

## DI-BSCCO の開発進捗

### Recent development of DI-BSCCO

武田 宗一郎, 鍵山 知宏, 山崎 浩平, 菊地 昌志, 中島 隆芳, 小林 慎一, 長部 吾郎,  
藤上 純, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工); 北口 仁(NIMS); 下山 淳一(東大)

TAKEDA Soichiro, KAGIYAMA Tomohiro, YAMAZAKI Kohei, KIKUCHI Masashi, NAKASHIMA Takayoshi,  
KOBAYASHI Shinichi, OSABE Goro, HUJIKAMI Jun, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (Sumitomo Electric Industries, LTD.);  
KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SHIMOYAMA Jun-ichi (The University of Tokyo)  
E-mail: takeda-souichirou@sei.co.jp

#### 1. はじめに

当社は最終焼結に加圧焼結 (CT-OP® : Controlled over pressure) を施した銀シース (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 超電導線材 (DI-BSCCO (Dynamically-Innovative BSCCO)) を製造している。様々な超電導応用機器の実用化に DI-BSCCO が貢献できるよう開発を進めてきており、量産線材の臨界電流値 ( $I_c$ ) は km 長にわたって 180 ~ 200 A の水準に達している。また、短尺サンプルでは 77 K 自己磁場下で  $I_c = 270$  A を記録したほか、in-field  $I_c$  も向上してきている。

今回は、高  $J_c$  化と単長あたりの銀の使用量低減による線材コストダウンを目的とした薄型線材開発と、新補強材を使用した高強度化線材の開発進捗について報告する。

#### 2. 高 $J_c$ 化と価格低減化

線材の成形工程である伸線、圧延での加工条件をわずかに変えて、従来の Type H から厚みだけを 30  $\mu$ m 薄くした場合も線材の  $I_c$  は変わらないという結果を得た。[1] Table.1 に従来の Type H と Type H を薄型化した New Type H の典型的な線材の仕様を示す。New Type H では、線材断面積が小さくなっているにも関わらず同一  $I_c$  を有しているため、 $J_c$  が従来の Type H に比べて 15% 向上していることを意味する。さらに断面積の低減により、単位長さあたりの銀の使用量が設計上約 13% 低減できており、線材コストの低減にもつながっている。

一方で、厚みを薄くしたことによる機械特性の低下が懸念される。そこで引っ張り試験や曲げ試験、疲労試験による機械強度の評価を実施したところ、薄型化した New Type H も Type H と同等の機械特性を有していることが確認できている。すでに、長尺線の製造にも着手済みであり、Fig.1 には、2 ロット分の New Type H の  $I_c$  と N 値の分布を示す。数百 m 長にわたって均一な  $I_c$  と N 値を有した線材であることが確認できる。

New Type H では、薄型化による機械特性の低下なしに Type H の高  $J_c$  化、単位長さあたりの価格低減に成功している。低温磁場中においても New Type H は Type H と同等の  $I_c$  を有していたことから、低温磁場中の  $J_c$  も向上しており、コイルやマグネット応用へより一層の貢献が可能となっている。

#### 3. 新素材を使用した高強度化

線材の高強度化に関しては、当社では補強材と超電導線をラミネートした補強線を提供している。補強材として SUS テープを用いた Type HT-SS と、銅合金テープを用いた Type HT-CA の二種があり、高強度化に向けては補強材の厚みを厚くすることで、引っ張り強度を上げることが可能であるが、 $J_c$  とはトレードオフの関係となる。従来の補強材を用い 77 K、自己磁場下  $J_c \geq 100$  A/mm<sup>2</sup> を維持した線材の引っ張り強度は 300 MPa 程度であり、 $J_c$  を維持した高強度化が望まれていた。

$J_c$  を損なわずに更なる高強度化を実現するために弊社では新たな補強材として“XX”を採用し、500 MPa (77 K) を

越える引っ張り強度を有した Type HT-XX の商品化を進めている。Table.2 に三種類の補強線材の典型的な仕様を示す。すでに短尺で作製したサンプルに関しては、低温磁場特性や引っ張り試験、曲げ試験、疲労試験といった評価が完了しており、低温磁場特性は、bare 線材と比較して  $I_c$  の劣化がないことが確認できている。また、曲げ試験でも従来の補強線材に比べて良好な結果が得られており、これら評価の結果から、Type HT-XX は大型・強磁場マグネット用に大きなフープストレス下でも使用に耐える線材として有望と考えている。評価と並行して長尺製造にも着手しており、進捗を報告する。

Table.1 Specifications of Type H and New Type H.

Wire Type	Type H	New Type H
Width	4.3 mm	4.3 mm
Thickness	0.23 mm	0.20 mm
$I_c$ (77 K, Self-Field)	170 ~ 200 A	
$J_c$ (77 K, Self-Field)	200 A/mm <sup>2</sup> (*)	230 A/mm <sup>2</sup> (*)
Critical Tensile Stress (77 K)	130 MPa	130 MPa

(\*) in case of  $I_c = 200$  A wire

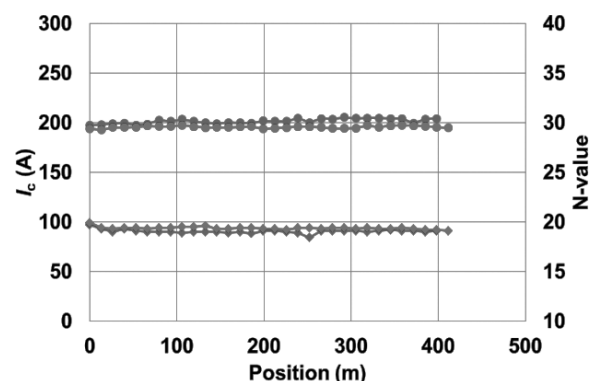


Fig.1  $I_c$  & N-value distributions. This figure shows example of 2 lots (@ 77 K).

Table.2 Specifications of laminated wires.

Wire Type	Type HT-SS	Type HT-CA	Type HT-XX
Width	4.5 mm	4.5 mm	4.5 mm
Thickness	0.30 mm	0.36 mm	0.28 mm
$I_c$ (77 K, Self-Field)	170 ~ 200 A		
$I_c$ (4.2 K, 17 T)	300 A (*)		
$J_c$ (4.2 K, 17 T)	220 A/mm <sup>2</sup> (*)	180 A/mm <sup>2</sup> (*)	235 A/mm <sup>2</sup> (*)
Critical Tensile Stress (77 K)	270 MPa	250 MPa	500 MPa

(\*) in case of  $I_c = 200$  A wire

#### 参考文献

1. M. Kikuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.172

# Bi-2223 線材の臨界電流密度分布に与える自己磁界の影響と 並列導体の電流容量に与える素線間相互作用の評価

## Self-field Effect on Critical Current Density Distribution in Bi-2223 Tape and Interaction among Strands on Current Capacity of Parallel Conductor

古川 和樹, 今戸 幸佑, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九州大学);

菊地 昌志, 小林 慎一, 中島 隆芳, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工); 富田 優(鉄道総研)

FURUKAWA Kazuki, IMADO Kosuke, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

KIKUCHI Masashi, KOBAYASHI Shin-ichi, NAKASHIMA Takayoshi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (SEI);

TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: k.furukawa@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導線材の機器応用に際しては、素線を束ねた並列導体としての使用が所望の電流容量を達成する上で重要となる。一方、並列導体の電流容量は、単純に素線の本数分とはならず、定量設計が困難となっている。これは、素線の臨界電流値 ( $I_c$ ) 値が、すでに自己磁界の影響を含んでいることに起因していると考えられる。そこで本研究では、走査型ホール素子顕微鏡を用いて、高温超伝導線材の自己磁界が臨界電流密度分布に与える影響を明らかとし、有限要素法に基づく電磁界解析コードにより、並列導体の電流容量に与える素線間相互作用について評価した。

### 2. 臨界電流密度分布に与える自己磁界の影響

測定対象とした線材は、加圧焼成法によって作製された 4.2 mm 幅の Bi-2223 線材であり、77 K の自己磁界下における  $I_c$  値は 200 A のものである。本線材を 87 K まで冷却し、 $I_c$  値を通電した際のシート電流密度分布を評価することで、線材内の臨界電流密度分布を得た。また、本測定を自己磁界下と外部磁界を印加した条件下で行うことにより、臨界電流密度分布に与える自己磁界の影響を評価した。その結果を Fig. 1 に示す。自己磁界条件下および  $\pm 10$  mT の外部磁界を印加した条件下では、臨界電流密度分布は大きく変化しており、経験磁界分布に注目すると、ちょうど経験磁界がゼロとなる領域 ( $\Delta$ 印) に電流が集中している様子がわかる。すなわち、本質的な臨界電流密度分布は、同じ強度の磁界を経験している  $\Delta$ 印(0 mT)や、 $\circ$ 印( $\pm 10$  mT)を結んだ楕円形状をしており、それに自己磁界の効果が加わることによって、線材内の臨界電流密度分布が敏感に変化する様子を実験的に初めて明らかとすることができた。

### 3. 並列導体の電流容量に与える素線間相互作用

これらの結果から、線材内の臨界電流密度分布の具体的な空間分布と磁界依存性が明らかとなり、有限要素法に基づく電磁界解析コードを構築した結果、線材内の臨界電流密度分布を定量的に表現することができた。この電磁界解析コードを用いて、Fig.2(a)に示すような 3 本の線材を重ねた並列導体の電流容量を評価すると、自己磁界を強め合う効果により、各素線で電流容量が小さくなっている。これは、線材単体の電流容量が 102 A であるのに対して、約 2割も減少していることになる。また、Fig.2(b)に示すような一極を有するケーブル形状の導体では、自己磁界を打ち消し合う効果により、各素線で電流容量が約 3割も増大している。関連研究では、実験により線材の並べ方によって電流容量が変化することが報告されていたが<sup>[1]</sup>、本研究で構築した自己磁界を考慮した解析コードにより電流容量の定量的表現が可能となった。

### 参考文献

[1] H.Ohara, et al., Abstract of IEE Conference (2014) p.299

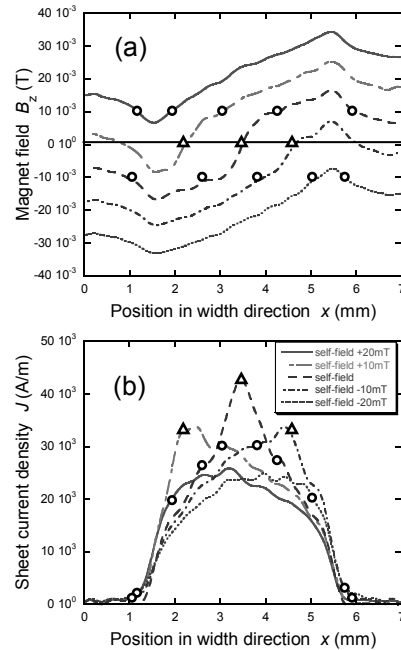


Fig. 1 Experimental results on the distributions of (a) experienced magnetic fields and (b) critical sheet current density in a Bi-2223 tape.

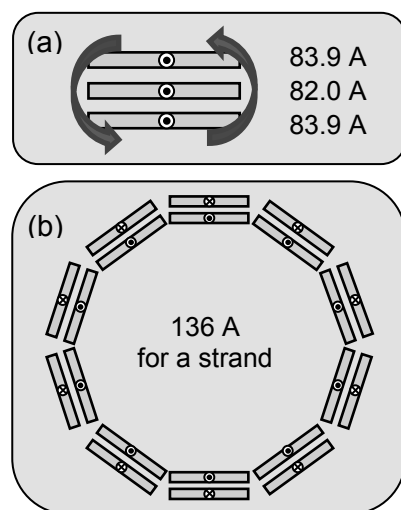


Fig. 2 Current capacities of parallel conductors estimated by FEM analyses, where each strand has 102 A of critical current at self-field condition.

謝辞 本研究の一部は、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)の一環として行われたものである。

# ピックアップコイル群による自己磁界測定波形を利用した HTS 線材内の電流分布特性評価法

## Characteristic evaluation method of AC current distributions in HTS tapes using self-magnetic field waveform measured by a pickup coil array

平山 斉, 今岡 貴史, 下野 貴之, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, IMAOKA Takashi, SHIMONO Takayuki, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、低損失加工されたマルチフィラメント HTS 線材内の電流分布を定量的に評価できる測定法の確立を目的としている。これまで、ピックアップコイル群を用いてマルチフィラメント HTS 線材内の電流分布測定を行ってきたが[1]、フィラメントの細線化に伴い、より高い測定精度が必要となってきた。そこで本研究では、本電流分布算出法の測定精度の改善を図るために、ピックアップコイル群によって測定した試料線材の自己磁界測定波形を利用して、これまで考慮していなかった HTS 線材内で分布して流れる電流の位相差を考慮した電流算出法について検討した。

### 2. 磁場分布測定用ピックアップコイル群と電流分布算出法

本測定法では、極小サイズのピックアップコイル群を試料線材に直接貼り付けて、試料線材表面付近の磁場分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を求める。電流分布の測定に用いるピックアップコイル群は、線径  $\phi 30 \mu\text{m}$  の絶縁 Cu 線で巻線された極小サイズのコイル 40 個から成る。各コイルのコイル長は 0.18 mm、巻数は 3 層 17 ターンである。

電流分布は、ピックアップコイル群で測定した磁場分布を用いて数値計算により求める。まず、試料線材断面を線材幅方向に分割する。これを電流要素と呼ぶ。次に、各電流要素に電流分布を与え、その電流分布に対する磁場分布を計算する。計算磁場分布と測定磁場分布の誤差の二乗和が最小となるような電流分布を探索することで解を求める。

### 3. 電流の位相差を考慮した電流分布算出法

本測定法ではこれまで、各電流要素に流れる電流の位相が全て同相であるとして電流分布を算出していたが、ここでは線材内に流れる電流の位相差を考慮した電流分布算出法を検討した。

Fig. 1(a)は電流要素が 5 つの場合の試料線材とピックアップコイル群の断面図を示したものである。また、Fig. 1(b)には計算の例として、 $I_1 = I_5 = 1.2e^{j30^\circ}$ 、 $I_2 = I_3 = I_4 = 0.9e^{j26^\circ}$ とした場合の各電流要素の電流およびピックアップコイル群  $i$  番目のコイルで測定される磁場  $B_i$  のベクトル図を示した。ここで、 $I_1 \sim I_5$  は各電流要素に流れる電流、 $\theta_1 \sim \theta_5$  は線材に流れる全電流  $I$  を基準としたときの各電流要素に流れる電流の位相、 $B_{i1} \sim B_{i5}$  は各電流要素の電流が  $i$  番目のコイルに作る磁場である。ベクトル図より、 $i$  番目のピックアップコイルで測定される磁場の振幅  $|B_i|$  および  $I$  との位相差  $\theta_i$  は次式で与えられる。

$$|B_i| = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n |B_{ij}| \cos \theta_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n |B_{ij}| \sin \theta_j\right)^2} \quad (1)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{j=1}^n |B_{ij}| \sin \theta_j}{\sum_{j=1}^n |B_{ij}| \cos \theta_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 $B_{ij}$ :  $j$  番目の電流要素が  $i$  番目のピックアップコイルに作る磁場、 $\theta_j$ :  $j$  番目の電流要素の位相、 $n$ : 電流要素数

(1), (2)式より磁場振幅  $|B_i|$  の分布および位相差  $\theta_i$  を算出し、それぞれにおいて計算値と測定値の誤差の二乗和が最小となるように各電流要素の電流を探索する。

### 4. 電流分布算出結果

Fig. 2 に、5 本のフィラメントから成るマルチフィラメント HTS 模擬線材の磁場分布およびその位相を誤差なしで測定できたと仮定したときの電流分布算出結果を示す。Fig. 2(a)は磁場分布および位相の設定値と算出結果である。図中の実線が算出した電流から求めた計算値であり、 $|B_i|$ 、 $\theta_i$  の分布とも設定値とよく一致している。Fig. 2(b)は各フィラメントの電流値の算出結果である。図中のプロットが設定した電流値、棒グラフが算出した電流値である。各電流要素の電流を同相であるとして算出した電流値(old)と比較すると、位相差を考慮した電流算出法(new)で求めた電流値の方が設定値により一致しており、フィラメント電流に位相差がある場合における電流分布算出精度が改善できている。

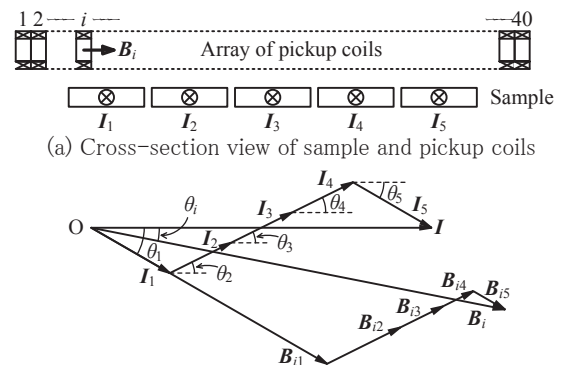


Fig. 1 Measurement model and vector diagram

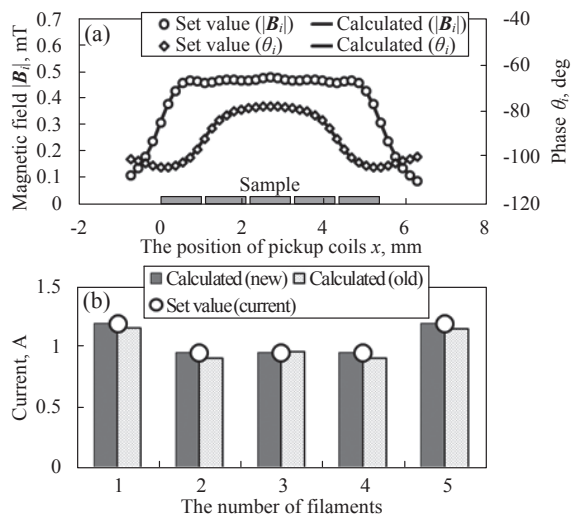


Fig. 2 Calculated results of (a) magnetic field distributions and (b) current distributions

### 参考文献

1. M. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.188

# デツインした REBCO コート線材における $T_c$ と $J_c$ のひずみ依存性

## Applied strain dependence of $T_c$ and $J_c$ for detwinned REBCO coated conductors

鈴木 匠, 淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大)

Takumi Suzuki, Satoshi Awaji, Hidetoshi Oguro, Kazuo Watanabe (Tohoku Univ.)

E-mail: takumi-s@imr.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導体  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (REBCO) はコート線材と呼ばれるテープ状の線材として用いられる。コート線材は磁場中でも高い臨界電流密度を持つ。更に、高強度の金属基板を用いることから、高い耐応力特性を持つ。この特徴から低温・強磁場マグネットへの応用が期待されている。しかし、マグネット応用において重要となるひずみ依存性は未だに明らかとなっていない。この原因として超伝導層が 2 軸配向していることが挙げられる。通常ひずみが印加される線材の長手方向には、 $a$  軸を持つ A ドメインと  $b$  軸を持つ B ドメインが双晶を形成しほぼ同程度存在している。これにより、REBCO コート線材の歪み効果は、自己磁場下でべき乗の振る舞いを示すが、磁場中では圧縮側と引張り側の両方にピークを持つなど複雑なひずみ依存性を示す[1]。これらは REBCO 単結晶で、 $T_c$  の圧力効果が  $a$  軸と  $b$  軸で逆の効果を示すことに起因していると予想されている。

これまで、 $a$  軸と  $b$  軸の各軸の  $I_c$  のひずみ依存性を分けて考えることにより、各ドメインのひずみ依存性を記述するモデルで解析が行われている[2]。このような解析のため、実験的に各軸のひずみ依存性を明らかにすることが求められている。我々は、コート線材においてひずみを印加してアニールすることにより双晶と残留ひずみが同時に制御できることを発見したが、体積分率が 2 割程度の制御にとどまっていた[3]。そこで、本研究ではひずみ印加アニールに改良を加え、高温中でのその場引張りにより、コート線材のデツインに成功した。本報告では、デツインしたコート線材の、 $T_c$  と  $J_c$  のひずみ依存性から、各ドメインのひずみ効果について議論する。

### 2. 試料緒元および実験方法

試料線材は SuperPower 社製の MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法によって作製した (Y, Gd)BCO コート線材を用いた。この試料に対して、大気中で 300°C に昇温してから、徐々に引張りひずみを印加した。残留ひずみ及び各ドメインの体積分率は MoK $\alpha$  線を用いて透過法により測定した。

$I_c$  のひずみ依存性は 77 K、外部磁場 0-3 T において 4 点曲げひずみ効果測定装置を用いて測定した。臨界電流密度は試料をフォトリソグラフィ及びウェットエッチング技術を用いて、幅約 100  $\mu\text{m}$ 、長さ、約 1 mm のブリッジ形状に加工し、直流四端子法を用いて通電法にて測定した。電界基準は 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  とした。印加ひずみは、ひずみゲージを用いて測定を行った。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に as-received とひずみ印加アニールを行った試料の線材長手方向と横方向における、(200)、(020)ピークの X 線回折パターンを示す。比較のため強度は (020)ピークの値で規格化してある。ひずみ印加アニールによってピーク位置と強度がそれぞれ変化した。As-received では 2 つのピーク強度がほぼ同程度なのに対し、ひずみ印加アニールを行った試料では長手方向には (020)、横方向には (200)ピークのみが残り、もう一方のピークがほぼ消失した。この結果から線材長手方向には  $b$  軸、横方向には  $a$  軸が揃い、デツインが可能となったことがわかった。

Fig. 2 にデツインした試料における長手方向 ( $b$  軸方向) の  $J_c$  のひずみ依存性を示す。これまで報告されているべき乗のひ

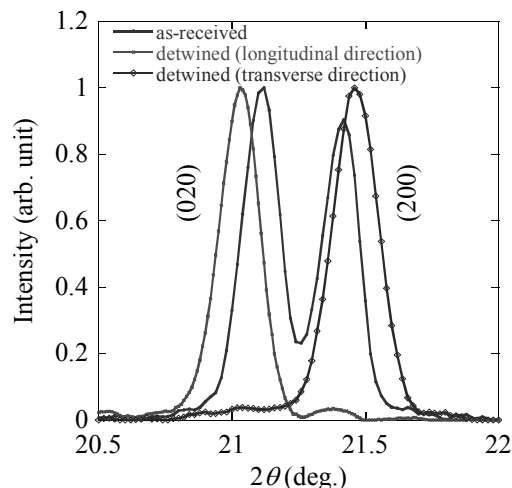


Fig.1 (200) and (020) reflections along the longitudinal and transverse direction after the annealing under the strains in the (Y,Gd)BCO coated conductors.

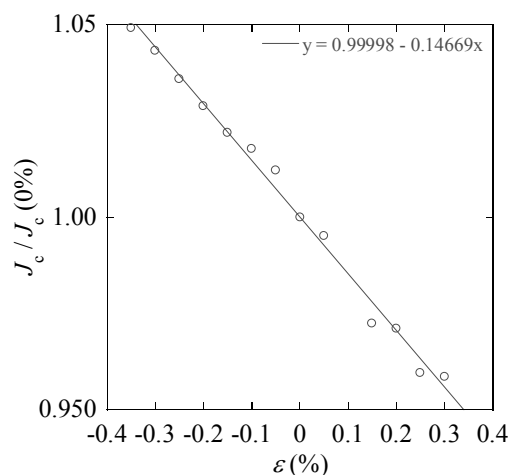


Fig.2 Strain dependence of  $J_c / J_c$  (0%) in the detwinned (Y, Gd)BCO coated conductors.

ずみ依存性とならず、直線的なひずみ依存性を示している。この結果から、単結晶の 1 軸圧力効果と同様に、 $b$  軸のひずみ依存性は直線的な振る舞いとなることが明らかとなった。

当日は、デツイン線材の横方向の  $a$  軸のひずみ依存性と、 $b$  軸の  $T_c$  と  $J_c$  のひずみ依存性を示し、実験結果から見積もった各軸のひずみ依存性を用いて、ドメイン比を導入したモデルによる解析結果について報告する。

### 4. 謝辞

本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 ALCA の一環として行われたものである。

### 参考文献

1. D C van der Laan et al., Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 072001
2. M. Sugano et al., Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 054014
3. T. Suzuki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **23** (2013) 8000104.

# REBCO 超電導テープの室温機械特性の国際ラウンドロビンテスト

## International Round Robin Test for Mechanical Properties of REBCO Superconductive Tapes at Room Temperature

長村 光造(応用科学研); Shin Hyung-Seop (Andong National University); Weiss Klaus-Peter (Forschungszentrum Karlsruhe); Nyilas Arman (Cryogenic Engineering and Materials Expertise); Nijhuis Arend (Applied Superconductivity Centre, University of Twente); 山本 潔(古河電工); 町屋 修太郎(大同大学); 西島 元(NIMS)  
 OSAMURA Kozo (RIAS); SHIN Hyung-Seop (Andong National University); WEISS Klaus-Peter (Forschungszentrum Karlsruhe); NYILAS Arman (Cryogenic Engineering and Materials Expertise); NIJHUIS Arend (Applied Superconductivity Centre, University of Twente); YMAMOY Kiyoshi (Furukawa Electric Cop); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS)  
 E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

### 1. はじめに

IEC-TC90 の国際標準の作成活動の一環として最近 REBCO テープの室温における機械特性の国際ラウンドロビンテスト(RRT)を7か所の研究グループが実施した。その試験結果をとりまとめ、測定データの標準不確かさを推定するとともに、結果の考察から試験方法の改良についての知見を得ることができた。

### 2. 供試材料および試験方法

本 RRT では市販されている4種類の実用 REBCO テープを用いた。これらのテープはすべて銅あるいは銅合金でラミネートされたもので、テープ厚さは 0.22 mm (A), 0.10 mm(B), 0.19 mm(C)および 0.19 mm(D)であった。

試験には標記共著者の7研究機関  $F_j$  ( $j=1$  to 7)が参加し、各機関でテープ毎に5回( $N=5$ )の試験を行った。

試験は以前実施した BSCCO テープの RRT[1]と同様の方法であり Guideline REBCO13 [2]として公開された試験方法に従った。本試験では図1に示すように2種類の弾性定数と2種類の 0.2%降伏強度の値を決めた。

### 3. 試験結果とその解析

各研究機関から報告された試験データの妥当性を検討するため弾性定数の比  $E_0/E_U$  が

$$1 - \delta < \frac{E_0}{E_U} < 1 + \delta \quad (1)$$

を満たすとき、その試験は正常に行われたと判定した。ここでは  $\delta = 0.3$  とした。今回報告された試験データはすべてこの条件をクリアした。

まず弾性定数についての結果を表1に示す。4種類のテ

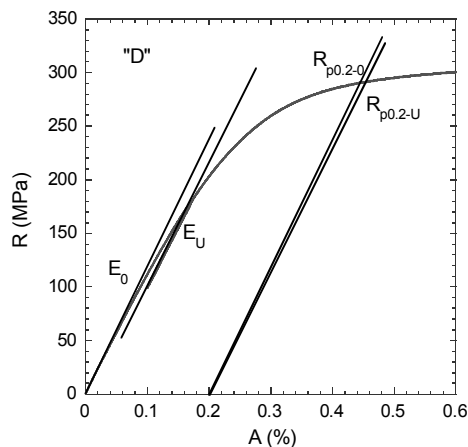


Fig. 1 Enlarged stress versus strain curve for the tape “D” and mechanical properties, which shall be determined for the present RRT.

ープについて全平均と相対標準不確かさ(RSU)を示す[3]。RSUは次のように定義される統計量である。

$$RSU(\%) = \frac{100}{\langle E \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (E_j - \langle E \rangle)^2}{N(N-1)}} \quad (2)$$

Table 1 Total average of the modulus of elasticity and their relative standard uncertainty, where  $N$  is the total number of experiments

Sample	N	$E_0$		$E_U$	
		$\langle E_0 \rangle$ (GPa)	RSU (%)	$\langle E_U \rangle$ (GPa)	RSU (%)
A	35	143.0	1.28	155.5	0.70
B	35	142.3	2.23	142.4	0.92
C	35	130.2	0.72	133.6	0.83
D	35	109.2	0.91	112.9	0.78

ここで RSU の変動を調べると、 $\langle E_0 \rangle$  に対してのほうが  $\langle E_U \rangle$  より大きく、異なるテープ間ではテープ厚さが薄いほど RSU は大きくなる傾向が見られた。実験条件の中で(1)式の  $\delta$  を 0.2 程度に小さくすること、引張速度を  $10^{-4}$  [1/s]より遅くすること、テープ厚さの測定を精度よく行うことにより、RSU を小さくすることができることが明らかとなった。

0.2%降伏強度の RSU の変動についても弾性定数についての結果と同様の傾向がみられた。ただし RSU は全体に小さな値となり、弾性定数よりは精度よく求められる機械定数であることが示された。

### 4. まとめ

IEC-TC90国際標準の制定の一環として、国際RRTを実施しその試験結果を検討したところ、本試験で参考にしたガイドラインREBCO[2]の試験条件よりさらに厳しい条件を課すことが必要であることが明らかとなった。

### 参考文献

1. K. Osamura, K-P.Weiss, H-S.Shin, K.Katagiri, S.Ochiai, M.Hojo, M.Sugano and K.Ohsawa: Intenational round robin test for mechanical properties of BSCCO superconductive tapes at room temperature, Cryogenics 51 (2011)21-26
2. The updated text of the guideline REBCO13 is possible to be referred from the archives of JNC of IEC/TC90 committee (tc90tsunoda@istec.or.jp)
3. K. Osamura, A. Nyilas, H.Shin: Estimation of uncertainty with the modulus of elasticity measured by means of tensile test for BSCCO tapes, Cryogenics 50 (2010) 660-665

鉄系超伝導体  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  の電気化学反応による特性制御Tuning the properties of iron based superconductor  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  via an electrochemical reaction山下 愛智, 出村 郷志, 山木 拓馬, 原 裕, 出口 啓太, S.J. DENHOLME, 岡崎 宏之,  
藤岡 正弥, 竹屋 浩幸, 山口 尚秀, 高野 義彦 (NIMS)Aichi Yamashita, Satoshi Demura, Takuma Yamaki, Hiroshi Hara, Keita Deguchi, Saleem J. Denholme,  
Hiroyuki Okazaki, Masaya Fujioka, Takahide Yamaguchi, Hiroyuki Takeya, Yoshihiko Takano (NIMS)

E-mail: YAMASHITA.Aichi@nims.go.jp

## 1. はじめに

近年発見された鉄系超伝導体の中でも、11系と呼ばれる鉄カルコゲナイドは、超伝導層のみで構成された、もっとも単純な結晶構造を有する。そのため、鉄系超伝導体の超伝導機構を理解する上で重要な物質系であると考えられる。

この11系物質は、層間に過剰な鉄が含まれると超伝導が抑制されることが知られている[1]。過剰鉄を合成段階で選択的に取り除くことは困難であるが、これまでに我々は、赤ワインなどの有機酸溶液に試料を浸し加熱することにより、過剰鉄を除去して超伝導を発現させることに成功している[2]。

本研究では、過剰鉄がプラスのイオンとして層間に存在していることに着目し、電気化学的手法による超伝導発現を試みた。

## 2. 実験方法

11系鉄カルコゲナイド  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  多結晶試料は固相反応法により作製した。電気化学反応における電極は、図1に示すように作用電極と対電極に白金のプレート、参照電極として  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  を用いた。作製した試料は銀ペーストを用いて作用電極側に固定した。溶液は、水にクエン酸を 6.0 (g/L) 溶かして 80 °C に過熱したものを用い、電圧を1時間印加した。

得られた試料は SQUID 磁束計を用いて磁化率測定を行い、ICP 発光分光測定により電気化学反応後の溶液に含まれる Fe と Te の溶出量を定量した。

## 3. 結果と考察

磁化率温度依存性の測定結果より、電圧を印加した全ての試料では、約 7 K 付近において超伝導化に伴う大きな負の磁化率が観測された。この結果は、本研究における電気化学反応が超伝導の発現に効果的であることを示している。

磁化率から見積もられた超伝導体積分率と、母相の鉄に対する Fe、Te 溶出量の印加電圧依存性を図2に示す。1.0 V から 1.5 V の範囲において、印加電圧に対する超伝導体積分率と Fe 溶出量の振舞いに明確な相関性が見られた。また、この電圧域において、Te はほとんど検出されなかったことから、試料の層間から過剰鉄が溶け出し、超伝導が発現していることが示唆された。

超伝導体積分率は 1.0 V から印加電圧の上昇とともに増加し、1.5 V において最も高い値を示す。このことから、1.5 V 付近に超伝導特性向上に最適な電圧値があることが判明した。さらに電圧を上げた 1.7 V では Te の溶出量が増加し、これに伴い超伝導体積分率も低下した。このことは超伝導層が壊れ始めていることを示唆しており、電気化学的手法による超伝導発現には、1.0 V から 1.5 V の範囲での電圧印加が必要であることが明らかになった。

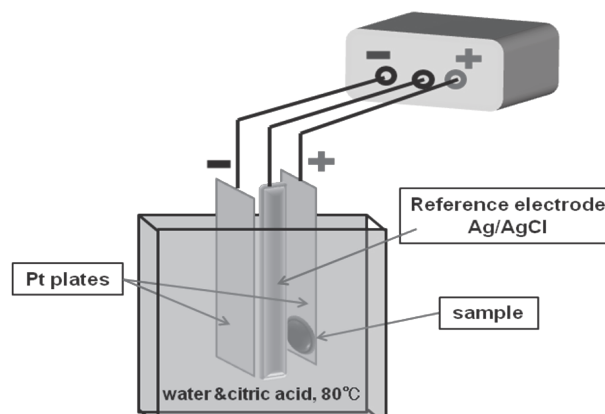


Fig.1 Schematic illustration of electrochemical reaction

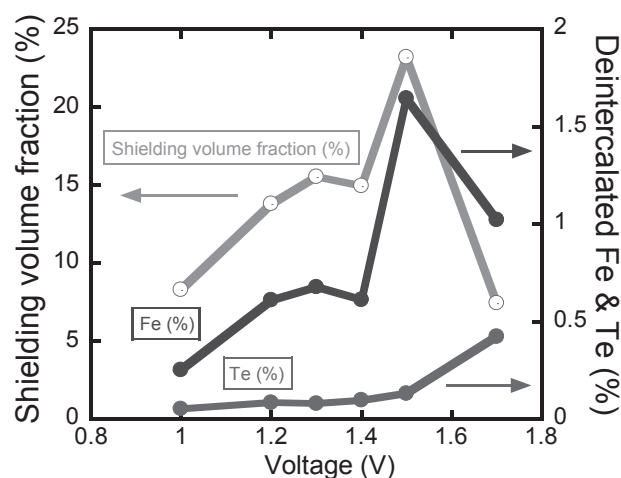


Fig.2 Applied voltage dependence of Fe, Te (%) and shielding volume fraction (%)

## 参考文献

1. M. J. Han, et al., Phys. Rev. Lett., **103** (2009) 067001.
2. K. Deguchi, et al., Supercond. Sci. Technol., **24** (2011) 055008.

# 高いフッ素濃度を有する単結晶 $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ における基礎特性の評価

## Characterization for a single crystal of $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ with a high fluorine concentration

藤岡 正弥, 岡崎 宏之, Saleem. J. Denholme, 出村 郷志, 出口 啓太, 原 裕, 山木 琢磨, 山下 愛智, 山口 尚秀, 竹屋 浩幸, 熊倉 浩明, 高野 義彦 (NIMS)

FUJIOKA Masaya, OKAZAKI Hiroyuki, Saleem. J. Denholme, DEMURA Satoshi, DEGUCHI Keita, HARA Hiroshi, YAMAKI Takuma, YAMASHITA Aichi, YAMAGUCHI Naohide, TAKEYA Hiroyuki, KUMAKURA Hiroaki, TAKANO Yoshihiko (NIMS)  
FUJIOKA.Masaya@nims.go.jp

### 1. はじめに

1111 鉄系超電導体において、超伝導を発現するためには、フッ素や水素、酸素欠陥を導入してキャリアをドーピングする必要がある。特にフッ素ドーピングに関しては、水素ドーピングのように、オーバードープ領域が見られておらず、ドーピング量に応じて、 $T_c$  は上昇している。現在得られている最高  $T_c$  (58 K) もフッ素ドーピングにより合成されている[1]。しかし、十分にフッ素がドーピングされた試料を単相で合成することは非常に難しく、現在でもその固溶限界については議論が続いている。我々のグループでは、バルク試料を、1000°C 以下の低温で焼成し、徐冷を行う事で、ほぼ固溶限界と思われる領域までフッ素を置換した単相試料の合成に成功した[1]。その時のフッ素濃度はおよそ 20% 程度である。一方、単結晶試料においては、依然 52K 程度の超伝導転移温度しか得られておらず、この転移温度はフッ素濃度にして、およそ 10% 程度であり、固溶限界と考えられるフッ素濃度のおよそ半分程度である[2]。

従来、1111 系の単結晶は高温高压下でのフラックス法により合成されてきた。我々のグループでは CsCl が石英管と反応性が低い事を利用して、封管により単結晶を育成した。この方法で得られる単結晶は、これまでに報告されていた単結晶に比べて、非常にフッ素が導入されやすく、現在得られている単結晶としては最高の転移温度(57.5 K)を示す試料合成に成功した[3]。また、残留抵抗比  $\text{RRR}(R(300\text{K})/R(T_c))$  の値はこれまでに得られていた単結晶と比較しても非常に高い値を示しており、このような高いフッ素濃度かつ良質な単結晶の基礎特性については未だ研究が進んでいない。本研究では Focused Ion Beam (FIB) を用いてデバイスを作製し、異方性等の基礎物性について、フッ素濃度の上昇に伴いどのような変化が現れるか議論する。

### 2. 実験方法

$\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  の単結晶は CsCl を使ったフラックス法により合成した。実際のフッ素濃度は EPMA から見積もった。また、格子定数を算出してフッ素濃度との関係を明らかにした。得られた単結晶の超伝導特性は磁化率測定、電気抵抗率測定から評価し、電気抵抗率の測定に関しては、1 つの単結晶に対して FIB を用いてデバイスを作製し、磁場中電気抵抗の温度依存性や、effective mass model を用いて異方性を概算した。また、パルス磁場を用いて、50T までの高磁場を印加し、上部臨界磁場を見積もった。

### 3. 結果・考察

Fig. 1 に多結晶と単結晶の格子定数とフッ素濃度の関係を示す。得られた単結晶試料のフッ素濃度と格子定数の関係は多結晶試料で得られたものと非常に良く一致しており、本研究から得られた単結晶体には従来の 2 倍近いフッ素が導入されている事が示された。また、そのように高いフッ素濃度を有する単結晶試料の電気抵抗率の変化を Fig. 2 に示す。測定した単結晶のフッ素濃度は 15%、22% であり、それぞれの転移温度は 54 K、57.5 K である。これらの試料において、残留抵抗比は非常に大きく、従来得られていたものと比較すると

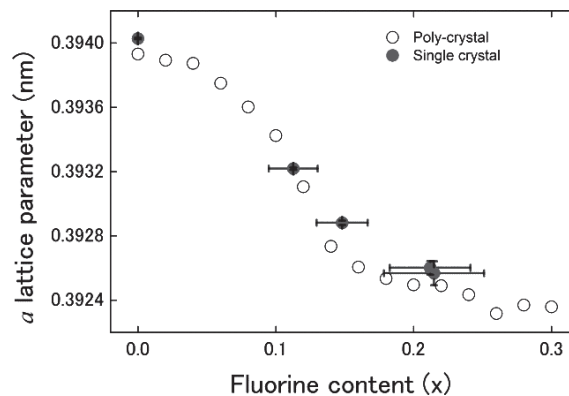


Fig.1 XRD pattern for polycrystalline and single crystal  $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$

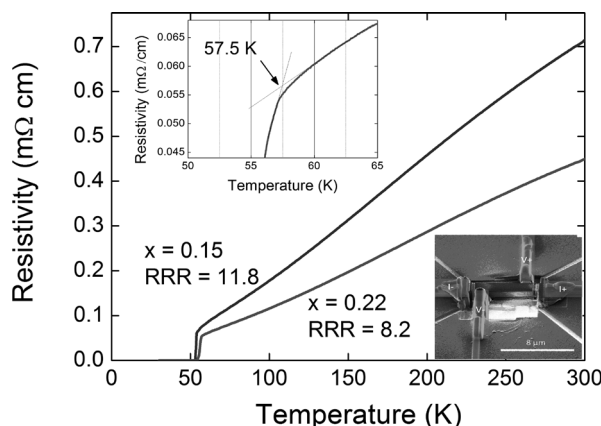


Fig.2 Temperature dependence of resistivity for  $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  ( $x = 0.15$  and  $0.22$ )

3~4 倍であり、良質な単結晶が得られている事がわかる。また、フッ素濃度の増加にともない異方性が減少していく事が effective mass model や WHH model から示唆された。詳細な結果については会議で報告する。

### 4. まとめ

本研究ではフッ素濃度の増加にともない、非常に高い超伝導転移温度を有する単結晶試料の合成に成功した。また、オーバードープ領域は未だ確認されておらず、今後さらなるフッ素導入が可能となれば、より高い超伝導転移温度が期待できる。さらに、フッ素濃度の増加に伴い、異方性の減少も示唆されるので、より多くのフッ素を導入する事は応用上、非常に有利な超伝導物質を得る事につながるのではないかと期待している。

### 引用文献

- [1] M. Fujioka, et al., Supercond. Sci. Technol. 26, 085023 (2013).
- [2] J. Karpinski, et al., Physica C 469, 370 (2009).
- [3] M. Fujioka, et al., arXiv: 1401.5611 (2013).

# 硫黄アニールによる鉄カルコゲナイド系超伝導体の $J_c$ 向上効果

Sulfur annealed Fe-chalcogenide superconductors: effect on  $J_c$

出口 啓太, 金子 充宏 (ジェック東理社); 高野 義彦 (NIMS)  
 DEGUCHI Keita, KANEKO Mitsuhiro (JECC TORISHA); TAKANO Yoshihiko (NIMS)  
 E-mail: Keita.Deguchi@jecctorisha.co.jp

## 1. はじめに

鉄カルコゲナイド系は鉄系超伝導体の中でも最も単純な構造を有しており、超伝導層のみが積層している。この系は層間に過剰な鉄が存在し、超伝導を阻害する事が知られているが、我々は酸素・有機酸アニールを施すと過剰鉄の効果は抑制され超伝導特性が向上する事を発見した[1-6]。

これまでに PIT 法による鉄カルコゲナイド系の線材化が取り組まれてきたが、他の鉄系に比べるとその  $J_c$  は低い。アニールを施すことが出来れば高い  $J_c$  の発現が期待できるが、従来のアニール法ではガス雰囲気や水溶液中での加熱を要するため、試料をシースに入れる PIT 法への適用は困難である。

最近我々は、PIT 法に適用できる方法として硫黄アニール法を開発した[7]。この方法は試料に硫黄を添加し、加熱することで過剰鉄と硫黄が硫化鉄を形成し、超伝導阻害効果を抑えることが出来る。更に線材へ応用した場合、形成された硫化鉄がピンニングセンターとして働くことも期待できる。しかしこれまでのところ硫黄アニールによる  $T_c$  の上昇は確認したが、 $J_c$  に対する影響は検証されていない。そこで本研究では鉄カルコゲナイド系超伝導体の  $J_c$  向上を目指し、 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  多結晶試料に対して硫黄アニールを試みた結果を報告する。

## 2. 実験方法

$\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  多結晶試料は固相反応法を用いて合成し[8]、硫黄とともに 200 °C で 2 時間アニールした。次に硫黄アニールが  $J_c$  向上に効果的であるか検証するため、得られた試料の M-H 測定を行った。測定は超伝導状態である 2 K と常伝導状態である 15 K で行い、2 K における磁化の値を 15 K の値で引くことで磁性の強いバックグラウンドを取り除き、超伝導による変化だけを検証した。測定後、ビーンモデルを用いて  $J_c$  を見積もった。

## 3. 結果

Fig.1 に硫黄アニールを施した  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$  多結晶粉末試料の M-H 曲線を示す。硫黄アニールを施すと超伝導による明確なヒステリシスが出現していることがわかる。Fig.2 は as-grown および硫黄アニール試料におけるそれぞれの M-H 曲線からビーンモデルを用いて見積もった  $J_c$  である。As-grown 試料は  $1 \times 10^3$  程度であるのに対して、硫黄アニールを施すと 2 桁近く  $J_c$  が高くなっている。これは鉄カルコゲナイド系に対する硫黄アニールが  $J_c$  向上に効果的であることを示している。更に我々は多結晶試料においても同様の実験を行い、 $J_c$  が向上することを確認した。また、添加する硫黄の量によっても特性が変化することが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究から硫黄アニールを施すと鉄カルコゲナイド系試料の  $J_c$  が向上することが明らかとなった。本アニール手法はガス雰囲気を必要とせず、試料中に硫黄を添加することでアニールを行えるため PIT 法による線材化に適すると考えられる。今後、シース中での硫黄アニールを行うとともに最適条件を探索することで鉄カルコゲナイド系の  $J_c$  向上が期待できる。

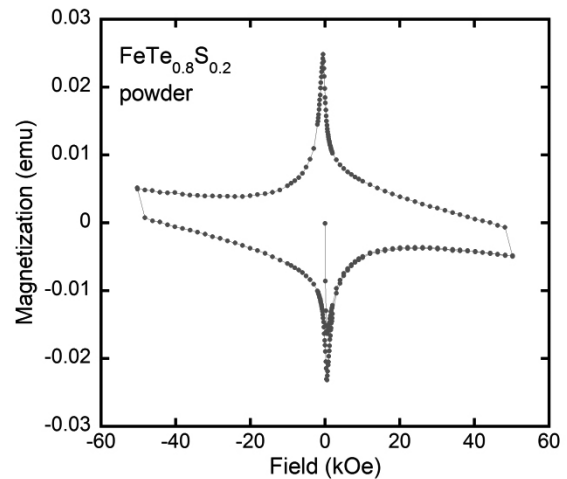


Fig. 1 M-H curve of the sulfur annealed  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ .

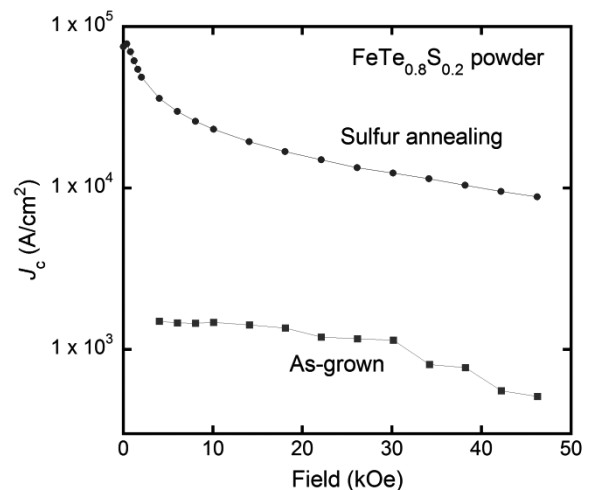


Fig. 2 Estimated  $J_c$  of the as-grown and sulfur annealed  $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ .

## 参考文献

1. K. Deguchi et al.: Physica C, Vol. 470 (2010) p.S340.
2. Y. Mizuguchi et al.: Phys. Rev. B, Vol. 81 (2010) p.214510.
3. Y. Mizuguchi et al.: Europhys. Lett., Vol. 90 (2010) p57002.
4. Y. Kawasaki et al.: Solid State Commun., Vol. 152 (2012) p1135.
5. K. Deguchi et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 24 (2011) p055008.
6. K. Deguchi et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 25 (2012) p084025.
7. K. Deguchi et al.: J. Appl. Phys., Vol. 115 (2014) p.053909.
8. Y. Mizuguchi et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 94 (2009) p012503.



# 通常の冷間加工によって作製した Ba122 テープの高磁界特性 High magnetic field properties of Ba122 tapes by conventional cold mechanical deformation

高召順, 戸叶一正, 松本明善, 熊倉浩明(物材機構)

GAO Zhaoshun, TOGANO Kazumasa, MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

## 1. Introduction

In February 2008, the Hosono group discovered superconductivity at 26 K in the oxypnictide  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ , representing a new class of high- $T_c$  superconductors [1]. There has been a flurry of work on these and related pnictide superconductors since then and the critical temperature has been raised to 55 K. These materials are particularly interesting to the applied superconductivity community because they appear to have superconducting properties that may make them suitable for practical applications. Current research results indicate that the global critical current is limited by intergrain currents across grain boundaries in iron based superconductors. In this work, we found that the transport  $J_c$ - $H$  values of Ba122 tapes were greatly improved by cold mechanical deformation.

## 2. Samples and experiments

The precursors were prepared from the Ba filings, K plates, Fe powder and As pieces. These element materials were mixed with the nominal composition of  $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.44})\text{Fe}_2\text{As}_{2.1}$  in an Ar atmosphere using a ball milling machine and put into a Nb tube of 6 mm outer diameter and 5 mm inner diameter for the heat treatment. The Nb tube was put into a stainless steel tube, whose both ends were pressed and sealed by arc welding in Ar atmosphere. The heat treatment was carried out at 900°C~950°C for 10 h followed by furnace cooling in a box furnace. The precursor was then ground into powder using an agate mortar in a glove box filled with a high purity argon gas. Ba122 tapes were fabricated by an *ex-situ* powder-in-tube (PIT) process. The details of fabrication process were described elsewhere [2]. The transport current  $I_c$  at 4.2 K and its magnetic field dependence were evaluated by standard four-probe method. Magnetic fields up to 12 T were applied parallel to the tape surface. We also carried out the  $I_c$  measurement in a 28 T hybrid magnet of the Tsukuba Magnet Laboratory (TML) of the National Institute of Materials Science (NIMS). Transport critical current density,  $J_c$ , was estimated by dividing the  $I_c$  by the cross sectional area of the Ba122 core. We carried out mechanical polishing using emery paper and lapping paper, and then Ar ion polishing by cross section polisher to observe the surface morphologies of the tapes precisely. After the polishing, we performed scanning electron microscopy (SEM) observations using a SU-70 (Hitachi Co. Ltd.).

## 3. Experimental results and discussion

Large transport  $J_c$  is essential for high magnetic field applications. Figure 1 shows the transport  $J_c$  measured as a function of applied magnetic fields for rolled and pressed tapes. The inset is the cross-section of the tapes. The transport  $J_c$ - $H$  curve shows extremely small magnetic field dependence and maintains a high value of  $4.3 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> in 28 T at 4.2 K for cold uniaxial pressed sample as shown in Figure 1. More interestingly, even the as rolled tape still sustains  $J_c$  of  $3.2 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> in 28 T. This is the highest value reported so far for iron-based superconducting wires without pressing. These results indicate that our process is very promising for fabricating long 122 wires for high field magnet, i.e. above 20 T.  $J_c$ - $H$  curves of commercial NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn and MgB<sub>2</sub> wires are also included in Fig. 1 for comparison. It can be seen that the  $J_c$  values of Ba122 tapes exceeded the values of MgB<sub>2</sub> and NbTi conductors in the magnetic fields of higher than 8 T.

Furthermore, the  $J_c$ - $H$  curve crosses that of Nb<sub>3</sub>Sn wire at magnetic field around 16 T. These indicate that the 122 superconducting wires can be competitive with MgB<sub>2</sub> and well established Nb based conductors for high field generation.

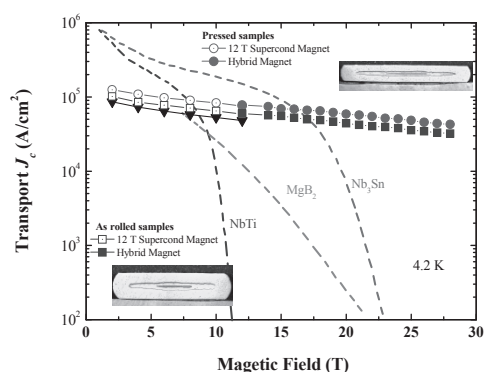


Fig.1 The transport  $J_c$  values obtained in this experiment plotted as a function of applied magnetic field.

In order to investigate the effects of cold mechanical process on the tapes, we studied the difference in microstructures for as rolled and pressed tapes. The observation was carried out on the tape plane of the tapes (Fig. 2). It can be seen that although the rolling can reduce the voids and improve the density of Ba122 core [3], the microstructures are still porous and quite inhomogeneous. In contrast, the pressed tape shows a dense and uniform microstructure, which may be the primary reason for improved  $J_c$  values.

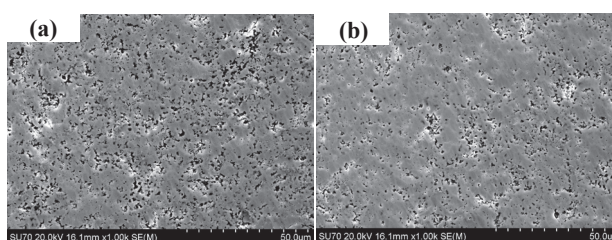


Fig.2 The SEM surface images of as rolled tape (a), and pressed tape (b).

## 参考文献

1. Kamihara, Y. et al., Iron-based layered superconductor:  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x = 0.05$ - $0.12$ ) with  $T_c = 26$  K. *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296-3297 (2008).
2. Gao, Z. et al. Achievement of practical level critical current densities in  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2/\text{Ag}$  tapes by conventional cold mechanical deformation. *Sci. Rep.* **4**, 4065 (2014).
3. Togano, K. et al. Enhancement in transport critical current density of *ex situ* PIT  $\text{Ag}/(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  tapes achieved by applying a combined process of flat rolling and uniaxial pressing. *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 115007 (2013).

## LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(2)

## - モデル磁石開発の現状 -

## Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (2)

## - Status of 2m long model magnet development -

中本 建志, 菅野 未知央, 徐 慶金, 川又 弘史, 東 憲男, 岡田 尚紀, 飯尾 雅実,

岩崎 るり, 荻津 透, 木村 誠宏, 佐々木 憲一, 山本 明, 吉田 誠 (KEK);

NAKAMOTO Tatsushi, SUGANO Michinaka, XU Qingjin, KAWAMATA Hiroshi, HIGASHI Norio, OKADA Naoki, IIO Masami,

IWASAKI Ruri, OGITSU Toru, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Ken-ichi, YAMAMOTO Akira, YOSHIDA Makoto (KEK)

E-mail: tatsushi.nakamoto@kek.jp

## 1. はじめに

2010 年から運転を開始した CERN-LHC 加速器は、2013 年ノーベル物理学賞に繋がるヒッグス粒子の発見などの成果を上げてきた。今後も 2020 年頃までの実験を予定しているが、並行して将来のビーム衝突頻度の改善を目指した高輝度化アップグレード計画 (High Luminosity LHC Upgrade: HL-LHC) の検討が始まっている。その中でも特に重要なのが、ビーム衝突点超伝導磁石システムの新規開発であり、CERN を中心に CEA-Saclay、INFN、米国 (BNL, Fermilab, LBNL) 及び高エネ研などが概念設計、研究開発に参加している。高エネ研が分担するビーム分離用大口径双極超伝導磁石 (D1) については、2013 年春に最終的な磁石仕様が決まされ、これまでに概念設計及びモデル磁石のための技術開発を進めてきた。本報告では、2m 長モデル磁石の開発状況について報告する。なお、LHC 高輝度化アップグレード計画の詳細については、前回の講演概要[1]及びホームページ[2]を参照されたい。

## 2. D1 モデル磁石の概要

LHC 高輝度化アップグレードにおけるビーム最終収束超伝導磁石システムの配置図を図 1 に示す。高エネ研は、ビーム最終収束四極磁石 Q1~Q3 の直後に設置され、相対する陽子ビームを衝突用軌道から周回用軌道に戻す役割を担う、ビーム分離用大口径双極磁石 (D1) の概念設計を担当している。主な技術的な課題として、

- (1) 衝突点でのビームサイズを細く絞るためのコイル内径の大口径化 (150mm)、
  - (2) 鉄ヨーク中の磁場の飽和に起因する誤差磁場の影響及び周辺への漏れ磁場の問題、
  - (3) 材料の耐放射線性能やコイルからの除熱性能、
- などが挙げられる。

主な設計パラメータを表 1 に、また開発中の超伝導磁石断面を図 2 に示す。超伝導コイルには、現行 LHC アーク部主双極磁石で使用された NbTi ケーブルを採用している。漏れ磁場をできるだけ防ぎ、鉄ヨークによる磁束リターンを期待するため、J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石と同様にヨークカラー方式を採用して、鉄ヨーク幅を最大化した。鉄ヨークとコイル間のカラー Spacer には、優れた非磁性を示す NSSC130S を採用している。なお内径に対して幅が細いため、双極コイルだが 4 分割カラー構造となっている。コイルは、除熱性能にも配慮し、1 層構造としている。1.9 K での 75% の負荷率 (直線部) で、コイル口径 150mm 中に定格磁場 5.6 T を発生する。コイルブロック間のウェッジやエンド Spacer には、新規開発の耐放射線性 BT 樹脂 S ガラス繊維強化プラスチックを採用している。

## 3. まとめと今後の予定

高エネ研ではこれまでに LHC 高輝度化アップグレードに向けた D1 磁石の概念設計及び工学設計を行ってきた。2014

年度はまずテストコイル巻き線を行い、直線部断面モデルを開発し、機械構造設計の検証を行う予定である。その後 2m 長モデル磁石を完成させ、超流動ヘリウム冷却下での性能検証を行う予定である。

## 参考文献

1. T. Nakamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.121
2. <http://hilumilhc.web.cern.ch/HiLumiLHC/index.html>

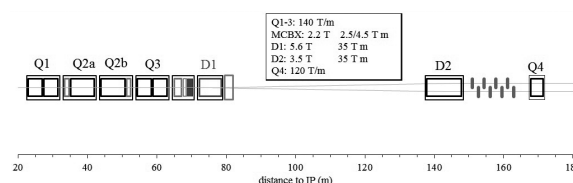


Fig. 1 Layout of final beam focusing superconducting magnets for the HL-LHC. Horizontal axis indicates the distance from the beam collision point (IP).

Table 1 Main design parameters of a large-single aperture superconducting dipole magnet (D1) for the HL-LHC.

積分二極磁場	35 Tm
定格磁場/ピーク磁場	5.60 T / 6.71 T
コイル口径	150 mm
磁石外径	570 mm
運転温度	1.9 K (HeII)
誤差磁場(参照半径 50 mm)	$< 10^{-4}$
コイルへの線量、入熱量 (ビームスクリーン含む)	20 MGy, $< 2 \text{ mW/cm}^3$

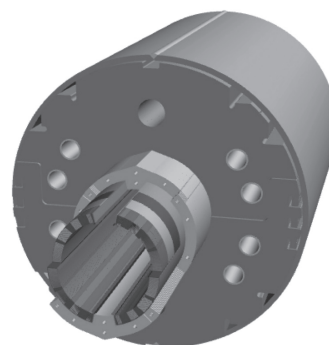


Fig. 2 Cut view of a large single-aperture superconducting dipole magnet (D1).

# LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(3)-電磁設計

## Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (3) - Electromagnetic design

菅野 未知央, 中本 建志, 徐 慶金, 川又 弘史 (高エネ研)  
 SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, XU Qingjin, KAWAMATA Hiroshi (KEK)  
 E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

### 1. はじめに

CERN-LHC 加速器ではビーム衝突頻度の向上を目指したアップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。この中で特に重要になるのが衝突点近傍の超伝導磁石システムの性能向上であり、KEK はビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石) の開発を担当している。

D1 磁石の特徴の一つとして、衝突点でビームをより細く絞るために必要な大口径化 ( $\phi 150$  mm) が挙げられる。積分磁場長は 35 Tm、1.9 K 運転で定格磁場は 5.60 T、磁場精度は  $10^{-4}$  以下 (参照半径 50 mm) が要求される。

D1 磁石の 2 次元断面を Fig. 1 に示す。現在の LHC 加速器アーク部の双極磁石外層コイルと同じ Nb-Ti/Cu ラザフォードケーブルを用いて、4 ブロックの超伝導コイルが巻線される。その外側をコイル位置を決定するステンレス製カラーが取り囲んでおり、さらにその外側に鉄ヨークが配置されている。

本講演では、D1 磁石の電磁設計の一環として、磁場性能に影響を及ぼすであろう各因子について電磁場計算による確認を行った結果について報告する。

### 2. 各設計要因が磁場性能に与える影響

電磁場計算は CERN で開発されたコイル電磁設計プログラム ROXIE[1]を使用した。ここでは特に、各設計要因が磁場性能に与える影響を調べるため、発生磁場を参照半径 50 mm で多極展開したときの多極磁場成分の変化に注目した。

#### A. 熱交換器穴径

鉄ヨークには上下 1 個づつ熱交換器が挿入される穴が設けられており、コイルの除熱に用いられる。D1 磁石への入熱量にはまだ不確定な要素があるため、現在の  $\phi 50$  mm よりもさらに大きくなる可能性がある。そこで、コイル配置を維持したまま熱交換器穴を  $\phi 60$  mm、 $\phi 70$  mm に変更することによる多極磁場成分の変化を調べた。結果として、ノーマル 6 極成分 ( $b_3$ ) がそれぞれ 2.04unit、4.03unit (1unit は主磁場の  $10^{-4}$ ) 増加することが確認された。しかし、これらの誤差磁場の増加分は許容されるコイル配置の変更の範囲内で改善可能であることから、大きな問題とはならないことが確認された。

#### B. クライオスタット形状

現状は、円形断面のクライオスタットの中心にコールドマスが配置される設計となっている。大口径化に伴ってクライオスタットの外径も大型化されるが、地下トンネルへの輸送や設置スペースの制約から外径には上限がある。そこで、クライオスタットの横幅を維持したまま、縦方向に長くした楕円断面のクライオスタットも検討されている。そこで、クライオスタット形状が磁場精度に与える影響について確認した。クライオスタット内径 445 mm、胴部厚さ 12 mm の円断面と内径 445 mm  $\times$  556 mm の楕円断面設計を比較すると、 $b_3$  が -2.05unit 変化することが確認された。

#### C. ステンレスカラーの比透磁率

カラーには高い非磁性を有する NSSC130S が用いられ

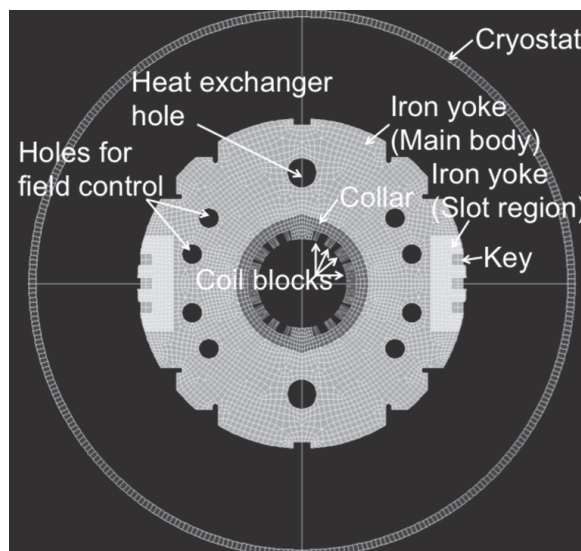


Fig. 1 2D model of D1 magnet used for ROXIE simulation.

る。カラーの比透磁率を 1 とした場合と、上記材料について実測した比透磁率 (1.002) を用いた場合を比較したところ、 $b_3$  で -0.58unit の違いが確認された。

#### D. 鉄ヨークの packing factor

鉄ヨークは厚さ 5.6 mm の固定用ヨークと厚さ 6 mm のスペーサーヨークを交互に積層し、上下に歯を噛み合わせる様にして組み立てる。このとき、ヨーク本体とキーを挿入するスロット部 (Fig. 1 参照) では packing factor が異なる。ヨーク本体とスロット部に同じ packing factor を仮定した場合と、ヨーク板の厚さから予想されるスロット部の packing factor の低下 (本体の 96.6%) を考慮した場合を比較したところ、 $b_3$  が -1.24unit 変化することが分かった。

#### E. コイル組立時の変形

コイル組立工程の一つであるヨーキングの際のヨーク、カラーの変形を ANSYS で計算し、コイルがカラーに追従した変形をすると仮定して組立によるコイル配置のズレを算出した。その結果、各コイルブロックが x、y 方向に 10~50  $\mu$ m 移動することが予想された。この変形を考慮したところ、 $b_3$  が -1.18unit 変化することが確認された。

### 3. まとめ

LHC の高輝度化アップグレードの一環として、KEK で D1 磁石の概念設計、工学設計を進めており、磁場精度に影響を及ぼす各因子について ROXIE を用いた電磁場計算を実施した。今後、汎用の電磁場解析ソフト Opera を用いた比較検証を予定している。さらに、2014 年度に 2m 長の短尺モデル磁石製作を計画しており、その磁場測定結果との比較により誤差磁場の原因を議論する予定である。

#### 参考文献

1. S. Russenschuck, "ROXIE routine for the optimization of magnet x-sections, inverse field calculation and coil end design", CERN 99-01 (1999).

## SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発 - ビーム最終収束用超伝導 4 極電磁石製作 -

### Development of Final Focusing Superconducting Magnet System for SuperKEKB - Constructions of the superconducting quadrupole magnets for beam final focusing -

有本靖, 大内徳人, 土屋清澄, 東憲男, 宗占国, 山岡広, 川井正徳, 近藤良也 (KEK)  
ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, TUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, ZONG Zanguo, YAMAOKA Hiroshi,  
KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari (KEK)  
E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子衝突型加速器 (KEKB) のルミノシティを 40 倍 ( $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) に高めた SuperKEKB を建設している[1]。SuperKEKB ではビーム衝突点において鉛直方向のビームサイズは約 50 nm まで収束される。この収束要素が、現在製作がすすめられている最終収束超伝導 4 極電磁石システム (QCS) である。QCS は 8 台の超伝導 4 極電磁石と 43 台の補正コイルから構成される。

これまでに、我々は 2 種類の QCS の試作機を製作し、低温試験を行なった[2]。この試験において、ビーム光学より要請されている値よりも大きな 6 極成分が発生していることが確認された。これは超伝導ケーブルのヤング率を小さな値で磁石の設計をしていたことによる。

この結果を踏まえて、実機の製作では電磁石断面形状とエンド部の形状を決めるスペーサーの再設計をした。システムとしては衝突点右側の QCS に超伝導 6 極補正コイルを追加した。製作工程においては、カラーリング後に、電磁石製作現場において常温磁場測定を行なって、6 極成分を確認する工程を追加した。これにより、許容値より大きな 6 極成分が発生した場合に、分解し再度カラーリングができる。

実機の製作は三菱電機株式会社において、2013 年 6 月 11 日に開始された。2014 年 4 月 8 日に 8 台すべての超伝導 4 極電磁石のコイル製作、カラーリング、常温磁場測定が完了した。

#### 2. 超伝導 4 極電磁石の製作

4 極電磁石の製作は次の工程で進められた。1) 巻線、加温キュア、2) 仮キー (仕上がり寸法より細いキー) によるカラーリング、磁場測定、3) 仮組用ボロンの引き抜き、4) 本キー (仕上がり寸法と同じ太さのキー) によるカラーリング、磁場測定。カラーリング後の 4 極電磁石 QC1LP 本体と、カラーリング前の 4 極電磁石 QC1RP のコイルとカラーの写真を図 1 に示す。尚 QC1LP と QC1RP は同じ設計の磁石である。また今回製作された 8 台の 4 極電磁石の写真を図 2 に示す。

図 3 にキュア後の超伝導コイルの寸法測定結果を示す。左側のグラフは各電磁石のコイル長 (上図  $L$ , コイル 4 極分の平均値) の設計値との差あり、エラーバーはコイル 4 極分の標準偏差である。差はほぼ  $\pm 0.1 \text{ mm}$  以下に抑えられている。また、図 3 の右側のグラフはコイルの動径方向の厚み (上図  $t$ ) の設計値 ( $5.425 \text{ mm}$ ) との差であり、許容値 ( $\pm 0.025 \text{ mm}$ ) 以下であった。

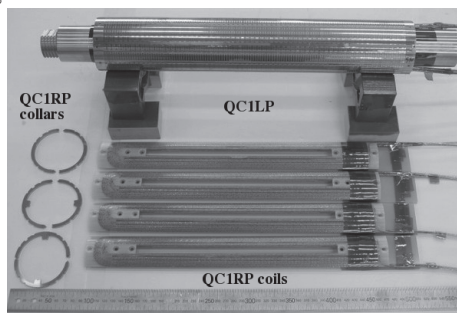


Fig. 1. QC1RP coils and collars before collaring process, and QC1LP magnet after collaring process.

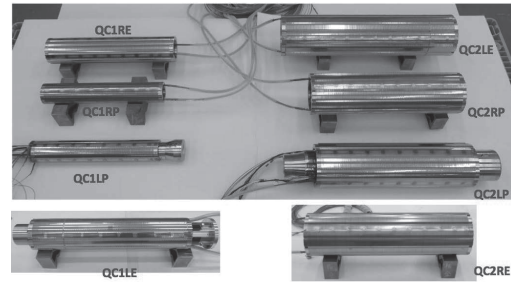


Fig. 2. The quadrupole magnets after collaring processes.

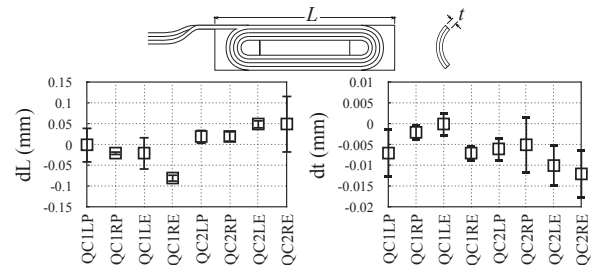


Fig. 3. Differences from design value for coil length,  $L$  (left plot) and thickness,  $t$  (right plot) after cure processes. Definitions of  $L$  and  $t$  are shown in the upper figure.

#### 3. 常温磁場測定

各カラーリング作業後にハーモニックコイルを用いてビーム軸方向に積分された多極成分を測定した。励磁電流は運転電流の約 1000 倍以下である  $1.0 \text{ A}$  に設定した。

本キーによるカラーリング後に測定された各磁石の 6 極成分を図 4 に示す。縦軸は 4 極 normal 成分の大きさを 10000 とした時の 6 極成分の大きさで、白及び黒のバーはそれぞれ skew 成分,  $I_{\text{normal}}$  成分を表わしている。すべての電磁石に関して許容値 ( $=10$ ) 以下となった。

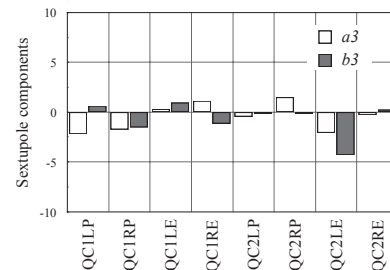


Fig. 4. Measured sextupole components for each magnet. These values are reduced at  $r_0$  and they are scaled so that normal components of the quadrupole are 10000.

#### 参考文献

1. Y. Ohnishi, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys., (2013) p.03A011
2. Y. Arimoto, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86, (2012) p.121.
3. N. Ohuchi, *et al.*: Proceedings of North American Particle Accelerator Conference, (2013) p.WEOD1.

## 20MW 級船舶用モータを想定した超電導界磁 1 極モデルコイルの開発

Development of one-pole superconducting field model coil for a 20MW HTS ship propulsion motor

上野 栄作, 山口 貴寛, 加藤 武志, 林 和彦(住友電工)

UENO Eisaku, YAMAGUCHI Takahiro, KATO Takeshi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: ueno-eisaku@sei.co.jp

## 1. はじめに

高温超電導応用における有望な製品のひとつとして、船舶用超電導モータが挙げられる。近年、我々は DI-BSCCO 線材を用いた大サイズの超電導界磁コイルを開発・製造し、川崎重工が 3MW 船舶用超電導モータに搭載、ロードテストに成功した[1][2]。

船舶用モータに使用される界磁コイルは、コイルに繰り返し印加される拡張力に対して十分な耐久性を確保することが特に重要である。界磁コイルには、レーストラック型コイルが多く使用されるが、レーストラックコイルは、直線部分を持つことが円形コイルとの大きな相違点であり、レーストラックコイル直線部分の拡張力に対する支持機構は円形コイルのそれとは大きく異なる。

今回、我々は 20MW 級船舶用モータを想定した実機大の 1 極モデルコイルを製作し、基礎試験を行ったので、その結果について報告する。

## 2. コイル諸元

Fig. 1 に製作した超電導界磁コイルの外観を示す。コイルは内側に TypeHT(SS)i、外側に TypeHi を用いたハイブリッド構造であり、全長 1,657 mm、幅 357 mm、直線長 1,300mm、総ターン数 1,000 ターンのレーストラック型ダブルパンケーキコイルである。

Table 1 に 1 極モデルコイルの諸元を、Fig. 2 に外観を示す。1 極モデルコイルは界磁コイルを 4 個積層しており、また可能な限り実機に近い冷却構造を念頭に置きつつ、200A のフル励磁時、直線部に発生すると想定される約 150t(=33MPa)もの拡張力を支持可能な補強構造を検討し製作を行った。

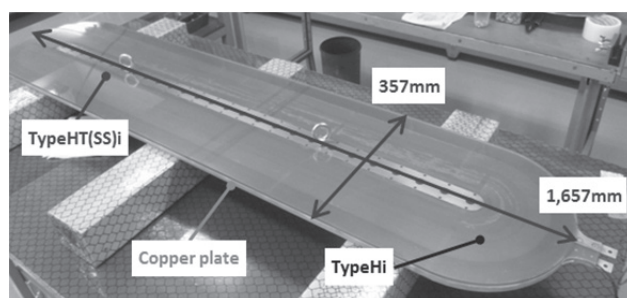


Fig.1 Appearance of HTS field coil

Table 1 Specification of one-pole HTS field model coil

Type of DI-BSCCO wire	TypeHT(SS)i + Type Hi
Ic of DI-BSCCO wire (77K, s.f.)	about 180 A
Number of stack	4
Total length	12,880 m(=3,220m×4)
Total number of turns	4,000(=1,000 turns×4)
Maximum perpendicular magnetic field	3.0 T
Maximum parallel magnetic field	5.7 T
Expansion force	150ton,33MPa
Inductance	15 H
Stored energy	300 kJ at 200 A

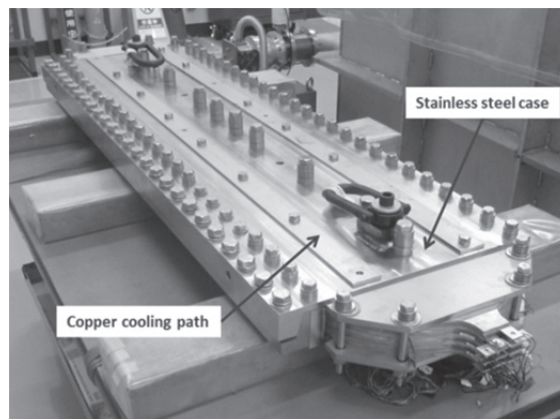


Fig.2 Appearance of one-pole HTS field model coil

## 3. 実験方法

製作した 1 極モデルコイルは伝導冷却にて GM 冷凍機の 2nd ステージに取り付けたヒータにより、約 27K に温調して I-V 特性を評価した。

## 4. 実験結果

試験結果を Fig. 3 に示す。計 3 回、200A までのフル励磁試験を実施したが、I-V 特性に変化はなく、異常な電圧の発生などは特に見られなかった。また励磁試験終了後に解体し、各コイルの外観を確認したが、レーストラックコイル直線部の剥離などの外観異常は見受けられなかった。詳細については講演当日に報告する。

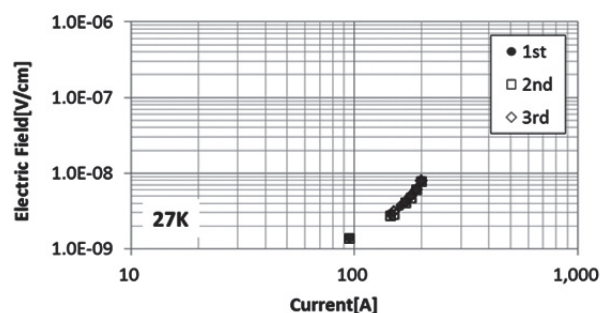


Fig. 3 I-V characteristics of one-pole HTS field model coil

## 5. まとめ

20MW 級船舶用モータを想定した実機大の 1 極モデルコイルを製作し、特性に問題ないことを確認した。また通電試験後の外観調査においても、剥離など外観異常は見受けられなかった。

## 6. 謝辞

本研究は、研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)の支援を受けて進めたものである。

## 参考文献

- [1] E.Ueno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88 (2013) p.170  
 [2] E.Ueno, et al.: will be published in Physica C(2014)

## DI-BSCCO コイルのクエンチ保護(2)

### Quench protection of DI-BSCCO coil(2)

山口 貴寛, 上野 栄作, 加藤 武志, 林 和彦(住友電工)

YAMAGUCHI Takahiro, UENO Eisaku, KATO Takeshi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: yamaguchi-takahiro1@sei.co.jp

#### 1. はじめに

高温超電導線は常電導伝搬速度が $\sim$ cm/s と非常に遅いため、ホットスポットが発生し劣化することが懸念されている。その保護のためには、異常を検知した際、通電電流を速やかに下げることが必要と考えられる。しかしながら、20MW 級の大出力回転機ではコイルのインダクタンスが非常に大きく、電流減衰時定数を短くするには保護抵抗値を大きくし、コイル及びモータ内配線を高耐電圧化しなければならず、クエンチ検出・保護回路の最適化が必要である。そこで、大出力回転機用コイルを模擬した小コイルを用いて、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧をパラメータとし、コイルを劣化させずにクエンチ検出・保護できる条件を調査したので報告する。この報告は 2013 年度秋季 低温工学・超電導学会で発表したものにデータを追加し Fig. 4 を完成させたものである。

#### 2. コイル諸元

実験に使用したコイルは DI-BSCCO 線材(Type Hi)を用いて作製されており、内径 70 mm、外径 216 mm、高さ 9.7 mm の円形ダブルパンケーキコイルである。これらを 4 個積層した。線材長で比較すると、20 MW 機の実機サイズコイルの約 1/14 となっており、発生磁場はほぼ同等の値となっている。

#### 3. 実験方法

冷却は冷凍機伝導冷却で 35 $\sim$ 40 K 前後の温度とし、上下に冷却パスを設け上下コイル間で極力温度差が無いようにした。通電電流は 200 A、クエンチ検出はバランス回路を用い、クエンチ検出時間を 0.1 s に固定した。クエンチはコイル温度を徐々に上昇させることで発生させた。クエンチ検出すると外部制御により電流を exp 関数で掃引する回路とした。そのときの電流減衰時定数とクエンチ検出電圧を変化させることにより、コイルの劣化の有無を調査した。

#### 4. 実験結果

前回の報告では電流減衰時定数 4 s ではクエンチ検出電圧 0.15 V まで保護可能、電流減衰時定数 20 s、60 s ではクエンチ検出電圧 0.05 V まで保護可能であることを述べた。

Fig. 1 と Fig. 2 に今回追加したデータの一例として、電流減衰時定数 10 s、クエンチ検出電圧 0.07 V での試験時の温度と電圧の分布を示す。今回の試験結果から、電流減衰時定数 10 s では 0.06 V までクエンチ保護可能なことがわかった。これらの結果をクエンチ保護可能な領域として Fig.3 に示す。また、詳細は講演当日に報告する。

#### 5. まとめ

今回の実験で用いたコイルでの電流減衰時定数とクエンチ保護可能な検出電圧との関係がわかった。今後は、Fig. 4 を拡充すると共にシミュレーションを実施し、20 MW 機の実機サイズのコイルでのクエンチ検出・保護実験に反映する。

#### 6. 謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

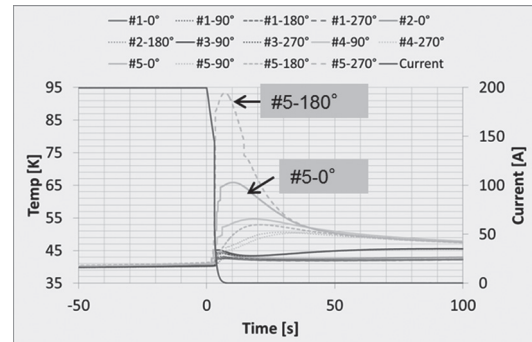


Fig. 1 Temperature shift at detecting voltage 0.07V and decay time constant 10s

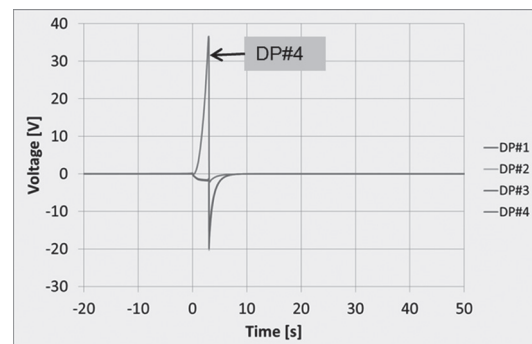


Fig. 2 Voltage shift at detecting voltage 0.07V and decay time constant 10s

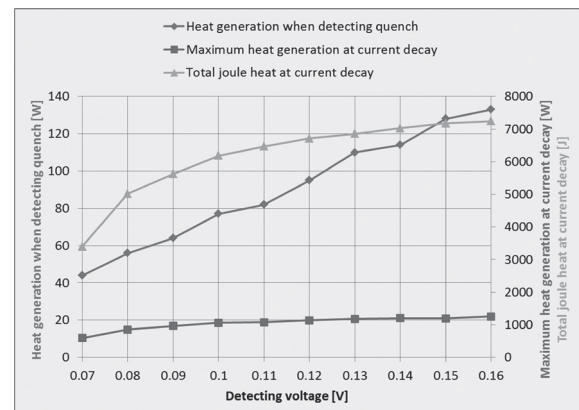


Fig. 3 Transition of joule heat

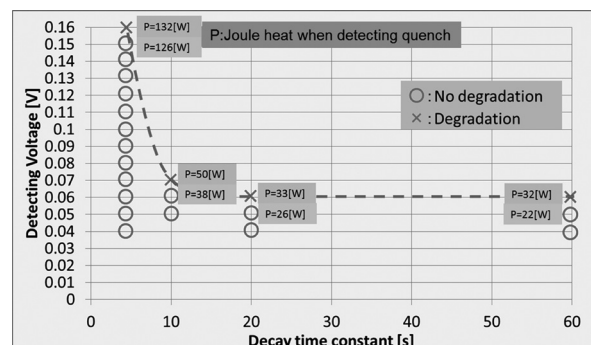


Fig. 4 Decay time constant vs detecting voltage

## Current leads for the SuperKEKB final focus SC magnets

宗 占国, 大内 徳人, 土屋 清澄, 有本 靖, 東 憲男, 山岡 広, 近藤 良也, 川井 正徳(KEK)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, ARIMOTO Yasushi, HIGASHI Norio, YAMAOKA Hiroshi, KONDOU Yoshinari, KAWAI Masanori (KEK)

E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

### 1. Abstract

The service cryostats of the final focus superconducting (SC) magnets at the SuperKEKB interaction region (IR) will be equipped with 110 current leads in total. The 22 leads of the SC quadrupole magnets and solenoids, rated at 450 A, 1.0 kA, 1.35 kA, 1.8 kA and 2.0 kA, are conventional leads and commercially supplied. The other leads for the SC correctors, with the design currents of about 70 A, are incorporated with a HTS section and have been developed at KEK. Considering the large number of the 70 A leads and the strong space constraints imposed by the configurations of the cryostats, every 8 leads are assembled into a same cooling channel. The cryogenic tests of all the types of the leads are being carried out at KEK prior to integration into the service cryostats. This paper describes the thermal and electrical specifications of the leads and presents the cryogenic test results.

### 2. Introduction

The final focus SC magnet system of the SuperKEKB interaction region consists of 8 main quadrupole magnets, 4 compensation solenoids, 35 corrector coils and 8 cancel coils to the leakage magnetic fields of QC1LP/RP [1]. Table 1 lists the design currents and the total numbers of the magnets or coils. To energize these magnets, totally 110 current leads will be equipped in the two service cryostats.

The leads for the main quadrupoles and solenoids are the conventional type of the helium vapor cooled current lead and commercially supplied. When the leads were being fabricated by the manufacture, the qualification program had been planned as the cryogenic acceptance test at KEK. The test is scheduled to ensure that each lead performance reaches the thermal and electrical requirements under the nominal current operation. The test is with a vertical cryostat of double LHe vessels, which is used for our previous experiments [2]. The purpose-built cryostat can exclude the other heat leaks except from the leads into the LHe and allow the leads to run with self cooling mode. The test progress and results are presented in this paper.

To address the small currents (<70 A) and the large number of the correction/cancel coil leads, the compact unit of 8 brass leads with the 2nd generation (2G) HTS tape at the

cold ends was developed. A prototype had been fabricated and the benefit of the HTS tape presence had been demonstrated by the cryogenic tests [3]. This year, a pre-production unit with the HTS tape (FYSC-SC05 [4]) was fabricated and tested. The thermal and electrical performances are confirmed again, which are reported in this paper.

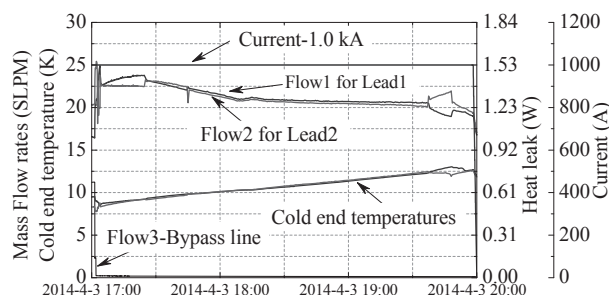


Fig. 1 Some results during the 1.0 kA lead measurement

### 3. Measurement set-up and results

The measurement setup consists of the cryostat with double LHe vessels, flow monitor/control system, data acquisition system and current source. The lead cold ends are connected with the LTS cables and immersed in the LHe of the inner vessel. As the inner LHe vessel is immersed in the LHe of the outer vessel, the inner LHe is just vaporized by the lead heat leaks. The mass flow rates through each lead are monitored and recorded to calculate the heat leaks. As a typical example, Fig. 1 shows some measured results with time during the 1.0 kA lead measurement. All the results (except of 1.8&2.0 kA leads: not tested) are summarized in Table 1, which verify the expected performance of the leads with some indicators, such as the mass flow rates of helium vapor and cold end temperatures.

### 4. Reference

1. N. Ohuchi, et al.: Proc. of NAPAC2013, WEODA1
2. Z. Zong, et al.: Abstracts of CSSJ Conf. Vol.86(2012) p.88
3. Z. Zong, et al.: Abstracts of CSSJ Conf. Vol.87(2013) p.135
4. Product documents, Fujikura Co. Ltd., [Online] available: <http://www.fujikura.co.jp/products>
5. Wilson, M.N., Superconducting magnets, p. 256-278

Table 1 Magnet currents, lead types and performance for the SuperKEKB final focus SC magnets

Items	Unit	Solenoid	QC2P	QC2E	QC1P	QC1E	Corrector/cancel coil	
Magnet	Current	kA	0.45	1.0	1.35	1.8	2.0	<0.070
	NO.	-	4	2	2	2	2	35/8
Lead type	-	Helium vapor cooled current lead (VCCL)					VCCL+HTS tape	
Heat leak	Design	W	<0.72	<1.6	<2.16	<2.16	<2.4	<0.58 (Ref. [5])
	Meas.	W	<0.63	<1.35	<1.84	-	-	<0.55/8-lead
Helium vapor	Design	g/s	0.031	0.068	0.089	0.106	0.117	0.027
		SLPM	10	22.9	29.9	35.6	39.3	9
Meas.	SLPM	<10	<22.0	<25	-	-	<10	
LHe consumption	L/h	<0.86	<1.88	<2.14	-	-	<0.77	