

## 安全性向上を目指した J-PARC 加速器の監視システムの整備

### NEW SURVEILLANCE SYSTEM TO ENHANCE SAFETY OF J-PARC ACCELERATORS

上窪田紀彦<sup>#, A)</sup>, 飯塚上夫<sup>B)</sup>, 青山俊明<sup>B)</sup>, 吉田奨<sup>B)</sup>, 山本昇<sup>A)</sup>, 仁木和昭<sup>A)</sup>

Norihiko Kamikubota<sup>#, A)</sup>, Takao Iitsuka<sup>A)</sup>, Toshiaki Aoyama<sup>B)</sup>, Susumu Yoshida<sup>B)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>B)</sup>,  
Kazuaki Niki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, KEK and JAEA

<sup>B)</sup> Kanto Information Service (KIS)

#### Abstract

After the radioactive material leak accident at the Hadron Experimental Facility of J-PARC, various discussions have been made to investigate and analyze causes of the accident, together with the external expert panel. The accelerator control system is requested to detect early signals which may result in a severe accident.

Two new surveillance systems have been introduced during 2013-2014: a High-risk MPS system, and a radiation-accelerator data-sharing system. The former is that MPS events, which may cause a severe accident, have been proved as the "high-risk MPS". They are summarized into an operator's GUI application. The latter is that a data-sharing system between the radiation safety system and the accelerator control system has been constructed. The radiation safety system has been an isolated system. However, the data-sharing system make it possible to watch at radiation data from the accelerator control system.

#### 1. はじめに

J-PARC 加速器は、400MeV リニアック(LI)、3GeV シンクロトロン(RCS)、30GeV 主リング(MR)から構成される<sup>[1,2]</sup>。また J-PARC には、これら加速器の大強度陽子で生成する 2 次粒子を利用した実験施設 (物質生命科学実験施設(MLF)、ニュートリノ実験施設(NU)、ハドロン実験施設(HD))がある<sup>[3]</sup>。

2013 年 5 月 23 日、ハドロン実験施設で起こった放射線物質漏洩事故を受けて、J-PARC センスタッフは、外部有識者を交え、事故に至った経緯を検証した<sup>[4]</sup>。2013 年 8 月の法令報告第三報では、事故に至った主要な現象・原因として、(1) ビーム取り出し装置 (MR EQ 電源) の誤動作<sup>[5]</sup>、(2) 金標的の損傷、(3) 放射線物質のハドロン実験ホールへの漏洩、(4) 放射線安全管理システム (の情報共有が不十分)、の 4 点が指摘された<sup>[6]</sup>。

さまざまなレベルの事故への対応の中で、加速器運転制御の観点からも事故を防ぐために何が足らなかったのか、真摯な検討が行われた。第 1 に、EQ 電源の interlock (MPS) を日常的な事象として事故の兆候を見逃し、ビーム運転を再開した点があった。この事実への反省から、重篤な事故の引き金となりうる MPS は特別な扱いをする必要がある、と考えた。また第 2 に、事故時のハドロン実験ホールの放射線レベル上昇の情報が、加速器にはほとんど伝わらなかった点があった。この点は法令報告第 3 報の(4)でも指摘されており、J-PARC 加速器・実験施設で放射線レベル情報をデータ共有する仕組みが必要と考えた。

本稿では、事故後に新しく導入した「重篤な事故の引き金となりうる MPS (High-risk MPS)」と、「放

射線レベル情報のデータ共有」を報告する。

#### 2. High-risk MPS の導入

J-PARC 加速器で使用される MPS (machine protection System, 機器保護システム)は、機器不調 (例: 電源 fault) やビームハンドリング不調 (例: ビームロス)などを検知した時、直ちに加速器を自動停止する仕組みである<sup>[7]</sup>。ビーム運転中に発生する MPS のほとんどは、日常からのわずかな逸脱であり、原因は良く理解できているものである。

事故の時には MR EQ 電源の MPS が発報し、加速器は自動停止した。当時の再開手順に従って運転を再開したが、その後の結果をみれば事故を未然に防ぐ最初のチャンスを見逃したことになっている。この経験からの深い反省は、大強度加速器の MPS リスクを再検討する活動へと発展していった。

Acc	location	sensor	recordname	HIGH値	HIHI値	通常値
LI	0度ダンプ	温度	LI_BD0DUMP01-MON-TEMP1	40	50	29.5 deg
		温度	LI_BD0DUMP01-MON-TEMP2	40	50	29.6 deg
		温度	LI_BD0DUMP01-MON-TEMP3	40	50	28.7 deg
		温度(窓)	LI_BD0DUMP01-MON-WIND_TEMP	35	40	27.8 deg
	真空(コベ クトロ)	LI_BD0CNVCT06-MON-PRS	300	1000	21.4 Pa	
* LIは、この他に、30度、90度、100度、のHRMPS項目がリストされている						
RCS	HOダンプ	温度	RCS_H0DUMP-MON-TEMP1	50	60	42.0 deg
		温度	RCS_H0DUMP-MON-TEMP2	50	60	41.0 deg
		温度	RCS_H0DUMP-MON-TEMP3	50	60	41.0 deg
		温度	RCS_H0DUMP-MON-TEMP4	50	60	40.0 deg
	3NBダンプ	温度	BT_CC-TC01_4-VAL	40	50	25.0 deg
温度		BT_CC-TC01_5-VAL	40	50	24.7 deg	
MR	Abortダンプ	温度	MRMON-ABTDUMP-IRON1-TEMP	150	250	室温
		鉄温度	MRMON-ABTDUMP-IRON2-TEMP	150	250	室温
	Abortダンプ コンクリート	温度	MRMON-ABTDUMP-CONC1-TEMP	30	60	室温
		温度	MRMON-ABTDUMP-CONC2-TEMP	30	60	室温

Figure 1: List of High-risk MPS.

2013 年 11 月から 2014 年 1 月にかけて、3 加速器それぞれで High-risk MPS を洗い出す検討が進めら

<sup>#</sup> norihiko.kamikubota@kek.jp

れた。その結果を Figure 1 に示す (一部省略)。結果的に、LI/RCS/MR とビームダンプの温度等を High-risk MPS と認識し、危険度の目安となる閾値を検討・決定した。また、MPS 発報が実装されていないものは、順次発報するよう改修するものとした。なお、RCS の High-risk MPS 実装が別途報告されている<sup>[8]</sup>。

Table 1: Alarm Levels

危険レベル	ツール表示 閾値 EPICS field	オペレータの対応
通常範囲	緑表示 (Normal) -	特になし
注意報	黄表示 (Minor) HIGH	担当者に連絡 (ビームは継続)
警報 High-risk MPS 発報	赤表示 (Major) HIHI	ビーム運転を停止 「注意体制」に移行

J-PARC 加速器制御システムは、EPICS toolkit で構築された分散制御システムである<sup>[9]</sup>。選別された High-risk MPS のほとんどは、以前から加速器制御システムの EPICS PV (EPICS の信号単位) として整備済みであった。High-risk MPS では、各信号で注意報レベルと警報レベルを設定するが、その実装は EPICS alarm severity の仕組みを利用した。この機能は EPICS 標準なので、関連 tool でも統一した扱いが可能であった。実装上の関連付けを、オペレータの対応と併せて Table 1 に示す。

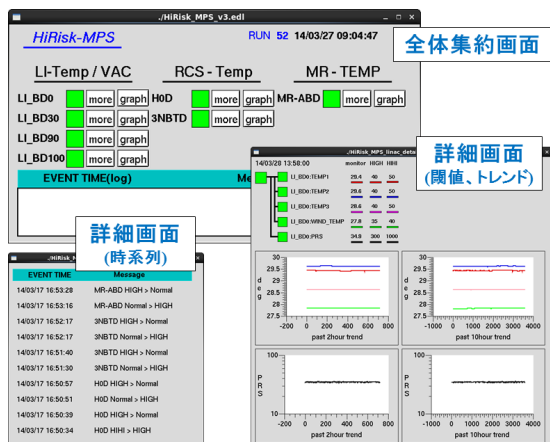


Figure 2: Operator's GUI screens for High-risk MPS.

High-risk MPS の監視点数は、現時点で 20 程度である。MLF が再開した 2014 年 2 月頃には、既に全監視信号を 1 画面に詰め込んだ画面で監視していたが、情報が雑多でオペレータが注意深く観察するには無理があった。試行錯誤の末、階層化して簡略化した画面が整備された (Figure 2)。オペレータは、通常は全体集約画面の色の変化のみに注意を払えばよい。緑以外の表示 (なんらかの異常の兆候) があれば、詳細画面を開いて閾値・トレンドやイベント時系列で状況を確認する。3 月末には High-risk MPS 画面のマニュアルが整備され、本格的な運用状態に

なった。

### 3. 放射線データ共有システムの構築

#### 3.1 J-PARC 放射線安全システム

J-PARC の放射線安全システムは、加速器制御システムとは独立に開発・管理され、安全システムであるが故に独立した運用が求められた。制御システムとの情報共有も充分には検討されたとは言えない状態であった。実際、加速器スタッフ・オペレータが放射線モニタの情報を知るには、放射線管理室に行って専用端末で調べるしかなかった。

放射線安全システムの中でも、JAEA 担当部分 (LI,RCS,MLF) と KEK 担当部分 (MR,NU,HD) は実装が異なる別システムである。例えば、放射線モニタの front-end 部分を見ると、JAEA は PLC-base で通信は TCP/IP packet、KEK は CAMAC-base で PC (MS SQL) との間の File-share でデータ収集する。KEK の放射線モニタデータは、最終的には JAEA 管理の database (Oracle) に集約される予定であるが、実現していない。

また、放射線データ共有の仕組みを構築するに当たって、既存の安全システムには手を入れない (例えば集約 Oracle に SQL client を追加するのは避けたい)、JAEA 部分は会社の商用製品ベースなので詳細な内部仕様を提供できない、という条件があった。

#### 3.2 Workgroup の活動と提案

2013 年 7 月、この問題の解決を目指す workgroup が立ち上がり、議論を重ねた結果、8 月に実現可能な案が提示された。放射線データ共有の全体概観図を Figure 3 に示す。

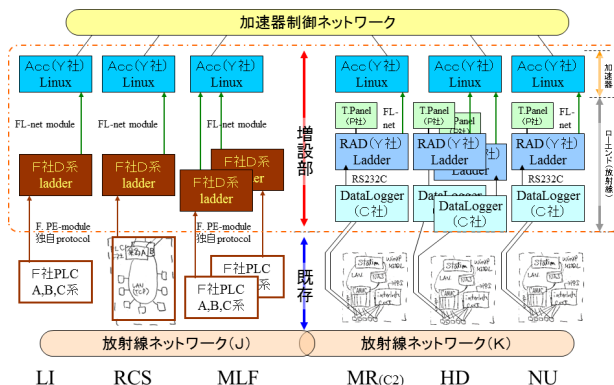


Figure 3: Overview of Acc.-Rad. data-sharing system.

提案の骨子は以下のとおりである。

- JAEA 分は、既存の PLC データ集約部 (A,B,C 系) に、新規にデータ分配 PLC (D 系) を設置して接続。両者は独自通信モジュールで相互接続され、D 系に放射線モニタの情報を流す。
- KEK 分は、放射線モニタから CAMAC 入力へのパルス信号線を分岐し、同じパルス信号を入力とする全く別の新 DAQ システムを開発する。
- 両システムとも、PLC FL-net module で加速器制御システムの PLC-IOC (IO controller) に接続

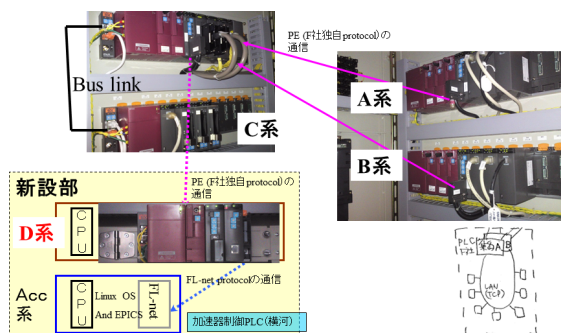


Figure 4: Install JAEA-side data-sharing system.

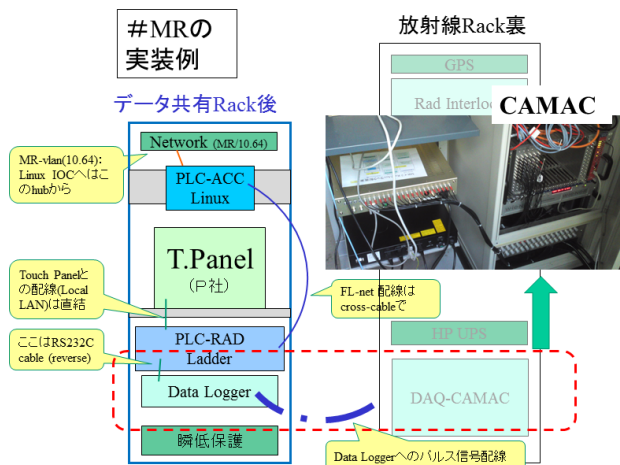


Figure 5: Install KEK-side data-sharing system.

する。PLC-IOC では PLC の CPU module で Linux/EPICS が動作しており、KEKB や J-PARC MR で標準的なものである<sup>[10,11]</sup>。

- FL-net は、異なる会社の PLC 間を相互接続する規約で、日本電機工業会 (JEMA) が標準化を推進する枯れた技術である<sup>[12]</sup>。
- 各建屋ごと、計 6ヶ所で接続点を設ける。

### 3.3 JAEA/KEK のデータ共有の仕組みの実装

Figure 4 は JAEA 側で、新規 D 系 PLC システムを追加した図である。LI/RCS/MLF 建屋での D 系 PLC 実装は、2013 年 12 月から 2014 年 2 月の間に行った。また、Figure 5 に、KEK MR での実装レイアウトを示した。写真では、CAMAC から分岐した信号線が Data logger に接続されたのが確認できる。MR の実装は 2014 年 6 月、NU は 2014 年 5 月、HD は現時点(2014 年 8 月)で未実装である。

両システムの実装の詳細は紙面の都合から省略するが、別途報告する予定である<sup>[13]</sup>。

### 3.4 加速器側から見える放射線モニタ情報

2014 年 6 月までに、HD を除く全施設で放射線データ共有の仕組みが実装され、加速器制御側で放射線モニタの情報が見えるようになった。例として、Figure 6 に 2014 年 6 月 18 日 (半日保守日) の MR の放射線モニタ (ガス系の一部) のトレンドを示す。ビーム運転の停止やビーム調整に連動して MR のガ

スモニタレベルが変動しているのが分かる。

放射線データ共有の監視モニタ数は各施設 20-30 個で、合計では 100 個超 (おのこの注意報、警報、レベル値の 3 点がある) である。オペレータ向けの監視画面は、High-risk MPS と同じ look-and-feel の全体集約画面・詳細画面を用意した。ただし、各施設で MAP 型表示画面を追加開発した(Figure 7)。

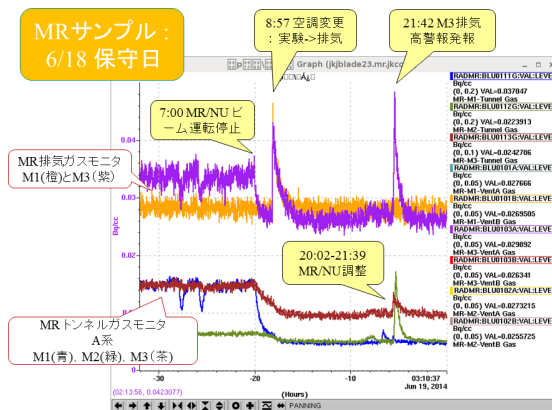


Figure 6: Demonstration of radiation level monitoring from the accelerator control system.

### 放射線データ共有:MAP型表示 (LIの例)

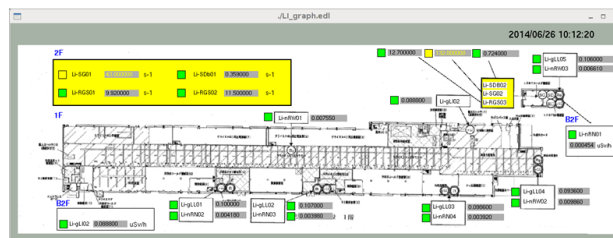


Figure 7: Example of a map-style GUI display.

## 4. 考察

### 4.1 運用

High-risk MPS システムは 2014 年 3 月末頃から、放射線データ共有システムは、2013 年 12 月~2014 年 2 月に JAEA 側施設(LI,RCS,MLF)が、また 2014 年 5 月~6 月に KEK 側施設(MR,NU)が利用可能になった。現時点(2014 年 8 月)でハドロン実験施設(HD)はビーム再開に至らず、両システムも未実装である。

Figure 8 に、実際に加速器オペレータが監視していた 2014 年 6 月 21 日の MR study 時の画面を示す。High-risk MPS と放射線データ共有の全体集約画面が中央にあり、オペレータはこの 2 画面を監視している。左側には放射線モニタのリスト型表示やトレンド (MR ガスモニタ)、右側には High-risk MPS のトレンド (MR Abort dump の温度) を表示している。MR study に関連して変化が生じる可能性のあるものを MR commissioning staff が監視していたとみられる。



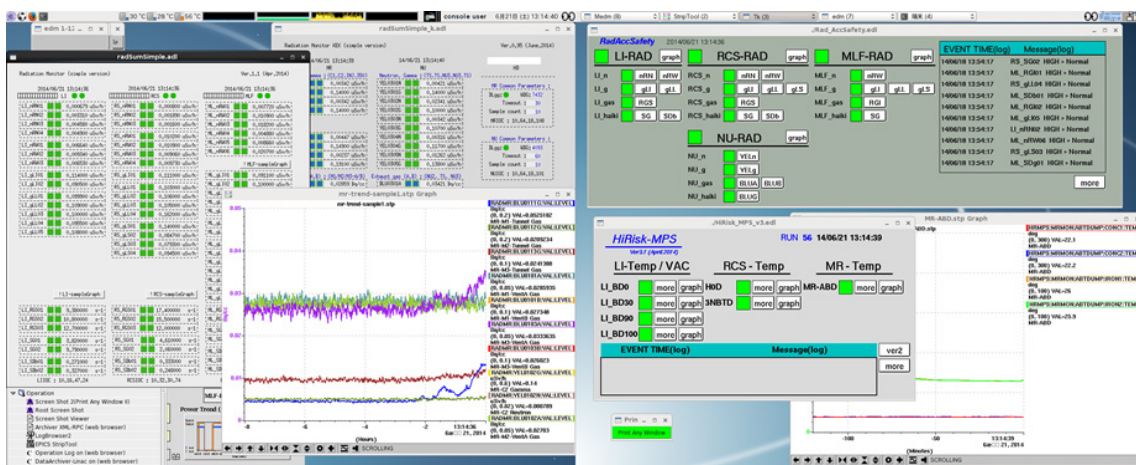


Figure 8: Operator's screen for two new surveillance systems on June 21, 2014.

## 4.2 意義

High-risk MPS システムの開発途上で、さまざまな安全に関する議論が行われた。J-PARC 加速器の更なる大強度運転に向けたリスク意識は、以前に比べ格段に向上している。

放射線データ共有システムの運用開始によって、格段な簡便さで放射線モニタレベルを調査できるようになった。また、今や加速器制御系の全端末（数 10 台）で放射線モニタを確認できるが、これは 1 年前（コントロール室の隣の放射線管理室の 1-2 端末のみ）とは比較にならない。

両システムとも、3 加速器が単一画面に集約され、J-PARC 全体が監視できる。部署を横断しての統括画面の開発は、過去にはあまり例が無い。

## 4.3 課題

High-risk MPS システムでは、一部の MPS（例：MR Abort dump 温度）が未整備で発報しない。今後の追加の検討と共に、着実に実装していく。

放射線データ共有システムでは、閾値の管理が中途半端である。JAEA 側仕様は閾値が共有データに入らず、KEK 側仕様では加速器と放射線で別々の閾値が設定できてしまう。中期的に対応を検討する。

両システムとも、まだ archive system が準備されていない。2014 年秋までに開始したい。また、異常検知時に音を鳴らしたいというオペレータ希望が根強い。音アラームは、他のものとの整理統合を検討しつつ進めたい。

## 5. まとめ

2013 年 5 月 23 日のハドロン実験施設での放射線物質漏洩事故をきっかけに、2 種類の監視系が新たに構築された。High-risk MPS システムでは、重篤な事故の引き金と成り得る MPS 事象を洗い出し、全体集約画面で集中監視を可能にした。放射線データ共有システムでは、既存システム（2 種類）の独立性を維持したまま、放射線モニタのデータを加速器側で共有することに成功した。

2 種類の監視系はここ 1 年で実装が進み、順次運

用を開始した。今後も着実に改修する。ハドロン実験施設のみ未実装であるが、再開になればすぐに運用できるよう準備を進める。

本件の検討・実装・運用と続いた流れの中で、非常に多くのスタッフ（部門横断的）や会社のご協力をいただきました。感謝いたします。

## 参考文献

- [1] H.Hotchi, et al., "Commissioning the 400 MeV Linac at J-PARC and High Intensity operation of the J-PARC RCS", Proceedings of the IPAC 2014, Dresden, Germany, June 2014, TUXA01, in press.
- [2] 小関忠、他、"J-PARC MR の加速器の運転状況"、加速器学会誌 2012 年 9 巻 1 号, pp.30-40 (2012).
- [3] 日本物理学会誌 2011 年 1 月 (vol.66 no.1) 小特集「J-PARC その実現まで」.
- [4] "J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故関連情報", <http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>
- [5] 木村 琢郎、他、"J-PARC 遅い取り出しのスピルバック制御システムの改良", 加速器学会 (青森), Aug.2014, SUP096, (this meeting).
- [6] "J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質の漏えいについて(第三報)" および "事故・故障等発生報告書(第三報)", [http://j-parc.jp/ja/topics/HDAccident20130812\\_01.pdf](http://j-parc.jp/ja/topics/HDAccident20130812_01.pdf)
- [7] 伊藤雄一、他、"J-PARC 加速器の可用性向上に向けた MPS 機能強化について", 加速器学会 (姫路), Aug.2010, WEPS025, pp.383-385.
- [8] 山本風海、他、"J-PARC 3GeV シンクロトロン機器保護システムの増強", 加速器学会 (青森), Aug.2014, SAP096, (this meeting).
- [9] N.Kamikubota et al., "J-PARC Control toward Future Reliable Operation", Proceedings of the ICALEPCS 2011, Grenoble, France, Oct.2011, pp.378-381.
- [10] J.-I.Odagiri et al., "Application of EPICS on F3RP61 to Accelerator Control", Proceedings of the ICALEPCS 2009, Kobe, Japan, Oct.2009, THD005, pp.916-918.
- [11] 小田切淳一、他、"組み込み EPICS 技術の SuperKEKB 加速器制御への応用", 加速器学会 (大阪), Aug.2012, FRUH03, pp.206-208.
- [12] <http://www.jema-net.or.jp/Japanese/standard/opcn/>
- [13] N.Kamikubota et al., "Integration of Independent Radiation Monitoring System with Main Accelerator Control", PCaPAC 2014, Karlsruhe, Germany, Oct.2014, to be published.