

## 加速器施設における安全性向上への取り組み

### VARIOUS EFFORTS TO IMPROVE SAFETY AT ACCELERATOR FACILITIES

別所光太郎#

Kotaro Bessho #

J-PARC Center (KEK)

#### Abstract

At accelerator facilities, in addition to radiation safety aspects such as radiation shielding, dosimetry, interlocks, management of radioactive materials, and radiation exposure control for workers, there are also important safety issues such as electrical safety for high-power electrical devices, fire prevention, safety measures in crane works, working at high places, dealing with the risk of oxygen deficiency, handling high-pressure gas, refrigerants, laser equipment, and combustible materials such as insulating oil. Furthermore, emergency preparedness in case of fire, radiation accidents, or earthquakes is also an important safety issue at accelerator facilities. We introduce several examples of safety-related issues and activities at various accelerator facilities in Japan, and some characteristic activities at overseas accelerator facilities. We also introduce several safety-related activities that J-PARC has continued to undertake since learning from the radioactive material leak incident in 2013.

#### 1. はじめに

加速器施設においては、放射線の遮蔽や線量評価、インターロック、放射化物の管理、作業者の被ばく管理等の放射線安全の観点に加え、大電力機器に対する電気安全確保、火災予防、高圧ガス設備、低温設備、レーザー機器、絶縁油等の危険物、酸欠リスクへの対処、クレーンや高所作業における安全確保など、様々なリスクに対する安全対策が重要な課題として存在する(表 1)。また、加速器施設内における火災や放射線事故、地震等の自然災害の発生時における緊急時対応のための備えも、安全上の重要な課題である。

本報告では、国内の多くの加速器施設からこれまでに報告されている安全上の課題への対処や技術的取り組み、海外の加速器施設における特徴的な取り組みに加え、J-PARC[1]で 2013 年に発生した放射性物質漏えい事故[2, 3]を教訓に取り組みを続けてきた活動の一部も含め、安全に関わる取り組み事例を紹介する。

表 1: 加速器施設に存在する様々なリスク

リスク因子	リスクの内容
放射線	加速器の運転中に発生する放射線、放射能を帯びた機器から発生する放射線
放射性物質	加速粒子や二次粒子による核反応で生成される放射性核種が、様々な物質(固体部品、標的、空気、冷却水、等)中に生成・蓄積
大電力	電磁石、実験装置等の大電力(大電流・高電圧)機器
電気火災	可燃物(ケーブル被覆、断熱材、絶縁油等)と大電力機器が共存する状況
爆発・破裂	高圧ガス、液体ヘリウム・窒素、等
酸欠	液体ヘリウム・窒素、加速器の充填気体、地下や実験室の閉鎖空間
レーザー光	レーザー装置
化学物質	特殊材料標的、実験試料、洗浄用溶媒
作業安全上の様々なリスク	クレーン作業、重量物運搬、高所作業、機械加工、等

# kotaro.bessho@kek.jp

#### 2. 加速器施設における放射線安全管理

加速器施設内では、加速器の運転に伴って発生する各種の放射線、放射化により放射能を帯びた機器から発生するガンマ線などの放射線が存在する。また、加速粒子や二次粒子による核反応で生成される放射性核種が、加速器機器や標的材、加速器室の空気や機器冷却水などの様々な物質中に生成・蓄積される。これらの放射線、放射性物質に対して、各施設の状況・特徴に応じた安全対策がとられている。

本節では、著者が所属する J-PARC における放射線安全に関わる課題のうち、空気の放射化に関わる加速器室への入域管理、及び、作業者の被ばく低減に関わる状況を紹介する。

J-PARC の加速器施設・実験施設における放射線管理においては、高エネルギー陽子の加速器であることに由来して、加速器の運転中に発生する放射線は、線種が多様であること(中性子、陽子、ミュオン、ガンマ線、パイ中間子、等)、エネルギー範囲が広いこと、パルス状に発生すること、放射線レベルが急激に変動する可能性があること、などの特徴を持つ。これらの特徴に対し、放射線計測や設備運用上の工夫を踏まえた必要な設備対応がなされている[4]。

また、陽子ビームの強度が極めて大きいことに起因して様々な放射化に関係する課題が生じ、加速器停止後のビームライン機器の残留放射線レベルが高いこと、加速器室内空気や機器冷却水の放射能レベルが高いこと、標的関連機器に生成される放射能が膨大で生成核種の種類も多様であること、などが顕著な特徴として現れる。これらの特徴に関係して、放射線管理の観点からは、標的等の高線量の機器も含めた各種放射化機器の適切な取扱いと保管管理、放射能を含んだ空気や水の適切な取扱いと放出管理、作業者の被ばく管理、汚染管理、などが重要な課題となる[5]。

J-PARC の加速器運転中に加速器室の空気中に生成

される放射性核種は、空気を構成する気体成分元素の原子核と高エネルギー粒子や熱中性子との核反応により生成されるもので、 $^{15}\text{O}$ (半減期:2.04 分)、 $^{13}\text{N}$ (9.97 分)、 $^{11}\text{C}$ (20.4 分)、 $^{41}\text{Ar}$ (1.83 時間)、 $^7\text{Be}$ (53.3 日)、 $^3\text{H}$ (12.3 年)などが主要な生成核種である。これらの核種のうちで、半減期が 20 分程度までの  $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$  等がビーム運転中及び運転停止直後の主要な含有核種となる。ビーム停止後数時間が経過した後は  $^{41}\text{Ar}$  が主成分となり、酸素原子の核破砕反応で生成される  $^3\text{H}$  と  $^7\text{Be}$  も空気中の生成核種として放射線管理上重要である。これらの状況を踏まえ、J-PARC の加速器トンネル等では、ビーム運転停止後、短半減期核種の減衰を待った後に、放射化した空気を一定時間排気し、その後に入業者の入域を可能とする運用がとられている。本運用により、加速器室内の放射化された空気に由来する入業者の内部被ばくを防止している。

J-PARC における放射線業務従事者数は、2022 年度は 3,111 名であり、残留線量の高い機器のメンテナンス作業や高線量エリアでの作業等により 0.1 mSv 以上の被ばくが検出された従事者数は 77 名、最大被ばく線量は 1.6 mSv であった。全従事者に対する総被ばく線量は 26.8 人・mSv であり、ビーム強度が年々増大していることに対して総被ばく量は 20~40 人・mSv の範囲で概ね一定の水準に抑えられている。また、海外の陽子加速器施設や KEK つくばキャンパスの 12GeV-PS (2005 年に運転停止)における総被ばく量と比較しても、顕著に低い値となっている。このように J-PARC の業務従事者の被ばく量が低いレベルに抑えられている理由は、ビームロスや極力減らす加速器の設計と運用によりビームライン機器の残留線量や加速器室の空間線量が低く抑えられていることに加え、高線量エリアで行われる作業の実施方法や作業計画について事前の検討が十分に行われ、計画的に作業を実施するなどの努力が積み重なり達成されているものである。J-PARC の各施設では今後もビーム強度の増強が予定されるが、同様の取り組みを継続して被ばく量を最小限にする努力が引き続き求められる。

### 3. 加速器施設における電気安全確保

加速器施設では、多数の大電力機器が稼働しており、これらの機器に関わる不適切な取り扱いや、機器の故障等によるトラブル、正規の作業手順や安全確保のためのルールからの逸脱等により、入業者(自身、他者)に対する深刻な人的被害や、重大な設備被害が生じる危険性が考えられる。

このような状況下で電気安全を確保するため、以下のような対策が施設の状況に応じて実施されている。

- (1) 作業ルールの設定・周知と遵守 : 作業手順、通電手順、入域手順等を明確に定め、遵守・徹底する。
- (2) 物理的防護 : 電極等の露出部をできる限りなくす。機能や構造上、外部への露出が避けられない電極部等は、人が触れない場所(柵内や高所等)に設置する。
- (3) インターロック : 大電力機器が設置されたエリア入口のドア開による電源遮断、通電禁止ボタンの設置、等により安全確保に有効な設備措置を行う。

これらの対策のうち、設備対策(2),(3)については、装置の用途や周囲の状況から措置できない場合もあり、作

業上の理由から一時的にインターロックや防護カバーを解除して作業すること等もあり得る。設備面の防護措置が一部解除されている状態等においても、状況を的確に把握し、同状況の中で安全を確保するために遵守すべき事項を理解し、適切な対応を厳守することで安全を確認しながら必要な作業を実施することが重要である。

大電力機器が設置されているエリアで作業を行う場合には、入域して作業を行うエリア内の大電力機器の電源は必ずオフにし、入域者はこれらの状況を確認してから入域することが、安全確保における基本となる。これらのルールと運用を確実に遵守するための対策としては、入域制限エリアを明確にして出入りにフェンスや扉等を設置すること、電極露出部を有する装置に不用意に近づくことがないようにする措置(ガードフェンス等)、大電力機器の通電状態を明確に確認できるディスプレイ表示や機器の通電状態に対応して点灯するパトライトの設置などの対策が有効である。また、入域や通電に関わる手順や運用をマニュアルや手順書として整備し、常に最新の設備状況に対応する内容に更新しながら運用を行うこと、各人がチェックシート等で通電状態を確実に確認することなどが有効である。これらの措置を各施設の実情に合わせて組み合わせ、大電力機器のリスクに対する安全確保を確実に実施することが重要である。

大規模な加速器施設の建設や実験計画は国際協力により進められることも多く、これらの状況の作業では安全確保において通常の作業とは異なる困難さも伴う。QST 六ヶ所研究所の IFMIF 原型加速器施設[6]では、加速器本体機器は主に欧州で設計・製作され、六ヶ所研究所で、欧州側スタッフのサポートの下、日本人スタッフが中心に据え付け、コミッションング、運転を実施する体制がとられている。このような運営形態の施設の建設では、電気規格やケーブル規格の違いに加えて、作業の手順や標識、安全基準に関わる認識なども入業者の出身国により異なる場合も多いが、日欧の研究者、技術者が理解を共有して協力し合い作業が進められている。設備面の安全対策としても、電気規格の日欧間の相違について協議を重ね、日本仕様の設備の接地方式を欧州規格に合わせて全面的に変更するなどの大規模な設備対策も実施された。これらの様々な努力を踏まえ、これまでに大きな事故を発生せずにプロジェクトを進展させている参考にするべき事例として紹介したい[7]。

後述する加速器施設安全シンポジウムなどでも、電気安全上のトラブル事例が各種報告されているが、トラブルにつながった原因や背景は類似する状況も多い。(施工不良、老朽化、情報共有/引き継ぎの不足、配線系統の行先表示や負荷名称表示の不適切さ、系統誤認識、慣れた作業での検電未実施、など)これらの他施設でのトラブルの発生状況、原因、対策、教訓等も適宜参考にしながら、電気安全確保に取り組むことが有効である。加速器施設内の作業現場で電気作業を担当する職員や、業者に依頼した作業を監督する職員等に対しては、電気安全に関わる安全講習の受講[8]や関連資格の取得[9]を推奨すること等について検討することも、電気安全に関わる技術力の向上につながる対策として有効である。



#### 4. 加速器施設における電気火災防止への取り組み

加速器施設や実験施設の放射線管理区域内では、火災予防の観点から、可燃物の持ち込みはできる限り最小限にして運用されているが、ケーブル被覆材料や断熱材等として可燃性の材料を装置の一部に使用することは不可欠であり、多量の絶縁油を内部に充填した電気機器等も存在することなどから、加速器施設内での火災発生リスクをゼロにすることは容易ではない。また、地下施設では、発災時の避難経路や避難方法も制限を受ける状況があり、万一施設内で火災が発生した場合には、大きな被害につながる可能性が考えられる。これらの点から、電気火災の発生防止と拡大防止は、加速器施設の安全確保上重要な観点として、十分な配慮が必要である。

以下では、参考情報として、最近数年間に国内の加速器施設で発生した火災事象の概要を紹介する。

##### 4.1 KEK 電子陽電子入射器棟加速管組立室の火災 (2019年4月) [10, 11]

火災は、KEK つくばキャンパスの電子陽電子入射器棟に隣接する加速管組立室で発生した。火災発生時には、国際共同研究による X-band 加速管の開発に関わる作業が行われており、マイクロ波を発生する大電力パルス変調器電源が焼損し、大量の煙が発生して建屋内に蔓延した。負傷者は発生しなかったが、加速管組立室内の装置のほとんどは利用できなくなった。また、隣接する電子陽電子入射器棟にもケーブル貫通孔等を通じて多量の煤が侵入し、一部の装置については機器故障や精度低下が懸念され、復旧作業が必要となった。

本火災発生の原因は、プラスチック製のコンデンサが経年劣化により破裂し、放電により着火し延焼したものと推定された。今後はプラスチック製のコンデンサは使用せず金属管体のコンデンサを使用すること、カメラやセンサによる監視の強化、長期に維持される機器に関する知見や重要事項の継承、隣接する建屋間での情報の共有と安全措置に関わる連携を密にする重要性などが、再発防止策・教訓として挙げられた。

##### 4.2 QST 千葉地区・サイクロトロン棟地下電源室の火災 (2021年11月) [12, 13]

QST 千葉地区のサイクロトロン棟地下1階電源室に設置された NIRS-930 サイクロトロン用メインコイル電源付近から出火した。人的被害はなかったが、煤と消火用水により電源室に設置されていた多数の電気機器が使用不可能となった。また、開口部を通じて1階の本体室や操作室にも煙が充満し、建屋内の全員が屋外に退避した。火災の発生原因は、ブレーカー端子もしくは端子付近のケーブル接触部の過熱もしくは相間短絡によるものと公設消防により推定された。

事故後、火災防止と安全性向上に関わる様々な取り組みが展開され、現場職員の緊急時対応への意識改革、大電力機器の緊急点検と必要な修繕、建屋単位の避難訓練による居住者の避難経路把握・初動対応習熟・安全意識向上、総合訓練、給電遮断訓練、夜間守衛の増員や放送設備の強化、などが実施された。また、組織内

水平展開、人材育成、組織改編等に継続的に取り組む重要性が確認された。

##### 4.3 J-PARC MR 第2電源棟の火災 (2023年4月) [14, 15]

電磁石電源で異常が発生し、電源が自動停止した。職員が電源棟内を確認したところ、電源盤内で数 cm の炎を確認した。直ちに消火器で初期消火を行い、公設消防により鎮火が確認された。

事故後の原因分析の結果、電源主回路のチョッパー回路から初充電回路のトランスに回り込む高周波ノイズの影響で、トランスの2次巻線と静電シールド間でコロナ放電による絶縁劣化が徐々に進行し、最終的に火花放電に至って絶縁材料に着火し、焼損したものであることが分かった。

同電源装置に関わる再発防止策としては、新たな初充電回路として、コンバータに繋がる主系統と並列に初充電のためのバイパス回路を追加し、抵抗、ヒューズ、電流検出器で構成する回路構成の設備とした。本方式では、高周波ノイズによりバイパス回路が破損するリスクはなく、同設備の運転再開後、安全に稼働している。また、その他の機器も含めた今後の安全性確認として、チョッパー回路を有する大電力容量電源の設計製作にあたっては、チョッパー回路にトランスを接続する回路構成とする場合には、トランスに高周波ノイズが印加される可能性も考慮し、必要な絶縁対策が行われていることを十分に確認することとした。

##### 4.4 J-PARC ハドロン電源棟の火災 (2023年6月) [15, 16]

火災報知設備の発報を受け、職員が電源棟内を確認したところ、電磁石電源装置の転極器(電流の正負の向きを逆転させることで電磁石の極性を変更する装置:高さ 50 cm x 幅 55 cm x 奥行 70 cm)から火が出ていることを確認した。直ちに消火器による初期消火を行い、その後鎮火が確認された。

原因と対策については、2023年8月末時点では調査・検討中である。J-PARC 全体の電気工作物について、総点検を実施した。

欧米の大型加速器施設では、火災予防、消火活動等に関わる安全確保 (Fire Safety) に関し、多くの人的・設備的措置を踏まえた技術開発が進められている。CERN, DESY, Fermilab, ESS 等の機関は本格的な自衛消防組織を保有し、Fire Safety を専門とする技術者グループによる設備開発等が精力的に進められている。これらの施設で実用化されている特徴的な消火設備の例としては、European XFEL に設置・運用されているミスト状の水噴霧による消火システム、CERN LHC 実験 ALICE 検出器 (16 m x 16 m x 26 m, 10,000 t) に導入されている不活性気体(窒素ガス)による窒息消火システムなどが稼働しており、万一の大規模火災発生時にも効果的に消火対応が行えるよう備えている。また、トンネル内で火災が発生した際に消防隊が迅速に現場に急行できるよう、機動性が高い消火活動専用の電気自動車や電動バイクをトンネル内に常時待機させるなど、参考にできる状況も多い。今後、ILC などの大規模加速器計画の実現に向けた検

討においては、初期設備として防火設備や消火設備に関わる考慮も重要な要素になるように思われる。

## 5. 加速器施設における緊急時の対応と安全確保に関わる取り組み

加速器施設内での火災や放射線事故等の発生可能性に対し、異常の発生や兆候を迅速・効果的に検知する設備、異常事態発生後の事象収束や人員避難、通報連絡等への対応を効率的に行うための設備面およびソフト面からの対策が、緊急時における安全確保のために重要である。

J-PARCでは、2013年に、機器の誤作動で発生した異常な短パルス陽子ビームによって金標的が損傷し、放射性物質が実験ホール及び管理区域外に漏えいする事故が発生した[2, 3]。事故後に取られた安全対策のうち、類似事故の再発防止のために導入された設備の1つとして、標的機器に損傷等の異常が発生した場合にそれを迅速に検知することを目的に、放射線検出器を利用する標的異常監視装置がハドロン実験施設の標的システムに設置された[2, 17, 18]。同システムは、標的容器の充填気体を放射線検出器(Ge 半導体検出器)に循環させ、標的から異常な放射性核種が放出されていないことを常時監視するもので、放射線の計数レベルが閾値を超えた場合にはビームを自動停止するシステムとなっている。異常検知時には、ガンマ線ピークのエネルギーから放射性核種の種類を同定し、発生した異常の内容(標的の損傷、ビーム窓の損傷、気密容器のリーク、など)を推定することが可能である。中性子生成標的として高度に放射化された多量の液体水銀を設備内に備える物質・生命科学実験施設(MLF)においても、水銀の蒸気が標的容器や配管から万一漏えいした場合に Ge 半導体検出器で迅速・高感度に検知するシステムが稼働している[19]。これらの標的異常を監視する装置により、ビーム運転中の標的設備の健全性を確認し、安全・安定な加速器実験の遂行に貢献している。

多量の液体ヘリウムを使用する超伝導加速空洞が多数連なる European XFEL においては、ヘリウム漏えい事象を赤外線サーモカメラで監視する装置が稼働している。同装置による監視はビーム運転中も継続され、ヘリウムの漏えい検知に加えて、補助的な火災検知装置としても機能するものと期待され、運用方法の改善と信頼性向上のための技術検討が継続されている。

また、加速器トンネル内で緊急事態が発生した際に入域者の退避を補助する設備として、European XFEL では、トンネル内入域者の個人位置を検知するシステムを利用した入域者管理が 2012 年から実施されている。トンネル入域者の位置をリアルタイムに把握できれば、緊急時にも効率的な避難誘導や指示、救助活動等に活用が期待できる。日本国内においても、東日本大震災時の加速器トンネルからの人員避難に関わる経験等も踏まえ、民間企業を含む複数機関の研究者・技術者が協力して、スマートフォン端末を利用する新たな個人位置識別システムを開発し、J-PARC MR 全周に Wi-Fi アクセスポイントを設置して運用を行っている。同システムは、個人位置検知システムとしての機能に加え、音声、メッセージ、写真等を双方向に通信することも可能であり、緊急時の避

難誘導等に関わる対応に加えて、平常時にはトンネル内での作業を支援するツール等として活用することが可能である[20, 21]。開発チームのウェブサイトが開発成果等の情報をまとめており、本技術に興味をお持ちの方はご連絡いただければ幸いです[22]。

緊急時の対応力を向上するために各加速器施設で実施可能なソフト面からの対策としては、異常事象が発生した際の対応の内容や手順を整理し、運転手引きや運用マニュアルとして関係者にあらかじめ十分に周知し理解を共有しておくこと、外部への通報や施設内関係者に直ちに連絡や情報共有を行うべき事象の基準や、施設からの退避基準を明確に定め、施設関係者に周知しておくことは効果的な対策である。また、各施設で想定される様々な緊急事態のシナリオをもとに対応訓練を実施することで、万一異常事態が発生した場合の対応の内容や手順を整理し、関係者が緊急時に必要とされる具体的な行動内容を経験し実感することも、緊急時対応力の向上に有効である[2, 3]。

## 6. 加速器施設間での安全に関わる情報交流に関わる取り組み

各加速器施設における安全上の課題やトラブル経験、取り組みを共有し活用することは、加速器分野全体としての安全性向上につながる取り組みと考える。

2013 年から開催されている「加速器施設安全シンポジウム」では、各回ごとに設定するテーマを中心に、加速器施設における安全に関わる課題と解決のための様々な取り組みが紹介され、情報の共有と関係者の交流がはかられている[23]。

2024 年 6 月には、世界の加速器施設や大型実験施設の安全・装置関係者等が集まって、安全に係わる様々な話題を交換する International Technical Safety Forum (ITSF) も、理化学研究所和光キャンパスにおいて開催される予定である[24]。

加速器施設の運転・維持等に携わる多くの皆様にも、これらの会合への参加や、話題の提供等をご検討いただければ幸いです。

## 7. おわりに

本稿では、加速器施設における様々なリスクに対する安全確保の取り組みと緊急時の対応に関わる取り組み、情報共有に関わる取り組み等の事例を紹介した。

安全の確保は研究活動を進めるための基盤として不可欠な要素であり、何より、加速器施設で働く一人ひとりが安全・健康に業務を遂行できるように意識を高めることで、加速器施設における安全な作業環境がさらに向上するようになれば幸いです。

## 謝辞

本発表をまとめるにあたっては、多くの方々にご協力とご助言をいただきました。特に、J-PARCセンターの多くの皆様(安全ディビジョン、加速器ディビジョン、素粒子原子核ディビジョン、他)、理研・仁科加速器科学研究センター・田中鐘信様、QST 六ヶ所研究所・春日井敦様、QST 千葉地区・北川敦様、涌井崇志様、KEK 加速器研

究施設・古川和朗様、DESY/European XFEL・Fabian Saretzki 氏、Sven Mohr 氏からは、多くの資料と情報の提供をいただきました。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] J-PARC センター,  
<https://j-parc.jp/c/index.html>
- [2] J-PARC センター, J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故関連情報  
<http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>
- [3] 小松原健, “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”, 高エネルギーニュース, 2015, 34, pp. 56-61.
- [4] 宮本幸博, “J-PARC の放射線安全管理設備”, 放計協ニュース, 2003, 32, pp. 2-3.
- [5] 中島宏, 宮本幸博, “J-PARC における放射線安全対策とその管理”, RADIOISOTOPES, 2008, 57, pp. 253-260.
- [6] G. Pruneri *et al.*, “Conventional facilities of the linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc)”, Fusion Eng. Des., 2017, 124, pp. 1101-1107.
- [7] K. Hasegawa *et al.*, “Status of IFMIF prototype accelerator (LIPAc)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 777-780.
- [8] 安全衛生マネジメント協会, 講習会一覧,  
<https://www.aemk.or.jp/kyoiku.html>
- [9] 電気技術者試験センター,  
<https://www.shiken.or.jp/>
- [10] KEK ニュースルーム, 電子陽電子入射器棟・加速管組立室における火災について,  
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/04/04/1340/>
- [11] K. Furukawa *et al.*, “Fire and safety at KEK electron/positron injector linac”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 1091-1095.
- [12] 量研機構プレスリリース, 千葉地区内サイクロトロン棟地下電源室の火災発生について,  
<https://www.qst.go.jp/site/press/20211126.html>
- [13] A. Sugiura *et al.*, “Status report of NIRS-930 and HM-18 cyclotrons at QST-IQMS”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 1155-1157.
- [14] J-PARC センターお知らせ, J-PARC MR 第 2 電源棟における火災発生について,  
<https://j-parc.jp/c/information/2023/04/25001143.html>
- [15] 茨城県, 原子力施設における事故・故障等に関する情報,  
<https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/gentai/oshirasae.html>
- [16] KEK お知らせ, J-PARC ハドロン電源棟における火災発生について,  
<https://www.kek.jp/ja/notice/20230622/>
- [17] R. Muto *et al.*, “Monitoring system for the gold target by radiation detectors in Hadron Experimental Facility at J-PARC”, EPJ Web of Conferences, 2017, 153, pp. 07004-1 - 07004-6.
- [18] K. Bessho *et al.*, “Analysis of radionuclides in helium gas circulating through the target chamber at the J-PARC Hadron Experimental Facility”, JPS Conf. Proc., 2021, 33, pp. 011143-1 - 011143-6.
- [19] M. Harada *et al.*, “Unified mercury radioactivity monitoring system at J-PARC and its operation experiences”, JPS Conf. Proc., 2021, 33, pp. 011099-1 - 011099-6.
- [20] K. Ishii *et al.*, “Development of disaster prevention system for accelerator tunnel”, Proc. International Particle Accelerator Conference (IPAC 21), Campinas (Online meeting), Brazil, May 2021, TUPAB315, pp. 2228-2230.
- [21] 飛島建設, J-PARC センター, プレスリリース, J-PARC MR における ICT を活用した防災システムの開発,  
<https://j-parc.jp/c/press-release/2022/03/31000876.html>
- [22] 加速器トンネルにおける位置情報を活用した防災システム,  
<https://j-parc.jp/safety/PRCS/>
- [23] 加速器施設安全シンポジウム,  
<http://j-parc.jp/safety/safe-sympo/>
- [24] International Technical Safety Forum 2024,  
<http://j-parc.jp/safety/ITSF2024/>