発生させるための陽子ビームのパワーは数十kWが最高。 | <ul style="list-style-type: none"> 小型サイクロトロンを大出力化するとともに、そのビームパワーによる発熱を除去し、安定に6×10^9個/cm²/s以上の熱外中性子ビームを生成できる核破砕ターゲット及び中性子減速用モデレータを開発。 高効率中性子発生Liターゲットを開発。 中性子発生ターゲットの開発により、10kWクラスの小型熱中性子発生源及びそれを用いたコンパクトパルス中性子解析システムを実現。 | <ul style="list-style-type: none"> INFN-LNS (伊) で陽子ビームパワー150kW (5MeV, 30mA) の線形加速器によるBNCTプロジェクトが進行中。期待される熱中性子ビームは3×10^9個/cm²/s程度。 我が国が有する、熱外中性子発生量の増強が可能な数十MeVの大出力小型サイクロトロン加速器技術と中性子生成技術は、世界トップレベル。 小型陽子リニアックLiターゲットは我が国独自技術。 |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記治療法における線量分布のリアルタイム可視化による治療精度の高度化 | <ul style="list-style-type: none"> 血液中のホウ素濃度から患部の濃度を類推し、計算による線量評価を基に中性子の照射量を決めているため、正確な線量評価が困難。 高精度化のためには照射中に線量分布を三次元で計測することが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子捕捉反応過程で放出されるガンマ線の発生点と量を計測し、三次元線量分布の画像化が必要。PETカメラ等に使用されているシンチレータでは、エネルギー分解能が10%前後、感度は1万個のバックグラウンドから1個の本物事象を選び出すのが限界。 | <ul style="list-style-type: none"> 二次元にピクセル化したテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器の多層化、膨大な多次元情報処理の高速化、画像再構成の高精度化などにより、エネルギー分解能が1.5%以下、位置分解能が1~3mm、感度が10倍の三次元ガンマ線カメラを開発。 | <ul style="list-style-type: none"> JAXA宇宙科学研究本部と阪大が高いエネルギー分解能を有する世界初のCdTe多層検出器によるコンプトンカメラを開発し、世界をリード。 |
| <p>(治す・観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> がん治療効果を高める、放射線・抗がん剤相乗効果による新たな治療法の創成 | <ul style="list-style-type: none"> 現状では放射線効果と抗がん剤効果の相乗効果の定量的研究がなされていない。 BNCTにおけるB薬剤、PET用F薬剤、放射線感受増培薬剤のがん部への効率的伝達システム(ドラッグデリバリーシステム:DDS)の確立と、直接・間接効果を分析するシステムの確立が必要。 レーザーイオン源・誘導加速重イオン線形加速器による生体水のイオンパルスラジオリシスの実現に期待。現状ではHIMACでの少ないマシントイムで、マイクロ秒以降の遅い過程し | <ul style="list-style-type: none"> 間接効果の定量分析を可能にする高量子効率SバンドフォトカソードRFガン線形加速器・レーザーシステムによる生体水中での薬剤の電子・X線パルスラジオリシスが有効だが、その基礎研究が一部で始まったばかりであり、小型装置開発による当該研究の普及・活性化が期待。 現状普及している低量子効率銅カソードではレーザーが大きいものの電子発生量が少なく測定のSN比が悪く、Cs₂Te高量子効率カソードシステムでは光電面作製薄膜装置も電子銃に付加しなければならず | <ul style="list-style-type: none"> 小型化のためのカートリッジ型高量子効率フォトカソードRFガンの開発。 波形制御の容易な加速電圧モジュレータの開発、サブナノ秒・アンペア級高強度イオンビームバンチの実現等により、電子・X線分析システムと同等のレベルの時間分解能10nsを実現する、レーザーイオン源・誘導加速重イオン線形加速器によるイオンパルスラジオリシスシステムの開発。 | <ul style="list-style-type: none"> フォトカソードRFガン線形加速器・レーザーによるパルスラジオリシスシステムは、我が国で4施設(東大、阪大、早稲田、住重)、米国BNL、仏国Univ. Paris. Sudで稼働中。 レーザープラズマカソードパルスラジオリシスに関しては、フランスの応用光学研究所で初めて実験がなされたがデモ的で終わっている。アメリカアルゴンヌ国立研究所でも開発がなされているが、安定な電子発生に成功していない。 HIMACではマイクロ秒オ |

| | | | | |
|---|---|--|--|--|
| | <p>か分析されていない。がんを狙い打ちしているブラックピーク周辺の低速領域でのがん細胞殺傷の放射線物理化学反応が解明できればそれを相乗あるいは抑制する薬剤の送達システムの開発へと発展し、被ばく線量の低減や正常細胞の防護に役立つ。</p> | 大型となる。 | | <p>ーダーのイオンビームパルスラジオリシスが可能。フランスサクレーではナノ秒レベルの研究が進行中。原機構T IARAでも検討中。</p> <ul style="list-style-type: none"> 小型イオン加速器でのイオンパルスラジオリシシステムはまだ存在しない。 周辺細胞の放射線物理化学反応の解明については、世界の研究レベルは、反応種類・イオン種・エネルギー・空間分布・時間分解などの系統だった詳細分析に至っていない。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> 生体の放射線効果の新しいモニターとして、ミュオンの導入が有効。放射線効果の物理化学的側面を解明し、なにが細胞の致死に有効かを究め、治療計画に貢献する。 | <ul style="list-style-type: none"> 殆ど手が付けられていないが、現状でかなりのことが出来る。 | <ul style="list-style-type: none"> ミュオンビームの尖端化などの向上が必要。将来診療に定着するためには小型ミュオン源の開発が必要。 | |
| <p>(観る・治す)</p> <ul style="list-style-type: none"> 診断・治療の一体化によって患者の負担の少ない医療を実現する新たな治療法の創成 | <ul style="list-style-type: none"> がんの診断と治療は別々に行われているのが現状。超早期診断・治療、患者と医療関係者の被曝低減および医療費の軽減のためには、これらを一体化する(R I 内用療法システム)ことが有効。 | <ul style="list-style-type: none"> 診断と治療が同時に可能なR I で標識したがん親和性薬剤(R I -DDS)が開発されていない。 | <ul style="list-style-type: none"> 診断に適したガンマ線と治療に適したベータ線を同時放出するR I にごん細胞に特異的親和性を持つモノクローナル抗体を標識したR I 標識抗体などのR I -D S 開発。 | <ul style="list-style-type: none"> がんの診断・治療の一体化にはR I -D D S の開発と共に高精度診断装置の開発が必要なるため、世界的に実現されていない。 |
| | | <ul style="list-style-type: none"> 診断・治療用R I -D D S による超早期診断・治療では、体内からの極微弱なガンマ線を高感度・高空間分解能で計測する必要があるが、これを実現する診断装置が開発されていない。 | <ul style="list-style-type: none"> 二次元にピクセル化したテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器の多層化、膨大な多次元情報処理の高速化、画像再構成の高精度化などにより、エネルギー分解能が1.5%以下、位置分解能が1~3mm、感度が10倍の三次元ガンマ線カメラを開発。 | |
| <p>(治す)</p> <ul style="list-style-type: none"> RIビーム利用による次世代がん治療法の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 現在治療に用いられている重粒子線は安定核種のC12であるが、放射性核種であるC9のRIビームでより高い治療効果が期待。 | <ul style="list-style-type: none"> C9照射量は約10^7粒子/秒が必要であるが、現在のRI取出装置では約10^5粒子/秒に留まる。 RIビームを所定のがん細胞部位に照射する精度がない。 | <ul style="list-style-type: none"> RI (C9) ビームの品質向上が必要(純度90%以上のRFディフレクタの開発)。 RIビームを所定のがん細胞部位に照射する技術(マイクロメータ)開発。 | |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 心疾患と糖尿病による大腿部血栓の治療に有効な単色X線による経静脈血管造影と、カテーテルによる治療の、病院レベルでの普及 | <ul style="list-style-type: none"> 経動脈診断治療では150keV X線管を透視光源に用いたカテーテル挿入経動脈診断治療により実施しているが、静脈では経静脈では小型単色X線源がここまで存在していないためKEK蓄積リングのみで実施。 造影剤ヨウ素が選択吸収できる33keVの単色X線が病院治療室サイズで発生可能な装置の開発が課題。 | <ul style="list-style-type: none"> コンプトンマルチ散乱単色可変X線源により小型化が期待されるが、現状システムでは10^9光子/秒で空間分解能$100 \times 100 \mu m^2$で1秒10コマの動画像化にとどまるため、毛細血管の鮮明画像による診断治療が困難。 レーザー蓄積・周回システムの向上によって、増幅器搭載により、X線管動脈診断システムと同様の10^{11}光子/秒実現させ、空間分解能$25 \mu m^2$光で1秒30コマを実現させることにより、経動脈診断治療と同等の訓間分解能とスムーズな見やすい画像が期待される。 | <ul style="list-style-type: none"> 左記課題を克服するため、現状Xバンドリニアック・Y AGレーザー周回システムで10^9光子/秒の強度を、レーザー周回システムにレーザー媒質搭載するか、Sバンドマルチバンチシステムのレーザースーパーキャビティの向上。 | <ul style="list-style-type: none"> 米国ベンチャー企業にて40 MeVシンクロトロンとレーザースーパーキャビティを検討中だが、装置はより大型でコスト高。また電子ビームは40MeVで捨てられるので重厚な放射線遮蔽設備を必要とする。 |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 従来では見ることのできない、がん組織から骨の異常組織に至るまでを対象とした高分解識別画像システムの構築とそのコン | <ul style="list-style-type: none"> X線を用いた診断法として従来の吸収画像だけではなく、空間干渉性を用いたX線屈折画像は、わずかな組織の違いを高いコントラストで描画できるため注目されている。(例えば、乳 | <ul style="list-style-type: none"> 大型放射光施設を用いたX線屈折画像法のテスト実験が行われているが、大型施設であるために、各病院への導入が困難。普及のためには広く普及できるコンパクトなX線屈折画像臨床シ | <ul style="list-style-type: none"> 医学臨床応用システムを目指し、$100mm \times 100mm$の観察視野、焦点サイズ50ミクロン以下、エネルギー分解能$E=40keV$時に$\Delta E/E \sim 1/10$、X線強度10^{11}光子/秒を達成する、コンパクトERL(数10 | |

| | | | | |
|---|--|--|---|---|
| <p>パクト化</p> | <p>がんやリュウマチの早期診断が可能になる。)</p> <ul style="list-style-type: none"> 一方、微小焦点X線源から発生するX線を用いた乳癌検診装置が開発されているものの、エネルギー幅が広いために屈性画像の鮮明度には問題がある。 観察視野は100mm×100mmを確保し、全X線強度が10^{11}光子/秒以上の空間干渉性の高いコンパクトX線光源が医学臨床応用の目的には不可欠。 | <p>システムの構築が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> 微小焦点X線源(焦点サイズは$100\mu\text{m}$)の場合にはエネルギー幅が広く($\Delta E/E \sim 2$ @$E=20\text{keV}$)、屈折画像のコントラストが悪い。 | <p>MeVの加速エネルギーのエネルギー回収型リニアック)をベースにした大強度レーザーコンプトン装置(電子ビームとレーザー光を相互作用させて発生する高エネルギー準単色X線源)の開発。</p> <ul style="list-style-type: none"> 大強度レーザーコンプトン装置に必要な、X線強度および高い空間干渉性を実現する高輝度電子銃と輝度を落とさずかつ10kHz以上の繰り返しで加速する超電導空洞技術。 大強度レーザーコンプトン装置を実現するに当たって上記とともに必要な、大強度・高輝度レーザー(10mJ @10kHz)の開発。 <p>※3</p> | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ヘモグロビンの磁性をミュオンが感知し新しい脳機能研究が出来る事がわかってきた。脳の活性化の探知を、10cm以上の深部のmmの領域を外部磁場無しに、秒以下の時間分解でリアルタイムに行うことが出来る。MRIと相補的な情報を得られる。ミュオンの高感度磁気プローブとしての特性はさらに大きな生体医学利用が可能で、血流異常の検知、スーパーオキシサイドの検知などに威力を発揮するであろう。 | <ul style="list-style-type: none"> 人体血液中・水溶液中のヘモグロビンの実験が行われている程度である。 | <ul style="list-style-type: none"> mmサイズで単色の100MeV程度のミュオンビームが必要。小型加速器でミュオンを作りビームを先端化する技術が望まれる。 | <ul style="list-style-type: none"> 日本が先導しているが、米国で関心を寄せている。 |
| <p>(創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 社会復帰を助ける人工筋肉の創出 | <ul style="list-style-type: none"> 人工筋肉を実現するためには、熱、電気、pH等の外場に応答するソフトマターのスローダイナミクス解明が必要。10^{-12}~10^{-6}秒の広いダイナミクスレンジをカバーできることも重要。 | <ul style="list-style-type: none"> 左記を解決する要素技術(スピンエコー、背面散乱分光器、チョッパー分光器などに係わる技術)は開発済み。 | <ul style="list-style-type: none"> J-PARCでのスピンエコー装置の建設。 JRR-3での背面散乱分光器の設置。 J-PARCでの汎用チョッパー分光器の設置。 | <ul style="list-style-type: none"> 米国SNSでは、ドイツがスピンエコー装置の建設を進めている。 我が国には背面散乱分光器が1台もない。 |

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 (一般的課題) | 一般的課題に係る現状 (技術的課題) | 技術的課題に係る現行技術の現状 | 開発すべき要素技術、数値目標 | 備考・海外との比較 |
|--|---|--|--|--|
| <p>☆世界的課題解決に貢献する社会の実現 (CO₂削減等、環境負荷の軽減と持続可能な社会の創出)</p> <p>(創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 自動車、船舶などの交通機関への燃料電池搭載技術 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料電池の普及が期待されるが、高耐久化、高出力化などの技術的課題や経済性の課題が残されており、現状で実用化は困難。 燃料電池の高耐久化に必要な高分子電解質膜の耐熱性が不足。100℃以上が必要だが、現状70℃まで。 | <ul style="list-style-type: none"> イオンビームをグラフト重合に活用することで導電性と機械強度に優れた膜は実現できるが、現状では70℃までしか使えず、耐熱性が不足。 照射位置を制御しながら、大面積を均一にイオン照射する技術がなく、導電率や耐久性に優れた高密度電解質膜の高品質化・量産化に問題。 | <ul style="list-style-type: none"> ①大面積(50cm角以上)均一イオン照射(位置制度 m級)技術の開発 ②ナノ穿孔技術とグラフト重合技術の高度化 ③産業利用に適したコンパクトで低コストの超伝導AVFサイクロトロンにおける10GeVクリプトンイオンビーム等の大強度化(nA級)により、高い導電性と機械強度に加え、100℃以上の耐性を有する厚さ150ミクロン以上の電解質膜を実現可能。 | <ul style="list-style-type: none"> MSU(米国)の超伝導AVFサイクロトロンで加速される10GeVクリプトンイオンビーム電流は0.2粒子ピコA程度。幅50cmの範囲で10⁸~10⁹個/cm²の密度のイオン穿孔を行うには1時間以上の照射時間が必要であり、産業利用には程遠い。 高分子膜のナノ穿孔技術とグラフト重合技術では日本はトップレベル。 材料開発のためのイオン照射技術ではGSI(ドイツ)と比肩。イオン照射位置精度が高く大面積均一照射が可能な技術が完成すれば、電解質膜の実用量産化が大きく前進。 |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 多様な用途での燃料電池利用 | <ul style="list-style-type: none"> 大出力・大容量・小型化のためには、燃料電池内の水素の挙動を解析し、電池内で水分が滞留しない構造を実現することが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 電解質膜中での分布を観るためには、中性子ラジオグラフィの高解像度化が必要。(現状で0.1mmの分解能であるが、厚さ数10μmの電解質膜厚さ方向で水分分布を観るためには0.01mmが必要。) 中性子光学素子を駆使すれば集光型中性子超極小角散乱法が可能になり、観測対象スケールは1Åから10μmで中性子ラジオグラフィではカバーできない観測領域が解析可能。このスケールにより燃料電池膜中の水の分布や動きを捉えることが可能であり、低加湿下で動作可能な燃料電池膜の解析に有望。 質量が水素の1/9の正ミュオンを電解質膜中に静止させることで、水素原子の移動挙動を10⁻⁵秒から10⁻¹⁰秒で測定可能。 陽電子消滅法から、水素挙動の解析のために必要な膜中の自由体積の平均寸法分布と相対濃度が評価できるが、親水基と疎水基を分離評価する方法は確立していないため正確な評価ができない。また、膜特性の劣化(効率や機械特性の低下)とマイクロ構造変化 化学状態変化の相関は未 | <ul style="list-style-type: none"> 集光型中性子極小角散乱法のための高効率中性子光学を用いた中性子ビーム高輝度化とイメージング検出器の開発(中性子ラジオグラフィの高解像度化)により、0.01mmまで高解像度化。 燃料電池の電解質膜における水素イオン・プロトン伝導が温度、水分量から受ける影響を把握する伝導挙動把握装置(パルス幅1μ秒、50Hz, 500VミュオンNMRの開発)。 従来法と比べて約4倍の分解能を実現するためのミュオン(通常は水素)をプローブとして利用するNMR法を開発。 膜のマイクロ構造や化学状態の測定のための超高時間分解の陽電子寿命測定装置、及び、時間・運動量相関測定装置。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子ビーム集束技術において我が国は世界トップレベルにある。 J-PARCの中性子検出器、NHKが開発したHARP管、高速CD技術も最先端。 高速デジタル技術を用いた高時間分解能陽電子寿命測定法の開発で我が国は日本はトップレベルにある。 |

| | | | | |
|---|--|--|--|--|
| | | 知。 | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> 水素を安全にかつ効率的（高密度）に貯蔵するための水素吸蔵合金による燃料電池の開発に期待。 しかしながら、水素吸蔵合金では、水素吸蔵サイクルでの膨張・収縮により材料劣化が引起され、吸蔵量が低下することが問題。（吸蔵量と耐久性を同時に確保することが課題。） | <ul style="list-style-type: none"> 陽電子消滅法により、水素吸蔵サイクルで発生する原子空孔、マイクロボイド、転位を検出することができるが、より詳細な知見を得るためには水素化後の微粒子（数μm）を評価する必要がある。 μSR法により、水素吸蔵合金中及び表面における水素の局所的状態と運動を知ることが可能。詳細な知見を得るには高時間分解能測定が必要。また表面測定には低速ミュオンビームが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 高強度($10^{10}\text{e}^+/\text{sec}$以上)の陽電子マイクロビーム($1\mu\text{m}$径以下)の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> ミュンヘン工科大学では研究所による高強度陽電子ビーム、輝度強化技術、短パルス化技術を用いた陽電子マイクロビームの発生を計画。 |
| (観る) ・環境負荷の低いエネルギー貯蔵材料の創成 | <ul style="list-style-type: none"> 環境負荷の低いエネルギー貯蔵材料（リチウムイオン電池材料等、燃料電池材料、水素吸蔵材料、プロトン導電体、酸化イオン伝導体等、熱電変換材料など）は、すべて水素や酸素、リチウムなどの軽元素がキーマテリアルであり、質量が水素程度である中性子がこれらの検出プローブとして最も適しているため、実用電池作動条件下での計測が材料創成に不可欠。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子強度が弱い（現状の中性子数は$10^6/\text{cm}^2/\text{sec}$）、一測定の計測時間が長く（一測定4～5時間）、電池の充放電時間（数十分程度）と比較して実用条件下での計測は難しい。そのため、エネルギー貯蔵材料の性能向上に向けた計測技術の進歩が停滞している。 中性子ビーム強度の増大はJ-PARCがフルビームに到達すれば達成できる。（$10^8/\text{cm}^2/\text{sec}$以上が可能） 多数のコンポーネントで構成される電池の特定の部位（$100\mu\text{m}$程度）の構造変化のみを選択的に計測するため中性子集光が不可欠（現状では数ミリ程度）。 | <ul style="list-style-type: none"> 充放電下での時間分解能の高い中性子計測技術の開発。 中性子集光光学系により、百マイクロメートルまでの集光技術を実現。（再掲） | <ul style="list-style-type: none"> 米国SNSはJ-PARCと同レベルの能力を有する。 中性子集光技術において我が国は世界トップレベルにある。 |
| (創る・観る) ・プラスチックエンジンの創製、高強度・高弾性率繊維等の軽量材料によるエネルギー消費の削減 | ※5（後掲）に同じ | ※5（後掲）に同じ | ※5（後掲）に同じ | ※5（後掲）に同じ |
| | <ul style="list-style-type: none"> 軽量で強靱な高強度・高弾性率繊維の創製のため、実際の製品製造プロセスを直接観察し、高弾性率繊維の生成機構を明らかにすることが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 左記を解決する要素技術（放射光における小角・高角同時測定製造機械を持ち込めるビームラインがなく、専用ビームライン（小角、広角同時測定装置、中性子における広範囲Q測定装置、等）の要素技術は開発済）。 大型紡糸装置のビームラインへの設置が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> SPring-8における小角、広角同時測定ビームライン建設。 J-PARCにおける広範囲Q測定装置の建設。 専用ビームラインへの大型紡糸装置の設置。 | <ul style="list-style-type: none"> 海外放射光施設では既に大型紡糸装置を設置しているものがある。 中性子ではまだ大型紡糸装置が設置された例はない。 |
| (観る) ・船舶表面等の摩擦軽減材料の創出等によるエネルギー消費の削減 | <ul style="list-style-type: none"> 表面・界面解析技術は遅れている。 | <ul style="list-style-type: none"> ダイナミックレンジ6桁の中性子反射率計の整備、斜入射小角散乱装置の整備が期待（要素技術は開発済）。 | <ul style="list-style-type: none"> J-PARCにおける中性子反射率計の早期建設。 SPring-8におけるGISAXS装置（斜入射小角X線散乱装置）の設置と解析技術の確立。 J-PARCにおけるGISANS装置（斜入射小角中性子散乱装置）の設置と解析技術の確立。 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉・加速器の両施設でGISANSの整備は海外では急速に進んでいる。放射光施設でも同様。 |
| (創る) ・CO ₂ の削減を可能にする生分解性材料の開発 | <ul style="list-style-type: none"> CO₂の削減のためには、天然由来の高分子や微生物産生の高分子を原料とした材料開発が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> セルロースについては、100kGyでの放射線橋かけ技術により100%のセルロース誘導体から生分解性ゲルの作製に成功。コスト削減 | <ul style="list-style-type: none"> 量子ビーム利用によるプロセス技術の改良により、材料製作に要する線量を10kGyに低減化。 | <ul style="list-style-type: none"> IAEA、FNCAを中心として、天然高分子の改質技術や金属捕集材の研究が世界的に進められているが、日本の技術的優位性は高く、 |

| | | | | |
|--|--|---|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> 架橋に放射線を使用する場合、作成に高線量を要するためコストがかかるという課題がある。 | <p>のための橋かけ線量の低減化や生分解性高分子の性能改善が必要。</p> | | IAEA、FNCAプロジェクトの指導的立場にある。 |
| <p>(創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 工場・生活排水等の処理において利用可能な、金属捕集材料の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 水中の金属を捕集する材料については、グラフト重合を利用する現行技術では高コストであり更に高性能なものが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 石油由来の高分子を素材にして、100kGyの線量で放射線グラフト重合し、金属捕集材を作製。製造コスト削減と性能向上に向けたプロセス技術の開発が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 実用化のため、高分子基材やモノマーの種類、グラフト重合条件の最適化により、グラフト線量を50kGyまで低減するとともに、捕集材の耐久性、吸脱着特性を大幅に改善。 高分子材料の低コスト短時間大量処理が可能な電子線源を構築する真空ナノエレクトロニクス技術、高出力化技術等の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 真空ナノエレクトロニクス分野では世界をリードしている。 |
| <p>(創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 環境中から汚染物を高選択性・高効率で吸収・除去できるファイトレメデーション植物の創出 | <ul style="list-style-type: none"> 我が国独自のイオンビーム育種技術で環境耐性・浄化作物、環境浄化樹木等の品種改良が可能と考えられるが、照射施設は大型、高コストであり、開発環境が限られている。 | ※7 (後掲) に同じ | ※7 (後掲) に同じ | ※7 (後掲) に同じ |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射性廃棄物の毒性低減による、持続可能な社会のための原子力平和利用の高度化 | <ul style="list-style-type: none"> 我が国において、原子力発電所から排出される使用済燃料は、再処理後に高レベル放射性廃棄物として地層処分するが、加速器駆動核変換により、高レベル放射性廃棄物の毒性を低減し、管理を比較的容易にできる可能性がある。 | <ul style="list-style-type: none"> 核変換については、現状では1MW程度である陽子加速器の出力を10MW以上とする超伝導陽子加速器技術が必要。 MEGAPIE国際共同実験(出力700kW、最高温度350℃)で達成した性能を大幅に上回る(10MW以上、500℃)鉛ビスマス核破砕ターゲット技術が必要。 現状での未臨界原子炉技術は、核変換処理の対象となるマイナーアクチニド(MA)を含まずに臨界実験レベル(熱出力10W程度)であり、MAを多量に含んだ数百MW級の未臨界原子炉技術の確立が必要。 加速器駆動の原子炉では従来型の原子炉と異なり高速中性子を利用するため、炉の設計の重要な要素となる不安定核の反応断面積の知識が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 超伝導加速器システムの実証試験。 鉛ビスマス核破砕ターゲットに関する材料及び熱流動の試験。 J-PARCに500W未臨界原子炉を接続して模擬試験の実施。 J-PARCに600MeV超伝導LINACと200kW鉛ビスマス核破砕ターゲットを付設して実証試験。 J-PARCに続き、システム全体の総合試験を行う実験炉級ADSを国際共同プロジェクトとして整備(2020年以降)。 不安定核種の核反応断面積や反応特性(反応し易さ)データを取得する装置(多種粒子測定装置)を開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 加速器駆動核変換はJ-PARCの第II期計画において構想。「現時点で整備計画が具体化していない、核変換実験施設については、原子力委員会等の国レベルの検討結果を踏まえ、計画を具体化することが適当である。」(平成15年12月大強度陽子加速器計画中間評価報告書) 加速器駆動核変換の他、高速増殖炉(FBR)サイクルにより廃棄物量を削減するという流れもある。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> 使用済み核燃料棒のウランの残量評価に高エネルギーミュオンのラジオグラフィが有効。遮蔽体の外部から透過像撮影が可能。 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙線ミュオンのラジオグラフィで火山や高炉の内部探索が成果をあげているが、加速器ミュオンの本格的利用は行われていない。 | <ul style="list-style-type: none"> 先端ミュオンビームがいる。比較的小型の加速器を再処理施設に置きミュオンを作り利用すべきである。 | |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 高変換・高信頼性・長寿命シリコン半導体太陽電池の実用化 | <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池の高性能化にはシリコン材料の超高純度化が必要であるが、不純物が結晶格子間にあるのか、格子間にあるのか、現状では特定困難であり、また、どのような状態か(イオンか原子か)把握できていないため、超高純度シリコン半導体の創成が難しいという問題がある。超高純度化シリコン材料の評価手法を確立することが必要。 優れた機能性を有する表面 | <ul style="list-style-type: none"> メスbauer分光法やベータNMR法を用いた原子レベルの構造解析装置(スペック)が実現している。 さらなる解析のためにはRIビーム発生装置(現状純度90%程度)とガンマ線測定装置(現状計数効率約20%)の活用が有効。 高さ深さ分解技術は未確 | <ul style="list-style-type: none"> 高純度RIビーム発生装置の開発。(純度99%程度) 高感度ガンマ線測定装置の開発。(計数効率99%) 所定の場所にRIビームを照射する技術の開発。(寸法公差約10μm) 陽電子消滅と離脱オージェ | |

| | | | | |
|--|--|---|--|--|
| | <p>活性層や多層膜の特性発現・向上ためには、照射損傷、非化学量論組成、格子不整合、自己補償効果などに起源を持つ真性欠陥の制御のための測定技術を確立することが必要。</p> | <p>立。陽電子ビームを用いることで、空孔型欠陥の高さ深さ分解が可能であるが、単純打ち込みではストラグリングと熱化後拡散効果のため深さ分解能：50nmが限界。超薄膜や界面を評価するためには、従来よりも高い深さ分解能が必要。</p> | <p>電子同時計数測定や、スパッタリング・斜め研磨技術と陽電子マイクロビームの併用による高さ深さ分解技術の確立。このための高強度、短パルス陽電子マイクロビーム技術。</p> | |
|--|--|---|--|--|

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 (一般的課題) | 一般的課題に係る現状 (技術的課題) | 技術的課題に係る現行技術の現状 | 開発すべき要素技術、数値目標 | 備考・海外との比較 |
|--|---|---|--|---|
| <p>☆多様な人生を送れる社会 (ハンディキャップをなくし、「いつでも・どこでも・だれでも」を可能にするユビキタス社会の実現) (創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 高速移動体通信端末などを可能にする、超高密度半導体回路製造技術の確立による超高速 超低電力化 | <ul style="list-style-type: none"> これまでの半導体開発手法では、半導体材料の高純度化や、nmレベルでの超高集積化が困難であり、技術的限界に達しているとともに、経済性にも課題がある。 集積回路については、現行の回路転写技術が限界に達しているため、加速器による極紫外線(EUV)露光での半導体リソグラフィが必要だが、リソグラフィには大強度でなければならず、小型化・低コスト化との両立が困難。 低コストで運用できるERLが有力だが、大強度化と小型化が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> コスト低減のため、ERL小型周回軌道装置の実現。現状周長20m程度を2m程度に小型化。 | <ul style="list-style-type: none"> 高輝度大電流入射器(平均電流10mA以上、エミッタンス1mm-mrad程度)を開発。 レーザーによる電子変調技術(レーザーアンジュレータFEL)の開発。 小型ERL周回軌道(2m程度)を開発。 小型超伝導ERL-FEL加速技術の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 加速器ベースEUV光源技術は独DESY(小出力)、米Intel社(基礎研究)が先行しているが、ERLでないため運転コストの面からEUV露光実用化が困難。 米Intel社はEUV露光技術による量産を2009年に開始することを目標に掲げている。 |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記超高密度半導体材料の開発・高品質化を目指した機能解明 | <ul style="list-style-type: none"> 従来の性能を凌駕する新奇材料開発には、半導体物質の機能解明手法の高度化、特に動的特性の解明を目指した高時間分解能測定手法の開発が必要。現状では基底状態(動作していない状態)の構造や電子状態の解析しかできないが、デバイス動作中の動的な解析が必要。 新奇な磁性物質探索のため、J-PARCによる偏極中性子散乱研究の推進が有効。広範な波数、エネルギー領域を一挙にカバーすることが期待されるが、現行技術では限定された範囲の波数、エネルギー領域での観測しかできない。 | <ul style="list-style-type: none"> 放射光に特徴的な計測法であるXAFS、X線構造解析、共鳴・非共鳴弾性散乱などの高時間分解能化が必要。具体的には、放射光を生成する電子ビームの短バンチ化。現状では20~40ピコ秒程度。FELでは、100フェムト秒時間分解。 J-PARCの大強度パルス中性子を用いる散乱研究のためには、広範なエネルギー領域及び立体角領域をカバーする偏極素子、偏極マイクロビーム、高偏極度ビームが必要。現状では単色中性子の使用により立体角領域を絞った~Åスケールの観測が可能。 白色パルス中性子の利用により、観測可能領域を一挙に拡張し、かつ<math>0.1\text{\AA}</math>まで観測スケールを拡張することに | <ul style="list-style-type: none"> 極短パルスレーザー、クラブ空洞による電子ビームの短バンチ化技術について、0.1ピコ秒を目指す。 FELについてはXFEL利用推進研究課題として実地中。 白色パルス中性子に対応する中性子偏極デバイス(3He偏極フィルター、四極子、六極子磁気中性子デバイス、多チャンネル偏極スパーミラー)の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> ALS(米)では、レーザーを利用した短バンチ化を開発。 四極子、六極子磁気中性子デバイス開発は我が国が世界をリードしており、偏極中性子を利用した小角散乱や三次元偏極解析などは世界的にもトップレベル。 |

| | | | | |
|---|--|---|--|---|
| | | 期待。 | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> 半導体中で問題となる水素不純物の状態に関してはμSR法による評価は重要であり、新規材料の伝導機構解明に不可欠。 | | <ul style="list-style-type: none"> 高時間分解能のμSR測定手法の開発。 ミクロンオーダーの位置高分解能の陽電子測定装置開発。 低速ミュオンビームによるμSR測定手法の開発。 | |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 超大容量記録を可能にする、高性能磁気・電気的新機能材料の微視的物性評価 | <ul style="list-style-type: none"> 新機能材料の微視的物性評価には中性子等の量子ビーム(特に、磁性評価を可能にする偏極中性子)が不可欠であるが、手軽に利用できるシステムの構築が遅れているため、実用材料への応用は遅れている。 磁性新機能物質の発掘、改良、実用化、そして品質管理まで一貫した偏極中性子による実用材料実験法の実現に期待。 | <ul style="list-style-type: none"> 広いエネルギー領域の中性子に適合する偏極素子の開発が不可欠。現状は熱中性子から冷中性子までの全エネルギー領域(1~200meV)をカバーするフィルター型偏極素子として、再現性の高い偏極ヘリウム3フィルターが必要。 熱中性子及びそれ以上のエネルギーにおいて極めて広いエネルギー範囲をカバーしなおかつ長い利用実績を持つ動的核偏極法による偏極陽子フィルターを簡便なシステムとして確立することに期待。 | <ul style="list-style-type: none"> 70%の偏極度を示す偏極^3Heを大量製造する偏極ステーションの開発、作製、設置及び偏極^3Heの配送及び分光器への設置システムの開発及び構築。 動的陽子核偏極を簡便に利用するため、簡便な低温システムと全体のシステムの開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 欧州(ILL)、米国(SNS)ではフィルター型中性子偏極素子の導入に向けて精力的な開発研究が行われており、ここ1、2年で実用化される可能性が高い。 動的陽子核偏極は技術的蓄積があり、ごく短期間で実用可能。 中性子だけで一貫したシステムを組む必要はあるか?(放射光との相補的利用は?) |
| | <ul style="list-style-type: none"> 磁性新機能物質のμSR法による評価と機構解明が重要であるが、特に薄膜材料については手法の開発が必要となる。 | <ul style="list-style-type: none"> 特に磁性薄膜の解明には低速ミュオンビームが有利であるが、手法として確立していない。 | ※4(前掲)に同じ | |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> ユビキタス社会を実現する宇宙衛星で利用可能な高度材料開発 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙空間では高放射線場であるため、耐放射線性半導体デバイスの開発が必要。 半導体デバイスの高集積化 <ul style="list-style-type: none"> 高速化、超微細化、省電力化が進むに従いマルチビットアップセットやシングルイベントラッチアップ等の放射線による新たな誤動作・破壊現象が発生しており、評価手法の確立が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙線重粒子に対する半導体素子の評価手法の確立が必要。現状、LETで評価している。これはイオンが半導体の中を通過するとき与えるエネルギーの大きさとこの数値が大きくても動作する素子の方が耐久性が高い。現在数十MeVまでは達成。 現状は百MeVイオンビームでの評価であるが、宇宙模擬にはGeV級以上での評価が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙重粒子線最大のLETをもつウランについての素材評価手法の開発。 多種類の宇宙線を模擬した重イオンビーム照射装置の開発。 超多価イオン生成技術とビーム径1ミクロン以下のGeV級重イオンマイクロビーム技術の開発により、耐放射線性新材料半導体素子開発に必要な高放射線環境下の実装評価試験環境を実現。 KEKBooster改造の全種イオン加速器を材料照射専用の加速器として稼働させて利用する。レーザー駆動の金属イオン源の導入で、全ての重イオン(<2GeVまで)を供給。 | <ul style="list-style-type: none"> 半導体の耐放射線性評価技術では欧米に比肩するレベルに達したところ。 評価データを基に開発している宇宙用半導体素子は世界最高性能を有する。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> スイッチング素子の電気伝導度の高速反転機能を直接観察するため、サブピコ秒の時間分解能での観測が必要。 試料へのダメージがないことも必要。(X線の場合は10^7光子/パルス程度まで) | <ul style="list-style-type: none"> レーザーライス法では0.1ピコ秒の光パルスで実現しているがS/N比は1程度で広い時間幅を持ったバックグラウンドの中に同じ程度の強度の0.1ピコ秒のシグナルであるため、テスト的な測定が限界。(高速スイッチング素子の開発研究のためには、少なくとも100程度以上のS/N比が必要。またX線強度は10^7光 | <ul style="list-style-type: none"> コンパクトERLをベースにした電子源と高輝度短パルスレーザーを組み合わせた大強度レーザーコンプトンによるX線源の開発。 超電導空洞技術、大強度・高輝度レーザーについては、※3(前掲)に同じ。 | <ul style="list-style-type: none"> XFELではフェムト秒での観測が可能であるが、試料へのダメージ等を軽減したシステムは未完。 XFELにシーディングを導入することにより、試料へのダメージの軽減が可能。(再掲) |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 高速情報通信を実現する通信機器(次世代高速スイッチング素子)の開発 | <ul style="list-style-type: none"> スイッチング素子の電気伝導度の高速反転機能を直接観察するため、サブピコ秒の時間分解能での観測が必要。 試料へのダメージがないことも必要。(X線の場合は10^7光子/パルス程度まで) | <ul style="list-style-type: none"> レーザーライス法では0.1ピコ秒の光パルスで実現しているがS/N比は1程度で広い時間幅を持ったバックグラウンドの中に同じ程度の強度の0.1ピコ秒のシグナルであるため、テスト的な測定が限界。(高速スイッチング素子の開発研究のためには、少なくとも100程度以上のS/N比が必要。またX線強度は10^7光 | <ul style="list-style-type: none"> コンパクトERLをベースにした電子源と高輝度短パルスレーザーを組み合わせた大強度レーザーコンプトンによるX線源の開発。 超電導空洞技術、大強度・高輝度レーザーについては、※3(前掲)に同じ。 | <ul style="list-style-type: none"> XFELではフェムト秒での観測が可能であるが、試料へのダメージ等を軽減したシステムは未完。 XFELにシーディングを導入することにより、試料へのダメージの軽減が可能。(再掲) |

| | | | | |
|--|--|--|--|---|
| | | 子/パルス程度は最低必要。) | | |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 新原理に基づく超高速大容量通信の実現 | <ul style="list-style-type: none"> イノベーション25を睨んでそれまでに必要とされる超高速大容量通信の実現には、従来型の磁気記録やシリコンベースの集積回路には高密度化の限界や、高速化に伴う駆動電力の増大という限界がある。しかし現状ではそれらに代わるデバイスの原理が確立しておらず、実用化にもほど遠い。 高速化・大容量化にはデバイスの小型化が必須だが、その際、大型デバイスでは問題にならなかった電子の2面性(量子性)が生じてくる。現状ではデバイスの中の電子の動きの理解が充分でなく、新奇デバイス開発は複数の元素のあらゆる組み合わせを調べるしかない。 有機・無機の結合型デバイスが提唱されているが、水素を含むデバイスの構造物性(結晶構造と電子が絡んだ基本的機能性との関係)と分光物性(物質の格子・スピン振動と電子の運動との関係)の研究手法が確立していない。解決には、中性子利用が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子では精密構造解析に必要な単結晶の大きさが2mm角程度必要。(0.5mm角程度の単結晶による精密構造解析が求められている。) 中性子では格子・スピン振動の測定および解析には2週間必要。 中性子では一つの結晶の解析時間が1週間は必要。多種類の結晶解析の結果を比較するのに、数ヶ月から1年の時間がかかる。 中性子とX線を相補的に同一試料に適用できない。 | <p>中性子の高強度化、高輝度化、高速計測化が必要。 ※6(後掲)と同じ</p> <ul style="list-style-type: none"> J-PARCに専用の結晶分光解析装置を設置。 一つの結晶の解析時間を1日程度に短縮するためのデータ解析システムの開発、計測技術の標準化、自動測定化と自動解析化。 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子による結晶構造解析技術では我が国は世界に遅れをとっていたところ、1998年に科研費により作成した中性子4軸回折装置により諸外国に追いつき、最近では最先端の研究成果が出るようになってきている。 0.5mm角の単結晶中性子装置は豪州の新原子炉、米国のパルス中性子、欧州の大型原子炉の全ての装置の目玉装置として既に予算処置され建設中。これらが完成するとユーザは海外に流れ、創薬関連の新物質、新機能材料等々、大型単結晶取得が困難な重要分野の実験は全て外国で行われる可能性。 大強度非弾性散乱分光器の建設は米国SNS、英国ISIS等で先行して行われている。ソフトウェア開発も始まっている。 自動測定化と自動解析化はJ-PARCで一部開始しているが、予算措置が行われておらず開発が進んでいない。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> 革新的エレクトロニクス材料(光エレクトロニクス材料、スピントロニクス材料、イオニクス材料など)開発が必要。その設計には、ナノレベル、原子レベル、スピン状態の精密構造評価が必要。 量子スピントロニクス材料創製のためには、組織化現象を利用した量子構造の開発が必要とされているが、現状のトップダウン的な手法では実現できていない。これは表面超構造の利用により進められる可能性がある。 次世代スピントロニクス技術の開発においては、理論的に予測される100%電子スピン偏極率の達成が急務となっているが、十分なスピン偏極率を達成するに至っていない。 | <ul style="list-style-type: none"> 革新的エレクトロニクス材料を構成する超構造やハイブリッド構造等の解析(放射光及び中性子)の高精度化が必要。現状は構造決定精度は5/10000nm程度。現状の精度では、僅かな構造歪みの違いにより変化する機能の解析には不十分。 陽電子回折技術を用いることで、最表面の原子配列をバルクの影響なしに決定することができる。また電気伝導を支配する表面デバイス温度(熱振動状態)が決定できるが、これを標準的な方法として普及するためには、現状よりも3桁以上の高強度陽電子ビーム($10^8 e^+ / \text{sec}$以上)が必要。 スピン偏極陽電子を用いることで、磁性電子の運動量分布が測定でき、これより磁化率が評価できるが、スピン偏極陽電子ビームを用いた表面、薄膜、界面の選択的な磁性評価は未発達であり、高スピン偏極陽電子ビーム(スピン偏極率:90%以上)の開発が待たれる。 スピントロニクスに基づく次世代半導体開発では、スピンの緩和、拡散過程を時間領域で観測するために、単周期テラヘルツ光で位相を制御した電子スピン操作が必要であり、このため10MV/cm以上の大強度テラヘルツ光源の実現が必要。(現状テーブルトップ装置で10kV/cm程度。) μSRにより、選択的に表面におけるスピンダイナミクスの研究が可能である。 | <ul style="list-style-type: none"> コリメータや磁気光学デバイス等の開発により精密なビーム整形を達成し、それを用いて高分解能化(1/1000nm)。 イオンビームによる陽電子放出核種の大量製造による高強度陽電子ビーム($10^{10} e^+ / \text{sec} / \text{cm}^2 / \text{rad}^2 / \text{V}$)の開発。 高強度$\beta$壊変核種を用いた高偏極陽電子ビーム、または、スピン-軌道相互作用を用いた無偏極ビームの高偏極化技術の開発。 大強度単サイクル・テラヘルツ発生装置の開発。 低速ミュオンビームによるμSR測定手法の開発。(再掲) | <ul style="list-style-type: none"> 磁気光学技術において我が国は世界トップレベルにある。 反射高速陽電子回折技術は我が国で開発された技術。 スピン偏極陽電子ビームの利用は(極)表面の状態に敏感であるため、材料の磁性評価に係る技術であるSQUIDやXMCDと相補的な手法となり、表面・薄膜の磁性評価に役立つ可能性がある。 米国BNLでは、テラヘルツ専用放射光源を計画中だが、周長65mの大型施設。 |

| | | | | |
|--|---|--|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Si, Ge、グラファイトなどに注入された伝導電子のスピンの偏極は光学的方法では測定できない。偏極ミュオニウムのスピン交換反応による検出が期待できる。 | <ul style="list-style-type: none"> • 原理実験が行われている。 | <ul style="list-style-type: none"> • 強力な低速ミュオンビームが必要。 | <ul style="list-style-type: none"> • 日本が主導しているが、米国のスピントロニクス専門家が実験に参加を開始した。 |
|--|---|--|--|---|

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 (一般的課題) | 一般的課題に係る現状 (技術的課題) | 技術的課題に係る現行技術の現状 | 開発すべき要素技術、数値目標 | 備考・海外との比較 |
|--|--|--|--|--|
| ☆安全・安心な社会(建造物の長寿命化・製造物の安全) | | | | |
| (観る) ☆建造物の耐震性や自動車の安全性等を飛躍的に向上する超高強度材料(鉄より強い高分子繊維等)の創成 | <p>・高分子は軽量で成形性がよいが、強度が弱く耐熱性が低いのが欠点。 ①高弾性率・高強度高分子の創成 ②高耐熱性の高分子の創製が期待される。</p> <p>※5</p> | <p>・ナノ構造を含めた階層構造解明には、広い波数範囲と迅速な測定が必要となる。現在のところ、波数範囲で $3 \times 10^{-3} \sim 0.2 \text{ \AA}^{-1}$ が通常の範囲であるが。これをさらに $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ \AA}^{-1}$ に広げる必要がある。</p> <p>・中性子とX線ではコントラストが異なるため、これまでのX線に加え、中性子による情報は複雑なソフトマターの詳細な構造解析に不可欠。</p> | <p>・中性子ビーム集光系開発により 10^{-4} \AA^{-1} までの低波数観測の実現。</p> | <p>・海外でも同様の計画が進展。 ・中性子とX線の相補的利用が不十分。</p> |
| | <p>・材料開発評価、新物質開発では、着想段階から on site で構造等を観ることが必要である。水素を選択的に観察できる中性子は次世代を切り拓くために不可欠である。先駆的かつ革新的研究の初期段階では、中性子源を長期間にわたり随時利用できることが必要だが、中性子施設は数が限られている。</p> <p>・大学や企業の研究現場に配備可能なコンパクト中性子源が必要。</p> | ※1に同じ | ※1に同じ | ※1に同じ |
| | <p>・高強度材料の結晶構造や組成の局所的不均一性を、冶金学的に制御したり、機械的処理を行った材料の局所不均一性を結晶構造の立場から調べ、機械的特性との関連を探る必要がある。</p> <p>・しかし現状では、強い透過力で材料の内部を調べることが可能な中性子では、細かな局所構造の情報が、中性子強度が弱いため、迅速に採取することができない。</p> | <p>・放射光X線では表面の0.1mm以下の領域からの情報が得られるが、深さ方向も0.1mm程度の情報しか得られない。</p> <p>・数10cm程度の構造材料全体にわたる、0.5mm程度の領域での局所結晶構造や局所組成の情報をすばやく得られる手法がない(現状では2週間程度かかる)。</p> <p>・迅速に材料中の磁化分布測定ができる手法がない(現状では数ヶ月かかる)。</p> <p>・大型材料の機械的処理を行うための、装置が中性子散乱施設に整っていない。</p> | <p>中性子の高強度化、高輝度化、高速計測化が必要。</p> <p>・高強度化：J-PARCに専用の結晶構造解析装置を設置</p> <p>・高輝度化：高性能中性子鏡による中性子ビームの集束化(ビーム集光半径2mm以下)</p> <p>・高速・高分解能計測化：大面積高分解能2次元面中性子検出器の導入。面積 $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 以上、位置分解能0.5mm以下。</p> <p>・J-PARCに大型材料用機械処理設備を付帯</p> <p>※6</p> | |
| | <p>・大型建造物の鉄筋の健全性と腐食の進行度のモニターに、反射型 $\mu \text{ SR}$ ラジオグラフィーが有効。かぶり厚20cm程度の鉄筋の状態を10秒以内でモニターできる。</p> | <p>・宇宙線ミュオンの透過型強度減衰ラジオグラフィーは行われているが、$\mu \text{ SR}$ をラジオグラフィーに使った例はない。</p> | <p>・300MeVの電子マイクロトロンでミュオンを作り利用する車載型システムの構築が必要。</p> | |

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 (一般的課題) | 一般的課題に係る現状 (技術的課題) | 技術的課題に係る現行技術の現状 | 開発すべき要素技術、数値目標 | 備考・海外との比較 |
|---|---|---|---|--|
| ☆安全・安心な社会(食品の安全) | | | | |
| <p>(創る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐旱性、耐アルカリ土壌、耐紫外線などの環境耐性や病害耐性品種の創出などによる食糧不足の改善 高抗酸化物質含有野菜や低アレルギー穀物など高機能性食品の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 交雑による育種が進められているが、さらに品種改良を進めるためには、新しい遺伝子資源の創成が必要である。このため、従来からガンマ線等による突然変異育種が利用されてきたが、さらに新しい変異原の出現が期待されている。 イオンビーム照射による突然変異の誘発は、X線やガンマ線に比べてDNA欠失型変異が生じやすいため、変異率も高く、変異幅も広く、ワンポイントの品種改良が行える有望な育種技術になると期待。 劣悪な環境下でも旺盛に生育するバイオマス用の植物開発が必要。高乾物収量が見込まれるサトウキビ・イネ・ソルガム等で新品種の開発・試作が必要。 環境耐性を有する各種農作物の試作と、免疫・神経・消化等の生理機能調節に寄与する機能性食品の開発・試作が必要。 耐病性イネや大麦、紫外線耐性シロイヌナズナやイネ、栽培効率のよい矮性トマト、低コスト化となる低温成長促進メロン系統などの試作の成果がある。また、イオンビーム利用により、植物初の紫外線耐性遺伝子、色素蓄積遺伝子、植物ホルモン耐性遺伝子など重要な遺伝子をモデル植物シロイヌナズナから単離した成果があるが、主要作物への展開が進んでいない。 <p>※7</p> | <ul style="list-style-type: none"> 重イオンビーム照射では、突然変異誘発率が数十%という高い値を示すが、照射核種やLET効果の詳細な検討が必要。また、小麦などの高次倍数性植物、発酵食品、薬用成分高生産菌などに対する照射技術の開発が必要。 バイオエネルギーの効率的生産のため、重イオン育種法による作物のバイオマス(生物資源エネルギー)への応用を検討。 効率よく突然変異を誘発するためのイオンビームのエネルギーが不足しており飛程が短いため、イネ・ソバ等以外的大型植物種子や培養体、幼苗等への応用ができていない。 また、サイトが少なくビームタイムが不足しているため、ユーザーの必要に応じた照射回数と照射時期が得られていない。(普及が必要) | <ul style="list-style-type: none"> 照射植物・種子に応じて核種・エネルギー・時間等のパラメータを体系化した垂直照射試験装置を開発により、有益な組織を傷つけずに目的の遺伝子を破壊し、突然変異誘発率を従来の3倍程度向上させる。 MeV級からGeV級までエネルギー幅を持ち、ヘリウムから鉄までのイオン種が発生できる小型のイオン種・エネルギー可変制御技術 KEKBooster改造の全種イオン加速器(<2GeVまで)(再掲) | <ul style="list-style-type: none"> 国内で、理研、原子力機構、放医研、若狭湾エネルギーセンターでイオンビーム育種を実施 イオンビーム育種技術は、我が国が世界をリード。東南アジアやアフリカ等では、我が国と共同で利用を開始。中国や韓国では独自の技術開発を推進。 海外との共同研究では、主に相手国の主要穀物が研究対象。 食料の安定供給を目指し、海水の1/2濃度のNa⁺に植えても育つ耐塩性イネ、台風でも倒れない矮性ソバを試作済。 アレルギーフリーのソバ開発のため、約300系統の重イオンビーム照射種子を作成済。 腎疾患患者向けの低タンパク質米の開発が進行中。タンパク質の一種であるグルテリン、プロラミンの含量低下系統を選抜中。 |
| <p>(観る)</p> <ul style="list-style-type: none"> 植物・食料の毒性低減に視するイメージング技術の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 植物における有害物質の吸収低減のためには、有害物質が吸収においてどのような栄養成分と競合状態にあるかを観察し、安全性確保のターゲットとなる機能を特定することが必要。 このためには、分子レベルでの有害物質吸収機構ダイナミクスの解明のため、植物の生体分子イメージング技術が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 植物を対象とした唯一のその場観察技術である植物ポジトロンイメージングでは、ポジトロン放出核種のトレースしかできず、複数の成分の競合状態を同時にその場観察することができない。 | <ul style="list-style-type: none"> 二次元にピクセル化したテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器の多層化、膨大な多次元情報処理の高速化、画像再構成の高精度化などにより、複数のRITレーサの同時その場観察が可能となるイメージング装置の開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 植物ポジトロンイメージングは我が国の独自技術。 ※2に共通する技術。 |

| 国民生活にもたらされる成果 成果実現のための課題 (一般的課題) | 一般的課題に係る現状 (技術的課題) | 技術的課題に係る現行技術の現状 | 開発すべき要素技術、数値目標 | 備考・海外との比較 |
|--|---|---|--|---|
| ☆安全・安心な社会(生活環境における安全) | | | | |
| (観る) ・利便性と安全・安心に資するセンサ開発 | <ul style="list-style-type: none"> センサ(温度、湿度、圧力、加速度、ガス、磁場、電場、音、濃度、放射線、ハイブリッドセンサー等)に対して、使用現場(使用条件下)でセンサの応答を、構造科学的にリアルタイム解析することで高度化にきたい。 | <ul style="list-style-type: none"> 現状では、特定環境下での計測しかできない。 | <ul style="list-style-type: none"> 放射光や中性子実験施設の既設ビームラインにセンサ開発用に特化した標準設備(外場・環境の制御設備)を整備する。また、反応系に応じたタイムスケールでのデータ取り込み制御技術を開発。 | <ul style="list-style-type: none"> センサ市場は5000億円規模。 |
| | <ul style="list-style-type: none"> コンテナ・輸送車中の隠蔽核物質の検出を、小型加速器ミュオンによる元素選別透過型ミュオンラジオグラフィで実現できる。20秒以内で検知するにはこの方法しかない。 | <ul style="list-style-type: none"> 要素ごとのテスト実験が行われている。 | <ul style="list-style-type: none"> 車載型小型電子加速とミュオンビームの尖端化・加速が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> 要素開発が米国で始まっている。 |

「量子ビームテクノロジーの研究開発・利用推進について」（概要）
（平成18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）

◎量子ビームの横断的利用への取組み（プラットフォームの整備）

- ・ 各種量子ビーム利用を横断的に進める産学官の「プラットフォーム」の整備が極めて重要。
- ・ 実際の量子ビーム施設を活用した研究に先立って先端的な計算科学・情報処理技術等を活用したシミュレーションを実施し、最適の利用条件を探索することも、ビーム利用に係る費用節減や成果創出までの時間短縮の観点から有効。
- ・ 関係専門機関・自治体の効果的連携・協力の下、ニーズ即応型の課題設定・体制整備、窓口機能・サービスの体系化や柔軟な制度運営等を通じ、各地域及びこれを横串に貫く形でのより幅広いプラットフォーム構築を目指した取組みが重要。

◎専門人材の育成・確保の方策

1) 量子ビーム施設に係る専門研究者・技術者の育成・確保

- ・ 量子ビームの主たる供給源となる加速器等に係る研究開発の進展を図り、更なる高度化・多様化するビーム機器を整備・運用するに当たっては、当該分野における高度な技術・知識を有する専門人材の育成・確保が継続的に必要。
- ・ 理学・工学系の大学・大学院において専門的な知識教育・訓練を受けるだけでなく、量子ビーム施設を直接取扱う研究・実験を通じて経験的・実践的に知識や技術を習得できる環境の整備が必要。
- ・ 専門人材の育成方策として、
 - ① 大学・大学院教育の充実・強化及びポストドク制度等の活用
 - ② 量子ビーム利用を支える専門技術者を対象とした研修・訓練の充実
 - ③ 高校生・大学学部生を対象とした先端的な量子ビームの教育・研修制度の創設等が重要。（一部については総研大・東京大等のプログラム等により具体化）
- ・ 量子ビーム利用に関する専門研究者の育成とともに、主要なビーム供給源である加速器に係る専門研究者・技術者等の人材育成が必要。その際、優秀な人材を惹きつける上でも、「入り口」側の人材に対し、「出口」側の将来のキャリアパスのイメージを明確に示すことが重要。
- ・ 横断的な量子ビームプラットフォームを整備し、育成のための共通基盤として活用すべき。その際、機関間連携の確保・強化による人材流動性の向上を通じ、主要加速器の整備・運用サイクルに応じた最適のフェーズで、これら専門人材の全国ベースでの配置・活用を図ることが有効。
- ・ 量子ビーム施設を、アジア諸国をはじめとする研究者・技術者のための共通の研究・研修のプラットフォームとして積極活用していくことも政策的に重要。

2) 量子ビームプラットフォームの運用に係る人材の育成・確保

- ・ 支援人材とユーザー間の緊密な協力・緊張関係が必要。そのためには、複数の専門

分野等のスキルと産業界課題の理解・解決に向けての高い意欲等のマインドを持った人材を、コーディネータ等として配置することが重要。

- ・ 理学系出身者に加え、工学系出身者や民間経験者など様々なバックグラウンド、幅広い知識を有する人材を確保することが必要。
- ・ ユーザーと支援者間の強い信頼関係の構築が重要。
- ・ 支援人材（組織）の育成・確保及び配置とともに、ユーザーニーズに即応した最先端の設備、効果的な利用制度等の整備は、大型施設としての「総合力」の強化を促し、成果を創出するために必要不可欠。一方、人材の能力を効果的に発揮・向上させていくための環境整備としても重要。
- ・ 今後の課題として、評価指標の設定が困難なユーザー支援業務に対する業績評価、特定施設に固定されがちな従事者の将来の処遇、研究開発から分析サービスまでの多様なニーズへの対応、24時間稼働施設での支援のあり方等についての検討が必要。

「量子ビーム研究開発・利用の推進方策について（最終報告）概要」
（平成18年1月 量子ビーム研究開発・利用推進検討会）

○各種量子ビームの横断的利用への取組みと具体事例

- ・ 複数の量子ビームを相補的に利用することにより、対象物のより高度な計測・分析・加工等が可能。
- ・ 各々のビームに関わるコーディネータ間の連携等を通じ、組織横断的な利用支援体制の構築や窓口機能の一本化を図ることが必要。

○プラットフォームの運営体制と運営機関のあり方

- ・ 欧米の先行事例を踏まえれば、量子ビーム施設を拠点とした大学・研究機関と産業界との有機的連携による横断的ビーム利用のための「プラットフォーム」形成は極めて重要。特に地域の研究機関、県内企業群との面的連携・協力体制構築がプラットフォーム形成を図る上で有効。
- ・ 行革の方針を勘案すれば、プラットフォームの運用機関については、既存の公的利用促進機関の機能・体制の拡充及び相互連携の強化が必要不可欠。

○プラットフォームの活用による専門研究者・支援者の育成のあり方

- ・ 物質・生命科学等ビーム利用に関する専門研究者の育成とともに、主要ビーム供給源である加速器に係る専門研究者・技術者、技術支援者の人材育成が必要。
- ・ 国内の主な加速器施設における人材の充足度等に関するアンケート調査では、全体として不足感が見られる。特に不足感の強い人材として、研究者では超伝導技術、ビーム診断技術、真空工学等、技術者では保守・管理技術等、技術支援者では、生物分野、計算機科学等。
- ・ 利用拡大には、専門分野別需要を踏まえたきめ細かい人材育成・確保が重要。とりわけ、潜在的な産業ユーザー開拓に当たり技術支援者の確保・配置が必須。
- ・ 実際に加速器を利用した研究・実験を通じ、経験的・実践的に知識・技術を得ることが重要。一方、個別大学毎に多額の経費を必要とする加速器の運転管理を行い、人材育成に供することは益々困難化。
- ・ 「プラットフォーム」を専門研究者・技術者の育成のための共通基盤として活用することは合理的かつ有効。
- ・ 人材育成を効果的・効率的に進める上で、プラットフォームを活用した関係学会等の諸活動の強化・展開が重要。
- ・ こうした人材層強化により、競争研究資金等によるリソース流入増、成果創出を通じた出口側たる産業界へのキャリアパス展開促進、これによる更なる若手人材の流入増というポジティブループの形成が期待。
- ・ 大型ビーム施設を、アジア諸国等の量子ビーム開発利用研究者・技術者の研究・研修のための共通プラットフォームとして積極活用することは重要。
- ・ 支援者の「評価」及び処遇のあり方について検討が必要。
- ・ 加速器の整備・運用サイクルと人材面の「ライフサイクル」の整合が重要。