

物性研究のための負ミュオン減速器

NEGATIVE MUON DECELERATOR FOR MATERIAL SCIENCE

大森千広^{*A)}、下村 浩一郎^{A)}、大谷 将司^{A)}、河村 成肇^{A)}、高柳 智弘^{B)}

Chihiro Ohmori^{*A)}, Koichiro Shimomura^{A)}, Masashi Otani^{A)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{B)}

^{A)}KEK/J-PARC

^{B)}JAEA/J-PARC

Abstract

J-PARC の実験施設 MLF ではミュオンビームを用いて物性研究はじめ多彩な研究が行われている。特に正のミュオンを用いたミュオンスピン回転、 μ SR、は磁性や超伝導の研究などの幅広い用途に使われている。この J-PARC ミュオン施設の特徴の一つは世界最高強度の負のパルスミュオンビームである。水素化合物の中の水素の挙動を見るため、世界で初めて負ミュオンを用いた μ^- SR 実験が昨年行われた。正ミュオンが物質内を移動することができるのに対し、負ミュオンは重い原子核の周りにトラップされた状態で付近の水素の核磁場を感じることができる。こうした負ミュオンを用いた物性研究は今後更に発展していくことが予想される。より広範な用途に負のミュオンを活用する際に、研究するサンプルが薄い場合にはよりエネルギーの低いミュオンビームが必要となる。しかしながら、現状の負ミュオンビームは飛行中にパイオンから崩壊した粒子であるためエネルギーは数 100 keV 以上あり、薄いサンプルに適した数 10 keV の粒子を得ることはできない。また負ミュオンは原子核に捕獲されやすいことから、物質を用いて減速できない。ミュオンは短寿命であり効率的な減速が必要になる。このため我々はパルス電源と減速セルを組み合わせたミュオン減速器の検討をおこなった。減速によりミュオンビームはエミッタンスが増加するため、セル間に四極電磁石を設置することで、実験に必要な負ミュオンを得ることができる。

1. はじめに

J-PARC MLF は世界最強のパルス中性子、ミュオン源である。特に負ミュオンは生成に使用される陽子のエネルギーが 3 GeV であるため、生成断面積が他の施設に比べて大きく、MLF 利用において魅力的な性能を実現している。負ミュオンを用いた最初の μ^- SR [1] をはじめ様々な用途に使われ始めている。負ミュオンは原子の軌道内に捕獲され低い順位に遷移する際に放出する特性 X 線を検出することで、微量試料や考古学上貴重な資料の成分分析などにも使われている。また、近年負ミュオンは半導体のソフトエラーにおいても注目されている。これは負ミュオンが原子核に吸収された後に発生する中性子やアルファ線などの半導体にとって影響の大きな粒子のためである。J-PARC では負のミュオンを比較的エネルギーの高い負のパイオンからの崩壊によって得ている。正のミュオンも同様の手法によって得ることができると同時に、物質中で静止した正ミュオンと電子が結び付いたミュオニウムを乖離することで極めて低エネルギーのミュオンを得ることができる (Fig. 1, U-Line)。負ミュオンではこのような手法で低速ミュオンを得ることができないため、Fig. 2 のように実験に使用できる負ミュオンは比較的エネルギーが高く、試験するサンプルとしてはある程度の量が必要となる。これに対し、ミュオンを減速することで、小サンプルに適した負ミュオンビームを得ることが本研究の目的である。Figure 2 に D-Line の負ミュオンの運動量分布を示す。超伝導ソレノイドの

導入により、2016 年以降の負ミュオン強度が約 300 倍増加している。このような十分に強度の増えた負ミュオンを減速して低エネルギー負ミュオンとすることができると考えられる。線形加速器による荷電粒子の減速は CERN AD において RFQ を用いた減速が行われている [2]。また、最近稼働を始めた反陽子減速リング ELENA のビームを半導体パルス電源で駆動する誘導加速技術を用いて減速する試みも検討されている [3]。また、リング加速器においても半導体駆動のパルス電源を用いた加速技術も開発されている [4]。

Figure 2 のように負ミュオンのエネルギーは約 300 keV (= 8 MeV/c) 以上のものがほとんどであり、低エネルギーの負ミュオンは物性実験に用いるには強度が低すぎるといえる。本研究では 300 keV の負ミュオンを 30 keV まで減速するための装置の概念設計について報告する。これは広帯域空洞をパルス電源で駆動し、パルス電圧形状を改善するためにダミー抵抗を付けた構造である。この減速器は MLF の D2 実験エリア (Fig. 1) に設置できる大きさでなければならないため、全長 2~3 m に収める必要がある。

2. 概念設計

崩壊ミュオンのエミッタンスは約 1000π mm-mrad と大きく、減速によって更に増加する。広がったビームをいかにして μ SR 測定装置の中心にあるサンプル標的のところでできるだけ絞込み込む必要がある。オプティクス計算では、減速空洞の間に収束用に四極電磁石を設置し、最適なパラメータを探した。案 1 (Fig. 3) では空洞を 4 セルと 2 セルの 2 空洞に分割している [5]。案 2 (Fig. 4) では 5 セルと 1 セルに変更

* chihiro.ohmori@kek.jp

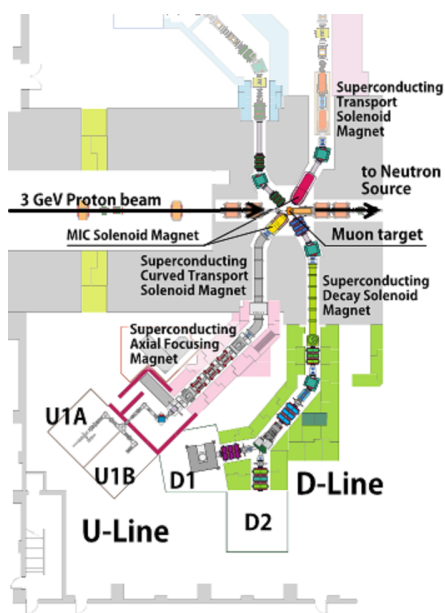


Figure 1: D2 experimental area and beam line.

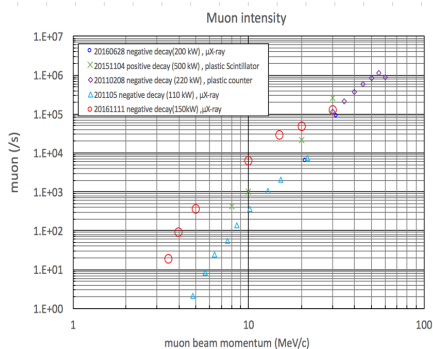


Figure 2: Negative muon intensity at J-PARC MUSE. By the replacement of solenoid magnet in the D-line, the intensity of negative muon increased by 300 times (circles) than before (triangles). We plan to decelerate 8 MeV/c (300 keV) muon to below 30 keV.

している。電源の台数は2台であるが、案2では電圧波形を考慮すると5セルを2セルと3セルに分割し、それぞれ別の電源で駆動することが望ましい。このため、サンプル位置でのビームサイズは案2のほうがより小さくできるが、初期コストは案1が少ない。したがって、最初に案1の配置で実験を開始し、案2にアップグレードできるように装置設計を考えている。

案1では減速装置をできるだけμSR測定装置に近づけることでビームの広がりを減らすことができる(Fig. 3)。負ミュオンのビームサイズは十分に絞ることができるため、比較的大きなサンプルが必要となる。案2では1セルを移動し、μSR測定装置の前の減速空洞を1セルのみにすることで、収束を強化している。四極磁石のところでビームサイズが大きくなる欠点はあるが、サンプル標的のところで28 mm×22 mmまで収束する。Figure 3とFig. 4は計

算コードTRACE3D [6]によって計算された。

本装置ではパルス電圧を変化させることで、減速された負ミュオンのエネルギーを変えることができるため、ミュオンが止まる深さを制御することができる。また、ある程度厚みのあるサンプルの場合、減速する前のミュオンエネルギーを高く選ぶことで、より多くのミュオンを使用することができると同時にミュオンのビームサイズをより小さくできる。

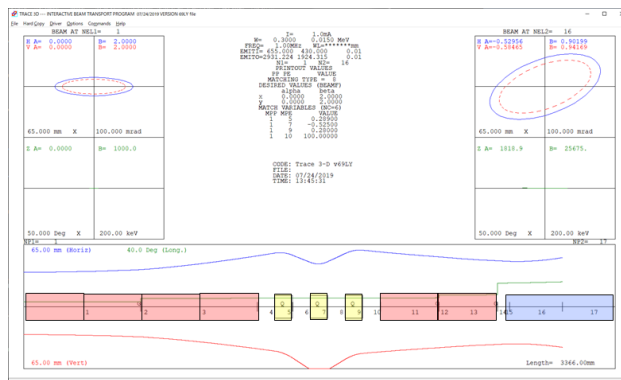


Figure 3: The beam emittance before and after deceleration.

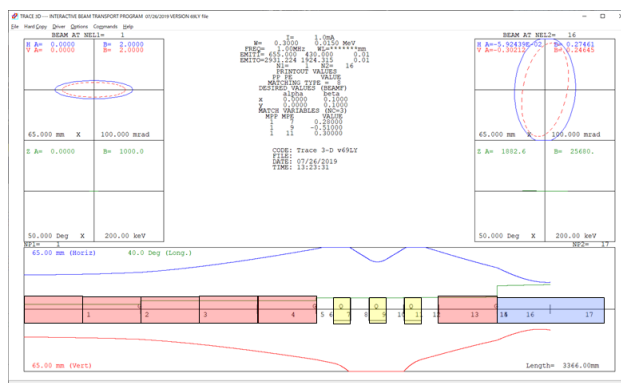


Figure 4: The beam emittance before and after deceleration in case of another option.

Figure 5に案1の場合の装置の概念図を示す。減速装置は減速空洞、ダミーロード、パルス電源および収束装置により構成される。パルス電源は inductive adder [7] または Linear Transformer Drivers, LTD [8] を考えている。

3. 減速空洞

Figure 5のように減速空洞は4セルと2セルの空洞から成る。2つの空洞の間には四極電磁石のトリプレットが設置される。セル当たりの減速電圧は最大50 kVである。それぞれの減速セルにはファインメット FT3L コア [9-12]5枚が設置される。外径500 mm コアのインピーダンスは1 MHzで122 Ω、16 μHである。4セルまたは2セルの空洞セルはシングルエンド構造であり、ブスバーによって連結される。同時に25 Ωのダミーロードに接続される。空洞セル

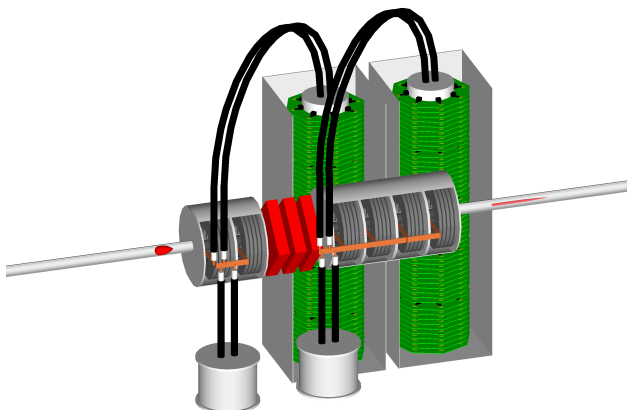


Figure 5: Induction decelerator system.

のインピーダンスはダミー抵抗に比べ大きいため、パルス電源からみた負荷インピーダンスはダミー抵抗が主となる。このため、必要なパルス電流は 2 kA となる。完全にインピーダンス整合の取れた回路ではないため、LTSpice を使った計算では 4 セル空洞の場合で約 3 kV の電圧低下が予想される。この電圧低下は案 2(Fig. 4) の場合より大きくなる。減速電圧パルスのフラットトップ幅は 400 ns であり、ミュオンバンチの幅 200 ns に比べ十分に大きいため、案 (Fig. 4) では電圧低下は問題とはならない。しかしながら、ミュオン 2 バンチを減速する場合、バンチ間の時間は 600 ns あるため、フラットトップ幅は 800 ns 程度必要となり電圧低下が問題となることが予想される。また、この場合、磁性体コアの飽和にも考慮する必要が生じるため、本検討では 1 バンチの減速について主に検討している。飽和の効果について実際の測定が必要であるが、コアの外径を J-PARC 加速器のように 800 mm 程度にすることで緩和できる。Figure 6 に 1 バンチの場合の減速の様子を示す。300 keV での運動量広がり を 1% とし、30 keV のミュオンを得ることができる。

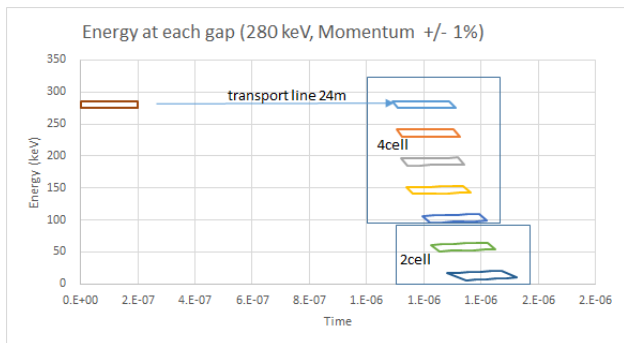


Figure 6: Deceleration through 4-cell and 2-cell cavities.

4. パルス電源

パルス電源は現在 J-PARC RCS で開発の進んでいる LTD 方式を主に検討している。表 1 に LTD 方式

パルス電源のパラメータを示す。Figure 7 に LTD 方式の回路図を示す。LTD 方式では下記モジュールが 1000 V、2 kA のパルスを発生させ、それをトランスコアにより 50 モジュール結合させることで 50 kV のパルスを発生できる。Figure 8 に LTD 回路モジュールを示す。RCS では、取り出し用キッカー電磁石電源をサイクロトロンを用いた方式から LTD 方式に変更するための R&D が進められている [13–15]。

Table 1: Pulse Power Supply

Parameters	Value	unit
Output current	2.0	kA
Max. Voltage	50	kV
Rise/Fall times	200–500	ns
Flat Top	>300	ns
Repetition	25	Hz

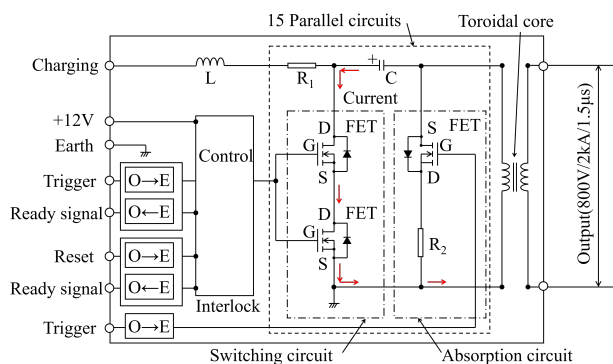


Figure 7: Induction decelerator system.

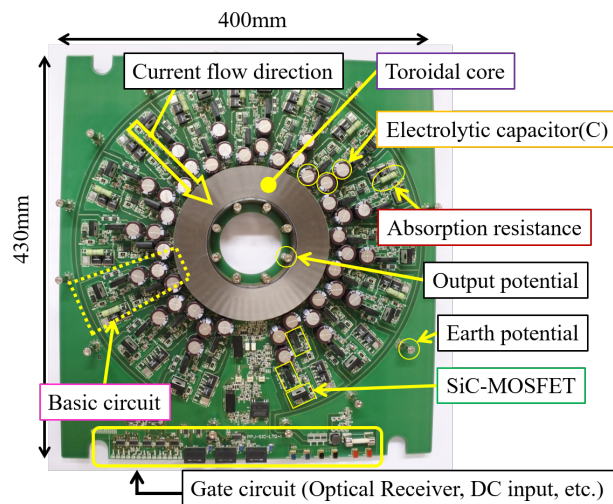


Figure 8: A main LTD module.

5. CONCLUSION

J-PARC MLF のための負ミュオン減速システムについて検討を行った。減速空洞を半導体駆動の LTD

方式などのパルス電源で駆動することで、300 keV のミュオンを 30 keV 以下に減速することができる。四極電磁石の位置を最適化することで、試験サンプル位置でのビームサイズを絞ることができることが分かった。

参考文献

- [1] J. Sugiyama *et al.*, Phys. Rev. Lett. 121, 087202 (2018).
- [2] Y. Bylinsky *et al.*, “RFQD - A DECELERATING RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE FOR THE CERN ANTIPROTON FACILITY”, presented at XX International Linac Conference, Monterey, USA August 21-25, 2000, pp.554–556.
- [3] M. Hori, ASACUSA collaboration.
- [4] T. Iwashita *et al.*, “KEK Digital Accelerator”, Phys. Rev. STAB, vol. 14, 071301 (2011).
- [5] C. Ohmori *et al.*, “Conceptual Design of Negative-Muon Decelerator for Material Science”, presented at the 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’19), Melbourne, Australia, May 2019, pp.610–612.
- [6] K.R. Crandall and D.P. Rusthoi, “TRACE 3-D Documentation”, LA-UR-97-886, May 1997.
- [7] J. Holma and M. J. Barnes, “Preliminary Design of an Inductive Adder for CLIC Damping Rings”, in *Proc. 2nd Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’11)*, San Sebastian, Spain, Sep. 2011, paper THPO032, pp. 3409–3411.
- [8] W. Jiang *et al.*, “Pulsed Power Generation by Solid-State LTD”, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 42, NO. 11, NOVEMBER 2014.
- [9] C. Ohmori *et al.*, “Development of a high gradient rf system using a nanocrystalline soft magnetic alloy”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 16, no. 11, p. 112002, Nov 2013.
- [10] Y. Yoshizawa, S. Oguma and Y. Yamauchi, J. Appl. Phys., **64**, 6044(1988).
- [11] 高エネルギーニュース, “陽子の加速から電車の加速へ”, Vol.38 No.1 2019/04.05.06.
- [12] J-PARC 季刊誌, “加速空洞を知る”, No. 10(2017).
- [13] T. Takayanagi *et al.*, “Development of a New Pulsed Power Supply with the SiC-MOSFET”, in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp. 3412–3414; doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA063
- [14] T. Takayanagi, K. Horino, and T. Ueno, “Development of a New Modular Switch Using a Next-Generation Semiconductor”, in *Proc. 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’18)*, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 3841–3844; doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL082
- [15] T. Takayanagi, K. Horino, and T. Ueno, “Development of Low Inductance Circuit for Radially Symmetric Circuit”, presented at the 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’19), Melbourne, Australia, May 2019, pp.2013–2016.