

INJECTION ENERGY RECOVERY OF J-PARC RCS

Naoki Hayashi^{*A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Saha Pranab^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{A)},
Kazami Yamamoto^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Yoshio Yamazaki^{A)},

^{A)}Accelerator Division, J-PARC Center (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, IBARAKI, 351-1195

Abstract

The J-PARC RCS is a high beam power Rapid-Cycling Synchrotron (RCS). The original designed injection energy is 400MeV, although presently it is 181MeV, and its beam power is limited to 0.6MW. Works to recover the Linac energy are ongoing and injection magnets power supplies upgrade are required in the RCS. In order to achieve 1MW designed beam power, new instrumentation is also planned simultaneously. Activities related injection energy recovery in the J-PARC RCS is presented.

J-PARC RCS の入射エネルギー回復

1. はじめに

J-PARC RCS の初期設計時の入射エネルギーは、400MeV である^[1]が、現在は、181MeV で入射を行っている^[2]。ビームパワー 1MW 達成のための条件として、入射時の空間電荷効果を抑制するため、入射エネルギーをデザイン当初の 400MeV に回復させることが必須である。現状、181MeV, beam power 0.3MW 相当 (粒子数 $N = 2.5 \times 10^{13} ppp$), $\epsilon = 216\pi mm \cdot mrad$, $B_f = 0.4$ において、tune shift $\Delta\nu \sim 0.15$ である。エネルギーが単純に、300, 400MeV と上がると、tune shift は、単純に $\Delta\nu \propto \beta^{-2}\gamma^{-3}$ なので、1/2, 1/3 となる。400MeV になれば、1MW 相当の粒子数 $N = 8.3 \times 10^{13} ppp$ でも、 $\Delta\nu \sim 0.15$ だが、181MeV のままでは、 $\Delta\nu \sim 0.5$ 近くになり、大きなビームロス要因になる。このため、181MeV のエネルギーでは、0.6MW をビームパワーの上限、と設定している。

400MeV にした場合、その他の影響について考えてみると、入射エネルギーに直接関係しない、誤差磁場の影響は、小さくなる。また主電磁石の制御は、DC に対し 25Hz で変動している分を重畳しているの、DC 成分が増えるだけ、実効電流値は増えるが、磁場の tracking 自体は、楽な方向に向かうはずである。仮にビームロスによる散乱が起きた時、その角度分布は、約 1/3 になるので局所的な残留線量は、減る傾向と考えられる。ただ、各粒子のエネルギーが高くなっているの、この点で状況が改善すると断定はできない。

2. 入射機器増強

RCS では、入射時の空間電荷効果の緩和の為、 $216\pi mm \cdot mrad$ の位相空間領域に均等にビームを入射する painting を行っている^[3,4]。入射の主要な機器は、周回ビームを単純に水平移動させる水平シフトポンプ、フォイル位置での周回ビームを時間的に変えて、入射ビームが emittance の楕円の特定の一部を占めるように制御してやる水平ペイントポンプ、入射ビームの位置は変えないが、パルス毎に傾きのみ変える、リニアックから RCS へのビーム移送ライン (L3BT) 上最終段の的可変偏向電磁石がある。同様に、vertical 方向

の painting を行う、垂直ペイントポンプも L3BT 上にある。rigidity $B\rho$ は、181MeV で、2.0356、400MeV で、3.183 なので、現行では電流値が不足する電源、主にポンプ電磁石等、は増強する。DC のセプタム電磁石は、既に 400MeV のデザイン要求通りに作られているので、増強の必要はない。

2.1 シフトポンプ電磁石電源

水平シフトポンプ、及び水平ペイントポンプ電源の増強計画の概要については、既に報告している^[5]。

現行の IGBT チョップ方式は、複数の IGBT (単体の素周波数 6kHz) を多重化 (8 重化) したもので、電源全体としては、基本、48kHz の ripple があることが分かっており、その高調波も電磁石にあるサーチコイルで観測されている。

ビームにあらわれる影響として、入射時に、 $\Delta\nu = 0.2 \sim \frac{100kHz}{469kHz}$ の、side band が観測されていた。さらに、調査するために、加速器の study 時に特殊な運転条件、「加速しない直流モードかつビームを射出せず、入射後 40ms 後に再度ポンプ電磁石を励磁し」、ポンプ領域の外の BPM で turn-by-turn でビーム位置の振動を調べた。軌道の振動は大きなところで、10mm、さらに周波数解析するとやはり、100kHz の成分があった。

電源から ripple が出ていることが原因の一つだが、負荷の電磁石側側も、この 100kHz 付近のノイズを強める特性を持っている、と考えられる。最近、4 台直列の電磁石を、1 から 4 について、個別にインピーダンスを測定したところ、共鳴が、100kHz 付近にあるが、個々に周波数が微妙にずれていることが分かった。特に、ビームを外側に蹴る 1、4 番目とビームを内側に蹴る 2、3 番目で周波数が異なっていた。詳細な計算が必要だが、この電磁石側の影響もあり、 $\Delta\nu \sim 0.2$ があると思われる。

また、このノイズは、パルス毎の再現性がない。J-PARC の timing システムと IGBT のキャリアーとが非同期の為、生じていると思われるので、偏向電磁石で実施したような同期化をする作業を進める予定でいる^[6]。ノイズを消すことはできないが、平均化処理等により種々のビーム調整の確度が上がると期待している。

400MeV 入射時には、switching ripple の少ない電源方式 (コンデンサバンク方式) に変える方針である。全体で、定格電流 32kA, 最大電圧 13kV の電源を構成す

* naoki.hayashi@j-parc.jp

るため、16 並列の電源とし、さらにその一並列分の電源も複数のユニットで構成するようにしている。また、switching 回数が少なくても、その転流時に発生するノイズ、及びその影響について試験、検討を実施しているところである。

2.2 ペイント電磁石電源

ペイントバンブ電磁石電源も、現行シフトバンブ電源と同様 IGBT チョッパ方式の電源である。ただ、シフトバンブ電源に比べ要求仕様電圧が低いため、より高速な IGBT 素子を用いている¹。こちらも、シフトバンブの場合と同様、実際にビームを使った試験をした。水平ペイントバンブは、4 台の電磁石を独立な電源で給電している為、バンブ領域の外で、若干の COD がでているものの、シフトバンブの場合に見られたような振動は見られなかった。

また、シフトバンブと異なり、多様な任意波形パターンが必須であるため、それに適した現行の IGBT チョッパ方式で、ペイントバンブ電磁石は増強する。計画としては、まず 1 台分を新規製作する。残り 3 台は、現行電源にチョッパ盤を付加した形で増強をする。

一般に、定格の大きい電源で、低電流で運転する際に精度が問題になる。特に、400MeV になるまで、或いは、小さなペイント領域にする際は、それが懸念される。最近、小さなペイント領域を実現するため、低電流の運転中に、一部の電源の制御が不安定になることがあった。この電源の制御は、マイナー電圧制御 (m-AVR) 付き定電流制御 (ACR)^[7] を使っているが、調査の結果、他電源起源のノイズが出力電圧を検知しフィードバックする 2 本の同軸ケーブルに混入したことが要因であることが分かった。幾らかの試行錯誤と 100kHz 程度までは、ツイストペア線の方がノイズに強いということから、対策として、3 芯ツイストペア線に置き換えることで解決した。これは、新しい電源、改造時に対応してゆく。

2.3 可変偏向電磁石システム

可変偏向電磁石は、2 つの役割、

- MR/MLF と beam size (emittance) を切替えて運転する
- ペイントバンブを使わない center 入射をする

がある^[8]。

「center 入射」は、「painting 入射」と対比するモードで、入射ビームを周回ビームの全て同じ位相空間上に入れることである。通常の運転には、用いないが、beam study や、調整運転の初期にシフトバンブのみを使った入射調整の際に必要となる。181MeV 入射の際は、入射セプトラム電磁石に設計時より多い電流を流すことで kick 量を稼ぎ、使用しなくてもよかったが、400MeV 入射になると、入射セプトラムの定格励磁量では足りなくなり、DC モードで構わないので、可変偏向電磁石に、数 1000A を流す必要が出てくる。

また、運転当初は、MR/MLF と beam size を切替えて運転する要求は、強くなかった。しかし、徐々にユーザー側でも、中性子ターゲット向けには、ターゲット

の衝撃を減らすためなるべく広いビームを、MR 向けには、特に、MR までのビームトランスポートラインの physical aperture の制約からなるべく細いビームを、という要求が切実になってきている。これら、ペインティング領域の切替の為のパターン運転も必要である。磁石は、L3BT 上の入射セプトラム 1 と 2 の上流に 2 台設置する。電源は、3000A DC と 400A パルス用のモードを分けた電源を用意する。

3. ダンプセプトラムコリメータ

現在、RCS のビームロスの多い場所は、コリメータ部を除き、荷電変換フォイル下流部である。これは、multi-turn injection のスキームを採用したこと由来するもので、入射が続く間、既に周回しているビームが常に、フォイルに当り続けることによるものである。フォイルを小さくすることと、painting 操作により、空間的にもビームの存在する領域を広げ、なるべくフォイルに当たる粒子数を減らすなどの対処をしているが、限界がある。フォイルを小さくしすぎると、Linac からのビームのすその部分 (ハロー部分) が荷電変換されず、H0 ダンプヘビームが捨てられてしまう。

運転開始前に、入射点のフォイルからコリメータ領域までの間で、合計 10W 程度のビームロスが、予想されていた^[9]。ただ、十分な統計精度がなく、損失が局所化されることまでは分らなかった。これに対し、フォイル下流部からのロスを現在の第 1 コリメータ手前で回収するためにダンブラインとの分岐部にダンプセプトラムコリメータを設置する^[10]。

4. 漏れ磁場対策

初期の beam commissioning の時に、RCS 出射部付近の漏れ磁場、出射セプトラムによるものと、出射後のビーム輸送ラインにある偏向電磁石によるもの、それぞれ、22, 29 Gm の漏れ磁場の影響を測定した^[11]。2009 年に磁場シールドを追加したが、作業性を優先し、簡易的な方式を採用したため、ダクトの接続部や真空ポンプのある枝管部は、シールドされないまま残った。その後、ビームを使った測定によれば、30 ~ 40% を減らす効果しか認められなかった。このため、漏れ磁場をさらに 1/10 に減らすよう、ダクト自体を磁性体材料に変更し再製作し、取り替えることにしている。

5. 補正四極電磁石システム

入射時にシフトバンブ電磁石が励磁されている間、edge focus 効果により、四極成分が発生しこれが、特に vertical 方向の β 関数を非常に歪ませている。これによるビームロスの効果も無視することはできず、これを補正する系として、補正四極電磁石システムを検討している。元々、この加速器には、非常に限られたスペースしかないが、3 回対称の各直線部の両端には、わずかながら将来の補正用機器を置くスペースを確保していたので、ここに全部で 6 台の磁石を設置する。

6. キッカー電磁石のインピーダンス

RCS の出射キッカー電磁石は、反射型のキッカーであり、電源側から見たトンネル内での磁石は短絡され、

¹素周波数は、50kHz、多重化により電源全体としてとして 600kHz。

かつ通常 OFF 時は、ビーム側から見ると電源側は開放端としてみえる。このため、インピーダンスが大きくビーム不安定性を引き起こすことが指摘されており、粒子数増強に伴う最大の問題になりうる^[12]。キッカーをトンネル内でマッチングさせる方式に改造するのは、大がかりであり、下記に述べる方法、もしくは、横方向ダンパーを導入することが検討されている。

実際に、ビームパワー 300kW 相当で、六極電磁石のパターン化で可能になったクロマティシティ制御をすると、水平方向のビーム不安定性が誘起されることが確認され、ビームが誘起する電圧 (~ 140V) も観察した。

キッカー電源は、ON 状態の時、電磁石側からの戻ってくる反射波を高耐圧ダイオードと抵抗で構成されるエンドクリッパーで吸収する。概念としては、スイッチであるサイクロトロンより磁石側にエンドクリッパーと同機能のものを置き、ビームが誘導する電磁石からの波は吸収し、キッカーへ給電する進行波は、通す、という役割を持たせる。ただ、逆電圧に対し 50kV の高耐圧ながら、高々 300V 程度の順方向電圧でもダイオードとしては機能させるデバイスは大きな課題である。

7. ビームモニタ他

他にもビームパワー増強に伴い、ビームをより精度よく観察し、ビームロス低減の為に、リング内のビームのプロファイルである、IPM (Ionization Profile Monitor) の dispersion free 領域への追加、及びその電極構造の改良、ビームハローや電子雲を測定するためのビームモニタの追加、ビームロスモニタの増強等を計画している。

さらに、Linac からの H^- を荷電変換するフォイルは、最初の第 1 フォイル以外、第 2、3 のフォイルは、目視監視できていない。今後の長期運転、大電流化で、それらの機能追加も必要となってくる。

8. スケジュール

2011 年 3 月の東日本大震災の影響で、J-PARC 施設全体も大きな影響を受けた。2011 年度の運転は、施設の復旧工事の為停止しており、年度末に 2 サイクルの運転を予定している^[13]。

震災前は、来年度に長期 5 カ月の停止中に、400MeV upgrade の移行、さらに 2013 年度にイオン源、RFQ の 50mA 化を計画していた。震災後の計画では、今年度の長期停止をユーザに対し補う形で、来年度は、通常の夏のメンテナンス、3 か月のみ、を見込んでいる。そのため、入射エネルギーの 400MeV 回復、及び大電流化は、共に 2013 年度になる見通しである。

現在、流動的要素がまだ含まれているが、RCS の 400MeV への移行は、順次、準備ができたものからインストールし、試験調整はしてゆく。ただ、最重要かつ最大のシフトバンク電源については、長期の据付調整期間を要することから、最終年度の見込みである。

9. まとめ

J-PARC では、Linac のエネルギー回復に伴い、RCS の入射機器機器増強が計画され、徐々に実行に移されている。また、2007 年の RCS beam commissioning 開始後からの経験も踏まえ、最終的な design 値であるビーム

パワー 1MW に向けた対策も検討している。これらの対策、増強は、今年の大震災の影響を踏まえ、2013 年度完了を目指し推進している。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki eds., Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Hotchi, et al., "Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex" *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 040402 (2009)
- [3] P.K. Saha, et al., "Direct observation of the phase space footprint of a painting injection in the Rapid Cycling Synchrotron at the Japan Proton Accelerator Research Complex" *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 040403 (2009)
- [4] 原田寛之, 「ビームの入射・取り出し 1 負水素イオンビーム入射」OHO'10 (2010)
- [5] T. Takayanagi, et al., "ポンプシステムの性能向上計画", *Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p.584-586., Himeji, Japan (2010)
- [6] Y. Watanabe, et al., "Suppression Scheme of COD Variation Caused by Switching Ripple in J-PARC 3GeV Dipole Magnet Power Supply" *Proceedings of IPAC'10*, p.3242-3244., Kyoto, Japan (2010)
- [7] 高柳智弘、他「高精度大電流パルス励磁電源の開発」電気学会論文誌 **D 127** p.813-p.821 (2007)
- [8] T. Takayanagi, et al., "Design of the Pulse Bending Magnet for Switching the Painting Area between the MLF and MR in J-PARC 3-GeV RCS" *Proceedings of IPAC'10*, p.3293-3295., Kyoto, Japan (2010)
- [9] P.K. Saha, et al., "Realistic Beam Loss Estimation from the Nuclear Scattering at the RCS Charge-exchange foil" *Proceedings of EPAC 2006*, p.333-335., Edinburgh, Scotland (2006)
- [10] 加藤新一、他「J-PARC 3GeV RCS 入射部コリメータの最適化」このプロシーディングス参照。MOPS019 . 山本風海、他「J-PARC 3GeV RCS 入射部コリメータによるロス低減」このプロシーディングス参照。MOPS025 .
- [11] M. Yoshimoto, et al., "Leakage Field of Septum Magnets of 3GeV RCS at J-PARC" *Proceedings of EPAC08*, p.3626-3628., Genova, Italy (2008)
- [12] Y.H.M. Chin, et al., "Impedance and Beam Instability issues at J-PARC Rings" *Proceedings of HB2C08*, p.40-44., Nashville, Tennessee, USA (2008)
- [13] 長谷川和男, 「J-PARC 加速器の現状」このプロシーディングス参照。MOPS003 .