

田辺 義雄
TANABE Yoshio

小平 政宣
KODAIRA Masanobu

高野 廣久
TAKANO Hirohisa

加速器は、原子核物理や高エネルギー物理、放射光科学、粒子線がん治療、放射性廃棄物処理、工業分野など、多方面での利用が注目されており、多くの新たな加速器建設計画がある。当社は従来から加速器の主要機器開発を進めており、クライストロン^(注1)およびその電源、高周波加速空洞、常電導および超電導電磁石、電子ビーム冷却装置など、多岐にわたる納入実績をもっている。また、1980年代中頃から加速器システムを指向するようになり、このシステム技術がSPring-8シンクロトロン^(注2)に結実して97年初頭には順調にビーム加速に成功した。加速器は21世紀の科学技術の発展に大きく寄与すると期待され、当社は最先端技術力を結集してこの分野で協力していく。

The application of accelerators is expected to expand to many fields, including nuclear physics, high-energy physics, science using synchrotron radiation, cancer therapy using ion beams, transmutation of nuclear waste, industrial uses, and so on.

Toshiba has been fabricating many main accelerator components such as klystrons and their power supplies, radio-frequency (RF) cavities, normalconducting and superconducting magnets, and electron beam cooling devices. We have also been making efforts to develop accelerators as a whole system since the mid-1980s. Our accelerator-related technologies were concentrated in the construction of the SPring-8 synchrotron, the acceleration of which was successfully carried out at the beginning of 1997.

Accelerators will make a prominent contribution to the evolution of science and technology in the 21st century. We at Toshiba will devote our best efforts to this field with our advanced technologies.

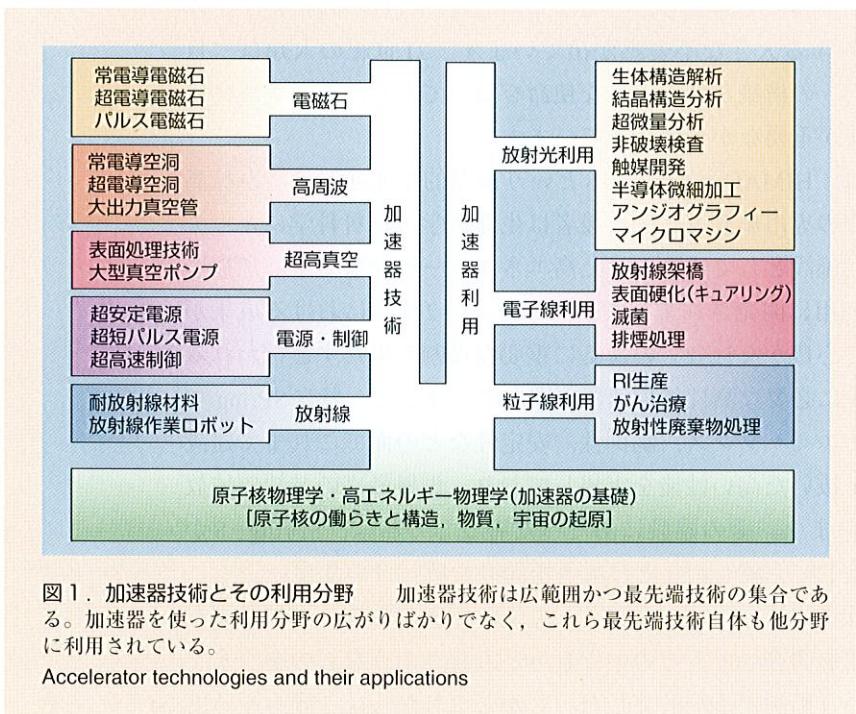


図1. 加速器技術とその利用分野 加速器技術は広範囲かつ最先端技術の集合である。加速器を使った利用分野の広がりばかりでなく、これら最先端技術自体も他分野に利用されている。

Accelerator technologies and their applications

広がる加速器の利用分野

加速器は元来、原子核物理学および高エネルギー物理学とともに発展してきた。図1に示すように、加速器は、粒子を曲げたり収束したりする各種電磁石や粒子を加速する高周波系をはじめとして、超高真空、電源・制御、放射線など多岐にわたる技術を必要とする。しかも、これらの技術は最先端のレベルが要求され、ここで開発された基礎技術が他の分野で応用されている。したがって、広い意味ではこれも加速器の利用分野(波及効果)と言えるが、ここでは図1の根元および右側の幹に相当する分野について現状を概観する。

(注1) クライストロン

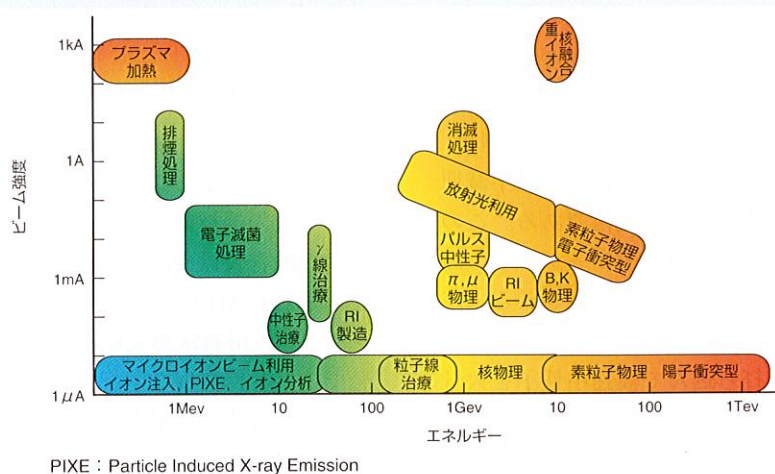
高周波の発生・増幅に用いる真空管の一種。増幅率が大きく大電力の高周波を得やすい。

(注2) SPring-8シンクロトロン

SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) は兵庫県西播磨に設置された世界最高性能の放射光を発生する大型の共同利用研究施設である。装置は、線形加速器、シンクロトロン、蓄積リングから構成される。シンクロトロンは線形加速器からの電子ビームを1GeVから8GeVまで加速する。

加速器応用分野のエネルギー・ビーム強度マップ

核物理研究のためにスタートした加速器は、大電力高周波・超高真空・計算機制御・超電導・精密加工技術などの目覚ましい進歩により飛躍的に発展した。その結果加速器が出現した1930年から今日までにエネルギーで10けた、ビーム強度で10けた近い性能向上を果たしてきた。これにより、今日の加速器利用は原子核・素粒子物理研究にとどまらず、物性・化学・生物などの基礎分野、環境・半導体・材料分析・医学治療などの一般産業分野へと拡大しており今後ますますその重要度が高まって行くことが予想される。



PIXE : Particle Induced X-ray Emission

■原子核・高エネルギー物理学

原子核物理学分野では、特に10年ほど前に重イオン反応で生成された不安定核(ラジオアイソトープ:RI)を分離して利用する方法が日本人グループで開発され、原子核研究が飛躍的に進歩した。この分野のさらなる発展を旨として、現在理化学研究所のRIビームファクトリー計画^(注3)が進められている。

また、KEK(高エネルギー加速器研究機構)で進行中の大型ハドロン施設(JHF: Japanese Hadron Facility)は世界一大強度の陽子加速器を使って世界一多種類の粒子ビームを作り出し、質量の起源やニュートリノ発見といった原子核研究を行う計画である。

さらに、電子と陽電子の衝突型加速器であるKEKのBファクトリー計画は98年度中の運転を予定しており、B中間子と反B中間子の対を大量生成して、宇宙の起源(ビッグバン)の検証を旨としている。

■放射光科学

ここ十数年間に放射光を利用した応用研究が急速に拡大し、物質科学、生命科学の発展に不可欠なものとなっている。たとえば、X線分光学による触媒の研究、蛋白質のX線構造解析、人の心臓冠動脈の造影診断(アンジオグラフィー)などの医学診断利用、新薬開発などのバイオ技術分野、半導体の高密度集積化などのエレクトロニクス・新素材分野、マイクロマシンなど、多岐にわたる研究に利用されている。アンジオグラフィーでは、高輝度の放射光を使用することにより患者の負担を軽減し、従来のX線胸部診断のような簡便さできわめて鮮明な撮像が一回の撮影で得られる。

国内の放射光源としては、KEKのフォトンファクトリーや世界最大のSPring-8が現在利用運転を行っている。さらに、東京大学物性研究所や東北大学などで多くの中規模放射光加速器の建設が計画されてい

る。これらの各計画は、研究目的に応じてそれぞれ特徴的な光源となっている。

■粒子線によるがん治療

粒子線のなかには電子線も入るが、ここでいう粒子線は速中性子線、陽子線、パイ中間子線、重粒子線(C, Ne, Siなど)である。従来の電子線よりも治療効果が大きいと期待され、陽子線や重粒子線を用いた臨床試験が進められている。陽子線治療は筑波大学の施設で行われており、国立がんセンターでも臨床照射に向けてビーム調整が進行中である。

また、放射線医学総合研究所では94年より炭素イオンによる治療が開始され、多くの患者に対して良好な治療成果を収めつつある。今年度からは、より高精度のねらい撃ち照射を可能とするための新たな研究も開始されている。

さらに、科学技術庁補助金による粒子線がん治療装置の導入がいくつかの地方自治体で進んでいる。

(注3) RIビームファクトリー計画

理化学研究所で建築中のプロジェクト。超電導サイクロトロンで加速したイオンをターゲットに当て、多種類のRIビームを作り実験する。そのビームをシンクロトロンで加速し、RIとイオンとの衝突実験なども行う。

■原子力分野

日本原子力研究所では大強度核破砕中性子源の開発と、これを用いた基礎科学の飛躍的な発展や高レベル放射性廃棄物の消滅処理技術開発のため、97年4月に中性子科学研究センターを発足させた。消滅処理は、長半減期核種を安定核種や短半減期核種に核変換する技術である。このため、核破砕中性子ターゲットの周りを長半減期核種で構成される未臨界炉心で囲み、ここに大強度陽子ビームを打ち込んで高速中性子を大量に発生させて核変換する加速器駆動消滅処理システムを開発する。

この計画の陽子線型加速器は、全長約800m、最終目標のビーム出力は約8MWと従来より一けた高く、このため、超電導加速空洞が採用される予定である。

■産業分野

電子線加速器は従来から、電線やタイヤの改質、材料表面の硬化(キュアリング)、滅菌などに用いられているが、最近、環境汚染の問題に加速器を用いる研究開発が盛んになっている。特に、電子ビーム排煙処理技術については、日本原子力研究所、中部電力(株)、(株)荏原製作所が共同実施したパイロット試験の成果を踏まえて中国の成都火力発電所、およびわが国でも中部電力(株)西名古屋火力発電所で、実用規模プラントによる排煙処理の実証試験を実施するところまで進展している。

また、水環境汚染も従来の水処理技術だけでは対処できず、電子ビーム廃水処理の研究も行われている。

■当社の実績

当社はKEKの大型電子・陽電子衝突リング“トリスタン”の六極電磁石やクライストロンおよび同電源などのコンポーネント対応であった

が、半導体の微細加工(リソグラフィ)などの産業用小型加速器が注目をあびるようになった80年代中頃から、システムを指向するようになった。

■加速器システムの製作実績

前述のように、加速器は多くのコンポーネントからなり、それぞれに対して最先端技術が要求される。当社は核融合装置や、高い磁場精度が要求されるMRI(磁気共鳴イメージング装置)用超電導電磁石などの開発で培われた高度な解析技術や製造技術を総合的に応用し、加速器システムの開発に取り組んできた。

当社が初めてシンクロトロンを加速器システムとしてまとめたのは86年に日本電信電話(株)(NTT)に納入した加速・蓄積型電子シンクロトロンNAR(Normal conducting Accelerator Ring)であった。このシステムを設計・製作するなかで、電磁石などの従来技術の高度化に加え、ビーム軌道解析技術、高周波加速空洞などの高周波技術、ビームモニタ技術、超高真空技術などシステムとして不可欠な技術を確立した。

引き続き88年には(株)ソルテックに電子シンクロトロンおよび射出ビームを蓄積リングに導くための高エネルギービーム輸送系を納入し

た。このシンクロトロンの調整運転を通してビーム調整に関するノウハウを蓄積した。

これらの技術は、世界最大のビームエネルギーを誇るSPring-8に結実した。詳細については以下の論文に譲るが、当社はシンクロトロンシステム一式を担当した。図2の写真はトンネル内に設置されたシンクロトロンを示す。当初の予定より約1年早く96年12月から始まったシンクロトロン調整運転では、きわめて順調に定格の8GeVまでの加速に成功し、当社の技術力を証明した。

また、最近では97年に広島大学に電子周回装置を納入しており、小型装置ではあるが、この装置を用いてシリコン多層膜による高輝度X線の発生について共同研究も行っている。これらの実績を表1に示す。

■主要コンポーネントの製作実績

当社は前述のシステム以外にも主要コンポーネントを製作し、納入実績を積み上げてきた。

高周波関連装置では、加速空洞やクライストロンおよび同電源をKEKのトリスタンやSPring-8のシンクロトロンをはじめ、SPring-8蓄積リングおよび線形加速器(表2)など数多く納入している。また、KEKの放射光加速器であるフォト

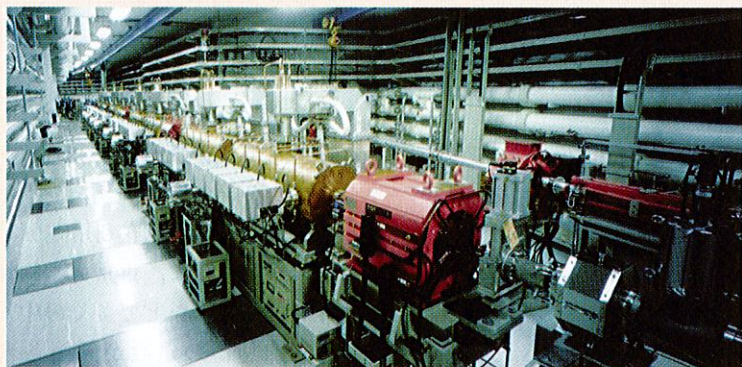


図2. SPring-8シンクロトロン(中央部が高周波加速空洞群) 加速器は高周波加速空洞、電磁石、真空容器、電源など多数の機器から構成され、これらを一体で計算機制御・タイミング制御してシステム運用されている。
SPring-8 synchrotron (RF cavities are shown at center)

表1. 当社の加速器システム納入実績
Accelerator systems delivered by Toshiba

客先(納入年)	装置名	仕様(*)
NTT (1986)	電子加速・蓄積リング(NAR)	E=800MeV, L=53m, I=120mA, f=125MHz
(株)ソルテック (1989)	電子シンクロトロン	E=1GeV, L=43m, I=40mA, f=118MHz
日本原子力研究所 (1996)	SPRING-8 電子シンクロトロン	E=8GeV, L=396m, I=10mA, f=508MHz
広島大学 (1997)	電子周回装置	E=150MeV, L=14m, I=2.5mA, (設計値)

(*) E: 最大エネルギー, L: リング周長, I: ビーム電流, f: 加速周波数

表2. 当社の主要サブシステム納入実績例
Example of main subsystems delivered by Toshiba

客先(納入年)	装置名	仕様
理化学研究所 (1996)	SPRING-8 蓄積リングRFシステム	クライストロン電源(508MHz-1MWCW) 4式, 加速空洞16台
日本原子力研究所 (1996)	SPRING-8 線形加速器クライストロン部	クライストロン電源, 伝送系, 各13式, 2,856MHz-ピーク出力80MW
放射線医学総合研究所 (1993)	HIMAC シンクロトロン 高周波系, 真空系, BT系	フェライト装荷型加速空洞 (周波数1~8MHz, 4極管アンプ30kW出力)

ンファクトリーと同形の500MHz加速空洞を韓国POSTECH(Pohang University of science and technology)向けに5台輸出している(94年)。

一方、イオン加速器についても放射線医学総合研究所の重粒子線治療装置HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)向けに数MHz帯のフェライトを装荷した加速空洞および同用高周波電源, 真空ダクト, ビーム輸送(BT)系などを納入した(表2)。

イオンの運動エネルギーをそろえる電子ビーム冷却装置(EC)を89年にKEK田無(旧東大原子核研究所)のイオン加速器“TARN II”に第1世代機を設置, 96年には第3世代機として3.5T超電導電磁石と20kV電子銃システムを納入した。

加速器用超電導電磁石にはビームの偏向および収束用の双極および四極電磁石, 粒子検出器用電磁石があ

(注4) DO

素粒子実験の大型検出器の名前(装置の設置場所のセクションから名づけた)。

(注5) Belle

素粒子実験の検出器で, bクォークの別名“Beauty”の意味のフランス語“Belle”から名づけた。

る。当社は欧州国際原子力研究所(CERN)で建設中のLHC(Large Hadron Collider)用の双極電磁石をKEKの基本設計に基づいて89年から計5台製作した。また, 粒子検出器用大型超電導電磁石としては, 米国フェルミ国立加速器研究所の大型加速器「Tevatron」用D0^(注4)やKEKのBファクトリー用Belle^(注5)を製作した。

当社の展望

このように, 加速器は今後とも利用分野の拡大が予想され, 当社も加速器の高性能化を旨として技術開発を進めている。

原子核および高エネルギー物理学分野では, 今後とも大型加速器建設が予定されており, 当社は高周波関連技術を中心として, 超電導電磁石, 大電力加速空洞など, 各研究機関と

協力して幅広く開発を進める。

放射光利用施設や粒子線がん治療用など民生用加速器は, ビームラインや利用系まで含めたトータルシステムとして性能を保証できる開発・製造体制作りを旨としている。

原子力分野は, 中性子科学研究計画の開発に参画し, KEKとの共同研究で進めている超電導加速空洞の開発も含めて, 超電導線型加速器システム技術の構築を図っている。

21世紀に向かって

以上, 広がる加速器の多方面への利用を展望し, かつ当社の実績と今後の展望について概観した。加速器技術は21世紀の科学技術に大きく寄与することが期待されており, 当社も最先端技術力を結集してこの分野の発展に貢献する所存である。この特集を通して当社のこの姿勢を理解していただければ幸いである。



田辺 義雄

TANABE Yoshio, D.Eng.

電力・産業システム技術開発センター 超電導・量子応用技術担当主幹, 工博。加速器用高周波機器の開発などに従事。電気学会, 原子力学会, 放射光学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



小平 政宣

KODAIRA Masanobu

原子力事業部 先端エネルギー開発部長代理。加速器などの開発設計およびシステム技術とりまとめに従事。電気学会会員。

Nuclear Energy Div.



高野 廣久

TAKANO Hirohisa

京浜事業所 技監。核融合装置, 超電導電磁石, 加速器などの新規装置の開発設計に従事。日本機械学会, 日本原子力学会会員。

Keihin Product Operations