

超電導パルスダイポールマグネットの設計とモデルフィンディング

小林嶺夫, 森本喜三夫, 石木英彦, 和気正芳, 鈴木克弘, 菅原繁勝, 工藤昇 高工研

F. Kercher サクレー研(フランス)

1. 設計の概要

超電導線(NbTi)を用いて中心で40KG, 均一度 1×10^3 以下の双極子磁場を得ることを目標とする。試作するダイポールマグネットの基本パラメータを表1に掲げる。

Design Parameters of KEK Dipole Magnet

Magnet

Geom. length	50 cm
Magn. length	40 cm
Coil i.d.	6 cm
Iron core i.d.	11.8 cm
Core material	Si-steel, laminated (0.7 mm thick)
Load line	13 G/A
Operating field	40 KG
Operating current	3100 A
Stored energy	20 KJ
Inductance	5 mH

2. 超電導線材

超電導平編みケーブルの各パラメータを表2に示す。超電導線は Transposition pitch 毎に直接に液体ヘリウムで冷却されるため冷却効率が良く, また電流容量が大きいのでコイルのインダクタンスを下げる事ができる等の特長がある。

表1. 設計の基本パラメータ

3. コイルの設計

超電導線を円筒形の巻き枠のまわりに4箇及び7箇のグループに分けて巻く場合について計算した。各グループを巻き枠の内周に沿って動かし中心付近で均一度の良い双極子磁場が得られるような分布を求める。図1に7グループに分けたときの配置を, 図2にX軸上での磁場の均一度を示す。コイルを液体ヘリウム温度に冷却したときの収縮による均一度の変化は次に述べる tolerance の計算結果よりも小さい。

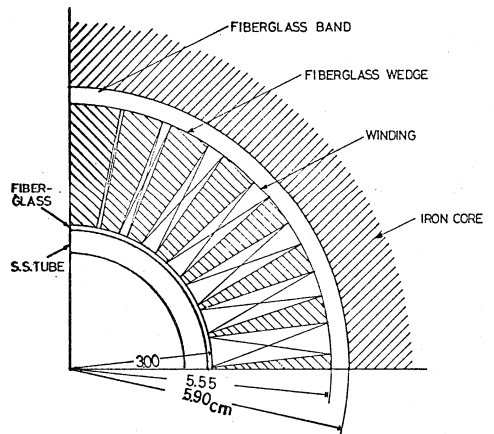
SC Braid

No. of wire	138
Patern	Ishime Ori
Transposition Pitch	10 cm
Dimensions in winding	$25.5 \times 0.48 \text{ mm}^2$
Critical current	4100 A at 50 KG
Overall current density in winding	25 KA/cm ² (for 3100A)

表2. 超電導ケーブルの特性

4. Tolerances

コイル配置の誤差に伴う均一度の変化は表3によって与えられる。すべての誤差を考慮に入れたときの結果を図3に示す。これらの結果から配置の精度として,



NO	TURNS	W(cm)	D(cm)	$\theta_i(^{\circ})$
1	13	2.55	0.628	6.726
2	11	-	0.532	18.513
3	10	-	0.483	30.773
4	9	-	0.435	42.594
5	7	-	0.338	55.400
6	4	-	0.193	67.980
7	2	-	0.097	78.271

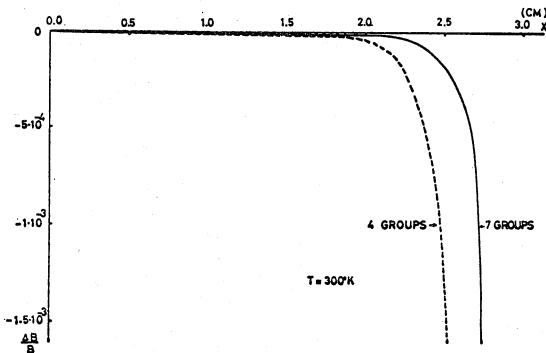


図2. 磁場の均一度(計算値)

図1. コイルの導体配置

$\Delta X \leq 0.1 \text{ mm}$, $\Delta Y \leq 0.1 \text{ mm}$, $\Delta \theta \leq 1 \text{ mrad}$ が要求される。

5. Model Winding

実際に使われる超電導ケーブルとほぼ同じ大きさの銅の平編みケーブルを用いてモデルコイルを巻いた。巻き治具はアルミニウム合金、導体間のスペーサーはガラスファイバーで製作された。超電導線は約 20 kg/cm^2 の圧力の下で 150°C に加熱され約1時間で cure された。モデルコイルと鉄シールドを図4に掲げる。このモデルコイルに電流を流して測定した結果 load line ヒンダクタンスはほぼ計算値と一致していることが確かめられた。

6. Quench に伴う温度上昇

コイルの一部で quench が起ったときの温度上昇の計算結果を図5, 6に示す。図5の No.1, No.7 は quench の起ったグループで No.1 は水平面に近い最も大きなブロックで No.7 は水平面から遠い最も巻数の少ないブロックである。磁場の値は臨界温度として使用した値のパラメータを与える。図7では quench が始って 50msec 後に電源電圧を反転した場合、 0.1Ω の保護抵抗もコイルに並列につけて quench の後 150msec で電源回路を開放した場合、両方を組み合わせた場合について計算している。 0.1Ω の保護抵抗が有効であることがわかる。

Tolerances of positioning

1. Random rotation of the conductor groups
 $\sigma(\Delta B/B) = 0.6 \times 10^{-4}$ for 4 groups design
 $\sigma(\Delta B/B) = 0.5 \times 10^{-4}$ for 7 groups design
 angular deviation $\sigma_\theta = 1 \text{ mrad (r.m.s.)}$
2. Relative positioning between two coils
 (i) $\Delta B/B = 2 \times 10^{-4}$
 for Δx (one coil /the other) = 0.1 mm
 (ii) $\Delta B/B = -3.6 \times 10^{-4}$
 for Δy (one coil/the other) = 0.1 mm
 (iii) $\Delta B/B = -4.1 \times 10^{-4}$
 for $\Delta \theta$ (one coil/the other) = 1 mrad
3. Positioning of coils inside the iron core
 $\Delta B/B = 4 \times 10^{-4}$
 for Δx (coils/iron core) = 0.1 mm
 same for $\Delta y = 0.1 \text{ mm}$

In 2,3 $\Delta B/B$ is calculated at $x = 2.0 \text{ cm}$ and tolerances are the same for two designs.

表3. コイル配置の tolerance

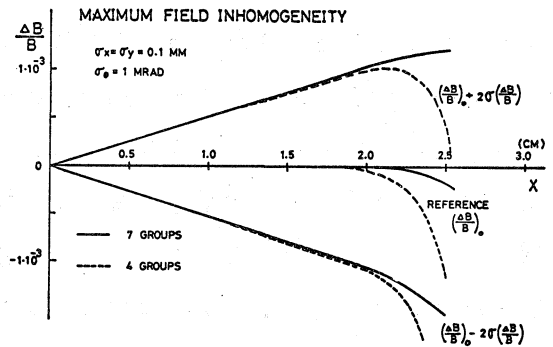


図3. 配置の誤差による均一度の変化

謝辞

高工研の三浦、西川両教授からは常に暖い御援助を頂き、BNLのDahl博士からは磁場計算、Model Winding について種々の助言を頂いた。巻き治具及びスペーサーの製作を担当された高工研工作室の諸氏、特に木御助教授、酒井、佐藤両氏に感謝する。

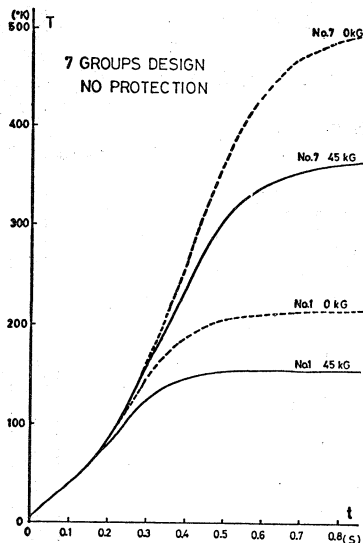


図5. quench による温度上昇

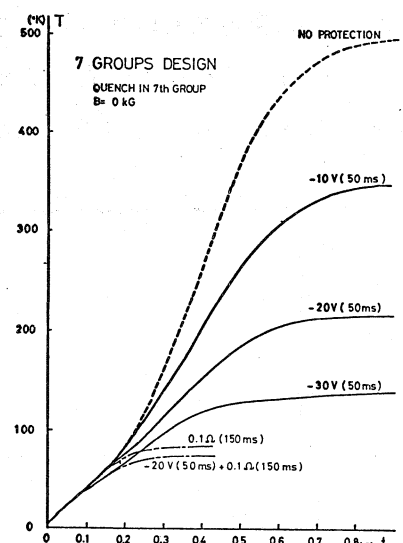


図6. quench による温度上昇

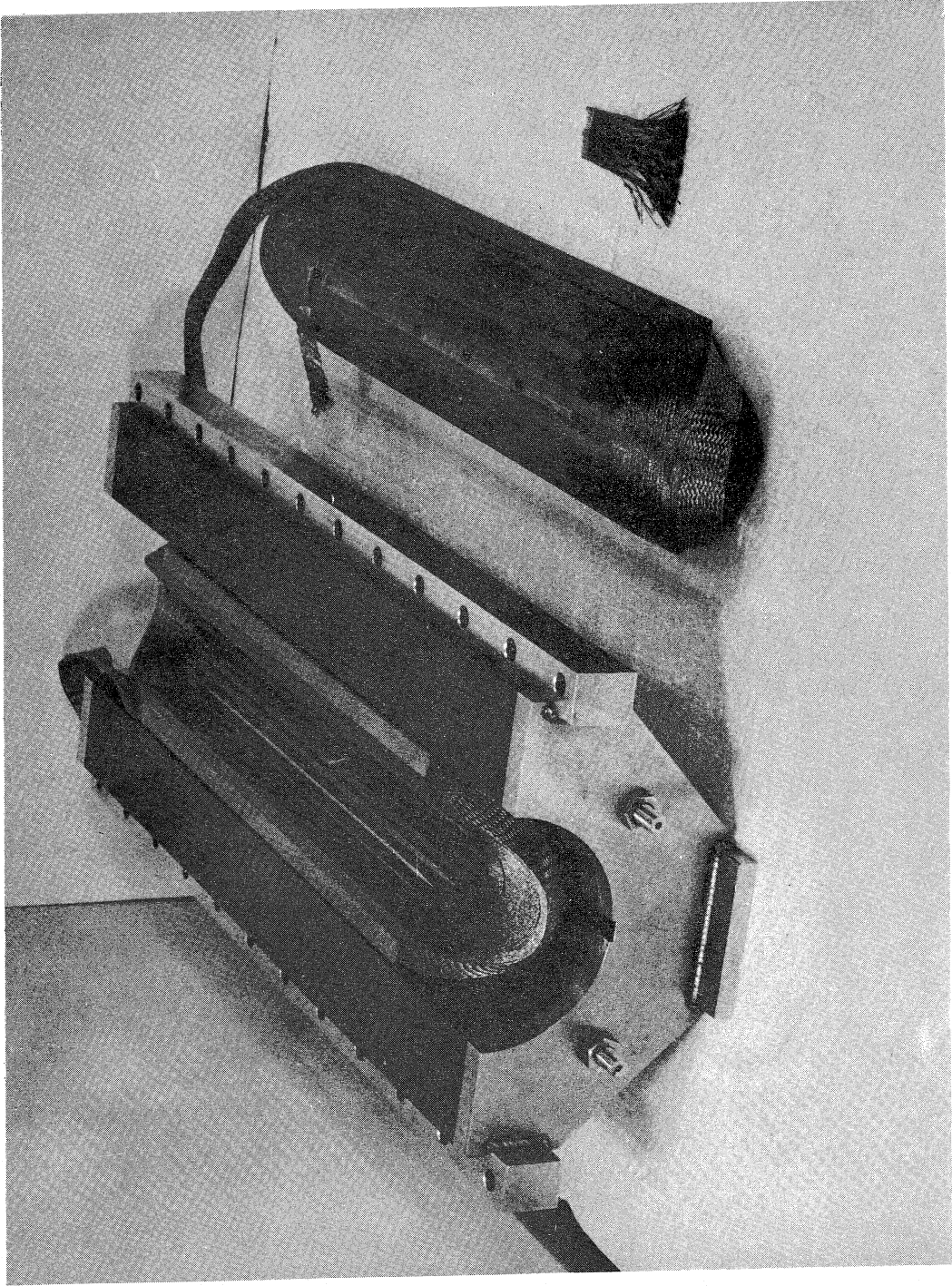


図4. モデルコイルと鉄ミールド