

# J-PARC 遅い取り出しスピル制御開発の現状

## Status of the development of spill control system for the J-PARC slow extraction

清道 明男\*

高エネルギー加速器研究機構

Akio Kiyomichi, KEK

### Abstract

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) is a new accelerator facility to produce MW-class high power proton beams at both 3GeV and 50GeV. The Main Ring (MR) of J-PARC can extract beams to the neutrino beam line and the slow extraction beam line for Hadron Experimental Facility. The slow extraction beam is used in various nuclear and particle physics experiments. A flat structure and low ripple noise are required for the spills of the slow extraction beam.

We are constructing the spill control system for the slow extraction beam. Here we report the design of the spill control devices and the development of the feedback system using Digital Signal Processor (DSP).

### 1. はじめに

私は2007年4月よりJ-PARCハドロンビームライングループに所属し、加速器グループとともに遅い取り出し部のスピル制御開発に取り組んでおります。この記事では現在開発中のスピル制御について、その構成と開発状況、今後の計画について記述しました。J-PARCのスピル制御について理解を深めるきっかけとなれば幸いです。

### 2. スピル制御

J-PARCのメインリング(MR)では加速された陽子ビームを用いてハドロン実験及びニュートリノ実験が行われる。遅い取り出しビームはハドロン実験施設に供給され、原子核や素粒子の様々な物理実験に利用される。特に実験側からは取り出しビームの時間構造であるスピルが平坦で安定することが求められている。本章では遅い取り出しの原理とスピル制御の方法について解説する。

J-PARCメインリングの遅い取り出しでは3次共鳴を利用した方法を採用している。メインリングでは216台のQ磁石群を用いた収束・発散により、加速器内の荷電粒子は閉軌道(粒子が安定して運動することのできる、一周で閉じたループ)の周りを横方向に微小振動しながら安定に周回する。この微小振動をベータatron振動と呼ぶ。加速過程終了後、ベータatron振動に共鳴を励起することで、振幅を増大させてビームを取り出す。

3次共鳴の取り出しでは、6極電磁石の励磁により共鳴を励起し、加速器1周当たりのベータatron振動数であるチューン( $\nu$ )を3次共鳴点(整数 $\pm 1/3$ 、J-PARCでは $\nu=22.333$ )に近づける。これにより安定限界をこえた粒子は、ベータatron振動の振

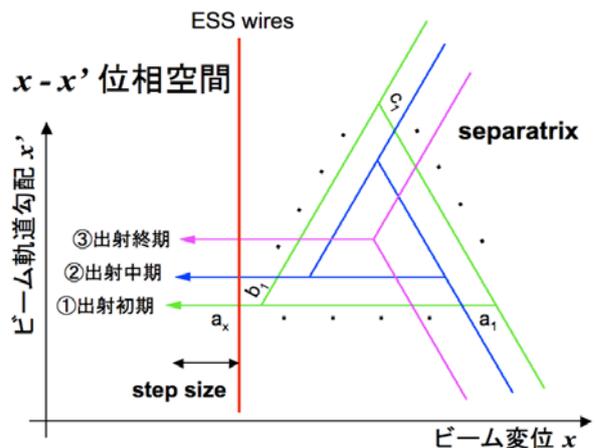


図1 ビーム取り出し時の位相空間

幅が増大してリング外に取り出される。そして安定限界を徐々に小さくすることにより、振幅の大きい粒子からあたかも果物の皮をむくようにビームを取り出してゆき、約1秒にわたってゆっくりとビームを供給する<sup>[1]</sup>。

このときのビームの挙動を図1の位相空間を使って説明する。図1はビーム取り出し時における静電セプタム(ESS)位置での位相空間で、横軸はビームの水平方向変位 $x$ 、縦軸はビームの軌道勾配 $x'$ ( $=dx/ds$ 、 $s$ はビーム進行方向距離)を表す。6極電磁石により3次共鳴を励起させると、図1の三角形①に示すような三角形のセパトリックス(安定限界)が存在する。チューンを整数 $\pm 1/3$ に近づけることは3周に一度ほぼ同じ状態になることを意味し、安定領域を外れた粒子は3ターン毎に同じ方向へ蹴りだされて3次共鳴線上にのって外へ出てくる。図1における $a_1, b_1, \dots$ の記号は、セパトリッ

\* E-mail: akio.kiyomichi@kek.jp

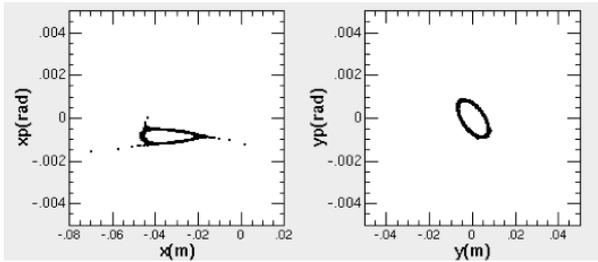


図2 3次共鳴で取り出される粒子の位相空間  
左：水平(x)方向、右：垂直(y)方向

クスの外側に出た粒子の状態遷移を示したものである。例えば $a_1$ の状態をとった粒子は、一周後に $b_1$ 、更に一周後に $c_1$ 、といった遷移をする。そして最終的にESSのワイヤーに到達してビーム軌道の外側に蹴り出される（蹴り出された後のビーム分離方法については武藤氏の記事を参照されたい）。図2は3次共鳴取り出しのシミュレーションで計算した、取り出し位置における1粒子の位相空間分布である。垂直(y)方向は安定しているが、水平(x)方向に3次共鳴が励磁されて振幅が増大している。

周回している粒子はベータトロン振動の振幅が小さいものから大きいものまでであるが、位相空間上では振幅の小さいものが分布の中心、大きいものが外側に位置する。さて、粒子を徐々に取り出すためにはセパトリックスを図1の三角形①から三角形③へと時間とともに小さくしていく。これは4極電磁石の調整によりチューンを整数 $\pm 1/3$ にやや近い値から、ほとんど整数 $\pm 1/3$ の状態にまで少しずつ近づける操作に対応する。それによりベータトロン振動振幅の大きい粒子から順に取り出してゆくことができる。このチューン変化の加減を操作して、取り出しビームの時間構造を調整することがスピル制御の基本となる。

取り出し時のチューン変化を一定にした場合、取り出されたビームのスピル波形はベータトロン振動振幅のばらつきを反映した、ガウス分布に近い形となる。そして電力系が起源となるリップルが存在するために数百Hzから数kHzの高周波構造がスピルの波形に乗る。取り出しビームのスピルを計測してそれが平坦となるようにフィードバックをかけ、リップルを除去して、ビームの時間構造の安定化を図ることがスピル制御の目的である。

スピル制御用の機器は、取り出し用4極電磁石とその励磁パターンを与えるフィードバック装置からなる。取り出し時のチューン変化に対してフィードバックによる微調整を行えるように、メインのQ磁石群とは別に専用の4極電磁石を用意する。

スピル制御用電磁石は取り出し用4極電磁石(Extraction Q Magnet: EQ) および高速リップル除去用4極電磁石(Ripple Q Magnet: RQ) で構成される。EQの励磁電流を調整することによりスピルのマクロ成分を成形して取り出しビームの平坦化を行う。具体的には電流の励磁パターンを最初と最後が急勾配となるように逆S字型のパターンを与えて平坦化

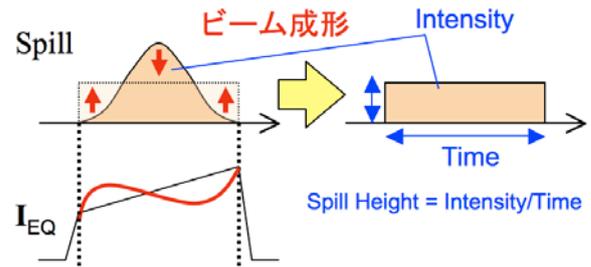


図3 EQ、RQによるスピル制御

を図る。そしてRQにより周波数の高いリップル成分(マイクロ成分)やスパイク構造を打ち消し、より直流に近い取り出しビームを作りだす。EQ,RQによるスピル制御の様子を図3に示す。

EQおよびRQの励磁パターンはスピルフィードバック装置によって作られる制御信号を入力とする。取り出し直後に設置するスピルモニタからの信号を元に、スピルが平坦となるようにEQへフィードバックをかける。フィードバック装置はDSPを用いたデジタル制御システムであり、武蔵工大と共同開発を行っている。また、J-PARC標準の制御システムであるEPICSによる遠隔操作を行うために、LAN通信機能を持つように開発している。

次章より、スピル制御用の各機器について詳細な解説と開発の現状を記します。

### 3. スピル制御用電磁石

スピル制御用電磁石は、取り出し用EQ磁石および高速リップル除去用RQ磁石からなり、メインリングの第1アーク部(遅い取り出しビームラインの手前)に設置する。

EQはビームのマクロ成分の平坦化を担う4極電磁石である。スピル成形に必要なスペックとして、磁場勾配はMR通常のQ磁石の1/10となる2T/m程度、高速応答性を得るために渦電流を極力減らすよう鉄芯材料は0.1mmの薄い積層鋼板を用いて1kHz程度までのリップル除去も行えるよう設計している。設計に当たっては3次元磁場計算ソフトのToscaを用いて仕様を決めた。表1に基本パラメータを示す。

強収束のビーム軌道が確立した加速器でQ磁石が1つだけ追加されると、収束・発散の繰り返しの転調(ベータモジュレーション)を引き起こす。そこでEQは同型機を2台設置してベータモジュレーションをキャンセルし、チューンの調整のみを行うものとする。

機械的パラメータ	
電磁石実効長	692 mm
鉄芯長	620 mm
ボア径	R80 mm
導体寸法	6.5×6.5 mm
冷却孔	3.5×3.5 mm
巻き数 (磁極当り)	22
電氣的パラメータ	
最大磁場勾配	2.60 T/m
最大電流	301 A
抵抗 (60°C)	99 mΩ
インダクタンス (mH)	8.8 mH
ピーク電圧 (リップル無し)	100 V
(リップル有り)	500 V

表 1 EQの基本パラメータ

RQは1kHz以上の高い周波数のリップル成分を相殺するための4極電磁石である。ビーム成形は行わずリップル除去のみを行う。仕様は現在策定中であるが、必要な磁場勾配は0.2T/m程度でありEQとほぼ同じ形状、応答時間を重視した設計を行っている。

EQ磁石1号機はテクノ電気(株)が製作を担当することとなり、2008年1月より製作を開始し7月に納品の予定である。その後、2か月かけて磁石の試験を行いRQの設計に反映させる。春から始まるMRの運転により実際のリップルが測定可能となるので、それも設計に反映させたいと、9月よりEQ磁石2号機とRQ磁石の製作を開始する計画である。

#### 4. フィードバックシステム

EQ, RQ磁石の励磁パターンはスピルフィードバックシステムの作り出す信号を入力として動作する。フィードバック装置は構成回路の動作時間を決めるゲート信号、リングに設置したビームモニタから得られるビーム強度信号、取り出し直後に設置するスピルモニタからのスピル信号の3種類が入力となる。スピル信号は遅い取り出しビームラインの加速器側とハドロンホール側を仕切る真空遮蔽膜からの散乱粒子をロスモニタで計測して作る。ロスモニタは比例計数管または光電子増倍管を用いる。取り出し直前の周回ビーム強度と取り出し時間から理想のスピル強度 ( $\text{Spill Height} = \text{Intensity}/\text{Time}$ ) を求め、それが維持できるようにフィードバックをEQにかけてスピルの平坦化を行う。また、数百Hz~数千Hzといった高い周波数のリップル除去のために高周波信号をRQに与える。図4にスピルフィードバックのシステム構成図を示す。

J-PARCの前身であるKEK-PSにおけるスタディにより、取り出しビームスピルを安定にするためには伝達関数に時間依存を持たせる必要があることが分

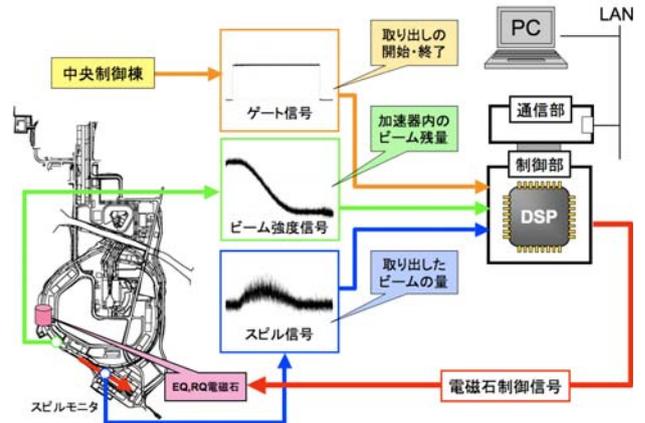


図4 J-PARCスピルフィードバックシステム構成

かっている。具体的には取り出し時間の経過に応じてフィードバックパラメータの最適化を行うことであるが、アナログ制御で行うことは難しい。これを実現するために、高速のDSPを用いたデジタルフィードバックの開発を行い、KEK-PSではスピル制御の運用に大きな改善が見られた。J-PARCの遅い取り出しではこの経験を基にして、DSPを用いたデジタルフィードバックによるスピル制御の開発を進めている<sup>[2,3]</sup>。

デジタルフィードバックを導入することにより、アナログ回路では実現不可能だったビーム取り出し中のパラメータ変更が可能となった。取り出し中にフィードバックのループ特性が変化することがわかったので、取り出し時間に応じたゲインパラメータの最適化を行う。パラメータ選択はビーム強度信号からビーム残量比により分けし選択条件を決めた。図5にパラメータ最適化のプロチャートを示す。とくに取り出し初期と終期にフィードバックのゲインを大きくすることがスピルの平坦化に有効であった。

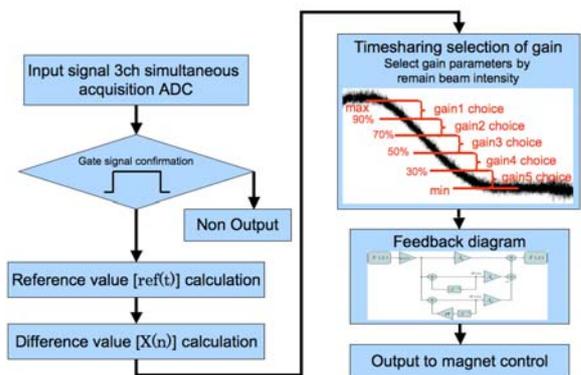


図5 パラメータ最適化の手法

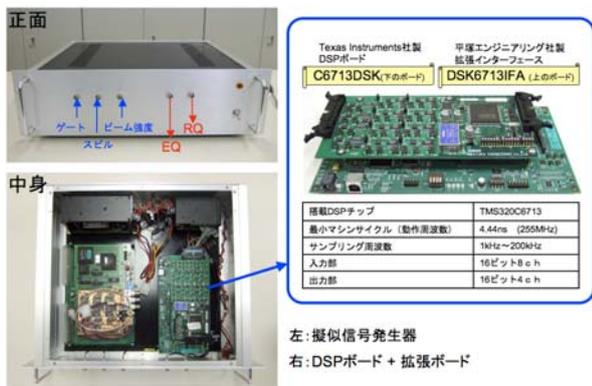


図6 デジタルフィードバック装置試作機 (Mark-I)

フィードバック装置の開発は、DSP開発キットを用いた試作機の製作 (Mark-I)、Mark-I に入出力部の改良と通信部の追加を行う開発機 (Mark-II)、さらに実機として専用ボードの製作 (Mark-III) といった3段階の開発プロセスを進めている。

Mark-I 開発ではKEK-PSのスタディで得たアルゴリズムをベースに、最新のDSPチップへ移植することを目的とした。DSPボードは高速32ビット浮動小数点演算DSPを搭載したTI社のTMS320C6713を採用した。J-PARC用デジタルフィードバックシステムの試作機として完成し、後述するビームテストなどでその性能を確認している。図6にMark-Iの写真を示す。

ビーム供給を長期的に安定な運用を行うためには、ビームの条件が変わったときやリップルが変動したときにフィードバックの設定変更を迅速に行う必要がある。デジタル制御のメリットの一つはパラメータ変更が容易にできることである。KEK-PSのデジタルスピル制御では、遠隔操作まで開発が進まなかったため、設定変更が容易でなかった。J-PARCでは遠隔操作によるパラメータ操作を実現するべく通信機能の追加を行う。Mark-IIではMark-Iに通信部を追加する形で開発を進めている。通信用IOボードとして、ネットワークインターフェースとFPGAを搭載し、OSにLinuxが採用された小型CPUボードのSUZAKUを用いた。J-PARCの制御システムのベースとなるEPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) による遠隔操作を行うよう開発を進める。

Mark-IIでは高性能のFPGAチップを搭載したADC (ORS-112) を導入した。DSPによるフィードバックとは別に、スピル波形のリアルタイム周波数解析を行うことを目的としている。将来のアップグレードとして、リップル変動に対するパラメータ変更の自動化により更なるビーム安定化を目指す研究を進めるための布石である。図7にMark-IIの構成を示す。

Mark-IIの開発をベースとして、実機 (Mark-III) を製作する。Mark-IIIは、Mark-IIと同等の構成で、

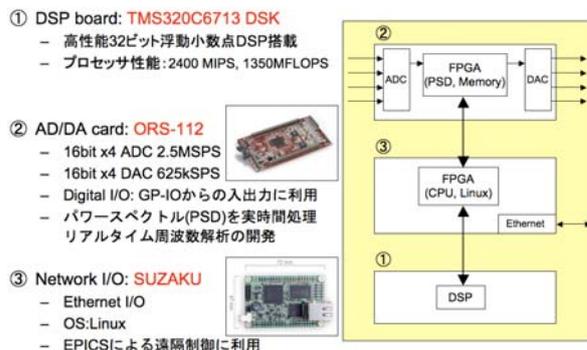


図7 デジタルフィードバック装置開発機 (Mark-II) の構成

専用ボードとする。個々のチップのモジュール化を図り、将来のアップグレードが容易となるように設計を進めている。

現在はMark-IIの開発を誠意進めており、平成20年度にはこの開発を基に実機 (Mark-III) 制作に着手します。

## 5. ビームテスト

DSPによるスピルフィードバック装置の検証を行うため、千葉にある放射線医学総合研究所の重粒子がん治療用加速器HIMACを用いてビームテストを行っている。HIMACはJ-PARCと同じ3次共鳴の遅い取り出しビームラインがあり、またJ-PARCのEQに相当するQDS電磁石が用意されているので、フィードバック装置の試験環境として適している。

2007年7月に、DSPフィードバック装置の試作機であるMark-Iを用いてビームテストを行った。ビームテストでは、周回ビームの強度信号とシンチレータで測定したスピル信号を測定し、その信号をDSPの入力としてQDS電磁石にフィードバックをかけた。なお、RQに相当する電磁石はHIMACには設

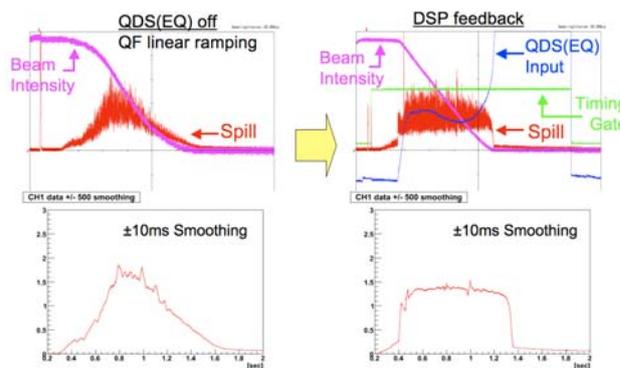


図8 HIMACでのスピル制御テスト結果

置されていないため、リップル除去のテストは行わない。

取り出し時のチューン変化を一定とし、QDSをオフの場合とフィードバックをかけた場合でスピルの計測を行った。図8にテスト結果を示す。左図がQDSオフ、右図がフィードバック運転時のスピン波形である。右図ではフィードバック出力であるQDSの励磁パターンも示している。今回はリップル除去を行っていないので、スムージングにより高周波成分を無視したスピン波形を図の下部に示している。約1秒間の取り出しで、QDSがオフの状態ではビームの分布を反映したスピン波形となり、フィードバック運転ではビームスピルの平坦化に成功した。DSPで構築したデジタルフィードバック装置が設計通り動作することを確認できた。

## 6. まとめと今後の展望

J-PARCの遅い取り出しビームのスピン制御のために、取り出し用電磁石とDSPを用いたスピンフィードバックシステムの開発を行っています。KEK-PSにて実現していたデジタル制御を基に、そのアルゴリズムを最新型のDSPボードに移植したフィードバック装置は、HIMACにおいてその性能が確認されました。

遅い取り出しは現在機器の製作が進められており、平成20年春のMRコミッショニングの後、平成20年冬より遅い取り出しビームのコミッショニングが開始されハドロン実験施設へビームが供給されます。スピン制御用のEQ、RQ電磁石の製作は予算の都合で、他の遅い取り出し機器より1年遅れの平成20年度となります。したがって、平成20年冬の時点ではフィードバックによるスピン制御は行われません。このときの遅い取り出しビームは、全体のQ磁石の調整によりある程度のマクロ構造成形をフィードフォワード的に行う予定ですが、完全なフラットにはならずまたスパイク構造が残ると予想されます。

EQ,RQ電磁石は平成20年度中に制作して平成21年夏のシャットダウン中にインストールを行い、平成21年秋よりスピン制御を実施したビームを供給します。これに合わせてスピンフィードバックシステムも構築します。安定したビームを供給するべく尽力しますのでご支援をよろしくお願いいたします。

## 参考文献

- [1] M.Tomizawa, et al, "Design and development for slow beam extraction from J-PARC main ring", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August 1-3, 2007, 91-93
- [2] A.Kiyomichi, et al, "The research on the spill feedback using DSP for J-PARC", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August 1-3, 2007, 410-412
- [3] H.Nakagawa, et al, "Development of a Signal Processing Board for Spill Digital Servo System for Proton Synchrotron", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Oct.15-19, 2007