

特集 加速器と超伝導技術

広がる超伝導技術

ミューオン源用超伝導ソレノイド

吉田 誠^{*1,2}

Superconducting Solenoid Magnets for Muon Source

Makoto YOSHIDA^{*1,2}

Abstract

A muon beam generated with accelerator is utilized for elementary particle physics, material science and for wide application. For higher intensity of a muon beam superconducting magnets are being adopted in muon source recently. High radiation tolerance is required on the superconducting magnets in high radiation environment near a production target. Development of the superconducting magnets for muon source is introduced in this manuscript.

1. はじめに

ミューオンは、古くから知られている素粒子であるが、今なお素粒子物理、物性物理などの最前線で利用されている。ミューオンは、電子と同じレプトンに属する素粒子であり、電子と同じ電荷、スピンを持つが、質量は電子の200倍で、弱い相互作用によって電子とニュートリノに崩壊する。ミューオンは、1937年にAndersonとNeddermeyerによって霧箱を使って宇宙線の中から発見された¹⁾。宇宙線中のミューオンは、陽子などの一次宇宙線が地球大気に突入した際に大気との核反応によってパイオンが生じ、その崩壊を経て生成される。手のひらくらいの面積に毎秒1個程度のフラックスで地上に降り注いでおり、1 GeV以上の高いエネルギーを持つものを多く含む。このようなミューオンは大気ミューオンとも呼ばれ、その透過力の高さから、ピラミッドや火山の透視²⁾などへの応用が試みられている。

人工的にミューオンを得るには、陽子ビームを標的に入射し、生成したパイオンを利用する。パイオンは寿命26ナノ秒でミューオンとニュートリノに崩壊する。素粒子物理においては、ミュー

オンの稀崩壊探索や磁気モーメントの精密測定など、現在も精力的に研究が進められている。応用分野としては、ミューオンスピン回転(μ SR)による物性物理や、非破壊元素分析など、すそ野の広い研究が行われている。加速器を使ったミューオン源は、1970年代にスイスPSIに建設されたのをはじめ、カナダTRIUMF、英国RAL、そして日本のKEKおよびJ-PARCに建設された。最近では、日本のRCNPにもミューオンビームラインMuSIC³⁾が建設された。PSI、TRIUMFおよびRCNPでは、サイクロトロンを用いた直流状ミューオンが得られる一方、RALおよびKEK、J-PARCは、シンクロトロンを用いたパルス状ミューオンビームである。

2. 加速器ミューオン源の構成

加速器を使ってミューオンを生成するには、パイオンを生成するための標的と、標的から放出されるミューオンまたはパイオンを捕獲するための磁場、およびパイオンを崩壊させたり実験室に輸送するためのビームラインが必要である。従来のミューオン源では四重極磁石などが用いられていたが、近年、ミューオンビームの大強度化、高純

*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

*2 J-PARC センター J-PARC Center

(Makoto Yoshida E-mail: makoto.yoshida@kek.jp)

度化などの性能向上のために、超伝導ソレノイド磁石が採用されるようになってきた。

加速器によるミュオンは、その生成過程によって「表面ミュオン」と「崩壊ミュオン／クラウドミュオン」に大別される。標的中でパイオンが停止した後、標的内で崩壊して標的から放出されるミュオンを「表面ミュオン」と呼ぶ。このとき、負電荷のパイオンは原子核に捕捉されてしまうので、正電荷のミュオンのみが得られる。パイオンの崩壊はニュートリノとミュオンへの二体崩壊なので、静止系では100%偏極したミュオンを得ることができる。さらに、ミュオンのエネルギーもおよそ4 MeV と揃っている。一方、パイオンが標的から飛び出し、飛行中に崩壊して得られるミュオンを「崩壊ミュオン」と呼ぶ。標的近傍で崩壊したものを「クラウドミュオン」とも言う。パイオンのドリフトスペースとして長いソレノイド磁石を用いることで効率よく崩壊させることができる。こちらは、パイオンが崩壊時に運動量を持つためミュオンの偏極が崩れるが、幅広いエネルギー分布を持った正負両電荷のミュオンを得ることができる。 μ SR や偏極を求める実験には表面ミュオンが用いられ、非破壊元素分析などには崩壊ミュオンの負ミュオンが用いられる。

輸送に超伝導ソレノイド磁石を使えば、強磁場によって崩壊するのに十分長い距離を取ることができ、より純度の高い崩壊ミュオンを得ることが可能となる。例えば、J-PARC MUSE⁴⁾では厚さ2 cm のグラフィイト回転標的を使用し、標的を取り巻く4本のビームラインにミュオン（およびパイオン）を供給している。標的近傍には、四重極磁石またはソレノイド磁石を設置し、放出されたミュオンを捕獲する。崩壊ミュオン用のビームライン D-line では、ドリフト長を確保するために6 m 長の超伝導ソレノイド磁石⁵⁾が設置されている。

3. 大強度化への道

加速器を使ったミュオンビームの大強度化のためには、捕獲ソレノイドをなるべく生成標的に近づけて大立体角でミュオン、パイオンを捕獲することが必要である。従来は四重極磁石や常伝導ソレノイドを使用していたが、より大口径、強

磁場の超伝導ソレノイドを生成標的に近くに設置できれば、さらなる大強度化への道を拓くことができる。

前述した MuSIC 以外のミュオン源は、薄い生成標的の串刺しビームラインとなっており、多数の標的、多数のミュオンビームライン設置が可能であるが、さらに大強度のミュオンビームを引き出すために、超伝導ソレノイド内部に標的を設置し、標的に印加された強磁場によってミュオン・パイオンをトラップする“solenoid capture system”（以下、パイオン捕獲システム）が、MELC 実験⁶⁾のために考案された。パイオン捕獲システムは、厚い標的を超伝導磁石内部に設置して強磁場を印加することで、従来型の1000倍以上のミュオンを引き出せる、単一のミュオンビームラインのための捕獲ソレノイドである。後続のビームラインにもソレノイドを使えば、正電荷、負電荷を同時に引き出すことができるので、特に大強度の負ミュオン源として、最大効率を期待できる。

以上のように、生成標的を捕獲ソレノイドに近づけるほど大強度化を期待できるが、しかし、生成標的近傍はおのずと高放射線環境となり、超伝導磁石の劣化、不安定性を招くことになるので、通常の超伝導磁石設計だけでは対応できないことになる。そこで、超伝導コイルに入射する放射線を遮蔽する厚いシールドを磁石内に設置するために、より大口径の超伝導コイルが必要になり、さらに、厚い遮蔽体さえも透過してくる中性子による核発熱、劣化によって引き起こされる超伝導コイル内部の温度上昇をいかに抑えるかが肝となってくる。また、超伝導磁石には、含浸樹脂など多くの有機系材料が使われており、これらの放射線耐性も十分に考慮する必要がある。例えば、通常ポリエチレン等が使われる多層断熱フィルムをポリイミド基材としたり、エポキシ樹脂プリプレグを使った絶縁テープは耐放射線性樹脂のプリプレグに変更する必要がある。超伝導磁石の構造材としてよく使われるエポキシ GFRP (G10 等) は、高い中性子環境下では、ガラスクロスに含まれるホウ素の核反応によってエポキシ樹脂が劣化すると考えられているので、ホウ素を含まない S ガラスクロスなどを使う必要がある。LHC アップグレード計画のビーム分離用双極磁石や後述す

る COMET では、S ガラスクロス を基材にして耐放射線樹脂のビスマレイミドトリアジン樹脂 (BT 樹脂) を使った GFRP を開発し⁷⁾、これを使用することとなった。

4. ミューオン源用超伝導ソレノイド

ミューオンビームの大強度化のためには、超伝導磁石の活用が有効であり、そのために高放射線環境下で運転できる超伝導磁石を開発する必要がある。以下では、ミューオン源に使われる超伝導磁石の実例を紹介する。

4.1 Dai-Omega

超伝導磁石を使用したミューオンビームラインの先駆的なものとして、Dai-Omega⁸⁾ があげられる。これは、2001 年に KEK-MSL に設置された、超伝導磁石を使ったミューオンビームラインである。KEK ブースターからの 500 MeV, 250 kW のパルス陽子ビームをグラフィット標的に入射し、既存ビームラインの 10 倍以上である毎秒 4×10^5 個の表面ミューオンを引き出すことに成功した。Dai-Omega は、内径 741 mm, 軸長 48–73 mm の 4 個のコイルを 80 cm おきに配置し、表面ミューオンがほぼ単色であることを利用して後続の離散的な超伝導コイルによって軸収束させながら、生成標的から 3.6 m 離れた位置に収束するように磁場分布が調整されている。先頭コイルを標的の極近傍 (コイル中心と標的の距離が 20 cm) に置くことで、表面ミューオンを 1 sr の大立体角で取り込むことができる。放射線によって 0.1 W の入熱があるが、液体ヘリウム浸漬冷却によって、温度上昇は無視できるレベルに抑えられていた。

4.2 Super-Omega

J-PARC では、Dai-Omega の軸収束を発展させ、J-PARC の大強度陽子ビームに対応した Super-Omega⁹⁾ が、2012 年に J-PARC MUSE U-line に設置された (図 1)。Super-Omega は、長さ 6 m, 内径 320 mm の直線状超伝導ソレノイドと、その先頭および後端のおよそ 1 m の 45 度湾曲したコイルから成る。標的からの強烈な放射線が実験室へ漏れ出すのを遮蔽するため、コールドボアにして磁石外径を最小化するとともに、両端部を湾曲させることで、直線経路を避けた。湾曲部ではトロイダル磁場によって飛跡中心がドリフトするので、低エネルギーのミューオンを出口中心に導くため

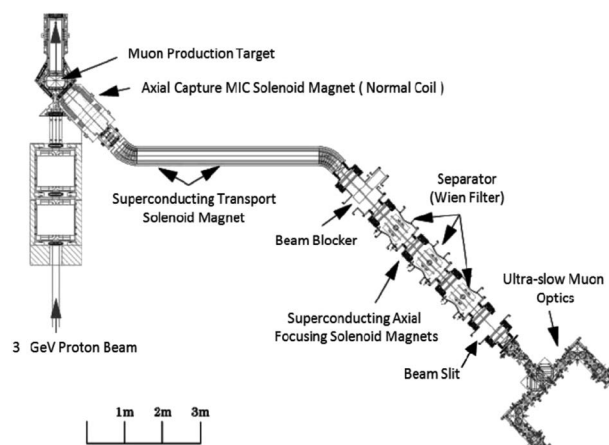


図 1 Super-Omega ビームライン⁹⁾

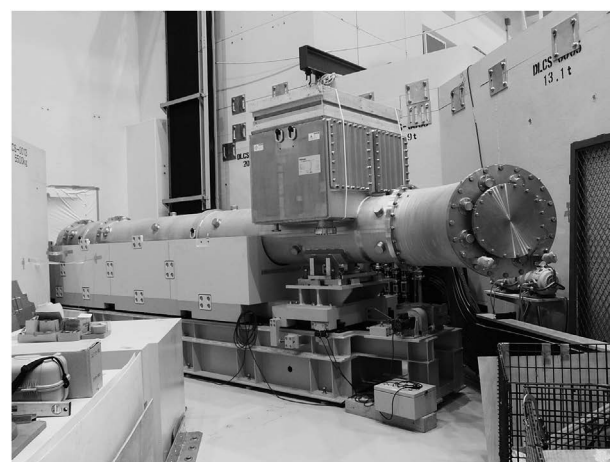


図 2 Super-Omega 超伝導磁石の写真。

の補正ダイポールコイルも併設されている。

冷却は、トリチウム生成量を低減するためおよび取り扱いの容易さから GM 冷凍機を使った伝導冷却方式が採用された。4 K 部の熱負荷は、放射線による発熱 2 W (1 MW ビーム時) を含めて計 8.6 W と見積られており、最下流部に配置した 5 台の 1.5 W コールドヘッドから厚さ 20 mm の純アルミ板を磁石軸方向に伸ばし、各コイル外表面を冷却する。図 2 に本磁石の外観写真を示す。

捕獲ソレノイドは常伝導ソレノイドであるが、その後段の Super-Omega 先頭部分でも、40 年で 10 MGy 程度の被ばくが想定されるので、磁石材料の放射線耐性を考慮した磁石材料が重要になった。そこで先頭 2 m の超伝導コイルには、素線絶縁としてポリアミドイミドが使われ、含侵には BT 樹脂に粘度調整用エポキシ樹脂を配合したものが使われた。含侵樹脂は、ガンマ線照射したサ

ンプル試験によって10 MGy以上の耐性を持つことが確認されたものが採用されている。

4.3 MuSIC

RCNPでは2010年に、捕獲ソレノイドを超伝導化した世界初のパイオン捕獲システムMuSIC¹⁰⁾が設置された(図3)。MuSICでは、比較的出力の小さいRCNPサイクロトロン(392 MeV, 400 W)陽子ビームによって、超伝導磁石出口で毎秒 10^8 個の大強度ミュオンを得ることができる。MuSICは、パイオン生成標的とそれを取り囲む放射線シールド、標的に3.5 Tの磁場を発生する超伝導磁石(捕獲ソレノイド)およびパイオン・ミュオンを輸送するための2台の輸送ソレノイド(BT5, BT3)から構成される(図4)。軸上磁場分布を図5に示す。パイオン生成標的は、直径4 cm、長さ20 cmのグラファイトロッドである。標的に生成したパイオンのうち後方散乱されたものが磁場にとらえられ、3.5 Tから2 Tに漸減する磁場によって収束されながら下流の輸送ソレノイドに送られる。パイオンと共に発生する中性子や高エネルギー二次粒子、散乱陽子は前方にピークを持ち、これらが下流の輸送ソレノイドに照射されるのを避けるために、後方のパイオンのみを収集する。そのために、陽子ビームは捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドの隙間を通して磁石内に導入され、前方散乱した粒子、陽子ビームは磁石外に引き出されてダンプされる。

標的からの放射線を遮蔽するには標的の周りに最大厚さ27 cmのSUSシールドが必要で、これら標的とシールドをボア内に収めるために、捕獲ソレノイドは内径900 mm、長さ1000 mmの大口径ソレノイドとなっている。捕獲ソレノイドは3台の小型冷凍機(合計冷凍能力4 W@4 K)を装備し、超伝導コイルはアルミ伝熱板を介して冷却される。400 MeV, 1 μ Aの陽子ビームを入射したときに、放射線によってコイルに落ちる熱量は1 mW/kgと想定され、コイル全体ではおよそ1 Wとなる。これは1年のビーム運転における被ばく量にして10 kGyに相当する。超伝導線の特性や、伝熱パスに使用している純アルミ材の熱伝導率、エポキシ接着剤の強度などには影響を及ぼさない被ばく量ではあるが、半導体では劣化が起こる可能性がある。そのため、クエンチ保護用のダイオードは、超伝導磁石から離れた励磁電源内部に

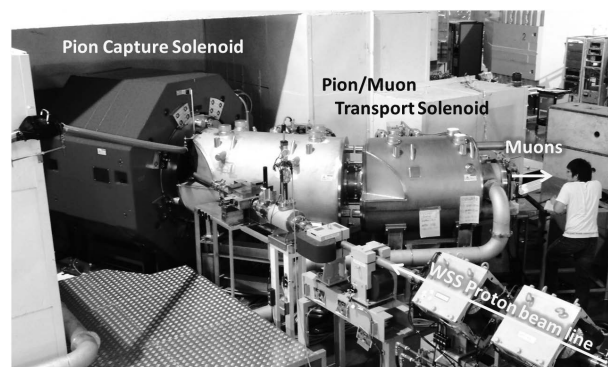


図3 MuSICパイオン捕獲システムの写真。

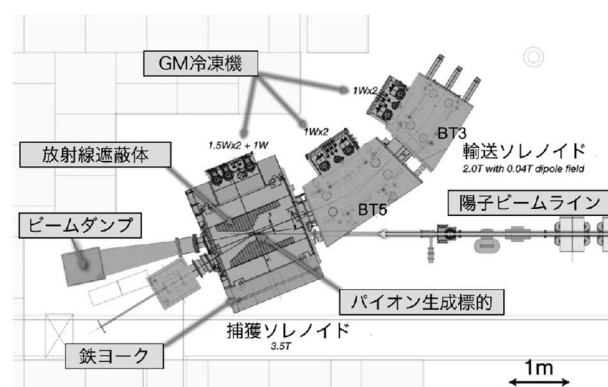


図4 MuSICのレイアウト。

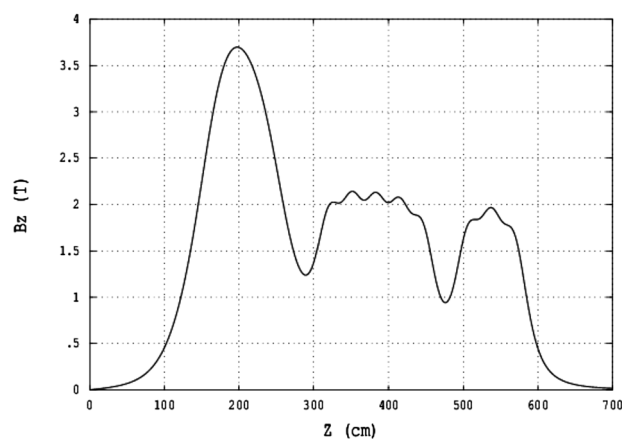


図5 MuSICの軸上磁場分布。

設置されている。

捕獲ソレノイドで集められたパイオン・ミュオンは、下流に続く全長およそ3 mの湾曲した輸送ソレノイドで輸送される。輸送ソレノイドは、内径36 cm、長さ20 cmの超伝導ソレノイドコイルを、曲率半径3 mの円弧上に6度おきに並べて連結することで、軸上磁場2 Tのトロイダル磁場を発生する。トロイダル磁場中を輸送される粒子の軌道は、その運動量、ピッチアングルに応じて

鉛直方向にドリフトする。欲しい粒子の軌道が磁石軸上を通るようにダイポール磁場で軌道を補正することで、輸送する粒子の電荷、運動量を選択することが可能である。輸送ソレノイドを構成する各ソレノイドコイルには超伝導ダイポールコイルが巻き込んであり、最大0.04 Tのダイポール磁場を発生できる。0.04 Tダイポール磁場によっておよそ30 MeV/cから50 MeV/cの粒子が軸上に輸送される。

4.4 COMET

COMET 実験¹¹⁾ (J-PARC E21) は、J-PARC に建設中のミューオン-電子転換事象を探索する実験である。COMET の実験感度を達成するためには大量の負ミューオンが必要で、J-PARC MR の8 GeV、56 kW 陽子ビームによって世界最大強度となる毎秒 10^{11} 個の負ミューオンビームを供給する計画である。陽子ビームエネルギーが高すぎると、ミューオンと一緒に生成される反陽子によってバックグラウンドが増えてしまうので、反陽子生成閾値に近い8 GeVが採用される。COMET 実験は、3 kW ビームとグラフィイト標的を使う Phase-1 から始め、56 kW ビームとタングステン標的を使う Phase-2 へアップグレードする計画である。

COMET 超伝導磁石システム^{12, 13)} のレイアウト (Phase-1) を図6に、軸上磁場分布を図7に示す。COMET Phase-1 の超伝導磁石システムは、パイオン捕獲ソレノイド、90度湾曲したミューオン輸送ソレノイドおよび検出器ソレノイドで構成される。パイオンの捕獲効率を上げるために MuSIC より磁場を強くし、標的にかける磁場強度は5 T、輸送ソレノイドの軸上磁場は3 Tとしている。

COMET Phase-2 では MuSIC の100倍強度の陽子ビームとパイオン生成断面積の大きいタングステン標的を使用する。そのため COMET 用超伝導磁石には、MuSIC で実現したパイオン捕獲システムをさらに大強度化するために様々な工夫が施されている。超伝導コイルと標的の間に最大厚さ45 cmのタングステン合金のシールドを設置するため、内径約1.3 mの大口径ソレノイドコイルを使用する。標的で発生するほとんどの荷電二次粒子は超伝導コイルに達する前に遮蔽できるが、中性子の一部はシールドを透過し、コイル上の中性子フルエンスは最大 10^{22} n/m²と予想されている。

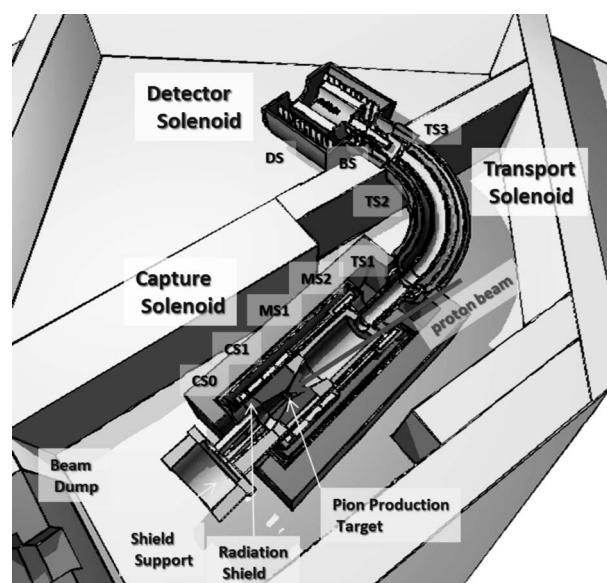


図6 COMET Phase-1 用超伝導磁石のレイアウト。

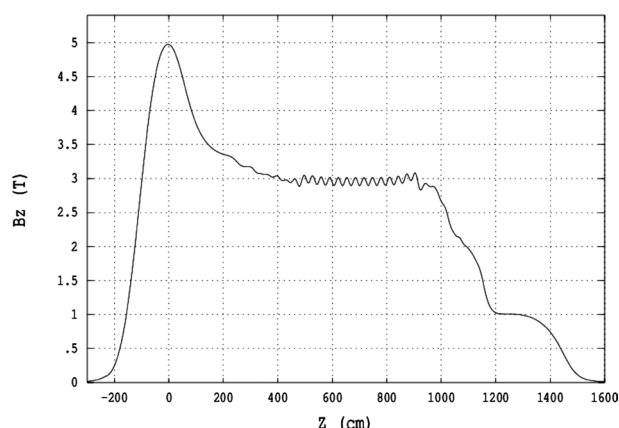


図7 COMET Phase-1 用超伝導磁石の軸上磁場分布。

このような高放射線環境では超伝導磁石を構成する物質が劣化することが懸念される。超伝導コイル内部での中性子による核発熱を減らすために反応断面積の小さいアルミ安定化超伝導線を採用し、コイル構造体もすべてアルミとする。さらにコールドマスを減らすために、高強度アルミ安定化材を使用してコイル自体の強度を上げるとともに、ヘリウム冷却パイプからの伝熱冷却とすることで、最小限の構造体で構成する設計とした。

COMET パイオン捕獲ソレノイドでは、超伝導コイル内部の核発熱は最大40 mW/kgに達し、CS1 コイルだけでも93 Wの熱負荷を生じる。強磁場を生成するためソレノイドを多層巻きした構造で(最大9層)、導体絶縁、層間絶縁が熱抵抗となり、コイル内部で発生する核発熱に対抗して

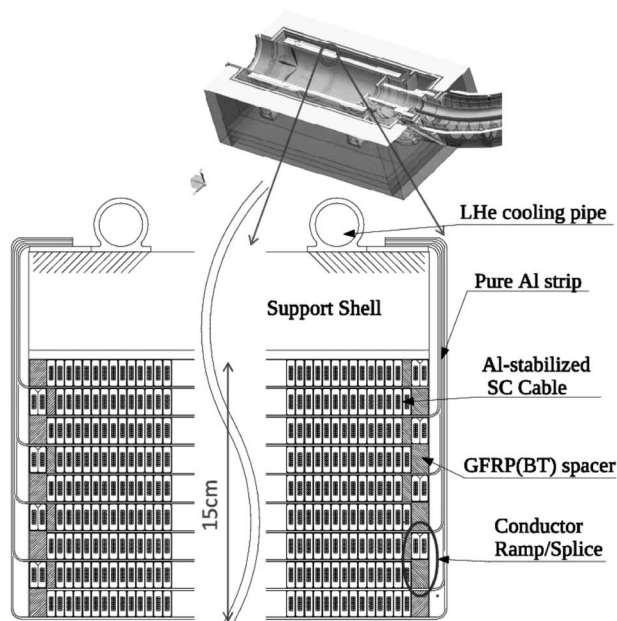


図8 COMET 捕獲ソレノイド CS1 のコイル構造.

内部を冷却できるかが問題となる。そこで、多層巻きソレノイドの層間に純アルミ板を挿入してこれをヘリウム冷却管に接続することで、コイル内部からの伝熱パスを確保した(図8)。金属の熱伝導率は中性子照射によって劣化することが知られており、ビーム運転に伴って冷却効率が悪化すると考えられる。COMET パイオン捕獲ソレノイドの冷却効率、クエンチ保護特性のシミュレーションスタディ¹⁴⁾によると、核発熱を考慮したコイル温度は4.9 K 程度であるが、ビーム運転とともに上昇し、COMET Phase-2 の100 日程度で6.4 K を超え、NbTi 超伝導線に必要な温度マージンを確保できなくなることが予想される。ただし、アルミ安定化材、アルミ伝熱材の熱伝導率は、磁石を室温まで昇温しアニールすることで照射損傷を完全に除去することができるので、劣化が顕著になった時点で運転を休止して昇温アニールを行う運用が計画されている。その他、高放射線環境への対応として、ポリイミド基材の多層断熱フィルムやBT 樹脂とホウ素を含まないガラスクロスを使った絶縁テープ、GFRP が採用されている。

このように、MuSIC のパイオン捕獲システムを発展させ、より大強度の陽子ビームを受け入れることで世界最大強度のミュオン源を構築することが期待されている。

5. まとめと展望

加速器を用いたミュオンビーム源には、近年、超伝導磁石が応用され、高品質化、大強度化に大きく貢献している。素粒子物理実験では、ミュオン稀崩壊探索などのためにより大強度のミュオンビームが切望されている。パイオン捕獲システムでは、ミュオンの捕獲効率を劇的に改善でき、特に負ミュオンが必要なミュオンコライダーへの応用も期待されている。

大強度化のためには放射線対策が不可欠であり、含侵樹脂などの有機材料にBT 樹脂を使用するなど、耐放射線性磁石材料の開発が進められている。一方、NbTi 超伝導線を使った超伝導磁石においては、核発熱によって超伝導コイルが温められるため、伝熱材の劣化と相まって冷却に問題が生じることがわかっている。COMET パイオン捕獲ソレノイドで見たように、厚い遮蔽体を内蔵するため大口径ソレノイドとし、さらに冷却パスをコイル内部に導入するなど、様々な工夫を取り入れているが、COMET を超える大強度陽子ビームの受け入れや強磁場化は難しい状況である。

そこで、次世代のミュオン源にはReBCO など高温超伝導体 (HTS) を使用することが検討されている。HTS を使って捕獲ソレノイドを実現できれば、大強度化のみならず、パイオン捕獲システムのコンパクト化も期待できる。HTS コイルを20 K 程度で運転すれば、アルミや銅など磁石材料の比熱が4 K に比べて一桁以上大きくなり、核発熱による温度上昇を緩和できると考えられる。さらに熱伝導率も数桁改善することが期待されるので、放射線によって劣化するとしても、冷却問題が解消する可能性が高い。HTS を使った捕獲ソレノイドの概念設計¹⁵⁾によると、HTS コイルにCOMET の10 倍の核発熱密度が生じても温度上昇はわずか2 K であり、HTS に対して十分な温度マージンを確保できる。その結果、磁石内部のシールド厚を減らして内径340 mm のコンパクトな磁石で、MuSIC と同等の性能を持つパイオン捕獲ソレノイドが実現できることが期待されている。ただし、ガンマ線などによる有機材料の劣化は避けられないので、導体をセラミックスでコーティングするなど無機絶縁を使った巻き線技術の開発がKEK などで進められており、大強度

化のみならず、既存ビームラインの常伝導捕獲ソレノイドへの置き換えにも期待されている。

参考文献

- 1) S. H. Neddermeyer and C. D. Anderson: *Phys. Rev.* **51**, 884 (1937).
- 2) H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida and K. Niwa: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **575**, 48 (2007).
- 3) S. Cook, R. D'Arcy, A. Edmonds, M. Fukuda, K. Hatanaka, Y. Hino, Y. Kuno, M. Lancaster, Y. Mori, T. Ogitsu, H. Sakamoto, A. Sato, N. H. Tran, N. M. Truong, M. Wing, A. Yamamoto and M. Yoshida: *Phys. Rev. Accel. Beams* **20**, 030101 (2017).
- 4) Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, Y. Ikedo, S. Makimura, Y. Kobayashi, J. Nakamura, K. Kojima, T. Adachi, R. Kadono, S. Takeshita, K. Nishiyama, W. Higemoto, T. Ito, K. Nagamine, H. Ohata, Y. Makida, M. Yoshida, T. Okamura, R. Okada and T. Ogitsu: *J. Phys. Conf. Ser.* **552**, 012061 (2014).
- 5) Y. Tanaka, T. Semba, S. Nakajima, Y. Hagiwara, S. Kido, Y. Murata, K. Sasaki, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, Y. Makida, H. Ohhata, N. Kurosawa and Y. Miyake: *J. Phys. Conf. Ser.* **897**, 012022 (2017).
- 6) R. M. Djilkibaev and V. M. Lobashev: *AIP Conf. Proc.* **372**, 53 (1996).
- 7) A. Idesaki, T. Nakamoto, M. Yoshida, A. Shimada, M. Iio, K. Sasaki, M. Sugano, Y. Makida and T. Ogitsu: *Fusion Eng. Des.* **112**, 418 (2016).
- 8) H. Miyadera, K. Nagamine, K. Shimomura, K. Nishiyama, K. Fukuchi and K. Ishida: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **569**, 713 (2006).
- 9) Y. Makida, Y. Ikedo, T. Ogitsu, K. Shimomura, Y. Miyake, M. Yoshida, T. Adachi, R. Kadono, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, K. Nishiyama, H. Ohhata, T. Okamura, R. Okada and T. Orikasa: *AIP Conf. Proc.* **1573**, 438 (2014).
- 10) M. Yoshida, M. Fukuda, K. Hatanaka, Y. Kuno, T. Ogitsu, A. Sato and A. Yamamoto: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 1752 (2011).
- 11) The COMET Collaboration, Accepted in *Prog. Theor. Exp. Phys.*, DOI: 10.1093/ptep/ptz125;arXiv:1812.09018v2 [physics.ins-det].
- 12) M. Yoshida, T. Nakamoto, T. Ogitsu, K. Tanaka, A. Yamamoto, M. Aoki, Y. Kuno and A. Sato: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 1730 (2011).
- 13) M. Yoshida et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25**, 4500974 (2015).
- 14) Y. Yang et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28**, 4001405 (2018).
- 15) Y. Yang, M. Yoshida, T. Ogitsu, Y. Makida, T. Nakamoto, T. Okamura, K. Sasaki and M. Sugano: *IOP Conf. Series Mater. Sci. Eng.* **101**, 012054 (2015).