

UNIFORMIZING AN ENVIRONMENTAL MAGNETIC FIELD OF THE INJECTOR SECTION AT SACLA

Taichi Hasegawa ^{#A)}, Yutaka Kano ^{A)}, Shinichiro Tanaka ^{A)}, Takuya Morinaga ^{A)}, Ryo Yamamoto ^{A)}, Yasuyuki Tajiri ^{A)}, Teruaki Hasegawa ^{B)}, Teruhiko Bizen ^{B)}, Kazuaki Togawa ^{B)}, Toru Hara ^{B)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd.

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo 679-5165, Japan

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

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

Abstract

At the low-energy injector section of the x-ray free electron laser facility SACLA, an environmental magnetic field significantly affects quality of an electron beam. However, after installation of the accelerator components, ununiform environmental magnetic field was measured, and it was found that the ununiformity was caused by the vacuum components such as cold cathode gauge and ion pump. In order to solve this problem, we made magnetic shields that effectively confine the magnetic fields generated by these components. By installing the magnetic shields, an environmental magnetic field becomes uniform, and a magnetic field at the beam axis could be almost zero by adjusting a long-coil that was prepared to cancel out the earth magnetic field. In this paper, we report the details of the fabrication of the magnetic shield and the effect of these shields.

SACLA 入射部における環境磁場の一様化対策

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA の入射部は 500 keV 電子銃、238 MHz Pre-buncher、476 MHz Booster Cavity、L-band 補正空洞、L-band APS 加速管、磁気レンズ等で構成される。電子ビームは速度変調バンチングにより約 20 倍に圧縮され、L-band APS 加速管 (L-APS) によりビームエネルギーは 30 MeV 程度にまで加速される。

速度変調バンチングが行われる L-APS 入口迄の低エネルギー領域 (エネルギーが 1MeV 以下) では、地磁気程度 (~0.3 G) の環境磁場でもビームの質に大きく影響を与える。このため、入射部には地磁気を相殺するための補正コイルが導入されており^[1]、さらに、加速器コンポーネント設置前に、コンクリート内部の鉄筋を消磁するといった環境磁場の平坦化が行われた^[2]。

しかし、入射部コンポーネント設置後の環境磁場

分布に大きな乱れがあると、補正コイルによる磁場補正を効果的に行うことができない。そこでコンポーネント設置後の磁場分布測定を行い、どの程度環境磁場が乱されているかを調査し、これを平坦化するための対策を行った。

2. SACLA 入射部の環境磁場分布

ビームの進行方向を Z とした左手系で軸をとり、ビームダクト直上 40 cm (床面から 120 cm) の位置で、加速器に沿って 0.5 m 間隔で磁場測定を行った。測定には三軸のベクトルフラックスゲートマグネットメーター (MEDA 製 FVM-400) を用いた。測定の結果、加速器コンポーネントのインストール後、環境磁場に歪みが現れていることが判明した。歪みの箇所は入射部の Cold Cathode Gauge (CCG) や Sputter Ion Pump (SIP) 等、真空機器の設置場所に対応していることが判明した。図 2 はコンポーネント設置前後の環境磁場の測定結果である。

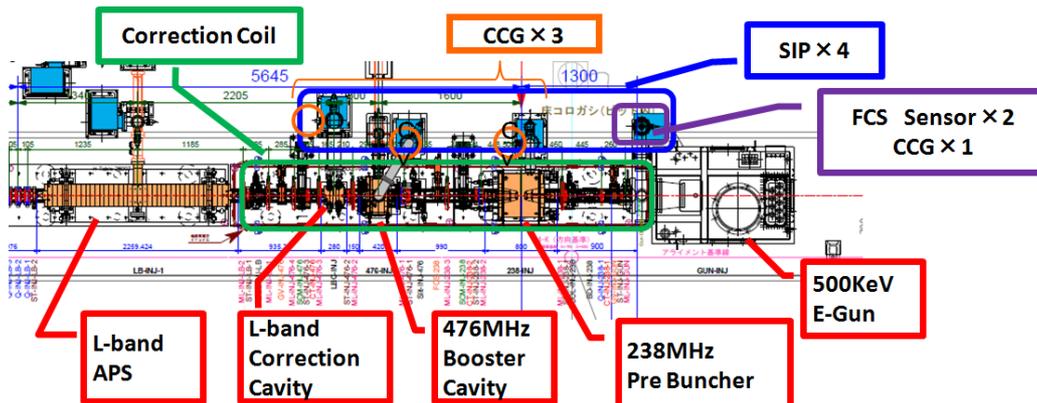


図 1 : SACLA 入射部図面

[#] hasegawa-t@spring8.or.jp

赤のプロットが X 方向、青色が Y 方向、緑色が Z 方向の磁場を表し、白抜きのマーカーが消磁直後、塗りつぶしがコンポーネント設置後の磁場を表している。

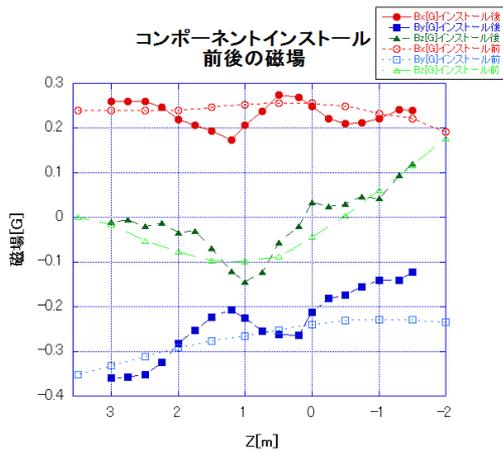


図 2：入射部の環境磁場分布 (238MHz 空洞の中心を Z=0 m としている)

消磁直後に比べ、X 方向で 0.08 G、Y 方向では最大で 0.1 G 程度、真空機器の設置位置に対応する磁場の歪みが見られた。

地磁気補正コイルによる補正 (X、Y 方向のみ、ビームの進行方向である Z 方向に対しては補正を行わない) を効果的に行うには、この磁場分布の乱れを地磁気の 1/10 程度にまで低減する必要がある。このため、入射部真空機器の磁場遮蔽について再検討を行った。

3. 磁場遮蔽の検討

3.1 遮蔽の対象と検討方針

磁場の歪み位置に対応する真空機器は以下の通りである。

- 電子銃直近の Fast Closing Shutter (FCS) 用の HV センサー (VAT 製緊急遮断シャッター Series 77 用高真空センサー HV 冷陰極型×2) と CCG (ULVAC 製 C-11×1) を締結したクロス管(図 1-①)
- CCG (ULVAC 製 C-11×3) 単体 (図 1-②)
- SIP (ULVAC 製 PST-200AXII×4) (図 1-③)

これらの発生する磁場の影響を、ビーム軸付近で 0.01 G 程度に低減させることを目標とした。方法としては、各真空機器の形状に応じて可能な限り強磁性体 (炭素鋼板) によって遮蔽を行うこととし、測定によりその遮蔽効果を評価した。

磁場の測定には三軸のホールプローブ (測定機器: Lakeshore460、レンジ: ±3 G、分解能: 0.001 G) を使い、距離に対する磁場の絶対値をとった。また FCS センサーに関しては、CCG と同程度の磁場が発生するものとして遮蔽を検討した。

3.2 CCG 遮蔽の検討

CCG については、4.5 mm 厚の炭素鋼管 (JISG3444STK400-E-G) による円筒状の遮蔽を適用した場合、同じ材質の鋼板で軸方向を覆った場合 (真空締結やケーブル接続用の穴空きが有る場合と無い場合) のそれぞれの条件について測定を行った。

CCG の半径方向を X 軸、真空締結方向 (ケーブル接続方向) を Y 軸とした軸上の磁場測定結果を以下に示す。

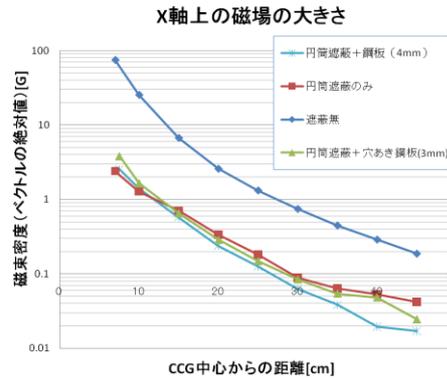


図 3：CCG 磁場測定結果 1 (半径方向)

図 3 は X 軸方向の磁場測定結果である。CCG 中心から 45 cm 程度の距離で、遮蔽無しでは 0.2 G 程度の大きさであった磁場が、円筒遮蔽有のものではいずれも 0.04 G 程度にまで低減されていることが分かる。実際に設置されている CCG とビームダクトとの距離は、最も短いもので 60 cm 程度離れている。従って、CCG 半径方向には厚さ 4.5 mm の円筒遮蔽によって十分な遮蔽効果が得られることが確認された。

Y 軸方向の磁場測定結果を示したのが図 4 である。

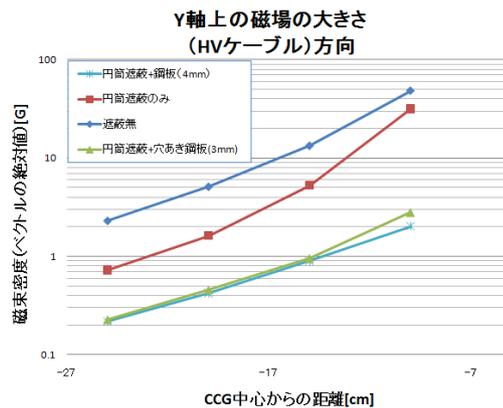


図 4：CCG 磁場測定結果 2 (軸方向)

軸方向は鋼板による遮蔽の有無により顕著に差が表れている。鋼板に穴が空いている場合でも、CCG 中心から約 20 cm 離れたところでは、遮蔽無しで 2 G ほどあった磁場が 0.3 G 程度に低減できており、十

分に遮蔽効果があらわれている。

以上の結果より、CCG 遮蔽については、厚さ 4.5 mm の炭素鋼管による遮蔽に加え、その上下を厚さ 3 mm 程度の鋼板（ケーブル接続部、および締結部は穴開き）で覆う事により、遮蔽効果が改善されることが分かった。

3.2 SIP 遮蔽の検討

入射部に設置されている SIP は製品自体が 1 mm 程度の鉄板で遮蔽されているが、この外側をさらに炭素鋼板で覆った状態で磁場測定を行い、製品そのままの状態を含め、次に示す 3 条件で比較した。

- 製品そのままの遮蔽（1 mm）のみ
- 側面および上面を厚さ 3 mm の鋼板で遮蔽した場合
- フランジ締結部分と SIP 底面を含めた全面を 3 mm 厚の鋼板で遮蔽した場合

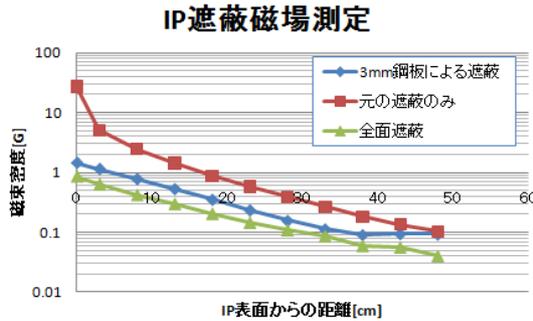


図 5 : SIP 磁場測定結果

測定は SIP の側面中心から面に垂直な方向にとった軸上で行った。イオンポンプ側面の磁場の強さは各面で同様の傾向にあり、元々の遮蔽（1 mm）のみでは、直近では最大 20~30 G であった。面から 30 cm 程度離れた場所で地磁気（0.3G）程度に低下した。図 5 は最も漏れ磁場の影響が大きいと考えられるフランジ開口部に近い側面のデータである。製品そのままの遮蔽でも約 50 cm 離すと、磁場は 0.1 G 程度にまで低減できているが、3 mm 厚の鋼板でさらに外側を遮蔽した場合は、面から約 30 cm の距離で同程度にまで低減されており、鋼板による遮蔽に効果がみられた。

以上の結果より SIP の磁場遮蔽に関しては、3 mm 程度の鋼板で可能な限り側面、および上面を遮蔽することにより、ビーム軸付近への磁場の影響を地磁気の 1/10 程度にまで低減できる事が分かった。

3.3 材質の選択と具体的な形状

実験より遮蔽性能を改善する為の材質選択および加工方法について以下のように決定した。

- 材質は、実験に用いたものと同様の鉄材として炭素鋼板（SPCC）と炭素鋼管（JIS G 3444 STK400-E-G）を使用する。

- 鋼板の厚さは流通材の 3.2 mm、鋼管の厚みは 4.5 mm 厚。
- 鉄材は強磁性体であるため消磁器による脱磁処理を行う。

形状については、以下の通りとした。

- CCG 単体：4.5mm 厚の炭素鋼管で CCG を覆い、ケーブル接続部、及び、フランジ締結部を 3.2mm の穴開き（半）円形鋼板によって遮蔽する。
- 最上流のクロス管部（CCG×1、FCS センサー×2）：フランジに固定したアルミサポートに鋼板の張り合わせ、全体を覆う箱型の遮蔽を行う。
- SIP：真空締結部を除く上面を 2 枚の鋼板の組み合わせで覆い、側面を 4 枚の鋼板で取り囲み L 字型治具で張り合わせる構造とした。以上の遮蔽を製造、設置し再度磁場測定を行った。

4. 遮蔽の設置とその結果

4.1 遮蔽設置後の磁場測定結果

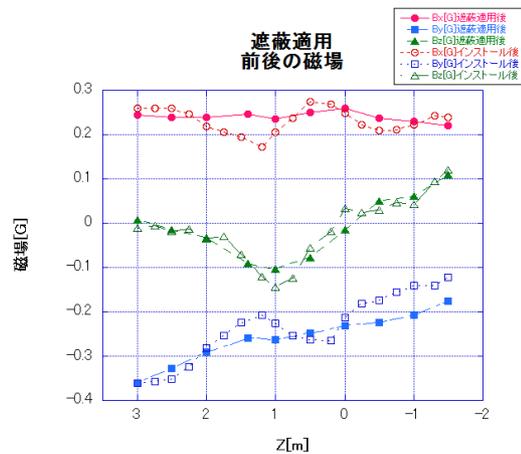


図 6 : 遮蔽適用後の磁場測定結果

図 6 は遮蔽設置後の磁場測定結果である。消磁直後の磁場分布より差分をとると、X 方向は STD、P-P 共に 0.02 G 以下に収まっている。また、Y 方向も STD は 0.02 G 程度であり、地磁気の 1/10 程度のバラつきで、ほぼ消磁直後の状態にまで回復した。

4.2 地磁気補正コイルによる磁場補正

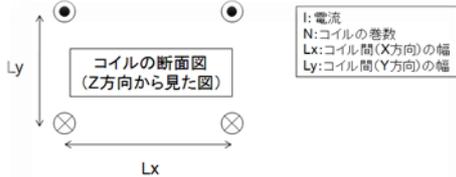
遮蔽による磁場平坦化の効果を確認した後、以下の方針で補正コイルによるオフセット磁場の補正を行った。

- X 方向、Y 方向それぞれで、Background 磁場を測定し、その値がゼロとなる電流値を推定。
- 推定した電流値をコイルに通電した状態で磁場分布を測定し、測定区間での積分磁場を求め。
- 電流値を 10~20%程度変えて、同様の測定を行い、積分磁場がゼロとなる電流値を内挿し求め。

測定から X 方向の Background 磁場の平均は 0.32 G、Y 方向の平均は-0.26 G であった。スタートとして、この磁場を打ち消すように、補正コイルに電流値を設定した。電流値は無限長直線電流による磁界

$$H = \frac{I}{4\pi r}$$

を重ね合わせるにより、図 7 の様なコイルによって囲まれた XY 平面内の中心磁場を考え、磁場（磁束密度）と電流の関係から求めた。



$$B_x[G] = \frac{I_x N L_y}{L_x^2 + L_y^2} (16e-3) \quad B_y[G] = \frac{I_y N L_x}{L_x^2 + L_y^2} (16e-3)$$

図 7：電流値の見積もり

求めた初期値をコイルに設定し、入射部にわたる磁場積分を測定した。さらに、数%電流値を変えて同様の測定を行った。測定結果を表 1 に示す。

表 1：コイル通電時の磁場積分値

| | コイル電流値[A] | 磁場積分[G・m] |
|------|-----------|-----------|
| X 方向 | 4.736 | -0.131 |
| | 3.938 | 0.103 |
| | 3.501 | 0.219 |
| Y 方向 | 2.88 | -0.1435 |
| | 3.168 | -0.0255 |
| | 3.456 | 0.07 |

結果の線形近似より、

$$X : y = -0.2846x + 1.2187$$

$$Y : y = 0.3707x - 1.2073$$

となり、これよりゼロクロス点の電流値は X 方向 4.282 A、Y 方向 3.257 A と求めた。

4.3 コイルによる補正適用後のビーム軸上磁場

遮蔽による環境磁場の平坦化、およびコイルによる最適な補正を行った結果、ビーム軸上での磁場がゼロ付近に補正されていることを確認する為、ビームダクト直近での磁場測定を行った。

図 8 はビームダクト直近における X 方向、Y 方向の磁場測定結果である。白抜きマーカーは磁気レンズ (ML) 直近の点でのデータである。これらの点では X、Y 共に大きく磁場が乱れているが、これは補正を行っていない Z 方向の磁場が、ML ヨークに吸収される影響によるものであり、対称性からビームダクト中心では磁場の歪みは無いものと考えられる (図 9)。これら ML 付近の点を除いたデー

タが、実際のビーム軸中心の磁場データを表してい

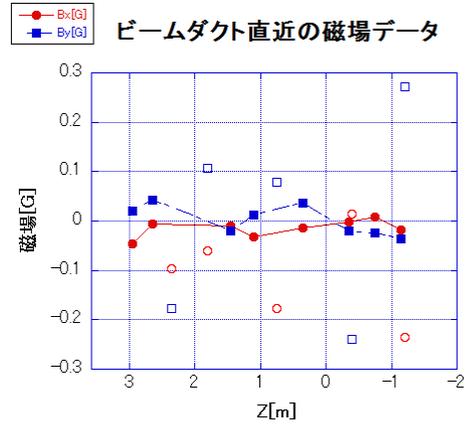


図 8：ビームダクト直近磁場

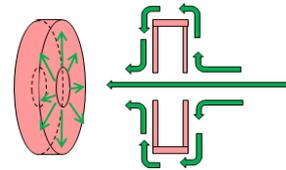


図 9：ML 付近での Z 方向磁場の变化

と考えられる。この統計を表 2 に示す。X、Y 方向共に、磁場は 0.01 G 以下に補正され、さらにバラつきも 0.01 G 程度にまで低減できていることが確認できた。

表 2：補正後のビーム軸上磁場統計

| | X 方向磁場[G] | Y 方向磁場[G] |
|------|-----------|-----------|
| Mean | -0.01 | -0.001 |
| P-P | 0.04 | 0.07 |
| STD | 0.01 | 0.03 |

5. まとめ

SACLA 入射部低エネルギー領域では、ビームの質に影響を与える環境磁場を補正する為、地磁気補正コイルが導入され、磁場の平坦化が行われたが、CCG、FCS センサーおよび SIP 等、真空機器のインストールにより、環境磁場に大きな歪みが生じた。これを解決する為、各真空機器に対し効果的に磁場を低減させる遮蔽体を新規に設置したところ、入射部の磁場分布は地磁気の 1/10 程度のバラつきで消磁直後の状態に回復した。

この状態で地磁気補正コイルを通電し、最適な補正電流値を設定することにより、ビーム軸中心の磁場もゼロ付近で平坦に補正できることを確認した。

参考文献

- [1] H. Hanaki et al., "Construction of Injector System for SPring-8 X-FEL", Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, p.425
- [2] S. Matsui et al., "XFEL 加速器トンネル内の地球磁場と鉄筋の消磁", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.268