COMET と耐放射線超伝導磁石開発

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、ミューオン一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 10¹¹ 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、ミューオン一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。

$\pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu} \tag{2-1}$

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(µSR)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、 標的上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

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。
- そ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5T 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5Tから3T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、3T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

標的上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、標的上 に5T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になるおおむね 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。

$$p_t^2/_R \propto p_t \times R = \text{const.}$$
 (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で p_t を軸方向運動量 p_ℓ 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 CSO 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3T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;

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

ここで、p、q は輸送する粒子の電荷、運動量、 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。

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

| Table 3-1 | ミュ・ | ーオン輸送ン | ノレノ | イ | ドの諸元 |
|-----------|-----|--------|-----|---|------|
|-----------|-----|--------|-----|---|------|

| Item | Value | | | | |
|------------------------|--|--|--|--|--|
| Conductor | NbTi/Cu monolith wire | | | | |
| | Cu/NbTi = 6 | | | | |
| Cable dimensions | $\phi 1.5 \text{ mm}$ (without insulation) | | | | |
| (Solenoids) | φ1.56 mm (with insulation) | | | | |
| Cable dimensions | φ1.2 mm (without insulation) | | | | |
| (Dipole coils) | φ1.3 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44cm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4×10²¹ n/m²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。

10²⁰ n/m² 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をして頂きたい。

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5T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 10²¹ 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へリウム配 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 用構造部品の材料は 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 スティック(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(最終設計では SUS 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 化しすることにし、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 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撚線と純アルミニ 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向に対して、Ex(R)=43.2 GPa, E_{Y(0)}=73.7 GPa, Ez=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

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1mm 設けている。また、モデルにはミューオ 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5.4T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20%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

| | 設計パラメータ | | | PCS: "ON", MTS: "ON" | | PCS: "ON", MTS: "OFF" | | | | |
|------|---------|------|------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ID | | | | | | | Cold mass | | | Cold mass |
| | 内径 | 厚さ | 長さ | 電流値 | $\mathbf{F}_{\mathbf{R}}$ | $\mathbf{F}_{\mathbf{Z}}$ | $\mathbf{F}_{\mathbf{Z}}$ | $\mathbf{F}_{\mathbf{R}}$ | $\mathbf{F}_{\mathbf{Z}}$ | $\mathbf{F}_{\mathbf{Z}}$ |
| | [mm] | [mm] | [mm] | [A] | [kN] | [kN] | [kN] | [kN] | [kN] | [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 | | 194 | -3 | 4 |
| TS1b | | 48 | 240 | 2581 | 1056 | -53 | | 1052 | -55 | |
| TS1c | | 64 | 200 | 2700 | 1148 | -8 | | 1137 | -13 | 000 |
| TS1d | | 64 | 320 | 2619 | 1686 | -42 | -368 | 1648 | -66 | -923 |
| TS1e | | 48 | 200 | 2538 | 853 | 58 | | 818 | 20 | |
| TS1f | 820 | 96 | 350 | 2916 | 3001 | -321 | | 2894 | -806 | |

Table 5-1 コイルの設計パラメータと電磁力の結果

カで引き込まれる。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9MPa 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 オ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1GPa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 は一つだけ内直径が大きい 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 イオンやミュー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9t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 40t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80t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アフラム とフランジの接触によって行われので、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18.2tで左 向き、MTS 側は右向きに 6.5t 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る必要が 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層流へ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 台座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4N 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、70K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輻射による 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6K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4mm、長手方向で17mm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17mm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70 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 ュー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]。この様 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いないため新たな 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



Fig. 6-1 各線材の臨界電流密度の磁場特性

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、そのミュー 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、ミューオンビーム収量を最大化するため、3 GeV、1MW 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。この様 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 線材に対す るガンマ線照射と中性子照射に関して紹介する。

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 Ic 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 1×10^{23} n/m² 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 $10^{21} \sim 10^{23}$ n/m² 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 の人ロピン入り GdBCO テープ (SCS4050-AP) であり、ガラス製アンプルに真空で密閉された。 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、Ic 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 Ic 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 Ic 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 Ic 測定用治具の構成



Fig. 6-4 ガンマ線照射による Ic 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 μ V/cm に達した電流値を Ic と定 義している。Fig. 6-4 に線量と照射されたサンプ ルの Ic を未照射の Ico 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 Ic 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℃未満の温度で目標の中 性子フルエンス(10²¹~10²³ n/m²、En>0.1 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±0.1 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、Ic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、Ic 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、Ic 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 Ic 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、Ic 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 温度測定の誤差が大きくなる。

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。灰色三角のマーカー は未照射のサンプルの物であり、90K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 8.23×10²¹ n/m² の結果を示してお り、約10Kの転移温度の低下が観測されている。 4.11×10²² および 7.92×10²² 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お り、サンプルの超伝導性が消失していることを示 してる。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 Tc の劣化は、6×10²¹ 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 6×10²¹ n/m²で約5K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、低エネルギー中性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 $8.23 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ 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 μ V/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 Ic-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 8.23×10²¹ n/m²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いる。中性 子照射によるの Ic 劣化は、すべての温度で明確に 確認た。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49kb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 10²² n/m² の桁で YBCO の Ic 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 8.23×10^{21} n/m² の Ic を未照射サ ンプルの Ico 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



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 Ic 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ンクボンディング技 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する。

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4mm、厚さ0.1mm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7.1W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21.6K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 イオンとミューオンの捕獲量を最大化するため に、エネルギー3GeV、ビームパワー1MW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

720 680 HTS Solenoid 200 200 200 Iron Return Yoke 4.2 4.2 **Radiation Shield** ¢1642 1600 (Tungsten) 10 **Production Target Proton Beam** 1.8 0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 2.1 24 2.8 B [T]

Fig. 6-10 TS2-PCS の構造と磁場分布

フラックスを 1×10^{23} n/m² 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 7.7×10^{20} n/m²/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 層当たり 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 Ic 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℃で5時間の熱処理を行った場合、Ic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、ディン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、SiO₂ と Al₂O₃ 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℃で10分間の乾燥をセ



Fig. 6-12 熱履歴による Ic 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℃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 µm 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 µm 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 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 µm



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 Ic の比較

(目標厚さ 30 µm) 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 Ic の比較を示 している。コーティングされた REBCO テープの Ic 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~77 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 パス長 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℃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 μ 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±4.3 μ m(σ)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14m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 剤には東亞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℃で1時間、150℃で1時間の熱処理 で良く、Ic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℃で 13×10⁶ /℃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実験用ミューオンビームラ 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。近年のミューオンビームライン では、2次粒子生成標的をソレノイド内部に配置 し標的上に印加された強磁場でミューオン及び 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倍以上のミューオン 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 レノイドの機械設計を紹介し、電磁気特性、熱特 性、機械特性が相互に影響を及ぼす超伝導磁石に おいて、有限要素法を用いた連成解析は非常に有 効な方法であることを示した。高放射線環境で運 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 8.23×10²¹ n/m² で劣化が観測され、4.11×10²² n/m² 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で塗布し100℃の熱処理す 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

- 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-triazinebased insulation tape at cryogenic temperature," *Cryogenics* 89 107-112 (2018).
- [10] A. Idesaki, at al., "Development of high radiationresistant 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、「大強度ミュー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 Collabora-tion 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 forMuon Production Solenoid," MDPI Instruments., vol. 4, no. 4, Oct. 2020. 4040030