

## XFEL ELECTRO-MAGNETS AND THEIR EXCITATION CHARACTERISTICS

Yutaka Kano<sup>1A)</sup>, Toru Hara<sup>B)</sup>, Hideki Takebe<sup>B)</sup>, Kenji Fukami<sup>A)</sup>, Noritaka Kumagai<sup>B)</sup>

A) SPring-8 Joint-Project for XFEL/JASRI

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

B) SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

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

### Abstract

The production of the electro-magnets for XFEL/SPring-8 was completed in July 2010. According to the beam acceleration in the linac, the field strength and size of the magnet is varied with the beam energy. In order to reduce the cost of the production, a pure iron block was chosen as yoke material except for the steering magnets. Since the iron block yoke shows non-negligible residual fields and eddy current effects, the excitation of the magnet should be controlled with a fixed current pattern. For the steering magnets, which will be used for orbit feedback, permalloy with a low residual field is used as the magnet yoke. In this presentation, we report the overview of the XFEL/SPring-8 magnets and the results of the magnetic field measurements, particularly reproducibility of the field by a pattern excitation.

## XFEL電磁石の概要とパターン励磁特性

### 1. はじめに

SPring-8では、2011年春のビーム運転に向けX線自由電子レーザー施設(XFEL/SPring-8)の建設が進められている<sup>[1]</sup>。XFEL/SPring-8では、熱電子銃とバンチャーを組み合わせた入射部を採用しており、ディフレクターで切り出した1ナノ秒のビームを、入射部におけるvelocity bunchingと3カ所の磁気バンチ圧縮器によってバンチ長を数百フェムト秒に圧縮しつつ、電子ビームを8 GeVまで加速する。このとき電子銃の初期エミッタンスを増大させることなく加速、バンチ圧縮し、アンジュレータまで導かなければならない。

XFEL/SPring-8で使用する電磁石は、ビーム軌道制御とビーム収束の機能が分離されており、所謂複合型電磁石は使用していない<sup>[2]</sup>。空間電荷効果を無視できない1 MeV以下のビームに対しては、離散的な磁気レンズを用いて軸対称にビーム収束を行い、エミッタンスの悪化を防ぐ。1 MeV以上に加速されたビームの収束には、四極電磁石を用いる。バンチ圧縮器などのシケインを構成する偏向電磁石は、エネルギー分散関数の漏れによるエミッタンスの実効的な増加を防ぐためヨークを長方形型とし、エンドシムを用いて多極磁場成分の補正を行っている<sup>[3]</sup>。

電磁石の設置は、レーザートラッカーでアライメントした定盤上の基準面に電磁石底板側面を押し当ててすることで、デザイン軌道に対する電磁石の位置精度を確保しつつ、設置作業の簡素化をはかっている。

またアンジュレータ部の四極電磁石には、ビーム軌道に対して特に厳しい位置精度が要求されるため、隣接するRF-BPMと四極電磁石の相対位置をワイヤーアライメントにより合わせた後、これらと同じ可動ステージ上に載せることで、デザイン軌道に対しミクロンオーダーの位置精度を実現する。なお磁場中心がある四極電磁石については、冷却水の振動がビームに与える影響を抑制するため、コイルをすべて自然空冷方式としている。

本報告では、XFEL/SPring-8で用いる電磁石の概要と、パターン励磁による磁場の再現性について報告する。

### 2. 電磁石の概要

蓄積リングと異なり、線形加速器では加速によって増大する電子ビームエネルギーに合わせて磁場強度を上げなければならない。よって電磁石の製作も少量多品種となる。電磁石ヨーク材の選択肢にはいくつかあるが、コスト面から電磁純鉄のブロック材を採用した。電磁石は基本的にDC励磁で用いるが、純鉄ブロック材の場合残留磁束密度が大きいだけでなく、磁場の時間変化率が異なると渦電流の大きさが変わり励磁特性に影響を与える。このため、磁場再現性の点からパターン励磁は必須である。但し、電子ビーム軌道調整用ステアリング電磁石については、フィードバック等に用いることを考慮し、残留磁場特性に優れたパーマロイをヨーク材として用いている。製作した電磁石は、磁気レンズ2種類10台、四極電磁石5種類114台、偏向電磁石7種

<sup>1</sup> E-mail: kano@spring8.or.jp

類 28 台およびステアリング電磁石 5 種類 121 台である。

電磁石電源の制御は、SPring-8 で開発・利用されている VME 用 field Bus である光 IO module を、電源シャーシ組込型に改造したカードモジュール(i-DIO)を用いて行う。i-DIO カード 1 枚で 2 チャンネルの電源を制御し、i-DIO 内の FPGA を利用して電流監視機能やローカル操作機能などを実現している<sup>[4]</sup>。



図 1. 8 GeV 用四極電磁石

### 3. パターン励磁による磁場再現性の確認

磁場再現性の確認は、可搬型 VME 上の shell プログラムで作成した励磁パターンを用いて電磁石を励磁し、磁場をホール素子で測定することによって行った。このときの電流の時間変化率は、VME を用いて一定になるよう制御する。測定に用いた電源の電流再現性は、 $1 \times 10^{-4}$  以下である。以下いくつかの電磁石について、測定結果を紹介する。

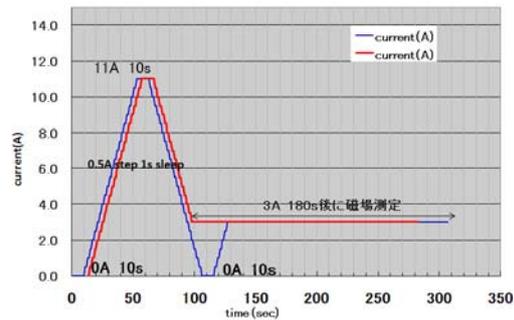


図 2. 設定電流 3 A に対する 2 種類の励磁パターン

#### 3.1 8 GeV用四極電磁石

XFEL アンジュレータ部で用いる四極電磁石 (図 1) の主なパラメータを表 1 に示す。磁場測定は、磁極中心から水平 10mm の位置にホールプローブをセットし行った。設定電流 3A に対し、非励磁状態から電流を上げてセットした場合と、最大電流から下げてセットした場合 (図 2) の磁場の比較を表 2 に示す。この場合磁場に約 2%のずれが生じていることから、励磁パターンの固定は必須である。

表 3 は、正負の最大電流で電磁石ヨークに残留磁場を与えた後、正の最大電流で励磁、その後電流を 3 A まで下げた結果を比較したものである (図 3)。この結果から、一度最大磁場まで上げた後電流をセットするパターンを用いれば、ユニポーラで使用する通常四極電磁石の場合、0.1%以下の精度で磁場の再現性を確保できることが確認された。

電流をセットする前に、複数回最大励磁を繰り返した場合についても測定したが、図 3 の 1 回励磁と有意な差は見られなかったため、図 3 の励磁パターンを採用する予定である。

表 2 : 2 種類の励磁パターンによる磁場の差

設定電流	11A→3A (mT)	0A→3A (mT)	差 (%)
3A	47.036	46.128	1.93

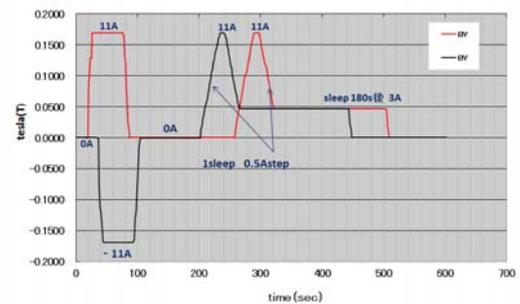


図 3. 四極電磁石の励磁パターン

表 3 : 残留磁場の差の影響

設定電流	正の最大電流励磁後 (mT)	負の最大電流励磁後 (mT)	差 (%)
3A	47.166	47.111	0.11

表 1 : 8 GeV 用四極電磁石の主要パラメータ

磁極長	185 mm
ボア直径	27 mm
最大電流	11 A
最大磁場勾配	15.1T/m
有効長	199 mm

### 3.2 3 GeV 暗電流除去シケイン用偏向電磁石

偏向電磁石の磁場は、電子ビーム軌道に直接影響を与え、電子パンチ圧縮にも関係するため、四極電磁石よりも高い再現性が求められる。図4は、C-band 加速管途中の3 GeV 地点に設置する、暗電流除去シケインに用いる偏向電磁石である。表4に主なパラメータを示す。

電磁石中心の磁場を、図3のように一度最大励磁を行った後電流をセットして測定し、再現性を確認した。結果を表5に示す。偏向電磁石の場合、四極電磁石と異なり、磁極ギャップ中心付近での磁場均一性がよいため、ホールプローブ位置など測定系のエラーが乗りにくい。表5の結果から、偏向電磁石の磁場の再現性は、十分な精度で確保されていることを確認した。

表4：暗電流除去用偏向電磁石の主要パラメータ

磁極長	300mm
最大電流	20A
偏向角	0.162deg
最大磁場	0.11T
有効長	329mm



図4. 3 GeV暗電流除去シケイン用偏向電磁石

表5：暗電流除去シケイン用偏向電磁石磁場の再現性

設定電流	1回目 (mT)	2回目 (mT)	差 (%)
15A	83.253	83.247	0.007
5A	28.412	28.414	0.007

### 3.3 8 GeVビームダンプ用偏向電磁石

アンジュレータを出た8 GeV電子ビームは、ビームダンプ用偏向電磁石(図5)で垂直方向に20°曲げられ、床下のビームダンプに廃棄される。ダンプ用偏向電磁石の主なパラメータを表6に示す。この電磁石は、磁場が約1.5 Tと高いため、ギャップ部

付近のヨークを飽和に近い状態で使用する。ダンプ用偏向電磁石についても、一度最大磁場まで上げた後電流をセットすれば、表6に示すように約0.02%程度の磁場の再現性が得られることを確認した。

表6：偏向電磁石の主要パラメータ

磁極長	6660mm
最大電流	600A
偏向角	20deg
最大磁場	1.48T
有効長	6850mm

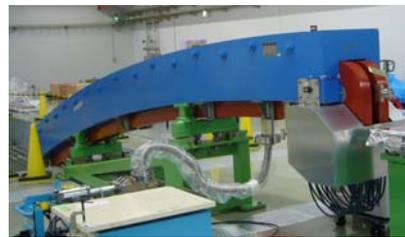


図5. 8 GeVビームダンプ用偏向電磁石

表6：ダンプ用偏向電磁石磁場の再現性

設定電流	1回目 (mT)	2回目 (mT)	差 (%)
541.9	-1396.56	-1396.32	0.017
464.5	-1226.86	-1226.62	0.019
387.1	-1026.74	-1026.57	0.016

### 3.4 8 GeV用ステアリング電磁石 (Combined型)

XFELで使用するステアリング電磁石は、設置スペースに制限のあるC-band加速管部を除いて、x-yを1台にまとめたcombined型を採用している(図6)。ステアリング電磁石は他の電磁石と異なり、軌道フィードバックなどで頻りに極性や設定値を変化させる必要がある。このためヨーク材は、残留磁場が小さくヒステリシス特性に優れたパーマロイ(PC-2)を使用し、パターン励磁を行わなくても十分な磁場再現性が得られるよう設計した。

表7は、加速器の8 GeV部分で用いるステアリング電磁石の主なパラメータである。表8に、励磁電流を正負の最大電流間で変化させたときの磁場のヒステリシスを示す。測定した磁場は、地磁気などの環境磁場を含んでいるため、正負の同一電流値における磁場が異なっているが、これを除けば0.02%以下の精度で再現性が確保できている。

表 7: ステアリング電磁の主要パラメータ

磁極長	40 mm
最大電流	3A
最大磁場	0.011T
有効長	142mm



図 6. 8 GeV 用ステアリング電磁石

表 8: ステアリング電磁石のヒステリシス

設定電流	0A→±3A (mT)	±3A→0A (mT)	差 (%)
1.2A	4.6595	4.6596	0.0021
1.8A	6.9998	7.0003	0.0071
2.4A	9.3389	9.3386	0.0032
-1.2A	-4.6899	-4.6908	0.019
-1.8A	-7.0322	-7.0329	0.009
-2.4A	-9.3739	-9.3743	0.004

#### 4. 今後の予定

磁場測定によって得られたパターン励磁の結果はおおむね良好であり、磁場の再現性は必要な精度を実現できている。一部の偏向電磁石については、電子ビームを真っ直ぐ通過させる無励磁状態を求められており、バイポーラ補助電源を用いた消磁パターン等の確認を行う必要がある。これらの測定は、電源と制御系の環境が整った時点で、XFEL 加速器トンネル内において行う予定である。

#### 参考文献

- [1] <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/index.html>
- [2] Kenji Fukami, et al., “DESIGN OF ELECTRO-MAGNETS FOR XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 3, p.805 (2007).
- [3] Toru Hara, et al., “ESTIMATION OF EMITTANCE DEGRADATION DUE TO MULTI-POLE FIELDS OF XFEL BUNCH COMPRESSOR”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5, p.585 (2009).
- [4] Hideki Takebe, et al., “Test Operation of Magnet Power Supply and Control System for XFEL/SPring-8”, in these proceedings.