

COMET 実験施設の建設状況

KEK 素粒子原子核研究所

深尾 祥紀

yoshinori.fukao@kek.jp

2015 年 (平成 27 年) 5 月 20 日

1 COMET 実験概要

COMET 実験 (COherent Muon to Electron Transition) [1, 2] は茨城県東海村 J-PARC において建設中の μ^- 粒子から電子への (μ -e) 転換事象の探索を目的とする実験である。 μ -e 転換事象は (荷電) レプトンフレーバー保存を破る過程 (LFV, Lepton Flavor Violation) であり, 素粒子の標準模型ではニュートリノ振動を介して起こるものの, その分岐比は 10^{-50} 以下と非常に小さい [3]。一方で, 多くの標準模型を超える物理の理論モデルにおいては大きな分岐比を预言しており [4], 現在の実験の上限値を記録しているスイス PSI 研究所の SINDRUM-II 実験 [5] の測定感度においてもすでに理論の预言領域に到達しつつある。COMET 実験の目標とする測定感度は SINDRUM-II 実験の感度から約 4 桁の更新となる分岐比 10^{-16} であり, 標準模型を超える物理の発見が期待されている。世界的には, アメリカ合衆国フェルミ国立加速器研究所において, COMET 実験と競合する Mu2e 実験 [6] が計画されているほか, μ^+ 粒子から陽電子と光子への崩壊事象を探索するスイス PSI 研究所の MEG 実験では, 2013 年に最新結果を発表し [7], さらに感度向上のためのアップグレードを進めているなど, LFV 探索は活発に行われている。

COMET 実験は二段階のステージで実験を進めていく計画となっている。最初の Phase-1 では実験装置を簡略化し, 分岐比 10^{-14} の感度を目指して 2016 年の実験開始を予定している。Phase-2 では実験装置を完成させた後, 目標である分岐比 10^{-16} の感度への到達を目指して 2019 年に実験開始することを計画している。現在, J-PARC の 8 GeV の陽子ビームを利用するため, 一次陽子ビームラインを新たに構築中である。また, 2015 年 4 月には COMET 実験を行うための新しい実験棟が J-PARC ハドロン施設内に完成した。この記事では上記 2 項目に焦点を当て, COMET 実験の進捗状況について紹介する。続く 2 章において, 実験装置, 測定方法について簡単に解説した後, 3 章において一次陽子ビームラ

インについて, 4 章では実験棟について述べる。また, 実験棟の設計において特に問題となる放射線安全の話題についても 5 章に記述する。

2 実験装置

測定は以下の手順で行う。陽子ビームによって生成された μ^- 粒子を原子核に吸収させてミューオンニック原子を生成する。そして原子核に捕獲された μ^- 粒子がニュートリノを放出せずに電子へと転換する $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$ という反応を探索する。信号となるのは μ^- 粒子の質量とほとんど同じ約 105 MeV のエネルギーを持った単独の電子である。図 1 に示すのは, Phase-2 時における COMET 実験装置である。

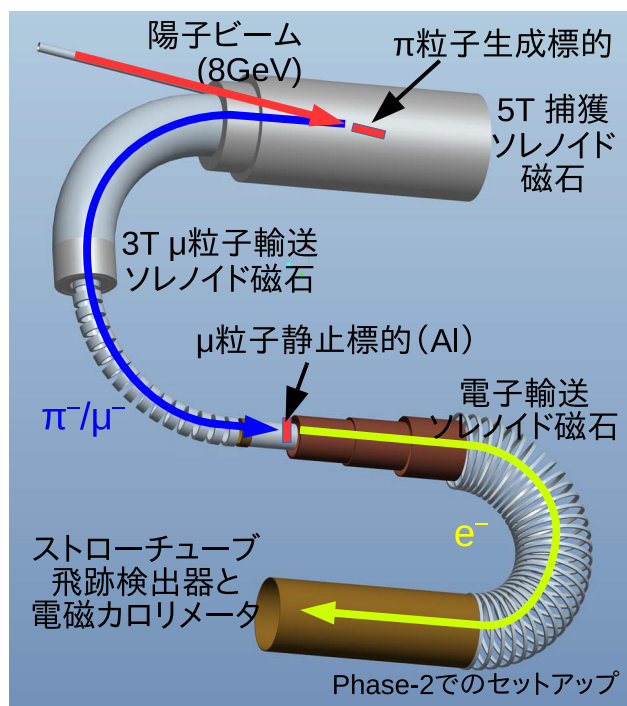


図 1: COMET 実験装置 (Phase-2 時)

J-PARCの陽子ビームのエネルギーは8 GeVに設定する。これは、測定に必要な π^- 粒子の生成量はビームエネルギーに比例して増加するものの、背景事象となる反陽子の生成量が約10 GeVから急激に増加するためである。加速されたパルス状の陽子ビームは厚さ160 mmのタングステンで作られた π 粒子生成標的に打ち込まれる。標的は捕獲ソレノイド磁石内に設置されており、生成された π^- 粒子は下流へ輸送するために5テスラのソレノイド磁場によって捕獲される。このとき陽子ビームの前方生成と後方生成を比較した場合、前方生成の方が π^- 粒子の収量は2倍程度有利ではあるものの、背景事象の原因となり得る比較的高いエネルギーの π^- 粒子がより多く生成される。そのため最終的なSN比は後方生成の方が有利となることから我々は後方生成の π^- 粒子を利用する。捕獲された π^- 粒子は μ 粒子輸送ソレノイド磁石の中を3テスラの磁場に巻き付きながら下流へと輸送される。 μ 粒子輸送ソレノイド磁石は背景事象の原因となり得る約75 MeV/c以上の粒子を除去するように設計されている。また、輸送距離は20 m程度で、 π^- 粒子が μ^- 粒子へと崩壊するのに十分な長さとなっている。このように生成・輸送された40 MeV/c程度の μ^- 粒子ビームを合計3.4 mm厚のアルミニウムの μ 粒子静止標的に入射・静止させ、ミュオニック原子を形成する。標的の物質としては μ^- 粒子の寿命が短くなる重い物質ではなく、軽い物質を選んでいる。これは、ビーム起源の早いタイミングの背景事象を避けるために、測定を陽子ビームの入射から700 nsec後から開始するためである。

μ 粒子静止標的から放出された電子は電子輸送ソレノイド磁石によって電子検出器まで輸送される。標的からは、当然、 $\mu-e$ 転換事象による電子だけでなく、膨大な量の通常の μ 粒子崩壊による電子が放出される。電子輸送ソレノイド磁石の重要な役割は、これらの大量の、大部分が低エネルギーの電子によって検出器が不感になってしまうことを防ぐことである。低エネルギーの荷電粒子は湾曲ソレノイド磁場の中では磁石の中心軌道面に垂直な方向へドリフトすることを利用し、磁石内部に遮蔽物を設置することで低エネルギー電子のみを除去することができる。電子検出器としては、多層構造のストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータを組み合わせたシステムを構築する。検出器システムは1 MHzまでの入射電子に耐え、0.4%以下の運動量分解能を有するように設計されている。最終的に主要な背景事象となるのは原子核に捕獲された μ^- 粒子崩壊による電子(DIO, Decay in Orbit[8])である。通常の静止した μ 粒子からの崩壊電子の最大エネルギーは52.8 MeVであるが、ミュオニック原子からのDIO電子のエネルギー分布は原子核の反跳のために52.8 MeVを超えて μ 粒子の

質量と同じ値まで裾野をもつ。 $\mu-e$ 転換による電子と同じエネルギーのDIO電子の量はCOMET実験の感度と比べて十分に小さいが、実験装置のエネルギー分解能によってDIO電子のエネルギー分布が $\mu-e$ 転換の電子のエネルギー領域にまで染み出してくる。これを防ぐためには十分な分解能をもつ検出器が必要である。図2にCOMET実験において測定されると期待される電子のエネルギー分布を示す。

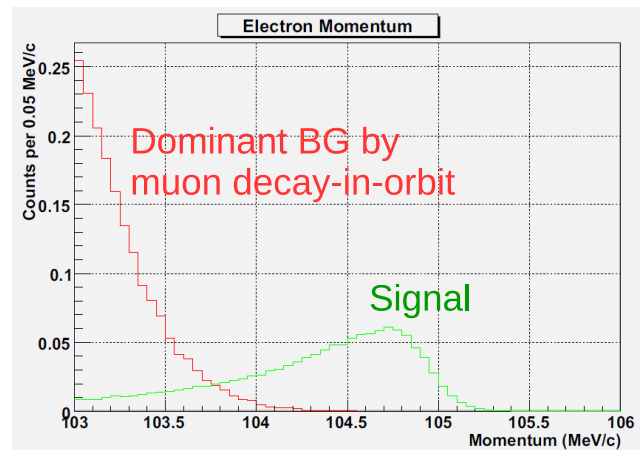


図2: アルミニウムのミュオニック原子からの $\mu-e$ 転換事象による電子と主要な背景事象となるDIO電子の運動量分布。 $\mu-e$ 転換事象の分岐比は 10^{-16} を想定している。横軸は電子検出器によって再構成された運動量である。

これまではPhase-2での実験装置について紹介した。Phase-1では輸送ソレノイド磁石を大幅に簡略化し、 μ 粒子輸送ソレノイド磁石の最初の90度分のみを設置する。その下流に μ 粒子静止標的を内部に取り付けたPhase-1用の検出器ソレノイド磁石を接続する。標的を取り囲むように設置するCylindrical Drift Chamber (CDC)を用いて μ 粒子静止標的からの電子を検出し、 $\mu-e$ 転換事象の分岐比を測定する。Phase-1において物理測定と並んで重要なことは、実際の実験セットアップでの背景事象の評価であり、Phase-2の成功に向けての問題点の洗い出しである。Phase-1のCDC検出器はPhase-2で使用予定のストローチューブ飛跡検出器、電磁カロリメータ(の試作機)と入れ替え可能となるように設計しており、それぞれの検出器の応答を実測することを計画している。

3 一次陽子ビームライン

ハドロン実験施設にはJ-PARCメインリングからの一次陽子ビームをそのまま実験に利用するためのビームラインは存在しなかった。そのため、ビームラインを新

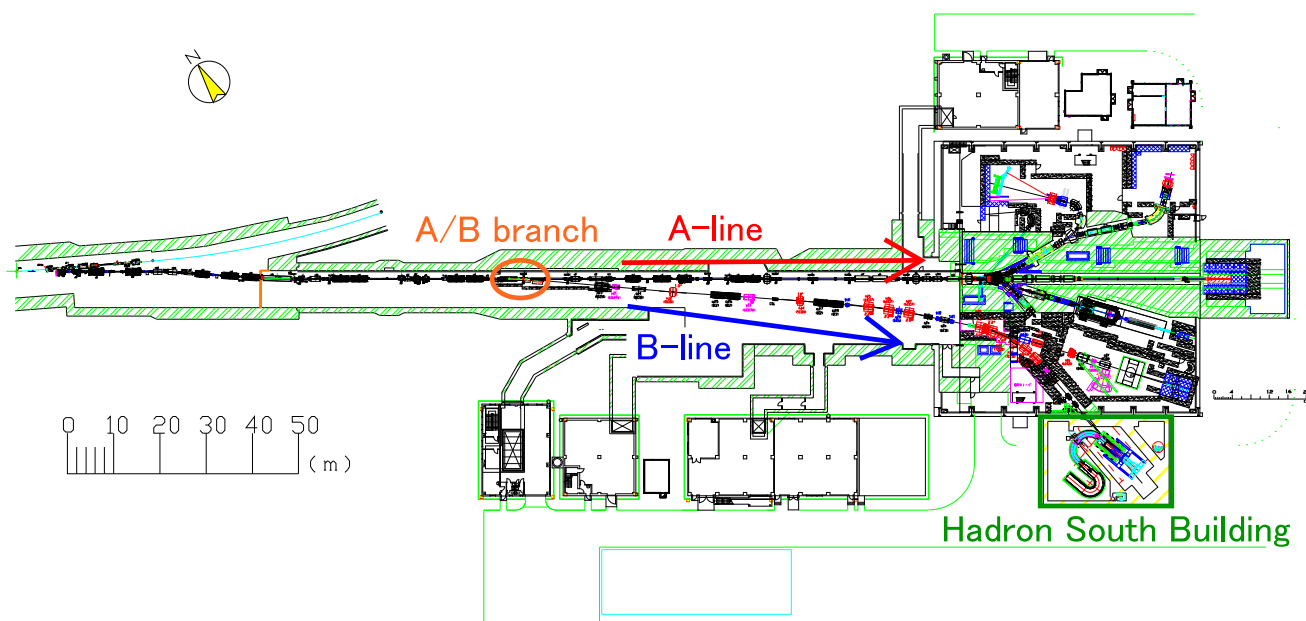


図 3: J-PARC メインリングから COMET 実験棟までの一次陽子ビームラインの図。

設し (B ラインと呼ぶ), 既存のビームライン (A ラインと呼ぶ)¹ から分岐させる必要があった。図 3 にハドロン実験施設のビームラインを示す。COMET 実験では 8 GeV のビームエネルギー, Phase-1 では 3.2 kW, Phase-2 では 56 kW のビームパワーでの運転を計画している。図 4 は建設中の B ラインの写真である。



図 4: スイッチヤード (メインリングとハドロン実験ホールとをつなぐエリア) 内の建設中の B ラインの写真。写真奥の壁の向こう側はハドロン実験ホールであり, ビームラインはこの壁を貫通していく。

B ラインでは COMET 実験の他に一次陽子ビームを利用してハドロン物理を研究するための実験が計画されており (例えば J-PARC E16 実験), 途中までビー

ムラインを共有している。後者の実験では, A ラインと B ラインを同時に使用し, B ラインにはビーム全体の 0.01 % 程度の量を供給するという運転を行う。一方, COMET 実験では高統計のデータが必要なことから, 全ビームを利用する。COMET Phase-1 の期間では, これらの運転モードを頻繁に変更する必要があるが, このような特殊な状況を実現するために A ラインと B ラインの分岐部にはランバートソン磁石を採用している。図 5 はランバートソン磁石の断面図である。下側のホームベース型の開口では磁場がなく, 既存 A ラインにビームを供給したいときはこちらにビームを通す。上側の開口には通常の上極磁場がかかっており, COMET 実験におけるビーム運転ではすべてのビームをこちら側に通すことになる。ビームの一部を B ラインに供給する場合にはビームの一部を上側の磁場を通すことによって, ビームを切り出すことができる。このように, ビームを上下にシフトさせることでそれぞれの運転モードに対応することが可能になる。現在, ランバートソン磁石の実機の制作が完了し (図 6), 磁場の均一性など基礎的な性能の評価が行われている。ランバートソン磁石を用いて B ライン (COMET) 運転と A ライン運転を行うためにはビームを少なくとも 76 mm 上下にシフトさせることが必要になる。これには上流の偏向磁石で行うが, 磁石の開口には制限があり, 容易ではない。実現可能かどうかを TURTLE シミュレーション [9] を用いて評価した結果, A ライン運転時に下方に約 30 mm, COMET 運転時に上方に約 50 mm のシフトが可能であるということが分かっている。ランバートソン磁石の上側の開口は水平に対して約 3 度傾いているが, 上流で一度上に蹴り

¹ 既存の A ラインでは一次陽子ビームを二次粒子生成標的に入射し, π 粒子, K 粒子などの二次ビームを利用した実験が行われている。

上げたビームを下に蹴り下げてももとのビーム高さに戻すためである。

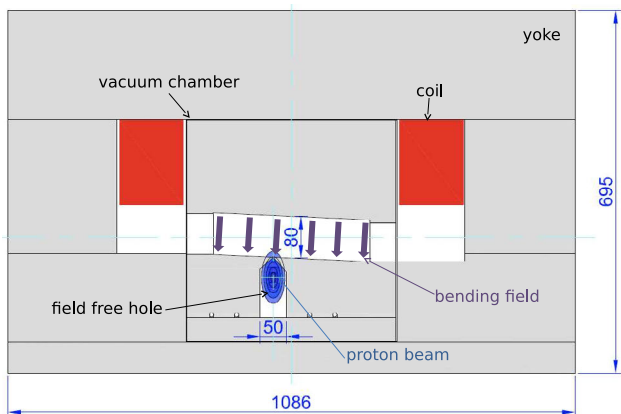


図 5: ランバートソン磁石の断面図。図中の陽子ビームの位置は J-PARC E16 実験運転中の設定で、ビームの大部分を既存 A ラインへ、一部を B ラインへ供給する場合である。COMET 実験運転時では全ビームを上側の磁場がある開口へ、A ラインのみの運転時は全ビームを下側の磁場のないホームベース型の開口へ通す。



図 6: ランバートソン磁石の写真。

COMET Phase-2 の段階では、より高統計のデータが必要になるため、COMET 実験の運転時間が長期になり、頻繁な運転モードの変更の必要性がなくなると予想される。また、より高いビーム強度ではビームサイズの増大も予想されるため、現在のランバートソン磁石の設計では対応できない危険性がある。これらを考慮して、Phase-2 ではランバートソン磁石を通常の大極磁石に置き換える計画となっている。

一次陽子ビームライン光学については TRANSPORT シミュレーション [9] を用いて最適化した。図 7 にビームのエンベロップを示す。LAM とラベルされた位置が A ラインと B ラインの分岐部にあたり、H28, H29 は B ライン上の COMET 実験とハドロン物理実験との分岐部に当たる。COL とラベルされた位置には遠隔で調

整可能なタングステンのコリメータがインストールされる。最終的にビームは 4 台の Q 磁石によって FF (Final Focus) とラベルされた π 粒子生成標的の位置でフォーカスする。ビームは捕獲ソレノイド磁石に磁石の中心軸から 10 度傾いて入射するため、磁場によって鉛直下方向に偏向される。捕獲ソレノイド磁石内でのビーム軌道は GEANT4 によって計算しており、標的位置では下方向に約 30 mm ビームがシフトすることが分かっている。現在の設計では標的でのビームサイズは 1 シグマで水平方向に 5.8 mm, 垂直方向に 2.9 mm と見積もっている。

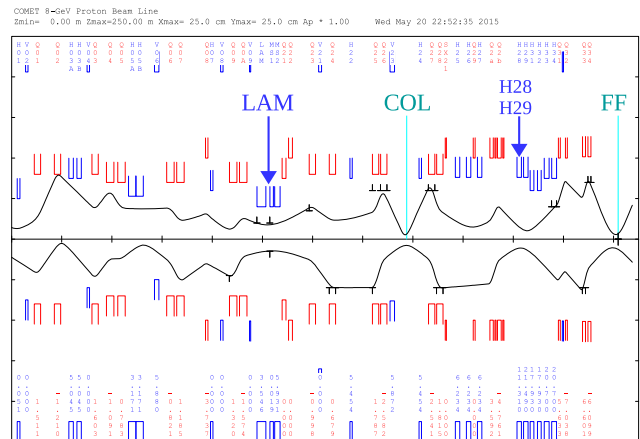


図 7: TRANSPORT シミュレーションによる 2 シグマのビームサイズを表すビームエンベロップ。図の下側と上側はそれぞれ水平、垂直方向のビームサイズに対応している。図中の四角は磁石の開口の大きさを示す。軸の一目盛りは縦軸では 5 cm, 横軸では 20 m となっており、左端はメインリングからの分岐位置、右端は COMET 実験棟のビームダンプ位置に相当する。

4 COMET 実験棟 (ハドロン南実験棟)

J-PARC メインリングからの一次陽子ビームは最終的に新規に建設した COMET 実験棟 (正式名称はハドロン南実験棟) まで輸送され、図 1 に示した実験装置に入射する。図 8 は実験棟の平面図, 断面図である。実験棟は地下 1 階, 地上 3 階建ての構造となっている。地下の大部分は実験装置を設置するスペースとなっている。ビーム室には π 粒子生成標的, 捕獲ソレノイド磁石, ビームダンプが設置され, 実験室には μ 粒子静止標的, 電子輸送ソレノイド磁石, 電子検出器が設置される。 μ 粒子輸送ソレノイド磁石はビーム室と実験室の壁を貫通する。 π 粒子生成標的やビームダンプからは一次陽子ビームの入射によって強烈な放射線が発生する。放射線から検出器や電子回路を防ぎ, また, 中性子を始めとする測定

背景事象となり得る粒子を遮るために、ビーム室と実験室の間は鉄とコンクリートの壁で区切られている。床については土壌の放射化を防ぐ必要があることから3.5 mの厚さのコンクリートとなっている。ビーム室には建物としての天井はないが、実験機器のインストールが完了した後、地上エリアの人の被曝を防ぐために2 mの鉄と2.7 mのコンクリートで塞ぐ。ビーム室はビーム運転後には非常に高い残留放射能レベルとなるため容易には立ち入ることはできない。また、放射線防護の必要性からも常設の階段は設置しない。

の厚さのコンクリートとなっている。実験装置などの重量物を実験室に運び込むときには実験室天井にある8.0 m × 3.8 mの搬入ハッチを使用する。実験室へは頻繁なアクセスが予想されるため、地上フロアとをつなぐ階段を設置している。

実験棟の1, 2階の大部分は搬入ヤードであり、吹き抜けの構造となっている。捕獲ソレノイド磁石を始め、重量のある実験装置の移動や、コンクリート、鉄の遮蔽体の設置のために40トン天井クレーンが装備されている。地下1階、地上1, 2階の残りのエリアは機械室となっており、空調や冷却水を供給するための機械設備が設置されている。地下の機械室にはビーム運転中に放射化した水を貯めておくためのタンクが置かれている。機械室ではビーム室や実験室で放射化した空気や水が循環することになり、それらから放射するガンマ線から実験棟3階や実験棟外部の人の被曝を防ぐために、機械室の周囲のコンクリート壁は40 cmの厚さとなっている。上記のビーム室、実験室、搬入ヤード、機械室は放射能汚染の危険性があるため、実験棟1階に設けられている汚染検査室において、外部のエリアに出る前に汚染検査を行うように設計されている。実験棟3階は運転室と計算機室となっている。実験の制御システム、データ収集システムなどは計算機室に置かれる。運転室には、COMET実験の研究者のみではなく、ハドロンビーム運転グループ、ハドロン実験ホールでの研究者も滞在することになる。実験棟は2015年4月に完成し、使用可能な状態となっている(図9, 10)。

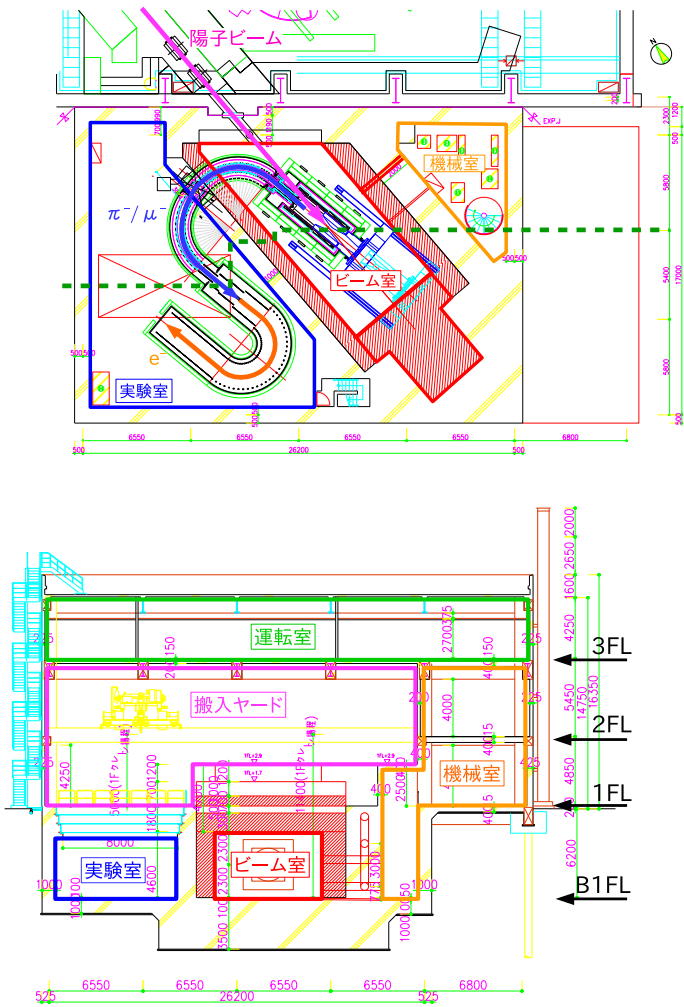


図 8: COMET 実験棟の設計図面。上の図は実験装置が設置される地下階の平面図である。下の図は断面図であり、平面図中の点線の位置で切り取った面である。図中のハッチのかかった領域は鉄遮蔽を示している。断面図の右側に各階のフロアレベルを示している。

ビーム室ほどではないものの、実験室の放射線量も無視できない値となる。主な線源としては、ビーム室から μ 粒子輸送ソレノイド磁石の貫通部を通ってくる放射線や、二次 μ^- 粒子ビームが μ 粒子静止標的に吸収されることによって発生する中性子である。これらの放射線による人の被曝を防ぐために実験室の天井は1.8 m



図 9: COMET 実験棟の外観の写真。写真中右側のCOMET 実験棟の隣の建物は既存のハドロン実験ホールである。ビームライン上流(メインリングのある方向)は写真中の奥方向である。



図 10: COMET 実験棟内の搬入ヤードの写真。手前の開口はビームライン室であり、 μ 粒子輸送ソレノイド磁石が一部すでにインストールされている。陽子ビームは写真中の右奥側から入射される。

5 放射線安全設計

J-PARC によって大強度の陽子ビームが利用可能になり、それにより高統計を必要とする COMET 実験が実現可能となった。一方、大強度ビームによって発生する放射線に対する安全性を担保する必要があるため、COMET 実験棟の設計においても放射線安全による制限が大きなウェイトを占めている。放射線防護の観点から考慮すべき主な項目はバルク遮蔽、ストリーミング、スカイシャイン、空気・水の放射化、残留放射能、異常ビーム入射想定である。

5.1 バルク遮蔽

バルク遮蔽とは標的などの放射線源からの直接の放射線を減衰させるための遮蔽のことであり、実験棟の壁、床の厚さなどの設計に関係している。簡単な遮蔽形状の場合、J-PARC では 1 GeV 以上の陽子加速器に対して有効な Moyer モデルが用いられる。このモデルは 100 MeV 以上の中性子が発生中性子の大部分を占め、その減弱距離が一定であることに着目したモデルである。線量 H (Sv/sec) は

$$H = \frac{J}{r^2} H_0 e^{-2.5\theta} e^{-d/\lambda \sin \theta}$$

$$H_0 = 0.88 \times 10^{-13} E_p$$

によって与えられる。 J (1/sec) は標的で失われた陽子数、 E_p (GeV) は陽子ビームエネルギー、 r (m) は標的からの距離、 θ はビーム軸との角度、 d は遮蔽体の厚さである。 λ (g/cm^{-2}) は物質に依存する減弱距離であり、例えば、コンクリートでは 143、鉄では 188 となっている。評価の対象がより複雑なジオメトリの場合、数

値シミュレーションを用いることが多い。J-PARC においては MARS[10]、PHITS[11] などが利用されており、COMET 実験棟の設計では MARS を使用した。Phase-2 のビーム強度では、ビーム室の線量は ~ 1 MSv/h、実験室の線量は ~ 1 Sv/h となっており、ビーム運転中に人が立ち入ることは不可能なレベルとなっている (図 11)。一方、常時、人が滞在する実験棟 3 階の運転室では $0.1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下となるように設計されている。

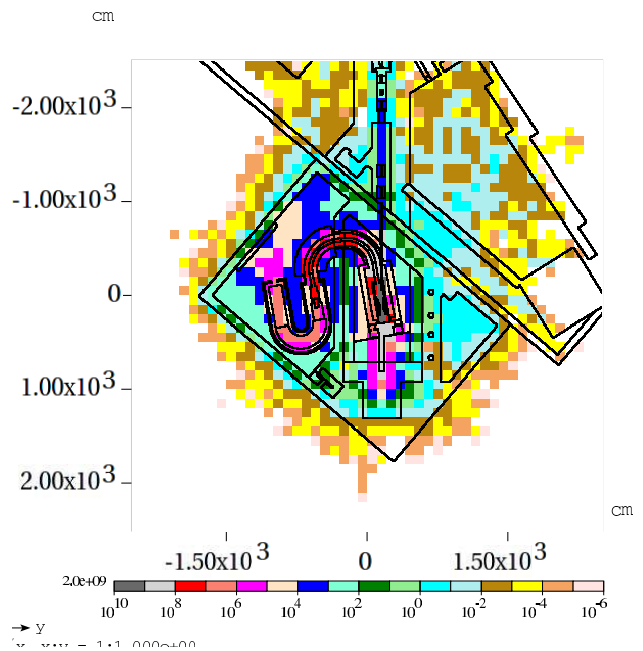


図 11: MARS シミュレーションによる実験棟地下部分の線量評価。図中の色は線量の高さを示しており、単位は mSv/h である。

5.2 ストリーミング

想定しているジオメトリに遮蔽の内外を行き来するための通路や階段、給排気ダクトなどがある場合、そこから放射線の漏洩が生じる。この現象をストリーミングと呼ぶ。ストリーミングによる線量を抑えるため、通路や階段は迷路構造とし、ダクトにはクランクをもたせて設計する。これらの構造は通常複雑になるため、計算による評価は難しいものの、近似式、数値シミュレーションを活用して評価している。例えば、COMET 実験棟では、ビーム室の空調ダクトは 4 回のクランクを経て機械室とつながっている。また、地上搬入ヤードから地下実験室へ入るための階段は 3 回のクランクをもたせている。

5.3 スカイシャイン

実験棟の天井方向に放出した放射線は、上空の大気と散乱をしながら線源から距離の離れた場所まで到達する可能性がある。この現象をスカイシャインと呼ぶ。線源から遠い場所での線量は直達の放射線よりもスカイシャインの寄与が優位となることが多いため、その影響を無視することはできない。スカイシャインの評価については、線源から評価点までの距離が非常に遠いことや、上空まで広い範囲を考慮に入れなければならないことから、数値シミュレーションで見積もることは困難である。J-PARCでは実験棟屋上で中性子の放射線量をもとにスカイシャインの寄与を見積もる以下の近似式が用いられている。

$$H(r) = \frac{2 \times 10^{-15} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) Q}{(40+r)^2}$$

$H(r)$ (Sv/h) は距離 r (m) での線量、 Q (1/h) は屋上で中性子の放出量、 λ は中性子のカットオフエネルギーに依存する実効的な吸収長で COMET 実験では 620 m である。

5.4 空気・水の放射化

COMET 実験棟のビーム室、実験室では放射線量が高く、放射線と空気、水との核反応による放射化（放射性核種の生成）を無視することはできない。過去のデータなどから得られた放射性核種の生成断面積と、上記の Moyer モデルや数値シミュレーションによって見積もった放射線の強度から空気、水の放射化について評価している。COMET 実験での評価としては、Phase-2 のビーム強度における空気の放射化は、トリチウム 3.3 Bq/cc、短寿命核種 202 Bq/cc となっている。また冷却水の放射化はトリチウム 542 Bq/cc、短寿命核種 188 kBq/cc となっている。この放射性核種濃度では、人の立入りも禁止され、排気または排水についてもそのまま行うことはできない。実験棟の設計としては、ビーム室、実験室の空気が外部（搬入ヤード）に漏れないように気密扉を使用し、開口部には気密のための隔壁を設ける計画となっている。ビーム停止後、人が立入るための排気（排水）方法としては、1 日程度、短寿命核種が崩壊して濃度が十分に下がるのを待ち、また、トリチウム（半減期約 12 年）などの長寿命核種については必要なだけ濃度を薄めて、排気、排水する、という手順を踏む必要がある。COMET 実験においては空気の放射化のみでなく、捕獲ソレノイド磁石に使用するヘリウムも、微量に含まれる ^3He と中性子の反応によってトリチウムを生成する。見積もりでは気体状態で 2 Bq/cc となり、空気の排気と同様の手順を取る必要がある。

5.5 残留放射能

大強度の一次陽子ビームと、捕獲ソレノイド磁石内部の π 粒子生成標的との散乱によって大量の放射線が発生する。その結果、標的のみならず捕獲ソレノイド磁石も放射化してしまう。それにより、ビーム停止後においても磁石近辺では 100 $\mu\text{Sv/h}$ のオーダーで残留放射線が存在するため、容易に近づくことはできない。電磁石のメンテナンスに入ることも非常に困難となるため、電磁石はメンテナンスが必要ないように設計されている。また、Phase-1 から Phase-2 へと移行する際、 π 粒子生成標的の交換を計画しているが、人が標的近くで作業することを避けるため、遠隔で交換できるようなシステムの構築を進めている。

5.6 異常ビーム入射想定

定常運転時の線量評価に加えて、異常ビームが入射した場合の評価も重要である。J-PARC ハドロン施設では、電磁石の電源が誤動作した場合などの、ビームラインが通常と異なる状態になった場合、最悪でも 1 スピル（現在の設定ではスピルは 6 秒周期）のビーム入射後にはビームが停止するようにインターロックが構築されている。逆に言うと、1 スピル分は異常なビームライン設定で入射される可能性があるということである。ビームライン、実験棟の設計においては、そのような異常ビーム入射時においても安全が担保されるように放射線遮蔽の量などを決定している。

6 まとめと今後の展望

COMET 実験では分岐比 10^{-16} の測定感度での μ - e 転換事象の探索を目標として実験準備を進めている。これまで見てきたようにビームライン、実験棟と必要なインフラはすでに整いつつある。本原稿では触れなかったが、捕獲・輸送ソレノイド磁石、電子検出器である CDC 検出器、ストローチューブ飛跡検出器、電磁カロリメータ、データ収集系などの開発、制作も着々と進行しており、多くのパートについては、すでに試作機制作を行い、性能評価、実機制作の準備に入っている。COMET Phase-1 は 2016 年度の実験開始を目指しており、近いうちに驚くべき実験結果が得られるかもしれない。

LFV 探索を目的とする実験としては、我々の COMET 実験や、冒頭で紹介した Mu2e 実験、MEG 実験の他にも、J-PARC/MLF の DeeMe 実験 [12]、PSI 研究所の Mu3e 実験 [13] が提案されている。関連するミュー粒子を利用した新物理探索を目的とする実験としては、ミュー粒子の異常磁気モーメントおよび永久電気双極子の精密測定

を行う J-PARC E34 実験 [14] と FNAL-E989 実験 [15], ミューオニウムの超微細構造を精密測定する J-PARC MuSEUM 実験 [16] などが計画中である。COMET 実験としては, Phase-2 のさらに先に, ミュー粒子蓄積リングを建設し, 位相空間回転法を用いた PRISM 計画の検討も行われている [17]。このように実に多くの実験が現在進行中であり, 活発な研究活動が行われている。

7 謝辞

本原稿執筆にあたり COMET 実験グループのメンバーにご協力をいただきました。一次陽子ビームラインの建設においては J-PARC ハドロンビームライングループの皆さん, COMET 実験棟の建設においては KEK 施設部の皆さん, 実験施設全般の放射線安全については J-PARC 放射線安全セクションの皆さんに多大な支援をいただきました。また, 高エネルギーニュース編集委員の方々には原稿校正等の面でお世話になりました。その他, 多くの協力していただいた方々に, お礼申し上げます。

参考文献

- [1] COMET 実験のプロポーザル等は以下から得られる。 <http://comet.kek.jp/Documents.html>
- [2] 西口創, 高エネルギーニュース **31-3**, pp.219-227 (2012)
- [3] T.-P. Cheng and L.-F. Li, Phys. Rev. D**16** (1977) 1425, B. W. Lee and R. E. Shrock, Phys. Rev. D**16** (1977) 1444, S. Petcov, Sov. J. Nucl. Phys. **25** (1977) 340 and W. Marciano and A. Sanda, Phys. Lett. **B67** (1977) 303.
- [4] W. Altmannshofer *et al.*, Nucl. Phys. **B830** (2010) 17, W. Marciano, T. Mori and M. Roney, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **58** (2008) 315, A. de Gouvea and P. Vogel, Prog. Part. Nucl. Phys. **71** (2013) 75, M. Koike, Y. Kuno, T. Ota, J. Sato and M. Yamanaka, COMET-DOC-49 and R. Alonso *et al.*, JHEP **1301** (2013) 118
- [5] W. H. Bertl *et al.* (SINDRUM-II Collaboration), Eur. Phys. J. **C47**, 337 (2006).
- [6] Mu2e 実験のプロポーザル等は以下から得られる。 <http://mu2e.fnal.gov/>
- [7] J. Adam *et al.* (MEG Collaboration), Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 201801
- [8] A. Czarnecki, X. G. Tormo and W. J. Marciano, Phys. Rev. **D84** (2011) 013006
- [9] <http://aea.web.psi.ch/Urs.Rohrer/MyWeb/optics.htm>
- [10] <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>
- [11] <http://phits.jaea.go.jp/>
- [12] <http://deeme.hep.sci.osaka-u.ac.jp/>
- [13] <http://www.psi.ch/mu3e/>
- [14] http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-12.pdf
- [15] <http://muon-g-2.fnal.gov/>
- [16] K. S. Tanaka *et al.*, JPS Conf. Proc. **2** (2014) 010405
- [17] 佐藤朗, 高エネルギーニュース **26-1**, pp.16-31 (2007)