A Cryocooled Superconducting Magnet for High Magnetic Field Science

M. Ishizuka, T. Itou, J. Sakuraba, S. Awaji*, G. Nishijima* and K. Watanabe*

Research and Development Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 19 Natsushima-chou, Yokosuka, Kanagawa, 237-8555 Japan

* Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

We have developed a cryocooled superconducting magnet for the 28 T hybrid magnet. The liquid helium-free hybrid magnet has been designed to generate the magnetic field of 28 T that can be accomplished by combining 9 T generation due to the cryocooled superconducting magnet with 19 T generation due to a water-cooled resistive magnet, which is inserted into a room bore of the superconducting magnet. In this work, we developed the 10 T cryocooled superconducting magnet with the 360 mm room bore, whose inner coils are wound for employing high-strength Nb₃Sn wires in consideration of large hoop stress. The liquid helium-free hybrid magnet has reached the generation of 27.5 T, which is greatly useful for high magnetic field science. The hybrid magnet also achieved the high magnetic-force field ($B \cdot dB_z/dz$) of 4500 T²/m, which could levitate materials of small magnetic susceptibility such as an InSb semiconductor.

Key words: cryocooled superconducting magnet, hybrid magnet, high magnetic field science, high magnetic-force field, high-strength Nb₃Sn wire

強磁場科学用冷凍機冷却超電導マグネットの開発

石塚正之・伊藤智幸・櫻庭順二・淡路智*・西島元*・渡辺和雄*

住友重機械工業株式会社, 神奈川県横須賀市夏島町 19 (〒237-8555)

*東北大学金属材料研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

1. はじめに

磁気科学分野の研究において、強磁場の利用は、それまでの弱磁場では応答が小さかったため、捉えることが困難であった現象を検出することが可能となる。最近では、小型冷凍機の性能向上によって、液体ヘリウムを用いることなく伝導にて超電導コイルを冷却する超電導マグネットが普及し、10 T 級の磁場であれば比較的容易に利用することが可能となっている¹⁾。しかしながら、磁気科学における物性研究、新材料創成、プロセス制御、超電導材料、半導体材料、生物研究、化学研究等の分野では 20 T を超える更なる強磁場が必要とされ、そのため、各国において定常強磁場を発生させるハイブリッドマグネット施設が保有されている。

ハイブリッドマグネットは、超電導マグネットの内側に水冷銅マグネットを挿入した組み合わせ構造であり、それぞれ単独では発生できない強磁場を定常的に発生させることができる。到達磁場としては、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究所の 31.1 T、アメリカの国立高磁場研究所の 45 T、日本の物質・材料研究機構の 37.3 T、フランスのグルノーブル強磁場研究所の 31.4 T、オランダのナイメーゲン磁石研究所の 30.4 T などが挙げられ²⁾、これら全てのハイブリッドマグネットにおいて、その構成されている超電導マグネットは、液体ヘリウムにより浸漬冷却されている。

こうした中、我々は早くから小型冷凍機による伝導冷却超電導マグネットの開発に着手し、これまでに、冷凍機冷却超電導マグネットにおいて、直径 52 mm の貫通室温空間にコイル中心で 15 T の磁場を発生させる強磁場タイプの超電導マグネット^{3), 4)} (以下、15 T-φ52 mm 冷凍機冷却超電導マグネットと呼ぶ) あるいは直径 220 mm の貫通室温

空間にコイル中心で 6 T を発生させる大口径タイプの超電導マグネット¹⁾ (以下、6 T-φ220 mm 冷凍機冷却超電導マグネットと呼ぶ) を開発してきた。さらに、この冷凍機冷却超電導マグネットを、ハイブリッドマグネットの液体ヘリウム浸漬冷却超電導マグネットと置き換えることを検討してきた⁵⁾。ハイブリッドマグネットの超電導マグネットを冷凍機冷却超電導マグネットに置き換えることで、煩わしい液体ヘリウム注入作業が不要になり、長期連続運転が可能となる大きなメリットが得られる。強磁場下での物性研究、生物研究、化学研究等では連続運転が必要となる実験もあり、今回開発するハイブリッドマグネットの使用により、今後新たな知見を得ることが期待できる。

本研究においては、磁気科学分野における強磁場源の提供に焦点を当て、液体ヘリウム冷媒を必要としない、28 T 強磁場ハイブリッドマグネットを開発することを目的とする。19 T 水冷銅マグネットは既に現存するため、本研究では、その水冷銅マグネットと組み合わせるための、冷凍機冷却による 9 T 強磁場大口径超電導マグネットの開発が主な目的となる。

2. 冷凍機冷却超電導マグネットの設計

2.1 超電導線材設計

本研究において開発する、冷凍機冷却超電導マグネットの基本仕様は、直径 360 mm の貫通した室温ボアを有し、中心で 10 T の磁場を発生させることである (以下、10 T-φ360 mm 冷凍機冷却超電導マグネットと呼ぶ)。19 T 水冷銅マグネットをその室温ボアに挿入することで、水冷銅マグネットと組み合わせたときは 9 T 発生として、室温空間 φ32 mm に 28 T 級の強磁場を発生させる構成としている。なお、開発する超電導マグネットは、単独で 10 T の磁場

を発生させる設計とし、水冷銅マグネットと組み合わせるときは、10 % のマージンを考慮して 9 T までの励磁に留めることとした。

10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネットは、大口径、強磁場となるため、超電導コイルには大きなフープ力が加わることとなる。そのため、コイルを構成する超電導線について、まず、検討をしなくてはならない。現在、商用ベースで入手可能な超電導線材としては、9.8 K の臨界温度 (T_c)、12.5 T の上部臨界磁場 (B_{c2} @ 4.2 K) を示す NbTi 線、同じく 18 K の T_c 、26 T の B_{c2} を示す Nb₃Sn 線が挙げられる。NbTi 線は Nb₃Sn 線に比べて低い T_c 、 B_{c2} を示しているが、合金であるため、その機械的強度は 0.2 % 耐力で 500 MPa 以上と高く⁶⁾、比較的扱いやすい材料である。一方、Nb₃Sn 線は、NbTi 線に比べて高い T_c 、 B_{c2} を示しているが、金属間化合物であるため脆く、さらに、その機械的強度は 0.2 % 耐力で 150 MPa と低く、歪に対する臨界電流 (I_c) の低下が大きい⁷⁾ため、使用する際に注意を要する材料である。

また、Nb₃Sn 線に関しては、化合物を生成させるために 650 °C 前後の高温での熱処理が必要となり、歪による I_c 低下を避けるため、通常はコイル形状に巻線した後、熱処理を施す製法 (Wind & React (W & R) 法) にてコイル化している。このため、コイルが大型化するに伴い、大きな熱処理炉が必要となり、サイズ制約を受けることとなる。しかしながら、強磁場を得るためには、材料物性的に高い T_c 、 B_{c2} を示す Nb₃Sn コイルの外側に NbTi コイルを配置させた複合化したコイルが必要となり、Nb₃Sn コイルが必要となってくる。前章での 15 T- ϕ 52 mm 冷凍機冷却超電導マグネットでは、この複合化した構成となっている。15 T- ϕ 52 mm 冷凍機冷却超電導マグネットの Nb₃Sn コイルにおいて、フープ力は最大で 120 MPa であるため⁵⁾、機械的強度は従来の Nb₃Sn 線にて十分対応可能であった。しかしながら、強磁場化・大口径化に伴いフープ力が大きくなり、従来の Nb₃Sn 線では機械的強度が不足することが予想され、高強度化が求められる。詳細は後述するが、今回の Nb₃Sn コイルの概略設計では、150 MPa を超えるフープ力となるため、これまでの通常ブロンズ法 Nb₃Sn 線では対応できなくなる。このため、線材内部に補強構造を持たせ線材自体の強度を向上させた Nb₃Sn 線を使用することとした。今回使用する高強度 Nb₃Sn 線について、断面構成の概略を従来のブロンズ法 Nb₃Sn 線と比較して、Fig. 1 に (a) 従来ブロンズ法 Nb₃Sn 線、(b) 高強度 Nb₃Sn 線として示す。高強度 Nb₃Sn 線は Fig. 1 の (b) に示されるように、外側より順に、安定化銅、外側 Nb バリア、ブロンズ/Nb₃Sn、内側 Nb バリア、CuNi-NbTi 強化材の構成となっている。なお、CuNi-NbTi 強化材は、Cu-10 wt. %Ni マトリックスに NbTi フィラメントを埋め込んだ複合体である。また、熱処理により各層が汚染されるのを防止するため、ブロンズ/Nb₃Sn 層の内側および外側に Nb バリアを設けている。Table 1 には、10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネットに使用する線材の諸元を示す。Table 1 に示すように、Nb₃Sn 線材及び NbTi

Fig. 1 Schematic figures of the superconducting Nb₃Sn wire : (a) Cu/Nb₃Sn and (b) CuNi-NbTi/Nb₃Sn.

線材を用い、それぞれの線材について線径の異なる 2 種類の線材を用いている。Nb₃Sn 線については、2 種類ともに 330 MPa 以上の 0.2 % 耐力を示しており、通常のプロンズ法 Nb₃Sn 線の 150 MPa を大きく上回っている。今後、さらなる強磁場化・大口径化に対応可能としておくため、300 MPa 以上の 0.2 % 耐力を有することとした。一方、NbTi 線については、従来の線材でも 500 MPa 以上の 0.2 % 耐力を示し、今回のコイルでは最大 155 MPa のフープ力であるため、従来線材を使用することとした。

2. 2 高強度 Nb₃Sn 線の性能試験

本研究では、線材の性能確認のため、一回り小さいテストコイルを作製・評価し、使用可能であることを確認してから、実際のコイル製作に移ることとした。テストコイルに使用する線材は、10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネットに使用する線径よりも小さい ϕ 1.0 mm 線とし、熱処理済の線材を巻線する (React & Wind (R & W) 法) 厳しい製作条件でコイル化することとした。10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネットでは W&R 法にてコイルを作製するが、テストコイルでの R & W 法の採用は将来のコイル大型化を想定しているためである。

2. 2. 1 テストコイルの作製

テストコイルの線材緒元を通常のプロンズ法 Nb₃Sn 線と比較して Table 2 に示す。高強度 Nb₃Sn 線の 0.2 % 耐力は 340 MPa であり、通常のプロンズ法 Nb₃Sn 線の約 2.3 倍を示し、実機に使用する ϕ 1.85 mm および ϕ 1.80 mm の高強度 Nb₃Sn 線とほぼ同等である。一方、 I_c については 12 T 中で 209 A であり、通常のプロンズ法 Nb₃Sn 線の 222 A とほぼ同等となっている。得られた熱処理済の高強度 Nb₃Sn 線

Table 1 Major specifications of superconducting wires for 10 T ϕ 360 mm cryocooled superconducting magnet.

Items	Nb ₃ Sn wire		NbTi wire	
Wire diameter (mm)	1.85	1.80	2.00	1.60
Reinforcement material	CuNi-NbTi		—	—
Filament diameter (mm)	3.5	3.5	30	24
Twist pitch (mm)	50	50	50	40
Diffusion barrier	Nb		—	—
Fraction (%)				
Cu (stabilizer)	35	35	67	67
Reinforcement materials	28	33	—	—
Superconducting area (including Nb barrier)	37	32	33	33
Insulation material	E-glass		Polyvinyl formal	
0.2 % proof stress (MPa) (at R.T.)	330	330	—	—
Critical current (A) (at 4.2 K)				
7T	—	—	—	1220
7.5 T	—	—	1440	1010
8 T	—	—	1170	810
12 T	630	510	—	—
13 T	520	420	—	—
14 T	420	340	—	—

Table 2 Major specifications of CuNi-NbTi/Nb₃Sn wires for test coil.

Items	CuNi-NbTi/Nb ₃ Sn	Cu/Nb ₃ Sn
Wire diameter (mm)	1.0	1.0
Reinforcement	CuNi-NbTi	—
Filament diameter (μ m)	3.5	4.1
Twist pitch (mm)	32	30
Diffusion barrier	Nb	Nb
Fraction (%)		
Cu (stabilizer)	26.5	50.0
Reinforcement materials	22.2	—
Superconducting area (including Nb barrier)	51.3	50.0
0.2% proof stress (MPa) (at R.T.)	340	150
Critical current (A) (at 4.2 K)		
10T	293	309
12T	209	222

材がR&W法によるコイル化に絶えうることを、繰り返し曲げ後の I_c 測定により確認した後、コイル製作に移行した。熱処理済の高強度 Nb₃Sn 線材を 50 MPa の張力で、エポキシ樹脂にて塗り込みながら R&W 法によりコイル製作を行った。Table 3 にコイル緒元を示す。コイルは、内径 260 mm、外径 289 mm、高さ 319 mm であり、180 A の通電によりコイル中心で 2.18 T の磁場を発生させる設計としている。中心で 2.18 T の磁場を発生させたとき、線材に加わるフープ力は BJR より 49.2 MPa と求められる。但し、 BJR における B は線材に加わる外部磁場、 J はコイル電流密度、 R はコイル半径である。テストコイルの外観写真を Fig. 2 に示す。励磁中のコイル温度の変化を測定するため、コイルの中央部分外側にカーボングラス測温抵抗体を取り付けている。作製したコイルの通電試験は、冷凍機冷却のクライオスタ

ットに組み込んで実施した。なお、Nb₃Sn コイルに加わるフープ力を大きくするため、バックアップ磁場を印加することを考慮して、Nb₃Sn コイルの外側に NbTi コイルを組み込んだ。バックアップ磁場用の NbTi コイルは、内径 317 mm、外径 380 mm、高さ 377 mm であり、220 A の通電でコイル中心に 5.85 T の磁場を発生させる。コイル試験装置の概略を Fig. 3 に示す。GM-冷凍機 2 台を用いて Nb₃Sn および NbTi の超電導コイルを 4 K まで冷却する。また、Nb₃Sn コイル、NbTi コイルの設計電流値が異なるため、通電はそれぞれ別系統で行い、熱侵入を低減させるために、各電流ラインの途中には、外径 23 mm、内径 20 mm、長さ 120 mm の円筒型の (Bi, Pb) ₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x 高温超電導電流リードを用いている。

Table 3 Major specifications of CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil fabricated by React and Wind technique.

Items	Inner section	Outer section
Inner diameter (mm)	260	276
Outer diameter (mm)	276	289
Coil height (mm)	319	319
Number of layers	8	6
Number of turns	2316	1736
Coil constant (T/A)	0.012	
Operating current (A)	180	
Central field generation	2.18	
<i>BJR</i> (MPa)	49.2	
Impregnation material	Epoxy resin

Fig. 2 The CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil by the react and wind technique.

Fig. 3 A schematic view of the cryostat for CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil.

2. 2. 2 テストコイルの性能評価

Nb₃Sn コイル単体での性能試験結果を Fig. 4 に示す. Fig. 4 は, Nb₃Sn コイルに通電したときのコイル温度, Gifford-McMahon (G-M) 冷凍機の 2nd-stage 温度の時間変化を示している. コイルの最低到達温度は 4 K 以下となり, 十分冷却されていることがわかる. Nb₃Sn コイル単体での励磁では, ヒステリシス損に起因する, 通電直後からのコイル温度上昇が見られ, 約 6 K まで上昇している. その後, 電流値を 180 A に保持すると同時に, コイル温度は下がり始め, 約 4 K で安定していることがわかる. 180 A の電流値で約 2 時間保持した後, 電流値を下げ始めると, 再度, ヒステリシス損による, 温度上昇が観察される. Nb₃Sn コイル単体での通電試験により, 単体では 180 A 通電が可能であることを確認できた.

次に, Nb₃Sn 線材に加わるフープ力を大きくするために, バックアップ磁場中での Nb₃Sn コイルの通電試験を行い, その結果を Fig. 5 に示す. NbTi コイルに 220 A まで通電し, コイル中心で 5.85 T 発生させた状態で, Nb₃Sn コイルに通電している. Fig. 5 において, バックアップ磁場の励磁開始直後および Nb₃Sn コイルの励磁開始直後において, Nb₃Sn コイルの温度上昇が見られるが, この温度上昇は, Nb₃Sn コイルの単体通電時と同様にヒステリシス損に起因すると考えられる. 5.85 T のバックアップ磁場中では, 長時間安定して Nb₃Sn コイルへ通電できるのは 130 A であり, 約 6 時間の保持を確認した. なお, 6 時間後のコイル温度は 7.5 K で安定していた. また, 最大では 140 A の通電まで可能であり, 140 A でクエンチする直前の Nb₃Sn コイルの温度は 8 K であった.

スケーリング則より求めた高強度 Nb₃Sn 線の I_c - B 特性と R & W 法により作製した今回の Nb₃Sn コイルのロードラインを Fig. 6 に示す. また, Nb₃Sn コイルに 130 A および 140 A 通電したときに, コイルを構成している線材に加わるそれぞれの歪を, Table 4 に示す. Fig. 6 より 130 A 通電時の最大経験磁場 8.07 T において, I_c は, コイル温度が 7.5 K であるため, 250 A と求められる. 同様にして, 140 A 通電時の最大経験磁場 8.21 T において, I_c は, コイル温度

が 8 K であるため、213 A と求められる。但し、Fig. 6 の I_c - B 特性は、歪のないストレート短線からのデータを基にしておき、コイル形状にしたときの特性とは異なる。このため、今回のコイル形状において、実際に線材に加わっている歪を検討し、その歪が加わった状態での I_c について考察する。Table 4 より、巻棒への巻線による曲げ（巻棒の

Fig. 4 Performance results of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil fabricated by the React and Wind technique.

Fig. 5 Performance results of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil fabricated by the React and Wind technique in the buckup coil.

直径は 260 mm) により、歪は 0.38 % と算出され、また、コイル巻線時の張力 50 MPa より、本線材の低歪域でのヤング率 67 GPa⁸⁾ を用いて、歪は 0.07 % と算出される。これら 2 つの歪は、コイル化した時点で既に線材に加わっており、コイルに通電することにより、さらにフープ力がかかることとなる。Table 4 に示すように、コイルへの 130 A 通電時、フープ力は B/R より 119 MPa となるため、歪は 0.18 % となり、合計歪は 0.63 % となる。また、コイルへの 140 A 通電時、フープ力は 131 MPa となるため歪は 0.20 % となり、合計歪は 0.65 % となる。したがって、どちらの通電においても、0.6 % 以上の大きな歪が加わっていることとなる。

ここで、歪と I_c の関係を明らかにしておくため、本線材と構成部材が同一、かつ、構成比もほぼ同等である線材に関する三好らの報告⁹⁾ を Table 5 にまとめ、今回の歪がかかった状態での I_c を算出した。なお、Table 5 において、歪が加わっていない状態で規格化した値 (I_c/I_{c0}) で、 I_c を表記し、比較のため、通常のブロンズ法 Nb₃Sn 線の値についても併記している。Table 5 より、Nb₃Sn コイルに 130 A 通電したときの 0.63 % の歪がかかった状態において、 I_c/I_{c0} は 73 % となっており、また、140 A 通電したときの 0.65 % の歪がかかった状態において、 I_c/I_{c0} は 70 % となっ

Fig. 6 I_c - B curves and load line of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil fabricated by the React and Wind technique in the buckup coil.

Table 4 Strains of CuNi-NbTi/Nb₃Sn test coil.

Items	Operating current of Nb ₃ Sn test coil (A)	
	130	140
Winding		
Bending strain (%)	0.38	0.38
Tensile strain (%)	0.07	0.07
Hoop stress (MPa)	119	131
Hoop strain (%)	0.18	0.20
Central field generation (T)	7.42	7.55
$B_{\max}$ (T)	8.07	8.21
Total strain (%)	0.63	0.65

Table 5 Strain dependence of I_c at 4.2K, 14.5T in CuNi-NbTi/Nb₃Sn wire and Cu/Nb₃Sn wire.

Strain (%)	Normalized I_c (I_c/I_{c0}) ⁹⁾	
	CuNi-NbTi/Nb ₃ Sn	Cu/Nb ₃ Sn
0.63	0.73	0.42
0.65	0.70	0.23

Table 6 Major specifications of superconducting coils for 10T- ϕ 360mm magnet.

Items	Inner coil		Outer coil	
	Section A	Section B	Section C	Section D
Superconducting wire	CuNi-NbTi/Nb ₃ Sn		NbTi	
Wire diameter (mm)	1.85	1.80	2.00	1.60
Coil inner diameter (mm)	400	495	605	670
Coil outer diameter (mm)	480	580	665	755
Coil height (mm)	400	450	500	550
Number of turns	4350	5490	3860	6570
Wire length (km)	6.0	9.2	7.7	14.9
Operating current (A)	246	246	350	350
Current density (A/mm ²)	70	73	93	143
Critical temperature (K)	8.5	9.5	6.5	7.5
Maximum magnetic field (T)	11.3	8.5	5.5	2.6
Central field generation (T)	2.3	2.4	2.1	3.2
Total magnetic field (T)	10			
Stored energy (MJ)	6.5			
Hoop stress (MPa)	160	155	155	130

ている。前述より、130 A 通電時における 8.07 T, 7.5 K の条件では、250 A の I_c であるため、0.63 %の歪を考慮すると、250 A $\times$ 73 %より 183 A の I_c が得られる。しかしながら、今回安定して通電可能であった値は 130 A であり、 I_c (=183 A) の 71 %に留まっている。また、140 A 通電時における 8.21 T, 8 K の条件では、213 A の I_c であるため、0.65 %の歪を考慮すると、213 A $\times$ 70 %より 150 A の I_c が得られる。したがって、作製したテストコイルの I_c は歪を考慮したときの I_c の 94 %となり、100 %とはならなかったが、コイル内部に温度分布があり、局所的に 8K 以上となりうることを考慮すると、6%の差は十分予想される範囲であると考えられる。また、通常のプロセス法 Nb₃Sn 線においては、0.63 %の歪では I_c/I_{c0} が 43 %となり、0.65 %の歪では I_c/I_{c0} が 23 %となり、0.6 %以上の歪により I_c が大きく低下してしまうことが確認できる。今回のテストコイル評価により、高強度 Nb₃Sn 線材および Nb₃Sn コイルの R & W 製作方法が、実用に耐えうることを確認できた。ところで、10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネット用の実機 Nb₃Sn コイルは W & R 法にて製作するため、コイル化した時点では構成線材に歪は加わらず、歪に関しては通電時のフープ力のみを考慮すれば良いことになる。このため、テストコイルよりも実機 Nb₃Sn コイルの方が、リスクを低減できると考えられる。

2. 3 実機超電導コイルの設計

10 T- ϕ 360 mm 冷凍機冷却超電導マグネット用の超電導コイルの諸元を Table 6 に示す。これまでの強磁場超電導マグネットと同様に^{1), 4), 5)}、コイルは大別して、内側に

Nb₃Sn コイル、その外側に NbTi コイルを配置した構成となっている。さらに、各コイルはそれぞれ 2 つのセクションに分割され、合計で 4 つのコイルによって構成されている。なお、4 つのコイルは、コイルボビンを別々としており、グレーディングによる巻き線時の巻き乱れを、防止できる構造としている。Table 6 に示すように、各セクションのコイルにおいて、使用する線材の線径を変化させてグレーディングし、また、高さを調整することでコイル全体として小型化を図り、その結果、コイル巻線重量を 1t 未満となる、851 kg に抑えることができた。液体ヘリウム浸漬冷却方式による従来型の超電導マグネットでは、ほぼ同等仕様とした場合、コイル外径 1121 mm、高さ 680 mm、コイル巻線重量 3800 kg であり¹⁰⁾、コイル重量で約 1/4 まで小型化できている。内側の Nb₃Sn コイルは、線径 ϕ 1.85 mm の線材よりなるセクション A コイルと、線径 ϕ 1.80 mm の線材よりなるセクション B コイルとによって構成されている。定格の 10 T を励磁したとき、Section A の Nb₃Sn コイルで最大経験磁場は 11.3 T となり、フープ力は B_z/R より算出して 160 MPa となった。同様にして、Section B の Nb₃Sn コイルには、155 MPa のフープ力が加わることとなる。したがって、どちらの Nb₃Sn コイルにも 150 MPa 以上のフープ力が加わることとなり、高強度 Nb₃Sn 線が必要であることがわかる。また、160 MPa の応力下では、高強度 Nb₃Sn 線に加わる歪は、ヤング率 67 GPa⁹⁾を用いて 0.23 %と算出され、本歪では I_c 低下は殆どないことから⁹⁾、本コイルに十分使用可能であることがわかる。一方、外側の NbTi コイルは、線径 ϕ 2.00 mm の線材よりなるセクション C コイ

Table 7 Estimated heat loads of 10T- ϕ 360mm superconducting magnet.

Heat load	No operating current		Full energized	
	Inner coil	Outer coil	Inner coil	Outer coil
Operating current (A)	0	0	246	350
1st-stage				
Copper current leads (W)	21.3		38.2	
Measuring wires (W)	0.4		0.4	
Radiation (W)	26.0		26.0	
Joule heating (W)	0		8.5	
Support structures (W)	6.3		6.3	
Total (W)	54.0		79.5	
2nd-stage				
Bi-2223 current leads (W)	0.18		0.18	
Measuring wires (W)	0.20		0.20	
Radiation (W)	0.05		0.05	
Joule heating (W)	0		0.86	
Support structures (W)	0.46		0.46	
AC losses	0		2.75	
Total (W)	0.89		4.50	

ルと、線径 ϕ 1.60 mmの線材よりなるセクションDコイルから構成されており、NbTiコイルへ加わるフープ力は、セクションCコイルに加わる155 MPaが最大となっている。NbTi線は機械的強度の1つの指針となる0.2%耐力で500 MPaを示し、今回の155 MPaのフープ力による歪では I_c の劣化は殆どないことから¹¹⁾、今回開発する超電導コイルには従来のNbTi線にて対応可能と判断できる。また、Nb₃Snコイルへの電流負荷を低減するため、Nb₃Snコイルの通電電流値をNbTiコイルの通電電流値よりも低く設計し、このため、通電電流ラインを2系統とした。Nb₃Snコイルへ246 A通電し、NbTiコイルへ350 A通電したとき、コイル中心で10 Tの磁場が発生する。

コイル中心で10 Tの磁場を発生させたとき、蓄積エネルギーは6.5 MJとなり、これまでに我々が製作してきた冷凍機冷却超電導マグネットに比べて、最大の蓄積エネルギーとなる。

2. 4 熱設計

冷凍機冷却超電導マグネットにおける超電導コイルの冷却は、冷凍機による伝導冷却であるため、マグネットシステム全体としての熱設計が重要となる。この熱設計を基にして、G-M冷凍機の必要能力および台数が決定される。コイルに無通電時および定格電流通電時の熱設計値を、Table 7に示す。無通電時において、G-M冷凍機の1段ステージへの熱負荷は、Cu電流リードの伝導熱である21.3 Wと輻射熱の26.0 Wとで大半を占め、合計では54.0 Wとなっている。また、G-M冷凍機の2段ステージへの熱負荷は、荷重支持体からの伝導熱である0.46 Wが最も大きく、合計では0.89 Wとなっている。一方、定格電流通電して、10 Tの磁場発生時においては、1段ステージへの熱負荷は、ジュール発熱分が無通電時の熱負荷に加算され、合計で79.5 Wとなっている。また、2段ステージへの熱負荷は、交流損失の発熱とジュール発熱が無通電時の熱負荷に加算され、合計で4.50 Wとなっている。ここで、設計電流通電

Fig. 7 Schematic view of the 10T- ϕ 360mm superconducting magnet.

したとき、2段ステージには交流損失による大きな熱負荷2.75 Wが加わっているが、この計算には、想定される最大挿引速度である0.175 A/sを用いている。以上の計算結果から、1段ステージの冷凍能力が35 W/50 K、2段ステージの冷凍能力が1.5 W/4.2 Kを有する、G-M冷凍機を4台用いることとした。このとき、G-M冷凍機1台当たりの熱負荷は、定格電流通電時、1段ステージに19.85 W、2段ステージに1.13 Wとなり、したがって、コイル温度は4.2 K以下に冷却されることがわかる。

2. 5 超電導マグネット

作製した10 T- ϕ 360 mm冷凍機冷却超電導マグネットの概略をFig. 7に、外観写真をFig. 8にそれぞれ示す。超電導マグネットは外径1300 mm、高さ1610 mmであり、直径360 mmの貫通した室温ボアを有しており、G-M冷凍機4台を用いて超電導コイルが冷却される。また、通電電流に関しては、外側のNbTiコイルと内側のNb₃Snコイルとで電流値が異なり、2台の電源を用いてそれぞれのコイルへ別系統で通電す

Fig. 8 Photograph of the 10T-φ360mm superconducting magnet.

るため、本超電導マグネットは2つの電流ラインを有している。さらに、超電導コイルへの熱侵入を低減するため、Fig. 7に示すように、 $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 高温超電導電流リードを、1st-stageと2nd-stageとの間の電流供給ラインに用いており、電流ラインが2系統であるため、合計4本の高温超電導電流リードを使用している。なお、本マグネットはこれまでの冷凍機冷却超電導マグネットに比べて、電流値および漏洩磁場が大きいことから、 I_c を増やすために断面積を大きくして、外径33 mm、内径30 mm、長さ120 mmとしている。この断面積増加により、従来の超電導電流リードに比べ、 I_c は1.5倍以上となり、1500 A (@ 77 K, 自己磁場) 以上を示している。

3. 試験結果および考察

3. 1 初期冷却

初期冷却における超電導コイルと熱シールドの温度変化をFig. 9に示す。超電導コイルに関しては、 Nb_3Sn コイルの電極部、 NbTi コイルの電極部および冷凍機より離れた Nb_3Sn コイルの底部の3箇所を、セルノックス測温抵抗体により温度計測している。また、熱シールドに関しては、冷凍機に近い上部と冷凍機から最も離れた底部の2箇所を、セルノッ

Fig. 9 Coil and thermal shield temperatures as a function of time during initial cooldown.

クス測温抵抗体により温度計測している。冷却を開始してから約215時間後に、超電導コイルの温度が約3 Kに到達し定常となり、そのときの熱シールド温度は、上部が42K、下部が45 Kで定常となった。熱シールド温度の上部と下部とで、温度差が3 K生じたのは、上部側に冷凍機が配置されており、上部と下部とで温度分布が生じているためと考えられる。一方、コイル温度に関しては上下を均熱のための銅ブスバーで接続しているため、殆ど温度差は確認されなかった。冷却被重量から算出した初期冷却時間は約220時間であり、実測値とはほぼ一致していることが確認できる。

3. 2 励磁試験結果

ハイブリッドモードでの励磁試験に先立ち、10 T-φ360 mm冷凍機冷却超電導マグネット単体にて励磁試験を実施した。まず、外側の NbTi コイルを単体にて励磁試験し、3回のトレーニングを経て、4回目の励磁で設計磁場5.3 T (通電電流350 A) を達成した。一方、内側の Nb_3Sn コイルの励磁試験は、単体では線材への最大経験磁場が設計値より小さく、臨界温度が12 Kを超えるため、設計磁場よりも25 %増しの5.8 T (通電電流303 A) までの励磁試験を行い、その結果、トレーニング無しで5.8 Tを達成した。以上のように、各コイル単体での励磁試験による健全性を確認後、内側の Nb_3Sn コイル、外側の NbTi コイルを組み合わせる励磁試験を行った。組み合わせ励磁試験では、安全を考慮して設計磁場の10 Tよりも5 %低い9.5 Tでの確認試験を行うこととし、その結果、内側の Nb_3Sn コイルで4.2 T (通電電流221 A)、外側の NbTi コイルで5.3 T (通電電流348 A) の磁場をそれぞれ発生させ、合計で9.5 Tの磁場発生を確認した。

超電導マグネット単体での9.5 Tの磁場発生を確認後、超電導マグネットの室温ボア内に設置された水冷銅マグネット (32 mmの室温ボア) と組み合わせるハイブリッド励磁運転を実施した。ハイブリッド励磁運転での試験結果をFig. 10に示す。Fig. 10は、超電導マグネットで8.5 Tの磁場を発生させた後、水冷銅マグネット19 Tの磁場を発生させ、合計で27.5 Tの磁場を発生させたときの、通電電流、磁場、温度の関係を時間経過とともに示している。中心での27.5 T磁場発生は、冷凍機冷却超電導マグネットを用い

Fig. 10 Performance results of hybrid operation and independent operation of superconducting magnet.

たハイブリッドマグネットとしてはこれまでに報告はなく、今回が初めてである。

ハイブリッド励磁運転での27.5 Tの磁場発生後、水冷銅マグネットを消磁し、超電導マグネットの磁場を8.5 Tから9.5 Tまで上げて、9.5 Tの磁場発生を確認している。なお、コイル温度に関しては、Nb₃Snコイルの巻棒内側（中央高さ）にセルノックス測温抵抗体を追加設置し、コイル高さの中央付近での温度を計測できるようにした。超電導コイル単体での通電開始直後より、ヒステリシス損失に起因するコイル温度の上昇が見られ、Nb₃Snコイルの巻棒内側では約8 Kまで上昇しており、他の測定箇所のコイル温度に比べて3 K以上高くなっている。今回のコイル温度測定により、Nb₃Snコイルにおいて少なくとも3K以上の温度差のある分布が生じており、コイル中央付近で最も温度が高くなっていると推察される。高さ方向に長いコイルを上下より伝導にて冷却しているため、コイル中央で温度が高くなっていると思われる¹⁰⁾。一方、熱シールド温度に関しては、27.5 Tの磁場を発生させたとき、約3 Kの上昇が見られ、シールド上部と下部とで、通電開始前の約3 Kの温度差がついたままであった。なお、28 Tの発生磁場については、温度上昇による、Section Aコイルのクエンチにより、確認できていない。Section Aコイルの T_c はTable 6より8.5 Kであり、巻棒内側での約8 Kまでの温度上昇を考えると、8.5 K以上となる箇所も十分存在すると推察され、温度クエンチの可能性が高い。

3. 3 磁気科学へのハイブリッドマグネット利用

強磁場を用いることにより、磁気力場は通常大きくなり、水、プラスチック、ガラス等の通常は磁場に応答しない非常に小さな磁化率の反磁性体等の物質を、重力に逆らって

Fig. 11 Calculated magnetic-force field distribution of the hybrid magnet along the z-axis.

浮上させることが可能となる。物質を磁気浮上させた状態で溶融することにより、坩堝が不用となり、坩堝からの不純物混入を防ぐことができる。また、磁気浮上により、重力の影響を排除することができ、熱処理による結晶配向が有利に働くことも考えられる。磁気科学においては、磁場強度とともに磁気力場 ($B \cdot dB_z/dz$) は磁気浮上等に重要な値であると考えられる。反磁性物質を磁気浮上させるには、その物質の重力と磁気力とが釣り合うことが必要である。単位質量当たりの磁気力 F_w は次式 (1) より求められる¹²⁾。

$$F_w = \chi_w / \mu_0 \cdot B \cdot dB_z/dz. \quad \dots (1)$$

ここで、 χ_w は質量磁化率、 μ_0 は真空の透磁率、 B は磁束密度、 dB_z/dz は垂直方向の磁束密度勾配である。半導体材料の1つであるInSbは $\chi_w = -3.58 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ であり、磁気浮上に必要な磁気力場 ($B \cdot dB_z/dz$) は3440 T²/m以上である¹²⁾。室温ボアでの鉛直方向の磁場分布測定結果と、その結果より算出した磁気力場 ($B \cdot dB_z/dz$) をFig. 11に示す。本マグネットは、最大で4500 T²/mの磁気力場が得られ、従来では磁気浮上させることができなかった、磁化率の小さなInSb半導体材料の浮上が可能となることがわかる。

4. まとめ

強磁場科学用冷凍機冷却超電導マグネットの開発を行った。本マグネットを開発するにあたり、高強度Nb₃Sn線が必要となり、テストコイルにてその性能評価を行った結果、実機コイルに適用可能であることを確認した。高強度Nb₃Sn線を用いて開発した超電導マグネットは、単体では設計磁場10 Tに対して9.5 Tまで到達し、水冷銅マグネットとのハイブリッド運転では、設計磁場28 Tに対して27.5 Tまで到達した。このときのハイブリッドマグネットの磁気力場 ($B \cdot dB_z/dz$) は最大で4500 T²/mであり、従来では磁気浮上させることができなかった磁化率の小さい材料を、浮上させることができるようになった。今回開発したマグネットは、液体ヘリウム補充のための試験中断が不用なため、長時間の連続磁気浮上が可能であり、それによって、新材料開発への貢献も期待できる。その他、強磁場を保持して行う、磁

場中での材料評価等にも優位性があり，磁気浮上したままでの金属溶融あるいは強磁場中での結晶配向，新材料開発，材料評価等に利用することが考えられる．

謝辞 本研究の実施にあたり，高強度 Nb₃Sn 線材を開発・提供してくださった古河電気工業株式会社関係者に感謝致します．また，本論文の執筆にあたり，実験結果の考察に関して，ディスカッションさせて頂いた東北大学の濱島教授に感謝致します．

References

- 1) T. Hasebe, J. Sakuraba, K. Jikihara, K. Watazawa, H. Mitsubori, Y. Sugizaki, H. Okubo, Y. Yamada, S. Awaji and K. Watanabe : *Adv. Cryo. Eng.*, 43 (1998).
- 2) K. Watanabe : *J. Cryo. Soc. Jpn.*, 41 (2006) (in Japanese).
- 3) K. Watanabe, S. Awaji, M. Motokawa, Y. Mikami, J. Sakuraba and K. Watazawa : *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37 (1998).
- 4) J. Sakuraba, Y. Mikami, K. Watazawa, K. Watanabe and S. Awaji : *Supercond. Sci. Technol.*, 13 (2000).
- 5) K. Watanabe, G. Nishijima, S. Awaji, K. Takahashi, K. Koyama, M. Motokawa, M. Ishizuka, T. Hasebe and J. Sakuraba : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 14, 2 (2004).
- 6) D. S. Easton and C. C. Koch : *Adv. Cryo. Eng.*, 22 (1977).
- 7) J. W. Ekin : *Cryogenics* 20 (1980).
- 8) M. Ishizuka, T. Hasebe, T. Itou, T. Tsurudome, J. Sakuraba, K. Miyoshi, G. Nishijima, S. Awaji and K. Watanabe : *J. Cryo. Soc. Jpn.*, 39 (2004) (in Japanese).
- 9) K. Miyoshi, H. Sakamoto, S. Meguro, G. Nishijima, S. Awaji and K. Watanabe : *J. Cryo. Soc. Jpn.*, 39 (2004) (in Japanese).
- 10) S. Awaji, G. Nishijima, K. Watanabe, T. Itou, M. Ishizuka and J. Sakuraba : *J. Cryo. Soc. Jpn.*, 41 (2006) (in Japanese).
- 11) J. W. Ekin, F. R. Fickett and A. F. Clark : *Adv. Cryo. Eng.*, 22 (1977).
- 12) K. Takahashi, S. Awaji, Y. Sasaki, K. Koyama and K. Watanabe : *J. Cryo. Soc. Jpn.*, 41 (2006) (in Japanese).

2007 年 2 月 13 日受理，2007 年 5 月 16 日採録