

J-PARC における偏向電磁石 (DB2) 用予備コイル製作のための最適化 OPTIMIZATION FOR MANUFACTURING SPARE COILS FOR THE BENDING MAGNET DB2 AT J-PARC MUSE

湯浅 貴裕^{#, A)}, 藤森 寛^{A)}, 河村 成肇^{A)}, 坂田 茂雄^{B)}, 目黒 学^{B)}, 川端 公貴^{B)}, 池戸 豊^{A)}, 下村 浩一郎^{A)}
Takahiro Yuasa^{#, A)}, Hiroshi Fujimori^{A)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Shigeo Sakata^{B)},
Manabu Meguro^{B)}, Koki Kawabata^{B)}, Yutaka Ikedo^{A)} and Koichiro Shimomura^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd. (NAT)

Abstract

A dipole magnet, called DB2, is installed in Decay muon beamline (D-line) of MLF in J-PARC. Muon beams generated by muon target are bent in the angle of 40 degrees by the DB2 after passing through the solenoid magnet, and transferred to experimental areas. As the DB2 has used over 40 years since its production, we plan to make the spare coils. However, it is difficult to get a hollow conductor with the same cross-sectional shape as existing coil. So we decided to make the coil by using a hollow conductor with same the nominal cross section and external dimensions as the existing coil. For this reason, we came to optimize the parameter of DB2.

1. はじめに

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) における崩壊ミュオンビームラインに設置されている偏向電磁石 (DB2) は製作から 40 年以上が経過しているため、予備コイルの製作を計画している。しかし、現行コイルと同一な断面形状のホローコンダクター (ホロコン) が入手困難なことから、既設コイルと断面形状の若干異なるホロコンを用いて予備コイルを製作する。現行の断面形状 $\square 12 \times 12 - \square 6 \times 6$ と符合するホロコンとして、 $\square 12 \times 12 - \phi 6.5$ が選定され、電気特性のパラメータを比較することによって両者の整合性が確認された [1]。一方、J-PARC における冷却水の流速、温度上昇等の運用条件を満たすようにパラメータを調整すると共に、高運動量ミュオンの輸送に対応できるように水路数の最適化を行い、更に、三次元磁場解析プログラム (OPERA-3d) を用いて磁場の最適化が行われた。

2. 偏向電磁石 (DB2)

Figure 1 に示すように DB2 はミュオン標的から崩壊ミュオンビーム輸送系 (D-line) に導かれたミュオンビームを 40 度偏向させて実験エリアに導く電磁石である。

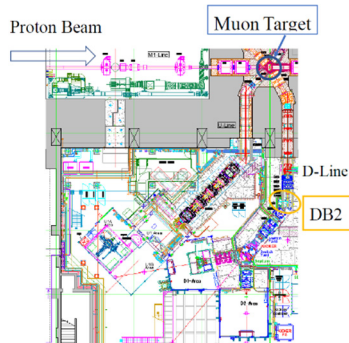


Figure 1: Decay muon beamline (D-line).

実際に D-line から取り出した DB2 と三次元磁場解析プログラム (OPERA-3d) モデルを Fig. 2 に示す。

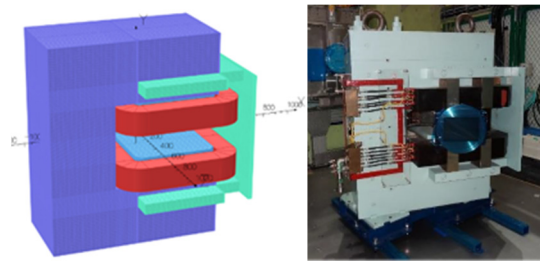


Figure 2: Analysis model (left) and existing DB2 (right).

3. 電磁石パラメータおよび磁場評価

3.1 パラメータの計算

既設 DB2 のホロコンの断面形状は $\square 12 \times 12 - \square 6 \times 6$ であるが、今回製作するコイルのホロコンの断面形状は $\square 12 \times 12 - \phi 6.5$ と形状が異なるので、現行パラメータと比較し、整合性を確認する必要がある。J-PARC においては冷却水の流速、温度上昇等の運用条件が定められているため、新しいコイルのパラメータを計算し、条件を満たすことを確認した。現行および新規コイルのパラメータの比較を Table 1 に示す。今回のコイル製作と共に、高運動量ミュオンの輸送に対しても冷却水の温度上昇を抑えられるよう水路数の最適化も行った。

3.2 磁場評価

新しいコイルによる DB2 の磁場を評価するため、OPERA-3d を用いて解析モデルを作成し、磁場計算を行った。現行コイルにおける磁場測定結果および現行コイルと新コイルの各々を用いた DB2 の磁場計算結果を比較することによって、両者は非常に良く一致していることが確認された (Figure 3)。

Table 1: Comparison of the Parameters between Existing and New Coils

	Existing DB2	New DB2
Cross section of hollow conductor	□12×12-□6×6	□12×12-φ6.5
Cross-sectional area [mm ²]	108	110.8
Number of coil turns [Turns/coil]	120	120
Resistance of coil [Ω] (at 20°C)	0.0588	0.0583
Inductance [H] (calculation)	-	0.204
Number of water channels [water channels/coil]	3	6
Pressure drop [MPa]	0.5	0.5
Water flow [ℓ/min]	15.1	22.3
Maximum output current [A]	510	510
Temperature rise of cooling water Δt[°C]	34	23

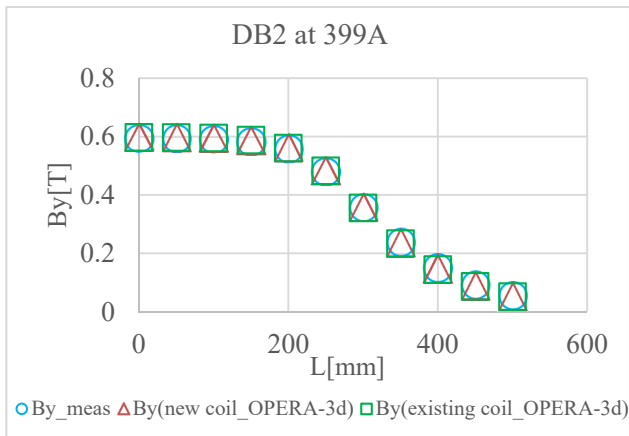


Figure 3: Compare of measurement and calculation of magnetic field of DB2 at 399A.

また、コイルに58Aの電流を流した時の軌道計算を行うことによって、Fig. 4のように27.4MeV/cの表面ミュオンが40度偏向されることを確認した。磁場の評価については、実際に荷電粒子が感じる磁場を反映させるためにBL積を用いた。

$$Bl = \frac{p}{e} \theta = \int B_y dz$$

ここでBLは磁場中の軌道長l [m]に沿ったBL積 (BL)、pはミュオンの運動量[MeV/c]、eは電気素量 [C]、θはミュオンの偏向角[rad]、Byは鉛直(y軸)方向の磁場[T]である。軌道長lを求めるためにFig. 5(a)のように磁極から染み出す磁場(fringe field)を求め、Fig. 5(b)のようにS1=S2となる領域を磁場長Lと定義

すると、磁場長LはFig. 6に示すように770mmとなり、BL=0.0698[T・m]が得られる。

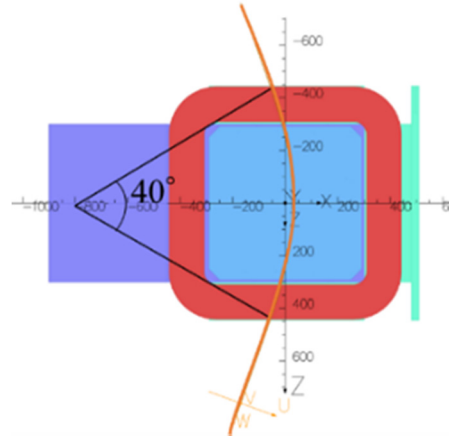


Figure 4: Beam trajectory of surface muon (27.4MeV/c) in the median plane.

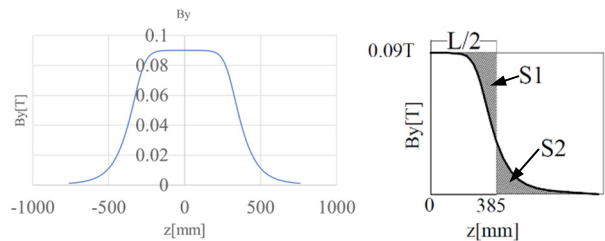


Figure 5: (a) Magnetic field of DB2 along with z axis and (b) Magnetic length is defined by hatched area (S1=S2).

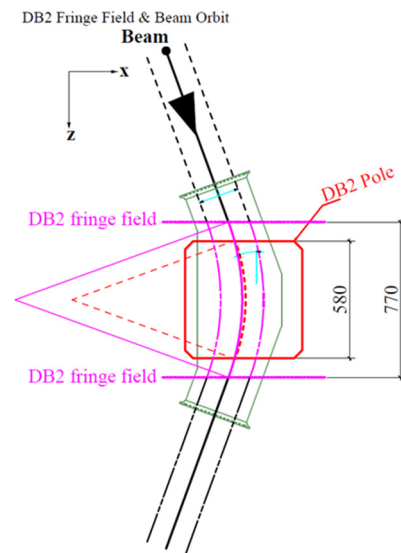


Figure 6: Magnetic length and fringe field.

次に磁場の一様性についての評価を行う。実際のミュオンビームは広がりを持つため、磁場の一様性が要求される。同径方向をrと置き、ビームの中心軌道をr=0として、中心軌道と水平方向X=±80mmの軌

道($X < 0$ は内側軌道を示す)におけるBL積を求め、中心軌道とのBL積の差が 10^{-3} 以内となるように条件を課した。DB2のYokeとEnd-guardの間隔 ($s=170, 180$) およびEnd-guardの厚さ ($d=30, 40$) を変えた場合の比較を行った。Figure 7およびFig. 8にBL積およびBL積の一樣性を示す。これらの比較から、YokeとEnd-guardの間隔およびEnd-guardの厚さを変更することなく、現行の状態で磁場一樣性が $-40 < x < 80$ の範囲内で $\Delta BL < 1 \times 10^{-3}$ を満たしていることが分かった。また、将来的に高運動量のミュオンを偏向する最大電流は510Aを見込んでいる。その際、磁性体 (Pole、YokeおよびEnd-guard) の飽和によって磁場に影響を及ぼさないか、励磁電流240A (120MeV/c相当)と510A (250MeV/c相当)の両方で飽和状態を比較した。その時の励磁曲線をFig. 9、飽和の様子をFig. 10に示す。Figure 9において、240A付近よりサチレーションの影響が現れ始め、510Aにおいては顕著に現れている。さらに、Fig. 11に示す通り、コイルに流す電流の増加に伴い、磁場の一樣性が悪くなり、良磁場領域が狭くなることが分かった。

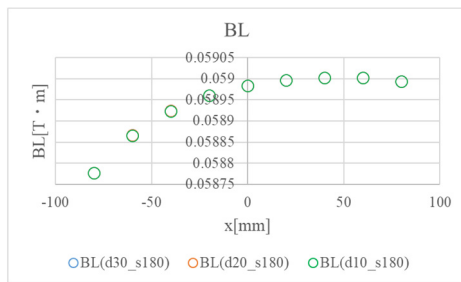


Figure 7: BL-integration with new coils at 60A.

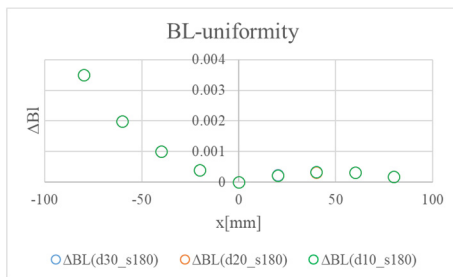


Figure 8: Uniformity of BL-integration with the new coils at 60A.

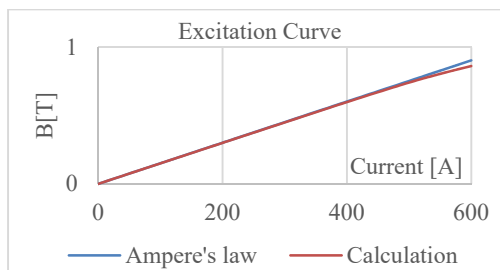


Figure 9: Excitation Curve of DB2.

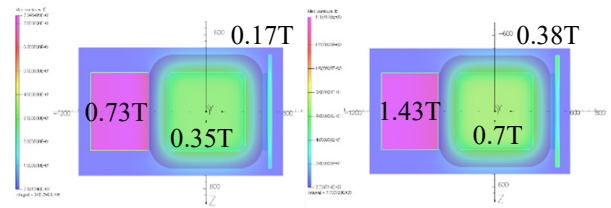


Figure 10: Magnetic field saturation of DB2 at 240A (left) and 510A (right).

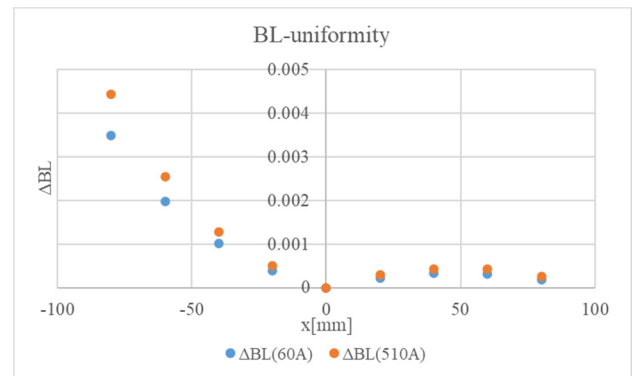


Figure 11: Comparison of BL-uniformity between 60 A and 510A.

4. まとめ

今回、断面形状の異なる予備コイルを製作するにあたり、パラメータの整合性及び磁場の一樣性の評価を行った。その結果、現行コイルの仕様を再現すると共に、流速および温度上昇等の諸条件を充分満足することが確認された。また、予備コイルでは水路数を増設することにより、最大電流 400 A (現行コイルの場合) から最大電流 510 A の励磁が可能となり、250 MeV/c のミュオンが輸送可能となる。尚、電流増加に伴う良磁場領域の最適化については今後の課題である。現在、コイルは製作中であり、2021年度に予備コイル入れ替えを予定している。入れ替え後には磁場測定を実施し、BL積や各パラメータの計算結果が実測値と一致するか確認する予定である。

参考文献

- [1] T. Yuasa and H. Fujimori *et al.*, Optimization of spare coils and magnetic field for dipole magnet (DB2) at decay muon beamline in J-PARC, KEK Proceedings 2019-13 (March 3-5 2020, Chiba University, Japan), P57-60 (in Japanese).