

2.2 加速器の種類と役割

2.2.1 加速器の種類

放射線発生装置として許認可の対象になっている加速器は、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いる加速器とは必ずしも一致しない。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加速器は多い。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ている。

永宮 座長

(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(CW)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

ッククロフトウォルトン加速器)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ているシングルエンド型と、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ンドレー型と、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ー型がある。前者は荷電粒子の速度が遅い場合に使われるが、陽子など軽い粒子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高周波 2,856GHz 用の進行波加速管が用いられていることが多い。電子線型加速器では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。

永宮座長

永宮座長

(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、起動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。

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求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、クオリティの高い2次粒子を用いた実験が始まるとともに、エキゾチック粒子の加速・減速が行われるようになり2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ツールであり、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。

永宮座長

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。1980年代までは、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、ハイパワー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。エネルギー科学の主要研究装置は大学に設置するにはあまりにも大型化しているので、加速器は、ハイパワーレーザーを含めて、大学に設置できる数少ないシステム化した装置になっている。大学におけるエネルギー科学の先端的研究だけでなく、教育/人材養成に果たす役割を重視する必要がある。

永宮座長

(3) 先端の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の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オリティオブライフ(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。

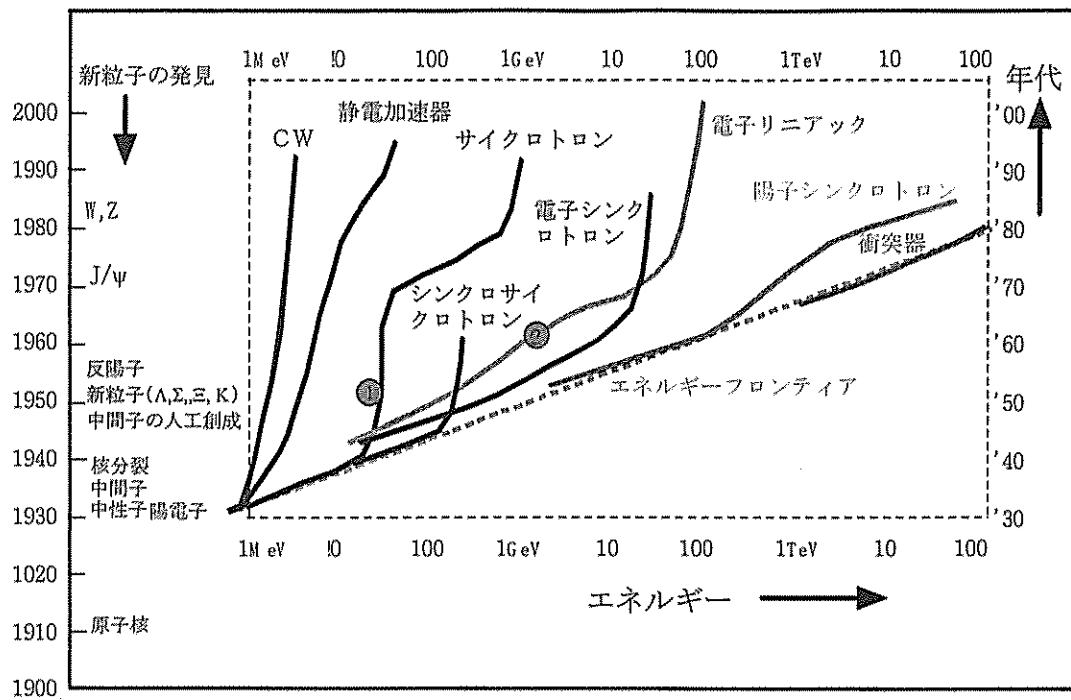


図2-1 エネルギーフロンティアで見た加速器の発展

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	多段倍電圧整流器	コッククロフト・ウォルトン(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	ウイ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、FEL、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、
	円形加速器	静磁界	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、
			同(分離セクター型)	数100MeV/u	陽子／重イオン	高エネルギー、大強度	原子核、RI、照射
			FFAG	数100MeV	陽子／軽イオン	小型	開発中、医学利用
		変動磁界	マイクロトロン	数10MeV	電子	小型	前段加速器／入射器
			シンクロトロン	強集束型	電子／イオン、		高エネルギー物理、前段加速器／入射器
	変動磁界	蓄積リング	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
			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、
			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 ための 根本的 装置 的役割 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	$>TeV$ $\sim 10TeV$	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 オンプラズマ	HI/HI	重イオン衝突器	2×200 GeV	重イオン衝突における粒 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 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	
工度 ネ利 用 ギの 先 導 学的 と研 究 射装 線置 高	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	
	高速中性子の 発生と利用	パルス $p,$ d e パルス d	CW, バンドグラフ、 ダイナミトロ ン 電子リニアック CW	0.15- 5MeV $< 45MeV$ 0.3MV	D,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 γ 線の発生	e	バンドグラフ、 電子リニアック		$p\gamma$ 反応	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, α	直流高圧電源/サ イクロトロン	数MeV - 20MeV	α 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, α 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 慣性核融合	p HI(Pb)	シンクロトロン 誘導ライナック	$\sim 1GeV$ 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、
	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
広お いけ れる 学先 技端 術的 分野 盤の 研 究 装 に置	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X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	パルスラジオリシス
	ミュオンの利用	p	大強度シンクロ トロン	$\sim 1GeV$	パイ中間子の崩壊、	生命科学、材料科学、環境科学、医学利用 ミュオンエスアール(μSR)、
	中性子の利用	p	大強度シンクロ トロン	$\sim 1GeV$	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, α	バンドグラフ、タンデム	$< 10MV$	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、イオン・物 質相互作用、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	$p \sim HI$	CW、タンデムバンドグ	$< 数MeV$	イオン注入、重イオン照射	半導体、表面改質、格子欠陥生成、イオンビ ーム誘起界面反応、結晶表面構造解析
	加速器質量分析	HI	タンデムバンドグラフ	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
高療 度用 先加 進速 医器	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
産発 業と 基工 盤業 技利 術用 開	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
新利 し用 い技 加術 速の 器開 及発 び	イオン注入	HI	CW	<1MeV		半導体加工、表面改質
	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	L.S.G,Xバンドリニアック	→ GeV	SASE	X線領域のコヒーレント、フェムト秒パルス
	ERL	e		→ GeV		
器開 及発 び	既存加速器の改善				低エミッタンス化 短バンチ化、大ピーク電流	
	加速器の小型化	e、p				医学利用、産業利用、