

三重水素除去設備の性能確認試験 —国際熱核融合実験炉 ITER

枝尾 祐希
Edao Yuki

磯部 兼嗣
Isobe Kanetsugu

1. はじめに

核融合とは、水素のような軽い原子核同士が融合して、ヘリウム等のより重い原子核に変わることである。この時、原子力発電所の核分裂反応と同様に質量欠損を生じ、エネルギーを持った中性子や原子核が生成されることから、核分裂炉の次の発電炉として期待されている。一方、核融合反応は自然の中にも存在し、特に太陽の中で起こっていることは広く知られている。太陽では重力で閉じ込められた圧縮された水素原子が核融合反応を起こし、ヘリウムへと変わっている。この重力で起こる核融合反応を地上で実現することは現実的ではないが、密度を高めて地上で核融合反応を起こすことは可能である。核融合炉に利用可能と考えられている核融合反応の中で最も起こりやすい、すなわち最も有望な反応は

以下の反応である。



重水素 (D : Deuterium), 三重水素 (T : Tritium) は水素の同位体であり、このうち三重水素は β 崩壊し、微弱な電子を放出する放射性物質である。したがって、早期の核融合発電実現のためには、三重水素を燃料として使用することが必須である。

現在、7極 (欧州, 日本, 米国, 露国, 中国, 印度, 韓国) が協力し、フランスで建設が進んでいる国際熱核融合実験炉 (ITER) においても、重水素と三重水素を用いた核融合反応実験が計画されている。

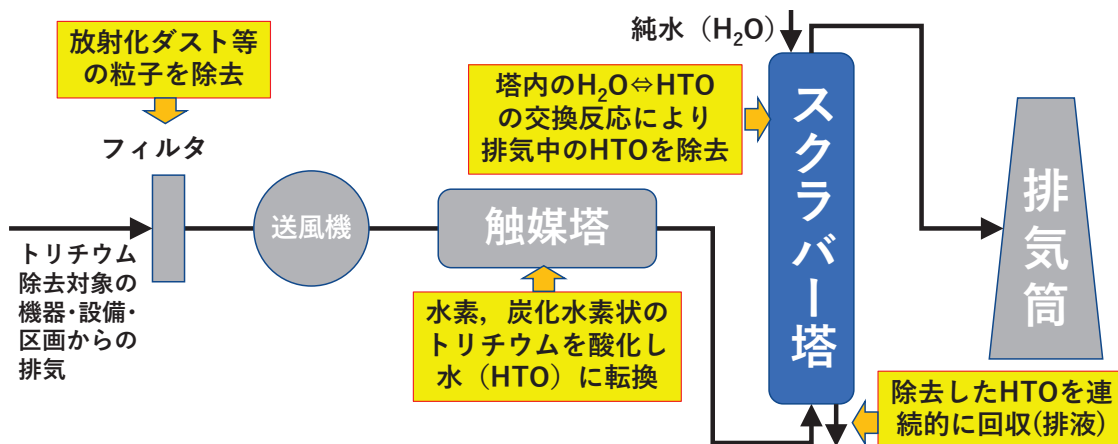


図1 ADSの概略構成

2. 三重水素除去設備

ITERでは放射性物質である三重水素を燃料として大量に取り扱うことから、フランスの規制においても原子力施設と分類されている。ITERでは、三重水素を施設内に閉じ込めるため、建屋内を負圧(大気圧よりもやや低い圧力)に維持し続けることと、万一設備から三重水素が放出されたとしても、大気から三重水素を除去・回収する設備によって三重水素を除去し、環境中に管理されていない状態で放出されることを防ぐことを方策としている。この三重水素を除去する設備を三重水素除去設備(ADS: Atmosphere Detritiation System)と呼んでいる。大気から三重水素を除去する原理は非常に単純である。核融合炉で水素同位体は、水素ガス、有機系ガス、水蒸気の化学形を持つが、水素ガスや有機系ガスも酸化させれば水蒸気となる。そのため、三重水素を含んだガスを触媒等で酸化させ、水(水蒸気)の形で捕集するのがADSの原理である。図1にADSの概略構成を示す。ADSは、中性子等で生じる放射化ダスト等の粒子を除去するフィルタ、大気を除去設備に送り込む送風機、三重水素を含んだガスを酸化させる触媒酸化反応塔、水の形の三重水素を回収する三重水素回収塔(スクラバー塔)で構成され、排気筒から三重水素を含まないガスとして環境中に排出する。このうち、フィルタと送風機については、商業的に使用されている機器を採用することになっている。このようにADSの原理自体は非常に単純であるが、ITERにおける安全の要となる設備であり、ITERの通常運転時だけでなく事故等の異常事象においても、その性能を維持することが求められる。そのため、フランスの規制当局から三重水素除去設備の性能確認試験を実施することがITERへ求められた。

3. スクラバー塔の開発

ITERのADSでは、これまでにない試みとして、三重水素回収塔に日本が提案したスクラバー塔方式が採用された。これまで三重水素を大量に取り扱うことのできる施設にもADSと同様の設備があったが、三重水素回収塔としては微量の水分でも強く吸着できるモレキュラーシーブ(ゼオライトの一種)

を使用した乾燥塔方式が採用されている。この方式は処理ガス中の水分濃度を数ppmにすることができ非常に優れた方式であるが、吸着できる水分量に上限があり、乾燥塔の再生のためにも複数の系統と煩雑な操作が必要となる。ITERでは想定される事故時に、長時間にわたりADSの機能を維持するため、日本がスクラバー塔を提案しITERにおいて採用された。

スクラバー塔による三重水素除去の原理は、特殊な充填物が詰まった塔の上部から、三重水素を含まない水(いわゆる普通の水)を導入・散布し、三重水素を含む水蒸気を連続的に洗い流すものである。そのため、スクラバー塔を用いた場合の必要な操作は、水を塔内に導入するのみという非常にシンプルな設備となる。スクラバー塔内部では、水と三重水素を含む水蒸気を接触させて、水蒸気側から水側へ三重水素を移すこと(同位体交換)によって排出ガス中の三重水素を除去している。スクラバー塔内には、親水性表面加工を施した充填物とその充填物の高い濡れ性を保持するために均一に水を分散可能な水分散器を採用した。これにより、水と水蒸気ガスを効率的に接触させることができ三重水素の除去性能の向上と排液量の減少が可能となる。

スクラバー塔による三重水素除去の実績としては、放射性廃棄物処理施設における焼却処理装置に排ガスの洗浄のためにスプレー式のスクラバー塔が挙げられるが、これは三重水素除去に特化したものではないため、三重水素の除去性能は高くない。一方で、ADSの充填物を充填する湿式スクラバー塔は三重水素除去を目的としたものであり、これまで実績がないことから、フランス規制当局からスクラバー塔については、より詳細な性能確認が求められた。

4. 性能確認試験

ADSの性能確認試験は大別して2つのフェーズで実施した。最初のフェーズではITERで初めて採用されるスクラバー塔の性能確認試験であり、次のフェーズでは統合された設備としての性能確認試験である。

4.1 スクラバー塔の性能確認試験

ADSではスクラバー塔による三重水素除去はこ

れまでの実績がないため、(国研)量子科学技術研究開発機構にて性能確証試験を実施し、三重水素の除去性能やその動特性等を確認した。この性能確証試験では、2011～2022年までの11年間にわたる長期信頼性等も確認した。また、一般的な設備や機器に対する性能確認だけではなく、地震に対する影響として、**図2**に示すように大きな3次元加振台にスクラバー塔自体を設置して揺らし、その後の試験により除去性能が維持されることも確認した。

4.2 統合性能確証試験

ADSはスクラバー塔も含めた設備として性能を維持する必要がある。そのため、**図1**に示した送風機、触媒酸化反応塔、三重水素回収塔(スクラバー塔)で構成される除去システムを模擬した小型の試



図2 3次元加振台の上に設置されたスクラバー塔
中央のステンレス製の銀色の筒がスクラバー塔

験設備を製作し、統合性能確証試験を実施した。試験の結果、ITERの通常運転で想定される条件、また、火災を含む事故の際に想定される条件において必要とされる三重水素除去率(除去率とは、入ってくるガス中の三重水素を除去した割合であり、ITERではフランスの原子力規制に則り定められた要件書において、通常運転時：99%以上、非火災の事故時：99%以上、火災時の事故：90%以上と定められている)を満たすことを確認した。統合性能確証試験では最大で 9×10^{11} Bqの三重水素を用いた試験を実施し、 3×10^8 Bq/cc程度の水となった三重水素を取り扱ったが、被ばくや汚染拡大もなく、安全に試験を完遂した。

5. 今後の原型炉に向けて

核融合炉発電の実現に向け、実験炉ITERの次の段階である原型炉開発が各国で進められている。特にITERに参加する7極は個別に原型炉開発の国家プログラムを持ち、その概念検討が進められている。核融合反応においては、注入した燃料に対し数%しか核融合反応を生じないことから、排気ガス中にも多くの未反応水素があり、排気ガスから燃料をリサイクルすることが求められる。この燃料のリサイクル(燃料循環システム)の中で水素同位体は水素分子や水蒸気の状態だけでなく、水や液体水素としても存在する。このように多様な形態を持って存在する水素同位体をいかに管理するかが、核融合による発電を目指すために重要な課題となる。今回紹介した三重水素除去設備は核融合炉の安全上重要機器であり、日本においてその性能確証試験を完遂できたことは原型炉開発における国際的なイニシアチブを取る上で重要な実績の1つとなる。

((国研)量子科学技術研究開発機構)