我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第5回

量子ビームが切り拓く未来(Ⅰ)

量子ビーム応用研究の動向

日本原子力研究開発機構 長島 章, 藤井保彦

これまで「放射線利用」として開拓されてきた広範な応用分野で、近年の技術の結集により、中性子、イオンビーム、レーザー、放射光などの品質の高い放射線の利用技術開発がなされ、とともに応用分野も多様化し、学術の進歩と産業の振興に大きく寄与する基盤となり、「量子ビームテクノロジー」という新たな展開が始まっている。技術革新のキーテクノロジーとして世界的に注目されている量子ビームの応用研究について4回に分けて紹介する。1回目は、量子ビーム研究開発の応用分野と世界の動向について紹介する。

I. はじめに

1895年のレントゲンによるエックス線の発見はまさにイノベーションであった。それまで知られていなかった放射線の持つ特異な能力によって、急速に人体内部の骨や組織の異常の有無を見る医療分野への応用が切り拓かれた。その後も電子線やアルファ線など様々な放射線の発見が続き、それらの利用が原子核構造の発見など基礎科学の重要な展開を導き、基礎科学の発展がさらに新たな放射線の発見や性質・機能の理解につながるなど、放射線と基礎科学は相互に進展し貢献し合ってきた。放射線は学術の分野に限らず、ジャガイモの発芽抑制、医療器具の滅菌、自動車のタイヤの材質強化、有害物質の処理技術、劣化のない排気ガス用触媒開発、非破壊・非接触の材料検査技術の産業への応用、生物の遺伝子突然変異、脱石油を指向する生分解性植物由来プラスチックの開発など食品、医療・診断、工業への応用研究、技術開発などにより、ライフサイエンス、ナノテク・材料、環境・エネルギーの広範な分野でも活躍している。

放射線利用の技術はこれらの分野での要請に基づき、高輝度化、マイクロビーム化など高品質化と多様化が進み、近年の著しい科学技術の発展によって「高度に制御された高品位の中性子、イオンビーム、レーザー、放射光など」の「量子ビーム」が利用可能となった。そして粒

子性と波動性を併せ持つ「量子ビーム」の「観る」、「創る」機能により、これまでできなかった原子レベルでのタンパク質の観察や物質の制御・加工が可能になってきた(第1図)。

『量子ビームテクノロジー』は我が国が提唱し、「原子力政策大綱¹⁾(原子力委員会策定、平成17年10月11日)」においても新たな技術領域として、最先端の科学技術・学術分野から産業・医療利用に至る広範な分野においてイノベーションをもたらすものと謳われ、技術革新のキーテクノロジーとして世界的に最も注目され定着しつつある²⁾。

物質の機能発現機構解明には、原子の位置や運動状態の情報を知ることが必要である。中性子は物質透過性が高く、原子核や磁性を担う磁気モーメントを通じて、放射光は原子核の周りの電子を通じて、「観測子」の役割を果たす。一方、イオンビームやレーザーは物質と強く相互作用するので、原子分子の反応過程等の基礎研究から、放射線医学、放射線育種、食品照射の応用研究まで、物質の改質・加工を行う「加工子」として威力を発揮する。本稿ではこれらの特長を基盤とした様々な研究成果の一端を紹介する。

詳細については、次回以降の解説を参照いただきたい。

II. 量子ビームテクノロジーへの期待

量子ビームの発生は、最先端の大型研究施設を要し、様々な公的研究機関などが利用に供している。

Quantum Beams Open up the Future(Ⅰ): Akira NAGASHIMA, Yasuhiko FUJII.

(2008年 9月24日 受理)

第1図 粒子の性質と波の性質を合わせ持つ量子ビーム

第2図 原子力機構の量子ビーム施設群と貢献分野

エネルギー利用としての原子力と放射線利用としての原子力の両面から研究開発を担っている日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」)は、研究炉からの中性子ビーム、加速器からのイオンビーム、RIからのガンマ線、高強度極短パルスレーザーや大型放射光施設(SPring-8)のエクス線など基幹的施設を研究開発・産業利用等に供してきた。2008年度内には、原子力機構が高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で建設を進めてきたJ-PARC(大強度陽子加速器施設)も稼動を開

始し、これまでにない高輝度のパルス中性子の供用が始まる予定である(第2図)。

そのほかにも、理化学研究所が運営管理しているRIビームファクトリー(RIBF)、KEKが運営管理しているフォトンファクトリー(PF)などがあり、我が国の代表的大型研究施設として、その特長を生かして種々の研究開発に利用されている。

これらは我が国の共通科学技術インフラとして、それぞれの研究機関の制度や国の利用支援制度のもとで外部

利用が促進されている。原子力機構では、外部利用制度の施設共用、国の支援を受けて実施している先端施設利用イノベーション事業(高崎量子応用研究所)、ナノテクノロジー・ネットワーク(関西光科学研究所)などの制度の下で国内外の研究者や技術者への施設利用を提供・支援しており、科学技術基本計画³⁾で重要とされているライフサイエンス、ナノテク・材料、エネルギー・環境等の分野のキーとなる研究手段を提供している。さらに、「水素貯蔵材料先端基盤研究事業」や「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発/物質輸送現象可視化技術」(新エネルギー・産業技術総合開発機構:NEDO)、「元素戦略プロジェクト」(文部科学省)など、原子力機構を中核機関とした全国的規模でのプロジェクトが進んでおり、国が必要としている基礎研究や産業利用において量子ビームテクノロジーが革新的な技術を切り拓くことに大きな期待が持たれている。

Ⅲ. 世界の研究開発の動向

「量子ビーム」は国内での科学技術の展開に重要な役割を果たすツールとして期待されているが、国際的にも各国で大きな力が注がれている。

米国では、ローレンスバークレー、ロスアラモス、オークリッジ、ブルックヘブン、アルゴンヌなどエネルギー省(DOE)所轄の国立研究所があるが、これらの研究所には大型の中性子や放射光の施設が設置されており、それらに併設して戦略的なナノテク研究センターの整備が進んでいる。さらに、オークリッジ国立研究所では高中性子束原子炉(HFIR)に加えてパルス中性子の大型利用施設(SNS)が稼動している。また、商務省の管轄である米国標準技術研究所(NIST)においても研究用原子炉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業への先端利用研究開発が進んでいる。

欧州では、フランスのグルノーブルに近接して、大型の放射光施設(ESRF)と中性子の研究利用施設であるラウエ・ランジェバン研究所(ILL)があり、ナノテク研究施設(MINATEC)や材料工学研究施設(FaME 38)によるナノ・材料研究や欧州分子生物學研究所(EMBL)によるタンパク質の総合的な研究開発が行われている。

特に注目すべきは、中性子利用施設と大型放射光の運営の一体化が進んでいることである。米国はDOEの配下で一元化しており、英国のラザフォードアップルトン研究所の核破砕中性子源として長らく世界最高強度を誇ったISIS施設とDIAMOND放射光施設、スイスのポールシェラー研究所の核破砕中性子源と放射光施設など一体の運営がなされている。最近、ドイツではもともと独立して運営されていたベルリン放射光施設(BESSY)と中性子利用施設を持つハーン・マイトナー研究所(HMI)が2009年からヘルムホルツ協会傘下に統

合され、シナジー効果が期待されており、相補的な利用の重要性がうかがえる。

近年はアジアでも大きな動きがあり、中国では上海で第3世代の放射光施設(SSRF)の建設が進み2009年に稼動の予定である。この設置主体である中国科学院(CAS)は核破砕中性子施設(CSNS)の建設にも着手したが、原子力機構とも協力関係にあり、「中国科学院との量子ビーム応用研究分野における研究協力取り決め」の下で、相互の研究交流が展開されている。一方、中国原子能研究所(CIAE)は60 MWの研究用原子炉(CARR)を建設中である。また、韓国では原子力機構の関西光科学研究所のようなレーザー開発研究を展開する光州科学技術院光子科学研究所(APRI)が設置されたことや、原子力機構の高崎量子応用研究所に類似の高度放射線技術院(ARTI)が韓国原子力研究所(KAERI)のもとに設立されるなど、量子ビームの開発と利用に国として大きな力を注いで進めており、量子ビーム利用の重要性が国際的に定着しつつある。

Ⅳ. 量子ビーム研究開発の応用分野

例をあげればきりが無いが、特に、超伝導と磁性や格子振動との関係など、超伝導発現の機構や新しい高温超伝導材料の発掘など超伝導の謎の解明に向けた展開や、タンパク質など生体の複雑な構造・機能の理解、創薬開発、極短時間でのストロボ的観察による高速の物質変化や生体プロセスの把握、高密度磁気メモリ開発への応用など新奇ナノテクノロジー材料の発掘や制御法の開発などは枚挙にいとまがない。ここでは、生命科学・医療・バイオ技術、物質科学・材料、環境・エネルギーについて主な現状を紹介する。

1. 生命科学・医療・バイオ技術

がん化や老化のメカニズムの解明やエイズなどの難病の克服は人類の夢である。イオンビームの精密な照射技術などを基に、生命の設計図であるDNAの損傷と修復機能との関係を明らかにしつつあり、放射線に対して耐性のある細菌の原因は強力なDNA修復機能であることなどを明らかにした。ガンマ線やエックス線に対して放射線抵抗性を示すがん遺伝子を持つ細胞が重イオンの照射では抵抗性を示さない特異な現象、直接放射線にさらされていない細胞が影響を受けるバースタンダー(傍観者)効果などの現象も解明されつつある。

生体中のタンパク質や酵素の機能発現の機構やさまざまな病気への薬剤の機能などには水素原子や水和水が深く係わっており、中性子が水素に高感度のプローブとなることから、中性子による構造解析が創薬設計の有効な手段となり先端を切り拓いている。最近の成果としては、中性子回折により、有用酵素についての水素位置を含

んだ構造や HIV プロテアーゼ(エイズウィルスの増殖を助けるタンパク質)の水素位置を含む全原子構造の解明に成功している。水素位置の認識においては、中性子とエックス線を相補的に利用し、それぞれの信号の差分情報から、水和水位置の正確な同定を可能とする手法の開発もなされ(第3図)、今後、タンパク質など生体物質の機能発現の解明が進み、創薬設計などに寄与することを目指している。

粒子線がん治療は切らずに治せる治療法として広まりつつあるが、設置に高額の予算が必要であることなどのため、現在、治療施設が国内で数箇所程度と限られている。この治療法の普及を目指し、小型のレーザー駆動粒子線加速器の実現を目指す研究開発も進められている。

2. 物質科学・材料

物質・材料研究の大きなキーテクノロジーは高温超伝導である。送電での損失低減や超伝導利用による蓄電技術など、社会生活への大きなインパクトを与えるものとなるが、超伝導の発現機構はいまだに謎のままとまっている。中性子散乱により銅酸化物高温超伝導体の電荷・磁気揺らぎの観測やウラン化合物で磁気を媒介とした新しい超伝導メカニズムを見い出したり、放射光による非弾性散乱測定により高温超伝導物質の格子振動が超伝導発現に関与していることを見出すなど多くの成果を上げている。今後、多くの量子ビームの特長を活用し、さらに深く現象を理解することを目指している。

もう一つは将来の水素社会を展望し、キーテクノロジーとなる燃料電池である。このために開発が求められている高性能電解質膜や革新的水素貯蔵材料の開発を狙った基礎研究からの技術開発などが進められている。物質透過性が高く、水素検知感度の高い中性子はこのためにも最適なツールであり、燃料電池中での水分布や水素が酸素と結合して生成された水の流動の様子や、自動車のエンジン内での燃料の燃焼の様子など、中性子ラジオグラフィでの観察は非破壊・非接触でこれまでにない観察手法を提供する。

第3図 中性子とX線の差分解析による水和水の詳細位置

電子の情報をもたらすX線と水素原子核の情報主体の中性子の散乱強度の差(N-X)から水和水の位置構造を決定

3. 環境・エネルギー

環境を守るための貢献については、様々な側面が求められるようになってきている。生態系の保全に影響のある有害物質や直接に生命への脅威となる汚染物質への対策はもとより、地球上の環境維持への対策が必須となっている。

火力発電所の排煙に含まれるNO_xやSO_xを電子線照射により分解してこれを肥料に変える技術や、ダイオキシンを電子線で分解除去する技術、自動車の排気ガス用触媒で触媒機能の劣化しない機構を解明し、触媒作用に必須となっている貴金属の消費を低減化することなどへの貢献、貴金属から脱却した新触媒の開発など、様々な領域に量子ビームテクノロジーで貢献している。また、食物の安全性も人の生存に必須の事項であるが、カドミウムなど有害金属などがどのようにどれくらい蓄積されるかなどの把握はなされていなかった。これまでポジトロン(陽電子)イメージング技術の開発により、ポジトロン放出核種を植物に吸わせ植物中の動態を観察する技術を開発してきたが、最近、¹⁰⁷Cdの作製技術を開発し、イネ中のカドミウムの移動プロセスを定量的に明らかにすることに成功し、安全な食糧の生産技術などにも貢献している(第4図)。

エネルギー分野については、原子力は発電の段階で炭酸ガスを出さないという意味で地球温暖化防止に役立つエネルギー源であるが、安全性や廃棄物の問題に真摯に取り組む必要がある。そのために特定の放射性核種の分離・抽出過程に有効な抽剤開発にも量子ビームが利用され始めている。

構造体の溶接配管や自動車エンジンの健全性評価に重要な内部残留応力について、中性子と放射光を相補的に使って、構造材を評価する方法の開発や、表面に発生する加工時の残留応力を極単パルスレーザーで内部の構造に影響を与えず除去する方法の開発、また材料の元素組成を原子単位で分析する技術の高度化開発など、原子炉の健全性に関する評価手法の開発など基礎研究的側面で重要な寄与をしている。

第4図 ポジトロンで見たイネ中のカドミウム移動

V. 今後の研究開発の展望

冒頭にも述べたが、放射線と基礎科学は相互に貢献し合って進展してきた。この関係は本質的なもので基本的には変わるものではない。現在の最先端の量子ビームはいろいろな謎の解明に大きな力となるであろうが、またその先の新しい世界での謎を切り拓く力が求められることは必須である。このためには量子ビームのさらなる高度化や多様性の開拓をたゆみなく進め、世界を引き続き主導しつづけることが重要である。

— 参 考 資 料 —

- 1) 原子力政策大綱 <http://www.8.cao.go.jp/cstp/>
- 2) 世界物理年フォーラム「量子ビーム・テクノロジー革命」実行委員会編, 量子ビームテクノロジー革命, 日経印刷, (2006).

3) 科学技術基本計画

http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/kihon/06032816/001.htm

著 者 紹 介

長 島 章(ながしま・あきら)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) プラズマ計測/量子ビーム応用

藤井保彦(ふじい・やすひこ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 中性子・放射光による構造物性研究

From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための
テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい

<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/atomos/mokuji.html>

— 最近の編集委員会の話題より — (10月3日 第4回編集幹事会)

【学会誌関係】

- ・50周年記念WGから、一般応募記事、部会・連絡会記念記事の状況について報告があった。
- ・50周年記念号(2009年4月号)に掲載予定の挨拶・祝辞について依頼先を決定した。
- ・「秋の大会」講演から記事候補を検討し、依頼先を決定した。
- ・Screening Reviewの進め方について検討した。

- ・ATOMOΣの記事構成について議論した。いわゆる業界誌から「原子力界の代表誌」に向けて、会報など機関誌的部分を別綴に切り離す案などが提案され、具体的な進め方については、今後検討することとした。
- ・会員外購読の依頼を各大学図書館に随時発送開始した。今後も継続して実施する。

【論文誌関係】

- ・論文審査報告書の一部改定(投稿種別変更の誘導は行わない)について検討した。
- ・新審査システムの進捗状況について報告があった。編集委員によるテスト運用を開始する。
- ・審査結果に対する意見書について取り扱いを検討した。
- ・編集委員会倫理規定について検討し、早急に制定することとした。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp