

J-PARCハドロン実験施設における
放射性物質漏えい事故検証に係る
有識者会議

作業部会 報告書

平成 25 年 7 月 29 日

作業部会報告書目次

報告書の要約	i
はじめに	1
報告書本文	
1. 放射性物質漏えい事故発生の概要	2
2. 事故の原因	4
2. 1. 施設・実験装置面の原因と問題点	
2. 1. 1. 50 GeVシンクロトロンからハドロン実験ホールへの短パルスビームの出力	
2. 1. 2. 2次粒子発生用標的の損傷	
2. 1. 3. ハドロン実験ホール内コンクリート遮へい壁の内部空間への漏えい	
2. 1. 4. ハドロン実験ホール内への漏えい	
2. 1. 4. 1. 管理区域の種別	
2. 1. 4. 2. 漏えいの原因	
2. 1. 4. 3. 遮へい壁の密閉性	
2. 1. 4. 4. 換気設備の妥当性	
2. 1. 5. 第2種管理区域内のエリアモニタ及び区域境界のモニタリングポストについて	
2. 1. 5. 1. 放射線検出に係わる経緯	
2. 1. 5. 2. ハドロン実験ホールの放射線監視設備と検出記録	
2. 2. 安全管理体制面の問題点	
2. 2. 1. 通報の遅れとそれに係わる判断基準	
2. 2. 2. 放射線管理区域内への放射性物質の漏えい	
2. 2. 3. ユーザ等作業員の被ばく	
2. 2. 4. 放射線管理区域外への放射性物質の漏えい	
2. 2. 5. 課題の抽出	
3. 汚染及び被ばくの状況	18
4. 周辺への影響評価	20
4. 1. 空気試料中の放射性核種分析	

4. 2. 総放出量評価	
4. 3. 事故による周辺環境の線量への影響評価	
5. 再発防止策	25
5. 1. 50 GeVシンクロトロン の再発防止策	
5. 1. 1. 遅い取り出し用電磁石EQの調査結果	
5. 1. 2. EQ電源系の再発防止策	
5. 1. 3. ハドロン実験施設に短パルスビームが取り出されるリスクに対する安全対策	
5. 2. ハドロン実験施設における放射性物質漏えいの再発防止策	
5. 2. 1. 標的装置	
5. 2. 2. 1次ビームライン室	
5. 2. 3. ハドロン実験ホール	
5. 2. 4. 過酷事象への対応	
5. 3. 放射線情報の共有化	
5. 4. 原因と再発防止策のまとめ	
6. ハドロン以外の施設の健全性の検証	38
6. 1. 加速器施設	
6. 1. 1. リニアック	
6. 1. 2. 3 GeVシンクロトロン (RCS)	
6. 1. 3. 50 GeVシンクロトロン (MR)	
6. 1. 4. ビーム停止機構の信頼性向上	
6. 2. 物質・生命科学実験施設	
6. 2. 1. 管理区域	
6. 2. 2. 放射性物質の漏えい防御システム	
6. 2. 3. 陽子ビームの輸送ライン	
6. 3. ニュートリノ実験施設	
6. 3. 1. 管理区域	
6. 3. 2. 放射性物質の漏えい防御システム	
6. 3. 3. 陽子ビームの輸送ライン	
6. 4. 火災及び停電時の対応	
6. 5. ハドロン実験施設の再発防止策と他施設の現状のまとめ	
7. 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等の再確認	55
7. 1. 異常に対応する体制の再構築	
7. 2. 放射線安全上の審査体制の見直し	
7. 3. 教育訓練、基準の定期的な見直し	

7. 4. 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等のまとめ

おわりに 61

別紙

- 1 作業部会委員及び会議開催日
- 2 用語集

参考資料

判断の整理・分析表

報告書の要約

平成 25 年 5 月 23 日 11 時 55 分頃に発生した 50 GeV シンクロトロン の ビーム 取り出し 電磁石 の 誤作動 により、設計想定をはるかに超えた瞬間強度のビームがハドロン実験ホールに設置された金標的を損傷し、飛散した放射性物質が設計外現象と事実誤認を経て施設外に漏えいした。作業部会はこの事故の原因を調査・分析し、現システムの問題点を指摘し、再発防止策を検討・提案するとともに、ハドロン実験施設以外の施設の健全性を検証した。

放射性物質漏えい事故は以下の 5 段階を経て進行した。

- 1) 電磁石の誤作動により、設計想定を超えた瞬間強度のビームが金標的を照射した。
- 2) 金標的が極めて高温になり、標的中の放射性物質が気化、飛散した。
- 3) 標的容器が密閉されてなく、放射性物質が 1 次ビームライン室に拡散した。
- 4) 1 次ビームライン室の気密が不十分だったため、放射性物質がハドロン実験ホール内に漏えいし、作業者が被ばくした。
- 5) 実験ホールの排風ファンを運転したために、実験ホール内の放射性物質を管理区域外に漏えいさせた。

この事故により、事故時に実験ホールにいた 102 名のうち 34 名が内部被ばくを受けた。検査の結果被ばく線量は最大でも 1.7mSv であり、健康に影響が出る線量ではなかったが、確認のための健康診断を行なった。またハドロン実験ホール内の空気の成分分析とエリアモニタで測定された放射線レベルから、ハドロン実験ホール外に漏えいした放射性物質の総量を約 20 GBq と評価した。またハドロン実験施設に最も近い事業所境界においては法令報告第 1 報で報告された $0.29 \mu\text{Sv}$ を超えず、環境への影響は心配ない。

これらの経緯を分析し、「漏えい防止」「被ばく防止」「施設の健全性の確保」の観点から、各々の要因に対して表に示す再発防止策をまとめた。対策の骨子は 1) 電磁石の誤作動対策、2) 気密の確保、3) 排気の管理、及び 4) 放射線等の監視の強化である。電源の誤作動頻度を減らすことは非常に重要であり、数々の対策を検討したが、誤作動を根絶することは困難であることが判明した。誤作動が起きても事故を引き起こさないためには、標的容器の気密を強化するとともに、ハドロン実験ホール内の空気の排気は、放射線レベルを監視しながらフィルタを通して行うことが、漏えい事故対策の要である。これらの対策について考え得る過酷事象への対応の検証も行ない、漏えい事故を防ぐことが出来ることを確認した。

損傷した標的の直接観察はまだ行なわれていない。シミュレーションによる解析でもほぼ現象は把握できていると考えられるが、最終的な結論を得るには標的及び周辺の直接観察が必要である。但し、再発防止策を考える上で標的自体の直接観察は本質的ではない。

ハードウェアの対策に加え、安全管理体制の検証も行なった。J-PARC の安全管理体制の不備が通報の遅れや誤った判断を招き、本来食い止められたはずの放射線漏えいや被ばくを防ぐことが出来なかった。この安全管理体制の不備は、1) 異常に対応する体制の不備、2) 放射線安全上の審査体制の不備、の 2 点に集約される。安全体制については、センター長を頂点とする責任者の明確化と権限・指揮系統の整理、異常の兆候段階での情報集約と対処

を起動する「注意体制」の新構築、及び判断基準の明確化と手順書の整備を推進する。この安全体制は、ユーザとの連携を取り込んで構築する。放射線安全審査体制の不備については、放射線安全を審議する委員会の強化を主眼とする対策を提示した。人選も含め再検討し、徹底的な議論が出来る場にしなければならない。また体制を整備してもそれを担うのは人であり、各人の安全意識の維持・向上のため、不断の教育・訓練の実施が不可欠である。今回の事故においても、放射線レベルの上昇を認識しながら、避難に至らなかったユーザが多数いた。ユーザに対しても教育・訓練を実施し、安心して実験を進めることができる環境を提供する。

J-PARCは、ハドロン実験室施設のほか、物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設及び加速器施設から構成される。それらの施設について、放射線管理区域の設定と管理設備の妥当性、及び装置の安全性についての検証も行なった。結論として、上記3施設の管理区域の設定と管理は適切に行なわれており、装置の安全性も十分に高いものであった。

表1 原因と再発防止策の対応表

原因	再発防止策
標的の損傷	・ E Q電源の運転条件改善による異常なビーム取り出しの抑制 ・ 標的温度モニタの改善 ・ 調整運転時の標的退避、ビーム軌道の変更
放射性物質漏えい	・ 標的容器の気密化、漏えい監視モニタの設置 ・ 1次ビームライン室の気密強化と監視機能設置 ・ ハドロン実験ホール内の排気は監視しながらフィルタを通して実施。
放射線モニタ情報の共有化不足	・ 放射線安全管理設備の一元管理 ・ インターロックへの組み込み

表2 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等の問題点と対策

問題点	対策
異常に対応する体制が不十分	・ 「基本体制」「注意体制」「非常体制」を設け、明確な指揮者のもとで、情報収集と共有、通報連絡、現場対応、避難誘導を行う。
審査体制が不十分	・ 放射線安全検討会をJ-PARC放射線安全評価委員会に改組し、技術的な審議を可能とする。
教育訓練と基準の定期的見直し	・ ユーザも含めた不断の教育訓練 ・ 双方向的な教育と放射線事故を想定した訓練 ・ 基準、手順等の定期的な見直しで、対応のルーチンワーク化を防止

はじめに

大強度陽子加速器施設（J-PARC）は、世界最高性能の加速器とその加速器が発生する粒子ビームを利用する研究施設である。そこには国内だけでなく世界各地から第一線の研究者が訪れ、自然界の根源的理解や産業・医療などのイノベーションに役立つノーベル賞級の研究が行われており、地元住民を始め国内外からその成果が期待されている。一方で、J-PARCは強力な放射線発生施設でもあることから、その設置と運用に当たっては放射線に関わる安全確保が何よりも重要であり、それを利用する研究は地元の理解があつてはじめて許されることである。そのJ-PARCで放射性物質が実験室の外にまで漏えいするといふ、あつてはならない事故が発生した。J-PARC関係者はこの事故の発生を深く反省し、失われた信頼の回復に努力し、地元住民と国内外の期待に応えなければならない。

平成25年5月23日に発生したJ-PARCにおける放射性物質の漏えい事故に取り組むため、J-PARCを共同運営する大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と独立行政法人日本原子力研究開発機構は第三者による有識者会議を設置した。有識者会議は6月21日の第1回会議において、当該事故の検証作業と対策計画の妥当性評価作業を効率的に進めるため、専門性の高い外部の有識者で構成される、作業部会を設置した。

作業部会は事務局を通じて、J-PARCセンター内に設置された調査チームから、検証作業の基礎となるデータの提供及び報告を受け、審議を行った。本報告書は、その報告内容及び審議結果をまとめたものである。

1. 放射性物質漏えい事故発生の概要

現在までの調査によって、事故は下記のような経過で進行したと理解される。今後の調査の進行に伴って、一部変更される可能性もある。

(第1段階)

ハドロン実験施設では、50 GeVシンクロトロン (MR, メインリング) より取り出された陽子ビーム (1次ビーム) をハドロン実験ホール内の標的 (T1標的という。最近は金の標的を使用していた。) に照射し、生成した K 中間子、 π 中間子等の2次ビームを複数の実験エリアに輸送して、様々な実験が行われている。正常時には、50 GeVシンクロトロンから1パルス当たり粒子数 3×10^{13} 個の陽子が2秒の時間をかけて取り出され (このようなビームの出力方法は、遅い取り出し法と呼ばれている)、ハドロン実験ホールの金標的に導かれていたが、平成25年5月23日11時55分頃、突然5ミリ秒の短い時間に通常の1パルス分の3分の2にあたる 2×10^{13} 個の陽子が取り出され、金標的を貫通した。

(第2段階)

金標的を直径約1ミリメートルの大強度陽子ビームが瞬時に貫通したことにより貫通部の金の温度が急上昇し、一部が溶解して大気中に流れ出て、それまでのビーム運転により標的中に生成され、蓄積されていた放射性物質が大気中に飛散した。

なお、その後加速器を運転したり停止したりしているが、金標的由来の放射性物質が大気中に放出されたのはこの一瞬のみで、その後の運転時には標的温度は異常上昇しておらず、標的中に生成されたものは標的外に放出されず、大気中の放射性物質の量を増加させてはいない。

(第3段階)

本来T1標的は密閉した格納容器に入れる設計であったが、今回使用した金標的は密閉されていなかったため、放出された放射性物質がコンクリート遮へい壁の内部空間 (J-PARCでは第1種管理区域としている区域) に広がった。

(第4段階)

コンクリート遮へい壁の内部空間 (第1種管理区域) に広がった放射性物質が、ハドロン実験ホール内の遮へい壁の外にある人の出入りが可能な区域 (J-PARCでは第2種管理区域としている区域) に漏れ出た。

(第5段階)

第2種管理区域であるハドロン実験ホール全体は密閉構造ではないため、事故当初からわずかに放射性物質が室外に漏えいしていた可能性は否定できないが、近くのモニタリングポストに見られる放射線レベルの上昇が、漏えいした放射性物質による上昇であるものとは確

認されていない。しかし、5月23日15時15分頃、人為的にハドロン実験ホールの排風ファンを回したことによって実験室外へ放射性物質の一時的漏えいが発生した。排気により室内の放射性物質の濃度が減少するにつれ空気中の放射性物質濃度も減少した。15時30分頃いったん排風ファンを停止するが、17時30分頃排風ファンの運転を再開した。これにより再び一時的に室外への漏えい量が増加し、やがて空気中の放射性物質濃度は減少した。その後排風ファンは5月26日11時頃に止めるまで運転された。この排風ファンの運転続行に伴って放出された放射性物質の量は、それまでに放出された量に比してほとんど無視できる程度と考えられる。

排風ファンを回した理由は、1回目は人が出入りできる区域の放射線量が増加した原因を確認しようとしたものである。17時30分頃からの2回目の排気は、室内のユーザの被ばくを低減するためであった。この排風ファンはハドロン実験ホール内の空気を換気するものであり、遮へい壁内部の放射性物質が漏れ出ていることは設計時には想定していないので、フィルタは設置されていない。今回排風ファンを回した際、担当者はいずれも第2種管理区域に漏れていても微量であるので、空気中の放射性物質濃度は低く問題にならないと理解していた。実際には漏れた量より、このように管理されない状態で排気したことが問題であった。

放出された全放射能の推定には現段階では金の溶解量を仮定せざるを得ないが、その上で推定作業が進行中である。第2種管理区域への放出量は空気中の放射性物質の濃度から推定している。ハドロン実験ホール内の放射能汚染の実態は既に測定済みである。なお、2回目の排風ファンを回す頃まで放射線作業従事者(ユーザ)がハドロン実験ホール内にいたため、汚染、内部被ばく等が検出された。これらに関しては後述の各章で詳しく報告する。

本報告書では、上記の経緯を踏まえ、2章で事故の原因、3章でハドロン実験ホール内の汚染及び被ばくの状況、4章で周辺への影響評価、5章で原因分析を元にした再発防止策、6章でハドロン以外の施設の健全性の検証、7章で安全管理体制における再発防止策、について現在までの調査検討結果を詳しく報告する。

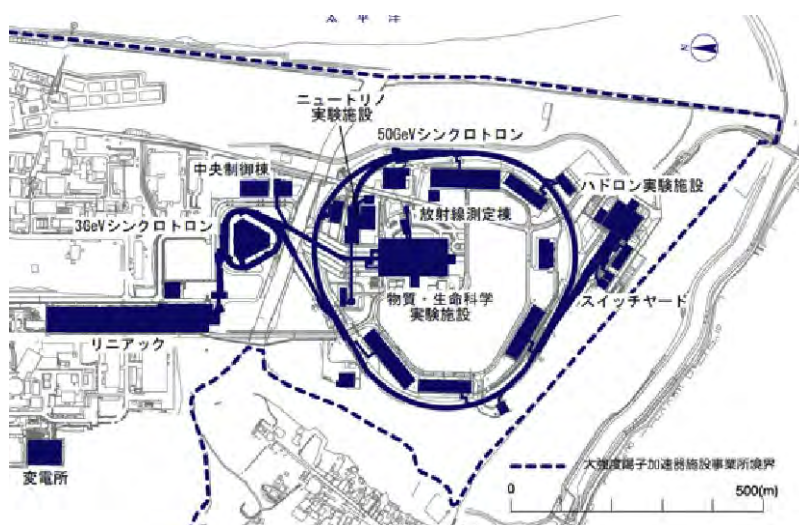


図 1-1 : J-PARC 施設の全体図

2. 事故の原因

2. 1. 施設・実験装置面の原因と問題点

概要に述べたように、今回の事故の要因の1つは、設計時には想定していなかった標的の破損が起こったことであり、標的破損は50 GeVシンクロトロンからのビーム取り出し電磁石の誤作動により、設計想定をはるかに超えた瞬間強度のビームが金標的を衝撃したことによって引き起こされた。このように、事故の根本原因は設計の際に過酷事象を想定し得なかったという設計思想の過ちではあるが、経過からまず明白となるのはハードウェアの問題である。以下ではこの事故において明らかになった機器の問題についてまとめる。

各論に入る前に起こり得る事態の想定とそれに対する対応策の重要性を指摘しておく。過酷なビーム条件のもとで標的が破損しうることが今や明らかではあるが、この標的の設計時においても判断の元となる情報は十分存在し、入念な検討を行えば、事故の発生を想定することは可能であったと考えられる。

もし標的の破損が想定されていれば、加速器側では短時間にビームが取り出されることのないように遅い取り出し用電磁石の電源電圧を制限する、短時間に取り出されそうになったら緊急に取り出しを中止し、別の排出用コースにビームを導く（アボートするという）、などの対策をとることができたであろう。また、標的を気密容器に入れる、標的容器からの放射性物質の漏れに対して1次ビームライン室の気密度を保証しておく、などの対策が可能であったはずである。実際の運転においても、標的にとって過酷なビーム発生の有無を常に監視し、放射性物質の発生の有無を監視することは可能であった。このように、今回のような事故の発生を防ぐ対策を幾重にも準備しておくとともに、たとえ事故が発生したとしても事故の規模を速やかに把握し、拡大を防ぐ適切な対応をとることが可能であったと考えられる。

2. 1. 1. 50 GeVシンクロトロンからハドロン実験ホールへの短パルスビームの出力

通常、50 GeVシンクロトロンのリングを周回しているビームは、遅い取り出し用電磁石により制御されながら、1ショットごとに2秒間をかけてハドロン実験ホールに向けて繰り返し取り出されている。今回の事故は、11時55分の取り出しショットにおいて、遅い取り出し用電磁石の動作が本来の制御を外れ（図2-1）、周回ビームの約3分の2にあたる約 2×10^{13} 個の陽子が、5ミリ秒ほどの短パルスとして大きなビーム損失をすることなくハドロン実験ホールへ輸送されたことにより発生した。この際、遅い取り出し用電源の過電圧による警報と、取り出しに伴う若干のビームロス信号によるインターロックの作動により、加速器のビーム運転は一時停止した。

図2-1に、正常時及び誤作動時の遅い取り出し用電磁石（EQ電磁石）用の電源（EQ電源）の電流出力波形などを示す。正常時にはEQ電源の出力電流は緩やかに変化し、陽子ビームは2秒間をかけて緩やかに取り出される（シンクロトロン内の周回ビーム粒子数が緩やかに直線的に減少している）が、誤作動時には、制御信号とかかわりなくパルス状の急峻

な出力電流が発生していることがわかる。この時、赤線で示した周回ビーム粒子数は5ミリ秒程度で急激に減少しており、遅い取り出し用電磁石のパルス的な出力に同期して陽子ビームを急速に取り出したことを示している。

この原因は、以下のように考えられる。遅いビーム取り出し制御システムの制御ユニットからE Q電源への電流指令信号が、ビーム取り出し開始直後の段階で、何らかの事情で正常に伝送されなかったか、正常に伝送されたにもかかわらずE Q電源が正常に応答しなかったため、E Q電磁石の励磁電流がゼロの状態が継続した。その後何らかの理由によりこの不具合が解消したが、電流の制限値を必要以上に大きく設定していたため、ステップ状の過大な電流指令値が与えられ、E Q電源がその過大な値に応答しE Q電磁石を励磁した。なお、電流指令信号の伝送と応答に関しては今後も引き続き調査することが望まれる。

リングからの急激なビームの減少は、別のビームラインへの取り出しで使われる速い取り出し用のシステムが動作したときにも起こるので、加速器シフトリーダ（加速器のビーム運転のリーダ）は速い取り出し用電磁石が誤作動したのではないかと勘違いした。さらにE Q電源のインターロックで加速器の運転が停止すること自体は時々起こっており、その場にいた加速器関係者は特別の異変とは認識しなかった。そのため事故の初動調査が遅れた。

また、加速器関係者はビームが瞬時にハドロン実験ホールに導かれた場合に標的で起こりうる事象、すなわち標的が破損し内部に生成されていた放射性物質が飛散してしまうことを理解していなかった。

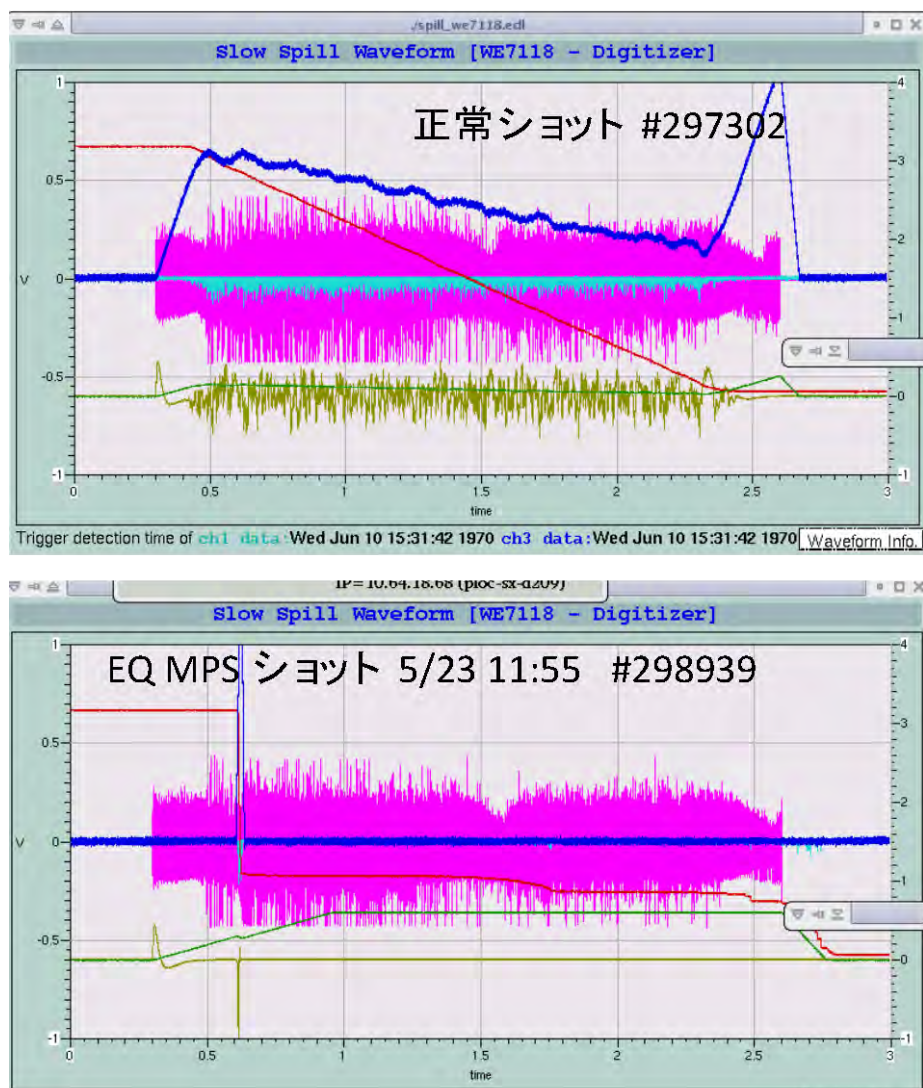


図 2-1：正常時（上）及び誤作動時（下）の周回ビーム、遅い取り出し用電磁石電源の電流出力波形など：50 GeV シンクロトロン内の周回ビーム粒子数（赤線）、陽子ビームの時間分布波形（シアン線）、遅い取り出し用電磁石電源（EQ 電源）の出力電流（青線）、陽子ビームの取り出し時間を制御するユニット（スプイル制御 DSP ユニット）での EQ 制御信号波形（緑線）、遅い取り出し用電磁石（EQ とは別の電磁石：RQ 電磁石）の電源出力電流（鶯色線）、及び RQ 制御信号モニタ値（桃色線）の時間的挙動を示す。

2. 1. 2. 2次粒子発生用標的の損傷

金標的は断面が6ミリメートル角で長さは66ミリメートルであり、長さ方向に6分割され、各ブロックの間にわずかな隙間がある。金標的をビームが通過するとエネルギーの一部を標的中で失い、そのエネルギーは金の温度の上昇をもたらす。これを防ぐため、金標的は銅ブロックに接着され、銅ブロックは水で冷却されている（図 2-2）。通常の遅い取り出しでは、

取り出された陽子ビームの強度は2秒間ほぼ均等であるため温度上昇は大きくないが、5ミリ秒という短時間に大量のエネルギーが持ち込まれると金標的は非常な高温になる。

金標的の直接観察は未だ実施されていないが、次に示すことから金標的の一部が消失していると推察される。まず、陽子ビームの空間分布を測定するモニタのデータからビーム軌道は変化していないにも関わらず、事故直後のショットから2次粒子の生成量が約40%に低下したことである。ハドロン実験施設のシフト員はビーム軌道が上流で変化したものと判断し、その後のビーム位置調整によって、1.3ミリメートル程度の修正を行い、2次粒子生成量を正常時のレベルまで回復させることができた（図2-3）。従って、この移動量に相当する部分が溶解した部分に相当すると考えられる。2次粒子生成量の減少及びこのビーム位置調整量から判断すると、消失した部分はビームが貫通した軸に沿って中央部分約40ミリメートルの長さ、直径は約1ミリメートルと推定される。

短パルスのビームがもたらすエネルギーは、ビームサイズの仮定にも依存するが中心で2000度以上の昇温を引き起こすことが熱計算により示されている（図2-4）。標的に設置されている温度計も当該ショットのみで異常な温度上昇を示している（但し、図2-3では、急激な温度変化に比してデータ取得間隔が1秒と長いため、記録された温度上昇は340度にとどまっている）。なお、観測されている標的の温度変化から、放射性物質の放出は当該ショット1回のみで発生したものと考えられる。このことは、ハドロン実験ホール内のエリアモニタの時間変化が滑らかで、その後の加速器の運転に 관련된 変化がみられないことから裏付けられる。

放射性物質を含む溶解した金の流れ出た経路は、標的の後方部分が溶解し貫通していれば後方から、またはブロック間の隙間である可能性が高い。

以上は推測であるので、標的の直接観察作業を行う必要がある。そのためには、作業者の安全と再漏えいのリスクをなくすため、標的周辺の空気中の放射能濃度の低減が必要であるとともに地元自治体、住民の作業開始に対する理解が不可欠である。

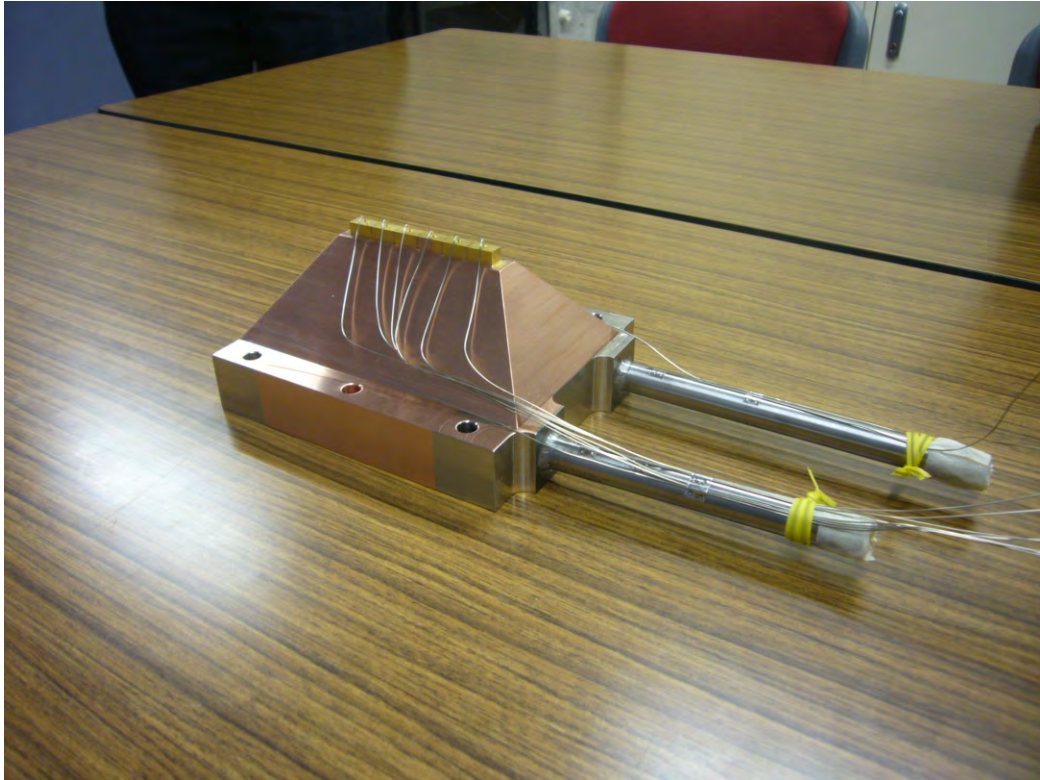


図 2-2 : 金標的と冷却ブロック

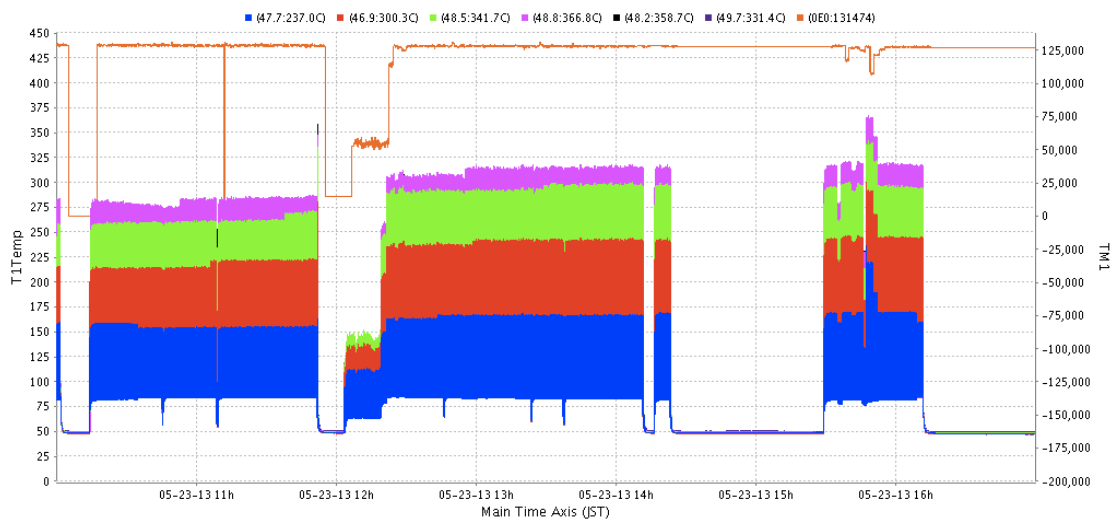


図 2-3 : 事故のショット前後の、2 次粒子の発生量（上赤線）と標的各部の温度（下各色）。問題のショットのところで一瞬急激な温度上昇の一部が見られる。わずかな中断後のビーム再開時二粒子の発生量は、事故以前の 40%程度まで減少、標的温度の上昇も著しく低下している。その後ビーム照射位置の移動を水平方向に 1.3 ミリメートル程度行ったところ 2 次粒子発生量が回復し、同時に標的温度も上昇していることがわかる。さらにしばらく休止した後の記録は、水平、垂直両方向を調整した時の記録である。

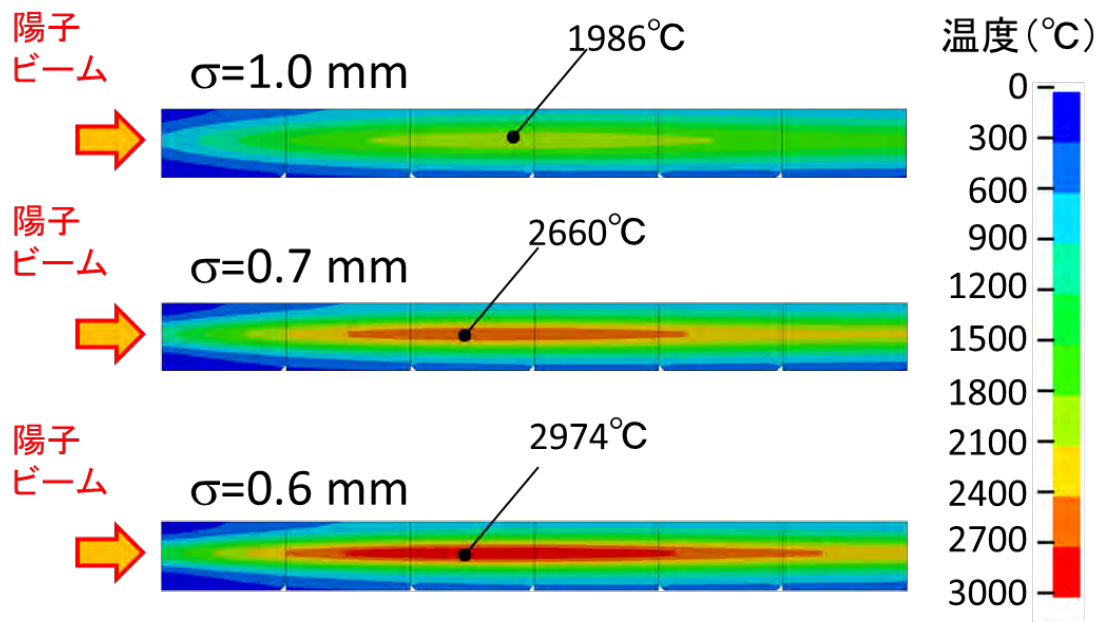


図2-4：事故ショットを想定した標的昇温の熱計算結果。仮定するビームサイズにより最大温度や領域は変化するが、金標的が一部溶融あるいは昇華したものと推察される。

2. 1. 3 ハドロン実験ホール内コンクリート遮へい壁の内部空間への漏えい

最初の変更許可申請書では、T 1 標的装置は、T 1 標的本体とそれを格納するT 1 標的チェンバ（2 枚のベリリウム窓をもつ標的容器）で構成されることとなっていた。T 1 標的装置は、加速器が定格運転する場合に備えて、ニッケルの円盤状のT 1 標的本体を回転し、円盤の下部を直接水冷しながら使用できる構造となっていた。T 1 標的冷却水は循環させる必要があり、その場合には標的容器は密閉となるように作られていた。この標的システムでは水の放射化があるために、密閉構造を採用していた。また、冷却水の循環が停止した場合等、冷却水系に異常が生じた場合には加速器の運転を停止することとしていた。当初の設計では、もし何らかの理由で冷却が不十分となれば標的は相当程度高温になり、破損することは想定されていたと考えられる。しかし、今回のように加速器から大強度のビームが短時間に間違えて出力されることは想定されていなかった。

一方、運転開始当初のビーム強度は最大 1.2 kW と非常に低く、ニッケルの円盤状の標的を水冷する必要はなかった。そのため冷却水は無く、T 1 標的チェンバは密閉状態ではなかった。その後、利用したいK中間子などの2次ビーム量を増やすためにT 1 標的本体を白金の固体標的とし、気密構造の標的容器を用いず、室温大気中で空冷または間接水冷して使用することも可能となるように変更した。この時点では陽子ビームの強度も低く、かつてKEKにおける12 GeV陽子シンクロトロンでの経験もあったため、標的破損の想定はしていなかったと考えられる。その後標的材質を白金から金に変更したが、この時もビーム強度は定

格より低く、破損を想定していなかった。しかし、ビーム強度は次第に増加しており、これに対応して約 50 kW 以上のビームパワーが視野に入る頃には、当初設計したニッケル標的に戻す予定であった。ただし、この標的でも短時間のビーム取り出しに対する損傷には配慮すべきである。

いずれの場合でも標的容器内に放射化物を閉じ込めることは不可欠であり、密閉構造を持つことは、安全上最も重要なことである。

2. 1. 4. ハドロン実験ホール内への漏えい

2. 1. 4. 1. 管理区域の種別

第1種管理区域：

図 2-5 にハドロン実験ホールの放射線管理区域を示す。第1種管理区域は、表面汚染や空気の汚染が想定される区域で、図中赤線内の標的、コリメータ、電磁石、ビームダンプを含む領域である。排気は放射性物質の濃度を監視しながら、フィルタを通して排気筒から行う。

第2種管理区域：

第2種管理区域は表面汚染や空気汚染がないとされ空間線量のみが管理の対象となる区域であり、ハドロン実験ホール内の第1種管理区域に含まれない領域である。

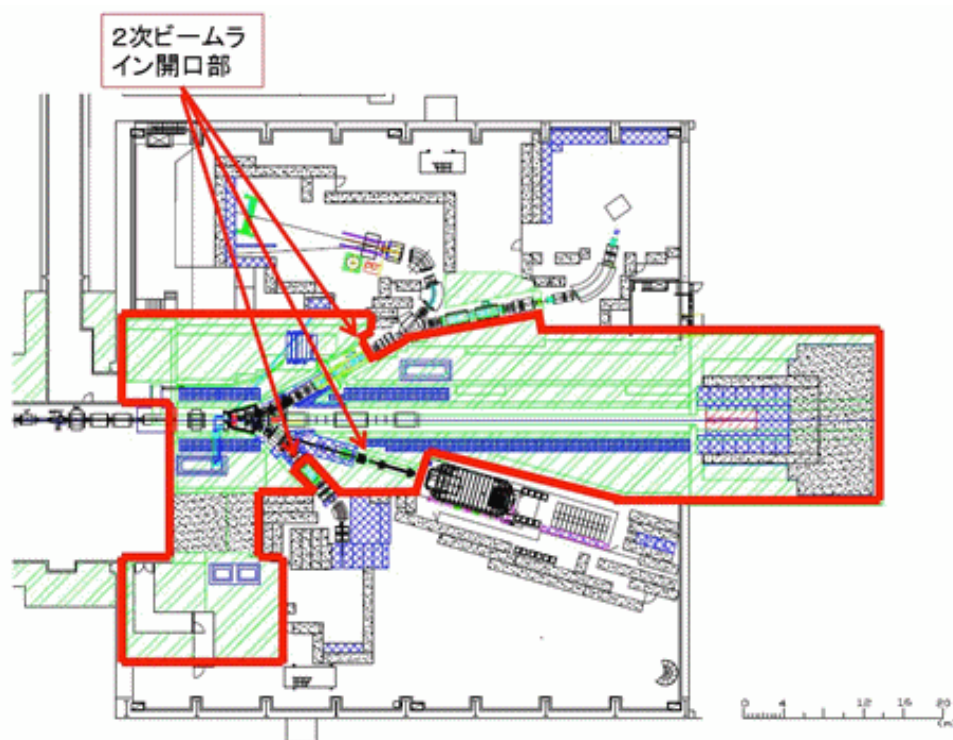


図 2-5 : ハドロン実験ホールの放射線管理区域

2. 1. 4. 2. 漏えいの原因

環境への漏えいの観点から見ると、放射線防護のための壁としては、標的容器、第1種管理区域と第2種管理区域の境界、ハドロン実験ホール外壁の3つがあり得た。ハドロン実験ホール内第2種管理区域は、本来、放射性物質の漏えい及び汚染があってはならない領域であるので、放射性物質漏えいを防ぐには、標的容器の気密化、そして第1種管理区域と第2種管理区域の境界の気密性の確保が必要であった。標的容器の気密性の問題についてはすでに述べたので、ここでは2番目の第1種管理区域と第2種管理区域の境界（コンクリート壁からなる遮へい壁）の気密性に関連する問題を扱う。

2. 1. 4. 3. 遮へい壁の密閉性

今回の事故では、コンクリート遮へい壁で囲まれた内部にあった放射性物質が、ハドロン実験ホール内の遮へい壁の外にある人の出入りが可能な区域（第2種管理区域）に漏れ出た。これは遮へい壁の密封性が十分でなかったためである。当該コンクリート壁は、主として標的や最終的にビームを止めるビームダンプで発生する中性子などが外部に出る透過放射線量を減少させるための遮へいを目的としていたが、遮へい壁内部では中性子によって空気が放射化しアルゴン41などの放射性物質が生成されるため、放射線遮へい用コンクリートブロックを重ねる際、間にゴムシートを挟む、配管ダクト等の貫通部をコーキングや粘土などで塞ぐなどの対策がとられていた。この設計と実装は、空気の放射化によるアルゴン41等に関する生成量の定量的評価と、KEK-P S実験における経験に基づいており、アルゴン41の漏えい量に関する定量的評価は行っていないものの、通常運転で放出された放射性物質の濃度に対しては有効であった。しかし今回の標的損傷事故に対しては密閉度が十分でなく、第2種管理区域に放射性物質の漏えいを引き起こした。

当初計画した標的の使用方法であれば、現在のコンクリート壁は妥当であったはずなので、T1標的本体が密閉容器に格納されてない事例に対応するために、その密封性強化を求めることはやや合理性を欠くが、今後の陽子ビームの更なる大強度化などに備えて、可能な強化策を講じることが望ましい。

2. 1. 4. 4. 換気設備の妥当性

コンクリート遮へい壁で囲まれた領域の空調設備の主目的は真空ポンプやビーム輸送機器等、1次ビームライン室内の機器から発生する熱の除去であった。ビーム運転中はこの空調は循環運転されており、10 %がフィルタを通過しているが、放射性物質の濃度は監視していなかった。この領域の排気はビーム運転終了後に、放射線レベルの減衰を待って、放射性物質の濃度を監視しながらフィルタを通して行う仕組みをとっていた。標的が密閉されている状態では、遮へい壁内部のいわゆる第1種管理区域の換気方法は、標的の破損事故が生じたとしても、許容できるものであったと言える。しかし、今回のように標的が密閉されていな

い状態での換気方法としては不十分であった。さらに、万が一、今回のような標的の破損等が起きて放射性物質が漏えいした場合には、それを直ちに検出して必要な警報を出せるように設計されるべきであったが、漏えいや汚染の程度を外部から監視する手段が装備されていなかった。漏えいをいち早く検出できていれば、不要な内部被ばくをもたらすこともなかった。今後は、750 kW の高出力運転を想定した設計の妥当性の確認も必要である。

2. 1. 5. 第2種管理区域内のエリアモニタ及び区域境界のモニタリングポストについて

ハドロン実験ホール内の第2種管理区域の放射線モニタは室内の放射線レベルの監視を目的として空間線量をモニタするものであり、遮へい壁内部から第2種管理区域への放射性物質の漏えいを監視するためのものではなかった。漏えいしやすい場所付近にもモニタを設置してあれば事故時の判断材料が増えたと考えられる。事業所境界のモニタリングポストに関しては J-PARC 以外の施設が設置したモニタが周辺にもあり、全体としては適切な配置であったが、連携したシステムになっていないため、ハドロン実験ホールでそれら全てを監視できるようになっていなかった。

2. 1. 5. 1. 放射線検出に係わる経緯

5月23日11時55分頃の機器保全のためのインターロックシステム(MPS)作動によるビーム停止後、EQ電源等の機器の健全性を確認し、所定の手続きを経て12時08分頃加速器の運転及びユーザ利用運転を再開した。12時55分頃ハドロン実験施設のシフトリーダ(HDシフトリーダ)は、実験者側の安全電磁石の自動停止の原因を調査中にシンチレーションカウンタの計数率異常に気づき、放射線の調査を開始した。13時30分頃にエリアモニタの指示値の最大値が通常の10倍程度にまで上昇していることを確認し、ハドロン実験施設の放射線発生装置責任者と管理区域責任者に報告、さらに14時26分頃に加速器シフトリーダに報告しビーム運転が停止された。その後、原因調査の一環として排風ファンの起動などがあったが、15時50分頃に該当区域の全てのエリアモニタで指示値が上昇していることが確認されるに至り、当初疑われたエリアモニタの異常ではないことが認識され、17時30分頃にホール内の作業者の退出が開始された。その後、翌24日の17時30分頃に核燃料サイクル工学研究所からモニタリングポストの数値に関する問い合わせがあり、管理区域外への漏えいが初めて認識された。

このように核燃料サイクル工学研究所から問い合わせがあるまで施設外への放射性物質漏えいが認識されず、放射線安全の確保に対するこの緩慢な動きは大きな問題である。その原因の一つとして、放射線監視の中心にあるべきエリアモニタへの信頼性が不十分であり、配置や連携機能に関する不備がそれらの動きをさらに鈍くしたと思われる。

2. 1. 5. 2. ハドロン実験ホールの放射線監視設備と検出記録

ハドロン実験施設に設けられた放射線安全管理に係わる設備の配置を図2-6に示す。1次ビームラインを除くハドロン実験ホールの空間は、本来放射性物質が漏れ出ることのない第2種放射線管理区域として設定され、5カ所にエリアモニタが配置されている。さらに実験室建屋外に設定された第2種管理区域境界にも3カ所のエリアモニタが設置されている。

管理区域内モニタは1時間あたり積算放射線量が $25\mu\text{Sv}$ に達する時点でハドロン電源棟制御室に警報を発し、また線量率が $25\mu\text{Sv/h}$ を超えた時は管理区域内モニタの警報が現場で吹鳴することになっている（ $25\mu\text{Sv/h}$ は管理区域内における1週間（40時間）あたりの法的規制値 1mSv に対応する値）。他方、管理区域境界モニタは1時間積算値が $0.5\mu\text{Sv}$ に達した時点でハドロン電源棟制御室に警報を出すとともに、人の放射線障害防止のためのインターロックシステム（PPS）によりビームが停止する安全対策が採られている（管理区域境界については3ヶ月あたり 1.3mSv が法的規制値）。

図2-7にデータベースに残された全てのモニタのトレンドを示す。これらを精査すると、全てのモニタが11時55分以降に上昇を開始し、その後もゆっくりと上昇を続けている。全てのモニタが正常に放射線を検出していることから、必要な感度を持ち、数や設置位置についても問題がなかったものと考えられる。

監視区域境界のモニタについても、区域内の事象に同期した上昇が認められることから、境界モニタとしての機能は果たしていると判断される。しかし、データの視認性及び監視画面の設置場所が適切でなかったために、データの共有化ができず、現場における事象認識や対応の大幅な遅延が生じることとなった。

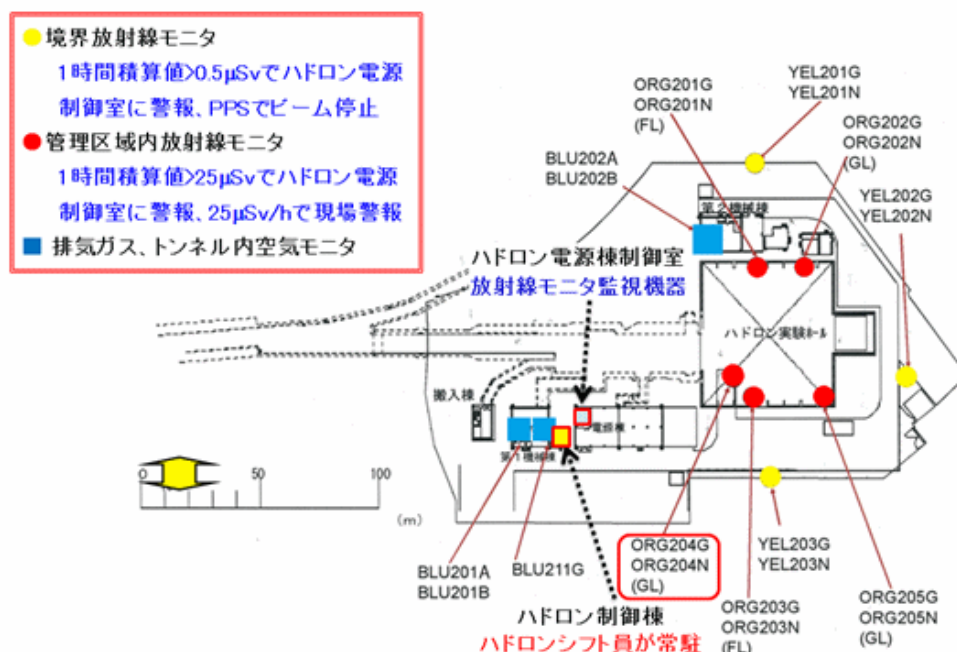


図2-6：ハドロン実験ホールの放射線管理設備の配置

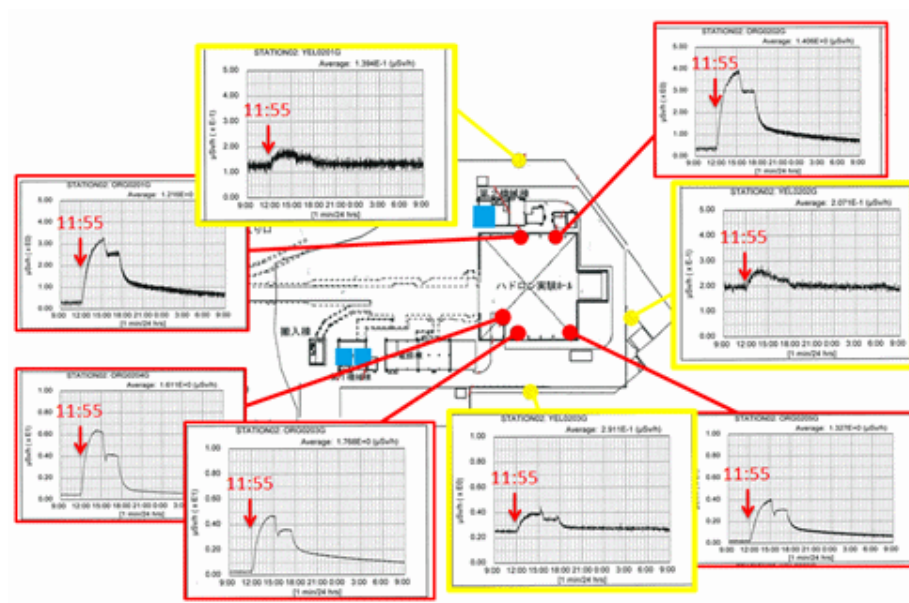


図 2-7：全てのモニタで検出された線量のトレンド

2. 2. 安全管理体制面の問題点

ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故対応をめぐり、安全管理体制上の問題点の抽出を行うとともに、その対策案について議論した。問題点の抽出にあたっては、安全体制に係わる規定や手引き等を含め総点検を行った。

安全管理体制上の問題点は、①通報の遅れ、②放射線管理区域内への漏えい、③ユーザ等作業員の被ばく、④放射線管理区域外への漏えいに大別される。安全管理体制上の問題点と原因、課題を表 2-1 に示す。

表 2-1：安全管理体制上の問題点とその原因及び解決のための課題

問題点	原因	課題
通報遅れ	・ 情報集約不十分 ・ 法令誤解釈 ・ 判断基準不明確 ・ 責任者不在	異常対応体制の見直し (情報管理体制、通報基準、判断基準、責任者不在時の対応)
管理区域内への漏えい	・ 運転再開時の確認手順が不適切	異常対応体制の見直し (運転再開手順)
	・ 異常想定不十分	放射線安全審査体制の見直し (異常を考慮した放射線安全審査)
作業員の被ばく	・ 避難基準不明確 ・ 情報共有無し	異常対応体制の見直し (避難基準、情報管理体制)
管理区域外への漏えい	・ 排風ファンによる排気 ・ エリアモニタの確認不十分	異常対応体制の見直し (機器操作手順、情報管理体制)

2. 2. 1. 通報の遅れとそれに係わる判断基準

通報の遅れの原因としては、加速器、ハドロン実験施設、放射線管理部門、実験ユーザの間での情報集約が不十分であったため、それぞれが断片的な情報に基づいて行動し、報告義務に該当するか否かの判断に時間を要したことが第一に挙げられる。それぞれの情報が早い時点で集約できていれば、総合的に判断して通報にあたる非常事態に該当すると判断できた可能性が高い。

また、法令上の報告義務について、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律・第四十二条（報告徴収）及び同施行規則・第三十九条（報告の徴収）第4項及び第5項の解釈、ならびに茨城県原子力安全協定：原子力施設周辺の安全確保及び環境保全に関する協定書・第十七条（事故・故障等の連絡等）及び同運営要綱・第十三条（事故・故障等）に記載された報告に該当する要件について、その判断を行うべき責任者等が解釈を誤ったことが通報遅れの原因の一つである。解釈の誤りの原因には法令上の報告義務の判断基準がJ-PARCセンター放射線障害予防規程、事故等通報マニュアル、各施設運転手引等の規定類に明確には定められていなかったことが挙げられる。その結果、ハドロン実験ホール内のユーザ等作業員の内部被ばくや、施設外への放射性物質の漏えい等に発展したことが判明するまで、報告事象に該当すると判断できなかった。

さらに、加速器、ハドロン実験施設、安全ディビジョン等で事故対応に対して責任を持つべき者が事象発生当時不在であったため、適切な指揮を執ることができなかったことも遅れの原因の一つとして挙げられる。

2. 2. 2. 放射線管理区域内への放射性物質の漏えい

管理区域内への放射性物質の漏えいの原因としては、J-PARCセンター内及びKEK、JAEAの下での放射線安全に関する審査過程において、標的破損に至るような重大事象に関する安全対策が十分に審議されていなかったことが挙げられる。J-PARC建設開始当初は、放射線安全専門部会を頻繁に開催して技術的な問題を審議していたが、近年はほとんど開催されていなかった。標的が破損する可能性の評価、標的が破損しても放射性物質が拡散しない構造、1次ビームライン室内に放射性物質が充満したとしても実験ホールまで拡散しない構造等の適切な安全対策が審査過程において十分議論されるべきであった。

また、加速器側の対応としては、機器保全のためのインターロック(MPS)発生後の加速器運転再開時において、インターロック発生原因の究明が不十分であったこと、根本的には当該事象の誘発事象としてハドロン実験施設において標的破損という重大事象が発生する可能性の検討がなされていなかったことが挙げられる。さらに、加速器側とハドロン実験施設側の情報共有の欠如も大きな問題であった。すなわち、加速器側では大強度ビームが短時間でアボートダンプに入射されたと誤解していたのに対し、ハドロン実験施設側ではハドロン標的にビームが入射されたことは認識していたものの、それが異常な取り出しであったことを認識できていなかった。この時点で両者の情報が共有できていれば、それ以降に起こる放射性

物質の漏えいなどの事象を認識できた可能性が高い。

2. 2. 3. ユーザ等作業員の被ばく

ユーザ等作業員の被ばくに至った原因としては、作業場所における放射線量の増大や、放射性物質漏えい等に対する避難基準が明確でなかったことが挙げられる。ハドロン実験ホール内の放射線モニタの警報設定値が法令に基づく管理上の基準値のみで、警報レベルが設定されていなかったために、事故に至る前の段階で空間線量率の上昇に気づかず、注意・避難行動をとることが出来なかった。このような背景が、放射性物質のハドロン実験ホール内の漏えいに気づきながら、ユーザ等作業員の被ばくを抑えるために、排風ファンを運転して放射性物質を屋外に排出するという行動に導いてしまったと言える。

さらには、自主的に避難をしたユーザ、実験ホール内に留まり続けたユーザ等、まちまちに対応に終始した。その原因は実験施設、放射線管理部門、ユーザ等作業員のそれぞれが得ていた放射線に関する情報が共有されなかったことにあり、ここでも情報共有のあり方が大きな問題であった。

2. 2. 4. 放射線管理区域外への放射性物質の漏えい

放射性物質をハドロン実験施設の放射線管理区域外へ漏えいさせた原因としては、排風ファンの運転に関して、放射性物質の漏えいなどの異常発生を想定した操作手順や判断の基準が無かったことが第一に挙げられる。これは、放射線安全審査の過程で、標的破損やそれに伴う実験ホール内への放射性物質の漏えいが想定されていなかったためである。

排風ファンを作動させたことにより実験ホール内の線量が低下したことが確認されているので、放射性物質が屋外に漏えいしたことは明白であるが、屋外の管理区域境界における放射線モニタの監視が不十分であったため、管理区域外への漏えいの有無を適切に判断できなかった。もし、管理区域境界におけるエリアモニタのトレンドが注意深く監視されていれば、排風ファンの作動と連動して線量に変化していることが確認され、翌日の核燃料サイクル工学研究所からの連絡を待たずに放射線管理区域外への漏えいが認識できたと考えられる。

2. 2. 5. 課題の抽出

安全管理上の問題点とその原因は複雑に見えるが、①異常に対応するための体制が不十分であったこと、②放射線安全上の審査体制が不十分であったことの2点に集約できる。

- ① 異常に対応するための体制が不十分であったことについては、従来の体制が実際に発生しうる事象を十分に網羅できていなかったことが主な問題点である。すなわち、現行の体制では、事故活動要領、事故等通報マニュアルが定められ、各施設の運転手引きにも事故時の対応方法が記載されているものの、それらは「発見者が明らかに事故と判断できる事象」を想定しており、通報の判断に迷った場合には「施設管理責任者」あるいは

「安全ディビジョン長」に判断を委ねることとなっている。そのため、現行の事故時の対応方法では、今回の事故のように「複数の施設」で「時々刻々と進展する」事象には対応できないことが明らかとなった。特に、「複数の施設で構成されている多目的施設」、「多数の実験ユーザが利用する施設」という J-PARC の特徴が反映されていなかった。

加速器施設、特にビーム照射利用施設では、ビームの誤照射による被ばく事故は想定されていても、放射性物質の漏えいによる被ばく事故はあまり想定されてこなかったという背景もあり、J-PARC のような大強度の加速器における問題点も考慮されていなかった。

- ② 放射線安全上の審査体制については、各施設の特性やリスクを十分に理解した上で、従来の体制を見直し、技術的な安全確保に関する議論が十分なされるように構成、審査内容等を見直す必要がある。

3. 汚染及び被ばくの状態

平成 25 年 5 月 23 日 11 時 55 分頃の事象により、ホール内の空気が汚染し、その空気を吸入したことにより、ホール内で実験準備等を行っていた放射線業務従事者が被ばくしたと考えられる。5 月 23 日の事故発生以降に J-PARC ハドロン実験施設管理区域に入域していたものは 102 名であったが、102 名全員の被ばく量の測定・評価を行い、34 名が被ばくしていたことが判明した。被ばく線量は、内部及び外部被ばくの合算で 0.1-1.7 mSv であった。これは健康に影響が出る線量ではないが、確認のためこれら 34 名の健康診断を行なった。健康診断については今後も必要に応じて実施していく予定である。

ホール内に漏えいした放射性物質により、ホールの床、壁等が汚染した。事故当日の汚染の状況を図 3-1 に示す。J-PARC においては、放射線障害予防規程での管理区域区分として、第 1 種管理区域は「空気中の放射性同位元素の濃度又は放射化物によって汚染された物の表面密度が告示第四条第二号、第三号及び第四号に規定する値を超え、又は超えるおそれのある区域」、第 2 種管理区域は「外部被ばくに係る線量が告示第四条第一号に定める管理区域に係る値を超え、又は超えるおそれのある区域であって、第 1 種管理区域の区分基準に該当しない区域」と定義している。ここで告示第四条とは科学技術庁告示第五号第四条を指す。ハドロン実験施設の発生装置使用室（1 次ビームライン室）は、第 1 種管理区域として管理されているが、ハドロン実験ホールは、第 2 種管理区域として管理されていた。事故当日の表面汚染密度の最大値（21 Bq/cm²）は第 1 種管理区域の設定基準（4 Bq/cm²）を超えており、表面汚染が確認された時点で本来は第 1 種管理区域に変更すべきであったが、それはなされなかった。

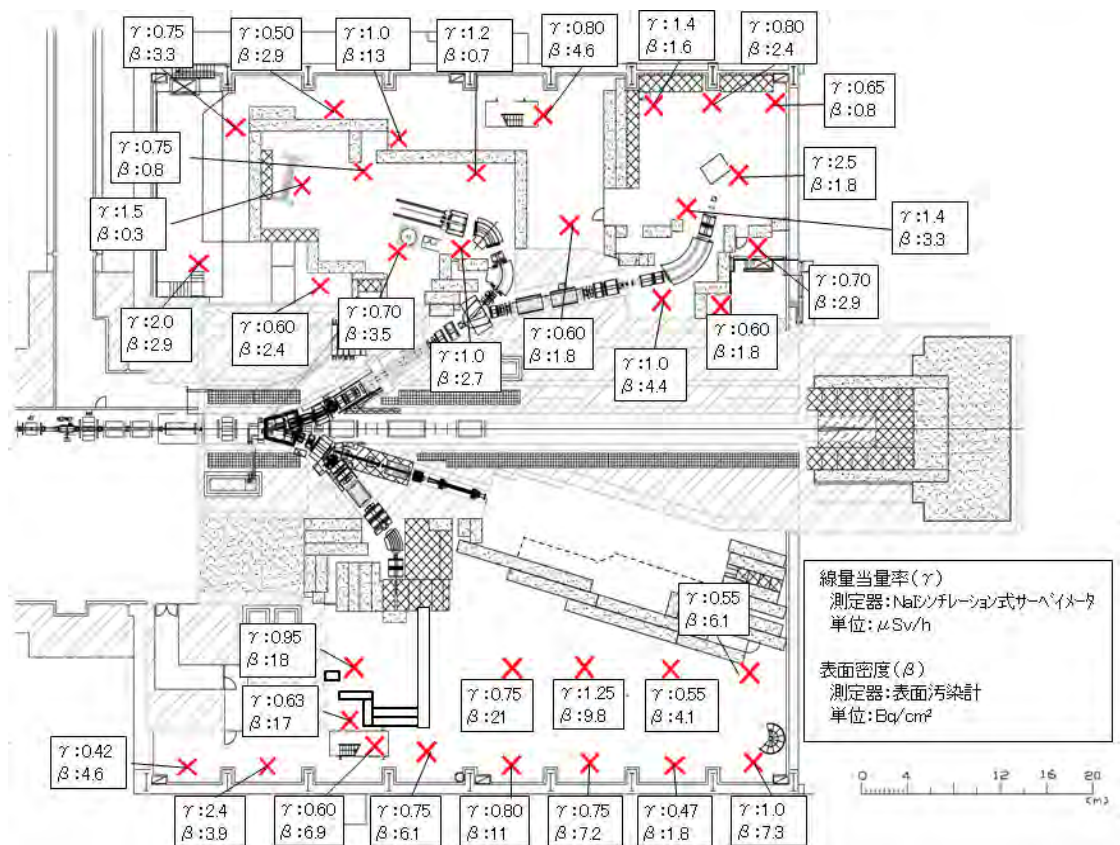


図 3-1 ハドロン実験ホール（実験ホールフロア）の表面汚染密度と空間線量率

4. 周辺への影響評価

J-PARCハドロン実験施設の周辺地域へ漏えいした放射性物質の種類と量を評価するために、ハドロン実験ホール内の空気試料を採取して放射性核種を分析し、シミュレーション結果をエリアモニタの指示値と比較することにより、放射性物質の周辺への総放出量及び周辺環境での被ばく線量を推定した。

4. 1 空気試料中の放射性核種分析

空气中放射性核種測定のために平成25年5月23日17時20分頃、ハドロン実験ホール内の図4-1に示す場所において空気試料を採取した。この採取場所を選んだ理由は、周辺の放射線の測定により、空間線量率が高いことを確認したためである。

空気試料の採取は、床上約30センチメートルの位置にてエアポンプ（排気流量12リットル/分）から排気される空気を500立方センチメートルの密封可能なポリエチレン容器（ポリビン）内にチューブで導入し、ポリビン内の空気を1～2分間置換することで行った。チューブで導入した空気がポリビンに吹き付けられたため、空気12～24リットル中に含まれていた放射性ダストやエアロゾルがポリビン内外壁に残ったおそれがある。このため、採取した空気試料から放射能濃度を算出することは困難で、放出量の評価には放射性核種の放射能比のみを使用した。

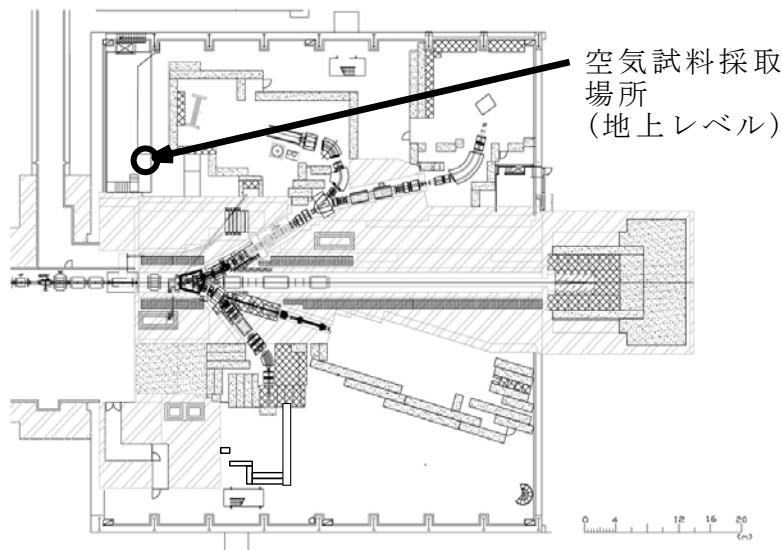


図4-1：ハドロン実験ホール内の空気試料採取場所

採取した試料空気に含まれる放射性核種について、Ge半導体検出器を用いてガンマ線スペクトルを定期的に測定し、ガンマ線のエネルギーと放射性核種の半減期特性から核種を同定し、ガンマ線の計数率から放射能比を求めた。空気試料（500立方センチメートル）中に

検出された放射性核種とその採取時（17 時 20 分）に換算した放射能比を表 4-1 に示す。放射性核種の同定は、床汚染密度測定試料、共同利用実験グループの Ge 半導体検出器（東北大学）においても確認された。また、この空気試料は理化学研究所の測定においても同様の結果が得られている。また、測定された核種は、高エネルギー加速器施設（アルゴンヌ国立研究所、フェルミ国立加速器研究所、高エネルギー加速器研究機構など）において金標的に高エネルギー陽子を照射した際に生成する核種と良く一致している。

なお、ガンマ線を放出しない核種が含まれる可能性も検討したが、それらの線量は上記の値に比べて無視できる程度であることが分かった。事実、その中で最も量が多いと考えられるトリチウムについて実測を行ったが、環境や健康に影響が出るほどの線量ではなかった。

表 4-1：ハドロン実験ホール内で採取された空気試料中の放射性核種とその放射能比

核種	半減期	放射能比	核種	半減期	放射能比
^{129}Cs	32.1 時間	1.6×10^{-1}	^{121}Te	16.8 日	1.4×10^{-2}
^{24}Na	15.0 時間	1.1×10^{-1}	^{72}As	26.0 時間	1.4×10^{-2}
^{42}K	12.4 時間	8.3×10^{-2}	^{94}Tc	293 分	1.3×10^{-2}
^{127}Cs	6.25 時間	8.1×10^{-2}	^{97}Ru	2.9 日	1.0×10^{-2}
^{181}Re	19.9 時間	6.5×10^{-2}	^{96}Tc	4.28 日	9.8×10^{-3}
^{43}K	22.3 時間	6.2×10^{-2}	^{83}Rb	86.2 日	8.9×10^{-3}
^{81}Rb	4.58 時間	4.4×10^{-2}	^{183}Re	70.0 日	8.4×10^{-3}
^{192}Au	4.94 時間	3.8×10^{-2}	^{84}Rb	32.8 日	7.0×10^{-3}
^{123}I	13.3 時間	3.6×10^{-2}	$^{119\text{m}}\text{Te}$	4.70 日	5.9×10^{-3}
^{191}Au	3.18 時間	3.5×10^{-2}	^{74}As	17.8 日	5.4×10^{-3}
$^{82\text{m}}\text{Rb}$	6.47 時間	2.9×10^{-2}	^{125}I	59.4 日	5.1×10^{-3}
^{119}Te	16.0 時間	2.5×10^{-2}	^{75}Se	120 日	2.4×10^{-3}
^{77}Br	57.0 時間	2.4×10^{-2}	^7Be	53.3 日	2.2×10^{-3}
$^{193\text{m}}\text{Hg}$	11.8 時間	1.9×10^{-2}	^{190}Ir	11.8 日	2.1×10^{-3}
$^{195\text{m}}\text{Hg}$	41.6 時間	1.8×10^{-2}	^{72}Se	8.4 日	2.0×10^{-3}
^{76}As	26.3 時間	1.7×10^{-2}	^{185}Os	93.6 日	3.9×10^{-4}
^{197}Hg	64.1 時間	1.6×10^{-2}	^{192}Ir	73.8 日	3.6×10^{-4}
^{95}Tc	20.0 時間	1.5×10^{-2}	^{22}Na	2.60 年	2.5×10^{-4}
^{186}Ir	16.6 時間	1.5×10^{-2}			
合計					1.0×10^0

4. 2. 総放出量評価

ハドロン実験ホール全体の放射能濃度は、粒子・重イオン輸送統合コードシステム（PH I T S ver. 2.52） [Niita et al., JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)]を用いたシミュレーシ

ョンによる計算結果をエリアモニタの測定値と照合することにより求めた。

表4-1に示される放射能比の核種が、ハドロン実験ホール全体に分布したとして、各核種から放出されるガンマ線の分布についてシミュレーション計算を行った。計算においては、ハドロン実験ホールを56メートル×56メートル×地上19メートル+地下6.4メートルの直方体に近似し、ハドロン実験ホールの内部構造となる1次ビームライン室遮へい体を除外、ホール南側や西側の搬入ヤードや通路も設計図面を元にモデル化した。また、モニタ位置での線量率は、モニタ位置に直径2メートル×高さ2メートルの円筒形の領域を定義し、その領域におけるガンマ線のエネルギースペクトルに、周辺線量当量H*(10)への換算係数[ICRP Publication 74]を用いて求めた。

ハドロン実験ホール内のエリアモニタ5台について、周辺線量当量率の指示値と、採取された空気試料中の核種の放射能比を用いてシミュレートした結果の比較から放射エネルギーを評価した。その結果得られた評価値の中で、最も大きい値である0.17 (Bq/cm³)をハドロン実験ホール内の放射能濃度として採用した。

ハドロン実験ホール内の放射能濃度の時間変化は、エリアモニタORG 204 Gの指示値の時間変化から導出した。エリアモニタの中でエリアモニタORG 204 Gを選んだ理由は、(1) エリアモニタの中でポリビンによる空気採取場所に比較的近いこと、(2) 事故発生時に最も線量率が増加し、排風ファン操作後での線量率減少が最も大きいことの2点である。(2)は、他のエリアモニタに比べてハドロン実験ホール内に残留した表面汚染による影響がエリアモニタの中で最も小さいことと、ハドロン実験ホール内の放射性物質を含む空気からの影響が最も大きいことを示唆する(図4-2)。

漏えい後の最大放射能濃度は、エリアモニタORG 204 Gの指示値が放射能濃度に比例すると仮定して求めた。空気試料を採取した時刻は、1回目の排風ファン運転後の17時20分であった。図4-2から、空気試料採取時のハドロン実験ホール内の線量率(ORG 204 G)は空気試料採取時で約3.5 μSv/h、事故以降の線量率最大値は約6 μSv/hであった。なお、バックグラウンドの線量率として0.5 μSv/hを引いている。15時15分の排風ファン運転前の最大時の放射能濃度は、採取時の放射能濃度にエリアモニタ(ORG 204 G)の線量率変化からスケーリングした1.7倍(6 μSv/h / 3.5 μSv/h)を乗じることにより求めた。

ハドロン実験ホールの空気容積として、ハドロン実験ホール全体(56×56×25.4立方メートル)から1次ビームライン周辺のコンクリート部分(16×56×12立方メートル)のみを除外した容積(6.9×10¹⁰立方センチメートル)を用いた。この値は、ハドロン実験ホール内に他の構造物もあるため評価上安全側の値となる。

総放出量は、ハドロン実験ホール内に存在していた放射能が全量放出されたとして、以下の式で求めた。

総放出量(Bq)

$$\begin{aligned} &= \text{採取サンプルの放射能濃度} \times \text{最大時と採取時の濃度比} \times \text{ハドロン実験ホール容積} \\ &= 0.17 \text{ (Bq/cm}^3\text{)} \times 1.7 \times 6.9 \times 10^{10} \text{ (cm}^3\text{)} \\ &= 2.0 \times 10^{10} \text{ (Bq)} \end{aligned}$$

したがって、ハドロン実験ホールから外部に放出された放射能の総量は、約 20 GBq と評価される。

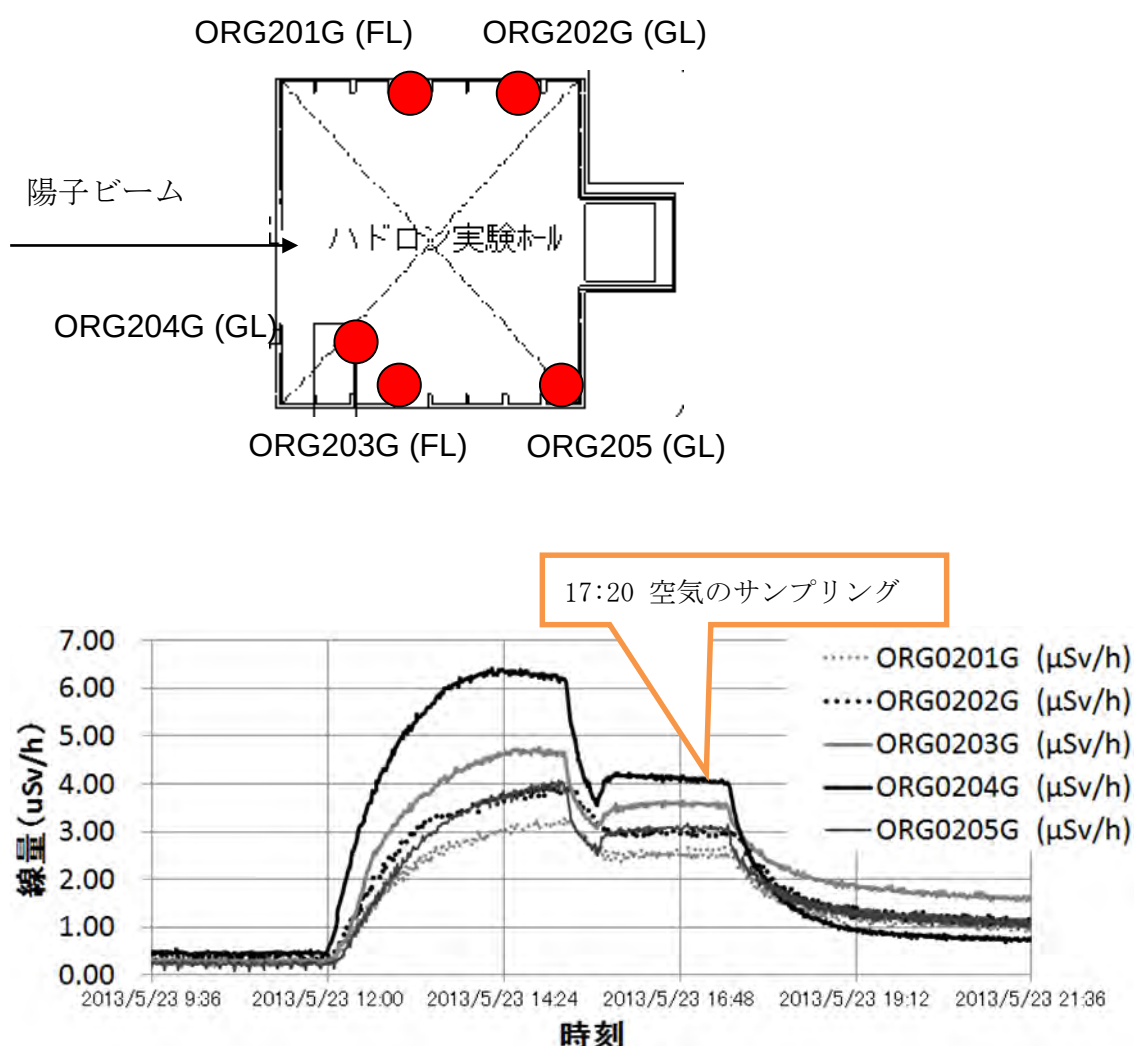


図 4-2 : 5 台のエリアモニタの時間変化図

4. 3. 事故による周辺環境の線量への影響評価

事故によって放出された放射性物質によるハドロン実験ホールから距離の近い事業所境界の線量を、核燃料サイクル工学研究所の施設内に設置されたガンマ線エリアモニタの記録及び当時の気象データ等をもとに、放射性物質の拡散式を用いた解析的な評価法で求めた。事故直後の分析では測定されたガンマ線のエネルギーのみをもとに核種の同定を行い、エネルギーだけでは識別出来ない核種候補が複数あった場合には、より影響の大きな核種を採用し、計算が過小評価にならないようにした。その後も定期的な測定を継続することによって半減期が明らかになったので、その解析結果を含めることでより正確な核種同定と放射能比の見直しを行い、詳細な分析結果（表 4-1 参照）を得たので再評価を行った。

まず表 4-1 の組成比の放射性核種がハドロン実験ホールから単位放出量だけ放出されたと

して、その時点の気象条件を加味して拡散計算を行い、大気中の濃度分布と線量率分布を算出した。次に、核燃料サイクル工学研究所 ST-1 で測定された線量率と、拡散計算による ST-1 の位置における線量率の計算値が一致するように換算係数を求め、この換算係数を大気中濃度分布及び線量率分布の値に乗じて外部被ばく及び内部被ばくの線量を評価した。この際、事業所境界の複数の位置で線量を求め、このうち線量が最も大きくなる位置を評価点とした。

再評価の結果、この事故における放射性物質の放出に伴う線量は、ハドロン実験施設に最も近い事業所境界についても法令報告第一報で報告された $0.29 \mu\text{Sv}$ を超えることはなく、環境への影響は心配ない。

5. 再発防止策

本章では、再発防止のために、1) 今回の事故の直接的な原因となったビームの遅い取り出し部分のハードウェアへの対策、2) 発生した放射性物質を第1種管理区域に閉じこめる対策、及び3) 異常を速やかに検知するための放射線モニタリング情報の共有化、について対策を述べる。

5. 1. 50 GeVシンクロトロンの再発防止策

今回の事故の加速器側の原因は、遅い取り出し用の電磁石（E Q電磁石）系の異常により、瞬時に大量のビームが取り出されたことである。原因が完全に解明されたわけではないが、瞬時に大量のビームが取り出されないための対策を講じることは可能である。さらにE Q電磁石系以外の異常による瞬時の大電流取り出しの可能性と対策についても考察した。

5. 1. 1. 遅い取り出し用電磁石E Qの調査結果

（1）E Q電磁石の役割とE Q電磁石電源系の構成

50 GeVシンクロトンからハドロン実験施設へのビーム取り出しは「遅い取り出し」法によって行う。陽子ビームはシンクロトンの中でベータトロン振動とよばれる横振動をしながら周回している。遅い取り出しは、この振動の共鳴現象を使ってビームサイズを広げ、広がったビームの外側から削り出すように徐々にビームを取り出す手法である。精度のよい実験を行うためには取り出される陽子の数（ビーム強度）が取り出される時間内で一定になる必要がある。このため、取り出されたビーム強度の時間分布（ビームスプイル）を測定しながら2種類の電磁石E Q (Extraction Quadrupole) 及びR Q (Ripple Quadrupole) をフィードバック制御してビーム強度を一定にする。今回のハドロン実験ホールにおけるターゲット損傷の直接的な原因は、このE Q電源系の誤作動である。

図5-1に、ビーム強度をフィードバック制御する、デジタル信号制御ユニットとその信号伝送系のブロック図を示す。取り出されたビームの強度はまずデジタル信号制御ユニット

(DSP) に取り込まれる。このユニットは内蔵されたコンピュータによりビーム強度を一定に保つために必要なE Q電源及びR Q電源に対する電流指令値を計算し、デジタル化された電流指令信号を出力する。電流指令信号は外部ノイズの混入を防止するために光信号に変換された後、各電源に送信される。

図5-2にE Q電源の構成を示す。受信した光信号はデジタル電気信号に変換された後、電源制御部に入る。電源制御部では受信したデジタル電気信号に基づいて電源出力部を動作させるために必要なアナログ電流指令値を発生する。出力電圧、出力電流値は常に監視され過電圧・過電流等の異常が検知された場合は、制御コンピュータが電源を停止させるとともに電源異常警報を外部に出力する。また、電流指令値と実際に流れた電流の差が大きい場合には、電源は停止しないものの「電流偏差異常」という異常記録を出力する。

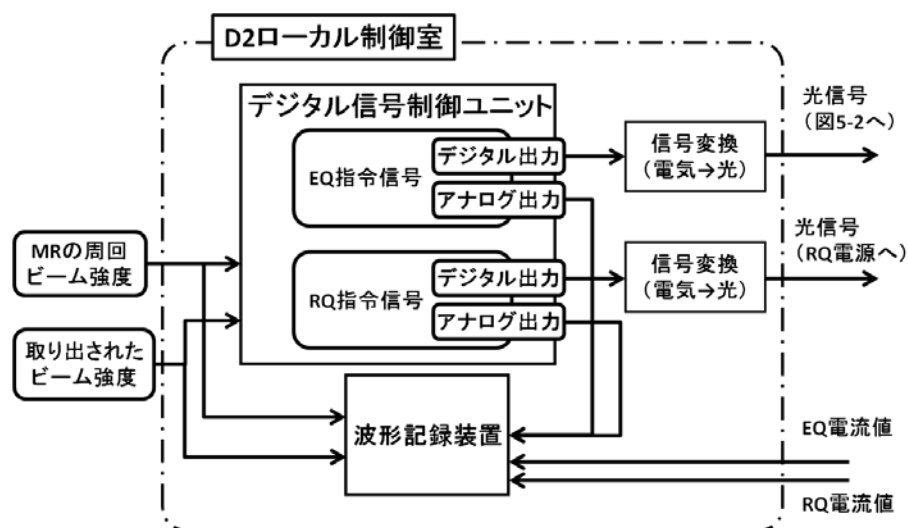


図 5-1 : デジタル信号制御ユニット (DSP) と信号伝送系

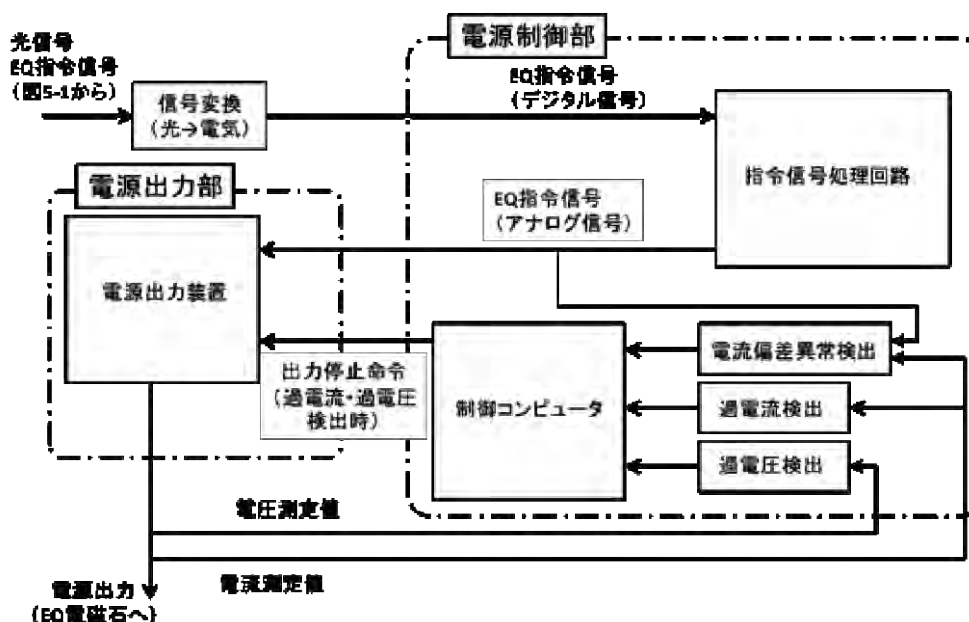


図 5-2 : E Q 電源の構成

(2) E Q 電磁石電源系の誤作動

正常な遅い取り出し運転では、6 秒の運転周期の中で、加速終了後のフラットトップ 2.93 秒のうち約 2 秒間にわたってビームをビーム輸送系に取り出している。E Q 電磁石電源系の誤作動が起こった時の状況を記録した波形記録装置の画面記録 (図 5-3) から、DSP のアナログ出力は正常な動きをしており、DSP は通常と同様な指令値を生成していたが、このショットだけ E Q 電源出力電流が全く流れない状態が約 0.3 秒続いたことが確認できる。DSP は取り出されるべきビームが取り出されないため、さらに電流を流すように指令している。電流指令値は通常は最大でも 100 A 程度であるにもかかわらず、誤作動ショットでは指令値が 159 A 付近まで上がっている。この瞬間に、突如不具合が解消され、159 A の指令値に従った

出力電流が急激に流れはじめている。この急激な電流増加により、ベータトロン振動が一気に共鳴条件に近づき、約 5 ミリ秒という短時間に 3×10^{13} 個の陽子ビームのうちの約 2/3 が取り出された。

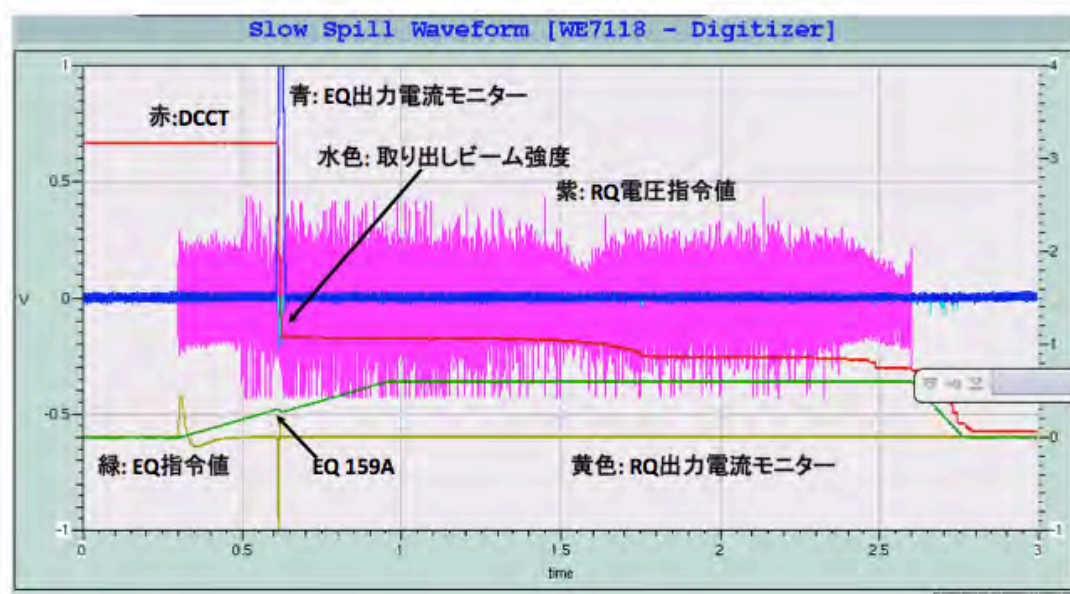


図 5-3 : 誤作動時の波形

(3) 調査状況

今回のEQ電源の誤作動に関する調査の結果、事故時のショットでは、DSP制御ユニットからの電流指令値が電源の出力制御部に正しく伝送されず、EQ電源の出力制御部は159Aのステップ指令として応答していることがわかった。159Aのステップ指令を送るとEQ電源の応答は事故時をよく再現することが確認されている。しかしながら、なぜ電流指令値がEQ電源の出力制御部に正しく伝送されなかったのか、その原因はまだ明らかになっていない。現状では、以下の2つの可能性のいずれかによるものと推定している。

(1) 電源制御部の指令信号処理回路は正しく信号を処理していたが、制御コンピュータの出力に何らかの原因で一時的不具合が生じ、出力電流が流れない状態が続いた。その後、その異常が突然解消され指令値に向かって電流が流れ始めた。この場合、電流偏差異常はDSPが電流を流す命令を開始した直後に発生していたと思われる。

(2) DSPと信号伝送系を含む電流指令系統になんらかの一時的不具合が生じ、DSPは電流を流す指令を送っているにも関わらず、最終的に電源出力部が受け取る電流指令値はゼロのままだったため電源出力電流もゼロの状態が続いた。その不具合が突然解消されたためその時点での電流指令値に向けて急激に出力電流が増加した。この場合、電流偏差異常が発生したのは電流が流れ始めた時点だと推定される。

5. 1. 2. E Q電源系の再発防止策

E Q電源系が誤作動を起こした直接的原因は現在の時点では特定できていないが、どの要因により異常が起こったとしても、今回のような急激な電流増加を回避する対策案を今回の基本方針とする。具体的な対策案は以下の通りである。

- (1) E Q電源の過電流設定レベルは現状では最大定格の 340 A に設定されていたため 159 A を越える電流が流れたが、金標的を使用する場合、最大設定電流を 120A まで下げる。さらに、電源の出力電流指令回路にも最大指令電流を 120 A に制限する装置を設け、仮に予期せぬ大きな電流指令値が制御系から入力した場合でも、出力電流をこの制限値以下に抑える。これらのことにより瞬時に取り出されるビーム量が抑制される。
- (2) 現状ではE Q電源内部で電流偏差異常が起こったときは参考情報（軽故障）が出力されるだけであったが、今後は電流偏差異常で電源を停止し警報を出力する対策を行う。また、現在は定格電流の 5 %に設定されている電流偏差異常を検出する設定値を見直す。さらに、DSP からの指令値（図 5-1 の「アナログ出力」）とE Q電源の出力電流値とを比較し、偏差異常が検知された場合は電源を停止する。
- (3) 今回の調査によると異常検出から出力停止動作までに最短でも約 5.5 ミリ秒間を要していた。そこでハードウェアの見直しを行い停止動作までの時間を 1 ミリ秒に短縮させる。これにより異常発生時のE Q電源の電流増加量を大幅に抑制することができる。

これらの対策を実行することにより、今回の誤作動と同様の事象が発生した場合においても多重の防護となり、標的損傷を引き起こすリスクを十分に低減できると考える。

5. 1. 3. ハドロン実験施設に短パルスビームが取り出されるリスクに対する安全対策

遅い取り出しにおいて、機器の不具合等により短時間でビームが取り出される可能性を無くすることは困難であり、過去の記録を調べると 5 0 G e VシンクロトロンやKEK-P S（KEKつくばキャンパスで 1976 年から 2005 年にかけて稼働していた陽子シンクロトロン）においても、通常よりも短時間でビームが取り出される事象が発生していることがわかった。ただし、いずれの場合もビーム強度が低いために標的の損傷にはつながらなかった。以下では、前節に述べた遅い取り出し用電磁石電源の誤作動以外の理由によって短パルスビームが取り出される潜在的なリスクと、それを回避するために実施する安全策を示す。

(1) 速い取り出し蹴り出し用電磁石の誤作動

通常 5 0 G e Vシンクロトロンの遅い取り出しでは、約 2 秒間の時間をかけてゆっくりとビームが取り出される。しかし、100 %のビームを取り出すことはできず、一部が取り出されずにリングに残る。リングに残ったビームが 5 0 G e Vシンクロトロンの内部で失われると機器を放射化する可能性があるため、これらのビームは、リング内のビームを蹴り出し用電磁石で一度に排出する方法（このようなビームの取り出しは、速い取り出し法とよばれる）

によってアボートダンプ（50 GeVシンクロトロンの特ネル内に設けられたビームダンプ）に捨てられる。速い取り出しには5台の蹴り出し用電磁石を用いるが、もし5台のうちの1台が誤作動して本来のタイミングではない時刻に動作すると、そのままハドロン実験施設に取り出される可能性がある。最悪の場合、5マイクロ秒の短パルス大強度ビームがハドロン実験ホールの特的に輸送されることも起こり得る。蹴り出し用電磁石は6秒の運転周期ごとに充放電されるが、充電完了のタイミングを現行の「遅い取り出し開始前」から「遅い取り出し終了直前」に変更する。この変更により、蹴り出し用電磁石の誤作動が生じた場合でも誤ってビームがハドロン実験ホールに取り出されるリスクを低減することができる。

（2）発散用四極電磁石の非常停止

遅い取り出しの過程で何らかの理由で発散用電磁石が緊急停止すると、EQ電磁石の誤作動と同様にベータトロン振動が急速に共鳴条件に近づき、大強度の陽子ビームが短時間で取り出される可能性がある。実際、過去には1パルス当たり 1.6×10^{12} 個の陽子が約2ミリ秒の間に取り出されてハドロン実験ホールの特的に輸送されていた事例がある。このときはビーム強度が低いため特的損傷には至っていないが、大強度ビームで同様なことが生じると特的の破損につながる可能性がある。そこで、発散用四極電磁石の電源で非常停止が発生した場合は停止信号を検知して、それに合わせて収束用四極電磁石の電源も同時に緊急停止させることとする。それによって遅い取り出しを停止して、短パルスビームがハドロン実験施設に取り出されることを防ぐことができる。

（3）ビーム調整時

遅い取り出しにおいてビーム強度を増強していくためには、ビーム強度の段階に応じて加速器の調整を重ねながら、その都度、連続運転が可能な設定を確立していく必要がある。設定が最適化されていない調整中の過程においては、短パルスのビームが取り出される可能性をゼロにはできない。また調整中には人の操作を介してビーム制御を行う場合もあるため、慎重を期したとしても人的ミスが発生する余地は残る。実際、加速器の調整中に遅い取り出し用電磁石電源の制御値の設定ミスにより1パルス当たり 1×10^{13} 個の短パルスビームが取り出され、ハドロン実験ホールの特的まで到達した事例がある。このときはターゲットの損傷は確認されていないが、今後のビーム強度の増強に伴い、加速器調整の際に大強度ビームが短時間に取り出されるリスクは増大することが予想される。対策として、加速器調整の際には、ハドロン実験ホール内の特的部分のビーム軌道を変える、または特的に駆動機構を設けてビームを避ける位置に特的を移動するなどして、ビームを特的には当てずに直接ビームダンプに導くこととする。

5. 2. ハドロン実験施設における放射性物質漏えいの再発防止策

ハドロン実験施設の管理区域の見直しを進めるとともに、施設や設備の改修を以下の方針に基づいて検討する。

- (1) ハドロン実験ホールの1次ビームライン室における放射性物質の閉じ込め
- (2) ハドロン実験ホール内の空気の排気の管理設備の導入

本節ではこの方針に基づき、また大強度ビームを扱う施設であることを踏まえて検討を行った。以下にハドロン実験施設における再発防止策を述べる。

5. 2. 1. 標的装置

標的が壊れた場合にも放射性物質を漏らさないことを第一とするが、万が一漏れが発生した場合でも事態の把握と拡大を防ぐ手段を備えることを旨とする。このため、以下の対策を行う(図5-4)。

① 標的容器の気密化

標的本体を取り囲む容器を気密構造とする。これは今回の事故の再発防止策のうち最も重要な対策である。標的容器を二重化することも検討する。

② ガス循環系とその監視装置の新設

これまではビーム強度が低かったため問題とはならなかったが、今後のビーム強度増加を考慮すると、標的容器の内部が通常の大気雰囲気では内部に窒素酸化物が発生し、標的及び周辺機器が腐食する恐れがある。このため、内部を不活性ガスで満たす。また、標的容器内ガスの循環系を新設し、ガス内の不純物を取り除くとともに、ガス内の放射性物質濃度を監視して標的の異常を検知できるようにする。ガスの圧力を常時監視して標的容器の異常を検知できるようにするとともに、緊急用ガスバッグを設け、事故時には切りかえてガスをそこに溜めることができるようにする。切りかえは手動とするが自動化もできるように検討する。

既存の冷却水循環系は、標的容器との接続部分で隙間が生じないように封止し、気密試験を実施する。

③ 標的の監視の強化

標的の温度測定の間隔を短くし、急速な温度上昇も検知できるようにする。また、発生する2次粒子の収量を監視して、標的の損傷による2次粒子数の減少、または異常な上昇を検知できるようにする。さらに、短時間にビームが取り出されたことがわかるビームモニタを設置する。

④ 標的の退避

加速器調整中などに標的にビームが照射されないようにするために、標的本体を駆動装置により移動させるか、もしくはビーム軌道を変更する。(5. 1. 3. (3) 参照)

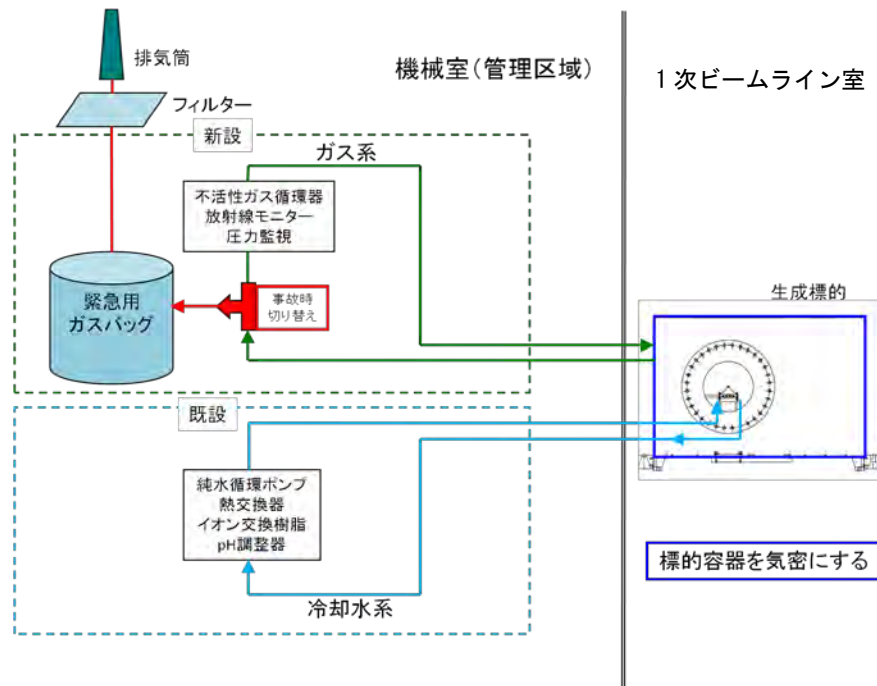


図 5-4：新標的システムの概念図

5. 2. 2. 1 次ビームライン室

1 次ビームライン室から実験ホールへの放射性物質の漏えいを阻止するために、次の対策をとる（図 5-5、5-6）。

① 1 次ビームライン天井遮へい体の気密強化

1 次ビームライン室天井部の遮へい体を全域にわたって二重に気密シートで覆う。各気密シートと既設のコンクリート構造体との境界部は、コーキング材等でそれぞれ隙間なく気密処置を施す。

② 2 次ビームライン開口部の気密強化（図 5-7）

2 次ビームライン開口部の空気隔壁を二重化する。各隔壁は、前項の天井部遮へい体の気密シート及び既設のコンクリート構造体との境界部において、コーキング材等でそれぞれ隙間なく気密処置を施す。

③ ケーブル貫通口の気密強化

貫通ケーブルの出入り口について、二重にコーキング材等で隙間なく封止し、気密試験を実施する。

④ 放射線監視の強化

1 次ビームライン室の空気の放射性物質濃度を監視するモニタを新設する。

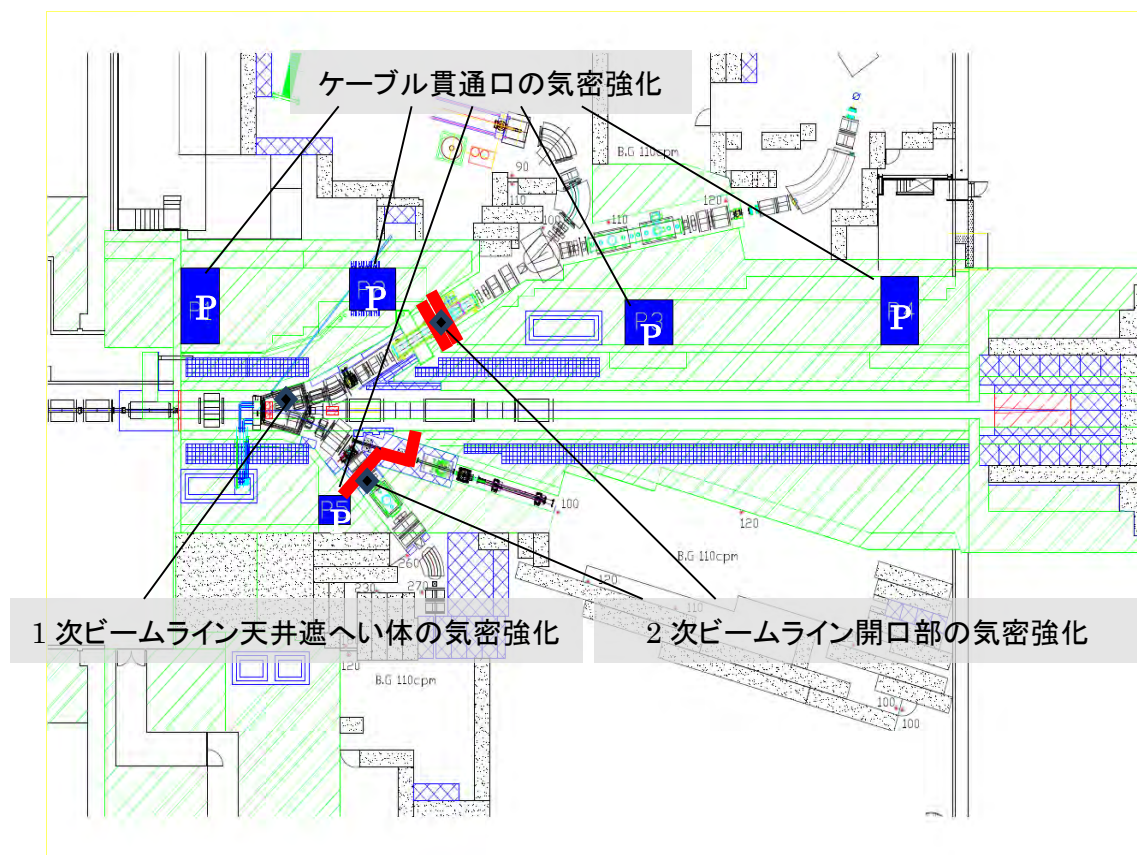


図5－5： 1次ビームライン室の気密強化の一例（平面図）

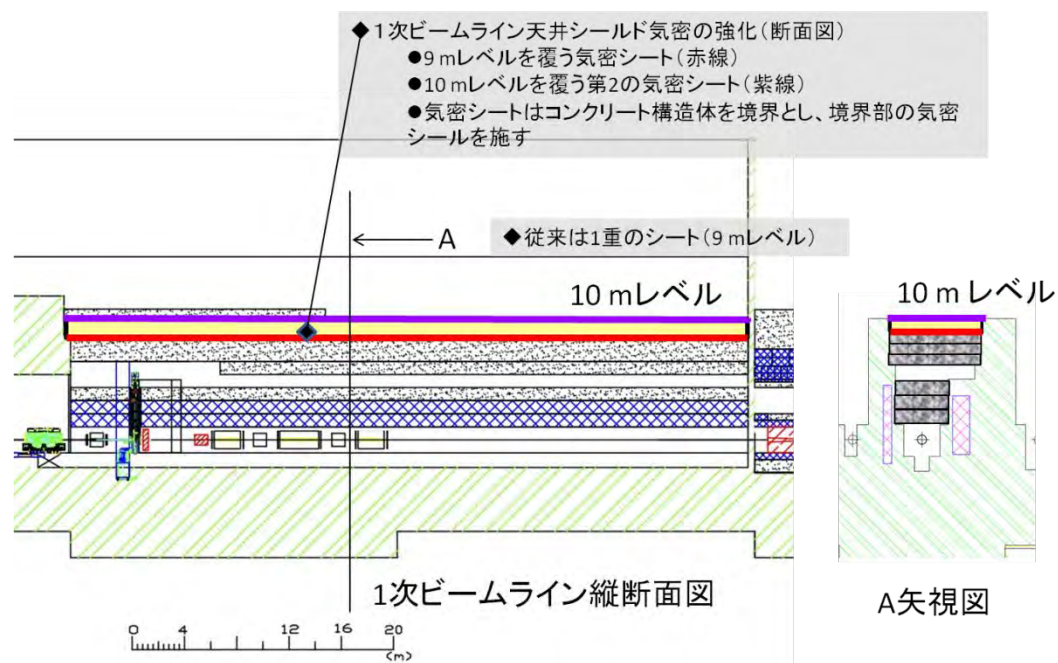


図5－6： 1次ビームライン室の気密強化の一例（断面図）

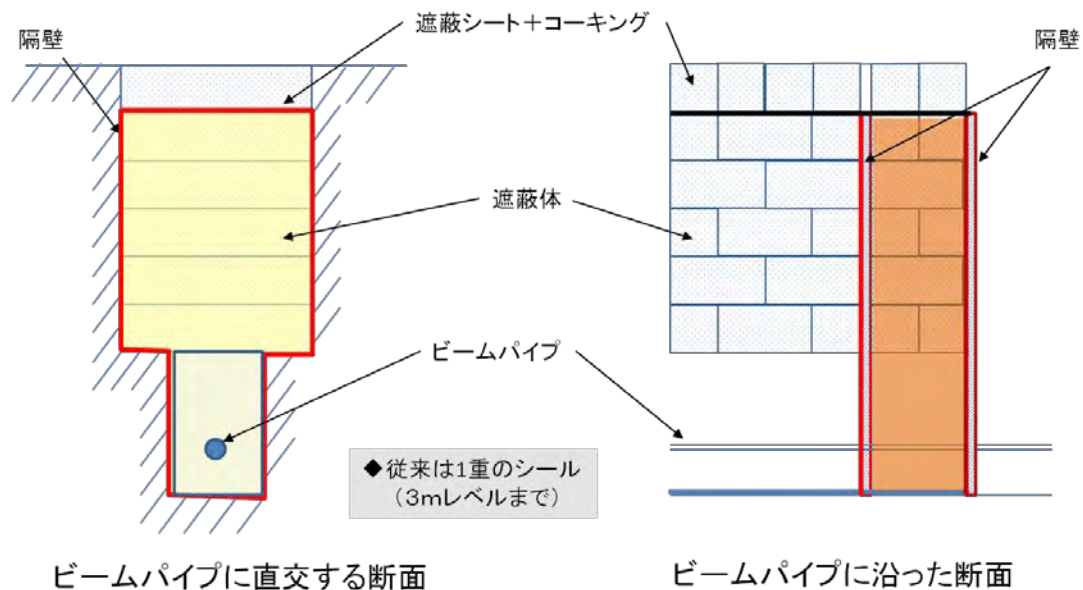


図 5-7： 2次ビームライン開口部の気密強化の一例（断面図）

5. 2. 3. ハドロン実験ホール

標的容器を気密化し、さらに1次ビームライン室を気密構造とすることで放射性物質の閉じ込めを図った上で、さらにハドロン実験施設管理区域外の一般区域への放射性物質の漏えいを阻止するために、次の対策をとる。下記の対策を施したハドロン実験ホールの改修案の一例を図5-8に示す。

① ハドロン実験ホール内空気の排気の管理

既設の排風ファンは全て封止する。

実験ホール内の空気の排気を、放射性物質の濃度を監視しながらフィルタを通して排気筒から行うための、排気管理設備を設ける。

② 実験ホール建屋の入出管理

作業等が実験ホールから外へ退出する際に汚染検査を行える設備を設ける。

③ 放射線監視の強化

ハドロン実験ホール内に放射線モニタを増設するとともに、ハドロン実験ホール内空気の放射性物質濃度を監視するモニタを新設し、放射性物質の閉じ込め監視を強化する。

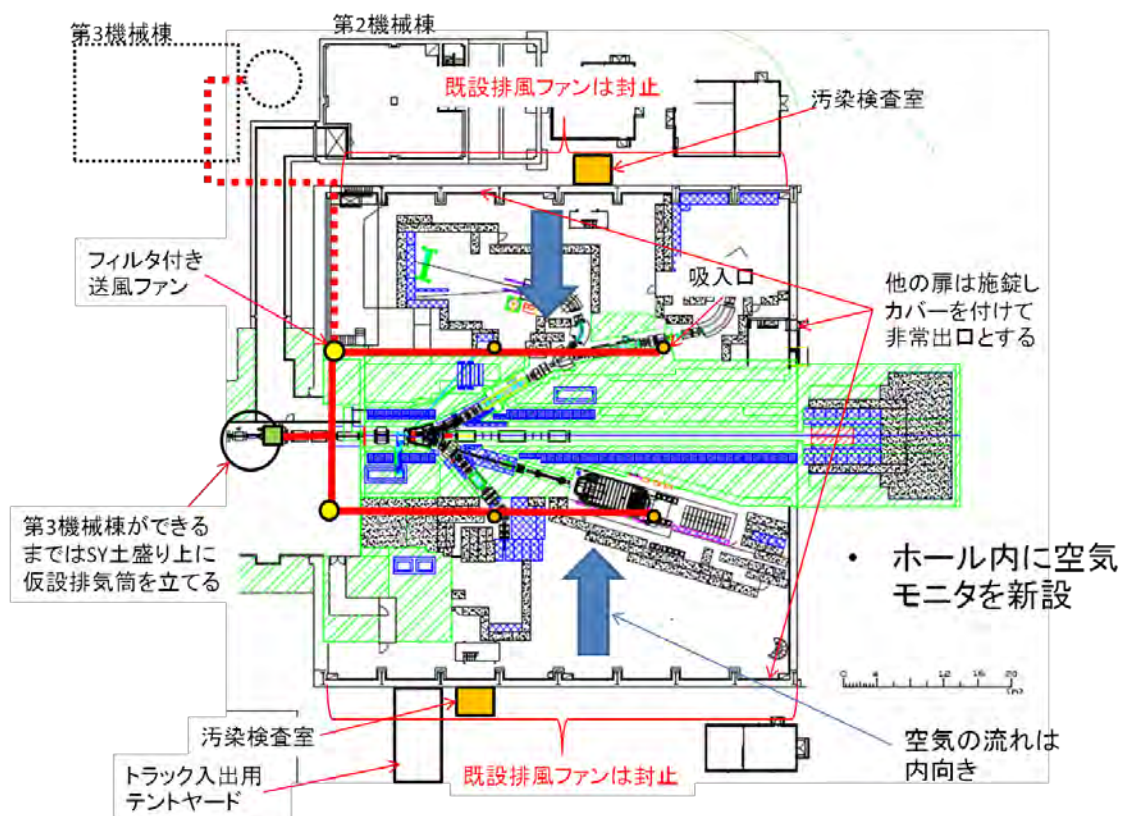


図5-8：ハドロン実験ホール改修の一例

5. 2. 4. 過酷事象への対応

図5-9に上記の再発防止策を施した後のハドロン実験ホールにおける過酷事象を示す。過酷事象とは、瞬間的に大強度の陽子ビームが標的に照射され、標的金属が融解・蒸発し、同時に標的容器とビームラインを仕切る真空膜が破れた場合である。標的容器の気密構造により1次ビームライン室への放射性物質の直接の漏えいは防げるが、1次ビームラインの真空ダクト内に放射性物質が漏えいする。しかし、標的が損傷したことを検知して真空ポンプの電磁弁を自動的に閉じることにより、1次ビームライン室への放射性物質の漏えいを最小限に食い止め、1次ビームライン室の気密構造により、ハドロン実験ホールへの漏えいを防ぐ。万が一複数の真空膜が破れる事態に至っても、放射性物質は1次ビームライン室内に閉じ込められる。

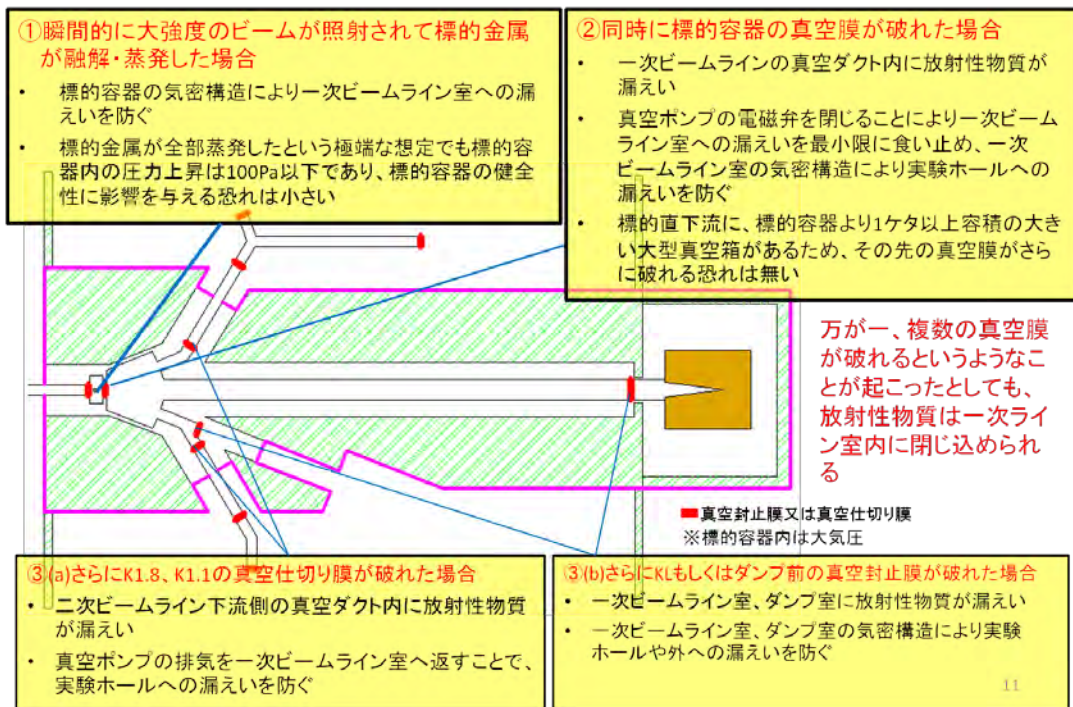


図 5 - 9 ハドロン実験施設における過酷事象

5. 3. 放射線情報の共有化

これまで、物質・生命科学実験施設（MLF）を除く各施設のシフト員が常駐する場所では放射線モニタの指示値が確認できなかった。初動対応に必要な放射線モニタ情報の共有化が不十分であり、今回の事故に際して初動対応の遅れの大きな要因となった。このような事態を繰り返さないために、図 5 - 10 に示すような、放射線モニタ値を共有化できる対策を施す。

- (1) 放射線モニタ情報と各施設の安全情報を同一の場所で確認できるよう、シフト員の常駐場所に放射線監視端末等の監視設備を整備する。
- (2) 放射線モニタの指示値上昇を早期に把握できる注意喚起警報を設定する。また、シフト員が放射線モニタ値のトレンドを確認できるようにする。

さらに中期的には、モニタの信頼性を高めるための努力を進める。具体的には、ハードウェア、ソフトウェア上での統合化を進めつつ、多重化、並列化などによって信頼度を高める。また、放射線モニタ値をネットワークで共有できるようにする（図 5 - 11 参照）。

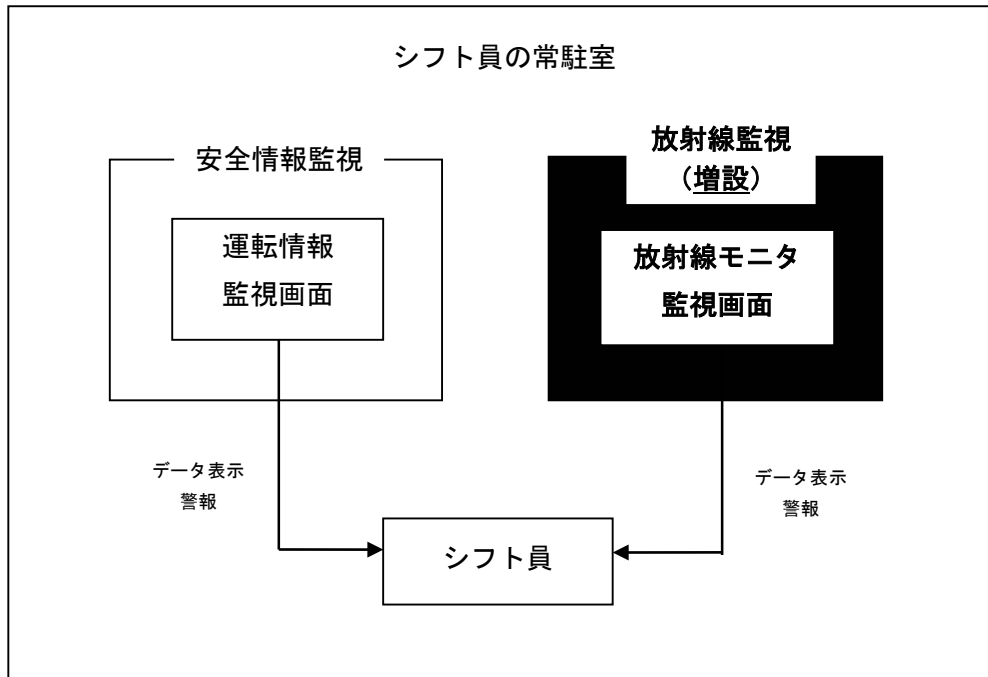


図 5 - 1 0 : 放射線モニタ値共有化のイメージ

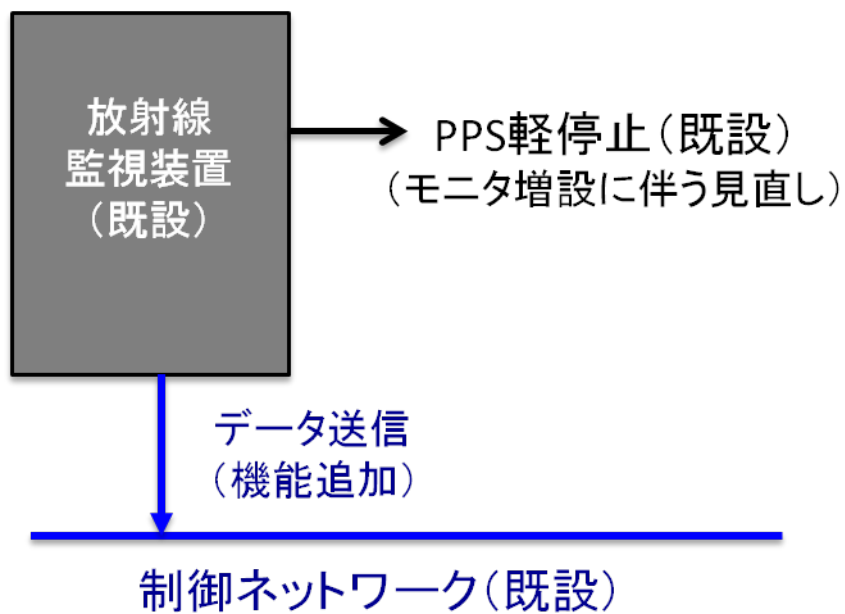


図 5 - 1 1 ネットワークによる放射線モニタ情報の共有化のイメージ

5. 4. 原因と再発防止策のまとめ

1 章及び 2 章に記載された事故の経緯と原因に対して、5 章で述べられた再発防止策を表 5－1 にまとめる。

表 5－1 原因と再発防止策の対応表

原因	再発防止策
異常なビーム取り出し	・ E Q の最大設定電流の見直し ・ 電流偏差異常の検出による電源停止 ・ 異常検出後の電源停止の高速化
標的の損傷	・ 標的の温度異常検知の高速化 ・ 調整中の標的退避、ビーム軌道の変更
1 次ビームライン室への漏えい	・ 標的容器の気密化 ・ 標的容器内のガス循環系の新設 ・ ガス中の放射性物質濃度や圧力の監視
ハドロン実験ホールへの漏えい	・ 1 次ビームライン室の気密強化 ・ 空気の放射能モニタを設置し、異常検知時にビーム停止
施設外への漏えい	・ 既設の排風ファンは封止 ・ ハドロン実験ホール内の排気は監視しながらフィルタを通して実施。
放射線モニタ情報の共有化不足	・ 放射線安全管理設備の一元管理

6. ハドロン以外の施設の健全性の検証

今回の事故の原因となったのは加速器の誤作動に加えてハドロン施設における放射性物質の閉じこめ性能が不十分であったことであり、本章では J-PARC 内他施設（加速器施設、物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設）について放射性物質の閉じこめ性能を検証する。また、加速器施設についてはインターロック発報時のビーム停止機構の信頼性について検証する。

6. 1. 加速器施設

加速器施設はリニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS)、50 GeV シンクロトロン (MR) から構成されている。加速器トンネルにおいては、ビームがビーム輸送機器等に衝突して発生する中性子が空気を放射化し、大量の放射性物質が発生する可能性がある。それらを外部に漏えいさせないように、すべての加速器トンネルは第 1 種管理区域として気密管理されている。また加速器トンネルと、第 2 種管理区域及び一般区域との間には中間排気システムが設けられている。中間排気部はその領域の排気を行うことによって外部に対する負圧を維持しており、その排気は加速器の運転中も放射性物質濃度を監視しながらフィルタを通して排気筒から行なっている。加速器自身は標的を持たないので高濃度で拡散性の放射性物質が発生することはない。万が一ビームの損失などによってトンネル内で放射性物質が発生したとしても、中間排気部を設けることにより加速器トンネル内で発生した放射性物質が外部に漏えいすることのない構造になっている。

6. 1. 1. リニアック

リニアックでは、イオン源で生成した負水素イオンビームを直線状に並べた 34 台の加速空洞にて 181 MeV のエネルギーに加速し、ビーム輸送系を経由して 3 GeV シンクロトロンに入射させる。リニアックの全体構造を図 6-1 に示す。

イオン源及び加速空洞は、地下 2 階の全長約 400 メートルの加速器トンネルに設置されている。加速空洞に大電力高周波を供給する高周波源は、1 階のクライストロンギャラリと呼ばれるエリアに設置されている。リニアック棟の断面図を図 6-2 に示す。リニアック棟は、地下 1 階及び 2 階、地上 1 階及び 2 階の 4 階構造となっている。地下 2 階の加速器トンネルは第 1 種管理区域に、地上 1 階及び 2 階（吹き抜け構造となっている）のクライストロンギャラリは第 2 種管理区域にそれぞれ設定されている。その間に設けている中間トンネルは、第 1 種管理区域に設定し、負圧管理している。そのため、万が一、加速器トンネル内で放射性物質が発生した場合や、気密管理に不具合が生じた場合であっても、加速器トンネル内の空気が地上の第 2 種管理区域に漏えいすることはない。

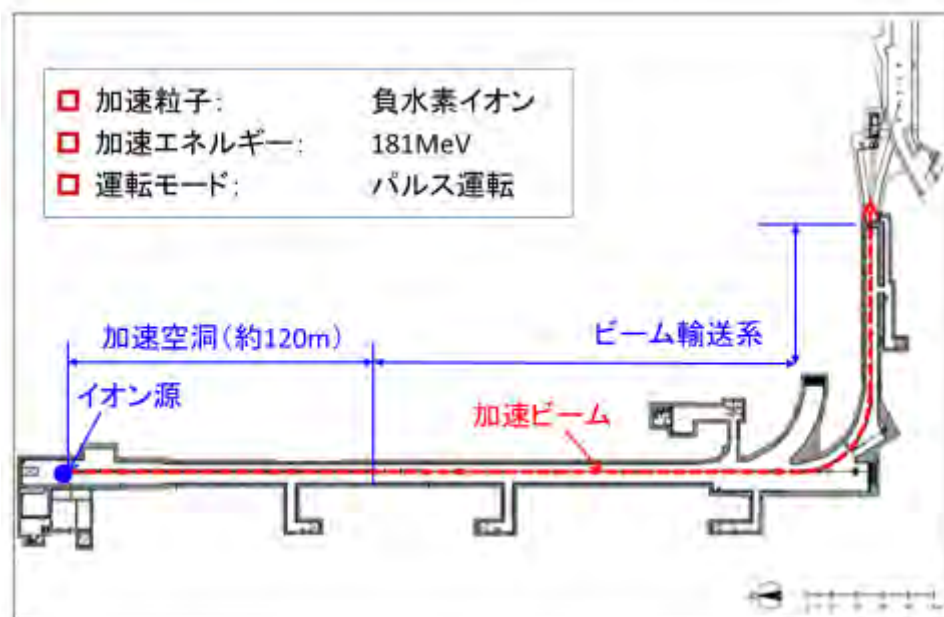


図 6-1 : J-PARC リニアック全体構造図

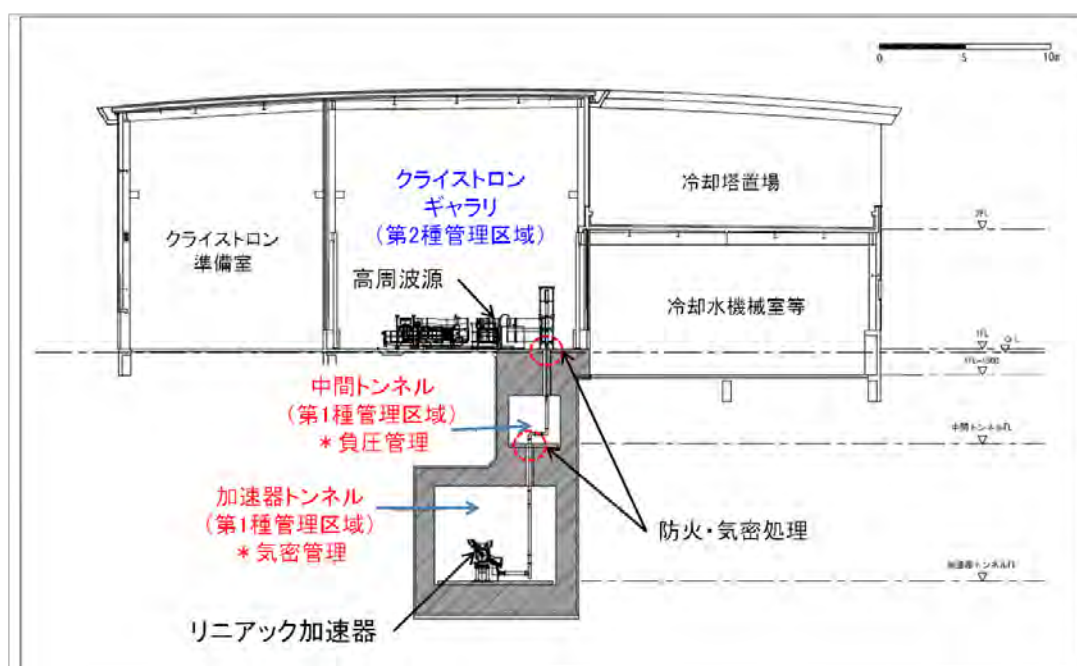


図 6-2 : リニアック棟断面図

6. 1. 2. 3 GeVシンクロトロン (RCS)

3 GeVシンクロトロン施設 (RCS) は、3 GeVシンクロトロン棟 (RCS 棟)、主トンネル、及びサブトンネルからなる。RCS 棟は地上 1 階、地下 2 階からなり、主トンネルは地下 2 階部分、サブトンネルは地下 3 階部分にある。加速器本体は主トンネルに設置され、RCS 棟

と主トンネルは気密扉で仕切られている。図6-3にRCS施設の断面図を示す。図中の赤字は第1種管理区域を、青字は第2種管理区域を示す。主トンネル、サブトンネル、及びRCS棟地下2階は第1種管理区域、地下1階は第2種管理区域、そして地上階は主に一般区域である（図6-4参照）。

図6-4に示すように、第1種管理区域は3系統（主トンネル系、サブトンネル系、ホット機械室系）の空調換気システムを有しており、三段階の負圧管理を実施している。また、放射線管理上はRCSに含まれる3-NBTトンネル及び3-NBT電源機械棟の管理区域もRCS同様の管理を行っている（図6-5参照）。これらの排気は放射能濃度を監視しながら、フィルタを通して排気筒から行なわれる。第1種管理区域の負圧管理状況を図6-6に示す。全系統で設定値通りの外部に対する負圧を維持しており、放射性物質が外部に漏えいすることはない。

ビーム運転中は、サブトンネル系とホット機械室系は連続排気による負圧管理をしており、その排気は放射性物質濃度を監視しながらフィルタを通して排気筒から行なわれる。主トンネル系は空気を閉じ込めた状態で循環運転を行っており、主トンネルで発生した放射性物質が外部に漏えいすることはない。またその排気は、ビーム運転終了後に放射線レベルの減衰を待って、放射性物質の濃度を監視しながらフィルタを通して排気筒から行う。

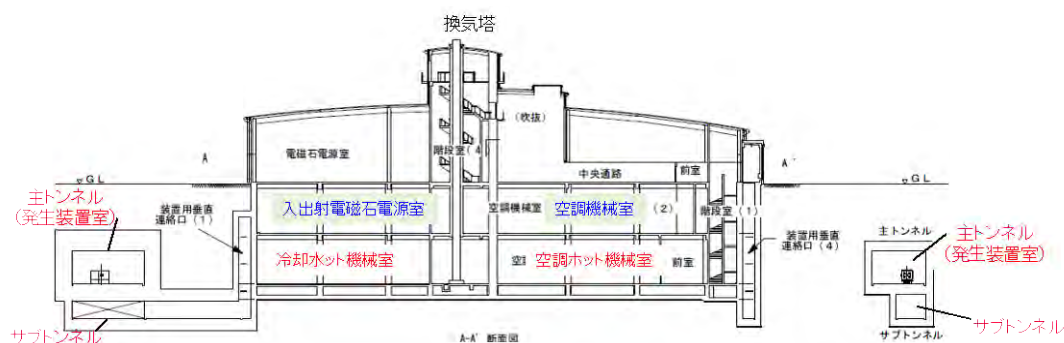


図6-3：3GeVシンクロトン施設の断面図。主トンネル、サブトンネル、ホット機械室は第1種管理区域で気密管理されている。電源室、空調機械室は第2種管理区域でありサブトンネル側が負圧管理されている。

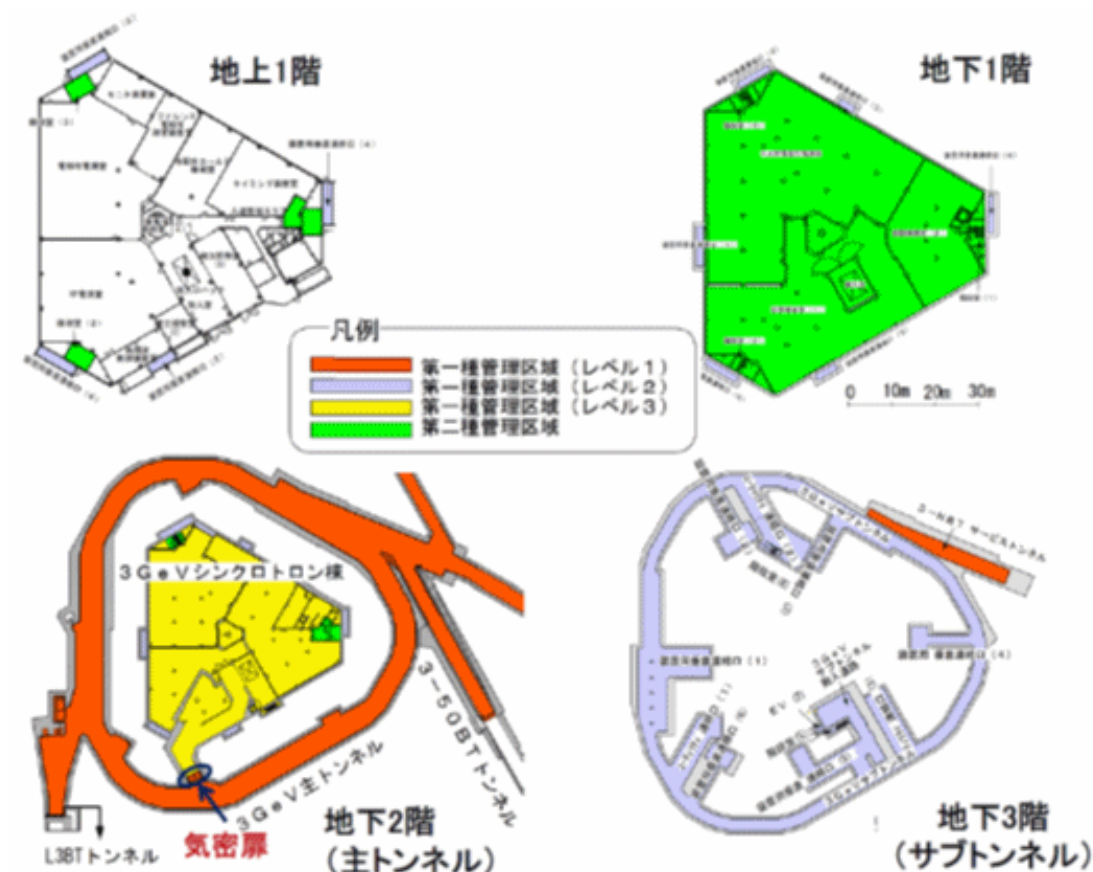


図6-4：3 GeVシンクロトン施設の管理区域区分。第1種管理区域は3系統の空調換気システムを有しており、三段階の負圧管理を行っている。

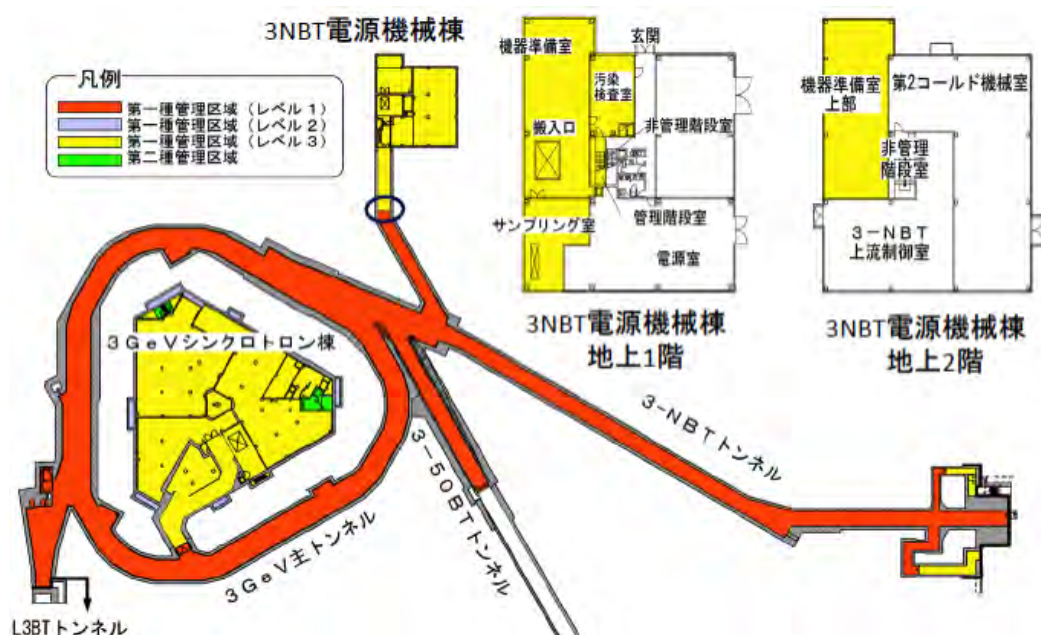


図6-5：3-NBTトンネル、及び3-NBT電源機械棟の管理区域区分。

建家 名称	各系統	項 目	機 器	負圧検知 場所	設定負圧 (Pa) 設定風量 (CMH)	日 付 時 刻	6月10日 21:00	6月11日 21:00	6月12日 21:00	6月13日 21:00	6月14日 21:00	6月15日 21:00	6月16日 21:00
3GeV 棟	サブトン ネル系	負圧	dPT-1401	サブ トンネル	-25		-26	-25	-26	-27	-25	-26	-25
		排気風量	FT-1501		4000 (3000)		2996	2996	2990	2990	2994	2994	2996
	主トンネ ル系	負圧	dPT-2401	主トンネル	-30		-29	-27	-31	-27	-30	-25	-33
		排気風量	FT-2501		12800		12760	12800	12770	12760	12750	12760	12790
	ホット機 械室系	負圧	dPT-2601	汚染検査 室	-20		-20	-18	-21	-19	-20	-20	-21
		負圧	dPT-2701	空調機外機 械室(2)	-20		-20	-18	-21	-19	-20	-21	-20
		排気風量	FT-2801		33300		33300	33320	33480	33440	33420	33160	33260

図 6-6 : 3 G e Vシンクロトロン施設の負圧管理記録

6. 1. 3. 5 0 G e Vシンクロトロン (MR)

図 6-7 と図 6-8 に 5 0 G e Vシンクロトロン施設の地下部と地上部を示す。地下部は、RCS からのビームを MR に輸送するビームラインが設置されている 3-5 0 B T トンネル、MR 本体が設置されている加速器トンネル、ハドロン実験施設にビームを輸送するビームラインが設置されているスイッチヤードトンネル、ニュートリノ生成ターゲットまでビームを輸送するビームラインが設置されているニュートリノ 1 次ビームライントンネル、及び各トンネルと付属建物との間を結ぶサブトンネル部から構成されている。加速器やビームラインが置かれたトンネルはすべて気密管理されている。

地上部は MR に付随した建物として、第 1、第 2 搬入棟（一般区域）、加速器及び 3-5 0 B T 用機器の電源やローカル制御室が置かれている第 1、第 2、第 3 電源棟（一般区域）、空調や冷却水系が置かれている第 1、第 2、第 3 機械棟（一部は第 1 種管理区域）、及び緊急時の避難口である第 1、第 2、第 3 脱出棟（第 2 種管理区域）がある。さらに、スイッチヤードトンネルに付随して、ハドロン搬入棟（第 1 種及び第 2 種管理区域）、ハドロン電源棟（ハドロン電源棟制御室を除く。第 2 種管理区域）、ハドロン第 1 機械棟（第 1 種管理区域）がある。また、ニュートリノ 1 次ビームラインに付随して、ニュートリノ入域管理棟（一部は第 1 種管理区域）、第 1、第 2 設備棟（一部は第 1 種及び第 2 種管理区域）、ニュートリノ搬入口（一部は第 1 種管理区域）がある。これらの建物は加速器トンネルやビームライントンネルとサブトンネルで接続されているが、トンネルと第 2 種管理区域または一般区域との間に中間排気部を設けることで放射性物質の漏えいを防いでいる。ニュートリノサブトンネル B とサブトンネル D E には中間排気部が無いが、サブトンネル B は一般区域との境界をコンクリートブロックで封じ切り、ブロックの継ぎ目とケーブル貫通部をコーキング処理することで、またサブトンネル D E は対抗するサブトンネル D M が機械室への吸気ダクトになっていることにより、外部への漏えいを防いでいる。図 6-9 に MR に付随した 4 種類の建物における中間排気部を示す。

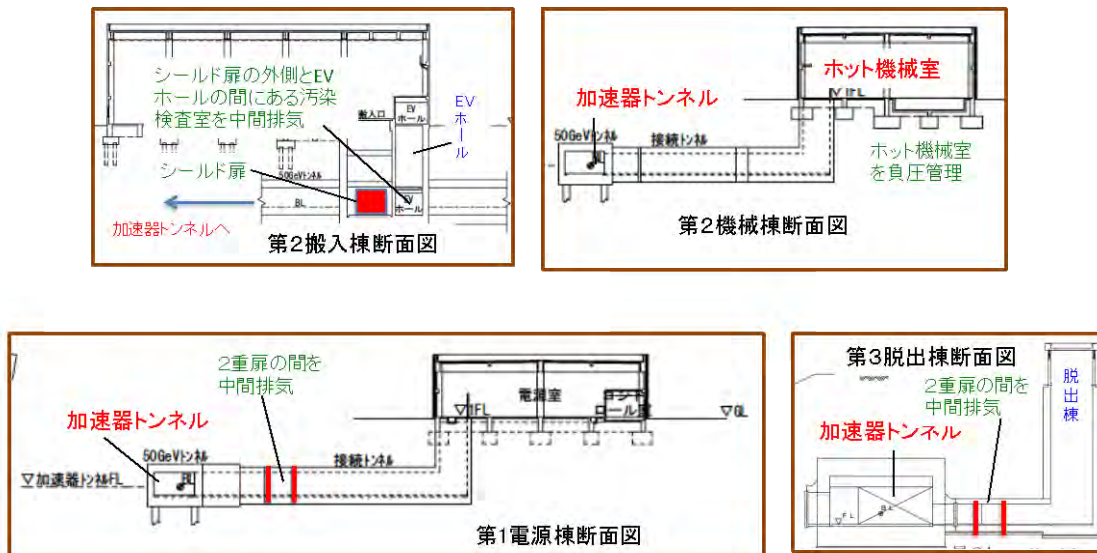


図6-9：50 GeVシンクロトロントンネルに付随した4種類の建物の負圧管理/中間排気区域。

6. 1. 4. ビーム停止機構の信頼性向上

実験施設とは異なり加速器施設では標的を有していないが、電源の故障により真空容器にビームが衝突することは想定できる。その際には、以下のプロセスによりビームは停止する。

- ①電源の故障を示すインターロック（MPS）が発報し、ビームが自動停止する。
- ②万一、電源故障のMPSが故障により機能しなかった場合には、ビームが真空容器に当たることによりビームロスモニタのMPSが発報し、ビームが自動停止する。
- ③万一、ビームロスモニタのMPSも故障により機能しなかった場合には、ビームロスに伴ってトンネル内空気の「放射化レベル高」を示す警報が発報し、シフトリーダーや運転員が手動でビームを停止する。
- ④万一、トンネル内空気のモニタも故障して警報を出さなかった場合には、真空容器が損傷し、真空悪化のMPSによりビームが自動停止する。

以上のように、多重の独立したビーム停止インターロックをくぐり抜けてビームを異常な軌道に打ち続けることは考えにくい。上記のプロセスのうち、①、②、④はMPSによるビーム自動停止であり、その信号はリニアックの上流の回路（ロジックコントローラ）に集約され、三重のビーム停止操作（加速空洞の電圧を停止、イオン源のビーム引出を停止、イオン源下流側にビームストッパーを挿入）が、それぞれの必要性、緊急性に応じて自動的に行われる（図6-10参照。青線部分が現在の構成）。その際に、ロジックコントローラはFPGA（Field-Programmable Gate Array）で構成されており信頼性も高く、フェールセーフとなる（故障時にはビームを止める）ように設計されているので、それが故障してビームが停止できないということは考えにくい。ロジックコントローラ部は多重化されていないため、万一の場合にはビームが止まらない可能性も否定できない。

そこで、このビーム停止機構の脆弱性に対する対策として、単純な回路構成により、既設とは独立した系統で物理的にビームを止める操作（ビームストッパー挿入）を加える改良を施す。この改良により、ビームの自動停止機構の信頼性の向上を図る。

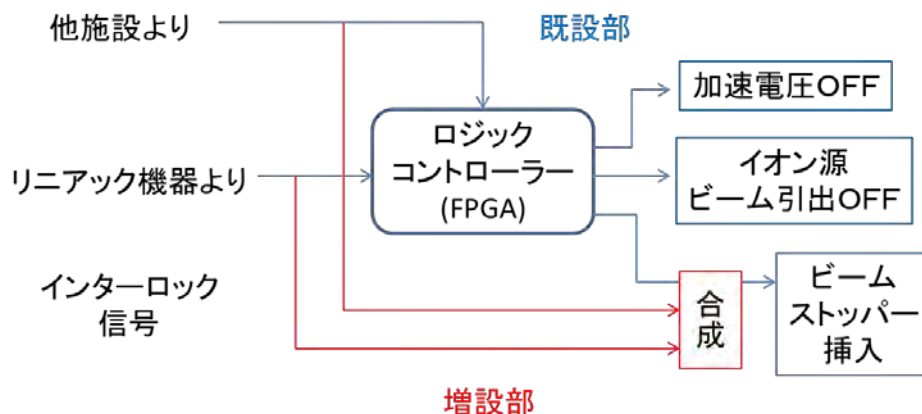


図6-10：MPS発報時のリニアック上流部におけるビーム停止機構

6. 2. 物質・生命科学実験施設

6. 2. 1. 管理区域

物質・生命科学実験施設(MLF)には中性子生成標的（中性子ターゲット）とミュオン生成標的（ミュオンターゲット）を配置し、その両翼に、標的で生成される中性子及びミュオンを用いて実験を行うエリアを配置している。これらは構造的に区画されている。（図6-11参照）

MLFでは、陽子ビーム輸送ライン、ミュオンターゲット及び中性子ターゲットを含む「放射線発生装置室」と、放射化した機器を扱う設備、1次冷却水を扱う設備、放射性ガス等を含む空気の管理排気設備を設置しているエリアを第1種管理区域としている。ミュオン及び中性子を引出して実験を行う2次ビームラインを設置した「第1・第2実験ホール」を第2種管理区域としている。（図6-12左図参照）

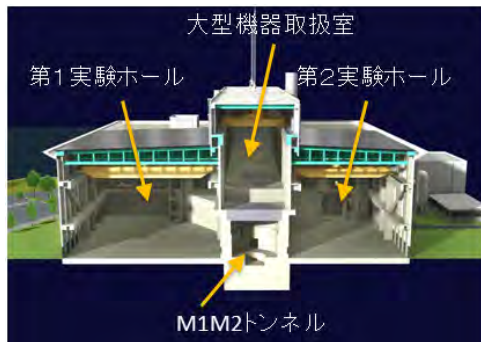


図 6-1 1 : 物質・生命科学実験室の断面

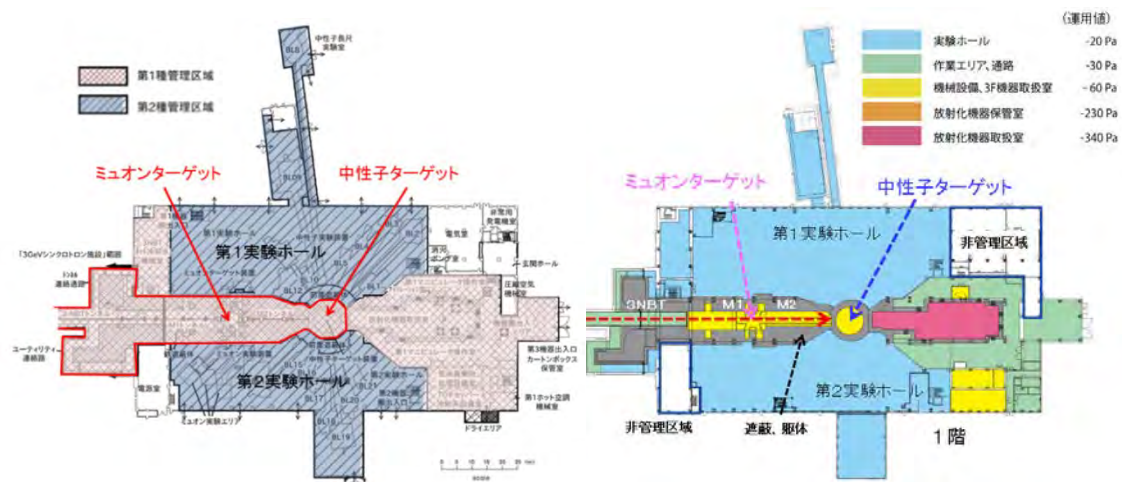


図 6-1 2 : 物質・生命科学実験施設の管理区域区分（左）と負圧区分（右）

第1種管理区域のうち、上述の「放射線発生装置室」は、他のエリアに対して空氣的に隔絶しており、その空調は、ビーム運転中には排気を行わずに閉じ込め循環としている。他の第1種管理区域及び第2種管理区域はいずれも負圧管理している。特に放射化機器取扱室の負圧度を最も高くするとともに、周辺の負圧度を段階的に弱くして汚染の拡大を防ぐ設計となっている。（図 6-1 2 右図参照）

管理区域からの排気は放射性物質の濃度を監視しながら、排気設備のフィルタを通し MLF の排気筒から行なっている。これにより、第1種管理区域から第2種管理区域への漏えいが生じないことを担保している。負圧管理を行っているエリアで負圧に異常が発生した場合は、負圧制御を監視している中央監視室から加速器運転シフトリーダーへ通報し、ビーム運転を停止する措置を講じることとしている。さらに停電時など負圧が維持できなくなった場合は、給排気設備が停止し、給気側の自動ダンパ及び排気側の自動ダンパがともに「閉」となることで封じ込めを行う。

6. 2. 2. 放射性物質の漏えい防御システム

a) 中性子ターゲット

中性子ターゲットには大強度のビームの熱負荷に対応するため水銀を用いている。水銀は容器（SUS316L 製）に内包し、この中を流動させる。水源ターゲット中にはビームによって生成した大量の放射性物質が存在しており、厳重に閉じこめる必要がある。さらに、この容器が放射線損傷等によって破損しうることを想定し、容器は図 6-1 3 に示す気密の多重防護構造を有する。即ち、水銀を内包する「水銀容器」の外側を「保護容器」で覆っている。保護容器はその中に冷却水路を有するため、水銀に対しては三層の多重構造となっており、水銀容器が破損しても水銀ターゲット容器外へ放射性物質が流出することを防いでいる。水銀容器と保護容器の間はヘリウムを密閉できる構造とし、この層の放射性物質濃度を監視するシステムを設けている。水銀容器に破損が生じた場合には放射性物質濃度の変化を検知し、インターロックを作動させて漏えいが拡大する前にビーム運転を停止する。さらに、このヘリウム層には、電極の短絡によって水銀の流出を検出する水銀漏えい検知器も設置している。容器の温度や陽子ビームの入射を受けたときの容器の振動速度も計測しており、容器の状態は多重の検出器によって監視している。

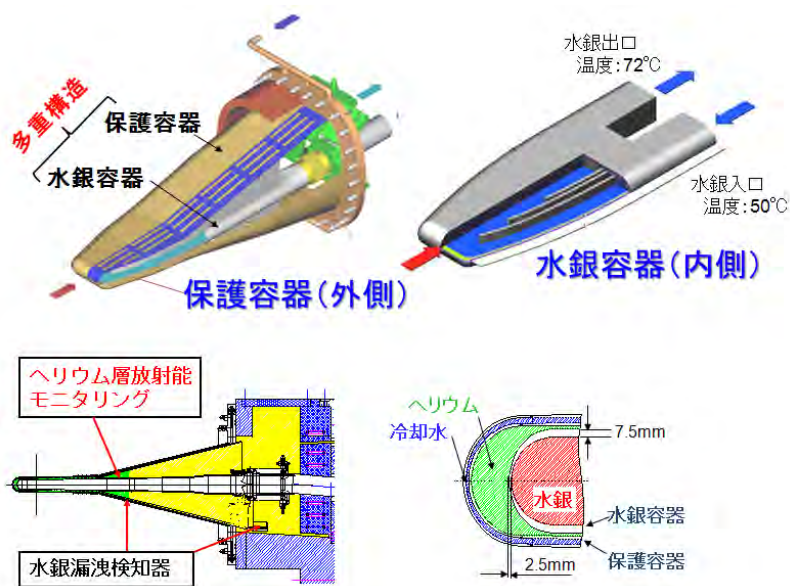


図 6-1 3：水銀ターゲット容器の概要

図 6-1 4 に中性子ターゲット装置の概要図を示す。運転時、中性子ターゲットは容器構造のヘリウムベッセル（SUS316L 製）に装着し、ビームを入射させる。ヘリウムベッセルでは陽子ビーム窓を介して上流の高真空ビームダクトと空氣的に隔離し、ターゲット容器のメタルシールで外側雰囲気と区画をなす。万が一水銀の保護容器まで破損して水銀がその外に流失することがあっても、ベッセルの外部には漏れない構造になっている。さらに、ヘリウムベッセルは周囲の遮へい体とともにアウターライナーと呼ばれる円筒形の容器（炭素鋼製）

の中に設置される。アウターライナーは上部の遮へい体部で外部とシールを取る構造であり、大型機器取扱室であるターゲットステーション上部（図6-11参照）も、第1種管理区域として管理されている。このように中性子ターゲット外側にも多重の防護構造を有しており、中性子ターゲットが破損しても、放射性物質が第2種管理区域である実験ホールまで漏えいすることはない。

水銀の循環設備は台車の後方に搭載され、放射化機器取扱室に位置する。放射化機器取扱室には放射性物質濃度を監視するシステムを設置して、いち早く漏えいの兆候を検知できるようにしている。台車上には水銀漏えい検知器を設置しているほか、液受けやドレンタンクを設け、万が一漏えいが生じた場合でもその拡大を防ぐ手段を講じている。

水銀の循環状態については、ポンプの入口と出口での圧力、水銀の流量、水銀タンクの水銀温度等を監視し、異常が生じた場合はインターロックを作動させてビーム運転を停止する。水銀ターゲットの運転監視では、インターロックが作動する基準値より厳しい条件の値を設定し、この値が検知されると「注意報」を発報させ、事象をできるだけ早期に捉える手段も講じている。

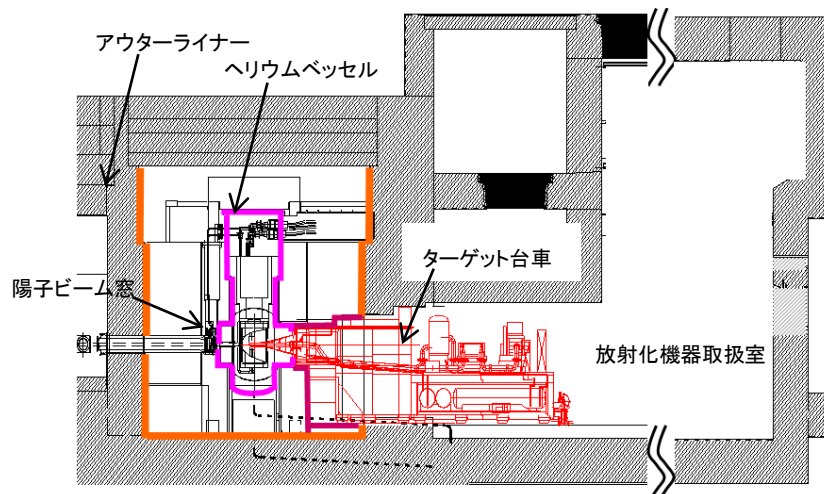


図6-14：中性子ターゲット装置概要図

b) ミュオンターゲット

ミュオンターゲット（標的）の概要を図6-15に示す。ミュオン標的は2センチメートル厚の黒鉛で、中性子ターゲットの上流約30メートルの位置に設置されている。ミュオン標的には大量の放射性物質が蓄積されているため、ミュオン標的は密閉容器に内包されている。この容器からミュオンビームを実験ホール側に引き出すミュオンビームダクトは、仕切り膜により実験ホールと空氣的に隔絶されている。そのため、万一ミュオン標的が黒鉛の気化などによって破損しても、放射性物質が第2種管理区域である実験ホールまで漏えいすることはない。ビームラインの真空度が劣化した時には緊急遮断弁が動作し、各々のラインの真空を分断するとともに、インターロックによりビーム運転を即時停止する。

ミュオン標的には、多数の標的温度計測システム、標的冷却水流量計及び標的位置モニタが取り付けられている。標的温度、冷却水の停止または流量の減少、標的位置の異常があれば検知し、インターロックによりビームを停止する。

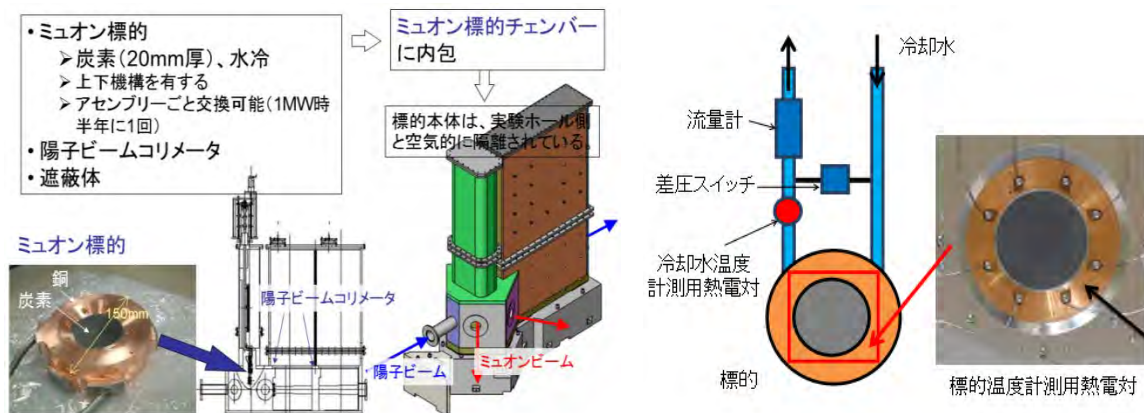


図 6-1 5 : ミュオン標的の概要

標的チェンバ、陽子ビームライン、及びミュオンビームライン先頭部は M1、M2 トンネル部（ミュオンターゲット前後の陽子ビームライン用トンネル）に設置される。これらのトンネルとその上部の大型機器取扱室（第 1 種管理区域）とは遮へいブロック上部で目地を気密処理している。また、実験ホール（第 2 種管理区域）との間にはゴムパッキンで気密を担保する構造の気密板を取り付け、空氣的に隔絶する。運転中はトンネル内から外部に通じるダクトのダンパを閉じ、空調は循環運転とする。（図 6-1 6 参照）

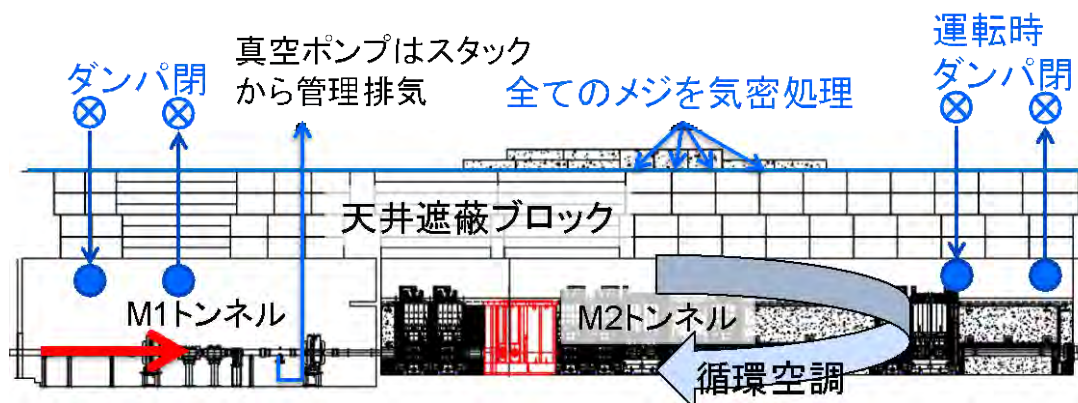


図 6-1 6 : M1、M2 トンネル部の気密確保の概念図

6. 2. 3. 陽子ビームの輸送ライン

陽子ビームをミュオン標的や中性子ターゲットに輸送する 3 GeV 陽子ビーム輸送ラインには、多数のビーム強度モニタとビーム形状診断装置、ビームロスモニタを設置している。何らかの原因で電流密度が上昇した場合、これらの診断装置で検知し、次の陽子パルスビー

ムが来るまでの 40 ミリ秒以内にビームを停止することができる。電流密度が通常の 2 倍程度となる場合を異常と判断することとしている。このとき、異常を起こしたビームパルス 1 発がターゲットに入射することは想定しているが、水銀容器及び外側の保護容器における温度、応力が増加しても、許容値を超えないと評価しており、容器の健全性は保たれると考えている。

6. 3. ニュートリノ実験施設

6. 3. 1. 管理区域

ニュートリノ実験施設では、陽子ビームを黒鉛の標的に照射し、発生する π 中間子が崩壊した際にミュオンとともにニュートリノが生成される。このニュートリノビームが 295 km 離れた岐阜県神岡町にある実験室に送られる。ビームが通過する地下部分はすべて第 1 種管理区域で、地上部分は、入域管理棟、ターゲットステーション棟、第 2 設備棟 (NU2) 機械室、第 3 設備棟 (NU3) が第 1 種管理区域である。その周辺地上部は第 2 種管理区域である (図 6-17)。地下部と地上部の間は気密シート等により気密構造となっている。ビーム運転中は地下の空調は循環運転となり、地上又は屋外に排出されることは無い。その地上部は図 6-18 に示すように連続排気により負圧管理されており、その排気は放射性物質濃度を監視しながら、フィルタを通して排気筒から行なっている。この概念は、ヘリウム容器終端部が地下にある第 3 設備棟 (NU3) においても同様である。

6. 3. 2. 放射性物質の漏えい防御システム

ニュートリノ生成標的や電磁ホーンなどの、機器自身が高度に放射化する 2 次粒子生成機器は、ターゲットステーション棟地下部のヘリウムガスを封入した気密鉄容器 (ヘリウム容器) 内にすべて密封されている (図 6-19、図 6-20)。また、第 3 設備棟地下にあるビームダンプも、同じヘリウム容器内に密封されている。標的とヘリウム容器はそれぞれ専用のヘリウム循環装置で冷却されているが、その循環系にはフィルタが設置されている。

ニュートリノ実験施設において想定しうる過酷事象は、高度に放射化した標的や電磁ホーンの破損やそれに伴う破砕片の飛散である。通常の運転においてはビームや冷却系の異常を検知するセンサーのインターロックによりビーム運転を停止し、標的の破損を防ぐ。万が一上記インターロックの異常などにより標的が破損ないし蒸発した場合は、 π 中間子が崩壊してできるミュオンをショット毎にモニタしているので、ミュオン生成量の変化から即座に標的の損傷を検知できる。また破損の形態によっては、冷却のためのヘリウムガスの流量、温度、圧損にも変化が現れる。これらの警報によりビーム運転を停止し、放射性物質を標的冷却系密閉容器内に閉じ込めることができる。仮に全ての標的監視システムが機能せず、標的冷却系密閉容器をも破損した場合や、電磁ホーンやビームダンプ等の機器が破損した場合でも、放射性物質はヘリウム容器内にとどまり、管理区域外への汚染の拡大は無い。

ターゲットステーション地下及び第3設備棟地下の空気の放射能濃度も測定しており、万が一ヘリウム容器が破損して放射性物質が地下に漏えいした場合は、空気中の放射能濃度の変化として検知することができる。この場合は直ちにビーム運転を停止し、ヘリウム容器の温度を下げてヘリウム圧力を下げることによりヘリウム容器から地下空間への放射性物質の漏えいを抑止するとともに、地上部の排気を停止して、管理区域外への漏えいを防止する。

6. 3. 3. 陽子ビームの輸送ライン

ニュートリノ実験施設では50 GeVシンクロトロンに蓄積された陽子ビームを全て一気に取り出すモードで運転しており、遅い取り出しのように設計よりも短時間に集中してビームが取り出される危険性は存在しない。

陽子ビームを標的に輸送する陽子ビーム輸送ラインには、多数のビーム強度モニタとビーム形状診断装置、ビームロスモニタを設置している。何らかの原因でビーム電流が上昇した場合、あるいはビームの大きさや軌道が変化した場合はこれらの診断装置で検知し、次の陽子パルスビームが来るまでにビームを停止することができる。このとき異常を起こしたビームパルス1発がターゲットに入射することは想定しているが、標的本体、標的容器及び電磁ホーンの温度、応力は許容値を超えないと計算されており、装置の健全性は保たれる。

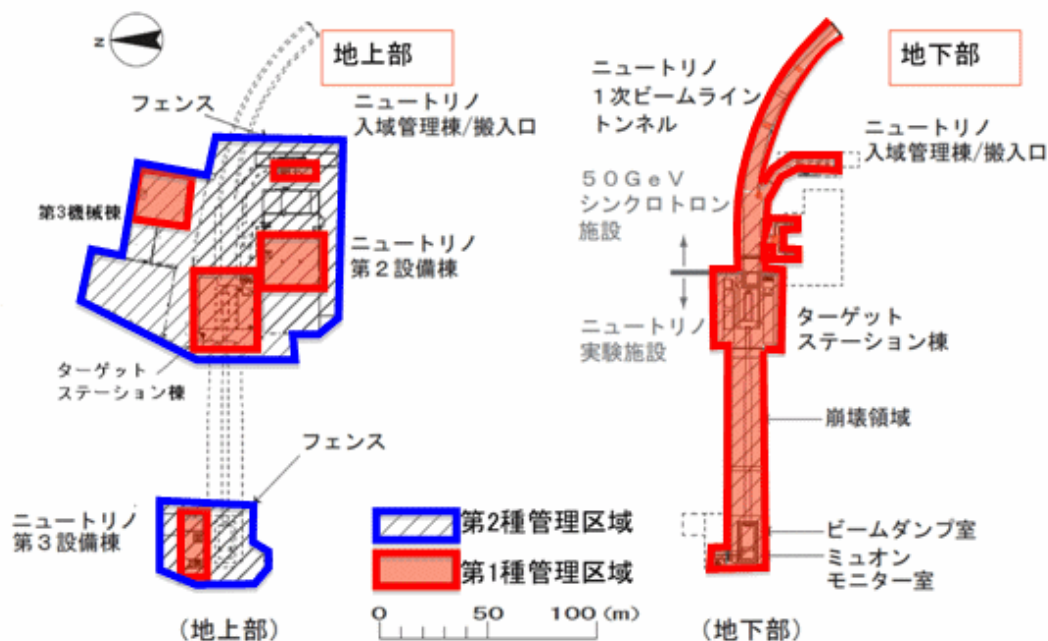


図6-17：ニュートリノ実験施設の管理区域

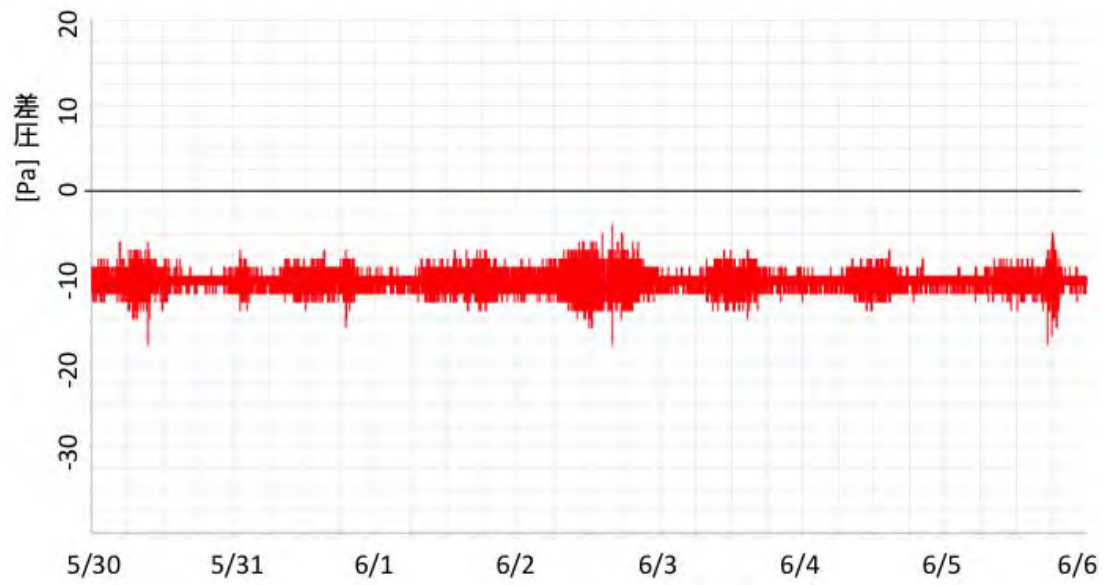


図 6-1 8 : ターゲットステーションの負圧管理

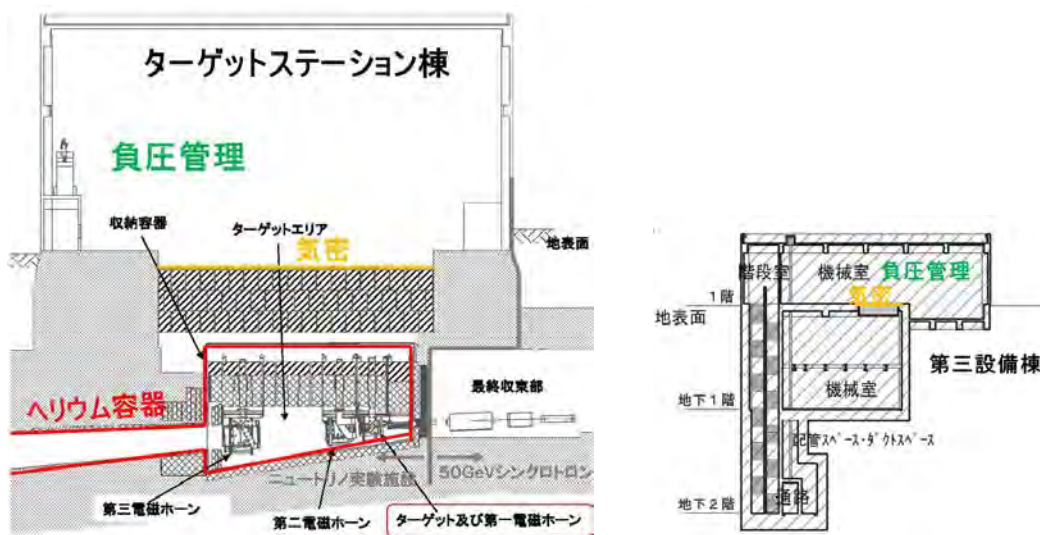


図 6-1 9 : ターゲットステーション棟 (左) と第 3 設備棟 (右) の建家縦断面図

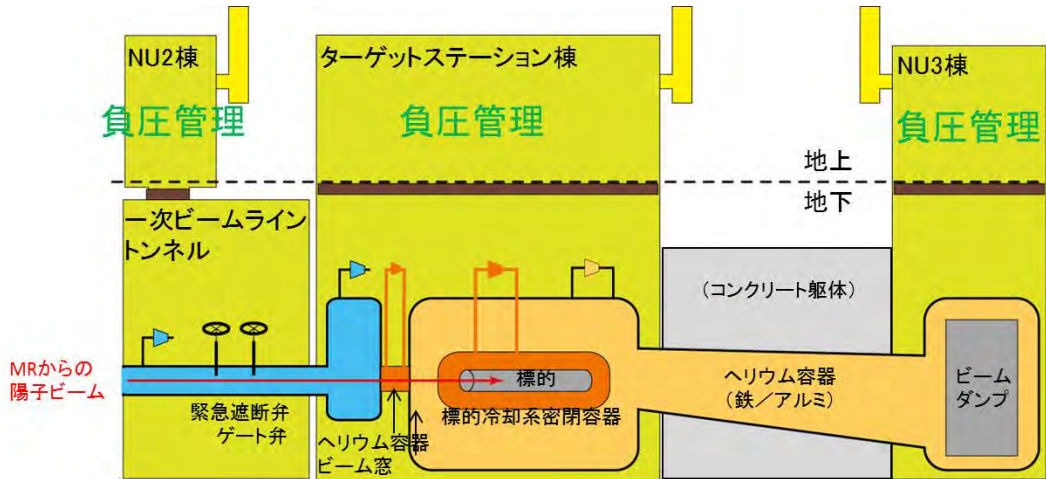


図 6-20：標的冷却系密閉容器とヘリウム容器による封じ込めと地下封止

6. 4. 火災及び停電時の対応

J-PARC加速器及び実験施設の1次ビームライントンネル内では、原則として高難燃性の電力ケーブルを使用することとされており、火災時にもケーブルが延焼することはない。電磁石、真空ダクト、真空ポンプなどのトンネルに設置されている機器は、ケーブル以外の装置の殆どは金属やセラミック等の不燃物や難燃物であり、火災発生時にも発火しない。

万一トンネル内で火災が発生した場合には、原則としてトンネル内には立ち入らず、窒息消火させる。

運転中に予定されていない停電が発生した場合には、直ちにビーム運転は停止する。加速器トンネル及び実験施設の1次ビームライントンネル空調、中間排気システム、負圧管理システムにおいては、停電時には負圧維持のためのポンプが停止するが、排気ダンパは電力の供給が断たれると自動的に閉鎖するようになっており、停電時には放射性物質は閉じ込められ、外部へ漏れない構造となっている。

6. 5 ハドロン実験施設の再発防止策と他施設の現状のまとめ

5章及び6章でハドロン実験施設の再発防止策と他施設の健全性の検証を述べたが、表6-1に対策後のハドロン実験施設及び他施設における事故リスク項目に対する対応をまとめる。

表6－1 各施設の事故リスク項目に対する対応。陽子ビームラインの第1種管理区域はビーム運転中、密閉されその中の空気はフィルタを通して循環している。運転後の排気は放射能の減衰の後、放射線レベルを監視しながら、フィルタを通して行う。

事故リスク項目	ハドロン実験施設 (対策前)	物質・生命科学 実験施設	ニュートリノ 実験施設	加速器施設
	(対策後)			
予期しない 短パルスビームの導入	考慮せず	加速器の最短パルスを利用して いるので今回の事故のような異常は生じない。	同左	常に運転時の最短パルスで動作。今回の事故のような異常は生じない。
	異常兆候、または異常が小さい状態でビーム停止			
標的損傷による第1種管理区域への放射性物質漏えい	標的容器は気密でない	標的は多重の密封容器に設置。	同左	標的はない。ビームは常に真空容器内に閉じ込められている。
	標的を気密容器内に設置し、損傷しても漏えいを容器内にとどめる。			
第1種管理区域から第2種管理区域への漏えい	放射化空気の閉じ込めのための気密性	第1種管理区域は負圧制御	同左	第1種管理区域と第2種管理区域への間に中間領域を設け、そこを負圧で制御。
	第1種管理区域から実験ホールへの気密性を強化			
管理区域から管理区域外への漏えい	考慮せず	実験ホールは負圧管理。排気は監視しながらフィルタを通す。	実験ホールはない。第1種管理区域の機械室は同左。	実験ホールはない。第1種管理区域の機械室は同左。中間領域は負圧制御で担保。
	実験ホールの排気は監視しながらフィルタを通す。			

7. 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等の再確認

2. 2. 5項で示したように、従来の安全管理体制においては、異常に対応するための体制と放射線安全上の審査体制が不十分であった。この点について、有識者会議において以下の指摘がなされている。

- ・安全文化上の価値を共有すること。
- ・「想定外」を無くすこと。
- ・異常の兆候を見逃さないこと。
- ・多数のユーザが利用することを念頭に情報の収集と共有をすること。
- ・対応がルーチンワーク化しないようにすること。
- ・適切な運転再開手順を構築すること。
- ・ユーザも含めた適切な教育訓練を実施すること。

以上の指摘事項を網羅した形で課題の解決を図るため、異常対応体制の再構築と、放射線安全上の審査体制の見直しを行った。さらにこれらの対策を有効に機能させるための手段として、教育訓練と基準の定期的な見直し方法を策定した。以下それぞれについて詳述する。

7. 1. 異常に対応する体制の再構築

J-PARCにおいて最も重要なことは「放射性物質や放射線を外部に漏えいさせないこと」、「被ばくをさせないこと」及び「施設を健全に保ち研究を推進すること」である。新しい体制の使命はこれを実現することにある。

今回の事故対応においてもっとも大きな問題は、様々な兆候や情報を得ながら情報共有がなされず、適切な判断ができずに、放射性物質の施設外への放出、被ばく、通報の遅れという事態を招いてしまったことである。こうした問題の再発を防止するためには、組織のあり方を再構築する必要がある。

従来の体制では、事故が発生した場合に発動される「非常体制」が規定されているのみであり、そこでは「発見者が事象を認識して事故と判断できるもの」もしくは「判断に迷う場合は責任者等が代わりに判断できるもの」と想定されている。この体制では「兆候」を認識し、今回のような時々刻々と変化する事象に対応することは困難である。従って、非常事態に至る前の「兆候」を的確にとらえる体制を構築しなければならない。また、J-PARCの特徴である「複数の施設で構成されている多目的施設」では、各施設間及び放射線管理部門との情報の共有が重要である。さらに、J-PARCは「多数の実験ユーザが来訪して利用する施設」であるので、情報は施設側だけでなくユーザとも共有する必要がある。これらの課題を抜本的に解決する手段として、以下に示す体制を構築する。

「基本体制」「注意体制」「非常体制」の3段階を設定する。通常の「基本体制」に加えて、異常の兆候に対応するために「注意体制」を新たに設定する。また、これらの体制に応じて、指揮、情報収集、連絡等の役割を明確化する。さらに、どの体制においても各施設と

放射線管理部門が情報を共有する。

また、機器の異常を検知する MPS を、原因調査、誘発事象の確認、復帰方法等がマニュアル化され、運転員等で対応できるもの（低リスク MPS と定義）と、施設管理責任者を中心とした組織的な対応が必要となるもの（高リスク MPS と定義）に分類する。

一方で、「基本体制」、「注意体制」であっても、「事故」に発展する可能性を常に考慮しながら情報収集等の対応をすることが重要である。どの体制であっても、指揮者は「事故」に該当すると判断した場合には速やかに通報する。

実験施設のユーザに対しても、情報共有並びに避難に関して、当該体制の指揮者が指揮を執るものとする。

それぞれの体制での状況、シフトリーダー、初期対応、指揮者、指揮所、対応要員、対応内容、運転再開の判断を以下に示す。

表 7-1 異常に対応するための新体制

体制	要件	指揮者 【指揮所】 対応要員	対応内容	運転再開 の判断
基本体制	・低リスク MPS 等	・シフトリーダー 【各施設】 ・運転員、装置担当者	・MPS 復帰 ・誘発事象確認 ・他施設の異常の確認 ・放射線レベルの確認 ・注意体制/非常体制 移行時の連絡・通報	シフトリーダー
注意体制	・高リスク MPS 発報 ・PPS 発報 ・異常が複数の施設に及ぶ場合 ・放射線レベルの異常等組織的な対応が必要な場合	・施設管理責任者 【中央制御棟】 ・セクション、ディビジョンメンバ	・初期対応、ビーム停止 ・避難誘導 ・非常体制移行時の通報	施設管理責任者 (放射線取扱主任者の同意)
非常体制	・「事故」に該当する場合	・センター長 【現地対策本部】 ・事故対策チーム員 ・事故現場係員	・通報連絡、機器停止 ・現場対応 ・避難誘導	センター長

(1) 基本体制

状況：通常の運転状態であり、シフトリーダー、運転員等で対応可能な場合。

対応内容：低リスク MPS 発報時には、シフトリーダーの判断でリセットする。リセットできない場合には、機器の故障が疑われるので装置担当者に連絡し、支援を依頼する。

(以上は従来と同等であるが、安全対策として以下の手順を追加する。)

ビーム運転再開に際しては、当該事象でのビームの最終的な行き先の確認、隣接施設での異常の有無の確認等により、誘発事象の有無の確認を行う。さらに、放射線モニタの値が通常とは異なるレベルやトレンドを示していないことを確認する。誘発事象が無いと明確に判断でき、放射線モニタの値にも異常が

見られない場合には、シフトリーダーが運転再開の指示を出す。MPS 発報の原因が特定できない場合、誘発事象の発生が疑われる場合、もしくは放射線監視モニタの値に異常が見られた場合には、「注意体制」に移行する。

指揮者：シフトリーダー

指揮所：各施設

対応要員：運転員、装置担当者

運転再開の判断：シフトリーダー

(2) 注意体制

状況：高リスク MPS の発報や PPS の発報等の「セクション、あるいはディビジョンレベルでの組織的対応」が必要、あるいは「放射線事故を誘導する可能性がある」と判断された場合。

シフトリーダー初期対応：施設管理責任者、放射線管理責任者に連絡し、当該施設関係者を召集する。

指揮者：施設管理責任者

指揮所：中央制御棟

対応要員：関連施設関係者、放射線管理部門

対応内容：加速器を含む各施設、放射線モニタ、設備のそれぞれについて組織的に情報を収集し、状況の認識と事象の内容を明確化するとともに、ビームの停止や事故へ拡大することを未然に防止するための初期対応を行う。人命にかかわる事態が生じ又はそのおそれのある場合には避難誘導を行う。「事故」に進展する恐れがあると判断される場合、もしくは既に進展している場合には速やかに通報するとともに「非常体制」に移行する。

運転再開の判断：施設管理責任者（放射線取扱主任者の同意）

(3) 非常体制

要件：事故が発生した場合。

シフトリーダー初期対応：発見者が非常通報をしていない場合には、非常通報する。加速器シフトリーダーは、事故現場責任者が到着するまで、その業務を代行する。

指揮者：センター長

指揮所：現地対策本部

対応要員：現地対策本部要員、事故対策チーム員、事故現場係員

対応内容：事故発生の連絡を受けた場合、速やかに所内及び関係機関に通報・連絡し、機器を停止させる。また、事故現場から情報を収集して一元管理するとともに、事故原因の除去、災害の拡大の防止、人命救助等の事故現場で必要な活動を実施し、人命にかかわる事態が生じ又はそのおそれのある場合には避難誘導を行う。

新規に導入した「注意体制」を有効に機能させるためには、低リスク MPS と高リスク MPS の分類、誘発事象の確認方法等、注意体制に該当する要件を明確にする必要がある。そのプロセスにおいては、以下に示すような一連の想定とそれに伴う事象の拡大範囲を詳細に評価する。

- ・機器、設備はどのような誤作動をするか？ 電源喪失時等にはどのような振る舞いをするか？（機器、設備担当者）
- ・それによって、ビームはどのような振る舞いをするか？（ビーム物理担当者）
- ・そのビームの振る舞いによって、機器の破損等が発生するか？（機器、設備担当者）
- ・その機器の破損は、どのような誘発事象を発生させるか？ 等々

事象の拡大範囲によっては複数の施設を網羅した形で評価を行う。以上の評価を基に、警報発報の閾値や、注意体制に該当する要件を決定する。

このような体制を速やかに機能させるために、通報基準と体制、情報共有体制、責任者不在時の対応、異常発生時の対応、避難基準等を具体化し、放射線障害予防規程及び細則、各施設の運転手引、マニュアル類に、明確に記載するものとする。

なお、上記の「異常に対応する体制」はシフトリーダーが的確に「誘発事象の有無」や「放射線モニタ値のレベル情報、トレンド情報」を確認でき、また「放射線情報」等の必要な情報が中央制御棟に集約できることが前提になる。これを実現するために、監視機器の配置や監視画面の変更などを含めたハードウェア・ソフトウェア上の対策が現在具体化しつつあり、速やかに実行に移すものとする。

7. 2. 放射線安全上の審査体制の見直し

J-PARCにおける放射線安全に関わる検討・審査体制の現状と見直し案を図7-1に示す。

放射線安全上の審査過程において、放射線事故につながる機器の異常が発生しうるかどうかの判断は、各施設の構造、排気排水設備の構成と運転状態、ビームの特徴、各機器の詳細設計等を網羅したうえで検討する必要がある。現状の審査体制においては、これらの情報を集約し、議論する場はJ-PARC内部に設けられた放射線安全検討会であるが、従来その開催頻度は少なく、また時間も十分ではなかった。さらに、放射線安全検討会は異常の想定を十分なされた上での技術的議論がなされたとは言い難い。

放射線安全上の問題への対応を強化するために、J-PARC放射線安全検討会の代わりにJ-PARC放射線安全評価委員会を設けることとする。J-PARC放射線安全評価委員会は、専門家メンバーにより構成され、さらにその下に特定の技術的項目を審議するための「部会」を設ける権限を持たせることにより、要項等の変更にも対応できる組織とする。これによって、放射線安全を確保するための、安全管理体制を含む広くかつ実質的な対応を可能とし、問題の再発を防ぐ。

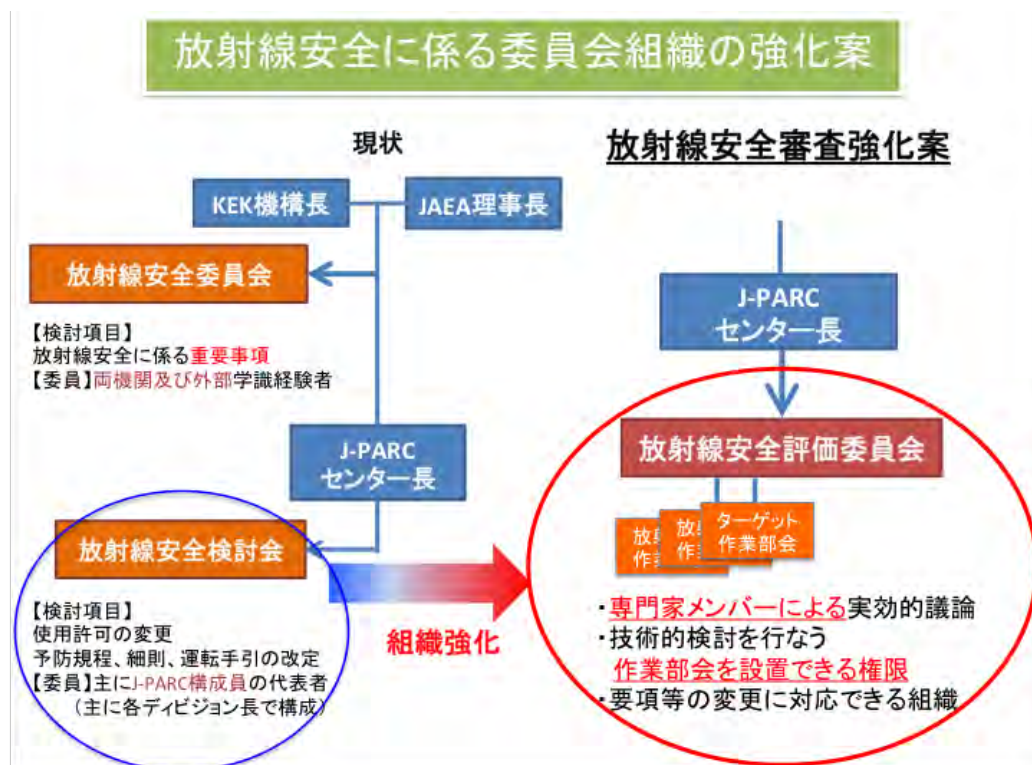


図 7-1：放射線安全に関わる検討・審査体制の現状と見直し案

7. 3. 教育訓練、基準の定期的な見直し

これらの体制を整備してもそれを担うのは人であり、各人の安全意識を維持・向上させるとともに、新たな体制を有効に機能させるためには、J-PARC構成員と実験ユーザに対する不断の教育・訓練の実施が不可欠である。今回の事故においても、放射線レベルの上昇を認識しながら、避難に至らなかったユーザが多数いたことを踏まえて、ユーザに対しても教育・訓練を実施し、安心して実験を進めることができる環境を提供する。

教育については、一方的な情報提供に終始するのではなく、理解度評価も含めた双方向的な周知徹底を進めるものとする。特に、通報基準を十分に理解して、的確な通報が実施できる体制を構築するとともに、ユーザからの情報を汲み上げ、判断に利用できる仕組みも取り入れる。

訓練においては、従来なされていなかった放射性物質の漏えい事象も想定して実施するものとする。

J-PARCは未だ発展途上の施設であり、運転経験の蓄積によりリスクの低減が期待される一方で、ビーム強度の増大に伴う新たなリスクに備えなければならない。それに伴い警報の閾値や、注意体制に該当する要件に対する評価が変化するので、これらの基準の見直しを定期的に行う。これは、異常時に対応すべき手順がルーチンワーク化して、新たに導入した「注意体制」の機能を形骸化させないために必要不可欠である。

7. 4. 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等のまとめ

安全管理上の課題を解決するために、新たに設けた「注意体制」により施設管理責任者の指揮の下で組織的な対応を図る体制の構築と、技術的な審議を可能とするような放射線安全上の審査体制の見直しを行う。さらに、これらの安全管理面での見直しを有効に機能させるために、教育訓練と基準の定期的な見直しを行う。表 7－2 に問題点と対策をまとめる。

表 7－2 安全管理体制及び緊急時に実施すべき手順等の問題点と対策

問題点	対策
異常に対応する体制が不十分	・「基本体制」「注意体制」「非常体制」を設け、明確な指揮者のもとで、情報収集と共有、通報連絡、現場対応、避難誘導を行う。
審査体制が不十分	・放射線安全検討会を J－P A R C 放射線安全評価委員会に改組し、技術的な審議を可能とする。
教育訓練と基準の定期的見直し	・ユーザも含めた不断の教育訓練 ・双方向的な教育と放射線事故を想定した訓練 ・基準、手順等の定期的な見直しで、対応のルーチンワーク化を防止

おわりに

今回の J-PARC の事故の第一報を聞いた多くの関係者が、まさか加速器施設でこのような事故が起こると思わなかったという感想を述べている。科学者、特に物理学者は今までに考えられていないこと、いわゆる「想定外」のことを探求することを生業とする者である。その物理学者たちが実験していた J-PARC ハドロン実験施設で「想定外」のことが起こった。当事者も周辺の関係者もこの事故をきわめて深刻に受け止めた。漏えいした放射性物質の量は少なかったものの、量が問題ではなかったのは、地元住民にとってだけではなく、研究者たちにとっても同様であり、研究者たちが自らの生き方に反省を迫られた事故であった。

J-PARC センター関係者は、文部科学省に指示されるまでもなく、その場にいた者からの聞き取り調査など事故原因の解明と対策の検討を始めていたが、文部科学省の要請を受けて有識者会議が発足し、作業部会を設けて本格的な作業に取りかかった。実態が明らかになるにつれて、事故は「想定外」などといえるものではなく、過去の経験にとらわれて対策を怠っていたのではないかという、科学者としては誠に無念な思いがする作業となった。馴れによる慢心や油断、安全性や技術的完成度をとことん突き詰めなかった怠慢、そしてそれを看過してしまった体制上の不備、そのようなものが今回の事故の本質なのかもしれない。

J-PARC センター側の積極的な協力を得て作業を進めた結果、作業部会としては、標的の破損状況の確認など一部の作業は残ったが、事故の全容はほぼ明らかにすることができ、その対策についても本質的なところは検討できたと考えている。今後 J-PARC センターが施設の安全対策と組織の改革を進めるにあたり、またこの事故の教訓をこれからの世代にも受け継いでいくために、この作業部会報告が役立てば幸いである。

J-PARC が一刻も早く立ち直り、地元の信頼を回復して、最先端の研究成果をあげることができる状態に戻ることを期待する。

別紙 1 作業部会委員及び会議開催日

(1) 作業部会委員

部会長 井上 信 (京都大学名誉教授、加速器施設運営)
委員 熊谷 教孝 (公益財団法人高輝度光科学研究センター専務理事、加速器)
委員 戸崎 充男 (京都大学環境安全保健機構放射性同位元素
総合センター准教授、放射線科学)
委員 馬場 護 (東北大学名誉教授、放射線理工学)

(2) 作業部会開催日

第1回作業部会 平成25年6月26日(水) 9:30～17:10
日本原子力研究開発機構 東京事務所 第五会議室
東海地区とTV会議：原子力科学研究所 防護活動本部

第2回作業部会 平成25年7月2日(火) 13:30～17:50
一橋大学 一橋講堂 特別会議室101、102

第3回作業部会 平成25年7月11日(木) 10:00～15:32
日本原子力研究開発機構 東京事務所 第五会議室
東海地区とTV会議：原子力科学研究所 防護活動本部

第4回作業部会 平成25年7月18日(木) 9:30～12:53
日本原子力研究開発機構 東京事務所 第五会議室
東海地区とTV会議：原子力科学研究所 防護活動本部

用語集

用語	解説
ハドロン	強い相互作用をする粒子の総称で、原子核の構成要素である陽子や中性子、湯川秀樹博士が存在を予言してノーベル物理学賞を受賞したパイ中間子などがある。現在の素粒子物理学では、クォークと呼ばれる素粒子から構成される粒子と理解されている。
モニタリングポスト	環境中の放射線の強さを測る測定器。原子炉施設周辺でも用いられている。
エリアモニタ	ある場所の放射線の強さを測る測定器。放射線管理区域内に置かれることが多い。
シンチレーションカウンタ	放射線が通過すると光を発生する物質を利用して、放射線の数数を数えたり、そのエネルギーを測ったりするための測定器。
Ge半導体検出器	ゲルマニウム(Ge)半導体を使い、X線や γ 線のエネルギーや強度を測る放射線測定器。
バックグラウンド	ある物から出ている放射線の強さを正しく測るには、身の回りにある放射線の強さを測定器の示す値から差し引く必要がある。測りたいもの以外から来る放射線をバックグラウンドと呼び、測りたいものから直接出てくる放射線と区別する。
ホット機械室	放射化した空気や水を扱う装置を設置している機械室。
HEPAフィルタ	空気中からゴミ、塵埃などを取り除き、清浄空気にする目的で使用するエアフィルタの一種。HEPAは捕集能力のランクの1つ(高性能)で、0.3 μm の粒子に対して99.97%以上の捕集率をもつ。
インターロック	安全機構の一種で、必要な条件が満たされないとその操作が出来ないようにする、あるいは、条件が成立しなくなるとその操作が取り消されるようにあらかじめ設定しておく。
シンクロトロン	電荷を持つ粒子を電磁波で加速して高いエネルギーにする装置の一種。電磁石がリング(円周)状に配置され、粒子は円軌道を周回し、決まった場所で加速される。
リニアック	電荷を持つ粒子を電磁波で加速して高いエネルギーにする装置の1種。シンクロトロンとは異なり、リニアックでは加速装置を直線状にたくさん配置して加速する。
加速空洞	シンクロトロンやリニアックの最重要部分の1つで、電磁波のエネルギーを溜めて粒子を加速する装置。
クライストロン	加速空洞で粒子を加速するためのエネルギー源となる電磁波を作る装置。
フラットトップ	シンクロトロンで粒子の加速が終わり、粒子が同じエネルギーで軌道を周回している状態。
ベータトロン振動	シンクロトロンの中で周回軌道を描いて回っている粒子は、実際には円軌道の周りを微小振動しながら周回している。この振動をベータトロン振動という。
共鳴条件	ベータトロン振動をしている振幅がどんどん大きくなっていく条件。
EQ, RQ	EQはExtraction Q 電磁石、RQはRipple Q 電磁石の略で、どちらも粒子の遅い取り出しに用いられる。
コリメータ	ビームの裾を削り取って、広がりを小さくするために置かれる厚い板やブロック。
ビームダンプ	加速器中の不要なビームを取り出して捨てる場所。金属などで作られ、厚く放射線遮蔽されている。

判断の整理・分析表

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
	当日の状況				ハドロン24時間利用運転の予定。計4本のビームラインの内、3本でビーム利用実験中、残り1本は実験準備中であった。		
1	2013/5/23		11:55頃	zlog HDlog	MPS作動によりビーム停止 (検出信号) ・MR-EQ「過電圧」、「トラッキングエラー」 ・MR-RQ「過電流」 ・MR-BLM ・HD実験施設BLM		
2			12:06頃	zlog 聞き取り	EQの異常について、加速器シフトリーダーは電源担当者に判断を仰いだ。ただちに電源担当者がCCRでEQの制御画面を確認、「トラッキングエラー」の発生は初めてであり、その発生理由は特定できなかったものの、電源のMPS信号は通常の手続きでリセットできた。「EQ過電圧」は比較的頻度の高いMPS信号であり、通常は問題無く再スタートできる。	加速器シフトリーダー 電源担当者	電源担当者は電源が正常な状態に戻ったと判断した。
3			12:06頃	zlog 聞き取り	電源担当者がRQ電磁石のMPS信号をリセットした。「RQ過電流」は比較的頻度の高いMPS信号であり、通常は問題無く再スタートできる。このときも問題無く再スタートできた。	電源担当者	電源担当者は電源が正常な状態に戻ったと判断した。
4			12:06頃	zlog 聞き取り	加速器シフトリーダーは、主リングのビーム電流が急速に失われたこと、ビームロスのMPSが発報したことから速い取り出しキッカーの誤作動によるものと考え、MR-BLM のMPS信号をリセットした。	加速器シフトリーダー	速い取り出しキッカーの誤作動は、これまでも数ヶ月に一度程度の頻度で発生していたため、リセットすれば運転再開が可能と考えた。
5			12:06頃	zlog HDlog 聞き取り	HDシフトリーダが陽子ビームラインの電磁石電源電流値、真空度などを確認し、HD放射線発生装置責任者(@つくば)に伝え、再開について合議の後ハドロンBLM MPSを解除、加速器シフトリーダーにビームラインが健全であることを報告した。	HDシフトリーダ HD放射線発生装置責任者 加速器シフトリーダー	HDシフトリーダはロスの分布から上流(加速器)の問題と推測、陽子ビームラインは健全であると判断、MPSを解除した。
6			12:06頃	zlog HDlog 聞き取り	HDシフトリーダの要請に応じ、加速器シフトリーダーはビームライン機器の健全性を確認するために、連続運転に先立ち、1パルスのみ出射した。陽子ビームプロフィールモニターのデータから取り出されたビームはハドロン標的まで正常に輸送されていることを確認した(これはMPS発報によるビーム停止の後で運転を再開するための通常の手順である)。	加速器シフトリーダー HDシフトリーダ	加速器シフトリーダーおよびHDシフトリーダは、ビーム軌道やビームロスが正常であると確認できたことから運転再開が可能であると判断した。
7			12:08頃	zlog HDlog 聞き取り	ビーム連続運転開始、ユーザー利用運転開始	加速器シフトリーダー HDシフトリーダ	加速器シフトリーダーとHDシフトリーダは運転再開が可能と判断し、連続運転を再開した。
8			12:15頃	HDlog	HDシフトリーダはKEK職員Aより、金標的からの二次粒子の収量が低下したとの報告を受け、実際に約4割に減少していることを確認、KEK職員A,Bとともにビーム調整を実施した。収量はほぼ元通りまで回復し、ビームラインの電磁石や真空度、金標的の温度等には異常がないことを確認した。	HDシフトリーダ KEK職員A,B	HDシフトリーダは二次粒子収量低下は取り出し軸がわずかにずれたためと判断し、ビームの水平方向の軌道調整を行うことにした。

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
9			12:30頃	聞き取り	ターゲット調整終了。HDシフトリーダは実験グループへ、ビーム調整が終了したことを連絡した。	HDシフトリーダ	HDシフトリーダは、軌道調整により収量が回復したことで、ビーム軌道のズレが収量減少の原因であったと判断した。
10			12:55頃	聞き取り	K1.8BR実験グループから、K1.8ビームラインの安全電磁石が励磁できない旨HDシフトリーダが報告を受けた。これはK1.8ビームラインの誤入射防止カウンターの一つで計数率がしきい値を越えた事による。その後安全電磁石は停止状態のまま。	HDシフトリーダ HD放射線発生装置責任者	HDシフトリーダはHD放射線発生装置責任者(@つくば)と相談し、ビーム軌道のずれやカウンターの誤動作を要因と推測した。
11			13:15頃	聞き取り	HDシフトリーダは、上記「誤入射防止カウンター」計数率上昇の要因と方策をK1.8BRコンテナにて検討していたところ、実験グループからK1.8BR実験グループのシンチレーション検出器の計数率が12時5分頃から時間と共に増大している旨報告を受けた。誤入射防止カウンター計数率上昇とあわせ、ビーム起因の現象であることを疑い、対処を行うためにハドロン制御棟へ戻り、調査を開始した。	HDシフトリーダ	HDシフトリーダは調査が必要であると判断した。
12			13:30頃	聞き取り	HD実験ホール内エリアモニタの指示値が最大で4μSv/h(通常運転時の約10倍)となっていることをHDシフトリーダ、KEK職員Cなどが視認した。HDシフトリーダはHD放射線発生装置責任者(@つくば)に報告した。	HDシフトリーダ HD放射線発生装置責任者 KEK職員C	HDシフトリーダはHD放射線発生装置責任者(@つくば)と相談し、ビーム軌道再調整の必要性、放射化空気の漏洩、モニターの故障などの可能性を検討した。
13			14時前	聞き取り	HDシフトリーダはHD管理区域責任者に、線量率上昇を連絡した。	HDシフトリーダ HD管理区域責任者	現場に赴いて調査が必要と判断した。
14			14時頃	聞き取り	放射線レベルが約10倍高いことに気が付いたKEK職員Cらが、他の作業者の一部に自主的にHD実験ホールの外への退避を薦めた。	KEK職員C	
15			14:26頃	zlog HDlog 聞き取り	HDシフトリーダは、加速器シフトリーダーへエリアモニタの線量上昇について報告し、ビーム運転停止を依頼。加速器運転シフトリーダーが運転を停止した。	HDシフトリーダ 加速器シフトリーダー	HDシフトリーダは空間線量率の上昇が変化するか確認するため、ビームを一旦停止することを決定した。
16				聞き取り	HDシフトリーダは、HD実験ホール内ガンマ線モニタ値の上昇が収まり、中性子モニタ値がビーム停止と同時に減少した事を確認、HD放射線発生装置責任者(@つくば)に報告した。線量率上昇の原因は直達放射線によるものか、放射化空気の漏れによるものか、またはエリアモニタの不具合であるのか特定するための調査が必要であると協議した。	HDシフトリーダ HD放射線発生装置責任者	HDシフトリーダおよびHD放射線発生装置責任者は、排気することで線量が下がる場合には放射化空気が原因であり、もしくは線量に変化が無い場合にはビーム軌道の異常やエリアモニタの動作の不具合等を検討する必要があると考えた。
17			15:00頃	聞き取り	ビーム取り出しシステム担当者(@つくば)は、zlogに、11:55にEQ他のMPSがあったこと、環境放射線レベルが高いためビーム停止という記述を見つけ、調査を開始した。	ビーム取り出しシステム担当者	
18			15:15頃	HDlog 聞き取り	KEK職員Bが、HD実験ホール内エリアモニタの動作健全性を確認するために、排風ファンを回して排気することをHD放射線発生装置責任者(@つくば)に提案した。KEK職員Bが排風ファンを起動した。	KEK職員B HD放射線発生装置責任者	HD放射線発生装置責任者、KEK職員BはHD実験ホール内のエリアモニターで測定された空間線量が通常の10倍とはいえ、排気を行っても環境には影響を与えない程度に十分に低いと考えた。
19			15:15頃	聞き取り	HD管理区域責任者は、エリアモニタの健全性を確認するため、業者(放射線)Aに指示し、HD施設に向かわせ、エリアモニタ周辺の線量率測定を開始させた。	業者(放射線)A HD管理区域責任者	HD管理区域責任者が、線量率測定の必要があると判断した。

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
20			15:20頃	HDlog 聞き取り	排気によりHD実験ホール内エリアモニタによる線量が低下した。	HDシフトリーダ HD放射線発生装置責任者	HDシフトリーダ及びHD放射線発生装置責任者(@つくば)は、異常なビーム軌道のために放射化した空気が、一次ビームライントンネルからHD実験ホール内に漏洩していると判断し、ビーム軌道再調整が必要と考えた。(第1種管理区域への設定には思い至らなかった。)
21			15:30頃	HDlog 聞き取り	KEK職員Bが排風ファンを停止した。	KEK職員B HDシフトリーダ	ファンの運転により空間線量率が下がったため、HDシフトリーダがファン停止を決定した。
22			15:32頃	HDlog 聞き取り zlog	HDシフトリーダが再調整のためのビーム運転再開を依頼した。	HDシフトリーダ 加速器シフトリーダー HD放射線発生装置責任者	HDシフトリーダとHD放射線発生装置責任者が協議し、排風ファンを元の状態に戻し、ビーム起因の放射化空気を減らすためビーム再調整を開始することを決定した。
23				HDlog 聞き取り	HDシフトリーダとKEK職員Aがビーム軌道の再調整を行った。HDシフトリーダが水平方向と垂直方向の軌道調整を行ったが、収量の最高値に変化は無いことを確認した。エリアモニターの指示値は下がらず、改善はみられないことを確認した。	HDシフトリーダ KEK職員A	
24			15:42頃	聞き取り	ビーム取り出しシステム担当者(@つくば)はHDシフトリーダに電話で状況を問い合わせた。EQ MPS後に収量が半分になり、ターゲッティングをし直して収量が回復したが、環境放射線レベルが上がり始めたので、ビームを停止して調査を行ったという説明を受け、MPS時の取り出しビームデータの解析を開始した。	ビーム取り出しシステム担当者	
25			15:50頃	聞き取り	HD管理区域責任者は、業者(放射線)と、CCRでエリアモニターデータを検討、すべてのエリアモニタで指示値が上昇していることを確認した。	HD管理区域責任者 業者(放射線)	HD管理区域責任者は、エリアモニタの異常ではないと判断した。
26			15:59頃	聞き取り	HD管理区域責任者は、HD実験ホールに居る業者(放射線)から、エリアモニタの指示値とサーベイメータの指示値が合っているとの報告を受けた。	HD管理区域責任者 業者(放射線)	HD管理区域責任者は、エリアモニタの異常ではないことを強く支持する情報であると認識した。
27			16:00頃	HDlog 聞き取り	KEK職員DがHD実験ホール内空間線量率を測定し、エリアモニタ以外の場所でも高い線量率(4～6μSv/h)が観測されることをHDシフトリーダに報告した。	KEK職員D HDシフトリーダ	
28			16:00頃 ～17:00頃	聞き取り	ビーム取り出しシステム担当者(@つくば)は、独自にEQ-MPS発報時のデータを調べはじめた。現象としては、突然EQに電流が流れ、短時間でビームが取り出され、ターゲットにダメージがあった可能性があると思いはじめた。環境放射線が上がった理由は無理なビーム調整で軌道がずれ、ターゲットの下流でロスしたのではないかと推測した。上記の推測を説明するための資料をまとめはじめた。	ビーム取り出しシステム担当者	
29			16:15頃	zlog HDlog 聞き取り	ビーム停止	HDシフトリーダ	HDシフトリーダは、ビーム調整で線量率の改善がみられない事とKEK職員Dからの高い線量率の報告により、ビーム運転を停止し調査を行う事を判断した。
30			17:00頃	HDlog 聞き取り	右の者は、HD実験ホール内等線量率の再測定を行い、局所的に線量率の高い部分を確認した。第2機械棟の空気フィルター(運転中はトンネル内の空気は排気されず封じ込められ循環されている。その循環ループに入っているフィルタ)ユニットの表面線量率が通常約17μSv/h(24kW運転中)のところ約3mSv/hに上昇していることを確認した。	HDシフトリーダ KEK職員D HD管理区域責任者 業者(放射線)B,C	

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
31			17:00頃	聞き取り	HD管理区域責任者は放射線取扱主任者(@つくば)に報告した。	HD管理区域責任者 放射線取扱主任者	放射線取扱主任者はHD管理区域責任者と電話で協議した。HD管理区域責任者は、HD実験ホール内の放射化した空気を排気することで空気中の放射能濃度を下げ、ユーザーへの被曝の可能性を低減させるために排風ファンを運転することを提案した。放射線取扱主任者はホール内の線量が法令上の規制値に達していないことなどから管理区域境界での影響はないと考え、ホール内の空気中の放射能濃度を下げるため排風ファンを運転することを判断した。
32			17:18頃	聞き取り	HD放射線発生装置責任者(@つくば)はビーム取り出しシステム担当者(@つくば)に電話連絡した。11:55のビーム取り出し時に、瞬時に大強度ビームが標的に入射され、標的が損傷している可能性があることがHD放射線発生装置責任者に伝達された。	HD放射線発生装置責任者 ビーム取り出しシステム担当者	
33			17:20頃	聞き取り	HD管理区域責任者と業者(放射線)B、CがHD実験ホール内の空気500mLをポリ瓶にサンプリングし業者(放射線)Bが放射線測定棟のGe検出器でエネルギースペクトル測定を開始した。	HD管理区域責任者 業者(放射線)B、C	HD管理区域責任者が、空気中の放射性物質の核種を調べる必要があると判断した。
34			17:30頃	HDlog 聞き取り	17:00頃の放射線取扱主任者(@つくば)の判断に基づき、排風ファンを運転した。	HDシフトリーダ KEK職員D	
35			17:30頃	聞き取り	HD実験ホール内の作業者のホール外への退出を開始した。作業者はホール外で身体汚染測定、除染のために待機した。	HD管理区域責任者 HDシフトリーダ	HD管理区域責任者は、HDシフトリーダと協議し、退避が必要と判断した。
36			17:40頃	聞き取り	ビーム取り出しシステム担当者(@つくば)は、電話およびメールで11:55のビーム電流解析結果をHD放射線発生装置責任者(@つくば)に伝えた。	HD放射線発生装置責任者 ビーム取り出しシステム担当者	
37			17:45頃	聞き取り	HDシフトリーダ交代。 KEK職員AがHDシフトリーダになった。これまでのHDシフトリーダを以後KEK職員Eと呼ぶ。		
38			18:20頃	聞き取り	放射線管理室員Aが、サンプリングしたHD実験ホール内の空気のGe測定結果から空気由来以外の核種の存在を確認し、HD管理区域責任者に口頭で報告した。	放射線管理室員A HD管理区域責任者	
39				聞き取り	HD管理区域責任者の依頼により、放射線管理室員AがHD実験ホール内の床および机などの汚染測定を行い、表面汚染を確認した。	放射線管理室員A HD管理区域責任者	(第1種管理区域への設定には思い至らなかった。)
40			18:35頃	聞き取り	HD管理区域責任者から放射線管理室長に管理区域内に表面汚染が広がっている旨報告した。さらに放射線管理室長は放射線取扱主任者(@つくば)、主任者代理に状況を報告した。	HD管理区域責任者 放射線管理室長 放射線取扱主任者 放射線取扱主任者代理	放射線管理室長は応援要員(6名)の出動を決定した。放射線取扱主任者は、現場での指示が必要と判断、つくばからJ-PARCへ移動することを決定した。
41			19:00頃	聞き取り	HD管理区域責任者の指示のもと、右の者9名でHD実験ホール内の詳細な線量測定と表面汚染測定を実施した。	HD管理区域責任者 KEK職員D、E、G 放射線管理室員(6名)	
42				聞き取り	放射線管理室員が人の汚染検査を開始した。これ以前は退出制限されておらず、汚染検査をうけないまま退出した者もいる。	放射線管理室員 HD管理区域責任者	

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
43			19:30頃	聞き取り	HD放射線発生装置責任者は、HD実験ホールに到着し、ビーム取り出しシステム担当者から5ミリ秒間に 2×10^{13} 個の陽子ビームが取り出された解析結果を受け取り、陽子ビームの軌道、ビーム強度検出器等のデータとつぎあわせ、その結果から金標的が損傷した可能性が高いと考え、素核Div長に報告した。	HD放射線発生装置責任者 素核Div長	HD放射線発生装置責任者は金標的に損傷があったのではないかとこの時点で推定した。
44			20:00頃	聞き取り	HD実験ホール内の詳細サーベイとスミア、およびホール外のサーベイが完了した。	HD管理区域責任者 KEK職員D、E、G 放射線管理室員(6名)	
45			20:15頃	聞き取り	放射線取扱主任者がJ-PARCに到着した。主任者、主任者代理、放射線管理室長がサーベイ結果の報告をうけ今後の対応を協議した。	放射線管理室長 放射線取扱主任者 放射線取扱主任者代理	
46			21:00頃	聞き取り	KEK職員および放射線管理室員から、作業者の表面汚染の基準について放射線取扱主任者に問い合わせがあった。	放射線取扱主任者 放射線管理室員	放射線取扱主任者が、4Bq/cm ² 以下であれば管理区域から退出可能、それ以上の場合は除染が必要と判断した。
47			21:41頃	聞き取り	放射線管理室長の指示により、放射線管理室員がHD実験ホール内でスミヤした試料のGe検出器を用いたエネルギースペクトル測定を放射線測定棟で開始した。	放射線管理室長 放射線管理室員	放射線管理室長が汚染核種の同定が必要と判断した。
48				聞き取り	右の者が放射線管理室員より新たにスミアのスペクトル分析結果を受けとった。これまでのデータと合わせ分析評価し、表面汚染は管理区域内の基準(40Bq/cm ²)を超えていないこと、また内部被曝は、顔面サーベイの測定値約4Bq/cm ² から、主な核種をNa24と仮定し、数μSv程度と評価した。今後の対応を協議した。	放射線管理室長 放射線取扱主任者 放射線取扱主任者代理 HD放射線発生装置責任者 HD管理区域責任者	一同は金由来と考えられる多数の核種が観測されたことを知り、『金標的に損傷』の傍証を得た。放射線取扱主任者は、安全裕度10倍を考慮しても内部被曝は数十μSvを超えるおそれはないと考え、放射線管理室が定めた被ばく線量管理値(男子500μSv/日、女子300μSv/日)と比較して十分小さいと判断した。
49			23時頃	聞き取り	右のメンバーが状況を確認した。	放射線管理室長 放射線取扱主任者 放射線取扱主任者代理 HD管理区域責任者 HD放射線発生装置責任者 加速器Div長 素核Div長	放射線取扱主任者は、汚染検査および詳細サーベイの結果を総合的に検討し、HD実験ホール内への放射性物質の漏洩があること、ホール内に汚染が認められたこと、汚染の範囲がホール内にとどまり、放射性物質が環境へ漏洩していないと考えられること、また推定される被ばく線量が想定内であることから報告事象には該当しないと判断した。それに異議は上らなかった。
50			23:30頃	聞き取り	職員及びユーザーの除染・身体サーベイが終了し、全員管理区域から退出した。その後放射線取扱主任者の指示によりHD実験施設を原則立ち入り制限とした。	放射線取扱主任者 HD放射線発生装置責任者	放射線取扱主任者がHD施設管理区域を立ち入り制限とすることを判断した。
51	2013/5/24		7時頃	聞き取り	素核Div長から副センター長(KEK)に電話で詳しい報告をした。	素核Div長 副センター長(KEK)	
52			9時頃	聞き取り	安全Div長は、センター長、副センター長(JAEA)にHD実験ホール内への放射性物質の漏洩が有り、ホール内に汚染が認められたが、汚染の範囲がホール内にとどまり、放射性物質が環境へ漏洩していないと考えられること、また推定される被ばく線量が想定内であることから報告事象には該当しないと判断したこと、10時から詳細に報告することを口頭で報告した。	安全Div長 センター長 副センター長(JAEA)	センター長は午前中病院で診察を受けるため、10時からの打ち合わせの結果を午後報告するよう副センター長に指示した。

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
53			9:00頃~	聞き取り	安全Div長は、HD実験ホール内への放射性物質の漏洩が有り、ホール内に汚染が認められたが、汚染の範囲がホール内にとどまり、放射性物質が環境へ漏洩していないと考えられること、また推定される被ばく線量が想定内であることから報告事象には該当しないと判断した旨、KEK機構長、J-PARC担当理事、安全・広報担当理事に報告した。	安全Div長 KEK機構長 KEK J-PARC担当理事 KEK 安全・広報担当理事	左記のKEK首脳部は、報告された情報に従うならば、即座に報告すべき事象ではないと考えた。しかし、確認が必要と判断し、追加情報等あれば報告を入れるべき旨、安全Div長に要請した。
54			9:45頃	聞き取り	放射線取扱主任者の指示をうけHD管理区域責任者が業者(放射線)に、第1、2機械棟内・管理区域境界の空間線量と汚染(スミア)の測定を依頼した。その結果、汚染が無いことを確認し、HD管理区域責任者に報告した。	放射線取扱主任者 HD管理区域責任者 放射線管理室員 業者(放射線)	放射線取扱主任者が、管理区域外のスミアが必要であると判断した。管理区域外に漏洩が検出されなかったことにより、報告事象に当たらないことを再確認した。
55			10:00頃	聞き取り	右の者で打ち合わせを開き、昨日以来の状況を確認、今後の対応について議論した。HD放射線発生装置責任者から標的が蒸発したと推定されること、放射線レベルが上がったこと、ファンを回したことなど23日の時系列にそって説明があった。J-PARCセンターからユーザーにたいして、ハドロン実験が数週間停止すること、ニュートリノ実験の準備を始めることをアナウンスする準備を開始した。	副センター長(JAEA) 安全Div長(放射線取扱主任者) 安全副Div長 放射線管理室長 HD放射線発生装置責任者 HD管理区域責任者 素核Div長 加速器Div長 素核副Div長(Skype経由) 素核Div員A,B,C	この時点では放射線取扱主任者は通報連絡に該当する事象とは考えなかった。参加者からも異議は唱えられなかった。念の為、作業者の一部にWBC測定を受けてもらうことが放射線管理室長から提案され、了承された。これを受けて素核Div員が前日の入域者に対してWBC検査希望の有無を打診した。議論の結果、当面(最低数週間)はハドロン実験の再開は不可能と判断した。ユーザーにアナウンスを配信することを決定した。
56				聞き取り	会議の決定を受け、放射線管理室長が原科研にWBC測定を依頼した。	放射線管理室長	
57			12:30頃	聞き取り	副センター長(KEK)がKEK所長会議で報告した。	KEK所長会議メンバー	
58			14:00頃	聞き取り	副センター長(JAEA)からセンター長に10時の打ち合わせの資料に基づき詳細が報告された。つくばからJ-PARCに到着した副センター長(KEK)も同席した。	両副センター長 センター長	汚染の範囲がHD実験ホール内にとどまり、放射性物質が環境へ漏洩していないと考えられること、また推定される被ばく線量が想定内であるとの報告から、センター長は報告事象には該当しないと判断した。
59			14:30頃	聞き取り	WBC測定2名	原科研	J-PARCとして内部被ばくが少ないことを確認するために、WBC受診者を募ったところ、4名(職員2名、国内大学ユーザー2名)の希望者があり、時刻調整を行い2回に分けて検査を行った。
60			15:00頃	聞き取り	WBC測定2名		
61			17:30頃	聞き取り	隣接する核サ研のモニタリングポストの一部で23日15時ごろ、および17時30分ごろに線量が上昇している件について、核サ研から放射線管理室員に問い合わせがあり、放射線管理室員からHD管理区域責任者、放射線取扱主任者に連絡した。	放射線管理室員 HD管理区域責任者 放射線取扱主任者	HD管理区域責任者はHD管理区域のエリアモニターの精査が必要と判断した。
62			18:00頃	聞き取り	HD管理区域境界に設置したエリアモニター(γ線)の記録データがHD管理区域責任者から右の者に示された。23日の15時頃と17時30分頃に排風ファンの作動と同期して放射線レベルがわずかに増加していることが明らかになった。	HD管理区域責任者 放射線取扱主任者 副センター長(KEK)	
63			18:13頃	聞き取り メール	共通基盤施設長は規制当局への報告事象には該当しないとのセンターの判断を知り、副センター長(KEK)、安全・広報担当理事あてに、地元との協定に基づく報告事項に当たる可能性を指摘した。	KEK共通基盤施設長 副センター長(KEK) KEK安全・広報担当理事	

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
64			18:28頃	聞き取り メール	理研仁科センター安全業務室員から放射線取扱主任者、共通基盤施設長に、当日HD実験ホールで作業をし汚染検査開始以前に退出した理研の研究員について、本日13:40頃に汚染検査を実施したところ、表面汚染(靴裏で3kCPM)が検出され、靴を回収した旨メールにて通知された。この理研研究員は、23日中にホールでの汚染情報を得、汚染検査を受けることを考えたがすでに業務時間外になっていたため、翌日勤務先にて受けた。	理研仁科センター安全業務室員 放射線取扱主任者 共通基盤施設長	
65			18:34頃	聞き取り	理研からの情報が、共通基盤施設長から副センター長(KEK)とKEK安全・広報担当理事に知らされた。	共通基盤施設長 副センター長(KEK) KEK安全・広報担当理事	
66			19:00頃 ～	聞き取り	右の者がJ-PARCセンター会議室に集合し、最新のデータに基づき、定量的な検討を行った。	センター長 副センター長 安全Div長 加速器Div長 素核Div長 HD放射線発生装置責任者 放射線管理室長 HD管理区域責任者	センター長、副センター長、安全Div長は、状況及びデータを確認し、放射性物質が管理区域外に漏えいした可能性が高いので通報すべき事象にあたるかどうか協議した。またデータから、放射線漏洩や被曝の状況はすでに収束しているという共通認識が有った。
67			21:10	対策本部 電子ログ	センター長の指示により安全Div長が原子力科学研究所の緊急連絡先に通報した。	センター長 安全Div長	センター長が緊急連絡が必要と判断した。
68			21:11	対策本部 電子ログ	現地対策本部が開設され、関係者が招集された。センター長が現場指揮所を開設した。	現地対策本部長代理 センター長	
69			21:19頃	対策本部 電子ログ	原子力規制委員会に連絡		
70			21:40頃	対策本部 電子ログ	茨城県に連絡		
71			21:43頃	対策本部 電子ログ	東海村に連絡		
72			22:15頃	対策本部 電子ログ	現地対策本部が法令報告に該当するものと判断した。		現地対策本部が法令報告に該当するものと判断した。
73			22:15頃	聞き取り	KEK緊急対策室がつくばキャンパス内KEK安全・広報担当理事室に設置された。	J-PARC副担当理事 KEK広報・安全担当理事 総務係長	
74			22:40	対策本部 電子ログ	関係機関へ第一報の連絡。事故の概要(作業者人数30名程度)、施設の状況、汚染の状況、作業者の被ばくの状況(調査中)、環境への影響(放出は続いてないこと)、一般公衆への影響はないと考えられることなどを報告した。		
75	2013/5/25		0:18	対策本部 電子ログ	第2報発信。第1報に加え、管理区域への入域87名という情報追加、核サ研データも示された。		
76			0:46	zlog	全加速器運転停止	加速器グループ MLFグループ	センター長が、総力で事故対策に臨むため決定した。

時系列番号		運 転	時系列			操作者、対応者	判断をした者、判断根拠、判断内容 (誰が、どのような判断をしたのか)
			時刻	情報源	内容 (何が起きたか、何をしたか)		
77			1:00頃	聞き取り	4名のWBC測定の結果、最大1.7mSv の被ばくを対策本部が確認した。(J-PARCの加速器で生成される核種は一般の原子力施設のものとは異なり、エネルギーの異なるγ線が多数検出されたため、内部被ばく評価対象の核種同定に時間を要した。)	現地対策本部	
78			1:00頃	対策本部 電子ログ	県で直接説明、謝罪	副センター長(KEK) 放射線管理室長	
79			1:55頃	対策本部 電子ログ	第3報。装置付近に立ち寄った人数は55名。4名のWBC測定結果を報告した。		
80			2:51頃	対策本部 電子ログ	最終報。連絡が遅れた理由を修正した。		
81	2013/5/26		11時頃	zlog 聞き取り	HD実験ホール排風ファンを停止した。	KEK職員F	24日18時頃ハドロン管理区域境界のエリアモニターの値を確認したところ、すでに通常値に戻っていたので、排風ファンを停止することはしなかった。26日になって排気を継続する理由がなくなったため止めることにした。
82	2013/6/12現在			聞き取り	事故以降現在まで、MRおよび一次ビームラインエリアの排気はおこなっていない。		通常の運転時にくらべ高い放射線レベルが観測されていたこと、また放射性核種も未測定なため、排気すべきでないと判断権者が判断した。

注)安全Div長と放射線取扱主任者は同一人物である。

BLM:ビームラインロスモニター

CCR:中央制御棟

Div長:ディビジョン長

EQ:取り出し補正用四重極電磁石

HD:ハドロン

HDlog:HDグループビーム運転ログブック

K1.8、K1.8BR :ハドロン実験ホール内の二次ビームラインの名称

MPS:機器保護システム

MLF:物質・生命科学実験施設

MR:50GeVシンクロトロン

RQ:リプル補正用四重極電磁石

WBC:ホールボディカウンター

zlog: 加速器運転の電子ログ

核サ研: 核燃料サイクル工学研究所

素核:素粒子原子核

トラッキングエラー:電流偏差の異常