

高温超電導回転ガントリー開発(1) —プロジェクトの進捗概要—

Development of HTS rotating gantry –Progress overview of the project–

田崎 賢司, 小柳 圭, 高山 茂貴, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 萩津 透(KEK); 岩田 佳之, 野田 耕司(NIRS)
TASAKI Kenji, KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);
AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); IWATA Yoshiyuki, NODA Koji (NIRS)
E-mail: kenji2.tasaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

重粒子線によるがん治療は優れた治療効果を有する一方で、施設全体が大型であることが課題となっている。特に、重粒子線回転ガントリーは、すでに普及している陽子線回転ガントリーと比較すると装置重量が約3倍の600トンにも達し、普及の妨げとなっていた。現在、低温超電導を用いた回転ガントリーが放医研にて建設中で、装置重量が大幅に低減する見込みである。重粒子線回転ガントリーに高温超電導線材を用いて高磁場化を図ることができれば、さらに重量低減が期待でき、陽子線回転ガントリー総重量と同程度の小型軽量化を実現することができる。現在進めている METI 国プロ「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」では、高温超電導線材を用いた回転ガントリー用偏向マグネット実現に向けた開発を行っている。本発表では、このプロジェクトでこれまでに得られた成果の概要について報告する。

2. 本プロジェクトの実施内容

(1) 回転ガントリー基本設計検討

回転ガントリー用の偏向マグネットについては、マグネットを励消磁する際に Y 系テープ線材に誘起される誤差磁場の影響を考慮に入れて設計する必要がある。この誤差磁場を定量的に評価する手法は、本プロジェクトの中で開発中であるため、最初のステップとして 2014 年度は、誤差磁場を考慮に入れずに総重量 200 トン以下となる回転ガントリーの基本設計を行った。設計した回転ガントリーのマグネット配置図を Fig.1 に示す。回転ガントリーは 10 個の高温超電導偏向マグネット(HTS magnet)、2 対のステアリングマグネット(STR)、1 対のスキヤニングマグネット(SCM)で構成されている。偏向マグネットの諸元を Table1 に示す。本設計では、ビーム軌道上の 2 極磁場として最大 5.8T が必要であることが示された。また、ビーム有効領域における BL 積での磁場均一度は 0.0206% が得られ、目標の 0.1% 以内を満足することも示された。なお、Fig.1 に示す回転ガントリーの総重量は 177 トンの試算である。

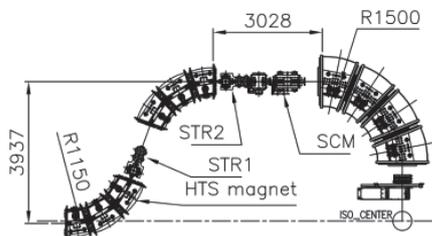


Fig. 1 Layout of HTS rotating gantry

Table 1 Specifications of HTS deflecting magnets for the rotating gantry

Magnet type	A	B	C	D
Bending radius [m]	1.15	1.15	1.5	1.5
Bending angle [deg.]	18	26	22.5	22.5
Dipole magnetic field [T]	5.8	5.8	4.5	4.5
Quadrupole magnetic field [T/m]	15.5	33	-	1.7
Valid magnetic field region [mm]			±20	
Inner radius of beam duct [mm]			30	
Inner radius of HTS coils [mm]			60	
Magnetic field inhomogeneity [%]			0.0024	

(2) Y 系鞍型コイル試作

偏向マグネットはレーストラックコイルなどの 2 次元形状コイルの組み合わせでも構成可能であるが、本プロジェクトではマグネットの低コスト化を意識し、使用線材量を低減できる 3 次元立体形状コイルの組み合わせで構成することを目標とした。極薄テープ形状の Y 系線材を立体形状に巻線することは困難であるが、巻線しながら線材を接着する手法を取り入れることにより、Fig.2 に示すようにネガティブバンド部を有する変形鞍型コイルの試作に成功した。本コイルは Y 系線材 10m を使用した 10 ターンコイルである。本コイルを液体窒素中で特性評価を実施した結果、コイル n 値は 28.4 と良好な特性を示し、3 次元形状の変形鞍型コイルも劣化させることなく巻線が可能であることを示すことができた。本成果に基づき、偏向マグネット用実機大鞍型コイル(コイル全長: 1.1 m)が製作可能な自動巻線機を試作した。

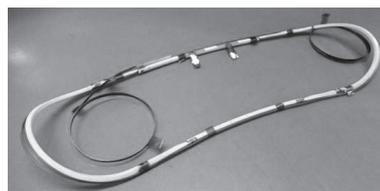


Fig. 2 Photograph of three-dimensional YBCO coil

(3) 1/3 モデルマグネットの設計検討

2015 年度には Y 系線材を用いた偏向マグネットの適用性検証のために、実機の 1/3 スケールのモデルマグネットを試作する。2014 年度はモデルマグネットの設計検討を行った。モデルマグネットの主要諸元を Table2 に示す。試作するモデルマグネットは、コイル長 300 mm の Y 系高温超電導鞍型コイルと低温部に配置された鉄心で構成されたコイルを冷凍機からの熱伝導で冷却する伝導冷却マグネットで、中心磁場 3 T の発生を目標としている。本マグネットを用いて、2015 年度には変動磁場中での磁場均一性評価を実施する予定である。

Table 2 Specifications of 1/3 model magnet

Magnet dimension [mm]	φ680 × 1,200 (L)
Bore diameter (Room temp.) [mm]	φ60
Central magnetic field [T]	3
Length of saddle-shaped coil [mm]	300

3. まとめ

重粒子線回転ガントリーの総重量 200 トン以下を実現するために必要となる技術開発を進めている。現状誤差磁場の影響は考慮に入れていないが、2 極磁場を 5.8T まで高めることで総重量 177 トンの回転ガントリーの目的を得た。また、変形鞍型コイルの試作に成功し、その結果に基づいて自動鞍型コイル巻線機の試作を完了した。今後は、本巻線機で鞍型コイルを試作し、2015 年度までに 1/3 スケールのモデルマグネットの試作・評価を完了させる。

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「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。

高温超電導回転ガントリー開発(2) - 1/3モデルマグネット用鞍型コイルの試作 -

Development of HTS rotating gantry - Fabrication of saddle-shaped coils for 1/3 scale model magnet -

小柳 圭, 高山 茂貴, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 萩津 透(KEK); 岩田 佳之, 野田 耕司(NIRS)
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);
 AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); IWATA Yoshiyuki, NODA Koji (NIRS)
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

重粒子線がん治療装置の回転ガントリーを構成する偏向マグネットに高温超電導を適用して高磁場化することで、装置の小型軽量化が期待できる。ビーム軌道に対して効率的に磁場を与えるためには、曲がったビームダクトに沿った形状の鞍型コイルを設計したいが、これまでの低温超電導(NbTi)の丸線と違ってRE系(REBCO)高温超電導線材はテープ形状をしているため、巻線時の線材の変形方向に制約があり、従来の丸線とは異なる新たなコイル設計、巻線技術が必要となる。本発表では、超電導特性を劣化させずに鞍型コイルに巻くためのコイル設計・巻線機の開発について報告する。

2. コイル設計, マグネット設計

回転ガントリーのマグネット実機構成を検討し、この実機設計に基づいて、RE系線材を用いた偏向マグネットの適用性検証を目的とした、実機の縮小スケールとなる偏向マグネット「1/3モデルマグネット」の試作を検討した。偏向マグネットは、磁場強度が3T以上、相対磁場精度がエンド部を含む三次元形状コイルの中心で0.1%以下となることを目標仕様として設計した。設計した偏向コイルの諸元をTable 1に示す。コイルはビームダクト断面に4分割されダクト径方向に4層積層したブロック状に配置する設計としており、中心で磁場3Tを発生する。磁場解析により、±20mmの範囲で相対磁場精度が0.0534%となることを確認した。設計したコイルの外観をFig.1に示す。コイルエンドの形状設計で不整磁場の低減を図っており、ビーム軌道に沿った磁場の積分値(BL積)の精度が0.021%と、目標の0.1%を満たす設計を得た。このコイルを組み込んだ伝導冷却式の1/3マグネットの計画図をFig.2に示す。電磁力をコイル外周の鉄心で受け、真空容器で鉄心を支持する構造としている。

Table 1 Specifications of an REBCO bending coil

winding inner radius	60 mm
winding outer radius	79 mm
coil length	300 mm
No. of winding blocks	4
No. of winding layers	4
turns / block	50
operating current	240 A
dipole field	3 T

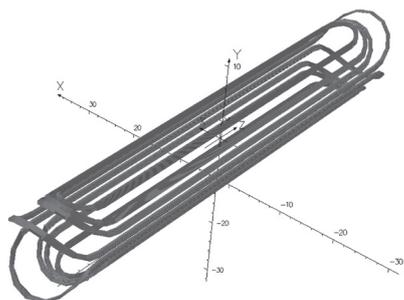


Fig. 1 Schematic view of the REBCO bending coil.

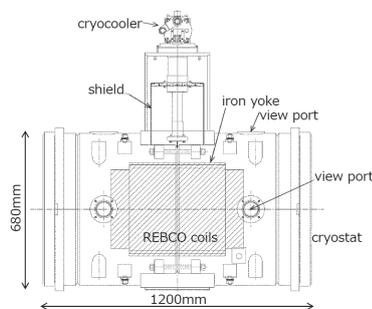


Fig. 2 Schematic drawing of the scaled model-magnet.

3. 巻線機の開発

テープ形状の線材を巻線しながら設計した位置に接着する手法を取り入れて、変形鞍型コイルを試作し、この成果に基づいて偏向マグネット用実機大鞍型コイル(コイル全長:1.1m)が製作可能な自動巻線機を試作した。巻線機の基本構造として、RE系線材に過度の歪が生じないように鞍型に巻き回すための軸構成、および可動範囲をTable 2およびFig.3のように設定し、最大長さ1.1mの湾曲鞍型RE系コイルを巻線できる巻線機の試作を完了した。

Table 2 Multi-axis configuration of the winding machine

axis	range
x-axis / head (AX)	500 mm
y-axis / head (AY)	1,250 mm
z-axis / head (AZ)	300 mm
Attitude control (ATX)	90 deg.
Yawing (RTZ)	360 deg.
Pitching (RTX)	360 deg.
y-axis / tape supply (SDY)	1,250 mm
z-axis / tape supply (SDZ)	300 mm

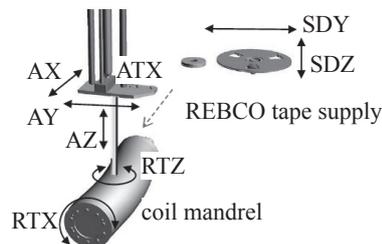


Fig. 3 Schematic diagram of the winding machine.

4. まとめ

重粒子線がん治療装置の回転ガントリーを構成する偏向マグネットへ高温超電導を適用するため、偏向マグネットおよびRE系鞍型コイルを設計し、これに基づいて自動鞍型コイル巻線機の試作を完了した。今後、本巻線機での鞍型コイル試作、1/3スケールのモデルマグネットの試作を進める。

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「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。

高温超電導回転ガントリー開発(3)－複雑形状コイルの熱暴走挙動の評価－

Development of HTS rotating gantry

-Evaluation of the thermal runaway behavior of complicated shaped coil-

高山 茂貴, 小柳 圭, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝);

雨宮 尚之(京大); 荻津 透(KEK); 岩田 佳之, 野田 耕司(放医研)

TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);

AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK); IWATA Yoshiyuki, NODA Koji (NIRS)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

1. はじめに

回転ガントリーとは、任意の方向から患者へ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。そこで回転ガントリーの小型・軽量化を目的に高温超電導の適用を検討している[1]。高温超電導を適用したマグネットは熱暴走によって焼損するリスクがある。そのため、熱暴走の挙動を把握し予測・管理することが重要となる。これまでに円形コイルについて熱暴走を解析的に求める手法を確立し、熱暴走の予測を行っているが[2]、加速器用マグネットに要求される複雑な三次元形状をしたコイルにおいて、その熱暴走の挙動を解析によって求めたので、その結果について報告する。

2. 熱暴走解析モデル

これまでに磁場均一度を高めたコイル設計を実施しており[3]、本設計をもとに50ターン鞍型コイルの解析モデルを作成した。モデル外観をFig.1に示す。1/8対象モデルであり、鞍型コイルの上面全体に樹脂層(エポキシ樹脂0.1mm厚)を介してアルミ板(0.25mm厚)が貼り付けられている。鞍型コイルエンドからアルミ板を引出し、冷凍機に接続することで伝導冷却することを想定し、コイルエンド頂点のアルミの温度を一定とすると共に、雰囲気との熱交換は無いものとした。アルミ、樹脂は単体の物性値を等方的に与えると共に、コイルは高温超電導線材と樹脂との等価物性値を異方的に適用した。解析においては事前に算出した線材経験磁場から臨界電流値分布を求め、それを用いて温度依存する発熱量分布を算出、適用している。

3. 熱暴走解析結果

初期温度20K、励磁電流458.5A、通電開始後934.7sでの解析結果をFig.2に示す。また通電電流値を変更した場合のコイル最大温度の時間依存性をFig.3に示す。458.5Aより大きな電流を通電した場合コイル最大温度が急激に上昇する熱暴走現象が確認された。また、本熱暴走は鞍型コイルエンド頂点から発生し、狭い領域のみで温度上昇することが明らかとなった。

4. まとめ

加速器用マグネットに要求される複雑な三次元形状をした鞍型コイルにおいて、その熱暴走の挙動を解析によって求めた。その結果、初期温度20Kでは458.5A以上の電流を通電した場合、鞍型コイルエンド頂点を起点に熱暴走が発生することが明らかとなった。

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「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. H. Miyazaki et al.: TEIONKOGAKU, Vol. 48, 239-246 (2013).
3. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.3

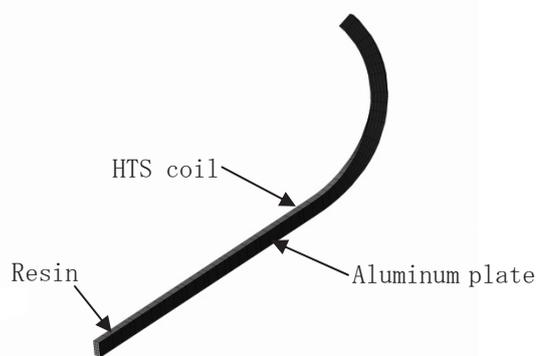


Fig.1 Outer view of analysis model

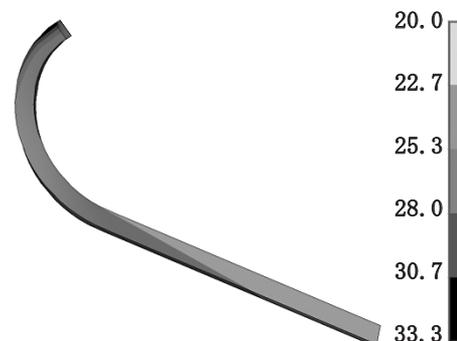


Fig.2 Result of the thermal runaway analysis

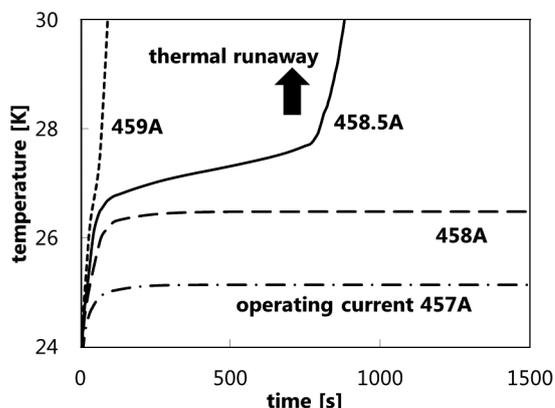


Fig.3 Time dependence of maximum coil temperature

スパイラルセクタ型 FFAG 加速器向けモデルマグネットの磁場設計

Magnetic field analysis of the model magnet for spiral sector FFAG accelerator

小柳 圭, 高山 茂貴, 田崎 賢司, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 雨宮 尚之(京大・工); 荻津 透(KEK)
 KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);
 AMEMIYA Naoyuki, (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

JST 国プロ S イノベのプログラム「高温超伝導を用いた高機能、高効率、小型加速器システムへの挑戦」では、スパイラルセクタ型 FFAG (Fixed Field Alternating Gradient: 固定磁場強収束) 加速器への高温超伝導の適用を検討している。加速器用磁石実機の実現に必要なキー技術を盛り込んだ「モデルマグネット」を検討し、試作に着手した。本発表では、複雑な三次元巻線形状やネガティブバンド部のある複数の RE 系コイルで構成する本マグネットの磁場設計とマグネット試作について報告する。

2. コイル構成の検討

本プログラムでは、これまでに使用線材量の低減、ビーム方向漏れ磁場の低減を図るスパイラルセクタ型 FFAG 加速器用マグネット用の RE 系コイルの検討を進めてきた。また、テープ形状の RE 系線材を設計したコイル形状へと正確に位置決めして巻線することを考慮して、ビーム軌道断面でのコイル配置を縦方向に圧縮した、レーストラック断面形状ダクトに沿う「片立体コイル」と「平面コイル」とを組み合わせたコイル構成を採用することとした。今回試作に着手したモデルマグネットも、実機の検討同様のコイル構成としており、ネガティブバンド部が実機同等で 4 分割したブロック状の平面コイル A~D と、曲率半径 150 mm のレーストラック断面ダクトに巻く片立体コイル E とからなるコイル群を対向させ、その間にビーム軌道空間を設ける配置とした。モデルマグネットのコイルの配置を Fig.1 に示す。マグネットを構成する平面コイルおよび片立体コイルの諸元を Table 1 および 2 にそれぞれ示す。

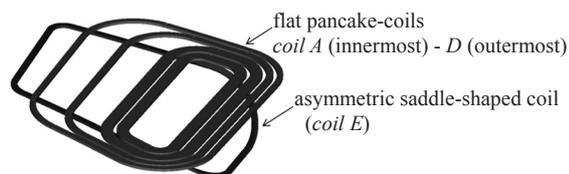


Fig. 1 Schematic view of the REBCO coils for the model magnet.

coil	A	B	C	D
bending radius of the negative-bend part, mm	3262	3186	3035	2884
number of turns	100	100	60	50
conductor length, m	79.5	94.0	70.6	68.4

coil	E
radius of the beam duct, mm	150
bending radius of the negative-bend part, mm	2700
number of turns	50
conductor length, m	75

3. マグネットの磁場設計

スパイラルセクタ型 FFAG 加速器はエッジフォーカスで収束作用を発生させる。そのためエッジの磁場分布も整える必要がある。モデルマグネットの室温鉄心をコイル形状に合

わせた形状に設計して、三次元磁場解析を実施した。解析結果を Fig.2 に示す。FFAG 加速器マグネットを模擬した非対称の磁場をミッドプレーンに発生し、電流 250A 通電時に最大 0.37T となる。

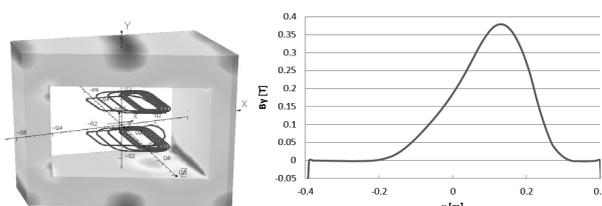


Fig. 2 Layout of the iron yoke and the coils (left), field distribution of the model magnet on x-axis, z=0 (right).

以上の設計をもとに、モデルマグネットを構成する真空容器の詳細設計製作を行った。マグネットの外観を Fig.3 に示す。本マグネットの発生磁場精度の検証するため、容器のボアは磁場性能検証用の回転ピックアップコイルおよび 3次元走査プローブシステム等の磁場測定機器を設置するための取り合いを考慮した設計としている。

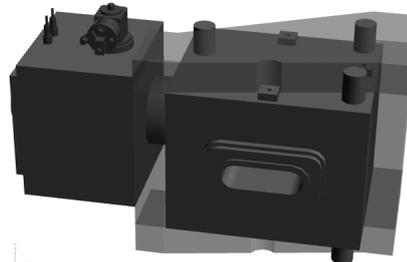


Fig. 3 Schematic view of the model magnet.

4. 磁場均一度に影響を与える因子の抽出

加速器用マグネットには高い磁場均一度が要求される。コイルの巻線精度が磁場均一度に与える影響の把握を目的とし、試作コイルの巻線精度と使用した RE 系線材の寸法とを測定すると共に、巻線精度が磁場に与える影響を計算によって評価した。その結果、使用線材長約 20m の幅方向寸法に peak to peak で 0.17mm のばらつきがあり、試作コイル巻線部での線材幅方向の凹凸は巻線の位置ずれよりも、線材寸法が支配的であることが判った。他にも磁場分布に影響を与える因子を洗い出し、解析によって磁場均一度への影響の確認を進めている。

5. まとめ

加速器用高温超伝導マグネットの性能検証用となるモデルマグネットの磁場設計を完了し、コイルとマグネットの試作を開始した。今年度にマグネット製作と検証試験を予定している。

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。

モデルマグネットを構成する RE 系三次元ネガティブバンドコイルの試作

Fabrication of the three dimensional REBCO coils for the FFAG model magnet

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

1. はじめに

重粒子線がん治療装置や加速器駆動未臨界炉などの加速器システムの高機能・高効率・小型化を目指し、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)加速器の高温超伝導化を検討している[1]。本検討を通して、高精度磁場発生技術や3次元巻線技術、高効率伝導冷却マグネット技術などの加速器用マグネットを高温超伝導化するための共通基盤技術の開発をおこなっており、現在本基盤技術の検証を目的にモデルマグネットの試作を計画している。本モデルマグネットは実機に要求される三次元立体形状や、ネガティブバンド形状を持ったコイルで構成され、本発表ではそのコイルを試作した結果について報告する。

2. コイル試作・特性評価

モデルマグネットは内側に凹んだネガティブバンド部を持つ4種類の平面コイル(A~D coil)と複雑な立体形状を持つ片立体コイル(E coil)とで構成される。各コイルの諸元を Table 1、Table 2 に示す。本諸元は実機コイル実現のために必要な巻線要素技術をすべて含む構成となっている。REBCO 線材を用いて上記5種類のコイルを試作した。コイルの外観を Fig.1、Fig.2 に示す。本コイルはネガティブバンド部や立体部を持つために、円形コイルで用いられるようなテンションを加えながら巻線する方法では形状を維持出来ない。そのため、ここでは線材とプリプレグテープとを共巻しながら巻線し、ヒーターを搭載したヘッドで前のターンに接着することで形状を維持する巻線方法を採用した。試作したコイルにおいて液体窒素中で通電試験を実施した。その結果を Fig.3 に示す。すべてのコイルにおいてn値20以上と良好な特性が得られ、本結果から、上記巻線方法に問題がない事が明らかとなった。

3. まとめ

線材を前のターンに接着する巻線方法においてモデルマグネットを構成する複雑形状を持った5種類のコイルの試作を完了し、通電試験によって良好な超伝導特性を確認した。

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

Table 1 Specifications of the negative-bend REBCO coil

Coil type	A	B	C	D
Radius of curvature of the negative-bend portion [mm]	3262	3186	3035	2884
Number of turns	100	100	60	50
Tape length [m]	79.5	94.0	70.6	68.4
Critical current [A]	37.1	47.8	52.7	46.6
n-value	21.5	21.9	22.1	21.4

Table 2 Specifications of the three-dimensional REBCO coil

Coil type	E
Radius of mandrel [mm]	150
Angle of the conductor [deg.]	42.2
Radius of curvature of the negative-bend portion [mm]	2700
Number of turns	50
Tape length [m]	75.0
Critical current [A]	67.3
n-value	24.2

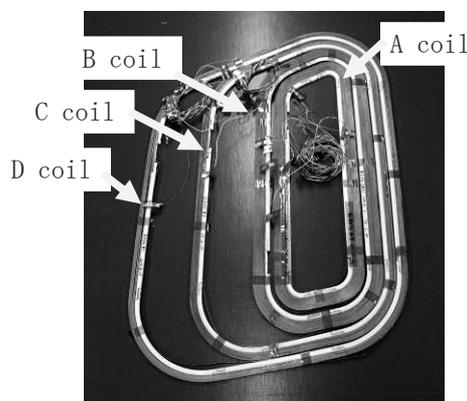


Fig.1 Outer view of the negative-bend REBCO coils

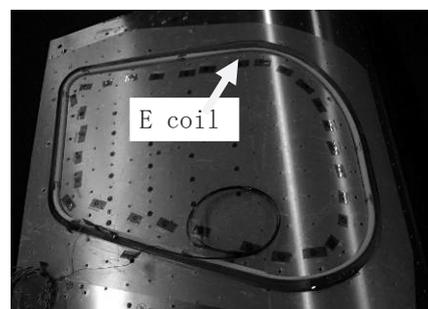


Fig.2 Outer view of the three-dimensional REBCO coil

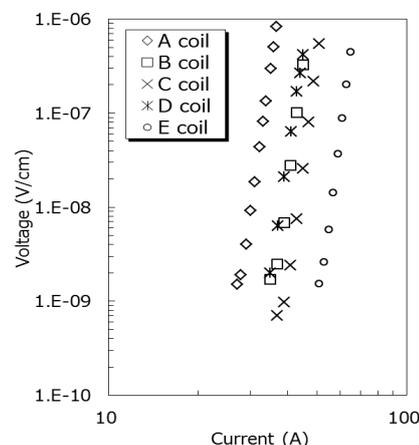


Fig.3 V-I characteristics of the REBCO coils

HTS マグネットを用いた NMR/MRI 開発における要素技術(1)

REBCO 多芯テープ線材の開発における内部スプリット技術のアイデアとその実証

Element technologies for NMR/MRI development using HTS magnet (1)

An idea of inner split technology for REBCO multi-core coated conductor and its demonstration

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

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

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

1. はじめに

次世代の NMR/MRI 開発に向けて、我々はV曲げによる内部スプリット技術(線材内部材料のみの分割技術)を用いた REBCO 多芯テープ線材の開発を進めている。ここでは、このタイプの線材をスプリッティング線材と呼ぶ。この技術のアイデアは REBCO 単芯テープ線材の機械強度と臨界電流の両方を高いレベルで維持しながら、あわせてテープ面の反磁性(遮蔽電流磁場)を改善しようとする目的から着想に至ったともいえる。最近の研究で、次世代の高分解能&高磁場均一度の NMR/MRI の実現には REBCO 単芯テープ線材の多芯化が必要不可欠な要素技術であることがわかり、今後解決すべき必須の課題となった。前報では長さ5.6mの3芯線について述べたが、今回は同じ長さの6芯線が製作できたので、製造評価で得られた知見を含め、内部スプリット技術による線材の高性能化について議論する。

2. REBCO 多芯テープ線材の製作

REBCO スプリッティング線材は、市販されている REBCO 単芯テープ線材を前駆体として、V 曲げなどの機械的加工によって得られている。セラミクスである REBCO 材料の脆性は線材化に大きな影響を与えてきたが、本研究の内部スプリッティングによる多芯化においてはこの脆性を活用して、線材の金属層はスプリッティングせずセラミクス層のみにスプリットを入れている。スプリットの加工速度は 300m/時間以上であり、シングルスプリッターで600m長さの6芯テープ線材を製作するにはわずか 10 時間程度で可能である。今までは SuperPower 製の幅 4mm の Gd123 テープ線材を使用し、6芯(スプリット5本)と長さ6mまで製作できている。Fig. 1に、ハステロイ側からスプリットを入れた6芯の線材表面写真を示す。フィラメントの平均幅は667 μ mである。

3. 線材評価

線材の評価では、臨界電流測定と引張強度および磁化測定などを行った。6芯までの線材の臨界電流は元のスプリッティングしていない線材の90%以上であり、引張試験において最大許容引張強度が90%以上であった。Fig. 2に例として元の線材と4芯(スプリット3本)のスプリッティング線材の引張なしと800MPaの引張応力下での臨界電流測定結果を示す。これらの結果から、内部スプリット技術により元の線材の臨界電流と引張強度をほぼ維持することを前提とした多芯化が可能であることが実証できた。

線材の反磁性(遮蔽電流磁場)の変化は外部印加磁場依存しているが、次世代 NMR 運転時の想定される磁場(例えば 25T)より低い 7T においても 6 芯のスプリッティング線材は元の線材の 15.5%に改善されていることが MPMS 測定から得られており、その結果を Fig. 3 に示した。

4. まとめ

REBCOスプリッティング線材は製造の効率が良く、テープ面の反磁性を大いに改善しながら元の線材の高臨界電流と高引張強度を保つ性能を持ち、次世代NMR/MRIの実現に有

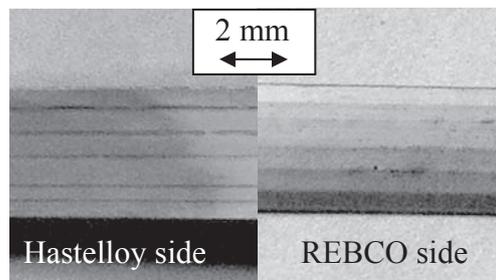


Fig. 1 Surface observation of six-core splitting wire. The splitting was carried out from hastelloy side.

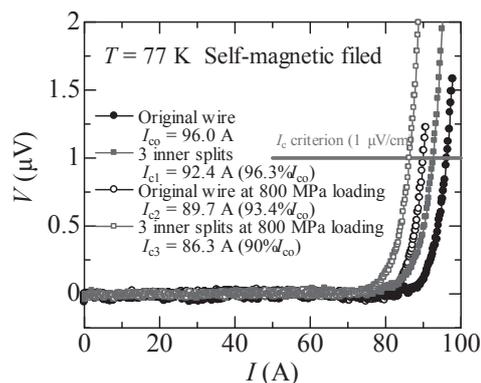


Fig. 2 I - V measurements for the original and splitting wires.

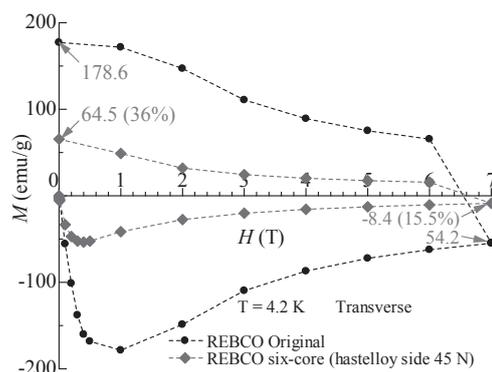


Fig. 3 I - V measurements for the original and splitting wires.

望な線材の一種として考えている。今後は実用線材の長尺化と多芯化においてさらに研究開発を進める予定である。

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

HTS マグネットを用いた NMR/MRI 開発における要素技術(2)

低包晶点 Yb123 バルクの結晶成長を利用いた Gd123 テープ線間のブリッジ接続

Element technologies for NMR/MRI development using HTS magnet (2)

A bridge joint between the Gd123 coated conductors by crystal growth using a low peritectic temperature Yb123 bulk

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

今まで我々は、既存の Y123 バルクの結晶成長技術を用いて、Gd123 テープ線材と Y123 バルク間の超伝導接続について開発を行ってきた[1]。モデル実験の結果、バルクと線材の接続面は 1.25MPa (50N) のせん断応力(半田付け接続強度の 38%)と 10A の臨界電流を持つ超伝導接続が測定できた。これらは実用超伝導接続における要素技術の一部であり、実現まではまだ様々な課題が残されている。本研究では全体の研究内容と、現在取り組んでいる課題について紹介する。

2. 超伝導接続の原理

バルクを用いた実用超伝導接続体は3つの技術要素部分から構成され、それぞれの完成度を含め、Fig. 1 にまとめた。図で線の長方形で示した接続体の中心は、種結晶である両側線材からの結晶成長でつながっており、複数の種結晶の近接効果により単一ドメインのバルクが形成されることはすでに知られている。もう一つの要素技術は、破線の長方形で示しているバルクと線材との接続であるが、上記のように我々が既の実証している。残りの技術課題は点線の長方形で示したように、実用長尺線材を用いた超伝導接続であり、バルクを用いた超伝導接続体の実現は後一步となった。この場合、接続体の全体において超伝導と機械強度の維持が必要となる。また、できるだけ加熱時の最高温度を下げることで焼成時間を短縮することが重要である。この最高温度は線材にとって 950°C 以下が望ましく、Y123 相より包晶温度が低い Yb123 相のバルクを用いることが考えられる。

接続方法は熱処理温度によって分類され、REBCO の相図からみれば、固相拡散または包晶温度近くでの熔融拡散 & 結晶成長、そして包晶温度以上に昇温した後に包晶点以下での結晶成長を利用する3つの方法がある。今回行ったのは3番目の方法であり、包晶バルクによる結晶的な接続方法(CJPB)と称する。前回報告した CJMB 法は熔融(分解熔融)バルクを用いた方法であり、上記の固相拡散法以外の2番目と3番目の方法が含まれる。

3. 接続体の作製と評価

今回はフジクラ製の幅 5mm、厚さ 0.2mm の臨界電流 210A (77K) 程度を持つ Gd123 テープ線材を使用し、接続用バルクは最高温度 900°C で固相法により作製した Yb123 バルクを用いた。線材の Gd123 層の露出処理では、まず Fig. 2 (a) のように線材の中心部分のみ剥離させ、臨界電流測定を行った後、線材の REBCO 層の露出部分を切断して2等分し、接続用線材とした。剥離は REBCO 層と銀層の間を約 5cm/min の速度でゆっくり行い、線材の接続部は REBCO 層と中間層とハステロイ層からなる構造である。線材の臨界電流は露出処理後にも 190A (元の 90%) 以上の値であることが測定されている。

加熱装置については、線材長さ方向で部分的に加熱するため、径 1cm 程度に集中加熱できる赤外線導入加熱装置 (Fig. 2 (b)) を利用した。様々な温度プロファイルで試した結果、接続時の線材の最高温度は 800°C まで下げることができ、

最高温度後は1時間内で徐冷しながら結晶成長を行った。本研究では CJPB 法であるため、接続した後の 123 相の形成、つまり 211 相と液相間の包晶反応による 123 相の成長での絶縁体から超伝導体(常温では導体)へ遷移過程を把握することが重要であると考えている。ここで、123 相はバルク中で電気伝導の良い物質であるため、バルク内部と接続部において 123 相が成長されてつながっていれば、接続体全体の電気抵抗は常温でも数十 Ω 程度以下に低いはずである。それで、次のステップである超伝導相を戻すための再酸素化熱処理を行う前に、まず常温で接続体の電気抵抗を測定し、評価した。その結果、数 MΩ の抵抗から数 kΩ、現在は 70 Ω 程度に降下させることができた。この値は 123 相でつながっている場合(酸素追加無)と同程度であるので、今後はすでにモデル実験で得られた技術を利用して、酸素アニール処理で超伝導相を戻すための適切な温度プロファイルを調べる予定である。

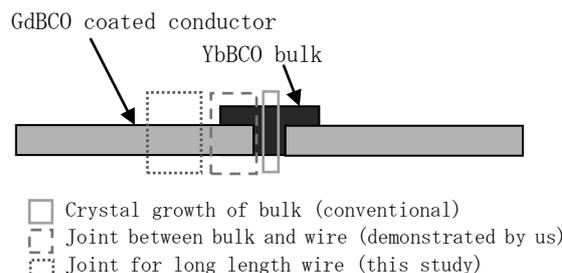


Fig. 1 Joint configuration and element technologies in CJMB method.

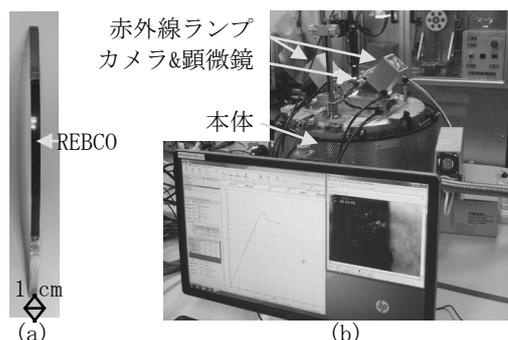


Fig. 2 (a) The Gd123 layer exposed wires to measure the critical current, and (b) Infrared heater.

4. まとめ

今回は Yb123 バルクを用いて、線材の最高温度 800°C で接続体を作製した。CJPB 法による超伝導接続体の実現までの最後の段階に向けて開発研究を進めている。

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