

8. 再発防止策

ここでは再発防止策を、まずはハードウェアの観点から、続いて安全管理の観点からまとめる。ハードウェアにおける再発防止策の骨子となるのは（1）EQ 電磁石電源の誤作動対策、（2）標的の気密確保とハドロン実験ホールの排気管理、及び（3）放射線監視の強化である。電源の誤作動による短パルスビームの取り出しを防止することは非常に重要であり、本章に示すようにいくつかの有効な対策を施すが、リスクを完全に根絶することは困難である。そこで、万が一誤作動が発生しても放射線事故を引き起こさないようにするために、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を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できるようにする。このような多重の防護策をとることにより放射線事故のリスクを徹底的に低減することが再発防止策の要となる。

8.1 遅い取り出しシステムにおける再発防止策

50 GeVシンクロトロン¹の遅い取り出しにおける再発防止策としては、今回の事故の引き金となった EQ 電磁石電源の誤作動に関する防止策が最も重要である。さらに EQ 電磁石電源の誤作動以外の原因で短パルス大電力ビームが取り出される可能性もあるので、それらのリスクに対する予防策についても検討した。

8.1.1 EQ 電磁石電源誤作動の再発防止策

今回の誤作動のような急激な電流増加を引き起こすことを回避する対策案を基本方針とする。具体的な対策案は以下のとおりである。

（1）EQ 電磁石電源の過電流設定レベルは現状では 340 A（電源の最大定格）に設定されていたため、159 A を越える電流が流れた。今後は指令電流値の上限を利用運転において必要とされる電流最大値 120 A まで下げる。このことにより瞬時に取り出されるビーム量を抑制できる。

（2）現状では電源内部で電流偏差異常が起こったときは異常記録が出力されるが、軽故障の扱いであり電源の停止は行わない。今後は電流偏差異常が検出された場合は警報を出しかつ電源が停止するように変更する。また、フィードバック制御系からの電流指令値（図 7.1-1 の「アナログ出力」）と EQ 電磁石電源の出力電流値（図 7.1-1 の「EQ 電流値」）とを比較し、その間で偏差異常が検知された場合にも電源を停止する。

（3）現在は、電源制御部における異常の検知（インターロックの発報）から出力電流停止動作までにかかる時間は約 1000 分の 6 秒であり、異常なビーム取り出しがなされるのを防ぐのに十分な応答速度ではない。今後は、異常の判断と指令に PLC やリレーのような応答性の遅いものを介さない高速の信号処理回路を新規に製作し、この時間を 1000 分の 1 秒以下に短縮する。これにより今回のような異常が発生した際の EQ 電源の電流増加量を大幅に抑制し、短時間に取り出されるビームの量を少なくする。

以上の対策を原因と対比してまとめて表 8.1-1 に示す。

表 8.1-1 原因と対策

短パルスビーム取り出しの原因	対策（予防措置、改善処置）
<p>事故のショットでは取り出し時間から 0.3 秒間にわたり EQ 電源が応答しなかったため、フィードバック制御系はさらに高い電流指令値を出力し続けた。その結果、応答が回復したときは従来（通常は 100 A 以下）よりかなり高い指令値（159A）になっており、その電流が急激に流れてビームが短パルスで取り出された。</p>	<p>EQ 電磁石の最大電流値を 340 A から 120A に変更し、短パルスビームが取り出されるリスクを低減する。</p>
<p>事故のショットでは電流偏差異常の状況が生じているがそれを検知して電源を停止するシステムになっていなかった。</p>	<p>電流偏差異常が発生した場合は、警報を出力するとともに電源、およびビーム運転を停止する機能を加える。さらに異常検知後、ただちに電源停止のプロセスに入れるよう、停止動作開始までの応答速度を現行の約 6 ms から 1 ms 以下に短縮する。</p>

8.1.2 ハドロン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完全に無くすことは困難であり、実際に 50 GeV シンクロトロンや KEK-PS においても、通常よりも短い時間でビームが取り出される事象は発生している。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 EQ 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) 速い取り出しキッカー電磁石の誤作動

50 GeV 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が、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残る。残ったビームは、シンクロトロンの内部で失われると機器を放射化するおそれがあるため、通常は速い取り出し法（Fast Extraction, FX）によってアポートダンプ（50 GeV シンクロトロンのトン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 台のキッカー電磁石を用いるが、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、ビームが遅い取り出し機器の一つである静電セプタムの位置で位相空間上の取り出し領域に蹴り出され、そのままハドロン一次ビームラインに取り出される可能性がある。その場合は 5 μ s の短パルス大強度ビームがハドロン実験ホールの標的に輸送されることも起こり得る。

キッカー電磁石は 6 秒の運転サイクル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、キッカー電磁石の誤作動が生じた場合でも誤ってビームが取り出されるリスクを低減できる。

(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四極電磁石が緊急停止すると、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1.6兆個 (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標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標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標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10兆個 (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標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、加速器スタディ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標的部分のビーム軌道を変える、または標的に駆動機構を設けてビームを避ける位置に標的を移動し、ビームを標的には当てずに直接ビームダンプに導く。

8.2 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した。

- (1) ハドロン実験ホールの一次ビームライン部分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管理排気

この方針に基づいたハドロン実験施設における再発防止策について記す。

8.2.1 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。さらに、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整備する。このため、以下の対策を行う（図 8.2-1）。

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。

② ガス循環系とその監視装置の新設

標的容器の内部が通常の大気雰囲気であると、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。ガスの圧力を監視して、標的容器の異常も検知できるようにする。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する。緊急バッグを設け、異常時に切り替えてガスをそこに溜めることができるようにする。

③ 標的の監視の強化

標的の温度測定の間隔を 1 秒から 0.1 秒以内に短くし、短時間での温度上昇を検知して一次ビームを停止できるようにする。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。短時間にビームが取り出されたことが分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。又はビーム軌道を変更する。

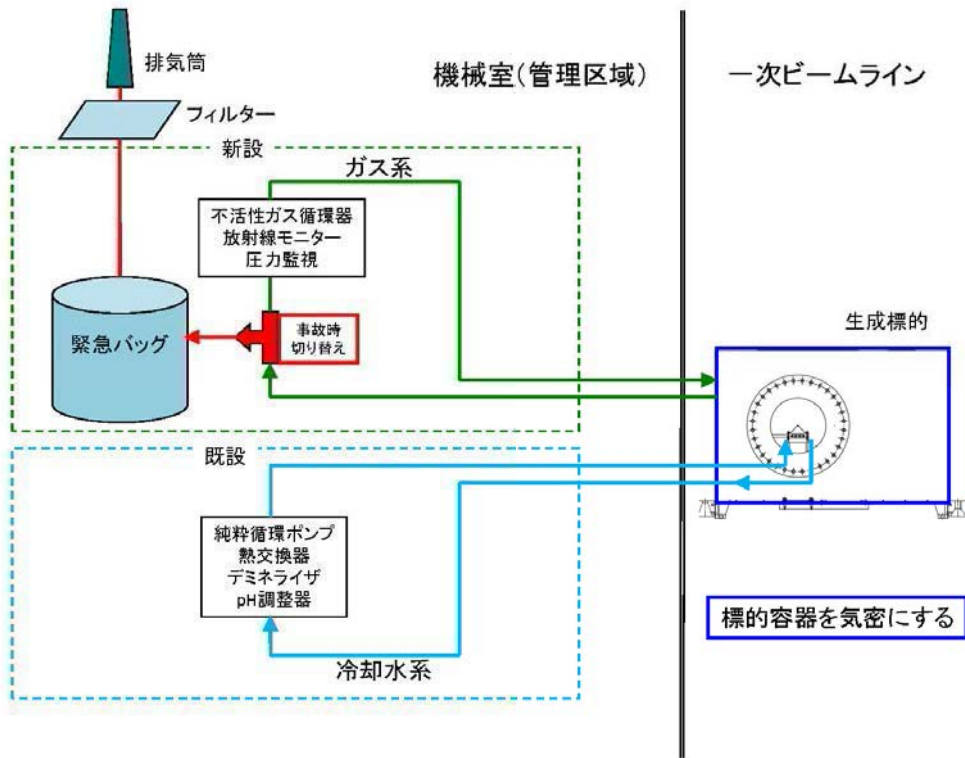


図 8.2-1：新標的システムの概念図

8.2.2 一次ビームライン室

コンクリート遮へい壁の内部空間である一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、次の対策を取る（図 8.2-2、8.2-3）。

① 一次ビームライン天井遮へい体の気密強化

一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 8.2-4）

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口について、二重にコーキング材等でそれぞれ隙間なく気密処置を施す。

④ 放射線監視の強化

一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。

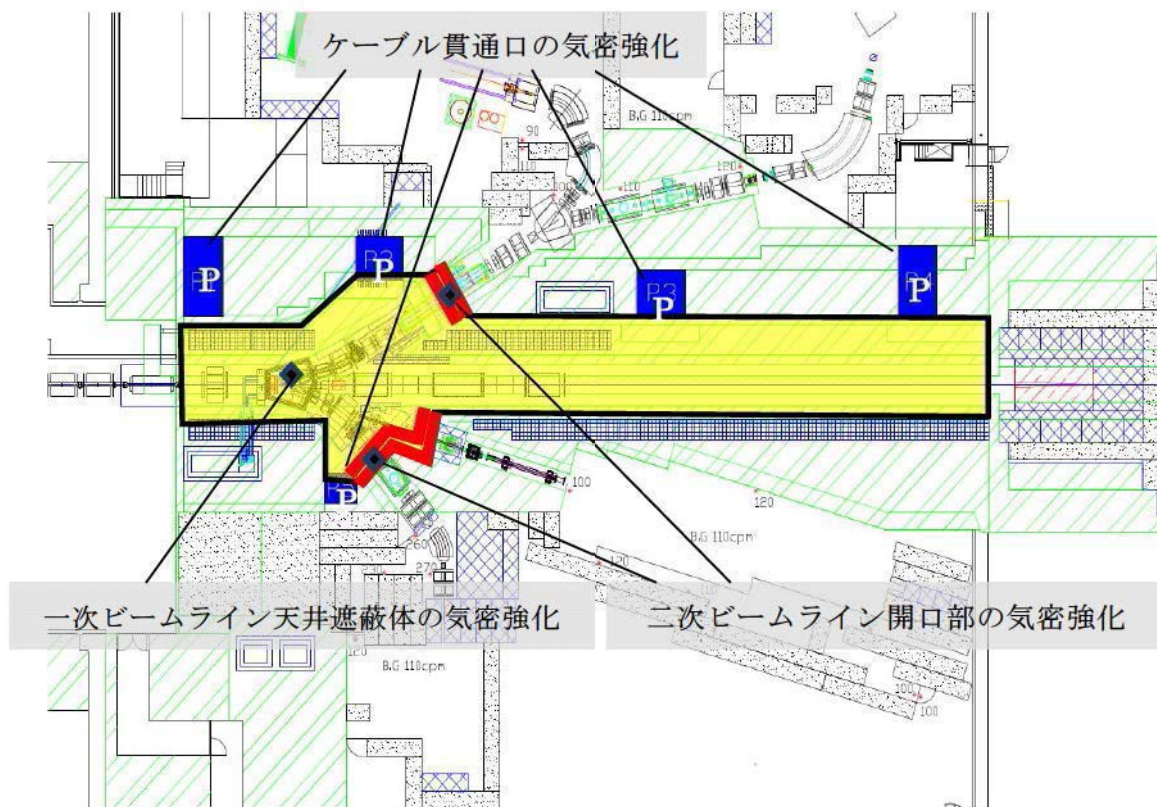


図 8.2-2 一次ビームライン室の気密強化案(平面図)

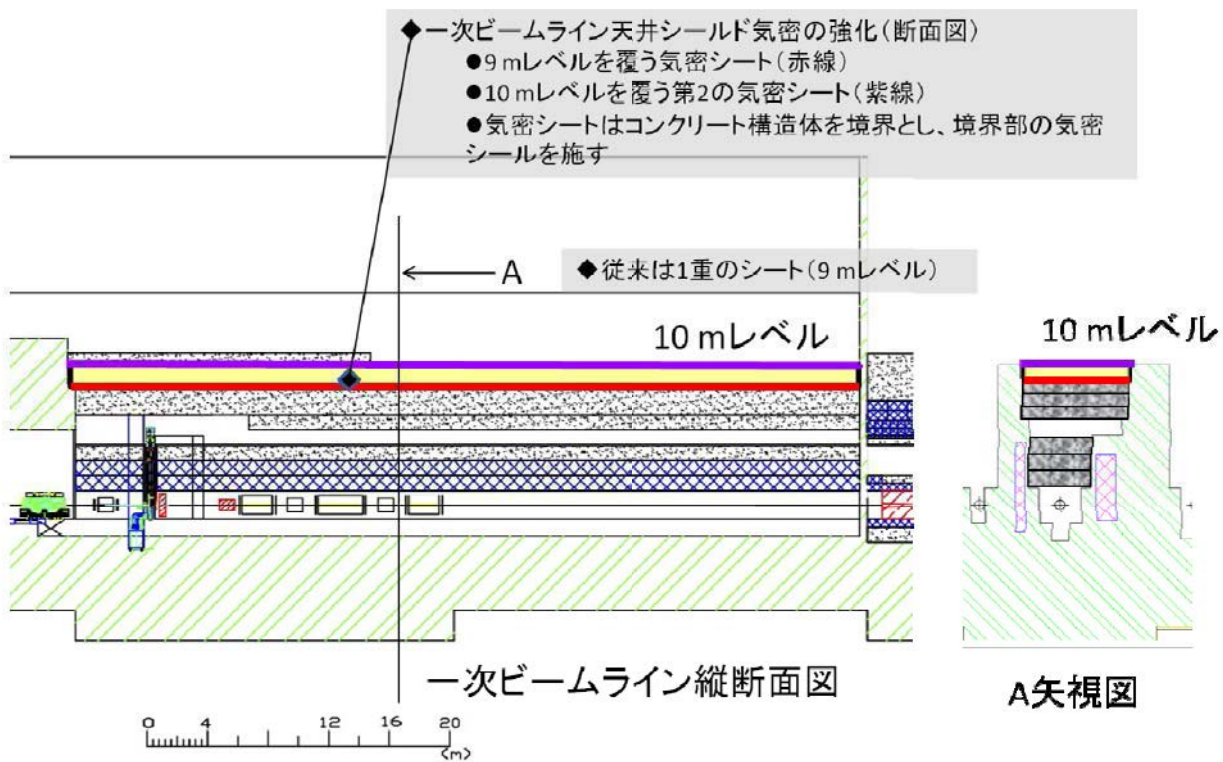


図 8.2-3 一次ビームライン室の気密強化案(断面図)

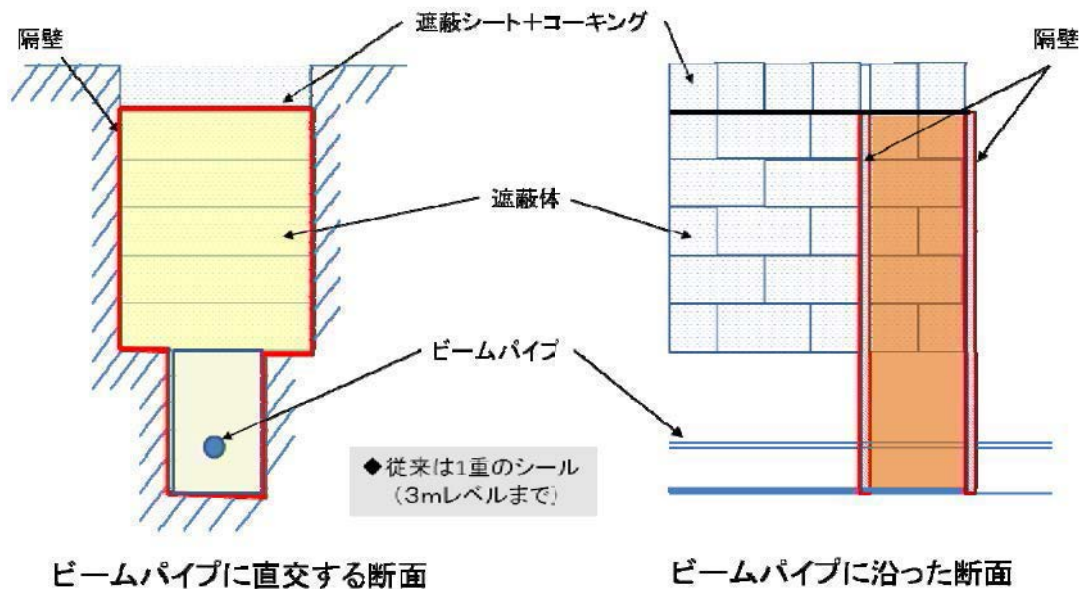


図 8.2-4 二次ビームライン開口部の気密強化案（断面図）

8.2.3 ハドロン実験ホール

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、次の対策を取る。下記の対策を施したハドロン実験ホールの改修案を図 8.2-5 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。

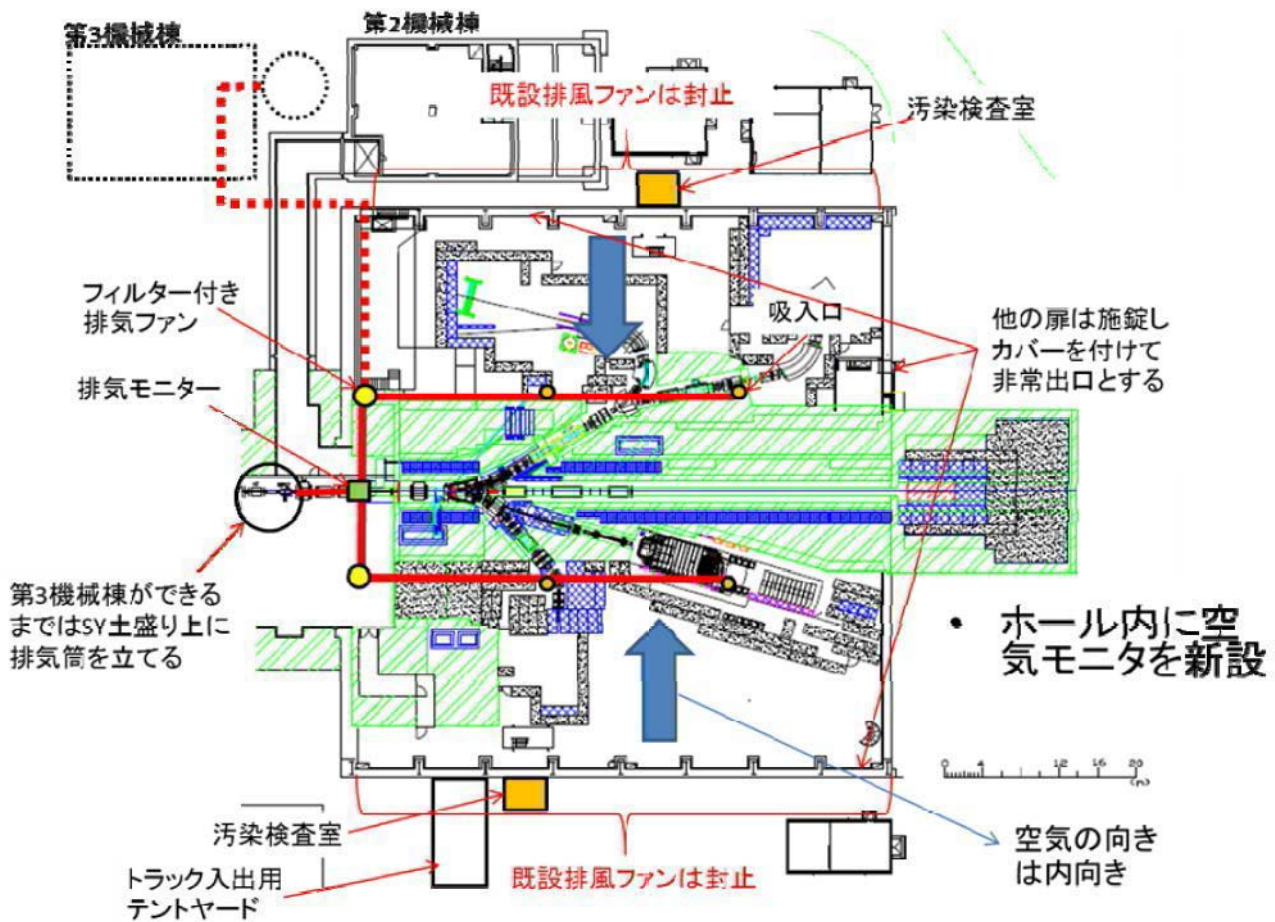


図 8.2-5 ハドロン実験ホール改修の一例

8.3 放射線情報の共有化

これまで、50 GeVシンクロトロン、ハドロン実験施設等に設置した放射線モニタは、放射線管理室によって随時監視されていたものの、当該施設のシフト員が常駐する運転管理室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要因となった。事態を繰り返さないために以下の対策を施す。

- (1) 放射線モニタ情報と各施設の安全系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、常時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。図 8.3 に放射線モニタ値の共有化に係るイメージを示す。

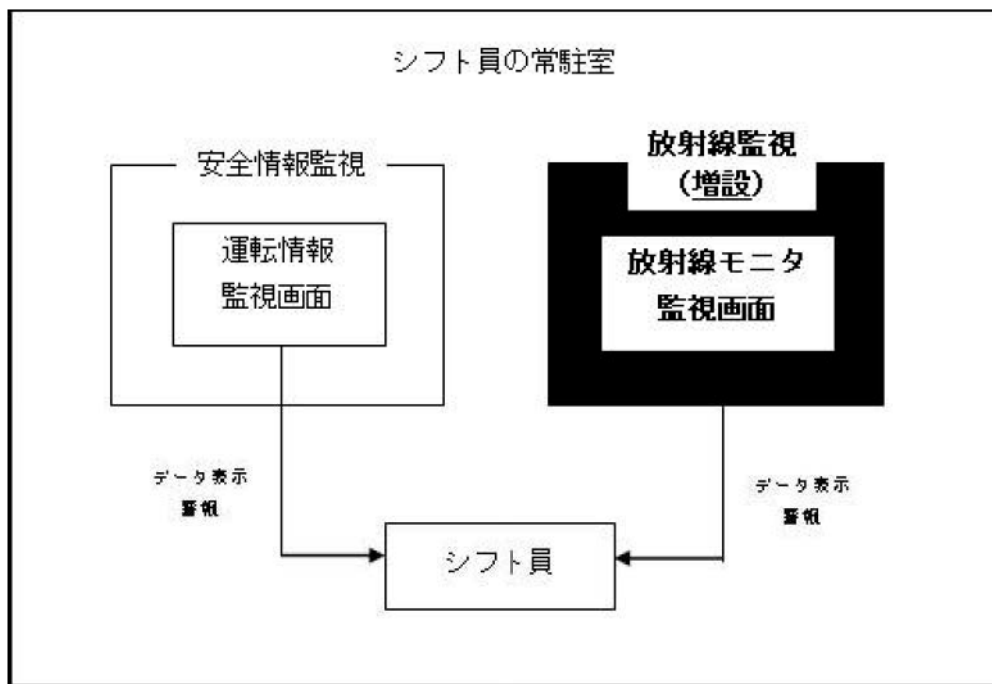


図 8.3 放射線モニタ値共有化のイメージ

8.4 施設及び機器面における原因と再発防止策のまとめ

施設及び機器面における事故の原因に対して、8.1章から8.3章で示した再発防止策を表8.4-1にまとめる。

表 8.4-1 事象及び原因と再発防止策の対応表

事象と原因	再発防止策
事象：異常なビーム取り出し 原因：ビーム取り出し装置の誤作動	<ul style="list-style-type: none"> ・EQ 電磁石電源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
事象：標的の損傷 原因：大強度の短パルスが金標的を照射	<ul style="list-style-type: none"> ・標的の温度異常検知の高速化 (損傷の検知を強化) ・調整中の標的退避、ビーム軌道の変更
事象：一次ビームラインへの漏えい 原因：金標的が気密容器に入れられていなかった	<ul style="list-style-type: none"> ・標的容器の気密化 ・ガス中の放射性物質濃度や圧力の監視 (漏えいの検知を強化)
事象：ハドロン実験ホールへの漏えい 原因：一次ビームラインの空気遮へい部の気密度が十分でなかった	<ul style="list-style-type: none"> ・一次ビームライン室境界を気密構造とする ・空気の放射能モニタを設置し異常検知時にビーム停止 (異常の拡大の防止)
事象：施設外への漏えい 原因：排風ファンを動作し排気	<ul style="list-style-type: none"> ・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行う
事象：放射線モニタ情報の共有化不足 原因：モニタ端末の設置場所や警報レベルが適切でなかった	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線モニタ情報の視認性の向上 ・注意喚起警報の設定

8.5 安全管理における再発防止策

7.2 章で展開した、事故の安全管理上の原因分析の結果、再発防止策への課題は、情報管理体制の形成、法令や判断基準の教育、規定類の見直し、そして放射線安全評価体制の見直しであった。これの課題の対する再発防止策は、

- (1) 現状の規定類を見直し、施設の隅々まで安全を浸透させる規定類（具体的想定事象に基づく行動基準を反映させた「マニュアル」「運転手引」）に改定すること。
- (2) これらの規定類に基づいた行動を実践するための教育及び訓練を実施すること。
- (3) 安全上の重要な設備の設計及び変更や、運転手引等の変更について、十分な審議をする放射線安全評価体制の強化を図ること。

である。

今回の事故を元にした今後の緊急時対応の検討策として、異常事象に対応するための体制を明確に定め、安全の規定類をその体制に対応させ、その体制を実践できる訓練を行うことが安全管理における再発防止策として集約できる。

そこで、異常事象に対応するための体制案、放射線安全上の評価体制案、教育訓練及び基準の定期的な見直し案について、以下に示す。

8.5.1 異常事象に対応するための体制

既存の異常事象への対応体制では、非常事態に至る前の「予兆現象」を的確に捉えることができない。また、J-PARCの最大の特徴である「複数の施設で構成される多目的施設」に特有の各施設間及び放射線管理室との「情報の共有」ができていなかった。さらに、「多数の実験利用者が不定期に利用する施設」に特有の利用者を含めた「避難体制」も組み込む必要がある。

これらの課題を解決する手段として、「基本体制」（通常の運転体制に相当）「注意体制」（今回の事故を元に新たに設ける「判断に迷う事象」や「複数の施設との情報共有が必要な事象」といった異常の兆候に対応する体制）、「非常体制」（現状の規定類で定められている直ちに通報事象であると判断できる体制）の3段階の体制を設定する。それぞれの体制で、指揮、情報収集、連絡等の役割を明確化し、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、異常を検知するMPSについて、原因調査、誘発事象の確認、復帰方法等をマニュアル化し、運転員レベルで対応できるもの（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。

それぞれの体制の概要を以下に示す。

①基本体制案（通常の運転体制）

状況：通常の運転状況

シフトリーダー初期対応：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。

安全対策として以下の手順を追加する。

- ・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、又は放射線異常が見られた場合には、「注意体制」に移行する。
- ・発見者が「通報事象」を認知した場合、「注意体制」を経ずに「非常体制」に移行すると同時に、非常用電話に通報する。
- ・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。
- ・誘発事象が無いと判断でき、放射線異常が見られない場合のみ、シフトリーダーが運転再開の指示を出す。

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注意体制案

状況：高リスク MPS の発報や、PPS の発報等の「放射線被ばくまたは環境への影響の恐れがある」事象で、組織的対応が必要と判断された場合。

シフトリーダー初期対応：直ちに非常電話に通報し、施設管理責任者及び放射線管理責任者に連絡し、当該施設関係者を召集する。施設管理責任者が到着するまではシフトリーダーは施設管理責任者の代行として現場を指揮し、情報収集を行うなどの活動を進めておく。

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、事故へ拡大する事を未然に防止するための初期対応を行う。人命に危険が生じ又はそのおそれのある場合には避難誘導を行う。「通報事象」に進展するおそ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「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非常体制案

状況：「通報事象」が発生した場合。

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：施設管理責任者は速やかにセンター関係者に連絡する。また、現場から情報を収集してそれを一元管理するとともに、原因の除去、災害の拡大の防止及び人命救助等の現場で必要な活動を実施し、人命に危険が生じ又はそのおそれのある場合には避難誘導を行う。

運転再開の判断：センター長（放射線取扱主任者の同意）

以上を表 8.5-1 にまとめる。図 8-5.1 に表 8.5-1 に対応した異常事象に対応するための体制の移行の流れを示す。

表 8.5-1 異常事象に対応するための体制の移行案

体制	異常の内容	移行時の連絡【連絡者】	指揮者【指揮所】 対応要員	運転再開の判断
基本体制	・低リスク MPS の発報等		・シフトリーダー【各施設】 ・運転員、装置担当者	シフトリーダー
注意体制	・高リスク MPS の発報や、PPS の発報等	・非常用電話 ・施設管理責任者【シフトリーダー】	・施設管理責任者【中央制御棟】 ・施設関係者	施設管理責任者（放射線取扱主任者の同意）
非常体制	・「通報事象」に該当する場合	・センター関係者【施設管理責任者】	・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	センター長（放射線取扱主任者の同意）

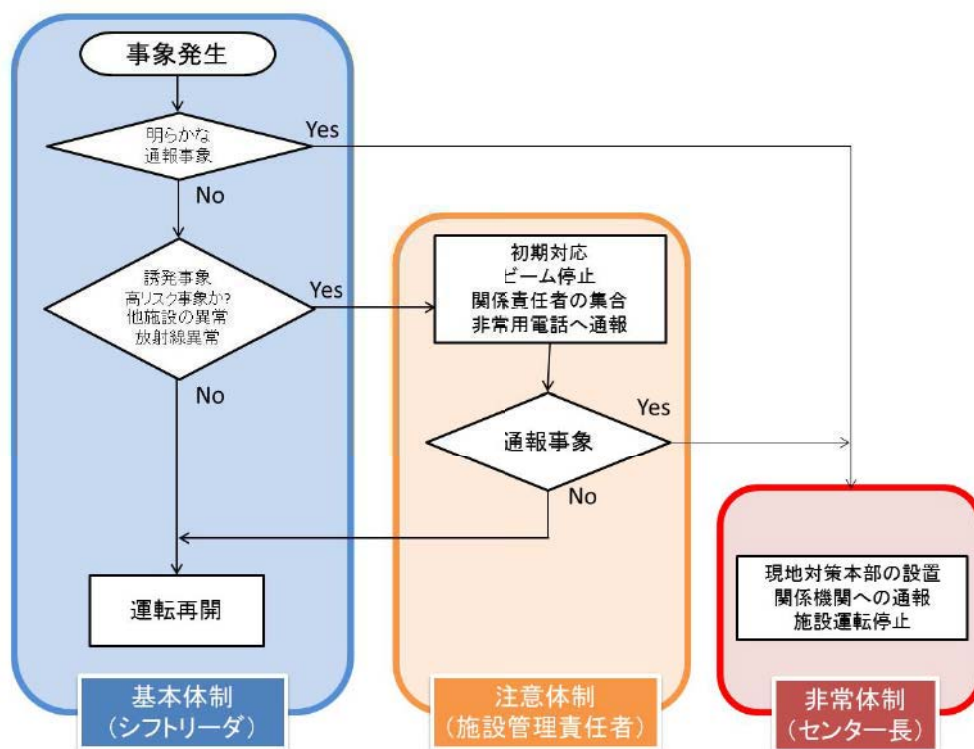


図 8.5-1 異常事象に対応するための体制案の移行の流れ

8.5.2 放射線安全上の評価体制

放射線安全にかかわる検討・評価体制の現状と見直し案を図8.5-2に示す。

放射線安全上の評価過程において、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されなければならない。現状の評価体制で、これらの情報が集約され、議論できる場はJ-PARC内部に設けられた放射線安全検討会である。

放射線安全検討会は開催頻度も少なく、その構成メンバーは、J-PARCセンターのディビジョン長を中心とした役職指定者がほとんどで、議論を深める広い分野の専門家で構成されていなかった。そこで、メンバーに外部の有識者を含めた装置や安全の専門家を入れ、評価事項の基準を明確にし、安全上の重要な設備の設計及び変更や、運転手引等の変更について必ず審議することとし、チェック機能の強化を図る。さらに、必要に応じ専門部会を設置することにより、より深い評価を行えるようにして、J-PARCの安全審査の強化を図る。強化の象徴として放射線安全検討会の名称を放射線安全評価委員会に変更する。

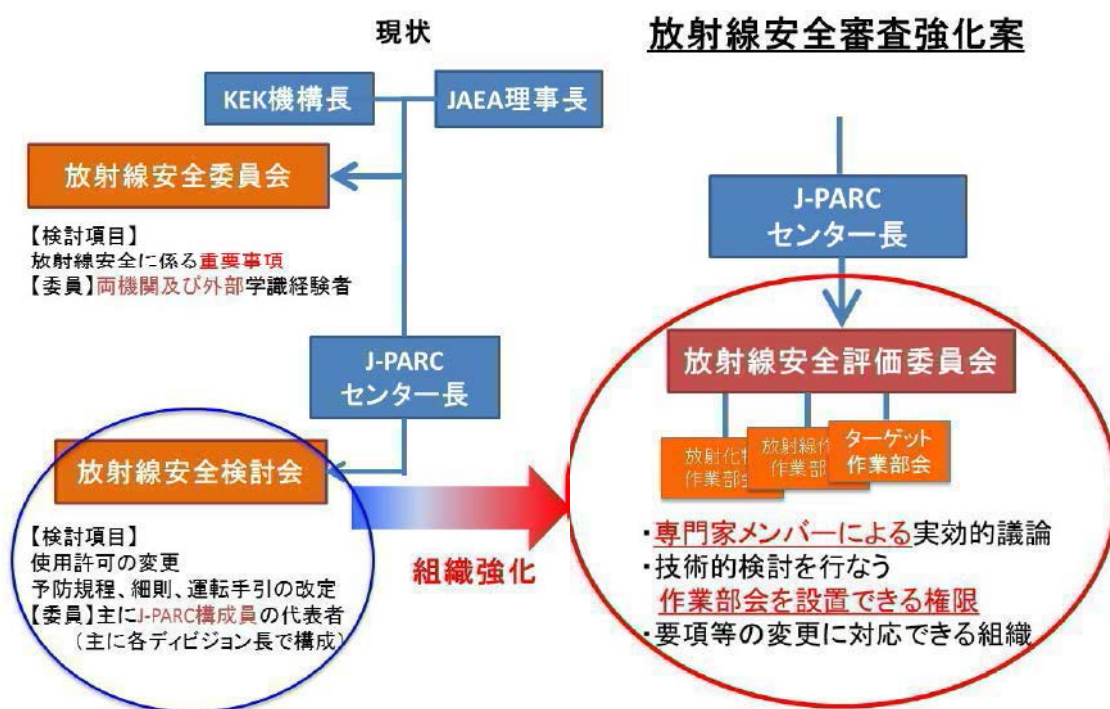


図8.5-2：放射線安全に係わる検討・評価体制の現状と見直し案

8.5.3 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、各人の安全意識の維持・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構成員と実験利用者に対する不断の教育・訓練の実施が不可欠である。特に、事故体制・対応に関する教育を実施することが重要である。また、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実験利用者が多数いたことを踏まえて、実験利用者に対して

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、実験利用者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、新規に導入した「注意体制」を導入し、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。

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よってリスクは増大する。リスクに対応した警報の閾値や、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も必要不可欠である。

8.5.4 安全管理における再発防止策のまとめ

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評価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 8.5-2 に問題点と対策をまとめる。これらについては、今後規定等を整備し、訓練等を行いながら改善を継続する。

表 8.5-2 安全管理及び緊急時に実施すべき手順等の問題点と対策

原因から抽出された課題	対 策
異常に対応する体制が不十分 ・ 通報遅れの防止 ・ 漏えい拡大の防止 ・ 被ばくの防止	・ 異常事象に対応する体制として「基本体制」「注意体制」「非常体制」を設け、明確な指揮者の下で、情報収集と共有、通報連絡、現場対応及び避難誘導を行う
評価体制が不十分 ・ 設計や変更への十分な審議 ・ 潜在リスクへの事前対応	・ 委員を、外部有識者を含めた専門家とする ・ 審査事項の基準を定め、チェック機能を強化する ・ 必要に応じ専門部会を設置する ・ 放射線安全検討会を放射線安全評価委員会に改組し、安全評価の強化を図る
教育訓練と基準の定期的見直しが不十分 ・ 異常対応への実践訓練 ・ 安全文化の醸成	・ 実験利用者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を行い、対応のルーチンワーク化を防止