

トリチウム分離技術の検証のための実証事業

目的と目標

本実証事業の目的は、キュリオンのモジュラー型トリチウム分離装置(MDS[®])を用いて、福島第一原発の汚染水と同等の水からトリチウムを除去することで、汚染水の経済的な処理を実証することである。MDS[®]システムは、化学交換電解セル複合法(CECE)を用いる。本実証事業においては、フルスケールの反応塔(触媒入りのカラム)と1/10規模の水電解装置が用いられた。本実証事業の成果として、概念設計、詳細な見積、及び、技術成熟度の検証が達成された。前処理設備についても、技術検証がなされた。

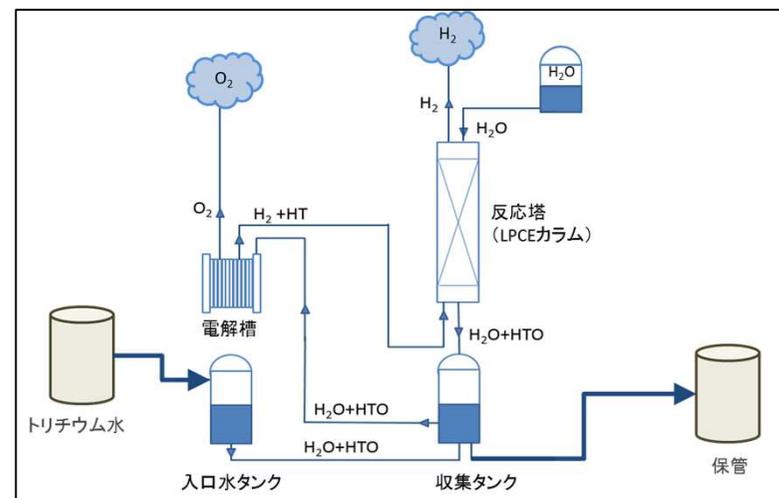
KURION

分離技術の原理/事業の概要

- ❖ **実証済みの技術の発展** – 重水からのトリチウム除去技術としては、過去数十年間、CECEが商用で用いられており、実証済であるが、MDS[®]は、これを進化させたものである。キュリオンは、軽水からのトリチウム除去について、福島と同等の濃度の低トリチウム濃度の水を用いて、高い除染係数を達成した。
- ❖ **出口水がない** – MDS[®]は全トリチウムの>99%を商業的に実証済の小容量(50L)の乾燥金属吸着材の中に捕獲する。出口側は清浄な水素ガスのみ。
- ❖ **適切な規模での実証** – 本実証事業においては、フルスケールの反応塔(MDS[®]カラム)と1/10規模の水電解装置が用いられた。また、実証は、福島第一の汚染水処理を想定して、関連性の高い状況下で実施された。
- ❖ **専門的根拠に基づき成熟度を評価** – 技術成熟度評価(TRA)と呼ばれる、米国エネルギー省およびNASAが、資材の調達の際のツールとして使用している手法が用いられた。専門家による第三者委員会により評価がされた。
- ❖ **概念設計報告書とコスト評価** – 機器類、施設、資本費、運転上の要求、及び福島第一への適用に関する考慮を含む、設計とコスト評価が完了した。
- ❖ **即時にフルスケールにスケールアップ** – 本実証事業の後、ただちに、技術上及び見積上の確信をもって、MDS[®]は、福島第一用に、フルスケール(一日400立米まで)とすることが可能。

CECE 技術の原理

1. 水電解装置が、トリチウム水を、水素(H₂とHT)と酸素(O₂)に分解する
2. 水素は反応塔を上昇するが、このとき、この水素中のトリチウムは、反応塔の上から流れ落ちる純水に移行する
3. このようにして浄化された水素が製造され、他方で、トリチウム水(HTO)は濃度が高くなり、収集タンクに移動する
4. このように生成された高濃度のトリチウム水は、入口水タンクから低濃度の水が供給されるとともに、収集タンクから除去される(キュリオンのシステムでは、その後、別途、同位体除去装置を用い、トリチウムが乾燥金属吸着材の中に捕獲される)



MDS[®] は大量のトリチウム汚染水を処理する現実的な技術です
キュリオンは、福島第一でフルスケール機を適用する準備が出来ていることを実証することにコミットしています

試験結果

- ❖ 低濃度汚染水について、大規模に、トリチウムを十分に除去可能なことを実証した(従前は実証されていなかった)
- ❖ 実験室規模のトリチウム分離試験において、最適な運転パラメータが確認された
- ❖ (不純物を取り除き)ASTM Type 3 に適合する高純度の水とする前処理が実証された。前処理については、商業的に実証されたシステムが利用できる
- ❖ エンジニアリング・スケールのシステムについては、フルスケールの反応塔を用いており、スケールアップを実証し、長期間の運転における信頼性を実証した。高流速の水素での運転が実証された(200 Nm³/h以上)



キュリオンの
フルスケールカラム

得られた結果

フルスケールシステムに使用される結果

- ❖ 供給水の量、流量とトリチウム濃度: 400 m³/日、平均1250 Bq/mL、合計800,000m³
- ❖ トリチウム除去後の水素の流量と濃度: 31,500 Nm³/時(水素として)、<5 Bq/L
- ❖ トリチウム濃縮側の量とトリチウム濃度: 50 L(金属水素固化体中に)、1.98E+13Bq/L(800,000m³のトリチウム水に対して)
- ❖ 二次廃棄物 – 前処理システムは、トリチウム水から溶解性固形分を除去し、極めて低い放射能濃度の3,200トンの固体廃棄物を生じる(800,000m³のトリチウム水に対して)

汚染水800,000 m³を処理するための資本費及び運転費

処理容量 (m ³ /日)	設備規模 (m ²)	資本費 (USD)	建設期間(月)	運転費 (USD)
400	10,200	\$891,400,000	40	\$1,157,500,000

運転費は電力単価を\$0.15/kwh とし、人件費を1日8時間として \$364とした。これらの単価は三菱総合研究所/経済産業省から提供された前提。

これらのコストは以下に基づいている:

- トリチウム分離係数284(1,250Bq/cc ÷ 4.4Bq/cc)、及び、
- トリチウム分離比111(1000TBq/1000-991TBq)

上記のトリチウム分離係数は、容易に増加することができる。例えば、上記の資本費を約2.5%増加すると、運転費は増加せずに、トリチウム分離係数を、3000まで増加できる。トリチウム分離係数が3000であれば、入口水の濃度が4,200Bq/ccのとき、出口側の濃度は1.5Bq/ccを下回る。

フルスケールの概念設計をベースにした上記の見積については、以下の点が重要:

- 上記の見積には、必要なプロセスをすべて含んでいる(前処理、トリチウム分離、後処理、及び固定化)
- 見積は、見積作成の専門家により実施されており、設計・プロジェクト管理・建設・試運転及び運転の費用のすべてを含む
- 見積には、概念設計の際に想定できなかった事態が発生する可能性を見込んで、保守側に費用をのせている。詳細設計において、より細かい事態を想定することで、保守側にのせた費用を軽減することが可能である。したがって、フルスケール設備の最終費用は、現在の見積よりも低くなると考えられる
- フルスケール設備の多くは、工場で製作される。この費用は、最初のユニットが完成した後、次第に減少する可能性がある

今後の課題/留意点

技術の完成度

キュリオンは、MDS®に自信を持っている。フルスケールの反応塔(触媒を用いたカラム)を用いて実験をし、MDS® がスケールアップ出来ることが実証された。本実証事業の当初の提案書で述べた全ての目標が達成された。MDS® 施設の許認可・設計・建設・運転・最適化の全てを実行するのに、実証事業の期間は極めて限られていたことから、エンジニアリング・スケールの設備は、本実証事業の前から利用してきたベンチスケール設備と同等の効率を得るには至っていない。このため、キュリオンでは4月に追加試験を開始した。追加試験によるシステムの最適化が数週間以内に完了する見込みである。その最適化試験の結果は、経済産業省などに提供される。エンジニアリング・スケールの設備の性能は、ベンチ・スケールの設備の性能と等しいか上回ることが期待され、これにより、福島第一原発に設置した場合の実機の資本費と運転費がさらに低減すると考えられる。

資本費の改善

上記の見積は、経済産業省から要求された処理量に基づいている。キュリオンは資本費を減らし、敷地面積と職員数を減少できる最適な処理容量の評価を行った。その一例を下に示す。

処理容量 (m ³ /day)	設備規模 (m ²)	資本費 (USD)
100	6,300	\$376,100,000

運転費の改善

- MDS® システムの運転に必要な電力を、電気料金により調整する。電力費が高いときには(典型的には日中)、システムの運転能力を落とし、電力費が低いときには(典型的には夜間)、システムの運転能力を最大とすることで、電力費が30~50%程度低減されると考えられる。
- 上記に示す費用は、水素タービン発電設備を併設し、水素を発電のためにリサイクルすることによる費用及び効果を含む。正味の電力消費は20%近く低減し、対応する運転費が低減されている。
- 廃棄物管理の戦略として一つの選択肢は、比較的より濃度の高いトリチウム水のみを処理することである。この戦略をとる場合、キュリオンは、800,000m³の半分以下の水が処理されると予測している。この場合には、運転費用の50%以上が更に削減される結果となる。

ライフサイクルコスト評価

- トリチウム処理の選択肢毎(自然減衰のための貯蔵、直接放出等)に、ライフサイクルコストの評価をすることが、最適な選択肢を決定するために必要である
- 他の選択肢のライフサイクルコストには、追加で必要となる貯蔵タンク費用、作業者の被曝、放出の遅れによる費用等を含む必要がある
- 選択肢の一つとして、種々の処理容量のMDS® と、放出基準内の海洋放出を併用することを検討すべきである(トリチウム処分の加速)

実機適用の際のプロセスフロー図

MDS® システムは全ての低濃度、高濃度トリチウム水を除去する。800,000m³中のトリチウムは金属水素化合物に貯蔵され、安全で長期間の保管のために一本の50L容器(一例を下の写真に示した)内に収納される。金属水素化合物「ゲッターベッド」は、トリチウムの永久保管に、これまでも広範に、商用で利用されている。

