

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：放射線分解による水素爆発に係る  
安全対策



日本原燃株式会社

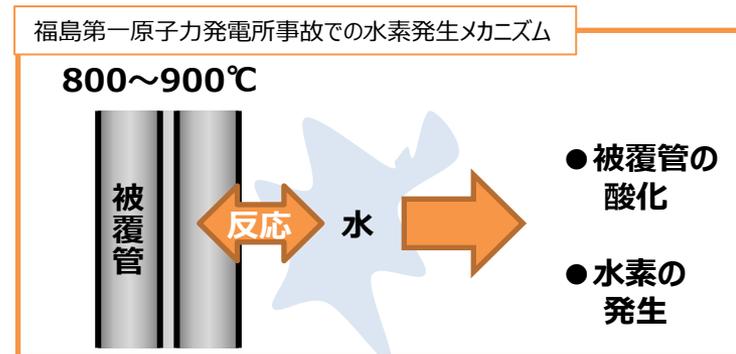
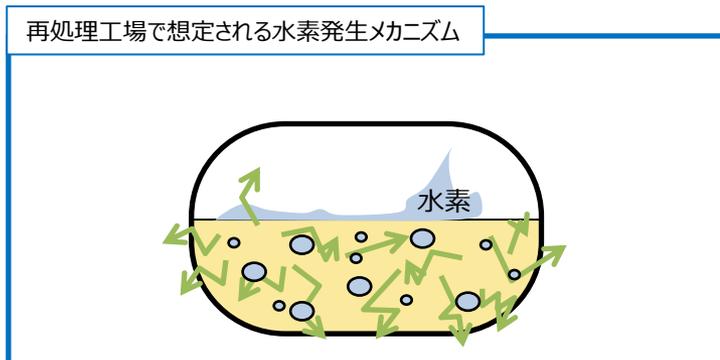
再処理事業部 エンジニアリングセンター  
プロジェクト部 安全グループ  
玉内 義一

- 1 事故の特徴
  - 1.1 再処理工場における水素発生と設計における考慮
  - 1.2 水素掃気機能喪失時の事故進展概要
  - 1.3 水素掃気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 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
  - 3.1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
  - 3.2 有効性評価の前提条件
  - 3.3 有効性評価結果
  - 3.4 有効性評価における不確かさ
- 4 同時発生における放出量評価
  - 4.1 評価条件
  - 4.2 放出量評価
- 5 安全性向上のために継続して検討する事項の例
  - 5.1 パラジウムイオンによる水素消費反応
  - 5.2 水素爆発時のARFの高度化
  - 5.3 水素爆発時の燃焼挙動について

# 1. 事故の特徴

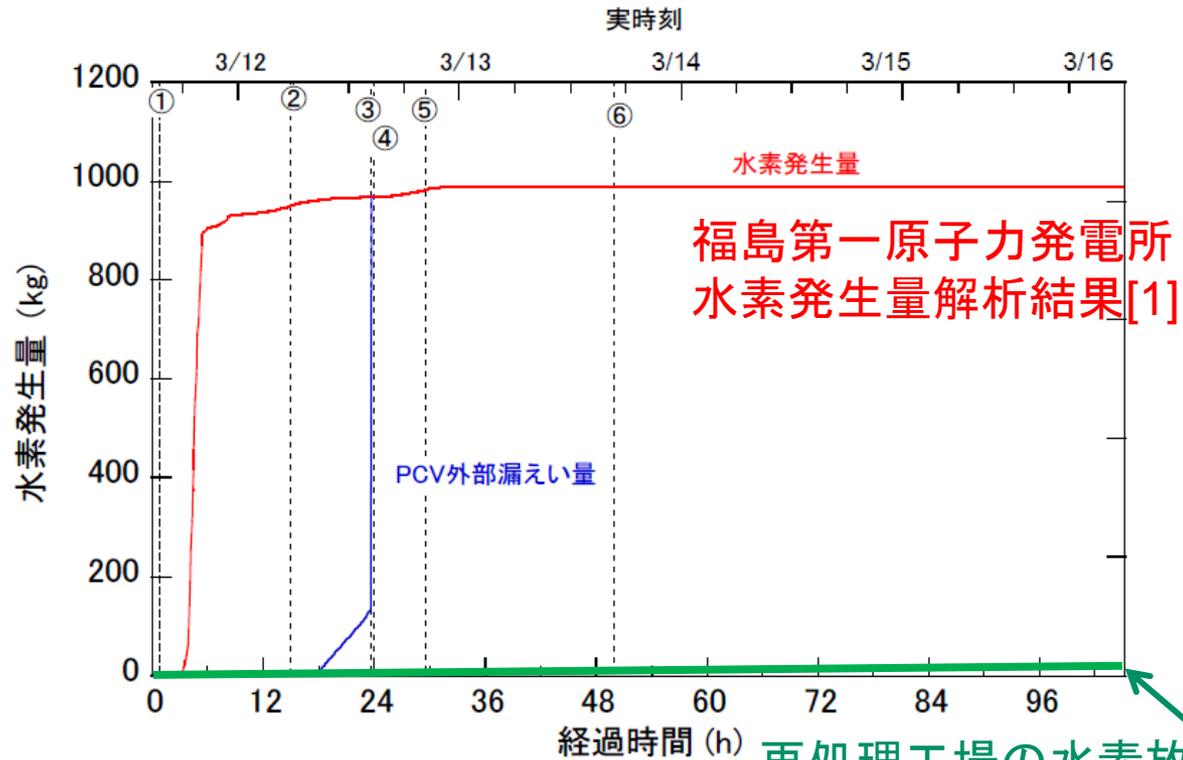
## 1.1 再処理工場における水素発生と設計における考慮(1/3)

- 再処理工場では放射性物質の多くは溶液の形態で貯蔵され、溶液内で放出された放射線により溶媒が分解されることで発生する水素(放射線分解により発生する水素)が蓄積することが想定される。
- 再処理工場では、放射線分解により水素が発生し、機器内の水素濃度が水素の可燃限界濃度である4vol%に短時間で達するおそれのある機器に対し、常に空気圧縮機から空気を供給し、水素が可燃限界濃度以上に溜まらない機能(水素掃気機能)を維持するために必要な設備を設置している。
- 一方、福島第一原子力発電所事故では、放射線分解ではなく、高温になった被覆管と水の急激な化学反応(水-ジルカロイ反応)により水素が発生した。
- 福島第一原子力発電所事故では、可燃濃度領域の水素が高温環境にさらされることで発火点の約500°Cに達し、着火・爆発に至ったと考えられる。
- 再処理工場で想定される放射線分解により発生する水素の発生速度( $\sim 3 \times 10^{-2}$  kg/h)は、水-ジルカロイ反応による水素発生速度( $\sim 4 \times 10^2$  kg/h)よりも極めて遅い。
- 再処理工場では被覆管や水素が存在する環境が500°C程度の高温になることは想定し難いことから福島第一原子力発電所事故のような規模の水素爆発は発生し難い。



# 1. 事故の特徴

## 1. 1 再処理工場における水素発生と設計における考慮(2/3)



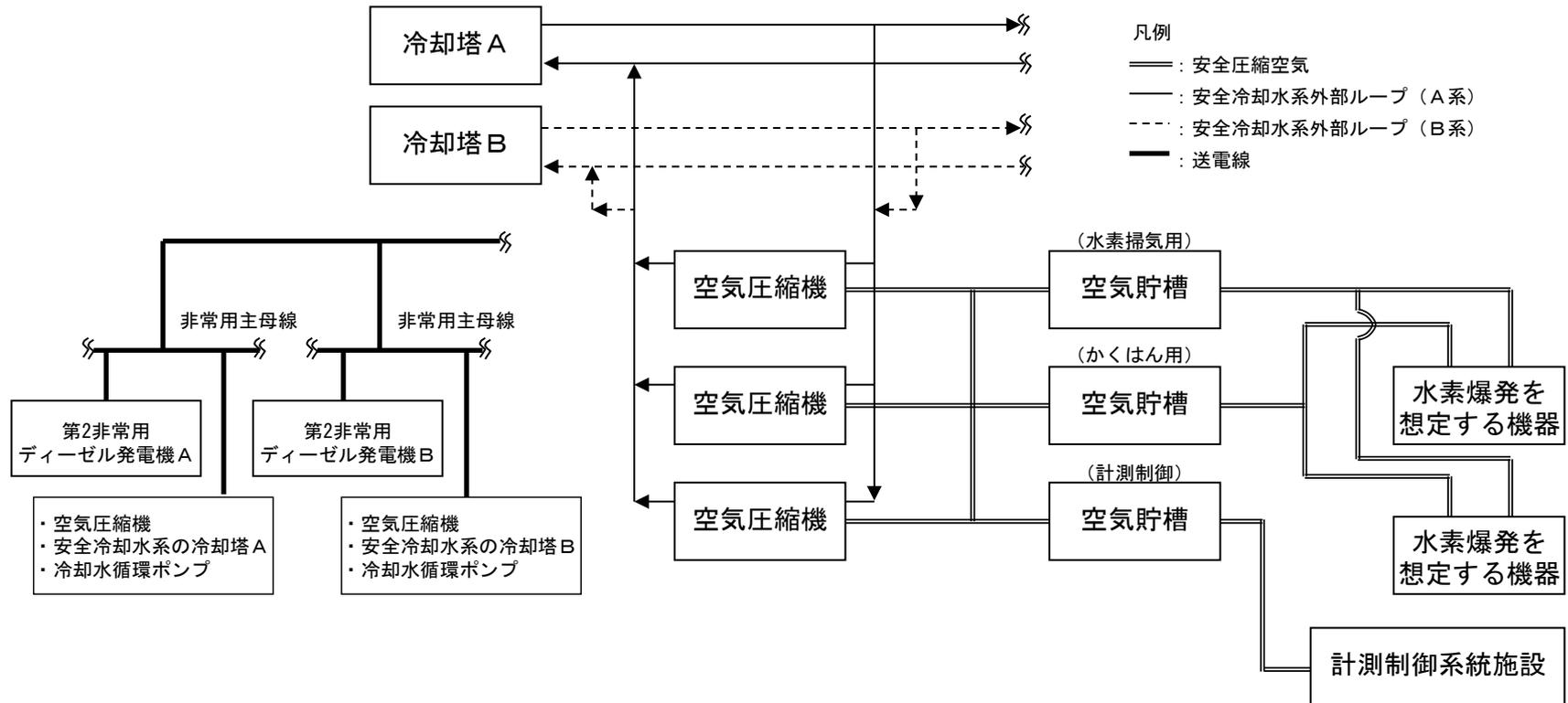
福島第一原子力発電所  
水素発生量解析結果[1]

再処理工場の水素放出量合計値  
(水素爆発を想定する機器87機器分)  
108時間で3kg程度

[1]東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価のクロスチェック解析概要、経済産業省

# 1. 事故の特徴

## 1.1 再処理工場における水素発生と設計における考慮(3/3)



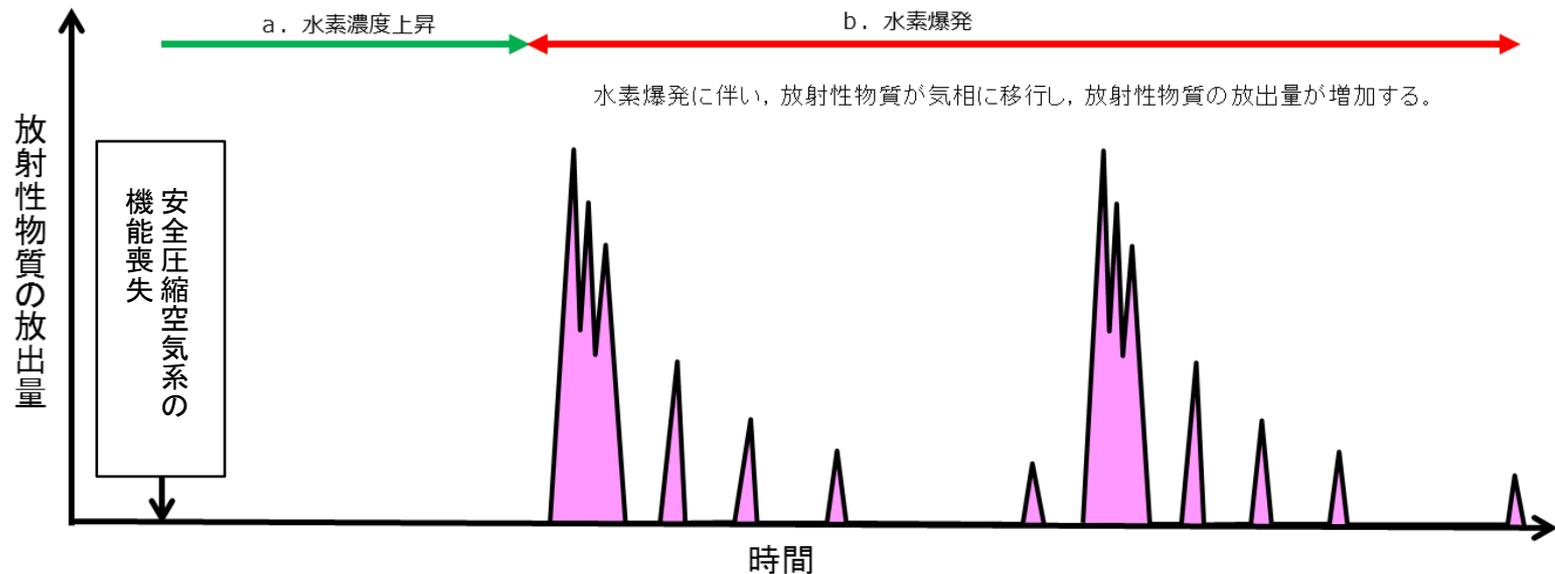
### ◇安全圧縮空気系の特徴

- (1) 3台の空気圧縮機及び水素掃気用、計測制御用、かくはん用の3基の空気貯槽等で構成し、各施設に圧縮空気を供給する。
- (2) 空気圧縮機は、1台でも必要な圧縮空気量を供給する容量を有する。
- (3) 空気圧縮機の運転に必要な冷却水は、安全冷却水系から供給する。
- (4) 空気圧縮機等の動的機器の単一故障を仮定しても、その安全機能が確保できるように多重化されている。
- (5) 空気圧縮機等は、非常用所内電源系統に接続することにより、外部電源が喪失した場合でも、その安全機能を確保できる設計としている。
- (6) 水素掃気用の空気貯槽は、短時間の全交流動力電源の喪失時においても、その安全機能を確保できる容量としている。

# 1. 事故の特徴

## 1.2 水素掃気機能喪失時の事故進展概要

- 安全圧縮空気系の機能喪失に伴い機器内の水素濃度が上昇する。
- 水素濃度の上昇速度は、インベントリ、溶液性状、空間容量に依存する。
- 水素濃度が可燃限界濃度以上となり、万が一着火源が存在すれば、水素が爆発し、放射性物質が放出される可能性がある。



水素爆発による放射性物質の放出量のイメージ

# 1. 事故の特徴

## 1.3 水素掃気機能喪失時の対処のための時間余裕(1/2)

- 再処理工場において水素爆発を想定する機器の気相部の体積は、 $1.6 \times 10^{-3} \sim 31\text{m}^3$ 程度であり、水素発生速度と気相部の体積の関係で機器毎に水素濃度が所定の値に到達する時間が異なる。
- 水素の空気中の可燃限界濃度は4vol%であるが、8vol%以上になると爆発により比較的高い圧力が発生するおそれがある。
- このため、重大事故等の対処を行う制限濃度として水素濃度8vol%(未然防止濃度)を選択した。
- 気相部の体積の8vol%の水素が発生するまでの時間を求めると、以下の表のとおりとなる。
- 水素掃気機能が喪失した場合においても、対処に必要な時間を確保できるよう、圧縮空気貯槽を分離建屋、精製建屋の水素掃気用安全圧縮空気系に、圧縮空気ユニットをウラン・プルトニウム混合脱硝建屋の水素掃気用安全圧縮空気系に設置することとした。
- 重要度高に分類される機器で、圧縮空気貯槽又は圧縮空気ユニットによる掃気が無かった場合に時間余裕が24時間未満となる機器に対して、圧縮空気貯槽又は圧縮空気ユニットのバックアップとして自動起動する圧縮空気ポンペを水素掃気用安全圧縮空気系に設置するとともに手動起動する圧縮空気ポンペを発生防止対策用圧縮空気供給系又はかくはん用安全圧縮空気系に設置することとした。
- 本設計対応により、水素掃気機能が喪失した場合の対処の時間を24時間程度に延長し、対処の信頼性を確保することとした。

建屋	気相部の水素濃度が8vol%となる時間(h) (建屋内最短機器)	気相部の水素濃度が8vol%となる時間(h) (空気貯槽等の設置を考慮した場合の建屋内最短機器)
前処理建屋	60	60
分離建屋	<1	<b>24</b>
精製建屋	<1	<b>24</b>
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	7.1	<b>24</b>
高レベル廃液ガラス固化建屋	84	84

# 1. 事故の特徴

## 1.3 水素掃気機能喪失時の対処のための時間余裕(2/2)

- 機器の空間部の水素濃度が8vol%になるまでの時間余裕 $t_{mar}$ の評価方法を以下に示す。

$$t_{mar}[h] = \frac{8[\text{vol}\%] - C_0[\text{vol}\%]}{100[\text{vol}\%]} \times \frac{V_{gas}[m^3]}{F_{H_2}[m^3/h[\text{normal}]]}$$

$t_{mar}[h]$ : 機器内水素爆発の時間余裕

$F_{H_2}[m^3/h[\text{normal}]]$ : 水素発生速度

$C_0[\text{vol}\%]$ : 初期水素濃度

$V_{gas}[m^3]$ : 機器気相部体積

- 水素発生速度 $F_{H_2}$ について水相のみの場合の計算方法を以下に示す。

$$F_{H_2}[m^3/h[\text{normal}]] = 8.36 \times 10^{-6} [s \cdot 100eV \cdot m^3[\text{normal}]/(J \cdot h)] \times V_{aq}[m^3] \times (Q_{\alpha,aq}[W/m^3] \times G_{\alpha,aq}[/100eV] + Q_{\beta\gamma,aq}[W/m^3] \times G_{\beta\gamma,aq}[/100eV])$$

$F_{H_2}[m^3/h[\text{normal}]]$ : 水素発生速度

$G_{\alpha,aq}[/100eV]$ : 水相の $\alpha$ 線による発生G値

$V_{aq}[m^3]$ : 水相溶液量

$Q_{\beta\gamma,aq}[W/m^3]$ : 水相の $\beta\gamma$ 線崩壊熱密度

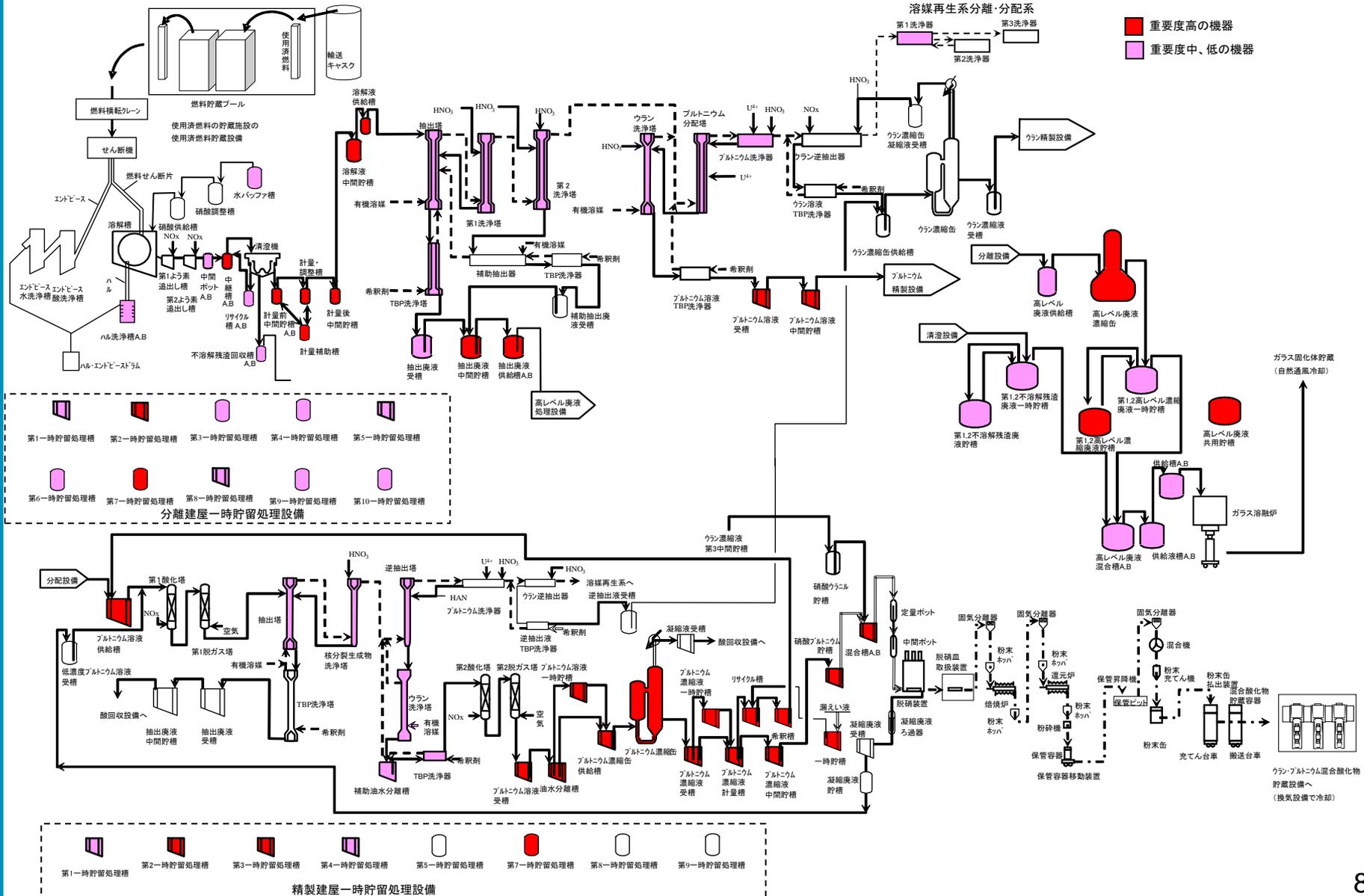
$Q_{\alpha,aq}[W/m^3]$ : 水相の $\alpha$ 線崩壊熱密度

$G_{\beta\gamma,aq}[/100eV]$ : 水相の $\beta\gamma$ 線による発生G値

- 水素発生G値については、基本的には「設計及び工事の方法の認可申請書 火災及び爆発の防止に関する説明書」において用いた値と同様であるが、高レベル廃液ガラス固化建屋の高レベル濃縮廃液及び混合廃液については、他施設の水素発生G値の測定結果<sup>1)</sup>を参考に、G値を文献値の1/20とする。

1)H. Kinuhata et al., Nuclear Technology, **189**, 122 (2015).

## 2. 発生を想定する機器と重要度分類



- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(1/7)



## 再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第三十六条

セル内において放射線分解によって発生する水素が再処理設備の内部に滞留することを防止する機能を有する施設には、再処理規則第一条の三第三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 放射線分解により発生する水素による爆発(以下この条において「水素爆発」という。)の発生を未然に防止するために必要な設備

### 1. 水素爆発に対する発生防止対策

通常、水素掃気用の安全圧縮空気は前処理建屋より各建屋へ一括で供給されている。

水素掃気機能が喪失した場合に水素爆発の発生を未然に防止するため、時間余裕が24時間未満の機器が存在する建屋には水素掃気用安全圧縮空気系に圧縮空気貯槽又は圧縮空気ユニットを設置し、自動で圧縮空気を供給することにより、24時間以上の間、機器内の水素濃度を未然防止濃度未満に維持する。

圧縮空気貯槽又は圧縮空気ユニットが有効に機能しなかったとしても、重要度高であり未然防止濃度に到達する時間余裕が24時間未満の機器について、水素掃気用安全圧縮空気系の機器近傍部に空気ポンベを設置し、自動で圧縮空気を供給することにより、24時間以上の間、機器内の水素濃度を未然防止濃度未満に維持する。

さらに、空気ポンベも有効に機能しなかった場合には、重要度高であり未然防止濃度に到達する時間余裕が24時間未満の機器について、他の独立した系統に圧縮空気ポンベ等を接続し、24時間以上の間、機器内の水素濃度を未然防止濃度未満に維持する。

その上で、水素掃気用安全圧縮空気系又は発生防止用圧縮空気供給系に可搬型空気圧縮機を接続し、対象機器の気相部に圧縮空気を供給し水素が蓄積することを防止する。

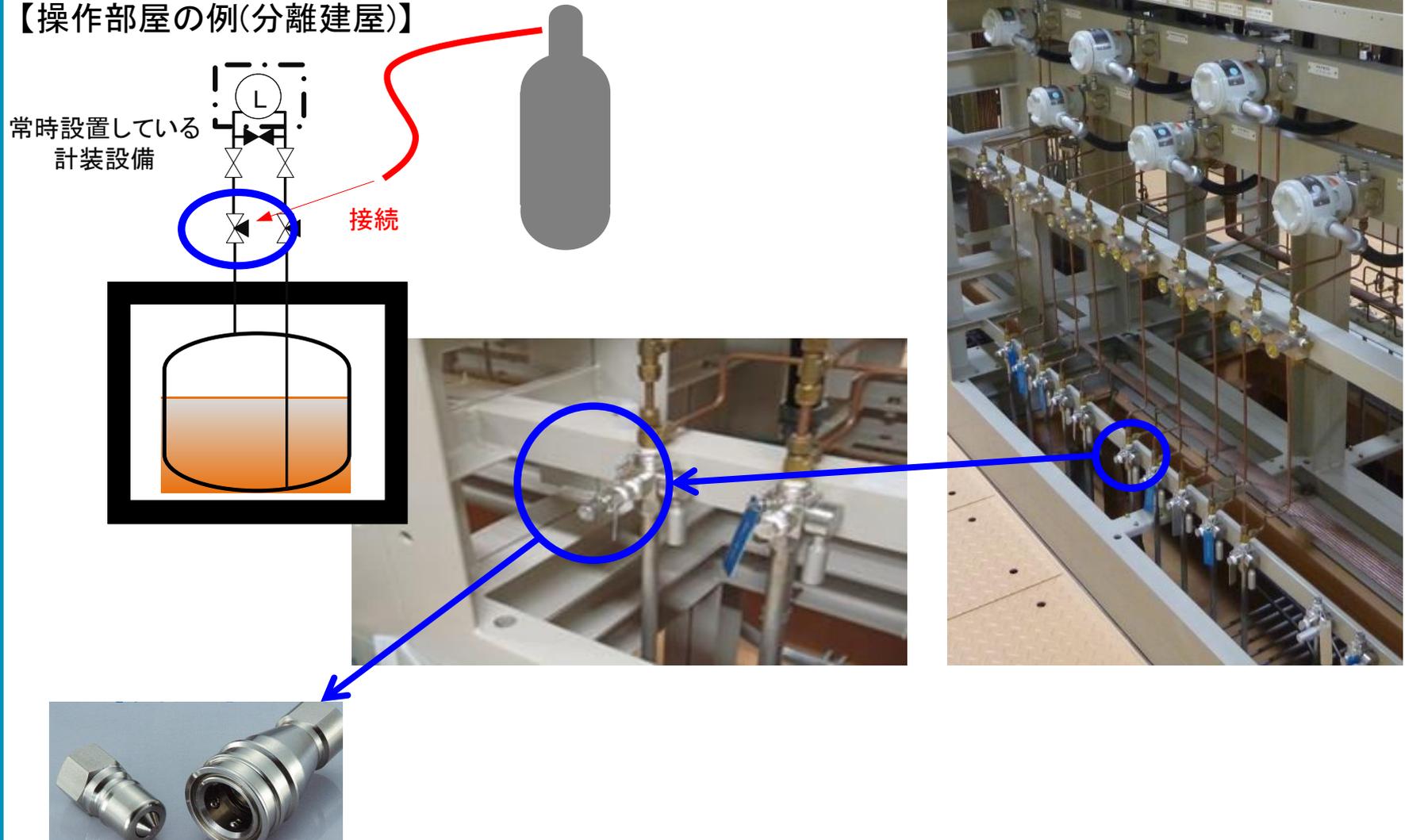
### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(2/7)

## 水素掃気用圧縮空気の初動供給

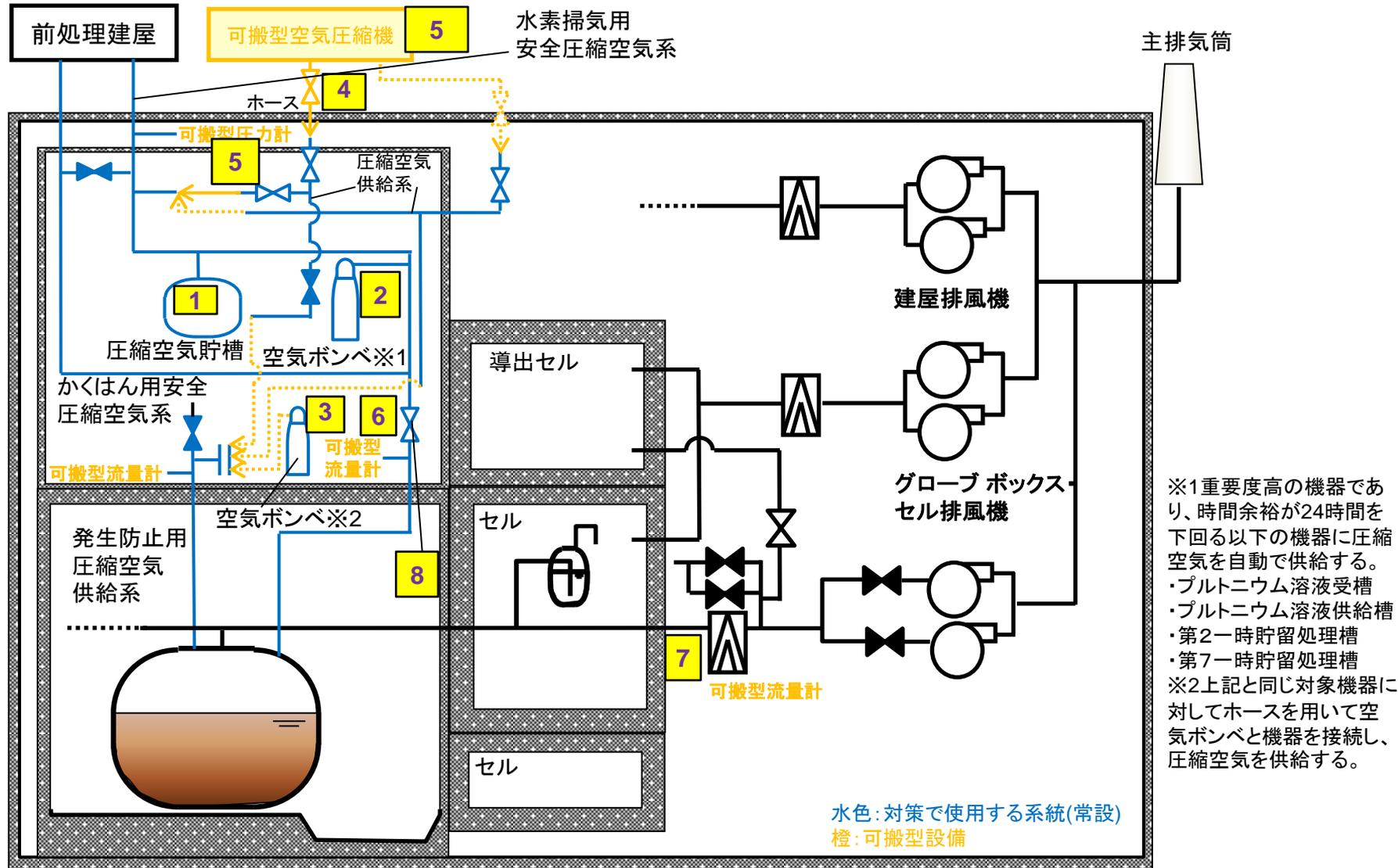
### 【操作部屋の例(分離建屋)】



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(3/7)



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(4/7)

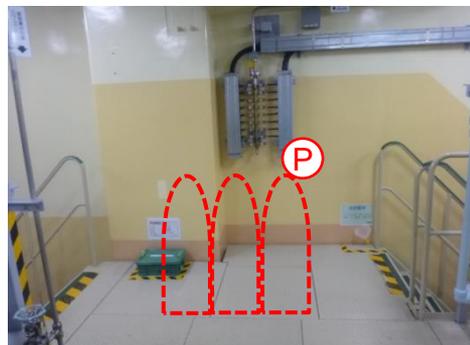
#### 1 圧縮空気貯槽の指示値確認



空気貯槽設置予定部屋

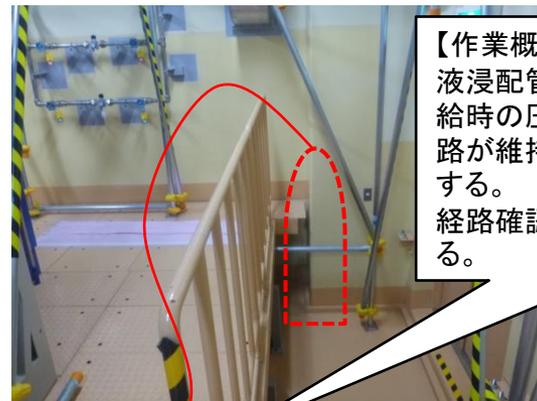
【作業概要】  
水素掃気用圧縮空気系の圧縮空気貯槽の圧力指示値が異常に減少していないことを確認する。

#### 2 圧縮空気ポンプの指示値確認



【作業概要】  
水素掃気用圧縮空気系の圧縮空気ポンプの圧力指示値が異常に減少していないことを確認する。

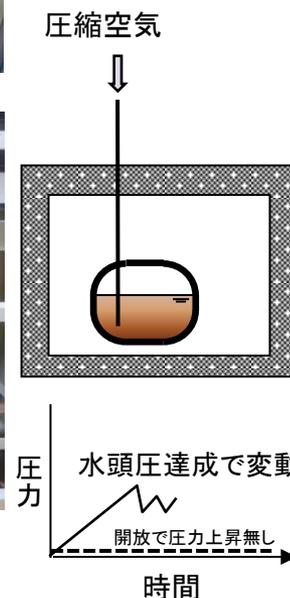
#### 3 圧縮空気ポンプからの手動供給及び経路確認



【作業概要】  
液浸配管を選択し、圧縮空気供給時の圧力変化から配管の経路が維持されていることを確認する。  
経路確認後、圧縮空気を供給する。



機器の液位が低く、配管が液浸しないような状態では、空間容量が大きくなることから対処のための時間余裕は確保される。



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(5/7)

#### 4 ホース布設(外回り)及び接続

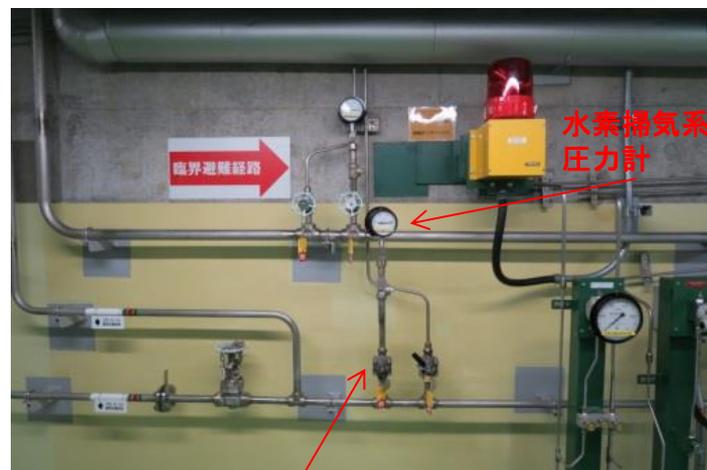
##### 【作業概要】

屋外の可搬型空気圧縮機から建屋入口近傍にある、圧縮空気供給系の接続口までホースを布設する。

#### 5 可搬型空気圧縮機からの供給開始、供給圧力確認

##### 【作業概要】

可搬型空気圧縮機により圧縮空気を供給し、建屋内の水素掃気用安全圧縮空気系に可搬型の圧力計を設置し、指示値を確認する。



水素掃気系統  
圧力計

ここに可搬型圧力計  
を設置する

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(6/7)

#### 6 可搬型流量計設置

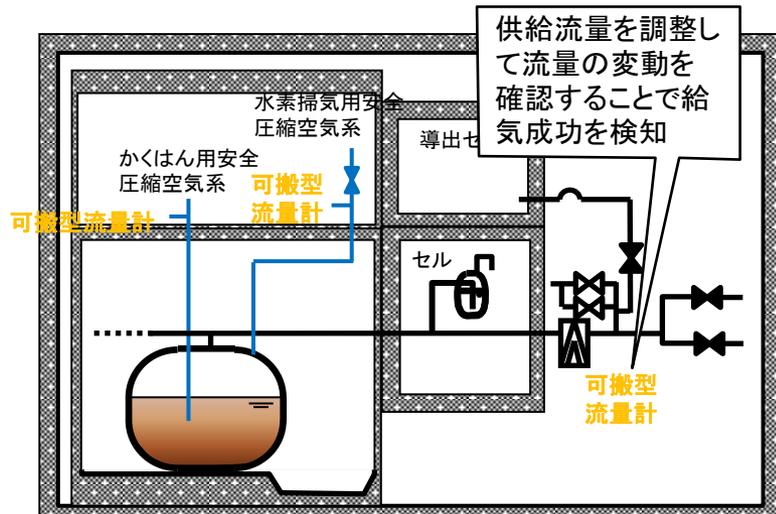
##### 【作業概要】

対象機器(28基、流量計設置箇所は8部屋)へ接続する水素掃気用安全圧縮空気系又は発生防止用圧縮空気供給系へ、可搬型の流量計を設置する。

#### 7 圧縮空気流量と廃ガス流量確認による成功検知

##### 【作業概要】

可搬型空気圧縮機からの圧縮空気供給後、各機器の水素掃気用安全圧縮空気系の圧縮空気流量を変動させる。これに伴い、空気の出口側であるセル導出経路の流量も変動することを確認することで、機器個別に圧縮空気の供給に成功していることを確認する。



水色: 対策で使用する系統(常設)  
 橙: 可搬型設備

#### 8 圧縮空気流量確認、圧縮空気流量調整

##### 【作業概要】

圧縮空気の供給に成功していることを確認した後、圧縮空気の供給を再開する。可搬型流量計の指示値を確認する。必要により流量を調整する。



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 1 水素爆発に対する発生防止対策(7/7)



#### 【水素爆発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	供給圧力	圧縮空気ポンベ 手動接続配管	液浸配管からの掃気の成功検知
	貯槽掃気流量	水素掃気用安全 圧縮空気系 発生防止用圧縮 空気供給系 (常設)	発生防止対策成否判断、水素掃気機能の 状態監視
	廃ガス流量	セル導出経路	発生防止対策成否判断
	水素掃気用 圧縮空気圧力	配管付計装配管 (常設)	各貯槽への水素掃気可能圧力到達の確認
	機器内水素濃度	貯槽付計装配管 (常設)	機器の気相部水素濃度が所定濃度以下で あることの確認

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 1. 2 水素爆発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 第三十六条

二 水素爆発が発生した場合において水素爆発が続けて生じるおそれがない状態を維持するために必要な設備



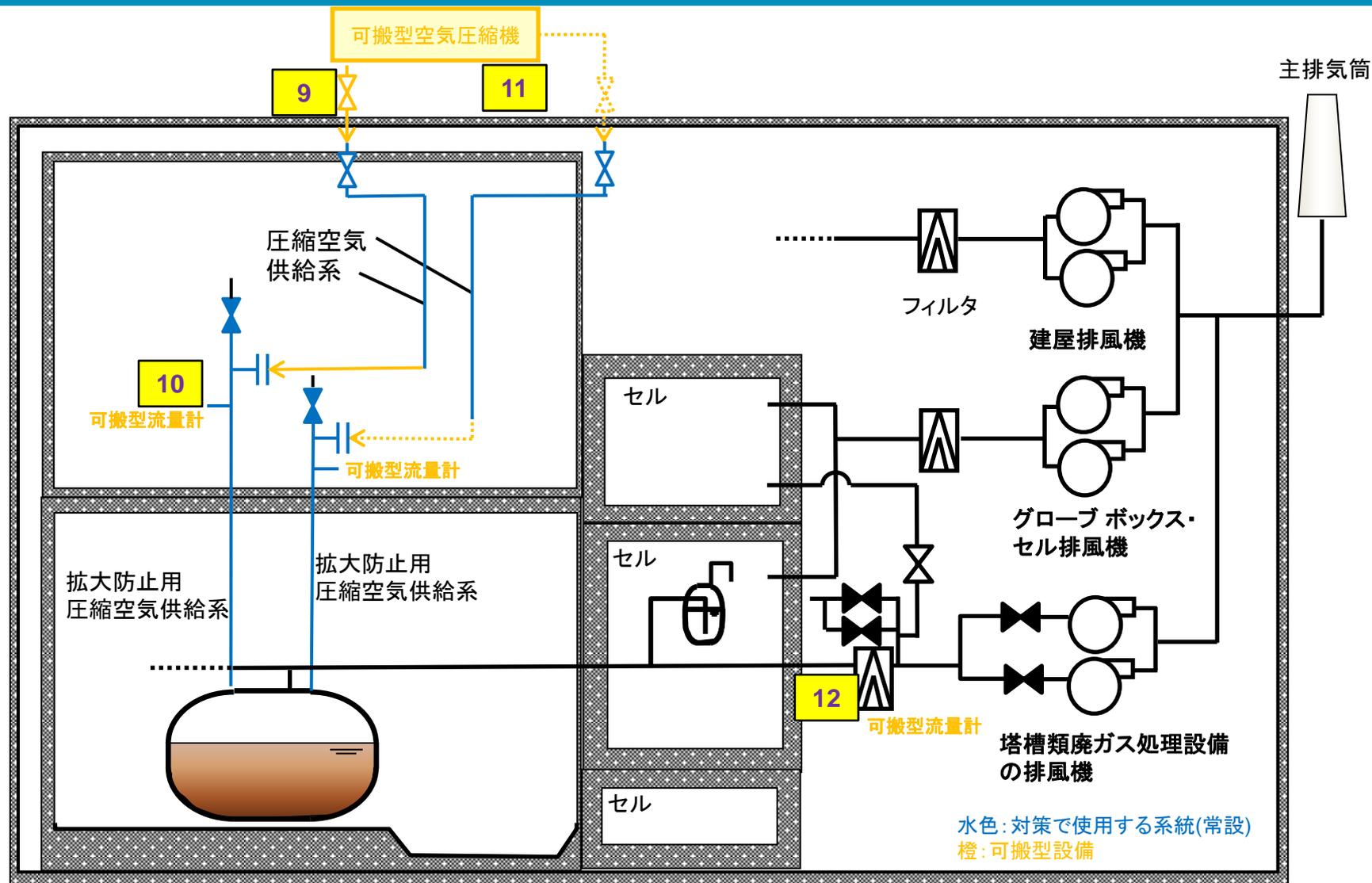
### 2. 水素爆発に対する拡大防止対策

発生防止対策に用いる系統の掃気流量が規定値を満足しない場合は、拡大防止用圧縮空気供給系に可搬型空気圧縮機を接続し、対象貯槽等の気相部に圧縮空気を供給し、貯槽内の水素を掃気する。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

#### 3. 1. 2 水素爆発に対する拡大防止対策(2/4)



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 2 水素爆発に対する拡大防止対策(3/4)

## 9 ホース接続

### 【作業概要】

屋外の可搬型空気圧縮機から、建屋入口近傍にある圧縮空気供給系の接続口までホースを布設し、建屋内の圧縮空気供給の接続口から拡大防止用圧縮空気供給系の接続口までホースを布設し接続する。

## 10 可搬型流量計設置

## 11 供給開始・流量確認

### 【作業概要】

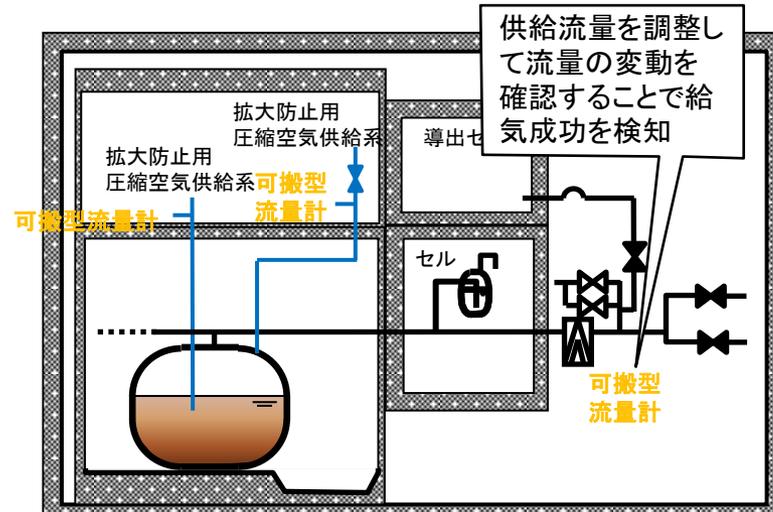
可搬型空気圧縮機により、圧縮空気を供給する。建屋内の拡大防止用圧縮空気供給系に可搬型流量計を設置し、指示値を確認する。



## 12 圧縮空気流量と廃ガス流量確認による成功検知

### 【作業概要】

可搬型空気圧縮機からの圧縮空気供給後、各機器の水素掃気用安全圧縮空気系の圧縮空気流量を変動させる。これに伴い、空気の出側であるセル導出経路の流量も変動することを確認することで、機器個別に圧縮空気の供給に成功していることを確認する。



水色: 対策で使用する系統(常設)  
橙: 可搬型設備

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 2 水素爆発に対する拡大防止対策(4/4)



#### 【水素爆発の計測パラメーター一覧】

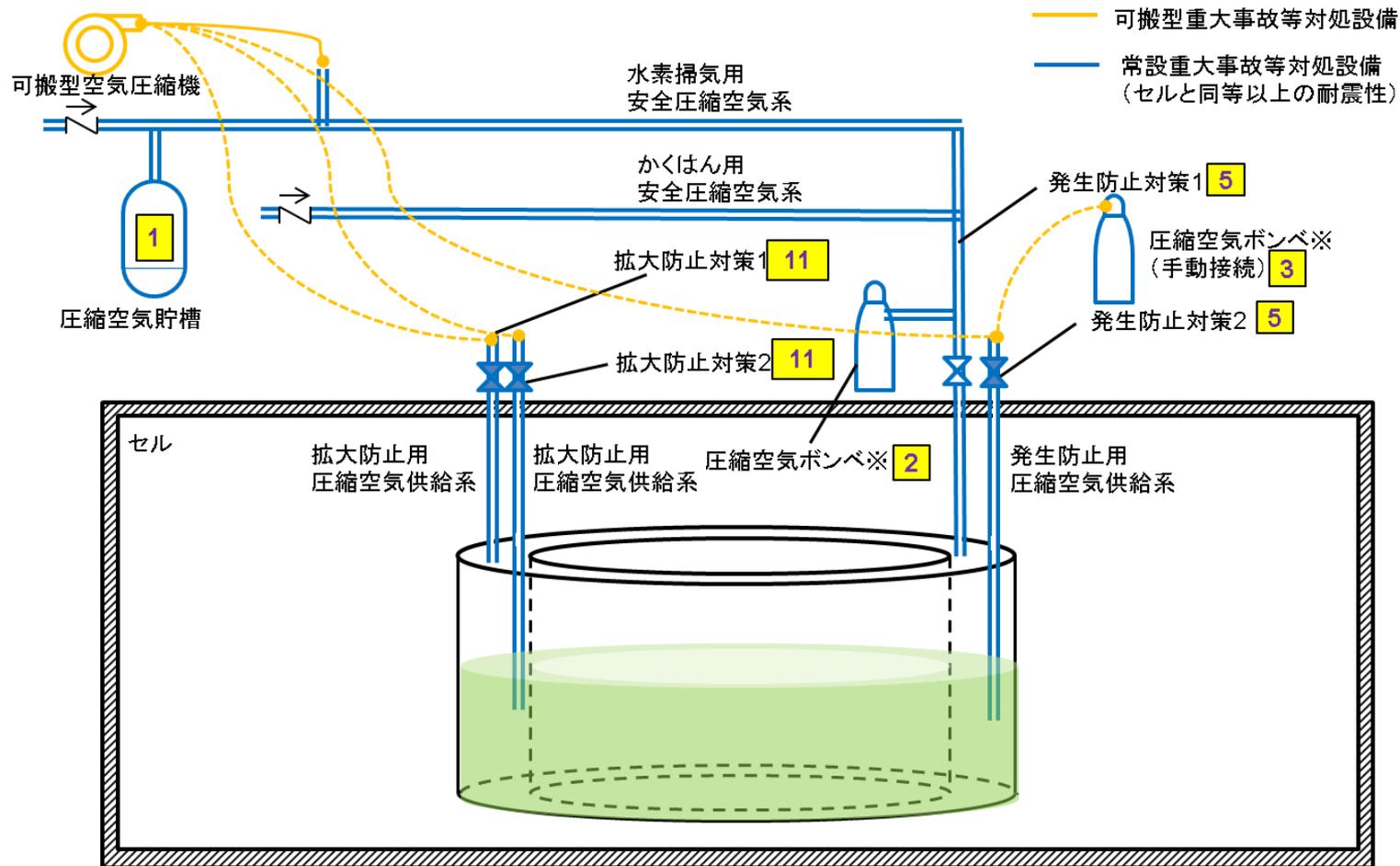
対策段階	計測パラメータ	設置先	計測目的
拡大防止	貯槽掃気流量	圧縮空気供給配管 (常設)	拡大防止対策の実施判断
	貯槽掃気流量	拡大防止用圧縮空気供給系 (常設)	拡大防止対策成否判断、水素掃気機能の状態監視
	廃ガス流量	セル導出経路	拡大防止対策成否判断
	機器内水素濃度	貯槽付計装配管 (常設)	機器の気相部水素濃度が所定濃度以下であることの確認

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

#### 3. 1. 3 水素爆発に対する重大事故等対処設備(発生防止対策、拡大防止対策)

- 常設重大事故等対処設備はセルと同等以上の耐震性を有する設計とする
- 圧縮空気供給に用いる系統毎に接続口を整備する



※重要度高かつ空気貯槽による水素掃気機能に期待しない場合に未然防止濃度到達までの時間が24時間未満の機器について圧縮空気ポンペを設置する。

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 1. 4 水素爆発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 第三十六条

三 水素爆発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. 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)

水素掃気用空気に機器内の放射性物質が移行し、放射性物質を含んだ空気が発生するため、対象機器等に接続する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、可能な限りセルに閉じ込める。



### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 4 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(セル導出)(3/3)

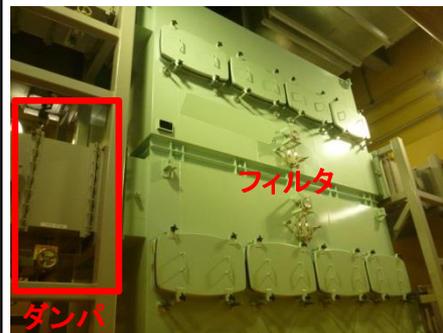
#### 13 隔離弁の操作



##### 【作業概要】

分離建屋塔槽類廃ガス処理設備の隔離弁を閉止し、分離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、分離建屋塔槽類廃ガス処理設備内の雰囲気をセルへ導出する。

#### 14 ダンパ閉止



##### 【作業概要】

セル換気システムから建屋換気システムをバイパスした際に、水素爆発時の雰囲気をセル換気系で閉じ込めるために、建屋換気システムのダンパを閉止する。

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要
- 3. 1. 5 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(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 第三十六条

### 四 水素爆発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. 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)

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. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価  
 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要  
 3. 1. 5 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(3/4)

15 水素濃度計設置

【作業概要】  
 機器及びセルの水素濃度を測定するために、水素濃度計を設置する。

16 セル内圧力計取り付け、確認

17 可搬型ダクト設置

18 可搬型排風機、可搬型フィルタ設置



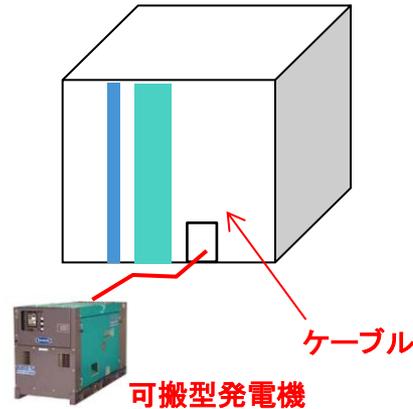
【作業概要】  
 塔槽類廃ガス処理設備の雰囲気を導出したセルの圧力を監視するため、セル内圧力計を設置する。  
 セルに導出した塔槽類廃ガス処理設備の雰囲気を排気するため、可搬型フィルタ、可搬型排風機及び可搬型ダクトを接続する。



19 ケーブル布設

20 可搬型発電機、可搬型排風機起動準備

21 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分離建屋換気設備のセル換気システムを排気するため、可搬型発電機からの給電ケーブルを接続(給電)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。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 1 要求事項の整理及び対策・対処設備の概要

##### 3. 1. 5 水素爆発に対する異常な水準の放出防止対策(影響緩和)(4/4)



### 【水素爆発の計測パラメータ一覧】

対策段階	計測パラメータ	設置先	計測目的
放出防止	導出先セル圧力	セル付属計 装管 (常設)	可搬型排風機起動の判断
	機器内水素濃度	貯槽付計装 管 (常設)	機器の気相部水素濃度が所定濃度以下であることの確認
	セル内水素濃度	セル付属計 装管 (常設)	セルの水素濃度が所定濃度以下であることの確認
	可搬型フィルタ差圧	可搬型ダクト (可搬型)	フィルタ差圧の確認

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 有効性評価の前提条件
- 3. 2. 1 有効性評価項目及び判断基準(1/2)

a. 重大事故等の発生防止対策

安全圧縮空気系の水素掃気機能が喪失してから機器内水素濃度が未然防止濃度に到達するまでに、水素掃気用安全圧縮空気系又は発生防止用圧縮空気供給系から圧縮空気を供給し、水素爆発を未然に防止できること。

(評価項目)

- ・未然防止濃度に到達するまでに発生防止対策の準備が完了し実施できることを確認する。
- ・機器内水素濃度を可燃限界濃度未満にするために必要な空気流量以上の空気が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

安全圧縮空気系の水素掃気機能が喪失してから発生防止対策を実施したにもかかわらず、掃気流量が規定値を満足しない場合は、未然防止濃度に到達するまでに、拡大防止用圧縮空気供給系から、圧縮空気を供給し、水素爆発を未然に防止できること。

(評価項目)

- ・未然防止濃度に到達するまでに拡大防止対策の準備が完了し実施できることを確認する。
- ・拡大防止用圧縮空気供給系から機器内水素濃度を可燃限界濃度未満にするために必要な空気流量以上の空気が供給できることを確認する。

3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
3. 2 有効性評価の前提条件
3. 2. 1 有効性評価項目及び判断基準(2/2)



c. 異常な水準の放出防止対策

環境へ放出される放射性物質の放出量(セシウム-137換算)が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。

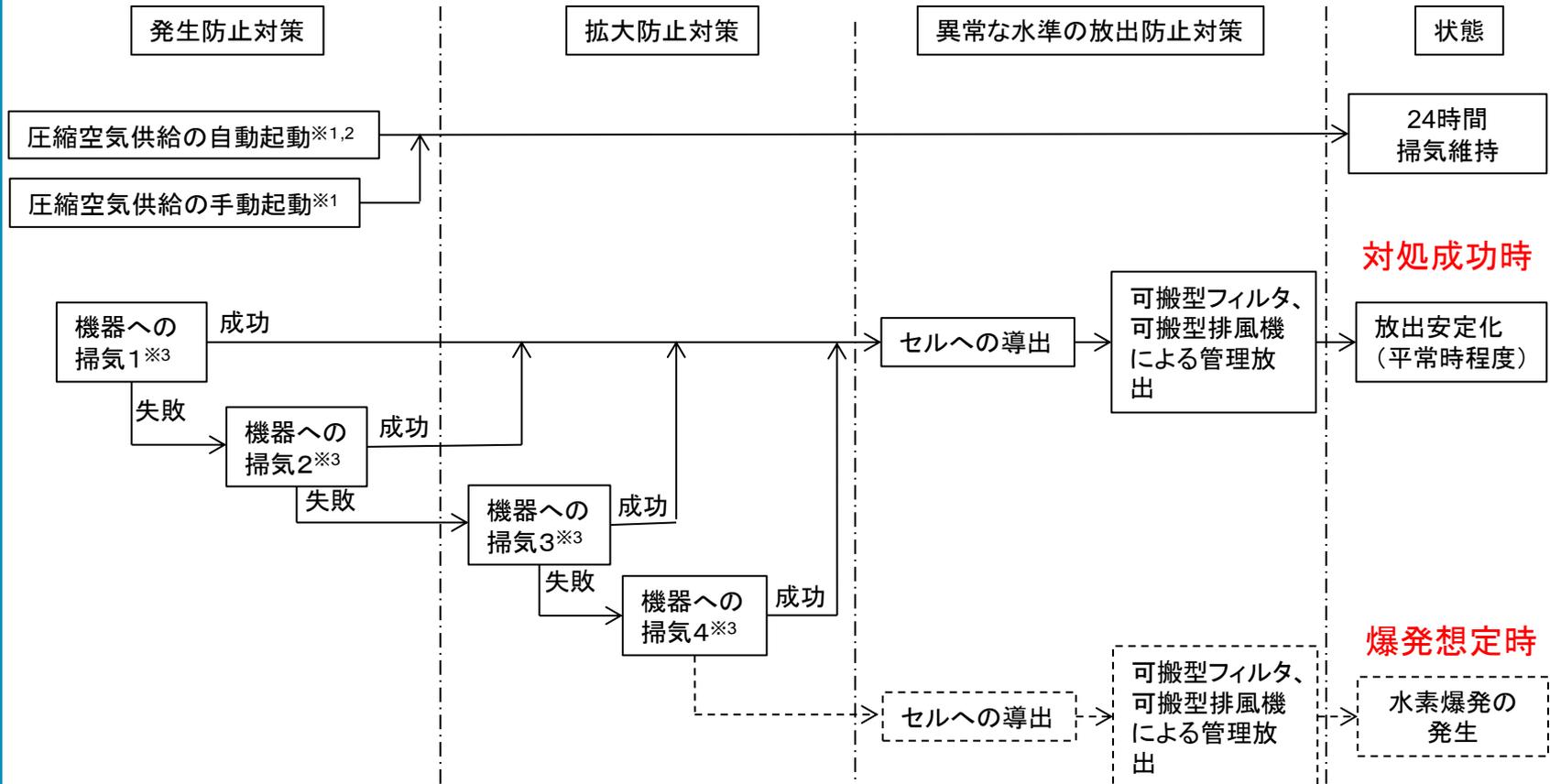
(評価項目)

- ・未然防止濃度に到達する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。
- ・水素掃気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100 TBqを十分下回ることを確認する。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 2 有効性評価の前提条件

##### 3. 2. 2 発生防止対策及び拡大防止対策の有効性評価における解析シナリオ



※1: 重要度高の機器でかつ未然防止濃度到達までの時間が24時間未満の機器に圧縮空気を供給する

※2: 圧縮空気供給を自動起動する設備は多重化する

※3: 発生防止対策及び拡大防止対策の機器への掃気に用いる系統はそれぞれ独立した2系統ずつを整備する。

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 2 有効性評価の前提条件
- 3. 2. 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している。

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

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. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 2 有効性評価の前提条件

##### 3. 2. 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
初期条件	安全圧縮空気系の運転状態	通常運転	1台の空気圧縮機により水素掃気系統へ圧縮空気を供給。
	内蔵液の崩壊熱密度	3600W/m <sup>3</sup> ※1	燃料型式:PWR、燃焼度:45,000MWd/t・U <sub>Pr</sub> 、比出力:60MW、初期濃縮度:3.5wt%、冷却期間:15年 ( $\alpha$ 線由来の発熱密度:495W/m <sup>3</sup> 、 $\beta$ $\gamma$ 線由来の発熱密度:3105W/m <sup>3</sup> )
	初期水素濃度	計算値	安全圧縮空気系の通常運転を仮定。
	水素発生G値	G <sub><math>\alpha</math></sub> :0.17、G <sub><math>\beta</math> <math>\gamma</math></sub> :0.053	G <sub><math>\alpha</math></sub> :Sheppard[1]、G <sub><math>\beta</math> <math>\gamma</math></sub> :Mahlman[2]

項目	対策成功時の放出量	爆発想定時の放出量	設定の考え方
MAR	平常運転時の最大値	同左	1日当たり再処理する使用済燃料の平均燃焼度45,000MWd/t・U <sub>Pr</sub> 、冷却期間15年、初期濃縮度4.5wt%、比出力38MW/t・U <sub>Pr</sub> を基に算出した平常運転時の最大値とする。
DR	1	同左	DRの概念はARFに包含されるとしてDR=1とする
ARF	10mg/m <sup>3</sup>	0.01%	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 10mg/m<sup>3</sup>はかくはんや液移送によるエアロゾル濃度に相当する。供給した空気に対する溶液の移行率を表す。</li> <li>✓ 0.01%は公開文献に基づくARFの幅から設定した。水素爆発により発生する飛沫の機器内溶液に対する割合を表す。</li> </ul>
LPF	DF10 <sup>5</sup>	同左	高性能粒子フィルタ2段を想定し、99.999%と設定する
	DF10	同左	放出経路上の構造的な特徴による除去効果を安全側に設定
RF	保守的に1を設定	同左	—

※1 高レベル廃液濃縮缶の場合を例として記載

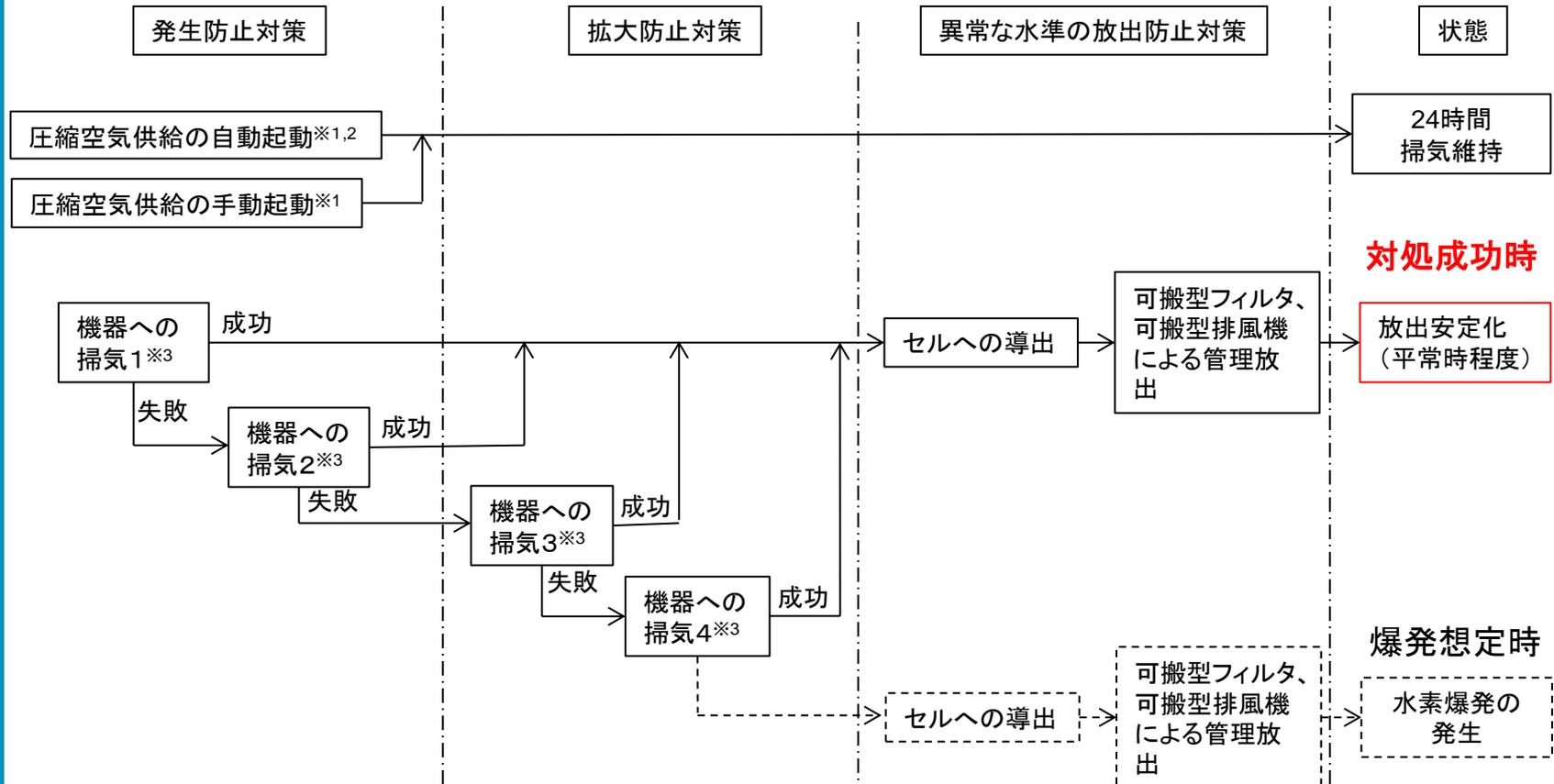
[1] J.C.Sheppard, "ALPHA RADIOLYSIS OF PLUTONIUM (IV) – NITRIC ACID SOLUTIONS", BNWL-751, 1968

[2] H.A.MAHLMAN, "The OH Yield in the Co60  $\gamma$  Radiolysis of HNO<sub>3</sub>", The Journal of chemical physics, Vol35, 3, 1961.

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.1 対処成功時の放出量評価(1/3)



※1: 重要度高の機器でかつ未然防止濃度到達までの時間が24時間未満の機器に圧縮空気を供給する

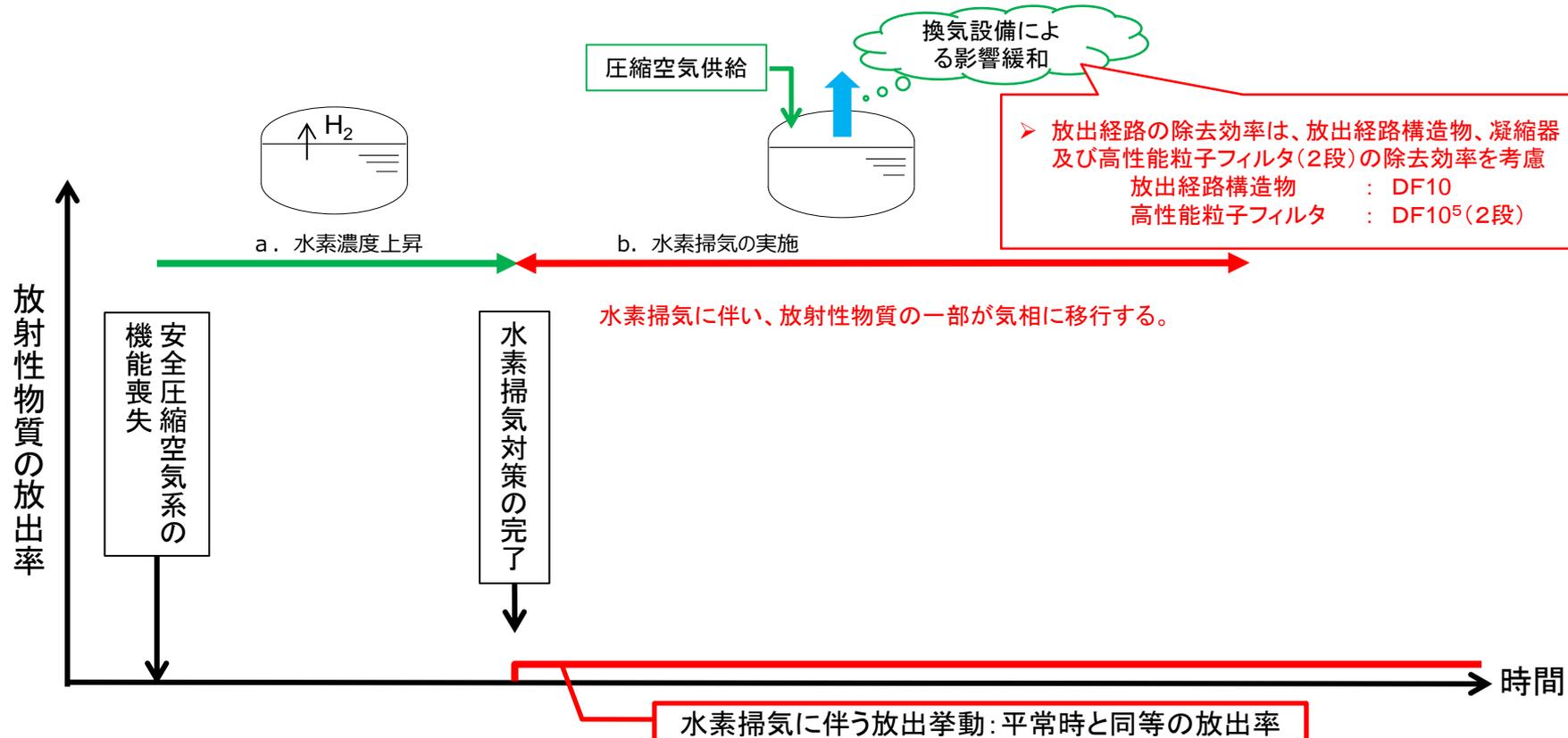
※2: 圧縮空気供給を自動起動する設備は多重化する

※3: 発生防止対策及び拡大防止対策の機器への掃気に用いる系統はそれぞれ独立した2系統ずつを整備する。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.1 対処成功時の放出量評価(2/3)



#### 放出量評価の前提

##### (1) 発生防止対策及び拡大防止対策

安全圧縮空気系の水素掃気機能が喪失し、水素爆発を想定する機器内の水素濃度が上昇し始める。しかし、未然防止濃度に到達する前までに機器内の水素濃度を可燃限界濃度未満に維持するために必要な空気量を供給できる。

##### (2) 異常な水準の放出防止対策

発生防止対策及び拡大防止対策である機器への給気の開始前に、空気に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. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 3 有効性評価結果

##### 3. 3. 1 対処成功時の放出量評価(3/3)

- 異常な水準の放出防止対策に係る準備は、安全圧縮空気系の水素掃気機能の喪失から24時間以内に完了可能である。
- 異常な水準の放出防止対策により、主排気筒から環境へ放出される放射性物質の放出量(セシウム-137換算)は、平常運転時の放出量と同等である。
- 各パラメータは下振れすると考えられ、3桁以上の保守性を有する。
- 以上より、安全圧縮空気系の水素掃気機能の喪失による水素爆発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。
- なお、対処シナリオを超えた場合の対処については、「建屋及びセルと同等以上の耐震性を有する設備の損傷への対処」及び「放射性物質及び放射線の放出抑制」に示す。

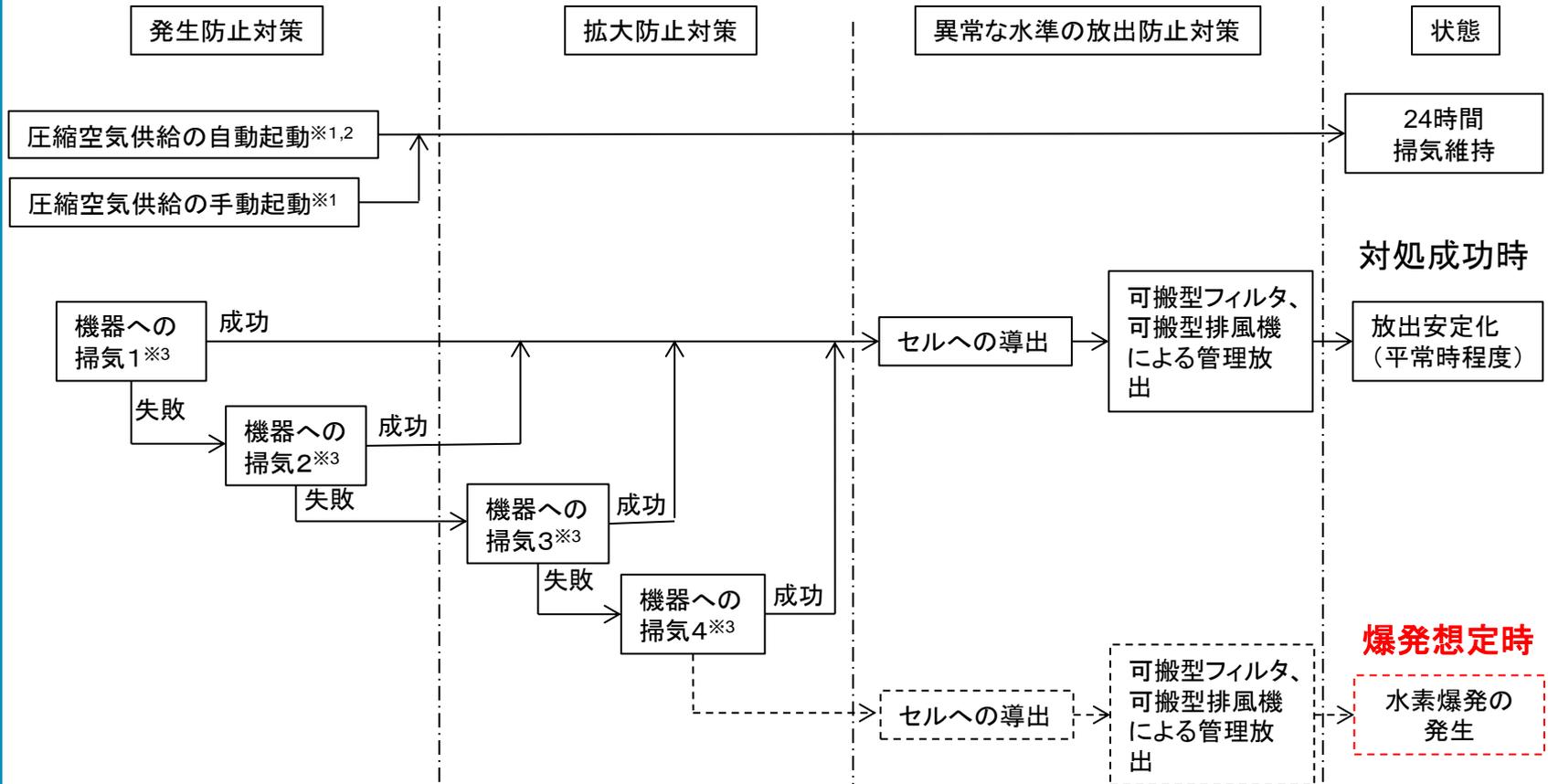
#### 放射性物質の放出量(セシウム-137換算値)

対象建屋	放出量(TBq)
前処理建屋	平常運転時の放出量 7.8E-5と同等
分離建屋	
精製建屋	
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	
高レベル廃液ガラス固化建屋	

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.2 爆発想定時の放出量評価(1/8)



水素爆発は発生し難いが、何らかの理由で水素濃度8vol%にて爆発することを想定。

※1: 重要度高の機器でかつ未然防止濃度到達までの時間が24時間未満の機器に圧縮空気を供給する

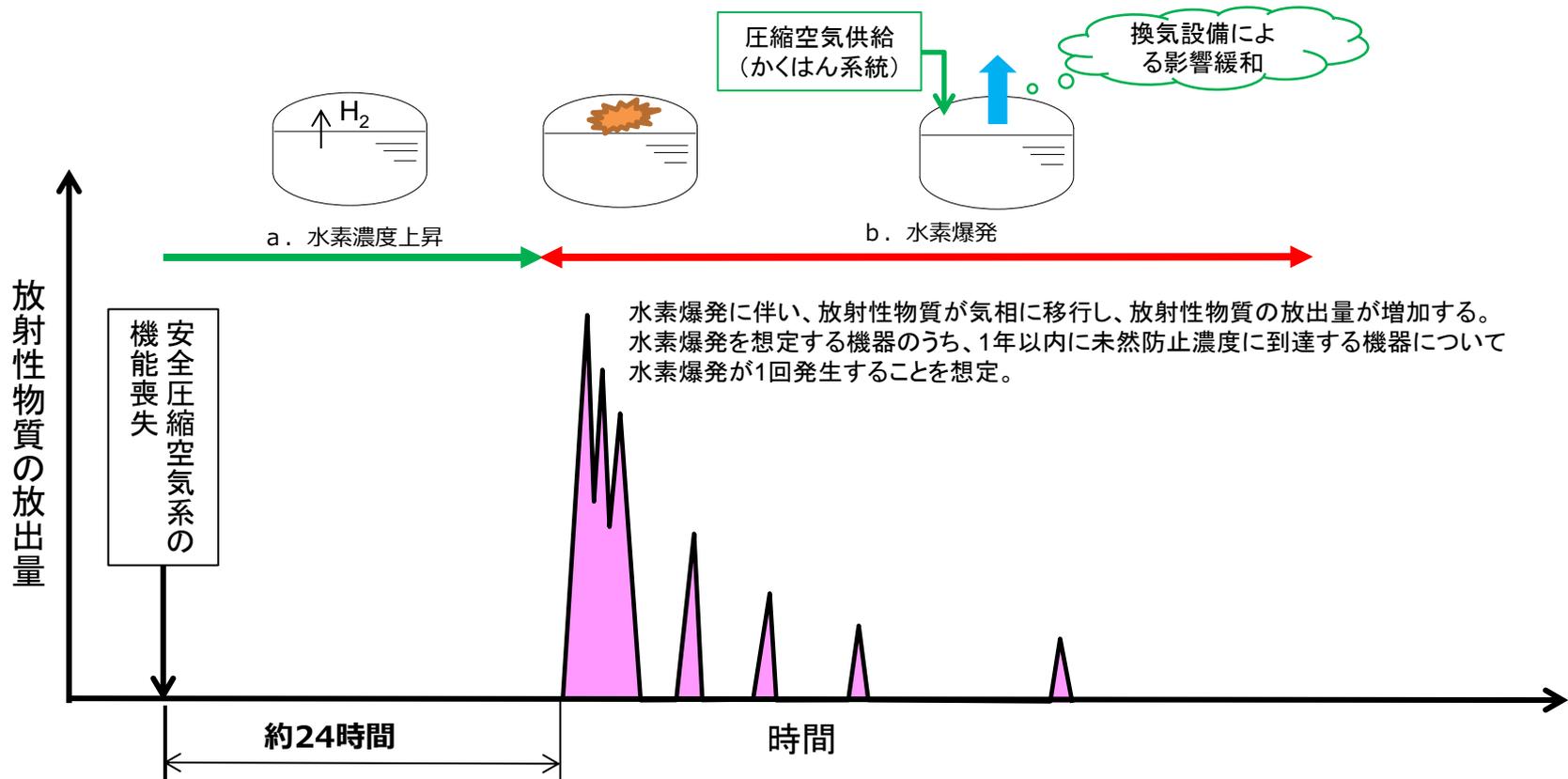
※2: 圧縮空気供給を自動起動する設備は多重化する

※3: 発生防止対策及び拡大防止対策の機器への掃気に用いる系統はそれぞれ独立した2系統ずつを整備する。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.2 爆発想定時の放出量評価(2/8)



#### 放出量評価の前提

##### (1) 発生防止対策及び拡大防止対策

水素掃気機能が喪失し、約24時間後に機器内の水素濃度が未然防止濃度に至った後、何らかの原因で着火し、放射性物質が気相へ移行する。水素爆発を想定する機器のうち、1年以内に未然防止濃度に到達する機器について水素爆発が1回発生することを想定する。

##### (2) 異常な水準の放出防止対策

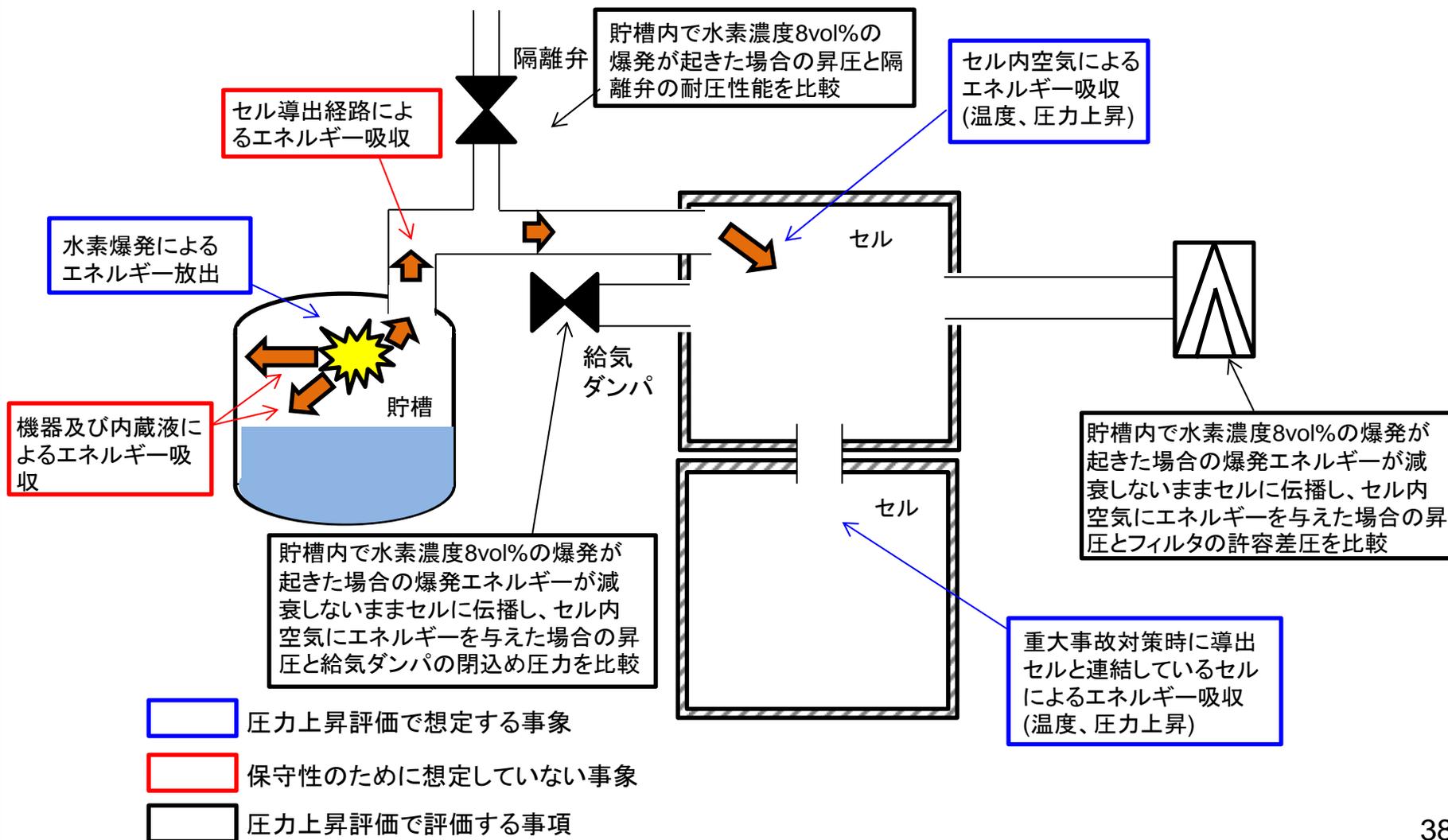
爆発によるエアロゾルの放出量低減のための異常な水準の放出防止対策(セル導出及び高性能粒子フィルタによる放射性エアロゾルの除去)が約24時間後に開始される。

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.2 爆発想定時の放出量評価(3/8)

➤ 除染能力維持確認等に用いる圧力上昇評価モデルを以下に示す。



- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3. 3 有効性評価結果
- 3. 3. 2 爆発想定時の放出量評価(4/8)

## 塔槽類廃ガス処理設備の経路上の隔離弁の健全性確認

### ① 隔離弁による経路維持評価

- 貯槽気相部の水素濃度が8 vol%で水素爆発が起きた場合を想定する。
- 水素爆発によって生じたエネルギーは全て貯槽気相部の温度上昇に使われると仮定する。
- 初期温度は50℃、初期圧力は1気圧とする。
- 温度上昇に伴う圧力上昇を評価し、水素爆発による貯槽内圧力の変動を求める。
- 同一の水素濃度であった場合、気相部体積によらず得られる結果は同一となるため、任意体積を想定して爆発後圧力を求める。

#### 【水素濃度8vol%における爆発後圧力】

- 水素濃度8vol%における爆発後圧力は0.27MPaとなった。

#### 【VOG隔離弁の耐圧性能】

- 各建屋のVOG隔離弁の耐圧性能の比較を以下に示す。

分類	前処理建屋	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
耐圧性能 (MPa)	2.3/ 3.0	2.0	1.5	1.5	2.9
隔離弁 種類	バタフライ弁/ ニードル弁	バタフライ弁	バタフライ弁	ゲート弁	バタフライ弁

- 各建屋のVOG隔離弁の耐圧性能は0.27MPa以上である。
- 従って、機器内で水素爆発が発生してもVOG隔離弁による経路維持は可能である。 39

- 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価
- 3.3 有効性評価結果
- 3.3.2 爆発想定時の放出量評価(5/8)

## 水素爆発による圧力上昇時の除染能力維持確認

### 給気ダンパの気密性及び可搬型フィルタの除染能力維持確認の想定

- 放出量評価の必要性から事象進展のシナリオとは別に、各建屋において8vol%に達する時間余裕が最も短い機器に着目し、当該時間における全水素発生量を評価し水素全量が反応すると想定し、セルの耐圧性及び可搬型フィルタの健全性を確認する。

$$\text{全水素発生量}(m^3) = \sum \text{各機器の水素発生速度}(m^3/h) \times \text{最短時間}(h)$$

No.	項目	評価の想定
1	燃焼に寄与する水素量	各建屋において8vol%に達する時間余裕が最も短い機器に着目し、当該時間における全水素発生量
2	爆発時の燃焼割合	完全燃焼すると想定。水素濃度8vol%程度では完全燃焼しないとの報告がある <sup>1)</sup> 。
3	連結セルの体積	導出先のセル及び連結するセルの体積を考慮する。
4	流体の圧縮性	考慮なし。実際は、機器内の流体により発生圧力は緩和されるが保守的に本効果は期待しない。
5	機器へのエネルギーの伝播	考慮なし。実際は、機器へのエネルギー伝播により発生圧力は緩和されるが保守的に本効果は期待しない。
6	系外への放熱	考慮なし。実際は放熱に伴い発生圧力は緩和されるが保守的に本効果は期待しない。

1) 柳生昭三、松田東栄、“水素の爆発危険性についての研究(第2報)－水素-空気混合物の爆発圧力－”、産業安全研究所報告、1973

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 3 有効性評価結果

##### 3. 3. 2 爆発想定時の放出量評価(6/8)



## 水素爆発による圧力上昇時の除染能力維持確認

### 健全性評価の判断基準

- セルの耐圧性及び可搬型フィルタの健全性を判断する基準を以下に示す。

項目	判断基準
セルの耐圧性	爆発後圧力増加分 0.5kPa未満 (セルの給気ダンパの耐圧設計から設定)
可搬型フィルタの健全性	爆発後のフィルタ差圧9.8kPa未満且つガス温度200°C未満

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.3 有効性評価結果

##### 3.3.2 爆発想定時の放出量評価(7/8)

#### 水素爆発による圧力上昇時の除染能力維持確認

- 評価結果を以下に示す。給気ダンパの気密性については、保守的な評価であることから漏えいの可能性があるが、作業環境への影響は微小であり、対策への影響はない。
- 可搬型フィルタの除染能力は全ての建屋で維持されることを確認した。

建屋	各建屋における最も時間余裕の短い機器	未然防止濃度	
		到達最短時間(hr)	到達時の水素発生量(m <sup>3</sup> )
前処理建屋	リサイクル槽	60	2.1
分離建屋	TBP洗浄塔	24	3.2
精製建屋	ウラン洗浄塔	24	1.4
U・Pu脱硝建屋	硝酸プルトニウム貯槽	24	0.22
高レベル廃液ガラス固化建屋	高レベル濃縮廃液貯槽	84	3.4

建屋	経過時間(h)	爆発後温度(°C) (T <sub>0</sub> =50°C仮定)	爆発後差圧(kPa)	判定	
				給気ダンパの気密性	可搬型フィルタの除染能力維持
前処理建屋	60	52	0.62	×	○
分離建屋	24	51	0.34	○	○
精製建屋	24	51	0.16	○	○
U・Pu混合脱硝建屋	24	63	4.1	×	○
高レベル廃液ガラス固化建屋	84	61	3.5	×	○

3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価  
 3. 3 有効性評価結果  
 3. 3. 2 爆発想定時の放出量評価(8/8)

- 異常な水準の放出防止対策に係る準備は、安全圧縮空気系の水素掃気機能の喪失から24時間以内に完了可能である。
- 異常な水準の放出防止対策により、主排気筒から環境へ放出される放射性物質の放出量(セシウム-137換算)が $1.6E-4TBq$ となり、 $100TBq$ を十分下回る。
- 設定したARF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を総合すると3桁以上の保守性を有する。
- 以上より、安全圧縮空気系の水素掃気機能の喪失による水素爆発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。

放射性物質の放出量(セシウム-137換算)

評価対象	放出量(TBq)
前処理建屋	$8.1E-5$
分離建屋	$1.6E-4$
精製建屋	$2.7E-4$
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	$6.2E-5$
高レベル廃液ガラス固化建屋	$1.3E-3$

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 4 有効性評価における不確かさ(1/5)

##### 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)

- 蒸発乾固と同様である。

##### ②DR:MARのうち事故の影響を受ける割合

- 機器内の溶液のうち水素掃気の影響を受けて放出に寄与する割合である。

##### ③ARF:気相を通じて貯槽外部へ移行する割合

- 対処成功時は、平常運転時と同様に、 $10\text{mg}/\text{m}^3$ で水素掃気用空気に機器内の溶液が移行するとした。 $10\text{mg}/\text{m}^3$ はかくはんや液移送によるエアロゾル濃度に相当する。水素掃気のために気相部に空気を吹き込んだ場合では、 $0.1\text{mg}/\text{m}^3 \sim 1\text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>であるため、1桁以上の保守性を有する。
- 爆発想定時について、文献値及び試験結果に基づく機器毎のARFが持つ幅は、 $1.0 \times 10^{-8}$ から $6 \times 10^{-4}$ である。詳細は5. 2参照。

[1] F.J.Herrman, E. Lang, J.Furrer, E Henrich "Some Aspects of Aerosol Production and Removal During Spent Fuel Processing Steps", 16<sup>th</sup> DOE Nuclear Air Cleaning conference

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.4 有効性評価における不確実さ(2/5)

#### 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DF $10^5$ 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<sup>※1</sup>、セル及び換気系の構造的な特徴<sup>※2</sup>)のDF10を設定。

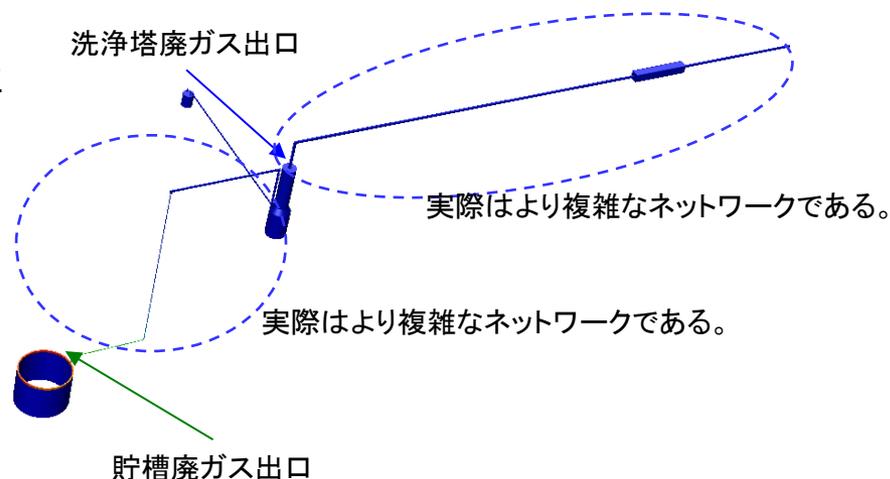
#### 【※1塔槽類廃ガス処理設備の構造的な特徴】

##### (1)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。

##### (2)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. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3. 4 有効性評価における不確かさ(3/5)



#### 【※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。

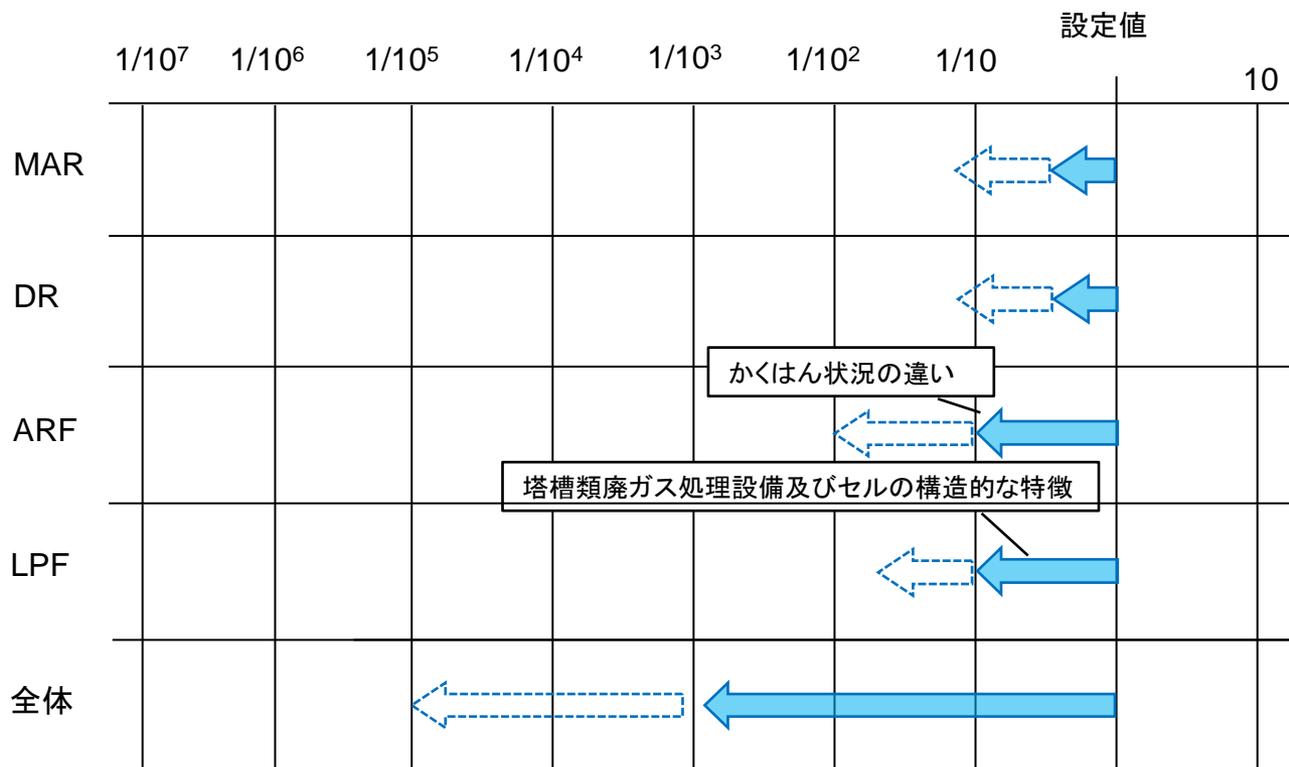
### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.4 有効性評価における不確かさ(4/5)



#### 対処成功時

- 各パラメータは下振れすると考えられ、総合すると3桁以上の保守性を有する。



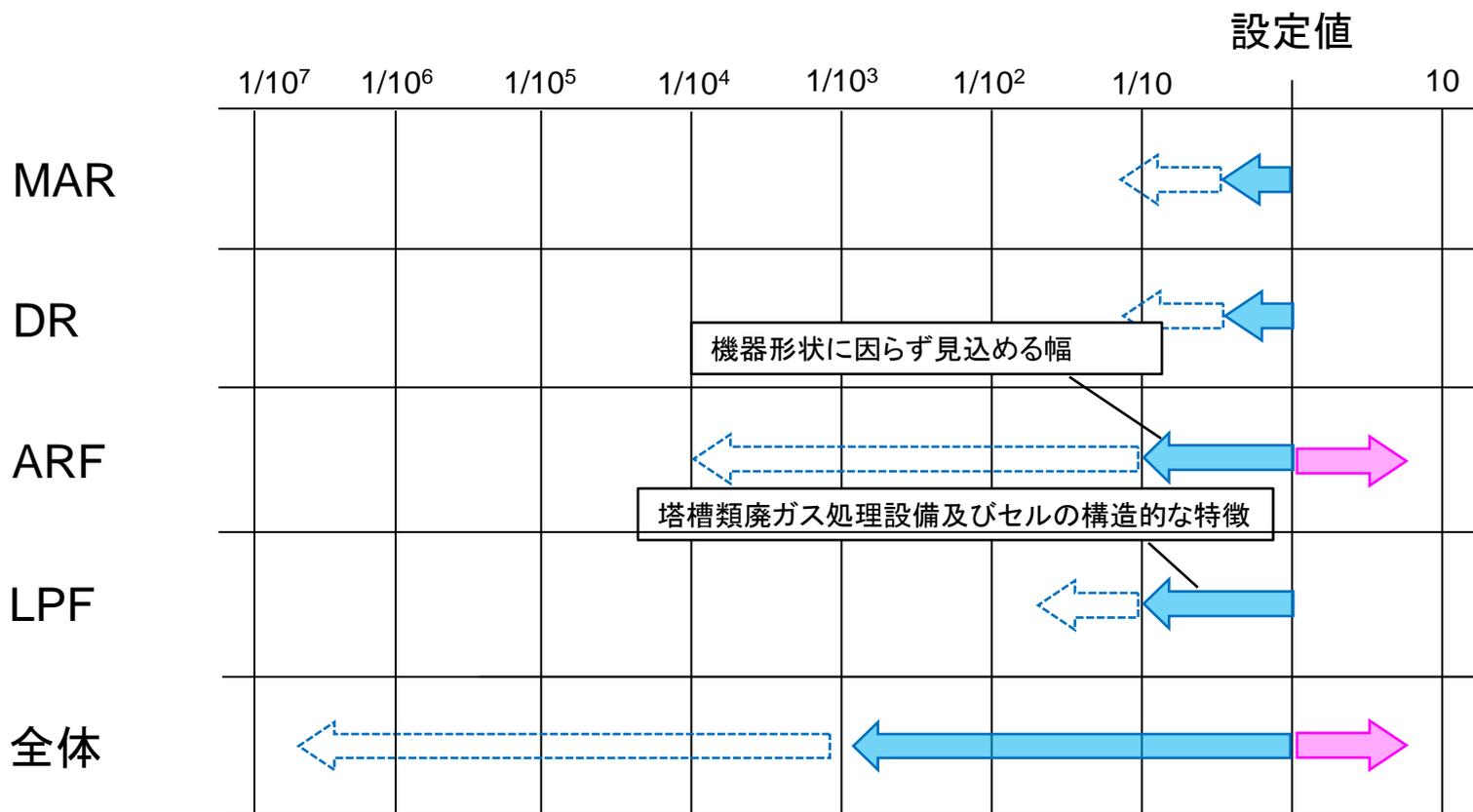
← : 条件に係らず低減効果が見込める  
⇐ : 条件によって低減効果が見込める

### 3. 分離建屋における水素爆発への具体的対処と有効性評価

#### 3.4 有効性評価における不確かさ(5/5)



- 設定したARF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を総合すると3桁以上の保守性を有する。



- ← (solid blue) : 条件に係らず低減効果が見込める
- ← (dashed blue) : 条件によって低減効果が見込める
- (solid pink) : 条件によって上振れの可能性がある

## 4. 同時発生における放出量評価

### 4. 1 評価条件

#### 4. 1. 1 有効性評価項目及び判断基準

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(セシウム-137換算)が、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、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。
- ・水素濃度が8%に到達する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。
- ・環境へ放出される放射性物質の放出量(セシウム-137換算)の合計値が100TBqを十分下回ることを確認する。

## 4. 同時発生における放出量評価

### 4. 1 評価条件

#### 4. 1. 2 放出量評価における解析シナリオ(1/2)



- 溶液が沸騰した場合、蒸気により水素が掃気されるため、機器内の水素濃度は未然防止濃度に到達しないと考えられる。
- しかし、凝縮器において蒸気を取り除かれると水素が濃縮し、凝縮器内で高い水素濃度に至ることが考えられる。
- このため、沸騰開始後であっても水素掃気は継続して実施する。
- 水素爆発を想定する機器内に圧縮空気を供給することに伴い、導出先セルの圧力は上昇する。
- 圧力上昇速度が比較的緩慢であると想定される前処理建屋、分離建屋及び精製建屋は、セルの耐圧性能が超過する前まで、セルに導出した気体を可能な限り閉じ込めた後にセル排気を実施する。
- セルへ放射性物質等を閉じ込めることにより、環境への放出量を可能な限り低減する。
- U・Pu混合脱硝建屋及び高レベル廃液ガラス固化建屋は耐圧性能を超過するまでの時間が短く、耐圧性能超過に伴う建屋内の環境悪化が想定される。復旧作業への影響を低減することを目的として、これらの建屋については連続的にセル排気を実施する。
- 放出量評価においては、連続的に水素掃気用の空気が供給されている状態を想定して放出量を算定する。

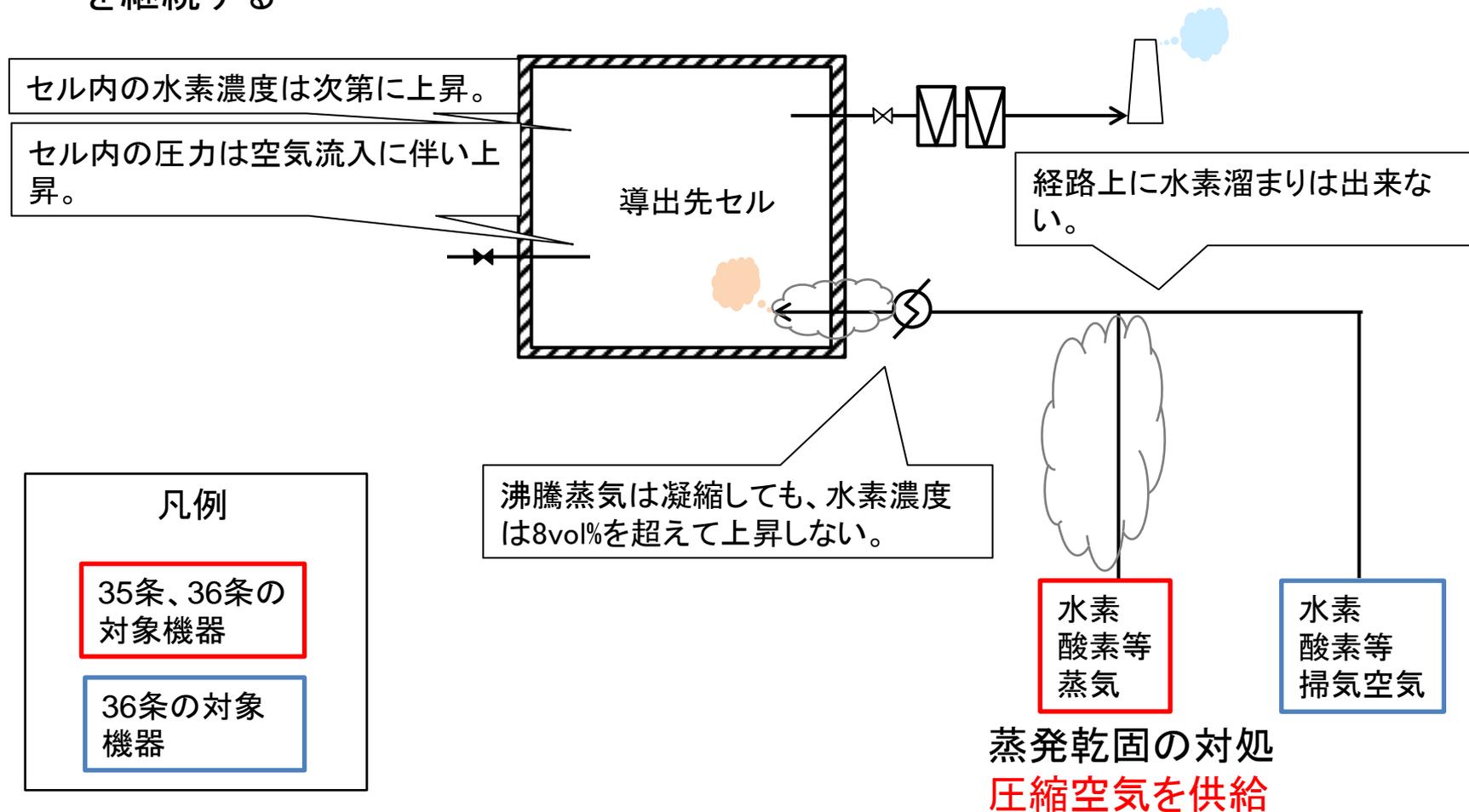
## 4. 同時発生における放出量評価

### 4. 1 評価条件

#### 4. 1. 2 放出量評価における解析シナリオ(2/2)

### 掃気継続時の圧力上昇について

- 沸騰する機器についても、機器及び凝縮器内の水素濃度を4vol%に維持できる掃気を継続する



## 4. 同時発生における放出量評価

### 4. 2 放出量評価(1/2)

#### 【同時発生時の各シナリオにおける放出量評価】

蒸発乾固及び水素爆発の同時発生時においても、対策成功時の放出量は単独事象発生時と同等である。

事象	凝縮器による 蒸気の凝縮	可搬型フィルタ、可搬型排 風機による管理放出	放出量評価結果	
			建屋	放出量(TBq/日)
蒸発乾固 水素爆発	成功 凝縮器 :DF10以上	成功 フィルタ(2段):DF10 <sup>5</sup> 放出経路構造物 :DF10	前処理建屋	平常運転時の放出量 7.8E-5 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	

事象	放出量(TBq/日)
その他漏えい	6.3E-4

## 4. 同時発生における放出量評価

### 4.2 放出量評価(2/2)

#### 【同時発生時の各シナリオにおける放出量評価(つづき)】

水素爆発の拡大防止対策及び凝縮器が機能しなかった場合においても、放出量は100TBqを下回る。

事象	評価条件	放出量評価結果	
		建屋	放出量(TBq/日)
蒸発乾固	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 1日あたりの放出率が大きく、可搬型凝縮器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常設の凝縮器が機能しなかった場合を想定</li> <li>➢ 冷却機能の喪失から24時間後に可搬型凝縮器の設置作業に着手、作業着手から12時間で可搬型凝縮器の設置作業を完了</li> <li>➢ 凝縮器設置までの放出量は下記条件で評価 フィルタ(2段):DF10<sup>3</sup> 放出経路構造物:DF10</li> </ul>	前処理建屋	平常運転時の放出量と同等
		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	4.1E-03
事象	評価条件	放出量評価結果	
水素爆発	フィルタ(2段):DF10 <sup>5</sup> (前処理建屋のみ※1) フィルタ(2段):DF10 <sup>3</sup> (前処理建屋以外) 放出経路構造物:DF10	前処理建屋	8.1E-05※2
		分離建屋	1.6E-02※2
		精製建屋	2.7E-02※2
		U・Pu混合脱硝建屋	6.2E-03※2
		高レベル廃液ガラス固化建屋	1.3E-01※2

※1: 沸騰よりも水素爆発の発生が先行するため、通常時のフィルタDFを期待

※2: 1年以内に未然防止濃度に到達する機器で1回の爆発を想定し積算

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例(1/2)

### ① パラジウムイオンによる水素消費反応について

これまでの研究報告及び検証試験の結果を踏まえて、高レベル濃縮廃液の水素発生G値を1/20とした。



実廃液では、さらに水素発生G値は低減しているが、反応メカニズムの詳細や阻害因子の影響の定量的調査等について未確認であることから、高レベル濃縮廃液の水素発生G値の高度化は今後の課題である。

### ② 水素爆発時のARFの高度化について

水素爆発に関するARFの報告は少なく、再処理工場に設置される様々な形状の容器を対象としたARFの推定方法は報告されていない。



これまでの試験結果に基づき、様々な容器に対するARFの推定方法を提案した。ただし、試験条件の充足性の観点から、評価においては保守的な設定値とした。



今後、基礎知見を蓄積し、より現実的なARFの設定を目指す。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例(2/2)

### ③ 水素爆発時の燃焼挙動について

水素の空気中の可燃限界濃度は4vol%であるが、8vol%以上になると爆発により比較的高い圧力が発生するおそれがある。このため、重大事故等の対処を行う制限濃度として水素濃度8vol%(未然防止濃度)を選択した。



再処理施設における水素爆発時の燃焼挙動を把握し、急激な過圧が発生する水素濃度をより明確にする。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5. 1 パラジウムイオンによる水素消費反応(1/5)



#### 【これまでの研究報告】

##### Beckerらの報告<sup>1)</sup>(ドイツ, 1979)

- ① Karlsruhe再処理プラントで実際の高レベル廃液貯槽からのオフガスを水素検出感度20ppmの測定器で測定した。
- ② 水素が検出されなかったことから、放出G値<sup>\*</sup>を $5 \times 10^{-5}$ 未満とした。
- ③ この現象は廃液の深さが関係しており、その後「液深効果」と呼ばれるようになった。

<sup>\*</sup> 崩壊熱100eVあたりの水素放出量であり、水素G値と単位が同じであるため、「放出G値」と呼ぶ(図参照)



##### AREVAの研究(フランス, 1995～1996)

- ① UP2-800再処理プラントで実廃液貯槽からのオフガスを測定して水素放出G値を求めたところ、 $3.3 \times 10^{-5}$ となった。
- ② フランスの規制当局もこの結果を承諾し(1998)、許認可にも反映させている。
- ③ 福島事故を踏まえて実施されたストレステストでは、「高レベル濃縮廃液貯槽の水素爆発事象」はシビアアクシデントから除外されている。

#### 金属イオン効果の確認

- ① 模擬廃液を用いた基礎研究により、水素放出を抑制しているのはPdイオンによる触媒効果であることを推定した<sup>2)</sup>。
- ② Pdが含まれる高レベル廃液において実液を用いた確認が報告されている(次頁)。

1)R. Becker et al., "Radiolytically Generated Hydrogen from Purex Solutions, IAEA- SM-245/13 (1979).

2)T. Kodama, et al., Nuclear Technology, 172, 77 (2010)

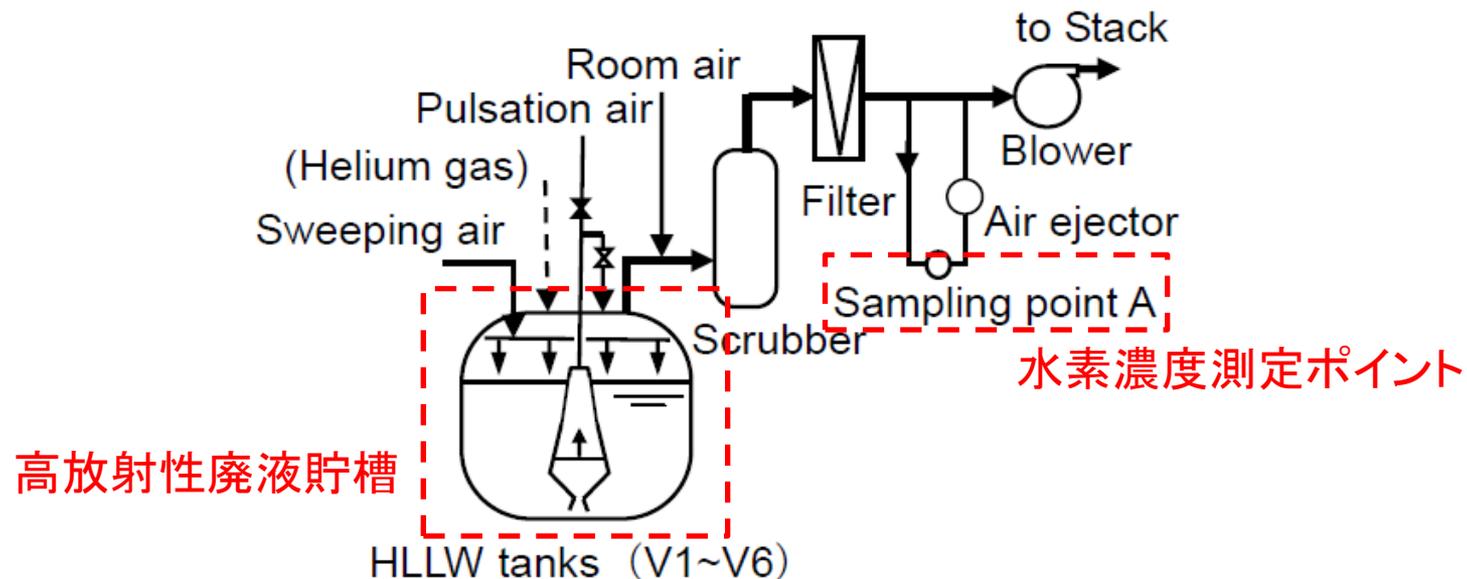
## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.1 パラジウムイオンによる水素消費反応(2/5)

#### 実貯槽オフガス中の水素濃度測定と解析<sup>1)</sup>

- ① 模擬廃液を用いた研究で得られた結果が、実廃液に適用可能であることを示すため、検証実験を行った。
- ② 東海再処理施設で高放射性廃液貯槽からのオフガスの水素濃度を測定して、測定値と模擬廃液を用いて得られたパラメータから求めた水素濃度を比較した(空気中のBG水素濃度である0.7 ppmを差し引いた水素濃度を比較)。

実測値から計算される水素放出G値は $3 \times 10^{-5}$ であり、従来の安全評価に用いていた値の1/1,000程度であった。この結果は、過去の研究報告とも整合している。



1)H. Kinuhata et al., Nuclear Technology, **189**, 122 (2015).

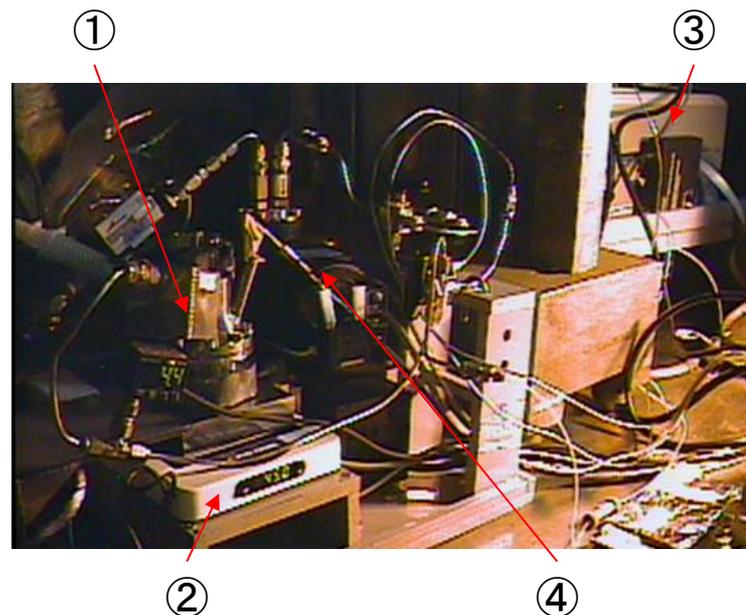
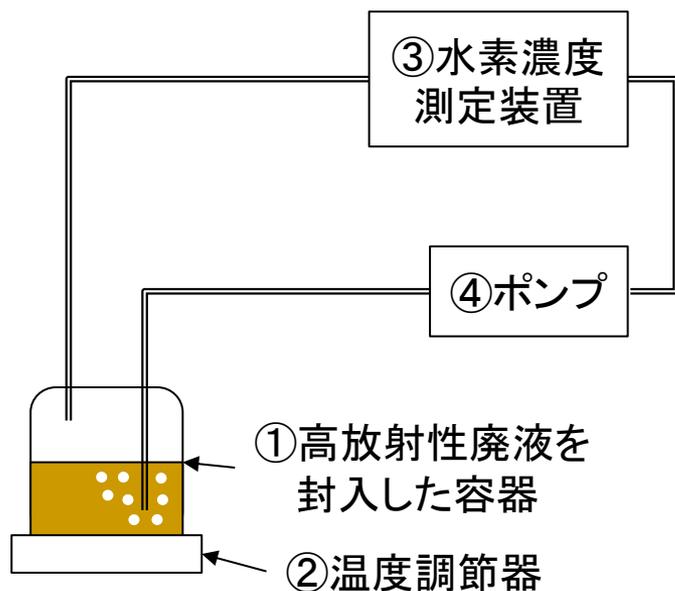
以上のような他施設での測定結果を踏まえて、高レベル濃縮廃液の水素発生G値を1/20とした。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.1 パラジウムイオンによる水素消費反応(3/5)

#### 実廃液入り小型閉鎖容器における平衡水素濃度測定<sup>1)</sup>

- ① 模擬廃液の $\gamma$ 線照射によるシミュレーション実験より得られた結果(掃気がない状態では、水素濃度は4%未満で平衡に達する)が、実廃液においても得られることを確認するため、小型閉鎖容器に実廃液を封入して水素濃度を測定した。
- ② 実廃液については、東海再処理施設の高放射性廃液を採取したものをを用いた。また、その希釈液についても実験を行った。



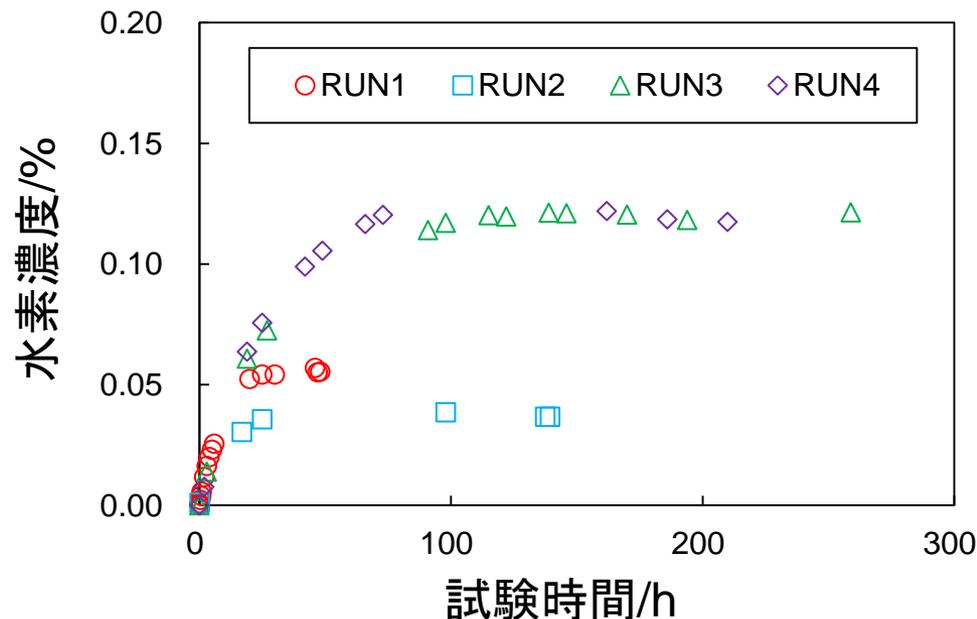
1)H. Kinuhata et al., Nuclear Technology, **192**, 155 (2015).

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.1 パラジウムイオンによる水素消費反応(4/5)

- γ線照射によるシミュレーション実験の結果と同様に、水素濃度は0.1%前後で平衡に達した。
- 実験温度が高い方が、触媒効果が大きくなった(RUN1, 2とRUN3の比較より)。
- 希釈を行って、Pd濃度が減少しても、崩壊熱密度も減少するため、希釈前と比較して同程度の平衡水素濃度となった(RUN3とRUN4の比較より)。

試験	凡例	崩壊熱密度	Pdイオン濃度	温度	備考
RUN1	○	820W/m <sup>3</sup>	15mM	28°C	東海再処理施設の高放射性廃液
RUN2	□	910W/m <sup>3</sup>	16mM	28°C	同上(バブリング攪拌によって濃縮)
RUN3	△	1100W/m <sup>3</sup>	19mM	23°C	同上(バブリング攪拌によって濃縮)
RUN4	◇	130W/m <sup>3</sup>	2.3mM	23°C	東海再処理施設の高放射性廃液を2M硝酸で希釈



## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5. 1 パラジウムイオンによる水素消費反応(5/5)



- 平衡水素濃度測定の実測値と模擬廃液を用いて得られたパラメータから求めた解析値を比較し、両者が同程度のオーダーであることを確認した。

試験	崩壊熱密度	Pdイオン濃度	温度	水素平衡濃度%	
				測定値	解析値
RUN1	820W/m <sup>3</sup>	15mM	28°C	0.050	0.12
RUN2	910W/m <sup>3</sup>	16mM	28°C	0.037	0.13
RUN3	1100W/m <sup>3</sup>	19mM	23°C	0.12	0.19
RUN4	130W/m <sup>3</sup>	2.3mM	23°C	0.12	0.29

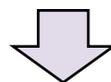
- 以上のような他施設での測定結果を踏まえて、高レベル濃縮廃液の水素発生G値を1/20とした。
- 実廃液では、さらに水素発生G値は低減しているが、以下の項目について未確認であることから、高レベル濃縮廃液の水素発生G値の高度化は今後の課題である。
  - ① 阻害要因として、塩化物イオン、硫酸イオンが特定されているが、定量的な触媒効果との関係が不明確
  - ② 反応メカニズムについて、硝酸系における検討を実施。高レベル廃液系で同様のメカニズムが支配的か確認必要。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(1/16)



- 水素爆発に関するARF及びDRに関するデータの報告は少ない。
- 過圧後の急激な減圧に関するARFがNUREG/CR-6410<sup>1)</sup>において報告されている。
- 石尾ら<sup>2)</sup>は加圧時間、表面積を制御してARFを測定し、結果を報告
- しかし、再処理工場に設置される様々な形状の容器を対象としたARFの推定方法はこれまで報告されていない。



これまでの試験に基づき様々な容器に対するARFの推定方法を提案(2016年11月2日審査会合)

→今後、不足しているデータを追加し、水素爆発時のARFの高度化を目指す

1) *Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook*, NUREG/CR-6410, 1998

2) Takahiro ISHIO et al., "Experiment on airborne release fraction in hydrogen explosion accident at Reprocessing plant". OECD-NEA CSNI Workshop. Aomori City 2016-11-15/18

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(2/16)

- 公開文献に基づくARFとして、NUREG/CR-6410の概要を以下に示す。
- 緩やかな加圧からの放出と比較し、急激な加圧からの放出はARFが小さくなることが明記されており、水素爆発に相当するARFは、記載されるARF=6×10<sup>-4</sup>より小さいことが示唆されている。
- 公開文献に基づくARFの幅、当社小型試験に基づくARFの幅を評価し、NUREGの記載内容(緩やかな加圧からの放出と比較し、急激な加圧からの放出はARFが小さくなる)を踏まえて1×10<sup>-4</sup>が妥当と考える。

ARF根拠	記載概要	問題点	適用方法と振れ幅
当社実施の小型試験に基づく加圧からの放出	ARFを単位面積あたりのエアロゾル発生量と機器の形状等のパラメータから導出できるとして機器毎にARFを計算。 単位面積あたりのエアロゾル発生量は当社試験に基づくものであるがNUREG/CR-3093の試験内容と当社試験を比較し、双方で水素爆発を模擬していない部分を幅として考慮した。	・取得すべき試験データがあるため、定量的議論を行うためには今後の追加データ取得が必要。	・機器毎にARFを評価しており、評価結果は1.0×10 <sup>-8</sup> から2.2×10 <sup>-6</sup> である。 ・オーダーで切り上げて、 <b>1×10<sup>-7</sup>&lt;ARF&lt;1×10<sup>-5</sup></b> ・試験条件の充足性の観点からARFの最大値に更に一桁の保守性をもたせて <b>ARF=1×10<sup>-4</sup></b>
緩やかな加圧からの放出 NUREG/CR-6410 (NUREG/CR-3093の試験に基づく)	吹き出し口が容器水位以上の場合であり、圧力が緩やかに上昇(slow build up)する場合、容器内圧力に応じてARFが与えられている。 <0.35MPa : ARF =5×10 <sup>-5</sup> (RF0.8) 0.35 ~3.5MPa: ARF=2×10 <sup>-3</sup> (RF0.3) >3.5MPa: ARF <sub>ub</sub> =1.28MF <sub>g</sub> <sup>0.827</sup> ここで、 MF <sub>g</sub> :溶存気体のモル分率 ARF <sub>ub</sub> :Upper bound equation of ARF	・放出のメカニズムは溶存気体の減圧に伴う沸騰。 ・溶存気体量に影響すると考えられる圧力保持時間や溶液深さが不明。	・NUREG/CR-6410及びDOE-HDBK-3010-94に記載の通り、急激な加圧に適用する場合はARFは <u>小さくなるものと想定</u> 。 ・爆発により機器内に発生する圧力は、0.1~0.6MPa程度であるため、ARFは4×10 <sup>-5</sup> (5×10 <sup>-5</sup> ×0.8)より大きく、6×10 <sup>-4</sup> (2×10 <sup>-3</sup> ×0.3)より小さな値である。 <b>4×10<sup>-5</sup>&lt;ARF&lt;6×10<sup>-4</sup></b>

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(3/16)



#### 当社小型試験に基づくARFの算出

- 水素爆発のARFを直接測定した例は少ないため、ARF算出のメカニズムを急激な加圧に伴う気体の溶存、その後の急激な減圧に伴う沸騰として考える。
- 本メカニズムは、NUREG/CR-6410の過加圧後の急激な減圧に伴う放出において記載されているものであり、ベースとなる試験はNUREG/CR-3093に記されている。
- 一方、ARFは、爆発前に機器内に存在した溶質量と飛散した溶質量の比として算出できる。
- ミスト回収量と測定濃度から飛散した溶質量 $W$  (kg)を求め、爆発前の溶液量 (体積 $V$  ( $m^3$ ) × 密度 $\rho$  ( $kg/m^3$ ))との比からARFの導入式を考える。(式(1)参照)

$$ARF = \frac{W(\text{kg})}{V(\text{m}^3) \times \rho(\text{kg}/\text{m}^3)} \dots (1)$$

ここで、

飛散した溶質量 $W$  (kg)

爆発前の溶液量 (体積 $V$  ( $m^3$ ))

溶液の密度 $\rho$  ( $kg/m^3$ )

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5. 2 水素爆発時のARFの高度化(4/16)



- 前頁のメカニズムに基づけば、単位面積当たりのエアロゾル発生量 $W/S$  ( $S$ は溶液表面積( $m^2$ )を式(1)を変形することにより第1項とし、溶液表面積 $S$  ( $m^2$ )と溶液体積 $V$  ( $m^3$ )の比で表した形状補正係数( $S/V$ )を考慮したARF算出式とすることができる。(式(2)参照)

$$ARF = \frac{W(\text{kg})}{S(\text{m}^2)} \times \frac{S(\text{m}^2)}{V(\text{m}^3)} \times \frac{1}{\rho(\text{kg}/\text{m}^3)} \dots (2)$$

試験結果から設定

対象機器の設計情報に基づき設定

- ARFの測定試験は NUREG/CR-3093において報告されているが、加圧時間が不明であること、加圧速度が遅い可能性がある。
- 小型容器を用いたARFの測定が石尾等により報告されている(本試験をISSTと呼ぶ)。しかし、減圧時間は実際の水素爆発と比較して短い。
- このため、 $W/S$ を上述の2つの試験を比較することより決定。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(5/16)



- ISSTのエアロゾル発生量 $W/S=2.89E-4$ は以下の条件で得られた値であり、本値をベースデータとする。
- 実験条件は実際の爆発とは異なるため、 $W/S$ を様々な項目で補正する。
- 補正係数 $C_i$  ( $i=1 \sim 7$ )で補正した補正後 $W/S$ を用いて、それぞれの機器特有のARFを算出する。

ISST	
加圧	3.45MPa
加圧保持時間	1秒
減圧時間	数百ミリ秒
溶液表面積	100cm <sup>2</sup>
溶液高さ	3.5cm
W/S	2.89E - 4 (kg/m <sup>2</sup> )

30vol %の水素-空気混合気の燃焼に相当する加圧と見なせる。(圧力は形状等にも影響されるので一概にはいえない)

実際の爆発現象より長い

実際の爆発現象より長い

対象機器に依存するパラメータ

対象機器に依存するパラメータ

$$ARF = \frac{W}{S} \prod_i C_i \times \frac{S}{V} \times \frac{1}{\rho}$$

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(6/16)



➤ 以下の項目 $C_1 \sim C_7$ をW/Sの補正係数として考慮した。

項目	水素爆発	NUREG/CR-3093	ISST
加圧時間 ( $C_1$ )	数ミリ秒	不明	1秒 600秒 3600秒
減圧時間 ( $C_2$ )	数ミリ秒	数ミリ秒と想定	数百ミリ秒 (電動弁の開放時間)
エアロゾル回収率 ( $C_3$ )	-	ほとんどのエアロゾルが回収されていると推定。	容器内側のエアロゾルは回収できない。
ピーク圧力 ( $C_4$ )	約0.1～0.6MPa	0.34～3.5MPa	0.34～3.5MPa
実験容器の形状 ( $C_5$ )	-	詳細な形状は不明	深さ及び表面積をパラメータとして実験
表面積の影響	-	表面積は不明	35cm <sup>2</sup> , 100cm <sup>2</sup>

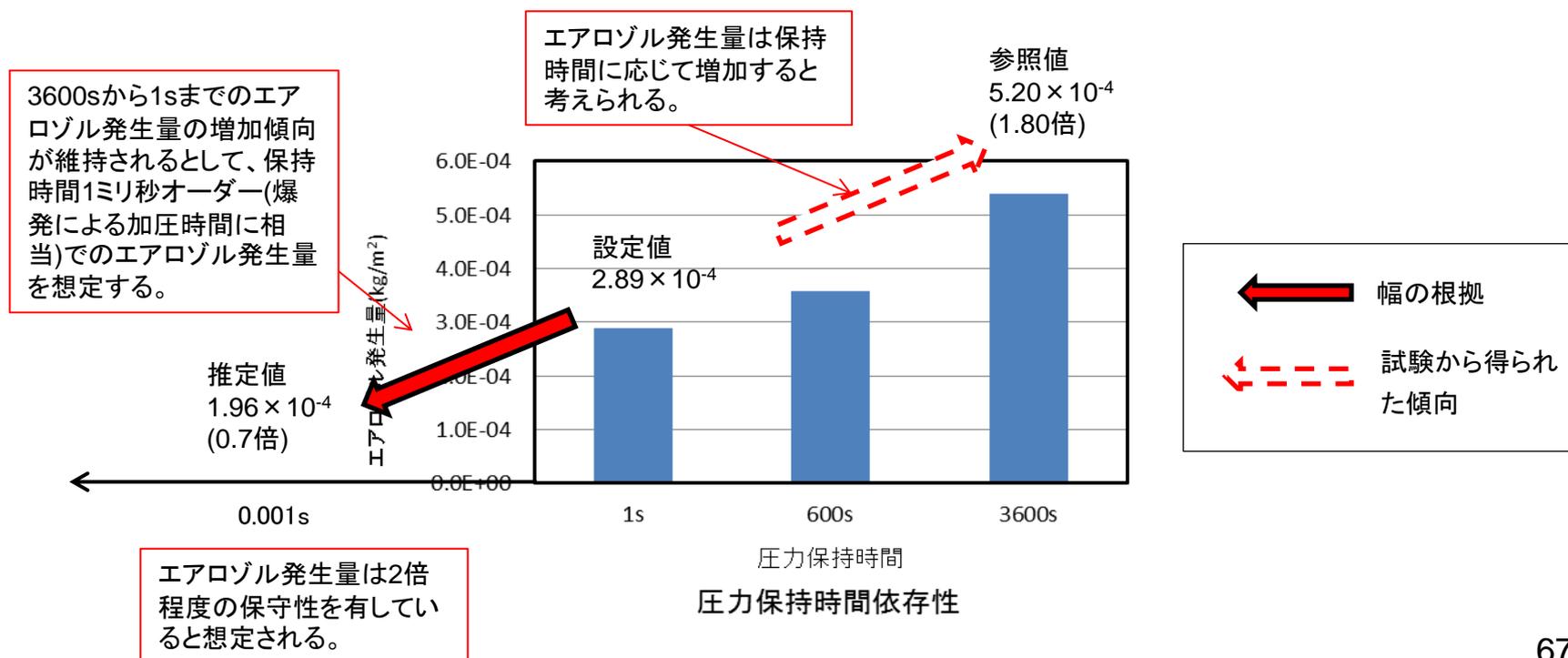
- $C_6$  と $C_7$  は六ヶ所再処理工場に設置されている機器のための補正係数である。
- $C_6$  は密度補正
- $C_7$  は容器内側に付着する量の補正)

# 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

## 5.2 水素爆発時のARFの高度化(7/16)



項目	内容	補正係数
加圧時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 小型試験結果から、エアロゾル発生量は圧力保持時間に応じて増加すると考えられる(下図参照)。</li> <li>▶ 圧力保持時間が1秒の場合と3600秒の場合を比較すると、エアロゾル発生量はおよそ2倍である。</li> <li>▶ 水素爆発現象の圧力保持時間はミリ秒単位で発生するものであり、圧力保持時間が1秒の場合とミリ秒単位の場合を直線的に外挿するとエアロゾル発生量はおよそ1/2程度になると想定される。</li> </ul>	$C_1=0.5$



## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(8/16)



項目	内容
減圧時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ NUREG/CR-3093の減圧時間が小型試験と比較して短いと考えられることから、NUREG/CR-3093の流速は速く、エアロゾル発生量としては多いと考える。</li> <li>➤ ここでは、NUREG/CR-3093のARFと、小型試験のARFの比を計算し考察する。</li> <li>➤ NUREG/CR-3093の試験では、溶液深さ、表面積、圧力保持時間が不明であるため、印加圧力、溶液量で整理した。</li> <li>➤ 小型試験の結果は、全て圧力保持時間1sec, 溶液濃度140g-Ce/Lの場合である。</li> </ul>

移行率比の計算結果(小型試験は圧力保持時間1sec,溶液濃度140g-Ce/Lの場合)

試験条件		重量比による移行率		移行率比 ※2
溶液量 (cm <sup>3</sup> )	圧力 (MPa)	NUREG/ CR-3093※1	小型試験	
350	3.45	2.49E-04	3.10E-05	0.12
350	3.45	2.49E-04	4.40E-05	0.18
350	3.45	2.49E-04	5.90E-05	0.24
350	1.72	9.50E-05	2.60E-05	0.27
350	1.72	9.50E-05	1.70E-05	0.18
350	1.72	9.50E-05	2.10E-05	0.22
350	0.34	4.00E-06	6.10E-06	1.53
350	0.34	4.00E-06	5.50E-06	1.38
350	0.34	4.00E-06	6.90E-06	1.73

試験条件		重量比による移行率		移行率比 ※2
溶液量 (cm <sup>3</sup> )	圧力 (MPa)	NUREG/ CR-3093※1	小型試験	
100	3.45	8.18E-04	3.70E-05	0.05
100	3.45	8.18E-04	6.20E-05	0.08
100	3.45	8.18E-04	4.50E-05	0.06
100	1.72	5.16E-04	3.20E-05	0.06
100	1.72	5.16E-04	2.70E-05	0.05
100	1.72	5.16E-04	2.20E-05	0.04
100	0.34	1.80E-05	1.20E-05	0.67
100	0.34	1.80E-05	2.10E-05	1.17
100	0.34	1.80E-05	1.20E-05	0.67

※1: 平均値を表す

※2: NUREG/CR-3093の平均値と小型試験により得られた各実験値の比(小型試験値/NUREG値)を表す

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(9/16)



項目	内容	補正係数
減圧時間	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 移行率比は、圧力1.72~3.45MPaで0.04~0.27であり、小型試験のほうが小さい値であることを示している。これは、容器内面への付着、減圧時間が長いことの影響によるものと考えられる。</li><li>➤ 一方、圧力0.34MPaにおいては、移行率比が1を超えており、NUREG/CR-3093の試験のほうが放出量が小さい。</li><li>➤ 圧力に依存してARFが増加する傾向は同様であるが、放出形態の差が与える影響は一定ではない。</li><li>➤ 移行率比の幅は、0.04~1.73であり、減圧時間の差(弁の開放とラプチャーディスクの差)が与える影響は、一桁程度の上振れであると想定され、それ以上大きな振れが存在する可能性は小さいと考える。</li><li>➤ このため、1桁程度の上振れを考慮する。</li></ul>	C <sub>2</sub> =10

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(10/16)



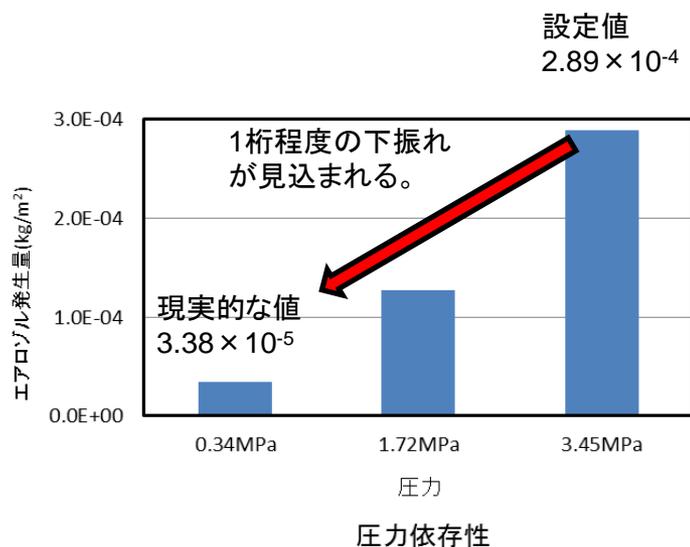
項目	内容	補正係数
エアロゾル回収率	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 小型試験から得られるエアロゾル発生量を以下の通り展開する。 LPF<sub>ullage</sub>は容器内面に付着するLPFとする。</li> </ul> $\frac{W(\text{kg})}{S(\text{m}^2)} = \frac{W'(\text{kg})}{S'(\text{m}^2)} \times LPF_{ullage}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 小型試験及びNUREG/CR-3093の試験結果を比較すると、①において示したとおり、振れ幅は0.04～1.73であった。</li> <li>➤ 機器内壁に付着することによるLPF<sub>ullage</sub>はこの幅に包含されると考えられる。</li> <li>➤ 明確に、①と②を分けることは困難であるため、保守的に容器内面の付着を考慮しない場合、エアロゾル発生量は1桁程度上振れすると考える。</li> </ul>	C <sub>3</sub> =10

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(11/16)



項目	内容	補正係数
ピーク圧力	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 小型試験の結果から、エアロゾル発生量は印加圧力に比例することがわかっている(下図参照)。</li> <li>▶ 最も圧力の高い3.45MPaを印加した試験結果では、エアロゾル発生量は<math>=2.89 \times 10^{-4}(\text{kg}/\text{m}^2)</math>である。</li> <li>▶ 水素濃度12vol%の水素爆発により機器内で発生する最大圧力は0.1～0.6 MPa程度である。一方、小型試験の結果から、0.34MPaを印加させた場合、エアロゾル発生量は<math>3 \times 10^{-5}</math>であり、本値が実際の挙動に近いと考えられる。</li> <li>▶ このため、印加圧力の観点からエアロゾル発生量は実際よりも1桁程度高く見込まれる想定となる。</li> </ul>	$C_4=0.1$



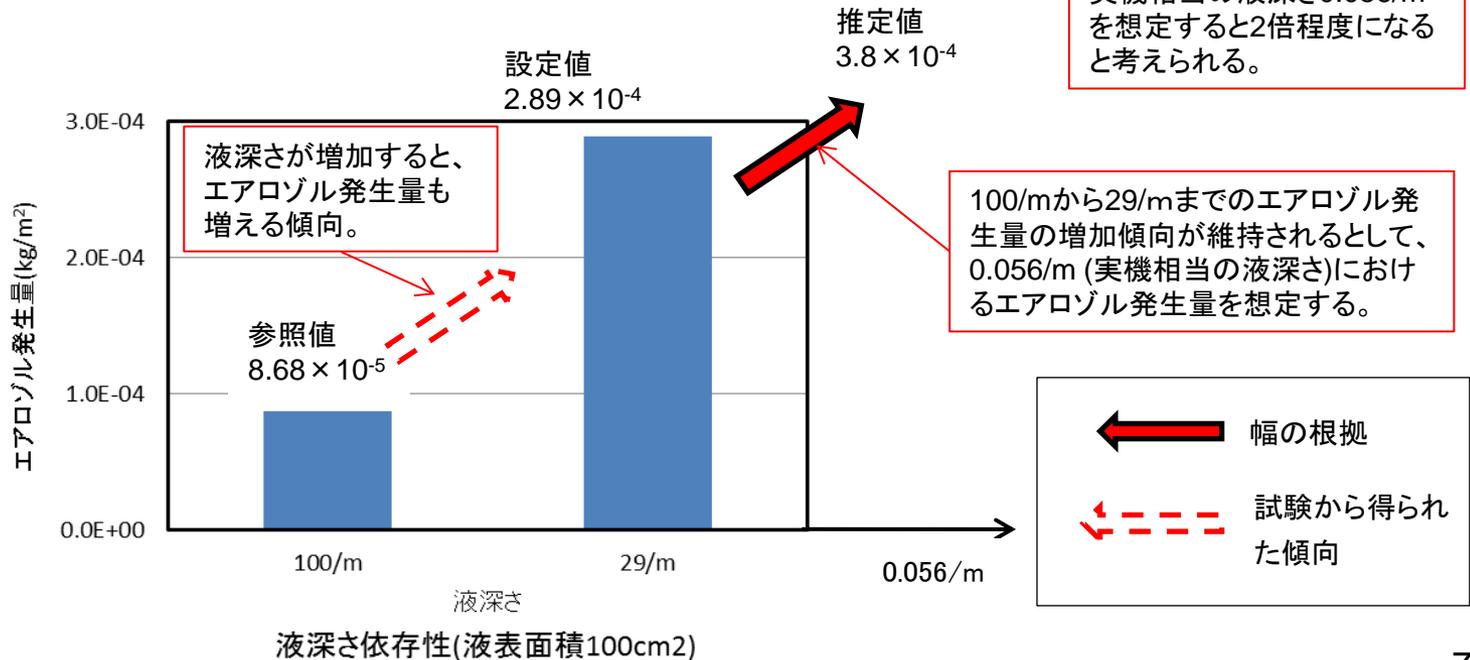
← 幅の根拠

# 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

## 5.2 水素爆発時のARFの高度化(12/16)



項目	内容	補正係数
形状補正係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 小型試験結果から、液深さ(貯液形状)が増加するとエアロゾル発生量は増える傾向があることがわかる(下図参照)。</li> <li>▶ 小型実験で用いた容器は液表面積100cm<sup>2</sup>、液深さ3.5cmであり、形状補正係数は29(/m) (液表面積S÷液量V=29)である。このときのエアロゾル発生量は<math>2.89 \times 10^{-4}</math>(kg/m<sup>2</sup>)である。</li> <li>▶ 一方、実機の場合、形状補正係数は0.056~11程度に分布しているため、直線的に外挿するとエアロゾル発生量は設定値の2倍程度の大きさとなると考えられる。</li> </ul>	C <sub>5</sub> =2

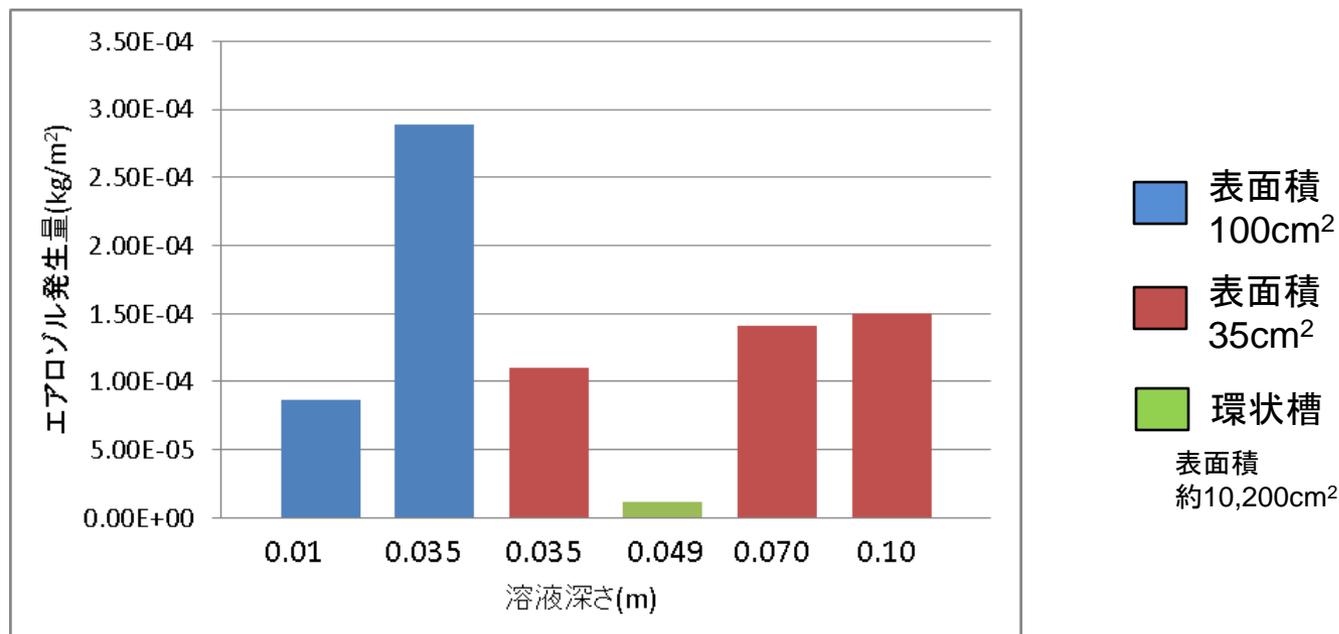


## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(13/16)



項目	内容	補正係数
表面積の影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 小型試験では容器の表面積を100cm<sup>2</sup>, 35cm<sup>2</sup>としてエアロゾル発生量を評価している。</li> <li>▶ 小型試験の試験条件の範囲であれば、表面積とエアロゾル発生量の関係は明らかにはなっていない。なお、環状槽試験は参考として示すが、ほとんどが壁面に付着していると考ええる。</li> <li>▶ 他の小型試験の結果は、類似のオーダーであり、試験のばらつきの範囲である可能性もある。</li> <li>▶ しかし、定性的な類推であり、データの不足による不確実さが大きい。</li> </ul>	-

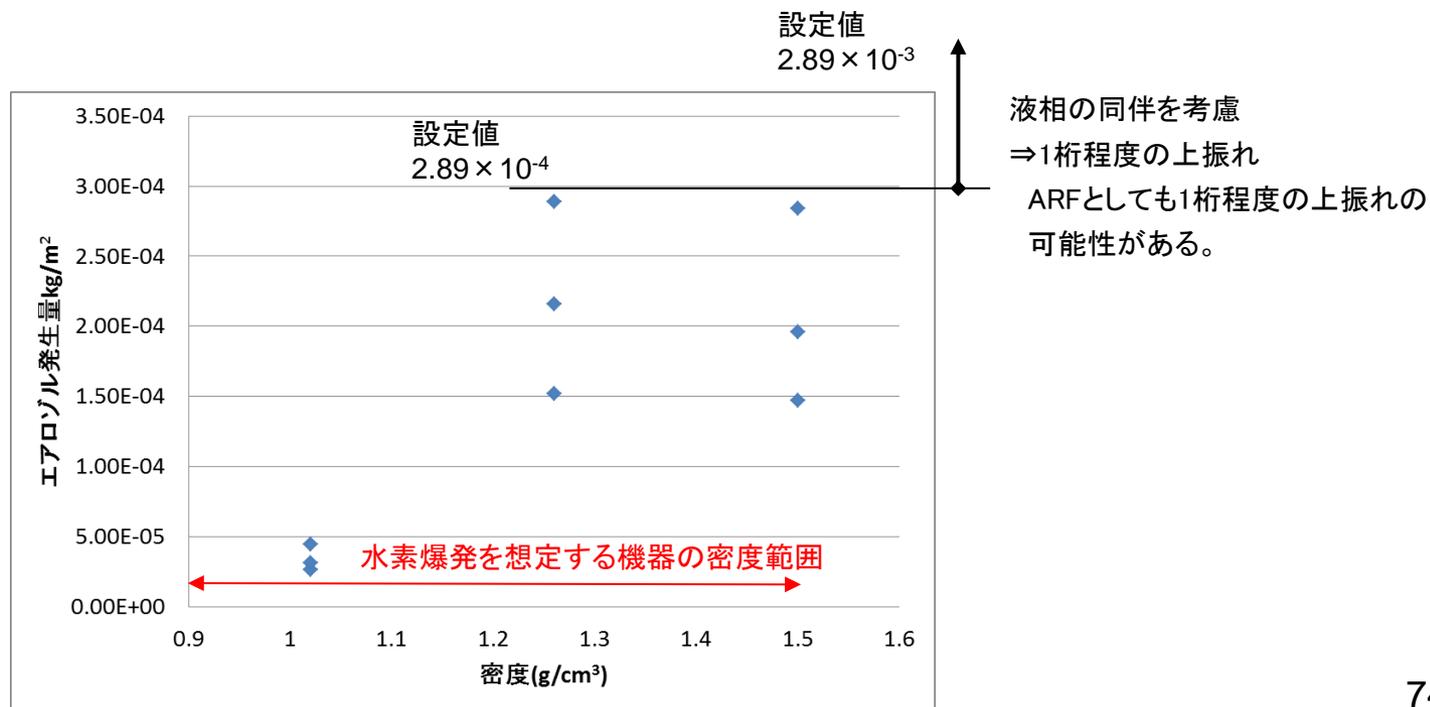


# 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

## 5.2 水素爆発時のARFの高度化(14/16)



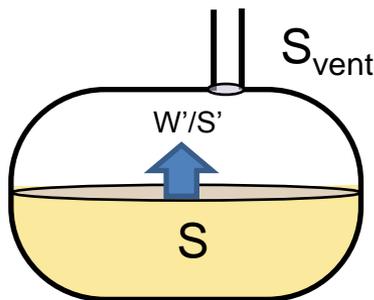
項目	内容	補正係数
濃度補正	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 小型試験から得られるエアロゾル発生量は、Ce濃度140g/Lの試験結果から得られたCe重量(kg)から設定される。</li> <li>▶ エアロゾル中には液相も含まれるが、エアロゾル発生量に与える影響は最大でも1桁程度である(下図参照)ため、エアロゾル発生量の上振れ1桁を幅として考慮する。</li> </ul>	$C_6=10$



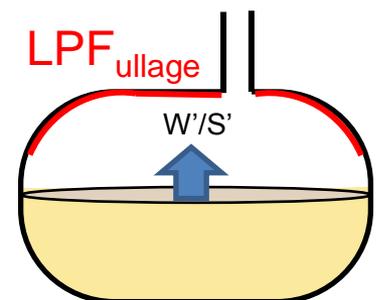
## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(15/16)

項目	内容	補正係数
容器内側に付着する量の補正	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ エアロゾルは溶液表面積全体から発生するが、出口配管の断面積は溶液表面積より小さいのが一般的である。</li> <li>➤ 容器内側にエアロゾルは付着するため、発生したエアロゾル全量がベッセルの外に出るわけでは無い</li> <li>➤ 容器内側に付着する量の補正係数<math>C_7</math>は、以下の式で定義。 <math display="block">C_7 = S_{\text{Vent}} / S</math></li> <li>➤ ここで、  <math>S(\text{m}^2)</math>: 溶液表面積  <math>S_{\text{Vent}}(\text{m}^2)</math>: 機器の出口配管表面積                      実機的设计情報から、<math>C_7</math>は<math>4 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-2}</math>と計算される。                 </li> </ul>	$C_7 = 4 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-2}$



容器内側に付着する量の補正係数 $C_7$ は、溶液内側への沈着量を考慮し仮定した値( $LPF_{\text{ullage}}$ ).



## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.2 水素爆発時のARFの高度化(16/16)



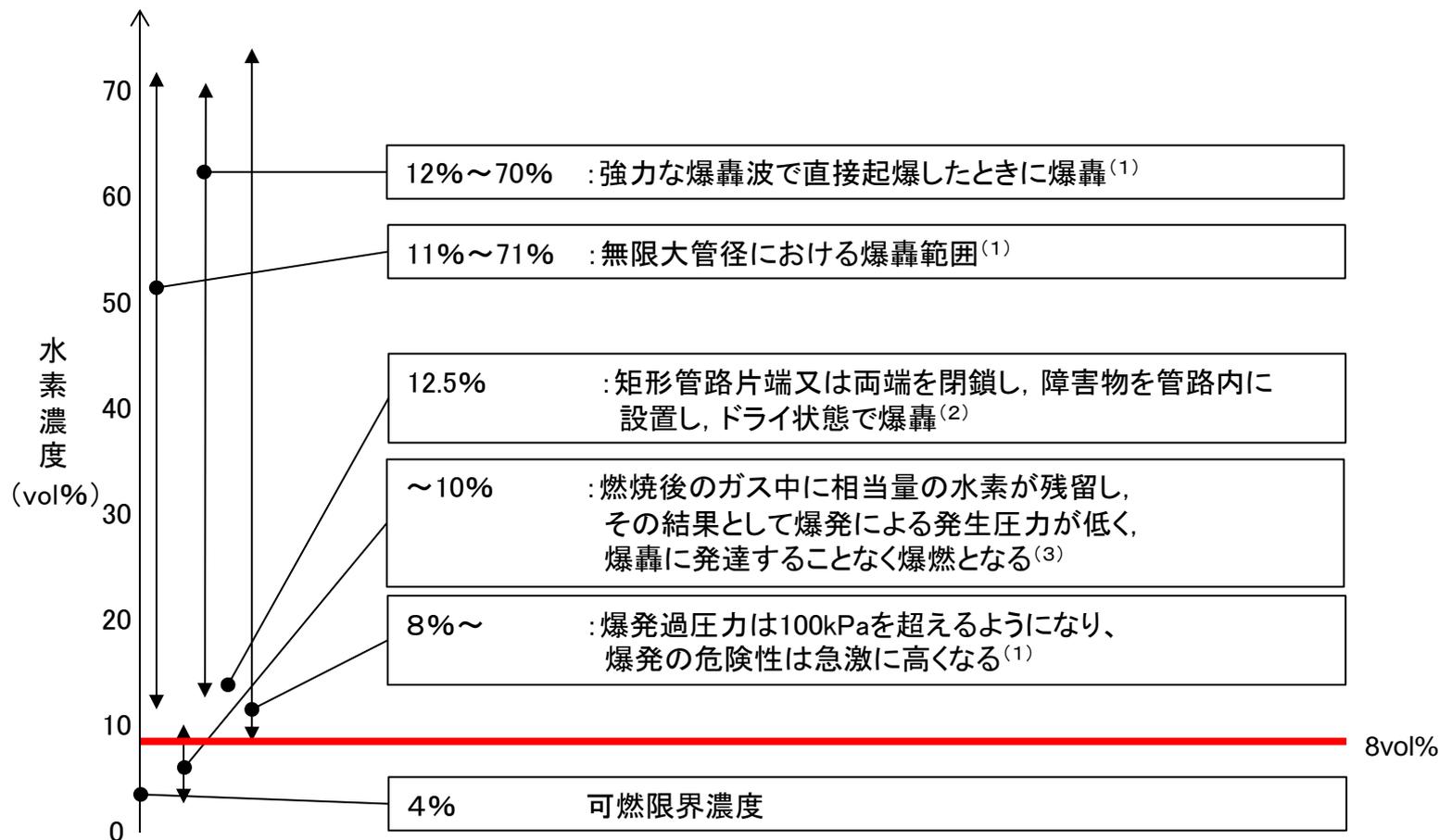
分類	項目	1E-7	1E-6	1E-5	1E-4	1E-3
ARFの幅	計算結果			● $2.2 \times 10^{-6}$		
	評価の想定			● $1 \times 10^{-5}$		
	文献			● $4 \times 10^{-5}$		● $6 \times 10^{-4}$
	ARFの設定				● $1 \times 10^{-4}$	

- 機器の形状によりARFは $1E-8 \sim 2.2E-6$ の範囲でばらつく評価となるが、試験条件の充足性(スケールファクタが不明、液深さの影響が不明等)の観点から、NUREG/CR-6410の幅も考慮し $1E-4$ をARFの設定値とした。
- 一方、環状槽を模擬した水素爆発試験結果から得られたARFは $1E-10 \sim 1E-6$ である。
- 今回の方法で推定した環状槽のARFの範囲は $1.6E-8 \sim 1.1E-6$
- 模擬環状容器の水素爆発試験結果と近い値であった。
- しかし、円筒型の試験結果がないため確実に考慮できる幅を決めることは難しい
- 今後、現実的なARFの設定のため、更なる基礎知見の蓄積が望まれる。

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.3 水素爆発時の燃焼挙動について(1/4)

水素濃度と水素爆発の規模の関係について文献調査をした結果を以下にまとめる。



水素濃度が8vol%以上になると、比較的高い爆発圧力が生じるおそれがある。

(1) 「水素の有効利用ガイドブック」, (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成20年3月

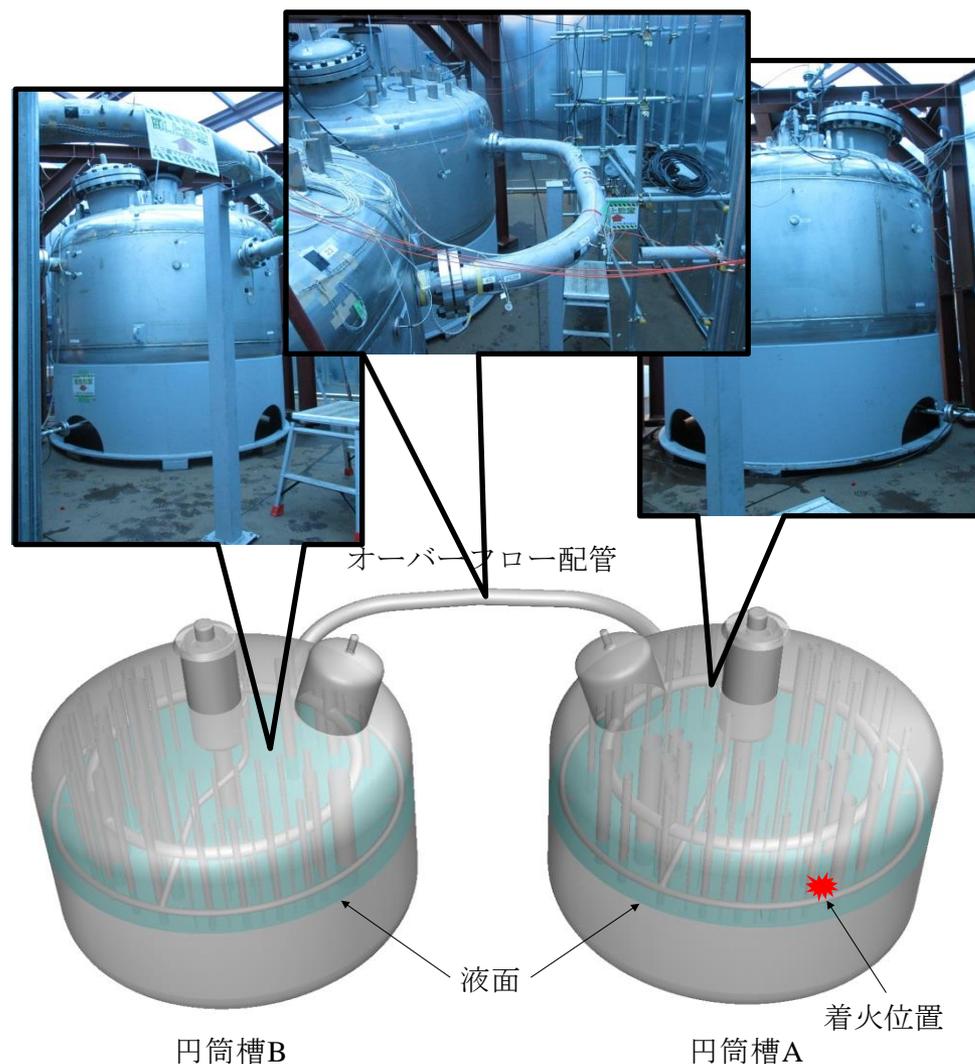
(2) S.B.Dorofeev, et al., "Effect of scale on the onset of detonations", Shock Waves (2000) 10: 137-149

(3) 「水素混合ガスの安全性に関する研究(I)」, 産業安全技術協会, 1996年3月

## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.3 水素爆発時の燃焼挙動について(2/4)

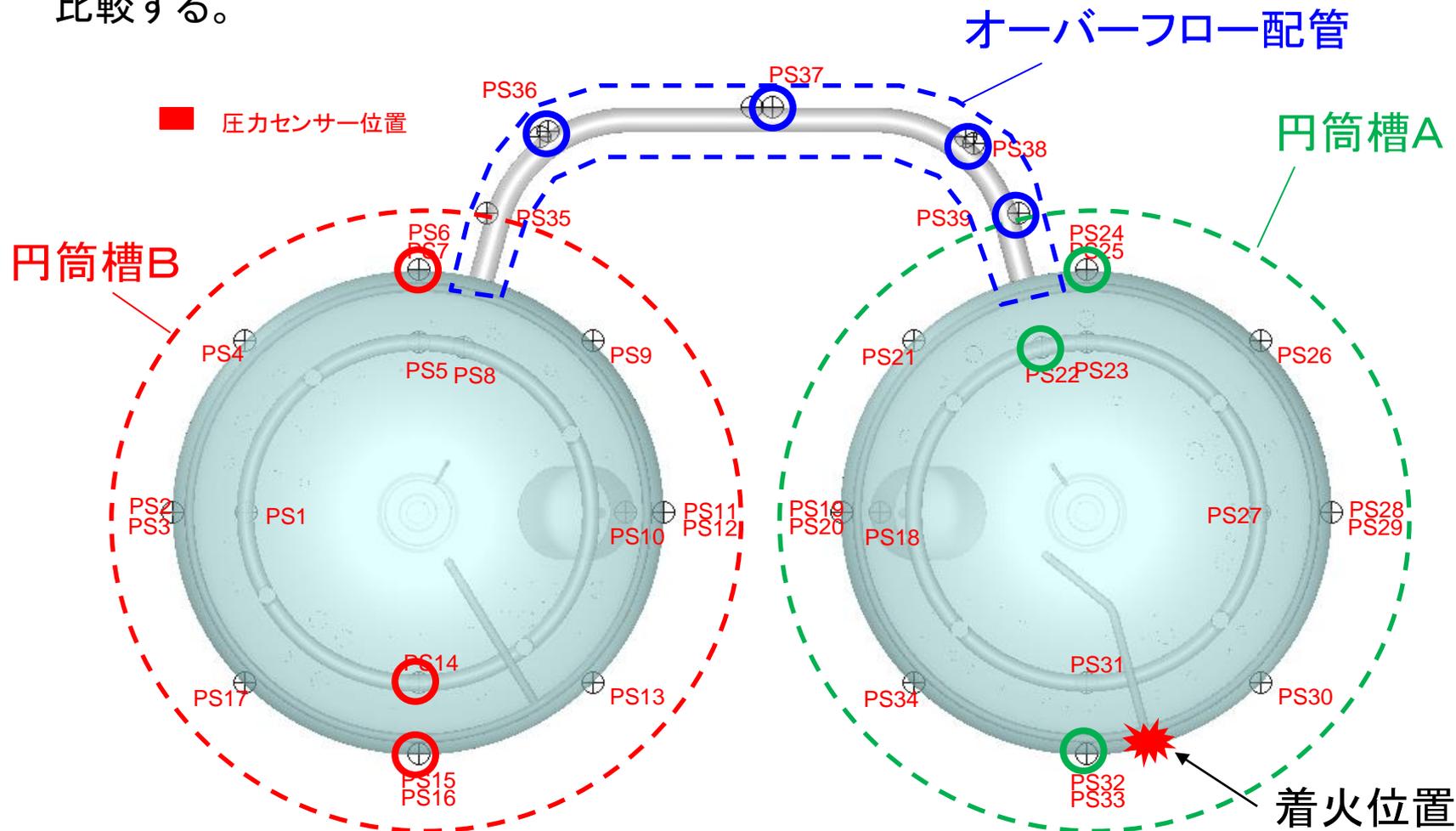
- 再処理工場に特化して、水素爆発時の燃焼挙動を把握した例は少ない。障害物の多い機器内で爆発が発生した際の挙動を把握すること、実際に爆発した場合の様態を把握することを目的に、爆発試験、解析を実施。
- 再処理工場に存在する機器について、代表機器を選定し、内部構造物まで忠実に再現して水素爆発試験を実施。
- 水素濃度を8vol%～30vol%に変化
- 円筒槽Aにて100 mJで放電着火
- 圧力、ひずみ等を測定



## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.3 水素爆発時の燃焼挙動について(3/4)

- 円筒槽Aの代表測定点(PS22,PS24,PS32)、オーバーフロー配管領域(P35~P39)及び円筒槽Bの代表測定点(PS6,PS14,PS15)において試験で得られた発生圧力を比較する。



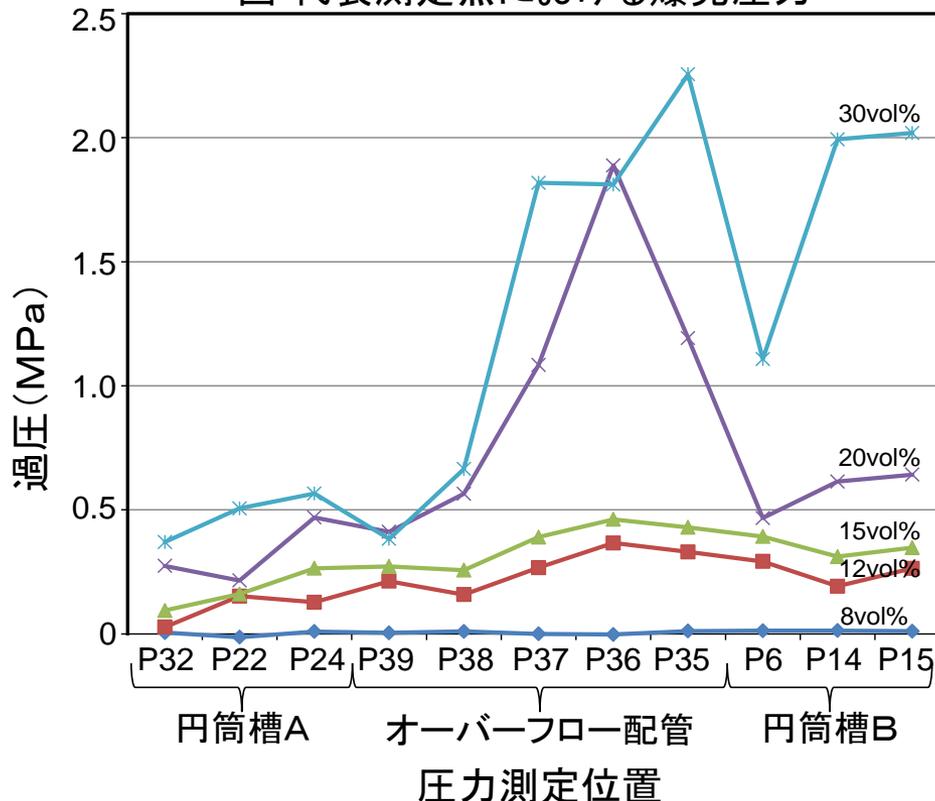
## 5. 安全性向上のために継続して検討する事項の例

### 5.3 水素爆発時の燃焼挙動について(4/4)



- 着火側貯槽3点、オーバーフロー配管5点、伝播側貯槽3点の圧力測定位置を代表例として選定し、爆発圧力の水素濃度依存性を比較した。

図-代表測定点における爆発圧力



- 8vol%ではほとんど過圧は観測されないが、12vol%からは水素濃度に依存した過圧の上昇が見られる。
- 急激な過圧が発生する濃度の調査を実施中。