

J-PARC 3 GeV シンクロトロン機器保護システムの増強 INCREMENT OF THE MACHINE PROTECTION SYSTEM IN J-PARC RAPID CYCRING SYNCHROTRON

山本風海^{#, A)}, 川瀬雅人^{A)}, 岩間悠平^{A)}, 福田真平^{A)}, 加藤裕子^{A)}, 大内伸夫^{A)}, 明午伸一郎^{A)}, 大井元貴^{A)},
上窪田紀彦^{A)}
Kazami Yamamoto^{#, A)} Masato Kawase^{A)}, Yuhei Iwama^{A)}, Shinpei Fukuta^{A)}, Yuko Kato^{A)}, Nobuo Ohuchi^{A)}, Shinichi
Meigo^{A)}, Motoki Ooi^{A)} and Norihiko Kamikubota^{A)}
^{A)} J-PARC Center

Abstract

The radiation leak accident happened in the hadron experimental hall of J-PARC on May 23, 2013. The accident was caused by a target sublimation due to an unanticipated beam from the 50 GeV main ring. To detect and prevent the radiation leakage in all facilities of J-PARC, we improve the machine protection system(MPS). In the J-PARC 3GeV synchrotron, a monitoring system of an abnormal state of the extraction beam to the mercury target of material life science experiment facility were prepared. The radiation level of the gas in the tunnel were able to always observed by connecting radiation safety system and accelerator control system. The dump temperature was included in the MPS. We also developed new interlock system that can stop the beam immediately when the beam current exceed the limit.

1. はじめに

J-PARC は、400MeV リニアック、早い繰り返し (25Hz) の 3 GeV シンクロトロン、主リング (MR) の 3 つの加速器と、物質生命科学実験施設 (MLF)、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設の 3 つの実験施設で構成されている。各加速器において加速された陽子ビームはそれぞれの実験施設に送られ、物理実験に必要な中性子やミュオン、ニュートリノ、K 中間子等の二次粒子生成に利用されている^[1]。J-PARC の実験ユーザーへのビーム供給は 2008 年 12 月に MLF で始まり、それ以降順次ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設での実験も開始された。2011 年の東日本大震災の際には、J-PARC 各施設は多大な被害を被りながらも 2012 年 1 月に復旧を完了し、物理実験が再開された。運転再開後もビーム強度を増強しながら運転は継続され、2013 年 5 月の時点では MLF へは最大 300kW、ニュートリノ実験施設へは最大 240kW、ハドロン実験施設へは最大 24kW で連続してビームを供給していた。ハドロン実験施設における放射性物質の漏えい事故は、このようにビーム強度を上げながら MLF とハドロン実験施設へのビーム供給運転を行っていた 2013 年 5 月 23 日に発生した。事故当時、MR はハドロン実験施設へ遅い取り出しでビーム供給を行っていた。この運転では 3×10^{13} 個の陽子を二次粒子生成標的である金標的に向けて照射していたが、11 時 55 分に遅い取り出しで取り出されるビームの時間構造を制御する四極電磁石 (EQ) の電源が誤動作し、EQ 電磁石に急激な電流が流れた。その結果、通常であれば 2 秒かけて照射されるビームが 5 ミリ秒という非常に短い時間で取り出されてしまい、金標的が急激に発熱され熔融した。この際に、標的中に生成された

放射性物質が大気中に飛散し、使用室と実験エリアを仕切る遮蔽体の隙間から漏えいした。この放射性物質の使用室からの漏えいは、使用室と実験エリア間の気密処理が不十分であったことが原因であるが、そもそもの発端は加速器が異常な状態でビームが取り出された事であった^[2]。ハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故の概要に関して図 1 に示す。

そこで J-PARC の加速器施設では、これまで想定していなかった放射線漏えい事故に発展しうるリスクの見直しを図り、漏えい事故に発展する可能性がある事象の検討を行った。検討の結果、特にリスクが高いと評価された事象に関しては、機器保護システム (MPS) のインターロックに組み込み、その中でも特に危険性が高い高リスク MPS として再定義した。高リスク MPS に含まれるインターロックが発報した場合には、注意体制という一段高い警戒態勢を取るにより、状況を正確に把握し事故を未然に防げるような体制とした^[3]。

2. 3 GeV シンクロトロンの改善点

加速器施設でのリスク再評価の際に、各施設特有の条件を考慮して検討を行った。その結果、3 GeV シンクロトロンでは放射線漏えいの恐れがあるリスクとして以下のようなケースを想定した。

- 1) MLF の中性子ターゲットに向けて、通常運転での設定を越えた強度、密度のビームが取り出された場合
- 2) 加速器真空容器、ダンプに異常なビームが当たり、それを溶解した場合
- 3) 放射化した冷却水が配管の劣化で漏れた場合

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



Figure 1: Hadron Hall accident^[4].

2.1 MLF ターゲットへの設定値を越えたビーム出力

上記1)の、MLF ターゲットへの通常運転での設定を越えた強度、密度でのビーム出力というケースは、まさに昨年発生したハドロン施設での放射性物質の漏えい事故と同様の事象が MLF で発生する事を想定している。ハドロン施設での事故の場合、取り出されるビームの時間構造が機器の異常により通常2秒のところは5ミリ秒まで圧縮されてしまった。より一般的に考えると、加速器から取り出されるビームの密度が増加するには a)ハドロン施設での事故と同様に縦(時間)方向にビームが圧縮される、b)ビームの横方向の分布が狭まり、空間的な密度が増加する、c)取り出されるビームの総粒子数が増加する、の3つのパターンが考えられる。このうち、a)時間方向への圧縮に関しては、3 GeV シンクロトロンでは取り出しの方法が早い取り出しのみであり、取り出しに使うパルスキッカー電磁石の磁場の立ち上げ時間とフラットトップ時間に制限がかかる事からそもそも時間構造を極力狭めた取り出しを行っている。そのため、原理的に a)のような事象は発生しない。

b)空間的な密度に関しては、電磁石の電源が誤動作するとピークが増加する可能性がある。そこで、電磁石電源の異常を検知した際に、MLFの水銀ターゲット直前に常設されているプロファイルモニタの信号が確認できるようにシステムの改良を行った。図2に、プロファイルモニタシステムの概要を、図3にMPS発報時のプロファイルの測定例を示す。モニタヘッドは垂直方向に14本、水平方向に32本張られたワイヤーで構成されている。このワイヤーを陽子ビームが通過した際の放出二次電子によって誘起された電気信号を増幅し、CAMACのADCモジュールで取り込みデジタル値に変換している。このシステムでは、ビーム停止トリガーから50ショット前までのデータをレコードとして読み取る事ができるが、これまではMPSでビームが止まってから数秒遅れてビーム停止トリガーが出ていたため、MPS発報時のプロファイルの記録が間に合わない場合があった。そこで、MPS発報とビーム停止トリガーを同期させ、遅くともMPSが発報したショットの次のショットでトリガーが止まるようにした。これによって、異常発生時のプロファイルがオンラインで確認できるようになった。

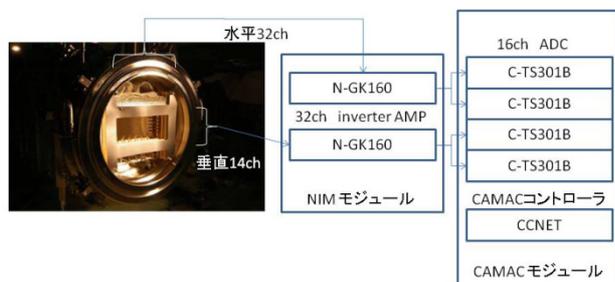


Figure 2: Profile monitor system of Neutron target.

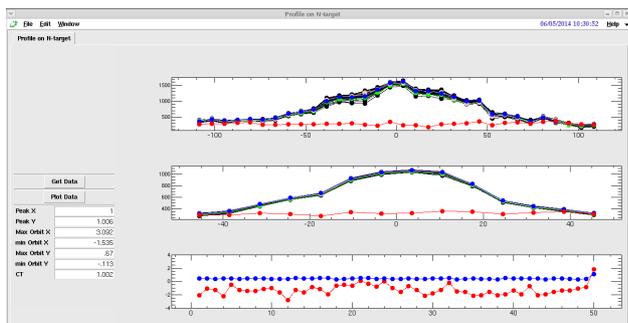


Figure 3: Profile data of Neutron target.

c) 総粒子数の増加は、イオン源ピーク電流の増加、もしくは3 GeV シンクロトロン入射時に RF バケットに併せるための中間バンチ構造を作るチョッパーの誤動作によりマクロパルスがチョップされない場合に発生する可能性がある。これまで、出力ビームが行先毎に決められた容量を超えないようにリニアックに設置された粒子数カウンターシステムによって一時間当たりの粒子数を制限していた。また、この粒子数カウンターシステムでは1ショットあたりの最大粒子数も制限する事ができ、どちらの場合も粒子数が設定値を越えた際には次のショットが来ないようにビーム運転を強制的に停止する設計となっていた。しかしこの方式では、どれほど早く運転を止めても1ショットは設定された最大粒子数を越えたビームがダンプやターゲットに到達してしまう問題があった。そこで、ビーム電流が設定値を越えた際により高速にビームを停止するシステムとして、ビームロスモニタで使用しているコンパレータを流用する方式を採用した。J-PARC の3 GeV シンクロトロンでは、ビームロスモニタの出力電圧を加速時間中アナログ回路で積分し、それをコンパレータ回路で監視し設定値を越えた際に瞬時にビームを停止している。各回路の応答は数マイクロ秒程度であり、ビームロスによる出力積分電圧が設定を超えてから10-20マイクロ秒程度でビームを停止する事ができる。これを電流値の監視に流用した。新たな電流値の監視システムでは、ギガ社製の積分アンプによりリニアック DTL 中に設置された電流モニタ

(CT) の出力を積分し、積分出力を三菱電機製のコンパレータに入力し常時監視している。このシステムを採用する事で、2014年6月時点で運転していた300kW の出力を設定値にすると、チョッパーの異常でビーム電流が増加しても350kW 程度の出力に相当する粒子数でビームを停止することができている。図4に粒子数コンパレータシステムの概要を示す。

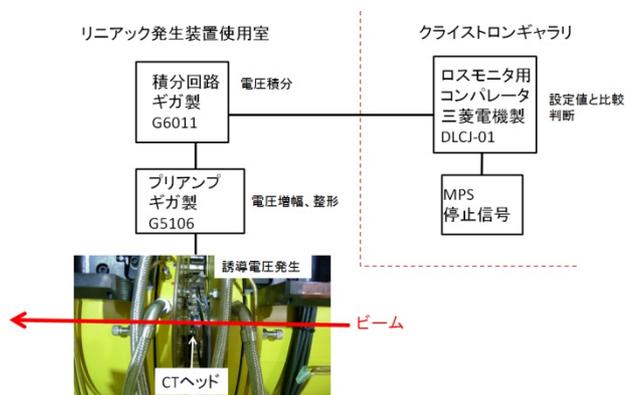


Figure 4: Particle comparator system.

2.2 真空容器、ダンプの溶解のリスク

放射線漏えいのリスクの二番目、2) 加速器真空容器、ダンプに異常なビームが当たりそれを溶解した場合、については、まずダンプへの追加対策としてダンプ内部の温度を監視するための熱電対出力をインターロックへ追加した。さらに、ダンプや真空容器が溶解、さらには昇華しトンネル内に気体として拡散した場合を想定し、放射線安全設備のサーバからトンネル内ガスの放射能濃度のデータを常時加速器制御システム側からも参照できるようにした。サーバからはガス濃度以外にも放射線安全設備に含まれる放射線モニタの出力も確認する事ができ、これらのデータを加速器の運転パラメータと常時比較する事によって、誤動作が発生した際に放射線漏えいにつながる可能性のある異常状態をいち早く検知できるようなシステムを構築した。図5に放射線監視画面を示す。

2.3 放射化した冷却水漏えいのリスク

3 GeV シンクロトロンの場合、トンネル内の加速器機器を冷却している一次冷却水は、加速器トンネルの中心にある3 GeV シンクロトロン棟のうちトンネルと同じ地下二階管理区域内に設置された熱交換設備で循環している。3 GeV シンクロトロン棟は地下一階より下は全て管理区域となっているため、放射化した一次冷却水が仮に配管の腐食等で漏れたとしても即座に管理区域外への漏れにはつながらない。しかしながら、そのまま見過ごすと気づかぬうちに管理区域外に持ち出してしまいう可能性がある

ため、早期の発見が必要である。元々冷却水設備に関しては、異常が発生しても他の加速器装置への冷却水量が確保されていれば運転に支障は無いという考えからインターロックに組み込まれていなかったが、上記のように早期発見が必要となったため、加速器制御システム側で冷却水設備の状態を確認できるような改造を行った。冷却水配管は加速器トンネル中に張り巡らされているため、どこから漏水が発生しているかをオンラインで検知するような構成にはなっていない。そこで、冷却水を貯めているタンクの貯蔵水量がある程度低下した場合に漏水の可能性有りとして判断する事とし、タンクレベル低を含めた冷却水設備の状態異常を中央制御室で監視できるように改良を行った。図 6 に冷却水状態監視画面を示す。

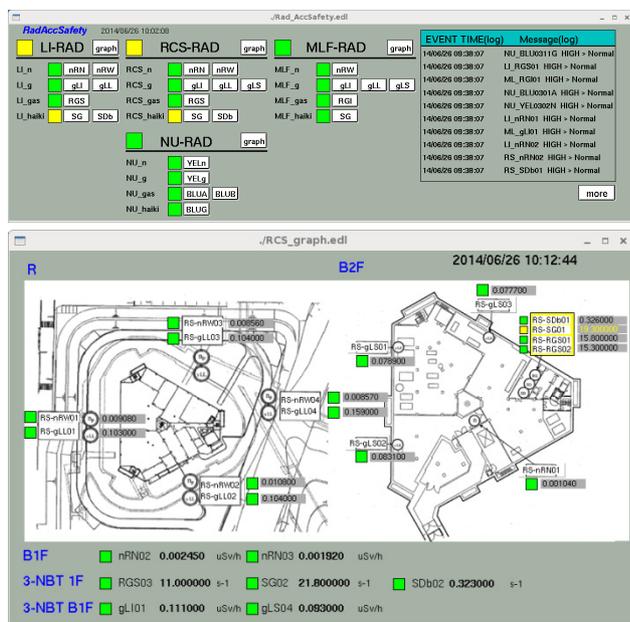


Figure 5: Screen of radiation monitor.

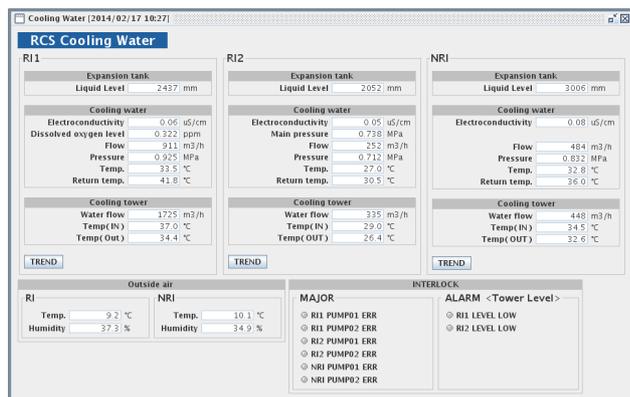


Figure 6: Screen of cooling water status.

3. まとめ

J-PARC では昨年 5 月に発生したハドロン実験施設での事故を受け、全施設で放射線漏えいの危険性を未然に検知、防ぐため機器異常状態の監視システムの増強を行った。3 GeV シンクロトロンでは、MLF 水銀ターゲットへの出射ビームの状態異常やトンネル内ガスの放射能濃度を常時監視し検知する、ダンプ温度をインターロックに組み込みダンプ溶解を早期に発見する、リニアックからのビーム電流が設計値を超えた際に即座にビームを停止する、冷却水システムの異常を加速器制御系から確認できるようにする、等の改良を行った。今後は、MPS 発報時の波形情報を遡って確認できるようなシステムを構築し、異常発生時のより詳細なビーム状態を判断できるようにする予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “Technical design report of J-PARC”, KEK Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-44
- [2] “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>
- [3] “大強度陽子加速器施設 J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えいについて (第三報)”, https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/data/20130812_1.pdf
- [4] “J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質の漏えい事故に関する報告 (第三報) に対する評価について (案)”, https://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h25fy/data/0019_01.pdf