

物構研からの提言

目次

1. はじめに
2. 物構研の理念と設置目的
3. 物構研の現状
4. 物構研の課題
5. 課題解決への提言
6. 物質・生命科学における量子ビームの将来像
7. 物質・生命科学における量子ビーム施設の将来像
8. まとめ

2016年7月25日
物質構造科学研究所運営会議

1. はじめに

日本初の国立大学共同利用研究所として「高エネルギー物理学研究所」が設置されてから40年あまり、また「高エネルギー加速器研究機構（KEK）」として改組され、その一部局として物質構造科学研究所（物構研）が発足してから18年が過ぎた。この間、社会は大きく変容し、大学を取り巻く環境も劇的に変化した。また物質・生命科学に関する学術研究や出口を見据えた応用研究は大きく進歩した。そのような中、大学共同利用と大学共同利用機関、さらには物構研の今後のあるべき姿もまた、鋭く問われている。

物構研はこの問題意識を動機とし、「物質・生命科学における大学共同利用～物構研のあり方を問う～」と言うタイトルで、平成25年12月より4回にわたり物構研特別シンポジウムを開催してきた。この中で我々は利用者やコミュニティの代表、物構研内外の機構の教職員を交えて議論を積み上げてきた。それらの議論を元に物構研の現状と課題を分析し、量子ビーム研究と量子ビーム施設の将来のあり方に向けての提言としてまとめたものがこの「物構研からの提言」である。

2. 物構研の理念と設置目的

物構研は、下記の理念と設置目的の基に運営されている。

【物構研の理念】

放射光、中性子、ミュオン、ならびに低速陽電子などの量子ビームの先端的・協奏的利用の追求により、物質・生命科学の先端的な研究拠点を形成し、国内外の基礎から応用にいたる広範な分野の研究者や技術者とともに、人類と社会の持続的発展と幸福に貢献すべく、自発的研究と教育を推進する。

【物構研の設置目的】

先導的研究

良質な量子ビームの発生と利用法の研究開発、さらにはその活用により、原子レベルから凝縮系、生体分子にいたる多様な物質構造の先端的な研究を先導し、物性発現機構や生命機能の解明、機能性材料の性能向上とその制御技術の進展に貢献する。

先端的共同利用研究拠点

先端的量子ビームの利用施設を維持・管理することで、複数の量子ビーム利用が可能な研究拠点を整備し、これを広く国内外の研究者に開放し、物質・生命科学の多様な研究と幅広い教育の場を提供する。

人材育成

大学、研究法人、ならびに企業等との共同研究を通じて、研究・教育プラットフォームを形成し、その中での人材交流を活性化させ、広範な分野における物質・生命科学の将来を担う人材を育成する。

社会貢献

量子ビームの活用により、物質・生命科学で得られた知恵をわかりやすく社会に伝え、共有するとともに、その知恵を新たな価値の創造や技術革新につなげることで持続可能な社会の構築に貢献する。

3. 物構研の現状

国立大学法人法は「我が国の高等教育及び学術研究の水準の向上と均衡ある発展を図る」ことを目的として制定されている。大学共同利用機関はその中で「大学における学術研究の発展等に資するために設置される大学の共同利用の研究所をいう」と定義され、具体的には、大学で整備・維持することが困難な大型実験装置・設備などを国の予算により整備・維持し、これを全国の大学研究者の利用に開放するとともに、自らも高度な学術研究・教育を行うための組織である。

物構研は、KEKの研究所として、加速器を用いて発生する放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子などの量子ビームによる原子レベルから凝縮系、生体分子レベルにいたる多様な物質構造と機能を総合的に研究する国内外の研究者のための共同研究拠点であり、これまで多くの研究者により利用されてきた。物構研はこのような共同研究拠点として、量子ビーム生成・利用技術などの開発研究と施設の維持・管理・運営を行うとともに、自ら先端的な研究を行い、多くの成果を上げてきていた。さらに大学に準じる教育機関として、また大学等との共同研究により、物質・生命科学研究を担う人材育成を行っている。

近年物構研は、従来のボトムアップ型研究に加えて、国家戦略等に基づいたトップダウン型プロジェクト研究や、産業利用の推進により、幅広い量子ビーム利用の重要な拠点としての役割を果たしており、個々の研究者による自発的な研究に軸足を置きつつも、制度上許容される範囲において幅広い利用研究を受け入れることにより社会の要請に対応してきた。

その成果は物構研の施設利用による研究成果として結実しただけでなく、日

本各地に放射光や中性子など量子ビーム施設が建設されるという大きな波及効果を及ぼしている。

4. 物構研の課題

上記のようにこれまで物質・生命科学への大きな貢献をしてきた物構研であるが、現在、いくつかの課題を抱えている。今後の継続的あるいは更なる発展をしていくために物構研の進むべき方向を考える上で、考慮すべき現状と課題を、大きく分けて「大学共同利用に関する課題」「設置目的を果たす上での課題」「将来計画に関する課題」の3つに分けて以下に述べる。

1) 大学共同利用に関する課題

1-1) 大学共同利用の位置付けの変化

特に物質・生命科学における大学共同利用とコミュニティにおける位置付けは、40年が経過する中で大きく変化した。放射光利用を例に挙げると、フォトンファクトリー（PF）発足当時は、放射光という「夢の光」を自ら創り、それを使って実験を行う専門家集団が、主な研究の担い手であり、コミュニティそのものでもあった。そこにおいては、物理・化学・結晶学・地球惑星科学などの基礎科学の研究者が中心となって、先端的研究成果を生み出してきた。また、1980年代には企業が建設、運営する専用ビームラインも4本建設された。その結果、放射光の有用性が世に広く知れ渡ることになり、多様な学術分野での放射光利用が爆発的に進んだ。1990年代に入ると、放射光を研究開発のためのひとつの分析ツールとして利用する幅広い研究分野の利用者が増えるとともに、新物質開発や創薬を目指す産業利用も盛んになってきた。また学術利用を中心とした知識探求型基礎研究に加え、産業利用まで視野に入れた課題解決型応用研究にも放射光が利用されるようになった。このような放射光利用の多様化により、放射光は学術分野から産業利用分野までの幅広い科学・技術分野において、研究・開発に不可欠な基盤的ツールに進化した。

このような放射光利用の進化の反面、放射光発生技術開発・ビームライン技術開発・実験装置/手法開発を行う大学を中心とした外部の研究者は減少し、これらの開発研究は施設側が主に担当することになった。このような役割分担の固定化は、将来の放射光科学の発展を考えると問題が多い。特に放射光科学の基礎を支える人材育成の停滞を招くとともに、物構研と大学等との間の人材の流動性低下にもつながる懸念がある。

このような放射光が抱える課題は、中性子に関しても同じように現れている。KEKブースター利用施設における中性子科学研究施設（KENS）では、18本のビームラインの半数程度が大学研究者によって運営されていた。これにより、2006

年のKENS運転停止までの25年あまりの期間に、多くの大学院生が装置建設と成果創出に参加し、その多くがその後J-PARCの物質生命科学実験施設(MLF)と中性子実験装置の建設に貢献した。しかし現在MLFにおいては、大学研究者が責任者となっているビームラインは皆無であり、大学が主体的に参加しているビームラインも少なく、人材育成の停滞が無視できなくなっている。これは、KEK、JAEAなどのJ-PARCを運営する機関に研究者が集中し、中性子利用の基盤を支える人材を育成する大学の研究室がほとんど無くなっているところにも原因がある。さらにパーマネントスタッフの少ないミュオンや、パーマネントスタッフがない低速陽電子についても同様の、あるいは、より大きな課題を抱えている。

1-2) 大学共同利用と共用促進利用の共存

1971年に高エネルギー物理学研究所から始まった大学共同利用に加えて、1994年にはいわゆる「共用促進法」がSPring-8の放射光施設に適用され、2009年からは適用範囲がJ-PARC/MLFの中性子施設や高速電子計算機施設(京)にも広げられてきた。これにより物質・生命科学の分野では「大学共同利用」と「共用促進利用」と言う2つの異なる制度による運営と利用の並立という新たな状況が生まれている。これら2つの制度には根拠となる法律や予算の違いなどによって運営やアクセスのポリシーに微妙な違いがある。MLFでは利用課題申請の窓口一本化により、このような違いを利用者には意識させないシステムを作ったが、実際のビーム利用の段階では、ビームライン担当者の数の多寡や旅費支給の有無など利用者支援体制に明らかな違いがある。これら2つの制度の並立はユーザーに混乱を招くとともに、ビームラインスタッフの研究環境の違いに起因する問題をも生み出しており、MLF全体での成果創出の最大化のために解決しなければならない課題の一つとなっている。

2) 物構研の設置目的を果たす上での課題

2-1) 大学共同利用推進上の問題

限られたマンパワーと減少傾向にある運転維持経費により施設運営をせざるを得ない状況は、物構研の存在自体を揺るがしかねない問題となっている。

A. 放射光科学研究施設

利用者運転時間は、国際標準の年間約5,000時間には遠く及ばない3,000時間すら確保が困難な事態に陥っている。また1ステーションあたりのスタッフ数(1.8人:技術職員、任期付き職員、ポスドクを含む)も国際標準(~5人)の1/3程度にとどまる。そのため新技術開発の遅れや不十分な利用者支援という状況を生んでいる。このような状況は先端量子ビーム共同利用拠点に相応しい成果を生み出す障害となり、人材育成の停滞にも繋がっている。

B. 中性子科学研究施設

物構研は8本のビームラインを運営するが、技術職員を含めて1ビームラインあたり2名というマンパワーは、安全を確保しつつ高度な実験環境を整備し、成果を創出するうえで不十分である。またMLFはJ-PARCを構成するKEKとJAEAに加えてCROSSや茨城県・茨城大も関与するなど複雑な組織になっているため、機関間の調整や情報共有など、単独機関による運営においては不必要な時間と労力が必要とされ効率の点で問題が大きい。その上予算やサポートスタッフ数のビームラインごとのアンバランスは、組織間の連携・協力にとって障害となるだけでなく、大学研究者や学生の中性子実験装置へのアクセスに困難をもたらすことになっている。

C. ミュオン科学研究施設

ミュオン施設はミュオン源（一次陽子ビームライン、ミュオン生成標的および付帯設備）とミュオンビームラインからなるが、これらすべてを物構研のスタッフが運営・管理している。従って、恒常的な人手不足と予算的な制限から逃れることができない。

D. 低速陽電子科学研究施設

低速陽電子科学研究施設は、現在、放射光科学研究系の中の一グループとして、研究と大学共同利用を行っているが、パーマネントスタッフが存在しない上に経常的経費が確保されていない点が最大の問題である。

2-2) KEKの中における物構研の立ち位置

KEKは、素粒子原子核研究所（素核研）の素粒子、原子核研究だけでなく、物構研が関与する生体物質や材料も含む多様な物質の構造と機能に関する実験的・理論的研究を包含しており、しかも加速器施設や共通基盤施設とともに、大型施設を建設・維持・管理し、共同利用の場を提供している。このような研究施設は国内では唯一のものであり、世界的にも希有な存在である。

しかし世界的には素粒子・原子核研究のためにスタートした大型加速器研究施設が、素粒子・原子核実験の終了とともに、放射光などの光科学や、放射光・中性子・ミュオンを中心とした物質・生命科学研究所へと変貌を遂げているところがいくつかある。加えて中性子・ミュオン施設と放射光施設運営を一体化する傾向も加速している。

一方で、これまではKEKの研究資源（予算や人員）の相当部分が、ビッグサイエンスとしての素粒子・原子核研究と、その命運に直結する大型最先端加速器

の建設のために充当されてきたと言う歴史的な経緯もあって、コミュニティから見た、KEKにおける物構研の特徴や存在感は必ずしも明確ではない。このような状況下にあつて、KEKの物構研として再確認すべき最も大きな特徴、存在意義は次の2点にまとめることができる。

A. 年間4000名程度の国内外の基礎から応用にいたる広範な分野の研究者や技術者の共同利用を支えており、多様な物質・生命科学の将来を支える人材育成に貢献できる。

B. 物質・生命科学の研究に重要な4つの量子ビームプローブが複合的に利用できる世界的にも希有の大型研究拠点として、それらプローブの複合性により期待される新しいサイエンスを追求できる。

3) 将来計画に関する課題

3-1) 放射光および低速陽電子の将来計画

KEKは2005年に設置された「PF次期光源検討委員会」の検討結果を受け、蓄積リングの汎用性と超高輝度、短パルスという先端性を併せ持つと期待されるEnergy Recovery Linac (ERL)をPFの次期光源の候補として、そのR&Dを開始し実証実験を進めてきた。しかし、その研究開発は当初の予定より遅れ、今後が開発すべき重要な技術も残されている。一方最近では、加速器技術の進歩により、ERLの性能と同等かそれを凌ぐ、蓄積リング型光源の設計が可能となってきた。このような状況下において、放射光コミュニティでは3 GeVクラスの蓄積リング型高輝度放射光源の実現を望む声が高まっている。このような国内外の放射光施設の動向および役割分担を踏まえて、将来のKEKの放射光施設はどのようなものであるべきか、その放射光施設は共同利用施設として今後どのような役割を果たしていくべきか、さらには施設の運営形態のあるべき姿などについて、物構研は方向性を定めなければならない。

低速陽電子実験施設は、様々な装置や線源開発により、近年、表面構造解析に非常に有用なプローブであることを世界に先駆けて示したが、パーマネントスタッフがいない状況で、この施設のアクティビティを高め、今後どのように安定に運営していくかという喫緊の課題がある。

3-2) J-PARC/MLFの将来計画

4機関にまたがる複雑な運営体制となっているMLF中性子において、各機関の特徴を生かしつつ、統一性の取れた運営を実現し、MLF中性子施設という世界に冠たるハードウェアを最大限に生かすソフトウェア（とくにユーザー支援）を

発展的に充実させることが喫緊の課題である。また、中性子利用を専門とする研究者が4機関に集中しており、4機関内外の研究機関との人事交流が必要となっている。MLFの中性子実験装置のほとんどは世界的に見てもトップクラスの性能を持つものとなっているが、そこから産み出されている研究成果の点では、量的にも質的にも不十分であるとの見方もある。従って装置性能に見合った研究成果創出のためには、装置の整備やユーザー利用プログラムの改良等のシステム上の改善だけでなく、装置担当者の研究者としての成長も必要であると考えられる。またその一方で中性子源やモデレーターを含む中性子実験装置全体の更なるR&Dも必要である。物構研はこれらの様々な点においてリーダーシップを取って行く必要がある。

一方ミュオンにおいては、当初からの計画に従ったビームライン建設のみならず、さらなる研究成果創出とコミュニティ拡大が必要であり、短期的には共同利用に供せられる装置の整備が最優先の課題である。そのためには予算獲得だけでなく、ビームラインや、実験装置整備のための人材を養成し、増員していく必要がある。一方長期的には、ミュオン透過型顕微鏡など、従来のミュオンビーム利用とは質的に異なる利用法の開発が課題となる。そのための加速器や素粒子原子核分野の研究者との共同研究や、クロスアポイントメント制度を活用した大学などとの互惠関係の構築が課題である。

MLFの長期的な将来計画としては、「第二ターゲットステーション」案の具体化も進めて行く必要がある。これはISISで2009年に実現し、SNSでも次期計画として進みつつあるものと同様に、陽子ビームラインを分岐して新たな中性子・ミュオン源と実験装置を建設する、と言う構想である。2016年春には学術会議の「大型研究計画マスタープラン」に向けて検討し提案書を提出しているが、必要性や実現性等についてはまだまだ検討の余地がある。物構研はこのような提案に関しても、リーダーシップを発揮して行く必要がある。

5. 課題解決への提言

1) 大学共同利用に関する提言

大学共同利用は、量子ビームによるボトムアップ型の基礎研究を支えるしくみとしては依然として有効に機能していると考えられる。しかしながら量子ビームの需要の増大と多様化に対応しきれない部分も多く、今後の広範な研究分野の発展に合わせて大学共同利用そのものの再定義が必要である。

そのために物構研は、二種類の利用形態に柔軟に対応する必要があると考える。その第一は、高度な学術研究を目的とし、物構研と大学等と密接に連携を持ちながらプロジェクト研究を中心に推進する利用形態（ここでは「共同利用形態1」と呼ぶ）である。もうひとつは、量子ビームを分析ツールのひとつと

して利用する多数の施設利用者を対象とした利用形態で、出来る限り使い易い施設としての形態（ここでは「共同利用形態2」と呼ぶ）である。両者に厳密な境界線はないが、共同利用形態1で開発された量子ビーム利用技術を、速やかに共同利用形態2のツールとして利用できるように開発を進めることが、施設側の重要な役割である。とりわけ両共同利用形態での研究推進を担う人材が継続的に生み出されることは、施設の維持・発展にとって重要であり、共同利用形態1での人材育成が鍵になる。両利用形態の具体的内容と物構研における位置付けを以下にまとめる。

【共同利用形態1】

高度な学術研究を目的とし、ボトムアップ型基礎研究を継続・発展させるとともに、社会の要請に応え物構研の設置目的を果たすためにプロジェクト型もしくはトップダウン型研究を推進するための形態である。そのためには、例えば物構研と複数の大学・企業等が密接な共同研究を行うサイエンスコンソーシアムを創り、複合量子ビームネットワークを構築する。このネットワークの中で、異分野融合や他分野との連携が作り易い仕組みを導入する。各サイエンスにおける先端的研究を通して、量子ビーム基礎技術・手法開発や人材育成を、物構研と大学・企業等が共同で行う。物構研からは、ビームタイムや研究環境の提供を十分に行い、世界最先端の研究成果創出を目指す。コンソーシアムの中では、クロスアポイントメントなどの制度を利用して、人事交流を積極的に行ない、組織的に人材の流動性を高める。

【共同利用形態2】

主に先端的な研究の分析ツールとして提供する形態である。利用者にユーザーフレンドリーな実験環境を提供するとともに、目的とする成果（論文や特許など）を出し易いようなサービスを行う。物構研の限られた研究資源を有効に活用するために、例えば、大学や企業との連携で開発したロボットなどにより測定自動化・効率化を極限まで高める。これによりハイスループット分析サービスを提供するとともに、いくつかの研究分野においては、有償のメイン測定サービスも導入する。このために必要な予算・マンパワー等の研究資源は、共同利用形態2による自己収入を中心に賄う。また、新しい量子ビームの利用価値を開拓し、従来の理工学中心の分野のみならず、農林・水産など震災復興や地方再生に関連する新分野での利用や、それに関連する利用者を増やすための活動を広報活動も利用して積極的に展開する。

物構研は、共同利用形態1と2の両方の利用形態を合わせ持ち、これらを区別して運用していく。特に共同利用形態2では、自動化や業務委託等のハイスループット利用を積極的に進め、物構研のスタッフのみならず業務委託等を積極的に活用した体制を確立する。

このような2つの利用形態を共存させるためには、大学共同利用と共用促進利用の両者の利点を取り入れた以下のような新しい共同利用制度が必要である。

A. 対象とする利用者

これまでの大学共同利用のように、利用者対象を大学およびそれに準ずる機関に限定することは、今の社会的な要請と逆行している。大学共同利用という設置目的の再定義を行い、学术界だけでなく産業界を含めた幅広い分野からの利用者が自発的に量子ビームを利用して成果創出できるように、現在の大学共同利用を見直す必要がある。その中において物構研は、先端的研究の先導とともに、将来の共同利用形態1と2を支える人材育成を重視する。

B. 研究成果・利用料について

研究成果の公開・非公開、ビームタイムの課金・非課金に関しても、国民への説明責任が果たせる範囲において、学术界・産業界からの要望を満たせるような柔軟な制度にする。

C. サービスの向上

上記の共同利用形態2においては、サービス体制の向上が必須である。そのために限られた研究資源の中で成果最大化を図れるような制度を模索する。また、共同利用形態1における大学・企業との連携体制も利用し、ビームラインの高度化を推進する。

2) 将来計画の明確化

物構研の将来計画は、オールジャパン体制を基盤にし、コミュニティの意向に沿ったものでなければならない。

放射光の短・中期計画においては、現在のPFのさらなる性能向上および運用の最適化・効率化によって施設の活力をより強化し、放射光の新たな利用法を開拓するための環境整備を進める。それと並行して、蓄積リング型高輝度放射光施設（KEK放射光）の実現を目指して、その運営も含めた詳細検討を進める。一方、長期計画においては、高繰り返し自由電子レーザーなどのライナック型回折限界光源のための加速器技術のR&Dを開始し、具体的計画は短・中期計画の進捗や国内外の情勢なども踏まえつつ策定する。

低速陽電子実験施設については、JAEAや大学などの他機関との緊密な連携を基盤とし、ビームの大強度化や、加速器による大強度偏極ビーム生成を目指す。さらにそれらを利用した表面構造解析法の確立とその応用研究や、物質表面のスピン状態研究など他の量子ビームでは困難な研究を進展させる。

中性子の短・中期計画においては、広いエネルギー領域で偏極度解析を行う偏極中性子実験の確立を目指し、J-PARC以外の施設では成し得なかった物質生

命科学における中性子利用研究を実現する。既存装置のスクラップアンドビルドを順次行いながら、高輝度化をキーワードとするR&D、とりわけ新しい概念に基づく中性子源やデバイス、装置の開発のための長期的かつ継続的な研究を進める。それらは「MLF第二ターゲットステーション」の計画のベースとなるものと考えている。現在の核破碎型中性子源の延長ではなく、J-PARCを凌駕する高輝度中性子を実現するための新しい中性子発生原理の探求も、中性子の新たな可能性の追求のため必要である。物構研中性子が大学や外部研究機関の連携の要となつて、長期的な視野に立って継続的に取り組む。また、J-PARCのみならず原子炉中性子源も含めた将来構想を中性子科学会が主導して検討を進めており、その議論に物構研も積極的に関与していく。

一方ミュオンについては、現在のMLFの自然な発展形としての将来計画を中性子の将来計画と緊密に連携を取りながら策定する。短期的には、最優先のD, S, U, Hラインを一刻も早く本格稼働させ、国内外の研究者に世界最高強度のパルスミュオンビームを用いた幅広い研究環境を提供する。さらに大阪大学核物理センターで運用が始まった、定常ミュオンビームラインとの相補的利用を積極的に推進し、一層の研究成果創出とコミュニティ拡大を図る。長期的には、日本中間子科学会において議論がなされている、ミュオンを物質波として利用する透過型ミュオン顕微鏡計画を将来計画として捉え、その実現の担い手として物構研も深く関与する。最終的には、中性子第2標的をそのままミュオン標的として用いることで、ミュオン強度を100倍にすることが可能なことから、透過型ミュオン顕微鏡、超低速ミュオン μ SRのストロボスコピック（パルス毎）測定を実現する。更に、中性子とミュオンの同時測定も可能となる分光器を用意し、マルチプローブ実験の本格的な運用を目指す。

以上の計画が実現すれば、物構研は4つの量子ビーム全てが利用できる場を提供するだけには留まらず、全てのプローブで回折現象を利用した広範囲で多面的な物質の構造研究ができる世界で唯一の研究所となる。

6. 物質・生命研究における量子ビームの将来像

物構研の理念である、「量子ビームの先端的・協奏的利用の追求による先端的な研究拠点の形成、人類と社会の持続的発展と幸福への貢献、自発的研究と教育の推進」を実現するために、量子ビームの将来像はどうあるべきかについて以下に物構研からの提言を示す。物構研が目指すべき量子ビームの将来像は、物構研の設置目的（先導的研究、先端的共同利用研究拠点、人材育成、社会貢献）を基に設計されるべきである。物構研は量子ビームの将来像としては、次の3つの方向性を共に満たす必要があると考える。

A. 量子ビームの先鋭化による融合：それぞれの量子ビームとしての先端性を

追求することによって、各量子ビームの限界を超えてそれぞれの量子ビームが“カバーする領域”が重なり合うような方向で新しいサイエンスの創成を目指す。

B. 量子ビームの複合活用の拡大と深化：日常的な分析ツールとしての利用であっても、物構研がもつ4つの量子ビームと、それ以外の手法との積極的な連携により、量子ビーム利用法の質的転換とその適用範囲の拡大を目指す。

C. 量子ビーム利用の高効率化：

以下に3つの方向性についての具体的内容を述べる。

A. 量子ビームの先鋭化による融合：

物質・生命科学の研究対象は、長さエネルギーという尺度によって緩やかに区別される階層構造を持っており、その階層構造は機能発現と密接に関係している。量子ビームは、従来原子・分子に対応する長さ・エネルギーの階層において最も威力を発揮してきたが、ビームの高度化や、検出法の改良により、研究対象となる階層を大きく拡張し続けている。このことが、量子ビームが物質・生命科学の重要な手法として位置付けられる大きな理由である。一方で、過去数十年にわたる量子ビーム利用の高度化の先に見えてきたのは、それぞれの量子ビームで得られる物質構造の相補的な情報をいかに有機的に繋ぎあわせて確かな全体像を得るか、という課題である。

例えば物質中に存在する水素を考える。中性子を用いて観測された水素の存在位置や状態についての情報をより定量的に機能性と関連させるには、放射光で観る水素以外の周りの原子の精密な情報と繋ぎあわせる必要があり、そのためには、ある種の任意性（モデル依存性）が入らざるを得ない。また、物質に注入されたミュオンによって水素の電子状態についての情報を与えたとしても、そのような局所的な電子情報を放射光や中性子が与える平均情報と繋ぎあわせることは容易ではない。また厳密に考えると、中性子で水素を観ること自体にも不確定性がある。すなわち、中性子が物質中の水素をはじき飛ばす反跳効果があり、その効果は物質中の水素の周囲との結合性に大きく依存する。また、中性子により水素の電子を見ることはできない。中性子のみで水素を議論することにも限界がある。

このような問題は、4つの量子ビームを「相補性」的にのみ用いる限り乗り越えることはできない。従ってこれからの先端的な量子ビームは、このような限界を超えてそれぞれの量子ビームが“カバーする領域”が重なり合うような方向での性能向上を目指すべきである。

長さスケールの視点からは、放射光・中性子といった回折プローブは、本質的に不均一な生物試料や実用材料にも適用できるよう、実空間での情報を同時に得ることができるような測定法の開発を目指すべきである。これに対応し

て、ミュオンはその局所性を乗り越えるための工夫が求められる。また、深さ方向の視点からは、表面第一層のみを見る陽電子と他のプローブで得られる情報を繋ぐべく、それぞれの適用範囲を拡大することが要求される。長期計画でも述べたように、ミュオンビームの波動性を利用し、回折現象から構造研究が可能となれば、反跳効果がないミュオンと中性子を組み合わせた水素の構造研究が可能となるかも知れない。

時間スケールの視点からは、放射光・中性子が観る時間領域とミュオンが観る時間領域が重なり合うよう、双方からの性能向上が必要である。加えて実時間測定を得意とする放射光と、エネルギー空間での測定を得意とする中性子の適用範囲を広げ、お互いの領域までカバーし合うような工夫も必要となる。

それぞれの量子ビームが“カバーする領域”が重なり合うための具体的な指標として、物構研では現在「水素とスピン」を掲げている。量子ビームのあるべき将来像のひとつは、このような具体的な研究対象についてそれぞれの限界を打破する努力を通じて「相補性」を乗り越え、真の統一的な物質像を得るべくそれぞれの量子ビームを高度化することであろう。

B. 量子ビームの複合活用の拡大と深化：

一方、量子ビームの利用が日常的な分析ツールになっている分野においては、量子ビームの性能の高度化とともに、高効率の測定手法でビッグデータを収集し、物構研の4つのプローブと異なる手法との連携により、新しい展開を目指していくことも必要である。特に構造生物学や材料工学の分野においては、電子顕微鏡、光学顕微鏡、電子計算機によるシミュレーションなどの躍進が目覚ましい事実留意すべきである。また、今後大きなテーマとなるマイクロからマクロに至る階層間の統合のため、nmから μm にわたるマルチスケールでの構造科学をシームレスに推進し、「高次の機能性の発現因子の相関を見いだすアプローチ」へと量子ビームの活用を深化させていく必要がある。物構研はその方法論の確立に大いに貢献できると考える。このような多面的な量子ビーム利用を促進するには、人的交流も含めて各分野の連携をはかっていく必要がある。これを可能にするためには、量子ビーム研究は構成要素を数え上げるような科学的な手法や情報の統合に関する手法との交流を活発にすることが求められている。生命科学でいえば、ゲノム科学、構成的生物学、バイオインフォマティクスであり、材料でいえば、様々な実験データを統合した材料データベース、情報科学や数理科学との連携したマテリアルズインフォマティクスである。種々の手法を組み合わせた物理的解析法を開発できるような量子ビームの利用拠点を、付帯設備も含めたかたちで物構研に構築することが必要であろう。また生物学においては、生化学的手法（分析的手法）と遺伝学的手法（全体的手法）の両者を構造科学の立場から強力にサポートするような新たな量子ビーム利用の高

度化を考えていくことも必要である。

C. 量子ビーム利用の高効率化：

コンビナトリアルケミストリーに代表されるように、短時間で非常に多くの構造情報を収集し、機能性-構造パラメータ平面上（あるいは空間内）で機能性の高い物質を探索する方向性で、短時間の多くのデータ収集により探索効率が上がるとともに、新物質を見いだす確率も高くなる。先に述べた共同利用形態2による研究の方向性に対応する。

7. 物質・生命科学における量子ビーム施設の将来像

量子ビームはその有効性を将来さらに高めると予想されるが、その有効性を最大限発揮するに理想的な施設と運用と利用の形態はどういうものであるべきなのか。以下に、量子ビームそのものの将来性を左右する点で最も重要であると思われるこの課題に対する物構研の考えを述べる。

そのために、まず量子ビーム施設が今までに果たしてきた役割を振り返る。かつて多くの大学や企業の研究室は、X線構造解析装置を導入し、それに関わる研究者を抱え、装置の維持管理を自らが行いつつ構造解析を行ってきた。ところが放射光施設の登場により、この状況は一変した。かつての従来型X線構造解析装置の多くは、より詳細な情報が得られる放射光施設に高度化され集約されることとなった。日本ではこのような放射光施設は SPring-8 や PF のような大型施設だけでなく、大学や地方公共団体により建設された中小型施設も多く存在し、様々な用途で利用されている。一方で中性子やミュオンは、大学や企業の研究室レベルで物質・生命科学の本格的な研究用発生装置を持つことは困難で、JRR-3 など大型研究用原子炉や J-PARC/MLF など大型施設の利用が大部分を占めている。

これらの量子ビーム施設を継続的に発展させて行くためには、大型加速器や原子炉などの施設の継続的な開発や建設、運転や保守のための多額の税金投入が必要である。そのためには、量子ビームによる物質・生命研究の有用性を広く国民に知らせ理解を得るとともに、利用や建設、開発等の効率性を向上させる不断努力が必要である。また量子ビーム施設を利用する研究者コミュニティ自身が、法人や地域の枠を越えた「オールジャパン体制」により将来ビジョンを構築する必要がある。

それに対して現在の日本の量子ビーム施設の運営（予算申請や運転スケジュールの決定、人事、研究、利用者支援等）は、それぞれの施設を維持管理する法人ごとに独立した運営が行われているのが現状であり、理想的な形態からかけ離れていると言わざるを得ない。とりわけ将来計画の立案は、コミュニティの意向は考慮に入れるものの法人独自に行う側面が強く、「オールジャパン体制」

によって将来計画を進めることを困難にしている。このように量子ビーム施設を運用する組織が独立して存在していることは、日本全体の量子ビーム施設の効率的運用から見ても問題が大きい。これは放射光のように複数の組織がそれぞれ異なる施設を運営している場合に限った問題ではなく、複数の組織によって運営される MLF においても存在する。すなわち KEK と JAEA のみならず茨城県・茨城大や CROSS 東海の組織間には、予算や人事面での乗り越え難い壁が存在し、一体的運営の妨げになっている。

一方、施設利用者が必要に応じて異なる特性を持つ複数の量子ビーム施設を横断的に利用するのは、多面的な実験手法を必要とする物質・生命科学研究にとって自然な研究形態であるが、施設ごとの独立性（＝閉鎖性）は、利用者の利便性の確保と研究成果の最大化にとっての障害になっている。加えてこのような状況は、施設内の研究者、技術者の「タコ壺化」を引き起こし、施設間の人材交流や、基盤技術の継続的発展を支える人材育成を妨げている。国の財政状況を考えても、各量子ビーム施設の成り立ちや運営形態の違い等を踏まえた上で、施設間の連携あるいは統合に向かう議論をスタートさせるべき時期が来ていると物構研は考える。

これら諸問題を解決するための究極的な運営形態は、量子ビームに関わっている組織を再編、統合し、例えば「物質構造科学研究機構」といった新しい統一的組織を作ることであろう。このような組織は国の施策としてトップダウン的に作るしかないが、当面は現行の施設を基本とし、そのネットワーク形成という形でスタートすべきであろう。「物質構造科学研究機構」は、このネットワークによる組織間の結合を究極まで高めたものとして実現されるべきである。このネットワークの形成は、現状で複数の組織が共存する放射光施設でスタートするのが現実的だが、将来的にはそのネットワークに、中性子やミュオン、陽電子など異なる量子ビームの組織が参加することが望ましい。

ネットワーク形成によって各組織が連携して取り組む課題として、以下の3つがあげられる。

- A) 施設運営と利用の効率化
- B) 人材交流の活性化と人材育成
- C) 将来計画におけるオールジャパン体制の構築

A) の利用効率の向上については、ネットワーク全体の運転スケジュールの策定、ネットワークでつながる施設間の利用申請課題の一括審査や、成果などの一括管理などを行っていく。また今は個々の施設で独立に作成している成果報告集やアニュアルレポートなどを一括して作成し、それらの作成にかかる経

費とマンパワーの削減に努めるとともに、利用者やステークホルダーに各施設のアクティビティなどが一目でわかるようにする。そのためには、施設の研究者や技術者同士の連携でなく、各施設の広報部門の緊密な連携を高める必要がある。

B) の人材交流・人材育成については、個々の施設スタッフの流動性を高めるとともに広範な技術習得によるキャリアアップを進めるため、新しいビームライン建設に異なる施設のスタッフが参画できるシステムを、クロスアポイントメントなどを活用し作り上げる必要がある。

C) の将来計画に関しては、中・短期および長期の計画（ネットワークに放射光以外の量子ビームがつながった場合は、それらも統合した将来計画）を作り上げ、建設に関わる加速器関連のスタッフの流動性を、B) の場合と同様に高めることにより、建設段階におけるオールジャパン体制が継続的に組めるような長期の人材配置を考えることが必要である。この場合には、物質・生命科学関連の加速器だけでなく、素粒子・原子核研究の将来計画とのすみ分けを議論する必要がある。

以上の課題を遂行するためには、ネットワーク全体の流れを包括的に見渡し、必要に応じて適切な判断を行う、「ネットワーク運営会議」（あるいは「ネットワークヘッドクォーター」）を設置することが必要であろう。この会議体は、各施設の代表者だけでなく、関連コミュニティや学会、施設を利用する主要大学の執行部、国研、産業界などからの委員で構成されることが想定される。

なお各組織の健全な競争関係を維持していくために、各組織は、それぞれ自発的な外部資金獲得と、研究所ごとに特色ある研究と教育を進める。また、量子ビームの活用により、物質・生命科学分野で得られた科学・技術的成果や知恵を、大学・産業界など関連コミュニティ、行政官庁、そして広く社会一般に対して、それぞれ分かり易く伝えていくことが重要である。このような広報は、各組織だけでなくネットワーク全体からも行なう。また、情報の送り先に対応した戦略的な広報を行うことも重要である。

物構研は放射光を核として、このネットワークの主要な一員として参加し、特に異なる4つの研究プローブを協奏的に利用する施設として、またそれ以外の研究プローブも引きつけるハブ的な存在を目指していく。

8. まとめ

物構研が発足してから18年の間、社会や大学は大きく変わった。そして今、大学共同機関としての物構研のあるべき姿が、鋭く問われている。この問題意識から始まった一連の物構研特別シンポジウムにおいて、物構研の理念・設置

目的、その現状と課題が整理され、課題解決への提言、量子ビームと量子ビーム施設の将来像について議論された。この「物構研からの提言」は、これらの議論をまとめ、物構研のあるべき姿を提言するものである。

物構研の現状と課題

物構研の現状が整理され、下記のような課題が浮き彫りとなった。

【大学共同利用体制に関する課題】

量子ビーム利用の進化の反面、量子ビーム発生技術開発・ビームライン技術開発・実験装置/手法開発を行う外部の研究者は相対的に少なくなり、これらの開発研究は施設側が主に担当することになりつつある。また、J-PARC/MLFでは、「大学共同利用」と「共用促進利用」と言う2つの異なる制度による運営と利用の並立による問題点も生じつつある。

【設置目的・役割を果たす上での課題】

限られたマンパワーと減少傾向にある運転経費により施設運営をせざるを得ない状況は、物構研と KEK の存在自体を揺るがし兼ねない問題となっている。また、より本質的な課題として、KEK 中における物構研の立ち位置がある。外部のコミュニティから見た、KEK における物構研の存在感は必ずしも高くない。

【将来計画に関する課題】

将来の物構研の放射光施設はどのようなものであるべきか早急に方向性を定めなければならない。低速陽電子実験施設もまた、今後、この施設をどのように運営していくべきか至急に決定する必要がある。MLF中性子施設では、世界に冠たるハードウェアを最大限に生かすソフトウェアを発展的に充実させることが課題である。一方ミュオンにおいては、当初からの計画に従って装置建設を進めることが、最優先の課題である。

課題解決への提言

上記の課題に対して、物構研は以下のような提言を行う

【大学共同利用体制に関する提言】

物構研は大学等と密接に連携を持ちながらプロジェクト研究を推進する利用形態と、量子ビームを分析ツールのひとつとして利用する多数の施設利用者を対象とした利用形態を区別して、その両立を目指す。

【将来計画の明確化】

放射光の短・中期計画においては、現在の PF のさらなる性能向上および運用の最適化・効率化を進めると共に、新しい高輝度中型光源計画を推進する。長期計画においては、コンパクト ERL で培われている技術を活かし、先端的放射光源の実現に向けた開発研究を進める。低速陽電子実験施設については、ビー

ムの大強度化や、加速器による大強度偏極ビーム生成を目指し、それらを利用した表面構造・状態の研究を進展させる。

中性子に関しては、J-PARC という世界トップレベルの施設で成果を創出しながら、物構研中性子が大学や外部研究機関の連携の要となって、中性子の新たな可能性を追求する。ミュオンについては、短期的には、当初からの計画に従ってビームラインを本格稼働させる。長期的には、透過型ミュオン顕微鏡計画を実現する。

量子ビームの将来像

物構研は量子ビームの将来像としては、次の2つの方向性を共に満たす必要があると考える。

A. 量子ビームの先鋭化による融合：それぞれの量子ビームとしての先端性を追求することによって、各量子ビームの限界を超えてそれぞれの量子ビームが“カバーする領域”が重なり合うような方向で新しいサイエンスの創成を目指す。

B. 量子ビームの複合活用の拡大と深化：物構研がもつ4つの量子ビームとそれ以外の手法との積極的な連携により、量子ビーム利用法の質的転換とその適用範囲の拡大を目指す。

C. 量子ビーム利用の高効率化：コンビナトリアルケミストリーに代表されるように、短時間で非常に多くの構造情報を収集し、機能性-構造パラメータ平面上（あるいは空間内）で機能性の高い物質探索をする。

量子ビーム施設の将来像

量子ビームの有効性を最大限発揮するための理想的な施設の運用と利用の形態として、「物質構造科学研究機構」といった新しい統一的組織を考えることができる。このような組織は国の施策としてトップダウン的に作られるしかないが、当面は現行の施設を基本とし、そのネットワーク形成という形でスタートすべきであろう。「物質構造科学研究機構」は、このネットワークによる組織間の結合を究極まで高めたものとして実現されるべきである。ネットワーク形成によって各組織が連携して取り組む課題として、以下の3つがあげられる：A) 施設運営と利用の効率化 B) 人材交流の活性化と人材育成 C) 将来計画におけるオールジャパン体制の構築。

物構研は、このネットワークの主要な一員として参加し、特に異なる4つの研究プローブを協奏的に利用する施設として、またそれ以外の研究プローブも引きつけるハブ的な存在を目指していく。国内のみならず、海外からも認知されるグローバルハブを目指すことは言を俟たない。また物構研は、量子ビーム

の活用により、物質・生命科学で得られた科学・技術的成果や智慧を基に、様々な方面への戦略的広報を積極的に行う。