

# DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR THE 2<sup>ND</sup> and 3<sup>RD</sup> CHARGE EXCHANGE SYSTEM IN J-PARC 3GEV RCS

Masato Kawase <sup>#,A)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Yoshio Yamazaki<sup>A)</sup>, Osamu Takeda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center/JAEA

2-4 Shirakatashirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

## Abstract

J-PARC 3GeV Synchrotron Accelerator is using method of charge exchange injection using three carbon foils. In order to achieve this injection, three charge exchange devices installed in this facility. These devices are controlled by one control system. The 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> charge exchange devices are upgrading to increase maintainability and exhaust ability of the vacuum unit, and the control system has reconsidered. Basic policy of redesigning the control system is separated from centralized control system of the three devices, and we reconstruct the control system that independent from the centralized control system. On this condition, we are upgrading of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> charge exchange device. It is necessary to redesign the interlock unit about safety, because of being stand-alone control. Now, the error signal of the charge exchange unit consolidates the error signal of three devices, and it operates the Machine Protection System (MPS). Therefore, we needed long time to search occasion why the error happened. However, the MPS will be operated by the error signal on each unit, we hope it makes a difference to search occasion easily. The 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> charge exchange units adopt a simple control system using Yokogawa electric PLC FA-M3. We are designing of the control system with safety that fuses the drive unit and the vacuum unit.

This report is about design of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> charge exchange unit control system that reconstructed the hardware of their unit.

## J-PARC 3GeV RCS 第 2, 3 荷電変換装置制御システム設計

### 1. はじめに

3GeV シンクロトロン加速器 (Rapid Cycling Synchrotron Accelerator ; RCS) では、3 つの炭素薄膜を使用した荷電変換入射方式<sup>[1]</sup>を採用している。この入射方式を実現するために第 1 から第 3 までの独立した荷電変換装置を設置している。これら 3 台の装置は、現状 1 つの制御システム (荷電変換制御システム)<sup>[2]</sup>で操作している。現在、RCS のビーム強度増強に合わせ、第 2・第 3 荷電変換装置に対するメンテナンス性の向上と真空性能の強化を目的とした高機能化を計画しており、これに伴い制御システムの見直しを進めている。制御システム見直しの基本方針は、3 台の装置を一元管理している制御システムから切り離し、それぞれ独立した制御システムとして再構築を行い、その条件の下で第 2・第 3 荷電変換装置のハードウェア高機能化に対応することとした。各々の装置を独立に制御することから、特に安全面に関するインターロック機構の見直しが必須である。これまで荷電変換装置の異常信号は 3 台分を 1 つの信号として集約し機器保護システム (Machine Protection System : MPS) を作動させていた。その為、異常発生後の復旧時は 3 台の装置をリセットしなければならず、またビームコミッション時の条件作りに時間がかかり不便を生じさせていた。今回の制御系見直しでは、個々の装置について異常信号に対する MPS を作動させることで、緊急時の個別対応を可能にする。

今回の第 2・第 3 荷電変換装置の制御系を独立させる

にあたり、制御機器としては横河電機製 PLC FA-M3 のみ用いたシンプルなシステムを採用し、軸駆動系及び真空排気系を融合し且つ安全な制御アルゴリズムの設計を進めることにした。このハードウェア高機能化に伴った制御系設計について報告する。

### 2. ハードウェア高機能化

#### 2.1 軸駆動システムの高機能化

RCS の荷電変換装置は、リニアックから来た水素負イオンを陽子に変換する第 1 荷電変換装置に加え、変換し損ねた非常に極わずかな水素原子や水素負イオンを再度陽子に変換して HO ダンプに廃棄する為の第 2・第 3 荷電変換装置から構成されている。第 1 荷電変換装置はフォイルの劣化を観測し遠隔で交換できるシステムを有しているが、第 2・第 3 荷電変換装置はフォイルを前後させる機能しかなかった。そこで RCS のビーム強度増強に合わせて、以下のような高機能化を行う。

- ◆ フォイル把持のクランプ機構を TR 軸に付ける
- ◆ フォイル交換機構を新たに追加する
- ◆ ビューポートによる観測系を追加する

第 2・第 3 荷電変換フォイルの劣化は第 1 荷電変換フォイルに比べて格段に低い為、フォイル交換に関する作業は全て手動で行うこととした。但し、フォイル交換機能の追加により第 2・第 3 荷電変換装置に独立した真空排気系が必要となった。またインターロック等の条件は格段に増加する結果となった。

以上の新しい機能を実装するにあたり、第 2・第 3 荷電

<sup>#</sup> kawase.masato@jaea.go.jp

変換装置軸駆動システムを第1荷電変換装置軸駆動システムローカルコントローラから切り離すこととした。独自のローカルコントローラを設置し、単独で操作・監視が行える制御機構を構築した。

## 2.2 真空排気系の設置

第1荷電変換装置には真空排気系が設置されていたが、第2・第3荷電変換装置には、真空排気系は存在しなかった。フォイル交換機能追加に伴い、第2・第3荷電変換装置真空排気系に関する高機能化を行う。

◆ ゲートバルブを取り付け、真空系を切り離す

◆ 真空排気系を新たに新設する

今までは主リング側の真空排気系で装置内を超真空状態にしていた。しかし、今回新たにゲートバルブを取り付けて真空系を切り離すために、第2・第3荷電変換装置にも独自の真空排気系を設置することにした。真空排気系は、ターボ分子ポンプ(TMP)やドライスクロールポンプ(DSP)で構成される真空排気装置、ピラニゲージ(PIG)、コールドカソードゲージ(CCG)、BAゲージ(BAG)などの圧力測定機器、ゲートバルブ(GV)やフォアラインバルブ(FLV)などの真空隔離装置で構成している。この内、ゲートバルブの開閉操作のみ現地手動で行う。

## 2.3 インターロック機構の強化

第2・第3荷電変換装置TR軸の高機能化に伴い、安全面の強化を目的としたインターロック機構の強化が必要となった。現在の軸駆動システムインターロック機構は、第1から第3までの荷電変換装置軸駆動システムの挿入及び退避時のリミットスイッチやその他駆動システムのエラー信号を利用し論理処理を行いMPSへ出力している。その為、各軸駆動初動条件を構築する際に軸間の依存度が増してしまい、各軸単独での初動条件を構築することができなかった。これまでのシステムでMPSへ出力しているインターロック項目を表1に示す。

表1: 異常信号一覧

| 信号名称        | 用途                         |
|-------------|----------------------------|
| Permission1 | 通信エラー及び非常停止                |
| Permission2 | TR1、TR2、TR3 挿入監視<br>論理和で出力 |
| Permission3 | フォイル挿入検知                   |
| Permission4 | モータドライバエラー<br>リミットスイッチ不成立  |
| GV320       | GV320 閉                    |
| TR 軸脱調      | TR 軸脱調検知                   |
| 真空 Ready    | 真空排気系エラー                   |

第2・第3荷電変換装置の高機能化に伴い、各々の装置の単独操作に変更した。また、インターロック機構も各装置単位で監視を行い、各装置間の依存関係が無いインターロック機構として再設計した。基本方針は、これまでのインターロック信号はそのままに、それらインターロック信号を装置毎に対応させることにした。表2はインター

ロック信号と第1・第2・第3荷電変換装置との対応を示したものである。

ゲートバルブの開閉操作を現地手動で安全に行うには、TR軸の位置把握が必須となる。そこでヒューマンエラーを避けるために、ゲートバルブ開閉リミットスイッチと軸退避状態を現場で目視できる機構を取り付けることとした。各リミットスイッチ状態を視覚的に判断できるようにLED等で賄うことにした。

表2: インターロック対応表

| 信号名称        | 1 <sup>st</sup> charge exchange unit | 2 <sup>nd</sup> charge exchange unit | 3 <sup>rd</sup> charge exchange unit |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Permission1 | ○                                    | ○                                    | ○                                    |
| Permission2 | ○                                    | ○                                    | ○                                    |
| Permission3 | ×                                    | ×                                    | ×                                    |
| Permission4 | ○                                    | ○                                    | ○                                    |
| GV          | ○ (GV320)                            | ○ (手動操作)                             | ○ (手動操作)                             |
| TR 軸脱調      | ○                                    | ○                                    | ○                                    |
| 真空 Ready    | ○                                    | ○                                    | ○                                    |

※Permission3は廃止

## 3. 独立型制御システム

### 3.1 制御システム構成

高機能化した第2・第3荷電変換装置は軸駆動システムに加え真空排気系を併せ持つ。これを実現する為の独立型制御システム構成を図2に示す。

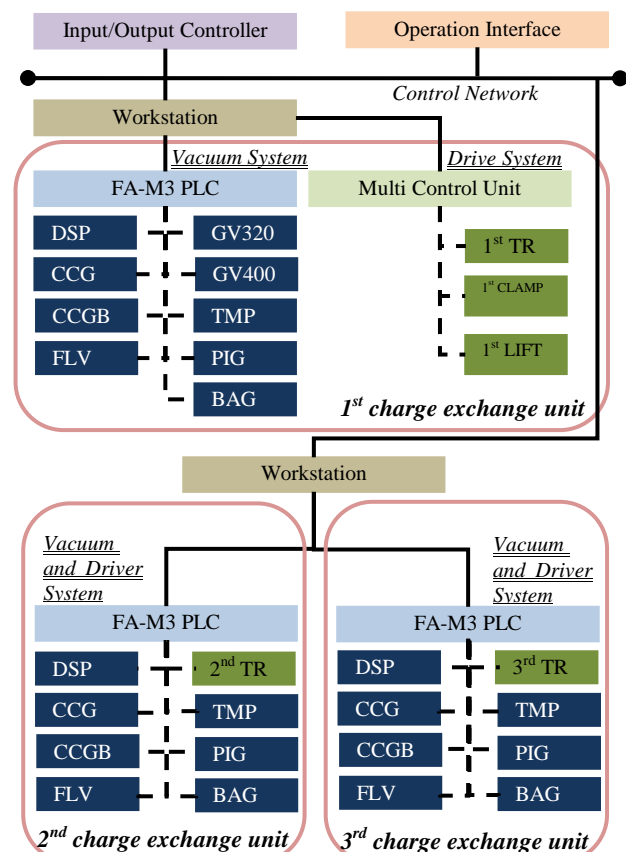


図2. 独立型荷電変換装置制御システム構成

第 1 荷電変換装置についてはこれまで通り、軸駆動システムローカルコントローラを日立造船製 Multi Control Unit (MCU)、真空排気系ローカルコントローラを横河電機製 PLC FA-M3 で構成することとした。しかし、新たに構築する第 2・第 3 荷電変換装置の制御システムについては、軸駆動系及び真空排気系ともに PLC FA-M3 の 1 つのローカルコントローラで実現させることとした。軸駆動システムと真空排気系に同期性のある制御システムにすることにより、超真空環境下での軸駆動処理に対して安全性が高まる。PLC のみで制御機構を構成することで、複数のシステムに同期性を持たせることも容易に行え、且つシーケンスやアルゴリズムを含めた初動条件も容易に構築できる。また、その副次的効果としてソフトウェア構築が効率的になることと、シンプルなソフトウェアが構築できるといった効果が得られる。現場タッチパネル機能と同等な装置としてワークステーションを設置する。このワークステーションで現場操作や監視が行えるよう GUI も含めて設計を進めている。

### 3.2 第 2・第 3 荷電変換装置マシンモデル

J-PARC マシンモデルは、加速器構成機器を抽象的な状態で表示し、その抽象化された状態を用いて安全に機器状態遷移を行うモデルである。<sup>[3]</sup>

第 1 荷電変換装置では、遠隔操作でフォイル交換を行う。その為、フォイル交換フラグを監視することにより、そのフラグの状況と装置の状態を組み合わせることで、フォイル交換シーケンスを開始させることができる。このフラグを使用することで、他の機器にはない、状態遷移に変則的なシーケンスを実装することができた。しかし、第 2・第 3 荷電変換装置の場合には、フォイル交換は現場の手動操作のみで行う為、状態遷移に変則的な仕様は実装していない。ただし、手動操作で行うゲートバルブの開閉やクランプ把持・開放の状況についても第 1 荷電変換装置と同様に他のアルゴリズムの初動条件に含めている。表 3 にこれまでの第 1 荷電変換装置状態遷移マシンモデルを、表 4 に新たに再構築した第 2・第 3 荷電変換装置状態遷移マシンモデルを示す。第 2・第 3 荷電変換装置状態遷移サイクルに必要なソフトウェアは、表 4 を基に設計している。

軸駆動システムを構成しているのは、クランプ軸、駆動軸である。駆動軸は、主リングへの挿入及び退避動作、クランプ軸は、フォイルの把持及び開放動作を行う。真空排気系を構成しているのは、真空装置とゲートバルブである。軸駆動システムと真空排気系が連携の取れたシーケンスを状態遷移に組み込み、また、遠隔操作が円滑かつ安定に動作できるよう状態遷移サイクル設計を行った。図 3 に第 2・第 3 荷電変換装置状態遷移サイクルを示す。

#### 3.2.1 DOWN

「DOWN」の条件は、制御ユニット用ブレーカが OFF の状態であるが、フォイルは把持している状態としている。「DOWN」から「STOP」への状態遷移は、手動操作で行う。ここで行うべき操作は、真空排気系の立上、ゲートバルブ開、制御ユニット用ブレーカ ON である。フォイル交

換作業を行う場合には、強制的に「DOWN」に遷移する。

#### 3.2.2 STOP

「STOP」の条件は、真空排気系は Ready 状態且つゲートバルブ開であり、TR 軸の原点サーチ未完 (TR 軸初期化) としている。フォイル交換作業が現場でのみ行われることから、クランプ軸の操作は、「STOP」では行わない。「STOP」ではすでにフォイルを把持している状態と見なしている。「STANDBY」への状態遷移に対応したコマンドは Go-Standby であり、コマンド受信後、TR 軸初期化を開始する。初期化完了で「STANDBY」に状態遷移する。

#### 3.2.3 STANDBY

「STANDBY」の条件は、真空排気系が Ready 状態且つゲートバルブ開、及び TR 軸初期化完了としている。ビーム運転待機中を示す状態である。「STANDBY」からの遷移に対応する状態遷移コマンドは Go-STOP もしくは Go-RUN となっている。Go-RUN は、TR 軸を目標位置へ移動させる軸駆動シーケンスを開始する。Go-STOP は、原点サーチフラグ保持状態であれば、状態のみ遷移する。何かしらの原因で原点サーチフラグが OFF した場合、TR 軸駆動シーケンスの初動条件を満たさない為、自動的に「STOP」に遷移することになる。その場合には、再び Go-Standby を実行し、TR 軸初期化を行い、「STANDBY」に遷移させる必要がある。

#### 3.2.4 RUN

「RUN」の条件は、TR 軸が主リングに挿入中としている。RUN 状態は、TR 軸微調整、TR 軸退避が行える状態である。「RUN」からの遷移に対応する状態遷移コマンドは Go-RUN と Go-Standby である。Go-Standby は、TR 軸退避シーケンスを開始する。TR 軸微調整は目標位置設定後、Go-RUN で目標位置まで移動する。

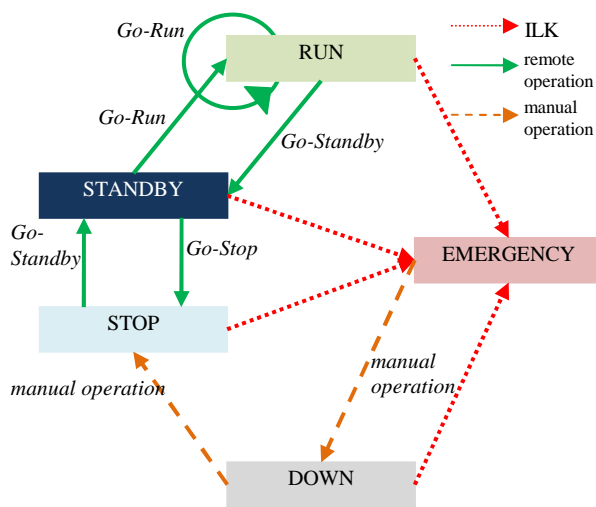


図 3. 状態遷移サイクル

表 3: 第 1 荷電変換装置状態遷移マシンモデル

|            | DOWN   | STOP   | STANDBY  | RUN  | EMERGENCY                             |
|------------|--|--|--|--|---------------------------------------|
|            | breaker off ;<br>GV320 close ;<br>vacuum not ready ; | TR un-initialize ;<br>foil unclamp ;<br>vacuum ready ok ;<br>GV320 close | TR initialize ;<br>Foil clamp ;<br>Vacuum ready ok ;<br>GV320 close              | TR insert ;<br>vacuum ready ok ;<br>GV320 open   | Heavy trouble                         |
| Go-STOP    | <manual operation><br>breaker on<br>vacuum ready     | No process   | State transition<br>standby -> stop  | No process   | No process                            |
| Go-Standby | No process   | TR search home position  | <foil change flag ON><br>foil change<br><br><foil change flag OFF><br>No process | TR leave ;<br>GV320 close  | No process                            |
| Go-Run     | No process   | No process   | GV320 open ;<br>TR insert + TR position adj.                                     | <foil change flag ON><br>Foil change + TR insert<br><br><foil change flag OFF><br>TR Position adj. | No process                            |
| RESET      | No process   | No process   | No process   | No process   | State transition<br>emergency -> down |

表 4: 第 2・第 3 荷電変換装置状態遷移マシンモデル

|            | DOWN  | STOP  | STANDBY  | RUN   | EMERGENCY                             |
|------------|---|---|--|---|---------------------------------------|
|            | breaker off ;<br>GV open/close  | TR un-initialize;<br>foil clamp ;<br>vacuum ready ok ;<br>GV open | TR initialize;<br>foil clamp ;<br>vacuum ready ok ;<br>GV open | TR insert ;<br>vacuum ready ok ;<br>GV open | Heavy trouble                         |
| Go-STOP    | <manual operation><br>breaker on;<br>foil clamp;<br>vacuum ready ;<br>GV open | No process  | State transition<br>standby -> stop                            | No process                                  | No process                            |
| Go-Standby | No process  | TR search home position   | No process   | TR leave                                    | No process                            |
| Go-Run     | No process  | No process  | TR insert + TR position<br>adj.                                | TR Position adj.                            | No process                            |
| RESET      | No process  | No process  | No process   | No process                                  | State transition<br>emergency -> down |

## 参考文献

- [1] M.Yoshimoto, et al., IPAC10 in Japan, Kyoto, May. 23-28, 2010
- [2] M.Kawase, et al., IPAC10 in Japan, Kyoto, May. 23-28, 2010
- [3] M.Kawase, et al., The 7<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010

### 3.2.5 EMERGENCY

第 2、3 荷電変換装置軸駆動システムにおいて、何かしらの異常が発生した場合、「EMERGENCY」に遷移する。真空排気系については、異常が発生した場合に MPS は発報されるが、主リング側真空排気系で排気できている。その為、「EMERGENCY」に遷移させないこととした。本装置に重大なダメージを受けないと判断した場合にのみ MPS をマスクし、ビーム運転を継続することとしている。「EMERGENCY」復帰先は、「DOWN」とし、安全確認のために現場ワークステーションでのみ復帰操作を行うこととしている。

## 4. まとめ

今回ハードウェアの高機能化に伴い、インターロック機構の強化及び制御システムの再設計を行ってきた。また、第 2・第 3 荷電変換装置の制御系を独立させ他機器と統一性のある状態遷移を実現させた。また安全性・安定性及び保守性を向上させた制御システムを構築した。今後のビームコミッショニングに本ソフトウェアが有効的な効果があることを期待したい。