

素核研ミューオングループではミューオン LFV 探索・ミューオン精密測定の本二柱で研究を推進している。今回は LFV 探索についての報告を行う。

■ ミューオン LFV 探索研究

通常のミューオン崩壊と異なり、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊やミューオン電子 ($\mu^- e$) 転換事象ではレプトン世代数の保存が破れており (charged Lepton-Flavor Violation (cLFV)), 標準理論では起こりえない。このため cLFV 探索は高エネルギーフロンティア実験と並んで新物理の検証に重要な役割を果たすと考えられている[1]。

■ MEG 実験

MEG 実験は、現在、実験の第二期 (MEG II) のエンジニアリングランを行っている。MEG 実験は 2008 年のデータ収集開始当初からリモートモニター・制御を重要視し実験を構築してきた。2020 年、現地への移動が制限されていたコロナ禍において、このことが功を奏しリモートシフトを駆使することで予定していたデータ収集を完遂している。

■ COMET 実験

cLFV 物理に関して LFV グループが精力的に推進している実験が J-PARC での $\mu^- e$ 転換事象探索 (COMET) 実験である。COMET 実験は 18 カ国、45 研究機関 (2021 年 2 月現在) の 283 名の研究者が参加する国際共同実験である。COMET 実験は、建設予定の超伝導電磁石のうち、最初の 90 度の折曲がりまでを建設して物理計測を行い (Phase I 感度 10^{-14}), その後、電磁石を延長 (Phase II 感度 10^{-16}) して段階的に物理感度を上げていくことを計画している。また Phase-I 開始前には、後述するパイ中間子を捕獲収集するための捕獲ソレノイド磁石を配置せずに低強度の陽子ビームを薄い標的に照射し、8GeV での二次粒子生成、陽子ビームの詳しい振る舞いを調べるためのエンジニアリングラン (Phase- α) を 2022 年度に実施することを予定している。

COMET 実験では、陽子標的でパイ中間子を生成し、その崩壊でできるミューオンを静止標的へと輸送する。静止標的で停止したミューオンはミューオン原子を形成し、その後スペクトロメータにより特徴的なエネルギーの電子を計測して $\mu^- e$ 転換事象を同定する。生成されたミューオンの輸送並びに信号電子の弁別のためには長大な超電導ソレノイド磁石を使用する。この磁石は、低温センサーならびに素核研低温グループとの強固な協力関係の

もとで準備を進めている。

2021 年 2 月現在、ビーム開始に向けて施設建設を進めるとともに物理計測を行うための検出器[2]の開発・製作が急ピッチで進められている。また、こういった物理計測のための検出器に加えて、高い放射線耐性を持つ陽子ビーム検出器の開発も様々な新しい技術を取り込みながら行っており、COMET 実験が必要とする特殊ビームを実現するために J-PARC 加速器グループと共同で研究を進めている。図 1 に J-PARC 主リング内で試験したダイヤモンド検出器の応答波形を示す。右図からわかるように 20Gy の放射線照射後もほとんど波形が劣化することなく応答信号が得られている。これに加えて素核研 e-sys グループと共同でミューオンビームのモニターとしても兼用できる SiC 製のモニター開発も進めている。

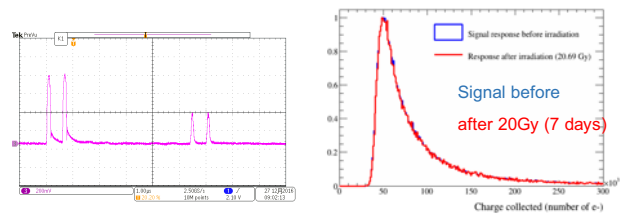


図 1 J-PARC 主リング遅い取り出し部ビームダクト横に設置されたダイヤモンド検出器からの信号。陽子ビームバンチ構造がきれいに判別できる速い時間応答性を持ちながら (左図)、高い放射線耐性を有していることを確認した (右図)。

COMET 実験の Phase-I では、パイ中間子を生成するための標的として J-PARC の大強度陽子ビーム環境下での使用実績が豊富なグラファイトを使用する。グラファイトは金属標的に比べると密度は低いながら高温まで安定でアクティブな冷却設備がなくても COMET 実験 Phase-I で使用するビーム強度程度までなら放射冷却により問題なく使用できる。大強度陽子加速器施設での標的開発は標的そのものの開発に加えて、メンテナンスシナリオを確立することが肝要であるが、COMET Phase-I では放射冷却方式を採用する事により標的のオペレーションを相当簡略化できている。図 2 に現在設計

中の Phase-I で使用するグラファイト標的とその支持機構を示す。標的自身はグラファイト製であるが標的を支えるための材質としては使用後の放射化の度合やビーム照射下における標的との整合性を考慮に入れた設計が行われている。また図 3 にエンジニアリングランである Phase- α で使用する陽子標的を示す。Phase- α ではビーム強度を極力落として、陽子ビームの性質そのものと、パイ中間子の（特に後方領域への）生成の具合を調べる事を主たる目的としており、専用の標的を使用することを予定している。

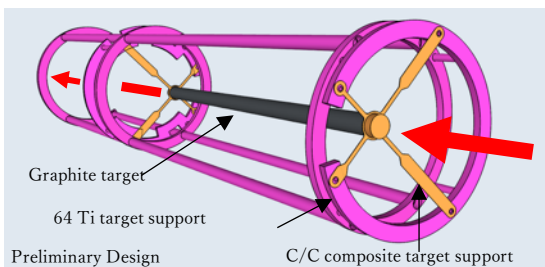


図 2 Phase-I 陽子標的と支持機構デザイン

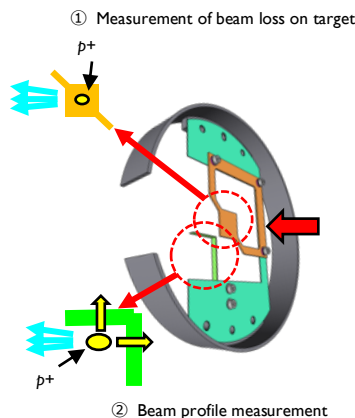


図 3 Phase- α 陽子標的。中央に正方形型の標的を配置する (①)。ビームプロファイルの測定は下部に配置した L 型の部分 (②) でビームをスキャンし二次粒子を計測することで行う。

COMET 実験 Phase-I (および Phase-II) では上述のグラファイト製標的は超電導捕獲ソレノイド磁石内に配置される。このため標的から発生する中性粒子の多くが超電導コイルに入射し、そこで相互作用することによりエネルギーを落とし超電導線の温度が上昇したり、線材の性能が悪化したりする恐れがある。このため COMET 実験では捕獲ソレノイド磁石内に標的からの二次粒子を遮蔽するための非磁性の放射線遮蔽を必要とする。COMET 実験で使用する陽子ビーム強度環境下で発生す

る二次粒子を十分遮蔽し、超電導線への放射線入射量を抑制するためにはおよそ 30 トンの遮蔽体を磁石内に配置しなければならない。また実験室で使用できるクレーンの最大荷重の制限から磁石内に遮蔽体を挿入した状態で設置することができないため、実験室に磁石と遮蔽体を別々に設置し駆動機構により遮蔽体を磁石内に配置する仕組みが必要である。図 4 に素核研メカ E グループの協力により設計を進めている磁石内に設置される放射線遮蔽体とその駆動機構を示す。遮蔽体の材質としては非磁性であり高い密度を持つ銅の使用を計画しており、遮蔽体内に配置した配管に冷却用の空気を送り込むことで冷却を行うことを予定している。

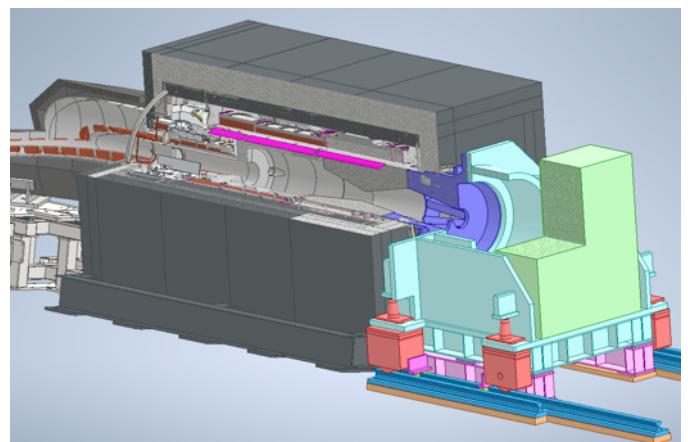


図 4 捕獲ソレノイド磁石内に配置される放射線遮蔽体と駆動機構

COMET 実験で使用する陽子ビームは通常 J-PARC で供給される 30GeV のビームとは異なり、8GeV のビームを使用する。これは計測の際に深刻な背景事象の起源になりうる反陽子の生成を低減するためである。また陽子ビームの時間構造もミュオンのミュオン原子中での寿命に合わせたものである必要があるため、正確にパルス化されている (漏れ出しの確率が 10^{-11} 以下) 必要がある。特にこの漏れ出し確率 (エクステンションファクター: R_{ext}) を要求値より小さく実現できなければ、背景事象の影響により目標とする実験感度を実現することができなくなるため、COMET 実験グループでは J-PARC 加速器グループと協力して R_{ext} の測定とその向上のための研究開発を続けてきた。この開発を続ける中で、陽子ビームを前段の RCS 加速器から主リングに入射する際の入射方法の改良が重要であることをつきとめ、様々な試験を経てようやく要求の R_{ext} を確実に実現できる目処が

立った。2021年4月にはハドロン実験ホールにて R_{ext} を計測するための実験 (J-PARC T78) が予定されており実験グループメンバーらと協力してテスト実験のための検出器製作を行っている。準備においては実験に参加する共同利用の大学院生らが主導的に活躍し COMET 実験の感度実現のために不可欠の計測を行うべく日々奮闘している (図 5)。



図 5 T78 実験のために開発された検出器と予備実験の様子

References

- [1] S. Mihara et al., Ann. Rev. of Nucl. and Part. Sci Vol. 63: 531-552 2013, 「荷電レプトンで探る新物理」, 三原智, 物理学会誌 70 巻 10 号 現代物理のキーワード
- [2] The COMET Collaboration, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 033C01