

SLOW EXTRACTION FROM J-PARC MAIN RING

Masahito Tomizawa^{1,A)}, Toshikazu Adachi^{A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Ainosuke Ando^{A)}, Koji Ishii^{A)},
Katsuya Okamura^{A)}, Jun-ichi Odagiri^{A)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Fan Kuanjun^{A)},
Akio Kiyomichi^{A)}, Tadashi Koseki^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)},
Hirohiko Someya^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Syuichi Tokumoto^{A)}, Hidetoshi Nakagawa^{A)},
Yoshinori Hashimoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)},
Shinya Onuma^{B)}, Koichi Mochiki^{B)}, Hikaru Sato^{C)}, Izumi Sakai^{D)}, Makoto Takagi^{E)}, Nobuaki Nagura^{F)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Tokyo City University, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo, 158-8557

^{C)} Tsukuba University of Technology, 4-3-15 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-8520

^{D)} University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui, 910-8507

^{E)} Kanto Information Service, 8-21 Bunkyo, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0045

^{F)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd., 3129-45 Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1112

Abstract

We have succeeded in slowly extracting protons accelerated at 30 GeV from the J-PARC main ring and delivering the hadron experimental hall in January, 2009. This success is a great step to establish advanced hadron facility in the world. Achieved beam extraction efficiency is estimated to be 90% from beam loss monitors and DCCT. This efficiency can be accepted enough as a first beam test. Large ripples of the bending and quadrupole power supply caused a serious spike structure in the beam spill. A spill feedback system will be implemented in this summer shutdown period. However, a ripple reduction of the bending and quadrupole power supply is strongly desired to obtain a uniform spill structure.

J-PARC MRの遅い取り出し

1. はじめに

大強度陽子ビームの遅い取り出しで最も問題となるのは、必然的に起こるビームロスに起因する周辺の放射化である。従って高効率での取り出しが求められる。J-PARCメインリング(MR)の遅い取り出しはビームロスを1%以下に減らすためのいくつかの基本設計上の特徴を持つ[1]。静電セプタム(ESS)とセプタム磁石(SMS)については、十分な蹴り角を確保しつつ、ビームロスの低減のためにセプタム厚を極力薄くすることが求められる。一方で、遅い取り出しユーザーから強い要求があるビームスピルの平坦化は、遅い取り出しに課せられたもう一つの重要な課題である。そのために、フィードバック信号をつくり出す制御系と高速応答性を持つQ磁石を必要とする。

遅い取り出しのビーム光学設計、静電セプタムのR&Dは、JHF時代の1998年頃からスタートした。その後セプタム磁石のR&Dが加わり、これらの検討をベースに、2007年単年度でほぼすべての遅い取り出し装置の実機製作が行なわれた。引き続いて行なわ

れたオフラインでの実機試験を経て、2008年中に装置のトンネル・電源棟へのインストールとオンライン試験が行われた。非常に厳しいスケジュールではあったが装置は順調に動作し、2009年1月27日に加速されたビームを遅い取り出し方法によってリングからビームを取り出し、ハドロン実験施設に供給することに成功した。本報告では遅い取り出し装置の概要と遅い取り出しビームコミッショニングの結果、今後の予定について述べる。

2. 遅い取り出し装置

J-PARCメインリングはimaginary γ_t を持つ周長1567.5mの3回対称性を持つシンクロトロンで、116.1mの直線部と406.4mのアーク部から構成される。J-PARCの遅い取り出しでは、ラティスのQ磁石の1つのファミリーQFNを用いてチューンを3次共鳴($Q_x=22.33$)に近づける。アーク部に設置されている3次共鳴を励起するための共鳴6極磁石は、4台ずつ2つのファミリーに分かれている。

¹ E-mail: masahito.tomizawa@kek.jp

遅い取り出し直線部には、4台のバンブ磁石、2台のESS、低・中・高磁場セプタム磁石が置かれている。

バンブ磁石は長さ1.4mで最大磁場は約0.7Tである。フラットトップに入ってから0.2秒で所定の磁場まで立ち上げるため、うず電流の効果を小さくするような磁場や形状が選ばれている。

ESSは長さが1.5mで、チタン電極とアース電位であるセプタム間距離25mmに104kVの電圧を印可する(50GeVエネルギーでは170kV)。セプタムはワイヤーより薄く、ねじれの少ない幅約1mm厚さ約30 μ mのタングステン(26%レニウム)リボンを採用した。リボンは両端にバネを介してヨークに張る構造となっている。ヨークに張られたリボンのアライメントをレーザー変位計で測定した結果では、リボンの厚みを含む実行厚さは約75~80 μ mに納まっていた。高電圧フィードスルー、ケーブル中継と電流制限抵抗を兼ねる中継器の絶縁には、フロリナートを用いている。フロリナートのフィルタリングを行なうための循環装置も設けられている。

低磁場セプタム磁石(SMS11,12)に用いる導体は、厚さ1.5mmの銅板の上下にステンレスのパイプをハンダ付けする構造(SMS12は2ターン)となっており、そこに直流3000Aを流す。中磁場セプタム磁石(SMS21-24)の導体は、厚さ7.5mmで縦に4ターンを並べるといいう難しい構造を採用する必要があった。銅導体には2本のステンレス冷却パイプが仕込まれている。導体はセラミック溶射されSUSバンドで固定されている。高磁場セプタムは新たに開発された2台の窓枠型と、2台のノーマル型から構成される。両者とも導体はホロコンを用いており、絶縁には耐放射線のBTレジンを用いている[2]。

4台のSMSの直流電源は予算の関係で、KEK-PSで使用されていたセプタム電源、またはR&D用に用いられていた電源を流用している。パターン運転が必要な4台のバンブ磁石電源と、2台の共鳴6極電源は新たに製作された。入射加速時には出力ゼロを保持する工夫がなされている[3]。

取り出し軌道上のビームのプロファイルを測定するためのスクリーンモニターが、ESSの上・下流と、各セプタム磁石の上流に合計5台設置されている。これらに加えて、ESSの電極とヨーク、低・中磁場のチェンバーには耐放射線ステッピングモーターが接続されている。ステッピングモーターは、電源棟に設置されたドライバー・制御装置で遠隔操作される。セプタム電源、ステッピングモーター、インターロック系の制御には組み込みEPICSを用いたPLCシステムを新たに採用した[4]。

スピル平滑化は、ハドロン実験施設へのビームラインに置かれたビーム強度モニター信号をDSPシステムで演算処理し、必要なチューン変動パターンをリアルタイムで求め、その信号をEQ,RQ磁石電源へ送り出すことにより行なう。EQ磁石は主にスピル全体の形を矩形にするために用いられ、RQ磁石は電源リップルによるスピルの構造を平滑化するために用いる。DSP制御装置はHIMACのビーム試験で基本

動作を確かめている。EQ磁石・電源の周波数・過渡応答測定もなされた[5]。

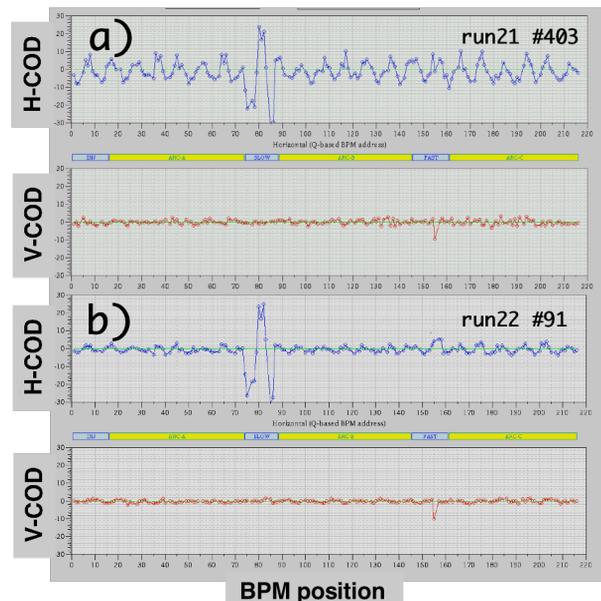


図1：バンブ軌道とCOD(縦軸は全範囲が ± 30 mm)

3. 遅い取り出しビームコミッションング

J-PARCの遅い取り出しビームコミッションングは、2008年12月の加速成功に引き続いて、2009年1月中旬から開始された。加速周期6秒の中で、30GeVフラットトップ時間は0.7秒であった。MRのバンチ数は1で運転され、粒子数は $2\sim 4 \times 10^{11}$ pppである。またRCSでは横・縦方向のペインティングを行っていないため、MRに入射されるビームの横方向エミッタンスは 10π mm \cdot mrad以下で、縦方向エミッタンスも非常に小さく運動量の広がりは0.1%以下と見積もられた。

まず入射エネルギーにおいてDC運転されるセプタム系の漏れ電場・磁場のCODへの影響を調べた。水平・垂直方向共に2~3mm程度のCODへの寄与が観測された。各々のセプタムをON/OFFすることによりどのセプタムが主な原因か調査した。その結果、

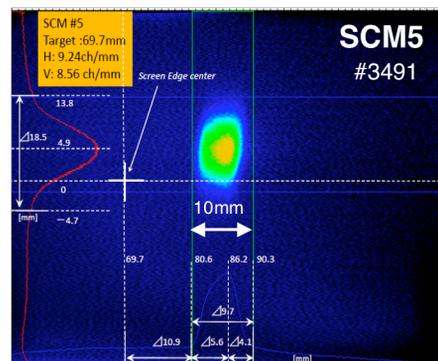


図2：取り出しビームのプロファイル

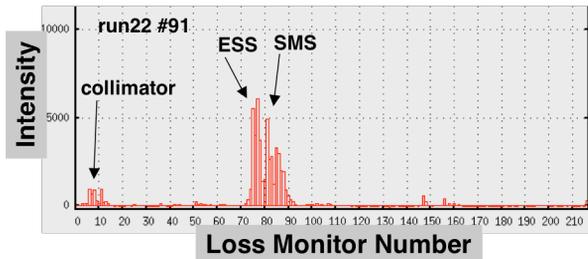


図3：リング全周にわたるロス分布

水平方向は高磁場セプタム磁石、垂直方向は中磁場セプタムが主な原因となっていることが明らかになった。これらの影響は、ステアリング磁石によりCOD補正された。

次にバンチされたままのビームに対して、バンパ軌道をつくる試験を行なった。その際フラットトップの終わりでビームはアボートビームラインへ速い取り出しで廃棄した。バンパ磁石の蹴り角を設計値にセットした場合に測定されたCODを図1a)に示す。10mm程度のバンパ軌道の外側へのCODの漏れが観測された。バンパ磁石の蹴り角度の調整と、周辺のステアリング磁石のアシストによって、漏れを小さくした。1月27日に共鳴6極磁石をフラットトップで励磁し、チューンを $(Q_x, Q_y) = (22.3, 20.8)$ からQFNによって $Q_x = 22.333$ に近づけることによって遅い取り出しを試み、数時間後にハドロンターゲットまでビームが輸送されていることが確認された。その後バンパ軌道のさらなる調整を行なうことにより、取り出し効率を上げることができた。バンパ軌道の設計軌道からのずれは最大で1mm程度となり、CODの漏れを図1b)まで抑制することができた。図2は高磁場セプタム上流に置かれたスクリーンモニターで測定された取り出しビームのプロファイルである。図3はリング全体のビームロス分布である。ロスはESS, SMS付近に集中している。コリメーターのロスは入射エネルギーでのロスである。ビームロスモニターとDCCTから求めた取り出し効率は90%（誤差10%）であった。一方下流の取り出しビームラインに設置されたSECとDCCTから得られた取り出し効率は100%（誤差10%）であり、正確な効率を求めるためには両者のさらなる校正が必要である。

今回観測された取り残し率は0.35%程度で、この割合はチューンのランピングの速度、周回ビームの位相空間分布に依存する。当面はアボートラインに

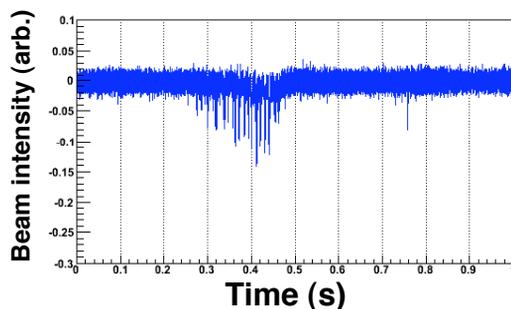


図4：ビームスピル

速い取り出しで廃棄するが、今後の大強度ビームの取り出しにおいては、RFロックアウトをかけて取り残されたビームを強制的に取り出すことを検討している。

測定されたビームスピルは図4に示されているように激しいスパイク状の構造を持っていた。このような構造は、主電源の現状の大きなリップルから容易に想像ができるものであった。取り出しはバンチを保ったままだけでなく、RFを切ってデバンチさせた状態でも行なった。後者は2次ビーム測定の際の多重性の回避の観点から有利であることが確認された。

4. まとめと今後の予定

2008年後半に行われた遅い取り出し装置のインストール・オンライン試験に引き続いて、2009年初めに加速されたビームを遅い取り出しによってリングからハドロン実験施設に供給することに成功した。

この夏にはスピル制御磁石・電源の設置が計画されている。今秋計画されているビームコミッションングでは、取り出し効率の向上と、ビームスピルの平滑化の試験を予定している。取り出し効率向上のために、まずバンパ軌道のファイナ調整を行なう。この際ラティス自身もできるだけ設計通りのものにした状態で行なうことが望ましい。さらに静電セプタム、低・中磁場セプタムの水平方向移動機構を動作させ、最適位置を探す予定である。この最適化は遅い取り出しのビーム調整に必須である。これらによって取り出し効率のさらなる向上が期待される。また今までのスピル長0.2秒を1.7秒程度まで延ばす試験も行なう。この夏に設置されるスピル制御系によってビームスピルの平滑化を試みる。ただし現状のBM、QM電源のリップルは想定をはるかに越える大きさのため、今回導入するスピル制御系で十分に満足できるスピル構造を得ることは困難と予想される。BM、QM電源自身でのリップルの低減が強く望まれる。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al., "Design of Slow Extraction from 50GeV Synchrotron", EPAC2002, p1058-1060.
- [2] R. Muto, et al., "Development of the Magnetic Septa for the slow Beam Extraction from the J-PARC Main Ring", These Proceedings.
- [3] K. Okamura, et al., "Development of the Magnet Power Supply for the Slow Extraction from the J-PARC Main Ring", These Proceedings.
- [4] M. Takagi, et al., "Control of the J-PARC Slow Extraction Line Based on Embedded EPICS", These Proceedings.
- [5] A. Kiyomichi, et al., "Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction II", These Proceedings.