

国内外加速器（放射線発生装置）の利用実態に関する調査

報告書

平成 14 年 3 月

株式会社 三菱総合研究所

本報告書は内閣府からの委託調査として、(株)三菱総合研究所が実施した「国内外加速器（放射線発生装置）の利用実態に関する調査」の成果を取りまとめたものです。従って、本報告書の複製、転載、引用等には承認手続きが必要です。

承認手続きに関する問い合わせ先：内閣府原子力グループ（電話 03-3581-6688）

目 次

はじめに

1 . 国内の加速器の保有・利用実態	1
1.1 加速器の保有実態	1
1.2 アンケート調査に基づく加速器開発・利用の実態	3
1.3 アンケート調査のまとめ	54
1.4 国内の大規模加速器施設の概要と複合加速器	56
2 . 欧米諸国の加速器開発・利用の現状	58
2.1 欧米諸国の加速器開発・利用の現状（概要）	58
2.2 主要な加速器施設	59
3 . アジア諸国の加速器開発・利用の現状	67
3.1 中国の加速器開発・利用の現状	67
3.2 マレーシアの加速器開発・利用の現状	73
3.3 韓国の加速器開発・利用の現状	75
3.4 ベトナムの加速器開発・利用の現状	79
3.5 インドネシアの加速器開発・利用の現状	82
3.6 インドの加速器開発・利用の現状	87
4 . 今後の加速器開発・利用の課題整理と対応のあり方検討	92

添付資料 1 アンケート調査票

添付資料 2 自由回答内容

加速器調査に関する小委員会

メンバー

【委員】

高エネルギー加速器研究機構教授	永宮 正治
武蔵野美術大学造形学部教授	粟屋 容子
(財)高輝度光科学研究センター副会長	上坪 宏道
放射線医学総合研究所加速器物理工学部部長	曾我 文宣

【調査協力】

高エネルギー物理学研究所名誉教授	福本 貞義
------------------	-------

(敬称略)

【事務局】

(株)三菱総合研究所	伊藤 一道
	井上 貴至
	松田 聡浩

はじめに

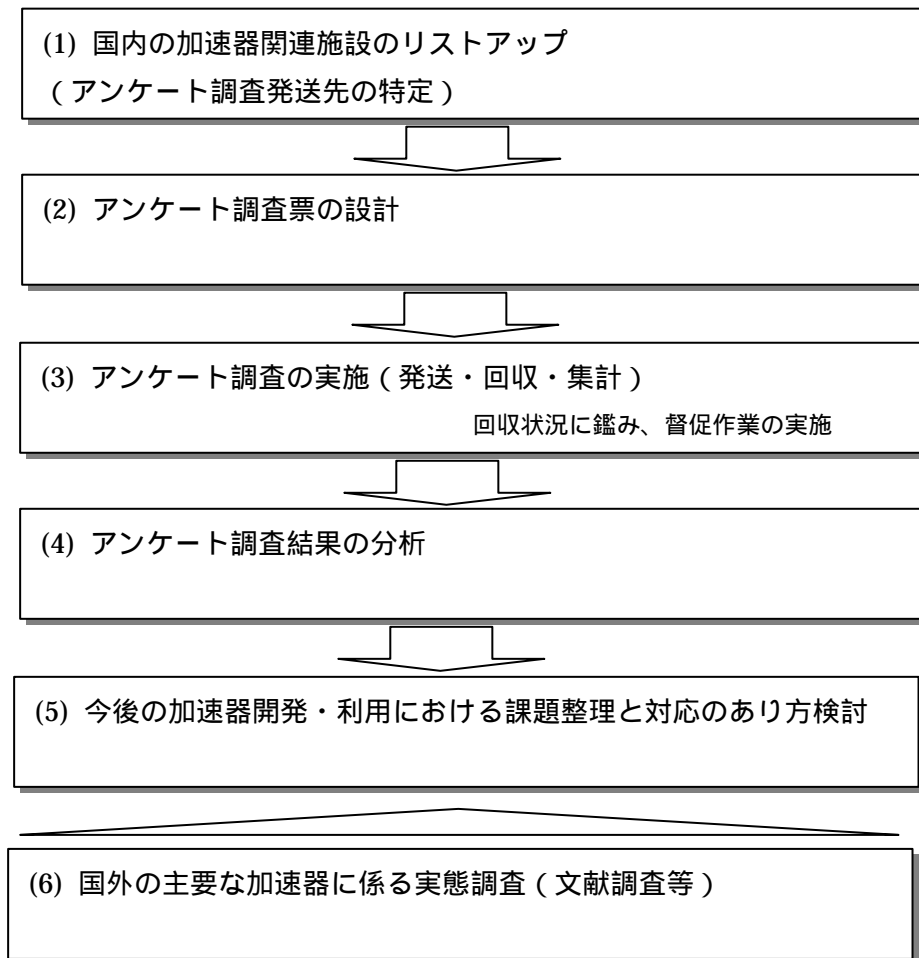
国内、及び先進諸国では様々な研究開発用途、医療用途として大学等の教育機関、公的な研究機関、民間企業の研究部門等に加速器が設置され、運用されているところである。

一方、原子力委員会では研究開発専門部会に加速器検討会を設け、我が国全体の加速器の現状、及び利用実態を把握し、長期的視野に立った加速器開発・利用のあり方について検討を行うこととしている。

このような状況を踏まえ、本調査では国内の加速器については把握しうる全ての施設に対しアンケート調査を行うことで、施設概要、利用実態（利用目的、利用頻度等）、ニーズ等を把握、分析し、データベース化を図ることで前記検討会での議論の基礎データに資することを目的に実施した。

また、参考としての位置づけにおいて、国外の主要な加速器についても文献調査等によりその実態把握を行った。

本調査を実施するにあたり、ご協力頂いた学識経験者各位、関連機関担当者各位に対し、謝意を表する。



1. 国内の加速器の保有・利用実態

1.1 加速器の保有実態

放射線利用統計（日本アイソトープ協会）によると、国内には2000年3月31日現在で1,136加速器（＝放射線発生装置）が存在している。これらには、医療機関（767施設）、教育機関（58施設）、研究機関（163施設）、民間企業（141施設）等となっている。

表 1-1 国内の加速器の保有実態（発生装置種類・機関別）

発生装置 Radiation Generators	機関 Category	総数 Total 構成比 Ratio(%)	医療機関 Hospitals & Clinics	教育機関 Educational Organizations	研究機関 Research Institutions	民間企業 Industrial Firms	その他の機関 Other Organizations
総数 Total		1,136	767	58	163	141	7
構成比 Ratio %		100	67.5	5.1	14.3	12.4	0.6
サイクロトロン Cyclotrons		63 5.5	25	-	16	21	1
シンクロトロン Synchrotrons		31 2.7	1	3	21	6	-
シンクロサイクロトロン Synchrocyclotrons		- -	-	-	-	-	-
直線加速装置 Linear Accelerators		836 73.6	709	11	47	66	3
ベータトロン Betatrons		14 1.2	6	-	1	7	-
ファン・デ・グラーフ加速装置 Van de Graaff Accelerators		41 3.6	-	16	23	1	1
コッククロフト・ワルトン加速装置 Cockcroft-Walton Accelerators		91 8.0	-	25	33	31	2
変圧器型加速装置 Transformer-type Accelerators		25 2.2	-	1	19	5	-
マイクロトロン Microtrons		34 3.0	26	2	2	4	-
プラズマ発生装置 Plasma Generators		1 0.1	-	-	1	-	-

出典) 放射線利用統計（日本アイソトープ協会）

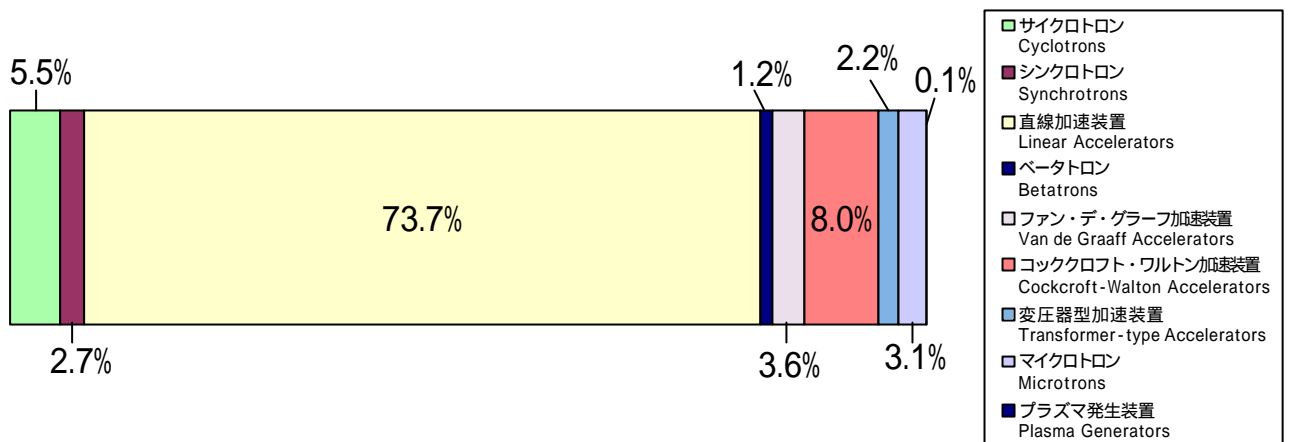


図 1-1 国内の加速器の保有実態（発生装置種類・機関別）

出典）放射線利用統計（日本アイソトープ協会）

このように、国内に設置されている加速器の 70%以上は、がんの放射線治療を目的として医療機関に設置された電子直線加速器（リニアックまたはライナック）である。そして最近のものは、コンピューター制御の回転機構等の駆動装置に搭載して、標的を任意の方向から照射出来る。加速される電子のエネルギーは十数 MeV 以下、平均電流は数十ないし数百マイクロ・アンペアである。一方、設置数は限られているが、研究機関（大学を含む）に設置されているシンクロトロン等の大型加速器は、素粒子・原子核物理研究、放射光・中性子による物性研究等に用いられ、加速粒子のエネルギーは 1GeV の程度またはそれ以上となる。これらの大型加速器は、単一の機種ではなく、複数の機種から構成される複合加速器（accelerator complex）である。

医療用電子直線加速器よりは規模は大きい、上記大型加速器よりは遥かに小さいコッククロフト・ワルトン加速器とファン・デ・グラーフ加速器は、かつては原子核研究に使用されたが、現在はより広範囲に微量分析、年代測定に利用されるようになってきた。

このように、加速器といっても様々な用途、規模のものが存在しており、本調査で実施する利用実態調査においてはこうした状況を勘案し、各々の実情に合致したアンケート調査を行うことが重要と考えられる。

1.2 アンケート調査に基づく加速器開発・利用の実態

本節では、1.1 節に示した設置実態を踏まえ、各設置機関に対するアンケート調査を実施し、国内の加速器開発・利用に係る実態把握、分析を行った。

アンケート調査の発送先は国内の加速器保有機関 853 機関であり、これらには公立・民間の医療機関、大学等の教育機関、国等の公立研究機関（独立行政法人含む）、民間企業等を含んでいる。

アンケート調査を実施するにあたっては、文部科学省放射線規制室が保有する放射線発生装置設置に係る認可手続き、届け出手続き関連データを活用した。これらデータに基づき、関連機関 853 ヶ所を抽出（加速器複数台保有も含む）し、以下に示すようなアンケート票を作成し郵送にて送付した。

表 1-2 アンケート票の設計仕様（1 / 2）

分類	調査項目	調査目的・分析の視点
(1) 加速器分野における我が国の現状の把握	加速器の形式	ライナック、サイクロトロン、シンクロトロン、ヴァンデ・グラーフ、ペレットロンなど加速器の形式
	利用目的	所有する加速器の主要な利用目的を記入してもらう。例えば、素粒子物理、原子核物理、材料科学（半導体、新素材など）、加速器開発、バイオ、医学利用、元素分析、フェムト秒解析、自由電子レーザー、表面解析、年代測定、放射光、多目的など。
	加速器の設置年月	加速器の利用年数を把握する。
	加速器スペック	<ul style="list-style-type: none"> ・ 加速電圧 ・ ビーム電流 ・ 加速粒子の種類 ・ イオン源 など、それぞれの加速器の形式に基づき仕様について記入してもらう。
	稼働率	マシンタイム / 年から、その加速器の利用活況度を推定する。

表 1-2 アンケート票の設計仕様 (2 / 2)

分類	調査項目	調査目的・分析の視点
(2) 加速器開発・利用について第三者評価や外部専門家の評価を受けているか 共同利用の有無 利用料金設定の有無	加速器開発・利用について第三者評価や外部専門家の評価を受けているか	加速器を利用した研究・開発・分析・治療活動を客観的に評価するために、第三者評価や外部専門家の評価を受ける制度を有しているかたずねる。
	共同利用の有無	他の機関との共同研究、共同利用の有無。相手方及び国内外の比率。可能ならば共同プロジェクト名称を記入(5つ程度)。
	利用料金設定の有無	利用料金を徴収する仕組みを有しているか、有している場合はおおよその料金体系について記入してもらう。
(3) 利用分野のニーズを踏まえた加速器開発・利用	行政(国)に求める技術的な支援や制度的な支援	どのような技術的支援、制度的支援があれば加速器を所有する研究機関同士、または加速器を利用したいユーザーとの共同利用・連携が促進されたと考えるかを自由に記述してもらう。また、参考とすべき施設があれば施設と支援内容を記述してもらう。
	これからどのような加速器を設置すべきか、または開発すべきか	国や企業はこれからどのような加速器を設置すべきか、または開発していくべきかを自由に記述してもらう。
	加速器を利用するうえでの課題	加速器を利用するうえでの日頃感じておられる課題、問題点について自由に記述してもらう。

本アンケート調査は、加速器の設置機関の約 8 割が医療機関であることから、回答者の便宜を考えて調査票を 2 通り作成した。それぞれの調査票とアンケートの設問の対応を表に示す。

表 1-3 調査票回答項目の概要

調査票	回答項目	本報告書の対応する箇所
調査票【1】	【A】加速器の基本仕様を尋ねる設問	問 1 ~ 問 9
	【B】加速器の利用状況を詳しく尋ねる設問	問 10 ~ 問 13
	【C】加速器開発・利用について尋ねる設問	問 14
調査票【2】	【A】加速器の基本仕様を尋ねる設問	問 1 ~ 問 9
	【C】加速器開発・利用について尋ねる設問	問 14

本アンケートに回答する機関の属性、主な利用目的によって次図に示すフローチャートで判別し、回答する調査票を選択してもらうこととした。

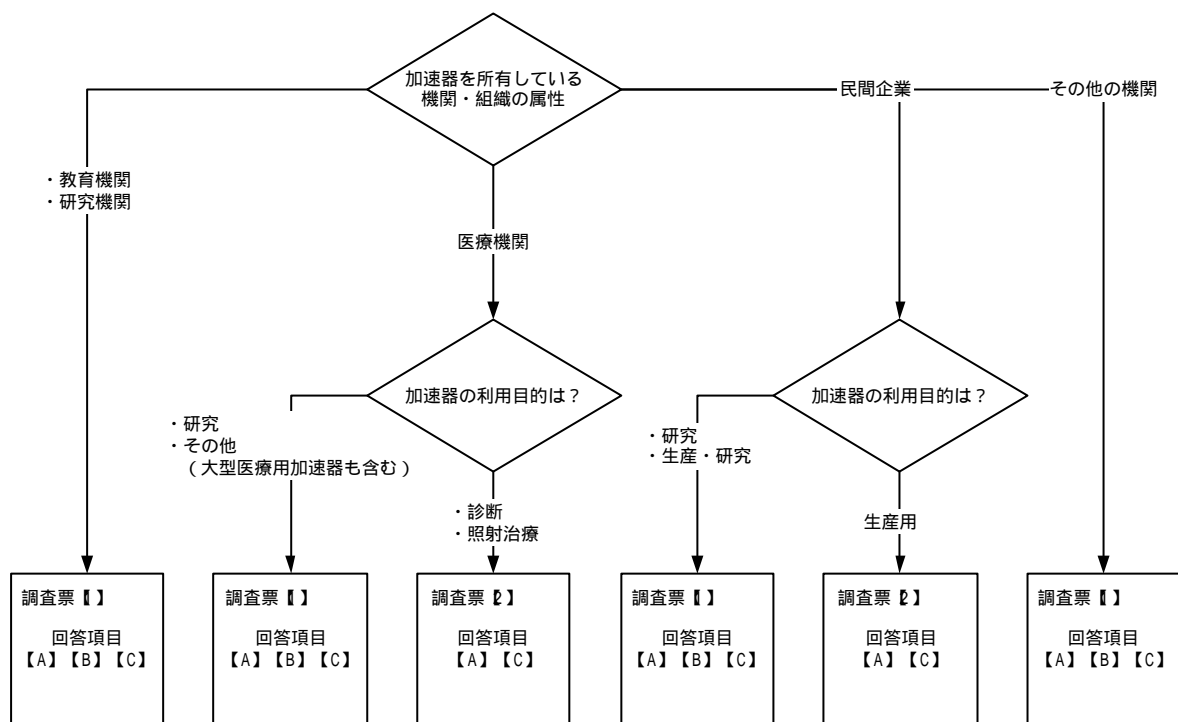


図 1-2 回答機関の属性に基づく回答項目判別フローチャート

なお、アンケート調査結果を集計する際に、集計の母数が回答機関（数）であるものを N、集計の母数が個別の加速器（台数）であるものを n とした。

以下にアンケート調査の結果を示す。

(1) 属性

問 1 貴機関・貴組織の属性のうち、あてはまるものに 印をつけてください。
(単数回答、回答機関全体への質問)

回収された調査票から、有効な回答を得られた全機関数は N=672 であった。その内訳として、教育機関 3.7%、研究機関 7.3%、医療機関 79.5%、民間企業 8.3%、その他 1.2%であった。

医療機関(機関数 N=534)においては、研究に利用している機関 0.9%、診断に利用している機関 4.7%、照射治療に利用している機関 81.3%、医療用大型装置を所有している機関 0.6%等となった。医療機関における加速器の主な利用目的は、照射治療が 8 割程度を占めていることがわかる。また、現在設置工事中、旧設備を廃止し新規設備に変更中、廃止、等と回答した機関については、本調査時点で加速器を設置していないことから「医療機関廃止および未設置」に区分した。

民間企業(企業数 N=56)では、生産に利用している機関が 57.1%と全体の約 6 割であった。次いで研究用は 3.6%であり、民間企業における加速器開発・利用は、生産を目的とした応用分野が中心であることがわかった。いくつかの民間企業では、エネルギーが 1MeV 未満の加速器に改修・変更したことにより、本調査の対象とする加速器のエネルギーレベルから外れたものもあった。また、加速器のメーカーでは、「常設の加速器は所有しておらず、医療用加速器の組立て・納品時の性能試験を行うときにのみ、加速器を設置している」と回答した企業もあった。

一方、加速器ごとに集計した結果、回収された調査票から抽出された全加速器は n=868 台であった。加速器ごとに着目した加速器の所有機関・組織の比率は、教育機関 4.7%、研究機関 12.8%、医療機関 71.6%、民間機関 9.7%であった。我が国における加速器は、約 7 割が医療機関によって所有されていることがわかった。医療機関が保有する加速器(n=622)については、研究 1.0%、診断 5.6%、照射治療 80.7%、医療用大型装置 1.3%等となった。民間企業が保有する加速器(n=84)については、生産用が 53.6%と全体の約 5 割が生産用である。次いで研究用は 9.5%であった。

なお、問 2 以降の集計は加速器ごとに行った。

(N=672)

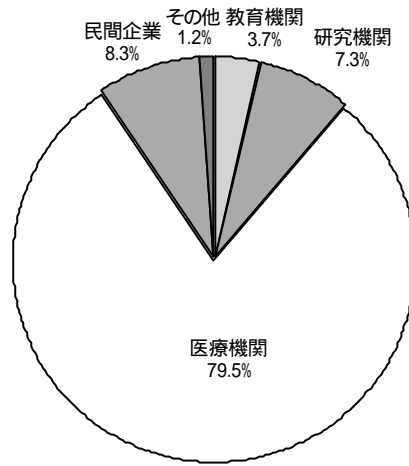


図 1-3 加速器所有機関の属性 (機関数 N=672)

(N=534)

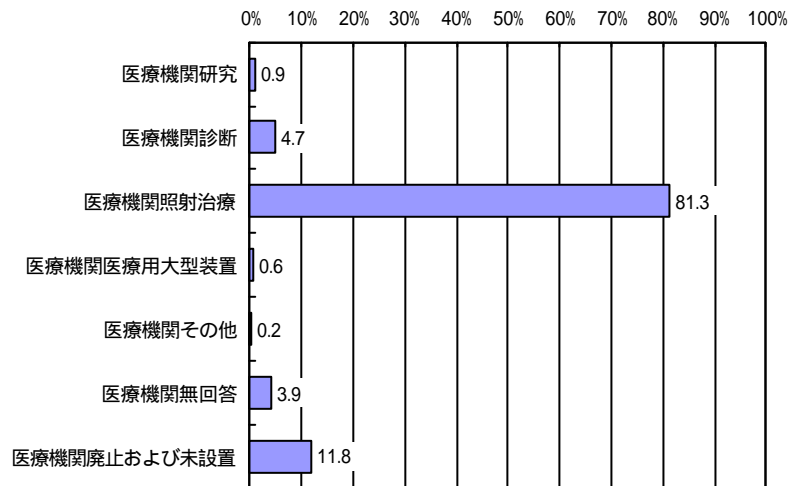


図 1-4 医療機関が所有する加速器の主な利用区分 (機関数 : N=534)

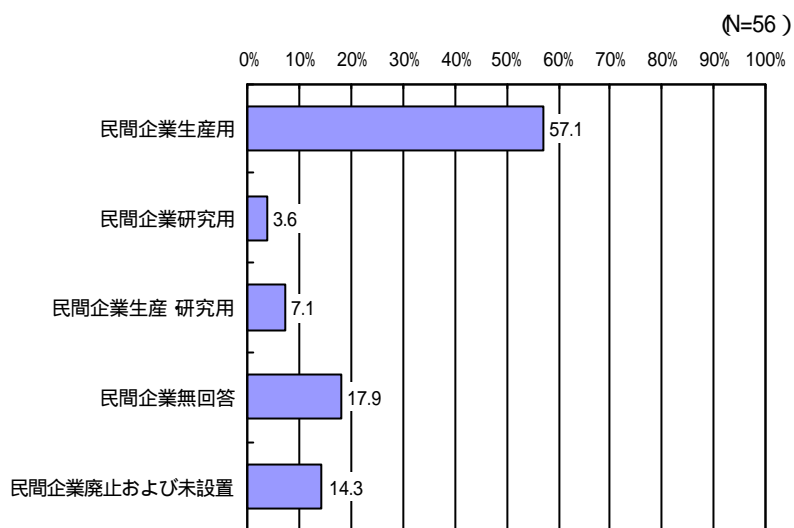


図 1-5 民間企業が所有する加速器の主な利用区分 (機関数 : N=56)

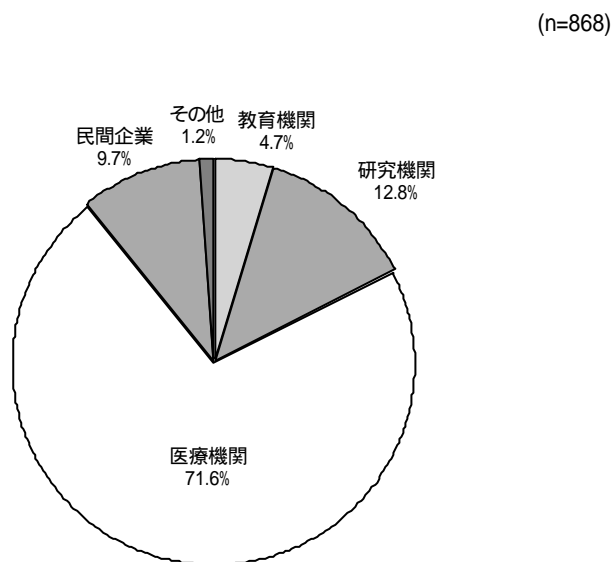


図 1-6 加速器所有機関の属性 (装置数 : n=868)

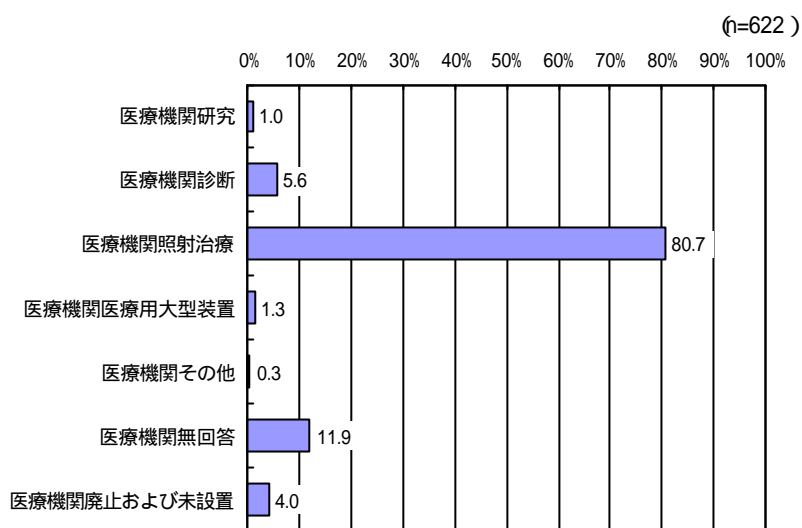


図 1-7 医療機関が所有する加速器の主な利用区分 (装置数 : n=622)

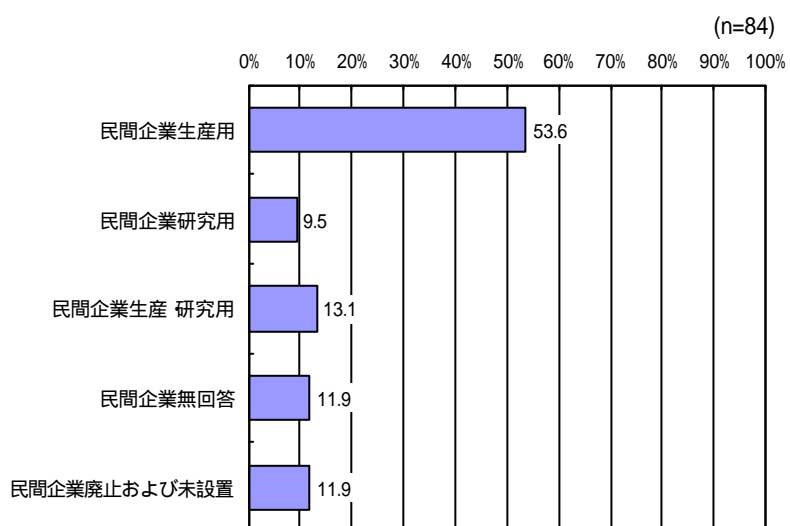


図 1-8 民間企業が所有する加速器の主な利用区分 (装置数 : n=84)

(2) 形式

問2 貴機関で所有されている加速器の形式は何ですか。次のうち、あてはまるものをすべて選んでください。(単数回答、回答機関全体への質問)

回答の得られた全加速器 (n=814) のうち、「ライナック」(633 台)、「コッククロフト・ワルトン加速装置」(49 台)、「サイクロトロン」(44 台)であった。

教育機関では「ライナック」(9 台)であり、「コッククロフト・ワルトン加速装置」(11 台)、「ファン・デ・グラフ加速装置」(10 台)であった。横集計の結果から、教育機関では、約 5 割は静電型加速器であることがわかった。

研究機関では、「ライナック」(26 台)、「サイクロトロン」(12 台)、「シンクロトロン」(8 台)となっている。静電型加速器については、「ファン・デ・グラフ加速装置」(18 台)、「コッククロフト・ワルトン加速装置」(20 台)であり、約 4 割を占めている。

医療機関では、「ライナック」(556 台)であり、医療機関における加速器の約 9 割がライナックであることがわかった。医療機関における加速器の利用目的は約 80%が「照射治療」であり、「照射治療」を主用途とした加速器が電機メーカーからパッケージ化された市販品として販売されていることから理解できる。

一方、縦集計の結果から、「サイクロトロン」(全 44 台)のうち 22 台(サイクロトロンの内数として 50.0%)が「医療機関」に設置されていること、また「シンクロトロン」(全 14 台)のうち 8 台(57.1%)が研究機関に設置されていることもわかった。

表 1-4 加速器の形式 / 利用機関

	調査数	サイクロトロン	シンクロトロン	シンクロサイクロトロン	ライナック	ベータトロン	ファン・デ・グラフ加速装置	コッククロフト・ワルトン加速装置	変圧器型加速装置	マイクロトロン	プラズマ発生装置	蓄積リング	入射器	その他
実数														
全体	814	44	14	1	633	1	29	49	5	19	-	11	2	6
教育機関	39	-	-	1	9	-	10	11	1	3	-	3	-	1
研究機関	96	12	8	-	26	-	18	20	1	1	-	6	-	4
医療機関	597	22	2	-	556	1	-	-	-	15	-	-	-	1
民間企業	74	9	4	-	38	-	-	16	3	-	-	2	2	-
その他	8	1	-	-	4	-	1	2	-	-	-	-	-	-
縦集計%														
全体	100.0	5.4	1.7	0.1	77.8	0.1	3.6	6.0	0.6	2.3	-	1.4	0.2	0.7
教育機関	100.0	-	-	2.6	23.1	-	25.6	28.2	2.6	7.7	-	7.7	-	2.6
研究機関	100.0	12.5	8.3	-	27.1	-	18.8	20.8	1.0	1.0	-	6.3	-	4.2
医療機関	100.0	3.7	0.3	-	93.1	0.2	-	-	-	2.5	-	-	-	0.2
民間企業	100.0	12.2	5.4	-	51.4	-	-	21.6	4.1	-	-	2.7	2.7	-
その他	100.0	12.5	-	-	50.0	-	12.5	25.0	-	-	-	-	-	-
縦集計%														
全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-	100.0	100.0	100.0
教育機関	4.8	-	-	100.0	1.4	-	34.5	22.4	20.0	15.8	-	27.3	-	16.7
研究機関	11.8	27.3	57.1	-	4.1	-	62.1	40.8	20.0	5.3	-	54.5	-	66.7
医療機関	73.3	50.0	14.3	-	87.8	100.0	-	-	-	78.9	-	-	-	16.7
民間企業	9.1	20.5	28.6	-	6.0	-	-	32.7	60.0	-	-	18.2	100.0	-
その他	1.0	2.3	-	-	0.6	-	3.4	4.1	-	-	-	-	-	-

(3) 利用目的

問3 加速器のおもな利用目的は何ですか。次のうち、あてはまるものをすべて選んでください。(複数回答、回答機関全体への質問)

加速器の利用目的は、回答の得られた全加速器(n=814)のうち、基礎分野では「医療(研究)」(86台)、「物質・材料科学」(70台)、「加速器開発」(49台)、「原子・分子物理学」(39台)、「教育・訓練」(37台)等となっている。応用分野では「医療(治療)」(567台)が圧倒的に多く、「微量元素分析」(40台)、「表面解析」(38台)、「非破壊検査」(35台)となっている。

機関別にみると(横集計)教育機関(n=39)では「物質・材料科学」(19台;48.7%)、「教育・訓練」(14台;35.9%)、「微量元素分析」(13台;33.3%)となっている。研究機関(n=96)では、「物質・材料科学」(44台;45.8%)、「加速器開発」(31台;32.3%)、「原子・分子物理学」(27台;28.1%)となっている。医療機関(n=597)では「医療(治療)」(560台;93.8%)となっている。民間企業(n=74)では「非破壊検査」(28台;37.8%)、「放射線加工」(14台;18.9%)となっている。

横集計の「全体」から、我が国における加速器の利用目的の約7割は医療分野における「医療(治療)」(69.7%)であることがわかる。

「その他」の利用目的としては、「海洋研究」(1件)、「材料改質」(1件)、「光量子科学の研究」(2件)、「電子線照射による絶縁体改質」(4件)、「半導体(整流素子のキャリアライフタイムコントロール)」(1件)、「滅菌」(6件)などがあげられている。

表 1-5 利用目的 / 利用機関

	調査数	高エネルギー物理学 【基礎】	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フェムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	表面解析 【応用】	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	814	11	23	39	70	21	25	49	11	6	86	24	37	38	40	11	22	567	18	35	28	27	32	13
	教育機関	39	6	9	11	19	9	6	8	5	1	3	5	14	6	13	4	-	2	1	1	1	-	-	4
	研究機関	96	4	14	27	44	12	15	31	6	3	17	19	15	26	22	6	5	4	6	4	13	8	13	6
	医療機関	597	1	-	-	-	-	-	4	-	-	65	-	7	-	-	-	16	560	5	-	-	10	1	3
	民間企業	74	-	-	1	5	-	4	6	-	2	1	-	-	4	4	-	-	1	5	28	14	8	17	-
	その他	8	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	1	2	1	1	1	-	1	2	-	1	1	-
横集計%	全体	100.0	1.4	2.8	4.8	8.6	2.6	3.1	6.0	1.4	0.7	10.6	2.9	4.5	4.7	4.9	1.4	2.7	69.7	2.2	4.3	3.4	3.3	3.9	1.6
	教育機関	100.0	15.4	23.1	28.2	48.7	23.1	15.4	20.5	12.8	2.6	7.7	12.8	35.9	15.4	33.3	10.3	-	5.1	2.6	2.6	2.6	-	-	10.3
	研究機関	100.0	4.2	14.6	28.1	45.8	12.5	15.6	32.3	6.3	3.1	17.7	19.8	15.6	27.1	22.9	6.3	5.2	4.2	6.3	4.2	13.5	8.3	13.5	6.3
	医療機関	100.0	0.2	-	-	-	-	-	0.7	-	-	10.9	-	1.2	-	-	-	2.7	93.8	0.8	-	-	1.7	0.2	0.5
	民間企業	100.0	-	-	1.4	6.8	-	5.4	8.1	-	2.7	1.4	-	-	5.4	5.4	-	-	1.4	6.8	37.8	18.9	10.8	23.0	-
	その他	100.0	-	-	-	25.0	-	-	-	-	-	-	-	12.5	25.0	12.5	12.5	12.5	-	12.5	25.0	-	12.5	12.5	-
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	教育機関	4.8	54.5	39.1	28.2	27.1	42.9	24.0	16.3	45.5	16.7	3.5	20.8	37.8	15.8	32.5	36.4	-	0.4	5.6	2.9	3.6	-	-	30.8
	研究機関	11.8	36.4	60.9	69.2	62.9	57.1	60.0	63.3	54.5	50.0	19.8	79.2	40.5	68.4	55.0	54.5	22.7	0.7	33.3	11.4	46.4	29.6	40.6	46.2
	医療機関	73.3	9.1	-	-	-	-	-	8.2	-	-	75.6	-	18.9	-	-	-	72.7	98.8	27.8	-	-	37.0	3.1	23.1
	民間企業	9.1	-	-	2.6	7.1	-	16.0	12.2	-	33.3	1.2	-	-	10.5	10.0	-	-	0.2	27.8	80.0	50.0	29.6	53.1	-
	その他	1.0	-	-	-	2.9	-	-	-	-	-	-	-	2.7	5.3	2.5	9.1	4.5	-	5.6	5.7	-	3.7	3.1	-

(4) 設置年月

問4 加速器の設置年月はいつですか(西暦で記入してください)
(単数回答、回答機関全体への質問)

加速器が設置された年代は、全体(n=814)の約5割が「90年代」(441台; 54.2%)となっており、続いて「80年代」(195台; 24.0%)、「2000年以降」(113台; 13.9%)となっている。

機関別にみると、教育機関、研究機関、医療機関で80年代にそれぞれ2割から3割程度、90年代にそれぞれ4割から6割程度となっており、どの機関でも最近十数年内に設置された加速器が多い。

特に教育機関(n=39)では医療機関(n=597)や民間企業(n=74)に比べて、「60年代以前」(7台; 17.9%)の比率が他の機関に比べて高くなっており、同様に研究機関(n=96)でも「60年代以前」(8台; 8.3%)となっている。教育機関および研究機関に設置されている加速器の一部で老朽化が進んでいることが伺える。

民間企業(n=74)では、「80年代」(28台; 37.8%)、「90年代」(28台; 37.8%)となっており、約8割近くの加速器が、最近20年の間に設置されたことがわかる。

表 1-6 設置年月(実数)

		調 査 数	1 9 6 0 年 代 以 前	7 0 年 代	8 0 年 代	9 0 年 代	2 0 0 0 年 以 降	無 回 答
実 数	全 体	814	17	30	195	441	113	18
	教育機関	39	7	2	7	23	-	-
	研究機関	96	8	10	31	35	9	3
	医療機関	597	1	4	128	349	101	14
	民間企業	74	1	14	28	28	2	1
	その他	8	-	-	1	6	1	-

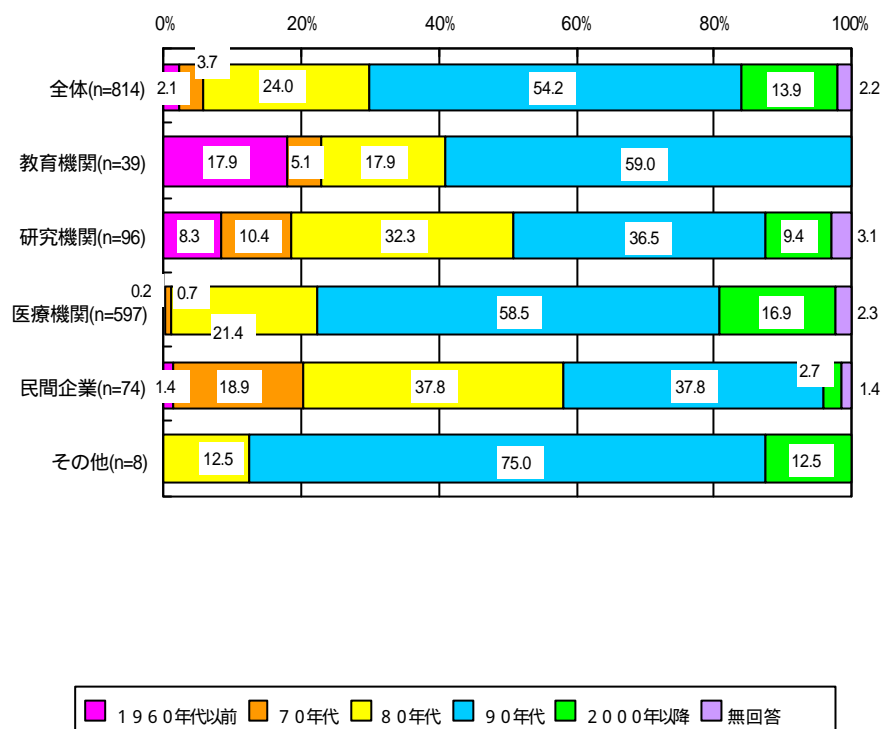


図 1-9 設置年月の機関別比率

設置年月別と利用目的の関係をみると、横集計の結果から、「60年代以前」に設置された加速器は、17台しかないものの「高エネルギー物理学」(2台; 11.8%)、「原子核物理学」(5台; 29.4%)、「原子・分子物理学」(7台; 41.2%)、「物質・材料科学」(9台; 52.9%)となっており、基礎分野に古い加速器が多いことがわかる。

一方、縦集計の結果から、利用目的別に設置年月をみると、基礎科学の分野の中でも、表中の「高エネルギー物理学」、「原子核物理学」、「原子・分子物理学」、「物質・材料科学」、「エネルギー科学」、「放射線科学」、「加速器開発」、「生命科学」、「教育・訓練」では、「80年代」及び「90年代」の加速器がそれぞれの分野で30%から50%となっており、「自由電子レーザー」、「フェムト秒現象解析」、「医療(研究)」では「90年代」の設置が60%程度となっている。

特に、「医療(治療)」の分野では、全567台のうち「90年代」(333台; 58.7%)、「2000年以降」(93台; 16.4%)となっており、「医療(治療)」を目的とした加速器は最近10年程度の間設置されたものが大多数を占めている。

表 1-7 設置年月 / 利用目的

	調査数	【基礎】 高エネルギー物理学	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フェムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	【応用】 表面解析	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	814	11	23	39	70	21	25	49	11	6	86	24	37	38	40	11	22	567	18	35	28	27	32	13
	1960年代以前	17	2	5	7	9	2	3	-	-	-	-	3	2	3	5	-	-	1	1	2	-	1	-	-
	70年代	30	1	4	2	6	5	4	3	1	1	2	2	5	-	2	2	1	4	1	9	4	1	3	3
	80年代	195	4	8	16	25	6	10	16	2	1	16	9	8	18	17	4	5	121	8	13	9	9	8	5
	90年代	441	3	4	11	27	7	7	23	7	4	52	8	17	15	15	4	12	333	7	10	14	12	14	4
	2000年以降	113	1	2	1	1	1	1	5	-	-	13	1	4	-	1	1	3	93	1	1	1	4	6	-
	無回答	18	-	-	2	2	-	-	2	1	-	3	1	1	2	-	-	1	15	-	-	-	-	1	1
横集計%	全体	100.0	1.4	2.8	4.8	8.6	2.6	3.1	6.0	1.4	0.7	10.6	2.9	4.5	4.7	4.9	1.4	2.7	69.7	2.2	4.3	3.4	3.3	3.9	1.6
	1960年代以前	100.0	11.8	29.4	41.2	52.9	11.8	17.6	-	-	-	-	17.6	11.8	17.6	29.4	-	-	5.9	5.9	11.8	-	5.9	-	-
	70年代	100.0	3.3	13.3	6.7	20.0	16.7	13.3	10.0	3.3	3.3	6.7	6.7	16.7	-	6.7	6.7	3.3	13.3	3.3	30.0	13.3	3.3	10.0	10.0
	80年代	100.0	2.1	4.1	8.2	12.8	3.1	5.1	8.2	1.0	0.5	8.2	4.6	4.1	9.2	8.7	2.1	2.6	62.1	4.1	6.7	4.6	4.6	4.1	2.6
	90年代	100.0	0.7	0.9	2.5	6.1	1.6	1.6	5.2	1.6	0.9	11.8	1.8	3.9	3.4	3.4	0.9	2.7	75.5	1.6	2.3	3.2	2.7	3.2	0.9
	2000年以降	100.0	0.9	1.8	0.9	0.9	0.9	0.9	4.4	-	-	11.5	0.9	3.5	-	0.9	0.9	2.7	82.3	0.9	0.9	0.9	3.5	5.3	-
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	1960年代以前	2.1	18.2	21.7	17.9	12.9	9.5	12.0	-	-	-	-	12.5	5.4	7.9	12.5	-	-	0.2	5.6	5.7	-	3.7	-	-
	70年代	3.7	9.1	17.4	5.1	8.6	23.8	16.0	6.1	9.1	16.7	2.3	8.3	13.5	-	5.0	18.2	4.5	0.7	5.6	25.7	14.3	3.7	9.4	23.1
	80年代	24.0	36.4	34.8	41.0	35.7	28.6	40.0	32.7	18.2	16.7	18.6	37.5	21.6	47.4	42.5	36.4	22.7	21.3	44.4	37.1	32.1	33.3	25.0	38.5
	90年代	54.2	27.3	17.4	28.2	38.6	33.3	28.0	46.9	63.6	66.7	60.5	33.3	45.9	39.5	37.5	36.4	54.5	58.7	38.9	28.6	50.0	44.4	43.8	30.8
	2000年以降	13.9	9.1	8.7	2.6	1.4	4.8	4.0	10.2	-	-	15.1	4.2	10.8	-	2.5	9.1	13.6	16.4	5.6	2.9	3.6	14.8	18.8	-

(5) 複合加速器

問 5 複数の加速器を複合的に（組み合わせ）利用している場合、利用の形態を具体的に記入ください。（回答機関全体への質問）

複数の加速器を複合的に利用している複合型加速器について、回答が記入されていた調査票は 25 件であり、有効回答（「単独使用のみ」等、複合型としてまったく利用していない回答を削除）を整理した結果を次に示す。

- ライナックを単独、または複数直列にして加速を行い、その次にシンクロトロンに入射してさらに加速してとりだすもの。
- 入射器から得られたビームをライナックで加速し、蓄積リングに蓄積しビームを取り出すもの。
- 加速器 1 のビームを用いて材料へのイオン注入を行い、加速器 2 の水素またはヘリウム・ビームを用いて、その試料の RBS(Rutherford Buck Scattering) および PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析をおこなうもの。
- 加速器 1、加速器 2、及び本調査対象外加速器 3 の 400kV イオン注入装置の各ビーム・ラインを一つの照射チェンバーに集中させ、イオン種・エネルギーの異なった 3 種類のビームを同一試料に同時に照射する“トリプル照射”をおこなうもの。
- 加速器 1 は単独で使用する場合もあるが、加速器 2 への入射器としても使用している。従って加速器 2 を使用する際には間欠的にはあるが必ず加速器 1 を使用するもの。
- 加速器 1 を入射器として、加速器 2 で加速した後、そのまま電子蓄積。
加速器 1 を入射器として、加速器 3 で加速した後、そのまま電子蓄積。 加速器 1 を入射器として、加速器 2 で加速し、加速器 3 でさらに加速した後、そのまま電子蓄積するもの。
- 加速器 1+2、 加速器 1+3、 加速器 1+4 と組み合わせる。加速器 1 で電子ビームを発生・加速し、2 から 4 の蓄積リングに入射・蓄積して、シンクロトロン放射（放射光）を発生させ利用するもの。

以上のとおり、複合型加速器は多様な利用方法がなされていることがわかる。なお、複合型加速器の詳細な調査結果に関するまとめは次章に譲ることとする。

(6) 最大ビームエネルギー

問 6 ビームエネルギーは次のうちどれですか。次のうち、あてはまるものを選んでください。(静電型加速器の場合、単位を MeV から MV に読替えてください)
(単数回答、回答機関全体への質問)

加速器全体 (n=814) のうち、「1~10MeV 未満」(403 台 ; 49.5%) 「10~100MeV」(359 台 ; 44.1%) であり、最大ビームエネルギーが 1~100MeV の加速器が全体の約 9 割を占めていることがわかる。

教育機関 (n=39) では、「100~1000MeV(1GeV)未満」(7 台) 「1GeV~以上」(1 台) であり、また研究機関 (n=96) においては「100~1000MeV(1GeV)未満」(13 台) 「1GeV~以上」(11 台) となっており、研究機関では、その他の機関に比べてエネルギーの高い加速器を所有していることがわかる。

教育機関、及び研究機関では、高エネルギーの加速器が必要な物理系の基礎科学の研究を行っている機関が多いことから、本結果は理解できる。

表 1-8 最大ビームエネルギー (実数)

	調査数	10 MeV 未満	100 MeV 未満	1 GeV 未満	1 GeV 以上	その他	無回答
実数							
全体	814	403	359	31	12	3	6
教育機関	39	17	13	7	1	1	-
研究機関	96	44	24	13	11	2	2
医療機関	597	298	292	5	-	-	2
民間企業	74	38	28	6	-	-	2
その他	8	6	2	-	-	-	-

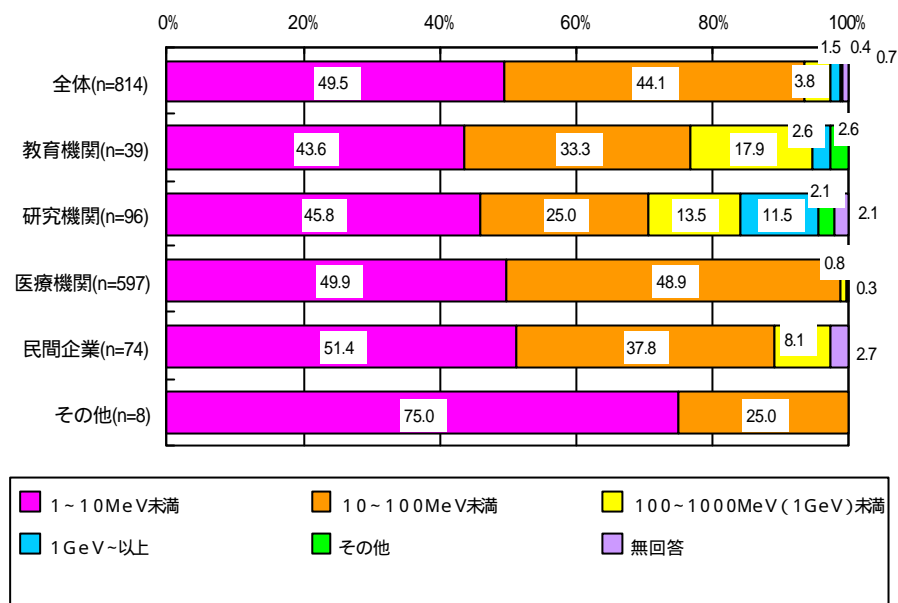


図 1-10 最大ビームエネルギーの機関別比率

最大ビームエネルギーと利用目的の関係をみると(横集計)ビームエネルギーが100MeV未満の加速器では、幅広い分野に満遍なく利用されている。特に、「1～10MeV 未満」の約70%、「1～100MeV 未満」の約75%の加速器が「医療(治療)」に利用されていることがわかる。「100～1000MeV(1GeV)未満」の加速器(n=31)では、該当するエネルギーをもつ加速器の台数は31台と少なくなり、「物質・材料科学」(12台;38.7%)「加速器開発」(12台;38.7%)の分野で多く利用されている。「1GeV～以上」のエネルギーを有する加速器(n=12)は、「加速器開発」(6台;50.0%)が特に多く、また、「原子・分子物理学」(4台;33.3%)、「物質・材料科学」(4台;33.3%)に利用されている。

一方、利用目的ごとにみると(縦集計)「高エネルギー物理学」「原子核物理学」「原子・分子物理学」「加速器開発」「生命科学」の分野では、他の分野に比べて「1GeV～以上」の加速器の割合が高く、各々12%～18%であった。基礎科学の分野では、高ビームエネルギーの加速器が利用されていることがわかる。

表 1-9 最大ビームエネルギー / 利用目的

	調査数	【基礎】 高エネルギー物理学	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フエムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	【応用】 表面解析	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	814	11	23	39	70	21	25	49	11	6	86	24	37	38	40	11	22	567	18	35	28	27	32	13
	1～10MeV未満	403	5	7	12	35	10	12	11	-	-	31	6	15	21	21	5	1	288	1	21	16	-	16	4
	10～100MeV未満	359	3	10	15	16	7	9	17	6	5	46	8	15	7	11	5	21	270	14	14	5	24	8	2
	100～1000MeV(1GeV)未満	31	1	2	6	12	2	3	12	5	1	6	7	5	7	5	-	-	6	2	-	4	2	6	4
	1GeV～以上	12	2	3	4	4	-	1	6	-	-	3	3	1	3	3	1	-	1	1	-	2	1	-	2
	その他	3	-	1	1	-	2	-	3	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
	無回答	6	-	-	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	1	-	-	1
横集計%	全体	100.0	1.4	2.8	4.8	8.6	2.6	3.1	6.0	1.4	0.7	10.6	2.9	4.5	4.7	4.9	1.4	2.7	69.7	2.2	4.3	3.4	3.3	3.9	1.6
	1～10MeV未満	100.0	1.2	1.7	3.0	8.7	2.5	3.0	2.7	-	-	7.7	1.5	3.7	5.2	5.2	1.2	0.2	71.5	0.2	5.2	4.0	-	4.0	1.0
	10～100MeV未満	100.0	0.8	2.8	4.2	4.5	1.9	2.5	4.7	1.7	1.4	12.8	2.2	4.2	1.9	3.1	1.4	5.8	75.2	3.9	3.9	1.4	6.7	2.2	0.6
	100～1000MeV(1GeV)未満	100.0	3.2	6.5	19.4	38.7	6.5	9.7	38.7	16.1	3.2	19.4	22.6	16.1	22.6	16.1	-	-	19.4	6.5	-	12.9	6.5	19.4	12.9
	1GeV～以上	100.0	16.7	25.0	33.3	33.3	-	8.3	50.0	-	-	25.0	25.0	8.3	25.0	25.0	8.3	-	8.3	8.3	-	16.7	8.3	-	16.7
	その他	100.0	-	33.3	33.3	-	66.7	-	100.0	-	-	-	-	33.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66.7	-
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	1～10MeV未満	49.5	45.5	30.4	30.8	50.0	47.6	48.0	22.4	-	-	36.0	25.0	40.5	55.3	52.5	45.5	4.5	50.8	5.6	60.0	57.1	-	50.0	30.8
	10～100MeV未満	44.1	27.3	43.5	38.5	22.9	33.3	36.0	34.7	54.5	83.3	53.5	33.3	40.5	18.4	27.5	45.5	95.5	47.6	77.8	40.0	17.9	88.9	25.0	15.4
	100～1000MeV(1GeV)未満	3.8	9.1	8.7	15.4	17.1	9.5	12.0	24.5	45.5	16.7	7.0	29.2	13.5	18.4	12.5	-	-	1.1	11.1	-	14.3	7.4	18.8	30.8
	1GeV～以上	1.5	18.2	13.0	10.3	5.7	-	4.0	12.2	-	-	3.5	12.5	2.7	7.9	7.5	9.1	-	0.2	5.6	-	7.1	3.7	-	15.4
	その他	0.4	-	4.3	2.6	-	9.5	-	6.1	-	-	-	-	2.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.3	-

最大ビームエネルギーと加速器の形式の関係をみると（横集計）、ビームエネルギーが100MeV未滿の加速器では、約8割の加速器が「ライナック」であった。

ビームエネルギーが「100～1000MeV(1GeV)未滿」では「シンクロトロン」(6台;20.2%)、「1GeV～以上」も同様に「シンクロトロン」(6台;50.0%)であり、高エネルギーでは主に「シンクロトロン」が利用されていることがわかる。

加速器の型式ごとにみると（縦集計）「ライナック」では、「1～10MeV未滿」(326台;51.5%)、「10～100MeV未滿」(296台;46.8%)となっており、国内に設置されている「ライナック」の98.3%(622台)は最大エネルギーが100MeV未滿であることがわかる。また静電型加速器である「ファン・デ・グラーフ加速装置」「コッククロフト・ワルトン加速装置」は、各々「1～10MeV未滿」が約85%、「10～100MeV未滿」が約10%程度となっている。

表 1-10 最大ビームエネルギー / 加速器形式

	調査数	サイクロトロン	シンクロトロン	シンクロサイクロトロン	ライナック	ベータトロン	ファン・デ・グラーフ加速装置	コッククロフト・ワルトン加速装置	変圧器型加速装置	マイクロトロン	プラズマ発生装置	蓄積リング	入射器	その他	
実数	全 体	814	44	14	1	633	1	29	49	5	19	-	11	2	6
	1～10MeV未滿	403	2	-	-	326	-	25	42	5	3	-	-	-	-
	10～100MeV未滿	359	38	2	-	296	1	4	4	-	13	-	1	-	-
	100～1000MeV(1GeV)未滿	31	3	6	-	5	-	-	-	-	3	-	10	2	2
	1GeV～以上	12	1	6	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	その他	3	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	2
無 回 答	6	-	-	-	3	-	-	2	-	-	-	-	-	1	
横集計%	全 体	100.0	5.4	1.7	0.1	77.8	0.1	3.6	6.0	0.6	2.3	-	1.4	0.2	0.7
	1～10MeV未滿	100.0	0.5	-	-	80.9	-	6.2	10.4	1.2	0.7	-	-	-	-
	10～100MeV未滿	100.0	10.6	0.6	-	82.5	0.3	1.1	1.1	-	3.6	-	0.3	-	-
	100～1000MeV(1GeV)未滿	100.0	9.7	19.4	-	16.1	-	-	-	-	9.7	-	32.3	6.5	6.5
	1GeV～以上	100.0	8.3	50.0	8.3	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3
	その他	100.0	-	-	-	-	-	-	33.3	-	-	-	-	-	66.7
縦集計%	全 体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-	100.0	100.0	100.0
	1～10MeV未滿	49.5	4.5	-	-	51.5	-	86.2	85.7	100.0	15.8	-	-	-	-
	10～100MeV未滿	44.1	86.4	14.3	-	46.8	100.0	13.8	8.2	-	68.4	-	9.1	-	-
	100～1000MeV(1GeV)未滿	3.8	6.8	42.9	-	0.8	-	-	-	-	15.8	-	90.9	100.0	33.3
	1GeV～以上	1.5	2.3	42.9	100.0	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	16.7
	その他	0.4	-	-	-	-	-	-	2.0	-	-	-	-	-	33.3

(7) 最大イオン（ビーム）電流

問7 最大イオン（ビーム）電流はいくらですか。
 (単数回答、回答機関全体への質問)

最大イオン（ビーム）電流は、各機関別にみても特に特徴はみられない。医療機関で「無回答」(253台；42.4%)が高いのは、市販の医療用加速器においてビーム電流に関する仕様が未公開である製品が多いことに起因している。また、医療機関からの回答では、回収された医療機関からの調査票のうち、5.7% (34台)においてビーム電流「1A以上」の数値をあげている回答があった。その一部には加速器の電源に求められる仕様から記載されたと思われる回答（例えば、「120A」等）もあったが、ここでは回答者によって記載された回答をそのまま活かすこととし、「1A以上」に集計した。

表 1-11 最大イオン（ビーム）電流

	調査数	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	10 μA 未満	無回答
実数	全体	814	30	105	118	21	106	107	43	284
	教育機関	39	9	9	4	5	3	6	2	1
	研究機関	96	17	22	22	7	8	11	4	5
	医療機関	597	1	65	83	4	83	74	34	253
	民間企業	74	3	6	7	4	12	16	3	23
	その他	8	-	3	2	1	-	-	-	2

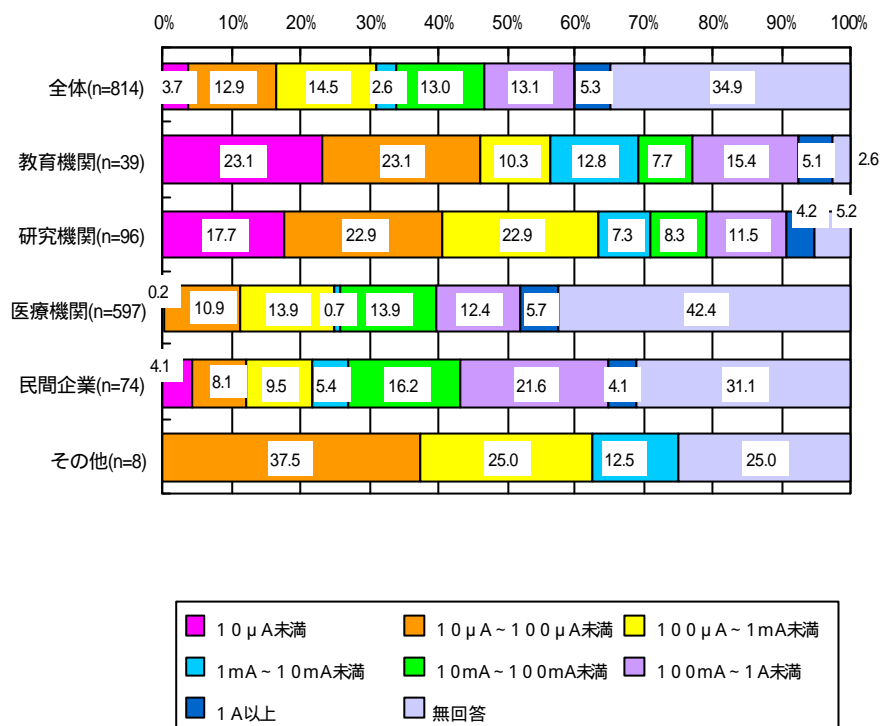


図 1-11 機関別の最大イオン（ビーム）電流の比率

(8) 加速粒子

問 8 加速粒子の種類、二次粒子はどれですか。次のうち、あてはまるものを選んでください。(複数回答、回答機関全体への質問)

加速器全体では横集計をみると、「電子（線）」(640台;78.6%)「X線」(609台;74.8%)となっており、加速器の約8割が医療機関によって所有されているという現状にも本結果は符合している。

横集計の結果から、教育機関(n=39)では、「電子（線）」(18台;46.2%)と「X線」(13台;33.3%)に加えて、「陽子」(13台;33.3%)「重陽子」(11台;28.2%)「イオン」(11台;28.2%)が高くなっている。研究機関(n=96)については、「陽子」(38台;39.6%)「電子（線）」(36台;37.5%)「イオン」(33台;34.4%)が高くなり、「重陽子」(28台;29.2%)「ヘリウム4」(28台;29.2%)が高くなっている。医療機関(n=525)では、照射治療に利用される「電子（線）」(525台;87.9%)「X線」(530台;88.8%)が著しく高くなっている。民間企業(n=74)においても医療機関とほぼ同様に「電子（線）」(58台;78.4%)「X線」(52台;70.3%)が高くなっている。

加速粒子ごとにみると、「電子（線）」、「中性子」、「X線」等、医療や産業などに多く利用されている加速粒子を除くと、陽子、重陽子、ヘリウム3・4、イオン等を加速可能な加速器は、「研究機関」の比率がそれぞれ約4割～7割程度となっており、「研究機関」に設置されている加速器は96台と全体の1割程度にもかかわらず、各々の加速器は種々の粒子の加速に対応できることがわかる。

また、「その他」としてC60などのフラレンを加速できると回答した機関もあった。

表 1-12 加速粒子の種類

	調査数	電子（一次粒子）	陽電子	陽子	重陽子	ヘリウム3	ヘリウム4	イオン	その他	中性子	X線	ニュートリノ	イオン	その他	無回答
実数															
全体	814	640	9	90	59	29	41	55	5	56	609	-	5	19	9
教育機関	39	18	-	13	11	6	10	11	1	9	13	-	-	3	-
研究機関	96	36	6	38	28	17	28	33	2	15	9	-	5	9	2
医療機関	597	525	2	28	16	1	-	6	-	27	530	-	-	6	5
民間企業	74	58	1	10	3	5	3	2	1	5	52	-	-	1	2
その他	8	3	-	1	1	-	-	3	1	-	5	-	-	-	-
横集計%															
全体	100.0	78.6	1.1	11.1	7.2	3.6	5.0	6.8	0.6	6.9	74.8	-	0.6	2.3	1.1
教育機関	100.0	46.2	-	33.3	28.2	15.4	25.6	28.2	2.6	23.1	33.3	-	-	7.7	-
研究機関	100.0	37.5	6.3	39.6	29.2	17.7	29.2	34.4	2.1	15.6	9.4	-	5.2	9.4	2.1
医療機関	100.0	87.9	0.3	4.7	2.7	0.2	-	1.0	-	4.5	88.8	-	-	1.0	0.8
民間企業	100.0	78.4	1.4	13.5	4.1	6.8	4.1	2.7	1.4	6.8	70.3	-	-	1.4	2.7
その他	100.0	37.5	-	12.5	12.5	-	-	37.5	12.5	-	62.5	-	-	-	-
縦集計%															
全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-	100.0	100.0	100.0
教育機関	4.8	2.8	-	14.4	18.6	20.7	24.4	20.0	20.0	16.1	2.1	-	-	15.8	-
研究機関	11.8	5.6	66.7	42.2	47.5	58.6	68.3	60.0	40.0	26.8	1.5	-	100.0	47.4	22.2
医療機関	73.3	82.0	22.2	31.1	27.1	3.4	-	10.9	-	48.2	87.0	-	-	31.6	55.6
民間企業	9.1	9.1	11.1	11.1	5.1	17.2	7.3	3.6	20.0	8.9	8.5	-	-	5.3	22.2
その他	1.0	0.5	-	1.1	1.7	-	-	5.5	20.0	-	0.8	-	-	-	-

加速するイオンの内訳をみると（横集計）、イオンを加速できると答えた全55台のうち、全体の約7割で「C」（38台；69.1%）があげられている。また、それ以外のイオンも多数あげられている。研究機関（n=33）では、「C～Au」、「Li～Bi」、「H～Bi（Ne、Ar、Kr、Xeを除く）」、「水素からウラン」、「ほとんど全ての安定同位体」等の回答があげられ、多くのイオンを加速できる加速器仕様となっていることがわかる。医療機関（n=6）では、重イオンの照射治療を目的とした加速器であり「C」（5台；83.3%）となっている。医療機関における重イオン照射治療のためには、特に炭素イオンが利用されていることがわかる。

加速するイオンごとにみると（縦集計）、全てのイオン種で「研究機関」の比率がそれぞれ約6割～8割程度となっており、「研究機関」に設置されている加速器は種々のイオンを加速できることがわかる。

表 1-13 加速粒子（イオン）の種類

		調 査 数	C	O	N	S i	F i	A r	N i	N e	P g	S	C l	そ の 他	無 回 答
実 数	全 体	55	38	29	25	23	21	20	20	19	19	19	19	41	3
	教育機関	11	7	6	2	3	2	1	2	1	1	2	2	7	1
	研究機関	33	24	20	20	18	16	17	16	16	16	15	15	28	2
	医療機関	6	5	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-
	民間企業	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
	その他	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	-
横 集 計 %	全 体	100.0	69.1	52.7	45.5	41.8	38.2	36.4	36.4	34.5	34.5	34.5	34.5	74.5	5.5
	教育機関	100.0	63.6	54.5	18.2	27.3	18.2	9.1	18.2	9.1	9.1	18.2	18.2	63.6	9.1
	研究機関	100.0	72.7	60.6	60.6	54.5	48.5	51.5	48.5	48.5	48.5	45.5	45.5	84.8	6.1
	医療機関	100.0	83.3	16.7	16.7	-	16.7	-	-	-	-	-	-	16.7	-
	民間企業	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-
	その他	100.0	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	100.0	-
縦 集 計 %	全 体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	教育機関	20.0	18.4	20.7	8.0	13.0	9.5	5.0	10.0	5.3	5.3	10.5	10.5	17.1	33.3
	研究機関	60.0	63.2	69.0	80.0	78.3	76.2	85.0	80.0	84.2	84.2	78.9	78.9	68.3	66.7
	医療機関	10.9	13.2	3.4	4.0	-	4.8	-	-	-	-	-	-	2.4	-
	民間企業	3.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.9	-
	その他	5.5	5.3	6.9	8.0	8.7	9.5	10.0	10.0	10.5	10.5	10.5	10.5	7.3	-

(9) 稼動状況

問 9 加速器の稼動状況についてうかがいます。次のうち、最もあてはまるものを1つ選んでください。(単数回答、回答機関全体への質問)

全加速器 (n=814) の約 9 割が「よく使われている」(733 台 ; 90.0%) であり、我が国における加速器の稼動状況はかなり活発であることがわかる。

機関別の稼動状況の比率をみると、特に医療機関 (n=597) では、すでに日常的な治療で利用しており、「よく使われている」(574 台 ; 96.1%) が極めて高くなっている。医療機関に比べて教育機関では母数は少なくなるものの (n=39) 「あまり使われていない」(6 台 ; 15.4%)、研究機関 (n=96) においては「あまり使われていない」(5 台 ; 5.2%) となっており、教育及び研究機関の一部の加速器では、稼動状況が低下している加速器の存在がうかがえる。

表 1-14 稼動状況

		調 査 数	よ く 使 わ れ て い る	と き ど き 使 わ れ て い る	い あ ま り 使 わ れ て い な い	無 回 答
実 数	全 体	814	733	47	23	11
	教育機関	39	29	4	6	-
	研究機関	96	72	18	5	1
	医療機関	597	574	9	7	7
	民間企業	74	53	14	4	3
	その他	8	5	2	1	-

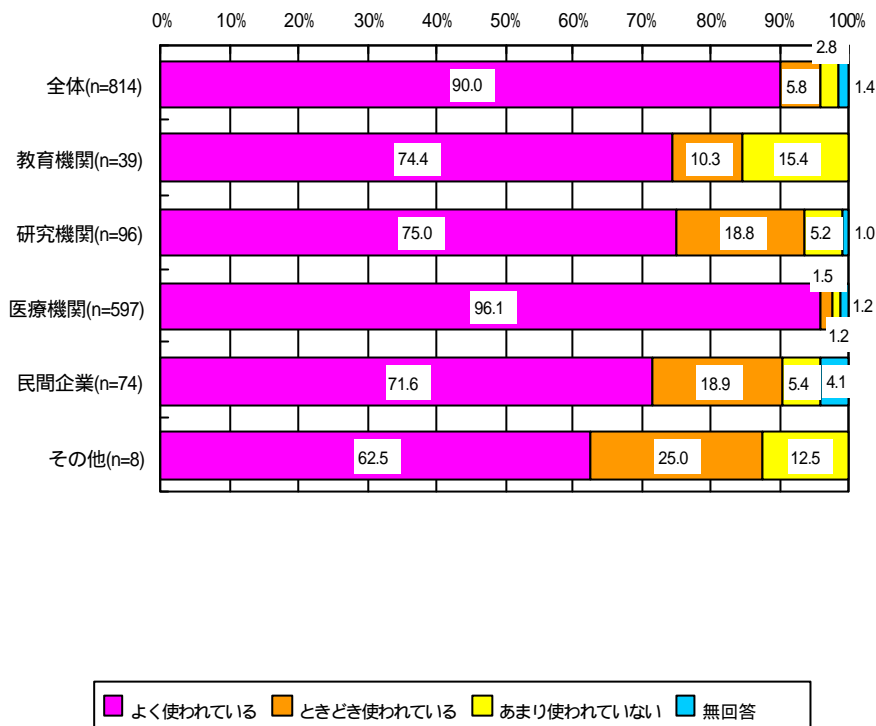


図 1-12 機関別の稼働状況の比率

稼働状況と加速器の設置年月の関係をみると（横集計）1960年代以前に設置された加速器は、母数は少ないものの（n=17）「ときどき使われている」（4台；23.5%）、「あまり使われていない」（6台；35.3%）となっており、加速器の老朽化によって稼働状況が低下している側面のあることがわかる。問4 加速器の設置年月に関する回答から、教育機関における加速器（n=39）の17.9%（7台）が「1960年代以前」に設置されていることから、教育機関における加速器の老朽化に伴い、稼働状況が低下していることが想定される。

稼働状況ごとにみると（縦集計）「よく使われている」（n=733）加速器は、「90年代」（409台；55.8%）および「2000年以降」（108台；14.7%）に設置されたものが517台（70.5%）となっており、設置年月が新しい加速器の稼働状況が高いことがわかる。一方で、各々母数は少ないものの「ときどき使われている」（n=47）、「あまり使われていない」（n=23）加速器のうち、「90年代」および「2000年以降」に設置された加速器がそれぞれ3割～4割程度を占めており、加速器の一部で設置年月が比較的新しいにもかかわらず、稼働状況が活発でないか、むしろあまり稼働していない状況にあることがわかる。

表 1-15 稼働状況 / 設置年月

		調 査 数	よ く 使 わ れ て い る	と き ど き 使 わ れ て い る	あ ま り 使 わ れ て い な い	無 回 答
実 数	全 体	814	733	47	23	11
	1960年代以前	17	7	4	6	-
	70年代	30	24	4	1	1
	80年代	195	170	18	6	1
	90年代	441	409	16	10	6
	2000年以降	113	108	5	-	-
	無 回 答	18	15	-	-	3
横 集 計 %	全 体	100.0	90.0	5.8	2.8	1.4
	1960年代以前	100.0	41.2	23.5	35.3	-
	70年代	100.0	80.0	13.3	3.3	3.3
	80年代	100.0	87.2	9.2	3.1	0.5
	90年代	100.0	92.7	3.6	2.3	1.4
	2000年以降	100.0	95.6	4.4	-	-
縦 集 計 %	全 体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	1960年代以前	2.1	1.0	8.5	26.1	-
	70年代	3.7	3.3	8.5	4.3	9.1
	80年代	24.0	23.2	38.3	26.1	9.1
	90年代	54.2	55.8	34.0	43.5	54.5
	2000年以降	13.9	14.7	10.6	-	-

稼働状況と利用目的の関係を利用目的ごとにみると(縦集計)、「非破壊検査」を除くすべての利用目的の分野で、各々「よく使われている」加速器は70%~100%となっており、それぞれの利用分野における加速器は活発に利用されていることがわかる。(「非破壊検査」についても、「よく使われている」「ときどき使われている」を足し合わせると約85%である)

「高エネルギー物理学」(n=11)および「自由電子レーザー」(n=11)では、他の利用目的の比べて「あまり使われていない」加速器がそれぞれ2台(18.2%)と、若干高くなっている。なかでも「高エネルギー物理学」の分野では、問4における加速器の設置年月と利用目的の集計結果から、「高エネルギー物理学」(n=11)では「1960年代以前」に設置された加速器が2台(18.2%)あり、「高エネルギー物理学」分野における一部の加速器の老朽化と関係すると考えられる。

「教育・訓練」(n=37)は加速器の利用・開発を推進する人材育成の面で重要な項目であるが、「よく使われている」(29台;78.4%)、「ときどき使われている」(6台;16.2%)となっており、「教育・訓練」を目的とした加速器開発・利用も活発に行われていることがわかる。

表 1-16 稼働状況 / 利用目的

	調査数	【基礎】 高エネルギー物理学	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フェムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	【応用】 表面解析	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	814	11	23	39	70	21	25	49	11	6	86	24	37	38	40	11	22	567	18	35	28	27	32	13
	よく使われている	733	8	17	34	61	17	22	41	9	6	85	21	29	33	33	11	21	546	18	17	23	25	26	12
	ときどき使われている	47	1	3	2	6	1	2	7	-	-	1	2	6	5	7	-	1	7	-	15	2	2	6	-
	あまり使われていない	23	2	3	3	1	3	1	1	2	-	-	1	2	-	-	-	-	7	-	2	3	-	-	-
	無回答	11	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	1	-	-	-	1
横集計%	全体	100.0	1.4	2.8	4.8	8.6	2.6	3.1	6.0	1.4	0.7	10.6	2.9	4.5	4.7	4.9	1.4	2.7	69.7	2.2	4.3	3.4	3.3	3.9	1.6
	よく使われている	100.0	1.1	2.3	4.6	8.3	2.3	3.0	5.6	1.2	0.8	11.6	2.9	4.0	4.5	4.5	1.5	2.9	74.5	2.5	2.3	3.1	3.4	3.5	1.6
	ときどき使われている	100.0	2.1	6.4	4.3	12.8	2.1	4.3	14.9	-	-	2.1	4.3	12.8	10.6	14.9	-	2.1	14.9	-	31.9	4.3	4.3	12.8	-
	あまり使われていない	100.0	8.7	13.0	13.0	4.3	13.0	4.3	4.3	8.7	-	-	4.3	8.7	-	-	-	-	30.4	-	8.7	13.0	-	-	-
	無回答	100.0	-	-	-	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63.6	-	9.1	-	-	-	9.1
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	よく使われている	90.0	72.7	73.9	87.2	87.1	81.0	88.0	83.7	81.8	100.0	98.8	87.5	78.4	86.8	82.5	100.0	95.5	96.3	100.0	48.6	82.1	92.6	81.3	92.3
	ときどき使われている	5.8	9.1	13.0	5.1	8.6	4.8	8.0	14.3	-	-	1.2	8.3	16.2	13.2	17.5	-	4.5	1.2	-	42.9	7.1	7.4	18.8	-
	あまり使われていない	2.8	18.2	13.0	7.7	1.4	14.3	4.0	2.0	18.2	-	-	4.2	5.4	-	-	-	-	1.2	-	5.7	10.7	-	-	-
	無回答	1.4	-	-	-	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-	2.9	-	-	-	7.7

(10) 共同利用

問 10 所有している加速器（施設）は、共同利用を目的としているものですか。次のうち、あてはまるものを選んでください。（単数回答、教育機関・研究機関等への質問）

本問は加速器を設置している機関のうち、教育機関および研究機関、医療機関のうち研究に主として利用している機関、民間企業のうち研究に利用している機関、またはそれ以外の属性に区分される機関に回答を求めている¹。

全体（n=210）のうち、約 4 割の加速器が「施設を管理している部門に属す研究者・利用者のみが利用している」（90 台；42.9%）となっている。また、「機関・組織内部（学内も含む）と共同利用している」（33 台；15.7%）、「機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している」（69 台；32.9%）が併せて 5 割程度であり、約半数の加速器で自らの研究チーム以外の内部・外部の機関と共同利用を行っている。

機関別にみると、特に、教育機関（n=39）では約 8 割（30 台）の機関で自らの研究チーム以外の内部・外部の機関と共同利用を行っており、外部との共同利用が活発に行われていることがわかる。

教育機関（n=39）のうち 41.0%（16 台）および研究機関（n=96）の 43.8%（42 台）で「機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している」となっており、それぞれ活発に海外も含む外部の機関・組織との共同利用を行っていることがわかる。

教育機関および研究機関は、国関連機関（国立大学、特殊法人、独立行政法人等）が多く、これらの機関では積極的に共同利用を推進していることがうかがえる。

医療機関（n=46）では、「施設を管理している部門に属す研究者・利用者のみが利用している」（35 台；76.1%）となっている。また、「機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している」（0.0%）となっており、医療機関の所有する加速器は、外部機関との共同利用には供せられていないことがわかる。

¹ このため(1)から(9)までの設問への回答に比べ、母数が少なくなっていることに注意。

表 1-17 機関別の共用利用の有無

		調 査 数	みに施設 が属す 利用し て研究 者・利 用者の 部門	る含機 む関・ と組 織内 部(学 内も 含む)	る含機 む関・ と組 織外 部(海 外も 含む)	無 回 答
実 数	全 体	210	90	33	69	18
	教育機関	39	8	14	16	1
	研究機関	96	30	10	42	14
	医療機関	46	35	8	-	3
	民間企業	21	15	1	5	-
	その他	8	2	-	6	-

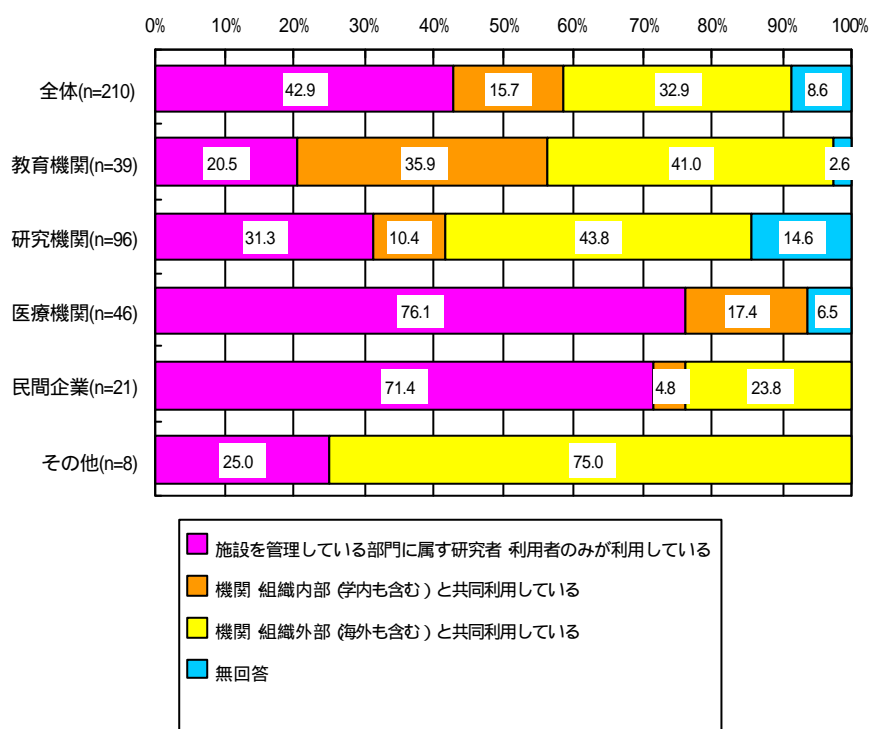


図 1-13 機関別の共用利用の有無の比率

共同利用と利用目的の関係を利用目的ごとにもみると(縦集計)、「医療(治療)」(n=46)のうち、「施設を管理している部門に属す研究者・利用者のみが利用している」が71.7%(33台)であり、「医療(治療)」に利用されている加速器は、加速器を所有している部門以外との共同利用に供するというよりはむしろ、自らの部門で放射線治療に利用していること

がうかがえる。

一方、「医療（治療）」以外の利用分野では、各々の利用目的ごとに「機関・組織内部（学内も含む）と共同利用している」が約 10～30%程度、「機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している」が約 30～80%となっており、多くの利用分野では、加速器を所有している部門のみならず、他の部門、または外部との共同利用が極めて活発に行われていることがわかる。

表 1-18 共用利用 / 利用目的

	調査数	【基礎】 高エネルギー物理学	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フエムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	【応用】 表面解析	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	210	10	23	39	67	21	22	45	11	6	36	24	32	38	40	11	9	46	13	12	20	16	21	10
	施設を管理している部門に属す研究者・利用者	90	4	5	8	7	6	2	13	2	1	12	1	7	9	9	2	1	33	5	6	10	6	11	-
	機関・組織内部（学内も含む）と共同利用している	33	1	5	8	16	1	3	5	1	1	8	3	5	7	11	3	4	7	-	2	-	3	1	3
	機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している	69	5	13	20	41	14	17	23	6	4	13	18	18	20	20	6	3	2	8	4	10	7	9	-
	無回答	18	-	-	3	3	-	-	4	2	-	3	2	2	2	-	-	1	4	-	-	-	-	-	7
横集計%	全体	100.0	4.8	11.0	18.6	31.9	10.0	10.5	21.4	5.2	2.9	17.1	11.4	15.2	18.1	19.0	5.2	4.3	21.9	6.2	5.7	9.5	7.6	10.0	4.8
	施設を管理している部門に属す研究者・利用者	100.0	4.4	5.6	8.9	7.8	6.7	2.2	14.4	2.2	1.1	13.3	1.1	7.8	10.0	10.0	2.2	1.1	36.7	5.6	6.7	11.1	6.7	12.2	-
	機関・組織内部（学内も含む）と共同利用している	100.0	3.0	15.2	24.2	48.5	3.0	9.1	15.2	3.0	3.0	24.2	9.1	15.2	21.2	33.3	9.1	12.1	21.2	-	6.1	-	9.1	3.0	9.1
	機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している	100.0	7.2	18.8	29.0	59.4	20.3	24.6	33.3	8.7	5.8	18.8	26.1	26.1	29.0	29.0	8.7	4.3	2.9	11.6	5.8	14.5	10.1	13.0	-
	無回答	100.0	-	-	16.7	16.7	-	-	22.2	11.1	-	16.7	11.1	11.1	11.1	-	-	5.6	22.2	-	-	-	-	-	-
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	施設を管理している部門に属す研究者・利用者	42.9	40.0	21.7	20.5	10.4	28.6	9.1	28.9	18.2	16.7	33.3	4.2	21.9	23.7	22.5	18.2	11.1	71.7	38.5	50.0	50.0	37.5	52.4	-
	機関・組織内部（学内も含む）と共同利用している	15.7	10.0	21.7	20.5	23.9	4.8	13.6	11.1	9.1	16.7	22.2	12.5	15.6	18.4	27.5	27.3	44.4	15.2	-	16.7	-	18.8	4.8	30.0
	機関・組織外部（海外も含む）と共同利用している	32.9	50.0	56.5	51.3	61.2	66.7	77.3	51.1	54.5	66.7	36.1	75.0	56.3	52.6	50.0	54.5	33.3	4.3	61.5	33.3	50.0	43.8	42.9	-
	無回答	8.6	-	-	7.7	4.5	-	-	8.9	18.2	-	8.3	8.3	6.3	5.3	-	-	11.1	8.7	-	-	-	-	-	-

(11) 共同利用率

付問 10-1 (問 10 で「2」、「3」を選んだ方にうかがいます)自らの研究部門・チーム、及び共同利用・共同研究を実施した相手方機関・組織の利用比率はどのくらいですか。(全体を 100%としておおよその数字をご記入ください)

注： 問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」

問 10 の 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」

(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」、および 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 101 台 (n=101) となった。

共同利用の比率として、自らの部門の利用比率を機関別にみると、どの機関属性においても、「60%~80%未満」と「80%~100%未満」の比率を足し合わせる 5 割程度となっており、共同利用を実施している機関においても 6 割以上は自らの部門で加速器を利用していることがわかる。

表 1-19 自らの研究機関の利用比率

		調 査 数	0 %	1 } 2 0 % 未 満	2 0 } 4 0 % 未 満	4 0 } 6 0 % 未 満	6 0 } 8 0 % 未 満	8 0 } 1 0 0 % 未 満	1 0 0 %
実 数	全 体	102	15	5	18	17	19	28	-
	教育機関	30	5	-	7	3	6	9	-
	研究機関	52	6	2	10	11	10	13	-
	医療機関	8	2	-	1	-	1	4	-
	民間企業	6	-	-	-	3	2	1	-
	その他	6	2	3	-	-	-	1	-

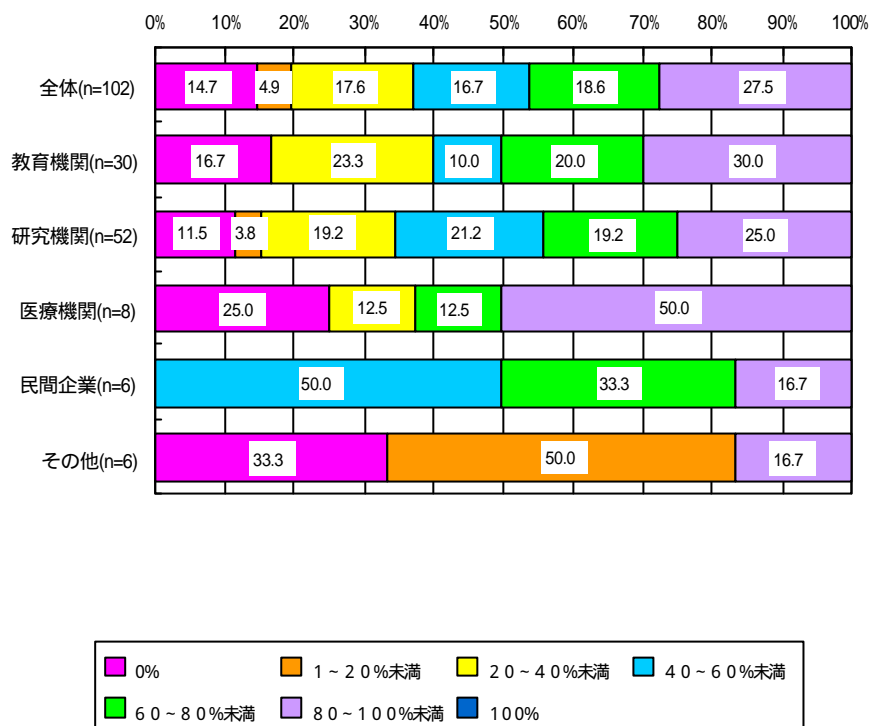


図 1-14 機関別の自らの研究機関の利用比率

(12) 海外機関・組織との共同利用

付問 10-2 (問 10 で「2」, 「3」を選んだ方にうかがいます) 共同利用・共同研究が海外の機関・組織と実施されている割合はどのくらいですか。次のうち、あてはまるものを選んでください。

注： 問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」
 問 10 の 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」
 (単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問においても、付問 10-1 と同様に、問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」、および 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 102 台 (n=102) となっている。

全 102 台 (n=102) でのうち、共同利用の比率として海外の機関・組織の比率をみると、「0」(52 台 ; 51.0%)、「1~20%未満」(40 台 ; 39.2%) となっている。

機関別にみると、教育機関 (n=30) では 4 割で「0」(12 台 ; 40.0%) であり、「1~20%

未満」(15台; 50.0%)となっている。研究機関(n=52)では5割が「0」(26台; 50.0%)、「1~20%未満」が(23台; 44.2%)となっている。わずか1台ではあるが「20~40%未満」(1.9%)もあり、教育機関および研究機関では海外との共同利用比率が高い加速器があることがわかる。なお、民間企業では海外との共同利用実績があるとの回答はなかった。

表 1-20 海外機関・組織との共同利用

実数		調査数	0%	1~20%未満	20~40%未満	40~60%未満	60~80%未満	80%以上	無回答
	全体	102	52	40	1	-	-	1	8
	教育機関	30	12	15	-	-	-	-	3
	研究機関	52	26	23	1	-	-	-	2
	医療機関	8	4	1	-	-	-	-	3
	民間企業	6	6	-	-	-	-	-	-
	その他	6	4	1	-	-	-	1	-

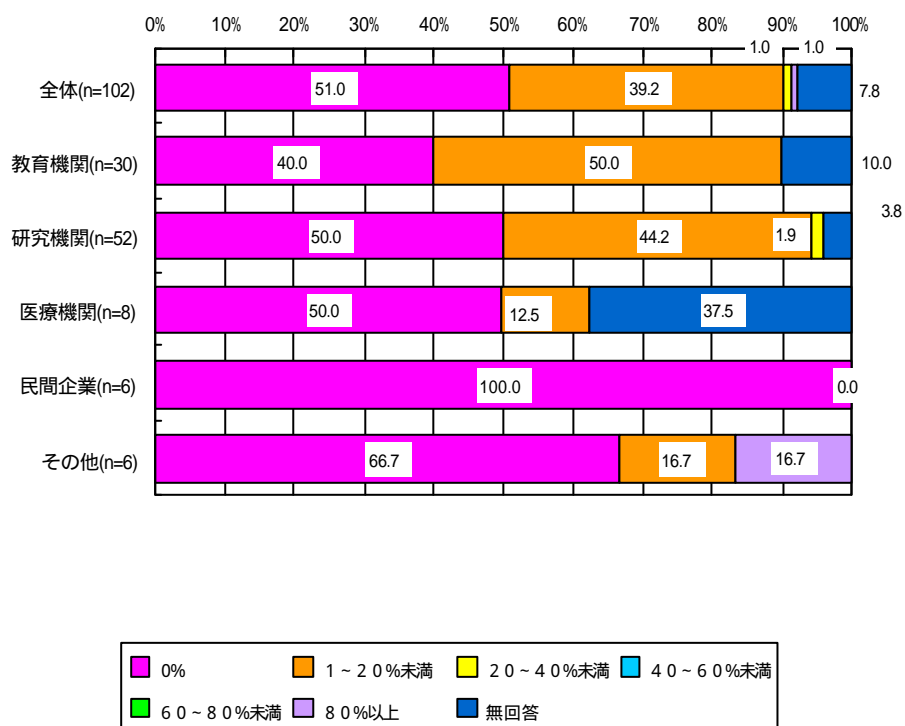


図 1-15 機関別の海外機関・組織との共同利用の比率

(13) 共同利用の費用助成の有無

付問 10-3 (問 10 で「2」,「3」を選んだ方にうかがいます)共同利用・共同研究を実施するにあたり、必要な費用を助成する制度を有していますか。次のうち、あてはまるものを選んでください。

注： 問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」

問 10 の 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」

(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問においても、付問 10-1 と同様に、問 10 の 2「機関・組織内部(学内も含む)と共同利用している」、および 3「機関・組織外部(海外も含む)と共同利用している」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 102 台(n=102)となっている。

本問は共同利用を行う研究者等に必要な費用の一部を助成し、共同利用を促進する制度を有しているかを尋ねた設問である。

共同利用の費用助成については、全体(n=102)のうち「ある」(25台;24.5%)、「ない」(69台;67.6%)であり、約2割の機関で共同利用の費用を助成する制度を有している。機関別にみれば、特に研究機関(n=52)では費用の助成制度を約4割(20台;38.5%)の機関で有していることがわかる。なお、民間企業では費用の助成制度を有している組織はなかった。

表 1-21 共同利用の費用助成の有無

		調 査 数	あ る	な し	無 回 答
実 数	全 体	102	25	69	8
	教育機関	30	2	25	3
	研究機関	52	20	31	1
	医療機関	8	-	6	2
	民間企業	6	-	6	-
	その他	6	3	1	2

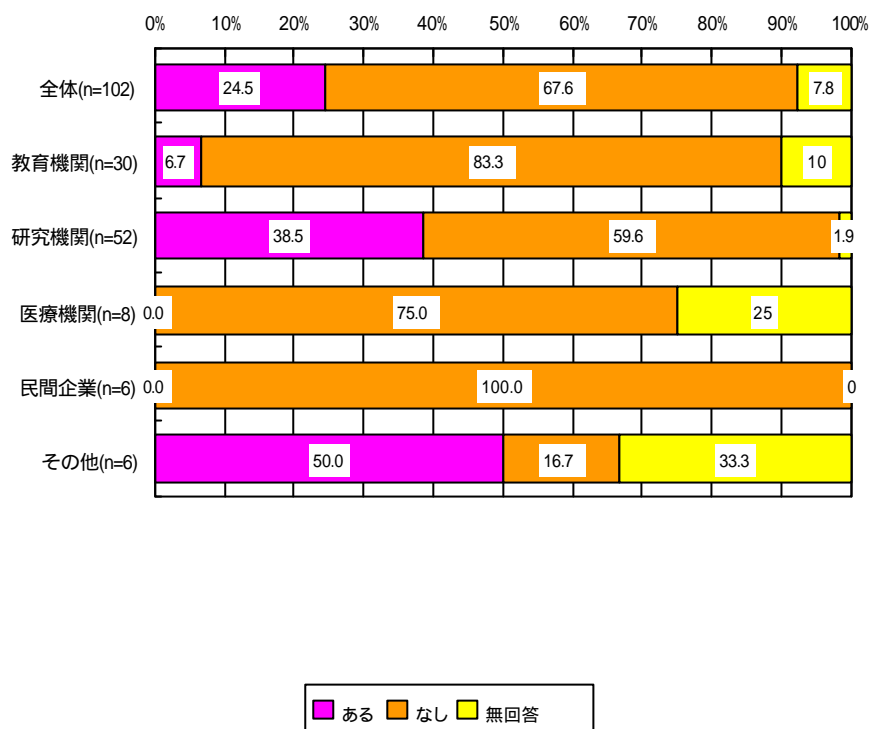


図 1-16 機関別の共同利用の費用助成の有無の比率

(14) 利用料金徴収形態の有無

問 11 加速器を外部の研究者等に利用料金を徴収して使用させる制度・仕組みはありますか。次のうち、あてはまるものを選んでください。(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は加速器を設置している機関のうち、教育機関および研究機関、医療機関のうち研究に主として利用している機関、民間企業のうち研究に利用している機関、またはそれ以外の属性に区分される機関に回答を求めている。このため、本問の母数は 210 (n=210) となった。

利用料金徴収形態については「利用料金の設定がある」(38 台 ; 18.1%)、「利用料金の設定はない」(154 台 ; 73.3%) であり、約 2 割の機関で利用料金徴収形態を有している。

機関別にみれば、教育機関、研究機関、医療機関のそれぞれ約 7 割から 8 割では「利用料金の設定はない」ことがわかった。

一方、サンプル数は少ないものの民間企業 (n=21) の約 3 割で「利用料金の設定がある」(7 台 ; 33.3%) ことがわかる。加速器を所有する民間企業の中には、PIXE 分析や炭素 14 年代測定等を受託する企業があり、加速器を利用した受託業務の料金体系として、利用料金徴収形態が明確になっていると考えられる。

表 1-22 機関別の利用料金徴収形態の有無

		調 査 数	利 用 料 金 の 設 定 が あ る	利 用 料 金 の 設 定 は な い	無 回 答
実 数	全 体	210	38	154	18
	教育機関	39	8	31	-
	研究機関	96	19	74	3
	医療機関	46	-	33	13
	民間企業	21	7	12	2
	その他	8	4	4	-

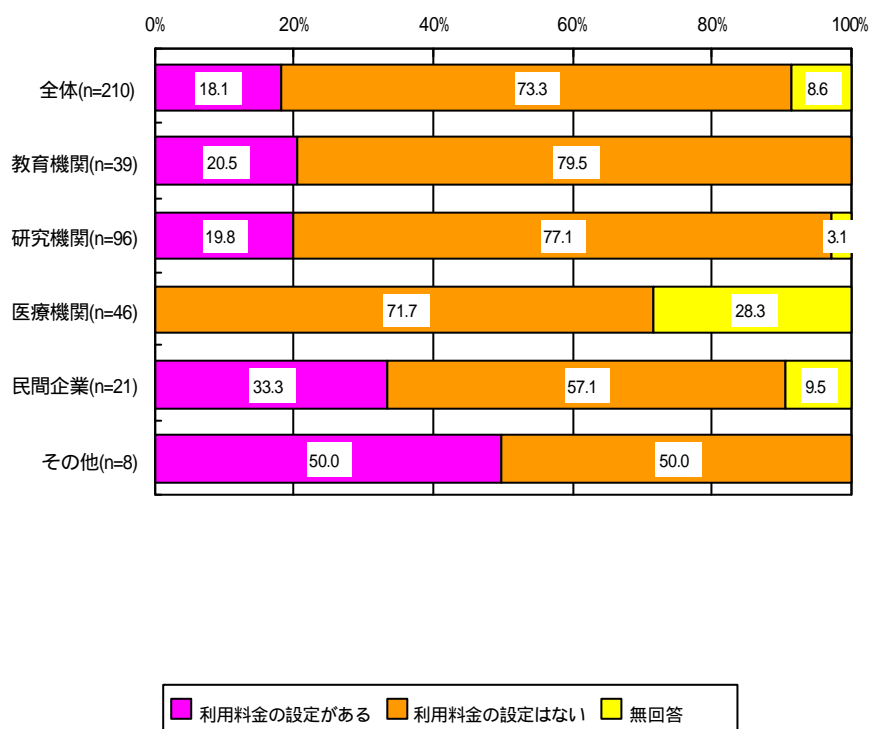


図 1-17 機関別の利用料金徴収形態の有無の比率

(15) 利用料金の概略

付問 11-1 (問 11 で「1」に 印をつけた方にうかがいます) 利用料金設定の概略を具体的に記述してください。

注：問 11 の 1「利用料金の設定がある」

(複数回答、教育機関・教育機関等への質問)

利用料金の概略について、回答が記入されていた調査票は 37 件であり、有効回答(具体的に記述してある回答のみを抽出)を整理した結果を次に示す。

- 22 万円/時間(共同利用、装置共用の場合)。但し研究成果が公開される課題は免除。
- 外部試料を受託測定という形で受け入れる。1 試料当たり約 20,000 円である。
- 利用料金を固定費+マシンタイム比例費にわけて課している。
- 学外者の利用は 15,000 円/時間。年間契約の場合は 1,800 万円/ビーム・ライン。学内利用は 6,000 円/時間。
- 保守料、運用料、建物費、減価償却費等を加算し、ポート数で割った額を基本に設定している。
- 1 試料 1 分析あたり 35,000 ~ 79,000 円。
- 1 照射条件につき T_m : 照射時間(分)として $34,440 \text{ 円} + 1,000 \text{ 円} \times T_m$ 。また、別の加速器では $28,800 \text{ 円} + 500 \text{ 円} \times T_m$ 。
- 年代測定試料 1 件につき通常は 80,000 円(化学処理費を含む)。
- 大学等、教育・研究機関は無料。民間企業等の利用は 23,200 円/時間。
- 1 日当りの定額。但し、サイクロトロン、合成装置、ポジトロン断層撮影装置、R I 実験室、動物管理室等を包括した使用料であり、サイクロトロンのみの単独料金はない。
- 装置の利用料金 770,000 円/日(別の装置では 660,000 円/日もある)。別に実験者の入場に伴う共通料金 20,000 円/人・日などが付加される。
- 34,680 円/時間の装置、76,890 円/時の装置で利用料金を設定している。
- 料金設定はあるが、自らの研究部門との共同研究や学内他部局による利用がほとんどであり、物品整備の負担で代用しているのが実情である。
- 料金時間単価あり。但し民間出資者・寄付者、大学・国立試験研究機関向けには一般料金から 10%から 30%を割り引いた額を設定している。
- RSB、チャネリング分析について受託分析の制度を発足させた(数万円/1 試料)。
- 分析サンプル毎、又は加速器使用時間毎の料金を設定。料金は消耗品費及び光熱水量を基準に算出。
- 加速器 : 550,000 円/日、350,000 円/半日、加速器 : 600,000 円/日、

400,000 円 / 半日

- 日単価 300,000 円、50,000 円、時間単価 20,000 円など

以上のとおり、加速器の種別、利用時間、利用形態等に応じてさまざまな利用料金体系が設定されていることがわかる。

(16) 更新・改良の必要性

問 12 加速器の更新・改良の必要性がありますか。

(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は加速器を設置している機関のうち、教育機関および研究機関、医療機関のうち研究に主として利用している機関、民間企業のうち研究に利用している機関、またはそれ以外の属性に区分される機関に回答を求めている。このため、本問の母数は 210 台 (n=210) となった。

更新・改良の必要性については、全体のうち (n=210) 「当面更新する必要はない」(107 台; 51.0%) となっている。機関別にみると、教育機関 (n=39) で「早急 (1 年以内) に更新する必要がある」(8 台; 20.5%)、研究機関 (n=96) で「早急 (1 年以内) に更新する必要がある」(21 台; 21.9%) となっている。また、それぞれの機関において「数年以内に更新する必要がある」も含めれば、両機関で所有される加速器の約 6 割が 1 年から数年以内に更新・改良の必要性を有していることがわかった。

表 1-23 更新・改良の必要性

		調 査 数	早 急 す る 必 要 が あ る に	必 要 が あ る 年 内 に 更 新 す る	な 当 面 更 新 す る 必 要 は な い	無 回 答
実 数	全 体	210	35	64	107	4
	教育機関	39	8	16	15	-
	研究機関	96	21	34	37	4
	医療機関	46	4	11	31	-
	民間企業	21	2	3	16	-
	その他	8	-	-	8	-

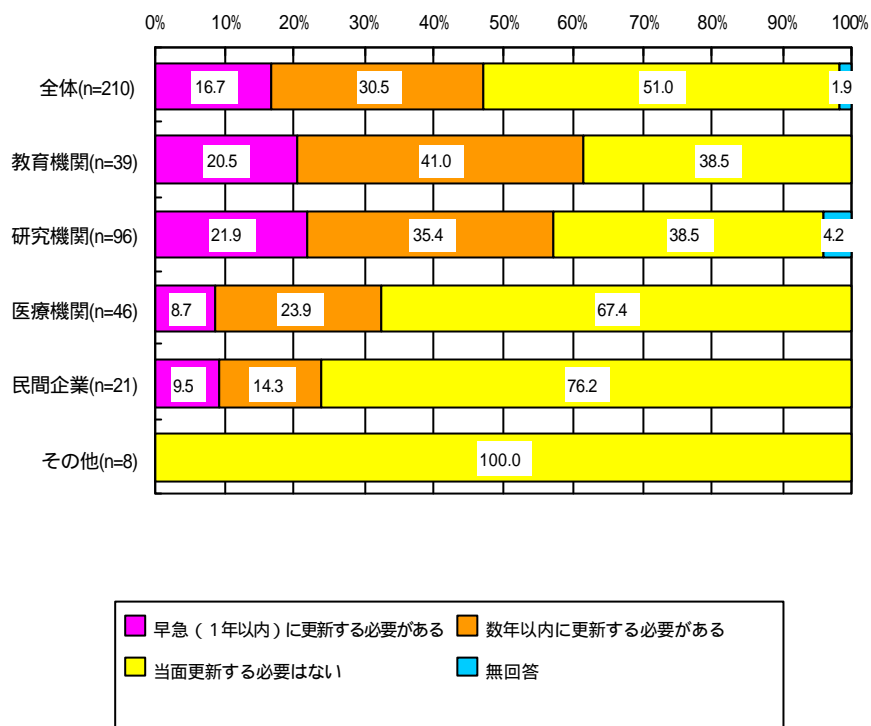


図 1-18 機関別の更新・改良の必要性の比率

更新・改良の必要性を利用目的ごとにもみると(縦集計)と、それぞれ母数は少ないものの「高エネルギー物理学」(n=10)、「自由電子レーザー」(n=11)、「フェムト秒現象解析」(n=6)、「生命科学」(n=24)の分野では、「早急(1年以内)に更新する必要がある」加速器がそれぞれ3割~7割程度あり、比較的早急な更新を求められている加速器が多い利用分野であることがわかる。

「原子核物理学」(n=23)、「原子・分子物理学」(n=39)、「物質・材料科学」(n=67)、「エネルギー科学」(n=21)、「放射線化学」(n=22)、「年代測定」(n=11)、「ラジオグラフィ」(n=13)、「アイソトープ製造」(n=16)の分野では、「数年以内に更新する必要がある」加速器がそれぞれ5割程度あり、これらの分野で数年以内に更新を求められている加速器が多いことがわかる。

表 1-24 更新・改良の必要性 / 利用目的

	調査数	高エネルギー物理学 【基礎】	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フエムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	表面解析 【応用】	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答	
実数	全体	210	10	23	39	67	21	22	45	11	6	36	24	32	38	40	11	9	46	13	12	20	16	21	10
	早急（1年以内）に更新する必要がある	35	3	3	7	12	3	5	9	4	4	6	7	4	5	8	-	1	6	-	1	2	-	3	4
	数年以内に更新する必要がある	64	3	13	20	38	10	13	19	2	1	11	9	14	17	18	6	2	11	7	3	8	8	3	1
	当面更新する必要はない	107	4	7	12	16	8	4	17	5	1	18	8	13	16	13	5	5	28	6	8	10	8	15	4
	無回答	4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	1
横集計%	全体	100.0	4.8	11.0	18.6	31.9	10.0	10.5	21.4	5.2	2.9	17.1	11.4	15.2	18.1	19.0	5.2	4.3	21.9	6.2	5.7	9.5	7.6	10.0	4.8
	早急（1年以内）に更新する必要がある	100.0	8.6	8.6	20.0	34.3	8.6	14.3	25.7	11.4	11.4	17.1	20.0	11.4	14.3	22.9	-	2.9	17.1	-	2.9	5.7	-	8.6	11.4
	数年以内に更新する必要がある	100.0	4.7	20.3	31.3	59.4	15.6	20.3	29.7	3.1	1.6	17.2	14.1	21.9	26.6	28.1	9.4	3.1	17.2	10.9	4.7	12.5	12.5	4.7	1.6
	当面更新する必要はない	100.0	3.7	6.5	11.2	15.0	7.5	3.7	15.9	4.7	0.9	16.8	7.5	12.1	15.0	12.1	4.7	4.7	26.2	5.6	7.5	9.3	7.5	14.0	3.7
	無回答	100.0	-	-	-	25.0	-	-	-	-	-	25.0	-	25.0	-	25.0	-	25.0	25.0	-	-	-	-	-	25.0
縦集計%	全体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	早急（1年以内）に更新する必要がある	16.7	30.0	13.0	17.9	17.9	14.3	22.7	20.0	36.4	66.7	16.7	29.2	12.5	13.2	20.0	-	11.1	13.0	-	8.3	10.0	-	14.3	40.0
	数年以内に更新する必要がある	30.5	30.0	56.5	51.3	56.7	47.6	59.1	42.2	18.2	16.7	30.6	37.5	43.8	44.7	45.0	54.5	22.2	23.9	53.8	25.0	40.0	50.0	14.3	10.0
	当面更新する必要はない	51.0	40.0	30.4	30.8	23.9	38.1	18.2	37.8	45.5	16.7	50.0	33.3	40.6	42.1	32.5	45.5	55.6	60.9	46.2	66.7	50.0	50.0	71.4	40.0
	無回答	1.9	-	-	-	1.5	-	-	-	-	-	2.8	-	3.1	-	2.5	-	11.1	2.2	-	-	-	-	-	10.0

次に、設置年月と更新・改良の必要性の関係をみると（横集計）「早急（１年以内）に更新する必要がある」（n=35）加速器のうち、「90年代」（15台；42.9%）が最も多くなっており、必ずしも設置年月が古い加速器ほど更新・改良の必要性が切迫しているわけではないことがわかる。「数年以内に更新する必要がある」（n=64）加速器のうち、「80年代」（25台；39.1%）「90年代」（26台；40.6%）となっており、設置から10年～20年程度の加速器において数年以内に更新する必要性が比較的高いことがわかる。

設置年月と更新・改良の必要性の関係を設置年月からみると（縦集計）「60年代」を除けば、設置年月がさかのぼるほど「早急（１年以内）に更新する必要がある」、および「数年以内に更新する必要がある」加速器の比率が増えていくことがわかる。

例えば、「早急（１年以内）に更新する必要がある」と「数年以内に更新する必要がある」をそれぞれの設置年月ごとに合計した台数の推移をみると、「2000年以降」（n=21）では2台（9.5%）「90年代」（n=104）では41台（39.4%）「80年代」（n=54）では33台（61.1%）「70年代」（n=13）では12台（92.3%）「60年代」（n=15）では10台（66.6%）となっている。

表 1-25 設置年月 / 更新・改良の必要性

		調査数	1960年代以前	70年代	80年代	90年代	2000年以降	無回答
実数	全 体	210	15	13	54	104	21	3
	早急（１年以内）に更新する必要がある	35	5	5	8	15	2	-
	数年以内に更新する必要がある	64	5	7	25	26	-	1
	当面更新する必要はない	107	5	1	21	60	19	1
	無 回 答	4	-	-	-	3	-	1
横集計 %	全 体	100.0	7.1	6.2	25.7	49.5	10.0	1.4
	早急（１年以内）に更新する必要がある	100.0	14.3	14.3	22.9	42.9	5.7	-
	数年以内に更新する必要がある	100.0	7.8	10.9	39.1	40.6	-	1.6
	当面更新する必要はない	100.0	4.7	0.9	19.6	56.1	17.8	0.9
	無 回 答	100.0	-	-	-	75.0	-	25.0
縦集計 %	全 体	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	早急（１年以内）に更新する必要がある	16.7	33.3	38.5	14.8	14.4	9.5	-
	数年以内に更新する必要がある	30.5	33.3	53.8	46.3	25.0	-	33.3
	当面更新する必要はない	51.0	33.3	7.7	38.9	57.7	90.5	33.3
	無 回 答	1.9	-	-	-	2.9	-	33.3

(17) 更新の範囲

付問 12-1 (問 12 で「1」,「2」を選んだ方にうかがいます)更新が必要な範囲は何ですか。

注: 問 12 の 1「早急(1年以内)に更新する必要がある」

問 12 の 2「数年以内に更新する必要がある」

(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は問 12 の 1「早急(1年以内)に更新する必要がある」、および 2「数年以内に更新する必要がある」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 99 台 (n=99) となった。

更新・改良の範囲については、「加速器全体を更新する必要がある」(35 台; 35.4%)、「加速器の付随部品を更新する必要がある」(57 台; 57.6%) となっており、部分的な改良にとどまらず、全体の更新を必要としている加速器も約 3 割あることがわかる。

機関別にみると、教育機関 (n=24) 及び研究機関 (n=55) で約 6 割から 7 割の加速器が「加速器の付随部品を更新する必要がある」となっている。一方、医療機関の場合、本問に回答をするのは医療用大型加速器を所有している機関が中心である(メーカーから市販されている医療用加速器を利用している医療機関に対しては問 12 への回答を求めていない)。この前提のもとで、医療機関の母数は少ないものの (n=15) 約 8 割で「加速器全体を更新する必要がある」(12 台; 80.0%) となっており、かなりの比率で全体の更新を必要とする加速器が医療機関にあることがわかる。

表 1-26 更新の範囲

		調 査 数	加 速 器 全 体 を 更 新 す る 必 要 が あ る	更 加 速 器 の 必 要 付 随 が 部 品 を 更 新 す る の 必 要 が あ る	そ の 他	無 回 答
実 数	全 体	99	35	57	5	2
	教育機関	24	7	15	1	1
	研究機関	55	16	37	1	1
	医療機関	15	12	2	1	-
	民間企業	5	-	3	2	-
	その他	-	-	-	-	-

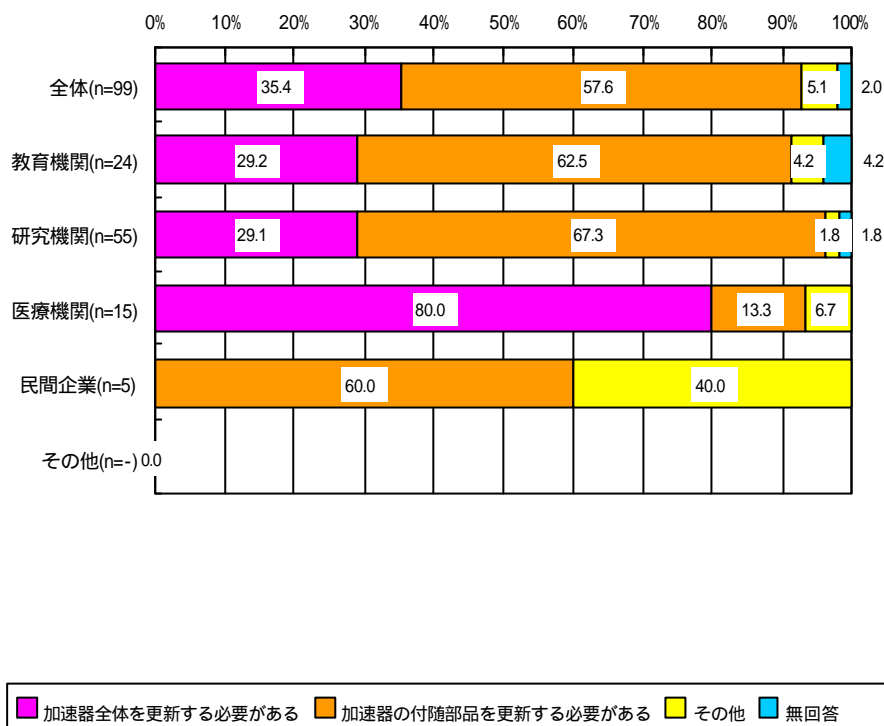


図 1-19 機関別の更新の範囲比率

(18) 更新の費用負担

付問 12-2 (問 12 で「1」、「2」を選んだ方にうかがいます) 費用負担についてはどのように計画していますか。次のうち、あてはまるものを選んでください。

注： 問 12 の 1「早急(1年以内)に更新する必要がある」

問 12 の 2「数年以内に更新する必要がある」

(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問についても、付問 12-1 と同様に問 12 の 1「早急(1年以内)に更新する必要がある」、および 2「数年以内に更新する必要がある」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 99 台 (n=99) となった。

更新・改良の費用負担については、「全額組織内で支出する」(35 台 ; 35.4%)、「全額国からの支出による」(24 台 ; 24.2%) となっている。一方で、「見込みが立っていない」(25 台 ; 25.3%) となっており、約 25%の加速器で更新・改良の必要性を感じつつも、費用面で見込みが立っていないことがわかる。

機関別にみると、教育機関 (n=24) 及び研究機関 (n=55) に設置されている加速器のう

ち、それぞれ 3 割程度の加速器が更新・改良の必要性を感じつつも、費用面で見込みが立っていない。一方で、医療機関（n=15）の 5 割弱（7 台）、民間企業（n=5）の 8 割（4 台）が「全額組織内で支出する」としている。

表 1-27 更新・改良の費用負担

	調査数	全額組織内で支出する	他機関（公的機関を除く）の支援の一部を受ける	国または公的機関の支援の一部を受ける	全額国からの支出による	見込みが立っていない	その他	無回答
実数								
全体	99	35	2	8	24	25	3	2
教育機関	24	4	-	4	8	6	1	1
研究機関	55	20	2	3	12	16	1	1
医療機関	15	7	-	1	3	3	1	-
民間企業	5	4	-	-	1	-	-	-
その他	-	-	-	-	-	-	-	-

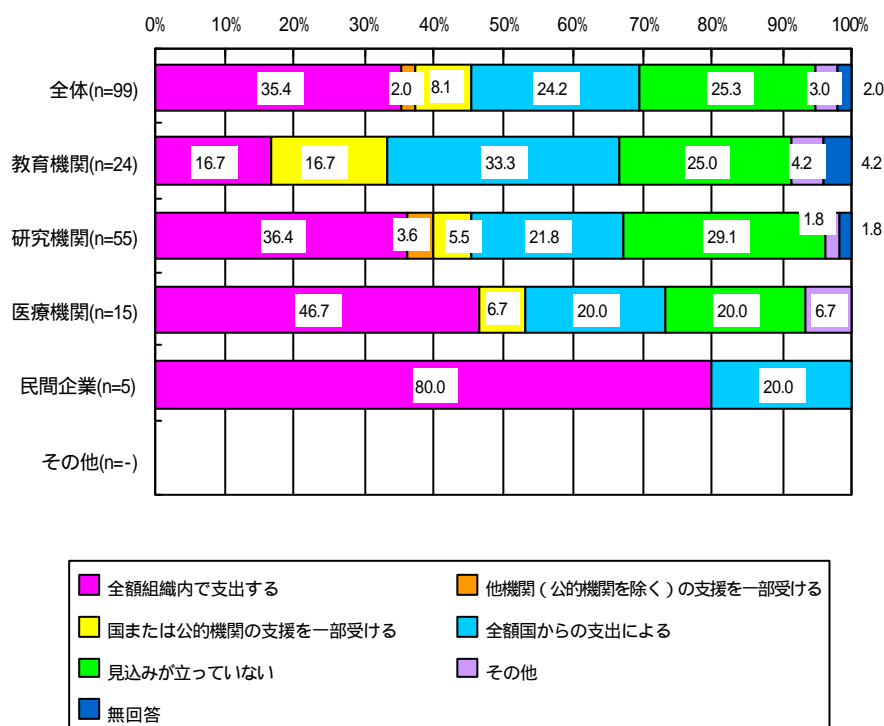


図 1-20 機関別の更新・改良の費用負担比率

更新・改良の費用負担と利用目的の関係をみると（横集計）「全額組織内で支出する」（n=35）加速器は、「物質・材料科学」（12台；34.3%）「加速器開発」（11台；31.4%）となっている。「全額国からの支出による」（n=24）加速器は、「物質・材料科学」（15台；62.5%）「原子・分子物理学」（10台；41.7%）次いで「加速器開発」（10台；41.7%）「微量元素分析」（10台；41.7%）となっている。これらの利用分野では、国立の研究機関・教育機関が主体となって研究・開発・利用を進めているため、全額国からの支出による加速器の更新・改良を選択したと考えられる。一方、「見込みが立っていない」（n=25）加速器は、「物質・材料科学」（15台；62.5%）「微量元素分析」（9台；36.0%）となっている。

更新・改良の費用負担と利用目的の関係を利用目的ごとにみると（縦集計）母数が3台と少ないものの「医療（診断）」（n=3）では「全額組織内で支出する」加速器は2台（66.7%）となっている。また「加速器開発」（n=28）において「全額組織内で支出する」加速器は11台（39.3%）となっている。一方、「フェムト秒解析」（n=5）では、「全額国からの支出による」加速器は4台（80%）「医療（研究）」（n=17）では「全額国からの支出による」加速器は9台（52.9%）「原子核物理学」（n=16）では「全額国からの支出による」加速器は8台（50.0%）となっており、これらの分野では全額国からの支出によって更新・改良の費用が負担される加速器の比率が高いことがわかった。

一方、比較的母数の大きい「物質・材料科学」の分野では、50台の加速器が利用されているものの、そのうち15台（30.0%）の加速器の更新・改良費用の見込みが立っていないことがわかる。

表 1-28 更新・改良の費用負担 / 利用目的

	調査数	【基礎】 高エネルギー物理学	原子核物理学	原子・分子物理学	物質・材料科学	エネルギー科学	放射線化学	加速器開発	自由電子レーザー	フエムト秒現象解析	医療（研究）	生命科学	教育・訓練	【応用】 表面解析	微量元素分析	年代測定	医療（診断）	医療（治療）	ラジオグラフィ	非破壊検査	放射線加工	アイソトープ製造	その他	無回答
実数	99	6	16	27	50	13	18	28	6	5	17	16	18	22	26	6	3	17	7	4	10	8	6	5
全額組織内で支出する	35	2	3	7	12	1	5	11	-	-	3	5	1	5	4	-	2	7	1	-	5	3	1	5
他機関（公的機関を除く）の支援を一部受ける	2	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
国または公的機関の支援を一部受ける	8	3	-	2	5	3	3	4	-	-	-	-	3	2	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
全額国からの支出による	24	-	8	10	15	6	5	10	2	4	9	6	7	7	10	5	-	4	3	1	2	3	1	-
見込みが立っていない	25	1	4	7	15	2	4	1	2	-	2	3	6	7	9	-	-	3	3	2	2	2	2	-
その他	3	-	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	-	1	1	1	2	-	1	1	-	1	-
無回答	2	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
横集計%	100.0	6.1	16.2	27.3	50.5	13.1	18.2	28.3	6.1	5.1	17.2	16.2	18.2	22.2	26.3	6.1	3.0	17.2	7.1	4.0	10.1	8.1	6.1	5.1
全額組織内で支出する	100.0	5.7	8.6	20.0	34.3	2.9	14.3	31.4	-	-	8.6	14.3	2.9	14.3	11.4	-	5.7	20.0	2.9	-	14.3	8.6	2.9	14.3
他機関（公的機関を除く）の支援を一部受ける	100.0	-	-	-	50.0	-	-	50.0	-	-	50.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50.0	-
国または公的機関の支援を一部受ける	100.0	37.5	-	25.0	62.5	37.5	37.5	50.0	-	-	-	-	37.5	25.0	12.5	-	-	12.5	-	-	-	-	-	-
全額国からの支出による	100.0	-	33.3	41.7	62.5	25.0	20.8	41.7	8.3	16.7	37.5	25.0	29.2	29.2	41.7	20.8	-	16.7	12.5	4.2	8.3	12.5	4.2	-
見込みが立っていない	100.0	4.0	16.0	28.0	60.0	8.0	16.0	4.0	8.0	-	8.0	12.0	24.0	28.0	36.0	-	-	12.0	12.0	8.0	8.0	8.0	8.0	-
縦集計%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
全額組織内で支出する	35.4	33.3	18.8	25.9	24.0	7.7	27.8	39.3	-	-	17.6	31.3	5.6	22.7	15.4	-	66.7	41.2	14.3	-	50.0	37.5	16.7	100.0
他機関（公的機関を除く）の支援を一部受ける	2.0	-	-	-	2.0	-	-	3.6	-	-	5.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.7	-
国または公的機関の支援を一部受ける	8.1	50.0	-	7.4	10.0	23.1	16.7	14.3	-	-	-	-	16.7	9.1	3.8	-	-	5.9	-	-	-	-	-	-
全額国からの支出による	24.2	-	50.0	37.0	30.0	46.2	27.8	35.7	33.3	80.0	52.9	37.5	38.9	31.8	38.5	83.3	-	23.5	42.9	25.0	20.0	37.5	16.7	-
見込みが立っていない	25.3	16.7	25.0	25.9	30.0	15.4	22.2	3.6	33.3	-	11.8	18.8	33.3	31.8	34.6	-	-	17.6	42.9	50.0	20.0	25.0	33.3	-

(19) 第三者評価・外部評価

問 13 加速器を利用した研究・開発・分析・治療活動を客観的に評価するために、第三者評価や外部専門家の評価を受ける制度を有していますか。次のうち、あてはまるものを選んでください。(単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は加速器を設置している機関のうち、教育機関および研究機関、医療機関のうち研究に主として利用している機関、民間企業のうち研究に利用している機関、またはそれ以外の属性に区分される機関に回答を求めている。このため、本問の母数は 210 台 (n=210) となった。

第三者評価・外部評価については、全体 (n=210) のうち約 5 割で「とくにそのような制度はない」(109 台;51.9%)となっているものの、「第三者評価を受けている」(38 台;18.1%)、「外部専門家の評価を受けている」(33 台;15.7%)、「内部の別組織や別部署による評価を受けている」(17 台;8.1%)となっている。全体の約 4 割が何らかの第三者評価・外部評価を受けていることがわかる。

機関別にみると、教育機関 (n=39) の約 3 割で「内部の別組織や別部署による評価を受けている」(11 台;28.2%)となっている。一方で、研究機関 (n=96) の約 3 割で「第三者評価を受けている」(29 台;30.2%)となっている。教育機関、研究機関のそれぞれで、「第三者評価を受けている」、「外部専門家の評価を受けている」、および「内部の別組織や別部署による評価を受けている」の比率を足し合わせると、教育機関 (n=39) では 20 台 (51.2%)、研究機関 (n=96) では 57 台 (59.3%) となっており、それぞれ評価する主体は違うものの、それぞれ約半数が何らかの第三者評価・外部評価を受けていることがわかる。

医療機関 (n=46) では、約 7 割で「とくにそのような制度はない」(36 台;78.3%)となっているものの、約 1 割で何らかの第三者評価・外部評価を受けている。治療を主体とした医療機関では、加速器の利用は日常的な照射治療などの医療活動が主となるため、加速器をさまざまな利用目的のために使用する教育・研究機関のように、第三者評価・外部評価を実施することは少ないこと等が理由として考えられる。

表 1-29 第三者評価・外部評価

	調査数	第三者評価をうけている	外部専門家の評価をうけている	内部の別組織や別部署による評価をうけている	とくにそのような制度はない	無回答
実数						
全体	210	38	33	17	109	13
教育機関	39	7	2	11	19	-
研究機関	96	29	25	3	31	8
医療機関	46	1	1	3	36	5
民間企業	21	1	2	-	18	-
その他	8	-	3	-	5	-

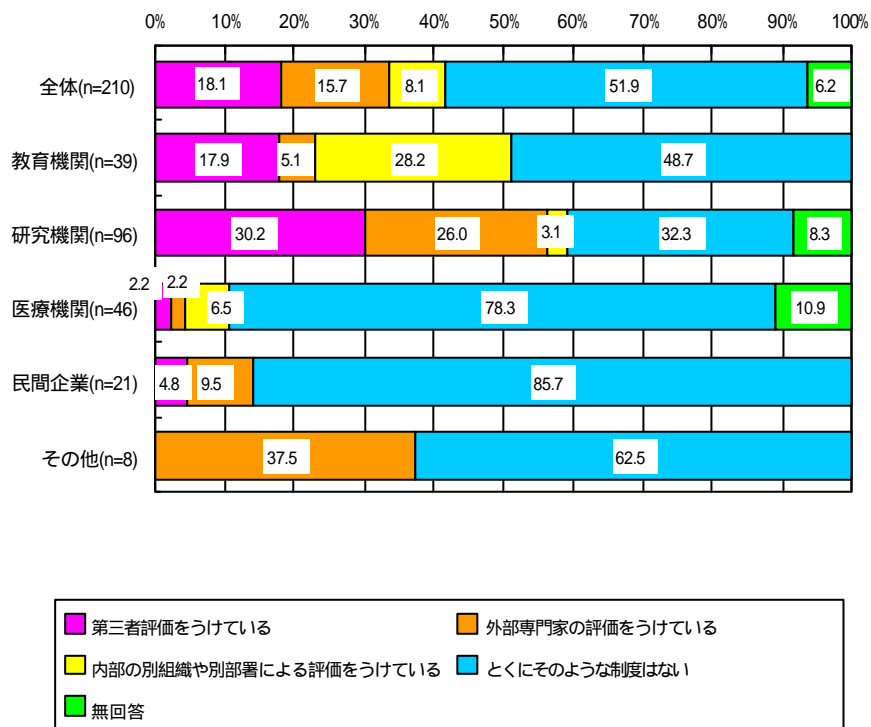


図 1-21 機関別の第三者評価・外部評価の比率

(20) 評価頻度

付問 13-1 (問 13 で「1」、「2」、「3」を選んだ方にうかがいます) 評価をうける頻度はどのくらいですか。次のうち、あてはまるものに 印をつけてください。

- 注： 問 13 の 1「第三者評価をうけている」
 問 13 の 2「外部専門家の評価をうけている」
 問 13 の 3「内部の別組織や別部署による評価をうけている」
 (単数回答、教育機関・教育機関等への質問)

本問は問 13 の 1「第三者評価をうけている」、2「外部専門家の評価をうけている」、および 3「内部の別組織や別部署による評価をうけている」を選択した加速器について回答を求めた付問である。このため母数は 88 台 (n=88) となった。

第三者評価・外部評価の評価頻度については、全体 (n=88) の約 7 割が「年に 1 回」(44 台; 50.0%)、約 3 割が「数年 (2 ~ 5 年) に 1 回」(30 台; 34.1%) となっている。わずかながら、「制度はあるもののまだ実施されたことはない」(6 台; 6.8%) となっているものの、第三者評価・外部評価制度を有する機関では、制度を実効的に機能させていることがうかがえる。

機関別にみると、教育機関 (n=20) の 7 割で、研究機関 (n=57) の 9 割で 1 年から数年に 1 回の頻度で第三者評価・外部評価制度を実施していることがわかる。

なかには、「治療活動については必要に応じて対応」、「研究部門の研究活動の外部評価の中で評価を受けている」、「大学物理学関連組織の一つとして外部評価を受けた」、「オメガ計画の一環として平成 10 年度に国の評価を受けた」、「年 2 回」との回答もあり、さまざま評価頻度で第三者評価・外部評価が行われたことがわかる。

表 1-30 機関別の評価頻度の比率

	調査数	年に 1 回	1 数年 (2 ~ 5 年) に 1 回	ない制度は実施されたものはない	その他	無回答	
実数	全体	88	44	30	6	7	1
	教育機関	20	9	5	4	2	-
	研究機関	57	31	21	2	3	-
	医療機関	5	2	1	-	1	1
	民間企業	3	2	1	-	-	-
	その他	3	-	2	-	1	-

(21) これからの加速器開発・利用

問 14 これから加速器をつくる側と利用する側の連携や協力はどのような方策があれば進むとお考えになりますか。行政（国）に求める技術的な支援や制度的な支援、について具体的に記述してください。また、これからどのような加速器を設置すべきか、または開発すべきか、加速器を利用するうえでの課題、についても具体的に記述してください。（スペースが足りない場合は、裏面にご記入いただくか、別紙を同封していただきますようお願いいたします）
（自由記述答、回答機関全体への質問）

匿名での個別の回答内容は参考資料2に示す。

行政（国）に求める技術的な支援や制度的な支援：

行政に（国）に求める支援策として、「設置許可申請に伴う法手続きの簡素化」、「監督官庁の一元化」、「法令について具体的に相談できる窓口の設置」、「加速器の規制エネルギー（現行1Mev以上）の緩和」、「審査期間の短縮」、「加速器の設置だけではなく、維持・管理費用への助成」があげられている。一方、「国立研究所に予算が集中しているため、基礎研究の振興のためにはもっと中小研究室への予算配分が必要」との指摘もあった。

人材育成の側面からは、「中短期的な加速器スクールを設置して欲しい」、「放射線専門医の大幅な増員」、「医学物理士の制度的な確立」等を望む声が多く、加速器を維持・管理する人材の大幅な増員・強化が望まれている。また、国立研究所等の加速器研究者、技術者集団を抱える組織から、加速器を設計する際に人材を派遣してもらう等の人的支援を望む記述もあった。

医療機関からは、「保険点数の増加」、「毎日の治療終了後の管理業務はとても煩雑であるため、管理業務の簡略化」、「各病院個別ではなく、加速器の地域医療センターを設けて移行する」等、現在の医師及び放射線管理技師だけでの治療・管理業務の負担の重さが指摘されている。

一方、国産医療用ライナックのメーカーにも助成を行い、国内の医療用ライナックの品質向上への行政の支援を求めるものもあった。

国や企業はこれからどのような加速器を設置すべきか、または開発すべきか：

「多機能・多目的で操作性がよく、精度が高く、安全性が高く、さらに安価であること」、また「維持管理費の安価なもの」、など運用・維持・管理の全般にわたる費用低下を望むものが多い。「加速器の共同利用が容易となる共同利用センターの設置」、「陽子線治療機の多府県への設置」等、自治体レベルにさらに加速器開発・利用環境の整備の要望もある一方で、「設置場所を減らしてもいいから高性能加速器のみ運用す

べき。地域中核医療センターへの紹介システムを整備すべき」との指摘もある。

本調査では、回収された調査票の約 8 割が医療機関であったため、大型・超大型加速器へのニーズよりは、むしろ、これまでに実績を積み重ねてきたライナックの「小型化・大出力化・静音化」、「最適な治療計画の開発」などのソフト面開発等、を望む記述が多い。また「重イオン照射治療装置を一般病院に設置できる程度に小型化、安価にして欲しい」との要望もあった。

加速器を利用するうえでの日頃感じておられる課題、問題点：

医学利用の立場から、「日々の維持管理があまりにも大変」、「人手不足（放射線科医師、放射線技師）」等の運用面での課題が多い。また、「精度管理が重要であり、メーカーとユーザーから離れた第三者機関が必要」、「メーカーの対応が遅く、装置更新まで不具合が改善されない」、「医療用加速器は海外のメーカー製も多く、ユーザー側の要望がメーカーに反映されにくい」等の指摘もあり、行政の指導が求められている。

また、他の医療機器と比較すると故障が多いこと、測定装置などの付帯装置にかなり費用がかかることも指摘されている。

研究機関の立場からは、「共同利用の加速器は何ヵ月もマシンタイムが決められているので、研究のアイデアが浮かんでも柔軟に対応してもらえない。このため外国の友人にビームを利用させて貰っている」など、共同利用施設・設備の柔軟な運用を求める意見もあった。

加速器全般として、「加速器の故障による停止を極力少なくするためには頭を悩ませている。部品が高価であるため予備部品を十分に確保できない。このため、加速器の部品開発などの補助があれば、ユーザーは安く部品を購入できるのでは」ともあった。また、法規制について、「遮へい計算の煩雑さ」、「遮へい規制が厳格化された場合、遮へい壁を簡単に増強できないため、運用時間で調節するしかない」等、厳格化される法規制に対して不安の声もあった。

また、「大型加速器の建設が多く、予算や人員の面で大学の中小規模加速器が弱体化して困る」という加速器開発・運用計画の偏りを指摘するもの、「性能を維持していくための十分な維持費が 0 となる時期が早すぎる」という継続的な維持費の助成を要望する意見もあった。

1.3 アンケート調査のまとめ

(1) 加速器を所有する機関・組織および目的

本アンケート調査は、文部科学省放射線規制室が保有する放射線発生装置設置に係る認可手続き、届け出関連データから抽出されたデータをもとに、我が国に存在する加速器のうちかなりの部分を網羅的に調査したものである。その結果、『放射線利用統計 2001』（社団法人 日本アイソトープ協会 編）に示されているとおり、我が国に設置されている加速器の約 7 割が医療機関にあることが確認された。電機メーカーによる市販医療用加速器のラインナップの充実も手伝い、医療機関におけるガン治療などへの加速器の臨床応用は確実に広がってきていることが伺える。

また、約 1 割の加速器が民間企業において活用されており、加速器を線源とした放射線照射の工業利用も進展している。

教育機関および研究機関が所有する加速器は、それぞれ 4.8%、12.7%程度であり、加速器の開発・利用の最先端を担うべき機関が所有する加速器は、両機関属性を合わせても 17%程度に過ぎないことがわかった。これらの機関では、加速器科学の研究、原子・分子物理学、物質・材料科学の基礎研究分野から、表面解析や微量元素分析などの応用分野まで広範囲にわたって加速器が利用されている。その一方で、古い年代（60 年代以前）に設置された加速器が多く、最先端研究を引き続きリードしていくためには、全面的または部分的にも大規模な改修または更新を求められている加速器が多い。

(2) 加速器の仕様

我が国における加速器の型式は、約 8 割弱がライナックであることがわかった。これは、加速器を所有する機関の約 7 割を占める医療用加速器の分野で、通常の電子線・X 線照射を行う放射線照射治療装置は、ライナックをベースに設計された機種が多いことも一因として挙げられる。

加速粒子として、医学利用の立場から電子（線）、X 線が極めて多く扱われているものの、基礎研究や医学利用の立場から陽子、（重）イオン等も多く加速されていることがわかった。基礎科学の分野では、陽子エネルギー 1GeV の大強度陽子ビーム加速器の建設が検討されている。一方、医学利用の分野では 250MeV 前後の陽子ビームを利用した陽子線治療センター等の建設が計画され、実施され始めている。

加速器のビームエネルギーが数百 MeV までは主に医療（治療）利用が主であり、100MeV 以上の加速器は、原子・分子物理学、物質・材料科学、加速器開発などの基礎研究・開発に利用されていることも明らかとなった。

(3) 加速器の利用・管理

我が国の加速器の 9 割は活発に利用されていることがわかった。しかしながら、研究・教育機関で使用されている加速器の約 2 割程度が 1970 年代以前に建設された加速器であり、

設備・施設の老朽化が進んでいる。このため、古い年代に設置された加速器は、稼動状況が低下しつつ、更新・改修の必要性が高まっていることがわかった。しかしながら、更新・改修費用の負担の見込みの立っていない組織・機関が多かった。

加速器の共同利用については、加速器を管理している自らの部門以外との共同利用が盛んに行われていることがわかった。基礎科学では、原子核物理学、原子・分子物理学、物質・材料科学、エネルギー科学、放射線化学、加速器開発、医療（研究）、生命科学、教育訓練等の分野で海外も含めた共同利用が活発に行われていることがわかった。一方、応用分野では、表面解析、微量元素分析、医療（治療）の分野で共同利用が活発に行われていた。

利用料金を徴収して加速器を時間単位、半日単位、一日単位でユーザーに利用させる制度・仕組みを有している組織・機関・企業があることがわかった。研究機関等では、加速器の利用に係るコストを積算し、ユーザーに実費負担を請求するもの、研究成果を公開するならば利用料金を免除するもの、ビーム・ラインをまるごと借用できるもの、などさまざまな形態がある。一方、民間企業では受託測定という形で分析する試料、分析内容ごとに細かく課金制度を決めている、という事業形態もあることがわかった。このような仕組みは、加速器を自ら持たない組織・機関においても加速器を利用した測定・分析法を試みることができる有効な方法である。

自らの研究部門・チームで行っている研究について、公正なる第三者評価・外部評価制度を設けることは、加速器の開発・利用の推進に効果的である。特に教育機関、研究機関が所有する加速器の5割は、何らかの第三者評価・外部評価を1年から数年に一度以上の頻度で受けていることがわかった。今後、これらの評価結果を広く公開することによって、一般への加速器の開発・利用の現状をわかりやすく伝えることが必要になるであろう。

1.4 国内の大規模加速器施設の概要と複合加速器

原子核・素粒子の実験的研究は、加速器技術の進歩と共に進展してきた。そしてより高いエネルギーを追及する加速器施設は、より大規模となった。他方加速器の進歩により、放射光や中性子を利用する新しい広範な研究分野が開けることになった。そこで表 1 にこれらの国内での典型的な加速器施設を取り上げることとした。これらの加速器は全て複数の加速器を組み合わせた複合加速器である。そしてその他の複合加速器を表 1-31、表 1-32、表 1-33、表 1-34 に示した。

表 1-31 陽子および重イオン

SN	機関名					
600	筑波大学 陽子線医学利用研究 センター	RFQ	直線加速装置 3MeV	シンクロトロン 250MeV	ビーム輸送系	標的
609	兵庫県立粒子線医療 センター	RFQ	直線加速装置 1MeV/u	シンクロトロン P:230MeV C:320MeV/u	ビーム輸送系	標的
672	放射線医学総合研究 所	RFQ	直線加速装置 6MeV/u	シンクロトロン(上) ⇒シンクロトロン(下)↗ C~Ar:800MeV/u	ビーム輸送系	標的
	(財)若狭湾エネルギー 研究センター	ファン・デ・グラフ加速装置	10MeV	シンクロトロン P:200MeV、He,C:50MeV/u	ビーム輸送系	標的

表 1-32 電子・陽電子

SN	機関名			
676	民間企業	直線加速装置 20MeV	シンクロトロン 最大 1GeV	蓄積リング
693	分子科学研究所 極端紫外光実験施設	直線加速装置 15MeV	シンクロトロン 600MeV	蓄積リング 750MeV
695	京都大学化学研究所 附属原子核研究施設	直線加速装置	蓄積リング	
722	日本原子力研究所 関西研究所	マイクロトロン	蓄積リング	
764	広島大学放射光科学 研究センター	マイクロトロン	蓄積リング ↓ ストレッチャーリング	
764	教育機関 (立命館大学)	マイクロトロン マイクロトロン	蓄積リング 蓄積リング	
810	民間企業	直線加速装置	→シンクロトロン ↓ シンクロトロン (兼蓄積リング)	↓ シンクロトロン (兼蓄積リング)
818	民間企業	マイクロトロン 150MeV	シンクロトロン 700MeV (兼蓄積リング)	
998	産業技術総合研究所	RF 電子銃	直線加速装置	蓄積リング →蓄積リング ↓蓄積リング

(b) では目的に応じた多岐の組合せが可能である。

表 1-33 同時照射

SN	機関名	
82	日本原子力研究所 高崎研究所	サイクロトロン ファン・デ・グラーフ加速装置 → 試料 400kV イオン注入装置 → (本調査対象外) イオン種・エネルギーの異なった3種のビームを同一試料に同時照射する。

表 1-34 照射と分析

SN	機関名	
81	産業技術総合研究所 関西センター	コッククロフト・ワルトン加速装置 イオン注入 → 材料 ファン・デ・グラーフ加速装置 → {RBS PIXE 分析 H, He イオン注入を行った材料を H 又は He ビームを用いて PBS 及び PIXE 分析を行う。

複数の加速器を組合せて利用している場合には、(a) 加速器それ自身が他の加速器を入射器として要求する場合と、(b) 異なるイオンの同時照射や分析のために複数の加速器を使用する場合がある。

(a) に分類されるものには、陽子およびイオンの直線加速装置、シンクロトロンおよび大型のサイクロトロンがある。陽子およびイオンの直線加速装置は、その入射器として直線加速装置の一種である RFQ 等を必要とするが、単独で用いられることは少なく、大部分はシンクロトロンの入射器として用いられている。より高いエネルギーまで加速するには、シンクロトロンにより加速された粒子を取り出して、更に大きなシンクロトロンに入射して加速する、電子ではシンクロトロンの入射器には直線加速装置やマイクロトロンが用いられる。そしてシンクロトロンを加速終了後放射光発生用蓄積リングや衝突器として使用する場合と、独立した蓄積リングに入射する場合がある。

今回の調査では、複合加速器を構成する個々の要素である直線加速装置、シンクロトロン等はそれぞれの形式に従って別々に集計されている。複合加速器は数は多くないが、組合せの自由度が大きいので、それぞれの構成を略記し、公立研究機関(独立行政法人を含む)では機関名を表示した。

2. 欧米諸国の加速器開発・利用の現状

2.1 欧米諸国の加速器開発・利用の現状（概要）

加速器の利用では、基礎と応用の両面にわたり、加速された粒子（1次粒子）（電子、陽子、重イオン）が用いられる場合と、これらの粒子から生成した2次粒子（X線、中性子、シンクロトロン放射光、陽電子、RI等）が用いられる場合とがある。

基礎研究で高エネルギーを追求する場合は、陽子、電子共加速器は衝突型加速器（衝突器、Collider）となり、その施設の巨大化に伴い組織は国際協力となる。陽子の衝突型加速器は、スイスの欧州合同原子核研究機関（CERN）において、周長 28 km の LHC（Large Hadron Collider）が建設中である。電子は、周回軌道ではシンクロトロン放射光（放射光）によるエネルギー損失の為、衝突型加速器では加速されるエネルギーに限界が生じる（周長 28 km の CERN の LEP で 104.5 GeV）。そこで対向する2台の長い直線加速器により、反対方向に加速された電子を衝突させるリニアコライダーの開発が、米国、ドイツ、スイスと日本で進められている。

電子の周回軌道でエネルギー損失となる放射光は、可視光から X 線までの強力な光源として、物質の構造解析に広く用いられている。波長の短い電磁波を発生するには、より高いエネルギーの電子を周回させねばならず、6 ~ 8 GeV という最も高いエネルギー領域の放射光施設が、米国、フランス、日本にある。

構造解析のもうひとつの有力な手段は、中性子である。飛行時間法（time of flight）に適したパルス中性子線は、加速器により作られた高強度陽子により重い元素を破碎して生成される。この目的の最も強力な施設はイギリスにあり、米国と日本にはこの分野のパイオニア的施設が現在も活発に稼働している。米国ではローレンス・バークレー国立研究所、ロス・アラモス国立研究所、アルゴンヌ国立研究所、ブルックヘブン国立研究所が協同して、オークリッジ国立研究所に強力な中性子源 SNS を建設中であり、日本でも高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が合同で進めている大強度陽子加速器計画に、新しい中性子源の建設が含まれている。

パルス中性子源の加速器よりはビーム強度は遥かに低いけれども、エネルギーでは大差のない加速器が、がんの重粒子線治療に使われている。炭素ビームを使用できる医療施設は、現在日本に2ヶ所あるだけである。陽子線を用いる、より規模の小さい医療施設は、米国に2ヶ所、フランスに1ヶ所ある。後者では原子核研究用シンクロサイクロトロンを医療専用に転用した。スイスでは超伝導サイクロトロンを導入する医療専用施設が建設中である。日本では病院に設置された2施設が稼働中で、もう1施設が2002年以内に運転開始を予定している。そして上記重イオン治療施設のうち1ヶ所では陽子線治療も実施している。

現在日本で加速器総数の約70%を占める医療用電子直線加速器（リニアック、又はライナック）は、1960年代の初めから世界で急速に導入され、1986年には2,500台に達し、そ

の半数は米国にあった。そして現在の総数は 5,000 台と推定されている。日本では以前は民間企業 3 社が製造していたが、現在は 1 社となった。

医療目的の寿命の長い RI 製造には中型サイクロトロンが使われ、PET 診断用短寿命の RI 製造用の小型サイクロトロンは病院に設置されている。この中にはイギリスから輸入された超伝導サイクロトロンがあり、米国、イタリア、オランダには研究用の大型の超伝導サイクロトロンがあるが、日本にはまだ超伝導サイクロトロンは建設されていない。

1930 年に最初の原子核人工変換に用いられたコッククロフト・ワルトン加速装置は、研究用のほかに、加圧容器に入れて小型化され工業用照射や殺菌に用いられている。機械的に電荷を運んで高電圧を発生するファン・デ・グラーフ加速装置は、初期から高電圧を保持する為に加圧容器に入れられていた。高圧部にイオン源や電子銃を置くシングルエンド型から出発して、負イオンを接地端から正の高電圧の高圧部に向けて加速し、高圧部で正イオンに変換した後、再び接地電極に向けて加速するタンデム型に発展して、原子核研究の他に、より広範囲に微量分析や年代測定に使用されている。コッククロフト・ワルトン加速装置もコンデンサーを電極間の浮遊容量に置き換えたタンデム型が同じ目的に使用されている。現在タンデム型加速装置は米国とベルギーで商品化されているが、日本の企業は撤退した。

2.2 主要な加速器施設

欧米諸国における主要な加速器施設は次表以降に示す通りである。

表 2-1 ヨーロッパ・アメリカの高エネルギー電子加速器（放射光施設を除く）

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数 / 秒)	外形規模 (直径 : m)	完成年	備 考
米国	スタンフォード 線形加速器セン ター (SLAC)	PEP B- Factory	電子・陽電子 非対称衝突器	e- 9.0 e+ 3.1	ルミノシティ $4.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	700	1998	B ファクトリー
		SLAC 3 km Lin-ear Accelerator	直線加速器	35 56	50 mA 20 mA	長 3,050	1966	PEP の入射器にも使用
	コーネル大学	Cornell Electron Storage Ring (CESR Phase)	電子・陽電子 衝突器	5.3x2	ルミノシティ $2 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	240	1999	
		Cornell Electron Synchrotron	シンクロトロン	12.2	3×10^{10} per pulse	240	1967	CESR Phase の入射器
	トマス・ジェフ ァーソン国立研 究所 (Jlab)	CEBAF Super- conducting Linac	直線加速器 (超伝導、5 回還 流型)	5.5	200 μ A CW	周長 1400 (レーストラック)	1990	
スイス	欧州合同原子 核研究機関 (CERN)	LEP (Large E- lectron Positron Collider	電子・陽電子 衝突器	104.5 x2	ルミノシティ $5.6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	8,486	1989	2000 運転停止
ドイツ	ドイツ電子シ ンクロトロン 研究所 (DESY)	DESY 2	シンクロトロン	8	3.1×10^{11}	93.2	1985	DORIS 3 (放射光専用) と PETRA 2 の入射器

表 2-2 ヨーロッパ・アメリカの高エネルギー陽子・重イオン加速器 (1/2)

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数/秒)	外形規模 (直径:m)	完成年	備 考
スイス	欧州合同原子核 研究機関 (CERN)	SPS (Super Proton Syn- chrotron)	シンクロトロン	450	3.4×10^{12}	2,200	1976	重イオン加速にも使用 電子・陽電子衝突器 LEP の入射器 として電子・陽電子も加速
		CPS (CERN Proton Syn- chrotron)	シンクロトロン	28	2.6×10^{13}	200	1959	素粒子・原子核実験 SPS の入射器 重イオン加速にも使用
		PSB (CERN PS Booster)	シンクロトロン (4段重ね)	1.4	3.4×10^{13}	50	1972	CPS の入射器 重イオン加速にも使用
		Linac 2	直線加速器	0.05	176 mA	長 33.6	1978	CPS 又は PSB の入射器
		Linac 3	直線加速器		0.25 electrical mA	長 8.1	1994	重イオン加速、CPS の入射器 Pb55+を 4.2MeV/u に加速
		AD (Anti- proton Decelerator)	シンクロトロン (減速)			54	1998	反陽子を 2.76GeV から 5.31 MeV に減速
		LHC (Large Hadron Collider)	シンクロトロン 兼衝突器 (2リング)	7,000x2		8,486	(2006)	陽子・陽子衝突 LEP のトンネルに建設中
米国	フェルミ国立加 速器研究所 (FNAL)	Tevatron	シンクロトロン	1,000x2	ルミノシティ $2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	2,000	2001	陽子・反陽子衝突 超伝導電磁石
		Main Injector	シンクロトロン	150	1.5×10^{13}	1,056	1992	Tevatron の入射器
		Fermilab Booster	シンクロトロン	8	4.5×10^{12} per pulse	150.94	1971	Main Injector の入射器
	ブルックヘブン 国立研究所 (BNL)	AGS (Alternating Gradient Synchrotron)	シンクロトロン	33	4×10^{13}	256.9	1960	重イオン加速にも使用 (RHIC の入射器)
		AGS Booster	シンクロトロン	1.94	2×10^{13} per pulse	64.118	1991	AGS の入射器
		Brookhaven 200-MeV Linac	直線加速器	0.2	35-40 mA	144.8	1970	AGS Booster の入射器
		RHIC (Relativ istic Heavy Ion Collider)	シンクロトロン兼 衝突器	100 MeV/u	ルミノシティ $2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1,220	1996	陽子から金までの衝突 超伝導電磁石

表 2-2 ヨーロッパ・アメリカの高エネルギー陽子・重イオン加速器 (2/2)

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数/秒)	外形規模 (直径: m)	完成年	備 考
ドイツ	ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY)	HERA	シンクロトロン 兼電子・陽子衝突器	e 27.5 p 820	ルミノシティ 1.6×10^{31} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	2,054	1990	陽子リングは超伝導電磁石
		PETRA 2	シンクロトロン	e 12 p 40	2×10^{12} 6×10^{12}	733.4	1989	HERA への電子・陽電子・陽子の入射器、放射光
		DESY 3	シンクロトロン	7.5	2.95×10^{11}	100.84	1989	PETRA 2 の入射器
	重イオン研究所 (GSI)	SIS	シンクロトロン	U 0.05 - 1 GeV/u Ne 0.05 - 2 GeV/u		69	1990	
		ESR	蓄積リング	U 0.03 - 0.56 MeV/u Ne 0.03 - 0.83 MeV/u		周長 108	1990	電子冷却、ストカスティック冷却
		UNILAC	直線加速器	2 - 20 MeV/u			1981	SIS の入射器
ロシア	セルプコフ高エネルギー物理学研究所 (IHEP)	70 GeV Proton Synchrotron (U-70)	シンクロトロン	76	1.5×10^{12}	236.3	1967	重イオン加速にも使用
		1.5 GeV Fast Cycling Booster Synchrotron	シンクロトロン	1.5	2.3×10^{12}	31.6	1983	U-70 の入射器
		I-100 linear proton accelerator.	直線加速器	0.1	140 mA	長さ 80	1967	Alvarez 型
		I-30 linear proton accelerator	直線加速器	0.03	100 mA	長さ 21.3	1983	RFQ 型、1.5 GeV Fast Cycling Booster Synchrotron の入射器
	ドブナ合同原子核研究所 (JINR)	Nuclotron	シンクロトロン	6 GeV/u	5×10^{11} per pulse	80	1993	重イオン加速にも使用
	理論実験物理学研究所	U-10	シンクロトロン	10	7×10^{11}	80	1961	
		UK Booster Synchrotron	シンクロトロン	20-700 MeV/u	1×10^{10}	70	1998	重イオン加速にも使用
		I-2	直線加速器	24.6	230 mA	長さ 6	1966	U-10 の入射器

表 2-3 ヨーロッパ・アメリカの中性子源用陽子加速器

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数/秒)	外形規模 (直径:m)	完成年	備 考
英国	ラザフォード・アップルトン研究所 (RAL)	ISIS	シンクロトロン	0.8	0.2 mA	52	1986	兼ミューオン源
		70 MeV Linac	直線加速器	0.07	20 mA	長さ 35 m	1985	ISIS の入射器
スイス	ポールシェラー研究所 (PSI)	PSI-Ring Cyclotron	サイクロトロン	0.59	1.5 mA CW	磁極径 9.2	1974	パイ中間子工場として出発
		Injector 2	サイクロトロン	0.072	1.85 mA CW	磁極径 3.42	1984	Ring Cyclotron の入射器
カナダ	トライアンフ研究所 (TRIUMF)	TRIUMF-Cyclotron	サイクロトロン	0.52	0.14 mA CW	磁極径 34	1974	パイ中間子工場として出発
米国	ロスアラモス国立研究所 (LANL)	PSR	蓄積リング	0.8	0.2 mA	30	1986	
		LANL Proton Linac	直線加速器	0.8	6 mA	長さ 800	1972	パイ中間子工場として出発 PSR の入射器
	アルゴンヌ国立研究所 (ANL)	RCS (rapid cycling synchrotron)	シンクロトロン	0.45	0.015 mA	12	1981	IPNS (Intense Pulsed Neutron Source)の加速器
	オークリッジ国立研究所 (ORNL)	SNS	蓄積リング	1.0	1.4 mA	78.9	(2006)	建設中
		SNS H minus Linac	直線加速器	1.0	24 mA	長さ 331	(2006)	建設中、SNS の入射器 超伝導高周波空洞

表 2-4 国内の大規模加速器施設

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数/秒)	外形規模 (直径:m)	完成年	備 考
	高エネルギー加速器研究機構 (KEK)	KEK-PS	シンクロトロン	12	3.6×10^{12}	108	1976	陽子シンクロトロン S カミオカンデのニュートリノ源
		KEK ブースター	シンクロトロン	0.5	4.4×10^{13}	12	1974	12-GeV PS の入射器 中性子、ミューオン源 陽子線治療(2000 終了)
		KEK 陽子 ライナック	直線加速器	0.04	10 mA	長さ 30	1974	KEK ブースターの入射器
		TRISTAN	電子・陽電子 衝突器	32x2	ルミノシティ $4.1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	960	1986	1995 運転停止
		KEKB	電子・陽電子 非対称衝突器	e- 8.0 e+ 3.5	ルミノシティ $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	960	1998	B ファクトリー TRISTAN のトンネルに建設
		PFAR	蓄積リング	6.5	60 mA	周長 374	2002	単バンチ放射光源
		PF (Photon Factory)	蓄積リング	2.5	450 mA	周長 187	1981	放射光源
		電子陽電子入射 器	直線加速器	e- 8.0 e+ 3.5	1 nQ/bunch 0.6 nQ/Bunch	長さ 600	1998	PF、PFAR、KEKB の入射器
		ATF ダンピング リング	蓄積リング	1.3	60 mA	周長 140	1996	Linear Collider 用高品質ビーム開発
		ATF ライナック	直線加速器	1.5	1×10^{10} per bunch	長さ 70	1993	ATF ダンピングリングの入射器 20 bunches
	理化学研究所	RRC 理研リング サイクロトロン	サイクロトロン	210 MeV/u	0.3 pμA	磁極径 3.56 m	1986	
		理研 AVF サイク ロトロン	サイクロトロン	14.5 MeV/u	10 pμA	磁極径 0.714 m	1989	RRC の入射器
		RILAC	直線加速器	16 MeV		長さ 29	1981	重イオン可変周波数ライナック RRC の入射器
		fRC	サイクロトロン			K=510		RI ビームファクトリー
		IRC	サイクロトロン			K=980	(2004)	RI ビームファクトリー、建設中
		SRC	サイクロトロン	350 MeV/u	1 pμA	K=2500	(2005)	RI ビームファクトリー、建設中

表 2-5 国内の大規模加速器施設

国別	機関名	加速器名称	機 種	エネルギー (GeV)	ビーム強度 (粒子数/秒)	外形規模 (直径:m)	完成年	備 考
	大阪大学核物理 研究センター (RCNP)	RCNP リング サイクロトロン	サイクロトロン	0.4 MeV/u	0.5 pμA	磁極径 4 m	1991	
		RCNP AVF サイクロトロン	サイクロトロン	80 MeV/u	50 pμA	磁極径 1 m	1974	RCNP リングサイクロトロンの入射器
	(財)高輝度光科 学研究センター (理研・原研)	SPring 8	蓄積リング	8	100 mA	457	1997	放射光源
		シンクロトロン	シンクロトロン	8	10 mA	126	1996	SPring 8 の入射器
		ライナック	直線加速器	1	1 nQ/bunch	長さ 140	1996	8 GeV シンクロトロンの入射器 姫路工業大ニュースバルの入射器
	姫路工業大学	ニュースバル	シンクロトロン 兼蓄積リング	1.5	500 mA	周長 118.7	2002	放射光源
	高エネルギー加 速器研究機構・日 本原子力研究所	シンクロトロン	シンクロトロン	50	0.015 mA	周長 1,600m	(2007)	大強度陽子加速器計画
		シンクロトロン	シンクロトロン	3	0.333 mA	99.8	(2006)	50 GeV シンクロトロンの入射器 中性子、ミュオン源
		ライナック	直線加速器	0.4	50 mA	長さ 250 m	(2005)	3 GeV シンクロトロンの入射器

表 2-6 海外諸国の主要加速器の実態（放射光施設）

場 所	リング（関数）	電子エネルギー（GeV）	注	場 所	リング（関数）	電子エネルギー（GeV）	注
韓国 Pohang	Pohang Light Source	2	専用	（台湾） Hsinchu	SRRC(Synch.Rad.Res.Ctr)	1.3-1.5	専用
オランダ Amsterdam Eindhoven	AmPS EUTERPE(Tech.Univ.Eind.)	0.9 0.4	利用計画中 利用計画中	デンマーク Aarhus	ASTRID(ISA)	0.6	部分的に専用
ロシア Moscow	Siberia (Kurchatov Inst.) Siberia (Kurchatov Inst.)	0.45 2.5	専用 専用	英国 Daresbury	SRS(Daresbury) DIAMOND(Daresbury) SINBAD	2 3.0 0.6	専用 専用/計画中 専用/計画中
	Novosibirsk	VEPP-2M(Inst.Nucl.Phys.) VEPP-3 (Inst.Nucl.Phys.) VEPP-4 (Inst.Nucl.Phys.) Siberia SM(Inst.Nucl.Phys.)	0.7 2.2 部分的に専用 部分的に専用 部分的に専用 専用/建設中	フランス Grenoble Orsay	ESRF DCI(LURE) SuperAco(LURE) SOLEIL(LURE)	6.0 1.8 0.8 2.15	専用 専用 専用 専用/計画中
	Zelenograd	TNK(F.V.Lukin Inst.)	1.2-1.6 専用/建設中				
スペイン Barcelona	Catalonia SR Lab.	2.5	専用/計画中	ドイツ Berlin	BESSY BESSY	0.8 1.7	専用 専用/建設中
スウェーデン LUND	MAX (U.Lund) MAX (U.Lund)	0.55 1.5	専用 専用	Bonn	ELSA(Bonn Univ)	1.5-3.5	部分的に専用
スイス Villigen	SLS(Paul Scherrer Inst.)	2.1	専用/計画中	Dotrmund	DELTA(Dortmund U.)	1.5	専用/FEL 用
タイ		1.0-1.3	検討中	Dresden	Rosy(Res.Ctr.Rossendorf)	3.0	専用/計画中
ウクライナ Kharkov	N-100	0.7-1.4	専用	Hamburg	DORIS (HASYLAB/DESY) PETRA (HASYLAB/DESY)	4.5-5.3 7-14	専用 部分的に専用
	Kiev	HP-2000 ISI-800(UNSC)	専用/計画中 専用/計画中	Karlsruhe	ANKA(Res.Ctr.Karlsruhe FZK)	2.5	専用/建設中
米国 Argonne Baton Rouge Berkeley Durham Gaithersburg Ithaca Raleigh Stanford Stoughton Upton	APS(ANL) CAMD(Louisiana State U.) ALS(LBL) FELL(Duke U.) SURF (NIST) CESR(CHESS) NC STARN(N.Carolina S.U.) SPEAR(SSRL) Aladdin(SRC) NSLS (BNL) NSLS (BNL)	7.0 1.4 1.5-1.9 1-1.3 0.28 5.5 2.5 3-3.5 0.8-1.0 0.75 2.5-2.8	専用 専用 専用 専用/FEL 専用 部分的に専用 専用/計画中 専用 専用 専用 専用	インド Indore	INDUS- (Ctr.Adv.Tech.) INDUS- (Ctr.Adv.Tech.)	0.45 2	専用/建設中 専用/計画中
ブラジル Campinus	LNLS-1 LNLS-2	1.15 2.0	専用/建設中 専用/計画中	イタリア Frascati Trieste	DAFNE(LNF) ELETTRA(Sunch.Trieste)	1.5 1.5-2	寄生的利用/建設中 専用
カナダ Canada	CLS(Canadian light Source)	2.5	計画中				
中国 Beijing	BEPC(Inst.High En.Phys.) BLS(Inst.High En.Phys.)	1.5-2.8 2.2-2.5	部分的に専用 専用/計画中				
	Hefei	NSRL(USTC)	0.8 専用				
	Shanghai	SSRF(Inst.Nucl.Phys.)	2-2.5 専用/計画中				

出典)「加速器工学ハンドブック」(平成12年3月、(社)日本原子力産業会議発行)
より作成

3. アジア諸国の加速器開発・利用の現状

3.1 中国の加速器開発・利用の現状

3.1.1 序論

北京電子・陽電子コライダー (BEPC)、Lanzhou の重イオン研究施設 (HIRFL)、および 80 年代の終わりに構築された Hefei シンクロトロン放射施設 (HESYRL) は、中国のシンクロトロン放射光の応用研究、素粒子物理学、重イオン原子物理学の実験研究により状況を与えた。過去 10 年間でそれらの装置は常に改良されたため、装置の性能は非常に改善された。1996 年以来、3 つの加速器を開発する加開発計が提案されている。

3.1.2 基礎研究目的の加速器

BEPC、HIRFL および HESYRL は基礎研究を目的とした設備である。最初の 2 つは 1980 年代の後半に完成し、最後のものは 1992 年に完了した。

(1) BEPC

BEPC は、高エネルギー物理学およびシンクロトロン放射実験のために運転されている。1 年当たり稼働時間は、1995 年 3 月まで、約 95% の稼働率で約 5500 時間であった。高エネルギー物理学については、運転方法の改良で BEPC の統合ルミノシティが、1992 年から 1994 年まで年々上昇したため、多くの重要な物理学結果、例えば、 e^+e^- 質量測定、 (2230) 粒子についてのより深い理解などを得た。

装置はルミノシティの改良のために 1995 年 6 月から 1996 年 3 月までシャット・ダウンされた。この期間に、線形加速器を対象として、新しく設計・設置された、高周波電源、150MW の変調器、および 65MW のクライストロン、およびその他の改良によって、線形加速器からの出力ビーム・エネルギーは、1996 年の 5 月に 1.3GeV から 1.55GeV に増加した。これは J/ψ 実験のためのリングへの十分なエネルギーを有する入射器である。

四極子は約 40cm 相互作用ポイント(IP)の方へ移動し、IP での垂直 関数を 8.5cm から 5cm までを減少させることによって、 J/ψ エネルギー (1.55GeV/ビーム) のピーク・ルミノシティは、1.5 ~ 1.7 倍増加し、1996 年の 5 月に $4.010^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上に達した。

1 年のうち、1 ~ 2 か月間運用される専用 SR モードについては、2.2GeV のエネルギー、30 ~ 80 mA のビーム電流を備えた電子線が得られている。1991 年以来、約 5000 時間の専用ビーム時間は、国内 35 の研究所および大学の 100 人を越える利用者に提供された。また、実行された研究企の数は過去 5 年に 200 以上であった。

多周期ウィグラーの新しいビーム・ライン 3W1A および 3W1B が導入された。永久磁石で作られていたウィグラーは、5 つの周期、および 1.5 テスラの強度を有している。新しいビーム・ラインからのフォト・フラックスの強度は $\sim 10^{14} \text{ph/s.rad}$ である。さらなる開発

として、高ルミノシティ北京タウ・チャーム・ファクトリー (BTCF) が提案された。標準モードの最大ルミノシティは 2.0GeV で $110^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、垂直偏極モードとモノクロマティック・モードも提供されることになっている。

装置は対称な垂直に分離された、それぞれ周囲 385m の 2 つのリングで構成されている。相互作用ポイントにおけるマイクロ ($y=1\text{cm}$) が採用される予定である。1 本のビームあたりのビーム・カレントの合計は 560mA である。ビームあたり 86 バンチ、水平交差角度は $\pm 2.6\text{mrad}$ である。相互作用を生じる領域に超伝導四極電磁石、および超伝導空洞が使用されることになっている。

(2) HIRFL

HIRFL は、入射 SFC (セクター集束サイクロトロン、 $K=69$) および主加速器 SSC (分割セクター・サイクロトロン、 $K=450$) から構成される。HIRFL は、物理学実験に 3500 時間/年のビーム時間を提供することができる。そして、イオンは C から Xe までである。1995 年以来、いくつかの重要な実験結果が HIRFL で得られた。例えば、6 つの新しい核種 (^{208}Hg 、 ^{185}Hf 、 ^{237}Th 、 ^{175}Er 、 ^{239}Pa 、 ^{235}Am) の合成、および 4 つの新しい核種 (^{153}Er 、 ^{157}Yb 、 ^{209}Fr 、 ^{130}Cs) の崩壊スキームの確立である。

2 つの機器の更新が最近完成した。1 つは SFC の新しい入射器の開発である。それは、新式の ECR の追加、SFC の真空状態の改良、および SFC の垂直入射システムの改良である。その結果、イオンは Xe から U まで拡張することができ、ビーム強度を 10 倍に増加させることができる。もうひとつは、SSC の後ろの新しいビーム・ライン RIBLL (Lanzhou の放射性イオンビーム・ライン) が構築された。

RIBLL は ^{19}Ne 、 ^{17}F および ^{17}N を 10^6PPS 程度の強度で得られるようになっている。

(3) HESYRL

HESYRL は主として 200MeV の線形加速器、および 800MeV の蓄積リングから構成されている。1993 年以来、SR ユーザのために 25000 時間稼働している。典型的な運転使用は、 800MeV でビーム強度は 150mA 、ビームエミッタンスは $\sim 166\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、寿命は 10 時間である。これまでのところ、5 ビーム・ラインと VUV および軟 X 線範囲のユーザーの実験に適した施設を持っている；すなわち、X 線リソグラフィ、時間分解分光学、軟 X 線顕微鏡、光化学、使用、電子分光学のビーム・ラインと実験施設である。異なる機関からの約 100 のユーザ・グループが登録され、120 の研究課題が今年度選択された。

(4) SSRF

特に上海地域では、21 世紀に中国の科学および技術の発展の要求を満たすために、新しいプロジェクト (SSRF) は 1994 年末以来ずっと提案されている。SSRF のエネルギーは、予算の制限により $2.2\text{GeV} \sim 2.5\text{GeV}$ である。したがって、VUV と軟 X 線の光源となる。よ

り低い自然エミッタンス(~ 4 nm.rad)により、SSRF は、VUV(10^{18} Ph./s.mm².mrad².0.1%BW、10eV、アンジュレータ)、軟 X 線(10^{19} Ph./s.mm².mrad².0.1%BW、3keV、アンジュレータ)、および硬 X 線(10^{15} Ph./s.mm².mrad².0.1%BW、3~60keV、超伝導磁石)の高い光を提供する。

SSRF は、将来の開発用の潜在成長力を持っています。SSRF の将来のユーザーおよび潜在的なユーザーの広範囲な調査に基づいた SSRF の設計目標は、15 本のビーム・ライン、および SSRF の実験棟は、蛋白質結晶学、XAFS、汎用回析学、光電子分光学、汎用散乱解析、軟 X 線顕微鏡、LIGA などが提案された。

SSRF の全コストは少なくとも 8 億・中国元(1995 年度)である。SSRF が 2003 年の中旬に完成することを望んでいるが、審議の結果、研究開発資金(約 8000 万元)が承認されたばかりである。

3.1.3 低エネルギー加速器

過去十年間で、低エネルギー加速器、特に放射線療法への適用、放射線処理、放射線リソグラフィーなどが急速に発展してきた。

(1) 線形加速器

医療用の電子線線形加速器は、人間のガンの治療に重要な役割を果たしてきた。中国では、およそ 160 万人の新しいガン患者、および 130 万人の死者が毎年いると推測されている。中国において膨大なガン患者が存在することから、医療用の線形加速器は急速に普及し、合計 300 台程度存在する。しかしながら、中国全土の必要を満たすことはまだ十分ではない。医療用線形加速器のおよそ半分は手製であり、高度な放射線療法の設備は輸入されている。ほとんどの手製の線形加速器のエネルギーは、4~6MeV 程度である。最近開発された 14MeV の電子線線形加速器は、6MV および 15MV の 2 つの X 線モード、5 つのモード E-放射線、6、8、10、12、14MeV を提供することができる。装置の線量率は、それぞれ X 線モードで 2.5Gy/min.m、および E-放射線モードで 4.0Gy/min.m である。放射線照射領域は 40cm x 40cm である。

金属、および非金属の非破壊検査に使用される電子加速器も中国では製造されている。ラジオグラフィに利用される加速器のうち、少数が中国製である。最近、Tsinghua 大学(TSHU)は、税関における大型コンテナのオンライン検査へ線形加速器を応用することに成功した。この装置の最大線量率は、40Gy/min.m に達し、ビーム・スポット・サイズは直径 1.5 mm 未満である。線形加速器および検査システムは TSHU によって開発された。

その他では、ラジオグラフィ用の強力な 9MeV SW 電子線線形加速器が中国で開発された。この装置は非常に強い X 線を放射し、その線量率は 30Gy/min.m、ビーム焦点スポットは直径 1.5 mm である。この線形加速器は、マイクロの波動力源として s-バンド 2.6MW

可調整マグネトロンを使用している。加速されたビーム・カレントは 120mA に達する。

上記の応用とは別に、いくつかの線形加速器は近年 FEL 研究用に使用われている。IHEP の 30MeV 高周波線形加速器は、コンプトンレジメ IRFEL を構築するために採用された。出力パルス平均パワーは 2~5kW であった。中国工程物理研究院 (CAEP) の高カレント 3.5 MeV 誘導型線形加速器は、ミリ波 FEL 増幅装置設備を開発するために利用された。1994 年には、最大出力が 140MW を超えた。4 MeV 高輝度 ($3 \times 10^9/\text{m}^2 \cdot \text{rad}^2$) L 周波帯線形加速器は、中国原子能研究院 (CIAE) において 100~200 μm の FEL を得るために建設された。さらに、50MeV 高周波線形加速器が上海 (SFEL) の広領域 FEL で建設中である。

(2) 陽子線形加速器と重イオン RFQ

近年、35MeV 北京陽子線形加速器 (BPL) は、医学利用に主に利用されてきた。中性子ビームは、ベリリウムをターゲットした 35MeV 陽子によって生産され、ガン患者を治療するために使用されている。これまでのところ、300 人を越える患者が高速中性子によって治療された。

加速器科学および技術の広範囲な進歩により、核廃棄物の変換、および核エネルギーの増幅などの応用分野に高強度・中エネルギー陽子加速器を構築することが可能となった。加速器駆動の原子力発電システム (AD NPS) の提案は、IHEP および CIAE によって提案された。第 1 のステップとして、検証装置は次の 10 年にうちに建設されること予定しており、それは 150MeV、平均カレント 3mA の陽子線形加速器、および 0 パワーサブクリティカル・ブランケットから構成されている。この線形加速器は、原理検証の目的のためだけでなく、本格的な線形加速器のプロトタイプでもある。第 2 のステップとして、テスト用のデモ装置は、さらに 10 年のうちに建設され、1GeV、10~20mA の陽子線形加速器、および対応するサブ・クリティカルな炉とターゲットシステムから構成される予定である。

重イオン RFQ の研究に関しては、北京大学 (PKU) が、26MHz のインテグラル・スプリット・リング (ISR) RFQ のプロトタイプを構築した。タンクの長さは 0.9m、その直径は 0.5m である。40kW の高周波最大出力では、1/6 のデューティ・ファクターで、75kV のインターロッド電圧が達成される。平均出力ビーム・カレントは、窒素イオンで 16mA であり、22 keV から 300 keV までのエミッタンス効率は 50% である。プロトタイプにおいては、1MeV 酸素イオンについて 26MHz の ISR RFQ が、重イオン RFQ およびイオン注入に関する研究用に建設されている。

(3) サイクロトロン

医学利用における放射性同位体生産用に 30MeV、およびビーム・カレント 300mA 程度を備えた 4 つの小型サイクロトロン、および中国科学院上海原子核研究所 (SINR) に非常に高感度なミニ・サイクロトロン質量分析計(SMCAMS)がある。

第 1 の小型の医療用サイクロトロンは 1984 年に米国から輸入された。

第 2 のものは 1993 年のベルギーから輸入され、1995 年末に完成した。

第 3 のものは 1995 年に CIAE で稼動した。30MeV で陽子を加速し、350 μ A を越えるビーム強度である。その消費電力は 100kW 未満である。設計はベルギーの IBA によって行われた。2000 年の稼動状況は良好で、7 つの医学用の短寿命中性子同位体が国内市場のために生産された。

第 4 のものは UCLA(アメリカ)によって提供され設置されている。

SMCAMS は炭素 14 の分析に特化しており、現在では炭素 14 の計数効率の向上や、その他の炭素 12、炭素 13 なども加速できるように改良している。

3.1.4 高電圧電子加速器

(1) タンデム型加速装置

初めての 21.0MV のタンデム型加速装置が 1981 年に TSHU で稼動して以来、15 のタンデム型加速装置が中国で次々と設置された。

CIAE の HI-13 タンデム型加速装置は、傾けられたフィールドおよび大口径加速器管、ラダトロン・チャージ・システムおよび水平のタンクを備えた HVEC 型装置である。1986 年建設され、1987 年に通常の運転スケジュールに組み入れられた。その時以来、HI-13 タンデム加速装置の稼動状況は良好である。

ラダトロン・チェーン、高電圧用の分割抵抗、および真空機器など、いくつかの主要な予備部品は国産品を使用している。1995 年末までに、原子物理学の分野で 137 を越える実験で行なわれた。オクスフォードからの EN タンデム型加速装置は改造され、北京大学(それは毎年、実験に約 1000 時間利用できる)で 1990 年前半に稼動し始めた。加速器質量分光法 (AMS) は、この装置の主要な研究・応用分野である。Be から Br のイオンが、さまざまな目的のために加速された。AMS の測定精度は 1.7%に達し、AMS ビーム・ラインの効率は、25 ~ 40%の範囲である。また、この装置の感度は、 3×10^{-14} であり、限界感度は 1.0×10^{-15} を達成できる。600 を越えるサンプルが 1993 年以来測定された。夏-商-周王朝の年代測定研究のために、より高精度(0.1 ~ 1.0%)、感度(約 10^{-15})、および効率(>50%)を目指す改良が行われている。

SINR の 2×6 MV のタンデム型加速装置は、SINR 自身で設計・建設された中国製のタンデム加速器で最も高い端子電圧を有している。この装置は 1992 年に運転を始めた。1992 年以来、この装置は、AMS の研究・応用、および低エネルギー原子物理学実験研究のため

に利用されてきた。放射線量の制限のため、稼働時間は週に 2 日間に制限されている。

他のいくつかの小さなタンデム型加速装置については、上海 Fudan 大学の $2 \times 3\text{MV}$ タンデム、Lanzhou 現代物理学研究所の $2 \times 2\text{MV}$ タンデム、などがあり、主にイオン・ビーム分析およびイオン注入などの研究に利用されている。

(2) 放射線処理のための電子加速器

中国の放射線処理の産業は急速に増加している。放射線処理のための電子加速器の総数は約 45 である。また、電子線の合計は現在 1.5MW である。放射線処理の主要な応用分野は、ワイヤーとケーブルの相互接続、熱収縮チューブと成形、食品照射等である。中国で最もポピュラーな加速器はダイナミトロンである。最近過去 4 年で、西安-Feng 発電機工場 (2MeV) に加えて、IHEP および SINR は、ケーブル照射のために 3MeV および 20mA のダイナミトロンを完成させた。

(3) 大強度相対論的電子線加速器

大強度相対論的電子線加速器 (IREB) 技術は、1960 年代以来急速に開発されている。現在、25 セット以上の IREB 加速器が導入され稼働している。それらの中で、CAEP の Flash I (8MeV , 100kA , 80ns)、および線形誘導型加速器 (10.3MeV , 2.1kA , 70ns) Northwest Institute of Nuclear Technique では、Flash (1MV , 1MA , 70ns) が主な設備である。近年、NINT は、誘導エネルギー蓄積、及び高反復パルス電子線加速器の開発に専念している。

1970 年前半では、IREB 装置は、主にフラッシュ X 線、ラジオグラフィ、放射線擬似ソースとして使用したり、材料や構造の放射線電子効果や熱力学的効果の高速度過渡現象の研究に使用したりしている。最近、それらのうちのいくつかは CAEP の線形誘導型加速器のように、FEL 開発研究のための高輝度電子源として利用したり、高出力マイクロ波、およびエキシマー・レーザーのポンピングの研究開発のために使用されている。

3.2 マレーシアの加速器開発・利用の現状

3.2.1 はじめに

マレーシアでは、ほとんどの加速器設備が基礎研究のために使用されていない。マライ大学 (UM) の設計・建設された z-ピンチプラズマ・フォーカス装置は、中性子および軟 X 線のパルス線源として広範囲な特徴を有している。さらに、ペナンのマレーシア理科大学 (USM) で、従来の DT 高速中性子発生装置は、高速中性子の均一な緩和に関する研究に使用された。熱中性子放射化分析 (TNAA)、中性子ラジオグラフィーおよび小角度中性子散乱 (SANS) のための施設は、Malaysian 原子力研究所 (Malaysian Institute for Nuclear Technology and Research; MINT) で利用可能となり、その 1MW の TRIGA Mk II プール型原子炉を使用している。MINT にある電子線 (EB) 施設の目的は、一連の産業と医学の製品に付加価値をつける応用分野を見つけるためである。

医学への応用では、比較的多くの電子線形加速器が過去 15 年にわたってマレーシア放射線治療研究機関に設置された。マライ大学は特に、最先端の医療用線形加速器を所有している。鼻咽頭ガン (NPC) 治療についての研究、中国系の民族の間で特に流行している悪性疾病の研究では、まだ初期段階である。

3.2.2 加速器開発の歴史

マレーシアで加速器は 1968 年に初めて登場した。第 1 の装置は、新しく設置されたクアラランブル病院の放射線治療研究所に導入され、6MV の光子用の進行波型線形加速器と 5 ~ 43MeV の電子を供給できるシーメンスのベータトロンが設置された。研究を目的とした加速器の最初の設置は 1970 年代であった。これらのうちの 1 つはドイツからの装置でプラズマを発生することができ、その他の 2 台の機械が中性子発生装置 (フランスから) であった。これらの装置はマレーシアの物理学者で原子と低エネルギー原子物理学の詳細な研究へ参加していた人たちからの意見を反映させたものであった。

1980 年前半以来、医療用線形加速器の設置が急増した理由は、高い信頼度を有する小型の装置が開発されたことに刺激されたためである。電子線形加速器を装備した放射線治療センターは、人口に応じて適切に配置されている。医学利用の電子線形加速器は、クライストロンあるいはマグネトロンのいずれかによって運転される定常波装置になる傾向がある。

1980 年は、さらに放射線処理産業で成長が見られた。その分野では、医療用品と健康製品の殺菌が主な需要である。現在稼働中の 3 施設のうち、よく稼働しているコバルト 60 照射装置は、10 年間以上運転中である。その他の 2 つは民間企業が所有している。1990 年代初期の全国における、放射線処理能力は日本の JICA の支援によって Malaysian 原子力研究所 (MINT) に建設された専用の高出力電子線照射装置によって大きく増加した。

医学と産業用で加速器の利用が拡大していく一方で、全国規模の加速器施設の建設の計画はない。シンクロトロンのような装置は、原子物理、製品分析、およびバイオ医学の研究における研究の刺激において非常に効果的であるとわかった。マレーシアでもっとも可能性のあるシナリオとして、マレーシア人科学者が国際共同研究センターでの研究活動に参加していくことである。

3.2.3 マレーシアの加速器開発・利用

(1) 基礎研究

マライ大学は、プラズマ物理学研究の専用である z-ピンチ装置を所有する、マレーシアで最初の高エネルギー研究施設であった。パルス中性子の発生に関する研究に専念していた。マレーシアの 2 つの大学（マレーシア理科大学（USM）および国立マレーシア大学（UKM））は、中性子発生装置（フランスの Sames によって設置された）を所有している。この装置は 14.1 MeV の中性子が発生でき、4 で、約 10^7 の高速中性子束が可能である。エネルギー範囲が 8~12MeV の擬単一エネルギーの中性子発生は、回転面に作られた薄い固形パラフィン変換器を用いて可能になった。部屋散乱および高速中性子束の制限により、USM の中性子発生装置は、実用的な 8~12MeV の中性子発生源にすることはできない。USM で中性子発生装置を使用する研究は、最近減少した。

(2) 放射線療法物理学

上記に述べたように、電子治療は最初にクアラルンプール病院で 6MV の MEL-75 線形加速器、および 5~43MeV のエネルギーを利用可能なシーメンス・ベータトロンの設置と共に、1968 年から利用可能になった。約 1985 年以来、16 あるいはそれ以上の医療用電子加速器がマレーシアの病院に設置された。現在利用可能な最も高い光子エネルギーは 15MV であり、その他のほとんどの装置は 6~10MV のエネルギーである。電子では、現在同国に設置されている加速器は 5~21MeV のエネルギーを提供している。特に、鼻咽頭ガン(NPC)への適用は重要な研究領域である。

(3) 放射線処理

MINT は放射線処理のために多くの施設を設置した。実例としてコバルト 60 照射施設が殺菌処理に非常によく利用された。さらに、1~30mA のビーム・カレントで、なおかつ 2% 以内に安定した運転のできる 3.0MV の電子線（EB）設備が建設されている。EB 設備の走査ホーンは、幅 120cm（±5%範囲内で線量が均一である）のビームを提供し、材料（素材）は分速 1~20m の速度で駆動されているコンベヤーベルト上で照射することができる。EB 設備は、合板のコーティング、タイルの装飾、光沢紙、印刷インク、ラミネート等、様々なメディアへの放射線照射効果の研究に利用されている。

3.3 韓国の加速器開発・利用の現状

3.3.1 はじめに

韓国では、2001年現在、およそ90の粒子加速器が稼動している。それらのうちで、およそ75の加速器が、病院において、主として電子線によって生成されたX線を使用する腫瘍治療のための高周波線形加速器である。韓国原子力研究所(KAERI)の韓国ガンセンター病院(KCCH)にある1台の22MeVマイクロトロンも同じ目的に使用されている。さらに、4つの病院でサイクロトロンを用いた陽電子放射断層撮影(PET)のために使用される放射性同位体の生産を行っている。13MeVサイクロトロンの建設は、浦項理工大学(POSTECH)の協力でKCCHにおいて進められている。このプロジェクトは2002年3月までに完成することになっており、PETのために ^{18}F 同位体(半減期~110分)を生産する。

1980年代の終わりでは、浦項理工大学(POSTECH)が、第三世代のシンクロトロン放射光源を建設する建設計画を始めた。1988年に始められたこのプロジェクトは1994年に完了しており、プロジェクトの資金は浦項鉄鋼会社(POSCO)、および韓国科学技術省(MOST)からである。2001年9月時点で、合計14ビーム・ラインがユーザーに提供されており、一つのビーム・ラインがコミッショニング中、9本のビーム・ラインが建設中である。2008年末までに、約40ビーム・ラインを導入する予定である。第3世代の装置では、PLS蓄積リング中の遅い軌道ドリフトは、装置の安定稼動を阻害する原因となる。およそ $140\mu\text{m rms}$ の軌道ドリフトが10日間の運転中に観測された。その種の軌道のドリフトを同定し、かつ修正するために組織的な研究が行われている。軌道ドリフトを低減するための改造として、2001年8月に、蓄積リングの空調・換気装置は、トンネル温度を従来の ± 1.0 から ± 0.2 の間に安定させるように変更され、リング・トンネルの空気はリング・トンネルのまわりで循環するように変更した。

KAERIでは、韓国多目的複合加速器(KOMAC)で1GeVの陽子線形加速器を建設中である。この加速器は、主に核変換や陽子治療などに主として使用される。加速器システムは、3MeV RFQ、100MeV CCDTL、および1GeVの超伝導線形加速器から構成される。現在、450keV試験用RFQを作成し、20MeV試験用CCDTLを建築中である。KAERIの別のグループは、産業利用と同様にFEL研究のための電子加速器を稼動し、建設している。

3.3.2 浦項(Pohang)光源

浦項光源(Pohang Light Source, PLS)は2.0~2.5GeVの第3世代シンクロトロン放射光源であり、1995年以来ユーザーの利用に供されてきた。1998年までは、PLSは2.0GeVの電子線エネルギーで運転されてきた。1998年の高エネルギー(>2.4GeV)ビームでの運転に成功した後、1999年により高いエネルギーでの運転を提供するために詳細に調整され

た。2000年には、運転エネルギーが設計目標を超え、170mAの平均入射カレントで、エネルギーは2.5GeVに増加した。最大入射カレントは、ビームの不安性を抑えこむことと、利用可能な高周波電源の制限によって約180mAである。2.0GeVでは、PLSチームが、2000年5月に高周波空洞の冷却と色収差の系統的な制御によって設計目標の300mA蓄えることに成功した。ビーム・カレントの新記録である430mAは、2000年10月に達成された。

第1の挿入装置(U7)には14本のビーム・ラインが稼動中である。さらに、楕円偏極ビーム用のEPU6ビーム・ラインがコミッショニング中、U10アンジュレータが2001年8月に導入された。

3.3.3 KAERIの活動

(1) KOMACプロジェクト

KAERIでは、韓国多目的複合加速器(KOMAC)で1GeVの陽子線形加速器を建設中である。この加速器は、主に核変換や陽子治療などに使用される。線形加速器は最終段階で20mAの強度で1GeVの連続的な陽子線を発生することができる。350MHz CW RFQは50 keVから3MeVまで20mAの陽子線を加速する。RFQは、4つの羽がついたタイプで、56のチューナー、16の真空ポート、1枚のカップリング・プレート、4つの高周波電源駆動ループ、96の通路、および8本の安定ロッドから構成される。RFQからの出力3MeVビームは、700MHz、100MeV CCDTLへ入射される。試験のために、KOMACチームは20MeV CCDTLを開発している。

(2) 電子加速器設備

韓国原子力研究所(KAERI)は1992年以来、3種類の電子加速器を開発してきた。ミリメートル波自由電子レーザー(FEL)のための0.4MeV再循環型静電加速器、遠赤外線FELのための7MeVの小型マイクロトロン、および(e⁻、e⁺、n)の粒子ビームと光子ビーム(FEL、X線、ガンマ線)のための40MeV超伝導高周波線形加速器である。

0.4MeV再循環型静電加速器は、30keV電子銃、400kVの高電圧電源、加速カラム、永久磁石のヘリカル型アンジュレータ、減速カラムおよびコレクタから構成される。MMWFELの最初のレーザー発振は、1995年に達成された。波長は310mmであり、FELの最大出力は1kWであった。1996年からKAERIは7MeVのマグネトロンで駆動されるマイクロトロン加速器を用いて遠赤外線(FIR)FELを開発した。マイクロトロンは非常に小型で(直径70cm)、単純な加速構造である。電子線の高品質なFELを保証するのに十分であった。エネルギーの広がりや0.3%であり、電子線のトランスバース・エミッタンスは1mm mradである。小型で低コストなマグネトロン(高価なクライストロンの代わりに)は、加速器を安く小型で単純にする。特別な技術はマグネトロンの周波数安定化のために開発されている。高機能永久磁石に支援された電磁石アンジュレータは、FIR FELのために開発

されている。アンジュレータの磁界の強度は、純粋な永久磁石アンジュレータより 10%以上高く、その平均二乗分布誤差は 0.05%程度と小さく、それはアンジュレータによって、高 FEL ゲインおよび完全な電子の輸送を可能にする。1999 年末に FIR FEL を最初にレーザー発振させることができた。また、今、FEL は 100 ~ 300mm の波長範囲で安定に作動している。

1999 年以来、新しいプロジェクトが掲げられ、(e⁻、e⁺、n)の粒子ビームと光子ビーム (FEL、X 線、ガンマ線) のための 40MeV 超伝導 (SC) 加速器の開発が行われている。電子線の平均カレントは、光子ビーム用エネルギー回復モードで 10mA、粒子ビーム用の非回復モードで 2.5mA である。加速器への 2MeV 入射器は既に完成しており、それは 300keV 電子銃と 176MHz の常伝導 (NC) パンチャー空洞、および 2 つの 176MHzNC 加速空洞から構成されている。主な加速部のために、CERN からの 2 つの SC 加速器モジュールが使用される。各 SC 加速器モジュールは、4.5 K で動作する 2 つの 352MHz の 4 セル SC 空洞を含んでおり、6MV/m の加速勾配を生成することができる。1 つの SC 加速器モジュールのエネルギー利得は 20MeV である。第 1 の SC 加速器モジュールの設置は 2002 年の半ばで終了する予定である。

3.3.4 医学加速器

韓国ガンセンター病院 (KCCH) が韓国における原子力の医学利用を促進するために 1963 年に放射線学研究所 (Radiological Research Institute) として設立されて以来、KCCH はガンの治療および研究と同じく、放射線医学にも指導的な役割を果たしてきた。中性子治療および放射線治療については、1986 年に Scanditronix 社によって 50MeV の医学用サイクロトロンが病院に設置された。サイクロトロンは、²⁰¹Tl、¹²³I、⁶⁷Ga 等のような放射性同位元素や、特に、診断・臨床用の短寿命放射性同位元素の供給源であった。このサイクロトロンは、韓国内での役割として、サイクロトロンを用いた放射性同位元素の 15%を生産し供給した。これまでのところ、4 つ病院で PET (陽電子放射断層撮影) のために臨床的に重要な陽電子放出源として ¹⁵O、¹³N、¹¹C および ¹⁸F を製造するための専用サイクロトロンを導入した。

KCCH では、中断されず、信頼でき、適切なときに患者のために同位元素を供給できるようにという要望が高まり、PET のために専用の 5~13MeV サイクロトロンを得ること、かつ、別途 30MeV の医学用サイクロトロンの購入を求めてきた。その結果、韓国で PET 用のサイクロトロンを設計することになった。これらのプロジェクトは、中・長期核エネルギー研究計画の第 2 段階として、韓国科学技術省 (MOST) によって支援される。本プロジェクトは 1997 年 7 月に始められ、2002 年 3 月に完了されることになっている。

表 3-1 韓国の加速器

研究用加速器			
イオン	0.4 - 2.0MeV ファンデグラーフ	8 研究所	基礎研究・開発
電子	1.0MeV 静電型	SHI	環境研究・開発
	2.0MeV ES	ADD	非破壊検査
	8.0MeV マイクロトロン	KAERI	FEL
	0.1GeV	PAL	核データ
	2.0GeV	PAL	光源
医療用加速器			
線形加速器	5 ~ 20MeV	約 60 病院	治療
マイクロトロン	22MeV	KCCH	アイソトープ製造
サイクロトロン	50MeV 18 / 13MeV 16 / 13MeV	KCCH SNU 民間企業	治療、PET PET PET

SHI: Samsung Heavy Industry

ADD: Agency for Defense Development

KCCH: Korea Cancer Center Hospital

SNU: Seoul National University

KAERI: Korea Atomic Energy Research Institute

PAL: Pohang Accelerator Laboratory

3.4 ベトナムの加速器開発・利用の現状

3.4.1 はじめに

1974 年以来、中性子発生装置 (10^{10} n/秒) が核データ研究および 14MeV 中性子を使用した放射化分析のためにハノイの物理学研究所 (Institute of Physics; IP) に設置された。1982 年には、15MeV マイクロトロンが Dubna の JINR からハノイの IP に移設された。この装置は、今でも大学院生の教育・研究のために稼働している。重いターゲットが、基礎・応用物理の研究のため制動放射と中性子発生のために使用されている。中性子およびガンマ放射化分析法は地質学と環境の研究用に開発された。ハノイ半導体研究所には、物質科学あるいは安定放射性同位元素分析の分野で教育研究のために使用されているイオン注入装置 MBP-200 がある。それらの設備の主要な技術的な特徴、および現在の状況を表に示す。

3.4.2 研究開発および教育のための加速器ビーム

(1) 14MeV 中性子による核データ

1980 年以来、14MeV の中性子によって引き起こされる反応断面積の測定が中性子発生装置 NA-3C を用いて行われてきた。IAEA の研究契約では、Cr、Ti、Mg、Zn、Mo、Zr、Rb に関する (n, 2n)、(n, p)、(n, n'p)、または(n,)反応について 14MeV 近傍の中性子活性化断面積の測定および分析が行われた。NA-3C が稼働を停止したため、新しい中性子発生装置の購入が 2002 年に、教育目的および放射化分析のために計画されている。

同位体比率は、14MeV の中性子によって引き起こされる(n, 2n)反応で NA-3C を用いて研究されたもの、マイクロトロン MT-17 での制動放射 ($E_{\max}=15\text{MeV}$) によって引き起こされた光核反応で研究されたものがある。

制動放射 ($E_{\max}=15\text{MeV}$) によって引き起こされた光核分裂は、電磁相互作用のすでに知られた特性を備えたマイクロトロン MT-17 で研究された。質量分布は核生成物質の累積生成量によって測定され、電荷分布は個々の核生成物質の一次か、独立した核生成物質の生成量から得られた。ガンマ分光学は同時に異なる短寿命核種の多質量連鎖生成量を測定するために適用された。

これらの研究プログラムは、大学院生教育に著しい成果をあげ、多くの学生たちが NA-3C および MT-17 での実習の後に、原子物理学の PhD および修士論文を仕上げている。

3.4.3 基礎的研究

1996 年には、原子物理学コンピュータセンター (CCNS) が、RIKEN (日本) 支援のもとで設立された、RIKEN と INST の新しい共同プログラムが開始された。最近、原子物理

学グループが CCNS に設置され、主要な研究課題は重イオン・ビームによって引き起こされる核反応である。特にエキゾチック・ビームは、GANIL、RIKEN および世界中にあるその他の重イオン加速器センターで生産している。

場の理論研究は、30 年間ベトナムの伝統的な研究分野である。最近では、標準モデルに及び (SUSY、331 モデル、ストリング理論など) を研究する理論グループが IP にある。超伝導理論を使用したクォーク・グルーオン・プラズマに関する研究は、新しい主流になっている。

ベトナムでは、INST にベトナム・オージェ・トレーニング研究所 (Vietnam Auger Training Laboratory; VATLY) が設置されるまでは、高エネルギー物理学用の実験設備はなかった。その研究所は、宇宙線物理学および電子工学の分野で将来の実験家を養成する、優れた訓練機関である。VATLY が高エネルギー宇宙線を探索するためにピエール・オージェ (Perre Auger) 国際共同プロジェクトに参加することが期待された。このため、CERN における異なる国際共同作業の支援の下を受けて、オージェ水チェレンコフ検出器の正確な複製を VATLY に設置した。最近、大気のみュー粒子スペクトルが初めてベトナムで測定されている。ニュートリノ発振に関する現象論的な研究も、この研究所で行なわれている。IP のホーチミン支部の、B 物理学の CP 破れついでの研究を行うグループでは、米国 Fermilab で最近 D 共同プロジェクトに参加した。

表 3-2 ベトナムの低エネルギー加速器

	名前	設置者 / 年	型式	ビーム	エネルギー	稼動状況
1	中性子発生装置 NA-3C	ハンガリー 1974 年	コックロフト・ウォルトン	重陽子	120keV	使っていない
2	マイクロトロン MT-17	旧ソ連 1982 年	周期的共鳴装置	電子	15 MeV	稼動中
3	イオン注入装置 MPB-200	スイス 1979 年	コックロフト・ウォルトン	イオン	150 keV	わずかに利用中

3.4.4 応用物理学

ダラト原子炉は放射化分析用の非常に強力なツールであるが、ハノイのマイクロトロンおよび中性子発生装置には高エネルギー中性子であるという長所がある。これらの装置は地質学と環境上の軽元素の分析に使用されている。特に、Al、Si、Fe (ボーキサイト中の)、N (ダイズ豆中の)、および F (螢石鉱石中の) の 14MeV 中性子放射化分析は NA-3C で実行された。MT-17 では、制動放射ターゲット (W) および熱中性子ターゲット (^{238}U) の組み合わせが、光・熱励起に基づく複合分析法を開発するために使用された。そして光・熱中性子励起の混合は、分析の感度を著しく改善した。例えば、 ^{114}Cd 、 ^{116}Cd および ^{122}Sn 、 ^{124}Sn については、感度が 2 倍から 10 倍程度改善された。

加速器技術の分野では、イオン注入装置 MPB-200 は 10 年間稼働を停止している。1992 年には、装置を研究活動を活性化するために補修する必要があったが、真空、高電圧、電気・磁気フォーカス、ビーム・モニタリング、電気と機械的制御システムなどのような加速器技術上で有用な訓練設備として役立った。修理は成功し、安定放射性同位元素質量分析を含む物性論および分析技術を MPB-200 で調査研究することが可能になった。

一方、2000 年に 2 つの線形加速器が放射線治療のために、ハノイ・ガン研究所(K-病院) および HCMC Choray 総合病院によって導入された。これらは X 線と電子線治療のために、6 ~ 22MeV からの可変エネルギー型の線形加速器である。線形加速器を用いた放射線療法は、ベトナムにおいて新技術であるため、従来型のコバルト治療と比較して、より正確な訓練が必要である。現在、INST スタッフは、Q-A (品質保証)、メンテナンス、修理などのための加速器技術上のトレーニングを含む、線形加速器を用いた治療の品質保証を増強する技術提携として IAEA プロジェクト (VIE/6/021) を実施している。

3.4.5 電子線 (EB) 利用

ベトナムの人口は約 7660 万であり、新しいガン患者が 1 年当たり約 100,000 人であることが見込まれている。ベトナムには、現在 10 の放射線治療センターがあり、コバルト遠隔照射や短照射治療を行っている。それは絶えず伸びつづける需要を満たすには十分ではない。

最初の 2 つの放射線治療用線形加速器については、放射線療法の新時代を開いた。ベトナムのような開発途上国には、コバルト治療は非常に有効である一方で、加速器治療の迅速な成長も期待されている。加速器技術のより知識を改善することを含みつつ、より良いメンテナンスおよび品質保証を必要としている。

最近の十年間に、EB 加速器技術の進展は、産業だけでなく税関検査でも非破壊試験 (NDT) 用の大規模 CT スキャナーを開発するために使用された。ベトナムは AFTA に加盟し、AFTA の内の自由貿易は急速に輸出入量を増加させるであろう。そのためには、加速器に基づいた大きな X 線の CT スキャナーが将来に経済開発の要求を満たすために必要である。

EB 放射線処理は、自動車用のケーブルを生産するためにポリマーの架橋、熱収縮パッケージの生産、食物の保存処理、医療品の殺菌のような分野で商用利用が進んでいる。酸性雨を回避するための排気ガス処理にも使用されている。それらの応用は、アジア太平洋地域の開発途上国に非常に魅力的である。ASEAN のブロックでは、最初の EB 設備が過去 10 年間でマレーシアとインドネシアで導入された。ベトナムは、表面硬化、ポリマーの性質改変、および他の応用ために EB 放射線技術を開発することを計画している。

3.5 インドネシアの加速器開発・利用の現状

3.5.1 はじめに

インドネシアにおいて、粒子加速器の技術開発と利用活動は、1979年にBATANによって始められた。BATANの高度技術研究開発センター（Research and Development Center for Advanced Technology; RDCAT）では、科学者と技術者が限られた予算の中で、イオン注入用のコッククロフト・ワルトン型200keVイオン加速器の設計と建設の技術力を徐々に高めて行くことに成功した。同様の活動は、中性子発生装置の一部として150keV重陽子加速器でも実行された。インドネシアにおける研究開発は次の2つに分類される：

- 1) イオン注入のためのイオン加速器の設計と設置、研究への応用
- 2) 中性子発生装置のための重陽子イオン加速器および研究活動のためのその適用の研究活動

アイソトープ技術・放射線研究開発センター（Research and Development Center for Isotopes Technology and Radiation; RDCITR）に2つの電子加速器が導入された。ひとつは1984年に300 keV電子線装置（EPS 300）、もうひとつは1993年に2MeV電子加速器GJ-2であった。BATANはSerpongの放射性同位体製造センター（Radioisotope Production Center）に固定低エネルギー・サイクロトロン・モデルCS-30を導入し、運転している。サイクロトロン設備は、スイッチング磁石の6本のビーム管を持っており、2本のビーム管が ^{67}Ga および ^{201}Tl の生産に用いられており、その他のビーム管は研究に使用されている。現在、BATANは、高度技術研究開発センターで加速器を備えた研究所を設立することを計画している。研究所の設立および稼働は、様々な科学技術問題、第1に人間の健康および医学と関係するもの、産業技術、環境保全およびバイオテクノロジーなどの研究に寄与することが期待されている。

3.5.2 コッククロフト・ワルトン型イオン加速器

1979年以来、加速器技術の研究開発はRDCATで行われてきた。主な研究開発として、イオン注入のための200keVイオン加速器の構築、中性子発生装置の一部として150keV重陽子イオン加速器が設計、設置された。

(1) イオン注入装置

RDCATで設置されたイオン注入加速器は、イオン源、最大200kVのコッククロフト・ワルトン高電圧発生装置、加速管、四極子レンズ、質量分離装置、ビーム掃引装置、真空システムおよびターゲット・チャンバーから構成される。イオン注入に必要なビーム・カレントは、数マイクロアンペアから数ミリアンペアの間である。低カレントはMOSデバイス、例えばしきい値電圧の調節などには適当であるが、バイポーラ・トランジスタや物理的・

機械的性質の改変を行う場合には高カレントビームが必要である。

1) 半導体への注入

イオン注入は半導体結晶へのドーピングのための新プロセスとして開発されている。過去に使用された最も一般的なプロセスは、エピタキシー、拡散および合金化であった。エピタキシーの場合には、ドーピングがある層がウエハー上で成長する。拡散プロセス中に、ドーピングされた原子は半導体の表面から内部に拡散される。合金化の場合には、表面近傍の半導体層が再結晶中に溶かされドーピングされる。その性質によれば、注入のプロセスは、注入中の化学的可溶性限界、温度、および半導体表面でのドーパントの集中には基本的に依存しない。現在、注入の研究開発は、半導体材料および金属、あるいは非半導体の表面の改変に集中している。

2) 金属へのイオン注入

イオン注入の用途は、半導体の分野だけに限らず、固体物理および化学など他の分野に適用されている。高カレントの注入装置の開発によって、半導体へのドーピングだけでなく、固体や金属の物理的、化学的、機械的、光学的な挙動を変更することも可能になった。高容量の注入によって、表面の近くの層から別の化合物に変化することも可能である。

反応的な元素（例えばイットリウム、セリウム、ハフニウムあるいはそれらの酸化物）をクロミアあるいはアルミナを生ずる合金に加えた時、高温酸化挙動におけるかなり改良された。少量の反応的な元素の追加は、合金あるいはイオン注入によって可能である。イオン注入では、よく制御され、再現可能な方法によって表面近傍層中の合金に 1 つ以上の元素を加えるという利点がある。

(2) 中性子発生装置

1979 の最初に RDCAT は、中性子発生装置のための低エネルギー重陽子イオン加速器を設計し構築するプログラムを実施した。構築された RDCAT 中性子発生装置は、RF イオン源、最大電圧 150kV のコッククロフト=ウォールトン高電圧発生装置、イオン光学装置、真空装置、ターゲットおよび冷却装置を備えた、さらに空調装置から構成される。

イオン光学装置は、一次ビーム集束ユニット、加速装置、加速されたビームの輸送装置から構成される。ターゲット・ユニットは集中的に冷えることを使用して Ti - T 固定ターゲットから作られる。重陽子ビーム・カレントは最大 2.5mA である。

3.5.3 電子加速器

アイソトープ技術・放射線研究開発センター（Research and Development Center for Isotopes Technology and Radiation; RDCITR）に 2 台の電子加速器が導入され、稼動して

いる。一台は 300keV の電子線加速器 EPS 300 で 1984 年に導入された。もう一台は 2MeV 電子加速器 GJ-2 で 1993 年に導入された。

(1)EPS 300 電子加速器

EPS 300 は日新ハイボルテージ社製であり、可変ビーム・カレントが最大の 50mA のとき、最大電子エネルギーは 300 keV である。走査幅は 120cm、コンベアーの速度は 2.5m ~ 25m/分である。この機械は、UNDP/IAEA-RCA プロジェクトおよびインドネシア政府の木製品の表面コーティングを放射線硬化のためのパイロットプラントである。このプラントの主な目的は、放射線硬化と表面コーティングの技術と経済性の研究である。

(2)GJ-2 電子加速器

中国から導入された GJ-2 電子加速器は、最大 2MeV であり、最大ビーム・カレントは 10mA、走査幅は 120cm である。この装置は次の目的に使用されている：

- a) ワイヤーとケーブルの放射線架橋のパイロット規模デモプラント
- b) ワイヤーとケーブルの架橋の、技術的かつ経済的な側面を研究と同様に、訓練、デモ
- c) 電子放射線技術とその利点の潜在的な応用への、産業界の意識向上
- d) ゴム加硫、表面コーティングの硬化、ワイヤーおよびケーブルの架橋手段として放射線利用の促進

架橋によって生じる有利な特性は、ハンダ抵抗、熱抵抗および機械的性質の向上である。多くの顧客がワイヤーと設備を接続するためにハンダを使用している。

3.5.4 サイクロトロン設備

BATAN は Serpong の放射性同位元素製造センターで、固定低エネルギー・サイクロトロン・モデル CS-30 を導入し、稼働させている。サイクロトロン設備は、スイッチング磁石の 6 本のビーム管を持っている。2 本のビーム管が ^{67}Ga 、 ^{201}Tl の生産、他のビーム管は研究活動のために使用される。CS-30 サイクロトロンの主要な特性は次のとおりである。

- 磁極の直径：96.52cm
- 丘の間のギャップ：5.08cm
- 谷の間のギャップ：10.16cm
- 磁界（丘）：22,500 ガウス
- 磁界（谷）：14,400 ガウス
- 磁界（平均）：17,500 ガウス
- 周波数：26.901 MHz（ H^+ イオン）
- 共振器：短絡板移動型

- イオン源：電離ゲージ（PIG）型
- 取り出しビーム・カレント：78 μ A（陽子）
- エネルギー：取り出し半径 41.5cm で 26.5 MeV（陽子）

この設備の主要な応用領域は、医学の診断学のために使用される ^{67}Ga 、 ^{201}Tl の短寿命放射性同位体の生産である。CS-30 サイクロトロンを使用して実行された他の活動は、真空システムの外側の照射設備開発、同様に固体ターゲット・ステーションおよび操作システムの開発である。

3.5.5 将来計画

BATAN では、研究開発高度技術センター（RDCAT）で加速器に基づいた研究所を設立することを現在計画している。研究所の設立および稼動は、次の分野に貢献すると思われる。

- 人間の健康および医学、産業技術、環境保全、バイオテクノロジーなどの科学的・技術的な問題を解決すること
- イオン源、粒子加速技術、ビームの取扱いと診断、磁石技術、真空技術、検出器技術、核エレクトロニクスおよびデータ収集・処理技術のような先端技術の幅広い分野を開発し獲得すること
- 原子物理学と技術の様々な分野における人的資源の開発および向上、特に国内の大学と外国の機関と共同作業の向上

想定している研究所は、いくつかの実験室、支援設備を備え、加速器を設置している計画である。ユーザーの視点から、研究所は低エネルギー、中エネルギーの 2 つの領域にわたることを予定している。

(1)低エネルギー・エリア

これは低エネルギー・イオン加速器を提供するために予定されている。3 種類の加速器、すなわち、静電型、RFQ 型（高周波四重極）または、周期型（例えばサイクロトロン）から利用可能な型式を選定する予定である。最適化はイオン・タイプ（軽、中、重）、達成可能なビーム・カレント、ビーム位相空間品質、および時間構造に関して行われるであろう。幾種類もの実験や応用に利用するために、単独の加速器として低エネルギー加速器を使用するだけでなく、より高（中）エネルギーの加速器への入射器として利用できるように予定している。

イオン加速器設備は次の分野で使用される予定である。

1) 産業応用

- 半導体デバイス開発用のイオン注入技術
- イオン注入技術は、例えば、電気伝導度、表面硬度、腐食抵抗、摩擦係数、疲

劣挙動、粘着性あるいは触媒現象の挙動と関係する特殊な効果を達成するために、材料の表面の機械的性質を改変するために使用される

- 屈折率の変更による光導波路の組立てのような光学用材料への注入
- 2) 粒子線によって引き起こされる遺伝子突然変異による新しい植物種の生成のようなバイオテクノロジー
- 3) 診断と治療のための健康および医学
- 4) 空気、水あるいは土壌サンプル中の様々な汚染物質の分析ツール

(2) 中エネルギー加速器

低エネルギー・イオン加速器からの注入されたビームは、中エネルギー加速器（例えばシンクロトロン）によって加速され、かつ、異なるユーザーの要件を満たすためにその位相空間および（または）時間構造で操作される。中エネルギー（200～300MeV / 核子）を備えた軽イオン・ビームは医学と他の科学的な応用が予定されている。中エネルギー領域では、次の活動のための設備が特に予定されている：

- 健康 / 医療および治療。
- 基礎研究と同様に応用指向
- 特殊技術および分析法の開発

計画および促進活動は現在進行中である。損益比率を最適化する試みで、ユーザーの条件を注意深く検討し、それらの中で最も適切なタイプの加速器（線形加速器か周期型か静電型など）を商業ベースの加速器から選定しなければならない。実験室の仕様、さらに詳細な技術仕様書、およびプロジェクトの実施戦略を含む基本的な概念設計を続けている。

3.6 インドの加速器開発・利用の現状

3.6.1 はじめに

インドでは 1950 年代に、次に示す加速器の建設に伴い、さまざまな加速器を利用した研究に乗り出した。例えば、ムンバイにあるタタ基礎研究所 (Tata Institute of Fundamental Research; TIFR) の 1MV コッククロフト・ワルトン加速器、カルカッタのサハ原子物理学研究所 (Saha Institute of Physics; SIPS) の低エネルギー・サイクロトロンである。

60 年代のはじめ、5.5MV のファン・デ・グラーフ加速器がムンバイの Bhabha 原子核研究センター (Bhabha Atomic Research Centre; BARC) に導入された。Kanpur の IIT には 2.5MV のファン・デ・グラーフ加速器、パンジャブ大学 (チャンディガル) の低いエネルギー (5MeV 陽子) サイクロトロンも、60 年代に導入された。Trombay にある APSARA と CIRUS 研究炉に沿ってあるこれらの施設とアイソトープが、可変エネルギー・サイクロトロン (K=120) がカルカッタで使用可能になるときまで、ほぼ 20 年間の提供されてきた。続いて、ムンバイ (ボンベイ) およびデリーの 2 つのタンデム型加速器が、さらに 1990 年頃コミッションされた。それはインドにおいて銃印の実験研究が開始された時期でもある。

現在、大学や研究機関に多く設置されている低エネルギー加速器、例えば CCCM (Hyderabad) のタンデム型、IGCAR (Chennai) 2MV タンデム型 (同様のものは、BARC で以前に構築された) Poona の 8MeV マイクロトロン、および最近マンガロール大学で応用技術センター (Centre for Advanced Technology; CAT) によって設置された 12MeV 電子マイクロトロンがあります。さらに、古い 5.5MV ファン・デ・グラーフ加速器の代わりに、7MV タンデム型加速装置が BARC に導入された。これらの低エネルギー加速器は、基礎と応用研究の学際的な領域に研究に利用されている。

K=120 可変エネルギー・サイクロトロンは、カルカッタに 80 年代の初めに構築されコミッションされ、これはインドにおける中エネルギー加速器に基づいた研究の始まりであった。14MV の重イオン・タンデム型加速装置 (14UD ペレトロン) 施設が、ムンバイの TIFR で 1989 年に BARC と TIFR によって共同で設置されたとき、大きな進歩がおとずれた。それはインドの研究者が中エネルギーの重イオンビームを用いた研究領域へと踏み出すことができたのである。1991 年には、別の 15MV の端子電圧を有するタンデム型加速器 (15UD ペレトロン) が、デリーの原子力科学センター (Nuclear Science Centre; NSC) にある大学助成委員会 (University Grants Commission) により設置され、これは大学における加速器を利用した研究を押し上げることになった。80 年代に Indore で立ち上げられた CAT と呼ばれる新しいセンターは、シンクロトロン放射光施設を構成する 450MeV 電子蓄積リングがコミッションを行っており、2.0GeV のシンクロトロン放射光源に強化するためにさらに作業が進行中である。現在、2.5GeV 電子蓄積リングへとアップグレードすることを検討している。議論はさらに核破砕型中性子源となる GeV 陽子加速器施設を設置

すること、第 2 に原子物理学、固体物理学研究のためのメソンと放射性イオンビーム、加速器駆動未臨界装置に関する研究へと広がっている。

これらの加速器プログラムとは別に、インドはさらに多くの国際的な共同研究に取り組んでいる。特に高エネルギー加速器を利用するもの、海外のフォトン源を利用するものである。

3.6.2 BARC-TIFR 14MV のペレトロン加速器施設

14MV のタンデム・ファン・デ・グラーフ（ペレトロン）加速器は協力的な BARC-TIFR の共同で 1989 年に TIFR キャンパスで設置されコミショニングされた。主要な加速器部品は、は米国 EII によって供給され導入された。ペレトロン高圧容器、SF₆ ガス取り扱いシステムの部分、5 つのポートを切り替える磁石、ビーム・ラインおよびペレトロン・コントロールシステムは、設置された。分析磁石は、2 つのビーム・ホール A および B へビームを伝送するように設計されている。多くのビーム・ラインおよび実験装置がいくつかの研究領域を探求するためにビーム・ホール A の中に設置されている。実験装置は、一般的な目的に使用できる散乱チャンバー、大型のイオン化チャンバー、反跳型質量分析計 (SHRI) BaF₂ および BGO ガンマ検出器アレイ、CSHPGE 検出器アレイ、および荷電粒子、中性子検出器アレイなどがある。研究プログラムは、原子物理学、原子・分子物理学、固体物理学、および加速器物理学の領域で実施されている。原子物理学では、弾性・非弾性散乱、輸送、核融合および核分裂反応、高スピン状態の核子の核分光学などである。加速器物理学研究は、イオン源、チャージ装置、超伝導高周波共鳴装置、まためっき開発などである。二重調和バンチングに基づくビーム・バンチャーは、加速器の低エネルギー部に設置されており、100 ナノ秒の分解能を持つナノ秒単位のビーム・バンチが提供されている。このビーム・バンチャーは、寿命と飛行時間測定の研究を可能にし、超伝導ライナック・ブースターのための適切な時間構造を供給する。

超伝導ライナックは、重イオンビームのエネルギーを増強するための加速器強化の第 2 段階として、ビーム・ホール B に導入されている。ライナック・ブースターは 7 つの加速モジュールからなっており、各々四分の一波長共鳴装置 (Quarter Wave Resonator; QWR) を持ち、約 14MeV / 電荷のエネルギーを得ることができる。

3.6.3 原子核研究センター (NUCLEAR SCIENCE CENTRE)、デリー

これは 15MV タンデム・ペレトロン加速器から成る UGC の大学共同研究施設である。原子核物理学、原子物理、材料や生物科学における研究などのための多くの実験の施設があり、この加速器センターに設置されている。反跳型質量分析計 (HIRA) CSHPGE と BGO のガンマ線検出器配列、一般的な目的用の散乱チャンバー、などを備えている。超伝

導材料として Nb を用いた超伝導高周波共鳴装置の使用を通じてビーム・エネルギーを増強する計画がある。この増強計画では、各モジュールが設計されており 97MHz、 $Q=0.08$ の 4 つのニオブ 4 つのギャップの共鳴装置から成り、米国のアルゴンヌ国立研究所と共同で設計、開発した。

3.6.4 VECC、カルカッタ

可変エネルギー・サイクロトロンは 80 年代の初めの中でコミッショニングされ、インドにおける応用実験原子核物理の研究用としては最初の加速器施設だった。加速器は原子核反応と分光学の研究のために陽子および α 粒子を供給した。ISOL 施設も同様に設置され、誘起反応による短寿命放射性核種の分離が行われていた。

現在、2 つの重要なプログラムがこのセンターの研究施設で進行中である。一つは、ECR 重イオン源、軸注入ビーム・ライン、およびサイクロトロンの真空やその他のサブシステムを変更することより、重イオンビーム伝送するためにサイクロトロンの増強が進められている。このプロジェクトは、ほぼ完成しておりもうすぐ重イオンビームを使った実験が開始される。もう一つの重要なプロジェクトは、今後数年間に中間エネルギー領域の重イオンビームを使った研究用として超伝導サイクロトロン K=500 を設置することである。

3.6.5 CAT (Indore) のシンクロトロン放射光源のための電子加速器

シンクロトロン放射光源 INDUS-1 および INDUS-2 は CAT (Indore) に設置されている。INDUS-1 は VUV 放射線の発生用の 450MeV 電子蓄積リングである。当初 2GeV リングとして計画されていた INDUS-2 は、X 線領域のより高強度のための 2.5GeV リングへと増強が検討されている。入射装置は、両方のリングのために、20MeV マイクロトロンと 700 MeV まで電子を加速できるシンクロトロン (INDUS-2 への注入に適している) から構成されている。

INDUS-1 はコミッショニングテスト中であり、6 ビーム・ラインが建設、試験および設置の様々な段階にある。当初 INDUS-1 は、4 つの偏極磁石でそれぞれ 0.5 のフィールド・インデックス、および 1.5 テスラ偏極磁場を持つ弱集束型の蓄積リングとして計画された。リングの設計は、蓄積リング Novosibirsk にある BINP の SIBERIA-1 と類似であった。研究を通じて、ラティスの設計は現在のものにこのように修正された。INDUS-1 加速器は、吸収、蛍光および光電スペクトルの研究によって、原子、分子、固体物理学における分光分析に使用されるであろう。光物理学のビーム・ラインは、500 2000 の波長域をカバーする Seya-Namioka 分光器のまわりに建設されている。シンクロトロン光源の固有時間調整法の開発によって、このビーム・ライン施設は分子の励起状態の寿命に関する情報を提供するであろう。

INDUS-2 は、このリングのために、拡張した Chasman - Green 型 (2 重偏極アクロマット) のラティスが選択され、最適化された。リングは、8 つの単位セルから構成されており、それぞれは 4.5m の直線である。おのおの単位セルは、アクロマット・セクションに 2 つの 22.5 偏極磁石、分散の制御用四重極のトリプレット、および長い直線のセクション (長さ 4.5m) の中にビーム・サイズ調節用の 2 つの四重極トリプレットを持つ。クロマティシティーのコレクションのため、アクロマット・セクション中の 4 つの sextupoles がある。この配置の利点は、アクロマット・セクションにおける四重極間の 2 つの長いギャップが、ビームの診断および真空装置のために使用することができることである。

参考文献

- (1) : **"BRIEF OVERVIEW OF PARTICLE ACCELERATORS IN CHINA"**, Shouxian Fang, Institute of High Energy Physics, Beijing, China, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- (2) : **"Accelerator-Related Research Activities in Malaysia"**, S. P. Chia, S.P. Moo and D.A. Bradley Department of Physics, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- (3) : **"OVERVIEW OF ACCELERATOR ACTIVITIES IN KOREA"**, Moohyun Yoon, Pohang Accelerator Laboratory, San 31, Hyoja Dong, Nam Gu, Pohang, Gyeongbuk, 790-784, Rep. of Korea, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- (4) : **"STATUS OF ACCELERATORS IN KOREA"**, Won Namkung, Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Pohang 790-784, Korea, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- (5) : **"ACCELERATOR RELATED ACTIVITIES IN VIETNAM"**, Vo Van Thuan and Tran Thanh Minh, Institute for Nuclear Science and Techniques-VAEC, Nguyen Van Do and Tran Duc Thiep, Institute of Physics-NCNST, Hoang Quoc Viet Street, Nghiado, Hanoi, Vietnam, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- (6) : **"ACCELERATOR TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION IN INDONESIA"**, A. Djaloeis (National Nuclear Energy Agency of Indonesia Jl. KH. Abdul Rohim P.O. Box 4390, Jakarta 12043, Indonesia), Sudjatmoko (Research and Development Center for Advanced Technology Jl. Babarsari P.O. Box 1008, Yogyakarta 55010, Indonesia),
- (7) : **"ACCELERATOR BASED ACTIVITIES IN INDIA"**, S. S. Kapoor, B.A.R.C., Trombay, Mumbai - 400 085, India, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001

4. 今後の加速器開発・利用の課題整理と対応のあり方検討

本調査では、文部科学省放射線規制室が保有する放射線発生装置設置に係る認可手続き、届け出関連データから抽出されたデータをもとに、我が国に存在する加速器の全数を対象としたアンケート調査、および国内外の主要加速器を対象とした文献調査を行った。

本調査で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 我が国における加速器開発・利用の現状

我が国に設置されている加速器の約7割が医療機関に設置されており、ガン治療などへの加速器の臨床応用は確実に広がってきていることがうかがえる。また一方で、約1割の加速器が民間企業において活用されており、加速器を線源とした放射線照射の工業利用も進展している。

我が国における加速器開発は、主に教育機関、研究機関によって行われているが、加速器の開発・利用の最先端を担うべきこれらの機関が所有する加速器は、教育機関に39台、研究機関に96台となっており、全数814台（アンケートの有効回答数）のうち両機関を合わせても17%程度に過ぎない。また、加速器開発に利用される加速器は試作的な小規模なものが多く、実験が終了したと同時に稼動しなくなるデッド・ストック状態の加速器もあることがわかった。

研究機関における加速器についても、すでに必要十分な加速器が設置されているように見えるが、実際には、入射用加速器、初段加速、および蓄積リングなどの複数の加速器を組み合わせで一連の複合型加速器施設を構成している場合が多い。このため、設置台数で評価するよりは、むしろ複合型加速器を一式の加速器施設とみなす必要がある。

以上のことから、我が国の加速器開発・利用の現状は、医療機関における治療用途が大多数を占めており、一見すると加速器の設置台数は十分に見えるようにみえても、最先端の加速器科学の研究や人材育成を担う教育機関、および研究機関における加速器の実質的な台数は未だに十分であるとは言い難い。

(2) 加速器の管理・保守・共同利用

我が国に設置されている加速器の9割は活発に利用されていることがわかった。しかしながら、研究・教育機関で使用されている加速器の約2割程度が1970年代以前に建設された加速器であり、設備・施設の老朽化が進んでいる。このため、古い年代に設置された加速器は、稼動状況が低下しつつ、更新・改修の必要性が高まっている。しかしながら、更新・改修費用負担の見込みのたっていない組織・機関が多く、加速器の設置に伴う費用の助成だけでなく、継続的な運転・保守コストへの費用助成を求める声も大きい。

加速器の共同利用については、原子核物理学、原子・分子物理学、物質・材料科学、エネルギー科学、放射線化学、加速器開発、医療（研究）、生命科学、教育訓練等の分野で海

外も含めた共同利用が活発に行われている。特に国際的な共同利用の仕組みの確立と推進は、アジア諸国で大型加速器を自ら持たない国の研究機関から求める声も高まっており、アジアの CERN のような役割を担っていくことが求められている。

(3)我が国における加速器開発・利用の推進に求められていること

我が国に設置されている加速器の約 7 割は医療機関に設置されている。現在の加速器を取り巻く法制度では、大多数の医療機関に設置されているメーカー製の市販加速器であっても、大型加速器と同様に放射線発生装置として監督官庁の管理下にある。このため、特に医療分野では設置許可申請に伴う手続きの煩雑さと、維持管理にかかる膨大なコストが指摘されている。一方、教育機関・研究機関にある試作的で小規模な加速器についても、実験が終了したと同時に稼動しなくなりそのままデッド・ストック化してしまう加速器もあることがわかった。

以上のことから、試作的で小規模な加速器や、すでに実用段階にある医療用のメーカー製加速器や産業用の加速器については、大型加速器とは区別して設置・廃止手続きの簡素化、加速器の規制エネルギー（現行 1Mev 以上）の緩和、等、一段の規制緩和が望まれる。