

## 大型放射光施設計画（Ⅱ）

日本原子力研究所・理化学研究所  
大型放射光施設研究開発共同チーム  
原 雅弘、横溝英明

### Ⅰ. はじめに

日本原子力研究所と理化学研究所が共同して進めている大型放射光施設(SPring-8)計画は、兵庫県西播磨の播磨科学公園都市に、世界最大の放射光研究施設を建設しようというものである。この施設は短波長領域に重点を置いた高輝度放射光源で、挿入光源を主要な光源にしている。本計画について、これまでの経緯や、目標とする性能、装置の概要、敷地および建物など計画の概要は「大型放射光施設計画（Ⅰ）」<sup>1)</sup>に述べられている。本稿では加速器の具体的な内容について、Ⅱで蓄積リングについての計画研究の結果を詳述し、Ⅲで入射器であるライナックとシンクロトロンについての設計内容を紹介する。

### Ⅱ. 蓄積リング

蓄積リングは低エミッタンスで非常に安定なものが要求されることとなった。光源の性質をよくすると、挿入光源の蓄積リングに与えるビームダイナミクス上の悪影響を減らすため無分散直線部をつくり、そこに挿入光源を設置することにした。挿入光源の長さは4mを想定して直線部の長さを6.5mとした。

以下において、第1章で低エミッタンスリングのラティス（磁石の配列）の設計、2章で寿命と不安定性、3章で磁石システム、4章で高周波加速システム、5章で真空システムについて概要を紹介する。

### 1. ラティスの設計

#### 1. 1 低エミッタンスリングの問題点

エミッタンスはエネルギーの2乗と偏向電磁石の数の(-3)乗に比例することがよく知られている。低エミッタンスを得るには偏向電磁石の数を増やす（従って、周長を増やす）のが有効である。しかし、エネルギーが8 GeVで、周長を1.5 km以下にして5~10nmというような低エミッタンスを得るためには、偏向電磁石の中での水平方向のベータトロン関数( $\beta_x$ )を絞って小さくすることがどうしても必要となる。偏向電磁石の中で $\beta_x$ を絞り込むためには結局ベータトロン関数が凹凸の激しいものにならざるを得ず、強い4極電磁石を用いることとなる。このように強い4極電磁石を使用すると、ビームが4極電磁石の中心軸をはずれた場合に大きく偏向され、設置誤差、設定誤差等の誤差磁場に対して非常に敏感になる。

さらに、強い4極磁石を用いるために、クロマチシティーが大きくなってビームの不安定性を誘起する。クロマチシティーを小さくするため、分散のある場所に6極電磁石を設置して補正すると、こんどは、クロマチシティー補正のための6極電磁石がもたらす非線形磁場の影響でベータトロン振動の振幅に依存するチューンシフトが発生し、6極磁場の誘起する共鳴のためダイナミックアパーチャーが狭くなるという問題が生じる。

以上のように低エミッタンスリングは安定領域が狭く、誤差磁場に非常に敏感である。そのた

め、低エミッタンスリングといっても、ダイナミックアパーチャーが広く安定性ができるだけ高くなるようにリングを設計しなければならない。6極磁石の使い方（クロマチシティー補正、ハーモニック補正）、閉軌道の補正方法、地盤の振動・変位にたいする対策等問題点は多い。

### 1. 2 低エミッタンスラティスの設計

無分散系を構成する低エミッタンスラティスとしてChasman-Green(CG)、Triple-Bend-Achromat(TBA)、Quadruple-Bend-Achromat(QBA)の基本構成を検討した。これはそれぞれ偏向電磁石2個、3個、4個で無分散系を構成している。周長とエミッタンスをほぼ等しくしてこれらのラティスを比較検討した結果、安定領域の確保の点で大きな差は見られず、CGラティスが最も単純で、同じ周長の場合セル数つまり挿入光源の数がいちばん多くできることを理由にCGラティスを採用することとした<sup>2)</sup>。

周長はサイトの広さを考えて1500mを越えないこととした。セル数に関しては、低エミッタンスリングにおいて、安定性が6極磁場の対称性に非

常に敏感なため対称性のよい数を選ぶ必要がある。無分散系で得られる最小エミッタンスの3倍が10nm・radより小さくなるには40より大きい必要があり、この条件を満たし、かつ、対称性の高いできるだけ小さい数として48を採用した。ちなみに48は $2^4 \times 3$ である。

無分散直線部の長さを6.5m、エミッタンスを5~10nmとして設計を進めた。蓄積リングで採用したCGラティスは図1に2個のセルを示しているが、1個のセルが2個の偏向電磁石、10個の4極電磁石、7個の6極電磁石から構成されている。2個の偏向電磁石とその間の2組の4極ダブルレットで無分散系をつくり、2組(3個)の6極電磁石でクロマチシティーを調整する。無分散直線部の $\beta$ 関数の値に柔軟性をもたせるため4極トリプレット電磁石を使用している。エミッタンスを小さくするため偏向電磁石の両横の4極電磁石で $\beta_x$ を小さく絞り込んでいる。さらに、4極トリプレットの間には2組の6極電磁石(ハーモニック6極電磁石)をもちいてダイナミックアパーチャーを大きくしている。

最初の設計では、低エミッタンスを実現するた

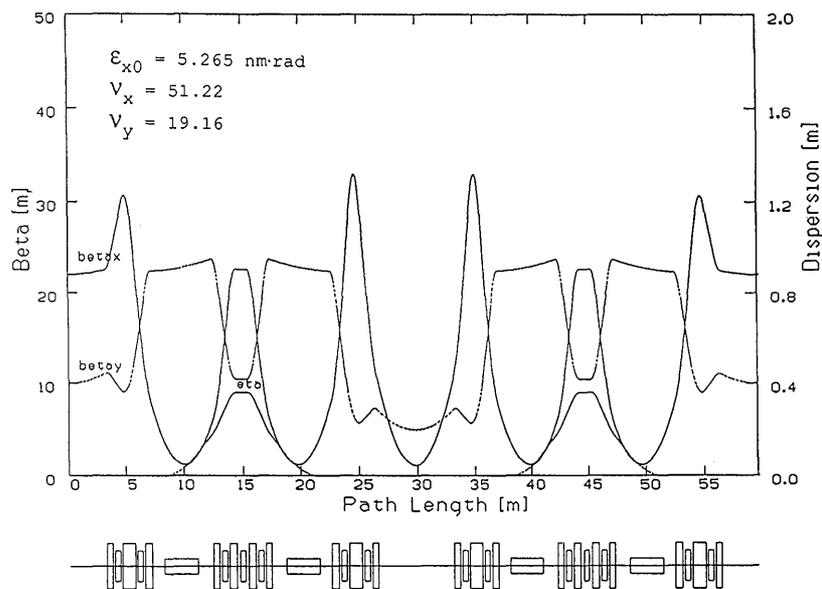


図1 最初に設計したCGラティス2セル分の磁石の配列とハイブリッドモードの場合のラティス関数

め対称性のよいセル数、長い周長として、セル数を48、周長を1429mとし、偏向電磁石の磁場は高周波系への負担を小さくするためできるだけ小さくした(0.61T)<sup>3)</sup>。また、運転モードとしては無分散直線部のベータatron関数が20m程度の大きい個所(高 $\beta$ 部)と5m以下の小さい個所(低 $\beta$ 部)が交互にくりかえすハイブリッドモードを基本としている。高 $\beta$ 部は電子ビームの平行度が高くビームサイズが大きいためアンジュレータ用に、低 $\beta$ 部は角度部分が大きいビームサイズが小さいため、多極ウィグラー用と考えた。このモードのほかに、さらに対称性の高い、高 $\beta$ モードばかりのもの(高ベータモード)も計算した。4極電磁石と6極電磁石の磁場の強さについては16T/m、300T/mを越さないように磁石長を調整した。動作点(ベータatron振動数)の設定については、セルあたりのチューンが6極磁場で誘起される1次と3次の共鳴を避けるように、さらに、チューンが整数及び和共鳴を避けるよう配慮した。図1にはハイブリッドモードのベータatron関数と分散を示し、このときのラティスのパラメータを表1に示す。

6極電磁石の最適化にはプログラムCATS<sup>4)</sup>を用いた。これはクロマチシティーを修正した後ハーモニック6極の強さを求める際、問題となる共鳴を避けてダイナミックアパーチャーを広げたり、運動量依存チューンシフトを減らすように値を決定することができる。

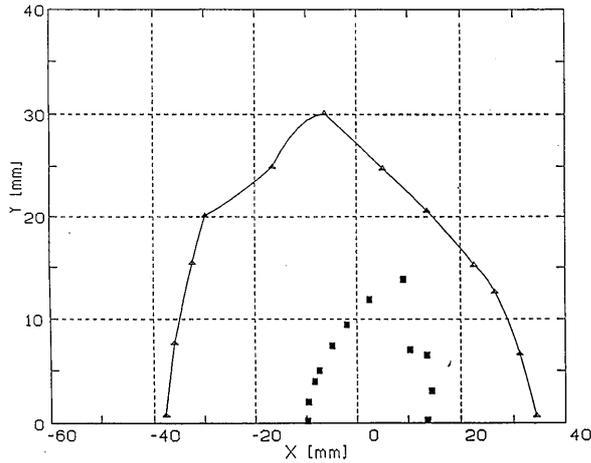
このリングに対して6極磁場を用いた補正を行い、誤差を考えない理想状態のダイナミックアパーチャーを計算したものを図2に示す。図2(a)で黒い4角で表わした点は分散部に設置した3組の6極電磁石を用いてクロマチシティー補正をした結果現れたダイナミックアパーチャーであり、そのままでは水平・垂直方向とも片幅10mm程度しかない。これに対して無分散直線部に設置した6極電磁石を用いてハーモニック補正を行なうと三角で表わしたようにダイナミックアパー

表1 Lattice Parameters(first design)

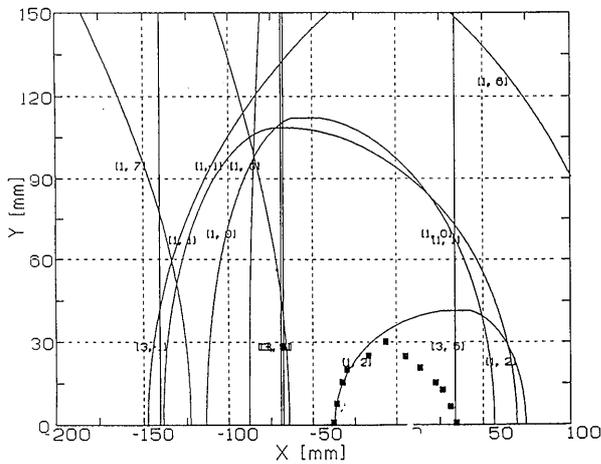
Energy(GeV)	8
Circumference(m)	1428.87
No.of Superperiods	24
Natural emittance(m.rad)	5.265
Betatron Tunes hor.	51.22
vert.	19.16
Chromaticities hor.	-119.35
vert.	-40.34
Momentum compaction	1.373 $10^{-4}$
Relative energy spread	0.00103
Horiz.damping time(ms)	9.203
Vert.damping time(ms)	9.206
Synchr.damping time(ms)	4.604
No.of dipoles	96
Maximum field(T)	0.61
Bending radius(m)	43.72
No.of quadrupoles	480
No.of families	8
No.of sextupoles	336
No.of families	7

チャーを広げることができる。6極の磁場を求めるとCATSを用いるが、これは6極磁場を周回方向のハーモニックに展開し、レゾナンス近似を用いて各ハーモニック磁場ごとにきまるダイナミックアパーチャーを計算している。その様子を示したのが図2(b)で、ハーモニック補正した後のダイナミックアパーチャーは[1, 2][3, 5]つまり2セル当たりのチューンを $\nu_x$ としたとき $\nu_x = 2$ と $3\nu_x = 5$ の共鳴で制限されていることが分かる。一般に低エミッタンスのCGラティスはセルあたりの位相の進みがほぼきまっていてそれほど大きく調整できない。最も大きな影響を与えるのがセルあたり1の共鳴である。

図3と4に運動量によるチューンシフトとベータatron関数の歪を示す。運動量の広がりによるチューンシフトも、ベータatron関数の歪もこのようなリングでは非常に大きいことが分かる。誤差磁場があるとダイナミックアパーチャーが減少するが、図5にはモニターを用いて閉軌道の歪(COD)を補正した場合、補正の程度によってダイナミックアパーチャーの回復の様子を示した。



(a)



(b)

図2 (a)磁場誤差のない理想状態でのダイナミックアパーチャー

(b)6極磁場の各ハーモニック成分[k,m]が制限するダイナミックアパーチャーをプログラムCATSで計算した。

この例では、磁場の設定誤差を含むため、CODコレクションをおこなっても安全にダイナミックアパーチャーを回復することはできない。誤差がある場合はダイナミックアパーチャーが2cm以下になることもある。ここで用いた誤差の大きさは表2に示してあるが、予想される値より大きい誤差を仮定しているため現実にはここで示された程のダイナミックアパーチャーの減少はないものと

Tune Distortion by Momentum Errors

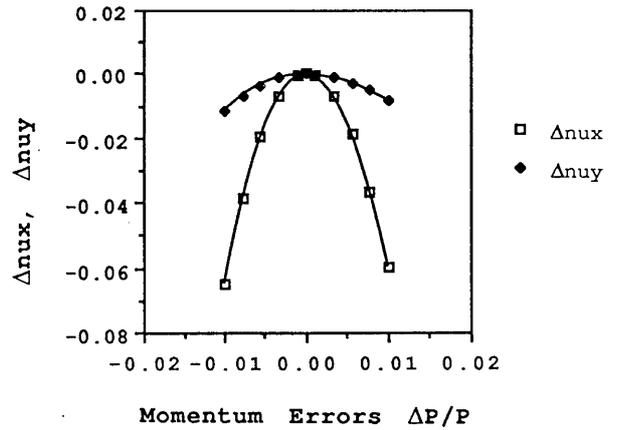


図3 運動量誤差によるチューンのズレ

B Function Distortion by Momentum Errors

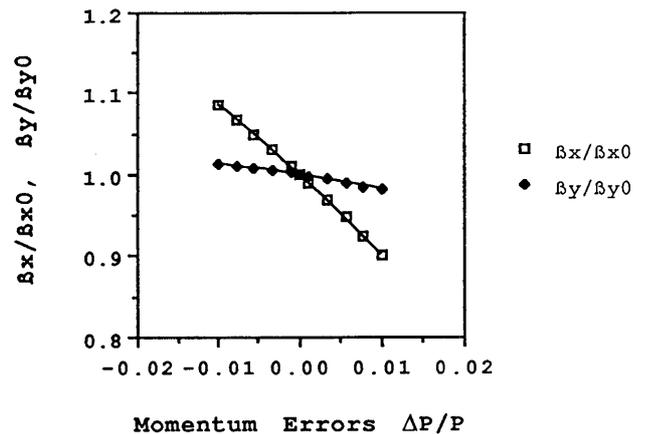


図4 運動量誤差によるベータatron関数のズレ

思われる。

このリングで得られたエミッタンスは5.265 nmであるが、これは無分散系で解析的に得られる最小エミッタンス<sup>5)</sup>

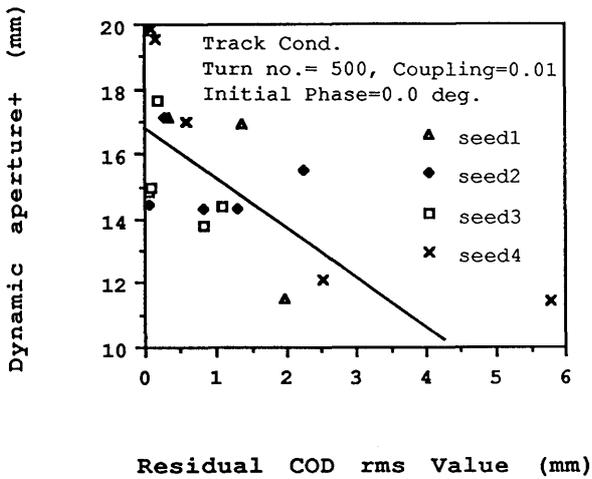
$$\frac{C_q \gamma^2 \cdot \theta^3}{4\sqrt{15}} = 1.7 \text{ nm}$$

の約3倍となっている。

1.3 長直線部

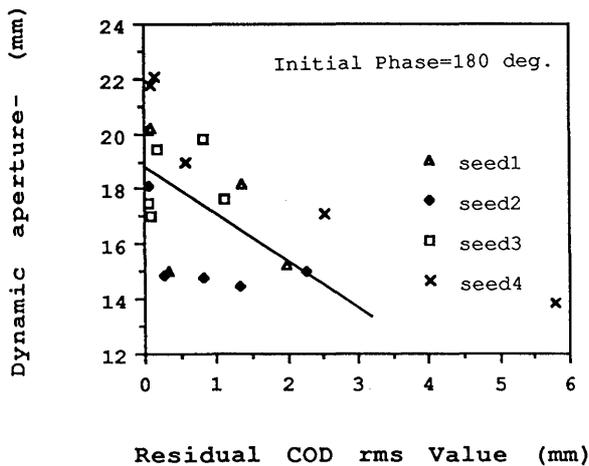
上で述べた48セルの蓄積リングに、参考文献

Recovery of Dynamic Aperture by COD Correction



(a)

Recovery of Dynamic Aperture by COD Correction



(b)

図5 (a)CODを補正したときのダイナミックアパーチャ-の回復(半径方向外側)  
(b)同上(半径方向内側)

1) で述べたように、特別に長い直線部を設定することになった。長い直線部を有することは SPring-8の大きな特長となる。特にダンピングウィグラーを用い、エネルギーを下げて運転すれば、光の回折限界での放射光発生が可能となり、

表2 Random Error Condition

Bending Magnet Field Error (dB/B)	$5.0 \times 10^{-4}$
Bending Magnet Tilt Error	$5.0 \times 10^{-4}$ rad
Misalignment at Q magnet	$2.0 \times 10^{-4}$ m
Q magnet Gradient Error (dB'/B')	$5.0 \times 10^{-4}$
Q magnet Tilt Error	$5.0 \times 10^{-4}$ rad
Misalignment at S magnet	$2.0 \times 10^{-4}$ m
S magnet Gradient Error (dB'/B')	$5.0 \times 10^{-4}$
S magnet Tilt Error	$5.0 \times 10^{-4}$ rad

軟X線領域でFELの実験を行うのに威力を発揮する。この場合、低エミッタンスリング特有の問題点を低減している対称性を保つ必要がある。その結果、48セルのうち4セルから偏向電磁石のみを取り除いて、残りの44セルの磁場をその分だけ強くすることとした。こうして通常セル44、直線セル4とすると、エネルギーが高く曲率半径の大きなリングについては偏向電磁石の収束作用はほとんど無視できるので、ビーム光学上は48セルと変わらないことが期待できる。こうすることで、直線セルの部分については、6.5mの直線部が2カ所、偏向電磁石を取り除いたあとのスペースが2カ所同一直線上に並ぶこととなる。当面はこうしたラティスで運転するが、将来、4つの直線セルについては電子軌道をかえることなしに、4極、6極電磁石を並べ変えて、連続した長い直線部を生み出すことができる。こうした考えに基づいて計算した蓄積リングの主なパラメータを表3に示してある。この時の磁石の並びを通常セルと直線セルについて図6に示し、ハイブリッドモードのベータatron関数と分散を図7に示した。図7は直線セルが中央にあり、左側に通常セルの高β半セルが、右側に通常セルの低βセルが示されている。偏向電磁石を除いた影響は予想した通り非常に小さく直線セルと通常セルの4極電磁石の強さの差は最大1.3%であった。ベータatron関数も

表3 Summary of Major Parameters of the Storage Ring  
(Present Design)

Energy	E(GeV)	8
Current(multi-bunch)	I(mA)	100
Current(single-bunch)	I(mA)	5
Circumference	C(m)	1435.95
Dipole magnetic field	B(T)	0.665
Bending radius	p(m)	40.098
Number of cells	Nc	48 (44+4)
Length of straight section	L(m)	6.5
Natural emittance	$\epsilon_n (\pi \text{ m-rad})$	$7.18 \cdot 10^{-9}$
Critical photon energy	$\epsilon_c(\text{keV})$	28.4
Tune	$\nu_x$	50.78
	$\nu_z$	17.84
Synchrotron tune	$\nu_s$	0.0113
Momentum compaction	$\alpha$	$1.49 \cdot 10^{-4}$
Natural chromaticity	$\zeta_x$	-113.17
	$\zeta_z$	-43.32
Energy loss in the arcs	$U_0(\text{MeV/rev})$	9.04
Energy spread	$\sigma_e/E$	0.00108
Damping time	$\tau_x(\text{msec})$	8.477
	$\tau_z(\text{msec})$	8.481
	$\tau_e(\text{msec})$	4.242
Harmonic number	h	2436
R.F.voltage	$V_{rf}(\text{MV})$	17
R.F.frequency	frf(MHZ)	508.58

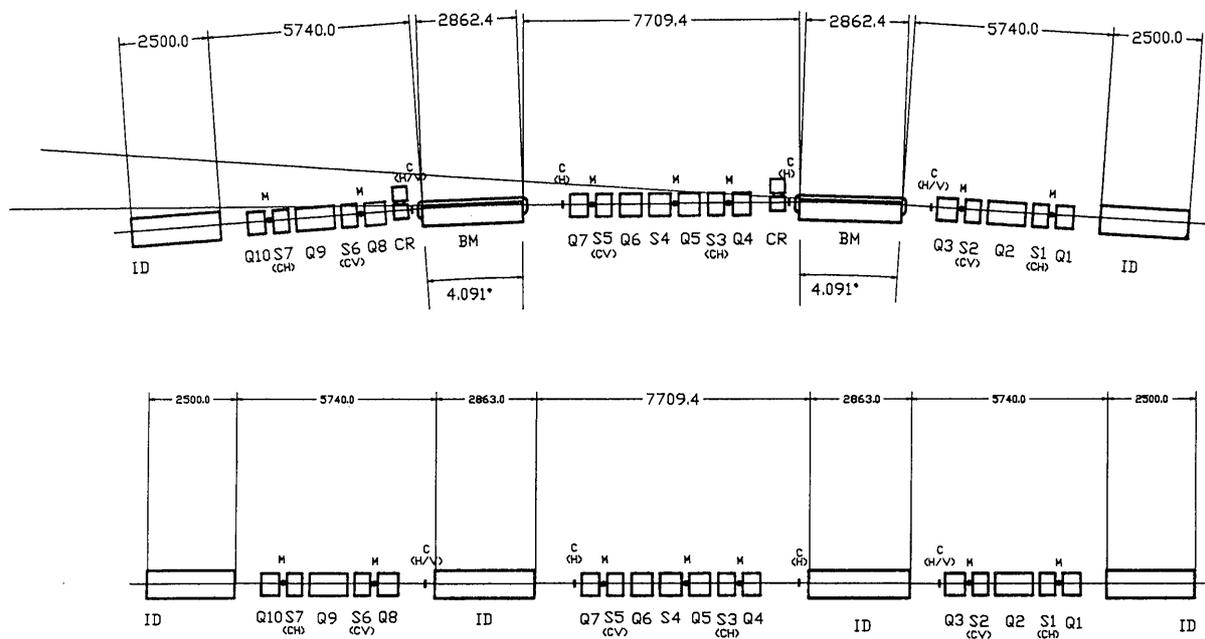


図6 (a)通常セル1セル分の磁石の並びとモニター、コレクターの位置

BM:偏向電磁石、Q:4極電磁石、S:6極電磁石、C:コレクター、M:モニター、CR:クロッチ

(b)直線セルの磁石の並び

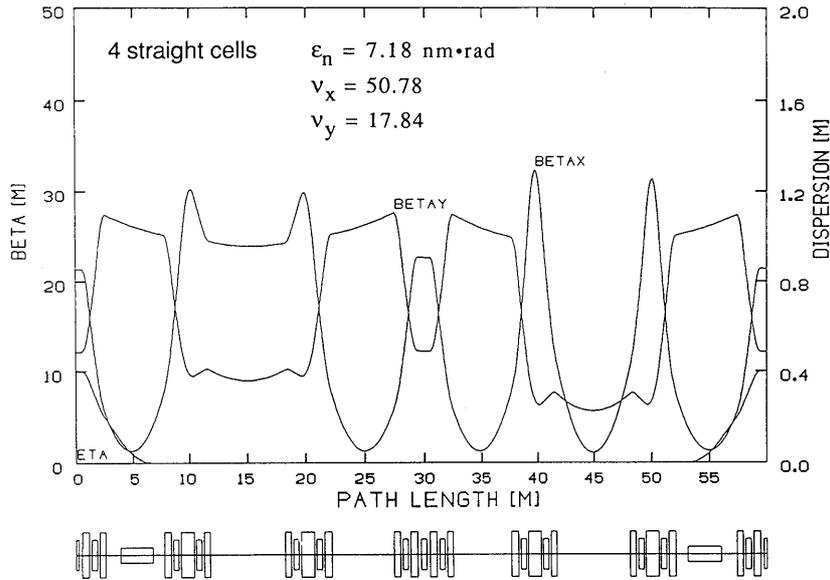


図7 直線セルを4つもつラティス2セル分の磁石の並びとラティス関数  
中央が直線セルで偏向電磁石が取り除かれている。

直線セルと通常セルではほとんど変わらないものが得られた<sup>6)</sup>。しかし偏向電磁石の数が96から88に減ったため、エミッタンスは5.27nmから7.18 nmへの増加とした。クロマチシティー補正のための6極電磁石の強さは分散が大きくなった効果と通常セルの数(クロマチシティー補正のための6極電磁石の数)が減った効果が相殺して変わらないことが期待されたが、以前のラティスと比べて弱くなっている。ハーモニック6極電磁石の値はすべて通常セルから構成されているリングを仮定してCATSを用いて求めた。この結果得られた理想のリングのダイナミックアパーチャーを図8に示す。

これまでの計算結果より、パラメータの小さな違いがあってもリングの諸特性は大きく変わらない。そこで、誤差磁場の影響や、不安定性の検討について、未検討な点については表1のラティスを用いて行った結果を参考にしている。

将来、4つの直線部を配列し直して連続した長い直線部を作ることができる。実際にこのモード

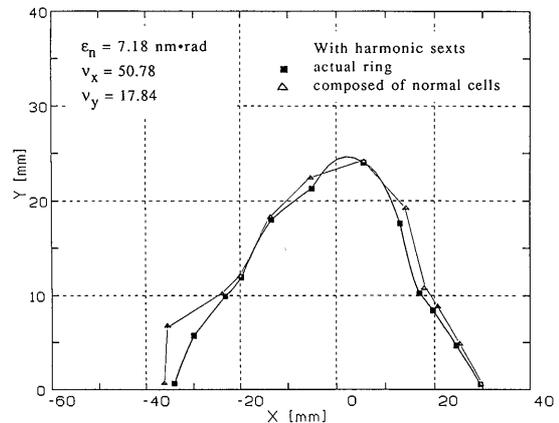


図8 直線セルを4つもつラティスの理想状態でのダイナミックアパーチャー

三角は6極磁場を計算するために計算した通常セル48個でできた仮想リングのダイナミックアパーチャーで、四角は直線セルを4つもつリングのダイナミックアパーチャーである。

を実現するのは先のことであるから、ここではその1例を計算してみただけで十分な検討はまだ行っていない。その例を図9に示してある。この

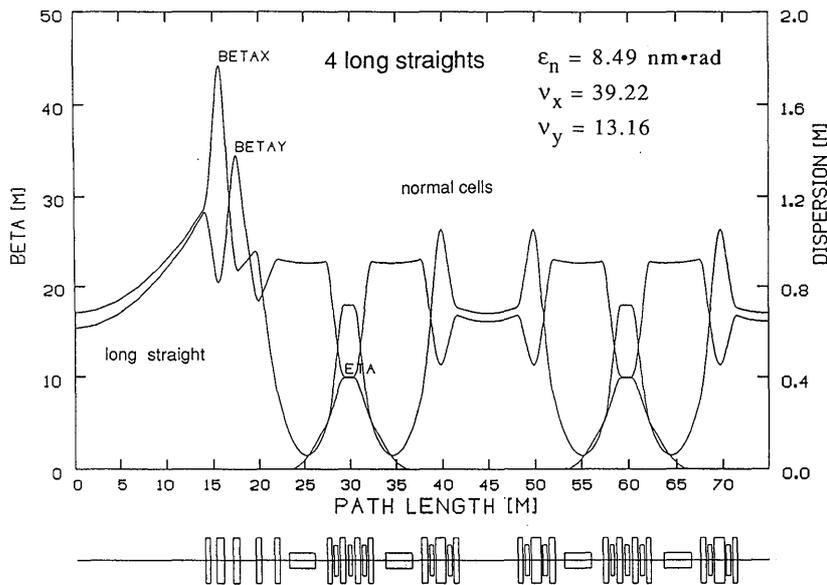


図9 30mの長直線部をもつラティスの1例

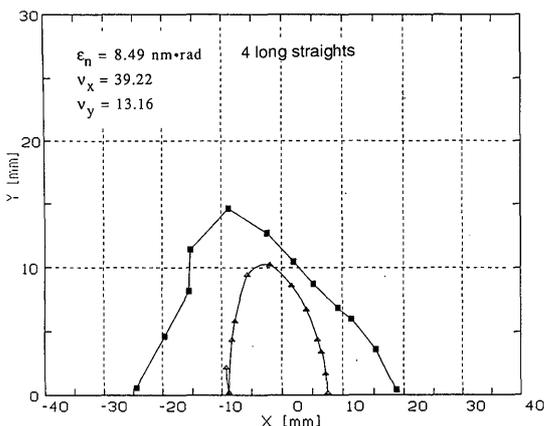


図10 図9に示したラティスをもつリングの理想状態でのダイナミックアパーチャー3角はクロマチシティー補正のみ、4角はハーモニック補正を行ったもの。

例では直線部のβxが大きい高βモードとなっている。この時のダイナミックアパーチャーの大きさを図10に示した。

1. 4 蓄積リング電磁石に対する許容誤差

蓄積リングでは非常に強い4極、6極電磁石を用いるため、閉軌道とベータatron関数はある種の磁場の誤差に非常に敏感となる。また線形オブ

表4 Storage Ring Tolerances

Quadrupole placement	0.1mm
Sextupole placement	0.1mm
Dipole tilt	$1 \times 10^{-4}$ rad.
Quadrupole tilt	$1 \times 10^{-4}$ rad.
Sextupole tilt	$5 \times 10^{-4}$ rad.
Dipole field	$5 \times 10^{-4}$
Quadrupole gradient	$5 \times 10^{-4}$
Sextupole field	$1 \times 10^{-3}$

ティクスの歪はダイナミックアパーチャーの減少や共鳴の励起、あるいは水平・垂直方向のベータatron振動の結合をもたらす、有害なものとなる。

このリングの誤差磁場に対する敏感さを統計計算で求めた。4極電磁石のランダムなズレに対してCODを計算し、リング全体にわたる閉軌道のズレの標準偏差を4極電磁石のズレの標準偏差で割った増幅数が、水平方向では90、垂直方向では60程度になった。同様に磁場の設定誤差、傾きの誤差による閉軌道のズレを計算し、真空チャンバーのアパーチャーにはいるように許容誤差を計算した<sup>7)</sup>。結果は表4に示したとおりである。

表5 Parameters of insertion devices

		Undulator	Wiggler
Field parameter	K	1.0	25.2
Peak field	$B_0$ (T)	0.357	1.5
Period length	$\lambda$ (cm)	3.0	18.0
No. of period	$N_p$	166	12
Total length	L(m)	4.98	2.16
Radius of curvature in the peak field	$\rho$ (m)	74.7	17.78
Vertical wave number	$k_y$ (1/m)	205	34.23
Horizontal wave number		$k_x=0.2k_y$	$k_x=0.2k_y$
Amplitude of equilibrium orbit	$\rho/(k\rho)^2$ ( $\mu\text{m}$ )	0.3	46.1
Photon energy	$\varepsilon$ (keV)	13.5	64.0

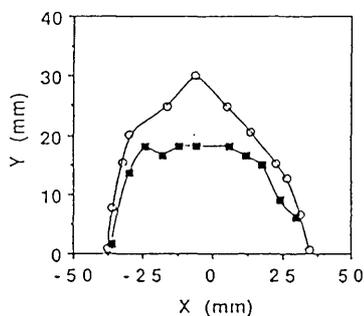


図11 ハイブリッドモードで1個アンジュレータを使用した時のアンジュレータの影響。

白丸はアンジュレータがない場合、黒4角はアンジュレータを1個用いた時のダイナミックアパーチャーを示す。

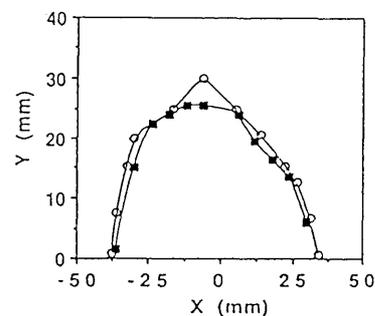


図12 ハイブリッドモードでウィグラーを1個用いた時の影響。

白丸はウィグラーなし、黒4角はウィグラーありの時のダイナミックアパーチャーを示す。

### 1.5 挿入光源の影響

SPring-8のような挿入光源を主体とした放射光専用の蓄積リングにおいては、多数の挿入光源を同時に用いることが予想される。そこで挿入光源のビームダイナミクスに与える影響を調べることは非常に重要である。挿入光源の導入は元の系の対称性を乱し、ベータatron関数を歪め、非線形力をもたらす、共鳴を増やす。

挿入光源のもたらす線形効果は疑似4極磁場であるが、4極磁場とことなり、水平・垂直方向とも集束力が働く。非線形効果としては疑似6極磁

場、疑似8極磁場が生じたことと同じである。しかし、これらの力は挿入光線内での曲率半径が大きくなると一般に小さくなる。SPring-8のように曲率半径が大きい場合非常に小さくなる。ここでは、表5に示した挿入光源を想定して、表1に示したラティスに対して影響を計算した<sup>8)</sup>。ダイナミックアパーチャーの変化を示した例が図11、12である。これらの図からみる限り、ダイナミックアパーチャーに与える影響は実質的には小さい。

### 1. 6 リング立ち上げ時の検討

低エミッタンスリングでは強い4極磁石、6極磁石を用いるため、誤差磁場・設置誤差に対して非常に敏感になっており、CODを発生しやすく、発生したCODはベータatron関数を歪ませる。それ故ビーム位置モニターとコレクター磁石を用いても最初の1周が必ずしも保証されない。

そこで、低エミッタンスリングの立ち上げには2つの方法を考えている<sup>9)</sup>。1つは誤差に強いデチューンドモードを用意し、そこでCOD補正をしておく方法である。この方法は有効であると考えて、現在デチューンドモードを計算している<sup>10)</sup>。しかし、この方法はデチューンドモードと低エミッタンスモードとの間に相関があれば、前者のCOD補正が後者のCOD補正に有効であるが、そうとは限らない点に問題がある。

もう1つは最初から低エミッタンスモードに入射し、スクリーンモニターを用いて最初のターンで軌道補正を行ってCODを減らす方法である。ハイブリッドモードに対して設置誤差を想定してシミュレーションを行った結果、デチューンド

モードを経ないでも直接低エミッタンスモードを立ちあげることが可能であることがわかった。

### 2. 寿命と不安定性

蓄積された電子ビームの寿命を決めるものとして、1) 量子効果、2) Touschek効果、3) 制動放射、4) クーロン散乱、が問題となる

1)、2) は真空度とは無関係で、このリングでは真空度に直接関係する3、4) の効果と比べて無視できるように設計している。真空度による寿命の計算を図13に示す。

電子ビームの不安定性を正確に予測することは難しいが、SPring-8についていくつかの代表的な不安定性について検討した<sup>11)</sup>。不安定性を論じる場合、ビームと壁との相互作用の大きさを表わすのにインピーダンスを用いる。インピーダンスはなんらかの仮定をすれば計算は可能だが、それほど信頼性のあるものは得られず、ここではパラメータとして扱った。なお、不安定性の解析についてはZAP<sup>12)</sup>コードを用いた。

不安定性として、単バンチと多バンチ、縦方向

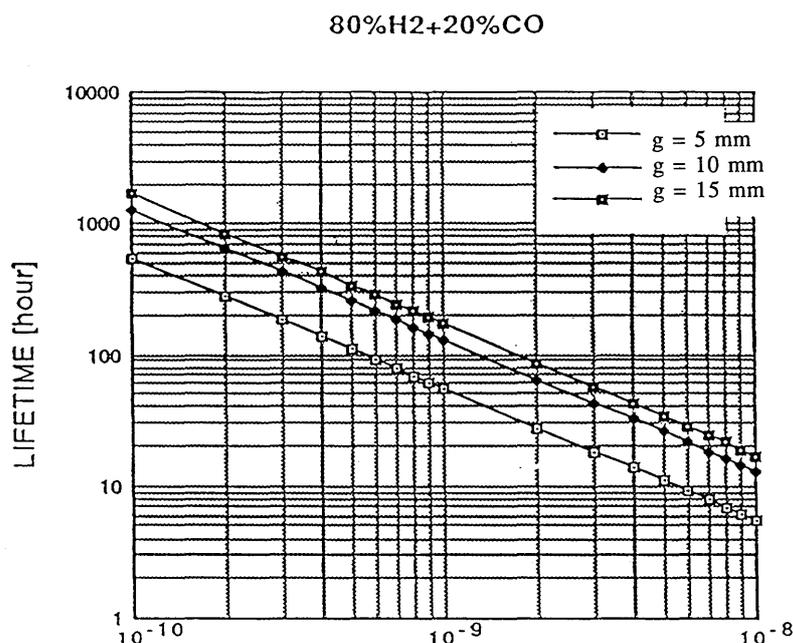


図13 アンジュレータ間隙をパラメーターとしたときの圧力とビームの寿命

と横方向のモードについて問題となる効果は以下の通りである。

- 1) 単バンチで縦方向  
マイクロ波不安定によるバンチ長の変化
- 2) 単バンチで横方向  
ファストヘッドテイル不安定性によるビーム損失
- 3) 多バンチで縦方向

Threshold Current of Microwave Instability

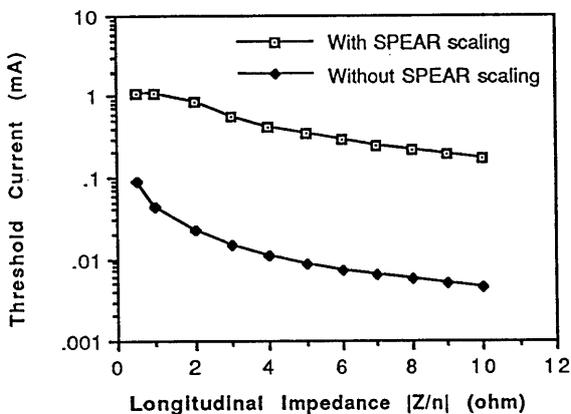


図14 マイクロ波不安定性のおこるしきい値

Bunch lengthening due to microwave instability

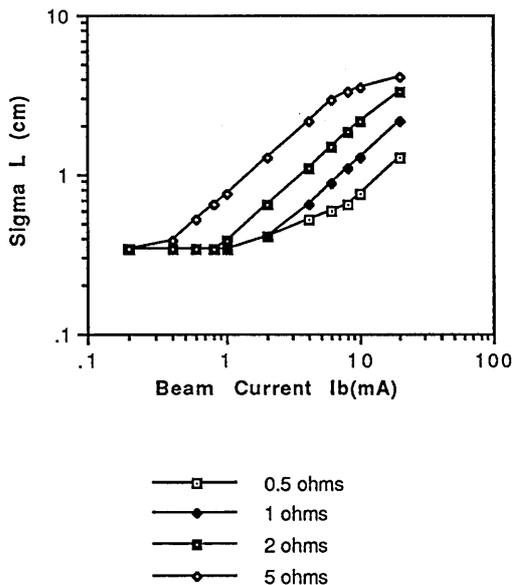


図15 マイクロ波不安定性によるバンチの長大化

バンチ結合型不安定性によるビーム損失

4) 多バンチで横方向

バンチ結合型不安定性によるビーム損失の検討  
マイクロ波不安定性が起きるとバンチの長さが伸び、運動量の幅を広げる。このリングについてチューンの運動量依存性の計算から、現在の所、2%以上運動量幅がずれた粒子はチューンシフトのため共鳴を引き起こして失われる。量子寿命を100時間とすると運動量の広がりには不安定性のないときの0.1%と比べて3倍の0.3%までの広がりが許される。運動量の広がりがバンチの長さに比例すると考えると、3倍の長さまでバンチの伸びが許される。ZAPを用いた計算で得られたマイクロ波不安定性の起こるしきい電流値を図14に、電流値によるバンチ長の変化を図15に示した。

横方向のファストヘッドテイル不安定性のおこるしきい電流を図16に示す。バンチ長としきい電流値の関係は図17のように概念的に表わせる。ビームを入射し始めたときは電流値が小さくバンチ長は短い。電流が増加して、縦方向のマイクロ波不安定性のしきい値を越えると、バンチの長大化がおこる。バンチが長くなるとピーク電流が下がるので、ある長さでバランスする。この現象は図の2つの曲線の交差点に達するまで起こり、

Threshold Current of Fast Head-Tail Instability

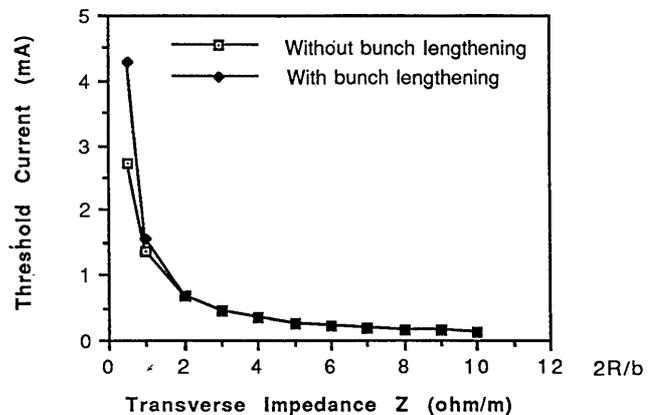


図16 横方向ファストヘッドテイル不安定性のしきい電流値

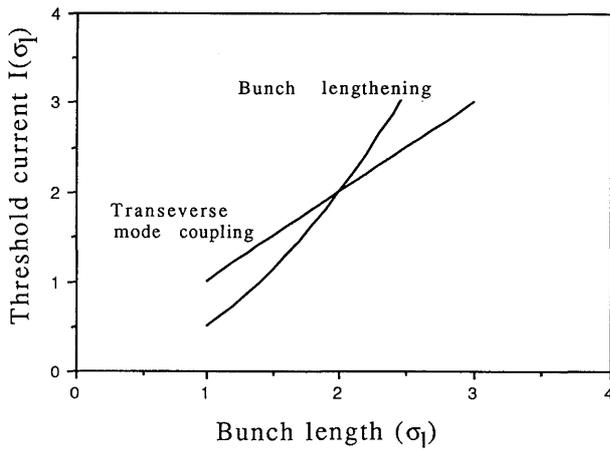


図17 バンチ長大化の概念図

もっと入射電流を増やすと今度は横方向のモードカップリングでしきい電流が決まるようになる。

多バンチの場合のバンチ結合型不安定性は加速空洞で問題となるが、SPring-8のように多数の空洞を使用する場合は、互いのセルの高次モードの関係によって影響は大きく異なる。①互いの高次モードが全く重なり合わない場合、②ある程度重なる場合、③全く一致する場合、を考えて、影響を計算してみた。計算には光子ファクトリーで用いられている空洞のパラメータを用いた。縦方向及び横方向のしきい電流値を図18、19に示した。この図でみると100mAの電流値を得

Threshold current of longitudinal coupled bunch instability

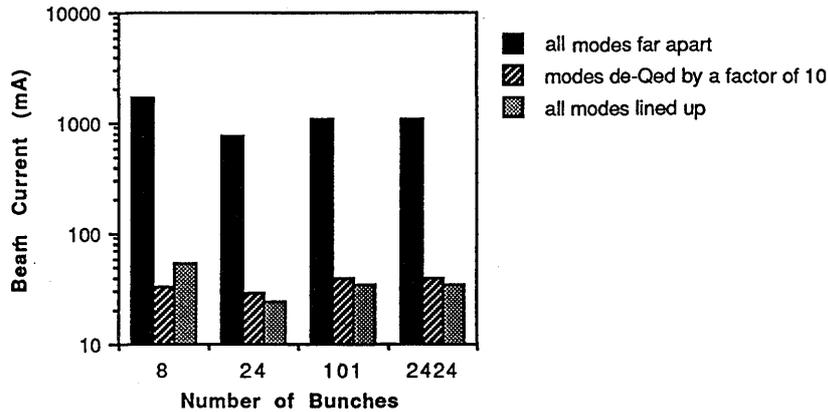


図18 縦方向バンチ結合型不安定性のしきい電流値

Threshold current of transverse coupled bunch instability

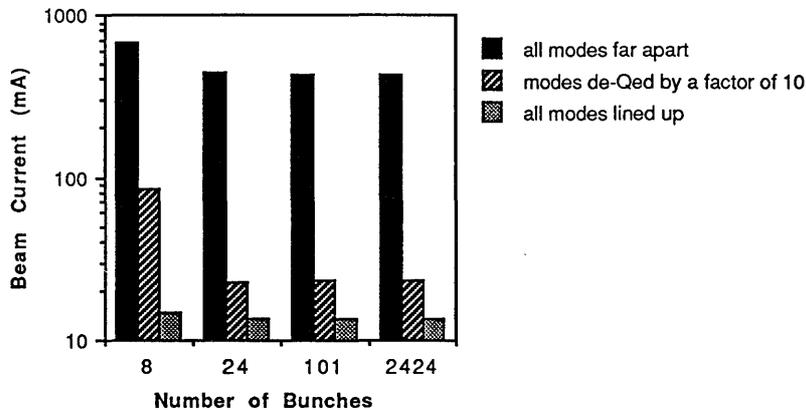


図19 横方向バンチ結合型不安定性のしきい電流値

表6 Required field quality of dipole, quadrupole, and sextupole magnets

Magnet	Dipole	Quadrupole	Sextupole
Maximum field strength	0.655T	18T/m	360T/m <sup>2</sup>
Gap distance or bore radius	65mm	45mm	55mm
Effective field length	2.863m	0.5, 0.6, 1.1m	0.6, 0.45m
Field uniformity	$\Delta B_1/B_1$ $< 5 \times 10^{-4}$	$\Delta G_1/G_1$ $< 5 \times 10^{-4}$	$\Delta G_1/G_1$ $< 1 \times 10^{-3}$
Region size	x=±40mm y=±17mm	x=±35mm y=±15mm	x=±35mm y=±15mm

表7 Main magnets parameters

	Dipole	Quadrupole	Sextupole			
Number of magnets	88	192	192	96	288	48
Maximum strength	0.66T		18T/m		300T/m <sup>2</sup>	360T/m <sup>2</sup>
Effective length (m)	2.86	0.5	0.6	1.1	0.45	0.6
Gap or Bore radius (mm)	65		45		55	
Magnetomotive force (AT)	$3.5 \times 10^4$		$1.5 \times 10^4$		$7.0 \times 10^3$	$8.3 \times 10^3$
Turns per pole	14		16		22	
Conductor size (mm)	14x23-φ10		11.5x16-φ5		8x8-φ3.5,	φ4.0
Current (A)	1250		940		320	380
Current density (A/mm <sup>2</sup> )	5.1		5.8		5.9	7.0
Voltage (V)	20.3	10.8	13.0	23.8	18.3	27.2
Power (KW)	25.3	10.2	12.2	22.4	5.9	10.3
Cooling water circuits	2	4	4	8	6	6
Water flow (l/min)	18.1	7.3	8.7	16.0	4.2	7.4
Pressure drop (bar)	5.0	2.0	3.2	2.6	2.3	4.1
Temperature rise (°C)	20		20		20	

るのはむずかそうであるが、インピーダンスの評価、バンチ長の短いビームに対する不安定性の計算、その他、いくつか問題点がある。また、2%の運動量幅にしてもまだ改良の余地があって、さらに正確な評価を行っていく必要がある。

### 3. 磁石システム

SPring-8の磁石システムは88個の偏向電磁石、480個の4極電磁石、336個の6極電磁石から構成される。この他に576個の軌道補正用電磁石があるが、このうち、288個は6極電磁石にコイルを余分に取り付けて実現し、96個は独立した水平方向、さらに192個は水平垂直両方向の補正用

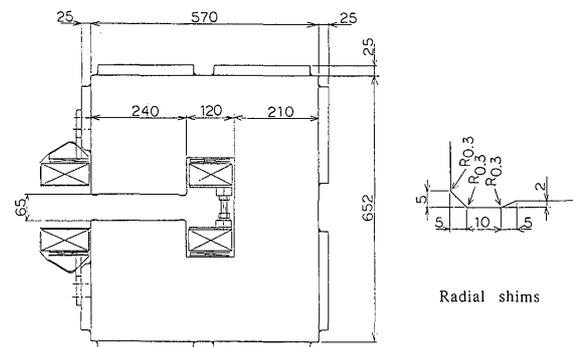
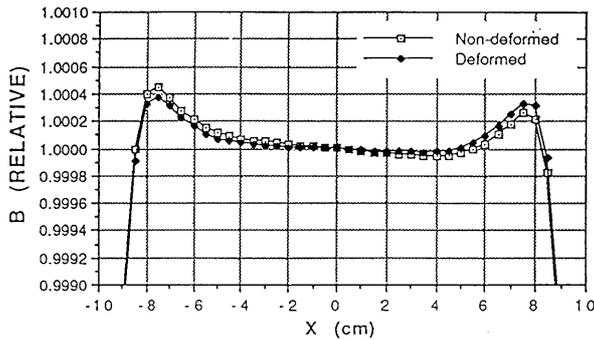


図20 偏向電磁石の断面図

磁石である。さらに、ビーム入射のため、3個のセプタム電磁石と4個キッカー電磁石がある。そ



Calculated transverse field distributions of a dipole magnet normalized at x=0 (B=0.655 T)

図21 偏向電磁石の磁場分布

それぞれの磁石に要求される仕様と主なパラメータを表6、7に示してある<sup>13)</sup>。

偏向電磁石は図20に示すようにC型の断面形状で、直方体をした2極の電磁石である。これは製作を容易にして経費を安くするのと、真空チャンバーの設置と磁場測定を容易にするためである。磁力による磁極間隙の減少は10 μm程度であり、要求される領域内で磁場を一様にするため半径方向のシムを付けている。磁場分布の計算値を図21に示した。

4磁電磁石の断面形状は図22に示したもので、長さは3種類ある。光ビームの取り出しポートがヨークの部分を通過するため、4極磁場の性能を変えないで、磁石の上下の部分はステンレス鋼で結合するように設計した。

6極電磁石は分散部におかれた3個がクロマティシティー補正のため、挿入光源用の無分散直線部におかれたものがダイナミックアパーチャーを大きくするために使用される。いくつかの磁石は光ビーム取り出しポートのためにヨークの形状を非対称に設計した。図23は非対称な場合の断面を示している。6極電磁石のいくつかは補助コイルを用いて水平方向もしくは垂直方向の軌道修正用の磁石を含むように設計している。図には両方向の補正用コイルが示されている。

シンクロトロンから蓄積リングへの入射は繰り返

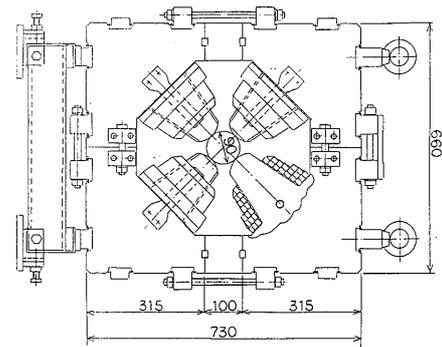


図22 4極電磁石の断面図

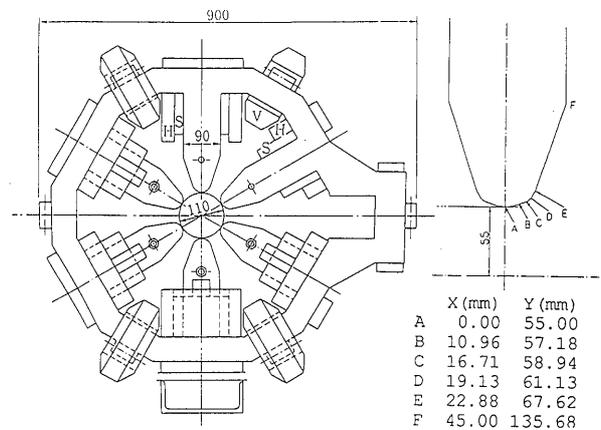


図23 6極電磁石の断面図

返し行うため、バンプ軌道を用いるOFF-AXIS入射方式を採用した。蓄積リングのベータatron関数の大きい直線部をもちいてリングの内側から入射するが、そのために、3個のセプタム電磁石、4個のバンプ電磁石を用いる<sup>14)</sup>。4個のバンプ電磁石で蓄積されているビームの軌道の一部にふくらみをつくりその軌道の近くにセプタム電磁石を用いて入射ビームを入射する。バンプ磁場は、入射ビームがベータatron振動のために入射機器や壁に当たらないよう、パルス運転を行い、パルス幅は1周しないうちにバンプ磁場が消えてしまうよう4 μsとした。磁場の強さがそれほど強くないようにバンプ磁石の位置と長さを決めた。入射用のセプタム磁石は2個は直流、リン

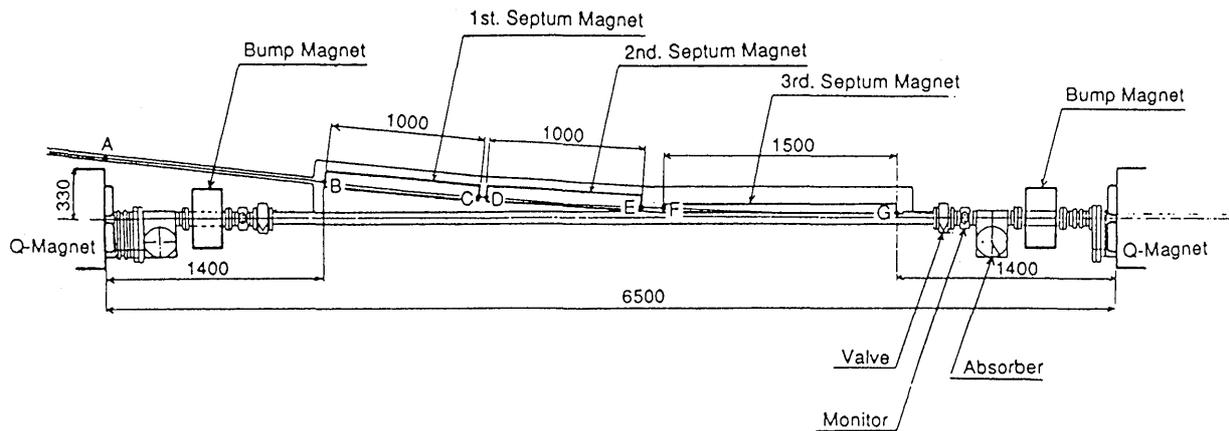


図24 入射点近傍の入射機器配置図

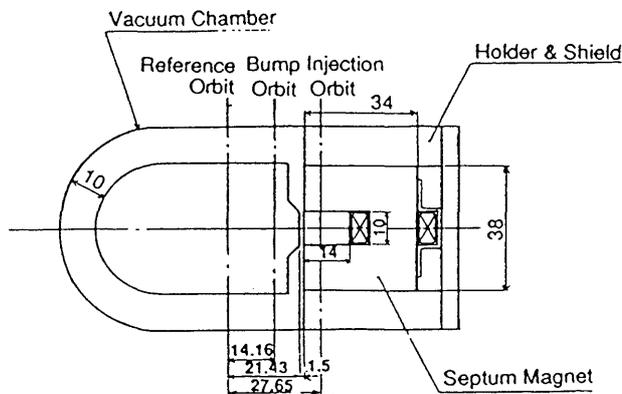


図25 パルスセプタムの断面図

表8 Parameters of the septum magnets

	1st and 2nd	3rd
Length(m)	1.0	1.5
Bending angle(deg)	2.0	2.6
Peak field(T)	0.931	0.807
Number of turns	4	1
Inductance(mH)	70.4	2.64
Current waveform	DC	Half sinusoidal
Peak current(A)	1480	6420
Pulse width( $\mu$ s)	—	40
Repetition Rate(Hz)	—	60

グに最も近い1個はパルス運転を行なう。入射部付近の磁石の並びとセプタム電磁石の概要を図24、25に、セプタム磁石のパラメータを表8に示す。

## 5. 高周波加速システム

高周波加速システムは、高周波のパワー源に信頼性がある安定に供給できることを考えて、高エネルギー物理学研究所のトリスタンで開発された周波数508.58MHz、出力1MWのクライストロンを利用することとした。使用周波数及びクライストロンはシンクロトロンと同じである。

SPring-8のRFパラメータは表9に示す通り

表9 RF parameters of the storage ring

Beam energy	8GeV
Circumference	1436m
Bending radius	40.1m
Revolution frequency	208.8kHz
Radio frequency	508.58MHz
Harmonic number	2436
Momentum compaction factor	$1.49 \times 10^{-4}$
Natural energy spread	$1.08 \times 10^{-3}$
Energy loss in arcs	9.04MeV
Energy loss in Insertion Devices	3.2MeV
Parasitic energy loss per 100 mA	0.5MeV
Maximum RF voltage	17MV
Damping time transverse	8.5msec
Damping time longitudinal	4.2msec
Quantum lifetime	>1day
Synchrotron frequency	2.13kHz
Klystron power	1MW
Number of klystron	4

である。偏向電磁石からの放射光損失は9.04MeVで、挿入光源による損失を3.2MeVと評価し、十分長い量子寿命を得るためピーク電圧を17MVと設定した。

バンチ結合型不安定性から制限される蓄積電流を大きくするため、加速空洞は、ベータトロン関数の小さい6.5mの無分散直線部に設置することとした。直線部を4カ所用意し、1個の直線部に8個の単セル空洞を設置し、1MWのクライストロン1個からパワーを供給する。はじめはノーズコーン付きの単セル空洞を考えてコールドテストを行なったが、この種のリングでは電子ビームが引き起こすウェークフィールドが問題で、空洞の高調波モードの影響を小さくするため、加速モードのシャントインピーダンスが小さくなるが、図26に示すような断面形状の空洞を採用することとした<sup>15)</sup>。現在モデルを製作して高周波特性を測定中である。

## 6. 真空システム

SPring-8蓄積リングの真空システムは2種類のアルミ合金製のチェンバー、2種類の放射光アブソーバー（クロッチ、アブソーバー）、NEG（非蒸発型ゲッター）ストリップ等の真空排気ポンプ、その他真空部品（ベローズ、フランジ、バルブ等）から構成される。

真空に対する要求は、蓄積リングの電子ビームの寿命を20時間以上確保するために、ビーム負荷がある状態で $10^{-9}$ Torr以下の真空度を確保することである。このリングでは、ガス放出の主な要因は放射光による光脱離反応である。それ故、偏向電磁石から発生するサーチライト状の非常に細い放射光を偏向電磁石の下流側に設置したクロッチとアブソーバーで吸収してできるだけ局所処理を行うこととした。各電磁石、モニター等の各構成要素の並びを図27に示す<sup>16)</sup>。

真空チェンバーは4極、6極電磁石を含む直線部のものと、偏向電磁石部のものとの2種類あり<sup>16)</sup>、

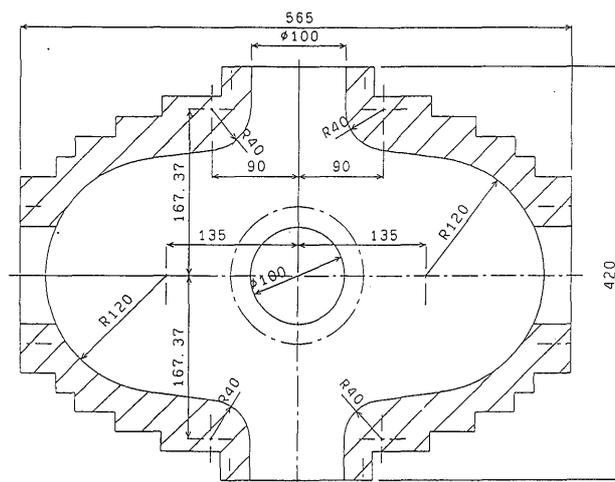
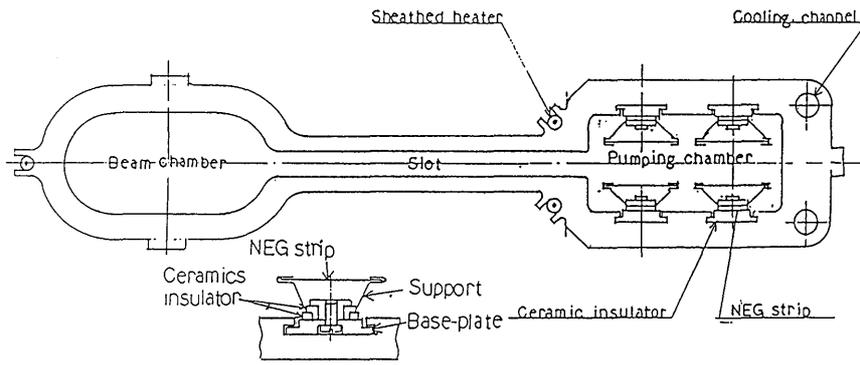


図26 ノーズコーンなしの高周波空洞の断面図

それぞれの断面を図28、29に示した。直線部のチェンバーは電子ビームの通過するビームチェンバーとスロットでつながったアンチチェンバーから構成され、後者にはNEGストリップが取り付けられる。スロットは放射光を通過させ、真空の引き口となるが、電子ビームが引き起こす高周波電磁波を通過させないように考えられた。一方偏向電磁石部のチェンバーは上記のほかに偏向磁場を利用する分布型のイオンポンプ(DIP)を設置するためのチェンバーが付属している。これらのチェンバーは形状が複雑なためアルミ合金(A6063-T5)の引き抜きで製作する。偏向電磁石部のチェンバーは偏向半径に合わせて曲げる予定である。

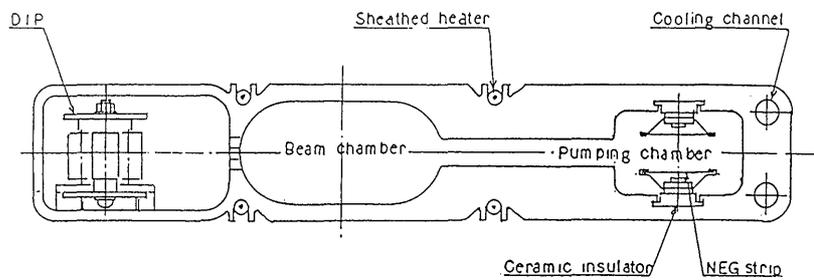
偏向電磁石から放出される放射光のうち不必要なものは偏向電磁石の下流側に置かれたクロッチでおもに処理する。現在、設計試作しているクロッチを図30に示す。このクロッチはビームがみるインピーダンスをできるだけ減らし、放射光が当たって生じる光電子、反射光、放出ガス等を効率よく捕獲してビームチェンバーに出ていかないよう工夫している。材質は放射光に対する放出ガスを減らすため無酸素銅（クラス1）であり、集中型のNEGポンプ、スパッタリングイオンポ





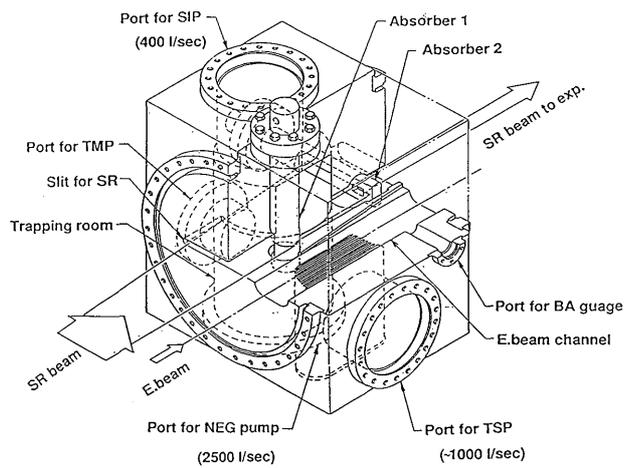
Cross sectional view of the vacuum chamber for the straight sections

図28 直線部のチェンバー断面図



Cross sectional view of the vacuum chamber for the bending magnets

図29 偏向電磁石部チェンバー断面図



Isometric view of the crotch

図30 クロッチ取瞰図

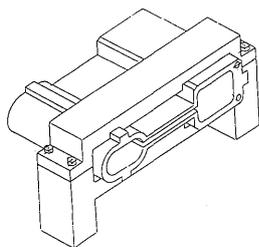
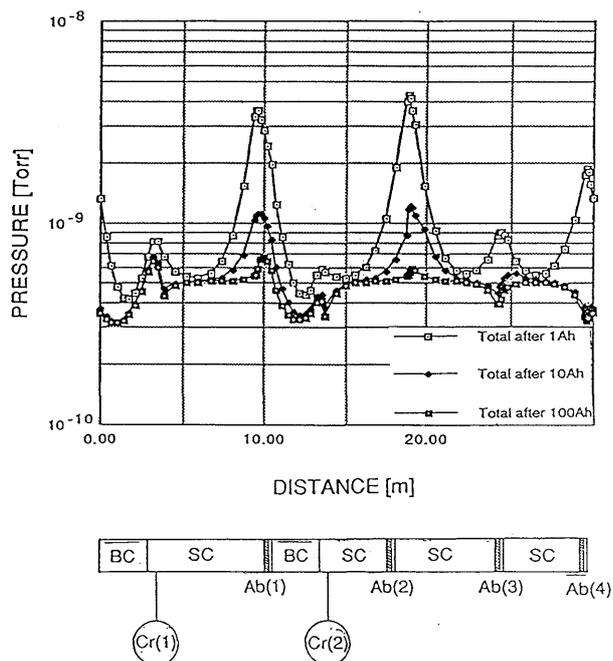


図31 自由マウント



Pressure gradient profiles after the integrated stored current of 1, 10, 100 Ah

図32 1セルにわたる真空度分布の計算チェンバー

ンプ(SIP)、チタンサブレーションポンプ(TSP)が接続されている。

チェンバーの取り付けは自由マウントと固定マウントの考え方を導入した<sup>17)</sup>。自由マウントは特別な工夫でチェンバーの伸び縮みをビーム方向にのみ許すもので図31にその仕組みを示す。これによって、位置モニターの部分の変位を0.1mm以内に抑えることとした。

排気システムについては、主ポンプとしてNEGストリップとDIPを用い、クロッチ、アブソー

バー部に集中型NEG、TSP、SIPを用いて排気することになっている。単位セルにわたるの圧力分布の計算例を図32に示す。

### III 入射系

SPring-8の入射系として、信頼性の高いシステムを目指して設計が進んでいる。蓄積リングへの入射は、安定な放射光利用研究を進めるために全エネルギー8 GeVで入射する方式が優れており、それを1 GeVのライナックと8 GeVのシンクロトロンを組み合わせた複合システムで行う<sup>18)</sup>。蓄積粒子としては、低エミッタンスでの不安定性など予想できないことがあるため、陽電子及び電子を使えるようにする。蓄積リングにためる最大電流の目標値は、蓄積粒子の種類に依らずマルチバンチ運転時に100mA、シングルバンチ運転時に5 mAと設定した。蓄積リングへの入射は、1日2回程度と考えており、1回当たりの入射所要時間は長くても20分以内をしたいと考えている。電子の場合は充分早く入射できるが、陽電子の場合はビームの生成効率が低いので、シンクロトロンの中で複数のパルス(8パルス)を同時に加速する工夫を行って所要時間を短くすることを考えている。ライナックのエネルギーとしては0.5-1.5GeVの間で検討を進めてきたが、ライナックビーム性能、入射系全体の運転シナリオ及び運転の信頼性、建設コスト、将来の利用等を勘案して1GeVに決定した。第1章でライナック、第2章でシンクロトロン、第3章でビーム輸送ラインについて現在設計している概要を紹介する。

#### 1 ライナック

##### 1.1 ライナックの全体構成

ライナックの主要性能を表10に示す。全体概念図を、図33に示す。ライナックは、陽電子ビームを発生、加速する為の陽電子ライナック、電子ビームを発生、加速する為の電子ライナック、及

表10 ライナックの主要パラメータ

共通パラメータ	
RF周波数	2856MHz
クライストロンパワー	35MW
全長	200m
運転繰り返し率	60Hz
主ライナック	
入射エネルギー	120MeV
到達エネルギー	1GeV
最大電流 (電子)	300mA
(陽電子)	10mA
エミッタンス	1.5 $\pi$ mm.mrad以下
エネルギー拡がり	$\pm 1.5\%$ 以下
電子ライナック	
到達エネルギー	120MeV
最大電流 (パルス幅 1 $\mu$ sec)	100mA
(パルス幅 1nsec)	300mA
陽電子ライナック	
電子加速エネルギー	250MeV
電流	10A
ターゲット材質	タンタル
厚さ	約10mm
陽電子加速エネルギー	120MeV
電流	10mA

び、陽電子または電子ビームを1 GeVまで加速するための主ライナックの3つの部分から構成されている。電子銃に要請されている性能が電子ビームと陽電子発生用電子ビームとで大きく異なることから、陽電子ライナックと電子ライナックとの2つを分ける構成とした。

陽電子ライナックは、平均ピーク電流10A、パルス幅1-10nsecの電子ビームを250MeVに加速する部分、電子を陽電子に変換する部分、発生した陽電子を効率良く収集し120MeVまで加速する部分から構成される。

電子ライナックは、平均ピーク電流100-300mA、パルス幅1  $\mu$ sec及び1 nsecの電子ビームを120 MeVまで加速する。主ライナックは、陽電子または電子を120MeVから1 GeVまで加速する。

図34に、この主ライナックで発生させるビーム

波形を示す。ロングパルス及びショートパルスは、各々、蓄積リングに入射した時のマルチバンチ及びシングルバンチ運転に対応して使用するものである。これ以外に、シンクロトロンの高周波加速周波数に対応してパルス幅1 nsecのビームを連続的に発生させるバーストモードのビーム波形も考えている。バーストモードによって、ライナックでのビーム負荷を軽減し、かつ、シンクロトロン内でのビームロスによる放射化を軽減することができる。

主ライナックの出力ビームのエネルギー拡がり、陽電子の場合 $\pm 1.5\%$ 以下となるよう設計しているが、シンクロトロンの真空ダクト、磁石等の寸法を小さくするには、出力ビームのエネルギー拡がりをできる限り小さくした方がよい。そのため、エネルギー圧縮システム(ECS)を使用



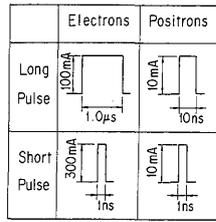


図34 ライナックで発生されるマクロパルス波形

して、シンクロトロンに入射するビームのエネルギー拡がりを狭めることにした。ECSのうしろはライナック-シンクロトロン間ビーム輸送(LS BT)ライン及びビームダンプ部となっている。ビームダンプ部は、エミッタンスモニタを兼ねて約30mの長さとしている。

ライナックの長さは、陽電子ライナックの電子銃からLSBTライン入口までで約200mとなっている。このライナックのビームをシンクロトロンへ導く以外に将来他の研究に利用する事を考慮して、陽電子ライナックのターゲット直前、主ライナックの中間点、及び、主ライナックの出口の3箇所にスイッチヤードを設ける為の空間を空けてある。

1. 2 入射部

入射部は、図35に示すように電子を発射させる電子銃、電子ビームを狭い位相幅にバンチさせる為のプリバンチャー、バンチャー、及び、加速管等から構成される。この入射部でのビーム性能が、ライナック出力ビームの性能の大半を決定すると言える。

電子ライナック用入射部の電子銃は、グリッド付三極管型でバリアン社製のY646の採用を予定している。0.5cm<sup>2</sup>の含浸型カソードで、100kVの加速圧力で2.8Aのピーク電流を発生できる。エミッタンスとしては、 $6.5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を期待している。パルス幅は、グリッド電圧の制御により可変であり、ロングパルス1μsec、ショートパルスとして1-2nsecを発生させる。

プリバンチャーには、リエントラント型空洞を2段使用することによって、電子ビームの出力位相幅が50°でバンチ率が約70%以上となることを期待している。図36にプリバンチャーの構成を示す。第一空洞と第二空洞間の距離は33cm、第二空洞とバンチャー間の距離は10cmである。バンチャーは、長さ約50cmの定在波型空洞とする。図37にバンチャーのバンチング特性を示す。電子ビームは位相幅50°で入射すると出力位相幅5-6°にバンチされる。このバンチャー出口で、電子はエネルギー約5MeVとなっている。電子ビームは次に初段加速管に入り、約30MeVのエネルギーにまで加速される。

陽電子ライナック用入射部の基本構成は電子ライナック用入射部とほぼ同じであるが、主な相違点としては大電流の電子を発生させる為の大口径の電子銃を採用していること、少しでも多くの電子を集められるようにサブハーモニックバンチャー(SHB)を設けている<sup>1)9)</sup>ことが挙げられる。電子銃は2cm<sup>2</sup>の含浸型カソードで、バリアン社製Y796を使用する。これは、加速電界150kVのとき20Aのピーク電流を引き出せる。パルス幅

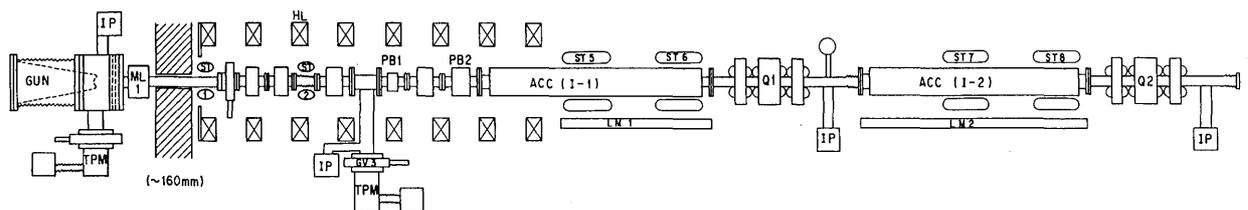


図35 電子ライナック陽入射部の概要



図36 ダブルプリバンチャーの構成

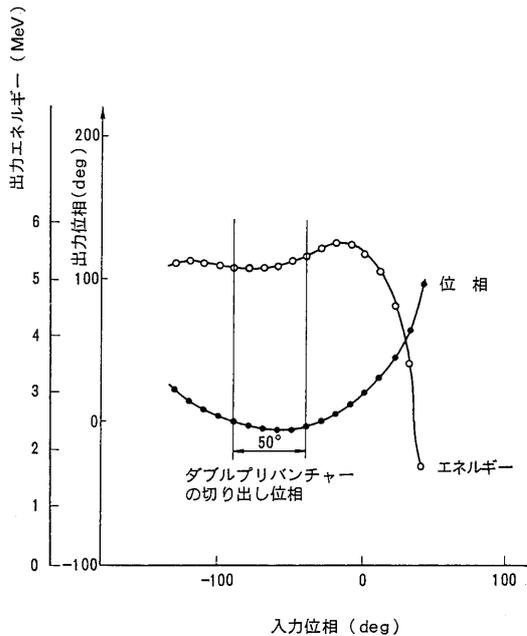


図37 バンチャーのバンチング特性

は、ロングパルスとして10-40nsec、ショートパルスとして2-3nsecを発生させる。エミッタンスは、 $87\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下が期待できる。SHBは、ショートパルス運転時に電荷量を増すため使用するものである。ライナックの加速周波数2856MHzの1/24である119MHzの周波数とし、1/4波長のリエントラント型空洞を採用する。この空洞によって、150keVで引き出された電子を約4nsecの長さから約1nsecのパルス幅に縮めることが出来る。SHB以降のプリバンチャー、バンチャー、加速管の構成は電子ライナック用入射部と同じである。

### 1. 3 加速管

表11 加速管の特性

周波数	2856MHz
構造	進行波管
モード	$2\pi/3$ 定勾配型
セル数	81
長さ	2.835m
加速管口径(2a)	20-26mm
シャントインピーダンス	54M $\Omega$ /m
加速管1本当たりのエネルギー利得	40MeV

加速周波数は、マイクロ波源(クライストロン)の安定的な供給や装置の信頼性を考慮して、日本及び米国で多く利用されている2856MHzを選択した。加速管の構造は進行波型とし、ビーム不安定性に強いことや実績を考慮して定勾配型の $2\pi/3$ モードとした。加速管の主要性能を表11に示す。加速管の長さは2m管、3m管及び4-6m管とを候補とし、クライストロンとの組合せも含めて比較検討した。製作性及び裾付作業性でも不都合のない長さとして、1本当たり81セル、2.835mを選択した。加速電界は、最近建設されたライナックでかなり高い値を達成しているものもあり<sup>20)</sup>、これら最新の技術の進歩<sup>21)</sup>や既設の大型装置の実績<sup>22)</sup>を考慮し、かつ、放射光施設の入射器としての信頼性をも配慮して、中程度の値14-15MV/mに設定した。この加速電界及び加速管長をどのように選ぶかはライナックの全長に大きく影響し、建物を含めて全建設コストを考えると重要なパラメータとなっている。現在案では、加速管の総数として34本が必要であり、ライナックの長さは、陽電子ライナックから主ライナックの出口までの合計で約170mとなっている。

進行波型の加速管は、円板と円筒とを交互に積み重ねたものであり、円板の中心に直径20-26mmの穴を空けてビームを通過させる構造である。ビーム不安定性を抑えるために中心の穴の直径を少しずつ変えた4-5種類の加速管をつくり、適当に組み合わせて使用する。

加速管の高周波特性は温度変化に影響されやすく、 $1^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対し共振周波数が50kHz変化する。これは通過するビームに対して加速用マイクロ波の位相がずれることになり、長い加速管ではそのずれが積み重なって影響が大きくなる。そのため加速管の温度制御が必要であり、冷却システムとして $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 程度の微調制御が行えるものを考えている。このレベルの制御となると加速管内の冷却水経路や加速管周囲の空調にも注意が必要となっている。

#### 1. 4 マイクロ波源

ライナックを運転するうえで、マイクロ波源の信頼性が最も重要な事項の一つである。加速管1本当たりの必要パワーは20-25MWである。クライストロンはこのパワーを安定に発生させることが必要である。現在市販されているクライストロンとしては、20MW級、35MW級、65MW級がある。開発中のものとして100MW級もある<sup>23)</sup>。必要パワーに対して余裕があること、入手が容易であること、実績があり信頼性が高いことなどを判断して、35MW級のクライストロンを基本として検討を進めている。現在案の場合、クライストロン1本につき1本の加速管にパワーを供給することになり、クライストロンの総数として34本が必要である。クライストロンの保守、交換等を考慮した場合、クライストロン本数の少ない構成にしたほうが良いという考え方もある。この場合、例えば、35MWのクライストロンを同じ条件で運転すると仮定し、2本の加速管にパワーを分割して供給すると考えると、加速電界としては $1/\sqrt{2}$ になり、その結果、到達エネルギーを同じにするにはライナックの全長を $\sqrt{2}$ 倍長くする必要がある。その為、必要なクライストロンの本数は $1/2$ にはならず $1/\sqrt{2}$ になり、24本は必要となる。パワーを2分割するに必要な立体回路や、全長が長くなることによって必要となる加速管、真空排気系、ビームモニタ、建物等の建設コストは、ク

ライストロン、モジュレータ等の台数が減ることによるコスト減を考慮しても、増加することになる。各加速管ごとの位相制御が容易になるなどの利点もあり、保守面では多少不利になるが現在案を選択した。

35MWクライストロン用のモジュレータとしては、85MW、 $4\ \mu\text{sec}$ 、265kV程度の能力が必要である。ライナックの出力ビームのエネルギー拡がりをおさえるために、モジュレータの電圧安定度として $\pm 0.2\%$ 以下が必要となっている。これは、隣でシンクロトロンがパルス運転していても、電力会社からの供給電力が電圧変動したとしても常に満足されるように設計を進めている。モジュレータ回路は幾通りかの候補が考えられるが、DeQ回路方式<sup>24)</sup>を中心に検討している。大電力回路では使用する部品の信頼性も重要であり、個々に検討する必要がある。

#### 1. 5 陽電子変換部

陽電子ビームは、250MeVに加速された電子を金属板（タンタルなど）に衝突させ、その時発生する制動 $\gamma$ 線がさらに金属内で対生成を行い、この対生成によって発生させる陽電子を利用する。入射した電子の数に比べて、ビームとして利用できる陽電子の量は $0.1-0.8\%$ と非常に少ない<sup>25)</sup>。そのため、入射させる電子ビームとしては、大電流であり、かつ、ターゲット上でのビームサイズが小さいことが必要である。金属内で発生する陽電子のエネルギーは、広い範囲に分布しているが、ここでは $10\text{MeV} \pm 5\text{MeV}$ にはいるものを利用する。現在想定している陽電子ビームの電流値の条件では、蓄積リングに所定の電荷量のためこむのにかかる入射所要時間は途中でビームロスがないと仮定して20分程度となる。この入射所要時間が短いほど利用研究の待ち時間が減り好ましいことから、10分程度を目標に陽電子変換部の試作開発を行う予定にしている。陽電子を効率良く収集する為にはパルス、DCソレノイド磁場

の強さ及び配置や、素早く加速するための高加速電界の加速管の配置などが重要課題となっている。

このようにして生成した陽電子ビームは、ビーム性能が悪く、量も少ないことから、途中でのロスをも最小限にして1 GeVまで加速できるように陽電子ライナックと主ライナックとを一直線上に配置した。しかし、この配置では不要な電子ビームも陽電子と共に加速されることになり、この為ビームモニタがむずかしくなる。また、放射線発生を軽減させる為にも早めに電子を選択的に除去したほうが好ましい。そこで、約120 MeVまで加速した所に陽電子と電子とを分離する為の磁石を設置する。軌道の変位を小さくおさえているので、この磁石によってバンチしたビームの位相が広がることは無視できる。

## 1. 6 ECS

主ライナックの出力ビームのエネルギー拡がりには陽電子の場合 $\pm 1.5\%$ 程度と考えており、シンクロトロンアクセプタンスの観点からこの値を少しでも小さくする為にエネルギー圧縮システム(ECS)を採用する。図38にECSの概念図を示す。25° 偏向する長さ1.5m、磁場1 Tの磁石4台と加速管1本を使い、エネルギー圧縮率が1/5以下となることを目標に検討を進めている。

## 2 シンクロトロン

### 2. 1 シンクロトロンラティス

ブースターシンクロトロンでは、ライナックか

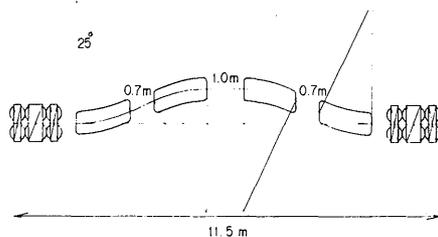


図38 ECSの磁石配置図

ら1 GeVで入射された陽電子または電子を8 GeVまで加速する。シンクロトロンラティスを考えるうえで、蓄積リングからエミッタンスを200 nm・rad以下にするよう要請された。入射及び出射用磁石の配置が容易となるように1セルの長さは約10m前後とし、そのうち約60%を偏向磁石の長さとする。偏向磁場の強さは、ビームの入射、加速、出射の信頼性を高める為に飽和しない領域を使用などを考慮した。既設のシンクロトロンを参考にしながら、表12に示すように周長300mから500mの範囲で広く比較検討をおこなった。ビーム性能的にはシンクロトロンが大型になるほど好ましいが、それにつれて建設コストが高くなることから、必要最小限の大きさとして表12の(c)に示した周長400mクラスのラティスを選択した。詳細な周長は、高周波加速システムの周波数508.58MHzと、蓄積リングとシンクロトロン周長比29/8とで決定されており、ハーモニクス数で672、周長で396mとなっている。セル数は40、ラティス構成はFODO型である。リングの対称性は、2回、3回、4回対称のラティスを比較検討したが、入出射用及び高周波加速用として必要な空間を確保し、かつ、エミッタンスを小さくするために偏向磁石の個数を多くできる2回対称を選択した。2箇所の直線部には、偏向磁石を抜いたミッシングバンド部が各々6個含まれており、中央の4個のミッシングバンド部で分散関数が零となるようにしてある。図39にシンクロトロン概念図を示す。

ノーマルセルの基本構成を図40に示す。1セル当り長さ9.9mで、そこに偏向磁石、四極磁石、六極磁石各2台及び補正用磁石2台を含んでいる。ビーム不安定性やチェーンシフトを抑える為にクロマチシティを補正する必要があり、六極磁石を設置した。単にクロマチシティを補正するだけであれば、六極磁石の台数を減らすことが可能であるが、それでは図41に示すようにダイナミックアパーチャーが狭くなってしまふので、運

表12 シンクロトロン ラティスの比較

	a	b	c	d	e	f
ITEMS	470m class	400m class	400m class	370m class	350m class	300m class
harmonic number	800	672	672	632	600	532
circumference [m]	472	396	396	372	354	314
number of cells	48	40	40	40	36	32
number of super periods	4	4	2	2	4	2
beam parameters at 8GeV						
emittance [nm · red]	119	237	192	218	324	405
momentum spread [%]	0.111	0.123	0.122	0.124	0.128	
$\eta$ max [m]	0.840	1.15	1.00	1.01	1.24	1.29
tune						
X	13.73	11.28	11.73	11.27	10.26	9.28
Y	10.73	10.72	8.78	10.73	9.74	8.63
betatron function max						
X [m]	16.7	17.3	16.7	16.7	17.4	17.3
Y [m]	17.4	17.4	17.9	16.3	17.5	17.3
rad.loss at 8GeV [MeV/turn]	9.49	11.7	11.5	12.0	12.7	12.9
BM						
number	80	64	68	68	56	52
bending angle [deg]	4.50	5.63	5.29	5.29	6.43	6.92
$\rho$ [m]	38.2	31.1	31.4	30.3	28.5	28.1
length [m]	3.00	3.05	2.90	2.80	3.20	3.40
max strength [T]	0.699	0.859	0.850	0.881	0.936	0.948
QM						
number	96	80	80	80	72	64
length [m]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50
max strength QF [T/m]	14.4	14.5	14.6	15.3	17.5	17.5
QD [T/m]	12.7	13.9	12.4	15.0	16.8	17.0
RF max power [MW]	0.98	1.44	1.29	1.44	1.85	2.00

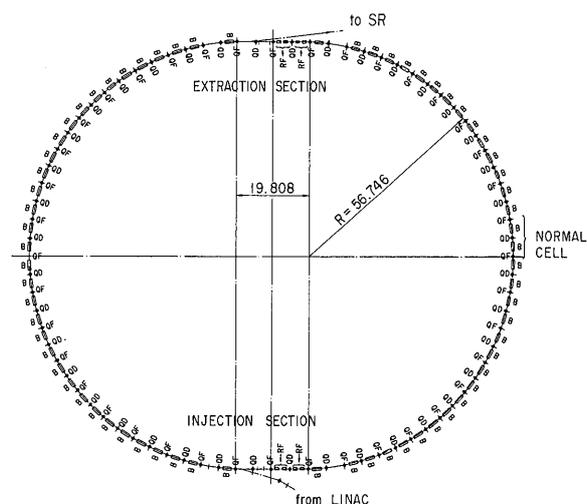


図39 シンクロトロンの概要

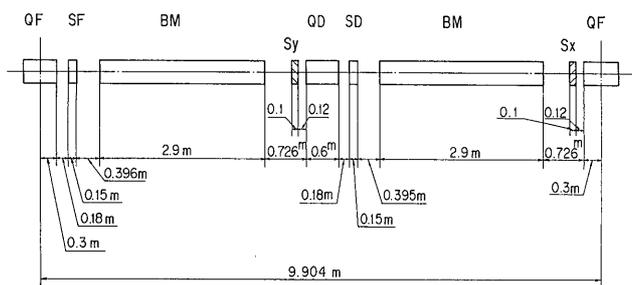


図40 シンクロトロンノーマルセルの磁石配置図

BM:偏向磁石、QF,QD:四極磁石、SF,SQ:六極磁石、Sx,Sy:補正磁石。

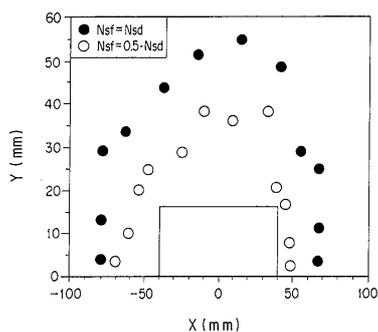


図41 ダイナミックアパーチャー

転上不都合が起きないように台数を決定した。RACETRACKコードによる解析によると、このラティスは磁石の製作誤差や据え付け誤差に強く、真空ダクトの物理的アパーチャーに対して十分なダイナミックアパーチャーが確保されている<sup>26)</sup>。

シンクロトロン加速繰り返し周波数は、共振励磁方式による10-50Hzの場合とサイリスタ電源による1Hz前後の場合とを比較検討した。電磁石、電源及び制御に関して違いがあり、各々利点欠点があるが、蓄積リングに陽電子(電子)を貯めるのにかかる時間に大差がない。技術面での検討と将来の制御の融通性を考慮して1Hzによる運転方式に決定した。

## 2. 2 磁石

シンクロトロンの磁石は、偏向磁石が68台、四極磁石が80台、六極磁石が64台、補正磁石が64台である。磁石の主要パラメータを表13に示す。これらの磁石の鉄芯材は、0.5mm厚の無方向性電磁鋼帯とし、JIS規格50A600相当珪素鋼板を選択した。0.5mm厚の板を使った場合、1Hzで運転する時の渦電流損は無視できる値であり、問題とならない。偏向磁石の断面形状としてはH型とC型の2種類が考えられるが、加工精度、コスト、真空ダクト据え付けの容易さ等を検討し、C型を採用した。ビームに沿ってのサジッタが最大で30mm程度なので、ストレート構造を採用しgood field

表13 シンクロトン磁石パラメータ

偏向磁石	
個数	68
磁極長	2870mm
磁極ギャップ	46mm
磁極幅	150mm
ヨークタイプ	C型
エッジ	短形
磁場 (8GeV)	0.85T
磁場精度	0.05%
四極磁石	
個数	80
磁極長	570mm
ボア径	40mm
磁場収束	14.598T/m
発散	-12.382T/m
磁場精度	0.1%
六極磁石	
個数	64
磁極長	150mm
ボア径	50mm
磁場収束	112.5T/mm <sup>2</sup>
発散	-162.8T/mm <sup>2</sup>
磁場精度	1%

regionとして横方向±42mmを確保している。四極磁石、六極磁石は上下二分方式とし、good field regionは半径30mmを確保している。

## 2. 3 高周波加速システム

高周波加速システムの周波数は、クライストロンの運転実績が多くあり、容易に入手できるものがある周波数帯として、高エネルギー物理学研究所で使われている508.58MHzと一致させた。これは、蓄積リングの周波数と共通である。

加速空洞は、DESY等で使われているスロット結合型5連のキャビティ<sup>27)</sup>を採用した。図42にキャビティの概要を示す。偏向磁石を抜いたミッシングバンド部1箇所当りに2台ずつ、4箇所のミッシングバンド部に合計8台のキャビティを設置する。

8 GeVにおけるシンクロトン放射エネルギー

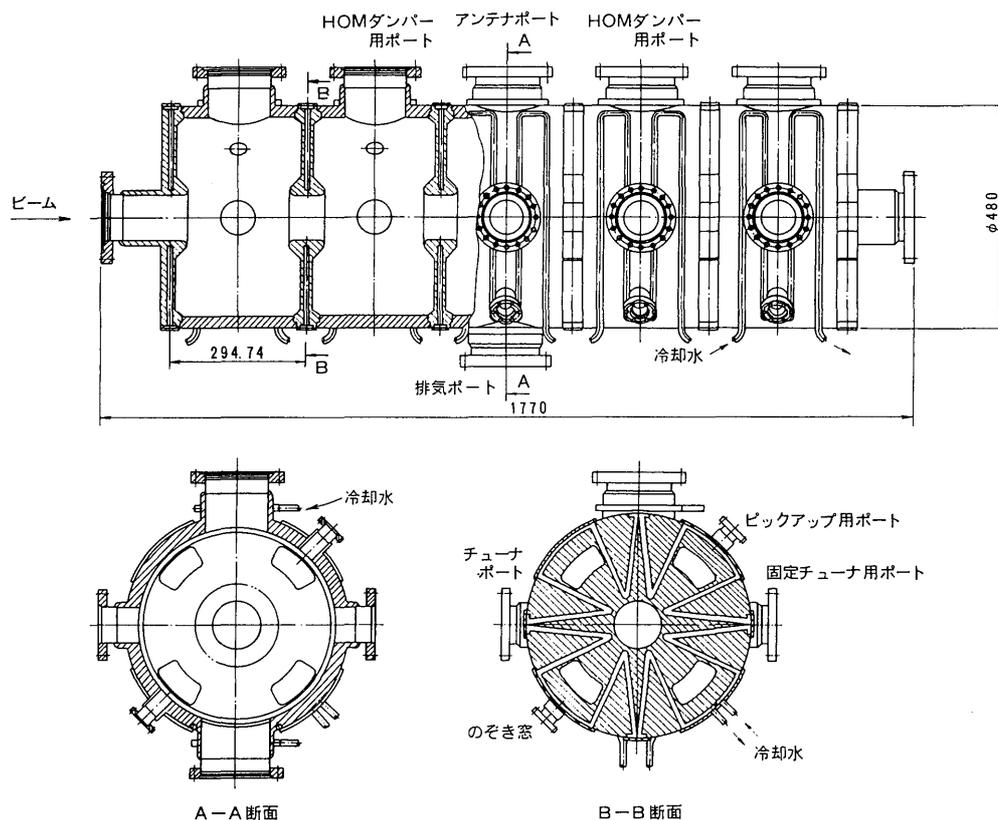


図42 スロット結合型5連キャビティの概要

ギーは、1周当たり11.55MeVであり、電流値10 mAの放射損失を補う為に必要なパワーは116kWである。量子寿命として10秒を設定し、キャビティのシャントインピーダンスを21M $\Omega$ /mと考えると、必要となる高周波パワーの合計は1.3MWとなる。1 MWクラスのクライストロンを2本使って、安定に供給出来ると考えている。

#### 2. 4 真空システム

真空ダクトの大きさは、ライナックから入射されるビームの質によって主に決められており、ダクト内径として横方向72mm、縦方向34mmが確保されている。シンクロトロン加速時の磁場変化によって発生する渦電流を小さく抑える為に、比抵抗率の高い材料としてステンレススティールSU S316Lを使用し、薄肉構造とする。1 Hzで運転する時にダクト内に誘起される渦電流の影響を常

時 $10^{-3}$ 以下にするには、板厚0.3mm以下にする必要がある。このような薄肉ダクトでは1気圧の圧力に耐えないことから、リブによる補強またはベローズ構造などの対策が必要となる。最終的な構造は試作試験を行なって決める予定である。

真空度に対する要求は、ビームが真空ダクト内の残留ガスと衝突して失われる時の寿命が10秒以上となることである。これは、ビームがシンクロトロンの中に滞在する0.5秒間に、失われずに残存する確率が95%に相当する。この条件を満たす真空度は、 $10^{-4}$  Torr以下であれば良い。一方、ビームが残留ガスによって制動放射を発生するので、この影響を極力小さくするには真空度を高める必要がある。また、イオンポンプなどの保守を考えるとある程度良い真空度が必要である。コストを高めることなく、集中型ポンプを使って容易に達成可能な真空度として、 $10^{-6}$  Torr以下

という値を設定した。この値は、10mAのビームを8 GeVで運転した時に最も真空の悪くなる場所での値として考えている。従って、ポンプヘッドではもっと良い真空度となっており、また、ダクト内面が枯れてくればさらに良い真空になると考えている。

### 3 ビーム輸送ライン

施設全体の配置図を図43に示す。この図からわかるように、ビーム輸送ラインが非常に長くなっている。特に、地盤の状況から蓄積リングの内側に入射系を設置できない為、リングの外側に出した。しかも、蓄積リングのレベルと入射系のレベルとで10mの段差があり、その斜面の造成からも蓄積リングとシンクロトロンとの間が離れてしまっている。ビーム輸送ラインには、ライナックとシンクロトロンとを結ぶ(LSBT)ラインとシンクロトロンと蓄積リングとを結ぶ(SSBT)ラインの2つがある。これらビーム輸送ラインでは、各加速器間のビームパラメータをマッチングさせること、及び、前の加速器から発生したビームの質を測定し、次の加速器へビームを正確に入射することが求められている。

#### 3. 1 LSBTライン

LSBTラインは、ライナックで発生された1 GeVのビームのうち、シンクロトロンで受け取ることのできる成分のみ選択的に通し、位相空間のマッチングを取り、シンクロトロンへ導くものである。

図44にLSBTラインの概要を示す。全長で約80mであり、7台の偏向磁石と26台の四極磁石から構成される。全偏向角は、 $116^\circ$ である。この配置は、施設全体の造成、ライナックビームを利用する将来の拡張スペース、切り土の堅固な地盤、ライナックビームダンプの遮蔽などを考慮した結果決められたものである。LSBTラインは、3つのセクションに機能を分けて考えることがで

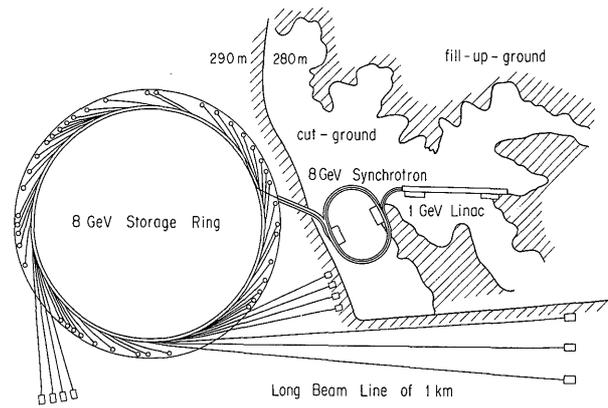


図43 放射光施設SPring-8の全体配置図

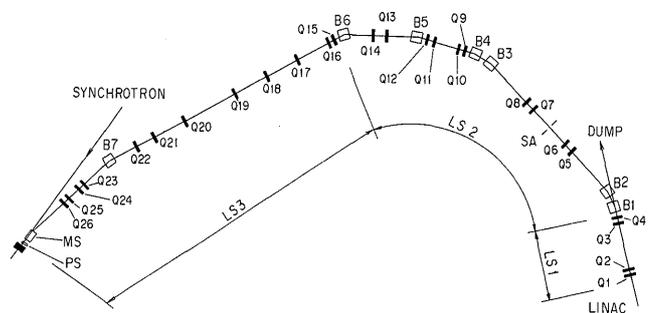


図44 ライナック-シンクロトロン間ビーム輸送(LSBT)ライン

きる。最初のセクションLS1は、2セットの四極ダブレットから構成されており、これ以降ビームの質がライナックの状態に依存しないようにLSBTラインとのマッチングを取り、かつ、ビームをコリメータSAの位置に収束させる。セクションLS2は、 $90^\circ$  偏向させるとともに、分散関数を消す。B1は、ライナックのビームをLSBTラインに導くスイッチングの役割をするとともに、B2とともに分散を発生させている。水平方向に可変のコリメータSAによって、ビームの運動量を選択する。運動量の分解能は、0.06%である。最後のセクションLS3は、Q19からQ22を使ってシンクロトロンとのマッチングをとるとともに、ビームをセプタム磁石まで導く。B7とセプタム磁石MS、PSとは、Chasman-Green型の

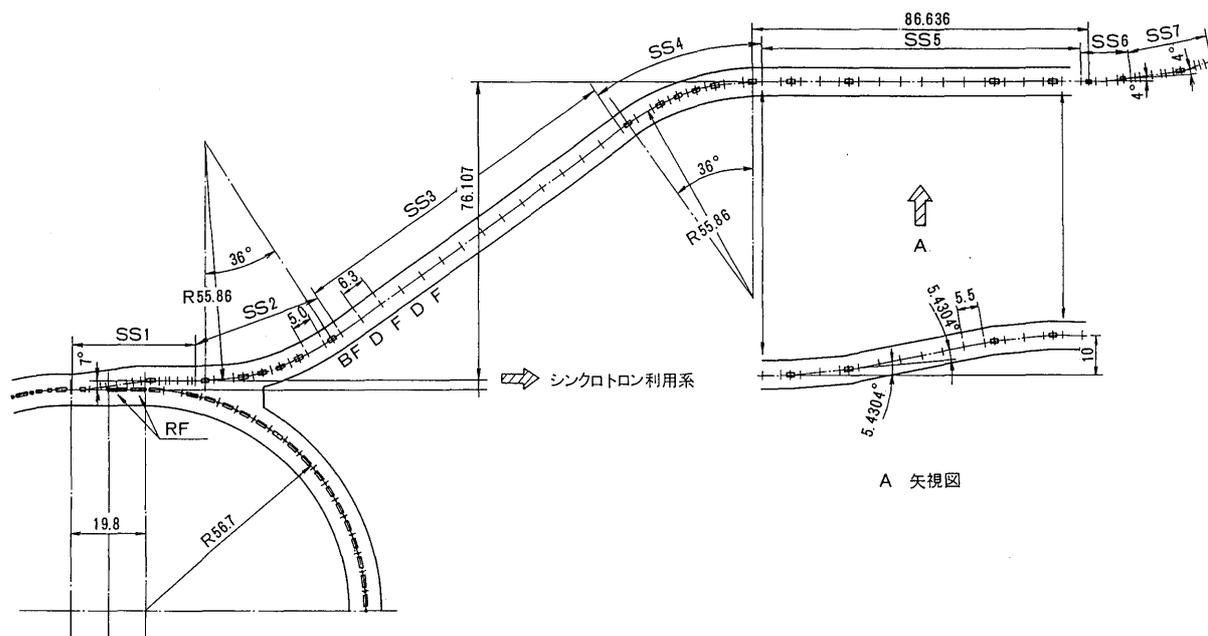


図45 シンクロトロン-蓄積リング間ビーム輸送(SSBT)ライン

磁石配置となっており<sup>28)</sup>、シンクロトロン入口で分散をゼロとしている。

### 3.2 SSBTライン

SSBTラインは、シンクロトロンからの8 GeVのビームを位相空間のマッチングを取って、蓄積リングまで導くものである。蓄積リングとシンクロトロンのレベルが10m差があることから、まずシンクロトロンを出たビームは地下のトンネルを通して蓄積リングの内側に入り、それから10m上昇し、いったん水平に戻されたあと内側からリングに入射される。

図45にSSBTラインの概要を示す。全長が約330mであり、20台の偏向磁石と75台の四極磁石から構成される。SSBTラインは、7つのセクションに機能を分けて考えることができる。最初のセクションSS1では、4つのセプタム磁石を使ってシンクロトロンからビームを引き出すとともに、これ以降ビームの質がシンクロトロンの状態に依存しないようにSSBTラインとのマッチングをとる。セクションSS2、SS4、SS6では、

進行方向を曲げるとともに、分散関数を零に戻している。磁石の配列は、FODOタイプを採用した。セクションSS3は、長い直線部である。セクションSS5で10m上昇し、蓄積リングのビームの高さに合わせる。最後のセクションSS7では、蓄積リングとのマッチングを取って、セプタム磁石までビームを導く。セクションSS7の偏向磁石と蓄積リングのセプタム磁石とは、Chasman-Green型の磁石配列となっており、蓄積リング入口で分散をゼロにしている。

### IV. おわりに

SPring-8の設計はまだ確定していない部分があり、また現在進行中の開発研究の結果により変更される部分も出るであろう。しかし基本的な構成は本稿で述べたとおりで、これに従って、1990年度から建設が始められることになった。現在のところ、文献1)で述べた建設年次計画より2年遅れることになっている。

利用計画については、文献1)で述べたように「検討委員会」が検討・評価することになってお

り、その下部委員会である「利用小委員会」で検討が進められている。一方、「菊田研究会」では具体的な研究計画案を作成し、「利用小委員会」に提案する予定である。その内容については「大型放射光施設計画(Ⅲ)」として本誌に発表されることになろう。

## 参考文献

- 1) 上坪宏道: 日本放射光学会誌、第2巻第4号(1989)69.
- 2) K. Tsumaki, R. Nagaoka, L. Yoshida, H. Tanaka, and M. Hara: Proc. Particle Accelerator Conference Chicago 1989, to be published.
- 3) M. Hara, S. H. Be, R. Nagaoka, S. Sasaki, T. Wada and, H. Kamitsubo: Proc. Particle Accelerator Conference Chicago 1989, to be published.
- 4) R. Nagaoka, H. Tanaka, K. Yoshida, K. Tsumaki, and M. Hara: RIKEN Accel. Prog. Rep. vol. 22, 248(1988)
- 5) Y. Kamiya and M. Kihara, KEK 83-16(1983) .
- 6) M. Hara, S. Be, T. Kusaka, Y. Lee, H. Miyade, Y. Morimoto, S. Motonaga, R. Nagaoka, T. Nishidono, J. Ohnishi, Y. Oikawa, S. Sasaki, H. Takebe, I. Takeshita, H. Tanaka, K. Tsumaki, T. Waba, S. Yokouchi, K. Yoshida, T. Yoshiyuki, and H. Kamitsubo: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 352 (1989) .
- 7) K. Yoshida, H. Tanaka, R. Nagaoka, K. Tsumaki, and M. Hara: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 293(1989) .
- 8) R. Nagaoka, K. Yoshida, H. Tanaka, K. Tsumaki, and M. Hara: Proc. Particle Accelerator Conference Chicago 1989, to be published.
- 9) K. Tsumaki, R. Nagaoka, H. Tanaka, K. Yoshida, and M. Hara: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 290(1989) .
- 10) R. Nagaoka, K. Tsumaki, H. Tanaka, K. Yoshida, and M. Hara: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 296(1989) .
- 11) K. Tsumaki, R. Nagaoka, H. Tanaka, K. Yoshida, and M. Hara: RIKEN Accel. Prog. Rep. vol. 22, 259(1988)
- 12) M. S. Zisman, S. Chattopadhyay, and J. J. Bisogno: LBL-21270, UC-28(1986)
- 13) J. Ohnishi, Y. Oikawa, and S. Motonaga: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 296(1989) .
- 14) H. Miyade, H. Tanaka, J. Ohnishi, and S. Motonaga: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 83(1989) .
- 15) T. Kusaka, T. Yoshiyuki, T. Moro, and M. Hara: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 83(1989) .
- 16) 裏頼喜、横内茂、森本佳秀、坂本浩幸、西殿敏朗、李英白、老川嘉郁・第30回真空に関する連合講演会1989
- 17) S. H. Be, S. Yokouchi, Y. Morimoto, T. Nishidono, Y. P. Lee, and Y. Oikawa: Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology Osaka, 133(1989) .
- 18) T. Harami, H. Yokomizo, H. Ohtsuka, T. Shimada, K. Yanagida, K. Mashiko, H. Yoshikawa, H. Suzuki, H. Kabasawa, K. Nakayama, H. Hashimoto, K. Ashida, T. Ishida, K. Yamada, M. Iizuka, S. Harada, Y. Suzuki, H. Kamitsubo: Proc. of the XIV Int. Conf. High Energy Accelerators, (Tsukuba, 1989), to be published.
- 19) N. J. Norris and R. K. Hanst: Proc. 1969 Particle Accelerator Conf., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-16 (1969) 323.
- 20) K. Tsumori, J. Ohkuma, T. Sawai, N. Kimura, S. Okuda, T. Yamamoto, T. Hori, S. Takamuku, S.

- Suemine:Proc.14th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1989)12.
- 21) H.Matsumoto and Linear Collider Study Group:Proc.13th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1988)46.
- 22) S.Kurokawa:Catalogue of High Energy Accelerators, (1989) .
- 23) H. Yonezawa,S.Miyake,K.Gonpei,Y.Ohkubo, K.Ohya,T.Okamoto,H.Baba,S.Isagawa:Proc. 14th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1989)228.
- 24) 設楽哲夫、穴見昌三、斉藤芳男、福田茂樹、田中治郎、益子勝夫：第5回リニアック研究会報文集(1980)114.
- 25) 大沢哲、三橋利行：日本放射光学会誌、第2巻第4号(1989)23。  
G.Stange:IEEE Trans.Nucl.Sci.NS-26(1979) 4146.
- 26) 中山光一、糀沢光昭、原見太幹、島田太平、横溝英明:JAERI-M 89-173 (1989) .
- 27) B.Dwersteg,E.Seesselberg,A.Zolfaghari: IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-32 (1985) 2797.
- 28) R.Chasman and K.Green:Proposal for a National Synchrotron Light Source,BNL 50595 (1977) .