

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20740162  
 研究課題名（和文） 大強度陽子ビームスピル安定化のためのデジタルフィードバックシステムの開発  
 研究課題名（英文） Development of Digital Feedback System for Spill Control in High Intensity Proton Beam  
 研究代表者  
 清道 明男（KIYOMICHI AKIO）  
 財団法人高輝度光科学研究センター 制御・情報部門 研究員  
 研究者番号：60373297

## 研究成果の概要（和文）：

大強度陽子加速器 J-PARC のメインリング遅い取り出しビームラインにおいて、スピル制御のためのデジタルフィードバック装置を開発した。本研究ではフィードバック装置にリップル解析の演算装置や通信装置の追加といった高度化を施し、スピル制御の効率化を図った。

平成 21 年夏にスピルフィードバック制御装置を導入し、秋よりビームスタディを開始した。スピルフィードバック装置は所定の性能を発揮し、ビーム供給効率は劇的に改善した。

## 研究成果の概要（英文）：

The digital feedback system of spill control has been developed for the J-PARC slow extraction. We have studied the upgrading of the feedback system to improve the operation efficiency.

The spill feedback system was installed in summer 2009, and beam study was successfully started from autumn run. The spill feedback control worked well and the duty factor was drastically improved.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：実験核物理、加速器、制御工学、量子ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器 J-PARC ではメガワット級の高エネルギー陽子ビームが加速される。J-PARC 50GeV シンクロトロンからの遅い

取り出し陽子ビームは、最大エネルギー 50GeV の一次陽子ビーム或いは数 GeV 程度の  $\pi$  中間子や K 中間子といった二次粒子ビームが原子核素粒子実験施設に供給され、素

粒子・原子核物理学研究において新しい飛躍と展開を図り、世界をリードしようとしている。

実験を効率よく施行するためには、取り出しビームの時間構造であるスピルが平坦かつ安定に供給されることが必要不可欠である。スピル安定化のために J-PARC ではビーム調整用の四極電磁石とは別に、取り出し用四極電磁石 (EQ) および高速リップル除去用四極電磁石 (RQ) をそして励磁信号を与えるフィードバック装置からなるスピル制御システムを導入しビームの安定化を図る。これらは平成 21 年度に設置し、スピル制御運転を開始する計画であった。

フィードバック制御装置は、平成 17 年度まで稼働していた KEK-PS でのスピル制御の知見を基にして DSP によるデジタルフィードバックシステムを構築するべく、開発を進めていた。KEK-PS では受電系統の電力使用状況などの外的要因により季節や昼夜で取り出しビームのリップルが大きく変動し、その度にパラメータ調整のためユーザタイムの削減を余儀なくされていた。このような不定期に現れるリップルの解析を自動化することができればビームのさらなる安定供給が期待できる。

フィードバック制御装置内でスピル波形のリアルタイム周波数解析を行い、最適パラメータを自動選択する手法が最も有効と考えた。周波数解析を行うためにパワースペクトラム解析の手法を取り入れたデジタルフィードバックのシステム開発を検討した。

## 2. 研究の目的

本研究は、大強度陽子加速器 J-PARC のメインリングの遅い取り出しビームラインにおいてスピルの平滑化を行い、ハドロン実験施設に対して安定したビームを供給することが最終目標である。それを実現するために、スピル制御用フィードバック装置の開発を行う。フィードバック装置は DSP を用いたデジタル信号処理回路を開発する。

さらに、装置に対してリップル解析の演算装置と通信装置を追加といった施策を図る。パワースペクトル (PSD) 解析の手法によってハードウェアによるリアルタイム周波数解析処理を実現し、フィードバック装置との連携を図る。周波数解析の負荷のためにフィードバック処理の性能低下を招かないためにも、演算部を別のチップにすることは妥当であろう。フィードバック装置に周波数解析の演算装置と遠隔制御のための通信装置を組み合わせた、一つの制御装置を構築することが目的である。

最終的にはスピル制御の安定化および効率化により、ビーム供給能力の性能を向上さ

せる。

J-PARC 加速器と同じ遅い取り出しによって運用される加速器としてはがん治療用の陽子・重粒子加速器があり、昨今日本の各所で計画・建設が行われている。このスピル制御とリップル解析の自動化の研究は、医療用加速器においてビーム供給能力の性能向上という形でがん治療の効率化が期待でき、これらへの応用も視野に入れる。

## 3. 研究の方法

スピル制御用フィードバック装置は、取り出しビームであるスピル信号とリングに残った周回ビーム信号を入力とし、マクロ成形成用の EQ 磁石とリップル除去用の RQ 磁石のパターン信号を出力とする。フィードバック装置の開発に先立ち、DSP 評価キットをベースとした開発機を製作し実機製作のためのテスト環境を構築する。開発機に対して組み込み FPGA ボードとの接続といった要素試験を行い、実機設計に反映させる。リップル解析の演算装置としては DSP および FPGA ボードを用いて評価を行う。通信装置として、LAN 端子と組み込み Linux を搭載した FPGA ボードの利用を試みる。

また、実際のビームを用いたフィードバック試験を行うために、放射線医学総合研究所のがん治療用重粒子加速器 (HIMAC) を用いたビーム試験を行う。HIMAC は J-PARC と同じ 3 次共鳴の遅い取り出しであり、取り出し用四極磁石を有しているため、J-PARC 完成前のテスト環境としては最適である。年に 3 回程度マシンタイムを申請し、フィードバック装置の開発の段階に応じて適宜、ビーム試験を行う。

## 4. 研究成果

DSP 評価キットをベースとしたフィードバック装置の開発機を製作し、実機設計のためのテスト環境を構築した。開発機による要素試験により、周波数解析用の外部演算装置にも DSP を用いるのが容易で有効であると判断した。フィードバック演算用の DSP とは共有メモリを介して接続する。また、通信装置として組み込み Linux の入った Ethernet ボード (SUZAKU-V) を導入し DSP との接続を確認した。

開発機によるスタディの結果、2 つの DSP および Ethernet 通信装置について共有メモリを用いた接続方法を確立した。その手法を実機設計へ反映させ、専用基板によるフィードバック装置の製作を行った。図 1 にスピルフィードバック装置のブロック図を示す。

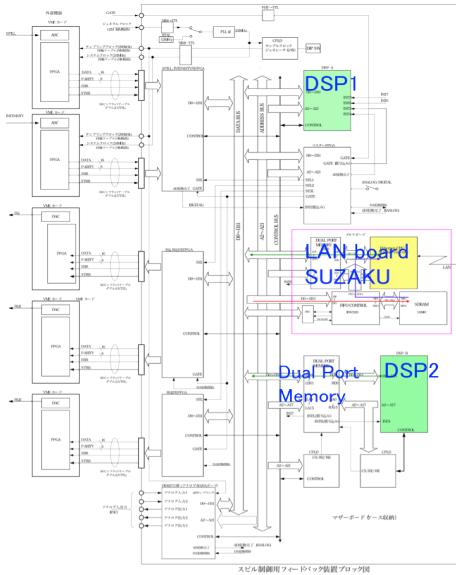


図 1 : フィードバック装置のブロック図

フィードバック装置の開発機および実機は、放射線医学総合研究所のがん治療用重粒子加速器（HIMAC）にてビーム試験を実施した。開発の段階に応じて、通算 5 回のマシンタイムを得た。平成 20 年度はフィードバック装置開発機を用いて、スピルフィードバックアルゴリズムやパラメータの検証、追加機器の動作検証を行った。フィードバックシステムとしてビームの成形に成功し、またリップル除去性能についても性能評価ができた。平成 21 年度は完成したフィードバック装置実機を持ち込んで、J-PARC へのインストール前の最終試験を行った。図 2 にスピルフィードバック装置を示す。

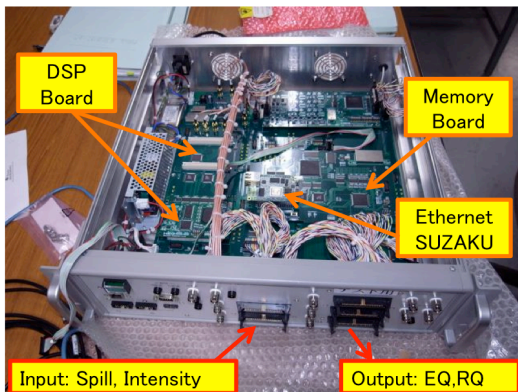


図 2 : スピルフィードバック装置

平成 21 年夏には、スピル制御用取り出し四極磁石およびフィードバック装置のインストールを行い、秋のランから J-PARC におけるスピル制御のスタディを開始した。このスピル制御系の導入により、ハドロン実験施設におけるビーム供給効率が 2% から 15% と劇的に改善させることができた。図 3 は J-PARC における取り出しビームのスピル波形である。フィードバック運転により EQ（青）・RQ（水色）が励磁され、スピル（赤）の平滑化に成功した。また、取り出しによる周回ビーム強度（緑）の減少率が一定となる様子も見て取れる。安定運用に向けてリップル解析アルゴリズムの検証や各パラメータの相関などの基礎データの収集も行った。加速器の主電磁石電源のリップルがかなり大きいため、スピルにはリップルノイズが残っているが、今後、加速器自身の性能改善とともに、さらなるビーム供給性能の向上を進めることが可能であろう。

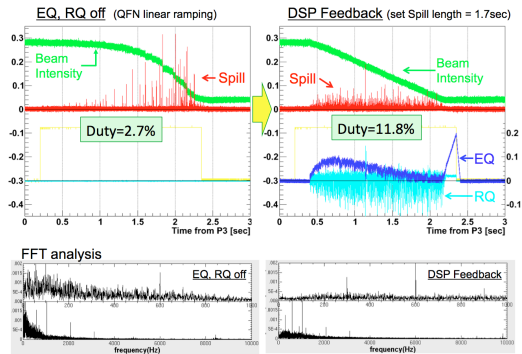


図 3 : 取り出しビームのスピル波形  
フィードバック運転無（左）／有（右）

フィードバック開発機による要素試験や開発の成果は、国際加速器会議（PAC09）、制御システム国際会議（ICALEPCS2009）および日本加速器学会にて報告した。実機製作にかかわる開発および J-PARC における最初のスピル制御のスタディ結果は、平成 22 年 5 月の第 1 回世界加速器会議（IPAC10）にて成果を報告した。

J-PARC 遅い取り出しビーム効率のさらなる改良のために、スピル制御による取り出し四極磁石の立ち上がりに応じたバンパ軌道の調整（ダイナミックバンパ）を導入する。バンパ磁石のパターン信号生成に DSP によるデジタル演算処理装置を採用することとなった。また、加速器主電磁石電源のリップル改善の施策として、各四極磁石で測定した磁場変動を基に同じ磁石内の補正コイルで打ち消す手法の導入を検討している。携帯型音楽プレイヤーのイヤホンで使われているノイズキャンセラーの技術を応用して、DSP

によるフィードバック制御の研究を進めている。これらは、本研究を J-PARC にて進めた結果、その成果が技術的な形で波及したものとといえるだろう。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- 1) A. Kiyomichi, et al, “Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction”, Proceedings of IPAC10, 2010, THPEB022, 査読無
- 2) A. Kiyomichi, et al, “J-PARC 遅い取り出しビームにおけるスピル制御システムの開発(2)”, 第 6 回日本加速器学会プロシーディングス、査読無、2009、pp.696-698
- 3) A. Kiyomichi, et al, “Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction”, Proceedings of PAC09, 2009, TU6RFP035, 査読無
- 4) A. Kiyomichi, et al, “Study of spill feedback using DSP for the J-PARC slow extraction”, 第 5 回日本加速器学会プロシーディングス、査読無、2008、pp.328-330
- 5) 清道明男、澤田真也、武藤亮太郎、“J-PARC 50GeV メインリングにおける遅い取り出しシステムの紹介”、原子核研究、査読無、Vol.53 No.1、2008、pp.47-56

[学会発表] (計 7 件)

- 1) A. Kiyomichi, et al, “Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction”, International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), 2010.5.27, Kyoto, Japan
- 2) A. Kiyomichi, et al, “A Signal Processing Board for the J-PARC Slow Extraction Feedback Control”, International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2009), 2009.10.13, Kobe, Japan
- 3) 清道明男, et al, “J-PARC 遅い取り出しビームにおけるスピル制御システムの開発(2)”, 第 6 回日本加速器学会、2009.8.6 茨城県東海村
- 4) A. Kiyomichi, et al, “Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction”, Particle Accelerator Conference (PAC09), 2009.5.5, Vancouver, Canada
- 5) 清道明男, et al, “J-PARC 遅い取り出しビ

ームにおけるスピル制御システムの開発”、第 5 回日本加速器学会、2008.8.6 東広島市

- 6) 清道明男, et al, “J-PARC 遅い取り出しにおける DSP によるスピルフィードバックの研究”、第 5 回日本加速器学会、2008.8.6 東広島市

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

清道 明男 (KIYOMICHI AKIO)

(財)高輝度光科学研究センター

制御・情報部門 研究員

研究者番号 : 60373297