

大学の研究・動向

超伝導応用のエネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野への展開 ― トピック：粒子加速器の高機能・高効率・小型化：粒子線がん治療装置の小型化などを目指して ―

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
amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

准教授 中 村 武 恒
tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 超伝導工学分野（雨宮研究室）における研究の概要

我々の研究室では、超伝導線、その中でも比較的高い温度で超伝導状態となる高温超伝導線を、エネルギー・環境分野、医療分野、産業・交通分野など、多様な分野に展開するための研究を行っています。

我々の研究の先に想定される超伝導応用には様々なものがありますが、主な例としては、超伝導送電ケーブル、重粒子線がん治療装置などに用いる高温超伝導加速器、高温超伝導かご型誘導／同期機の三つが挙げられます。

超伝導送電ケーブル（図1）は、コンパクトで大容量、しかも低損失での送電を可能にするものであり、世界的にも超伝導の電力応用の最右翼として活発に研究開発が繰り返されているものです。我々の研究室では、超伝導送電ケーブル実用化の鍵となる交流損失低減に関する研究を実施しています。

重粒子線がん治療は、正常な組織を温存しながらがん細胞だけを壊す放射線がん治療の一種で、粒子を加速する加速器にマグネット（電磁石）が用いられます。加速器用マグネットを高温超伝導化して、加速器を小型・高機能化し、重粒子線がん治療その他の加速器応用の新展開を目指す研究を行っています。

超伝導かご型誘導／同期機（図2）は、我々の研究室の独自のアイデアによる、車載用や液体水素燃料移送用他の応用が期待されるコンパクト・高トルク・高効率なモータです。高温超伝導線の非線形電磁特性に基づく第一原理的特性解明、全超伝導化、各種応用、制御法等の研究を推進しています。

これらの三つの応用のうち、超伝導送電ケーブルについては *cue* 第22号18ページにて、超伝導かご型誘導／同期機については *cue* 第19号18ページにて紹介させて頂いております。そこで、本稿では、粒子線がん治療装置などに用いる加速器の、高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型化について、以下に紹介させて頂くことに致します。



図1 超伝導送電ケーブル



図2 超伝導かご型誘導／同期機

2. トピック：高温超伝導による粒子加速器の高機能・高効率・小型化

2. 1 背景

荷電粒子を電場による力で加速する装置が加速器ですが、粒子をある程度高い速度（エネルギー）まで加速しようとした場合、電場による加速部（高周波加速空洞など）を有効に利用するために、粒子を周回させ同じ加速部を繰り返し通過させるということが行われます。これが円形加速器です（図3）。荷電粒子を周回させるためには、磁場によるローレンツ力を利用しますが、粒子のエネルギーが一定であるならば、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も小さくできます。しかし、銅線で巻いた

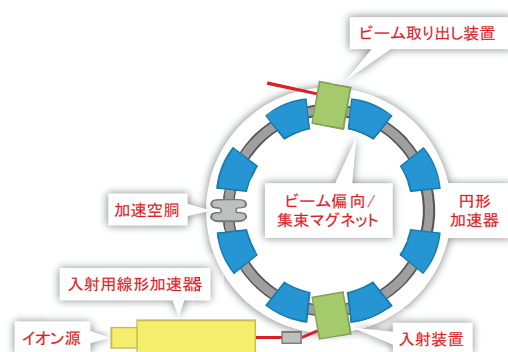


図3 円形加速器

たマグネットでは発生できる磁場はたかだか2 T程度であり、粒子のエネルギーが大きくなるにつれ装置は大型化してしまいます。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、運転には膨大な電力と冷却水が必要です。

これまで、医療用や産業用の中小型加速器には、主に銅線で巻いたマグネットが用いられてきました。一方で、高エネルギー物理学研究用の大型加速器では、エネルギーが極めて大きい粒子を周回運動させるためには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も用いられています。このような超伝導マグネットは、液体ヘリウム温度での冷却効率が数百分の一であることを考慮しても、消費電力を銅マグネットより小さくできます。原理的には、医療用や産業用の中小型加速器においても超伝導マグネットは魅力的ですが、冷却システムが複雑になり超伝導化してもトータルではメリットを享受しにくいこと、低温超伝導マグネットではクエンチ（超伝導が突然壊れる現象）の呪縛から逃れられないことなどが、超伝導マグネットの利用を妨げてきました。

高温超伝導も発見から二十余年が過ぎ、材料科学分野の研究開発努力により、ようやく長くて性能のよい高温超伝導線が製造されるようになってきました。イットリウム系などの高温超伝導線を用いれば、冷却効率の高い高温度領域で運転できること、高温度領域では物質の比熱が大きいため超伝導状態の安定性もよくなることから、超伝導化の敷居をずっと低くできます。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、また、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ません。

2. 2 目指す応用の例

1) 小型・高機能な重粒子線がん治療装置

重粒子線がん治療は、放射線治療の中でも特に副作用が少なく治療効果も高い治療法です。高温超伝導の適用により治療装置（図4）を小型化できれば、この治療法の普及を促進できます。重粒子線がん治療装置は、各県1台として国内50台、人口に比例するとして世界で2500台の需要が期待されています。建屋コスト含め1台150億円の建設コストが超伝導による小型化で半減できるとすればその効果は大きく、また、1台年間10億円を超えるランニングコストの過半は電気使用料で、超伝導化によるその削減効果も大きいと期待されています。

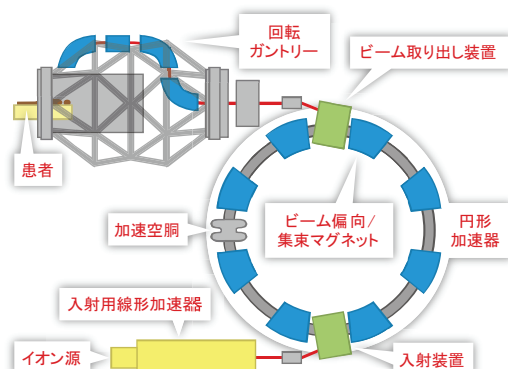


図4 重粒子線がん治療装置

2) 加速器駆動未臨界炉

加速器駆動未臨界炉（図5）とは、未臨界の核燃料体系に中性子を注入することにより中性子が注入している間だけ核反応を起こさせる原子炉の一種で、エネルギーの発生のほか、長寿命の高放射性核廃棄物の短寿命化が可能なことから注目されています。加速器駆動未臨界炉では、加速器で加速した陽子をターゲットにあてて中性子を生成しますが、加速器システムの効率が低いと、核廃棄物を処理するために、処理する以上の核廃棄物を出す軽水炉で発電して加速器を運転するようなことになり実用上意味がなくなってしまう。

最低でも 30% 程度のビーム電力効率が必要とされ、このような高効率の加速器を実現するためには、高温超伝導の適用が必須であると考えられます。

3) ニュートロニクス用中性子源

中性子の生成には、これまで原子炉や大型加速器といった大型装置が必要とされてきたため、X線や放射光利用に比べて普及が遅れているのが現状であり、様々な分野（例えば硼素中性子捕獲がん治療など）で小型で高強度の中性子源の開発が望まれています。すなわち、中性子利用を限られた科学研究ではなく、世の中で広く役に立つ工学（ニュートロニクス）にするためには、小型で高強度の中性子源の実現が必要です。高温超伝導を使った小型で高強度な陽子加速器で生成された陽子ビームをターゲットにあてて中性子を生成する、小型加速器中性子源の開発が期待されています。

4) ミュオニクス用ミュオン源

高温超伝導を用いた小型で高強度な陽子加速器により小型ミュオン源が開発できれば、未来の工学としてのミュオニクスの展開が期待できます。すなわち、現在既に行われている物性研究の高度化の他に、ミュオンビームの高い透過性を利用した核物質検知（核拡散防護）や火山の内部構造探査（火山噴火予知）等、従来のプローブ技術では実現不可能な検知能力を利用した環境・安全分野への貢献が期待されます。また、非常に高効率でミュオンが生成できるようになれば、未来のエネルギー源としてのミュオン触媒核融合の実現につながる可能性もあります。

2. 3 加速器用マグネットに高温超伝導を応用するために必要な要素技術

高温超伝導を加速器用マグネットに応用するためには様々な技術課題がありますが、その中でも、我々は以下のような要素技術に着目しています。

- 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

これらの要素技術の確立を目指して、雨宮研究室を中心として、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からなる研究開発チームにより、科学技術振興機構の研究費を得て、平成22年1月から10年計画の研究開発プロジェクトがスタートしています。

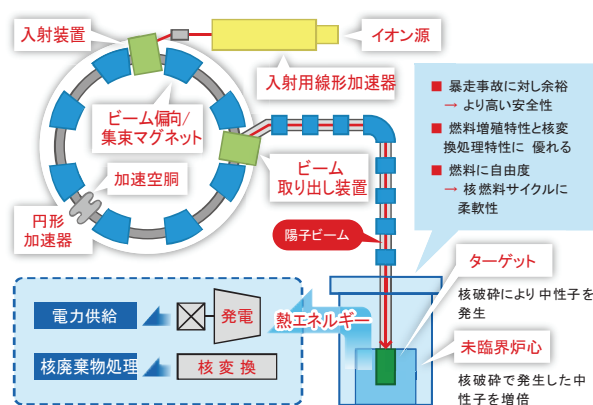


図5 加速器駆動未臨界炉

2. 4 超伝導工学分野（雨宮研究室）における研究の具体例

1) 高温超伝導テープ線内部のミクロスケールの電磁現象に起因する付加的磁場

実用的な高温超伝導線は、イットリウムやビスマスの銅酸化物から構成されていますが、これらの銅酸化物の結晶の向きをそろえないと超伝導電流をうまく流すことができません。結晶の向きをそろえるために、超伝導線製作プロセスにおいて様々な工夫がなされますが、その結果として、高温超伝導線はテープ形状をしています。このテープ形状ゆえ、マグネットを励磁した際にテープ面に垂直な磁場が加わると、この磁場を遮蔽する超伝導電流が流れ、この超伝導電流による付加的な磁場（マグネットの設計の際には、通常は考慮されない磁場）が、誤差磁場となって、加速器用マグネットにおいて重要な磁場精度を損なうおそれがあります。通常の銅線ですと、電気抵抗によって遮蔽電流は速やかに減衰してしまうので問題になることはありませんが、超伝導体は抵抗が極めて小さい（近似的に零と扱われることも多い）ため、遮蔽電流は実質的にはほとんど減衰せず、その結果、付加的磁場もほとんど減衰しない可能性があります。

ここでは、実験結果、解析結果について紹介する前に、磁場の多極展開による表現について説明します。加速器のビームが通過する領域をビーム方向から見て、その領域の磁場を周方向にフーリエ展開し、その重ね合わせで表現するのが磁場の多極展開による表現です（図6）。多極成分は、それぞれ粒子ビームを制御するマグネットの機能と密接に結びついています。例えば、粒子ビームを一方向に偏向させるためには粒子の周回軌道面に対して垂直な磁場成分が必要ですが、これは2極成分ということになります。さらに、2極成分にも、周回軌道面に垂直な2極成分とそれとは90度ずれた2極成分がありますが、これらをそれぞれノーマル2極成分、スキュー2極成分と呼びます（図7）。

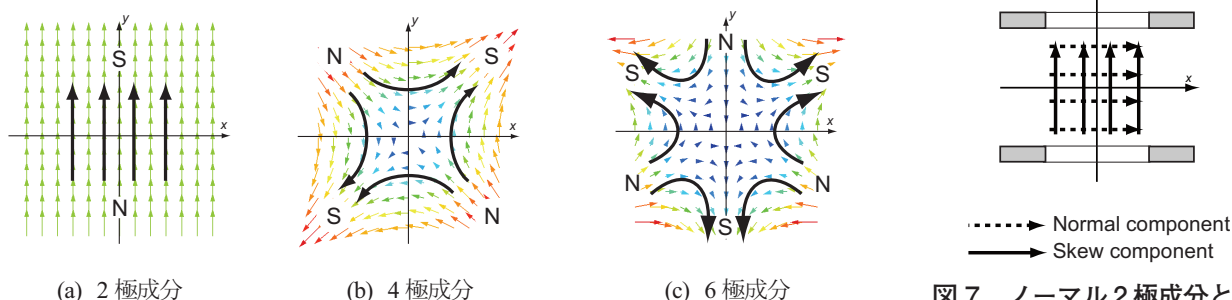


図6 磁場の多極展開による表現

図7 ノーマル2極成分とスキュー2極成分

さて、ビスマス系の高温超伝導線で図8に示すような2極マグネットを製作し、その発生磁場を回転ピックアップコイルで測定し、多極成分に変換した結果を図9に示します。図9(a)はマグネットに通電中の測定結果で、図9(b)はマグネットの通電電流を遮断した後の測定結果です。マグネットの通電電流遮断後もマグネットが磁場を発生していることを示しており、これが遮蔽電流による付加的磁場です。マグネット通電中にも、同じような付加的磁場が誤差磁場として重畳していると考えられます。平行して行った超伝導特性を考慮した非線形電磁場解析によれば、テープ線の幅方向に図10のような分布で遮蔽電流が流れていることが理論的に示されており、それが図9(b)に示すような付加的磁場を発生していると考えられます。

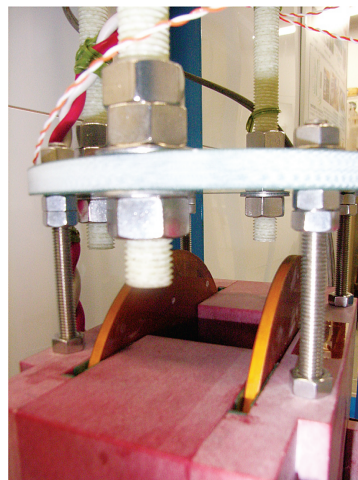
以上のように実験的検証に成功した遮蔽電流に起因する付加的磁場ですが、次のステップの研究として、この付加的磁場の抑制について、複数のアプローチにより取り組みつつあります。

2) イットリウム系高温超伝導線の通電特性実測に基づいた高温超伝導加速器用マグネットの設計

イットリウム系高温超伝導線は、液体ヘリウムのような高価な冷媒を用いなくても、冷凍機と呼ばれるスイッチオンで低温が得られる装置（冷蔵庫の高級品と考えて下さい）を使って冷却すれば優れた超伝導特性を示す超伝導線で、近年、ようやく市販される水準まで製造技術が進歩したものです。我々は、

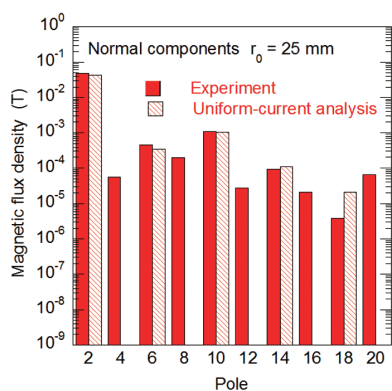


(a) 全体写真

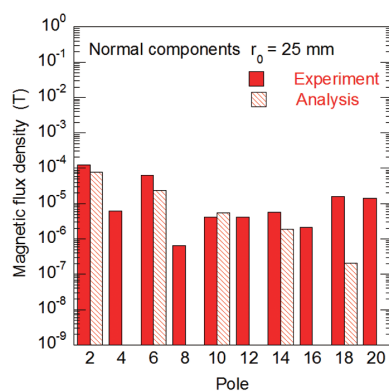


(b) 端部の拡大写真(左右の2枚の半円形に見えるものが2枚のレーストラックコイルの端部)

図8 ビスマス系高温超伝導線材で作製した2極マグネット



(a) 通電中



(b) 電流遮断後

図9 試作2極マグネットの磁場の多極成分

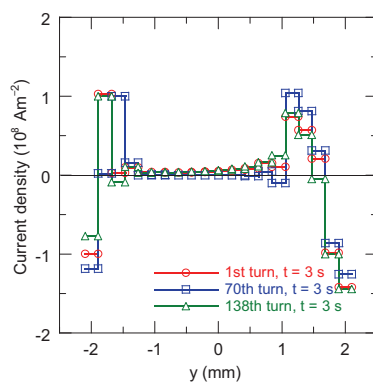


図10 テープ線幅方向の遮蔽電流分布 (図9(b)に対応)

冷凍機で冷却できる温度を想定してイットリウム系高温超伝導線の臨界電流（超伝導状態で輸送できる電流の上限）を様々な大きさの磁場下で測定し（図 11）、その結果をもとに高温超伝導加速器マグネットの設計研究を行っています。図 12 は、我々が設計した高温超伝導加速器用ビーム偏向マグネットの断面の一例です。今後、さらに多様な高温超伝導加速器用マグネットの設計を進め、企業と共同して、試作、評価試験を進めていく予定です。

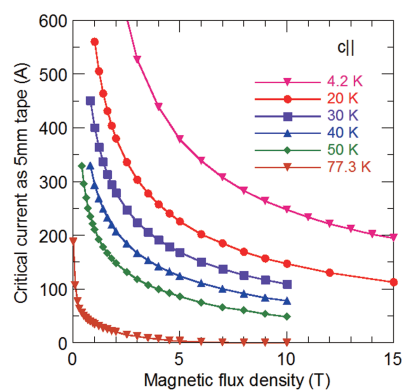


図 11 イットリウム系高温超伝導線の磁場中での臨界電流

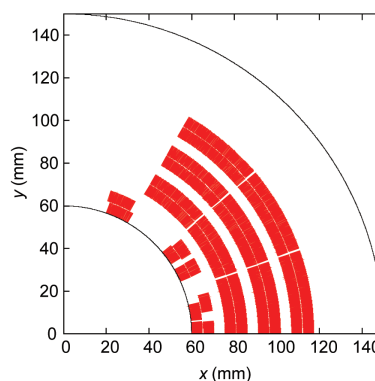


図 12 高温超伝導加速器用マグネットの設計例
(断面における超伝導線の配置)

3. まとめに代えて

応用を見据えつつも、すぐには「商売にならない」基礎的、先端的な研究を行うことが、大学工学部（工学研究科）の重要な使命のひとつですが、そのためには、税金によって賄われる公的な研究資金の支援を仰ぐ必要もあります。昨今、税金を使って研究を行う上で、その意義を社会に理解して頂くことがますます重要になってきております。その意味でも、本稿が、電気系教室における研究活動、国の資金（紹介した例では、科学技術振興機構を funding agency とした研究資金）による科学技術研究を理解して頂く一助になれば幸いです。