

3. 我が国における加速器利用研究

3.1 未知への挑戦

(知的フロンティアの拡大)

19 世紀から 20 世紀初頭にかけての多くの実験結果を基に、原子は原子核の周りを電子が取り巻いている構造であることが明らかになった。その後量子力学が誕生して、より基本的な自然界の構造を探る研究が急速に進められた。人類の知的好奇心は原子核の構造に向かい、原子核が陽子/中性子(核子)で構成されることが明らかになると、原子核の性質や原子核同士の反応を究める数々の実験が行なわれるようになった。1938 年に発見されたウランの核分裂が、1942 年にはその連鎖反応を利用した世界最初の原子炉に発展し、エネルギー源として実用化されたのが今日の原子力である。また、原子核研究の重要な「道具」として発明され、多くの技術開発を経て今日の加速器が実現されている。

原子核研究はやがて核子の構造とその間に働く力の性質の研究へと発展した。今日では基本的な粒子として光子などのゲージボソン、電子とニュートリノを総称したレプトン(軽粒子)、中間子、核子などのハイペロン(重粒子)が知られている。ところがメソンとハイペロンはクォークと呼ばれる素粒子の複合体であることが明らかになってきて、より根源的な粒子とその間に働く力の性質あるいは基本原理の探求が続けられている。これらの粒子間に働く力の性質で、電荷・空間・時間に対する対象性はその最も基本的な性質で、その対称性の破れの度合いは現代のもっとも重要な研究課題である。

(宇宙の誕生・進化と高エネルギー物理学)

一方、私達の宇宙は 150 億年前に起きたビッグバンで誕生し、膨張してきたことが明らかになっている。膨張の過程で宇宙は冷えていき、それに伴って物質が作り出されてきた。これまでの研究から宇宙誕生のごく初期の超高温状態のときにクォークが生じ、やがてクォークが集まって核子になり、更に冷えてきて核子が結合し元素が生まれたとされている。ところがウランにいたる多様な重元素は、このときではなく、軽い元素でできた星の爆発によって生み出されてきたと考えられている。このような立場で見ると、先に述べた自然界のより根源的な構成要素と基本原理の探求は、宇宙進化の過程を逆にたどることに相当している。言い換えると、高エネルギー加速器でより高いエネルギーが集中した状態を作り出す

ことが宇宙進化の逆過程を進むことであり、人類が存在する現在の宇宙のルーツを探ることである。そのためにはエネルギーフロンティアを開拓する加速器が必要になる。

前章の 2-2 で述べた我が国の高エネルギー加速器で行なわれている研究のうち、対称性の破れを確かめる実験の目的は、ビッグバンでできた宇宙は陽子や中性子が多く、なぜ反陽子や反中性子が存在しないかを明らかにする鍵の発見である。またニュートリノ振動実験からはニュートリノが質量をもつかどうか明らかになり、その大きさによっては宇宙全体の質量が変わってきてこの宇宙がどのように進化していくかが異なってくる。なお、最後にクォークにかかわる研究は、これまで核子に深く閉じ込められて見えなかったクォークの実態を明らかにする新しい研究の始まりと位置付けることができる。

(元素の生成と原子核物理学)

原子核は高々 300 個の陽子と中性子から構成されているのに、その構造や性質はきわめて多様である。なかでも未だ数多くは創製/発見されていない極端に中性子が多い原子核あるいは少ない原子核には、殆どその創製/発見の度に未知の性質が見つかっている。これまで我が国の研究者は、この領域の研究で既存の常識を覆す多くの発見をしてきた。このような未知の原子核を作り出してその性質を明らかにし、この宇宙でどのような過程を経て物質がつくられてきたかを地上で確かめようとする実験場が RIBF であり、原子核研究用加速器である。これまで我が国では重イオン加速器が安定領域から遠く離れた原子核のエキゾチックな性質を明らかにしてきた。一方、陽子/軽イオン加速器は原子核が高いエネルギー状態へ励起された時の形や性質を明らかにしている。

このような未知への探求は、自分の存在する自然界をより深く理解したいという人類の飽くなき知的好奇心の現れであり、その成果は人々の好奇心を更に刺激し、自然界に対する夢と畏敬の念を与えるものである。

3.2 広い科学技術分野における先端的基盤研究施設

(物質の研究とその手法)

この地球上に存在する安定元素は水素からウランまで 84 種しかなく、長寿命の放射性核種として存在する元素を含めても 92 種に満たない。ところがこの少数の元素からつくられた物質の種類は無数にあり、新しい原子構造（原子配列）や性質、機能を持つ物質の発見が続いてきた。とくに、20 世紀後半になって物質の熱的、電気的、磁気的特性と物質の原子配列あるいは電子状態との関係を解明する実験技術、解析手法や理論が進歩すると、新しい特性をもつ物質の探索/研究が急速に進み、また、人工的に原子配列を変えて新しい性質や機能をもつ物質の開発も行なわれるようになった。このような物質・材料科学の進歩が情報・通信技術・ナノテクノロジーの進歩を加速し、社会生活を一変させる大きな影響を現代社会にもたらしている。また、遺伝子の発見を端緒とする生命科学の発展も目覚しく、生体内で作り出される多様な物質の研究が行なわれて、生命現象の解明や病気の原因究明、治療法の開発に貢献している。なかでも生体機能をもつ蛋白質が次々に発見されており、その 3 次元原子配列（立体構造）を解析して新しい医薬品を創製する動きが活発になっている。

新しい機能をもつ物質の開発においては、物質中の原子配列と電子状態、微量成分元素の量と化学状態を精度よく決め、場合によってはその温度/圧力/磁場依存性や時間の経過に伴う変化を測定する必要がある。一般に、物質の特性や機能は表面、界面（二つの物質の接合面）、バルク（物質内部）で異なっているので、測定は表面/界面でも行なうことになる。なお、表面に吸着している不純物原子（分子）の量や表面の平面度/平滑度、界面における原子配列変化などは、ナノデバイス材料の良さを決める最も重要な指標である。

今日では、物質の研究には電子顕微鏡やトンネル顕微鏡によるイメージング法とともに、光（テラヘルツ波から X 線までの電磁波）や中性子の吸収（発光）分光、回折、散乱、偏光計測などが最もよく使われている。なお、高温高圧など極端条件下の計測や時系列計測など光や中性子のみで可能な計測も多い。

X 線や中性子を得るのに加速器を用いると、実験室 X 線源や原子炉に比べて 3 桁以上の輝度を得られるので、際立って高い精度の測定が可能になる。加速器が現代科学技術の研究開発において、最も重要な先端的基盤研究施設と言われる所以である。

(放射光の利用)

光は電子と強く相互作用するので、物質内の電子分布や電子状態を調べる最も優れたプローブである。放射光は真空紫外から X 線に至る幅広い波長領域で、平行で明るく（高輝度）波長の揃った特性をもっている。ごく微小な試料の計測が可能で、放射光を用いた物質研究の先端的研究手法が次々に開発されている。

生体高分子とくに酵素など蛋白質の立体構造を決めるのに、X 線回折と核磁気共鳴（NMR）が主に使われている。これまで立体構造が決められた蛋白質の総数（蛋白質データベース登録数）は、2003 年 10 月現在で約 22000 であり、そのうちほぼ 19000 が放射光 X 線回折で決められている。なお、中性子回折による蛋白質の構造解析は水素原子の位置を決めることができるという特徴があるが、これまでに解析された蛋白質の数は少ない。

我が国の放射光施設では、X 線領域で SPring-8 と KEK の放射光実験施設 KEK-PF が優れた成果を挙げている。SPring-8 の特長は X 線波長範囲が広く輝度が世界で最も高いことである。一方、KEK-PF はビームラインの使い易さなど実験環境に優れている。なお、KEK にはこの他に 6GeV の AR リング放射光源があり、波長の短い X 線を半ば占有的に使って、蛋白質構造解析や医学利用で優れた成果を得ている。この他、姫路工業大学、分子科学研究所、広島大学、立命館大学の小型放射光施設では、主に真空紫外・軟 X 線領域の放射光を用いた分光学や微細加工の研究が進められている。

放射光の特長は同時に多数のユーザーが実験できることで、スモールサイエンスのための最先端研究施設である。SPring-8 に例をとると、2002 年の統計では、1 年間のユーザーは延べ 8843 人、実験課題数は 1434 件で、学術雑誌に発表された論文数は 347 編であった。なお、共同利用ビームラインの産業界による利用が増えている、産業界の実験責任者が提案した課題が全体の 12%を超えている。

(中性子の利用)

中性子は電子と同じく物質波としての性格をもっており、X 線と同様に物質研究の優れたプローブである。その波長は中性子のエネルギーが低いほど長くなるので、実際に物質研究に使われるのは低速の熱中性子である。光が重い元素ほど強く散乱されるのに対して熱中性子は水素などの軽元素に強く相互作用するの

で、物質中の軽元素の情報を得ることができる。例えば中性子回折で蛋白質の立体構造を調べると、X 線では困難な水素の位置情報が得られ、蛋白質の機能解明に必要な水素の配位や周囲の水の情報が得られる。

電子や陽子、中性子はスピンとそれに伴った磁氣的性質（磁気能率）をもっている。中性子は電荷を持たないので、中性子は物質中の電子と磁氣的な相互作用により散乱される。物質の磁氣的性質はスピンの向きが異なる（例えば上向きと下向きの）電子の分布の違いで生じるので、中性子を用いると物質の磁氣的特性を解明することができる。現在情報機器で広く用いられている記録媒体などの磁気デバイスは、優れた磁気特性を持つ物質の発見で急速に進歩してきた。

中性子は光とともに生命科学や物質・材料科学の研究に不可欠のプロープであり、核破砕中性子源は最も重要な先端的基盤研究施設である。

（イオンビームの利用）

数 MeV に加速されたイオンによる分析も良く使われている。物質中の微量元素に衝突して出す X 線を測定して行なう定量や化学状態分析は PIXE 法と呼ばれていて、ppm（100 万分の 1）から ppb（10 億分の 1）の定量分析が可能である。このほか、入射イオンの後方散乱など原子核核反応やチャネリングを用いた欠陥の研究も行なわれているが、これらは主に大学、国公立研究所の小型加速器を用いて行われている研究である。

1950 年代から多様な化学物質が大気或いは河川に流出して環境が悪化する問題が表面化してきた。とくに化学物質には極微量でも生体に悪影響を与えるものがある。このような化学物質の分析には PIXE と放射光による分光が重要な役割を果たしている。

（陽電子 / ミュオンビームの利用）

陽電子は物質中の電子と衝突すると、反対方向に出る 2 つのガンマ線 (511keV) になる。この二つのガンマ線を同時計測して陽電子の

3.3 原子力への先導的基盤研究

(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果たしてきている。

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ことを踏まえ、2000年に策定された「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。

(我が国で原子力研究開発に用いられる加速器)

表3.1(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。原子力研究費で建設された加速器及び大学の原子力関係学科で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。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。

(原子力分野における核物理研究)

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成果は核データとして、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。

(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云うまでもない。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。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バンデグラーフは、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。

(生体影響研究)

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、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こと、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。

(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、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。

(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、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、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。

トカマク核融合の加熱装置である中性粒子入射装置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。

(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。

例えば、核変換のためには10mA 級の大電流連続型高周波 (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。

3.4 医療への展開

(加速器の医学利用)

サイクロトロンを発明したローレンス(E.O.Lawrence)は、放射性同位元素(RI)の製造と医学への応用が、加速器の普及に重要であると考えていた。わが国でも初めてサイクロトロンを建設した理研仁科研究室には戦後我が国の放射線医学の中心となる人々が集っていて、トレーサーの製造と利用や中性子の生物照射が行なわれていた。

1950年代に加速器技術が急速に進歩すると、ガン治療に使われていたコバルトのガンマ線照射に代わって電子線型加速器が用いられるようになった。また、サイクロトロンで作られた短寿命 RI がトレーサーとして使われ始めた。1952年に完成した理研の第3号サイクロトロンは、 ^{24}Na など短寿命 RI を製造してユーザーに提供していたが、

現在、医療における加速器の利用は多岐に亘っている。日本人の死亡率の第1位を占めている悪性新生物による病気、いわゆる癌の死亡率は全体の約3分の1を占め、これに対する療法としての一つである放射線療法においては、殆どの装置が加速器を利用している。

X線やガンマ線など電磁放射線においては、外照射装置のコバルトや小線源治療としてのイリジウムなどを除いて、殆どの放射線治療はX線を用いており、その発生装置は電子ライナックである。現在日本では、公共病院、個人病院を合わせて700台以上の電子加速器がX線治療に使用されている。エネルギー範囲は、6~20MeVに亘るが、近年はより高いエネルギーの加速器が増えてきている。

診断においては、SPECT(Single Photon Emission Computer Tomography)用あるいはPET(Positron Emission Tomography)用の放射性同位元素を作る為に、医療専用の小型サイクロトロン(主に10~20MeVの陽子及び重陽子加速)が製作され商用化されて久しく、その数は既に70台近くになっている。特にPET敷設は今ブームともいえる様相を呈しており、どんどんその数は増加している。

(粒子線治療)

これらにも増して、近年の医療に対する加速器の使用で特筆すべきことは、粒子線治療法の進歩とその普及への動きである。これには、陽子線及び重粒子線(今のところ炭素線)の2種類が用いられている。両者とも、治療法の研究開発に

において日本の果たした歴史的役割は非常に大きく、また現状における進展状況も、世界的に断然他をリードしている。これらの加速器は粒子が癌腫瘍部分に到達する為に、陽子の場合約 200MeV、炭素の場合核子あたり 300 ~ 400MeV という医療用としては相当高いビームのエネルギーが要求され、大型の装置になっている。

1973 年に放射線医学総合研究所（当時、放医研）に大型サイクロトロンが設置され、短寿命 RI の利用とともに高速中性子線を用いたガン治療の研究が始まり、やがて次に述べる重粒子線治療法の研究へと発展していった。陽子線治療は、筑波大学が高エネルギー研究所のブースターシンクロトロンに医療照射装置を付置し、1983 年に陽子ビームを使用して我が国初の本格的陽子線治療を開始した。以来、世界初の試みとして肝臓、食道などを中心とした深部がんを対象にして、2000 年までに計 700 人を治療した。また、患者の呼吸と同期して照射する治療法を開発した。これらの実績をもとに専用の陽子線治療施設を新たに建設し、2002 年の秋から照射治療を始めている。一方、千葉県柏市にある国立ガンセンター東病院は、厚生労働省の国立病院としては最初の陽子線治療施設で、ベルギーと日本が共同で開発した 250MeV の陽子サイクロトロンを用いている。回転ガントリー 2 台で 1998 年より治療を開始している。

重粒子線治療は、放医研が世界初の医学専用重粒子加速器施設（HIMAC）を建設して始まった。1994 年から炭素線による本格的臨床試験治療を開始して、現在まで 9 年間に身体の各部位に亘って約 1500 人の治療を実施している。なお、3.2 (4) で詳しく述べている。

放医研の治療開始後、兵庫県が県立粒子線医療センターを建設した。これは重粒子線と陽子線が利用可能で、両者の比較検討を目的としている。加速器の構成は重イオン線型加速器を入射し、シンクロトロン一台で加速する殆ど HIMAC と同じ構成であるが、炭素の最高エネルギーが 320 MeV / 核子で全体の規模は約 2/3 である。陽子線用に回転ガントリーが 2 台用意され、2001 年陽子線、2002 年炭素線による治療を開始した。一方、福井県は若狭湾エネルギー研究センターを設立して地域の産業振興を目的とした静電加速器を建設していたが、それを入射器にして新たにシンクロトロンを建設して、2003 年より陽子線による患者治療研究を開始した。また、静岡県は県立静岡がんセンターの開設に伴い、陽子線治療施設を建設し、2003 年秋から患者治療を開始した。

以上のように、現在、日本では医療専用として建設された本格的粒子線治療施

設（陽子線および炭素線）は 5 カ所にのぼり、併用施設 1 カ所を含めると計 6 カ所が稼働していて、世界的にみても他国より数段進んだ体制となっている。

外国の陽子線治療施設には既存の原子核物理研究用陽子加速器を使った施設が多いが、大部分は陽子エネルギーが低いので、大半は欧米人に多い眼球メラノーマ専用の施設である。一方、治療専用施設としてはロマ・リンダ大学（カリフォルニア）と北東陽子線治療施設（ボストン）の 2 施設がある。前者は 1990 年より稼働しているが、患者の半数が前立腺患者である。後者は建設・調整が大幅に遅れ、2002 年より稼働した。このほか、放医研の実績を参考にして、1997 年からドイツ重イオン研究所（GSI）が既存の加速器施設の一部で照射治療を開始した。その後、炭素線治療の実績（頭頸部症例、年間 20～30 人）を基礎として、本年よりハイデルベルグに欧米初の炭素線治療施設の建設が認められた。また、アメリカでは最近、テキサス州のアンダーソン病院で陽子線治療施設の建設が決まった。

以上から分かるように、重粒子線治療の分野では日本は少なくとも 10 年以上に亘って世界を大きくリードしている。陽子線を含めた治療実績は世界でも突出していて、粒子線治療が治癒効果に極めて優れた、また、患者の「生活の質」(QOL) の高い治療法であることが明らかになっている。がん患者の発生数や死亡率の高さを考えると、この治療法を今後できるだけ広く普及させ、がんの恐怖から逃れたいと言う国民の望みに応えていくことが必要である。国立ガンセンター及び兵庫県立粒子線医療センターの陽子線治療が国より「高度先進医療」の認定を受けて、新しいシステムでの治療体制で進められている。放医研の重粒子線治療施設も 2003 年 11 月に国から高度先進医療の適用施設と認定された。

放医研や他の陽子線治療施設の経験から見ると、粒子線治療法を標準的ながん治療法として全国に普及させることが望ましい。しかし、そのための最大の難点は、施設が大規模になり必然的に高コストになることである。HIMAC は重粒子線治療の基礎的研究開発を目的として建設されたので、アルゴンまでのイオン種を広いエネルギー範囲に亘って加速できるように設計されていて、大型になった。粒子線治療を普及させる為にはハードウェアとソフトウェアの両面での更なる技術開発が必要である。

3.5 産業基盤技術開発と工業利用

(産業界の加速器利用)

既に述べたように、加速器は科学技術の先端的基盤研究施設として、産業界においても広く使われている。しかし現在の日本では、科学技術の振興を通して我が国の産業力強化が求められていて、加速器利用がより強力なインパクトを産業技術に与えることができるかどうか厳しく問われている。このような時期には、従来の方式の延長では新しいブレークスルーを期待することは難しい。むしろ産学共同研究開発や産業界による研究開発成果の利用促進に、これまでの方式を越えた新しい仕組みを創り出すことが必要である。例えば研究成果の具体的な技術移転に関しては、既存の枠にとらわれない技術移転システムを効果的に構築するとともに、知的所有権やさまざまなノウハウを含む成果活用方法にも革新的整備が不可欠である。

(加速器の工業利用)

産業界による加速器の工業利用は1960年代後半から1970年にかけて始まった。その頃わが国でもイオン注入の基礎研究が始まっており、その動きが産業界にまで広がったのはこの時期である。現在産業界で最もよく使われている加速器は、エネルギーが数10keVから数MeVまでの直流型加速器(コッククロフト・ウォルトン加速器など)であるが、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などへも用途が広がっている。また、RBSやPIXEなどの分析技術が進歩していて、企業による分析サービスに用いられている。なお、半導体産業では電子ビーム露光装置も使われている。

電子リニアックを用いた放射線化学の研究が実用化され、高分子の架橋やキュアリングを行なって電線被覆材やタイヤを高質化するのに電子リニアックが利用されている。最近では滅菌や排煙処理にも使われ始めている。また、広範囲の非破壊検査に用いる移動型電子リニアックも実用化されている。

工業利用とは異なるが、最近短寿命RIの利用が増加していて、市販する短寿命RIの生産専用のサイクロトロンが専門企業に設置されている。

(産業技術開発と加速器)

企業における研究開発にも加速器が利用されている。実用化されている加速器利用では、同時に開発研究が進められている場合が多いので、イオン注入や電子ここでは除外しておく。産業界の利用が最も多いのは放射光で、1980年代に高エネルギー物理学研究所(当時、KEK)に放射光実験施設フォトンファクトリー(PF)が建設されると、我が国の主要な半導体企業と製鉄企業がそれぞれ占有的に使用するビームラインを建設した。また、小型放射光施設の開発も進み、3企業が社内に専用の小型放射光施設を設置した。また、多数の半導体企業がコンソーシアムを結成して放射光施設SORTECを建設し、期間を決めて利用研究を行なった。これらの放射光施設は鉄鋼企業のビームラインを除いて、殆どが半導体開発を主な目的にしていたが、1990年代になると、我が国の経済状況の悪化に伴って活動がおちて行った。

最近、生命科学分野の放射光利用が急速に増えている。国のプロジェクト「蛋白3000」で主要な解析手段に指定されていて、ゲノム解析で明らかになった有用蛋白質の構造を解析し、創薬への応用を図るための重要な手法と考えられている。また環境保全と結びついた触媒、電池材料等の研究で成果が期待されるほか、十分深いところまで加工できる微細加工技術LIGAプロセスにも利用範囲が広がっている。

放射光利用技術としては小型放射光施設を現場で建設・利用する場合と、大型共同利用施設を利用する場合がある。小型放射光施設開発は1980-90年代に我が国で特に活発化し、日本は世界で中小放射光開発・利用の最も盛んな国になった。大学・公的研究機関・産業界には技術が蓄積されており、今後もこれらの技術を有効に活用すべきである。また大型先端研究施設SPring-8は、高輝度放射光の産官学の共同利用施設であり、最近では産業利用が活発化しており、自社での研究開発の課題解決へ利用したいという要望が強い。今後の施策としては、産業応用優先のビームラインの増加、利用機会の増大、コンサルティング・技術支援・指導の充実などが課題である。