

GEOMAGNETIC SHIELD FOR ENTRANCE AREA OF UNDULATORS AT SACLA

Hideki Aoyagi^{#, A)}, Teruaki Hasegawa^{B)}, Teruhiko Bizen^{A, B)}, Yoshihiro Asano^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

^{B)} RIKEN Harima Institute
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

In SPring-8 XFEL "SACLA", it is necessary to steer the electron beam orbit that passes through in-vacuum undulators on a straight line in high accuracy to obtain an enough laser amplification. This can be achieved by a beam-based alignment. In this method, two BPMs are installed at interval of about 8m at the entrance area of undulators to determine the reference orbit. It is necessary to suppress a geomagnetic field of 0.4G to about 1/100 in this area so that the electron beam goes straight. We report on the magnetic shielding of the vacuum equipment such as an ion pump, vacuum ducts, and the halo monitor.

SACLA 挿入光源入口部の地磁気シールド

1. はじめに

SPring-8 XFEL "SACLA"において、レーザー増幅を十分に得るには、真空封止型挿入光源の中を通過する電子ビーム軌道を、 $\pm 4\mu\text{m}$ の精度で直線に定める必要がある。これは電子ビームを用いた Beam-based Alignment [1, 2]により実現される。この方法では、アライメントの基準となる参照軌道を規定するために、挿入光源入口部に2台のBPMが約8mの間隔で設置されている。この区間は、電子ビーム軌道のエネルギー依存性を排除し、かつ、電子ビームが直進するように、地磁気などの環境磁場を約1/100まで抑える必要がある。本稿は、イオンポンプや真空ダクトなどの真空機器と、新しく開発したハローモニタ[3]の磁気シールドに関する報告である。

2. 基本方針

SACLA 挿入光源入口部における磁気シールドの基本方針を以下に示す。(1) イオンポンプや冷陰極真空計など、磁気を帯びた機器は可能な限りビーム軸から遠ざけると共に、漏えい磁場を防ぐために軟鉄などを用いて各機器を個別にシールドした。(2) ビーム軸近傍で使用する素材は比透磁率がほぼ1のものを用い、磁場の集中を抑制した。例えば、真空ダクト、クロスポートなどは、SUS316Lで製作されている。(3) 環境磁場を遮蔽するために、飽和磁束密度と非透磁率が高いシート状の素材(日立金属社, "ファインメット®" [4])を用いて、直接、真空ダクトやベローズなどの機器に巻きつけた。磁気シールドの方法として、パーマロイ等の磁性材料を用い

て、対象区間全体を一重~三重に囲うことも考えられる。しかし、機器の保守性や磁場の影響を抑えるのはビーム軸上のみで良いこと、さらに遮蔽材料の重量や良好な加工性および施工性の良さを考慮して、"ファインメット®"に決定した。本製品は、文房具として使われているハサミやカッターで成形することが出来る点も大きな利点である。最後に、(4) 将来に亘って機器のメンテナンスの際に、地磁気シールドの取り外し・取り付けを繰り返すことを想定し、再現性のある施工を行なうこととした。

3. 各機器の地磁気シールド

3.1 測定手順

磁気シールドによる遮蔽効果を評価するためには、1mG程度の低磁場まで測定する必要がある。測定器は、磁場のベクトル成分を高精度で測定できるフラックスゲートメーター(MEDA社, FVM400 [5])を主に使用した。測定レンジは $\pm 1\text{G}$ 、確度 $\pm 0.025\% \pm 0.05\text{mG}$ 、分解能 0.01mG (いずれもカタログ値)である。測定素子サイズ(□25mm×長さ100mm)の都合により、直径22mmの真空ダクトやハローモニタのビーム軸上を測定できない場合は、別のフラックスゲートメーター(Bartington社, MAG-03MC [6])やホール素子(測定素子サイズ□5mm)を用いた測定器(Lake Shore社, 460型[7])で代用した。ホール素子での測定では、環境温度による表示値の大きな変動がみられたので、測定点毎に素子反転によるゼロ点補正を行ない、その影響を1mG程度に抑えた。

[#] aoyagi@spring8.or.jp

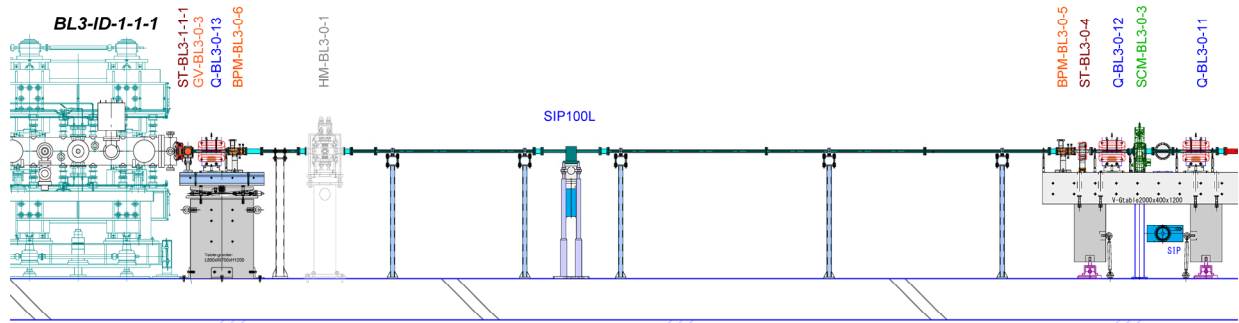


図 1：挿入光源入口部の機器配置図（対策前）。電子ビームの進行は右から左。真空計はイオンポンプでの引き口に取り付けられている。ハローモニタの設置予定場所も図に示している。

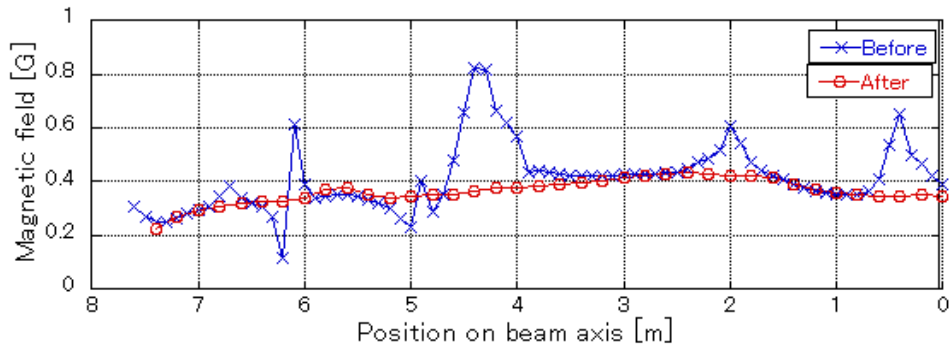


図 2：挿入光源入口部の磁場分布（対策前と対策後）。横軸の原点は上流側 BPM が設置される石定盤の下流端。

3.2 環境磁場の均一化

遮蔽区間の対策前の機器配置図を図 1 に示す。上下流に 2 台の BPM とイオンポンプ、真空計、ハローモニタがそれぞれ 1 台ずつ設置され、これらは真空ダクトおよびベローズで接続される。

遮蔽区間の磁場分布を図 2 に示す。環境磁場は主に地磁気によるもので、最大 0.43G であった。また、鉄製支持装置や真空機器周辺では、磁場が集中し、最大 0.82G という高い値を示した。

この局所的に高い磁場を抑制するため、前節(1)で述べた対策を施した結果、地磁気レベルで一様に分布する状態にまで改善した。

3.3 真空ダクト

真空ダクトはパイプ外径 25.4mm で、両端に ICF70 ハイブリッドフランジを有する。フランジを除くパイプ部分には、遮蔽シートを直接巻きつけ遮蔽した。

この様な磁場中に置かれた中空円筒遮蔽体の内部磁場は、次式のように表され、遮蔽体の磁気特性と形状因子で決定される。

$$\frac{B}{B_0} = \frac{4\mu_r}{(\mu_r + 1)^2 - (\mu_r - 1)^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2}$$

ここで、 B_0 は一様磁場の強さ(地磁気 0.43G)、 μ_r

は遮蔽体の比透磁率 (ファインメット 70000)、 a は遮蔽体内半径 (12.7mm)、 b は遮蔽体外半径 (12.7+T mm、T=遮蔽体厚み) である。

計算値と実測値を図 3 に示す。実測値は、測定素子のサイズの都合により、パイプ径 $\phi 48$ までスケールアップした塩化ビニル製模擬パイプに遮蔽シートを巻いて磁場測定した結果である。遮蔽材部分の厚みは 18 μm あり、巻き数を 7 巻きまで増やして評価した。比較のため、パイプ径 $\phi 48$ と $\phi 25.4$ に遮蔽シートを巻いた場合の計算値を示す。

パイプ径 $\phi 48$ の実測値では、計算値よりも内部磁場が低くなり、高い遮蔽効果を確認した。また、目標である 0.004G 以下を達成するには、3 重巻きで良いことが分かった。実際は、遮蔽シート幅 460mm を有効に使用するため、約 6 重巻きとした。計算によると、真空ダクトと同じパイプ径 $\phi 25.4$ の場合は、さらに低い磁場も期待できる。

この遮蔽方法は、遮蔽シートの内部に真空ダクトが存在し、真空ダクト自体の磁場が懸念される。そこで、同じ材質で製作された真空ダクト $\phi 38$ の内部磁場を測定した。フランジ溶接部近傍で最大 0.010G、パイプ部で 0.004G 以下という結果を得ており、真空ダクト自体による大きな影響はない。

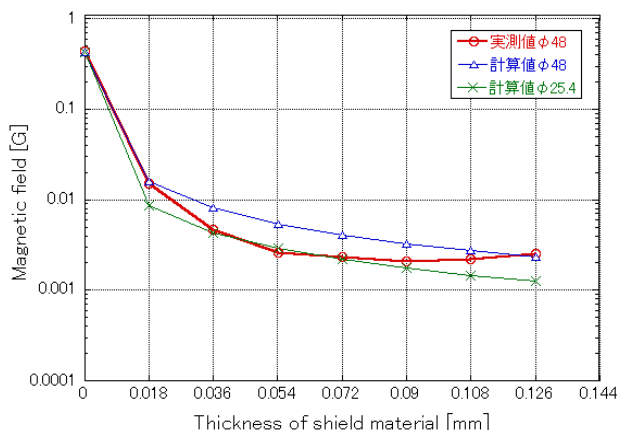


図3：磁気シールドによる遮蔽効果

3.4 フランジ部及びベローズ

フランジ部およびベローズは、フランジを締結した後、上記同様に遮蔽シートを重ね巻きした。フランジ部の遮蔽構造を図4に示す。事前に巻いた真空ダクト部の遮蔽シートと後から巻く遮蔽シートは、開口部の磁場侵入の影響を考慮して、8cm以上のオーバーラップを設けた。

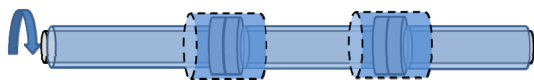


図4：フランジ部の遮蔽構造

3.5 ハローモニタ

ハローモニタの構造を図5に示す。本モニターは、φ70の円筒型真空容器の中心部に上下二つのポート(ICF70)を備え、ダイヤモンド検出器を装着することが出来る。側面にはメンテナンス用のビューポート(ICF70)も備えている。また、検出器を駆動するために、ステッピング・モータをモニター本体の上部に取り付けている。このモニターの地磁気シールドのために、モニターの躯体、及び、ダイヤモンド検出器のホルダー部品をSUS316L、若しくは、アルミに変更することにより、磁場の集中を抑制した。しかし、ステッピング・モータ、ボールねじ、ガイドレール等の一部については、材質を変更することが出来なかった。そこで、円筒型真空容器に直接シート状のファインメットを8重に巻きつけ、磁場の影響の及んでいる部材が外側になるようにした。しかし、前述のように長い円筒形状の地磁気シールドは容易であるが、本モニターの場合、中央部に3か所のビューポート及び検出器用ポートがあるため、その開口から磁場が回り込んでしまい、ファインメットだけで地磁気の影響を抑えるのは困難であった。

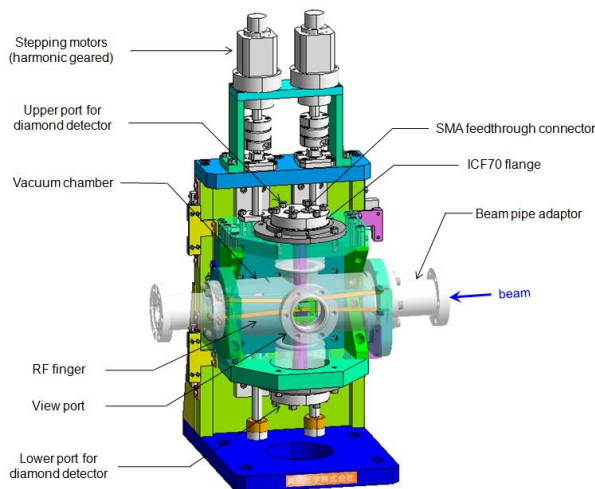


図5：ハローモニタの構造図

従って、その影響を最小限に抑えるために、ハローモニタ全体を軟鉄製のシールド・ボックスで覆うことにより、ベースとなる地磁気の影響を数分の1に抑えることとした(図6)。ステッピング・モータは局所的に数 Gauss 程度の磁場が発生しており、この磁場成分がビーム軸上に影響を与えないようにするため、ステッピング・モータをシールド・ボックスの外に出した。

シールド・ボックスの材質は、構造材としても良く用いられるSS400で、厚さは磁束密度の飽和を防ぐために15mmとした。材料は工場より納品された状態では磁化がみられ、ボックス中心部の磁束密度は200mG程度であったので、交流脱磁器により脱磁処理を施した。図7は、シールド・ボックス内における地磁気の減衰を測定した結果を示す。横軸の原点をモニターの中心位置とし、ビーム軸上の片側の磁場成分を示した。横方向(X,Y方向)の磁場成分は、ボックス内で数分の1に減衰していることが分かる。縦方向(Z方向)についても半減していることが分かる。

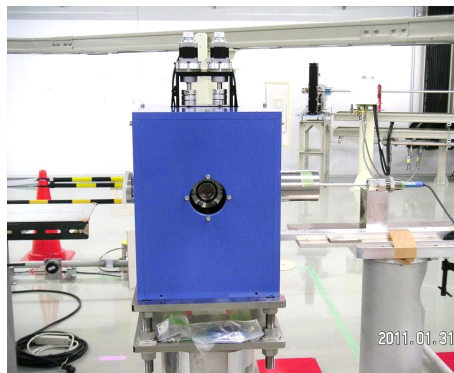


図6：軟鉄製シールド・ボックス。青色に塗装された部分がシールド・ボックス。写真右側より磁場測定用ホール素子を挿入している。

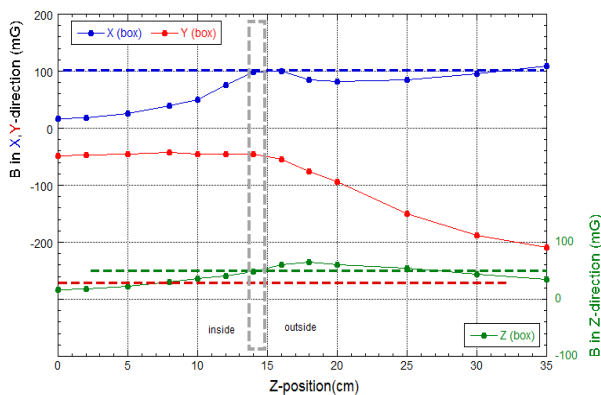


図 7：シールド・ボックス内の磁場測定結果。ボックス内部 ($Z < 13.5\text{cm}$) の磁場が減衰していることが分かる。横軸は、ビーム軸方向の距離で、ボックスの中心を $Z=0\text{cm}$ としている。 $Z=13.5\sim 15.0\text{cm}$ の点線は、SS400 の遮蔽板を示す。

図 8 は、ハローモニタ内部のビーム軸上の磁場測定結果を示す。水平成分(X 方向)については、ビューポートのある真空容器の中心部で、プラスとマイナスの磁場成分が最大 20mG 程度残存した。また、鉛直成分(Y 方向)については、中心部のマイナスの磁場成分が、シールド・ボックスによって低減されていることが分かる。水平、鉛直のいずれの成分も積分磁場としては、ほぼゼロに出来たものと考えている。一方、ビーム軸成分(Z 方向)については、十分な地磁気の抑制を施すことが困難であった。一つの原因として、測定素子 (ホール素子) の Z 成分のゼロ点較正を構造上の問題から正確に実施することが出来なかったことが挙げられる。しかし、Z 方向の磁場成分は電子ビーム軌道に影響を与えることがないので、実質的に問題になることはないと考えている。

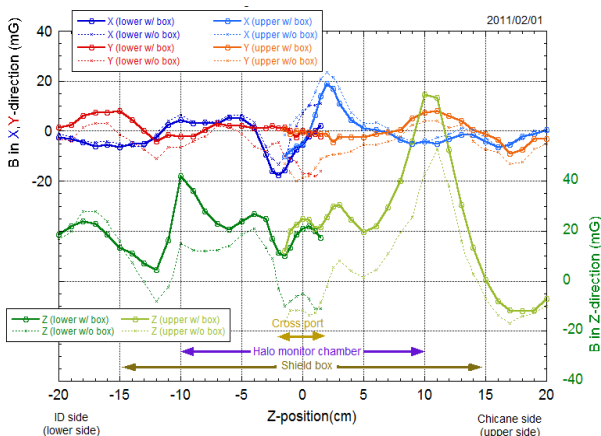


図 8：ハローモニタ内部の磁場測定結果。シールド・ボックスが有る (無い) 場合を実線 (点線) で示す。

4. まとめ

SACLA 挿入光源入口部における磁気シールドを施すために基本方針として、(1) 磁気を帯びた機器は可能な限りビーム軸から遠ざけると共に、軟鉄などを用いて各機器を個別にシールドした。(2) ビーム軸近傍で使用する素材は比透磁率がほぼ 1 のものを用い、磁場の集中を抑制した。(3) ビーム軸近傍の環境磁場を遮蔽するために、飽和磁束密度と非透磁率が高いシート状の素材を直接、機器に巻きつけた。(4) 再現性のある施工を行なった。

その結果、真空ダクト、フランジ、ベローズの各機器において、環境磁場による影響を地磁気の $1/100$ 以下に相当する 0.004G 若しくは、それ以下に抑えることができた。また、ハローモニタにおいては、ビューポートのある真空容器の中心部で、磁場の絶対値の水平成分が最大 20mG 程度残存したが、水平、鉛直のいずれの成分も積分磁場としては、ほぼゼロに抑えることが出来た。

謝辞

今回の磁場測定において SACLA 運転員の加納寛氏に協力して頂いた。また、SACLA 加速器研究開発グループの田中均氏、原徹氏、渡川和晃氏には、ビームオプティクス観点から地磁気シールドの目標値を設定して頂いた。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "A New Beam-Based Alignment of Undulator Segments for X-ray Free-Electron Laser (XFEL)", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [2] R. Yamamoto, et al., "SACLA アンジュレータセクションにおける Beam Based Alignment 法について", in these proceedings.
- [3] H. Aoyagi, et al., "Diamond-based Beam Halo Monitor equipped with RF fingers for SACLA", Proc. of DIPAC2011, Hamburg, Germany, MOOB03.
- [4] <http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm15-h.pdf>
- [5] <http://www.meda.com/FVM400.htm>
- [6] <http://www.bartington.com/mag-03-three-axis-magnetic-field-sensor.html>
- [7] <http://www.lakeshore.com/mag/ga/gm460po.html>