

# φ 20 cm 室温ボア世界最大級イットリウム系 5 T 高温超電導マグネット

新規事業推進センター 大保雅載<sup>1</sup>・藤田真司<sup>2</sup>・原口正志<sup>2</sup>・飯島康裕<sup>3</sup>・  
伊藤雅彦<sup>4</sup>・斉藤隆<sup>5</sup>

## World's Largest 5 T Yttrium-based High Temperature Superconducting Magnet with a 20-cm-diameter Room Temperature Bore

M. Daibo, S. Fujita, M. Haraguchi, Y. Iijima, M. Itoh, and T. Saitoh

イットリウム(Y)系超電導線材は 20 K 以上の高温領域でも高い臨界電流-磁場特性を示し、高い機械強度を有していることから様々な超電導機器への応用が期待されている。我々は過去 20 年以上 Y 系超電導線材の開発を行ってきたが、並行して応用化のためのコイル開発も行ってきた。今回、当社は φ 20 cm 室温ボアを有し、蓄積エネルギー 426 kJ という世界最大級の Y 系高温超電導マグネットの開発に成功したので以下に概要を報告する。

Yttrium-based coated conductors are expected to show high performance in superconducting applications, because of their high mechanical strength and high current density in magnetic fields. We have succeeded in developing the world's largest yttrium-based high-temperature superconducting (HTS) magnet, which is composed of 24 pancake coils with an inner diameter of 260 mm. The stored energy of the magnet is 426 kJ. The total length of the Yttrium-based coated conductors is approximately 7.2 km. These conductors were fabricated by Fujikura Ltd. using ion-beam-assisted deposition (IBAD) and pulsed laser deposition (PLD) methods. The magnet was cooled down to 24 K using a Gifford-McMahon (GM) cryocooler. We excited the magnet up to 5 T, successfully.

### 1. ま え が き

超電導とはある温度以下で物質の電気抵抗がゼロとなる現象である。現在、医療用 MRI (Magnetic Resonance Imaging) や分析用 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) など工業製品で超電導応用機器が使用されているが、これらは液体ヘリウム温度 (4 K = -269 °C) 近傍でゼロ抵抗を示す低温超電導または金属超電導と呼ばれる材料である。これに対して 1986 年以降、安価な液体窒素温度 (77 K = -196 °C) でも超電導特性を示す酸化物超電導が発見され、これらは従来の超電導体に比べて臨界温度が飛躍的に高いため高温超電導と呼ばれている。

一般に、超電導は温度が低くなるほど高い臨界電流特性を示し、高磁場になるほど臨界電流が低くなることが知られている。高温超電導の中でも第 2 世代と位置付けられているイットリウム(Y)系超電導線材 (図 1) は 20 K 以上の高温領域でも高い臨界電流 ( $I_c$ ) - 磁場 (B)

特性を示し、高い機械強度を有していることからさまざまな機器への応用が期待されている。当社は過去 20 年以上 Y 系超電導線材の高特性化、長尺化、高均一化の開発を行ってきており、最近では液体窒素 (77 K) 中の  $I_c$  500 A/cm 以上、600 m 以上の高性能線材の開発に成功している<sup>1)~3)</sup>。また、これら Y 系超電導線材開発を進めると共に Y 系超電導線材の機械特性および磁場特性の把握と性能向上にも努めている<sup>4)</sup>。

一方、Y 系超電導線材の市販化と共に世界中の研究機

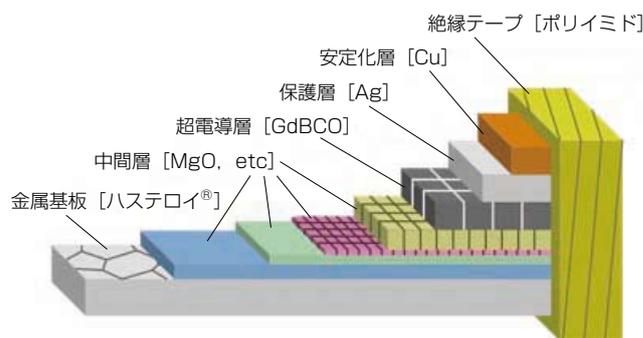


図 1 Y 系超電導線材模式図

Fig. 1. Schematic view of Y-based Coated Conductor.

1 超電導事業推進室研究開発部グループ長

2 超電導事業推進室研究開発部

3 超電導事業推進室研究開発部長 (博士 (工学))

4 超電導事業推進室長

5 超電導事業推進室超電導事業推進シニアコーディネーター

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
臨界温度	Critical temperature, Tc	超電導状態を維持できる上限の温度。
臨界電流	Critical current, Ic	超電導状態で流しうる最大の電流値を臨界電流 (Ic) といひ、電流値は温度、磁場に依存する。
イットリウム系超電導線材	Y-based coated conductor	超電導層にイットリウム (Y) やカドリウム (Gd) など希土類系元素を含む酸化物超電導で、希土類系を総称して RE (Rare Earth, レアアース) 系とも呼ぶ。他の高温超電導に比べて 30 K 以上の比較的高い温度の磁場中の臨界電流 (Ic) が高い特徴がある。
IBAD 法	イオンビームアシスト蒸着法 Ion Beam Assisted Deposition	フジクラが独自に開発したイットリウム系線材を作製するキーとなる技術で、超電導特性を左右する結晶配向性を金属テープ上にて高度に制御する手法。金属テープと超電導層の間の中層の作製に適用され、1991年に日米欧で基本特許をフジクラが取得。高特性の Y 系超電導線材の多くにこの IBAD 法が用いられている。
PLD 法	レーザー蒸着法 Pulsed Laser Deposition	イットリウム系超電導層の作製に使われる方法でエキシマレーザーを用いて紫外パルス光を真空中の超電導体に集光して超電導膜の蒸着を行う方法。
伝導冷却	Conduction-cooled	液体窒素や液体ヘリウムなど冷媒を用いずに超電導コイルと冷凍機などを熱的に接触させて冷却する方式。
蓄積エネルギー	Stored energy	超電導コイルに蓄えられる磁気エネルギー。インダクタンスを L、電流を I としたとき、 $LI^2/2$ で表される。超電導マグネットの規模を表す指標として良く使われる。
常電導転移	Normal transition	超電導状態から超電導でなくなり常電導に移ること。この逆を超電導転移と呼んでいる。
n 値	n-value	超電導線の臨界電流付近の V-I 特性は $V=V_c (I/I_c)^n$ ( $V_c$ : 臨界電流の電圧基準、 $I_c$ : 臨界電流) で表現される。この指数を n 値と呼んでいる。仮に超電導線材の一部で劣化が生じると見かけ上この n 値が低くなるため、コイル製作の健全性の指標として用いられる。
Gifford-McMahon (GM) 冷凍機	GM cryocooler	蓄冷材がシリンダ内部を往復運動し、冷媒ガスを断熱膨張し、寒冷を発生させる機械式冷凍機。ギフォード (Gifford) とマクマホン (McMahon) によって発明された冷凍機で構造が簡単で低温部に駆動部がないことから小型で信頼性が高いとされている。
クライオスタット	Cryostat	コイルなどを極低温に維持するために断熱層を有した真空容器のこと。

関などで小型コイル試作による課題抽出、低温下でのコイル特性評価も進められている<sup>5)~9)</sup>。当社も液体窒素中および伝導冷却下での Y 系超電導コイル特性、安定性評価などを行ってきた<sup>10)~13)</sup>。高温超電導は低温超電導に比べ運転温度が高いため熱容量が 2~3 桁大きく熱安定性は極めて高いといえる。さらに、伝導冷却コイルは運転温度も任意に設定でき、冷媒を使用しないため機器を使用する側にとっても使いやすい利点がある。しかし、万が一、伝導冷却下で超電導コイルに異常が生じると超電導コイルが熱暴走して、超電導線材に異常を生じる可能性もあるため、コイル内電圧分布特性も考慮した評価を行ってきた。その結果、小型の Y 系超電導コイルに関してコイル内電圧分布の実測値と計算値が概ね一致するなど、設計予測が可能な知見が得られてきている<sup>12)</sup>。

しかし、Y 系超電導線の実用機器への適用を想定すると、より大口径コイルでの実証例も必要である。今回、当社製 Y 系超電導線材を用いて  $\phi$  20 cm 室温ボアを有

する 5 T Y 系超電導マグネットの開発に成功した<sup>14)</sup> ので以下に概要を報告する。

## 2. Y 系超電導線材の諸元と安定化銅厚

### 2.1 Y 系超電導線材の諸元

超電導マグネットに使用した Y 系超電導線材の諸元を表 1 に示す。超電導線材は当社で Ion-beam-assisted deposition (IBAD) 法および Pulsed laser deposition (PLD) 法により製造された。表 1 中の  $I_c$ , n 値について  $I_c$  は  $10^{-7}$  V/cm 定義、n 値は  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm 定義であり、液体窒素中で無誘導巻きにて測定した値である。

### 2.2 Y 系超電導線材の安定化銅厚

前述したように高温超電導は低温超電導に比べ運転温度が高いため熱容量が 2~3 桁大きく従来の超電導マグネットに比べて熱安定性は極めて高いといえる。しかし、万が一、超電導コイルに異常が生じると電源を遮断

し、超電導コイルに蓄積されていた磁気エネルギー（蓄積エネルギーともいう）を外部抵抗によって回収、消費させる必要がある。電源遮断後、コイル電流は時定数で減衰するが、これらコイル保護の観点から超電導線材の安定化層厚は重要なパラメータである。超電導コイルが大型になればコイルのインダクタンスおよび蓄積エネルギーも大きくなり、必要な安定化層も厚くなってくる。ここではコイル保護過程におけるコイル内温度上昇について、最も保守的な前提として断熱条件下で常電導転移後の電流が安定化銅のみに流れる場合を想定した<sup>15)</sup>。

図 2 に断熱条件下での常電導転移時の超電導コイル保護回路例を示す。断熱条件下で常電導転移した電流が安定化銅のみの流れると仮定した場合、熱平衡方程式は (1)、(2) 式で表される<sup>15) 16)</sup>。

$$C_t(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q_j(T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S_t C_t(T) \frac{\partial T}{\partial t} = S_{stab} \rho_{stab}(T) \cdot J_{stab}^2(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $C_t$  は導体単位面積当たりの熱容量、 $Q_j$  は常電導転移に伴う自己ジュール発熱量、 $S_t$ 、 $S_{stab}$  は導体、安定化層断面積、 $\rho_{stab}$ 、 $J_{stab}$  は安定化層の電気抵抗率、電流密度である。

さらに、常電導転移時の初期温度  $T_0$ 、最高到達温度  $T_m$  とすると (3) 式が得られ、

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{C_t(T)}{\rho_{stab}(T)} dT = \frac{S_{stab}}{S_t} \int_0^t J_{stab}^2(t) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

超電導コイルの蓄積エネルギー  $E = LI_0^2 / 2$ 、検出遅れ  $t_d$ 、最大電圧  $V_m = RI_0$  とすると (4) 式が得られる<sup>15) 16)</sup>。

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{C_t(T)}{\rho_{stab}(T)} dT = \frac{S_{stab}}{S_t} \left( t_d + \frac{E}{V_m I_0} \right) J_{stab,0}^2 \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 $I_0$  は電源遮断時のコイル通電電流、 $J_{stab,0}$  は電源遮断時の安定化層電流密度、 $R$  は保護抵抗である。

今回の Y 系超電導マグネットの諸元を表 2 に示し、初期温度  $T_0 = 25$  K における安定化銅厚、検出遅れ  $t_d$  の違いによる最高到達温度の計算結果を図 3 に示す。検出遅れ  $t_d$  とは常電導転移発生から遮断器で図 2 に示すような保護回路に切り替えるまでの時間のことである。今回は検出遅れ  $t_d$  が 5 s 以内で超電導線材に異常を生じさせないように最高到達温度  $T_m$  が 300 K 以下になる条件として安定化銅厚 0.3 mm を採用した。

表 2 5TY 系超電導マグネットの諸元  
Table 2. Specifications of 5 T Y-based superconducting magnet.

項目	諸元
コイル内径	260 mm
コイル外径	535 mm
コイル高さ	271 mm
層数	24
総線材長	7.2 km
総ターン数	5775
運転温度	25 K
運転電流	333 A
中心磁場	5.0 T
インダクタンス	7.68 H
蓄積エネルギー	426 kJ

表 1 超電導マグネットに使用した Y 系超電導線材の諸元  
Table 1. Specifications of Y-based Coated Conductors.

項目	諸元
幅	10 mm
超電導層	GdBCO
基板厚	0.1 mm
安定化銅厚	0.3 mm (laminated)
臨界電流 (77 K, self field (s. f.))	> 467 A
n 値 (77 K, s. f.)	24-38

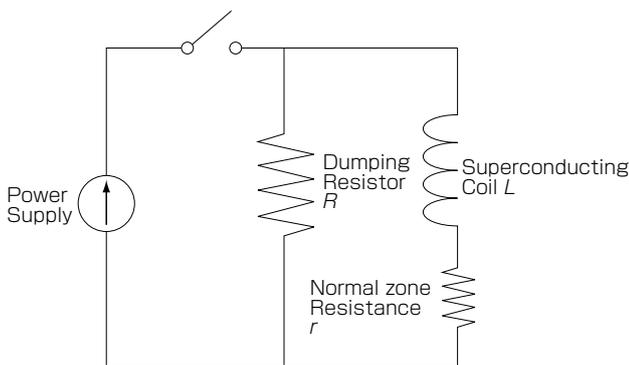


図 2 超電導マグネットの保護回路例

Fig. 2. Protection circuit for a superconducting magnet.

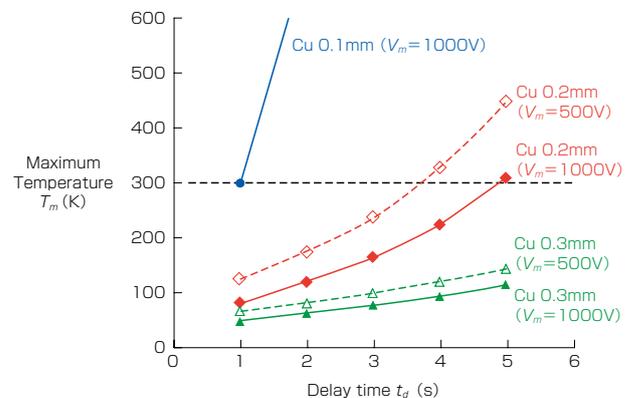


図 3 安定化銅厚、検出遅れと最大到達温度計算結果  
Fig. 3. Calculation results of maximum temperature for Cu thickness:  $V_m = 1000$  V (solid) and  $V_m = 500$  V (dotted).

表3 モデルコイルに使用したY系超電導線材の諸元  
Table 3. Specifications of Y-based Coated Conductors for the Model Magnet.

項目	諸元
線材幅	10 mm
基板厚	0.1 mm
安定化銅厚	0.3 mm (laminated)
臨界電流 (77 K, self field (s. f.))	350-426 A

表4 事前検証用モデルコイルの諸元  
Table 4. Specifications of the Model Magnet.

項目	諸元
コイル内径	260 mm
コイル外径	515 mm
コイル高さ	271 mm
層数	24
超電導コイル数	6
ダミーコイル数	18

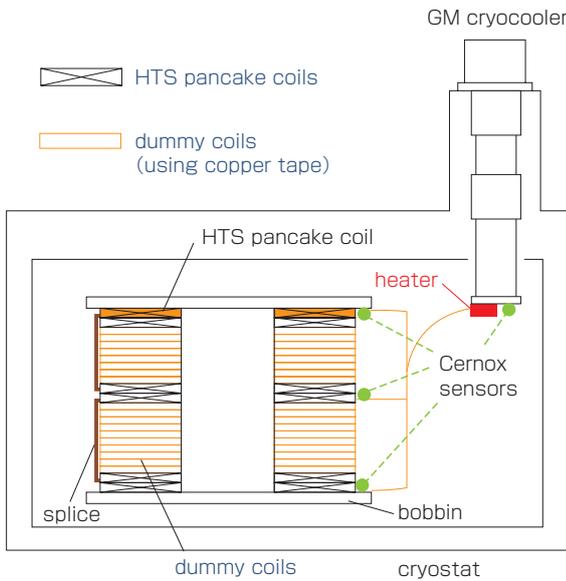


図4 モデルコイル模式図

Fig. 4. Schematic view of a Model Magnet.

なお、図3の安定化銅厚 0.1 mm, 0.2 mm の計算はコイル内径, コイル高さ, 通電電流は表2の値とし, ターン数を変えて中心磁場 5 T を得るコイル諸元を計算に用いている。

### 3. 事前検証

#### 3.1 モデルコイル試作による事前検証

Y系超電導マグネット製作に当たりコイル構造の妥当性, マグネット製作作業性検証のためほぼ同一寸法のモデルコイルを試作した。表3に示すようなY系超電導線材6本と0.4 mm厚, 10 mm幅の銅テープを用い表4に示すようなモデルコイルを試作し, 伝導冷却測定できるように図4のようにGifford-McMahon (GM) 冷凍機の2段階ステージ先端に温度調節用のヒータを取付たクライオスタットに取り付けた。図4中の“dummy coils”とは前述の銅テープを超電導線材と同様に巻線, 含浸し, コイルとして見立てたものであり, 各コイルは電気的に独立させてある。Y系超電導コイルは巻線, 含浸し, 液体窒素中で電圧 (V) - 電流 (I) 特性を測定した。この時後述の図10に示すように  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm 定義の  $n$  値を測定し, いずれも 21 以上でコイルが

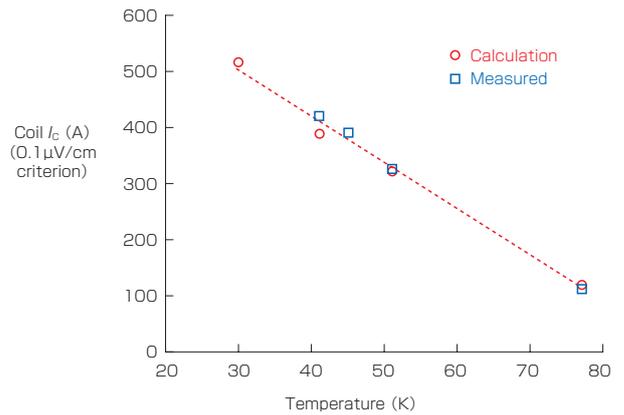


図5 モデルコイル最上層コイルのコイル  $I_c$  計算結果と測定結果

Fig. 5. Comparison between Measured and Calculated Coil  $I_c$  of a upper coil of a Model Magnet.

健全であることを確認している。その後, 各超電導コイルを最上層, 中間, 最下層に配置し, 各超電導コイル同士を接続板で半田接続した。コイルが積層された状態でコイル  $I_c$  が最も低い最上層の超電導コイルについて通電特性を評価した。

伝導冷却コイルの場合, コイル発熱量を予測するためにコイル内電圧分布を予測することは重要と考えられる。当社はこれまで小型コイルを用いてコイル内電圧分布が計算値と実測値とでよく一致することを確認している<sup>12)</sup>。モデルコイル通電特性評価は同様の手法を用いてコイル内磁場分布計算値と超電導コイルに使用した同一ロット短尺線材の臨界電流 ( $I_c$ ) - 磁場 ( $B$ ) 特性, および磁場角度測定結果を用いてコイル内各点の電圧の和をコイル両端電圧として (5) 式により計算し, コイル両端電圧のコイル  $I_c$  実測値と比較した。

$$V = \sum 2\pi r \times 10^{-6} \left( \frac{I}{I_c(B, T, \theta)} \right)^{n(B, T, \theta)} \dots \dots \dots (5)$$

ここで  $V$  はコイル両端電圧,  $r$  は半径,  $T$  は温度,  $\theta$  は磁場印加角度 (超電導線材の  $c$  軸 (法線) 方向が  $0^\circ$ ) である。

モデルコイル通電特性評価結果を図5に示す。図5ではモデルコイル最上層のシングルパンケーキコイルの

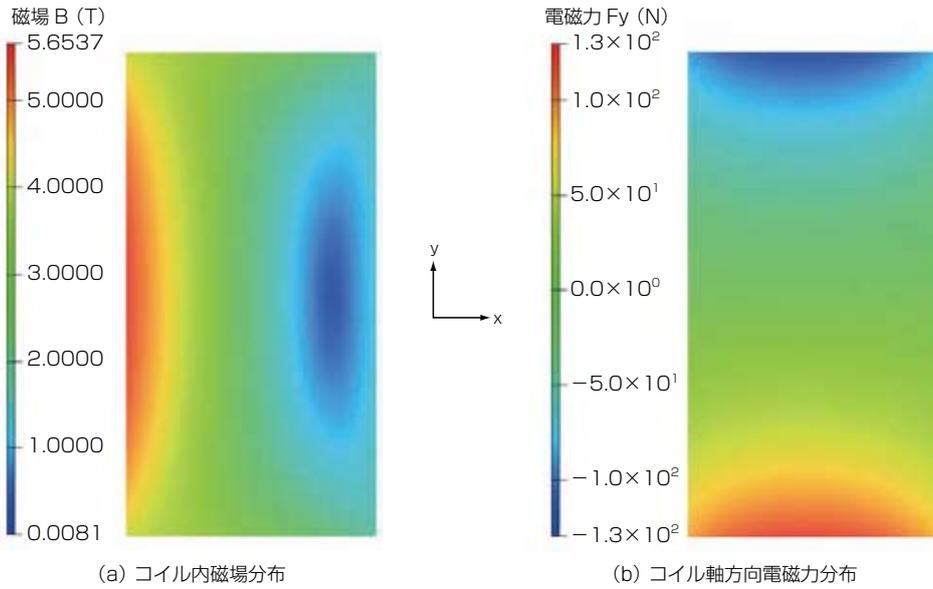


図6 5T超電導マグネット磁場分布と軸方向電磁力計算結果  
Fig. 6. Calculation results of Magnetic Field and Lorentz Force of the Magnet.

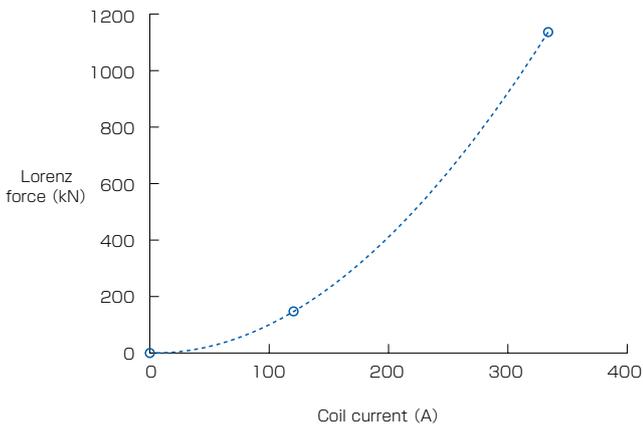


図7 コイル軸方向中心面の電磁力と通電電流計算結果  
Fig. 7. Calculation results of Lorentz Force of the Magnet versus Coil current.

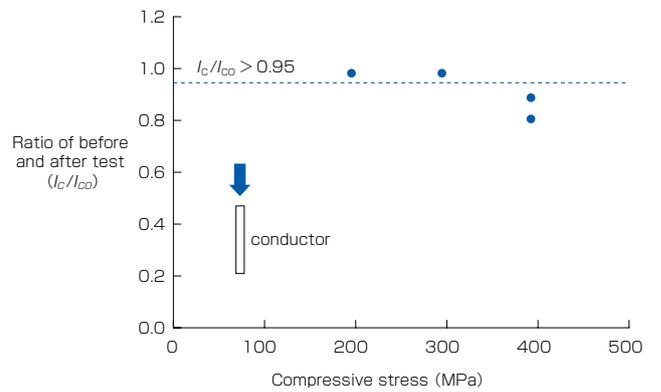


図8 Y系超電導線材 (0.1mm基板/0.1mm安定化銅) の幅方向圧縮力評価結果  
Fig. 8. Evaluation results of Compressive stress of Y-based coated conductor with 0.1 mm substrate and 0.1 mm copper stabilizer.

通電特性を 41 ~ 77 K の 4 点で測定した結果, 30 ~ 77 K の 4 点で計算した結果をそれぞれプロットした. その結果, コイル  $I_c$  計算結果の近似線に対してコイル  $I_c$  測定結果が  $\pm 5\%$  以内で一致していることを確認した. この結果は超電導線材の臨界電流 ( $I_c$ ) - 磁場 ( $B$ ) 特性から超電導コイルのコイル  $I_c$  - 温度特性実測値が計算により予測できることを示している.

### 3. 2 耐電磁力

超電導コイルはコイル自身が発生する磁場とコイル通電電流により電磁力が発生する. 超電導コイル軸方向には軸方向中心でゼロとなる圧縮的な電磁力が働き, コイル半径方向には膨張的な電磁力が働き超電導線材に張力 (フープ応力) が働く. 超電導コイルが大型, 高磁場になるほどこの電磁力は強大になる.

今回の超電導マグネットではフープ応力は最大約 40 MPa と Y 系超電導線材の許容応力の 1/10 以下であり大した問題にならない. しかし, 超電導コイル軸方向には大きな圧縮的な電磁力がかかるため超電導線材幅方向の圧縮応力について評価した. 図 6 に中心磁場 5 T 発生時の超電導コイルの磁場分布と軸方向の電磁力分布計算結果を示す. 超電導コイル側面に加わる圧縮力が最大となるのは超電導コイル軸方向中心の面であるため, 超電導コイル軸方向中心面の電磁力と通電電流の計算結果を図 7 示す. 図 7 のように中心磁場 5 T 発生 (通電電流 333 A) 時ではコイル軸方向中心に加わる電磁力 (圧縮力) 計算結果は  $1.1 \times 10^6$  N (コイル上半分の積算), 圧縮応力に換算して約 71 MPa となった.

Y 系超電導線材の幅方向圧縮応力評価結果例を図 8

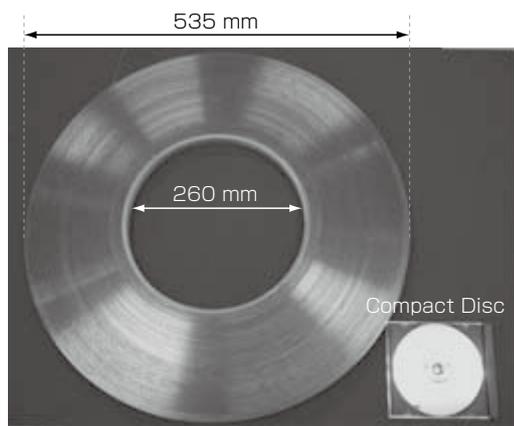


図9 パンケーキコイル外観

Fig. 9. Photograph of an impregnated two-layer stacked coil.

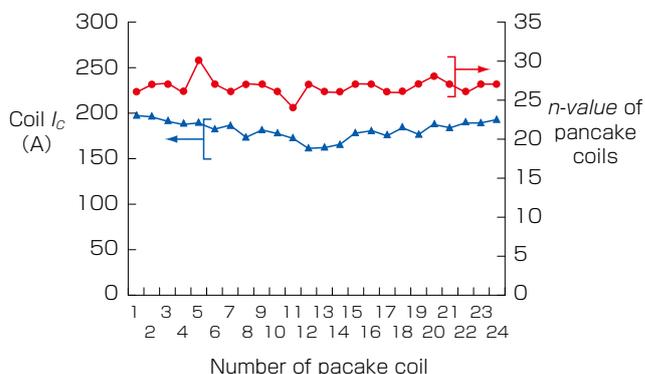


図11 24パンケーキコイルのコイル $I_c$ ,  $n$ 値測定結果  
Fig. 11. Measured  $I_c$  and  $n$ -value of 24 pancake coils.

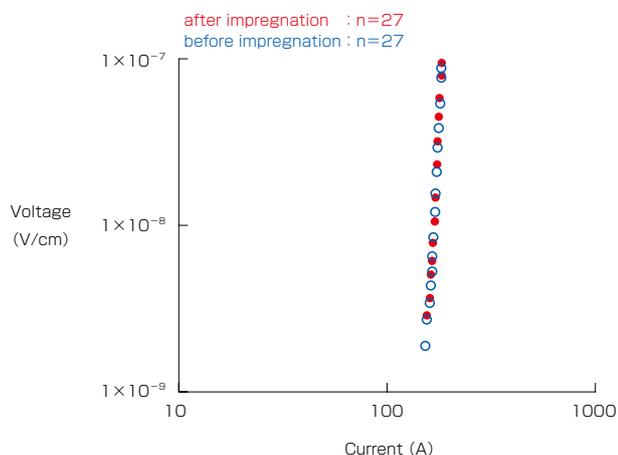


図10 含浸前後でのパンケーキコイル V-I特性 (液体窒素中)

Fig. 10.  $V$ - $I$  characteristics of pancake coil at 77 K.

に示す。図 8 より、線材幅方向圧縮応力は約 300 MPa まで試験前後の臨界電流に変化がなく、十分な強度を有していることがわかる。なお、超電導コイルは強大な電磁力に耐えられるようエポキシ樹脂などで含浸されるため、十分な裕度をもって電磁力には耐えられると考えられる。

#### 4. 5 T 超電導マグネット製作

##### 4. 1 パンケーキコイル評価

モデルコイルでの事前検証の結果、コイル $I_c$ の計算による予測、マグネット製作における作業性の検証で良好な結果が得られたため、超電導マグネット製作に取り掛かった。Y系超電導線材の $I_c$ 測定後、パンケーキコイルを製作した。パンケーキコイルとはテープ状のY系超電導線材をレコード状に巻線した形状のコイルである。パンケーキコイル製作においてはコイル製作中のハンドリ

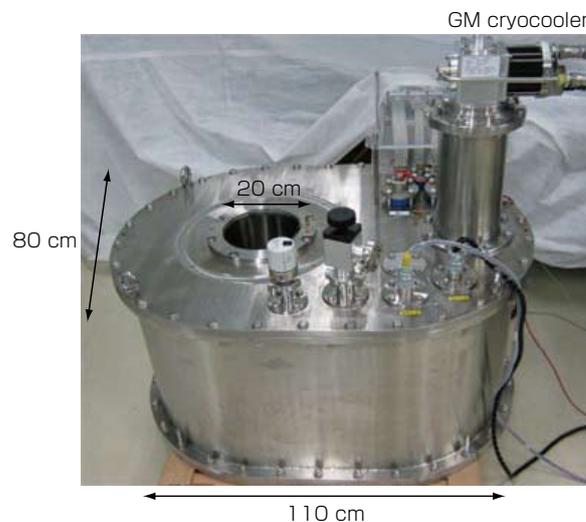


図12  $\phi$  20cm 室温ボア径5T イットリウム系高温超電導マグネット外観

Fig. 12. Photograph of a 5 T Y-based superconducting magnet with a 20-cm-diameter room temperature bore.

ングによるY系超電導線材の劣化も十分あり得ることから加工中は十分留意してパンケーキコイルを製作した。パンケーキコイルは 2 層毎にエポキシ含浸剤で含浸し、含浸後、液体窒素中でコイル $I_c$  ( $10^{-7}$  V/cm 定義),  $n$  値 ( $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm 定義) を測定した。含浸後の 2 層パンケーキコイル外観を図 9 に示す。また、含浸前後で比較したパンケーキコイルの  $V$ - $I$  特性例を図 10 に示す。図 10 に示すように含浸前後の  $V$ - $I$  特性は良く一致しており、 $n$  値 ( $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm 定義) もいずれも 27 と変化がなく、劣化なくコイル加工できていると考えられる。

図 11 には製作した全 24 パンケーキコイルの $I_c$  ( $10^{-7}$  V/cm 定義),  $n$  値 ( $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm 定義) を示す。全てのパンケーキコイルの  $n$  値が  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  V/cm の低電圧領域で 24 以上であり、良好にパンケーキコイルが製作できていることを確認した。なお、図 11 中のコイ

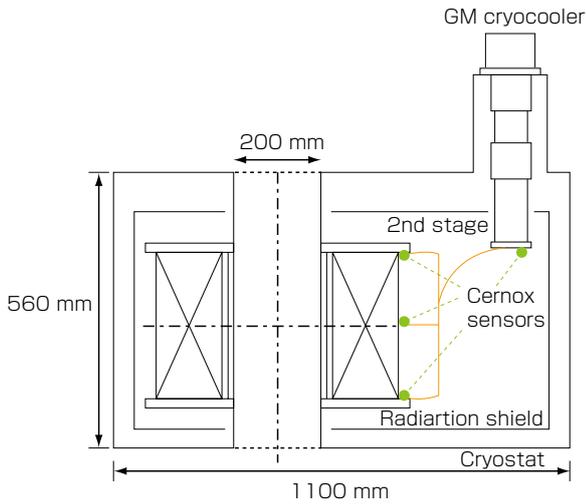


図13 5T イットリウム系高温超電導マグネット模式図  
Fig. 13. Schematic view of the Y-based superconducting magnet.

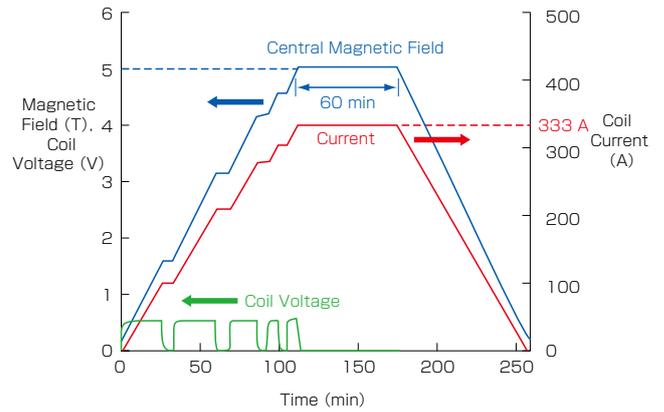


図15 超電導マグネット通電特性測定結果  
Fig. 15. Coil current, central magnetic field, and coil voltage during test.

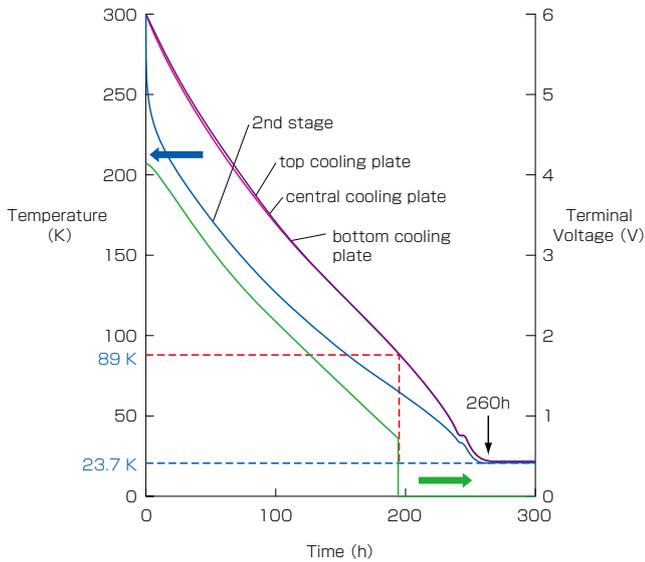


図14 超電導マグネットの初期冷却特性  
Fig. 14. Magnet temperature during initial cool down.

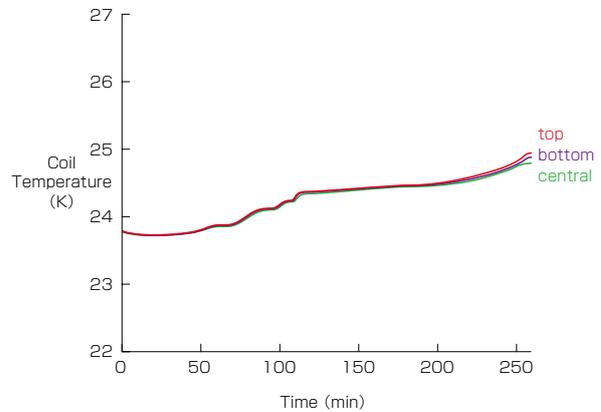


図16 通電試験中のコイル温度変化  
Fig. 16. Coil temperature during test.

ル番号はコイルの積層順を示しており、 $I_c$ の高い線材は磁場が高くなるコイル上下に配置した。

#### 4. 2 超電導マグネット製作

パンケーキコイル製作後、積層コイルを組み立て、クライオスタットへ取り付け付けた。完成した高温超電導マグネットの外観を図12に示し、模式図を図13に示す。冷却は2段GM冷凍機（1段ステージ：70 Wat 68 K、2段ステージ：13 Wat 20 K）を用い、冷凍機2段ステージの先端から銅板でコイルに予め付加されたコイル冷却板と接続した。冷却時や通電試験時の温度測定のためGM冷凍機2段ステージの先端、および上中下のコイル冷却板に温度センサーを取り付けた。

## 5. 5 T 超電導マグネット評価

### 5. 1 初期特性

製作した超電導マグネットの初期冷却特性を図14に示す。冷却中、マグネット端子間に100 mAを通電し、端子間電圧を測定した。各コイル冷却板が89 K以下になったとき全コイルの電圧がゼロ抵抗を示し、超電導転移を確認した。また、コイル冷却板温度は約260時間で23.7 Kに到達した<sup>14)</sup>。

次に、初期通電試験結果例を図15に示す。コイル通電電流333.4 Aのとき中心磁場は4,993 Tに達し、1 min後に5,000 Tに達し、60 min保持でもコイル電圧に異常がないことを確認した<sup>14)17)</sup>。また、通電試験時のコイル冷却板の温度変化を図16に示す。60 minの通電試験におけるコイル冷却板の温度上昇は約1.3 Kであった。なお、ロードラインから算出した中心磁場5.0 T到達時の負荷率は約0.6、温度マージンは約25 Kである<sup>17)</sup>。

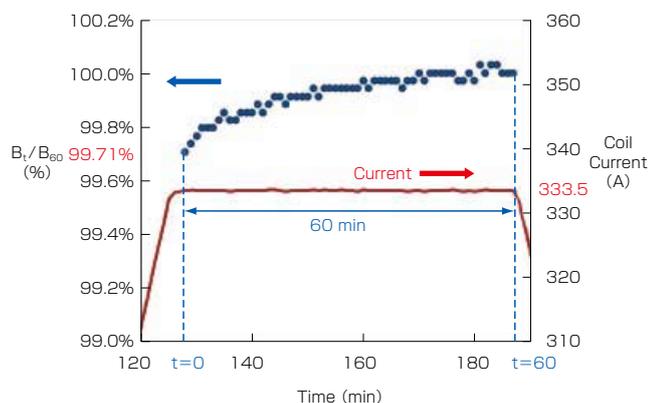


図17 正規化した中心磁束密度の時間変化（オーバシュートなし）

Fig. 17. Normalized magnetic flux density at center without current reversal.

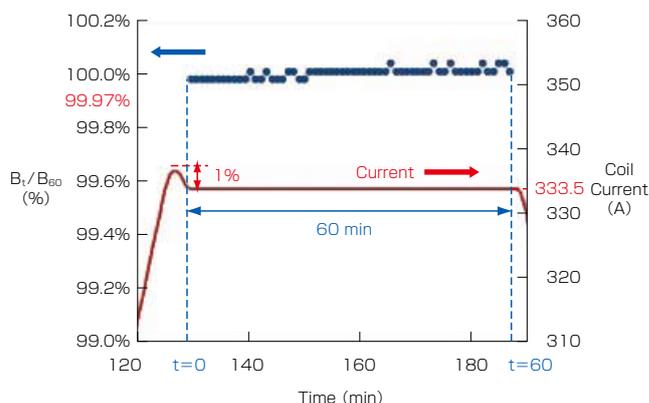


図18 正規化した中心磁束密度の時間変化（1%オーバシュート）

Fig. 18. Normalized magnetic flux density at center with 1% current reversal.

## 5. 2 磁場ドリフト評価

Y系超電導線材はそのテープ形状によりコイル径方向の磁場による遮蔽電流（コイル自身が発生する磁場を打ち消すように超電導層に誘導される電流のこと）により中心磁場のドリフトが懸念されている<sup>18)</sup>。そのため、製作した超電導マグネットについて図15と同様の通電試験を実施し、中心磁場5.0 Tに保持した際の中心磁場ドリフト量をホール素子により測定した。測定結果を図17に示す。コイル通電電流が一定になった時点をと $t=0$  (min)，そのときの中心磁場を $B_t=0$ とし、そこから60 min経過した中心磁場を $B_{60}$ として $B_{60}$ で正規化した百分率で表したのが図17の縦軸( $B_t/B_{60}$ )である。一方、超電導マグネットにおいて通電電流をオーバーシュートさせることにより中心磁場のドリフトを抑制させることが知られている<sup>15)</sup>。そのため、図17と同様の通電においてコイル通電電流の1%をオーバーシュートさせた場合の磁場ドリフト量を測定した結果を図18に示す。図17と図18を比較すると、図17では $B_t/B_{60}$ が99.71%に対し、図18では $B_t/B_{60}$ が99.97%と磁場ドリフト量が約1桁低く抑えられることが確認された<sup>14)</sup>。

## 6. むすび

今回、当社製Y系超電導線材を約7.2 km使用し、蓄積エネルギー426 kJという世界最大級のY系高温超電導マグネットの開発に成功した。超電導マグネット製作に当たっては各パンケーキコイルを液体窒素中で測定し低電圧領域からの $n$ 値を評価することによって各パンケーキコイルの健全性を確認した。さらに、製作したY系超電導マグネットは遮蔽電流による中心磁場ドリフト量を評価し、1%オーバーシュートにより磁場ドリフト量が約1桁抑制されることを確認した。

さらに、超電導マグネット製作の事前検証としてモデ

ルコイルを試作し、コイル内磁場分布計算値と超電導線材の $I_c$ -B特性測定結果から算出したコイル $I_c$ 計算値と測定結果を比較し、計算結果の近似線に対して測定結果が $\pm 5\%$ 以内で一致していることを確認した。

なお、製作したY系超電導マグネットは引き続き繰り返し通電試験など長期間の実証試験を行っているが、最終的に当社内でY系超電導線材 $I_c$ -B特性評価用外部マグネットとして利用することを予定している。

当社は今後も更なる高特性、高均一なY系超電導線材の開発を継続し、Y系超電導ケーブルを含めた応用機器開発を継続することでY系超電導線材の広範囲な適用の可能性を示し、省エネルギー社会に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) K. Kakimoto, et al.: "Long RE123 coated conductors with high critical current over 500 A/cm by IBAD/PLD technique," *Physica C* 471, pp. 929-931, 2011
- 2) M. Igarashi, et al.: "Advanced development of IBAD/PLD coated conductors at FUJIKURA," *Physics Procedia* 36, pp. 1412-1416, 2012
- 3) 大保ほか:「800 m級高性能イットリウム系超電導線」, フジクラ技報, 第121号, pp. 33-41, 2011
- 4) 藤田ほか:「RE系超電導線材の特性評価－機械特性・剥離特性・磁場中臨界電流特性」, 低温工学 第48巻, 第4号, pp. 172-177, 2013
- 5) S Matsumoto, et al.: "Generation of 24 T at 4.2 K using a layer-wound GdBCO insert coil with Nb3Sn and Nb-Ti external magnetic field coils," *Supercond. Sci. Technol.* 25, 025017, 2012
- 6) H. Miyazaki, et al.: "Thermal Stability of Conduction-Cooled YBCO Pancake Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.21, No.3, pp. 2453-2457, 2011

- 7) K. Marukawa, et al. : "Research and Development for Upgrading a Cryogen-Free 18 T Superconducting Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22, No.3, 3900304, 2012
- 8) M. Oomen, et al. : "Manufacturing and test of 2G-HTS coils for rotating machines: Challenges, conductor requirements, realization," Physica C 482, pp. 111-118, 2012
- 9) J. Bascunan, et al. : "A New High-Temperature Superconducting (HTS) 700-MHz Inert Magnet for a 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.23, No.3, 4400304, 2013
- 10) M. Daibo, et al. : "Evaluation of normal-zone propagation characteristics of REBCO coated conductor with laminated Cu tape," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.21, No.3, pp. 2428-2431, 2011
- 11) M. Daibo, et al. : "Characteristics of cryocooled racetrack magnet fabricated using REBCO coated conductor," Physica C 471, pp. 1436-1439, 2011
- 12) M. Daibo, et al. : "Characteristics of Impregnated Pancake Coils Fabricated using REBCO Coated Conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22, No.3, 3900204, 2012
- 13) M. Daibo, et al. : "Evaluation of thermal stability of conduction-cooled REBCO coil with 0.3-mm-thick stabilizer," Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, pp. 507-512, 2013
- 14) M. Daibo, et al. : "Development of a 5T 2G HTS Magnet with a 20-cm-diameter Bore," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.23, No.3, 4602004, 2013
- 15) Y. Kawai, et al. : "Determination of stabilizer thickness for YBCO coated conductors based on coil protection," Physica C 470, pp. 1865-1869, 2010
- 16) Y. Iwasa : Case Studies in Superconducting Magnets (2nd Ed.) , Springer, New York, 2009
- 17) 大保ほか : 「φ 20cm室温ボアRE系5T高温超電導マグネットの開発」, 低温工学 第48号, 第5号, pp. 226-232, 2013
- 18) Y. Yanagisawa, et al. : "Effect of current sweep reversal on the magnetic field stability for a Bi-2223 superconducting solenoid," Physica C 469, pp. 1996-1999, 2009
- 19) M. Daibo, et al. : "Evaluation of a 5T 2nd Generation High Temperature Superconducting magnet with a 200-mm-diameter Room Temperature Bore, Physics Procedia 45, pp. 229-232, 2013