講座

加速器施設における放射線管理

I. J-PARC における放射線安全対策とその管理[†]

中島 宏, 宮本幸博

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Key Words : radiation safety, J-PARC, proton accelerator, shielding design,
radioactivity, radiation monitor

1. 序

大強度陽子加速器計画¹⁾⁻⁴⁾は, 世界最高レベルのビーム強度を有する複合陽子加速器施設を建設し, そこで生み出される多彩な二次粒子を用いた新しい研究手段を提供することにより, 物質科学, 生命科学, 原子核・素粒子物理学等, 基礎科学から産業応用までの幅広い分野の研究を推進することを目的としている。本計画では, J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設) を, 日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で, JAEA 原子力科学研究所敷地内に建設を進めている。J-PARC は, 陽子リニアック, 3 GeV 及び 50 GeV 陽子シンクロトロン加速器を中心として, 3 GeV-333 μ A (1 MW) 陽子ビームを用いる物質・生命科学実験施設及び 50 GeV-15 μ A (0.75 MW) 陽子ビームを用いるハドロン実験施設及びニュートリノ実験施設から構成されており, 将来, 陽子リニアックによる陽子ビームを臨界実験装置に入射して, 加速器駆動による炉物理実験を行う核変換実験施設が建設される予定である

(図 1)。現在, 本施設では, 平成 21 年度の施設完成を目指して, 平成 18 年度から陽子リニアック及び 3 GeV 陽子シンクロトロン加速器の試運転が行われている。ここでは, 施設建設において検討した放射線安全対策を中心に述べる。

2. J-PARC にかかる法令

本施設の大半は加速器施設であることから, これにかかる法令は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 (障防法) である。しかしながら, 将来計画にある核変換実験施設は臨界実験装置であるので, 核原料物質, 核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (炉規法) の対象施設となる。障防法にかかる許可は使用にかかる許可であるため, 使用に際して許可を取得する。一方, 炉規法の対象となる場合は, 設置にかかる許可であるため, 着工前に認可が必要となる。そのため, 障防法のための対象部分とは, 明確な区別が必要となる。

また, 本計画では大強度の加速器施設建設を目指しているが, 建設初期から計画当初の大強度出力を達成することは困難である。そこで, 段階的に出力を上昇させるため, 申請もそれに対応して段階的に行われ, 何年にもわたって出力上昇のための施設変更と申請が繰り返されることとなる。

[†]Radiation Control for Accelerator Facility.

I. Radiation Safety and Management at J-PARC.
Hiroshi NAKASHIMA and Yukihiro MIYAMOTO: Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki Pref. 319-1195, Japan.

図1 J-PARC 概念図

3. J-PARC の放射線施設としての安全上の特徴

本施設の放射線施設としての安全上の特徴は、

- 1) 高エネルギー陽子を取り扱う施設であること（最大 50 GeV）
 - 2) 大出力の放射線発生施設であること（最大 1 MW）
 - 3) 大規模な加速器施設であること（総延長約 3 km）
- である。

高エネルギー陽子は、最終的にターゲットやビームダンプで全てのエネルギーを失う。その際、陽子は物質との相互作用として、核破碎反応等を起こし、大量の中性子、陽子、中間子、 γ 線等を生成する。更に、これら二次粒子が他の核とカスケード状に反応を継続し、ハドロンカスケードと呼ばれる現象を起こす。これら反応過程で生じる多種多様な放射線は、全て放射線安全設計の対象となるが、特に、透過力の高い、高エネルギー中性子が主に安全対策における対象となる。

また、本施設は大出力であるため、本施設における遮へい体、特にターゲット周り等の遮へ

い体については、鉄やコンクリートで数 m にも及ぶ厚さを必要とし、それら厚い遮へい体を透過する中性子及び γ 線は、スカイシャインにより事業所境界等における線量評価対象となる。また、大量の中性子、陽子は周囲の空気、水等の放射化に寄与するため、安全対策上、室内空气中放射能濃度、排気・排水中における放射能濃度も評価しなければならない。

更に、加速器施設においては、加速途中において、ビーム損失を生じる場合があり、特に本施設のような大出力の加速器施設では、僅かな割合のビーム損失でも安全対策上重要な放射線源となる。本施設のように大規模である場合、その放射線源が施設全体に分散したものとなり、これら全てを評価の対象とする必要がある。

4. 放射線安全上の課題と対策

本施設は大強度かつ大規模なものであることから、その施設設計・建設段階から、経済的側面も考慮した合理的設計は当然のこととして、円滑で効率的な施設運用を念頭におく必要がある。そのために、本施設の運転・管理・利用方法等を想定し、安全上の課題に対し、対策が行われている。

J-PARC の放射線安全上の特徴から、主な課題として、

- 1) 放射線遮へい
- 2) 空気, 冷却水における放射能の取り扱い
- 3) 放射化した機器の保守

がある。以下にそれらの対策について述べる。また、次章においては、これらを監視するものとして、現在、既に運用を開始しているリニアック施設及び 3 GeV シンクロトロン施設の放射線モニタリング設備について触れる。

1) 放射線遮へい

施設周辺の公衆や施設内作業員の放射線安全を確保するために、法令値に対して、設計手法における精度を考慮し、合理的な裕度を持った設計目標値を事業所境界、管理区域境界に設定し、施設設計を行った。施設周辺の公衆の安全確保のために、本施設は一部実験施設を除いて、大半の主要部を地下に設置し、場所によっては数 m 以上の厚い鉄やコンクリートを用いて、十分な遮へいを行っている。

放射線遮へい設計において、最も問題となるのは放射線の線源条件となるビーム損失率の設定である。本施設では、加速器施設全体的に局所ロスのない部分について、加速器機器の保守時近接性 (Hands on Maintenance) の要請から設定した。この設計条件を設定するに際しては、ICFA (International Committee on Future Accelerators) における報告書⁵⁾及び KEK 等既存の加速器施設における経験⁶⁾から、修理・保守・点検する際の作業員の被ばくを考慮して⁷⁾設定している。また、加速器の入射部・出射部においてはある程度のビーム損失が避けられず、実験施設のターゲットやビームダンプでは全てのビームを失うため、これらについては局所的に計画出力を設定している。

事業所境界・管理区域境界における放射線線量及び放射能量を評価するため、バルク遮へい厚さ、放射線ストリーミング、スカイシャイン、機器、機器冷却水及び施設内の空気の放射化に

ついて検討する必要がある。本施設は大規模であることから、高エネルギー放射線を扱う施設ではあるが、施設設計全体に詳細な計算手法を適用することは現実的ではない。そこで、加速器施設のほぼ大半の、一様ビーム損失を仮定したところに対しては、簡易計算手法や既存施設等における経験則^{8) - 13)}から推定し、設計を行っている^{14), 15)}。一方、加速器施設の入・出射部やビームダンプ、実験施設ターゲットやビームダンプにおいては、形状が複雑であり、また一様ビーム損失を仮定したところに比して、ビーム損失が大きいことから、周辺への影響が大きい。そこで、詳細な放射線輸送計算手法として、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コード: PHITS¹⁶⁾, MARS¹⁷⁾, MCNPX¹⁸⁾を用いた設計を行った。放射線・放射能の全体的な計算システムの概略を図 2 に示す。ここで、20 MeV 以下の中性子や γ 線の輸送計算には、JENDL¹⁹⁾などの輸送計算用断面積データセットを用いている。また、20 MeV 以下の核種生成計算についても、同様の断面積データセットなどを用いている。なお、これらの設計計算精度については、ベンチマーク実験データによる検証結果及び既存施設の経験に基づいて、独自に評価し、設計における裕度を設定した^{14), 15)}。

2) 空気, 冷却水における放射能の取り扱い

本施設では、特に局所ロス部におけるビーム損失が大きく、それに伴う二次中性子、陽子により、空気、冷却水が放射化する。放射化した空気については、 ^{13}N , ^{11}C , ^{15}O 等ガス状の物質が大半であるため、高性能フィルタを用いても環境への放出基準以下にすることは困難であるが、核破砕反応により生じる核種はほとんどが短半減期核種である。そこで、施設運転中は加速器室の換気を停止し、加速器室から直接外に放出しない構造としている。また、冷却水の扱いについても、運転中は外に直接放出せず、加速器停止後、貯留槽において安全を確認した後、放出する方式を採用している。

図2 詳細計算手法による設計計算の流れ

図3 窒素・酸素の陽子入射によるトリチウム生成断面積

施設の構造や空気・冷却水の取り扱いシナリオ及び空調機器や冷却水循環機器の能力を決めるため、施設内空気や加速器機器・ビームダンプ等の冷却水中における放射能の生成量を評価した。これらの生成については、基本的にKEKにおける実測値に基づいて、スケーリングにより評価している。しかしながら、このスケーリングは必ずしも全ての場合に適用できない。一方、PHITSやMCNPXを用いる計算手法では、

酸素や窒素のような軽核からの核破碎生成物を計算する精度が十分ではない。そこで、放射能評価上問題となる、空気・冷却水からの生成核種は限られていることから、実験値及び計算値を組み合わせる生成断面積を予め評価した²⁰⁾。図3に酸素及び窒素におけるトリチウム生成断面積の例を示す。これにそれぞれの場で計算した中性子束及び陽子束を掛け、それぞれの核種の崩壊を計算して、空気・冷却水中の放射能を

図4 加速器トンネル等にかかる管理区域の空調管理概念図

評価している。このようにして得た時間依存の放射能量から、空気、冷却水の総量及び換気、入れ替え回数を仮定し、空气中、冷却水中の放射能濃度を算定する。これを、法令に定められた排出濃度等と比較することを繰り返し、施設全体の構造、機器能力を決定した。

先にも述べたように、本施設では運転中に換気を停止する。そのため、換気停止の間、空気の漏洩を検知する構造が必要となる。そこで、本施設では、図4に示すように、ビームライン等加速器機器が設置される空間と、外部や非汚染管理区域の間に、汚染が予想される管理区域である中間部を設ける構造とした。それぞれの空間の境界は極力空気の漏洩のない構造とする他、この中間部を負圧とし、この空間における放射能濃度をモニタにより監視し、異常があれば加速器を停止することとしている。加速器停止後は十分な時間をおき、短半減期核種の減衰を待つと共に、排気設備に設置されたフィルタにより ${}^7\text{Be}$ 等を除去して連続監視しながら排気筒より排出する。

冷却水についても、一次系を閉ループとし、熱交換器を通して二次系冷却水が循環する。冷却水では、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{15}\text{O}$ の他、スラッジ等に含まれるCo、Mn、Fe等の放射性同位元素が経験上予想されている。一次系冷却水の扱いに際しては、運転停止後短半減期核種の減衰を待ち、イオン交換樹脂により金属元素を除去する。そこで、最終的に外部放出の測定の際、注意すべきは ${}^3\text{H}$ である。また、イオン交換樹脂が設置される機械室においては、残留放射能による空間線量が高くなる箇所があり、一部追加遮へいを必要としている。

3) 放射化した機器の保守

本施設の加速器における保守は、原則的に人が近接して行う。その保守を行うためには、ビーム損失による加速器の放射化による残留放射能からの線量を制限する必要がある。本施設では大強度であるため、通常の加速器施設のビーム損失設定では遥かにこれを超えるおそれがある。そこで、先に述べたように保守を可能とする、遮へい設計上のビーム損失率を想定した。運用に際しては、この損失仮定を著しく逸脱しないように加速器を運転する必要がある。そこで、本施設では、これを確認するために、ビームロスモニタを各所に設置し、過剰なビーム損失が生じないように検知している。

本施設の加速器の保守に際しては、加速機器の放射化による線量の他、加速器を設置するトンネルのコンクリート壁における残留放射能からの線量による被ばくを想定している²¹⁾。そこで、この被ばくを低減するために、一部トンネルには、低放射化コンクリートを使用している。これは、粗骨材として使用している岩石に石灰岩を用いたものであり、作業が想定される加速器停止後数週間における残留放射能による空間線量を、J-PARCで一般的に用いているコンクリートの残留放射能による空間線量に比して、評価上、約1/10に低減させたものである²²⁾。

実験施設においては、ターゲットの放射化による放射能の量が、施設設計に多大な影響を及ぼす。特に、ターゲット交換のような保守のシナリオの設定には重要である。一例として、物質・生命科学実験施設では、ターゲットとして水銀を採用している²³⁾。そのステンレス製ターゲット容器は大強度の陽子ビームに直接曝されるため、放射線損傷等により劣化することから、その耐用年数が計算されている。また、ビーム入射窓、ターゲット周辺に配置される液体水素減速材の容器等の機器についても同様に、劣化が想定されているため、耐用期間を評価し、定期的に交換することが予定されている。これら機器については、ターゲット後方に隣接したホ

ットセルにおいてその交換作業を行い、その地下に設置した放射化機器保管設備室に保管する。これら放射化量評価では、図2に示すようにPHITS及びMCNPXにより、水銀等の構成核種から生じる核破碎反応生成核種を計算すると共に、DCHAIN-SP2001²⁴⁾を用いて、核種崩壊による放射能の時間変化を評価している。この計算結果に基づいて、ホットセルの遮へい能力、空調等の機器能力等の設計・評価及び交換シナリオの作成が行われた²³⁾。

5. 放射線安全管理設備

本施設の放射線安全管理設備を整備する上では、先のエネルギー、強度、規模の他に、放射線発生過程にあるビームパルス特性、電磁波ノイズ等の影響を考慮する必要がある。放射線モニタに関しては、監視対象とする放射線の種類が、従来の原子炉・RI施設では主として γ 線であるのに対し、本施設では数百 MeV の高エネルギーから熱エネルギー領域にわたる中性子がその主たる対象となる。また、加速器運転中に発生する放射線がパルス状であること、及び、線源条件を超えるビーム損失が発生した場合にバースト状の放射線レベル上昇の可能性があることから、一般的な放射線測定機器では十分な応答が得られない状況も予想される。更に、様々な加速機器の影響により施設内の電磁波ノイズ・電源ノイズ等のレベルが高いため、機器の誤動作の確率が高く、十分な対策が必要である。

一方、先にも述べたように、本施設では加速器運転に伴い、加速器機器、ターゲット、空気、冷却水等について、広範囲かつ高レベルの放射化が予想されている。このため、本施設の加速器トンネル内は高線量エリアであるとともに、ある程度の表面汚染が定期的に存在する区域として扱わざるを得ず、厳重な被ばく管理及び汚染管理が必要となる。また、施設外への空気・水の排出管理も重要となる。

本施設の放射線安全管理設備の構成としては、施設の規模が大きいため、施設ごとに分散

処理し、各サブシステムを中央制御棟の集中監視システムで一元管理するものとした。すでに稼働中のリニアック施設及び3 GeV シンクロトロン施設のサブシステムでは、「最新のIT技術、FA技術を導入することにより信頼性とコストという相反する要求を両立させる」という基本コンセプトのもと、システム整備を実施した²⁵⁾。以下にその特徴を述べる。

1) 放射線モニタリング

放射線を監視するエリアモニタについては、監視エリアごとに放射線の種類、エネルギーに対応した検出器を選択すると共に、一部検出器については、異常な放射線レベルの上昇を検知して、速やかに加速器を停止させるために、高速インターロック回路を導入している。

室内空気や排気中の放射能濃度を監視する空気モニタについては、測定対象核種、管理濃度基準に応じて検出器を選択し、加速器トンネルからの放射能漏洩監視や排気の可否判定が可能のように配置している。

これらの放射線モニタからなるサブシステムでは、通線工事・放射線監視盤機器等のコスト合理化と将来の拡張性を考慮して、各放射線モニタと監視盤の通信ラインをLAN化し、監視盤を汎用PLCで構成したLAN-PLC方式放射線モニタリングシステム²⁶⁾を導入している。このシステムでは、①ループ状に配線した専用光Ethernet上のTCP/IP通信で測定データ等の伝送を行う、②放射線監視盤の信頼性を確保するためPLCを二重化する、③インターロック信号については別に専用光回線を設け高速化・高信頼化を図る等の対応を行っている。

また、加速器運転後の立ち入りに際しては、必ず、残留放射線のサーベイを行い、安全を確認した上で、加速器室へ入室することとしている。このため、現在は放射線管理員がサーベイを実施しているが、今後、このサーベイを自動化することを目指し、自走式エリアモニタの開発試験を行っている。

2) 入退出管理

入退出管理設備に関しては、本施設では多数の共同利用実験者が来ることが予想されるため、個人認証によるアクセス管理が不可欠である。そこで、個人線量計に非接触 ID 素子を組み込み、各出入口に ID リーダーを整備することにより、個人線量計の着用と管理区域アクセスの同時管理を行っている。また、本施設の加速器トンネルは、万一、加速器運転中に作業者が取り残されることがあれば人命にかかわるエリアであり、加速器停止後も高レベルの残留放射線場と定常的な汚染が想定される。そこで、加速器トンネルの入退出管理及び被ばく管理を徹底させるため、ID リーダー、ゲートモニタ、アラーム線量計及び加速器インターロックシステムの連動を図り、個人線量計、アラーム線量計、パーソナルキーを携行しなければ加速器トンネルへ入域できない一連の処理の流れを採用した。また、当該区域からの退出時には、体表面モニタ及び搬出物品モニタによる汚染検査が必須となるようゲート管理を行っている。

集中監視システムにおいては、高速光ネットワークによる専用基幹 LAN 及びデュアル UNIX システムによる二重化サーバを導入することで高信頼化を図るとともに、極力、パッケージソフト等を活用し、ブラウザ、JAVA、MS-Office 等を利用した汎用性・拡張性の高い監視システムを構築している。

6. ま と め

本施設は世界トップクラスの大強度・高エネルギー陽子加速器を中心とした大規模実験施設である。また、将来的には加速器駆動未臨界炉に関する核変換物理を行うために、原子力施設である臨界集合体との連結も予定されている。そのため、規模及び法的側面から、従来の加速器施設以上に安全性の確保に対して慎重にならなければならない。このような施設設計・建設において、経済的合理性を達成しつつ、安全性を確保していくために、筆者らが現在進めてい

ることは、安全に対する基本的思想が全体として統一された設計、施設運用・管理に即した設計条件の設定、信頼性の高いデータ及び設計手法の採用、そして、それらを踏まえた適切な放射線安全管理である。現在、これらの放射線安全管理上の対策は、施設の使用にかかる許可に関する安全審査を通してその妥当性が検証されてきており、また、一部開始された運用の中で実証されてきている。今後、施設運用におけるビームのエネルギー及び強度が増すにつれて、また、施設利用者等の増加に伴い、当初予想し得なかったことが生じることも念頭に置きつつ、放射線安全管理を行っていくこととなる。

文 献

- 1) 大強度陽子加速器計画, JAERI-Tech, 2000-003 (2000)
- 2) Nagamiya, S., JAERI-KEK joint project on high intensity proton accelerators, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Suppl. 1**, 40-48 (2000)
- 3) Tanaka, S., High intensity proton accelerator project in JAPAN (J-PARC), *Radiat. Prot. Dosim.*, **115**, 33-43 (2005)
- 4) Nagamiya, S., Construction status of the J-PARC project, *J. Nucl. Mater.*, **343**, 1-6 (2005)
- 5) Beam halo and scraping, Proc. 7th ICFA mini-workshop on high intensity high brightness hadron beams, Interlaken resort on Lake Como, Wisconsin, U.S.A. (1999)
- 6) Yamane, I., Radiation protection measures for the maintenance service of JHF 3-GeV ring, KEK Internal Report, 98-7 (1998)
- 7) Nakashima, H. et al., Estimation of activity and dose distributions around a proton linac induced by beam spill, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Suppl. 1**, 870-874 (2000)
- 8) Tesch, K., A simple estimation of the lateral shielding for proton accelerators in the energy range 50 to 1000 MeV, *Radiat. Prot. Dosim.*, **11**, 165 (1985)
- 9) Moyer, B. J., Method of calculation of the shielding enclosure for the Berkeley Bevatron, Proc. 1st Int. Conf. shielding around high energy accel-

- erators, 65 (1962)
- 10) Uwamino, Y. et al., Measurement and calculation of neutron leakage from a medical electron accelerator, *Med. Phys.*, **13**(3), 374 (1986)
 - 11) Tayama, R. et al., DUCT-III, A simple design code for duct-streaming radiations, KEK Internal, 2001-8, KEK (2001)
 - 12) Masukawa, F. et al., Verification of the DUCT-III for calculation of high energy neutron streaming, JAERI-Tech, 2003-018, JAERI (2003) (in Japanese)
 - 13) Stapleton, G. B., O'Brien, K. and Thomas, R., Accelerator skyshine : Tyger, tyger, burning brihgt, *Particle Accel.*, **44**(1), 1 (1994)
 - 14) Nakashima, H. et al., Radiation safety design for the J-PARC project, *Radiat. Prot. Dosim.*, **115**, 564-568 (2005)
 - 15) Nakashima, H. et al., Radiation shielding study for the J-PARC project, Proc. shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities-SATIF 8, 22-24 May 2006 (2006)
 - 16) Iwase, H. et al., Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1142 (2002)
 - 17) Mokhov, N. V., The Mars Code System User's Guide, Fermilab-FN-628 (1995) ; Mokhov, N. V. and Krivosheev, O. E., MARS Code Status, Fermilab- Conf-00/181 (2000) ; <http://www-ap.fnal.gov/MARS>
 - 18) Waters, L. S. (Ed.), MCNPX Users Manual-Version 2.1.5, TPO-E83-G-UG-X-00001, LANL (1999)
 - 19) Shibata, K. et al., Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision-3 : JENDL-3.3, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1125 (2002)
 - 20) Furihata, S. and Nakashima, H., Analysis of activation yields by INC/GEM, JAERI-Conf 2001-006, 236 (2001)
 - 21) Nakane, Y. et al., Estimation of radioactivity and residual gamma-ray dose around a collimator at 3-GeV proton synchrotron ring of J-PARC facility, Proc. of 11th international congress of the international radiation protection association (IRPA-11), Madrid, Spain (2004)
 - 22) Matsuda, N. et al., A study on induced radioactivity in a low-activationized concrete for J-PARC, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Suppl.4**, 74-77 (2004)
 - 23) 大強度陽子加速器プロジェクト物質・生命科学実験施設機器技術設計書, JAERI-Tech, 2004-001 (2004)
 - 24) 甲斐哲也, 他, DCHAIN-SP 2001 : 高エネルギー粒子誘導放射能計算コード, JAERI-Data/Code, 2001-016 (2001)
 - 25) 宮本幸博, 他, 大強度陽子加速器施設における放射線安全管理設備設計上の基本的考え方, JAERI-Tech, 2002-086 (2002)
 - 26) 宮本幸博, 他, J-PARC 用 LAN-PLC 方式放射線モニタ規格, JAERI-Tech, 2004-054 (2004)
-