

# ハドロン実験施設における事故と利用運転再開までの経緯

J-PARC センター素粒子原子核ディビジョン / KEK 素粒子原子核研究所

小松原 健

takeshi.komatsubara@kek.jp

2015年(平成27年)6月2日

## 1 はじめに

2013年5月23日(木)に、日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で運営している大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC)のハドロン実験施設において事故が発生しました。高エネルギー物理学の研究者をはじめとする、加速器科学に関わる全ての方々にご心配とご迷惑をおかけしたことをまずお詫び申し上げます。

本稿では、施設の概要、事故のあらまし、事故対応の取り組み、原因と再発防止策、施設と機器の改修、そして2015年4月24日(金)のハドロン実験施設の利用運転再開までの経緯についてご説明します<sup>1</sup>。改修の技術的内容については、直接担当された方々が執筆すべきと考え、本稿では省いています。

## 2 施設の概要

J-PARCは茨城県東海村のJAEA原子力科学研究所内に建設された、素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力など幅広い分野の最先端研究を行うための施設です。リニアック、3GeVシンクロトロン(RCS)、50GeVシンクロトロン(MR)の三つの加速器施設と、物質・生命科学実験施設(MLF)、ニュートリノ実験施設(NU)、ハドロン実験施設の三つの実験施設で構成されています(図1)。MLFとNUでは加速器からのパルス状の“速い”取り出しの陽子ビームを用いて実験を行うのに対し、ハドロン実験施設では2秒間をかけた“遅い”取り出しビームで実験を行います。

ハドロン実験施設では、MR加速器から取り出された30 GeVの一次陽子ビームをスイッチヤードの電磁石群で輸送し、実験ホール(幅60 m、奥行き56 m、高さは地上16 m、地下6 mの半地下構造)にある粒子生成標的



図1: J-PARCの施設

に照射します。生成されたK中間子、パイ中間子などを複数の実験エリアに導き、素粒子原子核物理の様々な実験に用います。大強度ビームを用いた精密測定や稀な現象の探索により、未知の物理法則を発見することを目指します。2004年度に建設を開始し、2009年1月に完成、1月27日に最初のビームを取り出し、2010年1月に本格的に2次ビームの供給を開始しました。現在はホール北側のK1.8、K1.8BRとホール南側のKL、K1.1BRの四つの2次ビームラインを運用しています。

## 3 事故のあらまし

2013年5月23日には、24 kWのパワー(6秒周期で $3 \times 10^{13}$ 個の陽子)のビームがMR加速器からホールに供給されていました。11:55に、ビームの遅い取り出しに用いるEQ電磁石の電源の突然の誤作動により、ワンショットだけ、 $2 \times 10^{13}$ 個の陽子が5ミリ秒で取り出されました。この誤作動の原因は、後に(2013年11月)、外部から電源に入力された電流指示値を電源内部で伝送するシステムの一部に一時的な不具合が発生したためであることが確認されました。不具合は、定電圧電源基板

<sup>1</sup>高エネルギー加速器科学奨励会広報誌「FASだより」第8号(2014.5)の報告記事と重複があることを予めお断りしておきます。

で電圧低下が生じたことに起因しています。基板に用いられている部品の発熱への対策が不十分であったために経年劣化が進み、今回の誤作動に至ったものと考えられています。

この短パルスのビームの照射によって、金の粒子生成標的が高温になり、損傷しました。金標的は断面が6 mm 角、長さが66 mm で五カ所の切り込み（スリット）が入っており、銅の台座の上に設置して、その銅を冷却水で冷やすことで標的を間接的に冷却していました。金標的の観察を、ファイバースコープを用いて2013年12月に行い（図2）、標的の後方に直径1 mm 程度の穴が開いており、スリット部分から金が漏れ出した痕跡が認められました。金標的の内部の温度が融点（摂氏1064度）さらに沸点（摂氏2856度）を超えて、融解金の一部が気化して急激な体積膨張が生じ、液化した金の一部分を押し出したものと考えられます。観察の結果は、それまでに行っていたシミュレーションに基づいた検討結果と同様なものです。

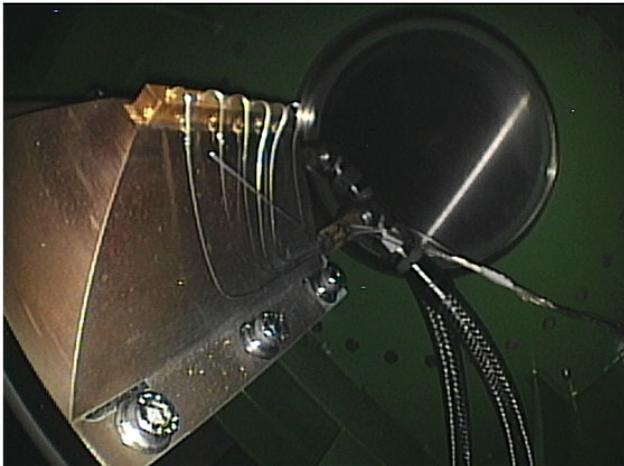


図2: 金標的のビーム下流方向に向かって左側の側面。標的のスリットの部分に少量の金が溶け出たように見える。また同台座底面に金色に光る飛沫のような点が見られる。

金標的の損傷により標的内にあった放射性物質が飛散し、標的が置かれていた一次ビームライン室<sup>2</sup>からホール内へ漏えいしました。事故発生後にハドロン実験施設の放射線管理区域に入った作業員102名のうち34名（全員が放射線業務従事者）について、0.1から1.7ミリシーベルトの被ばくを確認しました。放射性物質はさらに、ホールの排風ファンを動かしたために、管理区域外へ漏えいしました。拡散した放射性物質による放射線量は、施設に最も近い事業所境界で0.17マイクロシーベルトと評価されています。

<sup>2</sup>ホール内では、加速器からの陽子ビームを輸送する一次ビームラインの周りをコンクリートや鉄の遮蔽体で囲み、放射線防護をしています。遮蔽体の壁の内部を一次ビームライン室と呼びます。常時人が立ち入れない閉じ込め空間です。

事故対応の問題点として①放射性物質を施設外及び周辺環境に漏えいさせたこと、②ホール内で作業員が放射性物質を吸入し内部被ばくをしたこと、③国・自治体など関係機関への通報連絡（5月24日（金）22:40）と公表が遅れたこと、があります。機器や施設の安全対策（“ハードウェア”）と安全管理とその体制（“ソフトウェア”）の両方に問題がありました。

事故以降、J-PARCは施設の利用運転を停止し、2013年夏のシャットダウンまでに予定されていたビームタイムはキャンセルされました。J-PARCでの実験を予定されていた研究者の方々に多大なご迷惑をおかけしてしまったことを改めてお詫び申し上げます。

## 4 事故対応の取り組み

JAEA、KEK 両機関のもとに J-PARC の運営を担う J-PARC センターでは、事故以来、池田裕二郎センター長のもとでセンター構成員が一丸となり、事故の原因と事故対応の問題点の調査を行うとともに、事故の再発防止策と安全管理体制の構築に向けた作業に取り組みました。2013年6月から8月にかけて六回にわたり、文部科学大臣の要請に基づいて設置された「事故検証に係る有識者会議」において、ハードウェア面とソフトウェア面の両方から、事故の原因と再発防止策について審議していただきました。

加速器は放射線発生装置であり、その使用は放射線障害防止法のもと、原子力規制委員会の許可を得なくてはなりません。規制委員会に法令報告第一報（5月31日）、第二報（6月18日）、第三報（8月12日）を提出し、第19回委員会（8月21日）で議論していただきました。JAEA 原子力科学研究所内の施設は茨城県、東海村などの関連自治体との原子力安全協定<sup>3</sup>のもとにあります。法令報告と同時に、同内容の事故報告書を関連自治体に提出しました。JAEA と KEK を主管する文部科学省には、有識者会議の答申書（8月27日に両長に手交されました）と JAEA、KEK それぞれの安全体制の確認報告をまとめた「措置報告」を提出しました（9月26日）。東海村の原子力安全対策懇談会（6月21日、9月4日）、茨城県の原子力安全対策委員会（9月10日、12月13日）でも議論していただきました。また、原子力規制庁による現地確認（11月7日）や関連自治体による立入調査（12月5日）も行われました。J-PARC 周辺に住んでおられる地元の皆様に事故と事故後の取り組みを説明する会を、6月中旬と10月末～11月初めに開催しました。

<sup>3</sup>法律と同等に遵守すべき取り決めとして、事業者と自治体の双方に認識されています。原子炉や核燃料施設にとどまらず、加速器施設や RI 施設も含まれます。協定の内容や自治体の取り組みについては、茨城県の原子力安全対策課が広報資料として公開している「平成26年度茨城県の原子力安全行政」が参考になります。

## 5 原因と再発防止策

今回の事故のハードウェア面の問題点として、EQ 電磁石電源の誤作動、ハドロン実験施設の気密の不備と排気設備の不備、放射線モニタの不備が抽出されました。対策として、電源の誤作動や異常ビームの再発防止とともに、ハドロン実験施設で用いる標的を入れる容器を気密化し一次ビームライン室の気密も強化する、ホールは排風ファンを封止した上で排気は監視しながらフィルタを通すようにする、J-PARC 施設全般で放射線を監視するモニタを強化する、を実施することになりました。一方で、ハドロン実験施設以外の五施設については、有識者会議などにおいて、放射性物質の漏えいや標的の損傷への対策がすでになされていると評価されました。

ソフトウェア面については、事故時の行動から抽出された問題点として、異常時や緊急時の責任体制と指揮系統が不明確であった、放射線安全の審査体制とくに潜在リスクの評価と備えが不十分であった、情報の集約や共有が不足し判断と行動の基準も不明確であった、センター構成員やユーザへの安全教育が不十分だった、などがあげられました。安全管理体制の強化策として、センター全体の安全を統括する馬場護副センター長が 2013 年 10 月に着任し、安全管理部門を研究推進部門から分離して独立性を高め、施設管理責任者を東海常駐として責任者と代理者を含めた常時対応が可能な体制にしました。また、外部有識者などで構成される「放射線安全評価委員会」を設置し、この委員会には作業部会を設置する権限を持たせ、専門家メンバーによる実効的議論と技術的検討が行えるようにしました。さらに、事故の兆候段階で関係者を招集して組織的な対応を行うべく、「注意体制」という段階を新たに設け、ビームを止めて情報集約を行うなどの行動にすぐに移るようにしました。規程やマニュアルを改訂し、判断と行動の基準を明確にしました。新しい安全管理体制でのセンター構成員とユーザに対する安全教育、放射性物質漏えい事故を想定した訓練（2013 年度は 11 月 15 日に物質・生命科学実験施設で、1 月 20 日にニュートリノ実験施設で実施しました）、そして安全文化の醸成のための様々な取り組みを行いました。その一つとして、2013 年 12 月 11 日に東京で「加速器施設安全シンポジウム」を開催し、国内外の加速器施設における安全管理の経験と課題を共有し討論しました。

### 5.1 他施設の利用運転再開

J-PARC はリニアック加速器の性能確認を 2013 年 12 月 16 日から、RCS 加速器の性能確認を 2014 年 1 月 30 日から行い、2 月 17 日に物質・生命科学実験施設の利用運転を再開しました。また、MR 加速器の速い取り出

しの性能確認を 4 月 28 日から行い、5 月 26 日にニュートリノ実験施設の利用運転を再開しました。2015 年度の始めには、物質・生命科学実験施設で最大 500 kW の、ニュートリノ実験施設で最大 360 kW のビームパワーでの利用運転が実施されました。

## 6 施設と機器の改修

ハドロン実験施設についてはまず、再発防止と安全強化のための施設と機器の改修を進める必要がありました。ワーキンググループによる検討をへて、2013 年 10 月より J-PARC センターと KEK 素粒子原子核研究所のもとに“ハドロン改修タスクフォース”の体制が組織され、そのもとで改修が進められました。10 月 8 日と 9 日に、ハドロン実験施設の標的等改修に係る国際評価委員会を開催し、改修計画をレビューしていただきました<sup>4</sup>。金標的観察の作業が 2013 年 12 月中に完了し、2014 年 1 月よりホール内外での改修作業が本格化しました。

マイルストーンを述べると、ホールの北側と南側の天井部にあったすべての排風ファンの撤去・封止を 1 月 10 日に完了し、ホールの排気管理設備と汚染検査室、ホール搬入口のテントヤードを 3 月末までに新設しました。9 月 19 日に損傷した旧標的とそれが入った容器を撤去して<sup>5</sup>、9 月 30 日に気密容器に入った新しい標的を設置しました<sup>6</sup>。放射線モニタ関係の設備の強化は 11 月に終了しました。一次ビームラインの気密強化の作業が 12 月 28 日に終了し、改修作業は 2015 年 1 月 7 日に完了しました。

改修の要点をまとめると次のようになります。

**EQ 電磁石電源の誤作動への対策** 誤作動の発生部分である電源基板を放熱対策を施した基板に交換するとともに、遅い取り出しで他の要因により何らかの異常ビームが発生しても異常ビームの出力を小さくし標的を損傷させないように対策を EQ 電源へ施しました<sup>7</sup>。

**新しい標的** 長さ 66 mm の金を銅の台座の上に設置して冷却するのはこれまでと同じです。標的を二つ、銅も二山にして（図 3）、ビームが当たる標的を駆動装置によって交換できるようにしました。銅を冷や

<sup>4</sup>2014 年 1 月 29 日には進捗状況についての報告会を開催し、7 月 4 日にはその後の進捗を委員に報告しました。

<sup>5</sup>標的が入った容器は鉄製の保管容器へ収納し、さらにその保管容器を放射物保管庫に収納しました。

<sup>6</sup>放射線安全評価委員会の「ハドロン標的交換特別部会」を 7 月 10 日と 30 日に開催し、作業計画をレビューしていただいた上で交換作業を実施しました。

<sup>7</sup>インターロック機能の強化と高速化として、EQ 電源での「電流偏差異常」の取扱、そのフィードバック、EQ 電源の最大電流値設定、「電源非常停止」検知後の停止開始までの応答時間、などに対策を実施しました。

す冷却水配管の位置を再検討し、冷却の効率を二倍に改善しました。標的の温度の読み出しの間隔を1秒から0.1秒にしました。また、標的に当たる場所でのビームの幅を横に広げ、標的の温度上昇を少なくしました。標的の断面も6mm角から15mm×6mmにしました。

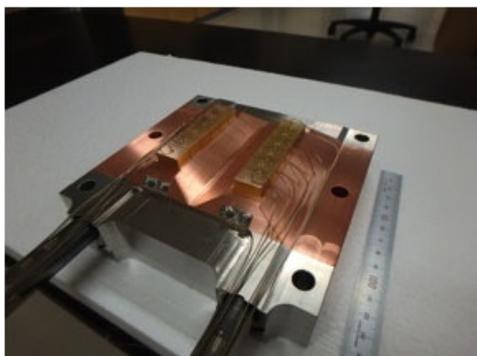


図 3: 新しい標的

**標的容器の気密化** 気密化した新しい容器（図4）を製作してその中に標的を入れ、さらに中を不活性ガスであるヘリウムで満たすようにしました。ヘリウムガスの循環系を新たに設けて、ガスの放射性物質濃度に異常がないことを監視します。異常を検知したときは、回収タンクに切り替えてガスと放射性物質を閉じ込めるようにします。



図 4: 新しい標的容器

**一次ビームライン室の気密強化** 一次ビームライン室天井部の遮蔽体を全域（奥行き40m）にわたって二重に気密シートで覆い、実験エリアにつながる2次ビームラインへの開口部の空気隔壁を二重化し、一次ビームラインに電力を供給するケーブルの貫通口にコーキング処理を施すことで、気密を強化しました（図5）。施工箇所で気密がとれていることを測定により確認して作業を進めるとともに、煙試験により全体の気密を確認しています。

**実験ホールの改修** 排気管理設備（図6）、汚染検査室、テントヤードの設置と運用により、ホール内空気の



図 5: 天井部遮蔽体の気密強化作業中の様子（上）；気密強化作業後のホール内の様子（下）

排気を管理し、ホールへの入出の管理を行えるようにしました。ホール内は現在、第一種放射線管理区域として運用しています。



図 6: ホール内に設置された排気管理設備

**放射線モニタの強化** 空気モニタを新設して、一次ビームライン室の空気中の放射性物質濃度とホール内の空気中の放射性物質濃度を監視しています。ホール内には、ガンマ線や中性子線の量を測る空間線量モニタを設置しています。ホール内及び測定室にディスプレイを設置して、放射線モニタの情報を確認できるようにしました。さらに、ホール内にフラッシュランプとスピーカーを設置し（図7）、緊急時にはホール内の作業者に迅速な退避を促す事ができるようにしました。

2013年5月の事故のような場合を改めて考えたときに、新しい施設と機器では、短パルスのビームが出ないようにする、仮に標的が損傷するようなことがあったとしても気密化した容器とヘリウムガス循環装置によりそ



図 7: ホール内のフラッシュランプとスピーカ

れを検知して閉じ込める、その外側にある一次ビームライン室の気密強化、さらにホール内の空気を管理することで、放射性物質が出て行くことが無いよう多重の備えをしています。

## 6.1 ソフトウェア面の継続的な取り組み

J-PARC センターでは安全管理とその強化のための取り組みを継続して行っています。2014 年度には、安全関係の人員を増員するとともに 24 時間連続の放射線監視体制にしました。放射線安全評価委員会は 2013 年 11 月からこれまでに 9 回開催し、作業部会は継続的に 2 部会、短期的なものも 6 部会が設置されました。安全教育は理解度確認テストとともに実施し、外国人の作業従事者のための英語による教育も実施しています。事故対応訓練は、2014 年 7 月 22 日に茨城県主導の“無予告による通報連絡訓練<sup>8</sup>”（対象は物質・生命科学実験施設、想定は放射性物質の異常放出）を、11 月 25 日に J-PARC と原科研の合同でハドロン実験施設での放射性物質漏えいを想定した訓練を、それぞれ実施しました。

事故発生からの節目となる 2014 年 5 月 23 日、2015 年 5 月 22 日には J-PARC センター構成員全員を対象にした「安全文化醸成研修会」を開催しました。また、2015 年 3 月 6 日に東海で「加速器施設安全シンポジウム」の第二回を開催し、CERN、PSI など海外の加速器施設からの発表も交えて討論を行いました。このシンポジウムは毎年度開催する予定です。

第三者による安全監査と安全評価として、毎年度、J-PARC の安全監査を実施することにしており、2014 年 10 月 21 日に外部の有識者二名の監査委員により行われました。

<sup>8</sup>原子力安全協定を結んでいる事業者が年に一度、夏期に課せられています。

## 7 利用運転再開までの経緯

標的の交換作業を終えた後の 2014 年 10 月 29 日に「事故検証に係る有識者会議」の第七回が開催され、

- 答申書に沿って、施設設備の改修、及び安全管理体制の見直しが行われたものと判断する。
- 可及的速やかにハドロン実験施設が再開されることを期待するが、再開にあたっては、地元住民に誠意ある丁寧な説明をし、地元からの理解を得ること。

との提言を受けました。

11 月 25 日の訓練を経て、関連自治体による立入調査（12 月 1 日と 2015 年 1 月 16 日<sup>9</sup>）が行われ、東海村の原子力安全対策懇談会（2 月 9 日）、茨城県の原子力安全対策委員会（3 月 5 日）でも議論していただきました。それらをもとに、3 月 24 日に茨城県知事と東海村長に再発防止に係る措置結果報告書を提出することができました。

地元の皆様に再発防止に関するこれまでの取り組みを説明する会を 4 月 3 日、4 日、5 日の三回開催しました。報道関係者への説明とハドロン実験施設の公開を 4 月 9 日の午後に行い、同じ日の夕方に、MR 加速器の遅い取り出しとハドロン実験施設のビームによる性能確認を開始しました<sup>10</sup>。4 月 17 日に、放射線障害防止法に基づく登録検査機関である「原子力安全技術センター」が施設検査を行いました。運転中の放射線レベルを実際に測定し、検査基準を満たしていることを確認し、気密の強化を実施した一次ビームライン室の天井遮蔽の構造などの確認を行いました。施設検査で問題がないことが確認され、合格証（4 月 20 日付け合格）を 4 月 21 日に受領しました。そして、4 月 24 日、報道関係者への説明の後、11:03 にハドロン実験施設の利用運転を再開しました。2013 年 5 月の事故時と同じ遅い取り出しのビームパワー（24 kW）で再開し、4 月 30 日の夜から 27 kW に上げて、5 月 7 日の朝まで安定な運転を実施しました。ホールでは、E13 実験（K1.8）、E15 実験（K1.8BR）、KOTO 実験（KL）、E36 実験（K1.1BR）がデータ収集を行いました。

<sup>9</sup>同じ日に、物質・生命科学実験施設第 2 実験ホールで火災が発生し、J-PARC は施設の利用運転を停止しました。1 月 27 日に開催された茨城県の原子力安全対策委員会ではその対策が議論されました。ニュートリノ実験施設は 2 月 25 日に、物質・生命科学実験施設は 2 月 26 日に利用運転を再開しました。

<sup>10</sup>4 月 9 日の 19:48 にハドロン実験施設を加速器のビームの行き先に設定し、23:11 に、標的を退避させたうえで、MR 加速器からハドロン実験施設へ、事故後初めて、陽子ビームを取り出しました。4 月 10 日の 19:24 にはビームを新しい標的に初めて照射し、21:12 からビームを連続して標的に照射する試験を開始しました。4 月 13 日の午前には、施設検査と同じ条件で自主検査を行い、放射線量を確認しました。

## 8 本稿のおわりに

地元自治体, 関係機関, 多くの関係者のご理解とご協力, そして研究再開を望むたくさんの方々からのご支援をいただくことにより, J-PARC 全施設の利用運転を再開することができました。心より御礼申し上げます。

今回の事故で学んだ多くの教訓をもとにして, 安全な施設の運用のために, 今後も絶え間なく立ち現れるであろう課題を克服していきたいと考えています。そして, J-PARC の最大の使命である最先端の研究成果の創出を, 全力で成し遂げたいと思います。

ハドロン実験施設の事故関連情報は

<http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>

で公開されています。英文化されたものは

<http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-e.html>

にあります。

事故直後の対応の詳しい時系列は, 法令報告第三報(2013年8月12日)の別添にある「判断の整理・分析表」をご覧ください。