

RESULTS OF THE MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS OF THE SDTL Q-DOUBLETS FOR THE J-PARC LINAC

Kazuo Yoshino^{1,A)}, Eiichi Takasaki^{A)}, Fujio Naito^{A)}, Takao Kato^{A)}, Hirokazu Tanaka^{A)}
 Hiroyuki Asano^{B)}, Takatoshi Morishita^{B)}, Takashi Ito^{B)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801
^{B)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
 2-4 Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195

Abstract

The separated DTL (SDTL), which accelerates a negative-hydrogen ion beam from 50 to 190 MeV, is one of the main components in the injection linac for the J-PARC project. It consists of 32 independent tanks. The doublet quadrupole magnet is set between the adjacent tanks of the SDTL. Because the distance between doublet was short, the interference between the magnetic fields of the doublets was expected. Then, the magnetic field measurements with the longish rotating coil, that was able to measure each magnetic field while exciting both magnets at the same time, were performed. The details of the measurement results for all Q-doublets are described.

J-PARCリニアックにおけるSDTL用四極ダブレットの磁場測定

1. はじめに

J-PARCリニアックのSDTL空洞（当初、32台中2台はデバンチャーとして下流側で使用）においては、空洞間に四極電磁石をダブレットで設置する（図1、表1）^[1]。全磁石とも、同一形状で使えるように設計しており、磁極先の両端には平坦部を用意して、磁石中心やアライメント用基準座及びビームポジションモニター(BPM)^[2]の基準面となっている。

本磁石では、ボア径が41mmに対して、磁石間の軸方向隙間が160mmと短めなので、磁場干渉による磁場強度の低下等が心配されていた。そこで、回転コイル（サーチコイル）による磁場測定では、上・下流共通の長尺コイルのみならず、ダブレット励磁(FD)状態で上・下流を同時に測れるように、上・下流個別のコイルをサーチコイル1本で用意した。

本ダブレットの軸方向隙間には、ゲートバルブやモニター類の他にステアリング磁石も取り付けられるようにしている。このステアリングの磁場強度は単独設置に比べかなり低下することが予想されていたので、その影響も測ってみた。

2. サーチコイル及び磁場測定の仕様

2.1 回転コイルの仕様

表2にコイルの仕様を示す。コイルの巻き方は、回転軸対称で、ショートコイルはボビン中央の穴（Φ8mm）でターンしている。

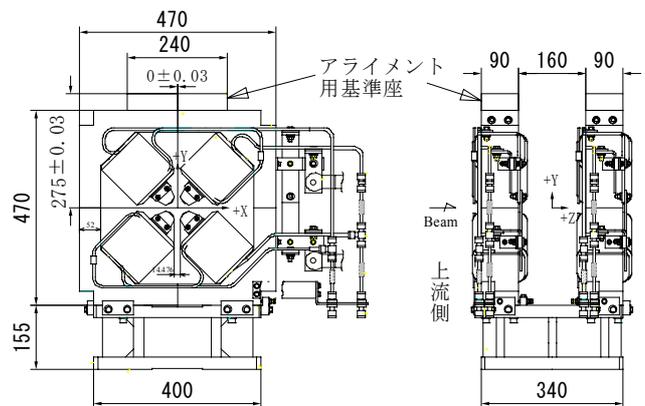


図1：SDTL四極ダブレット寸法図

定格積分磁場強度	[T]	1.91~2.64
最大積分磁場強度(100A)	[T]	3.37
最大磁場勾配(100A)	[T/m]	30
磁場有効長	[mm]	112.3
鉄心長	[mm]	90
ボア口径	[mm]	41
コイル巻数	[turn/pole]	54
コイル寸法	[mm]	5×6, t=1.0
最大電流	[A]	100
抵抗	[mΩ]	84
電圧	[V]	8.9
流量	[Liter/min]	1.2
冷却水温度上昇	[°C]	9
圧力損失	[MPa]	0.21

表1：SDTL四極ダブレットの仕様

¹ E-mail: kazuo.yoshino@kek.jp

2.2 駆動系の概要

図2に示すように、上下流の2本の支柱に、上下・左右移動できる台座（ステージ）を設け、その上にコレットが取り付けられる。この両コレットに回転コイルをチャッキングして固定する仕組みである。上下・左右方向にはパルスモーターで移動できるようにしており、マグネスケールにて位置を読み出す。コレットの下流側には回転用のモーターを取り付け、上流側にはエンコーダー+ロータリーコネクタが取り付けられる。

2.3 ビーム軸とアライメント軸の設定

今回、Q磁石の機械的なビーム軸方向中心（機械中心）としては、ターゲットホルダー（片方が円筒形で他方にテレスコープ用レンズを取付：SUS製）の円筒部をボアに挿入し、マイクロアライメントテレスコープ（テーラーホブソン製）で覗いて中心を出している。ホルダー円筒部の外径は、ボア径とほぼ同じサイズに $\pm 20 \mu\text{m}$ を加えた3種類6個を用意し、各磁石毎にフィットするホルダーを選んだ。

磁石上部のアライメント軸に関しては、レンズを取り付けられるハイタッチセットを用意し、磁石上部の基準座(SUS製)に挿入して、テレスコープで覗いて軸を出している。

2.4 測定手順

最初に磁石の機械中心と両コレットを光学的に一致させ、ビーム軸を定めた。次にその両コレットをアライメント軸まで上げ、各磁石上部のレンズとアライメント軸とのずれを計測した。次に両コレットをビーム軸まで戻し、回転コイルを装着して磁場中心を計測した。最後に回転コイルと各磁極先端との隙間をゲージで測定し、ビーム軸に対するチャッキング部の傾きやコイルのたわみ等の分を補正した。

2.5 測定系及びダブレットの位置精度

本測定系やダブレットの位置（アライメント）精度に関係する要因をまとめた（表3）。コイルのたわみや取付角度のずれは、ボビン表面と磁極までを測定して補正しているが、その分ボビン外径と素線巻径とのずれやゲージ測定の誤差が出てくる。

3. 磁場測定結果

3.1 四極電磁石ダブレット励磁測定（ホール素子）

磁石メーカーによるホール素子測定（2台測定した内の1台）の軸方向磁場分布を図3に示す。磁石中心からダブレット中心までと、磁石中心から自由端までの磁場勾配積分値(GL)を比較すると、ばらつきはあるもののダブレット中心側の積分値が0.1%~1.4%程度少ない。もう1台のダブレットでも同様の結果（0.3%~1.2%）であった。

ロングコイル巻径	33.113 [mm]
ショートコイル（上流側）巻径	33.144 [mm]
ショートコイル（下流側）巻径	33.121 [mm]
ロングコイル巻長	892 [mm]
ショートコイル巻長	442 [mm]
コイル回転速度	8 [Hz]
コイル素線直径	0.2 [mm]
コイル巻数	6
コイルボビンの材質	セラミック

表2：回転コイルの仕様

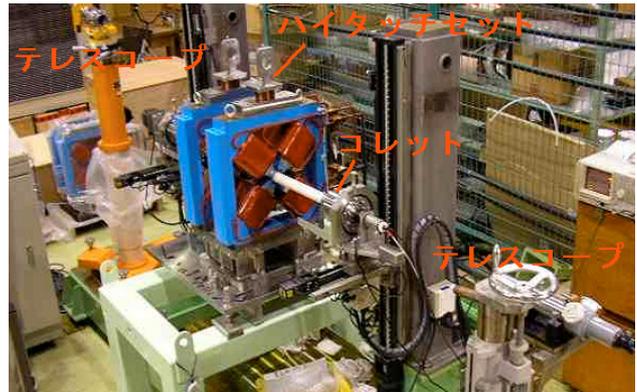


図2：SDDL四極ダブレット測定風景

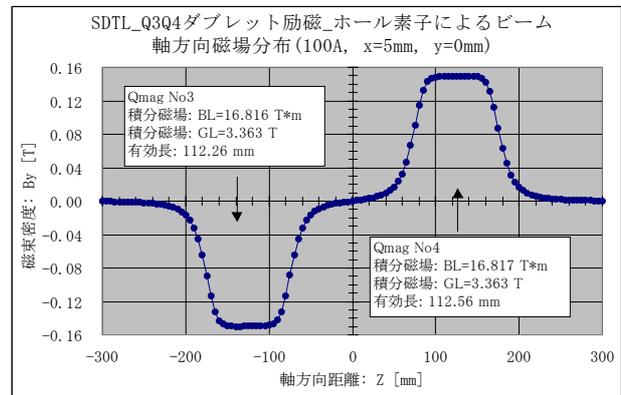


図3：SDDL Qダブレット励磁におけるビーム軸方向の励磁分布

	± μm	方向
測定系	①テレスコープ	10 両方向
	②レンズ	6 両方向
	③マグネスケール(7 μm /400mm)	7 垂直方向
	④ターゲット(レンズ)ホルダー	20 両方向
	⑤ハイタッチセット	10 両方向
	⑥支柱上面の水平度(20 μm /m)	10 水平方向
	⑦ボビン表面と巻線とのずれ	10 両方向
	⑧ボビン表面と磁極間のゲージ測定誤差	10 両方向
ダブレット	⑨ボア中心から基準座までの距離	30 両方向
	⑩基準座の水平度(20 μm /m)	10 水平方向
	⑪ボア径	30 両方向

表3：測定系と磁石の位置精度に関する要因

3.2 四極電磁石ダブレット励磁測定（回転コイル）

全ダブレットを励磁した場合の励磁特性（測定値平均と解析値との比較）を図4に示す。（解析は単体励磁で行っており、3次元電磁場解析コードMAFIAを使用した）。80A程度から飽和現象が開始

めているが、要求されている磁場強度(GL)の最大値が2.64T (約74A)なので、定格範囲内で運転する分には直線領域で使用できる。解析値との差は、平均で0.9%程度少なかった。この測定での出力のばらつきは、当初(7ダブレット)は-0.8%~+0.6%程度あったが、測定系の温度管理等により、それ以降は±0.4%に収まった。

磁場中心のずれ量を図5に示す。機械中心から磁場中心までのずれ量が、目標の±30μmから2割近くの台数が見出しているが、アライメント軸からのずれ量は±50μm以内で許容値内に収まっている。

3.3 四極電磁石シングル励磁測定 (回転コイル)

磁場干渉を検証する為、ダブレット配置の状態、上下流個別に励磁(70Aのみで20ダブレット)した。この場合、ダブレット励磁に比べGL値で0.4%程度大きかった(いずれも平均値での比較)。解析値と測定値の差は、約0.2%であった。この測定での出力のばらつきは-0.7%~+0.4%程度あった。

3.4 ステアリング電磁石を取付けた場合の四極電磁ダブレット励磁測定 (回転コイル)

本測定ではステアリング電磁石が無い場合に比べて、平均で0.3%程度少なかったが、測定数が1ダブレットのみなので、3.2項で示した測定出力のばらつき範囲内と思われる。

3.5 四極電磁ダブレットに取付けた場合のステアリング電磁石の励磁測定 (回転コイル)

SDTL用ステアリング電磁石は1種類8台用意していたが、その内2台については偏向角を大きくする必要が生じたので改造した(表4)。改造前の磁石の磁場解析では、ダブレット間に設置した場合、単独設置(解析値)に比べ約42%磁場強度(BL)が減る事が分かっていたので、改造で磁極隙間を15mm広げた分、減少幅の割合が増えると予想していた。改造磁石の測定結果は、約47%の減少幅であった。20AでのBLは、約50.2mT・mなので、コイルの温度上昇(表面で約12°C)が問題ないなら200MeVで2mrad以上の偏向角が得られる。

4 まとめ

SDTL空洞用四極ダブレットについて、サーチコイルにて全数測定した。ダブレット励磁(FD)状態での磁場強度は、シングル励磁に比べ平均で0.4%程度少なかった。磁石上部のアライメント軸からビーム軸まで下げて計測した磁場中心とのずれ量は±50μm以内であった。ステアリング電磁石を取付けた場合の四極磁石の磁場強度は、約0.3%少なかったが、測定数が1ダブレットなので、測定のばらつき範囲内と思われる。改造したステアリング電磁石を四極ダブレットに取付けた状態では、単独設置(解析値)に比べ磁場強度が約47%減るが、必要十分な磁場強度(偏向角)は得られている。

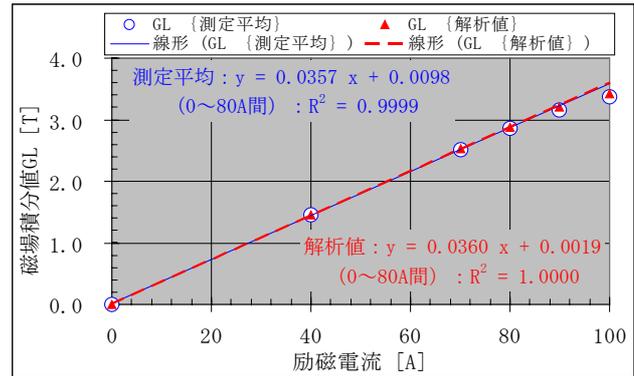


図4：SDTL四極ダブレットの励磁特性

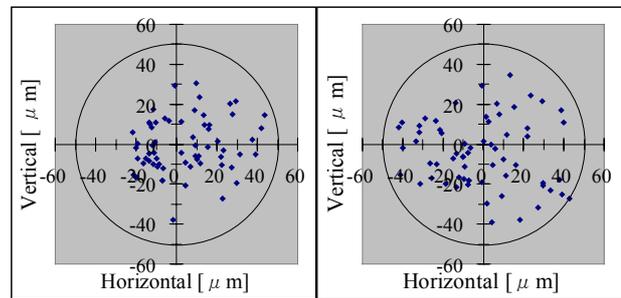


図5：磁場中心のずれ量(上流視:70A励磁)。左が機械中心からの場合、右がアライメント軸からビーム軸まで垂直に(400mm)下げた場合。

磁極隙間	[mm]	125	110
鉄心長	[mm]	64	64
コイル巻数	[turn/pole]	246	203
定格電流	[A]	10	5
起磁力	[AT]	2460	1015
最大電流	[A]	20	5
磁場強度(中心)	[mT]	22.6	11
コイル寸法	[mm]	1.6*2.6	Φ2.0
電流密度	[A/mm ²]	2.4	1.6
冷却方式		間接水冷	空冷
流量	[Liter/min]	4.4	-
コイル表面温度上昇	[°C]	3	-
直流抵抗	[Ω]: 20°C	0.65	0.62
電圧	[V]: 60°C	7	3.8
圧力損失	[MPa]	0.24	-
台数		2	6

表4：SDTL用ステアリング磁石の仕様

参考文献

- [1] JHF Project Office., "JHF accelerator design study report", KEK Report 97-16, JHF-97-10, March, 1998.
- [2] T.Tomisawa, et al., "DESIGN OF 4-STRIPLINE BEAM POSITION MONITORS OF THE J-PARC LINAC SDTL", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, August 4-6, 2004.