

(3) 原子力の先導的基盤研究

原子核変換の過程で生み出される原子力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 線等の放射線として放出され、物質の中で吸収され熱エネルギーに変わる。

したがって、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り、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果たしてきている。すなわち、我が国が1955年に原子力基本法を定め、1956年に日本原子力研究所を設立した翌年には、2MV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ことを踏まえ、現原子力長計でも、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对应してゆくためには、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。

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。原研や大学の原子力関係学科などで専ら原子力の研究開発に使われてきた加速器に範囲で整理したものであるが、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暗示している。

原研では1957年の2MVバンデグラフ以来、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。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。

a) 核物理研究

新たな原子力利用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の研究であり、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性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は核データに関する研究であり、1960 年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、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。

b) 放射線測定器の開発と校正

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言うまでもない。原子炉を始めとする原子力施設に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。原研が、平成14年に新たに設置した4MV バンドグラフは、我が国では始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り、我が国の中性子標準場としての役割が期待されている。

c) 生体影響研究

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原子力利用を推進するために最も希求されている研究課題の一つである。低線量放射線の影響を研究するためには、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加速器が大きな役割を果たし始めている。このことは、放射線による人体影響の特徴としてLET 効果、線量率効果などがあり、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、将来はDNA レベルにおける低線量放射線の影響を研究しなければならないということに起因している。

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の高度な加速器利用技術、放射線利用技術へのニーズと重要性が増しつつあることは注目される。

d) 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。

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スイオン照射施設は、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。この他、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は、新たな材料の開発と合わせて行われている。

強い中性子場、高温、高圧水等の極限環境に晒される原子炉構造材料の IASCC（照射応力腐食割れ）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。

f) 加速器を利用した新たな原子力システム開発

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。代表的なハイブリッド技術は、TRU 等の長寿命の核種変換を行うための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。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。

核変換システム技術の開発には、高エネルギー陽子、中性子による核破碎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。

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。

f) 原子力技術としての加速器開発

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。

例えば、核変換のためには10mA 級の大電流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超伝導電子加速器の開発とエネルギー回収型への高度化等に代表される単目的型の加速器の開発も着実に進んでいる。また、加速器利用技術の一つとして、ミュオン触媒核融合のような研究も注目すべき進展を見せている。

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。

表3(3)-1 原子力研究開発、教育用の加速器施設

加速器(所属)	エネルギー(MeV)	用途
<u>日本原子力研究所</u>		
電子リニアック(東海)	300	核反応、核構造
超伝導リニアック(東海)	38	FEL
コッククロフト電子線加速器(高崎)	2	高分子材料改質、排ガス処理、耐放射線性材料開発
ダイナミトロンの電子線加速器(高崎)	3	複合材料開発、機能性材料開発、食品照射データ等
2MV バンデグラーフ(東海)	2	核反応、核構造、物性物理研究、放射線測定器開発
5.5MV バンデグラーフ(東海)	5.5	核反応、核構造、放射線測定器開発
4 MV バンデグラーフ(東海)	4	中性子測定器開発・校正
超伝導タンデム・ブースター(東海)	C: 250, Au: 910	重イオン原子核、超アクチノイド核化学、物質科学
重陽子加速器FNS(東海)	D: 0.4	核融合中性子工学(d-T中性子源)
負イオン加速静電加速器(那珂)	H: 0.4	1 A級NBI 開発
TIARA(高崎)		
90MVサイクロトロン	H: 90, Xe: 450	耐宇宙線材料、核融合材料、バイオ技術、
3MVタンデム	H: 6, Ni: 15	機能材料開発等
3MV シングルエンド	H: 3	多重照射等の複合ビーム利用
400KV シングルエンド	Ar: 0.4	多重照射等の複合ビーム利用
J-PARC(東海)		
400MeVリニアック、3GeVシンクロトロン		中性子(生命科学、物質科学、産業利用)、核
SPring-8(播磨)	8GeV	放射光利用研究
注: 赤は廃止した加速器 青は汎用型大型加速器		
<u>大学(原子力関係)</u>		
電子リニアック(北大)	45	中性子核物理、放射線化学他
バンデグラーフ(北大)	2.5	物性物理他
ダイナミトロン(東北大)	4.5	中性子物理・工学、中性子標準場、PIXE 他
サイクロトロン(東北大)	K=130	医療(PET)、RI 研究、中性子工学他
電子リニアック(東大)	35	中性子核物理、放射線化学他
電子リニアック(東大)	18	中性子核物理、放射線化学他
タンデムペレトロン(東大)	5	AMS、PIXE 他
タンデトロン(東大)	1.7	PIXE、物性(イオン注入)
タンデトロン(東大)	1	照射損傷(重照射)、物性(イオン注入) 他
バンデグラーフ(名大)	3.75	中性子物理(放射化断面積)、放射線測定器開発他
バンデグラーフ(名大)	2.5	物性物理他
電子リニアック(京大)	46	中性子核物理、材料照射他
タンデトロン(京大)	1.7	中性子工学他
タンデトロン(京大)	1	照射損傷、イオン注入他
電子リニアック(京大)	45	FEL
CW:OKTAVIAN(阪大)	0.3	核融合中性子工学他
タンデムバンデグラーフ(九大)	10	中性子核物理他
CW	0.5	材料照射、放射線化学他
<u>その他(研究機関)</u>		
タンデトロン(放医研)	H: 3.4	元素分析、放射線科学他
サイクロトロン(物材機構)	H: 17	原子力材料他
タンデムバンデグラーフ(若狭湾エネ研)	5	材料、PIXE、AMS 他