

J-PARC リニアックにおけるエミッタンス増大抑制のための四極八極結合型電磁石の開発

DEVELOPMENT OF QUADRUPOLE-OCTUPOLE COMBINED MAGNET FOR EMITTANCE-GROWTH MITIGATION IN THE J-PARC LINAC

地村幹^{#, A), B)}, 原田寛之^{B)}, 高柳智弘^{B)}, 金正倫計^{A), B)}

Motoki Chimura^{#, A), B)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Tomohiro Takayanagi^{B)}, Michikazu Kinsho^{A), B)}

^{A)} Dept. of Phys., Tohoku Univ.

^{B)} J-PARC Center, JAEA

Abstract

In the low-energy region of a linac, strong space-charge field causes a rapid emittance growth. To mitigate this emittance growth, it has been proposed to apply nonlinear magnetic field to the beamline. In order to realize the mitigation of emittance growth by a nonlinear magnetic field, we have developed a combined multipole magnet that can generate a nonlinear magnetic field in addition to a quadrupole magnetic field. As a result, we designed a combined multipole magnet that can generate a quadrupole magnetic field equivalent to a pure quadrupole magnet by short circuiting the magnetic circuit of the magnet. This paper describes the design and performance of this new multipole magnet and the results of magnetic field measurements.

1. はじめに

加速器のさらなる大強度化の実現は、効率的な加速器利用を促進し、利用範囲の拡大や高精度な実験を可能にする。しかし、さらなる大強度化を行うと、ビームロスの増加によって加速器の放射化が促進され、機器の保守性が失われる。よって、ビームロスの原因を同定してその抑制を行うことは、さらなる大強度化を実現するための核となる仕事である。

我々は以前より、イオン線形加速器における数 MeV 程度の低エネルギー領域に着目し、高品質なビーム輸送の実現を目標に研究を進めてきた[1, 2]。低エネルギー領域はロスに対する放射化が少ない一方、それ以降の加速器全体のビーム品質（エミッタンス）を根本的に決定づけるため、さらなる大強度化実現のための基礎となる領域である。加えて、大強度化・高品質化・安定化の需要は常に存在すること、さらに、低エネルギー領域はあらゆる加速器に存在することから、本研究による高品質なビーム輸送の実現は既存・建設中・計画中間わず多くの加速器にとって有益である。

低エネルギー領域では、高エネルギー領域と比較してビームが遅く加速器の単位長さに対する滞在時間が長いため、空間電荷場（ビーム粒子による電場）から単位距離あたりに大きな力積を受ける。さらに、低エネルギー領域では縦方向の運動量に対する横方向の運動量の比が大きいためビームの発散角が大きくなり、ビームサイズが広がりやすい。したがって、低エネルギー領域のビームの理解は、以上の 2 つの性質（大きな力積と広いビーム幅）によって強く誘起される現象を明らかにすることによって

得られる。特に、エミッタンス増大が短距離で発生することは従来の定常分布の解析や共鳴現象による理解が適用できないことを示唆し、新たな理解が期待される。

我々は現在まで理論とシミュレーションを用いて位相空間分布の理解を進めることによって、エミッタンス増大の支配的要因が空間電荷場の非線形項による位相空間分布の変形であることを同定した[2]。さらに、このエミッタンス増大の理解から非線形場を印加することでエミッタンスを回復させることを提案した[1]。

本研究におけるこれからの課題は、非線形場による方法を実機に適用可能な方法に具体化することである。そのために、我々は四極磁場と非線形磁場を同時かつ独立に発生可能な四極八極結合型電磁石（quadrupole octupole combined magnet, QOM）を開発した[3]。本論文では、この四極八極結合型電磁石の設計およびその性能について述べる。

2. 低エネルギー領域におけるエミッタンス増大の抑制原理

本項では、電磁石製作の動機となる低エネルギー領域における非線形場を用いたエミッタンス増大の抑制原理について述べる[1, 2]。

Figure 1 にエミッタンス増大の抑制の例を示す。ここで、Fig. 1 の位相空間分布は 3 次元ビームシミュレーションコード IMPACT-Z[4]によって計算されたものである。初期のビーム位相空間分布が左図のように楕円形持っていた場合であっても、低エネルギー領域では強い空間電荷場によって中央図のような位相空間分布の歪みが生じる。このビーム分布の歪みは、ビーム中心部における空間電荷場が線形場である一方、外殻部における空間電荷場は中心から

[#]chimura@lambda.phys.tohoku.ac.jp

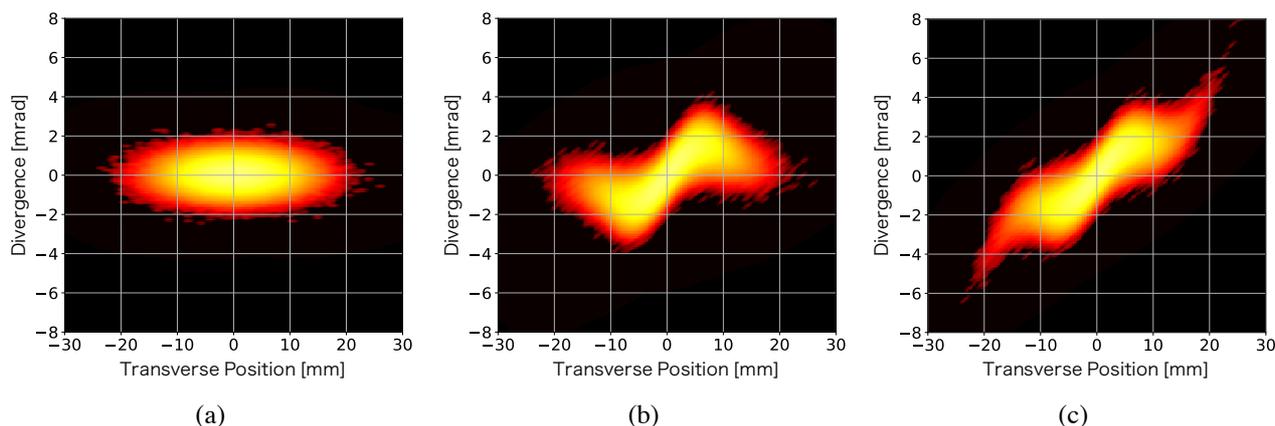


Figure 1: Example of calculated emittance growth mitigation using nonlinear field. These distributions show the initial state (a), distorted by the space-charge field (b), and compensated by the octupole field (c), respectively.

離れるほどゼロに漸近する非線形場であるため、この中心部と外殻部の運動方向の差がビーム分布の歪みとして現れたものである。このようなビーム分布の歪みはビームの品質を悪化させ、下流部におけるビーム損失の潜在的な要因となる。そこで、我々は八極磁場のような非線形場を与えることで右図のようにビーム分布の歪みを補償してエミッタンスを回復する手法を提案した。さらに、シミュレーションを用いることでエミッタンス増大が抑制されることを示した。

3. 四極八極結合型電磁石の設計

非線形場によるエミッタンス増大の抑制手法を適用するための電磁石を設計するにあたり、印加する非線形磁場の位置は以下に述べるビーム力学的な要請によって決定される。

低エネルギー領域におけるエミッタンス増大は、位相の進みが遅いためにビーム分布の歪みが大きくなるビーム幅の広い地点で顕著に起こる[2]。さらに、他方向と比較してビーム幅が十分に大きくなければ、水平方向と鉛直方向の結合項の効果が無視できず、かえってエミッタンス増大を招く可能性がある。以上より、ビーム幅が極大値をとる四極電磁石の中心に非線形磁場を印加することが望ましいため、四極磁場と非線形磁場を同時に発生可能な四極八極結合型電磁石の開発を行った。

八極電磁石の磁極構造ならば、八極磁場はもちろん、四極磁場様の磁場を発生させることが可能である[5]。Figure 2 に八極電磁石の磁極構造によって四極磁場を発生させた場合における磁力線を示す。ここで、磁力線は 2 次元静磁場計算プログラム Poisson[6]によって計算されたものである。Figure 2 の様な四極磁場は、通常の四極電磁石のように極性が 4 回反対称性を持つように励磁することで得られる。さらに、Figure 3 に八極電磁石の磁極構造によって四極磁場を発生させた場合における水平方向の位置に対する鉛直方向の磁場を示す。理想的な四極磁場の場合、水平方向の位置に対する鉛直方向の磁場は線形になる。Figure 3 より、八極電磁石の磁極構造による方法では、磁場が線形となる領域が狭

く、広く精度の良い四極磁場を得るには電磁石のボア径 (対向する磁極先端間の距離) を十分広く取らなければならない。しかし、Fig. 3 から分かるように電磁石のボア径を大きく取った場合、それに応じて磁場の傾きも緩やかになるため、電磁石が発生させる収束力も弱くなる。簡単な見込みによっては、電磁石のボア径が n 倍になった場合、必要な起磁力は n^2 倍になるため[7]、ボア径を広げる前と同じ収束力を持たせるためには電磁石を縦方向に n^2 倍する、あるいは電流値を n^2 倍にすることになる。したがって、既存の八極電磁石の磁極構造を用いて四極八極結合型電磁石を製作した場合には設置空間や電力などの面で課題を抱えることとなる。

そこで、我々は新たに Fig. 4 に示す磁極構造を持つ電磁石を設計した。本電磁石の特徴的な点として、8 つの極を持つが、磁極先端が 2 つごとに接触する

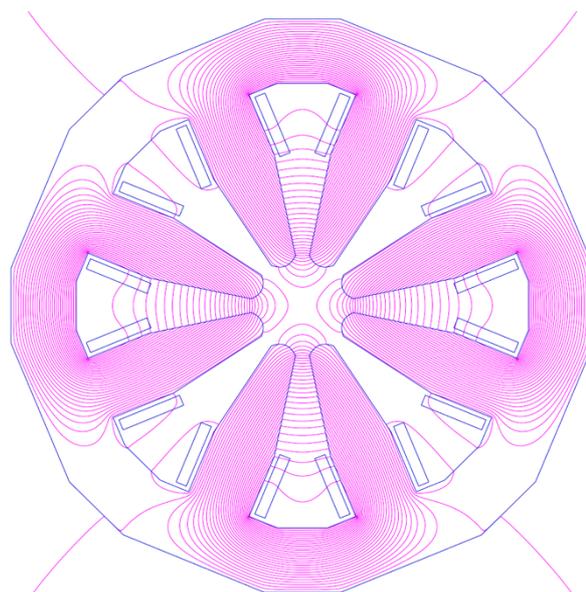


Figure 2: Magnetic field when a quadrupole magnetic field is generated by the core structure of an octupole magnet. The rectangle around the pole represents the coil used to generate the quadrupole magnetic field.

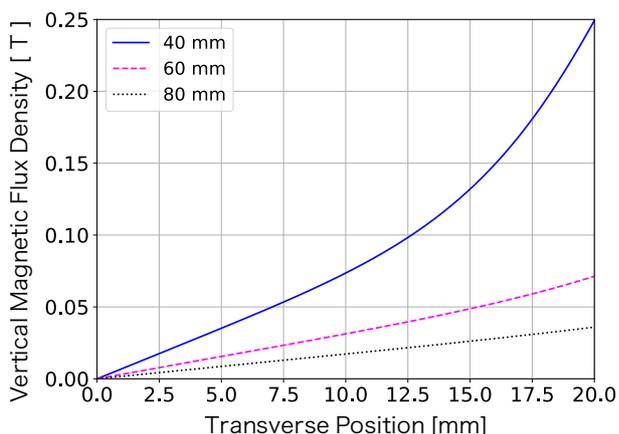


Figure 3: Vertical magnetic flux density along the horizontal direction when a quadrupole magnetic field is generated by the core structure of an octupole magnet for bore diameters of 40 mm (solid line), 60 mm (dashed line), and 80 mm (dotted line).

ことによって、先端の形状は四極電磁石と全く同様であることが挙げられる。この磁極構造に四極磁場を発生させるための4回反対称性を持つ極性を誘起する四極コイルと、非線形磁場を発生させるための8回反対称性を持つ極性を誘起する八極コイルの2種類のコイルを巻くことによって四極磁場と非線形磁場を独立に発生させることを可能とした。四極コイルによって励磁した場合における磁力線を Fig. 4 の (a) に、八極コイルを励磁した場合における磁力線を (b) にそれぞれ示す。電磁石の発生させる磁場は磁極

先端の形状が支配的であるため、本電磁石のように四極電磁石と同様の先端構造を持たせることによって精度の良い四極磁場を発生させることが可能となる。さらに、四極電磁石と同様の精度の四極磁場を発生可能であるという特徴から、八極電磁石の磁極構造と異なり、本電磁石によって既設の四極電磁石を置き換えた場合においてもその精度によってビームの品質を悪化させることがない。

精度の良い四極磁場を発生させるためには、通常四極電磁石と同様に磁極先端の精度が要求される。特に接触面は隙間やズレを作らないように考慮して製作する必要がある。本研究で製作した電磁石では、まず1/8のピースを作り、2つごとに接触面を合わせて1/4のピースにした後に磁極先端面を成形するという手順によって製作が行われた。

この電磁石の特異的な点として、八極コイルによって励磁した場合には、N極とS極が接触し、磁気回路が短絡することが挙げられる。通常、磁極を短絡させた場合、接触面を介して磁力線が回るため、ビームの通る領域に磁場を発生させることができない。しかし、本電磁石においては磁束密度の飽和現象を積極的に利用した。すなわち、接触面を可能な限り小さくすることによって接触面を通る磁束密度が飽和し、余剰分の磁場がビームの通る領域に発生する。この方法を用いることで磁極を短絡させながらビーム領域に磁場を発生することを可能とした。ここで、接触面の小ささは製作上の要求によって決定し、本研究で製作した電磁石では、ビーム進行方向に対して垂直な方向に2 mmの幅を持つ。

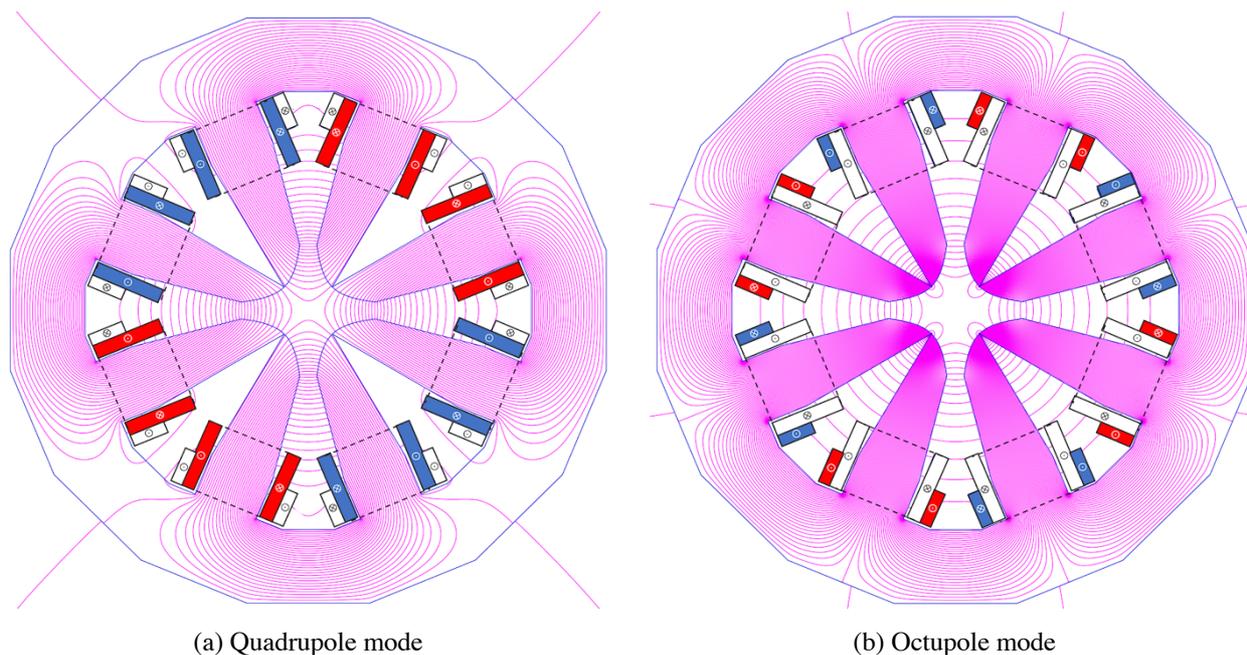


Figure 4: Structure of the combined multipole magnet and the magnetic field for each of the quadrupole (a) and octupole (b) modes. Current flows in the inner coil for the quadrupole mode (a) and in the outer coil for the octupole mode (b). Direction symbols represent the current of coils. The red coil excites the pole tip to the N-pole and the blue coil excites the pole tip to the S-pole.

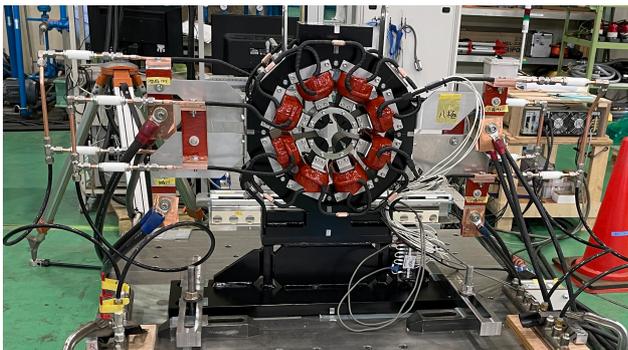


Figure 5: Photograph of the QOM.

4. 四極八極結合型電磁石の性能

本項では、前項で述べた設計より製作された四極八極結合型電磁石の性能について述べる。Figure 5 に製作された四極八極結合型電磁石の写真を示す。Figure 5 中央部には鉄芯とコイルが位置している。その左右にはコイル端部が伸びており、そこから四極コイルと八極コイルの電流と冷却水が供給される。

本電磁石は、大強度陽子加速器施設 J-PARC[8]のリニアックに存在する 3 MeV ビーム輸送路 (medium-energy beam transport line, MEBT1 line) に設置することを想定して製作された。大強度陽子加速器施設 J-PARC は、リニアック、3 GeV シンクロトロン、主リングシンクロトロンと呼ばれる 3 基の加速器からなる。リニアックは負水素イオンを 400 MeV まで加速し、後段の 3 GeV シンクロトロンまでビームを供給する。MEBT1 はリニアック上流部に位置し、後段の加速空洞群のためのビームマッチングの役割を担う。

Table 1 に MEBT1 の主なパラメータを示す。MEBT1 では 8 台の四極電磁石 (quadrupole magnet,

Table 1: Main Parameters of the MEBT1

Particles	Negative hydrogen ions
Energy	3 MeV
Length	2.86 m
Number of QMs	8
Number of bunchers	2
Peak current	50 mA
Pulse length	500 μ s
Repetition rate	25 Hz
Frequency	324 MHz

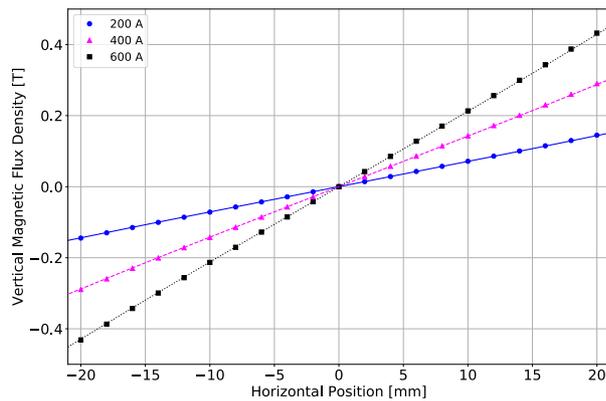
QM) と 2 台のバンチャーを用いて 3 MeV, 50 mA の負水素イオンビームを約 3 m 輸送する。本電磁石は、8 台の四極電磁石のうち上流側から 3 台目の四極電磁石 (QM03) と交換可能なように設計した。QM03 および四極八極結合型電磁石の主なパラメータを Table 2 に示す。Table 2 より、四極八極結合型電磁石は縦方向、横方向ともに QM03 と同等の大きさを持ち、さらに同等の積分磁場勾配を発生させることが可能である。したがって、四極八極結合型電磁石は、設置空間および収束力の面において既存の四極電磁石と交換可能な条件を満たす。さらに、QM03 および四極八極結合型電磁石のコイルのパラメータを Table 3 に示す。ここで、四極八極結合型電磁石は四極コイルと八極コイルの 2 種類のコイルが巻かれているため、ここではその両方について示した。四極八極結合型電磁石のコイルは、QM03 と比較して磁極あたりの巻数が少なく設計されている。これは、四極八極結合型電磁石の磁極の数が 8 つと四極電磁石と比較して多いため、磁極あたりのコイルの巻く空間が小さいこと、さらに、八極コイルを巻く

Table 2: Main Parameter of the QM03 and the QOM

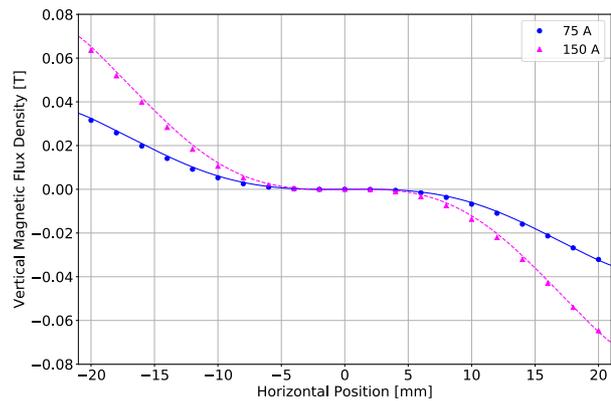
	QM03	QOM
Core length	60 mm	60 mm
Core width	380 mm	362 mm
Bore diameter	41 mm	41 mm
Maximum Integrated Gradient	1.74 T	1.76 T
Effective Length	82.6 mm	84.0 mm

Table 3: Coil Parameter of the QM03 and the QOM

	QM03	QOM: Quadrupole coil	QOM: Octupole coil
Turn number	19 turn/pole	6 turn/pole	4 turn/pole
Hollow conductor size	5 mm \times 6 mm, t = 1.0 mm	6 mm \times 6 mm, t = 1.5 mm	6 mm \times 6 mm, t = 1.5 mm
Maximum current	300 A	600 A	250 A
Resistance	25.0 m Ω	9.34 m Ω	7.40 m Ω
Water flow rate	3.0 L/min	2.7 L/min	2.9 L/min
Water pressure drop	0.5 MPa	0.5 MPa	0.5 MPa



(a) Quadrupole coil



(b) Octupole coil

Figure 6: Magnetic field at the center of the core generated by the QOM when the quadrupole coil (a) and the octupole coil (b) are excited. The dots represent measured values and the lines represent calculated values. The difference between the lines and dots types represents the difference in current values.

空間を確保しなければならないことによる。そのために四極八極結合型電磁石は QM03 よりも大きな電流値を必要としているが、これは横方向に大きくしてコイルを巻く空間を十分に確保することで緩和できる。本研究では、横方向に許容できる空間と流すことのできる電流値との兼ね合いによって 600 A とした。

Figure 6 に四極八極結合型電磁石の発生させる磁場の測定結果および数値計算の結果を示す。ここで、測定値は、縦方向の位置 s および鉛直方向の位置 y が磁極中心と一致する線上 ($s = y = 0$) における鉛直方向の磁束密度をホールプローブを用いて測定することによって得た。さらに、数値計算は 3 次元電磁場解析ソフト Opera-3D を利用して計算されたものである。Figure 6 により、四極コイルによって励磁した場合には線形な四極磁場が、八極コイルによって励磁した場合には非線形な場が発生している。また、本研究においては数値計算の値とよく合った磁場が測定され、非線形場によるエミッタンス増大の抑制を実現するために要求された場を得ることができた。

5. まとめ

本研究では、低エネルギー領域におけるエミッタンス増大を抑制するため、非線形磁場を発生可能な電磁石の開発を行なった。ビーム幅の大きい地点に非線形場を印加する必要があるという要請から、四極磁場と非線形磁場を独立に発生可能な結合型電磁石の設計を行った。そこで、磁極を接触させて磁気回路を短絡させたことによって、結合型電磁石でありながら四極電磁石と同等の精度の四極磁場を発生させることを可能とした。四極電磁石と同等の精度の四極磁場を発生可能であるという利点から本電磁石は収束系を一切変更せずに、既設の四極電磁石との交換のみで導入可能である。

以上の設計から J-PARC リニアックの MEBT1 に設置されている四極電磁石をモデルに四極八極結合型電磁石を製作した。その結果、既存の四極電磁石と

同等の大きさと収束力を持ちながら非線形場を発生可能な電磁石の製作に成功した。以上より、低エネルギー領域におけるエミッタンス増大を抑制可能な電磁石を開発することができた。

今後は、本電磁石を加速器に導入することによって、非線形場によるエミッタンス増大の抑制原理を実証することを予定している。

謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2114 の支援を受けたものです。

電磁石の設計・製作・磁場測定の際にご尽力いただいた株式会社トーキンの尾形取一郎氏、熊谷洋二氏、本波和真氏に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Chimura *et al.*, Proc. 16th Ann. Mtg. Part. Accel. Soc. Jpn., 728 (2019); https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI008.pdf
- [2] M. Chimura, H. Harada, and M. Kinsho, Prog. Theo. Exp. Phys. **2022**, 063G01 (2022); doi:10.1093/ptep/ptac077
- [3] M. Chimura *et al.*, Japanese Patent Application 2022-125801.
- [4] J. Qiang, R. D. Ryne, S. Habib, and V. Decyk, J. Comput. Phys. **163**, 434 (2000); doi:10.1006/jcph.2000.6570
- [5] Y. Shoji, IEEE TAS 20, 3, 230 (2010); doi:10.1109/TASC.2010.2040268
- [6] J. H. Billen and L. M. Young, LA-UR-96-1834 (1996).
- [7] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics* (Springer, Berlin, 2015), 4th ed., p. 144; doi:10.1007/978-3-319-18317-6
- [8] High-intensity Proton Accelerator Project Team, JAERI-Tech 2003-044 and KEK Report 2002-13 (2003).