小特集

核融合炉内外におけるトリチウムの回収技術

5 . ふげん発電所におけるトリチウム管理

北 村 高 一 , 北 端 琢 也 , 松 島 聡
(核燃料サイクル開発機構 敦賀本部 新型転換炉ふげん発電所)

Development and Experience of Tritium Control in Heavy Water Reactor "FUGEN"

KITAMURA Koichi, KITABATA Takuya and MATSUSHIMA Akira

Fugen Nuclear power station, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Fukui 914-8510, Japan

(Received 10 October 2002)

Abstract

Tritium is generated mainly from the activation of the heavy water moderator at Fugen. Its control is a key issue for heavy water handling technologies there. This paper describes the equipment considerations, methods of tritium monitoring, radiation work control, gaseous/liquid emission control, and personnel dose management for tritium that were developed and improved through the more than two decades of operation of the Fugen Nuclear Power Station.

Keywords:

heavy water reactor, equipment consideration, tritium monitoring method, tritium protection, tritium work control, tritium internal dose control, tritium emission control

5.1 はじめに

新型転換炉ふげん発電所（以下、「ふげん」）は、電気出力 165 MW の重水減速、沸騰軽水冷却、圧力管型の新型転換炉の原型炉である。ふげんでは、プルトニウムを効率良く燃焼させるため、核分裂で発生した中性子をあまり吸収させることなく十分に減速させることができる重水（重水濃度約 99.7 wt%）を減速材として使用している。このため、重水を構成する重水素が中性子を吸収してトリチウムを生成する。

減速材（重水）中のトリチウム濃度は、Fig. 1 に示すとおり、運転時間とともに上昇しており、2000年には約 260 Bq/cm³に達している。トリチウム放出管理およびトリチウム内部被ばく管理はふげんがこれまでに独自に開発・改良してきた技術により十分に低い値で管理されて

author's e-mail: kitamura@fugen.t-hq.jnc.go.jp

きている。

ここでは、ふげんが20年以上の運転の中で確立してきたトリチウム管理の実績について紹介する。

Fig. 1 Changes of ³H concentration in heavy water.

5.2 系統概要

ふげんの原子炉本体は、Fig. 2 に示すようにカランドリアタンク、圧力管、鉄水遮へい体で構成されている。カランドリアタンクは、正方格子状に配列された224本のカランドリア管をその内部に垂直に取り付けた縦型円筒タンクであり、カランドリア管の外側スペースに減速材である重水が満たされている。燃料にはプルトニウム・ウラン混合酸化物または微濃縮 UO_2 を用いており、28ピンの燃料要素から成る円筒型燃料集合体が1体ずつ圧力管に装荷されている。燃料集合体は圧力管内を流れる原子炉冷却水(軽水)で冷却される。原子炉冷却水の温度・圧力条件は280, 6.8 MPa で通常の沸騰水型原子力発電炉と同等である。また、発生した蒸気は蒸気ドラムで冷却水と分離された後、直接タービン・発電機に導かれる。減速材として使用されている重水は約140トンが装荷され重水濃度は99.7 wt%に保たれている。重水のカバーガスとしてヘリウムが用いられており、通常運転中、重水はヘリウムガスを巻き込みながら重水ダンプタンクに流れ落ち、重水循環ポンプによって循環される。

一方、重水の水化学維持のために、イオン交換樹脂が用いられている。これらイオン交換樹脂の交換作業に伴い軽水が重水に混入するため、劣化した重水が年間およそ6~7 m^3 発生する。また、重水・ヘリウム系機器の保守作業や重水の化学分析に伴い年間1 m^3 弱の劣化重水が発生する。

ふげんでは、運転等に伴い発生した劣化重水を再利用するため、2機の重水精製装置を導入し、ふげん独自の重水リサイクル技術を確認した[12]。水電解法を利用した重水精製装置1は、95 wt%以上の高濃度劣化重水を処理し、年間4.4トンの重水を精製できる。世界初の疎水性白金触媒による水・水素同位体交換反応法を利用した

Fig. 2 Overview of Primary Cooling system of Fugen.

Fig. 3 Heavy water recycling flow in Fugen.

重水精製装置2は、95 wt%未満の低濃度劣化重水を処理し、年間10 m^3 の重水を精製できる。ふげんの重水運用リサイクルの概念をFig. 3に示す。1979年に重水精製装置1を導入し、高濃度劣化重水の処理を行ってきたが、1987年に重水精製装置2を導入し、それまで貯蔵されていた低濃度劣化重水の処理が可能となるとともに、ふげんの重水精製能力が増強された。その後、重水精製装置2の単独の運転によりふげんで発生する劣化重水を全量処理できる見通しが得られたことから、重水精製装置1を1999年に停止している。

5.3 トリチウム対策

5.3.1 設備対策

重水・ヘリウム系機器の設計に際しては、重水系においては、炉心の核特性上、重水の純度の維持が要求されること、また、重水系・ヘリウム系ともに、トリチウムが含まれていることから、重水およびトリチウムの種々の漏洩・拡散防止対策が採られている[13]。

重水循環ポンプは、回転軸シールのないキャンドラータープンプを採用し(Fig. 4)、密閉構造とし、重水の漏洩を防止している。また、主要弁にはベローズシール弁を採用し、管継手は溶接構造とすることにより重水およびトリチウムの漏洩・拡散を防止している。また、重水が漏洩した場合のトリチウムの拡散防止対策として、重水・ヘリウム系機器は隔離された部屋に設置し、室内をトリチウム除去換気系(TRVS)で換気している。

トリチウム除去換気系(TRVS)はFig. 5に示すように、作業環境中のトリチウムを含んだ空気を吸引し、モレキュラシーブでトリチウムを含んだ水分を除去した後、作業環境中に空気を戻す換気系で、原子炉建屋および重水・ヘリウム系機器室を換気するほか、重水・ヘリウム系機器の開放点検時にも使用され、トリチウムの拡散を

Fig. 4 Heavy water circulation pump (Canned rotor type).

Fig. 5 Schematic diagram of Tritium Removal Ventilation System (TRVS).

防止している[23]. 2つの吸着塔から構成され、一方が水分を吸着している間、もう一方は乾燥・冷却される。回収された空気中の水分は、液体廃棄物として放出している。ふげんでは現在、原子炉施設および原子炉補助建屋を換気するもの(定格処理流量 1,110 Nm³/h)、重水精製装置 1の装置廻りを換気するもの(定格処理流量 200 Nm³/h)、重水精製装置 2の装置廻りを換気するもの(定格処理流量 500 Nm³/h)、重水精製装置 2の建屋全体環境を換気するために増強されたもの(定格処理流量 6,000 Nm³/h)の4系統が存在する。

5.3.2 トリチウム測定方法

トリチウムは、最大エネルギーが 18.6 keV の弱いβ線を放出する核種である。作業環境中の空気中トリチウム濃度を測定するためには、測定対象空気を電離箱内に直接流入しての測定方法や、凝縮水として採取し後に液

Fig. 6 Schematic diagram of Membrane separation type ionization chamber.

体シンチレーションカウンタで測定する方法がある。

ふげんでは、迅速かつ精度良く測定する方法を改良・開発してきた[14]。

(1) 電離箱式トリチウムモニタ

電離箱式トリチウムモニタは、対象空気を直接検出器内に流入して空気中トリチウム濃度を連続的に測定することができる。しかし、天然核種の Rn, Tn 等の影響を受け、検出感度は 7×10^{-2} Bq/cm³ 程度の低感度であるが、機器の開放点検等の高濃度が予想される作業環境下において、トレンド変動等の監視モニタとして有効に使用している。

(2) 膜分離式トリチウムモニタ

電離箱式トリチウムモニタにおいて、Rn, Tn 等の天然核種の影響を避けるため、それらを分離してトリチウムのみを測定できる膜分離式トリチウムモニタを開発した[16]。Fig. 6 に概略図を示す。電離箱検出器の前に水分のみを分離するパーフロロスルホン酸樹脂膜を置き、この膜を通過した水蒸気状トリチウムを測定するモニタである。従来の電離箱式トリチウムモニタより10倍程度感度が向上し、作業環境中の空気中トリチウム濃度監視に使用されているほか、主排気筒モニタ、エリアトリチウムモニタとしても使用されている。

(3) 冷却凝縮捕集法

作業環境中の空気中トリチウム濃度を比較的迅速に高感度で測定するために、ふげんではハンディクーラーを用いた冷却凝縮捕集法により空気中の水分を捕捉し、後に液体シンチレーションカウンタで測定する方法を用いてきた。ハンディクーラーは、実験室内の恒温水槽等の温度調節のための冷却器であるが、冷却管の表面は -20℃ まで低下させることができるため、これを20分間

程度空气中で放置することにより、測定に必要な 2 cm^3 程度の試料水を採取することができる。検出感度は 10^{-5} Bq/cm^3 程度である。

(4) 除湿器による液体捕集法

1週間程度の期間内の作業環境における空气中トリチウム濃度を測定するために、家庭用の除湿機を用いて空气中的水分を捕集して、この水分を液体シンチレーションカウンタで測定する方法が定常の放射線管理のために用いられている。検出感度は 10^{-5} Bq/cm^3 程度である。

5.3.3 トリチウム防護服

重水・ヘリウム系機器の分解点検等を実施する場合には、作業雰囲気の状態に応じてトリチウム防護服を着用し、体内へのトリチウムの取り込みを防止している。空気供給型のエアラインマスクと防水性の防護服を組み合わせ使用することで、防護服の内部にビニールチューブを配置し、空気を送り込むことにより服の内部を微正圧状態とし、防護服と体表面の隙間からのトリチウム侵入をも防止している。当初は塩化ビニール製の加圧型防護スーツを採用していたが、内部に送り込んだ空気により防護服が大きく膨らみ作業性に問題があったため、Fig. 7 に示すようなネオプレンゴムを使用したウェットスーツタイプの防護スーツに改良し、作業性を向上させた。防護係数は50程度である[14]。

5.3.4 作業管理

重水・ヘリウム系機器の開放点検時において、作業環境へのトリチウムの漏洩・拡散が予想される場合には、基本的にビニールシートによるクリーンハウスを設置して作業を行っている。クリーンハウス内はトリチウム除去換気系(TRVS)により換気し、負圧維持されることにより、トリチウムのハウス外への拡散を防止している。

また、ハウス内のトリチウム濃度は、膜分離式トリチウムモニタで連続監視するほか、作業前後および機器の

Fig. 8 Setting up clean house (working place isolation).

Table 1 Standard of wearing protection gear.

Tritium concentration in Air (Bq/cm^3)	< 0.07	0.07 ~ 0.7	> 0.7
Protection equipment	Not required	Air line mask only	Tritium protection suit + Air line mask

開放時等の作業の節目ごとにハンディクーラーを用いた測定を行い正確な作業環境の把握に努めている。ハウス外のトリチウム濃度は、適宜、ハンディクーラーによる測定で確認し、ハウス外へのトリチウム拡散を監視している。作業状況を Fig. 8 に示す[24]。

作業者は Table 1 に示すように空气中トリチウム濃度の作業環境に応じてエアラインマスクおよびトリチウム防護服を着用し作業を行う。

5.3.5 重水精製建屋におけるトリチウム対策強化

重水精製装置は独立した建屋内に設置されている。同建屋内のトリチウム対策は、従来からトリチウム除去換気系(TRVS)による換気、4チャンネルの膜分離式トリチウムモニタによる建屋全体の連続監視により実施してきたが、トリチウムの漏洩・拡散時に迅速に対処し、環境へのトリチウム放出をできる限り最小限に抑えることを目的として、2000年3月にエリアの小区画化および従来のトリチウム除去換気系(TRVS)の10倍の容量を持つトリチウム除去換気系(S-TRVS)の設置によるトリチウム対策の強化を図った。

Fig. 9 に示すとおり、重水漏洩が想定される重水精製装置廻りをポリカーボネイト板により覆い、漏洩個所を特定しやすいように6つの部屋に小区画した。区画された部屋はコンパートメント室という。

Fig. 10 に実施したトリチウム対策強化の概略図を示

Fig. 7 Diver-type tritium protection suit.

Fig. 9 Compartment of the D₂O Upgrader's building. Fig. 10 Strengthened countermeasures in the D₂O upgrader's building.

す。各コンパートメント室内は6チャンネルの膜分離式トリチウムモニタにより常時空气中トリチウム濃度を監視するほか、大容量トリチウム除去換気系(S-TRVS)により常時室内は吸引されている。エリアの小区画化、トリチウム除去換気系の大容量化により、トリチウムの漏洩・拡散対策の迅速化が図れた。また、コンパートメント室外の重水漏洩においては、一般換気系の排気ラインに5チャンネルの膜分離式トリチウムモニタトリチウムモニタを設置することにより対策を図った。トリチウムモニタが濃度上昇を感知した場合には、一般換気系から大容量トリチウム除去換気系(S-TRVS)に自動的に切り替わり、建屋外へのトリチウム拡散を防止している。さらに排気筒トリチウムモニタを2チャンネル化とし、信頼性を向上させている。

5.4 トリチウム内部被ばく管理

ふげんで作業する作業員のトリチウムによる内部被ばくを測定するために、作業員の尿中のトリチウム濃度を

Fig. 11 Actual occupational tritium exposure dose.

測定している。ふげんでは、作業員が放射線業務従事者として指定される前および解除前に作業員全員の尿中のトリチウム濃度測定を全身カウンタ(ホールボディカウンタ)と同時に実施している。また、3ヶ月以上ふげんで作業する作業員については3ヶ月ごとの定期測定も行っている。これらとは別に、作業員が高トリチウム濃度環境下で作業し、トリチウム内部被ばくが考えられる場合には、その都度測定を実施している。

Fig. 11にトリチウム内部被ばくによる総線量の推移を示す。1989年度を除き、1～5人・mSvで推移し、非常に低い値で管理されている。1989年度については、定期検査期間中において、原子炉建屋の換気系が長期間停止したため、防護具の着用基準値以下ではあるものの、建屋内の空气中トリチウム濃度が若干上昇したことによるものである。なお、これまでにICRPが推奨する内部被ばくの記録レベル2 mSvを超えた作業員はいない〔2・4〕。

5.5 トリチウム放出管理

ふげんの運転開始以来の気体状、液体状のトリチウム放出実績と重水中トリチウム濃度をFig. 12に示す。運転開始後約10年間については、重水中トリチウム濃度の上昇にほぼ比例するように放出量が増加しているが、主と

Fig. 12 Actual tritium emission.

してトリチウム除去換気系の積極的な利用等により、1988年以降は気体状のトリチウム放出量は抑制されてきている。また、液体状のトリチウムについても機器の開放点検前の十分な水切りや乾燥作業の適用により、徐々に放出量が低減されており、総放出量は保安規定に定める気体状トリチウム 18 TBq および液体状トリチウム 11 TBq 以下の年間管理目標値を十分下回る値に保たれている[24]。

5.6 まとめ

ふげんの20年以上の運転を通じて種々の重水・トリチウム管理技術を蓄積することができた。

設備上の対策により原子炉運転中における重水の漏洩はなく、重水・ヘリウム系機器室の作業環境においても、空气中トリチウム濃度は法令に定める空气中濃度限度 0.8 Bq/cm³以下に管理されている。重水精製建屋のトリチウム対策の強化においては、重水漏洩時にも迅速かつ確実なトリチウム回収を可能としたことにより、直接環境へ放出されることなく管理されている。また、作業者のトリチウム内部被ばくにおいても、作業管理、防護服の改良により、重水中のトリチウム濃度が年々上昇し

ているにもかかわらず、これまでに異常な被ばくはなく、総線量も十分低い値に管理されてきている。

今後ともこれまでのトリチウム管理技術を活用し、また、さらなる改善を図りつつ、トリチウム放出管理、被ばく管理に努めていく。

参考文献

- [1] 新型転換炉原型炉「ふげん」技術成果の概要, PNC TN1410 91-052.
- [2] T. Kitabata, Heavy Water Management and Radiation Protection against Tritium in the Fugen Nuclear Power Station, PNC TN3413 97-002.
- [3] K. Kitamura, Tritium Control Experience in Fugen PNC TN3411 97-008.
- [4] 松島 聡 他: 「ふげんにおけるトリチウム管理」 サイクル機構技報 No.11 2001.6.
- [5] 鈴木和也 他: 「膜分離式トリチウムモニタの開発」 動燃技報 No.80 (1991.12).
- [6] K. Suzuki, "Experience of Occupational Dose Reduction at the Fugen Nuclear Power Station", *Proc of International Conference on Radiation Effects and Protection*, Mito (1992).