

# 強磁場応用向けイットリウム系超電導線材

先端技術総合研究所 五十嵐 光 則<sup>1</sup>・藤 田 真 司<sup>1</sup>・佐 藤 大 樹<sup>1</sup>・飯 島 康 裕<sup>2</sup>  
直 江 邦 浩<sup>3</sup>  
新規事業推進センター 永 田 雅 克<sup>4</sup>・館 野 文 則<sup>5</sup>・大 保 雅 載<sup>6</sup>

## Y-based Coated Conductors for Applications Generating Strong Magnetic Fields

M. Igarashi, S. Fujita, H. Sato, Y. Iijima, K. Naoe, M. Nagata,  
F. Tateno, and M. Daibo

イットリウム系超電導線材は、強磁場中でも高い臨界電流特性を有することに加え、強度にも優れていることから、従来材料では実現しなかった 20 T 以上の磁場に耐える超電導マグネットを構成することができる。本稿では、その応用としての科学研究用強磁場実験設備や 1 GHz 以上の共鳴周波数を用いる超高分解能 NMR 装置等の簡単な紹介と、それら強磁場応用へ向けた当社のイットリウム系線材開発のアクティビティーについて報告する。

Y-based coated conductors can be applied to the superconducting magnet with a magnetic field over 20 T which was not realized by conventional materials, due to their high critical current performance in strong magnetic fields and robust property in mechanical strength. In this report, applications for the strong magnetic fields, for example, nuclear magnetic resonance (NMR) instrument with extra-high resolution utilizing a resonance frequency over 1 GHz are briefly introduced, and our recent R&D activities for those applications are also reported.

### 1. ま え が き

#### 1. 1 イットリウム (Y) 系超電導線材

Y系超電導体は化学式 $RE_1Ba_2Cu_3O_y$  (REは希土類)で表される物質群であり、最初に発見された材料の希土類部分の元素がイットリウム (Y) であったことから総じてY系超電導体と呼ばれる。一般的な超電導体は磁場中で臨界電流特性が大きく低下してしまうのに対し、Y系超電導体は強磁場中でも高い臨界電流特性を維持することから最も広範な応用に期待できる超電導材料として注目されている。

当社で製造するY系超電導線材とその構造を図 1, 2 に示す。フレキシブルな金属テープの上に中間層、超電導層、保護層、安定化層が順に積層された構造であり、高い臨界電流を有することに加え、機械的な強度にも優れていることが特長である<sup>1)</sup>。

#### 1. 2 強磁場発生設備とその用途

昨今では、各種超電導線材の普及と超電導を利用するための冷凍技術の発展により、さまざまな強磁場発生設備が実現されているが、それらの中で最も多く稼働している機器は医療用のMRIである。MRIは磁気共鳴画像取

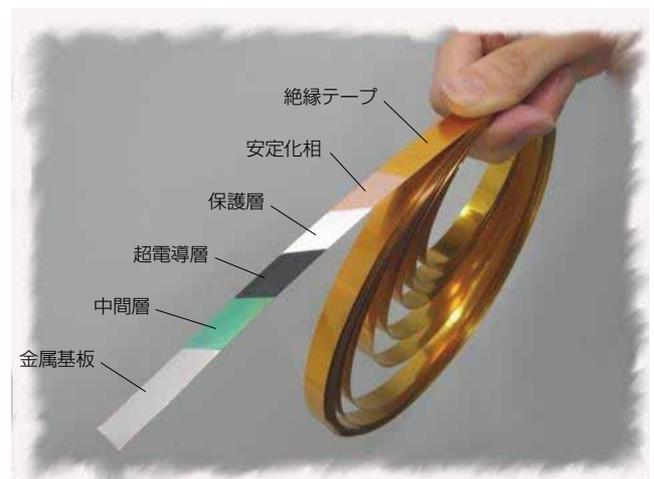


図 1 Y系超電導線材

Fig. 1. Photograph of Y-based coated conductor.

1 エネルギー技術研究部

2 エネルギー技術研究部次長 (博士 (工学))

3 エネルギー技術研究部部長

4 超電導事業推進室製造部部長

5 超電導事業推進室品質保証部部長

6 超電導事業推進室副室長

## 略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
臨界電流 (Ic)	Critical current	超電導状態で流すことのできる最大電流
テスラ (T)	tesla	磁場の強さを表す単位。 永久磁石の中でも強い磁場を発生するネオジウム磁石でおよそ0.5 T.
金属系超電導体	Metal superconductor	NbTiやNb <sub>3</sub> Snなどの金属からなる超電導体。超電導を発現する臨界温度 (Tc) が低いため、冷却には液体ヘリウム (He) が必要とされる。
高温超電導体	High Tc superconductor	銅酸化物からなる物質群で、超電導を発現する温度 (臨界温度 : Tc) が液体窒素温度 (77 K) を超える物質も多い。金属系超電導体に比べて劇的に高いTcを有することから高温超電導体と呼ばれる。代表的な物質としてY系超電導体やBi系超電導体がある。
臨界磁場	Critical field	超電導状態を維持することができる最大の磁場。
自己磁場 (s.f.)	Self field	導線に通電した際に自らを流れる電流によって生じる磁場。直線状の導体であっても自己磁場はわずかではあるが自らに作用する。
パンケーキ コイル	pancake coil	導線を円形の巻枠に対して外周方向に重ねていくように巻線したコイル。巻線後の形態がパンケーキのようであることからこう呼ばれる。それに対し、導線を螺旋状に巻線したコイルはソレノイドコイルと呼ばれる。

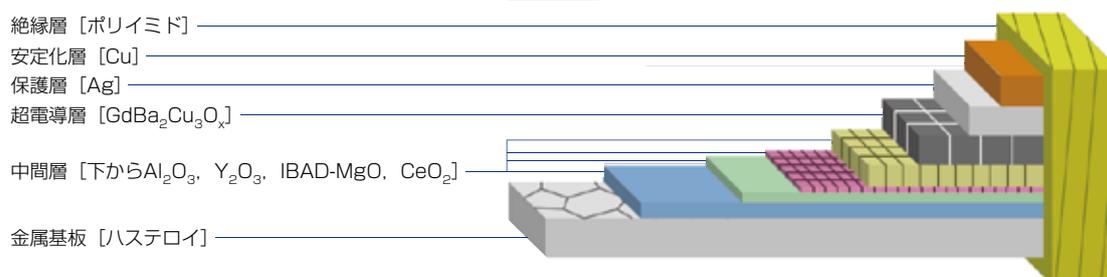


図2 イットリウム系超電導線材の構造  
Fig. 2. Structure of Y-based coated conductor.

得装置 (Magnetic Resonance Imaging) の略称であり、磁場中に置かれた原子が磁場強度と原子核スピンの応じた特定の高周波を吸収・放出する核磁気共鳴現象を利用した撮像装置である。脳や臓器など人体内部の精細な画像が得られるため、現代の医療において欠かせない存在となっている。現在のところ主要なMRIの磁場領域は1.5～3 Tであり、磁場の強さという観点からは強磁場発生設備の中でも低～中程度の領域であるが、高解像度化を求めた更なる高磁場化や液体Heフリー化、コンパクト化などの要求から高温超電導線材を用いたMRIの開発も行われている。

その一方で、強磁場マグネットやそれを利用した核磁気共鳴分光装置 (Nuclear Magnetic Resonance : NMR) などのようにMRIよりもさらに強い磁場が要求される機器もある。図3に示すように、強磁場マグネットは“ボア”と呼ばれるマグネット内部の空間に静止強磁場を発生させる装置であり、磁場中における物性研究や磁気科学と呼ばれる磁場中での物質の挙動に着目した研究などに用いられる。特に20 Tを超えるような強磁場マグネ



図3 超電導マグネットの構成例 (フジクラ製)  
Fig. 3. Photograph of superconducting magnet.

ットは物性物理発展のため世界の国立研究所数か所で建設が計画されている<sup>2)</sup>。他方のNMR装置はMRIと同様に核磁気共鳴現象を利用した分析装置であり、主に有機化合物の分子構造決定などに用いられる。核磁気共鳴自体は感度の低い現象であり、磁場が強いほど分析の感度と分解能が向上することからNMR装置では殊更に強い磁場が要求される。なお、NMRの分野では慣習的に磁場の強度 (T) をそれに比例する水素原子核の共鳴周波数 (MHz) で表すことが多く、その関係は 2.35 Tが 100 MHzに相当する。最近では 1 GHz超 (23.5 T) の超高分解能NMR装置が実現されており、強磁場の効果により 700 MHzのNMRに対して明らかに分解能が向上することが確かめられている<sup>3)</sup>。

ところで、こういった 20 T超の磁場領域は金属系超電導体の臨界磁場付近であるため、それら単体では実現困難となる。そこで図 4 に示すように、低温領域において 20 Tよりはるかに高い臨界磁場を有する高温超電導体のコイルを金属系超電導体コイルの内側に配した構造がとられる。本構造の場合、内側のコイルは通電時に大きな電磁力 (フープ力) が加わるため、機械的強度にも優れている必要があり、当社で製造しているような Y系

超電導線材はその点においても最適である。

このような強磁場応用向けとして、当社においても 2013 年に東北大学金属材料研究所の「25 T無冷媒超電導磁石システム」向けに Y系超電導線材を受注した<sup>4)</sup>。以下に強磁場応用向け線材開発の代表例として、本件を中心にその要求性能と実際に作製した線材のばらつき、およびそれらを使用したコイルの通電試験結果を紹介する。

## 2. 25T無冷媒マグネット向けの線材

### 2.1 線材構造と寸法公差

本件における線材は、図 1 の安定化層において線材幅方向の全周を覆う銅めっき構造を採用した。板状の対象物にめっきを施した場合、一般的にエッジ部のめっきが厚くなるドッグボーンと呼ばれる現象が生じる。ドッグボーンが生じると寸法公差の制御が困難になるため、めっき条件を工夫することで低減を試みた。最終的に完成した銅めっき線材の断面写真を図 5 に示すが、幅方向両端部と中央部で銅めっきの厚さが均一であることを確認できた。また、図 6 には線材の幅と厚さを長手方向の全長に亘って測定した一例を示す。コイルの設計には寸法公差が重要であるが、幅は  $5 \pm 0.1$  mm、厚さは  $120 \pm 10$   $\mu\text{m}$  という規格に対し、それぞれを満たしていた。

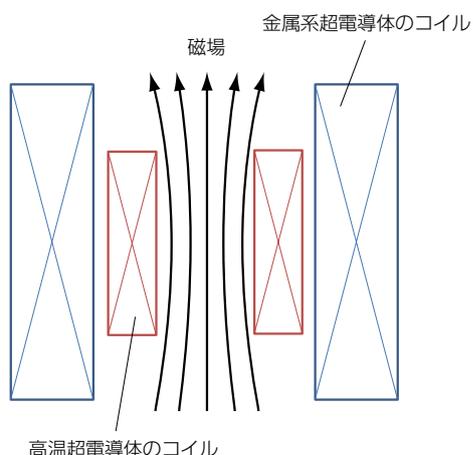
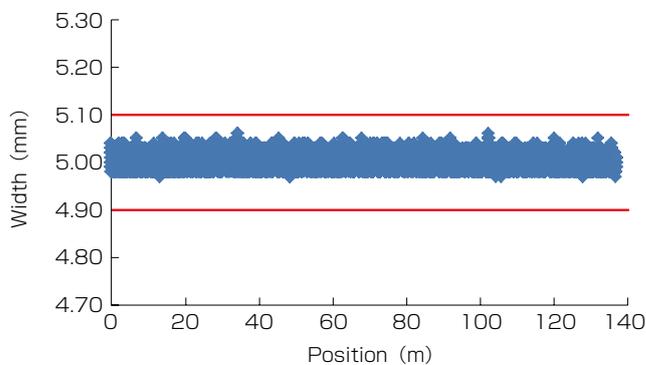


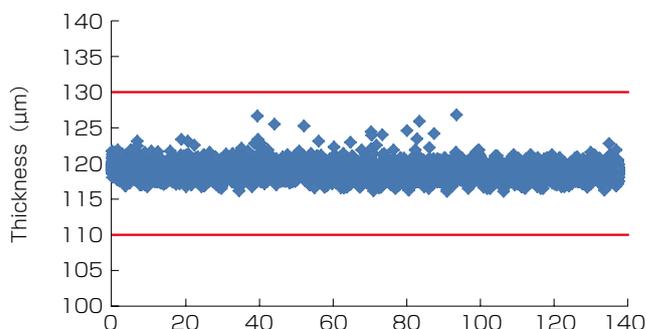
図 4 高温超電導複合型マグネットの断面模式図  
Fig. 4. Schematic illustration of cross-sectional configuration of hybrid superconducting magnet with High-Tc superconductor.



図 5 銅めっき線材の断面写真  
(a)(c) 幅方向エッジ部 (b) 幅方向中央部  
Fig. 5. Cross-sectional photographs of copper plated wire.  
(a)(c) Both edges across the width direction.  
(b) Center part across the width direction



(a)



(b)

図 6 線材長手方向の寸法ばらつき (a) 幅, (b) 厚さ  
Fig. 6. Longitudinal distribution of wire dimensions.  
(a) Width (b) Thickness.

2. 2 磁場中の臨界電流特性

本件での臨界電流の要求性能は、実使用環境である 20 K, 15 Tにおいて 300 A/cmであった。そこで、まず複数のサンプルに対し 20 K, 15 T, および 77 Kのs.f.と 0.6 Tで $I_c$ を測定し、それらを比較した。その結果、図 7 に示すように 77 K, s.f.と 20 K, 15 Tの $I_c$ は相関係数  $R= 0.373$  であったのに対し、77 K, 0.6 Tと 20 K, 15 Tの $I_c$ は $R= 0.847$  と良い相関を示した<sup>5)</sup>。このことから、社内で簡便に測定できる 77 K, 0.6 Tの $I_c$ から 20 K, 15 Tの特性をある程度推測できることがわかった。図 7 によれば 77 K, 0.6 Tにおいて 150 A/cm以上であれば、マージンを持って 20 K, 15 Tにおける要求性能を満たしていたが、これは開発当初の標準的な線材性能よりやや高い性能であった。そこで、超電導層の膜厚を厚くすることを試みたところ、臨界電流は向上したが、図 8 に示すように後述する機械特性が超電導層の膜厚とともに低下する傾向が見られた。結果として、両者のバランスが良い膜厚を狙って成膜する必要があり、試作を重ねて条件を最適化した。図 9 には、今回開発した線材の中で 77.3 K, 0.6 Tにおいて 150 A/cm (75 A / 5 mm-w) を満たした線材のヒストグラムを示すが、Lot間の特性にはややばらつきがあるものの、述べ 140 Lot以上の線材が要求性能を満たした。

2. 3 機械特性

マグネットの内挿コイルには通電時に大きな電磁力(フープ力)がかかるため、液体窒素中での引張強度を検証した。図 10 には開発当初に作製した線材の引張強度を示す。図の縦軸は引張負荷時の $I_c$ を負荷前の $I_{c0}$ で規格化しており、測定の誤差約 1 %を考慮して $I_c/I_{c0} = 0.99$ を劣化点とすると、このサンプルの引張強度は 790 MPaであり、要求性能を満たしていた。さらに線材の耐久性を評価するために、引張歪約 0.45 % (本サンプルでは応力に換算して約 729 MPa)を繰り返し 10000 回加えて

$I_c$ の低下率を評価したところ、図 11 に示すように 10000 回の試験後においても劣化は見られなかった。前項で述べたように、引張強度に影響を与える超電導層の膜厚も制御しながら線材を製造し、得られた線材の引張強度を

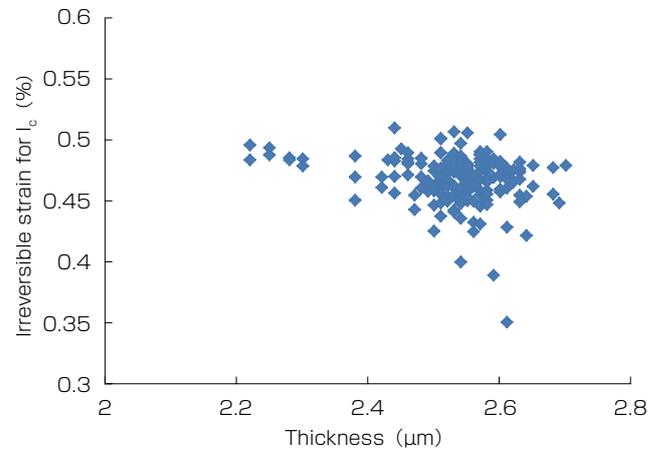


図8 超電導層の膜厚と機械強度の関係  
Fig. 8. Relationship between a thickness of superconducting layer and a mechanical strength.

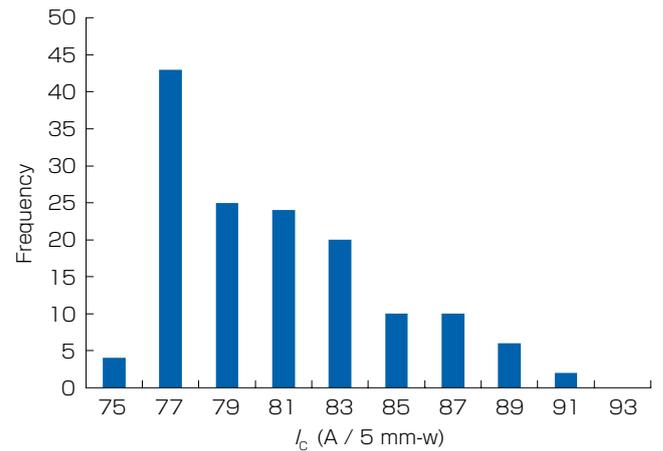


図9 25 Tマグネット向けに作製された線材の 77.3 K, 0.6 Tにおける $I_c$ 値

Fig. 9. Histogram of  $I_c$  (77 K, 0.6 T) on developed wires for 25 T magnet.

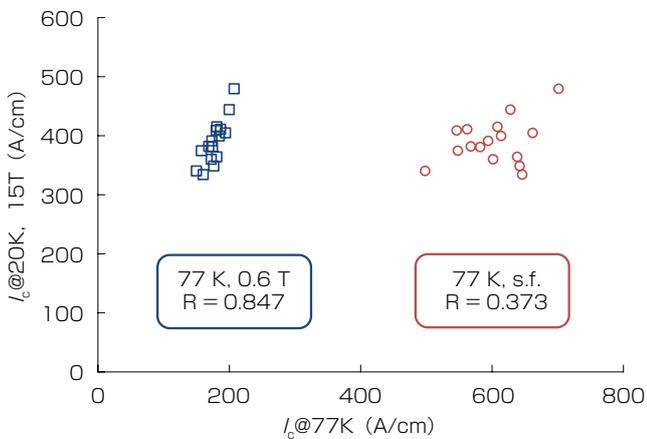


図7 20 K, 15 Tにおける $I_c$ と 77 K, s.f. および 0.6 Tにおける $I_c$ の相関。図内Rは相関係数  
Fig. 7.  $I_c$  at 20 K, 15 T ( $B // c$ ) as a function of  $I_c$  77 K, s.f. or 77 K, 0.6 T ( $B // c$ ). The values of R in the graph are correlation coefficients.

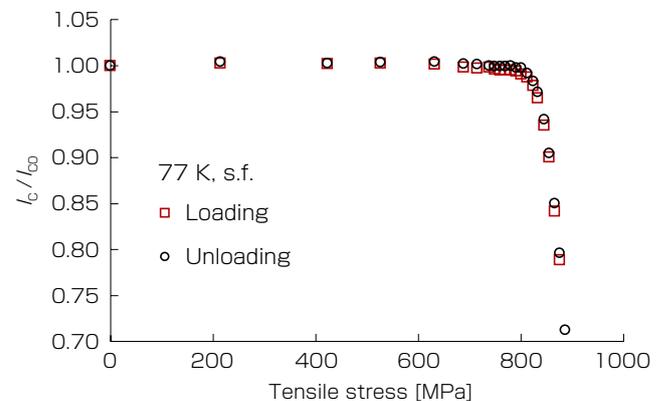


図10 引張応力に対する $I_c$ 低下率  
Fig. 10.  $I_c$  degradation ratio against tensile stress for a typical sample.

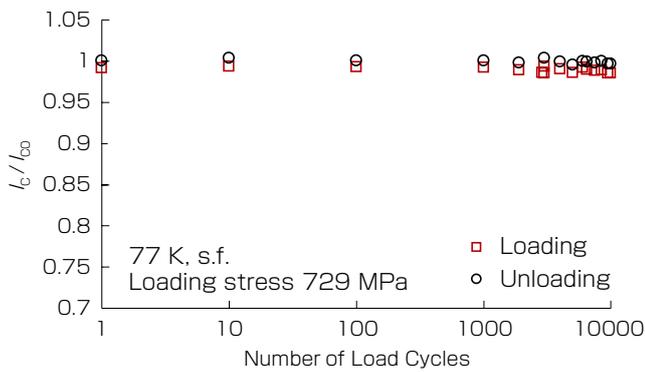


図11 繰り返し引張負荷に対する  $I_c$  低下率  
Fig.11.  $I_c$  degradation ratio against repeated cycle of tensile load.

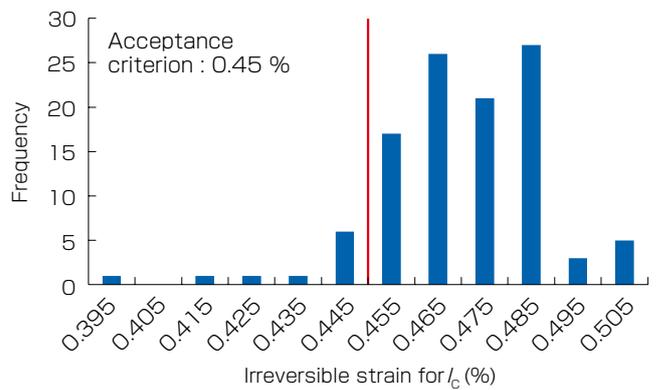


図12 25 Tマグネット向けに作製された線材における  $I_c$  不可逆の引張歪  
Fig.12. Histogram of Irreversible strain for  $I_c$  on developed wires for the 25 T magnet.

評価した結果を図 12 に示す。合格基準を引張歪 0.45 % (応力に換算して 700 MPa前後) としたところ、およそ 90 % のサンプルが合格であった。

### 3. 25 T無冷媒マグネット内挿コイルの評価結果<sup>6,7)</sup>

25 T無冷媒マグネットは、内挿コイルが 138 A 通電時に 11 T の磁場を発生し、外挿の金属超電導体コイルが発生する 14 T と組み合わせることで中心ボアに 25 T の磁場を発生させる設計である。

耐フープ力を検証するため、当社で作製した Y 系線材を用いて実機と同じサイズのシングルパンケーキコイルを 4 枚重ねたコイルを試作し、東北大学において 11 T バックアップ磁場中にて通電試験が実施された。最大 192 A 通電したところ、電圧 - 電流特性に異常は見られなかった。192 A 通電時の最大フープ力は 391 MPa であり、実機で想定される 387 MPa 以上でも問題が生じないことが確認された。

その後、56 枚のシングルパンケーキコイルからなる実機コイルが製作され、単体にて励磁試験が実施された。中心磁場の計算値 10.5 T に相当する 131.3 A まで 1 時間で励磁され、その時の実測値は 9.9 T であった。その後 132.6 A (計算値 10.61 T) まで電流が増加され、最終的に実測値 10.15 T が達成された。これは無冷媒冷却での Y 系単体コイルの試験では現時点で最高の磁場である。

### 4. む す び

強磁場応用向けとして東北大学金属材料研究所の「25 T無冷媒超電導磁石システム」向けに Y 系超電導線材を受注した。線材の安定化層には銅めっきを採用し、ドッグボーンなどを無くすことで線材寸法を厳密に制御することに成功した。磁場中での臨界電流性能に関しては、実使用環境である 20 K, 15 T の特性と 77 K, 0.6 T の特性に良い相関があることを示し、20 K, 15 T での

$I_c > 300$  A/cm という要求性能に対してマージンを持たせた 77 K, 0.6 T の  $I_c > 150$  A/cm という性能を実現した。機械特性に関しては、液体窒素中での引張試験で引張強度 700 MPa 以上を確認し、この領域での繰り返し引張負荷 10000 回に対しても劣化がないことを実証した。

今回当社で開発された線材はフープ力および実機試験用にコイル化された。フープ力試験では 11 T のバックアップ磁場中で通電され、最大 391 MPa のフープ力下においても正常な電流 - 電圧挙動を示した。56 枚のシングルパンケーキコイルからなる実機コイルの単体励磁試験では、132.6 A 通電時に磁場の実測値 10.15 T が達成された。これは無冷媒冷却での Y 系単体コイルの試験としては現時点で最高の磁場である。

### 参 考 文 献

- 1) 飯島：「Y 系超電導線材の高性能化と応用」、フジクラ技報、第 123 号、pp120-124, 2012
- 2) 淡路：「強磁場マグネット」、超電導 Web21, 2014 年 6 月号、pp.18-19, 2014
- 3) K. Hashi, et al: "Achievement of 1020 MHz NMR," Vol.256, Journal of Magnetic Resonance, pp.30-33, 2015.
- 4) 飯島：「東北大学金属材料研究所 25 T 無冷媒マグネット向け高温超電導線材受注」、フジクラ技報、第 126 号、pp70, 2014
- 5) S. Fujita et al: "In-field Critical Current Property of IBAD/PLD Coated Conductors," J. Phys.: Conf. Ser. vol. 507, 022007, 2014
- 6) 宮崎ほか：「無冷媒 25 T 超伝導マグネット用 Y 系 HTS コイルの試作開発と励磁試験」、第 92 回低温工学・超電導学会 講演概要集 p.173, 2015
- 7) S. Awaji, et al: "10 T generation by an Epoxy Impregnated GdBCO Insert Coil for the 25 T-cryogen-free Superconducting Magnet," submitted to Supercond. Sci. Techn.