

Magnet Design for a High Radiation Area

Hiroshi Fujimori^{1,A)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Shin-ichiro Meigo^{B)}, Yasuhiro Miyake^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801 Japan

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

Abstract

At the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), a 3GeV proton beam is extracted from the Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) and transported through the 3GeV to Neutron Beam Transport (3NBT) line to the Materials and Life Science Facility (MLF). The beamline within MLF is divided into the M1 line where a second muon production target can be installed in the future, and the M2 line which extends from the existing muon production target to the neutron source. The magnets in the M2 line are divided-into two categories as shown in Fig.1; the magnets along the primary line guiding the proton beam to the neutron source, and those installed around the muon production target to transport the secondary muons to the experimental halls. The M2 line will become high radiation area the large amount of radiation originating from the production target. Therefore the magnets near the Muon target were constructed from either hollow conductor Mineral Insulation Cables (MIC) or polyimide cables. The utilities for the magnets (electrical power and cooling water) are connected at a maintenance area, 4m above floor level (FL-4m) and 2.4m above the beamline (FL-1.6m), with no existing joints or connectors below this area. In the event a magnet fails it can be replaced by a spare magnet through remote handling. Between the beamline and the FL-4m, iron radiation shields (plug shields) are installed such that access to the maintenance area is possible during shutdown periods. These plug shields will inevitably affect the magnetic field distribution. Therefore, a careful study of the effects of shielding on the magnetic fields is performed through a non-linear 3D OPERA simulation.

高放射線場における電磁石の設計

1. はじめに

大強度陽子加速器 (J-PARC) において、3GeV陽子ビームは3GeVシンクロトロン (RCS) より出射され、3NBTを経由して物質生命科学研究施設に導かれる。物質科学研究施設内の陽子ビームラインは、ミュオン標的の近傍の放射線強度が極めて高いM2ラインと、将来、第2標的が設置される予定のM1ラインから構成されている。M2ラインの電磁石は図1に示すように、ミュオン標的を通過して中性子源まで陽子ビームを輸送する一次ライン電磁石とミュオン標的でミュオン、パイオンなどの二次粒子を実験ポートまで輸送する二次ライン電磁石に分けられる。特に、標的の近傍の電磁石は、ミュオン標的での粒子散乱により高放射線場になるために、無機質絶縁導体 (MIC) ないしは、ポリイミド導体を用いて製作を行った。また、電磁石への電力および冷却水の供給はビームライン (FL-1.6m) から2.4m上空のメンテナンスエリア (FL-4m) で行い、導体の途中には接続箇所を設けないこととした。重故障の場合は遠隔操作で交換できるような構造となっている。一方、電磁石の上にはFL-4mまで鉄の遮蔽が積まれるため、磁場の一様性に大きな影響を及ぼす。したがって、電磁石の設計には周りの遮蔽を考慮した3次元磁場解析が要求され、我々はOPERA-3dを用いてその最適化をおこなった。

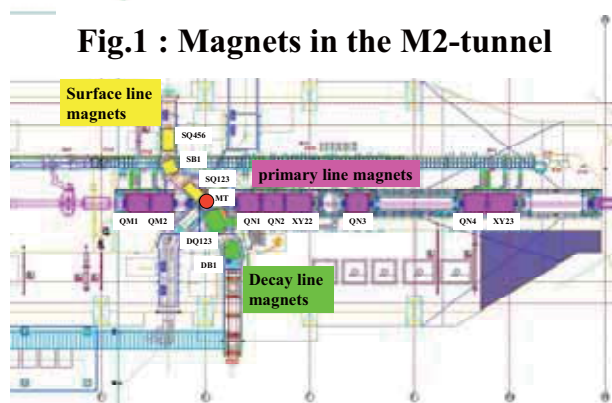


図1 M2ライン (□: 電磁石、赤: 一次ライン、緑および黄: 二次ライン)

2. 電磁石の材質とメンテナンス

M2ラインのミュオン標的の近傍では1kW程度の非常に高いビームロスが予想され、電磁石には高い耐放射線性が要求された。コイルの線材には、図2および表1に示す“無機質絶縁導体”MIC中空タイプ (日立製) が用いられた。このほかに、二次ラインの表面ミュオンチャンネル

¹ E-mail: fujimori@post.kek.jp

の四極電磁石には日立製の実空（間接冷却）タイプ、崩壊ミュオンチャンネルの四極電磁石にはロシア製の中空タイプも使われている。

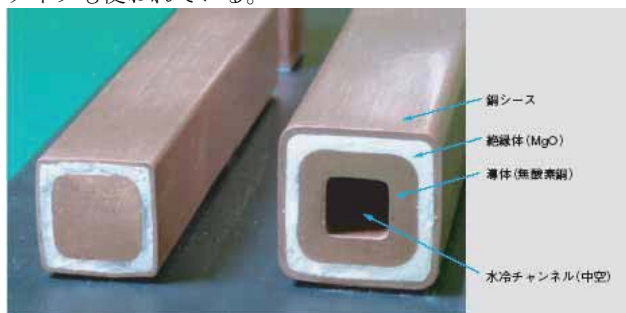


図2 MIC中空タイプ (MIHC-2000A-H)

シース	外径	mm	19.8
	厚さ	mm	0.9
絶縁体	外径	mm	18.0
	厚さ	mm	1.75 ⁴
導体	外径	mm	14.5
	厚さ	mm	3.6
断面積		mm ²	335.1
中空範囲		mm ²	53.1
単位重量		kg/m	2.201
最大長さ		m	60

表1 MIHC-2000A-H 仕様

一次ラインの四極電磁石Q2690MICにおいては、磁極あたり188mのMIC線材が必要であるが、上の表からも分かるとおり製作上60mが限界である。そこで、磁極あたりのコイルを4個のパンケーキに分けて接続することにした。ビームラインレベル (FL-1.6m) は高放射線場となるが、電磁石の上にシールドを積むことにより、FL-4mのエリアではビームのシャットダウン時にメンテナンスが可能である。これより下部では一切継ぎ目のない一連の導体を用いて、FL-4mにて電力および冷却水の接続を行っている。尚、電気は4コイル直列、冷却水は温度上昇を25℃以下にするため、図3のように磁極あたり4並列とし全体で16系統とした。また、インタロックとして用いる流量計（差圧スイッチ）および温度スイッチもFL-4mのエリアに置き、メンテナンス（交換）を可能とした。



図3 端末部：電気的に直列に冷却水が16系統に分けられる導体端部 (FL-4m)

M2ラインの電磁石は全てユニット化されており、重故障の際は電力端子からケーブルを取り外し、冷却水のジョイント (Swagelok) を外すことでプラグ遮蔽ごと上に持ち上げ、交換が可能である。また、床上ピボットおよび壁面ガイドの導入により、作業の円滑性および再現性が、実装作業により確かめられている。図4に実装作業の様子を示す。尚、電磁石に挿入固定されたビームダクトのシールは遠隔脱着機能を有するピローシールにより、実現された。M2ラインの全ての電磁石（一次ライン：四極電磁石6台、水平垂直補正電磁石2セット、二次ライン：四極電磁石トリプレット2セット、偏向電磁石2台）はNECトーキン株式会社（株 トーキンマシナリー）によって製作され、同社による据付も行われた。



図4 一次ライン電磁石 (QM1) 吊り上げ・据付

3. 解析モデル

一次ラインの四極電磁石は、磁極の飽和と上に積まれたプラグ遮蔽体から、磁場分布に大きな影響を受ける。さらに、口径が260mmと大きいと、近接して置かれる電磁石の漏れ磁場 (fringe field) の干渉が予想された。そのため我々は実際に即したモデルで解析をおこなう必要があった。そのとき用いたモデルを図5に示す。

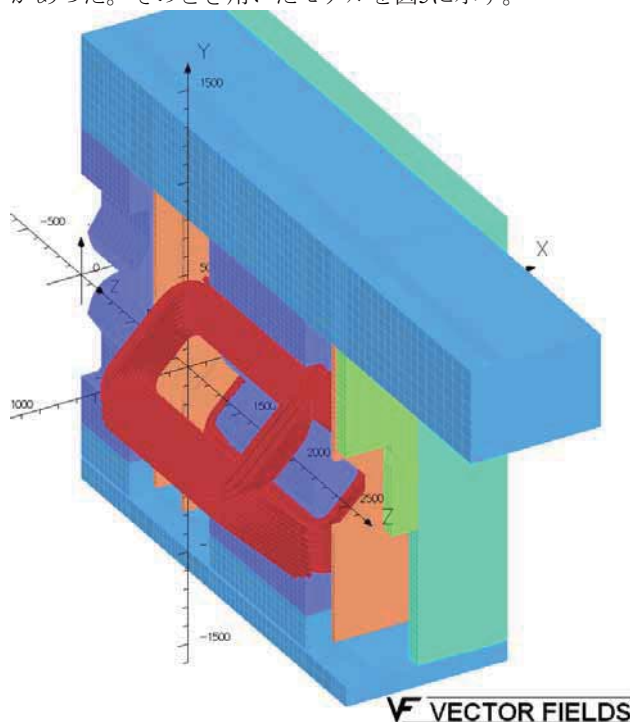


図5 一次ライン四極電磁石の解析に用いた1/2モデル

本モデルでは、できる限り磁場の対称性を保つため、電磁石の下部にも可能な限り磁性体（鉄）を入れて上部プラグとのバランスを図った。隣接する電磁石のfringe

fieldの影響を減らすため、端部シールドも入れている。磁極中の磁束が集中する箇所には純鉄、他の部分にはコスト面からSS400が使われた。磁極にはシムおよび面カットを施して、磁場の最適化が行われた。一方、本モデルはコイルを入れ換えるだけで、一次ラインの二種類の四極電磁石 (MIC、ポリイミド) の解析に対応できる。

4. 結果

計算結果からは、プラグ遮蔽の影響は図6に示すとおりである。プラグ遮蔽を入れることで飽和は緩和され、磁場は強くなるが、Bx成分 (y軸上での分布) において非対称となる。一方、By成分 (x軸上での分布) においての非対称性は見られない。

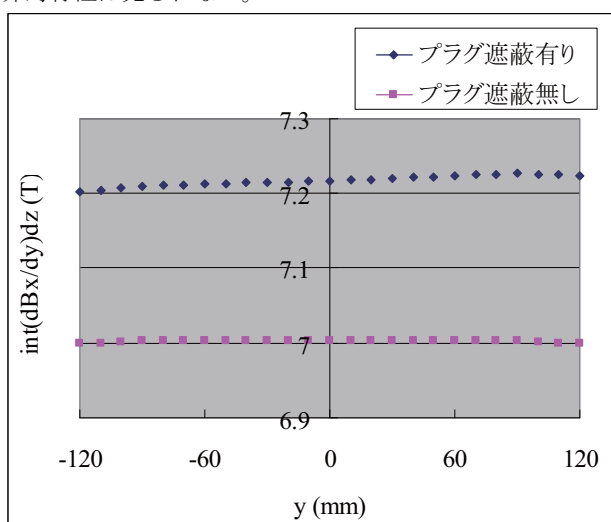


図6 プラグ遮蔽の有無によるBx成分のGL積 (計算値)

次に、(株) トーキョーマシンナリーにて、ホール素子を用いて測定された実測値と、計算値との比較 (Bx成分のGL積) を図7に示す。実測値がGL積で計算値より大きいのは、計算モデルでは近接する電磁石を考慮したのに対し、実測のときには置かれなかったからである。すなわち、ビーム軸方向 (z方向) の漏れ磁場が実測値に影響したものであると思われる。今回は、その検証は行っていない。

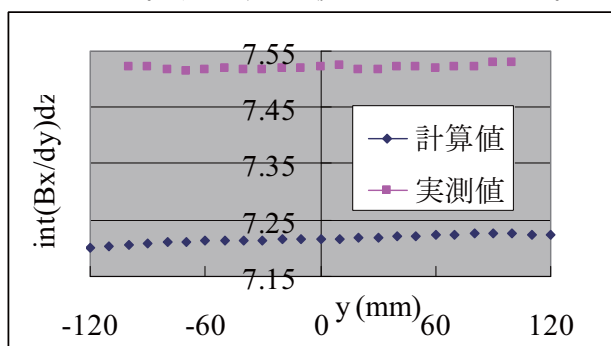


図7 計算値と実測値の比較 (Bx成分のGL積)

GL積の一様性の比較を図8に示す。実測値にばらつきがあるものの、むしろ一様性は実測値の方が良くなっている。ビーム옵ティクスからの要求も概ね満たした。また、補正電磁石は、水平・垂直 (X,Y) のダブレットとして製作され、プラグ遮蔽およびビームダクトを共有し

た一体型となっている。

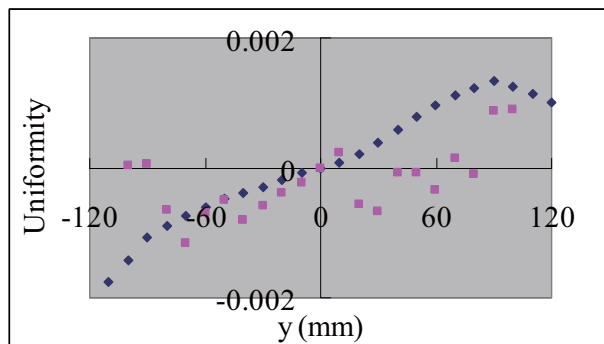


図8 計算値と実測値の比較 (GL積の一様性)

M2ラインの電磁石合計18台の内、一次ラインの10台については、定格での通電試験が終了している。この一次ライン電磁石の主なパラメータを表2に示した。

	単位	Q2690 MIC	Q2690 POL	S2640 MIC	S2630 POL
磁場・勾配	T, T/m	7.93	7.93	0.096	0.13
ボア径	mm	260	260	260	260
磁極長	mm	900	900	400	300
磁極幅	mm	262	262	270	270
良磁場領域	mm	±120	±120	±120	±120
BL, G積一様性		< 3×10 ⁻³	< 3×10 ⁻³	< 3×10 ⁻²	< 3×10 ⁻²
巻数/磁極	turn	49	95	12	36
流量	L/min	130	63	6.2	3.7
電流	A	1098	566	520	200
電圧	V	105	125	4.4	7
全重量	ton	37.4	37.1	56.9	56.1
数量	台	3	3	2	2

表2 一次ライン電磁石のパラメータ (S2640MICおよびS2630POLの全重量は、X,Y一体での重量)

5. まとめ

- ・ミュオンでは高放射線場に置かれる電磁石にMIC線材のコイルが使われ、遠隔操作にて交換が可能な構造としている。また、放射線に弱い計器および全ての接続は、メンテナンスが可能なFL-4mに置かれている。
- ・電磁石設計においては、実際に即したモデルでの解析により、非対称な磁場分布の最適化がおこなわれた。軌道計算からの要求を満たすと共に、実測値との比較においても良い一致が得られた。

参考文献

- [1] Hiroshi Fujimori, et al., Optimization of the field uniformity for large aperture magnets at the J-PARC 3GeV Beam Transport-line (3NBT), Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan)