

# 加速器の現状と将来

平成16年4月

原子力委員会  
研究開発専門部会  
加速器検討会

## 目 次 ( )

この冊子をお読みになる前に

第 1 章	はじめに	1-1
第 2 章	科学技術と加速器	2-1
2.1	加速器はなぜ必要か	2-1
2.2	加速器の種類と役割	2-6
2.2.1	加速器の種類	2-6
2.2.2	加速器の役割	2-9
2.3	日本や世界の加速器	2-15
2.3.1	日本における加速器の発展	2-15
2.3.2	我が国における加速器の現状	2-16
2.3.3	世界的に見た我が国の加速器	2-19
第 3 章	我が国における加速器利用研究	3-1
3.1	未知への挑戦	3-1
3.2	広い科学技術分野における先端的基盤研究	3-4
3.3	原子力への先導的基盤研究	3-8
3.4	医療への展開	3-13
3.5	産業基盤技術開発と工業利用	3-16
3.6	極端パルス・超高強度レーザー技術の開発と応用	3-18
第 4 章	大型加速器計画のフォローアップ	4-1
4.1	フォローアップの必要性	4-1
4.2	大強度陽子加速器 J-PARC	4-2
4.3	RI ビーム加速器 RIBF	4-6
4.4	大型放射光施設 SPring-8	4-10
4.5	重粒子線がん治療装置 HIMAC	4-15
4.6	まとめと今後の課題	4-19
第 5 章	加速器利用研究の推進	5-1
5.1	加速器利用研究の理解を得るための方策	5-1
5.2	加速器を用いた研究開発の進め方	5-4
5.2.1	長期的展望に立つ計画策定	5-4
5.2.2	国際競争と国際分担	5-5
5.2.3	加速器建設の新しい仕組みや新しい方式	5-7
5.2.4	大学における加速器	5-8
5.2.5	研究連携の推進	5-10
5.2.6	産業界における加速器	5-12
5.2.7	人材育成と技術継承	5-14

## 目 次 ( )

第 6 章	まとめ	6-1
6 . 1	社会への情報発信の強化	6-1
6 . 2	加速器の人材育成	6-2
6 . 3	加速器建設や加速器を用いた研究開発の進め方	6-3
6 . 4	J-PARC、RIBF、SPring-8、HIMAC の 4 加速器フォローアップ	6-5
6 . 5	レーザー研究	6-6

用語集

参考

## この冊子をお読みになる前に

### 基礎科学と人々の暮らし

人類はたえず未知のものに向かって探究し発展してきました。このような未知への挑戦は今も続いていますし、これからも続くでしょう。研究活動を支える原動力は、この未知への探究心です。

研究者は、未知の現象の発見に興奮したり、こうあるべきだという現象の確認に安堵したり、あるいは、実験する試料作りに専念したり、実験を行なう装置の建設を行なったり、といった日常生活を送っています。このような研究者の生活は人々の暮らしと無縁なものに見えます。

しかし、これらの研究は、人々の暮らしと繋がっているのです。一つの例を挙げてみましょう。19世紀は製鉄技術が人々の暮らしを大きく変えました。そこで、鉄を作る溶鉱炉の温度を光の色から測定する温度計が必要となり、温度と色の関係に対する研究が始まりました。その研究の中で量子力学という学問が誕生したのです。量子力学そのものの発展は地味な研究によって進展を遂げましたが、その研究の中からレーザーや半導体という概念が生まれました。これらが再び人々の暮らしを変えたことはよく知られていることです。このように長い時間の尺度で眺めれば、基礎科学と人々の暮らしの間は深く結びついていることに気がきます。

人々の暮らしに役立っている原子力エネルギーも、元をただせば、原子核反応の地味な研究の中で核分裂現象が発見されたことに始まりました。そして、この原子力が、再び未知なものに向かう研究を生み出す源にも繋がっているのです。

### 基礎科学と加速器

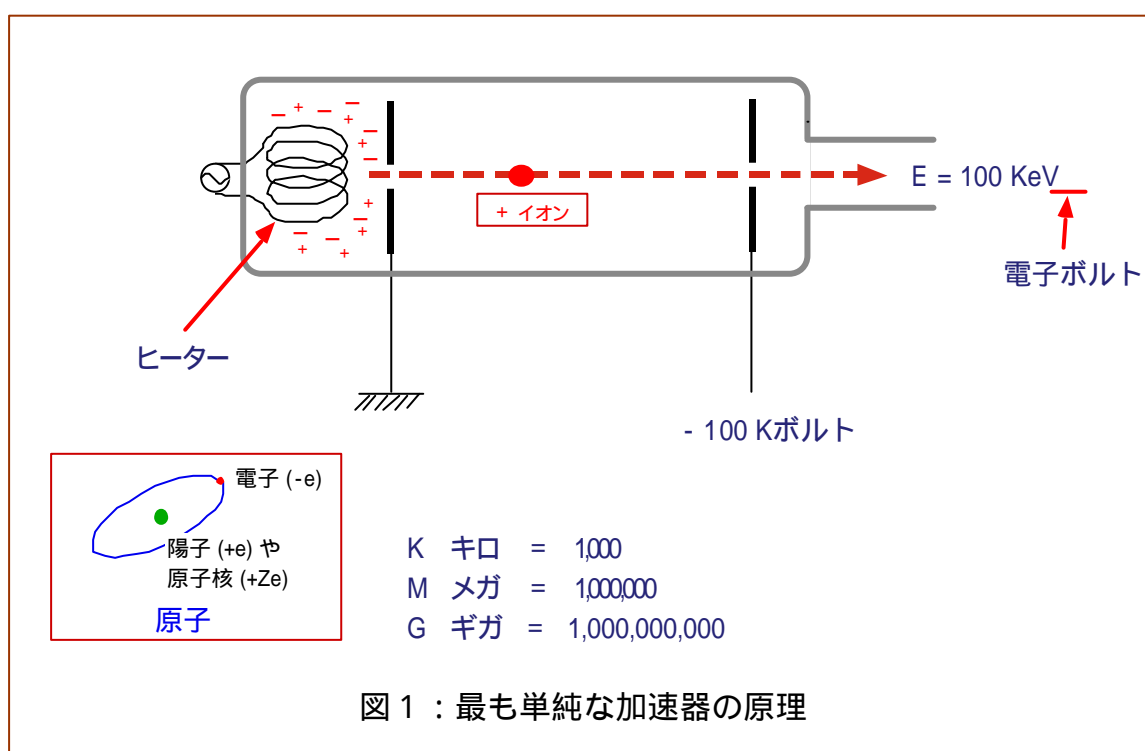
未知への探究心の方向はさまざまです。物理学においては、より小さい素なものや、より大きな宇宙への探究心がその一つです。物質は原子から構成され、その内部は原子核と電子から成り立っています。原子核を詳しく眺めると、陽子や中性子から成り、その陽子や中性子もクォークという素粒子から成り立っています。さらに、謎の粒子と呼ばれるニュートリノという素粒子も存在します。最近

のことで、このニュートリノは宇宙空間に満ちていて宇宙全体ではクォークの何億倍ものニュートリノが存在することも分ってきました。一方、広大な宇宙は150億年前に小さな火の玉が爆発（ビッグバン）して出来たといわれていますが、最近では、この150億年前の宇宙の描像も次々と解明されつつあります。

このような研究に対して加速器は必要不可欠な役割を果たしてきました。より小さな素粒子を研究するためにより大きな加速器が必要になるのは皮肉なことです。大型加速器が素粒子物理学の基礎を作り出したことはよく知られていることです。

### 加速器とは？

では、加速器とはどんな装置でしょうか？ 原子番号の一番小さい原子は水素原子ですが、その中を覗くと中心部に正電荷（プラス）の陽子があり、まわりを負電荷（マイナス）の電子がまわっています。この二つを引き剥がし、外部電極に正の電圧をかけると、負電荷の電子が電極に引き寄せられ、電子は運動エネルギーを持ちます。



このような装置を一般に**加速器**と呼び、電圧が1ボルトの時、電子が持つ運動エネルギーを1電子ボルトと決めておきます。この例は電子を加速する**電子加速器**ですが、もし外部電極に負の電圧をかけると、正電荷の陽子が引き寄せられ**陽子加速器**となります。さらに、水素原子よりも大きい炭素・カルシウム・金といった原子の中心部に存在する原子核を加速すると**重イオン加速器**となります。

### 加速器からの粒子エネルギー

加速器の技術は20世紀に飛躍的に発展しました。多くの種類の加速器があり、詳しくは本文で述べますが、ここでは、よく使われている二つの典型的な加速器を紹介しましょう。一つは、沢山の電極を直線上に並べ、荷電粒子を高エネルギーまで加速する線形加速器と呼ばれる装置で、リニアックとも呼ばれます。もう一つは、電極は一つしか用意しないのですが、磁石の中で荷電粒子をぐるぐると何回もまわし、元の電極に戻ってくるたびに同じ電極で何度も加速する円形加速器で、サイクロトロンやシンクロトロンがこれに相当します。

このような装置を用いることにより、粒子を数百万電子ボルトにまで加速することは、比較的たやすくできるようになりました。このエネルギーでは、装置の大きさは数メートル以内に収まり、コンパクトであることから工業用や医療用に広く使われ、日本では1千台ほどあるといわれています。

一方、エネルギーが1億電子ボルト以上の加速器は、主として大学や研究所において基礎科学の研究用に使われています。大きなエネルギーを得るためには、線形加速器ではその長さを長くし、円形加速器では半径を大きくする必要があります。長さや半径が百メートル以上の大型加速器になると、その数は世界的にも限られてきます。

### 加速器が拓く新たな研究分野

20世紀の加速器の進展を眺めると、主流は加速する粒子のエネルギーを上げることに置かれ、そのため、より大型化へと進んできました。その流れは今も続いています。一方、加速器の進展の中で、このような高エネルギー化とは別の、まったく新たな分野も出てきました。その例として、のちに第4章で取り上げる

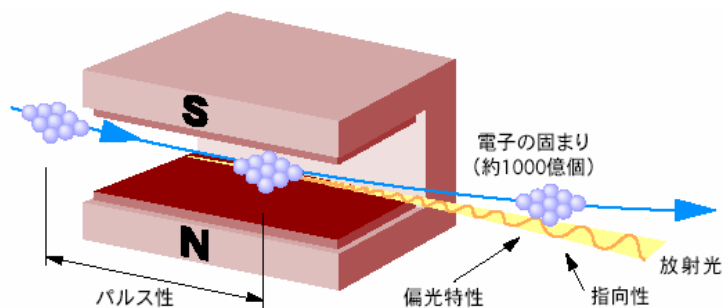
4つの加速器の利用方法や原理を図2に示しました。

たとえば、電子加速器では、磁石の中で電子が円形軌道を描く時に微弱な光を放射することが知られています。そのため電子はエネルギーを失い、円形加速器では電子を超高エネルギーにまで加速することができません。しかし、これを逆の立場から眺め、この光を物質科学や生命科学に積極的に使う動きや工夫が生まれました。その例が放射光施設です。さらに電子のエネルギーを上げることでX線まで発生できる大型放射光施設もできました。

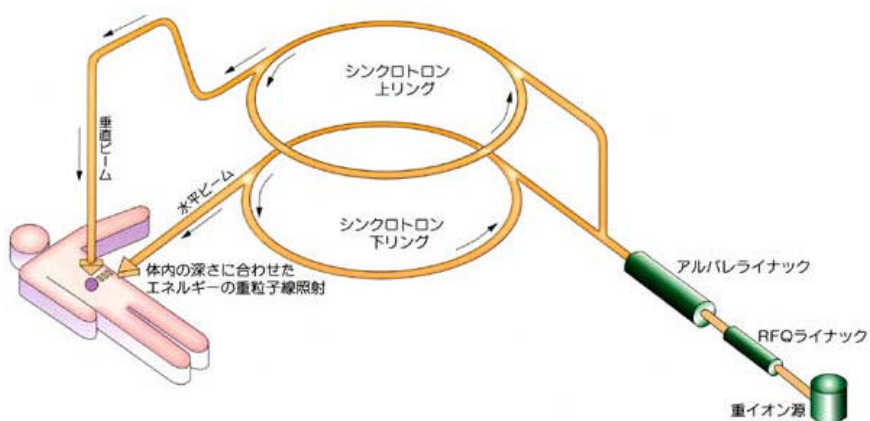
また、加速された重イオンビームを物質に照射すると、重イオンはある一定の距離を走って止まり、止まった地点でエネルギーを放出するという特性を持っています。人体に照射し、がん細胞の存在する場所で重イオンが止まれば、がん細胞だけを焼き切って正常細胞には損傷を与えずに済むでしょう。このような観点から、医療用重イオン加速器ができました。重粒子線がん治療装置とも呼ばれます。

今後切望される新たな研究領域もあります。その一つは、中性子ビームやニュートリノビーム・K中間子ビームといった、まったく新しいビームによって科学を作っていく領域です。陽子加速器からの陽子ビームを原子核に照射すると、原子核の構成要素の中性子は原子核の外にはじき出されます。さらに中間子と呼ばれる新たな粒子も生成されます。これらの粒子を「ビーム」として取り出し、それを用いた研究を展開するのです。K中間子ビームやニュートリノビームは原子核や素粒子物理学の重要な発見をもたらします。また、中性子ビームは、物質科学や生命科学に大きな役割を果たすといわれています。さらに、これを放射性原子核に照射すると、その放射性を消してしまう性質も持っています。そのため、原子炉からの放射性廃棄物の処理という観点からも、中性子ビームは注目されています。

眼を転じて、重イオン加速器を考えましょう。重イオンビームを標的である原子核に照射しますと、ちょうど的を少し外して投げたリンゴの実が飛び散るように、照射した重イオン原子核ビームの破片が飛散します。このような破片は元々の原子核の一部分で、一般的には不安定な原子核となります。すなわち、短寿命原子核ビーム(RIビーム)ができるのです。RIとはRadioactive Isotopeの略語です。これまでの加速器研究では、加速される原子核が安定な原子核に限ら

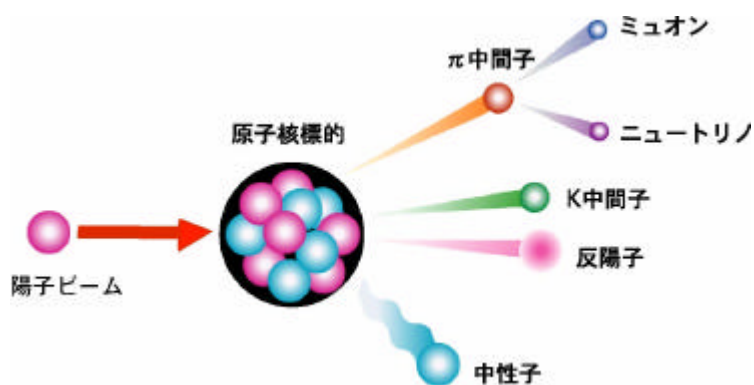


電子ビームから発生する  
夢の光・放射光  
(Spring-8、稼働中)

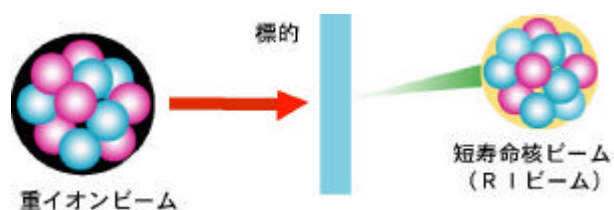


がん治療や診断に  
使われる重イオン  
ビーム  
(HIMAC、稼働中)

図 2：加速器技術を駆使した 4 つの大型加速器プロジェクト



陽子ビームにより原子  
核標的が破碎され、中  
性子やニュートリノな  
どの二次粒子ビームが  
発生。二次ビームの多  
彩な利用。  
(J-PARC、建設中)



重イオンビームを  
破碎して作る RI  
ビーム。元素誕生  
の謎に迫る。  
(RI ビームファク  
トリー、建設中)



れていたのですが、このような手法により、世の中に存在しない短寿命原子核のビームも得られるようになりました。

このように、加速器は、エネルギーを上げることにより素粒子物理学の究極を極めるだけでなく、放射光・重粒子線・K中間子ビーム・ニュートリノビーム・中性子ビーム・RI ビームといった新たなビームを用いることにより、科学や医療の領域に大きな役割を果たしつつあるのです。

### なぜ日本が加速器を？

加速器を用いる研究の主流は、やはり基礎科学にあります。しかし、加速器も近年大型化し、また多様化し、アメリカのような大国ですら、すべての種類の加速器を整備することができなくなってきました。そこで、世界的なレベルで加速器を整備していくための会議が国際機関を通じて始まりました。まず、長さが数十キロメートルにも及ぶ電子ビーム線形加速器などの超々大型の加速器は、世界に一ヶ所あればいいでしょう。また、超高エネルギーの重イオン加速器は米国に置き、超高エネルギーの陽子加速器は欧州に置く、K中間子ファクトリーは日本に置く、といった国際的な分担を決める議論も進んでいます。さらに、利用者の多い放射光施設や中性子ビーム施設に関しては、米・欧・日を主軸に世界で三極構造を作りながら整備していく、といった考え方が世界中で浸透しつつあります。

従来、日本では欧米で行われた基礎的な研究や原理の発見に基づく応用研究が主に進められているといわれていましたが、今や世界の中で日本は大きな位置を占める国となり、その国力に見合った投資が科学の分野でも求められています。そのため、大型加速器の建設には、国際情勢をよく眺め、日本もそれ相当に国際的に分担するという姿勢が必要になっています。基礎科学進展のための国際分担といってよいでしょう。

一方、放射光施設・医療用加速器・中性子ビーム施設といった加速器は、国内の産業や日本人の暮らしに密着しています。したがって、これらは世界の情勢を眺めつつも、国内的な要望や必要性を俯瞰し、順次整備することが必要です。

このように、基礎科学を深めていくのみならず、人々の暮らしを向上していく上で、日本における加速器の整備は必要なのです。

## 本報告書の内容

本報告書では、日本や世界の加速器を用いていかなる研究や応用がなされ、また、どのような種類の加速器が存在するのかを、まず概観します。そして、これらの加速器はいったい何に使われるのかを考えることにします。さらに、今後、加速器を用いた科学やその応用においてどこを強化し、また、その研究をいかに進めていくべきかについて考えることにします。これらの諸点が加速器検討会での主たる議論でもあったので、本報告書の大きな流れとしては、今後の加速器利用研究の進め方の記述に重点が置かれています。

一方、原子力委員会は、放射光・重粒子線・中性子ビーム・RI ビームといった、加速器が拓く新たな分野の育成に重点を置いて加速器分野を育ててきました。その例が、第4章で述べる4つの加速器（大強度陽子加速器（J-PARC）、RI ビーム加速器（RIBF）、大型放射光施設（SPring-8）、重粒子線がん治療装置（HIMAC））です。これらの加速器は、大学共同利用機関の大型加速器と共に、現在の日本の加速器の中で大きな位置を占めています。本報告書ではこの4つの加速器もレビューも行い、今後の方向を探ります。

## 第1章 はじめに

20世紀の自然科学の発展を俯瞰すると、加速器は其中で大きな役割を果たしていることに気づく。19世紀の終わりに J. J. Thomson により、陰極線を構成するのがマイナスの電荷を持つ微粒子(電子)であることが明らかにされたが、この陰極線管の原理は振り返って見ると、簡単な加速器ともいえる。1930年代になって、英国ではコッククロフト・ワルトン型静電加速器が発明され、米国でも E. O. Lawrence と M. S. Livingston によりサイクロトロンが創案され、これらの加速器により人工放射能の生成が可能となった。これらは加速器としては初期の段階にあったが、当時の科学のフロンティアを築いた。

加速器が本格的な稼働を始めたのは第2次世界大戦終結後のことである。加速器を用いることによって、反陽子の発見、原子核や陽子の形状の決定、多種類の素粒子の発見、クォークの発見、相互作用の解明、等々、物質のミクロな描像が次々と解明されていった。加速器を用いた基礎科学研究に与えられたノーベル賞の数も、戦後だけで10件以上に上る(第1-1表参照)。そして、よりミクロな世界を研究するために、「加速器の高エネルギー化」が志向され、加速器の大型化へと進展してきた。

一方、20世紀の後半4半世紀になると、加速器は、単にミクロな自然現象の解明にとどまらず、科学そのものの拡がりや応用性を志向する方向へと進展を始めた。典型的な例は、電子ビームが円形軌道を描く際に放射される「放射光」を利用した研究である。また、陽子加速器から得られる中性子ビームやミュオンビーム、電子加速器やイオン加速器から得られる陽電子ビームによる物質・生命科学研究も始まり、これらのビームも放射光ビームと並んで有用な手段となりつつある。このような新しい研究領域は「加速器の大強度化」によって創り出された領域であり、「加速器の高エネルギー化」の方向とは異なる。さらにこのような大強度化は、応用分野だけでなく、K中間子ビーム、反陽子ビーム、不安定原子核ビーム、ニュートリノビームといった新たなビームを用いた原子核や素粒子の新しい分野も拓きつつある。最近注目を浴びている電子・陽電子衝突型加速器であるBファクトリー(高エネルギー加速器研究機構(KEK))も電子ビームや陽電子ビームの大強度化によってめざましい発展を遂げた分野である。さらに、表1-1に示すように、最近のノーベル賞の研究は放射光施設によって行われたものである。

第1 - 1表：加速器から生まれたノーベル賞

受賞年	受賞者	受賞理由	加速器の所在地
1939	E. O. Lawrence	サイクロトロン の発明と 人工放射性元素の研究	カリフォルニア大学（米） 加速器開発
1951	J. D. Cockcroft E. T. S. Walton	加速荷電粒子による原子核変換	キャベンディッシュ研（英） 加速器開発
1951	G. T. Seaborg E. M. McMillan	超ウラン元素の発見	カリフォルニア大学（米） 陽子加速器
1959	E. Segre O. Chamberlain	反陽子の発見	カリフォルニア大学（米） 陽子加速器
1961	R. Hofstadter	電子散乱による核子の形状	スタンフォード大（米） 電子加速器
1968	L. W. Alvarez	水素泡箱による多数の素粒子発見	カリフォルニア大学（米） 陽子加速器
1976	S. C. C. Ting  B. Richter	J/ $\psi$ 粒子の発見	ブルックヘブン国立研（米） 陽子加速器 スタンフォード大（米） 電子・陽電子衝突器
1980	J. W. Cronin V. L. Fitch	K 中間子崩壊における CP 対称性の破れの発見	ブルックヘブン国立研（米） 陽電子加速器
1984	C. Rubbia S. van der Meer	弱い相互作用を担う粒子 W と Z の発見	CERN（スイス） 陽子・反陽子衝突器
1988	L. Lederman M. Schwartz J. Steinberger	ミューニュートリノの発見と レプトンの二重構造	ブルックヘブン国立研（米） 陽子加速器
	J. Deisenhofer R. Huber H. Michel	光合成反応中心の 3次元構造の解明	DESY 放射光施設（独） （一部、KEK-PF（日本）） 放射光施設
1990	J. I. Friedman H. W. Kendall R. E. Taylor	電子深部散乱による クォークの発見	スタンフォード大（米） 電子加速器
1995	M. L. Perl	タウレプトンの発見	スタンフォード大（米） 電子加速器
1997	P. D. Boyer J. E. Walker	ATPを分解・合成する 酵素の研究	ダレスブリー研（英） 放射光施設
2003	R. MacKinnon	イオンチャンネルの構造と 機構の研究	コーネル大（米） および ブルックヘブン国立研（米） 放射光施設

20世紀の後半4半世紀におけるもう一つの特徴は、がん治療用加速器といった社会のニーズに直接に答える「社会還元型」加速器の登場である。医療用加速器として重イオン加速器が活躍し、また陽子加速器を用いた陽子線がん治療装置も各地で稼働している。さらにサイクロトロンを用いたイオン利用や陽電子断層撮影（PET）などの医療装置、植物産業に直接応用されている加速器などの特殊目的用加速器が続々と登場した。日本には大小合わせて千台を越す加速器が存在するといわれているが、その内の大半はこの「特種目的に特化」された加速器であり、特に医療用と産業用のものが多い。

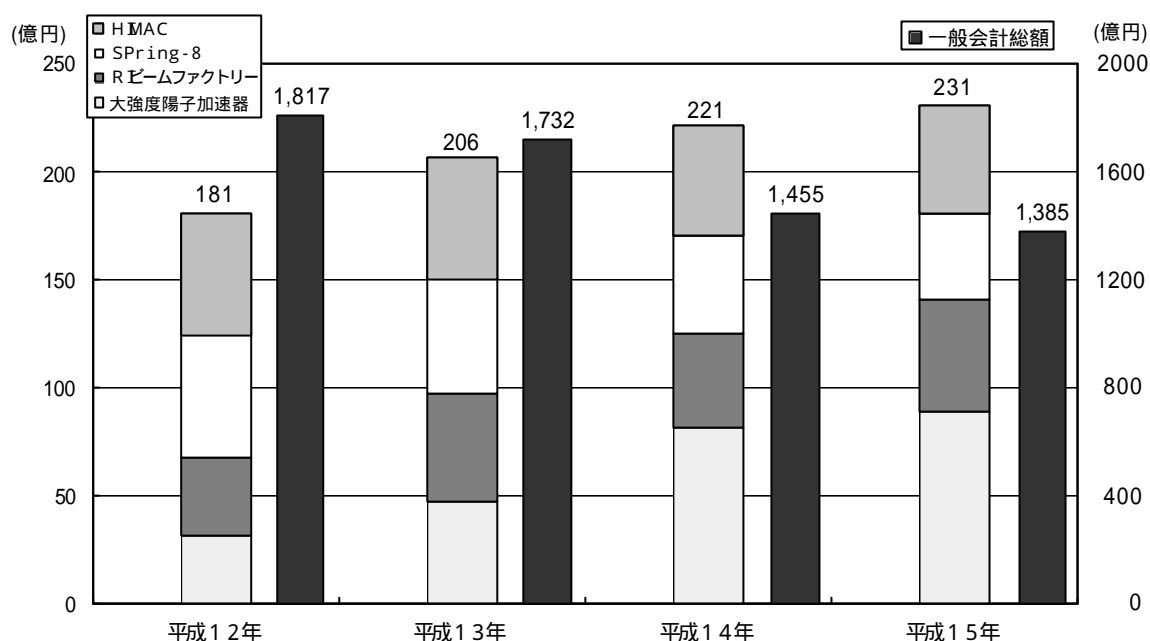
さらに、大学や研究機関に加速器が設置されるにつれ、加速器は教育面でも大いなる威力を発揮している。特に、大学や大学共同利用研究機関においては、学部学生や大学院生の教育に、加速器は重要な役割を果たしてきた。未来の人材育成への多大な貢献も、加速器の中で見のがしてはならない側面である。

このように、加速器は科学研究を大きく進歩させるために欠くことのできない装置となっている。上述したように、加速器はその応用性の高さから、物質科学・材料科学・生命科学などの分野への拡がりを見せている。また、医療用加速器のように、直接人々の暮らしに還元される加速器や、大学等に付置された教育に寄与する加速器もあり、加速器の応用分野は多様化している。

一方、原子力を中心とする我が国の戦後の科学技術の進展を辿ると、原子力というと原子炉を中心とする実用的なエネルギー開発の側面が強調されがちであった。そのため、加速器が原子力先端的研究として重要視され始めたのは、ごく最近のことである。重視された理由は、原子力のもつ潜在的可能性を考慮すれば、原子力を単なる実用的エネルギー生産技術としてだけでなく、現代社会を支える総合的科学技術として推進することが肝要であり、加速器を用いた科学の推進も、その中の重要分野として位置付けるべきであるという視点が生まれたためである。加速器で得られる高エネルギー放射線やさまざまな粒子線及び高出力レーザー光による原子核から物質科学、生命科学にわたる広い科学技術分野の基礎的・応用的研究開発は、原子力先端的研究として重視され、注目される分野となった。

平成12年11月策定の「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）」では、加速器や高出力レーザーを利用する先端的研究開発を「未踏領域への挑戦」として位置づけ、原子力開発研究の中での加速器を用いた科学技術研究開発の推進が提言されている。

しかし、原子力予算の推移を眺めると、原子力関係の一般会計は減少を続けている状況にある。その内、加速器関連の予算は、わずかながら上昇しているが、原子力関係の一般会計が減少している状況では、今後は加速器関連の予算も厳しい状況になるものと考えられる。(第1-1図参照)



第1-1図：原子力関係一般会計の推移と加速器への予算配分の推移

原子力委員会は、このような国内外の情勢や、加速器は科学技術の発展の一翼を担うものであるとの社会の期待を踏まえ、加速器分野における研究開発の着実な推進を図るため、研究専門部会の下に加速器検討会を設置し、調査審議を行うこととした。

原子力科学技術は直接的に人類に豊かさを与えるだけでなく、知ること（自然認識）のもたらす精神的な豊かさを人類社会に与えてきた「総合科学技術」である。我が国は現代社会を支える数々の先端科学技術を生み出す基盤を構築する総合科学技術として、この原子力科学技術を今後とも推進していくことが必要である。

本報告書は、「この冊子をお読みになる前に」にも述べたように、加速器はなぜ必要かという素朴な疑問に始まり、加速器の種類や我が国における加速器の現状を述べ、その方向性を探ると共に、今後の加速器の研究開発のあり方について述べる。また、原子力と加速器のつながりにも触れ、原子力予算によって推進されている4つの大型加速器のフォローアップ（原子力長期計画以後の進展のレビュー）も行なう。

## 第 2 章 科学技術と加速器

本章では加速器がなぜ必要か、加速器にはどのような種類のものがあり、夫々にどんな特徴があってどのように使われているかを概観する。

### 2.1 加速器はなぜ必要か

現在世界で最も大きい加速器は欧州合同原子核研究機関（CERN）に建設中の、周長が 27 キロメートルもある陽子・陽子衝突型加速器で、ヨーロッパを中心に世界各国が参加している巨大プロジェクトである。大型加速器の建設には巨額の費用がかかるが、加速器をつくることにはどんな意義があるのだろうか。このような誰もが抱く素朴な疑問に対して、なぜ加速器が必要なのかを、いくつかの例を示しながら説明する。

#### （１）宇宙研究からみた「自然界の生い立ち」と加速器を使ってわかった「自然界の生い立ち」

古事記は我が国の最も古い歴史書であるが、その最初に国作りの神話があって、我が国がどのようにして創られたかが書かれている。このような神話は世界各地にあり、人類が共通して自分達がどのようにして「この世」に存在するようになったかを常に考えていたことを物語っている。今日でも「この世」すなわち「私たちの住む自然界」がどのようにして生まれ、どのように進化して来たかは、人類に共通した最も興味あるテーマであろう。

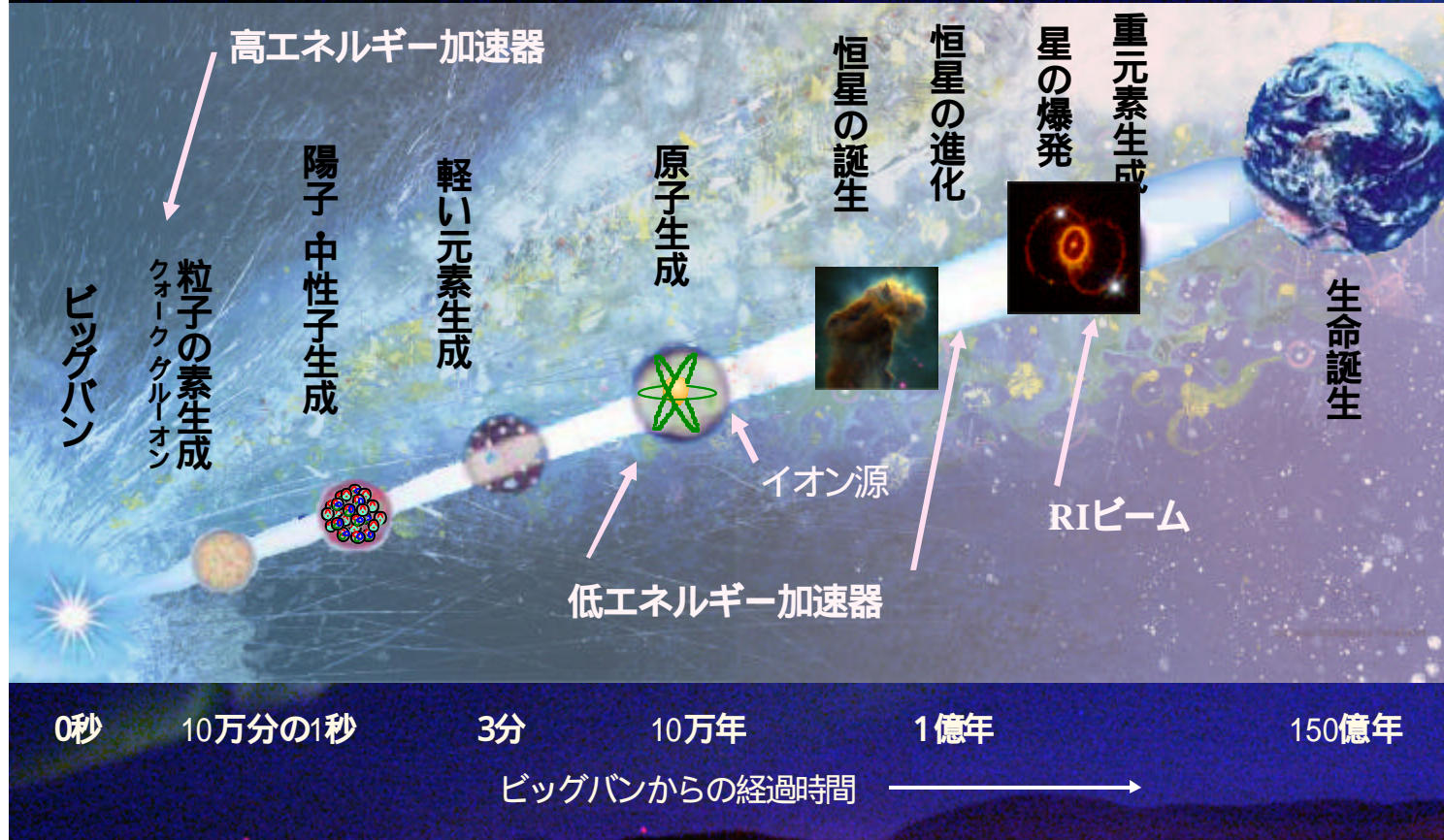
現在では、自然界すなわち宇宙はビッグバンを起こして膨張を始め、膨張に伴って温度が下がっていくと、クォークが創生され、やがて 3 つのクォークが集まって核子になり、さらに軽い元素である水素、ヘリウムなどができた。これらの元素が集まって星ができ、星のエネルギーを生み出す原子核反応が進む中で酸素など比較的軽い元素が作られたことが明らかになった。また、宇宙に無数にある星には誕生から死に至るまでの進化があり、その段階でもっと重い元素が誕生したことも明らかになった。

自然界の誕生から行く末までを明らかにする学問は、天文学を中心にする宇宙物理学と高エネルギー物理学である。前者は現在の人類が見ている宇宙の姿から、



## 図2-1 宇宙の歴史と加速器科学

種々の加速器による研究が、宇宙の歴史の違った時刻を探っている





宇宙の誕生から今日までの進化を解明し、今後の行き先を予測している。新聞や雑誌によく掲載される星の誕生や死の有様を映す天体望遠鏡（ハッブル宇宙望遠鏡やハワイにあるスバル望遠鏡など）の写真には、多くの人々が惹きつけられ、また、ロマンを感じる人も多い。

それに対し、高エネルギー物理学は加速器のエネルギーを上げることでビッグバンに迫る方法で、自然界の根源を探る学問である（第2-1図）。現在、高エネルギー物理学はクォークやレプトン等の素粒子の発見にまで到達している。たとえば、先に挙げた CERN はこの研究目的のために作られた加速器施設である。加速器がなければ人類は元素がどのようにして創られ、原子核はどのように生成されたかを知る由もない。ましてクォークの存在や、それがビッグバンのすぐ後に生じたことを知ることは不可能であろう。

加速器は第一義的には知的フロンティアを開拓する装置である。自然科学の大発見が、日本人によって日本の装置で成し遂げられたら、ほとんどの日本人が大きな喜びと誇りを抱くことは確かである。

今日ではビッグバンやブラックホールなどは社会の中で広く知られるようになっている。これまでも、相対性理論の発見や量子力学の誕生が新しい思想をもたらした社会変革に大きい影響を与えたと指摘されている。「純粋基礎科学」の研究がもつ重要な意義はこの点にある。

## （2）加速器で探る生命の仕組み

目を生体に転じると、生体内ではイオンがきわめて重要な働きをしている。ナトリウム、カリウム、カルシウム、鉄、銅、亜鉛など多くの元素イオンが存在し、夫々が神経の信号伝達、筋肉などを働かせる刺激、エネルギー代謝の触媒など固有の役目を果たしている。細胞膜にはイオンの通り道である多数のチャネル蛋白質があり、イオンはそこを通過して細胞の内外を行き来する。チャネルが開くとイオンは濃度の高いところから低いところへ移動するが、逆の場合はチャネル蛋白質がポンプになって、イオンを濃度の高い方へ送り込む。例えば神経細胞では、刺激があるとナトリウムとカリウムイオンが細胞膜の内外に濃度差を作り、それが電位差を生じて電気信号になり伝わっていく。このようなメカニズムは放射光を利用してチャネル蛋白質の構造（原子配列）が解析されて明らかになったものである。なお、2003年のノーベル化学賞はイオンチャネルの研究に対して与えら

れた。

筋肉の場合、カルシウム濃度が高くなると収縮し低くなると弛緩することは、日本人研究者によって明らかにされていた。最近、高輝度光科学研究センター( 播磨 ) の大型放射光施設 SPring-8 を使用して、筋小胞体 ( カルシウム貯蔵庫 ) の膜にあるカルシウムチャネル蛋白質の構造が解析され、その結果からチャネル蛋白質は極微スケールの手押しポンプのような動きをしてカルシウムを運ぶことが明らかになった。

このように中性子ビームを用いたタンパク質の構造解析や、今後は機能の研究も大きな注目を浴びている

### ( 3 ) 加速器を使った物質研究

放射光、中性子ビーム、ミュオンビーム及び陽電子ビームを用いた研究の主力は、物質の構造や機能の研究であり、これらは物質科学の中で大きな位置を占めている。これらの研究は今後も主流となるが、最近は社会への直接的な貢献も目立つようになってきた。次にそれらの例を示す。

最近、国内の自動車メーカーは、インテリジェント触媒を開発して高い評価を得ている。これは希少金属であるパラジウムをペロブスカイト型結晶に取り込み、触媒機能の劣化を運転中に回復する作用をもたせたものである。SPring-8 による構造解析によってインテリジェント触媒のメカニズムが明らかになり、更なる改良へのヒントを得ることができた。このように物質の構造や電子状態或いは化学状態などを、微小試料や高温高压など特殊条件下の試料でも解析できるのが、加速器をベースにした放射光や中性子の優れた点である。

このようにして構造や機能が明らかにされた蛋白質や新物質は、創薬や機能性材料開発の立場から極めて重要であることが多く、学術的価値の高い研究成果が同時に実用的価値の高い成果になる。このような研究は激しい国際競争の中で進められており、試料ができたなら一刻も早く解析したいという研究者が多いので、加速器はその要求をみたすことが重要となる。

### ( 4 ) 医療専用加速器の開発

昭和 40 年代に、陽電子崩壊をする炭素、酸素やフッ素の短寿命放射性核種( RI ) を含む薬剤を体内に注射して腫瘍部分に集め、反対方向に出る 2 つのガンマ線を

計測してその位置を決める陽電子放出トモグラフィ（PET）が開発された。わが国でも RI 製造、化学処理、検出器開発とがん研究の専門家がグループを作り、理科学研究所（理研）のサイクロトロンを利用して PET の技術開発と臨床試験を行なった。その成果を基に加速器メーカーが RI 処理装置を含めた PET 専用サイクロトロンを開発し、主に大学付属病院で PET の実用化研究が進められた。今日では全国に 60 台以上の PET 装置が設置され、脳などの腫瘍診断や脳機能検査に用いられている。現在重粒子線治療施設（HIMAC）で行われている粒子線によるがん治療も、高エネルギー物理学研究用加速器からビームをもらって、試験的に開始された治験から始まっている。このように、まず汎用中型（大型）加速器で開発が行なわれ、その有用性が認識された後に専用加速器が開発され普及した例が多い。

全国の主要な病院では電子線型加速器（リニアック）が放射線照射治療装置として使われている。最近普及した使い捨て注射器は電子リニアックによる放射線滅菌で安全性が確保されている。電子リニアックは排煙処理にも使われるようになってきたが、最近、大型コンテナを丸ごと透視する税関検査装置にも使用されている。

#### （５）大型加速器は革新的技術の先端的試験場

これまで大型加速器の果たした役割として、大型加速器が革新的技術の実用化へと導く先端的試験場になっていることも指摘しておく。大容量真空、超高真空では常に最先端の要求を実現してきた。大型超伝導磁石を大量に設置し、長時間にわたる安定運転を実現したのも高エネルギー加速器であり、計算機制御、大容量高速計算機を初めて使いこなしたのも大型加速器施設である。アメリカで軍を中心に開発されたネットワークが、高エネルギー物理学研究者の手によって www(world-wide web)と e-mail としてグローバルな展開が行なわれ、今日の IT 革命につながった。

加速器を用いた研究の多くは学術的な基礎研究であり、基本的に国際協力で進められている。東西冷戦の激しかった時代にも CERN やアメリカの研究所がロシアの研究者を迎え入れ、また多くのヨーロッパ、アメリカの研究者がロシアの研究所を訪問している。このような国際協調の精神は大型加速器利用研究を支える柱である。

## 2.2 加速器の種類と役割

### 2.2.1 加速器の種類

加速器は、学術研究、科学技術の基礎的・応用的研究や産業利用に供されており、エネルギーに関係なく最先端の研究開発や工業的利用で重要な役割を果たしている。ここでは低エネルギーも含めて、「良質のビーム装置」として用いられている広い意味での加速器を取り上げる。

#### (1) 直流加速器と交流加速器

加速器は荷電粒子（イオンや電子）を電界で加速する装置である。加速電界には時間的に一定な静電界と周期的に変化する高周波電界があり、前者が静電加速器、後者が高周波加速器である。イオンを例にとると、静電加速器の場合は正の直流高電圧の電極上で作られたイオンがアースに向けて加速されるので、加速粒子は連続ビームになる。これに対して高周波加速器では電極に正負に変化する交流電圧がかかるので、電界の向きが粒子の進行方向に向く位相（加速位相）と逆向きの位相（減速位相）になる時間があり、加速粒子は高周波と同期したパルスビームになる。

#### (2) 直線型加速器と円形加速器

加速器はまた、加速粒子が直進する直線型加速器と円軌道を描く円形加速器に分けられる。静電加速器は全て直線形加速器であるが、高周波加速器では高周波電極を直線状に並べて連続的に加速する線型加速器と、円軌道を描いて戻ってきた荷電粒子を同じ高周波電界を用いて加速する円形加速器とがある。さらに円形加速器には、加速されるにつれて軌道半径が大きくなるサイクロトロンと、加速エネルギーにあわせて磁界を変化させ、加速粒子が常に一定の軌道を周回するようにしたシンクロトロンがある。なお、変圧器と同じ原理で加速するベータトロンがあるが、現在はほとんど用いられていない。

#### (3) 静電加速器

静電加速器は加速粒子が直進する線型加速器のみであり、直流高電圧発生装置の型によってベルト起電器型（バンデグラフ加速器）と多段倍電圧整流器型（コッククロフト・ワルトン加速器）に分けられる。バンデグラフ加速器は電圧が1

MV 以上で 20MV を超える機種もあり、高電圧電極は絶縁性の高いガスの入った高圧タンク内に納められている。これにはイオン源が高電圧電極上に設置され、イオンがアース側に向かって加速されるシングルエンド型と、イオン源が外部（アース電位）に設置されたタンデム型がある。後者では、アース側にあるイオン源で負イオンを生成して高電圧電極に入射・加速し、電極上のストリッパで電子を剥ぎ取って正イオンにしたあと、アース側に向けて再び加速する。多様な元素のイオンを加速でき、電圧安定度が優れた加速器である。一方、コッククロフトウォルトン加速器（CW）は比較的低い電圧（1MV 程度まで）で大電流のビームを得るのに使われる。イオン注入装置や 14MeV 中性子源、高エネルギーイオン加速器の前段加速器などに用いられる。現在、10MV ぐらいまでのイオン加速器は静電加速器が用いられているが、それより高いエネルギーのイオン加速器と数 MeV 以上の電子加速器は殆ど高周波加速器である。

#### （４）線型加速器

粒子が加速されると速度だけでなく質量が増加（相対論的效果）する。実際には低エネルギーでは主に速度が増加し、エネルギーが高くなるにつれて質量変化が大きくなる。電子の場合、エネルギーが 1MeV を超すと速度は光速とほぼ同じになり、それより上では質量が増加する。一方、陽子ではエネルギーが 1GeV 近くになるまでは速度と質量がともに変化する。このため、イオンと電子とでは線型加速器の構造が異なってくる。イオン線形加速器では周波数を低く、直線状に並べている中空円筒電極（ドリフトチューブ）の長さをイオンの速度に比例して長くしている。その上で隣り合うドリフトチューブを高周波の両極に接続したウィドレー型と、ドリフトチューブ付の空洞共振器に定在波を生じさせたアルバレ型がある。前者は荷電粒子の速度が遅い場合に使われるが、陽子などを高エネルギーまで加速するには後者が用いられている。一方、電子線形加速器には穴の開いた円板を等間隔につけた進行波加速管が用いられていることが多く、基本的に高エネルギーまで同じ構造の加速管が用いられる。このほか時間的に変化する磁界を用いて加速する誘導型線型加速器や、断面が 4 重極電界になるような進行方向に長い四つの電極を持つ RFQ 型線型加速器がある。後者の場合、電極先端部にイオンの速度に同期した波形をつけて加速電界を形成している。

### ( 5 ) サイクロトロン

サイクロトロンは円運動の等時性に基づき静磁界を利用した円形加速器で、軽イオンを核子当たり数 10MeV に加速するのに適している。加速に伴って円軌道の半径が大きくなるので円形の磁極を用いている。加速で生じる質量増加の効果を補償するため、半径が大きくなるにつれて磁界を強くするとともに、ビーム集束のために周回軌道に沿って磁界に強弱をつけたセクター集束型 ( SF ) サイクロトロンが開発されて、100MeV を越すエネルギーまで陽子を加速できるようになった。今日では総てのサイクロトロンはセクター集束型である。なおその変形として、4 ないし 8 個のセクター磁石からなるリングサイクロトロンも建設され、陽子や重イオンを核子当たり数 100MeV まで加速している。サイクロトロンの大きな特徴は、加速周波数に同期したパルスビームが連続して得られることである。

最近原理実証器が作られた固定磁界強集束 ( FFAG ) 加速器や電子加速器マイクロトロンもサイクロトロン的一种と考えてよい。

### ( 6 ) シンクロトロン

シンクロトロンは粒子のエネルギーに応じて変化する磁界を用いた円形加速器であり、加速の全期間にわたって軌道を一定に保つことができる。円形軌道を作る磁石はサイクロトロンと異なり、電子シンクロトロンでは高周波電界の周波数は一定であるが、イオンの場合は周回周期がエネルギーとともに短くなるので、磁界だけでなく周波数を高くしなければならない。シンクロトロンの場合、軌道半径を大きくし磁界を強くすればエネルギーをあげることができる。現在ヨーロッパでは超伝導磁石を用いて直径 8 キロメートルを越す大型シンクロトロンが建設されている。

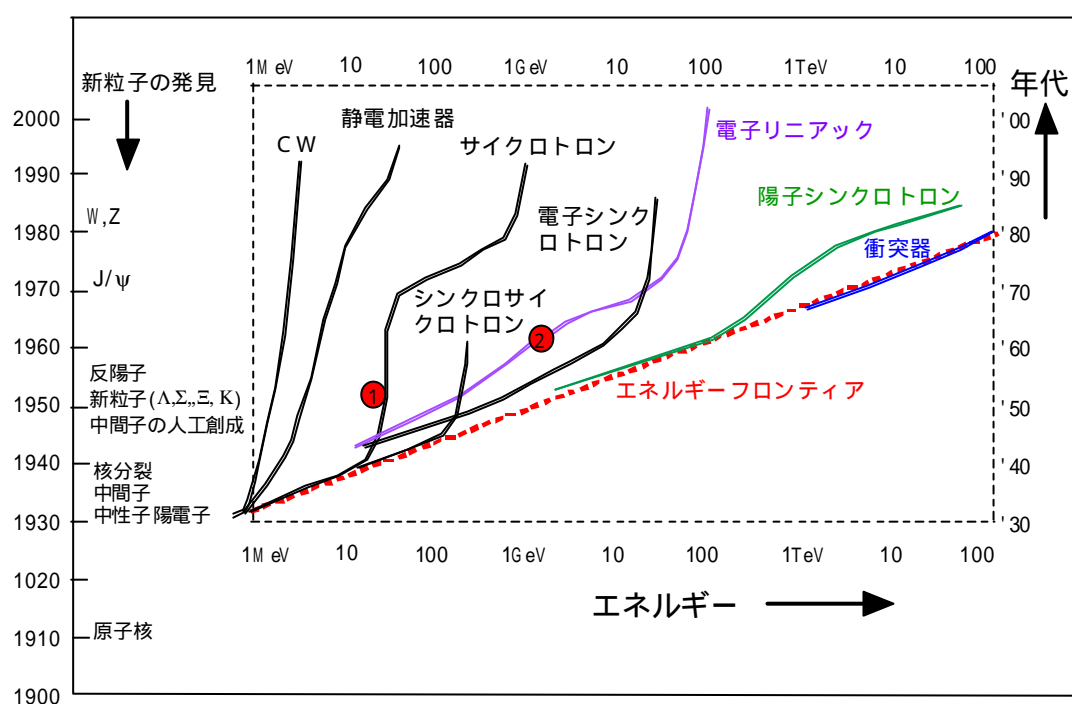
シンクロトロンは粒子のエネルギーに合わせて磁界を強くする装置であるが、装置が大きくなるにつれて磁界を変える周期が長くなる。ところが加速粒子は最終エネルギーに達した後で取り出すので、この周期に同期したパルスになっている。したがってひとつのパルスに含まれる加速粒子数をできるだけ多くしなければならない。

### ( 7 ) 衝突型加速器と蓄積リング

高エネルギー物理学の実験では、粒子を衝突させて新しい粒子を作り出し、素

粒子間に働く相互作用を解明する。エネルギー的に最も効率的な衝突（重心系エネルギーが高い）は同じエネルギーで互いに反対方向に進む粒子の正面衝突である。このようなビーム・ビーム衝突器が開発されている。そのためにはシンクロトロンで加速された後、磁界を一定に保ってビームを周回させ続けるビーム貯蔵を行う。このようなシンクロトロンを蓄積リングと呼んでいる。

以上に述べた加速器の種類とその特徴を第2-1表にまとめた。



第2-2図 エネルギーフロンティアで見た加速器の発展

## 2.2.2 加速器の役割

これまで述べたように加速器は自然界を構成する要素を探究する目的で発明され改良されてきた。ここでは現在科学技術の研究や産業技術において、加速器がどのように使われているかを概観する。

### （1）加速器のフロンティア

これまで加速器はより高いエネルギーに粒子を加速するエネルギーフロンティアと、より大強度の加速粒子を得る強度フロンティアの開拓を目指して発展してきた。それにつれて多様な二次粒子が作られるようになり、質の高い二次粒子

ビームを用いた実験が始まるとともに、エキゾチックな粒子の加速・減速が行われるようになり、二次粒子は新しいフロンティアになっている。

今日では、加速器が広い科学技術分野において先端的・基盤的研究装置として用いられていて、エミッタンス、エネルギー分解能、時間的特性や偏極特性などに優れた良質のビームを得る「クオリティフロンティア」が重視されるようになった。この場合、測定精度に直接かわる装置全体の安定性や低バックグラウンド性あるいはマイクロビーム性能も重要な条件である。一方、特定目的に使用する専用加速器の開発も進められている。その場合、それぞれの用途に特化した条件、例えば医学応用や工業利用専用加速器には、信頼性、制御性、操作性に優れたコストパフォーマンスの良い装置の実現が求められている。

## （２）加速器が果たしている役割

加速器は未知への挑戦、新しい技術の創出、豊かで安心な社会の実現に大きな役割を果たす装置として発展してきた。その歴史からもわかるように、加速器はまず基礎研究の重要な道具である。より根源的な自然界の構成要素を究める装置として中心的な役割を果たしてきており、そこで発見される現象は人々の知的好奇心をかきたてるとともに、人類の新しい知的財産になっている。

放射線利用を含む原子力エネルギー開発或いはエネルギー科学の研究において加速器は先導的研究開発の装置として重要な役割を果たしている。とくにわが国では、大学におけるエネルギー科学研究において、今日でも中型／小型加速器が重要な役割を果たしている。かつて大学におけるエネルギー科学の研究は原子力(核)工学科において活発に進められ、多くの人材を輩出してきた。今日ではその殆どが「量子エネルギー」の研究を取り上げ、より広い立場からエネルギー科学の研究を進めるようになっており、高出力レーザーと量子ビームが重要な研究テーマになっている。

## （３）先端的基盤研究装置としての重要性

自然科学研究の目的は、研究対象を取り出し、様々な実験手法を用いて対象物の性質や機能を、場合によっては温度、圧力、磁界や電界などの環境条件を変えて計測し、ときには対象にエネルギーや刺激を与えてその変化を追跡して、そこに働く原理や法則を明らかにすることである。その成果を用いて新しい材料が作



り出され、様々な装置が発明されて人類社会を支える技術が進歩してきた。このような科学技術の発展において、主要な実験手法の基礎となる研究装置が基盤的研究装置である。

20 世紀後半になると物質科学、生命科学の研究が急速に発展してきたが、その重要なプローブとして光が広く用いられている。なかでも放射光の進歩が今日の生命科学や材料科学の発展に大きく寄与していることは、万人の認めるところである。さらに自由電子レーザー或いはパラメトリック X 線の開発が更に新しい測定手段を提供することは明らかである。同様に中性子が物質科学や生命科学、環境科学の研究に重要なプローブであり、加速器はその強力な線源になっている。このように加速器は広い科学技術分野における先端的基盤研究装置として用いられ、その役割はますます広がっている。

#### （４）社会に直接役立つ加速器

あまり注目を浴びていないが、企業の生産活動や医学機関の診断・治療に多数の専用加速器が使われている。現在国内で稼動している加速器を所有している機関のうちおよそ 80% は医療機関で、その加速器の大半は照射治療に使われている。一方、がんの発見や血流の検査に短寿命の放射性同位元素（RI）が用いられ、また、直接粒子線を照射するがんの治療方法が行なわれるようになった。このように加速器を利用するクォリティ・オブ・ライフ（QOL）の高い先端医療が開発されている。一方、加速器を所有する機関の 10% 弱が民間企業であるが、その所有する加速器のうち過半数が生産用に使われているほか、排煙処理など公害対策として重要な加速器応用も開発されてきている。このように、豊かさと安心の得られる社会の実現に果たす加速器の役割はますます高まっている。

先端的な加速器の建設には新しく開発される要素技術と各パーツの製造技術が必要である。超高真空や超伝導技術、高周波技術などは常にこれまでの水準を越える性能が要求される。また加工/組み立て方法やその精度、品質管理などでも製作側に開発する要素が多い。このように工業技術に与えるインパクトは加速器の重要な役割である。

このように広い分野で進められている加速器利用の具体的な内容を第 2 - 2 表にまとめた。

第2 - 1表 加速器の種類

加速電界		タイプ	名称	最高エネルギー	加速粒子	特徴	主な用途
静電界	線型加速器	多段階電圧整流器	コッククロフト・ワルトン(CW)	~ 1MV	電子 / イオン	大電流	イオン源・電子銃 / 前段加速器、中性子源、イオン注入
		高周波多段高電圧装置	ダイナミトロン	~ 5MV	電子 / イオン	高電圧大電流	大強度X線源
		同(タンデム型)	タンデトロン	~ 2 x 数MV	重イオン	固体イオン多価イオン	物質材料分析、表面、微量元素分析、質量分析
		ベルト型高電圧発生器	バンデグラフ	~ 20MV	電子 / 軽イオン	高品質ビーム	物質材料分析、表面、微量元素分析
		同(タンデム型)	タンデム型バンデグラフ	~ 2 x 20MV	重イオン	多様な多価イオン高品質ビーム	原子核、物質材料分析、表面、微量元素分析、質量分析
高周波電界	線型加速器	ドリフトチューブ型	ウィドレー型リニアック	数MeV/u	重イオン	低速イオン加速、大電流	入射器 / 前段加速器
		空洞共振器定在波型	アルバレー型リニアック	数100MeV	陽子、軽イオン	高エネルギー、大電流	入射器 / 前段加速器、原子核、2次粒子(パイオン、ミュオン、中性子)
		進行波加速管型	電子リニアック	数10GeV	電子	高エネルギー、	高エネルギー物理、陽電子源、EFL、医学利用(低エネルギー)
		電磁誘導型	誘導型リニアック	数MeV	電子 / イオン	高エネルギー、大電流	大強度X線源、中性子源
		RFQ型	RFQ型リニアック	数100keV/u	陽子 / 重イオン	大電流	前段加速器
	静磁界	サイクロトロン	SFサイクロトロン	数10MeV/u	陽子 / 重イオン	汎用、専用	原子核、医学利用(PET、照射)、照射、陽電子源
		同(分離セクター型)	リングサイクロトロン	数100MeV/u	陽子 / 重イオン	高エネルギー、大強度	原子核、RL、照射
		FFAG	FFAG	数100MeV	陽子 / 軽イオン	小型	開発中、医学利用
		マイクロトロン	マイクロトロン	数10MeV	電子	小型	前段加速器 / 入射器
	円形加速器	ベータトロン	ベータトロン	数100MeV	電子	変圧器型	現在ほとんど製作されていない
		シンクロトロン	強集束型	数10GeV	電子 / イオン		高エネルギー物理、前段加速器 / 入射器
			機能分離型	1TeV		高エネルギー、大強度	高エネルギー物理、前段加速器 / 入射器
		蓄積リング	シンクロトロン / 貯蔵リング	30GeV	電子	高エネルギー	衝突器、放射光
		蓄積リング	シンクロトロン / 貯蔵リング	10TeV	陽子 / 重イオン	高エネルギー、大強度	高エネルギー物理
	変動磁界	蓄積リング	冷却器	1TeV	陽子	高エネルギー	高エネルギー・2次粒子衝突器

第2 - 2表 加速器利用のまとめ

役割	研究課題	加速 粒子	加速器の種類	エネルギー	主な実験手法	研究内容
自然を 究める の根 元装 置的 置 構の 成役 要割	新粒子の発見	e / e+ p / p	電子 陽電子衝突器 陽子衝突器 冷却	>TeV ~ 10TeV	リニアコライダー	ヒッグス粒子の発見
	対称性の破れ	e / e+	電子 陽電子衝突器	>GeV	高エネルギー陽子反 応生成粒子の崩壊過程	
	ニュートリノ振動	p	陽子シンクロトロン	50GeV	地下ニュートリノ計測	ニュートリノの質量
	クォーク状態	p	陽子シンクロトロン	50GeV	原子核によるK中間子散乱	クォーク物質
	クォーク・グル ンプラズマ	HI / HI	重イオン衝突器	2 x 200 GeV	重イオン衝突におけるた粒 子放出の空間分布	
	宇宙における元素 創製	HI / HI	重イオンサイクロトロン	> 100 MeV/u	不安定原子核による核 反応	
	反原子、反物質	p、e+	シンクロトロン反陽子 生成と蓄積 冷却減速 と加速、陽電子捕獲	26GeV+ 3.5GeV +5NeV	反陽子を生成し減速して 陽電子のトラップ	
	新粒子発見/クォ ーク状態	e	電子リニアック 電子蓄積リング	10GeV 8GeV	電子散乱 レーザー電子光	ペンタクォーク粒子の発見
	原子核構造 反応	e, p, HI	各種電子・イオン加速器	1MeV-1GeV	散乱計測、粒子相関etc	
	原子、原子反応	HI	イオン加速器	< 数MeV		
工度 ネリ ル用 ギの   先 科導 の発生 学的 と研 究装 射装 線置 高	高速中性子の発生 と利用	パルス p, d e  パルス d	CW バンデグラフ、 ダイナミトロン 電子リニアック  CW	0.15 - 5MeV < 45MeV  0.3MV	D2,T,Li,Be等ターゲット による(p,n), (d,n) 反応 放射化分析、中性子飛行 時間法中性子スペクトル 大強度パルス中性子	中性子標準場、中性子核反応 中性子検出器の開発 中性子散乱、中性子の生物効果 原子炉材 / 遮蔽体の核データ、 加速器駆動未臨界実験炉入射器
	高エネルギー 線 の発生	e	バンデグラフ、 電子リニアック		p 反応 レーザーコンプトン後方散乱	高エネルギー単色ガンマ線の 発生と計測法の開発
	イオンビームの 利用	p	直流高圧電源/ サイクロトロン	数MeV - 20MeV	粒子重照射、二重 照射 (損傷と分析)	核融合炉材ヘリウム脆化
	放射性同位元素の 利用	p, d, 3He HI	サイクロトロン  リングサイクロトロン	数10MeV  100MeV /u	照射,化学分離  照射,化学分離なし	トレーサー、PET  マルチトレーサー
	ミュオン核融合 核融合	p HI (Pb)	シンクロトロン 誘導ライナック	~ 1GeV 20MeV/u	パイ中間子の崩壊、 大強度パルスビーム照射	ミュオン触媒DT反応、
広お いけ 科る 学先 技端 術的 分基 野盤 の研 究 究装 に置	放射光の利用	e	電子蓄積リング	0.5 - 8GeV	偏向磁石、挿入光源、 ビームライン X線回折、X線散乱、XAFS、 分光、時分割計測 イメージング、マイクロ(ナ ノ)ビーム	生命科学、材料科学、環境科学、 医学利用、産業利用 結晶構造解析、電子状態 / 機能解析、 内部歪 / 応力測定、極微量元素分析、 極端条件下の物質構造、 微細加工(LIGA)、リソグラフィ X線顕微鏡、光電子顕微鏡
	自由電子レーザー	e	電子リニアック、 電子蓄積リング	40keV - 1GeV	コヒーレンス、ピコ/フェ ムト秒	分光、イメージング(顕微鏡)
	パラメトリックX線	e	電子銃 + 直流高電圧 / リニアック	40MeV	パラメトリック線	分光
	電子線の利用	e	電子リニアック(パルス)		電子線 X(ガンマ)線	放射線化学、パルスラジオリシス
	陽電子の利用	e	電子リニアック	10MeV ~ 1GeV	低速陽電子ビームによる 陽電子消滅法	表面 薄膜材料極微構造評価、格子欠陥の同定
	ミュオンの利用	p	大強度シンクロトロン	~ 1GeV	パイ中間子の崩壊	生命科学、材料科学、環境科学、医学利用、 ミュオンスカラー( $\mu$ SR)、
	中性子の利用	p	大強度シンクロトロン	~ 1GeV	核破砕中性子、冷中性子、 パルス	生命科学、材料科学、環境科学、医学利用、 産業利用、中性子散乱、中性子回折、 中性子ラジオグラフィ
	軽イオンの利用	p,	バンデグラフ、タンデム バンデグラフ	<10MV	チャネリング、ラザフォード 後方散乱、反跳原子分析、 蛍光X線測定、核反応	微量元素分析 (PIXE)、表面解析、 核物性、表面 バルクの結晶構造解析、 不純物 / 格子欠陥位置の同定
	重イオンの利用	p ~ H	CW、タンデムバンデグ ラフ	<数MeV	イオン注入、重イオン照射	半導体、表面改質、格子欠陥、ビーム誘起界面 反応、結晶表面構造解析
	加速器質量分析	HI	タンデムバンデグラフ	2 ~ 10MV	12,13,14C、9,10Beの加速 と14C、10Beの定量分析	考古学、環境科学

第2 - 2表 加速器利用のまとめ（続き）

役割	利用課題	加速粒子	加速器の種類	エネルギー	主な利用手法	利用内容
高度先進医療	放射光の利用	e	シンクロトロン、蓄積リング	数GeV	X線イメージング、蛍光X線分析	血管造影、微小ガン検診、極微量元素分析 / 分布
	電子線の利用	e	電子リニアック	<20MeV	X線照射	ガン治療
	陽子ビーム利用	p	サイクロトロン サイクロトロン/シンクロトロン	<20MeV 200MeV	放射性同位元素の製造 1次ビーム照射	PET (ガン検診、脳機能検査) 粒子線ガン治療
	重粒子線照射	HI	シンクロトロン		1次ビーム照射 2次ビーム利用	重粒子線ガン治療 放射性核種
産工業技術利用開発	放射光の利用	e	電子蓄積リング	<1GeV	放射光加工	微細加工(LIGA)、リソグラフィ
	電子線の利用	e	電子リニアック	<10MeV	X線透視画像	非破壊検査
	同上	e	CW、電子リニアック	<10MeV	X線照射、放射線硬化、放射線分解	電線、タイヤ、発泡体、熱収縮、排煙 排水処理
	同上	e	CW、電子リニアック		生物効果	滅菌
	イオン注入	HI	CW	<1MeV		半導体加工、表面改質
	重イオン照射	HI	サイクロトロン	~ 100MeV/u	照射	宇宙環境材料開発、育種
加速器・利用技術開発	新しい加速法	e,p	レーザープラズマ加速	MeV	レーザー航跡場加速 ビーム航跡場加速	加速器の小型化
	新電子銃	e	RFGun、DCGun			
	パラメトリックX線	e			パラメトリックX線	コンパクトX線源、コヒーレントX線
	自由電子レーザー	e	LSCX/フレンドリニアック	GeV	SASE	X線領域のコヒーレント、フェムト秒
	ERL	e		GeV		パルス
	加速器の改善				低エミッタンス化、短パルス化、大ピーク電流	
	高速度画像技術					
発	加速器の小型化	e, p				医学利用、産業利用、

## 2.3 日本や世界の加速器

### 2.3.1 日本における加速器の発展

#### (1) 日本の加速器

加速器が発明された 1930 年代には我が国は加速器の先進国であった。1935 年から 36 年にかけて理化学研究所（理研）で静電加速器を用いた実験が始まり、1937 年には理研と大阪大学でサイクロトロンが建設されて実験が始まり、1943 年には理研で当時世界最大級のサイクロトロンが完成している。

第二次大戦後しばらく途絶えていた加速器の建設は 1950 年代になって再開されるようになった。理研、大阪大学、京都大学では戦前に建設されたサイクロトロンとほぼ同規模のものが再建されたが、本格的な加速器建設は 1950 年代後半に完成した東京大学原子核研究所（当時、以降：核研）のサイクロトロンが最初である。次いで核研に電子シンクロトロンが完成し、理研にもサイクロトロンが建設されたが、世界最先端の加速器には遠く及ばないものであった。この様子を第 2 - 2 図に示しておく。

#### (2) 世界トップレベルの加速器の実現

欧米諸国に対して大きく遅れていた我が国における加速器環境は 1970 年代から急速に改善され、世界のトップレベルの加速器が建設されるようになった。高度成長に伴う経済発展と鉄鋼など基幹材料の生産技術及び加工 / 製造技術の目覚ましい発展に支えられて、我が国で高性能加速器計画が次々に実現していった。1980 年代半ばまでの 15 年間に、わが国では高エネルギー物理学研究所（KEK）の陽子加速器、大阪大学核物理研究センター（RCNP）及び核研のサイクロトロン、東北大学の電子リニアックや放射線医学総合研究所（放医研）の中性子治療用サイクロトロンが建設され、また、放射光施設では東京大学物性研究所の SOR リングに続いて、電子技術総合研究所の TERAS、KEK のフォトンファクトリー (PF) など、さらに多目的加速器として日本原子力研究所（原研）高崎研究所の加速器施設（TIARA）、東北大学サイクロトロン RI センター（CYRIC）のサイクロトロンが建設されている。なお、当時世界最先端の施設として計画された KEK のトリスタン、理研のリングサイクロトロンは 1986 年に完成している。

1990 年代になると、さらに大型の加速器計画が進められてきた。そして現在では、大型放射光施設 SPring-8（理研/原研）、重粒子線治療施設 HIMAC（放医研）

KEK の B-ファクトリーは既に完成して目覚ましい成果を挙げており、世界のトップを狙う大強度陽子加速器 J-PARC ( 原研・KEK) と R I ビームファクトリー RIBF ( 理研) が建設中である。

### ( 3 ) 加速器利用の拡大

加速器の発展とならんで、加速器を利用した研究開発も目覚しく発展した。新放射性同位元素 ( RI ) の利用やイオン注入、高エネルギー放射線を利用した放射線科学の研究あるいは放射光 X 線と中性子の利用などが世界的に行なわれ、加速器の産業利用や医学利用が急速に進められた。今日では、放射線による高分子の架橋など放射線化学的技術開発で、電線被覆材やタイヤの改質、滅菌や排煙/廃水処理などへの電子加速器の利用が実用化し、また、イオン注入、非破壊検査などに使うために多くの加速器が生産現場で使われている。また、X 線 ( ガンマ線 ) 照射治療用電子リニアックが約 700 台稼動しており、陽電子放射トモグラフィ ( PET) のための小型サイクロトロンが約 60 の医療機関に設置されている。

加速器が大型化するにつれて、大学の 1 学部あるいは 1 学科が最先端の加速器を建設・維持するのは困難になる。そこで多くの大学では比較的小型の加速器を研究教育に用いるようになり、特徴的な加速器技術の開発や加速器利用の研究が行なわれるようになった。現在では大学における研究開発がこのような加速器利用のフロンティアを広げている。

## 2.3.2 我が国における加速器の現状

今日、わが国には一千台を超える加速器が稼動している。そこでわが国の加速器環境が世界との比較においてどのような位置にあるかは、今後の加速器計画を考える上で重要な指針になる。そこで、先端的研究施設として広く利用されている中・大型加速器を対象として比較することにした。

### ( 1 ) 我が国の加速器の実態調査

わが国には 2000 年 3 月現在で、1,136 基の加速器が放射線発生装置として登録されている。その実態を第 2 - 3 表にまとめた。ところが実際には、エネルギーが低くて放射線発生装置の登録の必要がない加速器も多く使われており、とくに産業界にはこの傾向が強い。大阪大学産業技術研究所の田川教授の文献に引用さ

れたデータでは、1970 年から 1998 年の間に設置された電子加速器（総数 308 台）のうち、0.3MeV 程度の加速器が 178 台、エネルギーが 0.3-3MeV の加速器は 119 台である。これに対して 2000 年 3 月現在放射線発生装置として登録されている民間企業の加速器総数は 141 台である。後者にはイオン加速器も含まれているので、このデータから民間企業に設置されている加速器の多くが、放射線発生装置に登録する必要のない 1MeV 以下のものであることが推定される。

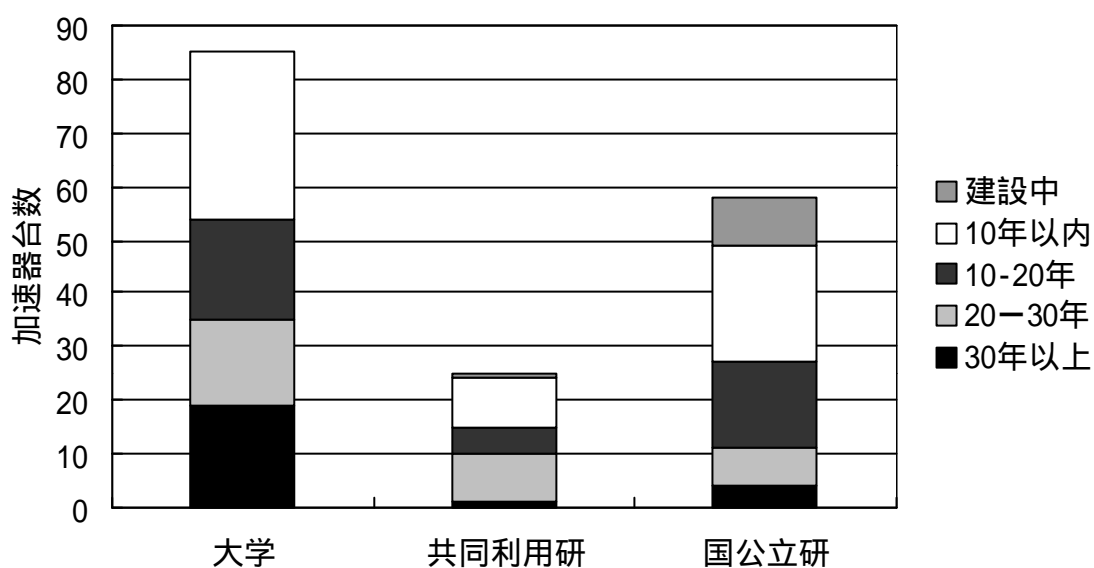
今回実態調査を再び行ったが、我が国研究機関の加速器施設には、実際に放射線発生装置としての認可が不必要なものも含まれていることが判明し、また、これらがエネルギー科学研究や基礎的・基盤的研究に使われて成果を挙げていることも判った。そこで、本報告書では、研究・教育の現場で使われている加速器をできる限り拾い上げて、その果たしている役割を記すことにした。第 2 - 4 表は公的研究機関に設置され実際に使われている加速器を、イオン加速器と電子加速器を分けてまとめたものである。複合加速器の場合、入射器と後段加速器が独立に使用できないときは一つの加速器として数えている。なお、大学付属病院あるいは公的医療機関で診療や治療に使われている照射装置と PET 専用加速器は含まれていない。

## （ 2 ）大学における加速器

第 2 - 4 表のデータをもとに、大学、全国共同利用機関及び国公立研究機関別に稼動年数を比較した結果を第 2 - 3 図に示した。大学では 30 年以上前に建設された加速器が 19 台使われているが、過去 10 年間に建設された加速器は 31 台あり、施設の更新が進んだことを示している。これは工学部原子力関係学科が量子エネルギー関連学科に衣替えしたときの効果と見ることができる。

調査の結果、いくつかの特徴が明らかになった。第一は、部分的な改造のための財政措置が得られれば、建設後 20 年近く経つ加速器でも最先端の加速器施設とし十分に利用できることである。例えば、東大原子力総合センターや阪大産業科学研究所では 1970 年代後半に建設された電子線型加速器をパルス幅フェムト（ $10^{-15}$ ）秒の電子線を加速できるように改造し、最先端パルスラジオリシスの研究を行なっている。第二は、物質・材料研究に複数の加速器を用い、照射 / 注入と特性評価を同時に行なう研究やマイクロビームの開発など研究が高度化していることで、核融合材料の開発など今後の原子力研究の重要課題が研究されてい

る。最後に、加速器質量分析による考古学的年代測定のような新しい加速器利用が広がり、小型加速器が新しい学問領域を開拓していることである。同様に東工大原子炉研究所で開発しているフラレン  $C_{60}$  加速器や KEK で完成した低エネルギー静電型蓄積リングは、高分子の精密質量分析でナノテクノロジーや生命科学の研究開発に新しい研究手法を提供する可能性がある。なお、後者は競争的資金を用いて建設された小型加速器である。



第2-3図 加速器稼働年数分布

中型及び大型の加速器施設は全て共同利用施設であり、殆ど大学共同利用機関、国公立研究所と大学付置の全国共同利用研究所に設置されている。例外は東北大学と広島大学で、東北大学にはサイクロトロンラジオアイソトープセンター（CYRIC）に全学共同利用施設のサイクロトロンが、また、理学研究科付属の原子核理学研究施設に電子線型加速器施設が設置されている。一方、広島大学では放射光研究センターに HISOR が設置され全学共同利用に供されているほか、地域センター的役割も果たしている。

これらの施設については、次節で世界的な比較からその特徴を述べることにする。



### 2.3.3 世界的に見た我が国の加速器

我が国の中型・大型加速器施設は、放射光施設と医療用加速器を除いて、全て原子核/素粒子研究を主目的にして建設されてきた。高エネルギー物理学の分野では全てが大型加速器であり、大学共同利用機関の高エネルギー加速器研究機構（KEK）に設置されてきたが、原子核研究の分野では複数の研究機関に中型あるいは大型加速器が建設されてきている。このように原子核/素粒子研究の分野では、幾つかの研究機関が特徴ある大型加速器施設を建設してそれぞれ独自の研究を展開し、世界の COE として認められている。その様子を分野別に第 2-5 表に示した。

#### （1）高エネルギー物理学分野の加速器

高エネルギー物理学の分野（第 2-5-1 表）で KEK は世界センターの一つである。エネルギーフロンティアでは欧米の研究機関に及ばないものの、CP 対称性の破れを検証する B ファクトリーの実験では、世界のトップに立っている。また、建設後 30 年を経た陽子シンクロトロン（KEK-PS）は数度に及ぶ改造・高度化によって、現在でもニュートリノ振動の実験や K 中間子の実験で新しい発見を次々に生み出している。なお、大強度陽子加速器施設 J-PARC の完成で、この分野の研究は今後ますます発展することが期待されている。

#### （2）放射光の応用や中性子

一方、最近 SPring-8 で新粒子（ペンタクォーク粒子）が発見され世界を驚かせたが、これは阪大 RCNP が放射光施設に原子核/素粒子研究の専用ビームラインを建設して挙げた成果であり、独創的発想があれば僅かな経費の追加で新しい研究が可能なことを実証した例である。

核破砕中性子源の開発は激しい国際競争のなかで進められている。我が国は KEK の中性子施設（KENS）で世界最初の核破砕中性子源を実現したが、その後世界各地で完成された同種の中性子源に大きく遅れをとってきた。現在建設中の J-PARC が完成すれば、再び世界の一大センターとなる。

#### （3）放射光専用加速器施設

第 2-5-2 表に示したように、放射光分野では SPring-8 が世界のトップに位

置している。とくに放射光 X 線の波長範囲と分解能、輝度、コヒーレンスや偏光特性では他の施設の追従を許していない。1975 年、我が国は世界に先駆けて放射光専用リング SOR リング（既に運転中止）を東京大学物性研究所に建設したが、それに続いて建設された KEK-PF は長年にわたって我が国の放射光利用研究を世界第一線級に持ちあげる原動力になってきており、最近、高度化も計画されている。この他幾つかの小型リングが建設されているが、世界的な傾向である中型（2 ～ 3GeV）高輝度放射光源の建設では大きく遅れをとっている。

放射光施設の発展として自由電子レーザーの研究が世界的に進められている。赤外線から可視光領域にかけての自由電子レーザーは、既に 1980 年代からヨーロッパ、アメリカ、日本で建設され実験に供されてきた。現在は X 線自由電子レーザー開発で世界的な競争が広げられており、アメリカとドイツで本格的な X 線レーザーの建設が進められている。なお、わが国では理研で 5 ナノメートル近辺の波長領域を目標とした軟 X 線領域の自由電子レーザーが建設されている。

#### （４）原子核研究分野の主な加速器施設

原子核研究分野における世界の主要原子核研究施設の加速器を第 2 - 5 - 3 表に示した。原子核研究では多様性が重視されていて、加速器も電子、陽子/軽イオン、重イオンごとの利用研究に分かれて建設されており、エネルギーにも大きな幅がある。第 2 - 5 - 3 表は地域別に主要な加速器施設をまとめたものである。我が国では、陽子/軽イオンの分野で阪大 RCNP のリングサイクロトロンが、また、重イオンの分野では理研のリングサイクロトロンがそれぞれ実験研究の世界のセンターになっている。また KEK-PS は GeV 領域の原子核研究で優れた成果を挙げているほか、原研の複合加速器（タンデムバンデグラフ + 超伝導リニアック）が重イオンによる原子核研究の精密実験で成果を得ている。一方、高エネルギー電子を用いた原子核研究は欧米の方が進んでいる。

#### （５）多目的加速器施設

加速器の応用では、原研高崎研究所の TIARA が高速イオンの材料科学、生命科学への応用で他に類例を見ない総合的研究施設である。また、重粒子線の医学利用では HIMAC が世界のトップランナーの地位を占めている。また、理研加速器研究施設と東北大学 CYRIC は原子核研究が主な用途であるが、RI 利用や生物照射な

ど限定的な範囲で多目的に利用されている。しかしこれらの分野の国際比較は資料整備が遅れているため行なっていない。

第 2 - 3 表 国内における加速器保有実態（発生装置種類別・機関別）  
放射線利用統計（2000年3月31日現在、日本アイソトープ協会）

	総数	医療機関	教育機関	研究機関	民間企業	その他
総数	1136	767	58	163	141	7
コッククロフト・ワルトン加速装置	91	0	25	33	31	2
バンデグラフ加速装置	41	0	16	23	1	1
変圧器方加速装置	25	0	1	19	5	0
直線加速装置	836	709	11	47	66	3
ベータトロン	14	6	0	1	7	0
マイクロトロン	34	26	2	2	4	0
サイクロトロン	63	25	0	16	21	1
シンクロサイクロトロン	0	0	0	0	0	0
シンクロトロン	31	1	3	21	6	0
プラズマ発生装置	1	0	0	1	0	0

第2 - 4 - 1表 我が国のイオン加速器

研究機関		イオン加速器	エネルギー	建設年	用途
北大	工学研究科量子エネ	バンデグラフ	2.5MeV		放射線物性
	同上	中性子源		1960	中性子源、放射化分析、水素分析
東北大	工学研究科量子エネ	ダイナミトロン	4.5MV	1974	PIXE、中性子工学
	同上	CW	0.6MV	1965	教育
	金材研	タンデムバンデグラフ	2MV	1990	表面元素分析、表面改質
	CYRIC	サイクロトロン	K=130MeV	1999	核、多目的
	電通研	バンデグラフ	2.5MV	1981	半導体研究 (RBSなど)
筑波大	陽子線医学利用研	シンクロトロン	Ep=250MeV	2001	治療
	加速器センター	タンデムバンデグラフ	12MV	1976	原子核、多目的
	同上	タンデトロン	1MV	1996	物質材料、微量分析
KEK	R&D	RFQ+リニアック	4MeV	2000	加速器開発
	PS	CW陽子リニアック	40MeV	1974	入射器
	PS	陽子シンクロトロン	0.5GeV	1974	入射器、中性子源
	PS	陽子シンクロトロン	12GeV	1975	原子核、中性子ミュオン
		静電型蓄積リング	30keV	2000	高分子質量分析
	R&D	POPFFAG	0.5MeV	2000	加速器開発
環境研究所		タンデムバンデグラフ		1996	年代測定、微量分析
産総研	つくばセンター中央	ペレトロン	4MV	1982	多目的、中性子標準
	同上	コッククロフト・ワルトン	0.3MeV	1980	中性子標準
	同上	コッククロフト・ワルトン	0.4MeV	1980	イオン注入
	つくばセンター東	タンデムバンデグラフ	1MV	1988	物質材料、表面改質
	中部センター	タンデムバンデグラフ	1.7MV	1988	物質材料、表面分析
	関西センター	タンデムバンデグラフ	1.5MV	1988	物質材料、表面分析、表面改質
	同上	バンデグラフ	2MV	1969	物質材料、表面分析
物質材料研	材料研究所	サイクロトロン	Ep=17MeV	1986	原子力材料
	ナノテクのロジック研	バンデグラフ	2MV	1993	化学系物質材料のイオン照射、表面
	同上	タンデムバンデグラフ	2MV	1998	物質材料のその場計測
長岡科技大	長岡科技大	CW	3MV	1981	イオン蒸着、abrasion、放化、技術
	同上	タンデトロン	1.7MV	1996	物質材料、放化、表面、微量
	同上	CW (パルス)	0.4MV	2000	表面改質
原研	東海研	タンデムバンデグラフ	20MV	1982	核、原子、物質材料、技術開発
	同上	ブースターリニアック(超伝導)	30MV	1994	核、原子、物質材料、技術開発
	同上	バンデグラフ	2MV	1957	原子分子、物質材料
	同上	RFQ + IH	1MV/u	2003	核、物質材料、技術開発
	同上	ペレトロン	4MV	2000	中性子校正場
	同上	CW	0.45MV	1981	中性子発生
	同上	陽子リニアック	5MeV	1994	技術開発
	同上	陽子リニアック	200MeV	2005	
	同上	陽子シンクロトロン	3GeV	2006	
	同上	陽子シンクロトロン	50GeV	2007	
	高崎研	サイクロトロン	K=130MeV	1991	多目的
	同上	タンデムバンデグラフ	3MV	1991	同上
	同上	バンデグラフ	3MV	1993	同上
	同上	イオン注入装置	400kV	1993	同上

第2 - 4 - 1表 我が国のイオン加速器（続き）

研究機関		イオン加速器	エネルギー	建設年	用途
	那珂研	中性子源CW		1981	材料試験
	同上	NBI加熱正イオン		1987	プラズマ加熱
	同上	NBI加熱負イオン		1996	プラズマ加熱
	むつ事業所	タンデムバンデグラフ		1997	質量分析
理研	和光研	重イオンリニアック	6MeV / u	2000	多目的
	同上	リングサイクロトロン	K=540MeV	1986	多目的
	同上	サイクロトロン	K=75MeV	1989	多目的
	同上	タンデムバンデグラフ	2MV	1990	物質材料
	同上	RIBF/IRCリングサイクロトロン		2006	ブースター
	同上	RIBF/IRCリングサイクロトロン		2006	核物理、多目的
	同上	RIBF/SRCリングサイクロトロン	300MeV/u	2006	核物理、多目的
	同上	ECRイオン源	eV-keV		原子物理
東工大	理工学研究科	バンデグラフ	475MeV	1968	原子、物質材料、生命、表面、微量
	原子炉研	シングルエンドペレトロン	3.2MV	1976	原子核、中性子発生
	同上	タンデムペレトロン	1.7MV	1984	プラズマ、微量元素(PIXE)
	同上	RFQ重イオンリナック	220keV/u	1993	加速器開発、プラズマ
	同上	C60加速装置	0.3MeV	2001	加速器開発、プラズマ
	同上	誘導型高電圧発生装置	200kV	1998	
	総合理工学研究科	タンデムペレトロン	1MV	1985	デバイス分析
	同上	コッククロフト	200kV	2001	イオン注入
東大	原子力総合センター	タンデムペレトロン	5MV	1995	AMS、PIXE、NRA
	同上	タンデトロン	1.7MV	1995	分析(RBS、PIXE)、イオン注入
	原子力工学研究施設	タンデトロン	1MV	1984	重照射実験
	同上	バンデグラフ	3.75MV	1984	イオン注入 + 重照射実験
立教大理		CW	0.3MV	1985	核、原子、技術開発
法政大	イオンビーム研	バンデグラフ	2.5MV	1980	物質材料、表面、微量
	同上	タンデムバンデグラフ	1.5MV	1992	物質材料
都立産業研		バンデグラフ	1.77MV	1994	PIXE
放医研		サイクロトロンAVF930	K=130MeV	1973	放射線科学
		RFQ + Hリニアック		1994	入射器
		シンクロトロン	100-800/u	1994	ガン治療、放射線科学
		シンクロトロン	100-800/u	1994	ガン治療、放射線科学
		タンデトロン	Ep=3.4MeV	1999	元素分析
国立遺伝研		CW		1968	生命科学/照射
国立ガンセンター		サイクロトロン	Ep=235MeV	1998	ガン治療
名古屋大	原子核工学	バンデグラフ（イオン+電子）	3.75MV	1967	放射化断面積、イオンビーム分析
	同上	バンデグラフ	2.5MV	1981	イオンビーム表面解析
	同上	CW	0.2MV	1980	不純物注入、表面解析、
	年代測定研	タンデトロン	1.8MeV	1983	<sup>8</sup> Be年代測定
	同上	タンデトロン	2.5MeV	1996	<sup>14</sup> C年代測定
静岡県立ガンセンター		サイクロトロン	Ep=235MeV	2003?	ガン治療

第2 - 4 - 1表 我が国のイオン加速器（続き）

研 究 機 関		イオン加速器	エネルギー	建設年	用 途
金沢大アイソトープ		CW		1963	
若狭湾エネルギー研		シンクロトロン	180MeV	2001	ガン治療、照射
		タンデムバンデグラフ	5MV	2001	表面界面、AMS、PIXE
		重イオン源 + CW	0.2MV	2001	イオン注入
京 都 大	化学研究所	陽子RFQ / Alvarez	2/7MeV	1992	イオン物質相互作用
	理学部	タンデムバンデグラフ	8MV	1990	AMS、PIXE、核物理
	工、量子理工学研	タンデトロン	1.7MV	1988	多目的（原子、物質材料、表面、分析）
	同上	バンデグラフ	2.5MV	1968	多目的
	同上	CW	0.25MV	1978	イオン注入
	量子エネルギー研	タンデトロン	1.7MV		
	同上	タンデトロン(シングルエンド)	1MV		
	原子炉実験所	ダイナミトロン	0.3MV	1976	中性子源、エネルギー
	同上	FFAG	150MeV	2005	
奈良女子大		ベレトロン	2MV	1993	原子、物質材料、微量分析
大 阪 大	核物理研	サイクロトロン	陽子90MeV	1974	核物理
	同上	リングサイクロトロン	陽子400MeV	1991	核物理
	理学部	バンデグラフ	2MV	1966	核物理、物質科学
	工学部R 等使用施設	CW	200kV	1968	核、原子、エネルギー
	同上	ダイナミトロン		1968	核、原子、エネルギー
	同上	CW(OKTAVIAN)	300kV	1981	中性子源、原子、エネルギー
大阪府大先端科学研		バンデグラフ		1965	イオン分析装置
近畿大理工学		CW	0.15MV	1962	中性子源、放化、微量
神戸大海事科学部		タンデムベレトロン	1.7MV	1996	分析(RBS、PIXE)、照射効果
同上			0.4MV	1980	大強度パルスビーム、
甲南大理工		バンデグラフ	1.5MV	1988	核、原子、微量分析、
兵庫県立粒子線治療センター		シンクロトロン	陽子230MeV 炭素320MeV/u	2002	ガン治療
広 島 大	原爆放射能研	CW	3MV	1993	中性子源、生命、微量分析
	工学部	バンデグラフ	2.5MV	1983	元素分析、表面解析、イオン注入
九 州 大	理学部	タンデムバンデグラフ	10MV	1972	核物理、多目的
	総合理工学研	CW	0.5MV	1962	多目的
	応用力学研	タンデム加速器	1MV	1991	分析(RBS,PIXE,ERD)

注) PET用の加速器を除く。

第2 - 4 - 2表 我が国の電子加速器

機 関		機 種	電子エネルギー	建設年	用 途
北大	工、量子エネルギー工学	電子リニアック	45MeV	1974	ガンマ線/中性子利用、多目的
	同上	電子リニアック	4MeV	1961	電子、X線、中性子、放射線化学、生物
東北大	核理研	電子リニアック	300MeV	1967	原子核、多目的
	同上	S/B ring	12GeV/S/B ring	1999	原子核、多目的
KEK	KEK	KEK-B1コライダー	8GeV/3.5GeV	1998	素粒子
	KEK	e-e+入射器	8GeV	1985	入射器
	KEK	テストリニアック	46MeV	1997	低速陽電子源
	KEK	ATF	1.5GeV	1996	加速器開発
	KEK	ATF入射器	1.5GeV	1993	加速器開発
	KEK	PF 蓄積リング	3GeV	1981	放射光、多目的
	KEK	ARリング	6.5GeV	1983	放射光、多目的
	KEK	CW		1984	校正場
産総研	つくばセンター	電子リニアック(TELL)	400MeV	1980	技術開発、入射器、陽電子源
	同上	電子蓄積リング(TERAS)	800MeV	1981	放射光利用技術開発、新量子放射源開発
	同上	電子蓄積リング(NIJI-II)	600MeV	1989	SRプロセス、偏光変調分光、測光標準
	同上	電子蓄積リング(NIJI-IV)	310MeV	1991	FEL技術開発
長岡科技大		CW (パルス)	8MV	1996	FEL、電磁波発生、排ガス処理
原研	東海研	SClinac/FEL/ERL	20MeV	2001	FEL
	高崎研	電子直流加速器	2MV	1981	材料照射
	同上	電子直流加速器	3MV	1978	材料照射
理研播磨研		電子線型加速器FEL	1GeV	2006	FEL
日大量子科学研		電子リニアック/FEL	125MeV	1996	FEL、量子ビーム技術開発
東京理科大		電子リニアック/FEL	40MeV	1999	FEL
東工大総合理工学研究科		誘導型線形加速器	800kV	2002移設	大強度X線源
東大	工学部原子力工学研究施設	電子リニアック	35MeV	1977	技術開発、放射線化学
	同上	電子リニアック	18MeV	1987	技術開発、放射線化学
消防研究所		リニアック		2001	非破壊検査
分子科学研UVSOR		UVSOR蓄積リング	750MeV	1983	放射光/FEL
同上		リニアック+シンクロトロン	20/600MeV	1983	入射器
立命館大	放射光	SR蓄積リング	575 MeV	1996	微細加工、多目的
	同上	マイクロトロン	150MeV	1996	入射器
	同上	SRシンクロトロン	50MeV	1998	放射光技術
	同上	マイクロトロン	21MeV	1999	入射器
京大	化学研	電子リニアック	100MeV	1995	加速器技術、原子物理
	同上	電子蓄積リング	300MeV	2001	加速器技術、核物理
	エネルギー理工学研	電子リニアック	45MeV	2003	FEL
	工、量子理工学研	バンデグラフ	2MeV	1968	X線照射
	原子炉実験所	電子リニアック	46MeV	1965	中性子源、材料照射
大阪大	産業科学研	リンドリニアック	38MeV	1978	放射線化学、リソ、FEL
	同上	Sリンドリニアック	150MeV	1989	放射線化学、陽電子、FEL
	工学部FEL研	電子リニアック/FEL	165MeV	1994	FEL
	同上	電子リニアック/FEL	20MeV	1994	FEL



第2 - 4 - 2表 我が国の電子加速器(続き)

機 関		機 種	電子エネルギー	建設年	用 途
大阪府大	先端科学研	電子リニアック	16MeV	1961	材料照射
	同上	CW	0.6keV	1969	材料照射
姫路工大産業科学研		SR蓄積リング	1.5GeV	2000	放射光多目的利用
同上		電子リニアック	15MeV	1995	FEL
広島大	放射光	SR蓄積リング	700MeV	1997	放射光、多目的利用
	同上	マイクロトロン	150MeV	1997	入射器
	同上	ストレッチャー	150MeV	1997	
佐賀県放射光		電子リニアック	250MeV	2004	入射器、FEL
同上		SR蓄積リング	1.4GeV	2004	放射光
高輝度光科学研究センター		電子リニアック	1GeV	1996	入射器
同上		シンクロトロン	8GeV	1997	入射器
同上		SR蓄積リング	8GeV	1997	放射光

注) 診療用線型加速器を除く。

全国大学、共同利用機関（加速器関係共同利用研を含む）  
 国公立研究機関の加速器施設（粒子線治療施設以外の医療用加速器を除く）  
 大学： 学部 付属研究所、付置研究所  
 共同利用機関： 全国共同利用研究機構、大学付置共同利用研究所（KEK、IMS、RCNP、KURRI、  
 国公立研究所： 国立研究所、公立研究所、公益法人研究所

第2 - 4 - 3表 イオン加速器統計

	30年以上	20－30年	10-20年	10年以内	建設中	合計
全加速器施設数	18	21	32	35	7	113
大学（含付置研）施設数	14	13	17	12		56
直流加速器	14	13	15	10		52
イオンリニアック			2			2
サイクロトロン				1		1
シンクロトロン				1		1
共同利用機関施設数	0	5	1	3	1	10
直流加速器		1				1
イオンリニアック		1		1		2
サイクロトロン		1	1		1	3
シンクロトロン		2		1		3
静電蓄積リング				1		1
国公立研究所施設数	4	3	14	20	6	47
直流加速器	3	3	10	10		26
イオンリニアック				5	1	6
サイクロトロン	1		4	2	3	10
シンクロトロン				3	2	5

第2 - 4 - 4表 電子加速器統計

	30年以上	20－30年	10-20年	10年以内	建設中	合計
全加速器施設数	6	11	7	27	3	54
大学（含付置研）施設数	5	3	2	19		29
直流加速器	2			2		4
電子リニアック	3	3	2	7		15
シンクロトロン				4		6
蓄積リング				6		4
共同利用機関施設数	1	4	3	6		14
直流加速器			1			1
電子リニアック	1		2	2		5
シンクロトロン		1		1		2
蓄積リング		3		3		6
国公立研究所施設数		4	2	2	3	11
直流加速器		2				2
電子リニアック		1		2	2	5
シンクロトロン						
蓄積リング		1	2		1	4

第2 - 4 - 5表 全加速器統計

	30年以上	20－30年	10-20年	10年以内	建設中	合計
全加速器施設数	24	32	39	62	10	167
大学 (含付置研) 施設数	19	16	19	31	0	85
共同利用機関施設数	1	9	5	9	1	24
国公立研究所施設数	4	7	16	22	9	58

第2 - 5 - 1表 世界の主要加速器施設（高エネルギー物理学）

機種	施設名	国名	加速器	エネルギー(GeV)	ビーム強度 (l/ミノシティ)	研究課題コメント
電子 加速器	SLAC	アメリカ	リニアック	35 / 56	50mA/20mA	素粒子物理、J/ 発見
	SLAC/ PEP-II	アメリカ	e/e+非対称衝突器	e= 9.0 / e+=3.1	4.50E+33	CP対象性の破れ
	KEKB	日本	e/e+非対称衝突器	e= 8.0 / e+=3.5	7.35E+33	CP対象性の破れ、 世界最高のルミノシティ
	LEP(CERN)		e/e+衝突器	104.5 x 2	5.60E+31	Z、W 粒子発見、2000運転停止
	HERA (DESY)	ドイツ	シンクロトロン・ e/p 衝突器	e=27.5/p=820	1.60E+31	素粒子物理、クォーク内部構造
	CEBAF(JLab)	アメリカ	超伝導リニアック	5.5	220 $\mu$ A (CW)	高エネルギー核物理
	LEPS(SPring-8/RCNP)	日本	蓄積リング	8	1E+7光子/秒	高エネルギー核物理、 ペンタクォーク粒子発見
	VEPP-4M(BINP)	ロシア	e/e+衝突器	6		$\Upsilon$ 中間子物理
	BEPC(IEP)	中国	e/e+衝突器	2.8 x 2	4.00E+30	- 質量測定
陽子・ 重イオン 加速器	LHC(CERN)	スイス	シンクロトロン・pp 衝突器	7,000x2		建設中、ヒッグス粒子探査
	SPS(CERN)	スイス	シンクロトロン	450	3.4 E+12 粒子/秒	LEP入射器、重イオン衝突
	AD(CERN)	スイス	シンクロトロン(減速器)	2.76 0.00531		反陽子利用実験、反物質
	Tevatron(FNAL)	アメリカ	シンクロトロン・ pp 衝突器	1,000 x 2	2.00E+32	素粒子物理、J/ 発見
	U-70(IEP)	ロシア	シンクロトロン	76	1.5E+12 粒子/秒	
	J-PARC(KEK/JAERI)	日本	シンクロトロン(建設中)	50	20 $\mu$ A	高エネルギー核物理、
	U-10(ITEP)	ロシア	シンクロトロン	10	7E11 粒子/秒	
	KEK-PS	日本	シンクロトロン	12		ハイパー核、ダブルハイパー核の発見
	RHIC(BNL)	アメリカ	シンクロトロン・ H/H 衝突器	100MeV/u x 2	2.00E+31	K2K (カミオカンデ入射) 実験 クォーク・グルオンプラズマ、スピン物理
	SIS(GSI)	ドイツ	シンクロトロン	< 1GeV/u		高エネルギー重イオン反応
	HIMAC(NIRS)	日本	重イオンシンクロトロン	0.8GeV		高エネルギー重イオン反応
	RIBF(Riken)	日本	超伝導サイクロトロン(建設中)	< 0.35GeV/u	1p $\mu$ A (CW)	不安定核構造/反応
核破砕 中性子・ 中間子源	SINQ (PSI)	スイス	リングサイクロトロン	0.59	1.5mA CW	パイオン工場/ 中性子源
			サイクロトロン	0.072	1.85mA CW	同入射器
	ISIS(RAL)	イギリス	シンクロトロン	0.8	0.2mA	ミュオン/ 中性子源
			陽子リニアック	0.07		同入射器
	J-PARC(KEK/JAERI)	日本	シンクロトロン(建設中)	3	0.33mA	中性子源、ミュオン源
			リニアック	0.4	0.33	同入射器
	KENS	日本	シンクロトロン	1.2		中性子源(世界最初)、ミュオン源
	SNS(ORNL)	アメリカ	シンクロトロン(建設中)	1	1.4mA	中性子源
			リニアック			同入射器
	TNF (TRIUMF)	カナダ	リングサイクロトロン	0.52	0.14mA CW	中間子工場/ 中性子源
	LAMPF (LANL)	アメリカ	陽子リニアック	0.8	1mA	中間子工場/ 中性子源

第2 - 5 - 2表 世界の主要放射光施設 (E > 1GeV)

	施設名	国	運転開始 年度	エネルギー (GeV)	周長(m)	エミッタンス (nm rad)	放射光 B M 臨界エネルギー (keV)
第三世代放射光源	SPRing-8	日本	1997	8	1436	5.9	28.9
	APS	アメリカ	1995	7	1104	8.2	19.5
	ESRF	フランス	1993	6	844	3.9	19.2
	KEK-PF	日本	2001	2.5 ~ 3	186.6	27	4
	SLS	スイス	2001	2.4	288	4.8	5.4
	PLS	韓国	1994	2.0 ~ 2.5	280.6	12 @ 2.0 GeV	2.8 @ 2.0 GeV
	BESSY	ドイツ	1998	1.7	240	6.1 @ 1.7 GeV	2.5 @ 1.7 GeV
	ELETTRA	イタリア	1993	1.5 ~ 2.8	259.2	7.0 @ 2.0 GeV	3.2 @ 2.0 GeV
	MAX	スウェーデン	1997	1.5	88.2	8	
	SRRC	台湾	1993	1.3 ~ 1.5	120	19.2 @ 1.3 GeV	1.4 @ 1.3 GeV
	ALS	アメリカ	1993	1.0 ~ 1.9	196.8	3.5 @ 1.5 GeV	1.9 @ 1.5 GeV
	SuperACO	フランス	1987	0.8	72	35	0.62
	SPEAR3	アメリカ	改造中	3	234	18	7.6
	Boomerang	オーストラリア	建設中	3	179.4	11.6	
	CLS	カナダ	建設中	2.9	171	18.2	
	SOLEIL	フランス	建設中	2.75	354	3.7	
	DIAMOND	イギリス	建設中	3	565.6	5.4	
	MAX IV	スウェーデン	建設中				
	Barcelona	スペイン	建設中	3	260	1-2	
	Candle	アルメニア	建設中	3			
	ShanghaiSRF	中国	建設中	3			
第二世代放射光源	KEK-AR	日本	1988	6.5	375	250	20.7
	CHESS	アメリカ	1979	5.4	769	65	
	DORIS II	ドイツ	1981	4.5 ~ 5.6	289.2	270	27.2 @ 5.3 GeV
	NSLS	アメリカ	1982	2.5 ~ 2.8	170	45	5 7.1 @ 2.8 GeV
	ANKAR	ドイツ	2000	2.5	110	80	
	SRS	イギリス	1982	2	96	110	3.2
	VEP-3	ロシア	1986	2	75		4.3
	BEPC	中国	1992	1.5 ~ 2.8	240	390	3.8
	LNLS-1	ブラジル	1997	1.37	93.2	100	2.08
	CAMD	アメリカ		1.5		166/256	
	NSRL	中国	1993	0.8	66	27	0.52
	TERAS	日本	1981	0.8	31.45	550 @ 0.8 GeV	0.568 @ 0.8 GeV
	NSLS I	アメリカ	1981	0.75	54	150	0.49
	UVSOR	日本	1983	0.75	53.2	115	0.425
	SSLS	シンガポール	2001	0.7	10.8	1370	1.47
	HISOR	日本	1998	0.7	22	400	0.885
	Rits SR	日本	1996	0.575	3.14		0.844

注) アジアの放射光施設は低エネルギーリングも含む

第2 - 5 - 3表 世界の主な原子核研究施設

	研究所名	国	装置名	粒子	機種	エネルギー
ヨーロッパ	JINR	ロシア	U-400	HI	サイクロトロン	25MeV/u
			U-400H	LHI	サイクロトロン	50MeV/u(Arまで)
	Uppsala U	スウェーデン	G-W Cyclotron	LI	サイクロトロン	K=200
	KVI	オランダ	AGOR	p、LH	超伝導サイクロトロン	K=600
	CRC	ベルギー	Cyclone 110	p	サイクロトロン	K=110
			Cyclone 30	H-	サイクロトロン	K=30
			Cyclone 44	RI	サイクロトロン	K=44
	GSI	ドイツ	UNILAC	HI	重イオンリニアック	2-20MeV/u
			SIS	HI	シンクロトロン	1-2GeV/u
			ESR	HI	蓄積リング	0.5-1GeV/u
	Bonn Univ.	ドイツ	ELSA	e	電子ストレッチャー	3.5GeV
	FZ-Juelich	ドイツ	COSY	p	シンクロトロン/冷却蓄積リング	1.75-2.88GeV
	Mainz	ドイツ	MAMI A1,A2,	e	マイクロトロン	180MeV
			NAMI B	e	マイクロトロン	850MeV
	GANIL	フランス	CSS1、CSS2	HI	リングサイクロトロン	<96MeV/u、24MeV/u(U)
			SPIRAL	RI		
	IReS(ULP)	フランス	VIVITRON	p、LH	タンデムバンデグラフ	35MV
	CERN	スイス	PSB+ISOLDE	p	陽子シンクロトロン/セパレーター	1-14GeV、核破砕、核分裂
			REX-ISOLDE	RI	セパレーター + 後段加速	3.1MeV/u、A<140
	PSI	スイス	PSI	p	リングサイクロトロン	590MeV
アメリカ	INFN/LNL	イタリア		HI	タンデムバンデグラフ	15MV
				HI	タンデムバンデグラフ	20MV
	INFN/LNS	イタリア		HI	タンデムバンデグラフ	13MV
				HI	超伝導サイクロトロン	後段加速、100MeV/u(Li)
	TRIUMF	カナダ	Cyclotron	p(H+)	リングサイクロトロン	< 520MeV
			ISAC	RI	Target+ISOL+RFQ+DTL	60keV+150keV/u+1.5MeV/u
	MIT	アメリカ	Bates	e	電子リニアック + リサークレーター + 蓄積リング	540MeV 1,060MeV 300-1100MeV
	SUNY SB	アメリカ		HI	タンデムバンデグラフ + 超伝導リニアック	9MV + 20MV(相当)
	Jefferson Lab	アメリカ	CEBAF	e	超伝導電子リニアック	< 5.5GeV
	TUNL、Duke U	アメリカ	TandemVdG	LI	タンデムバンデグラフ	12MV
			HIGS	e	電子リニアック+シンクロトロン 蓄積リング	270MeV + 12GeV、コンプトン 後方散乱、2-50MeV、225MeV
	Indiana U.	アメリカ	IUCF	p	サイクロトロン、 シンクロトロン・冷却リング	205MeV 250MeV
	MSU	アメリカ		HI	超伝導サイクロトロン (+)	K=500
				HI	超伝導サイクロトロン	K=1200
	ANL	アメリカ	ATLAS	HI	タンデムバンデグラフ + ECR+入射リニアック + 2x 超伝導リニアック	9MV 12MV 20MV+20MV

第2 - 5 - 3表 世界の主な原子核研究施設( 続き )

アメリカ	ORNL	アメリカ	HRIBF	HI, RI	サイクロトロン + MS + タンデムバンデグラフ	K=100 12MV
			ORELA	e n	電子リニアック	250MeV、中性子源
	Texas A&M	アメリカ	TAMU	LI	超伝導サイクロトロン	K=500
	LBL	アメリカ	88'Cyclotron	HI	サイクロトロン	K=130
	U.Washington	アメリカ	CENPA	LI、H	タンデムバンデグラフ + 超伝導リニアック	9MV + 8MV(相当)
アジア	東北大	日本	CYRIC	LI	サイクロトロン	K=90
	東北大核理研	日本		e	電子リニアック + ストレッチャー	300MeV + 1GeV
	原研	日本		HI	タンデムバンデグラフ + 超伝導リニアック	
	KEK	日本	KEK-PS	p、LIH	シンクロトロン	12GeV
	理研	日本		HI	リニアック/サイクロトロン + リングサイクロトロン	K=540
	阪大核物理研	日本		LI	サイクロトロン + リングサイクロトロン	k=400
	近代物理研	中国		LHI	リングサイクロトロン	K=400
	原子能研究院	中国		LHI	タンデムバンデグラフ	
	ANU	オーストラリア		HI	タンデムバンデグラフ + 超伝導リニアック	14UD+5MV/u
	Weizmann Inst	イスラエル		HI	タンデムバンデグラフ	

## 第3章 我が国における加速器利用研究

本章では、我が国における加速器を利用した研究について概観する。なお、最近のレーザー技術の発展は目覚しく、新しいイオン加速原理の開発や高エネルギー光子の利用において、加速器と重なり合う部分が増えてきた。このような観点から、加速器利用研究にあわせて、短パルス・高強度レーザーの利用を取り上げる。

### 3.1 未知への挑戦

#### (1) 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。その構造は、のちに量子力学によって見事に説明されることになったが、これを契機に、より基本的な自然界の構造を探る研究が急速に進んだ。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)から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、すぐにエネルギー源として実用化されたのが今日の原子力発電である。また、原子核研究の重要な「道具」として発明された加速器は、多くの技術開発を経て今日に至っている。

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)、メソン(中間子)、核子などのハドロン(重粒子)が知られている。また、メソンとハド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と基本法則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のうち、電荷・空間・時間に対する対称性は最も基本的な性質で、対称性の破れの度合いの測定は現代の最も重要な研究課題である。



## ( 2 ) 宇宙の誕生・進化と高エネルギー物理学

私達の宇宙は 150 億年前に起っ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からクォークが生じ、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寿命が尽きた最後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辿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だすことが、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。

現在我が国の高エネルギー加速器で行なわれている実験で、CP と呼ばれる対称性の破れが確認された。これはビッグバンでできた宇宙に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が明らかになった。その大きさの精密決定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明らかになる。なお、ペンタクォークの発見などクォークに関わる研究は、なぜ核子のような小さい領域に深く閉じ込められるのかという「閉じこめの機構」や、閉じこめられた瞬間に大きな質量を生み出すのかという「質量起源の機構」といった疑問を明らかにする新しい研究の始まりとすることができる。

## ( 3 ) 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。なかでも未だそれほど多くは創製・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、殆どその発見の度に未知の性質が見つかり続けている。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おり、また、星の内部で行なわれる元素合成過程を加速器の実験で確かめている。このように未知の原子核を作り出してその性質を明

らかにし、この宇宙における元素創成のシナリオを地上で確かめる実験場が 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、重イオン加速器を用いて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。

#### ( 4 ) 原子内電子の状態を探る

原子はこの世のなかの物質、例えば金、銀といったものの性質を保持した一番小さな構成単位であり、中心にある重い原子核とそれを取り巻く電子から構成されている。放電管（現在日常的に使われるネオンサイン管や蛍光灯はその一種である）中で熱せられた高温気体から発する光を分析すると、一連の決まった波長からなる線として現れ、その波長は元素によって皆違うことが分かり、遠い天体を構成する物質もその光を分析すれば分かる、ということは 19 世紀に既に分かっていた。元素であるヘリウムは、まず太陽を構成する物質として発見され、ついで地上での存在が確かめられた。原子が出す光の分析の結果は、原子の構造の説明や量子力学の誕生への大きな足がかりとなった。

ヘリウムより重い原子では原子核を取り巻く電子の数が変わるとその原子の示す性質は変わる。特に原子核に近いところにある電子が失われた場合の効果は大きく、その数によって、励起した原子から放出される光や X 線のエネルギーも本来の値から変わってしまう。このことは重イオン加速器を使って初めて詳細に調べられるようになった。十分に大きいエネルギーを加えなければ、沢山の内側の電子まではぎ取ることは出来ない。加速器の建設に伴って、様々なエネルギー、様々な構造を持つ原子の状態や、その間での衝突で起きる現象が、新しく工夫された測定器を使って行われ、その成果を上げてきた。重い高エネルギーのイオンは、相手の原子に対してハンマーでたたいたような大きな衝撃を与え、放射光は鋭いメスのように特定の電子をねらって衝撃を与える。2 種類の装置を使っ

ての研究結果を組み合わせることで、更に詳細な研究も可能である。

このようにして得られた結果は、遠い天体からの光や X 線の波長を調べた場合

に、どのような元素がどのような状態（原子核の回りに電子が幾つ残っているか＝その発光体の温度）にあるかまでの確に推定できる基礎データとしても役立っている。

### 3.2 広い科学技術分野における先端的基盤研究

#### （1）物質研究がなぜ必要か

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。

#### （2）物質研究の手法

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、高温高压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 桁以上の輝度が得られるので、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。

#### （a）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。

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。また、産総研の小型放射光施設ではレーザーコンプトン散乱線の利用研究や高速偏光可変アンジュレータによる研究が行われている。

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 2 月～翌年 2 月までの 1 年間に、利用者は延べ 8843 人、実験課題数は 1334 件である。発表論文数は査読つき学術雑誌に発表されたもの 342 編で、そのうち 26% 弱の論文がインパクトファクター（IF）の高いハイクオリティジャーナル（IF>3）に掲載されて

おり、なかでも 44 編がとくに評価の高い学術誌 (IF>6) に発表されている。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。

#### (b) 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ブであり、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。現在建設中の J-PARC は、1 秒間に 50 回繰り返すパルス中性子源として、世界で最も輝度の高い中性子を利用に供する予定である。

#### (c) 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。

#### ( d ) 陽電子ビームの利用

陽電子は物質中では電子と対消滅を起こし、主に二つのガンマ線(511keV)を反対方向に放出する。この消滅ガンマ線の放出時刻、エネルギー、角度分布などを高精度で計測して、電子の運動量分布や物質のミクロな構造を知ることが出来る。この陽電子消滅法によって金属フェルミ面や格子欠陥、金属や半導体の不純物析出のメカニズムの解明などが可能になった。

当初、陽電子線源として放射性同位元素を用いていたが、低速用電子ビームが実現してその短パルス化、収束、エネルギー等の制御が可能になるとともに加速器や原子炉を用いた陽電子ビーム発生技術の進歩により、陽電子の利用範囲は飛躍的に広がった。我が国は、とくに加速器による高強度低速陽電子ビームの発生・制御・計測技術や物質評価への利用で世界をリードしている。1999 年の国際半導体テクノロジーロードマップには、次世代半導体 LSI 用の新しい膜材料開発でブレークスルーをもたらす可能性がある評価技術として取り上げられ、産業界も注目するようになり、産官学連携研究が活発になっている。

#### ( e ) ミュオンビームの利用

ミュオン( $\mu$ )は電子の仲間(レプトン)で、正の電荷を持つミュオン( $\mu^+$ )と負の電荷を持つミュオン( $\mu^-$ )とがある。ともにスピンと磁気能率を持っていて、 $\mu^+$ ( $\mu^-$ )は2.2 マイクロ秒の寿命でそれぞれ陽電子(電子)と2つのニュートリノに崩壊する。その際、陽電子(電子)は $\mu^+$ ( $\mu^-$ )のスピン方向に強く出るので、スピンの向きを検出するのに陽電子(電子)を測定する。

高エネルギー陽子を原子核(実際にはベリリウムや炭素の原子核を用いる)に衝突させると、パイ中間子 $\pi^+$ ( $\pi^-$ )が放出され、それが崩壊して $\mu^+$ ( $\mu^-$ )になる。このミュオンは100%偏極しているので、ミュオンビームを物質中に注入して磁気共鳴(Resonance)やスピン方向の回転(Rotation)あるいは偏極の減少(緩和、Relaxation)を測定すると、他の方法では知り得ない物質の性質あるいは内部状態を調べることができる。この3つの方法をまとめて $\mu$ SRと呼んでいる。

$\mu$ SR は 1970 年代の初期に開発された研究手法であるが、わが国の研究グループがアメリカの加速器を用いてパイオニア的働きをしている。今日ではミュオン利用の研究は、カナダの Triumf、イギリスの ISIS、スイスの PSI、日本の KEK-PS などで行われているが、ISIS のミュオン実験施設は日英協力で建設された。

### 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、 $\gamma$ 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が、この成果を踏まえ、2000年に策定された「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 3-1 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。原子力予算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・部門で原子力関連の研究開発に使われてきた加速器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かを示している。

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。

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、数年後には原子・分子の研究が加わった。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手段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

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（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、原子核物理分野でもっとも重要となる研究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

放射線はエネルギー利用とともに原子力の利用において重要な役割を占めており、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測定用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いる。

我が国では、国家標準機関である産総研の加速器が放射線に関する標準開発・供給の役割を担っているのに加えて、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年には我が国で初めて中性子測定器の開発と校正のための専用加速器として4MVバンデグラーフ加速器が原研に設置されている。

## （５）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を特徴づける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レベルへと移行しており、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損傷試験が行なわれた。その後、高分子架橋など放射線

化学的研究も行なわれ、現在では耐熱性電線被覆材やラジアル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(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変化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、陽電子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

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を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。

トカマク型核融合炉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、大電流といった要請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。

例えば、核変換のためには10mA 級の大電流連続高周波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、トカマク型核融合炉の加熱装置としての大電流重陽子加速器やエネルギー回収型超伝導電子リニアックの開発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

#### (1) 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、がん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形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、1952 年に完成した理研の第 3 号サイクロトロンは、ナトリウム-24 など短寿命 RI を製造して利用者に提供していた。

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、いわゆるがん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、そのほとんど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リニアックである。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 施設の数急速に増加している。

## （２）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、粒子線治療法の開発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がん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（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 年から国内で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ている。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、この施設の運用が 2002 年の秋から始まっている。一方、千葉県柏市にある国立がんセンター東病院は、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、回転ガントリー 2 台で 1998 年より治療を開始している。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。

### ( 3 ) 重粒子線治療

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、HIMAC については、のちの 4.5 節でも詳しく述べている。

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形加速器を入射器とし、シンクロトロン一台で加速する HIMAC とほとんど同じであるが、炭素の最高エネルギーが 320 MeV / 核子で全体の規模は HIMAC の約 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。

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、世界的にみて他国より数段進んだ体制となっている。

### ( 4 ) 海外の粒子線治療

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。

### ( 5 ) 粒子線治療の普及に向けて

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、粒子線治療が治療効果に極めて優れた、また患者の「生活の質」(クオリティオブライフ：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。国立がん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。

今後、粒子線治療法が全国に普及されていくことが望ましい。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大型になっている。粒子線治療を普及させるため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

#### (1) 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、産業界でも広く使われている。しかし現在我が国では、科学技術の振興による産業力の強化が求められていて、加速器利用においても、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。そこで従来の方式を延長した産学協力や技術移転を超えて、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新しい仕組みを創りだすことが必要である。例えば、加速器科学の応用では、民間、とくに、広く産業・地域の活性化につながるような、地域産業や中小企業による新しい利用法の開発やその普及を図ることが必要である。また、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。

#### (2) 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。

わが国でも既に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がこの時期である。現在産業界で最もよく使われているイオン加速器は、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ほか、後方散乱法（RBS）や PIXE 法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。

一方、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ている。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ほか、最近では滅菌や排煙処理にも使われ始めている。また、大規模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、広く使われている。

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。

### （３）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、イオン注入や電子は、ここでは除外する。

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、電総研（当時）の小型蓄積リングを始めとして、小型放射光施設の開発も進み、4 企業が社内に専用の小型放射光施設を設置した。さらに電総研（当時）の技術を基に、半導体企業のコンソーシアムが、放射光リソグラフィーを主目的とした放射光施設 SORTEC を建設した。当時放射光リソグラフィーは次世代集積回路の主要技術と看做され、我が国でも活発に研究が行われたが、短波長レーザーなど有望な代替技術の登場により実用には至らなかった。

最近、生命科学分野の企業による放射光利用が急速に増えている。国のプロジェクト「タンパク 3000」では主要な解析手段に指定されて、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て創薬への応用を図るための不可欠の手法になっているためである。また、環境保全と結びついた触媒、電池材料等の開発研究やマイクロ/ナノデバイスの開発でも重要な解析手法になっていて、関連企業の利用が増えてきている。そのほか、放射光リソグラフィーを発展させ、十分深いところまで加工できる微細加工技術 LIGA プロセスが開発され、利用範囲が広がっている。

#### (4) 産業界による放射光の利用の促進

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が、この分野の技術開発では電総研(当時)の果たした役割は大きい。現在、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、技術相談・技術支援・指導の充実などが課題である。

今後、J-PARC を中心に中性子ビームの産業利用も急速に進展することが予想される。中性子ビーム利用においても、放射光施設の抱える諸課題と同種の問題が予測されるので、放射光施設と共に解決していく姿勢が必要であろう。

### 3.6 極短パルス・超高強度レーザー技術の開発と応用

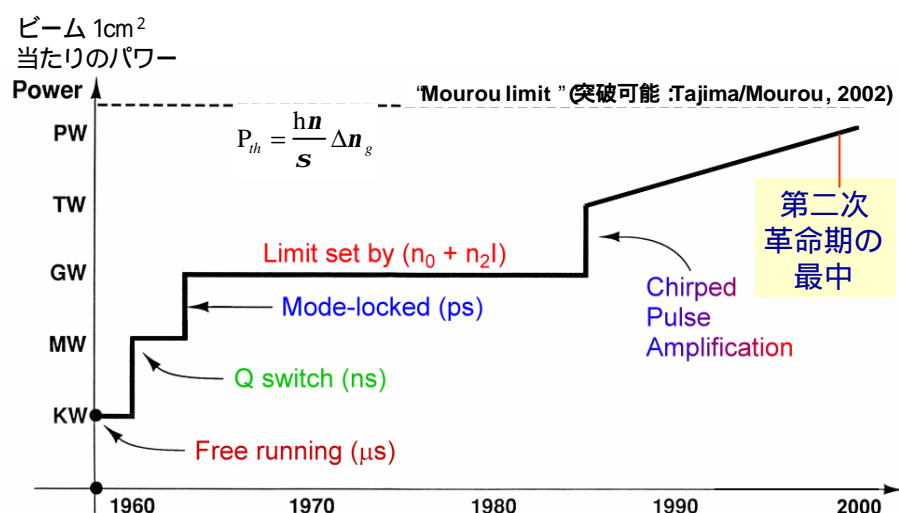
1960 年に発明されたレーザーは、最初の数年間で飛躍的に進歩してビーム  $1\text{cm}^2$  当りギガワットの出力密度に至るまでになった。しかしその後はレーザー媒質中での非線形効果による技術的困難を克服することが出来ず、出力密度の向上は頭打ちになっていた。しかし、90 年代に入るとレーザーの技術革新が急速に進んだことと合わせて産業、医療、原子力、加速器等の広い分野での様々な応用が拡がり、特に、近年はペタワットを超える高出力化の可能性も視野に入ってきたこともあり、レーザー利用技術の新たな展開が期待されるようになってきた。高強度

レーザーは21世紀の科学技術を支える重要な先端的基盤研究装置の一つであるばかりでなく、加速器技術や原子力技術に革新をもたらす技術としての期待も大きい。ここでは、高強度レーザー光源の技術開発及び応用の現状と今後を展望する。

## (1) レーザー光源の開発

### (a) 短パルス高強度レーザー技術

従来、固体レーザーの出力を上げるためには装置が大きくなってしまおうという困難があったが、1985年 G.A.Mourou (ミシガン大学)らのチャープパルス増幅(chirped pulse amplification; CPA)の発明が、その後の高出力固体レーザーの開発に大きな転換をもたらした。CPA技術と高出力固体レーザー素子の開発によって、1990年代に卓上型レーザーの出力は $10^3 \sim 10^5$ 倍に飛躍的に増大した。現在も、固体レーザーの高出力化は進展しており、これまでのレーザーの限界を越えつつある。すなわち、本固体レーザーは、小型のレーザー素子を使うことで小型化と低価格化を図ることができ、加えて、冷却が容易であることから高繰返し化が可能であるという特徴を有している。たとえば、チタンサファイヤといった広帯域レーザー結晶の開発が進んだこともあり、フェムト秒のパルス幅を有する極短パルスも可能になり、ピーク出力がペタワットという著しい高出力化も実現されつつある。



第3-1図：レーザーの出力の展開

(CPA技術の発明により、現在は第2次革命期の只中にある)

さらに、最近では半導体励起レーザーの開発が急速の進歩をみせている。半導体レーザーは、電気 - 光の量子変換効率が高く（理論値では90%以上のもあり、実際でも数十%程度）、小型で高フルエンス（単位面積当たりのエネルギー）のレーザー光が得られ、発振の繰返し数も高いという特徴がある。今後は、半導体レーザーを励起レーザーとして固体レーザーに入力する方式が短パルス高出力レーザー開発の主流となることが予想され、これにより、現在の固体レーザーの低いエネルギー変換効率が格段に上がるものと予測される。

レーザー光源の開発と合わせて、最近、補正光学（アダプティブ 光学）技術などによる光波面のミクロン以下の精密な補正や単一レーザーモードでの集光などの光学技術も急速に進歩し、kHz の高繰返しでミクロン以下の空間、フェムト秒以下の時間精度で制御できるレーザー制御技術が台頭して来ている。これらの技術はこれまで不可能とされてきた材料の極微細加工等の応用の可能性を拓くものである。同時に、高出力レーザーを有効に利用するためには、極めてクリーンな単一パルスを生成する必要があり、プレパルス制御と一般に言われている高速の光スイッチ技術の展開により6桁とか8桁落ちのプレパルスパワーが更に何桁も落とせる技術が望まれている。

#### （b）自由電子レーザー

極短パルス・超高強度レーザーのもう一つは自由電子レーザー（FEL）である。これはレーザー媒質として固体や気体 / プラズマの代わりに、真空中の電子制御用周期磁界（アンジュレータ）を用いている。当初は、ミラーと周期磁界で作る光共振器を用いたおり、1980年代に最初のレーザー発振に成功した。これは放射光蓄積リングにアンジュレータと光の上流 / 下流に設置したミラーを組み合わせた光共振器を用いていて、可視光から紫外線領域の分光実験に用いられた。わが国では分子研、電総研（当時）で成功している。最近、原研が超伝導伝電子リニアックを使って光共振器型の赤外領域FELを開発し、世界最高輝度を達成した。FELでは、エネルギーは電子ビームに貯えられるためエネルギー流量（フルエンス）は極めて高い。（一方固体レーザーのエネルギーは固体に貯えられているので、エネルギー密度が極めて高くコンパクトに出来る）

FELは、RF加速器による高いエネルギー変換効率に支えられているが、Tignerが提唱したように電子エネルギーのRF場への回収を行うことにより、一層の高

効率化が可能である。すでに、原研やジェファソン研では高いエネルギー回収に成功している。

短波長化のためには、電子の高エネルギー化やエミッタンス低下が必要になる。最近、電子リニアックから極短パルス・高ピーク強度の電子ビームを取り出してアンジュレータに入射し、レーザー発振・増幅を行う方法が開発されている。これは極短パルス・高ピーク強度の電子ビームがアンジュレータを通過する際に、上流で発生した光が下流側の電子で増幅されてレーザー発振をおこすもので、自己増幅・自発放射(SASE)レーザーと呼ばれている。アメリカ及びドイツでは 100 ~ 80 ナノメートルの波長領域で発振に成功しており、わが国では理研が 10 ナノメートル近辺の波長領域で SASE FEL を建設している。

今後の自由電子レーザーの課題としては以下のようなものが挙げられる。現在の自由電子レーザーは加速器を基にしていることから、その規模はどうしても大型になる。自由電子レーザーの発振は、電子ビームのエミッタンスによって決まるので、波長が短くなればなるほど、エミッタンスを小さくせねばならない。さらに、高強度場に耐えるアンジュレータの開発などが課題である。一方、FEL は固体レーザーに比較してコヒーレンス性が低いという弱点があり、コヒーレンスを良くするためには、低エミッタンスの電子ビーム生成の技術開発が重要である。

## ( 2 ) レーザーの応用

### ( a ) 加速器技術への応用

レーザーカソードやビームのレーザー診断のような比較的小出力レーザーの加速器への応用はかなり前から行われて来ているが、超高強度レーザー光は、物質との相互作用において相対論的な力をもたらす。そのひとつの例として航跡場粒子加速がある。高強度レーザーをプラズマ中に照射することによって生成する航跡場による加速勾配は極めて大きく、理論的には、これまでの高周波加速方式で放電による限界となっていた 100MeV/m を大きく超える 60GeV/m 程度の加速性能も予測されている。

同時に、レーザーの波長が短く生成面積が小さいのでエミッタンスの極めて良いビームを作り出すことが出来る。高強度レーザーによる相対論的な効果として、イオン、電子、X 線などの高エネルギーの粒子や光子を発生させることもできる。これらは、高輝度、高エネルギー、高コヒーレンス、極短パルス、低エミッタンス

スといった、従来の加速器からの放射線にない特徴を持っており、原子力を始めとするさまざまな分野で新しい応用を生み出すものとして期待される。

また、加速器技術と高強度レーザーのハイブリッド技術により、それぞれの技術では到達出来なかった研究領域を開拓することが出来る。たとえば、SLAC の電子線と高強度レーザーの結合でシュインガー場に肉薄したり、SPRing-8 の 8 GeV の蓄積リング電子線と紫外レーザーによって発生したコンプトン 線 (約 2 GeV) を用いて最近、阪大、原研、JASRI の共同チームが 5 個のクオークからなる新粒子を発見したのは、その典型である。

#### (b) 原子力技術への応用

これまで、レーザーによる同位体の分離、原子炉等の解体技術、レーザー核融合など、多くのレーザーが原子力技術として利用されてきている。前述したような高出力、極端パルス、高品質のレーザーは、原子力技術に革新をもたらすことが期待されるが、具体的な利用はこれからである。

第 3 - 1 表に示すように、これまでに原子力分野に応用された代表例の一つは、慣性核融合の駆動源としての大出力レーザー (ナノ秒) の利用であり、我が国では阪大レーザー研を中心に電通大、産総研などで研究開発が進められている。最近爆縮用のレーザーから切り離し、加熱用のエネルギー源としてより短パルス (ピコ秒) のレーザーを爆縮時に照射し核融合燃料の点火に使う方式が発展し、特に阪大の開発したターゲット (ペレットと呼ばれる) の方式は注目されている。こうしたレーザーは爆縮用レーザーのエネルギーのごく一部とはいえ、大きなエネルギー (10kJ 以上) をピコ秒の短時間に照射することが必要であり、効率の向上が課題である。現在、大出力の炭酸ガスレーザーや YAG レーザーが、原子炉などの解体に開発されているが、今後、より効率の高い半導体レーザーや FEL がより広く原子力技術に利用されるものと考えられる。

また、原子力の燃料、材料や廃棄物の物質分離のためのレーザー利用も想定される。レーザーによるウラン分離は効率や経済性の点を克服できず不成功に終わったが、原研、分子研、東大、東北大などでより短パルス (フェムト秒) のレーザーを用いた「量子制御」という方法で、よりエネルギー効率の高い、より選択率の高い方法も研究されており、従来の問題を克服することが囑望される。さらに、短パルス (フェムト秒) レーザーによって、熱を与えずに材料を加工するこ

と（非熱加工）が可能であり、切断面は鋭利でしかも多量の切れ屑を出さないなどの優れた特性を持つ。こうした特性を利用して、原子炉のシュラウド等の応力腐食割れの原因になる表面応力層の除去など、画期的な応用も検討されている。

原子力へのレーザー利用のもう一つの重要な柱は、放射線利用への応用である。表 3-1 で示されているように様々の研究所で研究がなされており、コンパクトな高輝度の電子、陽子、X 線、ガンマ線、陽電子などの放射線源として、様々な利用への挑戦が始まっている。小型の PET 源もその一つである。また、レーザー駆動のコンパクト X 線レーザー技術も、最近では完全空間コヒーレントで高縮重のピコ秒 X 線フォトンが発生に成功している。レーザー加速を受けたフェムト秒で高輝度の電子線を使い、フェムト秒の高輝度 X 線も開発されつつある。こうした電子や陽子は事実上点光源で極短パルスであるという特性を持つので、ラジオグラフィにも応用される。たとえば、核融合爆縮ターゲットの瞬間像を陽子線ラジオグラフィが電場の構造も含め捉えている。電子線とレーザーの掛け合せによるガンマ線を使った光核反応の断面積の測定も行われ、希少核の中性子反応の逆過程として中性子断面積の観測にも寄与している（産総研、原研、阪大、甲南大など）。

高強度・短パルスレーザーの出現は、広汎な科学技術に新しい可能性を開き新領域や従来の領域の新たな展開に大きな刺激となっている。レーザー技術の加速器技術への導入として小型加速器開発へと発展しつつあるのが一例である。加えて、物質科学や生物科学への利用など広い基盤研究のツールとしても利用されつつある。今後、レーザー技術はペタワットからエクサワットといった高パワー化を辿るものと考えられるが、一方、レーザーのエネルギー効率や繰返し数の向上と言った課題が横たわっており、これらの改良のための開発が急務である。

このためには、半導体レーザーや FEL 技術の開発が重要である。半導体レーザー技術は、レーザー技術と半導体技術の組合わさった極めて重要な将来技術である。またレーザー利用を進展させるためには、レーザーの品質の制御が重要であり、その研究開発も光源の開発と同様に極めて重要である。

第3 - 1 表 レーザーの応用

役割	研究課題	線種/波長	装置の種類	性能	主な実験手法	研究内容	研究機関	状態
レーザー小型加速器	粒子加速	電子	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs	プラズマカソード	シングルパルス方式 E>200MeV	日本原子力研究所	電子発生実験
				12TW, 50fs	プラズマカソード	最大加速エネルギー 40MeV	東京大学	電子発生実験
				100TW, 20fs	航跡場加速	電子を 300MeV まで加速	日本原子力研究所	加速実験
				2.5J, 25fs, 100TW, 10Hz	航跡場加速 イオン加速	超高速の生物、分子反応	LOA (仏)	加速実験
				0.5J, 45fs, 1.5x10 <sup>19</sup> W/cm <sup>2</sup>	航跡場加速	PET レーザー加速器	LBL (米)	加速実験
				100TW, 12fs	航跡場加速	レーザー電子源	University of Michigan (米)	電子発生実験
		電子、陽子	Nd:glass レーザー	40TW	航跡場加速	電子 48MeV、プロトン 7MeV へ加速	大阪大学	加速実験
		陽子	Ti:Sapphire レーザー	20TW, 1J, 50fs	航跡場加速	10MeV 陽子の生成	電力中央研究所	加速実験
				1TW, 100fs	航跡場加速	陽子加速器	宇都宮大学	計画中
		イオン	Ti:Sapphire レーザー	1TW, 50mJ, 50fs	レーザーイオン源	極薄膜照射	広島大学	イオン発生実験
				10TW, 50fs	イオン加速	癌治療	日本原子力研究所 / 放射線医学研究所	イオン発生実験
原子力への応用	エネルギー利用	高強度レーザー	Nd:glass レーザー	2kJ, 12beam, 0.1~10ns, 1.053μm	レーザー爆縮	高密度プラズマ物理研究	大阪大学	爆縮実験
				30J, 2beam, 1.053μm				爆縮実験
				~PW, 800J, 0.8ps, 0.53μm		高速点火		爆縮実験
				1.8MJ, 1.053μm		レーザー核融合	LLNL (米)	建設中
				>1PW, 30kJ, ~100fs, 1.053μm		高速点火		
				100TW, 2.8kJ, 1.053μm			Rutherford Appleton Laboratory (英)	増力中
	量子制御	線	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs	逆コンプトン散乱	量子制御による物質分離 線による原子核の研究	日本原子力研究所	基礎研究
		紫外光	自由電子レーザー	239nm	選択励起	物質分離	分子科学研究所	実験計画中
		紫外～遠赤外	自由電子レーザー	165MeV, 2.5kW, 0.23~100μm	選択励起	物質分離 汚染物質解体 創薬	大阪大学	利用実験
	非熱加工	極短パルス	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs, 800nm	非熱加工	原子炉解体 耐放射線材料の開発	日本原子力研究所	加工実証実験
		遠赤外光	ERL-FEL	~10kW 連続, 20μm	超電導リナック・エネルギー回収法	原子炉解体 物質分離 汚染物質解体	日本原子力研究所	建設中
		近赤外および紫外		10kW 0.3~10μm		光核反応 物質制御 非熱加工	Jefferson Laboratory (米)	建設中

役割	研究課題	線種/波長	装置の種類	性能	主な実験手法	研究内容	研究機関	状態
	放射線利用	X 線 線 高エネルギーイオン	Ti:Sapphire レーザー	300mJ, 140fs, 10Hz	超高強度場と物質 の相互作用	核励起、原子核振 動観察 同位体分離	大阪大学	発生実験
		コヒーレ ントX線、 極短パル スX線		200mJ, 35fs, 800nm		コヒーレント軟 X 線源開発・ア ト秒パルス発生	理化学研究所	発生実験
				22TW, 10Hz		アト秒パルス光 発生、高次高調波 発生	東京大学	実験中
		高エネル ギー粒子、 X 線		850TW, 20fs		高エネルギー粒 子、極短パルス X 線発生	日本原子力研究所	実験計画 中
		極短パル ス		10TW, 100fs		高強度場物理 医療応用	University of Michigan ( 米 )	利用実験
		陽子		~PW		医療応用 PET	LOA ( 仏 )	装置開発 中
		高エネル ギー粒子、 高エネル ギー X 線		10TW, 10Hz	クーロン爆発	医療応用 プロトン加速	京都大学	粒子発生 実験・利 用実験
		GeV photon beam	アルゴンレ ーザー	350nm	逆コンプトン散乱	クォーク核分光、 核物理、5 クォー ク重粒子の発見	大阪大学、甲南大 学、原研、JASRI、 他	基礎研究
		コヒーレ ント軟X線	X 線レーザー	~μJ, ~ps, 8.8nm	過渡衝突励起	短波長での極微 細観察	日本原子力研究所	利用実験
				~μJ, ~ps, 12nm		干渉計測	LLNL ( 米 )	利用実験
				~μJ, ~ps, 14nm		干渉計測	Paris-Sud University	利用実験
			X 線 FEL	1GeV, 0.1~3.6nm	真空アンジュレ ーター	生体観察	SCSS/Spring-8	装置開発 中
				230MeV, 80nm 1GeV, 6nm ( 目標 0.1nm )			DESSY ( 独 )	増力中 建設中
				217MeV, 530nm ( 目標 51nm )		高輝度・光時間 分解放射光源の 提供	Argonne National Laboratory	増力中
		極短パル ス X 線	ERL-LS	7GeV, 100mA, 100fs, 1.3GHz	超電導ライナック	X 線研究	Cornell University ( 米 )	装置開発 計画中
				100fs, 10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> photon s/pulse		超高速プロセス 計測、構造生物学	BNL ( 米 )	装置開発 計画中
		極短パル ス X 線	自由電子レ ーザー		逆コンプトン散乱	遠赤外レーザー と電子衝突によ る 線発生	高輝度光科学財団	基礎研究
		紫外光		500MeV, 595~198nm	低損失誘電体多層 膜ミラー	表面科学	産業技術総合研究 所	実験中
		線		500MeV, 1~40MeV	逆コンプトン散乱	原子核物理、光核 反応、 線 CT	Duke University ( 米 )	実験中
			1GeV, 193~400nm	光核反応 固体物理				
				~W, 4~16μm, 300~1000μm	赤外自由電子レー ザーの高度化	物性研究	東京理科大学	装置開発 中



## 第4章 大型加速器計画のフォローアップ

### 4.1 フォローアップの必要性

平成12年に策定された『原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画』(以下、「原子力長計」という)では、大強度陽子加速器(J-PARC)は原子力委員会、学術審議会共催で行った評価を踏まえ適切に推進すること、RI ビーム加速器(RIBF)は着実に建設を進めること、ならびに、一般に大型加速器計画は提案・評価後、遅滞なく評価結果を反映させることが重要であると述べられている。

また、原子力長計の策定に当たって長期計画策定会議第四分科会が作成した報告書『未来を拓く先端的研究開発』第3章「未踏領域への挑戦と持続可能な発展」のなかで、加速器分野の研究開発は未踏領域への挑戦として位置付け、最先端科学の一つとして、我が国の知的フロンティアの開拓に貢献すると期待されている。

現在わが国で建設が進められている大型加速器施設「大強度陽子加速器施設(J-PARC)」、「RI ビーム加速器施設(RIBF)」および建設後順調に稼動して成果を挙げている「大型放射光施設(SPring-8)」、「重粒子線治療施設(HIMAC)」の4施設は原子力長期計画に基づいて建設された先端的な研究施設である。J-PARC と RIBF については建設開始後それぞれ3年および6年以上を過ぎており、SPring-8 は供用開始後既に6年、HIMAC は供用開始後既に9年を経過している。

そこでこれら4計画について現状を調べ、当初計画との対比において計画の進行状況あるいは達成度、成果を検証することは、原子力長期計画に対して貴重な資料を提供することになる。

フォローアップにおいては以下の点に留意する。

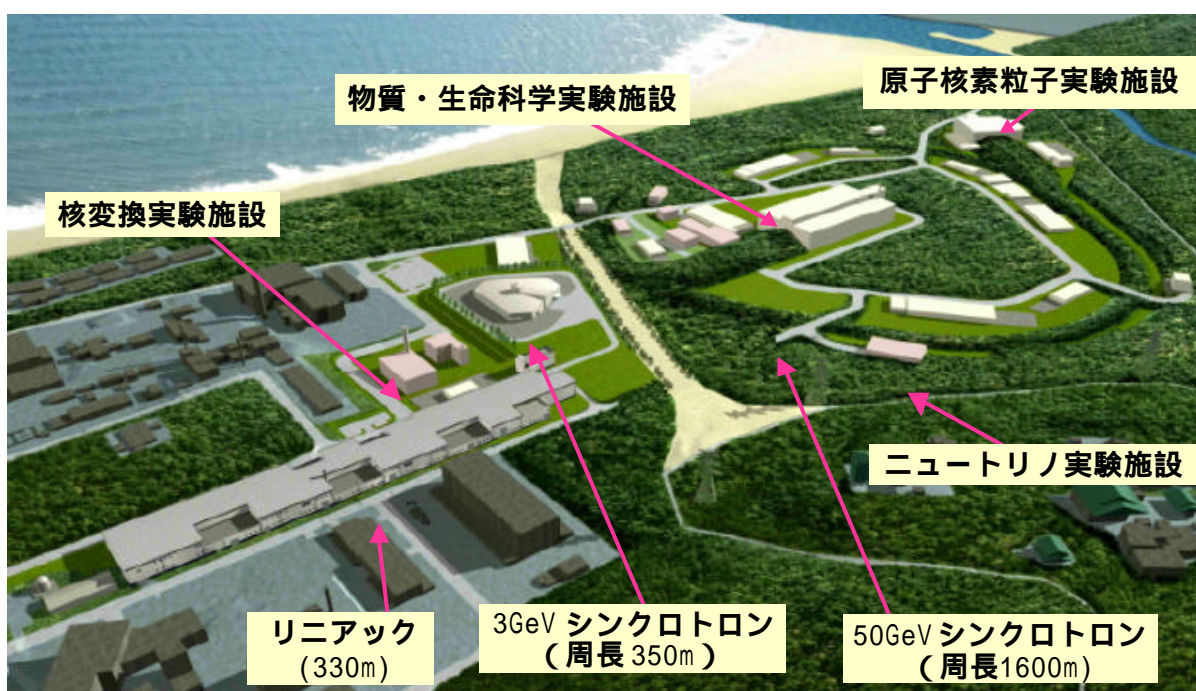
4計画は400億円から1,000億円以上の巨費を投じるあるいは投じた計画であり、完成後は世界最先端の研究施設として機能することが期待されている。したがって最も高いインパクトが得られるように計画が最適化されていること。巨額の資金を投入して建設する施設は、最先端加速器として長期間第一線で活躍できるように、将来の発展性を考えて設計し運用していること。また、運営段階に入った後は、世界トップの性能を実現する努力が行われていること。加速器の「生産性」をあげることを重視すべきであり、このため運用の効率化に努めるとともにトップクラスの成果を挙げるように、インハウススタッフの

強化や課題選定方式の改革に取り組んでいること。

## 4.2 大強度陽子加速器 (J-PARC)

### (1) 計画の概要

大強度陽子加速器 (J-PARC : Japan Proton Accelerator Research Complex) は世界最大級の強度を有する陽子加速器であり、平成13年度から7年計画で現在建設中である。計画は国 (原子力委員会と学術審議会加速器科学部会(当時)の共催) の事前評価をうけてスタートした大型加速器計画である。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (原研) の共同事業計画で、原研東海研究所に建設されている。



第4-1図 加速器施設

加速器システムは、入射器として0.4 GeVリニアック、出力1 MWの3 GeVシンクロトロン (中性子及びミュオン利用施設、物質・生命科学研究) と出力が0.75 MWの50 GeVシンクロトロン (原子核・素粒子物理学研究施設及びニュートリノ実験) で構成されている。大強度陽子ビームを原子核に照射し、そこから生成される二次粒子 (中性子、ミュオン、K中間子、ニュートリノなど) をビームとして用い、

物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理学、核変換の基礎実験など広範な分野の基礎的・応用的研究を行なう。現代科学技術にとって最も重要な基盤的研究施設の一つである。



- 物質・生命科学では、中性子等を用いる世界三大計画の一つ
- 原子核・素粒子物理では、K 中間子計画で世界唯一。ニュートリノ計画は世界三大計画の一つ
- 加速器駆動核変換の計画は世界のトップランナー

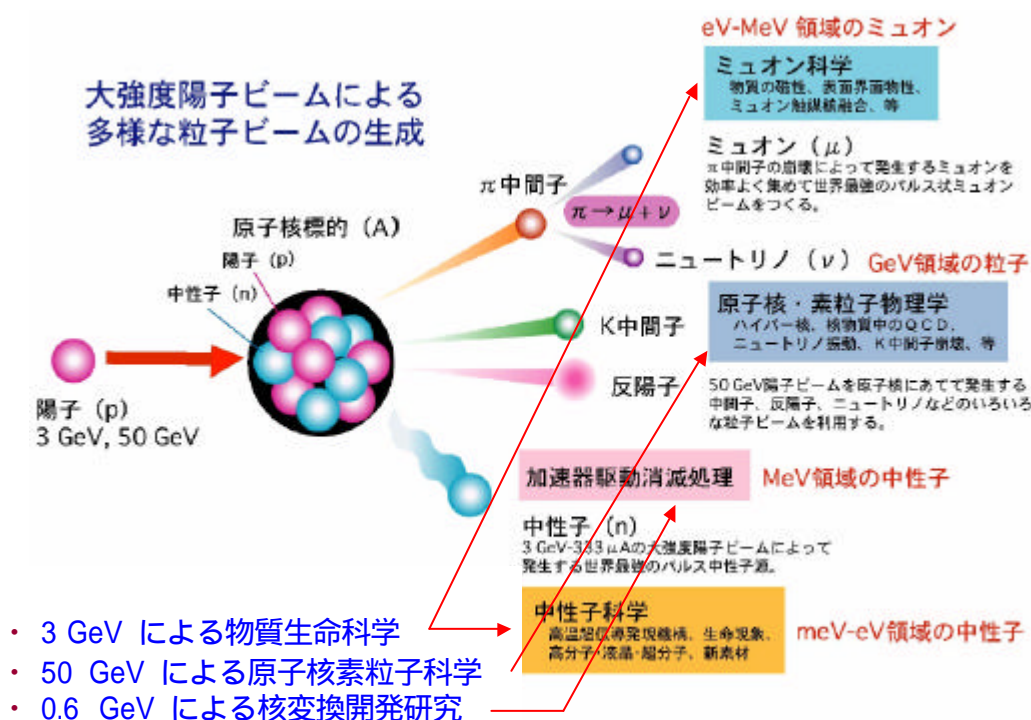
第 4 - 2 図 3 分野のトップをめざす国際研究センター

## ( 2 ) 日本に建設する必要性

世界的に見ると、中性子科学では、近年、陽子加速器を用いたパルス中性子による研究が台頭してきており競争も激しい。中性子のユーザーは大学の研究者のみならず産業界にも多く、すでに 1 千人規模に達していることから J-PARC が完成すると数千人の研究者が利用すると見込まれている。このような状況下、世界的には、OECD Mega Science Forum において北米圏・欧州圏・アジア圏に最低一つずつの施設が必要であると結論している。現在、世界的に最も強力なパルス中性子源は英国のラザフォード研に存在する ISIS と呼ばれる加速器であるが、米国では、その10倍の強度を持つ SNS (Spallation Neutron Source) と呼ばれる陽子加速器を建設中である (2006年完成予定)。日本のJ-PARC計画はこの SNS 計

画と競合関係にある。

J-PARC における原子核素粒子の科学では、世界的に「国際競争」と「国際分担」の二つのメカニズムが共存する。J-PARC において、国際分担の役目を担っているのは、K中間子ビームを用いる科学であり、世界的には「Kaon Factory」と呼ばれている。一方、原子核素粒子の領域において世界的な「国際競争」に直面しているのはニュートリノ実験研究である。これまでは、スーパーカミオカンデによる宇宙や大気圏からのニュートリノの観測実験により、日本はニュートリノ研究における世界のリーダーシップを確立してきた。J-PARCにおける実験は、日本のこの分野における先導的な役割を引き続き果たしていく上でも、重要な位置を占めており、平成15年12月の科学技術・学術審議会のもとで実施された中間評価においても、一刻も早くニュートリノ実験施設の建設に着手することが重要であるとされている。



第 4 - 3 図 プロジェクトの 3 本柱

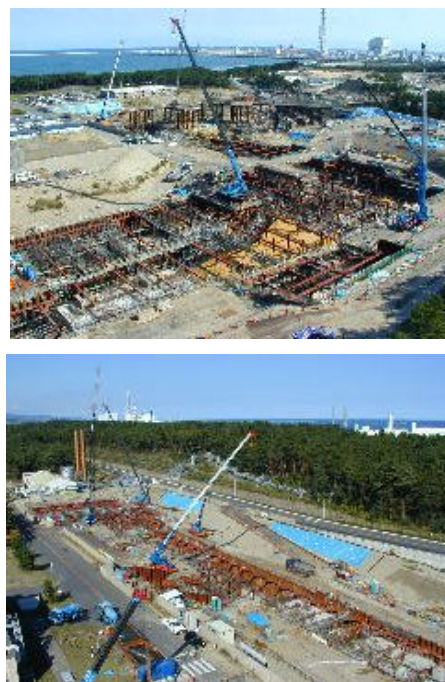


### ( 3 ) 施設建設の現状と今後の課題

J-PARCの建設は平成13年度に始まり、今年で建設3年目を迎える。加速器機器や実験室関連の機器の建設や建屋工事も着々と進み、建設は概ね順調に進んでいる。建設中に 3 GeV シンクロトロンの強化とそれに伴うリニアックエネルギーの低減化という加速器の仕様変更が施され、それにより結果的には 3 GeV シンクロトンからの陽子出力の低下を余儀無くされたが、長期的には中性子利用研究に影響が生じることを考慮し、運用開始後に速やかにエネルギー回復についての対策が図られることが望ましい。

また、前半3年間に交付された資金は全体の1/3強であるが、本計画は基礎研究から応用研究に至る幅広い分野を可能とする極めて意義が高い計画であることから、計画通り施設の建設が行えるよう着実に準備を進めていくことが望ましい。

さらに、施設完成後の実験開始に向けて、既に中性子科学や原子核・素粒子科学の分野において、実験企画書が提案されており それに基づくビームライン配置等の検討も開始されているが、これらの準備を着実に進めていくことや、完成後の運営体制についても十分な検討が望まれる。



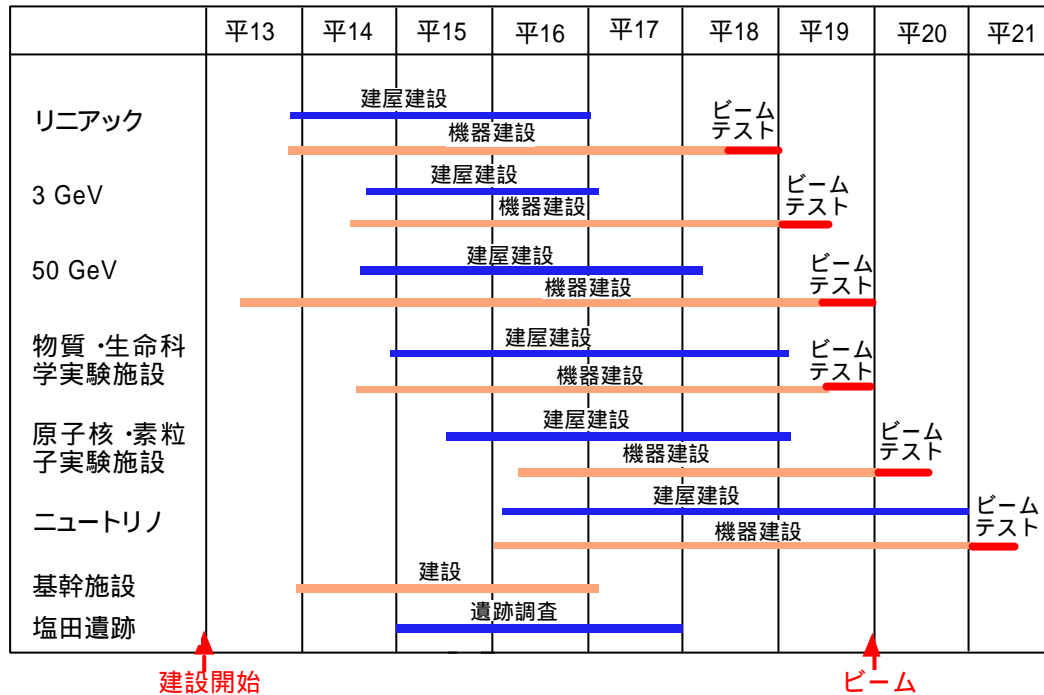
第 4 - 4 図 建設状況

### ( 4 ) まとめ

J-PARC は大強度陽子で生成される二次粒子（中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノなど）を用いて、生命科学、物質科学、原子核・素粒子物理学など広範な分野の基礎的・応用的研究を行なう現代科学技術にとって最も重要な基盤的研究施設である。平成 13 年度からスタートし平成 19 年度に完成する予定である。国際的にも J-PARC は世界のセンターとして、国際分担と国際競争の両面から注目されており、J-PARC 計画を着実に推進させることが望ましい。

また、施設完成後の実験に向けての準備や運営体制については、今後引き続き検討されることが望まれる。

## 建設スケジュール



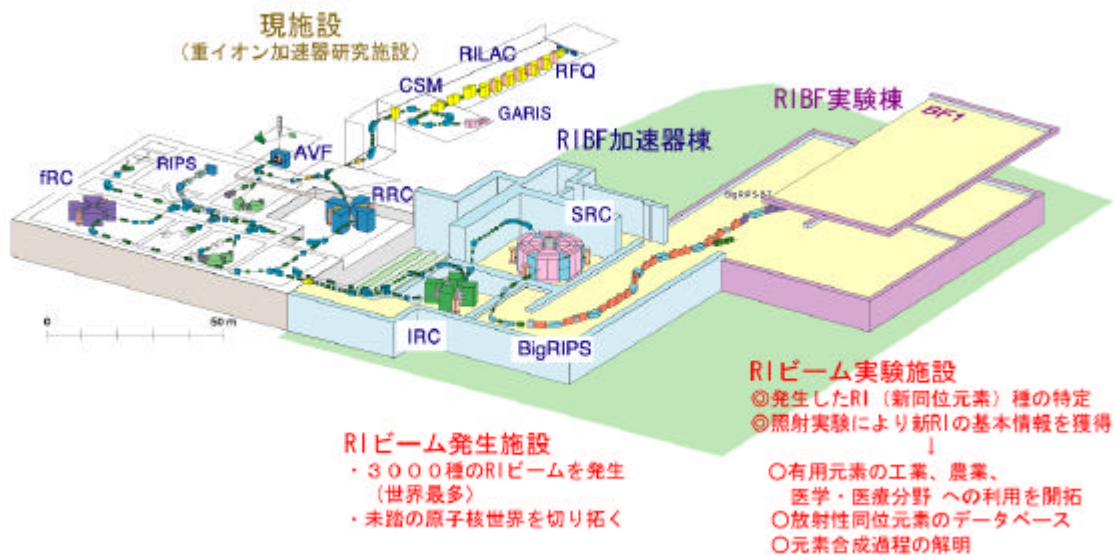
第 4 - 5 図 建設スケジュールとコミッショニング

### 4.3 RI ビーム加速器 (RIBF)

#### (1) 計画の概要

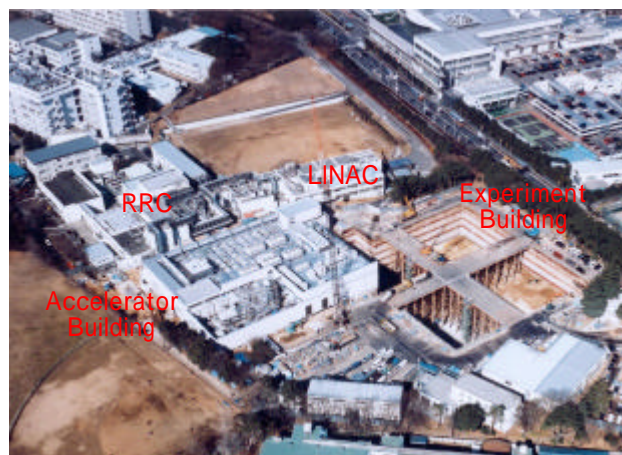
理化学研究所（理研）が推進しているRIビームファクトリー（RIBF）は、水素からウランまでの全元素の不安定原子核（RI）を世界最大の強度のビームとして発生させ、それを利用して基礎から応用にわたる幅広い研究を行うものである。

第1期計画はRIビーム発生装置の整備を主体とし、平成7年度からの要素技術開発にはじまり、平成9年度には全体の建屋基本設計、調査を始め、平成18年度には第1期計画の施設の整備が終了する予定である。第2期計画は、ビームを使って研究をする施設の整備を行う予定であるが、第2期計画は、第1期計画の進捗状況を踏まえ、その開始の是非を決定することになっている。

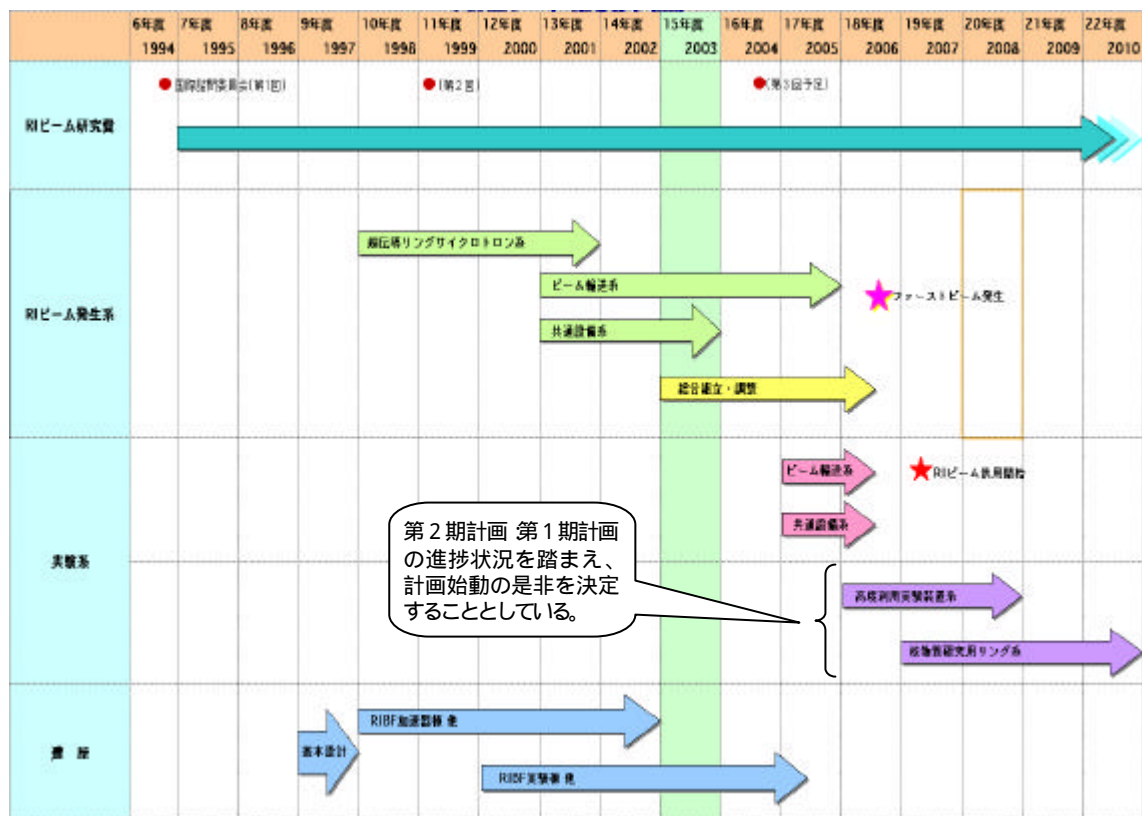


第4-6図 RIビームファクトリー計画(第1期) 概念図

第1期計画では核子あたり350MeVまで加速したウランによりRIビームを発生するほか、未知のRIを創成する実験等を中心に、研究を開始する予定で、実際にRIビームを使った装置のポテンシャルを十分に発揮できる反応などの利用・応用研究は、第2期計画の整備後に進める予定である。



第4-7図 RIBF建設現場



第 4 - 8 図 RI ビームファクトリー年次計画

理研の現サイクロトロン施設をはじめとして、世界のRIビーム施設におけるパイオニアによる研究は原子核物理学に大きな変化をもたらした。この変化は大きく、原子核物理学のルネッサンスと言われている。RIビームファクトリーは、完成すれば全元素のRIビームを最大の強度で得られることを利用して、原子核物理学の新世代を世界的にリードする。これまでに知られていなかった多くの原子核を作り出し、原子核の新しい様相を発見し、不安定核の研究により数多く見いだされた核理論のほころびを修正し、新しい理論の構築をすることになる。また、不安定核の反応の研究は、これまで実験室での研究が不可能であった、宇宙における元素合成の理解を大きく進めると期待される。20世紀の科学を開いた放射線の発見へと人類を導いたウランが宇宙の発展の中でいつどのように作られたかの問いに対してはじめて答えを導くことになる。

放射線の源であるRIの諸性質を解明することにより新しい原子力技術の開発への貢献も期待される。例えば高速炉や加速器駆動型の原子炉では、比較的短寿命な不安定核の崩壊熱や核反応が重要な役割を果たすと考えられるが、崩壊常数



や崩壊エネルギー、反応の確率などの研究も重要な課題である。

第1期計画では、現施設からのビームを、あらたに建設を進めている fRC, IRC, SRC の3台のリングサイクロトロンに導き、その後、BigRIPS (RIビーム発生装置)でRIビームを発生させる。加速器は平成18年度までにすべて完成する予定で、RIビームの分離器であるBigRIPS もそれまでに1基完成する予定である。これらの完成により、RIをつかってビームを発生することが可能となるので、この段階で重要な研究は開始できる。

第2期計画では、そのRIビームの特徴を活かし、高度に利用する実験施設を建設する予定であるが、更なる研究の開始には、これらの全体的な実験施設の完成が重要である。

## (2) 世界の中での位置付け

RIビーム利用の研究は日本人が開拓し、理研で発展させてきた研究である。また、RIBF計画は世界のトップを切って建設が進んでおり優位にある。このまま実験装置まで建設が進めば、世界で初めての研究が数多く可能である。

また、この計画は1999年のOECD Megascience Forumの原子核物理ワーキンググループのレポートで、世界の3地域のうちアジアを受け持つ役割を持って重要な施設計画との位置づけを得ている。RIBF計画の発足後、ドイツの重イオン研究所(GSI)の高エネルギーRIビーム計画、アメリカの大強度RIビーム計画(RIA)が提案され、いずれもRIBFに2~3年遅れて完成する予定である。このようにRIビーム利用の研究は世界で開始されることになる。

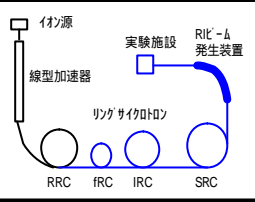
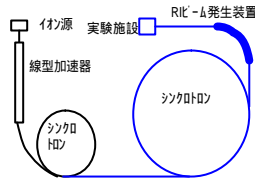
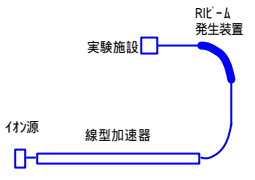
## (3) 今後の展開と課題

本計画は、平成6年に実施した国際諮問委員会を経て、平成9年度から建屋の基本設計、また、平成10年度からは超伝導リングサイクロトロン系等の建設に入っているが、2つの課題がある。

第一点は、第1期計画終了時の実験装置の整備や運転経費などの資金計画の策定が必要である。

第二点は、第2期計画は第1期計画の進行状況を見て判断することになっており、早急に国際諮問委員会、国の審議会などの外部評価を実施して、具体的な実験計画を明らかにし、建設に移行できるよう準備を進めることが望ましい。

第 4 - 1 表 世界の主要 RI ビーム加速器計画

事 項	主加速器	加速器構成概念図（青色部分を新設）	RIビーム 生成手法	1次ビーム	RIビーム	主な研究領域	予算規模	現状
RBF	超伝導 リングサイクロトロン		重イオン ビーム による 核破砕反 応	[ 大強度ビーム ]  ウラン 350 MeV / 核子 (光速の69%) 10 <sup>13</sup> 個 / 秒  連続波	エネルギー (光速の 60%) と ビーム強度 は 全施設とも ほぼ 等しい	核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究	第1期 397 億円	第1期 施設整備費の 80%まで 予算化
GSI	シンクロトロン			[ 高エネルギービーム ]  ウラン 23000 MeV / 核子 (光速の99.9%) 10 <sup>11</sup> 個 / 秒  パルス波		核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究 反粒子科学研究	900 億円	予算計画は 認められたが 予算化時期は 未定  設計実施中
RIA	線型加速器			[ 大強度ビーム ]  ウラン 400 MeV / 核子 (光速の72%) 10 <sup>13</sup> 個 / 秒  連続波		核図表拡大 元素の存在限界の検証 重い元素合成過程の検証 エキゾチック原子核研究 物質材料科学研究	950 億円	NSACの『2002 Long Range Plan』において 最重要プロジェクトに指定  OECDがサイエンスフォーラム において重要度の高い プロジェクトに指定  R & D実施中

注) RIビームを発生するための1次ビームエネルギーは、光速のおよそ70%が必要であるが、それを超えてもRIビームの発生効率は増加しない。

#### ( 4 ) まとめ

本施設の主たる目的は、原子核物理学の研究であり、なかでも宇宙における元素合成メカニズムの解明などを含む天体核物理学が主眼である。このような研究開発の目的設定は適切である。本分野は、日本人研究者がパイオニア的な貢献をした分野であるが世界における競争も激しい。特に、独国や米国において同種の加速器の建設が提案されつつあり、先日発表された米国DOEの“20 year outlook”ではRIA計画が今後の施設建設の中で非常に高い優先度で認定されている。RIビームファクトリー計画が着実に推進され、平成18年度までにウラン加速によるRIビームが得られ、諸外国に対して優位性が保てるようにすることが望ましい。

### 4.4 大型放射光施設 ( SPring-8 )

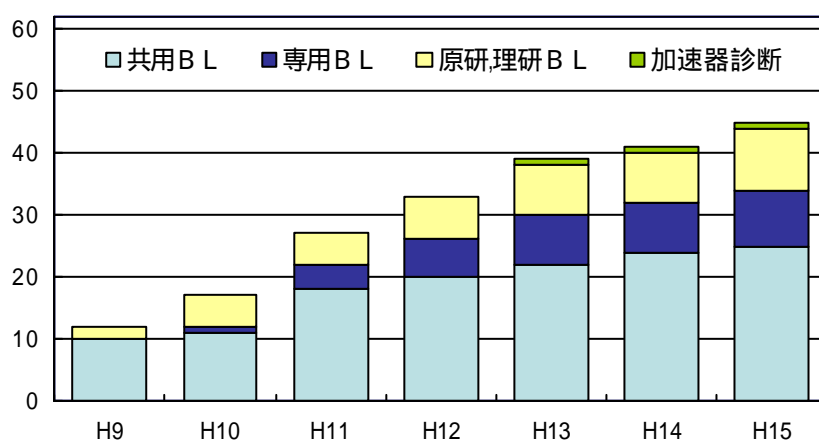
#### ( 1 ) 施設の概要

SPring-8 (= Super Photon ring 8GeV) 計画は、原研と理研が協力して建設した国内外に開かれた共同利用施設で、当初予算で計上した建設費で当初計画より1年以上早く完成した。1997年3月にビーム加速に成功し、同年10月から10本のビームラインで放射光利用実験を開始した。



第 4 - 9 図 SPring - 8 全景

過去 6 年間に 47 本のビームラインを建設し、年間 5400 時間の運転を実現している。なお、ビームライン (BL) の内訳は、SPring-8 建設費で建設した共用 BL25 本、外部資金により建設した専用 BL9 本、理研及び原研専用 BL が各々 7 本と 4 本、加速器診断用 BL2 本である。

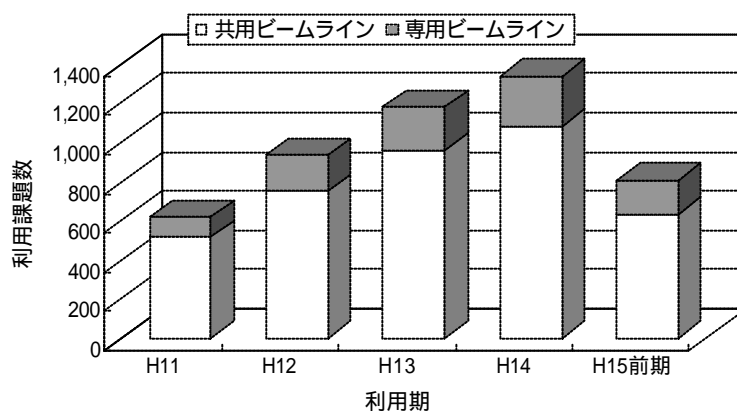


第 4 - 10 図 稼働ビームライン数

SPring-8 の蓄積リングは垂直方向のエミッタンスとビームサイズが設計値よりはるかに小さく、ビーム電流、ビームの寿命や安定度などで設計値を大幅に超

える性能を持っている。また世界一長いアンジュレータ、1km 長のビームラインなど独自の装置があり、得られる放射光は波長領域の広さ、波長分解能やパルス幅、輝度、指向性、干渉性、偏光特性など多くの点で世界最高の特性を有している。

SPring-8 では 1997 年 10 月の供用開始後すぐに実験が始まった。利用課題数は増加の一途をたどり、2002 年 2 月から翌年 2 月までの 1 年間に 1334 課題の実験を行い、延べ 8843 名が実験に参加した。2002 年に学術雑誌に発表された論文は 342 編である。産業界による利用も着実に増加しており、2002 年には共同利用で 150 課題を越す実験が行なわれた。また、成果占有課題（有料）も増加していて 57 件であった。



第 4 - 11 図 利用課題数

実験開始後、現在( 2003 年 7 月 )までに行なわれた実験課題の総数は 5197 件、総利用者数は 34000 人を超えている。とくに生命科学や物質科学の分野ではハイクオリティ学術雑誌の表紙を飾る世界的に注目される成果が数多く得られている。このように SPring-8 は広範な学術・科学技術の分野の基礎的、応用的研究で世界的な業績を上げている。

## 第 4 - 2 表 SPring-8 における成果

### **クォーク 5 個から出来ている新しい粒子 (新バリオン) 発見 (Physical Review Letters)**

新粒子は、クォーク 5 個からできているバリオンで、LEPS グループが SPring-8 のビームライン (BL33LEP) で得られる世界最高エネルギーのレーザー電子光を中性子に照射し反応を分析した結果、中性子の 1.7 倍の質量 (質量エネルギーにして 15.4 億電子ボルト) の新バリオンが生成されていることを発見

### **貴金属複合ペロブスカイト型酸化物触媒の自己再生機能を解明 (Nature)**

新しく開発したペロブスカイト型酸化物触媒が自動車の排ガス中で自己再生機能を有することを、大型放射光施設 SPring-8 の放射光 X 線を利用して原子レベルで解析

### **酸素分子を 1 列にならべる (Science)**

ゼオライトや炭素系物質と同じように、ナノスケールの細孔を規則正しく並べた物質をブロックに組むようにデザインし、化学的に合成することに世界で初めて成功

### **筋収縮を調節する分子メカニズムの一端を解明 (Nature)**

筋収縮の調節に重要な役割を果たしているタンパク質の立体構造を決定し、その分子メカニズムを解明することに世界で初めて成功

### **干渉性放射光散乱パターンを元にした実空間像の再現 (Physical Review Letters)**

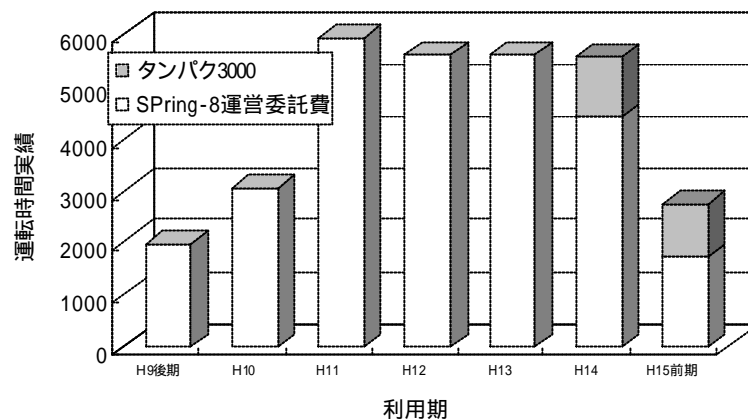
2 層のニッケルパターンから干渉放射光による散乱パターンから位相回復法により、3 次元実空間像をナノメートルスケールで世界で初めて再生する事に成功した。この方法はナノテクノロジー、ライフサイエンスなど広範な応用が期待される。

## ( 2 ) 今後の展開と課題

### ( a ) 研究利用の推進

我が国の重要施策である「タンパク 3000」計画 (RR2002) は、5 年間で 3000 種の蛋白質の立体構造を決める計画であるが、SPring-8 は理研ゲノム科学総合研究センターとともに拠点施設になっている。また重点研究課題に指定された研究に対する重点的なビームタイム配分をするなど、他の重要施策研究にも貢献しており、我が国の研究基盤施設として研究遂行に欠かせない役割を果たしている。

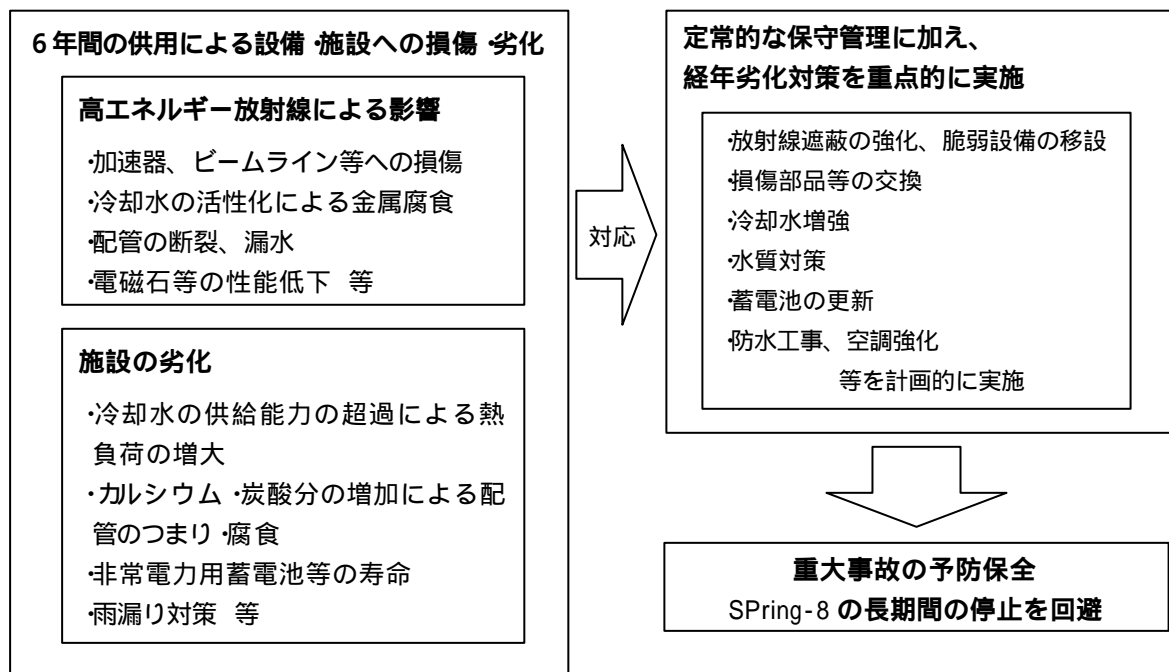
平成 14 年度から運転経費の約 30% を上記「タンパク 3000」計画 (RR2002) 予算から受けている。



第 4 - 12 図 SPring-8 の利用時間

### (b) 施設の保守

SPring-8 では、大強度高エネルギー放射線による加速器、ビームラインの損傷が進んでいる。特に冷却水の活性化でおこる金属腐食による冷却水配管の断裂や漏水、非常用蓄電池の寿命など経年劣化が進んでおり、その対策を重点的に実施する必要が生じてきている。



第 4 - 13 図 経年劣化とその対策

### (c) 施設の高度化

SPring-8 には他の放射光施設では実現できない特性をもつ放射光を発生する潜在能力がある。これまで高度化研究費を用いて SPring-8 の高度化が進められてきた。これまでに蓄積リングの安定化 / 低エミッタンス化で干渉性 X 線の実験を可能にし、現在はトップアップ運転で測定精度の大幅な向上を図っている。次は 30m 長直線部を利用したフェムト秒のパルス放射光の発生を計画しているが、これが成功すると SPring-8 は世界で唯一のパルス幅フェムト秒の X 線光源になり、新しい研究領域の開拓が可能になる。

第 4 - 3 表 SPring-8 加速器の高度化

<b>低エミッタンス</b> 蓄積リングにおける水平エミッタンスを 6nmrad から 3nmrad に低減
<b>TopUp 運転</b> 蓄積リングへの連続入射を行う TopUp 運転の実施により、積分電流値の増加、光学素子の熱負荷変動の軽減、強度測定精度の向上が可能
<b>フェムト秒パルス</b> 30m 長直線部挿入光源、低エミッタンス、及び軌道の安定性の特徴を活かして、30m 超直線部に Crab 空洞を設置し、フェムト秒の短パルス放射光を発生が可能

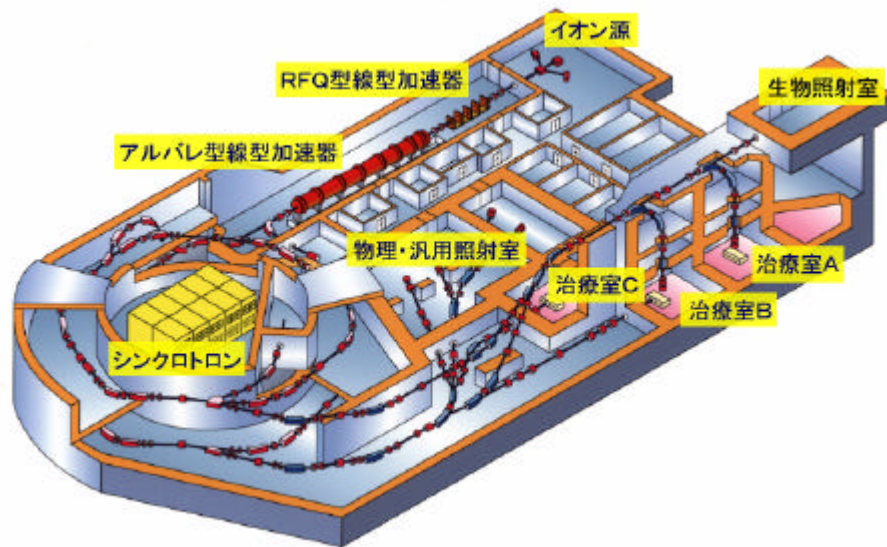
### (3) まとめ

SPring-8 は順調に利用実績を重ねている。今後は、加速器及びビームラインの保守 / 高度化をどのように進めるかが課題である。

## 4.5 重粒子線がん治療装置 (HIMAC)

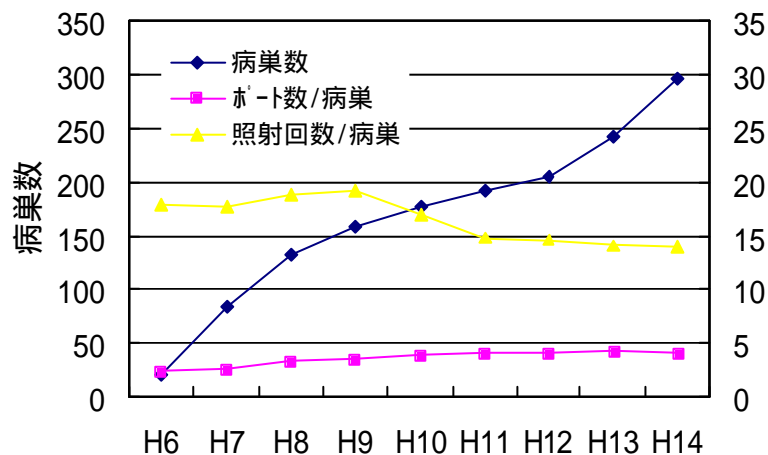
### (1) 施設の概要

独立行政法人放射線医学総合研究所のHIMAC (= Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba、重粒子線がん治療装置) は、臨床試験開始後、9年を経過し炭素ビームを使用して約1500人の患者を治療した。



第 4 - 14 図 重粒子線がん治療装置 HIMAC

平成15年3月現在、総治療病巣数 1,511 (患者数 1,448 名)



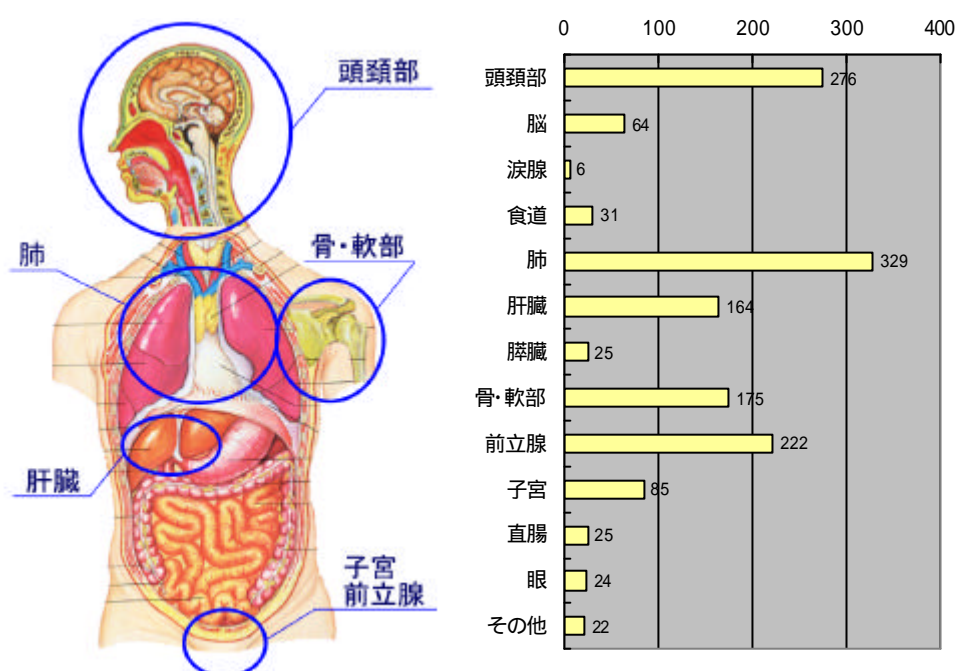
第 4 - 15 図 HIMAC での総治療病巣数

対象とした固形腫瘍部位は、頭頸部、肺、肝臓、子宮、前立腺など、ほぼ全身にわたる。治療成績は非常に良好で、最新鋭の放射線治療法としての実績を確立して、世界的にも非常に高く評価されている。肺や肝臓の短期間治療、骨軟部腫瘍のように他の適切な治療法がないような症例に対する優秀な成績などは、重粒子治療の他に抜きんできた実績と言える。平成15年10月に高度先進医療の認定がな



され、今後さらに実績を積み普及が進めば、治療プロトコルが確立した対象は、一般保険適用に向かうことになる。

放医研は、設立の趣旨から、今後とも医療活動のかなりの部分を、臨床研究に置くことになるので、今までは炭素線治療に絞ってきたが、今後は、腫瘍対象部位の拡大、分割照射回数の減少による治療期間の短縮、さらには、浅在性の腫瘍に対する炭素以外の粒子、NeやSiビームによる治療等を実施することになる



第 4 - 16 図 HIMAC での治療部位

照射技術の面では、現在行われているワブラー法を改良した積層原体照射法、三次元のスポット・スキャンニング、また  $^{11}\text{C}$  のRIビームの利用、照射治療計画における粒子線特有の最適化プログラムを開発している。

HIMAC 施設自体は、個々の装置の経年変化に対する更新、維持、改良を重ねつつ、順調に運転されている。医療用加速器の信頼性、安定性を重視した設計、関係者の非常な努力により、過去に治療スケジュールに影響のあった事象は、9年間でわずか4件にとどまっており、世界の加速器群の中で最高の安定性を維持している。

特に、この間、施設建設、装置の保守維持、改良、前臨床試験、臨床試験、を

通じて、物理学、工学、生物学および医学という異分野の研究者、技術者、が相互に協力して、上記のような優れた成果を得てきたという点が、高く評価されるべきであろう。

また、その実績と平行して、まだ少ないながらも医学物理関係の人材を育て他の施設へ送り込んでその建設、運営に寄与して来たという点でも、その貢献は著しい。

さらに HIMAC は核子あたり 800 MeV の重イオンビームを加速できるという日本では他にない特徴を活用するため、当初より分野を問わずその研究への利用を所内外に開放してきた。平日の昼間は2台のシンクロトロンからの炭素のビームで患者の治療用専用に使われているが、平日の夜間と週末は、これらの医学、生物、物理工学の基礎研究の実験に使用されている。

これらの種々の実験のためには目的に応じて多様なイオン種を加速することが要求されてきたことから、現在HIMACでは、3台のイオン源を駆使して陽子からXeに至るまでのイオンが供給されている。時間分割方式で2台のシンクロトロンは同時に異なるイオン種を異なるエネルギーで加速できるため、利用効率が非常に高く、供給されている実験時間数はのべ年間5000時間に達している。研究課題数は年間で約130であり、利用者は所内が約150人、所外が約600人（そのうち海外からの利用者が約10%）で、発表される原著論文数も年間約80編を数え、基本的に24時間運転でHIMACは非常に有効に使用されてきたといえる。

## （２）今後の展開と課題

重粒子線治療では日本は世界に対して少なくとも10年以上リードしており、陽子線を含めた実績は突出している。治療効果が極めて優秀であるということと、がん患者の発生数、死亡数を考えると、この治療法を今後できるだけ広く普及すべきである。

その普及に向けては、HIMACは研究用の色彩が強く、大きな装置で、コストも高いが、粒子線治療を普及させるためには、ハード的には装置の小型化、コストダウン、普及に際してのソフト体制の整備が課題である。

### （a）小型化への技術開発

経験を積んだ現在、実践的な最適化設計を目指している。例えば、加速粒子として炭素線に特化することにより、最大加速エネルギーをHIMACの1/2あるいはそれ以下にする。イオン源に永久磁石を採用する。照射装置、治療室を合理化、簡素化する、等。

### (b) 人材の養成

粒子線治療施設はまだ少なく、今後そのような施設を全国に展開していくためには、粒子線施設に必要な人材を養成していかなければならない。具体的には、粒子線の特殊性を十分理解している医師、放射線技師を養成する。加速器装置を運転、保守するエンジニア、テクニシャンを養成して増員する。大学教育及び既存施設の中で、医学物理士を養成する。

### (c) 体制の確立

粒子線治療装置を全国各地に設置してその施設を有効に活用するためには種々の課題を解決しなければならない。例えば、設備を運転、維持、管理する体制の確立。故障の際に迅速な対応のできる組織をつくる。治療の質の保持、改善をはかる。装置製作会社と発展、共存できる体制をつくる。

### (3) まとめ

HIMAC は、重イオンによる治療用加速器として特に安定性を重視した設計がなされ、故障が殆どなく、評価の高い加速器であり、すでに 1500 人を越える患者を治療し、高い利用効率を堅持している。このことは国際的にも評価されており、HIMAC の第一の波及効果として高く評価されるべき点である。

また、今後、重粒子線治療を医療技術として確立し全国に普及するには、医療用に特化した加速器の開発（小型化）、人材の育成、加速器の運転や運営に関する体制の確立等が課題となる。

## 4.6 まとめと今後の課題

対象とした 4 件の大型加速器計画は概ね順調に進行している。

また、これらの大型加速器は世界的に見ても最先端の施設であるとともに、ここで行われる研究開発は国際的な評価も高い。科学技術・学術的な意義も十分あり、今後の我が国の発展に大きく寄与するものである。

J-PARC、RIBF、SPRING-8 による創造的な研究によって生み出される新発見は、新産業・新技術の創出を促し、そこから得られる優れた研究成果は社会に還元されるものと期待される。

また、医療用加速器である HIMAC による優れた成果は、従来にない画期的な治療法として、高度先進医療の承認を経て、国民医療の中に重粒子線によるがん治

療を定着させることへの貢献が期待される。

さらに、これらの大型加速器による成果は、国民の知的好奇心をかき立て、科学技術に対する関心を引き起こすとともに、若者に夢を与え先端的科学技術分野に進もうとする意欲を持たせるきっかけを作ることにもつながると期待される。

以上を総合して、科学技術の発展において、これら 4 件の大型加速器計画は、今後も適切に推進されることが望ましいと考える。

しかし、これら 4 件の大型加速器計画は大型プロジェクトであり、その建設、運営にあたっての予算規模は極めて大きい。我が国の現下の財政状況等を踏まえれば、国際社会の中の分担や競争も十分に考慮する必要があるものの、緊急性・重要性の高い研究開発については優先的に実現する必要がある。

こうした状況の中、施設建設、実験装置の準備、維持運営費、研究費、高度化のための資金等が確保できない場合には、研究計画の遅れや研究レベルの低下が懸念されており、各研究機関が世界レベルあるいは、それを凌駕する研究成果を出し続けることが困難になるとの危機感も出ている。このような状況は大型研究施設の有効利用に支障を来すとともに、将来の基礎科学の発展に影響を及ぼすものである。

そのため、実験経費の不足で大型の研究施設を十分に活用できないことがないよう、原子力分野の資金配分（集中と選択）の検討と他の資金をどのように取り込んで研究開発を継続するかを検討し、加速器分野の研究開発の先細りを避けることが重要である。

現在の計画のまま進行すれば、これらの大型加速器計画は、世界のトップランナーを維持できることから国際的にも高い期待が寄せられており、世界各国の研究機関や産業界との共同研究も期待できる。

建設が完了し運用が開始されている SPring-8 の例に見られるように、世界的規模の施設が完成するとそれを利用した研究を求めて利用者は飛躍的に増大し、それにとまって産業界からの施設利用も増大すると考えられる。

そこで、HIMAC や現在建設中の J-PARC、RIBF についても、建設資金は原子力予算から配分するとしても、建設が終わった後の施設の運用に関しては工夫が必要である。たとえば共同利用を積極的に活用し、外部研究資金、施設使用料、特許実施料等の自己収入の増加に努めることを検討する一方で無償を原則とする基礎研究とのバランスに十分配慮する必要がある。

最先端の研究のための加速器は、各種基礎研究の基盤となる装置として建設されるが、研究を行うためには、粒子（中性子、放射光等）を取り出すビームラインや計測装置を併せて建設する必要がある。加速器を建設する研究機関等は、加速器建設資金と併せてこのビームライン等の資金を手当てしているが、それ以外の研究機関等がビームライン等を建設する場合、自ら予算を手当てすることが必要である。

また、ビームラインを建設するためのビーム取り出し口は有限であることから、研究内容に応じ、ビームライン建設にプライオリティをつけることが必要である。しかしながら、ビームラインを各研究機関等が様々な予算制度を活用して建設すると、このプライオリティ付けが難しくなるという問題が生じる。

多額の予算を投じて建設した、最先端の加速器はその能力を 120%使いこなさなければ宝の持ち腐れとなることから、ビームライン等の建設を研究の独創性、重要性等に応じ、一貫した選定方針の下に、スムーズに行えるような仕組みを検討することが重要である。

さらに、研究資金には国民の税金も使われていることを認識し、研究の推進に当たって、アカウンタビリティ（説明責任）を明確に果たす必要があることを忘れてはならない。つまり、研究者としての意欲だけでなく、成果がどのように還元されるのかを説得力ある形で国民に示すことが重要となっている。

また、研究開発の推進には加速器に関わる人材の確保（育成）も重要な課題となっている。将来の先端的な加速器科学研究を担う人材の養成について、大学等と研究開発機関との連携・協力を配慮していくことが重要である。

## 第5章 加速器利用研究の推進

本章では、加速器を用いた研究開発を進めていくに際して、長期的展望にたった計画の策定や、国際競争、国際分担での加速器研究の進め方、産学官連携や役割分担のあり方についてまとめる。

### 5.1 加速器利用研究の理解を得るための方策

多額の国費によって推進される研究開発は、広く国民の理解を得て進めることが必要である。とくに巨額の国費を投入して進められる加速器計画には、計画検討、建設、運用／実験研究の各段階において、常に社会の理解を得る努力が求められている。

#### （何を社会に伝えるか）

よりよい社会の理解を得る為には、社会が求める情報は何かを的確に捉え、分かりやすく伝えることが肝要である。広報のあり方を探るため、フォローアップを実施した4計画（HIMAC、SPRING-8、J-PARC、RIBF）について、社会的理解を得るための方法を検討し、今後の広報の参考にすることも必要であろう。

大型加速器計画に対する社会の関心事は、計画が何を目指しているか、安全性は確保されているか、環境問題は大丈夫かなどである。一方、計画の社会的な認知は、社会が計画に対して抱く期待感の強さと、計画が社会に与えるインパクトあるいは話題性によることが多い。「わが国だからこれができるのだ」ということを社会に示すことも重要である。広報はこの両面で社会に情報を伝えることが肝要である。

#### （計画の評価と社会への開示）

今後、大型加速器計画には必ず第三者評価と安全性評価が行なわれることになっている。そのシステムを利用して、社会の理解を深めることも可能である。例えば、第三者評価を強化して、学術的、科学技術的意義だけでなく、社会的、文化的な意義や環境に対する影響などを広く検討評価するようにし、その報告を国民に分かり易い表現で公表することが考えられる。同様に安全性の検討結果も専

門的な報告書に加えて、地方自治体への報告書を市民に分かり易い表現でつくることも必要である。このように既存の公的評価システムを活用して行なう情報発信は、社会的信頼を得る上でとくに有効であろう。

#### （広報活動の強化）

多額の国費を使って建設された大型加速器施設では、その研究活動や施設の内容を広く一般の人々に伝えることは施設の管理者に課せられた義務であり、そのための広報活動はこれまでも行われてきた。例えば、研究所やそこにある研究施設を紹介した各種のパンフレット、ホームページ、ビデオ等が作られて公開されている。しかし、一般の人々に対しては、このような広報活動では限界があることも事実である。

科学や技術の成果を広く国民に知ってもらうためには、先端的研究の内容を、科学的な正確さを大きく失うことなく、視覚化も取り入れてわかり易く表現する手法の開発が必要である。わが国では現在そのための「科学の語り部」や「科学のイラストレーター」の養成が望まれているが、この目的から大型加速器施設の広報部においては、科学者がサイエンスを説明するのではなく、従来の視点を変え、語りや視覚表現の能力に重点を置いて人材の発掘や養成を行なうことが必要であろう。できれば拠点研究所や大学の広報部を指定して、このような観点からの広報する体制を強化し、長期的視野に立って人材養成を行なうことが望ましい。

このようにして社会に対する働きかけを積極的に進め、社会における科学・技術への関心をより高めれば、研究施設の存在意義をより明確にすることが出来ると思われる。また、それと同時に、科学技術に対する関心を若い世代の中に芽生えさせ、将来における研究者、技術者の裾野を広げることが期待される。

上の視点に立った社会との関わりと可能な貢献を考えてみる。

#### （１）施設の公開

大型加速器の様な研究施設は、それを「見る」だけで強い印象を与える。科学への関心が、感動、感銘から生まれる場合も多い。加速器の原理とか、研究の内容はまだ理解出来ない年齢であっても、見て感激し、それが潜在した推進力となって将来科学への道に進むことも十分考えられる。多少とも関心を持って見る大人の場合にはまさに「百聞は一見に如かず」という効果がある。

研究所の一般公開は、年一回、およその時期を定めて行われる場合が多い。一般の人々が見学出来る日がより多くあることが望まれる。

## （２）社会人講座

最近では、学会で大きな話題になった研究成果を新聞などが報道することがしばしばある。が、限られた紙面では十分な説明も出来ないのもので、その記事を理解することは難しく、一般読者にとっては、難しい研究の印象で終わってしまう。このため市民講座開催等に経験豊かな研究者・技術者を派遣したり、施設として市民講座を開き、そこに装置そのものの見学を組み込むなどの工夫が考えられる。

## （３）青少年を対象とした理科教室の開催や教育用ビデオの制作

青少年の科学への理解を深め、興味・関心を涵養するため、加速器に関連した様々な現象、磁石と電気、放射線、物質のミクロの構成や分析、更には宇宙の創生に関する事柄などを、身をもって知ることのできる場の提供が有効である。また、ファラデーが始めた「少年・少女のためのクリスマス講演」のような講演も望まれる。

視覚を通しての教育は、例えば実験を行う事が難しい現象について理解を促すことになるばかりでなく、学んだことについて理解を深めることにも有効である。原子、原子核、素粒子、それを研究するための加速器や様々な測定装置等に関するビデオ等の視聴覚教材は非常に少ない。そのため青少年を対象としたものから、大学の理工系以外の学部の学生が学ぶ自然科学系科目を対象としたものまで、様々なレベルのものが望まれる。このような教育用ビデオを、大型研究施設の広報部が独自で、または、協力して系統的に制作することができれば、社会に対する大きな貢献となる。

## （４）小学校、中学校、高等学校の教員のための講座

理科の科目の範囲は広く、また学問的発展のめざましい分野である。希望する教員に新しい研究分野に関しての知識を伝えるシステムが、この加速器分野でも望まれる。研究者たちの情熱や新しい科学技術の知識が、小、中、高校の教員に伝われば、生徒に対する影響は大きい。そのため研究施設の現場での講習はより効果的であろう。



## ( 5 ) 大型研究施設についての広報

各研究施設で既にいろいろなビデオが作られているが、そのリストはその研究施設に訊いたりホームページで探さなければ分からない。これを纏め、似たものを分類したリストと、簡単な内容の紹介があれば、これまで以上にそのビデオが活用できるであろう。

また、最近インターネットによる検索が容易に出来、多くの人々が様々な場面でこれによって知識を得ている。大型研究施設間で連携し、必要な情報を得やすいようなネットワークの構築が望まれる。

## 5.2 加速器を用いた研究開発の進め方

### 5.2.1 長期的展望に立つ計画策定

わが国では総合科学技術会議が5年ごとに策定する「科学技術基本計画」に従って具体的な科学技術政策が進められている。しかし大型加速器のように巨額の国費を20年、30年の長期にわたって投入するプロジェクトについては、学術/科学技術の長期展望に基づく計画を検討し、専門家による学術的、科学技術的意義を検討・評価する仕組みが必要である。

## ( 1 ) これまでの我が国の加速器計画

わが国の学術研究を主目的にした加速器としては、全国共同利用加速器が高エネルギー加速器研究機構と大阪大学付置の核物理研究センターに、また、学内共同利用加速器施設は東北大学、広島大学、立命館大学に設置されている。一方、原子力研究の一環として建設された大型加速器が理化学研究所と日本原子力研究所にあり、学術研究から応用研究にいたる広い分野で、全国の研究者に開放されている。このように複数の研究機関がそれぞれ加速器計画を推進してきた結果、我が国の加速器は多様で充実したものになっている。

## ( 2 ) アメリカにおける大型計画推進の仕組み

アメリカでの科学技術の推進を行う行政庁としてエネルギー省( Department of Energy( DOE ))がある。DOE は科学技術を Advanced Scientific Computing、 Basic Energy Sciences、 Biological and Environmental Research、 Fusion Energy

Sciences、High Energy Physics、Nuclear Science の6 プログラムに分け、それぞれの分野に常設の「分野別諮問委員会」を置いている。「分野別諮問委員会」は必要に応じて担当する分野の科学技術の現状と動向を分析し、国が研究施設の設置等について勧告するとともに、専門的立場から大型プロジェクトの評価、順位付けを行っている。

### (3) エキスパートによる加速器研究開発の評価の必要性

大型加速器は、未知への挑戦において最も重要な研究手段であるとともに、物質科学、生命科学、情報科学/ナノテクノロジー、エネルギー/環境科学など現代科学技術の重要分野の研究にとって不可欠の基盤的研究施設である。これらの研究施設でどのような成果が得られているか、どのようにして世界トップの水準に保つかを検討するため、エキスパートで構成された評価組織(リサーチカウンシル)によって加速器研究開発の状況を評価することが望ましい。なお、リサーチカウンシルでは、ある程度広い学術科学技術の分野を俯瞰して検討するようにしておくのが望ましい。

これまで我が国では、欧米諸国で進められている計画を後追いするような計画が多かった。そこで、リサーチカウンシルは諸外国の動向を探るのではなく、科学技術・学術の動向を独自に判断することが望ましい。

## 5.2.2 国際競争と国際分担

### (1) 国際戦略の必要性

大型加速器の将来の方向性として、高エネルギー化をめざす方向や大強度化をめざす方向があることは、本報告書の冒頭に述べた。いずれの場合においても、加速器一台当たりのコストは近年上昇しつつある。したがって、国内のみならず国際的観点から、大型加速器設置の必要性の吟味と、特にこれから設置する加速器に関しては、日本になぜ配置しなければならないのかについて、十分な討論が必要となる。すなわち、今後の加速器計画を考える際には、国際競争と国際分担の両面を十分に検討した上で、設置計画を国際的観点から進めるという「国際戦略」が必要となる。

このような視点をいち早く取り入れたのは、高エネルギー物理学の分野である。高エネルギー物理学者は、科学者の集まりである IUPAP (国際純粋応用物理学連

合)の下に、世界の大型加速器の配置を議論するICFA (International Committee for Future Accelerators = 加速器将来計画委員会) を作り、世界の主要研究所長が率先してそのメンバーとなり、将来の加速器の立案作業を行っている。高強度短パルスレーザーの領域では、最近 IUPAP の下に ICUIL (International Committee for Ultra Intense Lasers) が作られ、世界のレーザー研究の連携や将来研究の方向の検討などを国際協力で行う体制ができた。注目すべきことにこの結成には日本が決定的な指導性を発揮した。さらに、高エネルギー物理学以外の分野でも、世界的な検討を行うべく、その試みが始まっている。一例は、OECD における Mega Science Forum であり、中性子ビームや原子核研究の加速器配置に関する議論が展開され、報告書がとりまとめられている。

## ( 2 ) 世界の三極構造と世界的すみわけ

目下、世界の共通認識は、21世紀の科学研究は、米国・欧州・アジア圏の3極構造を機軸に進展するであろうという予測である。そして、その中で日本はアジア圏のリーダーであり、3極の一翼を担う責任ある立場にあるということである。すなわち、日本の今後の加速器の建設や活用を考える場合に避けて通れない点は、日本は米国・欧州と肩を並べて進む必要性があることと、一方では、アジア諸国との緊密な連携を樹立する必要性がある点である。日本がこの点を十分に認識することこそが、日本の国際貢献でもあり国際責務でもある。

さらに、資金の巨大化する加速器に関しては、世界的な棲み分け作業、すなわち国際分担に関する議論が必要である。たとえば、第2-2表に掲載されているクォークグルーオンプラズマ探究のための米国の RHIC (重イオン衝突型加速器) や新粒子発見のための欧州の LHC (大型の陽子衝突型加速器) 等のタイプの加速器は日本で作る予定はなく、むしろ、日本から研究者をこれらの施設に送り込んで研究を進めるべき加速器施設である。一方、世界の中では日本でのみ作られ世界の研究者を集める加速器施設としては、J-PARCのK中間子施設 (Kaon Factory) 等がある。

## ( 3 ) 日本の加速器の役割

世界に類似のものが存在するにも関わらず、世界の三極の一つを形成する日本に設置されるべき加速器に関しては、それが世界的には「世界COE」を形成して

世界のリーダーシップを取ることができるかを十分に評価する必要がある。少なくとも SPring-8、大強度陽子加速器（J-PARC）の中の中性子施設やニュートリノ実験施設、RI ビームファクトリーについては、世界のリーダーシップを取り、世界センターとしての任務を十分に果しうる加速器計画であるとの認識を得た。これらの加速器施設においては、世界の 3 極の一翼を担う認識と自覚を持ちつつ、アジア圏に開かれた加速器センターとするなお一層の努力を講じるべきであろう。

日本にアジア圏のセンター的な加速器を配置する際、アジア圏の学生教育も可能とするように、アジア圏の大学との連携大学院の普及は重要なステップとなる。すでに、この制度は理化学研究所に導入されているが、日本の他の研究機関においても積極的にその導入を諮るべきであろう。

### 5.2.3 加速器建設の新しい仕組みや新しい方式

#### （１）我が国における加速器建設の問題点

我が国の加速器研究者は少数の研究機関に集中している。例えば KEK の加速器研究施設の職員と加速器関係技術職員の数は 232 名（加速器研究施設 192 名、PF 40 名）であり、理研の加速器関係研究者・技術者の総数は契約制職員を含めて 46 名、SPring-8 は 43 名（高輝度光科学研究センター加速器部門）である。また、原研は J-PARC 加速器の専任研究者・技術者が 35 名、その他 40 名であり、放医研は 21 名である。大学付置の加速器施設ではかなり少なく、阪大核物理研究センターが 9 名、東北大原子核理学研究施設が 9 名、同大学サイクロトロンラジオアイソトープセンターが 4 名である。

このような状況のもとでは、大型加速器計画の場合であっても、今後は十分な数の建設要員を確保することは困難である。一方、大学あるいは他の研究機関に属している加速器研究者は、先端加速器の建設に参加する機会は殆どない。そこで大型加速器計画は、全国的な規模で建設分担方式あるいは建設請負方式を導入して、マンパワーの実質的な適正配置を実現することが望ましい。なお、建設請負方式は入射器など独立した加速器を他機関の加速器チームが建設するものであり、建設分担方式は、加速器のパーツあるいは独立に開発できる部分を、他機関の研究者や研究グループが開発するものである。なお、予算は建設チームの属

する機関に移管されることが望ましい。

中小加速器を建設する場合も建設要員の確保が更に困難である。この場合は、他の機関の加速器チームが加速器全体の設計・建設に協力するか、場合によっては全面的に請け負うことが望ましい。

## ( 2 ) 建設費と R&D 経費、予備費

先端的加速器を建設する場合、従来技術の壁にブレークスルーをつくる新しい技術開発が必要である。そのためには事前に十分な研究開発(R&D)を行なわなければならないが、建設開始後も平行して R&D を行なうことも多い。ところがこれまでの加速器計画では、建設と並行して行なう R&D の経費を建設費に含めることは稀であった。既に述べたように、SPring-8 の場合は R&D 経費が建設費に含まれており、SPring-8 の建設が予定より早く、しかも当初予算内で完成できたのは、R&D を十分行なえたからであろう。

そのため、先端的加速器の建設では、その建設に関わる R&D 経費、予備費を含めた総額をプロジェクトの総経費と考えることが重要である。

## 5.2.4 大学における加速器

大学は教育、人材養成、人材開発のもっとも重要な場であるとともに、基礎研究を進める場であり、他にはない重要な役割を担っている。最先端の加速器を持つことは研究にとってのみならず、教育の上からも必要なことである。しかしながら最近では、先端加速器は大型化しており、一大学で建設・維持するのは困難になってきた。

このような現在においては、教育や、放射線関連事業のための人材養成のための加速器と、世界の先端研究をする加速器施設を区別してバランスよく全国に配置することが望ましい。そのために、大学などの加速器の位置付けを再定義することが必要である。加速器施設は、

複数の大学に設置する小型加速器（教育、人材養成が主な目的で、特長を生かした研究も可能とする）。現存の大学の小型加速器をこの目的に再定義

し利用することは望ましい。

少数の大学に置く共同利用の加速器施設（研究が主、教育も含む）。現状の加速器を、このカテゴリーとして役割を明らかにする。

大学以外の研究所に置く共用の加速器施設（研究）  
に分類することができる。

これらのうち、 と は施設として世界的観点から価値のあるものでなければならない。 においては、大学のカリキュラム等に組み込むことが重要であり、 と においても、教育、研修のために活用されるのが望ましい。

最近、加速器はがん治療、医薬品開拓、植物改良、加速器駆動型原子炉など、基礎研究以外の利用が広がっており、これからますますそれらに従事する人材が必要となる。

必要とされる系統的な人材教育は、大学において効率的に行われることが望ましく、加速器や放射線関連のカリキュラムを充実させる必要がある。そのためには、加速器を所有する大学が、地域や全国からの学生を常時受け入れること、大型施設を持った大学や研究所との連携を進め教育に役立てる等の工夫も考えられる。

また、大学における研究については、大学教員や大学院生の研究には大学の施設、大学の共同利用施設、国内の共用施設、国外の共用施設などのうちから、その研究に最適なものを選んで行われている。これは今後も大きな変化はないと考えられ、研究者は各大学の施設を主として、特殊性を用いた研究に利用すると共に、世界的レベルにある大学の共同利用施設や研究所の共用施設を利用することとなる。共同利用の場合、実験費や旅費なども共同利用施設から支給されることが多い。最近ではこれに加えて、連携研究としてある程度の期間にわたる研究を進める制度や積極的に装置を持ち込むパワーユーザーも現れている。

今後は、既存の施設を使った研究を進めるだけでなく、独自の予算で実験施設や実験装置を共同利用施設や共用施設に設置して研究を行うことが、容易にできるようにするのが効果的である。また、実験のための旅費を持ち実験準備や実験に独自の判断で参加できることも重要である。

## 5.2.5 研究連携の推進

### (1) 応用研究と基礎研究の連携協力強化

加速器研究開発の目的は、人類の科学的知見の拡大に貢献することが第一であり、このような基礎研究の成果は、それ自体が我が国や世界の貴重な財産である。従って着実な継続が必要であり、宇宙や素粒子を含め我々を取り巻く物理的世界の理解のためには、今後も加速器の研究開発は一定の割合で必要である。しかし、生命科学や脳科学と同様に、人類の科学フロンティアを、いつどの方向にどの程度まで広げるかは、今後も常に議論が必要である。

一方、純粋な科学の知見を切り拓くことを目的とした加速器も、今までに多くの応用範囲を広げてきている。工業における半導体イオン注入技術、分析・加工技術、医療における放射線診断・治療技術などはその例である。小型電子・イオン加速器、放射光施設などは、現在までも大きな社会的貢献を果たしてきている。また直接的な効果のみではなく、超高真空、高周波、データ処理、ネットワークなどの技術として、波及効果の大きい間接的な効果も生み出している。

### (2) 研究活動のネットワーク化

21世紀に入り、我が国に限らず世界各国においても、研究活動に対する期待とともに要求が厳しくなっている。限られた予算と人員の中で、研究を支える種々の環境や運用のシステムには常に効率性が必要とされているものの、研究自体の効率性は必ずしも他とは同様には行かないことも銘記すべきである。その一方で、大型で高額な装置をより効率的に使用し、研究を着実に推進するとともに、それによる研究成果の有効な活用が求められる。インターネットが進歩した現在、より有効なネットワーク化が重要である。また各地に分散している多数の中・小型の加速器をネットワークで繋ぎ、より有効に利用することも必要であろう。

このため、加速器サイドのネットワークの強化（より効率的な加速器研究のアイデアの採決）、ユーザーサイドのネットワーク化、加速器サイドとユーザーサイドの交流とネットワーク化、国内外の協力、などの進展が必要である。

今日では、コンピュータ間のネットワーク化技術、各種センサーによる取得データを瞬時に転送・共有する技術などが開発されており、効率的な研究が進められるようになった。特につくば地区においては、地域的なネットワークを用いた研究も進められている。

### （３） 産学官連携や役割分担のあり方。

従来の産学官連携における様式は学・官における先導的な研究開発があり、加速器開発とそれを利用した応用研究が技術開発の主要課題であった。その意味では、「光源駆動型開発研究」(Source-Driven R&D) ということができる。これにより世界に先駆けた研究開発を実現できたと考えられるし、必ずしも高収益な技術とは限らないものの、分析・計測・加工や診断・医療面での加速器の利用が促進されたと言えよう。今後の連携課題としては、先駆的な独創的加速器技術と実際の現場で使える技術の融合である。その際、 応用のニーズにどう対応するかという考え方と、 応用のニーズをどのように開拓して行くかということが大切であり、そこに至るシナリオをきちんと用意しておくことが必要である。これは、すでに述べた「プログラム駆動型研究開発」(Program-Driven R&D) ということができるであろう。実用化における取り組みにおいて、ニーズを調査するだけでなく、ニーズを積極的に開拓すること等が極めて重要であり、そのためにも着実な研究開発への投資・環境整備、継続的な人材育成が求められる。

### （４） 地方自治体と国公立立大学との連携の促進

産業振興または医療への寄与に向けて、加速器の開発利用を積極的に推進している地方自治体がある。一例として兵庫県は、SPRING-8 の開発利用（播磨科学公園都市／西播磨）、ニュースバルの建設や新たな医療用加速器施設（最先端がん治療施設「県立粒子線医療センター」）の開発・利用を進めている。また佐賀県は新たな放射光施設の建設を推進している。このように地域の取り組みについて、既に加速器を持つ大学が協力を行ったり、地元企業の利用に積極的に大学などの施設を開放する等の連携が進められるのが望ましい。また、地域と大学が連携して共同の施設を整備することも考えられる。

佐賀大学・九州大学との連携を進めている佐賀県の新たな放射光利用施設（佐賀県シンクロトロン光応用研究施設）の今後は注目すべき例の一つであろう。これはネットワーク型学術研究拠点の構築を目指す「九州北部学術研究都市整備構想（アジアス九州）」の一環として整備されるもので、九州地域はもとより広くアジアワイドな研究開発交流を促進することを目指している。今後も、このような地域研究開発拠点の整備が望まれる。



## 5.2.6 産業界における加速器

### (1) 加速器開発と加速器利用産業

産業界における加速器開発を考えた場合、まずは国により大型加速器の計画が立てられ、その実現に向けて産業界はR&D等を実施し、そこで設計・製作等の加速器技術力を延ばし蓄えていく。これにより新技術の創出や実証が行われ、それが中・小の産業用加速器の実現に向けて利用されることになる。例えば、医療用の加速器や半導体用の加速器が開発されて広く産業利用されていることは良く知られている。文部科学省が行った「我が国における放射線利用の経済規模」の調査によると放射線の工業利用は7.3兆円にのぼり、相当な割合で半導体加工に加速器が使用されている。

これらの中・小の加速器がビジネスとして成り立つことで加速器技術が産業界に保持される。これが新たな国の大型加速器計画実現の技術基盤となり、更なるR&Dを行うことで違った加速器利用産業の発展を促すことになる。

このようにメーカーの加速器技術の保持・進展には、加速器や加速器技術の産業利用が進むことが重要である。

### (2) 産官学連携の現状と問題点

#### (a) 大型加速器プロジェクトの建設システム

大型加速器プロジェクトの推進は二段階の構造を持っている。まずは『R & D フェーズ』で、ここで「官学」は基本概念を示し「産」は設計・製造ノウハウを出す。つぎに『実機建設フェーズ』に入ると「官学」は建設に向けた指導を行い、「産」は製造能力を発揮しプロジェクトを実現していく。

「産」と「官学」は技術やその応用を共同で開発する連携先であるが、R & Dと実機でメーカーが異なる場合「産」の立場からすると、R & D段階での技術ノウハウが他メーカーに使われることになる。

そこで、連携による共同研究開発の場合はもちろんのこと、試作等発注が伴う契約の場合でも、知的財産の帰属を明確にし、開示できる情報とそうでない情報を区別することなどにより、メーカーがR & Dフェーズに参入しやすい状況を作ることも望まれる。

### (b) 教育制度の充実

加速器の産業利用の普及の障害として、利用に関する基礎知識の不足の問題が挙げられる。この解決には、教育機関・公的研究機関における産業界への利用の開放を行うことや、教育制度の充実が効果的と思われる。

### (3) 産学連携への期待 ～加速器利用産業の活性化のために～

#### (a) ニーズとシーズの結合

加速器関連の産官学連携は、加速器メーカーと加速器関連研究機関(大型加速器納入機関)との連携が主であった。一方、加速器が広く利用されるためには産業界で利用されることが必要である。しかし、加速器メーカーは、保有するシーズ技術に対する潜在ユーザーのニーズの情報については余り持ち合わせていない。このため、ニーズに合わせた装置の開発が困難になっており、加速器を利用した産業が結実しないことになっている。

これを改善するためには、「学」の加速器研究機関と「産」の研究機関の連携強化を行うこと、「官」の援助の下、連携研究機関が中心となり加速器メーカーと利用ユーザーの情報共有を促進すること、新規産業の創出や既成産業の活性化を図ることが望ましい。そうすることによって幅の広い産学連携が構築できるのではないと思われる。

#### (b) 異分野に対する働きかけ

加速器は、高エネルギー加速器研究機構、理化学研究所、大学、放射線医学総合研究所等文部科学省関連の研究機関において開発されてきたため、他の府省関連の分野に普及させるためにはその分野に合った方法が要求される。

例えば、放射線治療装置の普及に関しては、「第3次対がん10ヵ年総合戦略」に、「がんの手術療法、化学療法、放射線療法等に通じた各分野の専門医が協力して診療に当たることができるよう」と述べられている。日本では米国等と比べてがん治療における放射線治療の占める割合が低く放射線治療装置を普及させるためには、仕組みの変革、人材の育成が不可欠である。例えば日本では医学物理士がほとんど採用されていないし、放射線治療医師の人数が日本の場合400人に対して、米国では2300人という状況もある。これは、加速器関連研究機関が働きかけて変わる問題ではなく、国民的議論が必要であろう。また、加速器技術

は、これまでも真空、高周波、超伝導、ビーム制御等先端技術を組み合わせてきてきたが、今後はさらにフェムト秒加速器におけるレーザー技術と加速器技術、先端粒子線治療システムにおけるロボット技術と加速器技術等、異分野の先端技術と加速器技術を融合させる必要が出てきている。そのための技術開発や技術の掛け合せを押し進めることが必要である。

#### (4) 産官学連携システムの提案

今まで述べてきたように、これからの産業用加速器の進展のためには府省の壁を越えた連携が必要となる。その中には、国が主導で進めるプロジェクトもあれば、異分野の専門家同士が連携して実現させていくべきものもある。

この実現には関連研究機関や企業の連携のみならず、文部科学省や厚生労働省、経済産業省等の府省間の連携のもと法的規制の見直しも含めた異業種間の協力体制の検討が行われるのが望ましい。

### 5.2.7 人材育成と技術継承

加速器を用いた研究の今後の発展を期するためには、現実の研究を活発に推進することが最も重要であるが、一方それを継続・遂行するために当該分野の人材を確保し、また加速器科学に強い興味を感じ、この分野に身を投じようという若き人材を育成することが強く望まれる。

#### (1) 人材育成

##### (a) 大学

加速器およびそれを用いた研究者の養成は主として大学院の専門課程を通じて行われる。この場合、大学に有用な加速器が存在していれば、専門家の育成は比較的スムーズに行われるが、近年は分野の進展と国際的競争環境の中で、新規性のある実験的研究を行いうる加速器は、必然的に大型かつ高価な施設であることが一般的である。そのため、博士の学位取得のためには、大学内というより、大学とは別の大型の共同利用施設を利用する必要性があることが多い。この点で、KEK、RIKEN、JAERI、RCNP、SPRING-8、HIMACなどの大型施設が、これらの要求に応えられるような、受け入れ体制を持つことが大変重要で、従来からかなりな程

度、条件を満たしているが、今後ともよりよい開かれた体制を継続することが必要である。

しかし、これらのマシントイムの限られた実験期間では、日常的技術の習得などには、不十分であり、大学での小型加速器による実習的研究、測定器の開発などが可能なことが望ましいのであるが、運転維持のための予算や人手が枯渇（近年、原子力、加速器・放射線、アイソトープ関係学科や講座の減少、若手研究者の不足が起こっているという指摘もある）のところが多く、加速器施設の維持管理に多くの困難を抱えている。適切な取捨選択と重点化が必要である。

#### （b）研究所

以上の観点からも、加速器のような大型設備を利用した研究は、大学よりも今後、法人化が進む共同研究所等の重みが一層増していくと思われるし、人材の育成においても、実際に専門家を作っていく装置は、これらの研究所が重要な役割を果たしていくことになる。先進諸外国においても同様の傾向が見られている。

一方、加速器そのものの研究および技術開発は、大学での関連講座が僅少であるため、従来から、他の専門分野からの転向者が多い。それで需要はなんとかカバーしているが、本格的な新しい加速器開発研究者を若くから養成しないと、技術の後追いに過ぎなくなる恐れがある。加速器学会の設立に近いと聞くのを、ひとつのきっかけとしたい。

#### （2）応用分野および関連分野における人材

加速器利用研究は今や非常に広い応用分野を擁している。物理、化学、工学、生物、農学、医学など、加速器を使用した研究はとどまるところを知らない。この内、特に医学応用は専門研究者のみならず、一般国民の健康福祉に広くかかわりあった問題であり、加速器を使用した治療、診断は、多くの国民が直接身近に体験し、利用するという意味で、社会に対する影響が特に大きい。

放医研が推進してきた重粒子線治療、筑波大学、ガンセンターなどの陽子線治療は、今後、多数全国に普及させるべき施設である。この場合、そこで働くべき適切な人材は、装置の運転、保守を担当する人員と共に、医学施設特有の人員が必要である。粒子線治療を良く理解しうる放射線医師、放射線技師、医学物理士等の専門家を、需要に応じてかなりの人数養成していかなければならない。これらは

施設のある現場で、教育ないし訓練が必要なので既存の粒子線治療施設が、これらの人達を一定期間受け入れられるようなシステムを作る必要がある。また、折角人材を養成しても、特に従来の医療厚生機関では、医療職、行政職しか存在せず、放射線治療に必須な医学物理士のような研究職を受け入れるシステムが必要である。

### ( 3 ) 産業界における人材

加速器関連のメーカーは、高精度機械加工、重電機器、高電圧電源、高電流電源、エレクトロニクス、計測機器、真空機器、など多分野に亘るが、特に加速器本体の製造技術部門は、加速器建設の或程度の需要がないと、他分野に配属が変わって行かざるを得ない。最近、産業界でのこれらに対する技術が一部において空洞化が起こりつつある、とも言われている。

大型加速器施設は、いまのところ一般に国立あるいは半公的機関でのみ建設されているが、この建設計画が適当な間隔で実行されていくのが、産業界での加速器技術者の技術継承に必要となる。このためにも加速器を利用した科学研究が、基礎、応用を問わず常に活発に活動が行われることが、産業界の人材養成にとっても必要不可欠である。

加速器の利用研究も、施設建設、技術の発展は産業界の協力なしにはあり得ず、加速器の利用研究と当該分野の産業界の発展は車の両輪といえる。今後、産業界、大学、公的研究機関の人事交流、流動化促進を積極的に行うこと、また、専門家のための講習会等を開くことにより、研究者が常に新しい情報にふれられるようにすることが有効であろう。

## 第6章 まとめ

本報告書の第1章や第2章では、「加速器とは何か」という問いに始まり、加速器はなぜ必要か、加速器にはどんな種類のものが存在し、いかなる役割を果たしているのかといった諸点について述べた。そして、日本や世界の加速器の現状にも触れた。その後、第3章ではこれらの加速器がいかなる方面で活躍しているのかを記述した。これら第1～3章の記述は、加速器という現代科学で主要な装置とその科学に対する概観であり、本報告書の導入部ともなっている。

第4章と第5章は、本検討委員会の議論の集約である。第4章では原子力長期計画において述べられている4つの加速器プロジェクトのフォローアップを中心に述べ、第5章では、これからの加速器利用研究の進め方について、本検討会で議論された主要点を記述した。

この章では、特に第5章における議論を中心に、第4章や第3章で議論したことも加味し、それらの内容に関するまとめと提言を述べる。

### 6.1 社会への情報発信の強化

加速器は、人類の未知への探究心、特に、より小さな「素」なるものへの探求にその威力を発揮し、現代物理学の基礎となる素粒子像や広大な宇宙の誕生の謎の解明に大きく貢献し、現在も重要な役割を果たしつつある。さらに近年は、放射光・重粒子線・中性子ビーム・RIビームといった、加速器技術が生み出す新たな基礎研究分野および応用分野が誕生し、加速器の活躍する場が一層広がりを持つようになった。加速器技術も進展を続け、レーザー加速といった新たな技術も生まれ、未来へ絶えることのない躍進を続けている。原子力の世界では、初期には放射線と物質の相互作用を理解するために加速器が導入されたが、生体・食品・植物・材料・等への放射線効果の応用に始まり高レベル放射性廃棄物中の長寿命放射性同位元素の核変換等、加速器の応用性の高さが認識され、最近では、原子力先端研究にとって加速器は欠かすことのできない基幹設備として認知されるようになってきた。

一方、このように有力な装置であるにもかかわらず、加速器は社会の中ではあ

まり馴染みのない施設でもある。本検討会は、世界の加速器の現状を踏まえながら日本の加速器の現状を俯瞰し、加速器の必要性・今後の発展の必要性・世界の中での日本の加速器の位置づけ、等々に関して議論をし、これらの必要性を本文で述べた。しかしながら一方では、この報告書はごく限られた読者への発信であり得ない。したがって、今後あらゆる機会をとらえて、加速器を用いた研究開発を社会へ情報発信することが何よりも肝要な作業であろう。

また、多額の国費によって推進される研究開発は、広く国民の理解を得て進めることが必要である。とくに巨額の国費を投入して進められる加速器計画には、計画検討、建設、運用／実験研究の各段階において、常に社会の理解を得る努力が求められる。

(提言)

加速器の建設や利用には多額の国費が使われるため、その研究開発は広く国民の理解を得て進めることが必要である。そのためには、それらの評価を一般の人々にも分かるような形で公表することが重要である。

また、加速器は時代の先端的研究が行われる場であると共に、その時代の最新の技術を集約して作られた施設である。社会の科学的好奇心を呼び起こすために、また若い人たちの心に未知なるものを知る感動や科学に対する可能性の夢を育むために、この場から今後一層の情報発信を行うことが望まれる。広報室等、これに関わる部署ではその構成を見直し、その成果を分かりやすく語り視覚化することの出来る人材に重点を置くことが望まれる。

## 6.2 加速器の人材育成

加速器そのものは最先端技術の結晶のような機器であり、たやすく生産可能なものではない。さらに、でき上がった加速器を研究開発に用いるには、加速器利用に関する知識が必要である。そのために、これから伸びゆく加速器科学を支えるには、そのための人材の育成が肝要である。

(提言)

加速器科学における人材育成において最も肝要な点は製作および利用にたず

さわる人材の育成である。そのため、人材育成において最も重要な役割を果たすのは大学であり、大学における加速器や放射線関連のカリキュラムの強化、加速器を所有する研究所と大学の連携強化が必要である。さらに、小型加速器を所有する大学においては、それを用いた加速器学や放射線関連のカリキュラムを充実させることが必要である。

一方、産業界においては、加速器製作のための技術の継承や加速器利用のための研究者の養成に向けて、研究所や大学との連携強化に向けたメカニズムを考案すべきであろう。

その他、社会人講座、小中学生のための理科教室、小中高校教員のための講座は、広い意味での人材育成に欠かせない。

### 6 . 3 加速器建設や加速器を用いた研究開発の進め方

本報告書の第5章では、加速器利用研究の推進に向けて、今後いかなる点に留意し、いかなる措置を講じるべきかという方策の議論を展開した。日本では、これから加速器の建設は進むであろうし、また、加速器を用いた研究も進む。しかしながら、我が国の厳しい財政状況を考慮すると、将来の加速器の建設や利用研究は、国全体としてどのような施設が必要であり研究を行うべきかということを十分に検討・調整した上で、真に必要とされるもののみ行うことが求められる。今後の留意点を、以下に箇条書き風にまとめる。

(提 言)

#### ( 1 ) エキスパートによる加速器研究開発の評価

加速器建設や利用の財源が異なっても、日本全体として加速器科学を広く検討し、分野ごとの将来も見据え、建設計画や利用の方針を検討するために、エキスパートで構成された評価組織(リサーチカウンスル)によって、加速器研究開発の状況を定期的に評価することが望ましい。

リサーチカウンスルの設置形態や設置先については特にこだわらないが、任務として、定期的に(たとえば毎年1回)加速器の利用状況や建設状況をレビューし、さらに必要に応じて新設計画の調整も行なうようにする。また、このリサーチカウンスルには人文社会などの加速器分野以外の有識者も含める。



これまで我が国では、欧米諸国で進められている計画を後追いするような計画が多かった。そこで、リサーチカウンスルは諸外国の動向を探るのではなく、科学技術・学術の動向を独自に判断できることが望ましい。

## （２）国際分担の明確化

大型加速器については、国際状況を把握し、日本としての国際的な分担を明確にするべきである。さらに、建設や施設の運営にあたっては、その加速器が世界のセンター的加速器ならば、世界的な分担に関して権威ある委員会等の議を経て世界の中での役割を明確にすることが必要である。世界の三極の一つを形成する日本に設置されるべき加速器に関しては、それが世界的には「世界の COE」を形成して世界のリーダーシップを取ることができうるかを十分に評価する必要がある。

また、加速器建設に当たっては、特定の組織の考え方のみを尊重するようなことを避け、また、加速器の運営では施設の独自性を重んじる。

## （３）新しい加速器建設方式

加速器建設の進め方として、ある建設チームが必要に応じて異なった機関の加速器建設に携わるという新たな建設請負方式や、建設分担方式を取り入れることができるよう検討することが必要である。また、建設費に R & D 経費と予備費を考慮したものをプロジェクトの総経費と考えることも必要である。

## （４）組織間の連携強化

大型加速器の場合、加速器施設を持つ大学や研究所と、その加速器を利用する大学や研究所が存在するが、両機関の連携を強化し、双方が自由に乗り入れる形での連携研究を強く推進することが重要である。この際、両機関にまたがった研究が進められるような仕組みを検討することが必要がある。

## （５）産官学連携の必要性や規制緩和

従来の産官学連携の様式は学官先導型が主であった。今後は、応用のニーズに対応し、応用のニーズを開拓する姿勢が大切であり、産先導型の研究開発も重要となる。このような産官学連携の実現のための、投資・環境整備、継続的な人材

育成が必要である。

また、産学官連携に当たっては、種々の規制が連携の弊害となることがあり、これらの規制緩和を有効的に議論できる場が必要である。

#### 6.4 J-PARC, RIBF, SPring-8, HIMAC の4 加速器フォローアップ

本報告書の冒頭にも述べたが、本検討会は原子力委員会の下に設けられた検討会である。原子力委員会は、放射光・重粒子線・中性子ビーム・RI ビーム等の加速器が拓く新たな分野の育成に重点を置いて加速器分野を育ててきた。その例が、第4章で述べられた4つの加速器である。これらは、それぞれに巨額の資金が投じられて建設され、あるいは、運営されている。

これら原子力長期計画に基づいて進行中の大型加速器4プロジェクトのうち、J-PARC と RIBF は目下建設中であり、SPring-8 と HIMAC はすでに稼働中であり、4プロジェクト共に世界最先端の研究施設として機能することが期待されている。今回、4プロジェクトをフォローアップしたところ、建設中の2計画は、概ね順調に建設は進行している。一方、稼働中の SPring-8 における創造的な研究によって生み出された新発見は、新産業・新技術の創出を促し、そこから得られる研究成果は社会に還元されるものと期待できる。今後、J-PARC や RIBF が完成すれば、同様な効果が期待できる。また、医療用加速器 HIMAC を用いての従来にない画期的な治療法は、高度先進医療の承認を終えて、国民医療の中に重粒子線による癌治療を定着させることへの貢献が期待できる。

これら大型加速器による成果は、国民の知的好奇心をかきたて、科学技術に対する関心を引き起こすと共に、若者に夢を与えて先端的科学技術分野に進もうとする意欲を持たせるきっかけを作ることにも繋がると期待できる。

#### (提 言)

以上を総合して、科学技術の発展において、これら4件の大型加速器プロジェクトは、今後も適切に推進されることが望ましい。

一方、これら大型加速器4プロジェクトは大型であり、その建設、運営に当たっての予算規模は極めて大きいことを考慮すれば、国際社会の中での分担や競争を、投入している国費の生産性・投資効率の観点から評価し、それぞれの計画の

中で緊急性・重要性の高いものから優先的に投資することにより、国費を有効に活用していくことが重要である。

#### 6 . 5 レーザー研究

最後に、本検討会では、レーザーに関する議論を何回か行った。広汎なレーザーの役割のごく一部について議論を始めたに過ぎないが、原子力先端研究におけるレーザーの役割は重要であり、その応用性の高さや将来性に関しては、非常に重要なものであるとの確信を得た。

#### (提 言)

最近急速に長足の進歩を遂げている高強度・短パルスレーザーは、加速器への応用（小型加速器や加速器要素など）を含む原子力の新しい展開に重要な新しいツールとして登場しつつある。これを原子力研究に有効に生かし取り入れていくことは21世紀の原子力やより広い科学技術の発展に極めて大切である。

## 【用語集】

### ア R F Q型リニアック

イオン源から出たイオンを効率よく加速するために開発された低速用リニアックである。進行方向に沿ったどの点の断面でも常に四重極電界が実現するように、長い四つの電極をビーム中心軸に対称に取り付け、互いに向かい合う二つの電極が同相になるような高周波共振器である。さらに進行方向に加速電界が出来るように、この電極先端部にイオンの速度に同期した波型をつけてある。この結果、イオンビームの横方向の広がりが四重極電場で集束されるだけでなく、連続的に入射したビームが時間的にも集束してパルスビームになり、ほぼ100%の加速効率を得ることが出来る。

### アルバレ型リニアック

リニアックでイオンをさらに高エネルギーまで加速するために開発されたのがアルバレ型リニアック。タンクと呼ばれる円筒空洞の中心軸上にステムと呼ばれる導体で支持されたドリフトチューブが並んでおり、全体としてドリフトチューブとタンクからなる二重の円筒状導体で形成される空洞共振器になっている。この空洞内に高周波電力を供給すると定在波が励起され、各ドリフトチューブの間隙に励起される電界の向きは（高周波の周期で変化するが）すべて同じである。1946年にLuis W. Alvarezによって初めて建設されたので、アルバレ型と呼ばれている。

### アンジュレータ

電子ビームを周期的磁場の中を通すことにより、電子から単色（に近い）光を出す装置。

### イ インピボでの実験

たとえば地球内部に存在する物質の構造や特性は、地球内部と同じ高温高压下でなければ正しく理解することは困難である。材料や生体試料を対象にして、それらが存在する環境の下で行う実験がインピボでの実験である。

### ウ ウィドレー型リニアック

直流加速器はすべて静電圧による加速であるため、その加速エネルギーには限界がある。そこで、高い周波数で変化する電界を用いて加速することが考えられた。直線状に並べた中空円筒電極（ドリフトチューブ）を交互に高周波電源の両極に接続すると、隣り合う中空円筒電極には常に逆符号の電圧がかかる。たとえば正の中空円筒電極の出口にいるイオンは電極間隙に生じた電界によって加速され、負の中空円筒電極内に入る。ところがイオンが電界のない中空円筒電極を進む間に電極の

正負が逆転すれば、次の電極間隙でまた加速することができる。すなわち、イオンの速度に比例してドリフトチューブを長くし、イオンがそれぞれのドリフトチューブを通過する時間を高周波の半周期と同じにすると、イオンは電極間隙を通過するたびに加速されるようになる。この原理の加速器は 1928 年に R. Wideroe によって初めて建設されたので、ヴィドレー型リニアックと呼ばれている。

なお、イオンのエネルギーが高くなるとドリフトチューブが長くなり、実用的でなくなるので、この加速器は比較的低エネルギーのイオンを加速するのに用いられる。

## 【エ】 S L A C

スタンフォード線型加速器センターの英略。スタンフォード大付属で世界の代表的線型加速器研究所。

## 【カ】 核融合爆縮ターゲット

レーザー核融合研究で用いられる小さな球状燃料（重水素を含むプラスチック）。この燃料球に強いレーザーを照射して爆縮（内向きに爆発）させることにより点火する。

完全空間コヒーレントで高縮重の  
ピコ秒 X 線フォトン

レーザー光の特質として、光がコヒーレント（位相が揃っている）で同じ波長の中に多量の光子が詰まっている状態を持つ。ピコ秒の長さの X 線レーザーもこうした性質を持つ。

## 【キ】 希少核の中性子反応の逆過程

核（A）に中性子が当たるとその核からより重い核に変換し、場合によってはガンマ線発生等を伴い更に違う核（B）に変換することがある。こうした反応の断面積を知ることは核変換の研究に重要であるが、稀な核（不安定核など）の場合、サンプルが用意できず実験が困難。A → B の核反応断面積と B → A の断面積は等しいので、（より多くある）B 核にガンマ線を当てることで A → B 反応断面積を測定することを指す。

## 【ケ】 原子核のエキゾティックな性質

原子核のハローや中性子スキンなどこれまでの原子核物理学の常識を破るような原子核の性質が発見されている。これらを指してエキゾティックな性質ということがある。

## ☐ 後方散乱法 (RBS)

比較的低エネルギー (1MeV ~ 数 MeV) の陽子 (あるいはアルファ粒子) は、物質中の原子核に衝突してクーロン散乱される。このとき真後ろ (散乱角  $\sim 180^\circ$ ) に散乱される陽子は、相手が反跳を受けて持ち去ったエネルギーだけ低いエネルギーになっている。反跳エネルギーは相手の質量に依るので、戻ってきた陽子のエネルギーを精密に測れば、衝突した原子核を同定することができる。また、標的原子核がある深さで物質中に分布している場合には、物質中で失われるエネルギーも分かっているので、標的原子核の分布を求めることができる。この実験手法を後方散乱 (RBS, Rutherford Back Scattering) 法という。

## コッククロフト・ワルトン装置 (加速器)

多段倍電圧整流装置により直流高電圧を発生させ、イオンや電子を加速する装置で、1929 年に John D. Cockcroft と Ernest T. S. Walton によって開発された。二人はこの装置を用いて核反応の実験を世界で初めて行った。通常 1MV 以下の高電圧の発生に用いられている。

直列につないだダイオード (整流器) を一つおきにコンデンサーで結んだ三角形を連ねた形の回路を作り、その一端を変圧器の二次側の両極に繋ぐと、交流の倍電圧の直流電圧を発生させることができる。これが多段倍電圧整流装置で、その高電圧側に設置したイオン源 (イオン発生装置) あるいは電子銃 (電子発生装置) から出るイオンあるいは電子を加速管で加速する装置がコッククロフト・ワルトン装置である。

## 固定磁界強集束型 (FFAG) 加速器

FFAG 加速器は時間的に一定の磁界で強集束の集束系を持つ加速器である。動径方向に磁界が変化する直流セクター電磁石を、隣り合う磁石が作る磁界の向きが互いに反転するようにリング状に配置して強集束系を実現している。なお、加速周波数がエネルギーとともに変るシンクロトロン型と等時性が成り立っているサイクロトロン型に分けられる。

シンクロトロン型の場合、入射から最高エネルギーに達するまでの時間が短く、またアクセプタンスが大きいので、大電流加速器や二次粒子加速器に適している。

## ☒ CP 対称性の破れ

現代物理学では、粒子が存在するとそれと同じ性質を持つ反粒子が存在するといわれている。CP 変換とは、厳密には、反粒子の世界に飛び込み、さらにその世界を鏡で映して鏡の中に飛び込む変換をさす。このような変換を施した世界に飛び込んでも、私達の住む世界と全ての自然法則は同じであると長く信じられていた。これを CP 不変性と呼ぶ。しかし、1960 年代にこの CP 不変性が成り立っていないことが発見され、いわゆる

CP 対称性の破れとして話題をまいた。現在では、B ファクトリーにおいてB 中間子と反B 中間子の性質の違いを測定することによって、この CP 対称性の破れが精密かつ定量的に測定されている。

#### JENDL 核データファイル

物質を構成する原子核の性質に関するデータ、すなわち、中性子と原子核との核反応の大きさ（確率）や放射線の種類・エネルギー等に関するデータを核データという。原子力利用にはこれらの核データ、特に、中性子核反応データを、必要なエネルギー範囲で連続的に与える必要がある。このため、様々な実験値や計算値を評価し、一定の書式にまとめて利用できるようにしたのが評価済核データファイルである。JENDL は Japanese Evaluated Nuclear Data Library の略で、JENDL 核データファイルは、日本の標準核データとして原子力分野で利用される評価済核データファイルである。

#### シュインガー場

極強度の電磁場で、この強度以上では、真空が電子と陽電子に分極し崩壊するとされている場。シュインガーが最初に提起した。

#### シンクロトロン

多数の磁石を円周上に配列し、エネルギーの増加に同期して磁界を増加させて粒子の軌道半径を常に一定に保つようにしたのがシンクロトロンである。高エネルギー電子のように速度が一定（光速）の場合には加速周波数は一定でよいが、エネルギーとともに速度が変化するイオンの場合には、エネルギー増加に同期して加速周波数も増加させなければならない。原理的にはどこまでも加速エネルギーをあげることができるが、それに伴って加速器の周長が増大するので、超伝導電磁石を用いて小型化が図られている。

#### スーパーカミオカンデ

岐阜県神岡町の旧神岡鉱山に設置されたニュートリノ検出装置。ニュートリノが 50,000 トンの純水との反応する際に発生する微弱なチェレンコフ光と呼ばれる光を、一万本以上の光電子増倍管によって測定。太陽ニュートリノや大気からのニュートリノの観測に成功。ニュートリノ振動と呼ばれる新現象を発見。

## セ セクター集束型（SF）サイクロトロン

通常のサイクロトロンでは一様な磁界をイオンが周回し、一周する時間（周期）はエネルギーによらず一定である（等時性）。ところが加速エネルギーが高くなると、イオンの質量が増加して周期が長くなる。等時性を保つために磁界を強くすると、垂直方向に発散する力が働いてイオンが失われる。この困難を克服するためには、周回軌道に沿って磁界に強弱をつけてこの発散力を打ち勝つような集束力を持たせればよい。そこで、円周に沿って磁極を6ないし8等分し、一つおきに扇形（セクター）磁極を取り付けて磁界を強くしたセクター型（SF, Sector Focus）サイクロトロンが開発された。この場合、加速イオンはセクターの境界を斜めに通過（斜入射、斜出射）するので、そのたびに集束・発散の力を受け全体として集束する。さらに強い集束力を得るために、スパイラル（渦巻き）型のセクターを持つサイクロトロンも作られている。SFサイクロトロンの発明で加速エネルギーを高くできるようになり、大強度、エネルギー可変、多様な加速粒子等の利点と相俟って、広く用いられている。なお陽子の場合、200MeV 以上まで加速できるサイクロトロンが建設されている。

## 線量率効果

原子力施設や放射線発生装置では、作業員及び一般市民への放射線被曝を極力低減する立場から、被曝管理が行われている。その際の放射線は主として電磁放射線と中性子であり、人体に与える効果をもとに共通の線量として計測されている。

生物体に対する放射線の影響は、単位時間に受ける線量（線量率）によるのかどうかを明らかにするのが、線量率効果の研究である。

## タ ダイナミトロン

多段倍電圧整流回路を発展させ、入力の高周波数を高くしてコンデンサーを電極の浮遊容量で置き換え、高圧ガスタンクに封入した装置が「ダイナミトロン」の商品名で市販されている。高圧ガス中に封入することにより比較的小型で高電圧（5MV 程度まで）・大電流が得られる。

## タンデトロン

小型化されたダイナミトロンをタンデム方式で使用する加速装置で「タンデトロン」の商品名で市販されている。（タンデム方式については事項を参照。）



## タンデムバンデグラフ

バンデグラフをタンデム方式で用いた加速器をタンデムバンデグラフと呼んでいる。高圧電極の電圧が高いほど、チャージストリッパを通過したイオンは多価のイオンになるので、エネルギーをより高くできる。

正の高電圧電極にチャージストリッパ（電荷剥ぎ取り器）を設置し、アース側から負イオンを正電極に向けて加速する。負イオンは電極上のチャージストリッパを通過するとき、電子を失い陽イオンになり、アース側に向かって加速される。これがタンデム方式で、二つの加速管を縦につないでいる。

タンデムバンデグラフはビーム性能が優れていて、精密実験に用いられている。

## タンパク 3000

ヒトゲノム解読が達成された後の国際プロジェクトの一環として、ゲノム情報をもとに得られる重要なタンパク質の構造解析を進める国家プロジェクトである。わが国で5年間に3000種類の蛋白質の構造を決めることを目標としており、タンパク3000計画と呼ばれている。

## ㊦ チャープパルス増幅（CPA） (Chirped Pulse Amplification)

レーザーパルスを時間的に拡張することにより、レーザー媒質の破壊限界を大幅に下げることによって超高強度に増幅する方法。

## 超伝導リニアック

超伝導加速空洞を連ねた加速器が超伝導リニアックで、高エネルギーの電子加速器及び低速重イオン加速器が実用化されている。特長は電力が節約できることに加えて、加速勾配（単位長さあたり加速するエネルギー）が高く小型化できること及び連続（CW）運転ができるため高い平均電流が得られることである。現在高エネルギーの超伝導加速器に使われている超伝導材料はニオブ（Nb）で、最高加速勾配は40MeV/m程度である。

## ㊦ 低バックグラウンド

加速されたビームを利用する場合に、標的になる試料以外にビームが当たると、測定邪魔になる放射線が出る。このような放射線をバックグラウンドと呼んでいる。精密な測定を行うにはバックグラウンドをできるだけ低くしなければならない。そのためには加速器から得られるビームが細く平行になるように、また、エネルギーの広がりや揺らぎをできるだけ小さくする技術開発が行われている。

## 電子リニアック

電子は質量がイオンの1800分の1であり、エネルギーが1MeV以上になるとほぼ光速に達する。それ以上に加速しても速度は殆ど変化せず、その質量が増していく。イオンの場合に

は、かなりのエネルギーになるまで速度が変化するので、種々の加速法を駆使するが、電子の場合にはこのように速度が一定になるので、同じ構造の加速管で加速することができる。そのため、電子リニアックでは円筒導体に一定の間隔で銅製の穴あき円板をはめ込んだ構造になっていて、この中を高周波が電子と同じ速度で伝播するようにする。その場合、電子は進行する高周波電界に乗って加速される。

電子リニアックは、電子銃、プレバンチャー、バンチャー、収束コイルと加速管のほか、クライストロンや導波管などから構成されている。

#### ㊦ トップアップ運転

高輝度放射光施設では、放射光が減衰してくると分光器など光学系などの熱負荷が変化して、測定精度が変動する。それを防ぐには蓄積リングへの電子入射を頻繁に行うか、常時入射を行うことが求められる。蓄積リングの電流がある一定の値より小さくなったら入射する運転方式をトップアップ運転という。

#### ㊦ 爆縮用レーザー

レーザー核融合研究では、小さな球状燃料（重水素を含むプラスチック）に強いレーザーを外から球状に照射する。これにより燃料が爆縮（内向きに爆発）する。このために使われる大出力のレーザー。

#### パラメトリックX線

相対論的速度の荷電粒子を結晶に入射すると、X線回折におけるブラッグ条件を満たす角度方向に単色の回折X線が発生する。これがパラメトリックX線で単色性に優れ、指向性があり、結晶の回転によって波長を連続的に変えられるといった特性を有している。

#### パルスラジオリシス

放射線分解で生じる短寿命のイオンやフリーラジカルの研究には、時間幅の短いパルス放射線を照射して分解反応を起こさせ、反応生成物の種類やその励起状態など分子構造などを時系列的に解析する必要がある。パルス化された電子あるいはイオンビームを用いた放射線分解反応の研究をパルスラジオリシスと呼んでいる。

#### バンデグラフ

ベルト起電機を用いて発生させた正（負）の高電圧電極上にイオン源（電子銃）を設置し、加速管を通して加速する装置がバンデグラフである。1931年にRobert J. Van de Graaffがはじめて建設したのでこの名がついている。

ベルト起電機は、絶縁ベルトに電荷をのせ、滑車でベルトを動かして高電圧電極まで運ぶ方式の高電圧発生装置である。なお起電機や加速管、チャージストリッパは絶縁性のガスを封

入した高圧タンクに収められている。

現在では、絶縁ベルトの代わりに金属ペレットを絶縁ワイヤーで繋いだペレットチェーンで電荷を運ぶ方式を用いた装置が主流になっており、20MV 以上の高電圧を発生する加速器も作られている。なお、中型の装置が「ペレトロン」の商品名で市販されている。

## P I X E

比較的低エネルギー (1MeV ~ 数 MeV) の陽子 (あるいはアルファ粒子) が物質中の原子に衝突すると、その原子固有のエネルギーを持つ X 線 (特性 X 線) が放射される。これを PIXE (Particle Induced X-ray Emission) と呼び、極微量元素分析に用いられている。検出限界は、通常でも  $10^{-6}$  (ppm) 以下であり、もっとも条件がよいときには  $10^{-9}$ (ppb)に近い値が得られている。

## B ファクトリー

電子と陽電子を衝突させ、両者が消滅した後に B 中間子と反 B 中間子を作り出す衝突型加速器。ビームを絞り強度を上げることによって大量に B 中間子と反 B 中間子を作り出すので「ファクトリー」と呼ばれる。また、エネルギーの異なる電子と陽電子を衝突させることにより、ある方向に揃って走る B 中間子と反 B 中間子作り出す工夫がなされている。このようにして作り出した B 中間子と反 B 中間子の性質の違いを検証することにより、粒子と反粒子の対称性 (CP 対称性) の破れを検出する。世界的には、KEK と SLAC に建設され、稼働している。すでにこの対称性の破れは検証されており、宇宙空間の中でなぜ物質だけが残る反物質が無くなってしまったのかという疑問に答える手がかりも与えた。

## ビームタイム

加速器を用いる研究では、自分の実験装置にビームの分配を受けなければ実験ができない。実際にビームの分配を受ける時間をビームタイムと呼んでいる。大型加速器では長期間にわたって連続運転を行うので、8 時間を単位にして 1 シフトと呼び、ビームタイムをシフト数で配分する場合が多い。なお、加速器の利用では、加速ビーム (一次ビーム) を直接使用する実験と、放射光や中性子、ミュオンなどように二次ビームを利用して行う実験がある。前者には全ビームを一つのグループが専有して実験する場合と、複数のグループの実験を平行して行う場合がある。いずれの場合もビームタイムの配分はシフト単位で行うのが普通である。

㉔ フラーレン

炭素原子が 60 個集まって作るサッカーボール状の形をした炭素分子である。

㉕ ベータトロン

電子を加速する磁気誘導加速器である。磁界中で電子が円軌道を周回しているとき、円軌道内を横切る磁束が時間的に変化すると、電子の運動方向に電界が発生する。この電界で電子を加速するのがベータトロンである。

ペロブスカイト型結晶

ペロブスカイトは、もともと  $\text{CaTiO}_3$  の発見者であるロシア人 Perovsky に因んで命名された  $\text{CaTiO}_3$  の鉱物名であるが、これと同じ結晶構造（一般に  $\text{ABX}_3$  の結晶構造で表現される）を持つ酸化物がペロブスカイト化合物であり、その結晶構造をペロブスカイト構造と呼んでいる。基本的な原子配列は、立方体の各頂点に金属 A が、体心（立方体の中心）に金属 B が、そして X（酸素 O）は立方体の各面の中央（面心）にいる配置になっている。酸化物高温超電導体などがペロブスカイト構造を持っているので、現在もっとも注目されている結晶構造である。

㉖ 補正光学（アダプティブ光学）

レーザーの波面の乱れなどを測定し、その情報のフィードバックをオンラインで行うことにより、その波面の乱れなどを矯正し、高品質のレーザーにする技術体系。

㉗ マイクロトロン

一様な磁界の中にある加速空洞で加速された電子は、円軌道を周回して加速空洞に戻ってくる。周回する時間は電子エネルギーによらず一定なので（等時性）、磁界の強さを変えて周回する周期と加速高周波の周期を合わせれば、電子を繰り返し加速することができる。円形磁石を中央で分離して引き離し、その間に小型の電子リニアックを設置したマイクロトロンが作られている。電子軌道が二つの半円とそれにつながる二つの直線部からなるので、レーストラックマイクロトロンと呼ばれる。

マイクロビーム

イオンビームや放射光を物質に照射して、その状態分析や構造解析を行う場合、極微量の試料やあるいは局所的な計測が必要になることが多い。とくに最近ではミクロン( $10^{-6}\text{m}$ )からナノメートル( $10^{-9}\text{m}$ )の構造を解析することが求められるようになった。そのため、イオンビームや放射光をミクロン以下の細く平行なビーム（マイクロビームあるいはナノビーム）にする技術が開発されている。

## □ 誘導型リニアック

通常の高周波リニアックでは不可能な大電流ビームの加速を目的として考案された加速器である。原理的には直流加速器や高周波加速器とは異なり、変化する磁束によって生じる誘導起電力を、空洞を用いてギャップに発生させるようにしたもので、ビームを直線的に加速する。一例を挙げると、トロイダル型の加速空洞の内部に、加速ギャップを取り巻くように強磁性体の鉄芯をいれ、それに一次コイルを巻いてパルス電圧をかけると、加速ギャップに電圧が生じる。誘導型リニアックは大電流、長パルス、低い繰り返し数などが特長である。

## □ リングサイクロトロン

SF サイクロトロンの扇形磁極を分離して（セクター電磁石という）リング状に配列したのが、リングサイクロトロンである。イオンをより高いエネルギーまで加速するために考案されたもので、あるエネルギーまで加速したイオンの後段加速に用いられている。そのため、磁極が台形をしたセクター磁石4～8台で構成され、セクター磁石間に加速電極などが配置されている。イオンの価数を $q$ 、質量数を $A$ とすると、最高エネルギーは $K \cdot q^2/A$  (MeV) と表せる。陽子専用では $K = 590\text{MeV}$ 、重イオンの場合は $K = 540\text{MeV}$  までのリングサイクロトロンが建設されている。

## □ LET 効果

高速のイオンあるいは電子は、物質中を通過する際に、その軌跡に沿って周囲の電子を弾き飛ばして原子を励起しあるいは原子に衝突してエネルギーを失う。LET (Linear Energy Transfer) は、物質中を進む高速荷電粒子が、単位長さあたりに物質に付与するエネルギーである。このように荷電粒子がエネルギーを与えるので、物質は放射線損傷を受ける。とくにイオンは電子に比べてLETが高く、物質に大きな放射線損傷を与える。なお、LETはイオンの電荷が大きいほど高くなり、また、その速度が遅いほど値が大きくなる。

材料が強い放射線を浴びて劣化し、また、生物が放射線照射で障害を受けるのは、LETの効果である。がん治療に陽子線あるいは重粒子線の照射がX線より効果的であるのはLETが高いためである。

【参考】

・ 研究開発専門部会加速器検討会の設置について

・ 加速器検討会構成員

（平成15年12月26日現在）

・ 研究開発専門部会加速器検討会の審議経過

（平成15年12月26日現在）

## 研究開発専門部会加速器検討会の設置について

平成 13 年 10 月 9 日

原子力委員会

研究開発専門部会

### 1．目的

「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」に基づき、加速器分野における研究開発の着実な推進を行うため、研究開発専門部会の下に、加速器検討会（以下、「検討会」という。）を設置し、調査審議を行う。

### 2．調査審議事項

- （１）大型既存プロジェクトのフォローアップに関する事項
- （２）加速器開発利用の進め方に関する事項
- （３）その他

### 3．検討会の構成

別紙のとおりとする。

### 4．検討の進め方

検討会における議事は、原則として公開とする。ただし、検討会が議事を公開しないことが適当であると判断したときは、この限りでない。

### 5．その他

- （１）検討会の座長は、必要があると認めるときは、部会長と協議の上、調査審議の結果について、原子力委員会に直接報告することができるものとする。
- （２）その他検討会の運営に必要な事項については、検討会で定める。

加速器検討会構成員  
(平成15年12月26日現在)

参与

(座長) 永宮 正治      高エネルギー加速器研究機構教授

専門委員

栗屋 容子	武蔵野美術大学造形学部教授
上坪 宏道	理化学研究所和光研究所所長、中央研究所所長(兼務)
小林 直人	独立行政法人産業技術総合研究所理事
曾我 文宣	放射線医学総合研究所加速器物理学部客員研究員
高橋 直樹	住友重機械工業(株)取締役専務執行役員技術本部長
田島 俊樹	日本原子力研究所関西研究所所長
田中 俊一	日本原子力研究所理事・東海研究所所長
谷畑 勇夫	理化学研究所理事
土井 彰	(株)日立製作所名誉嘱託



## 研究開発専門部会加速器検討会の審議経過

(平成15年12月26日現在)

### 第1回 平成13年12月12日(水)

- 議題 (1) 大型加速器計画の現状について  
(2) 大学の加速器の現状について  
(3) 加速器検討会の当面の進め方について

### 第2回 平成14年10月21日(月)

- 議題 (1) 国内外加速器の利用実態に関する報告書について  
(2) 大型加速器計画のフォローアップについて

### 第3回 平成15年4月21日(月)

- 議題 (1) 大型加速器施設のフォローアップについて  
(2) 加速器研究開発利用についての意見聴取  
(大阪大学 産業科学研究所 田川教授)  
(3) 加速器検討会 今後の検討内容について

### 第4回 平成15年7月9日(水)

- 議題 (1) 加速器研究開発利用についての意見聴取  
・日本原子力研究所 関西研究所 田島所長  
・高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
神谷施設長  
(2) 加速器検討会 今後の検討内容について

### 第5回 平成15年8月1日(金)

- 議題 (1) 加速器研究開発利用についての意見聴取  
(京都大学大学院 今井教授)  
(2) 今後の検討項目について  
(3) 大型加速器計画の現状と将来展望

第6回 平成15年9月2日(火)

議題 (1) 原子力予算について

(2) 加速器研究開発利用に係る論点整理

第7回 平成15年12月1日(月)

議題 (1) 加速器検討会報告書とりまとめについて

第8回 平成15年12月15日(月)

議題 (1) 加速器検討会報告書とりまとめについて

第9回 平成15年12月26日(金)

議題 (1) 加速器検討会報告書とりまとめについて