

表1 MQXAパラメータ

Magnetic Physical Length, mm	6660
Magnetic Length, mm	6370
Coil Straight Section Length, mm	5960
Coil Inner Radius, mm	35.0
Coil Outer Radius, mm	81.3
Yoke Inner Radius, mm	92.0
Yoke Outer Radius, mm	235.0
Field Gradient, T/m	215
Magnet Current, A	7149
Peak Field on the Coil, T	8.63

表2 MQXA超伝導ケーブルパラメータ

	Inner	Outer
Strand (NbTi)		
Diameter, mm	0.815	0.735
Cu/Sc Ratio	1.2	1.9
Filament Diameter, μm	<10	<10
Cable		
Width, mm	11.0	11.0
Middle Thickness, mm	1.470	1.337
Keystone Angle, degree	2.107	1.273
Number of Strands	27	30
Critical Current, A		
@1.9K, 9T	>13250	>9000
@1.9K, 11T	>6000	>4000

3. 励磁 (クエンチ) 試験

3.1 励磁試験

19台のMQXAは室温での磁場測定により磁場性能に異常が無いことを確認した後、縦型のクライオスタットを用いて1.9Kまで冷却し、励磁試験を行なった^[5]。試験項目としては、(1) 加速器運転時の磁場勾配は215T/mにマージンを含めた230T/m (励磁速度10 A/s) までの励磁、(2) 215T/mでの遮断試験 (全エネルギーは磁石部で熱に変換される)、(3) 220T/m迄の再励磁 (磁石が損傷を受けていないことの確認)、である。

3.2 試験結果

図3に、19台のMQXAのクエンチ特性が示されている。又、図4には常伝導転移が始まった場所の統計を示してある。MQXA-1~3号機に於いては、リード取り出し側 (図中: Lead End) で多く常伝導転移し、10回程度のトレーニングクエンチで230T/mに到達している。MQXA-2と3号機では、磁石を室温まで昇温し再冷却した場合の励磁特性への影響についても調べられた。結果として、再冷却後、運転磁場勾配である215T/mまでクエンチしないで励磁出来ることが確認された。MQXA-4~7号機では、5回以下のトレー

ニングクエンチで230T/mに到達しているが、それ以後の磁石では直線部分で常伝導転移が発生しトレーニングクエンチの回数も増加した。磁場測定の結果から、磁石本体に問題があるのではなく、磁場測定コイルをガイドする断熱2重配管 (材質: SUS) が非常に強い磁場勾配により偏心し室温部と1.9Kの磁石ボア一部が接触したことが原因であることが判明した。断熱2重配管改良後の試験では (MQXA-15~19)、トレーニングクエンチの回数も8回以下となり励磁特性も改善した。

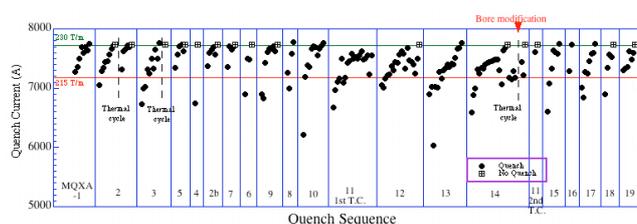


図3 MQXAのクエンチ特性

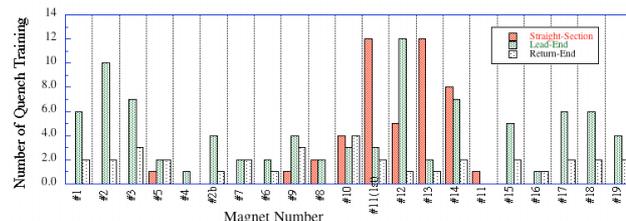


図4 MQXAのクエンチ発生場所

4. 磁場測定

4.1 磁場測定

MQXAの磁場性能は、長さ600mm、コイル半径21mmのTangential型のハーモニックコイルを用いて測定した^[6,7]。又、磁石磁場の積分値を測定する為に、300mmステップでコイルを移動し測定を行なった。以後報告する多極成分の値は、式(1)で定義し、参考半径 (R_{ref}) は17mmとしている。多極成分 (a_n , b_n) は4極成分 (B_2) に対する割合を10000倍した値 (units) で示してある。

$$B_y + iB_x = 10^{-4} B_2 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad (1)$$

4.2 磁場勾配と磁場長

まず、4極成分の磁石直線部分の磁場勾配と実効磁場長の測定結果について報告する。各値は式(2)、式(3)により測定値から計算した。又、19台の平均値と標準偏差 (1σ) の値を表3に纏めてある。磁場勾配の値は、電流値に依存するが、19台の平均値として31.7~30.0T/m/kAの値となる。各磁石間の差は小さく、標準偏差は平均値の0.03~0.05%となっている。この標準偏差をコイルの内半

径 (35mm) の形状誤差に換算すると約18 μ mの誤差に対応する。又、磁場長も電流依存性があり、電流の増加により大きくなる。測定値6364mm~6368mmの長さに対して、19台の磁石の標準偏差は1mm程度である。この標準偏差は磁場長の0.016%に相当する。

$$G = \frac{\int_{\text{straight_section}} B_2 dz}{L_{\text{straight_section}} \times R_{\text{ref}}} \quad (2)$$

$$L = \frac{\int_{\text{whole_magnet}} B_2 dz}{G \times R_{\text{ref}}} \quad (3)$$

表3 磁場勾配と磁場長の平均及び標準偏差

電流値 kA	磁場勾配 T/m/kA	標準偏差 1 σ , T/m/kA	磁場長 mm	標準偏差 1 σ , mm
0.392	31.721	0.016	6364.3	1.10
2.01	31.559	0.010	6364.2	0.97
3.21	31.488	0.011	6364.2	0.90
6.10	30.408	0.009	6367.0	0.94
6.68	30.211	0.009	6367.5	1.04
7.23	30.033	0.009	6367.9	1.15

4.3 多極成分 (エラー成分)

MQXA 4極電磁石には、多極成分に対してビーム光学上の制約から、表4に示す許容値が決められている。エラー成分は、systematic errorとrandom errorに分けて表示されている。図1に示す様に、 a_3 、 b_3 、 a_4 、 b_4 、 b_6 については補正コイルがトリプレットに組み込まれており、これら補正コイルは表4に示す許容値の3倍のエラー成分をキャンセルすることができる。

図5と図6に、19台のMQXAの多極成分と許容値の指標としてsystematic errorとrandom errorの和をエラーバーとして示している。殆どの多極成分がビーム光学上要求される許容値と比べて十分小さい値である。 b_4 成分は、ほぼ許容値に近い値となっているが、磁石間の差が小さく (1 σ = 0.108 units)、補正コイルで十分キャンセルすることが出来る。又、現在迄の解析で b_4 成分は、磁石製作時に発生する磁石断面の楕円変形が原因の一つと考えられ、50 μ mの変形で0.5 unitsの b_4 成分が発生することが計算上求められている。

表4 MQXAの許容多極成分 (units)

n	a_n			b_n		
	design	systematic	random	design	systematic	random
3	0.0	0.684	0.965	0.0	0.684	0.965
4	0.0	0.331	0.511	-0.17	0.923	0.658
5	0.0	0.130	0.240	0.0	0.131	0.252
6	0.0	0.067	0.120	0.33	0.891	0.446
7	0.0	0.031	0.056	0.0	0.031	0.055
8	0.0	0.021	0.028	0.003	0.041	0.028
9	0.0	0.012	0.019	0.0	0.012	0.019
10	0.0	0.012	0.009	-0.002	0.058	0.037

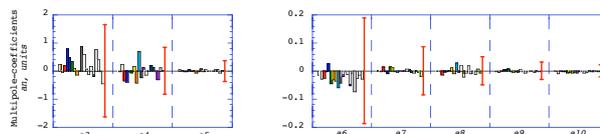


図5 MQXA19台の a_n 成分と許容値

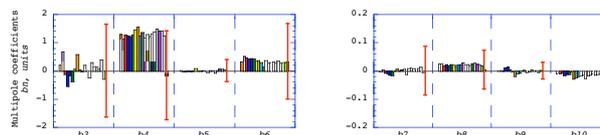


図6 MQXA19台の b_n 成分と許容値

5. まとめ

高エネルギー加速器研究機構では、CERNとの国際協力として衝突点近傍に設置される超伝導4極電磁石の開発を行ってきた。2001年から20台の磁石の製作を完了し、その内19台については1.9Kでの低温試験を行った。

低温試験の結果として、(1) 全ての磁石に於いて運転上必用な215 T/mの磁場勾配を発生することが確認された、(2) 磁場勾配及び磁場長の磁石間の差は非常に小さく 10^{-4} レベル以下である、(3) 多極成分は b_4 成分以外は十分許容値と比べて小さく、又 b_4 成分についても補正コイルでキャンセル出来る値である。

参考文献

- [1] R. Ostojic, "Superconducting magnets for LHC Insertions", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, No. 2, p.p. 181-186, 2004.
- [2] A. Yamamoto et al., "Design study of a superconducting insertion quadrupole magnet for the Large Hadron Collider", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, No. 2, p.p. 747-755, 1997.
- [3] K. Tsuchiya et al., "Magnetic design of a low-beta quadrupole magnet for the LHC interaction region", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 10, No. 1, p.p. 138-141, 2000.
- [4] N. Kimura et al., "A pressurized He II cryogenic system for the superconducting magnet test facility at KEK", *Adv. Cryo. Eng.*, vol. 47-A, p.p. 123-130, 2002.
- [5] T. Nakamoto et al., "Production and performance of the LHC insertion region quadrupoles at KEK", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, No. 2, p.p. 1321-1324, 2003.
- [6] N. Ohuchi et al., "Magnetic field measurements of the prototype LHC-IR MQXA at 1.9 K", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, No. 1, p.p. 188-191, 2002.
- [7] N. Ohuchi et al., "Magnetic field characteristics of the low-beta quadrupole magnets, MQXA, for LHC", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, No. 2, p.p. 191-194, 2004.
- [8] A. Ajima et al., "The MQXA quadrupole for the LHC low-beta insertions", to be published in *Nuclear Instr. and Methods*, 2005.