

2.3 日本や世界の加速器

(1) 日本における加速器の発展

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められている。

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、京都大学に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（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。この様子を図 2-1 加速器発展の歴史に示しておく。

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と加工製作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）のサイクロトロン、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、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。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。

この時期には、また、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化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、ガンマ線による非

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）照射治療のための電子リニアック、陽電子放射トモグラフ(PET)のための小型サイクロトロンが多くの医療機関で使われている。

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。

1990年代になると更に大型の加速器計画が進められてきた。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計画 J-PARC(原研・KEK)と不安定核ビームファクトリーRIBF(理研)が建設中である。

今日では、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。ところが小型・中型加速器の現状については世界各国の正確なデータを得ることができないので、ここでは、先端的研究施設として広く利用されている大型加速器を比較することにした。

(2) 我が国における加速器の現状

我が国には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。阪大産研の田川教授の文献に引用されたデータでは、1970年から1998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。

ところが今回実態調査した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おり、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。そこで、ここでは研究・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。

このデータを、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 2-2 図に示した。大学には 30 年以上前に建設された加速器が多いが、最近新しく建設された加速器の数も多い。後者は工学部の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、幾つかの特長が明らかになった。第一は、部分的な改造のための研究費が確保されれば、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て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}) 秒の電子線を加速するように変え、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ーレン 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。

中型及び大型の加速器施設は総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

事務局：
単に「多い」
ということ
なく、データ
を使って補
足すること
はできない
か

事務局：
研究費が改
造に使われ
ると解釈で
きるが問題
ないか

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長を述べることにする。

(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、総て原子核/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、大型加速器は国立大学共同利用機関である高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に設置されてきたが、原子核研究の加速器は複数の研究機関に建設されてきている。一方、その建設費をみると、大学及び KEK に設置される加速器は大学特別会計予算で、また、放医研、原研、理研などに設置される加速器は原子力予算で建設されている。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。

事務局：
「大型加速器」に対する言葉として「原子核研究の加速器」では不適切ではないか

要、事実確認
文科省

ところが現在進められている行政改革では国立大学が法人化されるのに伴って共同利用機関も法人化され、全国規模の大型加速器共同利用は KEK が行なうことになった。このため、KEK 以外の研究機関による加速器共同利用には何らかの制約が課せられることが予想される。

高エネルギー物理学の分野 (表 2-5-1) 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 対象性の破れを検証する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 中間子の実験で次々と新しい発見を生み出している。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。一方、近年 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、アイデア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

事務局：
「世界のトップの座を取り戻す」必要性がどこにあるのか。また、世界のトップでなければならない理由を明確に説明する必要がある

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、世界トップの座を取り戻すことが可能である。

表 2-5-2 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。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トップグループにもちあげる原動力になってきており、最近、第 3 世代放射光源に改造する計画が進行している。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、1970 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。現在は真空紫外-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、ドイツとアメリカで本格的な 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「水の窓」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。

事務局：
「水の窓」とは？内容説明が必要

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表 2-5-3 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。表 2-5-3 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、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において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。ところが高エネルギー電子を用いた原子核研究では、欧米に比較して遅れを取っている。

事務局：
「遅れを撮っている」ことで、どういうことになるのかを示し、遅れをとってはならない理由を明確に説明する必要がある

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、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が、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っていない。

表2-3 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
コッククロフトウォルトン加速装置	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(2003/10/26)

研究機関		イオン加速器	エネルギー	建設年	用途	クラス
北大	工学研究科量子エネ	バンデグラフ	2.5MeV		放射線物性	1)
	同上	中性子源		1960	中性子源、放射化分析、水素分析	1
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	2
	同上	CW	0.6MV	1965	教育	1
	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	3
	CYRIC	サイクロトロン	K=130MeV	1999	核、多目的	4
	電通研	バンデグラフ	2.5MV	1981	半導体研究(RBSなど)	2
筑波大	陽子線医学利用研	シンクロトロン	Ep=250MeV	2001	治療	4
	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	2
	同上	タンデトロン	1MV	1996	物質材料、微量分析	4
KEK	R&D	RFQ+リニアック	4MeV	2000	加速器開発	4
	PS	CW+陽子リニアック	40MeV	1974	入射器	2
	PS	陽子シンクロトロン	0.5GeV	1974	入射器、中性子源	2
	PS	陽子シンクロトロン	12GeV	1975	原子核、中性子ミュオン	2
		静電型蓄積リング	30keV	2000	高分子質量分析	4
	R&D	POPFFAG	0.5MeV	2000	加速器開発	4
環境研究所		タンデムバンデグラフ		1996	年代測定、微量分析	4
産総研	筑波研	ペレトロン		1982	多目的、中性子標準	3
	筑波東研	タンデムバンデグラフ	3MV	1988	物質材料	3
	中部研	タンデムバンデグラフ	2MV	1988	物質材料、表面、加工	3
	関西研	CW		1988	物質材料、表面、微量分析、加工	3
	同上	バンデグラフ		1962	物質材料	1
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	3
	ナノテクのロジー研	バンデグラフ	2MV	1993	化学系物質材料のイオン照射、表面	3
	同上	タンデムバンデグラフ	2MV	1998	物質材料のその場計測	4
長岡科大	長岡科技大	CW	3MV	1981	イオン蒸着、abrasion、放化、技術	2
	同上	タンデトロン	1.7MV	1996	物質材料、放化、表面、微量	4
	同上	CW(パルス)	0.4MV	2000	表面改質	4
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	2
	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	4
	同上	バンデグラフ	2MV	1957	原子分子、物質材料	1
	同上	RFQ+IH	1MV/u	2003	核、物質材料、技術開発	4
	同上	ペレトロン	4MV	2000	中性子校正場	4
	同上	CW	0.45MV	1981	中性子発生	2
	同上	陽子リニアック	5MeV	1994	技術開発	4
	同上	陽子リニアック	200MeV	2005		5
	同上	陽子シンクロトロン	3GeV	2006		5
	同上	陽子シンクロトロン	50GeV	2007		5
	高崎研	サイクロトロン	K=130MeV	1991	多目的	3
	同上	タンデムバンデグラフ	3MV	1991	同上	3
	同上	バンデグラフ	3MV	1993	同上	3
	同上	イオン注入装置	400kV	1993	同上	3

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	クラス
	那珂研	中性子源CW		1981	材料試験	2
	同上	NBI加熱正イオン		1987	プラズマ加熱	3
	同上	NBI加熱負イオン		1996	プラズマ加熱	4
	むつ事業所	タンデムバンデグラフ		1997	質量分析	4
理 研	和光研	重イオンリニアック	6MeV/u	2000	多目的	4
	同上	リングサイクロトロン	K=540MeV	1986	多目的	3
	同上	サイクロトロン	K=75MeV	1989	多目的	3
	同上	タンデムバンデグラフ	2MV	1990	物質材料	3
	同上	RIBF/IRCリングサイクロトロン		2006	ブースター	5
	同上	RIBF/IRCリングサイクロトロン		2006	核物理、多目的	5
	同上	RIBF/SRCリングサイクロトロン	300MeV/u	2006	核物理、多目的	5
	同上	ECRイオン源	eV-keV		原子物理	4
東 工 大	理工学研究科	バンデグラフ	4.75MeV	1968	原子、物質材料、生命、表面、微量	1
	原子炉研	シングルエンドベレトロン	3.2MV	1976	原子核、中性子発生	2
	同上	タンデムベレトロン	1.7MV	1984	プラズマ、微量元素(PIXE)	2
	同上	RFQ重イオンリナック	220keV/u	1993	加速器開発、プラズマ	3
	同上	C60加速装置	0.3MeV	2001	加速器開発、プラズマ	4
	同上	誘導型高電圧発生装置	200kV	1998	+	4
	総合理工学研究科	タンデムベレトロン	1MV	1985	デバイス分析	3
	同上	コッククロフト	200kV	2001	イオン注入	4
東 大	原子力総合センター	タンデムベレトロン	5MV	1995	AMS、PIXE、NRA	3
	同上	タンデトロン	1.7MV	1995	分析(RBS、PIXE)、イオン注入	4
	原子力工学研究施設	タンデトロン	1MV	1984	重照射実験	3
	同上	バンデグラフ	3.75MV	1984	イオン注入+重照射実験	3
立教大理		CW	0.3MV	1985	核、原子、技術開発	3
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	2
	同上	タンデムバンデグラフ	1.5MV	1992	物質材料	3
都立産業研		バンデグラフ	1.77MV	1994	PIXE	4
放 医 研		サイクロトロンAVF930	K=130MeV	1973	放射線科学	1
		RFQ + IHリニアック		1994	入射器	4
		シンクロトロン	100-800/u	1994	ガン治療、放射線科学	4
		シンクロトロン	100-800/u	1994	ガン治療、放射線科学	4
		タンデトロン	Ep=3.4MeV	1999	元素分析	4
国立遺伝研		CW		1968	生命科学/照射	1
国立ガンセンター		サイクロトロン	Ep=235MeV	1998	ガン治療	4
名 古 屋 大	原子核工学	バンデグラフ(イオン+電子)	3.75MV	1967	放射か断面積、イオンビーム分析	1
	同上	バンデグラフ	2.5MV	1981	イオンビーム表面解析	2
	同上	CW	0.2MV	1980	不純物注入、表面解析、	2
	年代測定研	タンデトロン	1.8MeV	1983	8Be年代測定	2
	同上	タンデトロン	2.5MeV	1996	14C年代測定	4
静岡県立ガンセンター		サイクロトロン	Ep=235MeV	2003?	ガン治療	4

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	クラス
金沢大アイソトープ		CW		1963		1
若狭湾エネルギー研		シンクロトロン	180MeV	2001	ガン治療、照射	4
		タンデムバンデグラフ	5MV	2001	表面界面、AMS、PIXE	4
		重イオン源+CW	0.2MV	2001	イオン注入	4
京都大	化学研究所	陽子RFQ/Alvarez	2/7MeV	1992	イオン物質相互作用	3
	理学部	タンデムバンデグラフ	8MV	1990	AMS、PIXE、核物理	3
	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)	3
	同上	バンデグラフ	2.5MV	1968	多目的	1
	同上	CW	0.25MV	1978	イオン注入	2
	量子エネルギー研	タンデトロン	1.7MV			3)
	同上	タンデトロン(シングルエンド)	1MV			3)
	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	2
	同上	FFAG	150MeV	2005		5
奈良女子大		ペレトロン	2MV	1993	原子、物質材料、微量分析	3
大阪大	核物理研	サイクロトロン	陽子90MeV	1974	核物理	2
	同上	リングサイクロトロン	陽子400MeV	1991	核物理	3
	理学部	バンデグラフ	2MV	1966	核物理、物質科学	1
	工学部RI等使用施設	CW	200kV	1968	核、原子、エネルギー	1
	同上	ダイナミトロン		1968	核、原子、エネルギー	1
	同上	CW(OKTAVIAN)	300kV	1981	中性子源、原子、エネルギー	2
大阪府大先端科学研		バンデグラフ		1965	イオン分析装置	1
近畿大理工学		CW	0.15MV	1962	中性子源、放化、微量	1
神戸大海事科学部		タンデムペレトロン	1.7MV	1996	分析(RBS、PIXE)、照射効果	4
同上			0.4MV	1980	大強度パルスビーム、	2
甲南大理工		バンデグラフ	1.5MV	1988	核、原子、微量分析、	3
広島大	原爆放射能研	CW	3MV	1993	中性子源、生命、微量分析	4
	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	3
九州大	理学部	タンデムバンデグラフ	10MV	1972	核物理、多目的	1
	総合理工学研	CW	0.5MV	1962	多目的	1
	応用力学研	タンデム加速器	1MV	1991	分析(RBS、PIXE、ERD)	3

第2-4-2表 我が国の電子加速器(2003/10/16)

	機 関	機 種	電子エネルギー	建設年	用 途	クラス
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	2
	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	1
東北大	核理研	電子リニアック	300MeV	1967	原子核、多目的	1
	同上	S/B ring	1.2GeVS/Bring	1999	原子核、多目的	4
KEK	KEK	KEK-BIコライダー	8GeV/3.5GeV	1998	素粒子	4
	KEK	e-e+入射器	8GeV	1985	入射器	3
	KEK	テストリニアック	46MeV	1997	低速陽電子源	4
	KEK	ATF	1.5GeV	1996	加速器開発	4
	KEK	ATF入射器	1.5GeV	1993	加速器開発	3
	KEK	PF 蓄積リング	3GeV	1981	放射光、多目的	2
	KEK	ARリング	6.5GeV	1983	放射光、多目的	2
	KEK	CW		1984	校正場	3
産総研	筑波研	電子リニアック	350MeV	1980	技術開発、陽電子源	2
	同上	SR蓄積リング	800MeV	1981	光発生利用技術開発	2
	同上	SR蓄積リング	600MeV	1989	測光標準、有機薄膜	3
	同上	蓄積リング/FEL	500MeV	1990	FEL技術開発	3
長岡科技大		CW(パルス)	8MV	1996	FEL、電磁波発生、排ガス処理	4
原研	東海研	SCLInac/FEL/ERL	20MeV	2001	FEL	4
	高崎研	電子直流加速器	2MV	1981	材料照射	2
	同上	電子直流加速器	3MV	1978	材料照射	2
理研播磨研		電子線型加速器FEL	1GeV	2006	FEL	5
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	4
東京理科大		電子リニアック/FEL	40MeV	1999	FEL	4
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	4
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	2
	同上	電子リニアック	18MeV	1987	技術開発、放射線化学	3
消防研究所		リニアック		2001	非破壊検査	4
分子科学研	UVSOR	UVSOR蓄積リング	750MeV	1983	放射光/FEL	2
同上		リニアック+シンクロトロン	20/600MeV	1983	入射器	2
立命館大	放射光	SR蓄積リング	575 MeV	1996	微細加工、多目的	4
	同上	マイクロトロン	150MeV	1996	入射器	4
	同上	SRシンクロトロン	50MeV	1998	放射光技術	4
	同上	マイクロトロン	21MeV	1999	入射器	4
京大	化学研	電子リニアック	100MeV	1995	加速器技術、原子物理	4
	同上	電子蓄積リング	300MeV	2001	加速器技術、核物理	4
	エネルギー理工学研	電子リニアック	45MeV	2003	FEL	4
	工、量子理工学研	バンデグラフ	2MeV	1968	X線照射	1
	原子炉実験所	電子リニアック	46MeV	1965	中性子源、材料照射	1
大阪大	産業科学研	Lバンドリニアック	38MeV	1978	放射線化学、リソ、FEL	2
	同上	Sバンドリニアック	150MeV	1989	放射線化学、陽電子、FEL	3
	工学部FEL研	電子リニアック/FEL	165MeV	1994	FEL	4
	同上	電子リニアック/FEL	20MeV	1994	FEL	4

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	クラス
大阪	先端科学研	電子リニアック	16MeV	1961	材料照射	1
府大	同上	CW	0.6keV	1969	材料照射	1
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	4
同上		電子リニアック	15MeV	1995	FEL	4
広	放射光	SR蓄積リング	700MeV	1997	放射光、多目的利用	4
島	同上	マイクロトロン	150MeV	1997	入射器	4
大	同上	ストレッチャー	150MeV	1997		4
佐賀県放射光		電子リニアック	250MeV	2004	入射器、FEL	5
同上		SR蓄積リング	1.4GeV	2004	放射光	5
高輝度光科学研究センター		電子リニアック	1GeV	1996	入射器	4
同上		シンクロトロン	8GeV	1997	入射器	4
同上		SR蓄積リング	8GeV	1997	放射光	4

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、JASRI)

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ترون				1		1
シンクロترون				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ترون		1	1		1	3
シンクロترون		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ترون	1		4	2	3	10
シンクロترون				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ترون				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ترون		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ترون						
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 (ルミノシティ)	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/ψ 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
	CERBAF(JLab)	アメリカ	超伝導リニアック	5.5	220μA (CW)	高エネルギー核物理
	LEPS(SPring-8/RCPN)	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		Υ 中間子物理
	BEPC(IEHP)	中国	e/e+衝突器	2.8 x 2	4.00E+30	τ-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・p/p 衝突器	7,000x2		建設中、ヒッグス粒子探索
	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・ p/p 衝突器	1,000 x 2	2.00E+32	素粒子物理、J/ψ 発見
	U-70(IEHP)	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	20μA	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 K2K(カミオカンデ入射) 実験
	RHIC(BNL)	アメリカ	シンクロトロン・ HI/HI衝突器	100MeV/u x 2	2.00E+31	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	1pμA (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	バイオン工場/ 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BM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 II	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 II	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 II	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		0.8	31.45	555	0.468
	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, LHI	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, LHI	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	1-1.4GeV, 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
	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)
アメリカ	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+	540MeV
					リサーキュレーター+	1,060MeV
					蓄積リング	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
				e	電子リニアック+シンクロトロン+	270MeV+1.2GeV, コンプトン
					蓄積リング	後方散乱、2-50MeV, 225MeV
	Indiana U.	アメリカ	IUCF	p	サイクロトロン、	205MeV
				p	シンクロトロン・冷却リング	250MeV
				HI	超伝導サイクロトロン(+)	K=500
	MSU	アメリカ		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+	9MV
					ECR+入射リニアック+	12MV
					2 x 超伝導リニアック	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+IMS+ 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, HI	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, LHI	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	