

トリチウム水タスクフォース報告書

平成 28 年 6 月

トリチウム水タスクフォース

トリチウム水タスクフォース報告書（概要）

東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原発」という。）における汚染水処理対策のうち、多核種除去設備等で処理した水（以下「トリチウム水」という。）の長期的取扱いを決定するための基礎資料として、様々な選択肢についての技術的な評価を行った（関係者間の意見調整や選択肢の一本化を行うものではない。）。

○基礎情報の整理

水素の放射性同位体（三重水素）であるトリチウムについて、その物性、環境動態、及び環境や人体への影響に関する知見を整理するとともに、福島第一原発におけるトリチウムの存在状態やトリチウムに係る規制基準、国内外における取扱い事例を基礎情報としてとりまとめた。

○トリチウム水の取扱いに係る各選択肢とその評価

諸外国の事例等を踏まえ、5つの方法と前処理とを組み合わせた11の選択肢について、横並び比較のための統一の取扱い条件に基づき評価ケースを設定し、技術的な評価を行った。

- 地層注入（前処理なし／希釈後／分離後）
- 海洋放出（希釈後／分離後）
- 水蒸気放出（前処理なし／希釈後／分離後）
- 水素放出（前処理なし／分離後）
- 地下埋設（前処理なし）

（主な条件）処分量：80万 m^3 、一日当たり処分量：400 m^3

原水濃度：420万 Bq/L 又は50万 Bq/L

処分濃度：法令告示濃度

評価においては、基本要件として、技術的な成立性や規制成立性、及び、制約となりうる条件として、処分に必要な期間、コスト、規模、二次廃棄物、作業員被ばく、その他の条件を評価項目として設定した（試算結果は、一定の仮定の下での概算であり、実際の処分内容を保証するものではない。）。

なお、同位体分離に関しては、トリチウム分離技術の検証試験の結果を踏まえ、直ちに実用化できる段階にある技術が確認されなかったことから、分離に要する期間、コストには言及していない。

目次

1. はじめに	2
2. 本タスクフォースの目的・前提	2
3. 基礎情報の整理	
(1) トリチウムの物性	3
(2) トリチウムの環境動態・影響	3
(3) 福島第一原発におけるトリチウムの存在状態	4
(4) トリチウムに係る規制基準	5
(5) 国内外における事例	6
4. トリチウム水の取扱いに係る各選択肢とその評価	
(1) 選択肢の整理	7
(2) 評価項目	8
(3) 比較評価のための条件設定	9
(4) 選択仕事の具体的なケースの設定	9
(5) 各評価ケースの概念設計	11
(6) 各評価ケースの評価結果	13
5. おわりに	13
● トリチウム水タスクフォース 名簿	14
● トリチウム水タスクフォース 開催実績	15

1. はじめに

平成 25 年 12 月 10 日、汚染水処理対策委員会において、「東京電力（株）福島第一原子力発電所における予防的・重層的な汚染水処理対策～総合的リスクマネジメントの徹底を通じて～」がとりまとめられた。その中で、「汚染源を取り除く」、「汚染源に水を近づけない」、「汚染水を漏らさない」という各種の対策を講じたとしても、最終的に、多核種除去設備等で処理した水（以下「トリチウム水」という。）の貯蔵に関するリスクが残存することが明確化された。このため、トリチウム水の取扱いについて、様々な選択肢について評価することを目的に、汚染水処理対策委員会の下にトリチウム水タスクフォースを設置することとし、平成 25 年 12 月 25 日より検討を開始した。

トリチウム水の取扱いについては、IAEA（国際原子力機関）調査団から、「あらゆる選択肢を検証すべき」との助言があり、原子力災害対策本部が平成 25 年 12 月 20 日に決定した「東京電力（株）福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水問題に対する追加対策」においても、「追加対策を講じた後になお大量貯蔵に伴うリスクが残存するトリチウム水の取扱いについては、あらゆる選択肢について、総合的な評価を早急を実施し、対策を検討する。」と位置づけている。

2. 本タスクフォースの目的・前提

本タスクフォースは、東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原発」という。）における汚染水問題のうち、特にトリチウム水の長期的取扱いを決定するための基礎資料として、分離、貯蔵、放出等の様々な選択肢を抽出するとともに、それらの選択肢それぞれについて、技術的成立性、規制成立性、取扱いに要する期間、費用等について技術的な評価を行うことを目的としている。（関係者間の意見調整や選択肢の一本化を行うものではない。）

なお、トリチウム以外の核種は多核種除去設備等により別途除去されることを前提としている。

3. 基礎情報の整理

(1) トリチウムの物性（参考資料1）

- ・トリチウムは、陽子、電子の他に中性子を2つ持つ水素の同位体（三重水素）である。
- ・トリチウムの半減期は12.3年である。また、体内に入ったトリチウムは、新陳代謝により、水の場合は10日程度、有機物の場合は40日程度で、半分が体外に排出される（生物学的半減期）。
- ・トリチウムの β 線のエネルギーは小さく（最大18.6keV）、紙一枚で遮蔽可能である。

(2) トリチウムの環境動態・影響（参考資料2～6）

(ア) トリチウムの環境動態

- ・大気中に放出されたトリチウムは、大気中での乱流拡散、地表への乾性又は湿性沈着、地中での移流や拡散、地表からの蒸発等の挙動を示す。放出時の気象条件で拡散状況は大きく異なるため、単純な評価は困難である。
- ・海洋中に放出されたトリチウムは、放出方法や放出位置にもよるが、放出地点から離れるに従い濃度は低減する。（約10km下流では約1桁低減、約50km下流では約2桁低減、約100km下流では約3桁低減との試算がある（海流による移流拡散のみを考慮）。）
- ・トリチウムは宇宙線等により年間 7×10^{16} Bq程度生成されるため自然界にも存在し、天然水中には1Bq/L程度、人体中（体重65kgの人）には100Bq/人程度存在する。過去には大気中核実験（1945年～63年）に由来する環境中トリチウムは約 $1.8 \sim 2.4 \times 10^{20}$ Bq程度存在した。2010年時点における環境中の存在量としては、 $1.0 \sim 1.3 \times 10^{18}$ Bq程度である。

(イ) トリチウムの環境影響

- ・有機物中のトリチウムには、FWT（自由水中トリチウム）とOBT（有機結合型トリチウム）がある。OBTは生体に吸収されやすく生物学的半減期が長いため、線量評価上重要である。
- ・水圏環境においては、生物中FWT濃度と水中トリチウム濃度は速やかに平衡に達し（ほぼ等しくなり）、水から特定の生物への生体濃縮は確認されておらず、トリチウムの濃縮係数（水中濃度に対する生物中濃度の比率）は1以下とされている。
- ・海洋生物に対する線量評価は、「標準生物」（例えば、ヒラメ、マス、カニといった形が違う海洋生物）を対象に行われている。一般的には、換

算係数を用いて、放射性物質濃度 (Bq/kg-生) (※1) から計算される。例えば底魚において、トリチウムが対象生物体内に均一に分布、海水中トリチウム濃度が法令告示濃度の 60,000Bq/L、濃縮係数が 1 と仮定すると、吸収線量率は 0.0048mGy/日 (※2) となる。NCRP (アメリカ放射線防護審議会) や IAEA (国際原子力機関) の評価では、10mGy/日以下の慢性的な吸収線量率であるならば、水棲生物集団の防護に十分であるとされている。したがって、相当に高濃度のトリチウムが水圏環境に存在し続けられない限りは、水棲生物への有意な影響は考えられない。

(※1) 環境試料を乾燥させない状態で計測した濃度を表す単位。

(※2) 吸収線量とは、単位質量あたりの「物体」が吸収する放射線のエネルギー量を表すもので、単位は Gy (グレイ) で表す。なお、放射線の種類や対象組織を考慮し、吸収線量を人体に与える影響に換算したものが線量当量であり、単位は Sv (シーベルト) で表す。

(ウ) トリチウムの人体影響

- ・トリチウムが人体に与える影響は、食品中の放射性物質の基準として設定されている放射性セシウムより極めて小さく、約 1,000 分の 1 となる。
- ・トリチウムは低エネルギー β 線の放射性核種であるため外部被ばくはほとんどなく、体内摂取による内部被ばくが考慮される。
- ・前述のとおり、トリチウムは生体内では FWT (自由水中トリチウム) と OBT (有機結合型トリチウム) の二つの形態で存在しており、ICRP (国際放射線防護委員会) によると、生体内での半減期は FWT で 10 日程度、OBT で 40 日程度とされている。
- ・福島沖の表層海水 (水深 200~300 メートルまで) 中におけるトリチウム濃度の計測データとしては、バックグラウンドのトリチウム濃度レベル (0.07Bq/L) に対して事故後は 0.15Bq/L に上昇した (海水 1 リットル当たり 0.08Bq/L の上昇) との調査結果 (2011 年 6 月) がある。この値を基に、魚が全量を OBT (0.15Bq/kg) として取り込んだと仮定し、その魚を 1 年間に 60 キロ摂取するとして人体への影響を試算した場合、(バックグラウンドの被ばく量を差し引くと) 年間の被ばく量は約 2×10^{-7} mSv 程度となる。

(3) 福島第一原発におけるトリチウムの存在状態 (参考資料 7)

- ・平成 28 年 3 月時点におけるタンク内で貯蔵されている汚染水の総貯蔵量は約 82 万 m^3 であり、このうち、多核種除去設備による浄化処理が完了した水は約 62 万 m^3 である。
- ・タンク貯留水中のトリチウム濃度は、建屋への地下水流入に伴う希釈によ

り徐々に低減しているため、貯蔵時期によって異なり、貯蔵時点における濃度は 30 万～420 万 Bq/L 程度（2011.9～2016.3）である。2016 年 3 月時点での半減期補正を行うと、濃度は 30 万～330 万 Bq/L 程度、タンク貯留水に含まれているトリチウムの累積量は約 7.6×10^{14} Bq（約 2.1g（※））（平成 28 年 3 月 24 日時点）である。

（※）トリチウムが「T」（トリチウム原子）の形態で存在した場合に相当する量

（４）トリチウムに係る規制基準（参考資料 8）

（ア）通常の原子力発電所における規制基準

- ・「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下「原子炉等規制法」という。）に基づき定められた「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」においては、気体状の放射性廃棄物を排気施設で排出する場合、「排気口又は排気監視設備において排気中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域の外の空気中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度（※）を超えないようにすること」が求められている。また、液体状の放射性廃棄物を排水施設によって排出する場合、「排水口又は排水監視設備において排水中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域の外側の境界における水中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること」が求められている。
- ・さらに、上記規則に基づき定められた「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」において、「外部被ばくによる 1 年間の実効線量の 1mSv に対する割合」、「空気中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」及び「水中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」の和が 1 未満となることが要求されている。

（※）一種類の核種のみで年間 1mSv の被ばく量となる値。放射性物質がトリチウムの場合の濃度限度は、空気中の濃度については、水蒸気の状態では 5Bq/L、水素ガスの状態で 70,000Bq/L、水中の濃度については 60,000Bq/L。

（イ）特定原子力施設である福島第一原発における規制基準

- ・原子炉等規制法に基づき定められた「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則」においては、気体状の放射性廃棄物を排気施設で排出する場合、「排気口又は排気監視設備において排気中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域の外の空気中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度（※）を超えないようにすること」が求められてい

る。また、液体状の放射性廃棄物を排水施設によって排出する場合、「排水口又は排水監視設備において排水中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること」が求められている。

- ・ さらに、上記規則に基づき定められた「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関して必要な事項を定める告示」では、「外部被ばくによる 1 年間の実効線量の 1mSv に対する割合」、「空気中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」及び「水中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」の和が 1 未満となることが要求されている。

(※) 一種類の核種のみで年間 1mSv の被ばく量となる値。放射性物質がトリチウムのみの場合の濃度限度は、空気中の濃度については、水蒸気の状態では 5Bq/L、水素ガスの状態では 70,000Bq/L、水中の濃度については 60,000Bq/L。

(ウ) 食品中の規制基準

- ・ 平成 24 年に食品中の放射性物質に関する基準値が設定された際、トリチウムの食品中濃度に関して、「考慮しなければならないほどの線量となることは考えがたい（厚生労働省薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会放射性物質対策部会報告書）」とされ、トリチウムについての基準値は設定されていない。

(5) 国内外における取扱いの事例（参考資料 9～13）

(ア) アメリカにおける事例

- ・ スリーマイル島原発事故においては、約 2.43×10^{13} Bq のトリチウム（約 8,700 m³）が大気中への水蒸気放出により処分された。
- ・ 24 の選択肢のうち、NRC（アメリカ合衆国原子力規制委員会）が 9 つの選択肢は影響が非常に小さいと評価し、この中から、事業主体がステークホルダーへの説明等を経て水蒸気放出を選定した。事故後、処分開始までは 10 年を要し、処分完了までは更に 3 年を要した。（スリーマイル島原発では水の増加量が少なく、貯蔵容量に余裕があったため、長期間かける余裕があった。）

(イ) フランスにおける事例

- ・ ラ・アーグ再処理工場におけるトリチウムの年間放出量は、液体で約 1.2×10^{16} Bq、気体で約 7.0×10^{13} Bq である。フランスでは、環境中に放出された放射性物質の総放出量は最近 20 年で減少傾向だが、トリチウムは処理できないため放出量が減少していない。

- ・トリチウムは健康影響が小さいとの国際的な認識があったが、国内で有機物のトリチウムを評価する必要性が指摘されたため、ASN（原子力安全局）は、2010年に「トリチウム白書」と呼ばれる報告書を作成した。報告書の作成過程を通じ、トリチウムの除去について世界の技術を探したが、許容できるコストで解決できる技術はなく導入不可能であるとの結論に至り、ステークホルダーとも共通認識となった。報告書作成後も、事業者はトリチウムの処理方法について最先端の可能性を説明するレポートを定期的に作成・報告し、これをASNが注視することとしている。

（ウ）イギリスにおける事例

- ・カラム核融合エネルギーセンターに設置された重水素とトリチウムを燃料とするEUの核融合実験装置（JET）では、高濃度のトリチウムを含む冷却水等から、電気分解、深冷分離等によりトリチウムを回収する施設を構築している。全30の選択肢について、事前審査で10の選択肢に絞り、その後、適用性・実現可能性、経済性、環境影響、健康・安全、規制・対外関係に係る合計16の項目の評価を実施し、このような処分方法を決定した。

（エ）国内における事例

- ・国内の原子力発電所においては、上記（4）（ア）の規制基準に基づきトリチウムの排出が行われている。
- ・平成22年度における国内の1つの原子力発電所からのトリチウムの海洋への放出量は、 $2.2 \times 10^{10} \text{Bq}$ ～ $1.0 \times 10^{14} \text{Bq}$ である（発電所により異なる。）。

4. トリチウム水の取扱いに係る各選択肢とその評価（詳細は「別紙1」参照。）

（1）選択肢の整理

- ・トリチウム水の長期的な取扱い方法として、諸外国の事例等を踏まえ、5つの方法を選び、前処理なし、希釈、同位体分離（※）（以下「分離」という。）と組み合わせることで得られる以下の11の選択肢に整理した。
 - 地層注入（前処理なし／希釈後／分離後）
 - 海洋放出（希釈後／分離後）
 - 水蒸気放出（前処理なし／希釈後／分離後）
 - 水素放出（前処理なし／分離後）
 - 地下埋設（前処理なし）

(※) 同位体分離後の減損側を処分する。

(ア) 地層中に注入廃棄（以下「地層注入」という。）

- ・圧縮機を利用して、地中へのパイプラインを通じ、深い地層中（深度2,500m）に、トリチウム水を、前処理なしで、又は希釈若しくは分離して、安全性を確保した上で注入する。

(イ) 海洋放出

- ・トリチウム水を、希釈又は分離して、安全性を確保した上で海洋に放出する。なお、希釈の場合は、希釈倍率により希釈する水の確保の方法が変わる可能性がある。

(ウ) 水蒸気として大気放出（以下「水蒸気放出」という。）

- ・トリチウム水を、前処理なしで、又は希釈若しくは分離して、蒸発処理し、トリチウムを含む水蒸気を蒸発装置に送り込み、高温水蒸気として、排気筒から、安全性を確保した上で大気に放出する。

(エ) 水素に還元し水素ガスとして大気放出（以下「水素放出」という。）

- ・トリチウム水を、前処理なしで、又は分離して、電気分解によって水素に還元し、安全性を確保した上で大気に放出する。

(オ) 固化又はゲル化し地下に埋設廃棄（以下「地下埋設」という。）

- ・トリチウム水とセメント系等の固形化材を混練し、コンクリートピット等の区画内に安全性を確保した上で埋設する。

(2) 評価項目

- ・(1)に掲げた各選択肢を横並びで比較できるよう、評価項目として以下を設定した。

(ア) 基本要件：成立するか否かの判断材料となる項目

- ・技術的成立性：技術的な実現可能性、技術的成熟度、実績の有無
- ・規制成立性：既存の規制との関係

(イ) 制約となりうる条件：制約条件となる可能性のある項目

- ・期間：処分に必要な期間（調査、設計・建設、処分、解体、監視等）
- ・コスト：処分に必要なコスト（調査、設計・建設、処分、解体、監視等）

- ・規模：処分に必要な面積（陸域・水域）
- ・二次廃棄物：二次廃棄物発生の有無、種類と量
- ・作業員被ばく：処分を行うことによる過度な作業員被ばくの発生
- ・付帯条件：その他、制約となりうる条件

（3）比較評価のための条件設定

- ・各選択肢を横並び比較するための統一条件として、以下の3条件を設定した。
- ・これらの条件は、比較検討のために便宜的に設定したものである。したがって、処分量、処分速度及びトリチウム濃度は、実施時期や具体的な手法により変動しうるものであり、下記条件は処分条件を意図するものではない。
 - 処分量：80 万 m^3
現状の1～4号機タンク総貯蔵量（約74万 m^3 ：平成27年11月19日時点）を元に設定。
 - 処分速度：400 m^3 /日
別途実施した汚染水処理対策技術検証事業（トリチウム分離技術検証試験事業）にて、前提としている処理速度。「汚染水増加量（試験事業開始時の評価値） \leq 処分速度」となるよう設定。
 - トリチウム濃度：告示濃度以下
被ばく影響を統一させる観点から、各選択肢に適用される告示濃度上限で処分するものとする。（告示濃度に達しない場合はあえて濃縮等せず、そのまま処分することとする）。また、トリチウムのみで告示濃度とすると、規制に適合しないが、ここでは、あくまで横並び比較のための条件として設定している。
- ・その他の留意事項は以下のとおり。
 - 分離については、別途実施した汚染水処理対策技術検証事業（トリチウム分離技術検証試験事業）において、分離係数100以上を基本要件としていたため、ここでも分離係数100を前提とした。
 - 各選択肢に共通して、作業員被ばく低減及び建設・処分・解体の各工程における労働安全の確保に留意する。
 - 処分場所の特定は行わない。福島第一原発サイト外で処分する場合は輸送が必要となるが、この輸送については全選択肢共通であるため、比較評価の対象外とする。
 - 告示濃度については、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関して必要な事項を定める告

示」を参照する。

- (4) 選択肢ごとの具体的なケース（以下「評価ケース」という。）の設定
- ・評価ケースの設定に当たっては、(1) で示した 11 の選択肢を基本としつつ、以下のような整理を行った。
 - ・水蒸気放出の「希釈後」は、以下の理由により「前処理なし」に比べて利点が無いと考えられるため、今回の評価の対象外とした。
 - 周辺監視区域の外における空気中のトリチウム濃度 (Bq/L) は、蒸発処理されるトリチウム水の濃度 (Bq/L) には依存せず、放出率 (Bq/s) に依存する。
 - 一日当たりの処分量を固定した場合、「希釈後」も「前処理なし」も放出率 (Bq/s) は同じとなるため、希釈することに特段の意味がないこととなる。
 - ・地下埋設については、地下水位より深い位置への埋設（以下「深地」という。）及び地下水位より浅い位置への埋設（以下「浅地」という。）の 2 ケースに細分化した。
 - ・水素放出はトリチウム水を電気分解等によって水素にすることを念頭に置くが、「(分離後) 水素放出」の場合、分離技術の種類によっては減損側（分離により濃度が低下する側）が既に水素の状態のものがあり、その場合、減損側をそのまま水素放出することが可能であることに留意が必要である。同様に「(分離後) 水蒸気放出」についても、分離技術の種類によっては減損側が既に水蒸気の状態のものがある可能性があり、その場合、減損側をそのまま水蒸気放出することが可能であることに留意が必要である。
 - ・以上を踏まえ、以下の 11 の評価ケースに整理した。
 - 地層注入（前処理なし (A1) / 希釈後 (B1) / 分離後 (C1)）
 - 海洋放出（希釈後 (B2) / 分離後 (C2)）
 - 水蒸気放出（前処理なし (A3) / 分離後 (C3)）
 - 水素放出（前処理なし (A4) / 分離後 (C4)）
 - 地下埋設（前処理なし（深地）(A5a) / 前処理なし（浅地）(A5b)）
 - ・さらに、これらの評価ケースについて、原水濃度と原水量を以下の 5 つの場合にそれぞれ細分化し、計 55 (=11×5) の評価ケースについて評価を行うこととした。(※)
 - ① 原水濃度 420 万 Bq/L、原水量 80 万 m³ の場合
 - ② 原水濃度 50 万 Bq/L、原水量 80 万 m³ の場合
 - ③ 原水濃度 420 万 Bq/L、原水量 40 万 m³ の場合
 - ④ 原水濃度 50 万 Bq/L、原水量 40 万 m³ の場合
 - ⑤ ③+④の場合

(※) 原水濃度 420 万 Bq/L、50 万 Bq/L は、平成 26 年 4 月 28 日第 12 回汚染水処理対策委員会資料 2-3「トリチウム水タスクフォース「これまでの議論の整理」」に示されたトリチウム水濃度の上限値と下限値を用いた。

(5) 各評価ケースの概念設計

- ・各評価ケースについて、上記の条件を踏まえた具体的な条件設定を行ったうえで、下記を含む概念設計を実施した。
- ・その際、地下埋設（参考資料 14、15）や地層注入（参考資料 16）に関しては、本タスクフォースにおいて説明された内容も踏まえて検討を行った。

(地層注入)

A1：(前処理なし) 地層注入

- ・トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、圧入ポンプにより大深度地下（深度 2,500m）の貯留層に送り、地層内に封入する。

B1：(希釈後) 地層注入

- ・トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、所定濃度まで海水で希釈し（原水濃度 420 万 Bq/L の場合：70 倍希釈、50 万 Bq/L の場合：約 8.3 倍希釈）、圧入ポンプにより大深度地下（深度 2,500m）の貯留層に送り、地層内に封入する。

C1：(分離後) 地層注入

- ・トリチウム水を、分離処理水タンク（減損側）からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、圧入ポンプにより大深度地下（深度 2,500m）の貯留層に送り、地層内に封入する。

(海洋放出)

B2：(希釈後) 海洋放出

- ・トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、濃度を測定する。その後、取水ポンプを用い海水と混合希釈し（原水濃度 420 万 Bq/L の場合：70 倍希釈、50 万 Bq/L の場合：約 8.3 倍希釈）、ポンプで海中に放流する。

C2：(分離後) 海洋放出

- ・トリチウム水を、分離処理水タンク（減損側）からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、ポンプで海中に放流する。

(水蒸気放出)

A3 : (前処理なし) 水蒸気放出

- ・トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、900~1,000°Cで直接気化させ、排ガスを空気希釈(設備、機器劣化防止のため)し、地上60mの高さで大気に放出する。

C3 : (分離後) 水蒸気放出

- ・トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、900~1,000°Cで直接気化させ、排ガスを空気希釈(設備、機器劣化防止のため)し、地上60mの高さで大気に放出する。

(水素放出)

A4 : (前処理なし) 水素放出

- ・トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、電解槽で水素と酸素に電気分解し、発生した水素ガス(トリチウムガスを含む)を地上20mの高さで大気に放出する。

C4 : (分離後) 水素放出

- ・トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、電解槽で水素と酸素に電気分解し、発生した水素ガス(トリチウムガスを含む)を地上20mの高さで大気に放出する。

(地下埋設)

A5a、A5b : (前処理なし) 地下埋設

- ・地下を掘削し、コンクリートピットを施工する。コンクリートピット周囲には、地下水の流入抑制、トリチウム水の浸出抑制のためベントナイト混合土(原水濃度420万Bq/Lの場合:厚2m、50万Bq/Lの場合:厚1m)を敷設する。
- ・完成したコンクリートピット内に、トリチウム水とセメント系固化材を混練したものを流し込み、コンクリート躯体と一体化させる。
- ・流し込み時には、トリチウム水の蒸発による散逸を抑制するため、上部にカバーを設置する。

- ・固化後、コンクリート躯体頂版を打設し、ベントナイト混合土（原水濃度 420 万 Bq/L の場合：厚 2m、50 万 Bq/L の場合：厚 1m）を敷設、さらに覆土を行う。

（6）各評価ケースの評価結果

- ・（5）で示した概念設計に基づく各評価ケースの評価結果について、まとめを別紙 2 に示す。
- ・なお、評価結果については、各種の仮定を設定した上で概算によって試算したものであり、実際の処分に必要なコスト等を保証するものではない。
- ・前処理として分離を行う場合については、平成 27 年度に実施した「トリチウム分離技術検証試験事業（別紙 3）」の結果を評価に用いることとしていたが、「ただちに実用化できる段階にある技術は確認されなかった。（トリチウム分離技術検証試験事業総括及び評価（別紙 4）」ことから、現状においては技術の特定が困難なため、期間やコストは空欄とした。
- ・その他の留意事項を以下に示す。
 - 処分を実施する場所については、特定せずに評価を行っている。
 - 期間評価結果について、敷地外処分の場合の輸送、環境影響評価等のシミュレーション、資材や要員の確保に係る不確実性は含まれていない。
 - コスト評価結果について、敷地外処分の場合の輸送、環境影響評価等のシミュレーション、資材や要員の確保に係る不確実性、原発敷地内であるが故の要因（高線量下における作業に伴う追加的な人件費、原子炉施設としての耐震安全性を備えるための追加的な建設費等）、土地の取得費用、固定資産税、解体廃棄物、二次廃棄物、残土の処分費用、第三者監視の費用は含まれてない。

5. おわりに

本報告書は、トリチウム水タスクフォースにおいて、平成 25 年 12 月 25 日から平成 28 年 5 月 27 日までの計 15 回にわたり有識者からの報告（参考資料 1～18）を含め審議された事項を取りまとめたものであり、福島第一原発における汚染水問題のうち、特にトリチウム水の取扱いを技術的観点から検討したものである。本報告書を今後の検討の基礎資料としていただきたい。

なお、トリチウム水の取扱いについては、風評に大きな影響を与えうることから、今後の検討にあたっては、成立性、経済性、期間などの技術的な観点に加えて、風評被害などの社会的な観点等も含めて、総合的に検討を進めていただきたい。

平成 28 年 5 月 27 日時点

トリチウム水タスクフォース

名簿

- 主 査： 山本 一良 名古屋大学 参与・名誉教授、名古屋学芸大学 教授（汚染水処理対策委員会委員）
- 委 員： 柿内 秀樹 （公財）環境科学技術研究所 環境影響研究部 研究員
高倉 吉久 東北放射線科学センター理事
立崎 英夫 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
放射線医学総合研究所 被ばく医療センター センター長
- 田内 広 茨城大学理学部教授（生物科学領域）
野中 俊吉 生活協同組合コープふくしま専務理事
森田 貴己 国立研究開発法人水産研究・教育機構 中央水産研究所
海洋・生態系研究センター 放射能調査グループ
- 山西 敏彦 国立研究開発法人 量子科学研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 六ヶ所核融合研究所 ブランケットシステム研究開発部長
- 山本 徳洋 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所 所長（汚染水処理対策委員会委員）
- 規制当局： 今井 俊博 原子力規制庁原子力規制部東京電力福島第一原子力発電所事故対策室長
- オブザーバ： 竹葉 有記 水産庁増殖推進部 研究指導課長
村山 綾介 文部科学省研究開発局原子力課 廃炉技術開発企画官
臼井 将人 外務省軍縮不拡散・科学部 国際原子力協力室長
藤原 博次 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 理事
今津 雅紀 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ審議役
松本 純 東京電力ホールディングス（株）福島第一廃炉推進カンパニー バイスプレジデント
菅野 信志 福島県危機管理部 原子力安全対策課長

トリチウム水タスクフォース

開催実績

平成 25 年 12 月 25 日（第 1 回）

- トリチウム水タスクフォース規約
- 主査の選出
- 汚染水処理対策委員会等での議論(説明)
- タスクフォースの進め方について(討議)

平成 26 年 1 月 15 日（第 2 回）

- 福島第一原発における汚染水処理とトリチウム水の保管状況
- 分離技術と地下貯蔵のイメージ
- 複数の選択肢と評価項目について

平成 26 年 2 月 7 日(第 3 回)

- トリチウムの評価項目(環境動態・影響の考え方)について

平成 26 年 2 月 27 日(第 4 回)

- トリチウムの評価項目(環境における拡散等)について

平成 26 年 3 月 13 日(第 5 回)

- 海外の取組事例について

平成 26 年 3 月 26 日(第 6 回)

- 海外の取組事例について

平成 26 年 4 月 9 日(第 7 回)

- 海外の取組事例について

平成 26 年 4 月 24 日(第 8 回)

- これまでの議論の整理等について

平成 26 年 7 月 9 日(第 9 回)

- 選択肢の評価に向けて(選択肢としての技術的成立性の検討)

平成 26 年 10 月 24 日(第 10 回)

- トリチウム水の浅地中処分について
- トリチウム分離技術検証試験事業の採択結果について

平成 27 年 1 月 21 日(第 11 回)

- ステークホルダーとのコミュニケーションのあり方について
- トリチウム分離技術検証試験事業の追加公募について

平成 27 年 6 月 5 日(第 12 回)

- トリチウム水の処分に係る各選択肢の検討

平成 27 年 12 月 4 日(第 13 回)

- 各選択肢に係る概念設計の検討

平成 28 年 4 月 19 日(第 14 回)

- トリチウム水の取扱いに係る各選択肢(評価ケース)についての評価について
- トリチウム分離技術検証試験事業について
- トリチウム水タスクフォース報告書 骨子について

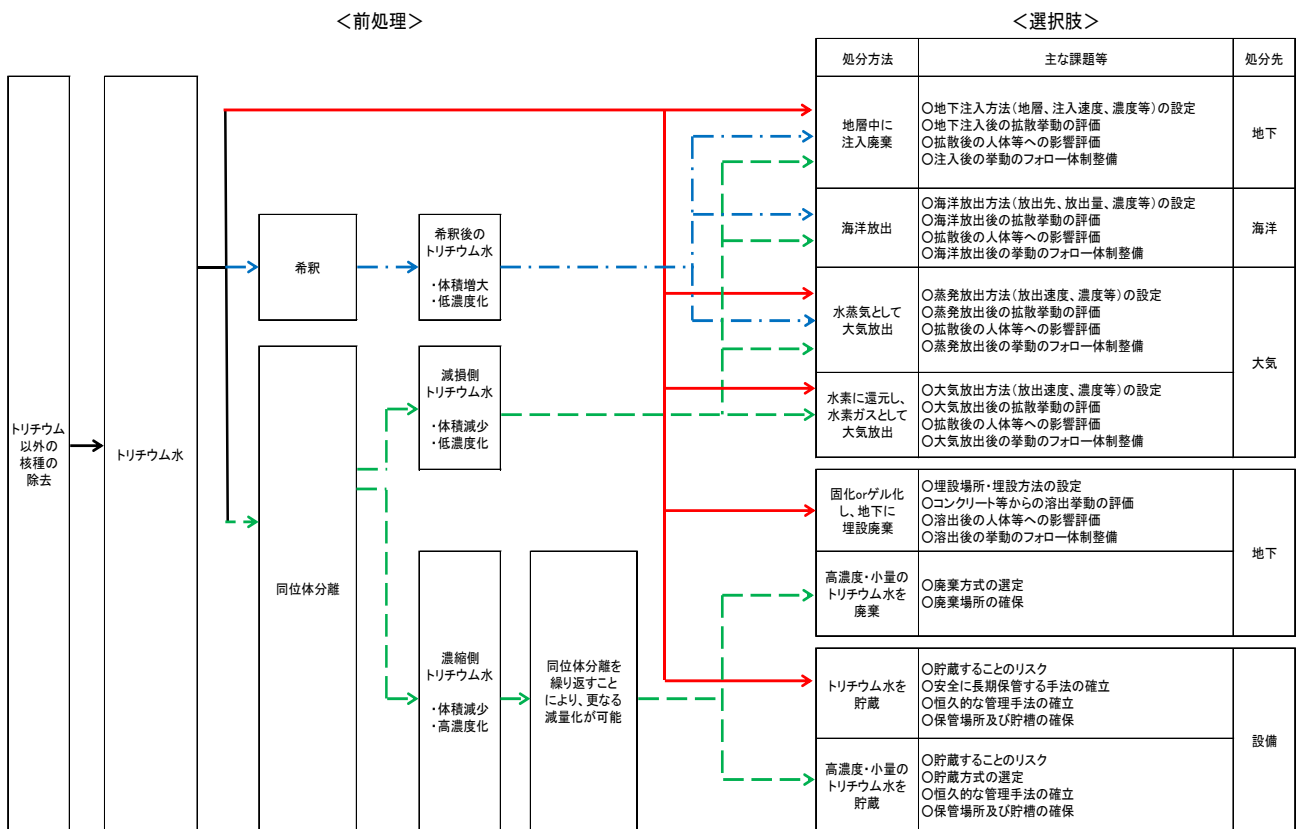
平成 28 年 5 月 27 日(第 15 回)

- トリチウム水タスクフォース報告書について

トリチウム水の取扱いに係る各選択肢 (評価ケース) についての評価結果

汚染水処理対策委員会事務局
平成28年5月27日

(1) 選択肢の整理



(1) 選択肢の整理

前処理	処分方法	略称	記号	成立性	成立性について特に留意すべき事項	
なし	地層中に注入廃棄	地層注入	A1		適用される既存の基準無し(安全性の確認が困難で成立性が低いとの意見あり)	
	海洋放出	海洋放出	A2	×	濃度限度(60Bq/cm ³)を考慮すると、実現困難	
	水蒸気として大気放出	水蒸気放出	A3			
	水素に還元し、水素ガスとして大気放出	水素放出	A4			
	固化orゲル化し、地下に埋設廃棄	地下埋設	A5			
	トリチウム水を貯蔵	貯蔵	A6		最終形にはならず、あくまで一時的な措置	
希釈	地層中に注入廃棄	希釈後、地層注入	B1		適用される既存の基準無し(安全性の確認が困難で成立性が低いとの意見あり)	
	海洋放出	希釈後、海洋放出	B2		効率的な希釈方法等についても要検討	
	水蒸気として大気放出	希釈後、水蒸気放出	B3			
	水素に還元し、水素ガスとして大気放出	希釈後、水素放出	B4	×	希釈により取扱い水量が増大するため、処理が困難化	
	固化orゲル化し、地下に埋設廃棄	希釈後、地下埋設	B5	×	希釈により取扱い水量が増大するため、処理・管理が困難化	
	トリチウム水を貯蔵	希釈後、貯蔵	B6	×	希釈により取扱い水量が増大するため、処理・管理が困難化	
同位体分離	減損	地層中に注入廃棄	分離後、地層注入	C1		適用される既存の基準無し(安全性の確認が困難で成立性が低いとの意見あり)
		海洋放出	分離後、海洋放出	C2		
		水蒸気として大気放出	分離後、水蒸気放出	C3		
		水素に還元し、水素ガスとして大気放出	分離後、水素放出	C4		
		固化orゲル化し、地下に埋設廃棄	分離後、地下埋設	C5	×	分離後も長期管理が必要となり、分離のメリットなし
		トリチウム水を貯蔵	分離後、貯蔵	C6	×	分離後も長期管理が必要となり、分離のメリットなし
	濃縮	高濃度・少量のトリチウム水を廃棄	濃縮廃棄	C'a		廃棄方法を要検討
		高濃度・少量のトリチウム水を貯蔵	濃縮貯蔵	C'b		最終形にはならず、あくまで一時的な措置(最終的な処理・活用方法についても要検討)

2

(2) 評価項目

□ 各選択肢を横並び比較するために、以下のとおり評価項目を設定した。

評価項目案	解説
基本要件	成立するか否かの判断材料となる項目
技術的成立性	技術的な実現可能性、技術的成熟度、実績の有無
規制成立性	既存の規制との関係
制約となり得る条件	制約条件となる可能性のある項目
期間	処分に必要な期間(調査、設計・建設、処分、解体、監視、等)
コスト	処分に必要なコスト(調査、設計・建設、処分、解体、監視、等)
規模	処分に必要な面積(陸域・水域)
二次廃棄物	二次廃棄物発生の有無、種類と量
作業員被ばく	処分を行うことにより過度な作業員被ばくが発生することが無いか
付帯条件	その他、制約となり得る条件

3

(3) 比較評価のための条件設定

- 各選択肢を横並び比較するための統一条件として、以下の3つを設定した。
※これらの条件は、比較検討のために便宜的に設定。処分量、処分速度、処分濃度は実施時期や具体的な手法の検討により変動しうるものであり、下記条件は処分条件を意図するものではない。

1. 処分量 : 80万 m^3
 - 現状の1～4号機タンク総水量(約74万 m^3 :平成27年11月19日時点)を元に設定。
2. 処分速度 : 400 m^3 /日
 - 別途実施した汚染水処理対策技術検証事業(トリチウム分離技術検証試験事業)にて、前提としている処理速度。
※「汚染水増加量(当時の評価値) ≤ 処分速度」となるよう設定
3. トリチウム濃度 : 告示濃度以下
 - 被ばく影響を統一させるために、各選択肢に適用される告示濃度上限で処分するものとする。(告示濃度に達しない場合はあえて濃縮等はせず、そのまま処分することとする)。
 - トリチウムのみで告示濃度とすると、規制に適合しないが、ここでは、あくまで横並び比較のための条件として設定している。

【その他留意事項】

- 分離については、別途実施した汚染水処理対策技術検証事業(トリチウム分離技術検証試験事業)において、分離係数100以上(減損側の放射エネルギーが元々のトリチウム水の100分の1以下となること)を基本条件としていたため、本評価においては分離係数100を前提とした。
- 各選択肢に共通して、作業員被ばく低減及び建設・処分・解体の各工程における労働安全の確保に留意する。
- 処分場所の特定は行わない。サイト外で処分する場合は輸送が必要となるが、この輸送については全選択肢共通であるため、比較評価の対象外とする。
- 告示濃度については、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関して必要な事項を定める告示」を参照。

4

(4) 選択肢ごとの具体的なケース(評価ケース)の設定

- 評価を実施するケースは、洗い出しを行った以下の11の各選択肢を基本とする。
- 地層注入(前処理なし/希釈後/分離後)
 - 海洋放出(希釈後/分離後)
 - 水蒸気放出(前処理なし/希釈後/分離後)
 - 水素放出(前処理なし/分離後)
 - 地下埋設(前処理なし)
- 水蒸気放出の「希釈後」のケースは、以下の理由により「前処理なし」に比べて利点が無いと考えられるため、今回の評価の対象外とした。
- ✓ 周辺監視区域の外における空気中のトリチウム濃度(Bq/L)は、蒸発処理されるトリチウム水の濃度(Bq/L)には依存せず、放出率(Bq/s)に依存する。
 - ✓ 後述する様に、一日当たりの処分量を固定した場合、「希釈後」も「前処理なし」も放出率(Bq/s)は同じとなるため、希釈することに特段の意味がないこととなる。
- 地下埋設については、
- ① 地下水位より深い位置への埋設(以後、「深地」と表記する。)
 - ② 地下水位より浅い位置への埋設(以後、「浅地」と表記する。)
- の2つに評価ケースを細分化した。

(4) 選択肢ごとの具体的なケース(評価ケース)の設定

- 水素放出はトリチウム水を電解等によって水素にすることを念頭に置くが、「(分離後)水素放出」の場合、分離技術の種類(CECE法等)によっては減損側が既に水素の状態のものがあり、その場合、減損側をそのまま水素放出することが可能であることに留意が必要。同様に、「(分離後)水蒸気放出」についても、分離技術の種類によっては減損側が既に水蒸気の状態のものがある可能性があり、その場合、減損側をそのまま水蒸気放出することが可能であることに留意が必要。

- 以上の11の評価ケースについて、原水濃度と原水量を以下の5ケースにそれぞれ細分化し、計55の評価ケースについて評価を行うこととした。

- ① 原水濃度420万Bq/L、原水量80万m3の場合
- ② 原水濃度50万Bq/L、原水量80万m3の場合
- ③ 原水濃度420万Bq/L、原水量40万m3の場合
- ④ 原水濃度50万Bq/L、原水量40万m3の場合
- ⑤ ③+④の場合

※原水濃度420万Bq/L、50万Bq/Lは、平成26年4月28日第12回汚染水処理対策委員会資料2-3「トリチウム水タスクフォース「これまでの議論の整理」」に示されたトリチウム水濃度の上限値と下限値を採用。

- 以上を踏まえた評価ケースの一覧を次頁以降に示す。

6

(4) 選択肢ごとの具体的なケース(評価ケース)の設定

第8回会合における選択肢の整理

記号	処分方法	前処理
A1	地層注入	なし
B1		希釈
C1		分離
B2	海洋放出	希釈
C2		分離
A3	水蒸気放出	なし
B3		希釈
C3		分離
A4	水素放出	なし
C4		分離
A5	地下埋設	なし

本検討での評価ケース

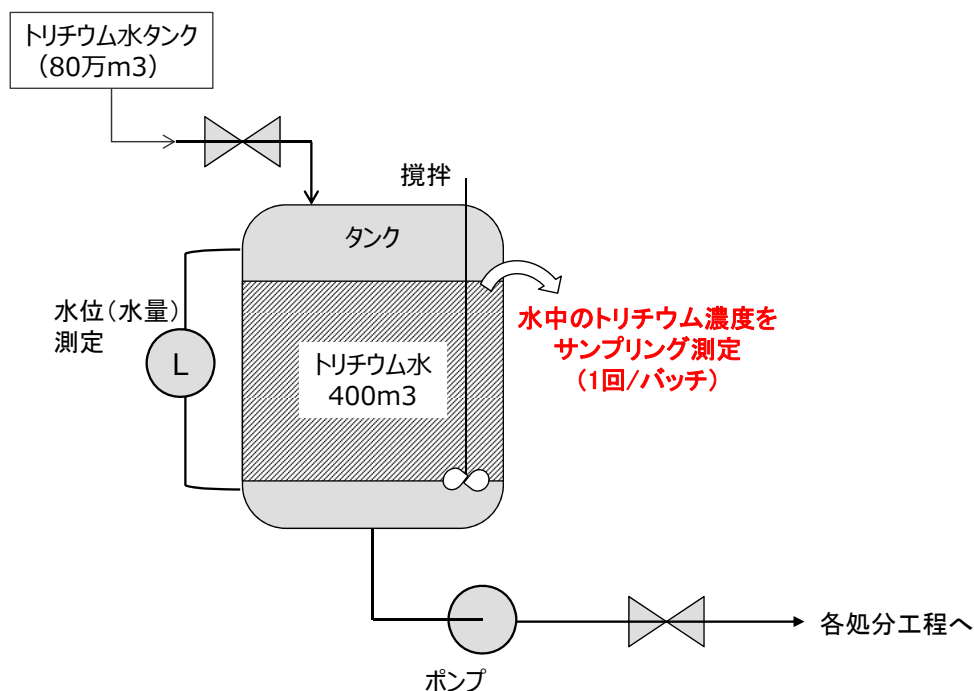
記号	処分方法	前処理
A1 ①~⑤	地層注入	なし
B1 ①~⑤		希釈
C1 ①~⑤		分離
B2 ①~⑤	海洋放出	希釈
C2 ①~⑤		分離
A3 ①~⑤	水蒸気放出	なし
C3 ①~⑤		分離
A4 ①~⑤	水素放出	なし
C4 ①~⑤		分離
A5a ①~⑤	地下埋設(深地)	なし
A5b ①~⑤	地下埋設(浅地)	なし

※①~⑤については前項を参照。

7

(5)各評価ケースの概念設計(各選択肢共通)

□ 原トリチウム水の濃度測定方法は、各選択肢共通で下図のとおり設定。



8

(5)各評価ケースの概念設計(地層注入)

□ 地層注入共通(A1、B1、C1)

- 工法・注入深さ: CCS(二酸化炭素貯留)の実証事例を参照して設定
※他の事例として、ハンフォード(米国)における浅地中注入事例が存在するが、地下水位が浅い我が国においては、浅地中への注入は不適切と考えられるため、CCSの事例を参照。
- 注入運転時のトリチウム水の原水の減少ペース: 400m³/日

□ A1 : (前処理なし)地層注入

- 濃度: 対応する告示濃度が存在しないため、便宜上、制約を設けず注入
- 処分量: 前処理なしのため、80万m³
- トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、圧入ポンプにより大深度地下(深度2,500m)の貯留層に送り、地層内に封入。

□ B1 : (希釈後)地層注入

- 濃度: 放水口の放射性物質の告示濃度である6万Bq/Lを参考値とし、6万Bq/Lまで希釈した後、注入
- 処分量: 上記の濃度を担保するための希釈率に応じて処分量は増加
- トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、所定濃度まで海水で希釈し(原水濃度420万Bq/Lの場合: 70倍希釈、50万Bq/Lの場合: 約8.3倍希釈)、圧入ポンプにより大深度地下(深度2,500m)の貯留層に送り、地層内に封入する。

□ C1 : (分離後)地層注入

- 濃度: 分離係数100で分離した減損側の濃度で注入する
- 処分量: 分離後濃縮側の物量は無視できる(減損側の物量は不変)と仮定し、80万m³とする
- 処分対象トリチウム水の状態: 分離後減損側の状態は液体とする
- トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、圧入ポンプにより大深度地下(深度2,500m)の貯留層に送り、地層内に封入する。

※これらの条件は比較検討のため便宜的に設定したものであり、実際の処分条件を意図するものではない

9

(5)各評価ケースの概念設計(地層注入)

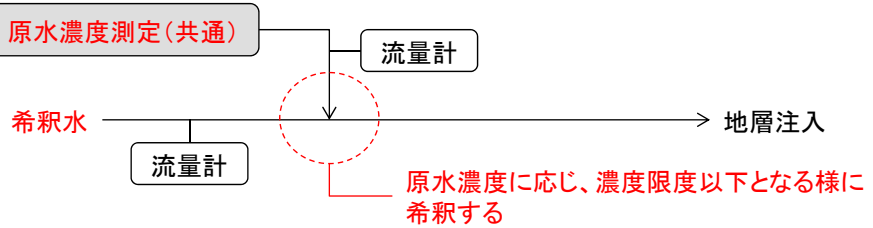
□ モニタリング方法

規則:
排水口又は排水監視設備において排水中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること

□ A1 : (前処理なし)地層注入

原水濃度測定(共通) → 地層注入

□ B1 : (希釈後)地層注入



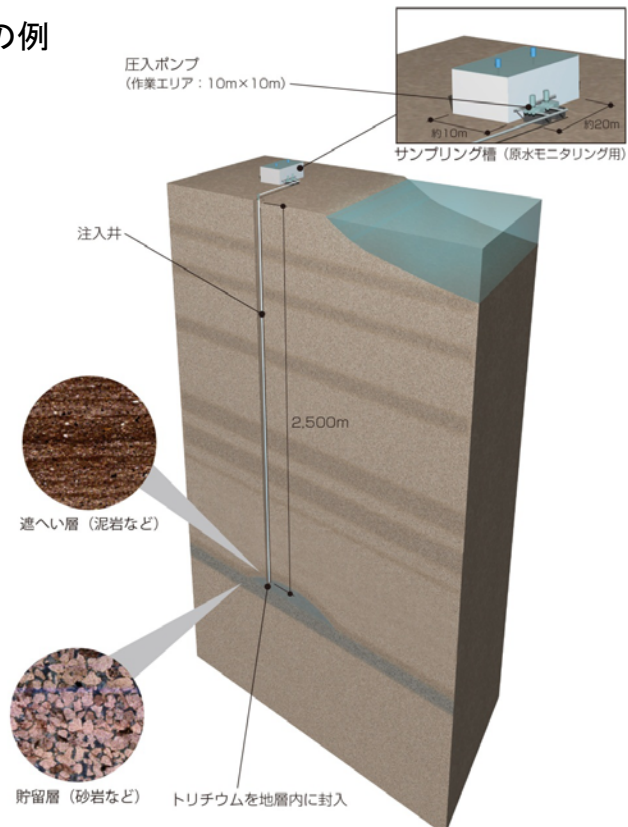
□ C1 : (分離後)地層注入



10

(5)各評価ケースの概念設計(地層注入)

□ イメージ図:(前処理なし)地層注入の例



11

(5)各評価ケースの概念設計(海洋放出)

□ 海洋放出共通(B2、C2)

- 定格放出運転時のトリチウム水の原水の減少ペース: 400m³/日

□ B2 : (希釈後)海洋放出

- 濃度:放水口の放射性物質の告示濃度である6万Bq/Lまで希釈した後、放出する
- 処分量:上記の濃度を担保するための希釈率に応じて処分量は増加する
- トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、濃度を測定する。その後、取水ポンプを用い海水と混合希釈し(原水濃度420万Bq/Lの場合:70倍希釈、50万Bq/Lの場合:約8.3倍希釈)、ポンプで海中に放流する。

□ C2 : (分離後)海洋放出

- 濃度:分離係数100で分離した減損側の濃度は6万Bq/Lを下回るため、そのまま放出する
- 処分量:分離後濃縮側の物量は無視できる(減損側の物量は不変)と仮定し、80万m³とする
- 処分対象状態:分離後減損側の状態は液体とする
- トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定後、ポンプで海中に放流する。

※これらの条件は比較検討のため便宜的に設定したものであり、実際の処分条件を意図するものではない

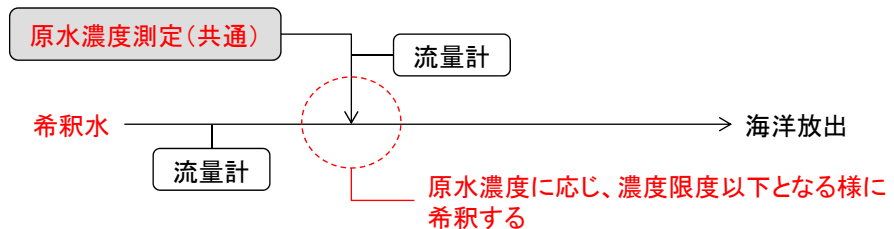
12

(5)各評価ケースの概念設計(海洋放出)

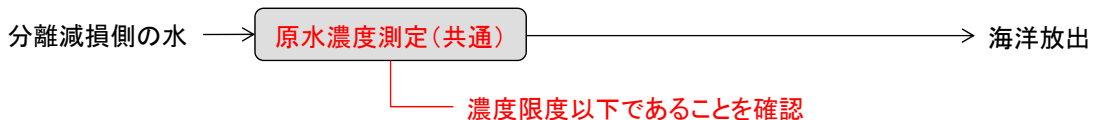
□ モニタリング方法

規則:
排水口又は排水監視設備において排水中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること

□ B2 : (希釈後)海洋放出



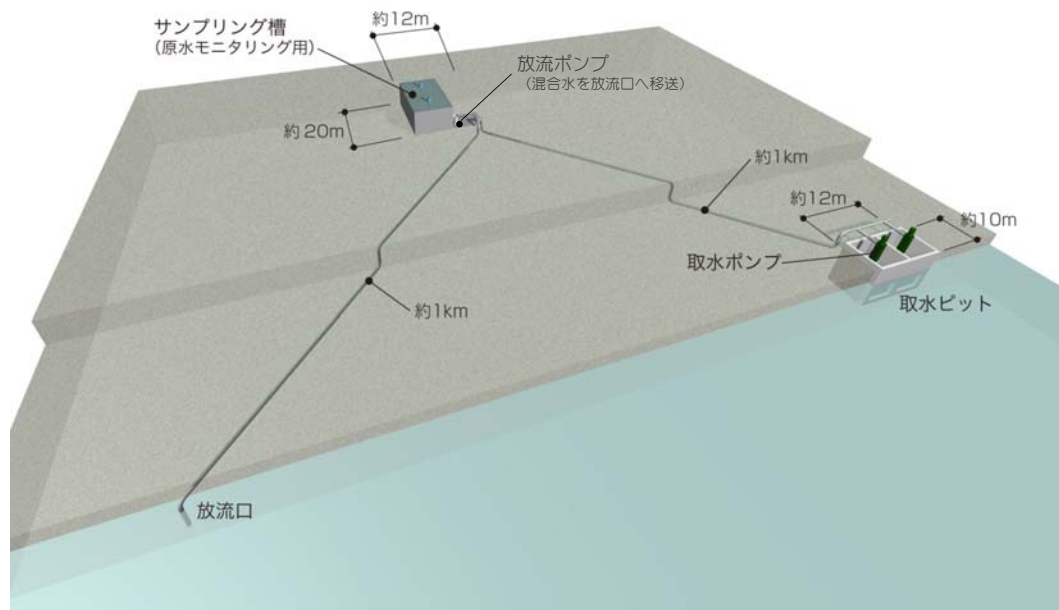
□ C2 : (分離後)海洋放出



13

(5)各評価ケースの概念設計(海洋放出)

□ イメージ図:(希釈後)海洋放出の例



※放流水が直接取水されることの無い様、工夫する必要がある。

- ここでは、取水ピットと放流口の位置・距離を十分に取る方策を採用している。
- その他の方策としては、取水ピットと放流口の間を岸壁等で間仕切る方法や、放流口を沖合に設定する方法等が考えられる。

14

(5)各評価ケースの概念設計(水蒸気放出)

□ 水蒸気放出共通(A3、C3)

- 放出運転時のトリチウム水の原水の減少ペース: 400m³/日
- 濃度: 周辺監視区域の外で、空気中の放射性物質の告示濃度である5Bq/L以下であること
- 排気筒出口以後で、結露しないこと(液体とならないこと)

□ A3 : (前処理なし)水蒸気放出

- 排気筒高さ: 周辺監視区域の外で空気中のトリチウム濃度が5Bq/L以下となるための排気筒高さと、直接燃焼装置を用いる際の一般的な排気筒高さを比較し、より高い排気筒高さ(地上60m)を採用
- 処分量: 前処理なしのため、80万m³
- トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、900~1000°Cで直接気化させ、排ガスを空気希釈(設備、機器劣化防止のため)し、地上60mの高さで大気へ放出する。

□ C3 : (分離後)水蒸気放出

- 排気筒高さ: 前処理なしの場合と同様
- 処分量: 分離後濃縮側の物量は無視できる(減損側の物量は不変)と仮定し、80万m³とする
- 処分対象状態: 分離後減損側の状態は液体とする
- トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、900~1000°Cで直接気化させ、排ガスを空気希釈(設備、機器劣化防止のため)し、地上60mの高さで大気へ放出する。

※これらの条件は比較検討のため便宜的に設定したものであり、実際の処分条件を意図するものではない

15

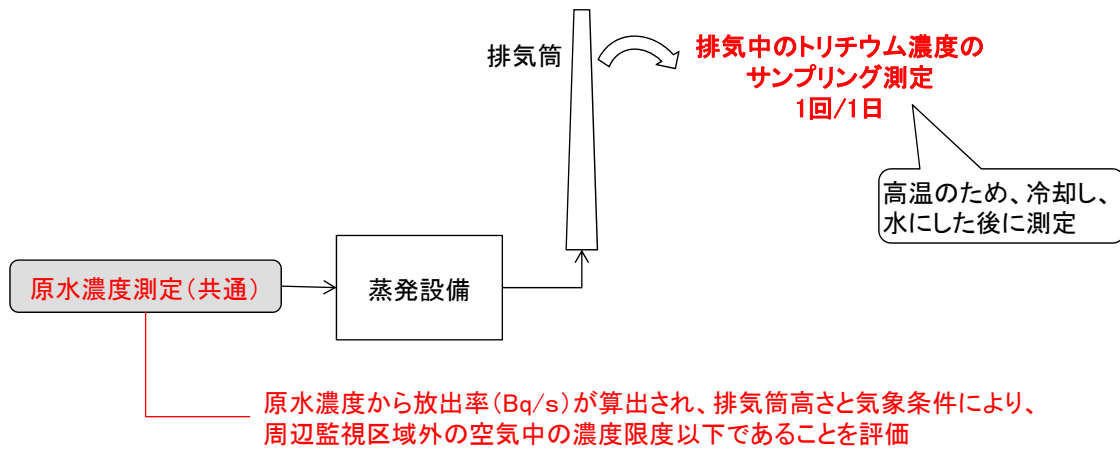
(5)各評価ケースの概念設計(水蒸気放出)

□ モニタリング方法

- A3 : (前処理なし)水蒸気放出
- C3 : (分離後)水蒸気放出

規則:

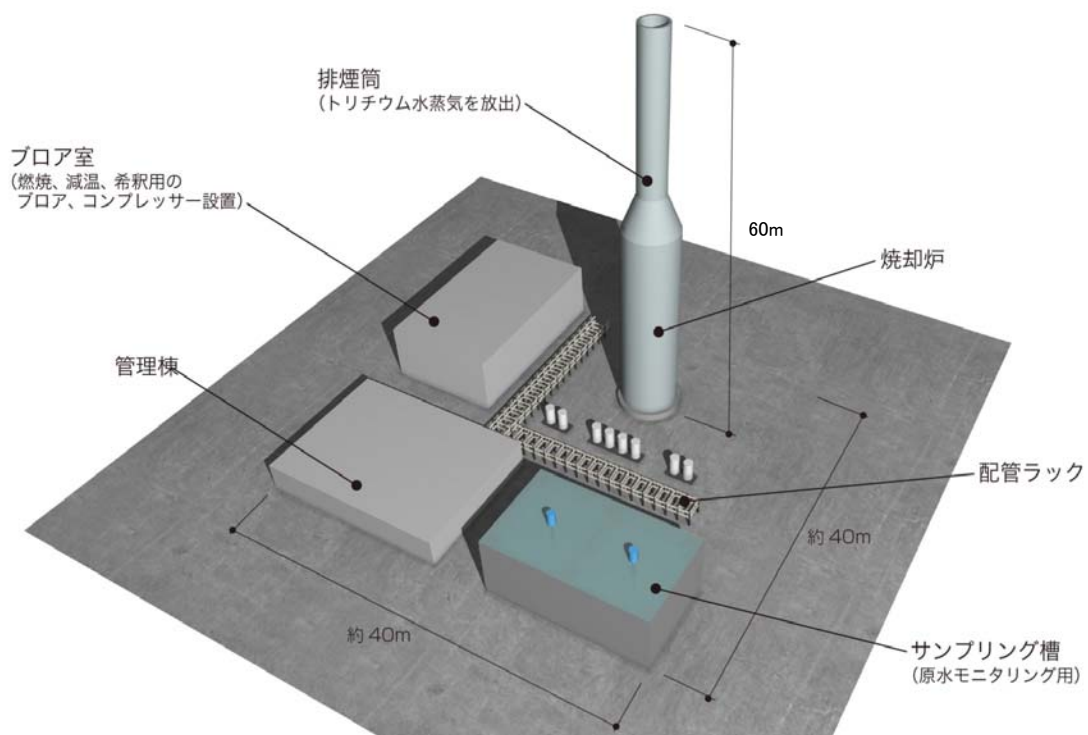
排気口又は排気監視設備において排気中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域外の空気中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること



16

(5)各評価ケースの概念設計(水蒸気放出)

□ イメージ図:(前処理なし)水蒸気放出の例



17

(5)各評価ケースの概念設計(水素放出)

□ 水素放出共通(A4、C4)

- 放出運転時のトリチウム水の原水の減少ペース: 400m³/日
- 濃度: 周辺監視区域の外で空気中の放射性物質の告示濃度である7万Bq/L以下であること
- 排気筒出口で、水素可燃濃度を下回ること

□ A4 : (前処理なし)水素放出

- 排気筒高さ: 周辺監視区域の外で空気中のトリチウム濃度が7万 Bq/L以下となるための排気筒高さ、工学的安全性を担保するための排気筒高さを比較し、より高い排気筒高さ(地上20m)を採用
- 処分量: 前処理なしのため、80万m³
- トリチウム水を、貯水タンクからサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、電解槽で水素と酸素に電気分解し、発生した水素ガス(トリチウムガスを含む)を地上20mの高さで大気に放出する。

□ C4 : (分離後)水素放出

- 排気筒高さ: 前処理なしの場合と同様
- 処分量: 分離後濃縮側の物量は無視できる(減損側の物量は不変)と仮定し、80万m³とする
- 処分対象トリチウム水の状態: 分離後減損側の状態は液体とする
- トリチウム水を、分離処理水タンク(減損側)からサンプリング槽に移送し、槽単位で濃度を測定する。サンプリング槽のトリチウム水を、電解槽で水素と酸素に電気分解し、発生した水素ガス(トリチウムガスを含む)を地上20mの高さで大気に放出する。

※これらの条件は比較検討のため便宜的に設定したものであり、実際の処分条件を意図するものではない

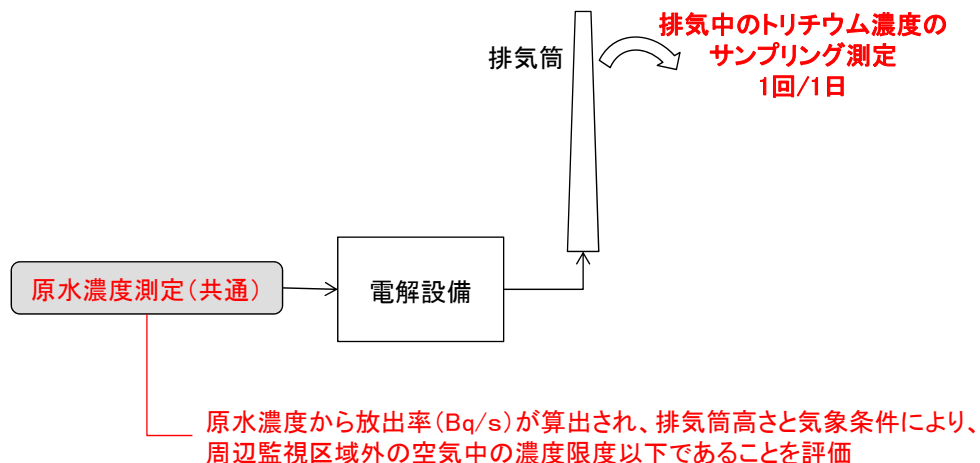
18

(5)各評価ケースの概念設計(水素放出)

□ モニタリング方法

- A4 : (前処理なし)水素放出
- C4 : (分離後)水素放出

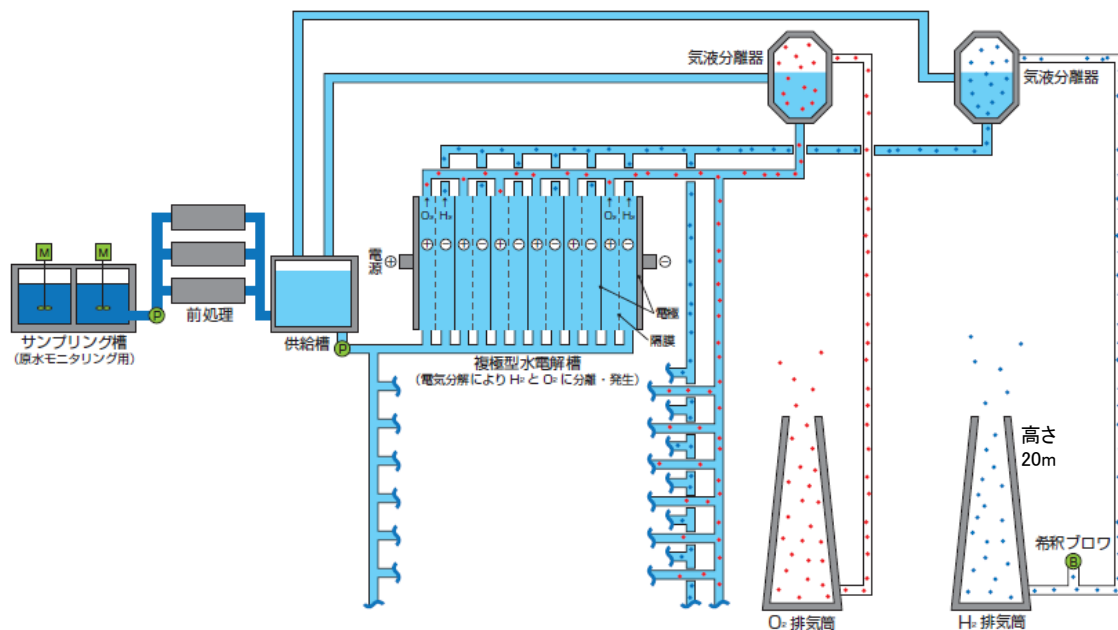
規則:
排気口又は排気監視設備において排気中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域の外の空気中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること



19

(5)各評価ケースの概念設計(水素放出)

□ イメージ図:(前処理なし)水素放出の例



20

(5)各評価ケースの概念設計(地下埋設)

□ A5 : (前処理なし)地下埋設

- 埋設時のトリチウム水の原水の減少ペース: 400m³/日
- 工法:コンクリートピット処分をベースとし、ピットの区画内にトリチウム水とセメント系固型化材を混練して直接流し込み、施設と一体的に固化する(※1)
- ベントナイト層厚さ:人工バリア(ベントナイト層)からの浸出水のトリチウム濃度が、水中の放射性物質の告示濃度である6万Bq/Lとなるようなベントナイト層厚さを算定
 - 例:約2m(原水420万Bq/Lの場合)、約1m(原水50万Bq/Lの場合)
- 処分量:前処理なしのため、80万m³
- 地下を掘削し、コンクリートピットを施工する。コンクリートピット周囲には、地下水の流入抑制、トリチウム水の浸出抑制のためベントナイト混合土(原水濃度420万Bq/Lの場合:厚2m、50万Bq/Lの場合:厚1m)を敷設する。
- 完成したコンクリートピット内に、トリチウム水とセメント系固化材を混練したものを流し込み、コンクリート躯体と一体化させる。
- 流し込み時には、トリチウム水の蒸発による散逸を抑制するため、上部にカバーを設置する。
- 固化後、コンクリート躯体頂版を打設し、ベントナイト混合土(原水濃度420万Bq/Lの場合:厚2m、50万Bq/Lの場合:厚1m)を敷設、さらに覆土を行う。

(※1 第10回トリチウム水タスクフォース資料1「トリチウム水の浅地中処分に係る検討」より)

※これらの条件は比較検討のため便宜的に設定したものであり、実際の処分条件を意図するものではない

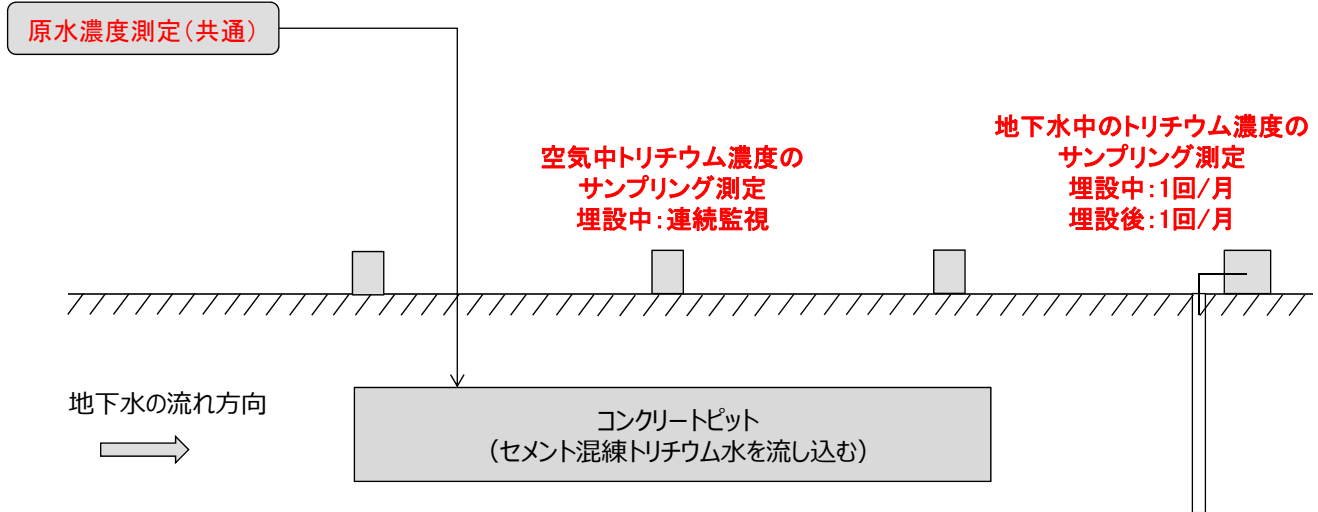
21

(5)各評価ケースの概念設計(地下埋設)

□ モニタリング方法

「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」に準拠

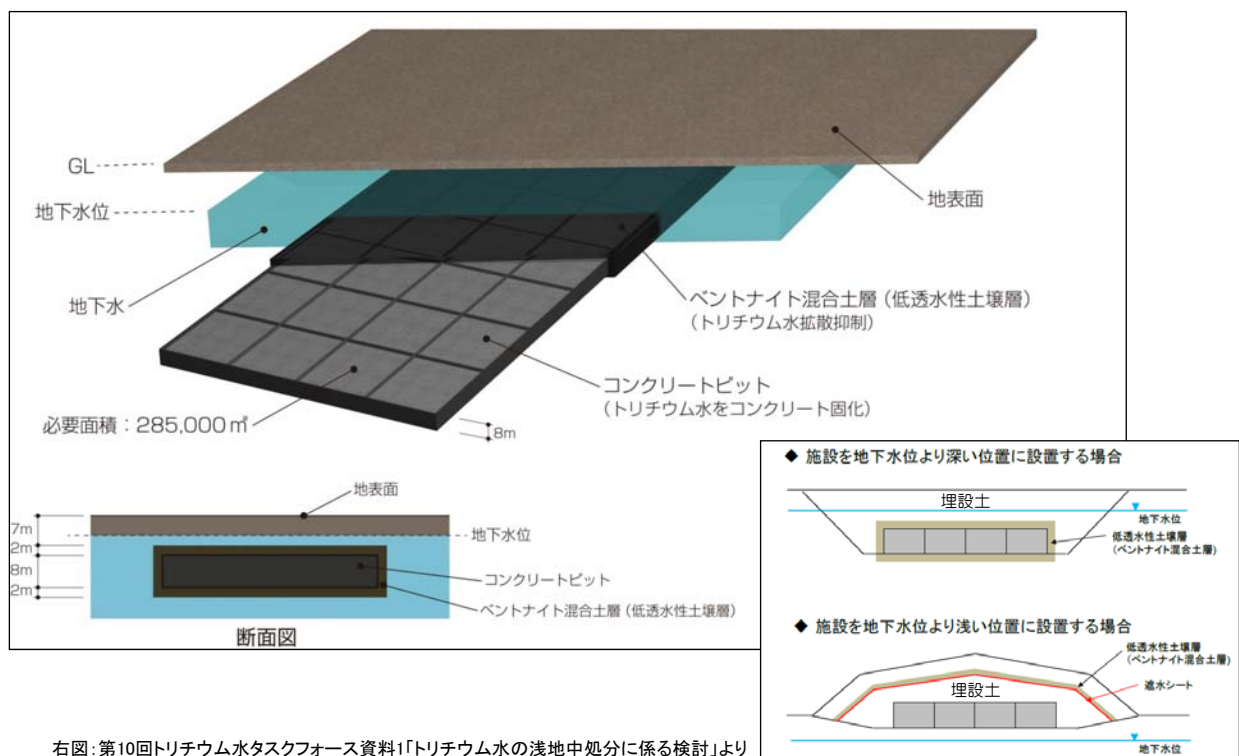
□ A5 : (前処理なし)地下埋設



22

(5)各評価ケースの概念設計(地下埋設)

□ イメージ図: 地下水位よりも深い位置に埋設する場合の例



右図: 第10回トリチウム水タスクフォース資料1「トリチウム水の浅地中処分に係る検討」より

23

(6)各評価ケースの評価結果(留意事項)

- 28頁以降に、前段で検討した概念設計に基づく評価結果を示す。
- 本評価結果については、各種の仮定を設定した上で概算によって試算したものであり、実際の処分に要するコスト等を保障するものではない。
- 前処理として分離を行う評価ケース(C1、C3、C4)については、前処理なしの評価ケース(A1、A3、A4)に、分離に要する期間、コスト等を組み合わせることとする。また、分離後海洋放出(C2)については、希釈後海洋放出(B2)の希釈工程部分を分離工程に置き換えることとする。

24

(6)各評価ケースの評価結果(留意事項)

- その他の留意事項は以下のとおり。
 - 処分を実施する場所については、特定せずに評価を行っている。
 - 期間評価結果について、以下は含まれていない。
 - ・敷地外処分の場合の輸送
 - ・環境影響評価等のシミュレーション
 - ・資材や要員の確保に係る不確実性
 - コスト評価結果について、以下は含まれていない。
 - ・敷地外処分の場合の輸送
 - ・環境影響評価等のシミュレーション
 - ・資材や要員の確保に係る不確実性
 - ・原発敷地内であるが故の要因(高線量下における作業に伴う追加的な人件費、原子炉施設としての耐震安全性を備えるための追加的な建設費等)
 - ・土地の取得費用
 - ・固定資産税
 - ・解体廃棄物、二次廃棄物、残土の処分費用
 - ・第三者監視の費用

25

(6)各評価ケースの評価結果(A1:(前処理なし)地層注入【基本要件】)

□ 技術的成立性:(A1共通)

- CCS(二酸化炭素貯留)技術は確立されており、深地層にトリチウム水を送り込むこと自体は可能であると考えられる。
- ただし、適切な地層を見つけ出すことができない場合には、処分を開始することはできない。
- また、深地層において、適切に長期モニタリングできる方法は、現在のところ確立されていない。

□ 規制成立性:(A1共通)

- 地層注入を、「液体状の放射性廃棄物の廃棄」と整理できる場合、原子力規制委員会の定める濃度限度を超えるため、適合しない。
- 別途、地層注入に係る新たな規制及び基準の策定が必要。

26

(6)各評価ケースの評価結果(A1:(前処理なし)地層注入【期間】)

□ 処分開始までの期間:約「36+20n」か月 (A1共通)

- 地層探査、ボーリング調査等で1箇所あたり約20か月を要する。適切な地層でない場合、複数個所の調査が必要であるため、約20+20nか月と表現。(n:調査箇所数)
- 注入井(1井戸)・注入設備の設計・建設に約16か月を要する。(設計:約6か月、リグ準備・調整:約4か月、掘削:約6か月)
- これらは前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるためケース①～⑤で不変。

□ 処分終了までの期間:(ケース別)

- 注入処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約66か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
- よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。(n:調査箇所数)
 - ケース①、②、⑤: 約「102+20n」か月、ケース③、④: 約「69+20n」か月

□ 解体期間:約2か月 (A1共通)

- 設備の解体、注入井のセメンチングに約2か月を要する。
- 設備、注入井の数・規模は前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。

□ 監視期間:(ケース別)

- 原水濃度がトリチウムの半減期に応じて告示濃度6万Bq/Lになるまでの間、監視を行うものとするため、原水濃度に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 約912か月、ケース②、④: 約456か月
- 但し、これは原水のトリチウム濃度を測定してからの期間であり、処分後の監視期間を意味するものではないことに留意

27

(6)各評価ケースの評価結果(A1:(前処理なし)地層注入【コスト】)

- 調査コスト: 約「 $6.5+6.5n$ 」億円 (A1共通)
 - 主にボーリング調査に必要な費用。
 - 適切な地層でない場合、複数個所の調査が必要であるため「 $+6.5n$ 」を付記している。(n: 調査個所数)
 - これらは、設備、注入井の数・規模の影響を受け、それらは前提条件である処分速度 $400\text{m}^3/\text{日}$ によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。
- 設計・建設コスト: 約162億円 (A1共通)
 - 主に現地工事費(約150億円)であり、その他として、設計(約0.8億円)、機器費(約11億円)
 - これらは、設備、注入井の数・規模の影響を受け、それらは前提条件である処分速度 $400\text{m}^3/\text{日}$ によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。
- 処分コスト: (ケース別)
 - 処分コストの内訳は、ユーティリティ(電気代)、人件費である。
 - これらは処分量に依存し、以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: 約5億円、ケース③、④: 約3億円
- 解体コスト: 約6億円 (A1共通)
 - 設備の解体、注入井をセメンチングで閉鎖するための費用。
- 監視コスト: 「m億円」(A1共通)
 - 適切な長期モニタリングできる方法は、現在のところ確立されていないため、新たな開発が必要。コストは不明であるため「m億円」と表現。
- コスト合計: (ケース別)(n: 調査個所数)(m: 監視コスト)
 - ケース①、②、⑤: 約「 $180+6.5n + m$ 」億円、ケース③、④: 約「 $177+6.5n + m$ 」億円

28

(6)各評価ケースの評価結果(A1:(前処理なし)地層注入【その他】)

- 規模(面積): 陸部に約 380m^2 (A1共通)
- 二次廃棄物: (A1共通)
 - 特になし
- 作業員被ばく: (A1共通)
 - 特段の留意事項は無い
- 付帯条件: (A1共通)
 - 適切な地層がなかなか見つからない場合には、調査期間・費用が増加する。

29

(6)各評価ケースの評価結果(B1:(希釈後)地層注入【基本要件】)

□ 技術的成立性:(B1共通)

- CCS(二酸化炭素貯留)技術は確立されており、深地層にトリチウム水を送り込むこと自体は可能であると考えられる。
- ただし、適切な地層を見つけ出すことができない場合には、処分を開始することはできない。

□ 規制成立性:(B1共通)

- 地層注入を、「液体状の放射性廃棄物の廃棄」と整理できる場合、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。

30

(6)各評価ケースの評価結果(B1:(希釈後)地層注入【期間】)

□ 処分開始までの期間:(ケース別)

- 地層探査、ボーリング調査等を行うが、その期間は設置する注入井の数※に影響を受け、注入井の数は一日当たりの処分量(希釈倍率)の影響を受ける。
(※ケース①、③、⑤:48井戸・8か所同時削孔、ケース②、④:6井戸・2か所同時削孔)
- また、適切な地層でない場合、複数個所の調査が必要であるため、「+On」を付記している。(n:調査個所数)
 - ケース①、③、⑤: 約「40+40n」か月、ケース②、④: 約「25+25n」か月
- 設計、建設期間も注入井の本数に影響を受け、以下の通りとなる。
 - ケース①、③、⑤: 約50か月、ケース②、④: 約28か月
- 以上より、処分開始までの期間は以下の通りとなる。(n:調査個所数)
 - ケース①、③、⑤: 約「90+40n」か月、ケース②、④: 約「53+25n」か月

□ 処分終了までの期間:(ケース別)

- 注入処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約66か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
- よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。(n:調査個所数)
 - ケース①、⑤: 約「156+40n」か月、ケース②: 約「119+25n」か月
 - ケース③: 約「123+40n」か月、ケース④: 約「86+25n」か月

□ 解体期間:(ケース別)

- 設備の解体、注入井のセメンチングを行う。
- 要する期間は、設備規模、注入井の本数に依存するため以下の通りとなる。
 - ケース①、③、⑤: 約12か月、ケース②、④: 約6か月

□ 監視期間:(B1共通)

- 処分水濃度が告示濃度以下であるため、モニタリングは処分期間中のみ。

31

(6)各評価ケースの評価結果(B1:(希釈後)地層注入【コスト】)

- 調査コスト：(ケース別)
 - 主にボーリング調査に必要な費用。設備、注入井の数・規模の影響を受ける。また、適切な地層でない場合、複数個所の調査が必要であるため、「+On」を付記している。(n:調査個所数)
 - ケース①、③、⑤：約「110+110n」億円、ケース②、④：約「13+13n」億円
- 設計・建設コスト：(ケース別)
 - 主に現地工事費であり、設備、注入井の数・規模の影響を受ける。
 - ケース①、③、⑤：設計(約9.8億円)+機器費(約250億円)+現地工事費(約3100億円)=約3360億円、ケース②、④：設計(約2億円)+機器費(約42億円)+現地工事費(約390億円)=約434億円
- 処分コスト：(ケース別)
 - 処分コストの内訳は、ユーティリティ(電気代)、人件費である。
 - これらは処分量と希釈倍率に依存し、以下の通りとなる。
 - ケース①：約215億円、ケース②：約34億円、ケース③：約107億円
ケース④：約17億円、ケース⑤：約123億円
- 解体コスト：(ケース別)
 - 設備の解体、注入井をセメンチングで閉鎖するための費用であり、設備、注入井の数・規模の影響を受ける。
 - ケース①、③、⑤：約290億円、ケース②、④：約36億円
- 監視コスト：(ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用であり、原水量に依存する。
 - ケース①、②、⑤：約1.02億円、ケース③、④：約0.91億円
- コスト合計：(ケース別)(n:調査個所数)
 - ケース①：約「3976+110n」億円、ケース②：約「518+13n」億円、
 - ケース③：約「3868+110n」億円、ケース④：約「501+13n」億円、ケース⑤：約「3884+110n」億円

(6)各評価ケースの評価結果(B1:(希釈後)地層注入【その他】)

- 規模(面積)：(ケース別)
 - 必要な面積は、希釈倍率に依存する。
 - ケース①、③、⑤：陸部に約2080m²、海岸部に約120m²(計 約2200m²)
 - ケース②、④：陸部に約730m²、海岸部に約12m²(計 約742m²)
- 二次廃棄物：(B1共通)
 - 特になし
- 作業員被ばく：(B1共通)
 - 特段の留意事項は無い
- 付帯条件：(B1共通)
 - 適切な地層がなかなか見つからない場合には、調査期間・費用が増加する。

(6)各評価ケースの評価結果(B2:(希釈後)海洋放出【基本要件】)

- 技術的成立性:(B2共通)
 - 原子力施設における、トリチウムを含む放射性液体廃棄物の海洋放出事例は存在し、技術的に成立すると言える。
- 規制成立性:(B2共通)
 - 「液体状の放射性廃棄物の廃棄」に該当し、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。

(6)各評価ケースの評価結果(B2:(希釈後)海洋放出【期間】)

- 処分開始までの期間:(ケース別)
 - 機器・設備・配管・取水口等の設置のための地盤・地勢調査に約3か月を要する。
 - 大型送水ポンプの調達と数kmの配管敷設工事が必要であり、これらは希釈倍率に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 約19か月
 - ケース②、④: 約16か月
 - 以上より、処分開始までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、③、⑤: **約22か月**
 - ケース②、④: **約19か月**
- 処分終了までの期間:(ケース別)
 - 放出処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約66か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
 - よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、⑤: **約88か月**
 - ケース②: **約85か月**
 - ケース③: **約55か月**
 - ケース④: **約52か月**
- 解体期間:**約3か月** (B2共通)
 - 設備の解体、埋設配管の埋め殺しに約3か月を要する。
- 監視期間:(B2共通)
 - 処分水濃度が告示濃度以下であるため、モニタリングは処分期間中のみ。

(6)各評価ケースの評価結果(B2:(希釈後)海洋放出【コスト】)

- 調査コスト:約0.4億円 (B2共通)
 - 機器・設備・配管・取水口等の設置のための地盤・地勢調査に要する費用。
- 設計・建設コスト: (ケース別)
 - 主に現地工事費であり、希釈倍率の影響を受ける。
 - ケース①、③、⑤: 設計(約0.88億円)+機器費(約7.9億円)+現地工事費(約14億円)
=約23億円
 - ケース②、④: 設計(約0.6億円)+機器費(約2.3億円)+現地工事費(約7.9億円)
=約11億円
- 処分コスト: (ケース別)
 - 処分コストの内訳は、ユーティリティ(電気代)、人件費である。
 - これらは処分量と希釈倍率に依存し、以下の通りとなる。
 - ケース①、⑤: 約5億円、ケース②、③: 約3億円、ケース④: 約1億円
- 解体コスト: (ケース別)
 - 設備の解体、埋設配管の埋め殺しの費用で、希釈倍率に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 約4.7億円、ケース②、④: 約3.4億円
- 監視コスト: (ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用であり、原水量に依存する。
 - ケース①、②、⑤: 約1.02億円、ケース③、④: 約0.91億円
- コスト合計: (ケース別)
 - ケース①: 約34億円、ケース②: 約18億円、ケース③: 約31億円
 - ケース④: 約17億円、ケース⑤: 約34億円

36

(6)各評価ケースの評価結果(B2:(希釈後)海洋放出【その他】)

- 規模(面積): (ケース別)
 - 必要な面積は、希釈倍率に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 陸部に約280m²、海岸部に約120m² (計 約400m²)
 - ケース②、④: 陸部に約280m²、海岸部に約12m² (計 約292m²)
- 二次廃棄物: (B2共通)
 - 特になし
- 作業員被ばく: (B2共通)
 - 特段の留意事項は無い
- 付帯条件: (B2共通)
 - 特になし

37

(6)各評価ケースの評価結果(A3:(前処理なし)水蒸気放出【基本要件】)

- 技術的成立性:(A3共通)
 - 水を燃焼炉で蒸発させた実績が存在する。(ボイラーで蒸発させる方式はTMI-2の事例が存在する)。
- 規制成立性:(A3共通)
 - 水蒸気放出を、「気体状の放射性廃棄物の廃棄」と整理できる場合、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。

38

(6)各評価ケースの評価結果(A3:(前処理なし)水蒸気放出【期間】)

- 処分開始までの期間:約35か月 (A3共通)
 - 機器・設備・配管等を設置するための地盤・地勢調査を行う期間、1年間の気象条件を取得するための期間として約12か月を要する。
 - 但し、既に1年間の気象条件を取得できている場合には、この期間は約12か月よりも短縮することが可能となる。
 - 設備の設計及び建設には約23か月を要する。これは、燃焼炉の調達、現地据付期間が大半を占める。
 - これらは、前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。
- 処分終了までの期間:(ケース別)
 - 放出処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約80か月を要し、ケース③、④は約40か月を要する。(処分量÷処分速度)(燃焼炉の年間稼働日数を300日と仮定)。
 - よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: 約115か月
 - ケース③、④: 約75か月
 - なお、降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、期間が延びる可能性がある。
- 解体期間:約5か月 (A3共通)
 - 燃焼炉の解体に約5か月を要する。
- 監視期間:(A3共通)
 - 法令告示濃度を満足する形での大気放出であるため、モニタリングは処分期間中のみ。

39

(6)各評価ケースの評価結果(A3:(前処理なし)水蒸気放出【コスト】)

- 調査コスト: **約0.4億円** (A3共通)
 - 機器・設備・配管等を設置するための地盤・地勢調査を行う費用、1年間の気象条件を取得するための費用。
- 設計・建設コスト: **約80億円** (A3共通)
 - 主に現地工事費(約58億円)であり、その他として、設計(約2.3億円)、機器費(約20億円)
- 処分コスト: (ケース別)
 - 処分コストの内訳は、ユーティリティ(重油)、人件費である。
 - これらは処分量に依存し、以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: **約243億円**
 - ケース③、④: **約121億円**
- 解体コスト: **約24億円** (A3共通)
 - 主に燃焼炉の解体のための費用。
- 監視コスト: (ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用、排気筒での濃度測定に係る費用であり、原水量に依存する。
 - ケース①、②、⑤: **約1.56億円**
 - ケース③、④: **約1.38億円**
- コスト合計: (ケース別)
 - ケース①、②、⑤: **約349億円**
 - ケース③、④: **約227億円**

40

(6)各評価ケースの評価結果(A3:(前処理なし)水蒸気放出【その他】)

- 規模(面積): (A3共通)
 - 陸部に**約2000m²**
- 二次廃棄物: (A3共通)
 - トリチウム水の成分によっては、焼却灰が発生する可能性がある。
- 作業員被ばく: (A3共通)
 - 排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。
- 付帯条件: (A3共通)
 - 特になし

41

(6)各評価ケースの評価結果(A4:(前処理なし)水素放出【基本要件】)

□ 技術的成立性:(A4共通)

- 水を電気分解し、水素に還元することは技術的に可能である。
- 一方、実トリチウム水を対象とした場合、前処理やスケール拡大等について、R&Dが必要な可能性がある。

□ 規制成立性:(A4共通)

- 水素放出を、「気体状の放射性廃棄物の廃棄」と整理できる場合、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。

(6)各評価ケースの評価結果(A4:(前処理なし)水素放出【期間】)

□ 処分開始までの期間:約35か月 (A4共通)

- 機器・設備・配管等を設置するための地盤・地勢調査を行う期間、1年間の気象条件を取得するための期間として約12か月を要する。
- 但し、既に1年間の気象条件を取得できている場合には、この期間は約12か月よりも短縮することが可能となる。
- 設備の設計及び建設には約23か月を要する。これは、電解装置の調達、現地据付期間が大半を占める。
- これらは、前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。

□ 処分終了までの期間:(ケース別)

- 放出処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約66か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
- よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: 約101か月
 - ケース③、④: 約68か月
- なお、降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、期間が延びる可能性がある。

□ 解体期間:約5か月 (A4共通)

- 電解設備の解体に約5か月を要する。

□ 監視期間:(A4共通)

- 告示濃度を満足するように大気放出するため、モニタリングは処分期間中のみ。

(6)各評価ケースの評価結果(A4:(前処理なし)水素放出【コスト】)

- 調査コスト: **約0.4億円** (A4共通)
 - 機器・設備・配管等を設置するための地盤・地勢調査を行う費用、1年間の気象条件を取得するための費用。
- 設計・建設コスト: **約130億円** (A4共通)
 - 文献ベースにおける概算
- 処分コスト: (ケース別)
 - 処分コストの内訳は、ユーティリティ(電気代)、人件費である。
 - これらは処分量に依存し、以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: **約831億円**
 - ケース③、④: **約431億円**
- 解体コスト: **約37億円** (A4共通)
 - 主に電解設備の解体のための費用。
- 監視コスト: (ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用、排気筒での濃度測定に係る費用であり、原水量に依存する。
 - ケース①、②、⑤: **約1.36億円**
 - ケース③、④: **約1.23億円**
- コスト合計: (ケース別)
 - ケース①、②、⑤: **約1000億円**
 - ケース③、④: **約600億円**

44

(6)各評価ケースの評価結果(A4:(前処理なし)水素放出【その他】)

- 規模(面積): (A4共通)
 - 陸部に**約2000m²**
- 二次廃棄物: (A4共通)
 - 電気分解の前処理工程において、二次廃棄物として残渣が発生する可能性がある。
- 作業員被ばく: (A4共通)
 - 排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。
- 付帯条件: (A4共通)
 - 特になし

45

(6)各評価ケースの評価結果(A5a:(前処理なし)地下埋設(深地)【基本要件】)

□ 技術的成立性:(A5共通)

- コンクリートピット処分場、遮断型処分場の実績がある。

□ 規制成立性:(A5共通)

- 容器に封入または固型化されていないため、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」における「廃棄体」とは整理できない。
- トリチウム水をセメント混練し固化されたものを、同規則における「コンクリート等廃棄物」と整理できる場合、トリチウム水をコンクリート固化したものをピット処分した事例は無いため、別途、新たな基準の策定が必要となる可能性がある。

46

(6)各評価ケースの評価結果(A5a:(前処理なし)地下埋設(深地)【期間】)

□ 処分開始までの期間:約26か月 (A5共通)

- コンクリートピットを設置するための地盤・地勢調査を行う期間、1年間の地下環境条件情報を取得するための期間として約12か月を要する。
- ただし、既に1年間の地下環境条件情報を取得できている場合には、この期間は約12か月よりも短縮することが可能となる。
- 設備の設計には8か月を要する。設備の建設については、全てのコンクリートピットを建設してから流し込みを開始するのではなく、部分的にコンクリートピットを建設し、そこへの流し込みを 行いつつ、並行してコンクリートピットを順次建設していく工程を想定しており、1区画目のピットを建設するためには6か月を要する。(処分開始までに14か月を要する。)
- これらは、前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。

□ 処分終了までの期間:(ケース別)

- 埋設処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約66か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
- さらに、埋設完了時には、頂板設置、覆土、等を行う期間が必要である。(同じく、6か月、3か月)
- よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: 約98か月、ケース③、④: 約62か月

□ 監視期間:(ケース別)

- 原水濃度がトリチウムの半減期に応じて告示濃度6万Bq/Lになるまでの間、監視を行うものとすると、原水濃度に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 約912か月、ケース②、④: 約456か月
- ただし、これは原水のトリチウム濃度を測定してからの期間であり、処分後の監視期間を意味するものではないことに留意

47

(6)各評価ケースの評価結果(A5a:(前処理なし)地下埋設(深地)【コスト】)

- 調査コスト:約1億円 (A5共通)
 - コンクリートピットを設置するための地盤・地勢調査を行う費用、1年間の地下環境条件情報を取得するための費用。
- 設計・建設コスト: (ケース別)(処分コストを含む)
 - 主に現地工事費であり、原水濃度、処分量の影響を受ける。
 - ケース①: 約2529億円
 - ケース②: 約2226億円
 - ケース③: 約1317億円
 - ケース④: 約1216億円
 - ケース⑤: 約2427億円
- 監視コスト: (ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用、埋設中・埋設後の空气中濃度測定・地下水中濃度測定に係る費用であり、原水量、原水濃度(監視期間)に依存する。
 - ケース①、⑤: 約2.2億円
 - ケース②: 約1.84億円
 - ケース③: 約2.09億円
 - ケース④: 約1.73億円
- コスト合計: (ケース別)
 - ケース①: 約2533億円
 - ケース②: 約2229億円
 - ケース③: 約1320億円
 - ケース④: 約1219億円
 - ケース⑤: 約2431億円

48

(6)各評価ケースの評価結果(A5a:(前処理なし)地下埋設(深地)【その他】)

- 規模(面積): (ケース別)
 - ケース①、②、⑤: 陸部に約285000m²
 - ✓ 福島第一原子力発電所敷地面積の約8%に相当
 - ケース③、④: 陸部に約144000m²
- 二次廃棄物: (A5共通)
 - 特になし。
- 作業員被ばく: (A5共通)
 - 埋設時の作業員の吸入被ばく対策として、セメント中のトリチウム水の蒸発を抑制するカバーの設置等
- 付帯条件: (ケース別)
 - **コンクリート及びセメント系固化材の必要量:**
 - ケース①、②、⑤: コンクリート約42万m³+セメント系固化材約160万トン
 - ✓ 上記は日本の1年間セメント消費量の約5%に相当
 - ケース③、④: コンクリート約23万m³+セメント系固化材約80万トン
 - **ベントナイトの必要量:**
 - ケース①: 約123万m³
 - ✓ 上記は世界の1年間の産出量の約8%、日本の産出量の約3年分に相当
 - ケース②: 約61万m³、ケース③: 約63万m³、ケース④: 約31万m³、ケース⑤: 約92万m³
 - **残土の発生量:**
 - ケース①: 約348万m³
 - ✓ 東京ドーム約3杯分、福島中間貯蔵施設の約5分の1の量に相当。
 - ✓ 残土を高さ5mに盛ると仮定すると、残土置き場として約70万m²(福島第一原子力発電所敷地面積の約20%に相当)の面積が必要。
 - ケース②: 約286万m³、ケース③: 約178万m³、ケース④: 約146万m³、ケース⑤: 約318万m³

49

(6)各評価ケースの評価結果(A5b:(前処理なし)地下埋設(浅地)【基本要件】)

□ 技術的成立性:(A5共通)

- コンクリートピット処分場、遮断型処分場の実績がある。

□ 規制成立性:(A5共通)

- 容器に封入または固型化されていないため、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」における「廃棄体」とは整理できない。
- トリチウム水をセメント混練し固化されたものを、同規則における「コンクリート等廃棄物」と整理できる場合、トリチウム水をコンクリート固化したものをピット処分した事例は無いため、別途、新たな基準の策定が必要となる可能性がある。

50

(6)各評価ケースの評価結果(A5b:(前処理なし)地下埋設(浅地)【期間】)

□ 処分開始までの期間:約26か月 (A5共通)

- コンクリートピットを設置するための地盤・地勢調査を行う期間、1年間の地下環境条件情報を取得するための期間として約12か月を要する。
- 但し、既に1年間の地下環境条件情報を取得できている場合には、この期間は約12か月よりも短縮することが可能となる。
- 設備の設計には8か月を要する。設備の建設については、全てのコンクリートピットを建設してから流し込みを開始するのではなく、部分的にコンクリートピットを建設し、そこへの流し込みを 行いつつ、並行してコンクリートピットを順次建設していく工程を想定しており、1区画目のピットを建設するためには6か月を要する。(処分開始までに14か月を要する。)
- これらは、前提条件である処分速度400m³/日によって決定されるため、ケース①～⑤で不変。

□ 処分終了までの期間:(ケース別)

- 埋設処分に要する期間は、処分量に依存する。ケース①、②、⑤は約64か月を要し、ケース③、④は約33か月を要する。(処分量÷処分速度)。
- また、埋設完了時には、頂板設置、覆土、等を行う期間が必要である。(同じく、6か月、3か月)
- よって、処分終了までの期間は以下の通りとなる。
 - ケース①、②、⑤: 約98か月、ケース③、④: 約62か月

□ 監視期間:(ケース別)

- 原水濃度がトリチウムの半減期に応じて告示濃度6万Bq/Lになるまでの間、監視を行うものとする、原水濃度に依存する。
 - ケース①、③、⑤: 約912か月、ケース②、④: 約456か月
- ただし、これは原水のトリチウム濃度を測定してからの期間であり、処分後の監視期間を意味するものではないことに留意

51

(6)各評価ケースの評価結果(A5b:(前処理なし)地下埋設(浅地)【コスト】)

- 調査コスト:約1億円 (A5共通)
 - コンクリートピットを設置するための地盤・地勢調査を行う費用、1年間の地下環境条件情報を取得するための費用。
- 設計・建設コスト: (ケース別)(処分コストを含む)
 - 主に現地工事費であり、原水濃度、処分量の影響を受ける。
 - ケース①: 約1620億円
 - ケース②: 約1519億円
 - ケース③: 約802億円
 - ケース④: 約742億円
 - ケース⑤: 約1519億円
- 監視コスト: (ケース別)
 - 原水濃度測定に係る費用、埋設中・埋設後の空气中濃度測定・地下水中濃度測定に係る費用であり、原水量、原水濃度(監視期間)に依存する。
 - ケース①、⑤: 約2.2億円
 - ケース②: 約1.84億円
 - ケース③: 約2.09億円
 - ケース④: 約1.73億円
- コスト合計: (ケース別)
 - ケース①: 約1624億円
 - ケース②: 約1522億円
 - ケース③: 約805億円
 - ケース④: 約745億円
 - ケース⑤: 約1523億円

52

(6)各評価ケースの評価結果(A5b:(前処理なし)地下埋設(浅地)【その他】)

- 規模(面積): (ケース別)
 - ケース①、②、⑤: 陸部に約285000m²
 - ケース③、④: 陸部に約144000m²
- 二次廃棄物: (A5共通)
 - 特になし。
- 作業員被ばく: (A5共通)
 - 埋設時にセメント中のトリチウム水が蒸発し、作業環境がトリチウム雰囲気となり、吸入被ばくの恐れがあるため、カバーの設置等で、蒸発を抑制する。
- 付帯条件: (ケース別)
 - **コンクリート及びセメント系固化材の必要量:**
 - ケース①、②、⑤: コンクリート約42万m³+セメント系固化材約160万トン
 - ケース③、④: コンクリート約24万m³+セメント系固化材約80万トン
 - **ベントナイトの必要量:**
 - ケース①: 約69万m³
 - ケース②: 約35万m³
 - ケース③: 約36万m³
 - ケース④: 約18万m³
 - ケース⑤: 約52万m³
 - **残土の発生量:**
 - なし

53

(参考1)水蒸気放出、水素放出：排気筒高さの算出

- 水蒸気放出、水素放出の場合、敷地境界外の濃度は、それぞれ5Bq/L、7万Bq/Lを下回る必要がある。
- ある地点の放射能濃度は「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」で定められている方法において算出する。
- 式からわかる様に、ある地点の放射能濃度(Bq/L)は、排気筒出口の放射能濃度(Bq/L)には依存せず、放出量(Bq/s)に依存する。(他に、排気筒高さや、気象条件に依存する)。

$$\chi = \sum_{S=A}^F \left[\frac{Q}{\pi \cdot \sigma_{yS} \cdot \sigma_{zS} \cdot U_{S1}} \cdot \exp\left(-\frac{H_1^2}{2\sigma_{zS}^2}\right) \cdot F_{S1} \right. \\ \left. + \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_{yS} \cdot \sigma_{zS} \cdot U_{S2}} \cdot \exp\left(-\frac{H_2^2}{2\sigma_{zS}^2}\right) \cdot F_{S2} \right. \\ \left. + \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_{yS} \cdot \sigma_{zS} \cdot U_{S3}} \cdot \exp\left(-\frac{H_3^2}{2\sigma_{zS}^2}\right) \cdot F_{S3} \right] \quad \dots (2)$$

式中記号の意味

$\chi(x, y, 0)$: 点(x, y, 0)における放射性物質の濃度 (Bq/m³)
 Q : 放出率 (Bq/s)
 σ_{yS}, σ_{zS} : 大気安定度Sの時の σ_y, σ_z (m)
 σ_y : 濃度分布のy方向の拡がりパラメータ (m)
 σ_z : 濃度分布のz方向の拡がりパラメータ (m)
 U_{S1} : 大気安定度Sの時の着目方位の風速 (m/s)
 U_{S2}, U_{S3} : 大気安定度Sの時の隣接方位の風速 (m/s)
 H_1 : 着目方位に対する放出源の有効高さ (m)
 H_2, H_3 : 隣接方位に対する放出源の有効高さ (m)
 F_1 : 大気安定度Sの時の着目方位の濃度の平均化の係数 (m)
 F_2, F_3 : 大気安定度Sの時の隣接方位の濃度の平均化の係数 (m)

$$\chi_{cont, S} = Q_{cont} \cdot \bar{\chi}_S \cdot \frac{1}{N_t} \cdot S_d \quad \dots (8)$$

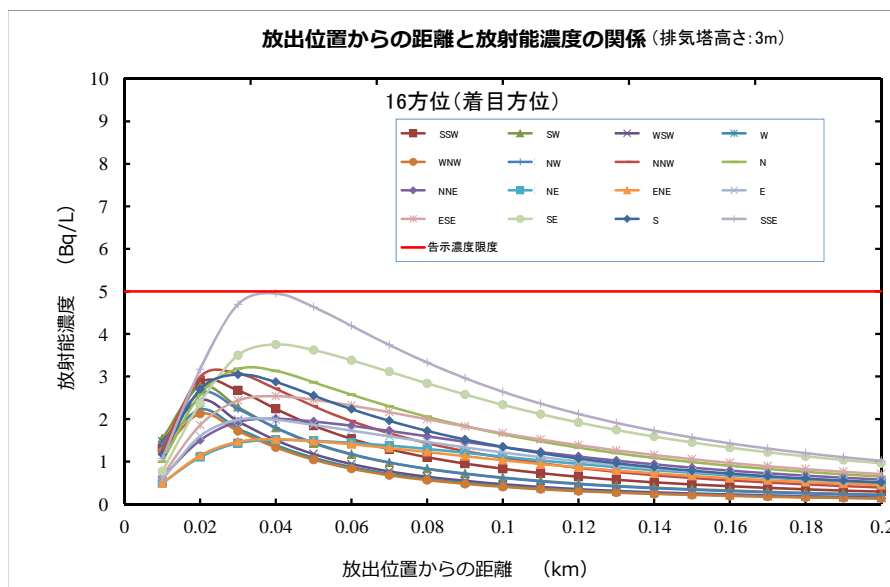
$\chi_{cont, S}$: 大気安定度Sの時の連続の年間平均濃度 (Bq/m³)
 Q_{cont} : 連続の線量が1年間に一様に連続して放出されるとしたときの放出率 (Bq/s)
 $\bar{\chi}_S$: 単位放出率 (1Bq/s)、単位風速 (1m/s) の時の地表空气中濃度の1方位内平均値 (Bq/m³)
 N_t : 総観測回数 (8,760 回)
 S_d : 風向別大気安定度別風速逆数の総和 (s/m)

「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」より抜粋

54

(参考1)水蒸気放出、水素放出：排気筒高さの算出

- 東京電力から提供されたパラメータを用いて、敷地境界外において、告示濃度を超えない様にするための排気筒高さを算出した結果例を以下に示す。
 - 420万Bq/Lのトリチウム水を1日400m³処理するとして、放出率Qは約1.95 × 10⁷Bq/sと設定。
 - 最大放射能濃度が水蒸気の告示濃度である5Bq/Lとなる様な排気筒高さを探索した結果、排気筒高さ3mの際に、放出位置から約40m地点で最大放射能濃度が5Bq/Lとなると評価された。
 - 排気筒高さ3m地点においても、東京電力殿申請書にある標高132m地点の気象条件が当てはまると仮定して、放出位置からの距離に応じた放射能濃度の算定結果を以下に示す。



55

(参考2)地下埋設:ベントナイト層厚さの算出

- 地下埋設において、人工バリアの最も外側であるベントナイト層からの浸出水のトリチウム濃度が6万Bq/L以下となる様な、ベントナイト層の厚さを算出する。
- ベントナイト層浸出水の放射能濃度を評価するためには、コンクリート層の透水係数、拡散係数、ベントナイト層の透水係数、拡散係数、地下水の動水勾配を設定する必要があり、それらの数値の設定とその妥当性について、以下に示す。
 - ✓ コンクリート層の透水係数: 1.0×10^{-6} m/s
 - 「TRU廃棄物処理処分検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ」(※1)における、セメントモルタルの透水係数のデータを参照
 - セメントモルタルにひび割れが無い場合: 5×10^{-11} 、ひび割れがある場合: 4×10^{-6}
 - ✓ コンクリート層の拡散係数: 3×10^{-10} m²/s
 - 「TRU廃棄物処理処分検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ」における、セメントモルタルの拡散係数のデータを参照
 - ✓ ベントナイト層の透水係数: 1.0×10^{-9} m/s
 - 「TRU廃棄物処理処分検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ」における、各種ベントナイトの透水係数のデータを参照して保守的に設定
 - ✓ ベントナイト層の拡散係数: 3.0×10^{-10} m²/s
 - 「日本原子力学会標準 浅地中ピット処分の安全評価手法」(※2)を参照
 - ✓ 地下水の動水勾配: 0.5%
 - 一般的な地下水の動水勾配として示された環境省資料を参照(※3)

※1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構「TRU廃棄物処理処分検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ」

※2 日本原子力学会「浅地中ピット処分の安全評価手法」

※3 環境省「土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン(改訂2版)-特定有害物質を含む地下水が到達し得る「一定の範囲」の考え方」

56

(参考2)地下埋設:ベントナイト層厚さの算出

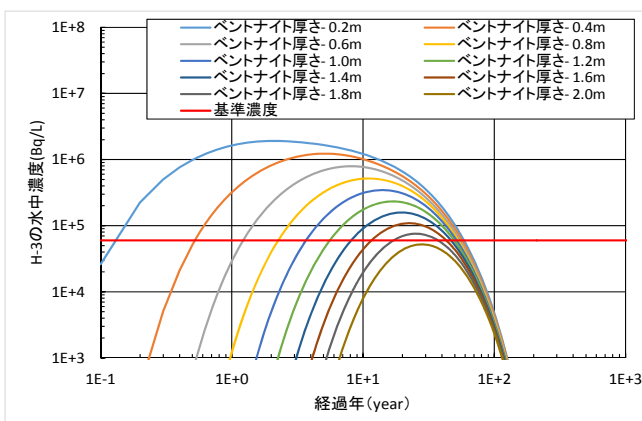


図1 トリチウムの水中濃度の時間変化
(固化体前の濃度が420万Bq/Lのケース)

↓
ベントナイト層厚さ2mと算定

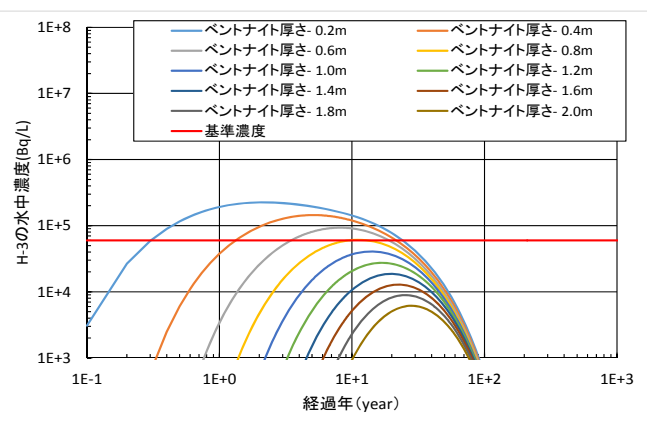


図2 トリチウムの水中濃度の時間変化
(固化体前の濃度が50万Bq/Lのケース)

↓
ベントナイト層厚さ1mと算定

57

(参考3)その他の前提条件

【地層注入】

□ 前処理なし

- ① 貯水タンク(80万 m^3)はプラント直近(100m)にあるものとする。
- ② プラント設置位置の標高 O.P.+10.0m
- ③ 電力は要求する電圧で十分量供給されるものとする。(変電設備等は範囲外)
- ④ 地層注入したトリチウム水が、長期間に安定して滞留することができる地層が、掘削可能な範囲に存在するものとする。
- ⑤ 地層注入に適した地層深さは、CCS(二酸化炭素貯留)の実証事例を参考に、深度2,500mとする。
- ⑥ 作業環境(放射能汚染等)による制約はないものとする。

□ 希釈

- ① 海水のトリチウム濃度は、希釈に際しては無視できるほど低いものとする。
- ② 以下、地層注入(前処理なし)の①～⑥と同様

【海洋放出】

□ 希釈

- ① 貯水タンク(80万 m^3)はプラント直近(100m)にあるものとする。
- ② プラント設置位置の標高 O.P.+10.0m
- ③ 海面近傍標高:O.P.+4.0m(潮位:O.P.+0.2m～+2.0m)
- ④ 電力は要求する電圧で十分量供給されるものとする。(変電設備等は範囲外)
- ⑤ プラントから海岸(取水口、放流配管口)までの距離は1,000mとする。
- ⑥ 埋設配管にはアクセスポイントを設けない。
- ⑦ 作業環境(放射能汚染等)による制約はないものとする。
- ⑧ 海水のトリチウム濃度は、希釈に際しては無視できるほど低いものとする。

58

(参考3)その他の前提条件

【水蒸気放出】

□ 前処理なし

- ① 貯水タンク(80万 m^3)はプラント直近(100m)にあるものとする。
- ② プラント設置位置の標高 O.P.+10.0m
- ③ 燃焼設備および付帯設備は屋外設置とする。
- ④ 電力は要求する電圧で十分量供給されるものとする。(変電設備等は範囲外)
- ⑤ 建設、運転に関しては、既存仮設焼却炉と同等の作業条件とする。
- ⑥ 作業環境(放射能汚染等)による制約はないものとする。
- ⑦ 降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があるが計算には考慮していない。

【水素放出】

□ 前処理なし

- ① 貯水タンク(80万 m^3)はプラント直近(100m)にあるものとする。
- ② プラント設置位置の標高 O.P.+10.0m
- ③ 電力は要求する電圧で十分量供給されるものとする。(変電設備等は範囲外)
- ④ 前処理施設、発生残渣処理の検討は研究開発事項とする。
- ⑤ 作業環境(放射能汚染等)による制約はないものとする。
- ⑥ 降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があるが計算には考慮していない。

【地下埋設】

□ 前処理なし

- ① 「トリチウム水の浅地中処分に係る検討」(※)に基づく設計、施工とする。
- ② コンクリートピット躯体は底版・壁を施工し、対象原水をコンクリート硬化した後に頂版を施工する。
- ③ 工事場所の既存構造物および地中埋設物の撤去までは考慮しない。
- ④ 残土の処分は考慮しない。
- ⑤ 仮に汚染土が発生した場合でも、その除染は考慮しない。
- ⑥ 作業環境(放射能汚染等)による制約はないものとする。

※平成26年10月24日第10回トリチウム水タスクフォース資料1「トリチウム水の浅地中処分に係る検討」

各評価ケースの評価結果一覧

(※これらの評価結果については、各種の仮定を設定した上で概算によって試算したものであり、実際の処分に要するコスト等を保障するものではない。)

処分方法	No.	前処理	原水濃度	原水処分量	希釈倍率	上段・全体処分量 下段・処分速度	処分濃度	基本要件		制約となり得る条件														規模 (面積) (m ²)	二次廃棄物	作業員 被ばく	付帯条件						
								技術的成立性	規制成立性	期間(月)						コスト(億円)																	
										処分完了まで						分離	調査	設計・建設			処分							解体	監視	合計			
										分離	調査	設計 +建設	計	計	解体			監視	設計	機器費	現地 工事費	小計	処分								解体	監視	
ユーティリティ	その他 人件費等	小計																															
地層注入	A1-①		420万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n	66	102+20n	2	912	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	m	180+6.5n+m	陸部:380	・特に無し	・特段の留意事項は無い。 ・適切な地層がなかなか見つからない場合には、調査期間・費用が増加する。 (n:地層調査の実施回数)			
	A1-②		50万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n	66	102+20n	2	456	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	m	180+6.5n+m						
	A1-③	なし	420万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n	33	69+20n	2	912	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	0.62	2.1	2.7	6	m	177+6.5n+m						
	A1-④		50万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n	33	69+20n	2	456	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	0.62	2.1	2.7	6	m	177+6.5n+m						
	A1-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L 50万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n	66	102+20n	2	912	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	m	180+6.5n+m							
地層注入	B1-①		420万Bq/L	80万m ³	70	5,600万m ³ 28,000m ³ /日	6万Bq/L	—	40+40n	50	90+40n	66	156+40n	12	処分期間中	—	110+110n	9.8	250	3,100	3,360	85	130	215	290	1.02	3976+110n	海岸部:120 陸部:2080	・特に無し	・特段の留意事項は無い。 ・適切な地層がなかなか見つからない場合には、調査期間・費用が増加する。 (n:地層調査の実施回数)			
	B1-②		50万Bq/L	80万m ³	8.33	666万m ³ 3,340m ³ /日	6万Bq/L	—	25+25n	28	53+25n	66	119+25n	6	処分期間中	—	13+13n	2.0	42	390	434	13	21	34	36	1.02	518+13n	海岸部:12 陸部:730					
	B1-③	希釈	420万Bq/L	40万m ³	70	2,800万m ³ 28,000m ³ /日	6万Bq/L	—	40+40n	50	90+40n	33	123+40n	12	処分期間中	—	110+110n	9.8	250	3,100	3,360	43	64	107	290	0.91	3868+110n	海岸部:120 陸部:2080					
	B1-④		50万Bq/L	40万m ³	8.33	333万m ³ 3,340m ³ /日	6万Bq/L	—	25+25n	28	53+25n	33	86+25n	6	処分期間中	—	13+13n	2.0	42	390	434	6.3	11	17	36	0.91	501+13n	海岸部:12 陸部:730					
	B1-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	70 8.33	2,800万m ³ 28,000m ³ /日 333万m ³ 3,340m ³ /日	6万Bq/L	—	40+40n	50	90+40n	66	156+40n	12	処分期間中	—	110+110n	9.8	250	3,100	3,360	49	74	123	290	1.02	3884+110n	海岸部:120 陸部:2080						
地層注入	C1-①		4.2万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	1.02	分離コスト +181+6.5n	陸部:380+分離面積	・分離技術によっては、二次廃棄物が発生する可能性がある。 ・特段の留意事項は無い。 ・適切な地層がなかなか見つからない場合には、調査期間・費用が増加する。 (n:地層調査の実施回数)				
	C1-②		0.5万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	1.02	分離コスト +181+6.5n						
	C1-③	分離	4.2万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n or 分離開始期間	33	処分開始まで +33	2	処分期間中	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	0.62	2.1	2.7	6	0.91	分離コスト +178+6.5n						
	C1-④		0.5万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n or 分離開始期間	33	処分開始まで +33	2	処分期間中	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	0.62	2.1	2.7	6	0.91	分離コスト +178+6.5n						
	C1-⑤		4.2万Bq/L×40万m ³ +0.5万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L 0.5万Bq/L	—	20+20n	16	36+20n or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	6.5+6.5n	0.8	11	150	162	1.3	4.0	5.3	6	1.02	分離コスト +181+6.5n							

基本要件								制約となり得る条件																									
								期間(月)								コスト(億円)								規模 (面積) (m ²)	二次廃棄物	作業員 被ばく	付帯条件						
								処分完了まで								設計・建設												解体	監視	合計			
								処分開始まで								設計・建設				処分													
分離	調査	設計 +建設	計	処分	計	解体	監視	分離	調査	設計	機器費	現地 工事費	小計	ユーティリティ	その他 入弁費等	小計																	
海洋放出	B2-①	希釈	420万Bq/L	80万m ³	70	5,600万m ³ 28,000m ³ /日	6万Bq/L	「液体状の放射性廃棄物の廃棄」に該当し、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。	「液体状の放射性廃棄物の廃棄」に該当し、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。	—	3	19	22	66	88	3	処分期間中	—	0.4	0.88	7.9	14	23	0.71	4.5	5.2	4.7	1.02	34	海岸部:120 陸部:280	・特に無し	・特段の留意事項は無い。	・放流水が直接取水されることの無いよう、取水ビッドと放流口の間を岸壁等で間仕切る場合には費用が増加する。
	B2-②		50万Bq/L	80万m ³	8.33	666万m ³ 3,332m ³ /日	6万Bq/L			—	3	16	19	66	85	3	処分期間中	—	0.4	0.6	2.3	7.9	11	0.13	2.6	2.7	3.4	1.02	18	海岸部:12 陸部:280			
	B2-③		420万Bq/L	40万m ³	70	2,800万m ³ 28,000m ³ /日	6万Bq/L			—	3	19	22	33	55	3	処分期間中	—	0.4	0.88	7.9	14	23	0.36	2.3	2.7	4.7	0.91	31	海岸部:120 陸部:280			
	B2-④		50万Bq/L	40万m ³	8.33	333万m ³ 3,340m ³ /日	6万Bq/L			—	3	16	19	33	52	3	処分期間中	—	0.4	0.6	2.3	7.9	11	0.07	1.3	1.4	3.4	0.91	17	海岸部:12 陸部:280			
	B2-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	70 8.33	2,800万m ³ 28,000m ³ /日 333万m ³ 3,340m ³ /日	6万Bq/L	—			3	19	22	66	88	3	処分期間中	—	0.4	0.88	7.9	14	23	0.64	4.5	5.1	4.7	1.02	34	海岸部:120 陸部:280				
	C2-①	分離	4.2万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	「液体状の放射性廃棄物の廃棄」に該当し、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。	「液体状の放射性廃棄物の廃棄」に該当し、原子力規制委員会の定める濃度限度を下回る。	—	2	14	16 or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	0.2	0.22	0.91	4.7	6	0.05	1.8	1.9	2.2	1.02	分離コスト +11	陸部:280+分 離面積	・分離技術によつては、二次廃棄物が発生する可能性がある。	・特段の留意事項は無い。	・放流水が直接取水されることの無いよう、取水ビッドと放流口の間を岸壁等で間仕切る場合には費用が増加する。
	C2-②		0.5万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L			—	2	14	16 or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	0.2	0.22	0.91	4.7	6	0.05	1.8	1.9	2.2	1.02	分離コスト +11				
	C2-③		4.2万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L			—	2	14	16 or 分離開始期間	33	処分開始まで +33	2	処分期間中	—	0.2	0.22	0.91	4.7	6	0.03	0.9	0.9	2.2	0.91	分離コスト +10				
	C2-④		0.5万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L			—	2	14	16 or 分離開始期間	33	処分開始まで +33	2	処分期間中	—	0.2	0.22	0.91	4.7	6	0.03	0.9	0.9	2.2	0.91	分離コスト +10				
	C2-⑤		4.2万Bq/L×40万m ³ +0.5万Bq/L×40万 m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L 0.5万Bq/L	—			2	14	16 or 分離開始期間	66	処分開始まで +66	2	処分期間中	—	0.2	0.22	0.91	4.7	6	0.05	1.8	1.9	2.2	1.02	分離コスト +11					

処分方法							基本要件		制約となり得る条件																	規模 (面積) (m ²)	二次廃棄物	作業員 被ばく	付帯条件			
							技術的成立性	規制成立性	期間(月)							コスト(億円)																
									処分完了まで							分離	調査	設計・建設				解体	監視	合計								
									処分開始まで			計	処分	計	解体			監視	設計	機器費	現地 工事費				小計					処分		小計
分離	調査	設計 +建設	設計	コナロイ その他 入弁費率																												
水蒸気放出	A3-①	なし	420万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	12	23	35	80	115	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	349	陸部:2000	トリチウム水の成分によっては、焼却灰が発生する可能性がある。	・排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。	・降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、多少期間が延びる可能性がある。	
	A3-②		50万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	23	35	80	115	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	349					
	A3-③		420万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	12	23	35	40	75	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	89	32	121	24	1.38	227					
	A3-④		50万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	23	35	40	75	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	89	32	121	24	1.38	227					
	A3-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L 50万Bq/L	—	12	23	35	80	115	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	349						
水蒸気放出	C3-①	分離	4.2万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	80	分離開始まで +80	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	分離コスト +349	陸部:2000+ 分離面積	トリチウム水の成分によっては、焼却灰が発生する可能性がある。	・排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。	・降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、多少期間が延びる可能性がある。	
	C3-②		0.5万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	80	分離開始まで +80	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	分離コスト +349					
	C3-③		4.2万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	40	分離開始まで +40	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	89	32	121	24	1.38	分離コスト +227					
	C3-④		0.5万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	40	分離開始まで +40	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	89	32	121	24	1.38	分離コスト +227					
	C3-⑤		4.2万Bq/L×40万m ³ +0.5万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L 0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	80	分離開始まで +80	5	処分 期間 中	—	0.4	2.3	20	58	80	180	63	243	24	1.56	分離コスト +349						
水蒸気放出	A4-①	なし	420万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	12	23	35	66	101	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	1,000	陸部:2000	電気分解の前処理工程において、二次廃棄物として残渣が発生する可能性がある。	・排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。	・降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、多少期間が延びる可能性がある。
	A4-②		50万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	23	35	66	101	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	1,000				
	A4-③		420万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	12	23	35	33	68	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	400	31	431	37	1.23	600				
	A4-④		50万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	23	35	33	68	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	400	31	431	37	1.23	600				
	A4-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L 50万Bq/L	—	12	23	35	66	101	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	1,000					
水蒸気放出	C4-①	分離	4.2万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	66	分離開始まで +66	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	分離コスト +1000	陸部:2000+ 分離面積	電気分解の前処理工程において、二次廃棄物として残渣が発生する可能性がある。	・排気筒高さを十分に取るため、特段の留意事項は無い。	・降水条件によっては放出を停止しなければならない可能性があり、多少期間が延びる可能性がある。
	C4-②		0.5万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	66	分離開始まで +66	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	分離コスト +1000				
	C4-③		4.2万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	33	分離開始まで +33	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	400	31	431	37	1.23	分離コスト +600				
	C4-④		0.5万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	33	分離開始まで +33	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	400	31	431	37	1.23	分離コスト +600				
	C4-⑤		4.2万Bq/L×40万m ³ +0.5万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	4.2万Bq/L 0.5万Bq/L	—	12	23	35 or 分離開始期間	66	分離開始まで +66	5	処分 期間 中	—	0.4	130				130	770	61	831	37	1.36	分離コスト +1000					

処分方法							基本要件		制約となり得る条件																						
									技術的成立性		期間(月)							コスト(億円)							規模(面積)(m ²)	二次廃棄物	作業員被ばく	付帯条件			
											処分完了まで							設計・建設											処分		
											処分開始まで			計	処分	計	解体	監視	分離	調査	設計	機器費	現地工事費	小計					ユークロイ	その他	
分離	調査	設計+建設	設計	機器費	現地工事費	小計	その他	入件費率																							
地下埋設 (地下水位より深い位置)	A5a-①	なし	420万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	・容器に封入または固化されたいないため、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」における「廃棄体」とは整理できない。 トリチウム水をセメント混練し固化されたものを、同規則における「コンクリート等廃棄物」と整理できる場合、トリチウム水をコンクリート固化したものをピット処分した事例は無いため、別途、新たな基準の策定が必要となる可能性がある。	—	12	14	26	72	98	0	912	—	1	25	4.3	2,500	2,529	建設費に含む	0	2.20	2,533	陸部:285,000	・右記のコンクリート、ペントナイトが必要。 ・右記の残土が発生。 ・埋設時にセメント中のトリチウム水が蒸発し、作業環境がトリチウム雰囲気となり、吸入被ばくの恐れがあるため、カバーの設置等で、蒸発を抑制する。	コンクリート:42万m ³ ペントナイト:123万m ³ 残土:348万m ³ セメント系固化材:160万t コンクリート:42万m ³ ペントナイト:61万m ³ 残土:286万m ³ セメント系固化材:160万t コンクリート:23万m ³ ペントナイト:63万m ³ 残土:178万m ³ セメント系固化材:80万t コンクリート:23万m ³ ペントナイト:31万m ³ 残土:146万m ³ セメント系固化材:80万t コンクリート:42万m ³ ペントナイト:92万m ³ 残土:318万m ³ セメント系固化材:160万t		
	A5a-②		50万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L		—	12	14	26	72	98	0	456	—	1	22	4.3	2,200	2,226		0	1.84	2,229	陸部:285,000				
	A5a-③		420万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L		—	12	14	26	36	62	0	912	—	1	13	4.3	1,300	1,317		0	2.09	1,320	陸部:144,000				
	A5a-④		50万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L		—	12	14	26	36	62	0	456	—	1	12	4.3	1,200	1,216		0	1.73	1,219	陸部:144,000				
	A5a-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L 50万Bq/L	—		12	14	26	72	98	0	912	—	1	23	4.3	2,400	2,427	0		2.20	2,431	陸部:285,000					
地下埋設 (地下水位より深い位置)	A5b-①	なし	420万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	・コンクリートピット処分場、遮断型処分場の実績がある。	—	12	14	26	72	98	0	912	—	1	16	4.3	1,600	1,620	建設費に含む	0	2.20	1,624	陸部:285,000	コンクリート:42万m ³ ペントナイト:69万m ³ セメント系固化材:160万t コンクリート:42万m ³ ペントナイト:35万m ³ セメント系固化材:160万t コンクリート:24万m ³ ペントナイト:36万m ³ セメント系固化材:80万t コンクリート:24万m ³ ペントナイト:18万m ³ セメント系固化材:80万t コンクリート:42万m ³ ペントナイト:52万m ³ セメント系固化材:160万t			
	A5b-②		50万Bq/L	80万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	14	26	72	98	0	456	—	1	15	4.3	1,500	1,519	0		1.84	1,522	陸部:285,000					
	A5b-③		420万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L	—	12	14	26	36	62	0	912	—	1	8.1	4.3	790	802	0		2.09	805	陸部:144,000					
	A5b-④		50万Bq/L	40万m ³	—	40万m ³ 400m ³ /日	50万Bq/L	—	12	14	26	36	62	0	456	—	1	7.6	4.3	730	742	0		1.73	745	陸部:144,000					
	A5b-⑤		420万Bq/L×40万m ³ +50万Bq/L×40万m ³	—	80万m ³ 400m ³ /日	420万Bq/L 50万Bq/L	—	12	14	26	72	98	0	912	—	1	15	4.3	1,500	1,519	0	2.20		1,523	陸部:285,000						

※1:分離技術については、別紙4の評価を踏まえ、技術の特定が困難なため空欄としている。

※2:コストの内、現地での作業を伴うもの(調査、現地工事費、その他人件費等、解体)は、作業環境(空間放射線量率、作業スペース、他の工事との取り合い等)によって増加する可能性があることに留意が必要。

※3:期間やコストの算出根拠は、非原発敷地での工事を想定したものであり、原発敷地内での要因は考慮していないことに留意が必要。

※4:解体コストには、解体廃棄物の除染費用、処分費用等は含んでいないことに留意が必要。

※5:処分コストは、原水処理量80万m³については、年間ランニングコスト×5.5年(800,000÷400÷365)で算出。原水処理量40万m³については、年間ランニングコスト×2.8年(400,000÷400÷365)で算出。

水蒸気放出については1年間に300日稼働と仮定。原水処理量80m³については年間ランニングコスト×6.7年(800,000÷400÷300)、原水処理量40m³については年間ランニングコスト×3.4年(400,000÷400÷300)で算出。

目的と目標

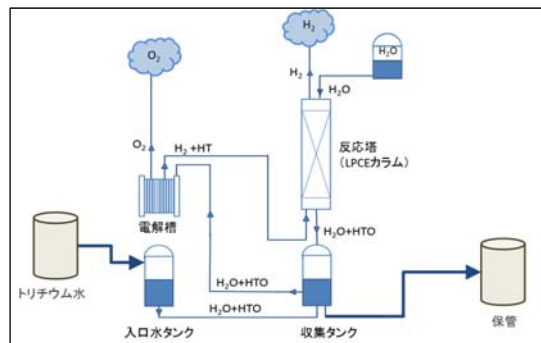
本実証事業の目的は、キュリオンのモジュラー型トリチウム分離装置(MDS®)を用いて、福島第一原発の汚染水と同等の水からトリチウムを除去することで、汚染水の経済的な処理を実証することである。MDS®システムは、化学交換電解セル複合法(CECE)を用いる。本実証事業においては、フルスケールの反応塔(触媒入りのカラム)と1/10規模の水電解装置が用いられた。本実証事業の成果として、概念設計、詳細な見積、及び、技術成熟度の検証が達成された。前処理設備についても、技術検証がなされた。

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

作成 Kurion, Inc. www.kurion.com

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)、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、工場で作製される。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

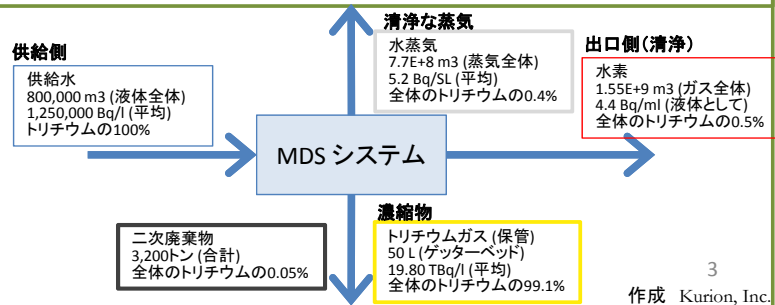
- MDS®システムの運転に必要な電力を、電気料金により調整する。電力費が高いときには(典型的には日中)、システムの運転能力を落とし、電力費が低いときには(典型的には夜間)、システムの運転能力を最大とすることで、電力費が30~50%程度低減されると考えられる。
- 上記に示す費用は、水素タービン発電設備を併設し、水素を発電のためにリサイクルすることによる費用及び効果を含む。正味の電力消費は20%近く低減し、対応する運転費が低減されている。
- 廃棄物管理の戦略として一つの選択肢は、比較的より濃度の高いトリチウム水のみを処理することである。この戦略をとる場合、キュリオンは、800,000m³の半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

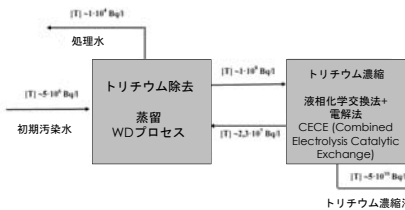


トリチウム分離技術検証試験事業

RosRAO, FSUE

目的と目標

当プロジェクトの目的は、WDとCECEを組み合わせた方法によるトリチウム分離技術の検証及びフルスケール施設(実機)にした際の実作業への適用可能性を確認することです。検証試験の前提としては、1:1のスケールにおいて分離係数、濃縮、減容を確認することであり、1:100のスケールで容量とエネルギー消費を検証することです(それが断面積によって決定されます)。従って、分離装置のカスケードにより、フルスケール施設(実機)を考える上での分離係数及び濃縮係数の実パラメーターを得つつ、断面積の上昇の原理を証明しました。



分離技術の原理/事業の概要

RosRAOのトリチウム汚染水からのトリチウム除去技術は、水素同位体分離法として下記既知の工業的手法の組み合わせです。

- WDプロセス：最小限のエネルギー消費で大容量かつ高分離係数を実現させる方法
- CECEプロセス：濃縮率が高いことから、処理が必要となる廃棄物量の減少を達成させる方法

プロジェクトの目標を達成するべく、RosRAOはこれらプロセスを用いつつ、下記2つのユニットを連鎖的に導入しました。

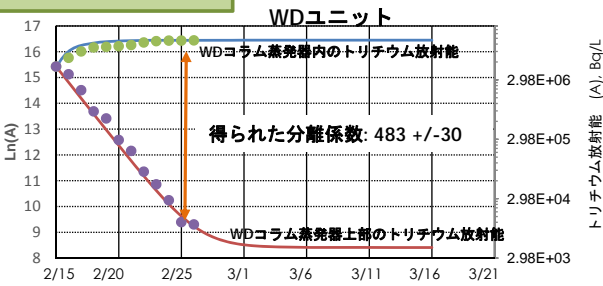
- ◆ ユニット1 (RosRAOの既存装置)：福島第一原子力発電所のトリチウム汚染水と同一である模擬水製造装置並びに模擬水除塩装置(同位体除去装置移行前)
- ◆ ユニット2：高さ43.5m/直径1.2mのWDコラム及び高さ7.5m/直径15cmのCECEコラムから構成されるトリチウム同位体除去装置、並びにトリチウム化チタンに固体化する装置(流入水を6,000減少するよう設計(Vwater/VIT2))

最終的に、福島第一原子力発電所のトリチウム水と核種・化学組成的に同一である48m³のトリチウム模擬水が検証試験施設で処理され、RosRAOのプロセス技術及び実現可能性のパラメーターが証明されました。

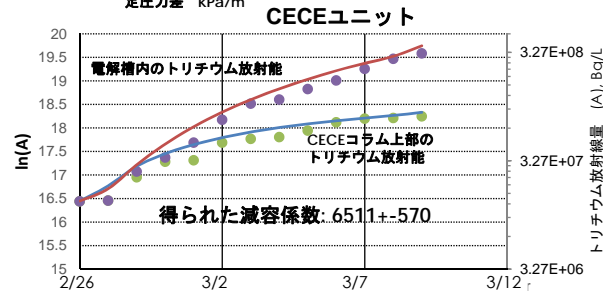
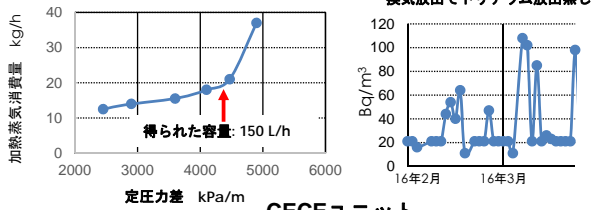


試験結果

線 - 計算日
点 - 試験日



WDユニットの圧力差グラフ



今後の課題/留意点

考察として、トリチウム分離の産業用フルスケール施設（実機）を建設する際には、以下の汎用性産業ソリューションを導入することが必要と考えます：熱回収ヒートポンプ設備、排出される酸素及び水素の触媒再燃焼装置の設置、サンプリングの自動化及び漏水対策などが必要です。

得られた成果

試験結果:

- トリチウム水の流入水量とトリチウム放射線濃度: 153 L/h、 5×10^6 Bq/L
- 流入後、トリチウムが減少された部分のトリチウム放射線量: 1.0×10^4 Bq/L (他にその状態及び量のデータ)
- 流入後、トリチウムが濃縮された部分のトリチウム放射線量: 8.4×10^8 Bq/L (他にその状態及び量のデータ)
- トリチウム除去係数 = 初期 (流入時) トリチウムの放射線量 (Bq) / 流入後、減少されたトリチウム放射線量 (Bq): 483 +/- 30
- 二次廃棄物の種類、量、トリチウム放射線量: 固体化されたトリチウム化チタン (TiTi_2)、3 Kg、 1.0×10^4 Bq/L

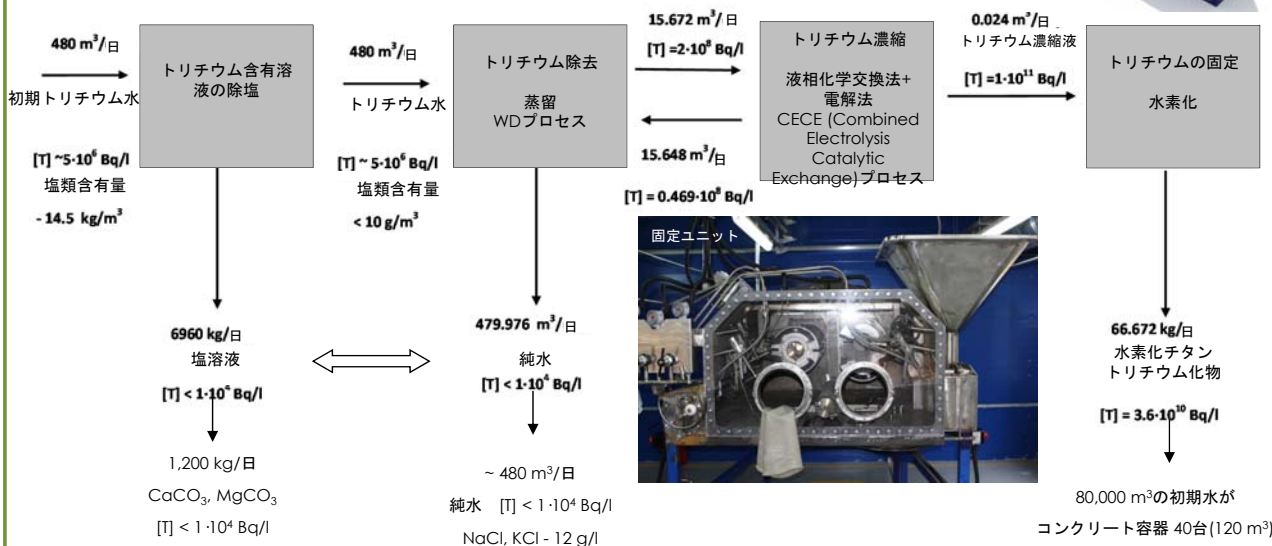
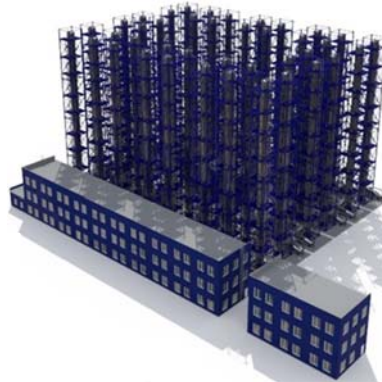


- フルスケール施設（実機）の評価データ:
- 容量: 480 m³/日、分離係数=分離比: 500 (処理期間: 4.6年間)
 - フルスケール施設の概算建設費用: 385億円 (建設費: 102億円、設備費: 283億円)
 - トリチウム汚染水800,000m³を処理する際の運転費用: 405億円 (電力費: 年間63億円、維持管理・労務費: 年間25億円)

RosRAO FSUE 作成

実機適用の際のプロセスフロー図

処理率 (容量)、m ³ /日	480
分離係数	500
トリチウム濃縮係数	20,000
放射性廃棄物減容	6,000
WDユニット数 (直径 2.2 m、高さ 46 m)	40
CECEコラム数 (直径 0.15 m、高さ 6.8 m)	10
電力消費量 (MW/h)	46
規模 (m)	51 x 51 x 49.5
建設期間 (月)	18



RosRAO FSUE 作成

目的と目標

従来の蒸留法を改良して実用的なシステム(①多核種除去装置(ALPS)処理水中のトリチウム濃度を1/100以下 ②1日当り400m³処理できる実機)の実現を実証する。

・**模擬液を使った前処理試験の実施**: 実液を想定した模擬液を調製して限界濃縮倍率まで蒸発濃縮処理し、不純物を含まない処理液(トリチウム水以外の核種を含まない凝縮水)が得られるか等を確認する。

・**トリチウム分離検証試験の実施**: 第1期(触媒機能充填物を充填したガラスカラムでの重水による分離係数の確認)、第2期(軽水による触媒機能充填物の液分散性の確認と圧力損失等流動特性を確認)、第3期(重水による触媒機能充填式蒸留塔の分離・流動特性を把握)、第4期(トリチウム模擬液による各種触媒機能充填物の分離特性と約1ヶ月間の連続運転による分離特性の経時変化を把握)を実施する。

分離技術の原理/事業の概要

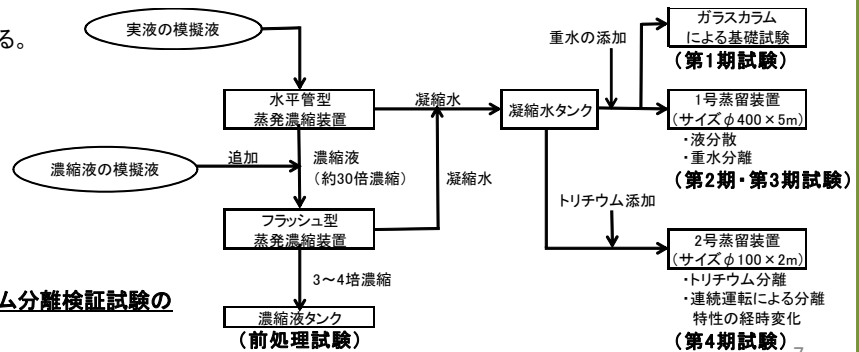
<分離技術の原理、特長>

分離技術としては蒸留法となるが、以下の点を改良し分離性能およびエネルギー効率の向上を図る。

- 1) 低温での真空蒸発によりトリチウムの分離係数を向上
- 2) 触媒機能充填物の採用によりトリチウムの分離係数を向上
- 3) ヒートポンプの導入により、大量の熱を循環使用することで省エネルギー蒸留を達成

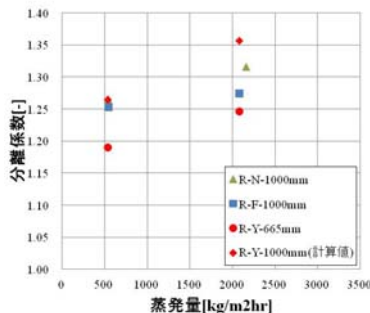
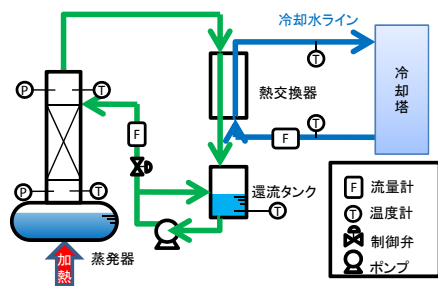
<事業の概要>

事業の概要について右図に概念図を記載する。



模擬液を使った前処理試験とトリチウム分離検証試験の処理工程の概念図

試験結果



上図の装置にて、種々の充填物でトリチウムの分離試験を実施。

結果として触媒機能(吸着効果)のあるゼオライトを担持した充填物(◆R-Y)が最も分離係数が高いことを確認した。

R-N: ノーマルシリリング
R-F: F大ゼオライト担持シリリング
R-Y: Y大ゼオライト担持シリリング
* 後段の数字は各充填物の充填高さを示す

得られた成果

得られた試験結果から実機の試設計を実施。

<設計条件>

- システム全体の分離係数 : 100
- システム全体の分離比 : 102
- 一塔当りの分離係数 : 10(第二塔でDF:100を実現)
- 一塔当りの濃縮液量 : 1/10(濃縮液蒸留塔で1/100を実現)
- 温度 : 60°C
- 還流比 : 20
- 入力側のトリチウム水量および濃度 : 400m³/日、4.2×10⁶Bq/L
- 減損側のトリチウム水量および濃度 : 392m³/日、4.2×10⁴Bq/L
- 濃縮側のトリチウム水量および濃度 : 4m³/日、4.2×10⁸Bq/L
- 前処理濃縮液のトリチウム水量および濃度 : 4m³/日、4.2×10⁶Bq/L

<試設計結果>

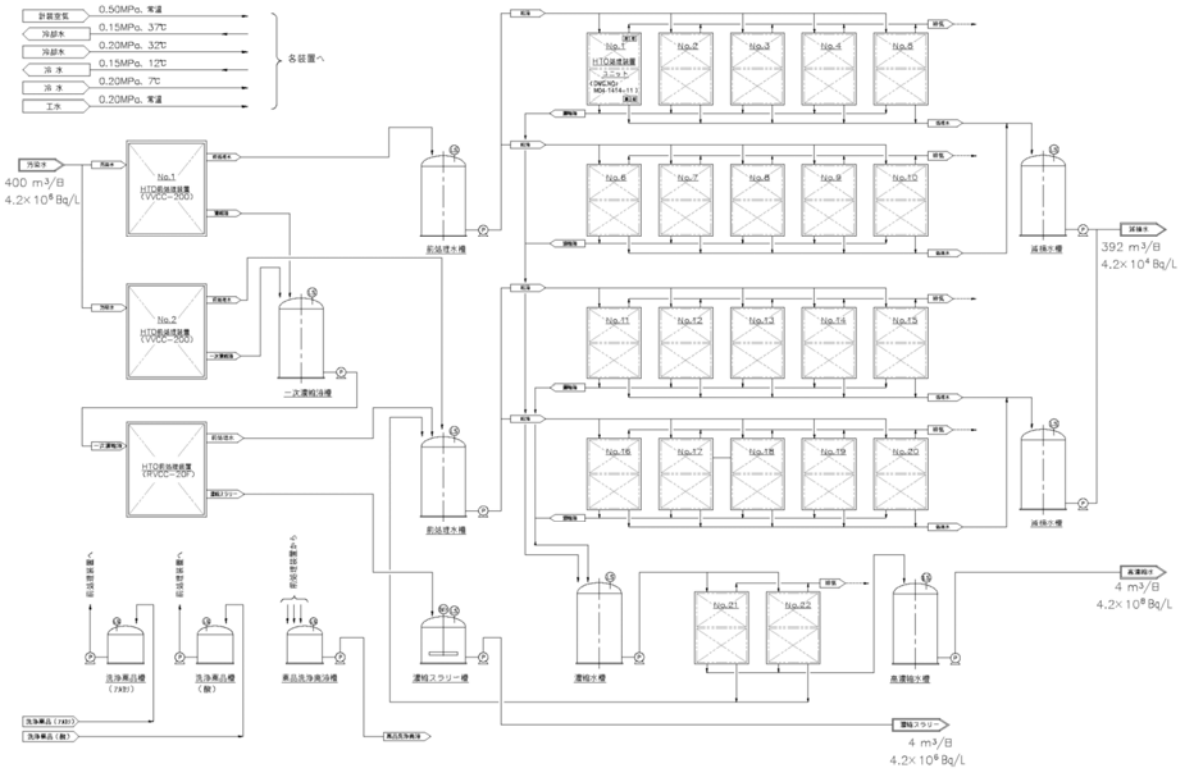
- 充填層高さ : 42m
- 塔口径 : 3.3m
- 1塔当りの処理量 : 20m³/日
- 分離係数=100に要する塔数 : 2(1系列)
- 400m³/日に要する系列 : 20+2
- 単位動力 : 1,193kWh/t
- 実施施設規模 : 100m×150m=15,000m²
- 実機建設コスト(総額) : 371億円
- 実機運転コスト(総額) : 212億円 (80万m³処理の場合)
- 実機建設工期 : 37ヶ月

今後の課題/留意点

- 1) 前処理濃縮水のさらなる減容積化の方法とその長期保管の実用的な要領の検討
- 2) 高濃度トリチウム水のさらなる減容積化とその長期保管の実用的な要領の検討

実機適用の際のプロセスフロー図

機全体フロー図



Demonstration Project for Verification Tests of Tritium Separation Technologies (創イノベーション)

目的と目標

目的

本プロジェクトの目的は、新規自社開発技術である「二段階ガスハイドレート法」によって、トリチウムを低濃度含む大量の水からトリチウムを効率良く分離できることをラボスケールで実証することにある。

目標

- 本技術によって、トリチウム濃度が 5×10^8 Bq/L以下の模擬処理水を分離係数100以上で分離できること。
- 本技術によって、分離濃縮後のトリチウム濃度を最終的に 10^9 Bq/L以上にできる可能性があること。
- 本技術によって、400 m³/日以上処理能力をもつ実機プラントが構成できること。
- 本技術によって、無機塩濃度が350 mmol/L程度の模擬処理水のトリチウム分離が可能であること。

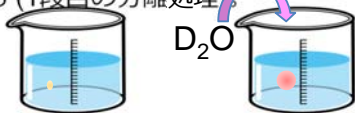
分離技術の原理／事業の概要

分離技術の原理、特長

トリチウム水 (HTO) のみを構造中に含むガスハイドレート結晶を析出させ、固液分離によりトリチウムを分離することが原理的には可能である。

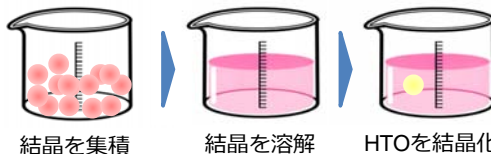
しかし、トリチウムが低濃度だと、HTO量が少ないので、析出する結晶が小さく、実際には分離は不可能である。

そこで重水 (D₂O) を添加し、HTOとD₂Oを含むガスハイドレート結晶をT-P図中の■領域で析出させ固液分離する(1段目の分離処理)。



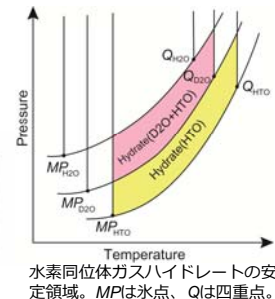
析出結晶が小さく分離不能 D₂Oで増量

次にこのハイドレート結晶を集積後、溶解した後、HTOを高濃度を含むガスハイドレート結晶をT-P図中の■領域で析出させ固液分離する(2段目の分離処理)。



試験の概要

- ラボスケール試験装置の設計・製造
- 擬似「処理水」に含まれる無機塩がガスハイドレート結晶化温度に与える効果の検討
- ゲスト分子となるガスの選定
- H₂O+D₂O+HTO系におけるトリチウム分離性能(1段目分離処理：処理水のトリチウム濃度を低減する操作)の検討
- D₂O+HTO系におけるトリチウム分離性能(2段目分離処理：分離したトリチウムをさらに濃縮する操作)の検討



水素同位体ガスハイドレートの安定領域。MPは氷点、Qは四重点。

試験結果

無機塩の影響

ガスハイドレート結晶の析出温度は、溶質の種類と圧力が一定であれば溶質分子数のみに依存し、次式に従う。

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] = -1.6 [^{\circ}\text{Cmol/kg}]/\text{ion conc. [mol/kg]}$$

軽水-プロパン系において総イオン濃度355 mmol/L、0.6 MPaの条件では、析出温度は5.5°Cから5.0°Cへ約0.5°C低下し、上式から得られる温度降下と良く一致した。

ガス（ゲスト分子）の選定

予備試験に使用してきたプロパンと比較して析出速度が大きく、常温、低圧でガスハイドレート結晶を析出させられるHFC-32 (CH₂F₂)+HFC134a (CH₂FCF₃) 混合系をゲストガスに選定し、以下の試験を行った。

H₂O+D₂O+HTO系トリチウム分離性能(1段目分離処理)

4.77×10⁵ Bq/kgのトリチウムを含む水からトリチウムを分離除去し、トリチウム濃度を1.40×10³ Bq/kgにすることに成功した。この分離係数は341であり、要求仕様を十分に満たしている。

D₂O+HTO系トリチウム分離性能(2段目分離処理)

3.11×10⁶ Bq/kgのトリチウムを含む重水からガスハイドレート法によりトリチウムの分離を試みた。液相のトリチウム濃度は約1/7に低減できたが、ガスハイドレートに含まれるトリチウム濃度は、ほとんど増大しなかった。

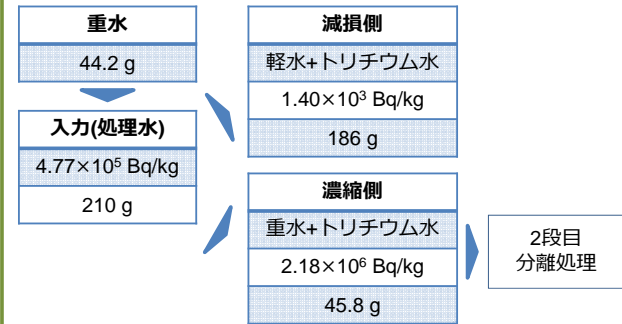
これは、トリチウムの絶対量が少ないため、重水を含まないガスハイドレート結晶を得ることができず、不純物として重水が含まれたことが原因である。従って、1 m³スケールのより大容量の試験による再検討が今後必要である。

得られた成果

低濃度トリチウム水のトリチウム分離に成功

反応容器容量 500mLのラボスケール試験装置による検討結果、1段目分離処理によってトリチウムを含む水からトリチウムを、分離係数最大341でトリチウム濃度を低減することに成功した。

本技術は福島第一原発処理水のフロントエンド処理技術としての要求仕様を十分に満たしている。



実機試算結果（400 m³/日規模、分離係数=分離比=341）

- 施設規模：2,160 m²×20 m
- 建設コスト：79億6千万円
- 建設工期：18か月
- 二次廃棄物総量：モレキュラシーブ5,000Bq/m³×0.5m³
- 運転コスト：62億円 (80万m³処理の場合)

今後の課題／留意点

- 2段階ガスハイドレート法によるトリチウム分離処理のうち、2段目の分離処理性能については、今回の最小規模の試験装置では実証することが原理的に困難であった。より大型の装置による検証が今後必要である。
- パイロットプラントによる実証試験を行い、システムとしての完成度を充実させる必要がある。

11

Demonstration Project for Verification Tests of Tritium Separation Technologies

株式会社 東芝

目的と目標

【目的】

一般産業で用いられている晶析法を応用し、福島第一原子力発電所における多核種除去設備処理水(1F処理水)よりトリチウムを除去するための技術検証、および実機システム検討を行う。

【実証対象】

実機適用に向け、実機システムのうち、晶析により生成する氷の分離機構検討、氷分離後のトリチウム除去性能確認、および晶析時の運転条件がトリチウム分離性能に与える影響確認を実証対象とする。

分離技術の原理／事業の概要

【分離技術の原理】

水(H₂O)とトリチウム水(HTO)からなる系について、水とトリチウム水の凝固点差を利用して氷にトリチウムを取り込み、トリチウム濃度が上昇した氷を除去することで、液中のトリチウム濃度を低減する。

【事業の概要】

コールド試験およびホット試験の結果をシステム検討に反映する。

(1)コールド試験

重水素をモデル物質として、晶析時の運転条件がトリチウム分離性能に与える影響を予察し、ホット試験条件に反映する。

(2)ホット試験

トリチウム水を用いて、トリチウム除去性能を確認するとともに、晶析時の運転条件がトリチウム分離性能に与える影響を確認する。

(3)システム検討

各試験結果を反映し、実機に適用するためのシステム構成を検討する。

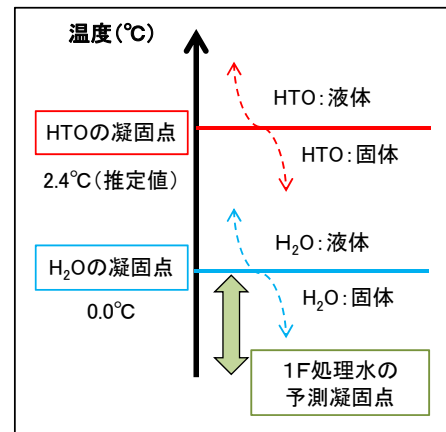


図1 水およびトリチウム水の凝固点と1F処理水の予測凝固点

12

試験結果

コールド試験結果で得られた重水分離性能からは、分離性能の晶析時温度への依存性はほとんどないと予想された。

ホット試験においてトリチウム分離性能の初期液濃度依存、晶析時の冷却温度依存を確認したところ、分離性能を向上させるのに有意な影響は確認されなかったが、トリチウム液中の氷滞在時間を長くとり、液中のトリチウムが氷側に移行するための反応時間を長くするほど、分離性能が向上する傾向が確認された。

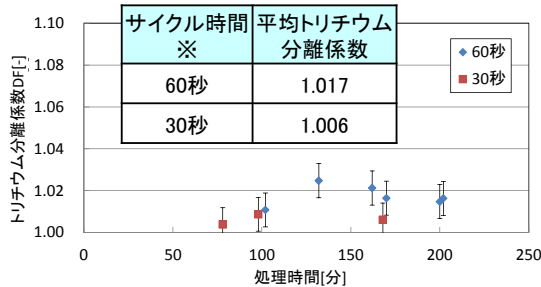


図2 トリチウム分離性能の氷滞在時間依存

※サイクル時間は、晶析により生成した氷と液が混在した液を、固液分離装置に供給する際の間隔を表す。サイクル時間が長いほど液中の氷滞在時間が長く確保される。

得られた成果

トリチウム液を用いた試験の結果、氷滞在時間を適切に設定することで、1段処理あたりのトリチウム分離比として、1.02を得る見込みを得た。

処理容量400m³/日、トリチウムの分離係数100以上を得るためのシステムとして、分離係数に余裕を持ち、トリチウム分離ユニット240段からなるシステム構成を検討した場合の入力側、減損側、濃縮側の状態・容量・トリチウム濃度を表1に示す。

表1 実機システムにおける状態・容量・トリチウム濃度

項目	状態	処理容量 (m ³ /日)	トリチウム濃度 (Bq/ml)
インプット	液体	400	4.20E+03
トリチウム減損側	液体	388	3.62E+01
トリチウム濃縮側	液体	12	1.39E+05

本技術を適用した実機システムにおける二次廃棄物としては、氷生成機構にて氷を掻き取るスクレイパ刃が1年あたり約17m³発生する見込みとなる。

実機(1日400m³処理)の性能とコストの推定値

分離係数	:116	実機建設コスト(総額)	: 6,000億円
分離比	:120	実機運転コスト(総額)	: 73億円
実機施設規模	:280,000m ²	(80万m ³ 処理の場合)	

今後の課題/留意点

試験にて確認されたトリチウム除去性能では、実機適用に当たり必要段数が多大となるため、トリチウム分離性能の向上を目的とした最適運転条件の検討、スケールアップによる影響確認が今後の課題となる。また、実機システムは氷生成機構と氷溶解機構を含むため、効率的な熱利用システムの検討が必要となる。

13

PSNN-2015-0376-12(2/2)

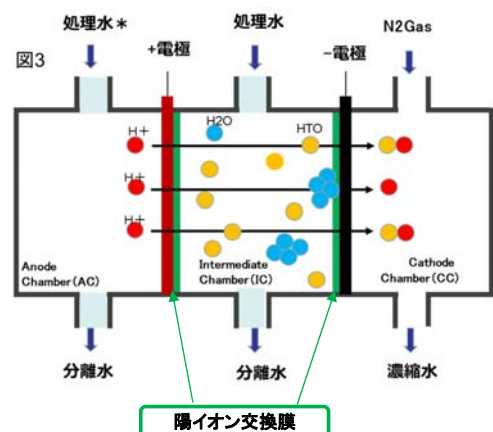
Demonstration Project for Verification Tests of Tritium Separation Technologies (株)ネクスタイド

目的と目標

- * 目的：3室型の電気分解装置を用いた新しい技術(Advanced Detritiation Method - 先進脱トリチウム法(AD法))によるトリチウム分離法が多核種除去装置処理水からのトリチウム分離に適用可能であるか、この技術を用いたカスケードシステムの性能の技術的検証試験をラボスケールで行い、さらには、400m³/dayの処理能力を持つ実用機への拡張について検討する。
- * 目標：ラボスケールでの試験でトリチウムの抽出・濃縮、分離に係るデータを取得し単体セルによる分離係数1.3以上、カスケードシステムによる分離係数100以上を得られることを検証する。また、カスケード段数の最適化を検討し、実用機拡張の場合のシステム構成とそのコスト見積もりを提示する。

分離技術の原理/事業の概要

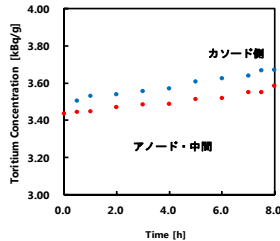
- * 原理：通常の軽水分子は大変大きなクラスターを形成し、その一方でトリチウム水分子は基本的にクラスターを形成せずに単独で存在するものと考えられ、この分子の大きさの違いによりH⁺イオンによる担送に差が発生することが期待できる。
分離セルの基本的な構成は、トリチウム水を抽出・濃縮するためのカソード室と、汚染水を入れてトリチウム減弱を行うための中間室、トリチウム水を担送するH⁺を発生させるためのアノード室から成る。各セルの間は陽イオン交換膜で遮り、アノード室側に電解用陽極、カソード室側に電解用陰極を備える。電解によってアノード室中の純水から発生したH⁺イオンが陽イオン交換膜を通過してイオン交換樹脂を充填してある中間室に入り、陰極に引かれて移動する際に、クラスターを形成していないトリチウム水を優先的に担送し、陽イオン交換膜を介してカソード室へ抽出されることで、中間室内汚染水のトリチウム減弱、カソード室へのトリチウム濃縮が生じる。
- * 事業の概要：単体セルによるカソード室へのトリチウム抽出・濃縮、中間室のトリチウム減弱を重水を用いたラボスケールの試験によって原理的検証を行なった後、トリチウムを用いたラボスケール試験でトリチウム抽出・濃縮率および、中間室のトリチウム減弱率を確認・評価し、カスケードシステムによる実験で、分離係数100以上を得られることを検証する。



14

試験結果

重水を用いた試験、トリチウムを用いた試験で、アノード室から中間室への純水の流入、中間室からアノード室へのトリチウムの漏出が見られ、結果として、汚染水量を増大させてしまうことが判明したこと、また、カソード室への抽出・濃縮率が想定した濃縮度に比べて小さいことから、実施計画を変更し、アノード室と中間室に同濃度のトリチウム水を流し、また、並列に置いた電解セルの電極電流を変化させて、目標とする抽出・濃縮度を得られるかの原理的検証試験を行うことにした。アノード室・中間室のトリチウム濃度を同じにした試験では、カソード室へは、ある程度のトリチウムの抽出・濃縮(下図)が見られたが、目標を大きく下回る結果となった。電解によってガス化した水素および酸素を放出してしまったために、中間室のH₂O量が減少し、中間室のトリチウム濃度は増大する結果となった。単体セルを用いたこれらの試験結果から、カスケードシステムの検証試験は中止として、単体セルの分離性能の評価を行うにとどめた。



得られた成果

アノード室・中間室の同濃度のトリチウム水を流した場合の実験データからは、分離係数は1以下となった。これは中間室のH₂O量が電気分解によるガス化で減少したために濃縮が生じていることが原因であると考えられるので、ガス化したH₂Oをすべて復水して中間室に戻したと想定して補正を加えると、その補正分離係数は1.015と1.021となり、カソード室へのトリチウム分離が生じていると評価することができた。

	カソード室濃縮係数	分離係数	補正分離係数
MS6004	1.045	0.957	1.015
MS6005	1.050	0.952	1.021

分離係数1.015の電解槽をカスケードとして実機に求められる分離係数100にするには、直列にした場合で、分離セルが310台必要であり、処理能力400m³/日を達成するには次の規模の施設となるため、実現は難しい。

- * 直列に310台で8時間で775g処理できる。
- * 1台で1日に2325g(773g×3サイクル)処理できる。
- * 1日400トン処理するには172千系統必要。
- * 分離セルの数にして約5330万台必要。
- * 1台あたりの消費電力量を225Whとすると、約287.2百万kWh必要。

上記の評価は今回の実験結果によるものであるが、左記のような実験系の課題があるため、実験系の更なる適正化、及び、機構・構造の更なる検討を行った上での試験によって、より厳密な性能評価を実施しなければ、当該技術がトリチウム分離技術として有効であるか、十分な評価は難しいことが判った。

実機(1日400m³処理)の性能とコストの推定値

分離係数	: 100	実機建設コスト(総額)	: 18兆円
		実機運転コスト(総額)	: 4,080億円
			(80万m ³ 処理の場合)

今後の課題/留意点

* 今後の課題：電極の面積・電極間距離・印加電圧・電流、イオン交換膜の種類・仕様、電解による発生ガス量の把握と復水機構の導入、各セル間の圧力差による水のセル間移動状況の把握・抑制、各セルの水流量、等の各種パラメータによる分離係数およびカソード室への濃縮率への影響を評価できる試験を行い、トリチウム分離技術としての原理的成立性の検証と分離性能の向上を検討し、試験データとして確認する必要がある。

* 留意点：当該分離技術は、そのトリチウム分離性能、装置製造(建設)コストの上から、更なる改良が行われた後に改めて検証・評価する余地は有るが、現時点に於いては実用機拡張を検討できる段階にないと判断せざるを得ないことに留意しなければならない。

Demonstration Project for Verification Tests of Tritium Separation Technologies

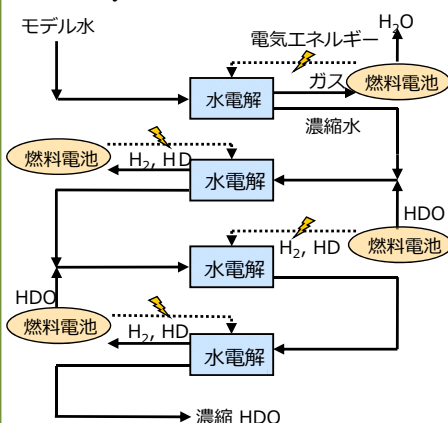
北海道大学

目的と目標

福島汚染水処理の問題は、依然としてトリチウム除去技術が確立されないことである。水電解は高い分離係数を有する分離方法として知られているが、汚染水処理には膨大な電力消費量が必要となる。そこで本事業では、従来の水電解法に燃料電池を組み合わせた省エネ型の電解再結合法を提案し、福島汚染水処理対策の実機開発に向け、1) 水電解と燃料電池の相乗効果による高効率な分離実証、2) 水電解法単独よりも低い電力消費量による分離実証、の2点を目標とする。

分離技術の原理/事業の概要

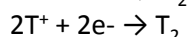
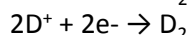
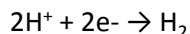
- Electrolytic Recombined Method -



* モデル水として重水を使うため、トリチウムの場合への外挿の妥当性調査・検討を行う

分離技術の原理:

質量数が小さくなることで、イオンからガスに変わる電極反応速度に差が生じることを利用。



軽い元素ほど反応が速い
(ガス中はトリチウムが希薄)

燃料電池を組合わせた電解カスケード方式により、水素エネルギーの有効利用を図り、水素同位体が希釈された廃液水を取り出す。

事業概要:

各試験項目を中心に重水素減損分離係数を測定する。

A 水電解試験：電極材料や濃度依存性の検討

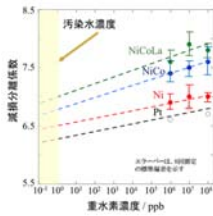
B 燃料電池試験：電池の種類や濃度依存性の検討

C カスケードシステム試験：1ユニットの実証や消費電力量の検討

試験結果

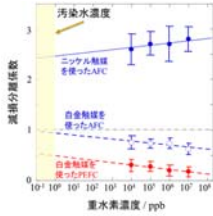
<A 水電解試験>

モデル水と量子計算の結果から、Ni電極を汚染水に適用すると減損分離係数が約6.5と推定され、Ni合金では、より大きな減損効果が得られた。



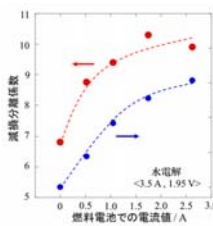
<B 燃料電池試験>

Ni触媒を使ったアルカリ型燃料電池では、汚染水に適用すると減損分離係数が約2.5と推定された。一方、Pt触媒を使った燃料電池では、生成水に水素同位体の濃縮効果が確認された。



<C カスケード試験>

水電解とアルカリ型燃料電池を組み合わせることで、減損分離係数は約10となった。また、水電解単独と比較しても、約30%程度低い消費電力量で同位体分離が行えることが確認できた。



得られた成果

各実証試験結果から得られた成果をもとに、量子計算によるトリチウムへの分離係数補正を行い、実際の汚染水に本希薄プロセスを適用した場合、下記の結果が得られた。

入力側のトリチウム水量	400 m ³
入力側のトリチウム濃度	4.20 x 10 ⁶ BqL ⁻¹
減損側の容量	320 m ³ (液体)
減損側のトリチウム濃度	3.98 x 10 ⁴ BqL ⁻¹
濃縮側の容量	80.0 m ³ (液体)
濃縮側のトリチウム濃度	1.97 x 10 ⁷ BqL ⁻¹
減損分離係数	105
二次廃棄物の種類等	—

*上記の数値は、アルカリ型水電解とアルカリ型燃料電池を2段組み合わせた場合の試算結果である。

実機(1日400m³処理)の性能とコストの推定値

分離係数	:105.6	実機建設コスト(総額)	: 795億円
分離比	:131.9	実機運転コスト(総額)	: 911億円
実機施設規模	:35,132m ²	(80万m ³ 処理の場合)	

今後の課題／留意点

実機に向けた課題として、本システムでは膨大に発生するアルカリ溶液の中和処理や耐腐食性材料を検討する必要がある。今回はモデル水として重水素を用いたため、今後は実際に希薄トリチウム汚染水を使い、各種燃料電池での減損分離係数の検証を行うことも、今後の課題である。

トリチウム分離技術検証試験事業
総括及び評価

2016年4月19日
廃炉・汚染水対策事業事務局

1. 採択事業者とトリチウム分離技術

カテゴリ	事業者名	実施期間	トリチウム分離技術
A	Kurion, Inc.	2014. 10. 21 -2016. 3. 31	水-水素同位体交換法 (CECE 法)
	Federal State Unitary Enterprise "Radioactive Waste Management Enterprise "RosRAO"	2014. 10. 14 -2016. 3. 31	水蒸留法と CECE 法との組み合わせ
	株式会社ササクラ	2015. 3. 31 -2016. 3. 31	触媒機能を有した低温真空蒸留法
B	創イノベーション株式会社	2015. 3. 30 -2016. 3. 31	二段階ガスハイドレート法
	株式会社東芝	2015. 3. 31 -2016. 3. 31	多段式晶析法
	株式会社ネクスタイド	2015. 3. 31 -2016. 3. 31	多連電解槽式電解法
	国立大学法人北海道大学	2015. 3. 31 -2016. 3. 31	燃料電池を用いた電解再結合法

2. 事業成果の総括

当事業は、現時点におけるトリチウムの分離技術に関する最新の知見を得るために実施したものであり、福島第一原子力発電所における多核種除去設備による処理後の水からトリチウムを分離処理するのに必要な設備（実プラント）の分離性能、建設コスト・ランニングコスト等の検証を目的として行われた。

(1) カテゴリ A

カテゴリ A は、任意の規模の設備を構築し、実プラントにおける分離性能やコスト等を評価することを目的とし、3 事業者において、CECE 法、水蒸留法及び両者の組み合わせの 3 通りの技術の実証試験が行われた。

それぞれの事業者から、実プラントの分離性能、コスト等の概算が示されたが、その精度や信頼度については精査が必要であることを含め、実プラントに向けては様々な課題があり、ただちに実用化できる段階にある技術は確認されなかった。

(2) カテゴリ B

カテゴリ Bは、実用開発初期段階の技術で、実験室レベルにおける試験を中心としたものであり、実プラントにおける分離性能やコスト等を評価することを目的とし、4事業者において、晶析法に基づく技術が2件、電解法に基づく技術が2件の計4件の技術の実証試験が行われた。

実機適用の可能性がないことが示された試験が2件あったほか、一定の分離性能を有する可能性のある技術が示された試験、科学的に新しい知見が得られた試験があったが、いずれにおいても、短期間で実用化に至る技術は無いことが確認された。

3. 各事業者に対する評価

<カテゴリ A>

【Kurion】

(実施状況)

- ・小規模試験や1 / 10スケール（エンジニアリング・スケール）の設備を構築し、得られた実験データから、実プラントにおける分離性能の検証やコスト見積もり等が行われた。

(評価)

- ・試験データはモル比等の条件の不安定性とデータのばらつきがあり、性能等を評価するためには、更なるデータ取得が必要である。
- ・プロセス二次廃棄物や濃縮側の取扱いの更なる検討も必要である。
- ・長期試験のデータにはばらつきが認められ、再現性に問題がある。本技術の活用に向けては、最適処理条件、安定条件等を調べる試験が必要である。
- ・試験プラントでは、実プラントの設計で想定しているレベルの性能が得られていない。
- ・実プラントの建設や解体に係るコスト見積もりは過小評価と考えられる。また、福島第一原発に実際に建設する際には、性能向上、安定性向上のために、更なるコスト増が見込まれる。

【RosRAO】

(実施状況)

- ・実規模レベルの設備を構築し、得られた実験データ等から、実プラントにおける分離性能の検証やコスト見積もり等が行われた。

(評価)

- ・まだ試験プラントを建設して性能試験を開始した段階であり、現時点ではデータの取得が十分ではない。更なるデータ取得を行い、分離性能等の根拠データを明確にする必要がある。
- ・濃縮側廃棄物の発生量も含め、マスバランスは精査する必要がある。

- ・実プラントに向けては、性能試験に加え、長期運転やプロセスの安定性の試験も行う必要がある。
- ・コスト見積もりは過小評価と考えられる。
- ・日本の建築基準等への適合性については精査が必要である。

【ササクラ】

(実施状況)

- ・エンジニアリングスケールの設備を構築し、得られた実験データから、実プラントにおける分離性能の検証やコスト見積もり等が行われた。

(評価)

- ・蒸発濃縮による前処理の試験データがしっかりと示された。
- ・小規模な試験の範囲では、充填材の種類に応じて蒸留塔の分離係数が異なることが示されたが、データの安定性の検証や濃度等のパラメータスタディをさらに深める必要がある。
- ・試験規模が小さく、実プラントまでのスケールアップを行うためには、もう一段規模の大きい試験プラントでの評価が必要である。
- ・実プラントに向けては、蒸留塔の保守・補修性、安全性、前処理二次廃棄物の発生量抑制、濃縮側の取扱いなどについて、さらなる検討が必要。
- ・コスト等の見積もりは、前述のとおり小さな試験規模のデータに基づいているため、より大きい規模の試験により精査する必要がある。

<カテゴリ B>

【創イノベーション】

(実施状況)

- ・実験室レベルの試験で得られたデータから、実プラントにおける分離性能等の検証が行われた。

(評価)

- ・一段目の軽水と重水・トリチウム水の分離については処理対象水と同等濃度のトリチウム水の濃度を下げるとの最初の段階の処理の方法としての可能性が示された。
- ・二段目の重水とトリチウム水の分離では、ガスハイドレート中のトリチウム濃度の増大は示されておらず、原理実証が不足している。
- ・実プラントに向けては、ガスハイドレート中のトリチウムを測定することによる分離性能の正確な評価、パイロットスケールでの試験、プロセスの安定化、代替フロンを用いるゲストガスの管理や処理といった様々な検討が必要であり、検証には長期間を要する。
- ・コスト等の見積もりは実験室規模の試験のデータに基づいているため、精度には課題

がある。

【東芝】

(実施状況)

- ・実験室レベルの試験で得られたデータから、実プラントにおける分離性能等の検証が行われた。

(評価)

- ・水とトリチウム水の凝固点差を利用して同位体分離を行う晶析法について、既製の装置を利用したトリチウム分離の試験が行われたが、分離性能が低く、水蒸留法や CECE 法などの既存の方法に対して有利な方法であるとは言えない。
- ・これ以上、この方法を追及しても福島第一原子力発電所のトリチウム水処理に適用する可能性のある技術の候補にはなり得ない。

【ネクスタイド】

(実施状況)

- ・実験室レベルの試験で得られたデータから、実プラントにおける分離性能等の検証が行われた。

(評価)

- ・データの不確実性が大きく、トリチウムが選択的に濃縮又は減損されたかどうかは明確にできていない。
- ・これ以上、この方法を追及しても福島第一原子力発電所のトリチウム水処理に適用する可能性のある技術の候補にはなり得ない。

【北海道大学】

(実施状況)

- ・実験室レベルの試験で得られたデータから、実プラントにおける分離性能等の検証が行われた。

(評価)

- ・燃料電池セルでのトリチウムの濃縮について有用な実験データが得られた。
- ・他方、処理対象水中のトリチウム濃度より高い濃度の重水を用いた実験であり、福島第一原子力発電所のトリチウム水のような低濃度領域での同位体分離への適用性は確認されていない。
- ・また、濃縮側の物量が多いこと、高アルカリ性廃液を生成すること、水素安全性や耐放射線性に係る課題があることなど、実用に至るためには検討すべき事項が多く、福島第一原子力発電所のトリチウム水処理への適用は困難である。

トリチウム分離技術検証試験事業
評価委員

氏名	所属
井上 正	一般財団法人電力中央研究所
山西 敏彦	日本原子力研究開発機構
山本 徳洋	日本原子力研究開発機構
David Babineau	米国 DOE (SRNL)
David Wickenden	英国 Magnox Ltd.
Karine Liger	仏国 CEA

(50 音順、所属は委員会開催時のもの)