

NEW INTENSE DC MUON BEAM CHANNEL AT RCNP: MuSIC

Akira Sato ^{*A)}, Toru Ogitsu^{B)}, Yoshitaka Kuno^{A)}, Hideyuki Sakamoto^{A)}, Yoshiharu Hatanaka^{C)},
Mitsuhiro Fukuda^{C)}, Akira Yamamoto^{B)}, Makoto Yoshida^{B)},

^{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)} RCNP 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

A new muon beam channel which provides a high intense muon beam with a continues time structure, MuSIC, is under construction in RCNP, Osaka University. The MuSIC is the first muon beam facility which adopts a pion capture system using a superconducting solenoid magnet. The system can achieve the most effective pion capture efficiency in the world. The muon yield is expected to be $10^8/s$ for positive muons. The construction of the MuSIC apparatus has been started in 2009 JPY and will be finished in five years. A pion capture system and the first 36 degrees of the muon transport solenoid have been already constructed and successfully commissioned. The first beam test was performed at 29-30 July, 2010. This paper overviews the MuSIC project, then reports status and the construction schedule.

核物理研究センターにおける大強度DC ミューオン源 MUSIC の建設状況

1. はじめに

現在、世界では4つのミューオン施設が稼働中である。スイスのPSI研究所、カナダのTRIUMF研究所、英国のRAL、そして、日本のJ-PARC ミューオン施設MUSEである。そして、2009年より、新たにもう一つのミューオン源の建設が大阪大学核物理研究センターで進められている。この大強度DC ミューオン源をMuSICと呼ぶ。ミューオンビーム施設は、利用できるミューオンビームの時間構造がパルスビームであるか連続ビームであるかにより2つに大別でき、どのような研究が展開できるかは、この時間構造に大きく依存する。サイクロトロンを使用するTRIUMFとPSIは連続(DC)ビームであり、シンクロトロン加速器を使用するJ-PARC-MUSEとRALは連続ビームである。MuSICは、核物理研究センターのサイクロトロン加速器を使用するので、ミューオンの時間構造は連続となる。J-PARC-MUSEに加えて、MuSICが稼働することにより、日本はパルスミューオン源とDC ミューオン源を同時に有する唯一の国となる。

表1にJ-PARC-MUSEとMuSICの特徴を比較してまとめた。MuSICの最大の特徴はパイオンとミューオンの生成・収集効率が高いことである。パイオンの生成標的を3.5テスラのソレノイド磁場中に設置することにより、高効率でパイオン・ミューオンを捕獲する。将来の加速器計画であるニュートリノ・ファクトリーやJ-PARCハドロン実験施設で計画されているミューオン・電子転換過程探索実験COMET(J-PARC P21)でも、MuSICと同様の手法によりパイオンを高効率で生成・収集し、大強度ミューオンビームを生成することが検討されている。MuSICは、このパイオン捕獲システムを世界で初めて実現した。このパイオン捕獲システムにより、従来のミューオン施設と比べて1000倍以上の効率でミューオンを生成・捕獲することが可能となり、陽子ビームパワー小さなRCNPの加速器でも、世界のミューオン

施設と同等かそれ以上のミューオンビーム強度が達成される。目標のミューオンビーム強度は $10^8/s$ である。この手法では、同時に使用できるミューオンビームラインは1つのみである。また、ビームサイズが大きく、ミューオンビームの偏極度を稼ぐための措置が必要など、従来のミューオン施設と異なる面もある。

図1はMuSIC全体配置の概念図である。装置全体は、大阪大学核物理研究センターの西実験室内に設置される。図には大強度ミューオンビーム発生装置とそれを使った実験・研究装置の概念図を示してある。ミューオンビーム発生装置部は、「パイオン捕獲部」と「パイオン・ミューオン輸送部」から構成される。ここまでの部分は全て超伝導ソレノイド電磁石で形成される。二次粒子生成標的から後方へ放出されるパイオンとミューオンを最大3.5テスラのソレノイド磁場で捕獲し、湾曲した輸送ソレノイドにより粒子の電荷と運動量を選択しつつ、実験エリアへと輸送する。MuSICで供給されるミューオンビームを使って、荷電レプトン混合現象の探索($\mu \rightarrow eee$)などの素粒子物理学実験、また、原子核、物性、化学の研究、さらにミューオンを使った加速器開発などを実施することを検討している。以下、MuSICの各構成要素の概要と、建設状況、スケジュールについて述べてゆく。

表1: J-PARC-MUSEとMuSICの特徴比較

	MUSE	MuSIC
場所	J-PARC	RCNP
陽子ビームパワー	1000kW	0.4kW
ミューオンビーム強度	$\sim 10^8/s$	$10^7 \sim 10^8/s$
時間構造	パルス (25Hz)	連続
偏極度	高	工夫が必要
ビームライン数	複数本	1本

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

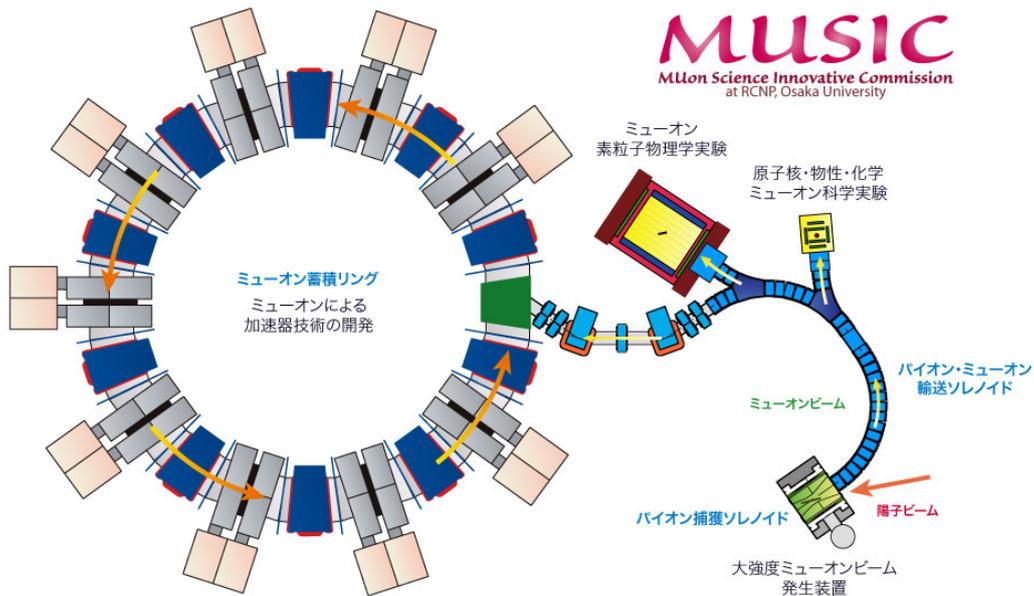


図 1: MuSIC 全体野配置概念図

2. MUSIC 概要

MuSIC は、大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロンから供給される 400MeV の陽子ビームを利用して、大強度 DC ミューオンビームを生成する。計画の第一段階では、陽子ビームの電流値を $1\mu\text{A}$ で運転する。最終的には $5\mu\text{A}$ 程度まで陽子ビームを増強したい計画である。

リングサイクロトロンから取り出された DC 陽子ビームは、新しく改造された陽子ビームライン (WSS コース) により MuSIC のパイオン捕獲部へと導かれる。パイオン捕獲部は、二次粒子生成標的、それを取り巻く SUS 製放射線シールド、大口径超伝導ソレノイドにより構成される。この部分と次の輸送ソレノイドの一部 (36 度まで) は 2009 年度中に完成している。その配置図面を図 2 に示した。また、パイオン捕獲部と輸送部の設計磁場分布を図 3 に示す。

生成標的は直径 4cm、長さ 20cm のグラファイトである。これを捕獲ソレノイド電磁石の中心、3.5 テスラのソレノイド磁場中に設置する。ソレノイドはウォームボアであり、生成標的は陽子ビームパイプとつながる真空中に置かれる。陽子ビーム $1\mu\text{A}$ 時の生成標的への入熱は 100W であるので、輻射による熱の放出で十分に冷却可能である。陽子ビームは、捕獲ソレノイド電磁石の中心軸に対し、水平方向に 22 度の角度をなして、捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドの隙間から入射される。MuSIC は、低エネルギーミューオンを用いる実験に最適化されているため、後方に放出されるパイオン・ミューオンを捕獲する。前方に放出される大量の高エネルギー粒子や標的を通過した陽子ビームはソレノイドへの入熱を避けて、前方下流に設置されてグラファイト製のビームダンプで停止される。生成標的からの放射線による超伝導コイルへの入熱を抑えるために、超伝導コイルの内側に SUS 製の放射線シールドを設置する必要がある。

ある。このため捕獲ソレノイドコイルの内直径 900mm となり、大口径の超伝導ソレノイドとなっている。コイルサポートも含めた捕獲ソレノイド超伝導コイルへの平均的な入熱は、陽子ビーム $1\mu\text{A}$ 時で約 0.6W である。超伝導コイルは、液体ヘリウムを使わず、GM 冷凍機により運転温度 4-6K まで冷却される。

捕獲されたパイオンとミューオンは、約 10 m の長さの輸送ソレノイドにより実験装置へと輸送される。高い輸送効率を実現するために、超伝導コイルの内直径は 480mm、ビームパイプの内直径で 360mm の湾曲型超伝導ソレノイド輸送ラインとなっている。この部分の重要な役割は、粒子の電荷と運動量を選択し、高純度のミューオンビームに加工することである。湾曲したソレノイドビームチャンネル中を粒子が進むと、湾曲面の法線方向に粒子がドリフトすることが知られている。このドリフトの向きと大きさは、粒子の電荷と運動量の大きさなどによる。さらに、ドリフト方向を平行成分の補正磁場を加え、その向きと大きさを調節することにより、輸送する粒子の電荷と運動量を選択することが可能である。輸送ソレノイド部の 2 テスラのソレノイド磁場、補正磁場強度は最大で 0.04 テスラである。補正磁場と運動量選択の関係は、後述する。

MuSIC の輸送ソレノイド最終でデザインでは、回転半径 3 m で 180 度の湾曲ソレノイドを建設する計画である。2009 年度には、図 6 に示したように、試作機的な意味合いも含めて、36 度分の輸送ソレノイドを 2 台のソレノイド電磁石で実現している。

シミュレーション計算から予想される MuSIC ミューオンビームの性質について説明する。陽子ビームのエネルギーは 400MeV とし、グラファイト標的と陽子ビームの相互作用に MARS[3] を、その後の粒子トラッキングには G4Beamline[4] を用いて計算を行った結果である。図 2 に示すように MuSIC の輸送ソレノイド 180 度分の出口まで計算に組み込んでおり、輸送ソレノイド終端で

のミュオン性質について、見てゆくことにする。ここで紹介する結果は、MuSICで実現可能なビームの一例に過ぎない。実際には、実験の内容によってビームへの要求が異なるので、DCセパレーターやコリメーターなどを駆使して、ビーム性質を各実験に最適化する必要がある。ここで示すシミュレーションでは、DCセパレーターとコリメーターを一切使っていない、ミュオンのビーム強度が重要である素粒子実験向けのビーム設定例である。

前述のように、ミュオンビームの性質は、補正磁場の設定に依存する。まず、図4は典型的な設定である補正磁場0.04テスラの場合のミュオンの運動量分布である。補正磁場の向きを反転させることにより、ミュオンの電荷を選択することができる。ミュオンの電荷に依らず、運動量の中心値は約40MeV/c、運動量広がりには $\pm 15\text{MeV}/c$ 程度である。予想されるミュオン収量は、陽子ビーム $1\mu\text{A}$ の場合で、正電荷ミュオンの場合で $8 \times 10^8/\text{秒}$ 、負電荷ミュオンの場合で $2 \times 10^8/\text{秒}$ 。この計算を信じると、世界最高強度のミュオンビーム生成施設となる。陽子ビーム電流値を $5\mu\text{A}$ に増強すれば、正電荷ミュオンで $4 \times 10^9/\text{秒}$ の強度である。

次に、正電荷ミュオンについて、補正磁場を0テスラ、0.04テスラ、0.08テスラと変化させた場合の運動量分布の変化、運動量の中心値、ミュオン収量について、図5に示した。補正磁場を0.07テスラまで上げることによって、ミュオン蓄積リングの開発に適した運動量70MeV/cのミュオンビームを供給することも可能である。



図2: シミュレーションのセットアップ

3. 現状とスケジュール

MuSIC建設は2009年度からの5年間で行う計画である。2009年度には、パイオン捕獲部とパイオン・ミュオン輸送部36度分を建設し、その後の4ヶ月で、周辺機器の整備とシステムのコミッショニングを完了した。そして、2010年7月29日と30日の二日間、MuSIC最初のビームタイムを頂き、MuSICで生成される2次粒子をプラスチックシンチレーターや半導体検出器などで観測した。図6は2009年度中に建設した部分の配置図、図7はビームタイム直後のMuSIC現場の写真である。現段階では、輸送ソレノイド部が36度分しか建

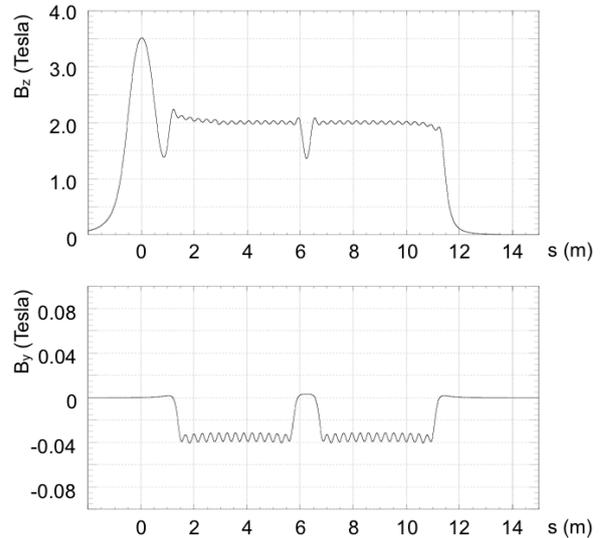


図3: パイオン捕獲部とパイオン・ミュオン輸送部の磁場形状

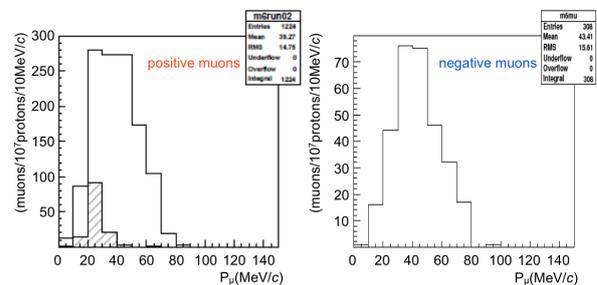


図4: 補正磁場0.04テスラの場合のミュオン運動量分布。(左)正電荷ミュオン、(右)負電荷ミュオン。正負で補正磁場の方向を逆転している。

設されていないため、輸送ソレノイド端部における二次粒子の種類は、多岐に及ぶことが予想された。ビームサイズが大きく、ソレノイド磁場中で螺旋運動をしている粒子の種類を正しく識別し、ミュオン収量と運動量分布を決定することは、容易ではない。光検出器として、磁場中でも動作するMPPCを用いるなどして、二次粒子の空間分布と強度を測定した。現在、データの解析中である。第二回目のビーム試験を2010年度の冬に行う計画で、ミュオンの寿命やミュオンX線などを測定することにより、ミュオン収量の絶対値を導き出す予定である。

また、MuSIC全体の完成に向けた機器の建設も順次進めてゆく。建設スケジュールは、予算の状況に強く依存するが、順調に行けば、2012年度に180度分の輸送ソレノイドを建設、2013年度に蓄積リングへの入射部分、2014年度にミュオン蓄積リングを完成させた。各段階において、ミュオンビームを利用した科学実験を遂行することも可能である。

参考文献

[1] H.Kobayashi, et al., “リニアック技術研究会論文投稿要領”,

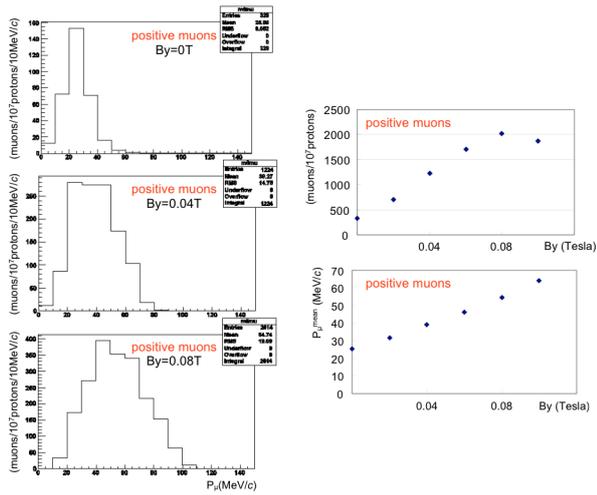


図 5: (左) 補正磁場強度の違いによる正電荷ミューオンの運動量分布変化。(右) 補正磁場強度と運動量中心及び収量の関係。

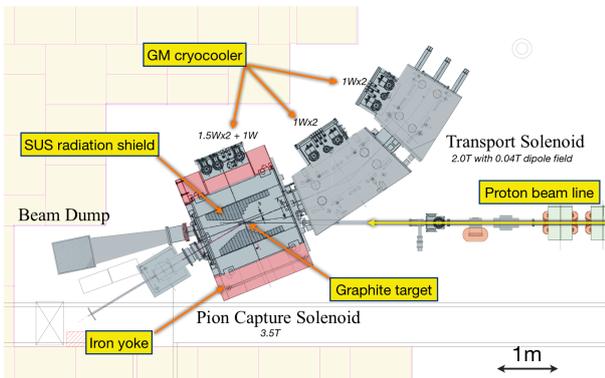


図 6: 2009 年度に建設されたパイオン捕獲部とパイオン・ミューオン輸送部 (36 度分)

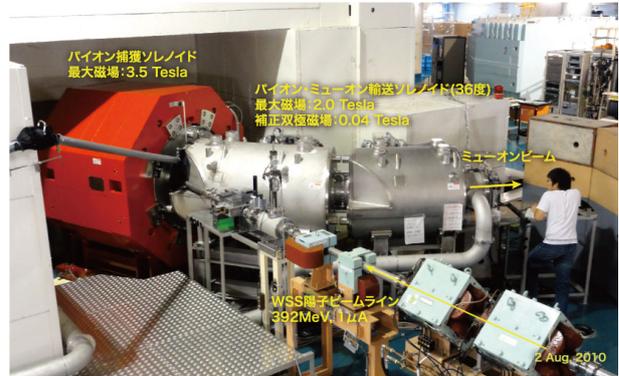


図 7: 2010 年 8 月現在の MuSIC 現場の写真

Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001.

- [2] R. Hajima, "EMITTANCE COMPENSATION IN AN ERL MERGER", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, 2004, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/proceedings.html.
- [3] <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/JACoW/help/help.htm>.