

## J-PARC MUSE におけるトリプレット電磁石のアップグレード UPGRADE OF TRIPLET MAGNETS AT J-PARC MUSE

湯浅 貴裕<sup>#, A)</sup>, 藤森 寛<sup>A)</sup>, 河村 成肇<sup>A)</sup>, ストラスサー パトリック<sup>A)</sup>, 目黒 学<sup>B)</sup>, 砂川 光<sup>B)</sup>, 川端 公貴<sup>B)</sup>,  
 Takahiro Yuasa<sup>#, A)</sup>, Hiroshi Fujimori<sup>A)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>A)</sup>, Patrick Strasser<sup>A)</sup>,  
 Manabu Meguro<sup>B)</sup>, Hikaru Sunagawa<sup>B)</sup>, Koki Kawabata<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
<sup>B)</sup> NAT Co., Ltd.

### Abstract

The decay muon beamline (D-line) at the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) in J-PARC has two experimental areas (D1, D2). In the D1 area condensed matter physics experiments are mainly carried out using surface muons (30 MeV/c). While the muon momentum can be adjusted according to the experimental condition, in recent years experimenters require to use muon beam with higher momentum (>90 MeV/c). However, the triple quadrupole magnets (D1 triplet) installed just upstream of the D1 experimental area is limited to transporting muons with 70 MeV/c at most. Therefore, an existing high-momentum-capable triplet was upgraded to be used as a new D1 triplet by modifying the magnet pitch and fabricating a new base. The performance of this D1 triplet is evaluated by comparing the parameters before and after the upgrade, and the GL product is optimized for the beam optics.

### 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(Dライン)の二つの実験エリア(D1, D2)の内 D1 実験エリアでは主に表面ミュオン(30 MeV/c 相当)を用いた物性実験が行われている。当エリアでは実験条件によってミュオンの運動量を変えることができ、近年ではより高い運動量(>90 MeV/c)のミュオンを用いた実験が要求されるようになった。しかし、D1 実験エリア直前に設置されている三連四重極電磁石(DQ10~DQ12; 以下、D1 トリプレットと称する)では 67 MeV/c のミュオンを輸送するのが限界である。そこで、高運動量対応の既存四重極電磁石を再構築しD1 トリプレットとして使えるように電磁石ピッチおよび End-guard (field clamp)の調整、新規架台の製作等、将来的に 120 MeV/c のミュオンを輸送できるようにアップグレードを行った。今回の発表では D1 トリプレットのアップグレード前後のパラメータ比較による性能評価およびビームオプティクスに対する GL 積の最適化について報告する。

### 2. 現行の D1 トリプレット

Figure 1 に示すように D1 トリプレットは崩壊ミュオンビーム輸送系(D-line)の D1 実験エリアの直前設置されている三連四重極電磁石である。

現行の D1 トリプレットは運動量 67 MeV/c までのミュオンを輸送することが可能であるが、実験者からより高い運動量(90 MeV/c)のミュオンを用いた実験を要求されるようになった。

現行の D1 トリプレットで 90 MeV/c のミュオンを輸送する際のパラメータを Table 1 に示す。90 MeV/c のミュオンを輸送する際の電圧と電流は 51 V 504 A であるが、電源は 40 V 375 A であるため、定格電流まで流しても必要な電流値に到達しない。たとえ 504 A 流せたとしても、冷却水の温度上昇が 30 °C を超えるため J-PARC の規定

(冷却水の温度上昇は 25 °C 以内)に抵触する。

以上の事から D1 トリプレット電磁石および電源のアップグレードを計画することにした。Figure 2 に現行の D1 トリプレット(コイル巻き数 N=48)を示す。

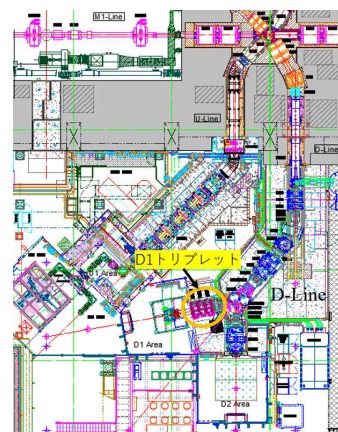


Figure 1: Decay muon beamline (D-line).

Table 1: Parameters of Current D1 Triplet

	Current D1 Triplet
Momentum [MeV/c]	90
Field gradient [T/m]	2.7
Magnetomotive force [A*Turns]	24170
Number of coil turns [Turns/coil]	48
Bore diameter [mm]	300
Pole length [mm]	300
Excitation current [A]	504
Excitation voltage [V]	51
Water flow[L/min]	10.8
Flow speed [m/s]	1.6
Temperature rise of cooling water Δt[°C]	34

# tyuasa @post.kek.jp

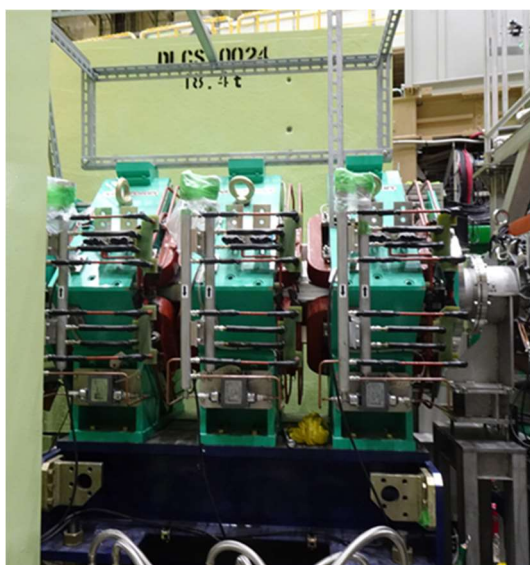


Figure 2: Current D1 triplet.

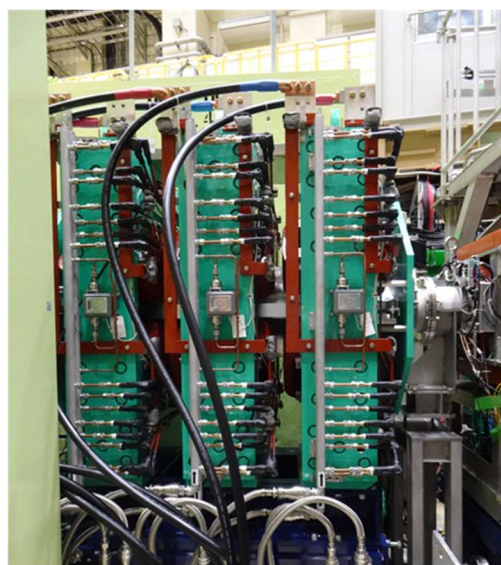


Figure 4: New D1 triplet.

### 3. D1トリプレットの更新

#### 3.1 新D1トリプレット

現行のD1トリプレットでは67 MeV/cのミュオンを輸送するのが限界であるので、高運動量対応の四重極電磁石(コイル巻き数 $N=72$ )を再構築しD1トリプレットとして使うためにFig. 3のように電磁石ピッチおよびEnd-guardの調整、新規架台の製作等、将来的に120 MeV/cのミュオンを輸送できるようにアップグレードを行った。Figure 4に更新されたD1トリプレットを示す。アップグレード後に行った磁場測定結果と三次元磁場解析プログラム(OPERA-3d)による磁場解析結果の比較としてDQ10の励磁特性をFig. 5、450 Aで励磁した際、中心から水平方向に100 mm離れた所でのビーム軸方向に沿った鉛直方向の磁場( $B_y$ )をFig. 6に示す。どちらの測定結果も磁場計算結果と非常に良く一致することが確認された。

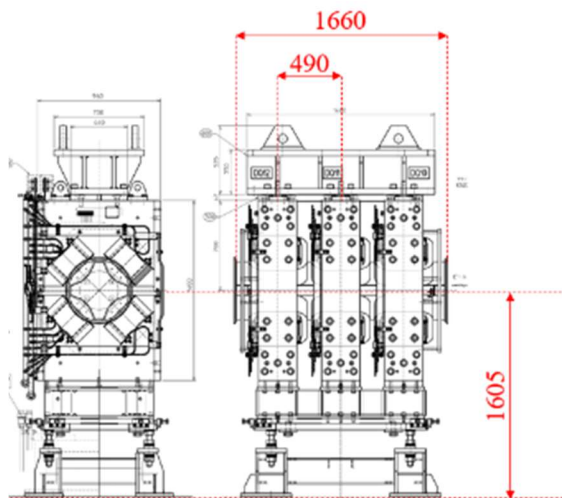


Figure 3: New D1 triplet (right).

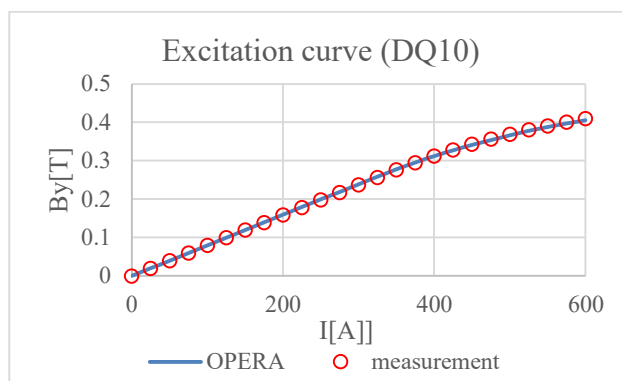


Figure 5: Excitation curve of DQ10.

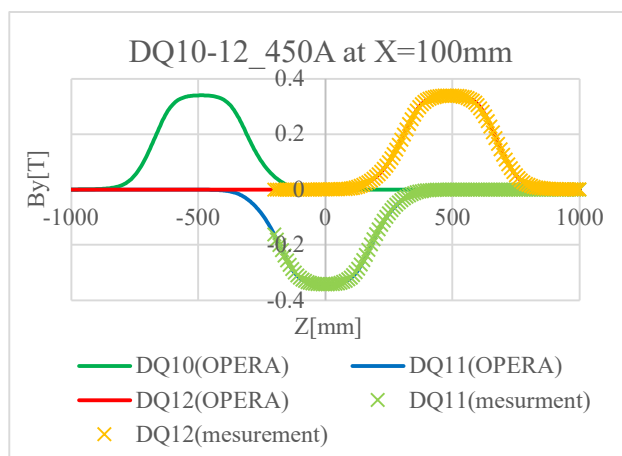


Figure 6: Comparison between calculated and measured magnetic field of DQ10, DQ11 and DQ12 at 450 A.

また、D1トリプレットを450 Aで励磁した際に、3台を個別に励磁して足し合わせた時と一斉に励磁した時のZ- $B_y$ 分布の違いをFig. 7、GL積の比較をTable 2に示す。個別励磁と足し合わせと一斉に励磁した時でGL積に1~3%程度の違いがあり、一斉に励磁した際に磁場の干渉が生じることが計算から確認された。

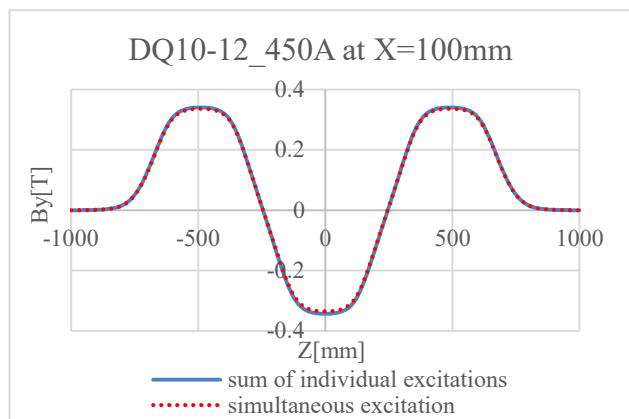


Figure 7: Comparison between sum of individual excitations and simultaneous excitation at 450 A.

Table 2: Comparison of GL Integration at 450 A

	Individual excitations [T·m]	Simultaneous excitation [T·m]	Raito [%]
DQ 10	0.125	0.124	98.858
DQ 11	-0.119	-0.116	97.486
DQ 12	0.125	0.124	98.858

一方、電源についても、将来的に 120 MeV/c のミュオンを輸送できるように現行 40 V 375 A を 75 V 1000 A 電源に更新することにした。Table 3 に新 D1 トリプレットで 90 MeV/c と 120 MeV/c のミュオンを輸送する際のパラメータを示す。

Table 3: Parameters of New D1 Triplet

	new D1 Triplet	
	90	120
Momentum [MeV /c]	90	120
Field gradient [T/m]	2.7	3.6
Magnetomotive force [A*Turns]	24170	32230
Number of coil turns [Turns/coil]	72	
Bore diameter [mm]	300	
Pole length [mm]	300	
Excitation current [A]	336	448
Excitation voltage [V]	51	68
Water flow [L/min]	25.6	
Flow speed [m/s]	1.9	
Temperature rise of cooling water $\Delta t$ [°C]	10	17

### 3.2 ビーム光学の計算

新 D1 トリプレットに入れ替えるにあたり、コイル巻き数の変更に伴い起磁力、電磁石ピッチおよび End-guard 位置の変更により磁場の干渉効果が変わることを考慮した電流の最適化が必要である。

そこで D1 トリプレットを構成する DQ10~12 内を通過

するビームサイズが同じになるようにビーム輸送プログラム Transport を用いて、励磁電流値の最適化を行った。

Figure 8 に新 D1 トリプレットの GL 積が等しくなるように電流値を調整した時のビーム軌道を示す。上半分は鉛直方向、下半分は水平方向のビームの広がりである。

その結果、表面ミュオン(30 MeV/c 相当)輸送時は DQ10 に 46.3 A(68.6 A)、DQ11 に 84.7 A(124.7A)、DQ12 に 83.6 A(124 A)を流せば現行のトリプレットと同じ光学になるという結果が得られた。ここで、カッコ内は現行の電流値である。

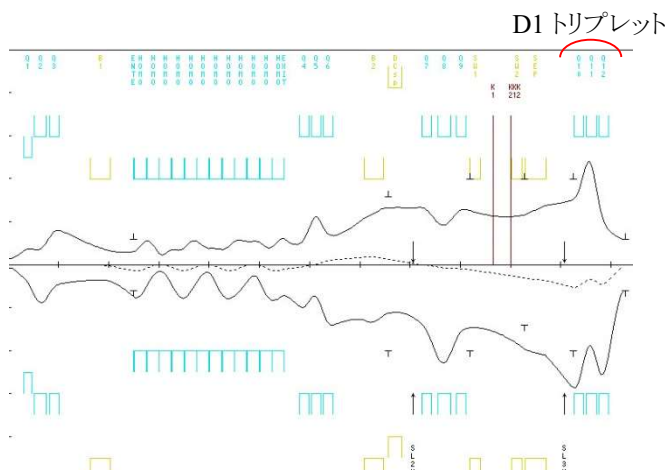


Figure 8: Beam envelope of new D1 triplet.

## 4. まとめ

今回、現行の D1 トリプレットと電源を入れ替えることで、120 MeV/c までのミュオンを輸送できるように D1 トリプレットのアップグレードを行った。

また、トリプレット更新によってビームパラメータが変わらないように、新旧トリプレットの GL 積が同じになる電流値を求めた。

D1 トリプレットと電源の入れ替えは今年の夏に実施して、メンテナンス期間終了後のビーム運転から使用される予定であり、その際のビームチューニングにおいて計算から求めた電流値との整合性を確認する予定である。

## 謝辞

本報告書の執筆にあたり、干渉磁場の評価についてご指導いただいた高エネルギー加速器研究機構名誉教授・入江吉郎先生に深く感謝する。