

DEVELOPMENT OF BEAM FLATTENING SYSTEM USING NON-LINEAR BEAM OPTICS AT J-PARC/JSNS

Shin-ichiro Meigo*^{A)}, Hiroshi Fujimori^{B)}, Motoki Ooi^{A)}, Shinichi Sakamoto^{A)} and Masatoshi Futakawa^{A)}

^{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

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 intensity is important for the beam injection system. At the JSNS, beam profile can be described by the clear Gaussian functions. To reduce peak intensity, we have developed a beam transport system by non-linear beam optics using octupole magnets.

J-PARC/JSNS における非線形ビームオプティクスを用いた ビーム平坦化技術の開発

1. 序論

J-PARC^[1] では 25Hz の早い繰返しのシンクロトロン (RCS) から出射した 3GeV の 1 MW 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図 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はカスケード状に配置されている。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。

東日本大震災等の困難を乗り越え、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 ORNL の核破砕中性子源 (SNS) を超え世界最大強度となった。2013 年には 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 LINAC からのピーク電流も増大しゴールとなる 1 MW の運転を行う。

最近の研究^[2, 3] により、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、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。さらにこの損傷はターゲットにおける陽子ビームのピーク密度の 4 乗に比例することがわかってきたので、大強度の中性子源を安定かつ計画的に運転する上で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 ではターゲットの著しいピッチング損傷が発見されており大強度の核破砕中性子源を安定した状態で運転するためにはピークの減少化が重要な課題となる。さらに J-PARC ではマイナーアクチノイド (MA) を短半減期に変換する核変換施設の建設も計画している。核変換施設

設では鉛ビスマスをターゲット材料として使用するが、ターゲット容器の健全性を保つためにもピークの減少化が重要な鍵となる。

ビームのピーク密度を減少させるためには、単純に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ことが簡単で効率的な方法ではある。しかし実際には遮蔽体等のターゲット周辺部にビームが入射し発熱するために困難である。ターゲット周辺部における発熱密度は 1 W/cc が実際の限界であり、これを許容範囲内で線形オプティクスのみで調整すると水銀ターゲットにおけるパルス当りのピーク発熱密度は 14 J/cc/pulse が下限となる^[8]。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、さらに密度を下げる事が望まれる。

そこで我々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、多重極電磁石を使用した非線形オプティクスの原理及びミスアライメントの影響などについて検討を行う。

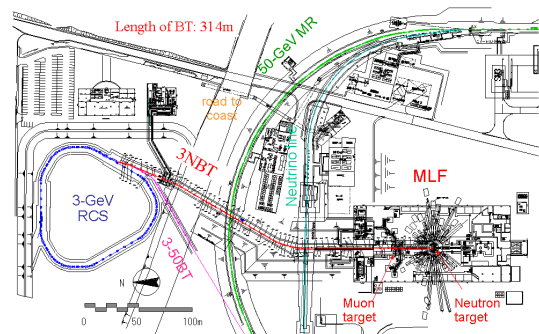


図 1: J-PARC における RCS と物質・生命科学実験施設 (MLF) の配置

* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

2. 非線形オプティクス設計

RCS から出射するビームは位相空間において楕円状のガウス分布^[7]となっている。この場合に線形オプティクスを使用している限りは、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につながる可能性がある。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ターゲットとビームの相互作用による8%程度のビームロスが見込まれており、遮蔽やメンテナンスもある程度のビームロスを見込んだ設計となっている。

当初の予定ではM2トンネル内に八極電磁石を設置する事も考慮したが、後述のようにビームのオフセットにより周辺付近にピークを生じるために設置することを躊躇した。その後実際運転において、パルス毎のビーム位置のバラつきが小さいことやビームの特性について理解が進んでいることなどにより十分に可能であると判断した。

3. ビームオプティクス

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においてガウス分布となる^[7]。位相空間でガウス分布をなす場合には Yuri 等^[4]によりターゲット上で平坦となるビームを得るために必要とされる多極電磁石の磁場は次式の通りとなる。

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

八極電磁石のみについて着目すると、

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

ここで 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 はビームエミッタンスの RMS (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} (dodecapole) 等が無いと平坦な分布とならず、ビーム周辺部においてピークを生じる^[4, 6]。低エネルギーやビームが大強度でない加速器では周辺部のピークはコリメータ等で取り除けるのであまり問題にならないかもしれないが、JSNS のように大強度の核破砕中性子源において、周辺部のピークはターゲットの材料に対する負荷が逆に増大するので避けるのが望ましい。

多重極によるビーム平坦化の原理は周辺部のビームを中心方向に曲げることである。中心部の分布は多重極では変更できないが、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する。従って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

ることが原理的には可能である。八極の磁場をどの程度に調整すればよいのか、位相空間で一様に分布する場合を参考に考察する。一様分布の場合には必要とされる八極電磁石の磁場は以下の式^[5]で表される。

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

K''_8L は位相空間で一様に分布する場合に必要とされる八極電磁石の磁場を示す。位相空間でガウス分布となる実際の場合において、上式では八極電磁石の磁場強度が不足し平坦な分布とはならない。そこで式(2)と式(3)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。

$$K_8 = (K'_8 + K''_8) / 2 \quad (4)$$

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(2)の場合より鈍るものの、周辺部にピークは無く平坦な分布となっており、ターゲットの損傷を防ぐために望ましいビーム形状となる。

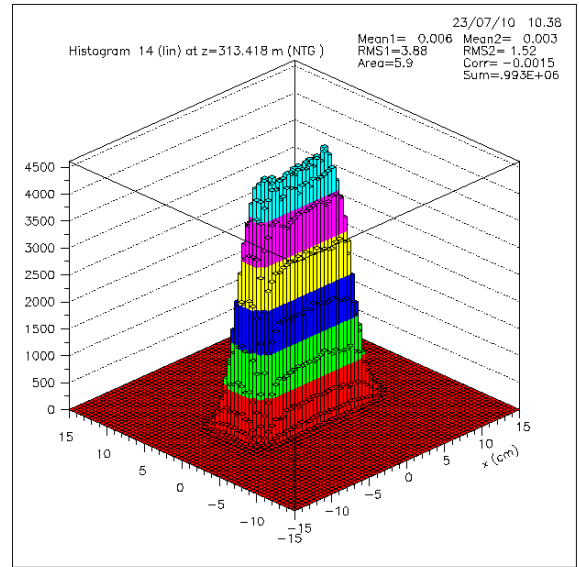


図2: 八極電磁石を用いて平坦化したビームプロファイル。ビームロスやミュオンターゲットの散乱の影響を無視している

3.2 八極電磁石による平坦化システム

図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を記す。図ではRCS出口を基点として水銀ターゲットまでの β 関数を示している。ビームの平坦化には式(2)、(3)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3 GeV という高いエネルギーの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。また大強度でエミッタンスの大きなビームを受け入れる必要があるために、電磁石の口径を小さくすることは難しい。

そこで八極電磁石において β 関数を大きくして対応することとした。八極電磁石が無い場合の設計では β 関

数は 40 m 以下に抑えていた。八極電磁石付近の電磁石の口径は直径で 300 mm と決まっており、 β 関数を大きくすぎるとビームの横方向の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。線形オプティクスだけのオリジナルの設計では RCS 内に設置したコリメータの口径で決定された $324 \pi \text{ mm mrad}$ をビーム輸送ラインのアクセプタンスとした。最近のシミュレーション^[11] や実測データなどによりアクセプタンスを $250 \pi \text{ mm mrad}$ 程度に減少できる可能性を示しているため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しエミッタンスを増大させる。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少ない方が望ましい。式 (2), (3) 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、ゼロに接近する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。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。

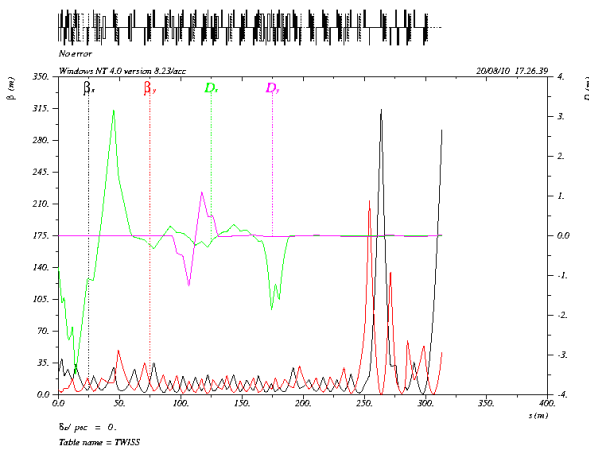


図 3: 八極電磁石を用いる場合のビームオプティクス

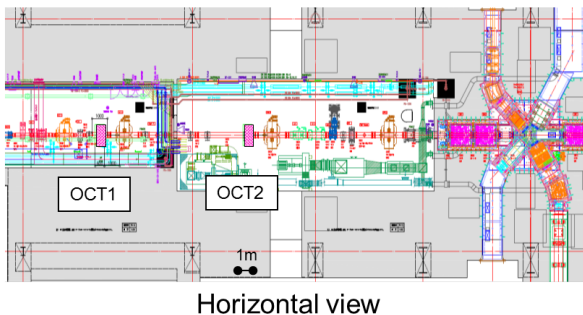


図 4: 八極電磁石の設置場所の詳細 (ミュオンターゲットより上流に設置する)

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^[9] で改良された DECAY-TURTLE^[10] を用いて計算をした。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。

4. 結果及び議論

4.1 ターゲット上でのプロファイル

図 5, 6 にターゲットにおけるビームのプロファイルを示す。線形オプティクスのみの場合と比較 (図 6 参照) により、ピーク密度を約 30% 減少できることが示された。これによりターゲットのパルスあたりの発熱密度を 11 J/cc/pulse 程度とすることができる。またアクセプタンスが $100 \pi \text{ mm mrad}$ に下げることができればピーク密度は 40% まで減少可能なことも検討によりわかった。このことは、ビームハローが想定よりも少なければさらにピーク密度を下げられる可能性を示している。

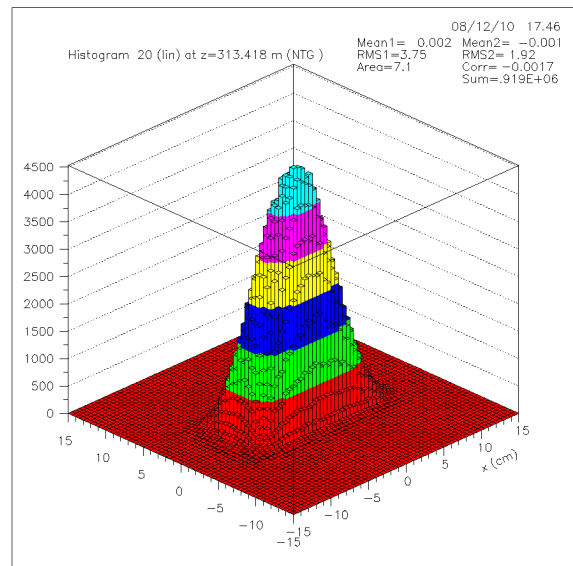
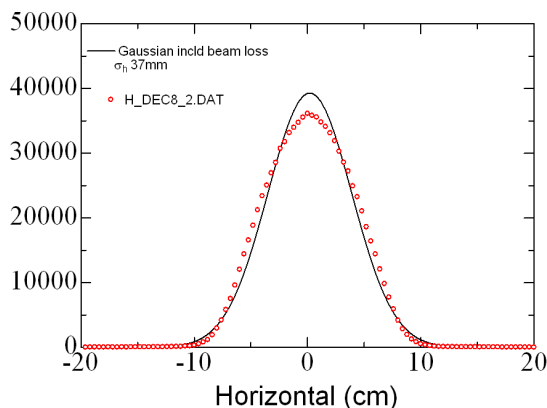


図 5: ミュオンターゲットの散乱やビームロスを考慮した場合のターゲットでのビームプロファイル

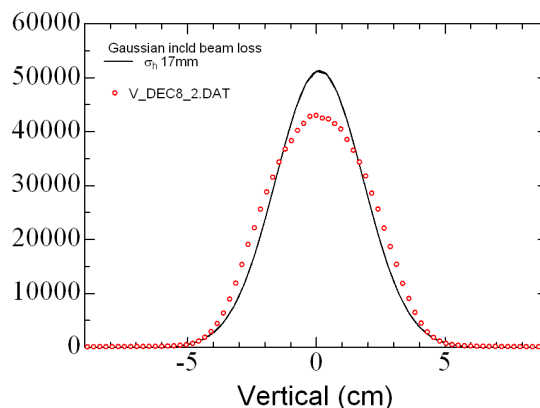
4.2 アライメント誤差等に対する影響

実際のビーム運転においてアライメント誤差などによるビーム軌道の逸脱が生じる。また地震や地下水の影響による建屋の不等沈下が観測されているので軌道の逸脱は避けることができない。本章ではアライメント誤差のプロファイルに対する影響とその許容値に関して検討を行う。なお影響を簡単に理解するために、ここでは図 2 と同様のミュオンターゲットによるビーム散乱を無視したオプティクスを用いた。

八極電磁石において水平方向に対し 2 mm シフトした場合のビームプロファイルを図 7 に示す。シフトが無い場合にはビーム形状は平坦であったが、八極電磁石におけるシフトによりビームの周辺部においてピークを生じることが示された。周辺部のピーク強度は平坦部に



(a) 水平方向ビームプロファイル



(b) 垂直方向ビームプロファイル

図 6: 八極電磁石を用いて平坦化したビームプロファイル (丸) と線形オプティクスによるガウス分布 (線) との比較

比で 8% 程度増大した。ターゲット設計では 4% 程度のエッジピークは許容されるので八極電磁石での許容オフセットは 1 mm となる。パルス毎のバラつきは十分に小さく、これは現在のビーム運転において達成可能な値である。

さらに八極電磁石の設置誤差としてビームに対し 0.5 mrad 傾斜し設置した場合を計算した。その結果、ビーム形状に対する設置傾斜の影響は殆ど無いことが示された。実際に、電磁石の設置精度は 0.2 mrad 以下となっているので、八極電磁石の設置に関しては問題ないことが示された。

さらに八極電磁石下流側の電磁石の設置精度について検討した。下流側の電磁石のミスアライメントによりビーム軌道はベータatron振動により振動を生じるものの、ターゲット上でのビーム形状は特に変化無く平坦な分布となっていることが確認された。下流側の電磁石でビームのオフセットが生じていても、図 7 に見られるような周辺部にピークを生じることは無い。実際に M2 トンネルに新規に電磁石を設置するのは簡単でなく、さらにアライメントを行うのは大変な作業となるので望ましくない。本検討によって、M2 トンネルの上流部に八極電磁石を設置することにより平坦化できることが示された。

4.3 ミュオンターゲットの散乱による影響

MLF では中性子ターゲットの上流にミュオンターゲット (炭素: 厚さ 2cm) があるために、ミュオンターゲットにおける散乱の効果が大きい。八極電磁石は作業性を考慮して、ミュオンターゲットの上流に設置する。ここでは散乱による効果を定量的に評価する。

八極電磁石を励磁した場合の水平方向に対する位相空間における分布を図 8 に示す。ミュオンターゲットに入射する前には位相空間において図 8 において楕円から腕状の分布が発生しているのがわかる。この腕に相当するのが、八極電磁石によって変形したものであり

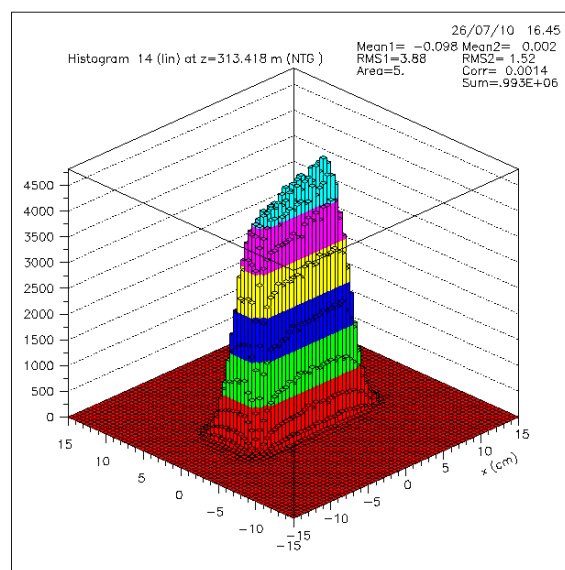


図 7: 八極電磁石の中心に対しビームが水平方向に 2mm 変位した場合の二次元プロファイル

平坦なビームの分布をするためには重要な粒子である。散乱後の分布を図 9 に示す。ミュオンターゲットの散乱により位相空間は、縦軸である角度方向に塗りつぶされてしまう。これにより図 8 中の腕状の分布が不明瞭となり実空間の分布がガウス分布に近づいてしまうことが理解できる。散乱の影響を防ぐためには、ビームを出来る限り絞り発散させ、即ち角度方向にビームを引き伸ばすのが有効である。これにより散乱の影響を最小化し、腕状の分布を明瞭にし、ガウス形状に接近するものの平坦な分布を得ることができた。

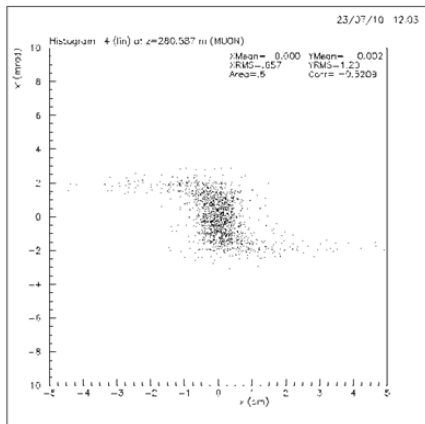


図 8: ミュオンターゲットにより散乱される前の位相空間分布

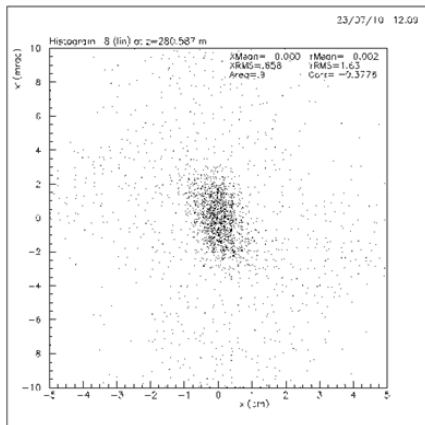


図 9: ミュオンターゲットで散乱された後の位相空間分布

5. 八極電磁石

ビーム光学の要求に従い八極電磁石を 2 台製作した。図 10 にその外形を示す。磁場勾配は 800 T/m^3 となり、ホール素子を用いたマッピングにより設計通りの良好な磁場分布を発生していることを確認した。八極電磁石でのビームのセンタリングが重要であるので、これを確保するために電磁石の内部にビーム位置モニタ (BPM) を設置する。既に 3NBT の最上流部の四極電磁石の内部に BPM を設置し、RCS からのビーム取り出し調整に用いられている。それぞれの八極電磁石においてビームのセンタリングを行うために、現状のステアリング台数では不足するので、新規にステアリングも 2 台作成し設置する。来年 (2013 年) の夏に LINAC のエネルギーを 0.4 GeV に増加するために長期のシャットダウンが予定されており、この期間に全システムをインストール予定である。

6. 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下げるために八極電磁石を用いた非線形ビーム光学によるビーム平坦化について

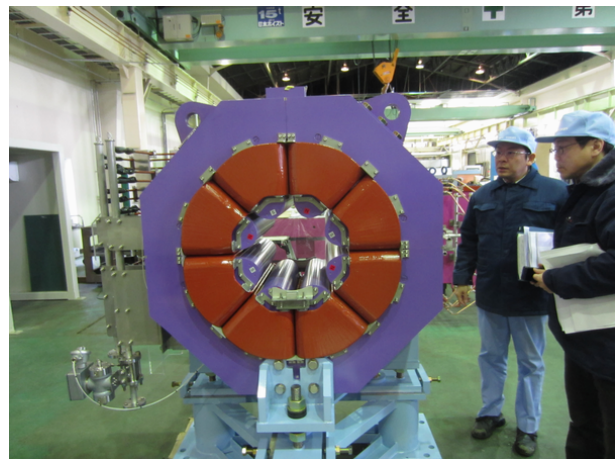


図 10: 実機の八極電磁石 (2013 年に設置予定)

検討した。必要とされる八極電磁石について検討した結果、位相空間でガウス分布となり多極を複数使用する場合と位相空間で一様な場合の磁場の中間において、平坦となる分布が得られることが判明した。シミュレーションを行った結果、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で平坦な分布となることわかった。ビーム軌道変位等に伴うビームオフセットの場合にエッジピークを持つためにビームオフセットに関して詳細に調査した。その結果、エッジピークが許容できる範囲に留めるためには、八極電磁石において許容できるビームのオフセットは約 1 mm となり、実際の運転の経験から実現可能であることがわかった。

ミュオンターゲットでのビーム散乱の影響を減らす為にミュオンターゲットにおいてビームをさらに収束させた。ビーム散乱を含めたシミュレーションの結果、八極電磁石を用いない場合に比べ、ピーク密度は約 30% 減少できることがわかった。八極電磁石は 2013 年に設置され 1 MW の大強度運転に備える。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] Y. Yuri, et al., Phys Rev ST Accel. Beams 10, 10401 (2007).
- [5] F. Meot and T. Aniel, Nucl. Instrum. Meth. A 379, 196 (1996).
- [6] N. Tsoupas, et al., Phys Rev ST Accel. Beams 10, 024701 (2007).
- [7] S. Meigo, et al., Nucl. Instrum. Meth. A562, 569 (2006)
- [8] S. Meigo, et al., MOPEB066, IPAC10 (2010)
- [9] PSI Graphic Turtle Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version
- [10] K.L. Brown, Ch. Iselin and D.C. Carey: Decay Turtle, CERN 74-2 (1974)
- [11] H. Hotchi, et al., THPPP080, IPAC12 (2012)