

12. COMET と耐放射線超伝導磁石開発

高エネルギー加速器研究機構

吉田 誠 飯尾雅実

目 次

COMETと耐放射線超伝導磁石開発

1	はじめに	12-1
2	ミューオンビームライン	12-1
3	COMET超伝導磁石	12-1
3.1	パイオン捕獲ソレノイド	12-2
3.2	ミューオン輸送ソレノイド	12-3
4	COMET超伝導磁石の放射線耐性	12-3
5	実際の設計例	12-4
5.1	パイオン捕獲ソレノイドの構造	12-4
5.2	有限要素法によるシミュレーション	12-5
6	さらなる大強度化に向けて	12-11
6.1	将来の耐放射線超伝導磁石	12-12
6.2	REBCO線材の照射効果	12-12
6.3	無機絶縁コイルの開発	12-16
7	まとめと謝辞	12-21
	参考文献	12-22

COMET と耐放射線超伝導磁石開発

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2-1)$$

1. はじめに

茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC では、ミューオン→電子転換過程を探索する COMET 実験[1]の準備が進められている。

ミューオンは、真空中では 2.2 マイクロ秒の寿命でミューニュートリノと反電子ニュートリノ、電子の 3 つの素粒子に崩壊するが、物質中では負ミューオンは原子核に捕獲されてミューニュートリノが放出される。これらの崩壊過程は素粒子標準理論によって説明でき、崩壊の前後でレプトンファミリー数は厳密に保存される。一方、ニュートリノが有限の質量を持てば標準理論の枠内でも荷電レプトンのレプトンフレーバ非保存過程は起こりえるが、ニュートリノ質量が非常に小さいこともあって、その崩壊分岐比は 10^{-54} 程度と、到底観測できないスケールである。したがって、もし荷電レプトンフレーバの破れを観測できれば、標準理論を超える未知の相互作用の存在を示す証拠となる。標準理論を超える物理モデルの多くは、荷電レプトンフレーバにおいて大きな破れを予言しており[2]、探索精度の向上が待ち望まれている。

COMET 実験は、過去の実験より探索精度を 1 万倍程度向上することを目指しており、そのためには世界最大強度となる毎秒 10^{11} 個の負ミューオンを生成する新しいビームラインが必要である。本稿は、COMET 実験のミューオンビームラインについて、その特色等について紹介し、大強度ミューオンビームを生成するための超伝導磁石の設計や、より大強度化を目指して放射線耐性を向上させるための超伝導磁石開発について述べる。

2. ミューオンビームライン

ミューオンは、高エネルギー陽子を標的に入射し、発生した 2 次粒子であるパイオンの崩壊によって得られ、ミューオン→電子転換過程探索に必要な負ミューオンは次式の崩壊で得られる。

このとき、パイオンを生成するための標的と、標的から放出されるパイオン・ミューオンを捕獲しビームラインに取り込むための磁石、およびパイオンを崩壊させミューオンを実験室に輸送するための磁石が必要である。従来のミューオンビームラインでは四重極磁石などが用いられていたが、近年はミューオンビームの大強度化、高純度化などの性能向上のため、強磁場を発生できる超伝導ソレノイド磁石が利用されている。例えば、J-PARC 物質・生命科学実験施設内のミューオン科学実験施設(MUSE)[3]では、標的から放出されたミューオンを集めるために標的近傍に四重極磁石または常伝導のソレノイド磁石を設置し、6 m 長の超伝導ソレノイド磁石[4]によって十分なドリフト長を確保することで、ミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR) 法や非破壊元素分析などにミューオンビームを提供している。

さらに大強度のミュー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ーオン・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) が考案された[5]。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強磁場を印加することで、従来型の 1000 倍以上のミューオンを引き出すことができる。パイオン捕獲システムは、大阪大学核物理研究センターに建設されたミューオンビームライン MuSIC[6]に採用され、その高効率性が実証されている。

COMET 実験においては、より大強度のミューオンビーム生成を目指して、J-PARC 主リングシンクロトロン(MR)の大強度陽子ビームを利用可能な大型超伝導磁石によるパイオン捕獲システムを採用した。

3. COMET 超伝導磁石

COMET ミューオンビームラインはすべて超伝導磁石で構成され、J-PARC ハドロン実験施設に新設されたハドロン南実験棟に設置される。レ

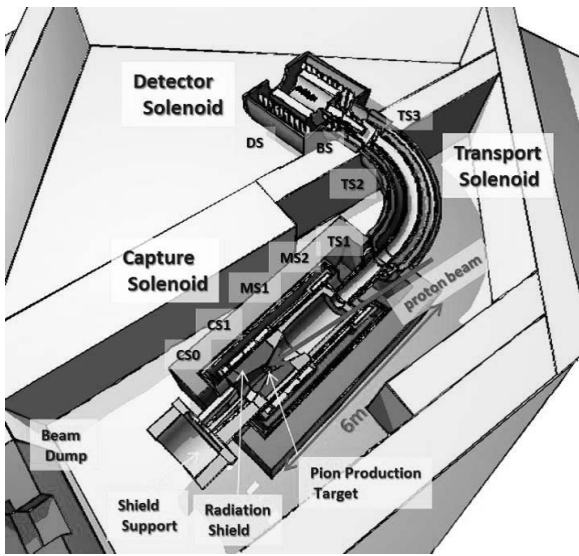


Fig. 3-1 COMET (Phase-I) ミューオンビームラインのレイアウト

レイアウトを Fig. 3-1 に示す。J-PARC MR で 8 GeV まで加速されたパルス陽子ビームを、超伝導ソレノイド磁石のボア内に設置した標的に入射し、生成したミューオンビームを遮蔽壁で隔てられた隣の実験室へ輸送する。ミューオンをロスしないために、標的から検出器まで連続したソレノイド磁石で構成する。このミューオンビームラインは強磁場、大口径の超伝導ソレノイドによって、以下に挙げる機能を実現する。

- 1) 生成標的から放出される負パイオンを捕獲し、下流に向かって収束させる。
- 2) 長いドリフト距離を確保してパイオンを崩壊させ、低運動量の負ミューオンのみを選別する。

Fig. 3-2 に COMET ミューオンビームラインの軸上磁場分布を示す。超伝導磁石によって 5 T の強磁場を発生し、その磁場ピーク上 ($z=0$) に生成標的を配置する。パイオンは 5 T から 3 T へ漸減する磁場勾配 ($z=0$ から $z=500$ cm) によって下流方向へ収束され、3 T の湾曲したソレノイド磁場 (トロイダル磁場) ($z=500$ cm から $z=1000$ cm) 中で崩壊し、実験室へ輸送される。COMET ではこのミューオンビーム生成のための磁場を、大きく分けてふたつの超伝導磁石によって発生させ、上

流側の磁石をパイオン捕獲ソレノイド、下流側をミューオン輸送ソレノイドと呼ぶ。以下、各磁石の特徴を述べる。

3.1. パイオン捕獲ソレノイド

標的に印加する磁場が強いほどミューオン収量が上がるので、COMET 実験ではパイオン捕獲ソレノイドの中心に生成標的を配置し、標的に 5 T を印加する。Fig. 3-2 において、陽子ビームは横軸のマイナス方向へ向かって入射し、前方へ散乱された陽子などの高エネルギー粒子は磁石外でダンプする。すなわち、ミューオンビームラインを構成する超伝導磁石や後続の実験装置の被ばく量を減らすため、生成標的の後方に放出されたパイオンのみを収集する。8 GeV 陽子ビームを標的に入射したときに放出されるパイオンは、陽子ビーム前方に向かって放出されるものが多いが、最終的に実験に必要なおおむね 50 MeV/c 以下の低運動量負ミューオンに関しては、後方に放出された低運動量パイオンのみを捕獲しても大きな差は生じない。

強磁場によって捕獲したパイオンは、下流に向かって漸減する磁場勾配を利用して収束される。ドリフト中のパイオンにおいて、ソレノイド磁場を B 、ソレノイド軸に垂直な運動量を p_t 、軌道半径を R とすると以下の式が成り立つ。

$$p_t^2 / B \propto p_t \times R = \text{const.} \quad (3-1)$$

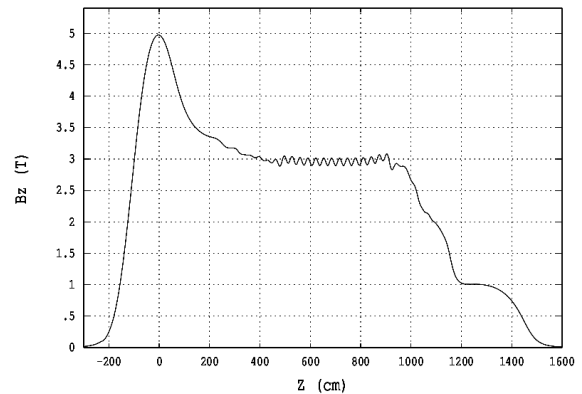


Fig. 3-2 COMET Phase-I 用超伝導磁石の軸上磁場分布

すなわち、垂直運動量 p_t は \sqrt{B} に反比例して小さくなるので、ソレノイド磁場を徐々に下げることによって p_t を軸方向運動量 p_z に変換し、並行ビームに近づけることができる。ただし、このとき軌道半径は \sqrt{B} に反比例して大きくなるため、ドリフトスペースを徐々に広げていく必要がある。COMETパイオン捕獲ソレノイド磁石の詳細設計については後述するが、巻き数の異なる複数の超伝導コイル (Fig. 3-1 の CS0 コイルから TS1 コイル) を組み合わせることで、このような磁場分布を実現する。コイル構造体の詳細設計に関しては、5 章で紹介する。

3.2. ミューオン輸送ソレノイド

パイオン捕獲ソレノイドで捕獲されたパイオンは、ソレノイド磁場に沿って輸送される。COMET では、5 メートル長 (Phase-II では 10 メートル長) の 3 T ソレノイド磁場中でパイオンを崩壊させる。さらに、この長いソレノイドを曲率半径 3 メートルの湾曲した形状とすることで、湾曲内側の磁場が強く、外側が弱いトロイダル磁場を形成する。この湾曲ソレノイドによる磁場中を荷電粒子が輸送される際、らせん軌道の回転中心は、湾曲面に対して垂直方向にドリフトする。ドリフト量は荷電粒子の運動量とピッチアングルによって次式で表される；

$$D = \frac{1}{qB} \left(\frac{s}{R} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left(\cos \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3-2)$$

ここで、 p 、 q は輸送する粒子の電荷、運動量、 θ はソレノイド軸に対するピッチアングル、 s はソレノイド軸に沿って輸送された距離、 R は湾曲ソレノイドの曲率半径である。すなわち、ドリフト量が運動量に比例し、さらに電荷の正負によってドリフト方向が逆になることから、低運動量の負ミューオンを、実験のバックグラウンドとなりうる正電荷ミューオンや高運動量ミューオンなどから分離することが可能となる。ただし、欲しいミューオンが過度にドリフトすると磁石内筒に当たって消失してしまうので、次式で表すダイポール磁場を追加してドリフトをキャンセルする必要がある。

$$B_{comp} = \frac{1}{qR} \left(\frac{p}{2} \right) \left(\cos \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3-3)$$

Table 3-1 ミューオン輸送ソレノイドの諸元

Item	Value
Conductor	NbTi/Cu monolith wire Cu/NbTi = 6
Cable dimensions (Solenoids)	ϕ 1.5 mm (without insulation) ϕ 1.56 mm (with insulation)
Cable dimensions (Dipole coils)	ϕ 1.2 mm (without insulation) ϕ 1.3 mm (with insulation)
Cable insulation	Polyamide-imide enamel (AIW), PVF (TS2-15,16, TS3)
Magnet length	~6 meters
Curvature Radius	3 meters
Num. of solenoid coils	18
Num. of dipole coils	16 pairs
Operation current	210 A (solenoids) 175 A (dipole coils)
Field on axis	~3 T (solenoid) ~0.056 T (dipole)
Stored energy	5.6 MJ
Total inductance	254 H
Coil inner diameter	468 mm (TS2a~TS2-16) 600 mm (TS3)
Refrigeration	conduction from forced flow 2-phase LHe piping (7~10 g/s)
Quench protection	semi-active quench back heater

ミューオン輸送ソレノイドは、Fig. 3-1 に示すように、内径約 46 cm、軸長約 20 cm の短い超伝導ソレノイドコイルを曲率半径 3 メートルの周上に連ねた構造をしており、各ソレノイドコイルに超伝導ダイポールコイルを併設することで、低運動量の負ミューオンを磁石中心に保持したまま輸送することができる設計となっている。その他、磁石諸元を Table 3-1 に示す。

以上のように、COMET ミューオンビームラインは、ミューオンビームの大強度化のみならず、バックグラウンド粒子の低減も図って最適化されている。次章では、大強度化に伴う高い放射線に対応するための設計について述べる。

4. COMET 超伝導磁石の放射線耐性

COMET は J-PARC MR の 8 GeV/56 kW 陽子ビーム (Phase-I では 3.2 kW) を使って大強度ミューオンビームを供給する計画である。パイオン捕獲ソレノイドでは、パイオン捕獲効率を最大化するため、生成標的を 5 T 磁場を発生する CS1 コ

イルのほぼ中心に設置する。生成標的からはパイオンのみならずガンマ線や中性子など様々な放射線が発生し、超伝導コイルが被ばくすることになる。そのため、標的の周りには最大 44 cm 厚のタングステン合金の遮蔽体を挿入し超伝導コイルを保護する設計であるが、それでもなお遮蔽体を透過してくる中性子等があるため、パイオン捕獲ソレノイドは高い放射線環境下で運転できることが要求される。

特に、極低温では金属材料の熱容量が極端に小さくなるので、放射線による発熱や熱伝導率の劣化などによってコイル温度が上昇しないように、特別な対処が必要となる。

COMET パイオン捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドは、実験棟地上階に設置したヘリウム冷凍機から供給される 2 相流液体ヘリウムによって冷却されるが、ヘリウムに中性子が照射されるとトリチウムが発生し、放射能が廃棄限度を超えるなど取り扱いが困難になることが予想される。そのため、これら超伝導磁石の冷却方式は、大量の液体ヘリウムが必要な浸漬冷却ではなく、磁石内部に配管した冷却管に液体ヘリウムを循環させて冷却管から伝熱板を介してコイルを冷却する間接冷却方式とした。

パイオン捕獲ソレノイドで予想される中性子フラックスは、ピーク位置で $4 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ に達する。超伝導コイルと中性子との反応による発熱を最小限にするため、超伝導コイルを含むコールドマスは原子番号が小さく中性子反応断面積の小さいアルミで構成される。超伝導線に高強度アルミ安定化材を使用することでコイル自体の剛性を上げ、さらに冷却管からの伝導冷却とすることで、コールドマスを最小限の構造体で構成することとした。

超伝導コイル内部の核発熱は最大 40 mW/kg に達すると予想されており、コイル表面を冷却するだけでは内部温度が上がってしまい NbTi の臨界温度を超えることが懸念される。そこで、Fig. 4-1 のように、ソレノイドコイルの層間に純アルミ伝熱板を挿入し、この伝熱板を冷却管に接続することで、コイル内部を直接冷却する構造とした。

10^{20} n/m^2 を超える中性子が照射されると伝熱板の金属結晶が乱されて熱伝導率が劣化し[7]、コイル温度が上昇することが予想される。熱伝導率の劣化を考慮したシミュレーションスタディ[8]によると、56 kW ビームで 100 日運転すると、コイル内温度が 6.4 K を超えて温度マージンを確保

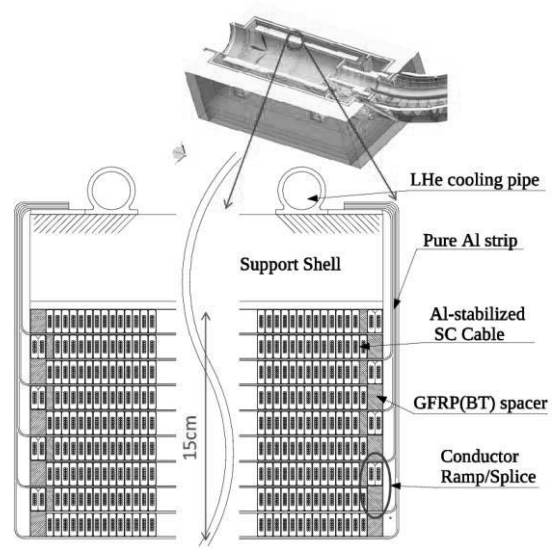


Fig. 4-1 COMET パイオン捕獲ソレノイド CS1 コイルの構造

できなくなるが、いったん昇温して欠陥をアニールすれば再度運転可能となる。

その他、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[9]、GFRP[10]を採用し、高放射線環境に対応している。

5. 実際の設計例

この章では、これまでに述べられた基本コンセプトや基礎研究データを基に実際に行った設計の例として、J-PARC COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイド (Pion capture solenoid: PCS) の機械設計について簡単に紹介する。

本章は 2017 年に雑誌に掲載された[11]を基に執筆されているが、2022 年において PCS の製作は進行中であり、本章の記述からの変更点が多数存在する。変更点の更新には追加の検討と解析が行われており、それらを全て網羅すると煩雑になる。本章の目的は実際の設計の基本的な流れを紹介するものであるため、更新されていない部分が多数含まれていることに注意して頂きたい。

5.1. パイオン捕獲ソレノイドの構造

PCS の設計・製作は非常に挑戦的な課題である。内径 1300 mm の大口径ボア中心に約 5 T の強磁場を発生させ、47 MJ にも及ぶエネルギーを

安全に回収し、更に中性子フルエンスが 10^{21} n/m² に達する高放射線環境下で安定に運転しなければならない。したがって、通常超伝導磁石で考慮すべき、力学的条件、電磁気学的条件、熱力学的条件に加えて、放射線による発熱や特性劣化を考慮する必要がある。

Fig.5-1 に PCS の構造を示す。口径の大きな 4 つのコイル (CS0, CS1, MS1, MS2) と口径の小さな 6 つのコイル (TS1a, TS1b, TS1c, TS1d, TS1e, TS1f) はサポート構造で一体化され、それぞれ CS コールドマス、TS1 コールドマスと呼ばれている。コールドマスは、コイルを機械的にサポートするだけでなく伝導冷却構造も担っており、構造部材は強度だけではなく液体ヘリウム配管や伝熱板の施工性も重要である。また、放射線による熱負荷を最小限にするために密度を低くする必要があり、それらを考慮してコールドマス用構造部材の材料は A5083 アルミニウム合金が採用されている。

コールドマスは、室温からの熱負荷を最小化するためにロッドによって真空容器に固定される。ロッドには非磁性で低熱伝導率が要求されるため、一般的な超伝導磁石ではガラス繊維強化プラスチック (GFRP) が用いられることが多い。しかしながら、PCS の運転環境においてプラスチックの放射線により劣化が予想されるため、サポートロッドは Ti-6Al-4V チタン合金で製作することにした。

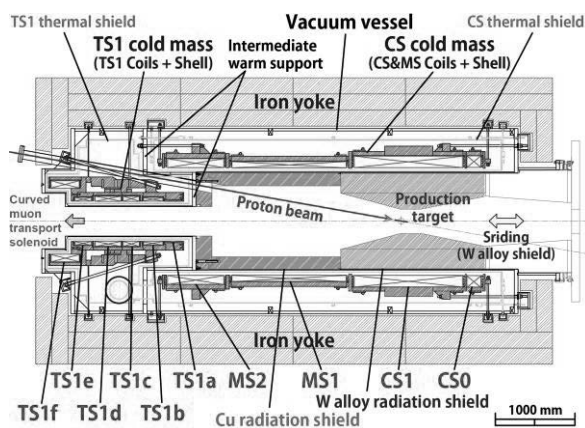


Fig. 5-1 COMET-PCS の構造

コイルや磁石部品への放射線の影響を低減するため PCS のボア内部に重量約 40 t のタングステン合金製と約 9 t の銅製の 2 つの水冷方式の放射線シールドが配置される。様々な制限により現地での挿入が困難なことから、銅製の放射線シールドは真空容器と一体化することにし、設計にはシールドの構造も考慮した。また、タングステンシールドは、PCS 設置後に挿入されるが、銅シールドと結合されるため荷重の半分を真空容器が受け持つことになる。

5.2. 有限要素法によるシミュレーション

有限要素法 (Finite Element Method, FEM) とは数値解析手法の一つで、複雑な形状・性質を持つ対象を小領域 (メッシュ、要素) に分割することで近似し、全体の挙動を予測しようとするものである。超伝導電磁石の設計は非常に複雑な要素が絡んでいるため、FEM 解析は非常に強力なツールとなる。本節では PCS の全体設計のために FEM による連成解析を紹介する。

5.2.1. 解析用モデル作成

実際の設計では、限られた時間内で FEM 解析を繰り返し、その結果を基に形状、構造部材、施工方法を最適化していくことになる。したがって、結果の妥当性と信頼性及び解析の効率性が重要である。構造を細部まで定義しメッシュも細かく切る事により現実的なシミュレーションが可能であるが、計算時間が膨大となり評価に時間を要する。一方モデルを簡略化しすぎると短時間の計算で結果が得られるが、解析結果の妥当性と信頼性が低下する。状況に応じて相反するそれらをよくうまく整合させたモデル作成が必要となる。

具体例として、CS コイルのモデル作成について記述していく。CS1 は内径 1344 mm、厚さ 152 mm、長さ 1391 mm と非常に大きなコイルで、構成は Fig. 4-1 で示されている様にポリイミドフィルム+BT 樹脂で絶縁されたアルミニウム安定化超伝導ケーブルが 270 ターンの 9 層構造になっている。層間には伝熱用に幅 75 mm、厚さ 1 mm の 5N (99.999%) 純アルミニウム冷却板が周

期的に差し込まれており、隙間は BT+エポキシの混合樹脂で埋められている。また、幅 4.7 mm、厚さ 15 mm のアルミニウム安定化超伝導ケーブルは、直径 1.2 mm、銅比 0.9 の NbTi-Cu 超伝導線 14 本から成るラザフォード燃線と純アルミニウム安定化材で構成されている。鉄ヨークを含む磁石全体の大きさは、幅 3560 mm、高さ 3560 mm、長さ 6370 mm であり、直径 1.2 mm の導体や厚さ 0.2 の電気絶縁層からなるモデルを定義するのは非現実的である。そこで、まずはコイルを一つの複合材料として定義して解析を進め、最終的に影響の大きい一部分にのみ簡易的なケーブル構造を定義した解析を行った。

Fig. 5-2 にコイルを複合材料として定義する際の計算に用いたケーブル周辺の断面構成を示す。コイル複合材は、NbTi、銅、アルミニウム、樹脂で構成されており、その体積比 1.0:0.9:7.0:1.3 より求められた合成密度は 3515 kg/m³ である。また、このコイル複合材は異方性を持っており、複合材料の複合則[12]を用いて、直交座標系及び円筒座標系のそれぞれの方角に対して、 $E_{X(R)}=43.2$ GPa, $E_{Y(\theta)}=73.7$ GPa, $E_Z=37.8$ GPa の弾性係数を定義している。線膨張係数、熱伝導率も同様の複合則で計算されており、Fig. 5-3, 5-4 に示すような温度依存性をもった線膨張係数と熱伝導率をそれぞれの座標方向で定義している[13]。PCS のコイルは高放射線環境に配置されるため、コイルを構成する金属材料の熱伝導率は、4 章で記述された中性子による劣化を考慮する必要がある。特にコイルの層間に挿入される伝熱板の材料は、残

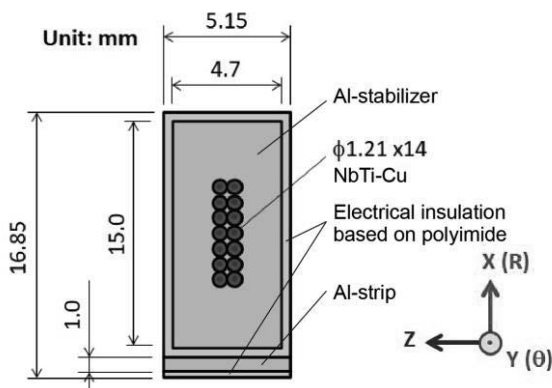


Fig. 5-2 コイル複合材の構造

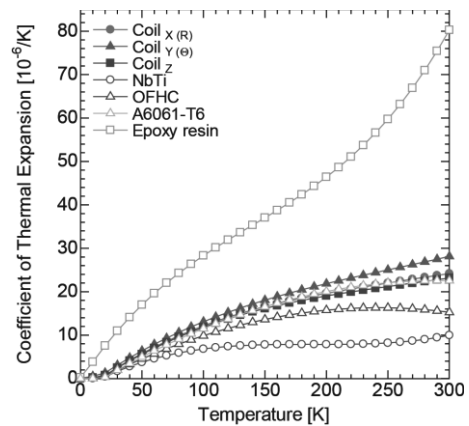


Fig. 5-3 コイル複合材の線膨張係数

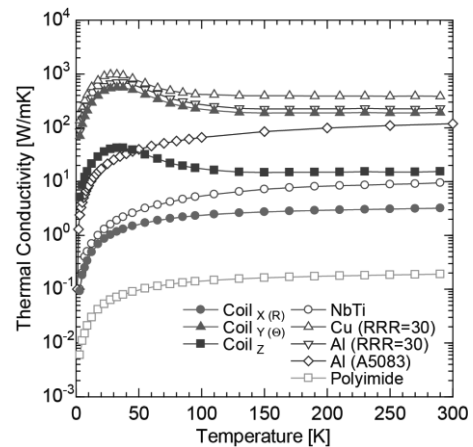


Fig. 5-4 コイル複合材の熱伝導率

留抵抗比 (Residual Resistivity Ratio: RRR) が数千の超高純度アルミニウムであるが、コイル内のアルミニウムの熱伝導率は全て RRR=30 の値で設定されている。

詳細は 5. 2. 3. 項で記述されるが、円筒型の複合材で定義されたコイルモデルで解析を行い、コ

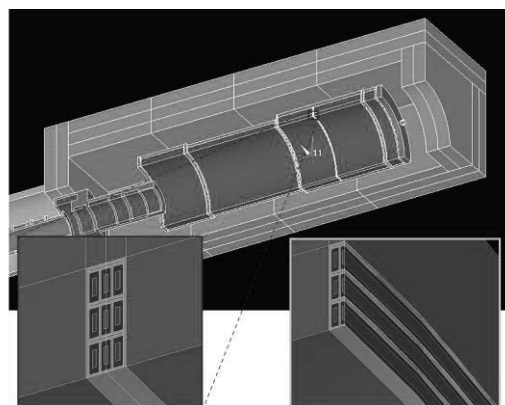


Fig. 5-5 一部分だけ詳細構造のモデル

コイルの内部応力が許容値以下になる様にサポート構造などの形状を最適化した。しかし、複合材モデルでは、超伝導ケーブル、安定化材、絶縁材など個々の構造部材に対して判断が難しい。そこで、Fig. 5-5 に示されるように応力が高くなる一部分に実際のコイル構造に近い形状でモデルを再定義して解析を行った。

5.2.2. 電磁場解析

コイルの及び鉄ヨークの配置、コールドマス部品の基本形状最適化のために2次元円筒モデルによる磁場解析を行った。鉄ヨークに関して、実際の製作において部品を組み合わせる構造になるため、モデルでは鉄ヨークを分割し隙間(空気層)を1 mm 設けている。また、モデルにはミュオン輸送ソレノイド(Muon transport solenoid: MTS)の影響を考慮するために、上流 10 個のコイルと MTS 用の鉄ヨークもモデルに定義されている。実際の MTS は 90 度湾曲した形状をしているが、PCS の解析において、その影響は無視できるものとして直線構造にしている。Fig. 5-6 (A) に2次元円筒対称モデルの磁場分布と (B) にソレノイド軸上の磁場の強さを示す。磁場の最大値は 5.4 T となり、CS1 コイルの内側中央に位置している。超伝導素線の負荷率は 0.2% 程度と見積ら

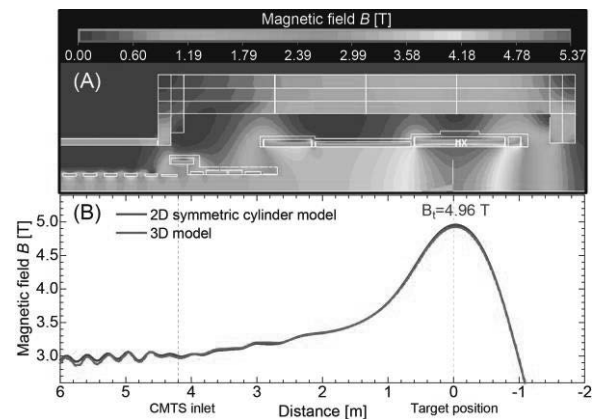


Fig. 5-6 コイル複合材の熱伝導率

れ十分低い値となっているが、運転を継続するにつれて、放射線による熱伝導率の劣化によってコイル温度が上昇し負荷率が増加するので注意が必要である。

Table 5-1 にコイルのデザインパラメータとコイルに作用する電磁力がまとめられている。磁場が高くなっている CS コールドマスのコイルに大きなフープ応力 (R 方向) が発生している。特に CS1 には非常に大きなフープ力が発生するため、コイルが破壊されないような強力なサポート構造が必要になる。一方、TS1 コールドマスは軸方向の成分が非常に高くなっており、PCS を単独で励磁した場合、CS コールドマス側に 100 kN の

Table 5-1 コイルの設計パラメータと電磁力の結果

ID	設計パラメータ				PCS: "ON", MTS: "ON"			PCS: "ON", MTS: "OFF"		
	内径 [mm]	厚さ [mm]	長さ [mm]	電流値 [A]	F _R [kN]	F _Z [kN]	Cold mass F _Z [kN]	F _R [kN]	F _Z [kN]	Cold mass F _Z [kN]
CS0	1344	152	180	2700	5568	5762	81	5568	5762	51
CS1		152	1391		60404	2371		60403	2370	
MS1		84	1468		26467	-3108		26463	-3112	
MS2		118	721		15139	-4943		15117	-4969	
TS1a	500	16	200	2700	194	-3	-368	194	-3	-923
TS1b		48	240	2581	1056	-53		1052	-55	
TS1c		64	200	2700	1148	-8		1137	-13	
TS1d		64	320	2619	1686	-42		1648	-66	
TS1e		48	200	2538	853	58		818	20	
TS1f		820	96	350	2916	3001		-321	2894	

力で引き込まれる。特に TS3 コイルの力が強い
ため、口径の異なるコイル間のサポートが変形しな
いような強力なリブ構造が必要となる。また、こ
の大きな軸方向電磁力は、真空容器からコールド
マスを支えるサポートロッドや真空容器にも影
響を及ぼすので十分に考慮する必要がある。

シミュレーションは、2次元円筒対称モデルで
の調整の後に3次元モデルに拡張された。3次元
モデルでは、コイルの形状、配置、電流密度等は
2次元モデルと同様で、鉄ヨークの形状だけが円
筒から箱型に変わっている。Fig. 5-6 (B) に2次
元モデルと3次元モデルのソレノイド軸上の磁場
の強さを比較しているが、ほとんど変化が見られ
ない。3次元モデルでの連成解析を行うために、
計算されたコイルの電磁力節点解を次節の構造
解析に入力している。

5.2.3. 構造解析

PCSの実製作に向けて、CS コールドマス、TS1
コールドマス及び放射線シールドを含む真空容
器の3次元構造解析を行った。

A. CS コールドマス

CS コールドマスは 5. 2. 1. 項で述べられたよ
うにコイルを異方性複合材料で定義し、サポート
形状を行った。コイルのサポートも非常に大きな
CS1 のフープ力に対してコイルが破壊されない
ような強力なサポートが必要であるが、サポート
も放射線による発熱源になるため軽量化も求め
られる。5. 1. 節で述べたように、コイルの冷却も
考慮してサポートシェルは A5083 アルミニウム
合金で製作することにし、その形状はコイルの内
部応力が許容値以下になる様に最適化された。そ
の際の許容応力は、アルミニウム安定化材の 4.5
K での 0.2%耐力の実測値を基準とし、その 3 分
の 2 である 63.3 MPa に設定された。

次項で熱解析の詳細について述べるが、本構造
解析でも温度分布と熱収縮が及ぼす影響は考慮
されている。コールドマスの主要部品は冷却管も
含めてアルミニウムで構成されており、冷却によ
る応力は小さくなっている。コイル複合材料の収

縮量は、Nb 成分が入っているため、外側のアル
ミニウム製シェルよりも若干小さくなっている。
これは冷却によりコイルを締め付けることにな
るので、励磁時のコイルのプープ応力を 9 MPa 程
度緩和させる。しかし、この冷却による効果は設
計の裕度として扱い、サポートシェルはその構造
のみで許容応力以下になる様に設計されている。

Fig. 5-7 に冷却と電磁力の両方を考慮した CS
コールドマスのミーゼス応力分布を示す。(A) は
コイル複合材モデルの結果を示しており、厚さ 50
mm のシェルの外側中央に、厚さ 70 mm、長さ
700 mm のリブを追加することで、CS1 コイル応
力を許容値以下の 54 MPa にすることができる。
冷却を考慮しない場合の応力は許容値と同等の
63 MPa 程度である。(B) と (C) は応力が最も
高い CS1 コイルの内側中央に一部分だけ現実的
なモデル (3 ターン、3 層) を定義した計算の結
果を示している。コイル構造において、NbTi ラ
ザフォードケーブルの応力が最も高くなり、最大
値は 110 MPa である。組成にもよるが一般的
な NbTi の引張強さは 1 GPa 以上であり、ケー
ブルは十分な裕度を持っていることが分かる。
また、アルミニウム安定化材の応力は 60 MPa 程
度となり許容値に近い。

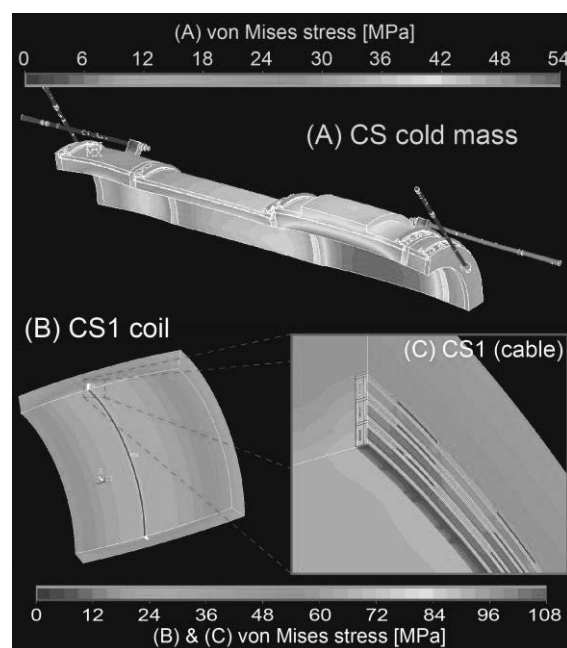


Fig. 5-7 CS コールドマスのミーゼス応力分布

実際の CS1 用のサポートシェルは、組立や製造方法を検討し、溶接試験等も行ったが、最終的に追加リブ分が一体化された中央部の厚みが 120 mm リング鍛造品を基に製作された。

B. TS1 コールドマス

TS1 コイルのフープ力は小さくシェルの外側に補強構造を必要としないが、非常に強い長手方向の電磁力を考慮した設計が必要である。Fig. 5-8 に形状最適化された TS1 コールドマスサポートの応力分布を示す。50 MPa 程度のやや高い応力がみられるが、A5083-H113 材の 0.2%耐力 280 MPa よりは十分に小さくなっている。

応力の高い部分の一つは長手方向ロッドの支持台座である。長手方向ロッドは、2 番目のコイル (TS1b) のシェル外周部に設けられる台座に固定される。この台座部分に非常に大きな応力が発生し、シェルと台座間のボルトや溶接での締結では強度が不足した。そこで、TS1b シェルはリング鍛造品を基に台座部分を残すような削り出し加工により製作された。もう一つの応力の高い部分は、最後のコイル (TS1f) のフランジ側のフィン構造の根本である。ソレノイド軸方向の電磁力は一つだけ内径が大きい TS1f コイルが支配的であるため、TS1f と TS1e コイル間のフランジには大きなせん断力が作用し、変形及び応力が高くなる。そこで、梯子の様な形状のフィン構造で TS1b シェルのサポート台座と連結させることにより構造を強化している。

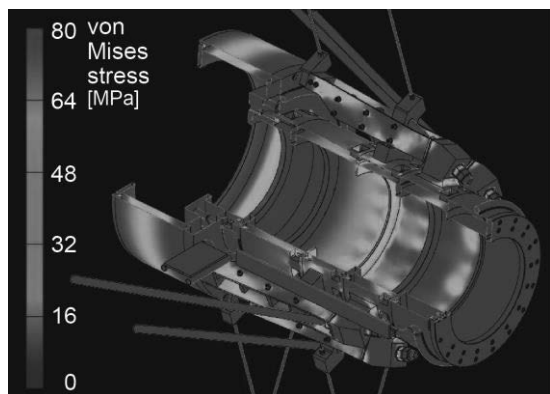


Fig. 5-8 TS1 コールドマスの応力分布

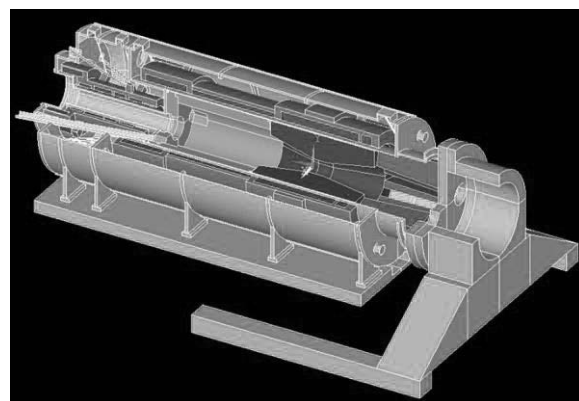


Fig. 5-9 真空容器の解析モデル

C. 真空容器

真空容器は、コールドマスや熱輻射シールドを格納する断熱真空と標的に陽子ビームを当てパイオンやミュオンを生成するビーム真空の隔離された 2 つ空間がある。Fig. 5-9 に真空容器解析用の 3 次元モデルを示す。断熱真空層において、CS コールドマスと TS1 コールドマスの間には中間フランジと呼ばれる構造体があるが、機械的な強度を補うための物であり、気密構造にはなっていない。内蔵される約 9 t の放射線シールドの荷重は中間フランジと真空容器内筒で受け持っており、更に現地で挿入される 40 t のタングステン合金製の放射線シールドの先端は内蔵シールドに接続されるため、稼働架台のも含めた約 80 t の荷重の半分も負荷される。ビーム真空の両側真空気密は、それぞれピローシールと呼ばれる 0.6 MPa 空気圧で枕の様に膨らませたダイヤフラムとフランジの接触によって行われるので、長手方向に圧縮力が作用する。Fig. 5-9 において、モデルには放射線シールド側のフランジには 18.2 t で左向き、MTS 側は右向きに 6.5 t の荷重を定義している。構造解析では地震も考慮し最大の荷重として鉛直下向きに 2G の加速度与えている。

Fig. 5-10 (A) に加速度、大気圧、ピローシール圧力、電磁力を考慮した真空容器全体のミーゼス応力分布を示す。真空容器は SUS304 ステンレス鋼で製作予定であり、許容応力は引張で 130 MPa、溶接部で 80 MPa としている。2 つの放射線シールドの荷重を受け持つ CS コールドマス側のセンターリングには高い応力が発生している

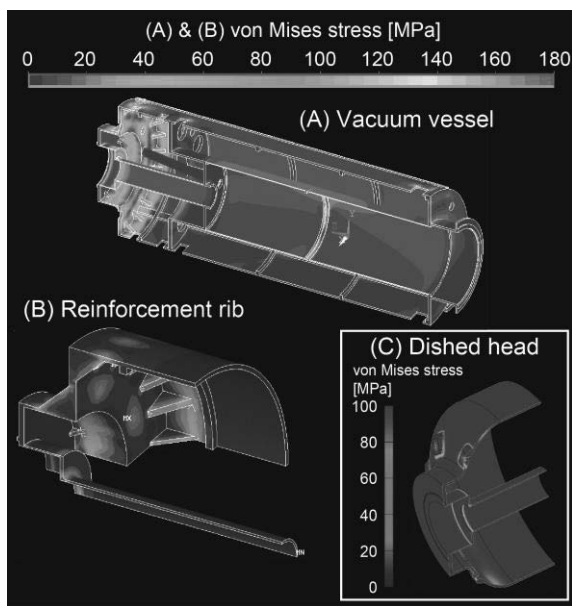


Fig. 5-10 真空容器の応力分布

が、許容値以下となっている。一方 TS1 コールドマス側はソレノイド軸方向の高い電磁力の影響で許容値よりも高い応力が発生している。そこで、真空容器の TS1 側だけのモデルを製作しリブの形状最適化を行った。その結果を Fig. 5-10 (B) と (C) に示す。(B) の場合、真空容器外側と中間に非常に屈強なリブを多数取り付けが必要があり、最内層のフランジと内筒の付け根は、空間的制限より一体物を湾曲に切削した様な形状が必要になる。(C) は鏡板を使って最適された形状である。両方の構造で応力は許容値を下回っているが、どちらの形状を採用するかは製造メーカーに一任することにした。

5.2.4. 熱解析

4 章で述べられたように PCS のコイルは様々な放射線の影響を最小化するために、冷却管を用いた伝導冷却法式が採用されている。PCS と MTS は、直列に接続された冷却管を介し冷凍機から供給される 2 層流ヘリウムにより冷却される [14]。アルミニウム製の冷却管はサポートシェルの外側に溶接で取り付けられ、コイル層間に差し込まれている高純度アルミニウム伝熱板は、まとめて冷却管の根元に溶接される。本磁石では溶接ビード付き冷却管を用いることで、溶接固定によ

る冷却管の影響を最小化している。コールドマスサポートの材料である A5083 は、他のアルミ材料と比較しても熱伝導率が低い。(Fig. 5-4 参照) コールドマスサポートの伝熱はコイルの冷却にも寄与するため、冷却管とサポート台座の間に 4 N 純アルミニウム製の冷却台座を設けて、コールドマスサポートの温度差を小さくしている。

冷却による温度分布、熱収縮による変位や応力の影響を調べるために熱解析を行った。Fig. 5-11 に CS コールドマスの熱解析条件を示す。チタン合金製のサポートロッドの先端は真空容器に固定されるため 300 K の温度を定義している。ロッドは室温からの熱を直接コールドマスに伝えないために、70 K の熱輻射シールドに熱的にアンカーされている。コールドマス表面への放射による熱負荷は 1.25 W と見積られている。放射線による発熱がコールドマスへの熱負荷の最大となっており、放射線シミュレーションにより CS コールドマスの発熱量は 190 W と見積られている。放射線による高純度アルミニウム冷却板の熱伝導率の劣化を考慮し、残留抵抗比 50 の熱伝導率を定義している。これは 4.5 K での熱伝導率が 95%異常低下していることを示している。また、流体や管内の条件に大きく依存するため冷却条件の定義は難しいが、本モデルでは冷却管の内側に裕度を持った 4.5 K で 600 W/(m² · K) の熱伝達係数を定義している。

Fig. 5-12 に CS コールドマスサポートの温度分布を示す。熱アンカーの効果でサポート構造による室温からの熱流入量は小さくなり、コールドマスのサポート台座部分でも温度は 6.4 K 程度である。冷却管の経路と冷却台座の最適化により、発

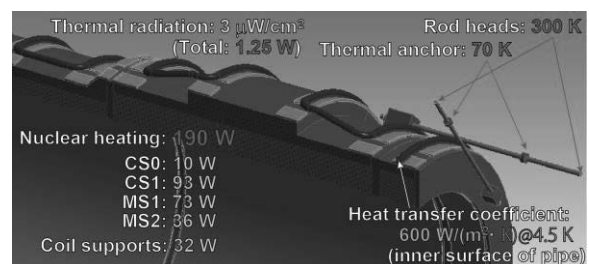


Fig. 5-11 CS コールドマスの熱解析条件

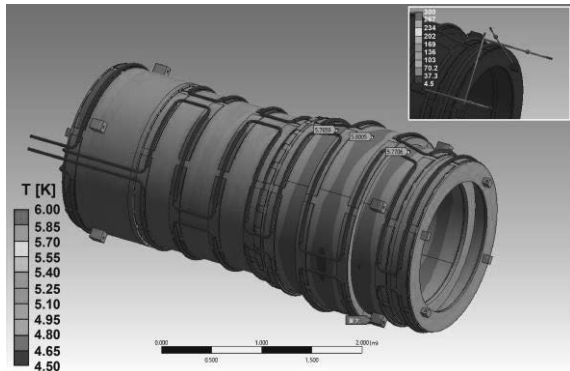


Fig. 5-12 CS コールドマスサポートの温度分布

熱量が最も大きい CS1 シェルの中央部でも温度は 6 K 以下となっている。

熱収縮に関して、変位分布より得られた収縮量は、径方向で最大 4 mm、長手方向で 17 mm となった。PCS のコイル配置精度は、加速器磁石よりも低く数ミリ程度であるので、冷却前後で精密な位置調整機構等を設ける必要はないが、これらの熱収縮量を考慮した設計が必要となる。また、コールドマスを室温で完全に真空容器に固定した場合、長手方向 17 mm の収縮量は非常に大きな応力を発生させる。回転座金やばね等を用いてコールドマスやサポートに過剰な負荷を逃がすことが重要である。

超伝導磁石の設計において、コイルの内部温度を正確に見積ることが極めて非常に重要であるが、複合材料モデルでは難しい。そこで、CS コールドマスのコイルに関して 2 次元円筒対称モデルによる差分法解析により評価された[15]。本モデルは、放射線のモンテカルロシミュレーションと連携されており、線量に依存した核発熱量や物性値の考慮されている。

Fig. 5-13 に COMET Phase-II の実験条件（陽子ビーム：8 GeV, 56 kW）で 30 日間運転した後の CS1 コイルの温度分布を示す。Fig. 5-13 において、高純度アルミ冷却板の先端が 4.5 K に冷やされている。コイルの外側には厚さ 500 mm の A5083 製のサポートシェルが配置されており、冷却管を想定した 4.5 K の冷却部がシェル外側の上流と下流の 2 箇所に設けられている。熱伝導率が劣化していない実験開始時の CS1 コイル温度の

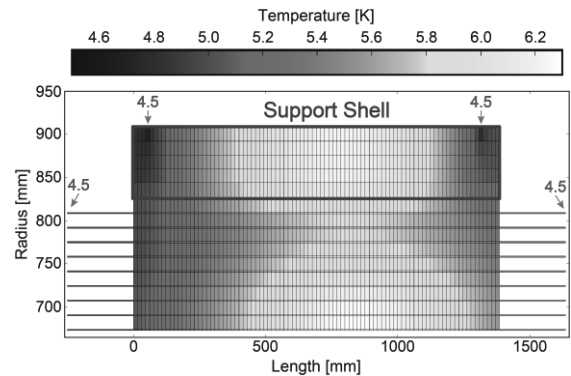


Fig. 5-13 CS1 コイルの温度分布

最大値は 4.9 K であり、90 日間の放射線による影響で 6.3 K まで温度が上昇する。冷却管から遠いシェル外周中央の温度は 6.2 K となっており、その影響でコイルの外層も中央の温度が高めになっている。実際の CS1 シェルは、コイルのフープ力による内部応力を低減するためにシェルの中央部分の厚みを 120 mm に増加しており、この計算モデルよりも核発熱は増加し更に伝導距離も長くなっている。コイルの温度上昇が懸念されるため、冷却管の 4 経路に増加させ、純アルミニウム冷却台座を配置することで、Fig. 5-12 の様にシェルの表面温度を 6 K 以下まで抑えている。

6. さらなる大強度化に向けて

超伝導磁石はミューオンビームラインに応用され、高品質化、大強度化に大きく貢献しているが、ミューオン稀崩壊探索などのためには、さらなる大強度化が切望されている。

大強度化のためには、コイル含侵や構造体などに使われる有機材料などの磁石材料において放射線対策が不可欠である。超伝導線材については、COMET パイオン捕獲ソレノイドのように厚い遮蔽体を磁石内部に挿入し、冷却板をコイル内部に導入するなど様々な工夫を取り入れたとしても、NbTi を使った超伝導磁石には 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と考えられる。

そこで、次世代のミューオンビームラインには高温超伝導体 (HTS) を使用することが検討されており、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[16]。HTS コイルは NbTi に比べて高い温度領域で運転できるので、

運転温度を 20 K 程度にすれば、アルミや銅などの比熱が 4 K に比べて一桁以上大きくなるため核発熱による温度上昇を緩和でき、さらに熱伝導率も数桁改善するので、十分な温度マージンを保って運転できる。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、線材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ソレノイドの置き換えにも期待されている。本章では、これらの開発状況について紹介する。

6.1. 将来の耐放射線超伝導磁石

原子核・素粒子物理学の発展は、粒子加速器や検出装置の高度化と共に歩んでおり、その中でも磁石技術の発展は欠かすことができないものの一つである。現在 CERN より提案されている周長 100 km にもなる超大型の円形衝突型加速器の建設計画 Future Circular Collider (FCC, <https://fcc.web.cern.ch>) では、究極の目標であるエネルギー 100 TeV の陽子ビームをコントロールするために 20 T 級の高磁場磁石が要求されている[17]。更にその先の Muon Collider 計画では、20 T のパイオン捕獲ソレノイドや 40~60 T のミュオンビーム冷却用ソレノイドなど、非常に挑戦的な性能を要求しているものがある[18]。このような高磁場では、現在一般的に使用されている NbTi は、超伝導状態を維持できないため新たな超伝導線材を用いた磁石の開発が必要になる。Fig. 6-1 に米国の National High Magnetic Field Laboratory (<https://nationalmaglab.org/>) がまと

めた各超伝導線材の臨界電流密度の磁場特性を示す。候補となるのは、Nb₃Sn や Nb₃Al といった A15 型超伝導体とイットリウム系及びビスマス系の HTS である。

放射線の問題も非常に重要であり、衝突点近傍に配置される磁石やパイオン捕獲ソレノイド等の高輝度 2 次ビームライン用磁石にも非常に高い放射線耐性が要求される。FCC の目標ルミノシティは高輝度 LHC より一桁高いため、衝突点付近の機器の総線量は数百 MGy に達すると予想され [19]、Muon Collider のパイオン捕獲ソレノイドはさらに厳しい放射線環境下で運転されることが予想される。

J-PARC の将来計画において、物質・生命科学実験施設 (MLF) では第 2 ターゲットステーション (TS2) の建設が提案されており、そのミュオンビームライン用のパイオン捕獲ソレノイド (TS2-PCS) の検討が行われている[20]。TS2-PCS は、ミュオンビーム収量を最大化するため、3 GeV、1 MW の陽子ビームが照射される 2 次粒子生成標的の近傍に配置されるため、吸収線量は 10 年間で 130 MGy に達し、核加熱は遮蔽構造にもよるが 650 W と見積もられている。このような大きな入熱に対する冷却は簡単ではないが、HTS 線材は冷却に関しても非常に有利に働く。HTS の臨界温度は約 90 K と高いため、NbTi に比べてコイルが超伝導性を維持できる温度裕度が格段に大きい。また、放射線の影響を考慮した軽量化のために、伝導冷却方式による冷却になるが、アルミニウムや銅の熱伝導率の非常良い温度領域 20 K でコイルを運転することができ、効率の良い運転と冷媒の放射化も最小化できる。

我々は、TS2-PCS の実現に主軸を置き、HTS 線材である REBCO (rare-earth barium copper oxide) に着目して、基礎的な研究開発を行っている。本章では、REBCO 線材の照射効果と無機絶縁 REBCO コイル研究開発について紹介する。

6.2. REBCO 線材の照射効果

本稿では、文献[21]を基に REBCO 線材田するガンマ線照射と中性子照射に関して紹介する。

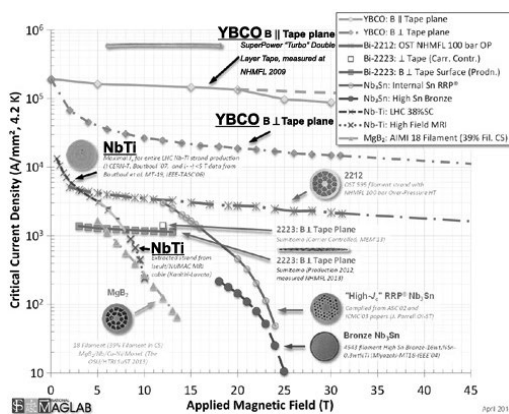


Fig. 6-1 各線材の臨界電流密度の磁場特性

6.2.1. 背景・目的

PCS のコイルは様々な放射超伝導材料の分野では、新しい人工ピンニングセンターの導入による超伝導特性改善を調べるために、低照射線量でさまざまな粒子を用いた照射が行われた [22-24]。さらに、イットリウム系(YBCO) 超伝導体に対するガンマ線照射の影響に関するいくつかの研究活動が行われている [25-27]。ガンマ線照射によって YBCO バルクサンプルの臨界温度 (T_c) の大幅な低下は観察されなかったが、0.4 MGy を超える線量で臨界電流 (I_c) の低下が報告されている。そこで、我々は実用線材に対する照射効果の理解を深めるために、市販の REBCO テープ線材の I_c に対するガンマ線照射の影響を調べることにした。

人工衛星に搭載する観測装置や核融合炉への応用を目指した HTS に対する中性子照射の研究も行われている [28-30]。MLF-TS2 の設計において、文献[28]を参考に高速中性子照射による I_c の劣化を裂けるために TS2-PCS への中性子フルエンスの上限を $1 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ に設定した。そこで、我々は TS2-PCS 開発のためのデータを取得するため $10^{21} \sim 10^{23} \text{ n/m}^2$ の中性子フルエンスの範囲で REBCO テープ線材への中性子照射を行った。

6.2.2. ガンマ線照射

ガンマ線照射は、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設で行われた[31]。TS2-PCS の吸収線量の推定値は 130 MGy であるが、照射時間が長期に及ぶため最初の目標線量は 20 MGy に設定された。照射用のサンプルは、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm、長さ 200 mm の人口ピン入り GdBCO テープ (SCS4050-AP) であり、ガラス製アンプルに真空中で密閉された。Fig. 6-2 にガラスアンプルに真空封入されたサン

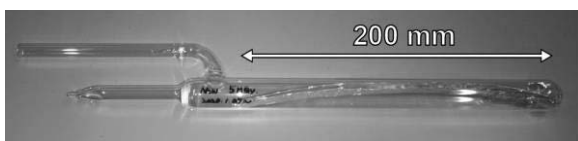


Fig. 6-2 真空封入された照射用サンプル

プルの写真を示す。サンプルには、平均線量率 8.4 kGy/h で 14.9 MGy までガンマ線が照射された。1 つサンプルセットは、更に平均線量率 5.7 kGy/h で 27.4 MGy まで照射された。照射されたサンプルは、 I_c 測定による評価試験まで、照射以外の影響を最小限に抑えるために真空中で保存された。

A. ガンマ線照射による臨界電流の影響

ガンマ線照射による超伝導特性への影響を評価するために、照射された REBCO サンプルの I_c は、液体窒素を用いて外部磁場がない状態で測定された。Fig. 6-3 に I_c 測定用治具の構成を示す。テープは無酸素銅の電極板挟まれ機械的に治具に固定される。組み立てられた治具は液体窒素に

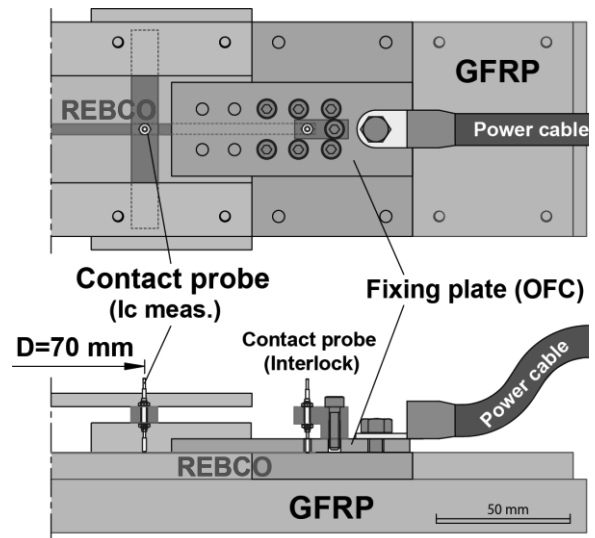


Fig. 6-3 評価用 I_c 測定用治具の構成

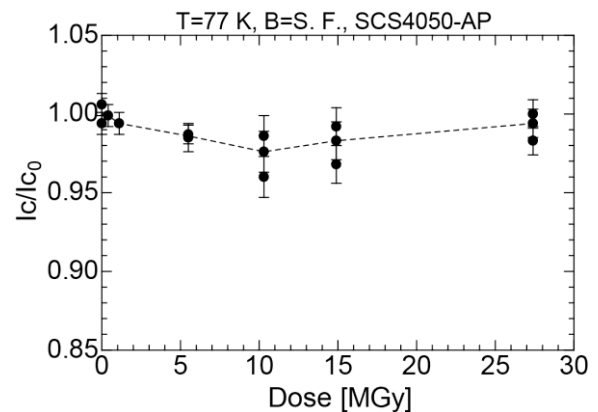


Fig. 6-4 ガンマ線照射による I_c の劣化率

ゆっくり沈められ、十分に冷却した後に通電された。電圧はテープ表面に接触している 70 mm 離れた 2 本のばね式のコンタクトプローブの両端で測定される。本測定では、電流を掃引し抵抗成分による電圧が $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に達した電流値を I_c と定義している。Fig. 6-4 に線量と照射されたサンプルの I_c を未照射の I_{c0} で除した劣化率の関係を示す。結果として、27.4 MGy までのガンマ線照射による I_c の劣化は観測されなかった。

6.2.3. 中性子照射

中性子線照射は、東北大学金属材料研究所の共同利用研究プログラムを利用して、量子エネルギー材料科学国際研究センター (IRCNMS) で行われている。IRCNMS でサンプルが装填されたカプセルは、ベルギー・モル研究所に送られ、実験原子炉 (BR2) 内で 100°C 未満の温度で目標の中性子フルエンス ($10^{21} \sim 10^{23} \text{ n}/\text{m}^2$, $E_n > 0.1 \text{ MeV}$) まで中性子を照射される。照射されたキャプセルは、輸送可能な線量に達するまで BR2 で冷却され後に返還される。その後サンプルは IRCNMS の放射線管理区域で厳密に管理される。

A. 超伝導特性評価装置

照射された REBCO サンプルの超伝導特性は、IRCNMS のホット実験室内に設置されている可変温度インサート (VTI) と 15.5 T 超伝導磁石からなる評価装置を利用して調べられている。評価装置は、それぞれのサンプルに適したホルダーを交換することで、さまざまな超伝導線材と外部磁場配向に対応している。

Fig. 6-5 に VTI と REBCO テープ用サンプルホルダーの構造を示す。冷媒の放射化を防ぐために、サンプルの冷却は 2 台の Gifford-McMahon (GM) 冷凍機による冷媒フリーの伝導冷却方式が採用されている。サンプルホルダーは、GM 冷凍機ヘッドから無酸素銅 (OFC) の冷却ステージ、高純度アルミニウム冷却ロッド、OFC 製のバスバーを介して冷却される。Fig.6-5 (B) に示されているサンプルホルダーの場合、REBCO の c 軸が外部磁場と平行に設定される。サンプルの電圧

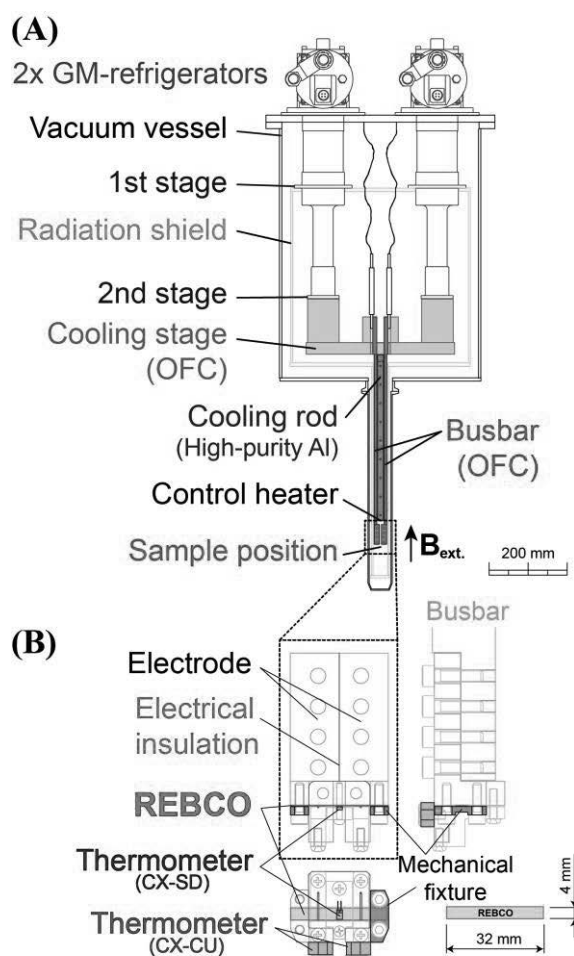


Fig. 6-5 VTI とサンプルホルダーの構造

はテープ表面に接触されるプローブで測定され、プローブ間の距離は 1.4 cm である。SD タイプの Cernox® 温度計 (CX-SD) は、電圧プローブの間で REBCO サンプルに直接接触するように取り付けられており、更に CU タイプの Cernox® 温度計 (CX-CU) がサンプルホルダー電極の両端にそれぞれ取り付けられている。サンプルホルダーの温度は、アルミニウム冷却ロッドの先端にあるヒーターによって 5~77 K の範囲で $\pm 0.1 \text{ K}$ の安定性で制御される。

本セットアップにはサンプルホルダー電極間の温度差があり、サンプル温度の不定性の一つになっている。アルミニウム冷却ロッドとバスバーの間には電気絶縁のためにポリイミドフィルム挟んでいるが、それぞれの接触条件に起因した熱抵抗が異なることで生じていると推測している。そこで、サンプル温度の中央値は、直接接してい

る CX-SD センサーで求め、電圧測定区間の温度勾配による不正確さは、両電極の CX-CU センサーの測定データから推定している。

サンプル温度の不定性のもう1つの要因は、電流輸送による抵抗発熱による温度上昇である。放射化したサンプルからの被ばくを最小限に抑えるために、ボルト固定による簡単で迅速なマウント方法が採用されており、この方法は一般的なはんだ接続よりも接触抵抗が高くなる。サンプル温度は電流掃引中上昇していくが、 I_c に到達した時にちょうど目標温度の ± 1 Kの範囲になる様に印加前のベース温度を下げることで調整している。例として、Fig. 6-6に電流掃引時の電圧とサンプル温度を示す。目標温度 20 K 付近の場合、外部磁場 5 T の場合、 I_c は 207A となり、その時の温度上昇は 0.98 K であった。印加前のベース温度を 19 K に制御することで、 I_c で 20 K になる様に調整している。

今回の一連の測定で両方要素を含む I_c の温度による誤差が最大となった測定は、未照射のサンプルを用いた温度 20 K、外部磁場 2 T、 I_c 419 A であり、誤差は ± 4.1 K と見積られている。結論として、本セットアップでは輸送電流が高いほど温度測定 of 誤差が大きくなる。

B. 超伝導転移温度の中性子照射効果

照射された REBCO サンプルの超伝導転移温度は、IRCNMS の超伝導特性評価装置を使用して、

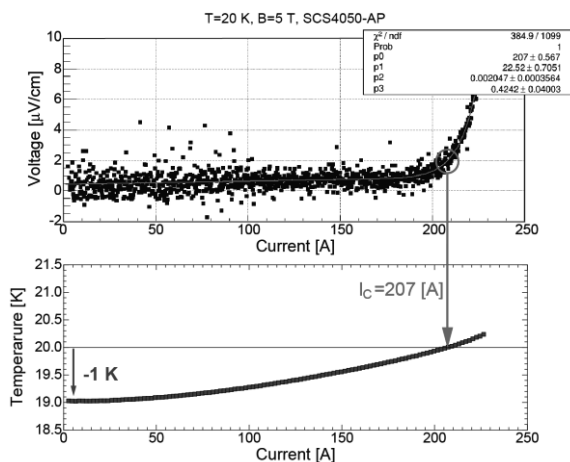


Fig. 6-6 電流掃引時の温度上昇

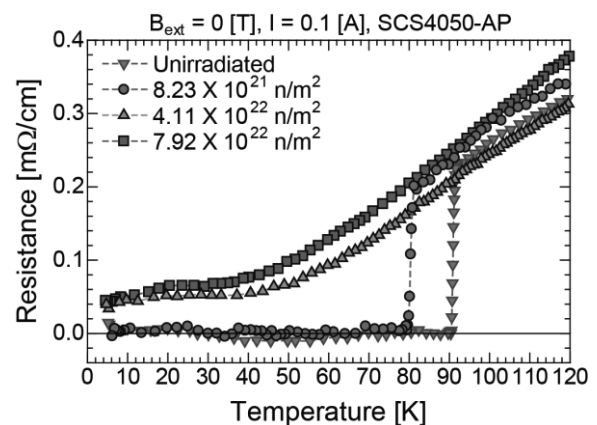


Fig. 6-7 超伝導転移温度の測定結果

測定された。Fig. 6-7に SCS4050-AP サンプルの外部磁場無しでの測定結果を示す。サンプルの抵抗は、0.1 A の電流供給により得られるプローブ間の電圧から導出している。灰色三角のマーカは未照射のサンプルの物であり、90 K 付近で超伝導転移による抵抗の消失が見える。赤丸は中性子フルエンス 8.23×10^{21} n/m² の結果を示しており、約 10 K の転移温度の低下が観測されている。 4.11×10^{22} および 7.92×10^{22} n/m² のデータでは、温度が下がるにつれて抵抗が単調に減少しており、サンプルの超伝導性が消失していることを示している。文献[29]によると、低エネルギー中性子抑制のためにシールドされた SCS4050-AP の T_c の劣化は、 6×10^{21} n/m² では観測されませんでした。シールドされていない SCS4050-AP の T_c は、外部磁場なしで 6×10^{21} n/m² で約 5 K 低下する。これらのデータは、我々の測定結果と類似しており、中性子照射による超伝導特性の劣化に対して、低エネルギー中子の寄与が大きなことを示唆している。

C. 臨界電流の中性子照射効果

約 10 K の超伝導転移温度の低下が観測された中性子フルエンス 8.23×10^{21} n/m² のサンプルの I_c -B 曲線が、温度 20~77 K、磁場 0~15 T の範囲で測定された。本測定において、電圧タップ間の距離は 1.4 cm であり、1 μV/cm の電圧に対応する電流値を I_c と定義している。Fig. 6-8に外部磁場の向きが REBCO の c 軸 (B//c) に平行での

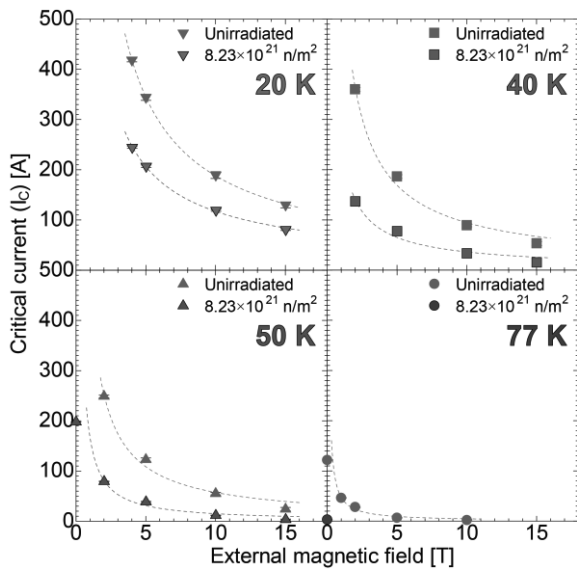


Fig. 6-8 I_c -B 曲線の測定結果

20、40、50、及び 77 K の温度に対する I_c -B 曲線を示す。それぞれの温度で、灰色のマーカーは未照射のサンプルの測定値、色付きのマーカーは中性子フルエンス $8.23 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ まで照射されたサンプルの結果を示している。文献[32]の関数で測定データをフィットした近似曲線は、測定データ間を補完するために点線で描かれている。中性子照射による I_c 劣化は、すべての温度で明確に確認された。SCS4050-AP の主な組成は GdBCO であり、超伝導性劣化に対する低エネルギー中性子の大きな寄与は、約 49 kb の高い中性子反応断面積を持つ Gd によるものと推測される[33]。文献[28] は、高速中性子のフルエンスが 10^{22} n/m^2 の桁で YBCO の I_c が増加したことが報告されており、さまざまなタイプの REBCO 線材で照射試験を行えば、反応断面積と超伝導劣化との関係を明らかにできるかもしれない。

フルエンス $8.23 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の I_c を未照射サンプルの I_{c0} で除した劣化率と測定温度の関係を Fig. 6-9 に示す。測定温度 20 K で約 0.6 だった劣化率は、77 K では 0.02 に低下している。これは劣化の影響が一定ではなく、測定温度に依存していることを示唆している。また、低い温度の劣化が小さい傾向にあるため、運転温度が低いほど磁石の寿命が延びると思われる。文献 [29] でも同様に、温度に依存した劣化率の低下が観察されて

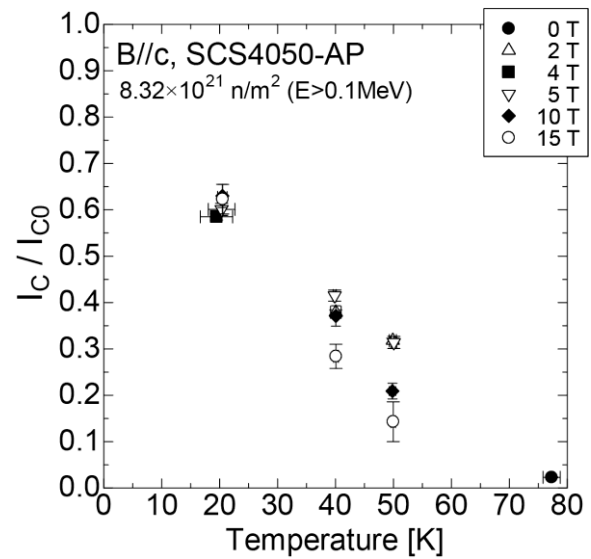


Fig. 6-9 I_c 劣化率と測定温度の関係

いる。また、高温側で劣化率が低い原因は、超伝導転移温度の低下に関係していると思われる。今後、中性子照射による I_c の劣化メカニズムを理解するためには、結晶構造の解析も必要である。

6.3. 無機絶縁コイルの開発

一般的な超伝導磁石の電気絶縁に用いられているエポキシ樹脂などを基にした有機材料は、10 MGy を超える放射線量で、機械強度の低下が顕著になる[34]。数十 MGy まで耐えうる絶縁材料として、シアネートエステルやビスマレイミドトリアジンを基にした耐放射線樹脂材料の開発も進んでいるが[10]、100 MGy 超える放射線環境で使用することは難しい。そこで我々は、セラミックコーティング及びセラミックボンディング技術を応用した無機絶縁超伝導コイルの基礎的な研究開発を行っている。本項では、文献[35]を基に無機絶縁コイルの開発状況を紹介します。

6.3.1. コイルの設計研究

HTS の耐放射線磁石の可能性を探るために、Phase-I 実験の陽子ビーム条件 (8 GeV, 3 kW) において、COMET-PCS と同等の性能を持つ REBCO テープ線材を用いたパイオン捕捉ソレノイドの設計研究が行われた[11]。内径 340 mm、厚さ 25 mm、長さ 340 mm のコンパクトな PCS

は、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の REBCO テープを用いた 34 個のダブルパンケーキコイルをスタックした構造になっており、COMET-PCS の重量を 100 分の 1 に縮小することができる。本モデルでは、素線絶縁として無機絶縁ではなく厚さ 25 μm のポリイミドが REBCO に巻き付けられている。モンテカルロシミュレーションにより放射線量が計算されるが、COMET-PCS よりコンパクトになったことで、生成標的を囲む立体角が増加し、放射線による発熱密度は、10 倍の 0.43 W/kg に増加する。しかし、重量は 100 分の 1 であるため、総発熱量は 10 分の 1 となり 7.1 W となる。また、ベース温度を 20 K で運転した場合、純アルミニウム冷却板の非常に高い熱伝導率を活かすことができ、コイルの温度は最大でも 21.6 K までしか上昇しない。このように REBCO を用いた PCS は、サイズおよび冷却に関して従来のものより大きな優位性を持つことが確認された。

上記の先行研究を基に、TS2-PCS の概念設計が行われた[36]。Fig. 6-10 に TS2-PCS の構造と磁場分布を示す。TS2-PCS は、後方に生成されるパイオンとミュオンの捕獲量を最大化するために、エネルギー 3 GeV、ビームパワー 1 MW の大強度陽子ビームが照射される生成標的の直下流に配置される。TS2-PCS は、10 年間の運用期間で 6. 2. 1. 項で記述したようにコイルへの中性子

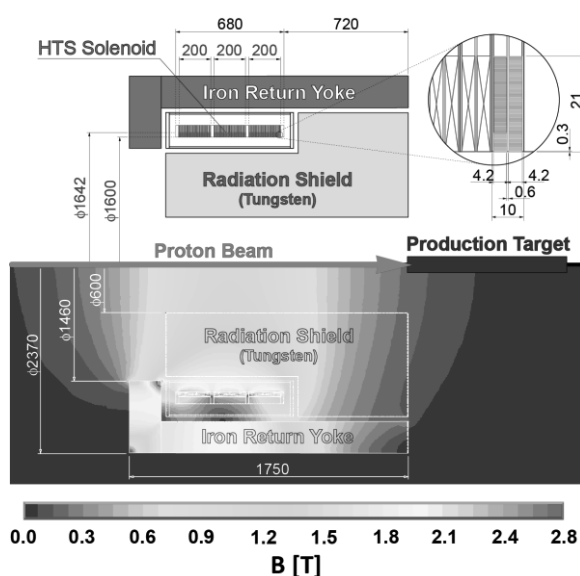


Fig. 6-10 TS2-PCS の構造と磁場分布

フラックスを $1 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ 以下に設計されており、コイルの内側に大きなタングステン合金製の放射線シールドが配置される。Fig. 6-10 の配置によるモンテカルロシミュレーションの結果、中性子フラックスは $7.7 \times 10^{20} \text{ n/m}^2/\text{y}$ となり、放射線によるコールドマスの発熱量は 650 W と見積られている。コールドマスは 3 台のコイルブロックからなっており、1 台のコイルブロックは、内径 1600 mm、厚さ 21 mm、長さ 10 mm のダブルパンケーキ円形コイルを 20 個スタックした構造になっている。2 層構造のコイルには、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の REBCO テープが 1 層あたり 70 ターン巻かれている。運転電流 200 A において、ソレノイド軸上の最大磁場は 1.1 T、コイル内の最大磁場は 2.3 T となり、負荷率は 48% である。

TS2-PSC の実現可能性を検証するために、REBCO テープを用いた小型の無機絶縁コイルの開発を行った。検証コイルは、内径 80 mm、1 層あたり約 30 ターンの円形ダブルパンケーキ型となっており、Fig. 6-11 に HTS 検証コイルの構造図を示す。検証コイルは、セラミック接着剤でセラミックコーティングされた REBCO テープで巻かれている。ターン間に塗布されるセラミック接着剤は、電気絶縁とコイルの機械的強度の強化が期待されている。検証コイルは、機械的

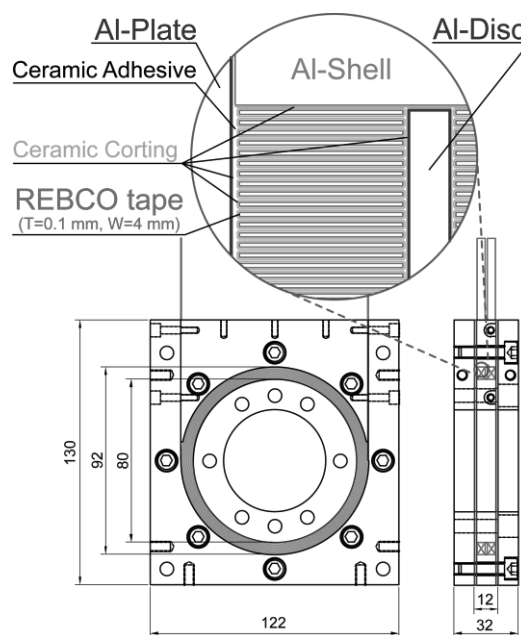


Fig. 6-11 HTS 検証コイルの構造図

強度と熱伝導を強化するために、セラミックコーティングされたアルミニウム製部品と純アルミニウム伝熱版とセラミック接着剤で一体化される。

6.3.2. セラミックコーティングの応用

A. REBCO サンプルへのコーティング

セラミックコーティングに関わらず、線材に何かしらの方法で表面処理を行う際には、ほとんどの場合熱処理が必要である。しかし、高温環境で REBCO 超伝導特性は酸素の蒸発により低下することが知られている。Fig. 6-12 に我々が測定した SCS4050-AP の熱履歴による I_c の低下を示す。水平軸の経過時間は、乾燥炉内の設定温度での保持時間を表している。経過時間 0 の場合、サンプルは設定温度に到達直後に乾燥炉のヒータ出力がゼロになり自然冷却されている。例として、 180°C で 5 時間の熱処理を行った場合、 I_c が 10% 低下する。この温度は、一般的なセラミックスの焼結温度よりも遥かに低い。そこで、我々は比較的低い温度でも成膜可能なゾルーゲル法によるセラミックコーティング技術に着目し、REBCO や磁石部品の電気絶縁への応用を試みた。市販のいくつかのコーティング剤で、スプレー、刷毛塗り、ディッピング等の方法で試行錯誤を繰り返した結果、現時点で最適化されている方法は、 SiO_2 と Al_2O_3 を 1:1 で特別に配合した日研製 G92-5 塗料をスプレーでの塗布である。絶縁層の膜厚は、1 回のスプレーと 80°C で 10 分間の乾燥をセ

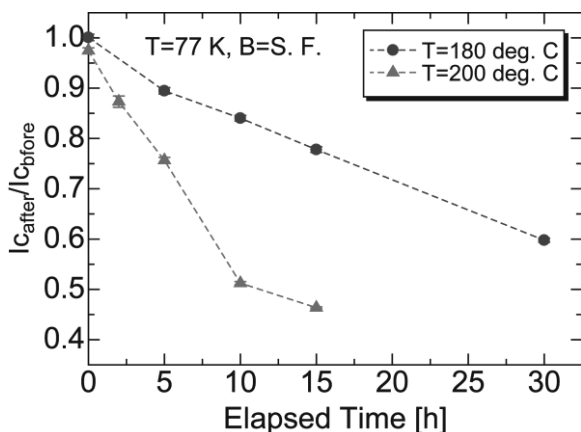


Fig. 6-12 熱履歴による I_c の低下

ットにした施工の繰り返し回数で調整される。SCS4050-AP の短尺サンプルを使用した試験で、 100°C で 20 分間の最適な最終熱処理条件が確認された。

Fig. 6-13 に目標膜厚 $50\ \mu\text{m}$ のセラミックコーティングを施した REBCO テープの全体および断面写真を示す。REBCO テープの表面には、厚さ約 $40\ \mu\text{m}$ のセラミック層が形成されている。コーティング後のサンプルは、ポイントプローブを用いた耐電圧試験により電気絶縁性能の評価が行われた。耐電圧試験の負荷は、周波数 $50\ \text{Hz}$ の交流電圧で与えられた。Fig. 6-14 に絶縁破壊電圧の膜厚依存性を示す。絶縁破壊電圧は、厚さ $24\ \mu\text{m}$

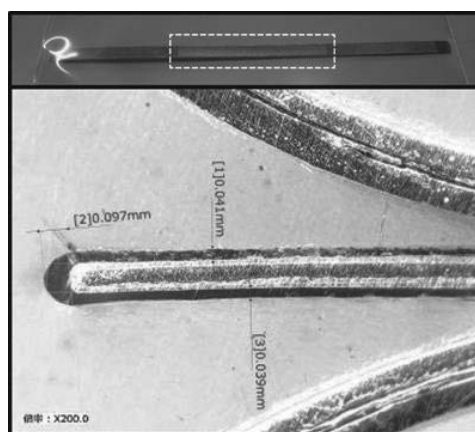


Fig. 6-13 コーティング後のサンプルの写真

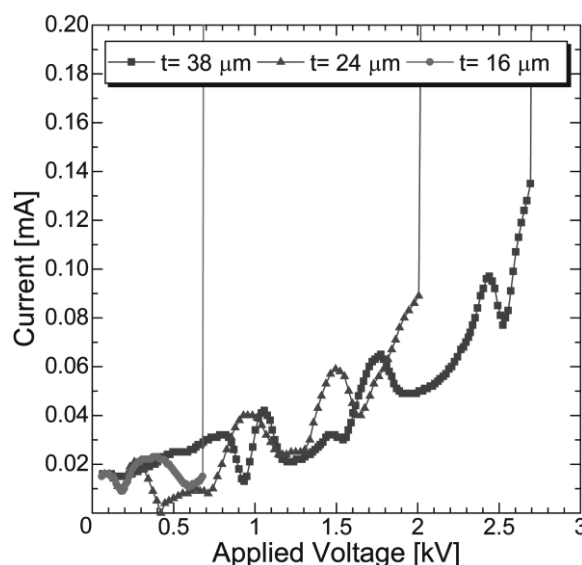


Fig. 6-14 絶縁破壊電圧の膜厚依存性

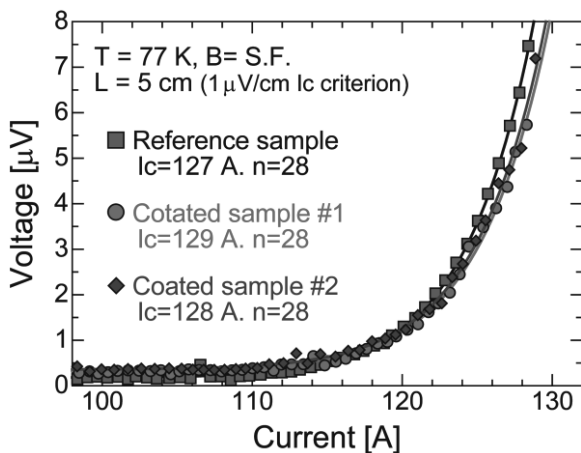


Fig. 6-15 コーティング前後の I_c の比較

(目標厚さ $30 \mu\text{m}$) で許容電圧の 2 kV 以上になった。Fig. 6-15 は、外部磁場なしの液体窒素中でのセラミックコーティング前後の I_c の比較を示している。コーティングされた REBCO テープの I_c は、未施工のサンプルとの有意な差はみられない。熱処理時間が短いため、超伝導特性の熱履歴による劣化がない事が確かめられた。セラミック被覆テープに室温 $\sim 77 \text{ K}$ の繰り返し熱負荷を 10 回以上与えても、外観、絶縁抵抗、臨界電流に変化はなく、良好な絶縁膜が成形されていることが確認された。

B. 長尺テープの連続コーティング

短尺サンプルによって施工条件の最適化が行われた。次にその条件を基に長尺テープへの連続コーティングの試行が行われた。Fig. 6-16 に開発された連続コーティングシステムの写真を示す。REBCO テープはリールに巻かれた状態で送出し機にセットされる。テープはスプレーセクション、熱処理セクションを介し巻き取り機取り付け

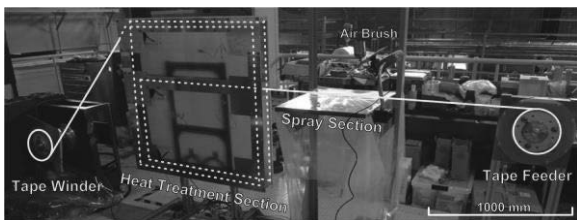


Fig. 6-16 連続コーティングシステムの写真

有られたリールに巻き取られる。テープの経路はプーリーを用いて行われるが、プーリーとの接触面はスプレーによる塗布面と反対になる。膜厚制御のための繰り返し施工では、リールを逆回転させて、テープ位置を元に戻し再施工される。方側コーティング完了の後、リールを取外しテープ面表裏を逆にして、もう片方のコーティングが施工される。短尺サンプルによって最適化された熱処理条件は、10 個の滑車で 長さ 7.6 m の熱処理セクションの通過時間によって調整される。例えば、 80°C で 10 分間の乾燥の場合、長さ 380 mm のテープの一部にスプレーし、熱処理セクションに送り込む時間は 30 秒である。

Fig. 6-17 に片面 8 m にわたってコーティングされた REBCO テープの膜厚測定の結果を示す。平均厚さ $19 \mu\text{m}$ のセラミック絶縁膜を 8 m の長尺テープに形成できた。ただし、スプレーやテープ送りは人の手で行われており、膜厚のばらつきが大きい。

現在、連続コーティング装置は改良され、コー

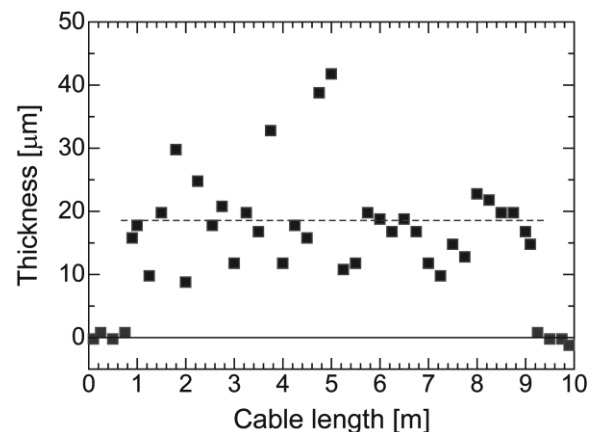


Fig. 6-17 コーティングテープの膜厚測定結果

ティング剤噴射機 (自動スプレー) の追加と送出し速度の一定化が図られた。その結果、長さ 40 m の REBCO テープ両面にそれぞれ $\pm 4.3 \mu\text{m}(\sigma)$ の均一度での絶縁膜コーティングに成功している。

6.3.3. 検証コイルの巻き線

無機絶縁コイルの実現性を検証するために、Fig. 6-16 の連続コーティング装置で両面セラミ

ックコーティングされた長さ 14 m の REBCO テープを使用して、セラミック接着剤を用いたウェットワインディング方式で、小型のダブルパンケーキコイルの巻き線が行われた。いくつかの市販のセラミック接着剤を用いてスタックサンプル製作を繰り返した結果、検証コイル巻線用の接着剤には東亜合成株式会社製アロンセラミック®タイプ C を採用した(<https://www.toagosei.co.jp>)。この接着剤の硬化条件は、室温で 16 時間乾燥させた後、90°C で 1 時間、150°C で 1 時間の熱処理で良く、 I_c の低下が起こらないと推測できる。また、タイプ C を選定した理由は、0°C で 13×10^{-6} /°C の線膨張係数は、他タイプよりも REBCO テープや金属製のサポート部品の線膨張係数に近い事であり、冷却による熱収縮の影響を小さくできる。

検証コイルは、目標膜厚 50 μm でセラミックコーティングされたステンレス鋼製の円形のセンターボビンに接着剤を塗布しつつテープを巻き付けることで製作された。テープの張力は、バネを用いてセンターロッドとベルト間の摩擦によ

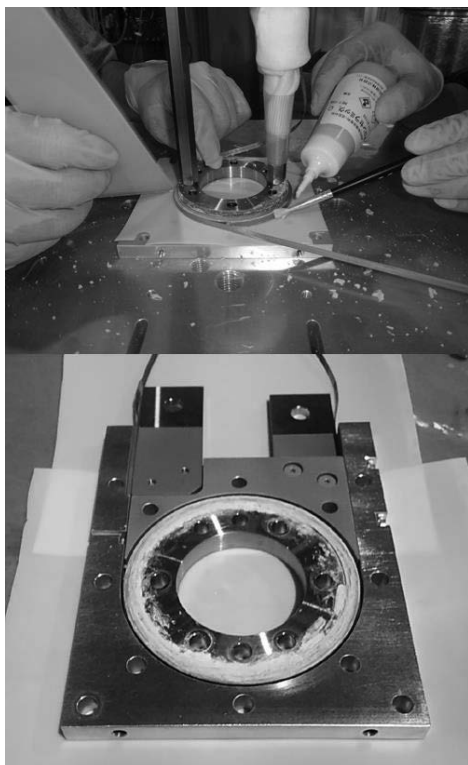


Fig. 6-18 検証コイルの写真

って制御されるフィーダーによって、0.85~0.95 kg に調整された。1 回目の巻線試作で、1 層目 26 ターン、2 層目 24 ターンの円形シームレスダブルパンケーキコイルの製作に成功した。Fig. 6-18 は、無機絶縁プロセスで巻かれた最初の検証コイルの写真である。コイルの平均厚さは、1 層目で 5.71 mm、2 層目で 5.49 mm であり、コーティング層と接着剤から構成されるテープ間の絶縁層の有効厚さは、0.13 mm と推定される。

検証コイルの健全性の確認のために、超伝導転移温度が測定された。4 端子法により測定された室温でのコイル抵抗は 1.57 Ω となり、巻き線前の 14 m 長の REBCO テープの抵抗値と同じ値であり、コイルのターン間ショートなどの問題は起こっていない。Fig. 6-19 に大気中で液体窒素を用いて冷却されたコイル抵抗の変化を示す。温度はコイル表面に取り付けられた白金測温抵抗体 (Pt100) で測定されているが、これはコイル表面の温度と環境温度合わせた参考温度である。90 K 付近に超伝導転移に伴う抵抗値の急激な現象が見られた。これは REBCO 線材の超伝導特性が劣化していないことを示しており、無機絶縁超伝導磁石の実現に向けた大きな一歩となった。

HTS の加速器や原子核・素粒子実験装置への応用は世界中で関心が高まっており、REBCO に限らず様々な研究が行われている。我々は、HTS の応用に関して、京都大学、東北大学、ローレンスバークレー研究所 (LBNL)、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) と共同研究を行っている。そのプ

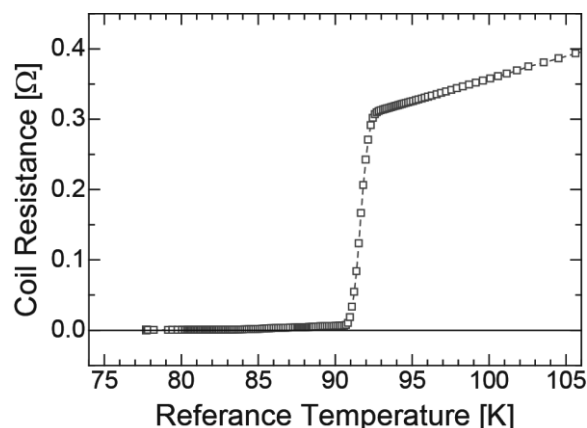


Fig. 6-19 試験用レーストラックコイルの構造

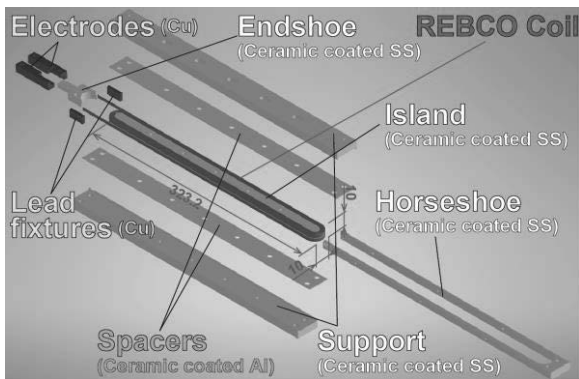


Fig. 6-20 試験用レーストラックコイルの構造

ログラム一つとして、無機絶縁 REBCO コイルの高磁場試験が計画されている。我々は上記の手法を踏襲して Fig. 6-20 に示されているような長尺のレーストラックコイルを製作し、BNL の Nb₃Sn レーストラックで構成されている試験設備で、外部磁場約 10 T、温度 4.2 K での試験を計画している。現在、ダミーとして同形状の銅テープを用いて巻き線を行い、コイル部品や巻き線治具の改良と共に技術の習熟を行っている。前項で記述した長さ 40 m の REBCO テープ線材へのセラミックコーティングは既に完了しており、間もなく高磁場試験用のレーストラックコイルの巻き線が開始される。

7. まとめと謝辞

高い放射線環境で運用される超伝導磁石の応用例として、COMET 実験用ミュオンビームラインと J-PARC-MLF 第 2 ターゲットステーション用パイオン捕獲ソレノイドの開発及び基礎研究が紹介された。近年のミュオンビームラインでは、2 次粒子生成標的をソレノイド内部に配置し標的に印加された強磁場でミュオン及びパイオンをトラップするため、従来の 2 次粒子ビームラインと比較し、1000 倍以上のミュオンを引き出すことができる。しかし、その構造に起因して、超伝導磁石は、標的とコイルの間に高密度の放射線シールドを配置しても、高放射線環境下での運用を強いられるため、放射線による影響を最小化し、目標線量に耐えうる設計をする必要がある。

具体例として、COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイドの設計では電磁気特性、熱特性、機械特性が相互に影響を及ぼすため、有限要素法を用いた連成解析は非常に有効方法であった。高放射線環境での運転される超伝導磁石の場合、上記に加えて線量に依存した材料特性の劣化や熱負荷等も考慮する必要がある。

運転環境が 100 MGy 超えるような、将来の耐放射線超伝導磁石の実現を目指した基礎開発研究の現状も紹介した。次世代耐放射線超伝導磁石の線材候補であるイットリウム系高温超伝導体の REBCO と呼ばれるテープ線材の照射効果の研究を行っており、ガンマ線照射では 27.4 MGy まで臨界電流の劣化は観測されなかった。一方、中性子照射において、中性子フルエンス $8.23 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ で劣化が観測され、 $4.11 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ で超伝導性が消失した。低エネルギー中性子の寄与が大きいことが示唆されており、Cd によってシールドされたサンプルの照射を行い劣化メカニズムの理解を深め、今後の磁石開発に生かしていく。

セラミックコーティング及び接着技術を用いた無機絶縁コイルの研究開発を進めており、コーティング剤をスプレーし 100°C で熱処理することで、テープ表面に SiO₂ と Al₂O₃ で構成される良好な絶縁膜を成形することに成功した。また、無機絶縁超伝導コイルの実現性を調べるためにコーティングされたテープ線材を用いてセラミック接着剤による小型の円形ダブルパンケーキ検証コイルが製作された。検証コイルの超伝導特性に劣化が見られないことから、我々の手法の有効性が確認された。次の目標として、BNL における低温、高磁場試験を目指した長尺レーストラックコイルの開発が進行中である。

最後に量子科学研究開発機構 高崎量子応用研究所のスタッフには、ガンマ線照射の際に様々な便宜を図って頂いた。また、東北大学金属材料研究所材料科学国際研究センターのスタッフには、中性照射に関する様々な手続きや作業だけではなく、測定に関する補助もやって頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] The COMET Collaboration, Prog. Theor. Exp. Phys. vol.2020, no.3, p.033C01 (2020)
- [2] Y. Kuno and Y.Okada, Rev. Mod. Phys. **73**, pp.151-202 (2001).
- [3] Y. Miyake, et al., J. Phys.: Conf. Ser., 552, 012061 (2014).
- [4] Yasuyuki Tanaka et. al., J. Phys.: Conf. Ser., 897 012022 (2017)
- [5] Rashid M. Djilkibaev and Vladimir M. Lobashev, AIP Conf. Proc. 372, 53 (1996).
- [6] M. Yoshida, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.21-3, 1752(5) (2011); S. Cook, et al., Phys. Rev. Accel. Beams, 20, 030101 (2017).
- [7] M. Yohida, et al., “Repetitive Irradiation Tests at Cryogenic Temperature by Neutrons and Protons on Stabilizer Materials of Superconductor,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no. 6, Sep. 2022, Art. ID. 7100405.
- [8] Ye Yang, et al., “Study of irradiation effects on thermal characteristics for COMET pion capture solenoid,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. ID. 4001405
- [9] Y. Yang, et al., “Influence of gamma ray irradiation on thermal conductivity of bismaleimide-triazine-based insulation tape at cryogenic temperature,” *Cryogenics* 89 107-112 (2018).
- [10] A. Idesaki, et al., “Development of high radiation-resistant glass fiber reinforced plastics with cyanate-based resin for superconducting magnet systems,” *Fusion Engineering and Design* 112 (2016) 418.
- [11] M. Iio, et al., “Mechanical Analysis of Pion Capture Superconducting Solenoid System for COMET Experiment at J-PARC” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, Jun. 2017, Art. ID. 4100205.
- [12] 野田尚昭、他「異種接合材の材料力学と応力集中」コロナ社
- [13] P.E. Bradley, R. Radebaugh, and M.A. Lewis. Cryogenic Material Properties Database, Update 2006. In: Proceedings of ICMC '06 Twenty First International Cryogenic Engineering Conference and 9th Cryogenics, pp. 13–21, Prague, CZ. Icaris Ltd, 2006. (<https://trc.nist.gov/cryogenics/>)
- [14] T. Ki, et al., “Cryogenic system for COMET experiment at J-PARC” *Cryogenics*, vol. 77, Apl. 2016, 25-35
- [15] 楊 叶、「大強度ミュオンビームラインのための超伝導磁石の熱特性に対する放射線の影響に関する研究」、博士学位論文、九州大学、2017年
- [16] Y. Yang, et al., “Influence of neutron irradiation on conduction cooling superconducting magnets,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 101 (2015) 012054.
- [17] L. Rossi, et al., “The EuCARD-2 Future Magnets European Collaboration for Accelerator-Quality HTS Magnets,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. ID. 4001007.
- [18] L. Bottura, et al., “A Work Proposal for a Collaborative Study of Magnet Technology for a Future Muon Collider”, arXiv:2203.13998, mar. 2022.
- [19] M. I. Besana, et al., “Evaluation of the radiation field in the future circular collider detector,” *Phys. Rev. Accel. Beams* 19 (2016) 111004.
- [20] 相澤直人、他「J-PARC 物質・生命科学実験施設第2ターゲットステーション概念設計書」J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン
- [21] M. Iio, et al., “Investigation of Irradiation Effect on REBCO Coated Conductors for Future Radiation-Resistant Magnet Applications,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Sep. 2022, Art. no. 6601905.
- [22] P. M. Niraula, et al., “Particle irradiation induced defects in high temperature superconductors,” *MRS Adv.*, vol. 4, pp. 119–124, Feb. 2019.
- [23] V. Bartunek, et al., “Microscale and nanoscale pinning centres in single-domain REBCO superconductors,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, no. 42, pp. 13010–13019, Sep. 2019.
- [24] T. Aoki, et al., “Effect of neutron irradiation on high-temperature superconductors,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 3200–3202, Jun. 2011.
- [25] L. Luo, et al., “Gamma-radiation effects on some properties of YBCO,” *Phys. C*, vol. 178, pp. 11–14, Apr. 1991.
- [26] B. A. Albiss, et al., “Effect of gamma irradiation on pure and silver-doped YBCO superconductor,” *Solid State Commun.*, vol. 88, no. 3, pp. 237–240, Mar. 1993.
- [27] A. Leyva, et al., “Radiation effects of CO60 gamma-rays in YBCO thick-films,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 816–821, Nov. 1995.
- [28] M. Eisterer, et al., “Neutron irradiation of coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23, Jan. 2010, Art. no. 014009.

- [29] D. X. Fischer, et al., “The effect of fast neutron irradiation on the superconducting properties of REBCO coated conductors with and without artificial pinning centers,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 31, Apr. 2018, Art. no. 044006.
- [30] V. Bartunek, et al., “Influence of neutron and gamma radiation on YBCO and GdBCO/Ag superconducting bulks,” *Ceram. Int.*, vol. 46, pp. 15400–15407, Mar. 2020.
- [31] S. Kurashima, et al., “Irradiation Facilities of the Takasaki Advanced Radiation Research Institute,” *MDPI Quantum Beam Sci.*, vol. 1, no. 1, Mar. 2017. 2.
- [32] C. Senatore, et al., “Field and temperature scaling of the critical current density in commercial REBCO coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, Dec. 2015, 014002.
- [33] K. Shibata, et al., JENDL-4.0, “A New Library for Nuclear Science and Engineering,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 48, 2011, 1–30.
- [34] S. Nishijima, T. Okada, “Radiation resistant organic composites for superconducting fusion magnets,” *Fusion Engineering and Design* 20 (1993) 463.
- [35] M. Iio, et al., “Research and Development of Future Radiation-Resistant Superconducting Magnets with Mineral Insulated REBCO Coils,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, Jun. 2020, Art. no. 4600505.
- [36] T. Ogitsu, et al., “Development of Radiation-Tolerant HTS Magnet for Muon Production Solenoid,” *MDPI Instruments.*, vol. 4, no. 4, Oct. 2020. 4040030