テーマ解説

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

雨宮 尚之^{*1,†}, 来栖 努^{*2}, 荻津 透^{*3}, 野田 耕司^{*4}, 森 義治^{*5}, 吉本 政弘^{*6}

Challenge to Functional, Efficient, and Compact Accelerator Systems using High T_c Superconductors

Naoyuki AMEMIYA^{*1,†}, Tsutomu KURUSU^{*2}, Toru OGITSU^{*3}, Koji NODA^{*4},
Yoshiharu MORI^{*5} and Masahiro YOSHIMOTO^{*6}

Synopsis: Application of high T_c superconductors to accelerator magnets provides the following benefits. It reduces power consumption compared to copper magnets, it allows simple operation and less governmental regulation compared to low T_c superconductors because of the applicability of cryocoolers, and it is potentially more stable thermally, when operated at high temperatures where the specific heats of materials are large. An R&D project focusing on fundamental technologies for accelerator magnets using coated conductors is in progress, funded by the Japan Science and Technology Agency from January, 2010. Stage I of the project was completed successfully in March, 2012, and the project moved to the four-year Stage II in April, 2012. We aim to realize application of high T_c superconductors to magnets of strong-focusing accelerators for carbon cancer therapy or accelerator-driven subcritical reactors (ADSR). In Stage I, we conceptually designed a couple of fixed-field alternating gradient (FFAG) accelerators for carbon cancer therapy and for ADSR as well as a beam transport line for a carbon cancer therapy facility. Based on the conceptual designs of accelerators, coil-dominated magnets and iron-dominated magnets wound with coated conductors were designed. The required winding technologies were clarified through designing these magnets, and the R&D of winding technologies for coils with three-dimensional shape and those with negative bend have been carried out. The influence of the magnetization of coated conductors on the field quality of magnets was studied experimentally. The influence of the neutron radiation on the conductivity of aluminum and that of copper was also studied.

Keywords: magnet, accelerator, coated conductor, magnetization

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

荷電粒子を電場による力で加速する装置が加速器であるが、その中でも円形加速器においては、荷電粒子を周回させて、電場による加速部（高周波加速空洞など）を繰り返し通過させて高エネルギーまで加速する。荷電粒子を周回させるためには、荷電粒子の軌道を曲げねばならず（偏向）、そのために磁場によるローレンツ力を利用する。粒子のエネルギーが同じであるならば、磁場が強いほどローレンツ力は大きくなり軌道半径、すなわち円形加速器の半径も小さくできる。しかし、銅線で巻いた電磁石（マグネット）では、電流密度の制約から起磁力を大きくできないため、鉄心によって磁気抵抗を下げた上で鉄磁極間ギャップの磁場を利用せざるを得ず、発生できる磁場はたかだか2 T程度である。また、銅線で巻いたマグネットではジュール損失も大きく、運転に必要な電力も大きくなってしまふ。

Received November 20, 2012

^{*1} 京都大学 大学院工学研究科
〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂
Graduate School of Engineering, Kyoto University,
Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo, Kyoto 615-8510, Japan

^{*2} (株) 東芝
〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1
Toshiba Corp., 1-1-1 Shibaura, Minato, Tokyo 105-8001, Japan

^{*3} 高エネルギー加速器研究機構
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
KEK, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

^{*4} 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1
National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage,
Chiba 263-8555, Japan

^{*5} 京都大学 原子炉実験所
〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2
Research Reactor Institute, Kyoto University, 2 Asashiro-Nishi,
Kumatori, Osaka 590-0494, Japan

^{*6} 日本原子力研究開発機構
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
JAEA, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

† E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

大型ハドロン衝突器（LHC）のような高エネルギー物理学研究用の大型加速器では、粒子エネルギーが極めて大きく粒子の軌道を曲げるために高い磁場が必要なことから、液体ヘリウムで冷やす低温超伝導線で巻いた超伝導マグネットがしばしば用いられる。このような超伝導マグネットは、冷凍効率を考慮しても、消費電力を銅マグネットより小さくできる。

一方、医療用や産業用の中小型加速器には、主に銅マグネットが用いられてきた。原理的には、これらの加速器においても超伝導マグネットは魅力的であり、放射光源用のシンクロトロン¹⁾や陽子線がん治療装置用のサイクロトロン²⁻⁴⁾に低温超伝導マグネットが応用されている。しかし、冷却システムが複雑になり加速器システム全体としてメリットを出しにくいこと、低温超伝導マグネットにおけるクエンチ可能性が利用者に受け入れられにくいことなどが、超伝導マグネットの広範な応用にあたっての障害となっていることも事実である。

比較的高い温度領域で運転可能な高温超伝導を加速器用マグネットに適用できれば、冷凍効率も高くなる上、冷凍機による直接伝導冷却も可能なこと、物質の比熱が大きくなり超伝導安定性も向上し得ることなどから、超伝導化の敷居を低くできる可能性がある。しかし、高温超伝導線で加速器用の超伝導マグネットを巻いた例はなく、固有の技術課題も多く、それらを解決しなければ加速器用高温超伝導マグネットは実現できない。

2. プロジェクト（課題）の概要

本プロジェクトは、2010年1月から10年度計画で、

- 1) 加速器マグネットを高温超伝導化するための共通基盤技術として位置付けた「機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術」を確立し、これをモデルマグネットで検証し（ステージⅠ、Ⅱ）、
- 2) モデルマグネットをスケールアップしてプロトタイプマグネットを製作し、これをビームラインに設置し加速器マグネットとしての機能を実証しようとするものである（ステージⅢ）。

加速器としてはモジュール型のマグネットを並べることで構成できる固定磁場強集束（FFAG）加速器やシンクロトロンを想定している。FFAG加速器は、直流励磁マグネットで構成可能でかつ強集束という特徴を有している。

ステージⅠ、Ⅱにおいて確立を目指す「機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術」は、以下のような要素技術から構成される。

- ① 高温超伝導による機能結合型マグネット技術：偏向、集束といった複数の機能をひとつのマグネットで実現する技術
- ② 高精度磁場発生技術：粒子軌道制御に必要な高精度の磁場を発生する技術

- ③ 高精度3次元巻線技術：加速器マグネット特有の立体的巻線を高精度で実現する技術
- ④ 高効率伝導冷却マグネット技術：加速器特有の発熱を考慮した伝導冷却マグネット技術
- ⑤ 放射線環境対応技術：ビーム損失による放射線負荷に対応する技術
- ⑥ 高温超伝導加速器システム技術：ビーム光学など加速器としてのシステム設計技術

2012年3月までのステージⅠは、世の中に存在しない、高温超伝導マグネットを用いた加速器がいかなるものかというイメージを得るために、

- ・ 高温超伝導を使った加速器システムの概念確立
- ・ 加速器用高温超伝導マグネットの概念確立

を目標として実施した。加速器の概念設計と高温超伝導マグネットの概念設計を相互に結果をフィードバックしつつ行い、これらの概念設計を通して、マグネットならびに加速器実現のために要求される要素技術の水準を明確にしていた。さらに、これを踏まえ、巻線技術の開発、高精度磁場発生のための線材磁化が磁場精度に与える影響の研究、中性子照射がアルミニウムや銅の導電率に与える影響の検討などを行った。2012年4月以降のステージⅡにおいても、概念設計の高度化と要素技術研究開発の深化を進めている。

3. これまでの成果

3.1 加速器の概念設計

機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術を生かす加速器として、固定磁場強集束（FFAG）加速器を設計した⁵⁻⁷⁾。FFAG加速器は粒子ビームの特性という点からはシンクロトロン的一种とみなせる加速器であり、リング中心からの距離を r として、 r^k に比例する非線形磁場 B によって、ビームの偏向、集束を行う。また、直流磁場を用いるため超伝導技術の適合性が高い。重粒子線がん治療装置と加速器駆動未臨界炉（Accelerator-Driven Subcritical Reactor, ADSR）における使用を想定したFFAG加速器の設計を行った。そのほか、重粒子がん治療装置用ビームラインについても設計を行った。

- (1) 重粒子線がん治療装置用ラディアルセクタ FFAG 炭素イオン加速器^{8,9)}

ラディアルセクタ FFAG 加速器ではビーム軌道をリングの内側へ曲げる集束マグネット（水平方向に集束／垂直方向に発散）と外側へ曲げてしまう発散マグネット（水平方向に発散／垂直方向に集束）を周期的に並べることで、強集束作用を得る。発散マグネットを配置することからリングサイズが大きくなるが、マグネット間の直線部への機器配置の自由度や設計・製作のしやすさの点ではすぐれている。既存の治療施設では半径10 m程度のシンクロトロン加速器が利用されているが、我々は最大5~10 Tの磁場に

Table 1 Outline of accelerator designs ⁹⁾

Name	R-C	S-C	S-A
Type	Radial sector (FDF triplet)	Spiral sector	Spiral sector
Purpose	Cancer therapy	Cancer therapy	ADSR
Particle	C^{+6}	C^{+6}	Proton
Energy	20 - 400 MeV/u	40 - 400 MeV/u	200 - 1000 MeV/u
Packing factor	0.535	0.35	0.33
k value	4.2	3.6	9.0
Number of cells	8	10	16
Average orbit radius	3.75 - 5.09 m	2.6 - 3.45 m	9.26 - 10.2 m
Spiral angle	-	51.0 deg	60.0 deg

よってビーム曲率半径 2.5 m 程度のラディアルセクタ FFAG 加速器を検討した。設計した加速器は、ひとつのセクタに集束マグネット (F) 2 台と発散マグネット (D) 1 台を F-D-F と配置する FDF 型 FFAG 加速器であり、その諸元を **Table 1** (加速器 R-C)、平面図を **Fig. 1(a)** に示す。後述のマグネット設計において評価したマグネット重量をもとにすると、加速器の全重量は 150 t 程度と見積もられる。

(2) 重粒子線がん治療装置用スパイラルセクタ FFAG 炭素イオン加速器 ^{9, 10)}

スパイラルセクタ FFAG 加速器は、マグネット端部におけるビーム集束／発散効果 (edge focus) を利用した加速器で、ラディアルセクタ FFAG 加速器のようなビーム軌道を外側に曲げてしまう発散マグネットが不要であり、磁場強度が同じであればリング径を小さくできるし、リング径が同じであれば磁場強度を下げられる。また、必要な線材量も低減できる。設計した加速器の諸元を **Table 1** (加速器 S-C)、平面図を **Fig. 1(b)** に示す。スパイラルセクタ FFAG 加速器のマグネットの磁場発生領域は **Fig. 1(b)** に示されるような形をしている。

(3) 加速器駆動未臨界炉用スパイラルセクタ FFAG 陽子加速器 ⁹⁾

加速器駆動未臨界炉 (ADSR) とは、加速した高エネルギー陽子を重金属標的に衝突させることでつくられた多量の核破砕中性子を未臨界炉心に導くことによりエネルギー増幅を得る原子力システムである。炉心に未臨界量の燃料しかないため安全度が高く、使用済み核燃料から出る高レベル放射性廃棄物を短寿命化する核種変換も可能である。加速器駆動未臨界炉に必要な大強度陽子加速器には、大強度 (mA 以上)、高エネルギー (GeV 以上)、高ビーム電力効率 (30% 以上) が要求される。FFAG 加速器の設計にあたり、特に高ビーム電力効率を考慮し、低磁場で高周波加

Fig. 1 Footprints of magnets of accelerators for carbon cancer therapy: (a) radial sector FFAG accelerator R-C and (b) spiral sector FFAG accelerator S-C. ⁹⁾

Fig. 2 Magnet types of accelerators.

速に無理のない設計パラメータを選択した。具体的には、磁場強度は 2 T 以下の範囲で磁性体支配型超伝導マグネットを用い、高周波加速装置の電力負荷を低減するためにリング径がコンパクトなスパイラルセクタ FFAG 加速器とした。設計した加速器の諸元を **Table 1** (加速器 S-A) に示す。粒子追跡シミュレーションにより 2 mA 以上のビーム加速が可能であることを確認した。入力電力約 4 MW (高周波電力 3.85 MW=350 kW×11、冷凍機消費電力 0.21 MW=6.5 kW×32) に対し、ビーム電力 (エネルギーゲイン分) は 1.6 MW=800 MV×2 mA のためビーム電力効率は 40% となり、システム成立に必要な効率を達成できている。

(4) 重粒子線がん治療装置用ビームライン

重粒子線がん治療装置の更なる普及のためには装置の小型化が重要な鍵を握るが、そのためには、加速用リングの小型化のみならず、患者に上方から照射するための垂直ビームラインの小型化も重要である。現用の銅マグネットを用いた高さ 17 m ある垂直ビームラインを小型化するために、偏向・集束機能を兼ね備えた機能結合型超伝導マグネットを用いた垂直ビームラインを設計し、高さを約 3 分の 1 に抑えることに成功した。

3.2 マグネットの概念設計

加速器用超伝導マグネットは、**Fig. 2** に示すような鉄支配型マグネットとコイル支配型マグネットに大別される。鉄支配型マグネットはスーパーフェリックマグネットとも呼ばれ、銅マグネットの銅コイルを超伝導コイルで置き換えたもので、鉄心に大きく依存するため 2 T を大きく超える磁束密度の発生は困難である。そのかわり、鉄磁極の形状により磁場分布・形状を精密に制御することができる。コイル支配型マグネットは、銅線より格段に高い電流密度が得られるという超伝導線の特性を積極的に利用したマグネットでは、鉄の飽和磁束密度を大きく超えた磁束密度を発生することができる。鉄はリターンヨークという形で補助的に使うのみで磁場整形を鉄磁極に頼ることはできず、コイル形状、すなわち導体配置を精密に設計し、精度よく巻線することによって、磁場分布・形状を精密に制御する。

以下、高温超伝導線を用いたコイル支配型マグネットの設計技術と、3.1 の加速器を構成するコイル支配型マグネットと鉄支配型マグネットの設計例について説明する。

(1) コイル支配型マグネットの設計技術^{8,9,11)}

コイル支配型マグネットにおいては、高温超伝導線の機械的特性を考慮しつつ、必要な磁場分布・形状を実現するコイル形状を設計しなければならない。

加速器用マグネットの発生磁場を議論する際には、ビームの偏向や集束といったマグネットの機能の観点から多極磁場成分に分解することがしばしば行われる。例えばビームを偏向させるために必要な磁場成分は 2 極磁場成分であり、集束させるために必要な磁場成分は 4 極磁場成分である。また、2 極磁場成分も 2 種類に分けられ、想定した方向にビームを偏向させる成分はノーマル成分、それとは方向が 90 度ずれた成分はスキュー成分と呼ばれる。ビーム偏向マグネットを例として考えると、必要とされる 2 極磁場成分以外の多極磁場成分は誤差磁場である。典型値としては、磁場利用空間において、2 極磁場成分に対する高次磁場成分の相対値は $10^{-3} - 10^{-4}$ 程度以下である必要があるとされている。

ここでは、以下のような手順でコイル支配型マグネットのコイル設計を行った。

- 1) コイル断面内で発生すべき 2 次元磁場を多極磁場成分に展開する。

(例) FFAG 加速器の場合、磁場は以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} B(r) &= B_0 (r/R_0)^k = B_0 \left\{ (R_0 + x)/R_0 \right\}^k \\ &= B_0 \sum_{n=1}^{\infty} r_0^{n-1} \frac{k!}{R_0^{n-1} (n-1)! \{k - (n-1)\}!} \left(\frac{x}{r_0} \right)^{n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 R_0 は加速器の主半径、 r_0 は参照半径（ビームが通過する領域で磁場精度を確保する領域の半径）、 x はマグネット中心からの径方向距離である。

Fig. 3 Bird's eye view of a coil-dominated magnet for accelerator R-C.⁸⁾

Fig. 4 Top view of the inner-most layer of the designed magnet shown in Fig. 3: (a) generalized flat-wise bending radius and (b) edge-wise bending strain.

- 2) $2n$ 極磁場成分がビームを囲む円筒上で $\cos n\theta$ 分布を持った面電流で与えられることを利用し、多極展開した磁場を与えるコイル断面内の導体配置を決定する。

(例) 1) の例の多極展開された磁場は、以下のような電流分布で与えられる。

$$i(\phi) = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R_c^n}{\mu_0} \frac{k!}{R_0^{n-1} (n-1)! \{k - (n-1)\}!} \cos(n\phi) \quad (2)$$

ここで、 R_c は円筒状面電流の半径である。このような面電流分布を近似的に与えるように導体を配置する。

- 3) 2) の導体配置を加速器リング周方向に引き伸ばし、線材の機械的特性（許容歪み、最小フラットワイズ曲半径）を考慮しながらコイルエンドを形成する。この際、微分幾何学的アプローチにより、線材形状と歪の関係を得る。
 - 4) 3) でできあがった 3 次元形状のコイルに流れる電流が作る磁場をビーム周回方向に沿って積分した積分磁場を計算し、これを積分磁場の仕様値と比較する。
 - 5) 4) の誤差を補正すべく、2) に戻って断面内の導体配置を補正する。
- 2) - 5) を所要の精度の磁場分布が得られるまで繰り返し、コイル形状を決定する。

Fig. 5 Coil shape of the coil-dominated magnet for accelerator S-C: (a) top view, (b) side view and (c) bird's eye view.⁹⁾

Fig. 6 Return yoke and field clamps together with the coil.⁹⁾

(2) コイル支配型マグネットの設計例^{8,9)}

(1)の方法によって設計した加速器 R-C (Table 1) のコイル形状を **Fig. 3** に示す。このコイルは、RE123 線材を使用するものとし、線材のフラットワイズ最小曲げ半径 20 mm 以上、エッジワイズ曲げ歪 0.3% 以下という制約条件のもとでコイルエンドを形成し設計した。この設計では、臨界電流の磁場依存性等については考慮していない。設計したコイルのフラットワイズ曲げ曲率 (半径の逆数) とエッジワイズ曲げ歪の分布を **Fig. 4** に示す。簡単化のために断面形状を円として設計したが、実際には、ビーム方向の漏れ磁場 (マグネット間に漏れ出す磁場) 低減と磁場発生効率化という観点からは、コイルを縦方向に圧縮した楕円断面などのコイルが望ましい。

加速器 S-C (Table 1) について、設計の第一段階として、機械的特性は考慮せずに線材を自由に曲げられる線電流で近似して、コイル設計を行った。設計されたコイルの形状を **Fig. 5** に示す。このコイルはビーム方向の漏れ磁場を低減するために楕円断面で設計し、さらに、**Fig. 6** に示すようなリターンヨークとフィールドクランプという鉄による磁場整形効果を確認するため、有限要素法による電磁場解析を行った (透磁率は一定と仮定)。なお、フィールド

Fig. 7 Effect of return yoke and field clamps to reduce leakage magnetic field.⁹⁾

クランプによる磁場整形は銅マグネットにおいても行われているものである。**Fig. 7** に磁場の周方向分布を示すが、リターンヨークとフィールドクランプにより漏れ磁場が抑制できている様子がわかる。

(3) 鉄支配型マグネットの設計例⁹⁾

加速器駆動未臨界炉用の加速器の場合、小型化はさほど重要ではなく、運転電力低減が超伝導化の主目的であるのでマグネットの高磁場化は必ずしも必要ではない。そこで、コイル支配型マグネットに比べて技術的難易度が低いと考えられる鉄支配型マグネットを、加速器 S-A (Table 1) について設計した。設計したマグネットの鉄心を含む概形やコイルを **Fig. 8** に示す。鉄心は室温部におかれ、鉄心のスロット中に設置されたクライオスタットの中に RE123 線材で巻かれたコイルを収納した設計になっている。

3.3 巻線技術

コイル支配型マグネットを実現するためには 3 次元形状のコイルを巻く技術が必要とされる。また、スパイラルセ

Fig. 8 Iron-dominated magnet for accelerator S-A: (a) entire magnet, (b) horizontal cross-section of the magnet and (c) cross-section of the coil installed in the cryostat placed in a slot of iron.⁹⁾

Table 2 Specifications of the YBCO saddle-shaped coil ¹²⁾

Outside dimensions	350 × 240 mm
Minimum winding radius	40 mm
Number of turns	100
Tape length	90 m
YBCO tape width × thickness	3 × 0.1 mm

Fig. 9 Saddle-shaped 100-turn coil. ¹²⁾

クタ FFAG 加速器用マグネットを実現するためには、負曲率の部分（ネガティブベンド）を持ったコイルを巻く技術が必要とされる。そこで、薄膜線材によってこのようなコイルを巻く技術の開発を進めている。マグネットは伝導冷却を想定しており、コイルはエポキシ含浸コイルである。

(1) 3次元コイル巻線技術 ¹²⁾

3.2(2)で示したラディアルセクタ FFAG 加速器 R-C 用コイル支配型マグネットの設計に基づき 3次元形状コイルを試作した。巻線方法として、線材を巻き取る巻枠側にビームダクト相当の曲率を持たせた巻枠を保持して、角度を変えながら回転させて線材を巻く方法を採用した。実機の一部に相当する 3次元形状コイルを巻線するためのプロトタイプ巻線機を設計・製作し、巻線を行った。

試作したコイルの巻枠は、台形を曲率半径 700 mm の円筒表面に沿わせた「瓦」のような形状をしており、この巻枠を回転・傾斜させながら、スプールに巻いてある線材を巻き取るような形で巻線していく。コイルの諸元を **Table 2** に、外観を **Fig. 9** に示す。このコイルは、加速器 R-C 用マグネットのコイルの一部とほぼ同等な形状をしている。試作したコイルはエポキシ含浸前後において、液体窒素中で通電し電圧－電流特性を測定し、劣化なく超伝導特性が保持されていることが確認できた。 10^{-9} V/cm の電場領域で求めた n 値は 20 以上であった。

(2) ネガティブベンドコイル巻線技術 ¹³⁾

スパイラルセクタ FFAG 加速器用の鉄支配型マグネットのコイルを模擬したネガティブベンドコイルを試作した。試作したコイルはネガティブベンド部を有する変形シングルパンケーキコイルである。ネガティブベンド部を治具で押さえる方法で形状を維持しながら巻線した。コイルの諸元を **Table 3** に、外観を **Fig. 10** に示す。コイルは室温硬化型樹脂で真空含浸されている。液体窒素中における通電試験結果によれば、コイル n 値は 33 で 10^{-9} V/cm の低電場領域まで良好な超伝導特性を示した。

3.4 線材磁化が磁場精度に与える影響

Table 3 Specifications of the YBCO negative-bend coil ¹³⁾

Outside dimensions	460 × 190 mm
Radius of negative-bend part	442 mm
Minimum winding radius	20 mm
Number of turns	100
Tape length	100 m
YBCO tape width × thickness	5 × 0.2 mm

Fig. 10 Negative-bend 100-turn coil. ¹³⁾

高温超伝導テープ線材で巻いたマグネットにおいては、線材の磁化（線材面内を流れる遮蔽電流）が付加的な磁場を発生し、コイル発生磁場の高精度化に影響する。NMR マグネット等でも遮蔽電流の影響は検討されているが、加速器マグネットは運転（励磁）パターンが複雑であること（一日の間での発生磁場の変更、励消磁の繰り返しなどの可能性があること）、ビームの偏向や集束といった機能の観点から、磁場を多極磁場成分に分解して議論する場合が多いことなどの点で特徴的であり、これらを考慮して、線材磁化が磁場精度に与える影響の評価を行った。

(1) 実験的評価 ⁹⁾

5 mm 幅の RE123 線材で巻かれた直線部長さ 250 mm、幅 153 mm のレーストラックコイル 2 つを積み重ねたものを片極とし、これを 58 mm 離して対向させて空心の 2 極マグネットを構成した。これを液体窒素で浸漬冷却し、58 mm の空間に挿入したインサートクライオスタット内部の室温空間で回転するピックアップコイルによって、マグネットの発生する磁場の多極成分を測定した。励磁履歴によって磁場の多極成分は影響を受けるが、電流フラットトップ到達後 8 時間での 2 極成分と 6 極成分のドリフトは、2 極成分の線材磁化を無視した理論値で規格した相対値で、それぞれ 4.8×10^{-4} 、 1.3×10^{-4} と比較的小さかった。

(2) 理論的評価 ⁸⁾

実規模のマグネットにおける線材磁化が磁場精度に与える影響について調べるために、**Table 4** に諸元を示した 2 極マグネットについて超伝導特性を考慮して線材内部の電流分布まで求める電磁場解析を行い、マグネット発生磁場の多極成分を求めた。解析はマグネット直線部が無限に延びると仮定して 2 次元断面内で行った。電流がフラットトップに達した後のマグネット断面内の電流分布を **Fig. 11** に、そのときのマグネット発生磁場の多極成分を **Fig. 12(b)** に示

Table 4 Dipole magnet for the numerical electromagnetic field analyses to evaluate the influence of tape magnetization ⁸⁾

Type of magnet	Cosine-theta
Radius of mandrel	60 mm
Inner radius of iron yoke	120 mm
Reference radius	30 mm
Magnetic field at magnet center	3.26 T
Operation current per tape	200 A
Number of turns	2800

Fig. 11 Current distribution in the cross-section of the dipole magnet. ⁸⁾

した。比較のために、線材磁化を無視した場合の多極成分を Fig. 12(a)に示した。線材磁化により高次多極磁場成分は増えるが、2 極成分に対する相対値で 5×10^{-4} 程度であることがわかる。これは、ビーム偏向用 2 極マグネットの磁場精度の目安である 10^{-4} と比べ極端に大きな値ではない。

3.5 中性子照射がアルミニウムや銅の導電率に与える影響

加速器駆動未臨界炉などに用いられる大強度の加速器においては中性子照射による材料の劣化は懸念材料である。中でも、高純度の銅やアルミニウムの導電率の低下（熱伝導率の低下）は、それらの安定化材としての性能のみならず、伝導冷却マグネットの伝熱材料としての性能にも影響する。これに関しては、低温下での中性子照射が高純度アルミニウムおよび銅の導電率に与える影響を実験的に調べられている ¹⁴⁾。照射量は原子炉 1 MW 運転時で約 1.4×10^{15} n/m²/s で、試料温度は 12 K である。アルミニウム、銅ともに照射により電気抵抗が増大するが、例えば、初め RRR が 500 であったアルミニウムに照射を行った場合、電気抵抗は照射時間に比例して増加し、1 MW 照射時の総照射量 2×10^{20} n/m² で RRR が 300 程度まで劣化することがわかった。RRR が 3000 の高純度アルミニウムに照射を行った場合も、1 MW、52 時間の照射で RRR が 400 程度まで劣化する。熱伝導率は導電率と同様の劣化を示すと考えられるの

Fig. 12 Multipole coefficients of the magnetic field in the cosine-theta magnet: (a) uniform current distribution in each coated conductor assumed and (b) tape magnetization (shielding current) considered via numerical analysis.

で、中性子が照射される環境で用いる伝導冷却マグネットでは伝熱板の高純度アルミニウムの劣化を考慮に入れて設計を行う必要がある。一方、アルミニウムの場合、室温まで昇温すれば RRR が完全に復帰することも実験的に確認できた。これは考慮すべき照射量が一回の低温運転期間に限定されることを示し、室温昇温を定期的に入れる等の運用で劣化を防げる可能性を示す。

4. まとめ

高温超伝導を利用した重粒子線がん治療用加速器と加速器駆動未臨界炉用加速器とそれを構成する高温超伝導マグネットの概念設計を行った。概念設計を通して明らかになった巻線技術に対する要求にこたえるべく、3 次元コイル巻線技術の開発、ネガティブバンドコイル巻線技術の開発を実施した。また、線材磁化が磁場精度に与える影響や中性子照射が導電・伝熱材料の特性に与える影響などについて要素研究を行った。今後、ステージ II においては、マグネットの小型化を目指した加速器とマグネットの概念設計の高度化、巻線技術のスケールアップを行い、伝導冷却されたモデルマグネットにおいて、高精度磁場の発生を含め要素技術を統合検証する。ステージ III においては、プロトタイプマグネットを試作し加速器マグネットとしてのビーム誘導機能の実証を行う予定である。

本解説は、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研究開発の成果をまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) N. Takahashi and H. Yamada: "Development of small synchrotron radiation source "AURORA"," Sumitomo Heavy Industries Technical Review **39**-116 (1991) 2-10 (in Japanese)
高橋令幸, 山田広成: 「小型シンクロトン放射光源"オーロラ"の開発」, 住友重機械技報 **39**-116 (1991) 2-10
- 2) H. Röcken, et al.: "The VARIAN 250 MeV superconducting compact proton cyclotron: medical operation of the 2nd machine, production and commissioning status of machines No. 3 to 7," Proceedings of CYCLOTRONS (2010) 283-285 (TUM1CCO04)
- 3) M. Schippers, et al.: "First year of operation of PSI's new SC cyclotron and beam lines for proton therapy," Proceedings of the Eighteenth International Conference on Cyclotrons and Their Applications (2007) 15-17
- 4) <http://mevion.com/triniobium-core>
- 5) K.R. Symon, et al.: "Fixed-field alternating-gradient particle accelerators," Phys. Rev. **103** (1956) 1837-1859
- 6) S. Machida, Y. Mori and R. Ueno: "Beam optics design of an FFAG synchrotron," Proceedings of European Particle Accelerator Conference (2000) 557-559
- 7) T. Obana, et al.: "Magnetic field design of superconducting magnet for a FFAG accelerator," IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 1185-1188
- 8) N. Amemiya, et al.: "Research and development of fundamental technologies for accelerator magnets using high T_c superconductors," Physica C **482** (2012) 74-79
- 9) N. Amemiya, et al.: "Progress of research and development of fundamental technologies for accelerator magnets using coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond, accepted for publication (presented at ASC 2012, 3LA-04)
- 10) B. Qin and Y. Mori: "Compact superferric FFAG accelerators for medium energy hadron applications," Nucl. Instr. and Meth. A **648** (2011) 28-34
- 11) K. Takahashi, et al.: "Magnetic field design of coil-dominated magnets wound with coated conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4901705
- 12) K. Koyanagi, et al.: "Development of saddle-shaped coils using coated conductors for accelerator magnets," IEEE Trans. Appl. Supercond, accepted for publication (presented at ASC 2012, 2LPG-04)
- 13) S. Takayama, et al.: "Fabrication of YBCO coils for accelerator magnet development (1) YBCO negative-bend coil," The 2012 Annual Meeting Record IEE Japan (in Japanese)
高山茂貴ら: 「加速器用マグネット開発に向けた高温超伝導コイルの製作 (1) Y系ネガティブベンドコイルの試作」, 平成24年電気学会全国大会講演論文集
- 14) M. Yoshida, et al.: "Neutron irradiation effects in aluminum stabilizer of superconducting cable for the COMET experiment at J-PARC," Proceedings of ICEC24-ICMC2012, accepted for publication (presented at ICEC24-ICMC2012, 17P-P06-07)

雨 宮 尚 之

1962年生。1985年東京大学工学部電気工学科卒業。1990年同大学院工学系研究科博士課程電気工学専攻修了。同年横浜国立大学勤務。2008年京都大学に異動、同教授。超伝導体の電磁現象、超伝導応用の研究に従事。低温工学・超伝導学会、電気学会、日本物理学会、プラズマ・核融合学会会員。工学博士。

来 栖 努

1967年生。1989年東北大学工学部原子核工学科卒業。1994年同大学院工学研究科博士後期課程(原子核工学専攻)修了。1994年(株)東芝研究開発センター勤務。超伝導応用機器の研究開発に従事。2008年より(株)東芝本社勤務。主に超伝導応用機器のエンジニアリングに従事。工学博士。

荻 津 透

1962年生。1984年筑波大学第3学群基礎工学類卒業。1986年同大学院理工学研究科修士課程修了。1986年高エネルギー物理学研究所(現高エネルギー加速器研究機構)勤務。加速器用超伝導技術開発に従事。低温工学・超伝導学会。博士(工学)。

野 田 耕 司

1981年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部部長。1989年より重粒子線がん治療装置 HIMAC の建設、医用重イオンシンクロトロンの研究開発に従事。2006年より高速3次元スキャンニング法による高精度治療照射法の開発研究に従事。工学博士。

森 義 治

1950年生。1973年九州大学工学部応用原子核工学科卒業。1978年同大学院工学研究科博士課程修了。1978年高エネルギー物理学研究所, 1994年東京大学原子核研究所教授, 2005年京都大学原子炉実験所教授。加速器物理研究に従事。日本物理学会, 米国物理学会, 原子力学会, 加速器学会会員。工学博士。

吉 本 政 弘

1972年生。1997年同志社大学工学部電子工学科卒業。2002年同大学院工学研究科博士後期課程(電気工学専攻)修了。2005年日本原子力研究開発機構に勤務。大強度陽子加速器施設 J-PARC にて加速器で用いるマグネットやビームモニタの研究・開発に従事。日本物理学会会員。工学博士。