



講座 大量トリチウム取り扱い技術開発30年の成果と今後の課題

2. 大量トリチウムの取り扱いに関する研究成果(1) —トリチウムの閉じ込め, 安全取り扱い実績の積み重ね—

波多野雄治¹⁾, 山田正行²⁾, 林 巧²⁾

¹⁾富山大学水素同位体科学研究センター, ²⁾日本原子力研究開発機構トリチウム工学研究グループ

(原稿受付: 2010年2月17日)

現在最も実現性の高い核融合炉は、重水素とトリチウム（三重水素、水素の放射性同位元素）を燃焼させるものであり、百万 kW の発電炉を想定すると約500g 程度のトリチウムを毎日燃焼し生産することとなる。核融合炉はもとより固有の安全性を有しているが、トリチウムの閉じ込め、安全取り扱いが施設全体の安全確保の要である。本章では、1) 国内の大学で最大級のトリチウム取り扱い施設である富山大学水素同位体科学研究センターと2) 国内唯一のグラムレベルトリチウム取り扱い施設である日本原子力研究開発機構トリチウムプロセス研究棟におけるトリチウム安全取り扱い実績を整理するとともに、主要な関連研究開発の成果を纏めた。

Keywords:

tritium, safety, confinement, contamination, decontamination, detritiation system, tritium transport, failure rate, tritium release behavior

2.1 富山大学水素同位体科学研究センターにおけるトリチウムの安全取り扱い

富山大学水素同位体科学研究センター（以下、センター）におけるトリチウムの取扱いは、1981年（昭和56年）の1日最大0.185 TBq (5 Ci)、年間最大1.85 TBq (50 Ci)の使用許可をもってスタートした。トリチウム取り扱い施設（管理区域）は約30年にわたり事故なく順調に運転されており、現在では許可を得ている1日最大使用数量が7.992 TBq、年間最大使用数量が558.7 TBqに増大している。トリチウム取り扱い開始当初に比べ、年間最大使用数量は実に300倍に増大することを許されており、安全取り扱い経験の積み重ねの結果と自負している。一方で、センターは2009年度（平成21年度）より富山大学水素同位体科学研究センター共同利用・共同研究を通して、2010年度（平成22年度）からは新たに核融合科学研究所双方向型共同研究をも通して、全国の研究者に開放されている。これら共同研究の実施に伴い、また上述のようなトリチウム使用環境の充実もあり、センターの利用者数も1980年代には30~40名程度であったものが、2009年度には125人（放射線業務従事者数）と大幅に増大している。これら多数の利用者に安全な実験環境を提供し続けるべく、センター職員は緊張感を持って施設の運営にあたっている。

トリチウムの取扱いは、施設外からのトリチウムの搬入（輸送）、施設内での保管、実験での使用、汚染検査、廃棄の各過程に分けることができる。以下、それぞれの過程ご

とに、これまでの研究開発の成果と管理の現状を紹介する。

トリチウムから放出されるβ線の最大エネルギーは18.6 keVと低く、飛程は空気中で6 mm程度、水や人体組織中で高々6 μm程度であり、外部被ばくは問題とはならない。ただし、散逸性が高い放射性同位元素であるので、安全確保のためにはトリチウムを上手に閉じ込め内部被ばくを防ぐことが鍵となる。被ばく管理も、内部被ばくの評価が重要である。一方で、最大エネルギーが低いためトリチウムからのβ線の検出には工夫が必要であり、汚染検査にはある程度の専門知識を要する。当センターでは、トリチウムの大部分をT₂ガスの状態で受け入れ、かつ貯蔵している。実験では水や他の物理的・化学的状态で使用する場合も当然あるが、例えばトリチウム水であれば比放射能が高いものは市販されておらず、トリチウムガスを酸化して調製する。そこで今回は、主にガス状態のトリチウムの取り扱いについて記述する。

2.1.1 トリチウム輸送時の安全閉じ込め

センター発足当初は1日最大使用数量が0.185 TBq (5 Ci)であったこともあり、1回あたり数十GBq程度のトリチウム受け入れが主であった。この程度の量の場合には、トリチウムガスはブレーカブルシールが付いたガラス製アンブルに入れられて輸送された。当時は実験でもガラス製の真空装置を用いることが多かったので、直接アンブルをガラス細工で装置につなぎ、トリチウムを装置内に導入していた。数十GBq程度の輸送の場合には特に支障はな

2. Accomplishments of the Large Amount of Tritium Handling Technology (1)

— Accumulation of the Safety Operation Experiences of Tritium Handling Facilities and the Related Safety Studies —

HATANO Yuji, YAMADA Masayuki and HAYASHI Takumi

authors' e-mail: hatano@ctg.u-toyama.ac.jp, yamada.masayuki@jaea.go.jp, hayashi.takumi@jaea.go.jp

かったが、ガラスなので比較的破損のリスクが高い、トリチウムを内包したままガラス細工をする必要がある、容器が再利用できない、などの問題があった。

近年は1日最大使用数量の増大に伴い、1回あたり3.7 TBq (100 Ci) 程度のトリチウム受け入れを行うようになった。このように大量のトリチウムを輸送する場合には、より破損のリスクが低い金属容器を用いている。図1にその例を示す。ステンレス鋼製のガス容器に2つのバルブと真空フランジを溶接した上で、それをキャップにて塞いだ状態で輸送する。容器は輸送中に想定される温度においてトリチウムガスの圧力が1気圧を超えないよう設計されている。2つのバルブの間を真空排気することでトリチウムの漏洩を防止すると同時に、大気がトリチウムに混入することを防ぐ。実験で用いる真空装置も金属製が主流になり、グローブボックス中でキャップをはずせば、そのまま真空装置に接続できるようになっている。このような容器を用いることで、輸送の信頼性を著しく向上させることができた。また、外側表面の汚染がない限り容器を再利用することもでき、廃棄物量の低減にも有効であった。現在では、大学間でのトリチウム輸送にも同種の容器を用いている。

2.1.2 貯蔵時の安全性確保

当センターの貯蔵室内には、トリチウムを保管する耐火性保管庫が設置されている(図2)。これは、市販の耐火性金庫を改造したものであり、内部がいくつかの取り外し可能なプラスチック製の密閉型チャンパーに分かれている。各チャンパーの扉にはバルブが2つ取り付けられており、扉を開ける前に内部のトリチウム濃度を測定できるようになっている。万一内部で容器が破損し汚染が検出された場合には、直ちにバルブを閉じて密閉状態を保ったままチャンパーを取り外し、グローブボックス内に運んで除染できる。散逸性の高いトリチウムを取り扱う上で、不可欠の工夫である。

2.1.3 トリチウム使用時の閉じ込めと安全対策

センター管理区域の見取り図を図3に示す。最も大量のトリチウムを取り扱うのは高レベル実験室であり、1日最大使用数量は7.4 TBq(200 Ci)である。反応実験室、物性実験室、環境実験室では、1日最大使用数量がそれぞれ

0.185 TBq(5 Ci)となっている。一般機器室、測定室、暗室は、3室合わせての1日最大使用数量が37 GBq(1 Ci)である。すべてのトリチウムを取り扱う部屋は空気調和設備により作業中は常に換気されるとともに、廊下に対して負圧に維持されている。不測の事態が生じトリチウムが漏洩した場合でも、作業者は廊下に避難することで内部被ばくを避けることができる。高レベル実験室、反応実験室、物性実験室、環境実験室、貯蔵室にはトリチウムモニタ(通気型電離箱)が設置されており、室内のトリチウム濃度を24時間監視している。加えて、これらの部屋は酸化装置と吸着塔からなる実験室系トリチウム除去装置に自動バルブを介してつながっており、トリチウムモニタが設定値以上のトリチウム濃度を計測すると、自動的に外部への排気を停止すると同時に室内のトリチウムが除去される仕組みに



図2 トリチウムガス保管庫。

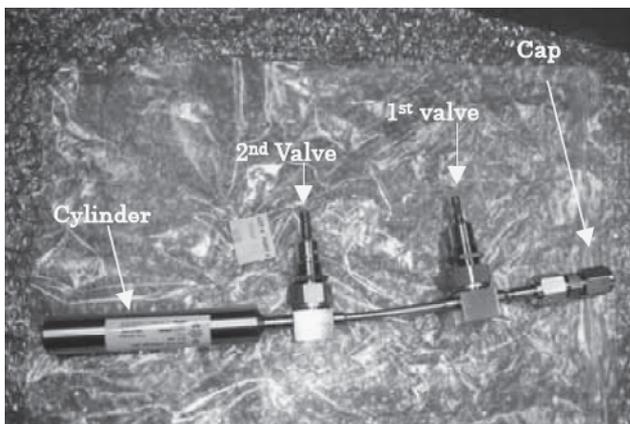


図1 高濃度トリチウムガス輸送容器。

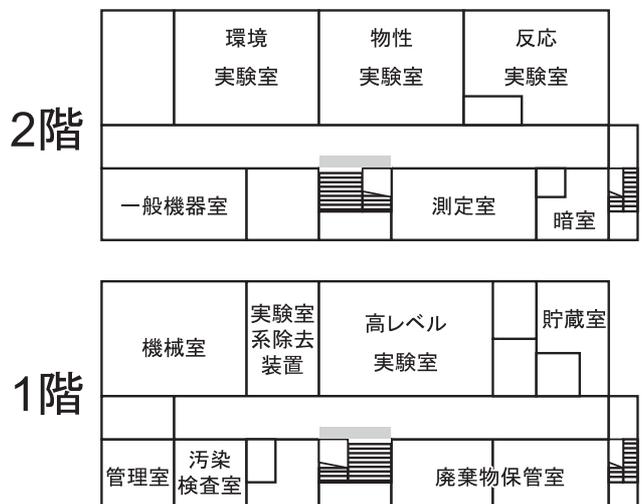


図3 富山大学トリチウム取り扱い施設の平面図。

なっている。不測の事態の際に廊下に退避した作業者は、このトリチウム除去装置が作動し室内のトリチウム濃度が十分低下してから事後処理を行えばよい。センターの運転開始当初にトリチウム除去装置の性能試験が慎重になされ、安全性が確認された[1, 2]。

高レベル実験室では大量のトリチウムを取り扱うため2台のグローブボックスが設置されており、1台は真空装置を用いたトリチウムガスによる実験に、他の1台はトリチウム水などの液体状トリチウムを用いた実験に供されている。例として、前者の写真を図4に示す。比較的厚いグローブを通しての作業は必ずしも容易ではないが、安全性は著しく高まる。グローブボックス内にトリチウムが漏洩した場合に備え、グローブボックス用トリチウム除去装置が設置されている。現在の除去装置は2009年度（平成21年度）に更新された2台目である。初期のものは1981年（昭和56年）に設置され28年にわたり運転されたが、交換部品の入手が困難になり、また徐々にではあるが配管等に腐食が見られるようになり更新に至った。更新にあたり装置がコンパクトになり操作性が向上したうえ、加熱部を2重配管としてトリチウムの透過漏洩を極力低減するなどの改善が加えられた。このトリチウム除去装置はグローブボックス内を負圧に維持し、グローブボックス外へのトリチウム漏洩を防ぐ機能も有している。それでも万一グローブボックス外にトリチウムが漏洩した場合には、先述の実験室系トリチウム除去装置により処理される。すなわち、密閉構造の実験装置とグローブボックスという二重の壁と、二段階のトリチウム除去装置によって作業者が守られる多重防護構造となっている。

反応実験室、物性実験室、環境実験室では、主に真空装置を用いたトリチウムガスによる実験が行われている。高レベル実験室と比べトリチウム使用量が少ないため、操作性を考慮し、真空装置はグローブボックス内に収められてはいない。しかし、トリチウムの漏洩とそれによる内部被ばくを防ぐため様々な工夫がなされている。トリチウムをガス状で長時間装置内に滞留させることは漏洩リスクを高めるので、通常はいわゆる水素吸蔵合金であるZr-Ni合金ゲッター中に保管している。必要ときにゲッターを加熱し、必要な量だけ装置内に放出させる。詳細は文献[3, 4]に記載されているので割愛するが、適当な温度で目的圧力までトリチウムを放出し、かつ耐久性が高いゲッター材料を見出すまでには、長期にわたる研究が必要であった。当センターでは耐久性が高いことからZr-Ni合金ゲッターを採用した。また、これらの真空装置では外部への排気を極力低減するよう、メインポンプにいわゆる「溜め込み式」真空ポンプであるスパッタイオンポンプを用いている。必ずトリチウムの娘核種である ^3He が装置内に発生するので、不活性ガスに対しても排気能を有するものでなければならない。装置を大気開放したのちなど、大量のガスを排気する必要がある場合にはターボ分子ポンプやロータリーポンプを使用するが、排気は一旦貯留タンクに溜めトリチウム濃度を測定した上でスタック（排気塔）から放出する。トリチウム濃度が高い場合には、酸化装置と吸着塔からなる

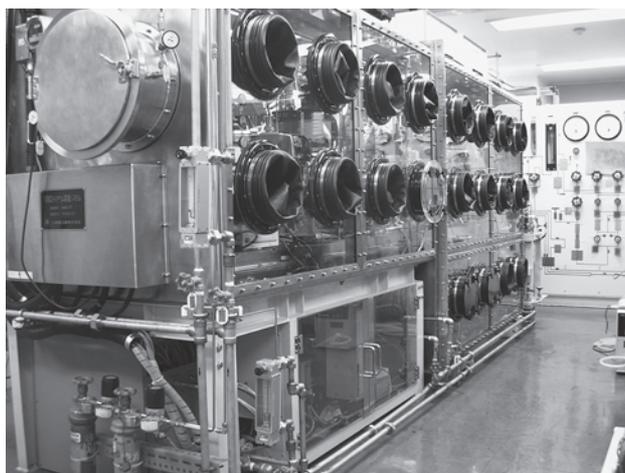


図4 高濃度トリチウム実験用グローブボックス。

除去装置でトリチウムを捕集した上でスタックに送る。また、フランジのシール材にも注意が必要である。初期の研究でバイトン製のオーリングでは室温でもトリチウム透過が生じること、メタルシールであれば有意な透過はない[5]ことがわかったので、高濃度トリチウムを使用する装置ではフランジのシールは全てメタルガスケットとし、放射線効果による劣化も考慮してエラストマー製オーリングの使用は極力避けている。金属配管の方がガラスに比べ信頼性は高いが、高温での実験ではトリチウムの透過漏洩が生じるという問題もある。現在は、およそ300℃以上の高温になる部分には石英ガラスを用いているが、並行して金属材料の高温適応性を向上させるためトリチウム透過防止膜の開発研究にも取り組んでいる[6]。部品の交換作業は内部被ばくのリスクが高い作業の一つであり、かつ廃棄物の発生につながるため、取り付けの真空ポンプや測定機器、バルブ等を選定する際には耐久性を重要視している。一方、交換作業の際には局所換気装置を用いるとともに、可搬型モニタを用いて作業箇所のトリチウム濃度を直接測定する。環境実験室ではトリチウム水等を用いた化学実験も行っているが、安全のため原則としてフード内で作業している。万一、室内のトリチウム濃度が許容レベルを超えて増大した場合には、先述の実験室系トリチウム除去装置で処理される。

一般機器室、測定室、暗室では、トリチウムに曝露した固体試料の機器分析やオートラジオグラフィによるトリチウム分布観察、およびそのための前処理（切断や研磨など）が行われている。トリチウム取り扱量が少ないため大掛りな放射線防護設備はないが、頻繁に汚染検査と除染作業を実施している。

2.1.4 被ばく管理と汚染検査

先述のように、トリチウムの場合には内部被ばくが問題となるので、被ばく管理も内部被ばくの評価に重点が置かれる。センターでは各室のトリチウムモニタによって示される作業室空気中のトリチウム濃度と、入退室記録から得られる作業室内滞在時間よりトリチウム吸入量を求め、その値より内部被ばくを評価している。ただし、センターのよ

うな共同研究・共同利用施設では多くの作業者の入退室時間を管理する必要があり、研究開発の結果、コンピュータによって自動化された線量算定評価システムを構築した[7]。必要に応じて可搬型モニタを用いて作業箇所のトリチウム濃度を測定し、被ばく評価に加えている。また、必要に応じて作業者の呼気中のトリチウム濃度を測定している。

トリチウムから放出される β 線はエネルギーが低く、通常の放射線検出器では窓材で吸収されてしまい検出できない。したがって、トリチウムの測定には特別な機器を使用する必要がある。センターでは、先述のように空气中濃度の測定には通気型電離箱を用いている。また、固体表面の汚染を測定する際には、ウィンドウレスあるいは極薄い有機物膜の窓材を使用したサーベイメータを用いる必要があるが、センターではPRガスの消費が少ない後者を使用している。空気中の飛程が6mm程度であるので、サーベイメータを被測定物に極力近づける必要があるが、慣れない作業者は案外と気づかない場合が多いので、教育訓練等で指導している。より精密な表面汚染評価は、ろ紙による拭き取り（スミヤ法）と液体シンチレーションカウンタによる計測による。これらの方法でトリチウムによる固体表面の汚染を測定することは可能であるが、 β 線の脱出深さが小さいことから固体内部の汚染評価は困難である。センターではX線の脱出深さが β 線に比べ著しく大きいことに着目し、 β 線で誘起される制動X線および特性X線を計測することで固体内部のトリチウム濃度を測定する技術の開発を進めてきた。詳細は文献[8]に譲るが、半導体検出器を用いて詳細なエネルギースペクトルを測定することで、固体内のトリチウム分布を非破壊で測定する技術を既に確立し、現在は同様の手法を排水中のトリチウム濃度測定へ応用することなども検討している。また、イメージングプレートを用いてX線を検出することで、より簡便に固体内部のトリチウム濃度を測定できる可能性があり、定量評価に向けた研究も展開している。いずれの手法でも、汚染検査でも求められる微量トリチウムの定量測定には、さらなる検出限界の向上が求められる。

2.1.5 廃棄物の安全取り扱い

センターで生じる固体廃棄物には、手袋などの放射線防護用品、ペーパータオルやピペットなどの実験用消耗品、トリチウムに曝露された試料、真空部品やガスカート等がある。トリチウム濃度が許容範囲以下であれば社日本アイソトープ協会に引き渡すが、高濃度に汚染されたものはセンター内で保管廃棄している。微量ながら廃棄物からは定期的にトリチウムが放出されるので、高濃度に汚染された廃棄物を保管する場合には密封容器中に収納することになる。のちに除染作業などをすることがある廃棄物を一時保管する場合には、完全に密閉すると内部にトリチウムガスがこもり開封時に内部被ばくを引き起こす可能性があるため、開封前に内部を除染できるようにバルブを取り付けるなどの工夫をしている。トリチウム汚染が著しい場合には、水洗や水拭き、アルコールによる拭き取りなどで除染した上で保管する。

液体廃棄物としては、液体シンチレータ、除染等に用いた水、金属中へトリチウムを導入するための電解チャージや試料の化学研磨に用いた酸・アルカリ溶液、オートラジオグラフィ用現像・定着液などがある。トリチウム濃度が十分低く、化学的にも問題となるような成分を含まない場合には、法令基準を遵守しながら十分に希釈した上で排水する。トリチウム濃度が高い場合、あるいは環境汚染物質等を含むため排水できない場合には、(社)日本アイソトープ協会に引き渡すか、保管廃棄することになる。いずれの場合でも、酸・アルカリを中和するなど、まず化学反応性を低減するための処理を行う。保管廃棄する場合には原則として密封容器を用いるが、容器材料の経年劣化や放射線効果による劣化には細心の注意を払っている。また、蓋の密閉性にも注意が必要であり、適宜テフロンテープなどのシール材を用いている。センターのような共同研究・共同利用施設では、多くの研究者により様々な研究目的のため多様なトリチウムを含む化学薬品が調製されるので、液体廃棄物の管理は必ずしも容易ではない。事前に利用者とセンター職員が入念に打ち合わせして調製する薬品数を最小限に留めるとともに、容器表面に内容物表示を添付することを徹底するなどして、管理に遺漏がないよう努めている。

先述のようにトリチウムを含むガスの処理は触媒による酸化と吸着材を用いた捕集によるので、トリチウム使用施設では固体廃棄物と液体廃棄物の中間とも言うべき「吸着材に捕獲されたトリチウム水」が発生する。当然のことながら吸着された状態では固体であるが、何らかの原因で温度が上昇すればトリチウム水蒸気が脱離し、それが凝集すればトリチウム水となる。吸着した状態の方がトリチウムの散逸性は低く、また高濃度トリチウム水の保管は放射線効果による腐食促進などがあり困難な場合もあるので、トリチウムを吸着させたまま保管廃棄する場合も多い。しかし、吸着させたままではトリチウム濃度の測定が困難であり、また廃棄物貯蔵室のスペースにも限りがあることなどから、将来にわたって吸着材の大部分を保管廃棄することは現実的ではない。吸着材からトリチウムを水蒸気として脱離させた上で直ちに元素状に還元し、再び実験で使用できるよう同位体分離するような処理装置の開発が望まれる。

2.1.6 おわりに

内部被ばくのみが問題となるトリチウムを安全に取り扱う上で重要なのは、(1)装置・容器内に確実に閉じ込めること、(2)作業環境へ漏洩したトリチウムを速やかに除去すること、(3)低エネルギーの β 線を検出するのに適した測定器を用いて汚染を管理すること、であり、これらに対する富山大学の29年間にわたる取り組みを紹介した。以上の3つの課題は、ITERをはじめとする核融合炉におけるトリチウムの安全取り扱いにもそのまま当てはまる。また、これらの課題を達成するための要素技術も大部分が共有できる。今後ともトリチウム取り扱いに関する要素技術の開発および高度化を通して、核融合炉の安全性確保に貢献していく所存である。加えて、核融合炉燃理工学研究者およ

びトリチウムの基礎物性研究やトレーサー利用に携わる研究者、ならびに関連分野の学生たちに安全で効率的な実験環境を提供し続けたいと考えている。

2.2 日本原子力研究開発機構トリチウムプロセス研究棟におけるトリチウムの安全取り扱い

日本原子力研究所（当時、現：日本原子力研究開発機構原子力科学研究所）に建設したトリチウムプロセス研究棟（TPL: Tritium Process Lab.）[9]は、核融合燃料サイクルの基本となるプロセス技術とトリチウム安全技術に関する研究開発をグラムレベルのトリチウムを使用して実施するための研究施設として、1988年3月よりホット運転を開始した。TPLは3重閉じ込め系で構成されており、370 GBq以上のトリチウムを取り扱うホット実験は、この閉じ込め系内で実施している。

第1次閉じ込め系は、実験装置およびトリチウム貯蔵設備等の装置本体を気密構造にすることにより構築している。第2次閉じ込め系は、グローブボックスおよびフードであり、負圧維持および風向維持することにより構築している。第3次閉じ込め系は、実験室であり、負圧維持および風向維持、さらに室内へのトリチウム異常放出時における周辺環境との隔離機能により構築している。各々の閉じ込め系には個別のトリチウム除去設備を設置しており、その原理は触媒酸化・水分吸着法である。トリチウム除去設備を含むトリチウム安全設備の運転操作、監視、記録および構成機器の運転積算は、中央制御設備で行っている。また、中央制御設備には、グローブボックス内または実験室内へのトリチウム異常放出時におけるトリチウム除去運転を行う自動ロジックを装備している。TPLではこれらの運転管理データの他、安全設備のトリップ、構成機器の不具

合発生状況を随時記録し保管しており、まず次の2.2.1章にホット運転開始から20年間のトリチウム安全設備の運転実績[10]についてまとめる。

上記のトリチウム安全設備を健全に運転する一方で、ITER・BAおよび将来の原型炉にむけたトリチウム閉じ込め・安全取り扱い技術の向上のための研究開発を実施してきた。特に、トリチウム安全性試験設備（通称CATS: Caisson Assembly for Tritium Safety study）を用いた室内漏洩トリチウム挙動研究は多くの大学・研究機関との共同研究を含めて実施中であり、漏洩トリチウムの3次元室内挙動コードの整備など多くの成果を蓄積している。また、原型炉でのトリチウム閉じ込め区画容積の増大に対応するため、トリチウム除去設備の小型・高性能化に向けた取り組みや火災などの異常事象時における設備の健全性試験を実施し、信頼性向上に係るデータベースを蓄積しており、2.2.2章では、これらの成果の概要を整理する。

2.2.1 TPLにおけるトリチウム閉じ込め安全取り扱い設備(1)トリチウム安全設備の運転実績

トリチウムプロセス研究棟の安全設備の構成を図5に示す。この安全設備は1985年に完成し、コールドでの試験の後、1988年よりトリチウムを用いたホット運転を開始した。本節では1988年3月から2008年3月までの20年間の運転実績を整理する。

・排出ガス処理設備 (Effluent tritium Removal System)

排出ガス処理設備 (ERS) は、第1次閉じ込め系である各種実験装置からの排ガス、グローブボックス負圧制御排ガス、トリチウム廃液貯槽バントガスおよびトリチウム用構成機器のメンテナンス排ガス等、様々な化学形かつ不連続に発生する排ガスを受け入れトリチウム除去を行う設備である。ERSは、不連続に発生する排ガスに対応するため、

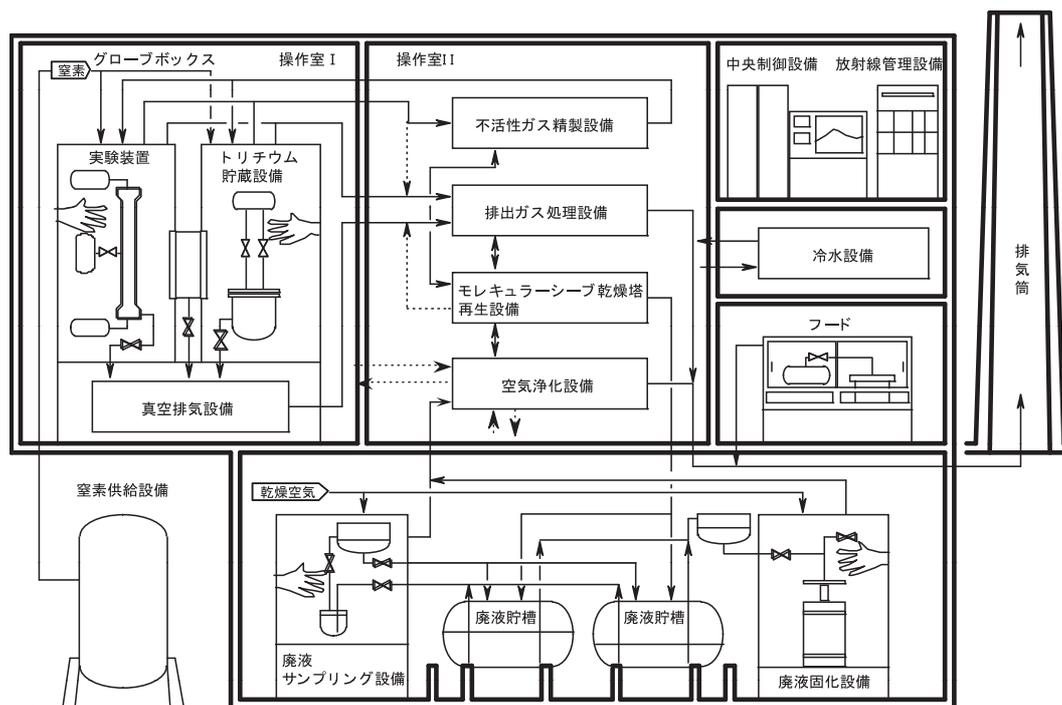


図5 トリチウムプロセス研究棟安全設備の構成。

ガス移送系およびガス処理系を常時待機状態とする連続運転を行っており、20年間運転時間は160,480時間であり、稼働率は91.6%である。ERSにおける処理トリチウム量は約340 TBq（乾燥塔再生水トリチウム量積算値）である。

・不活性ガス精製設備 (Glove box-gas Purification System)

不活性ガス精製設備 (GPS) は、第2次閉じ込め系である窒素雰囲気グローブボックス内に設置している実験装置等から透過、漏洩してきたトリチウムの除去、グローブボックスの負圧維持、グローブボックスへの室内空気の漏れ込みに対処する窒素雰囲気純度管理を行う設備である。GPSは、グローブボックス毎に設置している負圧制御系とグローブボックス雰囲気の循環換気系で構成している。負圧制御系の運転時間は166,321時間であり、稼働率は94.9%である。循環換気系の運転時間は146,358時間であり、稼働率は83.5%である。GPSにおける処理トリチウム量は約1 TBq（システム入口トリチウムモニタ積算値）であるが、グローブボックス内実験装置は、作業開始前に行うトリチウムリークチェックにより健全性を確認しており、定常的な漏洩はない。この処理トリチウム量は、実験装置とトリチウム供給ライン接続時、メンテナンス時における一時的なプロセス開放、グローブ材およびグローブボックス内壁、装置表面等からのトリチウム脱着などにより発生したものの積算である。

・空気浄化設備 (Air Clean-up System)

空気浄化設備 (ACS) は、第3次閉じ込め系である操作室I（グローブボックス設置室）および操作室II（トリチウム除去設備設置室）へのトリチウム異常漏洩時における室内トリチウム除去運転、トリチウム汚染機器の分解保守作業時における仮設テントハウス等の風向維持およびトリチウム除去運転、空気雰囲気グローブボックスの換気運転、グローブボックスの雰囲気置換運転を行う設備である。また、トリチウム放出模擬実験を行うトリチウム安全性試験設備 (CATS) からの実験後排ガスの処理およびERSトリチウム除去システム異常時のバックアップとしての排ガス処理を行う機能も有している。ACSはトリチウム異常漏洩時対応の設備であるため常時待機状態とする連続運転を実施している。ACSの運転時間は161,264時間であり、稼働率は92%である。ACSにおける処理トリチウム量は約0.3 TBq（システム入口トリチウムモニタ積算値）であるが、TPLではこれまでにトリチウム異常漏洩の発生は一度もなく、仮設テントハウス内で行うメンテナンス作業、空気雰囲気グローブボックス内でのトリチウム水取り扱い作業、トリチウム放出模擬実験の排ガスからの処理トリチウム量の積算である。

・モレキュラーシーブ乾燥塔再生設備 (Dryer Regeneration System)

トリチウム除去設備には、触媒で酸化したトリチウムを含む水蒸気を吸着するためにモレキュラーシーブ乾燥塔を設置している。モレキュラーシーブ乾燥塔再生設備 (DRS) は、これらの乾燥塔からトリチウム水を回収するための設備であり、ERS乾燥塔4基、GPS乾燥塔2基、ACS乾燥塔3基を再生対象としている。DRSによる再生回

数は96回、回収再生水量は4,572.9リットル、回収トリチウム総量は約353 TBqである。DRSは、乾燥塔の再生ガスラインおよび再生水移送ラインとも共用であるため、再生対象の乾燥塔に吸着したトリチウム水濃度が大きく異なる場合、回収したトリチウム水濃度と処理トリチウム濃度に誤差を生じる。このため乾燥塔毎の回収トリチウム量から各トリチウム除去設備の処理トリチウム量を計量することが困難となっている。

(2)トリチウム安全設備の不具合発生実績

TPLでは前述のようにトリチウム安全設備におけるトリチウム処理量、設備の運転積算時間の他、構成機器の運転積算時間、回数を収集している。また、発生した不具合情報も収集しており、そのデータシートには、発生事象、原因、検知時の措置、長期対策を記載してきている。

トリチウム除去設備の構成機器は、ガス移送用の送風機または圧縮機、予熱器、触媒酸化反応器、冷却器、モレキュラーシーブ乾燥塔を設置しており運転状態確認のための各種計器類（圧力計、流量計、温度計、トリチウムモニタ、酸素濃度計、水素濃度計、水分濃度計）を系統の出入口等に設置している。また、トリチウムモニタおよび濃度計のようにガスサンプリングの必要なものについてはサンプリングポンプを設置している。これらの構成機器の不具合発生頻度を表1に整理したが、主な機器について以下具体例を紹介する。

・送風機

送風機は、GPSに容積型ルーツプロア2基（当初）、ACSに軸流型スパンサープロア2基、DRSに容積型ルーツプロア1基設置している。GPSは当初、ルーツプロアを選定していたが、潤滑油が軸封を通じてプロセス側に混入する事象が確認された。プロセスガス中への潤滑油の混入は、触媒反応器の性能低下やトリチウム有機化合物の生成に寄与する恐れのあるため、その後、磁気軸受型の送風機に交換した。以降、ベアリングの交換程度の保守により連続運転を継続している。

送風機5基の不具合発生回数は14回であり、いずれも運転中に発生しているが、ベアリング異常やオイル漏れ等の機械的な不具合である。

・圧縮機

圧縮機は、ERSに3重ダイヤフラム式圧縮機2基（当初）設置している。この圧縮機は、3枚の金属ダイヤフラムをバイトンOリングで固定し、ダイヤフラム間を減圧保持し、この圧力変化を監視することによりダイヤフラム破損を検知する方式である。この圧縮機は、運転中にダイヤフラム間の圧力変化が発生し、その原因がダイヤフラム破損ではなくOリング不良であること、またOリングを通じて駆動油側へトリチウムが透過している事象が確認された。このため、TPLでは2重ベローズ式圧縮機を開発し、3基目として設置した。2重ベローズ式圧縮機は、運転中における駆動油側へのトリチウム透過が発生しにくい構造であるが、ダイヤフラムの交換作業に比べて、ベローズ交換等の分解保守作業が非常に困難であるという経験をしてきている。

表1 構成機器不具合発生頻度 1988年4月～2008年3月.

設備・機器・計器名称	台数	評価分類	積算時間&回数	平均時間&回数	不具合発生回数
送風機	5	運転時間	182181 hr	21 %	14
		運転回数	3102 回	31 回/年	0
圧縮機	3	運転時間	6438 hr	1 %	7
		運転回数	51362 回	856 回/年	3
サンプリングポンプ	19	運転時間	1349276 hr	41 %	7
		運転回数	8055 回	21 回/年	21
手動弁	307	開閉回数	6140 回	1 回/年	3
空気作動弁	49	開閉回数	19600 回	20 回/年	16
電磁弁	62	開閉回数	148800 回	120 回/年	6
室内雰囲気トリチウムモニター	7	運転時間	1227100 hr	100 %	5
プロセストリチウムモニター	13	運転時間	1242060 hr	55 %	15
水分濃度計	9	運転時間	1323296 hr	84 %	12
酸素濃度計	7	運転時間	1227100 hr	100 %	2
グローブボックス	10	使用時間	1752000 hr	100 %	9
中央制御設備	1	使用時間	175200 hr	100 %	14
グローブボックス負圧制御系	7	使用時間	1164247 hr	95 %	5
予熱器	5	使用時間	475314 hr	54 %	4
冷水設備	1	運転時間	175200 hr	100 %	20
無停電電源装置	1	運転時間	175200 hr	100 %	1
温度設定器	3	運転時間	525600 hr	100 %	3
真空ポンプ	10	運転時間	86450 hr	5 %	4
流量計	26	使用時間	4555200 hr	100 %	3
圧空設備	1	運転時間	175200 hr	100 %	1
GPS トリチウム除去系性能	1	使用時間	146358 hr	84 %	1
CENTUM 設定, 制御ロジック	1	使用時間	175200 hr	100 %	12

一方、ダイヤフラム式圧縮機はOリング交換保守以降、順調に運転を実施してきていたが、ガス圧縮の機構部の経年劣化が発生してきている。

圧縮機3基の不具合発生回数は10回であり、内3回は起動時における電源、冷水等ユーティリティ側に起因するものである。

・冷却器

冷却器は、ERSにコイル浸漬型1基、GPSにシェルアンドUチューブ型1基、ACSにシェルアンドUチューブ型2基、DRSにシェルアンドチューブ型1基を設置している。冷却器は、冷水が循環供給されており、定期的な保守として冷水置換してきているが、冷水中のトリチウム濃度がバックグラウンドを超える事象が確認された。このため、冷却器のリークチェックを実施したところERS用およびGPS用に経年劣化に伴うピンホールが発見され、各々冷却器の更新を行ってきている。

・サンプリングポンプ

サンプリングポンプは、各トリチウム除去設備の電離箱式トリチウムモニタ、酸素濃度計、水素濃度計、水分濃度計のガスサンプリングを行うためにメタルベローズ式ポンプを19台設置している。トリチウム安全設備は連続運転を行っているため、サンプリングポンプの年間稼働率もトリチウム除去設備の稼働率とほぼ等しくなっている。サンプリングポンプの不具合発生回数は28回であり、内21回は起動時における駆動モータ等の電源系統の不具合である。ベローズ破損は1回しか発生しておらずベローズ自体の耐久性は非常に高いものであった。なお、駆動モータ等の電源

系統の経年劣化のため、サンプリングポンプの更新を進めている。

・手動弁、空気作動弁、電磁弁

TPL安全設備にはベローズシール型の手動弁307台、空気作動弁49台、電磁弁62台を設置している。不具合発生回数は25回であり、内16回は空気作動弁で発生している。原因は、駆動用圧空系統の漏洩または計装電磁弁の故障による開閉不能である。これまでにベローズの破損および弁の外部リーク（プロセスガスの漏洩）は一度も発生していない。電磁弁は、電磁コイル-シャフト部の経年劣化による開閉固着が発生してきており更新を進めている。

・トリチウム安全設備異常停止

トリチウム安全設備のトリチウム除去設備は、中央制御設備に構築した制御ロジックにより、構成機器に発生した不具合のため、設備の連続運転が不可能と判断された場合、自動的に設備トリップ（強制停止）する。設備構成機器の不具合は188回発生しているが、設備トリップまで波及した事象は32回であった。表2に、この設備としての不具合発生頻度を設備毎に整理した。

(3)トリチウムプロセス研究棟の廃棄物実績

TPLでは、発生する放射性廃棄物を気体廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物に区分し処理している。

・気体廃棄物

気体廃棄物は、トリチウム除去設備による処理後の放出ガス、フード換気系排気ガスおよび建家換気系排気ガスであり、スタックから環境へ放出している。スタックからの放出ガスは電離箱式トリチウムモニタにより連続的に監視

する。さらに、トリチウム分離捕集装置による元素状トリチウムおよびトリチウム水の分別捕集を行い、月毎に積算した試料を液体シンチレーションカウンタで測定している。

TPLにおける20年間に発生した気体廃棄物のトリチウム量は元素状トリチウム 32 GBq, トリチウム水 415 GBq であり、合計 447 GBq をスタックから放出している。

図6に、20年間にわたるスタックからの放出トリチウム量を年度別化学形別に整理した。この図からわかるように、20年間の平均トリチウム放出濃度は、 6.6×10^{-5} Bq/cc であり、放射線障害防止法に定められているトリチウム水の排気中又は空気中の濃度限度 5×10^{-3} Bq/cc (3月間平均濃度)と比較して1/75を維持している。

・液体廃棄物

液体廃棄物は、トリチウム濃度に応じて高濃度、中濃度、低濃度、極低濃度に分別排水し、各々の廃液貯槽にて一次保管する。高濃度および中濃度廃液は、主にトリチウム除去設備のモレキュラーシーブ乾燥塔からの回収水であり保管管理している。低濃度廃液は、実験器具類の洗浄水、管理区域内で発生する冷水ドレン水、空調ドレン水等である。極低濃度廃液は、手洗水、管理区域内で発生する床ドレン水等である。低濃度および極低濃度廃液は、トリチウム濃度を測定し、放射線障害防止法に定められている排水中トリチウム濃度限度 60 Bq/cc 以下であることを確認し、排水口へ排水している。

・固体廃棄物

固体廃棄物は、可燃性廃棄物、不燃性廃棄物として難燃

表2 設備不具合発生頻度 1988年4月～2008年3月。

設備名称	設備記号	不具合発生回数	設備トリップ発生回数
不活性ガス精製設備 トリチウム除去系 負圧制御系	GPS	43	9
		5	4
排出ガス処理設備	ERS	39	9
空気浄化設備	ACS	20	8
モレキュラーシーブ乾燥塔再生設備	DRS	8	2
装置冷水設備	冷水設備	22	-
放射線管理設備	TMS	21	-
中央制御設備	CCS	13	-
グローブボックスおよび付属設備	GBS	6	-
真空排気設備	VPS	5	-
トリチウム廃液サンプリング設備	SPS	1	-
トリチウム廃液貯槽設備	廃液設備	2	-
無停電電源設備	CVCF	1	-
トリチウム廃液固化設備	WSS	1	-
トリチウム安全性試験装置	CATS	1	-
合計		188	32

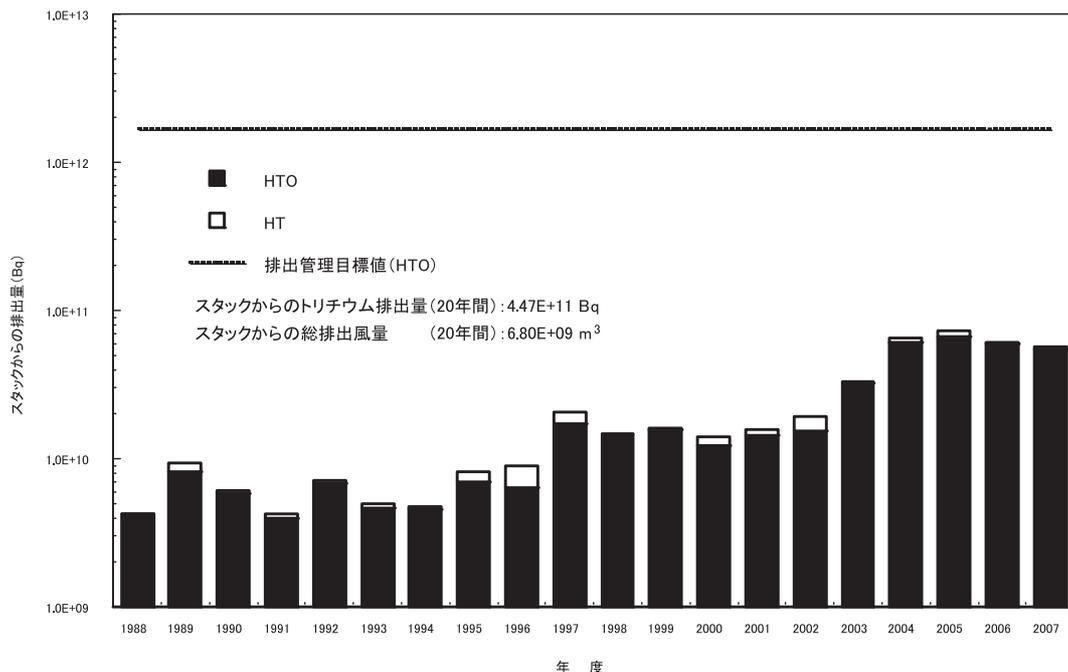


図6 トリチウムプロセス研究棟スタックからのトリチウム排出量 (1988年度～2007年度)。

性とそれ以外に分別している。20年間に発生した可燃性廃棄物は、20リットル紙バケツ 3,180 個、難燃性廃棄物は、同様の紙バケツ 348 個、それ以外の廃棄物は、金属容器で 46 個である。

2.2.2 TPL におけるトリチウム閉じ込め安全取り扱い技術の向上のための研究開発

(1)トリチウム安全性試験設備を用いた室内トリチウム挙動研究

核融合炉は、如何なる場合も反応を速やかに停止でき、また、仮に停止操作をしなくても暴走しないという固有の安全性を持っている。一方、他の放射性物質に比較して透過・漏洩しやすという特徴をもつトリチウム（放射性気体）を燃料として数 kg 程度用いるとともに、通常運転時において、多様な化学形で、広範囲の機器・施設にトリチウムが分布することから、その十分な閉じ込めを確保することが核融合炉の安全取り扱いの要である。よって、トリチウムを安全に取り扱うには、核融合炉の運転状態に応じて、i) 潜在的に存在し得るトリチウムの存在化学形・状態、量、分布を的確に把握し、ii) 限定された空間に閉じ込めるべく多重の障壁を効率的に設けることが重要である。さらに、iii) たとえ初段の障壁を漏洩・透過しても、そのトリチウムを迅速に検知して、周辺の最小限の空間に隔離し（閉じ込め）、iv) 効率良く除去することが重要となる。

前章で TPL の例を詳しく述べたように、世界の核融合炉開発における主要なトリチウム取り扱い施設（取り扱い

量：数十～百 g 程度）では、概ね上記のような多重閉じ込めの考え方を採用して安全に取り扱っており、TPL でも室内へのトリチウム漏洩などの事故を一切見ることなく、20 年余にわたる安全取り扱い実績を蓄積してきている。

将来、安全性および社会的受容性の高い核融合炉エネルギーシステムを設計／建設するためには、大規模補修時や万が一の事故想定において、保守的な数値解析のみならず実証データに基づいたトリチウム閉じ込め性能評価（特に部屋や建屋などの最終閉じ込め系の評価）を実施することが重要と考えるが、上記のような安全取り扱い実績の蓄積のため、逆に事故時の安全実証データは世界的にもほとんど報告例がなかった。そこで、日本原子力研究所（当時）では、燃料となるトリチウムが万一、室内に漏洩した場合の挙動を調べるため、TPL にケーソンと呼ぶ大型密閉容器を含むトリチウム安全性試験装置（CATS：Caisson Assembly for Tritium Safety study）を 1998 年に設置し、その中で、様々な室内環境条件を作り、世界に先駆けて本格的な室内トリチウム挙動を調べる模擬試験を 10 年余にわたり実施してきている [11]。

・トリチウム安全性試験設備（CATS）

CATS は、主に、室内空間を模擬したケーソンと呼ぶ 12 m³（2.6 m^W×2.0 m^D×2.3 m^H）のステンレス鋼製の気密容器と、ケーソン内へ計画的にトリチウムを導入するためのグローブボックス（GB）から構成されている。トリチウムの使用量は GB 内で 370 TBq、ケーソン内への計画導入量は最大 37 GBq/回で許可を得ている。ケーソンには通常

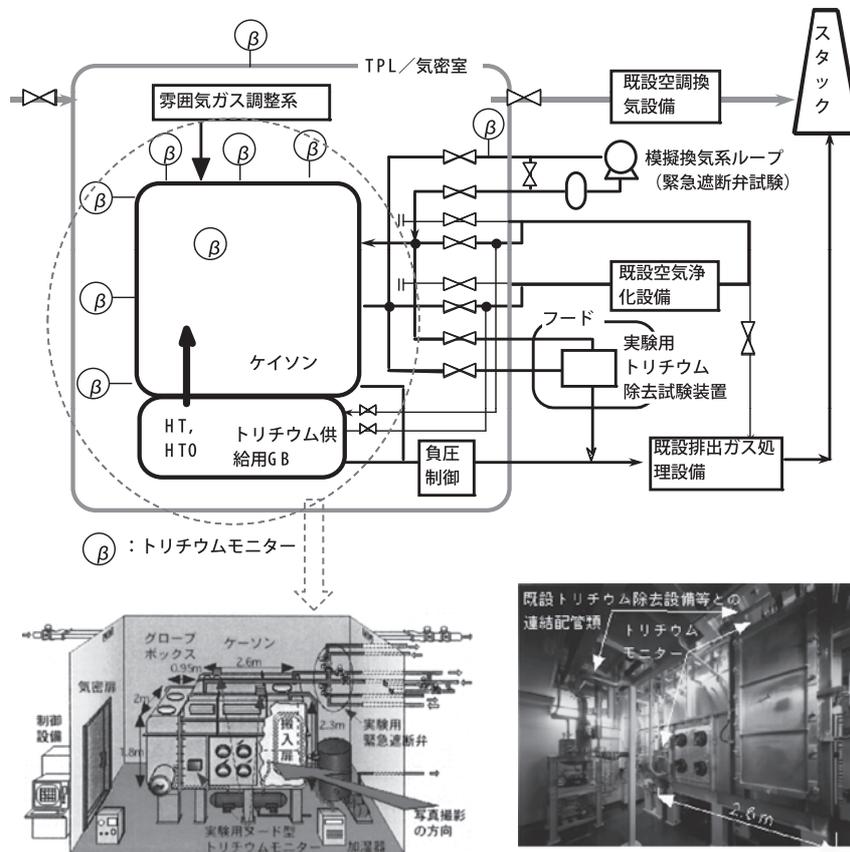


図7 トリチウム安全性試験装置（CATS）の系統構成。

換気系を模擬する循環換気ループ：1系統（模擬緊急遮断弁を含む）、トリチウム除去系：2系統（従来の触媒酸化水分吸着方式：2.2.1(1)空気浄化設備参照と、実用化開発中の気体分離膜方式：2.2.2(2)参照）、負圧維持系、雰囲気ガス調整系、などが接続されている。これらにより、標準的な模擬換気条件（0～5回/時）、任意の雰囲気ガス種&湿度条件下で、任意の化学形のトリチウムを、任意のケーソン内相対位置および速度で、安全に模擬放出できる。ケーソン内に導入されたトリチウムは、スード型電離箱（7台）、通気式電離箱（1台）、およびHTO濃度計測のための水バブラー装置（1系統）等でその挙動が観測でき、トリチウム除去設備（1～4回換気/時）で回収除去できる。なお、参考までにITERのトリチウム漏洩に関する最大仮想条件は、千～8万 m^3 程度の空間（1～2回換気/時）に最大70g程度のトリチウムの漏洩としており、除去設備の処理流量は漏洩空間の容積や気密度に合わせるが最大約4000 m^3 /時で検討されている。CATSにおいては、トリチウムを重水素で数10～数1000倍程度希釈することによって、この仮想漏洩条件を作ることができる。これらの系統構成を図7に整理した。

・漏洩トリチウムの室内挙動研究

最終閉じ込め系を構成し環境との接点となる建屋については、内部の広い空間内に漏えいしたトリチウムの挙動を把握し、その閉じ込め性能を実証することが重要である。特に、室内への漏洩からその検知と、換気口の封止による閉じ込めまでの初期挙動を把握する必要がある。本研究では前項で紹介したCATS:12 m^3 と、米国ロスアラモス国立研究所トリチウムシステム試験装置（LANL/TSTA）の実用トリチウム取り扱ひ室（主実験室）：3000 m^3 の2種類の空間におけるトリチウム放出実験[12]を実施してきた。

CATS：12 m^3 空間による模擬トリチウム放出実験は、通常換気の有無、相対的な放出位置や化学形のほか、高湿度などの日本固有の条件を含めて系統的に実施し、放出トリチウムの空間移行挙動データを取得・蓄積した。また、放出初期のトリチウム空間挙動を解析するため、汎用三次元流体解析コード（FLOW-3D）を、低レイノルズ数流れへの対応とトリチウム放出口からの吹き出し流れの模擬を中心として改造し、実験と比較しつつ「室内トリチウム挙動解析コード」を開発整備した[13]。

一方、3000 m^3 という実規模の空間を用いた計画的なトリチウム放出実験は日米協力の下で実施し、実験結果がCATSで整備したコードで再現できることを確認、実規模空間への適用可能性を検証できた。これらの実験および解析により、初期のトリチウム挙動は空間内の換気流れに大きく支配されることを明らかにした。

さらに、モニタの濃度警報によって換気口が封止されるまでの間に、換気口から排出されるトリチウム量を実験的に評価し、放出初期における安全機器のトリチウム閉じ込め性能を評価した。トリチウムの瞬時放出、検出遅延などの保守的条件を仮定しても現状の安全機器作動ロジックで十分に室内に閉じ込められる見通しを得た[14]。

・漏洩トリチウムの回収除去技術開発

緊急遮断弁の閉止により漏えい空間内に閉じ込められたトリチウムは、異常時用トリチウム除去設備により回収・除去される。雰囲気ガス中のトリチウムは除去設備を介した循環換気回数に対して完全混合モデルで一様に回収除去されていくが、この際、壁等への吸着・脱離が問題となる。本研究では、室内挙動把握のために開発したガスサンプリングを必要としない露出型モニタを用い、そのモニタが壁面と同じようにトリチウム汚染されることを利用し、壁残留汚染の連続的評価に適用した。

その結果、核融合炉のホットセルや遠隔保守時の種々のキャスクなどで想定される十分に乾燥した雰囲気に水蒸気状トリチウムが放出されると壁汚染が強く残留し、その汚染は雰囲気の湿度条件に強く依存することを明らかにした。特に湿度と壁表面への水の平衡吸着量との相関関係に着目し、トリチウム水の壁への吸着が水の平衡吸着量と比放射能に依存するとして壁汚染量を解析したところ、実験値を良く再現でき、残留汚染が湿度の関数で表現できることを確認した[15]。このことから、汚染源の比放射能にも依存するが、ホットセルなどの高度汚染区域の場合、数100ppm程度の水分添加でも十分な除染効果が期待できることを実証し、除染技術の高度化や廃棄物の低減に向け解析コードを整備した。

・大学との共同研究

上記の研究の一部は大学等との共同研究で実施されたものであるが、その他を含めCATSを整備した1998年から現在まで継続して、年間5件程度の共同研究を、種々の大学・研究機関・企業らと実施してきている。具体的には、種々のトリチウム閉じ込めに用いられる材料（金属、炭素複合材料、セラミック、プラスチック[16]、ゴム、コンクリート[17]他）の汚染・除染に係る基礎データの把握、気体・液体・固体（表面）状のトリチウム計測技術[18]・分別モニタリング技術の開発および向上、環境微生物によるトリチウム酸化とトリチウム酸化活性菌を用いた除染技術研究[19]などである。CATSは、この多岐にわたる共同研究に対し、それぞれ最適なトリチウム汚染・計測条件等を得るためのテストスタンド：空間トリチウムソースとしても大変有用されている。

(2)トリチウム除去設備の信頼性/性能向上をめざした研究開発

・中空糸状気体分離膜モジュールを用いた大容量化

TPLを含め世界の主要なトリチウム施設で用いられているトリチウム除去設備は、主に触媒でトリチウムを酸化してトリチウム水とし、水分吸着剤で除去する方式である。しかしながら、炉室などトリチウム閉じ込め空間が大きくなると、被処理ガス流量が増大すること、閉じ込め空間内に湿度として存在する大量の水分の吸着処理が必要となることから、必然的に設備は大型化する。本研究では、気体分離膜が水素と水蒸気に対して空気成分より高い選択的透過性を持つことに着目して、設備を小型・高性能化する方式を考案し、その性能を実証した。図8に従来型と比較して概念系統構成を示すが、本方式では、トリチウム汚染ガスは気体分離膜装置を介して循環され、トリチウムを

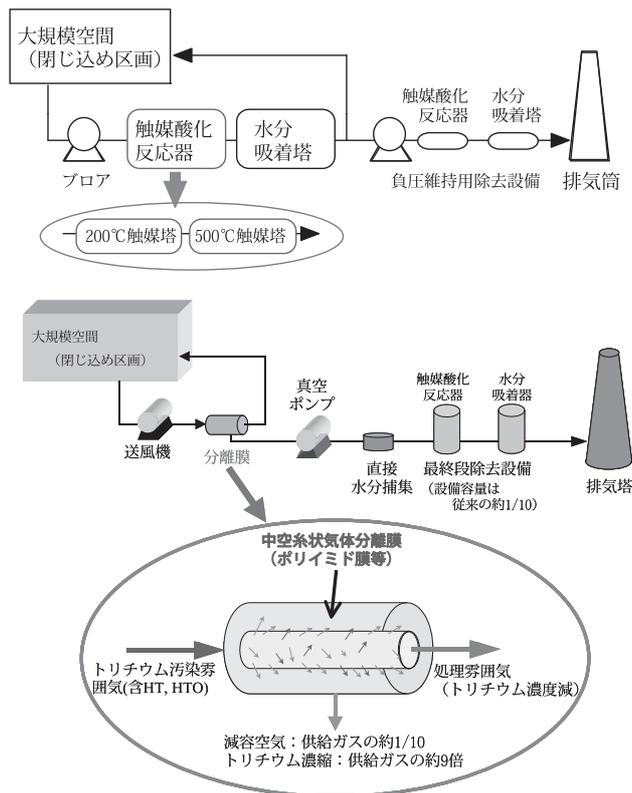


図8 触媒酸化水分吸着方式(上段)と気体分離膜方式(下段)トリチウム除去設備

含む水素同位体および水蒸気を膜の透過側へ濃縮してその後の被処理ガス量を減らす。さらに、水分トラップを設置して水蒸気を凝縮水として除去し、被処理ガス量を減少させる。この気体分離膜装置と小型の従来型除去装置を組み合わせることにより、核融合炉トリチウム除去設備の小型・高性能化を図るものである[20]。

まず、選択的透過性および対トリチウム耐久性などの諸特性を加速試験により把握し、気体分離膜としてポリイミド膜を選択した。その中空糸状膜を用いて有効膜面積約40 m²、処理量約10 m³/hの膜モジュールを開発し、実用施設へのスケールアップにむけた工学設計データを蓄積した。これらをベースとして設計検討を実施し、高透過・超透過膜の利用と膜透過側の向流パージ方式の採用により単位膜モジュールあたりの処理ガス流量を100倍程度増加できる見通しを得た。今後、実用運転実績を蓄積していくことにより、大規模空間への適用性を確かなものとする必要がある。

・異常時における健全性実証

上述のようにトリチウム除去設備は核融合炉の安全確保の要の設備であり、高い信頼性が求められる。特に、最終閉じ込め系を構成し環境との接点となる建屋内へ漏えいしたトリチウムを除去する設備は、停電や故障を想定して十分な冗長性を設計上確保する必要があるほか、火災や他の設備異常時に対する信頼性を確保することが重要である。

TPLでは、この間火災時に発生する一酸化炭素等が除去設備の触媒上で水蒸気の還元反応を起こさないことを検証

するとともに、電気絶縁ガスとして核融合炉の加熱装置で用いられる六フッ化硫黄(SF₆)が高温触媒(>350℃)で分解し、分解生成物(SF₄, SO₂F₂など)が水蒸気を還元して除染効率を下げることを確認し、設計上必要な対策をとるための基礎データを蓄積してきた[21]。今後も、ITERの要請に基づき、実用電気ケーブル火災を模擬したヒューム等の触媒被毒影響など、トリチウム除去設備の健全性に係るデータを取得・蓄積していく予定である。

2.2.3 おわりに

TPLでは、トリチウム技術研究室長(当時)が「運転・試験の安全対策」を1988年に定めている。以下はその抜粋である。

「TPLにおける各種実験、施設・装置の運転・試験は単独でも危険を伴うものが多く、まして複数の実験や運転・試験が同時に進行する場合には干渉により危険はさらに増大する。いかなる作業も、他の実験、装置、設備に与える影響を含めて、危険を事前に充分考慮しなければならない。特にホット実験、運転・試験においては確実な安全対策が必要である。

TPLにおける実験装置や設備の試験、運転、改造、除染作業などは、原則としてすべて事前に規定のフォーマットの計画書を作成し、関係者の審査、許可を経てはじめて行うものとする。

1. 試験の概要
2. 機器の配置
3. 期間
4. 人員
5. 安全設備および他設備との関係
6. 予期される危険、対策
7. 操作手順
8. 記録するデータ」

22年前にTPL独自で定めたこの「運転・試験の安全対策」に従った試験計画書は、700件を超え現在も積み重ねられている。この安全対策の考え方が、今後稼働するITERおよびBA等のトリチウム施設の運転管理、ひいては将来の核融合炉の実現に向け、参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] 松山政夫, 三宅 均, 芦田 完, 渡辺国昭, 竹内豊三郎: トリチウム取扱い装置の設計・製作および、その性能試験, 富山大学トリチウム科学研究センター研究報告 1, 15-24 (1981).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)
- [2] 松山政夫, 三宅 均, 芦田 完, 市村憲司, 渡辺国昭, 竹内豊三郎, 金 信次, 井上照明: トリチウム除去装置の性能試験(II) 富山大学トリチウム科学研究センター研究報告 2, 21 (1982).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)
- [3] 渡辺国昭: 水素同位体機能研究センターにおける研究の展開と展望, 富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 18, 1 (1998).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)

- [4] 渡辺国昭：富山大学におけるトリチウム取り扱い技術の研究・開発，富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 25, 1 (2005).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)
- [5] 芦田 完，三宅 均，松山政夫，渡辺国昭：真空 32, 411 (1989).
- [6] 波多野雄治，張 鯤：金属表面への被膜生成方法，特願 2009-166165.
- [7] 原 正憲，赤丸悟士，波多野雄治，松山政夫，柴尾幸伸，渡辺国昭：線量算定評価システムの構築とその運用，水素同位体機能研究センター研究報告 24, 47 (2004).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)
- [8] 松山政夫，渡辺国昭：制動 X 線計測法によるトリチウムの非破壊分析 (I) 有機材料への適用性，富山大学水素同位体機能研究センター研究報告 16, 81 (1996).
(<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/action/annual.html>)
- [9] Y. Naruse *et al.*, Fusion Eng. Des. 12, 293 (1990).
- [10] T. Yamanishi *et al.*, Fusion Sci. Technol. 54, 315 (2008).
- [11] T. Hayashi *et al.*, Fusion Sci. Technol. 54, 319 (2008).
- [12] T. Hayashi *et al.*, Fusion Technol. 34, 521 (1998).
- [13] Y. Iwai *et al.*, Fusion Eng. Des. 54, 523 (2001).
- [14] Y. Iwai *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 38, 63 (2001).
- [15] K. Kobayashi *et al.*, Fusion Sci. Technol. 41, 673 (2002).
- [16] K. Kobayashi *et al.*, Fusion Eng. Des. 81, 1379 (2006).
- [17] K. Furuichi *et al.*, J. Nucl. Mater. 367-370, 1243 (2007).
- [18] T. Tanabe *et al.*, Fusion Sci. Technol. 41, 528 (2002).
- [19] M. Ichimasa *et al.*, Fusion Sci. Technol. 48, 759 (2005).
- [20] T. Hayashi *et al.*, Fusion Eng. Des. 39-40, 901 (1998).
- [21] K. Kobayashi *et al.*, Nucl. Fusion 47, 1645 (2007).