

# 先進超電導電力変換システム用 SMES

## Study on SMES in Advanced Superconducting Power Conditioning System

新冨 孝和 (日大); 榎田 康博 (高エネ機構); 津田 理, 宮城 大輔, 濱島 高太郎 (東北大学);  
高尾 智明, 田上 尚樹, 太田 成美 (上智大学); 宗像 浩平, 梶原 昌高 (岩谷産業)

SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.); MAKIDA Yasuhiro (KEK);

TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.);

TAKAO Tomoaki, TANOUE Naoki, OTA Narumi (Sophia Univ.);

MUNAKATA Kohei, KAJIWARA Masataka (Iwatani)

E-mail: shintomi.takakazu@nihon-u.ac.jp

### 1. はじめに

地球環境にとって CO<sub>2</sub> の削減は喫緊の課題である。再生可能エネルギー (風力, 太陽光発電) の導入が一つの解であるが, その導入は電力供給に不安定な要素を生み出す。水素と超伝導を組み合わせることによって安定に再生可能エネルギーの導入ができる可能性がある。SMES, 水素, 燃料電池を組み合わせたシステムと今後急速に整備されると想定される燃料電池車用水素ステーションとの取り合わせで再生可能エネルギー導入の促進を図る。ここでは, 水素冷却 SMES の設計について報告する。

### 2. 先進超伝導電力変換システム (ASPCS)

ASPCS は, SMES, 燃料電池, 水素, 変換器システムの組み合わせによる。このシステムを用いて再生可能エネルギー (風力, 太陽光発電) の変動を安定化する。ここでは, 5 MW 出力の風力発電を想定している。風力発電の数十分以上の遅い変動成分は予測制御により平滑化する。一方, 数分の早い変動成分は予測制御で平滑化ができないので, 応答性の良い SMES で平滑化する。5 MW 出力の風力発電の早い変動成分を平滑化するには約 50 MJ の貯蔵エネルギーを持つ SMES が必要となる [1]。

### 3. ASPCS 用 SMES 設計

#### 3.1 10 MJ 基本コイル

液体水素冷却による 20 K 冷却によるソレノイドを想定する。導体は MgB<sub>2</sub> とし, 燃線により大容量化を図り, 粒子検出器用導体で開発された押出法により高純度アルミに埋め込む。現状の MgB<sub>2</sub> 線では, 20 K では磁束密度としては 2 T 程度である。Fig. 1 に, Hyper Tech 社の導の I<sub>c</sub>-B 特性によるロードラインを示す。

Fig. 2 には, ダブルパンケーキコイルによるコイル断面構造とサーモサイフォンによる伝導冷却構造を示す [2]。

コイルのパラメータを Table 1 に示す。

#### 3.2 50 MJ コイル

5 MW 風力発電の平滑化に必要な 50 MJ-SMES は, 10 MW-SMES 基本コイルを組み合わせた 4 ポール構造とする。これにより, 比較的小型コイルを用いることができ, 漏洩磁界を少なくすることができる。

### 4. まとめ

再生可能エネルギーの利用を促進する ASPCS 用液体水素冷却 SMES コイルの設計を行った。現状 MgB<sub>2</sub> 導体では 2 T が限界と考えられるが, コイルをコンパクトにするには 5 T 級コイルが必須であり, MgB<sub>2</sub> 導体の性能向上が望まれる。

謝辞: 本研究は JST-ALCA の支援を受けて行われた。

### 参考文献

1. T. Hamajima, et al., Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control, presented at MT-22 (2011).
2. Y. Makida, et al.: Study of Cryogenic System in Advanced Superconducting Power Conditioning System, Vol. 85 (2011) p.

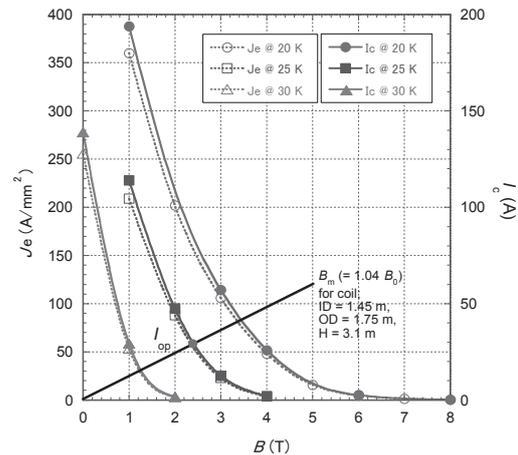


Fig. 1. The load line of the basic 10 MJ coil. The I<sub>c</sub>-B and J<sub>c</sub>-B curves are transcribed from the data of the typical 0.83 mm diameter MgB<sub>2</sub> wire of Hyper Tech Research, Inc..

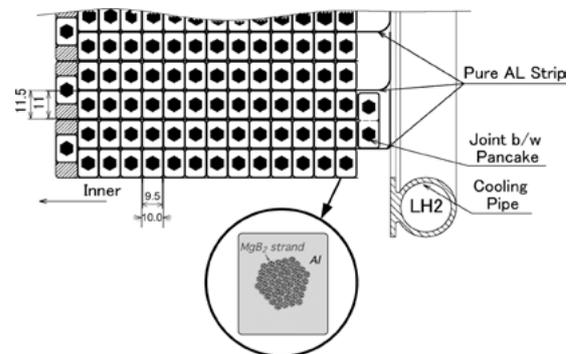


Fig. 2. The cross section of the basic 10 MJ coil with the thermo-siphon cooling pipe.

TABLE1 PARAMETERS OF BASIC SMES COILS

TABLE1 PARAMETERS OF BASIC SMES COILS		
Power	Constant output power	1 MW
	Maximum operating current	2.2 kA
	Maximum operating voltage	1 kV
Basic coil	Stored energy	10 MJ
	Inductance	4 H
	Central magnetic flux density	2 T
	Coil inner diameter	1.45 m
	Coil outer diameter	1.75 m
	Coil height	3.1 m
	Critical current	3.7 kA @ 3.4 T, 20 K
	Operating temperature	20 K
Cable	Temperature margin	~ 5 K
	Coil structure	Double-pan
	Number of double pancakes	100
	Dimension	11 x 9.5 mm <sup>2</sup>
	Number of MgB <sub>2</sub> strand	49 (=7 <sup>2</sup> )
	Configuration	Embedded into Al

# 先進超電導電力変換システム用 SMES 冷却システム

## Study of cryogenic system in advanced superconducting power conditioning system

植田 康博(高エネ機構);新富 孝和(日大);津田 理、宮城 大輔、濱島 高太郎(東北大学);  
高尾 智明(上智大学);宗像 浩平、梶原 昌高(岩谷産業)  
MAKIDA Yasuhiro (KEK), SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.);  
TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.);  
TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); MUNAKATA Kohei, KAJIWARA Masataka (Iwatani)  
E-mail: yasuihiro.makida@kek.jp

### 1. はじめに

我々の研究チームでは、今後大量導入が予想される自然エネルギー発電の変動補償システムとして、SMES、燃料電池、電気分解装置、液体水素ステーションで構成する先進超電導電力変換システム(ASPCS)を提案してきた[1]。Fig. 1 に示すように、車両用液体水素供給ステーション内で貯蔵される液体水素の一部を、SMESに送ることで、 $MgB_2$  超電導コイルは、約 20 K に冷却される。4 ポール・ソレノイド型 SMES[2]に関する冷却系の検討を行ったので報告する。

### 2. 冷却系の設計方針

#### 2.1 間接(伝導)冷却

液体水素は、高い可燃性を持つ流体で、通常寒剤として使用する液体ヘリウムや液体窒素と比べ、格段に注意を払って、電気機器のスパークや静電気、高温物体との接触を避けなければならない。このため電流リードも含めて超電導磁石の通電部は、無冷媒超伝導磁石で普及している、コイル自身の熱伝導に依存する間接冷却とする。媒体としては 20 K、2 T で約  $2900 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  の熱伝導率を持つ純アルミ板をコイル内外に有効に配置して、伝導冷却路を構成する。

コイルはダブルパンケーキ巻きさされ、各パンケーキ層間には純アルミ板が挟み込まれる。純アルミ板は液体水素冷却管まで引きまわされて熱伝導回路を形成する[3]。AC ロスも含めた熱負荷は全体で約 230 W 最大と見積もられているが、1 mm 程度板厚で温度差は 2 K 以内に抑えられる。

#### 2.2 サーモサイフォン冷却

Fig. 2 に示すように、4 台のソレノイドの上方に位置する液体水素バッファタンクから伸びる 2 組のサーモサイフォンラインは、液体水素を自然循環させて、純アルミを介して伝達してきた熱負荷を吸収する(注: Fig. 2 には純アルミ板は描かれていない)。熱負荷に対応した流量を流す水頭圧が、圧力損失より十分大きくなるよう、配管径を設定している。Fig. 3 は、予冷や励磁した状態での再充填も考慮したフローを示す。

#### 2.3 バッファータンク容量及び圧力

水素ステーション側の貯蔵圧力は 0.6 MPa 以上であるが飽和温度は 28 K 以上となる。超電導コイル冷却の観点からは低い方が望ましく、燃料電池への蒸発ガスの移送も考慮してバッファータンクの圧力は 0.15 MPa (飽和温度 21 K) で設定した。また水素ステーションからの液体水素の補充は 1 日一回だと、1000ℓ程度の移送量となり、バッファータンクの容量は 3000ℓ程度を考えている。

#### 参考文献

1. T. Hamajima, et al., Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control, presented at MT-22 (2011).
2. T. Shintomi, et al, Design Study of SMES System Cooled by Thermo-Siphon with Liquid Hydrogen for Effective Use of Renewable Energy, presented at MT-22 (2011).
3. T. Shintomi, et al., Study on SMES in Advanced Superconducting Power Condition System, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011)

謝辞: 本研究は JST-ALCA の支援を受けて行われた。

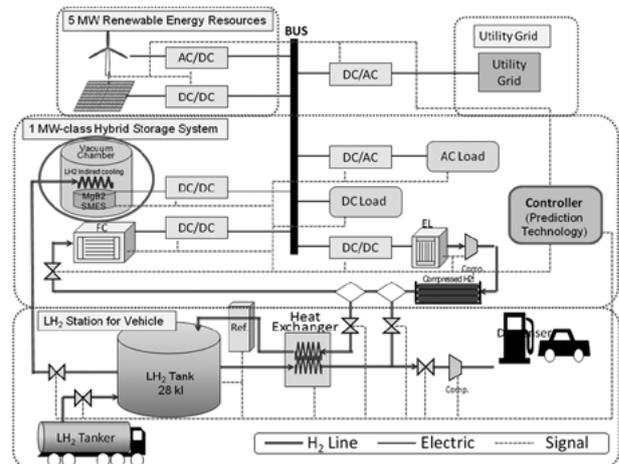


Fig.1 The concept of ASPCS with a liquid hydrogen cooled SMES, a liquid hydrogen storage at a vehicle station, a fuel cell (FC), an electrolyzer (EL), and power conditioners.

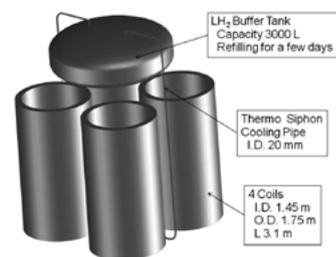


Fig.2  $MgB_2$  four-pole coil and thermo-siphon cooling system with buffer tank is composed.

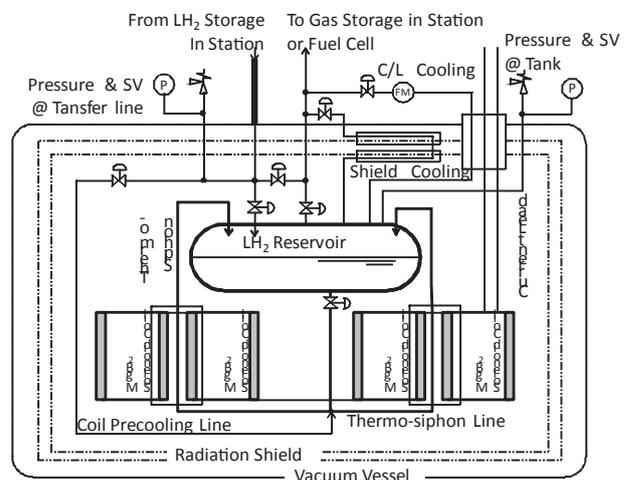


Fig.3 Flow diagram in the SMES cryostat with thermo-siphon circulation.

# 先進超電導電力変換システムのハイブリッド貯蔵システムに関する検討

## Study of Hybrid Storage System in Advanced Superconducting Power Conditioning System

天田 博仁, 岩崎 辰哉, 孫 敬雨, 佐藤 諒亮, 津田 理, 宮城 大輔, 濱島 高太郎 (東北大学);  
新富 孝和 (日本大学); 高尾 智明 (上智大学);

槇田 康博 (高エネルギー加速器研究機構); 宗像 浩平, 梶原 昌高 (岩谷産業)

AMATA Hiroto, IWASAKI Tatsuya, SON Kyoungwoo, SATO Ryosuke, TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke,  
HAMAJIMA Takataro (Tohoku University); SHINTOMI Takakazu (Nihon University);

TAKAO Tomoaki (Jyochi University); MAKIDA Yasuhiro (High Energy Accelerator Research Organization);  
MUNAKATA Kohe, KAJIWARA Masataka (Iwatani Corporation)

E-mail: amahiro@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

近年のエネルギー問題から自然エネルギー発電の導入が進むと予想される。しかしこうした発電では電力システムに接続する際に出力変動が大きいため電力システムが不安定となることが懸念され、そのため電力変換装置を導入することが考えられている。そこで我々は超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES), 燃料電池 (FC), 電気分解装置 (EL), 液体水素ステーション, 自然エネルギー源で構成される先進超電導電力変換システム (ASPCS) を提案し, 風力エネルギーの変動補償方法やそのシステム有効性を確認してきた [1]。そこで本研究では, これまで検討してきた風力エネルギーの変動補償時に必要な SMES 容量について検討を行った。

### 2. システム構成と変動補償方法

本研究で提案している ASPCS の概念図を Fig. 1 に示す。電源は最大出力 5MW の風力発電としている。風力エネルギーが要求電力よりも不足している場合は FC で発電をして, 逆に余剰している場合は EL で水素を製造する。さらに急激な変動に対しては大電力を瞬時に入出力でき充放電効率が高い SMES で補償をする。また各装置の入出力はカルマンフィルタを用いて未来予測を行い, 未来予測値  $P_{pred}$  と要求電力  $P_{out}$  の差を FC や EL が, 未来予測値と実際の風力発電出力  $P_{wind}$  の差を SMES が担当する。

### 3. 予測時間に対する SMES 入出力容量

本システムの SMES に入力または放出されるエネルギーは以下の式のように与えられる。

$$E_{SMES} = \int |P_{wind} - P_{pred}| dt \quad (1)$$

そこである1日分の風力波形に対して10秒先未来予測をした場合の SMES の入力または放出エネルギーのヒストグラムを Fig.2 に示した。ここで分布を正規分布とすると全体の 99.7% を補償する SMES 入出力容量は, 標準偏差  $\sigma$  とすると  $6\sigma$  であり約 45MJ となる。また SMES 貯蔵容量のうち 80% 程度使用出来ることから実質の SMES 貯蔵容量は 50MJ クラスとなる。

次に FC の運転を考慮した場合は, スタンバイ状態では出力が 10% から 90% まで 10 秒以内に制御できるが, 休止状態では 60 秒程度の遅れ時間が必要になる。そのため予測時間に対する SMES 入出力容量の変化を Fig.3 に示した。図から SMES 入出力容量は予測時間に対して線形に変化することが分かる。特に予測時間 60 秒の場合は SMES 入出力容量が 80MJ 程度となり, SMES 貯蔵容量は 100 MJ クラスとなる。

### 4. まとめ

ASPCS に用いる SMES 容量について検討を行った。今後は SMES 入出力容量を 99.7% と設定しているため, 貯蔵または放出が出来ないエネルギー量の総和はどの程度か, さらに FC をスタンバイ状態から運転して対応すると考えると, その回数はいくつ程度であるか計算する予定である。

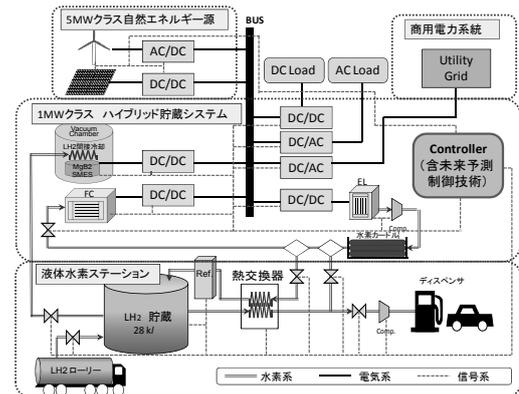


Fig. 1 Advanced Superconducting Power Conditioning System (ASPCS)

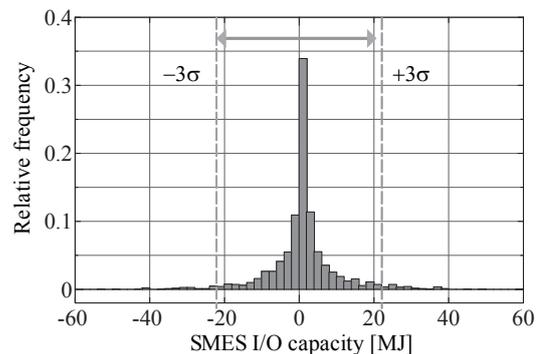


Fig. 2 Histogram of SMES I/O capacity.

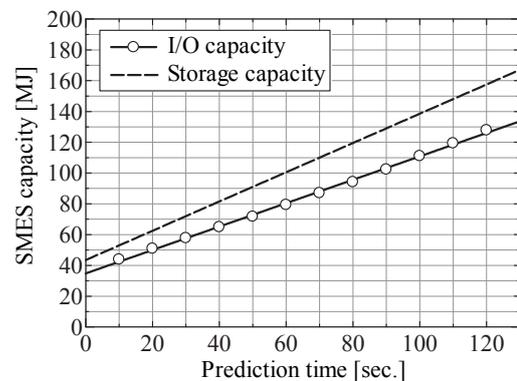


Fig. 3 Prediction time dependence of SMES capacity.

謝辞: 本研究の一部はJST-ALCAの支援を受けた。

### 参考文献

- H. Amata, et al.: The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, ASC-11-033 (2011), p.51-56

## EBCO バルク超電導磁石を用いた MR マイクロスコピ MR microscopy using EBCO bulk superconducting magnet

仲村 高志(理研), 小川 恭平, 寺田 康彦, 巨瀬 勝美(筑波大), 拝師 智之(MRTe)

NAKANURA Takashi (RIKEN); OGAWA Kyohei, TERADA Yasuhiko, KOSE Katsumi (U. Tsukuba); HAISHI Tomoyuki (MRTe)

E-mail: takashi.nakamura@riken.jp

### 1. はじめに

我々は高温超電導の発見による新しい応用形態である超電導バルクを用いた NMR/MRI 用の磁石を開発している[1, 2]。今回は着磁の強度を 4.7 T とし、均一度の評価に MRI の手法を用いた。その結果、バルク磁石内の直径 6.2 mm 長さ 9.1 mm の空間に RMS 3.1 ppm の均一磁場空間の発生が確認できた。その空間上で MR マイクロスコピを実施したところ妊娠 14 日目のマウス胚を空間分解能 50  $\mu\text{m}$  で撮像に成功した[3]。

### 2. 磁石構成

直径 60mm のバルク体を用いて磁石内部に直径 3 mm 長さ 5 mm の空間に 1 ppm 以下の均一領域を目標とした有限要素法による電磁界解析を実施した。その結果バルクの径を 28 mm 長さを 120 mm と決定した。本実験では直径 60 mm 径 28 mm 厚さ 20 mm の EBCO バルクを 6 個積層させて磁極を構成し、そのバルク体を GM パルス管冷凍機 (AISIN, PR1211, 100V, 1200W) で伝導冷却する構成とした。

### 3. 均一磁場着磁法

NMR/MRI を計測するには均一な強磁場が必要となるため着磁法として磁場中冷却法を用いた。バルク体に対して均一な磁場を与えるよう NMR 用のワイドボア超電導磁石を使用し、さらに形成される均一磁場をバルク自身が乱さないように比透磁率が 1 に近い素材として現在最も開発の進んでいる GBCO から新規素材として EBCO を開発し、採用した。着磁時の磁場強度は 4.7 T、バルク体の温度は 50K の温度調節下で実施した。着磁用の磁場を除いた後にバルク体の温度を冷凍機の連続運転温度 40K にしてから着磁用磁石から取り出し、磁石として用いた。

### 4. 実験

4.7 T で着磁した磁石の磁場強度は、着磁時とほぼ同じ 4.7 T でプロトン共鳴周波数 200.0MHz であった。室温空間ボア径 23 mm 内に、自作の傾斜磁場コイルと検出コイルを開発した。永久磁石を用いたコンパクト MRI 装置(MRTe)の分光計と組み合わせて(Fig. 1)MR マイクロスコピ装置を実現した。

まずはファントムによる予備実験を実施し、良好な結果を得たので、位相エンコード法を用いて磁場均一度の評価を行い、最終的には化学的に固定処理した妊娠 14 日目のマウス胚を 3D スピンエコー法にて MR マイクロスコピの実験で空間分解能 50  $\mu\text{m}$  の画像(Fig. 2)取得に成功した。

### 5. まとめ

高温超電導バルク体を用いた小型無冷媒磁石による MR マイクロスコピに成功した。これは磁石内部の磁場の均一性を画像化し、評価できるため今後のバルク磁石の性能向上の大きなツールである。磁場均一領域の拡大による、より大きな対象物の MRI や、高均一磁場生成で高分解能 NMR への道が拓けたといえる。

### 6. 謝辞

この研究は理研産業界連携制度の補助を得て実施された。この場を借りて深く感謝したい。

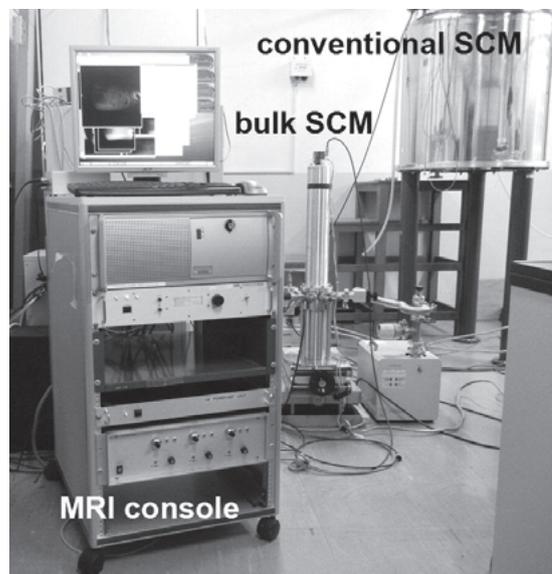


Fig.1 MR microscope developed in this study.

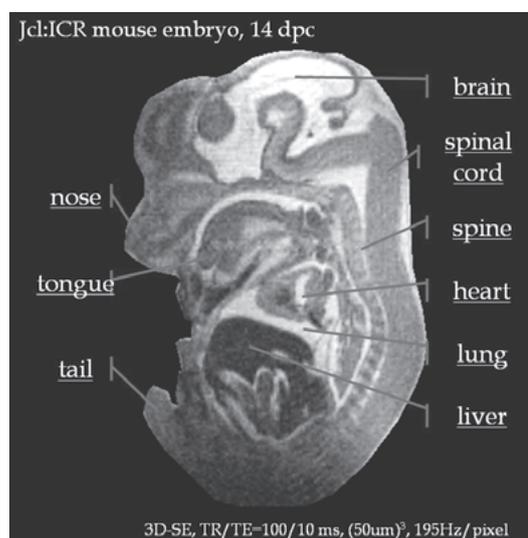


Fig.2 The midsagittal cross-sections of a chemically fixed mouse embryo measured using the MR microscope. The voxel size is (50  $\mu\text{m}$ )<sup>3</sup>.

### 参考文献

1. T. Nakamura, M. Yoshikawa, Y. Itoh, H. Koshino, Concept Magn. Reson. B (Magn. Reson. Eng.) **31B** (2007) 65
2. T. Nakamura, Y Itoh, M. Yoshikawa, et. al., TEION KOGAKU **46** (2011) 139
3. K. Ogawa, T. Nakamura, Y. Terada, K. Kose, T. Haishi, Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 234101

# 高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発; 高電流密度コイル化技術の構築 (4) —電磁力評価用 REBCO コイル試験結果—

Development of the next-generation NMR technology using HTS materials;  
For achievement of HTS coil with high operating current density (4)  
- Experimental results of REBCO coils under electromagnetic forces -

松本 真治, 木吉 司(物材機構); 大塚 昭弘, 濱田 衛(JASTEC);

前田 秀明(理研); 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大学); 末松 浩人(JEOL RESONANCE)

MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OTSUKA Akihiro, HAMADA Mamoru (JASTEC);

MAEDA Hideaki (Riken); YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE)

E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

## 1. はじめに

科学技術振興機構研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)において「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」を遂行している。プロジェクトでは、超伝導マグネットおよびプローブ(検出器)に高温超伝導材料を適用することで、マグネットをコンパクトにし、プローブ性能を向上させ、利便性と性能の両立を図ることを目指している [1]。これまで、REBCO 線材によりレイヤー巻コイルを製作し、17.2 T の磁場中で試験を行い、高温超伝導線材の高電流密度コイル化技術の構築を進めてきた。

## 2. コイル試験結果

HASTELLOY®基板を持つ2種類の線材を使用して試験用 REBCO コイル (#1, #3, #4 : SuperPower Inc. 製線材, #2 : 株式会社フジクラ製線材)を製作し、耐電磁力試験を行った。各コイルは、冷却や電磁力による線材の剥離の恐れがないことが報告されている wax による含浸を施した [2, 3]。コイル#1 は、試験中にクエンチし、線材が破断した。コイル#1 と同タイプの線材でのコイル化技術の確立のため、コイル#1 を分解検査し、考えられるクエンチの原因を改善させた2個の試験コイル (#3, #4)を製作した。また、実機用コイルの場合、コイル中での線

材間接続は不可避であると考えられるため、コイル#3 中に線材間接続を導入した。これまで行ってきた、耐電磁力試験結果について報告する。コイル#1、#3、#4 の試験結果には、ばらつきが見られたが、コイル内に線材間接続を有する試験コイル#3 は、高い耐電磁力特性を示し、使用した線材間の接続方法も高い電磁力に耐えることが実証された。コイル#2 は、試験プローブの最大通電電流の 400 A までの通電に成功した。さらに、高い電磁力下での試験が求められる。試験コイルの諸元・特性を TABLE I に示す。

## 謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

## 参考文献

1. H. Suematsu: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.185
2. T. Takematsu et al., Physica C 470 (2010) 674.
3. Y. Yanagisawa et al., Physica C 471 (2011) 480.

TABLE I. Specifications of the REBCO test coils.

REBCO coil	test #1	test #2	test #3	test #4
<b>Coil parameters</b>				
Conductor	SuperPower Inc.	Fujikura Ltd.	SuperPower Inc.	SuperPower Inc.
Conductor Width × Thickness [mm]	4.00 × 0.11	5.00 × 0.22	4.00 × 0.11	4.00 × 0.11
Insulated Conductor [mm]	4.10 × 0.21	5.10 × 0.32	4.10 × 0.21	4.10 × 0.21
HASTELLOY® substrate [ $\mu$ m]	50	100	50	100
Copper stabilizer Thickness [ $\mu$ m] × Side	20 × both	100 × one	20 × both	20 × both
Inner diameter [mm]	79.10	79.00	78.90	79.10
Outer diameter [mm]	82.50	85.30	83.50	82.40
Coil height [mm]	98.44	100.54	100.09	96.60
Total layers	8	10	8	8
Total turns	179	186	184	180
Impregnation	wax	wax	wax	wax
<b>Results under electromagnetic force</b>				
Operating current [A]	353@10T	398.8@17.2T	293@17.2T	209.2@17.2T
Maximum BJR [MPa]	340	262	469	331
Current density/conductor [A/mm <sup>2</sup> ]	802.3	362.5	665.9	475.5
Current density/coil [A/mm <sup>2</sup> ]	377.6	234.2	234.2	236.3
<b>Notes</b>				
	Vc ↑ 203A@17.2T (Vc : Coil voltage)	Up to 400A (maximum operating current of the test probe)	Joint in the 4th layer 1st Iq=293A@17.2T 2nd Iq=135A@17.2T 3rd Iq=135A@17.2T	Vc ↑ 209A@17.2T 1st Iq=324A@10T 2nd Iq=268A@10T 3rd Iq=264A@10T
	Iq=353A@10T (Iq : Quench current)		Coil degradation	Coil degradation

# 高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発; 高電流密度コイル化技術の構築 (5) —GdBCO 内挿コイルによる 24T の発生—

Development of the next-generation NMR technology using HTS materials;  
For achievement of HTS coil with high operating current density (5)  
- Generation of the magnetic field of 24 T using a GdBCO insert coil -

松本 真治, 木吉 司(物材機構); 大塚 昭弘, 濱田 衛(JASTEC);

前田 秀明(理研); 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大学); 末松 浩人(JEOL RESONANCE)

MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OTSUKA Akihiro, HAMADA Mamoru (JASTEC);

MAEDA Hideaki (Riken); YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE)

E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

## 1. はじめに

科学技術振興機構研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」において、これまで、REBCO線材により製作したレイヤー巻コイルを、17.2 Tの磁場中で試験を行い、高温超伝導線材の高電流密度コイル化技術の構築を進めてきた。

## 2. GdBCO 内挿コイル試験結果

これまでに得られた知見をもとに、GdBCO 内挿コイルを製作した (TABLE I)。このコイルを、Nb<sub>3</sub>Sn および Nb-Ti コイルからなる中心磁場 17.2 T の超伝導マグネットに挿入し、耐電磁気力試験を行った。GdBCO 内挿コイルは、Fig.1 に示すように、321 A まで 0.1 μV/cm の電圧基準以下で通電することができた。通電電流 321 A において、コイル中心 (O) でホール素子により測定された磁場は、24.07 T であった。また、コイルパラメータより磁場の値は、24.03 T と見積もられた。よって、GdBCO、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Ti コイルからなる超伝導マグネットは、4.2 K で 24.0 T の磁場を発生することができたと結論した。これは、超伝導マグネットが単独で発生させた最大磁場である。これまでの最大値は、1GHz NMR マグネットが発生させた 23.5 T であった [1]。これまで、20 T を超える超伝導マグネットは、2.2 K 以下の超流動ヘリウム中で運転されてきた。今回、4.2 K で 24 T の磁場を発生することができたことは、現在進めている、高温超伝導マグネットを用いた次世代 NMR システムの開発を大きく前進させる結果である。GdBCO 内挿コイルの負荷率を Fig. 2 に示す。負荷率は、Q(r[mm],z[mm])=(41.38, ±44.16)において、0.74 と見積もられた。通電電流によって、

TABLE I. Specifications of the GdBCO insert coil.

GdBCO insert coil	
Conductor	Fujikura Ltd.
Conductor Width × Thickness [mm]	5.00 × 0.15
Insulated Conductor [mm]	5.10 × 0.25
HASTELLOY® substrate [μm]	100
Inner diameter [mm]	50.27
Outer diameter [mm]	112.80
Coil height [mm]	88.33
Total layers	124
Total turns	2010
Conductor length [m]	515.00
Impregnation	wax
Results under electromagnetic force	
Operating current [A]	321@17.2T
Maximum B/JR [MPa]	408
Current density/conductor [A/mm <sup>2</sup> ]	428.0
Current density/coil [A/mm <sup>2</sup> ]	233.6

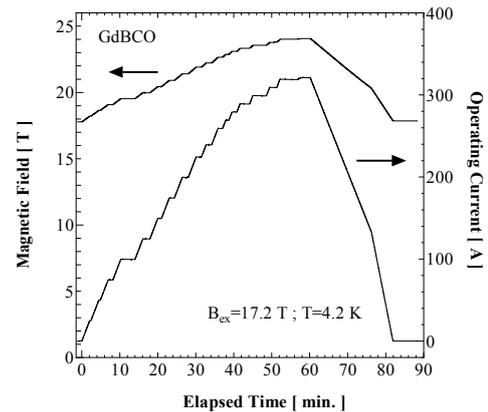


Fig.1 Operation of the GdBCO insert coil at 4.2 K in an external magnetic field  $B_{ex}$  of 17.2 T. The operating current was increased stepwise up to 321 A. The magnetic field at the center of the coil was measured using a hall sensor.

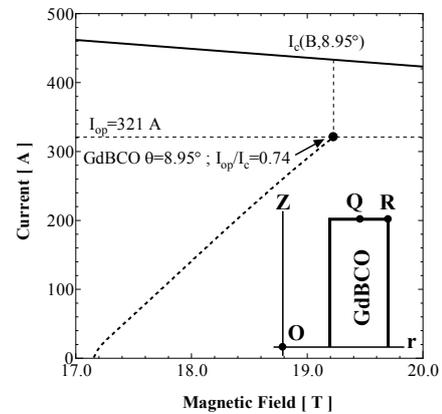


Fig.2 Load factor of the GdBCO insert coil at 4.2 K in an external magnetic field  $B_{ex}$  of 17.2 T. The load factor of the coil was estimated for an operating current  $I_{op}$  of 321 A at Q. The critical current  $I_c(B, \theta)$  for GdBCO conductor as a function of the strength and direction of the applied magnetic field. The maximum  $B/JR$  was estimated at R.

負荷率を決定するコイル内の位置は異なる、Fig.2 中に、各電流に対する負荷曲線を破線で示す。通電電流 321 A での、コイル内最大の電磁気力  $B/JR$  は、R(56.40, ±44.16)において 408 MPa と見積もられた。

## 謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

## 参考文献

1. <http://www.bruker-biospin.com/pr090601.html>

# イットリウム系 12 積層コイルの磁場中通電試験(1)

## -伝導冷却通電試験-

Operating test of an impregnated YBCO coil composed of a stack of 12 single pancakes  
in background magnetic fields (1)  
-Operating test of a conduction-cooled coil-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)  
MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,  
URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)  
E-mail: hiroschi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

イットリウム系超電導コイルの実機適用に向け、高磁場化を目指した開発を進めている。磁場が高くなると電磁力によるコイル径方向応力の増加および口出し電極付近にかかる応力集中が問題となる。そこで、コイル径方向応力を低減するとともに、口出し電極構造を改良することで、伝導冷却にて 5 T 以上の磁場発生可能なイットリウム系超電導コイルを開発したので報告する。

### 2. 12 積層コイル構造

超電導コイルに電気を流すために、口出し電極をハンダ付けなどにより電気的に接続する必要がある。通常の超電導コイルでは電磁力の影響を低くするために、磁場の低い外径側に口出し電極を設けるのが一般的であるが、口出し電極をコイル外周部に取り付けられた場合には、冷却時の熱応力および電磁力などにより、取り付け部に応力集中が生じ、巻線部が劣化してしまう危険性がある。そこで、Fig.1 に示すように 12 積層コイルの内側に口出し電極を取り付ける構造とした。さらに、口出し電極を他のシングルパンケーキコイルの巻枠に固定することにより機械強度を向上させ、巻線部への電極の影響を低減している。

### 3. 諸元および通電試験

12 積層コイルに使用したシングルパンケーキコイルの諸元および液体窒素中での電流-電圧測定結果より算出したコイル Ic ( $10^{-6}$  V/cm 定義) およびコイル n 値 ( $10^{-8} \sim 10^{-7}$  V/cm 定義) を Table 1 に示す。試作した全てのシングルパンケーキコイルが高いコイル n 値を示しており、劣化のないことを確認した。12 積層コイルはコイル内周および外周で電気的に接続されており、2 枚のシングルパンケーキコイルごとに厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付け、各アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。コイル温度は 2 段冷却ステージに取り付けたヒータにより制御し、発生電圧は各シングルパンケーキコイルの両端で測定した。また、通電中のコイル中心磁場はホール素子により測定した。コイル温度を 10 K から 60 K まで変化させたときの電流-電圧測定試験の結果を Fig. 2 に示す。全温度領域で低電界領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。また、コイル温度 10 K において、305 A 通電時に中心磁場 5.1 T を達成した。中心磁場 5.1 T 発生時においてもコイルは熱暴走することなく安定に運転できた。

### 4. まとめ

口出し電極構造を改良することにより機械強度を向上させたイットリウム系 12 積層コイルを試作し、伝導冷却にて通電試験を実施した。10 K から 60 K と幅広い温度領域で良好な超電導特性を有していることを確認し、コイル温度 10 K において、中心磁場 5.1 T を達成した。

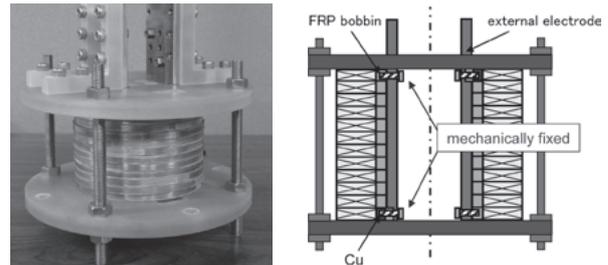


Fig.1 Picture and drawing of a stack of 12 single pancake coils

Table 1 Main features of impregnated pancake coils at 77 K

Coil No.	#1	#2	#3	#4	#5
Inner dia. (mm)	50	50	50	50	50
Outer dia. (mm)	91	92	92	91	91
Hight (mm)	5	5	5	5	5
Turns	108	110	109	108	108
Tape length (m)	25	25	25	25	25
Coil Ic (A)	48	61	54	54	48
n value	28	28	26	25	22

#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
50	50	50	50	50	50	50
92	92	92	88	88	88	88
5	5	5	5	5	5	5
108	108	108	108	108	108	108
25	25	25	25	25	25	25
47	49	51	45	56	59	47
26	26	26	27	26	26	27

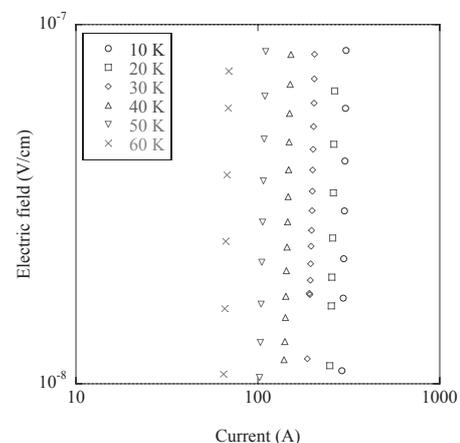


Fig.2 E-I characteristics of a stack of 12 single pancake coils from 10 K to 60 K

## イットリウム系 12 積層コイルの磁場中通電試験(2) -バックアップ 4 T 磁場中通電試験-

Operating test of an impregnated YBCO coil composed of a stack of 12 single pancakes  
in background magnetic fields (2)

-Operating test of an YBCO coil in a 4 tesla background-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)  
MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,  
URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)  
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

イットリウム系超電導コイルの実機適用に向け、高磁場化を目指した開発を進めている。磁場が高くなると電磁力によるコイル径方向応力の増加および口出し電極部付近にかかる応力集中が問題となる。そこで、コイル径方向応力を低減するとともに、口出し電極構造を改良した伝導冷却型の 5 T 級コイルを開発に成功した。このコイルの電磁力に対する機械強度を検証するため、4 T のバックアップ磁場中にて最大 8 T の中心磁場を発生させ、安定に運転可能かどうか検証した結果について報告する。

### 2. 試験方法

液体ヘリウム中でバックアップ磁場中試験を実施した。試験装置の概略を Fig.1 に示す。12 積層コイルが磁場の中心軸からずれないようにするためにコイル中心部に FRP 製の芯を挿入している。また、12 積層コイルを固定する台とヘリウム容器の寸法をほぼ等しくすることで、中心軸がずれないようにするとともに、通電中にコイルが動かないようにしている。12 積層コイルの中心にホール素子を取り付けており、発生磁場(バックアップ磁場と自己磁場の合計)が 8 T となるまで通電した。

### 3. 通電試験結果

4T のバックアップ磁場中試験を実施する前に、液体ヘリウム温度で冷却した際にコイルに異常が生じていないかどうかを調べるために、バックアップ磁場なしの状態での通電試験を実施した。中心磁場 4 T を越えるまで通電したが電圧発生は見られず異常がないことを確認した。引き続き、バックアップ磁場(4.28 T)まで印加した状態で、12 積層コイルに通電を開始し、最大発生磁場が 8 T を超えたところで試験を終了した。通電試験結果を Fig.2 に示す。最大 8 T の磁場発生時においてもコイルに電圧発生は見られず安定に運転することができた。さらに、バックアップ磁場中試験後に、コイルの健全性を評価するために、再度液体窒素中で通電試験を実施した。バックアップ磁場中試験前後の電流-電圧特性を Fig.3 に示す。バックアップ磁場中試験前後で電流-電圧特性を比較した結果、コイル  $I_c$  および  $n$  値に変化は見られず、コイルに劣化がないことを確認した。

### 4. まとめ

口出し電極構造を改良することにより機械強度を向上させた伝導冷却方のイットリウム系コイルの電磁力に対する耐性を評価するため、バックアップ磁場中にて通電試験を実施した。最大で中心磁場 8 T 発生時においても、コイルが劣化することなく安定に運転でき、高い機械強度を有していることを検証した。

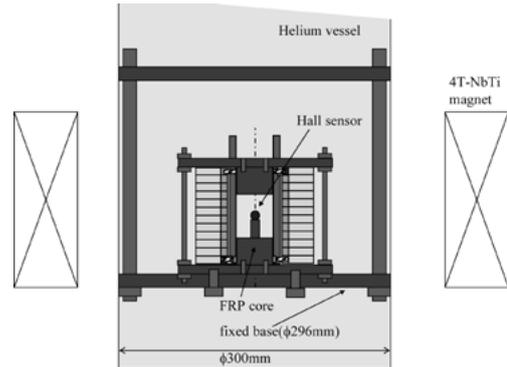


Fig.1 Schematic drawing of experimental apparatus for background magnetic field test

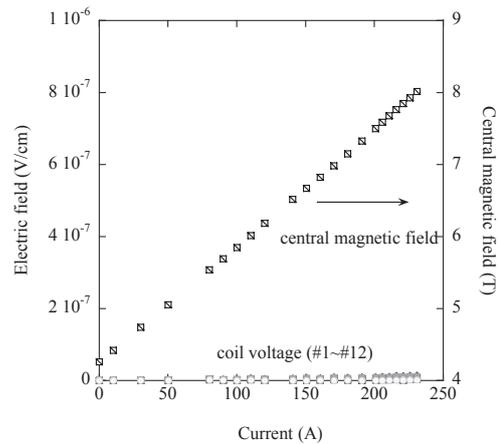


Fig.2 Current dependence of electric field and central magnetic field in background magnetic field test at 10 K

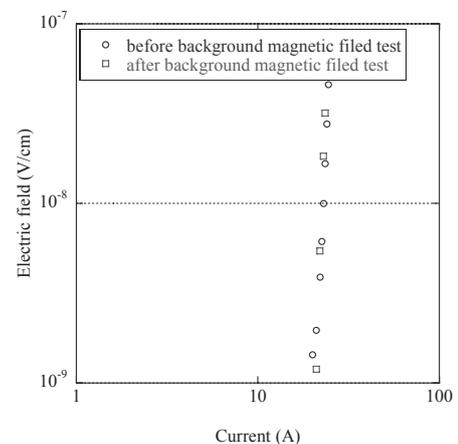


Fig.3 E-I characteristics of a stack of 12 single pancake coils at 77 K.

# イットリウム系幅広線材を用いたコイル開発

## Development of a single-pancake coil wound with an YBCO wide tape

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

イットリウム系(Y系)超電導コイルを実機に適用する際、パンケーキコイルを複数積層する構成を想定している。Y系線材は線材幅が選択可能であり、幅広線材を使用する場合、運転電流は大きくなるが、パンケーキ数を減らすことができる。しかしながら線材幅が広がると、長手方向に流れる電流が幅方向にも流れやすくなるため、コイルが発生する磁場分布が複雑になる。その結果、コイルE-I特性を精度良く予測できず、また、遮蔽電流の影響で設計どおりの磁場が得られない可能性がある。そこで、予め短尺での臨界電流特性を取得した12mm幅広線材を使用して含浸コイルを試作し、液体窒素冷媒中におけるコイルE-I特性について実験値と計算値との比較・評価を行った。また、より高い磁場が出る伝導冷却下20K~60Kにおいて通電試験を行い、発生磁場に対する遮蔽電流の影響を調べた。

### 2. パンケーキコイルの試作および通電評価

試作した含浸パンケーキコイルの線材諸元とコイル諸元をTable1に示す。巻線および含浸プロセスを経た後に、線材の臨界電流特性が劣化していないことを確認するため、試作したコイルは樹脂含浸前後において液体窒素中で通電評価した。含浸後のコイルがFig.1である。通電試験結果をFig.2に示す。含浸前後でE-I特性に変化は見られず、 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$  V/cm定義において、コイル $I_c \sim 122$  A, n値 $\sim 25$ の劣化のない良好な超電導特性が得られた。

さらにE-I特性の実験値に対し、短尺線材の臨界電流特性から予測される計算値との比較を行った。Fig.2に実線で示すコイルE-I特性の予測計算値は、実験値を良く再現することができており、幅広線材を用いた場合にも、コイルV-I特性の定量的予測に成功した。

### 3. 伝導冷却通電試験

コイル端面にアルミ板を接着し、先端をGM冷凍機の2段階ステージに熱的に接続して、コイルを伝導冷却した。2段階ステージに取り付けたヒータの制御によりコイル温度を一定に維持し、20Kから60Kの範囲で通電試験を実施した。発生電圧はコイルの両端で測定し、コイル温度は端面に取り付けた抵抗温度計により測定した。またホール素子によりコイルの中心磁場を計測した。

Fig.3に一例としてコイル温度60KにおけるE-I特性、およびコイル中心磁場の結果を示す。今回通電した310Aまでの通電範囲において、20Kから60Kまで電圧発生は見られなかった。また、310A通電時、コイル中心磁場は0.57Tを観測した。実験値と計算値との差は、低電流領域で最大約2%であり、コイル $I_c$ に近づくにつれ、差は減少する結果となった。通常機器では問題ないものと考えられるが、より高い精度が要求されるような機器では考慮する必要がある。

### 4. まとめ

12mm幅広Y系線材を用いて含浸シングルパンケーキコイル劣化なく製作することに成功した。また、液体窒素温度におけるコイルE-I特性について、幅広線材に対しても、定量的に予測可能であることが分かった。また、遮蔽電流の影響につ

いて調べたところ、伝導冷却下60Kにおいて磁場の実験値と計算値との差はコイル $I_c$ に近づくにつれ小さくなる結果が得られた。今後、積層数を増やした場合について検証を進めていく。

Table1 Specifications of a single-pancake coil

Tape width	12 mm
Tape thickness	0.1 mm
Tape Length	25m
Tape $I_{c, min}$ (77 K, s.f.)	319 A
Inner diameter	50 mm
Outer diameter	92 mm
Number of turns	110



Fig.1 Single-pancake coil wound with an YBCO wide tape

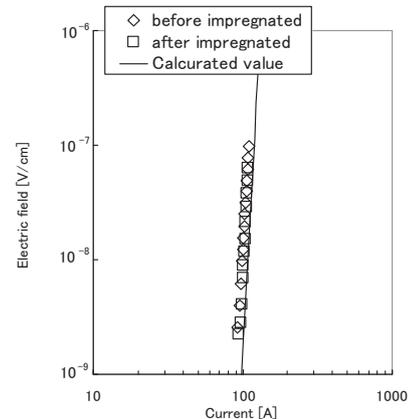


Fig.2 E-I characteristics of a single-pancake coil at 77 K

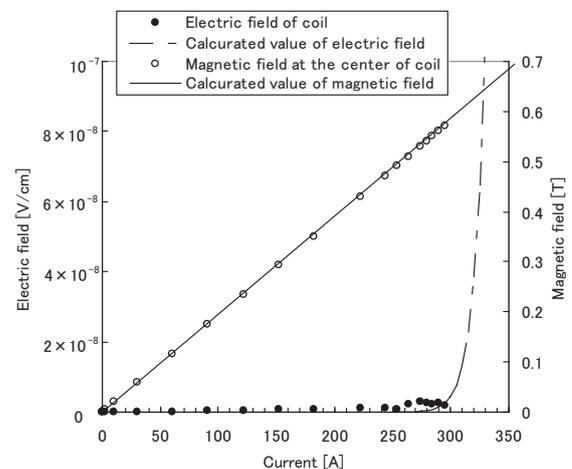


Fig3. Current dependence of electric field and central magnetic field in a conduction-cooled test at 60 K

## φ 730 mm 級イットリウム系大型パンケーキコイルの開発(1) -液体窒素中通電試験-

### Development of a φ 730 mm-class large scale pancake coil wound with an YBCO tape (1)

#### -Operating test of a coil in a liquid nitrogen-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroschi17.miyazaki@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

イットリウム系超電導コイルの実機適用に向け、大型パンケーキコイルの開発を進めている。超電導コイルは、巻線部に 1 mm 程度のわずかな区間であっても欠陥が生じてしまうと、コイルとしての特性が低下してしまう。そのため、コイルが大型になるほど線材長が長くなり、高い超電導特性を有するコイルを製作することが困難になる。今回、SMES などの実機を想定して φ 730 mm 級のイットリウム系大型パンケーキコイルを開発し、液体窒素中での通電試験により、健全性を評価したので報告する。

#### 2. 製作実績および大型パンケーキコイル諸元

これまで製作したイットリウム系シングルパンケーキコイルの製作実績の一部を Table 1 に示す。また、各シングルパンケーキコイルの液体窒素中での電流-電圧測定結果より算出したコイル  $I_c$  ( $10^{-6}$  V/cm 定義) およびコイル  $n$  値 ( $10^{-8} \sim 10^{-7}$  V/cm 定義) も併せて示している。コイルサイズによらず全てのコイルで良好な超電導特性を有するコイルを製作できている。今回、新たに試作した φ 730 mm 級の大型パンケーキコイルの諸元を Table 2 に、コイル外観を Fig. 1 に示す。イットリウム系線材 200 m と同寸法の SUS 線 (200 m × 3) を用いた 4 本バンドル巻の構成としている。

#### 3. 応力解析

全てイットリウム系線材を用いた場合と今回試作したコイル (イットリウム系線材+SUS 線) の冷却時の発生応力の違いを調べるため、応力解析を実施した。イットリウム系線材と SUS 線は、縦弾性係数および熱収縮率ともにわずかに違いがあるものの、コイル劣化の主要因となる冷却時 (293 K → 77 K) の径方向応力は、どちらも 14 MPa 程度とほぼ等しいことがわかった。すなわち、今回製作する φ 730 mm 級のコイルが劣化なく製作できれば、すべてイットリウム系線材を用いた大型コイルも製作可能であると考えられる。

#### 4. 液体窒素中通電試験

製作したイットリウム系大型パンケーキコイルの健全性を評価するため、樹脂含浸前後で液体窒素中での通電試験を実施した。電界-電流特性の結果を Fig. 2 に示す。樹脂含浸前後で電界-電流特性に大きな変化は見られなかった。また、含浸後のコイル  $I_c$  54 A、 $n$  値 28 と高い超電導特性を有しており、劣化のない大型パンケーキコイルの製作に成功した。

#### 5. まとめ

イットリウム系線材を用いた φ 730 mm 級の大型パンケーキコイルを試作し、液体窒素中での通電試験を実施した結果、劣化のない良好な特性を有していることを確認した。今後は、ヒートサイクル試験を実施し、コイルの長期信頼性を評価予定である。

Table 1 Main features of impregnated pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4
Tape width	4	4	4	4
Tape thickness	0.1	0.1	0.1	0.1
Inner dia. (mm)	30	50	100	200
Outer dia. (mm)	55	90	142	290
Height (mm)	5	5	5	5
Turns	67	111	131	257
Tape length (m)	9	25	50	200
Coil $I_c$ (A) at 77 K	69	51	34	56
$n$ value at 77 K	28	27	27	32

Table 2 Specification of φ 730 mm-class pancake coil

Coil No.	#1
Number of YBCO tape	1
Number of SUS tape	3
Inner dia. (mm)	600
Outer dia. (mm)	737
Height (mm)	5
Turns	94
YBCO tape length (m)	200
SUS tape length (m)	200 × 3



Fig.1 Photograph of φ 730 mm-class pancake coil

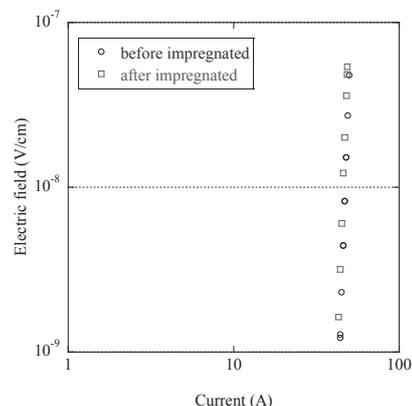


Fig.2 E-I characteristics of φ 730 mm-class pancake coil at 77K

## Φ730 mm 級イットリウム系大型パンケーキコイルの開発(2) -伝導冷却通電試験-

### Development of a Φ730 mm-class large scale pancake coil wound with an YBCO tape (2)

#### -Operating test of a conduction-cooled coil-

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)  
IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,  
URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)  
E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

イットリウム系超電導コイルの実機適用に向け、大型パンケーキコイルの開発を進めている。コイルが大型化してくると伝導冷却にて冷却する場合には、コイル内部に温度差が生じてしまう。そのため、冷却パスを十分に確保する必要があり、コイルは含浸されていなければならない。また、負荷率が高い箇所では局所的な発熱が生じ、安定に通電できない可能性がある。そこで、実際に大型コイルが冷却可能な伝導冷却試験装置を試作し、含浸コイルの伝導冷却試験を行った。今回、SMESなどの実機を想定してΦ730 mm級のイットリウム系大型パンケーキコイルを開発した。製作したコイルは液体窒素中で通電試験により健全性を確認した後、伝導冷却装置に組み、コイル温度 60K にて通電試験を実施したので報告する。

#### 2. 巻線構成およびコイル構成

試作したΦ730 mm級の大型パンケーキコイルの巻線構成およびコイル構成を Fig.1 に示す。幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm のイットリウム系人工ピン入り線材 200 m を使用しており、線材長節減のため、同寸法の SUS 線(200 m×3 本)を用いた 4 本バンドル巻の構成とした。ターン間には絶縁テープを挿入しており、エポキシ樹脂で含浸した。コイル上面には、冷却板として幅 170 mm のアルミ板を対称に接着し、周方向 45° 間隔に抵抗温度計を配してコイル温度を計測した。

#### 3. コイル各部の電流-電界特性

Fig.2(a)に液体窒素中におけるコイル電流-電界特性を示す。コイル各部の発生電圧を調べるため、巻線内部に電圧タップを取り付けている。電圧発生が得られた全ての領域で n 値が 20 を超える良好な超電導特性を有していることが確認できた。最内周 1 から 4 ターンの電圧発生が最も早く  $I_c \sim 50$  A, n 値  $\sim 31$  であった。液体窒素温度では、Fig.3(b)に示すように、 $I_c$  の磁場角度依存性が弱いため、磁場の絶対値が大きいコイル内側で電圧が支配的となることが分かった。

#### 4. 伝導冷却試験

アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段ステージに熱的に接続して、コイルを伝導冷却した。2 段ステージに取り付けたヒータの制御によりコイル温度を一定に維持した状態で通電試験を実施した。高い温度から順に試験を進めており、一例としてコイル温度 60 K における巻線部 1 から 4 ターンの発生電圧を Fig.3 に示している。 $I_c \sim 139$  A, n 値  $\sim 42$  であった。伝導冷却下においても n 値が 20 を超える良好な超電導特性が得られており、 $10^{-7}$  V/cm 付近まで安定に通電することができた。また、周方向におけるコイル温度の差は最大で約 1 K であり、本構成で十分な冷却ができていることを確認した。

#### 5. まとめ

イットリウム系線材を用いた Φ730 mm 級の大型パンケーキコイルを試作し、伝導冷却試験を実施した。コイル温度 60K

にて  $10^{-7}$  V/cm 付近まで安定に通電することができた。今後、より低温領域 20 K ~ 50 K での通電試験を進める。

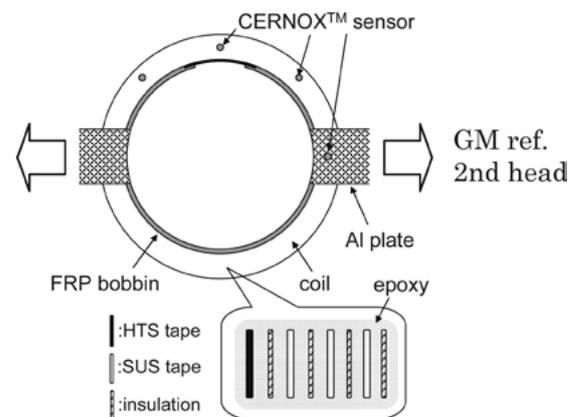


Fig.1 Schematics of a single-pancake coil and winding structure

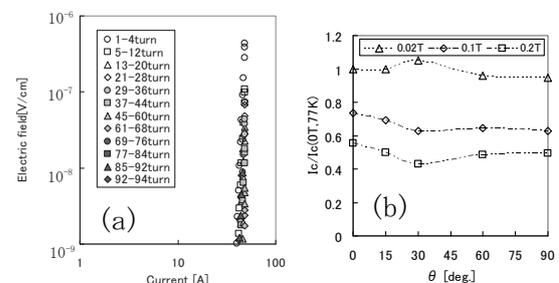


Fig.2 (a) E-I characteristics of a single-pancake coil and (b) Field angular dependence of  $I_c/I_{c(0T,77K)}$  at 77K

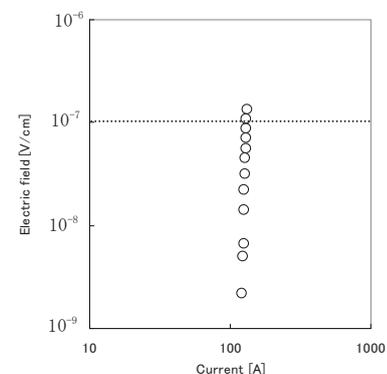


Fig.3 E-I characteristics of an inner region of a single-pancake coil in a conduction-cooled test at 60 K

## ILC 用超伝導四極磁石の開発

### Development of superconducting quadrupole magnet for International Linear Collider

土屋清澄、寺島昭男、江川一美、増澤美佳、大内徳人、岩崎昌子、大木俊征、宗 占国(高エネ研); 田中 学(三菱電機サービス); 遠藤友成 (日立プラントテクノロジー); 松山綾平、中村一信、千田 豊、仙波智行(日立製作所)  
 TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, EGAWA Kazumi, MASUZAWA Mika, OHUCHI Norihito, IWASAKI Masako, OKI Toshiyuki, ZONG Zhanguo (KEK); TANAKA Manabu (Mitsubishi Elec. System & Service); ENDO Tomonari (Hitachi Plant Tech.); MATSUYAMA Ryohei, NAKAMURA Kazunobu, CHIDA Yutaka, SEMBA Tomoyuki (Hitachi, Ltd.)  
 E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

#### 1. はじめに

高エネルギー物理学の分野では、次期大型加速器として、超伝導空洞を用いた線形衝突型加速器 International Linear Collider(ILC) の設計検討が進められている。この加速器では9連の超伝導空洞を収納した 13m 長のクライオモジュールが 1680 台程度必要と考えられているが、その他に多数の超伝導四極磁石も必要とされる。然し乍ら、この四極磁石の設計は未だ流動的で種々の議論の中にある。本研究では、この四極磁石のモデル磁石を試作し、その特性試験を行ったので、その結果について報告する。

#### 2. モデル四極磁石

磁石の主要パラメータ及び写真を表 1 および図 1 に示す。本磁石製作の目的は、素線絶縁されたケーブルを用いたエポキシ樹脂含浸コイルの製作性および超伝導・磁場特性の感得を得ることであった。そのため、超伝導線材は手持ちのものを流用し、また、鉄ヨーク板厚も製作性のみで選ばれており最適化は行われていない。本磁石のコイルには、8本のポリイミド絶縁 NbTi/Cu 線をケーブル糸で織ったケーブルが使われ、巻線後にエポキシ樹脂含浸し、コイル端部で8本の素線を直列接続して一つのコイルとする製作手法を採用した。また、鉄ヨークは断面的には無分割とし、ヨーク断面の対称性は加工精度で決まるような構造とした。従って4個のレーストラック状含浸コイルは、鉄ヨークの内側(ボア側)から挿入し鉄芯に固定された。また、磁石端部には鉄製の端版が取り付けられた。

Table 1 Main parameters of ILC quadrupole model

Field gradient	56.5 T/m
$L_{\text{effective}}$	0.53 m
Pole aperture	95 mm
Current	400 A
Coil cross section	20 x 20.5 mm <sup>2</sup>
Coil current density	~266 A/mm <sup>2</sup>
Coil peak field	3.4 T (2D)
Weight	191 kg



Fig.1. Photo of ILC quadrupole model.

#### 3. 実験

磁石の冷却・励磁試験には、縦型クライオスタットを用い、液体ヘリウムの浸漬冷却で行った。磁場測定は磁

石口径内に断熱パイプを挿入し半径 21 mm の常温ハーモニックコイル( Long coil; L=600 mm, Short coil; L=25 mm)を用いて行った。

#### 4. 実験結果

負荷曲線とクエンチ電流の図を図 2 に示す。3回の試験を行い、通算 17 回のクエンチの後、定格電流に到達した。クエンチ発生時には wire motion に起因すると思われるスパイク状電圧信号が観測されている。

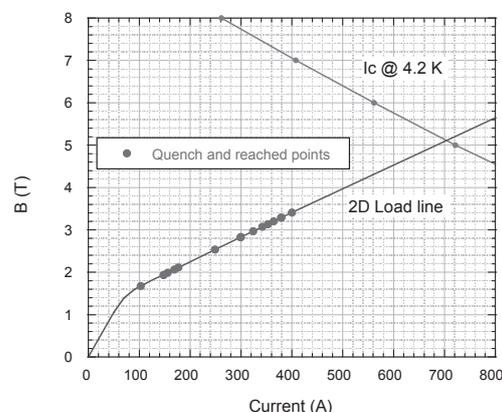


Fig. 2. Load line and quench points of model quadrupole.

図3には long coil で測定した多極成分( $B_6$  and  $b_{10}$ )の電流依存性とその計算結果を示す。測定値と計算値は良く一致している。

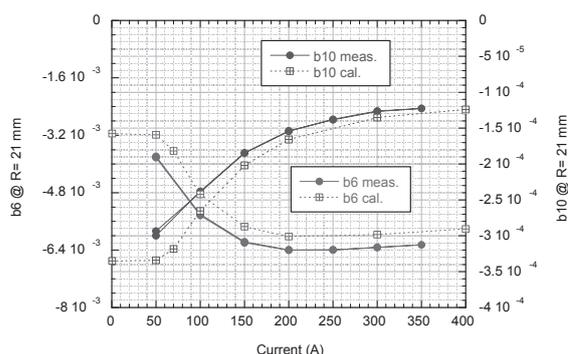


Fig. 3. Higher multipole components ( $b_6$  and  $b_{10}$ )

#### 5. まとめ

ILC 用の四極磁石開発を目的として、8本織りケーブルを用いてモデル磁石を製作し、励磁試験を行った。17回のトレーニングクエンチの後、定格電流に達した。また、サーマルサイクルによるクエンチ電流の劣化はほとんど見られなかった。磁場特性では、allowed multipole は測定値と計算値は非常に良い一致を示したが、無視できない unallowed multipole が観測された。今後、より詳細な解析が望まれる。

## SuperKEKB 衝突点用超伝導 4 極磁石の開発

## - 開発試験用磁石の低温試験結果 -

## Development of the Superconducting Quadrupole Magnet for SuperKEKB Final Focusing System

岩崎昌子, 大内徳人, 土屋清澄, 多和田正文, 東憲男, 宗占国, 大木俊征, 山岡広 (高エネルギー加速器研究機構)  
 IWASAKI Masako, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, TAWADA Masafumi, HIGASHI Norio, ZHANGUO Zong,  
 OKI Toshiyuki, YAMAOKA Hiroshi (KEK)  
 E-mail: masako.iwasaki@kek.jp

## 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器を用いた B ファクトリー実験が行われてきた。現在、KEKB 加速器の高輝度化を目的として、SuperKEKB 加速器の設計・建設が進められている[1]。この高輝度化において、SuperKEKB 加速器の心臓部である電子・陽電子ビーム衝突部のビーム最終収束用超伝導磁石を新しく作り変え、2014 年度にビーム運転を開始する予定である。

SuperKEKB の最終ビーム収束システムは、電子・陽電子各ビームラインに組込まれる超伝導 4 極磁石ダブレットで構成され、合計 8 台の超伝導 4 極磁石で構成されている。本学会では、検討が進んでいる SuperKEKB ビーム衝突用超伝導磁石の開発について、特に開発試験用に作成した超伝導 4 極磁石の低温試験結果について報告を行う。

## 2. 開発試験用超伝導 4 極磁石の製作

我々は、開発試験用に超伝導 4 極磁石の試作を行った[2]。開発試験用磁石は、磁石の巻き枠と下層コイルの上に、超伝導線を直接巻きつける方法[3]で作成した。開発試験用超伝導 4 極磁石の写真を図 1 に、開発試験用磁石の主要なパラメータを表 1 に示す。

Table 1 Parameter of the R&amp;D magnet

R&D magnet		Superconducting wire	
Inner radius of cold bore	35 mm	Diameter	0.648 mm
Inner radius of the magnet	41.6 mm	Number of filament	1338
Outer radius of the magnet	46.2 mm	Filament diameter	10.6 $\mu$ m
Magnet length	400 mm	Cu/Sc	1.8
Design field gradient	28.26 T/m	$I_c$ (4.2 K, 3 T)	545 A
Effective magnetic length	328.5 mm	$I_c$ (4.2 K, 4 T)	452 A
Operation current	368 A	$I_c$ (4.2 K, 5 T)	375 A
Current density in the wire	997 A/mm <sup>2</sup>		
Peak field w/o iron yoke	1.19 T		
Peak field with iron yoke	1.59 T		

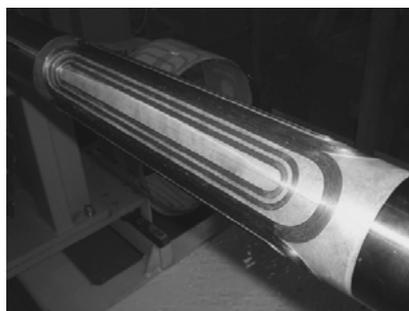


Fig. 1. Photo of the R&amp;D Magnet

## 3. 開発試験用超伝導 4 極磁石の冷却試験

我々は、縦型クライオスタットを用い、液体ヘリウムの浸漬冷却で、開発試験用超伝導 4 極磁石の冷却・励磁試験を行った。磁場測定は電磁石口径内に断熱パイプを挿入し半径 21

mm の常温ハーモニックコイル (Long coil; L=600 mm, Short coil; L=25 mm) を用いて行った。

## 4. 冷却試験結果

図 2 に、鉄ヨーク無しの場合で、long coil で測定した開発試験用超伝導 4 極磁石の Transfer function の電流依存性を示す。この測定結果から、磁場実効長 328.5 mm に対して 55.45 T/m/kA が得られ、定格電流 368 A に対する磁場勾配 20.41 T/m が得られた。また、図 3 に、long coil で測定した多極成分 ( $b_6$ ) の電流依存性を、鉄ヨーク付き (黒丸) と鉄ヨーク無し (白丸) の場合について示した。鉄ヨークをつけた場合、 $b_6$  の amplitude が小さくなる傾向が観測された。

また、short coil を用いて 4 極磁石の長手方向の磁場分布の測定を行い、磁場分布の計算値との比較も行った。

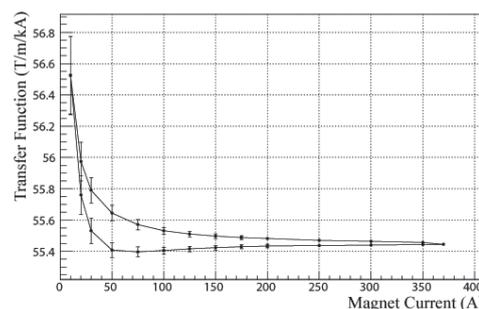


Fig. 2. Transfer function of the R&amp;D magnet.

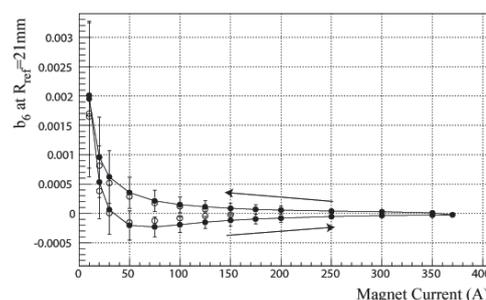


Fig. 3. Multipole coefficient  $b_6$  as a function of the magnet current. Solid and open circles are the results without and with the iron yoke, respectively.

## 5. まとめ

我々は、SuperKEKB 衝突点用超伝導 4 極磁石開発の一環として、開発試験用超伝導磁石の試作を行った。本磁石は液体ヘリウムで冷却され、励磁試験、磁場測定を行った。その結果について、学会で詳細を報告する。

## 参考文献

- [1] SuperKEKB Task Force, Letter of Intent for KEK Super B Factory, KEK-REPROT-2004-4, Jun. 2004. Belle II Collaboration, KEK-REPORT-2010-1, Nov. 2010.
- [2] N. Ohuchi, et al., "Design and Construction of the Final Focus Quadrupole R&D Magnet for Super-KEKB", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 3. Jun. 2011, pp.1829-1832.
- [3] B. Parker, et al., "Serpentine coil topology for BNL direct wind superconducting magnets", Proc. of 2005 Particle Accelerator Conference (PAC05), Knoxville, 2005, pp.737-739.

# LHC アップグレードに向けた高磁場小型レーストラック磁石の開発(1)

## - RHQ-Nb<sub>3</sub>Al ケーブルを用いたレーストラックコイルの試作 -

### Development of high field sub-scale magnets for the LHC upgrade (1)

#### - Test production of a racetrack coil using a RHQ-Nb<sub>3</sub>Al cable -

飯尾 雅実, 中本 建志, 荻津 透, 佐々木 憲一, 寺島 昭男, 土屋 清澄,

徐 慶金, 山本 明 (高エネ研); 菊池 章弘, 竹内 孝夫 (物材研)

IIO Masami, NAKAMOTO Tastushi, SASAKI Kenichi, TERASHIMA Akio, TSUCHIYA Kiyosumi,

XU qinjin, YAMAMOTO Akira (KEK); KIKUCHI Akihiro, TAKEUCHI Takao (NIMS)

E-mail: masami.iio@kek.jp

## 1. はじめに

高エネルギー粒子加速器では、装置の高エネルギー化、大型化に伴い、超伝導磁石が不可欠な基盤技術となっている。欧州原子核研究機構 (CERN) では大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の物理実験運転が始まり、現在、加速器の安全を確認しながらビーム電流を徐々に増強している。LHC 加速器は、陽子を 7+7 TeV で衝突させ、ピーク luminositiy が  $10^{34}$  cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> にまで到達する予定であるが、順調に運転が進んだとしても、2020 年頃には統計誤差の大きな改善が望めなくなり、luminositiy の大幅な改善が必要になってくる。このような状況のもと、CERN では将来の ATLAS 及び CMS 実験のため、ビーム luminositiy を 5 倍に増加させるアップグレード計画、いわゆる『HL(High Luminosity)-LHC』計画が開始された。

現行の LHC 加速器には、主だったものだけでも約 1600 台の超伝導電磁石が配置されている。これらの磁石には、超伝導線材として NbTi が用いられ、超流動ヘリウムによる冷却で (1.9 K)、定格約 9 T の磁場を実現している。しかしながら、更なる luminositiy フロントティアを目指すためには、10 T を超える次世代の加速器用電磁石の開発が必要である。そこで、KEK では、NIMS との共同研究として、Nb<sub>3</sub>Al を用いた加速器用高磁場電磁石の開発を進めており、現在、NbTi を用いた 2 台の試作機開発を経て、1 台目の Nb<sub>3</sub>Al を用いたダブルパンケーキ型レーストラックコイルが完成した。

本講演では、wind & react 法で製作された Nb<sub>3</sub>Al コイルの巻き線、熱処理、含浸などの詳細と電気試験の結果について報告する。

## 2. 高磁場超伝導モデル磁石の開発

高磁場磁石のための線材の候補として、KEK では NIMS と協力して、加速器応用を目指した Nb<sub>3</sub>Al 線材開発を行っており、現在も開発は進行中であるが、急熱急冷法 (Rapid Heating Quench) と呼ばれる一次熱処理施した結果、15 T において 700-800 A/mm<sup>2</sup> の臨界電流密度達成している [1], [2]。そこで、Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ケーブルの加速器応用への実現可能性を実験的に検証するため、我々は、13 T 級のボア無しサブスケール超伝導磁石を開発し、その性能評価試験を行う計画である。サブスケール磁石は、3 台 (又は 2 台) の 300mm 長 RHQ-Nb<sub>3</sub>Al コイルに、LBNL で開発された既存の Nb<sub>3</sub>Sn コイル 2 台を組み合わせたハイブリッド型で、いわゆる common coil 型のコイル配置により効率良く高磁場を発生する設計となっている。

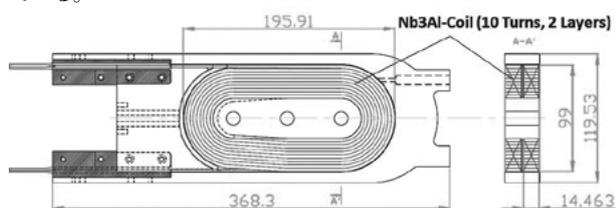


Fig.1 Schematic view of a Nb<sub>3</sub>Al racetrack coil

## 3. Nb<sub>3</sub>Al レーストラックコイル

図 1 に、今回製作したコイル (K1) の構造を示す。Nb<sub>3</sub>Al は超伝導相を生成するために、800°C での高温熱処理が必要であり、熱処理後は化合物になり非常に脆くなる。そこで、コイルの製作は、巻き線を行った後、高温熱処理をする、いわゆる wind & react 法で製作された。また、熱処理後のコイルの脆性と電気絶縁性能を改善するため、エポキシ樹脂で真空含浸を行った。

### 3.1. 巻き線

ケーブルは、直径 1 mm の線 28 本がラザフォード型に依られ、その上に、800°C の熱処理に耐えうる絶縁材として、厚さ 0.125 mm のアルミナ繊維テープをハーフラップで巻きつけられたものを使用した。線が硬いため、撚り線形状の崩壊 (ポップアップ) が起こり、それに起因する様々な問題があったが、10 巻きのダブルパンケーキコイルを製作することができた。

### 3.2. 熱処理

コイルは、ステンレス製の治具で固定され、真空炉の中で熱処理された。炉は、窒素で 5 回ハージされた後に真空に引かれ、10<sup>-2</sup> Pa 以下になったところで加熱された。コイルは、昇温開始から 6 時間後、温度が 800°C で一定になったことを確認し、10 時間保持された。大きな問題はなく、熱処理は終了した。

### 3.3. 真空含浸

熱処理後のコイルは、GFRP などの絶縁材を用いて再組立てされ、エポキシ樹脂による真空含浸が行われた。混合されたエポキシ樹脂は、真空中で、60°C に保たれ 5 時間脱泡され、コイルへと導かれた。その後、110°C で 5 時間、125°C で 18 時間かけて、固められた。真空含浸も問題なく終了した。

### 3.4. 電気試験

含浸後、電気試験が行われ、コイル-導体部品間、対地間の絶縁が問題ないことが確かめられた (2000 MΩ 以上 @ 1kV)。しかし、コイル 1 層目内の 3~5 ターンの間でショートしていることが発覚した。

## 4. まとめと今後の展望

Nb<sub>3</sub>Al の加速器応用の可能性を検証するためにコイルを試作した。結果として、様々な問題を洗い出すことができ、実現に向けて大きく一歩を踏み出すことができた。現在、この 1 台目の経験を生かし、2 台目のコイルを製作中であり、更に、もう 1 台製作した後に、冷却、通電試験を行う予定である。

## 参考文献

1. A. Kikuchi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No. 2 (2008) p. 1026
2. K. Tsuchiya, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No. 2 (2008) p. 1034

# 高温超電導マグネットを用いた重粒子線治療用小型加速器の開発

## Development of compact accelerator with HTS magnet for heavy-ion therapy

長内 昭宏, 渡辺 郁男, 吉行 健, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之, 森 義治(京大); 吉本 政弘(原子力機構)  
 OSANAI Akihiro, WATANABE Ikuo, YOSHIYUKI Takeshi, KURUSU Tsutomu (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki, MORI Yoshiharu(Kyoto Univ.); YOSHIMOTO Masahiro (JAEA)  
 E-mail: akihiro.osanai@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

高効率で小型な加速器システム実現のため、高温超電導マグネットを採用した加速器システムの検討を行っている。その1つとして重粒子線治療用加速器への適用を考えた加速器設計では、イットリウム系(Y系)線材を用いたコイル支配型マグネット設計[1]、コイル巻線要素技術開発[2]と並行して固定磁場強収束型(FFAG)加速器の採用を想定した小型化設計を進めている。本報告では加速器小型化設計についてこれまでの検討結果を紹介する。

### 2. 加速器リングサイズの小型化

主加速器としてスケーリング型 FFAG の採用を検討している。固定磁場であるため高温超電導を適用しやすく、リングの中心からの距離  $r$  に対して

$$B = B_0 \times \left( \frac{r}{r_0} \right)^k$$

となる磁場勾配を持つことが特徴である。現在設計を検討しているものはラジアルセクタ型 FDF triplet FFAG で、線材の配置によって上記磁場分布を実現するコイル支配型である。Fig.1のように収束と発散マグネットを交互に3台並べたものを1セルとし、8セルのリングを構成とした。詳細仕様を Table.1 に示す。リング直径で 10m 程度となり、これは同スペックの既存加速器の半分のサイズとなる。

### 3. 加速器用マグネットの小型化検討

マグネットに要求する  $k$  値を高くすることでビームが入射から出射までに径方向に移動する量(エクスカッション)を小さくすることができる。マグネットの小型化と共に、コイル支配型のマグネットでは線材量を大幅に削減できる点でもメリットが大きい。 $k$  値を 20 程度に設定すると、ビームエクスカッションは 35cm 程度となり  $k$  値が 4.2 の場合の 1/3 以下とすることができる(Fig.2)。

一方、 $k$  値を高くすると加速器のアクセプタンスが小さくなるため、加速器システムとして要求されるビーム量を満足できるように粒子トラッキングによる解析を行いながら設計値を選択する必要がある。Fig.3 にトラッキング結果の1例を示す。

### 4. まとめ

高温超電導マグネットを用いた加速器システムとして FFAG 加速器を想定した設計の検討を行い、リングサイズとして既存加速器の半分程度にできる見込みが得られた。磁場勾配を高くした設計でのマグネットの小型化についても検討を進めており、今後コイル設計の面も含めた実現性を確認していく。

Table.1 Specification of FFAG Accelerator

Accelerated particle	C6+
Injection/Extraction energy	20MeV/u / 400MeV/u
Mean radius	3.75~5.09 m
Number of sector	8
Field index (k)	4.2
Open angle	8.59(F) 6.88(D) 8.59(F) deg
FD ratio (bending angle)	1.38

### 謝辞

本研究は、産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】として、科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

### 参考文献

1. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.3
2. K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.137

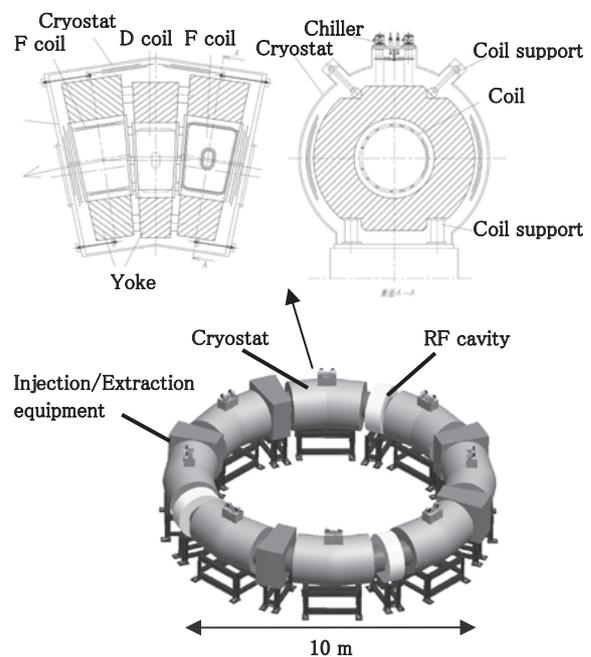


Fig.1 Outline drawing of radial sector FFAG (FDF triplet)

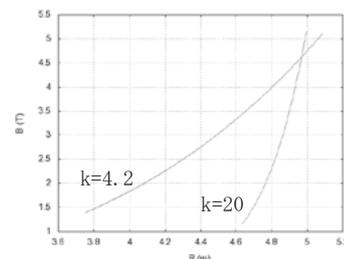


Fig.2 Difference of field distribution with R (k=4.2 and k=20)

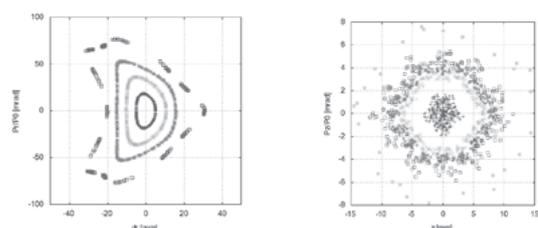


Fig.3 Result of particle tracking (k=21)

## 加速器用マグネット開発に向けたY系鞍型コイルの試作

### Fabrication of saddle-shaped YBCO test coils for the accelerator magnet development

小柳 圭, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 来栖 努, 吉行 健(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 萩津 透(KEK)  
 KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

加速器用マグネットへの高温超伝導線材の適用を目指し、イットリウム系(Y系)線材を使ったコイルの巻線技術の検討を進めている[1]。本プログラムでは、直流励磁マグネットのモジュールを並べることで構成できる固定磁場強収束(FFAG)加速器を想定し、幾つかのマグネット案について検討を進めている。磁性体支配型マグネット(スパイラルセクタ型)の場合、コイルはネガティブバンド部があり、この部分の巻線時の形状維持が課題となる[2]。一方、磁場分布を線材の配置で実現するコイル支配型マグネットの場合は、巻線部が鞍型のような複雑な三次元形状になる。そこで、Y系線材を三次元的に変形して位置を固定して且つ超伝導特性を劣化させない巻線方法を明らかにするため、Y系線材による鞍型コイルを試作し、超伝導特性を評価した。

#### 2. コイルの設計および試作

FFAG 加速器用として検討したコイル支配型マグネットの形状を Fig.1 に示す[3]。直径 1400mm のビームダクト上に幅 3mm の Y 系線材を巻く想定で設計したもので、エッジワイズ曲げ歪の制約を最大 0.3%としている。この実機の一部に相当する、三次元形状コイルを設計した。コイルは FRP 製の巻枠に巻く方法とし、ターン数を段階的に増やしながら超伝導特性の評価をすることとした。巻枠は、矩形を円筒表面に沿わせたような“瓦”の形状とし、周長約 900mm (外形約 300×180mm)、角部の曲率約 50mm、線材をエッジワイズ曲げる部分を実機と同等の曲率半径 700mmとした。この巻枠表面に、予め樹脂を塗布した線材に沿わせ、加熱して接着させながら巻く方法を試みた。加熱には、超音波加熱とヒーター加熱の2通りの方法を用いた。試作したコイルの外観を Fig.2 に示す。巻線には、幅 3mm 厚さ 0.09mm の IBA/PLD 線材 ( $I_c=90A$ , n値 28)を使用した。

#### 3. コイルの通電試験結果

2通りの加熱方法で1ターンコイルを試作し、両端に電圧タップを付けて液体窒素中で通電し、コイルの発生電圧挙動を観察した。測定したコイルの V-I 特性を Fig.3 に示す。ヒーター加熱したコイル#2 は低電界の領域までn値が 26 と高い特性を示し、同じロットの線材短尺の V-I 特性とほぼ一致していることから、三次元形状に巻いた線材が良好な超伝導特性を有していることを確認した。一方、超音波加熱したコイル#1 は n値が 5 であり特性劣化が生じた。

#### 4. まとめ

Y系線材を三次元的に巻いた1ターンコイルの一部で良好な超伝導特性が得られ、FFAG 加速器マグネット特有の鞍型形状にY系線材を巻線できる可能性を確認できた。一部のコイルで生じた特性劣化の原因と対策を検討し、さらにターン数を増やしたコイルを試作する予定である。

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援により実施したものである。

#### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.184
2. K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.137
3. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.3

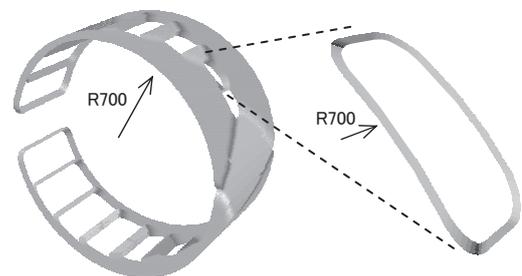


Fig.1 Schematic view of the coil-dominated magnet[3] (left) and saddle-shaped coil for trial fabrication (right).

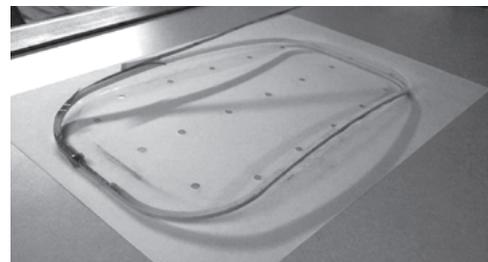


Fig.2 Outer view of a saddle-shaped YBCO test coil.

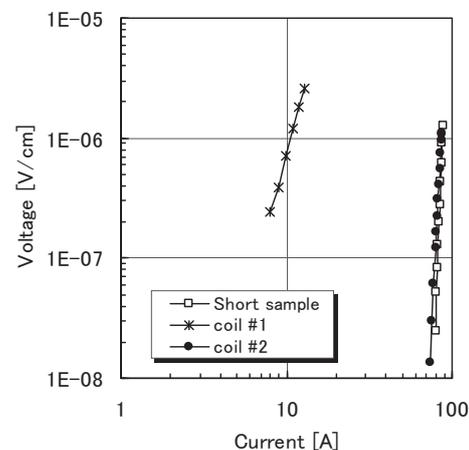


Fig.3 V-I characteristics of 1-turn coils and short sample.

## RE 系薄膜線材を用いたダイポールマグネットの多極磁界成分の測定

## Measurement of multi-pole magnetic field components in dipole magnet wound with REBCO coated conductors

大竹 宏明, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 荻津 透(KEK); 小柳 圭, 吉行 健(東芝)

OTAKE Hiroaki, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);

OGITSU Toru (KEK); KOYANAGI Kei, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba)

E-mail: otake@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々はこれまで加速器用マグネットへの高温超伝導線材の適用を目指した研究開発を進めてきた[1]。今回、RE 系薄膜線材を用いたダイポールマグネットの多極磁界成分に線材内の遮蔽電流が与える影響について検討したので報告する。

加速器用マグネットでは鞍型三次元形状のコイルがしばしば用いられるが、今回はレーストラック形状のコイルを測定対象とした。

## 2. 解析・実験方法

マグネット断面に対する二次元有限要素法により、線材内の遮蔽電流(磁化)を考慮した電磁界解析を行った。薄板近似を用いて低次元化した。線材の超電導特性は  $n$  値モデルにより表現した。

実験では、測定対象のマグネットを液体窒素浸漬冷却し、2 時間毎に 50A 電流の通電および遮断を三周期行い、回転ピックアップコイル法により多極磁界成分を測定した。ピックアップコイルを回転して得られる誘導起電力から磁界の角度依存性を求め、それを Fourier 展開することで多極磁界成分を求めた。

## 3. 結果

本稿では主に電流遮断後に焦点をあて、議論していく。電流遮断後の多極磁界成分の理論値を Fig. 1 に、線材幅方向の電流分布の時間推移の解析結果を Fig. 2 に示す。Fig. 1 から、2 極成分が単調に減衰するのに対し、6 極成分は緩やかに減衰したあとやや増加している様子が見える。これは、Fig. 2 のふたつの位置の線材の電流分布をもとに描いた Fig. 3 のコイル断面での電流分布の概念図からわかるように、コイル中心部と両端部において電流分布の変化、すなわち磁化の減衰が異なること、電流配置が  $x$  軸からの角度を  $\theta$  としたときに  $2n$  極成分は  $\cos(n\theta)$  に比例するため 6 極成分に寄与する電流配置は 30 度線を境目に符号変化することが影響していると考えられる。次に、実験結果を Fig. 4 に示す。2 極成分は解析結果と同様、 $10 \mu\text{T}$  程度の緩やかな減衰を示した。一方 6 極成分は信号が小さいため明確ではないが、2 極成分のような明らかな減衰はみられない。

また、50A 通電時の 2 極磁界成分の測定結果は、Bi 系線材を使用した先行研究での測定結果に比べて明らかに磁界のドリフトが小さかった[1]。これは、薄膜線材と多芯線材の違いによる遮蔽電流の減衰時定数の差に由来していると考えられる。

## 謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究開発事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた。

## 参考文献

1. 雨宮尚之他: 2011 年度春季低温工学・超電導学会 (2011) 1A-a04

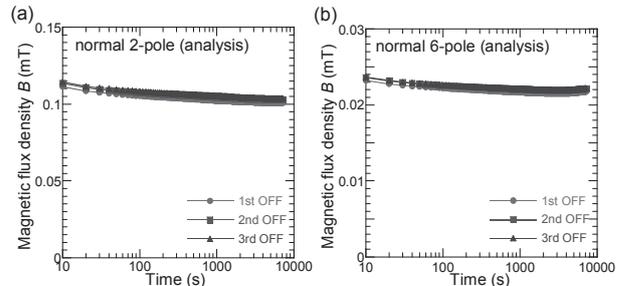


Fig. 1 Multi-pole components after shutting down transport current (Analysis result): (a) 2 pole, (b) 6 pole

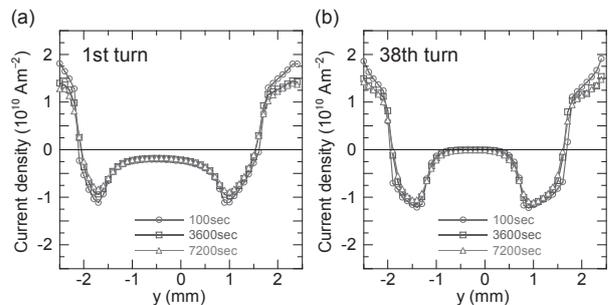


Fig. 2 Current distribution after 1st shutting down transport current: (a) inner-most turn (1st TURN), (b) center turn (38th TURN)

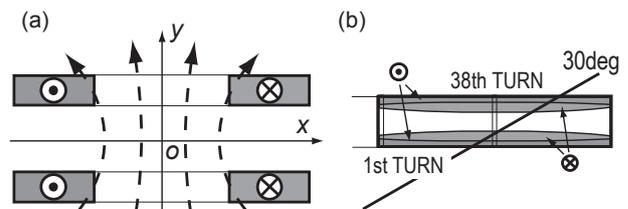


Fig. 3 Assumed current distribution: (a) when carrying transport current, (b) after shutting down transport current (Enlarged view)

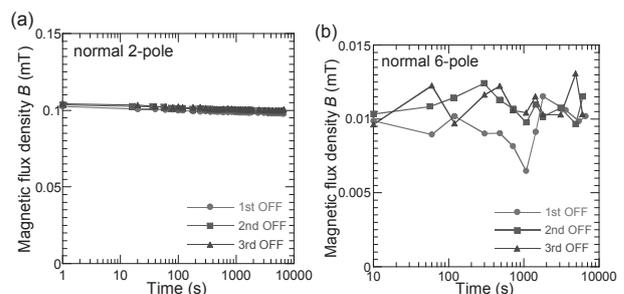


Fig. 4 Multi-pole components after shutting down transport current (Experiment result): (a) 2 pole, (b) 6 pole