

世界最高性能の放射光源 SPring-8 にみる東芝のシステム技術

Toshiba Accelerator System Technologies Utilized in SPring-8, the World's Highest Performance Synchrotron Radiation Source

熊谷 教孝
KUMAGAI Noritaka

横溝 英明
YOKOMIZO Hideaki

米原 博人
YONEHARA Hiroto

平田 寛
HIRATA Yutaka

大型放射光施設 SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) は、世界最高性能の放射光を発生することができる大型の共同利用基礎研究施設で、日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設を行った。東芝は、今まで培ってきた加速器技術をさらに発展させ、シンクロトロン全体のとりまとめに加え、蓄積リングの高周波システム、線形加速器の高周波システムを担当した。SPring-8 は、1997 年 10 月 3 日から放射光利用が開始され、現在も順調に運転されている。

SPring-8, the world's highest performance synchrotron radiation source, was developed through the joint efforts of the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and the Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN). With its wealth of technical expertise in the field of particle accelerators, Toshiba made an important contribution to the SPring-8 project in various areas including the total system engineering of the synchrotron, and the RF systems for the storage ring and linear accelerator (linac). SPring-8 has been in operation for users since October 3, 1997.

1 まえがき

大型放射光施設 SPring-8 は、産、学、官の共同利用施設で、高輝度、硬 X 線源として、物質材料科学、情報・電子科学、生命科学など広い範囲の科学技術分野の最先端研究の推進を目標としている。世界的には、SPring-8 は、欧州 ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)、米国 APS (Advanced Photon Source) と並ぶ世界三大放射光施設の一つであり、蓄積リングの周長 1,436 m およびリングビームエネルギー 8 GeV は、世界最大・最高性能の放射光施設である。

SPring-8 の特長を以下に示す。

- (1) 真空紫外線から X 線までの幅広い波長範囲で世界最高の輝度を得られる。
- (2) 指向性の優れた光を得られる (挿入光源部の場合 100 m 先で 0.5 mm の広がり)。
- (3) 多数の挿入光源からの光を同時に利用できる (38 台)。
- (4) 長尺の挿入光源 (30 m) からの光を利用できる。

東芝では、今まで培ってきた加速器技術を発展させ、シンクロトロン全体のとりまとめに加え、蓄積リングの高周波システム、線形加速器の高周波システムを担当した。

2 放射光

電子がその進行方向を磁場によって曲げられるとき、接線方向に光を出す。この光は放射光と呼ばれ、きわめて輝度が高く、指向性の良い光で、赤外線から X 線までの広い波長領域にわたっている。SPring-8 では波長範囲として

0.01~2 nm の間で、世界最高の輝度を得ることができる。

3 放射光の利用

放射光源より生み出される放射光は、従来の光に比べきわめて優れた特性があるため、この光を利用することにより、物質構造と物性の研究、化学反応、物理変化過程の研究、医学診断、生体物質の構造の研究、新薬の開発などを行うことができる。主な利用研究項目を以下に示す。

- (1) XAFS (X 線吸収微細構造) 原子固有の X 線吸収を使用して、周辺原子の種類、配置を解析する。
- (2) 光励起反応 物質に X 線を照射することにより、特定の化学結合を切断し、新物質を創生する。
- (3) 蛍光 X 線分析 物質に X 線を照射すると、物質中の元素に特有な蛍光 X 線が放射されるため、物質中の元素の組成を調査することができる。
- (4) X 線回折 物質に照射された X 線は、原子、分子の集団により、配置固有の方向に散乱される。この像を用いて、物質の構造を求める。
- (5) イメージング技術 高輝度で波長の短い X 線を投影することにより、正確なイメージデータが得られる。

4 全体構成

SPring-8 は、8 GeV の運動エネルギーをもった電子を、リング状に周回させることによって光を生み出すための装置である。図 1 に示すように、大きく分けて三つの加速器から構成される。

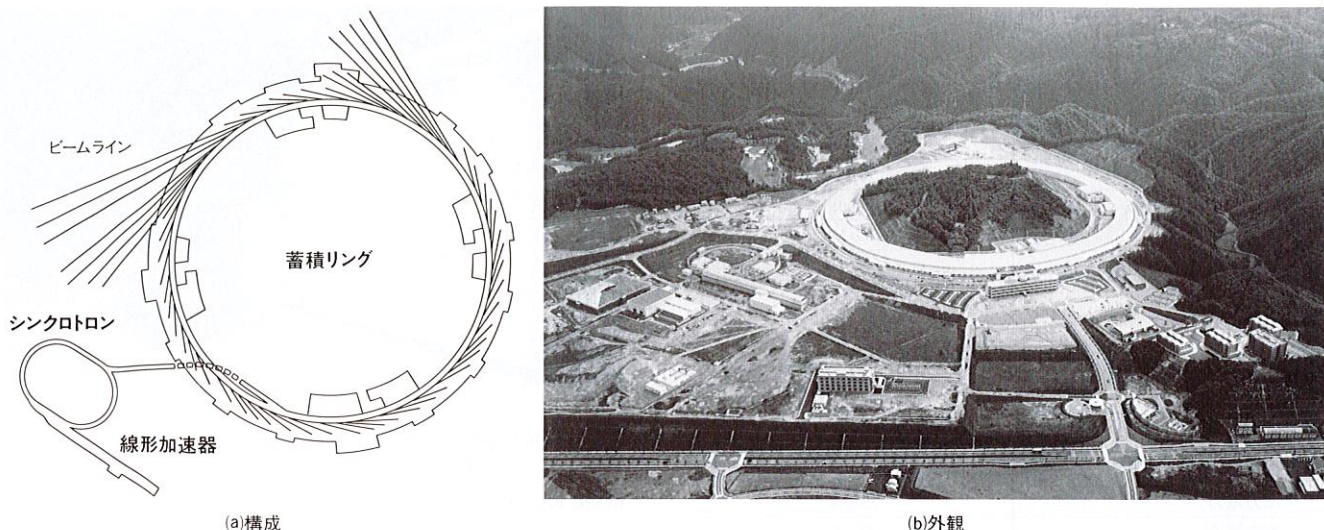


図1. SPring-8 構成および外観 Overview of SPring-8 大型放射光施設 SPring-8 は、線形加速器、シンクロトロン、蓄積リングから構成される。

- (1) 線形加速器は、電子銃で電子を生成し、電子ビームをエネルギー 1 GeV まで加速する装置で、全長は 140 m である。
- (2) シンクロトロンは、線形加速器の 1 GeV 電子ビームを受け取り、蓄積リングの定格 8 GeV まで加速し、蓄積リングへ供給する。周長は 396 m で、偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石によって構成されるレーストラック状の周回軌道をもつ。
- (3) 蓄積リングは、周長 1,436 m で、8 GeV の電子ビームを周回させることにより、リング接線方向に放射光を発生する。この失われたエネルギーは、高周波加速ステーションによって補充される。
- (4) ビームラインは、蓄積リングから取り出した放射光を放射光利用区域に設置された実験ハッチに取り出すもので、最終的には偏向電磁石ビームライン 23 本、挿入光源ビームライン 34 本、長直線部挿入光源ビームライン 4 本が予定されている。

5 東芝の担当範囲

SPring-8 における東芝の担当範囲を以下に示す。

- (1) 線形加速器 線形加速器では、電子を加速する 13 セットのクライストロン、パルス電源および高周波電力を加速管に伝える立体回路を担当した。
- (2) シンクロトロン シンクロトロンでは、全システムの取りまとめを行った。主な製作機器は、偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石、補正電磁石、入出射パルス電磁石、入出射パルス電源、真空ダクト、ビームモニタ、高周波加速空洞、1 MW クライストロン、高周

波電源および全体制御装置である。

- (3) 蓄積リング 蓄積リングの心臓部にあたる、高周波加速ステーション 3 セット (1 MW クライストロン、高周波電源) および高周波加速空洞 16 台を担当した。
- (4) ビームライン ビームラインインターロックシステム 22 本を担当した。

6 線形加速器

線形加速器は、電子銃で生成された電子を高周波電力によって励振された加速管 (加速器本体) で高エネルギーに加速する直線形の加速器である⁽¹⁾。SPring-8 線形加速器の主加速部は、26 本の加速管、13 台の高周波電源および高周波電力を伝送する立体回路 (導波管) から構成されている。

6.1 高周波電源

高周波電源は、高周波電力を発生する電子管クライストロンおよびモジュレータ (クライストロンを駆動するパルス電源) から構成される。これらは世界最高出力を誇る装置で、東芝の大電力電子管製造技術およびレーダ、放送機で培った高周波技術が生かされている。

クライストロンおよびモジュレータの仕様を表 1、表 2 に、高周波電源の外観を図 2 に、回路構成を図 3 に示す⁽²⁾。高周波電源は、AC 400 V 系の商用電源で受電し、変圧整流器により昇圧・整流して、パルス成形回路に直流充電した後、サイラトロンスイッチをオンすることにより、矩(く)形波のパルス電力を供給する電源である。

電源出力は、加速器側の要請により変動を厳しく制限 (± 0.5 % 以内) されており、高周波電源では低インダクタンス化を図ったパルス成形回路、パルストランスを採用してい

表1. クライストロン E3712 の仕様

Specifications of E3712 klystron

項目	仕様
出力電力 (ピーク)	80 MW
出力パルス幅	4 μ s
パルス繰返し数	60 pps
出力周波数	2,856 MHz
効率	44%

表2. モジュレータの仕様

Specifications of modulator

項目	仕様
出力電力	391 kV
出力電流	471 A
出力パルス幅 (FWHM)	$\geq 5 \mu$ s
出力パルス平坦(たん)部	$\geq 2 \mu$ s
パルス繰返し数	60 pps

FWHM: Full Width Half Maximum (電力が最大値の 1/2 になる帯域幅)

る。また、新規要素として負荷との調整作業を最小限にする結合型パルス成形回路、電源効率を改善する電力再生型 de'Qing 回路を採用した。

97 年度に試作した試験用電源には、直流電源部に高周波インバータ電源を採用し、電源の全体容積を 60 %程度に小型化することができた。また、現在消耗品であるサイラトロンを半導体に置き換えて、半永久寿命の電源とする研究開発を推進している。

6.2 立体回路系

クライストロンから出力された高周波電力を加速管まで伝送するシステムである。伝送電力としては世界最大級の導波管システムである。表3に基本仕様を示す。このシス

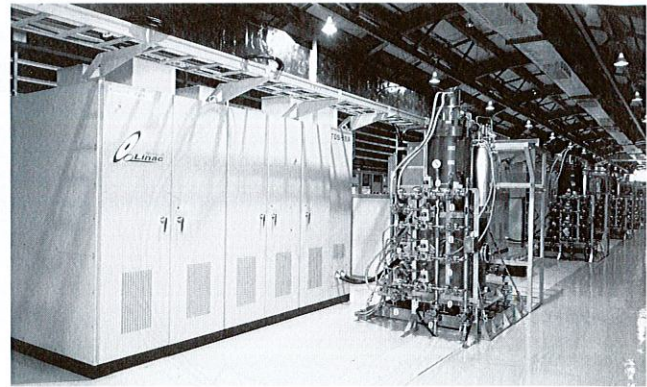


図2. 線形加速器高周波システム 線形加速器の高周波システムは、クライストロン E3712, モジュレータ, 立体回路で構成される。

Linac klystron and modulator

テムは、導波管、大電力セラミック窓、位相調整器、ダミーロード、方向性結合器、真空排気系などから構成される。

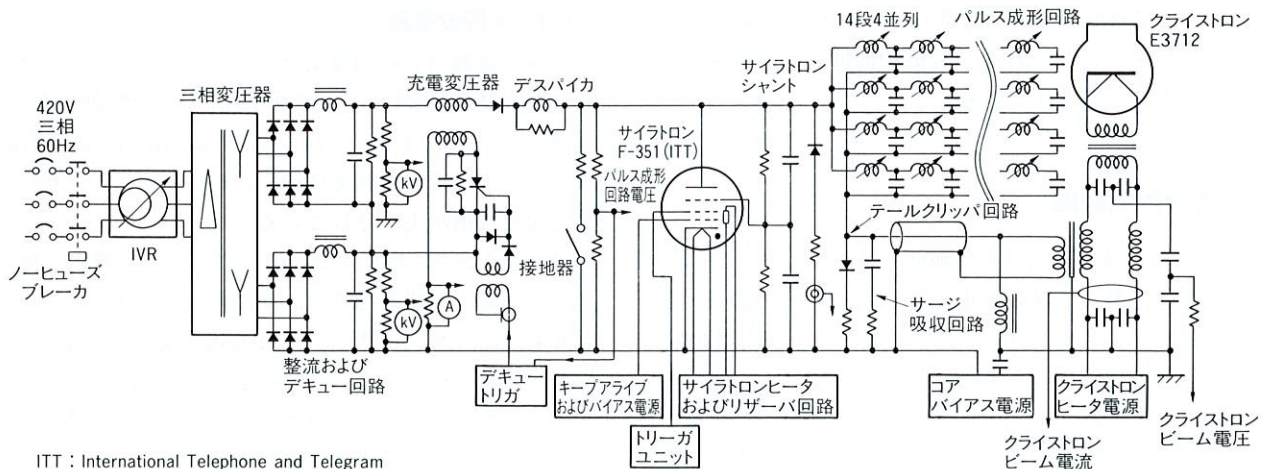
立体回路系をとおして 80 MW もの大電力を伝送する必要性から、導波管内部は 10^{-7} Pa オーダの高真空に保たれ、大電力伝送に起因する導波管内部での放電を抑制している。また、導波管は加速管に供給する高周波電力の位相をそろ

表3. 立体回路の仕様

Specifications of waveguide system

項目	仕様
伝送電力 (ピーク)	80 MW
パルス幅	4 μ s
パルス繰返し数	60 pps
伝送周波数	2,856 MHz
VSWR	≤ 1.05

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio (電圧定在波比)



ITT: International Telephone and Telegram

図3. クライストロンモジュレータ回路 モジュレータは、商用電源を変圧整流器で、昇圧・整流して、パルス成形回路に直流充電した後、サイラトロンスイッチをオンすることにより、矩形波のパルス電力を供給する。

Simplified circuit diagram of linac modulator

える必要があるが、導波管の実長でそろえるためには、導波管の製作および機器据付への制約が大きいので、位相調整器を装備することで位相の調整をできるようにした。

このシステムは、世界でも経験のない大電力伝送であるため、実機製作前に東芝において、基本構成機器について電源との組合せ試験を実施し、機器健全性の検証を行った。

6.3 実績

この高周波システムは、96年7月に8時間連続フル定格試験(80 MW-60 pps (pulse per second))を完了し、その後導波管の枯らし運転(エージング)も無事完了し、現在に至るまで安定に稼働している。

7 シンクロトロン

7.1 シンクロトロンの原理と構成⁽³⁾

シンクロトロンは、電子ビームの軌道を一定に保ちながら加速する装置である。線形加速器で加速された1 GeVの電子ビームを8 GeVまで加速し、蓄積リングに入射する(図4)。軌道を一定に保つために、磁場はエネルギーの増加(加速パターンという)に合わせて時間とともに変化させる。

また、加速は高周波加速設備によって行い、加速周波数は、電子ビームの周回周波数の整数倍になるようにする。そして、磁場の変化と同様に、高周波の加速電圧も時間とともに変化させる。SPRING-8シンクロトロンでは、繰返し周波数1 Hz、加速周波数508.58 MHzを採用している。

シンクロトロンを構成する主な機器は、偏向電磁石64台、四極電磁石80台、六極電磁石60台、補正電磁石80台、入出射パルス電磁石15台、これらの電磁石電源、真空ダク

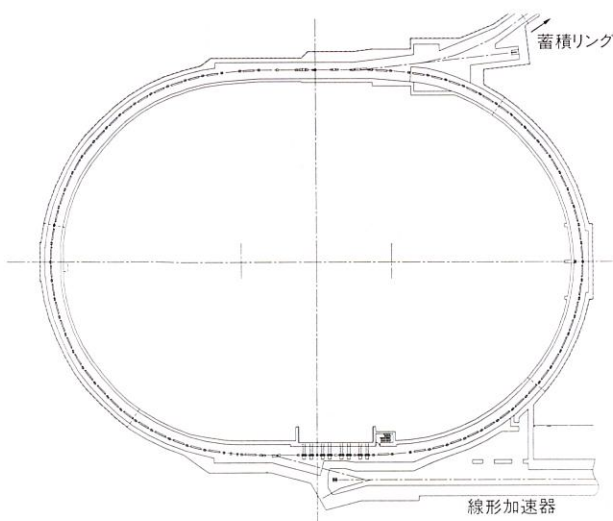


図4. シンクロトロン概観 シンクロトロンは、周長396 mで、線形加速器から打ち込まれた1 GeVの電子を8 GeVまで加速して、蓄積リングに入射する。

Overview of SPRING-8 synchrotron

ト、ビームモニタ、高周波加速空洞8台、1 MW クライストロン2台、高周波電源および全体制御装置である。

シンクロトロンの電磁石の配列は、FODO (Focusing-Drift-Defocusing-Drift)を採用している。FODOは、真空ダクトの断面(電子ビームの通り道)が大きくとれ、調整しやすい特長をもつ。シンクロトロンの形状は、入射部と高周波加速空洞および出射部の2か所の長直線部をもつ周長396 mのレーストラック型としている。

また、シンクロトロンは、1 GeVの入射から8 GeVへの加速、出射を1 Hzで繰り返す運転を行う。加速パターンは図5に示すように台形波状とした。入出射時の時間を長くしているのは、蓄積リングの単バンチ(電子の塊)運転を行うときに、入射時間を短縮するため、シンクロトロンで等間隔の位置にある八つのバンチを同時に加速し、蓄積リングの特定のバンチに入射するためである。単バンチ運転は、蓄積リングの特定の単一のバンチに電子を入射し、放射光を発生させる時間間隔を開けた運転のことであり、放射光を照射した後、資料の反応を観察する際に次の放射光が来るまでに時間間隔の必要な研究に用いられる。

このようにシンクロトロンでは、さまざまな運転パターンを作り出し、蓄積リングに入射することができる。シンクロトロンの主要諸元を表4に示す。

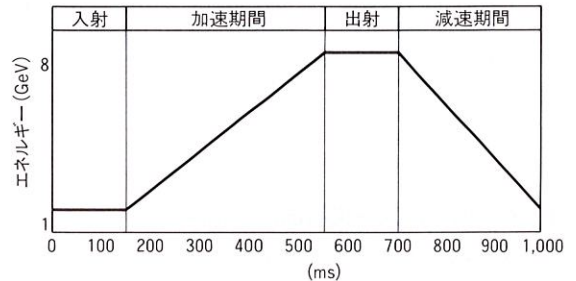


図5. シンクロトロン運転パターン シンクロトロンは、1 GeVの入射から、8 GeVへの加速、出射を1 Hzの台形波で行う。電磁石の磁場変化は、このパターンで行われる。

Operation pattern of SPRING-8 synchrotron

表4. シンクロトロン主要諸元

Main parameters of SPRING-8 synchrotron

項目	仕様
入射エネルギー	0.9~1.0 GeV
出射エネルギー	8.0 GeV
周長	396.12 m
エミッタンス	~200 nm ² rad
運動量幅	~0.1%
チューン(ν _x /ν _y)	11.73/8.78
ハーモニク数	672
最大加速電圧	18.7 MV

7.2 電磁石

シンクロトロン電磁石は、1 Hz の繰返し速い磁場変化に対応するために、積層鉄心構造を採用している。偏向電磁石は、水平方向に電子ビームを曲げるもので、360度を64台の偏向電磁石で偏向させる。したがって、電磁石1台当たりの偏向角は、5.625度である。四極電磁石は、電子ビームを集束するものである。六極電磁石は、電子ビームの運動量に比例した集束、発散力を得るために設けられる。また補正電磁石は、水平方向および垂直方向にビームの軌道を補正するものである。電子ビームを精度良く周回させるため、分布幅±30 mmにおいて、均一度 5×10^{-4} の磁場精度で設計、製作されている。図6にシンクロトロントンネル内の電磁石を示す。



図6. シンクロトロン電磁石 シンクロトロン電磁石は、偏向電磁石64台、四極電磁石80台、六極電磁石60台から構成され、これらが、0.1 mm オーダの精度で全周にわたって据え付けられている。
Synchrotron magnets

7.3 入出射パルス電磁石および電源

線形加速器からシンクロトロンへの入射は、2台のセプトム電磁石(注1)と2台のキッカー電磁石(注2)で構成しており、蓄積リングへの出射は、4台のパンパ電磁石(注3)、4台のセプトム電磁石および3台のキッカー電磁石で構成している。キッカー電磁石は、鉄心にフェライトを用いた分布定数型を採用しており、100 ns (ナノ秒) 以下の速い立上がりを達成している(図7)。

7.4 真空排気系

電子ビームの通り道である真空ダクト内は良好な真空度(1×10^{-5} Pa 程度)に保つ必要がある。また、偏向部の真空ダクトは、磁場変化の影響を避けるため、厚さ0.3 mmの非磁性ステンレス鋼を使用している。断面はレーストラック形状のリブ付き薄肉ダクト構造である。

真空排気装置は、粗排気系に磁気浮上型ターボ分子ポンプを、主排気系にイオンポンプを設置した。シンクロトロン平均的な真空度は、ビーム運転中で 2×10^{-6} Pa 程度を実現している。

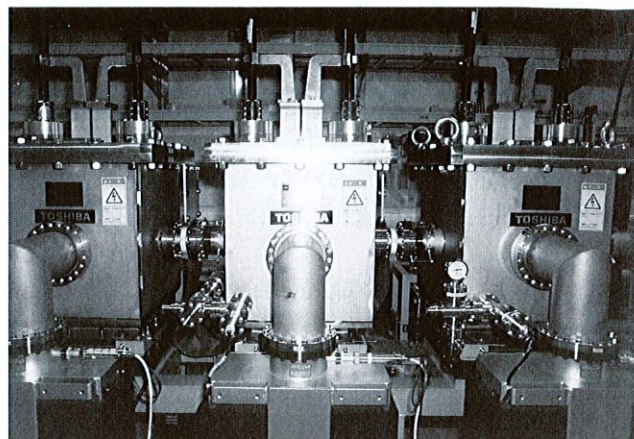


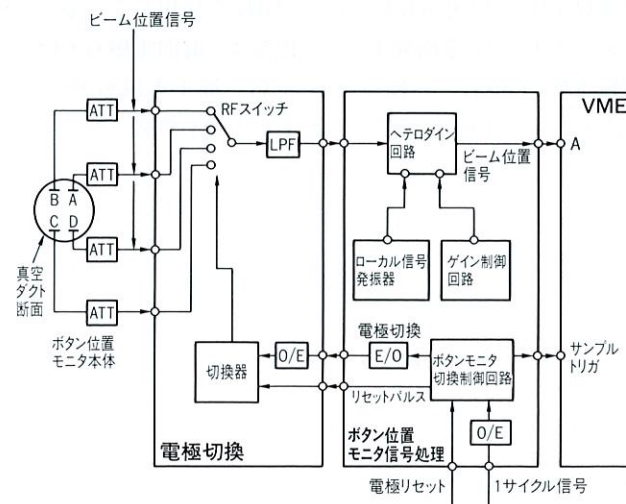
図7. キッカー電磁石 キッカー電磁石は、真空容器内部に、フェライトを用いた鉄心を内蔵した分布定数型を採用している。立上がりは、100 ns 以下を達成している。

Kicker magnet

7.5 ビームモニタ

シンクロトロン電子ビームの挙動を探り、調整するために、さまざまなビームモニタが設置された。ここでは、ボタン位置モニタとその信号処理回路について述べる。

ボタン位置モニタは、図8に示すようにダクトに取り付けられた四つのボタン電極に生ずる電圧を増幅し、演算処



A, B, C, D: 真空ダクトの四つのボタン電極
ATT: アッテネータ O/E: 光信号受信器
LPF: ローパスフィルタ E/O: 光信号送信器

図8. ボタン位置モニタ信号処理回路 真空ダクトに設けられた四つのボタン状の電極には、ビームが通過すると、電圧が誘起される。この信号を処理・演算して、ビームの位置を検出する。

Circuit diagram of synchrotron button position monitor

- (注1) 電子ビームの周回軌道に入射したり、そこから出射したりする部分で使用される一種の偏向電磁石。
- (注2) 短いパルスでビームを急激にキックし、角度を曲げる電磁石。
- (注3) 電子ビームを周回軌道に入射・出射するときに、ビームの中心軌道をずらすため用いる電磁石。

理を行うことにより、ビームの位置を測定するものである。

四極電磁石近傍の真空ダクトに取り付けられたボタン位置モニタ近傍に、ピンダイオードを用いたRF (Radio Frequency) スイッチを内蔵する電極切換装置を設置し、四つの電極からの信号を順次高速で切り換える。信号は、4か所のモニタ室に設置されたボタン位置モニタ盤でモニタごとに切り換え、ヘテロダイン回路でDC出力とし、モニタ室のVME (Versa Module European)^(注4)盤で演算処理を行う。このシステムで、80か所の通過位置を30msで検出する能力をもっている。

この処理システムで、シンクロトロン一周にわたる電子ビームの位置を測定し、補正電磁石でCOD (Closed Orbit Distortion: 閉軌道のズレ) 補正を行った。結果として、1mm以下のCODを得ることができた。

7.6 高周波加速空洞

図9に示すように、電子ビームを加速する高周波加速空洞は、五つのセルをディスクを介して結合したスロットカップル型5連空洞で、シンクロトロンでは8台使用している。この空洞は、電子ビームをフラット π モードで加速するものである。この空洞は、SPring-8建設前に独自に開発を進めてきたもので、これまでに国内に設置されたことのない初めてのタイプの空洞である。空洞の材質は、無酸素銅で、内部は放電を防ぐために最大表面粗さ $3\mu\text{m}$ で加工されている。

胴体部とディスク部はそれぞれ信頼性に優れた拡散接合で接合している。拡散接合は、銅と銅の間にインサート剤として銀箔(はく)を用い、雰囲気温度800度の炉の中で銅と銀の合金層として接合するもので、変形が少ない利点がある。完成した空洞は、シンクロトロンへの組込み前に蓄積リングのクライストロンテストスタンドで、250kWの大

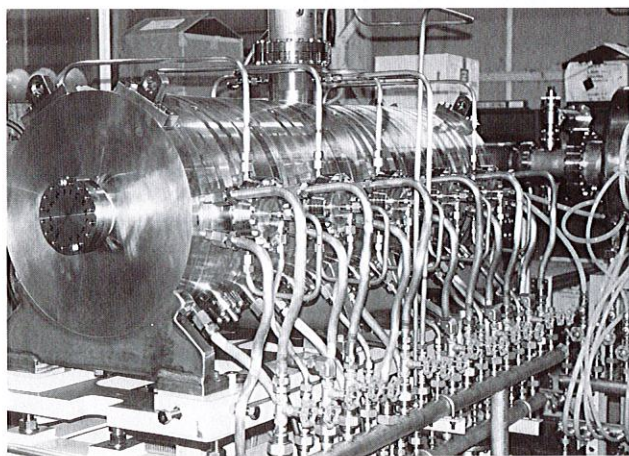


図9. スロットカップル型5連高周波加速空洞 電子ビームを加速する高周波加速空洞は、五つのセルをディスクを介して結合したスロットカップル型5連空洞を製作した。

Slot-coupled type 5-cell RF cavity

電力入力を確認している。

7.7 クライストロンおよび高周波電源

高周波加速空洞に入力する高周波は、最大1MWまで増幅できる大電力クライストロンE3732を用いたクライストロン電源により供給する。このシステムは、高エネルギー加速器研究機構向けに納入した実績のあるもので、1台の電源で、2台のクライストロンをドライブすることができる。高周波の加速電圧も時間とともに変化させる必要があり、高周波システムの制御としては今回初めて、位相制御方式を導入した。これは、2台のクライストロンの出力を加速パターンに合わせて変化させずに一定の出力で運転し、クライストロンへ入力する低パワーの高周波電力(数W)の位相差をパターン制御し、合成加速電圧を変化させるものである。これによって、クライストロンの出力電力の増減に伴う加速位相の変化と空洞が1秒間隔で受けるヒートサイクルの問題を克服することができた。

また、高周波伝送系は、各クライストロンから出力された1MWの高周波電力を1MWサーキュレータとマジックTを介して四等分して、高周波加速空洞に入力する。

7.8 全体システム制御

シンクロトロンの全体制御システム構成を図10に示す。

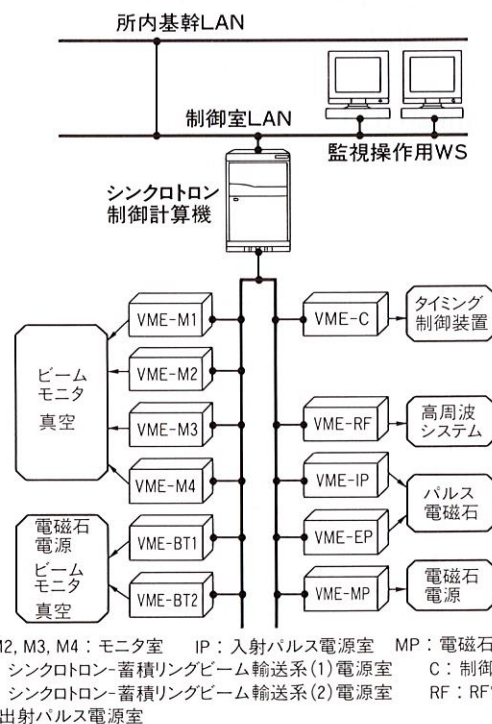


図10. 全体制御システム構成 2台の監視操作作用WSとVMEを用いた全体制御システム構成を示す。

Configuration of synchrotron control system

(注4) モトローラ社が提案したバスとモジュールの規格。

(注5) OpenVMSは、コンパックコンピュータ(株)の商標。

(注6) Ethernetは、富士ゼロックス社の商標。

シンクロトロンでは、制御機器室に設置されたサーバとしてのシンクロトロン制御計算機と操作端末として設けた2台のワークステーション (WS) を用い、基本ソフトウェア (OS) は OpenVMS^(注5) を選択した。現場用の制御計算機としては、VME を採用し、施設内 11 か所に分散配置した VME を Ethernet^(注6) (通信プロトコルは TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)) により結合したネットワークを構築し、各機器の運転監視を行っている。初期調整運転時から運転がスムーズに行えることを考慮したシステム設計を行い、高周波システムの自動枯らし (エージング) 運転シーケンスも装備されている。

7.9 高精度タイミング制御

高速の電子ビームに合わせて機器を動作させるためには、高精度のタイミング制御が必要である。図 11 にシステム構成を示す。

今回、新技術として 508.58 MHz の基準高周波を直接カウントする方法を採用した。すなわち、2 ns ごとに時を刻む基準時計を作り、さらに 1 周カウンタ、入射インターバルカウンタ、入射回数カウンタをカスケードに接続して、ps (ピコ秒) オーダの精度で正確に機器を動作させるタイミング制御装置を開発した。これによって時間分解能約 100 ps、出力の再現性 ±50 ps の高精度タイミング制御を実現し、ねらったバンチにビームを正確に入射し、RFKO (Radio Frequency Knock Out: 高周波キッカー) と組み合わせて純度のよい単バンチ運転ができるようになった。

7.10 精密据付け (アライメント)

トンネル幅 3.8 m、周長約 400 m の狭いトンネルの中に、

204 個の電磁石を 0.1 mm オーダの高精度で据え付けるために、移動式三次元レーザトラッキングシステムを導入した。この装置は、シンクロトロンの各電磁石基準面に設置したターゲットを自動的に追尾し、その位置を三次元座標で連続かつ高精度で測定できるものである (距離分解能 1.26 μm、角度分解能 0.7 秒) この装置を用いた基準点の設定風景を示す (図 12)。アライメント方法は、シンクロトロンが見渡せないため、セオドライトで角度を、レーザトラッキングシステムで距離を測定し、そのデータから X-Y 厳密網平均計算を行うことにより、絶対座標を求めることとした。その座標値の結果と設計値を比較し、必要な電磁石架台の移動方向と同じ方向に座標変換させて、ずれ量を補正した。その後シンクロトロン 1 周にわたって再度角度と距離を測定し、網平均計算を行った。これらを 3 回行い、収束させた。結果として、表 5 に示す精度で据付けを行うことができた。周長 396 m に対する実測値との差は、+0.22 mm であった。



図 12. 精密アライメント 移動式三次元レーザトラッキングシステムを用いて、204 個の電磁石を 0.1 mm のオーダで精密据付けを行う。図は基準点を設定している様子を示す。

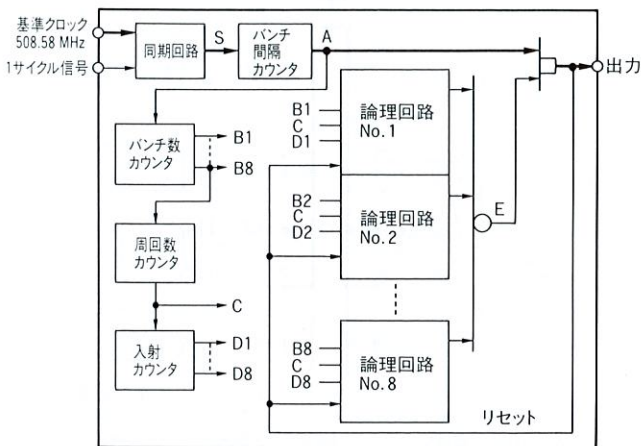
Precise alignment of synchrotron

表 5. 精密アライメント測定結果

Results of precise alignment

電磁石	X 軸 (mm)	Y 軸 (mm)	回転 (mrad)
偏向電磁石	0.087	0.051	0.054
四極電磁石 (QF)	0.045	0.049	0.035
四極電磁石 (QD)	0.054	0.047	0.035

QF: Quadrupole magnet Focusing QD: Quadrupole magnet Defocusing
* 値はすべて r.m.s (自乗平均)



S: 同期クロック A: バンチ間隔クロック B: バンチ数カウンタ
C: 周回数カウンタ D: 入射カウンタ
E: Aを基準にバンチ数カウンタ、周回数カウンタ、入射カウンタをカスケードに動作させ、それらの出力を論理回路No.1~No.8で論理演算した 8回出力の条件信号

図 11. 高精度タイミング制御装置システム構成 508.58 MHz の基準高周波を直接カウントすることによって、ps オーダの精度で、正確に機器を動作させることができる。

Configuration of synchrotron timing system

8 蓄積リング

8.1 高周波加速システム

蓄積リングの高周波加速システムは、リング内を周回中の電子ビームがシンクロトロン放射などによって損失した

エネルギーを高周波電界により供給するシステムである。

高周波加速システムは、高周波励振系、高周波電力を最大1 MWまで増幅するクライストロン、クライストロンを動作させるためのクライストロン電源、クライストロンからの出力を高周波加速空洞まで伝送する高周波伝送系、ビームを加速する高周波加速空洞、および冷却系などから構成される。

高周波加速システムの構成を図13に、主要機器の仕様を表6に示す。

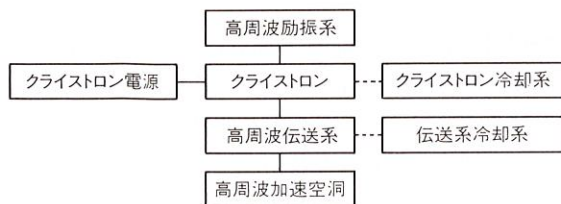


図13. 高周波加速システム構成 高周波加速システムは、クライストロン、クライストロン電源、高周波励振系、高周波伝送系、高周波加速空洞、クライストロン冷却系、伝送系冷却系から構成される。

Configuration of storage ring RF system

表6. 蓄積リング高周波加速システム主要機器の仕様

Specifications of main components of storage ring RF system

機器	項目	仕様
クライストロン	台数	3
	周波数	508.58 MHz
	高周波出力	1 MW
	電力利得	60%以上
クライストロン電源	台数	3
	カソード電圧	-90 kV
	ビーム電流	20 A
	電圧リプル	1 kHz以上 0.2 p-p 1 kHz以下 1.0% p-p
加速空洞	台数	16
	タイプ	ベル形 単セル
	共振周波数	508.58 MHz
	最大入力電力	150 kW
	Q値	35,000以上

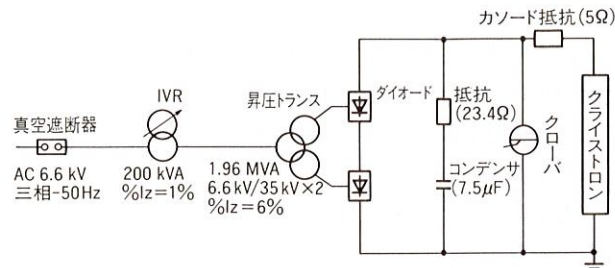
8.2 クライストロン

クライストロンには、シンクロトロンと同様に1 MW クライストロン E3786 および E3732 を採用した。E3732 は、E3786 の改良型である。

8.3 クライストロン電源

蓄積リングのクライストロン電源は、シンクロトロンと異なる新方式の電源を採用した。従来の電源は、実績があるものの、クローバ回路による誤動作の恐れがあった。

従来方式の回路を図14に、新方式の回路を図15に示す。新方式の電源は、従来方式と比べ下記の特長をもっている。



%Iz: パーセントインピーダンスのことで、回路のインピーダンスに定格電流が流れたときに生ずる電圧降下と回路電圧との比を%で表したもの。

図14. 従来方式のクライストロン電源 従来実績の電源は、クライストロン短絡時の保護のために、クローバ回路を使用している。

Circuit diagram of conventional klystron

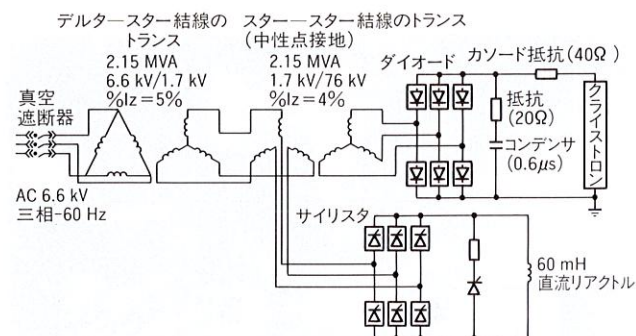


図15. 新方式のクライストロン電源 昇圧トランスの一次側中性点にサイリスタ三相ブリッジを接続し、その直流側に大きなリアクトルを取り付け、カソード抵抗を大きくしてクローバ回路を取り除く。

Circuit diagram of new klystron power supply

- (1) 従来方式のIVR (Induction Voltage Regulator: 誘導電圧調整器) とトランスのタップ切換えで行っていた出力電圧制御が、サイリスタの点弧角制御で行えることになり、電圧変化への対応が速くできるようになった。
- (2) 直流側に付けた大きなリアクトルにより、リプルを低く抑えたまま直流高圧側のパッシブフィルタのコンデンサ容量を小さくでき、クライストロンへの流入エネルギーを小さく抑えた。
- (3) さらに、クライストロン短絡時にサイリスタ側へエネルギーを還流することで、クライストロン保護用のクローバ回路を取り除くことができ、従来のクローバ回路の誤動作などの心配がなくなった。

8.4 高周波加速空洞

蓄積リングでは、放射光の発生により周回する電子ビームがエネルギーを損失するため、つねにその損失分のエネルギーを電子に供給する必要がある。高周波加速空洞は高周波電力により、このエネルギーを電子ビームに供給する機器である。

蓄積リングでは、ベル形単セル空洞を採用し、空洞(本体、

チューナ、高周波信号ピックアップ)、空洞架台、真空系、冷却系により構成されている。外観を図16に示す。

今回の加速空洞は、以下の特長をもっている。

- (1) 単セル型空洞としては、世界最大級である150 kWの入力電力。
- (2) 電子ビームの不安定性の原因となる高次モードの共振周波数が空洞ごとにそろふことを防止するため、空洞の内面寸法を200 μm ごとに変えて製作。さらに高次モード抑制用の可変チューナを装備。
- (3) 電子ビーム溶接など他の接合方法に比べ、変形が少ない拡散接合の採用。
- (4) 蓄積リングに必要な 10^{-7}Pa オーダの真空度。

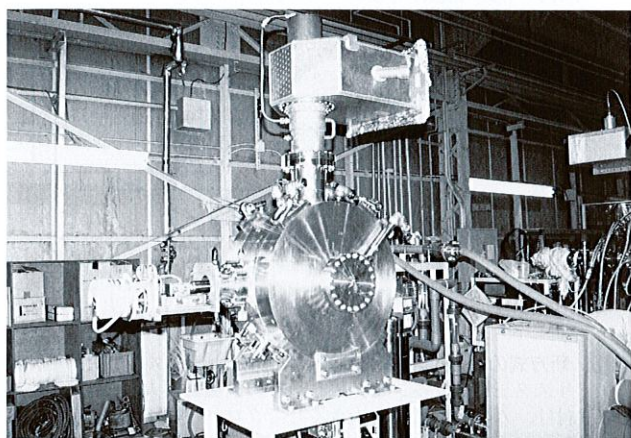


図16. ベル形単セル空洞を採用した蓄積リング 単セル空洞としては、世界最大級の150 kWの入力電力が可能。また、高次モードの抑制のために、空洞の内面寸法を200 μm ごとに変えて製作した。

Bell-shaped single-cell RF cavity for storage ring

9 ビームラインインタロック

蓄積リング内で発生した放射光を、各種実験装置まで導く部分をビームラインと呼ぶ。ビームラインインタロックは、ビームライン機器を監視し、機器操作を受け付けて安全が確保されるようにビームライン機器を制御するシステムで、人的保護と機器保護を目的とする。ビームラインインタロックは主にインタロック主制御盤、インタロック専用操作盤、ハッチ退出制御盤、状態表示盤から構成される。東芝はこれらのシステムを22式納入した。

10 あとがき

日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設した大型放射光施設は、各機器の据付試験後、ビーム調整が行われた。線形加速器は、96年11月に施設検査に合格、12月か

らシンクロトロンへのビームの打込みが始まった。シンクロトロンへの入射を開始した12月10日に1周回、5周回成功し、97年1月末までに8 GeV加速と出射に成功した。

さらにこれを受けて、蓄積リングでは、3月14日に1周回の確認、4月17日に19.6 mAの蓄積電流を実現した。施設の使用時検査も10月3日までに完了し、10月8日から、放射光の一般供用が開始された。さらに100 mAの初期設計蓄積電流も98年5月に達成した⁽⁴⁾。

88年10月に大型放射光施設研究開発共同チームが設置されてから実に9年を経て、世界最大級の放射光施設の完成に至った。

大型放射光施設 SPring-8 の建設にあたり、長期間にわたり、さまざまな研究開発、システム検討、要素機器検討、試験を積み重ね、これらの機器を開発、製作した。

これらを通じて得られた技術、ノウハウを生かし、今まで培ってきた技術をさらに高め、今後の科学技術の発展に寄与したい。

謝辞

各装置の開発に当たり、多大なご指導、ご協力をいただいた関係者各位に深く謝意を表する。

文献

- (1) 横溝英明, “線形加速器のコミッションング”, SPring-8 利用者情報, 1, 4, 1996, p.23-27,
- (2) Mizuno, A., et al. “Modulators for SPring-8 Linac”, JAERI-Conf, 95-021. 1995, p.76-78.
- (3) 米原博人, “シンクロトロン現状”, SPring-8 利用者情報, 2, 2, 1997, p.1-14.
- (4) 熊谷教孝, “蓄積リングのビーム性能”, SPring-8 利用者情報, 3, 1, 1998, p.10-14.



熊谷 教孝 KUMAGAI Noritaka, Ph.D.

助高輝度光科学研究センター 放射光研究所加速器部門長、理博。SPring-8 加速器の設計・建設に従事。日本物理学会、日本放射光学会会員。

Japan Synchrotron Radiation Research Institute



横溝 英明 YOKOMIZO Hideaki, Ph.D.

助高輝度光科学研究センター 放射光研究所加速器部門、理博。SPring-8 入射系線形加速器の設計・建設に従事。日本物理学会、日本放射光学会会員。

Japan Synchrotron Radiation Research Institute



米原 博人 YONEHARA Hiroto, Ph.D.

助高輝度光科学研究センター 放射光研究所加速器部門、理博。SPring-8 入射系シンクロトロンの設計・建設などに従事。日本物理学会、日本放射光学会会員。

Japan Synchrotron Radiation Research Institute



平田 寛 HIRATA Yutaka

原子力事業部 先端エネルギー開発部主務。加速器関連機器のシステム開発・設計に従事。日本機械学会会員。

Nuclear Energy Div.