

# FFAG 加速器に向けた高温超伝導モデルマグネットの三次元磁場測定

## THREE-DIMENSIONAL MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS OF A HIGH TC SUPERCONDUCTOR MODEL MAGNET FOR FFAG ACCELERATORS

Hanako Marui<sup>#,A)</sup>, Taro Masugu<sup>A)</sup>, Ryushi Kasoku<sup>B)</sup>  
吉本政弘<sup>#,A)</sup>, 武藤正文<sup>B)</sup>, 栗山靖敏<sup>B)</sup>, 上杉智教<sup>B)</sup>, 石 禎浩<sup>B)</sup>, 森 義治<sup>B)</sup>,  
坂洋輔<sup>C)</sup>, 李陽<sup>C)</sup>, 曾我部友輔<sup>C)</sup>, 富永直樹<sup>C)</sup>, 雨宮尚之<sup>C)</sup>,  
小柳圭<sup>D)</sup>, 高山茂貴<sup>D)</sup>, 田崎賢司<sup>D)</sup>, 折笠朝文<sup>D)</sup>, 石井祐介<sup>D)</sup>, 来栖努<sup>D)</sup>, 荻津 透<sup>E)</sup>  
Masahiro Yoshimoto<sup>#,A)</sup>, Masahumi Muto<sup>B)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>B)</sup>, Tomonori Uesugi<sup>B)</sup>, Yoshihiro Ishi<sup>B)</sup>,  
Yoshiharu Mori<sup>B)</sup>, Yosuke Saka<sup>C)</sup>, Yang Li<sup>C)</sup>, Yusuke Sogabe<sup>C)</sup>, Naoli Tomiyama<sup>C)</sup>, Naoyuki Amamiya<sup>C)</sup>, Kei Koyanagi<sup>D)</sup>,  
Shigeki Takayama<sup>D)</sup>, Kenji Tasaki<sup>D)</sup>, Tomofumi Orikasa<sup>D)</sup>, Yusuke Ishii<sup>D)</sup>, Tsutomu Kurusu<sup>D)</sup>, Toru Ogitsu<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA) / J-PARC

<sup>B)</sup> Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)

<sup>C)</sup> Faculty of Engineering, Kyoto University

<sup>D)</sup> TOSHIBA Corporation

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

In the project “Challenge to functional, efficient, and compact accelerator system using high Tc superconductors” funded by the Japan Science and Technology Agency under its S-Innovation Program, feasibility studies to achieve high Tc superconducting (HTS) accelerator magnets are carried out. We designed a principle realistic coil configurations by using tape-shaped coated HTS conductors based on a spiral-sector type of FFAG accelerator for carbon cancer therapy. In order to establish winding technologies for these coil configurations, a model magnet was fabricated and three-dimensional field mapping was carried out.

### 1. はじめに

JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム「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」(プロジェクトマネージャー: 雨宮(京大))では、FFAG 加速器への高温超伝導の適用を検討している<sup>[1]</sup>。テープ形状のRE系高温超伝導線材を使用する場合、スパイラルセクタ型でかつ電流配置により磁場形状を形成するFFAG マグネットが、巻線技術として最も製作が困難である。そこで、この複雑な形状のマグネットに対する巻線技術の実証と発生磁場の検証を目的としたモデルマグネットを製作し、磁場評価の第1段階として三次元磁場マッピング測定を実施した。本論文では、モデルマグネットの三次元磁場マッピング測定に関して測定系やアライメント方法について説明した後、解析の進んでいる室温及び低温(120K)の常伝導モードでの測定結果について詳しく報告する。

### 2. モデルマグネットの目的

本プロジェクトは、加速器マグネットを高温超伝導化することを目的とし、共通基盤技術となる「機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術」の確立を目指して2010年1月から開始した。これまでFFAG 加速器の概念設計<sup>[2,3,4]</sup>、テープ形状の高温超伝導線材を用いたマグネット設計<sup>[2,3,5]</sup>、巻線

技術<sup>[6,7]</sup>、線材磁化による磁場精度への影響<sup>[2,3]</sup>、中性子照射によるアルミニウムや銅の伝導率への影響<sup>[8]</sup>等の項目について検討を進めてきた。これらの課題について様々な観点からの比較・検討を経て、重粒子線がん治療装置用スパイラルセクタ型FFAG炭素イオン加速器に焦点を絞り、マグネットの詳細設計を進めた。FFAG磁場を作るマグネットについて、高磁場化と軽量化の観点から磁性体支配型マグネット(superferric)ではなくコイル支配型マグネットを採用した。また鉄心の配置について、コイル設計難度と冷却重量の観点から低温鉄方式(cold bore)ではなく常温鉄方式(warm bore)を採用した。コイルの巻線形状について、使用線材量の低減とビーム方向漏れ磁場の低減実現するために、Fig.1(a)のような新たなマグネット設計を提案した<sup>[9,10]</sup>。これは二極磁場を生成するメインコイルと磁場勾配を生成する分布コイルの組み合わせ方式<sup>[11]</sup>をテープ形状高温超伝導線のコイルに応用したものである。レーストラック断面ビームダクトを採用することで、分布コイルは変形パンケーキコイルを組み合わせた平面梯子型コイルで実現することが可能となった。メインコイルには高磁場側での磁場漏れを抑えるために鞍型コイルを変形させた片立体コイルとした。

以上の詳細設計を踏まえて、高温超伝導マグネットの加速器応用の実現性を検証すべく、モデルマグネットの試作<sup>[12,13]</sup>と性能評価試験を実施した。モデルマグネットの目的は、実用化に向けた三次元巻線技術や高効率伝導冷却技術等を実証することである。

<sup>#</sup> gakkai@kasokuki.com

そのためモデルマグネットの設計は、(1)スパイラル磁場分布を実現するためのネガティブバンド形状、(2)磁場勾配を生成するための平面梯子コイルの組み合わせ、(3)立体的な鞍型形状を実現するための三次元ひねり曲げ（フラットワイズ曲げ）を有する片立体コイル、のような課題を実用マグネットから抽出し、小型化した構造になっている（Fig.1 (b)参照）。鉄ヨーク（常温鉄心）を含めた三次元磁場計算（TOSCA）の結果、最大コイル電流 250A 時の中心平面での最大磁場は 0.37T となる。但し、モデルマグネットは巻線技術の検証が目的であるため、発生する磁場分布は正確には FFAG 磁場にはなっていないことに注意が必要である。



Figure 1: Schematic views of the Spiral FFAG magnet. (a) Designed coil shape for practical use. (b) Coil of the model magnet to implement coil winding technology.

モデルマグネットの性能評価試験として、ホールプローブによる三次元磁場マッピング測定及び回転ピックアップコイルを用いた多極磁場成分測定を行う。前者は TOSCA による計算磁場との比較から磁場分布の形状を評価することを目的とし、2016 年 3 月 3 日から 4 月 19 の期間に京都大学原子炉実験所で実施した。後者は FFAG 磁場特有の多極磁場成分を高い精度で評価することを目的とし、京都大学桂キャンパスにおいて 2016 年度の実施を計画している。

### 3. 三次元磁場マッピング測定

#### 3.1 磁場測定システムの構成

Fig. 2 は今回試作したモデルマグネットとホールプローブを用いた三次元磁場マッピング測定のシステム全体像を示したものである。システム構成として、三次元駆動ステージの上にプローブアライメント機構を設置し、さらに支持ロッドを介してホールプローブを取り付けており、マグネットに対してプローブを三次元方向(x, y, z)に走査することが出来る。座標系はマグネットからプローブを引き抜く方向を z 軸方向と定義し、z 軸から見て水平左方向を x 軸方向、鉛直上側を y 軸方向とした。プローブアライメント機構は回転ステージと二軸ゴニオメータを組み合わせたもので、プローブ本体に対して z 軸に対する方位角調整(yawing)と傾斜角調整(rolling 及び pitching)を独立かつ高精度に実現できる。

ホールプローブを用いて磁場の三次元成分を計測するためには、3 個のホール素子を (x, y, z) の三軸方向に配置して測定する方法が良く使われている。しかし、一般的に市販の三軸ホールプローブは 3 つの素子を小型ケースにモールドしていることが多く、位置及び角度（特に三軸の直行性）について高い精度を期待することは出来ない。そこで我々は、KEK

における FFAG の研究開発や J-PARC でのマグネット開発で実績の持つ、Group3 社製の一軸ホールプローブ MPT-141 を 3 台組み合わせる手法<sup>[4]</sup>を採用した。ホールプローブ MPT-141 は基準平面に対する素子の位置及び角度の精度の精度に優れているため<sup>[15]</sup>、3 台のホールプローブを収納するアルミニウム製のホルダーケースを高精度の精密機械加工で製作することで位置及び角度の高精度化を実現した。Fig. 3 は今回製作したホルダーケースを示したものである。市販の三軸プローブと比べてかなり大きくなるが、z 軸方向に 10mm ずつ 3 回走査することで結果として任意の位置での三次元磁場成分を得ることが出来る。

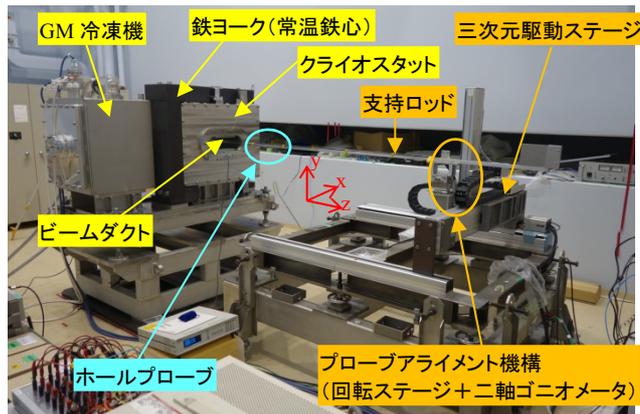


Figure 2: Setup of the 3D field measurement system with hall probes for the spiral FFAG model magnet.

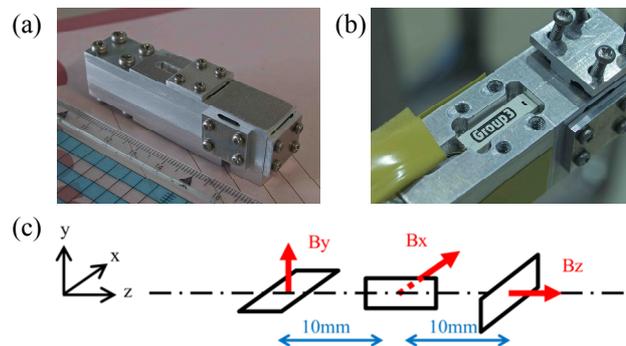


Figure 3: Holder case for the hall probe (MPT-141). (a) Photograph of the holder case. (b) Installation of the MPT-141 into the holder case. (c) Schematic diagram of three hall-probes layout.

#### 3.2 アライメント

三次元磁場マッピング測定に置いて、測定精度を決定するもう一つの要素は測定系全体のアライメントである。今回の測定システム構成の場合、モデルマグネット、三次元駆動ステージ、三軸ホールプローブの座標軸を精度よくそろえる必要がある。アライメントの具体的な手順を Fig. 3 の(a)から(e)の順に沿って説明する。

(a) 基準座標系の設置：

実験室に基準座標系( $x_0, y_0, z_0$ )を設定する。基準軸( $z_0$ 軸)及び水平面( $x_0$ - $y_0$ 平面)のレベル基準をそれぞれセオドライト及びオートレベルで設定する。光学観測系が動いてしまったときに確認できるように、ターゲットシールを壁面及び床面に張り付けておき、いつでも確認できるようにする。レベル基準を見るオートレベルはマグネット等による死角をなくするために実際には2台設置し、高さを揃えた。

(b) 三次元駆動ステージのアライメント:

三次元駆動ステージの三軸座標系( $x_s, y_s, z_s$ )を基準座標系( $x_0, y_0, z_0$ )の方向に合わせこむ。ステージにターゲットシールを張り付け、光学観測系で追跡する。まずオートレベルでターゲットシールを覗きながら  $x_s$  軸及び  $z_s$  軸を前後させて水準が変わらないように架台の高さ調整ボルトで調整する。次にセオドライトでターゲットシールを覗きながら  $z_s$  軸を前後させて軸がずれないように架台の水平面位置調整ボルトで調整する。実際にはこれらの作業を繰り返し、アライメントの精度を高める。

(c) ホールプローブのアライメント:

三次元駆動ステージにホールプローブを設置して、プローブ本体の座標系( $x_p, y_p, z_p$ )を基準座標系( $x_0, y_0, z_0$ )の方向に合わせこむ。プローブフォルダには精密機械加工時にケガキ線をつけており、このケガキ線を光学観測系で追跡する。(b)と同様にオートレベルでフォルダのケガキ線を覗きながら、プローブ調整機構の二軸ゴニオメータを使って、中央面( $x_p$ - $z_p$ 平面)を基準面( $x_0$ - $z_0$ 平面)一致させる。次にセオドライトで覗きながら回転ステージでプローブの中心軸( $z_p$ 軸)が基準軸( $z_0$ 軸)に一致させる。この調整も繰り返し実施することで精度を高める。

(d) モデルマグネットのアライメント:

プローブアライメント完了後に、モデルマグネットの据え付け・アライメントを行った。アライメント後にマッピング可能範囲が想定からずれて置き直しが必要な事態が生じることを避けるために、おおよその設置位置を床面にケガキを入れて置いた後にマグネットを据え付けた。アライメントはビームダクトケガキ線をマグネット座標系( $x_m, y_m, z_m$ )として採用し、基準座標系( $x_0, y_0, z_0$ )の方向に合わせこんだ。クライオスタットの真空容器についているケガキ線は確認のために使用した。マグネットの中央面( $x_m$ - $z_m$ 平面)のレベルを2か所に設置したオートレベルで覗きながら基準面( $x_0$ - $z_0$ 平面)に合わせるようにマグネット架台の高さ調整ボルトで調整する。またダクトフランジのケガキ線にアライメント糸を貼りつけ、セオドライトで覗きながら上下流の十字交差点を  $z_0$  軸に一致するようにマグネット架台の水平位置調整ボルトで調整する。この調整も精度を高めるために繰り返す。

(e)  $z$  軸方向の基準位置の確認:

(a)~(d)の調整で3つの三次元駆動ステージ( $x_s, y_s, z_s$ )、ホールプローブ( $x_p, y_p, z_p$ )、マグネット( $x_m, y_m, z_m$ )の3つの座標系はそろったが、 $z$  軸方向の相対位置関係は決定していない。(d)の時に取り付けたアライメント糸はビームダクトのフランジ面と一致して

いるので、プローブフォルダにあるホール素子の位置を示すケガキ線とアライメント糸を目視で合わせることでマグネットと三次元駆動ステージの  $z$  軸の相対位置関係を決定することができる。ケガキ線は10mm 間隔で3本あるので、目視で合わせる際にもステージを10mm ずつ駆動させ、3本のケガキ線がそれぞれ良く一致するように調整することで精度を高めるようにした。

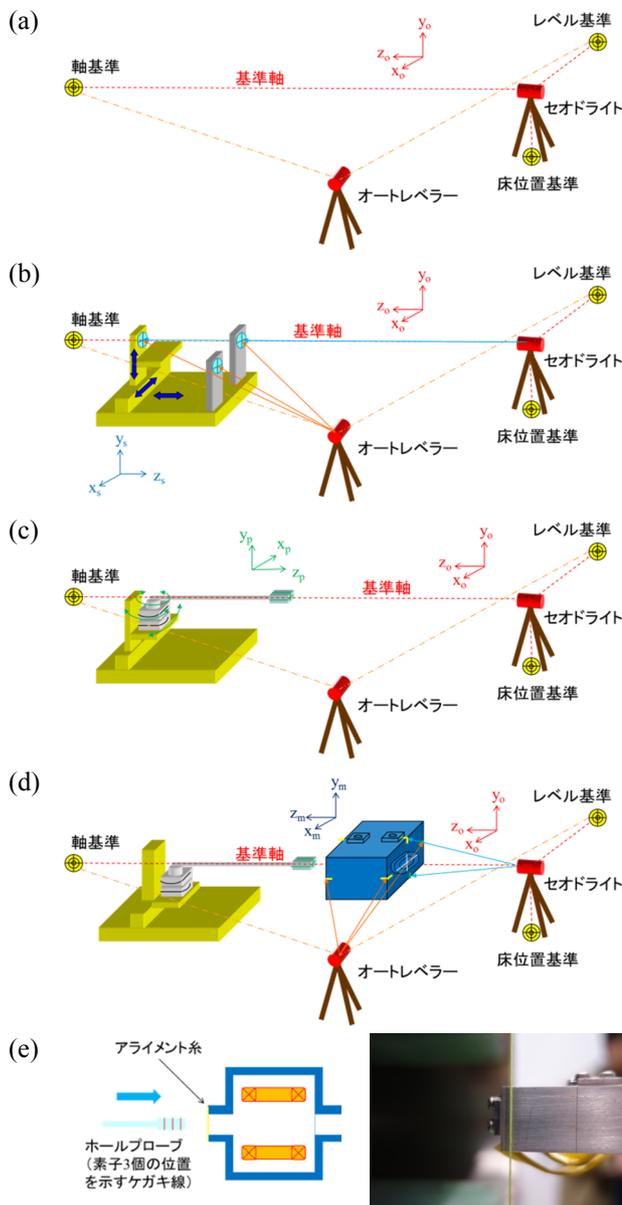


Figure 4: Alignment method for the field measurement.

### 3.3 測定条件

Table 1 はスパイラル FFAG モデルマグネットのマッピング磁場測定の測定条件をまとめたものである。モデルマグネットの性能評価試験は、今回のマッピング測定の他に、回転ピックアップコイルを用いた磁場高次成分評価試験を予定している。そのため今回の試験でコイル破損等による不測の事態を避けるために、冷却後低温時でも高温超伝導コイル

に最大定格 250A までの通電は行わず、10A までの通電に抑制した。また、常伝導モードとの比較も重要な課題である。このモードでも安全を優先させて最大電流を 0.5A までとした。

Table 1: 磁場マッピングの測定条件

実験項目	電流値
1 バックグラウンド測定	0A
2 室温・常伝導モードでの磁場マッピング <冷却>	±0.5A, ±0.3A
3 低温(120K)・常伝導モードでの磁場マッピング <冷却後>	±0.5A
4 励磁試験・磁場安定度評価試験	0~10A
5 低温(4K)・超伝導モードでの磁場マッピング測定	10A
6 鉄シムによる磁場分布調整試験 <昇温>	10A
7 低温 (120K)・常伝導モードでの磁場マッピング <昇温後>	±0.5A
8 室温・常伝導モードでの磁場マッピング	±0.5A, ±0.3A

### 3.4 バックグラウンド測定

今回製作したモデルマグネットはスケジュールの都合上、出荷前の工場試験（冷却試験や通電試験等）を実施せず、製作完了後すぐに測定室に搬入した。そのため通常あまり行われることのない、一度も通電経験の無い状態のマグネットに対するバックグラウンド測定を実施することができた。Fig. 5 はマグネットを設置する前と設置・アライメント後で励磁する前のバックグラウンド測定を比較したものである。設置前の磁場分布はおおよそ 0.5Gauss 程度ではほぼ様な分布をしており、地磁気による影響と考えられる。設置後の磁場分布はマグネットを中心に山型構造をしており、ピークはおおよそ 0.75Gauss であった。これは鉄ヨークの加工時に発生した残留磁化による影響と考えられる。また、もう一つ大きな特徴として、 $x = -150\text{mm}$  の軸上に沿った磁場分布をみると  $z = -200 \sim 0\text{mm}$  の領域で大きなキック構造があり、また  $x = 150\text{mm}$  の軸上でも  $z = -400 \sim -200\text{mm}$  の領域で小さなキック構造がみられる。クライオスタット内部の測定領域の近傍にコイルを支えるための支持治具があり、測定結果はコイル支持治具の一部に磁性材料を使用していた可能性を強く示唆している。このキック構造によるマッピング測定への影響は注意が必要である。

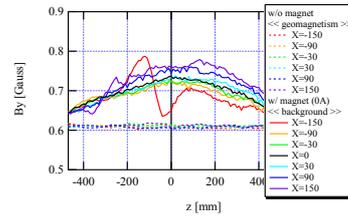


Figure 5: Measured distributions of the background magnetic field.

### 3.5 室温・常伝導モードでの磁場マッピング

Fig. 6 は室温・常伝導モードでの測定結果を示したものである。(a)はコイル電流 0.5A 時の、(b)はコイル電流-0.5A 時の測定結果を示している。全体として、設計磁場分布（スパイラル FFAG 磁場に似た構造）を再現しているが、明らかに正方向のオフセットしていることがわかる。また、 $x=150\text{mm}$  の軸上分布において僅かな歪みがみられる。これらの測定結果を平均することで、オフセット成分を抽出した結果が Fig. 6(c)である。このオフセット成分は Fig. 5 のマグネット設置後のバックグラウンド測定と一致していることがわかった。Fig. 7 はマッピング測定からバックグラウンド測定を差し引いた結果を示したものである。 $x = -150\text{mm}$  の軸上で見られた歪みもなくなり、コイル電流の向きに対する対称性に優れた結果を得ることができた。以上のことから、マッピング測定で得られた結果にはコイルが作る磁場分布に鉄ヨークやコイル支持治具による残留磁化成分が重畳しており、差し引くことで理想的なコイルによる磁場分布を得ることが分かった。

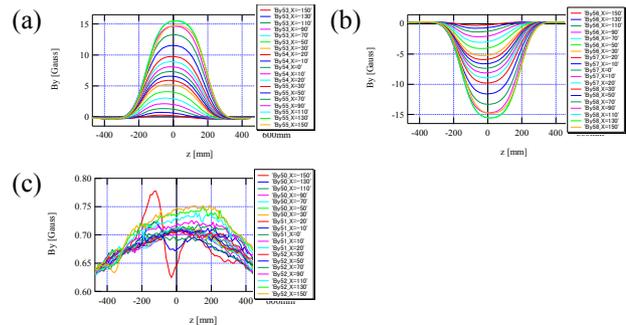


Figure 6: Measurement results of the field mapping at room temperature in a normal conducting state. (a) a coil current of 0.5A, (b) -0.5A. (c) Average of two distributions.

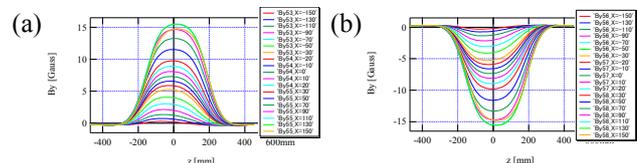


Figure 7: Measured field distributions corrected for offsets by using the background magnetic fields.

また Fig. 8 はコイル電流を $\pm 0.5A$  及び $\pm 0.3A$  通電時の積分磁場で見た時の励磁特性を示したものである。励磁特性はきれいな線形応答を示し、ヒステリシスは見られなかった。つまり、常伝導モードにおける $0.5A$  程度の小電流通電では鉄ヨークの磁化にはほとんど影響を与えていないことが分かった。マッピング測定で得られた磁場分布のオフセットはほとんど変化しないと考えるとよい。低温( $120K$ )・常伝導モードにおける測定データの解析もバックグラウンド測定の差し引き処理で十分であることが分かった。

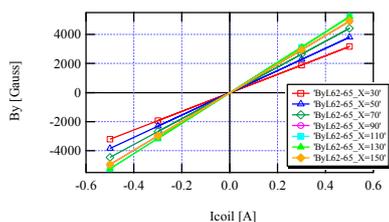


Figure 8: Excitation curve of the integrated magnetic field as a function of the coil current.

### 3.6 低温( $120K$ )・常伝導モードでの磁場マッピング

純粋にコイルやクライオスタットの冷却による影響を知るためには、低温で且つ常伝導モードでの磁場測定を行えばよい。そこで、常伝導モードを維持しつつ、冷却による影響が十分に効いてくる $120K$  付近でマッピング測定を行った。Fig. 9 はコイル電流 $0.5A$  時の低温時のマッピング測定結果をまとめたもので、(a)は室温時と比較、(b)は差分を示している。(a)はマグネットのミッドプレーンがずれたこと、(b)は上下コイルが $z$  方向に対してずれたことを示唆している。詳細な解析は現在 TOSCA を用いた磁場計算との比較を行っているところである。

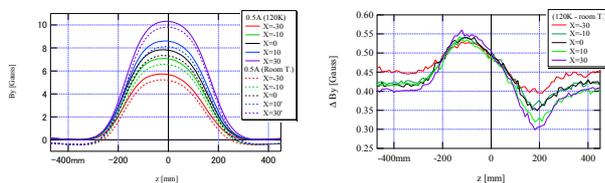


Figure 9: Measurement results at low temperature ( $120K$ ) in a superconducting state. (a) Comparison between at  $120K$  and room temperature. (b) Difference in the field distributions between at  $120K$  and room temperature.

## 4. まとめ

モデルマグネットの初期性能評価試験として、 $0.5A$  程度の小電流通電による3次元磁場マッピング測定を実施した。設計値よりもかなり小さな磁場分布を計測するために、G3社製の高性能ホールプローブを用いた3次元磁場マッピング測定システムを構築し、精密アライメントを実施した。磁場測定は無事完了し、常温及び低温( $120K$ )での磁場測定結果について解析した。その結果、この領域では鉄ヨー

ク等の磁化の影響が無いと、バックグラウンドを差し引く解析で精度の良い磁場分布評価が出来ることを確かめた。また、 $120K$  まで冷却することで、コイル収縮・移動の影響がみられることを確かめた。

## 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. Amamiya *et al.*, “Challengi to Functional, Efficient, and Compact Accelerator Systems using High Tc Superconductors”, TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn) Vol. 48, No. 1, (2013), p30 (in Japanese).
- [2] N. Amamiya *et al.*, “Reserch and development of fundamental technologies for accelerator magnets using high Tc superconductors”, Phys. C, Vol. 482 (2012), p74.
- [3] N. Amamiya *et al.*, “Progress of research and development of fundamental technoloties for accelerator magnets using coated conductors”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, No. 3 (2013).
- [4] B. Qin *et al.*, “Compact superferriic FFAG accelerators for medium energy hadron applications”, Nucl. Instr. And Meth. A 648 (2011) p28.
- [5] K. Takahashi *et al.*, “Magnetic field design of coil-dominated magnets wound with coated conductor”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3 (2012).
- [6] K. Koyanagi *et al.*, “Development of saddle-shaped coils using coated conductors for accelerator magnets”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, Issue 3 (2013).
- [7] K. Takahashi *et al.*, “Superconducting properties of experimental YBCO coils for FFAG accelerator magnets”, Phys. C, vol 507 (2014), 032048.
- [8] M. Yoshida *et al.*, “Neutron irradiation effect in aluminium stabilizer of superconducting cable for the COMET experiment at J-PARC”, Proc. ICEC24-ICMC2012, p685 (2013).
- [9] K. Goda *et al.*, “A Novel Magnet Design Using Coated Conductor for Spiral Sector FFAG Accelerators”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, No. 3 (2014), 4402605.
- [10] K. Takahashi *et al.*, “Fabrication of Three-Dimensional HTS Coils for Accelerator Magnets”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015), 4602804.
- [11] M. Yoshimoto *et al.*, “Magnet design study for the FFAG Accelerator”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 14, pp. 397-401, Jun, 2004.
- [12] N. Amamiya *et al.*, “Progress of Fundamental Technology R&D Toward Accelerator Magnets Using Coated Conductors in S-Innovation Program”, IEEE, Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015), 4003505.
- [13] K. Koyanagi *et al.*, “Design and Experimental Study of a Model Magnetfor Spiral-Sector FFAG Accelerators”, Vol. 26, No. 3 (2016), 4402705.
- [14] M. Yoshimoto *et al.*, “Field Measurement of DC Magnets at 3-GeV RCS in J-PARC”, Vol. 18, No. 2 (2008), P301.
- [15] <http://www.group3technology.com/vdb/document/36>