

## EXPERIMENT AND ANALYSIS OF THE INJECTION BUMP SYSTEM OF THE 3-GeV RCS IN J-PARC

Tomohiro Takayanagi<sup>1</sup>, Tomoaki Ueno, Michikazu Kinsho, Osamu Takeda, Yoshio Yamazaki, Masahiro Yoshimoto,  
Junichiro Kamiya, Masao Watanabe, Masaya Kuramochi, Irie Yoshiro  
Accelerator Development Group, Japan Atomic Energy Agency  
2-4, Shirakata, Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

### Abstract

The injection bump system of the 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) in J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) consists of the pulse bending magnets for the injection bump orbit, which are four horizontal bending magnets (shift bump), four horizontal painting magnets (h-paint bump) and two vertical painting magnets (v-paint bump). The four shift bump magnets, which are connected in series, produce a closed bump orbit to merge the injection beam into the circulating beam. The preceding machine of the shift bump magnet was manufactured, and the current pattern of the shift bump was excited by the preceding machine of the paint bump power supply. The magnetic field distributions of the shift bump magnet were measured with a long search coil, thus giving a BL product over the magnet gap area. Future more, the temperature distributions at the various points were measured by the thermocouples over 24 hours till they saturated. The good performance at the 181MeV injection beam design was confirmed.

### J-PARC 3-GeV RCS入射バンブシステムの実験と解析

#### 1. 緒言

J-PARC 3GeV RCSの入射バンブシステム[1]は、Linacからの入射ビーム ( $H^-$ ) とRCSの周回ビーム ( $H^+$ ) を合流させ、大強度の陽子ビームを生成する重要な機器の一つである。このうち、1号機を製作した水平シフトバンブ電磁石[2]の磁場分布の測定と、コイル、端板、及び、側板の温度分布測定を行った。また、水平ペイントバンブ電磁石電源の24時間の連続通電試験を行った。その結果、Linacの初期ビーム出力となる181 MeVビーム入射の仕様を十分満足することを確認した。

#### 2. 入射バンブシステム

入射バンブシステムで使用する水平シフトバンブ電磁石、水平ペイントバンブ電磁石、及び、垂直ペイント電磁石の仕様を表1に示す。400 MeVビーム入射の仕様には、電源容量のみを増加して対応する。入射部に配置された水平シフトバンブ電磁石 (BUHS)は、入射時のビームロスを小さくするため、310 mmの大口径ギャップで設計した。

ペインティング入射におけるビーム軌道の概念図を図1に示す。Linacからの $H^-$ の入射ビームの99.8%が1stフォイルで $H^+$ に変換され、周回ビームに合流する。1stフォイルで変換されずに残った $H^0$ ビームは、 $H^+$ に変換してダンプリーンへと導くため、4台目 (BUHS4)の位置にフォイルが必要となる。そのた

め、電磁石鉄心をビーム軸方向に分割し、2ndフォイルを挿入できる構造とした。4台の電磁石は、磁場分布の精度が必要であるため、すべてを同じ構造で設計した。また、励磁タイミングのジッタでCODが生じないように、4台を直列に接続して入射バンブ軌道を閉じるようにした。

ペインティング入射に使用する水平ペイントバンブ電磁石 (BUHP)と垂直ペイント電磁石 (BUVP)を励磁する電源は、様々な入射パターンに対応した励磁波形の出力が必要である。また、1%以下の誤差にする高精度な制御特性が要求される。

400 MeVビーム入射の仕様に対応した各電磁石電

表1:入射バンブシステムパラメータ

Title.	BUHS	BUHP	BUVP
Number of magnets	4	4	2
Structure	W- frame	C-type	C-type
Core Length [mm]	400 - 400	400	400
Maximum Field [T]	0.26(0.16)	0.26(0.16)	0.09(0.05)
Maximum Current [kA]	32.2(20)	29(17.4)	3.4(2.0)
Turns per Coil	2	2	2
Gap Height [mm]	310	280	100
Coil Inside Distance [mm]	616	370	240
Beam Stay Area [mm] [Horizontal / Vertical]	370 / 224	257 / 250	44 / 91
Lamination thickness [mm]	0.15	0.10	0.10

(181 MeV beam injection)

<sup>1</sup> E-mail: takayanagi.tomohiro@jaea.go.jp

源の設定波形例を図2に示す。500  $\mu$ sの入射期間中、MLF、MRに要求されるペインティングに対応した励磁波形の制御を行う。また、垂直ペイント電磁石は、correlated injection と anti-correlated injection に対応している。

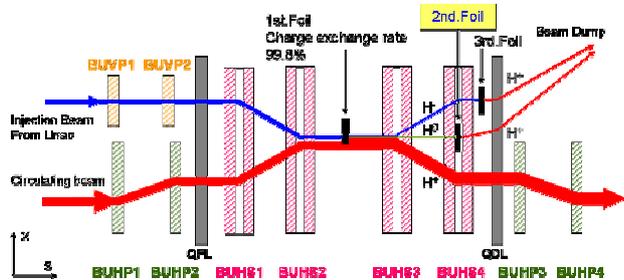


図1:ペインティング入射のビーム軌道概念図

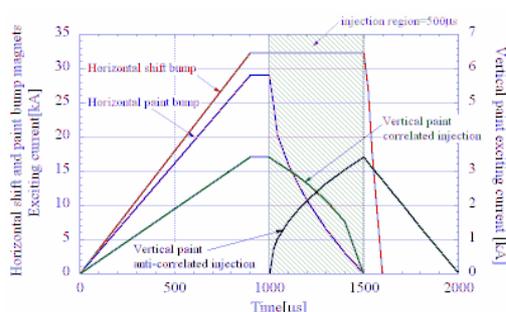


図2:励磁電流設定波形

### 3. 1号機の製作

#### 3.1 水平シフトバンプ電磁石

入射バンプシステムの中で、ギャップが最も大きく、また、2ndフォイルを挿入するために鉄心を上下流方向に分割した複雑な構造である水平シフトバンプ電磁石の1号機を製作し、その磁場分布と温度特性を確認した。電磁石の写真を図3に示す。2ndフォイルを挿入する側を(a)に、電流導入側を(b)に示す。写真の電磁石には、BL積分磁場を測定するためのロングサーチコイルが装着されている。また、ギャップ内コイル、フレキ板、端板、及び、側板の発熱温度を測定した。

#### 3.2 水平ペイントバンプ電磁石電源

水平ペイントバンプ電磁石と垂直ペイント電磁石は、図2に示したペインティング波形を任意に設定する必要がある。また、励磁用電源は電流容量が大きいため、IGBTを並列接続した多重化構成とした。特に、水平ペイントバンプ電磁石電源1は電流容量が大きく、2象限チョッパを18並列で構成し、さらに、3並列ごとの6多重構成とした。2象限チョッパの構成を図4に示す。1%以下の誤差でトラッキング通電を行うため、PWM周波数は50 kHz、合成PWM周波数は600 kHzとした。水平ペイントバンプ電磁石電源の1号機を製作し、波形制御の試験を行った。

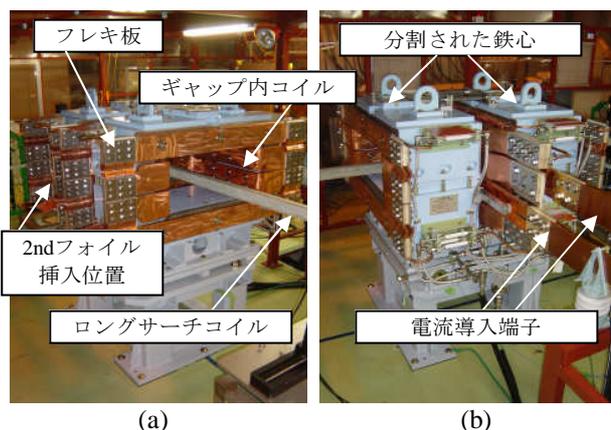


図3:水平シフトバンプ電磁石1号機

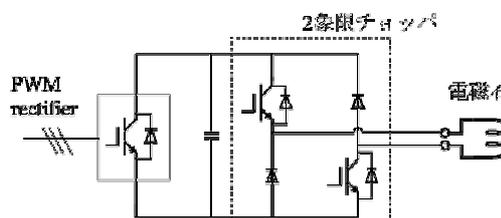


図4:2象限チョッパ電源構成図

## 4. 実験と結果

### 4.1 磁場測定

水平シフトバンプ電磁石の磁場分布測定を、1号機を先行製作した水平ペイントバンプ電磁石用励磁電源を用いて行った。励磁電流は、水平シフトバンプ電磁石の181 MeVビーム入射の仕様である20 kAである。ただし、実機と組み合わせが異なるため、立ち上がり650  $\mu$ s、フラットトップ600  $\mu$ s、立ち下り650  $\mu$ sの励磁波形とした。

直径0.1 mmの銅線を幅4 mm、長さ2500 mmで3ターンしたロングサーチコイルを用いて、積分磁場分布の測定を行った。結果を図5に示す。ビームが通過する幅370 mm、高さ224 mmの領域で、1%以下の有効磁場領域があることを確認した。また、中心磁場は0.16 Tであった。

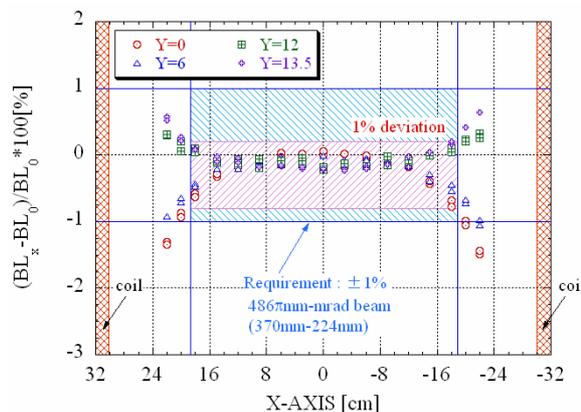


図5:積分磁場分布測定結果

### 4.2 電磁石温度測定

励磁電流20 kAで24時間の連続通電試験を行い、水平シフトバンプ電磁石のコイル、端板、及び、側板の温度を測定した。結果を図6に示す。最も温度が高かったのはギャップ内のコイルで、67℃上昇して90℃と高温になった。1 mm程度の熱膨張が見込まれるが、ギャップ内コイルと冷却パイプがある渡りのコイルをフレキ板で接続しているため、熱伸びを吸収することが可能である。フレキ板は厚さ0.2 mmの銅板を50枚重ねた構造になっている。

また、コイルの絶縁支持に耐熱性(230℃)に優れた日本理化学工業所製のリカライトを使用した。リカライトは、イミド系の材質で耐熱性と耐放射線性に優れている。リカライトの材料試験結果(JIS K 6911)を図7に示す。(a)は温度特性を、(b)は耐放射線特性を示す。照射試験は、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所内のコバルト60照射施設のガンマ線で行った。400 MeVビーム入射の仕様では励磁電流が32.2 kAとなり、コイル温度が165℃になることが予想される。また、コイルのサポートは100 MPa以下の応力で設計した。そのため、1年間で1 MGyの被曝がある領域で180℃の運転を行うと仮定した場合でも、30年の使用に耐える設計としている。

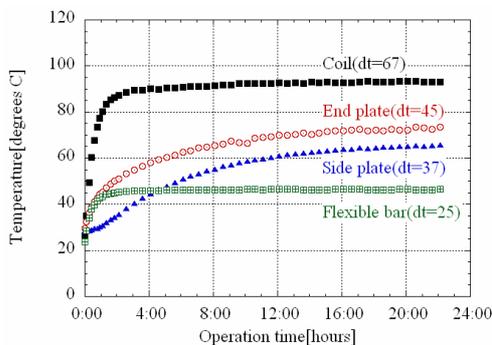


図6:温度分布測定結果

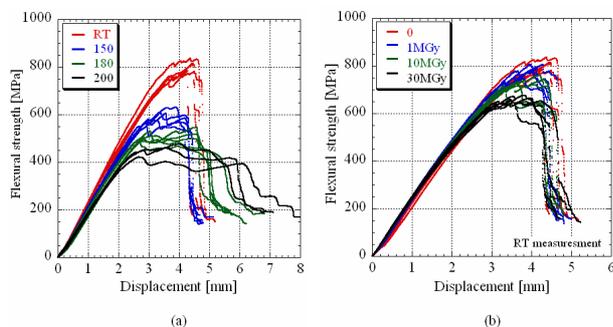


図7:リカライト材料試験結果  
(a)温度特性、(b)耐放射線特性

### 4.3 電源安定度

24時間の連続通電試験を行い、設定波形と励磁電流の偏差の変化を測定した。結果を図8に示す。コイルの温度変化により負荷抵抗が変化するため、温

度が安定すると偏差も安定した。設定波形に対する偏差が1%以下で制御できることを確認した。

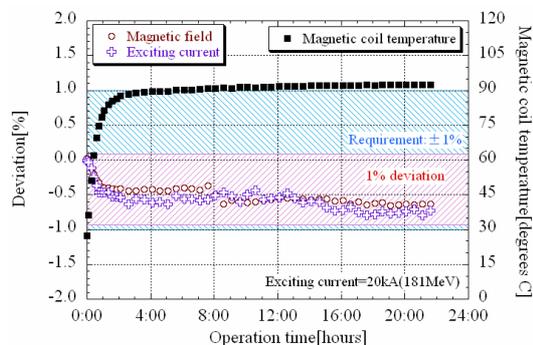


図8:連続通電試験結果

### 4.4 ペイント波形

水平ペイントバンプ電磁石の仕様に合わせてダミー負荷を用いて、181 MeVビーム入射の仕様である17.4 kAを励磁したペイント波形の設定精度と制御特性の試験を行った。結果を図9に示す。高精度制御を行なった期間は、1%以下でコントロールが可能である事を確認した。

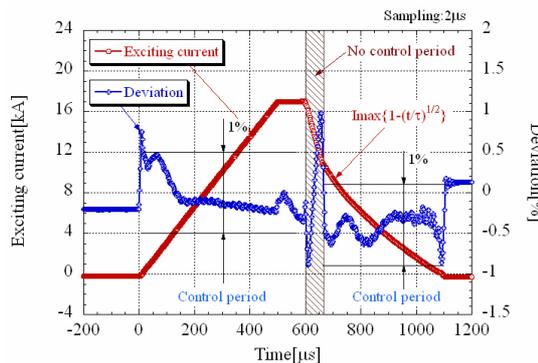


図9:ペイントバンプ波形精度

## 5. 結言

水平シフトバンプ電磁石の磁場特性と温度特性を測定し、181 MeVビーム入射の仕様を満足することを確認した。また、ペイントバンプ電磁石の励磁波形を1%以下の精度で制御できる事を確認した。今後は、水平ペイントバンプ電磁石と垂直ペイント電磁石の磁場測定と連続通電試験を行い、有効磁場領域と励磁波形精度を確認する予定である。

## 参考文献

- [1] T.Takayanagi et al., "Design of the injection bump system of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1358-1361
- [2] T.Takayanagi et al., "Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369