

加速器の心臓部 — 大電力高周波技術

High-Power RF System for Accelerators

佐藤 潔和
SATOH Kiyokazu

米澤 宏
YONEZAWA Hiroshi

山崎 長治
YAMAZAKI Choji

大電力高周波技術は、高周波源となる電子管、それを駆動する電源、高周波を伝送する伝送系、そして電子やイオンなどの荷電粒子ビームを加速する高周波加速空洞から構成される、加速器の心臓部と言える技術である。当社はこの分野に高い技術力をもっている。電子管としてはさまざまな種類のクライストロンを製作し、世界最高性能を達成しているものも少なくない。このクライストロンを駆動する電源では、従来のクローバ回路方式に替わるスターポイントコントロール方式、インバータ方式などの電源を開発し信頼性を高めている。高周波加速空洞には電子用からイオン用まで幅広い製作実績をもっている。さらに、加速器の高性能化に対応する新しい技術開発にも積極的に取り組んでいる。

The high-power radio-frequency (RF) system is a key component of the accelerator total system, because charged particles including electrons and ions are accelerated by the RF voltage generated by the high-power RF system. It consists of an electron tube, its power supply, an RF waveguide, and an RF accelerating cavity.

Toshiba has developed high-performance klystrons (high-power electron tubes), reliable power supplies for klystrons, and many types of RF accelerating cavities. This paper describes Toshiba's activities and R&D efforts in the field of high-power RF systems.

1 まえがき

加速器に必要とされるさまざまな先端技術のなかで大電力高周波技術は、実際に電子やイオンなどの荷電粒子ビームにエネルギーを与えて加速する高周波電圧を発生する加速器の心臓部と言える技術である。そして、高周波源となる電子管、それを駆動する電源、高周波を伝送する伝送系、および高周波電圧を発生する高周波加速空洞の各技術により構成される。扱う高周波の周波数範囲も数 MHz から十数 GHz(マイクロ波)ときわめて広い。当社は、この全般にわたり高い技術力と豊富な実績をもっており、加速器事業を推進している。

以下、代表的な大電力電子管クライストロンとその電源、および高周波加速空洞に対する取組みについて述べる。

2 世界最大出力の電子管 — クライストロン

クライストロンは、電子ビームの集束作用を利用してマイクロ波の増幅を行う電子管である。電子ビームを発生させる電子銃部、マイクロ波を増幅する相互作用部、使用済みの電子ビームの残存エネルギーを熱として排出するコレクタ部から構成される。他の多くの電子管と異なり、マイクロ波の入力部と出力部が電氣的に完全に分離されており、入出力回路の結合による不安定現象がなく、動作が安定である。また各構成要素が構造的に独立しているため、

表1. 当社大電カクライストロン(加速器用)

Toshiba high-power klystrons for accelerators

動作方式	加速器方式	周波数 (GHz)	出力電力 (MW)	当社管型名
連続動作 (CW)	電子シンクロトロン	0.5	1.2	E3732
	蓄積リング	0.5	0.2	E3774
	大強度線形加速器	1.3	1.2	E3718
パルス動作 (μ s 級)	電子線形加速器	2.9	50	E3730 A
		2.9	80	E3712
		5.7	50	E3746
		11.4	75	E3717*
パルス動作 (数 10 μ s)	線形加速器 FEL	2.9	24	E3729
パルス動作 (数百 μ s ~ ms)	陽子線形加速器	0.3	3	E3740*
	超電導線形加速器	0.6	1.2	E3748*

CW : Continuous Wave(連続波)

FEL : Free Electron Laser(自由電子レーザー)

* : 開発中

それぞれの機能に特化した設計ができる。このため高い電力利得(50 dB 以上)、高いエネルギー変換効率(最大 78%)、大きな出力電力(連続動作で 1.2 MW、パルス動作で 100 MW 程度)が可能で、しかも長寿命(数万時間以上)という優れた特性を備えている。さまざまな分野で使用されているが、特に、高エネルギー加速器に必要な出力電力 MW 級の大電力マイクロ波増幅・発生装置に適している。

加速器は、荷電粒子を円形軌道上で加速するリング加速器(シンクロトロン)あるいは蓄積リングなどと、直線的な軌道上で加速する線形加速器(ライナック)に大別される。

電子(あるいは陽電子)を加速するリング加速器では数 10 kW から数 10 MW の連続マイクロ波が必要で、特に大電力が必要な高エネルギー加速器では連続波動作のクライストロンが使用される。線形加速器は単体で、またはリング加速器の入射器として使用される。線形加速器では電子がその中を通過する一瞬だけ加速が行われるため、大きなマイクロ波電力をパルス状に入力する。このため、数 μs 程度のパルス幅でピーク電力が数 MW から数 10 MW の周波数には、主に 3 GHz 程度のクライストロンが使用される。

当社は国内外の研究機関の指導のもと、最先端の科学技術研究用大電力電子管を開発している。特に、加速器用クライストロンでは、世界最大の出力電力を誇る製品を数多く開発し、高エネルギー物理学、原子核物理学の研究に貢献してきた。表 1 に主な加速器と対応する当社大電力クライストロン型名の一覧を示す。

1997 年に完成した世界最新鋭の第三世代放射光施設 SPring-8 では、入射器線形加速器に動作周波数 2,856 MHz、出力電力 80 MW のパルス動作クライストロン E 3712 が 13 ユニット、またシンクロトロンおよび蓄積リングに動作周波数 508.6 MHz、出力電力 1,200 kW 連続動作クライストロン E 3732 が 5 ユニット稼働している。E 3732 とその前身モデルである E 3786 は、単一メーカーが製造する連続出力 MW 級のクライストロンとしては最多の稼働実績がある。KEK(高エネルギー加速器研究機構)のトリスタン加速器での累計稼働時間は 106 年・台^(注1)、もっとも長期間稼働している管球の動作時間は 5 万時間を越えている⁽¹⁾。また、E 3712 はメーカーが商業的に生産しているパルス動作クライストロンとしては世界最大のピーク出力が可能である。

近年の高エネルギー物理学の進展に伴い、より高い加速エネルギーの加速器が必要とされている。このため加速電界強度を高め、より短い距離で加速できるような加速器の研究が行われている。一般に加速器の動作周波数を高くすると、同じマイクロ波電力に対して単位長さ当たりが発生する加速電界強度が高くなる。現在実用化されている線形加速器の動作周波数は S バンド(3 GHz 弱)が多いが、その 2 倍の周波数(C バンド)、または 4 倍の周波数(X バンド)の線形加速器の開発が行われている。当社ではこのような加速器開発の動向に添って、より高い周波数、より高いピーク出力電力を旨としたパルスクライストロンの開発を行っている^{(2),(3)}。一般に動作周波数を高めるとクライストロン内部に発生するマイクロ波電界強度が高くなるため、絶縁破壊を生じ放電する危険性が高くなる。電子ビームからマイクロ波電力を取り出す出力回路部はもっとも電

(注 1) 何台が何年稼働したかを意味し、例えば 10 台が 10 年なら 100 年・台を示す。

界強度が高く、この部分の絶縁破壊によって出力電力が制限されていた。当社では、一般的な出力回路の単一セル共振空洞に代え、電界強度を低減することができるマルチセル進行波型を採用した。これにより、X バンドでピーク電力 56 MW、パルス幅 0.5 μs 、C バンドでピーク電力 54 MW、パルス幅 2.5 μs を達成している。C バンドクライストロン E 3746 の外観を図 1 に、特性例を表 2 に示す。

これらのクライストロンでは、電子ビームの発散を防ぐ集束磁界は電磁石により発生する。動作周波数を高めた場合、電子ビームをより細く集束する必要があり、電磁石の消費電力が過大になる。永久磁石を用いれば消費電力はなくなるが、強大な磁界を発生させることは困難である。このため、同じマイクロ波電子管の進行波管で実用化されている、極性を反転させた永久磁石を電子ビームの進行方向に周期的に配置した PPM(Periodic Permanent Magnet)を

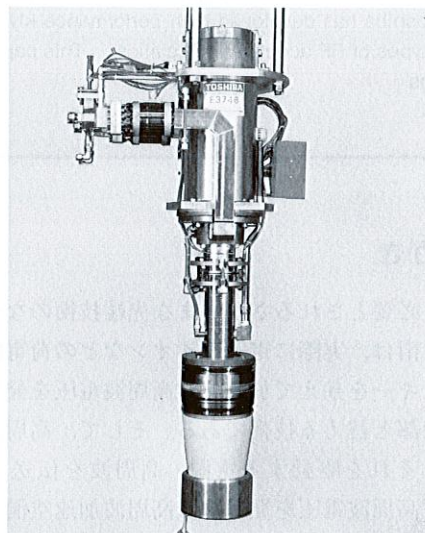


図 1. C バンドパルスクライストロン E3746 出力電力 50 MW、効率 44%。次世代線形加速器に使用する。
Model E3746 C-band pulsed klystron

表 2. E3746 の動作特性例
Performance of model E3746 pulsed klystron

項目	動作特性
動作周波数	5,712 MHz
ビーム電圧	369 kV
ビーム電流	333 A
出力電力	54 MW
RF パルス幅	2.5 μs
パルス繰返し	50 pps
入力電力	323 W
電力効率	44%
電力利得	52 dB

RF: Radio Frequency(高周波)

用いたクライストロンが注目され、開発が急がれている。

このような高い加速エネルギーを目ざす方向とは別に、中性子ビーム応用研究や放射性廃棄物の消滅処理を目的として、従来よりも平均ビーム電流値が格段に大強度な線形加速器の建設が検討されている。連続動作または数 100 μ s から ms オーダの比較的長いパルス動作で、出力が数 100 kW から数 MW のクライストロンが必要である。

当社では 324 MHz、出力電力 3 MW の長パルスクライストロン E3740 を開発中である。このような長パルスの場合、高圧電源自体を高速でパルス状に制御することは困難で、クライストロンの電子銃に電子ビームのオンオフ機能をもたせた、モジュレーションアノードタイプの電子銃を採用する。また、全長 4 m を超える長尺となるため、集束電磁石、高電圧絶縁油槽をクライストロン本体と一体化するとともに、全体を水平に設置することにより、建屋の高さを抑え、建屋を含む加速器全体の建設コストの抑制を図っている。

3 クライストロン電源

クライストロン電源は、カソード電源、アノード電源、ヒータ電源、集束コイル電源で構成される。これらのなかで大電力を扱うカソード電源が設計上もっとも重要となる。当社では種々の大電力クライストロンに合わせて、電源の開発を進めてきた。特に、保護連動などをクライストロンと協調して設計し、最適かつ合理的な電源システムを提供している。

カソード電源の主な仕様は次のとおりである。

- (1) E 3732 用
 - (a) カソード電圧：-90 kV, (b) ビーム電流：20 A
 - (2) E 3774 用
 - (a) カソード電圧：-45 kV, (b) ビーム電流：9 A
- 一方クライストロンからの主な要求事項としては、
- (1) カソード電圧のリプル： $\pm 1\%$ 以内
 - (2) 短絡時の流入エネルギー：24 J 以下

の 2 項目があげられる。後者はクライストロン内部の電極でアーク放電した際、エネルギー流入を抑制して電極の損傷を防ぐ目的がある。一方でリプルの制限からはフィルタ用のコンデンサを増やす必要があり、短絡時の流入エネルギーは増えてしまう。このようなことから、クライストロン短絡時の流入エネルギーを抑制するためのカソード電源の回路方式がいろいろ考えられてきた。

図 2 に従来から広く採用しているクローバ回路方式の電源を示す。この回路ではクライストロンの短絡を検出し、高速にクローバ回路を動作させることにより、クライストロンへの流入エネルギーをバイパスさせる。この電源システムは、KEK のトリスタン、SPring-8 シンクロトロンな

どで採用され、10 年以上の運転実績がある。ただしこの回路ではイグナイトロンを用いたクローバ回路の誤動作がしばしば問題になり、ノイズ対策を実施しながら運転してきた。このようなことから、クローバレスの電源が開発された。

図 3 はスターポイントコントロール方式の電源である。この回路はトランスのスター結線の中性点を引き出し、サイリスタのブリッジ回路と直流リアクトルを接続した構成である。直流リアクトルが出力電圧のリプルを低減させる効果を持ち、フィルタ用のコンデンサを 1/10 以下に小さくできる。またクライストロン短絡時は、サイリスタを停止することで、クローバ回路なしで流入エネルギーを抑制できる。この方式は SPing-8 の蓄積リングで採用されている⁴⁾。

図 4 はインバータ方式の電源である。この回路ではインバータにより整流回路の動作を数 10 kHz で高周波化し、

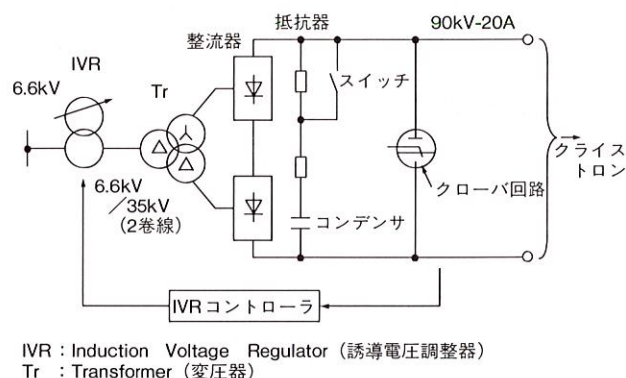


図 2. クローバ回路方式電源の構成 クローバ回路にイグナイトロンを用いて、短絡時の流入エネルギーをバイパスさせる。

Configuration of crowbar circuit type klystron power supply

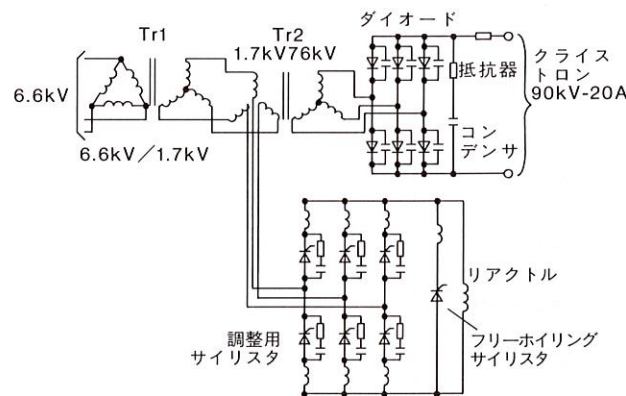


図 3. スターポイントコントロール方式電源の構成 トランスのスター結線中性点とサイリスタブリッジ回路を接続し、フィルタ用コンデンサを小さくしている。

Configuration of starpoint controller type klystron power supply

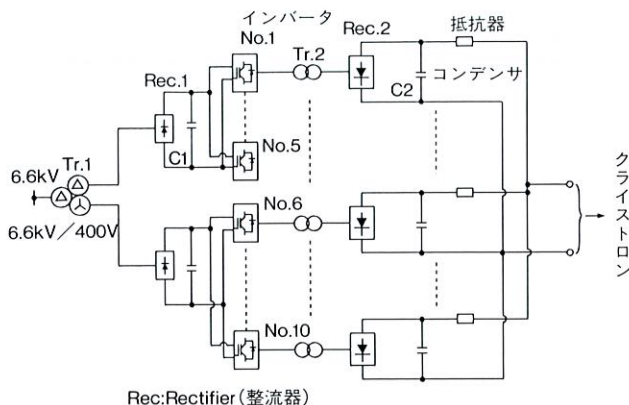


図4. インバータ方式電源の構成 インバータで数10 kHzの高周波動作をさせフィルタ用コンデンサを小さくしている。

Configuration of inverter type klystron power supply

フィルタ用のコンデンサを小さくしている。高周波化により高速応答も向上している。このシステムは、姫路工業大学の放射光リング(ニュースバル)で採用されている⁵⁾。

4 高周波加速空洞

高周波加速空洞は、電気的共振現象を利用して高周波電

力を高い高周波電圧に変換し、その電圧で電子やイオンなどの荷電粒子ビームを実際に加速する加速器の心臓部と言えるコンポーネントで、シンクロトロンや放射光リングの加速部として、また線形加速器として広く用いられている。

当社は、高周波加速空洞の設計・製作に必要な幅広い先端技術を駆使して高周波加速空洞の製作に取り組んでおり、表3に示す豊富な種類と台数の製作実績をもっている。また総合的な大電力高周波技術を活かし、必要に応じて社内で実負荷大電力試験⁶⁾を実施して性能・信頼性を確認しており、空洞は納入先で順調に稼働している。

以下に、代表的な高周波加速空洞の概要と近年の新技術の動向およびそれに対する取組みについて述べる。

4.1 電子用高周波加速空洞

電子を加速する高周波加速空洞は、放射光リングや電子シンクロトロンには不可欠であり、製作実績ももっとも多い。

図5に現在KEKの放射光リングPF(フォトンファクトリー)で稼働している高周波加速空洞の外観を示す。内面形状・寸法により共振周波数が決まる空洞共振型である。加速器リング内での電子の周回周期は一定なので、共振周波数は500 MHz固定であり、高周波源には当社製クライストロンE3774が用いられている。

空洞の材質は電気伝導度、熱伝導度、真空特性に優れた内

表3. 高周波加速空洞製作実績(80年~98年)
RF accelerating cavities manufactured by Toshiba

空洞型式	納入先	製作台数	共振周波数(MHz)	入力電力(kW)	用途	備考
ノーズコーン1セル	KEK-PF	8	500	70	電子蓄積リング	PF 初代
リエントラント1セル	NTT	1	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	9	508.6	300	電子シンクロトロン	
ベル形1セル	SPring-8	27	508.6	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	全数大電力試験実施
高次モード減衰	KEK-PF 高輝度化	5	500	150	電子蓄積リング	SiC ダクト付属
高次モード減衰	KEK-ATF	3	714	50	電子蓄積リング	SiC 導波管ダミーロード付属
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	姫路工業大学ニュースバル	1	500	90	電子蓄積リング	SiC ダクト付属
ARES	自主開発	1	508.9	300	電子蓄積リング	大電力試験実施
リッジ付きTEモード	自主開発	1	100	60	電子線発生	
フェライト装荷	東京大学核研 TARN II	1	0.5~8	20	イオンシンクロトロン	東京大学核研:現 KEK 田無
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	兵庫粒子線治療センター	1	1~7	15	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	バイアス磁場不要
磁性合金装荷2ギャップ	KEK-JHF(R&D)	1	2~5	30	イオンシンクロトロン	
磁性合金装荷4ギャップ	KEK-JHF(R&D)	1	2~5	200*	イオンシンクロトロン	高加速電圧(80 kV)
4ペインRFQ	東京大学核研(現 KEK)	1	80	22	イオン線形加速器	日本で最初のRFQ
4ペインRFQ	東京工業大学	1	80	120*	イオン線形加速器	
Nb超電導1セル	自主開発	2	1300	-	電子/イオン加速	試作(34 MV/m 達成)
Nb超電導3セル	自主開発	1	1300	-	電子/イオン加速	試作(34 MV/m 達成)

RFQ:Radio Frequency Quadrupole(高周波四重極加速器)

*パルス運転

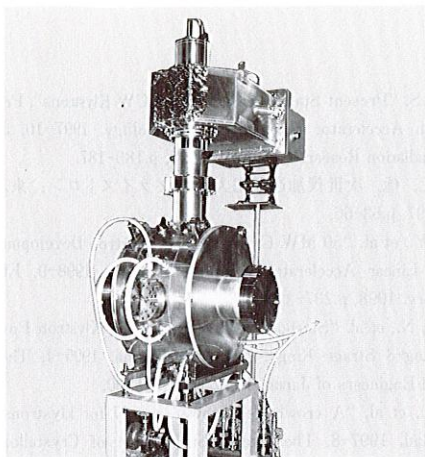


図5. 電子加速用の高周波加速空洞 高周波電力は上部の入力カプラから入力される。電子ビームは中央のビームポートを通過する。
RF accelerating cavity for electron beam

部欠陥の少ない電子管用無酸素銅で、内面は超精密旋盤により欠陥の少ない仕上げとして高周波損失を低減している。最大入力電力(壁損失)は150 kW(連続)で1 MV以上の加速電圧を発生する。この値は、SPring-8蓄積リング用の単セル空洞とともにこのサイズの空洞としては世界最大級の大電力性能である。

4.2 イオン用高周波加速空洞

イオンシンクロトロンに設置されるイオンを加速する高周波加速空洞では、加速とともに増大するイオンの速度に合わせて共振周波数を変化させる。また、一般的に電子用に比べ共振周波数は低い。これらの特徴によりイオン用高周波加速空洞の構造は電子用とは大きく異なっている。

図6は、放射線医学総合研究所のガン治療用重イオンシンクロトロン(HIMAC)で稼働している高周波加速空洞で

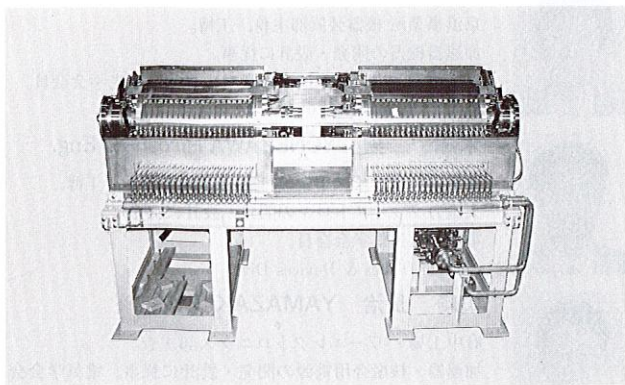


図6. イオン加速用の高周波加速空洞 中央がセラミックダクトで絶縁された加速ギャップ。黒く見えるのがフェライトリングで内部をビームダクトが通っている。運転時はカバーを閉じる。

RF accelerating cavity for ion beam

ある⁷⁾。共振周波数は1~8 MHz可変で、シンクロトロンの加速に同期して700 msで変化させる。共振周波数は、加速電圧を発生する加速ギャップに取り付けられたコンデンサのキャパシタンスと真空ダクトの周囲に積み重ねられているフェライトリングのインダクタンスで決まり、空洞というよりは集中定数共振回路に近い。

フェライトリングの間には発熱を除去するために水冷銅板が挟まれている。フェライトに磁場を印加すると透磁率が変化する性質を利用して共振周波数を変化させるので、フェライトの周囲には磁場を発生するためのバイアス電流回路が設けられている。

高周波源は四極真空管で空洞直下に取り付けられる。広い周波数範囲で安定に動作させるために寄生共振の抑制、発熱の集中の回避などについて多くの細かい配慮がなされており、30 kWの高周波電力で全帯域にわたり6 kV以上の電圧を発生している。

4.3 新しい技術

大型の放射光施設や物理実験用の加速器に対する要求はますます高度化しており、高周波加速空洞にもさまざまな面での高性能化が求められている。一方、産業応用、医療応用の加速器にはなるべく小型で運転の簡単な空洞が望まれる。以下にこれらの要求に答える新しい技術について述べる。

4.3.1 ビーム不安定性の抑制技術

大電流で質の良いビームを加速するにはビームと空洞の相互作用によってビームが消失したり質が悪化するビーム不安定性を抑制しなければならない。電子用加速空洞では、空洞内に誘起される高次モード(寄生共振モード)の電力をビームポートや専用の導波管から空洞外に引き出して高周波吸収体で吸収する方法が有効である。高周波吸収体としてはSiC(炭化珪素)セラミックスが優れた特性をもっている。

当社はSiCビームダクトやSiCダミーロードを備えた高次モード減衰空洞^{8),9)}を完成し、KEKおよび姫路工業大学で稼働している。

多くの空洞をもつSPring-8蓄積リングでは、各空洞の効果が重なって強め合わないよう空洞の寸法を少しずつずらしている¹⁰⁾。この空洞の製作においては精密加工と変形の少ない接合技術により設計どおりの性能を得てSPring-8の安定な運転に貢献している。

4.3.2 新しい磁性材料を用いた高周波加速空洞

現在計画が進められているKEKの大型ハドロン施設(JHF)や理化学研究所のRIビームファクトリでは従来の性能を大きく上回るイオン用高周波加速空洞が必要とされている。そのため、従来に替わる新しいフェライトや他の優れた磁性材料が望まれており、テストベンチを製作して各種材料の特性を測定し加速空洞に適した磁性材料を明らかにしようという試みが行われている。

当社はテストベンチの製作、特性測定、測定の成果を活かした磁性合金装荷型空洞の試作に協力し、ビーム不安定性を抑制できかつ従来の10倍近い高加速電圧を発生する空洞の開発に貢献している¹⁰⁾。

4.3.3 無同調イオン加速空洞 医療用、産業用の小型イオンシンクロトロンでは発生電圧は低くてもよいが、小型で制御が容易な加速空洞が望まれる。

当社は大阪大学と共同で、オールパスネットワークを用いてバイアス磁場がなくても1~8MHzの広い帯域で安定に電圧を発生できる無同調イオン加速空洞の開発に成功している¹¹⁾。

4.3.4 超電導加速空洞 超電導加速空洞は少ない電力できわめて高い加速電圧を発生でき、将来の高エネルギー加速器の小型化、省電力化のためには不可欠な技術と言える。当社はKEKと共同で空洞内面の表面処理を最適化して安定に高い加速電界を発生する研究を行っており、試験空洞で34MV/mという世界最高レベルの電界を達成している¹²⁾。

また、より効率の良いシステムを旨として2K冷凍システムを採用したクライオスタットと空洞の開発も進めている。

4.3.5 新しい製造技術 直径、全長が1m近い大型の空洞共振型の空洞は、従来、鉄やステンレスに銅メッキを施して電気的な内面を形成していた。しかし、高周波加速空洞に求められる平滑で緻密な大面積のメッキを安定に行うことは容易ではない。

当社はステンレスや鉄の円筒内面に薄い銅板をHIP(熱間等方加圧)技術を用いて拡散接合する方法を開発し、優れた高周波特性、大電力特性、真空特性をもつことを実証した。この技術は今後ARES(Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage)型空洞¹³⁾やイオン線形加速器などへの応用が期待される。

5 あとがき

以上述べてきたように、当社は大電力高周波技術により多くの加速器の安定な運転に貢献し、将来の加速器に要求される新しい技術の開発にも積極的に取り組んでいる。今後ますます高度化すると思われる加速器技術の牽引役となるよう、さらなる挑戦を続けていきたい。

なお、大電力高周波技術としてパルスクライストロンモジュレータや高周波伝送系も重要な要素であるが、別論文(p.6-14)で紹介しているので参照されたい。

文献

- (1) Isagawa, S. "Present Status of High Power CW Klystrons". Proc. of the 11th Symp. on Accelerator Science and Technology. 1997-10, Japan Synchrotron Radiation Research Institute. 1997, p.185-187.
- (2) 水野 元, 他. 次世代加速器用大電力クライストロン. 東芝レビュー, 52, 9, 1997, p.63-66.
- (3) Ohkubo, Y., et al. "50 MW C-band Pulse Klystron Development". Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1998-9, Electrotechnical Laboratory. 1998, p.237-239.
- (4) Kumagai, N., et al. "Starpoint Controller for the Klystron Power Supply in the SPring-8 Storage Ring". IPEC-Yokohama. 1995-4, The Institute of Electrical Engineers of Japan. 1995, p.1497-1500.
- (5) Kozu, H., et al. "A crowbarless power supply for klystrons". J. Synchrotron Rad. 1997-8, The International Union of Crystallography. 1998, p.374-375.
- (6) Yoshizuki, T., et al. "High Power Test of RF Cavities for the PLS Storage Ring". Proc. of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan. 1994-7, Japan Atomic Energy Research Institute. 1994, p.175-177.
- (7) Kanazawa, M., et al. "RF High Power System of the HIMAC Synchrotron". Proc. of the 8th Symp. on Accelerator Science and Technology. 1991-11, The Institute of Physical and Chemical Research. 1991, p.161-163.
- (8) 小関 忠, 他. 高輝度光源加速器のための高周波加速空洞. 日本放射光学会誌, 10, 1, 1997, p.3-22.
- (9) Sakanaka, S., et al. "Construction of a 714-MHz RF System for the ATF Damping Ring". Proc. of 1997 Particle Accelerator Conference. 1997-5, TRIUMF(Canada's National Meason Research Facility). 1997, p.2980-2982.
- (10) Ego, H., et al. Suppression of the coupled-bunch instability in the SPring-8 storage ring. Nucl. Instr. and Meth. A 400. 1997, p.195-212.
- (11) Fujieda, M., et al. "MA-Loaded Cavities for Barrier Bucket Experiment". Proc. of 6th European Particle Accelerator Conference. 1998-6, European Physical Society Interdivisional Group on Accelerator. 1998, p.1796-1798.
- (12) Rizawa, T., et al. "High Power Test of a Proto-Type Tunig-Free Cavity with an All-pass Network". Proc. of the 11th Symp. on Accelerator Science and Technology. 1997-10, Japan Synchrotron Radiation Research Institute. 1997, p.230-232.
- (13) Ota, T., et al. "Development of a High Field Three-Cell Superconducting Cavity". Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1998-9, Electrotechnical Laboratory. 1998, p.277-279.
- (14) Yamazaki, Y., et al. A Three-Cavity System which Suppresses the Coupled-Bunch Instability Associated with the Accelerator Mode. Particle Accelerators, 44, 1994, p.107-127.



佐藤 潔和 SATOH Kiyokazu, D.Eng.

京浜事業所 機器装置部主務, 工博。
加速器機器の開発・設計に従事。
日本物理学会, 日本原子力学会, 日本放射光学学会会員。
Keihin Product Operations



米澤 宏 YONEZAWA Hiroshi, D.Eng.

電子管・デバイス事業部 電子管技術部部长, 工博。
大電力クライストロンの開発・設計に従事。
電子情報通信学会会員。
Electron Tubes & Devices Div.



山崎 長治 YAMAZAKI Choji

府中工場 パワーエレクトロニクス部主査。
加速器・核融合用電源の開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Works