

量子ビーム研究開発・利用の推進方策について
(中間とりまとめ)

～ 中性子・R I ビームによる物質・生命・環境分野の
課題解明・産業応用の新地平開拓に向けて ～

2005年7月

量子ビーム研究開発・利用推進検討会

目 次

はじめに（検討会の趣旨等）	1
第1章 科学技術政策における量子ビーム研究開発・利用の重要性	
第1節 我が国の量子ビーム研究開発・利用の現状・動向	2
第2節 各分野における量子ビームの利用状況・課題	6
第3節 科学技術政策上の量子ビーム研究開発・利用の重要性及び位置付け	11
第2章 量子ビーム研究開発・利用のうち重点を置くべき分野及び利用課題	
第1節 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	
(1) ライフサイエンス・医療分野	14
(2) 環境関連分野	15
(3) 材料・ナノテク分野	16
第2節 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	
(1) 産業界での新たな利用可能性の開拓	17
(2) ビーム利用の国際展開の可能性	20
第3章 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に向けた諸課題	
第1節 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	21
第2節 外部利用のあり方と支援・サービス体制の構築	22
第3節 コスト回収の考え方と運転経費の確保	25
第4節 小型先進加速器技術開発による利用高度化と地域展開	26
第5節 専門研究者・支援者の育成のあり方	26
第4章 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	
第1節 未着手ビームラインの機器整備・利用系構築	28
第2節 ビーム利用に係る各種促進プログラムの導入	31
おわりに（今後の検討会の進め方等）	34

- 図表 1 JRR-3（研究用原子炉）におけるビーム利用の推移
- 図表 2 SPring-8 の共用及び専用施設利用の推移
- 図表 3 理研加速器施設（RARF）の利用の推移
- 図表 4 量子ビームテクノロジーの進展
- 図表 5 各量子ビームの物理的特性関係
- 図表 6 各種ビーム源の相互補完性
- 図表 7 量子ビーム研究開発・利用の推進体制について

- 参考 1 我が国の主な量子ビーム関連施設
- 参考 2 世界の主な「原子炉」中性子ビーム施設
- 参考 3 世界の主な「加速器」中性子ビーム施設
- 参考 4 世界の主な放射光施設
- 参考 5 世界の主な RI ビーム施設

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、光量子、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渡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等、既存の幅広い量子ビーム施設に加え、世界最大強度の中性子ビーム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、昨今の政府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。本検討会では、レーザー等の他の量子ビームについても重要な検討課題が存在することを念頭に置き、幅広い量子ビームを視野に入れつつ特に近未来に供用が開始されるJ-PARC及びRIBFを主たる対象として、その研究開発・利用系のあり方について、産業界の専門家・有識者を交えた集中的な検討を行ってきた。

本報告書は、これまでの数次にわたる本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について中間的に取りまとめたものである。

第1章 科学技術政策における量子ビーム研究開発・利用の重要性

第1節 我が国の量子ビーム研究開発・利用の現状・動向

<量子ビーム研究開発・利用の概観>

加速器や研究用原子炉等の大型研究施設は、その時々最先端科学技術を駆使して初めて建設・整備が可能となるものである。一方、これらの施設の建設後の有効な利用は科学技術の最先端を切り拓き、国の科学技術の進歩、産業の発展等に大きく貢献する。

これら大型研究施設の建設・運用には多くの資金と人材を必要とするため、我が国では特定の研究機関にそれらを集中する形で実施されてきた。一つは施設とともに研究者も集中し、そこで研究を行うとの考えで設けられた現在の日本原子力研究所（原研）及び理化学研究所（理研）等、もう一つは関連する研究者コミュニティの共用施設として整備し、全国の大学等研究者が共同利用・共同研究する場として設けられた大学共同利用機関であり、高エネルギー加速器研究機構（高エネ機構）等がその代表的機関である。前者においては計画的なプロジェクト実施、民間への技術移転、当該施設の外部利用等を図る一方、後者においては大学共同利用による自由闊達な学術研究を推進している。

元々これらの大型研究施設（Large Facility）は、素粒子実験のような、多数の研究者による単一あるいは限られた研究目的（Large Science）のために建設されたものであり、“Large Science at Large Facility”と呼び得るものである。一方、Large Science のために建設された大型研究施設からの各種量子ビームが、物質の構造・機能の解析等ものを「観る」ための極めてユニークな手段（「探索子」：プローブ）として活用できることや、材料の加工等ものを「創る」ための強力な手段（「作用子」）として利用できることが分かり、初期の副次的利用から発展し、量子ビーム利用のための専用の大型実験施設が建設されるに至った。

これらの研究分野は、広範な物質科学、生命科学の基礎研究から応用研究に拡大し、さらには産業利用や医療応用へと発展しているが、各々の研究は比較的少数（場合によっては一人）の研究者で実施できることから Small Science と呼ばれている。すなわち、大型研究施設を利用するこれらの研究は、“Small Science at Large Facility”としての特徴があり、ハードとしての実験設備のみならず、ソフトとしての運用や利用体制にも独特の工夫を要するものである。かつては研究用原子炉で発生する安定した（熱）中性子を用いた物質科学の研究手段としての中性子回折・散乱実験が唯一の Small Science at Large Facility であったが、我が国においては、1970年代に放射光が、続いて1980年代にはミュオンが新たなビーム源として加わった。

<量子ビーム施設の発展経緯と研究開発の動向>

量子ビーム研究開発・利用の発展は、量子ビーム施設の発展・整備と表裏一体のものである。我が国においては、1937年に理研の仁科芳雄が国内初(世界で2番目)のサイクロトロン加速器(サイクロトロン)を建造したことにはじまり、イオンビームによる原子核物理、核化学、放射線生物学の開拓的研究が開始され、大阪大学でもサイクロトロンを用いた実験が行われる等、1930年代においては最先端の研究が行われていた。さらに、1943年には理研で当時世界最大級のサイクロトロンが完成した。

その後、第二次世界大戦により加速器の建設はしばらく途絶えたが、1950年代になって再開され復興期に入った。1952年には大阪大学、京都大学、科研(現理研)において、戦前と同規模のサイクロトロンの建設が開始され、さらに1950年代後半には東京大学原子核研究所(東大核研)のサイクロトロンが完成した。次いで東大核研に電子シンクロトロン加速器(シンクロトロン)が完成し、理研にサイクロトロンが建設されたが、世界最先端の加速器には及ばなかった。

このように遅れていた我が国の加速器のレベルが欧米に比肩するようになったのは1970年代に入ってからであり、世界トップレベルの加速器が次々に整備されていった。1980年代半ばまでの15年間に、我が国では高エネ研(現高エネ機構)の陽子加速器、大阪大学核物理研究センター及び東大核研のサイクロトロン、東北大学の電子リニアック加速器(リニアック)や放射線医学総合研究所(放医研)の中性子治療用サイクロトロンが建設され、さらに多目的加速器として、原研東海研究所のタンデム・バンデグラフ(TRIAC)や東北大学サイクロトロンRIセンターのサイクロトロン等が建設された。なお、当時世界最先端の施設として計画された高エネ研(現高エネ機構)のトリスタン、理研のリングサイクロトロンは1986年に完成した。

1990年代になると、さらに大型の加速器計画が進められ、原研高崎研究所の加速器施設(TIARA)、理研・原研による大型放射光施設 SPring-8、放医研の重粒子線がん治療施設(HIMAC)、高エネ機構のBファクトリー(KEKB)が完成し、いずれも国際的に特筆すべき成果を挙げている。現在、世界最先端施設である理研のRIBFが2006年度、原研・高エネ機構のJ-PARCが2008年度のビーム供用開始に向け、着実に整備が進められている。

一方、原子炉を供給源とする中性子ビームについては、我が国においては、1960年代初頭に中性子回折実験のできる原子炉 JRR-2(原研、東海村)が建設したが、欧米先進国に遅れること15~20年の差があった。しかし、我が国は中性子回折実験が最も得意とする磁性研究において国際的に高いレベルを保持していたことから、ビーム開発の遅れは次第に狭まり、1990年に改造した原子炉 JRR-3(原研、20MW)によって世界最高水準の中性子源を持つに至った。

また、1960年代半ばには、加速器によって発生する中性子を用いた回折・散乱実験の可能性が示され、東北大学理学部付属原子核理学研究施設での実証実験は世界の先鞭を付けた。その後、1980年に高エネ研（現高エネ機構）の陽子シンクロトロン（KEK-PS）のブースターを用いた世界初の専用加速器パルス中性子源（KENS）が建設され、各種のユニークな装置開発を通じ多くの成果を挙げるとともに、その後海外で建設されたパルス中性子施設に本施設の実験が多く取り入れられた。中でも、英国・ラザフォードアップルトン研究所（RAL）のISISパルス中性子施設（現在世界最高陽子ビーム出力160kW）に日英協力で建設されたMARI分光器は国際的に高い評価を得ており、特に高温超伝導体等の物性物理の分野で傑出した成果を輩出している。

さらに、2001年から原研・高エネ機構が共同で建設中のJ-PARCは、1MW大強度陽子加速器を共通基盤とする5つの施設から構成されるユニークなプロジェクトであり、第1期計画分は2008年に運転開始予定である。中でも、1MW陽子ビーム出力、25Hz運転により核破砕反応で発生する世界最高のパルス強度を有する中性子施設JSNSは、物質科学や生命科学の基礎から応用研究の最先端を切り拓き、さらに産業利用への貢献が期待されている。2008年以降には、原研東海研キャンパスに、稼働中の原子炉JRR-3と建設中の世界第一線のパルス中性子施設JSNSが800mの距離で隣接することになり、国際的に極めてユニークな研究環境が実現する。（類似の研究環境を有するのは、稼働中の原子炉HFIRと建設中のパルス中性子施設SNSが同一研究所内に立地する米国オークリッジ国立研究所（ORNL：テネシー州）のみであるが、両施設は数km離れている。）

なお、低出力（4kW）ながら先駆的施設と位置づけられるKENSは、今年度でその活動を停止し、J-PARCの中性子施設JSNSに移行する方針としている。

また、放射光は、元来、素粒子実験用の加速器であるシンクロトロンにとって、エネルギー損失に過ぎないと見なされており、加速エネルギーを高くすればするほど放射により損失するエネルギーも大きくなることから、加速器の高エネルギー化にとっての障壁となっていた。しかし、物性研究において試料の超精密な電子状態解析等にその利用の有効性が見出され、これを積極的に利用しようとしたものが放射光利用のはじめである（第一世代放射光源）。我が国では、1965年に東大核研の原子核研究用電子シンクロトロン（INS-ES）で一連の実験がなされている。但し、これらの実験はいずれも、加速器から捨てられる光を一時的に使用するという副次的な利用であった。1970年代に入ってから、この放射光を専用に発生するための加速器施設が造られはじめた（第二世代放射光源）。我が国においては、世界に先駆けて1975年に東京大学物性研究所のSOR-RINGが整備され、これに続いて1980年代に入ると電子技術総合研究所（現産総研）のTERASが、高エネ研（現高エネ機構）に放射光研究施設（KEK-PF：

1982年)が、分子科学研究所に UVSOR (1984年)が整備され、それぞれの機関の目的に応じて利用研究が進められている。なかでも KEK-PF は我が国で初めて X 線を利用できる放射光施設として広く利用されている。さらに、1990年代に入ると、世界各地でより高い輝度の光を放射する挿入光源を多数設置可能な放射光源(第三世代放射光源)の開発が進められ、欧州 ESRF (European Synchrotron Radiation Facility : 1994年)、米国 APS (Advanced Photon Source : 1996年)に続き、1997年に理研・原研による大型放射光施設 SPring-8 が整備され、以来共用施設として広く利用研究が進められている。

レーザーは、1960年にルビー結晶を媒質とするものが初めて発振に成功して以来、同年中にはヘリウム・ネオンの希ガスを媒質とするレーザーが開発され、さらに、各種色素溶液を媒質とする色素レーザー、Nd:YAG 等を用いる固体レーザー、希ガスとハロゲンガスの組み合わせによるエキシマーレーザー、半導体素子を媒質とする半導体レーザー等、媒質の種類により様々なタイプのレーザーが開発されてきた。これらは、光ファイバーを始めとする光学素子の進展と相まって、それぞれの特質に対応して、既に光ディスク等の情報通信分野、レーザーメスや眼底治療等の医療分野、レーザー加工や微細形状計測等の製造技術分野等々、学術のみならず産業における幅広い分野で日常的に応用されるに至っている。

我が国の主な高出力レーザー拠点として、大阪大学ではレーザーにより極限的な物質の状態を作り出し、レーザー核融合や宇宙物理実験等の学術研究を、また原研では小型超高ピーク出力のテラワットレーザー等の開発を行い、これらを用いた小型がん治療装置の開発やレーザーによる物質加工や物質分離等が進められている。現在、より広範な分野での更なる利用拡大に向け、レーザーの波長領域の拡大(X線レーザー、テラヘルツ・レーザー等)、高出力化(レーザー核融合等)、短パルス化(フェムト秒～アト秒パルスレーザー等)等、光源の研究開発が進められるとともに、それらと並行して共焦点顕微鏡技術等ライフサイエンスを始めとする先端科学研究分野への応用、光と電子工学を融合したオプトエレクトロニクス等先端産業技術分野への展開等、様々な利用・応用技術の研究開発が進められているところである。

ミュオンビームを用いた研究は、1970年代半ばにパイ中間子及びミュオンを大量に発生するために建設された陽子サイクロトロン(スイス・ポールシェラー研究所 PSI、カナダ・トライアンフ研究所 TRIUMF)による連続ミュオンビーム源が開発され、強いスピン偏極ミュオンビームが得られてから広まった。現在国内外で4箇所の加速器施設、PSI、TRIUMF、高エネ機構、英国 RAL においてミュオンビームを用いた実験が行われている。

国内では1980年に高エネ研（現高エネ機構）KEK-PS ブースターシンクロトロン施設内に東京大学附属施設（UT-MSL、現在は高エネ機構 KEK-MSL）として、世界に先駆けてパルス状ミュオンビーム源の開発等に成功した。当該施設は、今日に至るまで国内で唯一の施設として全国共同利用に供され、高温超伝導特性や半導体の電気活性解明等に成果を挙げてきている。また、我が国のパルス状ミュオンビーム源の開発は、パルス源に適した測定手法及び装置の開発と相まって、極めて有用な実験手段であることを世界に示すこととなり、1987年にはRALのISIS施設にパルス状ミュオン源が建設された。一方、1988年には東京大学が日加協力により TRIUMF に超伝導ミュオンチャンネルを、さらに1994年からは理研が RAL にビームチャンネルを設置する等日本は世界のミュオン科学分野での主要な役割を担い続けている。KEK-MSL は今年度で活動を停止し、J-PARC のミュオン施設に引き継がれる予定であり、KEK-MSL より2桁強い世界最大強度のミュオンビームが得られることにより、物質科学をはじめとした幅広い分野での基礎研究や産業利用への期待が持たれている。

これらの代表的な量子ビーム及び量子ビーム施設は、これまで我が国の基礎科学研究のみならず、産業応用を強力に牽引してきている。各量子ビーム施設の利用に対する需要は、近年のビームの多様化・高性能化に伴い、いずれも継続的に増加傾向にあり、利用対象となる研究分野もより多様な領域に拡大しつつあるが、主要なビーム施設の利用は既に施設供用能力の限度に達しつつある。このことを踏まえ、産業応用の需要・期待の高い領域については、既存施設の能力拡充、あるいは早急に新たな供用施設を確保することが望まれる。

（図表1：JRR-3（研究用原子炉）におけるビーム利用の推移）

（図表2：SPring-8の共同利用及び専用施設利用の推移）

（図表3：理研加速器施設（RARF）の利用の推移）

第2節 各分野における量子ビームの利用状況・課題

<中性子線>

○国内における経緯・現状

1990年に冷中性子源を有する原研の改造3号炉 JRR-3 が完成して以来、装置台数と利用できる中性子のエネルギー（波長）範囲が格段に広がり、同施設の利用者は急増した。特に、それまで海外の施設に頼っていた冷中性子によるソフトマターや生物学分野での利用が始まり、今や全申請課題（大学側）の1/4を占めるに至っている。折しも、1987年に発見された酸化物高温超伝導体のブームに乗って、良質な結晶を用いた中性子散乱実験が実施され、我が国は、その後の巨大磁気抵抗物質に至る強相関電子系物質の研究をリードしている。

一方、生物学分野においては、中性子イメージングプレートの開発により（原研・富士フイルム共同開発）画期的な中性子カメラが発明され、タンパク質の水素・水和構造の詳細な解析が可能となった。その後各国において類似の装置が建設され、「中性子構造生物学」なる分野を確立するに至り、極めて大きい波及効果をもたらしつつある。中性子光学素子の領域においては、急峻な磁場勾配を利用して中性子を集光・偏極する磁気レンズの技術開発が行われた（理研・原研）。その成果として、世界初の収束型小角散乱装置のプロトタイプが JRR-3 に設置され、これまで到達できなかった小角散乱領域の実験が可能となった。このように、我が国における中性子利用研究は、物質科学・生命科学の学術研究分野及び、装置技術開発研究においても世界の第一線にある。

○産業利用の動向と課題

こうした高い水準の科学技術に裏打ちされ、産業界が製品開発や材料評価等に中性子を利用する「中性子産業利用」は、比較的最近活発に議論され始めたところである。従来は一部の企業による残留応力測定、ラジオグラフィーによる製品評価等が行われてきたが、ほとんどは研究機関との共同研究として実施されてきた。最近、原研においては企業が有償で原研所有の中性子装置を利用できる制度を導入し、中性子の産業利用を推進し始めたが、本格的な制度・支援体制の整備は今後の課題である。

JRR-3 は稼動開始 15 年を経て利用申請課題数は飽和してきたものの、平均して約 2 倍の競争率（装置によっては 3 倍）があり、ビームタイムの不足が深刻化している。我が国の装置開発技術の粋を結集して建設中の J-PARC/JSNS は、2008 年に完成すればこのような状況を打破し、新たな研究分野を切り拓くとともに、産業利用にも大きく貢献するものと期待されている。

○海外の動向と課題

他方、2006 年完成を目指して建設中の米国オークリッジ国立研究所の最先端中性子源 SNS (Spallation Neutron Source)、並びに英国 RAL の ISIS 第 2 ターゲットステーションとの国際競争も極めて熾烈である。さらに、仏国・グルノーブル地区では、近接する放射光施設 ESRF と中性子源施設 HFR/ILL を相補的に使った先進的取組み「PSB」(構造生物学パートナーシップ) や大型ナノテク研究プロジェクト MINATEC 等が進められており、ナノテク・ライフサイエンス等先端分野での国際競争における我が国の技術開発の立ち遅れに加え、日本国内のユーザのこれら地域への流出が懸念される。従って、我が国がこうした分野において国際的なリーダーシップをとり続け、産業界の国内施設利用の流れを定着させるためには、J-PARC の計画通りの完成と、然るべき台数の中性子利用装置の開発・整備を図ることが極めて重要である。

現在 KEK-PS で行われている実験について、世界最高レベルのビーム強度を持つ J-PARC での運転に合わせて関連機器が利用可能となるよう、高エネ機構では 2005 年度で KEK-PS をシャットダウンし、そこで用いられた実験装置、電磁石等に J-PARC で使用するための必要な改造を加える予定としている。その上で、中性子、ミュオン、ハドロン、ニュートリノ実験施設のビームライン、実験機器等として設置し、実験研究の利用に供することとしている。

このような既存設備の再活用は、KEK-PS による実験研究の継続と短期間中断後の J-PARC での実験研究の費用対効果及び研究効果の面からも極めて有効であり、また、多大な経費を要する J-PARC 計画の着実な推進にとって不可欠である。

なお、その際、留意すべきことは、これら作業は J-PARC 本体の建設スケジュールと密接に連動しており、関係研究者の多くは運転開始時まで諸外国において活動の場所を求めることになる点である。当該観点からは、我が国からの研究者の海外流出が最小限となるよう検討すべきである。

<イオンビーム>

○国内における経緯・現状

初期のイオンビーム利用においては、原子核物理の利用が主であったが、医学利用もかなり早い時期から行われ、多大な成果を挙げてきた。戦後においては放射線防護や生物影響等の研究が行われ、原子核物理利用も原子核・素粒子物理学利用と高エネルギー化へと進んだ。材料分野では、微細加工、分析や材料改質等に利用がされており、特にこの分野では、物質・材料研究機構（物材機構）において、大電流重イオン・レーザー複合照射装置（EPF：タンデム加速器＋YAG レーザー）を用いた耐放射線性材料の開発や次世代光通信用のナノ粒子・フォトニクス材料の創製・制御、軽イオン AVF サイクロトロンを用いた核融合炉 ITER 用の原子炉材料の機械特性試験を行う等、各種イオンビームを広範な物質・材料研究に活用している。また、照射試験については、初期の段階では単一ビームによるものであったが、やがて損傷を与える照射とイオンビームを用いた解析を同時に行なう 2 重照射が行われるようになった。近年、TIARA に設置された 3 種類のイオンを同時に照射できるトリプルイオン照射施設は、世界的にもユニークな加速器施設である。さらに、最近ではライフサイエンス利用としてイオンビームによる植物の品種改良が行われる等様々な用途に広く利用が進展している。

また、近年では特に、天然には存在しない原子核（RI）を人工的に作り出す最も新しいビームである RI ビームの利用が進んできている。この RI ビームは、1980 年代半ばに我が国の研究者らによって開発されたものであり、原子核分野の新しい研究領域を切り拓いたものである。我が国においては、理研において

1990年よりRIビームによる原子核研究が本格化し、「新同位元素の発見」や「マジックナンバーの消滅の発見」等その研究成果は世界を圧倒的にリードしている状況にある。さらに、イオンビームによる関連の成果として、理研、東京大学や埼玉大学等によって「新113番元素の発見」もなされた。

利用状況の面では、例として理研の既存加速器施設（RARF）において、1986年からの累計で実施課題数が約200件、延べ利用者数が約12,000人に上り、また、原研高崎研のイオン照射研究施設（TIARA）においては、実施課題数が有償による共同利用で400件、共同研究等による外部利用で約4,900件（1992年4月～2005年3月）、延べ利用者数は共同利用が約1,500人、共同研究等の利用が約7,000人（1992年4月～2005年3月）となっている。

○産業利用の動向と課題

我が国のイオンビームの産業利用については、イオン注入の動きが1960年代後半から1970年にかけて始まった。1970～80年代になると、半導体への不純物導入を図るイオン注入技術が急速に普及した。現在では金属表面の改質等へも用途が広がっているほか、後方散乱法（RBS）や粒子誘起X線法（PIXE）等の分析技術が進歩しており、企業による分析サービスに用いられている。

なお、RIビームについては、偏極RIビームによる材料解析やRIビームを分離・精製して得られるマルチ／シングルトレーサーの利用等の産業応用が期待されるが、産業界にとり利用しやすいシステム設計・構築の検討が必要である。

○海外の動向と課題

RIビームについては、多分野にわたる基礎・応用両面での有用性が認められ、今や世界の主要な重イオン加速器施設では、競ってRIビーム施設の整備や利用実験が行われている。欧州ではドイツ国立重イオン研究所のFAIR（Facility for Antiproton and Ion Research）計画が、米国ではRIA（Rare Isotope Accelerator）計画が進められており、両計画では早ければ2012年に実験が開始される。

我が国では理研において、これまで培ってきた重イオン加速器建造技術と利用研究での成果を結集し、水素からウランまで全元素のRIビームを、種類と強度において現在の世界水準をはるかに凌ぐ性能で発生させることのできる最先端の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー」（RIBF）計画を推進している。この施設が完成すれば、基本テーマである究極の「原子核モデルの構築」に留まらず、「元素起源の解明」といった根源的な研究が可能となる上、RIビーム技術による診断・治療技術の開発や創薬・物質材料の開発等への貢献も期待される。しかしながら、RIBF計画においてこれまでに整備が進められてきたのは、RIビームを発生する施設が主であり、根源的な研究や各種実験のための設備整備は未着手状況という課題がある。

<放射光>

KEK-PF は、1982 年より稼働を開始し、大学共同利用機関の施設として広範な分野の多くの研究者を受け入れると同時に、NTT、日立、富士通、NEC 等民間企業の専用ビームラインの建設を含めて放射光の産業利用活動の育成にも大きく貢献した。また、放射光専用加速器に関する技術、ビームライン及び放射光利用技術の開発、それらを担う人材の育成にも大きく貢献し、技術的・人的蓄積はその後の SPring-8 建設等に大きく寄与している。

利用状況は、2004 年単年度の共同利用実施課題数は約 700 件、共同利用者実数（放射線作業登録者数）は 2,975 人、共同利用実験参加者実績は約 30,000 人・日と SPring-8 稼働後も利用者数・課題数は共にむしろ増加の傾向を示している。これらの共同利用研究課題の分野別の分布をみると、生物学関連：27%、化学：27%、材料科学：19%、固体物理学：9%、表面科学：5%、高圧物理学・地球科学：5%等となっており、広範かつ多彩な分野の研究者に利用されている。共同利用者による研究成果は 1997 年以降多少の増減はあるが、出版論文数は年間ほぼ 500 前後を示しており、高い活力を保っている。

また、SPring-8 は、欧州 ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)、米国 APS (Advanced Photon Source) と並ぶ世界最先端の第三世代大型放射光施設として 1997 年より供用が開始されている。SPring-8 では、25 本の共用ビームラインに加え、大学や研究機関等の専用ビームラインの他、産業専用ビームライン 2 本（産業用専用ビームライン建設利用共同体：電機、鉄鋼等 13 社）と創薬産業ビームライン（蛋白質構造解析コンソーシアム：21 社）の計 3 本の企業が専有するビームラインが設置されている。利用状況としては、実施課題数は共同利用が約 5,900 件、専用施設利用が約 1,400 件（1997 年 10 月～2004 年 12 月）、延べ利用者数は共同利用が約 37,000 人、専用施設利用が約 11,000 人（1997 年 10 月～2004 年 12 月）となっている。

こうした中、SPring-8 を利用した研究として物質科学分野や生命科学分野において数多くの際立った成果が創出されるとともに、考古学や地球科学等の分野においても優れた研究成果が得られている。さらに、半導体や外部記憶装置等のエレクトロニクス系、繊維・ゴム等の高分子系、鋼材やメッキ等の素材・金属系等様々な産業界において利用が進められており、近年開始した産学官連携利用推進（トライアルユース）による取組みも奏効し、全体の実施課題の 1 割程度の産業利用がなされている。さらに、2005 年度から文部科学省が国の大型研究施設の新規利用・新領域利用促進のため開始した「先端大型研究施設戦略活用プログラム」により、産業利用の割合が 2 割以上に増加する方向にある。

第3節 科学技術政策上の量子ビーム研究開発・利用の重要性及び位置付け

<基本認識>

我が国においては、これまで高エネ機構や理研、原研等を中心として、世界最高水準の先端・大型加速器の開発・整備に取り組んできた。これら先端加速器・ビーム技術の発展・高度化に呼応する形で、高エネルギー物理学以外の広範な研究分野にも加速器の利用・開放が広がり、更に狭義の「放射線」の範疇には留まらない種々の2次粒子・ビームの利活用により、ライフサイエンスやナノテクノロジー、環境分野等にわたる多彩な研究基盤が形成されてきた。今日では、全国の研究・教育・医療機関で計1,200台強の加速器が整備・運用され、高い精度・性能での物質の構造解析・微細加工、RI製造や生体照射等を通じた産業・医療利用の多角的展開が図られている。

(図表4：量子ビームテクノロジーの進展)

こうした量子ビーム利用の経済効果については、2003年12月の原子力白書において、関係する産業の総経済規模の合計として「放射線利用の年間経済規模は8兆6千億円」との評価が引用されているように広範な産業振興、国民の生活の質の向上に大きく寄与しているものと認識されている。

<新原子力研究開発長期計画案における位置づけ>

上述のような経緯・現状及び近年の状況変化も踏まえた上で、現在審議・策定作業の最終段階に入っている原子力委員会の「新計画」案においては、これまでの論点整理等に立脚し、量子ビーム研究開発・利用の重要性及び今後の推進方策について、以下の通り政策上の位置づけを行っている。

この中で、特に、産学官各セクター間・異分野間の連携促進及びインターフェース構築を通じた情報提供、経験交流、共同作業の重要性を指摘するとともに、産学官連携のための環境整備、研究者・開発者にとって利用しやすい柔軟性に富んだ共用・支援体制の整備が必要との認識が示されている。

またその際、施設・設備を利活用するユーザの利便性の向上や、様々な研究分野のユーザが新しい応用方法を拓きやすい環境の整備が必要とした上で、研究開発施設・設備の利用に当たり、受益者は、成果が広く国民に還元される場合を除き、原則として費用の応分を負担すべきとの考え方を提示している。

原子力委員会「新計画」案

(平成17年7月15日・新計画策定会議資料より抜粋)

○放射線利用

[基本的考え方]

放射線はこれまで、学術、工業、農業、医療その他の分野で適切な安全管理の下で利用されてきており、社会に大きな効用をもたらしている。しかしながら、放射線は取扱いを誤れば人の健康に悪影響を与えること、不適切な取扱事例が報告されることがあることから、利用現場においては、安全確保のあり方について絶えず見直し、今後とも厳格な安全管理体制の下で、効果的で効率的な利用に向けて努力がなされることを期待する。

放射線や放射性物質を利用する分野は着実に拡大してきているが、今後ともこれが進展していくためには、潜在的な利用者の技術情報や効用と安全性についての理解の不足を解消していくことが重要である。そこで、従来から存在する産学官の連携の取組を強化して情報提供、経験交流、共同開発を進める観点から、医学分野・工学分野・農学分野間の連携等を図ったり、事業者、国民、研究者間の相互交流のためのインターフェースや相互学習のためのネットワーク等を整備していくべきである。

国は、先端技術が効果的に利用されるように、放射線利用技術の高度化に向けて適切な支援策を講じるとともに、国と民間の科学技術活動に対する効果の大きい先端的な施設・設備の整備を行っていくべきである。

(中略)

[各分野における進め方]

(1) 科学技術・学術分野

放射線は基礎研究や様々な科学技術活動を支える優れた道具として重要であり、引き続き我が国の科学技術や学術水準の向上に資する活動において積極的に利用されるべきである。量子ビームテクノロジーは、今後、ナノテクノロジーやライフサイエンス等最先端かつ重要な科学技術・学術分野から、医療・農業・工業等の幅広い産業までを支えていくことが期待されている。そこで、国は、大強度陽子加速器といった世界最先端の量子ビーム施設・設備を我が国の基幹的な共通科学技術インフラとして整備していくことに継続して取り組むとともに、こうした施設・設備において、産官学が連携して活用できる環境の整備や研究者及び開発者にとって利用しやすい柔軟性に富んだ共用・支援体制の整備等に取り組むべきである。

○基礎的・基盤的な研究開発

(前略)

この段階の主要な活動には、原子力安全研究、核工学、炉工学、材料工学、原子力シミュレーション工学等原子力の共通基盤技術の研究や保障措置技術、量子ビームテクノロジー、再処理の経済性の飛躍的向上を目指す技術や放射性廃棄物処理・処分の負担軽減に貢献する分離変換技術の研究開発等がある。(中略) 量子ビームテクノロジーに関しては、革新技術の探索や新しい利用分野を開拓する研究、原子力以外の広範な分野での利用を開発する研究等を着実に推進することが必要である。(後略)

○大型研究開発施設

原子力の研究開発を進めるに当たって、加速器や原子炉等比較的大規模な研究施設の建設を必要とする場合がある。

(中略)

また、こうした施設が建設される場合、国は、これが多くのユーザに開放されるべきものとして、設置する研究開発組織に対して、関連する研究者コミュニティはもとより、事業者、施設・設備が整備される地方公共団体とも連携・協力して、それを利活用するユーザの利便性の向上や、様々な研究分野のユーザが新しい利用・応用方法を拓きやすい環境を整備することを求めていくべきである。ただし、こうした研究開発施設・設備の利用にあたっては、受益者が、その成果が広く国民に還元される場合を除き、原則として応分の費用を負担するべきである。

<科学技術基本計画上の位置づけ>

現在、総合科学技術会議において審議検討中の第3期科学技術基本計画に関し、本年3月の科学技術・学術審議会(基本計画特別委員会)による同計画の「重要政策」中間とりまとめにおいて、「量子ビーム」は重点領域の例示の中で、ナノテク・ライフサイエンスの「融合領域」の一つとして位置づけられている。

<今後の検討課題>

既に国内各地域への本格的普及・実用化の段階に入りつつある粒子線治療装置、並びに、延べ約3万人に及ぶ多数の利用者が多様な科学技術・産業領域での活用を進めてきたSPRING-8に代表されるように、「量子ビーム利用」は国民生活にその成果・インパクトが広く、かつ深く浸透しうる段階に至っている。

他方、昨今の政府の厳しい財政状況を踏まえれば、上述のような科学技術政策上の位置づけも念頭に置きながら、先端・大型量子ビーム供給施設におけるビーム利用の効果的・効率的な推進体制のあり方について、研究開発の戦略的重要性や産学官の連携と適切な役割分担の観点から、より具体的かつ掘り下げた検討を進めることが喫緊の課題となっている。

第2章 量子ビーム研究開発・利用のうち重点を置くべき分野及び利用課題

第1節 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

最先端の量子ビームは、基礎科学研究分野での利用に加え、産業界を中心とした先端応用技術の開発を支える重要なツールとして、広範な利用を進めるべきものである。

(1) ライフサイエンス・医療分野

<基本認識>

ライフサイエンス・医療分野における量子ビームの利用としては、様々なビーム種において広範な範囲での利用が進んでいる。具体的には、X線による診断や治療、ガンマ線や電子線による医療用品の殺菌等、さらには、粒子線によるがん治療が高度先進医療の承認を受け、国内各地域への本格的普及の段階に差しかかる等顕著な成果が上がりつつある。また、ガンマ線による農作物の品種改良や電子線による病害虫の駆除等にも利用されている他、近年では新たなビーム源としてイオンビームを用いた花色・花形の改良といった花卉の新品種の開発等が行われ、市販化もされている。

先端ライフサイエンス分野においては、X線によるタンパク質や核酸等の生体高分子の構造解析が行われ、SBDD (Structure-Based Drug Design) による薬物設計や生命現象の解明研究等が進められている現状にある。

<今後のビーム利用の方向性及び主要課題>

今後の本分野における量子ビーム利用の方向性及び主要課題として、特にタンパク質の構造・機能解析における中性子ビーム利用と、粒子線がん治療及び植物の品種改良技術の普及・高度化におけるイオンビーム利用が挙げられる。

合理的薬物設計に際しては、標的タンパク質に関する水素原子の位置、水和水の配向を含めた詳細かつ動的な情報の取得が望まれ、中性子線による解析はこれを可能とするものであることから、欧米においては中性子線による解析が進められつつある。一方、我が国においては、これまでX線源と異なり手軽に使える中性子源がなく、利用に際して本分野に素養のある専門家が少ない上に、放射光等他の分析手段に比して大きなタンパク質の結晶が必要になるとの理由から中性子によるタンパク質の解析は進んでいなかった。

今後は中性子ビーム源の大強度化により、必要とされる結晶サイズの微小化を図るとともに、中性子線解析の利用支援サービス提供により利用に当たっての「敷居」を低くし、X線結晶解析による骨格構造解析、中性子線結晶解析等による精密分子構造解析、中性子非弾性散乱解析等による動的構造解析という形で、相補的に複数のビームを利用することにより、合理的薬物設計を進めることが有効であろう。

また、粒子線がん治療では、高度先進医療の承認及び放医研HIMAC他での臨床データの積み重ね、小型機開発の進展により、国内各地域での普及が具体化の段階に入っている。今後は加速器の更なる小型化と低コスト化を図ることによって、各地域レベルでの本格的普及が期待される。また、同時に粒子線がん治療における医療技術面に従事する医学物理士の増員等人材育成・確保も不可欠である。

さらに、これまでのガンマ線等による植物の品種改良に加え、近年、新たなビーム源としてイオンビームによる品種改良が注目されている。我が国においては、1966年に放射線育種による初の国産品種レイメイ（水稻）を育成し、1999年までに我が国の突然変異育種による育成品種は約40種の植物で200程度あり、そのうち、ガンマ線照射由来のものは84%に上る。一方、1990年代初頭より我が国で新しい変異原として注目されたイオンビームは、元来原子核物理研究のためのものであったが、1989年より理研加速器施設（RARF）において、理研・原研・大学の共同で植物突然変異効果の基礎研究が開始された。その後、2001年より花卉園芸植物を中心に、イオンビームによる新品種の開発・商品化が進められている。

但し、現状での品種改良はランダムに照射・スクリーニングを行っている状況にあるため、より科学的な品種改良技術の開発が望まれる。これについては、例えば、我が国においてはイネ等のゲノムとcDNA研究での強みがあり、このゲノムシーケンスとcDNAの成果と併せたイオンビームによる品種改良のための基盤技術を確立することが期待される。

(2) 環境関連分野

<基本認識>

環境関連分野での量子ビームの利用としては、電子線による環境有害物質の除去技術、生分解性高機能素材の創製のほか、電子線・放射光による微量分析等が実用化されている。また、イオンビームによるシングルイオンヒットといった先端技術の応用による高環境耐性植物の育種、イオンビーム及び中性子線による環境微量分析技術の開発・利用等が進められている。

また、中性子等量子ビームの利用は、環境低負荷な材料開発及びデバイスの小型化、新エネルギー開発等への寄与を通じ、環境維持・保全型社会の実現に大きく貢献しうることに留意すべきである。

<今後のビーム利用の方向性及び主要課題>

本分野における今後の量子ビーム利用の主要課題として、燃料電池等の水素

利用エネルギーシステムの構築における中性子ビーム利用が挙げられる。

水素利用エネルギーシステム構築に際しては、安全な水素の貯蔵・輸送システム確立や燃料電池における高耐久性の高分子膜開発が必要とされ、そのためには水素吸蔵材料や高分子膜中における水素原子や分子、あるいは水分子の挙動等の動的解析が必要となる。これらは中性子線による水素原子の解析やラジオグラフィーによってのみ可能となる。

これに対し、既存の中性子線施設では強度が弱く測定に時間が必要なため、十分な時間分解能が得られなかった。また、中性子線の収束の制約による空間分解能の低さもあり、現状では十分な動的解析の情報が得られていない。

今後は中性子ビーム源の高強度化による時間分解能及び中性子線収束技術の向上を図り、中性子による水素原子の挙動解析と放射光による電子状態解析という相補的な利用を確立することが必要である。さらには、施設利用の簡便化を進めることが、本分野においてより多くの中性子利用研究者を育成・確保するためにも重要である。

また、RI ビームから分離・精製して得られるマルチ／シングルレーザーを活用した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）の促進も期待される。

(3) 材料・ナノテク分野

<基本認識>

材料・ナノテク分野は、その目覚ましい発展により、高機能化・高集積化が進められ、さらに、過酷な環境下でも使用可能な材料の開発が進められる等、我が国が世界をリードする技術分野の一つである。今後、さらに微細構造の特性を生かした新材料の開発や超小型化が進められることが予想される。これに伴い、極限環境下又は局所的に発生する原子・分子レベルでの現象の解明が新たな研究課題となってきた。こうした課題を解決する有力なツールが量子ビームであり、物質・材料の創製、造形、制御、計測の各領域にわたり、様々なブレイクスルーの実現により、我が国の国際競争力の一層の強化につながることを期待される。

<今後のビーム利用の方向性及び主要課題>

本分野ではこれまで様々な量子ビーム施設が供用され、「創る（加工する）」、「観る（分析する）」、「（直接）利用する」の3つの用途を駆使し、産業界での利用を含め、数々の研究開発成果を上げている（例：ロケットに使用される加工品の品質確認等）。2008年度には新たにJ-PARCの運用が始まり、高強度中性子ビームによる水素等の軽元素の観測や磁性の観測等が可能になるため、従来の量子ビーム施設では難しかった原子・分子レベルの現象の解明が期待される。

現時点で想定される具体的な中性子ビームの用途は以下の通りである。

- ・ ハードディスクの記憶密度向上（積層薄膜の磁気構造の解明）
- ・ 水素吸蔵材料の水素吸着メカニズムの解明
- ・ 燃料電池中の水の分布・形成排出の観測
- ・ 原子力発電所等の大型施設及び大型構造物の非破壊残留応力の解析
- ・ リチウムイオン電池のエネルギー密度向上（リチウムの動態及び静的分布の解明）
- ・ 中性子ラジオグラフィによる 2 相流の可視化（空間・時間分解能の向上）

例えば、ハードディスクの記憶密度の向上については、記憶密度の飛躍的向上に寄与する薄膜層の磁化の厚さ依存性に係る詳細情報が得られることにより、放射光を用いた磁気円二色性測定によって得られる特定の元素の磁化に関する情報や、偏極中性子反射率測定によって得られる磁化ベクトルプロファイル等の解析結果と合わせて、中性子ビームによる薄膜層の磁化の厚さ依存性等記憶密度の飛躍的向上に寄与する詳細な磁気構造の把握が可能である。

水素吸蔵材料の開発については、高強度中性子線により、これまで観測できなかった水素の挙動が直接観測されることから、水素の吸着メカニズムが解明され、効率的に水素を貯蔵できる物質・構造の開発が加速されると期待される。

このように、中性子ビーム利用は、ハイテク機器の小型化や、新エネルギーの実用化に必要な貯蔵技術開発、大型構造物の耐久性を確認するための検査技術等、国民生活の利便性や安全性の向上に役立つ技術開発の鍵を握っている。

一方、材料開発プロセスに中性子実験を組み込むに当たっての課題としては、データ取得に要する時間の短縮、数多くのサンプルを効率よく測定するための自動解析手法の確立、物質・材料の高精度構造解析用のソフトウェアの開発、高速ネットワーク接続や試料郵送サービス等による地理的な制約の解消が挙げられる。

また、イオンビームについても、偏極 RI ビームによる材料の電・磁場構造の解析や、原研 TIARA や物材機構の大電流重イオン加速器によるイオン注入による半導体の不純物添加や量子ドット材料の創製等、材料・ナノテク分野において産業応用を視野に入れた広範な利活用が期待される。

第 2 節 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

(1) 産業界での新たな利用可能性の開拓

量子ビームを用いた産業技術の開発については、医薬品開拓や植物改良等種々の領域に広がってきているが、前節に述べたものに加え、特に中性子及び RI ビームの利用が新たな領域へと拡大しつつある。

＜中性子＞

○国内の利用動向

中性子ビームの産業利用としては、熱中性子とシリコンとの核反応によりシリコン半導体へのドーピング元素であるリンが生成されることを利用したシリコンドーピングがこれまで最もよく知られ、かつ実際にルーチン的に利用されている。その生産量はガスドーピングの在来法に比べ数%と僅少であるが、高品位の特性を有することから厳しい規格が求められるデバイス産業にとって今や不可欠の技術となっている。本手法は、大容量の照射場に均一の中性子束が要求されるため、原子炉中性子源が今後とも活用されるものと考えられる。

現在世界の年間生産量 150 トンのうち 70%は日本の半導体企業が行っているが、国内の主要照射施設である原研 JRR-3、JRR-4 の能力は年間約 4 トンに留まっており、大部分を海外の原子炉施設（豪州、米、仏、韓国等）に依存している状況にある。また照射費用も海外に比べ国内施設は割高であり、今後のシリコンウエハーの大口径化に伴う益々の需要拡大を考えると、国内での受入れ態勢のさらなる充実が望まれる。

一方、中性子の探索子としての機能を利用した物質内部の原子レベルでの構造や原子・分子の運動状態の研究は、主として学術目的で行われてきたが、原研 JRR-3 の産業利用プログラムの進展により、材料・加工品内部の残留応力測定、磁性材料・電池材料開発、高分子材料開発等にも利用されるようになってきた。しかし、産業界が単独で中性子利用できる支援制度はごく最近まで存在せず、多くは産学の共同研究として実施されてきたのが実情である。

中性子の持つ高い物質透過性、水素・磁性検出能力を活かして、今後燃料電池、磁気記録材料開発等のナノテク分野、タンパク水素・水和構造解析による薬物設計、生体高分子の運動・機能解析等のバイオ分野、ラジオグラフィーによるタービン翼の検査、2相流の可視化、放射化による元素分析、さらには中性子測定法の標準・基準の確立等の工業利用に至る広範な産業領域での利用拡大が期待されている。

こうした産業利用の効果的推進を図るためには、企業側に中性子利用の経験を積んでもらうためのトライアルユース制度の導入、企業側のニーズの強い時期指定のビームタイム利用、守秘義務の担保、支援体制の充実等を図る必要がある。その際、これまでは企業側にとり馴染みが少なく、「敷居」の高い感のある中性子ビームの利用を促進するには、先行している SPring-8 の利用体制等を参考としつつ、施設側で入口から出口までの利用制度と支援体制の構築を目指す必要がある。

○海外の利用動向

欧米では、ナノサイエンス、ナノテクやライフサイエンスの基礎・応用研究、

さらには、産業利用に大型量子ビーム施設の中性子や放射光を積極的に利用する戦略的取り組みを始めている。米国では2003年にブッシュ大統領が署名した「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」に則り、エネルギー省傘下をはじめとする中性子ないし放射光施設を有する5つの国立研究所に、ナノサイエンス・ナノテク研究センターの建設を順次進めている。最初のオークリッジ国立研究所に設置するCenter for Nanoscale Materials Sciencesが今年度完成し、同研究所の有する原子炉中性子源HFIRと建設中のパルス中性子源SNSをフルに利用する研究課題の公募が進められている。

また、商務省傘下の標準技術研究所(NIST)においては、所有する原子炉NBSR内に燃料電池開発専用の中性子ラジオグラフィ装置を設置し、産学官一体となったプロジェクトを推進中である。

欧州では、世界最大の原子炉中性子源HFR/ILLと欧州放射光施設ESRFが隣接するグルノーブル地区(仏)において、欧州分子生物学研究所(EMBL)のライフサイエンス、ナノテク研究施設MINATECのナノテク、材料エンジニアリング研究施設FaME38の材料評価・材料開発を推進するため、欧州連合としてこれらの量子ビーム施設を活用するプログラムを実施している。

我が国においては、タンパク3000、ナノテク等の国家的プロジェクトにおいて、SPRING-8の活用が進められているが、こうした欧米主要ビーム源の動向も視野に入れ、国家戦略として広範な量子ビーム施設の横断的利用を促進するための産学官の連携体制、共通のプラットフォームの構築が望まれる。

<RI ビーム>

RIBFにおいては、RIビーム実験中にビーム生成分離装置BigRIPSのビームダンプで同時にマルチレーザーを製造することや、BigRIPSで大強度RIビームを生成してシングルレーザーを製造することができる。それらは、①周期表上の全ての元素について、利用目的に最適な寿命や壊変特性を有するRIが供給可能、②従来の加速器や原子炉で生産されるRIと比較して極めて多彩かつ高純度、③物理的手法によるRI分離により、化学的精製プロセスがほとんど不要(シングルレーザー)といった特長を有する。

RIBFから供給されるマルチレーザー、シングルレーザーの活用によって、環境物質の環境中循環の解明や、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)研究等環境分野への貢献が期待される。また、RIの放射性医薬品としての利用、応用も期待される場所である。一方、偏極RIビームを利用することにより偏極不安定核イオンを結晶中に不純物として埋め込むことができ、局所位置から見た磁気構造・結晶構造解析や原子拡散計測が可能となり、物性研究・材料開発にも寄与しうるものと期待される。

<産業利用の問題点>

ビーム利用技術の更なる普及のためには、産業界と大学との連携が不可欠であり、最新の技術成果の情報交換が行える場を設けることも必要であろう。さらに、産業界ではコストパフォーマンスを重視していることから、成果非公開の課題に係る有償利用についても、利用コストが国際競争力を持つような工夫、すなわち、海外主要施設の利用料金との対比において、国内施設の利用が比較優位となるような料金設定を行う必要がある。

(2) ビーム利用の国際展開の可能性

我が国の量子ビーム施設への海外からの大型の設備投資としては、これまで豪州が KEK-PF に 1 本、台湾が SPring-8 に 2 本の放射光ビームラインを設置して自国の研究者の利用に供している。また、建設中の J-PARC の中性子施設 JSNS には、台湾からビームライン 1 本の設置申請がなされている。

J-PARC は 2000 年 8 月に行われた原子力委員会、学術審議会合同による事前評価において、「我が国はもとより全世界の研究者が利用可能な国際的に開かれた研究プロジェクトであり、国際公共財と考えられる」としてその建設意義が認められた経緯もあり、海外からの実験装置設置及び一般利用についても、所要の受入れ態勢を整備する必要がある。即ち、今後のビーム供用開始に向け、課題申請を国際的に受け付け、最高のサイエンスを生み出し、求心力のある国際研究施設として機能するメカニズムを整備していくことが重要である。その際、J-PARC は 5 つの異なる施設（中性子、ミュオン、原子核、素粒子、核変換）から構成される点を踏まえ、国際的に異なる各々の研究者コミュニティの利用形態に留意した受入れ態勢を整えていく必要がある。

一方、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ついては、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ろう。事実、欧米においては、自国の産業保護のため、産業利用専用ビームライン（装置）への海外からのアクセスを制限しているところもある。

第 3 章 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 拡大に向けた諸課題

第 1 節 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

<各種ビーム源の特長>

量子ビームのうち、レーザーや放射光は電磁波であり、中性子等は物質波である。それぞれの波動が持つ波長とエネルギーの関係（分散関係）は異なるため、物質をどのような長さのレベルで、どのようなエネルギーレベルにある現象を観測するかを決めると、それに適した量子ビームが決まってくる。例えば、物質のナノ構造を観測するためには X 線（放射光）や中性子が適しており、その meV レベルの運動は中性子、keV レベルの運動は X 線（放射光）による計測が適していると大づかみにいうことができる。しかし、放射光では meV から keV レベルまで、中性子では neV から eV レベルまで測定可能となっているように、最近の量子ビーム技術の進展や近い将来実現する量子ビーム施設・技術によってその限界が異なることに留意する必要がある。（図表 5 参照）

また、ビームが本来持つ感受特性、強度、指向性等によって、計測、分析、加工等の得意分野が決まる。例えば、J-PARC/JSNS は結晶構造解析、磁気構造解析、格子振動解析、磁気運動解析、透過計測に強みを発揮するものと期待される一方、SPring-8（現在計画検討中の X 線自由電子レーザー（XFEL）を含む）は電子状態解析、結晶構造解析、磁気構造解析、格子振動解析、微小部分計測に強みを持つ。他方、RIBF の偏極不安定核イオンは結晶中に不純物として埋め込むことができ、局所位置から見た磁気構造・結晶構造解析、原子拡散計測に有利である。

<各種ビーム源の相互補完性>

中性子ビーム（J-PARC/JSNS）と放射光（SPring-8・XFEL）、イオンビーム（RIBF）の補完性については、第 2 章に示した具体事例も踏まえれば、図表 6 のレーダー型チャートのように整理することができる。実際、各種ビームの利用計画の立案に当たっては、これを踏まえ研究・産業応用のために最も相応しい量子ビームを選択し、必要に応じてこれらを組み合わせて利用することが極めて重要である。例えば、燃料電池の開発では、水素吸着材の開発に関し、未知の材料の構造解析には放射光が早くて正確であるが、吸着された水素の位置と占有率の解析には中性子がはるかに適している。また、個別の元素の移動追跡は、不安定核イオンの導入によって行うことができる。即ち、燃料電池膜の結晶構造解析は放射光で行い、反応時のプロトン移動の解析については中性子を使うこと等が有効である。

また、ナノフォトニクス材料の創製では、材料改質には重イオンビームによる原子導入及びフォトン（レーザーや放射光）による原子の位置の制御が有効

であり、創製したナノ構造の精密構造解析には、放射光や中性子を使うことが有効である。

さらに、ラジオグラフィ法によるセル全体の透過写真撮影では、空間分解能が要求される場合は放射光を使う必要があり、生成水の滞留の観測では中性子を使う必要がある。

このように、量子ビームは各々の特性・強みを活かし、相補的・総合的に利用していくことが重要である。ともすれば、施設側も利用者側も自分が関わっている単一のビーム源に捉われがちだが、視点を量子ビーム全体へと広げ、相互補完性を踏まえつつ、最善の利用戦略を常に探索し、実行していくことが求められている。

第2節 外部利用のあり方と支援・サービス体制の構築

<JRR-3の現状>

JRR-3には、施設運営者たる原研が設置した中性子ビーム実験装置15台と東大物性研を中心とした大学が設置した装置14台がある。このうち大学設置の装置については、大学共同利用に100%供する占有利用形態をとるため、東大が原研へ共同利用料金を一括して支払っている。また、装置の整備・維持・運営に係るコストは大学側で負担している。従って、各大学の利用者は消耗品費以外は無償で先端的な中性子実験装置を利用することができる。

一方、原研の装置は2004年度実績で独自研究67%、大学—原研間の協力研究25%、企業—原研間の共同研究2%、有料の共同利用6%（うち大学3%、企業3%）であった。装置の整備・維持・運営に係るコストは原研で負担している。

共同利用の料金は施設の運転経費を基準として算出されており、原子炉室内の装置で1日約12万円、中性子ガイドホール装置で1日約6万円に設定されている。但し、本料金には支援スタッフの人件費は含まれておらず、現状では施設側がボランティアベースで対応している。こうしたシステムでは、経験の浅い産業界のユーザが利用を希望するケースが増えてきた際に、施設側として十分な対応ができないことになり、今後トライアルユース等の利用促進プログラム導入に当たり、支援人材の確保も重要課題として検討していく必要がある。

<SPRING-8の現状>

SPRING-8においては、共用ビームラインとして25本、原研／理研ビームライン11本（調整・建設中を含む）、原研／理研以外の専用ビームライン10本（調整・建設中を含む）、加速器診断ビームライン2本の計48本が設置されており、うち共用ビームライン25本のほか、専用ビームラインのビームタイムの一部が共用に供されている。

共用ビームライン（専用ビームラインの共用を含む）の利用形態としては、成果非専有（内容審査、成果公開、利用料免除）と成果専有（安全審査のみ、成果非公開、利用料徴収）がある。さらに、成果専有については、通常利用（年2回募集、472千円/8時間）と時期指定利用（随時受付、708千円/8時間）がある。

また、専用ビームラインにおいては、成果非専有（利用料免除）と成果専有（264千円/8時間）からなる（いずれの場合も維持費は設置者が自ら負担）。

また、外部利用者に対する実験支援者も十分な体制を取っている。

さらに、産業界を中心とした新規の利用ユーザ開拓等を目指したトライアルユース制度を2001年度補正予算から開始し、2004年度で計40課題を実施している。トライアルユースによる支援策として、

- ・コーディネータグループを中心とした申請段階からの相談・指導
- ・産業利用に特化した利用設備の提供
- ・啓蒙的利用に沿った利用実験への技術的な指導
- ・実験結果のまとめと利用報告書作成等の指導

を実施している。

<J-PARC/JSNSにおける外部利用のあり方>

SPring-8の先行事例からも明らかのように、研究会開催やトライアルユース等のステップアップ方式による利用促進方策、実験支援者の配置、適正なビーム利用料金の設定等、適切な利用支援体制を整えることにより、産業界をはじめとする新たな一般利用が大きく増えることが期待される。そこで、J-PARCでは、施設運営者である原研・高エネ機構の本来のミッションである量子ビーム利用研究と大学共同利用を基本に据えつつ、以下のような外部利用促進システムについて、さらに検討を深めるべきである。

- ・施設運営者が設置する中性子利用実験装置については、ビームタイムの一部（30～50%）を設置者が運用を決定する枠として利用し、残りを共同運営主体であるJ-PARCセンターが一元的な一般利用（注）に供するとのシステムが検討されている。
- ・施設運営者以外の第三者が設置する中性子利用実験装置については、
 - － 設置期間： α 年間（ α は5～7年間程度、審査により更新可）
 - － 専用利用： β %（ β は現時点では50～70%程度と予測されるが、設置目的に応じて柔軟に検討）
 - － 一般利用： $(100-\beta)$ %

との枠組みの下、装置の維持管理は設置者の責任において行うものとし、J-PARCセンターが提供する $(100-\beta)$ %の一般利用枠の利用者支援については、設置者が中心的に実施する方向で検討が行われている。

(注) 一般利用：現在、原研が行っている共同・協力研究、産業共同利用や高エネ機構が行っている大学共同利用、J-PARC で期待される産業利用といった広く一般の研究者、研究機関が利用できる仕組みを想定。

<理研の現有加速器施設 (RARF) の現状>

外部利用者が理研加速器で研究を行うには、原子核・非原子核分野にてそれぞれ年2回開催される実験課題採択委員会において、提出された研究課題が採択されることが必要である。研究課題が採択され、理研加速器で実験を行う場合、現状では利用者は理研の客員研究員として研究を行うこととされている。

外部の利用者に対する支援体制については、利用者がスムーズに研究を行えるよう、理研の研究員が研究チームのメンバーとして必ず参加し、調整役としてサポートしている。また、各種講習会（放射線安全取扱講習会等）を開催するとともに、加速器に係るアドバイスやトラブル対応のため、加速器運転従事者が24時間体制でバックアップをしている。

<RIBFにおける外部利用のあり方>

現在建設中のRIBFの外部利用については、今後2年以内を目途に「重イオン加速器研究センター」を創設し、外部利用者を理研の客員研究員として受け入れる従来の方法に加え、センターの一部門として「連携研究部門」を設置して外部利用者が自らの所属機関の身分のまま、大型実験装置を持ち込み、自らの研究を実施できるような制度を検討している。

RIBFを外部利用に供するための詳細な運営体制については、2005年度に理研に設置した「RIBF 共用促進検討委員会」での提言を受け、具体的検討を行う必要がある。

<産業利用支援体制の考え方>

上記のような量子ビーム施設において、一般共同利用枠を活用した産業利用を促進するためには、予め一定の割合で産業利用枠を確保しておき、産業利用に特化した組織体を設けた上で、アドバイザー、コーディネータ、オペレーター等の支援者を配置し、利用者にとって迅速かつスムーズな利用システムを構築していく必要がある。さらに、海外の主要ビーム施設ないしSPRING-8で既に導入され、一定の効果を上げているような郵送試料方式による実験代行・分析業務の実施 (mail-in サービス)、研究会開催やトライアルユース等の利用促進プログラムの創設、適正なビーム利用料金の設定等、施設運営者は効果的な利用促進・支援方策を講じていくことが求められる。

また、ビームライン設置に至るリードタイムを考慮すれば、施設運営者ない

し第三者による産業界専有ビームラインの設置・関連企業群のコンソーシアムによる専用ビームラインの整備を計画的に推進すべく、産学官関係者による研究会等において、利用者側のニーズの吸い上げとこれを踏まえたビームラインの設計・運用形態の掘り下げた検討を早期に進めていく必要がある。その際、特に、中性子ビームについては、これまで企業側の実利用の経験が不足していることに鑑み、主な利用分野・領域毎に、最低 1 例の顕著な成功事例を早い段階に創出できるような方向で、具体的な課題設定及び推進体制の構築を行っていくことが望ましい。

なお、文部科学省では、国の大型研究施設の新規利用・新領域利用促進のため、2005 年度より「先端大型研究施設戦略活用プログラム」を開始している。本プログラムでは、SPRING-8 と地球シミュレータに関し、産業界を含めた新規利用者拡大と重点領域における集中的な取組みを実現するため、充実した支援体制との組合せで利用資源を提供している。2005 年度、SPRING-8 の場合、課題の応募から利用にわたる期間を通じ、利用者からの相談に応じるコーディネータ及びビームライン支援者を欧米の施設並みに大幅に拡充させている。

今後、J-PARC をはじめとする大型量子ビーム施設の新規利用・産業利用の拡大に向け、有効なビーム利用促進方策を検討する上で本プログラムを参考とすることが望ましい。

第 3 節 コスト回収の考え方と運転経費の確保

J-PARC、RIBF 等の大型研究施設に係る利用料については、その国際公共財としての役割に鑑み、成果公開の場合は無償、成果非公開の場合は有償とすることが考えられている。無償の場合、当該施設の運転経費は基本的に当該施設を所有する機関が措置することが求められる。一方、有償の場合、利用に当たったの支援経費、設備の減価償却費、維持管理費等の負担については、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、当該施設を所有する機関と利用する者との間で適切な分担が行われるよう検討する必要がある。

但し、大型研究施設間の国際的な競争を考慮すれば、J-PARC、RIBF 等を国の推進すべき先進的な研究プラットフォームとして位置付け、成果非公開であっても研究・利用促進のため国が利用料の一部を負担する、あるいは、我が国の産業競争力強化の観点から、成果非公開であっても我が国の企業が利用する場合には国が利用料の一部を負担する等の仕組みを構築し、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ことも検討していく必要がある。

一方、J-PARC 等の共同利用施設において、研究者の自由な発想による優れた

研究課題について無償で利用できる機会を提供（実験費、旅費等）することは、大学共同利用機関としての責務であり、こうした利用枠が設けられることは極めて重要である。

（参考）

J-PARC 中性子ビームの有償利用の場合、中性子源で用いる 3GeV の陽子ビームを生成する加速器、及び中性子源施設の運転経費を年間約 110 億円と仮定して、全利用時間年間（年間 200 日）を 23 本のビームラインが均等に分担する（運営費回収方式）との前提に立って試算すると、約 240 万円／日がビームライン当たりの料金として課されることになる。国際的には中性子ビームラインの利用料金は平均約 150 万円／日程度とされており、J-PARC で前述の利用料金が課せられた場合、多くの外部利用者は海外のビームラインの利用に流されると予想される。

第 4 節 小型先進加速器技術開発による利用高度化と地域展開

中性子及びイオンビームは、ともに産業分野での先端的应用のための重要な技術であるが、いまだ拠点集中型のツールであり、広範な地域での利用に向けた道のりは遠い。普及を妨げている理由の一つとして、主要なビーム源である高出力の加速器が、大規模かつ高価であることが挙げられる。

中性子ビームによる橋脚構造体の測定、高エネルギーの粒子線（イオンビーム）によるがん治療等、小型化・可搬型開発によるオンサイト利用あるいは全国への展開が強く望まれている分野は多い。特にイオンビームによるがん治療には、がん細胞のみにダメージを与えるという、従来の光子線治療にはない特長があることから国内では新しい治療法としての期待が高まっており、今後の国内各地への普及・展開が重要な課題となっている。このためには大幅な装置の小型化、低コスト化が必要となることから、先進的な小型加速器や次世代のレーザー駆動型の粒子線発生装置の開発、これによるビーム利用の低コスト化が期待されている。

こうした取り組みにおいて、大学及び公的研究機関の果たすべき役割は大きく、競争的研究資金の活用も図りつつ、本分野の将来を担う若手の有為な人材を惹きつける形で、効果的な研究開発が進められることが望まれる。

第 5 節 専門研究者・支援者の育成のあり方

量子ビームは、これまで学術研究における基幹プローブとして利用されるとともに、最近はがん治療、医薬品開拓、植物改良等様々な方面に利用が広がっ

ており、これから益々量子ビームの利用は高まることが予想される。今後、量子ビームの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研究者や、利用者向け支援サービスを行うビーム利用支援者といった人材の育成が必要となる。

現在、これら人材育成や教育の中心は大学であり、特に最先端の研究、新たな利用、高度化等を支える研究者の育成は主として大学院において行われているが、それらは大学共同利用機関による共同利用体制に支えられている部分も多い。また、オールジャパンでの人材育成や教育のためには、量子ビームに関する加速器施設は全国にバランスよく配置されることが望ましいが、先端加速器は大型化してきており、一大学での建設・維持が困難になってきているため、大学とは別の大型施設を共同利用する必要性が高まっている現状にある。

このように、技術の進展と今後の利用可能性の拡大に鑑み、加速器に係る高い専門性を有する研究者やビーム利用支援者を育成するための方策として、

- ①専門人材の育成・確保に向けた大学・大学院教育の充実・強化及びポストドク制度（海外への派遣を含む）の活用（例：総合研究大学院大学において設置計画中の高エネルギー加速器研究科の大学院 5 年一貫教育プログラムの活用、修士の学生を対象とした CERN 夏期セミナーの活用等）
- 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（例：粒子線医療のための医学物理士育成等）

等を活用すると同時に、新たに、

- ③先端的な量子ビームの活用により、高校生・大学学部生を対象とした教育・研修ができる仕組み（サマースクール等）を創出していくことも必要である。

なお、高エネ機構で実施される加速器科学総合支援事業の活用により、人材育成の一翼を担う大学等が行う加速器科学の研究・教育について連携・支援を図るとともに、大学の学生に加え、民間の技術者に対しても加速器開発技術の提供・支援を行ったり、技術者を直接指導したりすることにより、幅広く人材育成の場を活用・展開していくことも期待される。

また、産業界での量子ビーム関係の人材育成においては、大型加速器施設の適当な間隔での建設により技術継承が行われてきた面があるが、最近、産業界での加速器建設に対する技術が一部において空洞化が起こりつつある、と言われている。今後産業界での加速器技術者の技術承継のためには、大学、公的機関との人事交流や専門家のための講習会を開催する等により、技術者が常に新しい情報に触れられるような場所を提供することが有効であろう。

第4章 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

第1節 未着手ビームラインの機器整備・利用系構築

(1) J-PARC ビームラインの整備及び利用系構築

<J-PARC/JSNS において提案された主なビームライン機器>

J-PARC 中性子ビームラインに設置すべき実験装置については、将来の科学の動向の予測を踏まえた 34 台の実験装置が提案された（「統合計画中性子分光器検討班報告書」KEK Report 2001-22）。その後、2005 年 3 月の国際諮問委員会の報告において、10 台程度の装置を整備する必要ありと指摘されている。

これを踏まえ、高エネ機構は、世界最高の反射率（ 10^{-10} ）を実現させて、液体間の界面等の研究を行う「高性能試料水平型中性子反射率計」、世界最高の分解能を誇る「超高分解能粉末回折計」、液体・ガラスや非晶質体等の無秩序系について極めて高い空間分解能と強度をもって解析を行い、特に機能性材料の階層構造を明らかにする「高強度汎用全散乱装置」、強相関電子系や磁性体、超伝導体や非晶質体といった系に存在する動的構造を解析し、物質機能の解明を行う「高分解能型チョッパー分光器」について、2007 年度を目途に整備を進めている。

これら装置は、現在 KEK-PS で行われている実験を世界最高レベルのビーム強度を持つ J-PARC で実施できるよう、2005 年度に KEK-PS を停止し、そこで用いられていた実験装置等を改造・移設することにより、大学共同利用に供する装置として整備するものである。

これは、KEK-PS による実験研究の継続と短期間中断後の J-PARC での実験研究の費用対効果及び実験研究効果の面からも有効であり、また、多大な経費を要する J-PARC 計画において、既存設備の有効活用を図ることは極めて重要である。

なお、これらの作業は J-PARC 本体の建設スケジュールと密接に連動しており、関係研究者の多くは運転開始時までの間、諸外国の中性子施設に活動場所を求めざるを得ない状況となる。国際競争力確保の観点からも、研究者の海外流出は最小限とすべきであり、J-PARC 本体の建設計画及びビームライン機器整備の着実な進展が望まれる。

原研においては、工学分野において自動車、原子力材料、精密機器等の内部残留応力評価を行う「残留応力解析用パルス中性子回折装置」、生命科学分野での生体タンパク質等の運動・機能を解明する「生物用非弾性散乱装置」、物質科学分野において磁性材料・超伝導材料等の動的構造を解明する「冷中性子ダブルチョッパー型分光器」、ナノスケールの材料やソフトマター等の階層構造・機能の解明を行う「大強度型小角散乱装置」等について、産業界をはじめとする利用者側のニーズを踏まえた優先度付けに留意しつつ、ビームの本格供用が予定される 2008 年度を目途に整備を進めていることが望まれる。

これらビームライン機器の整備に当たっては、産学官の関係専門家による研究会の開催等を通じ、産業界等の利用者の具体的ニーズ、技術面・制度面の要請を適確に捉えた上で、設計段階からこれを参酌、反映していくことが必要である。

<茨城県装置の整備・運用計画>

茨城県はサイエンスフロンティア 21 構想推進事業の一環として、J-PARC 内に産業利用促進を目的とした「生命物質構造解析装置」及び「材料構造解析装置」の整備を計画している。これらの装置は原研・高エネ機構の協力の下で基本設計が固められ、2007 年度の設置を目途に整備が進められている。同時に、中性子関連 8 テーマ、放射線関連 2 テーマの計 10 領域について中性子利用促進研究会を設置し、産業界に対する中性子ビーム利用の有用性の啓発、具体的利用ニーズの掘り起こしに努めている。

これら研究会参画企業をはじめとした産業界による県の装置の先行的利用は、企業ニーズに根差した本格利用への道筋を拓くものと期待され、その着実な進展を図るべきである。

<その他競争的資金による機器整備・利用系構築の可能性>

競争的研究資金の獲得によるビームライン機器開発・整備への取組み事例として、これまでに、京都大学原子炉実験所川端教授他は先端計測分析機器開発事業の資金（「中性子スピン干渉原理に基づくスピンエコー装置開発」、2004～2009 年度）を得て共鳴中性子スピンエコー分光器群を J-PARC に建設し、ガラス・ナノ粒子・ソフトマターのダイナミクスを独自の時間－空間領域で測定し、生体高分子の機能発現解明や創薬への貢献を目指している。

また、競争的資金を活用したビーム利用の高度化研究の事例として、原研新井主任研究員他による原研・高エネ機構・大学の連合チームは、科学研究費補助金特別推進研究の資金（2005～2009 年度）を得て、世界最強の「4 次元空間中性子探査装置」の研究開発を行い、磁気励起プロセスの全貌解明によって高温超伝導発現機構を解明することを目指している。

このように、優れた研究提案を行って競争的研究資金を得ることは、ビーム機器開発・整備及び利用系構築の促進とともに、優れた若手研究人材の結集を図る上でも極めて重要かつ有効なアプローチである。上記 2 例に見られる競争的資金以外にも、科学技術振興調整費、原子力システム研究開発公募事業、戦略的創造研究推進事業におけるチーム型研究（CREST）等のプログラムが本分野における研究開発の重点推進に向け有望と考えられる。関係研究機関の人材・構想力・研究遂行能力を結集し、これらプログラムへの戦略的かつ積極的な獲得に向けた努力が積み上げられることが期待される。

<産業界専用ビームラインの可能性>

第2章で述べた通り、産業界が抱える技術的課題の解決のために、中性子ビームの利用は大きな貢献を果たし得るものと期待されている。しかしながら、産業界では中性子利用に対する理解・経験が未だ進んでおらず、その有効性に対する評価は必ずしも高くない。そこで、第3章第2節で述べた産業利用促進のための各種プログラムの創設と並行して、ビームライン整備そのものに対する産業界の積極的参画を促す方策を検討すべきである。その際、SPring-8における産業専用ビームラインの設置・運営の考え方及び実績を参考にしつつ、企業体連合・コンソーシアムによるビームライン設置ないしビームタイム買い取りの可能性を検討するとともに、成果の帰属及び秘密保持の担保、適切なビーム利用料金の設定とこのための各種支援制度の整備等について、施設設置者側と関係産業界の間で早急に具体的検討を進めることが必要である。

(2) RIBF 実験設備の整備及び利用系構築

理研 RIBF 計画では実験設備の整備は未着手であり、施設の潜在能力を引き出すための基幹実験設備の整備が必要な状況である。主な設備として、ゼロ度スペクトロメータ（新同位元素の基本量測定）、偏極 RI ビーム発生装置（内部電・磁場測定等材料解析）、大立体角多重粒子磁気分析装置（SAMURAI：エキゾチックな集団運動探索、元素合成核反応実験）、超低速 RI ビーム生成装置（SLOWRI：精密電磁モーメント測定）、分散整合ビームライン（新奇励起モードの発見）、稀少 RI リング（ウラン合成核種の精密質量測定）、陽子分布測定装置（SCRIT：精密陽子分布測定）及び新入射器システム（実験効率の向上）がある。これらの基幹実験設備の整備により、究極の原子核モデルの構築、元素の起源の解明、新しい産業利用の開拓等、今後基礎科学及び産業応用の両面で成果を挙げていくことが期待される。

理研では、2004年11月に、これら基幹実験設備の整備等について、海外専門家を主体とした外部委員による国際諮問委員会を開催し、「提案されている計画の全てが、世界の先頭を切る RIBF 加速器施設の潜在的な能力を徹底的に活用するために実現されるべき、重要かつ必要なものである」との評価を得ている。これを踏まえ、2006年度以降、外部利用の可能性や国際的研究開発動向も考慮した優先度付けや外部資金を含む多様なリソースの確保に留意しつつ、これら基幹実験設備の着実な整備が進められることが期待される。

第2節 ビーム利用に係る各種促進プログラムの導入

<利用促進プログラムについて>

量子ビームについては、ナノテクノロジー・ライフサイエンス等最先端科学技術・学術分野から、幅広い産業利用が期待されているところであり、既存の大型施設はもとより、数年のうちに本格的なビーム供給を開始する J-PARC や RIBF のポテンシャルを十分に引き出し、利活用を促進していくためには各種のプログラムを整備する必要がある。

既にイオンビームについては、重粒子線の医療利用や電子線による材料加工等、先駆的に産業利用が進んでいるが、量子ビーム全体で見れば、昨今の加速器技術の進歩によるビームの多様化や高品位化に比して、産業界に対する情報発信や利用機会提供の不足により、必ずしも十分な産業利用が進んでいるとは言い難い状況にある。

特に、中性子ビームの利用については、従来、研究用原子炉から供給される中性子線の利用が大部分であり、利用可能な施設がごく少数であることや安全規制上の厳しい制約等の理由から、必ずしも産業界等にとって利用しやすい環境が整っていたとは言い難い。さらに、これらの事情から、産業利用の観点からの中性子ビームの持つ特徴・利点や潜在的な利活用の可能性が関係コミュニティに十分認識されておらず、相乗的に情報不足が継続する状況にあった。

これらの状況を踏まえ、SPring-8 の先行事例も参照すれば、今後の量子ビーム利用促進に向けた効果的なプログラムとして、以下の導入を検討することが望ましい。

○量子ビーム利活用コーディネータ等の設置

量子ビームを利用する最先端大型施設は数が少なく、産業界からの潜在的利用可能性についての認知度は必ずしも高くない。また、利用に際しての適切な相談先の不在により、積極的な利用や新規参入に対するインセンティブが働きにくい状況にある。

これらを改善すべく、ユーザとビーム供給者を効果的に結び、各種量子ビームの特徴や利用にあたっての条件等について幅広く相談に応ずるとともに、各種ビームの横断的・包括的利用を促進するためのコーディネータ及びアドバイザー（非常勤）を設置し、量子ビームの利用を促進する必要がある。

その際、結晶構造解析等においては、中性子ビーム利用と放射光利用との間に相補的な関係がある等、利用者の詳細かつ具体的なニーズを踏まえ、中性子ビーム、放射光を含む量子ビーム全体の横断的利用を視野に入れた、適切な助言や機動的な提案を行うことが有効である。これらの観点を踏まえ、適切なコーディネータの人選を行う他、ユーザの利活用課題の機密部分に係る秘密保持義務の仕組み等の体制整備に留意する必要がある。

○量子ビーム利活用トライアルユース制度の創設

放射光については、従来のX線利用の延長との認識から、産業界等においても比較的認知度が高く、利用に際しての敷居は低い。他方、中性子ビームについては、利用可能施設が極端に限られる上、中性子線に対するネガティブな一般的印象から、利活用に対するインセンティブが低いものであった。

しかし、水素原子との相互作用性やスピン偏極が利用できる点等、中性子線のみ持つ優れた特長は、今後産業利用において大きなブレイクスルーをもたらすことが期待され、また、今後、2008年度に予定されるJ-PARCのビーム供給開始以降は、より高品位なパルス中性子線の供給が可能となり、産業利用への期待はさらに高まる。

またRIビームについては、2006年度のRIBFの完成により、従来は未開拓であった元素のRIを世界に先駆けてビーム等として多種類・大強度で生成することが可能となる。これにより、調べたい現象・物質・時間に応じた元素（約3千種にわたるRI核種）を選択することが可能となり、医療・材料・環境等の分野における有用なツールとして利用が進展していくことが期待される。

これらの状況を踏まえ、RIビームの更なる産業利用促進やJ-PARCの本格運用に向けた中性子ビームの潜在的ユーザの開拓を図るため、原研高崎研究所の各種イオンビーム源及び東海研究所のJRR-3等を用いたトライアルユース制度を創設し、産業界等が実際に試行的に各種ビームを利用する機会を増やすための取組みを実施することが有効と考えられる。

その際、所要の支援サービスの提供等を通じ、長期的にユーザの確保を図るとともに、トライアルユース終了後のユーザのニーズを十分に把握した上で、実際の利用が実施できるような制度設計を行う必要がある。

○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

量子ビーム利用についての潜在ユーザ開拓に向けた戦略的広報の強化及び一般的なパブリシティ向上を図るとともに、上記の「量子ビーム利活用コーディネータ等の設置」、「量子ビーム利活用トライアルユース制度の創設」の効果的推進の支援を行うため、先駆的な量子ビームの利活用事例紹介等を行う定期刊行物・ハンドブック等の発行や、量子ビーム技術の理解増進、利用者と供給者間のインターフェース強化等を目的としたポータルサイトの構築を推進することが有効と考えられる。

その際、既存の定期刊行物や関連ホームページ等との役割分担を意識し、必要に応じそれらを発展的に拡張する等の合理的方策を検討する必要がある。

<プログラムの推進方策について>

これらのプログラムの実施に際しては、各分野のビーム利用において、産業界とのインターフェースの役割を有する関係専門機関に対し、横断的な共通基盤（プラットフォーム）としての効果的な量子ビーム利用環境システムを構築していくことが重要である。このため、こうしたプラットフォームの整備・運営を司る中核的な機関を設置し、一体的かつ体系的にプログラムを推進していくことが望ましい。（図表7参照）

但し、この種の機関の設置に際しては、行政改革の流れの中で、新規組織・機関を創設することは予算的にも困難な状況にあり、既存の機関・組織を発展的に改組・活用する方向で検討を行う必要がある。その際、当該機関は、量子ビーム利用促進プログラムの性質上、原研等の有する量子ビーム利用施設等との相応のインターフェースを持ち、量子ビーム技術について専門的な知識を有する機関であることが望ましい。

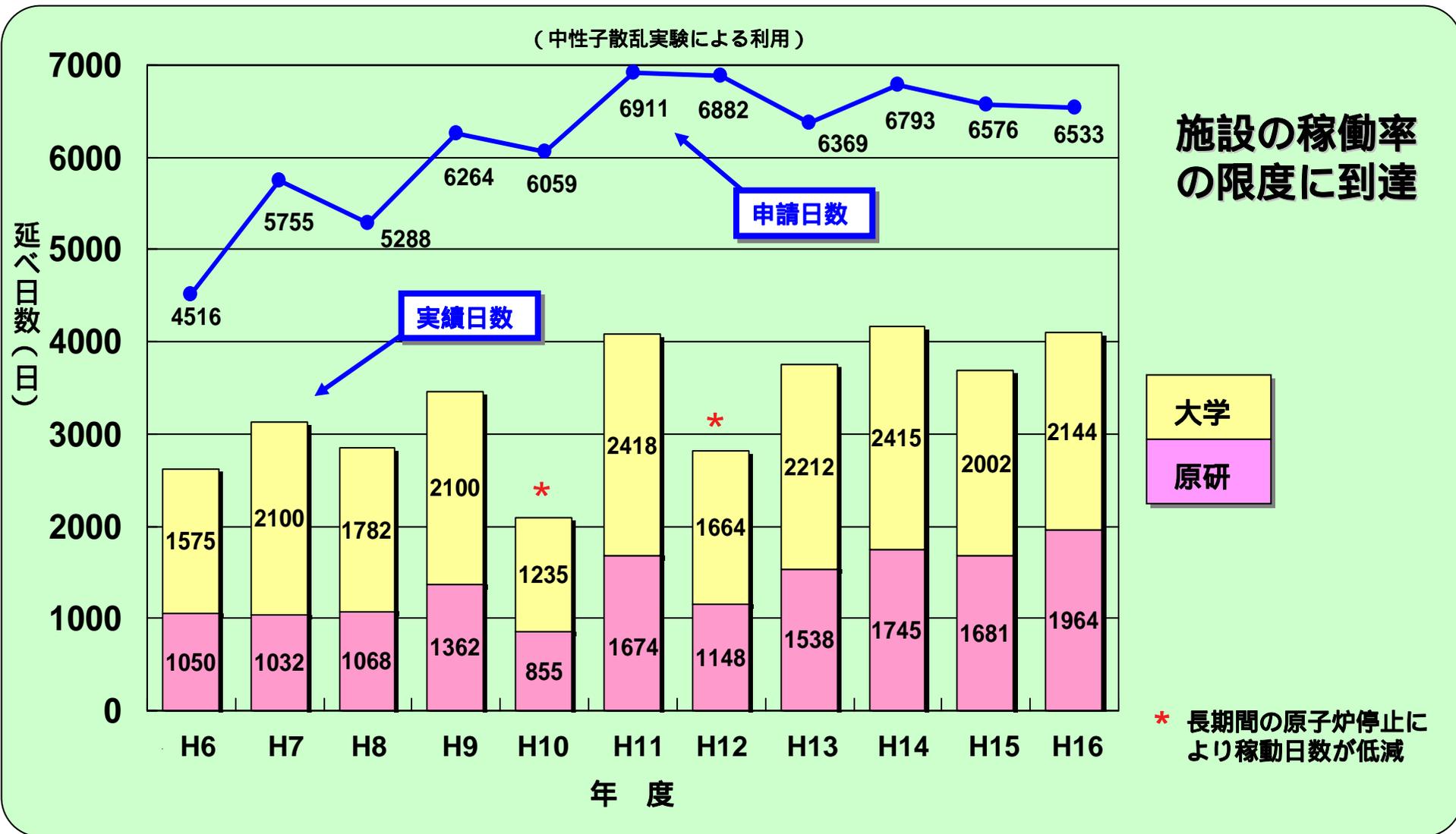
おわりに（今後の検討会の進め方等）

本中間とりまとめでは、科学技術政策における量子ビーム研究開発・利用の重要性を踏まえ、当面取り組むべき課題として、広範な科学技術分野との連携による利用促進、利用者コミュニティ拡大に向けた方策等を中心に、検討会におけるこれまでの検討結果をとりまとめたものである。

今後は11月中の最終とりまとめを目指し、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整備、システム・体制整備、ビーム機器の性能向上及び更新のあり方等、ビームライン支援者の確保及び処遇の考え方を含む人材の育成・確保策、専門組織の設置による依頼分析サービスの提供可能性、多様な専用ビームラインの整備、運営方策等、今後取り組むべき中長期的課題についても検討を進めていく予定である。

図表 1

JRR-3（研究用原子炉）におけるビーム利用の推移

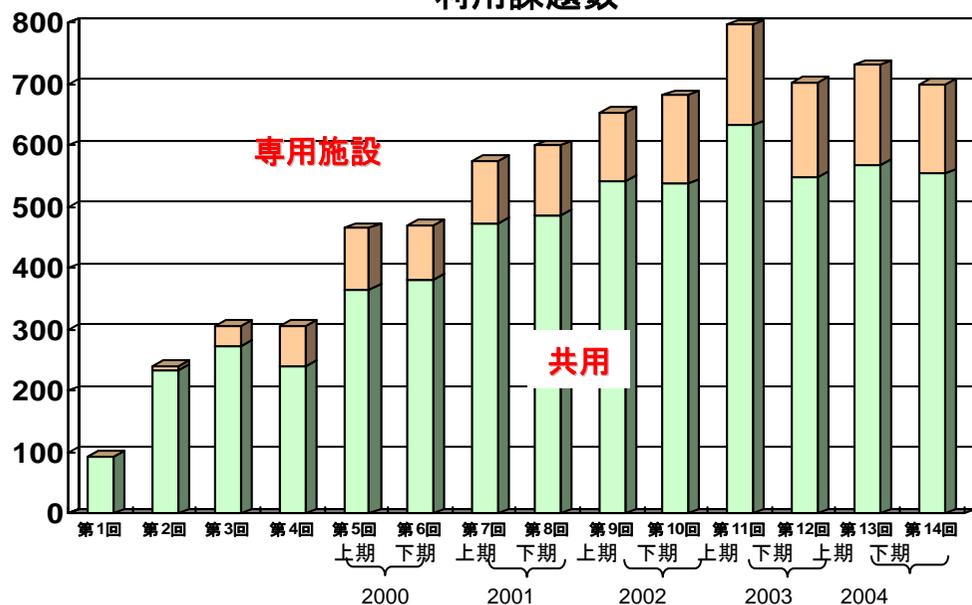


SPring-8の共用及び専用施設利用の推移

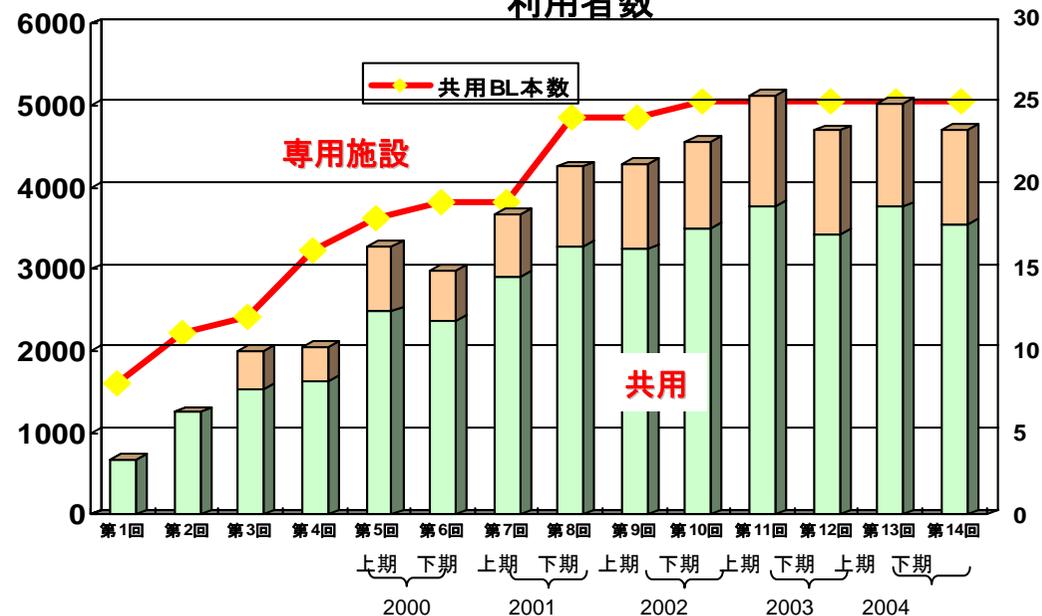
図表 2

利用期間				利用時間	共用		専用施設	
					利用課題数	利用者数	利用課題数	利用者数
第1回	H9.10	～	H10.3	1,286	94	681	—	—
第2回	H10.4	～	H10.10	1,702	234	1,252	7	—
第3回	H10.11	～	H11.6	2,585	274	1,542	33	467
第4回	H11.9	～	H11.12	1,371	242	1,631	65	427
第5回	H12.1	～	H12.6	2,106	365	2,486	100	794
第6回	H12.10	～	H13.1	1,558	382	2,370	88	620
第7回	H13.2	～	H13.6	2,381	473	2,915	102	766
第8回	H13.9	～	H14.2	1,893	486	3,277	114	977
第9回	H14.2	～	H14.7	2,093	543	3,246	110	1,043
第10回	H14.9	～	H15.2	1,869	538	3,508	143	1,046
第11回	H15.2	～	H15.7	2,244	632	3,777	164	1,347
第12回	H15.7	～	H16.2	1,844	548	3,428	154	1,264
第13回	H16.2	～	H16.7	2,095	568	3,756	163	1,269
第14回	H16.9	～	H16.12	1,971	554	3,546	146	1,154
合計				26,998	5,933	37,415	1,389	11,174

利用課題数



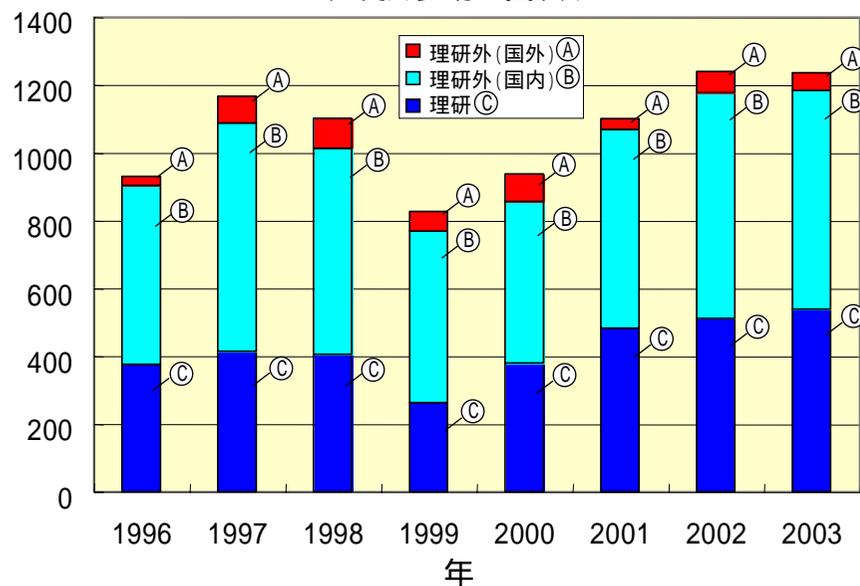
利用者数



理研加速器施設 (RARF) の利用の推移

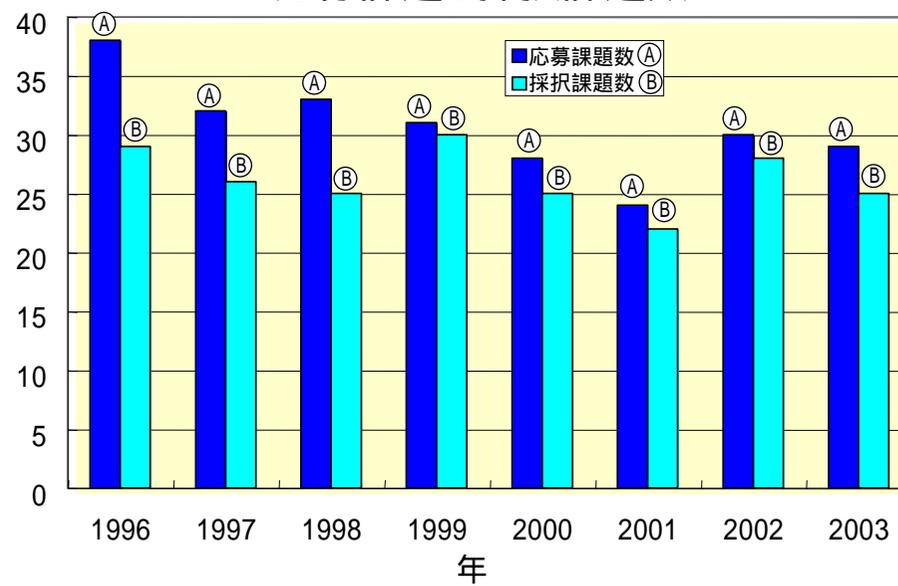
参加者数(人)

実験参加者数



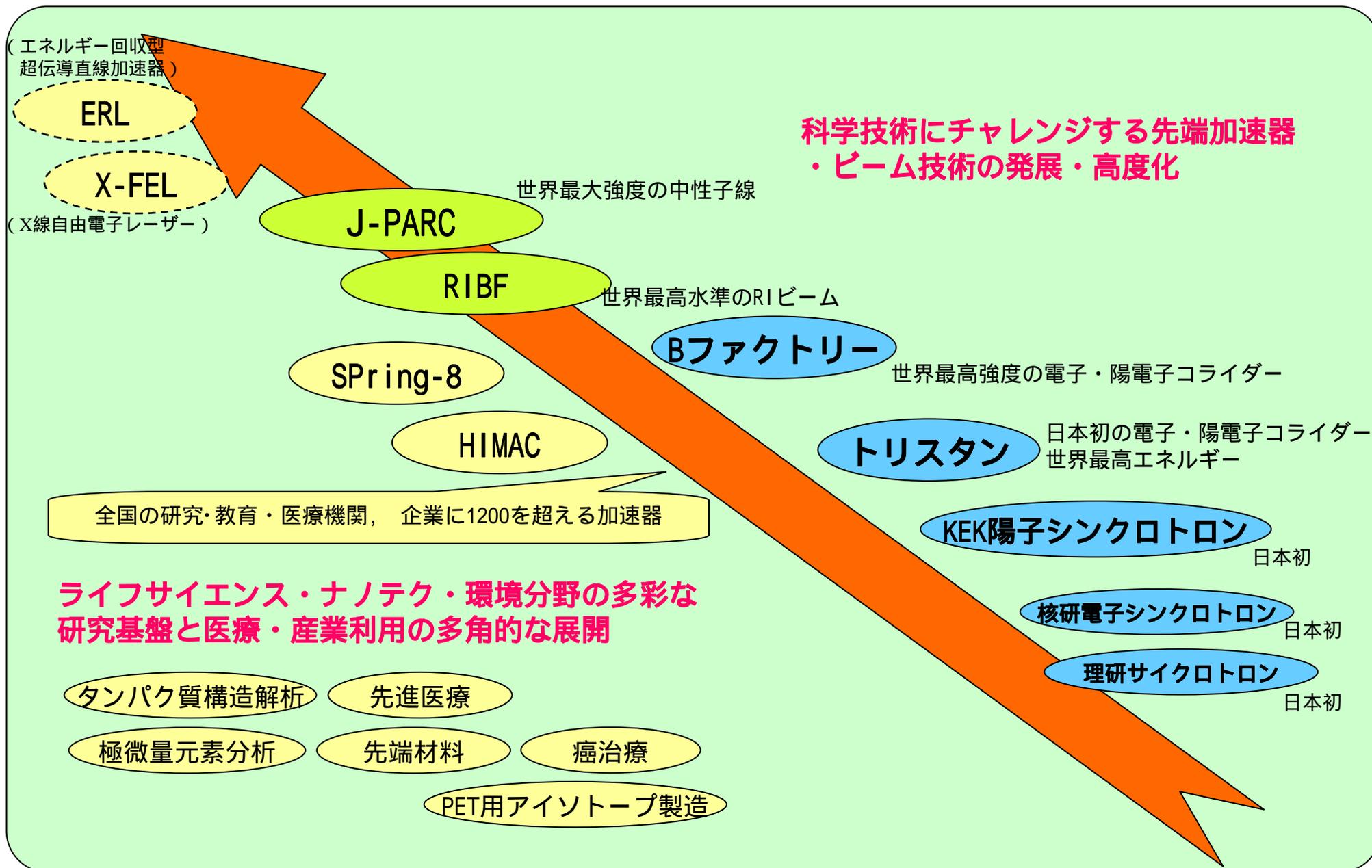
課題数

応募課題と採択課題数



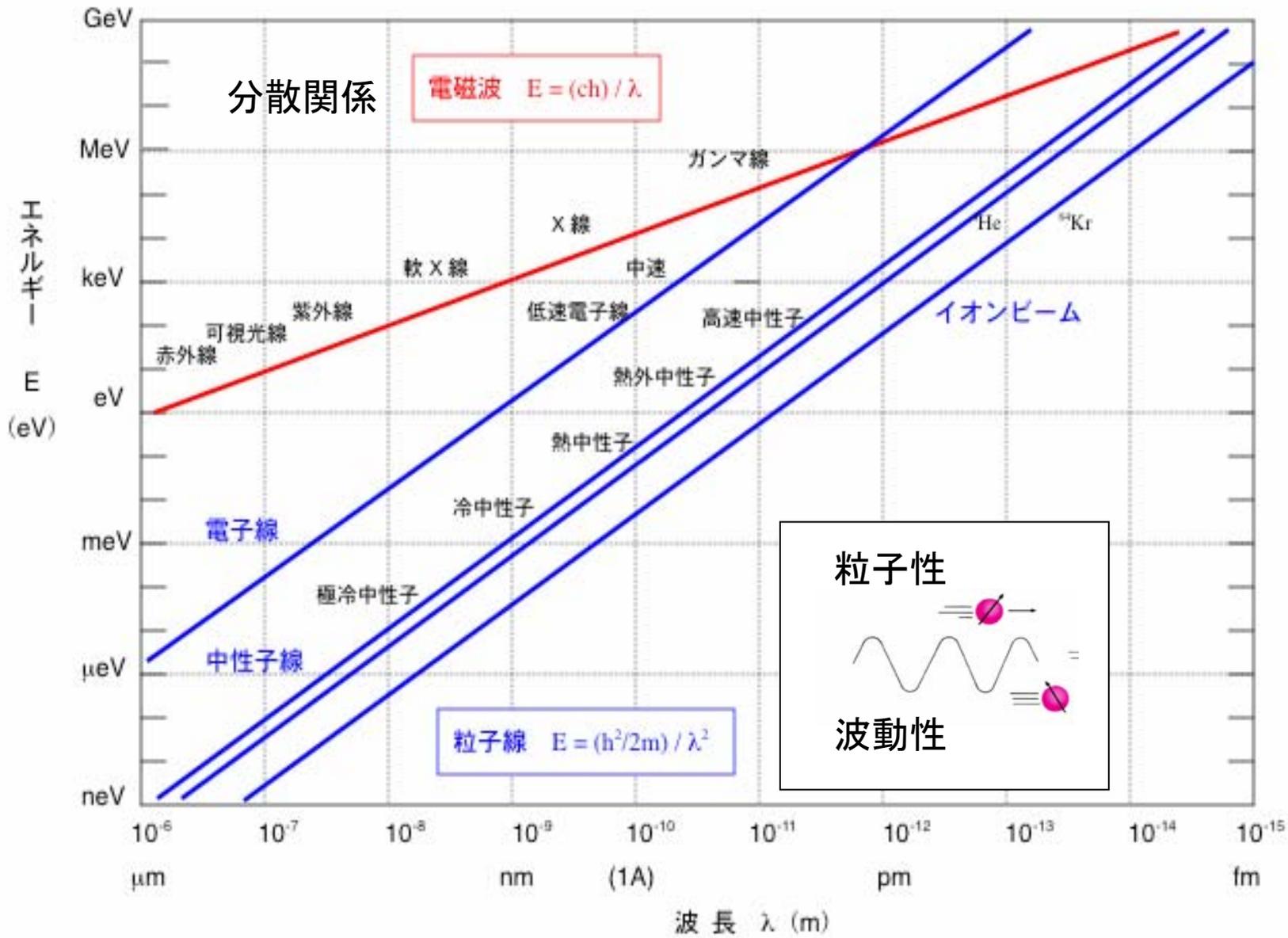
量子ビームテクノロジーの進展

図表4



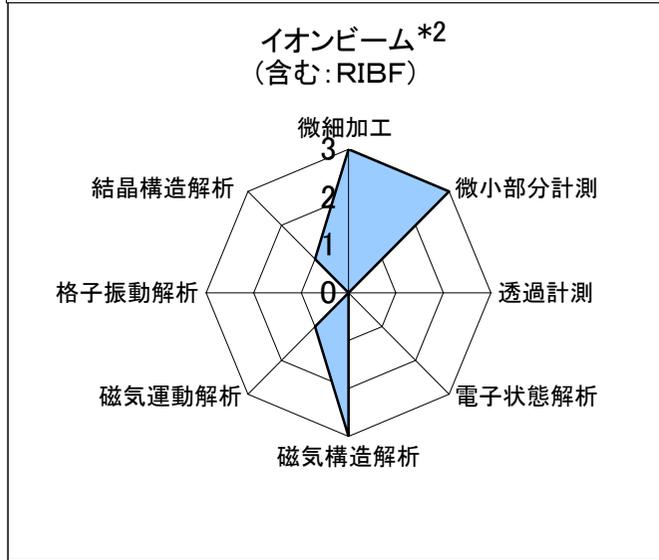
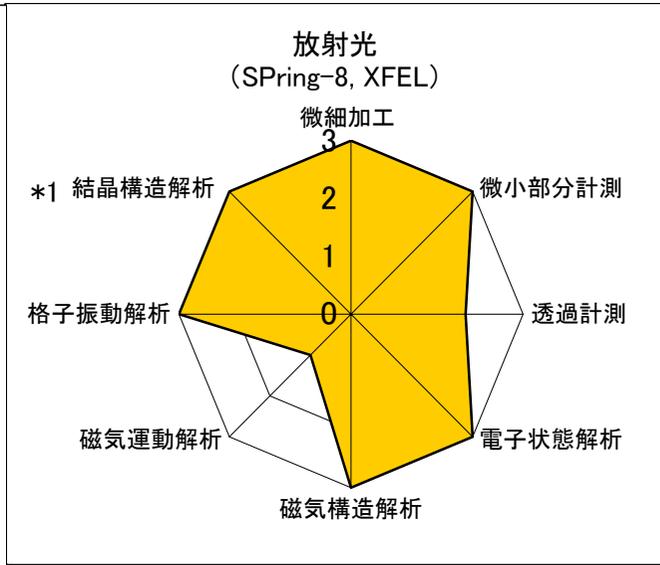
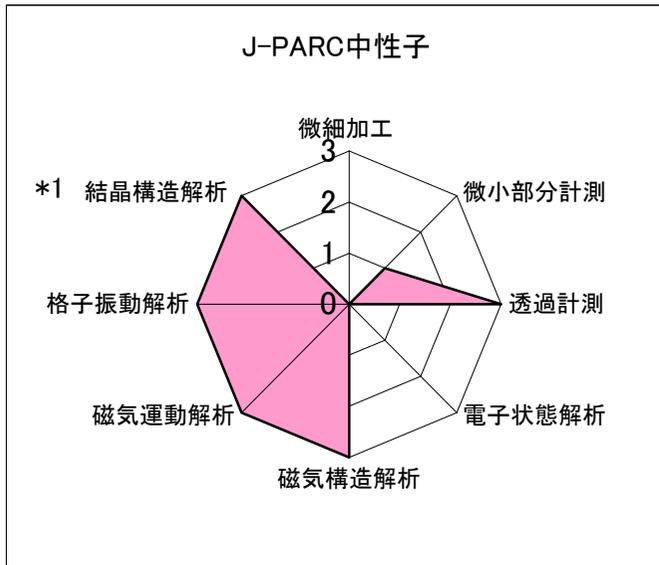
各量子ビームの物理的特性関係

図表5



各種ビーム源の相互補完性

図表6



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)

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)

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

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)

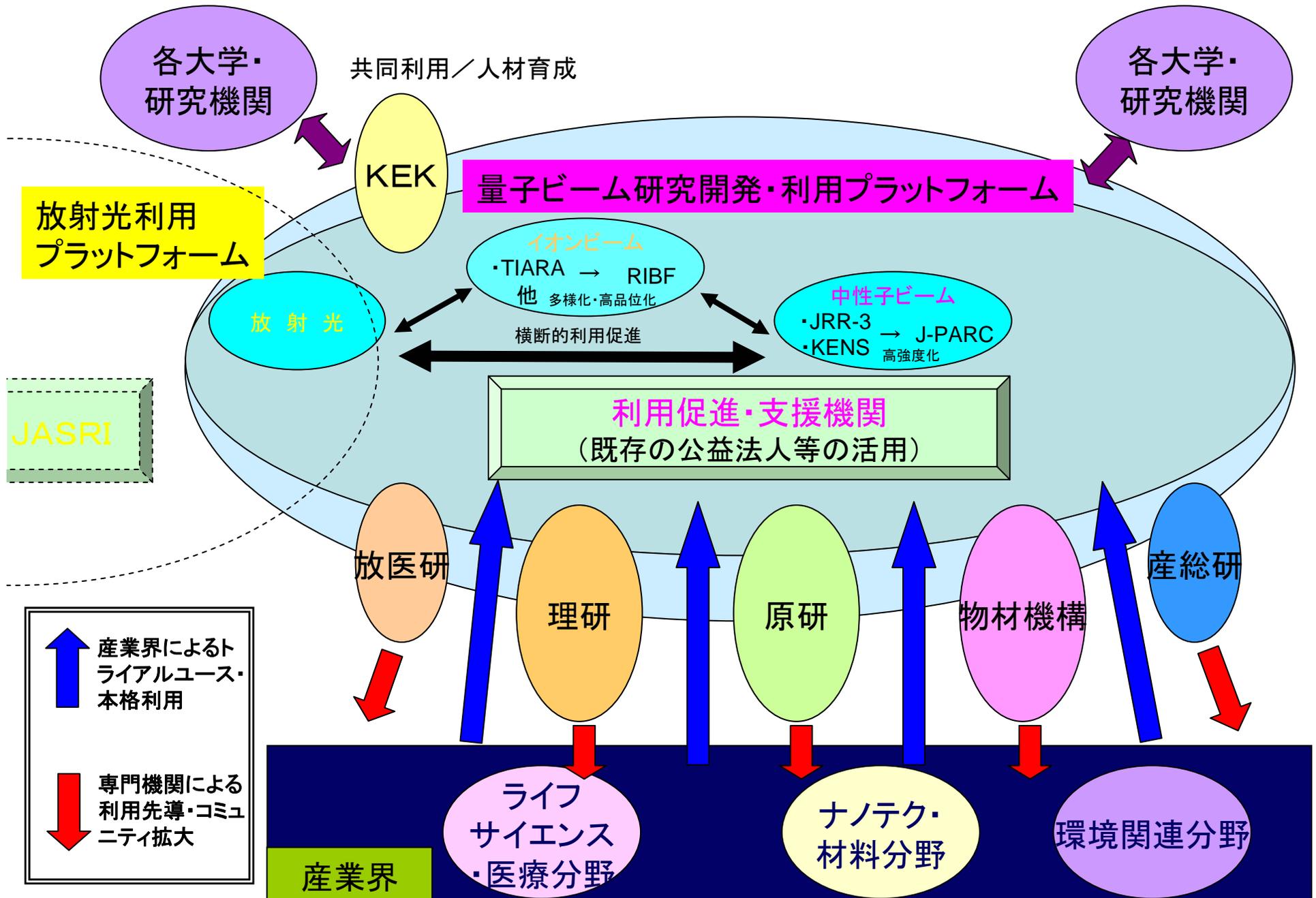
格子振動解析
 物質の性質・機能を理解・利用するために、結晶格子に伝播する原子振動波(エネルギー、波数、伝播方向)や安定性を解析する(物質の力学強度や相安定性など)

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)

*1 J-PARC中性子では軽元素(水素、リチウムなど)測定、放射光では高分解能・高速性など、それぞれ異なる特長を持つ
 *2 イオンビームでは物質注入や核反応の誘起などの特長を持つ

量子ビーム研究開発・利用の推進体制について

図表7



我が国の主な量子ビーム関連施設

参考資料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	(財)高輝度光科学 研究センター	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
	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 所	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 (2007年)	860億円
高エネルギー 加速器研究機構		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 (RRC)	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
	RIBeam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 ・RIBeam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 所	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
高出レーザー 装置	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 所	-	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

世界の主な「原子炉」中性子ビーム施設

参考資料2

国／地域	米国		欧州				オーストラリア	アジア	
中性子源	HFIR	NBSR	HFR(仏)	ORPHEE(仏)	FRJ-II(独)	FMR-II(独)	OPAL	HANARO(韓)	JRR-3(日)
研究機関	オークリッジ国立研究所 ORNL DOE	国立標準技術研究所 NIST 商務省	ラウエランジュバン研究所 ILL	レオンブリリアン研究所 LLB	ユーリッヒ	ミュンヘン工科大	豪州原子力研究機構 ANSTO	韓国原子力研究所 KAERI	日本原子力研究所 JAERI
熱出力 (MW)	85	20	58	15	20	20	20	30	20
炉心での熱中性子束 (n/cm ² /s)	2.1x10 ¹⁵	3x10 ¹⁴	1.5x10 ¹⁵	2x10 ¹⁴	2x10 ¹⁴	8x10 ¹⁴	3x10 ¹⁴	3x10 ¹⁴	3x10 ¹⁴
冷中性子源／熱外中性子源数	1(2005新設予定)/0	1/0	2/1	1/0	1/0	1/0	1/0	1(設置中)/0	1/0
中性子散乱装置台数	9(現在) 17(2006改造後)	24	26	22	6	>10 planned	8	6	25
中性子源完成年	1967	1970	1972, 1993 改造	1980	1962	2004	2006	1997	1990 改造
特筆事項他	DOEによる高度化推進拠点施設 ナノサイエンスセンター併設	DOE、ユーザーから最も共同利用の評判の高い施設 米国「燃料電池」開発戦略拠点	EU 13ヶ国共同運営機関 PSB(構造生物学パートナーシップ)や MINATECを推進中	財政危機による運転時間短縮(以前は200日以上)	2006運転永久停止予定	2004.3 臨界達成	建設中、2006完成予定	冷中性子源設置 予算化済	アジア地域で最もよく共同利用されている施設
主な研究分野	固体物性 高分子科学	固体物性 材料 高分子科学	固体物性 材料 高分子科学 生命科学		固体物性 材料 高分子科学	固体物性 材料 高分子科学 生命科学	固体物性 材料 化学	固体物性 材料 高分子科学	固体物性 材料 高分子科学 生命科学

世界の主な「加速器」中性子ビーム施設

参考資料3

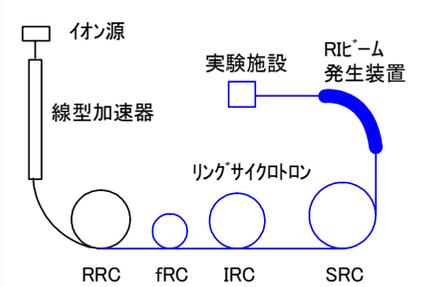
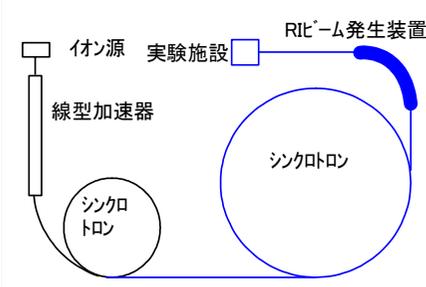
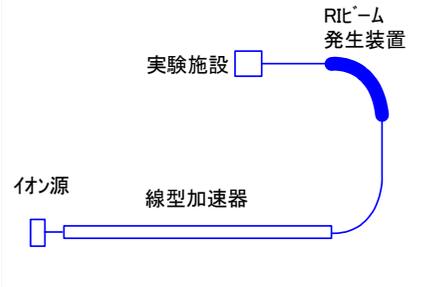
国／地域	米国			欧州			日本	
中性子源	IPNS	LANSCE	SNS	ISIS(英)	PSI(スイス)	ESS(EU)	KENS	JSNS
研究機関(所轄) ／所在地	アルゴンヌ国立研究所 ANL (DOE)	ロスアラモス国立研究所 LANL (DOE)	オークリッジ国立研究所 ORNL (DOE)	ラザフォードアップルトン研究所 RAL	ポールシェラー研究所	未定	高エネ機構 KEK	原研・高エネ機構
陽子エネルギー (MeV)/ 電流(μA)	450/18	800/70	1000/1400	800/200	590/1500	1333/7500	500/9	3000/333
陽子ビーム出力	8.1kW	56kW	1.4MW	160kW	1MW	5MW/5MW	4.5kW	1MW
繰返数(Hz)	30	20	60	50	連続	10/50	20	25
ターゲット材料	濃縮U	W	Hg	Ta	ジルカロイ	Hg	W	Hg
減速材	固体メタン・水	固体メタン・水	液体水素・水	液体水素・液体メタン・水	液体重水素・重水	液体水素・固体メタン	固体メタン・水	液体水素
積分速中性子数 (n/s)	5x10 ¹⁵	6.7x10 ¹⁵	1.8x10 ¹⁷	1.8x10 ¹⁶	1.25x10 ¹⁷	6.3x10 ¹⁷	5x10 ¹⁴	1.25x10 ¹⁷
中性子散乱装置台数	12	7	24	17	15	40	15	23
中性子源完成年	1981	1983	2006.6	1985/2007	1996	未定	1980	2008.4
特筆事項他	ナノサイエンスセンター併設	ナノサイエンスセンター併設	建設中(2006完成予定) ナノサイエンスセンター併設	第2ターゲット計画進行中(2007年完成予定)		最も早い時期に計画されたが延期	世界初のパルス中性子専用施設(2006年停止予定)	建設中(2008.4完成予定)
主な研究分野	固体物性材料 高分子科学 生命科学	固体物性材料 高分子科学 生命科学	固体物性材料 高分子科学 生命科学	固体物性材料 高分子科学 生命科学	固体物性材料 高分子科学	-	固体物性材料 高分子科学 生命科学	固体物性材料 高分子科学 生命科学

世界の主な放射光施設

国	米国				加	欧州							日本		アジア				
施設名	APS (ANL)	ALS (Berkeley)	NSLS (BNL)	SPEAR-III (Stanford)	CLS	ESRF (EU)	DIAMOND (英国)	ELETTRA (伊)	MAX II (スエーデン)	BESSY II (独)	SLS (スイス)	SOLEIL (仏)	SPring-8	PF	BOOMERANG (オーストラリア)	SSRF (中国)	SRR C (台湾)	PLS (韓国)	
エネルギー (GeV)	7	1.0-1.9	2.5	3.0	2.9	6	3	1.0-2.0	1.5	1.7	2.4	2.15	8	2.5-3.0	3.0	3.5	1.3-1.5	2.5	
最大蓄積電流 (mA)	100	400	280	100 (500計画中)	200	200	300 (500)	320		250	350	500	100	450	200	100	240	180	
周長(m)	1,104	197	170	234	171	844	562	259	88	240	288	354	1,436	187	216	396	120	281	
エミッタンス (nm・rad)	8.2	3.5@1.5GeV	45	18	18	3.9	2.5	7.0@2.0GeV	8.8	6.1	4.4	3	5.9	36	7-16	12	19@1.3GeV	12@2GeV	
挿入光源数	35	12	6		11	38	21	11	8	14	6	14	38	13	9	20	5	10	
稼動状態	1995~	1993~	1984~	2003~	2004~	1994~	建設中	1993~	1996~	1998~	2000~	建設中	1997~	1982~	建設中	計画中	1993~	1994~	
特記事項	ナノサイエンスセンター併設		ナノ材料センター併設	改造後第3世代光源	第3世代光源	PSB、MINATEOを推進中	2006年完成第3世代光源	第3世代光源				第3世代光源	2005年完成	ナノテク・タンパクなど重点課題を推進中	計3回の改造で性能向上	第3世代光源		第3世代光源	第3世代光源
主な研究分野	物性材料 高分子生命	物性 生命化学	環境 生命医学			物性材料 高分子生命							物性材料 高分子生命	材料 生命環境医学					

注: PSB は構造生物学パートナーシップ

世界の主なRIBーム施設

事項	主加速器	加速器構成概念図(青色部分を新設)	RIBーム生成手法	1次ビーム	RIBーム	主な研究領域	予算規模	現状	
RIBF (日本)	超伝導 リングサイクロトロン		重イオンビーム による 核破碎反応	[大強度ビーム] ウラン 350MeV/核子 (光速の69%) 10 ¹³ 個/秒 連続波		核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究	発生施設 397億円	発生施設整備費の 97%まで予算化	
GSI (ドイツ)	シンクロトロン			[高エネルギービーム] ウラン 2300MeV/核子 (光速の99.9%) 10 ¹¹ 個/秒 パルス波		エネルギー (光速の60%) とビーム強度は 全施設とも ほぼ等しい	核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究 反粒子科学研究	900億円	予算計画は認められたが 予算化時期は未定 設計実施中
RIA (米国)	線型加速器			[大強度ビーム] ウラン 400MeV/核子 (光速の72%) 10 ¹³ 個/秒 連続波			核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究	950億円	NSAC(DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee)の「2002Long Range Plan」において 最重要プロジェクトに指定 OECDがサイエンスフォーラム において重要度の高い プロジェクトに指定 R&D実施中

注)RIBームを発生するための1次ビームエネルギーは、光速のおよそ70%が必要であるが、それを超えてもRIBームの発生効率は増加しない。

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・(社) 日本経済団体連合会産業技術委員会重点化戦略部会長
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
福嶋 喜章 (株) 豊田中央研究所シニアフェロー

【発表者等】

今瀬 肇 茨城県企画部科学技術振興室長
長我部信行 (株) 日立製作所基礎研究所長
郷 信広 京都大学名誉教授・日本原子力研究所特別研究員
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 (独) 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 日本原子力研究所関西研究所所長
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
藤井 保彦 日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター長
森井 幸生 日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター次長
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