

電磁石電流変動監視システム Curs-BIS の開発

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM FOR ELECTROMAGNET CURRENT FLUCTUATIONS

熊谷桂子^{#,A)}, 内山暁仁^{A)}, 福澤聖児^{B)}

Keiko Kumagai^{#,A)}, Akito Uchiyama^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

Abstract

More than 850 electromagnet power supplies are used in the operation of the RI Beam Factory at the RIKEN Nishina Center. Beam operation and experiments can be maintained only when all magnet power supplies on the beamline used for the experiment are in stable operation. The Beam Interlock System (BIS) is used to protect the accelerator components from the beam. The system stops the beam when it detects various anomalies, such as an abnormal status or off signal of the magnet power supply, or abnormal values of baffle signals installed in the injection and extraction sections of cyclotrons. There was an accident in which the vacuum chamber was damaged due to unintended changes in the current of the magnet power supply. To prevent such events, the current as well as the status of the magnet power supply must be constantly monitored, and the beam must be stopped if an unintended change occurs. Since 2018, we have developed and installed the magnet current fluctuation monitoring system Curs-BIS in all power supplies. We will report on the system, its operational status, and future issues.

1. はじめに

理研仁科センターRI ビームファクトリーは、44 年前に稼働開始した RILAC、38 年前に稼働開始した旧施設 (RARF)と 2007 年に稼働開始した新施設 (RIBF)とで構成されている[1]。旧施設は主にイオン源、リングサイクロトロン (RRC) (1986~)、AVF サイクロトロン (1989~)を中心として各実験室にビームを輸送する複数のトランスポートラインで構成されている。新施設はイオン源、新入射器 RILAC2、RRC 出射後のビームを再加速する fRC、IRC、SRC という 3 台のサイクロトロンと、それらに付随するビームトランスポートラインで構成されている。これらの施設で使用されている電磁石用電源は Table 1 で示した通り 850 台余りに上る。これらの電源の遠隔制御の方法は、それぞれの電源の製作年代に開発された数種類のインターフェイスを使用しているが、基本的には 16 ビットの電流設定、14 ビットの電流モニタ、最大 16 ビットのステータス取得、数ビットの操作指令で構成されている。

加速器制御システムの一環として、電磁石用電源やその負荷のトラブル等で電源がダウンしたとき、あるいは高周波加速系のトラブル、ビーム軌道の逸脱などの際に、速やかに加速中のビームを停止するために「ビームインターロックシステム (BIS)」が全系で整備されている[2]。電磁石用電源の場合、すべての電源に、電源にエラーが起きた時あるいは電源がオフになった時に接点が開となるリレーまたはシーケンスが組み込んであり、ハードワイヤーで BIS に信号を送るようになっている。BIS は各種機器から送られる信号を検知するとビームを止めに行く構成となっている。

一方電磁石電源の状態監視の面では、電源のデジタルインターフェイスを介したデータは全て EPICS システム

に取り込まれているので、必要な時にデータを調べることはできるが、出力電流値は 14 ビットの分解能に制限されている。電源のメンテナンスや、挙動不審の電源の状態を調べるために必要な精度の高い出力電流測定は、担当者レベルの閉じられた測定系のみしか存在せず、測定している電源数も限られていた。

長年このような電磁石電源制御システムでビーム運転を続けている中、RI ビームファクトリーの進化により年々ビーム強度が増してきた。2020 年には ⁷⁰Zn 加速におけるビーム強度は加速最終段では 20 kW に迫る強度となり、何らかのトラブルでビーム軌道が変化するとビームが真空容器に当たり短時間で大規模な損傷につながるリスクが年々大きくなってきた。

2017 年 4 月 8 日、マシンタイム中に突然実験者に供

Table 1: Number of Power Supplies

Type	Current Range (A)	Old Facility (RARF)	New Facility (RIBF)	RILAC
Cyclotron Main	450-5200	2	4	0
Injection, Extraction	800-3500	12	21	0
Trim Coil	100-1200	50	110	0
Dipole	300-400	37	32	38
Quadrupole	150-260	118	108	42
Steering	7-10	142	94	30
High Voltage (kV)	100-130	5	6	0
TOTAL	851	366	375	110

[#] kkumagai@riken.jp

給していたビームがいなくなり、最終段の超伝導サイクロトロン SRC の真空が悪化する事象が起きた。調査の結果、SRC にビームを入射する直前の入射軌道の曲がり角を補正する電磁石の電源電流値が、 -24 A から -97 A に勝手に動いたために、入射ビームラインと SRC バレー箱を繋ぐベローズにビームが当たり、穴が空いたことがわかった。事後の調査で原因は、電源のスイッチング素子のノイズが、盤内の電流値設定用のデジタル I/F 基板に乗ることがあり、電流設定と設定ストロブと同時にノイズによる誤った信号が入ったことによる電流値の変化だったと考えられた。I/F 基板の交換と基板のデジタル入出力ケーブルにノイズ低減用フェライトを装着したことによって、以後同様の事象は起きていないが、この経験から電源のエラー、オフだけでなく、電源電流値の変動を直接監視し、意図しない電流値の変動がある場合にも、速やかにビームを止めるシステムが必要であることを痛感し、対策となる電磁石電流変動監視システム(Curs-BIS)を開発することにした。

2. Curs-BIS システム

2.1 システムの概要

Figure 1 に本システムの全体図を示す。プログラマブルコントローラーで電源電流値を常時モニターし、電流値があらかじめ設定された上限下限を超えるとインターロック信号を発生し、それを全系の BIS に送るシステムであり、Curs-BIS と名づけている。プログラマブルコントローラーは、横河電機株式会社の FA-M3 V シリーズを使用している。搭載モジュールは、1 ユニット (48 電源に対応) あたり、シーケンス CPU (F3SP71-4S) 1、リアルタイム OS CPU (F3RP71-1R 他、Linux 対応) 1、リレー出力モジュール 1、16 ビットアナログ入力モジュール 6 である。システムの動作環境として、電源台数が多い上に、実験によって使用する電源が変化する、各電源の電流設定値は

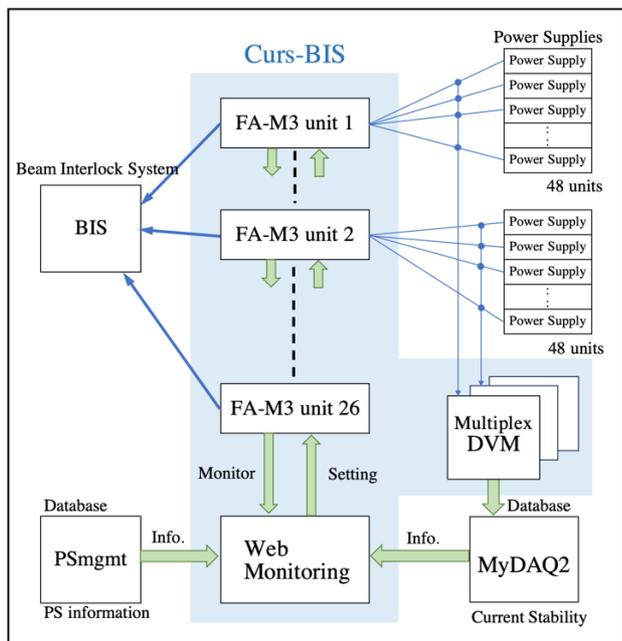


Figure 1: Block Diagram of Curs-BIS.

都度異なり、実験中にもビームを出しながら電磁石電流値を随時調整するなどの状況下であることから、設計の方針として、加速器オペレータによる設定が不要で、勝手にシステムが動作し、異常時だけ速やかにインターロック信号が発出できるものを目指した。

例えば、運転者が人為的に電源を操作した場合にも電流値は変化するが、その場合にはインターロック信号は発出されないようにしなければならない。電流値の変化が操作によるものかどうかを判別するために、リアルタイム CPU モジュールを搭載した。CPU 上で EPICS CA クライアントが動作しており、EPICS ネットワーク上で電源操作が行われると、数ミリ秒以内にその情報を検出し、FA-M3 パスを介してシーケンス CPU レジスタに書き込みが行われる。この値から、電流の変化が運転操作によるものなのか、何らかのトラブルによるものなのかを判別し、ビームインターロック信号を発出するかどうかを決める。運転操作によって電流が変化した後、あらかじめパラメータで設定した不動作時間 (電源の特性により設定値を決めている。おおよそ数 10 秒) 後に基準となる電流値とそれに対する許容範囲 (上限、下限) が自動的に再設定される。

ステアリング電源以外の電源の場合、出力電流値が 0 A 付近である場合には電流は設定されていない (= 電源を使用していない) ことを示すので、その場合にもインターロック信号は発出されない設計になっている。また 0 A から使用電流値に設定する場合は、ビーム運転中に電流値を微調する場合に比べて、設定値までの電流到達時間が長くなるため、インターロックの不動作時間も長くなるようパラメータを決めている。

2.2 動作模式図とラダープログラム

Figure 2 に各電源の電流値判定の動作模式図を示す。人為的に電源電流値を調整した場合にはインターロック信号は発生せず、不作為の電流値変動の場合のみ信号を発生する。電流の上限、下限値の幅は、パラメーターとしてシーケンス CPU 内に記入しており初期値は、ステアリング電源は定格電流値の $\pm 5\%$ 、それ以外の電源は定格電流値の $\pm 1\%$ としている。さらに後述するように Web の監視画面上で電源個別に変更が可能である。

本システムのアルゴリズムが書かれているシーケンス CPU 内のラダープログラムは、全ユニット共通とし、各電

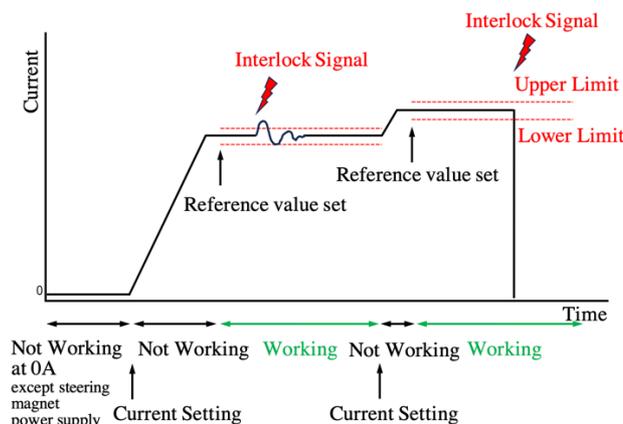


Figure 2: Operation Diagram of Curs-BIS.

源の名称や上限、下限、不動作時間などの各種パラメータは、全てプログラム内の「共通信号定義」に記入することとし、この部分だけ書き換えれば誰でも簡単に電源の変更などができる設計とした。電源-電磁石対応データ、電源の諸元などは制御ネットワーク上のデータベースを利用して得ている。「電源名称」の登録は FAM3 のシーケンス CPU のレジスタの容量を多く占有するが、パラメータがあちこちあることで電源やパラメータの変更時に変更し忘れ、不整合が起きることのないよう全てレジスタ内に保持することにした。

最大 48 電源を監視する 1 台のシーケンス CPU のラダープログラムの 1 周のスキャンタイムは定常状態で 1.1ms である。通常と異なるイベント(電流値の上昇、下限超えなど)があった場合は、事象が起きている電源台数に伴って増え、1 周で最大 4 ms 程度まで延びる。

各電源のアナログ電流値は上記 Curs-BIS システムに取り込まれると同時に、最大 60 ch の測定が可能なマルチプレクサ型 DVM (34972A または DAQ970A、Keysight)にて高精度に電流値を測定している。このデータは簡易データ収集システム MyDAQ2[3]に保管されており、過去の電源電流値を確認でき、Curs-BIS システムの動作と連携し補完するデータを蓄積している。

Figure 3 は 2 ユニット分の Curs-BIS である。このセットで 96 台の電源の電流を監視できる。

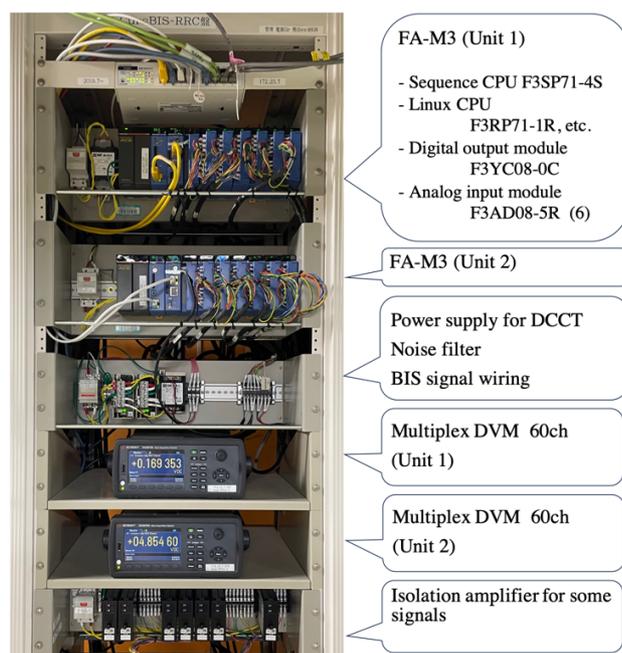


Figure 3: Two units of Curs-BIS. 96 power supplies can be monitored with this equipment.

2.3 電流値測定

各電源電流値の測定方法は大きく分けて 3 種類の方法を利用している。(1)電源内蔵モニター用 DCCT。(電源にフィードバック用 DCCT とは別にモニター用 DCCT が備わっている場合) この方法では、電流フィードバックと同程度の性能の DCCT が使われているため、高精度の電流測定が可能である。(2)簡易型の DCCT を外付け。モニター用の DCCT 等がない電源には、ホール素子を用

いた汎用直流電流センサー(U_RD 社 HCS シリーズなど)を用いている。これらは電源のフィードバック制御に使用されている DCCT より測定精度(直線性、応答性)が悪く、電流値変化が大きい時の検出値のドリフトは大きい。一定電流に達した後の微小な電流変化を測定する目的には十分な性能がある。何より価格が高精度の物の 1/10 以下であるため経済的である。(3)電源のフィードバック用 DCCT あるいはシャントの出力を分岐したもの。これらの出力は、精度はそれなりにあるが、電源と独立した測定系でないため、インターロック信号を発生する目的のみには使用できるが、電源の動作の不安定など細部の電源動作の検証には不向きである。

電流値の測定にあたって、上記(1)と(3)の方法の中で、電源本体の設計によってはアナログ電流値出力のベースとなる電圧が、電源の出力電流にともなって上下するものがある。電流の測定値(差動電圧)が $\pm 10V$ 以下であっても、ベース電圧の上下があると FA-M3 のアナログ入力モジュールの入力信号レンジ($\pm 11V$)を逸脱してしまて正しく測定できないことになる。その場合は測定手段を(2)に変更するか、アイソレータ(VJH1、横河電機)を介して電流値を測定するようにしている。

2.4 Web 監視画面

Curs-BIS 自身はプログラマブルコントローラ FA-M3 ユニートを ON にするだけで自動的に動作するが、その動作内容は、Web 画面で監視できるようになっている。

現在は FA-M3 のユニットは 26 台稼働している。Web サーバーとなる PC は 1 秒に 1 回 FA-M3 の全ユニットにアクセスし、現在の各種データと過去のインターロック発出/解除を取得し、画面表示する。電源-負荷の対応、電流の現在値、基準値、上限下限、マスク状態、電源を人が操作しているかどうか、ネットワークの異常等が表示できる。インターロック信号を発生している電源はすぐわかるよう当該電源の欄が赤く光る。インターロック発出/解除の履歴は 10 ms の分解能で記録されており、最新の 30 件は画面で表示し、過去の全履歴は PC 内に保存される。FA-M3 の仕様上 10 ms 以上の精度で発出/解除の時間を記録することは難しい。また Web 画面から、個々の電源の電流の基準値、上限、下限値や、BIS 出力のマスク等の変更の操作を行うことができ、変更内容は FA-M3 に反映される。FA-M3 のシーケンス CPU は長期間連続動作する上に、時刻精度があまり良くないので、1 日 1 回、CPU 内の時刻データを PC の時刻に自動で補正している。Figure 4 が Curs-BIS の 1 ユニットの監視画面である。

Web 画面上の個々の電源の電流の現在値から MyDAQ2 に記録された最大 6.5 桁の DVM で取得した精度の良い電流値の時系列グラフに直接リンクできるため、当該電源の現時点までの安定度等の動作確認が瞬時に行える。電源が突然ハンチングを起こしたりした場合、インターロックの発出と、時系列データ確認によってすぐに状況が分かり、対処することができる。さらに、データベース上にある電源の仕様・図面・故障履歴・写真などのデータ(PSmgmt: Power Supply management [4])にもリンクしているので、電源の仕様確認等もすぐに行うことができる。

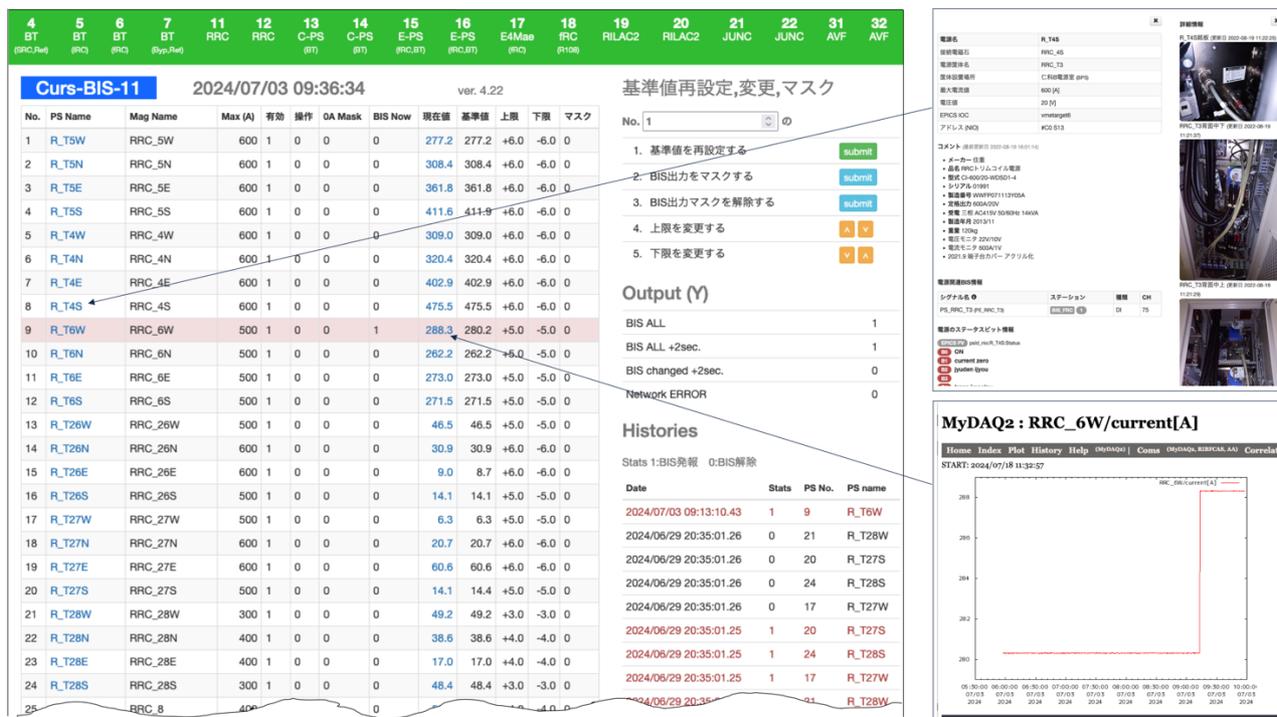


Figure 4: Web monitoring screen of Curs-BIS and samples of related information links.

2.5 システムの問題点

当然のことながら、人が操作した場合はインターロック信号を発生しない仕様であるため、オペレーションミスで過大な電源電流値を設定してしまった時などは防ぎようがない。また、このシステムでは人が操作したことを検知する信号は、EPICS ネットワーク上で電源操作を行なった後にシステムに伝わるため、操作信号がシーケンス CPU レジスタに至るまでの間に数ミリ秒の間、先に実電流が動き、インターロック信号が出てしまう電源がある。電流値がランプアップしない上に操作時の値の変更が大きい小型電源の一部にそのような現象が起きている。対策としては問題がある個々の電源のインターロック出力にわずかな Delay を入れざるを得ないと考えている。

120 kV 程度の直流高電圧が印加されている。放電により印加電圧が下がることがしばしば起きるが、電圧低下中はビーム位置も変化するため、放電が起きたら直ちにビームを止め、回復すればビームを出す必要がある。今回開発した Curs-BIS のシステムを 4 つのサイクロトロン (EIC, EDC) 用高電圧電源にも適用し、放電時の過渡的な電圧降下、電流上昇時にインターロック信号を出してビームを都度停止している。電圧が自動で回復すれば信号も復帰するので、ビームが復旧する。放電の履歴は通常の Curs-BIS と同じように Web 監視画面で見ることができ、1 時間ごとの放電回数や電圧、電流は MyDAQ2 に記録されている。Figure 5 が EIC/EDC の電圧と放電の監視画面である。

3. インストールと応用、今後の予定

3.1 インストール履歴

Curs-BIS システムのインストールは 2018 年から開始し、基本となるシーケンスプログラムと監視プログラムに改造を加えつつ、毎年数ユニットずつ設置・配線・接続・調整した。電磁石用電源は、施設の多くの場所に点在しているため、電源設置エリアごとに Curs-BIS システム用の 19 インチラックを設置した。2023 年に 26 ユニット (新施設 11 台、旧施設 11 台、RILAC 4 台) の設置を完了し、RILAC を含め 851 台の全電源を網羅した。

3.2 EIC, EDC の放電検出システムへの応用

サイクロトロンの入出射部には、静電偏向チャンネル (EIC, EDC) を装備している。これは入射、出射するビームの最内周、最外周だけを取り込み、取り出す装置であり、薄いセパタムと電極間の 10 数ミリのギャップに 100~



Figure 5: The Curs-BIS applied as a discharge detection system for the electrostatic deflection channel of cyclotrons.

3.3 今後の予定

一部の電源について操作信号の到達が遅れることで短時間の誤信号が発生してしまう問題を個々の電源で対策する必要性と Web 監視画面の改良が必要であると考えている。本方式でのビームインターロックの発出までの速さは数 ms から 10 ms 程度であるが、FAM3 シリーズを使用した現在のシステムでは、記録できる時間分解能が 10 ms であることもあり、将来これ以上の速さが必要な状況になった場合は新たに別のシステムを考えなければいけない。

4. まとめ

電磁石電源の不意の電流値変化から加速器を守るための監視システム Curs-BIS の概要について述べた。システムの問題点で述べた改善事項を修正する必要があるが、本来の目的は果たせていると思われる。

加速器をビームによる損傷から守るための監視システムとして開発されたものではあるが、それ以外のメリットが

大きかった。多数の電源の電流値の状態が一覧で確認可能なこと、例えば一部の電源が何らかの不具合でハンチングし始めたり、電流がドリフトし始めたりした時などにインターロック信号が出ることですぐに気がつけること。電源の安定度が精度良く時系列ですぐに確認でき、電源の諸元や写真、図面との対比がすぐにできることなどである。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RI Beam factory Project: A status report", Nucl. Instrum. Meth. B (2007).
doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174
- [2] https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/21P037.pdf
- [3] T. Hirono *et al.*, Proceedings of PCaPAC08, Ljubljana, Slovenia, (2008), pp. 55.
- [4] <https://conference-indico.kek.jp/event/184/contributions/4447/>