

J-PARC におけるビーム平坦化のための八極電磁石の開発 DEVELOPMENT OF OCTUPOLES FOR BEAM FLATTING SYSTEM AT J-PARC

藤森 寛^{#, A)}、明午伸一郎^{B)}、大井元貴^{B)}、池崎清美^{B)}、
 坏 敦^{B)}、坂元眞一^{B)}、二川正敏^{B)}
Hiroshi Fujimori^{#, A)}, Shin-ichiro Meigo^{B)}, Motoki Ooi^{B)}, Kiyomi Ikezaki^{B)},
Atsushi Akutsu^{B)}, Shinichi Sakamoto^{B)} and Masatoshi Futakawa^{B)}

^{A)} J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

As the beam power is increasing, damage to the target becomes serious. Especially for the target of the Japan Spallation Neutron Source (JSNS), where the damage due to the high-power short-pulse proton beam on the target vessel of the liquid metal (mercury) target is reported to be proportional to the 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, the beam profile can be described by clear Gaussian functions. To reduce the peak intensity, we have developed a beam transport system by non-linear beam optics, called beam flattening system, using octupole magnets. Octupole magnets, which are the main components of the beam flattening system, were required possessing a strong field gradient as high as 800 T/m³ and being downsized for the installation due to space restrictions. In order to realize the requirements, we evaluated the saturation field of the octupole magnets with a three-dimensional field analysis code (Opera-3d) to optimize the pole and coil shape.

1. はじめに

J-PARCでは25Hzの速い繰返しのシンクロトロン(RCS)から出射した3GeVの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Figure 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水銀ターゲットに入射される。2008年よりビーム運転が開始され、今やパルスあたりの中性子およびミュオンの強度は世界最大強度となった。昨年、LINACからRCSへ入射するエネルギーを0.181GeVから0.4GeVに増強し、さらにLINACからのピーク電流も引き上げて最終目標である1MWの運転が始まろうとしている。水銀のような液体金属のターゲットに短パルス(〜μs)の大強度の陽子ビームを入射する場合に、ターゲット容器に著しいピッチング損傷が発生することが最近の研究によって明らかになり、オークリッジ国立研究所(ORNL)の核破砕中性子源(SNS)では損傷により水銀容器に大きな孔が開くほど深刻になっている。この損傷はピーク電流密度の4乗に比例するため、大強度の中性子源を安定に運転する場合にはピーク密度を如何に下げるかが重要な鍵を

握る。RCSから出射されるビームは位相空間において、ガウス分布となり、四極電磁石の磁場を変更する線形ビーム光学では、どの場所においてもガウス分布のビーム形状となる。ターゲット周辺部ではビームによる発熱密度を1W/cc以下にする必要があり、線形光学ではパルスあたりの発熱密度を14J/cc/pulseとすることが限界となるが、この値はSNSの2倍以上の値となり更なるピーク密度の減少が必要である。そこで我々は非線形ビーム光学^[1]に着目し、八極電磁石を用いてターゲット位置においてビームを平坦化する「ビーム平坦化システム」の開発を進めてきた。

本稿では、ビーム平坦化システムに用いた八極電磁石の開発について報告する。

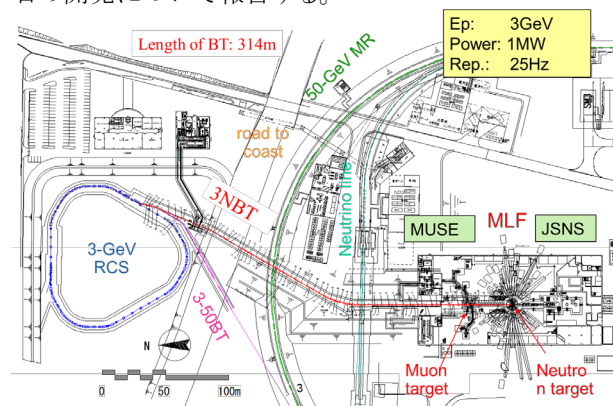


Figure 1: Beam transport line from RCS to MLF (3NBT).

[#] fujimori@post.kek.jp

2. 八極電磁石の設計

ターゲット位置においてビームの平坦化を実現させるためには、ビーム光学において八極以上の多極磁場成分が必要であり、ターゲットの上流のビーム輸送ライン上の二か所(Figure 2)に八極電磁石を設置することになった。

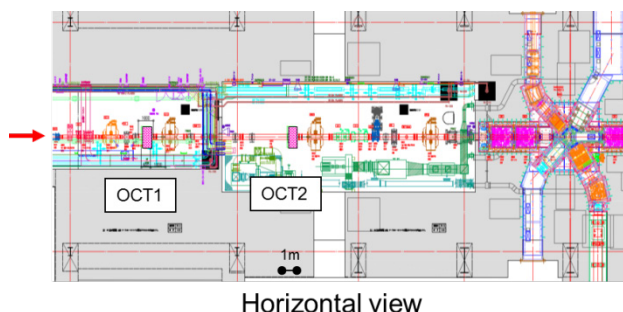


Figure 2: Arrangement of octupole magnets in the beam transport line.

ビーム輸送ライン上には、電磁石等の機器が密に並べられており、ビーム輸送上これら既設コンポーネントの位置は変更できないため設置スペースには上下左右の寸法および重量制限の他に、前後方向(ビーム方向)において 1m 以内という設置スペースの厳しい制約があった。ビームダクトの取り合いを考慮すると八極電磁石の磁極長は 600mm が上限であり、八極磁場勾配として 800T/m³ が要求される。電磁石の中心を原点とする xyz 座標系(z はビーム軸)において、鉛直方向の磁場成分 B_y を用いて八極磁場勾配 G[T/m³]は①式で表される。

$$G = \frac{d^3 B_y}{dx^3} \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、磁極あたりのコイル巻数を N[Turn]、コイルを流れる電流を i[A]、真空中の透磁率を μ₀[H/m]、ボア半径を R[m]とすると、②の近似式が成り立つ。

$$Ni = \frac{1}{24\mu_0} GR^4 \quad \dots \textcircled{2}$$

設計当初は、低コスト化のためコイル形状はレーストラック型で検討され、コイルには断面が小さく実績のあるホローコンダクタ(□9×9-φ6)を用いることとした。磁極あたりのコイル巻き数 24[Turn]およびボア半径 150[mm]を②式に代入すれば、必要磁場を与える電流は 560A となる。この時、OPERA-3d による解析結果を Figure 3 に示す。磁極のサチレーションが大きく、磁場勾配は高々 650 T/m³ 程度で 800T/m³ には遠く及ばなかった。

Figure 4 に改良前後の磁極・コイル形状(上段)および対応する OPERA-3d モデル(下段)を示す。磁極(純鉄)中の磁場を 2T 以内(鉄中の飽和は 2T 付近から始まる)に抑えるため、Figure 4 に示すように磁極欠損部分を補うことによって磁極のサチレーションを緩和する対策を施し、コイルの形状もレーストラック型から鞍型に変更した。その結果、磁極中の磁場は 2T 以内となり、ビーム光学から要求された八極磁場勾配 800T/m³ を満たすと共に、コイル形状(レーストラック型→鞍型)の変更に伴

いコイル層が 3 段から 1 段に減少し、ビーム方向のコイルの突出(磁極からの膨らみ分)は約 50mm 短縮された。

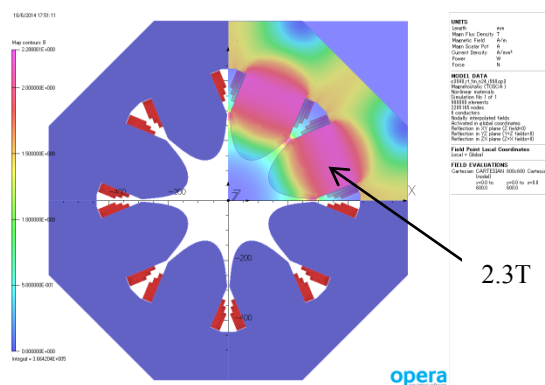


Figure 3: Saturated original pole shape.

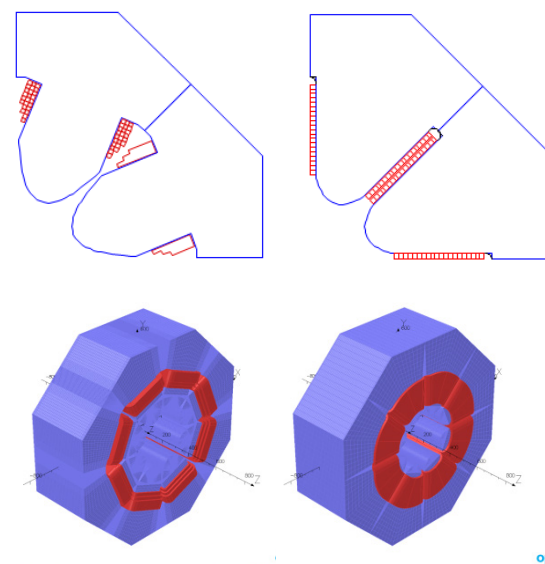


Figure 4: Original (left) and improved (right) pole shape.

Figure 5 に最適化された磁場断面図を示す。磁極中の最大磁場は 2.3T から 1.6T に減少し、サチレーションはかなり緩和された。コイル巻き数は 24Turn から 20Turn に変更となり、それに伴いコイルに流れる電流は 560A から 670A に変更された。

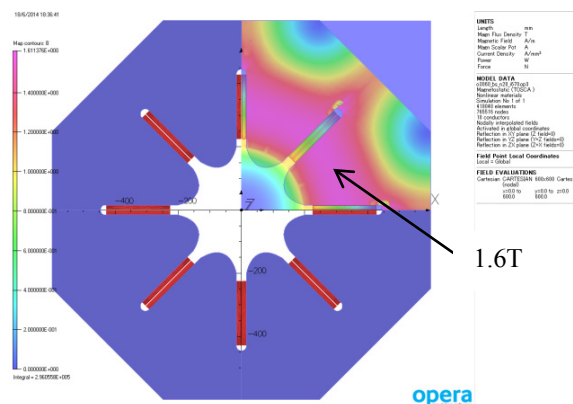


Figure 5: Unsaturated improved pole shape.

Figure 6 は median plane 上での x-By 曲線を示し、理想曲線は①式を積分して得られた③式に $y=0$ を代入して原点を通る x の 3 次式として与えられる。また、八極磁場勾配が 800T/m^3 を満たしていることは、Figure 6 より弁別できる。

$$B_y = \frac{1}{6}G(x^3 - 3xy^2) \quad \dots ③$$

必要電流を供給しても磁極飽和により要求磁場が得られないレーストラック型コイルの場合に比べ、磁極の欠損部分が改善された鞍型コイルの場合は、理想曲線とほとんど一致した磁場が得られる。

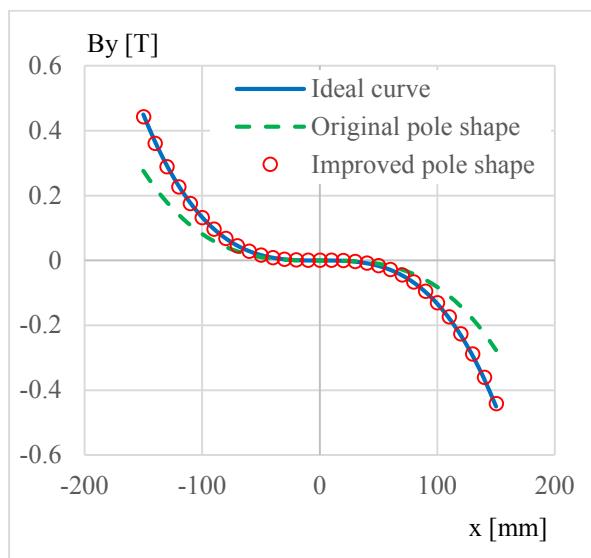


Figure 6: x-By curve in the median plane.

以上の評価を基に Figure 7 に示す詳細設計がなされた。磁極形状は $4(x^3y - xy^3) = r^4$ の曲線によってコイルの直前まで加工されている。また、組み立て効率及びメンテナンス性を考慮し、1 台の電磁石は Figure 4 右上に示す「2 個の磁極を連結しコイル 2 組を挿入したパーツ」4 組から構成される。実機の写真を Figure 8 に、電磁石の主要パラメータを table 1 に示す。

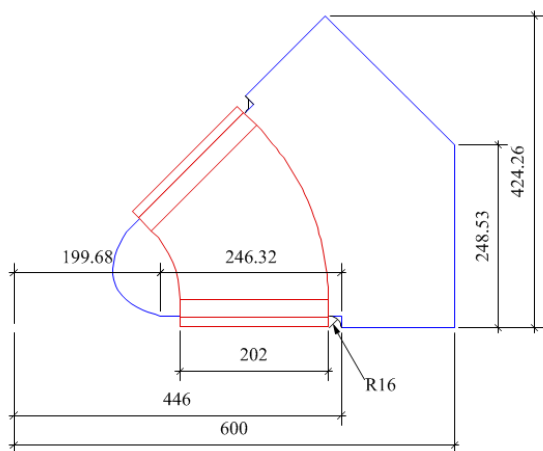


Figure 7: Structure of one octupole element.



Figure 8: Finished products (in NEC Tokin Corp.).

Table 1: Main Parameters of Octupole Magnet

項目	Unit	Parameter
Bore diameter	mm	300
Pole length	mm	600
Pole width	mm	262
Field gradient	T/m ³	800
Conductor cross-section	Hollow Conductor □9-φ6	
Insulator	Polyimide	
Ampere turn	A · Turn	13400
Winding number/coil	Turn	20
Number of water loop		8
Water loop length	m	40
Conductor length/coil	m	40
Nominal cross-sectional area	mm ²	52.7
Resistance	Ω	0.121
Flow rate	L/min	26.4
Flow velocity	m/s	1.95
Current	A	671
Voltage	V	82
Electric power	kW	54.7
Temperature rise	°C	29.7
Pole weight	ton	4.85
Coil weight	ton	0.15
Total weight (except base)	ton	5.0

3. 実機の性能及び結果

3.1 八極磁場の計算値と実測値の比較

median plane 上で $z=0$ における x-By および $x=100$ における z-By について OPERA-3d 解析結果(計算値)と実機による磁場測定の結果(Hall probe による実測値)との比較を Figure 9 および Figure 10 に示す(励磁電流 670A)。電磁石中心($z=0$)における x-By 分布は、計算値と実測値の曲線で善く一致しており、電磁石中心から水平方向に 100mm オフセット($x=100$)位置での z 軸に沿った By 分布(z-By)においても Figure 10 に示すように計算値と実測値の曲線は善く一致しており、z 方向への染み出し磁場(fringe field)においても設計通りの結果が得られた。

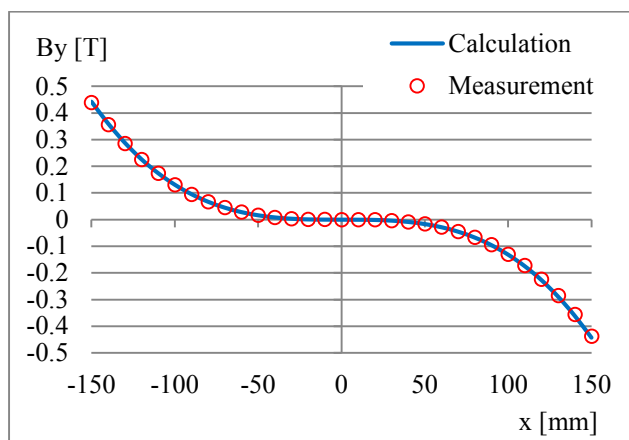


Figure 9: Comparison between calculation and measurement of the x-By distribution.

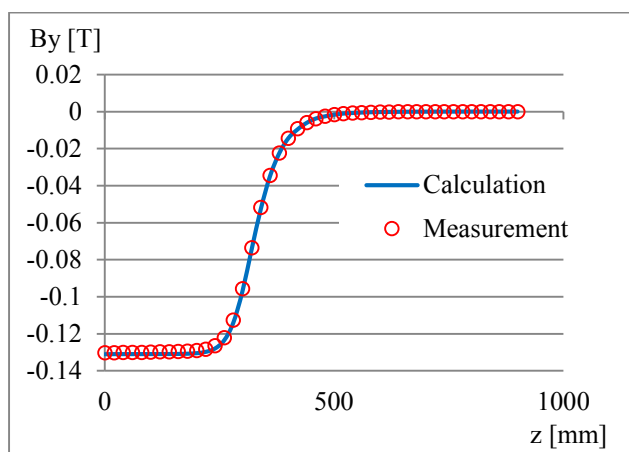


Figure 10: Comparison between calculation and measurement of the z-By distribution.

3.2 ビーム平坦化

製作した 2 台の八極電磁石は Figure 11 に示すように 3NBT 下流に Octupole1 (OCT1) および M1 ライン上流に Octupole2 (OCT2) として設置され (Figure 2 参照)、コミッションングが行われた。

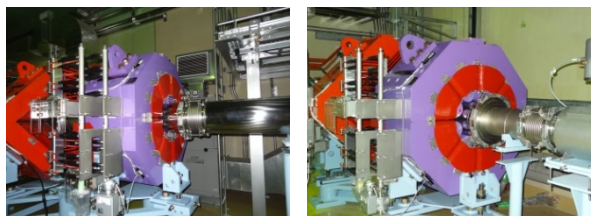


Figure 11: OCT1(left) and OCT2(right) were installed downstream of 3NBT and upstream of M1-line, respectively.

Figure 12 は八極電磁石の通電の有無によるターゲット直前のマルチワイヤービームプロファイルモニター

(MWPM) で見たビームプロファイルを示す。赤色は八極電磁石を通電していないとき、青色は 660A にて通電したときの波形である。明らかに、ビームの平坦化が確認できる。

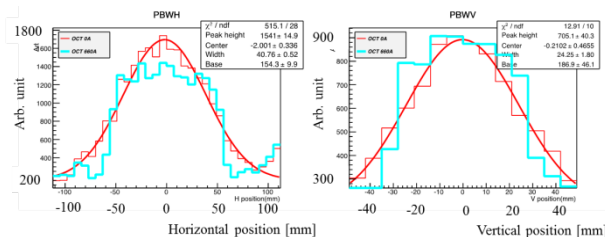


Figure 12: Horizontal (left) and vertical (right) beam profiles just before the target.

4. まとめ

4.1 電磁石の設計

限られた設置スペースに強磁場の八極電磁石を収めるため、電磁石の小型化と磁場サチレーションの軽減が求められ、OPERA-3d を用いて磁極およびコイル形状の最適化を行い、サイズ制限および磁場条件を満たす八極電磁石を設計した。

4.2 磁場評価

磁場計算および磁場測定の比較において中心磁場、fringe field 共に善く一致し、供給電流 670A において 800T/m^3 の磁場性能を有する設計通りの八極電磁石が完成した。

4.3 ビーム平坦化

当該八極電磁石を用いたビームコミッションングにおいて、ターゲット直前のビームプロファイルモニターによって、水平及び垂直方向共にビームの平坦化が確認された。

4.4 最後に

本研究で開発された八極電磁石によりピーク電流密度を 30%以上低減できることが期待される。これによりターゲットのピッチング損傷を 80%も低減できることになる。2014 年の秋以後には 1MW のビーム運転が試験計画されており、世界最大強度となるミュオン・中性子源の運転が実施される予定である。

参考文献

- [1] Shin-ichiro Meigo, Hiroshi Fujimori et al., Development of Beam Flattening System Using Non-Linear Beam Optics at J-PARC/JSNS, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (8-11 August, 2012, Toyonaka, Japan)