

水処理二次廃棄物の処理にむけた検討状況

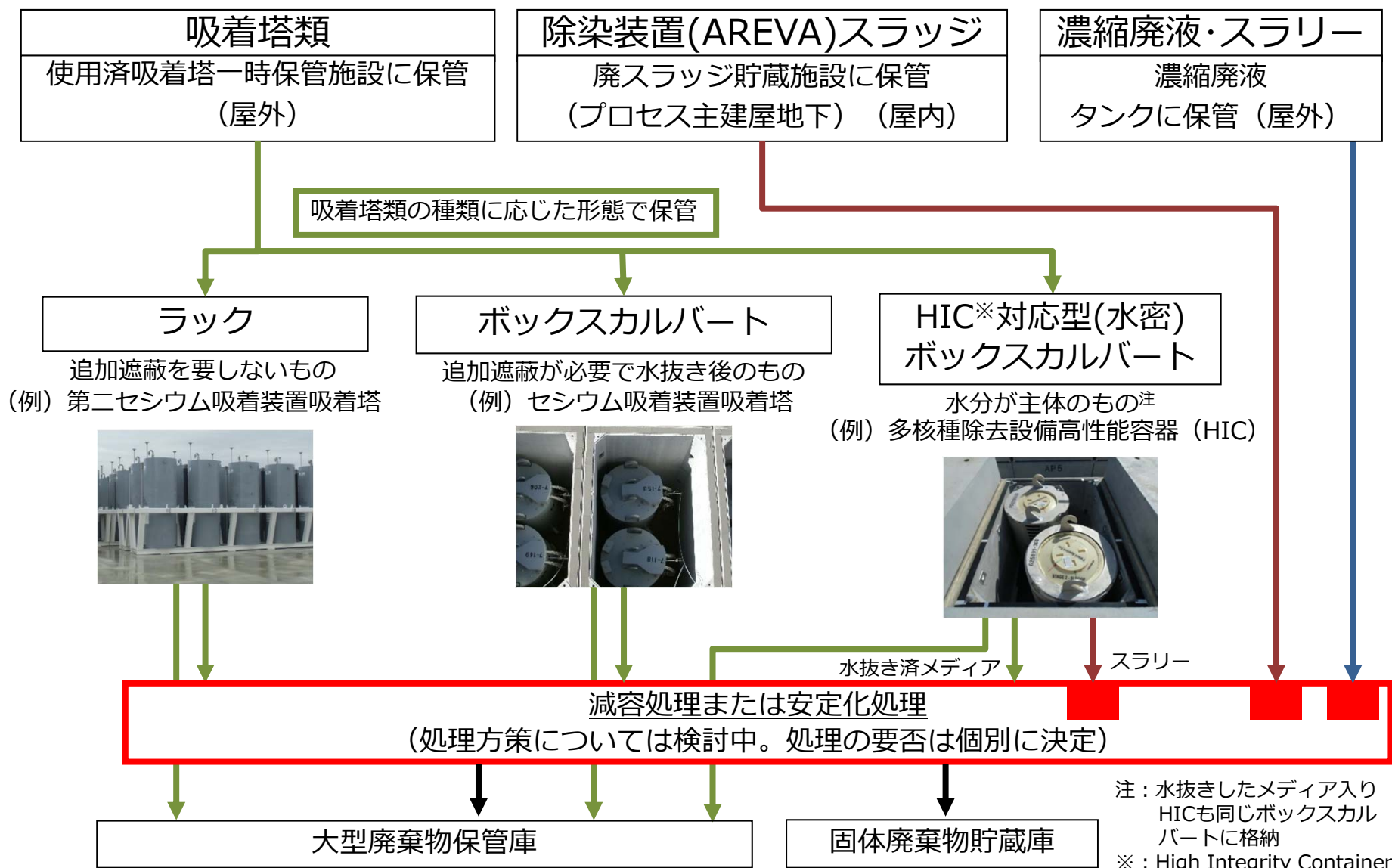
2017年2月10日



東京電力ホールディングス株式会社

1. 水処理二次廃棄物の種類と発生状況
 2. 水処理二次廃棄物の保管・処理
 - 2-1.水処理二次廃棄物に係るリスク認識
 - 2-2.現行の保管・管理におけるリスク低減
 - 2-3.安定化処理・固化技術の例と技術選定上の視点
 - 2-4.処理に向けた検討方針
 3. 除染装置(AREVA)スラッジの処理に関する検討状況
 - 3-1.除染装置(AREVA)スラッジの処理技術抽出の概要
 - 3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術
 - 3-3.処理技術以外の課題への取組み
 4. ALPSスラリーの処理に関する進捗状況
- 参考資料

1.水処理二次廃棄物の種類と発生状況（水処理二次廃棄物保管フロー） **TEPCO**



注：水抜きしたメディア入り HICも同じボックスカルバートに格納
※：High Integrity Container (高性能容器)

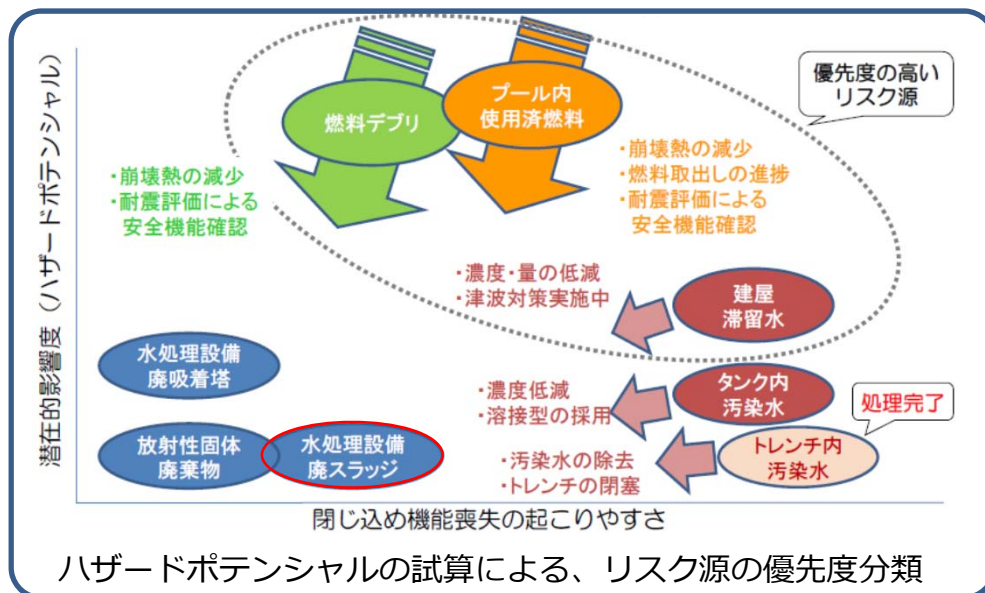
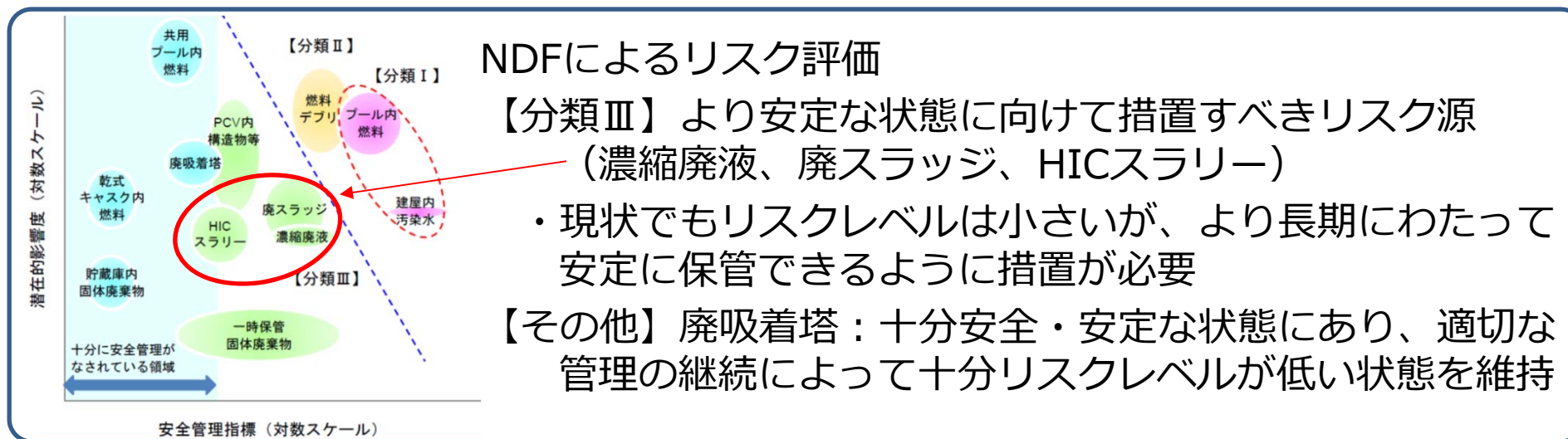
1.水処理二次廃棄物の種類と発生状況



発生元	形態(貯蔵形態)、数*	内容物の主要成分	備考、代表核種のインベントリー※	耐震性※※	標高※※
除染装置 (AREVA)	スラッジ(建屋内貯槽) 597m ³	硫酸バリウム+ フェロシアン化物	⁹⁰ Sr : 2E17 (実績値 : ~1E16Bq)	B(S)	10m
セシウム 吸着装置 (KURION)	ろ過材(吸着塔)	珪砂	¹³⁷ Cs : 6E17 (~2014年実績 : ~2E17Bq)	B(S)	>30m
	吸着材(吸着塔) 計758基	ゼオライト 珪チタン酸塩			
第二セシウム 吸着装置 (SARRY)	ろ過材(吸着塔)	砂	¹³⁷ Cs : 6E17 (~2014年実績 : ~3E17Bq)	B(S)	>30m
	吸着材(吸着塔) 計180基	ゼオライト 珪チタン酸塩			
多核種除去設備 (既設・増設ALPS)	スラリー (高性能容器)	鉄共沈沈殿物 炭酸塩沈殿物	⁹⁰ Sr : ~6E16Bq	B(S)	>30m
	吸着材 (高性能容器) 計2251基	ゼオライト (珪)チタン酸塩 フェロシアン化物 活性炭 (キレート)樹脂 その他			
高性能多核種 除去設備及びRO 濃縮水処理設備	吸着材(吸着塔) 計94基	既設・増設ALPSの 吸着材類似品	⁹⁰ Sr : ~2E17Bq	B(S)	>30m
サブドレン 浄化設備等	(上記の範疇に含まれる) 計177基		各種モバイル系設備などを含む 未評価	B(S)	>30m
蒸発濃縮装置	廃液(溶接タンク) 9233m ³ (スラッジ込)	濃縮塩水	水処理設備による処理を検討中	B	>30m
	スラリー(横置タンク)	炭酸カルシウム	⁹⁰ Sr : ~1E15Bq	B(S)	>30m

* : 2016年末までの発生数・量 ※ : 廃棄物の放射能濃度計画値 (上限) に2016年末までの発生量に乗じた保守的な評価値 ※※ : 保管施設

2-1.水処理二次廃棄物に係るリスク認識



原子力規制委員会

『中期的リスクの低減目標マップ』

- 沈殿処理生成物貯蔵容器等
二次廃棄物の安定的な管理への移行（固化等）
- 除染装置スラッジの安定化・固化処理
- 大型保管庫の運用開始

● 液体状の廃棄物の保管を高リスクと認識。インベントリは廃吸着塔が大。

課題

- 水処理によって発生した二次廃棄物は、水分を含んだ状態で一時保管されているものがあり、容器の腐食や水素の発生等による放射性物質の漏えいリスクが残っているものがある。
- 処分までの期間、保管中の廃棄物の安全が維持された状態で管理する必要がある。

対応方針

- 環境に有害な影響を与えないよう、廃棄物中の放射性核種を管理された保管場所に閉じ込めた状態を継続する。具体的には、廃棄物中の放射性核種が容器から飛散・漏えいしにくい状態、あるいは飛散・漏えいしたとしても堰や保管施設外へ汚染が拡大しない状態を維持する。
- 将来を見越してリスク評価を行い、リスクが高い状態が長く継続すると見込まれるものに対しては、安定化処理など、適切なリスク軽減策を検討・適用してゆくこととし、必要な技術開発を進める。

● 吸着塔からの内容物漏えい防止

- 放射性核種は、吸着材と物理／化学的に結合させて保持。崩壊熱等により、脱離する温度条件にならないことを評価
- 吸着材として固体状物質を採用し、金属製容器（一部はHIC）で保管
- 淡水洗浄で容器の腐食環境を緩和してから保管

● 崩壊熱の除去、可燃性ガスの滞留防止

- 崩壊熱は大気をヒートシンクとして静的に冷却
- 吸着塔内の最高点にベントを設け、保管中は開とし、放射線分解で生成する水素を自然排気

● 除染装置(AREVA)スラッジ

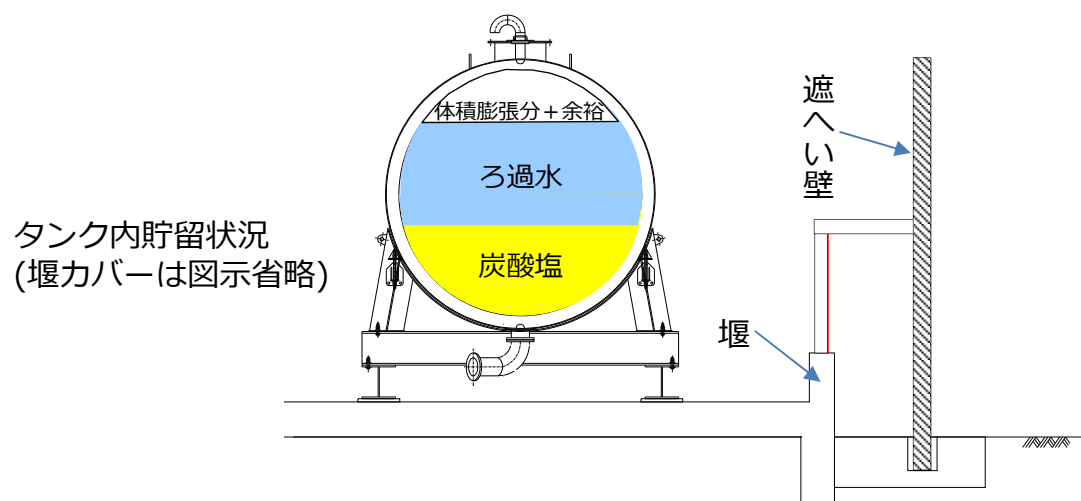
- プロセス主建屋内の、放射性廃棄物用既設貯槽（鉄筋コンクリート造、厚さ0.9～1m）に保管
- 崩壊熱集中化防止のため、底部から圧縮空気でスラッジを攪拌
- 崩壊熱除去用の熱交換器を貯槽内に設置
- 貯槽内上部空間の水素滞留防止のため、排気設備を設け、常時運転
 - 電源喪失に備えた仮設発電機を設置済
- 検討用津波に対する防護策（引波による流出リスク対策）を検討中

● ALPSスラリー

- 鉄共沈沈殿生成物（スラリー）、炭酸塩沈殿生成物（スラリー）を高性能容器（HIC、水素バント機能付き）に収納して保管
 - 各種イオン吸着材（メディア）も同様に保管
- 酸・アルカリに対する安定性の高いポリエチレン材を使用
 - 耐薬品性、耐熱性、耐放射線性（ γ 線、 β 線）、耐紫外線性を評価し問題なく運用できることを確認。高線量スラリー入りHICの定期モニタリングを実施
 - ステンレス鋼の補強体を取付け、落下等に対する健全性を確保
- 保管中のボックスカルバートの水密化のほか、取扱い事故を想定した汚染拡大防止策（作業時の堰閉止）、汚染に備えた回収機器配備・定期訓練を実施
- 2015年、炭酸塩スラリーの膨張によるHIC上部からの溢れ出しを受けて、スラリーの充填量見直しを実施。上澄み水の抜取りによる内部液位低下を実施中

● 濃縮廃液スラリー

- 蒸発濃縮装置の濃縮廃液（当初、H2エリア横置きタンクに保管）の炭酸塩スラリー成分を収集し、横置タンク（ベント管付き）に保管
- ALPSスラリーのHICからの溢れ事象をうけ、スラッジの膨張を考慮して、タンク内の貯留量を制限
- 漏えい拡大防止策
 - 漏えい拡大防止のため、コンクリート堰および堰カバーを設置
- 周辺及び敷地境界への線量影響を軽減するため、堰外の周囲に遮へい壁を設置



2-3.安定化処理・固化技術の例と技術選定上の視点 (1) 安定化処理・固化技術の例

- 「液体状の廃棄物を固体状に」、「さらに安定な形態に」処理する技術

注:候補技術は例示であり、下表に限定されない

技術	脱水	乾燥	セメント固化	ガラス固化
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・減容される(スラッジ・スラリーで効果大) 	<ul style="list-style-type: none"> ・減容される(スラッジ・スラリーで効果大) ・容器腐食の可能性が小さくなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・多様な廃棄物に適用可能 ・原料が安価 ・実績が多い ・容器腐食可能性小 	<ul style="list-style-type: none"> ・減容される(ゼオライトでは効果大) ・安定性が高い ・高放射性廃棄物への実績 ・保管時の水素対策不要 ・容器腐食の可能性なし
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・保管時の水素対策 ・処分時に固化処理 ・容器の耐食性評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・(絶乾以外は)保管時の水素対策 ・処分時に固化処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・嵩が増える ・保管時の水素対策 ・レシピ検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温プロセス ・オフガス対策 ・レシピ検討
二次廃棄物※	<ul style="list-style-type: none"> ・分離水 ・ろ材(ろ布など) 	<ul style="list-style-type: none"> ・前処理分離水 ・オフガス凝縮水 ・オフガスフィルタ 	<ul style="list-style-type: none"> ・前処理分離水 	<ul style="list-style-type: none"> ・前処理分離水 ・オフガス凝縮水 ・オフガスフィルタ

:二次廃棄物はできるだけ1F既存の装置を活用して処理するよう計画するのが合理的

- 含水物に必要な水素対策等は、海外の合理的な保管実績も参考に検討
 - 含水率目標設定、水素発生量評価、容器設計、保管施設設計、処分要件、etc.

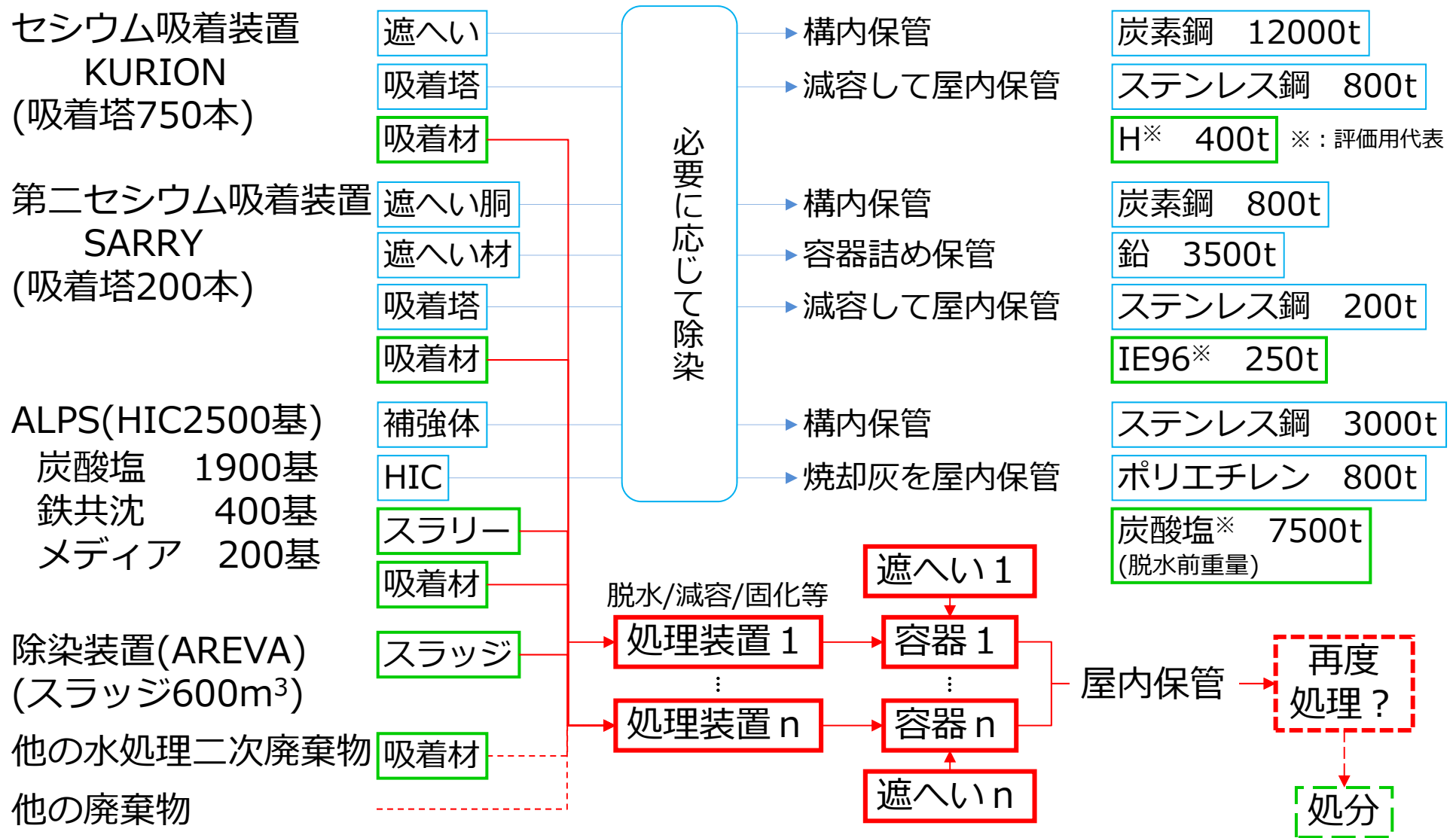
2-3.安定化処理・固化技術の例と技術選定上の視点 (2) 処理技術選定上の視点 (例)

項目	考え方の概要
放射線安全	設備の複雑さによる保守物量の差が作業被ばくに影響
閉じ込め性	処理後の廃棄物の流動性、保管容器に接液する自由水量が腐食・漏えいリスクに影響
廃棄物の潜在的リスク	保管中の水素発生量、処理中の環境への漏えいリスクの有無
技術的成熟度	原子力施設への適用実績
経済性	安定化処理に関して、設備規模、遮へい規模、保管容器の物量（廃棄物発生量に依存）およびランニングコスト
廃棄物量	廃棄物発生量（減容性を含む）、二次廃棄物の有無
設備の共用性	他の廃棄物の処理への適用性
処分適合性	最終処分のための処理が別途必要と仮定し、処理のし易さを評価
時間的制約	設備納期（実機検証等の検討時間も含む）で評価
社会的受容性	処理・保管中の健全性（外部漏えい、放散）、設備信頼性（原子力施設への適用実績有無）で評価
必要な敷地面積	保管エリアの面積 > 設備設置面積と想定し、処理後の廃棄物量で敷地面積を評価

注：記載順は優先順位を表わすものではない

2-3.安定化処理・固化技術の例と技術選定上の視点

(3) 処理対象の物量 (量は2016年末概数、主要物のみ)



□: 処理対象物
 □: 処理後に発生する廃棄物
 □: 追加発生し得る廃棄物

2-3.安定化処理・固化技術の例と技術選定上の視点 (4) 廃棄物量の面から見た処理技術選定上の視点

- 最終的に残るものは廃吸着材、スラッジ・スラリーの固形分など、放射性物質と結合した“廃棄物”
 - “廃棄物”に直に接した容器は固体廃棄物になる可能性
 - 遮へい部は汚染状況、除染次第で管理レベルを軽減できる可能性
- “廃棄物”の“容器”を変えると、新たな廃棄物が発生する
- 容器変更を伴う“廃棄物”処理を計画する場合の留意点
 - 容器数が少なくなるよう、“廃棄物”が減容されること
 - 容器から“廃棄物”を容易に取り出せ、容器の除染性、減容性にも配慮
 - 容器と遮へい部の分離性に配慮
- 最終的な廃棄物形態、廃棄体要件を念頭に、一回の処理でその状態に到達することが望ましい
 - 今後、どこまで処理を進めるかは要検討事項

2-4.処理に向けた検討方針

カテゴリー	主要成分	線量※1	物量※2	検討状況・方針
吸着塔/HIC内のメディア・ろ過材	ゼオライト 珪チタン酸塩 珪砂、etc.	中～高	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固体状 ・ 高線量であり、処理の確実性が重要 ・ 各種吸着材を一括して処理できる設備を志向 ・ 多様な容器からの取出し、二次廃棄物処理も含めて検討
除染装置(AREVA)スラッジ	硫酸バリウム	高	小	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高線量であり、処理の確実性を志向して技術調査中（後述）
多核種除去設備のHIC内のスラリー	鉄共沈沈殿物 炭酸塩沈殿物	低～中	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固体化を目標とした脱水／乾燥にむけた技術開発が進展（後述）
蒸発濃縮装置スラリー	炭酸カルシウム	低	小	<ul style="list-style-type: none"> ・ HIC内の炭酸塩スラリーと同じ技術で処理可能と想定 ・ 取出し、移送の実績あり

※1 高：廃棄物への接近が困難（Csが主）、中：時間・量を限れば接近可能、低：遮へいなしで接近可能

※2 大：1000トンオーダー、小：数十トンオーダー

- 廃棄物の性状に応じて、処理技術を選定してゆく
- 実廃棄物のハンドリング、前処理も含めた一括処理の可能性、複数の廃棄物への適用などの視点での検討は今後実施

2-4.処理に向けた検討方針

- 1Fの水処理二次廃棄物は、国内の原子力発電所では処理・処分実績に乏しいものが多いが、海外を含めれば、類似物の処理実績が認められる。
 - 高Csゼオライト：TMI-2の水処理廃棄物をガラス固化(参考資料参照)
 - スラッジ/スラリー：燃料再処理施設廃棄物の乾燥・セメント固化
 - 本資料の後半でご紹介
- IRID-JAEAにおいて、各種の廃棄物に対する多様な固化基礎試験が実施され、廃棄体化に適用可能な技術のスクリーニングを実施中(参考資料参照)

どの処理・廃棄体化技術を選定するか

□ 個々の廃棄物ごとに最適・最速の技術を適用



- リスク軽減は速まる
- 処理物の種類・二次廃棄物量が増

VS.

□ 集中的に処理できる技術を適用

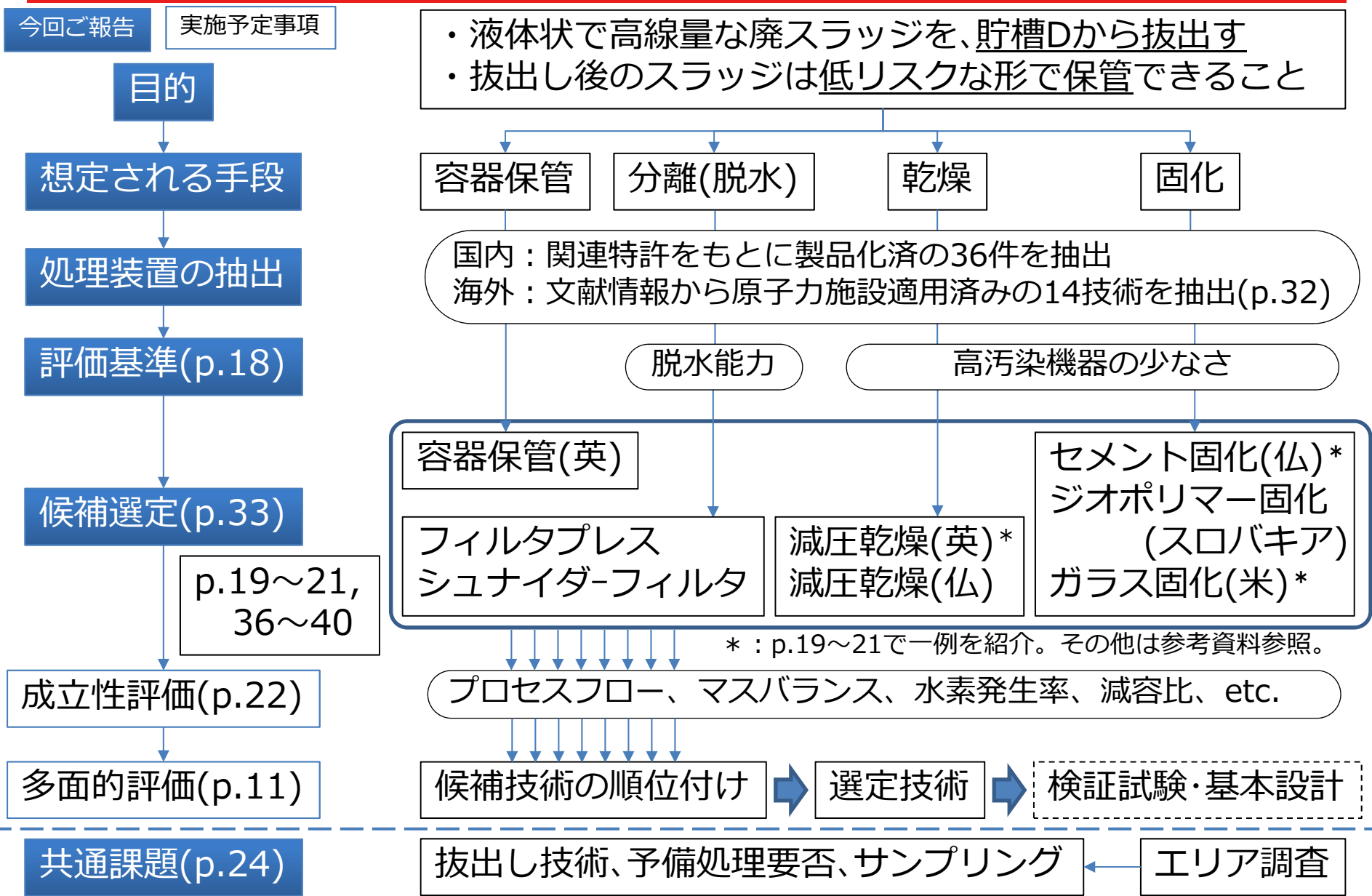


- 処理物の種類が限定され、処分検討時に有利。二次廃棄物も抑制
- 適用までの期間のリスク軽減


- 現状のリスクを許容範囲に抑制しつつ、将来リスクを見据えた全体最適を目指すことが必要

3.除染装置(AREVA)スラッジの処理に関する 検討状況

3-1.除染装置(AREVA)スラッジの処理技術抽出の概要



3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (1) 抽出した技術の評価基準

手段	判断項目	評価基準	理由
分離	・流動性なし	含水率60%以下	<ul style="list-style-type: none"> ・含水率60%超の脱水物は表面に濡れが生じるが、同60%以下では濡れが見られない。 ・スラッジの流動性が低い含水率まで処理する技術が有効とした。 <p>参考例：フィルタープレスした水酸化鉄脱水物</p>  <p>含水率～53%：浮き水なし 含水率61～63%：浮き水あり</p>
乾燥	・汚染する動的機器数が少ない。	インドラム方式	<ul style="list-style-type: none"> ・除染装置スラッジ向けとしては、設備内で汚染物と接触する範囲の小さいことにより、保守が容易となり、作業員の被ばく量も少なくなる技術が有効とした。 ・高線量の除染装置スラッジでは、アウトドラム方式は、設備全体をセル内に設置して遠隔操作が必須となり、セルの設計に時間を要する等、デメリットが多い。 ・インドラム方式の固化装置では、攪拌羽根ごと固化することで、汚染範囲を更に小さくすることができる。
固化	・汚染する動的機器数が少ない。	インドラム方式	

その他の項目への対応は以下のとおり（全技術共通）

腐食対策：保管容器に十分な厚みを持たせる、またはライニングや高級材料の採用

水素対策：水素の発生は避けられないため、容器に対策を施す（ベントフィルターなど）

昇温対策：温度上昇は、保管エリアを換気することで対応 遮へい：各装置の設計による

3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (2) 候補技術の例：真空乾燥機（英）

- 容器内で減圧乾燥する一貫システム（Advanced Vacuum Drying System）。前処理として50%濃度までスラッジを濃縮（フィルタプレス、Bradwellサイト）することで、処理期間の短縮が可能。
- 放射性物質での処理実績があり（英国）、密閉性と作業員被ばく軽減が担保されていると考えられる。

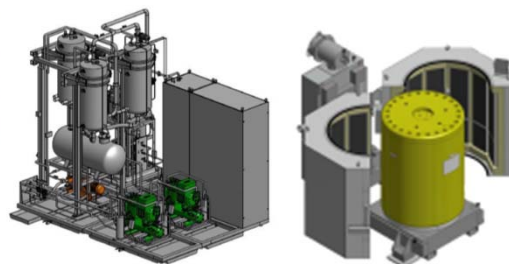


表 装置仕様

項目	内容
処理能力	16kg/h（蒸発量）
含水率	1%～
インドラム/ アウトドラム	インドラム式 （乾燥スラッジの移送は不要）
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・ バッチ処理 ・ 自動運転 ・ 遠隔操作
その他	

<http://www.mechatechsystems.co.uk/high-vacuum-systems>

図 AVDS乾燥システム概要
(前処理装置として、フィルタプレスが入る場合あり)

3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (2) 候補技術の例：セメント固化(仏)

○予め沈降分離で濃縮したスラッジ※1を専用ドラム缶に詰め、セメントとスラッジを混合し、固化保管する。常温、常圧での操作可能。

○高濃度放射性物質の保管用に開発※2、メンテナンス性（ライン洗浄）も良好。

※1 貯槽D内の沈降分離で250g/Lのスラッジに濃縮

※2 長期間の保管に対する実績（バンデリヨス発電所、20年）を有する

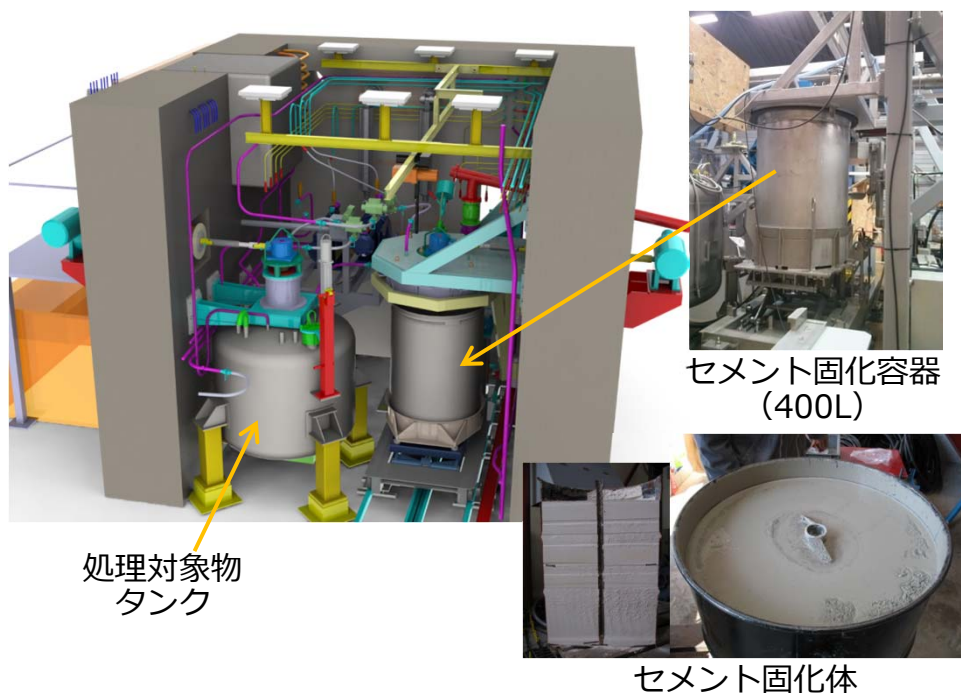


表 装置仕様

項目	内容
処理能力	200L, 400L (1バッチ当り)
含水率	10%以下
充填率	8~13%
インドラム/ アウトドラム	インドラム式 (混練物(高線量)の移送が不要)
操作性	・バッチ処理 ・自動運転
その他	

☒ In Drum Cementationシステム

3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (2) 候補技術の例：ガラス固化（米）

- GeoMelt法は、バッチ式の溶融炉に装荷した対象物に挿入した電極間に通電し、ジュール熱で対象物を溶融（1000～2000℃）することにより汚染物質を分解無害化または安定したガラス固化体中に封じ込める。
- 可搬式設備もあり、オンサイト処理も可能。低レベル放射性廃棄物や一般廃棄物での実績あり。
- 硫酸イオンの配合率に制限あり。

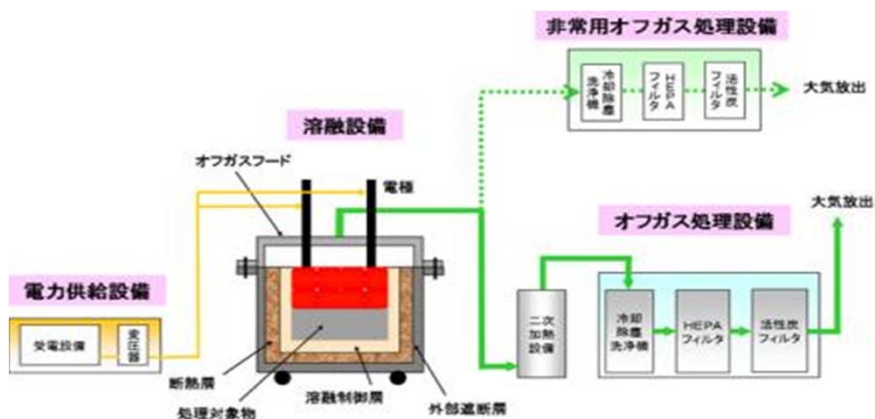


図 GeoMelt法処理フロー

出典：<http://www.konoike.co.jp/solution/detail/000355.html>



図 実証試験設備 (Hanford)



図 GeoMelt法処理物 (イメージ)

出典：<http://kurionveolia.com/new-solution-for-hanfords-tank-waste/>

表 装置仕様

項目	内容
処理能力	100 t (1バッチ当り)
含水率	0%
充填率	3%
インドラム/ アウトドラム	インドラム式 (溶融物 (高線量) の移送が不要)
操作性	・バッチ処理 ・自動運転
その他	

3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (3) 技術成立性の評価事項

- 候補として選定した技術(8件)について、技術成立性を評価する。
 - 処理プロセスの検討
 - 水素の発生及び保管容器構造 (含ベント、フィルター) ● 保管容器内の温度上昇
 - 保管容器の腐食および対策 ● 有害物(Cs、シアンガス)の放散有無
 - 概略ブロックフローを設定し、マスバランスの概略を評価
 - 評価に必要な以下の項目を調査する。
 - 主要構成機器 ● 製品含水率 ● 水素発生量 ● 処理条件
 - 想定保管容器 ● 充填量 (充填率) ● 減容比 ● 廃棄物量 (容器数)
 - 処理量 (処理速度) ● 遮へいが必要な範囲
 - 消耗品 ● ユーティリティ

3-2.除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した抽出技術 (4) 今後の評価に際しての留意点

- 除染装置(AREVA)スラッジ597m³中、固形分は70t程度と見られ、比較的少量である。処理終了後に他の液体状廃棄物も処理できれば効率的
- ALPSスラリー（鉄共沈、炭酸塩沈殿）、濃縮廃液スラリーの処理にも適用できるか検討
 - 炭酸塩沈殿：主成分は炭酸カルシウムと水酸化マグネシウム。高粘性
 - 鉄共沈：主成分は水酸化鉄。一般産業界の排水処理設備で実績多数
 - 濃縮廃液スラリー：RO濃縮水の蒸発濃縮残渣。主成分は炭酸カルシウム
 - いずれも除染装置(AREVA)スラッジよりは大幅に低線量
- 逆に、他の廃棄物に適する処理装置（ゼオライトに適するガラス固化など）での除染装置(AREVA)スラッジ処理性も評価が必要

3-3.処理技術以外の課題への取組み

(1) 処理技術以外の課題 (2017~2019目標)

- 貯槽Dからのスラッジ取出し、処理装置への移送技術は共通課題
 - 隅まで攪拌されて容易に移送できる状態か要確認
 - 既設機器を用いた移送可否の確認
 - 貯槽内に固定された機器・配管（熱交換器、送気管等）の取出し性への影響
 - 洗浄により希薄化したスラッジの濃縮も課題
- 乾燥、固化を効率的に進めるために、スラッジの含水率を前処理で調整する必要性の検討
 - 貯槽D内処理（沈降分離等）⇔ 貯槽D外処理（脱水技術を組合せ）
 - 貯槽外でのアウトドラム型の前処理導入の要否を含めた検討
 - 取出し技術に大きく依存
- 実スラッジのサンプリングと分析（設計検討に必須）
 - 固形化有無、上澄水との分離状況、貯槽内空／スラッジ内線量、等
 - 採取できたサンプルの核種濃度、化学成分、粒径分布、等
 - 試験用模擬スラッジとの相似性

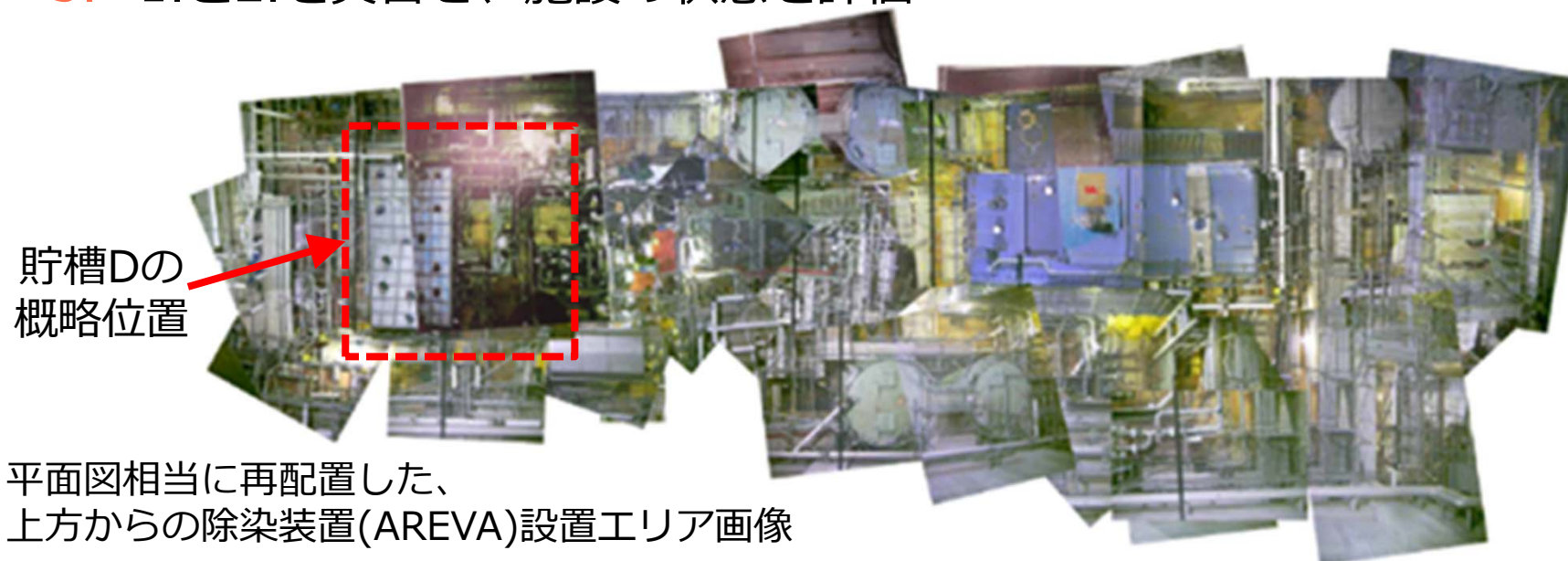


- 並行して処理技術の検討を進め、早期の処理具体化を図る

3-3.処理技術以外の課題への取組み

(2) 除染装置(AREVA)設置エリアの状況確認

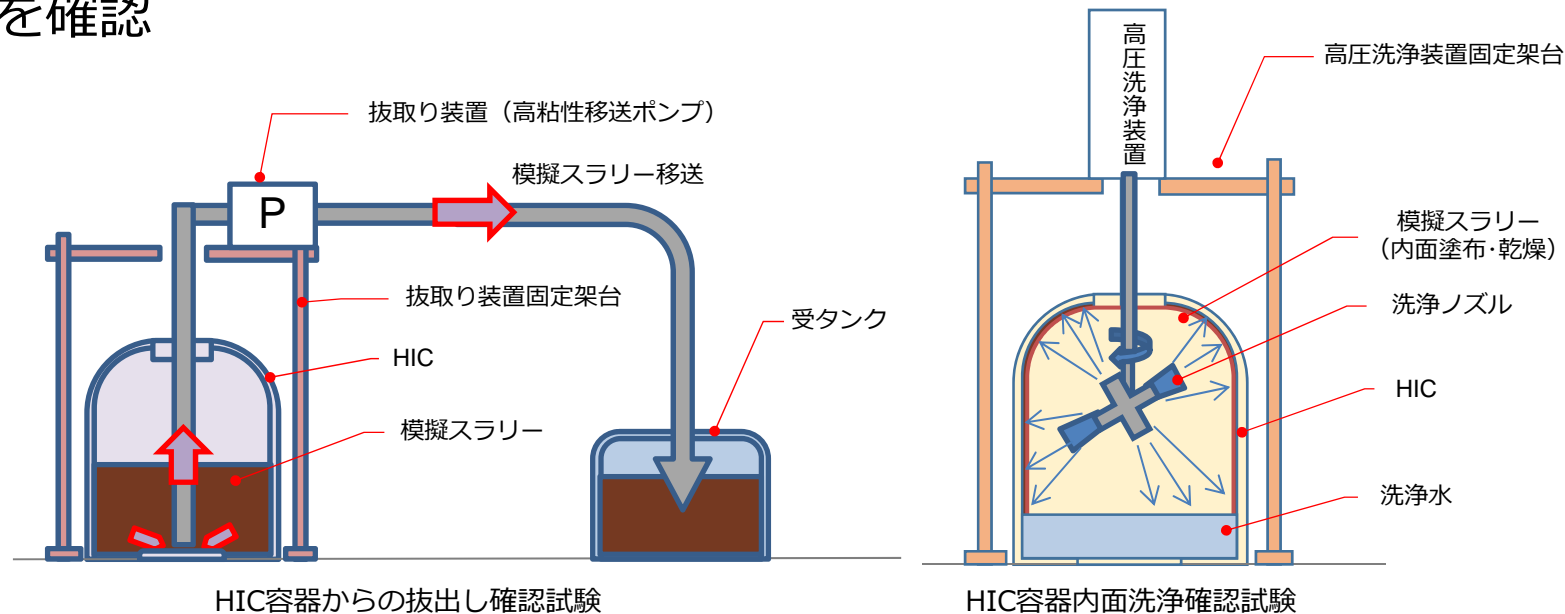
- 貯槽D上部の除染装置(AREVA)設置エリアは、装置運転中の漏えいに伴い、汚染・線量が高い。また建設完了後ただちに運転に入ったため、未撤去足場部材などの支障物が多い。
- エリアの状態を把握する調査を準備中
 - 工期：～2017年度上期
 1. 既存情報(図面、写真、線量、ほか)の収集・整理
 2. 天井クレーンに吊下げてのレーザースキャン、写真撮影、 γ カメラ調査により、正確な施設の全体像を把握
 3. 1.と2.を突合せ、施設の状態を評価



4. ALPSスラリーの処理に関する進捗状況

4. ALPSスラリーの処理に関する進捗状況

- 脱水・乾燥の候補技術による処理試験は実施済み(既報)
 - 脱水(加圧搾ろ過)：含水率60%以下の固形物を得た
 - 乾燥(円板加熱乾燥)：含水率5%以下の粉末を得た
- 実HICからの鉄共沈/炭酸塩スラリーの抜き出し試験、抜き出し後の空きHIC内面の洗浄確認試験(高圧水洗浄)を実施
 - 両スラリーとも上部からの抜き出し、内面付着物の洗浄が十分できることを確認



本資料の内容においては、技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (IRID) の成果の一部を活用しております。

4. ALPSスラリーの処理に関する進捗状況

- 安定化処理について、引き続きIRIDの研究開発と協調して検討中
 - 2016年9月～12月：
スラリー抜き出し・空きHICの洗浄確認試験
 - 2016年10月～2017年3月：
安定化処理装置の概念設計

2017年度～

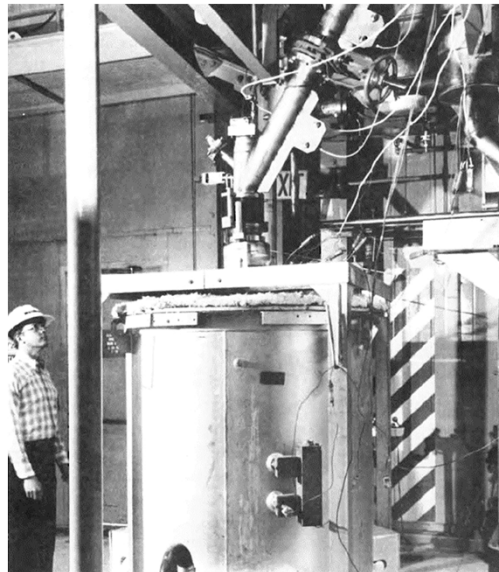
- 水分が残った状態の安定化物を保管する場合の水素対策の検討

注) 本資料中におけるIRIDの成果とは、以下の研究・開発における成果を示す。
○平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（事故廃棄物処理・処分技術の開発）」
○平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」

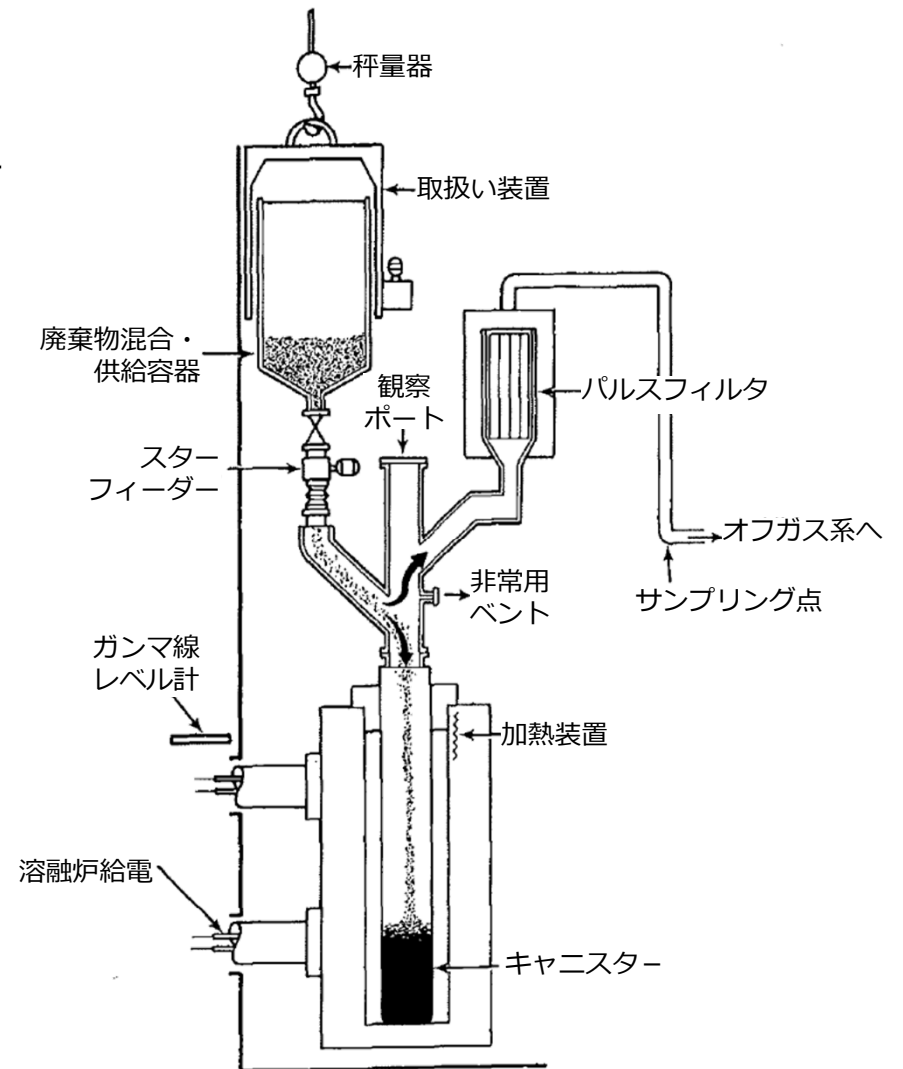
以下、参考資料

TMI-2廃棄物のガラス固化概要

- TMI-2の事故後、汚染水約3600m³を無機ゼオライトで除染
- ~9E15Bqの放射性物質を内包した脱塩装置をPNNLに移送し、容器内溶融炉(In-Can Melter)でガラス固化
- 直径20cm、高さ2.58mのキャニスター4基を製造
 - 70wt% ゼオライト、30wt% ガラス形成剤



PNNLの容器内溶融炉



TMI-2ゼオライトの処理に使用されたガラス固化システム

固化基礎試験の実施状況



廃棄物分類			廃棄体化技術					
			混練		加熱			成型
グループ	発生源	名称	セメント	ジオポリマー	ガラス	熔融	セラミック (焼結)	ペレット (圧縮)
スラッジ・スラリー類	AREVA	スラッジ	H25済	H27済	H25済	H28	H27済	H27済
	ALPS	鉄共沈スラリー	H26済	H27済	H28	H28	H27済	H27済
		炭酸塩スラリー	H26済	H27済	H28	H28 5	H27済	H27済
無機系 吸着材	KURION	H (ゼオライト)	H24済	H27済 1	H24済	H28 1	H27済	H27済
	SARRY	IE-96 (ゼオライト)	H24済 1	H28	H24済 1	H28	H27済 1	H27済 1
		IE-911(ケイチタン酸塩)	H27済	H28	H28	H28	H27済	H27済
	ALPS	チタン酸塩	H28	H28	H28	H28	H28	H28
		フェロシアン化合物	H28	H28	H28	H28	H28	H28
		酸化チタン	H28	H28	H28	H28 5	H28	H28
	高性能ALPS	Sb吸着材	H27済	H28 2	H28	H28 5	H27済	H27済
有機系 吸着材	ALPS	キレート樹脂	H28	H28	H28	H28 4	H28	H28
		樹脂系吸着材	H28	H28	H28 3	H28 3	H28	H28
	高性能ALPS	Csコロイドフィルタ	H28	H28 2	H28	H28	H28	H28
		Srコロイドフィルタ	H28	H28 2	H28	H28	H28	H28

※1 試料の供給量から、ゼオライトを対象とした試験は、KURIONのHもしくはSARRYのIE-96を用いた

※2 試料の供給量から実施を見送り、性状の近い廃棄物の試験結果から結果を推定する予定

※3 焼成後生成物（酸化鉄）が鉄共沈スラリーの焼成後生成物と重複するため除外

※4 焼成後生成物（炭酸ナトリウム）が潮解性をもつため除外

※5 焼成後生成物の融点がアルミナるつぼの一般的な使用温度1800℃を上回るため除外

■ : 実施済 (~ H27)

■ : 実施 (H28)

本資料の内容においては、技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）の成果の一部を活用しております。

除染装置(AREVA)スラッジを想定した処理技術の調査内容



手順	考え方	具体例
前提	貯槽Dに保管されているスラッジは漏洩リスク低減のため、できるだけ早く、取り除く必要がある。ただし、除去後のスラッジにおいても低リスクな形で保管することが重要。	
1	スラッジ処理に適用可能な単位操作を抽出。 参考資料：「水処理工学」, 「化学機械の理論と計算」など	「沈降分離」, 「浮上分離」, 「脱水」, 「乾燥」, 「ろ過」, 「固化」
2	各単位操作を実行するための手段を抽出する。	「遠心分離」, 「遠心脱水」, 「加熱乾燥」, 「減圧乾燥」*1, 「膜ろ過」, 「セメント固化」, 「ガラス固化」 *1 真空乾燥を含む
3	上記手段を用いた装置（技術）を調査する。ただし、処理の開始時期を早めるため、少なくとも一般産業界で実用化済（実績を有する）のものとする。	特許登録されたものを抽出後、内容を調査
4	上記に加え、海外技術の調査は原子力施設での実績（実規模実証含む）を有するものに限定（原子力施設で実績を有しないものは国内技術と差がないため）。	原子力施設で実績を有する技術を抽出後、内容を調査

「化学機械の理論と計算」に記載の単位操作

流動, 伝熱, 拡散, 蒸発, ガス吸収, 蒸留, 吸着, 抽出, 調湿, 乾燥, 粉碎, 混合・攪拌, 機械的分離, ろ過

「水処理工学」に記載の単位操作

沈降分離, 浮上分離, 汚泥脱水, 活性汚泥法, 散水ろ床法, 嫌気性消化法, 活性炭吸着, イオン交換, 電気透析法, 逆浸透法

海外技術の調査では、欧米, ロシアの放射性廃棄物処理施設および処理装置メーカーを対象に実績のある技術を抽出。

また、抽出した技術に抜けが無いかを確認するため、下記文献情報（①②）, 学会情報（③④）を追加調査した。

- ① IAEA report: “Innovative waste treatment and conditioning technologies at nuclear power plants”
- ② 佐々木憲明: 「高レベル放射性廃棄物の処理処分の研究開発の現状について」, 保健物理, 22, 337-346, 1987.
- ③ Annual meetings, DD&R, IHLRWM of ANS, 2001-2016.
- ④ ICONE 01-24, 1991-2016.

抽出された海外技術

● 原子力施設に導入されている処理装置から抽出

国	サイト名	処理技術	対象物質	線量	実績
USA	Hanford	外気保管	K-West Fuel Storage	高	実機
USA	Hanford	ガラス固化	K-West Fuel Storage	高	実機(建設中)
USA	Hanford	減圧乾燥		模擬	実証試験
USA	Hanford	GeoMelt		模擬	実証試験
USA	Savannah River	ガラス固化			
USA	TMI	GeoMelt			実機
USA	Los Alamos	GeoMelt			実機
USA	West Valley	ガラス固化		高	実証試験
USA	PNNL	ガラス固化			実機
英国	Berkeley	真空乾燥(AVDS)			実機(試運転)
英国	Bradwell	真空乾燥(AVDS)	Fuel Element Debris		実機(試運転)
英国	Bradwell	フィルタープレス	Fuel Element Debris		実機(前処理)
英国	Dungeness A	真空乾燥(AVDS)			実機(建設中)
英国	Sellafield	GeoMelt	燃料スラッジ, 汚染土壌	模擬	実機
英国	Sellafield	容器保管	Magnox Swarf Storage Silos	中	
英国	Sellafield	ガラス固化			実機
フランス	La Hague	セメント固化		高	実証試験
スペイン	Vendellios	セメント固化			実機
フランス	La Hague	ガラス固化		高	実機
フランス	Marcoule	ガラス固化		高	実機
フィンランド	Olkiluoto	減圧乾燥		低	実機
ドイツ	Wackersdorf	ガラス固化			実機
ベルギー	Mol	ガラス固化			実機
欧州	複数原発	減圧乾燥		低	実機
チェコ	ドゥコバニ	シリンダー	スラッジ, 使用済樹脂	高	実機
チェコ	テメリン	シリンダー		低	実機
スロバキア	ボフニチA1/V1/V2	シリンダー	Cs,Sr,TRU汚染スラッジ	高	実機
スロバキア	モルナチEMO1/EMO2	シリンダー		低	実機
ロシア	ホホロネジ	プラスマ溶融	有機物・無機物		シールド試験

除染装置(AREVA)スラッジの処理を想定した技術の抽出結果

- 国内特許5163件を抽出し、5件以上を保有する企業(除化学・素材メーカー)63社の製品のなかから製品化済の36件を調査対象に選定
- 海外技術としては14技術(29件)を選定
- 抽出された装置、技術を要素技術の手段で分類

手 段		装 置 名
保管	容器保管	容器保管
分離	膜ろ過	ベルトプレス, スクリーン型濃縮機, スクリュープレス, フィルタプレス , 真空脱水機, ロータリープレス, ローラープレス, 電気浸透式脱水機, シュナイダーフィルター
	遠心分離	遠心分離機
	遠心脱水	遠心脱水機
乾燥	加熱乾燥	遠心薄膜乾燥機, 低温熱風乾燥機, 気流乾燥機, 加熱乾燥機, ドラムドライヤー, 造粒乾燥システム
	減圧乾燥	真空乾燥機(インドラム式) , 真空乾燥機 (アウトドラム式)
固化	セメント固化	セメント固化 (インドラム式) , セメント固化 (アウトドラム式)
	ガラス固化	ガラス固化 (アウトドラム式), ガラス固化 (GeoMelt, インドラム式)
	その他固化	ジリン°リマ-固化(SIAL, インドラム式)

注: **赤文字**は一次評価(後述)で抽出されたもの。参考資料に一件一葉で示す。

インドラム方式とアウトドラム方式の定義

- インドラム方式 : 保管容器に直接対象物を投入し処理を行う方式
- アウトドラム方式 : 処理を行った後、処理物を保管容器に移送する方式

	インドラム方式	アウトドラム方式
概略構造 (例:セメント 固化)	<p>赤色は処理液と接液する高線量の機器/配管等を示す</p>	<p>赤色は処理液と接液する高線量の機器/配管等を示す</p>
処理能力	保管容器サイズの制約を受けるため、処理能力は小さい。	保管容器サイズの制約を受けないため、処理能力の大型化が可能。
設備規模	保管容器の中で処理できるため、機器点数が少なく、規模が小さくなる。	処理設備と保管容器が異なり、処理物を保管容器に移送する機器も必要となり、大型化する。
保守性	汚染物に接触する動的機器が少ないため、保守が容易。また、メンテナンス時には保管容器の交換のみで除染が可能となる等、対応に要する時間も短く、被ばく量も少ない。	処理物の移送機器等は汚染物と接触するため、保守前の除染等の操作が追加となる。メンテナンス時には装置全体の除染が必要となり、対応に時間を要し、被ばく量も増加する。
遮蔽範囲	保管容器周辺に限定した遮蔽	移送機器を含む装置全体を遮蔽

抽出された技術（装置）

手段	技術名 (装置名)	技術情報（除染装置(AREVA)スラッジのみを処理する場合を想定）					
		処理速度 (充填率)	実績	温度 圧力	含水率 (水素発生量)	容積比*1 (概算)	備考（前処理）
膜ろ過	フィルタープレス	100~600 L/バッチ	一般	常温 最大1.5MPa	40%	0.15	ALPSスラリー脱水向け候補技術
	シャイダーフィルタ	0.1~20 m ³ /h	一般	常温 最大0.4MPa	30%	0.13	
減圧乾燥	真空乾燥	16kg/h (水蒸発量)	原子力	33℃ 50mBar	<10%*2	0.09	前処理：フィルタープレス
	真空乾燥	130~400 L/バッチ	原子力	60℃ 200mBar	<10% (20 NL/年)	0.09	前処理：沈降分離*3
固化	セメント固化	130, 400 L/バッチ (8-13%)*4	原子力	常温 常圧	10% (10 NL/年)	0.56	前処理：沈降分離*3
	ジエチルアミン固化 (SIAL)	200L/バッチ 5h/バッチ (40%)*4	原子力	常温 常圧	17~25% (G値=0.02)	0.20	前処理あり 実験ではろ過+乾燥+400℃加熱
	ガラス固化 (GeoMelt)	100t/バッチ 6d/バッチ (3%)*4	原子力	1000~ 2000℃ 負圧(水ガス)	0% (0 NL/年)	1.5	前処理：乾燥 フェロシアン化物の分解によるシアンガスの発生, Csの揮発

• このほかSellafield社で計画されているスラッジの容器保管について調査

- *1:現状597m³を1とし、処理後のスラッジ容積又は固化体容積を比較。スラッジ固体の比重は4.5で計算。
- *2:1wt%まで乾燥させることができる。
- *3:沈降分離で250g/Lまで濃縮後に供給。
- *4:メーカー回答の充填率（スラッジの見掛け密度を1.5とした）。

フィルタプレス

- ろ板にろ布を張ったものを直列に密着させたもので、スラッジをポンプでろ板中心の穴から圧入する。スラッジは、その圧力で水分が外へ排出され、脱水ケーキが形成される。
- ろ布に積層したスラッジによってろ過を継続するため、その性状によっては目詰まりが発生。
- ろ過後、圧搾することで脱水を促進する。

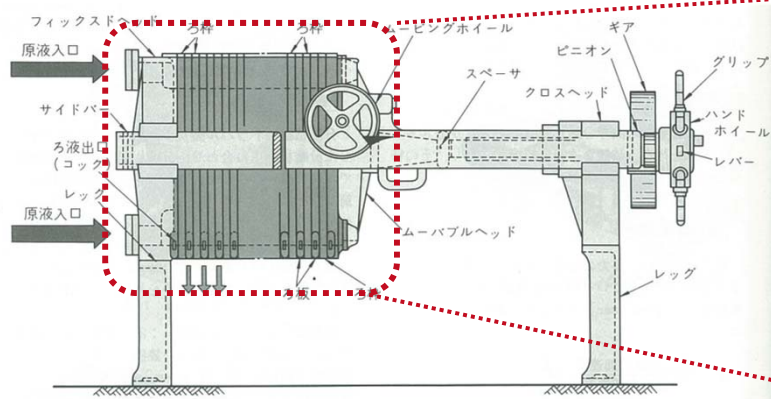


図 フィルタプレス概念

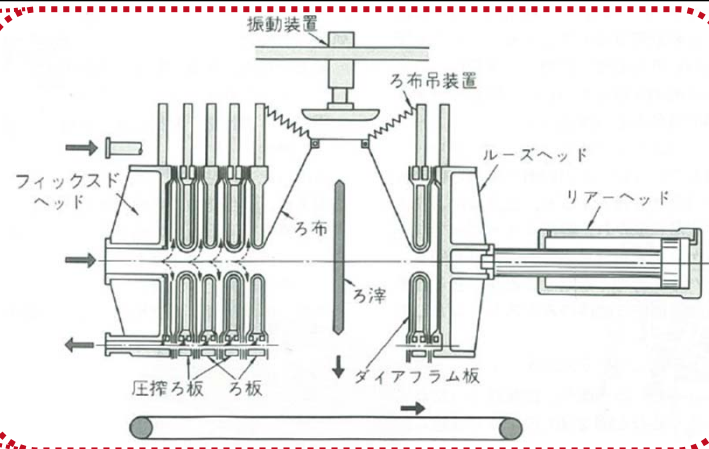


図 スラッジ落下機構

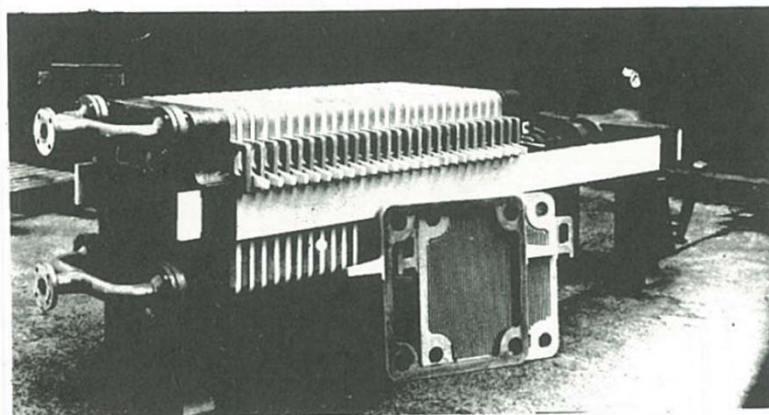


図 フィルタプレス 全景

出典：絵とき 化学装置・機器の実務知識 (1997.化学装置研究会編)

項目	内容
ろ過能力	0.1~0.6m ³ (1バッチ当り)
含水率	40%以下
操作性	・自動運転 ・バッチ処理
保守性	ろ布, パッキンは手動交換

シュナイダーフィルタ

- 積み重ねられた水平ろ板の間に通されたろ紙によってろ過を行い、ろ過後はろ板を開けて、ろ紙を自動的に取り出すことが出来る加圧型のフィルタ。ろ板枚数の増加により最適なる過面積を構成。
- 水平型であり、均質な厚みの脱水ケーキを形成。
- 高粘度、難ろ過性のスラッジにも対応可能。

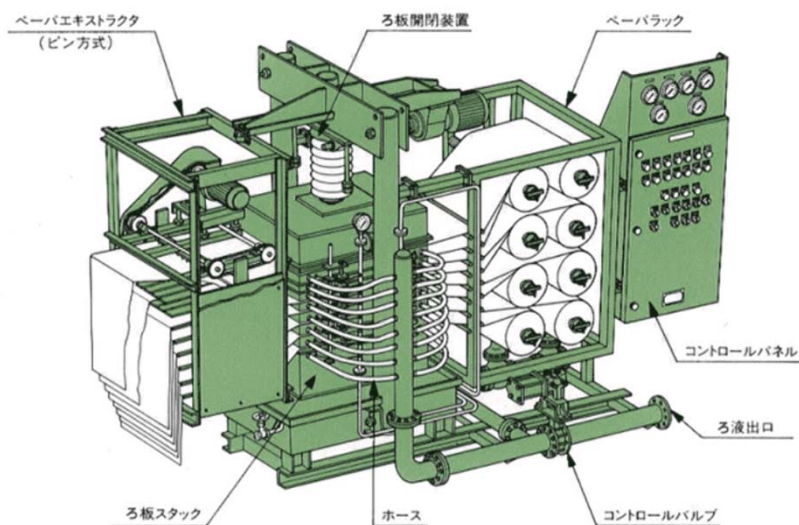


図 シュナイダーフィルタの構造



図 シュナイダーフィルタ全景

表 装置仕様

項目	内容
ろ過能力	0.1~20m ³ /h
含水率	30%
操作性	自動運転
保守性	ろ紙は自動交換可能

出典 : <http://www.kakoki.co.jp/products/m-010/index.html>

真空乾燥機（仏）

- 予め沈降分離で濃縮したスラッジ※1を専用ドラム缶に詰め、熱風及び加熱により水分を除く。減圧することにより蒸発温度を下げています。
 - 高濃度放射性物質の保管用に開発※2、メンテナンス性（ライン洗浄）も良好。
- ※1 貯槽D内の沈降分離で250g/Lのスラッジに濃縮
 ※2 長期間の保存に対する安定性に関しては実証が必要

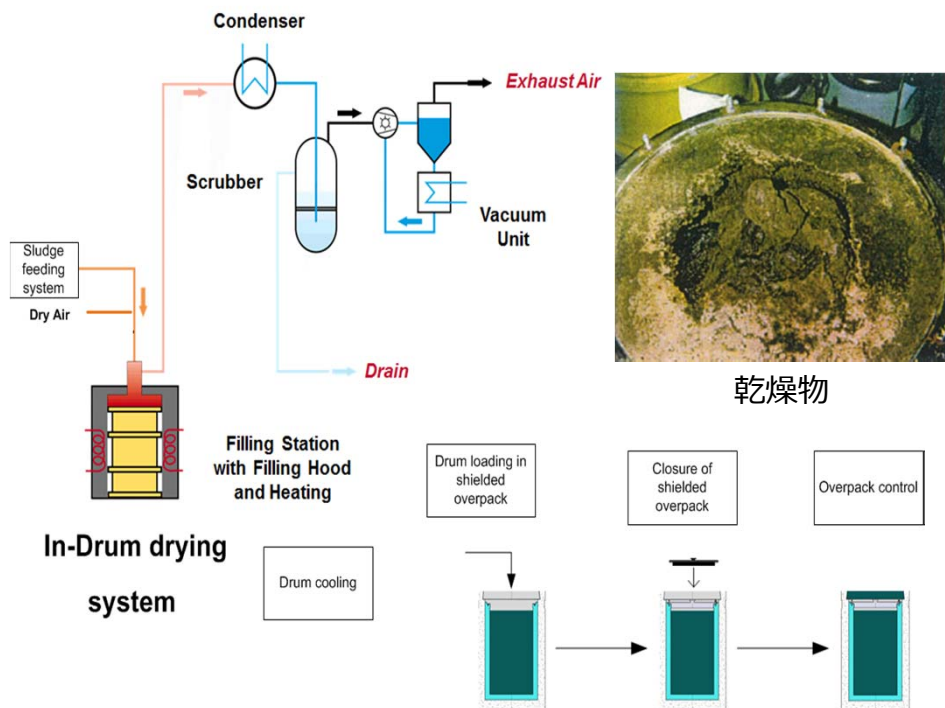


図 In Drum Dryingシステム

表 装置仕様

項目	内容
処理能力	50L/d
含水率	10%以下
インドラム/アウトドラム	インドラム式 (乾燥スラッジの移送は不要)
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・ バッチ処理 ・ 自動運転 ・ 遠隔操作
その他	専用ドラム缶の容量は130L

出典：AREVA社提供資料

ジオポリマー固化(スロバキア)

- ジオポリマーはアルカリ性溶液とアルミノケイ酸塩との反応により形成される無機縮重合体（ポリマー）。加温（60℃）にて反応。セメントと異なり、酸性雰囲気下での劣化は少ないことが特徴。
- セメント固化に対し平均4倍の廃棄物の充填が可能となる。硫酸バリウムのジオポリマー封じ込め試験が実施されている。



図 ジオポリマー混練装置



図 ジオポリマー固化体

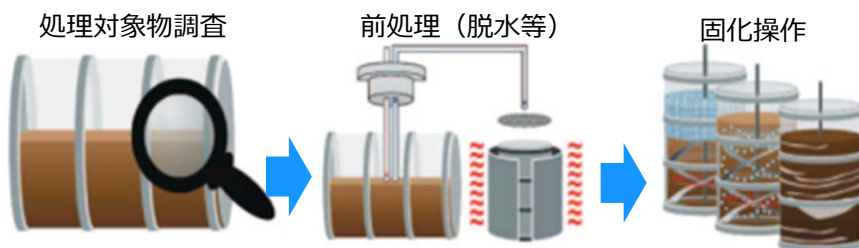


図 固化工程

表 装置仕様

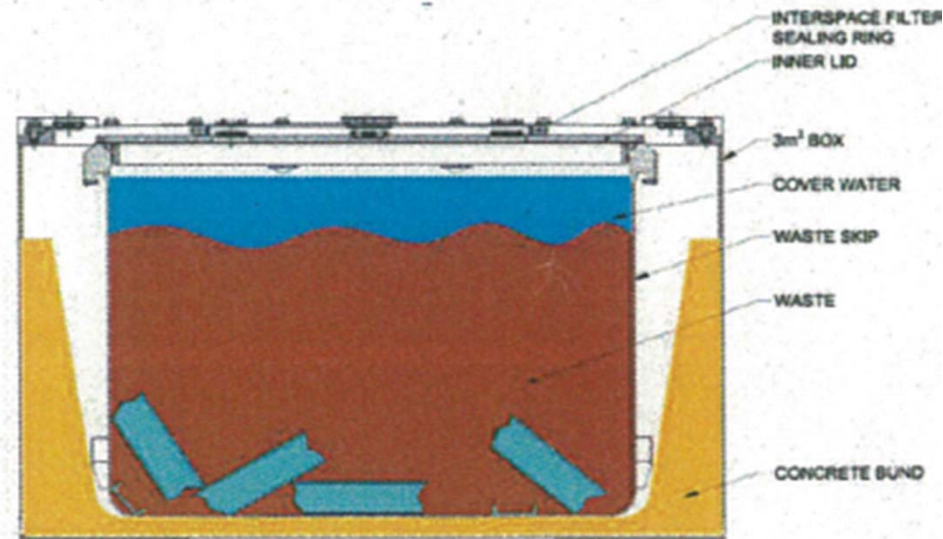
項目	内容
処理能力	200L（1バッチ当り）
含水率	17～25%
充填率	40%
インドラム/ アウトドラム	インドラム式 （混練物（高線量）の移送が不要）
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・バッチ処理 ・自動運転
その他	

出典：https://www.fujielectric.co.jp/products/nuclear/topics/2016/nuclear_2016_01.pdf
原子力学会予稿集（2016年秋）

○SellafieldではMagnox Swarf Storage Silosの閉鎖に向けて、内部の中レベル廃棄物の中間貯蔵を計画。容器は3m³容量の2重構造の鋼製コンテナ（中間層にモルタルを充填）であり、その中に放射性廃棄物を保管する。

表 装置仕様

項目	内容
処理能力	3m ³ /コンテナ



Proposed Schematic of Skip with 3m³ box

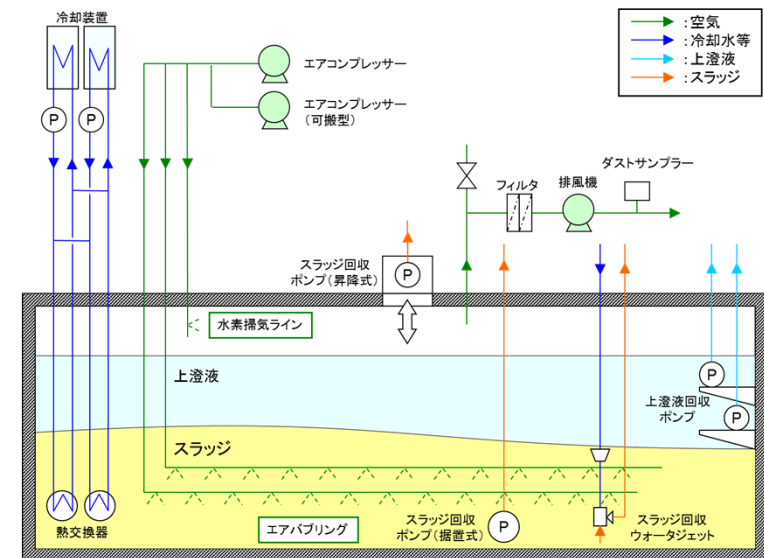
出典：http://www.sellafieldsites.com/publications/sellafieldplan/Sellafield_Plan.pdf
<http://www.engineeringcapacity.com/news101/business-news/sellafield-contract-worth-up-to-47m>

	分析項目	目的
上澄み液	pH、電導度、SS、成分分析 (Cl、SO ₄ 等)	処理装置、保管容器の材料検討 固化可否の検討
	放射能 (全 γ 、全 β)	遮へい設計条件の設定 発熱量の算出
	成分分析 (CN等)	スラッジ内のフェロシアン化物が分解していないことの確認
スラッジ	密度、粘度、粒径分布、化学組成	移送システムの検討
	放射能 (核種濃度)	遮へい設計条件の設定 発熱量の算出 安定化処理後の廃棄物の核種濃度算出

- 項目の追加要否は処理技術候補の選定と並行して検討

貯槽Dの概要

- 設置場所：プロセス主建屋地下（建屋壁 鉄筋コンクリート造 厚さ0.8m）
- 貯槽：構造：鉄筋コンクリート造（内面にコンクリート保護材を塗布） 厚さ1m
内寸：約10m×約10m×高さ約10m 保管容量：700m³
- 冷却系：貯槽内に熱交換器2基を設置し、屋外の冷却塔から冷却水を循環させ冷却可能（貯槽内の最高温度は35℃で、これまで冷却系の使用実績なし）
- 送気系：
 - 攪拌用：貯槽底部から30cmの高さに設置された4本の配管下面から空気を噴射、上昇時の循環流により攪拌
 - 送気のみバックアップ：送気バックアップコンプレッサー1台設置
- 排気系：HEPAフィルタを通して排気、2系統のうち常時1系統運転。非常用DGを接続。ダストサンプラを設置
- 移送系：貯槽底部にスラッジ回収用水中ポンプ1台設置。貯槽上部にスラッジ回収用兼スラッジ攪拌用昇降型ポンプを設置
- 監視：水位、温度



貯槽D内の系統構成概略図

ALPSスラリー安定化処理の検討状況

- スラリーの性状、遠隔操作性、処理速度を考慮し、乾燥・ろ過・遠心分離の3種類の処理技術を選定し、模擬スラリーによる適用試験を実施
- 乾燥・ろ過について安定化処理の成立性を見通しを得た（遠心分離では分離性能が不十分で適用が困難なことを確認）

選定技術	処理装置例	原理・特徴	安定化物
円盤加熱乾燥式	<p>「CDドライヤ」による処理</p>	<p><原理></p> <ul style="list-style-type: none"> ○加熱した円盤面にスラリーを塗布し、円盤を回転させ、固定式スクレーパで円盤表面の安定化物を剥離し粉末状で排出 ○分離水は蒸気として排出 <p><特徴></p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒径に関係なく処理可能 ・塗布にあたって粘度調整が必要 	<p>含水率：5%未満</p>
加圧圧搾ろ過式	<p>「フィルタプレス」による処理</p>	<p><原理></p> <ul style="list-style-type: none"> ○加圧しながらスラリーをろ過したのち、さらに圧搾を行う。安定化物は装置下部から固形板状で排出 ○分離水はろ布洗浄水とともに回収 <p><特徴></p> <ul style="list-style-type: none"> ・汚泥処理において多数実績あり ・大量処理が可能 	<p>含水率：50%程度</p>

液体状水処理二次廃棄物の特性

二次廃棄物	主要成分	代表的放射性核種の濃度	分析の状況
除染装置(AREVA)スラッジ	硫酸バリウム(~66%) フェロシアン化物	^{90}Sr : ~2E7Bq/g ^{137}Cs : ~1E6Bq/g	処理前後水濃度より算出(実物無し)
多核種除去設備(既設・増設ALPS)スラリー	鉄共沈沈殿物: $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ (~75%)	^{90}Sr : ~1E6Bq/cm ³	既設鉄共沈 1点
	炭酸塩沈殿物: CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 比は原水の成分に依存	^{90}Sr : ~4E7Bq/cm ³ (右記6点の平均値)	既設炭酸塩 2点 増設炭酸塩 4点
蒸発濃縮装置スラリー	炭酸カルシウム	^{90}Sr : ~1E7Bq/cm ³	実スラリー

