

Optimization of the field uniformity for large aperture magnets at the J-PARC 3GeV Beam Transport-line (3NBT)

Hiroshi Fujimori^{1,A)}, Shin-ichiro Meigo^{B)}, Shinichi Sakamoto^{B)}

^{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, a 3GeV, 324 π mm*mrad proton beam is extracted from the 3GeV synchrotron (RCS) and transported through the 3NBT line to be used at the experimental hall dedicated to the Material and Life Science Facility. The field uniformity of the magnets along this beam-line as characterized by the field integral must be $dB L/BL < 5E-4$ (dipole magnets) and $dGL/GL < 3E-3$ (quadrupole magnets). The present report will describe the comparison between the calculated and measured field values as well as the study performed in optimizing the magnet design.

J-PARC 3GeV ビームライン (3NBT) における 大口径電磁石の磁場一様性の最適化

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)において、RCS (3GeV シンクロトロン)から出射した陽子ビームは、3NBT (3GeV陽子輸送ライン) を通ってMLF (物質・生命科学実験施設)まで導かれる (図1)。

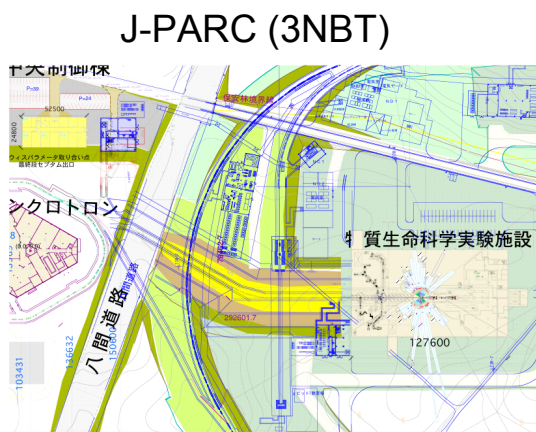


図1 RCSからMLFまでのビーム輸送ライン (3NBT)

3NBTの全長は約 320mで、このラインに110台 (14種類) の電磁石が設置される。この輸送ラインでのビームの最大エミッタンスは324 π mm-mradとなるため、ビームが通るダクトのサイズ (直径) としては最大290mmが必要である。また、ビームロスを抑えるために、

輸送ライン上の電磁石には広い領域での磁場一様性が要求される。

2. 電磁石の磁場と一様性

3NBTのビーム光学から要求される電磁石は、磁場の一様性が広い範囲で要求される一方、クレーンおよびスペースの制限によって大きさの制約を受ける。また、電磁石の間口が大きいためビーム方向への漏れ磁場も大きく、3次元磁場解析が不可欠である。3NBTの電磁石の設計に当たり、多くの実績と高い評価のある磁場計算コードOPERA-3dを用いた。偏向電磁石および四極電磁石の設計に用いた解析モデルを図2.1および図2.2に示す。

計算の効率化のため、1/8対称モデルを用いた。偏向電磁石については、偏向角7.5度、10.3度の2種類の内、7.5度のものを紹介する。尚、偏向角7.5度の偏向電磁石には、水平偏向用と垂直偏向用があり、両者共に広い良磁場領域 (BL積の一様性) が要求される。この要求を満たすため、ウインドフレーム型の磁極にシムを加え、磁場長に影響を与えるビーム方向への漏れ磁場 (fringe field) を制御するためのエンドプレート (シールド) を設けた。一方、四極電磁石については3種類のボア径の内、最大口径 (ϕ 300mm) のものを紹介する。四極電磁石はコストを抑えるため、コイル形状をレーストラック型とし、GL積の一様性を高めるため、磁極のシムに加えてビーム方向に直角な磁極端部に45度のカットを入れた。これらの解析により設計した電磁石のパラメータを表1にまとめた。

¹ E-mail: fujimori@post.kek.jp

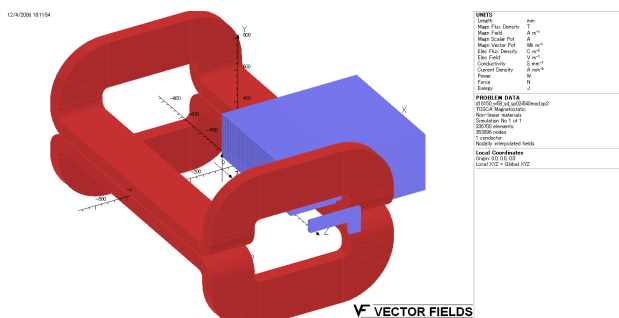


図2.1 偏向電磁石 (D16150) 解析モデル

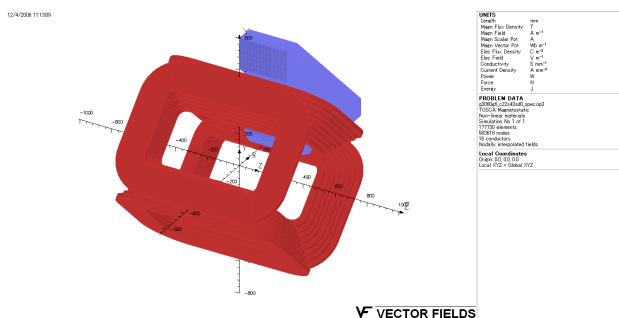


図2.2 四極電磁石 (Q3060) 解析モデル

	単位	D16150	Q3060
偏向角度	deg	7.5	-
磁束密度, 磁場勾配	T T/m	1.11	1~6
曲率半径	m	11.494	-
磁極間隔, ポア径	mm	160	300
磁極長	mm	1500	600
磁極幅	mm	580	290
良磁場領域	mm	±100	±140
BL, GL積の一様性		$< 5 \times 10^{-4}$	$< 3 \times 10^{-3}$
起磁力/磁極	A・Turn	70920	537150
巻数/磁極	turn	120	129
電流	A	591	416
電圧	V	174	128
電力	kW	103	53.4
コイル重量	ton	1.4	1.2
電磁石重量	ton	13.3	7.0
数量	台	7	18

表1 D16150およびQ3060のパラメータ

3. 磁場の最適化

3.1 偏向電磁石 (D16150) のエンドプレートによる最適化

図3.1.1はmedium plane における磁場 (By) について、

エンドプレートのある場合とない場合の比較である。明らかに漏れ磁場の違いがわかる。磁場のプレートへの吸収によりプレート有りのBL積はプレート無しに比べて僅かに小さくなるが、図3.1.2のとおりBL積の一様性はよくなっている。プレートの大きさを変えずに厚さ (10mm, 25mm) および材質 (純鉄, ss400) を変えた場合では、純鉄 (厚さ25mm) が最適である。

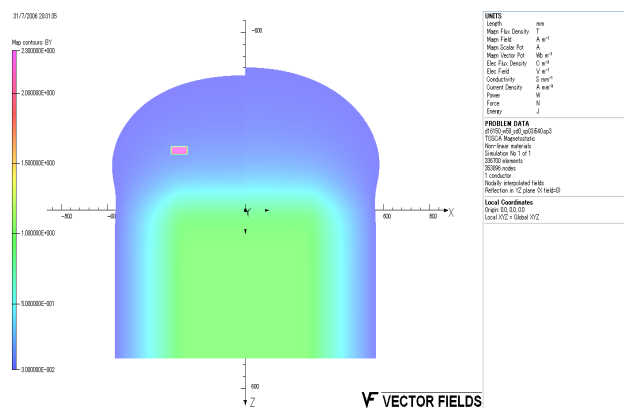


図3.1.1 medium plane上のBy分布
エンドプレート有り (左半分)、無し (右半分)

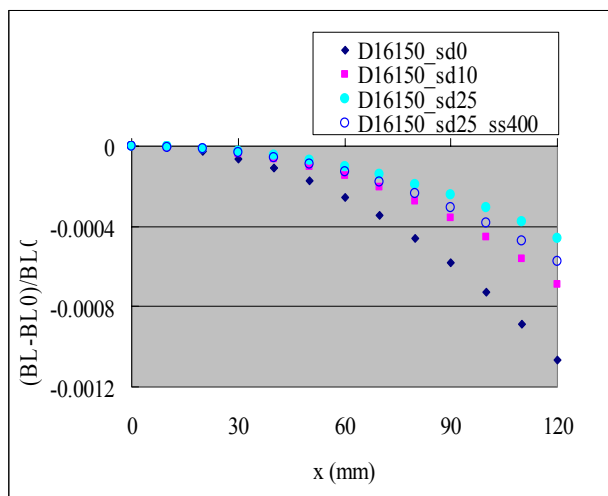


図3.1.2 D16150のBL積一様性

3.2 四極電磁石 (Q3060) のエンドカットによる最適化

Q3060は設置場所により磁場勾配が1~6T/mの範囲で異なる値をとるが、全ての磁場勾配で同じ一様性が要求される。一般にGL積の一様性は磁場勾配の大きさにより変わってくるので、全ての磁場勾配で要求を満たすようなエンドカットを解析により求める必要がある。図3-2.1は磁場勾配の最小, 最大 (1T/m, 6T/m) のGL積、図3-2.2はGL積の一様性を示す。途中の値 (2, 3, 4, 5T/m等) は2つの曲線の間にくるので、解析結果から両者の一様性が要求を満たすエンドカットの最適値は22mmとなった。

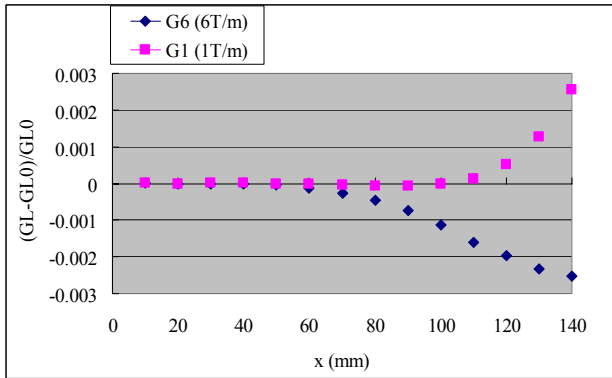


図3.2.1 Q3060 磁場勾配によるGL積の一様性

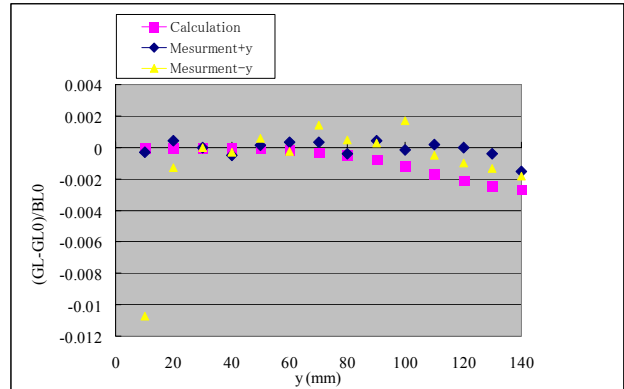


図4.2 Q3060 GL積の一様性
(+y : y>0, -y : y<0)

4. 実測値（ホール素子測定）との比較

4.1 偏向電磁石（D16150）の計算値と実測値

ビーム軌道方向に沿ってByを積分した値（BL積）の比較（図4.1）においてはオプティクスからの要求（ $-100 < x < 100$ において中心軌道のBL積に対する非一様性 $< 5 \times 10^{-4}$ ）を満たした。

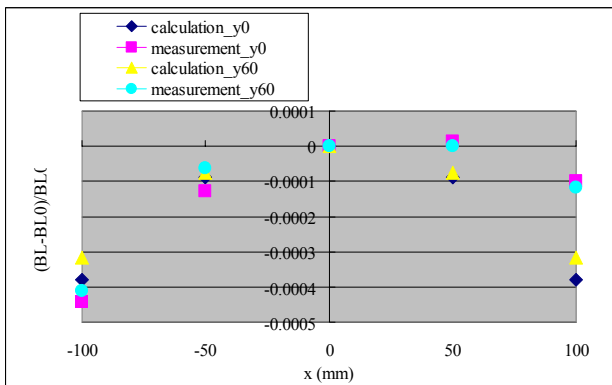


図4.1 D16150 BL積の一様性

4.2 四極電磁石（Q3060）の計算値と実測値

鉛直平面（ $x = 0$ ）の磁場（ B_x ）の分布を比較した。これは四極電磁石の架台（鉄製）が磁場の対称性に影響を及ぼすかを調べるためである。図4.2に示すとおり、 B_x のビーム軌道に沿った分布は架台に近い $y = -140$ と架台から遠い $y = 140$ の位置で対称性もよく、心配された架台が磁場に及ぼす影響は見られなかった。磁場勾配（ dB_x/dy ）のビーム方向に沿っての積分（GL積）についても計算値とよく一致した。実測値に多少のばらつきがあるのは、磁場中を動かすホール素子の変動および分解能（特に電磁石の中心付近において）やミスアライメントの影響と考えられる。四極電磁石においても、オプティクスからの要求（ $-140 < y < 140$ において中心軌道のGL積に対する非一様性は概ね $< 3 \times 10^{-3}$ ）を満たした。一方、水平平面（ $y = 0$ ）の磁場（ B_y ）のx方向に対する磁場勾配（ dB_y/dx ）については、鉛直平面のGL積よりも、さらに良い一様性を示した。

5. 今後の対策

現在、約8割の電磁石が完成し、一部の電磁石は3NBTの上流に設置された（図5）。既に設置された電磁石に対して、さらに一様性を高める手段として、偏向電磁石はエンドプレートの位置調整、四極電磁石は磁極端部に鉄板を貼る（エンドシム）対策が有効である。平成19年には全ての電磁石が3GeVシンクロトロンから物質生命科学研究施設に至る300mを越えるビーム輸送ライン上に並ぶことになり、しだいにその成果が形になりつつあるが、本当の意味で真価が問われるのは実際にビームが出る2年後である。

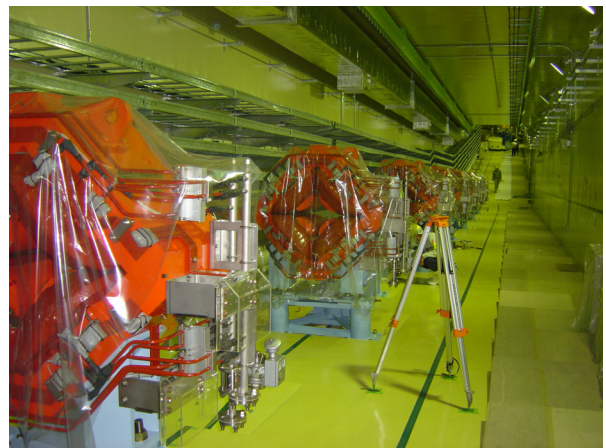


図5 7.5度の傾斜部に並べられた電磁石（下流から）

参考文献

- [1] 坂元真一 他, 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 3GeV 陽子ビーム輸送施設 (3NBT) 技術設計書, JAERI-Tech 2004-020, 2003年3月
- [2] Hiroshi FUJIMORI, et al., ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC (3.2.5 Beam Transport Components to Neutron and Muon Production Targets) KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC 03-01, March 2003