

パイオン捕獲超伝導電磁石を用いた大強度ミュオン源の開発

大阪大学 大学院理学研究科

佐藤 朗

sato@phys.sci.osaka-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

吉田 誠

makoto.yoshida@kek.jp

2016 年 (平成 28 年) 6 月 28 日

1 はじめに

電子・陽電子の次に軽いレプトン族の素粒子であるミュオンが、近年際だって注目を集めている。自然現象の一部として地表に降り注ぐ宇宙線ミュオンを活用して、火山や原子炉内部の透視、ピラミッド内部の秘密の小部屋探しなど、テレビのニュースでも「ミュオン」という言葉を耳にする機会が多くなったことは、ミュオンに関わる者としてはうれしい限りである。このミュオンを更に活用するには人工的に大量のミュオンを生成する必要がある。そのためのミュオンビームの生成・加工技術においても、この 10 年間で大きな進展があり、ミュオン関係者は新世代のミュオンビームによる科学技術発展の期待に胸を躍らせている。

J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) には RCS-3GeV リングからの 1 MW 陽子ビームを利用したパルスミュオン施設が完成した。世界最高強度のパルスミュオンビームを用いた μ SR 測定等による物性・生命・化学研究が進められるだけでなく、超低速ミュオンビームによる新しい表面・界面科学の開拓や、超低エミッタンスビームによるミュオン異常磁気能率精密測定実験及び透過型ミュオン顕微鏡の実現など、ミュオンビームのサイズ・角度広がり・エネルギー幅を制御する高品質ミュオンビーム加工技術によって様々な新しい研究が展開されようとしている。

一方、大阪大学・久野グループでは、荷電レプトンフレイバーの保存則を破るミュオン稀崩壊過程探索実験の実現に向けて、高効率ミュオン発生システムの開発に成功した。我々が目指す PRISM/PRIME や COMET 実験 [1] では、ミュオンビームの品質よりも目標実験感度を達成するためのミュオン強度が絶対的に重要であり、そのためにはミュオン生成効率を従来のシステムよりも 1000 倍以上も向上させる必要があった。そこ

で我々は、新方式のパイオン捕獲システムを用いた大強度ミュオン源 MuSIC を開発した。実際に大阪大学核物理研究センター (RCNP) に建設したパイオン捕獲システムによりミュオン生成効率を測定して、本システムが設計通りの性能を持つことを確認した。このパイオン捕獲システムを J-PARC の大強度陽子ビームと組み合わせることで、他のミュオン施設のビーム強度を 3 桁以上も上回る毎秒 10^{11} 個のミュオンビーム強度を達成することができる。現在、J-PARC では、MuSIC をスケールアップさせた COMET 実験用のパイオン捕獲システムの建設が進められている。また、RCNP では、MuSIC を発展させた日本初の DC ミュオンビーム施設が完成し、すでに DC ミュオンビームの特性を活かしたユーザー利用実験が開始されている。

本稿では、この大強度ミュオン源 MuSIC の開発とその展開について報告する。

2 大強度ミュオン源 MuSIC

我々は、パイオン捕獲システムを用いた高効率ミュオンビーム生成装置を開発し、大阪大学核物理研究センター (RCNP) に建設した。この大強度ミュオン源を MuSIC と呼ぶ。超伝導ソレノイド技術を駆使した MuSIC は、RCNP のリングサイクロトロンから供給される 400 W (392 MeV, 1 μ A) の陽子ビームを用いることで、ソレノイドビームラインの終端において毎秒約 10^8 個のミュオンビームが供給できるように設計されている。ビーム性能を議論する際は、ビーム強度だけでなく、サイズ、エネルギー幅、純度や偏極度など、実験目的に適するかどうかを総合的に判断する必要があるのだが、MuSIC で使用できるミュオンビームの量がスイスの PSI や J-PARC MLF など他のミュオン施設と

肩を並べるといことは特筆に値する。パイオン捕獲システムは、COMET 実験に代表されるように、何よりもミュオンのビーム強度が重要な実験に適した大強度ミュオンビームを供給するミュオン生成装置である。従来のミュオン施設では毎秒 10^8 個ミュオンを生成するために 1 MW 級の陽子ビームを使用しているのに対し、MuSIC は 400 W 陽子ビームでも同等のミュオンビーム強度を供給できる。ここに MuSIC の特徴がある。

従来のミュオン生成システムと MuSIC のパイオン捕獲システムの比較を図 1 に示した。PSI や J-PARC MLF などのミュオン施設では、陽子ビームラインを中性子施設と共有している。そのため、中性子生成標的よりも上流に配置されるパイオン・ミュオン生成標的の形状やパイオン捕獲電磁石の配置などに強い制約がある。MLF ミュオン施設ではミュオン生成標的での陽子ビーム損失を 5~10 % 以下に抑える必要がある。この条件を満たすために、厚さ 2 cm のグラファイト製生成標的を使用し、また、陽子ビームへの漏れ磁場の影響等を考慮して捕獲電磁石も陽子ビームラインから少し離れた位置に設置している。このため、ミュオンの生成効率や捕獲磁石の立体角が大きく制限されている。

一方、MuSIC はミュオンを大量に生成することに特化した設計となっている。陽子ビームを占有できるので、ミュオン生成に最適化されたパイオン・ミュオン生成標的や磁場分布が使用できる。標的は厚さ 20 cm の極厚グラファイトを採用し、陽子ビームはその下流でダンプされる。この標的を捕獲ソレノイド中心部に配置する。標的領域に強いソレノイド磁場があるため、どの方向に発生したパイオンやミュオンでも捕まえることが可能である。このうち後方に生成された粒子をソレノイド磁場に巻き付けながら大口径の輸送ソレノイドラインにより実験エリアへと輸送する。このように、MuSIC では極厚標的・大立体角捕獲・大口径輸送ラインの 3 つの特徴を持つ新方式のパイオン捕獲システムを採用することで、従来のミュオン施設よりも 3 桁以上高いミュオン生成効率を達成する。

我々は、2009 年度に、この大強度ミュオン源 MuSIC を RCNP 西実験室に建設した。その写真を図 2 に、全体のレイアウトと断面図を図 3 に示した。

2.1 パイオン捕獲システム

MuSIC の中核を担うパイオン捕獲システムは、パイオン生成標的とそれを取り囲む放射線シールド、標的に 3.5 T の磁場を発生する超伝導磁石 (捕獲ソレノイド) およびパイオン・ミュオンを輸送するための 2 台の輸送ソレノイド (BT5, BT3) から構成されている。パ

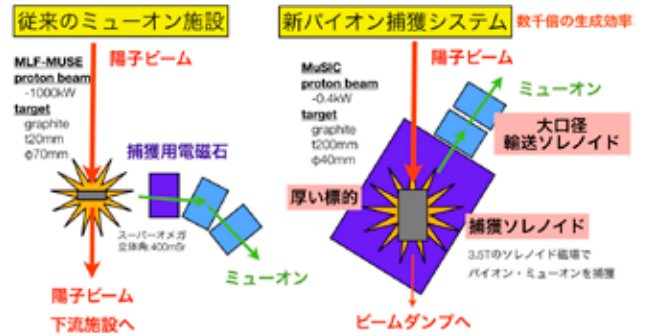


図 1: ミュオン生成・捕獲方法の比較。従来のミュオン施設 (左図) と MuSIC が用いるパイオン捕獲システム (右図)。



図 2: RCNP 西実験室に建設された大強度ミュオン源 MuSIC の写真。

イオン生成標的は直径 4 cm、長さ 20 cm のグラファイトロッドであり、捕獲ソレノイドの中心に配置されている。陽子ビームをパイオン生成標的に入射して生成したパイオンの内、後方に生成されたものがソレノイド磁場に捕らえられ、3.5 T から 2 T に漸減する磁場によって収束されながら下流の輸送ソレノイドに送られて実験装置エリアへと導かれる。超伝導ソレノイド電磁石が発生する磁場分布を図 4 に示す。

パイオンと共に発生する中性子や高エネルギー 2 次粒子、散乱陽子は前方にピークを持ち、これらが超伝導磁石に照射するのを避けるために、後方のパイオンのみを収集する設計となっている。このため、陽子ビームは捕獲ソレノイドと輸送ソレノイド BT5 の隙間から捕獲ソレノイドの内部へ入射されるが、磁場の落ち込みが大きくなるとミュオン収量が下がるので、陽子ビーム軌道を確認しつつ、捕獲ソレノイドのコイルと輸送ソレノイド BT5 のコイルの距離が離れすぎないように真空容器に切り欠きを設けるなどの工夫を施している。また、陽子ビームを捕獲ソレノイドの軸に対して大きな角度で入射できればコイル間を狭めて磁場の落ち込みを防ぐことができるが、より大きな直径の捕獲ソレノイドが必要になる。MuSIC では陽子ビームを 22 度の角度で入射し、



図 3: 大強度ミュオン源 MuSIC 全体とパイオン捕獲システムのレイアウト。

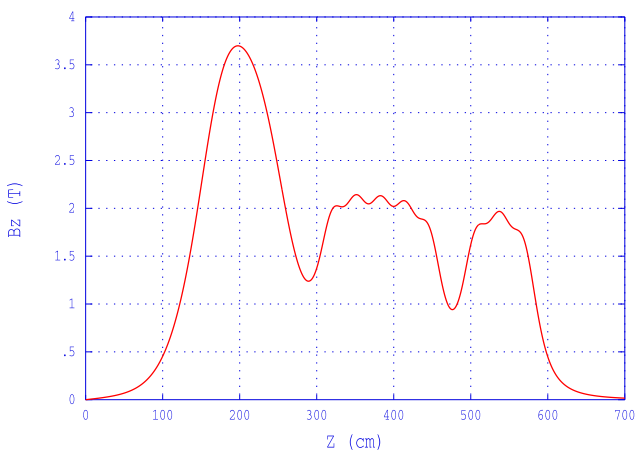


図 4: パイオン捕獲システムの軸上磁場分布

コイル間距離は 55 cm とした。

2.1.1 捕獲ソレノイド

捕獲ソレノイドは、パイオン生成標的を内部に収めた超伝導磁石であり、パイオン捕獲システムの中でも最も重要かつ最も設計の難しい部分である。捕獲ソレノイドのデザインパラメータを表 1 に示す。標的で発生する多量の放射線が超伝導コイルに入射するのを防ぐために、標的とコイルの間には最大厚さ 27 cm の SUS 製シールドが挿入されている。そのため、捕獲ソレノイドには内径 900 mm の大口径ソレノイドコイルが用いられている。コイルの長さは 1000mm であるが、磁場ピーク位置を標的に調整するために、ミュオンビーム上流側（図 3 の左側）400mm の範囲には超伝導線を巻き足し、厚さ 40mm となっている。下流側の厚さは 35 mm である。捕獲ソレノイドには直径 1.2 mm の NbTi/Cu 超伝導線が用いられており、この超伝導線に 145 A を流すことで約 4 MA ターンの起磁力を得る。

超伝導コイルの直下には、クエンチバックヒータとして、銅線のコイルを巻き込んである。クエンチが発生した際は、電源を遮断してダイオードを介した保護回路

に切り替え、ヒータコイルに通電することで超伝導コイルをクエンチバックし、磁石に蓄えたエネルギーをすべて熱に変換して磁石内で安全に消費する。捕獲ソレノイドのコールドマスはおよそ 1 トンで、液体ヘリウムを使わずに小型冷凍機によって間接的に冷却される。輻射熱、サポートや電流リードからの侵入熱は合計 1 W と見積もられており、放射線シールドを透過してきた中性子などによる核発熱は、1 μ A の陽子ビームを入射したとき 1 W 以下と予想されている。MuSIC では、住友重機製 GM 冷凍機 SRDK-415D-F50L を 1 台、SRDK-408D-F50L を 2 台使うことで、冷凍機 1 段目の冷凍能力は 134 W@40 K、2 段目の冷凍能力は 4 W@4 K となり、十分な冷凍能力を確保した。

表 1: 捕獲ソレノイドのデザインパラメータ

Conductor	Copper stabilized NbTi
Conductor diameter	1.2 mm
Cu/NbTi	2.4
RRR (R293K/R10K)	>240
Coil diameter	900 mm
Coil length	1000 mm
Coil thickness	35~40 mm
Number of turns	~30000
Operation current	145 A
Field on axis	3.5 T
Inductance	400 H
Stored energy	5 MJ

捕獲ソレノイドの放射線環境は MARS[4] を用いてシミュレーションした（図 5）。400 MeV、1 μ A の陽子ビームを入射したときにコイルに落ちる熱量は 1 μ W/g と計算され、コイル全体で積分するとおよそ 0.6 W である。これは 1 年（8760 時間）のビーム運転における被ばく量が 10 kGy であることを示す。超伝導線の特性や、伝熱パスに使用している純アルミ材の熱伝導率、エポキシ接着剤の強度などには影響を及ぼさない被ばく量ではあるが、半導体では劣化が起こる可能性がある。そのため、超伝導線がクエンチしたときに電流のバイパス回路を構成するためのダイオードは、超伝導磁石から離れた励磁電源内部に設置することとした。励磁電源は、放射線を避けるため実験室の地下にある電源室に設置され、磁石まで 30 m 長の配線を敷設した。

2.1.2 輸送ソレノイド

捕獲ソレノイドで集められたパイオン・ミュオンは、下流に続く全長およそ 3 m の湾曲した輸送ソレノイド

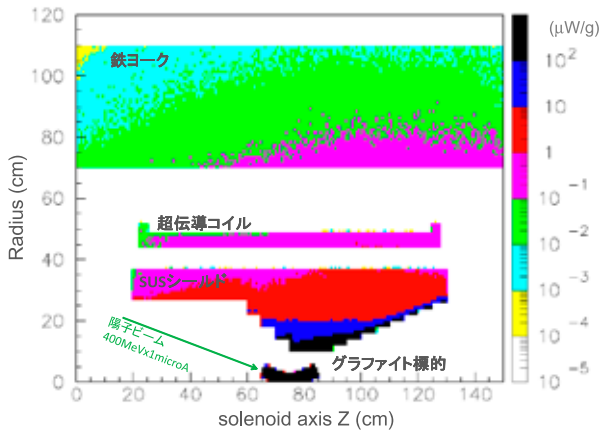


図 5: MARS によって計算された捕獲ソレノイド中での入熱量分布。(カラーチャートの単位は $\mu\text{W/g}$)

で輸送される。輸送ソレノイドは、長さ 20 cm の超伝導ソレノイドコイルを、曲率半径 3 m の円弧上に 6 度おきに並べて連結することで、軸上磁場 2 T のトロイダル磁場を発生する。輸送ソレノイドは製作工程の都合により 2 台の磁石 BT5 および BT3 で構成され、それぞれ 5 個と 3 個の超伝導コイルを連結してクライオスタットに収めている。なるべく多くのミュオンを輸送するため、内直径 36 cm と比較的大きなボアを有する。トロイダル磁場中を輸送される粒子の軌道は、その運動量、ピッチアングルに応じて高さ方向にドリフトする。これを利用して、輸送する粒子の電荷や中心運動量を選択することが可能である。欲しい粒子の軌道が磁石軸上を通るようにダイポール磁場で軌道を補正するために、各ソレノイドコイルにはダイポールコイルが巻き込んである。MuSIC では最大 0.04 T のダイポール磁場を発生でき、このときおよそ 30 MeV/c から 50 MeV/c の粒子が軸上に輸送される。輸送ソレノイドに使われたソレノイドコイルおよびダイポールコイルのデザインパラメータをそれぞれ表 2 および表 3 にまとめる。

輸送ソレノイドは、BT5、BT3 とともに、それぞれ小型冷凍機 2 台 (住友重機製 SRDK-408D-F50L) を用いて冷却される。

輸送ソレノイドのソレノイドコイルは、捕獲ソレノイドと直列に励磁電源に接続されている。捕獲ソレノイドと同様に、輸送ソレノイドにもクエンチバック用ヒータ銅線が巻き込んであり、いずれかがクエンチした際には電源を遮断してすべての磁石をクエンチバックさせる。ダイポールコイルは独立した電源で励磁され、最大 115 A で 0.04 T を発生し、正電荷粒子と負電荷粒子の双方の輸送に対応するため転極も可能としている。

表 2: 輸送ソレノイドのソレノイドコイルのデザインパラメータ

Conductor	Copper stabilized NbTi
Conductor diameter	1.2 mm
Cu/NbTi	4
RRR (R293K/R10K)	>150
Coil diameter	480 mm
Coil length	200 mm
Coil thickness	30 mm
Number of turns	~4000
Operation current	145 A
Field on axis	2 T
Inductance	124 H
for 8 element coils	
Stored energy	1.4 MJ
for 8 element coils	

2.2 ミューオン強度の測定

完成した MuSIC パイオン捕獲システムのミュオン生成効率を実証するために、輸送ソレノイド BT3 の出口に測定器を設置し、取り出されるミュオンの収量を測定した。パイオン生成グラファイト標的から測定器までの距離は約 4m である。電子・陽電子、ガンマ線、 π 中間子、中性子など様々な種類の粒子が様々なエネルギーを持って飛んでくる環境下で、ミュオンだけの収量を測定する必要がある。そのため、ミュオンの特性を利用した次の 2 つの方法で測定を行った。

一つ目はミュオン寿命の測定である [7][8]。ミュオンが物質中に停止してから崩壊し電子・陽電子が放出されるまでの時間を測定し、その時間スペクトルから停止ミュオン量を導出した。2011 年 6 月の測定では、物質中でのミュオンの寿命を考慮して、ミュオン停止標的として銅板を使用した。正電荷ミュオンは物質中でも真空中と同じ $2.197 \mu\text{s}$ の寿命を持つが、負電荷ミュオンは原子核への捕獲過程が加わるので寿命が短くなり、銅中での寿命は 164 ns である。図 6 に示すように、縦 8 cm、横 37 cm、厚さ 6 mm の銅板をプラスチックシンチレーターで挟み込み、輸送ソレノイド出口に設置した。プラスチックカウンターの大きさは縦 5 cm、横 40 cm、厚さ 3.5 mm である。検出器位置には 0.3 T 程度の漏れ磁場が存在するため、プラスチックシンチレーターの読み出しには MPPC を使用した。MuSIC は陽子ビーム電流値 $1 \mu\text{A}$ で運転するように設計されているが、この試験測定ではカウンターのパイルアップを避けるために 6 pA で測定を行った。図 7 に電子・陽電子放出時

表 3: 輸送ソレノイドのダイポールコイルのデザインパラメータ

Conductor	Copper stabilized NbTi
Conductor diameter	1.2 mm
Cu/NbTi	4
RRR (R293K/R10K)	>150
Coil layout	Saddle shape dipole coils
Length	200 mm
Aperture	460 mm dia.
Coil winding	528 turns
Operation current	115A (Bipolar)
Field	0.04 T
Inductance	0.04 H

間分布の一例を示す。この時間分布を次の関数にフィットした。

$$N(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + C \quad (1)$$

ここでは、2成分の寿命を考慮している。負電荷ミュオンが銅中に停止した場合の短寿命成分 A_1, τ_1 と、長寿命成分 A_2, τ_2 である。最後の項 C は偶然同時計数による定数成分である。フィットの結果得られた長寿命成分の寿命 $2.155 \pm 0.019 \mu\text{s}$ は、正電荷ミュオンが銅またはプラスチックシンチレーター内に停止した場合の寿命 $2.197 \mu\text{s}$ と負電荷ミュオンがプラスチックシンチレーターに停止した場合の寿命 $2.026 \mu\text{s}$ が混在していることにより説明できる。このフィット結果から停止ミュオン数を導出し、シミュレーションと比較することで輸送ソレノイド出口でのミュオン量を導出した。その結果、陽子ビーム電流値 $1 \mu\text{A}$ で運転した場合に換算して、毎秒 10^8 以上のミュオンが輸送ソレノイド出口まで引き出されることが確認された。

もう一つのミュオン収量測定にはミュオン X 線を使用した [7][9]。負電荷を持ったミュオンは物質中に停止すると原子核のクーロン場に捕獲されてミュオン原子を形成し、特性 X 線を放出しながらミュオン原子軌道の基底状態に向かって遷移してゆく。この特性 X 線をミュオン X 線と呼ぶ。ミュオン X 線は電子の特性 X 線に対して電子とミュオンの質量比 (約 200 倍) だけ高いエネルギーを持つので、軽い元素のミュオン X 線でも比較的容易に測定することが可能である。負電荷ミュオンを物質に停止させ、ゲルマニウム検出器でミュオン X 線による全エネルギーピークの事象数を測定することで、物質中に停止した負電荷ミュオン数を算出できる。ミュオン X 線によるミュオン収量の測定は、2011 年 6 月から 2012 年 6 月の期間に合計 3



図 6: MuSIC 輸送ソレノイド出口に配置された寿命測定によるミュオン収量測定用の検出器。

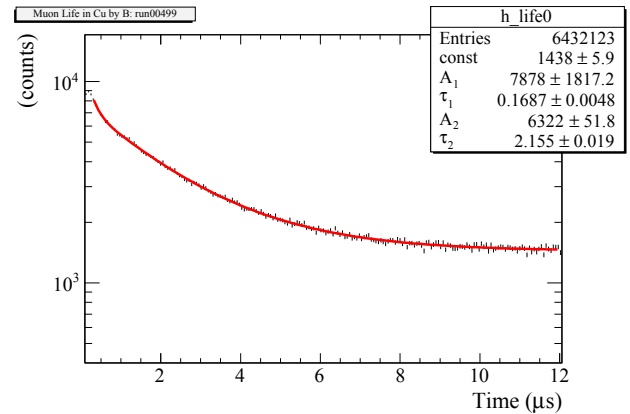


図 7: 銅中にミュオンを停止させ測定された電子・陽電子放出時間分布 (2011 年 6 月測定)。

回行った。輸送ソレノイドの出口にトリガー作成用のプラスチックシンチレーターを置き、その直後にミュオンを停止させるマグネシウム板を設置した。実験では検出器の piled-up を防ぐために陽子ビームの電流値を $20 \sim 500 \text{ pA}$ 程度に設定したが、さらにソレノイドビームダクトからのビームやパイオン生成標的から飛んでくる中性子がゲルマニウム検出器に当たる確率を十分に下げするためにゲルマニウム検出器の位置や遮蔽に注意する必要がある。シミュレーションにより遮蔽構成などを検討し、図 8 に示すようにゲルマニウム検出器の周辺にパラフィン、カドミウム、鉛の遮蔽層を形成することで、検出器の計数率を制御した。2011 年 10 月に測定されたミュオン X 線のエネルギースペクトルの例を図 9 に示した。マグネシウム標的からの $K\alpha$ -ミュオン X 線 (296.4 keV) と $L\alpha$ -ミュオン X 線 (56.6 keV) の全エネルギーピークの他にパイオンによる $L\alpha$ ミュオン X 線 (74.4 keV) も観測されている。観測された全エネルギーピークの事象数から測定器の検出効率やシミュレーション結果を考慮し、負電荷ミュオンの収量を算出し

た。その結果、陽子ビーム電流値 $1 \mu\text{A}$ の場合に換算して、毎秒 $3 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ の負電荷ミュオンが輸送ソレノイド出口まで取り出されることが確認された。



図 8: ミュオン X 線スペクトル測定時の実験セットアップ (2011 年 6 月測定時)。暗幕の中にトリガー用カウンターとマグネシウム板が設置されている。ゲルマニウム検出器の周辺にあるのはパラフィンなどの遮蔽体である。

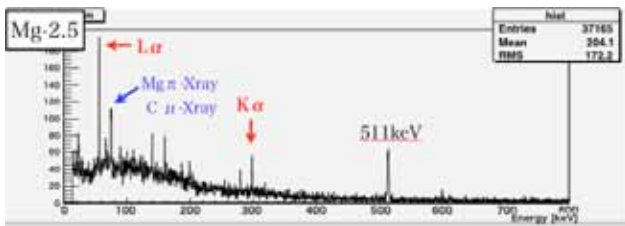


図 9: マグネシウム中にミュオンを停止させた場合のミュオン X 線スペクトル (2011 年 10 月測定)。赤矢印がマグネシウム標的からの $K\alpha$ -ミュオン X 線 (296.4 keV) と $L\alpha$ -ミュオン X 線 (56.6 keV) である。

これらの測定により MuSIC のパイオン捕獲システムが設計通りの高いミュオン生成効率を持つことが確認された。

3 MuSIC の発展

大強度ミュオン源 MuSIC 開発の成功は、ミュオン業界に大きな進展をもたらそうとしている。

一つ目は、大強度ミュオンを使った将来計画の進展である。従来の 1000 倍以上の強度を持つ大強度ミュオン源の実現は、素粒子原子核実験のみならず加速器応用分野からも強い要求がある。まず、素粒子実験分野のミュオン電子転換探索実験の進展である。この稀崩壊探索実験では、大強度ミュオンビームの実現が不可欠である。そのため、日本の COMET 実験、米国の

Mu2e 実験ともに高効率ミュオン生成システムが大きな技術課題であったが、MuSIC の成功によりパイオン捕獲システムの有用性が証明され、それぞれの実験用に MuSIC のパイオン捕獲システムを増強した超伝導ソレノイドによる高効率ミュオン生成システムの詳細設計と建設が進められている。これらの実験では、数十 kW の陽子ビームにより毎秒 10^{11} 個のミュオンが生成され、ミュオンの稀崩壊探索が大きく進展すると期待されている。大強度ミュオンは、将来のニュートリノファクトリー計画やミュオンコライダー計画においても最重要課題であり、海外研究者からも大きな注目を集めている。

二つ目は、国内・アジア圏ミュオン科学への貢献である。通常のミュオン施設が使用する陽子加速器のビームパワーはメガワット級である。しかし、MuSIC によって、陽子ビームパワー 400 W の核物理研究センターサイクロトロンにおいても他の施設と同等のミュオンを使った研究が可能となる。MuSIC パイオン捕獲システムを延長する形で、2013 年度に常伝導電磁石から成るミュオンビームラインが整備され、RCNP で原子核、物性、放射化学、非破壊元素分析などのミュオン科学が開始されようとしている。J-PARC-MLF のパルスミュオンビームと RCNP の DC ミュオンビームの 2 つの異なる時間構造のミュオンビームが国内に完成したことにより、両ビームの特性を活かした研究を相補的に進めることで、国内やアジア圏のミュオン科学が活性化し、ミュオン科学の新しい時代が拓かれると期待されている。

本章では、以下に、COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイドと RCNP におけるミュオン科学の展開について紹介し、各プロジェクトの状況を説明する。

3.1 COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイド

MuSIC では、生成標的を強磁場中に配置することでパイオンを大立体角で捕獲し、輸送するパイオン捕獲システムを世界で初めて実現したが、同様のコンセプトを持つ超伝導磁石システムが COMET 実験でも採用され、J-PARC に建設中である。ここでは、COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイドに触れるが、COMET 実験の概要、施設については文献 [5] を参照されたい。

COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイドは、J-PARC Main Ring の陽子ビームを利用して大強度ミュオンビームを生成する。ビームパワー 56 kW (8 GeV, $7 \mu\text{A}$) の陽子ビームを使うことで、 $10^{11} \mu^-/\text{秒}$ と世界最大強度の負電荷ミュオンビームを生成する計画である。COMET 実験は、第一期 (COMET Phase-I)、第二期

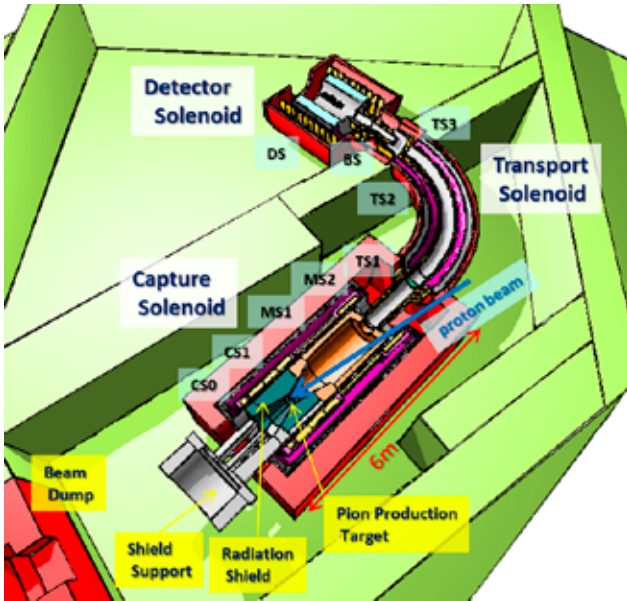


図 10: COMET Phase-I の超伝導磁石システムのレイアウト

(COMET Phase-II) と段階的に拡張しながら進められる。COMET Phase-I の超伝導磁石システムは、図 10 に示すように、パイオン捕獲ソレノイド、90 度湾曲したミュオン輸送ソレノイドおよび検出器ソレノイドで構成される [6]。パイオンの捕獲効率を上げるため、標的にかける磁場強度は 5 T、輸送ソレノイドの軸上磁場は 3 T としている (図 11)。このうち、パイオン捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドは、COMET Phase-II においても使用されるものである。COMET Phase-II では MuSIC の約 100 倍である 56 kW の陽子ビームパワーを利用するので、超伝導磁石が浴びる放射線量を低減するため、標的周りにタングステン合金のシールドを設置する。シールドの厚さは最大 45cm で、標的で発生するほとんどの荷電二次粒子は超伝導コイルに達する前に止めることができるが、中性子がシールドを透過してコイルに照射される。コイル上の中性子フルエンスは最大 10^{22} n/m² と予想されており、超伝導磁石を構成する物質が劣化することが懸念される。そこで、COMET 用パイオン捕獲ソレノイドでは様々な対策を施している。放射線の透過率をあげて入熱量を減らすために超伝導線にはアルミ安定化材を採用し、コイル構造体もすべてアルミとする。さらに、内部で発生する核発熱をすみやかに冷却するためにコイル内部の層間に純アルミ板を挿入して伝熱パスを確保した (図 12)。しかし、極低温に保持されたアルミに大量の中性子が照射されると熱伝導率や電気伝導度が徐々に低下することが予想されるので、劣化量を監視しながら、必要に応じて昇温して回復させることを計画している。

このように、COMET 実験では、MuSIC と同じコンセプトのパイオン捕獲ソレノイドに大強度の陽子ビームを

受け入れることで、世界最大強度の負電荷ミュオン源を構築する計画であり、現在、その建設が J-PARC/KEK において進められている。

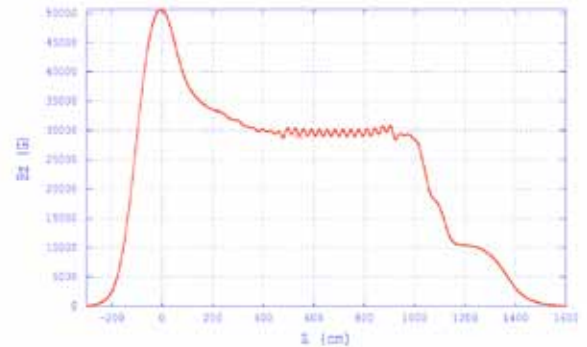


図 11: COMET 超伝導磁石システムの軸上磁場分布 (COMET Phase-I)

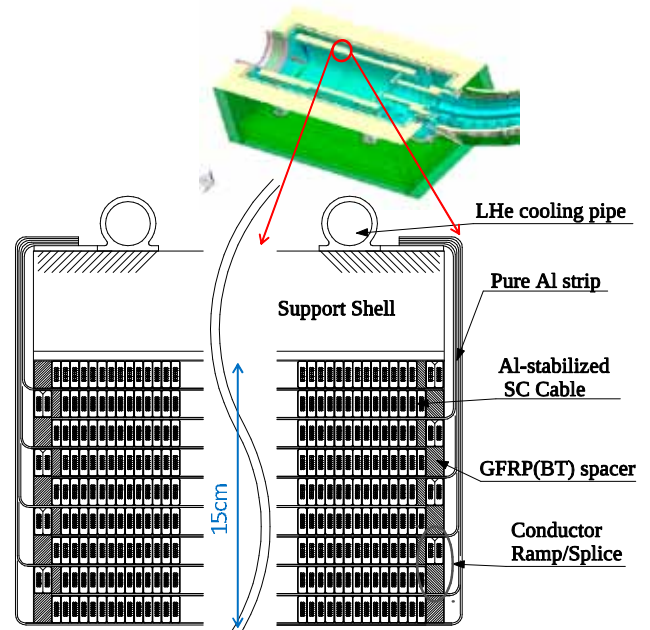


図 12: COMET 実験用パイオン捕獲ソレノイド CS1 の超伝導コイル構造

3.2 RCNP におけるミュオン科学の展開

MuSIC のパイオン捕獲システムの稼働に成功した核物理研究センター (RCNP) では、新しい RCNP の研究テーマとしてミュオン科学を展開すべく、DC ミュオンビーム用のビームライン MuSIC-M1 を建設した [10]。図 13 に示したように、MuSIC-M1 は MuSIC 輸送ソレノイド直下に接続された常伝導電磁石群から構成される全長 18 m のビームラインである。偏向電磁石

(ST1,ST2,BM1,BM2) と 3つの 3連四極電磁石 (Triplet-Q) に加え, 上下左右独立に稼働する 4台の 4軸ビームスリット, ビームライン後半には Wien filter が配置されており, ビーム整形および粒子・運動量を選択する機能も備えている。図 14 にある赤い電磁石群が MuSIC-M1 ビームラインである。このビームラインは, μ SR 法による物性研究やミュオン X 線を使った原子核・化学・非破壊元素分析など $10^4 \sim 10^5 \mu$ /秒程度のミュオン強度が必要な実験用に設計されたものである。

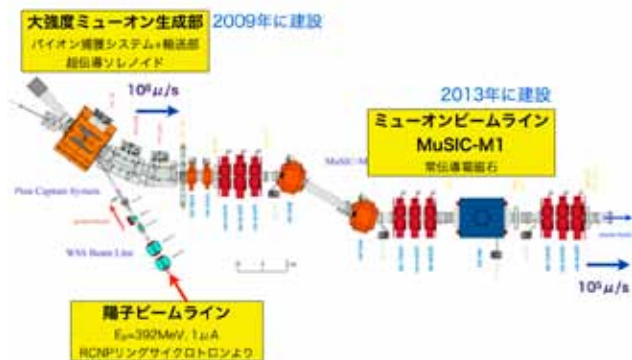


図 13: 核物理研究センター西実験室に建設された MuSIC-M1 ミュオンビームラインの全体図。

2013 年度に MuSIC-M1 ビームラインのビーム光学と機器の設計を行い, 同年度末までにビームライン機器の製造・設置まで完了した。その後, 2014 年度より機器の立ち上げと調整を開始し, 2014 年 7 月～翌年 2 月のビーム試験では崩壊ミュオンの観測に成功, 2015 年 6 月のビーム試験では表面ミュオンの引き出しに成功し, 運動量 100 MeV/c までのミュオンや電子/陽電子の DC ビームが利用できる MuSIC-M1 ビームラインが完成した。

既に負電荷ミュオンを使用したユーザー実験が開始されており, 2015 年 11 月には MuSIC-M1 初の公式ユーザー実験である RCNP-E411(阪大理・寺田氏) が実施され, はやぶさ 2 が持ち帰る地球外試料のミュオンによる初期分析に向けた研究開発として, 負電荷ミュオンによる隕石中の炭素の元素分析に成功している。また, Pd のミュオン捕獲機構の解明に向けた原子核実験 RCNP-G02/E475(理研・櫻井氏, 松崎氏) なども行われている。また, 正電荷ミュオンビームのメイン実験となる物性研究用 μ SR 測定についても, KEK/J-PARC ミュオングループの多大な協力により KEK 中間子施設で使用していた μ SR 測定用分光器を RCNP 西実験室に移設し整備を進めるなど, 実験開始に向けた環境が整いつつある。すでに, 永久磁石による磁場中でミュオンのスピニングが 80 ns の周期で回転する様子も観測されている。2017 年度からは 1μ A の大電流陽子ビームによる定常運転を開始し, 本格的なミュオンユーザー実験用の

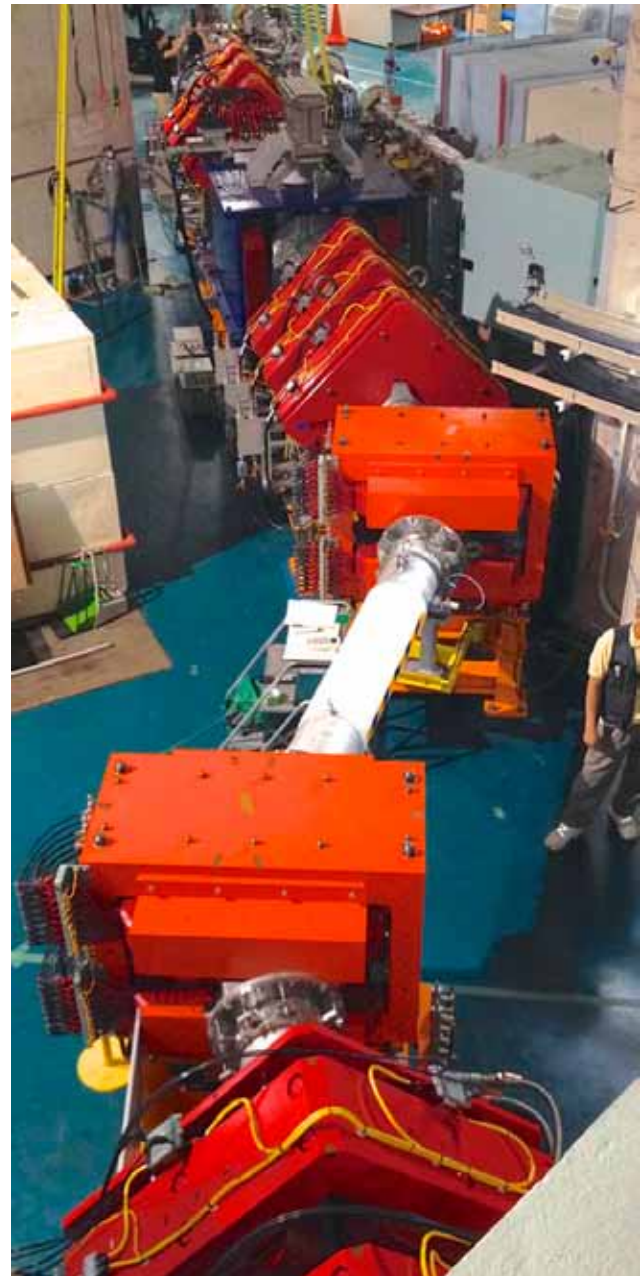


図 14: MuSIC-M1 ビームラインの写真。

ビームタイムを開始する予定である。

4 まとめ

大阪大学核物理研究センターに建設された MuSIC は, 世界で初めてパイオン捕獲システムを採用した新方式の大強度ミュオン発生装置である。ミュオン生成標的を超伝導電磁石中に設置することで, ミュオン生成効率を 3 桁向上することに成功し, J-PARC の COMET 実験など大強度ミュオンビーム実験の新しい可能性を開拓した。

ミュオンは不安定な素粒子の中でも比較的容易に大強度ビーム化が可能な粒子である。強い相互作用に感度

を持たず、適度な長さの寿命を持つミュオンは、将来の素粒子物理学実験の主役となり得るポテンシャルを十分に備えている。また、電子の約 200 倍の質量を持つことから、物質中での負電荷ミュオンは重い電子のように振る舞い、正電荷ミュオンは軽い陽子のような役割を担うことがある。これらの性質を原子・分子レベルの基礎研究や応用研究に利用することも可能である。

本稿で紹介した MuSIC は大強度ミュオンビームを実現する方法の一例に過ぎない。より大強度、高品質のミュオンビームを高効率に実現するアイデアはいくつもある。ミュオンビーム生成・ビーム加工技術の向上を常に念頭に置き、研究を進めて行けば、素粒子物理学実験の夢であるミュオン・コライダーの実現も見えてくるかもしれない。大強度・高品質ミュオンビームの実現は、素粒子原子核物理の分野のみならず、産業やエネルギー問題など幅広い分野に革新的発展をもたらす可能性を秘めているのである。

5 謝辞

大強度ミュオン源 MuSIC の開発と建設には、たくさんの方々から御協力とご支援を頂きました。大阪大学の久野良孝教授には、長年取り組んでおられる大強度ミュオン源を使った究極感度のミュオン電子転換探索実験計画の一環として、我々に MuSIC 開発の機会を与えて頂きました。MuSIC の設計においては、荻津透氏、山本明氏をはじめとする KEK 低温センターの方々、三宅康博氏ら KEK ミュオングループの方々に御協力頂きました。また、核物理研究センターの岸本忠史前センター長と中野貴志現センター長、そして加速器部門の畑中吉治氏、福田光宏氏のご理解とご支援がなければ、MuSIC の成功はありませんでした。MuSIC プロジェクトは、サブアトミック科学研究拠点プロジェクトの一部として進めさせて頂いております。板橋隆久氏、坂本英之氏をはじめとする久野研究室の方々、及び篠原研究室の方々、英国の Imperial College London, University College of London の方には、MuSIC の建設から性能試験まで様々な場面で助けて頂きました。この場をお借りして、心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 佐藤朗, “ミュオン・電子転換過程探索実験計画”, 高エネルギーニュース Vol.26 No.1 (2007).
- [2] A. Sato et al., Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, pp. 820–822, 2011.

- [3] M. Yoshida et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, pp. 1752-1755, June 2011.
- [4] N.V. Mokhov, Fermilab-FN-628 (1995); O.E. Krivosheev, N.V. Mokhov, Proc. Monte Carlo 2000 Conf., p. 943, Lisbon, October 23-26, 2000, Fermilab-Conf-00/181 (2000); N.V. Mokhov, Fermilab-Conf-03/053 (2003); N.V. Mokhov, K.K. Gudima, C.C. James et al., Fermilab-Conf-04/053 (2004); <http://www-ap.fnal.gov/MARS>.
- [5] 西口創, 高エネルギーニュース 31-3, pp.219-227 (2012).; 深尾祥紀, 高エネルギーニュース 34-1, 29-36 (2015).
- [6] M. Yoshida, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3, 4500904(4pp.) (2015).
- [7] S. Cook, et. al., Journal of Physics: Conference Series 408 (2013) 012079.
- [8] Samuel Leslie Cook, “Characterisation of the MuSIC muon beam and design of the Eu-XFEL LPD/CCC interface firmware”, University College London, Thesis (Doctoral) (2014).
- [9] 日野祐子, “大強度ミュオン源 MuSIC における負ミュオンビームの研究”, 大阪大学大学院理学研究科・物理学専攻・修士論文, 2013 年 3 月.
- [10] 佐藤朗, 日本中間子科学会誌「めそん」2015 年秋号, No.42, pp.12-17; 他同号掲載の MuSIC 特集記事.