

量子ビーム研究開発・利用の推進方策について
最終報告

～ 知のフロンティアを拓き、先端産業をイノベートする
多彩なビーム利用の可能性 ～

2006年1月

量子ビーム研究開発・利用推進検討会

目 次

はじめに	
中間取りまとめのポイントと主な検討課題	1
第1章 量子ビーム施設の利用システムのあり方	
第1節 多様なビームラインの整備・運営のあり方	5
第2節 ビーム機器の性能向上・更新のあり方	7
第3節 適切なビーム利用料金体系のあり方	7
第4節 専門組織による依頼分析サービスの提供可能性	11
第2章 量子ビームの利用促進活動とその波及効果	
第1節 対外的プロモーションの推進活動	14
第2節 量子ビーム産業利用研究会の組織化	15
第3節 今後の利用拡大が期待される産業ユーザー	16
第3章 各種ビームの横断的利用を支えるプラットフォームの整備と人材育成	
第1節 各種量子ビームの横断的利用への取組みと具体事例	19
第2節 プラットフォームの運営体制と運営機関のあり方	23
第3節 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	26
第4章 検討会の総括・提言と今後の課題	
第1節 量子ビーム研究開発・利用促進に向けた取組みに係る 総括と提言	33
第2節 今後引き続き検討・対応すべき課題	39
おわりに（謝辞と期待）	41

図表 1.3.2 利用者区分と経費負担の例

図表 1.3.1 運転経費のうち中性子発生に関わる加速器コスト割合の試算

図表 3.3.1 加速器関連人材の専攻・学歴分布

図表 3.3.2 加速器関連人材の充足度

図表 3.3.3 特に不足感の強い人材の専攻分野

参考 1 我が国の主な量子ビーム関連施設

参考 2 各種ビーム源の相互補完性

参考 3 量子ビーム研究開発・利用の推進体制について

参考 4 茨城県における中性子利用の推進体制について

参考 5 J-PARC/中性子源において設置計画中のビームライン機器

参考 6 量子ビーム利用促進プログラム

量子ビーム研究開発・利用推進検討会委員名簿等リスト

量子ビーム研究開発・利用推進検討会審議検討経過

はじめに

「量子ビーム」とは、光子、イオン、電子、中性子、中間子、ニュートリノ等のビームの一般的総称であり、加速器や高出力レーザー装置、原子炉等の施設から供給される種々の広範なビームを含む概念である。

これら量子ビームの活用により、基礎科学研究の新領域への展開が図られるとともに、産業分野での実用段階の応用に至る広範囲に亘る利用が進められている。こうした中、近年のビーム技術の高度化・多様化に伴って、従来の水準を大きく超える高い性能での物質の構造解析や加工・物質創製等が可能となっており、その高い潜在能力に立脚し、ナノテクノロジー、ライフサイエンス等最先端の科学技術・学術分野から各種産業に至る幅広い分野での活用が期待されている。

現在、大型放射光施設 SPring-8 や重粒子線がん治療装置 (HIMAC) 等、既存の幅広い量子ビーム施設に加え、世界最大強度の多彩な量子ビーム (中性子、ミュオン、K中間子、ニュートリノ等) を供給する大強度陽子加速器 (J-PARC) や、世界最多種の RI ビームを発生する RI ビームファクトリー (RIBF) といった最先端の大型量子ビーム施設の建設・整備が進捗している。これらはいずれも今後 2~3 年のうちに本格的ビーム供給開始を予定しており、各分野での潜在的な利活用の可能性の開拓や、産業界等による共同利用の仕組みの整備、各種利活用促進プログラムの導入等を検討すべき重要な時期にある。

他方、昨今の我が国の厳しい財政状況を踏まえ、人類の知的資産としての基礎研究の意義や、革新的な産業利用への展開の観点から、量子ビームによる研究開発の戦略的重要性や、産学官の連携・協力を通じたより効率的・効果的なビーム利活用推進のあり方について、改めて検討する必要性が生じている。

かかる認識の下、量子ビームに関する研究開発及び利用促進の方策を検討するため、2005 年 6 月に文部科学省研究振興局長の諮問組織として「量子ビーム研究開発・利用推進検討会」(以下「本検討会」という)が設置された。もとより、量子ビームを用いた科学・技術の研究・開発は、素粒子・原子核等の基礎科学から、物性科学さらには産業利用にまで広大な分野にまたがっているが、本検討会では、幅広い量子ビーム利用を視野に入れつつ、特に近未来に供用が開始される J-PARC/MLF 及び RIBF を主な対象として、その研究開発・利用系のあり方について検討を行ってきた。

この中で本検討会では 2005 年 7 月に、中性子・RI ビームについて、産業利用への本格展開を目指した重要な研究開発課題、利用促進に向けて当面採るべき方策等を中心に、以下の通り中間とりまとめを行ったところである。（なお、その際、基礎科学研究におけるこれらビーム利用のあり方については、関係審議検討組織・法人等での検討に委ねることとし、中間とりまとめの段階では、産業利用の側面に重点を置いて検討・取りまとめを行うこととした。）

○我が国の量子ビーム研究開発・利用の現状・動向

我が国は B ファクトリー (KEKB)、Spring-8 や HIMAC 等世界最高水準の量子ビーム施設を有し、さらに世界最高性能の J-PARC 及び RIBF の整備が進められている。一方、利用対象となる研究分野のより多様な領域への拡大に伴い、既設の量子ビーム施設の利用に対する需要は継続的増加傾向にあり、ビーム供用能力の限界に達しつつある状況。

○各分野における量子ビームの利用状況・課題

我が国の量子ビーム利用研究は、基礎から応用まで世界第一線にあるが、産業分野での先端的利用は最近議論され始めたところ。他方、欧米では産学連携の下に量子ビーム利用によるタンパク質構造解析やナノテクプロジェクト等を国家的に推進。最先端量子ビーム施設整備でも同様な計画が進められ、国際競争下での早期稼働と成果創出、関係研究者等の海外流出防止に留意すべき状況。

○重点研究分野におけるビーム利用の方向性及び主要課題

最先端量子ビームは、先端技術開発を支える重要ツールとして、広範な利用を進めるべきものであり、重点研究分野における利用の方向性として次のようなものが挙げられる。①ライフサイエンス・医療分野：がん治療及び植物品種改良技術の普及・高度化、タンパク質の構造・機能解析。②環境関連分野：高環境耐性植物育種、環境微量分析技術開発、燃料電池等の水素利用エネルギーシステムの構築。③材料・ナノテク分野：半導体の不純物添加や量子ドット材料の創製、ハードディスク記録密度向上や大型構造物の非破壊残留応力解析等。

これら利用促進に際しては、複数ビームの相補的利用、試料サイズの微小化、データ取得時間の短縮、自動解析手法の確立等が主な課題。

○産業界での新たな利用可能性及びビーム利用の国際展開

産業界での新たな利用可能性として、中性子ビームでは材料・加工品内部の残留応力測定、電池・高分子材料の開発、燃料電池・磁気記録材料の開発、薬

物設計、タービン翼検査、放射化元素分析等に期待。RI ビームでは環境修復開発、放射性医薬品の探索、物性研究・材料開発等に期待。

こうした産業利用の効果的推進を図るためには、産業界が利用しやすい体制の構築と、最新の技術成果の情報交換の場、さらに国際競争力ある料金設定が必要。主要ビーム施設は、「国際公共財」的視点に立ち、海外の受入れ態勢を整備する必要がある一方、国内の産業振興の観点についても留意が必要。

○各種ビーム源の相互補完性と包括的・横断的利用のあり方

各ビームが持つ波長・エネルギー等の特性に加え、感受特性、強度等の特徴を踏まえた相補的利用が可能。相応しいビーム選択、組合せ利用が極めて重要。

○外部利用のあり方と支援・サービス体制の構築

外部利用のあり方として、施設運営者のミッションを据えつつ柔軟な外部利用システムの構築が重要。

また、SPring-8等の取組みを参考に産業利用促進に向け、「コーディネータ等の支援者配置」、「試料郵送方式による実験代行・分析業務の実施（mail-in サービス）」、「トライアルユース・研究会開催」等の支援プログラム・サービス提供が期待。特に中性子ビームは産業界での利用実績の不足に鑑み、各利用分野で早期に顕著な成功事例が出るような具体的課題設定と推進体制構築が必要。

○コスト回収の考え方と運転経費の確保

成果公開の場合は施設者負担による無償、成果非公開の場合は施設者と利用者間の適切な分担での有償とすることが考えられる。但し後者でも利用促進や産業競争力強化の観点から国が利用料の一部を負担し、国際的優位性ある料金設定を図る等の仕組みも要検討。一方、大学等に対する共同利用制度も重要。

○小型先進加速器技術開発による利用高度化と地域展開

粒子線がん治療装置の地域展開に象徴されるように、量子ビーム利用の普及促進に向け、先進的な小型加速器技術開発による低コスト化、これによる全国各地域への普及加速化を期待。

○専門研究者・支援者の育成のあり方

技術の進展、利用可能性の拡大に鑑み、専門性の高い研究者・支援者の育成方策として、「人材育成・確保に向けた大学・大学院教育の充実・強化」や「産業界の加速器技術者の技術承継のための大学・公的機関との人事交流」等が重要。

○量子ビーム研究開発・利用推進に当たって当面採るべき方策

①未着手ビームラインの機器・利用系構築

J-PARC 中性子ビームラインでは、2007 ないし 2008 年度にかけての整備を目的として、原研及び高エネ機構、茨城県による整備の他、競争的資金の積極活用も極めて有効。また、産業界等の具体的利用ニーズ、技術面・制度面の要請を適確に捉え、設計段階からこれを参酌、反映していくことが重要。2006 年度より整備計画中の RIBF 実験設備では、基礎・応用両面での利活用と併せ、外部利用可能性や国際動向、外部資金を含む多様なリソース確保に留意することも必要。

②ビーム利用に係る各種促進プログラムの導入

広範な分野での量子ビーム利用促進に向け、SPring-8 の事例も参照し、次のプログラム導入を検討すべき。なお、本プログラムの一体的・体系的推進には、プラットフォームを支える中核機関の設置が望ましいことから、行政改革の流れを踏まえ、専門的知識を有する既存の機関の改組・活用の検討が必要。

- ・量子ビーム利活用コーディネータ・アドバイザーの設置
- ・量子ビーム利活用トライアルユース制度の創設
- ・量子ビームのパブリシティ向上及び産業利用促進に向けた広報活動の展開

その後、中間とりまとめの方向性も踏まえつつ、本検討会において上述の当面取り組むべき課題についてさらに検討を深めるとともに、共用促進のためのビームライン及び、多様な専用ビームラインの整備・運営方策、ビーム機器の性能向上・更新のあり方、専門組織の設置による依頼分析サービスの提供可能性、横断的ビーム利用を支えるプラットフォーム構築、ビームライン支援者を含む人材の育成・確保策等、今後取り組むべき中長期的課題について検討を進めてきた。

本報告書は、これまでの 6 回にわたる検討会での議論を踏まえ、量子ビームの中でも特に J-PARC 及び RIBF を主軸とする中性子・RI ビーム等の利用に関し、今後の重要な研究開発課題、利用促進に向けての方策等について取りまとめたものである。

第1章 量子ビーム施設の利用システムのあり方

第1節 多様なビームラインの整備・運営のあり方

我が国の主要な量子ビーム施設では、大型加速器や原子炉等で発生した量子ビーム（中性子、放射光、レーザー、イオンビーム等）を、その線源から高品位のビームに加工しながら測定装置まで導くが、このビーム輸送系と測定装置をまとめてビームライン（BL）と呼んでいる。これらは、一般ユーザーが共通に使うことを目的とした「共用ビームライン」、専用利用を目的に建設する「専用ビームライン」の2つに大別できる。

現在建設中の J-PARC の物質・生命科学実験施設（MLF）では、水銀の核破砕反応によって発生する 2 次粒子の中性子と、炭素の核反応によって発生する 3 次粒子のミュオンを利用する BL について、それぞれ最大で 23 本及び 4 本の整備を計画している。BL1 本当たりの建設費は、数億円～十数億円を要することから、中性子ビーム発生装置が完成して最初のビームが出る時点（2008 年度予定）で全 BL 整備を終えることは財政的に困難である。また、利用が始まった後、更に新しいアイデアに基づく BL 整備の余地を積極的に残しておくことが望ましい。

MLF の中性子 BL では、J-PARC 建設主体である日本原子力研究開発機構（原子力機構）と高エネルギー加速器研究機構（高エネ機構）の BL を当面それぞれ 6 本及び 4 本整備する計画である。また現在第三者が設置予定の BL については、茨城県が産業利用を目的とした BL 2 本の整備を予定している他、特定の研究課題を遂行するために、競争的資金によって 3 件の機器開発等が計画・推進されている。即ち、J-PARC/MLF の供用開始時点では、計 23 本の BL 設置可能枠に対し、施設側の 10 本の BL に加え、第三者 BL として 5 件の機器開発・整備計画が進められており、今後さらに大学や公的研究機関、企業・コンソーシアム、並びに海外ユーザー等による BL 設置が期待される場所である。

これらの BL 設置計画については、適切なコスト回収の観点に留意しつつ、計画的・効率的に検討・整備を進めていくことが重要である。実際の BL 整備に係る審査プロセスとしては、J-PARC プロジェクトディレクターの諮問機関である「中性子実験装置計画検討委員会」が、毎年国内外からの BL 設置申請に基づき、科学技術を先導できるか、産業化促進に役立つか、技術的に可能であるか、提案者グループに十分な整備能力があるか等を 2 段階（1 次審査では提案書、2 次審査では詳細な計画書とヒアリング）で評価し、決定している。このプロセスは、建設に多額の費用を要する大型ビーム発生装置を、国の科学技術及び産業の基盤的設備として位置づけ、有効に利用していく上で欠かせないものと言える。また世界の主要各極を代表する大型研究施設の一つである J-PARC は国際的公共財と位置づけられていることを踏まえ、外国からの BL 設置を含む利用を積極的に推進することとしており、アジア地域の関係国・地域が専用 BL 設置の可

能性を検討している。但し、主として産業利用の対象となる中性子ビーム施設の利用システム設計に当たっては、国際ルールとの整合性に留意しつつ、国内の産業振興のための然るべき方策を採り入れていく必要もあるものと思われる。

MLF の BL は、建設主体である原子力機構と高エネ機構の BL も専用 BL と位置づけられているが、その大半のビームタイム（70%程度）を実験課題が採択された一般利用者の利用に供する制度（一般共同利用）の導入を検討している。また、第三者が設置する BL についても、その一部のビームタイム（20～40%程度）を一般共同利用に供することとしている。これらの実験課題公募・審査・ビームタイム割当・実験実施等の一連の一般共同利用については、原子力機構と高エネ機構が J-PARC 共同運営のために設置する（2006 年 2 月予定）J-PARC センターで一元的に取り扱い、一般共同利用者の便宜を図ることとしている。

なお、ミュオン BL については、高エネ機構において 2008 年度を目途に、1 本の BL を整備する予定である。今後の BL 設置・運営に当たっては、ユーザー等のニーズを見極めるとともに、中性子 BL 等の他の J-PARC 施設との整合性・関連性を考慮しつつ更に検討を加えることが望まれる。

一方、RIBF は、主な利用が原子核物理を中心とした基礎科学分野であるが、偏極 RI ビームや多種 RI の生成等の施設能力を活かし、物質材料開発や医療技術・創薬開発や植物育種等応用研究分野への利活用にも供することのできるものである。

RIBF においては、利用分野の如何に関わらず、加速器とともにビーム輸送系と大型の基幹となる実験設備（基幹実験設備）までを施設者である理化学研究所（理研）が整備し、それに付加する測定装置等は施設者を含むそれぞれの利用グループが自らの予算で個別に設置して実験を行うこととされている。これら装置の設置にあたっては、想定される実験研究の科学技術的内容等に関して、ユーザーグループの提言や国際諮問委員会等における評価を受け、施設者がその整備を判断することとしている。施設者が整備する基幹実験設備は共用に供され、また、利用グループが個別に設置した実験装置についても、利用グループの判断により部分的に共用に供される仕組の整備が計画されている。すなわち、原子核物理実験のみならずその他の応用利用実験も含めて、利用者が国内であるか海外であるかによらず、施設全体が共用ビームライン的なものとなる。

RIBF では、施設者である理研も含め、すべての実験課題は、課題公募・審査・ビームタイム割当・実験実施等のプロセスに則り、外部委員を含めた実験課題採択委員会、マシンタイム委員会等により決定されることとなっている。また、特に共用に係る運営システムについては、独自の委員会組織を設置して関係事項を討議・整理し、所要の体制整備を図ることとしている。

第2節 ビーム機器の性能向上・更新のあり方

J-PARC/MLFにおけるBL機器の性能向上・更新にあたっては、専用BL設置・産業利用促進の実績等で先行する大型放射光施設SPring-8の各種制度を参考にしながら対応することが望ましい。SPring-8の専用BLの場合、10年間の契約期間で5年目に専用施設検討委員会による中間評価を実施して然るべき勧告を行うことになっている。現時点でのJ-PARC/MLFのBL設置に係る審査制度では、設置が承認されたBLは一定の期間毎（5～10年程度とする方向で検討中）にその設置契約を更新することとしている。本制度は既にその目的を達して役目を終えたBLや技術・機器の陳腐化により利用効率の低下したBL等に代わり、最新の技術動向や利用ニーズに即応したBLの新設・改良を行うことにより施設全体の活性を保ち、国際的な研究拠点としての機能・役割を維持・向上させるためには不可欠な制度である。こうした契約更新のプロセスを円滑かつ効率的に進めるためには、契約期間の満了する1～2年前に、専門の検討委員会により当該BLの稼働・利用状況を評価し、契約更新の可否、及び更新可の場合は、装置の改良・性能向上、一般共同利用へのビームタイム割当比率等についての勧告を行う制度を導入することが適当と考えられる。

なお、BLの整備・運用には、前述の多額の整備費用に加え、その維持・管理・運転、装置改良等に年間数千万円～数億円の費用を要する。特に競争的資金で機器開発・整備を行うものをはじめとして、これらのBL運転・管理経費を定常的に確保するための方策について検討・留意する必要がある。

RIBFにおけるビーム輸送系及び実験設備については、施設者が中心となり、利用ニーズの動向を踏まえ、ビーム性能の向上のための技術開発や日々進歩する最新技術の導入等の高度化を継続的に実施し、施設の先端性維持とこれによる利用者ニーズへの即応を図っていくことが望まれる。なお、RIBFの場合、SPring-8及びJ-PARC/MLFのように、複数のBLを同時並行して運用し実験を行うことについては、機器整備の運用上の工夫・配慮を要するものと考えられることから、今後の利用分野の拡大・多様化に応じ、BL機器の整備・運用のあり方について相応の検討を加えていくことが期待される。

第3節 適切なビーム利用料金体系のあり方

量子ビーム施設の共用にあたって、ユーザーの利用効率向上及び施設者側のコスト回収の観点から適切なビーム利用料金体系のあり方を考える際には、運転経費を負担すべき主体とともに、ユーザーが負担すべき運転経費の対象範囲に係る考え方を明確にすることが重要である。一方、実際の料金設定では、国内外の他の施設との競争性を考慮する必要もある。即ち、同様のビーム性能で

同質の成果が得られるならば、より安い料金の施設に利用者が集中するのは自明の理であり、利用者負担部分を徒に拡大するのみでは利用者の他施設への流出を惹起し、当該施設の効率的運用が阻害されるばかりか、運転コスト回収という本来の目的をも損なう結果となるおそれがある。

このため、量子ビーム施設のビーム利用料金体系の設定にあたっては、これまで多くの経験を重ね制度設計・運用が進められてきたSPRING-8及びTIARA（原子力機構高崎量子応用研究所）等の国内先行施設や海外施設における利用料金体系と比較しながら、効率的かつ合理的な利用体系を構築していく必要がある。

まず、国内外の主な大型量子ビーム施設（中性子源）の料金体系を調べてみると、利用者が負担すべき利用料金の原価として設定される要素は、スイスのポールシェラー研究所の中性子源 SINQ のように加速器建設費の減価償却費に光熱費及び人件費を加えたものや、英国の ISIS 中性子源のように減価償却は含まないがスタッフの人件費を含むもの等、様々である。しかし、これら負担コストをビームライン数と利用可能時間で割ることにより、時間当たりの料金を算出するとの手法は各施設に共通している。結果として、ほとんどの施設では、ビーム利用料金は 130～180 万円/日となっており、競争力保持の観点からは、国内の中性子源についても同程度の料金水準を目標とすることが望まれる（1\$ = ¥120, 1 ユーロ = ¥140 で換算）。なお、この算出法は、国内外の主な放射光施設でも同様であり、利用料金は 140～200 万円/日となっている。

次に、利用者の負担すべき料金について、J-PARC/MLF に代表される中性子源を念頭において原価要素を分析しコスト分担の考え方を整理すると、以下のように 4 種類の経費に分類できると考えられる。

- (A) 中性子の発生に関わる経費：全利用者が受益者となることから、利用者全体で負担。
- (B) ビームラインの維持費：当該ビームラインの利用者のみが受益者となることから、当該ビームラインの利用者全体で負担。
- (C) 実験消耗品：個々の利用者が消費するものであり、個々の利用者が負担。
- (D) 通常の利用支援を超える付加的サービスに係る料金：データ解析等、本来は、利用者自身が行うべき作業について、施設者に対し付加的に要求される技術支援に係るコストであり、当該利用者が負担。

J-PARC の場合、多目的施設であることから加速器部分の費用分担について、種々の考え方があり、現段階では具体的な見積もりを行うことは困難である。しかし、いくつかのケースを想定して、(A) の中性子の発生に関わる経費を試算してみると、150～190 万円/日となり、上述の国内外の同種施設とさほど変わらない料金設定が可能と思われる。（J-PARC プロジェクトチームの試算による。）

図表 1.3.1 参照)

特に、(D) の技術支援は、中性子利用の経験が乏しい産業界の利用者にとっては重要なサービスであり、試料の前処理からデータ取得・解析までの一連の分析サービスを全て代行することを期待されることも十分想定しておくべきである。即ち、産業界の利用者が所要の分析データを迅速に入手することを優先する場合には、上記 (D) の追加料金を支払ってでも利用することが考えられる。上記 (A) ~ (D) のどこまでを利用者が負担すべきかについては、一般利用者かビームラインの所有者か等、利用者の区分に依存する。また、成果の専有・非専有については、成果非専有であれば、受益の対象である成果を公共に還元していることから、国費を投じて整備した施設の利用コストを減免すべきとの考え方がある。他施設の例を見ても、国際共同機関が運営する欧州放射光施設 (ESRF) 及び隣接する中性子源 ILL では無償利用の対象が出資国の利用者に制限されることを除けば、無償としているところがほとんどである。

このような考え方を踏まえれば、図表 1.3.2 のような利用者区分と経費負担の考え方が適正な料金体系設定の根拠として受け入れられやすいものと思われる。しかしながら、J-PARC の中性子ビームラインの場合では、高エネ機構や原子力機構、茨城県等の様々な設置主体が共存しており、ユーザーの利用料金についても、例えば直接 J-PARC センターへ申請した場合よりも、茨城県を通して申請した場合の方が利用者の負担が軽くなるといった事態が予想される。こうした J-PARC/MLF の種々の BL に係る利用料金体系の整合性確保は、今後の重要な検討課題となろう。その際、原子力機構内の他の共用施設との整合性についても考慮する必要がある。

これらの点を踏まえ、利用者に対し無用の混乱を与えることなく、円滑な利用促進を図っていく上で、透明性のある分かり易い料金体系を構築していく必要がある。

また、大型量子ビーム施設間の国際的な競争を考慮すれば、J-PARC、RIBF 等の主要な量子ビーム施設を国の推進すべき先進的・共通基盤的研究開発のためのプラットフォームとして位置付け、我が国の産業競争力強化・地域産業振興の観点から、成果専有であっても研究開発・利用促進のため国が利用コストの一部を負担する等の仕組みを構築していくことが有効と考えられる。その際、国際ルールとの整合性に留意するとともに、別途行われている先端大型共用研究設備の整備・共用促進のためのシステム構築に係る検討の方向性を注視しつつ、国際的に比較優位性のあるレベルでの料金設定を可能とする方策についても検討していく必要がある。

J-PARC に代表される最先端の量子ビーム施設では、施設の大型化やビームの大強度化に伴い、多額の運転経費を要することから、予算面での制約の大きい

独立法人である施設設置者のみにより全運転経費を負担することが困難となってきた。一方、成果非専有のビーム利用を無償とすることは、運転経費回収の観点からは、施設者側にとってその分の経費が回収できないことを意味する。特に、J-PARC では大学共同利用機関たる高エネ機構と目的研究機関の原子力機構が共同運営する予定であり、大学共同利用機関は無償利用を原則にしているのに対し、原子力機構では施設の共用には原則として適正な対価が要求される。即ち、共用促進のためには運転経費回収が必要とされる。

こうした大型量子ビーム施設の共用を効果的に促進するためには、有償利用を先導する役目を担っている成果非専有の利用をまず促進し、施設の有用性を内外に示すことが重要である。このためには、成果非専有の利用についても運転経費回収の原則を適用することは必ずしも適当とは言えず、このような共用促進に係わる財源の一部を法人予算の枠外で確保する仕組みの適用についても検討していくことが重要である。

(参考)

TIARA の利用状況について

1. TIARA の概要

イオン照射研究施設 (TIARA : Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application) は、材料・バイオ技術研究のための専用加速器施設として建設された世界で最初の施設である。TIARA はサイクロトロンと 3 台の静電加速器を備えており、1991 年から利用が開始され、多種多様な実験に対応して数十 keV から数百 MeV の 5 桁にわたる広範囲のエネルギーで多種類のイオンビームを、マイクロビーム照射、カクテルビーム照射等多様な照射方法によって利用することが可能である。最近は、イオンビーム育種で実用化の成果も生まれ始めている。

2. TIARA の利用制度

TIARA は当初から所外に開かれた施設として運営されており、年 1 回の実験課題の公募、外部委員も含めた専門部会審査による課題採択と使用可能なビームタイムの決定、研究成果の公表 (TIARA 研究発表会と年報) を原則としている。緊急実験課題に関しては、年度途中であっても施設保有枠の範囲で随時受け入れている。

成果非公開又は優先的利用が可能な有料施設利用 (共同利用) に関しても、概ね共同利用枠の範囲で年間を通して随時受け入れている。総計 34 基の実験装置の内、8 基の実験装置を共用に供した経験があり、技術支援は実験装置によって各実験装置担当の研究者又は施設側スタッフが対応している。技術支

援の内容としては施設共同利用計画の立案・調整、利用実験内容についての事前検討・アドバイス等、照射試料の放射化量評価（IRAC code 使用）及び安全性評価、施設利用に関するガイダンス、安全教育・トレーニング、受付・案内等窓口業務、対象実験・計測装置等の日常的な保守・維持管理、修理及び改造等、照射方法・線量評価等についての照射技術相談及び指導、照射利用実験時における技術支援、実験済み試料等の処理・処分等があり、相当の経験と能力が要請される。

共同利用料金設定の考え方は以下の通りである。

- ・ 加速器の経費＝直接経費＋間接経費（直接経費の 15%）
- ・ 直接経費＝減価償却費＋租税公課＋人件費＋光熱水費＋材料消耗品費＋維持費＋施設保守費＋清掃費
- ・ 研究開発利用料金単価＝（直接経費－減価償却費）/（年間の計画運転時間）
- ・ 1 件当たりの請求金額＝取扱手数料＋研究開発利用料金単価×（ビーム利用時間＋60 分）

（サイクロトロンの場合）

$$=16,650 \text{ 円/件} + 1,650 \text{ 円/分} \times (\text{ビーム利用時間} + 60 \text{ 分})$$

3. 2004 年度の利用状況

2004 年度の実験課題に採択された課題数は、サイクロトロンの利用に係わる課題が 70 件、3 台の静電加速器の利用に係わる課題が 59 件、合計 129 件であった。各実験課題は 3 期に分けて実験を進めることができ、1 年間の実験期間中すでに行った実験の結果をフィードバックさせて効果的に実験を進めることができる。

サイクロトロンと 3 台の静電加速器は、年間運転計画に沿った運転が行われ、年間のビームタイムは計画通り確保され、サイクロトロン 2561.5 時間、タンデム加速器 158 日、シングルエンド加速器 158 日、イオン注入装置 144 日が提供された。

第 4 節 専門組織による依頼分析サービスの提供可能性

第 3 節で述べた通り、試料の前処理からデータ取得・解析までの一連の分析サービスを専門機関がすべて代行することは、特に産業界にとり馴染みの薄い中性子ビーム等の利用を促進する上で極めて有効な支援サービスといえる。

既に、こうした分析代行サービスは、小型のサイクロトロンからの中性子や陽電子等を用いた分析・測定サービス等の形で一部実用化されている。

現状において量子ビームを利用した民間専門機関による依頼分析及び関連サービスの内容としては、①原子核の核反応を利用するものとして、核反応により生成する中性子及び陽電子等の二次ビームを用いた透過試験・分析、核反応より生成した RI からの放射線を用いた放射化元素分析（荷電粒子放射化分析、薄層放射化磨耗測定）、②ターゲット試料のイオン化を利用するものとして、励起した元素から発光した特性 X 線の測定による元素分析（PIXE）、③ターゲット試料の原子欠損（格子欠損）を利用するものとして、半導体へのイオン照射等が挙げられる。

上記の分析・照射サービスの具体的事例として、中性子透過試験においては、ロケットや人工衛星の切り離し導火線、ジェットエンジンのタービンブレード等の精密鑄造品における品質検査・評価サービスが実施されている。

また、荷電粒子放射化分析においては、半導体や金属中の不純物（元素）の測定サービスが実施されている。代表的な適用対象である機能電子材料は、微量の不純物により特性が変化することが多く、その制御が極めて重要な課題となっている。特に、近年はこれら材料中の軽元素の存在量が注目され、本分析の有用性が高まっている。

更に、半導体へのイオン照射については、モーター駆動を行う乗用車のインバータ、高速鉄道の車両等における電力半導体（インバータ等のスイッチングデバイス）の特性改善（スイッチを切る速度の高速化、サージ電圧の低減化）に利用されている。これらは、電力消費を抑え環境負荷の低減化をもたらすものであり、エネルギー効率向上・環境保全に係る社会的要請に応えるものとして注目されている。

今後は、例えば中性子透過試験において、現状のように自らの加速器システムを用いた分析代行業では、中性子の強度が低いため静的な分析サービスに限定されていたものが、J-PARC/MLF 等の大強度の中性子ビームを分析代行機関が活用することにより、動的な分析サービスへの事業拡大の可能性が期待される。また、この中性子ビームの大強度化は、電子材料や磁性材料をはじめとした先端機能性材料などの開発を進める上で有効な手法で、試料調製も容易な中性子粉末回折の測定を迅速かつ少量試料で可能にすることから、新たな分析・構造解析サービスへの展開も可能にすることも考えられる。

一方、当該分析サービスに係る技術については、これまで公的研究機関から移転されてきたものが多く、今後の更なる事業展開を図る上では、技術的側面における潜在的な開発要素も少なからず存在する。特に、試料の測定効率向上・所要時間の短縮を図る上では、試料の自動交換システムの開発、試料セルのスペックの規格化等ハード・ソフト両面の技術開発を進めることが必要不可欠であり、これらの課題への取組みにおいて、公的研究機関と企業との連携・協力

を強化することが重要である。

更にその際、ビーム利用による各種測定・分析を精密かつ高信頼度で行うに当たり必須と言える「標準物質」作成及び分析法の標準化への取組みが、こうした分析代行サービスを実用ベースで進める上でも極めて重要である。実際に、茨城県が J-PARC における中性子ビームの産業利用促進の観点から設置・運営している「中性子利用促進研究会」（第 3 章第 2 節参照）の 1 領域として、我が国における「標準」作成について中心的役割を有する産総研の専門家を代表者として「中性子標準」に係る研究会を開催し、中性子標準化を通した検出手法の研究開発、試料による計測装置の最適化等に係る検討を行っている。我が国の「標準物質」への取組みが国際的に遅れを取っているとの指摘のある中で、今後の産業利用の推進・拡大に当たっての標準の重要性を勘案すると、こうした研究会の活動を契機として中性子標準を通した中性子計測の信頼性の向上が図られ、ひいては標準化への取組みに係る関係専門機関や府省間の連携・協力が一層強化されることが期待される。

第2章 量子ビームの利用促進活動とその波及効果

第1節 対外的プロモーションの推進活動

本検討会の中間とりまとめの成果をベースとして、事務局側より各般の業界団体や報道機関等を中心に、J-PARC 及び RIBF 等の多様かつ高品位の量子ビームの有効性について広報・アウトリーチ活動が展開され、以下のような産業利用の可能性に係る多くの有用な助言、新たな利用開拓の可能性に係る示唆・提言が得られた。

産業界の新たな利用開拓の可能性について、大手重電機メーカーの有識者からは、中性子ビームを用いた計測技術は、モノ作り産業の将来にとっても不可欠の技術であり、企業団体関係者に対し、より積極的に周知すべきとの認識・提言が示された。

また、これまで中性子ビーム等の利用にほとんど関わる機会のなかった農林水産関係の先端産業技術研究をサポートする団体（社団法人・農林水産先端技術産業振興センター：STAFF）との意見交換においては、農林系産業への量子ビーム利用の様々な可能性が示唆され、農林水産・食品関係の研究者・起業家が集まる技術フェア（アグリビジネス創出フェア）にビーム施設側よりブース展示を行うべきとの提言がなされた。これを受け、関係法人が当該フェアに出展を行い、ビーム利用に関わりを有する企業関係者と専門研究者の交流に係る貴重な機会が得られた。また、後述する量子ビーム産業利用研究会に STAFF 関係者が参画・貢献すること等を通じ、量子ビーム技術のこれら分野への周知・普及を効果的・効率的に進める仕組みが整いつつある。新たな産業分野における量子ビーム利用の可能性を開拓する上で、こうした公益的な組織・団体等を通じ技術・情報の周知・導入を図ることは、極めて有効な方策と言える。

さらに、これまで大型量子ビーム施設の利用経験をほとんど有しない石油・資源産業関連分野の研究者・技術者との会合では、中性子は、メタンハイドレート、燃料電池等の資源・材料の機能・構造評価のためのツールとして有効であるとの考え方、触媒の機能評価への利用可能性等についての示唆がなされた。このように、従来、中性子ビームの利用に馴染みの薄かった多くの研究者等に対し、業界団体や当該業界との連携・協力関係を有する専門機関を介して直接の説明・働きかけを行うことにより、その有用性が認識され、新たな産業ユーザーを生み出すきっかけが得られるものと期待される。

ビーム利用促進活動のあり方に関しては、原子力分野の有識者より、“量子ビーム”等の言葉を高校生の教科書等で積極的に取り上げていくことや、女性を主たる対象として意識した広報活動を行う等、若年層や女性等を対象とした効果的な PR 活動の必要性等の提言があった。また、加速器関連の企業団体の会合における意見交換では、世界最高水準の我が国の加速器技術を今後とも維持し

ていく上で、若手技術者を効果的に引き付け、活用する機会を与えることが重要といった意見が出された。

更に、主な報道機関の関係者との意見交換では、「イノベーションジャパン2005」等多くの研究者・企業人が集う場に出向き、積極的に意見交換、人脈づくりに努めるべき旨の提言がなされた他、各種メディアを通じ、一般の関心が必ずしも高いとは言い難い量子ビーム施設の動向・成果につき、積極的に情報発信していくことも重要と指摘された。

これら重要な示唆・提言等を踏まえ、今後も種々のメディアや人的ネットワークを活用しつつ、コーディネータ・アドバイザー等による広報・アウトリーチ活動を精力的に実施し、これまでビーム利用に係る知識・情報に接する経験の少なかった層にもアプローチしていくことが期待される。その際、多様な人材の参画を得つつ、各ビームの特性や強みをできる限り分かりやすい形で発信・アピールしていくことが重要であり、そのためにはこうした広報・アウトリーチ活動に豊富な経験を有する専門人材を配置し、各種学会誌・専門誌やwebを通じた発信等、人材活用やメディア開拓に関する工夫も必要と考えられる。

第2節 量子ビーム産業利用研究会の組織化

本検討会の中間とりまとめを踏まえ、原子力機構や理研、高エネ機構等のビーム施設関係者を主体として、関連する産業界関係者の参画を得て「量子ビーム産業利用研究会」を試行的に開催する運びとなった。この研究会は、新たな産業利用の促進が期待される課題（ニーズ）を持つ企業ないしは企業団体等とビーム施設を有する研究機関（シーズ）等とが、具体的な研究開発課題にテーマを絞り込んで議論することを目的としている。

第1回研究会は、本年9月日本原子力研究所（現・原子力機構）東海研究所において開催され、ポリグルタミン酸（PGA）を研究する産学協同コンソーシアムからPGAの架橋反応と水の吸着・放出特性との相関についての課題を受け、中性子ビーム施設の研究者を中心に当該課題の解明のための効果的な方法が検討された。その結果、中性子小角散乱法等を用い、架橋反応過程等を動的に捉え、当該過程における吸湿・放出特性を調べることにより、両者の相関に係る知見が得られる可能性があることが見出された。こうした議論を踏まえ、企業側と施設側研究者との間で、早速共同研究の実施が検討されるなど、相応の成果が得られた。

第2回研究会は、本年12月理研和光研究所において開催され、食品関連産業、農林水産系企業・研究機関の参画の下、希少RI供給及びビーム育種の現状・将来について広範な討議がなされた。研究会での討議を通じ、イオンビーム育種

による組換え体改変研究に係るビーム施設者側と利用者との共同申請により、競争研究資金獲得に成功した事例が紹介され、こうしたビーム利用研究における府省間・セクター間連携の有効性が示唆された。

2006年2月開催計画中の第3回研究会は、超伝導材料研究への中性子・放射光の相補的利用をメインピックとして、施設者側や産学官の関係専門家の参画を得て、複数の量子ビームの相補的利用による当該研究分野の課題解明についての議論を予定している。

このような研究会は、ビーム施設側及び利用者側の研究者間の個別具体的な利用促進活動としての役割と同時に、新規ユーザー獲得といった当面の利用可能性の開拓という点でも有益であり、近接する業種のコンソーシアムや企業団体への波及効果も期待できることから、量子ビーム利用拡大の先鞭として極めて有効と考えられる。

今後は、より包括的かつ具体的に産業利用が期待されるニーズを吸い上げ、これらニーズに的確に応えていくためのシステムとして、主要分野毎に施設設置者、産業界の潜在ユーザー、大学等の関係専門家の参画を得て、こうした産業利用研究会を効果的に組織化していくことが望まれる。その際、複数のビームの相補的利用の有効性に留意するとともに、産業界の関心を効果的に喚起する上で、テーマ・領域の絞り込みに当たり、早期の「成功事例」創出を目指すことが重要と言える。但し、こうした成功事例の創出を図る上で、特定企業との踏み込んだ共同研究を行う必要が生じ、その際に当該企業との間で機密保持契約の締結等産学官連携のための所要の枠組み・ルールを整備することが必要となることに留意すべきである。

併せて、公的組織による成功事例の「顕彰制度」を創設・活用することにより、これら成功事例の成果を広く一般に喧伝し、関係する産業界の更なるビーム利用促進のためのインセンティブを付与することも有効と考えられる。

第3節 今後の利用拡大が期待される産業ユーザー

これまでの本検討会での討議及び上述のアウトリーチ活動・産業利用研究会の実績・計画等を踏まえれば、今後主要分野での利用拡大が期待される産業領域を以下のとおり例示することができる。これらについては、今後産業利用研究会等による当該分野のユーザーとビーム施設者及び関係専門家間の検討・連携の更なる深化に加え、これら検討結果をJ-PARC/MLF等主要ビーム施設における専用（共用）ビームラインの設計・運用システムに反映していくことが望まれる。

<ライフサイエンス・医療分野>

医療機器産業においては、現在 HIMAC 等で行われている粒子線がん治療の有効性に着目し、設置コスト低減のための小型化等の技術開発成果を踏まえ、製品としての粒子線がん治療装置の国内各地域への設置・普及を目指している。また、製薬産業においては、中性子、放射光を用いたタンパク質等の高分子の詳細な構造・機能解析を行うことにより、合理的な薬剤設計が可能になると考えられている。さらに、農林水産・花卉産業においても、イオンビーム等の利用によるキク、カーネーション等の花卉の品種改良が盛んに行われており、今後、ステップワイズの照射による新たな品種の創生も期待されている。

<環境関連分野>

自動車産業等を主体とした燃料電池の開発においては、量子ビームは大きな役割を担うものとして注目されている。例えば、水素供給源となる水素吸蔵材料開発に際しては、中性子非弾性散乱等による機能・構造解析評価が、その高吸蔵化や高信頼性化に効果的に利用できることが期待されている。また、プロトン伝導膜に関しては、イオンビーム照射によりその高性能化が図られているが、中性子や放射光を用いることにより、伝導膜の構造・機能解析が可能となり、伝導性、耐久性等の更なる向上が期待できる。さらに、燃料電池開発において、出口側の生成水の排出能を高めることは信頼性向上のために必須と言えるが、中性子ラジオグラフィによる水の生成過程の「その場観察」により、排水を促すための効率の良い流路設計が可能になると考えられている。

一方、イオンビーム等のビーム育種による環境耐性植物の創出や、これまで製造できなかった RI をトレーサーとして利用することによるファイトレメディエーション（植物等利用による環境修復）の促進等により、種苗産業等での利用の期待が高まっている。

<材料・ナノテク分野>

材料・ナノテクは、量子ビームの強みが最も発揮される分野の一つとして大きな期待が持たれている。

情報通信産業においては、微小な磁石の性質を有する中性子を用いて磁性材料の特性評価を行うことにより、ハードディスクの記憶密度の向上等に貢献することが期待されている他、軽元素の効果的なプローブとしての特性を活かし、携帯電話等のリチウム電池の性能向上・品質保証にも活用しうるものと考えられている。鉄鋼・建設産業では、中性子の透過性を活かし、構造物の信頼性・耐久性に影響を及ぼす残留応力の評価に有効に利用しうるものと期待されている。

る。残留応力測定は、既に JRR-3 等の中性子ビームを用いて小型の実用機器についても行われており、相応の実績を上げているが、J-PARC/MLF 等の高強度中性子ビームを利用することにより測定時間が大幅に短縮され、更に大型の構造機器の測定やエンジン稼動中の残留応力を動的に評価できるようになると考えられている。

<その他の分野>

石油・資源関連分野においては、第 1 節で述べた通り、メタンハイドレートの構造・機能解析への中性子ビーム応用の可能性が期待されている。メタンハイドレートは、メタン分子が水分子に囲い込まれている構造であり、その水分子の挙動によりメタン分子（メタンガス）の吸蔵・放出特性が大きく影響を受けるとされている。こうした水分子の挙動評価に中性子非弾性散乱や中性子回折法が有効であると考えられており、効率の良いメタンハイドレートの輸送・貯蔵法の開発への貢献が期待できる。

従来、中性子ビーム等の利用にほとんど縁のなかった分野としては、食品産業における応用も期待されている。第 2 節でも述べた通り、高分子ポリマーの機能・構造解析への中性子ビームの利用が、食品産業を含むコンソーシアムから提案されており、吸湿・放出特性の優れたポリマーの開発に向けて、今後、ビーム施設者・研究者との共同研究の実施が計画されている。その他、現在問題になっているコメ中のカドミウム分析に関しても、中性子即発ガンマ線分析が最も有効な手法の一つとして注目されている。

こうした新たな産業分野へのビーム利用拡大に当たっては、前述の産業利用研究会のスキームが有効であると同時に、今後導入予定のトライアルユース制度を効果的に活用していくことが期待される。

第3章 各種ビームの横断的利用を支えるプラットフォームの整備と人材育成

第1節 各種量子ビームの横断的利用への取組みと具体事例

各種の量子ビームは、それぞれ固有の物理的特性（波長、エネルギー、スピン等）と物質との相互作用（電気、磁気、核反応等）の違いにより、計測・分析・加工等においてそれぞれ利用できる分野や範囲が異なっている。したがって、これら特性の違いを有効に生かし、複数の量子ビームを相補的に利用することにより、対象物質の構造・機能を俯瞰したより高度な計測・分析・加工等が可能となる。

本節では、原子力機構や他の研究機関等における各種量子ビームの横断的利用の具体事例を紹介する。今後はこうした横断的利用を効果的に促進すべく、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等を図ることが望まれる。

<中性子ビーム及び放射光の横断的利用事例>

・タンパク質の構造・機能解析

現状のタンパク質構造情報に基づく薬物設計は、放射光 X 線回折や NMR 等により得られた構造情報をベースに進められている。放射光 X 線回折によるタンパク質の構造解析では、骨格構造の炭素、酸素、窒素等の原子位置を精密に決定できる一方、水素原子の散乱能が小さいため、その位置に関する実験的情報を得ることが難しい。そのため、水素原子の位置は単純化したモデルを用いて決定されているが、当該位置は構造多形と絡む場合が多いこと、電子が脱離した水素は原理的に X 線では観測困難であることから、上述のモデル解析では実態とかけ離れた結果が出ることが多い。

一方、水素原子の中性子散乱能は大きいため、中性子回折では、生体内でのタンパク質の機能発現に重要な意味を持つ水和水の配向まで含め、水素原子の位置を高い信頼性をもって決めることができる。ただし、現状では中性子のビーム強度は X 線に比べて弱いため、中性子回折には大きなタンパク質の結晶を得る必要がある。しかし、J-PARC/MLF の完成により、現状の JRR-3 等の中性子ビームの数百倍のピーク強度が得られることから、これまでは結晶サイズが 1~3mm 程度必要であったものを数百 μm 程度まで小さくすることが可能となる。

これら回折実験に利用される中性子ビームのエネルギー（数 meV~数十 meV）は、結晶格子の振動エネルギーと同程度であるため、散乱によるエネルギーのやり取り（非弾性散乱）からタンパク質の運動状態に関する知見を得て、非破壊的に運動と機能の情報を得ることができる。他方、X 線を用いた同様の実験で散乱によるエネルギーのやり取りを散乱前後のエネルギーの差として測定することは、X 線のエネルギーが中性子の百万倍もあるため（数 keV~数十 keV）、

最近の高輝度放射光を用いて可能になりつつあるとはいえ、特に生体高分子の実験では困難である。

以上のことから、まず放射光 X 線回折でタンパク質の精密な骨格構造を決め、中性子回折により水素・水和構造を含む構造を決定するとともに（全原子完全構造解析）、中性子非弾性散乱による運動状態観測も併せ実施することにより、タンパク質構築原理や運動・機能の効率的な解明、これを踏まえたより合理的かつ高精度の薬物設計が可能となるものと期待される。

なお、大型中性子ビーム施設利用に係る産業界及び一般ユーザーの「敷居の高さ」を克服する上で、実験室規模の小型量子ビームの開発・活用も有効と考えられる。一例として、近年急速な発展を遂げたテラヘルツ分光が、タンパク質の動的状態解析等に有効であることが示されており、テラヘルツ分光による予備段階の解析を行うことにより、中性子散乱を利用した構造ダイナミクス解析への動機付け・橋渡しを効果的に行うことができるものと期待される。

・ 酸化物高温超伝導のメカニズム解明

1987年に発見された酸化物高温超伝導体は、基礎・応用研究から産業利用にいたる多大なインパクトをもたらすものであるが、その微視的な超伝導メカニズムは未だに解明されていない。超伝導を担う電子対が形成されるメカニズムが現象解明の鍵となるが、それには現在大別して、電子-磁気相互作用と電子-格子相互作用の2種類が提案されている。実験的には、中性子磁気非弾性散乱を用いた実験により前者の鍵となる情報が、放射光 X 線非弾性散乱及び光電子分光等により後者のメカニズムに関連するフォノン（音響子）及び電子状態に関する情報が得られつつある。特に、我が国は高温超伝導及び関連する強相関電子系物質とそれらの高品位単結晶の開発において世界をリードしており、今後国内においては、中性子・放射光両ビームの特長を生かした系統的かつ総合的な研究を進めることが重要である。

・ 実用機器・製品の内部構造評価

人体内部を観察・診断するために用いる医療用レントゲンのように、放射線を物体に透過させて内部構造を観察する手法は「ラジオグラフィ」と呼ばれている。このような放射光（X 線）や中性子等の量子ビームを用いた非破壊透過試験法は、工業分野においても、一般的な機器・製品に対する健全性評価のためのツールとして既に有効に利用されている。

中性子ビームの透過性は、一般的に原子番号に対して不規則に変化し、特に水素では低い。一方、X 線の透過性は、原子番号に対して規則的に変化し、重金属に対して低く、軽元素で構成されている材料に対しては高い。そのため、

プラスチックと金属の両者で構成されている一般的な機器・製品に対して、中性子ビームではプラスチック部品の像が、X線では金属部品の像が、それぞれ鮮明に取得できる。また、自動車エンジンではピストン等の金属をX線で、潤滑油の流動を中性子により、それぞれ明瞭に観察することができる。このように、中性子とX線を相補的に利用することにより、実用機器・製品内部における欠陥・損傷等の個所を的確かつ効率的に調べることができ、これら品質管理等を高信頼度で行うことが可能となる。

・物質中の微量元素分析

放射光を用いた蛍光X線分析は、表面から数 μm 付近における広範囲な元素を高感度で分析できる一方、中性子ビームを用いた即発ガンマ線分析や放射化分析は、表面から数 mm ～数 cm 深さの材料内部の微量分析が可能であり、特に水素やホウ素の検出能力に優れている。例えばジェットエンジンに使用されているTi合金中の水素による脆化問題や動物の臓器内の有害元素分析等への活用が期待されている。

・構造物等の残留応力評価

構造物の残留応力評価においては、部材の表面及び内部における残留応力状態が大きく異なる場合があることから、表面から内部にかけての残留応力状態を系統的に評価し、その構造物において将来的に破壊の起こり得る箇所を正確に予測することが重要である。放射光と中性子ビームでは侵入深さの違いがあり（前者で数 μm ～数十 μm 、後方で数 mm ～数 cm ）、両ビームを組み合わせることにより、材料の表面から内部までの詳細な残留応力の分布状態を把握することが可能となる。これにより、例えば大型の構造材料や自動車エンジン部材等の応力破壊の予測及び耐久性評価の精度・信頼性を格段に向上させることができる。更に、レーザー照射による表面層の残留応力除去等の新たな技術発展を促進することも期待される。

<中性子ビーム及び放射光、イオンビームの横断的利用事例>

・燃料電池の開発

現時点における燃料電池の3大開発要素として、①水素供給源（大吸蔵量・低温活性・長寿命水素吸蔵材料）の開発、②プロトン伝導膜（高伝導率・長寿命プロトン透過高分子膜）の開発、③生成水高除去能（高排水能力）構造体の開発が挙げられる。特に③は、国際的な競争が激しい分野であり、米国においては本件開発を促すための専用の中性子ラジオグラフィ装置を国立標準技術研究所（NIST）に設置し、企業の利用に供し始めている。

①の水素吸蔵材料開発においては、水素等軽元素の散乱・吸収能の高い中性子ビームと、中重元素の散乱・吸収能の高い放射光の両者を活用した回折・分光による材料設計（カーボンナノチューブや NaAlH₄ 合金等）が有効である。また、②の透過高分子膜の開発においては、イオンビームによるプロトン高分子膜の作製（加工）とともに、上述の散乱・吸収能の特性を生かした中性子及び放射光による回折・分光を行うことが、的確な材料設計を行う上で有効である。更に、③の生成水の高排出能構造体の開発には、中性子ラジオグラフィによるその場観察が排水構造体の設計・評価に有効である。

<中性子ビーム及びミュオンビームの横断的利用事例>

・超伝導状態における渦糸状態及び特異な磁性の解明

中性子ビームとミュオンビームでは、カバーできる実空間領域及び時間領域が異なることから、両者の解析結果を重ね合わせることにより、空間的・時間的な現象の全体像を明らかにできる。例えば、超伝導線材等に使用される第二種超伝導体の超伝導状態に印加された磁場は渦糸状に分断されて入り込むが、中性子小角散乱実験では各渦糸が形成する格子状態の配列を決定でき、ミュオンスピン回転実験では当該配列を基に各渦糸内での磁場分布を決定できる。これらにより詳細に決められた渦糸状態は、超伝導を担う電子対間の相互作用を知る重要な手掛かりとなるため、両実験の組み合わせによる総合的な研究を進めることが望まれる。

また、スピン揺らぎを媒介とした超伝導体の代表である CeCu₂Si₂ の磁性研究では、中性子回折実験により長周期の変調構造を持つ反強磁性状態のスピン配列が決定され、ミュオンスピン緩和実験では磁気秩序状態の割合、磁気モーメントの大きさ及びスピンの揺らぎを知ることができる。

この両者の研究により磁気的状態、磁性に対する量子効果の影響、スピン揺らぎに基づく超伝導状態といった全体像が明らかになり、超伝導発現メカニズムの解明につながるものと期待される。

<定常中性子とパルス中性子の横断的利用事例>

中性子ラジオグラフィは、非破壊で物体の内部構造を観測できるが、時間積分強度の強い原子炉中性子（JRR-3 等）を用いた静的な構造評価あるいは遅い運動状態の観測と、ピーク強度が著しく強いパルス中性子（J-PARC/MLF 等）を用いた速い動的な観測による相補的利用が期待されている。例えば、自動車エンジン内部の高分解能可視化像は既に原子炉中性子で得られているが、今後はパルス中性子により機械部分のみならず燃料や潤滑油の循環等の数ミリ秒オーダーの運動状態の可視化が可能となり、燃料電池中の水の流れ、熱交換器中の二相

流の挙動解析等に役立つものと期待される。

一方、両ビームにより異なる時間・空間スケールを観測できることから、高温超伝導機構の解明を目指した研究が既に活発に行われている他、非晶質やガラス材料の原子間の短距離～長距離の構造評価等のような材料研究開発に積極的に利用されている。

(参考) 欧米・アジアでの原子炉及び加速器中性子の相補的利用状況

同じ中性子でありながら、原子炉からの定常中性子と加速器からのパルス中性子は異なったエネルギー分布と時間特性を持つため、それぞれ異なった時間・空間領域を計測する相補性を有する。このような両中性子源の相補的利用は、先進的な計測手法として戦略的に進められており、米国ではオークリッジ国立研究所(ORNL)における SNS (加速器中性子) と HFIR (原子炉中性子)、欧州では英ラザフォードアップルトン研究所の ISIS (加速器中性子) と英独仏共同運営のラウエランジュバン研究所(ILL)の HFR (原子炉中性子) の相補的利用が推進ないし計画されている。我が国では建設中の J-PARC における加速器中性子と、近接して稼働中の JRR-3 原子炉中性子がまさにこうした相補的利用にてきたものであり、国際的にみてもユニークな環境が整っている。アジア諸国で建設が進んでいる原子炉(豪州 OPAL、韓国 HANARO 等)中性子利用者も、我が国の J-PARC/MLF を相補的に利用する機会を待望している状況である。

第 2 節 プラットフォームの運営体制と運営機関のあり方

欧米の主要な量子ビーム拠点施設の事例(欧州放射光施設 ESRF、米 ANL 等)を踏まえれば、大学・専門研究機関及び産業界が有機的に連携して、各種ビーム利用を横断的に進め、産業化に結びつける産学官の「プラットフォーム」の形成は、極めて重要な方向性と言える。我が国の主要な中性子ビーム施設(JRR-3、J-PARC/MLF)はいずれも茨城県内に立地しているが、これらと同県内に立地する放射光施設(KEK-PF)、ミュオン施設(J-PARC)を包摂する形で、こうしたプラットフォームの構築を目指す場合、これらビーム施設と「つくば」地域に集積する官民の研究機関、更には同県内の企業群との面的な連携・協力体制を構築していくことが、有効な方策と考えられる。

筑波研究学園都市には 100 を超える国・公立研究機関や企業の研究開発部門が立地し、世界に例を見ない「高密度研究集積」都市を形成している。つくば

では、それぞれの研究機関が最大限に機能を発揮するとともに、その高密度研究集積を利用し、一研究機関ではなし得ない新しい科学・技術を相互触発・協力の下、効率的に創成する大きな能力・ポテンシャルを有している。

このように、つくばにおける効果的な産学官連携推進の取り組みが期待されるものとして、産業－学術の橋渡しを業務の基軸とする産業技術総合研究所（産総研）や物質・材料研究機構（物材機構）、農業生物資源研究所（農業生物研）等の機関と、学術研究を基盤に置く筑波大学や高エネ機構等の双方の研究現場を直結させることにより、両者の研究活動を加速化させるものとして「つくばスパイラル」の構想がつくばの各研究機関に所属する研究者から提唱されている。こうしたネットワークを J-PARC や PF 等の量子ビーム施設と接合することにより、効率的な「遠隔実験」の仕組みが整い、物理的距離を越えたビーム利用の機会が飛躍的に拡大することとなる。こうしたいわば「つくばスパイラル-東海連携」を構築することにより、ひいては、つくば地区の大学・研究機関と高速回線で接続すれば全国の大学・研究機関がバーチャルな環境で J-PARC にアクセスし、遠隔利用を進めることも可能になるものと期待される。

例えば、これら研究機関の研究者等は、それぞれの専門知識・技術を生かして共同研究を迅速に進めるため、情報ネットワーク「つくば WAN」を利用し、実験装置制御、データ管理、数値計算を一瞬のうちに行ない、いわば「実測」と「予測」を同時化しつつ、効率的に実験を推進する環境を整備できる。

このように「つくばスパイラル」構想は、量子ビーム産業利用の先導的役割を果たしうるものとして期待されており、現在、つくば研究交流センターを事務局とする連携組織「筑波研究学園都市交流協議会」等のネットワークを通じ、研究者間で本構想への幅広い参加呼びかけが行われている。本構想については、省庁・官民の壁を越えた協力と、今後の複数のビームの横断的利用に係る産学官の面的連携強化によるプラットフォームの構築が期待されている。

(参考) 欧米における「横断的プラットフォーム」形成への取り組み

(1) EU: 仏・グルノーブル地区

欧州放射光施設 ESRF では、近接する中性子源施設 HFR/ILL 等との相補的ビーム利用の取組みとして、「構造生物学パートナーシッププロジェクト (PSB)」や「ナノテク研究プロジェクト (MINATEC)」、「材料エンジニアリング研究プロジェクト (FaME38)」が進められており、研究者 (On-site Staff Scientist とユーザーの両方のレベルで) の人的交流が盛んである。また、ESRF における産業利用として、mail-in サービスを実施中。

(2) 米 : DOE アルゴン国立研究所 (ANL)

- ・同一敷地内に先端放射光源 (APS) とパルス中性子源 (IPNS) が立地。
- ・DOE 科学局の主な使命は基礎研究であり、産業利用促進のための特別なシステムは存在しない。米国産業界での基礎研究もデュポン社が撤退、ベル研究所が Lucent Technology 社に吸収されるなど低調で、産業利用の割合は現状では全体の 5% 以下の状況。
- ・ANL での量子ビーム利用者は年間約 1 万人、うち放射光 (APS) が約 8 千人、中性子 (IPNS) が約 2 千人。放射光ユーザーを引き込んで中性子利用を喚起するため、放射光施設の機器担当科学者 (Instrument Scientist) 2 名を中性子施設兼務とし、相補的利用を促進。今後本システムをさらに拡充予定。

他方、茨城県内には、つくば及び東海地区における研究機関・量子ビーム施設の集積に加え、高度なものづくり企業が集積する「日立地区」があり、他には類を見ない科学研究・産業技術の一大集積拠点を形成している。

茨城県では、J-PARCの建設を契機とし、つくば、東海、日立地区の連携強化を図りつつ、これら世界最先端の知的資源と科学研究・産業技術の融合により、バイオ・ナノテク・IT等産学官による先端研究開発と成果の産業波及を促進し、科学技術創造立国を先導する一大先端産業地域の形成を目指す「サイエンスフロンティア21構想」を推進している。

本構想推進のための具体的取組みとしては、J-PARC内に、同県が2本の中性子ビーム実験装置（材料構造解析、生命物質構造解析）を整備し、県内企業はもとより、全国の企業にも広く開放し、中性子の産業利用を先導していくこととしている。これら実験装置は、2008年度のJ-PARCの供用開始を目標に鋭意整備が進められており、併せて、産業界が利用しやすい運営システムの構築に向けた準備も着実に進められている。

同県では、中性子の産業利用の効果的促進に向け、産業界に中性子利用の有効性に係る理解を深めてもらうため、2004年度より中性子利用促進研究会を開催している。2005年12月現在、難病治療薬開発等への応用が期待されるタンパク質の構造解析手法を研究する「新薬創生研究会」、大容量小型電池や高密度磁気メモリー等の性能向上につながる有効な材料の開発手法を研究する「次世代電池開発研究会」・「ナノ磁性材料研究会」等合計10テーマの研究会が設置されている。これら研究会では、200名以上の大学、研究機関、企業等の研究者等の参加により、公開ワークショップや実際に中性子を使ったモデル実験等積極的

な活動を展開している。

特に、中性子モデル実験では、企業からの提供試料に中性子を照射し、中性子利用の有用性を直接感じてもらうとともに、放射光による解析法との比較分析を行う等、中性子と放射光との複合的・相乗的活用も検討している。同県においては、2006年度以降更に中性子モデル実験を拡充する等、これら研究会活動を一層発展させていく考えであり、企業の更なる積極的な参加が期待される。

また、産業界が利用しやすい中性子ビーム実験装置の運営システムとして、企業からの技術相談の「場」を適切に設置することが重要である。このため企業からの具体的な技術相談を受け、中性子や放射光等の利用の適否とともに、専門的知見に基づく指導・助言を行い、企業単独での利用のみならず産学共同での実験装置の利用に繋げていくことを目的として、県独自のコーディネータの配置や県BL利用者支援協議会（仮称）の設置が考えられている。現在検討中の利用者支援協議会は、つくば・東海地区における世界的な研究機関との連携協力の下、これら機関の中性子や放射光に精通した専門家等から構成され、企業が抱える課題の解決のための技術相談窓口、更には実験装置の利用相談窓口としての機能が期待されている。

こうした茨城県における面的な産学官連携のプラットフォーム構築に向けた取組みは、他の地域の量子ビーム施設を中核とした利用システム展開にも有用な示唆を与えるものと期待される。今後、国・地方自治体及び関係専門機関の効果的連携・協力の下、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進展することが望まれる。

一方、行革の方針の下では、こうしたプラットフォームの運用を司る新たな公的機関の設立は事実上困難であることを勘案すれば、放射線利用振興協会（放振協）、JASRI等既存のビーム施設の利用促進を担う公的機関の機能・体制の拡充及び相互連携の強化を図ることが必要不可欠と考えられる。その際、民間企業等においてビーム利用に係る「技術営業」の豊富な経験・知識を有する人材を積極的に登用することの有効性にも留意すべきである。

第3節 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

量子ビームの産業への更なる利用促進及び利用者コミュニティ拡大を図るためには、物質・生命科学等ビーム利用に関する高い専門性を有する研究者の育成はもとより、主たるビーム供給源となる加速器に係る高い専門性を有する「加速器研究者・加速器技術者」や、利用者向け支援サービスを行う「加速器技術支援者」といった複数のカテゴリの人材の育成が必要となる。

<加速器・量子ビーム施設における研究者、技術者、技術支援者の現状>

ここで取り上げた「加速器研究者」とは、加速器の研究・技術開発に携わる高度な専門的知識・技術を有し、加速器本体の高性能化、ユーティリティ（操作性）向上に必要な技術・機器開発等の役割を担う者を言う。一方、「加速器技術者」とは、加速器の整備・運営等に携わり、機器整備や加速器本体の運転等の役割を担う者を言う。国内の多くの施設においては、研究者と技術者との明確な区別はなく、両方の業務を実施している人材が多い。

これら加速器研究者及び技術者は、主に理学・工学系の大学・大学院において専門的な教育・訓練を受け、国内の量子ビーム施設において加速器に係る科学研究・技術開発に従事している。図表 3-3-1a, b は、国内の主要加速器施設における加速器研究者及び加速器技術者の専門分野に関するアンケート結果であり、加速器本体の装置・機器の研究開発に携わる加速器研究者が、主に理学系を専門としているのに対し、検出器やターゲット機器の技術開発に携わる者が多い加速器技術者は、大多数が工学系を専門としていることが分かる。

また、ここでは「加速器技術支援者」は、ユーザーのシステム利用、実験実施に係る技術的支援を行う者を言う。ビーム利用に馴染みのない産業ユーザーに代わって装置運転やデータ測定・解析等を実施ないし支援する役割を担うことが多い加速器技術支援者は、主に大学院、大学、高校等で工学系の専門教育を受けてきている（図表 3-3-1c, d）。

とりわけ、潜在的な産業ユーザーを開拓する上では、これらユーザーにとって未知なる経験であるビーム施設の利用を簡便かつ効率的に進めることができる支援サービスの存在は死活的に重要であり、こうしたサービスを担う技術支援者の確保・配置は、産業におけるビーム利用拡大に向けて必須と考えられる。特に、中性子ビーム利用は、産業界の研究者・技術者にとって馴染みが薄い技術であり、その利用への敷居を低くし、更なる利用拡大を図るためには、技術支援者をビーム利用施設において適切に配置し、産業ユーザーが充実した支援サービスを受けられる体制を整える必要がある。

2008 年度供用開始予定の J-PARC/MLF においては、23 本の BL の機器開発・整備が可能な物質・生命科学実験施設の場合、少なくとも BL1 本につき 2 名の研究者並びに 1 名の技術者に加え、施設全体で技術支援者約 30 名が必要と考えられている（加速器の運転要員は除く）。しかし、利用目的、測定原理等が異なる BL を用いて研究・技術開発を目的とした測定・実験を円滑に進めるためには、それら測定・試験に即応する専門知識を有する人材が各 BL にバランス良く確保・配置される必要がある。

図表 3-3-2 は、国内の主な加速器施設における人材の充足度に関するアンケート結果である。全体として大多数の施設で不足感が見られ、特に研究者及び

技術者については、対象とした全施設で「不足している」結果となっている。

なお、技術支援者の充足度について「十分」との回答を寄せた施設もあるが、これは当該施設が運転・管理業務を委託している会社・団体等から、これら業務を円滑に遂行するための多数の技術支援者が派遣されていることによるものであり、施設を有する機関そのものに所属する支援者の数は少ないと言える。このような外部の企業・団体への業務委託により必要な技術支援者を確保することは、施設保有機関の職員定数制約を受けることなく効率的に施設の運営を行う上では有効であるが、知識・経験ベースの技術・技能の蓄積が委託先側のみで行われ、施設側ではこうした技術・技能の継承がほとんどなされない恐れがある。産業利用の効果的・継続的拡大を図る観点から、こうした人材育成をめぐる種々の課題を改善する方策が今後必要となっていくことを示唆している。

これら人材について、特に不足感の強い人材の専門分野をリストアップすると図表 3-3-3 の通りになり、研究者については、超伝導技術、ビーム診断技術、真空工学、電気工学等、技術者については、計測・制御、保守・管理技術等、技術支援者については、生物分野、計算機科学、電子工学、運転業務等であることが分かる。今後のビーム利用拡大に当たっては、高度化・多様化する量子ビーム技術の進展に応じ、こうした人材の専門分野別の需要を十分に踏まえつつ、きめ細かい人材育成・確保のための方策を講じていくことが重要である。

<加速器専門人材の育成方策全般>

高度化・多様化する加速器の整備・運用を進めるに当たり必要な専門人材を育成する上で、大学・大学院等での知識ベースの教育・訓練の他、加速器本体を直接取り扱う研究・実験を通じて、経験的・実践的に知識・技術を得ることも重視されている。しかし、加速器の設置・維持管理は多額の経費を必要とするため、特に大学においては予算上の制約もあり、個々の大学毎にこうした加速器の運転管理を継続的に行い、人材育成に供することは益々困難となってきた。そのため、学生・研究者が直接加速器を用いて実験・研究する機会も限られてきており、加速器を専門とする実践的人材を有機的に育成することを困難にしている。

こうした状況の下、加速器に係る専門知識・技術を有する人材の効果的育成・確保を図るためにも、大学・研究機関、産業界等の学生、研究者・技術者が加速器を用いた実験・研究を行うことのできる環境を整備することが、今後重要になると考えられる。その際、前節で述べた量子ビーム施設を核とする「プラットフォーム」を加速器に係る研究者・技術者の育成のための共通基盤として効果的に活用することは、高度な専門知識・技術を有する人材を効率良く育成・確保する上で合理的かつ有効であると考えられる。

そもそも、これまで量子ビーム施設を用いた研究・技術開発は、主に研究者個人間の繋がりに依存した限られた範囲の利用者によってのみ行われてきた面がある。こうした状況を打開すべく、産学官に渡る横断的プラットフォームを通じて効率的利用を進めることにより、多様な分野の大学・研究機関、産業界の学生及び若手研究者・技術者に対して、量子ビーム施設における実践的な教育・訓練を効果的・合理的に行うことができる。

こうしたプラットフォーム整備は、学生、研究者・技術者に対し、これら量子ビーム・加速器技術への関心・理解を深める機会を与えることにより、積極的に実験・研究に向かう姿勢を促し、本分野をより深化・発展させる人材の育成に寄与すると考えられる。今後の本分野に係る人材の育成を効果的・効率的に進めていく上で、こうした機会をより積極的に活かすべく、関係する学会等の諸活動の一層の強化・展開を図っていくことが重要と考えられる。例えば、我が国における中性子ビーム開発・利用研究において中核的役割を担う「日本中性子科学会」を中心として、他の量子ビーム関連学協会との横断的連携協力を強化することにより「学会連合」的アライアンスを形成し、学部・大学院学生等の若手人材という「入口側」メンバーシップの拡充、更には企業の賛助会員等「出口側」のプレイヤーを増やしていくことが、本分野の人材の量的・質的厚みを増していく上で、極めて有効であろう。

こうした人材層の強化が積極的な競争研究資金へのアクセス等を通じて、本分野全体へのリソース流入と新たなディシプリンの確立をもたらし、優れた成果の創出を通じて出口側たる産業界へのキャリアパス展開を促し、ひいては、更なる若手人材の流入増を誘引するというポジティブループを形成していくことも大いに期待される。

さらに、大型量子ビーム施設の「国際公共財」としての位置づけを踏まえ、これら施設を、アジア諸国をはじめとする量子ビーム開発利用研究者・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、各種の国際協力・人材育成プログラム等に積極活用していくことも、政策的に極めて重要である。

例えば、アジア・太平洋地域の途上国を中心としたIAEAの「原子力科学技術に係る研究・開発・訓練のための地域協力協定」(RCA)の下での協力活動として、近年放射線加工・品種改良、非破壊検査、放射線治療・核医学等、量子ビーム利用関連プロジェクトが大きなウェイトを占めるに至っている(下記参考)。これら協力活動のための格好の場として、J-PARCを中心とした大型ビーム施設の活用を図ることは必須の方向と言え、こうした研究推進・人材育成の努力の結果、各国においてビーム利用を主導する高度人材の活躍の場が拡がり、ひいてはこれら諸国による商業ベースでの我が国ビーム施設の本格的利用(専用ビームライン設置等)を先導する可能性も期待される。

＜人材カテゴリ毎の育成・確保策＞

次に、前々項で述べた加速器関連人材の3つのカテゴリ毎に人材育成のあり方を考えてみると、まず高度の専門性を有する「加速器研究者」に関しては、高エネ機構を基盤とする総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科において、加速器に係る研究・技術開発を担う専門家の教育・養成を行い、毎年十名程度の専門人材を輩出してきた。同研究科では、本分野に関する更なる専門的かつ高度な教育・訓練の実施を目的として、平成18年度より既存の後期3年の博士課程に代えて5年一貫の博士課程を設置する予定としており、今後加速器技術の発展を世界的にリードする研究者・技術者を着実に養成・輩出していくことが期待されている。また、修士課程学生を対象としたCERN夏期セミナーのような海外派遣事業等も効果的に活用し、国際的な競争環境下で広い視野を持った人材の育成を進めていくことも重要と考えられる。同時に、大学等における中小型加速器を用いた加速器教育や客員講座等を活用した関連研究グループの強化も並行して進め、幅広い分野から人材を育成することも有効である。

第2のカテゴリである「加速器技術者」の育成については、特に工学系の人材に不足感が強いことに留意すれば、これまでの加速器関連の教育カリキュラムが理学系を中心に組まれ、加速器のみの専攻者を主たる対象としていたことは必ずしも効果的とは言えない面がある。むしろ、最新の加速器における最先端技術の活用状況や先端加速器の活用による新領域・世界観の開拓等、いわば「加速器のフロント」に係る講義・研修等を工学系の人材育成プログラムの中に「実践」を伴う形で組み込んでいくことが極めて有効と考えられる。また、特に不足感の強い専攻分野として「計測・制御系」の人材が挙げられている点については、これら先端分野の人材が民間の研究開発部門においては比較的厚く分布していることを踏まえれば、前述のような産学官共通の人材育成に係るプラットフォームの構築・活用を通じ、相補的な連携・対応が可能となるものと期待される。

第3のカテゴリである「技術支援者」の育成・確保については、アンケート調査の結果を見る限り、「不足感」を克服する一番の早道は当該支援業務を民間の役務サービスにより全面的にアウトソースすることと言える。但し、これが可能となるのは、当該加速器の利用が実用ベースで十分採算の取れるもので、しかも相応の市場規模を有する「成熟した」ビーム利用の場合に限られる。

こうした「クリティカル・マス」に達しない加速器利用の場合は、施設者側が否応なくこれら支援人材を組織内に抱えざるを得ないこととなるが、その場合の検討課題として、これら人材の「評価」及び処遇のあり方の問題が挙げられる。即ち、量子ビーム研究開発・利用の成果が「論文」ないし「特許」の形

で外形化され得る加速器研究者・技術者と異なり、これら技術支援人材の成果・実績を定量的に把握・評価することは通常困難であり、これが欧米先進国に比して相対的に低いとされる技術支援者の処遇につながっている、との見方ができる。そこで、これら人材の支援サービスに係るモチベーションを高め、ひいては優れた人材の誘引・確保を図っていくためにも、例えば「ビーム利用の支援による新たな科学的価値・産業面のメリット創出」等を個々の支援者毎に定量化し、これを組織内で積極的に評価して処遇の向上にもつなげていく、といった取組みが期待される。

<加速器及び人材のライフサイクルと機関間連携の重要性>

これら 3 カテゴリの人材の需要・供給の時間的推移を大型加速器計画そのものの整備・運用サイクルと重ね合わせて考えると、計画の初期段階においては設計・技術開発面で新たなフロンティアを切り拓くため高度な専門性を有する「加速器研究者」がより多く必要とされ、次に本格整備・初期運転段階ではその過程で生ずる種々の技術的課題・トラブル等の克服のため、より広範な工学的スキルを有する「加速器技術者」が求められ、最後に産業界をはじめとするビーム利用が本格化し、安定運転期に入るとこれらをサービス面で支える「技術支援者」の役割が相対的に増大する、という人材面での「ライフサイクル」も見て取ることができる。

これを研究者・技術者及び技術支援者のグループの側から見た場合、これら人材が長期にわたり特定の機関ないし加速器施設に張り付く形で業務に従事することは必ずしも効率的とは言えない。むしろ、機関相互間の連携を確保・強化して人材の流動性を高めることにより、主要な加速器の整備・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・活用を図っていくことも非常に有効な方策と考えられる。こうした面からも、複数のビーム施設間の横断的・有機的な連携・協調のための「プラットフォーム」構築・活用は、極めて有用なコンセプトであると言えよう。

同時に、我が国が今後とも加速器科学を先導するためにも、革新的量子ビームの創出を担う新たな人材の育成に十分配慮することも重要である。

(参考) RCA プロジェクト (2001年～2002年)

	分野	プロジェクト数	主なプロジェクト
1	農業	6	「米穀の遺伝子変異改善」、「家畜の飼養・繁殖の効率管理」
2	健康	5	「細胞移植放射線殺菌の品質保証」、「核診断の応用」、「子宮癌処置の放射線治療」
3	工業	4	「癌治療コバルト 60 線源の製造と品質管理」、「非破壊検査と評価」、「非破壊検査・放射線トレーサー・密封線源を用いた石油化学産業における過程診断と活用」、「低レベル放射能・携帯核種計測器を用いた鉱物資源実収への活用」
4	環境	9	「環境と工業発展の効率管理」、「空気汚染評価のためのアイソトープと関連技術」、「飲料水の管理・防護におけるアイソトープ利用」、「海洋海岸環境汚染の管理」、「放射線防護とネットワーク構築」、「農産廃棄物への放射線加工の応用」、「放射線加工を用いた天然高分子の良質化と環境保全向上」
5	エネルギー /研究炉/廃棄物管理	3	「非原発施設からの発生した放射性廃棄物の処分」、「研究炉の運転・利用の改善」、「グリーンハウス効果排出物緩和のための原子力と他のエネルギーの役割」
6	放射線防護	2	「放射線防護の調和」、「環境放射線モニタリングと地域データベース」
7	一般	1	「アジア・太平洋における途上国間技術協力の発展」

[出展] 外務省ホームページ

(<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/atom/iaea/rca.html>)

第4章 検討会の総括・提言と今後の課題

第1節 量子ビーム研究開発・利用促進に向けた取組みに係る総括と提言

本報告書では、量子ビーム研究開発・利用の効率的な促進に向け、J-PARC/MLF及びRIBFを中心に産業利用の側面に重点を置いて当面取り組むべき課題に加え、今後の中長期的課題について取りまとめた。本節では、これらの主要事項について改めて総括・整理するとともに、今後の量子ビーム研究開発・利用促進に向けた方策についての提言を取りまとめる。（なお、基礎科学研究におけるこれらビーム利用のあり方については、関係審議検討組織・法人等での検討に委ねることとし、本報告では産業利用の側面に重点を置いて検討・取りまとめを行った。）

○ビームラインの整備・運営のあり方

- ・ J-PARC/MLF の BL 整備・運営では、ビーム施設設置者（以下「施設者」）の予算による整備や、大学等の第三者研究機関、地方自治体、企業・コンソーシアムによる BL 整備の他、競争的資金を活用した BL 整備も有効。これら BL 設置計画については、コスト回収の観点に留意しつつ、科学技術的観点や産業促進の観点、技術的実現性等に基づく評価・決定が不可欠。
- ・ また、大型研究施設の「国際公共財」としての位置づけを踏まえれば、海外からの BL 利用の受入れ体制の整備も要検討。但し、国内産業振興の観点からは、WTO 等の国際ルールとの整合性等に配慮しつつ、産業界の排他的利用における国際アクセスの制限につき慎重な検討が必要。
- ・ RIBF は、加速器とともに基幹実験設備までを施設者である理研が整備し、付加する測定装置等は各ユーザーが自ら設置するという全体が共用 BL 的なもの。また、理研を含む全ての実験課題の公募・審査・ビームタイム割当等は、外部委員を含めた実験課題採択委員会等により決定されるとともに、共用に係る運営システム検討のための専門委員会組織も設置予定。

○ビーム機器の性能向上・更新のあり方

- ・ J-PARC/MLF における BL 機器の性能向上・更新にあたっては、専用 BL 設置・産業利用促進の実績等で先行する大型放射光施設 SPring-8 の各種制度を参考にしながら対応することが望ましい。一方、競争的資金での機器開発・整備に当たっては、これら BL 機器に係る運転・管理経費の確保に留意が必要。
- ・ RIBF におけるビーム輸送系及び実験設備の性能向上・更新については、施設者が中心となり、最新技術の導入等の高度化を継続的に実施し、施設の先端性維持と利用者ニーズへの即応が必要。

○適切なビーム利用料金のあり方

- ・ビーム施設の共用に当たっては、多くの経験を重ね制度設計・運用が進められてきた SPring-8、及び大学共同利用施設等の国内先行施設や海外施設における利用体系を見極めた上で、効率的・合理的な利用体系の構築が必要。
- ・量子ビーム施設は、大型化やビームの大強度化に伴い、多額の運転経費を要するようになってきている。このため、施設者のみによる運転経費の負担は、独立法人予算の種々の制約の範囲内では困難化。
- ・このため、施設者以外の利用に際し、コスト回収の一環として利用形態に応じた適正な料金の徴収が重要。その際、ビーム施設の共用を効果的に進めるためには、有償利用を先導する成果非専有の利用をまず促進し、施設の有用性を内外に示すべく、当該施設を広く共用に供するための経費の一部を国が法人予算の枠外で直接負担する仕組みの適用についての検討も重要。
- ・こうした料金設定のあり方を検討する際には、施設者が海外の同種施設に対して十分な国際競争力を有するよう留意することが重要。
- ・特に、J-PARC/MLF では、原子力機構や高エネ機構、茨城県等の様々な設置主体間での利用料金体系の整合性の確保が今後の重要な検討課題。同時に、原子力機構内の他の共用施設との利用料金体系の整合性についても考慮が必要。これらを踏まえ、利用者に対し混乱を与えることなく円滑な利用促進を図る上で、透明性ある分かりやすい料金体系の構築が必要。

○専門組織による依頼分析サービスの提供可能性

- ・試料の前処理からデータ取得・解析までの分析サービスを専門機関が全て代行することは、特に産業界にとり馴染みの薄い中性子ビーム等の利用を促進する上で、極めて有効な支援サービス。
- ・こうした分析代行サービスは既に一部で実用化されおり、現状の民間専門機関による依頼分析関連サービスの内容として、①原子核反応を利用するものとして中性子透過試験やポジトロン分析等、②ターゲット試料のイオン化を利用するものとして特性X線測定による元素分析 (PIXE)、③ターゲット試料の原子欠損 (格子欠損) を利用するものとして半導体へのイオン照射等。
- ・今後は、例えば、J-PARC/MLF 等での大強度中性子ビームの活用により、中性子透過試験における動的な分析サービスへの事業拡大や、中性子粉末解析測定における新分析・構造解析サービスへの展開の可能性を期待。
- ・一方、当該分析サービスに係る技術については、これまで公的研究機関から移転されてきたものが多く、更なる事業展開を図る上では、今後とも公的研究機関と企業との連携・協力を強化することが重要。
- ・また、「標準物質」作成や分析法標準化への取組みは、ビーム利用による各

種測定・分析を精密かつ高信頼度で行う際に必須であり、分析代行サービスを実用ベースで進める上でも重要。今後の産業利用の推進・拡大に当たって、中性子標準を通した中性子計測の信頼性の向上が図られ、標準化への取組みに係る関係専門機関や府省間の連携・協力が一層強化されることが期待。

○対外的プロモーション活動の推進

- ・本検討会の中間とりまとめの成果をベースとして、これまで各般の業界団体や報道機関等を対象に広報・アウトリーチ活動を展開してきたところ、多くの有用な助言や新たな利用開拓の可能性を期待。
- ・今後は種々のメディアや人的ネットワークも活用し、コーディネータ・アドバイザー等による広報・アウトリーチ活動を実施し、これまでビーム利用に係る知識・情報に接する経験の少なかった若年層や女性層他にもアプローチしていくことが重要。その際、多様な人材の参画を得つつ、各ビームの特性や強みをできる限り分かりやすい形で発信、情報提供することも重要。

○量子ビーム産業利用研究会の組織化

- ・これまで原子力機構や理研、高エネ機構等が中心となり、新たな産業利用の促進が期待される課題（ニーズ）を持つ企業ないしは企業団体等との「量子ビーム産業利用研究会」が試行的に開催され相応の成果。
- ・今後は、より包括的かつ具体的に産業利用が期待されるニーズを吸い上げ、これらニーズに的確に応えるためのシステムとして、主要分野毎に施設者、産業界の潜在ユーザー、大学等の専門家の参画を得て、産業利用研究会を効果的に組織化することが有効。その際、複数のビームの相補的利用の有効性に留意するとともに、産業界の関心を効果的に喚起する上で、テーマ・領域絞り込みに当たり、早期の「成功事例」創出を目指すことも重要。
- ・併せて、公的組織による成功事例の「顕彰制度」を創設・活用することにより、成功事例を広く一般に喧伝し、産業界の更なる利用促進のためのインセンティブを付与することも有効。

○今後の利用拡大が期待される産業ユーザー

- ・これまでの本検討会での討議及び上述のアウトリーチ活動・産業利用研究会の実績等を踏まえ、今後主要分野での利用拡大が期待される産業領域を例示すると次の通り。これらについては産業利用研究会等での検討・連携の更なる深化と、これを踏まえたBL設計・運用システムへの反映等が必要。
- ライフサイエンス・医療分野：医療機器産業（粒子線治療施設の小型化）、製薬産業（構造解析による合理的薬剤設計）、花卉産業（ビーム育種）等

- 環境関連分野：自動車産業等（燃料電池開発）、種苗産業（ビーム育種）等
- 材料・ナノテク分野：情報通信産業（ハードディスクの記憶密度の向上）、建設業・鉄鋼業（大型機器・構造物の残留応力評価）等
- その他の産業分野：石油・資源関連分野（メタンハイドレートの輸送・貯蔵法の開発）、食品関連産業（高機能高分子ポリマーの開発）等
- ・こうした新たな産業分野へのビーム利用拡大に当たっては、上述の産業利用研究会が有効であると同時に、今後導入予定のトライアルユース制度を効果的に活用することを期待。

○各種量子ビームの横断的利用への取組みと具体事例

- ・各種の量子ビームは、固有の物理的特性と物質との相互作用の違いにより、計測・分析・加工等において利用できる分野や範囲が相違。これら特性の違いを有効に生かし、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。
- ・これまでの本検討会での討議結果等を踏まえれば、複数のビームの横断的・相補的利用が有効と期待される領域・テーマを例示すると次の通り。これらについては、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。
- 中性子ビーム及び放射光の横断的利用：タンパク質の構造解析、酸化物高温超伝導の機構解明、実用機器・製品の内部構造評価、物質中の微量元素分析、構造物等の残留応力評価
- 中性子ビーム及び放射光、イオンビームの横断的利用：燃料電池の開発
- 中性子ビーム及びミュオンビームの横断的利用：超伝導状態における渦糸状態及び特異な磁性の解明
- 定常中性子ビームとパルス中性子ビームの横断的利用：自動車エンジンや燃料電池の開発、熱交換器中の二相流の挙動解析、高温超伝導機構の解明、材料開発（非晶質やガラス材料の構造評価）

○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。我が国では、JRR-3、J-PARC/MLF と KEK-PF がいずれも茨城県内に立地し、これらビーム施設と「つくば」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。
- ・つくばでの産学官連携の取組みとして、産学の橋渡しを基軸とする産総研、物材機構、農業生物研等と、学術研究を基盤に置く筑波大学や高エネ機構等

の研究現場を直結し、両者の研究活動を加速化させる「つくばスパイラル」構想の提唱。今後、筑波研究学園都市交流協議会等を通じ、本構想が、省庁・官民の壁を越えた賛同を獲得し、複数ビームの横断的利用に係る面的連携強化によるプラットフォームが構築されることを期待。

- ・ ネットワークによる量子ビーム施設との接合は、物理的距離を越えたビーム利用の機会を飛躍的に拡大し、「つくばスパイラル-東海連携」の構築を通じ、全国の大学・研究機関によるバーチャル環境での遠隔利用可能性が期待。
- ・ 茨城県では J-PARC 建設を契機に、つくば、東海、日立地区の連携強化を図りつつ、バイオ・ナノテク・IT 等の先端研究開発と成果の産業波及促進により、一大先端産業地域の形成を目指す「サイエンスフロンティア 21 構想」を推進中。具体的取組みとして、同県が J-PARC/MLF 内に整備する 2 つの中性子ビーム実験装置を県内外企業に広く開放し、産業利用を先導していく方針。
- ・ 同県では、産業界が利用しやすい運営体系として、独自のコーディネータ配置や「県 BL 利用者支援協議会」（仮称）設置が考えられている。中性子・放射光専門家等から構成される同協議会には、企業の課題解決のための技術相談、実験装置の利用相談の窓口としての機能を期待。
- ・ 中性子の産業利用の効果的促進に向け、同県では 2004 年度より「中性子利用促進研究会」を開催し、現在計 10 テーマの研究会を設置。企業からの提供試料による中性子解析を行う「中性子モデル実験」を通じ、有用性を直接感じてもらう他、中性子と放射光との複合的・相乗的活用も検討中。
- ・ こうした茨城県の産学官連携の面的プラットフォーム構築に向けた取組みは、他地域の量子ビーム施設を中核とした利用システム展開にも有用。今後、国・地方自治体及び関係専門機関の効果的連携・協力の下、各地域及びこれを横串に貫く幅広いプラットフォーム構築を目指した取組みの進展を期待。
- ・ 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

- ・ 量子ビームの更なる利用促進、利用者コミュニティ拡大には、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、全体としてこれら人材についていずれも不足感が見られる。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。
- ・ 今後の多様化・高度化するビームの利用拡大には、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重要な支援サービスを担う技術支援者の確保・配置が必須。

- ・本分野の人材育成では、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。
- ・こうした状況では、前述の「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。
- ・今後の本分野に係る人材育成を効果的・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。例えば、「日本中性子科学会」と他の量子ビーム関連学協会との横断的連携強化による「学会連合」的アライアンスを形成し、「入口側」たる学部・大学院学生等の若手人材の拡充、更には企業の賛助会員等「出口側」の増加を図ることは、本分野の人材の量的・質的厚みを増していく上で極めて有効。
- ・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、国際協力・人材育成プログラム等に積極活用することは重要。
- ・IAEA/RCAにおける協力活動として、放射線加工・品種改良等、量子ビーム利用関連プロジェクトが大きなウェイトを占め、これら協力活動の場として、J-PARC等、大型ビーム施設の活用は必須。
- ・こうした研究推進・人材育成の努力の結果、各国のビーム利用を主導する高度人材の活躍の場が拡大。これら諸国による商業ベースでの我が国ビーム施設の本格的利用（専用ビームライン設置等）を先導することも期待。
- ・加速器関連人材の3つのカテゴリ毎に人材育成のあり方を考えると次の通り。
 - 加速器研究者：総合研究大学院大学に2006年度創設予定の加速器科学に係る大学院教育プログラムを活用することにより、今後の技術発展をリードする研究者・技術者の着実な養成・輩出を期待。CERN夏期セミナー等の活用による、国際的競争環境下で広い視野を持った人材の育成も重要。同時に、中小型加速器を用いた加速器教育や客員講座等を活用した人材育成も有効。
 - 加速器技術者：特に工学系人材に不足感が強いことから、最新加速器における先端技術の活用状況等「加速器のフロント」に係る講義・研修等を工学系の人材育成プログラムに「実践」を伴う形で組み込むことが極めて有効。また、特に不足感の強い分野とされる「計測・制御系」人材については、民間研究開発部門で比較的層が厚いことを踏まえ、産学官共通のプラットフォー

ムの構築・活用を通じ、相補的な連携・対応を期待。

- 技術支援者：「不足感」克服の早道は支援業務を民間役務サービスへ全面的にアウトソースすることだが、これが可能となるのは、十分に加速器利用の採算が取れ、相応の市場規模を有する成熟したビーム利用の場合。
- ・ 施設者側が支援人材を組織内に抱える際の課題は、支援者の「評価」及び処遇のあり方。例えば「ビーム利用支援による新たな科学的価値・産業面のメリット創出」等を積極的に評価・処遇に反映していくことを期待。
- ・ これら3カテゴリの人材の需要・供給の時間的推移を加速器の整備・運用サイクルと重ね合わせると、「研究者」→「技術者」→「技術支援者」という人材面の「ライフサイクル」が見て取れる。この際、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。こうした面からも、複数の施設間の横断的・有機的な連携・協調のための「プラットフォーム」構築・活用は、極めて有用なコンセプト。

第2節 今後引き続き検討・対応すべき課題

量子ビーム研究開発・利用促進方策全般については、本検討会での検討結果を踏まえつつ、今後の科学技術・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等の公的検討組織による更なる検討を期待する。更に、これら検討と連携・協調する形で、日本アイソトープ協会/理工学部会/量子ビーム専門委員会、日本中性子科学会等、より広範なコミュニティによる調査検討、並びに日本電機工業会加速器専門委員会等の産業界のフォーラムにおいても、量子ビーム施設の運用に係る技術支援者等の専門人材の育成確保等、更なる検討を要する中長期的課題について、関連する議論の深化が期待される。

今後、本格的ビーム供用の段階を迎える主要ビーム施設のうち、J-PARC については、2003年に行われた科学技術・学術審議会合同作業部会による中間評価を踏まえ、その後の本計画を取り巻く状況変化を勘案しつつ、ビーム取り出し・実験開始までの間に、計画全体の中間評価を再度実施し、第1期計画以降の具体的な施設整備・実験計画を検討・立案していく必要がある。その際、今般の検討会において中心的に検討を行った中性子等の産業利用を主眼とした事業の流れとともに、学術研究を主軸とした利用のあり方及び両者のバランスについても、十分に留意した検討を進めることが重要と考える。

他方、RIBF については、今後の基幹実験設備整備の動向を見極めつつ、理研に設置予定の施設共用に係る運営システム検討のための専門委員会による幅広い検討を行うことが期待される。その際、外部利用者に対する施設利用及び成

果の帰属の柔軟性・開放性の向上とともに、他の主要ビーム施設の例を参照しつつ、運用コスト回収の考え方についても相応の検討を加えることが望まれる。

2006年度予算案において、電源開発促進対策特別会計（電源特会）の活用による関連施策の創設が盛り込まれた「量子ビーム利用促進プログラム」については、電源特会の予算上の趣旨に起因する対象地域等の制約を踏まえ、更なる対象施設・地域の拡大に向けた検討を行うことが適当である。その際、利用促進のためのパイロット資金としての国の予算の役割に鑑み、成果の早期創出及び利用者からの適正な対価徴収の考え方についても配慮する必要がある。

加速器・量子ビーム専門人材の育成においては、高性能化・多様化する加速器・量子ビーム技術の進展に合わせて、加速器研究者・技術者及び加速器技術支援者を、必要な専門分野や人員数を考慮しつつ、バランス良く確保・配置する方策を講じていくことが望まれる。その際、産学官の共通基盤的プラットフォームを構築・活用し、大学・大学院のような専門教育研究機関における知識ベースの教育研究と、量子ビーム・加速器施設の実利用を通じた経験ベースの教育研究とを併用した教育・訓練を行うことが、必要かつ有効と考えられる。

最後に本検討会では中心的トピックとして取り上げる機会のなかったレーザー、テラヘルツ波等、多彩な量子ビームの利用に関しても、今後のこれらビームの大強度化・高品位化等の技術革新に合わせて、産業界及び基礎科学研究における新規利用分野やユーザーの開拓・拡大に向けた方策を検討・構築していくことが期待される。その際、コーディネータの横断的利用促進・拡大に向けた各種活動等を通じ、本検討会において議論された中性子・イオンビーム等の産業利用促進への取組みとこれら方策との有機的な連携・融合を図っていくことが、こうした多彩な量子ビームの利用を効果的に促進していく上で、極めて有効と考えられる。

おわりに（謝辞と期待）

本検討会は、高度化・多様化の進む量子ビーム技術について、重点を置くべき分野や利用に当たっての課題について幅広く討議するとともに、今後の研究開発推進と利用促進に向けての方策を検討することを目的に設置された。

本検討会での討議の過程において、量子ビーム利用に係る具体的なニーズを探るべく、重点分野等における多くの専門研究者・有識者の方々より、最先端の研究動向等に係るヒアリングないし発表に協力頂いた。また、量子ビーム施設の関係各位には、国内外の量子ビームの開発・利用に係る取組み状況や各施設における利用促進プログラム、産学官連携・人材確保の現状・動向に係る調査等に協力を頂いた。これらのご協力を通じ、有望な利用領域の抽出や具体的な問題意識に立脚した検討・議論を効果的・効率的に実施することができ、中間とりまとめを受けて、既にトライアルユースをはじめとする各般のビーム利用促進プログラムの創設、複数の有力テーマに係る産業利用研究会が開催されるなど、相応の成果、進捗を見ることができた。

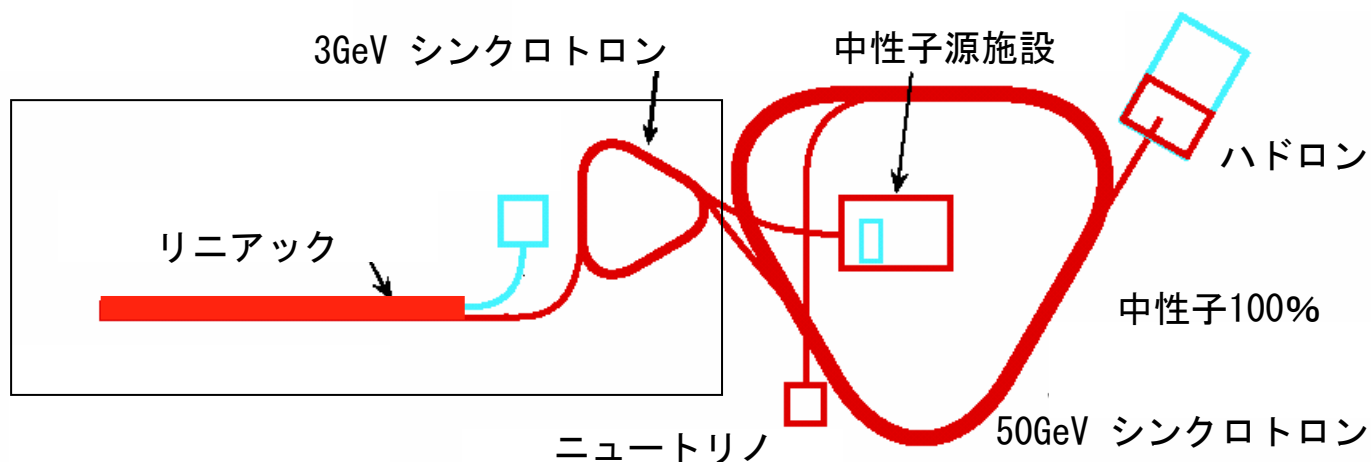
とりわけ、本検討会での検討を経て提起された諸課題について、事務局たる文部科学省及び関係専門機関が報告書の最終とりまとめを待つことなく随時具体的活動を展開したことは印象的であり、検討会におけるリアルタイムの討議・検討を進める上でも大いに助けとなるものであった。この場を借りて、本検討会への協力者各位、並びに文部科学省研究振興局及び関係専門機関の尽力に対し、心より謝意を表明したい。

本検討会としては、最終とりまとめに示した見解・提言を踏まえ、今後量子ビームの研究開発・利用の効果的・体系的推進方策について、国、関係機関及び産業界等の然るべき場で、より掘り下げた検討・討論が進められることを期待したい。折しも、2006年度からスタートする第3期科学技術基本計画においては、明確な成果目標の設定を前提として、5年間で計25兆円の高い政府研究開発投資目標の設定がなされることとされている。今後の多彩な量子ビームの研究開発・利用推進に当たって、本検討会の見解・提言が有効に活かされ、産学官の協調した取組みにより、早期の成果創出・社会還元及びこれによる産業競争力の強化が図られれば幸甚である。

図表1.3.1 運転経費のうち中性子発生に関わる加速器コスト割合の試算（第4回資料3-1から抜粋）

利用時間割合で分担	中性子源及び3GeVからの輸送系 100% 50GeV、ハドロン、ニュートリノ 0% <u>リニアック、3GeVは50%（中性子へ50%、50GeVへ50%）</u> 共通施設、安全等その他 50%	BL当たりの経費 （ * ） =約150万円/日
陽子ビーム利用割合で分担	中性子源及び3GeVからの輸送系 100% <u>リニアック、3GeVは中性子と50GeVへのビーム振り分け割合（中性子へ95%、50GeVへ5%）</u> ハドロン、ニュートリノ 0% 共通施設、安全等その他 50%	約190万円/日
全体を折半	中性子源及び3GeVからの輸送系 100% <u>50GeVまでの加速器全体の50%</u> ハドロン、ニュートリノは0% 共通施設、安全等その他 0%	約180万円/日

（*）プロジェクトチームが積算した運転維持費をベースに試算した。今後、運転維持費の積算が変わればそれに応じて変わる。

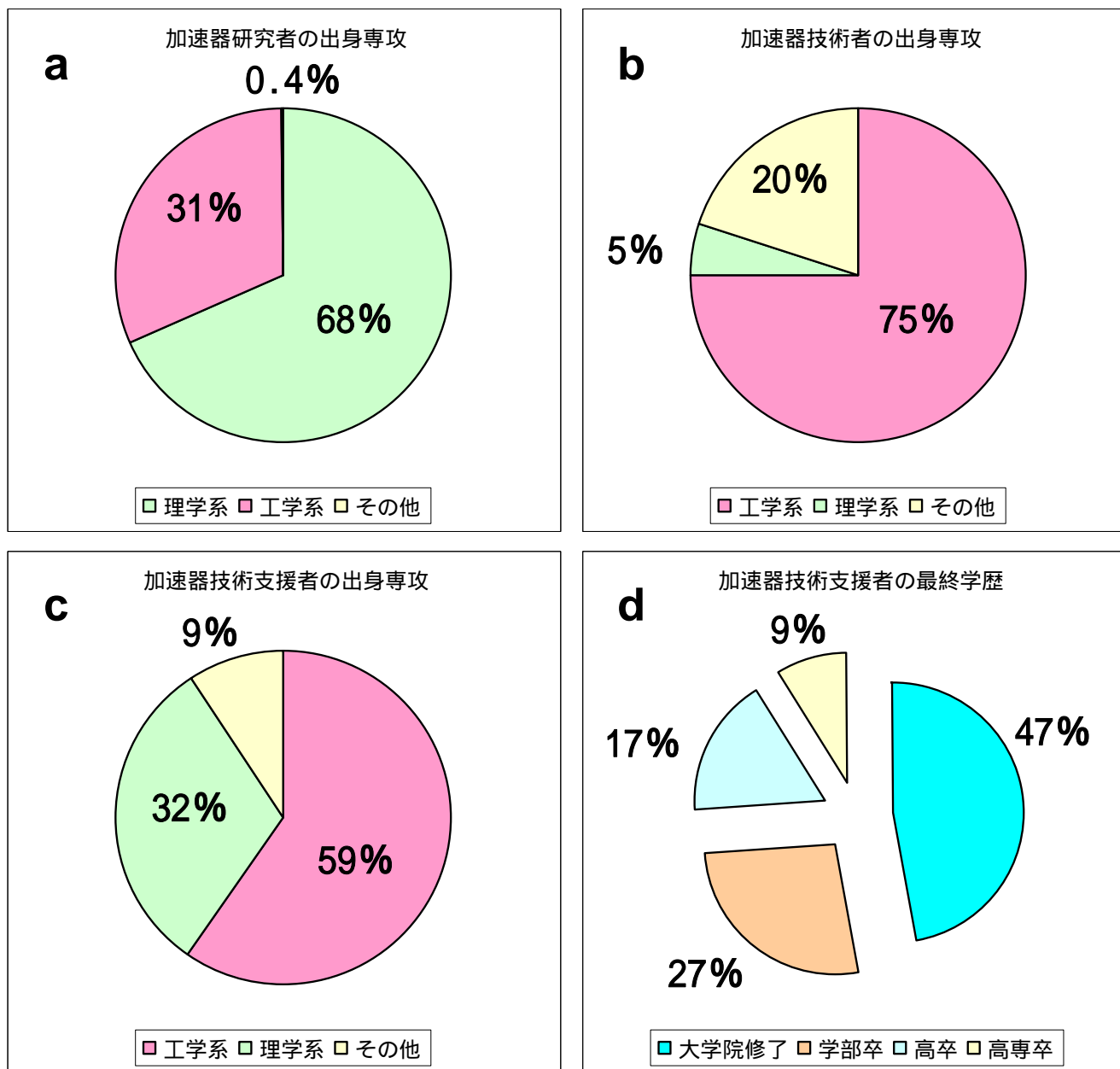


図表 1.3.2 利用者区分と経費負担の例

経費分類／利用者区分		一般ユーザー (産業応用含む)		B L 設置者	
		占有	非占有	占有	非占有
	成果の占有・非占有				
A	中性子発生に関わる経費	○	×	○	×
B	ビームラインの維持費	○	×	—	—
C	消耗品等	○	○	○	○
D	付加的技術支援に関わる経費	○	○	×	×

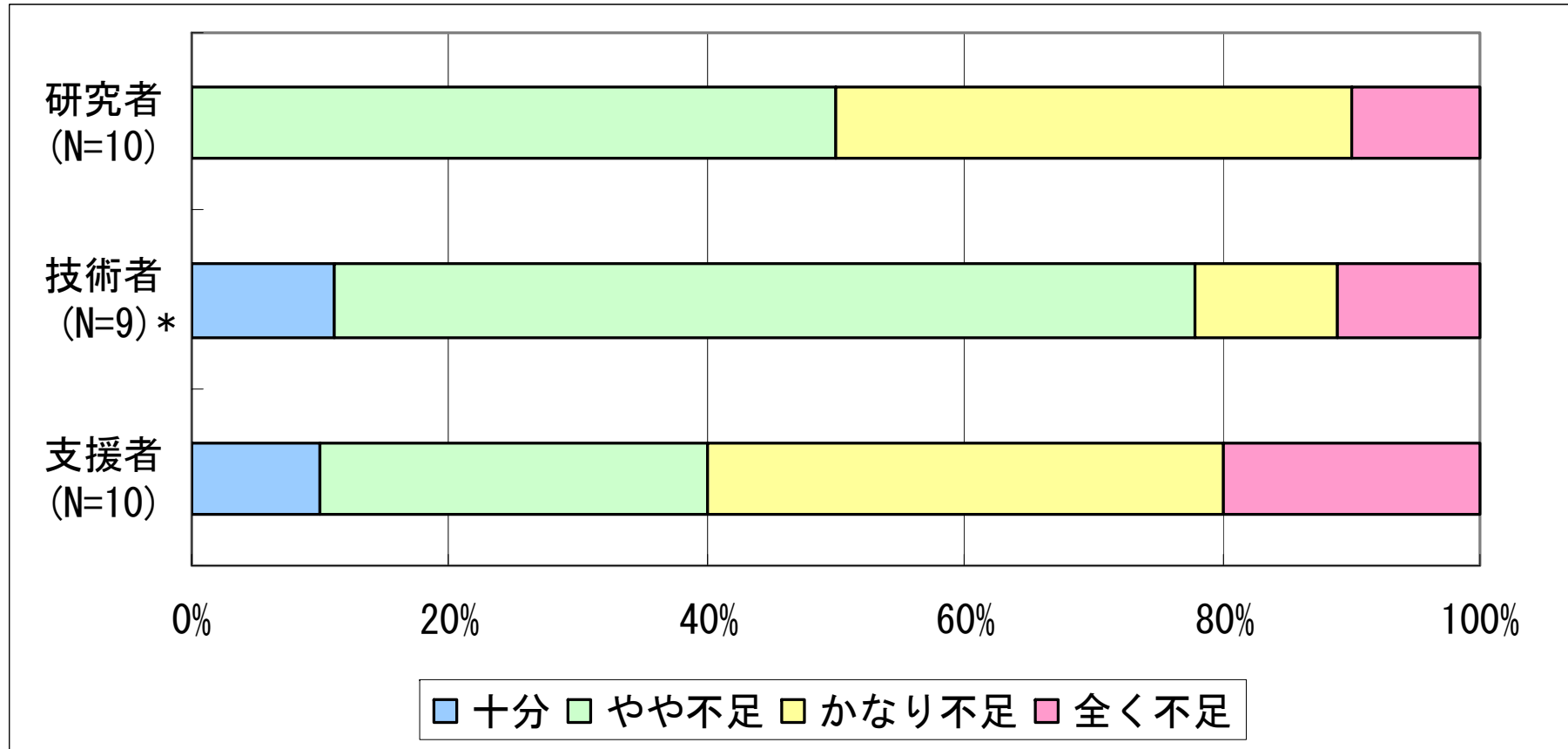
○負担あり、 ×負担なし

図表 3.3.1 加速器関連人材の専攻・学歴分布



アンケート協力機関：原子力機構、高エネ機構、放医研、理研、JASRI、大阪大学、東北大学
 (一部無回答の項目含む)

図表 3.3.2 加速器関連人材の充足度



*「研究者」と「技術者」の明確な区分のない回答については、研究者として集計

図表 3.3.3 特に不足感の強い人材の専攻分野

組織名	専攻分野
研究者	
機関 A	ビームの診断、制御、シミュレーションならびに超伝導磁石、高周波
機関 B	超伝導関係、真空、軌道解析、パルス電磁石
機関 C	サイクロトロン物理
機関 D	ビームの診断及び制御、真空、ビームライン工学系及び検出系・信号処理系開発、マーケティング (将来必要となる、超伝導空洞部門、電子銃、加速器理論は皆無)
機関 E	工学系
機関 F	電気系
機関 G	加速器物理、原子核物理、電気工学
機関 H	工学系、機器開発ならびに高度化に携わる人材
機関 I	計算物理
技術者	
機関 C	制御・計測
機関 D	電子工学、マイクロ波工学、超伝導工学、ビームライン設計・建設、制御システム、光学素子、検出系・信号処理系の設計、ネットワーク・ソフトウェア設計・支援に関する高度な専門知識を有する人材
機関 F	機械系
機関 G	理学、計算機制御、粒子計測、高周波電源
機関 H	工学系及び機器保守に携わる人材
機関 I	計算機科学及び真空工学
技術支援者	
機関 A	工学系
機関 B	ビームライン技術、利用促進
機関 C	生物系
機関 D	作業工程管理、制御ソフトウェア開発、システム開発、回路設計、ネットワーク管理、情報伝達システム製作、機械設計
機関 E	電子回路技術者
機関 F	理学系
機関 G	理学系、生物系、化学系、電子工学系
機関 H	運転業務に携わる大学学部卒・高専卒レベルの人材
機関 I	計算機科学

超伝導、真空工学分野等の不足が顕著

計測・制御系等の不足が顕著

生物系、計算機科学、電子回路分野等の不足が顕著

(調査票様式)

加速器関連施設長殿

加速器関連分野における人材の現状について

文部科学省研究振興局
量子放射線研究推進室

現在、文部科学省研究振興局におきましては、量子ビーム研究開発・利用推進検討会を設置して、量子ビームに関する研究開発及び利用促進の方策を検討しております。この中で、加速器関係の専門研究者・技術者等の育成のあり方について議論するに当たり、検討会委員からの要請を踏まえ、主要加速器施設におけるこれら人材の現状を把握致したく考えております。(本件につきましては、来る12/26に開催予定の上記検討会会合に基礎データとして提示の上、討議結果を最終報告取りまとめに反映する予定です。)

つきましては、大変お手数をおかけいたしますが、下記の事項につきましてご回答頂きたく、ご協力の程よろしく申し上げます。

1. 加速器研究者について (貴施設における現在員の概数: _____ 人)
(加速器研究者: 加速器の開発に携わる高度な専門性を有する研究者)

1) 貴施設における当該人材の充足度について [※通常の業務実施に当たっての感触、印象に基づくもので結構です。]
十分 やや不足 かなり不足 全く不足

(注: 充足度の目安として、「十分」=必要と考えられる数の100%以上、「やや不足」=75%前後[例: オータイムの勤務が週に1日程度など]、「かなり不足」=50%前後、「全く不足」=25%前後、ないしそれ以下 とお考え下さい。)

2) 出身専攻について [※概数で結構です。]
理学系 割、工学系 割、その他 割(主な分野: _____)

3) 特に不足感の強い人材の専攻分野等 [1)の回答が「やや不足」以下の場合]
(_____)

2. 加速器技術者について (貴施設における現在員の概数: _____ 人)
(加速器技術者: 加速器の整備・運営に携わる技術者)

1) 貴施設における当該人材の充足度について [※通常の業務実施に当たっての感触、印象に基づくもので結構です。] (注: 充足度の目安は上記1. に同じ。)
十分 やや不足 かなり不足 全く不足

2) 出身専攻(学部)について [※概数で結構です。]

理学系 割、工学系 割、その他 割(主な分野:)

3) 特に不足感の強い人材の専攻分野等 [1)の回答が「やや不足」以下の場合]

()

3. 加速器技術支援者について (貴施設における現在員の概数: 人)

(加速器技術支援者: ユーザのシステム利用、実験実施に係る技術的支援を行う者)

1) 貴施設における当該人材の充足度について [※通常の業務実施に当たっての感
触、印象に基づくもので結構です。]

十分 やや不足 かなり不足 全く不足

(注: 充足度の目安として、「十分」=ユーザからの技術的支援要請への対応可能度
100%以上、「やや不足」=同75%前後 [例: 本来は支援者が対応すべき技術
的作業・サービスを25%程度ユーザ自らが代行 など]、「かなり不足」=同50%
前後、「全く不足」=同25%前後、ないしそれ以下 とお考え下さい。)

2) 出身専攻(学部)について [※概数で結構です。]

理学系 割、工学系 割、その他 割(主な分野:)

3) 支援者の学歴分布について [※概数で結構です。]

大学院修了レベル 割、大学学部卒レベル 割、高専卒レベル 割、
高卒レベル 割

4) 特に不足感の強い人材の専攻分野・学歴 [1)の回答が「やや不足」以下の場合]

()

※上記の1と2、2と3等の各人材において、明確に区分されていない場合は、いずれ
か一方の項目に記入して頂き、包含する他の項目名を記して下さい。

※上記人員には職員以外の外部からの役務従事者も含まれます。

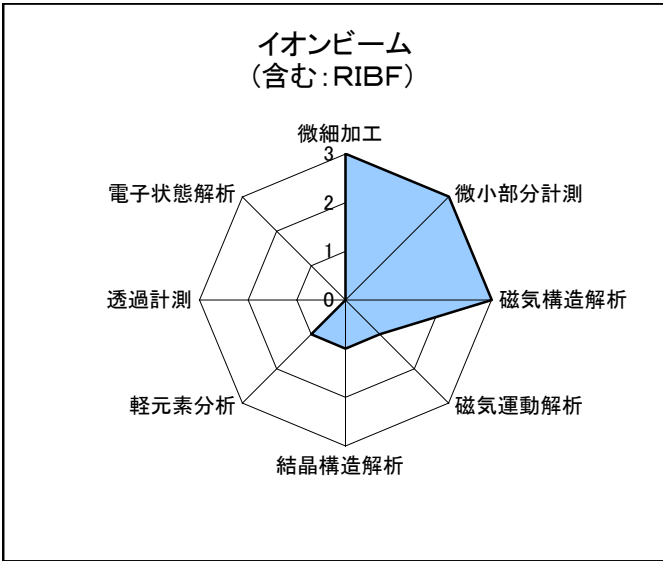
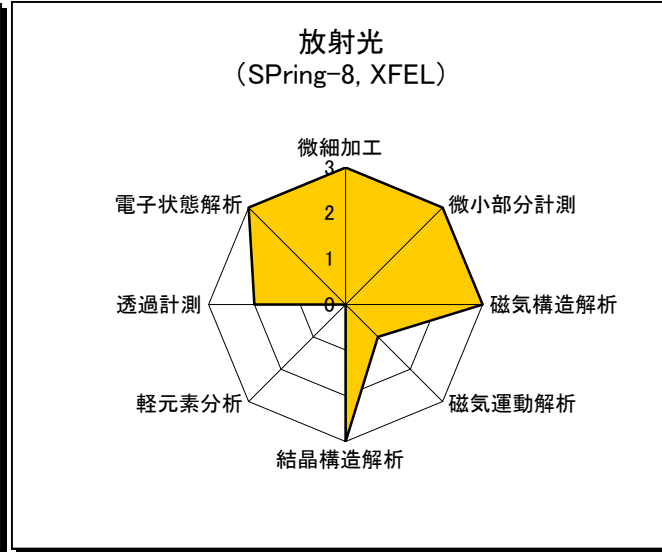
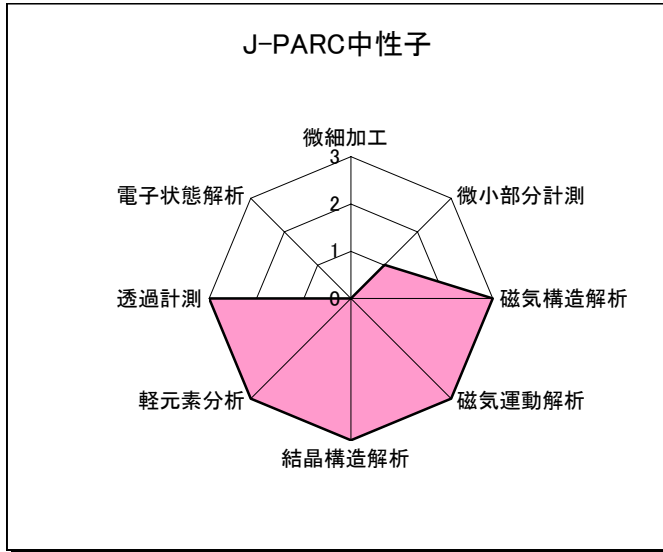
文部科学省所管の主な「量子ビームテクノロジー」関連施設

参考1

分類	加速器名称	機関	加速粒子	エネルギー	利用粒子(ビーム)	目的	完成年	建設費
電子加速器	Bファクトリー (KEKB)	高エネルギー加速器研究機構	電子 + 陽電子	8.0 GeV + 3.5 GeV	電子・陽電子	素粒子・原子核物理 ・CP対称性の破れの解明 ・標準理論を超える物理現象の探索	1998年	378億円
	PF (Photon Factory)	高エネルギー加速器研究機構	電子	2.5 GeV	放射光	物質構造科学 ・物質の構造と性質を解明 ・材料科学、生命科学、環境科学、 医学への応用	1982年	195億円
	PF-AR (Photon Factory Accumulation Ring)	高エネルギー加速器研究機構	電子	6.5 GeV			1989年	68億円
	SPring-8	理化学研究所	電子	8 GeV			1997年	1100億円
陽子加速器	KEK-PS (KEK-Proton Synchrotron)	高エネルギー加速器研究機構	陽子	12 GeV	陽子 ~ 重イオン	素粒子・原子核物理 ・ニュートリノ振動実験(K2K) ・K中間子の稀崩壊	1976年	136億円
	陽子シンクロトロン	筑波大学陽子線医学利用センター	陽子	250 MeV	放射光	医療 ・ガン治療	2001年	71億円
	大強度陽子加速器施設 (J-PARC)	日本原子力研究開発機構	陽子	3 GeV	中性子 ミュオン	物質構造科学 ・物質材料の構造や機能の解明 ・タンパク質やDNAの構造や機能の解明	建設中 (2008年)	860億円
50 GeV				K中間子 ニュートリノ 等	素粒子・原子核物理 ・質量の謎の解明 ・ニュートリノ振動実験(T2K)	667億円		
重イオン加速器	リングサイクロトロン (RRG)	理化学研究所	重イオン	軽元素: 135MeV/u	重イオン	原子・原子核物理 ・原子核研究を中心とした幅広い研究	1986年	161億円
	RIビームファクトリー (RIBF)	理化学研究所	重イオン	軽元素: 400MeV/u 重元素: 350MeV/u	重イオン (放射性同位元素)	原子核物理 ・RIビームによる核図表の拡大と元素合成の過程を解明等 ・材料・医療等の分野へのRI利用の拡大	建設中 (2006年)	397億円
	TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application)	日本原子力研究開発機構	陽子 ~ 重イオン	990 MeV	陽子 ~ 重イオン	物質構造科学 ・ナノテクノロジー・材料開発 ・バイオテクノロジー研究	1993年	118億円
	HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)	放射線医学総合研究所	重イオン	800 MeV/u	重イオン	医療 ・ガン治療	1993年	326億円
高出力レーザー装置	激光XII号	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	光子	20KJ	レーザー光	高エネルギー密度科学、レーザー核融合	1983年	200億円
	ペタワットレーザー (超高強度極短パルスレーザー)	日本原子力研究開発機構	光子	0.85 PW	レーザー光	物質構造科学 ・レーザー航跡場加速技術 ・材料科学、生命科学、医学への応用	2002年	34億円

各種ビーム源の相互補完性

参考2



注
 0 : 不可能
 1 : 限定的に可能
 2 : 条件付で可能
 3 : 可能

微細加工:
 材料にマイクロメートル以下の加工ができる(例: リソグラフィなど)

微小部分計測
 物質のマイクロメートル以下の分解能で元素分析等が可能であること(元素分析、不純物分析、構造解析等)

磁気構造解析
 物質の性質とりわけ磁気的な性質を理解・利用するために、電子や原子核がつくる磁気モーメントの配列や安定性を解析する。(永久磁石材料、薄膜磁気記録材料など)

磁気運動解析
 物質の性質とりわけ磁気的な性質を理解・利用するために、電子や原子核がつくる磁気モーメントの協調運動(エネルギー、波数、伝播方向)や安定性を解析する。(高温超伝導体の発生機構、磁気記録の安定性など)

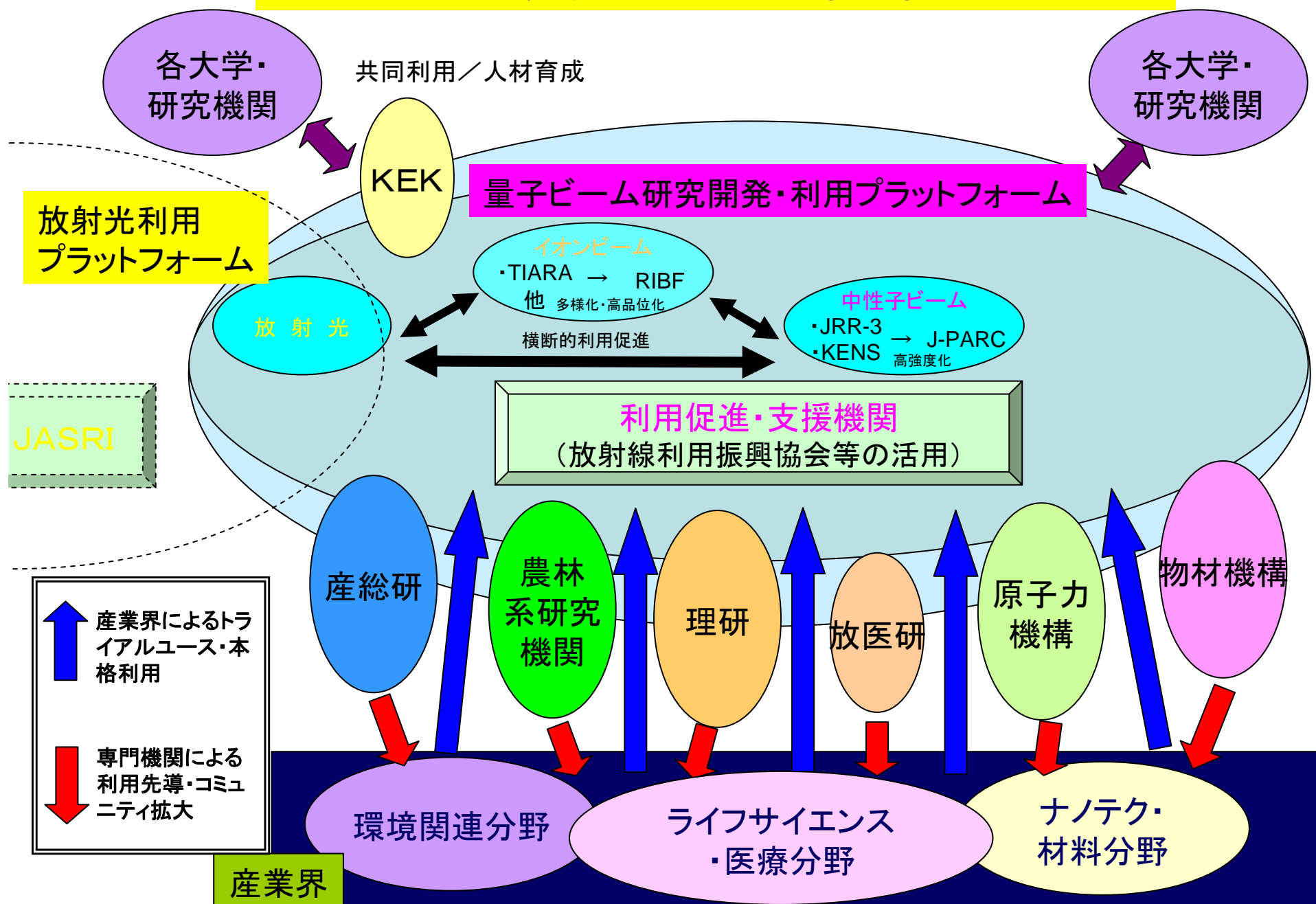
結晶構造解析
 物質の性質・機能を理解・利用するために、原子の並び方を解析する(物質同定の基本的データ)

透過計測
 物質や材料内部の状態が非破壊で観測できる(植物の根の水分吸収過程等)

軽元素分析
 物質や材料内部の水素、リチウムなど軽元素に対して構造解析、元素分析等が可能であること

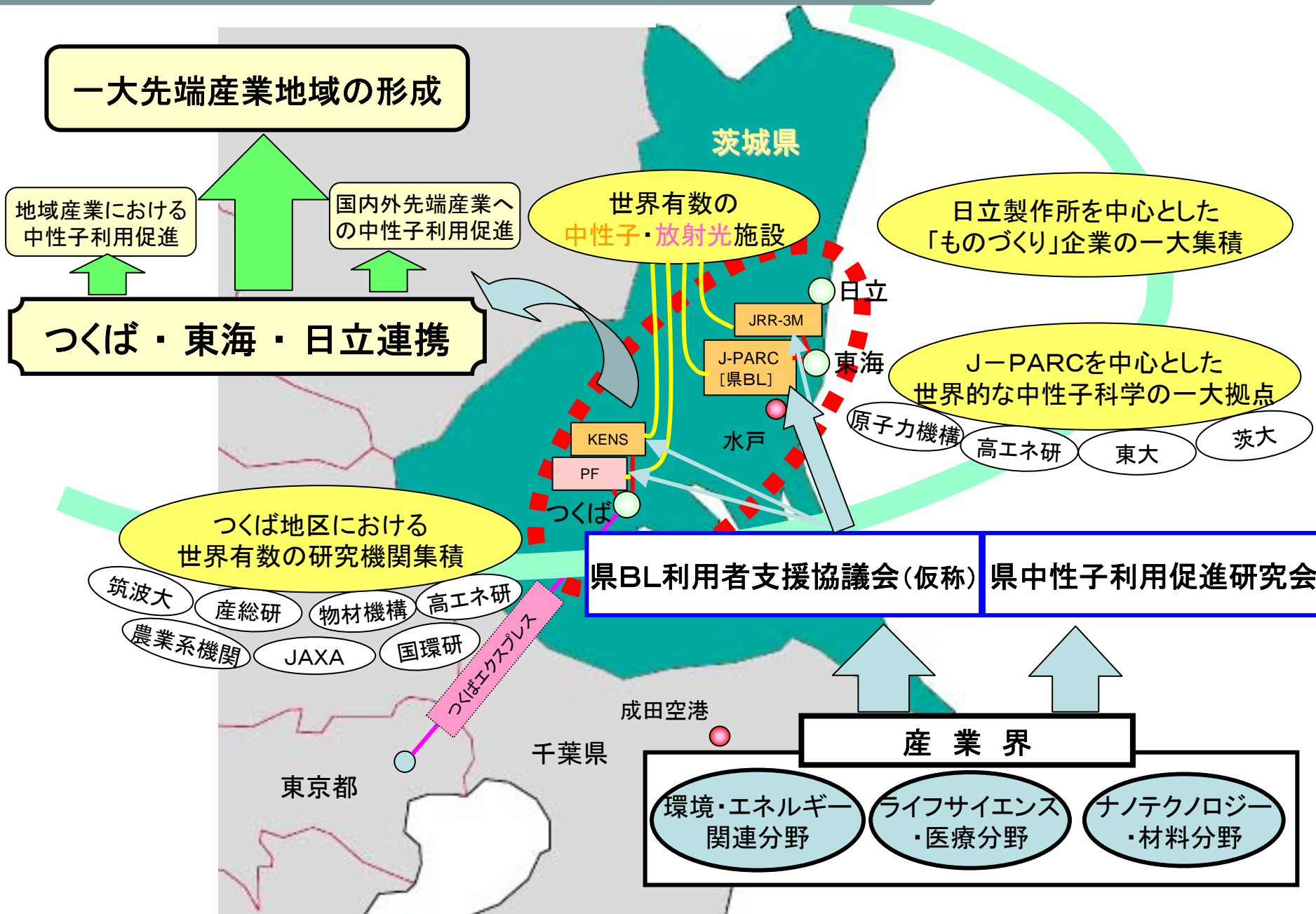
電子状態解析
 物質の導電性や磁気的性質、反応性などの性質を決める電子の状態を解析できる

量子ビーム研究開発・利用の推進体制について



茨城県における中性子利用の推進体制について

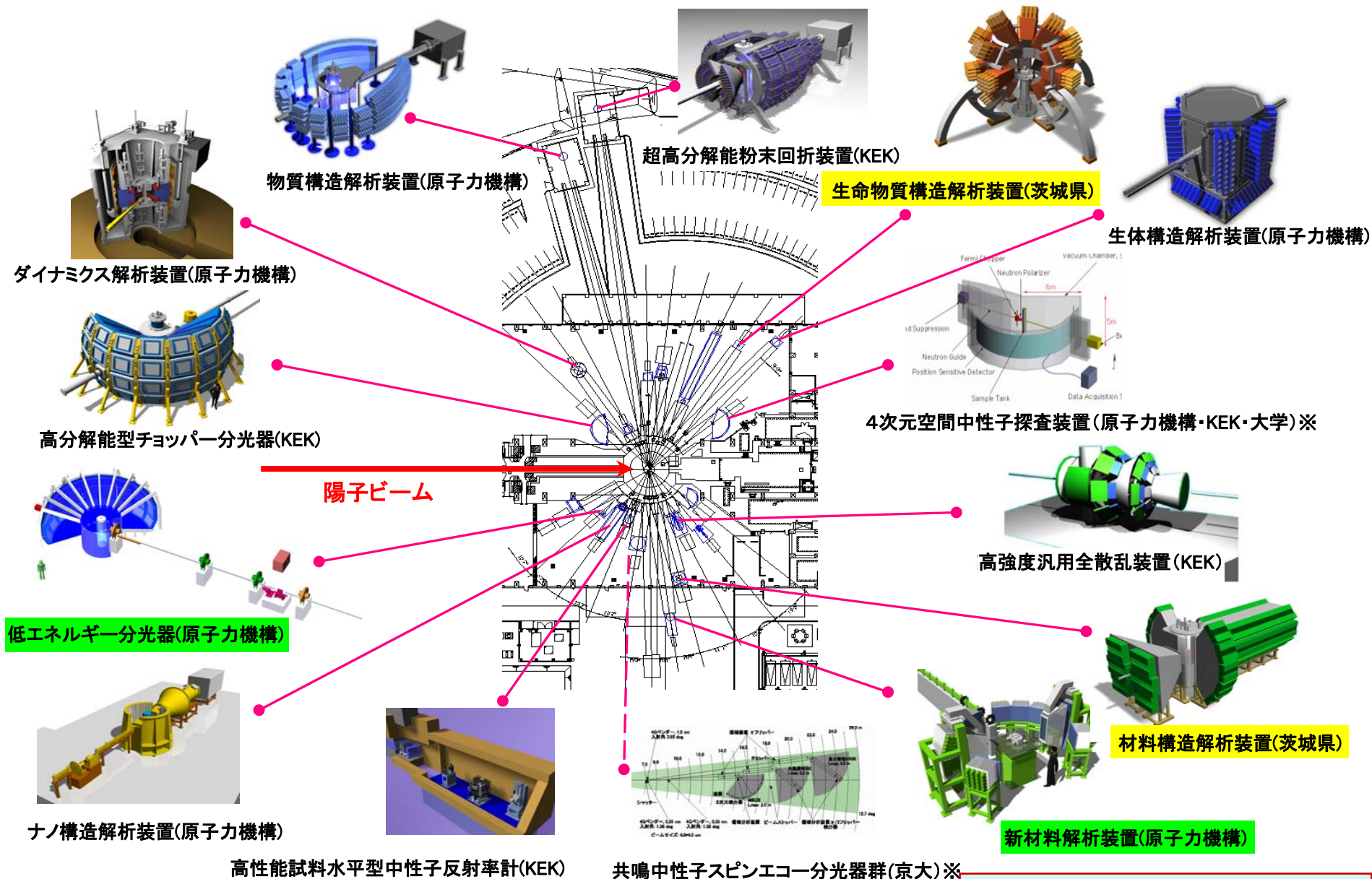
参考4



J-PARC/中性子源において設置計画中のビームライン機器

参考5

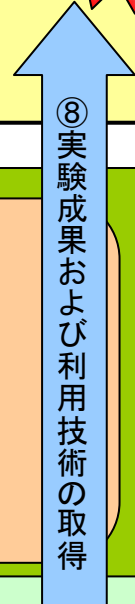
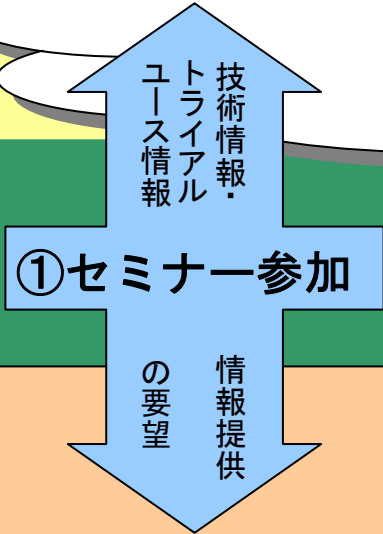
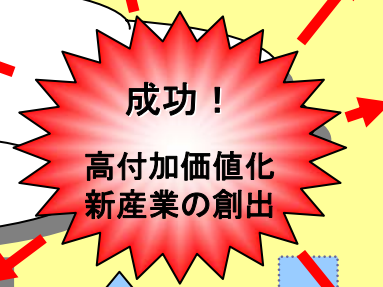
(平成18年度予算案新規設置機器予定、 茨城県設置予定)



※競争的資金等を活用

ユーザー数: 3,000-6,000人

研究機関・産業界



利用促進・支援機関
(放射線利用振興協会等の活用)

コーディネーター
要望の整理
計画打合せ

コーディネーター会議
提示計画の分析・
トライアル日程調整

⑤ 審査
審査委員会

量子ビーム施設(JRR-3)
試験設備の準備、
運転・実験・解析の
支援

- ①放射線利用の紹介
パンフレット・技術誌配布 等
- ②施設整備・利用への情報支援
データベース提供 等
- ③技術移転講座開設
放射線利用技術セミナー
研修生受け入れ制度 等

セミナー開催

トライアルユース

量子ビーム研究開発・利用推進検討会 委員等リスト

【主査】

福山 秀敏 東北大学金属材料研究所附属材料科学国際フロンティアセンター長

【委員】

河内 清光 (財) 原子力安全技術センター特任参事

阪部 周二 京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センター教授

桜井 健次 (独) 物質・材料研究機構材料研究所高輝度光解析グループディレクター

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) 顧問・技術監

鳥井 弘之 東京工業大学原子炉工学研究所教授

中井 泉 東京理科大学理学部応用化学科教授

中西 友子 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

中村 道治 (株) 日立製作所執行役副社長

西島 和三 蛋白質構造解析コンソーシアム幹事長・(株) 持田製薬研究開発企画推進部主事

西原 善明 住重試験検査(株) 取締役

庭野 征夫 (株) 東芝執行役専務・(社) 日本電機工業会原子力政策委員会最高顧問

橋本 治 東北大学大学院理学系研究科教授

福島 喜章 (株) 豊田中央研究所シニアフェロー

【 発表者等 】

- 池田 進 高エネルギー加速器研究機構教授・物質構造科学研究所中性子科学研究系研究主幹
- 今瀬 肇 茨城県企画部科学技術振興室長
- 大山 幸夫 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門陽子加速器施設開発ユニット長・大強度陽子加速器計画プロジェクトサブディレクター
- 長我部信行 (株) 日立製作所基礎研究所長 (委員代理)
- 小原 祥裕 日本原子力研究開発機構放射線高度利用施設部長
- 加藤 義章 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門長
- 郷 信広 京都大学名誉教授・日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子生命科学ユニット長
- 佐藤 卓 東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設助教授
- 竹市 信彦 産業技術総合研究所ユビキタスエネルギー研究部門燃料電池 機能解析研究グループ研究員
- 田島 俊樹 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門副部門長・関西光科学研究所長
- 棚瀬 正和 (財) 放射線利用振興協会理事・高崎事業所長
- 永宮 正治 高エネルギー加速器研究機構教授・大強度陽子加速器計画プロジェクトディレクター
- 原 雅弘 (財) 高輝度光科学研究センター広報室長
- 平井 康晴 (株) 日立製作所基礎研究所研究主幹 (委員代理)
- 藤井 保彦 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門副部門長
- 森井 幸生 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子産業利用技術研究ユニット長
- 矢野 安重 理化学研究所フロンティア研究システム重イオン加速器科学研究プログラムディレクター
- 若槻 壮市 高エネルギー加速器研究機構教授

(五十音順)

量子ビーム研究開発・利用推進検討会 審議検討経過

○ 第1回 平成17年6月7日(火)

- ・ 量子ビーム研究開発・利用推進に関する検討について
- ・ 量子ビームテクノロジーの現状・展望について
- ・ 今後検討すべき主要課題について

○ 第2回 平成17年6月21日(火)

- ・ 各分野からの量子ビーム技術への期待・課題について
- ・ 研究開発・利用推進に当たっての当面の課題について
- ・ 広範な科学技術分野との連携による利用促進及び利用者コミュニティ拡大の方策について

○ 第3回 平成17年7月4日(月)

- ・ 広範な科学技術分野との連携による利用促進及び利用者コミュニティ拡大の方策について
- ・ 量子ビーム研究開発・利用推進に係る中間とりまとめ案について

○ 第4回 平成17年10月4日(火)

- ・ 量子ビーム研究開発・利用推進に係る平成18年度概算要求の状況について
- ・ 主要ビーム施設の利用系設計のあり方について
- ・ 各種ビームの相補的利用の有効性及び横断的利用体制の整備に係る具体事例について

○ 第5回 平成17年11月17日(木)

- ・ 量子ビーム施設の利用システムのあり方について
- ・ 各種ビームの横断的利用を支えるプラットフォームの整備と人材育成について

○ 第6回 平成17年12月26日(月)

- ・ 量子ビーム研究開発・利用推進の方策に係る最終とりまとめ案について