

## J-PARC RCS エネルギー増強のための主電磁石の検討

### CONCEPTUAL DESIGN OF MAIN MAGNETS FOR THE J-PARC RCS ENERGY UPGRADE

谷教夫<sup>#,A)</sup>, 渡辺泰広<sup>A)</sup>, 發知英明<sup>A)</sup>, 原田寛之<sup>A)</sup>, 山本昌亘<sup>A)</sup>, 金正倫計<sup>A)</sup>,  
五十嵐進<sup>B)</sup>, 佐藤洋一<sup>B)</sup>, 白形政司<sup>B)</sup>, 小関忠<sup>B)</sup>

Norio Tani<sup>#,A)</sup>, Yasuhiro Watanabe<sup>A)</sup>, Hideaki Hotchi<sup>A)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>,  
Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>B)</sup>, Yoichi Sato<sup>B)</sup>, Masashi Shirakata<sup>B)</sup>, Tadashi Koseki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> JAEA, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

At the J-PARC Main Ring (MR), there have been various investigation carried out at the moment aiming at the beam operation of MW order. As one of the investigations, a study of the Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) magnets was implemented. Increase of the extraction energy of RCS was needed to reduce beam loss, as beam loss in the MR injection region was large under influence of Space Charge effect at the injection beam of 3GeV. Therefore conceptual design of the extraction energy upgrade using dipole and quadrupole magnets of RCS was performed. In this paper, we will report the contents of the study in extraction energy upgrade of RCS magnets and problems which became clear as a result.

#### 1. はじめに

J-PARC 加速器の大強度化を進めるために、J-PARC 3GeV Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) の加速エネルギーを現在の 3GeV から増強する案が検討されている[1]。その背景として、Main Ring (MR)は、素粒子物理と原子核実験のためにニュートリノビームラインとハドロン実験施設に陽子ビームを供給している。MR のビーム出力は 750kW を目標とし、大強度陽子ビームに対応するため大口径アパーチャーを持つように設計された。RCS は 2 バンチの 3GeV 陽子ビームを、0.12s の入射時間に MR に 4 回入射する。このビームは、1.4s で 30GeV まで加速され、速い取り出しモードでニュートリノビームラインに出射される。この時の繰り返し周期は、2.48s である。現在、速い取り出しモードでのビーム出力は 390kW まで達成されている。

750kW のビーム出力を達成するために MR では繰り返し周期を 1.3s に速める予定である。その為、電磁石電源や RF 空洞、入射・出射システムのアップグレードが計画されている。また、実現可能なシナリオを検討するために空間電荷効果を考慮した解析が実施された。3-50BT と MR に設置されたコリメータのビームロス許容値は、それぞれ 2kW と 3.5kW である。RCS のビーム出力が 1MW の時、解析結果から、3-50BT と MR のコリメータでのビームロス、それぞれ 1.9kW と 5kW となった。このため、MR のコリメータは、許容値を超えており、1MW の full ビームを RCS から受け入れることができない。しかし、RCS から 600kW のビーム入射で 750kW は達成

できることは判っている。

しかし、近い将来、MW 級のビーム運転が要求されることは明らかである。

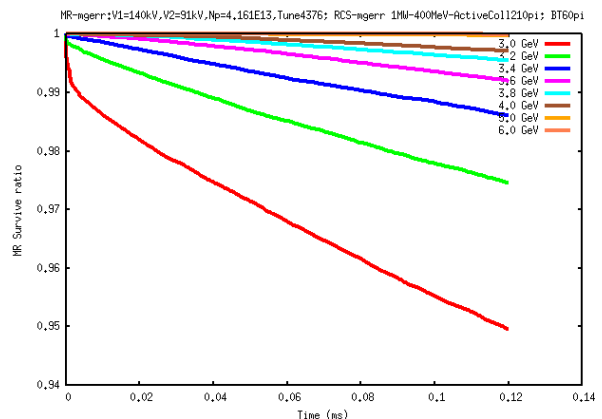


Figure 1: Simulation results for the beam survival ratio as a function of time during the injection period of MR for the injection energy of 3 to 6 GeV.

Figure 1 は、RCS から MR にビームを 3GeV から 6GeV の入射エネルギーで入射した際のビーム生存率と入射時間の相関関係を示した解析結果である。この解析に用いたビーム強度は、RCS が MR に対して 1MW の 3GeV ビームを入射するとして、粒子数は  $4.1 \times 10^{13}$  ppb とした。この場合、MR では 1.3 秒の繰り返し時間で 1.3MW のビーム強度が得られる。しかし、RCS から 3GeV ビームを MR へ入射すると、空間電荷効果の影響で MR 入射部でのビームロスが 5%と大きくなる。3.4GeV 以上の入射エネルギーでは、ビームロスが 1%程度となり MR で 1MW ビームの受け入れが可能となることが判っている。

<sup>#</sup> tani.norio@jaea.go.jp

本論文では、RCS の出射エネルギーを 3.4GeV とした場合における主電磁石の検討結果について報告する。

## 2. 現電磁石における設計裕度

3.4GeV の出射エネルギーの実現性を確認する為に、実機として使用している RCS 偏向電磁石と四極電磁石を用いた検討内容について述べる。

### 2.1 偏向電磁石・電源システムの検討

実機で使用している偏向電磁石は、限られた周長の中でドリフトスペースを確保するために鉄芯長を短くし、出射エネルギーも 3GeV 以上は出さないことを前提に設計された[2][3]。また、磁場と電流の飽和特性も 2500A を超えると急激に悪くなり、3GeV 出射(2662A 付近)で 5% 近い飽和特性を有していることが磁場測定の結果から判っている。この様に RCS の偏向電磁石システムにおいては、磁場と電流の関係が非常に重要となってくる。その為、設計検討は、三次元磁場解析コード TOSCA を用いて行う必要がある。3.4GeV の積分磁場 (BL 値) は、3.699Tm である。磁場解析ではビームの中心軌道上で BL 値がこの値になるようにコイル電流密度を調整し、電流値が決められた。400MeV と 3.4GeV の電流値は、それぞれ、647A と 3192A になった。現状の偏向電磁石を用いて計算された飽和特性を Figure 2 に示す。この飽和特性は、比較的線形性が保たれている 600A から 1600A の区間で線形近似を取り、直線式を求める。グラフでは、各電流値に対して、計算値と測定値の比を飽和特性として縦軸に表している。その結果、3.4GeV で 7.3% の飽和が見られた。

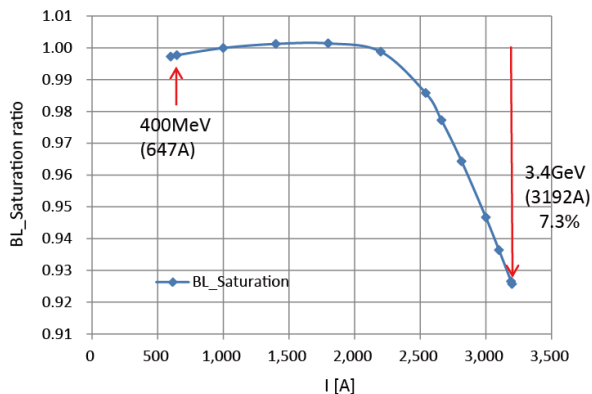


Figure 2: Saturation characteristic of current and magnetic field in present dipole magnet.

入出射時の電流値から直流電流  $I_{dc}$  と交流電流  $I_{ac}$  は、それぞれ 1919.5A と 1272.5A になる。

電磁石端子間の交流電圧  $V_{ac\_mag}$  は、次の式で示される。

$$V_{ac\_mag} = 2\pi fLI_{ac} \quad (1)$$

ここで、繰り返し周波数  $f$  は 25Hz、電磁石のインダクタンス  $L$  は 62mH とすると、 $V_{ac\_mag}$  は、12393V となる。チョークトランスの巻線比は、1:2 であるため、交流電源

の所要電圧  $V_{ac}$  は、12393V/2=6196V となる。現在の交流電源の所要電圧 (5832V) に対する比率は、6196V/5832V=1.062 から 6.2%アップとなる。

直流電源の所要電圧は、電磁石の直流抵抗を 32mΩ、チョークトランス直流抵抗を 24.5mΩ、全ケーブル直流抵抗を 52mΩ とすると、 $((32m\Omega + 24.5m\Omega) \times 25 \text{台} + 52m\Omega) \times 1919.5A = 2811V$  となる。従って、現在の直流電源に対する比率は、電圧(2661V)で、 $2811V/2661V = 1.056$  より 5.6%アップとなる。また、電流(1667A)で、 $1919.5A/1667A = 1.151$  より 15.1%アップとなる。定格値は、直流電源及び交流電源の最大定格の 15.1%及び 6.2% 超えており、現状のシステムで 3.4GeV は難しいことが判った。

### 2.2 四極電磁石・電源システムの検討

四極電磁石は、有効磁場長を鉄芯長として実際の電磁石設計が行われ、更に電源についても 3GeV 出射の設計電流値に対してチューン調整代を考慮して 15% の余裕を持った設計が行われていた。ここで、四極電磁石の基本設計パラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Parameter of the Quadrupole Magnets of RCS

Family Name	Number	Bore Dia. [mm]	N [turn/pole]	$L_{eff}$ [m]	$I_{max}$ [A]
QFN	12	290	32	0.828	1274
QDN	12	290	32	0.828	1313
QDX	9	290	32	0.828	1181
QFM	3	330	32	1.042	1180
QFX	12	330	32	0.640	1640
QFL	6	410	32	1.072	1797
QDL	6	410	32	1.072	1819

Table 2: The Design Current Value of Each Quadrupole Magnet in the Time of Extraction

Family Name	K1 [1/m]	I [A]		
		3GeV	3.4GeV	15%UP
QFN	0.23930	964.0	1067.5	1227.6
QDN	0.23930	964.0	1067.5	1227.6
QDX	0.21385	861.4	953.9	1097.0
QFM	0.18424	763.6	845.6	972.5
QFX	0.16110	1087.2	1203.9	1384.5
QFL	0.19433	1208.5	1338.3	1539.0
QDL	0.19511	1213.4	1343.7	1545.2

3.4GeV の出射エネルギーの検討では、三次元磁場解析コードを使用せず、K1 値より GL 積と磁場勾配、電流値等を算出した。各 family に対して、出射エネルギー

における電流値を Table 2 に示す。Table 1 と Table 2 から四極電磁石は、3.4GeV 時の電流値に対して 15%の余裕を考慮しても最大定格  $I_{max}$  の範囲内に収まっていることが判る。従って、四極電磁石については、現状のシステムで 3.4GeV 出射が実現可能であることが判った。

### 3. 偏向電磁石の 3.4GeV 設計検討

RCS から MR に対して、3.4GeV 出射を実現するためには、偏向電磁石の再設計が必要であることが、これまでの検討で明らかになってきた。再設計に当たっては、既存の建家に収まることと電磁石の飽和を 5%以内とすることを前提として設計を行うこととなった。

#### 3.1 偏向電磁石の再設計

偏向電磁石の基本パラメータを Table 3 に示す。再設計では、既存のビームライン上に据え付け可能な鉄芯長として、現鉄芯長の 10%増しとした。その場合、鉄芯長は、直線長で 3041.3mm、円弧長で 3050mm となる。電磁石の断面形状の最適化には二次元磁場解析 POISSON を用いた。電源負荷を低減するために、コイルの巻線数や形状を変えてインダクタンスを減らす検討を行ったが、あまり良い解は得られなかった。

Table 3: Parameter of a Dipole Magnet of RCS

項目	単位	数値
磁極間隙	[mm]	210
コイル巻き数	[turn/pole]	36
曲率半径	[m]	11.65
鉄芯長：		
直線長	[mm]	2763.5
円弧長	[mm]	2770
実効長：		
設計値	[mm]	3050
測定値	[mm]	2946

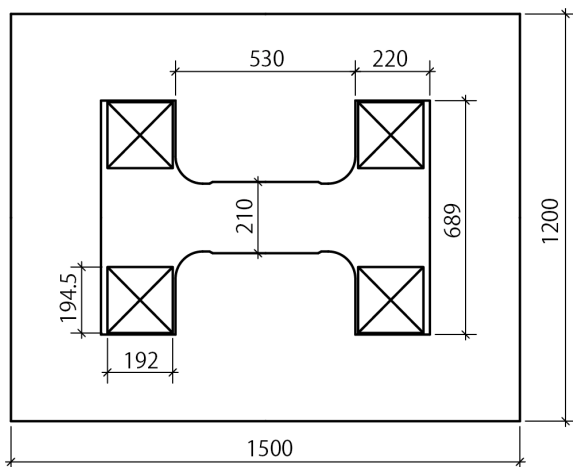


Figure 3: Dipole magnet design cross-section of 3.4GeV.

三次元磁場解析は、Figure 3 に示す断面形状を用いて計算された。3.4GeV の積分磁場 (BL 値) は、3.699Tm である。磁場解析ではビームの中心軌道上で BL 値がこの値になるようにコイル電流密度を調整し、電流値が決められた。再設計で計算された偏向電磁石の飽和特性が、Figure 4 に示された。その結果、3.4GeV で 3.4%の飽和が見られた。

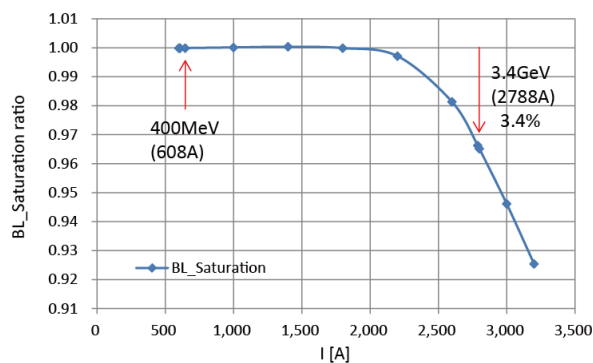


Figure 4: Saturation characteristic of current and magnetic field of 3.4GeV.

#### 3.2 電源の検討

偏向電磁石の再設計で実施した磁場解析の結果から、直流電流、交流電流、インダクタンスは、それぞれ 1698A、1090A、72.9mH となった。また、電磁石の直流抵抗は、20°C換算で 29.6mΩとなる。冷却水の供給温度が 35°Cで温度状況を 30°Cと仮定すると、65°Cの直流抵抗は 33.9mΩとなる。これらの値を用いて電源の検討を行った。

電磁石端子間の交流電圧  $V_{ac\_mag}$  は式(1)を用いて、12482V となる。チョークトランスの巻線比が、1:2 であるため、交流電源の電圧定格  $V_{ac}$  は、6241V となり、現在の交流電源に対する比率は、6241V/5852V=1.07 から 7%アップとなる。

直流電源の電圧定格は、2567V となり、現在の直流電源に対する比率は、電圧で 2567V/2661V=0.96、電流で 1698A/1667A=1.02 となり、2%アップとなる。

これらの検討結果から、交流電源は、交流電圧定格が 7%増加するため電源の交換が必要となる。直流電源は、電圧定格が現電源の仕様に乗っている。電流定格が 2%増加するが、この程度であれば主回路はそのまま使用し、制御系の変更のみで対応可能と思われる。

### 4. 偏向電磁石出射エネルギーの上限

これまでの電磁石や電源の検討結果から、RCS 出射エネルギーの 3.4GeV 化は実現可能であることが判ってきた。しかし、偏向電磁石として、どの程度まで出射エネルギーの増強が可能か 3.4GeV で再設計した偏向電磁石を用いて検討を行った。

エネルギー毎の電流値は、事前に必要な積分磁場を計算し、三次元磁場解析で中心軌道上の積分磁場が計算値と一致するようにコイルの電流密度を変えて決めら

れた。三次元磁場解析は、電磁石の飽和 10%を目途に実施した。Figure 5 に飽和特性の計算結果を示す。電磁石の飽和が 10%以内に収まるエネルギーは 4.0GeV であった。その時の飽和は、9.9%であった。

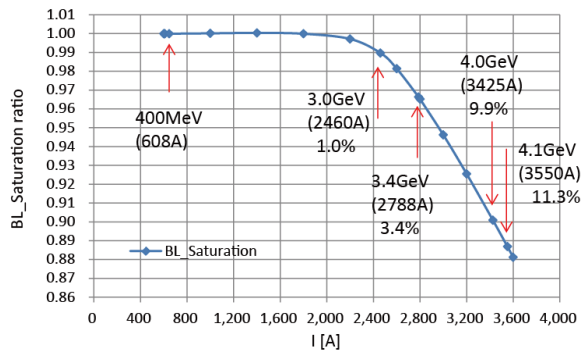


Figure 5: Saturation characteristic to extraction energy from RCS.

偏向電磁石の電源について、現在値と 4.0GeV 出射時のパラメータを Table 4 に示す。直流電源の電流定格は、21%アップとなる。また、交流電源の電圧定格は、40%アップとなる。さらに電磁石の端子間電圧が、14kV となり、絶縁クラスが 6.6kV から 11kV と 1ランクアップする。その為、電源、チョークトランス、共振コンデンサ、電力ケーブルは全て再製作しなければならない。もし、電磁石のコイル電流とコイル巻き数比を調整して、端子間電圧を現在値程度にできれば、共振コンデンサと電力ケーブルは一部既設品を再利用できるかもしれない。

## 5. まとめ

RCS の偏向電磁石や四極電磁石、並びに電源の検討結果から、3.4GeV アップグレードは、実現可能であることが判ってきた。しかし、偏向電磁石の鉄芯長を 1 割長くすることから、ビームライン上に配置されているモニタや真空排気等の配置見直しが必要となってくる。

また、MR 入射部のビームロスを低減するために、更なるアップグレードが要求された場合、磁場解析結果から、鉄芯長を 1 割長くした偏向電磁石で 4.0GeV まで対応できそうである。しかし、実際に製作する場合、端子間電圧が 1 ランク大きくなるため電源の再製作が必要となり、設計が難しくなることが想定される。

Table 4: Parameter of a Dipole Magnet Power Supply of RCS

パラメータ		現在値	4GeV 出射
入射エネルギー	Einj[MeV]	400	400
出射エネルギー	Eext[MeV]	3000	4000
電磁石電流値	Idc[A]	1654	2017
	Iac[A]	1007	1409
	Imin[A]	647	608
	Imax[A]	2662	3425
	電流実効値	1801	2249
	電磁石端子間電圧[V]	9969	13939
電磁石	インダクタンス [mH]	63	63
	直流抵抗[Ω] (60°C)	31.8	31.8
チョークトランス	インダクタンス [mH]	63	63
	直流抵抗 [mΩ](60°C)	25.7	25.7
共振コンデンサ	静電容量[uF]	1287	1287
	端子電圧[V]	9969	13939
直流電源	出力電圧[V]	2661	3219
	出力電流[A]	1667	2017
交流電源	出力電圧[V]	5832	8154
	出力電流[A]	1587	2219
電力ケーブル	電圧クラス[V]	6600	11000
	断面積	325	325

## 参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, JPS Conf. Proc. **8**, 012018 (2015).
- [2] N. Tani *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 409-412, 2004.
- [3] N. Tani *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, pp. 314-317, 2008.