

DESIGN OF ELECTRO-MAGNETS FOR XFEL/SPring-8

Kenji Fukami^{A)}, Hideki Takebe^{B)}, Toru Hara^{B)}, Toru Fukui^{B)}, Noritaka Kumagai^{B)}

^{A)} SPring-8 Joint-Project for XFEL/JASRI

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{B)} SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

The X-Ray Free Electron Laser (XFEL/SPring-8) is scheduled to be completed by 2010. This facility consists of a low-emittance electron injector, S-band and C-band 8GeV linacs, three chicane-type magnetic bunch compressors and the undulator section for FEL interaction. Beam optics of the linac and the undulator sections will be controlled by 103-quadrupole magnets. The bunch compressors have 12-dipole magnets. Beam orbit will be corrected by 104-steering magnets. This paper describes the outlines of design concept for quadrupole, dipole and steering magnets.

XFEL/SPring-8用電磁石の設計

1. はじめに

XFEL/SPring-8は、入射器部、S-band、及びC-band 加速管で構成される8GeV線型加速器と5本の並列したアンジュレータビームラインから成り、オングストロームオーダーの大強度X線を発生する。本計画は2010年完成を目標としている。実現性についての検証を行うため、電子エネルギーが250MeVの試験加速器による真空紫外FEL (SPring-8 Compact SASE Source, SCSS) が2002年よりスタートしており、本計画に必要な様々な技術開発が行われている[1]。

アンジュレータ区間の四極電磁石のアライメントは非常に厳しい精度が要求されるため、電磁石用架台をマイクロオーダーで安定化させる必要がある。試験加速器では、熱膨張係数が小さい($2 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]$) コーザーライト・セラミック製架台を、平坦度 $10\mu\text{m}$ まで研磨した1m四方のコンクリート床面に設置し安定化試験を行った。四極電磁石についてはCavity型BPMと一体で設置し、電子ビームやアンジュレータ放射光を用いてアライメントを行う方法を検討している。

また、XFEL/SPring-8では、偏向電磁石4台を用いた3ヶ所のシケイン型バンチコンプレッサ (以下、BC、低エネルギー側からBC1~3)、アンジュレータビームライン間に電子ビームを振り分けるパターン励磁偏向電磁石なども配置する予定である[2]。ここでは、XFEL/SPring-8線型加速器とアンジュレータビームラインに使用する四極電磁石、BC部とビームライン間の振り分け用偏向電磁石、ならびに電子ビーム軌道補正用のステアリング電磁石について概略の設計が完了したので報告する。

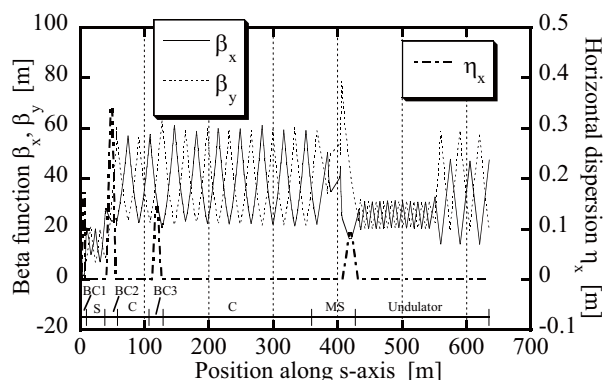


図1. 入射器出射部からのオプティクス。実線と点線はそれぞれ水平方向、垂直方向のベータ関数、一点鎖線は水平方向のディスペーションを示す。

2. 電磁石の設計

2.1 四極電磁石

線型加速器とアンジュレータビームラインのベータ関数、及びディスペーションを図1に示す[2]。加速によるエネルギーの変化に合わせて磁場強度別に5タイプ分けた (表1)。電磁石の振動を抑制するため、コイルは全て空冷とした。ボア径は全て27mmとした。鉄芯材には飽和磁束密度が高い純鉄を使用する。

BC1~3はそれぞれ入射器部下流 (30MeV)、S-band加速器部下流 (413MeV)、及びC-band加速器の途中 (1.448GeV) に設置する。それぞれのBC部下流側一部の四極電磁石はビームの収束系を形成する目的のほかに、Quad-scan法によりエミッタンスを測定するために用いる。これらの電磁石は双極型電源で励磁する。

アンジュレータ部にはType-d (表1) を設置する。

断面図を図2に示す。FEL発振に必要なビーム軌道の直線性を確保するため、50 μ m以内の設置精度が要求される。このタイプは磁場測定の際に磁場中心と機械中心の間の関係を厳密に求める予定である。

表1. 四極電磁石の仕様

Type-Num.	Flux [AT/pole]	Field [T]	Length [m]
a	14	3.0x96	0.194
b	15	5.0x108	0.090
c	17	10.0x84	1.70
d	21	10.0x84	2.36
e	36	20.0x48	6.08

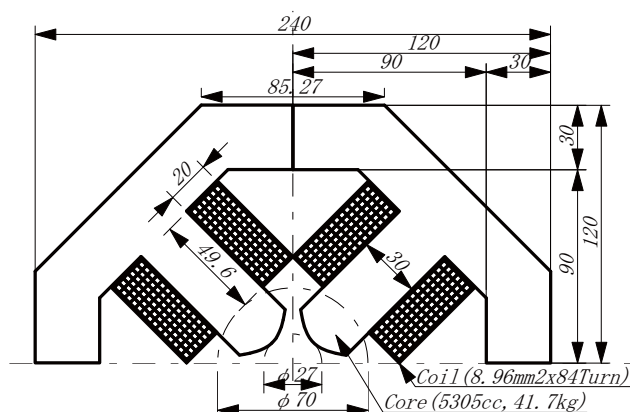


図2. 四極電磁石Type-dの断面図(上側半分)。他のタイプの電磁石のメディアムプレーンからの高さは、Type-a,-b,-c,-e=100,105,120,130mmである。

2.2 偏向電磁石

偏向電磁石の仕様を表2にまとめた。ギャップ寸法は全て27mmとした。表中のType-a,-c,-dはそれぞれBC1~3用のシケイン軌道形成用電磁石である。また、C-band加速管で発生したダークカレントがアンジュレータに入射するのを防ぐため、アンジュレータ上流にBCと同じ構造のシケインを設置する。この区間にはType-fの電磁石を用いる。これらの電磁石の鉄芯材は、飽和磁束密度が純鉄並みに高く、且つ保磁力の低いアルミ含有純鉄とした。

Type-b,-gはそれぞれBC1部、最下流部のダンプ用電磁石である。Type-eはアンジュレータビームライン振り分け用電磁石である。現状の設計では、ビームライン1本とビーム調整用ライン間の振り分けを行なうが、将来的には5本のビームライン間の切り替えを行なう。また、パターン励磁する可能性があるため、このタイプのみ鉄芯を積層鋼板とした。コイルの冷却方式はType-a~cが空冷、Type-d以降はホロコンによる水冷とした。

BC1の機器配置図を図3に示す。最上流の偏向電

磁石でディスパーションを発生させてエネルギー分散を水平方向位置に変換したうえでコリメータを用いて不要ビームをカットする。シケイン内のビーム軌道長はエネルギー依存性を持つので、適切なエネルギーチャープを電子ビーム内に与えておくことによりバンチ長を圧縮することができる。シケイン内偏向電磁石の水平方向収束力によるシケイン下流へのディスパーションの漏れを防ぐため、電磁石の形状をRectangular型とした。

電子ビームは最上流の偏向電磁石の端部に垂直に入射するため、偏向電磁石出口ではビームは磁極中心から水平方向に19.72mmずれた位置を通る。BC部でのエミッタンス悪化を避けるため、偏向電磁石磁場には水平方向 ± 30 mmの範囲で 10^{-4} 以内の平坦度が要求される。これを達成するため、鉄芯断面形状はポール幅150mmのH型を採用し4台を直列励磁する[3]。さらに4台の個体差を打ち消すため、独立した補助コイルを4台それぞれに巻き、ディスパーション補正に用いる。補助コイルによる磁場は最大定格磁場の5%とした。磁石の断面図を図4に示す。

水平方向の磁場分布をコード“MAFIA”により計算した結果を図5に示す。計算の結果、シムなしでも磁場の平坦度は確保されるが、適切なシムを入れれば ± 40 mmの範囲で 10^{-5} オーダーの平坦度が確保できることがわかった。

表2. 偏向電磁石の仕様

Type-Num.	Flux [AT/pole]	Field [Tm]	Length [m]
a*	4	20.0x40	0.0249
b	1	20.0x240	0.150
c*	4	20.0x150	0.0936
d*	4	600.0x8	0.150
e	2	600.0x16	1.60
f	4	600.0x10	0.299
g	4	600.0x28	5.25

*BC部の偏向電磁石

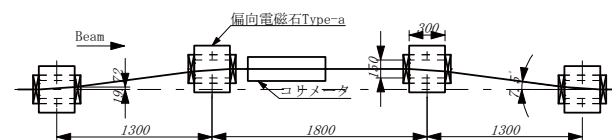


図3. BC1部機器配置図。

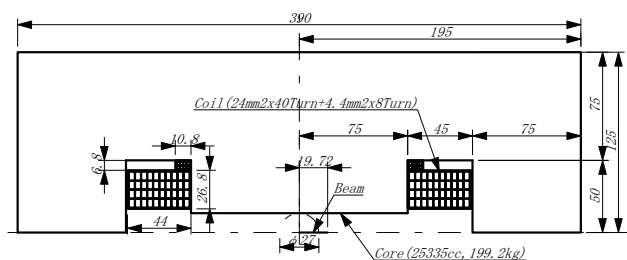


図4. BC1部偏向電磁石 (Type-a) の断面図 (上側半分)。コイルは、上側が補助コイル、下側がメインコイルを示す。

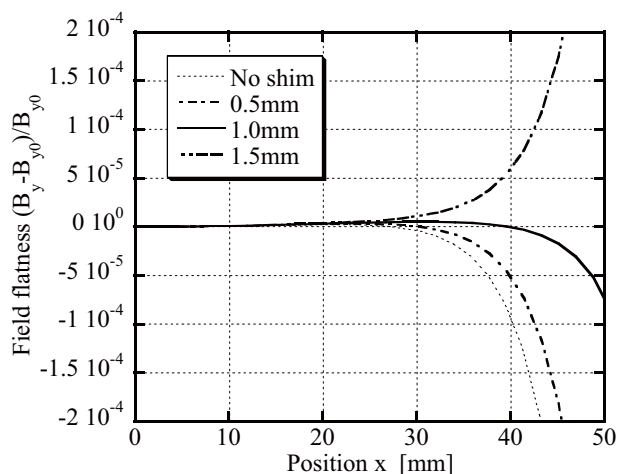


図5. 偏向電磁石Type-aのメディアムプレーン上の水平方向磁場分布。点線はシム無しの場合の計算結果を示す。その他は、ポール両端部に幅5.0mmのシムを入れた場合の計算結果を示す。

2.3 ステアリング電磁石

ステアリング電磁石は分散関数の発生を抑えるため、地磁気の2倍程度を目安に、必要最低限の補正に必要な強度としている。ビーム進行方向に空間的余裕に合わせ、水平、垂直方向一体型のコンバインド型または独立なセパレート型を選択した。ステアリングは運転時の調整頻度が高いため、鉄芯材にはヒステリシスの小さいパーマロイを用い、コイルは全て空冷とした。ステアリング電磁石についての仕様を表3にまとめた。ギャップ寸法は、付近の空間的干渉を考慮しタイプ別に異なる値とした。

セパレート型の断面図、上面図を図6に示す。この電磁石はC-bandの加速管と加速管の間のスペース13ヶ所に設置する。このスペースには、この他、四極電磁石、BPM、OTR、ゲートバルブ等の機器が設置される予定であるが、このスペースが短くすれば加速器の全長を大幅に短縮することができる。ベローズをギャップに挟み込む構造とし、図に示すような形状、寸法とすることで、スペースの全長を806mmまで短縮させることができた。

表3. ステアリング電磁石の仕様

Type- Num.	Flux [AT/pole]	Field $\times 10^{-3}$ [Tm]	Length [m]	
a*	32	3.0x160	1.42	0.025
b	12	3.0x100	0.603	0.040
c	38	3.0x84	0.304	0.040
d	22	3.0x218	1.41	0.050

*水平、垂直方向Separate型。その他はCombined型

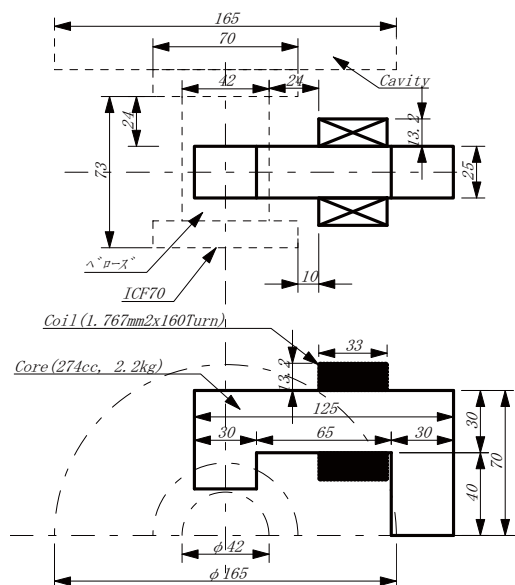


図6. セパレート型ステアリング電磁石 (Type-a) の上面図 (上) と断面図 (下)。他のTypeの電磁石のギャップ寸法は、Type-b,-c,-d=60,100,70mmである。

3. 今後の課題

BC部の偏向電磁石では、ビームは磁石の片方の端部に対して傾きを持つので端部で多極成分の影響を受けてBC下流区間にディスパーションが漏れる原因となる。端部での磁極形状についての検討を行い、多極成分を抑制するつもりである。

各電磁石の磁場測定方法の検討を行う。特に、アンジュレータ部の四極電磁石はアライメントのトレランスがもっとも厳しいので、磁場中心と機械的中心との関係を厳密に測定する方法について検討する。

参考文献

- [1] T.Shintake, et. al., "Status of the SCSS Test Accelerator and XFEL Project in Japan", Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, June 2006.
- [2] T.Hara, et. Al., "XFEL/SPring-8ビームパラメータの基本設計", in these proceedings.
- [3] H.Takebe, et. Al., "XFEL/SPring-8電磁石電源の設計", in these proceedings.