

DEVELOPMENT OF DYNAMIC BUMP SYSTEM FOR J-PARC SLOW EXTRACTION

Eiichi Yanaoka ^{#,A)}, Youichi Igarashi ^{A)}, Katsuya Okamura ^{A)}, Takuro Kimura ^{A)}, Akio Kiyomichi ^{B)}, Masahito Tomizawa ^{A)}, Hidetoshi Nakagawa ^{A)}, Kohichi Mochiki ^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

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

Abstract

At J-PARC Slow Extract, bump orbit was fixed during extraction, that couldn't decrease beam loss. To make measures, we develop the dynamic bump system for J-PARC slow extraction.

J-PARC 遅い取出し動的バンプシステムの開発

1. はじめに

J-PARC 主リング遅い取出しでは、バンプ軌道を形成し、1/3 共鳴でし取出しを行っている。バンプ軌道は、遅い取出し直線部の両端に 2 台ずつある計 4 台のバンプ電磁石により、つくられている(図 1)。

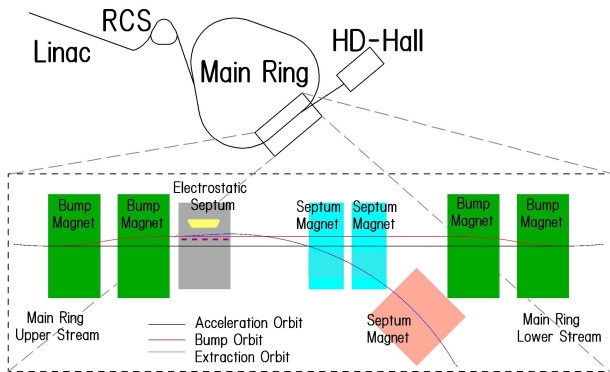


図 1: 遅い取出し概略図

2010 年 11 月時点で、30GeV に加速された陽子ビームを、約 1.8 秒かけて取出している。取出しの間、周回している陽子の粒子数は減少しているが、バンプ軌道は、取出しの間の中間にあわせて固定されていた。これがビームロスを増やし効率を下げていた。効率を上げるには、変化する周回ビームの状態にあわせたバンプ軌道をつくらなければならない。動的なバンプシステムとは、刻々と変わる周回ビームの状態に最適なバンプ軌道を、形成することである。

2. 動的バンプシステム

本システムでは、変動するチューンにあわせて、バンプ軌道を制御する。チューンの変動は、QFN 電磁石と EQ 電磁石の励磁でおこる。QFN 電磁石によるチューン変動は、経過時間に比例するように調整されていて、時間の関数となっている。EQ 電磁石は、スピル(取出しビーム)の時間分布をリアルタイムで調整しているの、時々刻々と励磁電流が変化する。EQ 電磁石の励磁電流から求めたチューン変動と、時間の関数として与えられている QFN 電磁石によるチューン変動を、あわせてチューンを求める。このチューンから計算したバンプ電磁石の励磁電流で、バンプ電磁石電源を制御する。

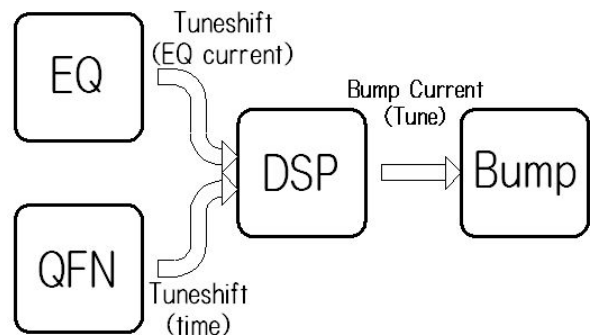


図 2: ダイナミックバンプ概念図

本システムは、一定の微小な時間で、演算してバンプ電磁石電源を制御する必要がある。近年計算機は速度は向上しているが、OS の肥大化により、常に遅れが起こらない補償が出来るものが少ない。この用途に DSP(Digital Signal Processor)を採用した。スピル用の DSP 装置は、周回ビームの強度とスピルから、EQ 電磁石と RQ 電磁石の励磁電流を計算し、電磁石電源を制御している。バンプ用の DSP

装置は、EQ 電磁石の励磁電流値を受取り、計算したバンパ電磁石の励磁電流値を電源へ送っている。

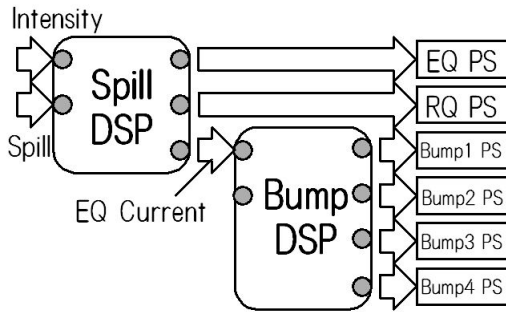


図 3: 信号の流れ

3. 機器

3.1 DSP

スピル用の DSP は、リップル成分の除去など、バンパのものより高い計算能力が必要である。スピル用の DSP 装置は、出力数が足りない以外は、バンパ用の DSP 装置として十分な性能を持っている。バンパ用 DSP 装置は、スピル用に開発された DSP 装置の出力数を 3 から 4 に変えたもの採用した。これは、バンパ用の DSP 装置はスピル用として使え、予備品になる。

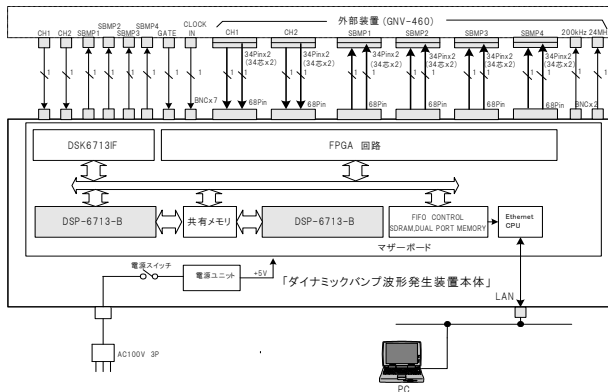


図 4: DSP 装置構成図

3.2 信号伝送系

DSP 装置間については、入出力の規格が TTL16bit と同一なので直接つながられるが、ローカル制御室内の配置で 5m 離れている為、光信号に変換して伝送している。変換の送受信は、光データ転送ボードの GNV-430K と TTL 規格信号の入出力ボードの GMV-460 を載せた、KEK-VME 規格の GPIO GNV251 がになっている。これは、スピル DSP 装置から、EQ、RQ の電磁石電源におくる物と同一の構成である。これらの回路は、反応速度、精度について本システムの為に、十分な性能を有している。

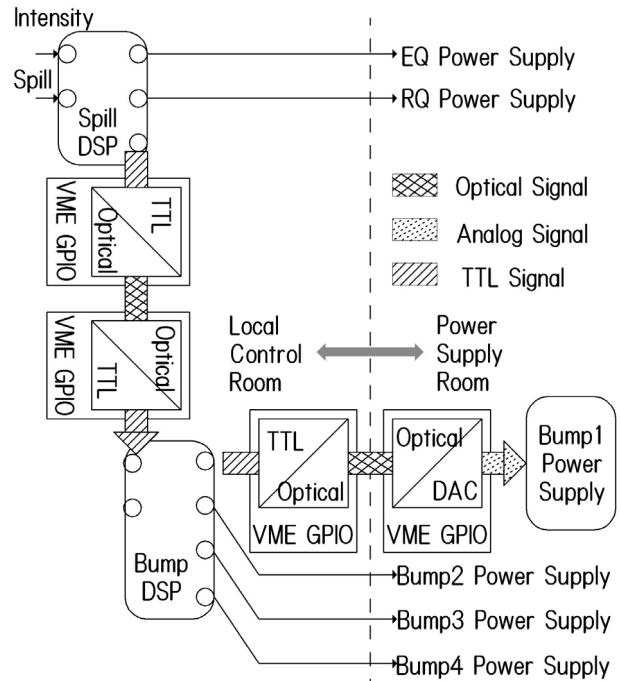


図 5: 信号配線概略

バンパ DSP 装置からバンパ電磁石電源への伝送も、DSP 間と似通っているが、電源の入力がアナログの為に、受信側で TTL 入出力ボードから置換えたアナログ-デジタル変換の GNV390(K)が、最大 1V の電圧に変えている。バンパ 2~4 への経路は、図 5 では省略されているがバンパ 1 への経路と同一である。

3.3 バンパ電磁石電源への入力部

バンパ電磁石電源は、約 3 年前の 2007 年度に製作され、動的バンパシステムの為のアナログ入力がある。デジタル入力は実績がなかったため採用せず、入力抵抗は、高い周波数の反射による波形の崩れ対策として 50Ω の最大 10V となっている。これにより、0.2A の電流を流さなければならないが、これだけの電流容量をもった適切な DAC がなかった。本バンパシステムによる軌道の変化はせいぜい数十 Hz 程度であり、重要なのは電磁石までの伝送時間を msec 以下に下げることである。独自の DAC をつくる時間的余裕がなく、電源改造も視野にいれ検討した結果、電源の前段を図 6 の様にした。

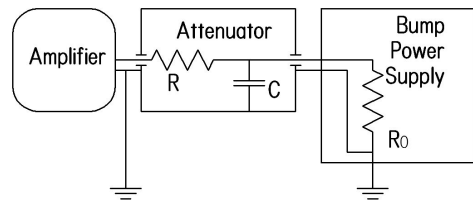


図 6: バンパ電磁石電源への入力

信号処理の為のンプでは電流量がたりず、電力増幅の為のンプでは応答速度が遅すぎる。そこで出力電圧を入電圧で制御する電力増幅器を中から、出力の高周波成分がすくない NF 回路ブロックの HSA4011 を選択した。だがンプで電圧を 10 倍にして電源に入力しところ、不安定な動作になった。バンプ電磁石電源の特性で 0A 付近の動作が不安定なのは既知で、ンプ出力が 0 ボルトふらついているのが、不安定の原因であった。図 7 の右がゲイン 10 倍のときのもので、20mV 程度ふらついている (5mV/div)。ふらつきが 10mV 以内であれば安定だが、加速器の長期の安定運転のために 5mV には抑えたいところである。ときに周期性もあり原因が追究したが、電力増幅のンプの仕様内であることから、別の方法を摸索した。

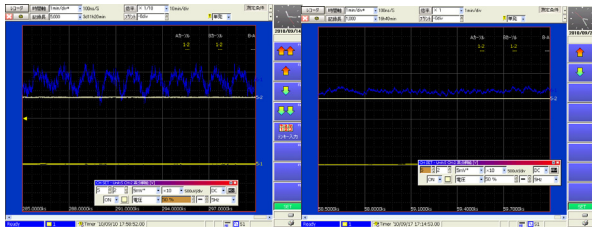


図 7: 入力短絡時ンプ出力電圧

ンプの精度が倍率に比例して悪くならないことから、図 6 の様に結線し、50 倍増幅後、減衰器で 1/5 にして出力を測定した。すると、図 7 右にあるように 5mV 内に収まり、バンプ電磁石電源が安定動作した。電源に入力される電圧は、ンプの出力電圧を A とすると $(R0/R)A$ となるため、機器が動き始めてから抵抗が熱平衡に達するまで 5 分間くらい変動する。熱平衡の状態では入力電圧は安定するので問題ない。

4. 較正

DAC とその後段ではアナログ信号を扱うので機器による個性差もでてくる。各機器を接続し動作が確認できたところで、電流値の較正をしなければならない。DSP から出力は 0~32767 であり 425、6553、13106、19660、26213 を出力したときの、電磁石に流れる電流を DCCT で測定した。

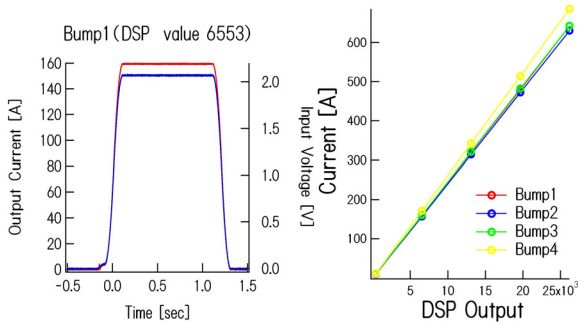


図 8: 較正の測定

図 9: 較正曲線

図 8 は、一つのデータ点で測定した電流波形である。台形の様な波形にしているのは、バンプ電磁石電源の容量の制約と、実際の波形に近くすることで減衰器内の抵抗発熱の条件そろえているためである。図 9 は、測定したデータ点をまとめて較正曲線である。また、スピル DSP の入力からバンプ電磁石電源の出力まで波形が伝送時間は 0.3msec であった。

5. ビーム試験

5.1 固定バンプ軌道によるバンプシステム

このシステムを使う前の固定したバンプ軌道で、取出しをおこなった時のビームロスの状態を図 10 に示す。効率 98.7%は測定や計算のやりかたで変わるので目安としてとらえている。

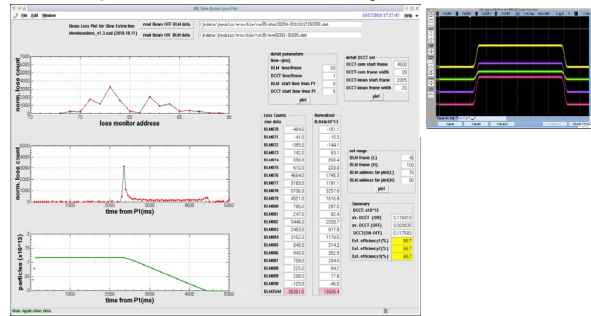


図 10: (右)固定バンプ軌道でのビームロスと (左)バンプ電磁石電流パターン

5.2 固定した動的バンプシステム

固定した動的バンプシステムとは、取出し期間をわけて(今回は 5 区間)それぞれの区間ごとに最適なバンプ軌道を描くように、バンプ電磁石の励磁電流を折れ線にしたものである。動的に変化する EQ 電磁石には対応していない。

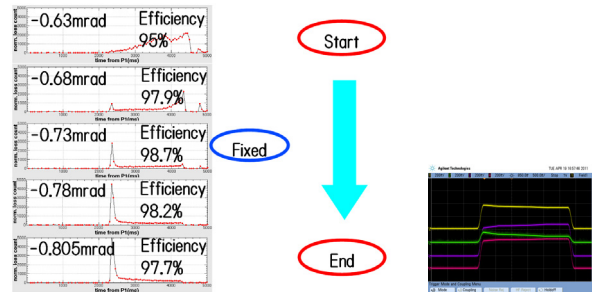


図 11: (左)区間ごとの最適値としたビームロス (右)バンプ電磁石電流パターン

図 11(左)の 5 つのグラフは、上から順番に 1 番目、2 番目、3 番目、4 番目、最終区間に最適なバンプ軌道としたとき、横軸時間にして、ロスの状態を書いている。一番目のグラフでは、ロスが始め少なく徐々に増えている。5 番目のものはその逆になっている。真ん中の区間を最適にしたものが 5.1 の固定バンプ軌道によるバンプシステムである。グラフにかかっている角度は静電セプトラム入口でのビームの角度である。

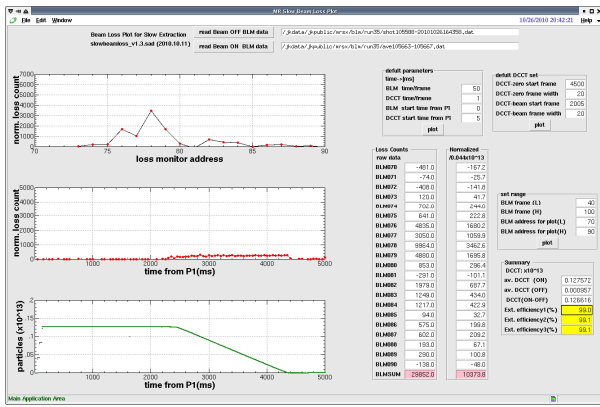


図 12: 固定された動的バンプシステムでのビームロス状況

図 12 の中段のグラフで、区間全体にビームロスが大きいたるところがないのが確認できる。効率は 99 パーセントになった。

5.2 即時動的バンプシステム

即時動的バンプシステムとは、EQ 電磁石電流をうけ、リアルタイムバンプ軌道を制御するシステムである。

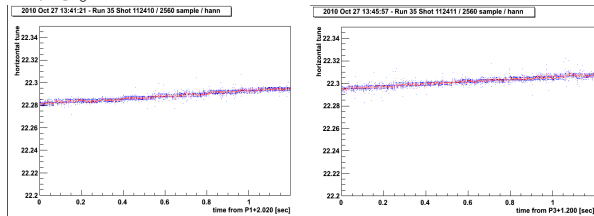


図 13: 遅い取出しでのチューン測定

まず、取出している間のチューン測定をし、QFN 電磁石によるチューン変動を測定した。これにより、チューンは $22.314 + 7.391304e-3t$ (t:時間) とした。

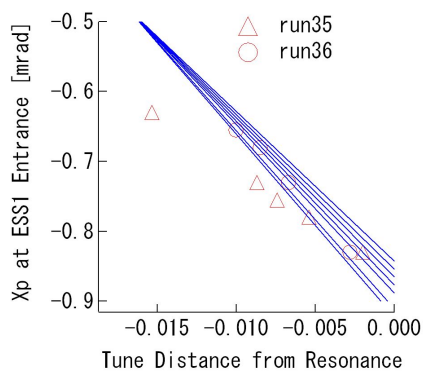


図 14: 共鳴線からのチューン差と EES への入射角度の関係

図 14 は、取出しの間に共鳴線に近づけながら ESS への入射角度を変えている様子を示している。図中の○と△は、5 区間に分けた折れ線パターンでバンプ電磁石を通电したときの状態を示している。ビーム試験は、青線に沿って共鳴線に近づくように、式を入力しおこなった。

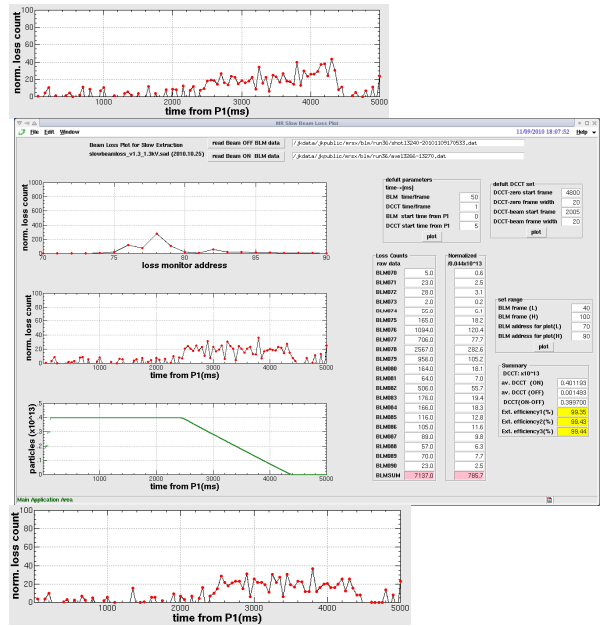


図 15: 即時動的バンプシステムビームロス状況

図 15 は、リアルタイムでフィードバックをかけたバンプ軌道で取出しをおこなった際のビームロス状況です。上と下に付け足してあるのは、図 14 の青線の一番上と、一番下の場合のビームロス状況です。下から 3 番目が、一番効率がよく 99.4 パーセントまで上がった。図 15 のロスモニターの感度が、50 倍になっていて、これはかなり良い結果であろう。図 16 は、このときのバンプ電磁石の励磁電流波形です。

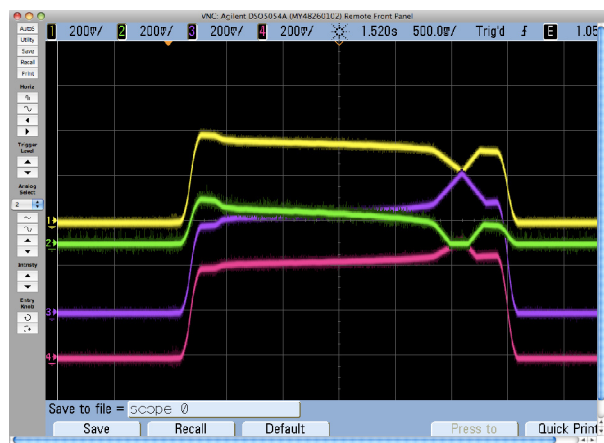


図 16: 即時な動的バンプシステムのバンプ電磁石電流波形

後日、このシステムを動かしながらビーム調整したところ、99.5%まであがりました。これは、ビームダイナミクスの上での構想が実現したと考えています。

6. まとめ

ロスが減り構想が実現したことで、アナログ入力や、DAC の bit 数の少なさは、問題にならないとわかった。スパイル用の DSP 装置、物理実験のための信号取扱いモジュールなど、他のところで開発

されたものをつかい悪く言えばつぎはぎなシステムであったが、動作して胸をなでおろしている。だが、DSP で動かしている肝心なプログラムの不安定さを、解消しなければならないし、丸投げしてしまった VME 関連の機器を動かす Verilog のプログラムの理解を深めたいとかがえている。それが、安定した加速器運転につながる。

- [1] M.Tomizawa, et al., “Improvements Slow-Extracted Beam from J-PARC Main Ring” This Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [2] A.kiyomichi, et al., “Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction” Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan