

トリチウム水の処分に係る各選択肢の検討

汚染水処理対策委員会事務局

平成27年6月5日

- 文献調査、現地調査等に基づき、各選択肢について簡易なコンセプトを設定
- 処理フロー、施設規模、建設工期・処理期間、処理能力、コスト、所要期間等を今後詳細に評価

(注)

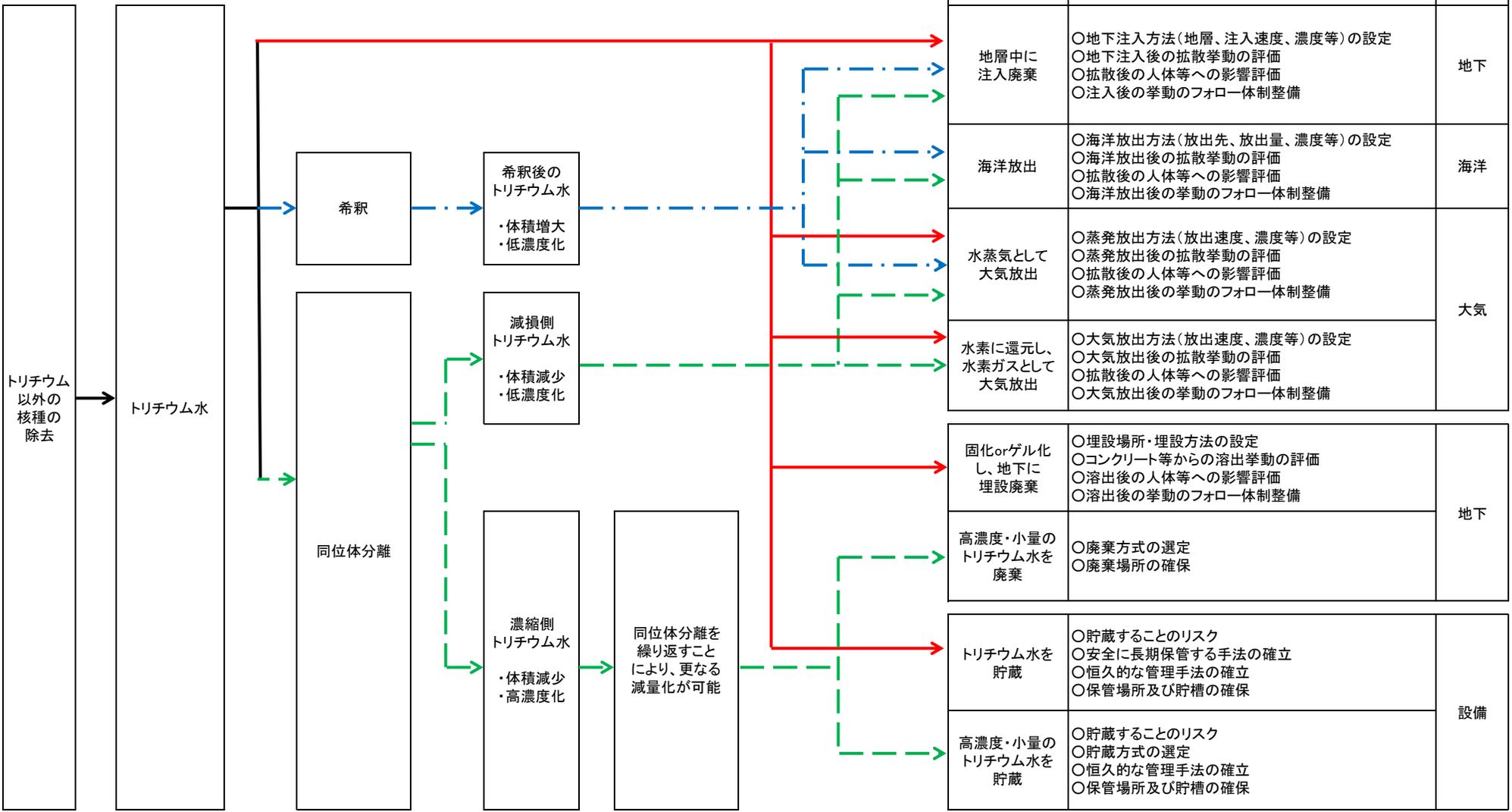
トリチウム水の処分は、世界でも前例の多くない取組であるため、評価を行うための情報は限定されており、各評価項目は必要に応じて条件を仮定した上で算出したものであり、今後の検討により適宜見直しを行うものである。

【参考】トリチウム水の取扱いに関する選択肢と主な課題等(再掲)

評価項目: 環境・水産物・人体への影響・リスク、処理期間、対策実施に係るコスト、
 技術的可能性(技術成熟度、技術適応性、国内外実績)、
 運用管理の確実性(安全を確認する手段の有無、規制適合性、風評被害の発生の可能性を含む) 等

<前処理>

<選択肢>



【参考】選択肢の略称と成立性(再掲)

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	×	分離後に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	×	分離後に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)

➤ 概要

- ① 圧縮機を利用して、地中へのパイプラインを通じ、深い地層中に、トリチウム水を、前処理無しで、又は希釈、同位体分離し、安全性を確保した上で注入する。
- ② どの程度の深さに注入するか、どの程度の濃度のトリチウム水を注入するかは、規制要求次第となるが、海洋に到達するとしても、トリチウムの半減期と比較して十分な時間的余裕を見込み、拡散の効果と併せ、十分な濃度低下が起きるよう深度・濃度を設定する。

➤ 課題

- ① 注入濃度によっては、地中でのトリチウムの挙動（何年後に海洋に到達するか、どの程度拡散するか、周辺の井戸等に流入しないか等）把握が必要ではないか。
- ② 適切な貯留層（粒粗の砂岩層や火山岩層。浸透性が高く、十分な隙間を要する。）とその上部に遮へい層（細粒で粘土質の泥岩層など。十分な遮水性を要する。）が存在する地質構造を要する。これらを確認するため、地質調査を要する。
- ③ 場合により、パイプライン直上の地権者等との合意が必要。
- ④ 利害関係者の十分な理解が必要。

➤ 規制要件

- ① トリチウム水の地層注入に関する法規制は存在しない。

※特定原子力施設としての規制対象に含まれるかも課題。

○安全性の評価に向けて、

- ・ 注入設備の構成の他、注入先の地層の調査方法、それを踏まえた注入位置、注入量・濃度等を明確化した上で、安全性を評価することが必要ではないか
- ・ 地震等の外力に対し、安全性が保持されることを示すことが必要ではないか

➤ 概要

- ① 希釈又は同位体分離し、安全性を確保した上で海洋に放出する。
- ② 希釈の場合は、どの程度の希釈とするかにより希釈する水の確保の方法が変わる可能性がある。

➤ 課題

- ① 放出濃度によっては、海洋でのトリチウムの挙動把握が必要ではないか。
- ② 希釈のために必要な水（海水を含む。）の確保方法の検討が必要ではないか。
- ③ 利害関係者の十分な理解が必要。

➤ 規制要件

- ① 敷地境界における実効線量の目標値（平成27年度末 1 mSv / 年未満）
- ② トリチウムの排水口又は排水監視設備において排水中の濃度限度（化学形態：水）
: 60 Bq / cm³

○安全性の評価に向けて、

- ・ 放出設備の構成の他、放出位置、放出量・濃度等を明確化した上で、規制基準を満足することが必要

➤ 概要

- ① トリチウム水を、前処理無しで、又は希釈、同位体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。
- ② どの程度のペースでトリチウム水を蒸発させるか、どの程度の高さの高所排気筒から放出するかは規制要求による。

➤ 課題

- ① 放出濃度によっては、大気中でのトリチウムの挙動を評価するため、大気中でのトリチウム拡散シミュレーションの実施が必要ではないか。
- ② 利害関係者の十分な理解が必要。

➤ 規制要件

- ① 敷地境界における実効線量の目標値（平成27年度末 1 mSv / 年未満）
- ② トリチウムの排気口又は排気監視設備において排気中の濃度限度（化学形態：水）： $0.005 \text{ Bq} / \text{cm}^3$

○安全性の評価に向けて、

- 放出設備の構成の他、放出位置、放出高さ、放出量・濃度等を明確化した上で、規制基準を満足することが必要
- 放出する濃度が告示濃度限度を上回る場合、評価地点を含めた影響の評価方法を明確化した上で、安全性を評価することが必要ではないか

➤ 概要

- ① 前処理無しで、又は同位体分離処理し、水素に還元し、安全性を確保した上で大気に放出する。

➤ 課題

- ① 放出濃度によっては、大気中でのトリチウムの挙動把握が必要ではないか。
- ② 水素ガスの形で放出するため、可燃性ガスとしての取扱いが課題ではないか。

➤ 規制要件

- ① 敷地境界における実効線量の目標値（平成27年度末 1 mSv / 年未満）
- ② トリチウムの排気口又は排気監視設備において排気中の濃度限度（化学形態：元素状水素）： $70 \text{ Bq} / \text{cm}^3$

○安全性の評価に向けて、

- 放出設備の構成の他、放出位置、放出高さ、放出量・濃度等を明確化した上で、規制基準を満足することが必要
- 放出する濃度が告示濃度限度を上回る場合、評価地点を含めた影響の評価方法を明確化した上で、安全性を評価することが必要ではないか

➤ 概要

- ① 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。

➤ 課題

- ① 広大な土地を要する。（P. 17参照）
- ② 地震や断層の影響によりクラックが発生するなど、閉じ込め機能が低下し、漏出する可能性への備えが必要ではないか。
- ③ 地中に移行した場合のトリチウムの挙動把握及び継続監視が必要ではないか。
- ④ 利害関係者の十分な理解が必要。

➤ 規制要件

- ① 固体廃棄物の廃棄事業の認可
- ② 敷地境界における実効線量の目標値（平成27年度末 1mSv/年未満）
- ③ ピットにセメントを流し込む方法を採用する場合、おおむね500m³を超えないこと（第二種埋設規則）

○安全性の評価に向けて、

- 埋設方法、埋設形態、埋設位置、埋設深さ、埋設量・濃度等を明確化した上で、規制基準を満足することが必要
- 埋設する濃度が告示濃度限度を上回る場合、評価地点を含めた影響の評価方法を明確化した上で、安全性を評価することが必要ではないか
- 地震等の外力に対し、安全性が保持されることを示すことが必要ではないか

希釈処理

- 前処理として、希釈処理を行う場合は、希釈工程を導入することでコストや工期は、導入しない場合と比べて大きくなり、処理期間も長期化することが予想される。
- コスト・期間の増加量は、希釈率による。

トリチウム同位体分離

- 現在実施中の検証事業も考慮する必要がある。
- 選択する分離方式や施設規模により、分離度合い、コストや処理期間は大幅に異なることが予想される。
- 分離された濃いトリチウム（濃縮側）は、適切に保管し続けるなど、別途検討が必要。

各選択肢の整理表

各選択肢ごとの整理

※下表は、議論のたたき台として整理したものであり、今後のタスクフォースの議論、トリチウム分離技術検証事業の成果等を踏まえ、評価項目や内容の充実を行っていくものである。

	処分方法	前処理	処理完了までの期間		経済性		実績	規制適合性	備考
			建設期間	処理期間	イニシャルコスト	ランニングコスト			
A1	1. 地層注入	A.なし	合致する事例がなく不明 ※CCSの事例が参考となる	規制要求、地質条件等による	合致する事例がなく不明 ※CCSの事例が参考となる	合致する事例がなく不明 ※CCSの事例が参考となる	合致する事例はない ※CCSの事例が参考となる	対応する規制が存在しない	処分地が必要
B1		B.希釈	希釈設備建設に要する期間増分は、大きくないものと想定	希釈により処分量が増大するため、処理期間は希釈率に応じ増大	希釈設備建設コストは、大きくないものと想定	希釈により処分量が増大するため、処理コストは希釈率に応じ増大	希釈して地層注入した事例は把握できていない	同上	処分地が必要
C1		C.分離	分離設備建設に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離処理に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離設備建設に要するコスト増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離に要する処理コストの増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	小規模な分離実績はあるが、福島第一原発で保有しているような低濃度かつ大量の分離実績なし	同上	処分地が必要 濃縮側の取り扱いの検討が必要
B2	2. 海洋放出	B.希釈	放出設備および希釈設備とも、建設に要する期間は大きくないものと想定	希釈率、設備規模による	放出設備および希釈設備とも、建設に要するコストは大きくないものと想定	放出のコストは大きくないものと想定されるが、希釈により処分量が増大するため、処理コストは希釈率に応じ増大	国内外の原子力施設において実績あり	水中の濃度限度：60 Bq/cm ³	
C2		C.分離	分離設備建設に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離処理に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離設備建設に要するコスト増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離に要する処理コストの増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	小規模な分離実績はあるが、福島第一原発で保有しているような低濃度かつ大量の分離実績なし	同上	濃縮側の取り扱いの検討が必要
A3	3. 水蒸気放出	A.なし	TMI-2の事例を考慮すると、蒸発設備建設に要する期間は大きくないものと想定	規制要求、設備規模等による	TMI-2の事例を考慮すると蒸発設備建設に要するコストは大きくないものと想定	TMI-2の事例を考慮すると、処理コストが大きくなる可能性がある	TMI-2における実績あり	空気中の濃度限度：0.005 Bq/cm ³	
B3		B.希釈	希釈設備建設に要する期間増分は、大きくないものと想定	希釈により処分量が増大するため、処理期間は希釈率に応じ増大	希釈設備建設に要するコスト増分は、大きくないものと想定	希釈により処分量が増大するため、処理コストは希釈率に応じ増大	希釈して水蒸気放出した事例は把握できていない	同上	
C3		C.分離	分離設備建設に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離処理に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離設備建設に要するコスト増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離に要する処理コストの増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	小規模な分離実績はあるが、福島第一原発で保有しているような低濃度かつ大量の分離実績なし	同上	濃縮側の取り扱いの検討が必要
A4	4. 水素放出	A.なし	合致する事例がなく不明	水素還元に係る事例情報は無いが、A3と同程度と想定	合致する事例がなく不明	水素還元に係る事例情報は無いが、A3よりも大きくなるものと想定	水素還元の実績はあるものと考えられるが、トリチウム水を水素還元し放出した事例は把握できていない	空気中の濃度限度：70 Bq/cm ³	可燃性ガスの取扱いについて、別途検討が必要
C4		C.分離	分離設備建設に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離処理に要する期間増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離設備建設に要するコスト増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	分離に要する処理コストの増分は、分離技術検証の結果を踏まえ、検討	小規模な分離実績はあるが、福島第一原発で保有しているような低濃度かつ大量の分離実績なし	同上	可燃性ガスの取扱いについて、別途検討が必要 濃縮側の取り扱いの検討が必要
A5	5. 地下埋設	A.なし	合致する事例がなく不明 ※低レベル放射性廃棄物の埋設実績が参考となる	規制要求等による	合致する事例がなく不明 ※低レベル放射性廃棄物の埋設実績が参考となる	設備の運転等を要しないため、大きくないものと想定	トリチウム水に対する実績はないが、国内外において低レベル放射性廃棄物の埋設実績あり	埋設に関する事業認可等	処分地が必要 処分後も管理が必要

参考事例等

参考事例

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)

→火力発電所や大規模工場などで排出されるCO₂ (Carbon dioxide)を大気中に放散する前に捕らえて(Capture)、地中に貯留する(Storage)技術。

第9回タスクフォースにおいて紹介。

【処理能力】

諸外国におけるCCSの事例では、年間数万トン～100万トンのCO₂を注入・貯留している実績がある(右下表)。

※水を地層中に圧入する例は世界各国で存在し、トリチウム水の場合であっても成立の可能性があるかと想定される。

【環境影響評価】

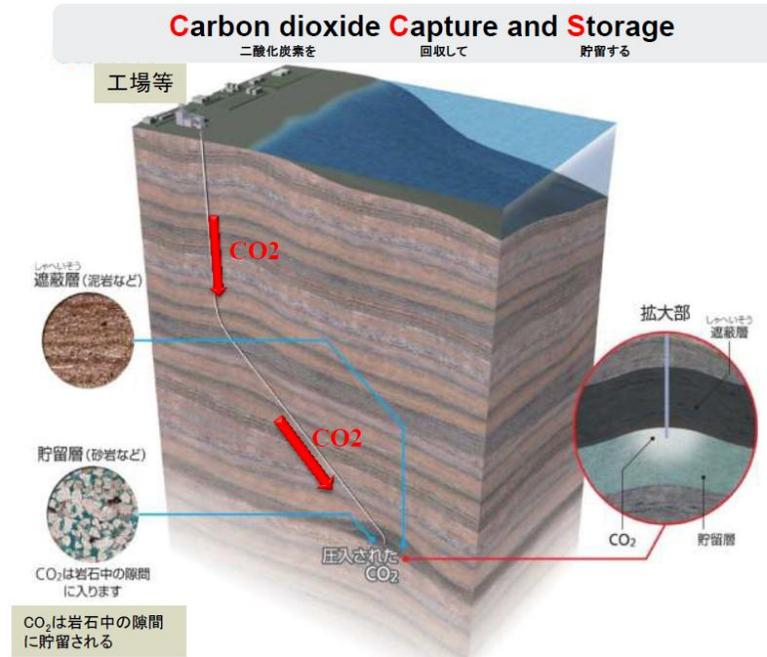
2005年に発表されたIPCCの特別報告書によれば、貯留場所を適切に選定し、適正な管理を行うことにより、貯留したCO₂のほとんどを1000年にわたって貯留層中に閉じ込められる可能性が高いとされている。

【必要条件】

適切な貯留層とその上部に遮へい層が存在する地質構造が必要。

遮蔽層: 水が浸透しにくい性質(細粒の粘土層など)、十分な遮へい能力(面積・厚さ含む)を有すること。

貯留槽: 浸透性が高く、十分な隙間が存在すること。



CCSの実績例

	プロジェクト名	国	CO ₂ 量/年	運転開始	排出源	回収	輸送距離	輸送	貯留
						タイプ		タイプ	タイプ
1	Val Verde Natural Gas Plants ¹⁾	米国	130 万トン	1972	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	132 km	陸→陸 パイプライン	EOR
2	Enid Fertilizer CO ₂ -EOR Project ¹⁾	米国	68 万トン	1982	肥料生産	燃焼前	225 km	陸→陸 パイプライン	EOR
3	Shute Creek Gas Processing Facility ¹⁾	米国	700 万トン	1986	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	190 km	陸→陸 パイプライン	EOR
4	Sleipner CO ₂ Injection	ノルウェー	100 万トン	1996	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	0 km	直接圧入	海底下 帯水層
5	Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale Project	カナダ	300 万トン	2000	合成天然ガス	燃焼前	315 km	陸→陸 パイプライン	EOR
6	In Salah CO ₂ Storage ²⁾	アルジェリア	100 万トン	2004	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	14 km	陸→陸 パイプライン	陸上 帯水層
7	Snohvit CO ₂ Injection	ノルウェー	70 万トン	2008	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	152 km	陸→海底 パイプライン	海底下 帯水層
8	Century Plant ¹⁾	米国	840 万トン	2010	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	256 km	陸→陸 パイプライン	EOR
9	Air Products Steam Methane Reformer EOR Project	米国	100 万トン	2013	水素製造	燃焼前 (合成ガス)	101-150 km	陸→陸 パイプライン	EOR
10	Petrobras Lula Oil Field CCS Project	ブラジル	70 万トン	2013	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	0 km	直接圧入	EOR
11	Coffeyville Gasification Plant	米国	100 万トン	2013	肥料製造	工業分離	112 km	陸→陸 パイプライン	EOR
12	Lost Cabin Gas Plant	米国	100 万トン	2013	天然ガス精製	燃焼前 (ガス処理)	不明	陸→陸 パイプライン	EOR

(参考②) 海洋放出に関する参考事例等

➤ 参考事例

Sellafield再処理工場(英)、La Hauge再処理工場(仏)

→両施設ともパイプラインを通じて海洋放出。

【処理能力】

・Sellafield再処理工場

年間 $1.1 \times 10^{15} \sim 2.1 \times 10^{15}$ Bq放出(規制値: 2×10^{16} Bq/y)

・La Hauge再処理工場

2013年放出実績:約40,000m³、 1.34×10^{16} Bq【濃度: 3×10^8 Bq/L】

(規制値: 1.85×10^{16} Bq/y)

【環境影響評価】

両施設共に、放出された放射性物質の分析、海洋モニタリング(サンプリング含む。)、公衆への情報提供(Annual Reportなど)を実施している。

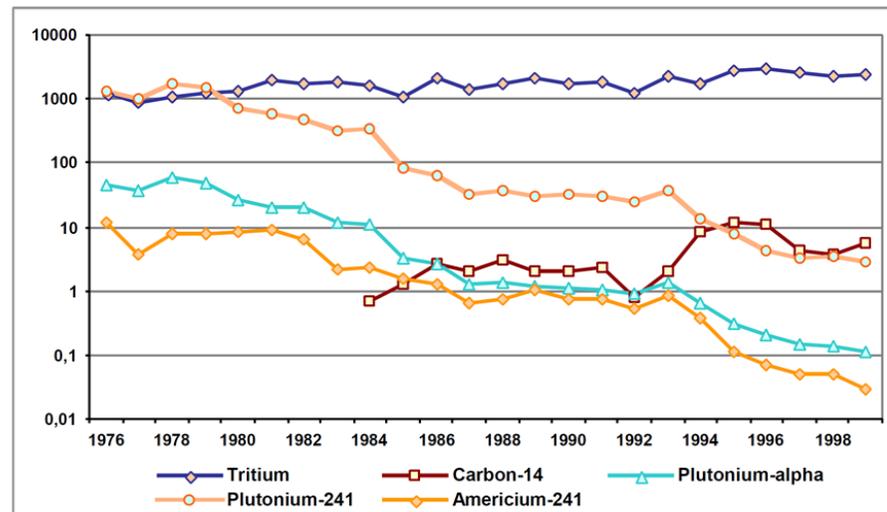
ASN(フランス原子力安全当局)の専門委員会による試算では、La Hauge再処理工場運営による地元住民への放射線影響評価の結果は次のとおり(2013年の評価)。

地元漁民:0.005 mSv/y 地元農民:0.011 mSv/y

※フランスの平均自然放射線量:2.4 mSv/y

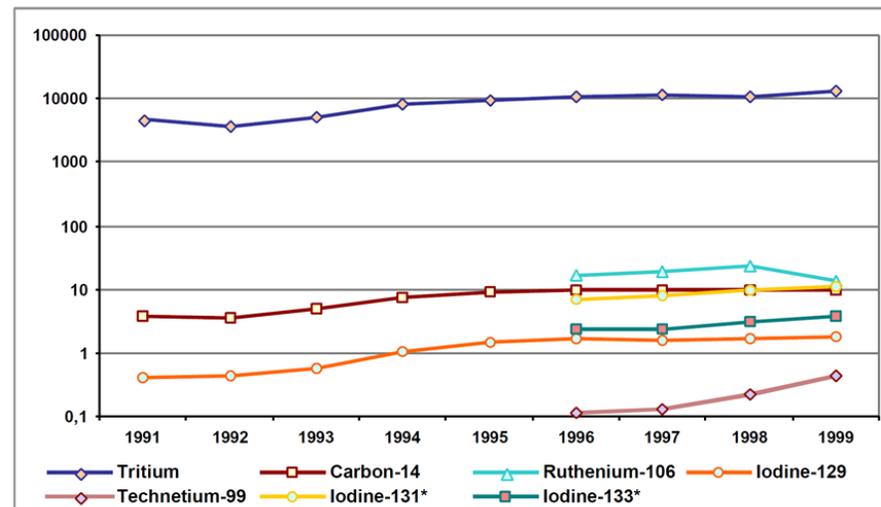
【出典】Schneider, M., Coeytaux, X., et al., POSSIBLE TOXIC EFFECTS FROM THE NUCLEAR REPROCESSING PLANTS AT SELLAFIELD(UK) AND CAP DE LA HAGUE(FRANCE), European Parliament Directorate General for Research Directorate A, 2001.

Sellafield再処理工場での放射性物質の年間海洋放出量(TBq)



Source: BNFL Annual Reports on Discharges and Monitoring of the Environment

La Hauge再処理工場での放射性物質の年間海洋放出量(TBq)



Source: COGEMA [1998], Dossier d'Enquête Publique

➤ 参考事例等

スリーマイル島原子力発電所(事故後)

→「処理水」処分システムは、下記の5つの装置で構成される。

- ① 蒸気再圧縮型蒸留装置(主蒸発装置) : あらかじめ他の汚染物核種を除去した「処理水」を閉鎖循環工程で蒸留し、次段の気化放出工程用に精製留分を回収。
- ② 補助蒸発装置 : ①の主蒸発装置の底部残留分をさらに濃縮。
- ③ 瞬間気化装置 : ①の主蒸発装置で回収された精製留分を加熱・気化し、制御・監視下で蒸気を大気中へ放出。
- ④ 廃棄物乾燥装置 : ②の補助蒸発装置からの濃縮廃棄物の水分をさらに蒸発させ、乾燥固化体にする。
- ⑤ 梱包システム : 乾燥固化体廃棄物を、低レベル放射性廃棄物処分商業施設での埋設処分に発送可能な状態にコンテナ封入。

【処理能力】

230万ガロン(8,706m³)

処理開始時におけるトリチウム濃度 : 2.8×10^6 Bq/L

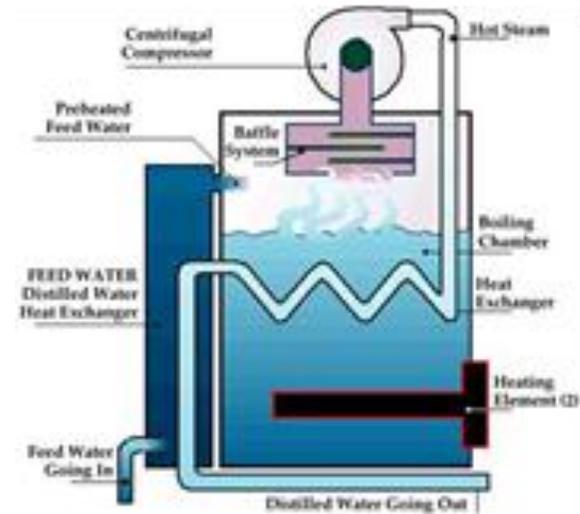
<経緯>

1979年 3月28日	事故発生
1990年12月	蒸発装置稼働開始
1993年 8月	計画より6か月以上遅延して全量放出完了

【二次廃棄物】

蒸発装置底部に濃縮される溶解性及び粒子状の汚染物質を乾燥固化した低レベル放射性物質(固体)が発生

蒸気圧縮型蒸留装置構造図



蒸気圧縮型蒸留装置(外観)



(参考④) 水素放出に関する参考事例等

➤ 参考事例

Darlington原子力発電所(カナダ)のTritium Removal Facility(TRF)

→20基のCANDU炉を対象に、重水中のトリチウムを除去・回収

- 同位体交換で重水中のトリチウムをD₂ガス中に移行させ、水素蒸留で濃縮。回収した99%-T₂ガスは金属Tiに吸収させ貯蔵。
- トリチウムのリーク対策として、グローブボックスや空気浄化系等の付帯設備を設置

採用技術・・・同位体交換(VPCE)＋水素蒸留

【施設規模】

TRF建屋:W35m×D24m×H12m(蒸留部のみH38m)

【建設工期】

- 1981.8:設計契約
- 1983夏:建設開始
- 1987.2:竣工
- 1988.10:操業開始

【処理能力】

処理速度:0～10L/分、約8.6m³/日(360kg/時)

年間処理量:約200,000ガロン(約760m³)(稼働率60～80%)

分離能力:Feed:0.4E+9～1.3E+9 Bq/ml

concentrated:99%-T₂ gas

depleted:1E+7～3.5E+7 Bq/ml

【二次廃棄物】

乾燥剤、フィルタ、回収したT₂ガスを吸蔵させた金属チタン

【コスト】

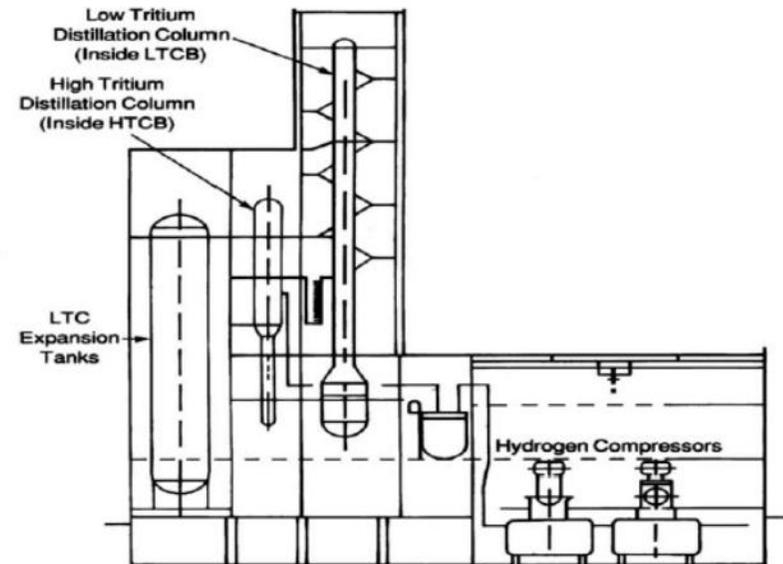
イニシャルコスト:約7億ドル程度

ランニングコスト:年数百万ドル程度(電気代は含まれない)

Tritium Removal Facility (TRF)



トリチウム分離棟 (Darlingtonサイト)



【出典】N. Sion, Discriminating Tritium Monitor For The tritium Removal Facility At Darlington Nuclear Generation Station. N. Sion, MONITORING SPECIES OF TRITIUM.

➤ 先行事例等

第10回タスクフォースにおいて検討を実施

→福島第一原発で発生しているトリチウム水の総量に鑑み、トリチウム水とセメント系固型化材を混練し、コンクリートピットの区画内に直接流し込む方法を検討。

【施設規模】

- ・ピット1基の大きさ: 40m × 36m × 6.9m
- ・必要ピット基数: 188基(4行 × 47列)
- ・ピット施設全体の大きさ: 約150m × 約1900m × 約7m
- ・ピット外容積: $1.9 \times 10^6 \text{m}^3$

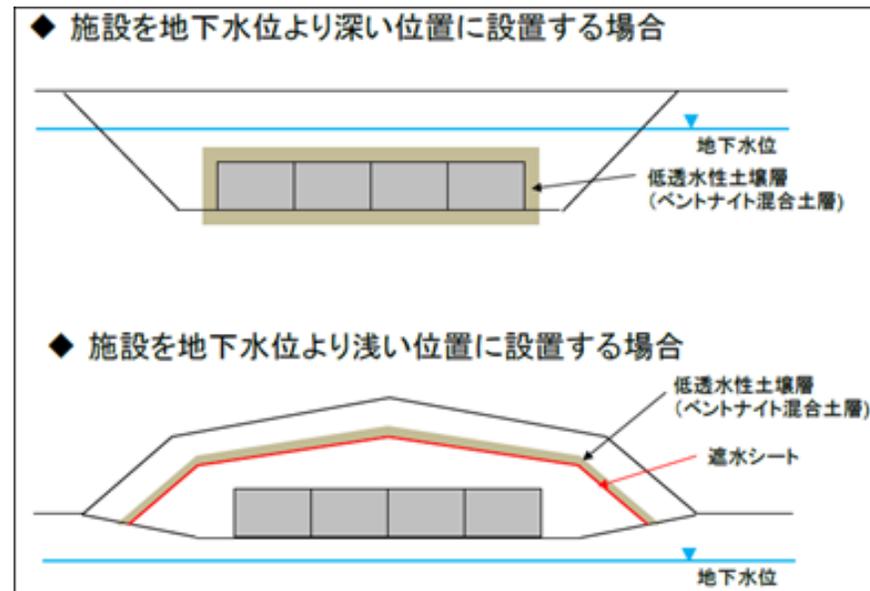
【処理能力】

トリチウム水を固化することで体積が約171%に増加すると試算

【その他】

トリチウム水の容量を $8.2 \times 10^5 \text{m}^3$ と仮定した場合、少なくとも28.2万 m^2 以上の土地(福島第一原発の敷地面積の約8%)が必要。

処分概念



【出典】第9回トリチウム水タスクフォース 資料1