

3.3 原子力への先導的基盤研究

(1) 原子力の研究開発と加速器

原子核変換の過程で生み出される原子エネルギーの大部分は、様々な放射線として放出される。核分裂によって放出されるエネルギーは、運動エネルギーを有する核分裂片、中性子、 γ 線などの放射線として放出され、物質の中で吸収されて熱エネルギーに変わる。

従って原子力利用の研究開発では、放射線と物質の相互作用を理解することがもっとも基本的な知見である。そのエネルギー、方向性等を制御して、研究目的に合った様々な放射線を発生させることができる加速器は、放射線と物質の相互作用の基礎的な研究の手段として、原子力研究開発の当初から極めて重要な役割を

上坪委員

果たしてきている。~~すなわ、わが国が1955年に原子力基本法を定め、~~
~~果たしてきている。~~

事務局

我が国が1955年に原子力基本法を定めた翌年に設立された日本原子力研究所は、1957年に2 MVバンデグラフによる中性子の核反応の測定などを開始している。
以来、加速器が原子力研究開発の最も重要な手段として利用されてきたが、この成果をことを踏まえ、2000年に策定された現「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力長計）」でも、歴史的に加速器の開発及びそれを用いた研究は、原子力開発に新しい展開をもたらしてきたと加速器を位置づけている。

今日、我が国の軽水炉発電は既に広く定着しているものの、燃料サイクル全般を確立するまでには今後、幾多の困難な課題を克服することが必要である。即ち、原子力エネルギー利用が将来的なエネルギー需要に的確に応えてゆくためには、原子炉から燃料サイクル全般にわたる経済性、安全性、信頼性の更なる向上に加えて、廃棄物管理を適切に行うための革新的な技術開発が求められており、加速器はこうした課題を解決するための重要な手段の一つとして大きな役割を果たすものと期待されている。

(2) 我が国で原子力研究開発に用いられる加速器

表 3.3-1 は、我が国で原子力研究開発等に使われてきた加速器の一覧である。

上坪委員

原子力研究費で建設された加速器及び大学や公的研究機関の原子力関係学科で原子力関連の研究開発に使われてきた加速器にこの範囲で整理したものである。如何に多くの加速器が原子力研究開発において大きな役割を担ってきたことを示

している。

原研では1957年の2 MV バンドグラフ以来、これまでに数多くの加速器を設置し、広範な原子力の研究開発に利用してきている。当初は、原子力エネルギーに関連した中性子核反応等の核物理、放射線測定器の開発、原子炉材料等の研究開発が中心であったが、放射線化学、食品照射といった分野での電子線加速器の利用を契機に原子力利用の一分野としての放射線利用が進展し、TIARA の建設へとつながってきている。

上坪委員

1966年にわが国最初の多目的利用加速器である160cmサイクロトロンが理研に完成し、約三分の一のビームタイムを用いて、放射線化学、放射線生物学や金属材料のイオン照射効果の研究が行われた。また、1970年代後半から電総研(当時)で、小型加速器を用いた低速陽電子ビームやレーザーコンプトン散乱γ線の技術開発が行われ、材料評価や光核反応断面積等の計測ツールとして利用されている。

さらに、1960年代に次々と設置された大学の原子力関係学科にも、例外なく複数の加速器が設置され、原子力の教育と研究に広く利用されて来ている。その中で、パルス中性子源としてのリニアックと原子炉を組み合わせた東大の炉物理の研究、単色エネルギー中性子場としての東北大のダイナミトロン、TOFによる中性子の断面積測定等の研究に特色を出した北大や京大原子炉実験所の電子リニアック、核融合中性子物理等の研究のために設置された阪大のOKTAVIAN、多目的利用のための京大のタンデトロンなどは、国際的にも特筆される先導的な研究成果を生み出してきている。

以下は、原子力の各分野の研究開発における加速器利用の実績と将来展望である。

(3) 原子力分野における核物理研究

上坪委員

新たな原子力開発や原子力利用の高度化の基礎となるのが、~~放射線と物質の相互作用を研究する~~原子核物理であり、原子核物理の研究の最も重要な手段が加速器である。核分裂反応をはじめ、中性子と物質(原子核)との核反応、核反応によって生じる中性子や核分裂生成物の収率、励起核から放出されるガンマ線やベータ線の特徴を表す核構造等の研究開発が、様々な加速器を利用して行われている。原子力分野における核物理研究のハイライト成果は核データに関する研究であり、として、世界的な組織でデータベース化されている。わが国では、1960年

上坪委員

代より原研が中心となり、大学、研究機関、民間と一体となって中性子断面積等の核データの測定と評価活動が続けられてお~~り~~いる。その成果はJENDL核データファイルとして集約され、国内外において原子力研究開発及び利用のための基礎データとして広く利用されている。

今後、原子力分野でもっとも重要となる原子核物理は超ウラン元素を対象とした研究である。超ウラン元素は核分裂物質としてばかりでなく、長寿命の放射性廃棄物にもなる核種であり、原子力エネルギー利用を円滑に推進する上で、適切に利用し、処理しなければならない核種である。理研のRI-ビームファクトリーや原研のタンデム・ブースターに付置される不安定核加速装置、TIARAの数10MeVの単色中性子等を使った中・高エネルギー中性子物理や重イオン核物理の研究は、核変換システム等の次世代原子力技術を支える基礎研究として重要な役割を担うことになる。

(4) 放射線測定器の開発と校正

上坪委員

原子力の利用は放射線の利用と表裏一体であり、様々な用途に応じた信頼性のある、精度の高い放射線測定器や線量計の重要性は改めて云うまでもない。原子炉を始めとする原子力施設で必要な放射線測定器、あるいは個人や環境の線量計等の開発や校正には、加速器から発生する制御された放射線の利用が必須であり、これまでも、こうした目的のために多くの加速器が利用されてきた。1982年にKEKに校正場としてコッククロフト型電子加速器が設置され、また、2002年には原研に新たに設置された4MV バンドグラフは、我が国では初めての中性子測定器の開発と校正のための専用加速器である。

(5) 生体影響研究

上坪委員

X線の発見以来、放射線照射は医学には欠かせない手法となるとともに、その人体への影響は放射線医学の重要な研究課題であった。その後、電磁放射線の生物効果の研究は、放射性同位元素と電子リニアックからのガンマ線照射によるジャガイモなどの発芽抑制、不妊処理による害虫駆除、殺菌などの技術へ発展して行き、一部は広く用いられている。

放射線による人体影響の特徴づけるLET 効果や線量率効果も精力的に研究されてきた。なかでも高速イオンは局所的に大きな放射線照射効果を与えるものの、

上坪委員

他の部位には影響が少ないという特徴があり、インビボでの実験から重イオンががん治療に効果があることが明らかになった。こうした効果を調べるためには、放射線の種類、強度、エネルギーを制御しつつ個体レベル、細胞レベルでの研究が必要で、各種加速器が利用されてきた。

低線量放射線による人体影響を明らかにするという課題はことは、原子力利用を推進するために最も必要とされている研究課題の一つである。近年、低線量放射線の人体影響についての研究は、疫学的な研究から細胞レベル、DNAレベルへとシフトしており、こうした研究を行うためには、様々な放射線のエネルギーを制御して発生させることのできる高性能加速器と高度な加速器利用技術、放射線利用技術とが必要になっている。

(6) 材料開発

原子炉材料等の照射損傷の研究には、従来からイオン加速器や電子線加速器が広く利用されてきた。中性子による損傷研究の場合は材料試験炉等による重照射研究が中心であるが、こうした研究と合わせて損傷の素過程や機構解明のための手段としてイオン加速器が利用されている。

初期の段階では単一加速器による照射試験が行なわれていたが、やがて損傷を与える照射とイオンビームを用いた損傷解析を同時に行なう2重照射がおこな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、こうした用途を目的にした世界的にもユニークな加速器施設である。

各種ケーブル等の絶縁材などの寿命を予測するために、電子線加速器を使った有機材料等に対する照射線損傷試験が行なわれた。その後、高分子架橋など放射化学的研究も行なわれ、現在では高性能電線被覆材や高性能タイヤの生産技術として実用化されている。

強い中性子場や高温、高圧水等の極限環境に晒される原子炉構造材料の照射応力腐食割れの(IASCC)は、原子力研究開発の大きな課題である。また、原子炉制御用ケーブル等の照射劣化の評価は、原子力施設の安全性や信頼性を担保する上で極めて重要であり、原子炉の長期利用が想定されることを踏まえると、照射劣化に伴う材料特性の研究や新たな材料の開発が必要である。この分野の最近の動向として注目されるのは、これまでの中性子重照射と照射後試験といった研究と

合わせて、よりミクロな材料の変化や損傷を研究するといった手法が盛んになっており、イオン注入、放射光、ポジトロンなど加速器からの制御された放射線が積極的に使われるようになってきていることである。

(7) 加速器を利用した新たな原子力システム開発

上坪委員

従来からの加速器利用に加えて、近年、~~原子力利用にブレークスルーを生み出すことが期待されている~~先導的な加速器利用として、加速器と原子炉等を組み合わせたハイブリッド技術が~~ある~~研究されている。代表的なハイブリッド技術は、超ウラン元素 (TRU) などの長寿命核種の核変換を行うために、未臨界炉システムと大電流陽子加速器の組み合わせである。た加速器駆動システム (ADS) である。大強度陽子加速器 (J-PARC) プロジェクトでも計画されているが、高レベル廃棄物処理技術として、国際的にも原子炉と加速器を組み合わせたハイブリッドシステムの研究開発が欧州を中心に盛んに行われている。て、原子力利用にブレークスルーを生み出すことが期待されている。

核変換システム技術の開発には、高エネルギー陽子、中性子による核破砕反応及び反応生成物に関する物理データ測定などの基礎研究をはじめ、中性子工学、耐放射線材料の開発など、付随的に加速器を利用した新たな研究が必要となり、このための加速器利用が今後、益々重要となるものと考えられる。

上坪委員

トカマク核融合の加熱装置である中性粒子入射装置、~~レーザー核融合のためのレーザー等~~も一種のハイブリッド装置と見なすことができるが、原子力技術としての加速器は、大出力、大電流といったニーズに対応できることが最大の課題である。

(8) 原子力技術としての加速器開発

前節で述べたように、加速器技術が原子力利用のブレークスルーを生み出すことが期待されており、このための加速器技術の開発が行われている。

上坪委員

例えば、核変換のためには10mA 級の大電流連続高周波 ~~CW~~ 陽子加速器が必要とされ、超伝導加速空洞や大電流イオン源の開発、大出力高周波源の開発が必然となる。また、トカマク核融合炉の加熱装置としての大電流重陽子加速器技術の応用、~~自由電子レーザーのためのエネルギー回収型~~超伝導電子リニアックの開発と~~エネルギー回収型への高度化~~など加速器の開発も着実に進んでいる。

こうした先端的な加速器技術は、原子力への利用という範囲にとどまらず、他の広範な加速器技術に対しても先導的な役割も担うものである。