

J-PARC 核破砕中性子源における非線形ビーム光学を用いた ビーム拡大システムの開発

DEVELOPMENT OF BEAM EXPANDER SYSTEM USING NON-LINEAR BEAM OPTICS AT J-PARC SPALLATION NEUTRON SOURCE

明午 伸一郎^{*A)}、大井 元貴^{A)}、坪 敦^{A)}、池崎 清美^{A)}、藤森 寛^{B)}
Shin-ichiro Meigo^{*A)}, Motoki Ooi^{A)}, Atsushi Akutsu^{A)}, Kiyomi Ikezaki^{A)} and Hiroshi Fujimori^{B)},

^{A)}J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Shirakata Shirane 2-4, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}J-PARC center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In the Japanese Spallation Neutron Source (JSNS) of Japanese Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), proton beam with a high power such as 1 MW is induced to the target consisted of mercury. As increasing in the beam power, the damage of the target becomes serious. Especially for a target for high power short pulse spallation neutron source, the damage due to the proton beam on the target vessel for liquid metal target such as mercury is reported to be proportional of 4th power of the peak intensity of the proton beam. Reduction of the peak current density at the target is a key for a constant beam operation. For reduction of the peak current density, a non-linear beam optics using octupole magnets has been developed. In order to achieve completely flat distribution, higher order magnets than the octupole are required. It was found that a considerable flat distribution can be obtained by only using octupole magnets with reduction of the magnetic field. By using the present beam expander system, the peak current density can be reduced as much as 40 %, which mitigates 90 % of the pitting damage at the target.

1. 序論

J-PARC^[1]では早い繰返し(25 Hz)の3GeVのシンクロトロン(RCS)から出射する1MWの大強度の陽子ビームを物質・生命科学実験施設(MLF)内の核破砕中性子源(JSNS)及びミュオン施設(MUSE)のターゲットに入射し、中性子およびミュオンビームを利用した様々な研究を行っている。RCSからMLF内部における全体的な配置をFig. 1に示す。MLFでは陽子ビームを有効的に利用するために、ミュオン生成および中性子生成ターゲットをカスケード状に配置している。それぞれのターゲットは約33m離れており、3GeV陽子ビームは厚さ2cmの炭素グラファイトターゲットを透過した後に水銀ターゲットに導入される。

2012年の夏より0.3MWの運転を開始し、パルスあたりの中性子強度はオークリッジ国立研究所(ORNL)内の核破砕中性子源(SNS)を超え世界最大強度となった。2013年にLINACからRCSへ入射するエネルギーを0.181 GeVから0.4 GeVに増加し、さらに2014年からピーク電流を50 mAに増加しゴールとなる1 MWの運転を目指す。

数 μ s程度の短時間パルスの大強度ビームを水銀等の液体金属のターゲットに入射する場合には、最近の研究^[2,3]でターゲット容器に著しいピッチング損傷を与えることが明らかになってきた。このピッチング損傷はターゲットにおける陽子ビームのピーク電流密度の4乗に比例することがわかり(P4則と呼ぶ)、大強度の中性子源を安定かつ計画的に運転するためにはピーク密度を下げることは肝要となる。実際の運転において、SNSやJSNSの使用後のターゲットには著しいピッチ

ング損傷が発見され、ピーク密度の減少が重要な課題となる。

ビームのピーク密度を減少させるためには、通常の線形ビーム光学を用いる場合には四極電磁石の磁場を変更しターゲット上でビームを広げる方法が考えられる。この場合にビームを広げることにより、ターゲット周辺部の遮蔽体等にビームが入射するために発熱量が上昇するために困難が伴う。ターゲット周辺部ではターゲットや陽子ビーム窓から生成する二次粒子(主に中性子)の核発熱により、1 W/cc程度の発熱が生じる。このため設計においてこの値を許容値とする。線形光学のみでビームを調整する場合において、水銀ターゲットにおける電流密度のピーク値は $8.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ となり、ターゲット内で生じるパルス当りの発熱密度のピークは14 J/cc/pulseが下限となる^[4]。このピーク密度の値は既に1MW運転を行っているSNSの水銀ターゲットの約2倍の値となっており、標的の容器においてかなりの損傷が発生している現状を考慮すると、さらにピーク密度を下げる事が望まれる。

電流密度を均一にしターゲットのビームの損傷を防ぐためには、ターゲット上でのビームの位置をパルス電磁石等を用いて振り、時間平均的に均一な分布を持つラスタリングの方法が考えられる。しかしながら、この方法ではピッチング損傷を低く抑えることはできない。八極電磁石を用いてビームをショット毎に平坦化する場合の損傷を初めに考えてみる。1ショット当たりの陽子の数を C 、ターゲット面積を S_1 とすると、ピッチング損傷(D_1)は、

$$D_1 = \int C^4/S_1^4 dt \quad (1)$$

* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

となる。一方、ビームを振って時間的に均一にするラスタリングの場合には、ピッチング損傷 (D_2) は、

$$D_2 = \int (C/S_2)^4 P dt \quad (2)$$

となる。ここで S_2 は1ショット当たりのビームの面積で便宜上小面積で平坦なものと仮定する、 P は単位時間あたりにビームがある場所にある確率であり、ビームが均一に塗りつぶされるためには、

$$P = S_2/S_1 \quad (3)$$

となる。これよりラスタリングの損傷は

$$D_2 = \int C^4 (S_2/S_1)^3 dt \quad (4)$$

となり、ラスタリングの場合のピッチング損傷は均一なビームの比 $(S_2/S_1)^3$ 倍となり、つまりターゲット面積に対するラスタリングビームの面積の3乗に比例する。このようにラスタリングはピッチング損傷の緩和には全く意味をなさないの、1ショット当たりでビームを平坦化する技術開発が必要となる。そこで本研究では非線形のビームオプティクスに着目し、八極電磁石を用いたビーム平坦化技術の開発を行った。本稿では八極電磁石の設置や結果を報告する。

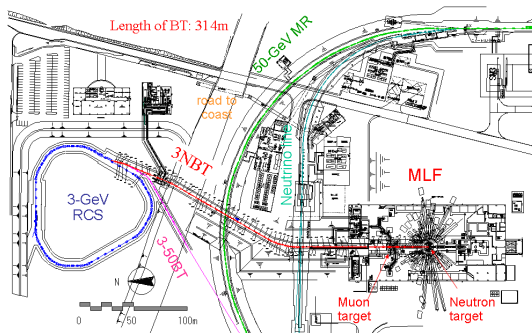


Figure 1: Plan of Rapid Cycling Synchrotron (RCS) and Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at J-PARC.

2. 非線形オプティクスの設計

RCS から出射するビームの分布は、位相空間においてガウス分布^[5] となっている。線形オプティクスを使用する限りは、実空間の分布は任意の場所でガウス形状となる。非線形のオプティクスによる平坦化は高次の磁場により位相空間の分布を楕円から変形させビーム周辺部を中心部に叩き込むようにするのが原理である。平坦化をそれぞれ水平および垂直方向に行うためにはそれぞれ1方向に1台以上の八極以上の多極の磁場が必要となる。

非線形によるオプティクスではエミッタンスを増大させるためにビームロスの検討が必要となる。J-PARC のように大強度のビームラインでは僅かなエミッタンスの増加も大きなビームロスとなる可能性がある。M2 セクションと呼ばれるミュオンターゲットの周辺部はビーム

とターゲットとの相互作用によるビームロスが8%程度の見込まれており、遮蔽やメンテナンスシナリオにおいてこのビームロスを見込んだ設計となっている。

J-PARC の機器設計を開始した当初ではミュオン標的の下流部に八極電磁石を設置する事も考慮したが、ビームの位置の変異によりターゲット周辺にピークを生じることを懸念し設置を見送った。その後実際運転において、パルス毎のビーム位置が安定していることやビームの特性について理解が進んでいることより十分に可能であると判断した。

3. ビーム光学

3.1 八極電磁石の磁場

J-PARC の RCS から出射するビームは位相空間上で綺麗なガウス分布^[5] となり、任意の場所において実空間でもガウス分布となる。位相空間上でガウス分布をなす場合にターゲット上で厳密に平坦な分布のビームを得るためには八極のみならず高次の磁場が必要となる^[6]。必要な多極電磁石の磁場は、

$$K'_{2n}L = \frac{(n-2)!}{(n/2-1)!} \frac{(-1)^{n/2}}{(2\epsilon\beta)^{n/2-1}} \frac{1}{\beta \tan \phi} \quad (n=4,6,8,\dots) \quad (5)$$

となる。ここで八極電磁石のみについて着目すると、

$$K'_8L = 1/\epsilon\beta^2 \tan \phi \quad (6)$$

となる。式において K'_8L は八極電磁石の磁場強度 ($/m^3$)、 L は電磁石の磁極長、 ϵ は RMS ビームエミッタンス (π mm mrad)、 β は八極電磁石における β 関数、 ϕ は八極電磁石とターゲット間の位相進行差を示す。上式では八極以外に十二極電磁石 K'_{12} 無しには平坦な分布とならず周辺部においてピークを生じる分布となる^[6,7]。このピークは低エネルギーや大強度でない加速器施設ではコリメータ等で取り除けるため大きな問題とならないが、JSNS のように大強度の核破砕中性子源において、周辺部のピークは逆に負荷が増大するために望ましくなく、周辺部のピークを取り除くのは困難である。また十二極電磁石は更に高い磁場を必要とされるので、エネルギーが比較的高い加速器施設では用いるのが困難となるため、本研究では八極電磁石のみで対応する方法を考える。

本ビーム拡大システムでは非線形光学により周辺部のビームを中心方向に曲げ平坦な分布を得る。中心部の分布は多重極では殆ど変化しないが、この中心部の分布と周辺部の分布の重ったところにピークが発生し、これが問題となる。直感的に考えて見ると八極電磁石の磁場強度を減少させることによりピークを減少させられると予想される。八極磁場を調整を検討するために、位相空間上で粒子が一樣に分布する場合^[8] を考慮する。この場合にでも多極の電磁石が必要とされるが、一樣分布の場合において必要な八極電磁石の磁場は以下の様になる、

$$K''_8L = \cos^3 \phi / 12\epsilon\beta^2 \sin \phi \quad (7)$$

K''_8 は位相空間上で一樣に分布する場合に必要な八極電磁石の磁場を示す。位相空間で一樣な分布の場合にはプ

ロファイルはパラボラ形状となるが、実際のビームは位相空間上でガウス分布となり、式(7)の解では磁場強度が不足するために実空間で平坦な分布とならない。ここでそこで式(6)と式(7)の中間状態を考慮してみると、周辺部のエッジを抑えながらも平坦となることが予想される。

$$K_8 = (K'_8 + K''_8)/2 \quad (8)$$

上式におけるターゲットにおけるビームのプロファイルを図2に示す。周辺部のエッジは式(6)の場合より鈍るものの、周辺部の盛り上がりを避けることができるため望ましいビーム形状となる。この方法により八極電磁石の磁場を最適化できるようになった。

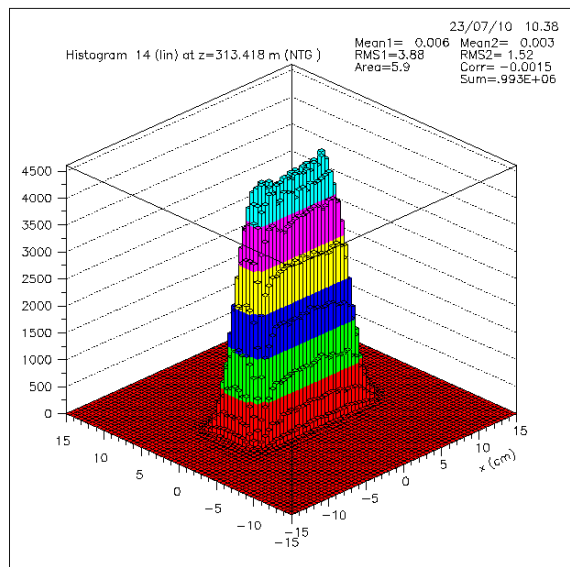


Figure 2: Flat beam distribution at the mercury target expanded with octupole magnets without beam scattering effect at the muon production target.

3.2 八極電磁石を用いたビーム平坦化システム

Fig. 3に八極電磁石を用いる場合の陽子ビーム輸送ライン全体のオプティクスと、RCSの出口を基点とする水銀ターゲットまでの β 関数の振舞いを示す。ビームの平坦化のためには式(6), (7)で示されるように八極電磁石に必要な磁場は β 関数の逆数の二乗に比例する。本研究では比較的高いエネルギーの3 GeVの陽子ビームを取扱うために大きなKを得ることは困難である。大強度のビームを取扱い大きなエミッタンスのビームを受け入れる必要があるために、単純に電磁石の口径を小さくすることは難しい。

本検討では八極電磁石で β 関数を大きくして対応することとした。八極電磁石付近の電磁石の口径は直径で300 mmとしており、 β 関数を大きくし過ぎるとアクセプタンスが小さくなり重大なビームロスを生じることとなる。今までの線形ビーム光学の場合ではアクセプタンスを大きくするために、 β 関数を40 m以下に抑え、アクセプタンスはRCS内に設置したコリメータの口径で決定された $324 \pi \text{ mm mrad}$ 以上を持つようにした。最近のシミュレーション^[9]や実測データはアクセ

プタンスを $250 \pi \text{ mm mrad}$ 程度に減少しても殆どビーム損失が起らない可能性を示している。そこで本検討ではアクセプタンスを $250 \pi \text{ mm mrad}$ とし、 β 関数を200 mと大きくした。

八極電磁石の励磁により位相空間の分布が二次元のガウス関数で表される楕円から変形するためにエミッタンスは増大する。このために、八極電磁石下流側のビームロスを考慮すると、八極電磁石の励磁量は可能な限り小さくする方が望ましい。式(6), (7)では励磁量は $1/\tan \phi$ となるので位相進行差 ϕ が $1/\tan \phi = 0$ に近づくのが望ましい。厳密にゼロとなる場合には平坦とならないが、ゼロに近づくように位相進行を調整する。

本検討におけるターゲット上でビーム分布は矩形となるのが望ましい。RCSから出射するビームにおいて水平と垂直の結合は観測されておらず、ターゲット上においても水平と垂直方向は独立した分布となるが理想である。そこでオプティクスでは水平方向に β 関数を大きくした場合には、垂直方向に対して小さくするようにした。

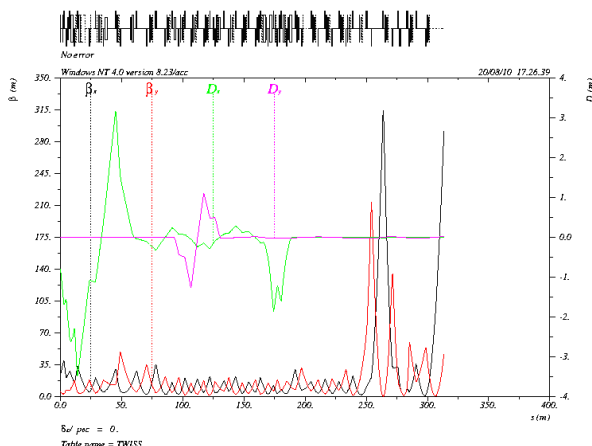


Figure 3: Beam optics and beta function for beam flat expander with the octupole magnets.

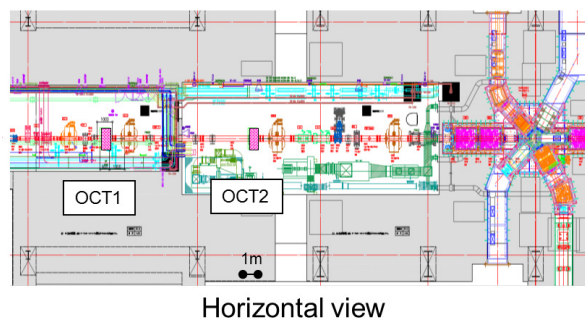


Figure 4: Plan of octupole magnets for beam expander system, where is placed upstream of the muon production target.

3.3 ビーム特性の計算

中性子源ターゲットにおけるビームプロファイルを得るために PSI^[10] で改良された DECAY-TURTLE^[11] を用いて計算した。PSI の改良により八極電磁石の磁場とミュオンターゲットによるビーム散乱の影響を考慮したビーム特性の計算が可能になった。ビーム散乱のパラメータは REVMOC コード^[12] により得られたパラメータを基に Moliere モデルで計算した。

4. ビーム拡大システムの導入と特性評価

4.1 八極電磁石の設置

ビーム光学の設計に従って八極電磁石を 2 台製作した。製作した八極電磁石を Fig. 5 に示す。八極電磁石の詳細は藤森氏により別途報告^[13] がされているので本報では簡略化する。八極電磁石の磁場勾配は 800T/m^3 でボア直径は 0.3 m で磁極長 0.6 m とした。八極電磁石においてビーム位置を中心にするのが重要であるが、これを行うためにビーム位置モニター (BPM) を製作し、それぞれの八極電磁石に設置した。



Figure 5: Fabricated octupole magnet with field gradient of 800 T/m^3 .

八極電磁石は昨年 (2013 年) の秋に設置した。垂直用の OCT1 は 3NBT トンネル内に設置し、水平用の OCT2 は M1 トンネル内に設置した。M1 トンネル内に設置するためには、上部の遮蔽ブロックを開放し MLF の建屋上部から設置する必要があった。設置場所上部の遮蔽ブロックは建設してから一度も開放しなかった。さらに震災の影響でブロックが一方に偏ってしまったために、ブロックの隙間が殆どなくなってしまい開放するのに手間がかかったが問題なく設置することができた。その後レーザートラッカーを用いた精密なアライメントを行った。

八極電磁石の極性は式 (6), (7) の様に位相進行差で決定されユニークにはならないため、必要に応じ反転する必要が生じる場合もある。上流側のビーム光学の自由度を持たせることを考慮し、八極電磁石の電源は両極性 (バイポーラー) とした。

4.2 実験と計算によるビームプロファイルの比較

八極電磁石の励磁に伴うビームプロファイルへの影響を実際に測定した。測定は 2014 年 2 月に 0.3 MW のビームを用いて行った。水銀ターゲットから 1.8 m 上流には加速器の真空領域とターゲット周辺のヘリウム領域を分離する陽子ビーム窓^[14] があるが、この陽子ビーム窓にはマルチワイヤープロファイルモニター (MWPM) が設置している。このモニターを用いてビームプロファイルを測定した。また陽子ビーム窓にはターゲット周辺部に入射するビーム強度を測定するためのビームハローモニターが設置してあり、周辺部のビーム強度の測定を行った。

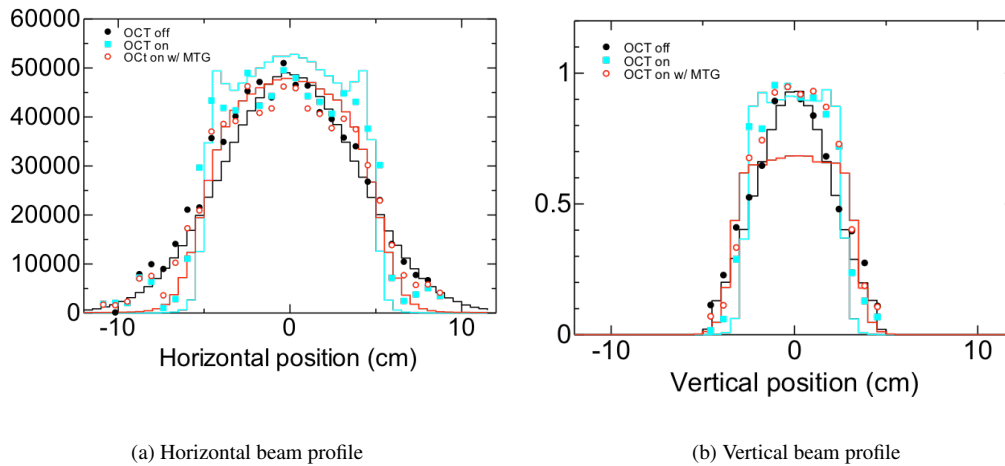
実験と計算の比較を Fig. 6 に示す。図中で実験値は全て丸印で示し、計算値は線で示す。初めに線形光学を用い、八極電磁石を励磁しない場合 (実験: 黒丸、計算: 黒線) において、計算と実験とが一致するように計算のビームエミッタンスの RMS を決定し、さらに縦軸に記載する強度が一致するように規格化した。八極電磁石の励磁する場合において (実験: シアン色の丸、計算: シアン色線)、若干の違いはあるものの実験と計算は良い一致を示すことが分かった。特に水平分布の裾野が縮小することが観測されている。ビームハローモニターの計測結果も八極電磁石の励磁により周辺部の強度が減少できていることが観測された。システムの試験のために、5 分程度の短時間の 25 Hz の連続運転を行ったところ、八極電磁石により発熱密度が大幅に減少できたことが確認された。連続運転中に水銀ターゲット周辺の放射線量も同時に測定したところ、八極電磁石の励磁に伴う線量の低下が確認された。これはビームハローモニターで計測された事と同一で周辺部のビームを高次の磁場により中心部に収斂したことによる。

八極電磁石を励磁した状態でミュオン生成ターゲットをビームに照射する場合における実験と計算の比較も Fig. 6 に比較する (実験: 赤丸、計算: 赤線)。計算結果はガウス形状に近づくが実験値は平坦な分布となっていることが判明した。この原因は調査中であるが、主にミュオンターゲットでの多重散乱の取扱いに起因するものと考えられる。実験の結果は平坦な分布を維持していることから、実際のビームは本検討の計算よりもさらにピーク電流は減少できると考えられる。

4.3 1MW 運転時のビームプロファイル

1MW 運転時にはビームエミッタンスが異なるので、RCS シミュレーション結果に基づきビームプロファイルの計算を行った。Fig. 7 にターゲットにおけるビームプロファイルの結果を示す。図における黒線は線形ビーム光学において一番ビームを広げた場合の結果を示す。周辺部のビーム強度は水平、垂直方向において中心より 10 cm , 5 cm よりそれぞれ外側において線形光学の結果 (黒線) より強度を弱くする必要がある。赤線は本システムを用いた場合の結果の一例であるが、ピーク強度を約 30% 減少できることが示され、これによりターゲットのパルスあたりの発熱密度は 11 J/cc/pulse 程度とすることができる。

前節で議論したように本計算はミュオンターゲット上での散乱を過大に評価しており、実際には散乱後でも平坦な分布を維持していることがわかった。この原因は今

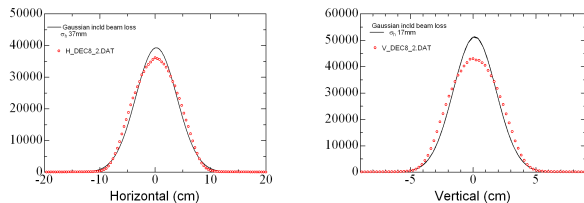


(a) Horizontal beam profile

(b) Vertical beam profile

Figure 6: Beam profile obtained by the MWPM (dots) compared with the calculations of DECAY-TURTLE (lines) for the result without excitation of octupole (black), with excitation of octupole (cyan) and with excitation of octupole and irradiation on the muon production target (red).

後解明する必要があるものの、ピーク密度を約 40% 減少できる見込みとなり、ターゲットのピッチング損傷を約 90% 減少できる見込みと思われる。



(a) Horizontal beam profile

(b) Vertical beam profile

Figure 7: Comparison of beam profile with linear optics (line) and with nonlinear optics with octupole magnets (red circle).

5. 結論

核破砕ターゲットである水銀ターゲットにおけるビームのピーク密度を減少させるために非線形ビーム光学を用いたビーム拡大システムについて開発した。厳密な平坦な分布を得るためには十二極以上の高次の磁場が必要であるが、八極電磁石のみで平坦な分布を得る解について検討した。多数の高次の磁場を用いて位相空間上でガウス分布の場合と同様分布する場合に平坦分布を得るために必要とされる八極電磁石のそれぞれの磁場の中間値を用いることで、位相空間上でガウス分布の場合には八極電磁石のみで実空間上で平坦な分布が得られることがわかった。シミュレーションにより八極電磁石で大きな β 関数を持つ事と八極電磁石とターゲット間で適切な位相進行差を持つ事によりターゲット上で平坦な分布を持つことわかった。

評価計算より八極電磁石を製作し陽子ビーム輸送ラインに設置した。0.3MW のビーム試験を行った結果、八極電磁石の励磁によるビーム形状は計算と良い一致を示し設計計算通りにビームプロファイルは制御でき、ターゲット周辺部のビームが中心に収斂できることが確認された。周辺部のビームを中心に収斂することにより、ビームハローの強度やターゲットのビーム入射部付近の放射線量が減少できることが確認された。以上から、本システムにより線形光学のみを使用する場合に比べ、ピーク密度を約 40% 減少でき、ターゲットのピッチング損傷は約 90% 減少できる見込みとなった。本システムは MW クラスの大強度陽子加速器において世界で最初の試みとなる。

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, JAERI-Tech 99-56, 1999.
- [2] M. Futakawa, et al., J. Nucl. Sci. Technol.40 (2004) 895.
- [3] M. Futakawa, et al., J. Nucl. Matter.343 (2005) 70.
- [4] S. Meigo, et al., MOPEB066, IPAC10 (2010)
- [5] S. Meigo, et al., Nucl. Instrum. Meth. A562, 569 (2006)
- [6] Y. Yuri, et al., Phys Rev ST Accel. Beams 10, 10401 (2007).
- [7] N. Tsoupas, et al., Phys Rev ST Accel. Beams 10, 024701 (2007).
- [8] F. Meot and T. Aniel, Nucl. Instrum. Meth. A 379, 196 (1996).
- [9] H. Hotchi, et al., THPPP080, IPAC12 (2012)
- [10] PSI Graphic Turtle Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version
- [11] K.L. Brown, Ch. Iselin and D.C. Carey: Decay Turtle, CERN 74-2 (1974)
- [12] C. Kost, P. Reeve: REVMOC - A Monte Carlo Beam Transport Program, TRI-DN-82-28 (1983).
- [13] H. Fujimori, et al., SAP066, 加速器学会 年会 (2014)
- [14] S. Meigo, et al., J. Nucl. Matter. 450, 141 (2014)