研究論文

高強度 CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線材を用いて作製した React and Wind 法による超電導コイル —冷凍機冷却型超電導マグネットへの適用—

石塚 正之[†], 長谷部 次教, 伊藤 智幸, 鶴留 武尚, 櫻庭 順二,
三好 一富*, 西島 元**, 淡路 智**, 渡辺 和雄**

A Superconducting Coil with High-strength CuNi-NbTi/Nb₃Sn Wire Fabricated Using the React and Wind Technique Application for the Cryocooled Superconducting Magnet

Masayuki ISHIZUKA, Tsuginori HASEBE, Tomoyuki ITO, Takehisa TSURUDOME, Junji SAKURABA,
Kazutomi MIYOSHI*, Gen NISHIJIMA**, Satoshi AWAJI** and Kazuo WATANABE**

Synopsis: A superconducting coil with high-strength CuNi-NbTi/Nb₃Sn wire was fabricated using the react and wind (R&W) technique. The CuNi-NbTi/Nb₃Sn wire indicated a high 0.2% proof stress at a room temperature of 340 MPa, which is much larger than the conventional Cu/Nb₃Sn wire of 150 MPa. The dimensions of the Nb₃Sn coil produced using the R&W technique are 260 mm in inner diameter, 289 mm in outer diameter and 319 mm in height. It is designed to generate a central field of 2.18 T at 180 A. The superconducting CuNi-NbTi/Nb₃Sn coil was inserted into a previously fabricated cryocooled backup NbTi coil and a field of 5.85 T was generated in the coil center. The constructed cryocooled superconducting magnet has a room temperature bore of 220 mm in diameter and is designed to generate a central field of 8 T. Consequently, the superconducting magnet generated 7.5 T at its maximum and 7 T stably for 12 hr.

Keywords: cryocooled superconducting magnet, react and wind technique, high-strength Nb₃Sn wire, CuNi-NbTi reinforcement

1. はじめに

冷凍機冷却型超電導マグネットは、Gifford-MacMafon (G-M) 型の小型冷凍機により、超電導コイルを伝導冷却するため、液体ヘリウムを全く必要としない^{1), 2)}。したがって、容易に強磁場が得られることとなり、その使用用途は広がっている。こうした中、十分なワークエリアを確保

するため、マグネットに対しては、より広い空間が求められ、同時に高磁場での特性評価目的で、より強い発生磁場が求められている。このようなマグネットの大口径化、強磁場化に対応するためには、超電導コイルを構成している線材の最大経験磁場 (B_{max}) の増加及び線材に加わる電磁力の増加の問題を解決しなくてはならない。そのためには、高い臨界温度 (T_c) 及び上部臨界磁場 (B_{c2}) を持つ高強度超電導線材が求められるが、これら T_c 及び B_{c2} は材料自体によってほぼ決まってしまうため、材料を変えることなくして大幅な改善は期待できない。一方、異種材料との複合化により比較的容易に強度は改善可能であり、このため、元々高い T_c 及び B_{c2} を有する超電導線を母材として、複合化処理により強度を上げることが、上記問題解決の有効手段と考えられる。

汎用的な実用超電導線として、NbTi 線、Nb₃Sn 線の二種類が挙げられるが、我々はその中で T_c 及び B_{c2} が高い Nb₃Sn 線に着目し、複合化による線材の高強度化を目指してきた^{3), 4)}。一方、Nb₃Sn コイル製作において、巻線後に

Received July 5, 2004

住友重機械工業株式会社

〒237-8555 神奈川県横須賀市夏島町 19

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

* 古河電気工業株式会社

〒321-1493 栃木県日光市清滝町 500

The Furukawa Electric Co., Ltd., 500 Kiyotaki, Nikko, Tochigi, 321-1493 Japan

** 東北大学金属材料研究所

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1

Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

[†] E-mail: Mas_Ishizuka@shi.co.jp

熱処理するいわゆる通常の Wind and React (W&R) 法では、熱処理炉によるサイズ制約を受けてしまうため、我々は、そのサイズ制約を回避する目的で、熱処理済の線材を巻線し、コイルとする React and Wind (R&W) 法の開発を、線材の高強度化と同時に実施してきた⁷⁾。高強度 Nb₃Sn 線材を R&W 法にて作製することで、マグネットの大口径化は可能となり、さらに NbTi コイルをその外側に配置し、組み合わせることで強磁場対応ができると考えられる。

これまでに、線材の高強度化に関しては、Nb₃Sn 線材の安定化銅の一部を CuNb に置き換えることで、従来のブロンズ法 Nb₃Sn 線材と比較して、室温における 0.2% 耐力が約 30% 向上し、195 MPa を有する線材が得られている⁷⁾。さらに、開発した CuNb 強化 Nb₃Sn 線材を R&W 法によりコイル化し、既存の NbTi コイルの内側に挿入し、冷凍機冷却超電導マグネットを製作した。本マグネットは直径 220 mm の貫通した室温空間を有し、中心で 8 T の磁場を発生させる設計とし、最大で 7.5 T の磁場を発生することができた⁷⁾。しかし、電極部での接続部等で線材に応力集中が生じてしまい、線材自体の強度不足が原因となり、長時間安定して励磁することは困難であった。このため、ここでは繰り返し長時間励磁を可能とするため、CuNb 強化線よりもさらに線材を強化することを目的として研究開発を行った。具体的には、強化材料の CuNb を CuNi-NbTi に変更し、線材内における強化材の配置をブロンズ/Nb₃Sn フィラメントの内側とした。強化材をブロンズ/Nb₃Sn フィラメントの内側とした理由は、仮に強化材を外側配置とし、同等の断面積を得ようとしたとき、強化材の断面形状のリング厚が薄くなるため伸線加工が困難となり、同時に Nb バリアの面積が増えてしまい、悪影響が出てしまうためである。ここでは、開発した CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材を R&W 法にてコイル化し、既存の CuNb 強化 Nb₃Sn コイルと入れ替えて、8 T-φ220 mm 冷凍機冷却型超電導マグネットとして評価した。本報告では、主として CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材の臨界電流 (I_c) 特性及び R&W コイルの特性について述べる。

2. 高強度 Nb₃Sn 線材の特性

得られた CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材の諸元をこれまで開発した CuNb 強化 Nb₃Sn 線材及び通常のブロンズ法 Nb₃Sn 線材と比較して Table 1 に示す。また、Fig. 1 にそれぞれの Nb₃Sn 線材の概略構成を示す。今回開発した CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材は、Fig. 1 (c) に示すように、内側より順に、CuNi-NbTi 強化材、内側 Nb バリア、ブロンズ/Nb₃Sn、外側 Nb バリア、安定化銅の構成となっている^{5), 9)}。なお、CuNi-NbTi 強化材は、Cu-10wt.%Ni マトリックスに NbTi フィラメントを配置した複合体である⁹⁾。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 層の内側及び外側に Nb バリアを設けている。

Table 1 Major specifications of Nb₃Sn wires.

Items	CuNi-NbTi/ Nb ₃ Sn	CuNb/ Nb ₃ Sn	Cu/ Nb ₃ Sn
Wire diameter (mm)	1.0	1.0	1.0
Reinforcement	CuNi-NbTi	CuNb	—
Filament diameter (μm)	3.5	3.5	4.3
Twist pitch (mm)	32	30	30
Diffusion barrier	Nb	Nb	Nb
Fraction (%)			
Cu (stabilizer)	26.5	20.0	50.0
Reinforcement materials	22.2	35.0	—
Superconducting area (including Nb barrier)	51.3	45.0	50.0
0.2% proof stress (MPa) (at R.T.)	340	195	150
Critical current (A) (at 4.2K)	293	—	309A
	(at 10T)		(at 10T)
	209	205	222
	(at 12T)	(at 12T)	(at 12T)

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

Fig. 2 Strain cycle dependence of the I_c for heat-treated CuNi-NbTi/Nb₃Sn wires.

Fig. 3 Magnetic field dependence of the I_c for heat-treated CuNi-NbTi/Nb₃Sn wires.

Table 1 に示すように二種類の強化 Nb₃Sn 線は、臨界電流 (I_c) を維持したままで強度を向上させるため、通常のブロンズ法 Nb₃Sn 線材の構成と比較して、ブロンズ/Nb₃Sn の低減を抑え、安定化銅を減らしその低減分を強化材に割り当てている。このため、強化線の I_c は通常のブロンズ法 Nb₃Sn 線に比較して、 $B=10$ T では約 5% の低減に収まり、CuNi-NbTi 強化線の室温における 0.2% 耐力は、通常ブロンズ法線の約 2.3 倍、CuNb 強化線の約 1.7 倍となる 340 MPa を示し、向上していた。また、CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線材は二重の Nb バリアを有するため、他の二種類の線材に比べ、ヒステリシス損失が大きくなると予想され、冷凍機冷却型超電導マグネットには不利になると思われるが、今回は線材の強度向上を主目的としたため、このような断面構成とした。

得られた CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材が、R&W 法に適用可能かを評価するため、熱処理後の線材を繰り返し曲げた後、 I_c の測定を実施した。なお、熱処理は Ar ガス雰囲気中で、670℃にて 96 時間行い、繰り返し曲げについては、実際の巻線機及び巻枠を使用して実施した。供給ドラムに巻かれている熱処理済の線材を、数個のプーリーに通した

後、巻枠に巻いてコイルとするため、この巻枠への巻線・巻戻しを数回繰り返した線材の I_c を測定した。なお、供給ドラム及びプーリーの直径は、線材に加わる曲げ歪が 0.4% 以下となるように設定し、巻線張力は 50 MPa とした。 I_c 測定結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 において、繰り返し曲げ回数 0 回は供給ドラムより取り出したままの線材、繰り返し曲げ回数 1 回は各プーリー通過後、直径 260 mm の巻枠に巻線・巻戻した線材をそれぞれ示し、最大 3 回までの繰り返し曲げを実施した各線材から約 30 mm 切り出し、直線状で I_c 測定を行った。なお、今回使用した巻き線機のプーリーを全て通しただけで、線材には 9 回の曲げ・逆曲げが与えられている。測定は液体ヘリウム (4.2 K) 中にて、14.5 T の磁場下で測定し、 I_c は 1 μ V/cm の電界基準で定義した。測定結果に若干のばらつきは見られるが、繰り返し曲げ 0 回の線材は平均で 155 A の I_c を示し、3 回では平均 160 A の I_c となり、繰り返し曲げ回数が増えるにつれ、 I_c が向上していることがわかる。なお、熱処理済の通常ブロンズ法 Nb₃Sn 線は、強度不足により本巻き線機を通すことができないため、比較用として、直線状で熱処理したブロンズ法 Nb₃Sn 線材から、約 30 mm 切り出した試料を測定し、その結果 I_c は約 163 A を示した。

13.5~17 T の磁場下における I_c の測定結果を Fig. 3 に示す。測定試料には、Fig. 2 と全く同一である繰り返し曲げ 0 回及び 1 回の線材と、その途中で切り出した線材を用いた。測定試料の形状は、直線状で約 30 mm の長さである。Fig. 3 において、#1 はドラムより取り出したままの線材 (Fig. 2 の繰り返し曲げ 0 回と同一)、#2 は全てのプーリーを通った状態の線材、#3 は全てのプーリーを通り巻枠に巻いた状態の線材、#4 は #3 を実施後、巻き戻した状態の線材 (Fig. 2 の繰り返し曲げ 1 回と同一)、をそれぞれ示す。測定した #1~#4 の全ての線材は、履歴に関係なく、磁場の増加とともに、ほぼ同じ割合で I_c が低下していることがわかる。今回の測定では、最も厳しい履歴を受けた #4 の線材が、各磁場において高い I_c を示しており、繰り返し曲げにより、 I_c が向上していることがわかる。繰り返し曲げを行うことで、線材の長手方向のみならず円周方向の残留歪が開放され⁵⁾、そのために I_c が向上したと考えている。強化 Nb₃Sn 線に適度な曲げ歪を与えることで、 I_c が向上することは他でも報告されており⁵⁾、 B_{c2} 及び T_c が向上するという報告もされている⁶⁾。今回の巻線工程における繰り返し曲げは、 I_c 劣化を及ぼさず、むしろ向上する結果となり、開発した CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線材は R&W 法に適用できることがわかった。

3. 高強度 Nb₃Sn 線材のコイル化

熱処理した CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材に 25 μ m 厚さのポリイミドテープをハーフラップ巻きして絶縁処置し、R&W 用線材とした。得られた CuNi-NbTi 強化 Nb₃Sn 線材

Table 2 Major specifications of Nb₃Sn coil fabricated using the 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 (T)	2.18	
Impregnation material	Epoxy resin

Fig. 4 The CuNi-NbTi/Nb₃Sn coil fabricated using the react and wind technique.

Table 3 Major specifications of the NbTi coil.

Items	Inner section	Outer section
Wire diameter (mm)	1.2	1.0
Inner diameter (mm)	317	335
Outer diameter (mm)	335	380
Coil height (mm)	377	376
Number of layers	8	24
Number of turns	2396	1725
Coil constant (T/A)	0.0266	
Operating current (A)	220	
Central field generation (T)	5.85	

を、エポキシ樹脂にて塗り込みながら、50 MPaの張力にて巻枠に巻線し、R&W法によるNb₃Snコイルを作製した。得られたNb₃Snコイルの諸元を**Table 2**に示す。クエンチ時の発生電圧を低減するため、コイル巻枠は同一としているが、二つに分割している。コイル全体としての形状は内径260 mm、外径289 mm、高さ319 mmであり、180 Aの通電にてコイル中心で2.18 Tの磁場を発生する設計とし

(a) A photograph of the magnet.

(b) A schematic view of the inside structure.

Fig. 5 The cryocooled superconducting magnet.

ている。また、コイルに通電したとき、コイル電極部でのNb₃Sn線立ち上げ部分において、電磁力による歪に、巻線張力による歪及び巻線時曲げ歪を加えても、線材への歪が0.4%以下となるように設計している。**Fig. 4**にNb₃Snコイルの外観写真を示す。通電用の電極及び分割のための電極を巻枠フランジ上に配置し、コイル中央部の線材最外層部にカーボングラス抵抗温度計、歪ゲージを取付けている。

4. NbTi コイルとの組み合わせ

既存のNbTiコイルの仕様を**Table 3**に示す。コイルは

クエンチ時の発生電圧低減のため二分割としており、内層側を直径 1.2 mm の NbTi 線、外層側を直径 1.0 mm の NbTi 線にて巻線しており、グレーディングを施している。コイル全体では、内径 317 mm、外径 380 mm、高さ 377 mm であり、220 A の通電によりコイル中心で 5.85 T の磁場を発生する。

この NbTi コイルの内側に、今回 R&W 法にて作製した CuNi-NbTi/Nb₃Sn コイルを挿入し、組合せにより直径 220 mm の貫通室温空間に中心で設計 8 T の磁場を発生させる冷凍機冷却超電導マグネットを作製した。なお、コイル中心で 8 T 発生させたとき、Nb₃Sn コイルを形成する線材が経験する最大磁場は 8.74 T となる。

NbTi コイルと Nb₃Sn コイルを組み合わせて得られた冷凍機冷却型超電導マグネットの外観写真及び内部構造概略図を Fig. 5 に示す。G-M 型冷凍機 2 台を用いて、二つのコイルを同系統にて冷却し、外側の NbTi コイル、内側の Nb₃Sn コイルをそれぞれ別系統で通電する二電源方式を採用している。また、熱侵入低減のため、約 40 K となる 1st-stage と約 4 K となる 2nd-stage の間の電流供給ラインに、Bi-2223 パルク電流リードを使用している⁸⁾。

5. 実験結果及び考察

5.1 Nb₃Sn コイル単体励磁試験

Fig. 6 に Nb₃Sn コイル単体での励磁試験結果を示す。試験結果は、コイルに通電したときのコイル温度、2nd-stage 温度の変化を示している。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。単独励磁において、コイルへの通電直後よりヒステリシス損によると思われる温度上昇が見られ、通電開始前に比べて最大約 2 K の上昇となっている。設計電流値 180 A にて保持すると同時に、コイル温度は下がり始め、保持後 30 分にて約 4 K で安定している。180 A で約 2 時間保持後、電流を下げ始めると、ヒステリシス損により再びコイル温度が上昇している。なお、コイル通電による冷却ステージ温度の大きな変化は観察されていない。本試験により、Nb₃Sn コイル単体での 180 A (設計値) 通電が可能であることを確認した。

5.2 NbTi コイルと Nb₃Sn コイルとの組合せ励磁試験

NbTi コイル単独での励磁試験はこれまでに実施しており、設計値の 220 A (発生磁場: 5.85 T) 通電を確認している^{3), 7)}。なお、NbTi コイルと Nb₃Sn コイルとの相互インダクタンスは 6.2 H である。

NbTi コイルと Nb₃Sn コイルの組合せ励磁において、スイープ速度はそれぞれ 0.2 A/sec、0.1 A/sec とした。NbTi コイルに 220 A 通電した状態で、Nb₃Sn コイルに 136 A の通電が可能であったが、保持できるのは短時間であった。長時間保持可能となるのは、Nb₃Sn コイルへの通電が設計値の 53% となる 96 A であり、このとき、中心では 7 T の磁場発生であった。そのときの NbTi コイルと Nb₃Sn コイル

Fig. 6 Performance results of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn coil fabricated using the react and wind technique.

Fig. 7 Performance results of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn coil fabricated using the react and wind technique in the backup field of a NbTi coil.

の組合せ励磁結果を Fig. 7 に示す。Nb₃Sn コイルへの単独通電結果と同様にコイル温度、2nd-stage 温度の変化を示している。最初に NbTi コイルを設計値の 220 A まで通電し、Nb₃Sn コイル温度が 6 K 以下となった後、Nb₃Sn コイルへの通電を行った。Fig. 7 より、Nb₃Sn コイルへの通電を行わず、NbTi コイルのみへの通電により、Nb₃Sn コイルの温度が、最大で約 12 K となり、通電前の約 4 K に比べ約 8 K の温度上昇が見られる。この約 8 K の温度上昇分は、Nb₃Sn コイル単独通電時の温度上昇分 (約 2 K) の約 4 倍と大きい、この原因としては、Nb₃Sn コイル通電による磁束変化が 0.0012 T/sec であるのに対して、NbTi コイル通電による磁束変化が 0.0053 T/sec であり、約 4 倍の違いがあるためと考えられる。なお、Nb₃Sn コイルにはクエンチ保護のため、並列にダイオードが接続されているが、ダイオードに電流が流れ始めるしきい電圧は約 10 V であり、NbTi コイルと Nb₃Sn コイルとの相互インダクタンス

(6.2 H) と NbTi コイルへのスweep速度 (0.2 A/sec) から誘導起電力は 1.24 V と求められ、ダイオードに電流が流れることはないと考えられる。Nb₃Sn コイルの電流ラインには、回路的に他に閉じた経路はなく、相互誘導が生じることは考えにくい。このため、相互誘導によるコイルの温度上昇はないと思われる。したがって、ここでの Nb₃Sn コイルの温度上昇は線材自体のヒステリシス損に寄与するところが大きいと判断している。その後、Nb₃Sn コイルへの通電により、再度コイル温度は上昇するが、96 A にて保持直後より下がり始め、12 時間の保持において、コイル温度は約 6 K にてほぼ安定している。消磁においては、Nb₃Sn コイルの消磁完了後、NbTi コイルの消磁を行っており、消磁の温度履歴は励磁のときとほぼ同じとなっている。なお、励消磁中、2nd-stage の温度変動は最大 0.5 K であり、大きな温度変化は見られなかった。今回の試験では、Nb₃Sn コイルと 2nd-stage との温度上昇に大きな相違が見られ、伝熱の強化が必要であることが明らかとなった。なお、この長時間励磁は数回繰り返し、再現性があることを確認している。

スケーリング則より求めた CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線材の I_c - B 特性と今回作製した Nb₃Sn コイルのロードラインを Fig. 8 に示す。Fig. 8 の測定試料には、Nb₃Sn コイル製作に使用した全く同じ未熱処理の線材が、測定形状にされた後熱処理 (W&R 製法) されて用いられている。その形状は直径 30~40mm の試料ホルダーに 3 ターン巻かれた構造となっており、外部歪はない状態となっている。得られた I_c を基にスケーリングし²⁾、 I_c - B 特性を求めている。Fig. 8 の I_c - B 特性は、コイル設計上、一つの目安とはなるが、試料に外部歪をかけない状態での値であるため、R&W 法を採用した本研究では、そのまま使用できない。そのため、ここでは、Fig. 8 の I_c - B 特性を元にして、線材に加わる歪と I_c の関係より、コイル特性を考察することとした。歪を考慮した I_c 及びコイル特性については、次の歪計測において述べる。

5.3 歪計測

Fig. 4 のコイルに示す位置に、最外層線材の長手方向及び円周方向に接着した歪ゲージを用いて歪測定を行った。歪ゲージは接着箇所 の線材絶縁被覆を除去し、直接 CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線に、低温用接着剤を用いて取付けた。NbTi コイルに 220 A 通電し、バックアップ磁場のある状態で、Nb₃Sn コイルへ最大 136 A 通電したときの歪測定結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 において、歪の正方向は引張りを示し、負方向は圧縮を示す。Nb₃Sn コイルへの通電により、線材自体には、長手方向に引張り力が、円周方向には圧縮力がかかることとなる。Nb₃Sn コイルへの通電とともに、歪は徐々に大きくなり、136 A の通電時、線材の長手方向、円周方向どちらも約 1500×10^{-6} (= 0.15%) の歪が発生している。本線材と若干断面構成比が異なるが、ほぼ

Fig. 8 The I_c - B properties of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn wire, and the load line of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn coil.

Fig. 9 Strain of the CuNi-NbTi/Nb₃Sn wire as a function of the coil current.

Table 4 Strain of the Nb₃Sn coil.

Items	Operating current of Nb ₃ Sn coil (A)		
	96	136	180
Winding			
Bending strain (%)	0.38	0.38	0.38
Tensile strain (%)	0.07	0.07	0.07
Hoop stress (MPa)	85	128	183
Hoop strain (%)	0.10	0.15	0.22
Central field generation (T)	7.0	7.5	8.0
B_{max} (T)	7.62	8.15	8.74
Total strain (%)	0.55	0.60	0.67

近い線材を短尺にて実測した 14.5 T、4.2 K における応力-歪曲線を元に、弾性範囲内と仮定してヤング率を求めると、約 100 MPa の引張り応力において、0.15%を示していることから⁹⁾、67 GPa と導かれる。一方、歪ゲージ取付け位置での電磁応力は JBR より 107 MPa と求められ、測定より得られた歪を用いて、同様に弾性範囲内と仮定して、コイルとしてのヤング率を求めると、71 GPa と算出され

る。今回の実測より得られた値はエポキシ等の影響もあること、また、短線での断面構成比が若干異なるため、短線との値と厳密には比較できないが、ほぼ同等であった。

Nb₃Sn コイルに 96 A (長時間通電)、136 A (短時間通電)、180 A (設計電流) を通電したとき、線材が受けるそれぞれの歪について、Table 4 に示す。Nb₃Sn コイルの線材には、直径φ260 mm の巻棒に巻かれているため 0.38% の曲げ歪と、張力 50 MPa による 0.07% の引張り歪とが複合されてかかっていることとなる。Fig. 9 より、長時間励磁可能な 96 A の通電をしたときには、さらに電磁応力による約 0.10% の歪が加わり、線材としてはトータル約 0.55% の歪がかかっていることとなる。136 A の通電時の歪も同様にして求めた。なお、Table 4 における電磁応力は JBR より算出した。一方、180 A の通電時においては、歪データがないため、Fig. 9 より外挿して電磁応力による歪を 0.22% と求めた。ここで、厳密には張力による歪は線材長手方向であるため、巻線時の曲げ歪及び励磁時の電磁応力による曲げ歪に、張力による歪を単純に加算すると、真の歪より大きく見積もられることとなり、より安全側での評価となる。また、巻き線時の曲げ歪 (0.38%) 及び張力による歪 (0.07%) は室温で加えられ、各電磁応力による歪は 4 K 近傍で加えられるため、各歪の温度履歴は異なることとなり注意が必要である。ここでは、単純化のため、線材長手方向及び曲げ方向の各歪をそのまま加算して考察する。Nb₃Sn コイルへの長時間通電が可能な電流値の 96 A では、線材に 0.55% の歪がかかることとなり、このときの I_c は歪が零のときの I_c と比べ、大きく低下することが推察される。本研究における CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線において、歪がかかった状態での I_c 測定は実施していないため、厳密な評価は出来ないが、断面構成比がほぼ同等な CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線に関する他の報告によれば、14.5 T、4.2 K における応力-歪曲線より、0.55% 歪は約 340 MPa の応力に対応し、0.55% の歪が加わった状態での I_c は、歪が零 (応力が零) のときの I_c の 85% 程度まで低下している⁹⁾。したがって、Fig. 7 より、Nb₃Sn コイルへ 96 A (0.55% の歪) 通電したとき、コイル温度は最大で約 6.5 K となり、最大経験磁場 7.62 T 中での線材の I_c は、Fig. 8 より約 325 A と読み取れるが、実際には Nb₃Sn コイルの I_c は、325 A から大きく低下すると思われる。また、同様にして、動作温度 6.5 K として、設計磁場 8 T を発生させたときの線材性能を求めると Fig. 8 より、最大経験磁場 8.74 T 中での線材の I_c は約 270 A となり、さらに 0.67% の歪が線材に加わるため、線材の I_c は歪が 0.55% 加わったときよりもさらに低下すると推察される。0.55% の歪が加わったときと同様に、他の報告より I_c の低下を見積もると、0.65% 以下の応力-歪曲線であるため、正確な値は求められないが、0.67% の歪は 400 MPa 以上の応力に対応し、そのときの I_c は歪が零 (応力が零) における I_c の、75% 以下となっている⁹⁾。今回、

仮に 75% の低下とすると、設計磁場の 8 T (電流値 : 180 A) は線材性能 (270 A × 0.75 ≒ 204 A) の 90% となる。今回、安定して長時間励磁可能となるのは、歪が加わっていない状態での線材の $I_c = 325$ A に対して 96 A となり、歪を考慮したとしても、それ以上に低くなっているが、この原因としては、電極部での線材の接続において、応力集中により線材が劣化し、そのためにジュール発熱が生じていることが一つの要因であると推察している。Nb₃Sn コイルの電極部において、Nb₃Sn 線材の巻棒胴部より電極までの経路では、各構成材の界面にて線材に応力集中が生じる可能性を有している。今後、この電極部での線材への応力集中を明らかにし、解決していきたいと考えている。

6. まとめ

高強度 CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線材を用いて、React and Wind 法により超電導コイルを作製した。既存の NbTi コイルの内側に、得られた CuNi-NbTi/Nb₃Sn コイルを挿入し、冷凍機冷却型の超電導マグネットとした。このマグネットは、直径 220 mm の貫通した室温空間を有し、コイル中心において 8 T を発生させる設計となっている。得られたマグネットを励磁した結果、コイル中心において、最大で 7.5 T の磁場を発生することができたが、安定して長時間保持できるのは 7 T であった。なお、7 T の長時間励磁は繰り返し可能であった。コイル中心にて 7 T 発生時における Nb₃Sn 線材の最大経験磁場は 7.62 T であり、設計電流値の 180 A に対し 96 A に留まっている。このとき線材には、巻き線時の曲げ歪が 0.38%、張力による歪が 0.07%、電磁応力による歪が 0.10% 加わることがわかった。これまでに開発した高強度 CuNb/Nb₃Sn 線に比べ、さらに高強度化した CuNi-NbTi/Nb₃Sn 線を今回用いたことで、長時間励磁が可能となり、改善効果があったと認められる。今後は、主な原因と考えられる電極部での応力集中、ジュール発熱及びコイルの伝熱を改善し、歪を考慮した線材性能の 80% 以上の通電が可能となるようにしていきたい。

参 考 文 献

- 1) J. Sakuraba, et al.: "Cryocooler Cooled Superconducting Magnet," J. Cryo. Soc. Jpn. **28** (1993) 519-525 (in Japanese)
櫻庭順二ら:「冷凍機冷却型超電導マグネットの開発」, 低温工学 **28** (1993) 519-525
- 2) K. Watanabe, et al.: "Liquid Helium-Free Superconducting Magnets and Their Applications," Cryogenics ICEC Supplement **34** (1994) 639-642
- 3) K. Goto, et al.: "Development of a CuNb Reinforced and Stabilized Nb₃Sn Coil for a Cryocooled Superconducting Magnet System," IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 3623-3626
- 4) H. Sakamoto, et al.: "(Nb, Ti)₃Sn Superconducting Wire with CuNb Reinforcing Stabilizer," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 1067-1070
- 5) S. Awaji, et al.: "Enhancement of Critical Current Densities by the

Prebending Strain at Room Temperature for Nb₃Sn Wire,” Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1142-L1144

- 6) S. Awaji, et al.: “Enhancement of Upper Critical Field and Critical Temperature by Prebending Process for Practical Nb₃Sn Wires,” Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L709-711
- 7) M. Ishizuka, et al.: “Development of the Cryogen-free Superconducting Magnets using R&W coil by high strength CuNb/(Nb, Ti)₃Sn,” Abstract of CSJ Conference **68** (2003)
石塚正之ら：「高強度 CuNb/(Nb, Ti)₃Sn 線材による R&W コイルを用いた無冷媒超伝導マグネットの開発」, 第 68 回 2003 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2003) 27
- 8) M. Ishizuka, et al.: “Development of the Bulk Current Lead Used by Bi-2223 Superconducting Material,” J. Cryo. Soc. Jpn. **39** (2004) 104-107 (in Japanese)
石塚正之ら：「Bi-2223 超電導材料を用いたバルク電流リードの開発」低温工学 **39** (2004) 104-107
- 9) K. Miyoshi, et al.: “Development of High Strength Nb₃Sn Conductor,” Proceedings of 18th International Conference on Magnet Technology (MT-18), to be submitted to IEEE Trans. Magn.

石 塚 正 之 昭和 41 年 4 月 23 日生。平成 2 年東北大学工学部金属工学科卒業。同年 4 月、住友重機械工業（株）に入社。平成 5 年より 2 年間科学技術庁金属材料技術研究所（現独立行政法人物質・材料研究機構）に派遣。現在、住友重機械工業（株）技術開発センターに勤務。主として超電導材料、冷凍機冷却型超電導マグネットの研究・開発に従事。低温工学協会会員。

長 谷 部 次 教 昭和 39 年 12 月 11 日生。昭和 62 年筑波大学第三学群基礎工学類卒業（物理工学専攻）。昭和 62 年 4 月より住友重機械工業（株）平塚研究所（現技術開発センター）に勤務。主として超電導マグネットの研究に従事。低温工学協会、応用物理学会会員。平成 16 年 5 月逝去。

伊 藤 智 幸 昭和 52 年 2 月 2 日生。平成 14 年 3 月大分大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月住友重機械工業（株）入社。主として超伝導マグネットの設計に従事。低温工学協会会員。

鶴 留 武 尚 1974 年 9 月 25 日生。1997 年九州大学工学部機械工学科卒業。1999 年同大総合理工学研究科修士課程修了。同年住友重機械工業（株）入社。主として超伝導磁石の研究開発に従事。低温工学協会会員。

櫻 庭 順 二 1949 年 11 月 6 日生。1975 年東北大学大学院工学研究科修士課程（原子核工学専攻）修了。1975 年より住友重機械工業（株）に勤務。現在、同社技術開発センターにて、超電導マグネット開発などに従事。低温工学協会会員。工学博士。

三 好 一 富 昭和 37 年 8 月 25 日生。昭和 60 年上智大学理工学部物理学科卒業。平成 2 年 3 月東北大学大学院理学研究科修士課程修了。同年古河電気工業株式会社勤務。主に超電導関連の開発に従事。低温工学協会、電気学会会員。

西 島 元 1970 年 3 月 10 日生。1993 年東京理科大学理学部応用物理学科卒業。1998 年東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士後期課程修了。日本原子力研究所博士研究員、東北大学金属材料研究所 COE 研究員を経て 2001 年 8 月より東北大学金属材料研究所助手。低温工学協会、応用物理学会、電気学会会員。博士（工学）。

淡 路 智 昭和 40 年 7 月 15 日生。昭和 63 年広島大学理学部物理学科卒業。平成 2 年同大学理学研究科物理学専攻博士課程前期修了。同年 4 月より東北大学金属材料研究所に勤務。同研究所助手を経て、現在同助教授。主に超伝導材料の基礎物性研究および強磁場マグネットの開発に従事。低温工学協会、応用物理学会、日本金属学会、応用磁気学会会員。工学博士。

渡 辺 和 雄 昭和 25 年 5 月 17 日生。昭和 50 年東北大学理学部物理学科卒業。昭和 52 年同大学院修士課程（物理学専攻）修了。真空冶金（株）勤務。昭和 56 年 4 月から東北大学金属材料研究所助手。講師、助教授を経て平成 13 年 4 月から同研究所教授。低温工学協会、日本金属学会、応用物理学会、応用磁気学会会員。工学博士。