

大学の研究・動向

高温超伝導を用いた粒子加速器用マグネットの研究

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

教授 雨宮尚之
准教授 中村武恒

1. はじめに

私たちの研究室では、平成22年1月から、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」の支援を受けて「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」という課題名の研究プロジェクトを、株式会社東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、京都大学原子炉実験所、日本原子力研究開発機構と共同で推進しています。このプロジェクトは、高温超伝導マグネットを粒子加速器に応用するための基盤技術の構築を目指すものですが、プロジェクト開始より6年余を経て、当初は、どんな「形」のものかもはっきりしていなかった、高温超伝導を用いた粒子加速器用のマグネットも、その姿が具体化し、この3月には、これまで、共同で研究開発を進めてきた基盤技術を検証するためのモデルマグネットというマグネットを製作し、その試験を開始するに至りました。本稿では、高温超伝導や粒子加速器の基礎から説き起こして、上記プロジェクトにおける産学連携による研究成果の一端について紹介させていただきます。

2. 超伝導線と超伝導マグネット

超伝導体（超伝導材料）は、超伝導状態になる温度である臨界温度により、低温超伝導体と高温超伝導体に大きく分類されることが多いです。このうち、低温超伝導体は、主に合金ないし金属間化合物で、ニオブチタン合金 NbTi（臨界温度 9.8 K）がその代表例です。一方、1986 年以降、相次いで発見された高温超伝導体は、イットリウムやビスマスなどの銅酸化物です。高温超伝導体は、元来、脆いセラミックスではありますが、ビスマス-ストロンチウム-カルシウム-銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223)（臨界温度 110 K）や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212)（臨界温度 90 K）、イットリウム-バリウム-銅酸化物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ (Y-123)（臨界温度 92 K）（イットリウム (Y) は、ガドリニウム (Gd)、サマリウム (Sm) などの希土類で置き換え可) について、金属と複合することにより柔軟性をもった実用的な高温超伝導線が市販されるに至っています (図 1)。

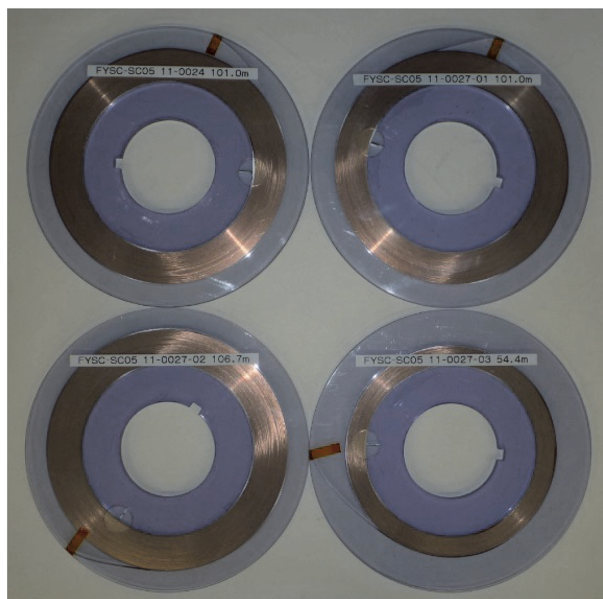


図 1 筆者らが購入した市販の高温超伝導線 (350 m)

NbTi 超伝導線を用いた超伝導マグネットは、MRI マグネットなど、広く実用に供されています。欧州原子核研究機構の世界最大の粒子加速器 LHC では、約 1700 台の NbTi 超伝導線で作られた超伝導マグネットが稼動しています。一方、高温超伝導線を用いた超伝導マグネットの本当の意味での実用化はこれからです。しかし、相対的に高い温度で運転できることが、擾乱に対する高い超伝導安定性（温度が高い故の大きな比熱に起因）や冷却効率の点で魅力的であるほか、液体ヘリウム温度では低温超伝導線よりずっと臨界磁界が高いために、超強磁界マグネットの実現の可能性という点でも強い興味を持たれています。

3. 円形粒子加速器

一般に粒子加速器では電界により荷電粒子を加速しますが、円形加速器では、加速部（高周波加速空洞など）を効率的に利用するため、荷電粒子を周回させ加速部を何度も通過させて、通過のたびに荷電粒子を少しずつ加速していきます。荷電粒子の軌道を偏向させ周回させるために、軌道面に垂直に磁界をかけて、これによるローレンツ力を向心力として利用します。磁束密度の大きさが B であるとき、質量 m 、電荷 q 、速さ v の荷電粒子の軌道半径は次式で与えられます。

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (1)$$

実際の円形加速器では、粒子の速さ v は次第に大きくなっていくので、 B が一定であれば r も大きくなっていきます。空間的にもほぼ一様で時間的にも一定な磁界で、粒子にらせん状の軌道を描かせながら加速する加速器がサイクロトロンです。これに対し、加速に応じて磁界を増加させ、軌道半径を一定に留める加速器がシンクロトロンです。また、円形加速器の中心から遠ざかるにつれて非線形に大きくなるように分布した磁界を与え（具体的には中心からの距離のべき乗に比例させる）、加速につれて軌道半径は大きくなるものの、大きくなり具合を抑え込むような加速器に固定磁界強集束（FFAG）加速器があります。シンクロトロンと FFAG 加速器には荷電粒子のビームを強く集束できるという利点があります。サイクロトロンと FFAG 加速器には直流マグネットで実現できるという利点があります。実績という点では、FFAG 加速器はサイクロトロンとシンクロトロンに劣ります。

電流密度を高くできない銅線で巻いたマグネットでは起磁力を大きくできないため、鉄心により磁気抵抗の小さい磁気回路を構成し、鉄心間のギャップを粒子ビームが通過するような構造をしています。鉄の磁気飽和のために 2 T を超える磁束密度を得ることは困難です。これに対して、超伝導線には銅線に比べて格段に高い密度で電流を流すことができるので、鉄心に頼らず、すなわち、鉄心の飽和磁束密度は気にせず、コイルの起磁力を大きくすることによって高い磁束密度を得る超伝導マグネットが実現できます。マグネットを高磁界化できれば、(1) 式からわかるように小さな軌道半径で荷電粒子を曲げることができるので円形加速器を小型化できます。また、鉄心に頼らないのでマグネットを軽量化できます。さらに、水冷の銅マグネットは莫大な電力を直接消費し、加えて建屋空調にも大きな電力を必要としますが、超伝導マグネットでは、冷却システムの低い効率を考慮しても、消費電力を低減できます。

4. 高温超伝導マグネットを応用した円形加速器の展望

4.1 重粒子線がん治療装置のコンパクト化・省エネ化に向けた展望

粒子線がん治療は、がんの放射線治療の一種です。放射線治療に用いられる主な放射線にはガンマ線のような電磁波や陽子線、炭素イオン線（重粒子線）のような粒子線があり、比較的簡易な装置で発生できることからガンマ線のような電磁波の方が広く用いられています。しかし、粒子線には、体内深部の病巣に線量を集中できること、生物効果（細胞に対する影響）が大きいことといった利点があります。さらに、重粒子線には、生物効果が大きいこと、散乱が小さくがん組織と周囲の正常組織に対する線量

のコントラストを高められることといった優位性があると言われていています。重粒子線がん治療装置の概念を図2に示します。荷電粒子を治療に必要なエネルギーまで加速するための粒子加速器や加速された荷電粒子を患者まで導き患部に照射するための高エネルギービーム輸送系・照射系が必要で、治療施設が大がかりなものになってしまうことが欠点です。

この欠点を少しでも克服することが、重粒子線がん治療の普及のために重要ですが、超伝導を用いた偏向マグネットの高磁界化は小型化のための本質的な解となり得ます。以下、シンクロトロンを用いた重粒子線がん治療装置を例に簡単な試算を示します。超伝導化によって偏向マグネットの磁界を1.5 Tから4.5 Tと3倍にできればビーム軌道半径は3分の1となり、偏向マグネット間の直線部の存在を考慮してもリング直径は2分の1程度になると考えられ、面積で見れば4分の1の小型化が期待できます。治療室の上方から照射する固定ポートにかかわる高エネルギービーム輸送系についても、高さの低減が期待できます。また、小型・軽量の回転ガントリー（高エネルギービーム輸送系・照射系の最終段を患者の周りで回転できるようにして、360度任意の方向からの照射を可能にする装置）も実用化できます。シンクロトロンと回転ガントリーを超伝導化することにより、重粒子線がん治療装置を設置するための放射線シールド建屋を、建屋面積で40%減、建屋高さで30%減と大幅に小さくでき、その建設コスト節減の効果は大きいです。建設コストのみならず、設置面積を小さくできることは治療施設の立地上大きな利点であり、重粒子線がん治療の普及に大きく貢献すると期待されています。また、重粒子線がん治療装置の年間ランニングコストは10億円を超えますが、その半分以上はマグネットの運転や建屋空調の電気使用料であり、この節減の効果も期待できます。

重粒子線がん治療装置への超伝導応用は、回転ガントリーで先行しており、最近、放射線医学総合研究所にNbTi伝導冷却マグネットを用いた回転ガントリーが設置されました。この回転ガントリーに用いられているマグネットは最大約3 Tの磁界を発生することができ、回転ガントリーの重量は300トン程度と、銅マグネットを用いたドイツの回転ガントリー（600トン）に比べると大幅な軽量化に成功しています。ただ、より高磁界化をはかり、陽子線回転ガントリーなみの200トン程度まで軽量化するためには、臨界温度が高く本質的に超伝導安定性に優れた高温超伝導の利用が必要であると考えられ、東芝・京都大学・高エネルギー加速器研究機構による研究開発が行われています。円形加速器本体に関しては、ビームを強く集束ができ、かつ、超伝導化の容易な直流マグネットで構成可能なFFAG加速器への高温超伝導応用が、京都大学・東芝・高エネルギー加速器研究機構・放射線医学総合研究所・日本原子力研究開発機構により検討され、基盤技術の研究開発が進められてきました。これらの研究開発の結果、テープ形状の高温超伝導線に立体形状のコイルを精度良く巻く技術や、超伝導線内部の電磁現象を理解し高精度の磁界を発生する技術など、高温超伝導を応用して重粒子線がん治療装置のコンパクト化・省エネ化をはかるために必要な技術が着実に構築されつつあります。

4.2 加速器駆動システムを成立させ得る高効率高強度陽子加速器の実現に向けた展望

加速器駆動システム（ADS）は、加速器駆動未臨界炉とも呼ばれ、加速器で加速した陽子をターゲット（液体鉛・ビスマス）に当て、発生した中性子を未臨界核燃料体系に当てて燃焼させる原子炉です。その概念を図3に示します。そもそも未臨界の燃料体系しかもたないため加速器の運転を止めれば炉も止まること、核廃棄物のうち高放射性・長寿命核種の短寿命化が可能であることなどから興味を持たれています。ADSは、物理的には実証されているものの、加速器の高効率化がその実用化のためには必須です。加速器のビーム電力効率を、「ビーム電力/加速器運転に必要な総電力」で定義します。銅マグネットを用いた加速器のビーム電力効率はせいぜい数%とまじりです。ビーム電力を10 MW、ビーム電力効率を5-10%とすると、加速器運転のために500 MW-1000 MWの電力が必要となり、中規模原子力発電所一基分の発電電力に相当します。これでは、核廃棄物処理ではなく核廃棄物をより多く生産する

システムとなり破綻します。核廃棄物処理を目的とした ADS が成立するためには最低 30% 以上のビーム電力効率が必要であるといわれています。

筆者らは、ADS 用の FFAG 加速器ならびにこれを構成する高温超伝導マグネットの概念設計を行いました。設計した加速器は、200 MeV の陽子を 1 GeV まで加速し、2 mA のビーム電流が得られるものです。ビーム電力（エネルギー利得）は、 $(1 \text{ GV} - 200 \text{ MV}) \times 2 \text{ mA} = 1.6 \text{ MW}$ となり、これに対し入力電力は、高周波電力 $350 \text{ kW} \times 11 = 3.85 \text{ MW}$ 、マグネット冷却用冷凍機消費電力 $6.5 \text{ kW} \times 32 = 0.21 \text{ MW}$ 、合計約 4 MW と見積もられました。すなわち、ビーム電力効率は約 40% となり、成立要件を満たしています。

今後の世界規模のエネルギー需要の増大、二酸化炭素排出量抑制の必要性を鑑みると、再生可能エネルギーを最大限導入しつつも、核分裂による原子力エネルギーも重要であると考えられます。ADS は、それ自身でエネルギーを発生すると同時に、高レベル放射能核廃棄物問題の解決にも資するものであり、その実用化が期待され、そのためには高温超伝導マグネットを利用した高効率高強度陽子加速器の実現が不可欠です。

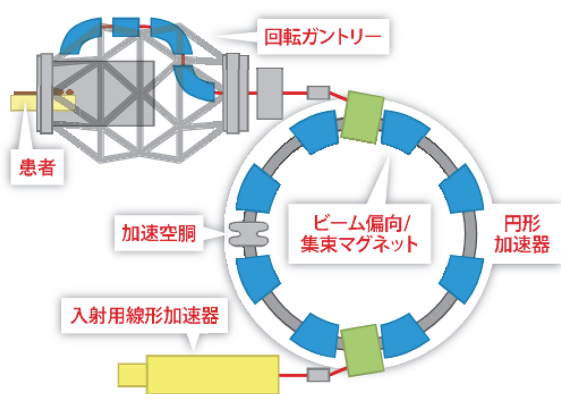


図2 重粒子線がん治療装置の概念図

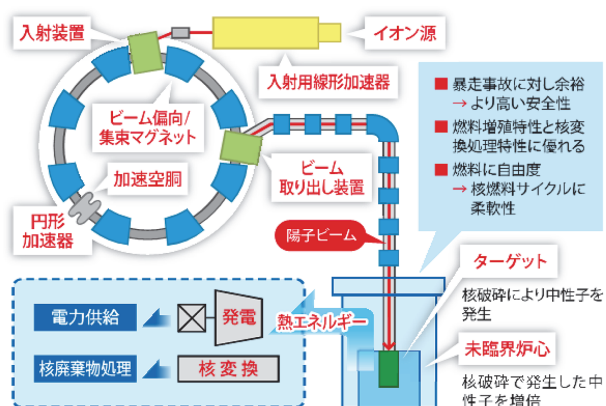


図3 加速器駆動システムの概念図

5. 京都大学における取り組み

超伝導の中でも、高温超伝導は、20 K から 30 K といった比較的高い温度で使うことができ、資源問題があり大型システムでは法規制も受ける液体ヘリウムによる冷却システムを使わずに、冷凍機とよばれる装置で直接冷却し運転できるマグネットを構成しやすいです。高温超伝導マグネットは加速器用マグネットとしても非常に魅力的ではありますが、これを実現するためには、解決しなければならない技術課題も多いです。まず、多くの加速器用マグネットでは超伝導線を複雑な 3 次元のコイルに巻く必要があるため、これを実現する巻線技術の開発が必要です。すなわち、テープ形状をした高温超伝導線の機械的特性を考慮しつつ、3 次元形状のコイルを巻く技術を開発しなければなりません。その際、高精度の磁界を発生するために高い巻線精度も要求されます。また、全てを巻線技術に押し付けるのではなく、なるべく巻線が容易なコイル形状で、必要な分布・強度・精度の磁界を発生できるマグネットの設計も重要です。また、テープ形状をした高温超伝導線において、テープ面上を流れる遮蔽電流（極めて減衰時定数の長い渦電流）が磁界精度を低下させる懸念もあり、これを克服する技術の研究開発も必要です。

このような技術課題の解決に向けて、筆者らは、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)」の支援を受け、東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、京都大学原子炉実験所、日本原子力研究開発機構と共同で、「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」という課題名の研究開発プロジェクトを推進しています。これまで、

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

などの要素技術の研究開発を進め、それを総合的に検証するためのモデルマグネットを平成27年度には製作しました（図4）。現在、このモデルマグネットの性能を確認する試験を行っている段階です。



図4 高温超伝導モデルマグネット