

THE FIRST MUON BEAM MEASUREMENT AT THE MuSIC

Akira Sato ^{*A)}, Taihei Adachi^{B,C)}, Toru Ogitsu^{B)}, Yoshitaka Kuno^{A)}, Hideyuki Sakamoto^{A)},
 Yoshiharu Hatanaka^{D)}, Shunsuke Hikida^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{D)}, Yoshiharu Mori^{E)}, Akira Yamamoto^{B)}, Makoto Yoshida^{B)},
 Tran Nam Hoai^{A)}, Nguyen Minh Truong^{A)}, Sam Cook^{F)}, Richard D'Arcy^{F)}

^{A)} Department of Physics, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{C)} University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

^{D)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP), 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

^{E)} Research Reactor Institute, Kyoto University (KURRI), 2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka 590-0494

^{F)} Department of Physics & Astronomy, University College London, Gower Street, London, WC1E 6BT, UK

Abstract

Beam tests with a low current proton beam have been carried out to estimate an achievable muon yield of the MuSIC. Preliminary analyses result that more than 10^8 muons/s is achievable with a 392MeV, $1\mu\text{A}$ proton beam.

大強度ミューオン源 MuSIC におけるミューオンビームの初測定

1. MUSIC 概要

大阪大学核物理センター (RCNP) では、新しい大強度 DC ミューオン源 MuSIC の建設を進めている。超伝導ソレノイド電磁石を用いたパイオン捕獲システムとミューオン輸送ラインを世界で初めて実現し、新しいミューオン生成手法により世界最高のミューオン生成効率を達成できる計画である。RCNP のリングサイクロトロンから供給される 392MeV, $1\mu\text{A}$ の陽子ビームを使って、毎秒 $10^8 \sim 10^9$ 個のミューオンを生成することを目指している。この強度は、現在の最高強度のミューオンビームを供給するスイスの PSI 研究所に匹敵するものである。

PSI では 1.2MW の陽子ビームにより大強度ミューオンを生成しているが、我々 MuSIC は、わずか 400W の陽子ビームパワーから同程度の強度のミューオンビームを生成可能である。そのポイントはパイオン捕獲システムにある。PSI や J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) のミュオン科学研究施設 (MUSE) など、従来のミューオン施設では、陽子ビームを中性子施設と共有する形で設

計されている。つまり、陽子ビームライン上の上流に、ミューオン生成標的が、その下流に中性子発生用の標的が設置されている。ミューオン施設は中性子施設に寄生する形で成り立っているため、ミューオン標的での陽子ビーム損失は 10% 以下でなければならないという厳しい制約がある。ミューオン生成用の標的はグラファイトが使用されるが、その厚さは 20mm 程度に制限されることとなる。さらに、発生したパイオンやミューオンを捕獲するための電磁石磁場が陽子ビームに影響することを防ぐために、捕獲電磁石は陽子ビームラインから離れた位置に設置されるため、必然的に捕獲立体角が大きく制限される。

一方、MuSIC では、ミューオン生成標的の下流にはビームダンプのみが存在する、つまり、陽子ビームをミューオン生成のためだけに使用できる。ミューオンの生成率を稼ぐために標的を厚し、かつ標的全体を高ソレノイド磁場下に配置することにより大立体角でミューオンを捕獲することができる。MuSIC では、厚さ 20cm のグラファイト標的と 3.5T のソレノイド磁場を用い、従来ミューオン施設に比べて数千倍高いミューオン生成効率を実現している。

現在、検討が進められているミューオン電子転換過程探索実験 COMET や PRISM、そして将来の加速器計画であるニュートリノファクトリやミューオンコライダでは、 $10^{11} \sim 10^{14}$ muons/s という超大強度のミューオンビームが不可欠であり、大強度陽子加速器とにこのパイオン捕獲システムを採用することにより必要なミューオンビーム強度を達成する計画である。パイオン捕獲システムは将来のミューオンプログラムにおいて極めて重要な技術開発の一つであるといえる。

図 1 は MuSIC 全体の構成と配置を示している。MuSIC はリングサイクロトロンからの 392MeV 陽子ビームをグラファイト標的に入射する。発生したパイオンやミューオンを 3 超伝導ソレノイド電磁石で形成する 3.5T の高磁場で捕獲し、後方の輸送ソレノイドへと導く。輸送ソ

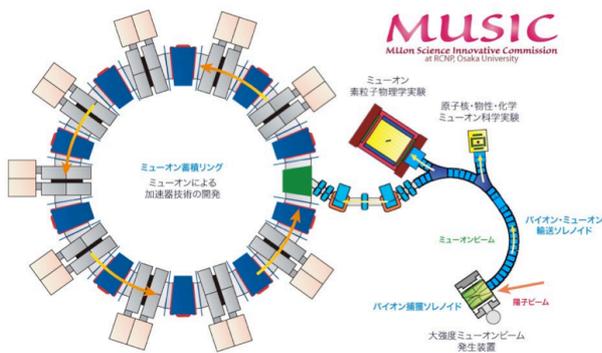


図 1: MuSIC 全体の配置案。

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

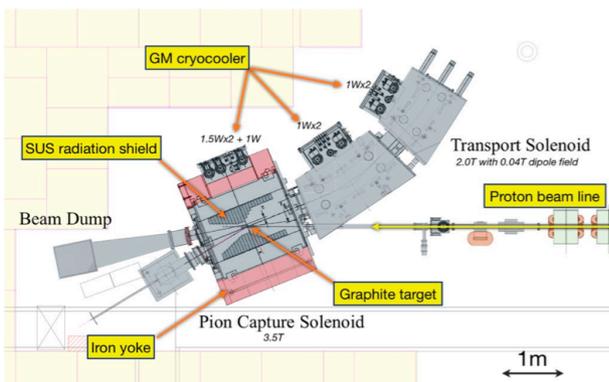


図 2: 現在までに完成している部分の詳細図。



図 3: 現状の MuSIC システム。

レノイドは大口径の湾曲型超伝導ソレノイド電磁石であり 2T の磁場で実験エリアへとビームを輸送する。この間にパイオンはミュオンへと崩壊する。この部分にはソレノイド磁場に加えてソレノイド湾曲面に垂直な方向に最大 0.04T の双極磁場成分を印加することができる。この双極磁場の向きや強さを変えることにより、ビームの電荷や運動量を選択することができる。

MuSIC の建設は 2009 年度から開始された。初年度で MuSIC への陽子ビームライン (WSS)、パイオン捕獲ソレノイド、そして 36 度までの輸送ソレノイドが完成した。その図面を図 2 に写真を図 3 に示した。超伝導ソレノイドについては文献^[1]に、計画概要や設計性能については文献^[2]に詳しい記述がある。

2. ミュオンビームの測定

2010 年 3 月に完成したパイオン捕獲ソレノイドと 36 度輸送ソレノイドは、直ちに励磁試験を完了し、陽子ビーム照射試験に向けた準備が急ピッチで行われた。現在までに 3 回のビーム試験を完了している。最初のビーム試験は 2010 年 7 月に行った。陽子ビームをグラファイト標的に入射し、全てのシステムが正常に動作し、また、36 度輸送ソレノイド出口での生成 2 次粒子の位置分布を測定した。

第 2 回目の実験は 2011 年 2 月に実施した。このビーム試験ではミュオン寿命の測定からミュオンが生成されていることを初めて確認した。また、統計量としては不十分であったが設計通りのミュオン生成効率が達成されていること示すデータを得た。

以下、本稿では 2011 年 6 月に行った第 3 回目のビーム試験結果について報告する。これまでと同様に輸送ソレノイド 36 度出口で測定を行い、ミュオンの生成効率と最終的に達成できるミュオン強度を評価するためのデータ収集を目標とした。シミュレーションによると図 4 に示すように、この部分では正電荷ミュオンと負電荷ミュオンが混在しており、それぞれを分離して強度を調べる必要がある。

今回はミュオン寿命とミュオン X 線の測定を行った。実験のセットアップを図 5 に、実験機器の写真を図 6 に示す。プラスチックシンチでミュオン停止標的を挟んだシステムをソレノイド出口中央に水平に設置した。プラスチックシンチレーターの大きさは $380 \times 50 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 、停止標的は Cu または Mg を使用した。上流側のカウンターに hit が有り、下流側に hit が無いことを条件としミュオンが停止したことを示すトリガー信号とした。このトリガー信号に対し、ミュオンが崩壊による電子がカウンターを通過する時間の分布を測定することがミュオン寿命がわかる。また、同カウンターから距離 50cm の位置に Ge 半導体検出器を設置し、放出される X 線のエネルギー分布を測定した。後述するように、ミュオン寿命測定からは正電荷・負電荷両方のミュオン収量の評価が可能である。一方、ミュオン X 線は負電荷ミュオンが原子核のクーロン場でトラップされる過程で表出される特性 X 線であるので、負電荷ミュオンの測定に限定される。

Cu を停止標的とした場合のミュオン寿命測定の結果を図 7 にしました。陽子ビーム電流は 6pA で測定で測定を行った。負電荷ミュオンが物質中に停止した場合の寿命は、原子核への吸収過程の影響で、真空中の静止寿命に比べて短くなる。このことを考慮するとこの時間スペクトルは 3 つの寿命成分で構成されると考えられる。ミュオンが停止する場所は上流プラスチックシンチレーター内、または Cu 内である。まず、

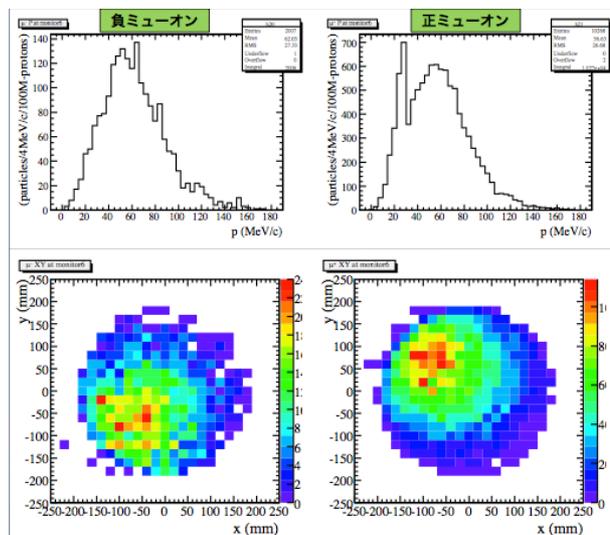


図 4: シミュレーションによる輸送ソレノイド 36 度出口でのミュオンビームの運動量分布 (上) と位置分布 (下)。左が負電荷ミュオン、右が正電荷ミュオンのプロットである。

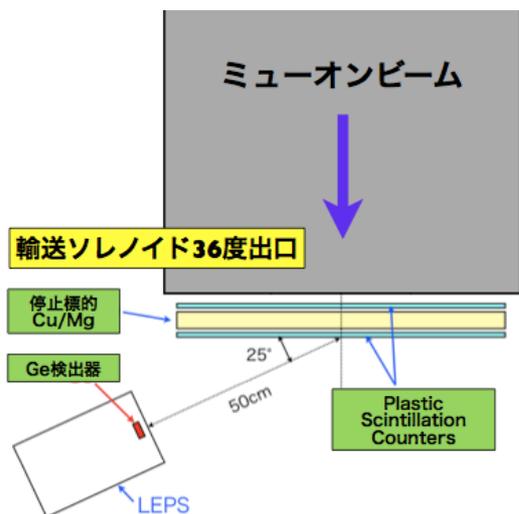


図 5: 第 3 回ビーム試験の検出器配置図。



図 6: 実験の様子。

正電荷ミュオンが停止した場合は停止物質に依らず $\tau_1=2.197\mu\text{s}$ の寿命成分と成る。次に負電荷ミュオンがプラスチックシンチレーター内に停止した場合、C 原子に吸収される場合を考えて、 $\tau_2=2.026\mu\text{s}$ 。また、負電荷ミュオンが Cu に停止すると $\tau_3=0.164\mu\text{s}$ の寿命と成る。これらの 3 成分と背景事象の定数項により時間スペクトルをフィットした。この結果と、測定時間、各種効率などを考慮すると、392MeV、6pA の陽子ビームにより $2 \times 10^3 \mu\text{ons/s}$ のミュオンビームが生成されたこととなる。フルビームの陽子電流値 $1\mu\text{A}$ に換算すると $3 \times 10^8 \mu\text{ons/s}$ の強度が期待される結果である。ただし、効率の評価は暫定的な物であり、最終結果を出すべく解析を続けている。

また、図 8 は観測された X 線のエネルギースペクトルである。この測定では停止標的として Mg を使用した。Mg から K_α ミュオン X 線のエネルギー 296keV のところにピークが観測された。このピークを形成する事象数を元に、測定時間、陽子ビーム電流値、立体角と各種検出効率を考慮すると、陽子ビーム 392MeV、 $1\mu\text{A}$ に換算した負電荷ミュオン量の暫定値は $1 \times 10^8 \mu\text{ons/s}$ である。

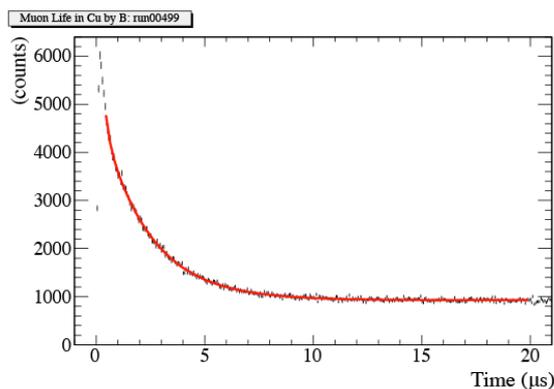


図 7: 観測されたミュオン寿命を示す時間分布。

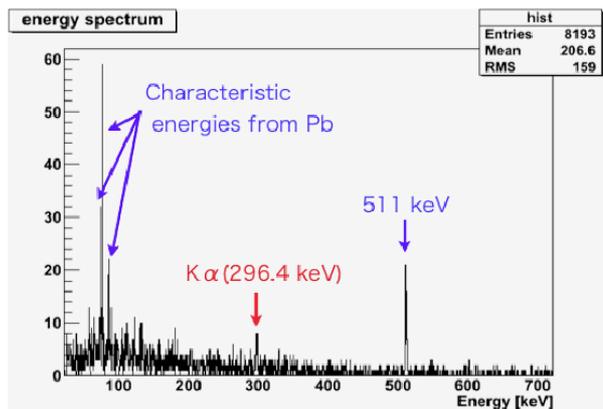


図 8: ミュオン X 線測定のエネルギースペクトラム。

3. まとめと今後の展望

ミュオン寿命、ミュオン X 線の解析とも、他の条件のデータ解析結果との整合性を確認するなど、精度を上げるべく解析を進めているが、暫定値ではどちらの結果からも陽子ビーム 392MeV、 $1\mu\text{A}$ 換算で $10^8 \mu\text{ons/s}$ を超えるミュオンが生成することが確認された。

ただし、これらの測定は陽子ビーム電流値を 6~26pA に押さえた状態で行われたものである。これら低電流のビーム試験により設計通りのミュオンの生成効率が実験により確認されパイオン捕獲システムの性能が確認できた。次の重要なステップは大電流下で超伝導を始めとする全システムの運転を行うことである。設計電流値の $1\mu\text{A}$ で 1 年以内に実験を行うために、放射線関係の書類手続きや遮蔽壁の増強、周辺中性子量の測定などを進めている。

参考文献

- [1] M.Yoshida, et al, IEEE Trans Appl Supercond 21(1) : 1752-1755 (2011), http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5643200.
- [2] 佐藤朗 他, “核物理研究センターにおける大強度 DC ミュオン源 MUSIC の建設状況”, Proceedings of 第 7 回日本加速器学会年会報告書, http://www.pasj.jp/dai7kainenkai/proceedings/LH_5AM_1/THLH04.pdf