

## FIELD ANALYSIS and OPTIMIZATION for DECAY MUON LINE MAGNETS in J-PARC

Hiroshi Fujimori <sup>#,A)</sup>, Patrick Strasser<sup>A)</sup>, Akihiro Koda<sup>A)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>A)</sup>,  
Wataru Higemoto<sup>B)</sup>, Koichiro Shimomura<sup>A)</sup> and Kusuo Nishiyama<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup> Muon Science Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

### Abstract

At the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), a 3-GeV proton beam is extracted from the Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) and transported through the 3-GeV to Neutron Beam Transport (3NBT) line to the Materials and Life Science Facility (MLF). The proton beam collides with the muon production target in MLF and produces muon particles. The muon particles are transported through six sets of quadrupole triplets and three dipoles to two experimental ports. Three of the quadrupole triplets and the two dipoles were remodeled or reconstructed with old magnets, which have been used more than twenty years in KEK. These magnets with large bore, which are installed close to each other, will inevitably affect the magnetic field distribution. Therefore, a careful study of the effects of the interference on the magnetic fields was performed through a non-linear 3D OPERA simulation for the first muon beam in J-PARC.

## J-PARC 崩壊ミュオンライン電磁石の磁場解析とその最適化

### 1. はじめに

J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) ミュオンセクションでは加速器 (RCS) からのパルス陽子ビーム (3GeV, 25Hz) をグラフィイト標的に当て、発生した粒子を超伝導ソレノイド磁石から二次ライン (崩壊ミュオンライン: 図 1) に導き、下流の実験ポートにおいて照射実験を行っている。崩壊ミュオンラインにはトリプレット四極電磁石 6 組と偏向電磁石 3 台が設置されているが、半数以上は KEK で 20 年以上使った中古電磁石を改造もしくは再構成して用いたものである。崩壊ミュオンライン電磁石の磁極間隙 (ボア径) は 300mm と大きく、近接する周辺機器も多いことから、ビームおよび周辺機器に与える Fringe field の影響[1]が懸念された。特に、再利用電磁石のパラメータがオプティクスを満足するよう、Fringe 効果および機器配置を考慮した改造と再構成を行う必要があった。さらに、崩壊ミュオンラインの途中にはビームモニタが存在しないため、ファーストビームに向けて、詳細な三次元磁場計算によって崩壊ミュオンライン全ての電磁石磁場 (励磁電流) の最適化が求められた。

### 2. ビームオプティクス

ミュオン標的から実験ポートに至る崩壊ミュオンラインのオプティクスの最適化には TRASPORT コード、ビーム損失の計算には DECAY-TURTLE コードが用いられた。図 2 は TRASPORT コードによるビームオプティクスのシミュレーション結果であり、

ミュオン標的から実験ポート (D1) までのビームエンベロップを示す。図中の実線はベータトロン振動による広がり (上は垂直方向、下は水平方向) を表し、破線は分散 ( $\Delta p/p = 5\%$ ) による広がりを表している。

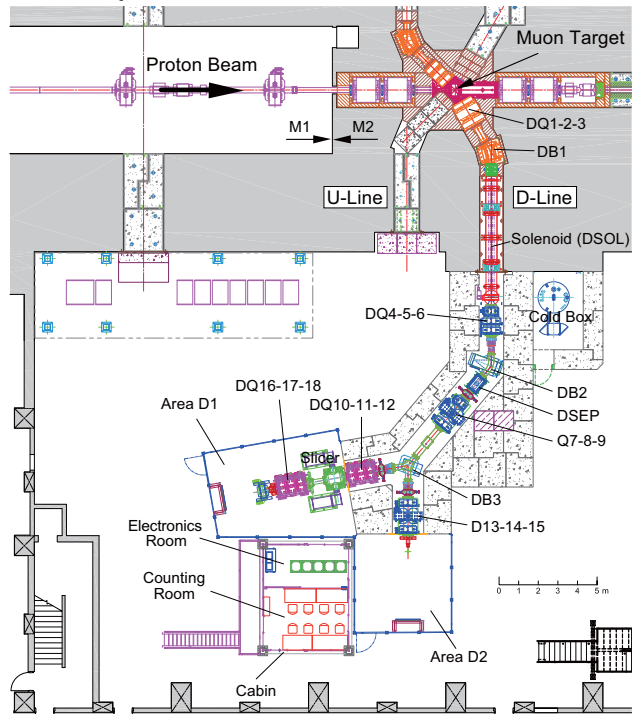


図 1: 崩壊ミュオンラインの概観

また、パラメータとしてのセル長には各電磁石の磁極長、およびドリフト長が入力され、磁場の染み

<sup>#</sup> fujimori@post.kek.jp

出し (fringe field) を考慮しない計算となっている。実際の磁場長は磁極形状や配置によって大きく変わるため、有効磁場長を反映したオプティクスに修正する必要があった。

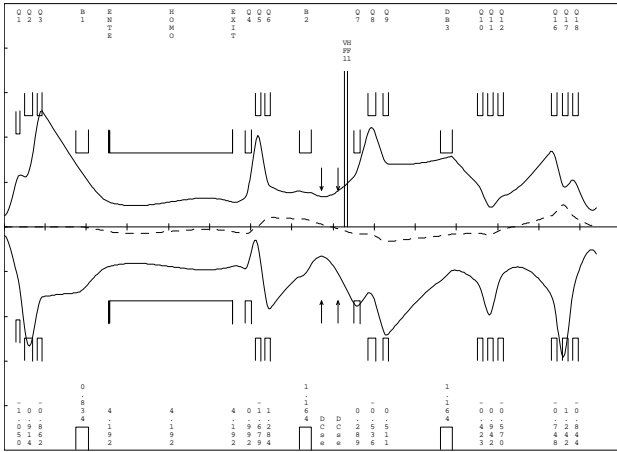


図 2: 崩壊ミュオンラインのビームオプティクス (横軸のフルスケールは 30m: ミュオン標的から D1 実験ポート終端まで。縦軸のフルスケールは垂直 (上) および水平 (下) それぞれ 300mm。)

### 3. 有効磁場長

#### 3.1 偏向電磁石の有効磁場長

偏向電磁石の有効磁場長は OPERA-3d コードを用いて得られた 3 次元磁場中に荷電粒子を中心軌道に沿って走らせて磁場の最適化を行った[2]。図 3 は DB3 と呼ばれる崩壊ミュオンライン上流から 3 台目の偏向電磁石で、二つの実験ポートにミュオンを振り分ける電磁石である。図中の磁極上の曲線は運動量 30MeV/c の正/負ミュオン粒子の軌跡を表す。z 軸上を (左側から) 入射した粒子が正電荷の場合は右に 40 度偏向され、負電荷の場合は左に 40 度偏向される様子を示している。

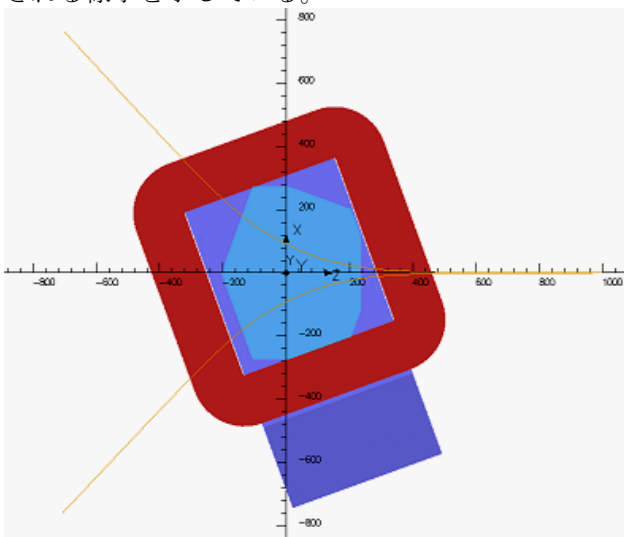


図 3: DB3 を通る正/負ミュオンの中心軌道

#### 3.2 トリプレットの有効磁場長

3 台の四極電磁石で構成されるトリプレット、特に中古の四極電磁石を組み合わせて構成されるトリプレットは構造上 (個々の電磁石がトリプレットとして用いるように製作されていないため) 磁場の干渉が有効磁場長に大きな影響を及ぼす。図 4a および図 4b は前述の偏向電磁石 (DB3) の上流に置かれた中古品で構成されたトリプレット (DQ7, DQ8, DQ9) およびその解析モデルである。

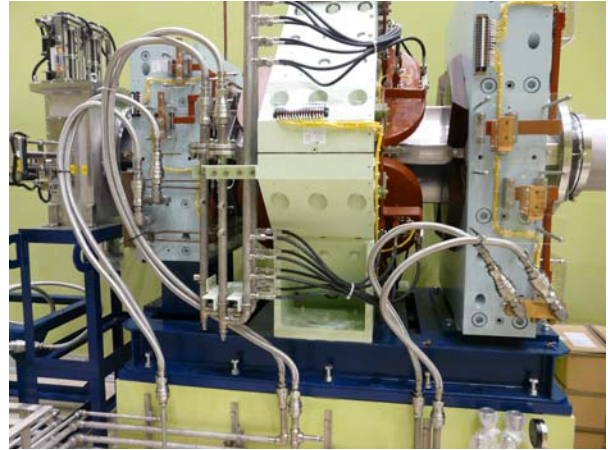


図 4a: Triplet (DQ7, DQ8, DQ9)

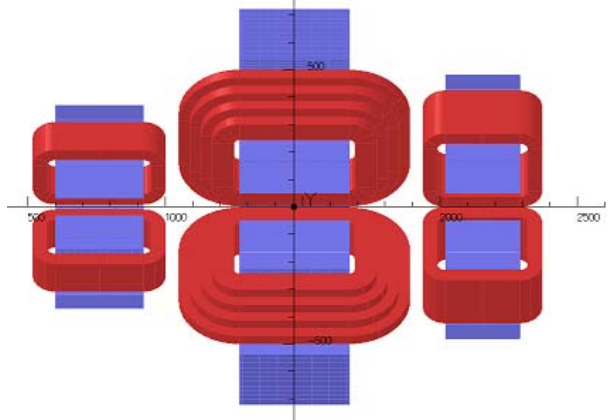


図 4b: Triplet (DQ7, DQ8, DQ9)の解析モデル

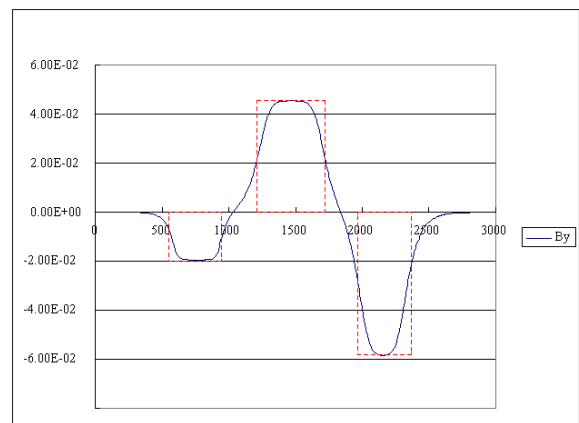


図 4c: 磁場 By の積分 (BL 積) が等しくなるように区切ったハードエッジ磁場 (破線)

図 4c は同トリプレットの中心軌道に対して水平方向にオフセット 100mm の軌道上の磁場分布から有効磁場長を求めたものであり、DQ7, DQ8, DQ9 の磁極長 320mm, 400mm, 270mm に対し有効磁場長はそれぞれ 415mm, 540mm, 407mm となった。

### 3.3 励磁電流の最適化

表 1 に「fringe field を考慮しない場合/fringe field を考慮した場合」における磁場長及び励磁電流の関係性をそれぞれ示す。

表 1 : 磁場長および励磁電流の比較

電磁石	磁場長 (m)	励磁電流 (A)
DQ1	0.20/0.323	-127.5/-81.5
DQ2	0.40/0.518	86.1/66.9
DQ3	0.25/0.395	-74.3/-48.5
DB1	0.628/0.813	118.5/93.8
DQ4	0.32/0.413	36.5/28.5
DQ5	0.27/0.387	-122.1/-87.2
DQ6	0.27/0.399	84.2/58.4
DB2	0.60/0.789	77.2/60.0
DQ7	0.32/0.415	26.2/20.3
DQ8	0.40/0.54	-47.0/-35.1
DQ9	0.27/0.407	51.9/35.3
DB3	0.45/0.644	71.8/52.0
DQ10	0.30/0.40	-43.3/-32.9
DQ11	0.30/0.414	104.2/76.6
DQ12	0.30/0.40	-56.0/-42.6
DQ16	0.30/0.40	-43.3/-32.9
DQ17	0.30/0.414	117.2/86.1
DQ18	0.30/0.40	-43.3/-32.9

## 4. 結果

### 4.1 励磁電流の最適化

前節の表 1 のパラメータを用いて計算したビームオプティクスを図 5 に示す。上段はベータatron振動によるビームの広がり（実線は水平方向、点線は垂直方向）、下段は分散による広がり（実線は水平方向、点線は垂直方向）をそれぞれ表している。青色の線のビームエンベロップが有効磁場長を用いたときのビームオプティクスである。これに対し、fringe field の影響を考慮しないビームオプティクス（赤色の線）は水平方向の広がりにおいて破綻していることが分かる。

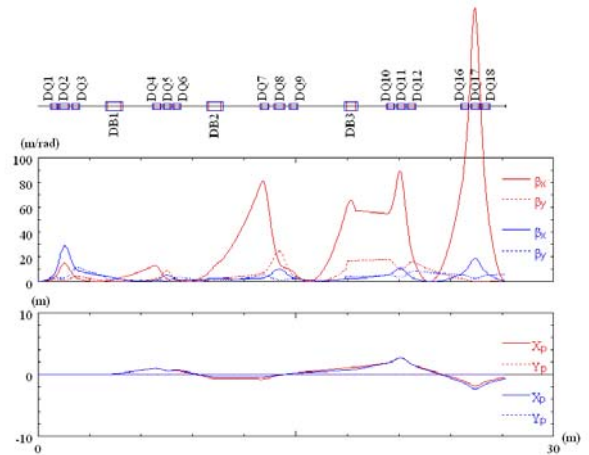


図 5 : fringe field がオプティクスに与える影響

### 4.2 J-PARC 最初のミュオン生成

三次元詳細計算による励磁電流の最適化により 2008 年 9 月 26 日 J-PARC に初のミュオンが発生した。図 6a はその最初のミュオンを確認したときの波形である。標的から生成された粒子がミュオンとなって、計算どおりの軌道を辿り、30m 下流の実験ポートに到達した記念すべき瞬間である。

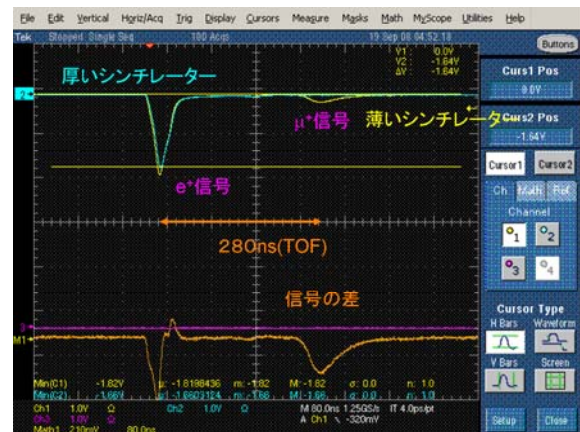


図 6a : J-PARC 初のミュオン



図 6b : ダブルパルスのミュオン



図中、厚いシンチレータで確認できるポジトロン（陽電子）より 280ns 遅れて到達している波形が、正に、運動量およそ 30MeV/c のミュオン (u+) である。その後のダブルパルス運転において、パルス間隔 600ns でのダブルパルスミュオン (図 6b) が確認されている。ここではセパレータ（電場）によってポジトロンを分離（排除）することで、ミュオンは大きな波形となっている。

## 5. まとめ

- 大口径の電磁石では fringe field の影響が大きいため、オプティクスの計算には fringe field を考慮した磁場（有効磁場長）を用いなければならない。そのためには、実際に即した三次元モデルを用いた磁場解析から fringe field を求めることが必要である。トリプレットの構成においては、近くに置かれる磁性体（近接する磁極、ヨーク等）の有無で fringe field および干渉が大きく左右される。意図的に fringe field を小さく押さえるには、エンドガード（磁極端部に取り付ける磁性板）が有効である。
- 崩壊ミュオンラインの電磁石 18 台（偏向電磁石 3 台、トリプレット 5 組）において、ライン途中にビームモニタがなくても詳細磁場計算による励磁電流の最適化によって D1 実験ポートまでビームを導くことができた。その結果、J-PARC に初のパルスミュオンをもたらした（2008 年 9 月 26 日）、2009 年 12 月 10 日には J-PARC のミュオンは世界最高強度に到達した。

## 参考文献

- [1] “Radiation Resistant Magnets for the J-PARC Muon Facility” Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 600 (2009), pp. 170-172  
“Magnet Design for a High Radiation Area” Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan)
- [2] J-PARC 3NBT ビームライン電磁石及び高耐放射線性を有する M1, M2 電磁石の三次元詳細計算による設計の最適化,平成 20 年度 KEK 技術賞受賞論文 The KEK Technology Prize 2008, KEK Internal 2009-2 July 2009 A/H/M, pp. 13-19