

# シンクロトン型加速器用高温超電導可変磁場コイルの研究開発 ～プロジェクト概要～

Research and development of the variable magnetic field HTS coil for a synchrotron accelerator.

—Outline of the project—

横山彰一、坂本裕介、山本和男、田中博文、今井良夫、吉田克久、津上浩伸(三菱電機)；

宮城大輔、津田理(東北大)；野田耕司(放医研)

YOKOYAMA Shoichi, SAKAMOTO Yusuke, YAMAMOTO Kazuo, TANAKA Hirofumi, IMAI Yoshio, YOSHIDA Katsuhisa, TSUGAMI Hironobu (Mitsubishi Electric Corp.); MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); NODA Koji (NIRS)

E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

## 1. はじめに

粒子線がん治療装置は、国内でも設置台数が増えており、治療実績も多く、注目度が高い。中でも重粒子線は治療効果が優れており期待が大きい。しかしながら、重粒子線がん治療装置はシンクロトン型加速器本体などの形状が大きいことから建屋設備が大きくなってしまふ。

本テーマでは、重粒子線シンクロトン型加速器リングに高温超電導マグネットを適用した場合、装置形状がどれほど小型化できるかを検討することを目的として研究を開始した。

本報告では、本プロジェクトの実施内容の概要とこれまで実施した当該テーマの成果について報告する。

## 2. プロジェクトの内容

本テーマの主な実施内容は、(1)高温超電導レーストラックコイル試作と(2)超電導シンクロトン加速器システムの基本設計からなり、初年度から3年間で、ボア形状400mmx200mmで中心磁場1.5T以上のレーストラックコイルを試作し、伝導冷却方式マグネットとして組み込み、可変磁場(交流)発生を行う。この通電結果を基にY系超電導コイルの交流損失を算定、評価し、シンクロトン加速器システムの基本設計に反映する。

4～5年目では、実機を想定したメートル級コイルを試作し、設計した通電パターンで可変磁場を発生させ運転評価を行う。また、システム設計では入射系周辺機器も含めたシンクロトン加速器システムの全体設計を行い、小型化評価を実施する。

成果目標は以下のとおり

- 1)コイル中心軸周辺(幅100mm)にて、磁場3T以上、磁場均一性が、100ppm以下の高温超電導コイル実証
- 2)小型シンクロトン加速器システムの全体設計

## 3. 高温超電導モデルコイル試作

高温超電導コイルを加速器本体に適用する場合、ビーム加速時などで可変磁場発生に伴う交流損失および偏向磁場形状を検討する必要がある。

本テーマで適用するY系高温超電導線材は、臨界電流密度が高く、機械特性が優れており、コイル形状の小型化など期待できる。一方、冷却時などでの特性劣化やヒステリシス損が大きいなどの課題もある。Fig.1に示すようなボア形状150mmx100mmのレーストラック小型コイルを試作した。本コイルは、フッ素コーティングフィルム絶縁線材[1]を用いることにより上記の特性劣化無く通電できることが確認できた。今後、この小型コイルを用い交流損失の基礎特性取得を行う。

また今年度、ボア形状400mmx200mmのレーストラックコイルの試作を実施中である。Fig.2に設計したレーストラックモデルコイルの外観を示す。コイルの定格電流は260Aで、中心磁場は3Tであ

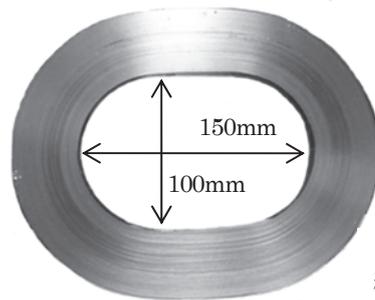
る。Table 1にコイルを組み込んだモデルマグネットの設計諸元を示す。本マグネットはH27年度に各種励磁パターンにて可変磁場評価を行い、励磁速度の高速化も含め適用検討を行う。

## 謝辞

本研究は、H25、26年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)により委託を受け実施したものである。

## 参考文献

[1]井村武志,他:第89回低温工学・超電導学会予稿集(2014)148



ターン数：200  
線材幅：5mm

Fig.1 The racetrack mini-model coil.

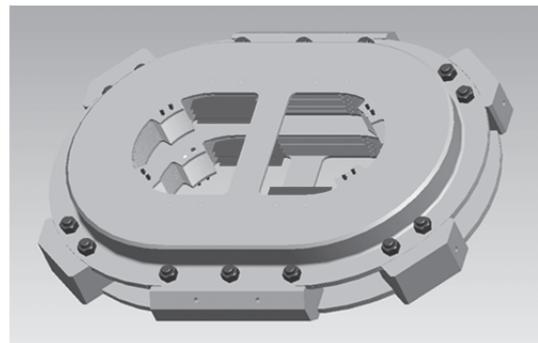


Fig.2 The designed racetrack model coil.

Table1 Specifications of the model magnet.

コイル内周形状	400mmx200mm
コイル外周形状	680mmx480mm
常温ボア形状	90mmx50mm
中心磁場	3T
運転電流/温度	260A (20K)
使用冷凍機	4K/1.5W(RDK-415D)

# スパイラルセクタ FFAG 加速器における巻線精度が磁場均一度に与える影響

## Influence of winding accuracy on the field quality in spiral sector FFAG accelerator

高山 茂貴, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 来栖 努, 石井 祐介(東芝); 雨宮 尚之(京大); 荻津 透(KEK)  
 TAKAYAMA Shigeki, KOTANAGI Kei, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, ISHII Yusuke (Toshiba);  
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)  
 E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

JST 国プロ S イノベのプログラムの一環で、重粒子線がん治療装置等の小型・高効率・高性能を目指し、非線形な固定磁場のみで強い収束力が得られるスパイラルセクタ FFAG(Fixed Field Alternating Gradient: 固定磁場強収束)加速器へのイットリウム系高温超電導(YBCO)の適用を検討している[1]。正確に粒子を加速するために高い磁場均一度が必要となり、そのために超電導コイルには高い巻線精度が要求される。これまでに様々な複雑形状のコイル試作を行ってきたが[2]-[4]、ここでは超電導コイルの試作及び巻線精度を測定した結果と、本巻線精度が磁場均一度に与える影響について検討した結果について報告する。

### 2. コイル試作・巻線精度測定

試作したコイル諸元を Table 1 に、外観を Fig.1 に示す。本コイルは上記プログラムにおいて試作する予定のマグネットの一部であり、本マグネットは実機を約 1/4 に縮小したモデルマグネットとなっている。巻線には幅 4mm、厚さ 0.1mm の YBCO 線材を適用している。試作したコイルにおいて線材幅方向巻線精度を測定することを目的に、2 次元レーザー変位計を用い、コイル端面の凹凸を測定した。コイルの直線部にて測定した結果を Fig.2 に示す。平均高さ 4.059mm、標準偏差 0.035mm となり、凹凸は peak to peak で 0.197mm であった。

### 3. 巻線精度が磁場分布へ与える影響

上記幅方向のばらつきがモデルマグネット試作時に発生した場合を想定し、線材幅にばらつきを加えた磁場解析を実施した。その結果を Fig.3 に、またばらつきがない場合と比較した結果を Fig.4 に示す。計算ではターン毎に異なる幅を適用し、それぞれ標準偏差 0.025、0.05、0.1mm とした。その結果、非線形な磁場分布を発生している領域 ( $0.85\text{m} < r < 1.05\text{m}$ ) において磁場均一度  $\Delta B/B$  は  $1 \times 10^{-4}$  以下と十分小さいことが明らかとなった。

### 4. まとめ

実際に試作したコイルでの巻線精度を測定し、それをモデルマグネットに適用し、磁場解析を実施した結果、磁場均一度  $\Delta B/B$  は  $1 \times 10^{-4}$  以下と十分小さいことが明らかとなった。

### 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)」の支援によって行われた。

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Phys. C, Supercond. Vol. 482 (2012) p.74
2. K. Koyanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22 Issue 3 (2012) p.4101904
3. K. Koyanagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.23 Issue 3 (2012) p.4100404
4. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.78

Table 1 Specifications of the YBCO coil

Coil height	4 mm
Coil width	295 mm
Coil depth	76 mm
Number of turns	20
Tape length	15 m

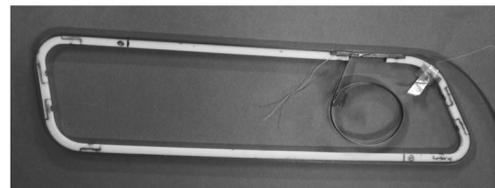


Fig.1 Outer view of the YBCO coil

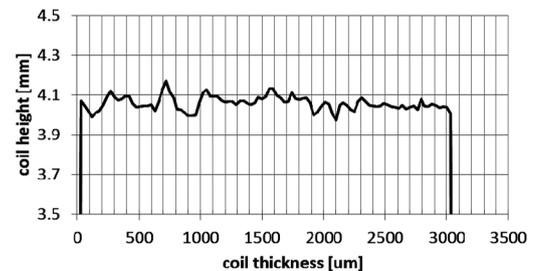


Fig.2 Distribution of the measured coil height

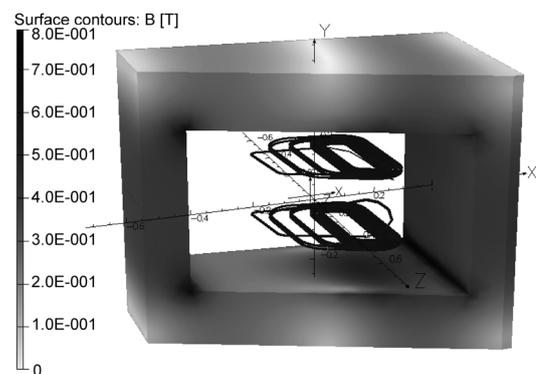


Fig.3 Result of the magnetic field calculation

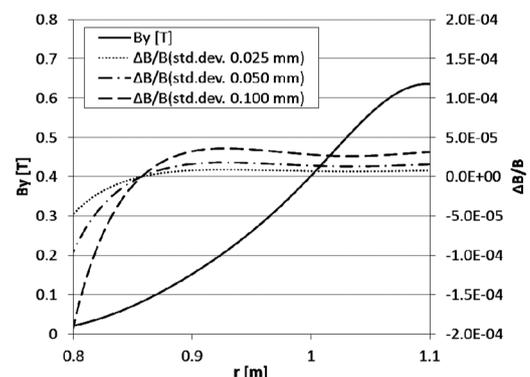


Fig.4 Uniformity of the magnetic field

# 回転ガンジー用高温超電導電磁石における高磁場均一度のための磁場設計

## Design of field quality in HTS magnets for a rotating gantry

高山 茂貴, 小柳 圭, 田崎 賢司, 来栖 努, 石井 祐介(東芝); 雨宮 尚之(京大); 荻津 透(KEK); 野田 耕司(放医研)  
 TAKAYAMA Shigeki, KOTANAGI Kei, TASAKI Kenji, KURUSU Tsutomu, ISHII Yusuke (Toshiba); AMEMIYA Naoyuki  
 (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); NODA Koji (NIRS)  
 E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

回転ガンジーとは、患者の周囲 360 度から粒子線を照射することを可能にする照射装置であって、医療関係者からのニーズは高い。一方で重粒子線を用いたがん治療装置の場合、本装置が非常に大型になってしまうために普及が進んでいない。そこで回転ガンジーの小型・軽量化を目的に高温超電導の適用を METI 国プロ「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」において検討している[1]-[3]。精度良く重粒子線を患者に照射するために、回転ガンジー用電磁石には高い磁場均一度が要求される。ここでは高磁場均一度を達成するためにに行った設計検討の結果に関して報告する。

### 2. マグネット設計・積分磁場均一度の評価

これまでの検討によって中心断面での相対磁場均一度が有効磁場領域±20mm において 0.0275%と均一な磁場を与えるマグネットの設計を得ている[2]。マグネットの諸元を Table.1 に示す。一方で、重粒子線はコイル長手方向にわたって通過するため、磁場も長手方向全体にわたって均一でなければならない。ここではコイル長手方向に磁場を積分し、その積分値の均一度で評価を行った。前述の設計における中心断面での積分磁場均一度( $\Delta BL/BL$ )を Fig.1 に示す。積分磁場均一度は有効磁場領域±20 mm の範囲で最大 0.971%と目標である 0.1%を達成出来ていない。長手方向中心軸に沿った多極成分分布を Fig.2 に示す。コイルエンドがある 0.3m 付近から負の六極成分が強く現れており、これが積分磁場均一度を低下させている要因と考えられる。

### 3. 積分磁場均一度の最適化

コイルエンドの一部を延長することで、コイルエンドにて発生している負の六極成分を低減することを検討した。コイルエンド最適化前後のコイル外観を Fig.3 に、延長した場合の積分磁場均一度を Fig.1,2,4 に示す。エンドの長さを延長するほど積分磁場均一度は改善し、80mm 延長することで、0.02%と目標値である 0.1%以下の達成を確認した。

### 4. まとめ

重粒子線がん治療装置用回転ガンジーへの高温超電導の適用を想定し、積分磁場均一度の改善を検討した。コイルエンドの一部を延長することで、積分磁場均一度が 0.02%と目標値である 0.1%以下を達成した。

### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<粒子線ビーム経路部・照射部用コイル>」を通じて実施された。

### 参考文献

1. K. Tasaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.75
2. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.76
3. K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.77

Table.1 Specifications of the superconducting magnet

Bending radius [m]	1.15
Bending angle [deg.]	18
Reference radius [mm]	±20
Inner radius of the coil [mm]	60
Number of turns	50

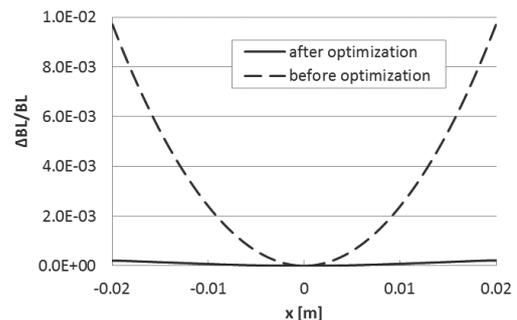


Fig.1 Uniformity of the BL products

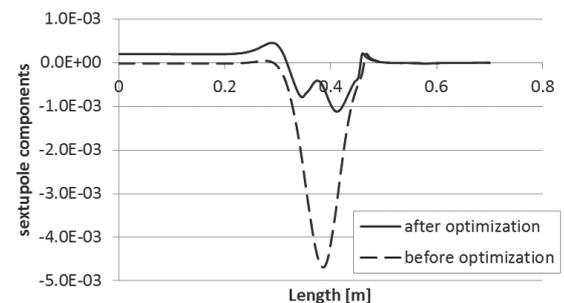


Fig.2 Distribution of the sextupole components

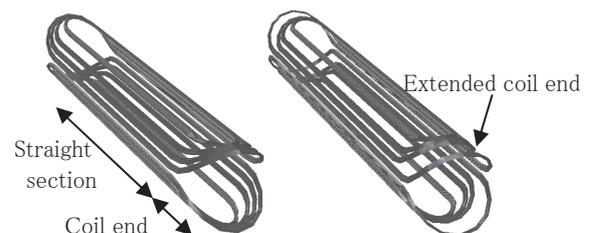


Fig.3 Outer view of superconducting coils (left: before optimization, right: after optimization)

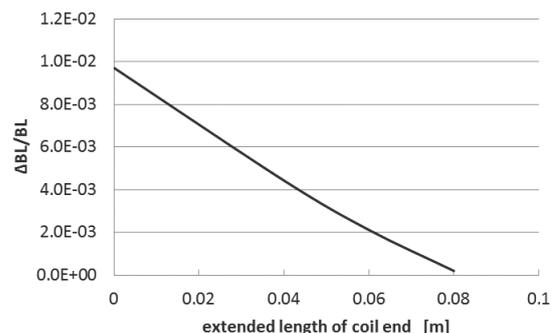


Fig.4 Extended length dependence of the BL products

# 伝導冷却された薄膜線材レーストラックコイル 4 個からなる 2 極マグネットの多極磁場成分測定

## Magnetic field harmonics measurements of conduction-cooled dipole magnet consisting of four race-track coils wound with coated conductors

佐野 拓也, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 荻津 透(KEK); 小柳 圭(東芝), 来栖 努(東芝)

SANO Takuya, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);

OGITSU Toru (KEK); KOYANAGI Kei, KURUSU Tsutomu (Toshiba)

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

### 1. はじめに

加速器用マグネットへの薄膜高温超伝導線材の適用を目指した研究開発を進めている[1]-[2]. 加速器用マグネットでは高い磁場精度が必要であるが, テープ形状をしている高温超伝導線材では, 線材内に生じる線材磁化(遮蔽電流)が発生磁場の精度を乱す可能性がある. 今回は, RE 系薄膜線材で作成したレーストラックコイル 4 個で構成される 2 極マグネットの磁場測定を伝導冷却下で行い, 過去の測定と比較しながら線材磁化が多極磁場成分に与える影響について検討した.

### 2. 実験方法

測定対象のマグネットは幅 4.0 mm, 厚さ 0.095 mm の REBCO 薄膜超伝導線材(SuperPower 社製)で巻いたレーストラックコイルを 2 個重ね, これを 56.2 mm の距離を置いて 2 個配置したものである(RTC4-SP). コイルの直線部の外側の幅, 内側の幅, ターン数はそれぞれ 134 mm, 96 mm, 108 turns/coil である. このマグネットを GM 冷凍機で伝導冷却し, 回転ピックアップコイル法を用いて多極磁場成分の測定を行った.

### 3. 結果

RTC4-SP を用いて, 20 K で 200 A を 1 時間通電したときの 2 極, 6 極磁場成分の時間変化を Fig. 1 に示す. ここで, Fig. 1 の縦軸は一樣電流分布のときの 2 極磁場成分の理論値を基準として発生磁場を規格化した値である. 200 A 到達後 1 時間で, 2 極磁場成分, 6 極磁場成分のドリフトの大きさはそれぞれ,  $6.5 \times 10^{-4}$ ,  $0.6 \times 10^{-4}$  となった. 2 極磁場成分と 6 極磁場成分でドリフトの大きさが異なるが, これは, 線材磁化が 2 極磁場成分と 6 極磁場成分に対して異なる影響を与えることを示している.

RTC4-SP と過去に液体窒素浸漬冷却下で測定した RTC4-F(フジクラ製の薄膜線材を用いて作成したレーストラックコイル 4 個からなる 2 極マグネット, 緒元は Table 1 参照)を用いて, 一定時間, 一定電流通電後の残留磁場の時間変化をそれぞれ Fig. 2 に示す. 両マグネットの結果を比較すると, 2 極磁場成分, 6 極磁場成分のドリフトの大きさは, それぞれ RTC4-SP で  $0.8 \times 10^{-4}$ ,  $0.1 \times 10^{-4}$ , RTC4-F で  $1.4 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-4}$  となり, RTC4-F のほうが大きい. 運転温度が高くなることで電界-電流密度特性の傾きが大きくなり, 磁化電流の時間変化が大きくなっていることが, この一因であると考えられるが, 運転電流・磁場等も異なるので, 詳細の検討は今後の課題である.

### 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)」の支援によって行われた.

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.20, no. 3 (2010), pp. 364-367
2. N. Amemiya, et al.: Physica C, Supercond., vol.482 (2012), pp. 74-79

Table 1 Specifications of magnets

	Outer width of straight parts	Inner width of straight parts	Number of turn
RTC4-SP	134 mm	96 mm	108 turns/coil
RTC4-F	152.8 mm	96 mm	83 turns/coil

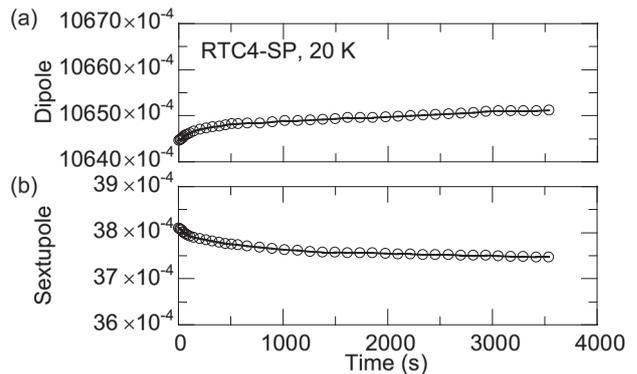


Fig. 1 Temporal evolution of multipole coefficients at 20 K using RTC4-SP: (a) dipole component (b) sextupole component.

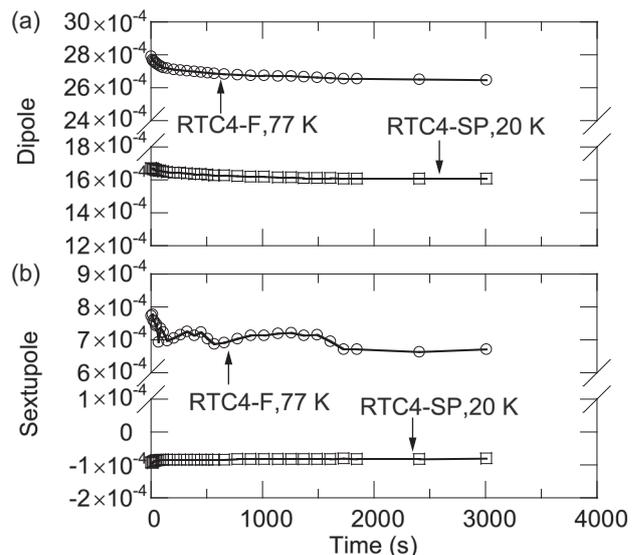


Fig. 2 Temporal evolution of the multipole coefficients of the remnant magnetic field: (a) dipole component (b) sextupole component.

# 10 MW 超級風車の調査研究として高温超電導発電機用マグネットの研究開発 Development of HTS Magnet on Feasibility Study for 10 MW class Wind Power Generator

向山 晋一, 松岡 太郎, 天野 俊昭, 古川 真(古河電工); 山崎 裕文, 古瀬 充穂, 淵野 修一郎, 岡野 眞(産総研);  
玉田 紀治(前川製作所); 福井 聡(新潟大学); 塚本 修己(上智大学); 大崎 博之(東京大学)

MUKOYAMA Shinichi, MATSUOKA Taro, AMANO Toshiaki, FURUKAWA Makoto (Furukawa Electric);  
YAMAZAKI Hirofumi, FURUSE Mitsuho, FUCHINO Syuichiro, OKANO Makoto (AIST); TAMADA Noriharu (Mayekawa);  
FUKUI Satoshi (Nigata Univ.); TSUKAMOTO Osami (Sophia Univ.); OSAKI Hiroyuki (Tokyo Univ.)

E-Mail: mukoyama@ch.furukawa.co.jp

## 1. はじめに

次世代の風力発電に関しては、単機発電容量を増大させ発電コストの低減をもたらす風車の大型化と洋上への拡大が大きなトレンドとなっている。特に、10MW 超級の大型風力発電機は洋上設置が検討されており、超電導を用いた発電機は小型・軽量が実現でき建設コストの低減等が期待されている。我々は、将来の10MW 高温超電導風力発電機の実現性の調査を進めるなかで、ローターに鉄心を用いた超電導マグネットを適用したダイレクトドライブ発電機の開発を進めている。

## 2. 発電機用超電導マグネットの検討

高電流密度・高磁界を特長とする REBCO 超電導線材を利用することで小型・軽量の大容量発電機を製作できると考えている。当初の設計検討では空心型の超電導コイルによるもので進め、大幅な重量低減の設計結果が得られた。一方で、マグネットに高温超電導線材を大量に使用する必要があり、その磁場も高く開発ハードルは高かった。今回の開発においては、回転子のみを超電導として、さらに鉄心を利用することで、少ない超電導線に必要な磁場を形成する設計を試みた。さらに、超電導コイルをクライオスタットに収納するコイルモジュール方式を採用した。

## 3. 解析方法と結果

鉄心と超電導コイルを組み合わせた回転子構造での磁場と、電磁力の解析を、電磁界解析ソフト(ANSYS)を用いて行った。図1には、対象とした発電機の界磁コイルと電機子コイルの解析モデル(3相, 48極, 10rpm)を示す。電機子に流れる電流  $I_{u,v,w}$  は、ローターの回転角度  $\theta_{rotor}$ 、 $I_0$ : 定格電流、 $n$ : 各スロットに設ける導体数、 $\delta$ : 初期位置からのずれとしたばあい、式1で与えられる。

$$I_{u,v,w} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot n \cdot \cos\left(24 \cdot \theta_{rotor} + \delta + \frac{2(k-1)}{3}\pi\right) \quad (1)$$

ここに、電機子巻線に定格の3相交流電流を通電し、定格回転で回転子が回転している時のU相ピーク時の磁場分布を考えて、そのときに電機子磁束ピーク位置とローターのd軸のなす角度を変化させた時の電磁力を解析した。その結果を図2に示す。さらにコイルおよび鉄心にかかるトルクから、発電量=トルク×角速度×極数で求めた。その結果を、力率を変化させた発電量として図3に示す。

## 4. まとめ

電磁場解析の結果から、現実的なコイル設計(線材量、磁場、電磁力)において、発電量10MWを得ることができた。

本研究は NEDO の風力発電高度実用化研究開発事業の中で「10MW 超級風車の調査研究」で実施した。

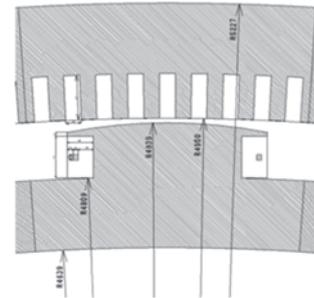


Fig. 1 Analysis model.

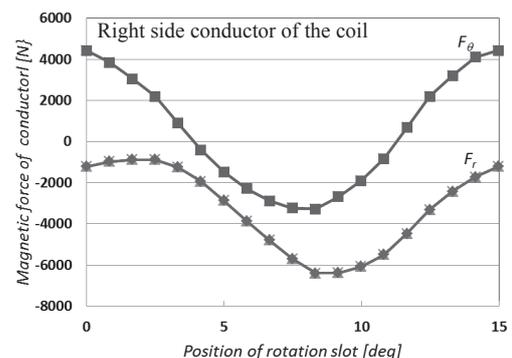
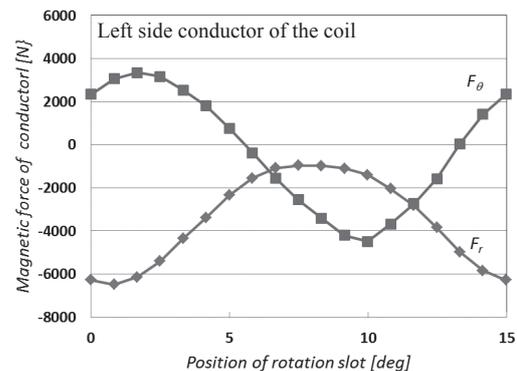


Fig. 2 Magnetic force depending on rotor position

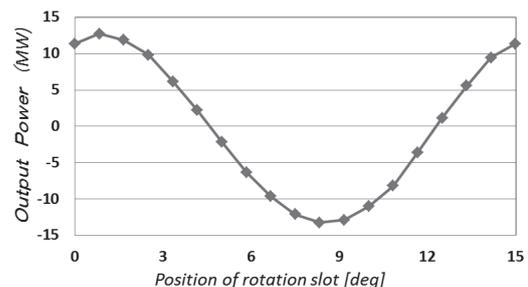


Fig. 3 Generated Power depending on rotor position.

# 10MW 超級高温超電導風力発電機の電気設計と電磁特性解析

## Electric Design and Electro-magnetic Analysis of HTS Synchronous Generator for Over 10MW-class Wind Turbine

福井 聡, 伏木 貴太, 小川 純, 佐藤 孝雄 (新潟大); 向山 晋一, 松岡 太郎, 天野 俊昭, 古川 真 (古河電工); 山崎 裕文, 古瀬 充穂, 淵野 修一郎, 岡野 眞 (産総研)

FUKUI Satoshi, FUSHIKI Kanta, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University); MUKOYAMA Shinichi, MATSUOKA Taro, AMANO Toshiaki, FURUKAWA Makoto (Furukawa Electric Co. Ltd.); YAMASAKI Hirofumi, FURUSE Mitsuho, FUCHINO Syuichiro, OKANO Makoto (AIST)  
E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

再生可能エネルギーの中で、風力発電は、発電コストが安価で設備利用率が大きいという優位性を持つことから、世界の風力発電産業は高い成長率で成長している。風力発電ではスケールメリットの効果が大きく、特に洋上風力の大規模化が進められ、容量10MW超が次世代洋上風力のターゲットとされている。本研究では、10MW超級鉄心利用型高温超電導同期発電機の電気設計を行い、発電機特性・機器パラメータ及び高温超電導界磁巻線の電磁特性について評価を行った。

### 2. 電気設計

必要線材長を少なくするためには、現用機と同様に鉄心を用いた設計が必要になる。本研究では、容量 10MVA/電圧 5kV を想定し、回転数は 10rpm, 極数は 48 とする。現用大型機の装荷配分定数を参考に、磁気装荷を 0.51 Wb とする。YBCO 線材を 30-40K で使用すること想定し、界磁巻線の電流密度は余裕をもって  $3.33 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  とする。鉄心内及び空隙の磁束密度を 1.5 T 及び 1.0 T とする。まず、これらの条件から断面寸法の概略値を決め、さらに、FEM 静磁界解析を行い、鉄心内・空隙の磁束密度及び 1 極当たりの磁束量が設計値通りになるように各部の寸法を調整する。次に、1 スロット導体数を仮決めし、定格回転状態での無負荷電圧及び電機子を定格 3 相電流源駆動した場合の発電電力を FEM 解析から評価して、想定した力率 (0.95) で 10MW の発電容量が得られるように導体数を決定する。得られた諸元を Tab. 1 に、1 極分の断面構造を Fig. 1 に示す。

### 3. 特性解析

Fig. 2 に定格回転状態で電機子を定格 3 相電流源駆動した場合の出力曲線を示す。力率 0.95 で 10.4MW の出力が得られていることがわかる。出力曲線から算出した同期リアクタンスは  $0.367 \Omega$  となった。力率 0.95/10.4MW 出力時に HTS 界磁巻線に加わる磁界分布の時間変動を評価した。界磁巻線内部で HTS 線材に加わる垂直及び平行磁界成分の最も大きくなる点での磁界の時間波形の例を Fig. 3 に示す。界磁巻線に印加されるスロット脈動による

変動磁界成分は、ピーク値が約 2.2mT/周波数が約 20-25Hz であることがわかった。従って、定常発電時では変動磁界成分により界磁巻線に発生する交流損失は問題ないレベルと考えられる。今後、風車からのトルク変動を考慮した解析を行い、詳細に検討を行う。

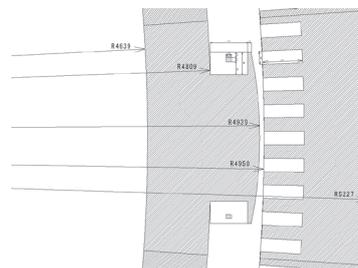


Fig.1 Schematic illustrations of cross section.

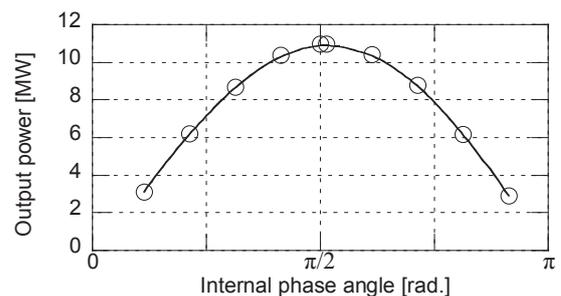


Fig. 2 Power curve of designed generator

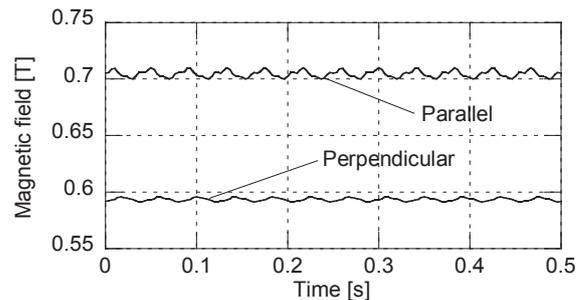


Fig. 3 Time varying magnetic field in HTS field winding

Tab.1 Design Specifications of Over 10MW Wind Turbine Generator

Basic parameters		HTS field winding		Generator characteristics	
Rated output power [MW]	10	Current density [A/m <sup>2</sup> ]	$3.33 \times 10^8$	No-load voltage [Vrms]	3147
Rated voltage [kV]	5	Rated current [A]	160	Output power at cosθ=0.95 [MW]	10.4
Rated current [A]	1155	Number of turns	179	Synchronous reactance [Ω]	0.367
Rated speed [rpm]	10	Inductance per coil [H]	1.79	Iron loss [kW]	35.0
Frequency [Hz]	4	EMF per pole [kA/pole]	28.6	Armature copper loss [kW]	139
Pole number	48	Length of HTS tape [km]	24.1		
Core magnetic field [T]	1.5	Armature winding			
Gap magnetic field [T]	1.0	Slot number per phase and per pole	3		
Magnetic flux per pole [Wb]	0.51	Conductor number per slot	5		
Outer diameter [m]	10.45	Current density of Cu [A/mm <sup>2</sup> ]	3		
Effective length [m]	1	Slot size [mm]×[mm]	36×107		
Weight [t]	161	Packing factor	0.5		

# 大容量風力発電機の主要性能に及ぼす回転速度の影響

Influence of rotating speed on main performance of large-scale wind turbine generators

牧 直樹, 許 媛媛, 和泉 充 (東京海洋大学)

MAKI Naoki, XU Yuanyuan, IZUMI Mitsuru (TUMST)

E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

## 1. はじめに

大容量洋上風力発電システムの実用化が活発化しており、それに適した突極型高温超電導 (HTS) 発電機の設計研究を進めている[1,2]。今回、10 MW の HTS 突極界磁発電機のダイレクトドライブと一段増速機の使用を考慮して、回転速度が主要性能に及ぼす影響について検討し、現用型の銅界磁機、永久磁石 (PM) 界磁機と比較検討した結果を報告する。

## 2. 発電機重量に及ぼす回転速度の影響

10MW の HTS 突極界磁発電機を対象に、開発した設計プログラム[1]を用いて、発電機パラメータが主要性能に及ぼす影響を検討し、最適化を図った。

HTS 機は、多極磁性界磁極に巻装したレーストラック形状の HTS 界磁巻線を持つ磁性回転子に、磁性ティース間のスロットに銅電機子巻線を巻装した現用固定子を組合せたレトロフィット機である。現用銅界磁発電機の場合には HTS コイルに代えて通電電流密度が二桁小さい銅コイルを用いる。また、PM 界磁発電機の電気設計では、PM の厚さと平均経験磁場 B を想定して三次元磁場解析を行い、所要起磁力が PM 保持力と一致する点が運転時の B となる。この B に対応する PM 減磁特性上の減磁力を H とすれば、(B,H) が動作点となる。

図 1 は HTS 機の最も重要な性能である発電機重量に及ぼす回転速度の影響を示す。発電機重量は回転速度にほぼ反比例して減少しており、その影響は大きい。また、発電機重量は固定子外径の  $1/2 \sim 1$  乗に反比例して減少しており、その影響も大きい。なお、銅界磁発電機と PM 界磁発電機の場合にも、ほぼ同様の回転速度と固定子外径の影響が見られる。

## 3. HTS 機と現用銅機、PM 機の電気設計と性能比較

Table 1、Table 2 は有効出力 10MW、回転速度  $8 \text{ min}^{-1}$  と一段増速機を用いて 10 倍に増速した  $80 \text{ min}^{-1}$  の HTS 機、現用の銅界磁機並びに PM 界磁機の主な電気設計結果を示すものであり、次の性能と特徴を有することが分かる。なお、現用型機では界磁起磁力が小さいので鉄心を未飽和領域で使用するので、HTS 機では界磁起磁力を大きく出るので回転子鉄心を 2 T 程度の磁気飽和状態を使用する。

- PM 機の空隙磁束密度は現用型機の 0.6 倍に減少するのに対して、HTS 機は 1.4 倍に増大して望ましい。
- PM 部重量は銅界磁巻線部重量の約 0.8 倍に減少するが、HTS 界磁巻線を内蔵するクライオスタットの重量は現用型機の 0.03 倍と大幅に低減する。
- PM 発電機重量は銅界磁機の約 3/4 に減少するのに対して、HTS 機は約 1/2 に減少し重量低減効果は大きい。
- 冷凍機動力を含めた発電機効率、PM 機で現用型機とほぼ等しく、HTS 機で 0.5~0.7% 向上する。
- 一段増速機を使用して回転速度を  $8 \rightarrow 80 \text{ min}^{-1}$  に増大させると、発電機重量は約 1/3 に減少し、発電機効率は約 2.5% 向上する。しかし、増速機重量は 90 ton 程度と推定されるので、総合発電機重量はほぼ同じと思われる。

### 参考文献

1. Y. Xu, N. Maki, and M. Izumi: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.24 (2014)
2. N. Maki, Y. Xu and M. Izumi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.90

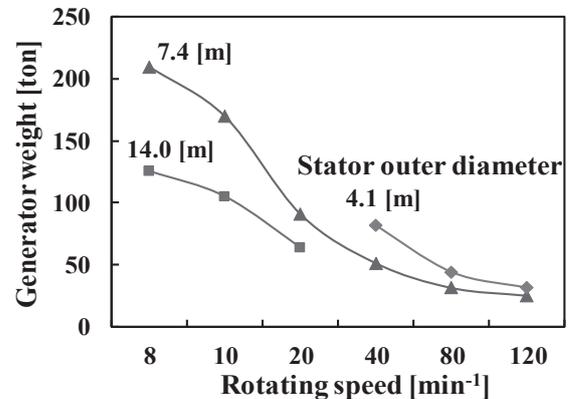


Fig.1 Influence of rotating speed on HTS generator weight

Table 1 Main design results of HTS, PM and copper generators at  $8 \text{ min}^{-1}$  rotating speed (10 MW, 3.3 kV)

	Cu	NdFeB	ReBCO
Field conductor	Cu	NdFeB	ReBCO
Operating temperature [K]	348	323	68
Number of poles	120	200	96
Pole pitch [mm]	350	219	438
Frequency [Hz]	8	13.3	6.4
Stator outer diameter D [m]	13.9	14.3	14.1
Stator length L [m]	0.78	0.85	0.38
Magnetic flux density in air gap [T]	0.82	0.48 (0.6)	1.13 (1.4)
Magnetomotive force of field winding [kA/pole]	12.4	31.3*	30.3
Field part weight [ton]	12.8	9.7 (0.76)	0.4 (0.03)
Generator weight [ton]	224	166 (0.74)	126 (0.56)
Armature copper loss [kW]	256	413	320
Field copper loss [kW]	172	0	1
Refrigerator power [kW]	0	0	46
Generator efficiency [%]	94.8	94.7 (-0.1)	95.5 (0.7)

\* PM 厚さは 35 mm、PM の動作点は 0.736 [T]、355 [kA/m]

(注)括弧内の数値は銅界磁機に対する比率 (効率差は差) を示す

Table 2 Main design results of HTS, PM and copper generators at  $80 \text{ min}^{-1}$  rotating speed (10 MW, 3.3 kV)

	Cu	NdFeB	ReBCO
Field conductor	Cu	NdFeB	ReBCO
Operating temperature [K]	348	323	68
Number of poles	30	52	24
Pole pitch [mm]	350	219	438
Frequency [Hz]	20	34.7	16
Stator outer diameter D [m]	3.86	4.01	4.06
Stator length L [m]	1.24	1.21	0.60
Magnetic flux density in air gap [T]	0.83	0.50 (0.6)	1.15 (1.4)
Magnetomotive force of field winding [kA/pole]	12.3	31.3*	24.2
Field part weight [ton]	4.5	3.6 (0.80)	0.13 (0.03)
Generator weight [ton]	79	56 (0.71)	44 (0.56)
Armature copper loss [kW]	79	139	97
Field copper loss [kW]	89	0	1
Refrigerator power [kW]	0	0	16
Generator efficiency [%]	97.3	97.1 (-0.2)	97.8 (0.5)

\* PM 厚さは 35 mm、PM の動作点は 0.763 [T]、335 [kA/m]

(注)括弧内の数値は銅界磁機に対する比率 (効率差は差) を示す

# IPM モータ回転子に埋め込まれた永久磁石の HTS バルク磁石による新しい着磁方法

## Novel magnetizing method for permanent magnets embedded in the rotor of IPM motor with use of HTS bulk magnet

岡 徹雄, 渡邊 大史, 玄海 亨, 川崎 信隆, 福井 聡, 小川 純, 佐藤 孝雄, 中野 智仁(新潟大学); 横山 和哉(足利工大)  
 OKA Tetsuo, WATANABE Hiroshi, GENKAI Toru, KAWASAKI Nobutaka, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATOH Takao,  
 NAKANO Tomohito (Niigata University); YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Institute of Technology)  
 E-mail: okat@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類磁石の磁場捕捉性能の向上につれてその着磁に必要なパルス磁場が強大となり、設備の大型化や工程のコスト高が強いられている。モータ回転子の設計には着磁法への十分な配慮が必要であり、将来、設計の自由度が制限される可能性がある。このため HTS バルク磁石(以後バルク)の発生する静磁場を用いて、DC ブラシレスモータの回転子に組み込まれた希土類系永久磁石を着磁する新たな手法を考案した。着磁実験と数値解析手法を通じて、モータ設計の自由度を向上する可能性をもつ新たな試みとして提案する。

### 2. 実験方法

実験試料はハイブリッドカーのエアコン圧縮機に使われている DC ブラシレスモータを分解して使用した。Fig. 1 にその様子を示す。20×26×2 mm<sup>3</sup>の形状の Nd 系希土類磁石が6極埋め込まれている。製品はパルス着磁によって回転子外部から着磁されている。これを熱消磁した後、バルクの発生する3Tの静磁場内で磁場に曝して着磁するが、実験では IPM モータの回転子の表面に磁極を走査した。着磁後はホールセンサ(F. W. Bell)によって回転子の法線方向の磁場分布を測定した。次にバルク磁石と回転子、永久磁石の位置関係から数値解析(J-mag)を行い、磁場印加の状況と着磁後の磁場分布を評価した。

### 3. 結果と考察

バルクの磁場を回転子に対してその外周面内を軸方向に走査することによって着磁し、その磁化性能を評価した。Fig. 2 にこの様子を示す。3極の異極に着磁された永久磁石の磁場分布は互い違いに、パルス着磁による捕捉磁場分布の形状とよく一致した。この結果、永久磁石のもつ材料性能一杯に達する十分な着磁性能と、回転子表面の製品性能と同等の磁場分布を得た。

バルクの磁場をトロイダルコイルの電流配置によりその特徴的な円錐型の磁場分布を再現し、これを回転子表面にその軸方向に走査した。6極の磁石配置において、回転子に侵入する磁場は着磁対象の磁石のみを着磁し、隣接する磁石への悪影響はなかった。一方、4極あるいは8極の磁石配置では、印加磁場の方向によって、着磁方向に逆向きに印加される磁場成分があり、これに着磁性能が影響されることが分かった。これには永久磁石材料の結晶磁気異方性と結晶配向性に起因する異方的な着磁挙動が影響することが明らかとなった。これらの結果は、回転機に関する設計の自由度がこの着磁方法によって向上できる可能性を示している。

### 4. 結論

バルクの発生する磁場を回転子表面に走査することにより、表面から3.5mmの位置に埋め込まれた希土類磁石を、製品に施されたパルス着磁による性能とほぼ同一の性能まで完全に着磁することができた。バルクの磁場分布を模擬した数値解析により、回転子と永久磁石の磁化挙動を評価し、6極

の磁石配置で健全な磁場分布を得ることができ、IPM 回転子が着磁できた。

### 参考文献

1. T. Oka, et al.: IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No. 15, Jan. 2011, pp. 1-4
2. 川崎信隆ら、低温工学、47巻9号2012年、568-575頁

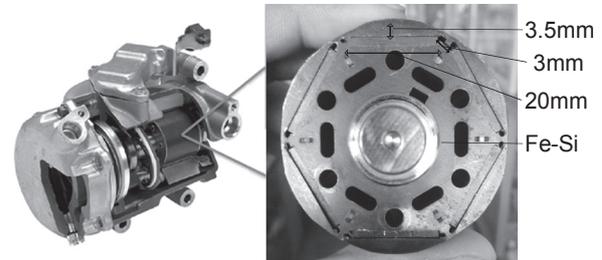


Fig.1 Structure of the rotor of compressor motor

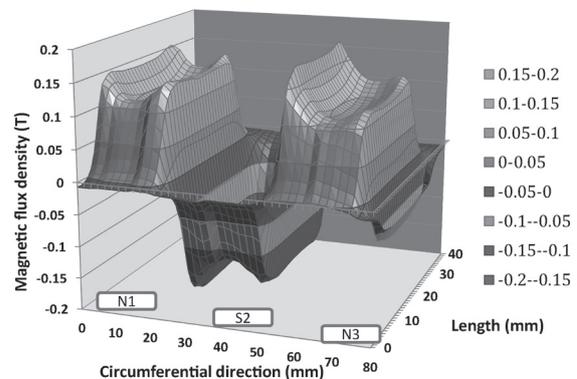


Fig.2 Activated magnetic field distribution along the surface

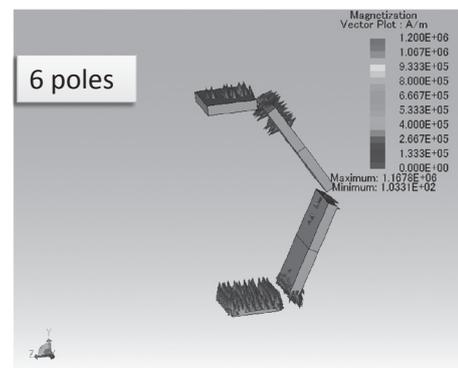


Fig.3 Numerical analyzed distribution of resultant magnetization after scanning HTS poles

# 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルにおける励磁遅れと励磁ロス Charging delay and energy loss for uninsulated REBCO layer wound coils

柳澤 杏子, 許 一, 名和 雅斗(千葉大); 柳澤 吉紀(理研); 中込 秀樹(千葉大); 前田 秀明(理研)  
 YANAGISAWA Kyoko, YI Xu, NAWA Masato (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori(RIKEN);  
 NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)  
 E-mail: kyoko.yanagisawa@riken.jp

## 1. はじめに

高電流密度 REBCO コイルでは、熱暴走からの保護が重要な課題である。ターン間の絶縁を使用しない非絶縁巻線法は、REBCO コイルの熱暴走からの保護技術として使用できる可能性がある。しかし、非絶縁コイル特有の特性抵抗(電源から見た巻線の有効抵抗)が種々の問題を生む。本研究では、(1)非絶縁レイヤー巻 REBCO コイルによる実験と回路モデルにより、励磁遅れ・特性時定数[1]を定量化し、(2)実用レベルの非絶縁レイヤー巻コイルの実用上の課題を明らかにした。

## 2. 実験方法

SuperPower 社製の REBCO 線材(SCS4050, 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm, 77 K での臨界電流 90 A, 線材総長 22 m)を使用して、内径 30 mm、外径 33.6 mm、長さ~60 mm、レイヤー数 18、総ターン数 216 の非絶縁レイヤー巻コイルを製作した(Coil-A, Fig.1(a)参照)。一定の張力 0.364 kg (6.2 kPa)をかけながら巻いた。コイルの臨界電流は 46.4A、自己インダクタンス  $L$  は 0.67 mH である。コイル中心部にはホール素子を設置した。コイルを液体窒素中に設置し、10 A まで励磁して電流遮断試験を行い、磁場減衰の時定数(すなわち特性時定数  $\tau$ )を測定した。その後、コイルの巻き戻し[1]を行い、レイヤー数 12、6 の状態でそれぞれ同様の実験を行った。

さらに、フジクラ社製の REBCO 線材(FYSC-SCH05, 幅 5mm, 厚み 0.12 mm)を用いた内径 79.1 mm、外径 81.2 mm、長さ 100.71 mm、レイヤー数 8、総ターン数 151、使用線材長約 40 m、自己インダクタンス  $L$  1.1 mH の実用レベルのコイル径の非絶縁レイヤー巻コイル(Coil-B)についても液体窒素中で励磁と電流遮断を行い、磁場減衰時定数を測定した。

## 3. 実験結果

Fig.2にCoil-A ( $L = 0.67$  mH)の磁場減衰時定数とレイヤー数の関係を白抜き三角( $\Delta$ )で示す。時定数はレイヤー数が少ないほど小さい。これはコイルの自己インダクタンスが小さくなるためである。非絶縁レイヤー巻REBCOコイルの特性抵抗  $R_c$ (非絶縁コイル内部のマクロな抵抗)を Fig. 1(b)に示す回路モデルで表すと、 $R_c$  は以下の関係を示す( $R_p$ ,  $N_L$ ,  $N_p$ ,  $w$ は Fig.1(b)参照)。

$$R_c = R_p \cdot N_L \cdot \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{0.27}{\log_{10}(N_L)} \right\} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{(N_L-1)}{0.9}} \right\} \right] \quad (1)$$

Eq.(1)はコイルの特性抵抗をレイヤー同士の接触抵抗の合成と考えて実験的に得たものである。Eq.(1)より見積もられる時定数を Fig.2 に白抜き丸( $\circ$ )で示す。レイヤー数 12、18 の場合に良く一致している。すなわち、Fig.1(b)のモデルにより磁石の巻線特性抵抗  $R_c$  と特性回路時定数  $\tau (= L/R_c)$  を求めることができる。

実用レベルのコイル径を持つ Coil-B ( $L = 1.1$  mH)の励磁・電源遮断の結果を Fig.3 に示す。得られた磁場減衰時定数  $\tau$  は 1500 s であった。ところが、上記の Eq.(1)より見積もられる特性時定数  $\tau$  は 48 s であり、実験結果のほうが約 30 倍も大きい。この乖離の原因は明らかでない。また、電源遮断後の磁場減衰では、磁場の値がゼロにならずにマイナス極性を示した(Fig.3 参照)。これはコイル内で、実効的にマイナス方向の電流が生じていることを意味する。

## 4. 考察

非絶縁レイヤー巻コイルでは、Coil-B の様に自己インダクタンスが mH 級のコイルで、特性時定数  $\tau$  が数千秒オーダーとなる。もし、特性時定数がインダクタンスに比例すると仮定すると、NMR で使用される数 10 H のコイルでは時定数が 100 日を超える。励磁時間  $T \ll \tau$  の場合、励磁時間にわたり、特性抵抗  $R_c$  に電源から電流を供給し続けることになるので、励磁中に蓄積エネルギー分のジュール発熱がコイル内部で発生する。すなわち、励磁によって蓄積エネルギー分の液体ヘ

リウムが蒸発してしまう。これを避けるには  $T \gg \tau$  の条件で励磁を行う必要があるが、これは必ずしも現実的ではない。消磁の場合も同様である。また、電流遮断のケースでは、蓄積エネルギーを外部に取り出すことができず、全エネルギーがコイル内部でジュール熱として消費されるため、ヘリウムが蒸発し、クエンチと同様の結果になってしまう。このように、実用レベルの非絶縁コイルでは、励磁遅れやダンブ時に大きなロスが生じると非常に危険な面がある。

## 4. まとめ

非絶縁レイヤー巻 REBCO コイルの励磁遅れ・回路時定数を見積もる方法を確立した。実スケールの非絶縁コイルでは回路時定数が非常に長くなるため、励磁時・消磁時・電源遮断時に蓄積エネルギーに対応したジュール熱が発生し、ヘリウムが蒸発するため、そのままでは実用できない。

## 参考文献

1. Wang et. al., *Supercon. Sci. Technol.*, **26**, 035012, 2013.

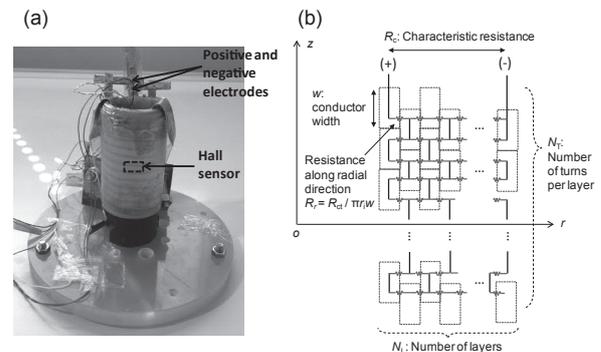


Fig.1 (a) No-insulation (NI) layer-wound REBCO coil (Coil-A,  $L = 0.67$  mH). (b) Circuit model of a characteristic resistance for a NI layer-wound REBCO coil

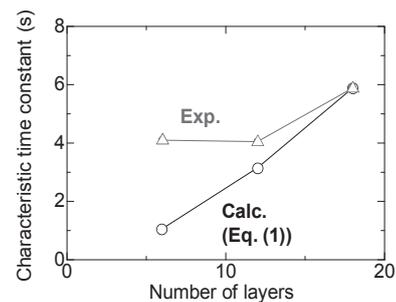


Fig.2 Characteristic time constant for Coil-A ( $L = 0.67$  mH).

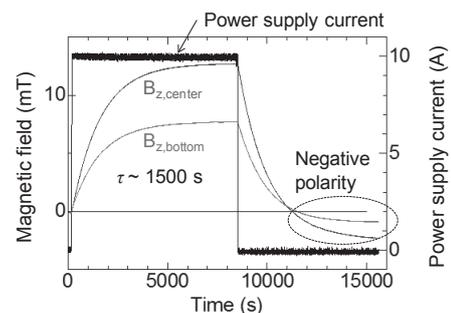


Fig.3 Magnetic field and power supply current versus time for Coil-B ( $L = 1.09$  mH).

## PEEC モデルを用いた部分絶縁 REBCO コイルの励磁特性解析・評価

## Analysis and Evaluation on Charging Behavior on Partial-Insulation REBCO Coil using PEEC model

池田 愛花, 大木 隆広, 荒川 一誠, 中田 恵理香, 南 克彦, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学);

伊藤 龍成, 野口 聡(北海道大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

IKEDA Aika, OKI Takahiro, ARAKAWA Issei, NAKADA Erika, MINAMI Katsuhiko, WANG Tao,

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); ITO Ryusei, NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.);

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc)

E-mail: atsushi@waseda.jp

## 1. はじめに

我々は, MRI や医療用加速器等の医療機器をターゲットとして 5H(高電流密度, 高熱的安定, 高磁場, 高磁場精度, 高機械強度)高温超電導コイルシステムの実現を目指してきた。その中で従来二律背反の関係となるコイルの高電流密度化と高熱的安定性を両立する可能性を有する手段として, 無絶縁(NI)コイルに注目した[1][2][3]。しかしながら, NI コイルの適用には, 励磁時の発生磁場に遅れが生じるという課題がある。この発生磁場の遅れを低減する方法として, 部分絶縁 PI (Partial-Insulation)コイルが提案されている。今回は, 部分絶縁コイルの励磁特性を, PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)を用いて解析・評価したので報告する。

## 2. 解析方法

本解析で対象としたモデルコイル[1]の諸元を Table.1 に示す。部分絶縁(PI)がコイルの振る舞いに与える影響を評価するため, 今回は PI コイル(Fig.1)について, PEEC モデル(Fig.2)を用いて電流分布解析を行った。A はコイル巻線に対して巻厚中央の 1 ターンのみ, B は巻厚の 1/3 の電極側に 180°, さらに巻厚の 2/3 の電極と逆側に 180° 絶縁を施している。A のコイルでは, 中央 1 ターンのうち絶縁が施されていない渡りの部分に電流が集中する可能性があると考え, それを軽減するために B のコイルについても検討を行った。また, C のコイルは NI コイルの層間接触抵抗率を 2,5,10 倍に変動させている。今回はコイルを周方向に 18 分割している。層間接触電気抵抗率は先行研究[1]より  $R_{ct}=70.0\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  としている。インダクタンスマトリクスは, 要素ごとにノイマンの公式より求めた。

## 3. 解析結果

PEEC 解析によるコイル内電流分布結果からは, 励磁において渡りの部分への電流集中は見られなかった。また, A,B 共に絶縁部分の電流集中は見られたが, 通電電流以上の電流が流れることはなかった。結果の一例として, 60-turn コイルに sweep rate 20A/s, 最大電流 30A で通電したときの各コイルの励磁遅れを Table.2 に示す。また, Fig.3 に A についてのコイル内電流分布の時間変化を示す。横軸はコイル内側から数えたターン番号, 縦軸を電流としている。ここでの励磁遅れは, 通電電流が最大値に達してから, 磁場  $B_z$  が最大値の 99% になるまでの時間としている。PI コイルである A,B では, NI コイルと比べ励磁遅れ時間がほとんど軽減されなかったのに対し, 全体の接触抵抗をパラメータとした C では, 励磁遅れの軽減が確認された。また, A において 2turn ごとに絶縁を入れ計 29turn の絶縁を入れたとき, C において接触抵抗を 2 倍にしたときの励磁遅れはほぼ等しくなった。よって, 今回のモデルコイルにおいて励磁遅れを軽減させる方法としては, PI である A,B コイルよりも, 全体の接触抵抗を変化させた C コイルの方が効果的であると考えられる。これを踏まえ, 今後は実験による励磁特性の検証や, 実応用を想定し多段積みした NI パンケーキコイルの特性等について検討していく。

本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)による。

Table.1 Specifications of No-Insulation REBCO pancake coils

REBCO conductor	Overall width; thickness(mm)	4.0; 0.063
	Copper stabilizer thickness( $\mu\text{m}$ )	10(5 per each side)
Coil	$I_c$ @ 77K, self-field(A)	> 100
	i.d ; o.d ; Height(mm)	60 ; 67.6 ; 4
	Turns	60
	$I_c$ @ 77K, self-field(A)	43
$B_z$ per amp at center(mT/A)		1.17
Contact surface resistivity, $R_{ct}(\mu\Omega\cdot\text{cm}^2)$		70

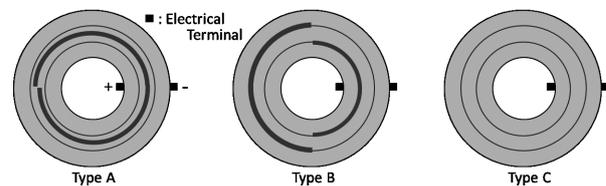


Fig.1 Partial Insulation Coil

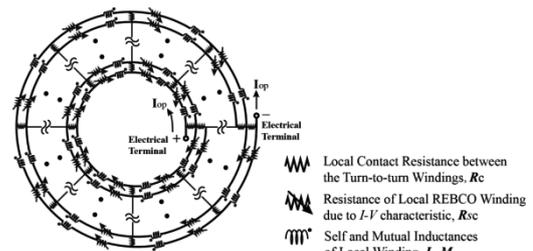


Fig.2 Partial Element Equivalent Circuit for an NI REBCO coil

Table.2 Charge delay on Partial Insulation Coil

NI	A	B	A Every 2turn	A Every 5turn	C $R_{ct}\times 2$	C $R_{ct}\times 10$
3.09s	3.07s	3.07s	1.38s	2.45s	1.35s	0.16s

$R_{ct}=70.0\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$

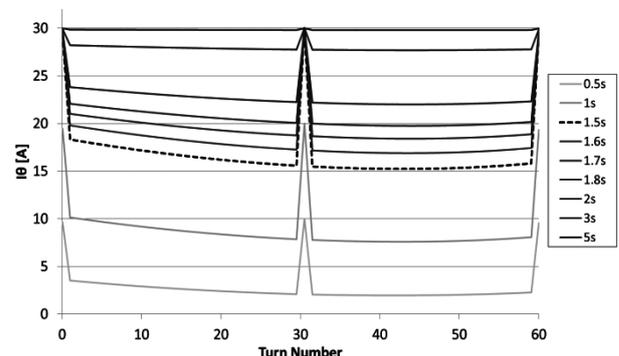


Fig.3 Results of charging simulation (Type A)

## 参考文献

- X.Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012
- S.Hahn, Y.Iwasa et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) 1592-5
- A.Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) P.64

# PEEC モデルを用いた無絶縁及び部分絶縁 REBCO コイルの遮断特性解析・評価

## Analysis and evaluation on sudden discharge behavior on No-Insulation and partial insulation REBCO coils using PEEC model

大木 隆広, 池田 愛花, 荒川 一誠, 中田 恵理香, 南 克彦, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学);  
野口 聡(北海道大学);王 旭東(KEK); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);  
OKI Takahiro, IKEDA Aika, ARAKAWA Issei, NAKADA Erika, MINAMI Katsuhiko, WANG Tao,  
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WANG Xudong (KEK); WATANABE Tomonori,  
NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc);  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁 HTS 線材を巻線したコイル(「無絶縁(NI:No-Insulation)コイル」と呼ぶ)は, 本来二律背反の関係にある高電流密度化と熱的安定性の両者を満足する設計が可能になると期待されている[1, 2]。一方でコイル内部の電磁的・熱的現象の詳細は明らかになっていない。また NI コイルは励磁・減磁時の時定数の増加が課題であり, その解決策として部分絶縁(PI:Partial Insulation)コイルが検討されている。今回は電源遮断時における NI 及び PI コイル内の電磁気的特性について PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)を用いて解析を行ったので報告する。

### 2. 解析方法

本解析で対象としたコイルの諸元を Table1 に示す。またコイルに対して Fig.1 に示すように絶縁を施した。Type A はコイル巻線に対して巻厚中央の 30 ターン目の一周のみ絶縁を施し, Type B は 20 ターン目の電極側に 180°, さらに 40 ターン目の電極と逆側に 180° 絶縁を施した。Type C は層間接触電気抵抗を任意のパラメータとした無絶縁コイルである。Type A のコイルでは, 巻厚中央 1 ターンのうちの絶縁が施されていない渡りの部分に電流が集中する可能性があると考え, それを軽減するために Type B のコイルについても検討を行った。これらのコイルに対して PEEC を用いて電流分布解析を行った。今回はコイルを周方向に 18 分割した。また層間接触電気抵抗率は先行研究[1]より  $R_{ct}=70.0\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  とした。インダクタンスマトリクスは, 要素ごとにノイマンの公式より求めた。

### 3. 解析結果

PEEC 解析の結果の一例として Type A のコイルにおいて電流を 30A ホールド状態から電源を遮断した時の, 電源遮断直後から 1.0 秒後までのコイル内周方向励磁電流分布を Fig.3 に示す。横軸はコイル内側から数えたターン番号である。Type A のコイルで懸念していた渡りの部分への電流の集中は発生せず, 渡りの部分では電流が流れなかった。また, 電源遮断直後でコイル内側外側と絶縁付近において極めて短い時間で電流の急上昇が見られ, その後落ち着きながら減少した。無絶縁コイルや部分絶縁コイルの振る舞いを検討していく上でこのような電源遮断時の過渡現象も予測する必要がある。今後は巻数が多い大口径コイルについて検討を進めていくとともに, PEEC 解析を用いて局所的に常電導転移が発生したときの NI コイル内部の熱的, 電氣的振る舞いを評価していく予定である。

本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によった。

### 参考文献

1. X.Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012
2. S.Hahn, Y.Iwasa et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) 1592-5

Table1 Specifications of No-Insulation REBCO pancake coils

Parameters	60turn NI pancake coil
REBCO conductor	
Overall width; thickness(mm)	4.0; 0.063
Copper stabilizer thickness( $\mu\text{m}$ )	10(5 per each side)
$I_c$ @77K,self-field(A)	> 100
Coil	
i.d.; o.d.; height (mm)	60.0; 67.6; 4
Contact surface resistivity, $R_t$ ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	70.0
$I_c$ @77K,self-field(A)	43
Inductance( $\mu\text{H}$ )	432.3

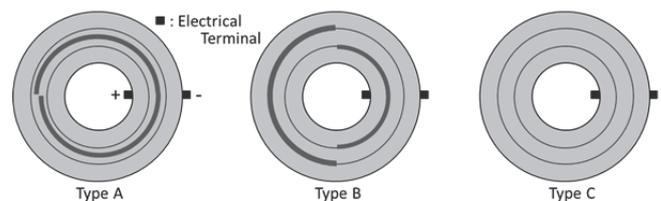


Fig.1 Partial Insulation Coil

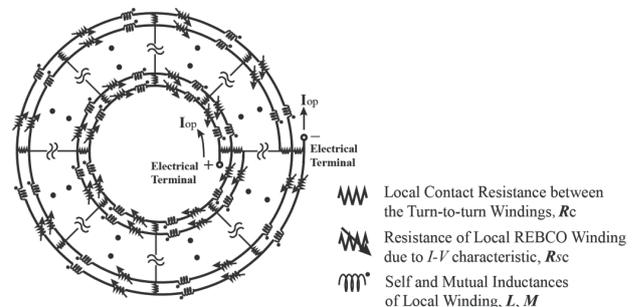


Fig.2 Partial Element Equivalent Circuit for an NI REBCO coil

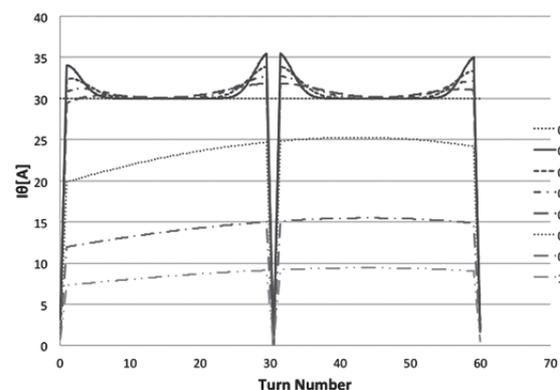


Fig.3 Results of sudden discharge simulation (Type A)

# PEEC モデルを用いた無絶縁 REBCO コイルの過電流通電特性の解析

## Numerical simulation of over-current test of no-insulation REBCO pancake coil using PEEC model

南 克彦, 中田 恵理香, 荒川 一誠, 池田 愛花, 大木 隆広, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学);  
野口 聡, 門馬 克敏(北海道大学); Seungyong Hahn, 岩佐 幸和(MIT); 王 旭東(KEK)

MINAMI Katsuhiko, NAKADA Erika, ARAKAWA Issei, IKEDA Aika, OKI Takahiro, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So, MONMA Katsutoshi (Hokkaido Univ.); SEUNGYONG Hahn, IWASA Yukikazu(MIT); WANG Xudong (KEK)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁(NI:No-Insulation)コイルは電流通電時に熱的安定性が向上することが数年前から報告されており、高電流密度化と熱的安定性を両方満たすことができる手段として注目されている。NI コイルに過電流を通電した場合の特異な現象を観測した実験に関する報告があるが、コイル内の熱的・電磁的振舞についての検討は不十分であった。そこで今回は、PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)モデルを用いて回路解析と差分法に基づく熱解析を連成し、無絶縁 REBCO コイルの過電流通電時について数値解析・評価を行ったので報告する。

### 2. 解析方法

NI コイル内の熱的・電磁的振舞を調べるため、先行研究[1]に用いられたコイルの諸元を用いて解析を行った。コイルの諸元を Table.1 に示す。NI コイルは巻き線間に絶縁がないため線材同士が接触し径方向に電流が流れる。そのため、線材間の接触抵抗を考慮した Fig.1 のように要素ごとに分割した回路モデルを用いた。式(1)から(4)に回路方程式を示す。

$$R_{\theta}^{(i)} I_{\theta}^{(i)} + \sum_{j=1}^N M_{ij} \frac{dI_{\theta}^{(j)}}{dt} + R_r^{(i+1)} I_r^{(i+1)} \quad (1)$$

$$= R_{\theta}^{(i+Div\theta)} I_{\theta}^{(i+Div\theta)} + \sum_{j=1}^N M_{(i+Div\theta)j} \frac{dI_{\theta}^{(j)}}{dt} + R_r^{(i)} I_r^{(i)}$$

$$I_{\theta}^{(i)} + I_r^{(i)} = \begin{cases} I_{OP} & (i=1) \\ I_{\theta}^{(i-1)} & (1 < i \leq Div\theta) \\ I_{\theta}^{(i-1)} + I_{\theta}^{(i-Div\theta)} & (N-Div\theta+1 < i < N) \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{\theta}^{(i)} = I_{\theta}^{(i-1)} + I_r^{(i-Div\theta)} \quad (N-Div\theta+1 < i < N) \quad (3)$$

$$I_{\theta}^{(i)} + I_r^{(i-Div\theta+1)} = I_{OP} \quad (i=N) \quad (4)$$

ここで  $R_{\theta}$  は周方向(線材長手方向)の抵抗であり、 $R_r$  は径方向の接触電気抵抗である。 $M$  はコイルの自己及び相互インダクタンスマトリクスであり、ノイマンの公式より算出した。この回路方程式から周方向電流  $I_{\theta}$  と径方向電流  $I_r$  を求め、熱解析との連成を行った。

### 3. 解析結果

先行研究と同様にコイルに Sweep rate 0.5A/s で 0A から  $I_c$  以上の過電流 125Aまで通電し、この時のコイルの中心磁場と電流分布、温度分布を解析により評価した。一例として中心磁場の解析結果と実験結果の比較を Fig. 2 に示す。通電電流が  $I_c$  を超え、発熱が始まったとほぼ同時に中心磁場の急激な減少が観測できた。この場合の解析結果(b)は先行研究の実験結果(a)をよく再現している。今回の実験・解析では局所的な熱の発生は観測できたが熱暴走は起こっていない。これより NI コイルにおいては電流が層間でバイパスする事により従来のコイルと比較して熱的安定性が向上している事を確認する事ができた。今後は大口径コイルにおいても同じ現象を再現できるか評価していく予定である。

### 謝辞

本研究は科研費基盤研究 A(No.26249036)によった。

Table.1 Specifications of REBCO Single Pancake Coil [1].

Inner diameter	60 mm
Outer diameter	66 mm
Height	4.0 mm
Tape thickness	0.1 mm
Tape width	4.0 mm
Copper stabilizer thickness	0.04 mm
Number of turns	30
Inductance	110.0 $\mu$ H
$I_c$ @ 77K, self-field	85 A
$I_c$ @ 77K, coil	54 A

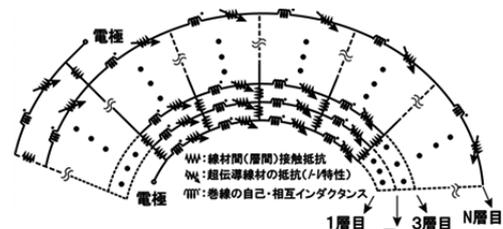


Fig.1 Equivalent circuit model for an NI REBCO coil

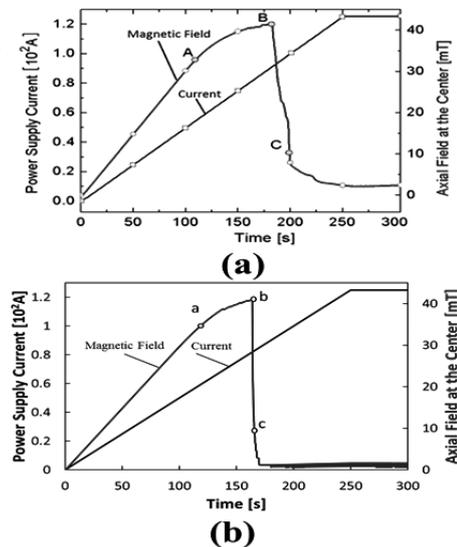


Fig. 2 Central magnetic field and power supply current in (a) experiment and (b) simulation.

### 参考文献

- S.Hahn, Y.Iwasa et al., "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation", IEEE Trans. On Appl. Supercond., Vol. 21 (2011) 1592-1595
- X.Wang, et al., "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil", Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012

# 1GHz 以上の高磁場 & 高均一度 NMR/MRI 開発向け要素技術の開発研究(1) REBCO 多芯テープ線材の開発研究

R&D toward a high-field & high-homogeneity NMR/MRI developments over 1 GHz (1)  
Development of the REBCO multi-core tapes

金 新哲, 大島 勇吾, 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研); 小黒 英俊(東北大)

Xinzhe Jin, Yugo Oshima, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda (Riken); Hidetoshi Oguro (Tohoku Univ.)

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

## 1. はじめに

次世代の高分解能 NMR/MRI には磁場均一度が 0.01ppm 以上の高磁場が求められている。高臨界電流を持つ REBCO 単芯テープ線材が市販されてから、これらの実現可能性があるものの、まだいくつかの課題は残されている。その一つは線材の REBCO 層が単芯テープであるため、テープ面に垂直な遮蔽電流磁場(反磁性)が大きく、本来磁場均一度の調整機能を果たすマグネット外側のシムコイルが効かなくなることである。遮蔽電流磁場のもう一つの影響はマグネットの中心磁場を降下させることである。そのため、REBCO 単芯テープ線材の遮蔽電流磁場を下げることは、NMR/MRI のマグネット開発において重要な課題の1つである。それに対して、近年開発が進められているレーザーによるスクライビング線材が、一つの解決法として挙げられる。そこで、我々理研横浜では、製作加工が簡便かつ量産に向けた REBCO 多芯テープ線材の開発を進めている[1]。本研究ではこのタイプの線材の特徴と性能について述べる。

## 2. REBCO 多芯テープ線材の製作方法と種類

REBCO 多芯テープ線材とは、銅安定化層から REBCO 層まですべて切断するスクライビング線と異なって、REBCO などのセラミックス層と他の金属層との脆性の違いを利用して、金属層は切断せずに REBCO 層(中間層)のみを切断した内部スリットを有する線材である。製作方法は、外部応力を印加することで、線材の各材料に生じる異なる相応力を利用して電氣的に分離する方法(Electrical separating by phase stress, ESPS)を用いた。具体的には、テープの長手方向に沿って折り曲げる方法(Electrical separating by bending stress, ESBS)と、部分的に圧力を加えることで応力集中を引き起こして分離する方法(Electrical separating by pressure concentration, ESPC)などがある。ここでは、ESBS 法による多芯テープ線材の作製と、それを用いた東北大金研と理研和光で行った引張応力下での臨界電流と磁化での実験評価結果について発表する予定である。現在までの実験結果では、スリット1~4本の多芯テープ線において、臨界電流が荷重ないときの 90%になる引張応力が 800MPa 以上であり、これは元の単芯テープ線材と比較すれば 90%以上である。すべての多芯テープ線材の臨界電流も 90%以上であることが測定されている。なお、テープ面に垂直な磁場 2T において、スリット 4 本の多芯テープ線材の磁化は NMR に実用されている Bi2223 線材と同程度であり、磁場 2T 以上ではさらなる改善がみられた。

REBCO 線材は、SuperPower 製の幅 4mm の Gd123 テープ線材を使用した。Fig. 1 に多芯テープ線材の表面と、銅と銀層を剥離させた後の REBCO 層の表面観察を行った結果を示す。3D 顕微鏡の深度合成写真により、銅表面の凹線の最大幅が 67.5 $\mu\text{m}$ 、深さは 8.3 $\mu\text{m}$ (銅層の厚さ: 20 $\mu\text{m}$ )であった。剥離後の REBCO には幅 33 $\mu\text{m}$  範囲内で内部スリットが入っていることが見られた。

## 3. 線材評価

線材の評価では、臨界電流測定と機械強度および磁化測

定を行った。その結果、内部スリット 4 本までの多芯テープ線材は引張強度の低下が見られず、かつ臨界電流が 90%以上を保持しながら、テープ面の磁化が大幅に改善されていることが測定された。詳細は当日に発表する予定である。

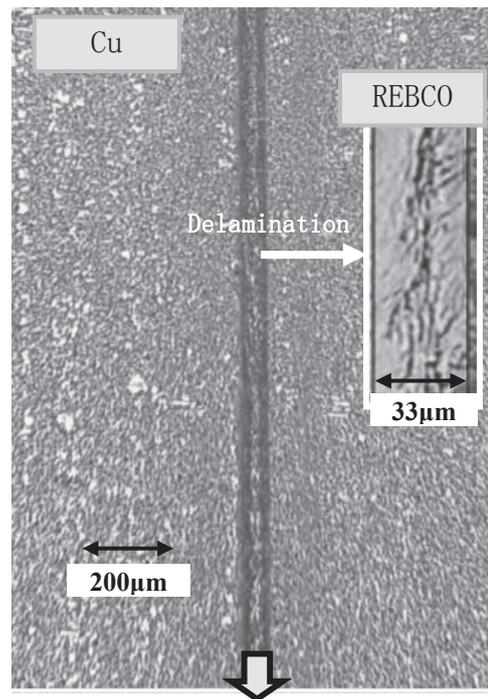
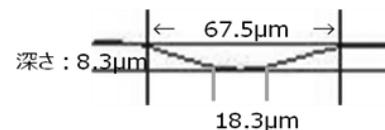


Fig. 1 Surface Observation for REBCO multi-core tape



## 4. まとめ

今回我々は臨界電流と機械強度の向上を目指した REBCO 多芯テープを製作開発した。今回製作した短尺線材は、元のテープ線材よりテープ面の磁化が大いに改善されていた。

## 5. 今後の予定

長尺線材の製作開発とコイルでの評価を考えている。

## 参考文献

- [1] 金新哲, 前田秀明, “高温超伝導多芯テープ線、その製造方法、および製造装置”, 特願 2014-164590, 2014.08.12

# 1GHz 以上の高磁場 & 高均一度 NMR/MRI 開発向け要素技術の開発研究(2) REBCO 多芯テープ線材より作製したコイルの評価

R&D toward a high-field & high-homogeneity NMR/MRI developments over 1 GHz(2)  
Experimental assessments for a coil prepared by using REBCO multi-core tape

松田 徹郎(東工大), 金 新哲(理研), 許 一(理研), 柳澤 吉紀(理研), 高橋 雅人(理研),  
前田 秀明(理研); 岡村 哲至(東工大)

MATSUDA Tetsuro (Tokyo Tech); JIN Xinzhe, Xu Yi, YANAGISAWA Yoshinori, TAKAHASHI Masato,  
MAEDA Hideaki (RIKEN), OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

E-mail: matsudatetsuro@gmail.com

## 1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材は、従来の NiTi や Nb<sub>3</sub>Sn 等の超伝導線材と比べて、高磁場中に高い臨界電流を示し、かつ線材の長手方向の引っ張り強度が 700MPa 以上と高い。したがって REBCO 線材を用いて、1GHz 以上の高磁場 NMR を開発するための研究が勢力的になされてきた。しかしながら、市販されている REBCO 線材はテープ形状のため、克服すべき課題がいくつかある。その一つがテープ面の大きな遮蔽電流磁場であり、マグネット中心磁場を低下させることと、磁場の時間的ドリフトを引き起こすなどの影響がある。

本研究では理研で開発した多芯テープ線材[1]を用いて小型コイルでの遮蔽電流磁場の実験評価を研究目的とする。具体的には、REBCO 単芯テープ線材をそれぞれ 2、3、4、5、6 分割(talwegs)にした多芯化テープ線材の臨界電流を測定した上で、長さ 5.6m の 3 分割した多芯テープ線材を製作し、小型のコイルに巻線して、遮蔽電流磁場の実験評価を行った。

## 2. 実験方法

REBCO 多芯テープ線材の作製には、REBCO 単芯線材 (SupePower 社製 SCS4050 幅 4mm) を長手方向にスリッターで折り曲げる方法により線材内部の REBCO 層のみにスリット (内部スリット) を入れることで作製した。

コイルの作製には、巻棒として外径 30mm 厚さ 9mm の円筒状の FRP 加工品を用い、線材のターン間には絶縁のために、粘着加工されたカプトンテープを挟んでダブルパンケーキとなるように巻線した。使用した線材は、市販されている REBCO 単芯テープ線材と 3 分割した REBCO 多芯テープ線材の 2 種類である (それぞれ Coil-I、Coil-II とする)。Fig. 1 に Coil-II の写真を示す。実験では、2つのコイルのそれぞれについて、コイル中心磁場測定のためにホール素子を設置し、液体窒素中(77K)で通電して測定を行った[2]。

## 3. 実験結果と考察

線材の実験結果: Fig. 2 に REBCO 単芯テープ線材と幅を 6 分割 (内部スリット 5 本) に加工した REBCO 多芯テープ線材の臨界電流および n 値を求めた結果を示す。多芯化加工により n 値は変化なく、臨界電流の低減もほぼなかった。

コイルによる実験結果: Fig. 3 に Coil-I、Coil-II の通電による遮蔽電流磁場の挙動を示す。それぞれのヒステリシス曲線の最大中心磁場 (B2max-B2min と Bomax-Bomin) を比較すると、多芯化加工により遮蔽電流磁場が約 20% 減少していることがわかる。また、通電流をゼロにしたときの残留磁場 (B20u-B20d と Bo0u-Bo0d) についても低減できたことがわかる。

## 4. まとめ

REBCO 多芯テープ線材について実験評価を行い、臨界電流を大きく減少させずに、遮蔽電流磁場を 20% 程度改善できていることを実証した。今後はカップリング効果の実験評価を考えている。

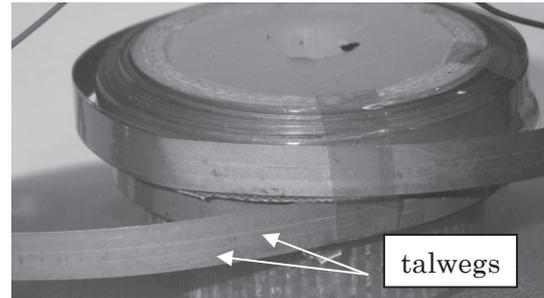


Fig. 1 Picture of the Coil-II using 3 separated tape

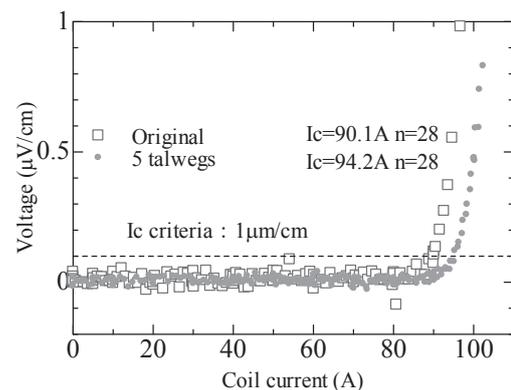


Fig. 2 V-I properties for original and multi-core tape

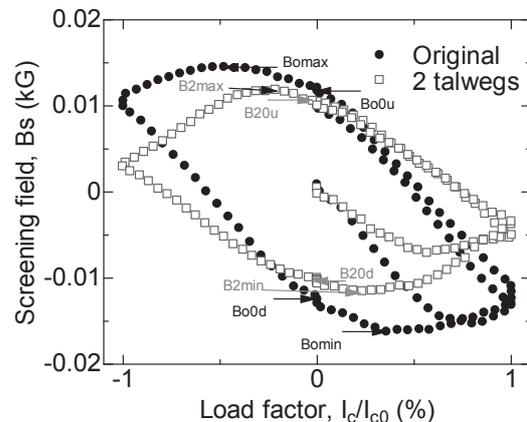


Fig. 3 Hysteresis of the screening current-induced at the coil center, Bs, as a function of coil load factor: Coil I: no talweg, Coil II: 2 talwegs.

## 参考文献

1. 金 新哲, 前田秀明, 特願2014-164590, 2014.08.12
2. Y. Yanagisawa, et al., ASC2014-4LP-06 p1.

# 1GHz 以上の高磁場 & 高均一度 NMR/MRI 開発向け要素技術の開発研究(3) マグネットの永久電流モードを目指した CJMB 法による Gd123 テープ線の超伝導接続

R&D toward a high-field & high-homogeneity NMR/MRI developments over 1 GHz (3)  
Superconducting joint for Gd123 tapes with CJMB method  
toward a persistent current mode of magnet

金 新哲, 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研); 高野 良紀(日本大)

Xinzhe Jin, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda (Riken); Yoshiki Takano (Nihon-univ.)

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

## 1. はじめに

我々理研ではすでに REBCO バルクを中間媒体とした REBCO テープ線材の低抵抗接続を開発している[1]。この接続方法は、熔融したバルクによって結晶的に線材の REBCO 層につながる方法(Crystalline joint by melted bulk)であり、CJMB として名づけた。REBCO バルクの研究分野では、すでに種結晶を用いて結晶成長させることにより単一ドメインのバルクを製作しており、広く実用されている。CJMB 法はこのようなバルクでの結晶成長の技術を基に、REBCO 線材間の接続への応用を考え出し、接続部における結晶的なつながりと臨界電流および接続強度などに注目する。そのため、CJMB 法はバルク全体を結晶成長させることなく、接続部のみを結晶化させることが特徴である。今回はすでに作製した接続体の 3D 画像合成による微細構造の観察とX線回折および臨界電流の測定を行った。なお、現在研究開発中である高純度 YbBCO バルク作製およびそれを用いた接続の評価などについても発表当日に言及する予定である。

## 2. 試料作製

ジョイント試料の原材料と作製方法については、すでに春季の学会原稿に言及しているので、ここではもう少し記述内容を追加する。REBCO 線材は、SuperPower 製の幅 4mm、厚さ 0.1mm の Gd123 テープ線材を使用し、接続用のバルクは新日鉄住金(株)の外径 46mm、厚さ 30mm の YBCO(Y123: 75%, Y211: 25%)バルクを使用した。線材は液体窒素に入れて取り出すことで熱サイクルを行い、REBCO 層と中間層の間を剥離することでハステイロイ側の層を除去した。ジョイント試料の作製は、温度 1000°C 前後で行った。最後に、酸素追加のための熱処理は 450°C で 100 時間(4 日程度)行った。

## 3. 試料評価

ジョイント試料の接続部での 3D 顕微鏡による合成写真を Fig. 1 に示した。左図で試料の表面と断面の両方において、線材とバルク間のジャンクションにはっきりした境界線が現れず、右図の断面拡大図にもジャンクションにおいて分離線が見えていない。このようなことは、線材の REBCO 層とバルクの間隙に隙間なく緻密につながっていることを意味する。これは高い臨界電流と機械強度を実現するために有益である。

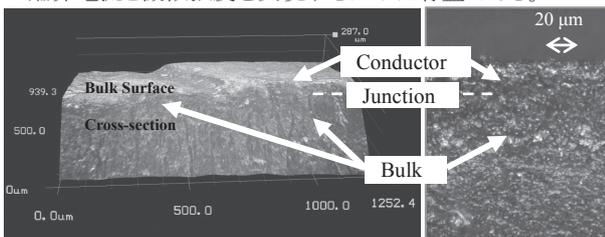


Fig. 1 Micro structure of the joint assembly with image synthesis method.

次は接続部付近のバルク表面とそれを粉末にした試料についてX線回折測定を行い、その結果を Fig. 2 に示した。特徴的に、粉末試料の XRD 測定結果では (013, 103, 110) のピーク強度が一番高いのに対して、バルク表面では現れていないこと、バルク表面には 00L(003, 005, 006, 007) ピークのみが現れていることは、REBCO 線材からバルクへ結晶成長が進んでいたことを示し、線材の REBCO 層とバルクの間結晶的なつながりができたことを意味する。

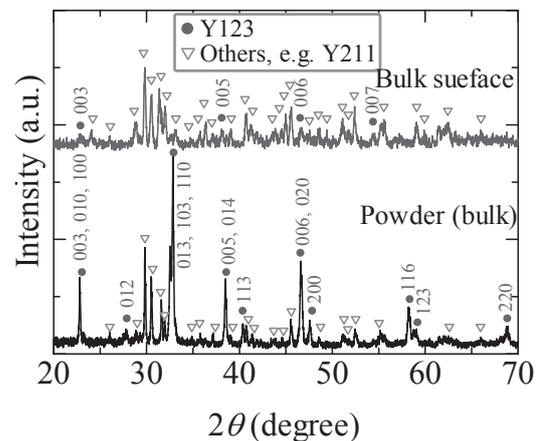


Fig. 2 XRD patterns for bulk surface and its powder

## 4. まとめ

CJMB法において、REBCO線材とバルクが結晶成長によりうまく接続されていることが、顕微鏡観察とX線回折測定から分かった。

## 5. 今後の予定

これから設計開発している赤外線導入加熱装置を利用して、線材長手方向における部分的な加熱によるジョイント試料の作製と評価を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 金新哲, 前田秀明, 柳澤吉紀, “高温超伝導線材の低抵抗接続体および接続方法”, 特願 2014-19034, 2014.02.04

# 高温超伝導対向型バルク磁石における均一な磁場分布のシミュレーション解析

## Simulation analysis of magnetic field uniformity in the space between face-to-face HTS bulk magnets

金井 智亮, 高橋 康宏, 佐藤 渉, 福井 聡, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大学); 仲村 高志(理研); 岡 徹雄(新潟大学)  
KANAI Tomoaki, TAKAHASHI Yasuhiro, SATO wataru, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATO Takao(Niigata University);  
NAKAMURA Takashi (Riken); OKA Tetsuo(Niigata University)  
E-mail: fl3c045a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

従来の NMR 開発は、低温超伝導線材を用い、磁場強度を向上させて、より高分解能にする方向に向かっている。ここで、我々はコンパクト強磁場源という特徴を持つバルク超伝導体を用いる事を提案する。そのことにより、無冷媒・小型・モバイルといった他に例のない利点を持つ事ができる。NMR 応用では、他の磁石応用に比べて、磁場に対する空間的均一性の要求が厳しいので、その改善が重要な課題となる。

现阶段では、磁場分布の形状を変える事により磁場の均一性が向上したので、その実験状況に合わせてシミュレーション解析を行い均一磁場の最適化を目指す。

### 2. 実験方法

Fig. 1に示すようにバルク超伝導体を仮想させた2つの渦巻きコイル(φ65 mm、厚さ20 mm)を対向させた。M字型の磁場形状を作るために、磁極(N極)表面に対して逆向きの磁場を発生させる小型の渦巻きコイルを用いた。また、実験値に合う磁場を発生させるために、それぞれのコイルに電流を流し、その値を調整した。さらに、小型渦巻きコイルから発生している磁束密度を測定し、実装可能な多層巻きコイルをシミュレーション上で作成した。多層巻きコイルを作成する上で、磁束密度や巻き数なども考慮し、次式を用いて条件を決定した。

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2(b-a)} \log \frac{b + \sqrt{b^2 + 4L^2}}{a + \sqrt{a^2 + 4L^2}} \quad (1)$$

式(1)の $\mu_0$ は真空透磁率、Nはコイルの巻き数、Iは電流、aはコイルの内径、bはコイルの外径、Lはコイルの長さを示す。また、均一性は4 mm区間で評価した。

### 3. 実験結果および考察

Fig.2とFig.3においては内径6 mm、外径20 mm、長さ5 mmの多層巻きコイルを用いたシミュレーション結果を示す。Fig.2はM字型をもった右極(N極)のみでの均一性、Fig.3は凸字型をもった左極(S極)と対向させた時の均一性であり、Lは磁極間距離を示す。Fig.2に示すように、片極のみ用いた場合では、14 mmの地点で42 ppmの均一性を記録した。この時の磁束密度は0.74 Tである。また、Fig.3に示すようにL=30 mmのとき10.95 mm地点で23 ppm、L=50 mmのとき12.53 mm地点で50 ppm、L=70 mmのとき13.45 mm地点で19 ppmの均一性を記録した。また、このときの磁束密度はそれぞれ1.37 T、0.97 T、0.83 Tである。

両極を利用した方が、表面に近い位置で均一性のピークが現れているが、これはM字型と凸字型がちょうど良く組み合わせることで均一性が向上したためである。

### 4. まとめ

片極のみでも十分な均一性を得られるが、磁束密度は0.74 Tで、他の結果よりも低い値となっている。NMRとして用いるには磁束密度が高い方が良いので、N極S極両方用いる利点を確認された。しかし、多層巻きコイルを実装するために

も電流値が大きすぎるなどの問題点があるので、今後は条件の見直しを行い、実現に近づけていく予定である。

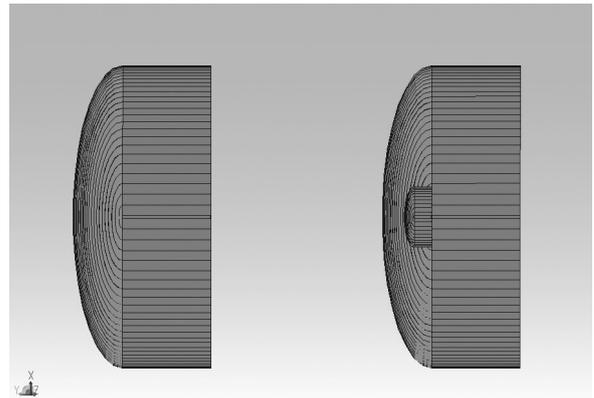


Fig.1 Schematic view of spiral coil

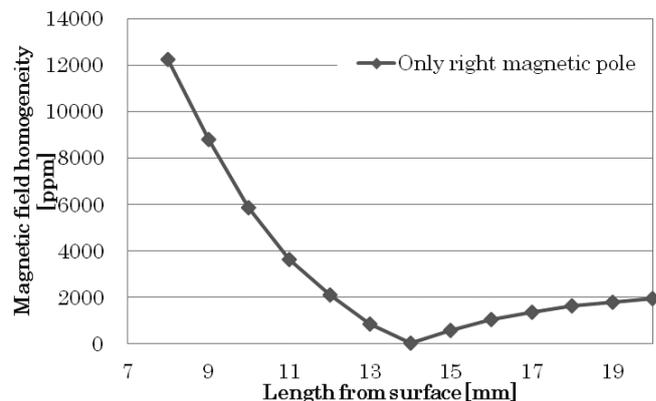


Fig.2 Magnetic field homogeneity of only right magnetic pole

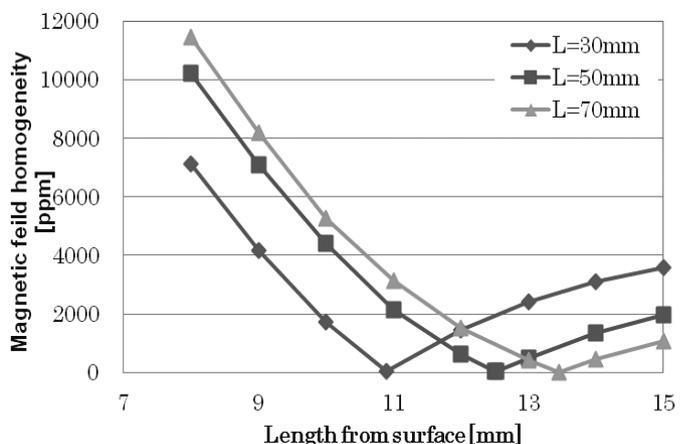


Fig.3 Magnetic field homogeneity between magnetic poles

# 高温超伝導バルク磁石とシムコイルを用いた高分解能 NMR とマイクロ MRI

## High Resolution NMR and micro MRI using Bulk Superconducting Magnet with Shim Coils

仲村 高志, 玉田 大輝, 巨瀬 勝美(理研, 筑波大院); 柳 陽介, 伊藤 佳孝(イムラ材研);  
内海博明, 根本貴宏(JEOL RESONANCE)

NAKAMURA Takashi, TAMADA Daiki, KOSE Katsumi (RIKEN, U of Tsukuba); YANAGI Yousuke, ITOH Yoshitaka(IMRA);  
UTSUMI Hiroaki, NEMOTO Takahiro (JEOL RESONANCE)

E-mail: takashi.nakamura@riken.jp

### 1. はじめに

ヘリウムを冷媒として用いず、冷凍機による伝導冷却で超電導を実現したバルク超電導体を磁極として構成した NMR/MRI 用超電導磁石を開発している[1, 2]。NMR/MRI の計測には、均一な磁場を形成することが重要で、MRI の位相差を用いた磁場分布計測法[3]をもちいることで静磁場着磁過程を精密に計測し、均一磁場空間形成のための開発を進めており、バルク磁石での MRI 撮像にも成功した[4]。この磁石に対して通常の NMR 装置でも用いられている室温シムコイルを設計し、実装したのでこの結果を報告する。

### 2. 装置構成

本実験では EuBCO を用いた外径 60 mm、内径 28 mm、厚さ 23 mm を上下に配し、中央部分は外径 60 mm、内径 36 mm、厚さ 74 mm のバルクをその外周すべてを内径 60mm、外径 70mm のアルミリングで補強した磁極を用意し、それを GM パルス管冷凍機 (AISIN, PR1211, 100V, 1200W) を用いた伝導冷却で 50K 以下に冷却し超電導磁石とするシステムを構築した。真空容器内部に格納されたバルク内部に室温空間ボア系 23mm を長さ 135mm が差し込まれており、エッジから 93mm にこの磁石の磁場中心がくるように設計されている[5]。この磁石に対し、内径 16mm の Z1, Z2, X, Y, ZX, ZY, X2, Y2 の補正項をもつシムコイルを設計し、設置した。

### 3. 実験

#### 3-1 静磁場着磁

検出系の周波数を 202MHz とし、磁場中冷却 (FC: Field Cool) 法を用いて 4.747T に静磁場着磁を行った。着磁に際して、バルク体に均一な磁場を与えるよう NMR 用のワイドボア超電導磁石 (JASTEC JRTC-300/89) を着磁用 SCM として使用した。温度を 100K でコントロールしたバルク磁石を、着磁用 SCM の磁場中心にバルクの設計上の磁場中心を合わせ SCM に内蔵されている SC シムを用いて均一度が 10ppm 以下 ( $\Phi 6\text{mm} \times L 6\text{mm}$ ) となるように調整した。着磁時の磁場強度は 4.747 T、着磁中のバルクの温度は 50 K にコントロールした。着磁用の磁場を除いた後にバルクウィさらに冷却し、1 時間以上経過の後に着磁用 SCM から取り出した。

#### 3-2 MRI および NMR による静磁場着磁過程の評価

MRI のスピンエコー法を用い、データ収集の開始時間を変えた 2 枚の画像からその位相差による磁場均一度を評価する方法[3]で静磁場着磁過程の最適化を試みた。この過程で 10ppm 以下の均一度を評価しようとする室温ボアに用いているアルミニウムに誘起される渦電流の影響が磁場均一度の計測に無視できないほど大きいことがわかった。そのため NMR 計測による半値幅での評価を併用することで磁場均一度の評価精度を向上させた。今回の着磁においては、バルク温度 100K にて SC シムによる MRI 評価では試料空間中心の  $\Phi 6\text{mm} \times L 6\text{mm}$  の最大最小値が 2.2ppm に対して NMR 試料管  $\Phi 6.9\text{mm} \times L 10\text{mm}$  の半値幅で 0.52ppm まで調整し、試料温度を 50K 下げた段階では、MRI が 13ppm、NMR が 12ppm、

試料温度を維持しながら外部静磁場を 2T まで下げた時に、MRI が 31ppm、NMR が 21ppm、0T では、MRI が 40ppm、NMR が 37ppm を示した。これらは我々が実施してきた静磁場着磁実験と比較して高い再現性を示している。

#### 3-3 磁場計測

静磁場着磁した磁石に対して、今回製作した室温シム装置を設置し、直径 2.5mm のガラスパイプ内に  $1\text{mm}^2$  角  $X \times L 3\text{mm}$  のシリコンゴムを入れた試料を計測する内径 2.6mm の 5 ターンソレノイドの自作プローブにて磁石の Z 軸方向の磁場分布を計測した (Fig.1)。Z 軸方向のシム中心を求めするためにシムなし (電流を流さないで計測)、Z 項に対して分光計の値で  $\pm 500$  の値を流した。室温シムは設計通りに機能し、磁石上端部より 94mm にシムの中心があることがわかったので、室温シムの中心とバルク磁石の中心 (磁石上端部より 93mm) を一致させ高分解能 NMR を計測するための実験を開始した。

#### 6. まとめ

高温超伝導バルクの静磁場着磁のプロトコルの精度向上による捕捉磁場均一度の改善と再現性が得られた。また、バルク磁石に対する室温シムコイルの設計、製作ができた。室温シムコイルによる均一度向上の確認実験は現在進めているところである、これらについての成果は会場にて報告したい。

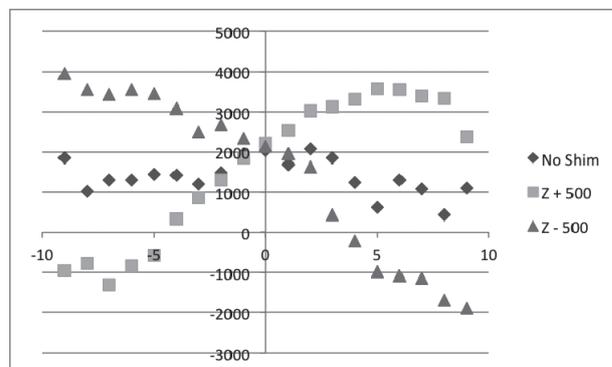


Fig.1 Bulk Magnet Field Map ◆ : No shimming data, ■ : Z = 500, ▲ : Z = -500

#### 参考文献

1. T. Nakamura, M. Yoshikawa, Y. Itoh, H. Koshino, *Concept Magn. Reson. B (Magn. Reson. Eng.)* **31B** (2007) p.65
2. T. Nakamura, et. al., *TEION KOGAKU* **46** (2011) p.139
3. Matt Bernstein, et. al., *Handbook of MRI Pulse Sequences* (2004) p.558
4. Ogawa K, et. al., *APL* **98** (2011) 234101
5. T. Nakamura, et. al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.33