

THE DESIGN OF J-PARC MR BUMP MAGNET FOR SLOW EXTRACTION

Ryouji Arakaki, Katsuya Okamura, Masato Tomizawa, *Eiichi Yanaoka
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The high intensity 50-GeV main ring of the J-PARC Project has slow extraction system. This bump magnet make bump orbit, to increase efficiency of extraction. Using code for magnetic field simulation, the shape of magnet core is designed.

J-PARC 主リング遅い取出しバンブ電磁石の設計

1. バンブ電磁石概略

J-PARC主リングでは、直線部の1つで、ビームの遅い取出しが行われる。バンブ電磁石（以下バンブ）は、その直線部の両端に2台ずつ、計4台置かれる。バンブは、遅い取出しの準備として、リング全周に設置された8台の6極電磁石による3次共鳴と共に、バンブ軌道をつくる。（図1）

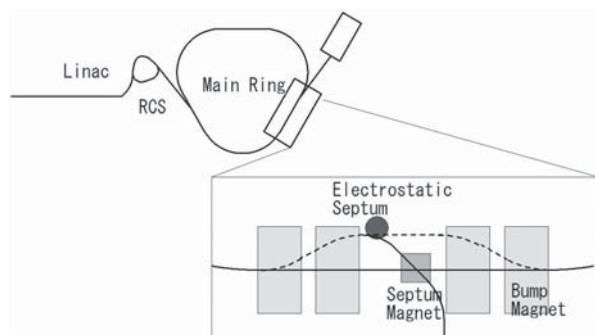


図1 バンブ電磁石配置とバンブ軌道

遅い取出し直線部に入った粒子は、1台目のバンブにてリング内側に曲げられ、2台目のバンブで通常軌道と平行になる。内側約25mmを通った粒子は、3台目のバンブにより外側へ曲げられ、4台目のバンブが進む方向をあわせ通常軌道に戻り、直線部を出て行く。

表1 諸元表

| | |
|------------------------|---------------------------------------|
| Field | 0.7 T |
| Effective Length | 1.4 m |
| Useful Aperture | 140 mm($\leq \pm 2 \times 10^{-4}$) |
| Gap Height | 132 mm |
| Length(including coil) | 1700 mm |
| Cooling Water Pressure | 0.4 MPa |
| Number | 4 |

磁場と有効長は0.65T、1.5mであったが、大きさの制限から、1.7T、1.4mに変更した。主な理由は、

製作ずみの真空ダクトにあわせ、コイルを含めた電磁石長を抑えたのである。横幅は、設置されたときハドロンビームラインの4極電磁石との間に隙間をつくるように、80~90cmにした。

磁場中での粒子の運動方程式 $(mv^2)/r=qvB$ (q は粒子の電荷、陽子の場合 $q=e$)に、運動量の式 $p=mv$ を代入すると $1/r=eB/p$ となる。50GeVの陽子ビームは、バンブの磁場により $[1/r]ds=(e/p) \times [Bds=(1/169.88) \times 0.7 \times 1.4=5.76e-3rad]$ 曲げられる。

2. 2次元磁場計算

2.1 鉄芯概形

断面形状を、磁極間隙132mmで無理なく0.7Tに励磁できるようにもとめる。（図2右下）コイル横の鉄芯は、幅110mmで0.7Tに励磁すると約1.25Tとなる。コイル上方の鉄芯は、1.4Tを超えないよう115mmに広げた。

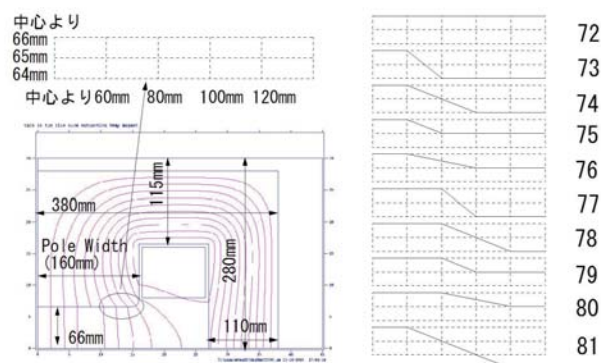


図2 鉄芯断面図

起磁力を変えて計算すると、中心磁場は図3の様に変化する。Fittingは、磁場が飽和していないであろう0.5Tまでのデータで、一次線形にフィティングしている。起磁力と磁場は、比例しているように見えるが、計算値とFittingの差をとったDifferenceは、

0.7Tから急に大きくなっている。このモデルは、0.7Tまでは起磁力と磁場とが比例していて、適切な大きさといえる。0.7T出すのに必要な起磁力は、37000Aturnである。

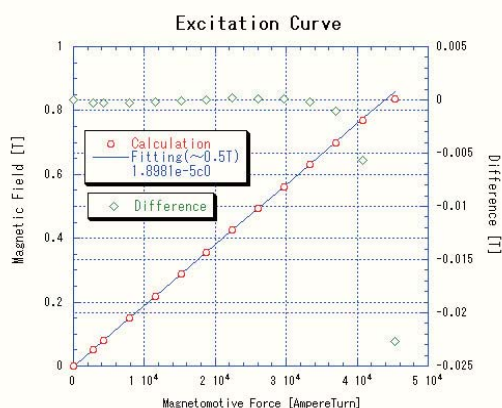


図3 励磁曲線

2.2磁極部

次に磁極形状を、直径140mmのアーチャーを得られるようにする。図2左下の磁極幅を変えて0.7Tに励磁する計算によると、中心より70mmでの減衰は、片側180mmの磁極幅で0.002となる。横幅を抑えて、70mmで0.005程度の減衰になる片側磁極幅160mmにする。均一性が落ちた磁場を、磁極両端部につけるシムで、改善する。磁極中心より60mmから120mmにかけての磁極両端(図2左下楕円内)に、シム(図2右)をつけて計算した。各モデルの磁場の分布は、図4の様になっており、この中で最適と思われる78のモデルを、採用する。

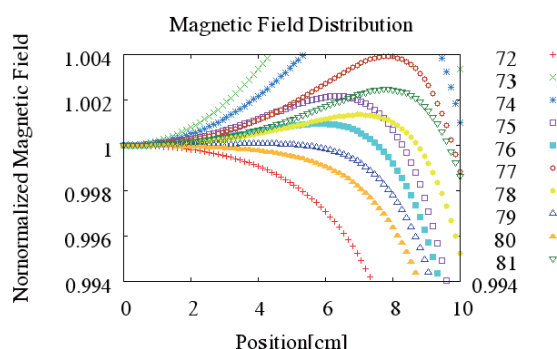


図4 シム形状の違いによる磁場分布の変化

3. 3次元磁場計算

3.1 Longitudinal方向磁場

モデル78の断面を垂直に1.4m引伸ばしたモデルで、0.7Tに励磁する3次元磁場計算した。図5左は、ビーム軌道軸中心の鉛直な面の鉛直方向磁場を、強さで色分している。ビーム軌道上の鉛直方向の磁場をグラフ化したのが、図5右である。

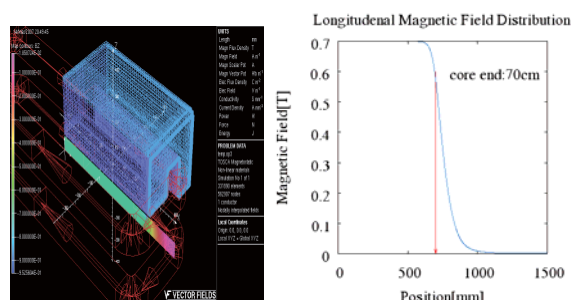


図5 Longitudinal方向磁場分布

3.2 RectangleとRogowski

起磁力を変えて計算したBL積と有効長を、図6に示す。計算は、電磁石口出し部の鉄芯形状を、Rectangle形状のものとRogowski Curveを模擬した5段の階段状のモデルで行なった。

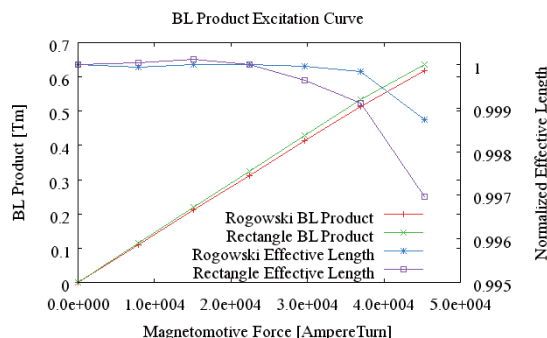


図6 3次元計算による励磁曲線

電流とBL積は、Rogowskiのモデルの方が比例しているが、Rectangleでも37000Aturnにおいて、0.001程の違いである。電流制御によりこの違いを補正すると、Rogowskiは採用しなかった。

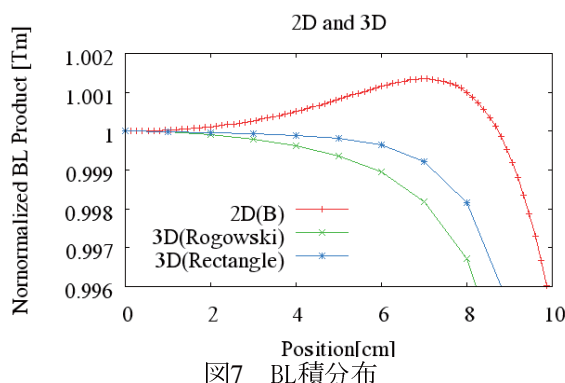


図7 BL積分布

BL積の断面水平方向の分布は、2次元で計算した磁場分布より、中心から離れたところが小さくなっている。(図7)この理由は、磁石口出し部では、漏れ磁場により中心軸(ビーム軌道)から離れたところ程、磁場の減衰が大きいからである。この効果は、シムによる磁場補正際にも考慮している。

4. コイル設計

4.1 電流と電圧

コイル断面形状は、鉄芯で決まっている。巻数を多くすると、電流が下がりバンプへの給電線が細くなる。しかし、巻線が細く長くなってしまい、ジュール熱の発熱量は変わらず、高い冷却水圧が要求される。しかも、電磁石電源を高圧対応の仕様になければならない。電圧を400V程度におさえ、巻数を6層8列の48ターンにすると、最大電流771Aになった。

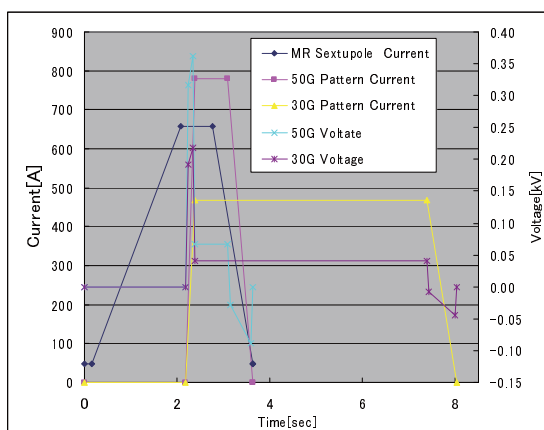


図8 パターン励磁時の電流と電圧

パターン電流で励磁したときの電圧は、3次元磁場計算より導いた電磁石のインダクタンス59mHで計算して、図8のようになる。直流98V交流305Vだが、最大電圧は、電流スムージングにより直流と交流の電圧が最大になる時刻がずれて370Vとなる。電磁石電源間は、距離170m、ケーブル200mm²で計算している。以上から設計したコイル既形を、図9に示す。

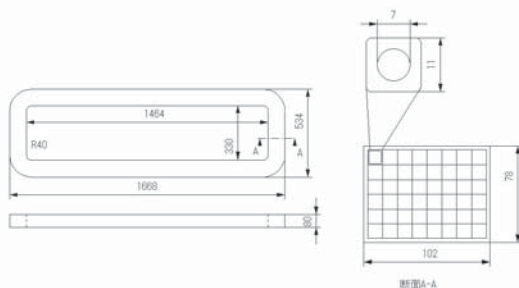


図9 コイル概形

4.2 冷却水

圧力損失を、冷却水路を1台あたり6系統にして抑えた。圧力損失を計算した結果は、下の式で、図10の様になる。(∠T:温度上昇、∠P:圧力損失、L_{mag}:冷却水流量)

$$\begin{aligned} \Delta T &= 2.2155e-5 L_{\text{mag}} \\ \Delta P &= 1.4546e-2 L_{\text{mag}}^{1.75} + 2.3828e-3 L_{\text{mag}}^{1.8} \end{aligned}$$

設置場所での冷却水差圧は、4kg/cm²は確保できるであろう。計算式はコイルの巻線の部分だけで、コイルとヘッダー間の圧力損失などは含まれていない。コイルヘッダー間が1kg/cm²になっても、コイルに3kg/cm²かかり冷却水18[l/min]流れるので、温度上昇14℃程度になる。

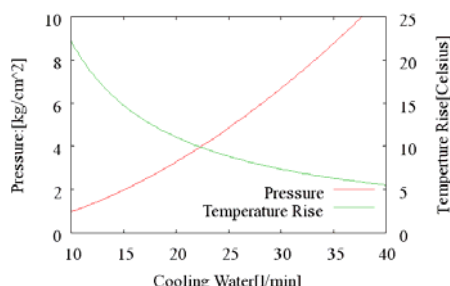


図10 冷却水量と圧損、水温上昇の関係

5. その他

この電磁石は、パターン電流で励磁するので、渦電流が流れ、発熱し、磁場が遅れる。発生する熱は立上げ時0.2秒間96W、下げる時0.5秒間35W、一周3.64秒で平均すると10W程度である。(図11)この程度の発熱であれば、自然放熱で充分である。

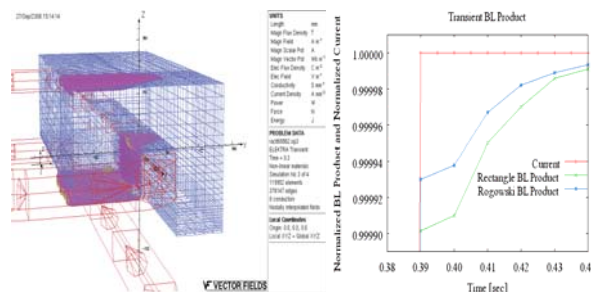


図11 渦電流の分布 図12 磁場の遅れ

また、磁場の遅れは、3次元の過渡磁場の計算の結果をみると、電源による補正で対応できる程度であろう。(図12)

6. まとめ

電磁石設計は、磁場計算コードでより精密な設計が出来るようになった。2次元磁場計算、3次元磁場計算から、冷却水の計算は、相互に繰返し計算して最適値を求める。これにより、必要で無駄のない電磁石が、設計できる。

参考文献

- [1] M.Tomizawa, et al., "Proceedings of the 8th European Particle Accelerator Conference", 2002, p1058-1060
- [2] 富澤正人.他 "This Proceedings"