

J-PARC 遅い取り出しのスピルフィードバック制御システムの改良

IMPROVEMENT OF THE SPILL FEEDBACK CONTROL SYSTEM OF J-PARC SLOW EXTRACTION

木村琢郎^{#, A)}, 富澤正人^{A)}, 岡村勝也^{A)}, 中川秀利^{A)}

Takuro Kimura^{#, A)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Katsuya Okamura^{A)}, Hidetoshi Nakagawa^{A)}

^{A)} KEK

Abstract

The slow extraction the Main Ring (MR) of J-PARC used the spill feedback control system. It consists of two kinds of Extraction Quadrupole Magnet (EQ), Ripple Quadrupole Magnet (RQ) and Digital Signal Processor (DSP) which calculates and controls it the optimal current pattern using the monitor signal of an extraction beam. It is used to make flatten the extraction beam structure and reduce the ripple. However, the target damage of hadron experimental Facility occurred for extremely short pulsed was extracted from MR by malfunction of the EQ power supply for a spill feedback control system. It caused the radiation leakage accident. The cause of the malfunction has been identified by an intensive investigation of EQ power supply system performed after the accident. We will show the Improvement of EQ power supply system and spill feedback control system to prevent a recurrence

1. はじめに

J-PARC の MR の遅い取り出しでは、スピルフィードバック制御システムを用いて、ユーザーの要求する取り出されるビーム時間構造を表すスピルが均一となるように制御を行っている^[1]。スピルフィードバック制御システムは 2 台の取り出し用四極電磁石(Extraction Quadrupole Magnet: EQ)と 1 台の高速リップル除去用四極電磁石(Ripple Quadrupole Magnet: RQ)とそれらの最適な電流パターンを取り出しビームのモニタ信号を用いて演算を行う DSP で構成される。EQ ではマクロなスピル構造が一定となるように制御している。一方で RQ ではスピル構造に存在する主電磁石電源に起因するスパイク状の構造を相殺することを目的に行っている。これら、スピルフィードバック制御システムに加え transverse RF システムを導入することでスピルのリップルの低減を図っている^[2]。制御アルゴリズムの最適化を行っていくことで、事故発生前には MR でビームを 30Gev に加速後、2.93 秒のフラットトップの区間のうち約 2 秒間でビームの取り出し行い、24kW ビーム、取り出し効率 99.5%、スピルの評価指標の Duty Factor45%を実現していた。

しかし、2013 年 5 月 23 日に EQ 電源の誤作動により、本来は 2 秒ほどでゆっくりと取り出されるはずのビームの 2/3 が約 5 ミリ秒という短時間で瞬時に取り出されてしまった。これによりハドロン実験施設で用いられていた金標的の一部が溶解し、さらにはハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故を引き起こしてしまった。我々は EQ 電源の突然の誤動作の原因調査を徹底的に行うことにより原因となる事象の特定ができた。今後、EQ 電源の動作により短時間でビームが取り出される事象を防止するた

め、EQ 電源の改造およびスピルフィードバック制御システムの改良を行った。本発表では、それらの取り組みについて報告を行う。

2. EQ 電源誤動作時の状況

遅い取り出しの通常運転時の DSP の生成する電流指令値等をモニタしたものが Figure 1 の上図である。緑のラインは DSP が演算した EQ の電流指令値である。それに追従するように青のラインが動いていることがわかるがこれが EQ の電流出力である。赤のラインは DCCT である。これを見るとリングを周回するビームが一定の量ずつ取り出されていく様子がわかる。水色のラインは取り出されるビームの量を測定するスピルモニタの信号である。黄色のラインは RQ の電流出力である。リップルの影響を抑えるため細かく変動している様子がわかる。これに対して Figure 1 の下図が EQ 電源誤動作時のショットを表したものである。注目すべき点は EQ の電流指令値は通常と同じように増加していつているのに対して、EQ の電流出力は応答せず 0.3 秒の間 0A を保ち、その直後に突然応答が回復し、その時の電流指令値の 159A にステップ状に追従を開始している。この急激な電流出力により EQ 電源は過電圧のインターロックにより停止している。この時同時に電流指令値と実際の電流出力の差の増大によりトラッキングエラーも検出している。このような EQ 電源の異常動作により急激に、そして大量のビームが取り出され始めたため RQ 電源はビームの取出しを抑えるように動作し過電流のインターロックにより停止していることも分かる。EQ 電源の突然の電流増大により 5 ミリ秒という短時間に周回するビームの 2/3 が取り出されてしまう事態となった。

[#] kimurata@post.j-parc.jp

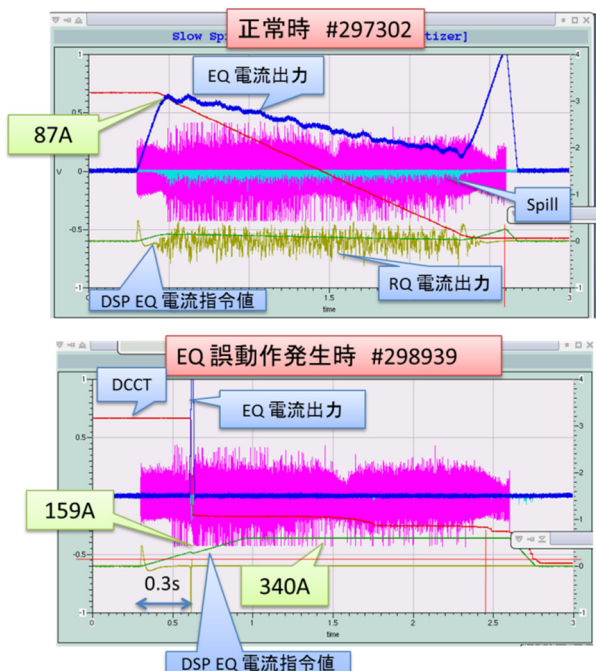


Figure 1: Spill control patterns normal and malfunction shot.

Figure 2 は誤動作時の電流出力をモニタしたものである。残念ながら 136A でサチってしまっている。その後 159A のステップ入力を指令する通電試験を行い事故時の状況を模擬した以下のような挙動を行ったと推定できた。指令 159A をオーバーシュートし最大で 177A 程度の電流出力となり、159A の近傍でハンチングを起こす。また電流出力開始から 14 ミリ秒後には PLC にて過電圧を検出しインターロックにより出力電流は減衰し 0A となる。以上に示す EQ 電源の誤動作時の挙動により短時間に大量の周回ビームを取り出すという事態となった。

3. EQ 電源誤動作の原因

Figure 3 は EQ 電源の電流指令値の伝送経路を示したものである。電源棟ローカル制御室の DSP からデジタル信号で出力された電流指令値は VME にて光信号に変換後 EQ 電源内の VME に送られ再びデジタル信号に戻る。このデジタル信号が EQ 電源のインターフェイス(IF)基板に入力され、さらにデジタル IF 基板のフォトカプラに入力後、DAC にてアナログ信号に変化され FET ゲートにて電流出力がなされる。誤動作時の状況から DSP の電流指令値出力後から EQ 電源の電流出力までの伝送経路の間に正しく伝送できていない区間があると推測されたため、伝送経路の要所をモニタし通電試験を行い誤動作時の再現を試み誤動作の原因の特定を行った。通電試験では 6 秒周期の三角波を電流パターンとして用いた。通電試験の期間は 3 か月に亘り、延べ 774600 サイクルのうち 4 回ほど誤動作の再現事象が

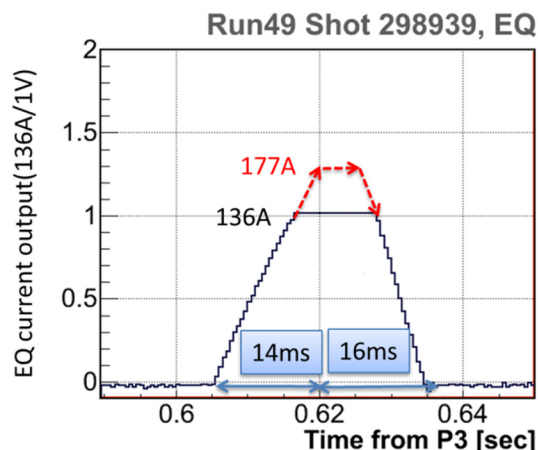


Figure 2: EQ current pattern at malfunction shot. Dotted curves show speculation by the test.

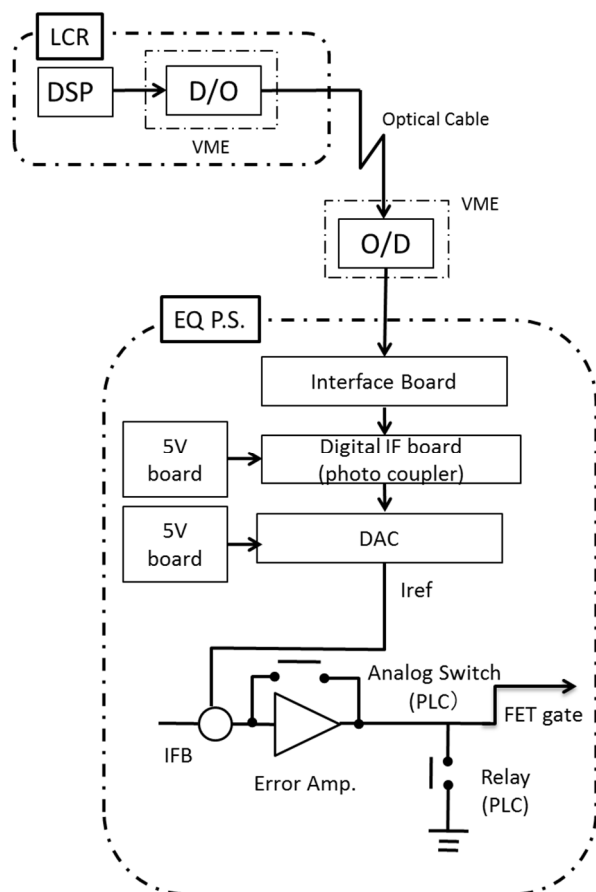


Figure 3: Block diagram of the EQ current control.

発生した。再現事象発生の際に原因部分の絞り込みを行うことで、デジタル IF 基板で伝送するデジタルデータの異常が発見された。さらにデジタル IF 基板の動作異常の原因は、デジタル IF 基板を動作させるために 5V の電圧を供給している電源基板の供給電圧の低下に原因があることが判明した。問題の電源基板には、ハイパワータイプとローパワータイプの 2 種類が存在する。EQ 電源の当該部分で

は、ハイパワータイプが使用されるべきであったがローパワータイプが使用されてしまっていることが確認された。ローパワータイプの電源基板には、ハイパワータイプに存在するヒートシンクとパワートランジスタが取り付けられていない。そのため電源基板は消費電力過大となり、表面温度は 130°C に上昇しオーバーヒートを起こしてしまうことが判明した。その結果、電源基板の供給電圧は 3V 程度まで低下し、デジタル IF 基板のフォトカプラが正常動作しなくなってしまうと考えられる。さらに電源基板の代わりに定電圧電源により任意の電圧をデジタル IF 基板に供給することで、供給電圧の低下とフォトカプラの異常動作の関係を通電試験により調査した。通電パターンには三角波を用いた。結果として、供給電圧が 3.45V まではフォトカプラが正常動作をすることが分かった。さらに供給電圧を下げていくとフォトカプラは正常動作しなくなり、供給電圧が 3.18V となったとき、フォトカプラの出力はステップ状の指令値となり、誤動作時とほぼ同一の状況を再現することができた。これが EQ 電源の誤動作時に起きていた事象であると考えられる。この調査結果から電源基板はローパワータイプからハイパワータイプに変更を行った。

4. 再発防止策

再発防止策として EQ 電源及びスピルフィールドバック制御システムの改造を行う。ここでは高速インターロックシステムと DSP による電流出力監視システムの 2 つの対策を取り上げる。

4.1 高速インターロックシステム

高速インターロック基板を追加導入した。過電圧や過電流などの異常信号を論理回路にて集約し、異常検出時にはアナログスイッチにより FET ゲートの出力を制御することで高速で電源の出力の停止を実現するものである。高速インターロック基板の異常検出から停止信号が出力されるまでの時間は 100 ナノ秒である。この高速インターロック基板を導入し、誤動作時と同様の状況を再現するため 159A のステップ入力を EQ 電源に指令すると、即座に過電圧を検出し電流出力が 0A となるまでに出力される最大電流はわずか 0.37A に抑えることができた。この結果から高速インターロックシステムを導入することで、万が一 EQ 電源が誤動作を引き起こしたとしても、ターゲットの損傷のリスクを低減することができる。

4.2 DSP による電流出力監視システム

DSP による電流出力監視システムはスピルフィールドバック制御システムに用いている DSP に EQ 電源の電流モニタ信号を A/D 変換し光信号を DSP のあるローカル制御に伝送し o/D 変換により DSP に入力することで、電流指令値と実際の電流出力を監視するシステムである。さらに電流指令値と電流出力の差分が一定以上になると、上述の高速インターロックシステムの外部入力ポートに停止信号を送信し即座

に電源を停止させるものである。このシステムの動作試験として EQ 電源に DC40A の電流出力を指令し、DSP の監視する電流モニタの信号レベルをアンプにより半減させることにより、意図的に電流指令との差分を大きくする試験を行った。DSP では 100kHz サンプリングで差分を監視しており、試験時は差分が 5A 以上になると異常と判定し、異常が 8 回連続検出されると停止信号を送信するように設定した。この試験において電流モニタ信号を半減させてから EQ 電源が外部インターロックにて停止シークエンスに入るまでの時間が 120 マイクロ秒と良好な結果が得られた。この結果から電流出力監視システムのハードウェアは問題なく動作することができた。さらに夏季シャットダウンの期間に通電試験を重ね異常検出の閾値や何回の異常検出で停止信号を送信するかなどの調整を行う。この電流出力監視システムの導入により、今回のような EQ 電源の誤動作時には、電流指令値の伝送に異常が発生した際には即座に異常を検知し EQ 電源を停止させ、ターゲットの損傷のリスクを低減することができる。

5. おわりに

J-PARC において EQ 電源の誤動作により、30GeV に加速した 2×10^{13} proton のビームが 5 ミリ秒という極めて短時間に取り出されてしまったことで、ハドロン実験施設で用いられていた金標的の一部を溶解させ、ハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故を引き起こしてしまった。この事故の発端となった EQ 電源の誤動作の原因について調査により原因特定に至ることができた。本文で示したような再発防止策を適切に施してゆき、遅い取り出しの運転再開を目指していきたい。

参考文献

- [1] A. Kiyomichi, et al., "Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction", Proc. of IPAC'10, p. 3933.
- [2] A. Schnase, et al., "Application of Digital Narrow Band Noise to J-PARC Main Ring", Proc. of IPAC'10, p. 1446.