

東芝の加速器事業への取り組み

中山 光一*1・佐藤 潔和*2

Accelerator Business of TOSHIBA

Koichi NAKAYAMA*1 and Kiyokazu SATOU*2

1. はじめに

加速器は、素粒子物理学および原子核物理学等の最先端物理学の実験装置として発展してきた。最近では、放射光を用いた物性・分子生物学の研究、電子やイオンビームによるがん治療、電子線による材料改質・滅菌処理などの幅広い分野で利用されている。当社は従来から加速器の主要機器である、電磁石、高周波、超高真空および電源・制御機器の開発を進めている。これらの機器は、いずれも高度な技術を要し、またそれを全体システムとして纏め上げるシステム技術も要求される。

東芝は、これらの機器から全体システムまで、幅広く手がけておりその中でも次の技術を得意としている。

- トータルエンジニアリング
- 高周波技術
- 超電導技術

東芝は、電子加速器からイオン加速器、小型加速器から大型装置まで、広くシステムを提供している。

1959年に日本で最初の電子リニアック（4 MeV）を中央研究所で自主開発して、商用には1960年に名古屋工業試験所に国産商用一号機の6 MeV電子リニアックを完成した。イオン加速器では、東大原子核研究所（以下核研）および理化学研究所（以下理研）のサイクロトロン、九州大学や電気試験所、東大のバンデグラフ型静電加速器を製作した。

加速器の応用としても、医療用電子ライナックおよびNAIG研究所の電子バンデグラフ加速器による電線等への電子線照射サービス、イオン加速バンデグラフをパルス中性子源として利用した核燃料物質等の非

破壊分析等も1970年代には行っていた。

ここに、1980年以降の主要な加速器の実績および今後の展開について紹介させて頂く。

2. 当社の実績紹介

2.1 加速器システムの製作実績

加速器は多くの機器から構成され、それぞれに対して最先端の技術が要求される。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設計・製造技術を総合的に応用して、加速器システムの開発に取り組んでいる。

電子シンクロトロン加速器システムとしては、1986年に加速・蓄積型電子シンクロトロンの設計・製作を行い、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。

引き続いて1988年には㈱ソルテックに電子シンクロトロン（図1）および出射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放射光施設のSPring-8（図2）に結実した。当社はシンクロトロンシステム一式および線形加速器、蓄積リングでは高周波システムを担当した。図3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。

また、2003年に都立大学に納入した静電型イオン蓄積リングは、ビームダクトを液体窒素温度まで冷却

*1 株式会社 東芝 電力システム社 原子力開発設計部
Advanced System Design & Engineering Dept. TOSHIBA Co. Power System Company

*2 株式会社 東芝 電力システム社 機器装置部
Machinery and Equipment Dept. TOSHIBA Co. Power System Company
(E-mail: kiyokazu.sato@toshiba.co.jp)

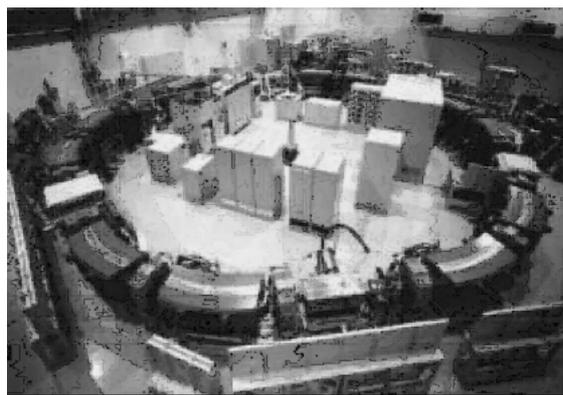


図1 ソルテック電子シンクロトロン (1 GeV)

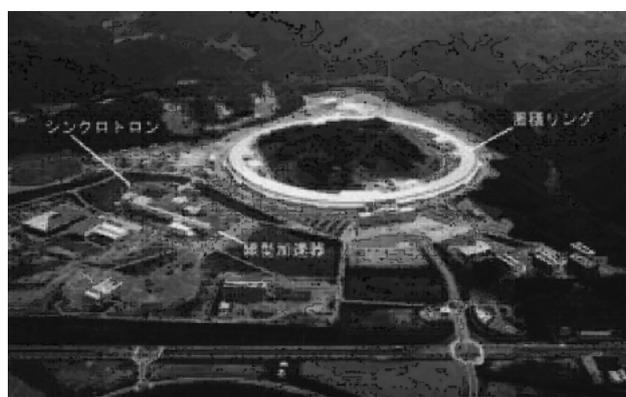


図2 SPring-8 加速器全体構成



図3 SPring-8 シンクロトロン

表1 加速器システム実績および仕様

納入先	装置名	仕様・用途
某所	電子加速・蓄積リング	電子 800 MeV 電流 120 mA
ソルテック	電子シンクロトロン	電子 1 GeV 電流 30 mA
原研	SPring-8 電子シンクロトロン	電子 8 GeV 電流 10 mA
広島大学	電子周回装置	電子 150 MeV 電流 2.5 mA
首都大学	静電型イオン蓄積リング	高分子イオンの蓄積
東大	電子冷却装置	重イオンビームの冷却
放医研	電子冷却装置	重イオンビームの冷却
KEK	電子標的 (冷却) 装置	高分子ビームとの衝突
京大	電子冷却装置	プロトンビームの冷却



図4 SPring-8 シンクロトロン5セル高周波空洞

して、原子から高分子までの構造分析が可能なシステムで、一般産業への応用が期待されている。さらに、電子冷却装置の製作実績も豊富である。これらの実績を表1に示す。

2.2 高周波関連機器の実績

電子加速器の高周波関連装置では、電子を加速する高周波空洞や高周波源のクライストロンおよび同電源を高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) のトリ

スタン, Bファクトリーをはじめ, SPring-8 シンクロトロン (図4)・蓄積リングおよび他の放射光施設などに数多く納入している。

KEK の放射光施設 (以下 PF) で実績のある 500 MHz の放射光向け空洞については, PF 旧タイプを韓国の POSTEC に 5 台輸出しているのに加えて, 現在の高次モード減衰型空洞は, 高度産業研究所ニュースバル, 九州シンクロトロン光研究センター: SAGA-LS (旧称佐賀放射光) に各 1 台, 改良型が建設中の豪州放射光施設に 4 台プラス予備 1 台を輸出している。

高周波源としての大電力クライストロンおよび高周波電源を含めた高周波システムとしては, SPring-8 の線形加速器, 8 GeV ブースター加速器および蓄積リングをはじめとして, 東北大学ストレッチャーブースター向け, ニュースバルリング向け, 九州シンクロ



図5 九州シンクロトロン光研究センター
高周波システム

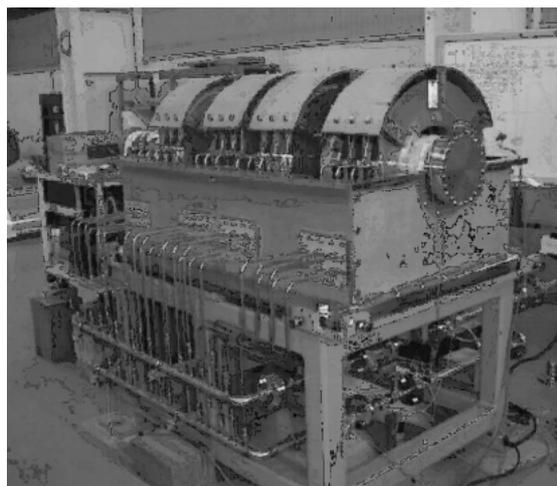


図7 小型炭素がん治療装置向け R&D 加速空洞

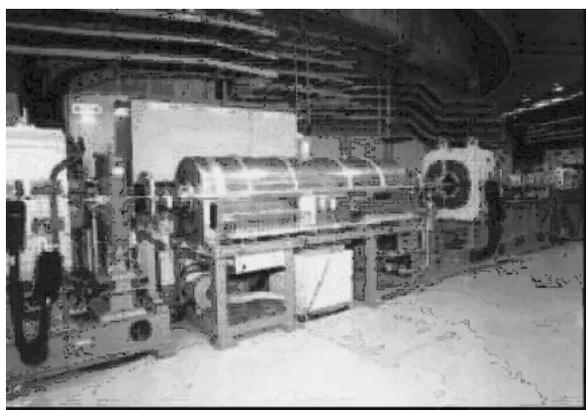


図6 放医研殿向けフェライト空洞



図8 J-PARC 向け MA 空洞

トロン光研究センター向けの 500 MHz (図5) の実績があり、最近では豪州のメルボルンで建設中の豪州放射光施設に4式が納入され調整試験中である。

イオン加速器については、重粒子線がん治療装置用の高周波システムとして、放射線医学総合研究所の重粒子線治療装置 HIMAC および兵庫ガンセンター向けに数 MHz 帯のフェライトを装荷した加速空洞 (図6) および高周波電源を納入している。また、最近注目を集めている小型炭素線がん治療向けに東芝製のコアを使用した小型加速空洞を放医研に協力して開発し、リングの小型化に貢献している (図7)。

さらに、現在建設中の J-PARC 向けには 3 GeV および 50 GeV リング向けに MA 空洞 (図8) および高周波電源を KEK および JAEA に協力して開発を行い、実機の製作中である。

表2に、高周波システムの製作実績、表3に、1980年以來に製作した120台を超える電子およびイ

表2 高周波システム実績および仕様

納入先	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4式 508 MHz 加速空洞 16台
日本原子力研究所 (1996)	SPring-8 線形加速器RFシステム	クライストロン電源・ 伝送系各13式
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	フェライト装荷型空洞
東北大学 (1998)	ストレッチャーブースター 高周波システム	500 MHz 空洞 クライストロン・高周波電源
姫路工業大学 (1999)	ニュースバル 高周波システム	500 MHz 空洞 クライストロン・高周波電源
KEK (2001)	B-ファクトリー 高周波システム	508 MHz 空洞 クライストロン・高周波電源
佐賀県 (2004)	佐賀放射光 高周波システム	500 MHz 空洞 クライストロン・高周波電源
豪州ビクトリア州 (2006)	豪州放射光施設 蓄積リング高周波システム	500 MHz 空洞4台 クライストロン4式・ 高周波電源4

表 3 加速空洞製作実績 (1980年～: 125台)

空洞型式	納入先	製作台数	共振周波数 (MHz)	入力電力 (kW)	用途
ノーズコーン1セル	KEK-PF	8	500	70	電子蓄積リング
リエントラント1セル	某所	8	125	30	電子蓄積リング
リエントラント1セル	SORTEC	1	118	5	電子シンクロトロン
リエントラント1セル	原研 JSR	1	117	2	電子蓄積リング
スロットカップル5セル	SPring-8	10	508.58	300	電子シンクロトロン
ベル型1セル	SPring-8	35	508.58	150	電子蓄積リング
ノーズコーン1セル	POSTECH (韓国)	5	500.1	70	電子蓄積リング
高次モード減衰	KEK-PF 高輝度化	5	500	150	電子蓄積リング
高次モード減衰	KEK-ATF-DR	3	714	50	電子蓄積リング
リエントラント1セル	自主開発	1	180	300*	電子線発生
高次モード減衰	姫工大ニュースバル	1	500	90	電子蓄積リング
ARES	KEK-B ファクトリー	9	508.58	300	電子蓄積リング
リッジ付き TE モード	自主開発	1	100	60	電子線発生
高次モード減衰	佐賀県 SOR	1	499.8	90	電子蓄積リング
リエントラント1セル	自然科学研究機構・分子研	1	90.1	20	電子蓄積リング
ノーズコーン1セル	広島大学放射光センター	1	700	0.1	電子蓄積リング
ノーズコーン1セル	東北大学核理研	1	1500	—	電子蓄積リング
高次モード減衰	オーストラリアン・シンクロトロン	5	499.654	80	電子蓄積リング
フェライト装荷	東大核研 TARN II	1	0.5~8	20	イオンシンクロトロン
フェライト装荷	放医研 HIMAC	2	1~8	30	イオンシンクロトロン
フェライト装荷	兵庫ガンセンター	1	1~8	30	イオンシンクロトロン
フェライト装荷無同調	大阪大学	1	1~8	1	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷2ギャップ	KEK-JHF (R&D)	1	2~3.5	30	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷4ギャップ	KEK→BNL	1	2~3.5	200*	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷2ギャップ	KEK (R&D)	1	2~3.5	400	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷3ギャップ	J-PARC・R&D	2	2~5	240	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷3ギャップ	J-PARC (3 GeV シンクロトロン)	(11)	2~5	240	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷3ギャップ	J-PARC (50 GeV シンクロトロン)	(6)	2~5	240	イオンシンクロトロン
磁性合金装荷2ギャップ	放医研・普及型がん治療用	1	0.44~7	8	イオンシンクロトロン
4ペイン RFQ	東大核研 (現 KEK)	1	80	22	イオン線型加速器
4ペイン RFQ	東京工業大学	1	80	120*	イオン線型加速器
4ペイン RFQ	JPARC (R&D)	1	324	200*	イオン線型加速器
Nb 超電導1セル	自主開発	2	1300	—	電子/イオン加速
Nb 超電導3セル	自主開発	1	1300	—	電子/イオン加速
Nb 超電導5セル	原研-中性子科学 (R&D)	1	600	—	イオン加速

注) 括弧つき台数は製作中

*はパルス運転

オン用加速空洞の実績を示す。

2.3 加速器用超電導関連機器

加速器用超電導磁石には、ビームの偏向および収束用の偏向および四極電磁石、粒子検出器用のソレノイド電磁石がある。当社は欧州合同素粒子原子核研究機構(CERN)で建設中のLHC (Large Hadron Collider) 用の四極電磁石を KEK の基本設計に基づいて 89 年

から計 20 台製作した (図 9)。この超伝導電磁石は、240 T/m の磁気勾配を発生させ、陽子ビームを絞り込んで衝突させるために使用される。また、冷却性に優れた超流動液体ヘリウムにより 2 K に冷却され、ニオブチタン超伝導線材では性能限界となる 9 T 以上の最高磁場を発生させることができる。理研の Big-RIPS 装置には超電導の 3 連 4 極電磁石を 15 台

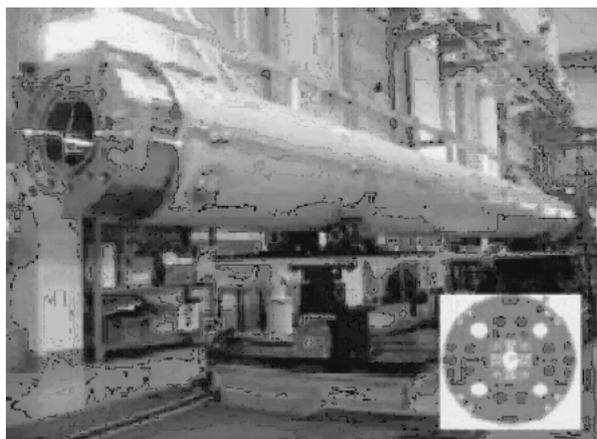


図9 LHC向けMQX超電導磁石

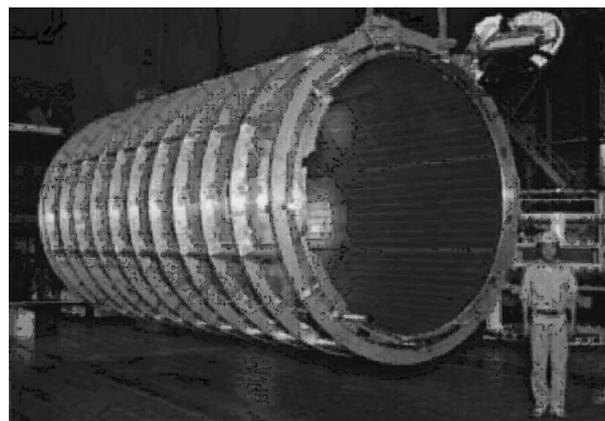


図11 LHC向けATLAS超電導ソレノイド

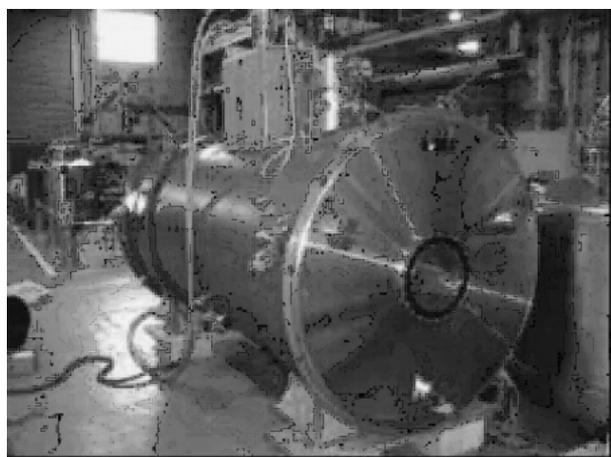


図10 理研BIG-RIPS向け超電導3連4極磁石

納入しさらに8台を製作中である(図10)。

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やKEKのBファクトリー用BelleおよびLHC用のATLASを製作した(図11)。表4に、大型超電導磁石実績および仕様を示す。

3. 今後の展開

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、当社も得意としているシステム技術、高周波技術および超電導技術を中心に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ている。

表4 大型超電導磁石実績および仕様

納入先	装置名	仕様
KEK (1996)	検出器用ソレノイド (Belle)	磁場：1.5 T 全長：3.9 m
フェルミ研究所 (1998)	検出器用ソレノイド (D0)	磁場：2 T 全長：2.6 m
KEK (2002)	検出器用ソレノイド (ATLAS)	磁場：2 T 全長：5.3 m
理研 (2003)	3連4極電磁石 (Big-RIPS)	磁場勾配：20 T/m 台数：14台
KEK (2004)	4極電磁石 (LHC-MQXA)	磁場勾配：240 T/m 台数：19台

これらの開発成果を産業用に生かすために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、トータルシステムとして性能を保証できる開発・製造体制作りを目ざしている。

以上、広がる加速器の多方面への当社の実績と今後の展望について紹介させて頂いた。加速器技術は今後とも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。この紹介を通して当社の姿勢を理解していただければ幸いである。

なお、本稿は(株)日本電機工業会発行「電機」平成18年1月号に掲載された「我が社の加速器事業紹介11—(株)東芝の加速器事業への取り組み—」を転載したものです。紙上をお借りして転載を許可いただいた(株)日本電機工業会関係者の皆様のご好意に対しお礼を申し上げます。