

加速器物理とその応用

High Energy Accelerators and Their Applications

菊池 健* *Ken Kikuchi*

本稿では、高エネルギー加速器とは何か、その構造や規模および世界の現状について述べ、さらに、このような大型実験装置を必要とする学問すなわち高エネルギー物理学の一端について紹介する。高エネルギー物理学は物質の究極的構造を追求する学問であるが、その成果として得られた知識はすべての科学ひいては今日の文明の基礎となる。また、加速器やそれを用いる実験のため広範な新技術が開発され、産業界へ大きい波及効果を与えて来た。最近では加速器そのものが広い分野の研究や技術開発に応用されつつある。日本での活動の中心となっている文部省高エネルギー物理学研究所の施設を例にとって、高エネルギー加速器をめぐる研究活動の概要を述べる。

1 緒言

加速器はもともと原子核を研究する手段として開発され、研究の対象が原子核からさらに素粒子へと進むにつれて大型化してきた。こうして出現した高エネルギー加速器の構成要素、規模、最近の話題などについて述べ、これらの加速器を用いる素粒子研究の現状を紹介する。わが国では文部省高エネルギー物理学研究所がこのような研究の中心施設であるが、ここでは、素粒子研究のほかに、加速器を用いる広い範囲の研究が遂行されており、あたかも高エネルギー加速器を中心とする総合科学研究所の感がある。さらに、現在、トリスタンと称する大型加速器の建設が進んでおり、これらの施設を例として加速器の利用、また加速器の産業界への波及効果についても言及する。

2 加速器の出現と発達

加速器 (Accelerator) は、人工的に放射線をつくり出す装置として、1930年頃誕生し、以後、原子核や素粒子の研究に不可欠の道具となって発達したが、今日では、さらに広範囲の応用研究や先端技術の開発においても重要な手段の一つとなりつつある。

1900年代の初頭、英国の物理学者ラザフォードは、自然の放射性元素から放出される α 線（今日ではヘリウム原子核であることが知られている）を金属の箔にあてて散乱実験を行い、その結果から、原子の構造を解明した。今日、原子は直径約1億分の1cmで、その中心には直径1兆分の1cm程度の小さくて重く、正電荷を有する原子核 (Nucleus) があり、その周りを軽くて負電荷を有する電子 (Electron) が廻っていることが知られているが、これを初めて明らかにしたのはラザフォードの実験である。さらに1919年、ラザフォードは、 α 線を窒素にあてて、酸素と水素が生ずることを確かめた。これは人類最初の人工核反応の実験であった。この頃から、 α 線を用いる核反応の実験は一層盛んになり、その結果、1932年になって、チャドウィックが原子核内に中性子が存在することをつきとめた。こうして、原子核は陽子（水素の原子核）と中性子から構成されることが示されたわけであるが、それと同

時に、原子核の研究をさらに進めるためには、自然の α 線より一層強力な放射線源の必要性が高まってきた。その要求に答えて考案された装置が、コッククロフト・ワルトン、バンデグラフ、サイクロトロンなど加速器の元祖であった。コッククロフト・ワルトンとバンデグラフは、いずれも静電高圧を発生し、それを利用して陽子やイオンなどの荷電粒子を加速するものである。これらの方法では、装置に用いる材料の絶縁耐力に限界があるので、エネルギーに限度があるが、サイクロトロンでは、磁場を併用して、くりかえし加速することによって、より高いエネルギーが得られる。1930年代から40年代にかけて、世界各地でサイクロトロンが建設され、わが国においても理研や大阪大学のサイクロトロンが稼動して、原子核研究の分野で世界のトップレベルの研究が進められていた。第二次大戦終了後、わが国のサイクロトロンは米軍によって撤収され、戦後の経済が復興するまで研究は中断されることになった。しかし、西欧諸国、とくに米国においては、シンクロサイクロトロンと称する大型の加速器が建設され、1947年には、湯川博士によって予言された(1935年) π 中間子が人工的に生成された。いわば、これが高エネルギー物理学の幕あけであって、これ以後、高いエネルギーのリニアックやシンクロトロンが建設され、続々と新しい粒子が発見されることになるのである。こうして、高エネルギーの加速器を研究手段とする素粒子の研究を高エネルギー物理学 (high energy physics) と呼ぶことになったのである。加速器のエネルギーが、時代とともに如何に増したかを図1に示す。

3 高エネルギー加速器の概要

今日では、エネルギーが10億電子ボルト (= 1 GeV) 以上のものが高エネルギー加速器と呼ばれている。これまでに建設された高エネルギー加速器は、目下建設中を含めて約40になるが、それらを大別すると次の通りである。

加速器のエネルギーを表わすのに電子ボルト (eV) が用いられるが、これは加速された粒子（陽子や電子）1個の持つ運動エネルギーである。常温で物質粒子（例えば空気中の酸

* 文部省高エネルギー物理学研究所教授(総括研究調整官) 理学博士

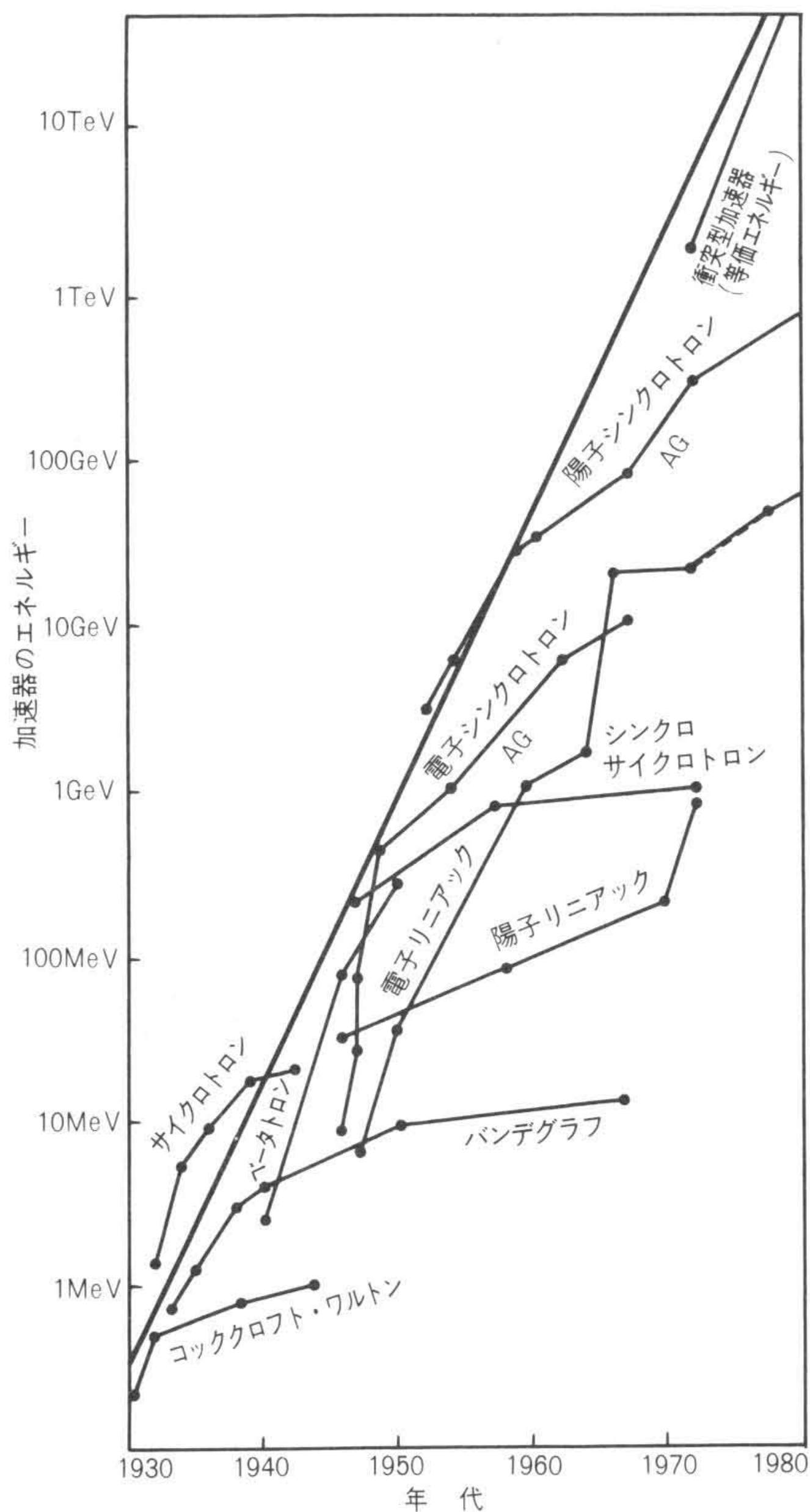


図1 加速器の進歩

表1 世界の高エネルギー加速器の数

加速器の機種	加速される粒子	数
シンクロトロン	陽子	12
	電子	6
リニアック	電子	4
衝突型加速器	陽子+陽子	1
	陽子+反陽子	2
	電子+陽電子	12
	電子+陽子	1

素や窒素の分子) が持っている運動エネルギーは約40分の1電子ボルト (=0.025eV) であるから、1 GeV=10⁹eVは、その400億倍ということになる。このような高いエネルギーを有する粒子は、原子核の奥深くまで飛び込むことができ、そこで反応を起して、その際、新しい粒子が創成されるので、それを調べることによって物質の究極的構造や自然界の法則を解明することができる。

表1に示されているように、高エネルギー加速器と言えばシンクロトロンとリニアックだと思ってよい。衝突型加速器は、いわばそれらの応用篇である。シンクロトロンの概略を図2に示す。リングサイクロトロンのような特別の例を除いて、サイクロトロンは1個の電磁石を使用し、その磁場の中で粒子は円運動をしながら加速されるが、シンクロトロンで

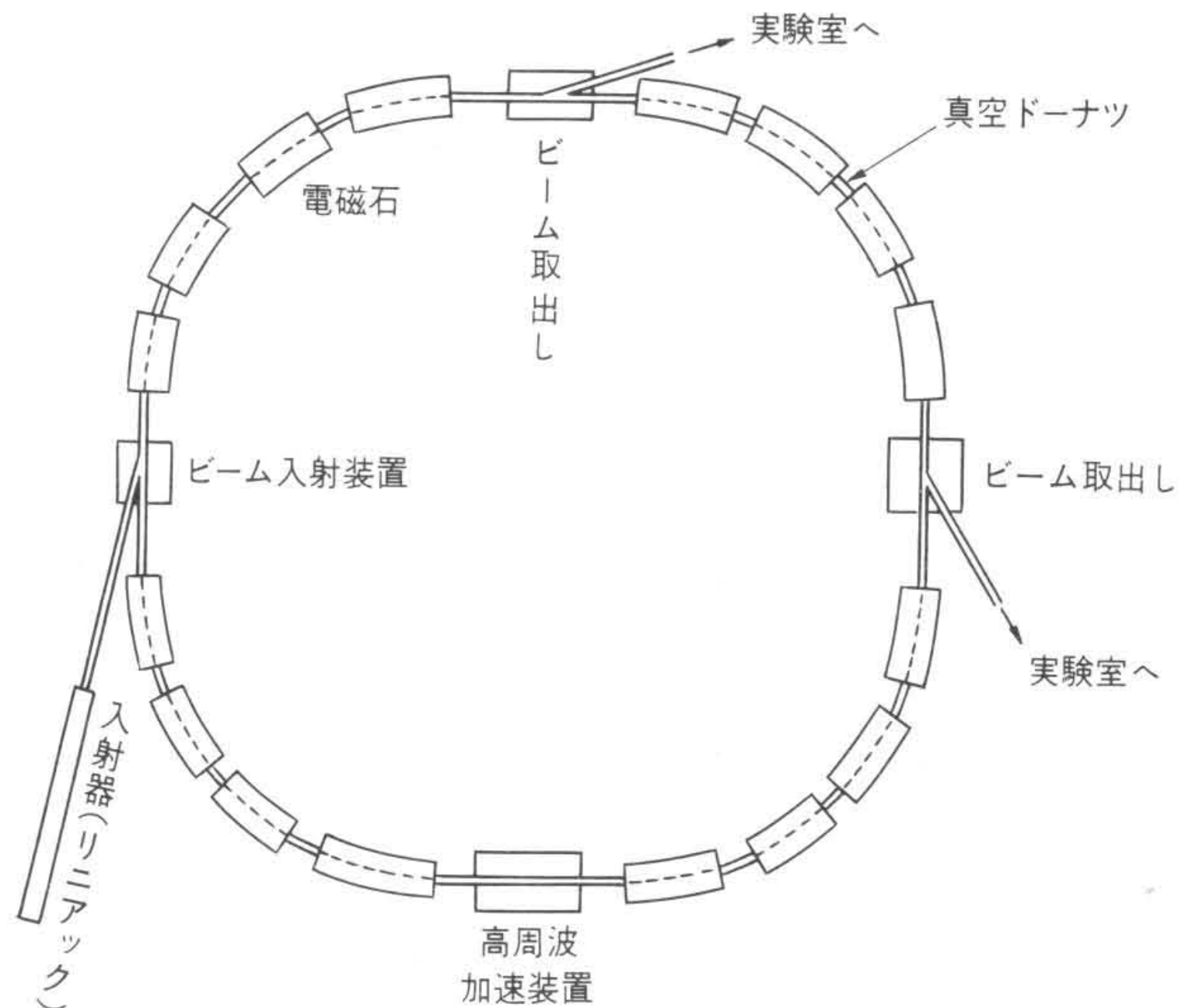


図2 シンクロトロンの概念図

は円周(リング)状に多くの電磁石を並べて、粒子を加速する。粒子はドーナツと呼ばれる真空の容器中を走るが、粒子は磁場中を通るときだけ軌道が曲げられるので、磁石と磁石の間のドーナツは直線である。あらかじめ入射器(多くの場合リニアックが用いられる)で加速された粒子はリングに打込まれるが、磁石のはたらきは粒子の軌道を曲げることであって、粒子を加速するのはリング上に置かれた高周波加速装置である。粒子はここを通過するたびにくりかえし加速される。粒子が加速されるのに応じて、電磁石の電流を大きくして磁場を強くし、粒子はつねに一定の軌道を保つ。粒子が加速されて速度が速くなるので、それに同期するように高周波の周波数を大きくする。このようにすべての装置が同期して動作することから、シンクロトロンと名付けられたのである。このシンクロトロンにもこれまでにいくつかの画期的な改良があった。まず第一に、強集束電磁石の採用が挙げられる。初期のシンクロトロンでは、電磁石に粒子ビームを集束する機能をとくに持たせなかったため、粒子ビームの大きさ(断面)は非常に大きく、ドーナツの断面も、高さ20cm、横1m程度という大きいものであった。そのため電磁石も高さ3m程度の巨大なものであった。1954年に強集束の原理が提案され、磁石の両極に勾配を持たせることによって粒子ビームを極力細く集束できることが可能になった。真空ドーナツの断面もはるかに小さくなり、したがって電磁石も小型になって建設経費も格安になったのである。例えば、1950年代に建設されたソ連のシンクロファゾトロンの電磁石総重量が10,000トン近くもあるのに対し、それより高いエネルギーの高エネルギー物理学研究所のシンクロトロンでは約800トンである。この新しい原理を採用した加速器が、米国ブルックヘブン国立研究所のAGS (Alternate Gradient Synchrotronの略、エネルギー33GeV、直径256mの陽子シンクロトロン)と、ヨーロッパ合同原子核研究所(セルン、CERNと略す)のCPS (CERN Proton Synchrotronの略、エネルギー28GeV、直径200mの陽子シンクロトロン)の二つで、いずれも1960年代に大活躍をした。

第二の改良は、機能分離方式の導入であろう。初期の強集束の加速器では、磁極に勾配を持たせることで粒子ビームを曲げると同時に集束する機能を持たせたが、2種の磁石すな

わち二極電磁石と四極電磁石を用いて、それぞれに曲げる作用と集束する作用を分担させるのが機能分離方式である。この方式は、加速器を運転する際、2種の電磁石の電流値の組合せを変えることによって運転パラメーターを変えることができ、粒子ビーム強度の増強などに適している。したがって最近のシンクロトロンは殆んどこの方式を採用している。

シンクロトロンは次のような構成要素に分けることができる。

(1) 入 射 器

リングに入射する前にあらかじめ粒子を加速する予備加速器で、ふつうリニアックが用いられる。陽子やイオンの加速器では、その前段階にコッククロフト・ワルトンを使っている。

(2) 電 磁 石

リングの構成要素の主要部であって、上に述べたように二極電磁石（偏向電磁石）と四極電磁石（集束電磁石）で構成される。その他に、粒子軌道を補正するため各種の磁石が用いられる。

(3) 真 空 系

粒子が通るドーナツと排気系から成る。粒子ビームを蓄積して長時間廻しつづける衝突型加速器や蓄積リングではとくに高真空が要求される。

(4) 高周波加速装置

文字通り、高周波電圧によって粒子を加速する装置。周波数は陽子の場合0.5MHz～50MHz、電子の場合100MHz～500MHz程度であるが、いずれも大出力の発生源を要する。

(5) ビームモニター及び制御系

加速器の脳と神経のはたらきをするもので、粒子ビームの状況を刻々監視しながら、すべての装置を制御する。km

シンクロトロンの特長は、粒子の束をパルス的に加速することで、一つの粒子集団は入射器からリングに送られて加速され、最高エネルギーに到達して実験に使われる。それが終わると、次の粒子集団の加速が開始される。一度に加速される粒子数を大きくすることと、くりかえし時間を短くすることが大強度ビームを得る必要条件である。

現在、世界で最も大きい陽子シンクロトロンは、米国フェルミ研究所の500GeV、シンクロトロン（直径2km）とCERNのSPS（Super Proton Synchrotron, 400GeV, 直径2.2km）であるが、後者はすでに陽子・反陽子衝突型加速器としても使われており、前者も超伝導磁石を用いたエネルギー倍増計画が着々と進んでいる（すでに800GeVを達成）。

高エネルギー加速器として電子リニアックの役割は見逃すことができない。電子は陽子に比べて約1,800分の1の質量しかなく、磁石で曲げられると光(X線)を放出してエネルギーを失う。この光は放射光（シンクロトロン軌道放射, SORと略す）と言ひ、広範囲の研究に利用できるが（後述）、電子シンクロトロンで高いエネルギーを得ようとする、放射光によるエネルギー損失は重大な問題となる。このエネルギー損失は、電子のエネルギーが高いほど、また磁場中での曲率半径が小さいほど大きくなる。したがって、電子シンクロトロンでは、同じエネルギーの陽子シンクロトロンに比べ、リングの半径を大きくして、放射光によるエネルギー損失を極力抑えている。その点、電子リニアックでは、電子は直線的に加速されるので、このようなエネルギー損失がない。その上、電子リニアックは、陽子リニアックに比べて構造が簡単だという利点もある。現在、世界最大の電子リニアックは、米国スタンフォードにあるエネルギー22GeV（近い将来50GeVに

なる予定）のもので全長は3kmに及ぶ。

1960年代までに活躍した加速器では、加速された粒子をリングから実験室にとり出して実験を行うのがふつうであった。これらの実験においては、加速された粒子またはそれによって作られる各種の二次粒子が、静止している標的物質に衝突して反応を起す。この場合、走ってくる粒子（入射粒子）は質量が重くなっているため、これが静止している粒子に衝突する状況は、丁度、ゴルフボールがピンポン球にぶつかるのに似ている。ピンポン球は、はねとばされるけれども、ゴルフボールの勢いは殆んど変らない。すなわち、静止している標的粒子ははねとばされるけれども、入射粒子は大してエネルギーを失わない。その結果、入射粒子の持っているエネルギーが反応に有効に使われない。この反応に有効なエネルギーのことを重心系のエネルギーと呼んでいるが、ほぼ入射エネルギーの平方根に比例する。したがって、リングの直径が100倍のシンクロトロンを建設し、100倍のエネルギーを得たとしても、反応に有効なエネルギーは10倍にしかならないわけである。そこで考案されたのが衝突型加速器(Collider)で、二つの粒子集団をそれぞれ反対方向に加速して、正面衝突をさせようというものである。この方式では、加速できる粒子の種類は限られるので二次粒子のように各種の粒子を使うことはできないが、より高いエネルギーを得るのに有利である。実際には、加速された二つの粒子集団を正面衝突させることは技術的に解決すべき点が多く、衝突型加速器が威力を発揮し始めたのは1970年代に入ってからである。衝突型加速器の多くは、円周状のリング内で粒子とその反粒子を加速し、リング上に設けられた実験室で両者を衝突させるものである。現在、高エネルギー物理学研究所では、電子・陽電子衝突型加速器トリスタンを建設中である。米国では、直径30km～70kmに及ぶ巨大衝突型加速器(SSC)を計画中であり、セルンでは直径8kmの電子・陽電子衝突型加速器(LEP)を建設中である。

4 高エネルギー物理学の現状

今世紀の後半に入って、物質の究極的構造の解明は急速に進展した。1960年代までに発見された素粒子は150種以上にのぼり、素粒子の分類学も進歩した。現在までに発見された素粒子を分類すると表2のようになる。

ここで、レプトン（軽粒子）は弱い相互作用をし、ハドロンは強い相互作用をするという特色を持っていることで区別されている。表2から分るように、素粒子の大部分はハドロンと呼ばれるものである。ハドロンはさらにバリオン（重核子）とメソン（中間子）に大別される。このハドロンに内部構造が存在することは、すでに1950年代に指摘されていたが、1963年頃になって、ハドロンはクォークと呼ばれる3種の基本粒子u, d, sから構成されるという仮説が提唱された。この理論では、陽子は(uud)、中性子は(udd)となり、中間子はクォークと反クォークの対、例えば π^+ 中間子は($u\bar{d}$)で構成される。その後、小林-益川等の理論により、クォークは少なくとも6種類必要であることが予言され、実際、4番目のcクォークは1974年、5番目のbクォークは1978年検証された。6番目のtクォークについても、最近の実験でそれらしい現象が見つかっている。また、レプトンについても、1975年、重いレプトン τ 粒子が発見された。これらのクォークとレプトンを表3に示す。

表3は完結しているわけではない。というのは、次の世代の重いレプトン、重いクォークが存在すると考えられるから

表2 素粒子の分類と数

レプトン	電子, μ 粒子, ニュートリノなど	6種
ハドロン	バリオン(重核子) 陽子, 中性子など	110種
	メソン(中間子) π , Kなど	80種
合 計		約200種

表3 物質を構成するクォークとレプトン

世代	I	II	III	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	⇒
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	
レプトン	e 電 子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	⇒
	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	

である。またクォークの特長の一つは、はんば電荷を持っていることで、u, c, tクォークは $+\frac{2}{3}e$, d, s, bクォークは $-\frac{1}{3}e$ の電荷を持っている。しかし、これまでにこのようなはんば電荷は観測されたことはなく、クォークは単体では発見されていない。

自然界に存在する力の研究もまた物理学の重要課題の一つである。古くから、ガリレオやニュートンは万有引力(重力)を解明し、ファラディやマクスウェルは電磁気力についての学問体系をつくり上げた。この二種の力は古くから知られていたが、今世紀に入って第三の力、核力が登場した。この核力は強い力または強い相互作用と呼ばれ、原子核の中で、陽子や中性子を結びつけている力である。この力を媒介する粒子として、湯川博士は π 中間子を予言したのである。第四の力は、弱い力または弱い相互作用と呼ばれ、原子核が β 崩壊する時に関与する力である。現在知られている自然界の力は、この四種である。今日われわれが利用しているエネルギーの根源はすべてこれらの力に由来している。例えば水力発電は万有引力エネルギー、火力発電は電磁気力エネルギー、原子力発電は核力エネルギーによるものである。

さて、これら四種の力が宇宙の初めから存在したかという、そうではなくて、もともとは一つの力であって、宇宙が膨張して冷却するにつれて四つに分化して来たのではないかと考えられている。すなわち、宇宙の創成期と同じような高いエネルギー状態では、力の一つであったというわけである。したがって、高いエネルギー加速器は宇宙の初期の状態を実現する手段としても重要なのであって、高エネルギー物理の研究は宇宙の歴史をさかのぼっているのである。数年前、弱い力と電磁気力が統一されることは実証されたが、さらに強い力をも統一できることを立証すべく実験が続けられている。

高エネルギー物理学は歴史が浅く若い学問である。その前途には、未知のかつ魅力ある課題——次の世代のレプトンやクォークの発見、レプトンやクォークの内部構造の解明、単体クォークや磁気単極子の発見、この宇宙ではなぜ物質が反物質より多いかなど——が山積している。これらに挑戦する超大型加速器計画の検討が着々進められつつある。

5 高エネルギー物理学研究所の加速器

高エネルギー物理学研究所は、昭和46年4月、文部省の国立大学共同利用機関第1号として設立された全国研究者の研究センターである。KEKの略称で国際的にも名が通っており、外国チームも実験に参加している。

現在、陽子シンクロトロンと放射光用電子加速器が稼動中であり、衝突型加速器トリスタンの建設が進んでいる。これらの加速器の建設には、日立製作所が大きく貢献している。

5.1 陽子シンクロトロン

昭和51年3月に完成したわが国初の本格的な高エネルギー加速器で、次のような4段階の加速器で構成されている(図3参照)。

- 前段加速器 (750kVコッククロフト).....750keV
- リニアック (全長16m).....20MeV
- ブースターシンクロトロン (直径12m).....500MeV
- 主リング (直径108m).....12GeV

この加速器は、素粒子研究を主目的に建設されたものであるが、原子核物理や放射化学の実験にも使われている。2週間を単位に、24時間連続で運転され、年間稼動時間は4,000時間を超えており、年間故障率(5%以下)が世界で最も小さい高エネルギー加速器である。この加速器の第三段階であるブースターで加速された500MeV陽子は、中性子や μ 粒子を用いる物性研究、癌の診断や治療の応用研究に利用され成果を挙げている。

5.2 放射光電子加速器

昭和57年3月に完成した放射光発生専用の加速器で、理工学、医学、農学など物質科学や生命科学の全分野に亘って利用されている。この電子加速器は、全長400mの2.5GeVリニアックと直径60mの蓄積リング(ストレージリング)から成っている。リニアックで加速された電子はリング内に蓄積され、偏向電磁石で軌道を曲げられるとき、軌道の接線方向に可視光から硬X線に至る広範囲の波長の光を出す。この光が放射光であるが、指向性が強く、また光の強度は従来の発生装置(例えばX線管)よりはるかに強い。リング内を廻っている電子は光を放出してエネルギーを失うので、シンクロトロンと同じように高周波加速装置によって電子を加速して失ったエネルギーを補充する。真空とは言ってもドーナツ内には空気が残っており、電子は空気の分子と衝突して失われてゆく。したがって、蓄積リングでは普通のシンクロトロンに比べ、数段と高い真空が要求される。つまりドーナツ内の真空度の良否で蓄積された電子の寿命がきまるのである。高エネルギー物理学研究所の電子加速器は、放射光専用としてエネルギー、性能ともに世界一のものである。ドーナツの真空も高真空が得られており、電子ビームの寿命は10時間に及んでいる。

5.3 電子・陽電子衝突型加速器——トリスタン

昭和61年秋に完成を目指して建設されている大型加速器で、エネルギー30GeVに加速した電子と陽電子を正面衝突させて、重心系で60GeVのエネルギーを得ることができる。エネルギーで比較するならば、これは1,800GeVの陽子が静止陽子に衝突するのに匹敵する。トリスタン加速器は、二つのリング、すなわち

- 入射蓄積リング.....直径120m, 6 ~ 8 GeV
 - 主リング.....直径960m, 30GeV
- から成る。入射器は、放射光のリニアックを用いる。入射蓄積リングの役割は、電子や陽電子を蓄積して8 GeVまで予備

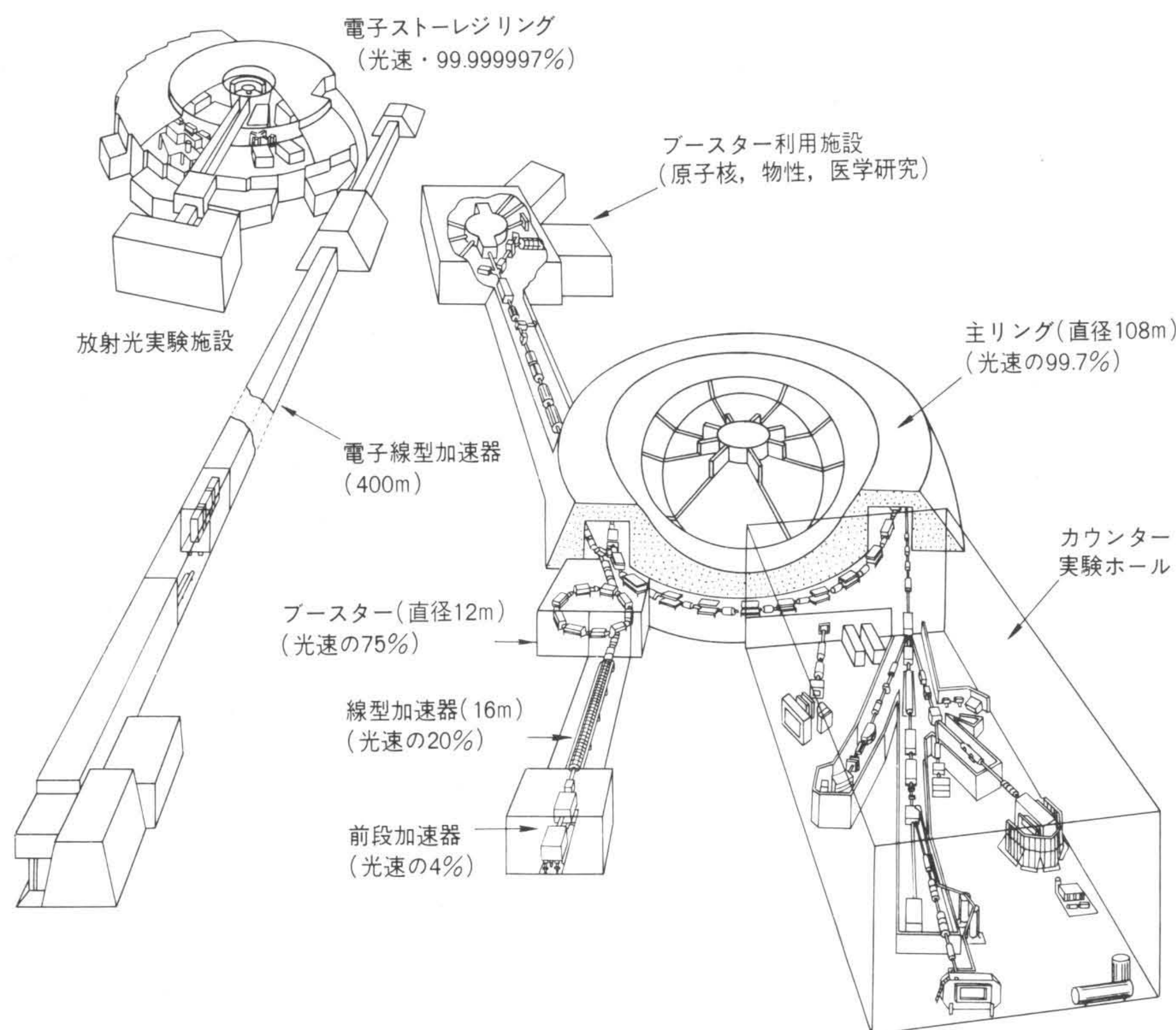


図3 電子加速器と陽子シンクロトロン

加速することである。とくに陽電子は自然には存在しないので、陽電子発生用の200MeV電子リニアックを新設し、発生した陽電子を2.5GeVリニアックで加速したのち、入射蓄積リングに蓄積する。主リング上には、四つの実験室が設けられ、方角に因んでそれぞれ富士、日光、筑波、大穂と名づけられている。主リング上には約270個の偏向電磁石、約450個の集束電磁石が並ぶことになるが、これらはすでに日立製作所で製造、高エネルギー物理学研究所に搬入され据付されつつある。高エネルギー物理学研究所では、陽子シンクロトロンの主リング、放射光リングなどを含めて合計900個の日立製電磁石が使われていることになる。

トリスタンの実験に用いられる測定器もまた巨大なものである。すでに建設が始まっているVENUS（富士）、TOPAZ（筑波）と呼ばれる粒子測定器は、それぞれ総重量が2,000トン以上になる。第3の測定器AMYは大穂に入居するが、日米共同で建設に着手したところである（図4）。

このように、高エネルギー物理学研究所では加速器を中心的施設として広範囲の研究が活発に行われており、国際的な研究センターの一つとなっている。

6 加速器利用と波及効果

高エネルギー物理学の研究は自然科学のなかで最も基礎的な学問であるが、その研究成果が他の自然科学や科学技術、更に産業界に及ぼす影響は、計り知れないものがある。またその研究手段として開発された加速器は、さまざまな研究や実用に応用されている。本章では、それらについて簡単に述べる。

6.1 加速器の利用

今日、加速器を用いる研究は素粒子や原子核だけでなく、物質科学や生命科学の殆んど全分野に及んでいる。加速器や原子炉でつくられる放射性アイソトープの利用はすでに長年に亘って行われて来たが、最近では加速器が発生する粒子を直接利用するものが増えてきた。

医学利用とくに癌の診断や治療には、陽子、中性子、イオン、 π 中間子などが用いられている。わが国においても、放医研や高エネルギー物理学研究所の加速器を用いて癌の治療が試みられており、注目すべき成果が報告されている。陽子線を用いる癌の診断も今後大いに期待されるものである。

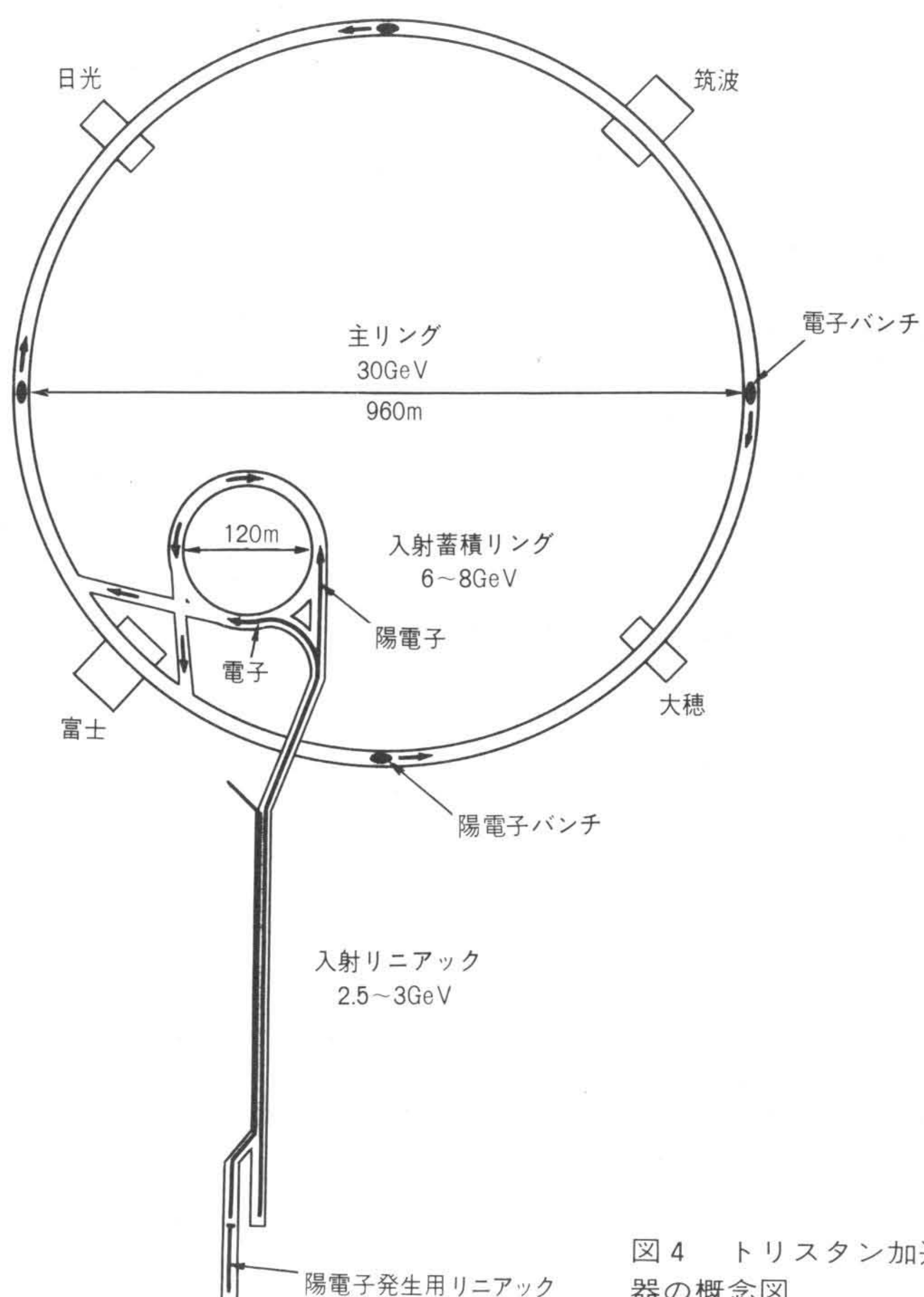


図4 トリスタン加速器の概念図

加速器で発生する中性子を用いる物質構造の研究は、これまで固体物性が主流であったが、最近では軟らかい物性、とくに生体の研究にも応用されようとしている。英国では、中性子発生専用のシンクロトロンが建設されており、わが国でも計画が検討されつつある。

最近急速に脚光をあびているのが放射光である。すでに世界中に専用、共用を含めて10台以上の放射光加速器があるが、その中でも高エネルギー物理学研究所の放射光加速器が世界の規模を誇っている。この放射光は応用範囲が極めて広く、微量分析、超LSI開発、巨大蛋白質や生体構造の解明、半導体や新素材の研究など直接先端科学技術につながるテーマも数多く含まれている。したがってメーカー側から見ても最も関心の深い加速器である。世界的にも、高エネルギー物理はやらないが、放射光の加速器は建設したいとの意向を表明している国がある。すでに、わが国においても、電総研や分子研で放射光加速器が稼動しているが、さらに増加の傾向にある。今後、バイオテクノロジーの進歩とともに生物、医学への応用が重要になると考えられる。

6.2 産業界への波及効果

これまで陽子シンクロトロンや放射光電子加速器、また実験設備の建設に関連して数々の新技術が開発されてきた。電磁石用の良質の鉄鋼、高周波空洞製作法、アルミ製の真空容器、超伝導線材、新型光電子増倍管など数えあげれば主なものでも十指に余る。このような波及効果について、わが国で系統

表4 高エネルギー物理学が産業界にもたらす波及効果についてのCERNの調査結果

メーカーの業種別	調査した メーカー 数	効用がな かったメ ーカー	Sales CERNが 購入した 金額	Utility 経済的効用 (CERNと の契約の 結果得ら れた利益)	利 益 率 (Utility) (Sales)
低 温 ・ 超 伝 導	15	1	48億円	82億円	1.70
エレクトロニクス	31	2	80	387	4.84
電気Ⅰ (磁石、電源、冷却、 機械など)	19	3	154	334	2.17
電気Ⅱ (ケーブル、コンデンサ ー、高周波製品など)	17	1	87	77	0.89
計 算 機	10	0	22	381	17.33
精 密 電 子 機 械	14	1	12	379	31.56
鉄 鋼	10	0	38	276	7.26
真 空 機 器	11	0	33	106	3.20
計	127	8	473	1,996	4.22

注：1スイスフラン＝¥120で換算

表5 経済的効用と分野の関係

市 場 の 分 類	経済的効用 (億円)	比 率 (%)
高エネルギー物理・原子核 物理など直接関係する分野	351	17.6
そ の 他 の 分 野	1,645	82.4
計	1,996	100

的に調べたデータは無いが、CERNでは創設25年を迎えての事業として高エネルギー物理のもたらす技術向上と、それによって生ずる経済的効用を調査し、定量的な形で報告を出している。この調査は精力的な実地調査に基づいており、CERNの仕事を受注したメーカー127社について行われた。CERNは1955年から1973年までに、約4,200億円の予算を使っているが、そのうち1,050億円がヨーロッパの工場への外注額で、そのうちこの調査の対象となったのは473億円である。調査の内容は、単に技術開発による売り上げ増だけでなく、経費節減による利益や販路拡大による利益なども含んでいる。その調査結果を表4、表5に示す。

表4に示すように、

利益率 = $\frac{\text{(経済的効用)}}{\text{(CERNが購入した金額)}}$

の平均値は4.22という高い値になる。また表5は経済的効用がどんな分野で挙げられたかを示している。CERNの加速器を建設したメーカーが他の加速器で金もうけをしたというのでは面白くないが、実際はそうでない。波及効果としてメーカーが利益を挙げたのは、鉄道、冷凍機、造船、水力発電、送電、地下鉄の制御、材料保管、自動車、石油探査など日常生活に極めて関係の深い仕事であった。波及効果のもう一つの特色は、効果が現れるのに10年程度の期間がかかることであり、かつ長期に亘って持続することである。

この調査結果は、わが国にそのまま適用することは妥当でないかも知れない。高エネルギー物理学研究所の場合には職員数が諸外国の研究所に比べて少ないこともあって、加速器建設の段階で研究所のメーカーに対する依存度が大きく、研究所とメーカーの関係がCERNの場合とは異なっているからである。しかし、日本においても研究所が要求する新技術をメーカーと協力して開発するという形で、高エネルギー物理がメーカーの有する潜在的能力を引き出す役割を果たしていることに変わりはない。

7 結 言

これまでに述べてきたように、加速器はもはや原子核や素粒子研究の独占手段ではなくて、広い分野の理工学研究や技術開発にとって不可欠の研究手段となりつつある。過去において、原子の研究の成果としてエレクトロニクスが誕生し、原子核の研究から原子力エネルギーを手中にした。現在、高エネルギー加速器を用いて進められている研究や技術開発の成果は人類の財産であり、やがては新しい文明を築くであろうと期待される。高エネルギー物理学研究所の西川所長の言葉を借りれば、「来るべき21世紀は素粒子文明の時代である」。長い歴史の中で、基礎研究、技術開発と応用、人間の生活は密接な関係を持っており、本稿が高エネルギー加速器を用いる研究の意義について御理解を深める一助となることを願って止まない。

参考文献

1) H. Schmied CERN Report "A Study of Economic Utility resulting from CERN contracts" 75-5 CERN June 6, 1975