

スラリー安定化処理に向けた設計について

2021年7月12日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

- 第91回特定原子力施設監視・評価検討会にて議論したスラリー安定化処理設備の設計に関する検討状況について報告。
- 脱水物保管容器の長期健全性
- スラリー安定化処理設備における閉じ込め機能

- HIC（高性能容器）スラリーの移替え作業に関する進捗状況について報告。

スラリー安定化処理に向けた設計

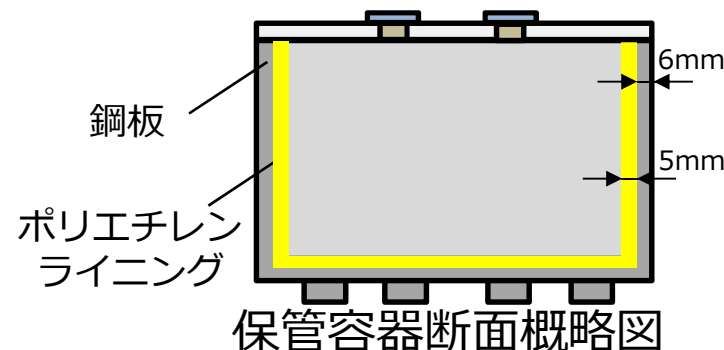
1. 脱水物保管容器の長期健全性

- 多核種除去設備で発生したスラリーの脱水物は処理水の性状より塩分を含んでおり、脱水物保管容器（以下、「保管容器」）の鋼板として、ステンレス鋼は腐食速度の大きな局部腐食が発生し、短期間で貫通するおそれがある。一方、炭素鋼はゆっくりと全面腐食するため、腐食代を考慮した設計とすることで、長期使用に適していると考える。
- これより、脱水物の性状と保管環境（固体廃棄物貯蔵庫第9棟内に屋内保管）を踏まえた保管容器（主な鋼板：炭素鋼）の長期健全性について、以下の通り考える。
 - 保管容器内面のライニング内表面は脱水物からの放射線劣化が懸念されるが、固体状の脱水物が鋼板と接触する障壁となる。仮にライニングが消失し、脱水物が鋼板と接触して鋼板内面に脱水物による全面腐食が発生すると想定した場合、40年間の腐食進展量は2.9mm（板厚6mm）であることから、約40年は貫通には至らないと評価する。
【腐食進行の評価 参照】
 - 脱水物には水分が含まれているが液体の層は形成されず、模擬脱水物の経時変化調査において脱水物の含水量は経時的に低下傾向にあることを確認しており、保管容器内での保管中には、液体の層は形成されないため、気液界面による影響は低いと考える。
 - 更なる腐食防止の観点から、外面に塗装を施し、内面にはポリエチレンライニングを施工する。ライニングは延性劣化するので、強度を必要とする使い方はしない。
 - なお、スラリー脱水物の保管は、国内において初めての事例であることから、模擬脱水物を用いた調査や保管開始以降の性状確認など知見拡充を図っていく。

炭酸塩スラリー



脱水



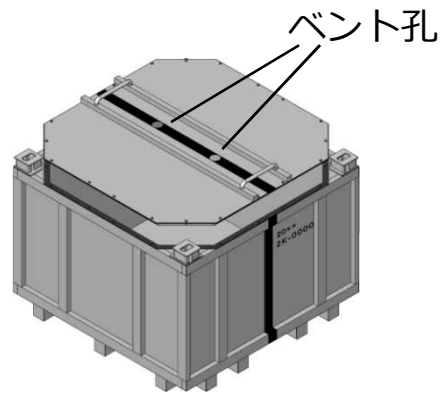
【参考】 前回コメント回答

- 前回（第91回）特定原子力施設監視・評価検討会におけるコメント及び回答は以下の通り。

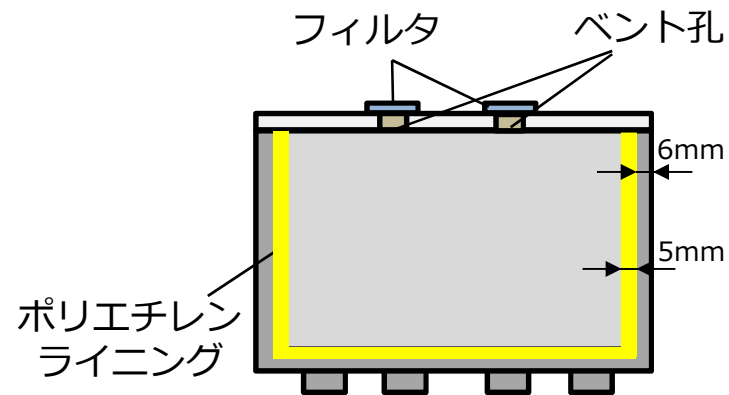
コメント	回答
気液界面や接液部において，腐食進展速度が大きくなると報告されているものもあるが，今回の評価は過小評価ではないのか。	脱水物には水分が含まれているが液体の層は形成されず，模擬脱水物の経時変化調査においても脱水物の含水量は経時的に低下傾向にあることを確認しており，固体廃棄物貯蔵庫第9棟にて保管容器内での保管中には，液体の層は形成されないため，気液界面による腐食影響は低いと考える。これより，脱水物の性状や設備環境を踏まえた腐食評価を実施した。
十分な耐食性を有した材料で容器を構成しているのか。	脱水物の性状から塩分が含まれているため，保管容器の鋼板として，ステンレス鋼は腐食速度の大きな局部腐食を発生し，短期間で貫通するおそれがある。一方，炭素鋼はゆっくりと全面腐食するため，腐食代を考慮した設計とすることで，長期使用に適していると考えます。
脱水物による腐食メカニズムが明確ではない中で，簡単なメカニズムで考えないで欲しい。	本評価では脱水物の性状や設備環境を踏まえた腐食評価を行っているが，スラリー脱水物の保管は，国内において初めての事例であることから，模擬脱水物を用いた調査や保管開始以降の性状確認など知見拡充を図っていく。

【参考】脱水物保管容器の仕様

- 脱水物保管容器（以下、「保管容器」）仕様は以下の通り。
 - 材質：SS400（蓋以外の内面にはポリエチレンライニングを施工）
 - 寸法：縦 約 2 m × 横 約 2 m × 高さ 約 1.3 m
 - 内容積：約 5.2 m³
- 放射線分解で発生する水素の容器内の濃度が可燃限界濃度を超えないようベント機構を設置。また、固体廃棄物貯蔵庫に収納し、建屋は換気して水素が滞留しないように管理。
- 保管容器の腐食防止の観点から、外面は塗装を施し、内面にはポリエチレンライニングを施工。なお、保管容器の鋼板（炭素鋼）の溶接部は、選択腐食が生じないように、溶接材料の成分を工夫する。



保管容器

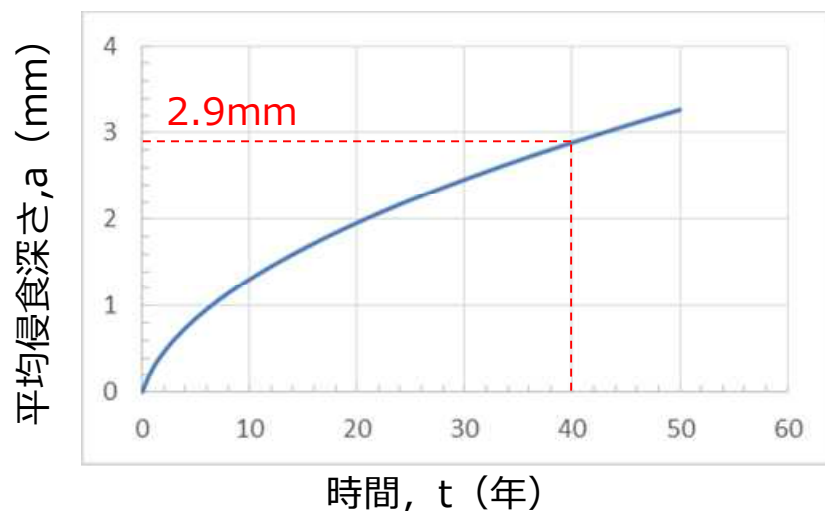


保管容器断面概略図

【参考】腐食進行の評価

- 炭素鋼が全面腐食すると腐食生成物（錆び）に覆われていく。この錆びの下地保護性により、実際の腐食速度は時間とともに低下していく。
- したがって、炭素鋼の腐食進展モデルとしては、平均侵食深さが時間のべき乗に比例するモデル（べき乗則モデル）が一般的であり、特にべき乗数を1/2とする放物線則モデルがよく使われている。
- 平均侵食深さ a (mm)と時間 t (年)との関係は次式で表される※1。初期速度を r_0 (mm/年)、速度定数を k (年)とする。

$$(a + kr_0)^2 = 2kr_0^2t + k^2r_0^2$$
- 脱水物より厳しい条件である自然海水中での腐食を想定して初期速度を $r_0 = 0.399$ (mm/年) ※1，速度定数を $k = 0.80$ (年) ※1として侵食深さを計算すると下図のようになり、40年間の腐食進展量は2.9 mmと評価される。なお、固体廃棄物貯蔵庫第9棟内での保管において、脱水物による発熱はベント孔等から周囲に放熱され、保管容器の鋼板は貯蔵庫内の空調設定温度(25℃)と同程度になると考えられるが、貯蔵庫設計上の最高温度40℃を評価に用いた。



※1：評価式及び r_0, k の出典は「金属の腐食・防食Q&A コロージョン110番（腐食防食協会編，丸善，1988）」による。 r_0, k は40℃の自然海水中での腐食を想定した値である。

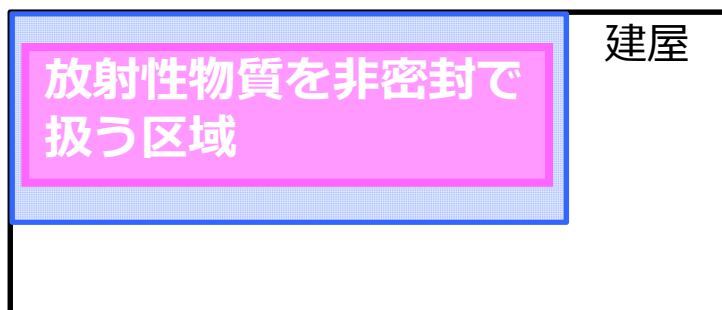
スラリー（脱水物）性状は以下の通りとして評価

- ・塩化物イオン濃度：20,000ppm
(上澄み水：約4,000ppm)
- ・温度：40℃
- ・pH：12（炭酸塩スラリー）
：8（鉄共沈スラリー）

2.1 スラリー安定化処理設備の閉じ込め機能

- スラリー安定化処理設備における閉じ込め機能について、原子力規制庁殿が求める事項に対して、当社の設計方針を見直しして、対応していく。

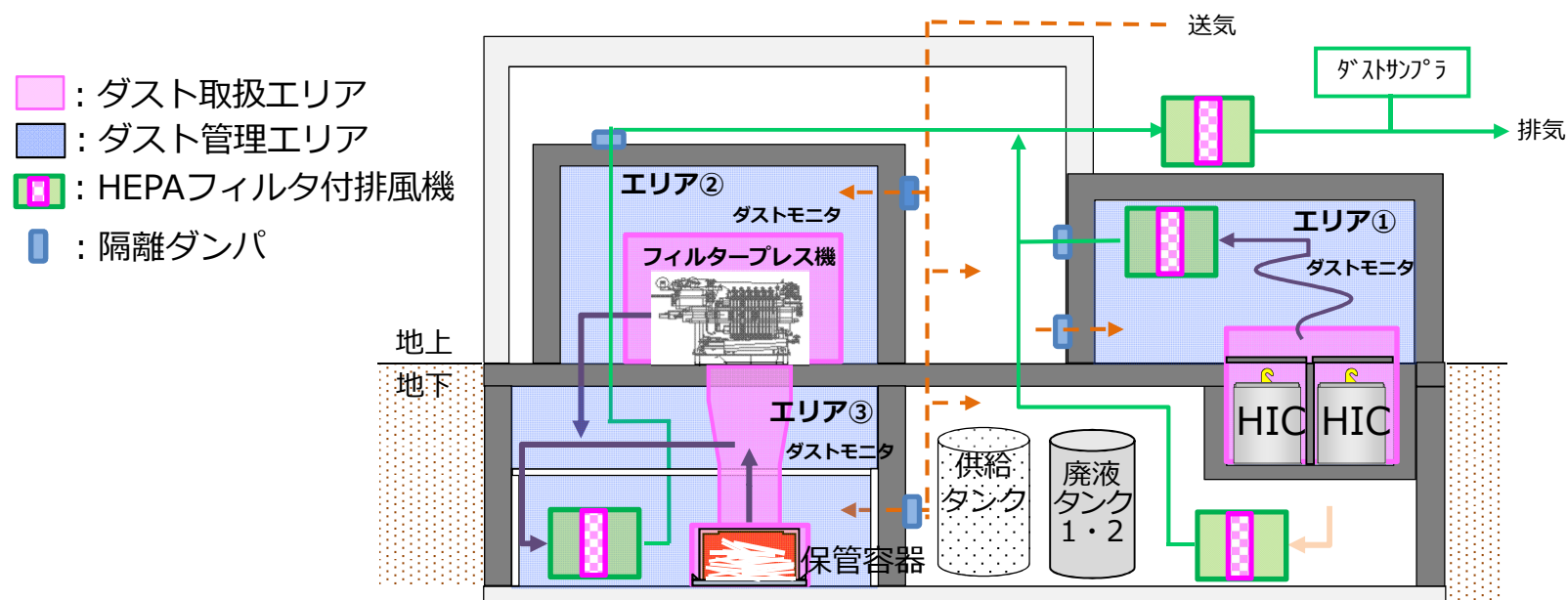
原子力規制庁殿の要求	当社の設計方針
非密封の放射性物質は、限定された区域内で取り扱う設計とすること。その区域は気密性の確保・負圧維持などにより、放射性物質を漏えいさせない設計とすること。	非密封の放射性物質を取り扱う区域をダスト取扱エリアとして限定する。ダスト取扱エリアは負圧を維持することにより、放射性物質を漏えいさせない設計とする。
非密封で扱う区域の外側に中間的な区域を設け、漏えいした場合にもその中間的な区域内に保持することができる設計とすること。	ダスト取扱エリアの外側にダスト管理エリアを設け、ダスト取扱エリアから漏えいした場合、ダスト管理エリア内にて放射性物質を閉じ込める設計とする。
放射性物質を非密封で取り扱う区域内において常時負圧維持及び浄化機能を備えた排気設備による管理、並びにダスト濃度の警報管理を行うこと。	放射性物質を非密封で取り扱う区域内の負圧を維持し、浄化機能を備えた排気設備による管理を行い、ダスト濃度の警報管理を行う設計とする。



イメージ (平面図)

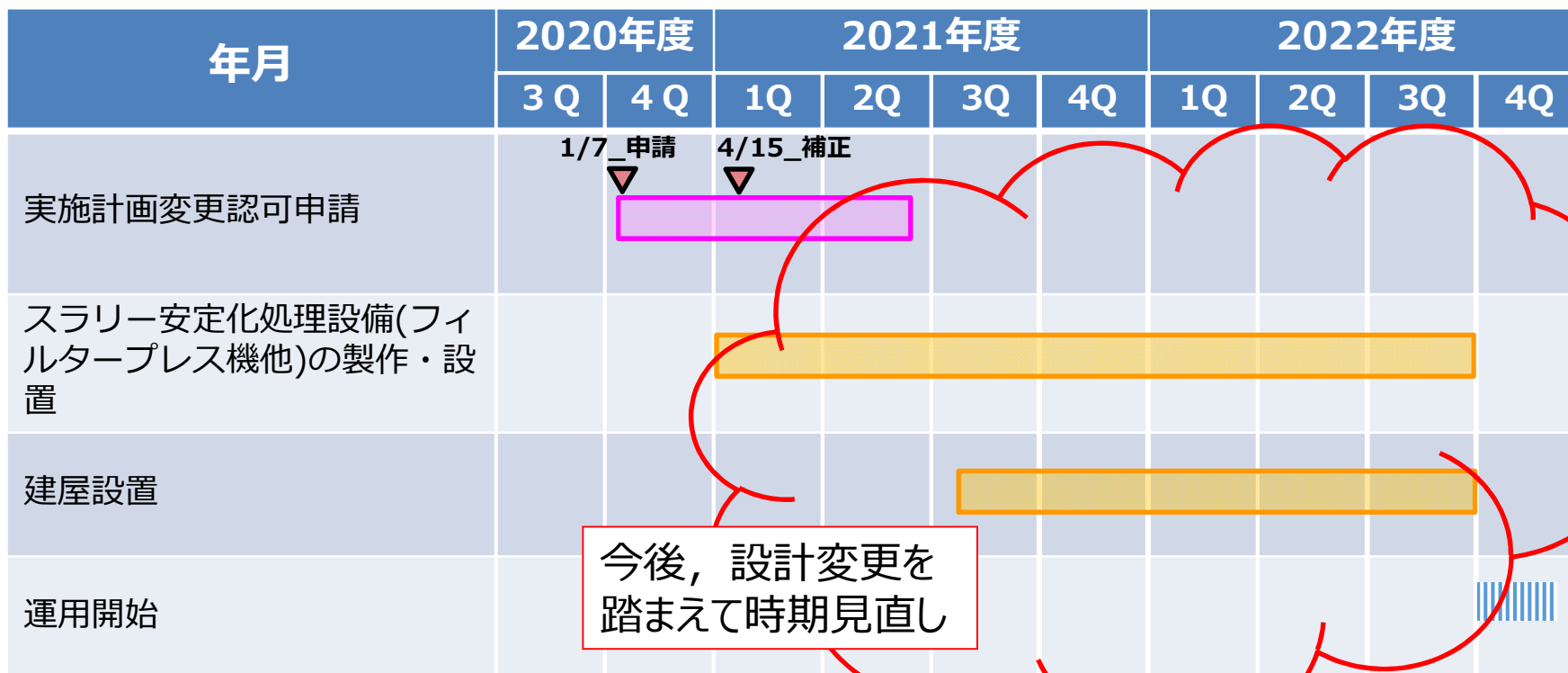
2.2 スラリー安定化処理設備の設計方針

- 閉じ込め機能を確保するために見直した設計方針を踏まえて、設備設計を実施していく。
- ダスト含有機器（フィルタープレス機、保管容器、HIC）は、ダスト取扱エリア内で取り扱い、使用施設と同程度の負圧にて管理する。
- ダスト取扱エリアから漏れ出したダストは、ダスト管理エリア内にて閉じ込める。換気設備停止時、ダスト発生作業を中止し、隔離ダンパによる閉じ込め機能にて放射性物質の漏えいを防止する。
- 上記エリアにおいて、浄化機能を有した排風機にて浄化し、放射性核種や作業環境に応じた管理値を設定してダスト濃度を監視する。なお、閉じ込め機能に必要な機器の電源は多重化する。



3. 今後のスケジュール

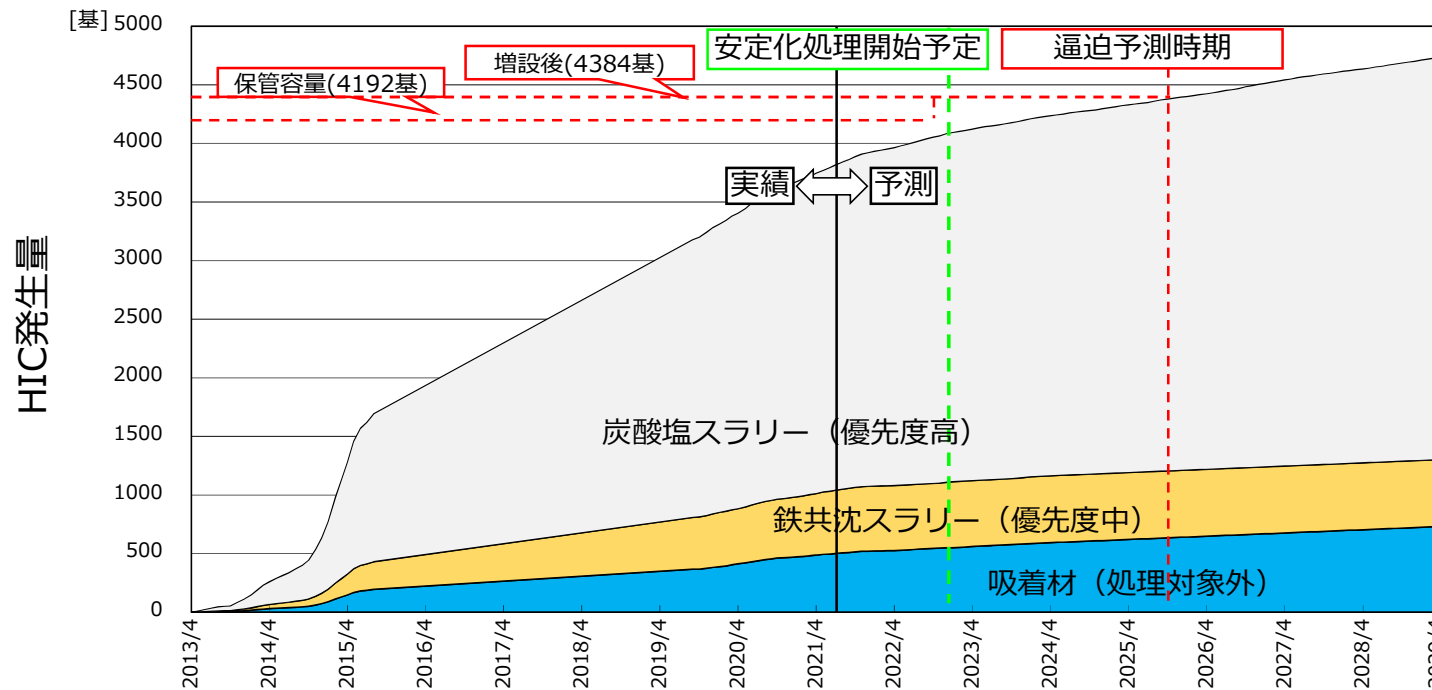
- 現在，実施計画について，原子力規制庁殿に審査頂いておりますが，設計方針に関する見直しを踏まえて，今後，実施計画の補正申請を実施していく。
- その後，設計変更を反映して，設備の製作・設置を実施し，運用開始していく。運用開始時期については，設計変更による影響を踏まえて，今後見直していく。
- なお，運用開始時期はHICの一時保管施設の保管容量を考慮する必要があるため，HICの移替作業による追加作業等を含めた発生予測の見直しにより，保管施設の増設などの必要な措置を検討していく。





【参考】HIC発生量予測

- 現在のHIC発生量は約23基/月。
- 今後、HIC発生量は、日々の汚染水処理により約10基/月程度に低減する想定。左記発生量に加えて、スラリーの移替え作業に伴う増加分を算出した場合、実施計画変更認可申請中の第三施設の保管容量（192基分）の増設を加味して、保管容量は今後約4年分となると推定。
- なお、処理途上水の二次処理を開始すると、保管容量の逼迫予測時期は前倒しされる。また、今後の状況変化に伴い、予測時期について変更となる可能性がある。

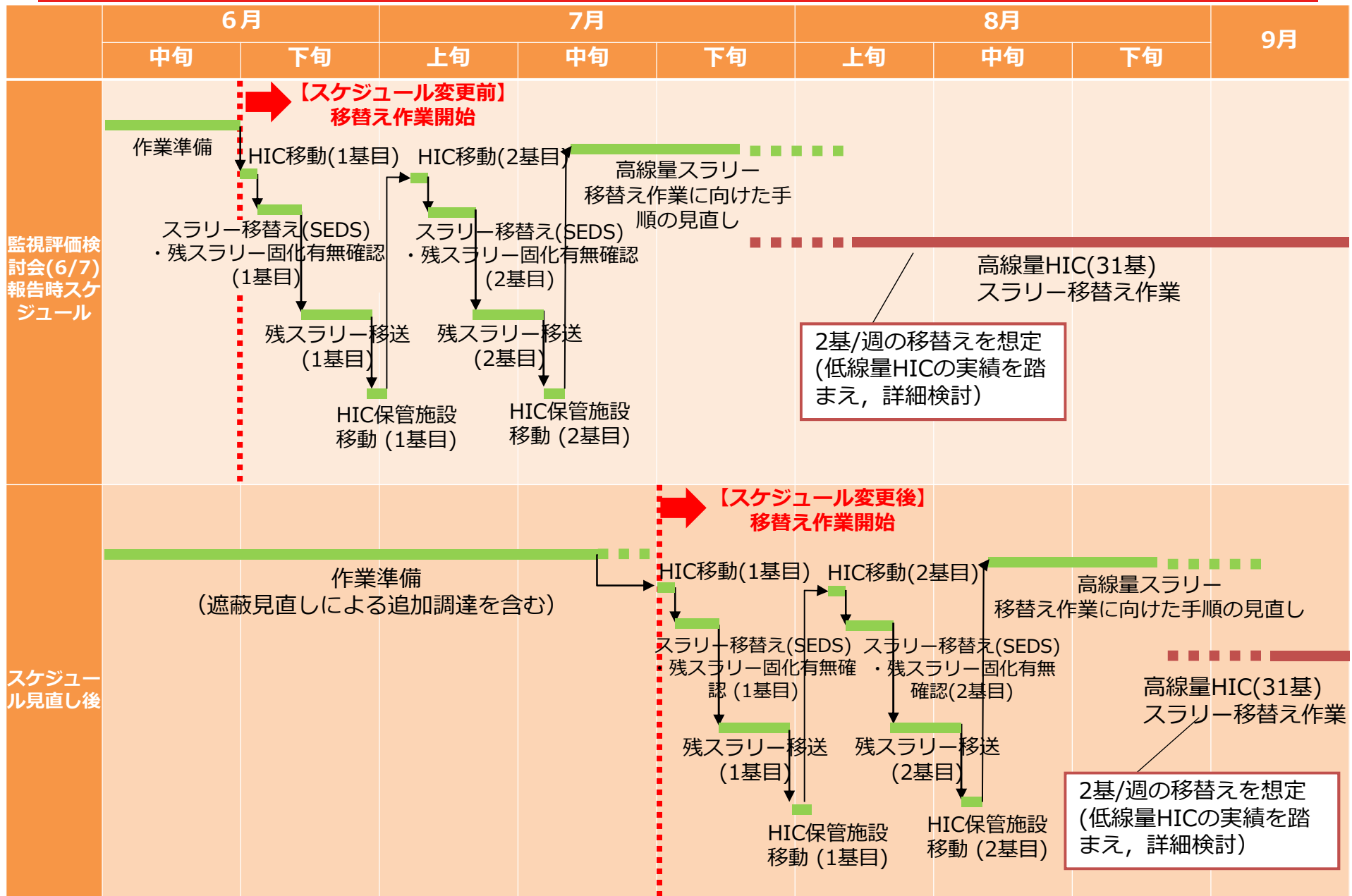


HICスラリー移替え作業の状況

4. スラリー移替え作業の準備状況

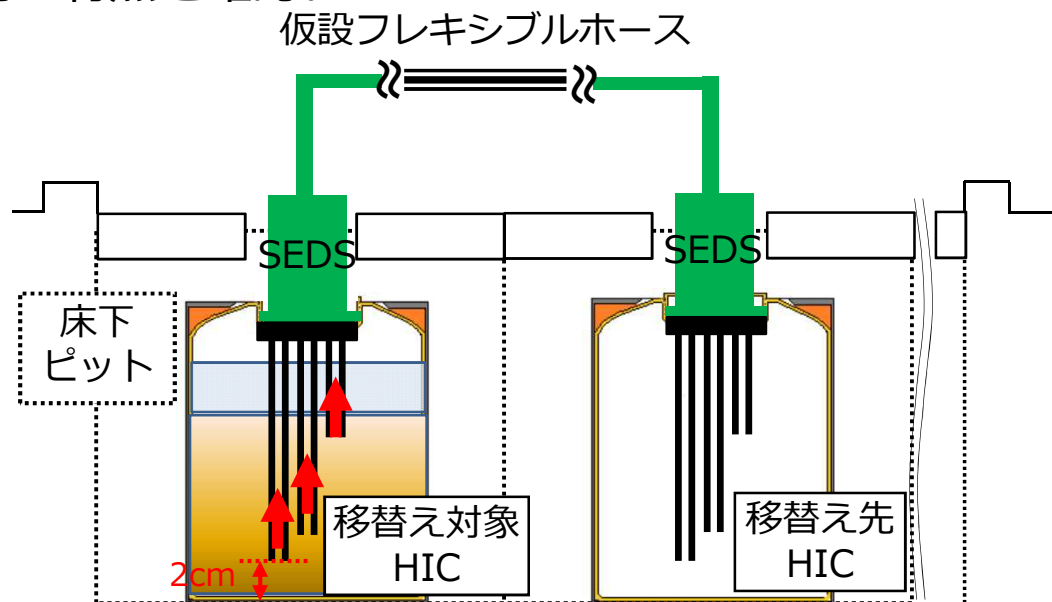
- スラリー移替え作業は、6月下旬から低線量HIC2基の移替え開始を予定していたが、β線被ばくに関する安全対策の追加実施により、開始が7月下旬となる見通し。
 - 高線量HICの上蓋開放時は、内部の炭酸塩スラリーからのβ線被ばくが想定されることから、HIC開口部に設置する遮へい材について、遮へい厚・材料を見直し（現在、遮へい材手配中）。
- スラリー抜出装置（SEDS）によるスラリーの移替え後、HIC底部の残スラリーはHICの内部構造物を取外して移替えを行う予定であったが、取外し時に高線量環境下となることが想定されるため、内部構造物を取外さないで残スラリーの移替えを行うこととした。
 - 万一、内部構造物の取外しが必要になった場合に備え、並行してスラリーに近接するHICの内部構造物の取外し作業に関して、空のHICを用いて内部構造物取外しのモックアップを実施し、作業に要した時間から実作業での被ばく量評価等に用いる。

5. スラリー移替え作業のスケジュール(詳細工程調整中)



6. スラリー移替え作業内容(1/2)

- スラリー移替え作業は，増設多核種除去設備建屋内のHIC払出しエリアにて，設備からHICへスラリーを移送するために使用している抽出装置（SEDS）を使用。
 - SEDSの概要
 - SEDSは多核種除去設備からHICへのスラリー・吸着材の排出，吸着材排出後に内部の水の抜取りを行う装置。
 - HICの内部構造上，抽出用の配管はHIC底部2cm程度上までとなっており，SEDSによる抽出後もスラリーがHIC内に残るため，他の手段を用いて残ったスラリー（残スラリー）を移送（次頁）。
- 移替え対象HICからSEDSにより移替え先のHIC（新品）へスラリーを移替えた後，SEDS備付けのカメラ・ファイバーカメラ等を用いて内面確認を行い，底部に残ったスラリー（残スラリー）の固化の有無を確認。



6. スラリー移替え作業内容(2/2)

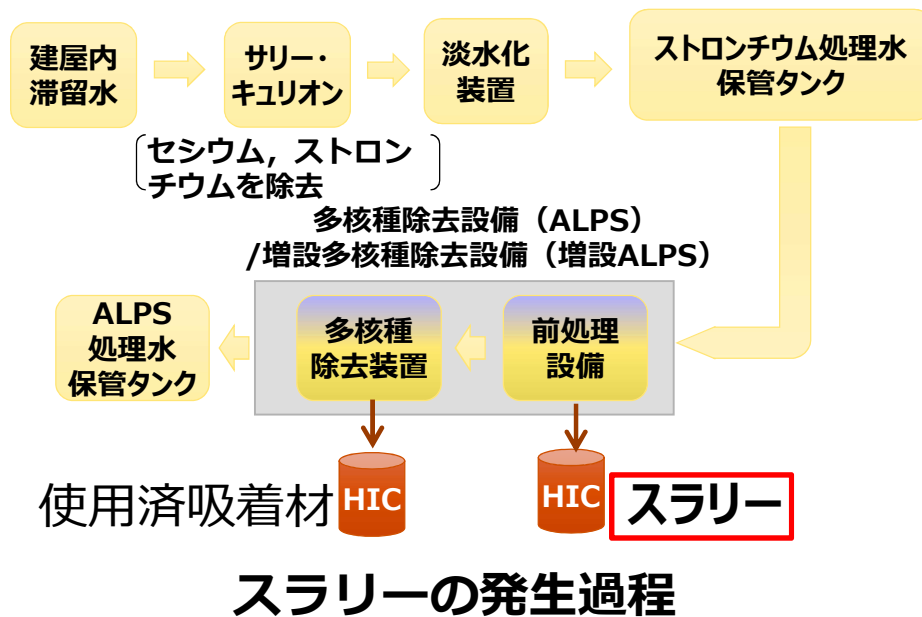
- 底部のスラリーの固化が確認されなかった場合、治具を用いて残スラリーを移替え。
 - 底部に残ったスラリーが固化していた場合は追加の対応が必要となるため、一旦、固化が確認されたHICを使用済セシウム吸着塔一時保管施設に移動。
- スラリー移替え完了後、壁面に付着したスラリーをろ過水によりすすぎ、ファイバーカメラにより可能な範囲で容器内面における損傷の有無を確認。
- 移替えが完了した後のH I C（移替え対象，移替え先）は、使用済セシウム吸着塔一時保管施設に移動し保管。
 - スラリー安定化処理設備には、HIC内部を洗浄する装置を計画しており、洗浄後、HICを減容処理していく予定。
 - スラリーの移替えにより空となったHICをスラリー安定化処理設備運用開始まで使用済セシウム吸着塔一時保管施設で保管すると、保管施設の空き容量が減少するため、先行して洗浄し、他エリアで仮置きすることを検討していく。
- 当該作業で得られた作業実績については、高線量H I Cのスラリー移替え作業やスラリー安定化処理設備における作業の安全対策等に反映していく。

以下，参考

【参考】背景

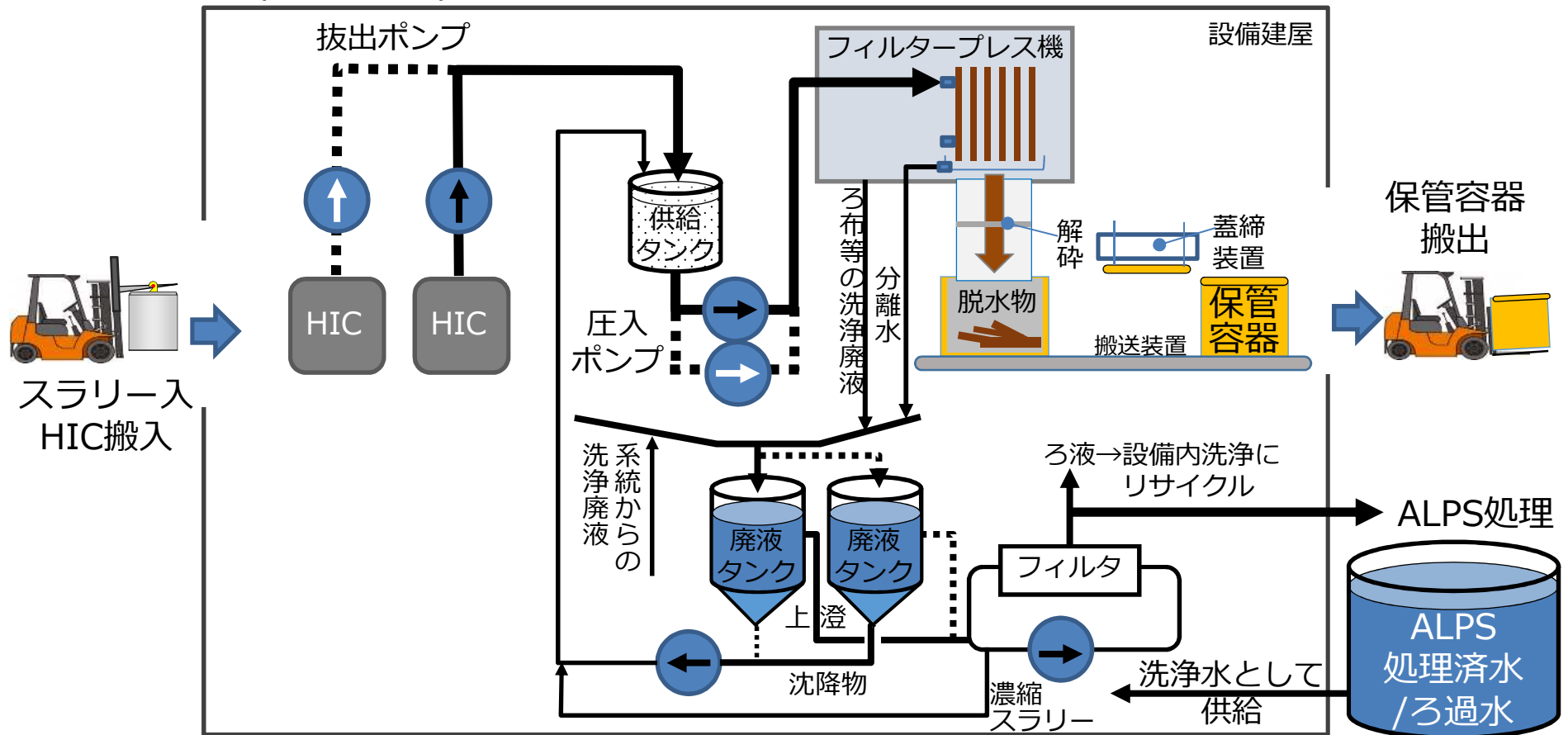
- 多核種除去設備（ALPS）の前処理工程で発生するスラリーは、高性能容器(HIC)に収納し使用済みセシウム吸着塔一時保管施設に保管。
- 保管中に上澄み水の溢水を経験し、またスラリー内での水素蓄積も推定され、リスク低減のため、安定化(脱水)処理を行い固形化する方針。
- 実規模試験により脱水処理の成立性を確認した「加圧搾ろ過処理」(フィルタプレス)にて、スラリーを安定化(脱水)処理する設備に関する基本設計及び配置設計等を実施。
 - 2021年1月7日，実施計画変更認可申請
 - 2021年4月15日，実施計画補正申請

『液体状』を『固体』に安定化



【参考】設備構成

- HICに収納されているスラリーは、ポンプ等にて抜き出し、フィルタープレス機で脱水され、脱水物を保管容器に充填し、別建屋に搬出。
- 脱水等により発生した廃液・洗浄水等は、フィルタ等を介して洗浄等に再利用し、余剰水はALPSに返送。
- その他に、換気系、制御装置等の付帯機器を配備。

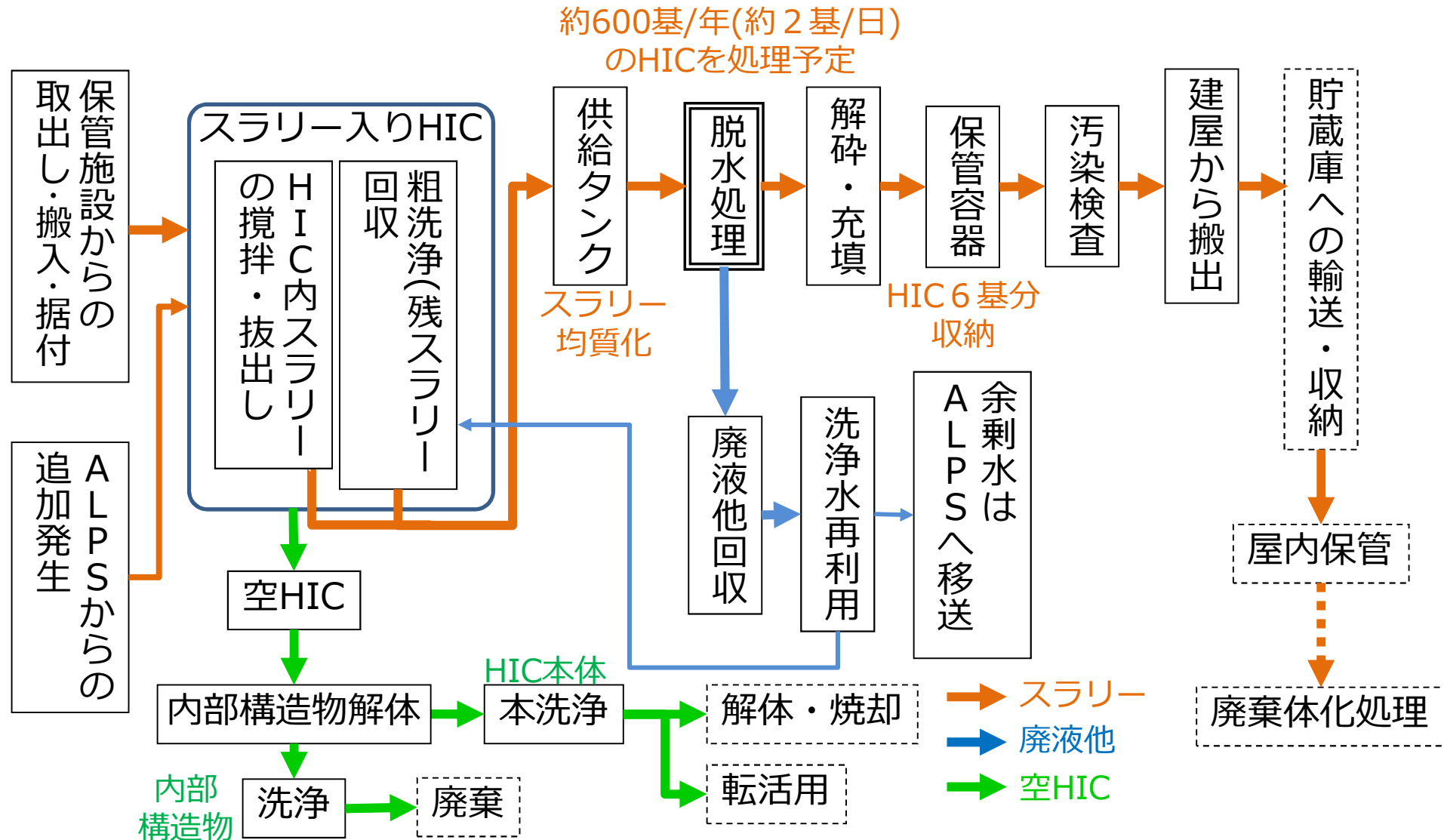


スラリー安定化処理設備全体概要図



【参考】処理プロセス

- 主な処理プロセスは以下の通り。



【参考】放射性物質の閉じ込め機能とダスト飛散対策 **TEPCO**

- スラリー安定化処理設備において処理対象のスラリーには高濃度のSr-90が含まれているため、放射性物質の屋外への放出や作業者の被ばくに関する安全対策が必要となる。
- 当該設備は、液体状のスラリーを固体状のスラリーへと安定化（脱水）する処理プロセスの中でダストが飛散する恐れがあるため、ダスト飛散対策を計画。ダスト飛散の恐れがある処理プロセス及び実施場所は以下の通り。

処理プロセス	実施場所	ダスト飛散の恐れ	作業者の介在
スラリー入りHIC搬入	建屋内外	無	有
HICからのスラリー抽出	地上階南側 抽出室	有(エリア①)	有
供給タンクへのスラリー受入	地下階南側 機器エリア	無	無
スラリーの脱水処理	地上階北側 フィルタープレス室	有(エリア②)	無
保管容器への脱水物受入	地下階北側 充填エリア	有(エリア③)	無
保管容器の蓋締め	地下階北側 蓋締めエリア	無	無
保管容器搬出	建屋内外	無	有
空HIC洗浄	地上階南側 抽出室	有(エリア①)	有
空HIC搬出	建屋内外	無	有

【参考】放射性ダストの飛散影響

- 万一放射性ダストが飛散した場合を想定し、建屋外へ排出される放射エネルギー及び建屋内の放射能濃度を評価する。なお、設備保全時には機器内洗浄後に実施するため、ダスト飛散の影響は低いと想定される。また、設備トラブル時には、スラリーの漏えいが想定されるものの、HICからの漏えい時の対応と同様な対応を実施する。

➤ 計算条件

処理工程の中でダスト飛散の恐れが高い、フィルタプレス機による脱水物を下方の保管容器へ自由落下により排出する工程を想定して評価する。スラリー中の核種は支配的な核種であるSr-90を想定する。Sr-90は全量が脱水物中に残留すると想定する。

A : スラリー中のSr-90濃度	1.40E+07 Bq/cm ³
B : HIC1基あたりのスラリー保管容量	2.21 m ³
C : HIC処理ペース	2 基/日
D : スラリーが落下により空气中へ移行する割合	5.00E-05 [-]※1
E : HEPAフィルタによる除去効率(DF)	1.00E+06 [-]※2
F : HIC 1 基あたりの脱水処理回数	3 回/基
G : 保管容器周囲容積 (保管容器及び脱水物シューター部)	19.0 m ³
H : 脱水物受入エリアの容積	399 m ³
I : HIC1基分スラリーに相当する脱水物容量	0.64 m ³

※ 1 : U.S. Department of Energy, AIRBORNE RELEASE FRACTIONS/RATES AND RESPIRABLE FRACTIONS FOR NONREACTOR NUCLEAR FACILITIES, Volume I - Analysis of Experimental Data, DOE-HDBK-3010-94 December 1994

※ 2 : 区画したエリアから建屋外へ排出される空気は少なくとも2段のHEPAフィルタを通過する。HEPAフィルタの除去性能はJIS規格にて99.97%以上 (DF=3333以上) と定めており、フィルタ2段を考慮するとDFは1.00E+07以上となるが、保守側に値を設定する。

【参考】放射性ダストの飛散影響

➤ 建屋外への放出量

フィルタープレス機より排出される脱水物が自由落下により空気中へ移行し、その空気がHEPAフィルタを通過して建屋外へ排出される際の建屋外へのSr-90放出量は以下の通り。

$$\text{建屋外への放出量} = A \times B \times 10^6 \times C \times D / E = 3.09E+03 \text{ Bq/日}$$

この値は、大気中に拡散する放射性物質に起因する実効線量評価にて用いる放出量（Ⅲ章2.1.3放射性気体廃棄物等の管理に記載の原子炉建屋からの放出量, 10^3 Bq/sec オーダー）に比べて十分低く、実効線量へ有意な影響を与える値では無い。

➤ 建屋内の放射能濃度

フィルタープレス機より排出される脱水物が自由落下により空気中へ移行し、当該エリア中の空気へ拡散することを想定する。

脱水物が落下する保管容器周囲の空気は排風機に吸い込まれる設計としているため、放射性物質が当該エリアへ広く拡散することはないが、保守側に、保管容器周囲の空気が脱水物の容積分押し出され、排風機に吸い込まれずに当該エリアに拡散することを想定する。脱水物が自由落下により保管容器周囲の空気中へ移行した直後の、保管容器周囲の空気中の放射性物質濃度は以下の通り。（換気空調系の寄与については次項に記載）

$$\begin{aligned} \text{放射性物質濃度} &= A \times B \times 10^6 / F \times D / (G \times 10^6) \\ &= 2.72E+01 \text{ Bq/cm}^3 \quad \dots \text{①} \end{aligned}$$

当該エリアの空気中の放射性物質濃度は以下の通り。

$$\text{放射性物質濃度} = \text{①} \times (I / F) / H = 1.45E-02 \text{ Bq/cm}^3 \quad \dots \text{②}$$

【参考】放射性ダストの飛散影響

➤ 全面マスク着用上限濃度

当該設備で取り扱うスラリーはSr-90が支配的であることから、全面マスク着用上限濃度（1年間を通して、週40時間平均して吸引すると仮定した時の上限濃度）はSr-90（チタン酸ストロンチウムの化合物）を基準に設定し、 $3.0E-03Bq/cm^3$ とする。

➤ 建屋内の空気浄化

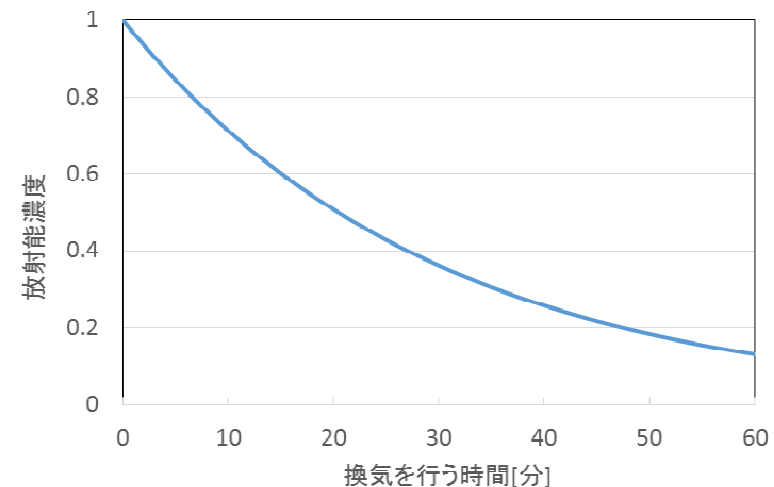
フィルタープレス機や保管容器を設置するエリアについては、ダスト管理エリアとして、エリアを区画してエリア内の空気をHEPAフィルタ付の局所排気設備により浄化する設計とする。また、その換気回数は1時間あたり2回以上としている。

②で求めた放射能濃度（ $1.45E-02 Bq/cm^3$ ）は、全面マスク着用上限濃度（ $3.0E-03Bq/cm^3$ ）に対して約5倍高い値であるが、約60分で同程度まで低下する。

作業者が、ダスト管理エリアへ立ち入る際には放射性ダスト濃度の測定を行い、放射性ダスト濃度が全面マスク着用にて作業可能な値であることを確認して作業する。

このため、作業者は立ち入りのために約60分待つ必要があるが、設備の運用に支障を及ぼすような長い待ち時間ではない。

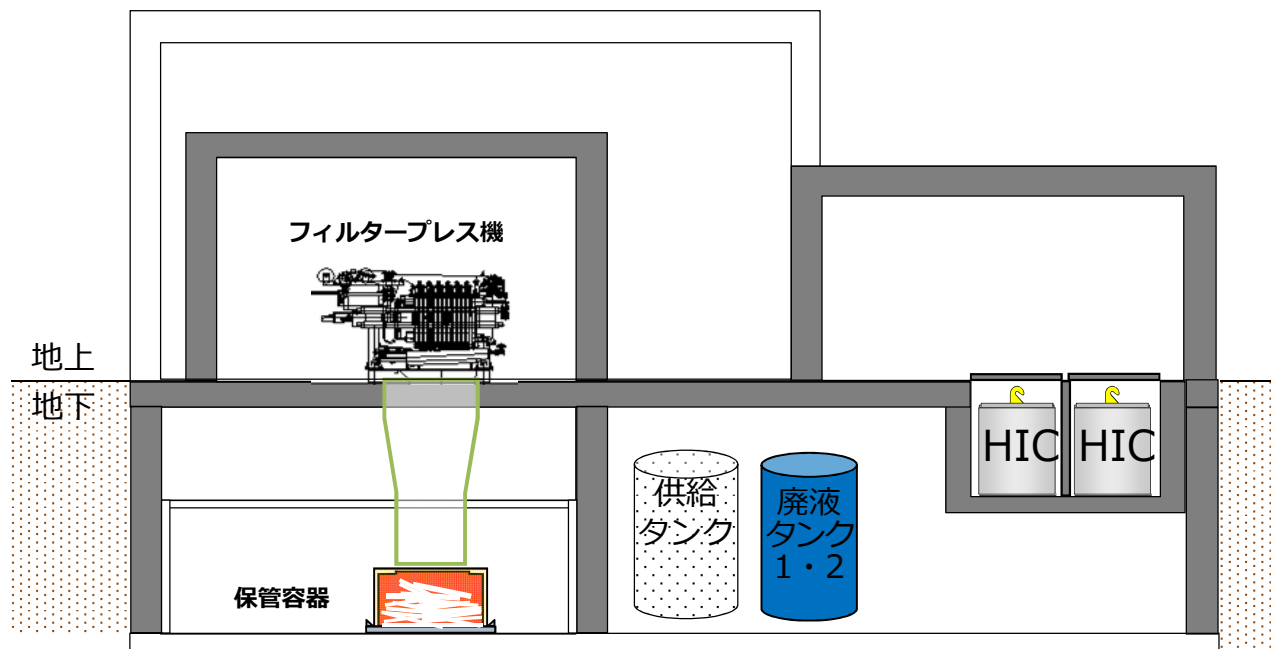
換気回数を2回/時間とする時の放射能濃度の推移を右のグラフに示す。
放射能濃度は、0分における値を1として無次元化して示している。



【参考】 遮へい計画

● 遮へい計画

- 高線量機器を建屋地下階に格納し、床及び壁等にて遮へいすることで、敷地境界線量への寄与を低減。最寄評価地点における線量寄与は、0.0006mSv/年。
- ✓ 主要機器：HIC, フィルタープレス機, 保管容器, タンク類(含水処理設備)
- ✓ 主要核種： $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (他の核種の存在比は多核種除去設備に準じる)
- ✓ 主たる遮へい：鉄筋コンクリート造の建屋
 - ・ フィルタープレス機以外は地下配置とし、地上階床スラブで遮へい
 - ・ フィルタープレス機は地上設置のため、鉄筋コンクリート造の壁等で遮へい



【参考】脱水物の長期的な管理

- 脱水物には水が滴らない程度の水分（含水率50～60%）が含まれており水素の発生は継続するため、保管容器にはフィルター付きの排気口を設けて、水素が保管容器内に滞留しない構造とする。保管容器は固体廃棄物貯蔵庫に収納し、建屋は換気し、水素が滞留しないようにする。
- 炭酸塩スラリーや鉄共沈スラリーの脱水物については、国内での長期保管経験がないことから、保管中に想定外の形態・性状変化を生じていないかを観察する計画を立てて管理してゆく。
- 内容物が充填された脱水物保管容器のうち、容器表面線量の高いもの若干数を選定し、保管開始後の経過年数について時期を定めて内部の観察を行う。
- 変化の有無を含め、観察結果を将来の廃棄体化の検討に活用する。