

平成29年12月7日
第13回再処理・リサイクル部会セミナー

テーマⅡ：重大事故等に対する再処理施設の
安全性向上について(その2)

重大事故等：冷却機能喪失による蒸発乾固に係る
安全対策



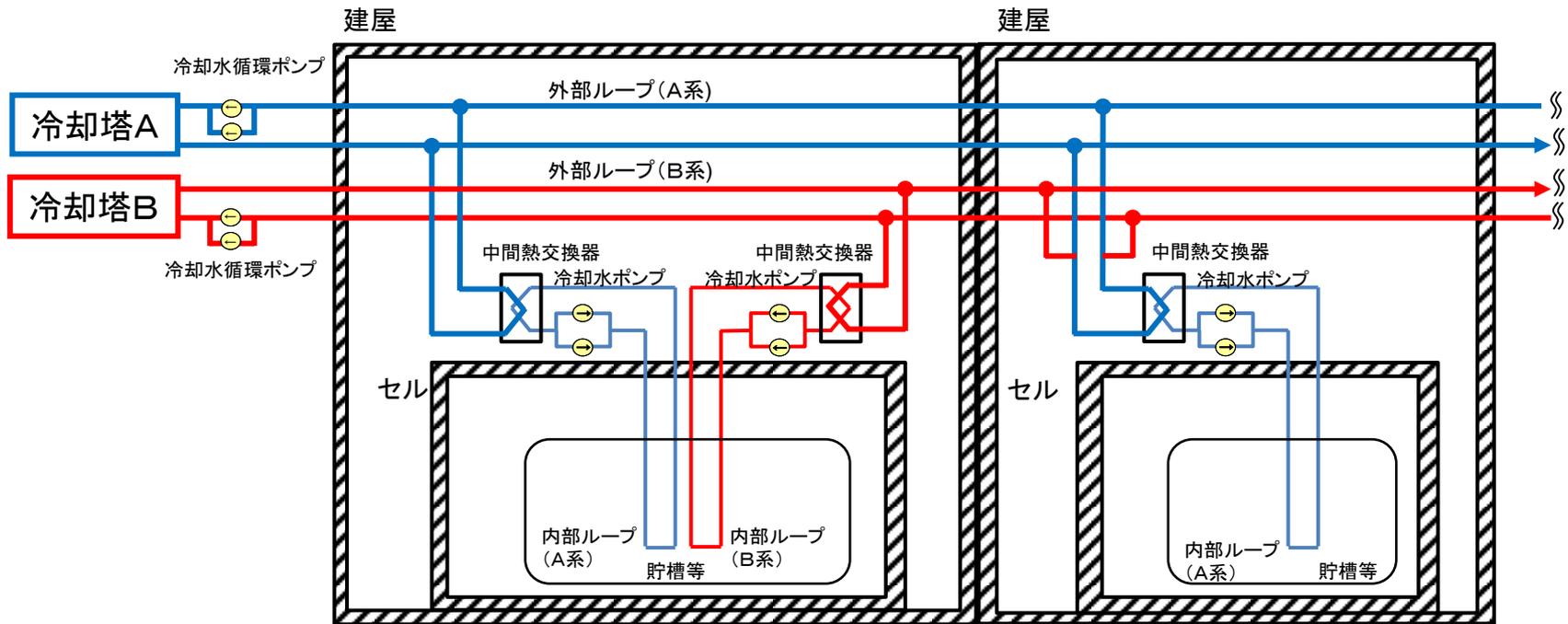
日本原燃株式会社

再処理事業部 エンジニアリングセンター
プロジェクト部 安全グループ
瀬川 智史

1. 事故の特徴
 1. 1 再処理工場における蒸発乾固に対する設計上の考慮
 1. 2 冷却機能喪失時の事故進展概要
 1. 3 冷却機能喪失時の対処のための時間余裕
2. 発生を想定する機器と重要度分類
3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
 3. 1 運用上の対応
 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
 3. 3 有効性評価の前提条件
 3. 4 有効性評価結果
 3. 5 有効性評価における不確かさ
4. 今後の課題

1. 事故の特徴

1.1 再処理工場における蒸発乾固に対する設計上の考慮



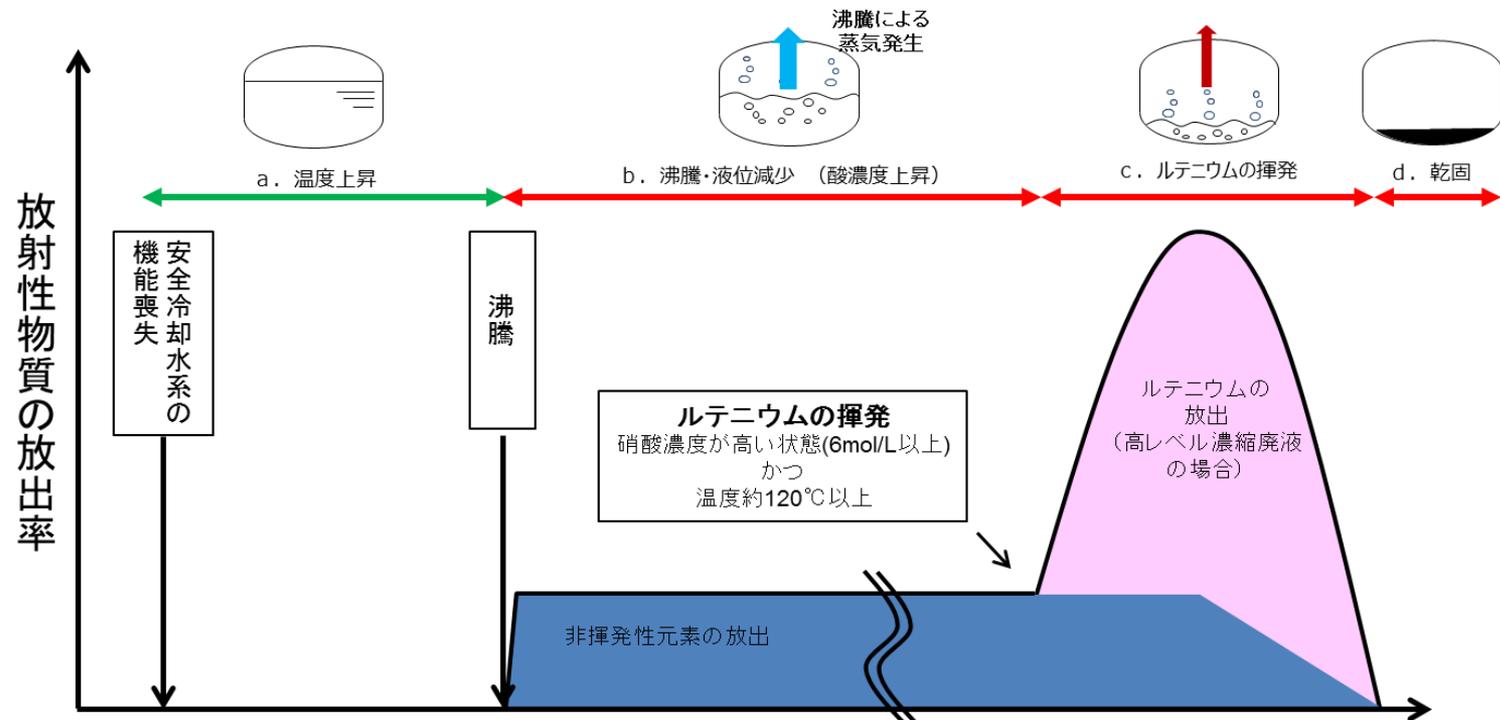
◇安全冷却水系の特徴

- (1) 貯槽等で発生する崩壊熱を除去する内部ループと、除去した熱を外部へ排出するための外部ループで構成する。
- (2) 外部ループは独立した2系列により構成し、1系列の運転でも崩壊熱除去に必要な容量を有する。また、各系列の冷却水循環ポンプ等の動的機器は多重化している。
- (3) 冷却機能が喪失してから沸騰に至るまでの時間が比較的長い貯槽等の内部ループは、1系列で構成される。冷却機能が喪失してから沸騰に至るまでの時間が短い貯槽等の内部ループは2系列により構成され、1系列の運転でも崩壊熱除去に必要な容量を有する。
- (4) 動的機器は、外部電源が喪失した場合でも機能を期待できるよう、非常用所内電源系統に接続する。

1. 事故の特徴

1.2 冷却機能喪失時の事故進展概要

- 蒸発乾固は、溶液の温度上昇を経た後、沸騰に至ることで環境への放出量が増大し、さらに、沸騰継続による溶液中のRuの化学形態の変化による放出量のさらなる増大という特徴を有する(放出挙動の変化が2回ある)。
- 沸騰に至るまでの時間、沸騰状態における放射性物質の放出率は、溶液が有する崩壊熱(溶液の放射性物質の濃度)に依存する。



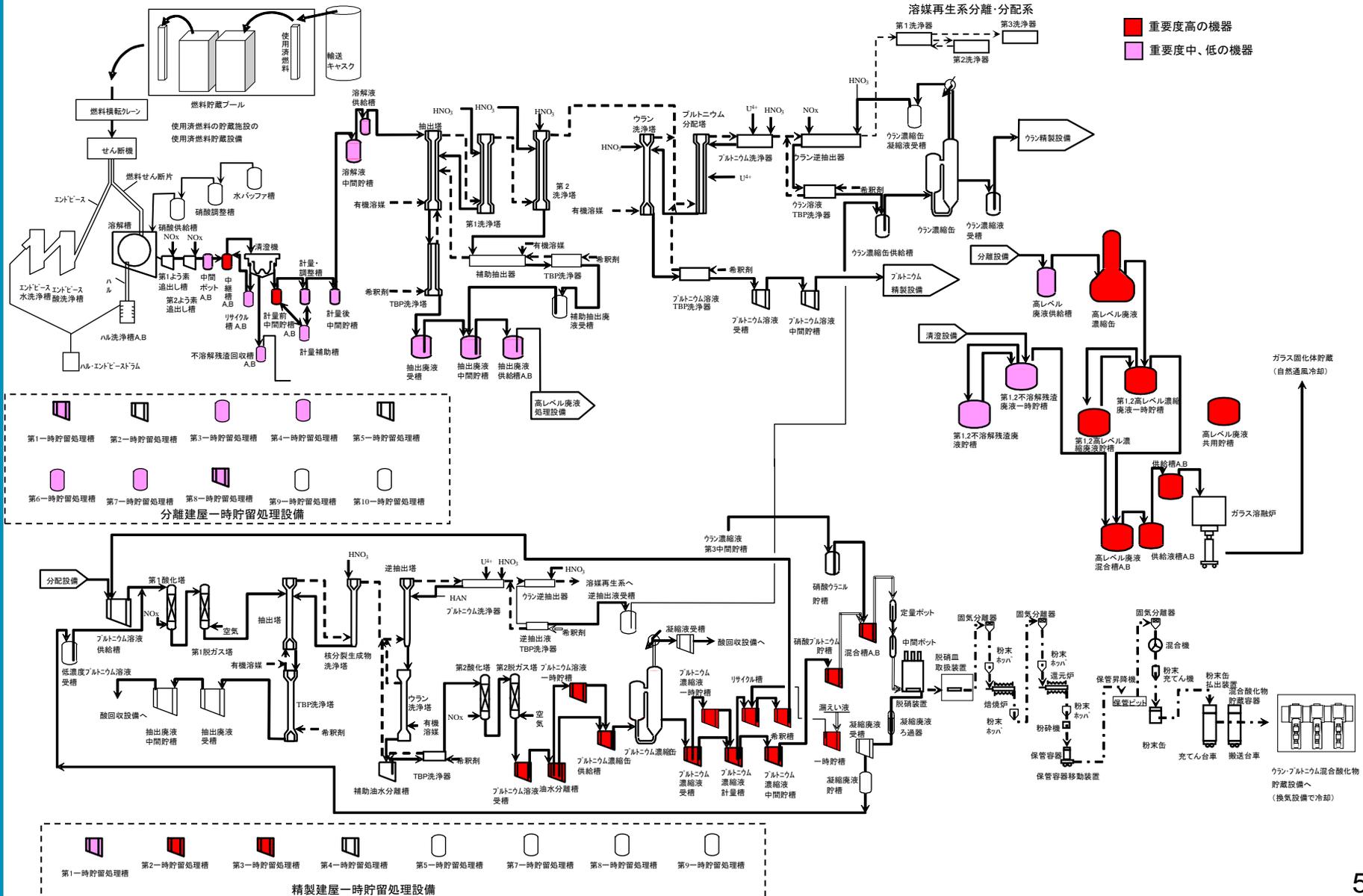
1. 事故の特徴

1.3 冷却機能喪失時の対処のための時間余裕



建屋	時間余裕	主な溶液
前処理建屋	148時間	溶解液 不溶解残渣廃液
分離建屋	15時間	溶解液 抽出廃液 高レベル濃縮廃液
精製建屋	11時間	プルトニウム溶液 プルトニウム濃縮液
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	19時間	プルトニウム濃縮液
高レベル廃液ガラス固化建屋	23時間	高レベル濃縮廃液 不溶解残渣廃液

2. 発生を想定する機器と重要度分類



3. 1 運用上の対応(1/7)

<燃料仕様の変更>

重大事故等の対応に要する時間を確保し、重大事故等の対応の実施を確実にするとともに、重大事故等が発生した際の一般公衆及び放射線業務従事者等への放射性物質等による影響を低減するため、再処理施設に受入れる使用済燃料、せん断処理等する使用済燃料の現実的な条件を考慮し、使用済燃料の仕様のうち冷却期間を、旧申請書等の4年から15年に変更する。

3. 1 運用上の対応(2/7)

<事象進展に影響する因子>

崩壊熱密度

- 放射性物質の放出に至るまでの時間(沸騰に至るまでの時間)余裕に影響する。
- 既許可の燃料仕様から得られる崩壊熱密度の場合、高レベル濃縮廃液で沸騰まで約6時間であり、時間余裕が小さい。

Ru106

- 蒸発乾固において、高レベル濃縮廃液中のRuは、沸騰が継続すると化学形態が揮発性へ変化することで、沸騰による飛まつ同伴よりも大きな放出をもたらし、環境へのCs137換算放出量に影響する。

3. 1 運用上の対応(3/7)

<燃料仕様変更の目的(つづき)>

①崩壊熱密度の観点

- 蒸発乾固や水素爆発等の重大事故等への対応の習熟が図られるまでの間、崩壊熱密度を制限し、時間余裕を確保した上で重大事故の対応に係る各対策を確実にする。
- 再処理する使用済燃料の冷却年数を制限することにより、崩壊熱密度の低減効果は下表のとおりであり、崩壊熱密度の低減割合に比例して重大事故等の時間余裕が延びる。

各種溶液の代表的な崩壊熱密度

溶液の種類	崩壊熱密度	
	4年	15年
溶解液	1500W/m ³	600W/m ³
抽出廃液	790W/m ³	290W/m ³
Pu濃縮液	8800W/m ³	8600W/m ³
不溶解残渣廃液	6200W/m ³	4W/m ³
高レベル濃縮廃液	10kW/m ³	3600W/m ³

3. 1 運用上の対応(4/7)

<燃料仕様変更の目的(つづき)>

②放射エネルギーの観点

- 重大事故等の発生により、放射性物質の環境への放出に至るような事態に至ったとしても、溶液中の放射エネルギーの総量を制限することで、その影響を一定程度以下に抑える。
- 蒸発乾固の特徴である放射性ルテニウムの場合、再処理する使用済燃料の冷却年数を制限することによりその放射エネルギーは約1/2000に減衰し、また、セシウムやストロンチウム等の放射エネルギーも約2/3に減衰する。
- これにより、重大事故等への対応が全て機能しなかった場合であって、蒸発乾固及び水素爆発が同時に発生し、放射性物質が環境へ放出されるような事態に至った場合でも、放出量の総量が100TBqを超えることはない。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.1 運用上の対応(5/7)

<崩壊熱密度やRu106の放射能に影響する燃料条件の要素>

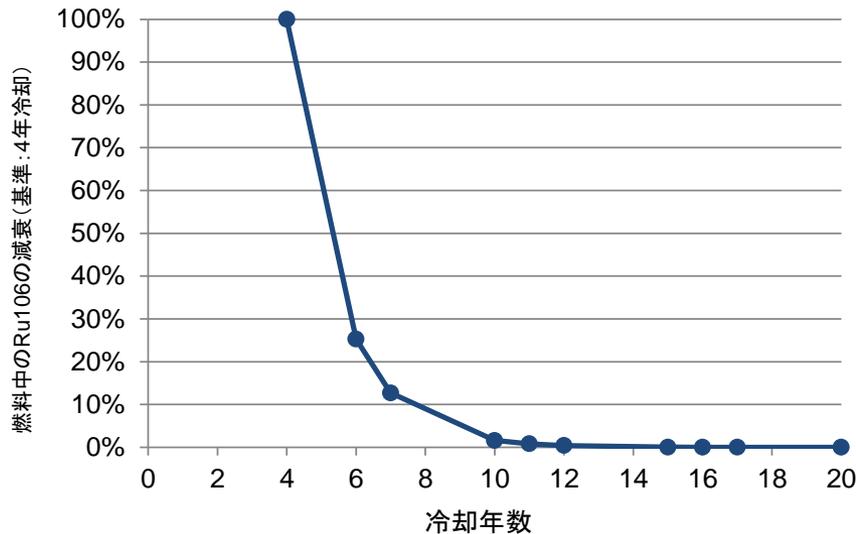
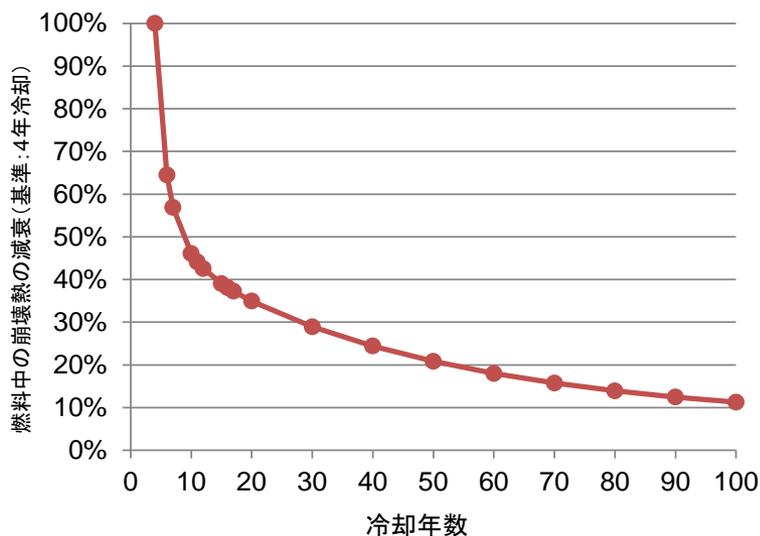
- 燃焼度は、原子炉における運転によって決まるため、使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の燃料貯蔵プールに受け入れる使用済燃料の燃焼度を管理するのは困難
- 冷却年数は、原子炉から燃料を取り出した後の再処理までの期間に依存する。使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の燃料貯蔵プールには3,000tUの受入容量があるため、再処理する使用済燃料の冷却年数を管理することは比較的容易



Ru106の半減期は1.02年と比較的短いため、冷却年数を長くすることによる減衰効果が大きく、また、放射能の減衰に伴い崩壊熱も減衰



再処理する使用済燃料の冷却年数に着目して運転管理することで各種目標値を達成



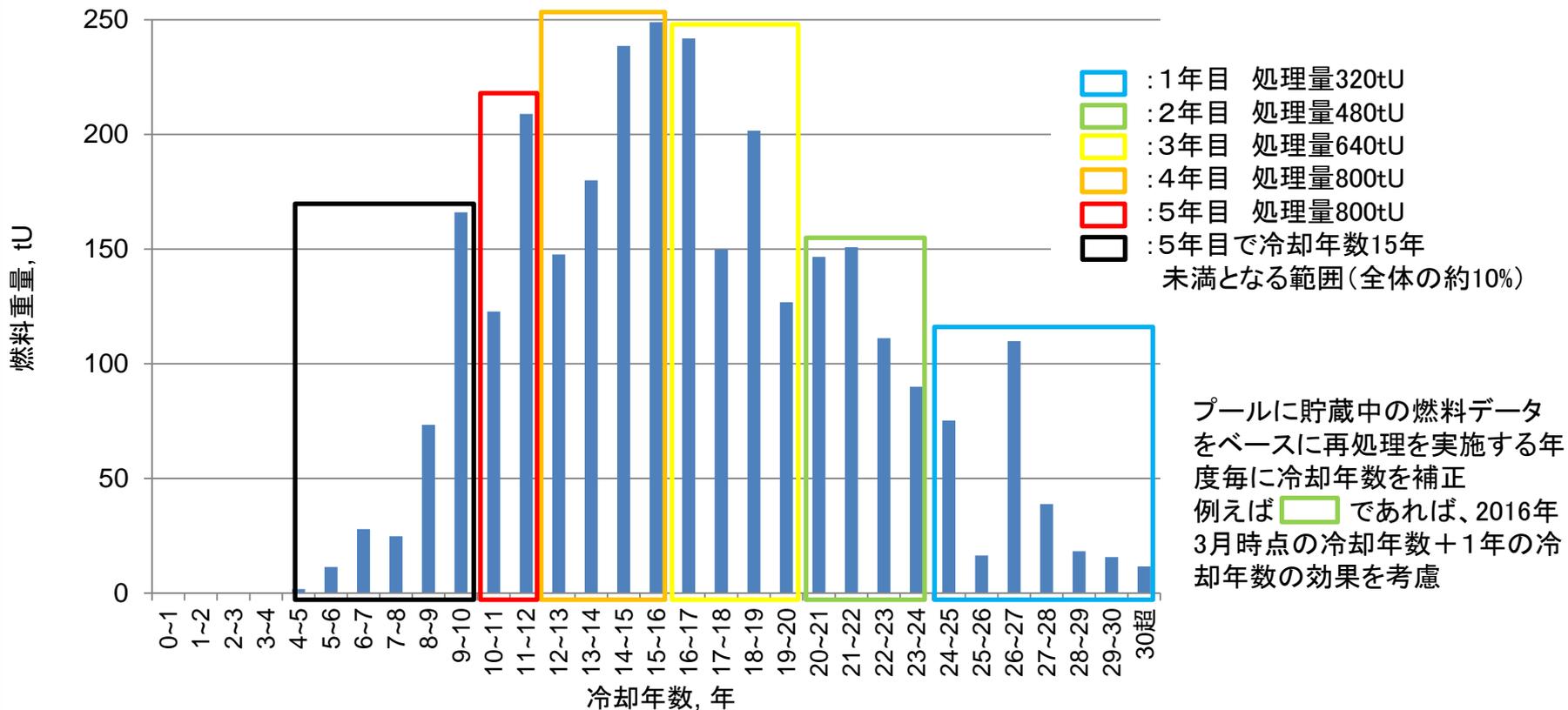
3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.1 運用上の対応(6/7)

<使用済燃料の貯蔵を踏まえた運転管理>

- 使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の燃料貯蔵プールには、現在約3,000tUの使用済燃料を貯蔵している。
- 使用済燃料を予定再処理数量を基に以下の処理量にて冷却年数の長い順に再処理することを想定する。
- その結果、使用済燃料の約90%は冷却年数15年以上で再処理可能である。



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.1 運用上の対応(7/7)

- 現実的な運転を考えた場合には、再処理する使用済燃料の冷却年数は15年以上を確保できる見通しである。



- 運転管理としては、冷却年数15年以上の使用済燃料に制限し、再処理することとする。

		冷却年数4年 (標準燃料条件)	冷却年数15年
崩壊熱密度	高レベル濃縮廃液	10kW/m ³	3.6kW/m ³
	時間余裕	約6時間	約23時間
Ru106	高レベル濃縮廃液中のRu106総量	3.0 × 10 ⁶ TBq	1.5 × 10 ³ TBq

- 3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 2. 1 蒸発乾固に対する発生防止対策(1/6)



再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第三十五条

セル内において使用済燃料から分離された物であって液体状のもの又は液体状の放射性廃棄物を冷却する機能を有する施設には、再処理規則第一条の三第二号に規定する重大事故の発生又は拡大を防止するために必要な次に掲げる重大事故等対処設備を設けなければならない。

- 一 蒸発乾固の発生を未然に防止するために必要な設備



1. 蒸発乾固に対する発生防止対策

安全冷却水系の機器等が損傷し、冷却機能が喪失した場合には、蒸発乾固の発生を未然に防止するため、重大事故等対処施設の冷却機能の喪失による蒸発乾固に対処するための設備の蒸発乾固未然防止設備の常設重大事故等対処設備の給水施設の冷却水設備の安全冷却水系の内部ループに注水し、蒸発乾固を想定する機器に内蔵する溶液を冷却し、溶液が沸騰に至ることを防止する。

さらに、内部ループへの注水が機能しなかった場合には、より貯槽に近い位置から冷却コイルに注水し、蒸発乾固を想定する機器に内蔵する溶液を冷却する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

3. 2. 1 蒸発乾固に対する発生防止対策(4/6)

1 膨張槽液位確認



【作業概要】

安全冷却水系内部ループ配管の破損有無の確認のため、膨張槽液位計の指示値を確認する。

2 温度計設置及び温度計測



【作業概要】

高レベル廃液の温度推移を監視するため及び拡大防止対策への移行判断のために可搬型の温度計を設置し、冷却停止による温度上昇の有無を確認する。
また、注水作業後においては、対策実施後の温度推移を確認する。

3 内部ループ注水準備(ホース布設、ホース接続)

【作業概要】

冷却水を供給するための建屋内ホースを布設する。

4 内部ループ注水準備(弁隔離)

5 内部ループ注水(弁操作、漏えい確認、流量確認)

【作業概要】

注水を実施するための弁隔離等を実施する。その後注排水弁を徐々に開とし注水を開始する。必要に応じて注水流量を調整する。また、布設したホース等からの漏えいがないことを確認する。



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

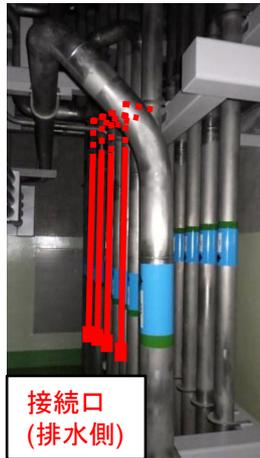
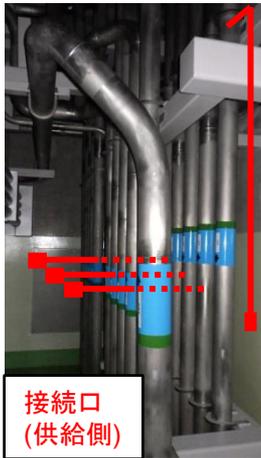
3. 2. 1 蒸発乾固に対する発生防止対策(5/6)



6 冷却コイル注水準備(ホース布設、ホース接続)

【作業概要】

冷却水を供給するための建屋内ホースを布設する。



7 冷却コイル注水準備(弁隔離)

8 冷却コイル注水(弁操作、漏えい確認、流量確認)

【作業概要】

注水を実施するための弁隔離等を実施する。その後注排水弁を徐々に開とし注水を開始する。必要に応じて注水流量を調整する。また、布設したホース等からの漏えいがないことを確認する。



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

3. 2. 1 蒸発乾固に対する発生防止対策(6/6)



【蒸発乾固の計測パラメーター一覧】

対策段階	計測パラメータ	設置先	計測目的
発生防止	貯槽温度	貯槽付計装配管 (常設)	ループ注水成否判断、貯槽内液の冷却確認
	冷却水流量	建屋内ホース	冷却に必要な冷却水量が連続して供給されていることの確認
	漏えい液受血液位	セル付属計装配管 (常設)	セル内の漏えい有無の確認
	膨張槽液位	膨張槽	内部ループの健全性を確認
	冷却水注水系統圧力	建屋内ホース	冷却コイルの健全性を確認

- 3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 2. 2 蒸発乾固に対する拡大防止対策(1/4)



再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第三十五条

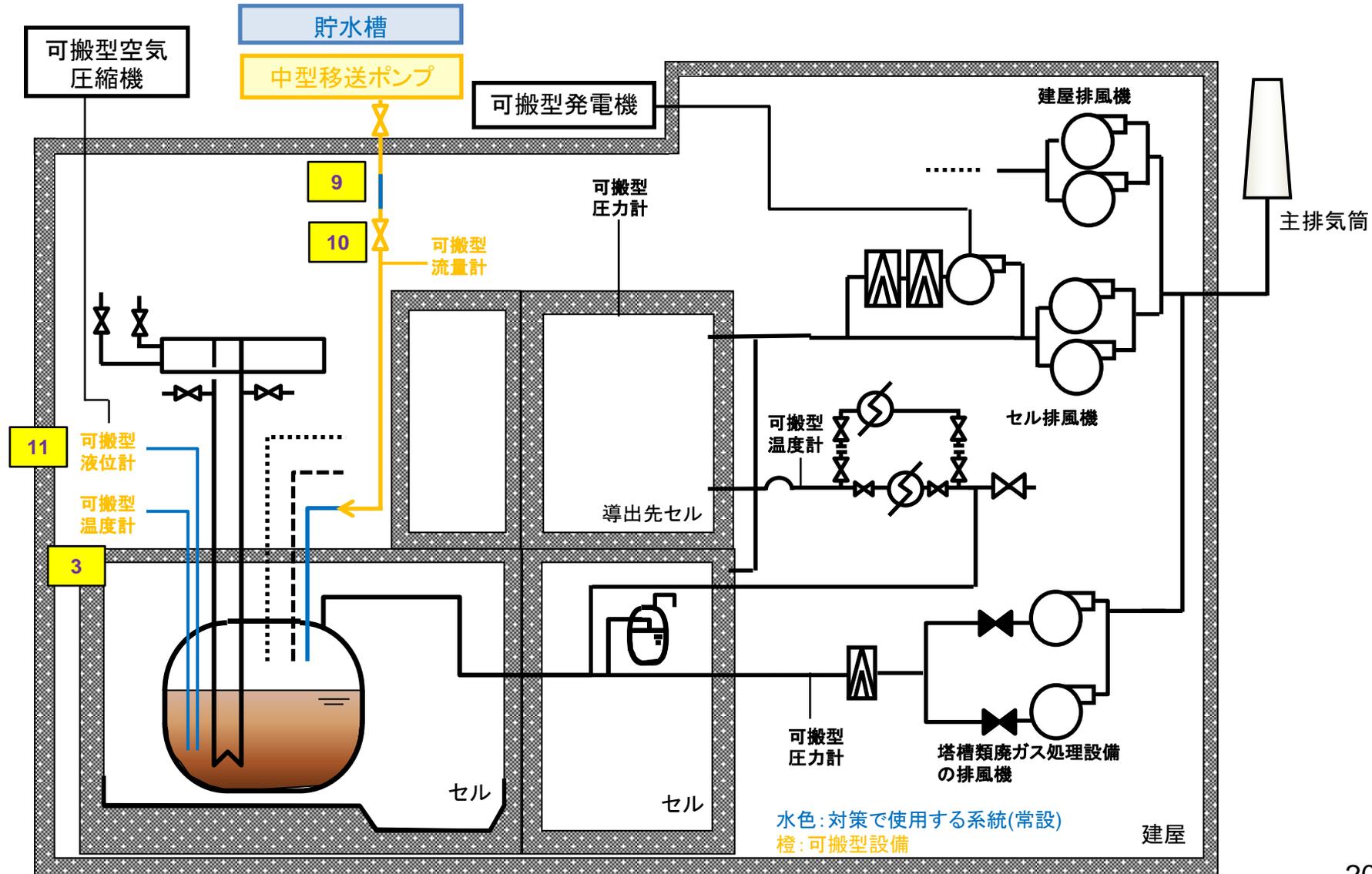
二 蒸発乾固が発生した場合において、放射性物質の発生を抑制し、及び蒸発乾固の進行を緩和するために必要な設備



2. 蒸発乾固に対する拡大防止対策

重大事故等の発生防止対策の実施にも係らず、機器に内蔵する溶液が沸騰に至る場合には、機器に注水することにより、揮発性のルテニウムが気相中に大規模に放出されるのを抑制し、蒸発乾固の進行を緩和する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
 3. 2. 2 蒸発乾固に対する拡大防止対策(2/4)



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

3. 2. 2 蒸発乾固に対する拡大防止対策(3/4)



9 ホース布設、ホース接続

【作業概要】

対象貯槽へ屋外から注水するため、建屋内にホースを布設する。

3 温度計測



【作業概要】

発生防止対策時に設置した可搬型温度計を用いて、対象貯槽の温度推移を確認する。

10 漏えい確認等／貯槽注水

【作業概要】

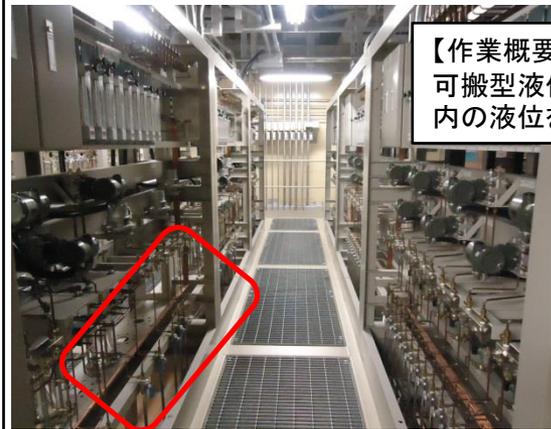
布設したホース等からの漏えいがないことを確認する。対象貯槽への実際の注水は、貯槽液位計設置後、槽内液位の低下が確認された場合に、貯槽への注水を開始する。



11 貯槽液位計設置及び液位計測

【作業概要】

可搬型液位計を設置し、対象貯槽内の液位を確認する。



- 3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 2. 2 蒸発乾固に対する拡大防止対策(4/4)



【蒸発乾固の計測パラメーター一覧】

対策段階	計測パラメータ	設置先	計測目的
拡大防止	貯槽温度	貯槽付計装配管 (常設)	拡大防止対策の開始判断
	貯槽液位	貯槽付計装配管 (常設)	注水開始／終了の判断
	機器注水流量	建屋内ホース	機器に必要な流量が供給されていることの確認

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
3. 2. 3 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)(1/3)



再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第三十五条

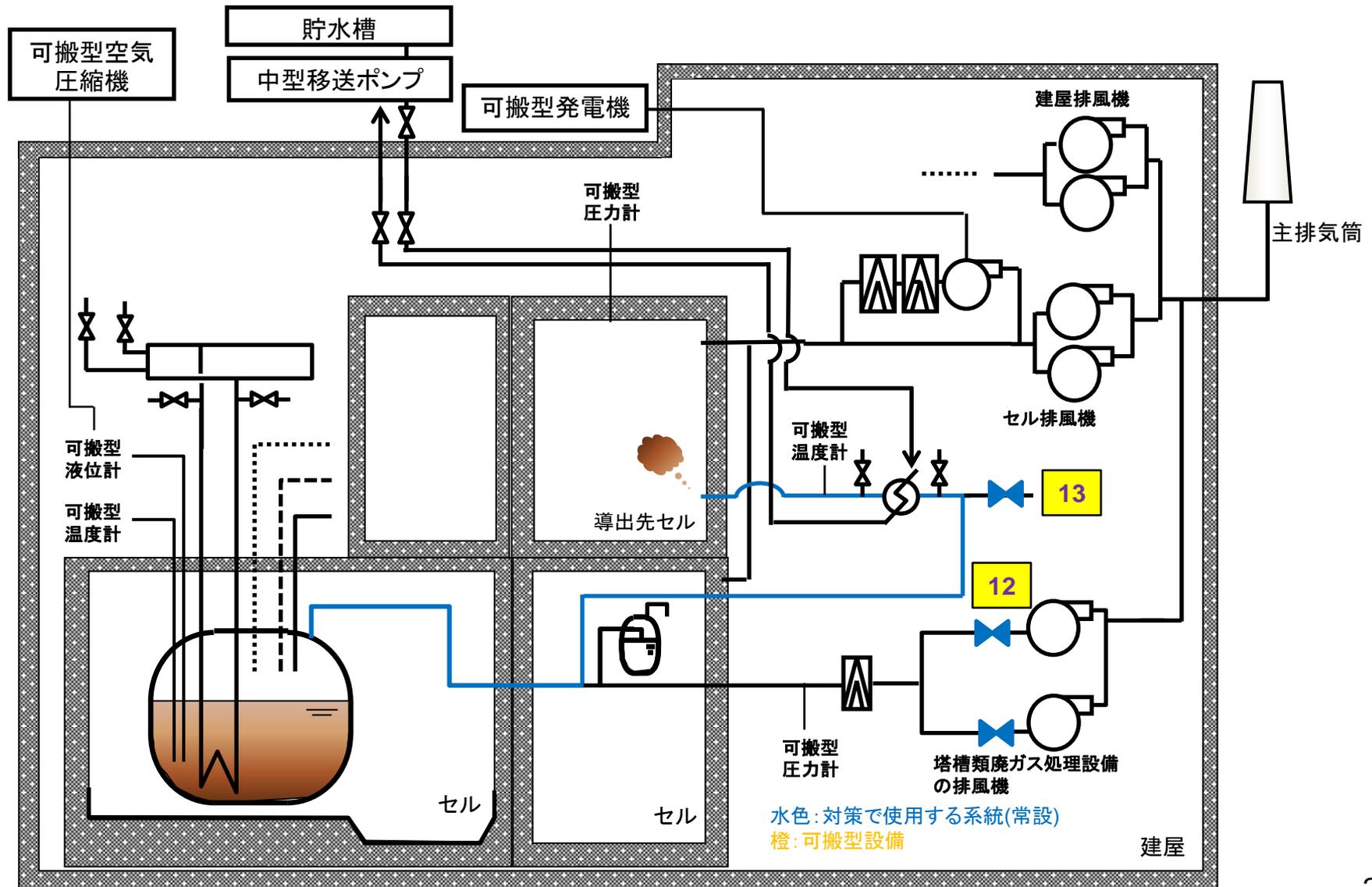
三 蒸発乾固が発生した設備に接続する換気系統の配管の流路を遮断するために必要な設備及び換気系統の配管内が加圧状態になった場合にセル内に設置された配管の外部へ放射性物質を排出するために必要な設備



3. 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)

機器に内蔵する溶液が沸騰に至る場合には、機器に接続する重大事故等対処施設の冷却機能の喪失による蒸発乾固に対処するための設備の換気系統遮断・セル導出設備の常設重大事故等対処設備の気体廃棄物の廃棄施設の塔槽類廃ガス処理設備の配管の流路を遮断すること等により、放射性物質等をセルに導出し、セルに閉じ込めることで放射性エアロゾルの沈着等を図る。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
 3.2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
 3.2.3 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)(2/3)



- 3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 2. 3 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)(3/3)



12 隔離弁の操作



【作業概要】

高レベル廃液ガラス固化建屋塔槽類廃ガス処理設備の隔離弁を閉止し、高レベル廃液ガラス固化建屋塔槽類廃ガス処理設備からセルに導出するユニットの隔離弁を開放することで、塔槽類廃ガス処理設備内の雰囲気セルへ導出する。

13 排気経路構築(ダンパ閉止等)



【作業概要】

廃ガス中に含まれる放射性物質を極力低減させて大気中へ放出するため、ダンパ閉止等により排気経路構築を行う。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
3. 2. 4 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(1/5)



再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第三十五条

四 蒸発乾固が発生した場合において放射性物質の放出による影響を緩和するために必要な設備



4. 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)

凝縮器により、沸騰に伴い発生する蒸気の凝縮及び放射性エアロゾルの除去を実施する。

セルの内圧が上昇し、経路外放出の可能性が高まった場合には、排風機を起動し、高性能粒子フィルタ(2段)により放射性エアロゾルを除去することで大気中へ放出される放射性物質を低減し、管理放出する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

3. 2. 4 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(3/5)



14 ホース布設、ホース接続、弁操作

【作業概要】

凝縮器へ屋外から注水し、機器からの蒸発蒸気を凝縮させるために、建屋内の接続口までホースを布設する。
外部からの注水を実施するための弁隔離等を実施する。

15 漏えい確認等／凝縮器注水

【作業概要】

出口弁を閉止した状態で一度注水して加圧し、コイルの健全性を確認した後に、出口弁を開として注水を開始する。必要に応じて注水流量を調整する。
また、布設したホース等からの漏えいがないことを確認する。



16 計器監視(液位、温度、圧力、流量)



【作業概要】

発生防止対策、拡大防止対策、異常な水準の放出防止対策後に、機器の状態を監視するため、定期的に流量、液位、温度、圧力を確認する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価
 3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
 3. 2. 4 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(4/5)



17 セル内及び廃ガス洗浄塔入口圧力計設置

18 ケーブル布設、可搬型発電機起動



【作業概要】
 塔槽類廃ガス処理設備の雰
 囲気を導出したセルの圧力及
 びセル導出時の圧力を監視
 するため、圧力計を設置する。
 また、可搬型排風機を起動す
 るため、可搬型発電機からの
 ケーブル布設等を行う。



ケーブル
 可搬型発電機

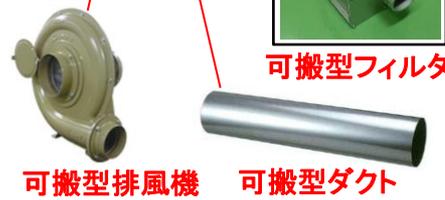
19 可搬型排風機、可搬型フィルタ、可搬型ダクト設置及び可搬型排風機起動準備

20 セル内圧力計確認/可搬型排風機起動



【作業概要】
 可搬型排風機により、セルに
 導出された放射性物質等を排
 気するため、可搬型排気フィ
 ルタ、可搬型排風機及び可搬
 型ダクトを接続し、可搬型排
 風機の起動準備をする。

 発生防止対策または拡大防
 止対策実施後、セル内圧力計
 による指示値の上昇を確認し
 たら可搬型排風機を起動する。



可搬型排風機
 可搬型フィルタ
 可搬型ダクト

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 2 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

3. 2. 4 蒸発乾固に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(5/5)



【蒸発乾固の計測パラメーター一覧】

対策段階	計測パラメータ	設置先	計測目的
放出防止	貯槽温度	貯槽付計装配管 (常設)	放出防止対策の開始判断
	凝縮器出口排気温度	配管付計装配管 (常設)	凝縮器出口排気温度の監視
	冷却水流量(凝縮器注水)	建屋内ホース	凝縮器に必要な冷却水量が連続して供給されていることの確認
	廃ガス洗浄塔入口圧力	配管付計装配管 (常設)	セル導出時の圧力確認
	導出先セル圧力	セル付属計装配管 (常設)	可搬型排風機起動の判断
	可搬型フィルタ差圧	可搬型フィルタ	フィルタ差圧の確認

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 3 有効性評価の前提条件

3. 3. 1 有効性評価項目及び判断基準



a. 重大事故等の発生防止対策

溶液が崩壊熱により温度上昇し、沸騰に至る前に、水源から冷却対象機器の内部ループへ冷却水を供給し、溶液が蒸発乾固に至ることを未然に防止できること。

また、内部ループへの注水が機能しない場合であっても、冷却コイルへ冷却水を供給し、溶液の温度を沸点以下に維持できること。

(評価項目)

- ・沸騰前までに内部ループへの注水の準備が完了し実施できることを確認する。
- ・溶液が有する崩壊熱を除去するために必要な冷却水量を供給できることを確認する。

b. 重大事故等の拡大防止対策

重大事故等の発生防止対策が機能しなかったとしても、水源から冷却対象機器へ希釈水を供給し、溶液の蒸発乾固の進行を緩和できること。

(評価項目)

- ・沸騰前までに拡大防止対策の準備を完了できることを確認する。
- ・沸騰に伴い減少する溶液を補填するために必要な注水ができることを確認する。

c. 異常な水準の放出防止対策

溶液の冷却機能の喪失から事態の収束までに環境へ放出される放射性物質の放出量が、凝縮器及び高性能粒子フィルタによる放射性エアロゾルの除去等により、セシウム-137換算で100TBqを十分下回るものであって、かつ、実行可能な限り低いこと。

(評価項目)

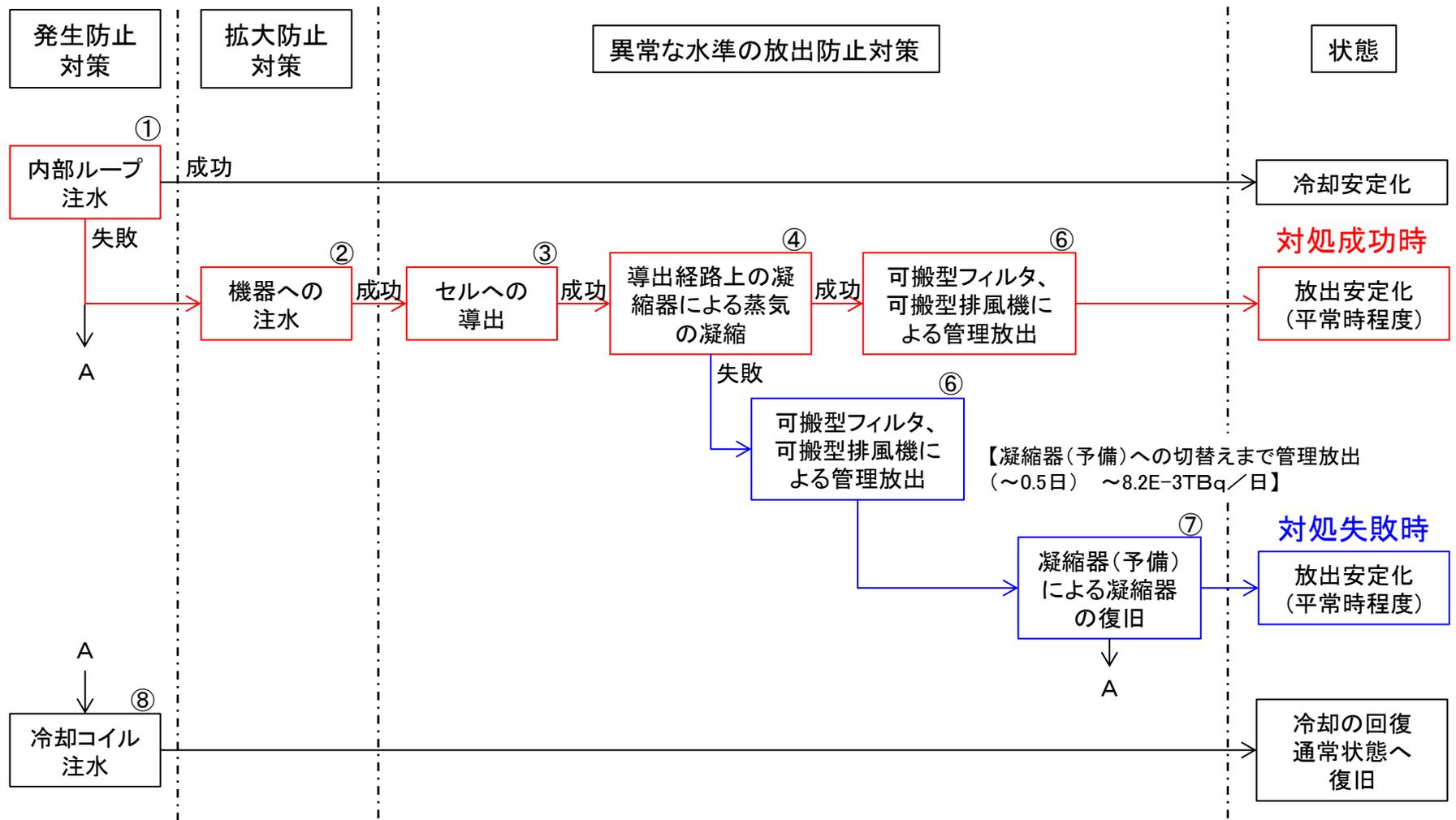
- ・沸騰前までに異常な水準の放出防止対策の準備を完了できることを確認する。
- ・沸騰に伴い環境へ放出される放射性エアロゾルの放出量(セシウム-137換算)が100TBqを十分下回ることを確認する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.3 有効性評価の前提条件

3.3.2 異常な水準の放出防止対策の有効性評価における解析シナリオ



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 3 有効性評価の前提条件

3. 3. 3 有効性評価の条件(1/2)



重大事故における放出量評価

重大事故における放射性物質の放出量評価は、安全評価で広く用いられる5因子法を基に以下の計算式より算出する。

$$\text{放射性物質放出量} = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARF} \times \text{LPF} \times \text{RF}$$

MAR: 当該事象が発生する機器に保有される放射性物質質量(Bq)

DR : MARのうち事故の影響を受ける割合

ARF: 気相を通じて貯槽外部へ移行する割合

LPF: 放出経路での低減割合。DFの逆数で表現される値

RF : 吸入摂取に寄与する割合

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3.3 有効性評価の前提条件

3.3.3 有効性評価の条件(2/2)



項目		主要評価条件	条件設定の考え方
解析条件	安全冷却水系の運転状態	1系列運転	冷却能力が100%2系列の安全冷却水系の1系列が停止していることを想定。
	崩壊熱密度	3200W/m ³ ※1	平常運転時の最大値 燃料型式:PWR、燃焼度:45,000MWd/t・U _{pr} 、比出力:60MW、初期濃縮度:3.5wt%、冷却期間:15年
	冷却水の初期温度	29°C	
	内蔵液の初期温度	計算値	安全冷却系1系列運転時の温度を設定。

項目	対処成功時の放出量	対処失敗時の放出量	設定の考え方
M A R	平常運転時の最大値	同左	平常運転時の最大値 燃料型式:PWR、燃焼度:45,000MWd/t・U _{pr} 、比出力:38MW、初期濃縮度:4.5wt%、冷却期間:15年
D R	崩壊熱密度3200W/m ³ ※1を基に算出	同左	平常運転時の最大値 燃料型式:PWR、燃焼度:45,000MWd/t・U _{pr} 、比出力:60MW、初期濃縮度:3.5wt%、冷却期間:15年
A R F	沸騰に伴う気相中に放出される放射性物質:0.005%	同左	文献値
L P F	HEPAフィルタ2段相当のDF10 ⁵	蒸気によるフィルタの劣化を考慮 DF 1000	文献値
	凝縮器による蒸気の凝縮のDF10	期待しない DF1	—
	放出経路上構造物によるDF10	同左	—
R F	保守的に1を設定	同左	—

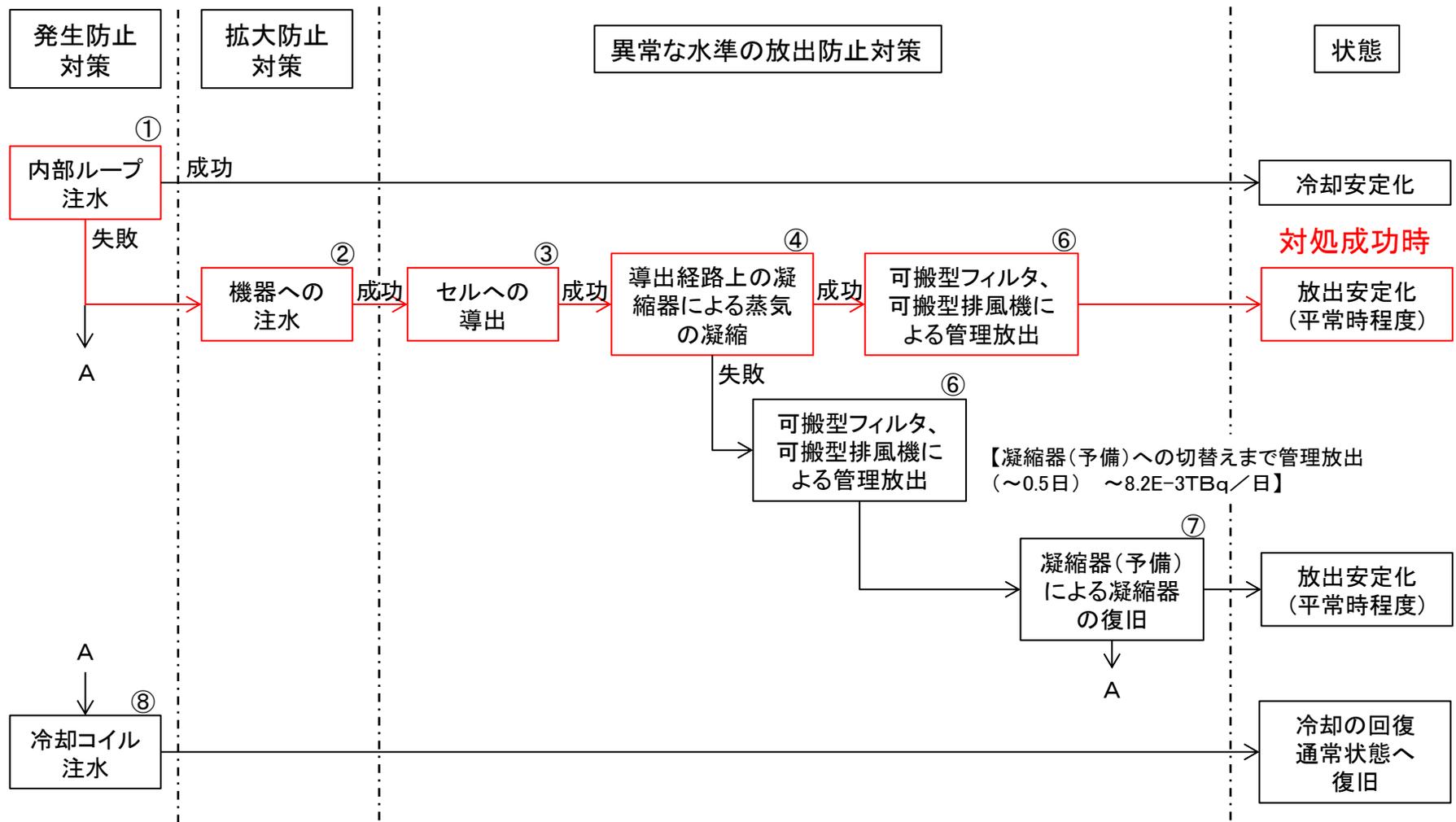
※1 高レベル濃縮廃液貯槽の場合

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.4 有効性評価結果

3.4.1 対処成功時の放出量(1/3)

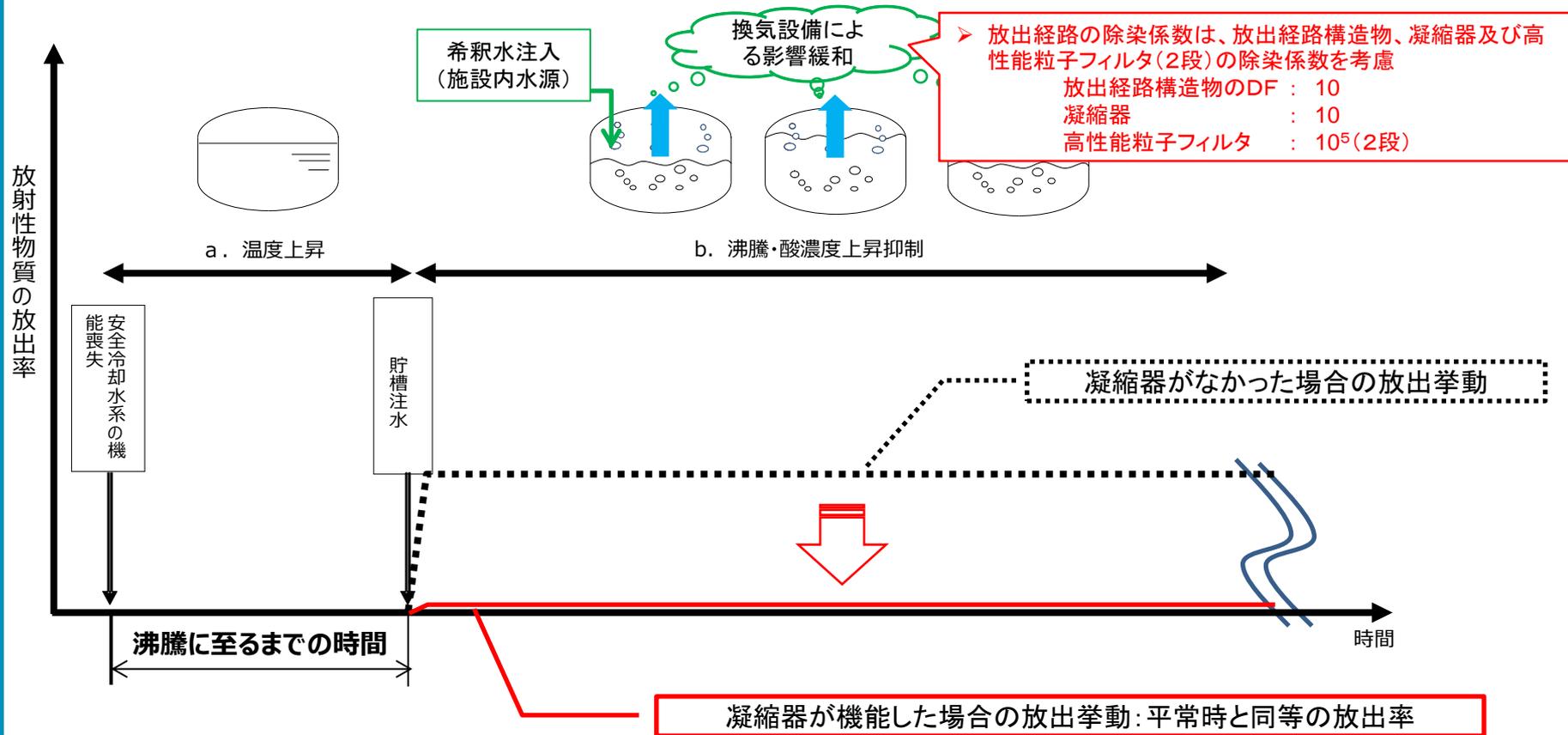


3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.4 有効性評価結果

3.4.1 対処成功時の放出量(2/3)



放出量評価の前提

(1)発生防止対策

冷却機能が喪失し内部ループ等への注水を試みるものの冷却機能の回復に至らず、沸騰に至ることを想定する。

(2)拡大防止対策

沸騰に至った後、機器への直接注水を継続し溶液の硝酸濃度上昇を抑制することでRuの大規模な放出を防止する。

(3)異常な水準の放出防止対策

拡大防止対策である機器への注水の開始と同時期に、沸騰により飛まつ同伴するエアロゾルの放出量低減のための異常な水準の放出防止対策(セル導出、凝縮器及び高性能粒子フィルタ(2段)による放射性エアロゾルの除去)が開始され、放出量が平常時程度に制限されることで収束する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3. 4 有効性評価結果

3. 4. 1 対処成功時の放出量(3/3)

- 異常な水準の放出防止対策に係る準備は、安全冷却水系の冷却機能の喪失から23時間以内に完了可能である。
- 沸騰が発生した場合における放射性物質の放出量は平常運転時程度であり、100TBqを十分下回る。
- 設定したARF、LPFに上振れの不確かさが内在するものの、その他のパラメータの下振れも存在し、被ばく線量はこの幅に含まれると考えられる。このため、有効性評価で示す放出量は妥当であると考えられる。
- 以上より、安全冷却水系の冷却機能の喪失による蒸発乾固時の放射性物質の異常な水準の放出を防止することができる。

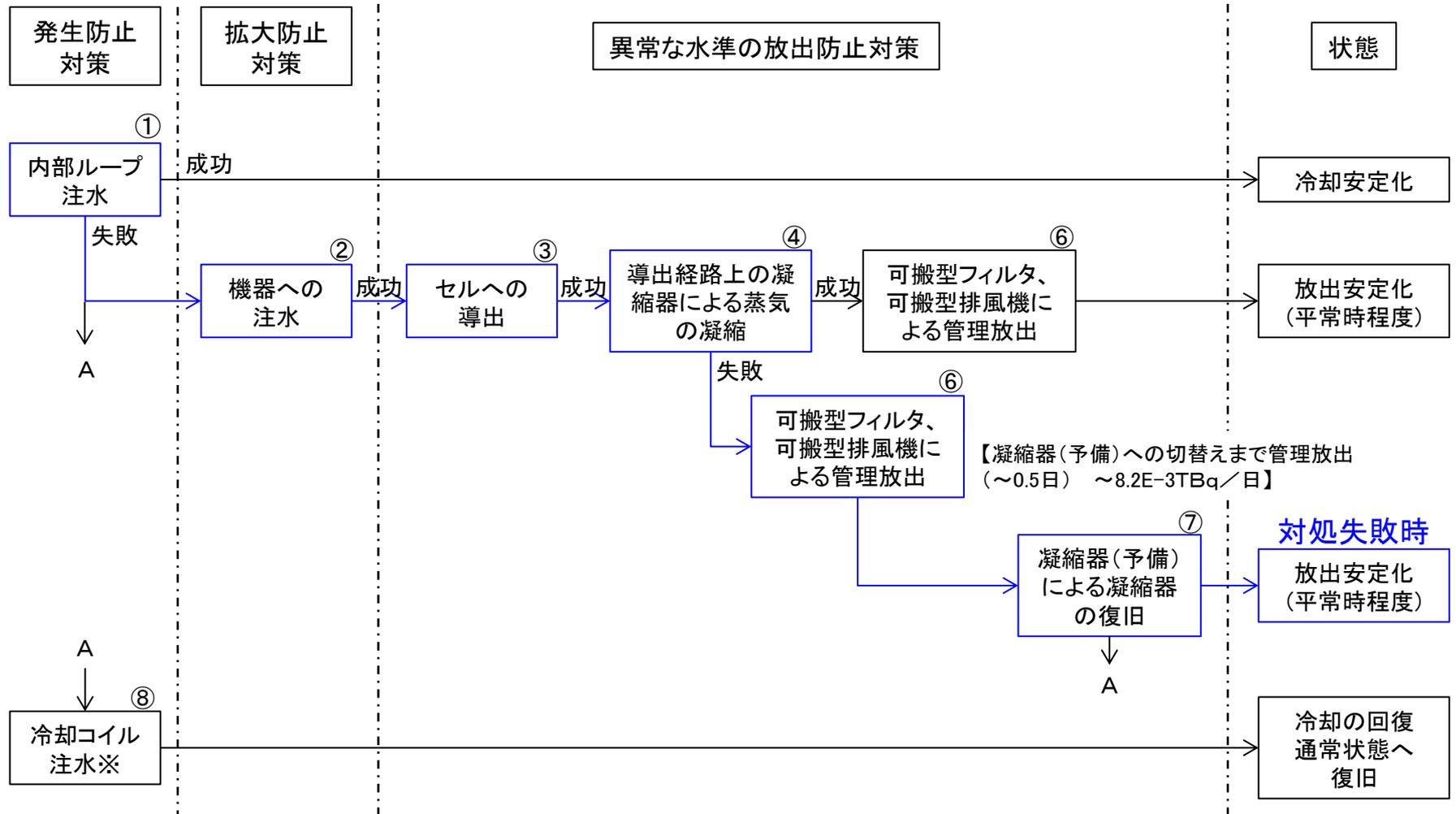
評価対象	放出量(TBq/日)
セシウム-137換算	平常運転時程度 (7.8E-5)

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.4 有効性評価結果

3.4.2 対処失敗時の放出量(1/3)

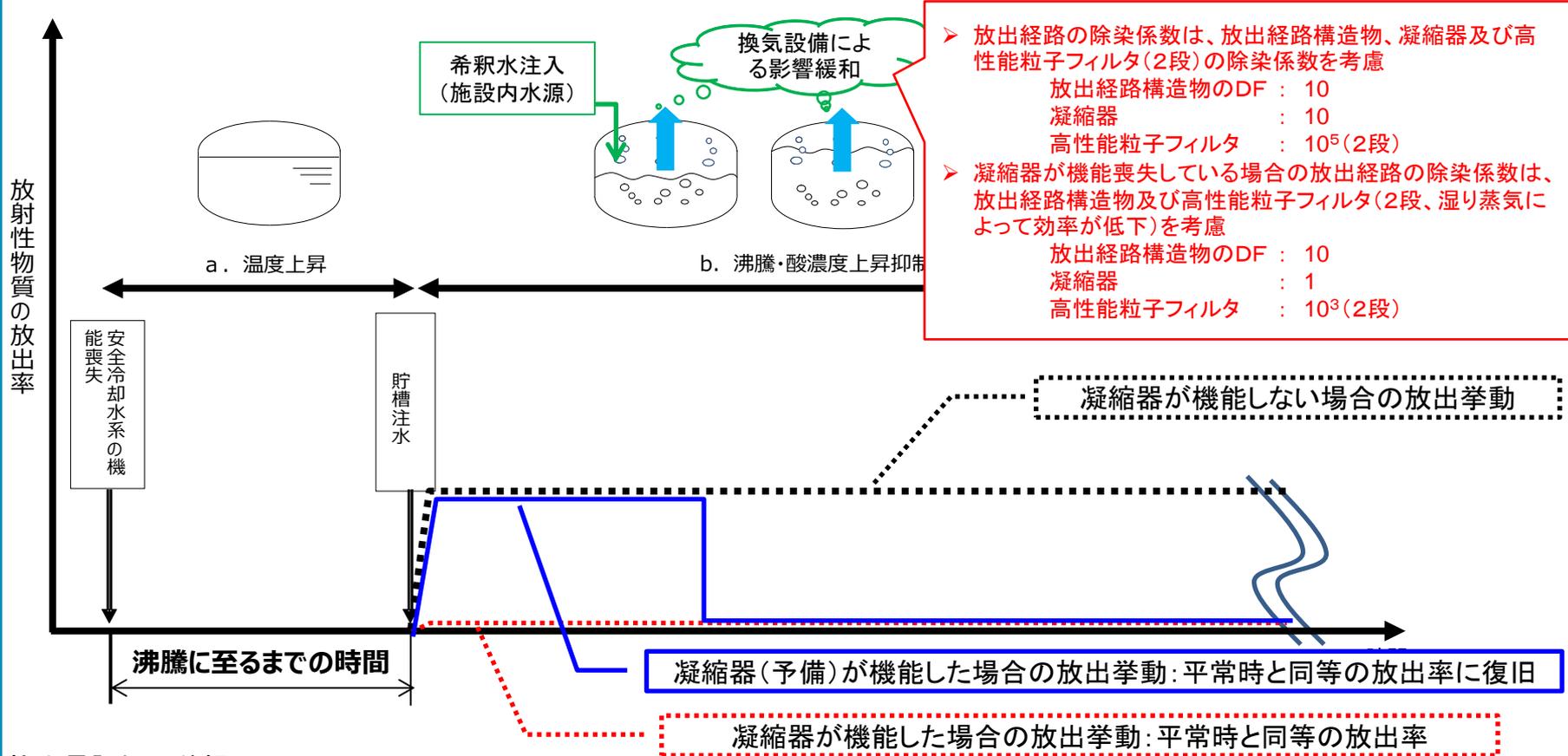


3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



3.4 有効性評価結果

3.4.2 対処失敗時の放出量(2/3)



放出量評価の前提

(1) 発生防止対策

冷却機能が喪失し内部ループ等への注水を試みるものの冷却機能の回復に至らず、沸騰に至ることを想定する。

(2) 拡大防止対策

沸騰に至った後、機器への直接注水を継続し溶液の硝酸濃度上昇を抑制することでRuの揮発を防止する。

(3) 異常な水準の放出防止対策

拡大防止対策である機器への注水の開始と同時期に、沸騰により飛まつ同伴するエアロゾルの放出量低減のための異常な水準の放出防止対策(セル導出、凝縮器及び高性能粒子フィルタ(2段)による放射性エアロゾルの除去)が開始され、放出量が平常時程度に制限されることで収束する。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3.4 有効性評価結果

3.4.2 対処失敗時の放出量(3/3)



各解析シナリオにおける放出量評価

凝縮器による 蒸気の凝縮(④、⑧)	可搬型フィルタ、可搬型排風機に よる管理放出(⑥)	放出量評価結果	
		建屋	放出量(TBq/日)
対処成功時 凝縮器DF10以上	成功 フィルタDF(2段) 1×10^5 放出経路構造物DF10	前処理建屋	平常運転時の放出量 $7.8E-05$ と同等
		分離建屋	
		精製建屋	
		U・Pu混合脱硝建屋	
		高レベル廃液ガラス固化建屋	
対処失敗時	成功 フィルタDF(2段) 1×10^3 放出経路構造物DF10	前処理建屋	$9.9E-05$
		分離建屋	$1.0E-03$
		精製建屋	$5.5E-03$ ※
		U・Pu混合脱硝建屋	$1.2E-03$
		高レベル廃液ガラス固化建屋	$8.2E-03$ ※
		建屋合計	$1.6E-02$

※ 1日あたりの放出率が大きく、凝縮器(予備)の設置作業に最も時間を要する高レベル廃液ガラス固化建屋において凝縮器が機能しなかった場合、冷却機能の喪失から24時間後に凝縮器(予備)への系統の切替え作業に着手する。作業時間を保守的に12時間と見積もった場合、放出量は $4.1E-03$ TBqとなる。(収束までの時間を冷却機能の喪失から1.5日)

また、沸騰に至るまでの時間が最も短い精製建屋の場合、 $5.5E-03$ TBqとなる。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 5 有効性評価における不確かさ

3. 5. 1 設定値が有する不確かさ(1/4)



①MAR: 当該事象が発生する機器に保有される放射性物質質量(Bq)

- 再処理する使用済燃料の燃焼条件の変動を考慮し15年冷却条件を基に算出される放射性物質質量の最大値を設定している。(核種によって1.1倍から2.7倍の保守性を考慮)
- 実際にせん断する使用済燃料の冷却年数は15年以上となり、減衰による放射性物質質量のさらなる低減が期待できる。

②DR: MARのうち事故の影響を受ける割合

- 蒸発乾固の発生が想定される溶液の崩壊熱密度に依存するパラメータであり、再処理する使用済燃料の燃焼条件の変動を考慮し15年冷却条件を基に算出される崩壊熱密度の最大値を設定している。(溶液によって1.0倍から1.6倍の保守性を考慮)
- 実際にせん断する使用済燃料の冷却年数は15年以上となり、減衰による崩壊熱密度のさらなる低減が期待できる。

③ARF: 気相を通じて貯槽外部へ移行する割合

- 旧JNES、JAEA、JNFLの三者共同研究の成果から保守的に設定。(5E-5を設定)
- 実験体系が必ずしも実機の体系を全て網羅できておらず、体系に起因した不確かさ(パラメータの上振れの可能性)が存在する。
- 上限としては、臨界(設計基準事故)に伴う沸騰時の移行率である5E-4がある。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 5 有効性評価における不確かさ

3. 5. 1 設定値が有する不確かさ(2/4)



④LPF: 放出経路での低減割合。DFの逆数で表現される値

- 可搬型フィルタの除染係数としてDF 10^5 (フィルタ2段)を設定。
- その他放出経路構造物(塔槽類廃ガス処理設備の構造的な特徴※1、セル及び換気系の構造的な特徴※2)の除染係数としてDF10を設定。
- 凝縮器による蒸気の凝縮による除染係数としてDF10を設定する。
- 放出経路となる配管は、数十m以上の長さがあり、かつ、それが複雑に曲がっているため、更なる沈着、凝縮等の効果が期待できる。また、凝縮器についても、保守的にDFを設定しているため、さらに除去効率を期待できると考えられるが、設定値に対して上述の効果が見込めない場合もある。

【※塔槽類廃ガス処理設備の構造的な特徴】

(1)配管長さ

B-DBAの発生を想定する機器によっても異なるが、数十mから百数十mの配管長さがあり、経路上の放熱や圧力損失によりエネルギーが大きく減衰する(塔槽類廃ガス処理設備内に放射性物質が留まる)。

(2)配管の曲がり

数十箇所の曲がりがあり、圧力損失によりエネルギーが大きく減衰することや、慣性沈着により放射性物質が除去される。

(3)機器

廃ガス洗浄塔やデミスタ、凝縮器、塔槽類廃ガス処理設備の排気フィルタなど機器が設置されており、圧力損失によりエネルギーが大きく減衰することや、慣性沈着やフィルタにより放射性物質が除去される。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 5 有効性評価における不確かさ

3. 5. 1 設定値が有する不確かさ(3/4)



【※2セル及び換気系の構造的な特徴】

(1)セル内への閉じ込めによる沈降

セル内に閉じ込める時間やセル容積、形状に影響を受けるが、セルに導出した後、セル内に閉じ込めることにより放射性物質は重力沈降により除去される。

(2)ダクト等への沈着

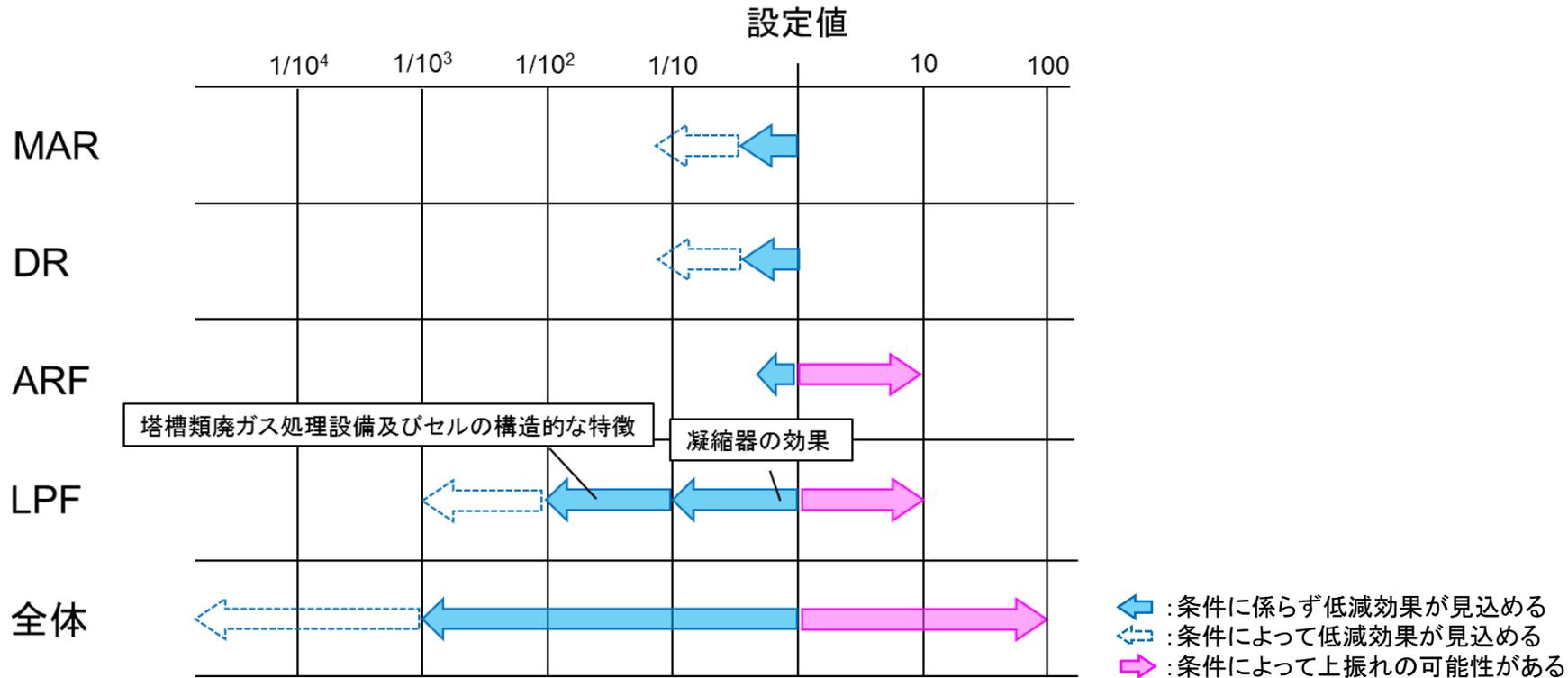
セルダクトの曲がり部等における慣性沈着、圧力損失に伴うエネルギーの減衰により放射性物質は除去される。

3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価



- 3. 5 有効性評価における不確かさ
- 3. 5. 1 設定値が有する不確かさ(4/4)

設定値に2桁程度の上振れの不確かさが内在するものの、その他のパラメータを総合すると3桁以上の保守性を有する。



3. 高レベル廃液ガラス固化建屋における蒸発乾固への具体的対処と有効性評価

3. 5 有効性評価における不確かさ

3. 5. 2 Ruの化学形態の影響



沸騰時に放出されるRuが揮発性の化学形態であったとしても、放出量は平常運転時程度である。

建屋	放出量(セシウム-137換算) (TBq/日)			
	凝縮成功時		凝縮失敗時	
	Ru非揮発性	Ru揮発性	Ru非揮発性	Ru揮発性
前処理建屋	9.9E-08	1.7E-06	9.9E-05	1.0E-04
分離建屋	1.0E-06	3.8E-05	1.0E-03	1.1E-03
精製建屋	5.5E-06	5.5E-06	5.5E-03	5.5E-03
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	1.2E-06	1.2E-06	1.2E-03	1.2E-03
高レベル廃液ガラス固化建屋	8.2E-06	3.2E-04	8.2E-03	8.5E-03
合計	1.6E-05	3.6E-04	1.6E-02	1.7E-02

凝縮成功時のDF

放射性エアロゾル : 10^7 (放出経路構造物10、凝縮器10、高性能粒子フィルタ 10^5)

揮発性ルテニウム : 1

凝縮失敗時のDF

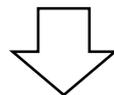
放射性エアロゾル : 10^4 (放出経路構造物10、凝縮器1、高性能粒子フィルタ 10^3)

揮発性ルテニウム : 1

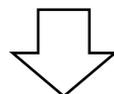
4. 今後の課題(1/2)

論点1: 放出経路(セル)上における放射性物質の除染係数について

- MAAPを用いて放出経路上の除染係数の定量化を実施
- 除染係数へ影響を及ぼす因子として、エアロゾルの粒子径が挙げられるものの、MAAPでは、粒子径が除染係数へ与える影響を把握することが困難



- ART-MOD2r^{※1}コードとの比較検証を行うことで、MAAPコードを用いることの妥当性を確認
- ART及びMAAPともに同様の挙動を示すことから、妥当と判断



- 一方、蒸発乾固へのARTコードの適用についてデータが不足

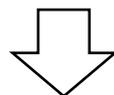
再処理施設で発生が想定される事象に対して、MAAPやARTといったエアロゾル挙動を扱うコードの適用性の検証、高度化が必要

※1 ART(Analysis of Radionuclide Transport)は、シビアアクシデント時の冷却系及び格納容器内のFP移行挙動を解析するために、日本原子力研究所のソースターム解析コードTHALES-2^{※2}の一モジュールとして開発された計算コードである。MAAPよりも機構論的な扱いをしており、且つMAAPでは扱っていない乱流/層流沈着、及びブラウン拡散評価モデルを網羅している。

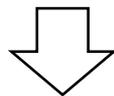
※2 “THALES-2コードによるBWR MARK-IIを対象としたレベル3PSAのための系統的なソースターム解析”,JAERI-Research 2005-021, 2005年

論点2: 沸騰時のルテニウムの化学形態について

- 沸騰時のルテニウムの移行は、エアロゾルと考えられるものの、これを完全に裏付けるデータがない



- 有効性評価における放出量算出では、ルテニウムをエアロゾルとして扱う評価を基本ケースとしながら、ルテニウムの化学形態の不確実さを認識し、揮発性として扱った場合の放出量も合わせて評価



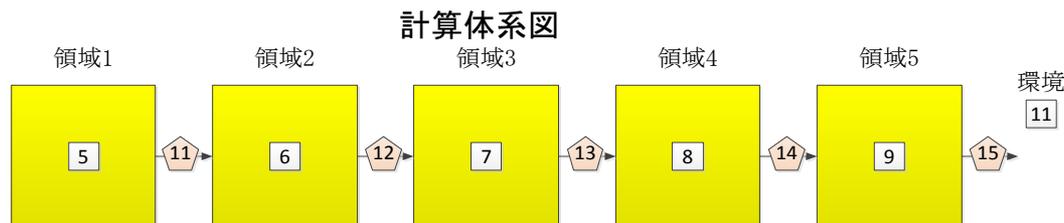
- 再処理する使用済燃料の冷却年数を4年から15年としたことにより、Ruの放射能が約2000分の1となっており、15年条件下では有意な影響がないものの、燃料条件を見直した場合、影響が大きい

沸騰時のルテニウムの移行がエアロゾルとしてなのか、揮発性の化学形態としてなのかを明らかにする必要がある

- 指摘事項の1点目に対しては、評価1において、放出経路上のFPエアロゾル沈着挙動を確認した結果、ARTコード及びMAAPコードともに同様の沈着挙動を示し、また、得られたLPFについても同様の傾向を示していることから、MAAPコードを用いてLPFを計算することは妥当であると考えられる。
- 指摘事項の2点目に対しては、評価2において、初期の粒子径分布が沈着挙動に与える影響を確認した結果、MAAPコードによる結果とARTコードによる結果で約3桁の違いが生じる（ARTコードの方が約3桁大きなLPFを算出）ことから、MAAPコードで算出したLPFに対し1000倍の裕度を持たせて有効性評価を実施している。
- 以上より、発生するエアロゾルの粒子径に起因する不確実さが内在するものの、その不確実さの程度は3桁程度の範囲に収まると考えられ、また、放出経路上の沈着挙動についても、MAAPコードよりも機構論的な計算で沈着挙動を模擬するARTコードと同様の傾向を示すとともに、得られるLPFもほぼ同じ傾向を示すことから、MAAPコードを用いて得られるLPFに3桁の余裕を見込んでDF100として有効性評価を実施することは妥当であると考えられる。

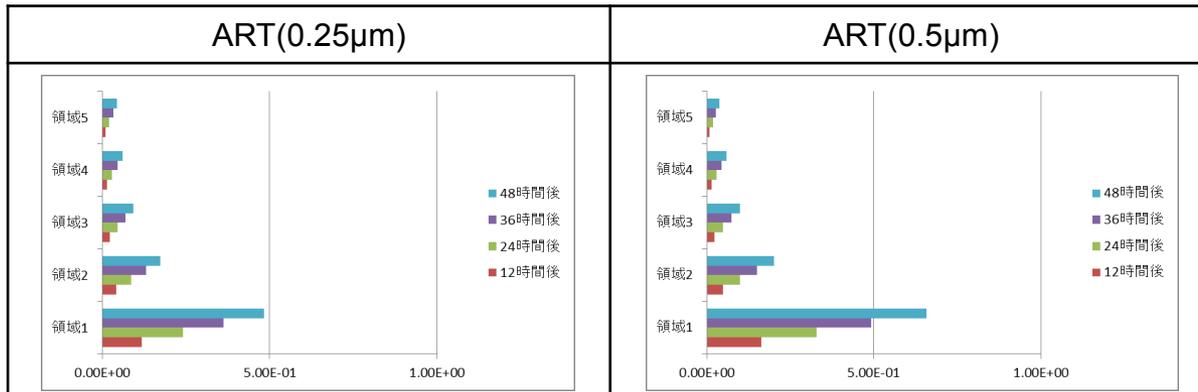
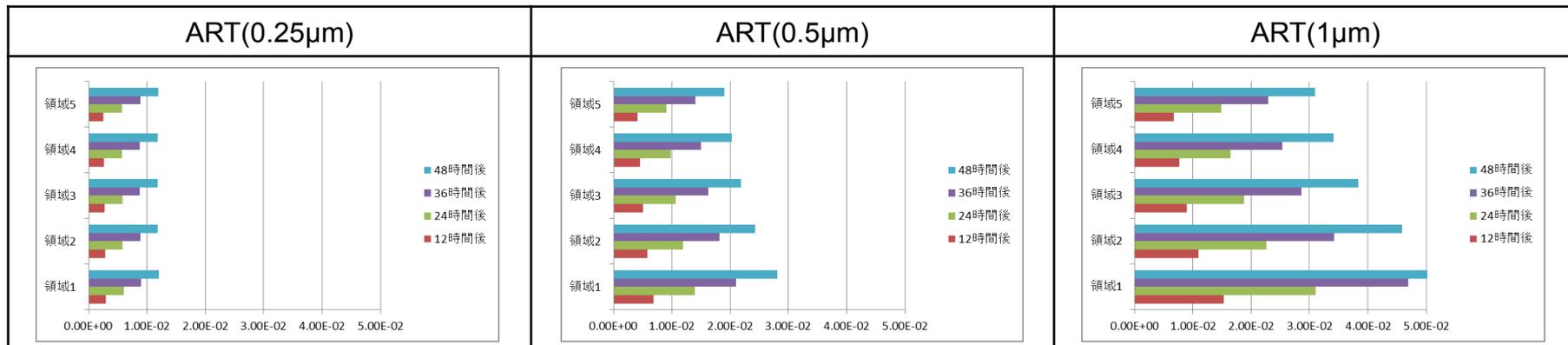
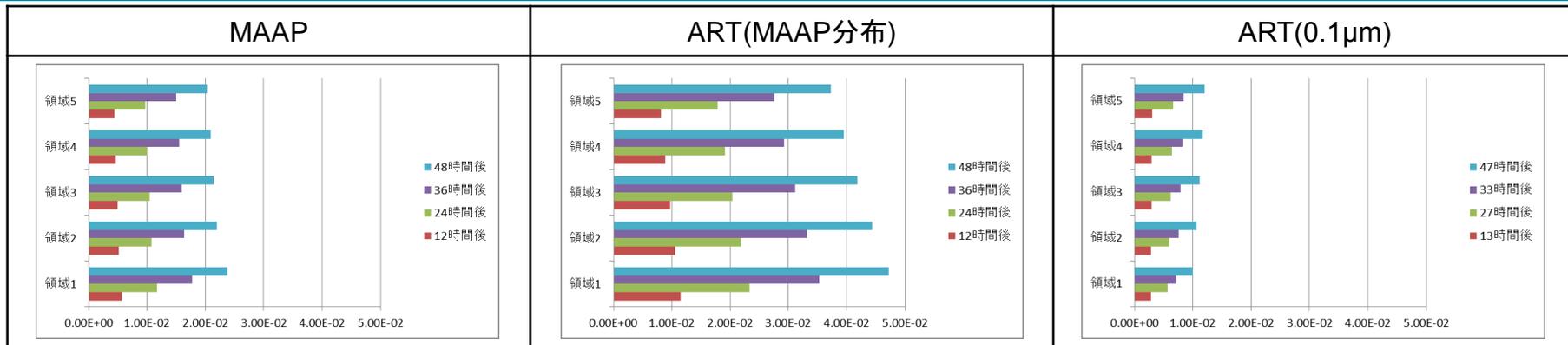
【MAAPコード及びARTコードの計算体系及び条件】

- MAAPコードとARTコードで同じ体系についてエアロゾル移行計算を行い、移行経路におけるエアロゾル粒子径分布及び沈着挙動を比較する。
- ARTコードに入力するエアロゾル発生箇所粒子径分布は、MAAPコードによる計算から出力した当該領域の分布の他、0.1 μ m～10 μ mを中央値に持つ粒子径分布とする。
- MAAPコードによる評価体系は、ARTコードで取扱い可能な簡易的な体系とし、MAAPコード及びARTコードともに凝縮が発生しない条件の評価とする。(ARTコードでは凝縮挙動を扱えないため)



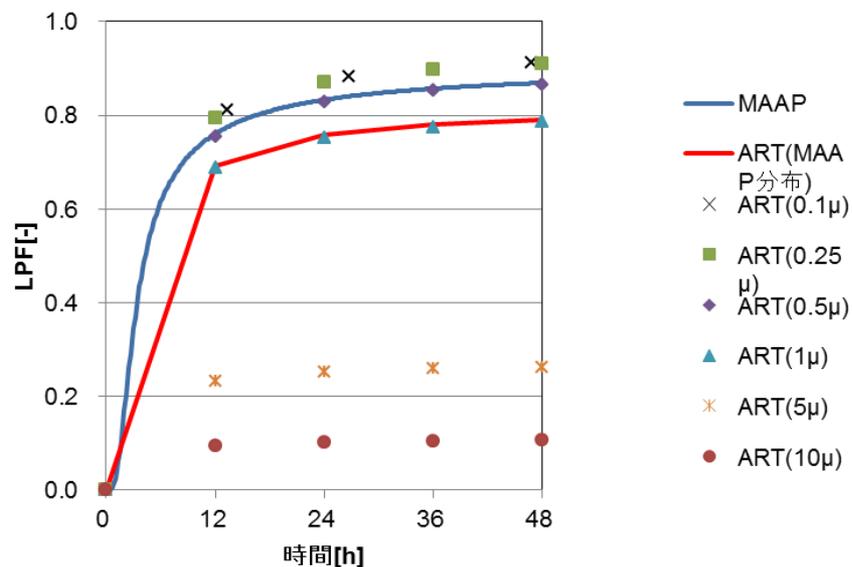
計算条件

パラメータ		設定	備考
セル条件	セル形状	1辺10mの立方体	
	セル個数	5つ	
キャリアガス条件	流速	0.7 m ³ /s	7日目の代表セル蒸気流量を設定
	温度	100°C	溶液沸騰事象、定常状態のセル温度
	組成	水蒸気100%	溶液沸騰事象、定常状態の組成
壁面条件	表面積	床、天井: 100m ² 側面: 400m ²	セルの形状に合わせて設定
	初期温度	100°C	凝縮が起こらない条件で評価
FP発生条件	発生量	6.912 × 10 ⁻⁶ kg/s	代表セルへの流入量
	粒子径分布 (ARTのみ)	MAAPの粒子径分布、0.1 μ m、0.25 μ m、 0.5 μ m、1 μ m、5 μ m、10 μ m	

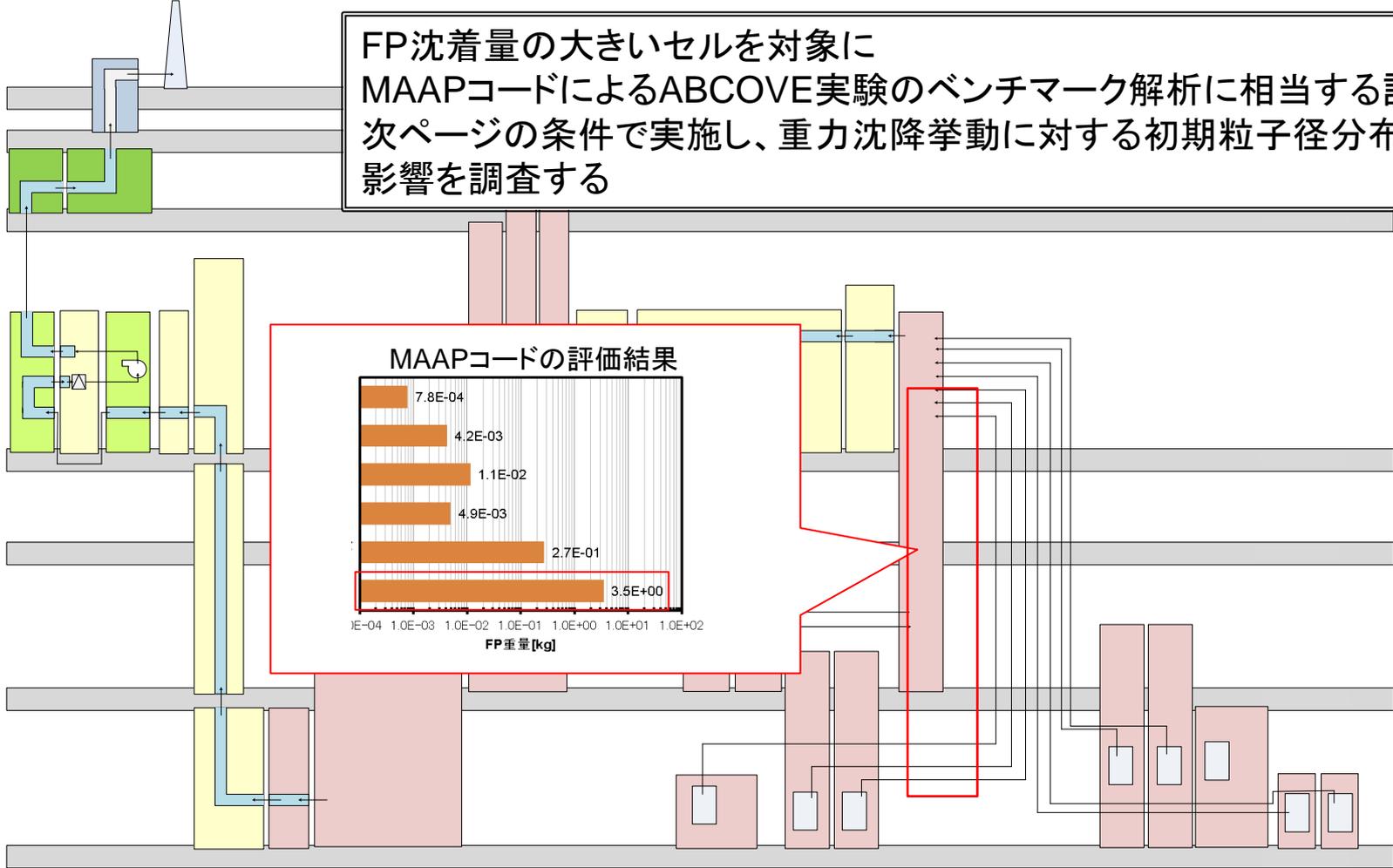


各領域におけるFP沈着量の結果を上図に示す。ARTコード及びMAAPコードともに沈着挙動の傾向が一致しているのがわかる。

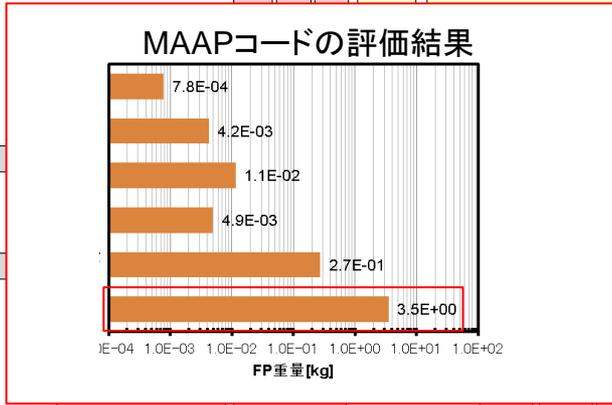
- MAAPコード及びARTコードによるLPFの算出結果の比較を下図に示す。
- 沈着挙動の傾向と同様に、LPFの挙動も傾向として良く一致している。
- MAAPコードのLPFは、ARTコードにおける0.5 μ mを中央値に持つ粒子径分布に基づく評価結果と傾向が良く一致している。
- ARTコードにおける1 μ mを中央値に持つ粒子径分布及びMAAPの粒子径分布をインプットとしたLPFの挙動は良く一致しており、MAAPから得られるLPFよりも保守側な出力となっている。
- 放出経路における沈着挙動及びLPFの挙動は、初期の粒子径分布に依存して絶対値が変動するものの、傾向は一致していることから、MAAPを用いてLPFを計算することは妥当であると考えられる。



解析モデル



FP沈着量の大きいセルを対象に
 MAAPコードによるABCOVE実験のベンチマーク解析に相当する評価を
 次ページの条件で実施し、重力沈降挙動に対する初期粒子径分布の
 影響を調査する



MAAPコードの解析条件

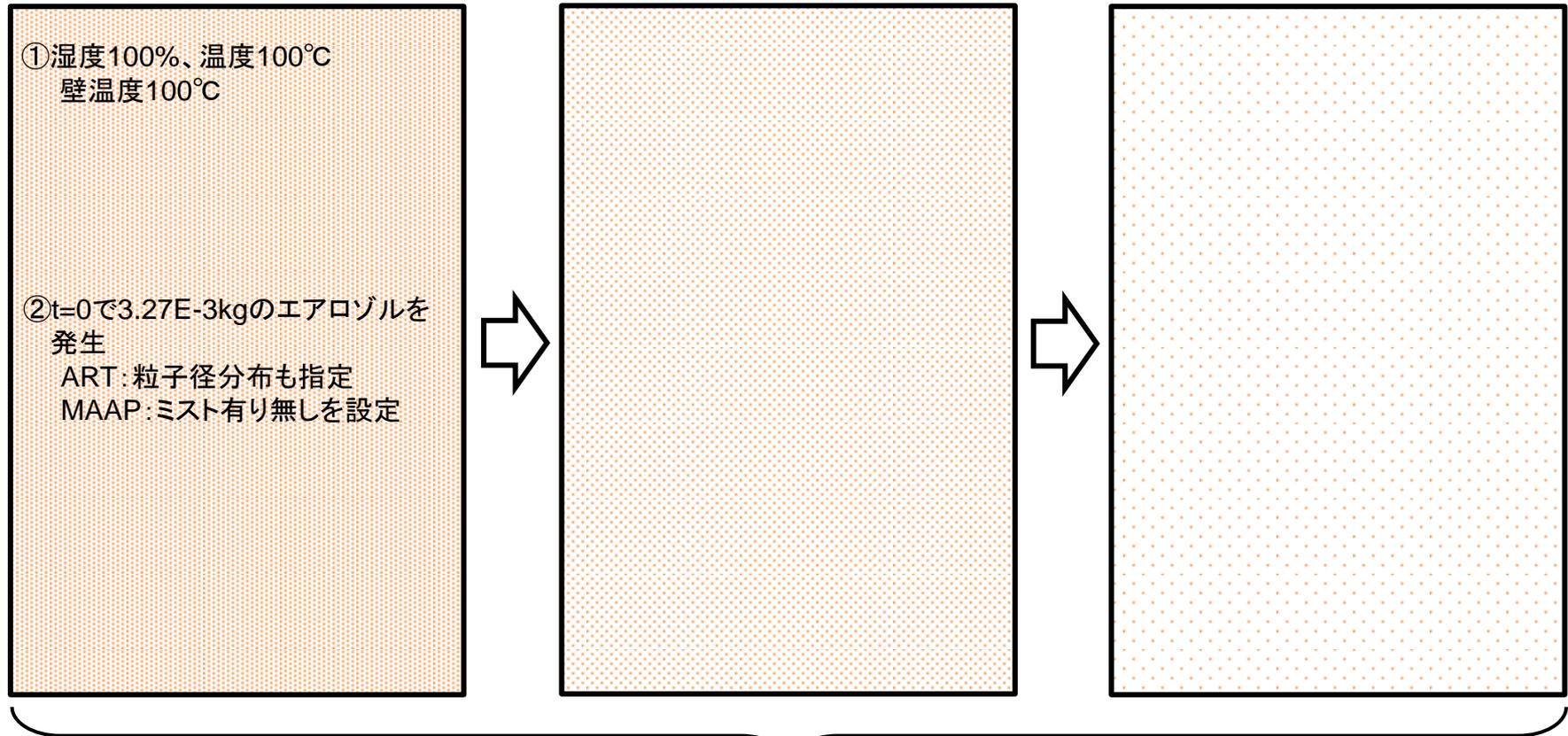
パラメータ		設定	備考
セル条件	セル形状	代表セル	—
	セル個数	1つ	—
キャリアガス条件	流速	—	静置した状態を模擬する
	温度	100℃	溶液沸騰事象、定常状態のセル温度
	組成	水蒸気100%	溶液沸騰事象、定常状態の組成
	ミスト	なし 20kg	7日目の代表セルのミスト量
壁面条件	表面積	代表セル	代表セルと同じ形状とする
	初期温度	100℃	凝縮が起こらない条件で評価
FP発生条件	発生量	3.27×10^{-3} kg	7日目の代表セル浮遊量

ARTコードの解析条件

パラメータ		設定	備考
セル条件	セル形状	代表セル	—
	セル個数	1つ	—
キャリアガス条件	流速	—	静置した状態を模擬する
	温度	100℃	溶液沸騰事象、定常状態のセル温度
	組成	水蒸気100%	溶液沸騰事象、定常状態の組成
	ミスト	なし	
壁面条件	表面積	代表セル	代表セルと同じ形状とする
	初期温度	100℃	凝縮が起こらない条件で評価
FP発生条件	発生量	3.27×10^{-3} kg	7日目の代表セル浮遊量
	粒子径分布 (ARTコードのみ)	MAAPの粒子径分布 0.1、0.25、0.5、1、5、10μm	

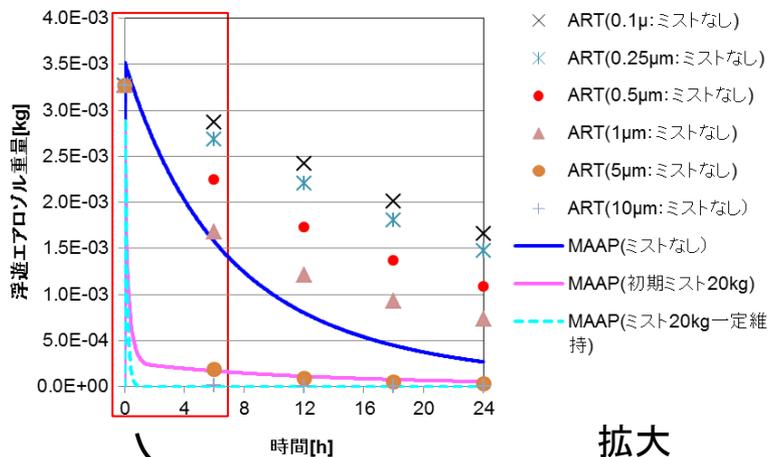
MAAPコードによるABCOVE実験のベンチマーク解析に相当する評価のイメージ

①代表セルに相当する体系



③雰囲気中のエアロゾル重量の経時変化を評価

- 霧困気中に残留するエアロゾルの重量を評価した結果を下図に示す。
- ARTコードにおけるエアロゾル沈着挙動とMAAPコード(ミストなし)のエアロゾル沈着挙動の傾向は概ね一致している。
- 粒子径に応じて沈降速度の違いが現れることをARTコードから確認した。
- MAAPコードにおいて、ミストの有無で沈着挙動が大きく異なる。これはMAAPコードではミストもエアロゾルとして扱われ、空間中のエアロゾル濃度が上昇し、粒子成長が促進されて重力沈降が活発となるためである。
- 代表セル霧困気の置換時間は、MAAPコードによるベース評価(DF 10^5 を算出した評価)に基づけば、約1時間となることから、本評価における静置時間として1時間目の値に着目する。
- 1時間経過後の霧困気中のエアロゾル残留量について、ARTコードの0.1 μm の値とMAAPコードのミストありの結果を比較すると、ARTコードが $3.2\text{E-}3\text{kg}$ 、MAAPコードが $4.8\text{E-}6\text{kg}$ となり、約3桁の差が生じていることが確認された。
- 以上より、有効性評価ではMAAPコードのベース評価値に対して3桁の余裕を見込んでLPFを設定した。



拡大

