

## 第6章 トリチウム技術の開発

### 6.1 ITERの燃料サイクルの概要

ITERの燃料サイクルのシステム構成を Fig. 6.1-1 に示す [1].

プラズマからは不純物（ヘリウム，メタン，水蒸気，軽水素(H)など）を10%程度含む重水素(D)－トリチウム(T)燃料が排気され，前置パラジウム拡散器と不純物処理トリチウム回収システムからなる燃料精製システムに最大  $200 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  の流量で送られる．このプラズマ排ガス中の水素ガスの95%以上は，水素のみを透過するパラジウム／銀合金膜からなる前置パラジウム拡散器で分離され，水素同位体分離システムに送られる．また，メタンや水蒸気の中のトリチウム ( $\text{CH}_3\text{T}$ ,  $\text{HTO}$ ) は，不純物処理トリチウム回収システムで化学的に処理され，回収される．深冷蒸留塔からなる水素同位体分離

システムでは，送られてきた水素ガスを液化蒸留して軽水素，重水素およびトリチウムに分離する．分離された重水素およびトリチウムは燃料貯蔵・分配システムを経由して必要量が再び燃料としてプラズマに注入され，サイクルが形成される．

燃料サイクルの周辺には，ヘリウム放電洗浄時の排気ガス（不純物を含むヘリウム）を精製するヘリウム放電洗浄ガス処理システム，炉心の冷却水からトリチウムを除去する水処理システム，トリチウム取り扱い機器を収納し漏洩してくるトリチウムを除去する閉じ込め・除去システム，トリチウム計量管理システム，トリチウム汚染廃棄物処理システムなどのトリチウム関連設備があり，これらが機能的に接続されてプラントが形成されている．ITERでは，トカマク建家内の炉心周辺に設置される燃料給・排気システムを除くトリチウム設備をトリチウムプラントと称している．

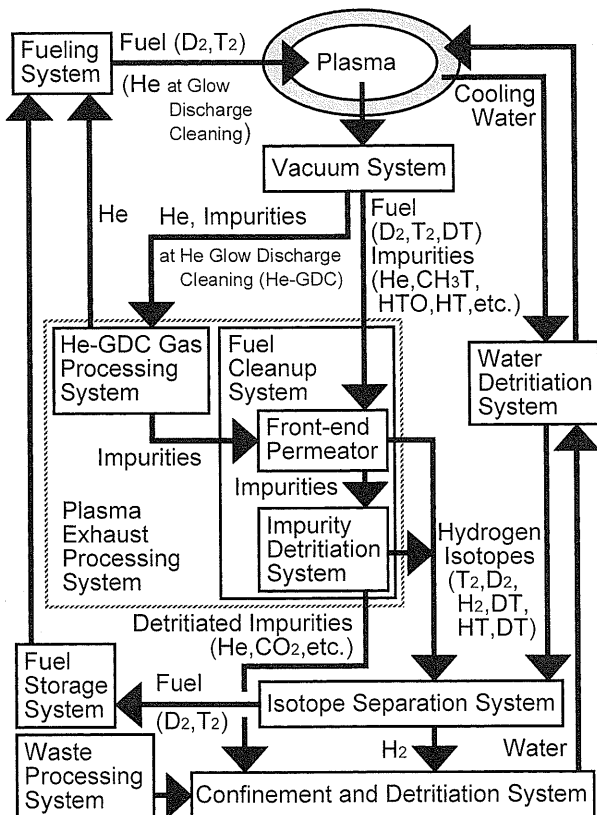


Fig. 6.1-1 Outline of the ITER fuel cycle, in which a variety of fuel processing (mainly tritium processing) systems are connected organically. Total system without fueling system and vacuum system is named "Tritium Plant".

### 6.2 ITER工学 R&D の下における研究開発項目

ITER工学 R&D として主にプラズマ排ガス処理技術開発と安全性向上技術開発が進められた．プラズマ排ガス処理にかかわる技術（不純物処理トリチウム回収技術，ヘリウム放電洗浄ガス処理技術）は核融合炉に特徴的な技術であり燃料サイクルにおいて主要な位置を占める不可欠な技術である．安全性向上技術開発は，最新の技術の導入による安全性の向上および安全確保技術の効率化をめざしたもので，トリチウム除去技術，トリチウムインベントリ低減化技術，分析・計量技術などの幅広い技術開発が行われた．また，プラズマ対向機器におけるトリチウムの滞留量および透過量の評価はトリチウムプラントの設計の最適化，トリチウムインベントリの低減化，ならびに ITER の安全評価などのうえから重要であり，ITER の設計と関連して精力的に進められた．

### 6.3 プラズマ排ガス処理技術開発

#### 6.3.1 開発項目および分担

本開発の主たる項目は不純物処理トリチウム回収システム技術開発であり，プラズマ排ガス中のトリチウムが結合したメタンや水蒸気などの不純物からトリチウムを回収する方法について米国，欧州連合 (EU)，日本がそ

それぞれ独自の方式を考案し、ITER が求めるトリチウム除去係数（不純物処理トリチウム回収システムの入口／出口ガス中のトリチウム濃度比）： $10^7$  を目標として並行して開発を進めた。また、微量のトリチウムなどの不純物を含んだヘリウムから不純物を取り除き、ヘリウムを放電洗浄ガスとして精製して炉心に再循環するヘリウム放電洗浄ガス処理システムの開発は日本、パラジウム拡散器を構成し大量のトリチウムが通過するパラジウム／銀合金膜のトリチウムに対する耐久性の確認はロシアが分担した。

### 6.3.2 不純物処理トリチウム回収システム開発(米国, EU, 日本)

#### (1) 米国における開発

PMR (Palladium Membrane Reactor: パラジウム膜反応器) 方式を考案し、開発を行った。本方式は、触媒の存在下で起こる以下の平衡反応を用いてメタンおよび水蒸気から水素を分離回収しようとするものである。



平衡反応であるためすべてのメタンおよび水蒸気が転換されるわけではないが、PMR では白金触媒を水素だけが透過するパラジウム／銀合金の管に充填し (Fig. 6.3-1), 触媒の作用で生成した水素が管壁を透過して抜け出ることを利用して反応を右辺側に誘導し、水素を回収する。

61 cm 長の PMR の二段直列システムを開発してトリチウム除去係数を測定した結果、一段目で 300, 二段目でそれ以上の値を得[2], 多段システムを構成することにより ITER の目標値  $10^7$  を達成できることを証明した。

#### (2) EU における開発

CAPRICE (CAlytic PuRiFiCation Experiment: 触媒反応器) と PERMCAT (PERMeator and CAlyst: 拡散器／触媒反応器) を複合した CAPER 方式をドイツ

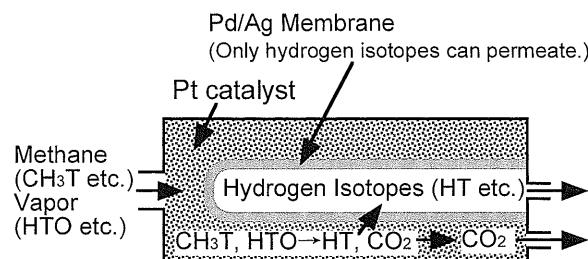
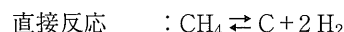
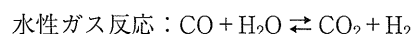


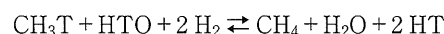
Fig. 6.3-1 Conceptual structure of one module of PMR (Palladium Membrane Reactor)-type impurity detritiation method developed by US. Simple and compact system is realized by combining catalyst and Pd/Ag membrane in one module.

が、HITEX (High Temperature EXchange Reactor: 高温交換反応器) 方式をカナダが考案し、それぞれ開発を進めた。

CAPER (Fig. 6.3-2) の前段である CAPRICE は触媒を充填した反応器であり、パラジウム拡散器と組み合わせてループを構成したシステムによって、不純物ガスを一定量ごとに繰り返し循環処理 (バッチ処理) する。一酸化炭素が供給される反応器では主に



が起こり、ループ中のパラジウム拡散器で水素が分離回収されることによってシステム内を循環する不純物ガス中の水蒸気やメタンの分解が進む。後段の PERMCAT は軽水素ガスの接触によって起こる



のような交換反応を用いてトリチウムを回収する方式であり、パラジウム／銀合金膜を介して供給した軽水素を不純物と触媒中で向流接触させ、不純物中のトリチウムを交換・除去し、パラジウム／銀合金膜を介して軽水素ガス中に回収する。

開発した CAPRICE では 773 K の温度による 20 分間

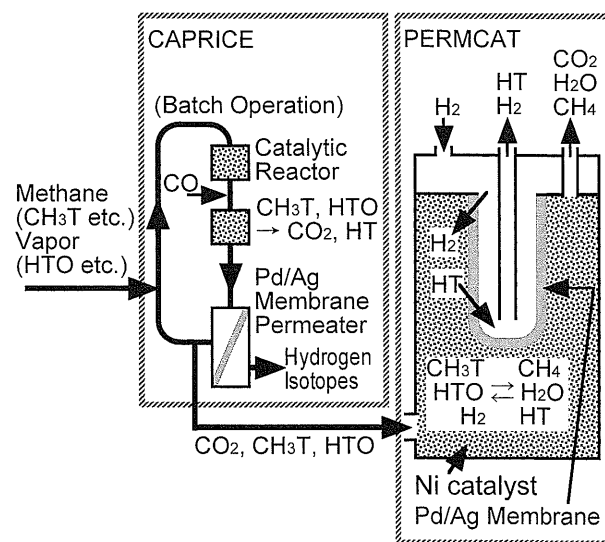


Fig. 6.3-2 Flow diagram and conceptual structure of CAPER (CAPRICE and PERMCAT)-type impurity detritiation method developed by EU. In the first stage, impurities are roughly processed by catalyst adding carbon monoxide in CAPRICE (Calytic Processing) circulating loop with batch processing manner. In the second stage, tritium remained in impurities is further removed by exchanging with protium ( $\text{H}_2$ ) supplied continuously to PERMCAT (Permeator and Catalyst) reactor.

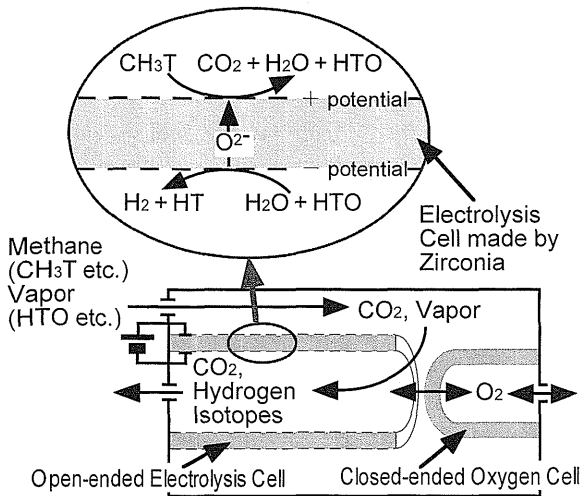


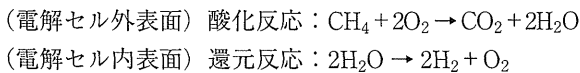
Fig. 6.3-3 Conceptual structure of Electrolytic Reactor developed by Japan home team for impurity detritiation. Methane/vapor mixture is converted without catalyst into carbon dioxide and hydrogen, which are separated by Pd/Ag permeator following the reactor. Oxygen cell controls proper oxygen concentration in the reactor automatically.

のバッチ運転でトリチウム除去係数 5,000 を得た。また、54 cm 長の PERMCAT の 673 K 運転では  $10^4$  のトリチウム除去係数を得[3, 4], 両者をつないだ CAPER でトリチウム除去係数目標値  $10^7$  を達成できることを証明した。

HITEX は PERMCAT と同じ原理の触媒反応器であるが、軽水素をパラジウム/銀合金膜を介さずに不純物に直接供給し、反応器の後段で水素を分離回収しながらループを組んでバッチ処理する。開発した 15 cm 長の HITEX では 673 K-80 分間のバッチ運転で  $10^4$  のトリチウム除去係数を得、ITER の要求値を満足する見通しを得た。

(3) 日本における開発

水蒸気の分解処理に電解セルを用いて実績のある処理方法[5]を発展させ、電解反応器 (Fig. 6.3-3) を考案し、開発を進めた。酸素導電性のジルコニアの円筒 (電解セル) の外表面に正、内表面に負の電位を与え、不純物ガスを外筒側から供給し内筒側から排出することによって



の反応を進ませる。生成した二酸化炭素と水素は後段に配置したパラジウム拡散器で分離する。還元で生成した酸素は電解セル中を内表面から外表面へ移動し、酸化に使われる。メタンと水蒸気の濃度の違いで生じる電解セル内の酸素の過不足は、反応器内の酸素濃度を一定に保つ酸素セルによって自動調整される。この幅広い不純物

濃度条件への適応性が、触媒を使わないためにトリチウムインベントリが低いことや、同位体分離システムへの負荷の増大を伴う水素の供給を必要としないこととともに本方式の特徴である。

開発した 50 cm 長の反応器は、1,073 K の運転温度における不純物ガスの 1 回通過処理 (ワンスルー処理) 運転でトリチウム除去係数 300 を示し[6], 反応器の排出ガスをパラジウム拡散器を介して反応器に再供給するループを組んでのバッチ処理などによって ITER の目標値を達成できることを証明した。さらに、このシステムに水素同位体分離システムおよび水素貯蔵システムを連結して模擬燃料循環ループを構築し、総合的な性能試験を始めている。

6.3.3 ヘリウム放電洗浄ガス処理システム開発(日本)

ヘリウム放電洗浄時の排出ヘリウムガス中に含まれる不純物を液体窒素冷却の低温モレキュラーシープによって吸着・除去し、ヘリウム放電洗浄ガスを精製する低温冷却塔 (Fig. 6.3-4) を開発した。複数本の冷却塔でシステムを構成することにより、一方で放電洗浄ガスの処理、他方で吸着性能の低下した冷却塔の再生操作 (昇温しての不純物の脱着・排出) を行うことにより連続処理を可能とする。開発した低温吸着塔の性能を 160 mol/h の実規模流量で実証し、解析コードも整備した[7]。

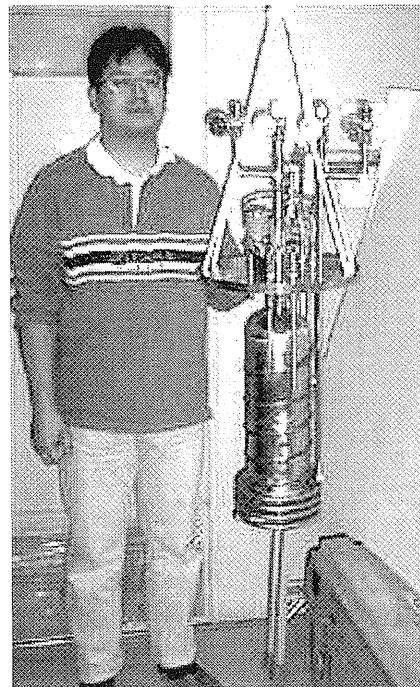


Fig. 6.3-4 Photograph of the developed Cryogenic Molecular Sieve Bed (CMSB) for helium glow discharge cleaning exhaust gas processing.

### 6.3.4 パラジウム拡散器の耐久性実証 (ロシア)

パラジウム拡散器について、50% 重水素-50% トリチウムの混合ガスを用いた大気圧、623 K の定格運転条件下での 3,600 時間連続運転を行った。パラジウム拡散器を構成するパラジウム/銀合金膜の水素透過性能はこの間劣化せず、機能的健全性が保たれたことから、連続運転で 150 日、稼働率 10% の場合で 4 年以上の耐久性を実証した。

## 6.4 安全性向上技術開発

### 6.4.1 開発項目および分担

以下の 8 項目につき、各極分担して開発を行った。

(1) トリチウム除去技術：

気体分離膜方式トリチウム除去設備開発 (日本)

(2) インベントリ低減化技術：

低インベントリ深冷蒸留塔開発 (EU), 低トリチウム残留乾燥塔開発 (EU)

(3) 分析・計量技術開発：

レーザーラマン分光方式ガス分析システム開発 (日本), 反射飛行時間方式高性能質量分析計開発 (ロシア), シンチレーション方式トリチウム検出器開発 (EU), 通気式熱量計量方式トリチウム貯蔵ベッド開発 (日本), 測温式熱量計量方式トリチウム貯蔵ベッド開発 (米国)

### 6.4.2 気体分離膜方式トリチウム除去設備開発(日本)

トリチウム閉じ込め空間内雰囲気中のトリチウム (主に水素状および水蒸気状) 除去は、触媒で酸化してすべて水に転換し水分吸着材で除去する方式が確立しているが、この従来方式を ITER の大きな閉じ込め空間に適用すると大規模な設備となる。一方、ポリイミド気体分離膜は水蒸気および水素を空気成分より格段に透過しやすい性質があり、これを用いて雰囲気ガスを前処理し水蒸気および水素を濃縮することによって触媒酸化・水分吸着設備に送るガス量を大幅に減容することができる。さらに酸化処理前に水蒸気を凝縮除去する工夫を加えた高効率トリチウム除去設備を考案し開発を進めた (Fig. 6.4-1)。

膜の透過特性の改良, 膜の透過側パージ方法の工夫などを進めたとともに、有効膜面積約 40 m<sup>2</sup>, 処理能力約 10 m<sup>3</sup>/h のポリイミド中空糸膜モジュールを開発し、1 m<sup>3</sup> のグローブボックスに接続して行った被処理ガスの濃縮・減容実験を通してその有効性を実証した。従来のトリチウム除去設備の前段にこの気体分離膜を設置することによってその処理能力を 10 倍程度に増力し得、設備の効率化に大きく貢献できる見通しを得た[8]。

### 6.4.3 低インベントリ深冷蒸留塔開発 (EU)

貯蔵システムを除き最もトリチウムインベントリの大きな深冷蒸留塔水素同位体分離システムの低インベントリ化は、安全性向上の観点から重要である。軽水素, 重水素, トリチウムを沸点の相違で分離する深冷蒸留塔は、その内部に気液平衡促進材 (Helipac-A, 同-B, 同-C, など) が充填されている。塔径 5~45 mm, 高さ 1,500 mm の蒸留塔による実験の結果, 40 mm 以上の塔径の場合には Helipac-B の採用によりインベントリを低減化できる可能性を示した[9]。

### 6.4.4 低トリチウム残留乾燥塔開発 (EU)

トリチウム除去設備などでは水分吸着材を充填した乾燥塔により水の形にしたトリチウムを吸着除去する方法がとられ、トリチウムプラント全体では相当量の吸着材

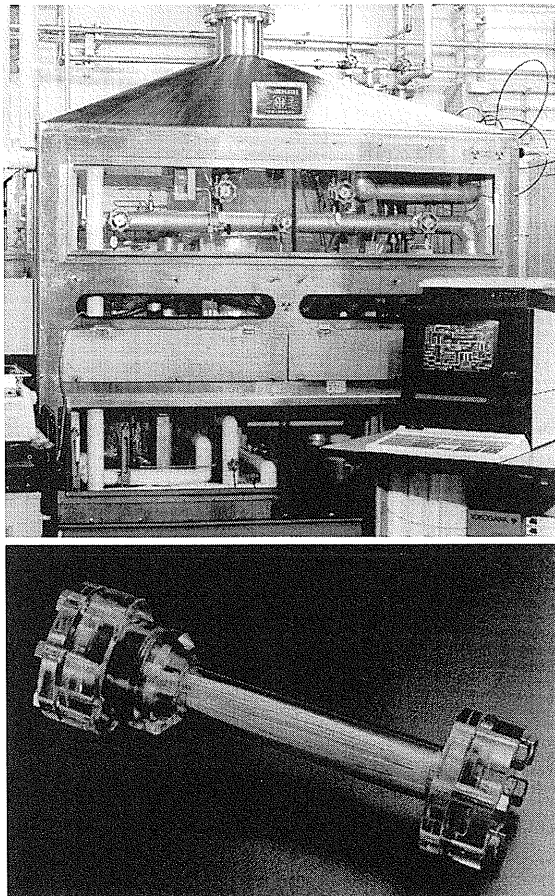


Fig. 6.4-1 Test equipment of the tritium removal system based on the gas separation membrane method (upper photograph) and gas separation membrane module, bundle of polyimide hollow-filament fibers (lower photograph). The gas separation module composed of about 10,000 hollow-fibers of 0.7 mm-diameter×1,400 mm-long was investigated in the test equipment.