

特集：高輝度 X 線 (I) — SPring-8 —

SPring-8 施設

熊谷 教孝

原研・理研大型放射光施設計画推進共同チーム*

Overview of SPring-8 Facility

Noritaka KUMAGAI

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team

SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) is the facility of a "third generation" synchrotron radiation source in the X-ray region. The facility, which consists of an accelerator complex and 61 photon beamlines, is now under construction in Harima Science Garden City, Hyogo Prefecture, Japan. The commissioning of the storage ring is expected in Feb. 1997 and several beamlines among 61 beamlines are installed in FY 1997.

1. 概要

大型放射光施設 SPring-8 (Super Photon ring 8 GeV)¹⁾は、X 線領域での生物、物理、化学、医学等の先端的分野での基礎および応用研究に用いるため、日本原子力研究所・理化学研究所が共同して平成2年から兵庫県播磨科学公園都市内に建設を進めている挿入光源を主体とした高輝度放射光光源である。この施設の全体配置図を図1に示す。

加速器施設は高輝度光を作る8 GeVの蓄積リング²⁾と、これにビームを供給する入射器系(1 GeVの線型加速器と8 GeVのシンクロトロン)³⁾で構成されている。蓄積リングは、5 nmradの低エミッタンスビームを得るためと、高輝度光を発生させる挿入光源を多数設置できるようにチャスマングリーン型磁石配列(C-Gセル)44セルと、

そのセルから偏向電磁石2台を抜いた直線セル4セルで構成されている。蓄積リングへの電子ビーム入射は、100 mAのビーム強度を安定に実現するために、8 GeVの全エネルギー入射方式とし、また蓄積リングでイオントラップ等によるビーム不安定性により、ビーム強度とビーム性能が劣化する場合にそなえて陽電子の加速、蓄積ができるように加速器系全体が作られている。加速器系の主要パラメータを表1に示す。

蓄積リングに設置される放射光ビームラインの数は61本で、その内38本が挿入光源から、残り23本が偏向電磁石からのビームラインである。この内、光源から実験ステーションまでの長さが80 mの普通長のビームラインが49本、300 mの中尺ビームラインが12本、1000 mの長尺ビームラインが3本である。また将来的には、4ヶ所の

* 原研・理研大型放射光施設計画推進共同チーム 〒678-12 兵庫県赤穂郡上郡町 SPring-8 リング棟
TEL 07915-8-0861 FAX 07915-8-0870

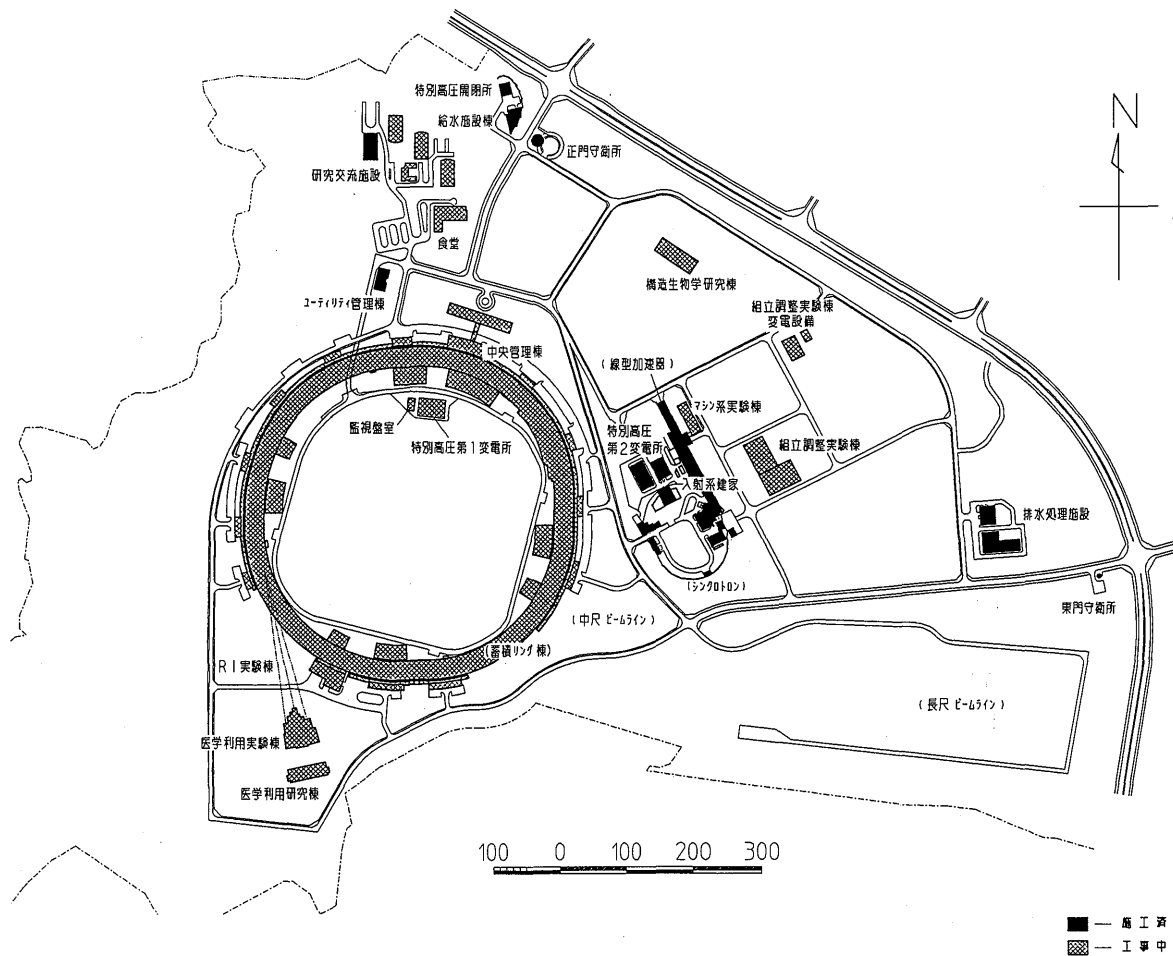


Figure 1. SPring-8 site.

Table 1. Main Parameters of Accelerator Complex

1. The storage ring		2. The injectors	
Particle	e^-/e^+	1) linac	
Energy	8 GeV	Energy (e^-/e^+)	1.15/0.9 GeV
Circumference	1435.948 m	Emittance (e^-/e^+)	$<1 \mu\text{rad}/<1.5 \mu\text{rad}$
Lattice	Chasman-Green	Beam current (e^-/e^+)	100 mA/10 mA
Superperiods/No. of cells	4/48	Repetition	60 Hz
Natural emittance	5.55 nrad	rf-frequency	2856 MHz
Stored current		Number. of acc. column	26
multi/single bunch	100 mA/5 mA	Number. of klystron	13
Harmonic number	2436	Klystron output power	80 MW max.
rf frequency	508.6 MHz	2) synchrotron	
Betatron tune (ν_x/ν_y)	53.22/20.16	Energy (inj./ext.)	0.9 GeV/8 GeV
Synchrotron tune	0.0101	Circumference	396.12 m
Momentum compaction	1.46×10^{-4}	Lattice	FODO
Energy spread (σ_E)	1.01×10^{-3}	Superperiods/No. of cells	2/40
Damping time (msec)		Natural emittance	222 nrad
($\tau_x/\tau_y/\tau_s$)	8.3/8.3/4.15	Beam current	10 mA
Beam life time	1 day	rf frequency	508.6 MHz
Number of ID sections	38	Repetition	1 Hz
Critical photon energy	28.9 keV	Betatron tune (ν_x/ν_y)	11.73/8.78
		Momentum compaction	1.01×10^{-2}

直線セルからのビームライン（普通長-2本，中尺・長尺-各1本）は，このセル内の電磁石を取り払い，両端の電磁石を再配置し約30 mの自由空間を利用した更に高性能の放射光ビームを利用することができる。又1 GeV線型加速器は，蓄積リングの入射器としての役割以外に小型のVUVリング，および可干渉光発生装置への入射器としても使用出来るようにビーム取り出し系と建物が作られている。現在施設はほぼ完成し，線型加速器は平成8年8月からビーム調整を開始し，1 GeVまでの電子ビームの加速に成功した。引き続きシンクロトロン，蓄積リングへの電子ビームの入射調整を行い平成9年10月から完成した数本のビームラインを用いて実験を開始する予定である。その後，順次ビームラインの整備を進めて行き，平成15年頃までには全数のビームラインが完成する。本稿ではこのSPRING-8施設の蓄積リング，入射器系，建物等について報告する。

2. 蓄積リング

ラティス構造

蓄積リングは高輝度放射光の発生を主目的として最適化されたチャスマングリーンラティス（C-Gセル）で構成されている。このラティス構造とビームの広がりを表すオプティカル関数を図2に示す。このC-Gラティスは，偏向電磁石部でのベータ関数（ β_x ）と運動量分散関数（ η_x ）を小さくすることで，より小さな自然エミッタンス（ ϵ_0 ）を実現できること，そして挿入光源を設置する直線部で，運動量分散関数をゼロにすることができる。この特長から挿入光源の輝度を決める直線部での実効的エミッタンスが，ビーム内のエネルギー拡がりによらず ϵ_0 のみで決まることから，より輝度の高い光を作ることができる。その反面，ベータ関数と運動量分散関数を小さくするために，より強く，より精度の高い高性能四極および六極電磁石の製作と，これらを高い精度で

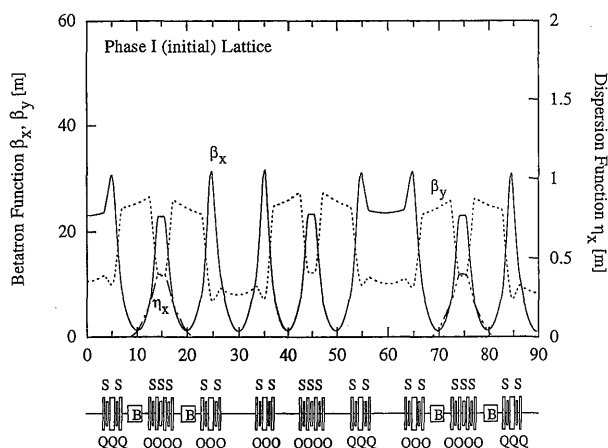


Figure 2. Optical function (β_x , β_y , η_x) in C-G and straight cells. B denotes dipole magnet, Q quadrupole and S sextupole magnet.

据え付け，あるいはアライメントする事が必要となる。

電磁石系

蓄積リングの主電磁石は88台の偏向電磁石，480台の四極電磁石，336台の六極電磁石で構成されている。図3にこれらの電磁石の断面形状を，表2に主要パラメーターを示す。この他に，軌道のずれを補正するための569台のステアリング電磁石，入射時のバンプ軌道を作るための4台のパルスバンプ電磁石，シンクロトロンからの電子ビームを蓄積リングに導き入れる4台のセプタム電磁石がある。

これらの電磁石は，磁場中心位置の低励磁依存性，磁石毎の励磁力一様性等を実現するため0.5 mm又は0.1 mm（バンプ電磁石）のケイ素鋼板

Table 2. Major parameter of storage ring

Magnet	dipole	quadrupole	sextupole
Number	88	480	336
Field strength	0.68 T	18 T/m	420 T/m ²
Gap/bohr diameter	64 mm	85 T/mm	92 mm
Good field region			
horizontal	±30 mm	±35 mm	±35 mm
vertical	±15 mm	±15 mm	±15 mm
Field uniformity			
$\Delta B^{(n)}/B^{(n)}I$	$<5 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-3}$

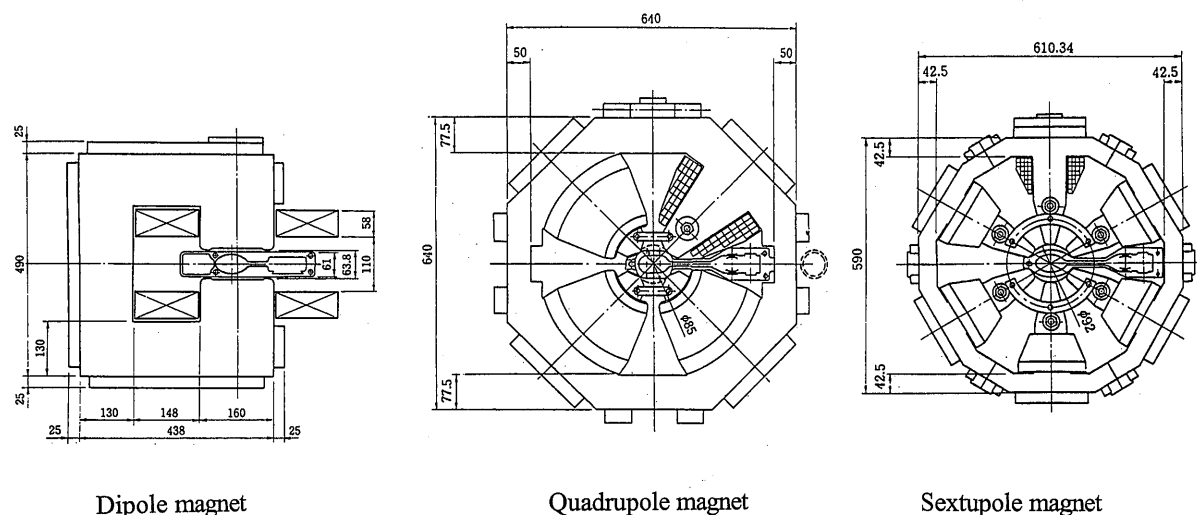


Figure 3. Cross-sectional view of main magnets.

を積層して作られた積層型電磁石である。特に主電磁石では、電子軌道の安定化のために、励磁コイルから鉄芯への熱移入によって鉄芯形状が変形し、それによって磁場中心や磁場の強さが変化する効果をできる限り小さくするため、コイルと鉄芯間に熱絶縁をほどこしてある。これら主電磁石の磁場の強さはロングフリップコイルとハーモニックコイルで測定された。又、電磁石の精密な据え付けに必要な四極、六極電磁石の磁場中心位置はハーモニックコイルで全数測定され、磁石上のアライメント用基準点に $\pm 10 \mu\text{m}$ の精度で移し換えられた。C-G ラティスでは、直線部に収束用と発散用の四極、六極電磁石を交互に配置するため、これらを精度良く並べることでCODの大きさを抑制する事ができる⁴⁾。蓄積リングでは、直線部の電磁石は、共通架台上にレーザーとCCDを用いたレーザーアライメント装置で $\pm 25 \mu\text{m}$ 以内に、そして共通架台と偏向電磁石、又は共通架台間はレーザートラッキングシステムSMART310で $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内に据え付けられた⁵⁾。

電磁石の電源は、サイリスタ又はチョッパ型の高安定 ($\Delta I/I < 10^{-4}$)、高精度 (分解能16ビット相当) の直流定電流電源で、偏向電磁石用1台、四極電磁石用10台、六極電磁石用7台、ステア

リング電磁石用569台バンプ電磁石用4台、セプタム電磁石用2台等で構成されている。又、六極電磁石用電源は、六極電磁石部の磁場の型と真空チャンバーの形状から電流リップルが二極成分の磁場リップルを誘起し、電子軌道の振動、ひいては光軸の振動を引き起こすことからチョッパー型の高安定化電源が使用された。

高周波系

高周波システムは、蓄積リングの周上4ヶ所の高周波ステーション (A, B, C, D) に設けられ、各ステーションは8台のベル型単空洞と、それを $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内で温度制御する精密冷却水温調システム、空洞に高周波を供給する高周波発生装置、高周波電力を空洞に伝送する高周波伝送系および加速電圧や加速位相を制御する高周波励振入力系で構成される。当面B, C, Dの3ヶ所でビームに一周最大15 MV程度の加速電圧を供給する。高周波加速空洞は、基本周波数508.58 MHz, Q値約40,000の単空洞で、図4にその形状を示す。空洞には、高周波入力コプラ、信号のピックアップ端子、基本周波数および高次モードの周波数を調整する固定チューナー1台と可動チューナー2台が取り付けられる。

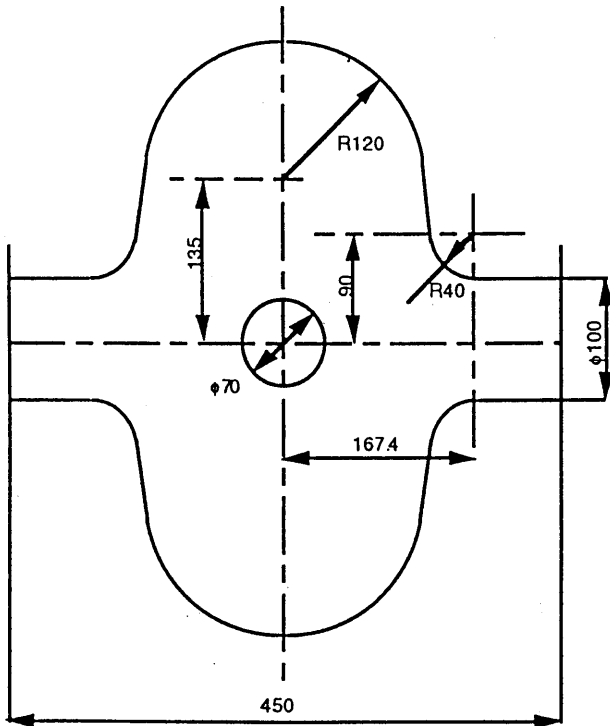


Figure 4. Dimension of bell shape cavity.

このベル型形状は、基本モードのインピーダンスを大きく低下させる事なく、ビーム結合型の不安定性を引き起こす高次モードのインピーダンスを低減できる事から採用された。さらに、システムとして高次モードの影響を小さくするために空洞の半数の入力カプラーの位置を水平に、残り半数を垂直に取り付け、モードの分離を行うとともに、個々の空洞の高次モードの周波数が同じ値にならないように、形状を少しずつ変えて製作した。又、これとは別に各空洞にとりつけてある。可動チューナーを用いて、高次モードの周波数のみを調整する方法が新たに開発された。高周波発生装置は定格1.2 MW、周波数508.58 MHzのクライストロンと、それに90 KV, 20 A を供給するクローバー回路を必要としないサイリスタ型の高圧電源⁶⁾で構成された。この1.2 MW のクライストロンからの高周波電力は矩形導波管とマジックTを用いて8分岐され、スリースタブ方式の移相器で位相が調整された後各空洞に供給される。

真空系

蓄積リングの真空システム⁷⁾は、基本的には直線部チェンバー (3台) と、偏向電磁石部チェンバー (2台)、クロッチチェンバー (2台)、挿入光源設置部のダミーチェンバー (1台) およびこれらチェンバーをつなぐベローズ部チェンバー (4台) とゲートバルブ (2台) 等から構成されている。ダミーチェンバーは挿入光源が設置される際には、挿入光源用のチェンバーと交換される。直線部と偏向電磁石部チェンバーの断面形状を図5に示す。

このチェンバーは、電子ビームが通るビーム室と発生した放射光を取り出すためのスロット部、チェンバー内の排気を行う非蒸発型ゲッター (NEG) ストリップを取り付ける Ante chamber 部からなる。偏向電磁石部チェンバーには、このNEG が排気能力を持たない希ガスや CH_4 に対しても排気能力を持つ分布型イオンポンプが設置されている。スロット部を通った放射光の内、不要な部分を遮断するクローチ、アブソーバー部の直下には強力な集中型のNEGポンプとイオンポンプで放射光照射による脱ガスを排気している。これらのチェンバーはアルミ合金製 (A6063-T5)

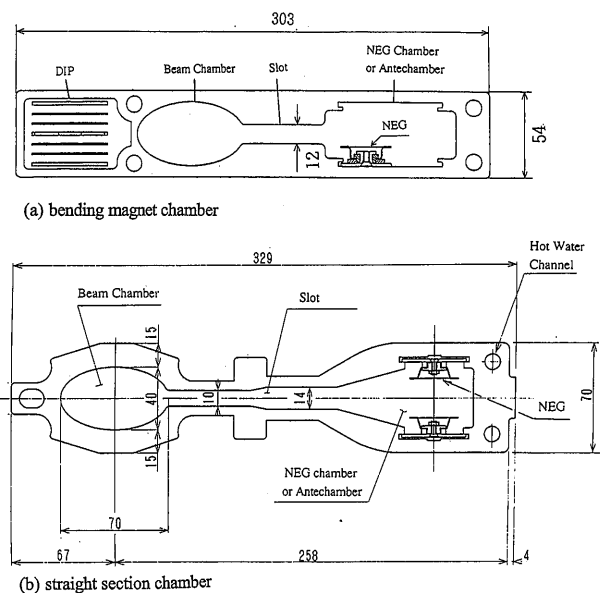


Figure 5. Chamber cross section.

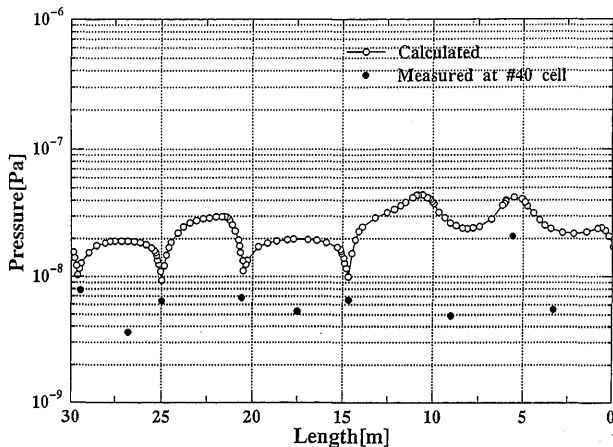


Figure 6. Total vacuum pressure profiles in one cell after baking and NEG activation.

で、チェンバー内面に緻密な酸化皮膜を得るために、 $\text{Ar} + \text{O}_2$ 混合ガスをシールドガスとして用いた特殊押し出しにより成型された。24時間のベーキングと NEG の活性化後到達した1セル分の圧力分布を図6に示す。ベーキング温度はアルミ部で 150°C 、ステンレス部で 220°C とした。又、NEGの活性化温度は 450°C 、時間は1時間とした。

蓄積リングのようにバンチ長の短い低エミッタンスリングでは、真空チェンバー等の内面形状の不連続によって作られるインピーダンスが、ビーム不安定性を引き起こす要因となる。そのためフランジ間、ベローズ、ゲートバルブのような段差や不連続部を持つ部分のインピーダンスを低く抑えるため、ビームの通過する内面をBeCu製のrfコンタクトで滑らかに接続した。

モニター系

ビーム診断系は、ビーム軌道を測定するためのボタン電極型のビーム位置モニター (BPM)、蓄積ビームの電流値を測定する電流モニター、チューンを測定するチューンモニター、入射部でのビームの位置とプロファイルを観測する蛍光板を用いたスクリーンモニター等で構成され、近い将来ビームサイズとエミッタンスを測定する、ビーム

診断用放射光ビームラインも設置される。

BPMは、C-Gセル中央の対称点の六極電磁石を除いた6台の六極電磁石に近接し、リング全周で288箇所に設置された。このBPMの電気的中心は、リング内へ設置する前にクリーンルーム内で、rfアンテナ法により据え付け基準面に対して $50\ \mu\text{m}$ 以内で測定された。BPM電極は真空チェンバーに直接溶接されているため、ベーキング作業後にBPMの基準位置を、隣接した六極電磁石のアライメント基準芯に対して $10\ \mu\text{m}$ 以下の精度で較正する。

BPMの信号処理システムは、リング一周の閉軌道の歪み (COD) を高精度 ($0.1\ \text{mm}$ 以下) で測定するCODモードと、周回毎のビームの位置を $\sim 1\ \text{mm}$ 程度の精度で測定するシングルパスモードの2つの信号処理回路で構成されている。

3. 入射器系

線型加速器

線型加速器は、電子銃、プリバンチャー、バンチャー、 $250\ \text{MeV}$ 線型加速器、 e^-/e^+ 変換部、 $900\ \text{MeV}$ 主線型加速器およびビーム輸送系で構成され、電子で $1.15\ \text{GeV}$ 、陽電子で $0.9\ \text{GeV}$ の加速エネルギーをもつ。電子銃としてはエミッション能力 $10\ \text{A}/\text{cm}^2$ 、EIMAC社製Y796のカソードアセンブリ (有効面積 $2\ \text{cm}^2$) を使用し、引き出し電圧 $180\ \text{KV}$ (定格 $200\ \text{KV}$) で $20\ \text{A}$ のビーム電流が得られる。電子ビームのパルス巾は単バンチ用として $1\ \text{nsec}$ 、陽電子の多バンチ用として $10\ \text{nsec}$ 、電子の多バンチ用として $1\ \mu\text{sec}$ の3種類が可能で、目的に従って切り換えて使用する。この電子銃から発生した電子ビームは、2台のプリバンチャーと、定在波型加速管を用いたバンチャーによって、高周波加速位相 (~ 5 度以内) に約65%の捕獲効率で捕獲され、 $250\ \text{MeV}$ 線型加速器へ送られる。陽電子ビームを生成する場合には、この $250\ \text{MeV}$ 線型加速器の後に設置されている e^-/e^+ 変換ターゲットで、陽電子を発生

させ主線型加速器に送られる。線型加速器は、長さ2.835 mの進行波型加速管26本で構成され、内訳は250 MeV 線型加速器で7本、主線型加速器で19本である。1本当たりの加速エネルギーは26 MWの高周波入力に対して約45 MVである。高周波発生装置は周波数2856 MHz、高周波出力80 MWのクライストロンと定格出力190 MW、パルス巾5 μ sec、パルス平坦部2 μ sec、平坦度 $\pm 0.5\%$ 、繰り返し60 Hzのパルスモジュレーター13式で構成され、一式で2本の加速管に高周波電力が供給される。又主線型加速器の下流には、将来さらにビーム性能を高度化するために利用できる空間が確保してある。ビームの取り出しは250 MeV部に1ヶ所、1.15 GeVにシンクロトロン用1ヶ所と将来計画用1ヶ所の計2ヶ所に設けられている。

シンクロトロン

シンクロトロンは、線型加速器で加速された電子または陽電子を8 GeVまで加速する。繰り返しは1秒で、入射0.15秒、加速部0.35秒、フラットトップ0.15秒、減速部0.35秒からなる。シンクロトロンのラティス構造は加速時のトラッキング比の取りやすさからFODO型とした。リングの形状は、入射用機器と高周波空洞および出射用機器を設置するための2ヶ所の長直線部を持つ、一周約400 mのレーストラック型である。電磁石系は64台の偏向電磁石、80台の四極電磁石、60台の六極電磁石、80台の軌道補正用二極電磁石、入出射用キッカーおよびセプタム電磁石と、それらを励磁する高精度電源で構成されている。主電磁石のパラメーターを表3に示す。真空チェンバーは、0.35秒の加速部での渦電流による磁場のみだれを極力小さくするために、偏向部ではリブ付の薄肉ステンレスチェンバーを、直線部では肉厚1.5 mmのステンレスチェンバーが用いられた。内径は、水平方向に80 mm、垂直方向に30 mmとした。高周波加速空洞は共振周波数として蓄積

Table 3. Major parameter of synchrotron magnet

Magnet	dipole	quadrupole	sextupole
Number	64	80	60
Field strength (max)	0.9 T	15 T/m	160 T/m ²
Length	2.9 m	0.6 m	0.15 m
Gap/bohr diameter	40 mm	70 mm	100 mm

リングの単空洞と同じ508.58 MHzで、形状は加速効率を重視したスロット結合型の5連空洞である。加速空洞の数は、8 GeV時に必要な最大加速電圧18.7 MVと空洞のシャントインピーダンス約30 M Ω /1台とから8台とし、それに必要な1.7 MWの高周波電力は、定格1.2 MWクライストロン2本から、各々4台の加速空洞に供給される。1 GeVから8 GeVまでの加速時に必要な電圧は、クライストロンの出力を一定に保ったまま、2台のクライストロン間の高周波位相を165°から0°まで変え、必要な加速電圧をビームに与える。シンクロトロンへのビームの入射はセプタム2台とキッカー電磁石2台を用いたon-axis方式で、そして出射は、取り出し用キッカー電磁石3台とバンブ電磁石を用いたシングルターン取り出し方式でビーム輸送系へ取り出す。

4. マシン制御系

SPring-8のマシン制御系⁸⁾の構成を図7に示す。入射器制御系(線型加速器とシンクロトロン)、蓄積リング制御系、中央制御系、ビームライン制御系の4系を100 Mbpsの通信速度をもつ光ファイバーFDDIでネットワークを構築し、ここに6つのFDDIノードが設置される。FDDIの全長は約4500 mで光ファイバーはエアブロン(Air Blown Fiber System)チューブの中に設置される。入射器系ではDEC net, UDPを使用するため、ノードシステムはマルチ・プロトコル・ルーターが用いられ、このルーターからEthernetで機器制御用VMEに接続される。蓄積リングの4つのノードシステムはEthernet/

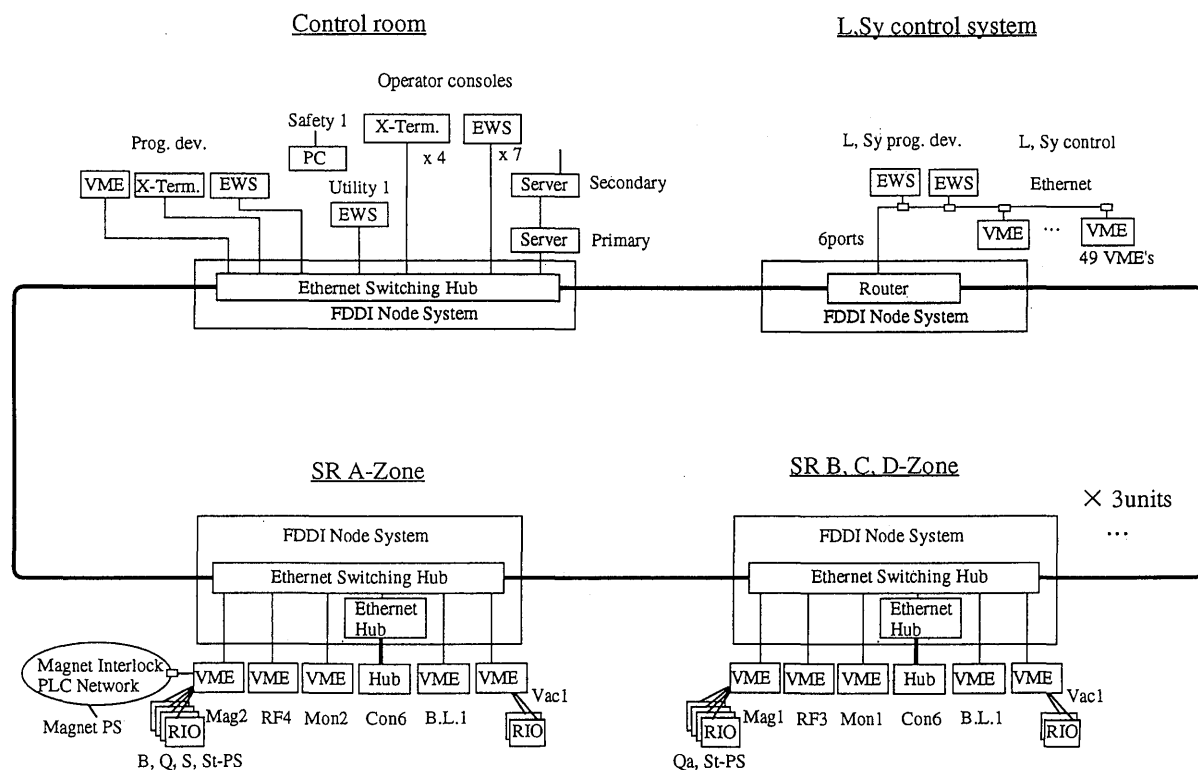


Figure 7. Control system and network.

FDDI Switching hub からなっている。Switching hub は蓄積リングの保守通路に沿って設置され、この hub の各 Ethernet ポートから機器制御用 VME の CPU ボードまで、光ケーブルで 1 対 1 で接続されている。この機器制御用 VME には電磁石電源用、rf 用、ビーム診断用、挿入光源用等がある。中央制御室には、Switching hub が 1 つ設置され、この各 Ethernet ポートとオペレーターコンソールの UNIX ワークステーションがメタルケーブルで接続される。最終的には、このワークステーション上から全ての系の機器を制御することができる。運転の記録、各制御機器のパラメーターなどのデータの保守、管理は、データベース・サーバマシンとリレーショナル・データベースを用いて行う。オペレーティングシステムとしては、上位ワークステーションでは UNIX を、VME システム系ではリアルタイム OS (HP-RT, あるいは OS-9) が用いられる。機器および軌道制御用ソフトウェアは C

言語又は FORTRAN で開発されている。

5. 建屋およびユーティリティ

蓄積リング棟の建屋構造は収納部を含む蓄積リング棟の地盤レベルの経年変化と、冷却水ポンプ、冷凍機およびトランス等で発生する振動の伝達を出来る限り小さくするため、1 周 1.5 km にわたって直接固い岩上に建設された。建物の構造は図 8 に示すように、加速器本体を格納する収納部を蓄積リング棟内に設置する、サヤ堂形式を採用した。これにより、外境変化の影響が直接収納部に伝わらない構造となっている。また、蓄積リング棟の外周側 2 ヶ所と内周側 1 ヶ所の計 3 ヶ所に、この変化による建物の変形力と各種振動が床面を通して伝わらないように、縁切りスリットが設けられた。又、冷却水ポンプなどの振動発生源には、大地への振動伝達を少なくするために防震装置を取り付けた。現在、収納部内の電磁石上で振動測定を行っているが、冷却水などを通水し

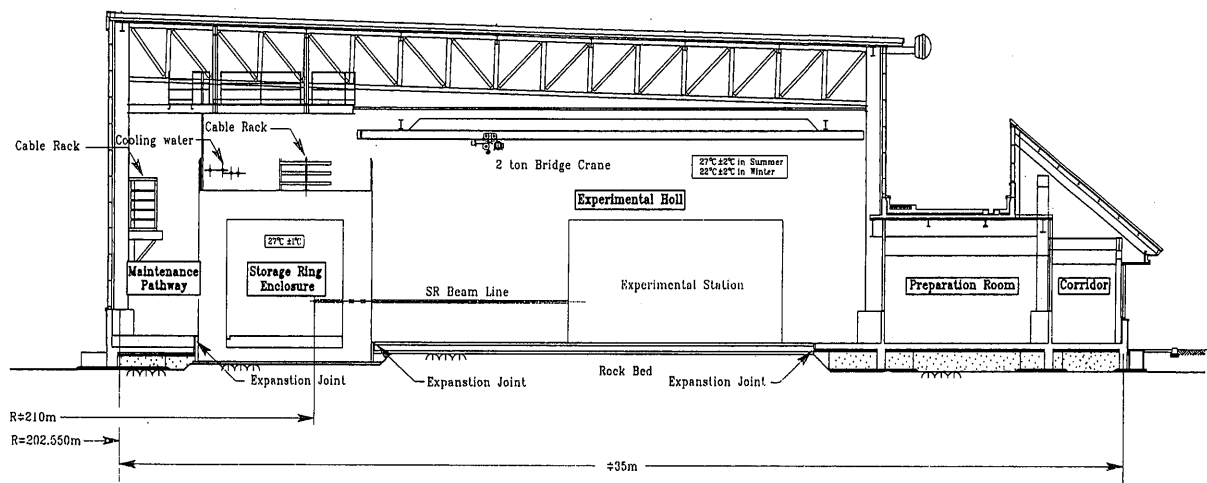


Figure 8. Cross section of storage ring building.

た状態で最大10数 nm と非常に小さい。また設置機器の室温変化による変形を抑えるため、収納部内は設定温度に対して $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内に、実験ホール内では $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に制御される。このように光軸の変動と振動除去のために、いろいろと建物の建設段階から対策が取られているが、仮に光軸の変動や振動が問題となった場合には、個々の挿入光源の変動を独立に補正するフィードバックシステムを導入することになっている。

一方入射器系建物でも、蓄積リングほどではないが地盤沈下を防ぐため、建物は切り土の上に建設されている。

SPring-8 施設の電気の設備容量は、全体で90 MVA、内訳は蓄積リング系の第一特高が60 MVA、(20 MVA, 2バンクが加速器, 20 MVA, 1バンクが建屋)、入射器系の第二特高が30 MVAである。蓄積リング棟の接地系は、リング棟が大地に対して接地を取りにくい岩上に建設されているため、一周1.5 kmのリング棟床面全体に埋め込んだメッシュ筋で大地接地されている。この事情から、短絡事故および落雷から機器を保護するため施設内の弱電系の信号伝達には光ファイバーシステムが採用された。

謝辞

本稿を書くに当たって資料を提供して下さいました、SPring-8の横溝英明、米原博人、原雅弘、大熊春夫、妻木孝司、田中良太郎、田中均の各氏に深く感謝いたします。

文献

- 1) H. Kamitsubo: Nucl. Inst. Methods **A303**, 241 (1991).
- 2) M. Hara et al.: "Storage Ring Design of SPring-8 8 GeV Synchrotron Radiation Facility in Japan", Proc. 2nd European Part. Accel. Conf., p466 (1990).
- 3) H. Yokomizo et al.: "Injector system for SPring-8", 15th Int. Conf. on High Energy Accel., p558 (1992).
- 4) H. Tanaka, N. Kumagai and K. Tsumaki: Nucl. Inst. Methods **A313**, p529 (1992).
- 5) S. Matsui et al.: "Magnet Alignment of the SPring-8 Storage Ring", Proc. 4th Int. Workshop on Accel. Alignment, KEK, p174 (1995).
- 6) N. Kumagai et al.: "Stair-point Control for the Klystron Power Supply in the SPring-8 Storage Ring", Proc. Int. Power Electronics Conf., Yokohama, p1497 (1995).
- 7) S. H. Be et al.: "Vacuum System for the 8 GeV Storage Ring", Proc. 1989 Part. Accel. Conf., Chicago, p571 (1987).
- 8) 田中良太郎: 放射光 **9**, 193 (1996).