

## 濃縮缶下部の温度上昇

### 1. アクティブ試験の実績

アクティブ試験における濃縮缶の運転の第5バッチ（平成19年3月頃～）から、蒸発・濃縮運転サイクルの後半において濃縮缶下部の温度が中部、上部に比べ上昇する状況が確認された。アクティブ試験中の運転実績（第5バッチ及び第6バッチ）を図1～図3に示す。

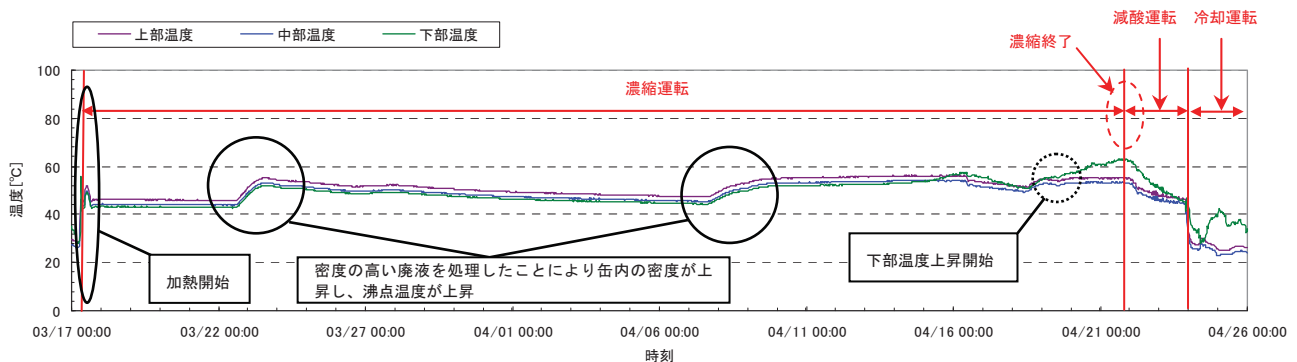


図1 アクティブ試験第5バッチのトレンド：平成19年3月17日～4月26日

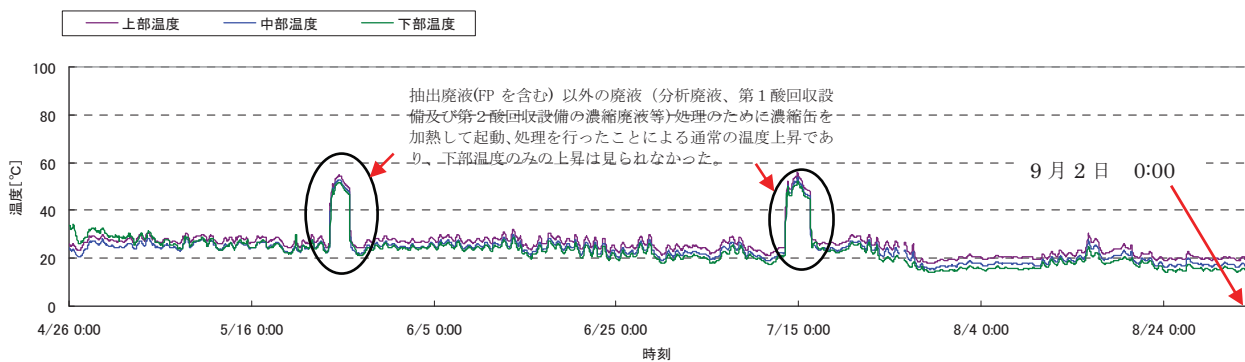


図2 アクティブ試験第6バッチ間のトレンド (1/2)：平成19年4月26日～9月2日

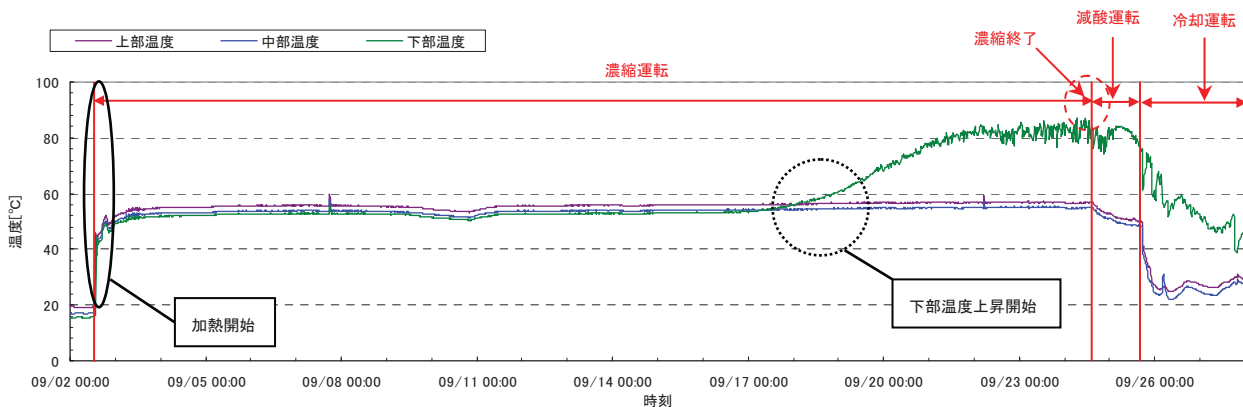


図3 アクティブ試験第6バッチのトレンド (2/2)：平成19年9月2日～9月30日

アクティブ試験では、10バッチの処理運転を実施しており、各バッチでの濃縮缶の下部温度と保持時間の関係を表1に示す。また、各運転バッチにおける処理量、燃焼度と下部温度の関係を表2に示す。

表1 濃縮缶下部温度

		第1バッチ	第2バッチ	第3バッチ	第4バッチ	第5バッチ	第6バッチ	第7バッチ	第8バッチ	第9バッチ	第10バッチ	第10バッチ以降
運転時間(日)		38	33	17	27	40	22	39	67	103	128	148
底部温度保持時間(日)	~60℃	38	33	17	27	38	15	15	28	21	43	148
	60℃~70℃	0	0	0	0	2	1	13	3	38	20	0
	70℃~80℃	0	0	0	0	0	3	4	13	30	50	0
	80℃~	0	0	0	0	0	3	7	23	14	15	0

第5バッチ以前 ← | → 第5バッチ~第10バッチ

合計	運転日数	~60℃	60℃~70℃	70℃~80℃	80℃~
	662	423	77	100	62

第5バッチから下部温度が60℃を超える傾向が見られる。

表2 各運転バッチにおける処理量等

運転バッチ	運転バッチ毎の処理量 [tU]	平均燃焼度 [MWD/tU]	最大下部温度 [℃]
1	31	22900	56
2	43	32000	56
3	16	24500	54
4	50	24100	57
5	49	27000	64
6	54	42100	87
7	44	42100	92
8	58	35200	105
9	56	32100	89
10	48	34000	86

なお、第10バッチ以降は、使用済燃料を処理しておらず、洗浄廃液等の核分裂生成物の含有量が少ない廃液を供給して濃縮運転を行っている。

また、化学試験、ウラン試験期間の運転において下部温度が上部、中部温度を超える傾向は確認されていない。

## 2. 下部温度上昇の要因

アクティブ試験において処理した高レベル濃縮廃液中のF Pの主成分は、セシウム、バリウム、ストロンチウム、モリブデン、ジルコニウム、ルテニウム、ロジウム、セリウム、鉄等であり、高レベル廃液の濃縮については以下の知見がある。

- ・蒸発・濃縮運転中の濃縮缶内は酸濃度が高く(約□～約□ mol/L)、文献では高レベル廃液中に含まれるバリウム、ストロンチウムについては高硝酸濃度条件下で析出する知見がある。
- ・放射性物質でない核種を用いた模擬廃液試験(コールド試験)では、模擬廃液を□倍程度に濃縮した時点で、ストロンチウム-バリウム硝酸塩、モリブデンとリン酸の化合物の析出生成が開始する結果が得られた。

このことから、濃縮缶下部の温度上昇は、以下の流れで発生したものと考える。

- ・高レベル廃液の濃縮倍率上昇に伴い、高レベル廃液に含まれるF Pのうち、溶解度の低いストロンチウム-バリウム硝酸塩等が析出した
- ・析出物が濃縮缶下部に沈降・滞留したことにより、濃縮缶下部の液の密度が上昇して下部液が対流しなくなった(図4 参照)
- ・滞留しているF Pの崩壊熱や加熱ジャケットからの熱により濃縮缶下部の水頭圧等に応じた飽和温度まで液温が上昇した

なお、同様の濃縮缶下部温度の上昇については、海外施設においても確認されており、以下の対応を実施してきた。

- ・下部温度上昇の情報は平成9年頃海外施設の情報として当社に提供されていた。しかし、まだ放射性廃液を処理していない状況であったこと、海外施設と当社では上流プロセスが異なるために濃縮缶で処理する廃液の性状が異なる状況ではあるものの、海外施設で行っていた対応策として洗浄運転を実施している等の情報入手を継続していた。
- ・一方、アクティブ試験における濃縮缶の運転の第5バッチ以降、実際に濃縮缶下部の温度上昇が確認されたことから、温度上昇に対する措置を検討、実施しながら濃縮缶の運転を行ってきた。

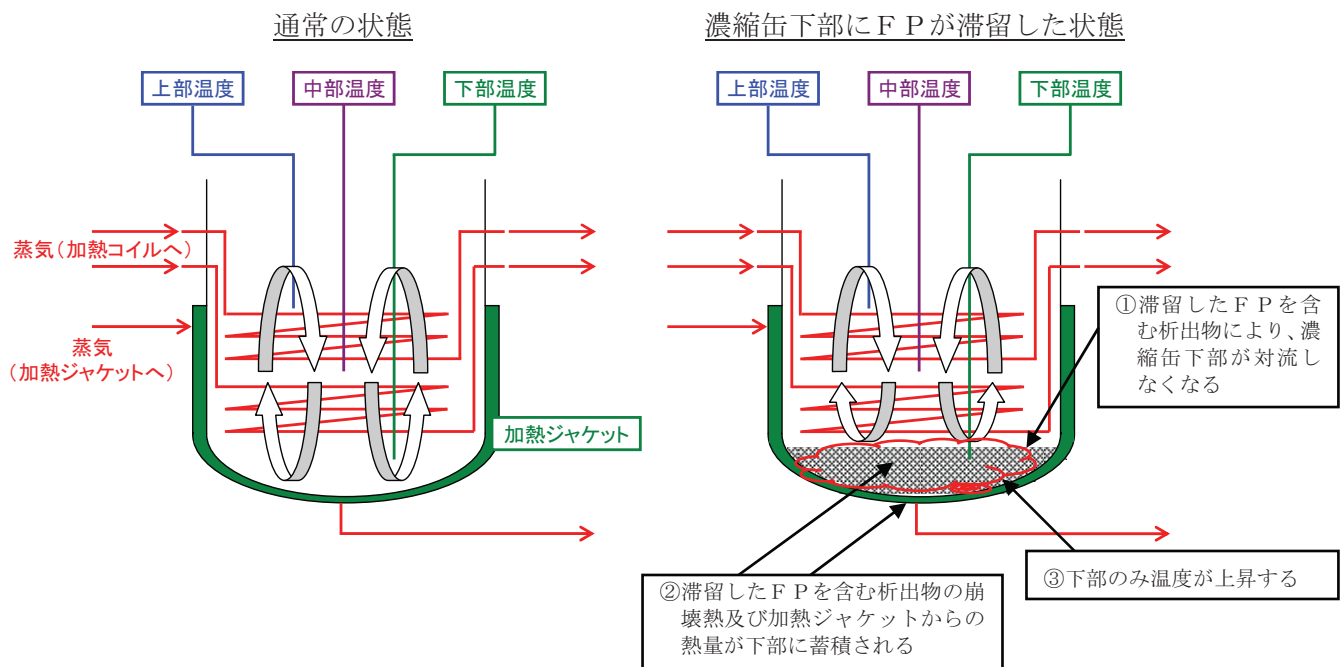


図4 高レベル廃液濃縮缶下部での対流状態 概要図

### 3. アクティブ試験における下部温度上昇に対する評価及び対応

アクティブ試験における下部温度上昇に対する評価及び対応を以下に示す。

#### ①第5バッチ

- ・ 運転開始時には、下部温度と中部温度、上部温度は同様の値を示していたが、濃縮終了の直前に下部温度が上昇する傾向がみられた。
- ・ 原因は、濃縮缶のFP等の濃度が上昇し、溶解度を越えたために析出し、温度上昇が発生したと考えられる。
- ・ 第5バッチまでに、少しずつ析出が蓄積し第5バッチ後半で濃縮缶下部温度に有意な影響を及ぼし始めたものとする。
- ・ また、冷却を開始した時点で再度下部温度が上昇したが、上昇期間に濃縮液を移送して硝酸を供給したことで、析出物が硝酸に再溶解し、下部温度は低下した。

#### ②第6、第7バッチ

- ・ 第5バッチと比較し、処理する使用済燃料の燃焼度が上昇した。
- ・ 濃縮を進めるにつれて、下部温度上昇が確認され、温度上昇は第5バッチよりも大きく、第6バッチでは最大で87℃、第7バッチでは最大で92℃に至った。(図5 参照)
- ・ これは、処理する使用済燃料の燃焼度が上昇したことにより、FPの濃度も上昇した影響であると考えられる。
- ・ 抽出廃液を含んだ廃液の処理の開始から下部温度が上昇を始めるまでの処理量は第6バッチよりも第7バッチの方が少ない。これは、第6バッチを高レベル廃液ガラス固化建屋へ移送した際に濃縮缶内に残留した堆積物の量が多かったことによると考える。

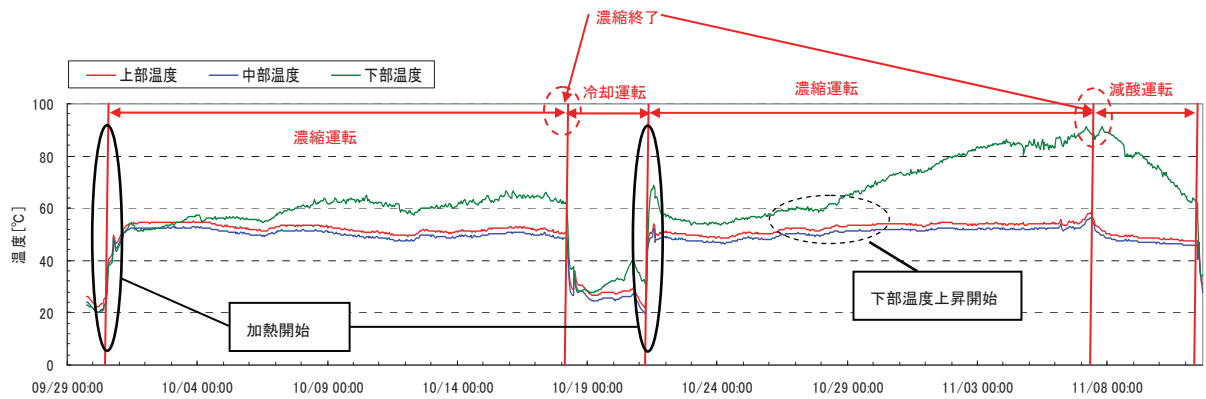


図5 アクティブ試験第7バッチのトレンド

### ③第8、第9バッチ

- ・濃縮缶での高レベル濃縮廃液中のF P濃度を第7バッチまでよりも高くするため、高レベル廃液の1バッチ毎の処理量[t U]を増加した。
- ・濃縮を進めるにつれて、下部温度上昇が確認され、第8バッチでは最大で105℃、第9バッチでは最大で89℃に至った。(図6、図7 参照)
- ・抽出廃液を含んだ廃液の処理の開始から下部温度が上昇を始めるまでの処理量はバッチ処理数が増えるに従い少なくなっている。これは、前バッチの濃縮液を高レベル廃液ガラス固化建屋へ移送した際に濃縮缶内に残留した堆積物の量が多かったことによると考える。

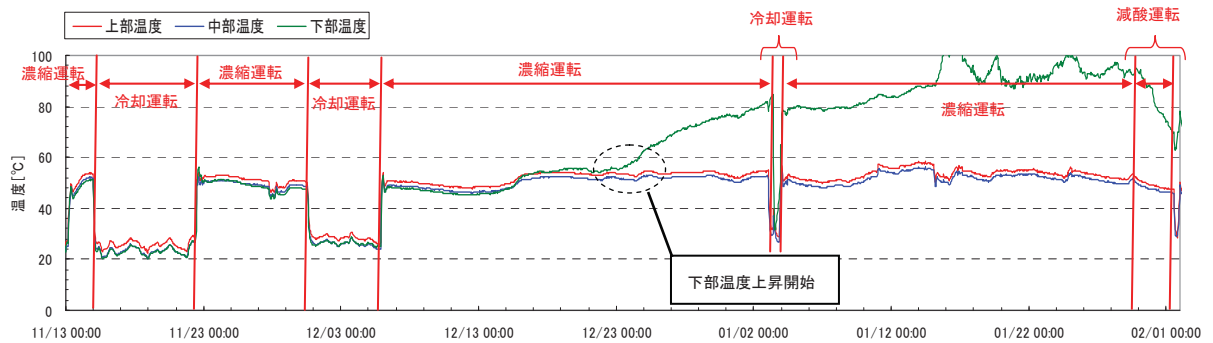


図6 アクティブ試験第8バッチのトレンド

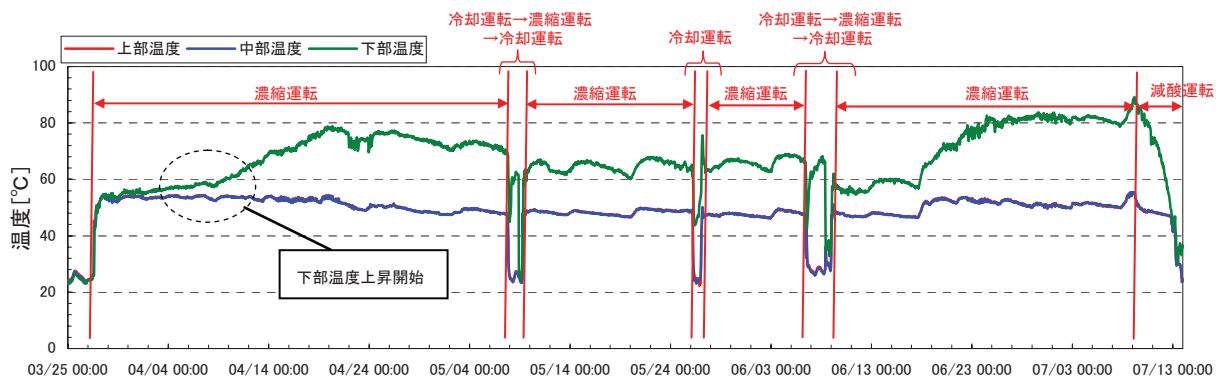


図7 アクティブ試験第9バッチのトレンド

#### ④第10バッチ

- ・第8、第9バッチと同様に濃縮缶での高レベル濃縮廃液中のF P濃度を高くするため、1バッチ毎の処理量[t U]を増加した。
- ・濃縮を進めるにつれて、下部温度上昇が確認され、最大で86℃に至った。
- ・下部温度上昇に対して、抽出廃液を含んだ廃液を処理し終わってから減酸運転<sup>※1</sup>を実施した。これにより、過度な温度上昇を抑制することができた。(図8 参照)
- ・抽出廃液を含んだ廃液の処理の開始から下部温度が上昇を始めるまでの期間は第8バッチ及び第9バッチとほぼ同じであった。理由として、濃縮終了後に実施する減酸運転を長期間行い濃縮液の酸濃度を低くしたことにより、濃縮缶下部に析出物が再溶解したことにより、前バッチで残留した堆積物と推定する。

※1：缶内の酸濃度が低下することで共沸混合物である硝酸イオン濃度が低下することから沸点も低下するため、減酸運転を実施することで濃縮缶の温度が低下すると考えられる。また、高酸濃度下で析出している析出物が、酸濃度の低下により再溶解して下部の対流が再開して温度が低下したものと考えられる。

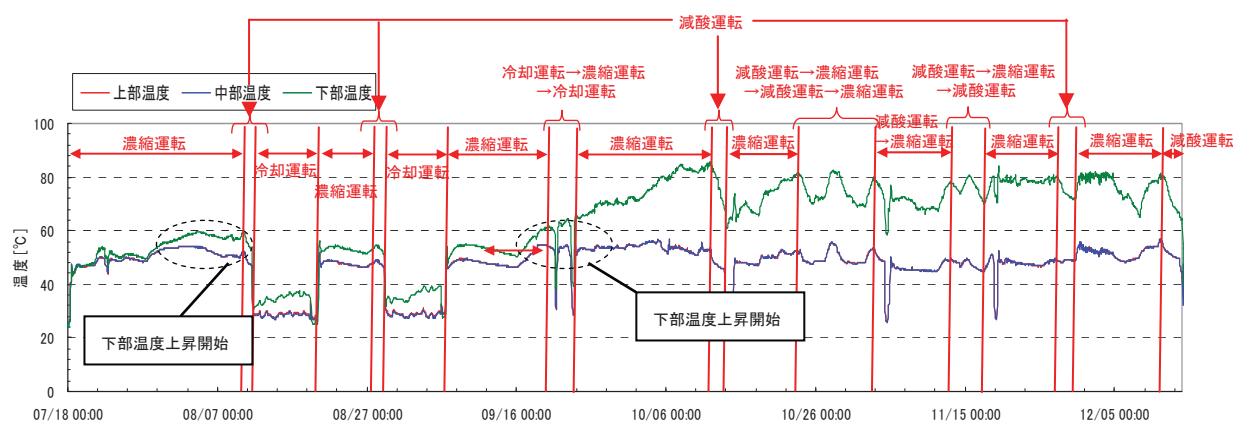
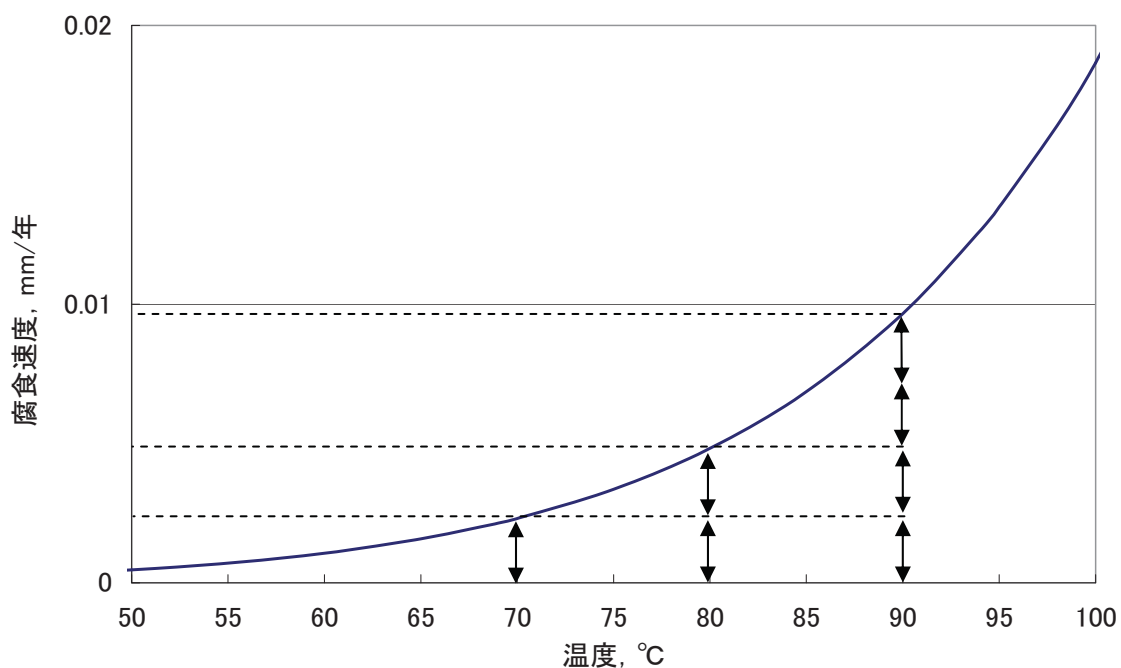


図8 アクティブ試験第10バッチのトレンド

## 全面腐食速度と温度の関係

金属の腐食は化学反応の一種であり温度依存性がある。例えば 8 mol/L 硝酸中の R-SUS304ULC の各温度における腐食速度を図示すると以下ようになる。



8 mol/L 硝酸中における R-SUS304ULC の温度と腐食速度の関係

上図より、温度が 10°C 上がると腐食速度が約 2 倍になることが分かる。

よって、アクティブ試験時に濃縮缶下部の温度が 64°C～105°C 程度まで上昇したことにより、腐食速度が設計時の評価より増加したものと考えられる。

## 保護管内への漏えい事象に対する復旧方策比較評価

保護管損傷の復旧措置を講じるための方法の評価にあたり、以下の制約を考慮した上で、技術的成立性の観点で復旧方策の比較を行った。復旧方策案のまとめを、次頁に示す。

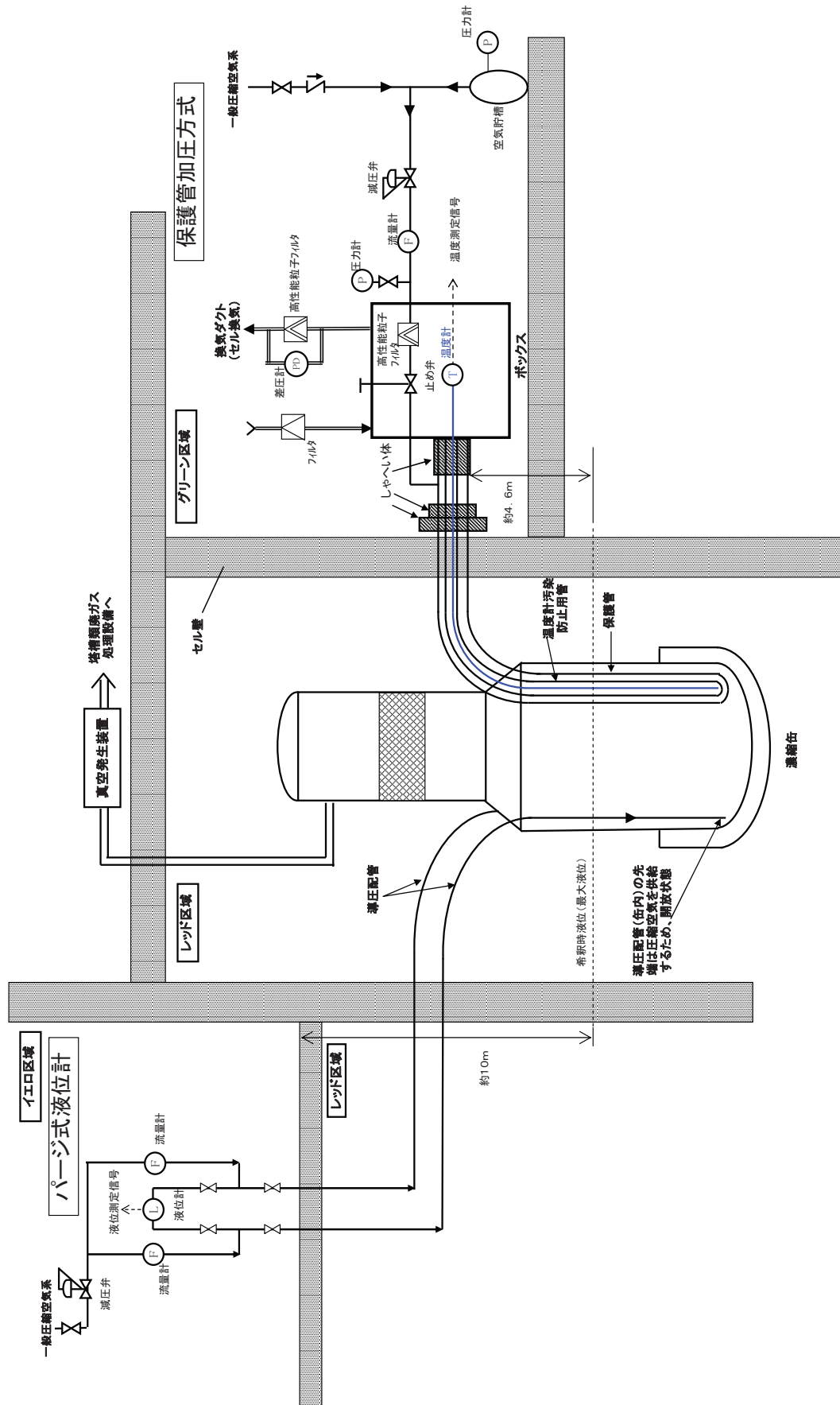
- ①濃縮缶が設置されているセル内は高い放射線環境にあり、人が直接保修することはできないことから、遠隔による保修作業の実施が必要となる。
- ②遠隔による保修作業において、以下の理由から保修に使用する機器の選定等に制約がある。
  - ・セル外から保護管先端までの距離が約 1 2 m あり、また保護管の内径が管台付近で最も小さく約 1 4 mm でアクセスが困難
  - ・保修対象となる保護管は高レベル廃液を処理する濃縮缶内に設置されており、濃縮缶内液位が低い状態で保護管先端部付近における放射線量が約 2 5 0 S v / h と保護管内部の放射線量が高い<sup>※1</sup>

※1：現品調査の保護管の内部観察において、集積線量 6 6 G y / h（ $\gamma$ 線測定の場合、放射線荷重係数が 1 であるため、 $G y / h = S v / h$ と読み替えられる）のビデオスコープを使用した際、保護管内に挿入した後直ぐに映像が見えなくなった。

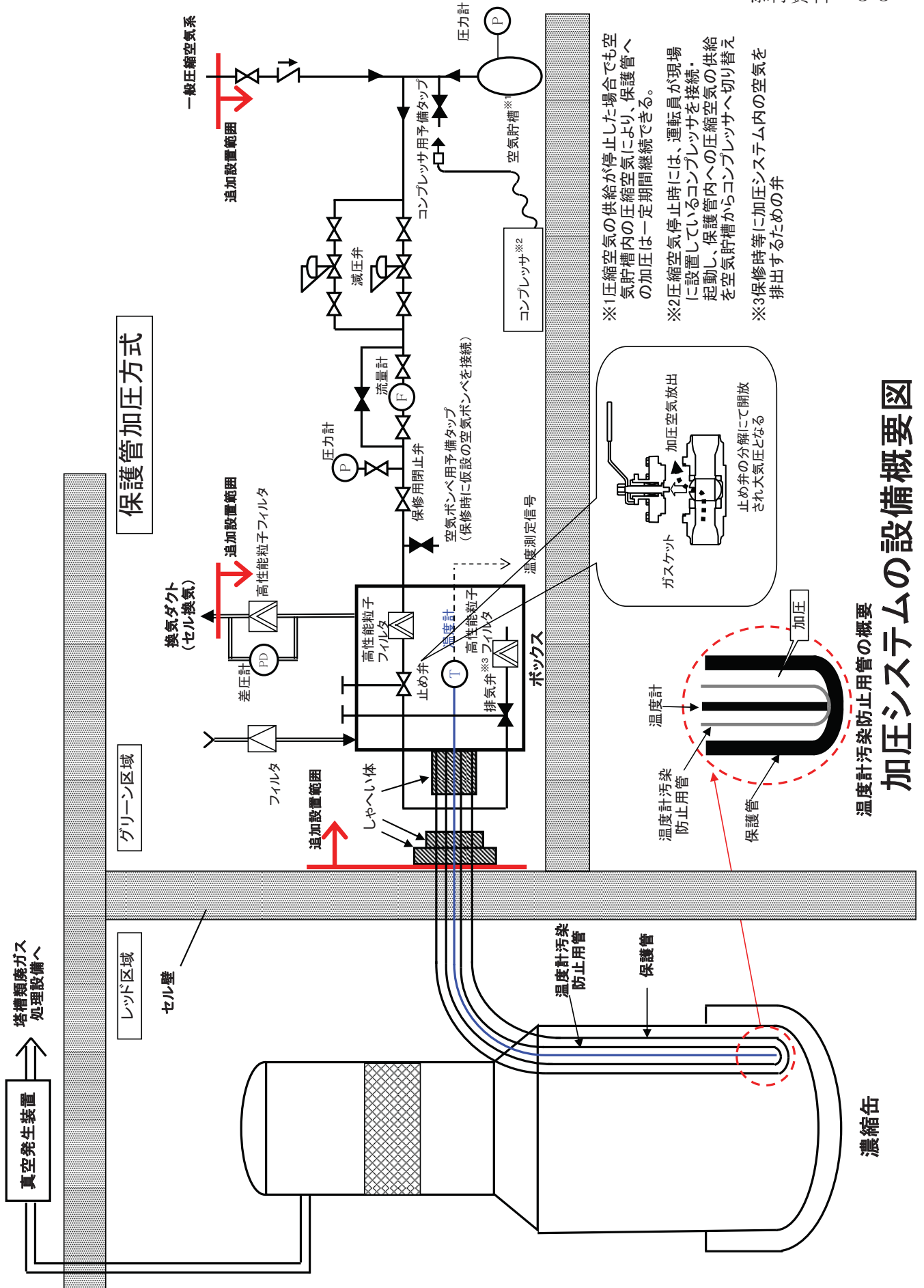


保護管内への漏えい事象に対する復旧方策比較評価

復旧方策の概要	復旧方策案1		復旧方策案2		復旧方策案3		復旧方策案4	
	溶接による閉止	管台部分での溶接閉止	充填材による閉止方式	二重管方式	加重方式	加重方式+	温度計汚染防止用管挿入方式	
<p>欠陥部近傍の肉盛溶接による閉止</p> <p>損傷が生じている可能性のある先端部近傍を肉盛溶接し、欠陥部分を塞ぐ。</p>	<p>管台部分での溶接閉止</p> <p>濃縮缶の管台部分で溶接し、閉止する。</p>	<p>損傷が生じている可能性のある先端部近傍に充填材を注入し、閉止する。</p>	<p>保護管内に保護管の内径に合わせた配管を施工し、二重管とする。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	
<p>技術的成立性</p> <p>濃縮缶の管台付近で保護管の内径が最も小さく、当該部を通過することが可能な溶接機器の開発が必要なこと、セラム外から保護管先端までの距離が約1.2mあり、当該部位に直接アクセスできないため、遠隔操作による溶接方法の確立が必要である。</p> <p>保護管は、濃縮缶内に設置され、濃縮缶が閉じ込め機能を有する設備であること、濃縮缶の閉じ込め機能を担うため、濃縮缶の境界である管台で溶接が必要であり、その場合は、濃縮缶までの距離は近いもの、当該部位に直接アクセスを行った上で、遠隔操作による溶接方法の確立が必要である。</p> <p>当初保護管に期待していた静的閉じ込め機能を維持できず、耐腐蝕性、耐放射線性、耐久性等を考慮した充填材を選定する必要がある。現時点で相当のものを各種試験を繰り返し、必要な条件を満足する充填材を確定することが必要であり、技術的に不確定要素が多い。</p>	<p>管台部分での溶接閉止</p> <p>濃縮缶の管台部分で溶接し、閉止する。</p>	<p>損傷が生じている可能性のある先端部近傍に充填材を注入し、閉止する。</p>	<p>保護管内に保護管の内径に合わせた配管を施工し、二重管とする。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	<p>セラム質貫通部のプラグ近傍より圧縮空気を送り、加重する。</p>	
<p>概要図</p>								
<p>評価</p>	×	×	×	×	×	×	○	



パージ式液位計と保護管加圧方式の比較



保護管加圧方式

温度計汚染防止用管の概要

加圧システムの設備概要図

濃縮缶

## 加圧方式に係る設計評価

損傷した保護管の復旧策として採用した加圧方式は、保護管内に圧縮空気を供給し、減圧弁の設定圧力を 60 kPa 以上の範囲の所定の圧力で設定し、保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管内を常時加圧する方式である。

本資料では、本設備に要求される保護管内部先端部にかかる圧力以上に保護管の内部を加圧する機能について、想定される以下の状態に対する有効性を評価し、本設備が十分な安全裕度を有した設計であることを確認する。

- 濃縮缶の各運転状態における濃縮缶内の圧力変化
- 濃縮缶と加圧方式の圧力バランスの変動
- 保護管先端部の損傷部位の腐食による損傷の進展
- 加圧システムを構成する設備の保守

また、作業エリアに対するしゃへい機能について確認を行うとともに、火災及び爆発の防止の評価として保護管内の水素の発生量を確認する。

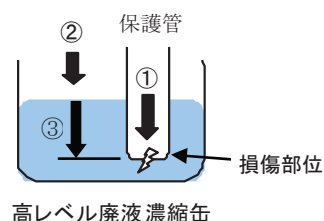
## 1. 保護管内への高レベル廃液の浸入防止機能の有効性評価

## 1. 1 濃縮缶の各運転状態における濃縮缶内の圧力変化

## (1) 評価方法

加圧方式は、保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管内を加圧する方式である。

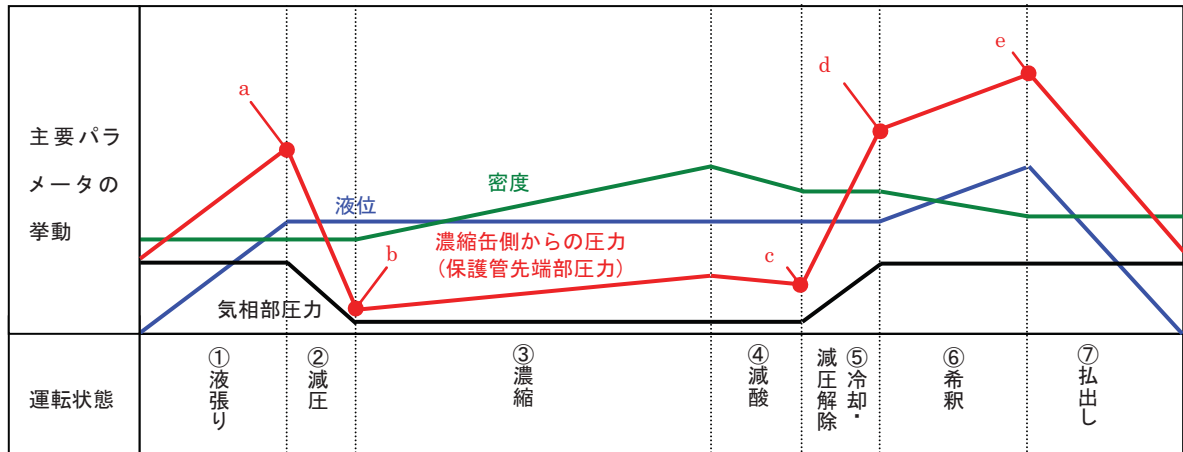
以下の条件が成立した状態では保護管内への液の浸入はない。



$$\textcircled{1} \text{ 保護管内先端部の圧力} \geq \textcircled{2} \text{ 濃縮缶気相部の圧力} \\ + \textcircled{3} \text{ 濃縮缶内の液による圧力 (液面から保護管先端部まで)}$$

【濃縮缶側からの保護管先端部にかかる圧力】

濃縮缶の運転状態により、濃縮缶内の気相部圧力及び濃縮缶内の液位と密度が変動することから、それらの変動に応じて、上記の「濃縮缶側からの保護管先端部にかかる圧力」（以降、「濃縮缶側からの圧力」という）が変動する（図 1 参照）。よって、濃縮缶のいずれの運転状態においても、保護管内先端部の圧力が濃縮缶側からの圧力を上回る（上記の式が成立）ことをもって、保護管内への液の浸入の有無を評価する。



運転状態	①液張り	②減圧	③濃縮	④減酸
運転概要	供給槽から濃縮缶へ廃液を供給する。	真空発生装置を起動し、濃縮缶内を減圧状態にする。	濃縮缶内液位を制御しながら、供給槽から濃縮缶へ廃液を供給し、濃縮缶で蒸発・濃縮する。	濃縮缶内の液位を制御し、第1酸回収系の凝縮液を供給しながら加熱することにより濃縮液の酸濃度を下げる。
各パラメータの挙動	液位: 上昇 気相部圧力: 一定 密度: 一定 先端部圧力: 上昇	液位: 一定 気相部圧力: 低下 密度: 一定 先端部圧力: 低下	液位: 一定 気相部圧力: 一定 密度: 上昇 先端部圧力: 上昇	液位: 一定 気相部圧力: 一定 密度: 低下 先端部圧力: 低下
濃縮缶内の状況 (模式図)				

運転状態	⑤冷却・減圧解除	⑥希釈	⑦払出し
運転概要	加熱を停止し、冷却を開始する(コイルに冷却水を通水)。濃縮缶内の減圧を解除する。	濃縮液に希硝酸を供給し、濃縮液の酸濃度を下げる。	濃縮液を次工程へ払い出す。
各パラメータの挙動	液位: 一定 気相部圧力: 上昇 密度: 一定 先端部圧力: 上昇	液位: 上昇 気相部圧力: 一定 密度: 低下 先端部圧力: 上昇	液位: 低下 気相部圧力: 一定 密度: 一定 先端部圧力: 低下
濃縮缶内の状況 (模式図)			

図1 運転状態と主要パラメータの変動

## (2) 評価条件

- ・ 図1の a～e のポイントについて、以下の評価条件に基づき、濃縮缶側からの圧力及び保護管内先端部の圧力を計算する。

### 【濃縮缶側からの圧力計算】

- ・ 濃縮缶の運転が液張り、冷却・減圧解除、希釈状態（図1の a, d, e）においては、濃縮缶の気相部圧力は、塔槽類廃ガス処理設備により、大気圧より若干負圧であるが、安全側の評価として大気圧を用いる。
- ・ 濃縮缶の運転が減圧、濃縮または減酸状態（図1の b, c）においては、濃縮缶の気相部圧力は通常運転圧力を用いる。
- ・ 保護管の損傷部位は濃縮缶側からの圧力が最も高い保護管先端部とする。
- ・ 計算に用いる液位は、各運転状態における運転液位から保護管先端までの間とする。
- ・ 濃縮缶の運転が濃縮、減酸、冷却・減圧解除、希釈状態（図1の c, d, e）においては、安全側の値として最大となる濃縮後密度（設計値）を用いる。

### 【保護管内先端部の圧力計算】（図2 参照）

- ・ 減圧弁の設定圧力を 60 kPa 以上としていることから、減圧弁の設定圧力は最も低い 60 kPa の場合を評価する。
- ・ 現状の保護管の損傷部位の大きさの推定及び今後の損傷部位の腐食の進展を考慮し、孔径 0.01mm、0.1mm、1.0mm 及び 1.5mm の 4 つで保護管内先端部の圧力の計算を行う。
- ・ 保護管内に空気が流れることを考慮し、配管や弁等の圧損を計算する。この際、計算に必要な空気流量  $Q_A$  は仮定値を用いる。
- ・ 保護管先端部においては圧力差により先端部から排出する空気流量  $Q_B$  を計算する。
- ・  $Q_A=Q_B$  となるような収束計算を行い、保護管内先端部の圧力を評価する。



### (3) 圧損の計算の考え方

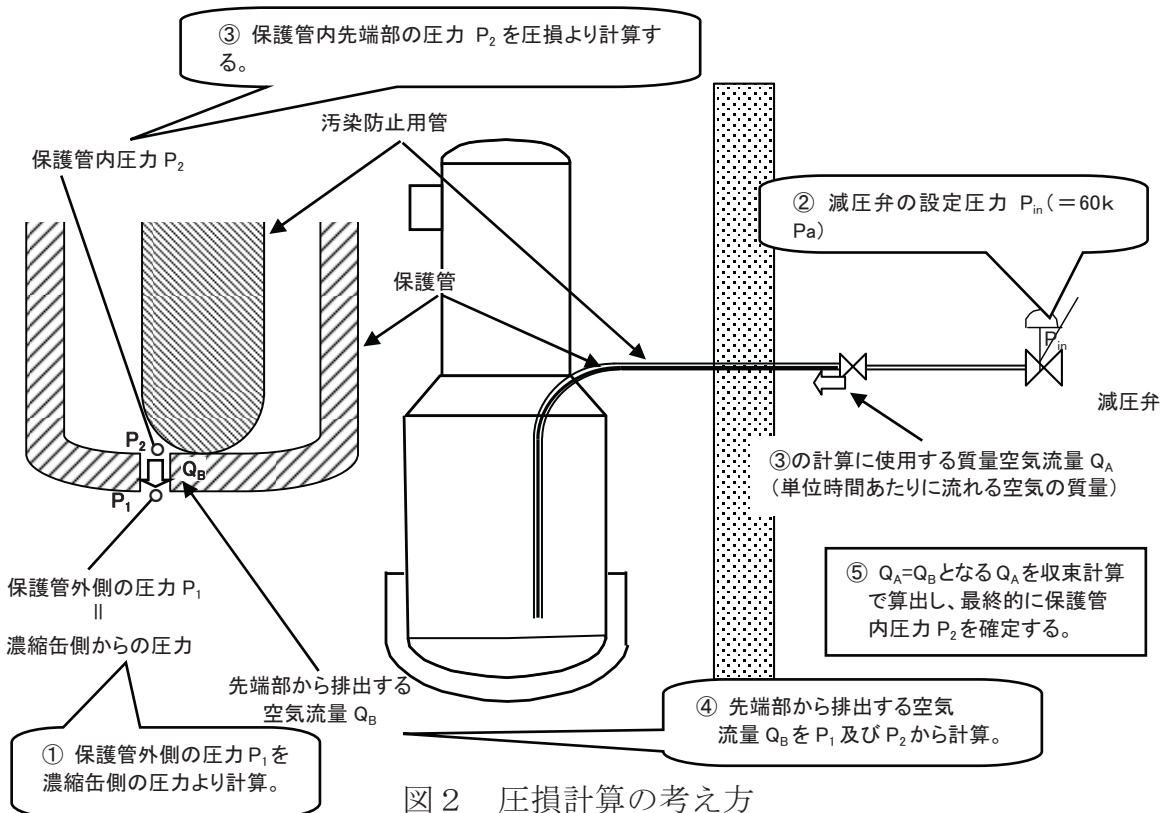
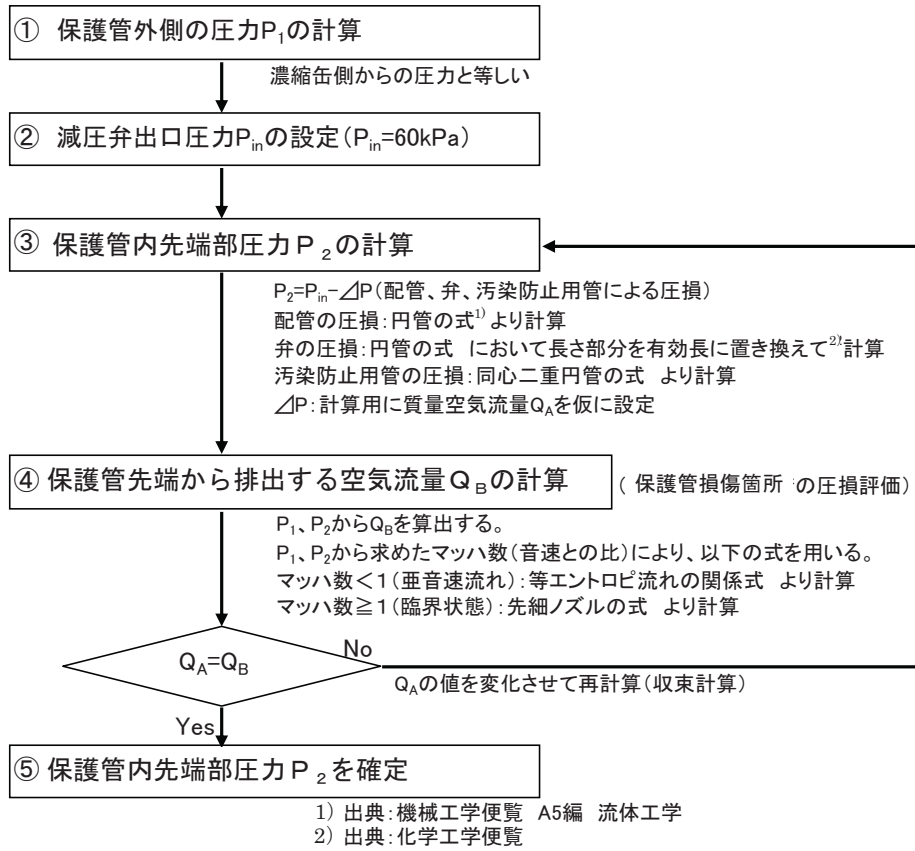


図2 圧損計算の考え方

#### (4) 評価結果

各運転状態に対して、保護管内を加圧した際の保護管内先端部の圧力と濃縮缶側からの圧力とを比較し、保護管内先端部の圧力が濃縮缶側からの圧力よりも大きくなることを確認した。この結果から、濃縮缶内のいずれの運転状態においても、保護管内へ廃液が浸入しないと評価する。

運転状態	濃縮缶側からの圧力 [kPa]	保護管内先端部の圧力[kPa]				保護管内への 浸入の有無
		0.01mm	0.1mm	1.0mm	1.5mm	
a 液張り①	24	60	60	53	40	無
b 減圧～濃縮前半②～③	-71	60	60	49	22	無
c 濃縮後半～減酸③～④	-59	60	60	49	22	無
d 冷却・減圧解除⑤	-59→36	60	60	49→55	22→46	無
e 希釈⑥	53	60	60	58	55	無



(5) 実規模試験による確認

① 試験方法

実際の濃縮缶及び保護管を模擬した装置を用い、損傷部位の大きさを覚えて濃縮缶の各運転状態における圧力等を模擬し、保護管内への液の流入の有無を確認する（図3 参照）。

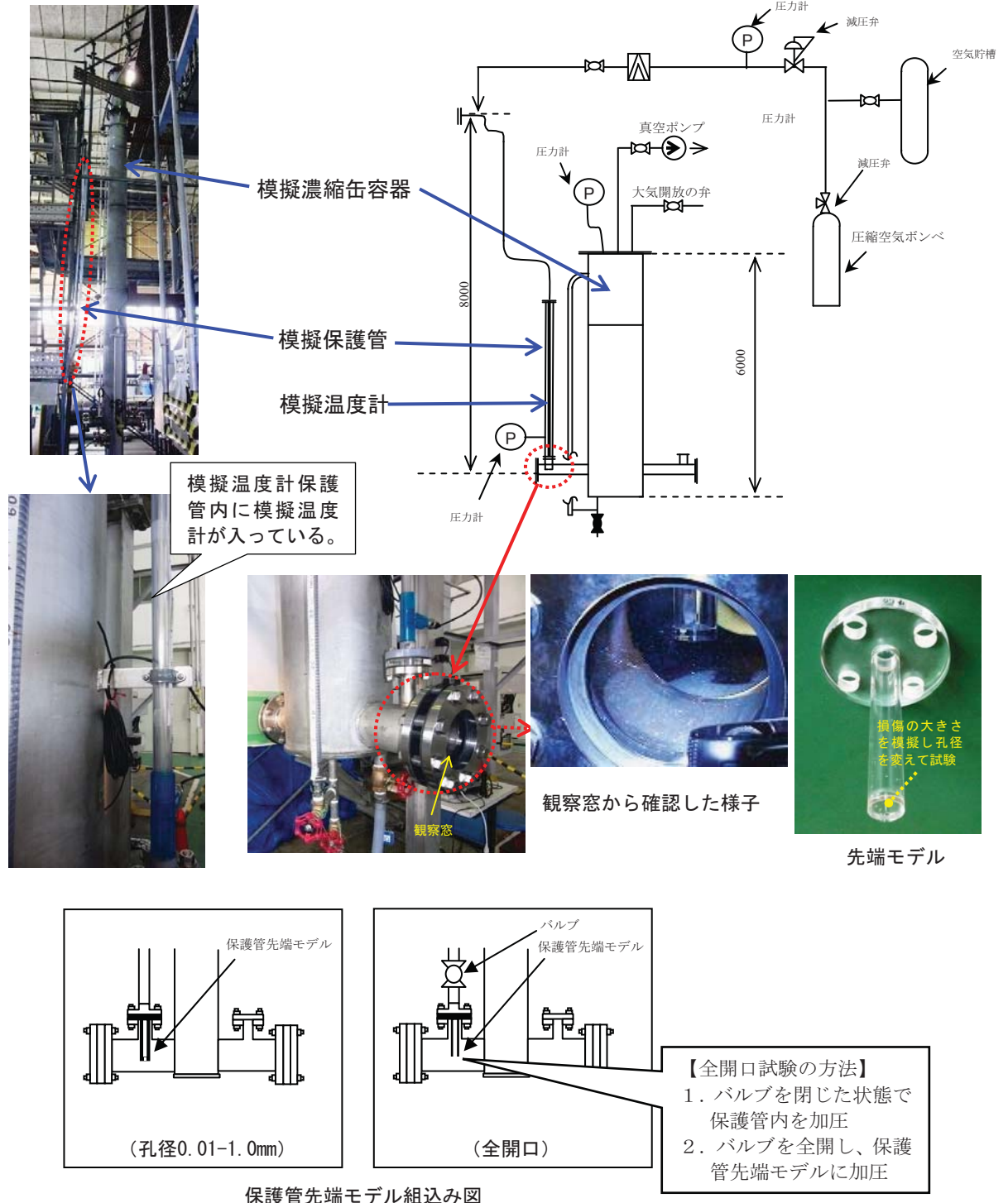


図3 実規模試験装置

② 試験条件

- ・ 減圧弁の設定圧力を 60～100kPa の範囲で設定し、保護管内を加圧する計画であることから、減圧弁の設定圧力を 60 k Pa 及び 100kPa とする。
- ・ 現状の保護管の損傷部位の大きさの推定及び今後の損傷箇所の腐食の進展を考慮し、孔径 0.01mm、0.03mm、0.3mm、1.0mm を備えた保護管先端モデルを用いる。
- ・ 試験では水を用いるため、試験での液位は各運転状態での液位に密度を補正し設定する。

③ 観察結果

実規模試験装置の観察窓から保護管先端モデルの先端からの空気の排出状況を観察した。試験条件のうち、最も空気の排出が少ない最小孔径0.01mm、減圧弁の最小設定圧力 60 k Pa、濃縮缶側からの最大圧力が加わる希釈後の条件において空気の排出が確認でき、保護管内への液の流入はないことを目視により確認した。詳細は以下のとおり。

孔径	減圧弁の設定圧力			
	60 k Pa		100kPa	
	濃縮缶側からの圧力			
	減圧後：-70kPa	希釈後：45kPa	減圧後：-70kPa	希釈後：45kPa
0.01mm	数分で保護管先端部の気泡が拡大。気泡は保護管先端から離れず。	数時間で保護管先端部の気泡が拡大。気泡は保護管先端から離れず。	数分で保護管先端部の気泡が拡大。気泡は保護管先端から離れず。	約1時間で保護管先端部の気泡が拡大。気泡は保護管先端から離れず。
0.03mm	数十秒に1回の頻度で気泡が発生	約10分に1回の頻度で気泡が発生	数十秒に1回の頻度で気泡が発生	数分に1回の頻度で気泡が発生
0.3mm	ジェット噴流状の気泡が発生	連続した気泡が発生	ジェット噴流状の気泡が発生	連続した気泡が発生
1.0mm	大きなジェット噴流状の気泡が発生	ジェット噴流状の気泡が発生	大きなジェット噴流状の気泡が発生	ジェット噴流状の気泡が発生
目視により、保護管内を確認したところ、全ての試験条件で保護管内への液流入はなかった。				

保護管先端から排出される気泡は以下の5ケースに分類された（図4 参照）。

a. 気泡拡大のみ。保護管先端から気泡が離れず	b. 数十秒～約10分に一回の頻度で気泡が発生	
 <p style="text-align: center;">気泡が拡大</p>	 <p style="text-align: center;">先端から気泡が離れる瞬間</p>	
c. 連続した気泡が発生	d. ジェット噴流状の気泡が発生	e. 大きなジェット噴流状の気泡が発生
		

図4 空気の排出状況及び保護管内への液浸入の有無

#### ④ 試験結果

試験の結果、いずれの孔径（0.01, 0.03, 0.3, 1.0mm）の場合においても保護管から空気が排出されており、保護管内を目視で確認した結果、保護管内への液浸入はなかった。

#### （6）まとめ

以上の評価及び実規模試験結果から、保護管内を加圧することにより、いずれの運転状態においても保護管内への液浸入が防止できると考えられる。

## 1. 2 濃縮缶と加圧方式の圧力バランスの変動

### (1) 圧力バランスが変動するケースの整理

「1. 1 濃縮缶の各運転状態による濃縮缶内の圧力変化」での圧力変化以外に、設備構成等を考慮して圧力バランスに影響する要因を洗い出し、洗い出した各要因の状態に対して、本加圧方式が有効に機能し、保護管内への液浸入が発生しないことを確認する。(下表 参照)

大要因	中要因	小要因
保護管内への加圧圧力の低下	圧縮空気設備からの圧縮空気の供給停止[a-1]	—
濃縮缶側から保護管先端部にかかる圧力の上昇	濃縮缶気相部圧力の上昇	通常運転操作以外の理由による減圧解除[b-1]
		塔槽類廃ガス処理設備による圧力変動[b-2]
		加熱コイルからの蒸気流出[b-3]
	濃縮缶内の液による圧力の上昇	濃縮缶内の液位上昇[c-1]
		濃縮缶内保有液の密度上昇[c-2]

### (2) 各要因の状態における液浸入の有無の評価

#### ① 圧縮空気設備からの圧縮空気の供給停止 [a-1]

##### a. 事象進展シナリオの設定

濃縮缶の各運転状態に対して、圧縮空気の供給が停止したと仮定し、評価を行った。評価にあたっては、濃縮缶の真空発生装置の運転状態及び加圧方式のシステム構成を考慮し、事象進展シナリオを以下のように設定する(図5 参照)。

状態1：圧縮空気設備の停止に伴い真空発生装置の停止及び真空解除弁が開となり、濃縮缶内は減圧解除

↓

状態2：濃縮缶の減圧解除が終了。保護管は空気貯槽内に蓄圧された空気による加圧が継続(減圧中においても保護管内の圧力低下はない)

↓

状態3：空気貯槽の圧力が保護管内の圧力とほぼ同じ値となった場合、保護管内圧力の低下が開始。

↓

状態4：保護管内の圧力は濃縮缶側からの圧力と等しくなる。

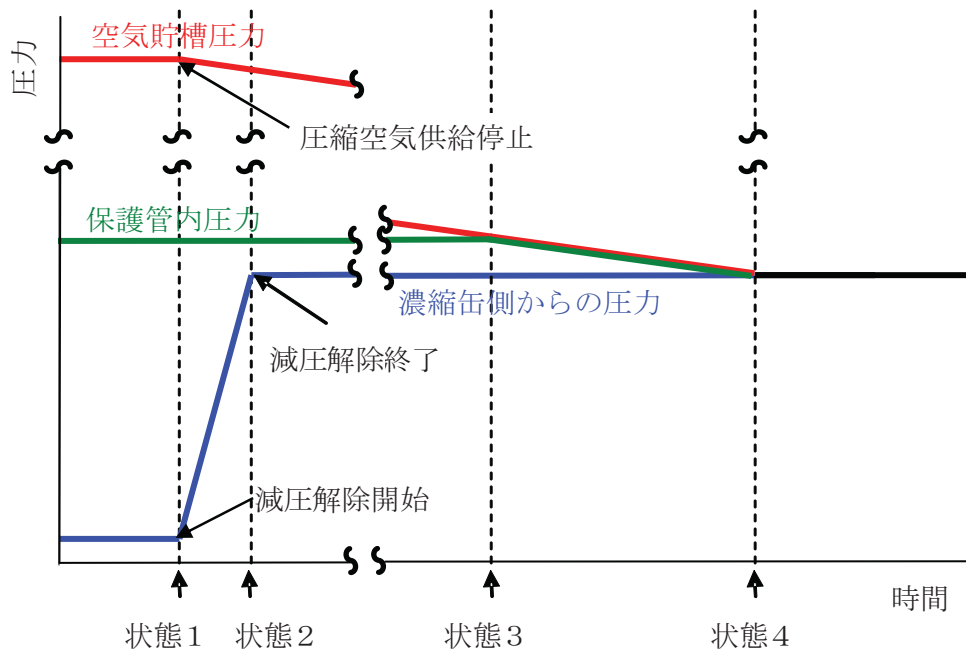


図5 圧縮空気設備からの圧縮空気供給停止時の圧力の経時変化

たとえ状態4までの状況に至ったとしても、保護管内の圧力は濃縮缶側からの圧力とつり合った状態で安定することから、それ以上の圧力の低下は生じず、保護管内への液浸入はない。

なお、空気貯槽の容量で加圧可能な時間を経過後も圧縮空気の供給が回復しない場合を想定し、現場にコンプレッサを設置する。このコンプレッサを加圧方式の予備タップにつなぎ起動することで、保護管への圧縮空気の供給が継続されるため、保護管内への液浸入を防止することができる。

## b. 実規模試験による確認

### ア. 試験方法

1. 1において使用した装置（図3参照）を用いて、保護管内の圧力が低下し始める状態3から圧力の低下が停止する状態4までを模擬し、その際の保護管内への液浸入の有無を確認する。

### イ. 試験条件

- ・ 減圧弁の設定圧力は最も低い60 kPaとする。
- ・ 保護管先端モデルの孔径は1mmとする。
- ・ 模擬濃縮缶容器の気相部圧力が大気圧であることを確認し、状態3を模擬するため、圧縮空気の供給を停止する。
- ・ 保護管内の圧力低下が停止したことをもって状態4とし、圧力を



確認する。

- ・ 試験中は常時、保護管内への液の流入状態を監視する。

#### ウ. 試験結果

試験の結果、状態3から状態4までの間において、保護管内への液浸入はなかった。(下表 参照)。なお、状態4における保護管圧力は約25kPaとなり、模擬濃縮缶容器側からの圧力とほぼ同等となった。

孔径	状態	模擬濃縮缶容器側からの圧力	減圧弁の設定圧力	保護管内圧力(測定値)	状態3→4に至る時間	保護管への液浸入の有無
1mm	3	25kPa	60 k Pa	58kPa	2 時間	無
	4			25kPa		

#### c. まとめ

以上より、圧縮空気設備からの圧縮空気の供給が停止した場合においても保護管内への液浸入はないと考えられる。

#### ② 通常運転操作以外の理由による減圧解除 [b-1]

濃縮缶の減圧解除は、通常運転の操作時だけでなく圧縮空気設備の停止(上記 [a-1] にて評価)、外部電源喪失、蒸気供給停止時(真空発生装置の駆動源である蒸気の供給が停止するため)及び濃縮缶の停止を伴うインターロックの作動時にも起こる(図6 参照)。

外部電源喪失時は圧縮空気の供給が停止することとなるため、圧縮空気設備の停止(上記 [a-1] にて評価)と同じ挙動となる。

また、蒸気供給停止時は通常運転時の減圧解除(1.1 にて評価)と同じ挙動となる。

以上より、圧力バランスの変動の観点から、本事象は上記①の評価結果に包含され、保護管内への液浸入は発生しない。

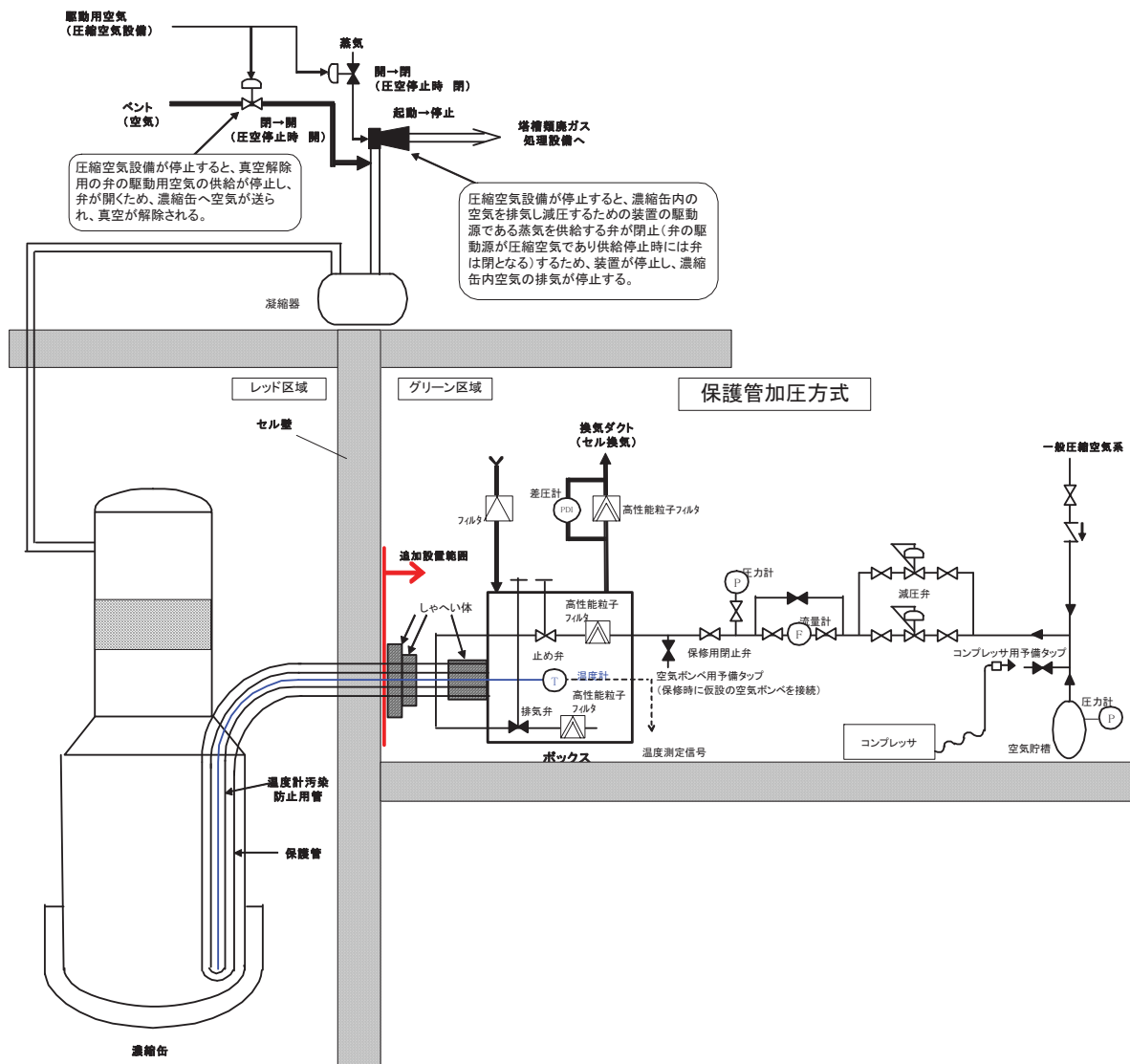


図6 圧縮空気設備からの圧縮空気供給停止時における真空発生装置の運転状態

③ 塔槽類廃ガス処理設備による圧力変動[b-2]

濃縮缶は塔槽類廃ガス処理設備により大気圧より若干負圧で制御されているが、同じ塔槽類廃ガス処理設備で排気されている他設備の状態によって、濃縮缶内の気相部の圧力は負圧の範囲で変動する。

この変動要因により保護管内への液浸入の可能性を評価した結果、1. 1において塔槽類廃ガス処理設備による濃縮缶内の圧力を大気圧で安全側に評価しており、負圧の範囲の圧力変動はこの評価結果に包含されるので、保護管内への液浸入は発生しない。

#### ④ 加熱コイルからの蒸気流出[b-3]

加熱コイルは溶接構造であり、定期的な肉厚測定の実施により腐食状況を把握しているが、万一、濃縮缶内の加熱コイル（濃縮缶内の溶液を加熱するため濃縮缶内に設置）からのリークにより加熱蒸気が濃縮缶内に流出すると濃縮缶気相部圧力が上昇する。濃縮缶気相部圧力が圧力高インターロック設定値（大気圧よりも十分低い負圧に設定）よりも高くなった場合は、インターロックにより通常と同じように加熱蒸気の供給が停止し減圧が解除され、濃縮缶気相部圧力は塔槽類廃ガス処理設備により負圧の状態に維持され、更なる圧力上昇はない。この場合は通常運転時の減圧解除と同様な挙動となることから、保護管内への液浸入は生じない。

#### ⑤ 濃縮缶内の液位上昇[c-1]

通常の運転状態において、濃縮缶内の液位が最も高くなる希釈運転は自動運転で行われ、供給液量が所定量に達すると自動的に濃縮缶への液の供給が停止する。自動的に停止した濃縮缶内の液位は1. 1での評価における希釈時の液位と同一であるので、1. 1の評価結果に包含され、保護管への液浸入は発生しない。

万一、希釈液の供給が自動で停止しなかった場合には濃縮缶内液位の上昇により濃縮缶側からの圧力が上昇する。この場合、濃縮缶に設置の警報（液位の異常高）が発報し、その液位から保護管内へ液が浸入する圧力に相当する液位まで上昇するには1時間程度を要する。この時間の余裕の間に中央制御室の運転員が希釈操作を停止する。よって、本事象についても保護管内への液浸入は発生しない。

#### ⑥ 濃縮缶内保有液の密度上昇[c-2]

濃縮缶内液の密度については、濃縮の進展と共に上昇する。1. 1において、通常液位よりも高い希釈液位で濃縮缶内の最高密度値（設計値）を用いて評価を行い、その結果、保護管内液への液浸入が発生しないことを確認している。また、濃縮の進展以外に密度が上昇する可能性はないことから、密度上昇に伴い保護管内への液浸入が発生することはない。

### (3) まとめ

評価の結果、いずれの要因に対しても、保護管内先端部の圧力は濃縮缶側から保護管先端にかかる圧力よりも高く、保護管内への液浸入が発生しないことを確認した。



### 1. 3 保護管先端部の損傷箇所の腐食による損傷の進展

#### (1) 圧力バランスの評価

保護管先端部の損傷箇所は、9. 2章①に記載する「濃縮缶下部の温度上昇の抑制」を講じることにより、濃縮缶の下部温度が過度に上昇することを抑制でき、腐食環境が緩和されることから損傷の進展は抑制できると考えるが、損傷進展の評価条件として、保護管の内径である 21.2mm とする。

21.2mm まで進展した場合、保護管先端部が濃縮缶に対して開放状態になるため、保護管先端部では保護管側の圧力は圧力の低い濃縮缶内側の圧力に引かれ、圧力が低下すると共に濃縮缶へ流れる空気流量が増加する。最終的には、保護管先端部では濃縮缶への空気の流れが継続したまま両者の圧力がほぼバランスした状態となるため、結果として保護管内への液浸入は発生しない。

なお、保護管先端部の損傷が進展した場合、保護管先端から濃縮缶への圧縮空気の流量が増大する。このために濃縮缶内圧力が上昇することが考えられるが、保護管から濃縮缶へ浸入する空気の流量（4kg/h 程度）に対して濃縮缶の真空発生装置の能力には十分に余裕があることから、濃縮缶は負圧に保たれる。

#### (2) 実規模試験による確認

##### ① 試験方法

1. 1において使用した装置（図3 参照）を用いて、損傷部位がない状態から保護管の内径に相当する 21.2mm まで急激に開口する変化を模擬し、保護管内への液流入はないことを確認する。

##### ② 試験条件

- ・ 減圧弁の設定圧力は最も低い 60 k Pa とする。
- ・ 試験中は常時、保護管内への液の流入状態を監視する。

##### ③ 試験結果

試験の結果、保護管内への液流入はなかった。（下表 参照）。

減圧弁の設定圧力	運転状態	濃縮缶の液による圧力	濃縮缶の気相部圧力	保護管内への流入の有無
60 k Pa	濃縮運転後	35kPa <sup>※1</sup>	-95kPa	無
	希釈運転後	48kPa <sup>※2</sup>	大気圧	

※1 減圧状態で液位の最も高い条件

※2 大気圧状態で液位の最も高い条件

### (3) まとめ

評価及び実規模試験による確認の結果から、保護管を加圧することで、損傷部位の腐食進行により保護管先端部の損傷が保護管の内径まで進展した状態においても保護管への液浸入が発生しない。

## 1. 4 加圧方式を構成する設備の保守

### (1) 保守時の評価

加圧システムにおけるボックス内の止め弁、排気弁を分解点検、保守を行う際には、加圧システムは開放状態になることから、保護管内の圧力は大気圧となる。よって、濃縮缶内の液を払い出し、濃縮缶を減圧状態にすることで、たとえ加圧システムを停止しても、保護管内に液が浸入しない圧力バランス（濃縮缶側からの圧力 $-9\text{kPa}$  $<$ 保護管内圧力 $0\text{kPa}$ ）が維持できる。この状態で分解点検、保守を実施する手順を採用することにより、保護管内への液浸入が発生しないことを確認した。

### (2) 実規模試験による確認

止め弁又は排気弁の保守時において保護管内は大気圧となる。1. 1にて使用した装置（図3 参照）を用いて模擬濃縮缶を減圧した結果、保護管内が大気圧であっても保護管内への液浸入はなかった。また、模擬濃縮缶を真空解除して濃縮缶の気相部圧力を大気圧にしたところ、保護管内へ液が浸入した。よって、(1)の評価のとおり、圧力バランスを維持することで保護管内への液の流入なかった。（図7 参照）

保護管内圧力が大気圧である場合の保護管内への流入の有無

孔径	保護管内圧力	保守時の濃縮缶の液による圧力	濃縮缶の気相部圧力	保護管内への流入の有無
1.0mm	0kPa (大気圧)	2kPa (濃縮缶の液を 払出した状態)	-10kPa	無
			0kPa (大気圧)	有 (約3分で保護管内 に濃縮缶の液位と同 等の液が流入)



a) 液の流入がない様子



b) 液の流入がある様子

図7 保護管内への液流入の様子

## 2. 作業エリアに対するしゃへいの確認

現在のしゃへい機能は、保護管からのストリーミングを考慮して、補助的なしゃへい体をセル壁部分の保護管内面に挿入している。

加圧方式では、保護管への圧縮空気の流路を確保するため、しゃへい体をセル壁部分から作業エリアへと移動する（図8 参照）。

加圧方式におけるしゃへい機能の確認は、濃縮缶セル内からの放射線がセル壁の開口部（保護管設置）を通じて作業エリアに到達するストリーミングの線量率と高レベル廃液から保護管気相部に移行した放射性物質による線量率をそれぞれ評価し、セル壁透過成分による線量率<sup>\*</sup>（ $3.0\mu\text{Sv/h}$ ）と合算して当該エリアの基準線量率（ $\leq 10\mu\text{Sv/h}$ ）を満足することを確認する。なお、計算点は人がアクセス可能な換気ボックスの表面とする（図8 参照）。

※高レベル廃液の濃縮運転における設計上の最大線源強度より評価

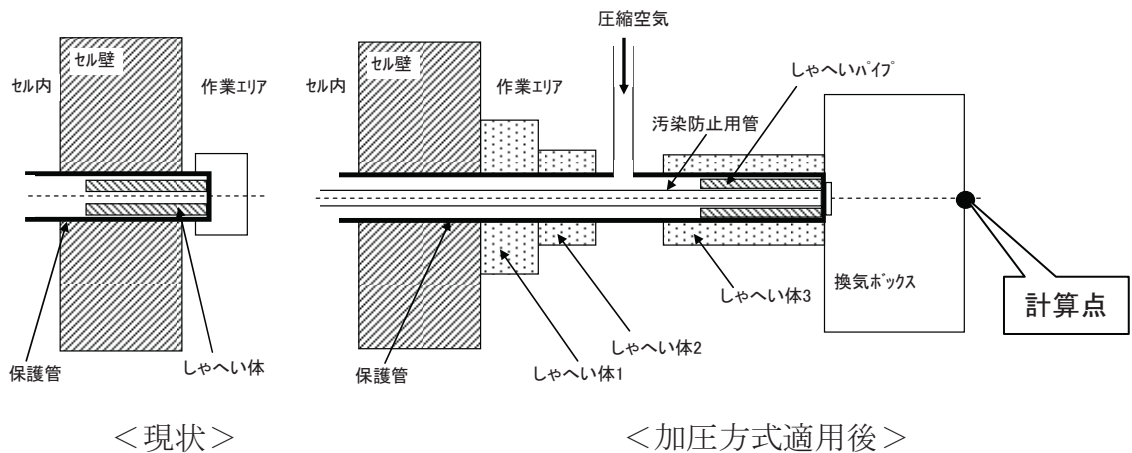


図8 保護管のストリーミングを考慮した遮へい体の比較

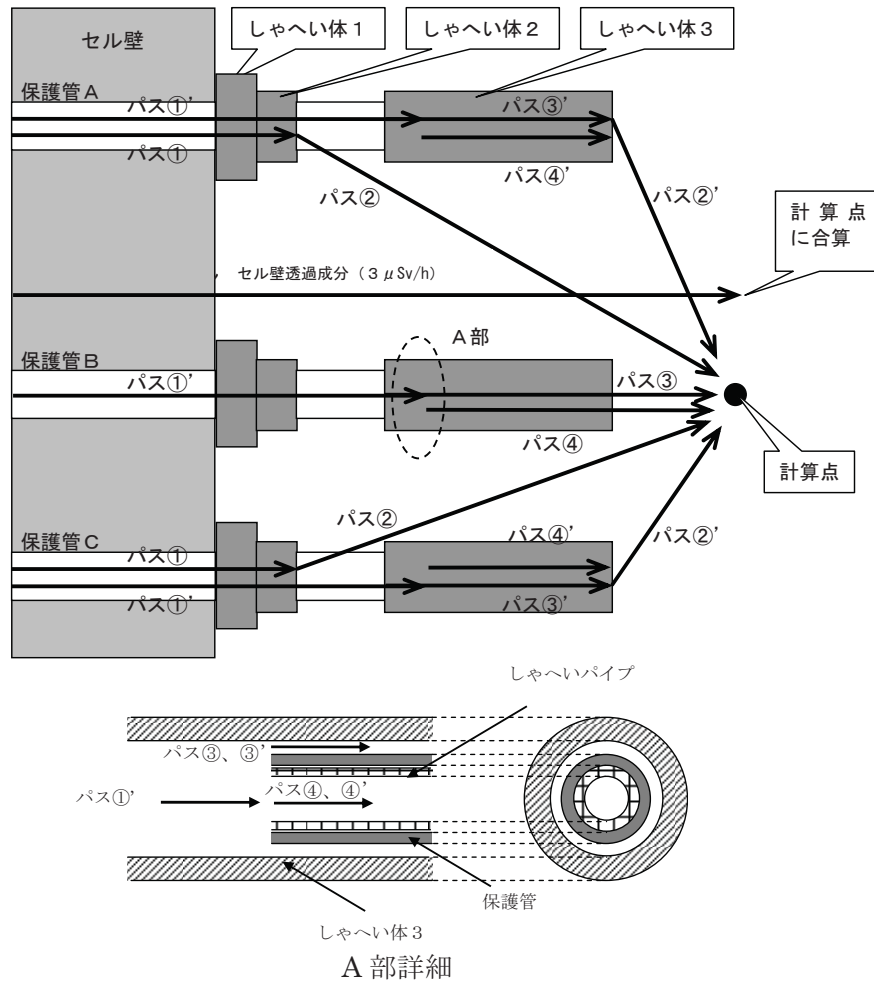
### (1) ストリーミングによる線量率の評価

現状の保護管におけるストリーミングの評価は、保護管内に設置されたしゃへい体による減衰を考慮して、1本毎に評価を行い、各保護管の線量率と壁の透過成分と合算して当該エリアの基準線量率（ $\leq 10\mu\text{Sv/h}$ ）を満足することを確認している。評価方法としては、しゃへい体入口までは円筒状の空洞となっているため、円筒ダクトによる減衰を評価する式で評価しており、しゃへい体から作業エリアまでは、しゃへい体により隙間部分が円環状であるため、円環ダクトによる減衰を評価する式にて評価している。

加圧方式におけるストリーミングについては、しゃへい体が作業エリア側に移動する。このため、保守的に3本の保護管のうちの両側の2本の保護管からの寄与もあるとして、図9に示す中央の保護管（保護管B）の中心軸上を計算点として評価する。

加圧方式設置における線量率の評価条件を以下のように設定する。

- ① セル壁内壁面の線量率（高レベル廃液の濃縮運転における設計上の最大線源強度）より評価する。
- ② 幾何条件は図9に示すとおり。計算点までの距離は人がアクセス可能な位置とする。
- ③ しゃへい体を透過する放射線は、透過時に減衰が生じ、直線的に寄与する放射線に比べ十分低くなることから考慮しない。



- ・パス③及び③' はしゃへい体3の内側から保護管内に設置したしゃへいパイプとの隙間（円環形状）を透過する放射線の評価している。
- ・パス④及び④' はしゃへい体3の内側の保護管内に設置したしゃへいパイプの内側の空間（円筒形状）を透過する放射線の評価している。

図9 ストリーミングによる線量率評価モデル

各透過パスの設定は以下のとおり。

なお、クォーテーション（「'」）の意味は、適用する評価式は同じだがパスの設定長さが異なることを示す。

パス	設定	適用式
①	セル壁内面からしゃへい体2出口までのパス	円筒ダクトの式
①'	セル壁内面からしゃへいパイプ入口までのパス	
②	しゃへい体2出口から計算点までのパス	円板面線源の式
②'	しゃへい体3出口から計算点までのパス	
③	しゃへいパイプ入口から計算点までのパス	円環ダクトの式
③'	しゃへいパイプ入口からしゃへい体3出口までのパス	
④	しゃへいパイプ入口から計算点までのパス	円筒ダクトの式
④'	しゃへいパイプ入口からしゃへい体3出口までのパス	

円筒ダクトの式…円筒状のダクトによる減衰を評価する式であり、貫通部の中の空洞部分の形状が円筒形の空洞であるのため適用（「再処理施設の放射線遮蔽安全ガイド資料」JAERI - M 86 - 060）

円板面線源の式…円板形状の線源からの距離による減衰を評価する式であり、線源の形状や評価点まで障害物がないことを考慮して適用（「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」）

円環ダクトの式…円環状のダクトによる減衰を評価する式であり、貫通部の中の空洞部分の形状が円環形状であるので適用（「再処理施設の放射線遮蔽安全ガイド資料」JAERI - M 86 - 060）

計算結果を下表に示す。線量率の計算結果の合計は  $2.1 \mu\text{Sv/h}$  であった。

保護管	セル壁内壁面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	透過ルート	計算点の線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
保護管 A	$2.40 \times 10^9$	パス①→パス②	$3.5 \times 10^{-1}$
		パス①' →パス③' →パス②'	$1.1 \times 10^{-4}$
		パス①' →パス④' →パス②'	$1.6 \times 10^{-5}$
保護管 B		パス①' →パス③	$7.0 \times 10^{-1}$
		パス①' →パス④	$4.5 \times 10^{-1}$
保護管 C		パス①→パス②	$6.2 \times 10^{-1}$
		パス①' →パス③' →パス②'	$4.9 \times 10^{-4}$
		パス①' →パス④' →パス②'	$7.0 \times 10^{-5}$
合計			2.1

(2) 放射性物質の移行による線量率の評価 (図10 参照)

保護管は圧縮空気により加圧されているため、保護管内への液の浸入はない。しかし、保護管には微小な開口部が存在するため、気相への移行を評価する。保護管気相部への放射性物質の移行による線量率の評価条件を以下に示す。

- ① 廃液の放射能濃度は  $1.37 \times 10^{11}$  Bq/cm<sup>3</sup>、保護管気相部への放射性物質の移行率は、流れはないものの掃気に対するエアロゾルの移行率の下限值  $0.1 \text{ mg/m}^3$ <sup>1)</sup> として、保護管気相部の放射性物質濃度は  $13 \text{ Bq/cm}^3$  を使用。
- ② 保護管周りに設置したしゃへい体、配管の厚み等のしゃへい効果は無視する。

- 1) 出典 F.J.Herrmann, E.Lang, J.Furrer, E.Henrich “Some Aspects of Aerosol Production and Removal During Spent Fuel Processing Steps” 16th DOE Nuclear Air Cleaning Conference

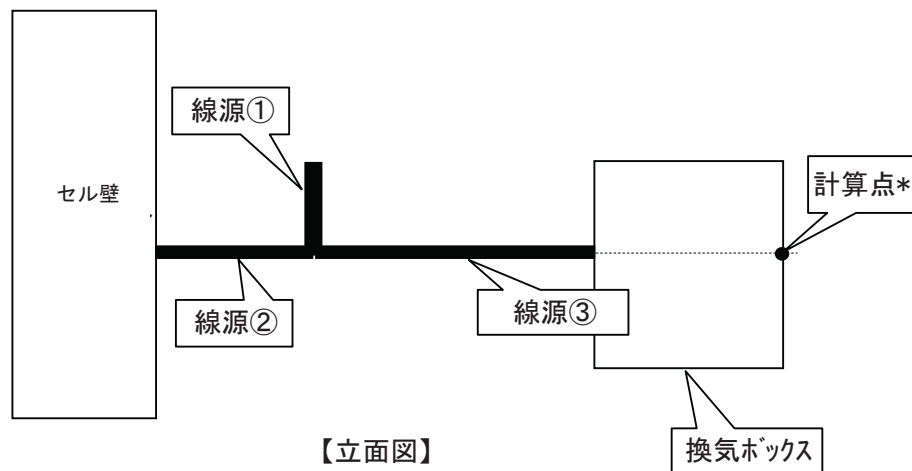


図10 放射性物質の移行による線量率評価モデル

評価方法としては、配管形状が線状であることから線状の線源からの距離による減衰を評価する式を適用する。(単純形状線源に対する計算公式「線線源」(ガンマ線遮蔽設計ハンドブック))

各線源からの寄与及び合計線量率は、線源①, ②, ③は共に  $0.0015 \mu \text{ Sv/h}$  であり、放射性物質の移行による線量率は、十分小さいことが分かる。

(3) まとめ

ストリーミングによる線量率は、 $2.1 \mu \text{ Sv/h}$  であり、一方の放射性物質の移行による線量率は十分小さく無視できる程度であることを確認した。これらにセル壁透過成分による線量率 ( $3.0 \mu \text{ Sv/h}$ ) を加えても  $5.1 \mu \text{ Sv/h}$  であり、当該エリアの基準線量率 ( $\leq 10 \mu \text{ Sv/h}$ ) を満足していることを確認した。



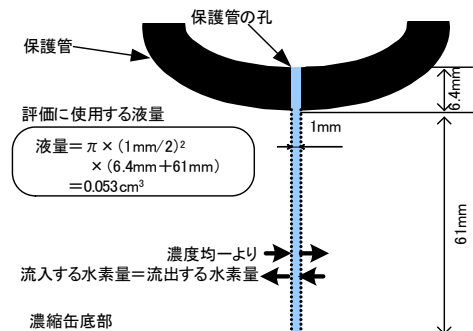
### 3. 放射線分解水素発生量の評価

濃縮缶で処理される高レベル濃縮廃液は、放射線分解により水素が発生する。1.において確認したとおり保護管内圧力が濃縮缶側からの圧力よりも高くなる圧力に保護管内を加圧し、保護管内に供給している空気が保護管先端部から濃縮缶側に抜けている状態では、保護管内への液浸入はない。しかしながら、損傷部位が微小であると毛細管現象により生じる圧力が大きくなり、加圧システムからかけられる圧力を上回り、保護管内に液は浸入しないものの損傷部位内には液が浸入することが考えられる。

損傷部位内に微量な廃液が滞留することを仮定し、そこから発生する水素により、保護管内への水素濃度が可燃限界である 4vol%に達するまでの時間を評価する。

#### (1) 評価条件

- ・ 損傷部位は十分小さく、保護管内の空気の流れはないとする。
- ・ 保護管表面から出た水素は保護管内に入るが、拡散の効果が大きく過度に水素濃度の高い箇所が生じることがないことを試験により確認しているため、保護管内の水素濃度は均一とする。
- ・ 保護管への加圧圧力は 60 kPa とする。
- ・ 損傷部位の孔径 1mm<sup>※2</sup> の損傷長さ 6.4mm に濃縮缶底部までの 61mm を加えた長さ<sup>※3</sup>での液量 0.053cm<sup>3</sup> で評価する。
- ・ 保護管内容量（気相部）は保護管から減圧弁までの容量とする。
- ・ G 値及び単位液量あたりの崩壊熱量 Q は濃縮缶での設定値<sup>2)</sup>を用いる。



※2 計算上、保護管への加圧圧力 60 kPa で毛細管現象により生じる圧力を抑えることができる損傷部位の孔径は 5μm 以上である。また、実規模試験での観察結果によると孔径 10μm では保護管先端で気泡が拡大し、孔径 0.3mm 以上では連続した空気の排出を確認できた。よって、評価値である孔径 1mm は十分安全側の値である。

※3 損傷長さについては、長さが不明であるものの損傷部位の孔径を 1mm として十分安全側の値を設定しているため保護管の肉厚とする。また、濃縮缶内の液から発生する水素については、濃縮缶気相部が保護管内よりも負圧のため濃縮缶気相部に移行すると考えられるが、安全側に損傷部直下部の液（孔径 1mm、高さ 61mm の円柱）から発生する水素を考慮に入れる。

2) 出典：第 6 回設工認申請書「Ⅲ 火災及び爆発の防止に関する説明書」

## (2) 評価方法

- ・ 評価液量からの単位時間当たりの水素発生量<sup>2)</sup>を計算する。  
時間当たりの水素発生量  $F = 8.36 \times 10^{-6} \times V \times Q \times G$   
(V : 液量、Q : 単位液量の崩壊熱量、G : G値)
- ・ 保護管内の水素濃度は以下の式により計算できるので、水素濃度が 4vol% となる時間を逆算する。  
水素濃度  $C = (\text{水素発生量 } Q_{H_2}) / (\text{水素発生量 } Q_{H_2} + \text{保護管内気体量 } N_{G.P.})$   
保護管内気体量  $N_{G.P.} = \text{保護管内容量 } V_{G.P.} \times \text{保護管内圧力 } P_{G.P.} / (\text{大気圧})$   
水素発生量  $Q_{H_2} = F \times \text{時間 } X$

## (3) 評価結果

保護管内の圧力 60 kPa において液量 0.053cm<sup>3</sup> から発生する水素により、保護管内の水素濃度が可燃限界である 4vol% に達するまでの時間は 104 年程度と、通常状態における水素の発生量は十分小さく、特別な対策をとらなくとも火災及び爆発の防止の観点での問題はないことを確認した。

## 4. まとめ

本設備に要求される保護管内への高レベル廃液浸入防止に係る機能は、運転時、保守時に想定される以下の状態に対し有効であり、また本設備が十分な安全裕度を有した設計であることを確認した。

- 濃縮缶の各運転状態における濃縮缶内の圧力変化
- 濃縮缶と加圧方式の圧力バランスの変動
- 保護管先端部の損傷部位の腐食による損傷の進展
- 加圧システムを構成する設備の保守

また、作業エリアに対するしゃへい機能について問題ないことを確認するとともに、保護管内の水素の発生量については十分小さく火災・爆発防止上問題ないことを確認した。



## 加圧方式に係る安全評価

加圧方式は、保護管内に濃縮缶側から保護管先端部にかかる圧力よりも大きな圧力で圧縮空気を供給することにより、高レベル廃液の保護管への浸入を防止するシステムであり、運転時及び保守時等に想定される以下の状態について、保護管内への浸入を防止できる設計としている。

- ・濃縮缶の各運転状態における濃縮缶内の圧力変化
- ・濃縮缶と加圧方式の圧力バランスの変動
- ・保護管先端部の損傷部位の腐食による損傷の進展
- ・加圧方式の設備の保守

再処理事業指定申請書における安全評価の考え方に基づき加圧方式の安全設計の妥当性の確認を行うために、上記のような機能が期待できないような状態を想定して、仮に保護管内に高レベル廃液が浸入したとしても周辺環境に対し影響を及ぼさないことを確認する目的で、安全評価を行った。

### 1. 評価条件

加圧方式は、上記のように圧縮空気です保護管内を加圧することでその機能を確保していることから、圧縮空気の圧力低下が着目すべき変動項目になる。圧力低下の中でも最も厳しい条件としては、圧縮空気やコンプレッサによる加圧圧力が全てなくなることである。

この際の保護管内に浸入する高レベル廃液の量は、濃縮缶の通常運転時の運転範囲の変動幅の最大値である液位警報設定点の位置までとした。

上記の状態において、検討すべき項目としては、保護管内に浸入した高レベル廃液からの「水素発生」及び「気相への放射性物質の移行」であり、これらについて評価を行った。

### 2. 評価結果

#### (1) 水素発生

高レベル廃液から発生する水素の濃度が可燃限界である4 vol%に達するまでに1日以上の時間余裕があり（根拠を別紙に示す。）、その間に圧縮空気による保護管内への加圧の復旧を行うことで水素濃度が4 vol%を超えることはないことを確認した。

対応としては、圧縮空気による保護管内への加圧の復旧を行うことを優先

するが、ボックス内を經由してセル換気系に移行させることが可能であり、影響は十分に小さい。

## (2) 気相部への放射性物質の移行

加圧システムでは、保護管内に廃液が浸入したとしても、廃液から気相に移行する放射性物質はボックス内に設置された排気弁を開放することにより、セル換気系に移行させることが可能であることから、保護管内に浸入した廃液から気相部への放射性物質の移行については、設計基準事象の候補事象「分離建屋塔槽類廃ガス処理設備 塔槽類廃ガス処理系の排風機の排気停止による閉じ込め機能喪失<sup>※1</sup>」の評価に包含される事象である。また、本事象において、更に、分離建屋換気設備のグローブボックス・セル排気系の高性能粒子フィルタによる放射性物質の除去や主排気筒からの放出といった影響緩和機能を期待せずに評価しても敷地境界での実効線量当量は $5.1 \times 10^{-3} \text{mSv}$  となり、平常時の年間の線量当量を十分下回る。

※1：分離建屋塔槽類廃ガス処理設備（塔槽類廃ガス処理系）の排風機が故障した場合は、予備の排風機に自動的に切り替える設計としている。仮に排風機が2台とも停止し、塔槽類の負圧が低下し廃ガスがセル内に漏えいしたとしても、分離建屋換気設備のグローブボックス・セル排気系の高性能粒子フィルタにより放射性物質が除去された後、主排気筒から放出されるため、平常時の年間の線量当量（ $2.2 \times 10^{-2} \text{mSv}$ ）に至るまでに、運転員対応が可能な時間余裕（1日以上）がある。

## 3. 結論

加圧方式の機能が期待できないような状態を想定して、仮に保護管内に高レベル廃液が浸入した状態に対する安全性評価を行った結果、水素発生及び廃液から気相への放射性物質の移行については、いずれについても影響は十分小さく、当該加圧方式の安全設計は妥当である。

なお、いずれの事象も十分な事故防止対策に加え事象の進展速度が遅いことや、影響緩和策を期待しなくとも、評価の判断基準を超えないことから再処理施設の設計基準事象とする必要がないと考える。

保護管内に廃液が浸入した場合の水素濃度 4 vol%に至る時間について

加圧システムの異常により保護管内に高レベル濃縮廃液が浸入した場合、発生する水素濃度が可燃限界である 4 vol%に達するまでの時間を評価する。

### (1) 評価条件

- ・ 保護管内に浸入する高レベル廃液は、濃縮缶の通常濃縮運転時の運転範囲の変動幅の最大値として液位高警報の設定点とし、これに相当する保護管内の液量として 677 cm<sup>3</sup>とする。
- ・ 保護管内圧力は大気圧とする。
- ・ 保護管内容量（気相部）、G 値及び単位液量あたりの崩壊熱量 Q は添付資料-34 での水素発生量の評価と同様とする。

### (2) 評価方法

- ・ 評価液量からの単位時間当たりの水素発生量<sup>1)</sup>を計算する。  
時間当たりの水素発生量  $F = 8.36 \times 10^{-6} \times V \times Q \times G$   
(V : 液量、Q : 単位液量の崩壊熱量、G : G 値)
- ・ 保護管内の水素濃度は以下の式より計算できるので、水素濃度が 4 vol% となる時間を逆算する。  
水素濃度  $C = (\text{水素発生量 } Q_{H_2}) / (\text{水素発生量 } Q_{H_2} + \text{保護管内気体量 } N_{GP})$   
保護管内気体量  $N_{GP} = \text{保護管内容量 } V_{GP} \times \text{保護管内圧力 } P_{GP} / (\text{大気圧})$   
水素発生量  $Q_{H_2} = F \times \text{時間 } X$

1) 出典：第 6 回設工認申請書「Ⅲ 火災及び爆発の防止に関する説明書」

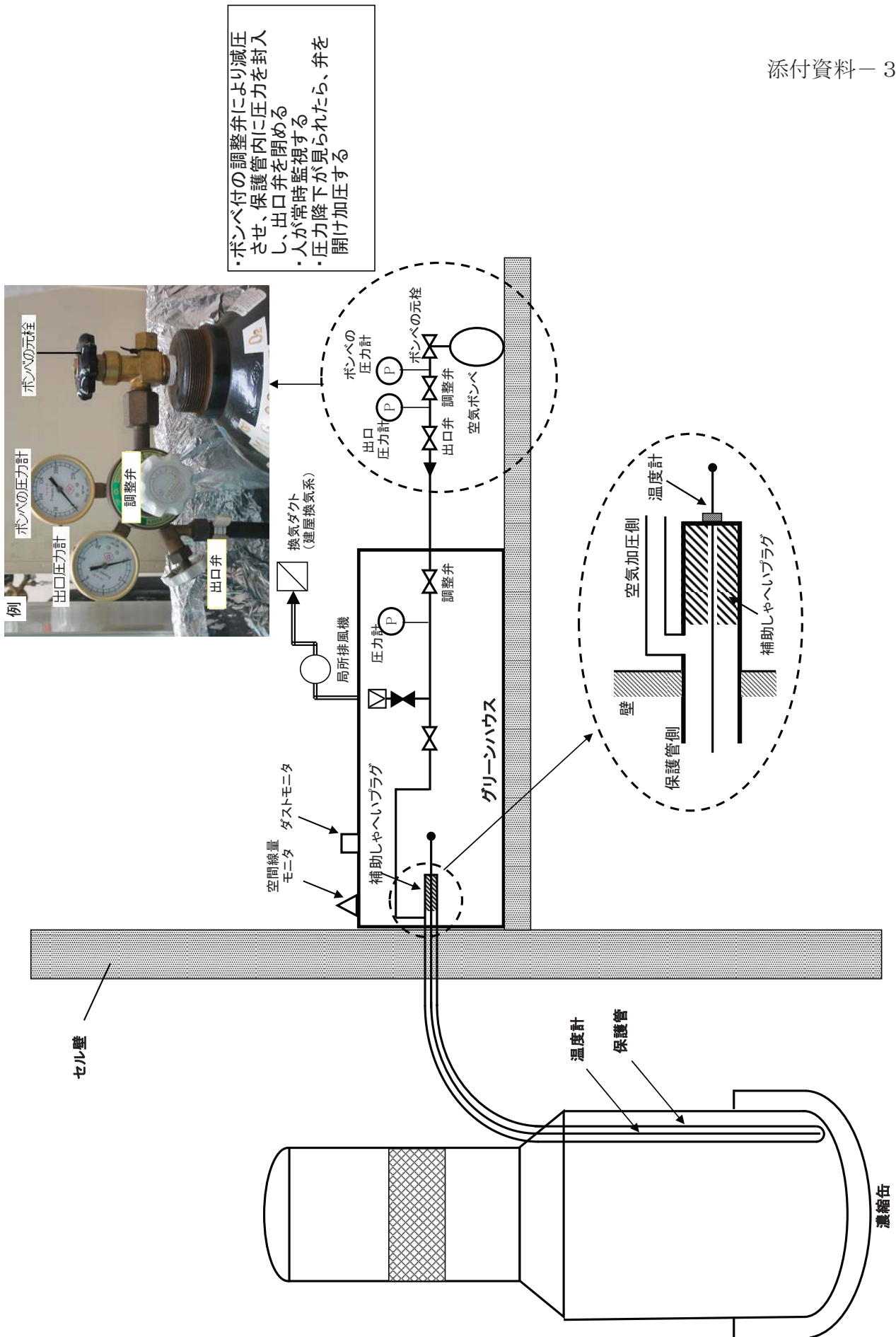
### (3) 評価結果

評価の結果、保護管内に 677 cm<sup>3</sup> の高レベル廃液が浸入した場合に発生する水素による保護管内の水素濃度が可燃限界に到達するまでの時間は 37.5 時間であることを確認した。

このことから、万一、保護管内に高レベル廃液が浸入した場合でも、水素濃度が可燃限界に達するまでに 1 日の時間余裕があり、その間に圧縮空気による保護管内への加圧の復旧を行うことで水素濃度が可燃限界である 4 vol% を超えることはない。

なお、上記評価では  $\beta \gamma$  核種の G 値については、濃縮缶の値を用いているが、保護管内は静置状態にあるため高レベル濃縮廃液貯槽での値を用いることも考えられる。この場合の評価では、4 vol% に達するまでの時間は約 194 時間となることから、上記評価は十分保守的なものであると言える。

緊急廃液処理設備（加圧システム）の概要図



- ・ポンプ付の調整弁により減圧させ、保護管内に圧力を封入し、出口弁を閉める
- ・人が常時監視する
- ・圧力低下が見られたら、弁を開け加圧する

## 濃縮缶温度を下げるための操作

### 1. 濃縮缶温度を下げる操作

濃縮缶における3本の温度計の平均値が5.5℃を超えた場合には温度を下げるための操作として以下を実施する。

#### (1) 減圧度を深くする操作

##### 【実施方法】

濃縮缶内は、図1に示すように、2台のスチームジェットにより濃縮缶気相部から廃ガスを排気することで減圧にすると共に、設定した圧力になるように排気したガスのリサイクル量を調整しながら缶内の圧力調整を実施している。

減圧度を深くする操作は、圧力制御の設定値の変更や排気したガスの流量を下げることにより実施する。

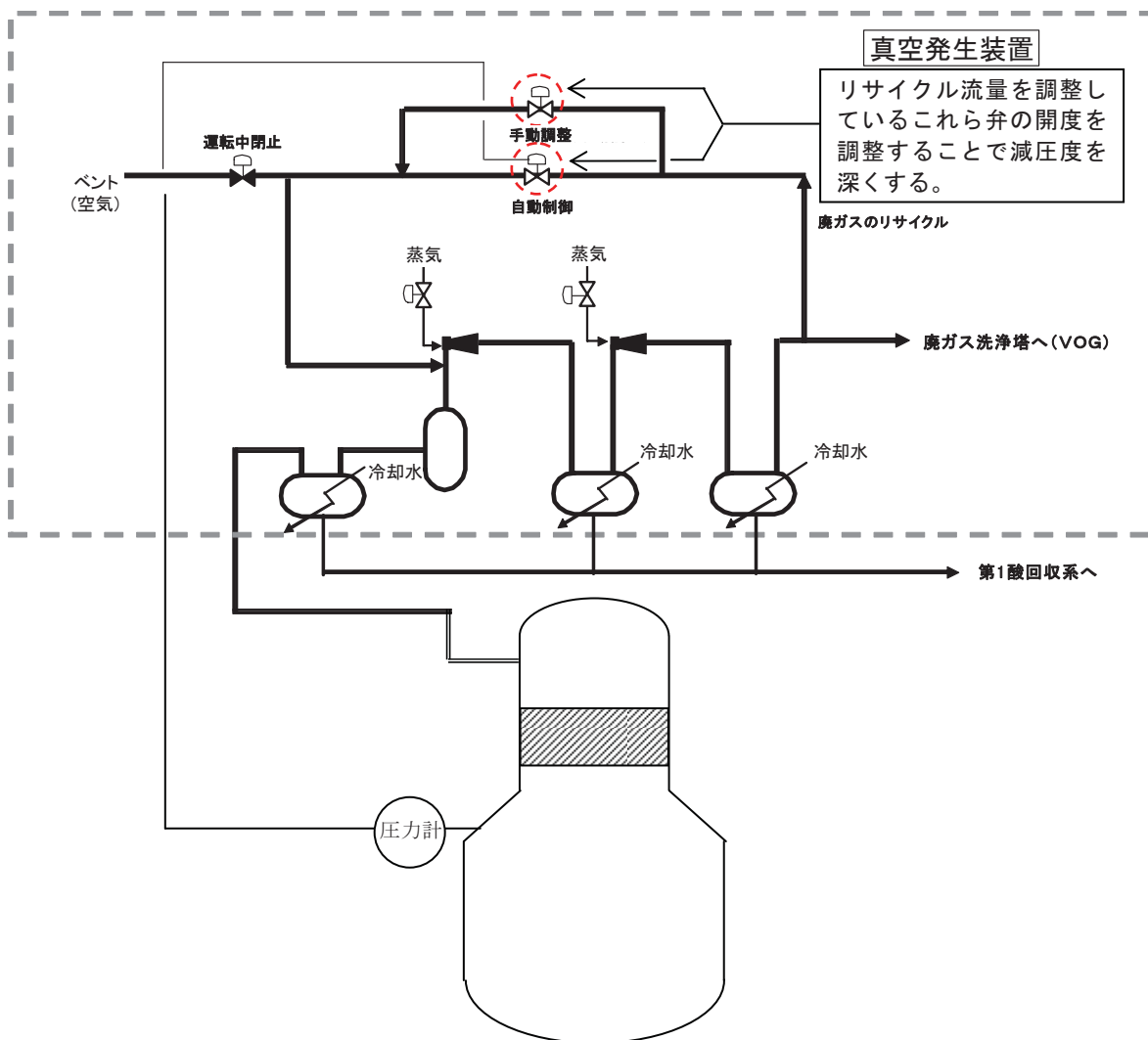


図1 高レベル廃液濃縮缶の減圧装置概要

**【効果】**

濃縮缶の減圧度を深くすることにより濃縮液の沸点を下げ温度を下げる。この際、濃縮缶の処理速度を下げることにより、減圧度をより深くし温度の引き下げ幅を大きくすることができる。

机上評価及びこれまでの運転実績を踏まえると、減圧度を深くする操作による温度引き下げ効果は以下のとおりと想定する。

高レベル廃液濃縮缶 処理量	圧力低下幅	温度低下幅
3 m <sup>3</sup> /h	0.1 kPa	約1℃
2.5 m <sup>3</sup> /h	1.0 kPa	約4℃
2.0 m <sup>3</sup> /h	1.8 kPa	約7℃

**(2) 減酸運転****【実施方法】**

減酸運転は、図2に示すように、第1酸回収工程から発生する酸濃度の低い凝縮液を濃縮缶に供給しながら加熱することにより、濃縮液の酸濃度を下げる運転である。通常、濃縮運転終了後に濃縮液の酸濃度を下げる目的で実施する運転である。

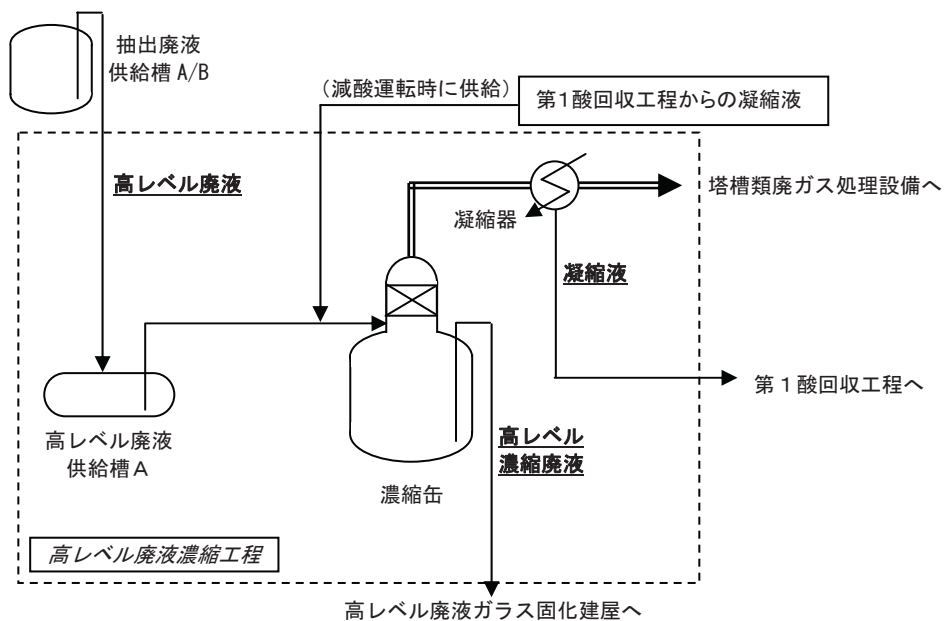


図2 濃縮缶での廃液処理に係る工程概要図

【効果】

減酸運転を行い濃縮液の酸濃度を下げることにより濃縮液の沸点が下がる。また、析出物である硝酸バリウム等は酸濃度の増加に伴い溶解度が減少するため、減酸運転を行って酸濃度が下がることにより再溶解する。これにより析出物が減少することから、濃縮缶下部の温度が低下する。

減酸運転による温度引き下げについてはアクティブ試験時に効果が確認されており、平均温度が55℃以下の条件で実施した減酸運転による温度の下げ幅は約3～約7℃であった(図3 参照)。

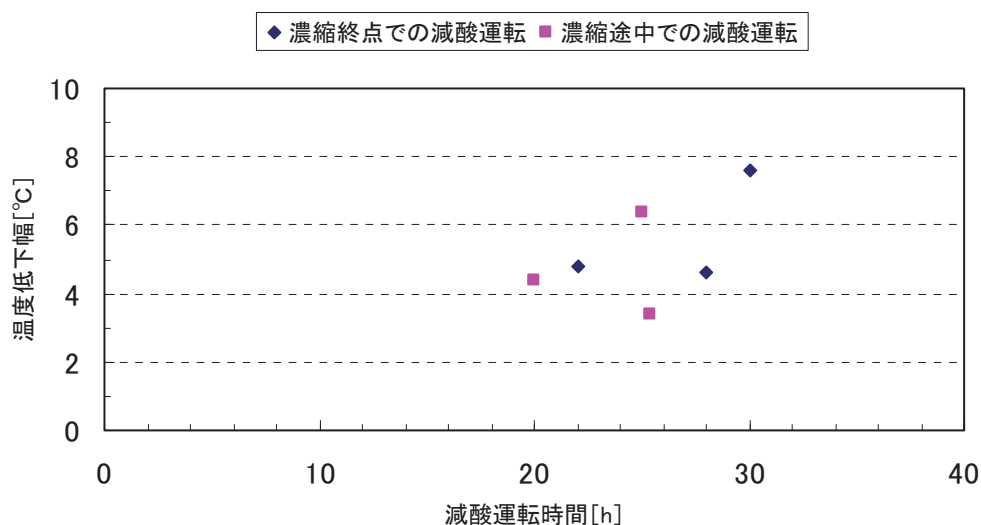


図3 減酸運転による濃縮缶下部の温度引き下げ効果



## 2. 温度上昇時の具体的対応

上記のとおり、温度上昇が発生した際は減圧度を深くする操作や減酸運転を行い温度を下げる。

このうち、減酸運転は第1酸回収工程から発生する酸濃度の低い凝縮液を濃縮缶に供給し加熱を行うことから廃液の処理が行えないが、この期間も上流工程からの廃液は発生する。廃液を貯留する貯槽の空き容量が減酸運転期間中に発生する廃液量よりも少ない場合は廃液を貯留できなくなるため、廃液の発生元である上流工程の停止等、工場全体の運転に影響を与える可能性がある。このため、温度状況に応じて減酸運転を開始できるよう、通常の濃縮運転時から運転調整により貯槽の空き容量を確保するよう運転管理を行う。

上記の空き容量管理を前提として、温度上昇が発生した際は以下の対応をとる。

### (1) 平均温度が55℃を超えた場合の具体的対応

- ① 減圧度を深くする操作を行う。
- ② 上流工程から発生する廃液を貯留する貯槽の空き容量に応じて上流工程の処理量を調整し、廃液発生量を低減する。
- ③ 減酸運転を開始する。
- ④ 温度計指示値が55℃を下回った後、濃縮運転を再開する。

### (2) いずれかの温度計が65℃を超えた場合の具体的対応

- ① 廃液を受け入れる貯槽の空き容量を確認し、洗浄運転終了までの期間中に発生する廃液を貯留できるよう上流工程の処理量調整を行う。
- ② ①と並行して減酸運転を開始する。
- ③ 希釈等の操作を行った後、濃縮廃液を払い出す。
- ④ 払出しを実施した後に洗浄運転を実施する。



## 類似機器での類似事象の発生防止に係る調査

## 1. 調査の考え方

「8.5 推定原因」で述べている通り、今回の事象の直接的な原因は、想定した以上の濃縮缶下部温度の上昇と考えられ、腐食速度が増加するような厳しい腐食環境となったことにより、鍛鋼品であるキャップ部の加工フロー腐食が発生したものと推定しており、これを踏まえ、類似事象の発生防止に係る調査を実施した。

また、当該保護管が損傷した直接的な原因ではないものの、設計時に腐食への影響の知見がなかったネプツニウムに対する腐食への考慮ができなかったことを受け、他の設備においてネプツニウムの影響による類似事象の発生の可能性についての調査を上記の調査と併せて実施した。

さらに、上記のように、腐食環境が厳しくなったことが確認されていることから、全面腐食の観点でもその影響を調査することとした。

以上を踏まえ、調査の対象範囲は、腐食環境とみなされる0.2mol/L以上の硝酸溶液に常時接液するステンレス鋼製の機器とした。

上記の対象機器に対して、想定以上の温度上昇と腐食成分としてのネプツニウムの影響度の観点で設計時の腐食速度への影響を評価し、加工フロー腐食と全面腐食について、それぞれ予防処置を実施すべき対象かを判定する類似事象の発生防止に係る調査フローを作成した。(図1 参照)

なお、ネプツニウム以外の元素については、使用済燃料中の含有量、分配係数及び腐食性を考慮して再検討したが、設計当時の考え方で考慮が不足していることはないことを確認している。

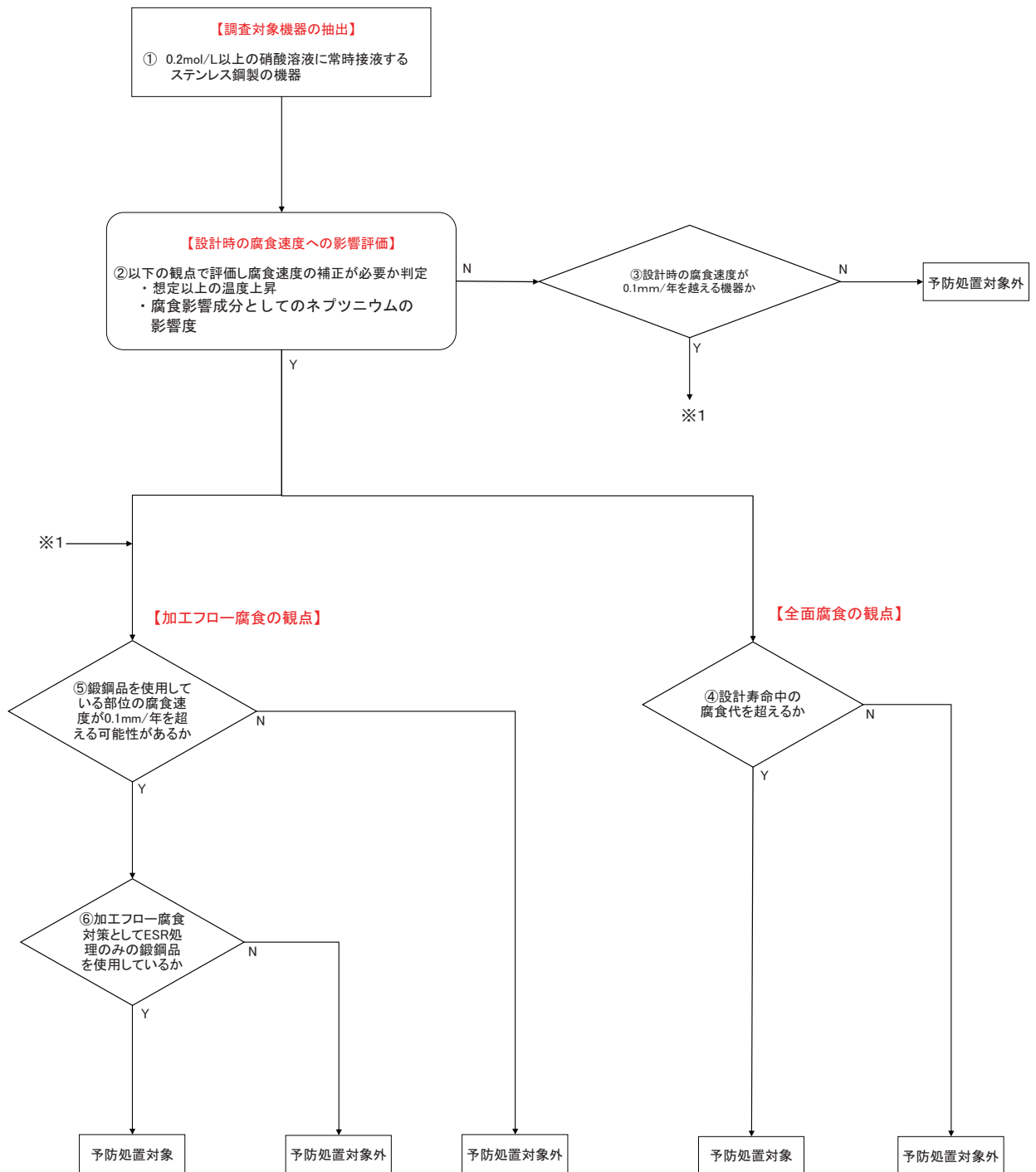


図1 類似事象の発生防止に係る調査フロー

調査フローのそれぞれの判定指標の考え方を以下に示す。

#### 【調査対象機器の抽出】

##### ① 0.2 mol/L以上の硝酸溶液に常時接液するステンレス鋼製の機器

再処理施設では、放射性物質を含む硝酸溶液を取り扱う系統及び機器の閉じ込め部材には、硝酸溶液に対して優れた耐食性を有し、豊富な使用実績のある304系・316系ステンレス鋼を使用している。また、常圧沸騰状態で2 mol/L以上の硝酸溶液を取り扱う場合には再処理施設用ジルコニウムを使用している。

再処理施設用ジルコニウムは純ジルコニウムであり、耐食性が極めて高いため、全面腐食が問題となることはなく、加工フロー腐食の発生メカニズムである不純物・介在物等の偏析を生じることがない。また、0.2 mol/L未満の硝酸溶液では、沸点である100℃近辺まで温度が上昇したとしても、腐食速度が極めて小さいため、全面腐食が問題となることはなく、腐食速度の小ささから加工フロー腐食が発生することもない。

そのため、腐食環境で使用される「0.2 mol/L以上の硝酸溶液に常時接液するステンレス鋼製の機器」を、予防処置を実施すべき対象かを判定するための調査対象とする。

#### 【設計時の腐食速度への影響評価】

##### ② 以下の観点で評価し腐食速度の補正が必要か判定

- ・ 想定以上の温度上昇
- ・ 腐食影響成分としてのネプツニウムの影響度

腐食環境の厳しさの指標として、温度の上昇要因とネプツニウムの影響を評価し、設計時の腐食速度への影響（腐食速度の補正の要否）を判定する。

##### ■ 想定以上の温度上昇

運転実績を確認し、設計時に想定した温度を超えている機器を抽出するとともに、今後の運転において想定温度を超える可能性がある機器を以下の観点で抽出した。

##### 1) 設計時に想定した温度を超えている機器の有無

アクティブ試験以降これまでの運転実績から、その期間の通常の運転における温度の最大値を抽出し、通常運転温度を超えているか評価する。

##### 2) 温度上昇を発生させる要因の有無

温度上昇が発生する要因としては、蒸気等により加熱を行っている機器に

については機器の加熱を行う加熱源の温度上昇、温度上昇を抑制又は防止するために冷却を行っている機器については冷却源の停止、また濃縮缶のような析出物を含めた沈殿物の堆積等が想定される。

- 3) 温度上昇の検知の可否及び検知した後に温度上昇を抑制する措置の可否  
 1) で温度上昇を発生させる要因があるとした機器については、温度上昇を発生させる状態を警報、工程監視等により検知することが可能かを調査する。また、温度上昇を発生させる状態を検知可能な機器については、検知した後に、温度上昇を発生させる要因を排除し、温度上昇を抑制する措置が実施することが可能であることを調査する。

主要な温度上昇要因は以下の通り分類できるものと考える。

温度上昇要因		温度上昇要因の 検知手段	検知時の措置 (措置を確実に実施する方法)
加熱源	加熱蒸気の温度上昇	警報	供給遮断 (インターロック)
	加熱温水の温度上昇	警報	供給遮断 (マニュアルに定める)
	電気ヒータの温度上昇	警報	供給遮断 (マニュアルに定める)
冷却機能	冷却水の循環停止	安全系	警報 安全冷却水系のポンプ等の動的機器は多重化されており、異常時は以下を実施する。(保安規定に定めている) ・運転可能な機器への切り替え ・異常が生じた機器を復旧する措置を開始し、バックアップがある状態を維持
		一般系	工程監視 (温度、流量等) により異常検知 熱源の停止 (マニュアルに定める)
	冷水の循環流量低下	警報	流量の回復措置 (マニュアルに定める)
沈殿物	沈殿物の堆積	かくはん手段の停止による沈殿物の堆積	警報 貯槽内の沈殿物をかくはんする空気は安全圧縮空気から供給されている。安全圧縮空気系の空気圧縮機は多重化されており、異常時は以下を実施する。(保安規定に定めている) ・運転可能な空気圧縮機に切り替え ・異常が生じた空気圧縮機を復旧する措置を開始し、バックアップがある状態を維持 安全圧縮空気を貯槽内に供給するパルセータの異常時は以下のいずれかを実施すると共にパルセータの復旧する措置を実施。(社内規定に定めている) ・かくはん可能な槽への移送 ・手動パルセーション及び底部温度監視の実施
			沈殿物の堆積
	沈殿物の堆積	沈殿物排除手段がないところでの沈殿物の堆積	工程監視により異常検知 温度を下げる措置を開始 (マニュアルに定める)

温度上昇要因に対して、温度上昇が発生する要因を、警報もしくは工程監視により検知することがマニュアル類に規定されていること、また、検知した後温度上昇要因を排除又は温度上昇を抑制する措置がインターロックにより行われる、もしくはマニュアル類に規定されその操作が手順化されていることを確認できれば、通常運転温度を超えて温度が高い期間が続くことはないと評価する。なお、上記の検知と措置に関するマニュアル類は、調査時点で未整備でも、予防処置の一環として当該機器の運転開始までに整備する計画を確認することでマニュアルが既に規定されているものと同等と評価する。

#### ■ 腐食成分としてのネプツニウムの影響度

腐食加速成分（ネプツニウム）の主な流れは、抽出廃液の経路と分離、精製の製品の経路である。添付資料－23の図2に示す流れにある機器については、ネプツニウムの腐食影響が考えられるため、これらの機器を対象とし、今回の濃縮缶でのネプツニウムの影響を考慮し、設計当時に評価した以上にネプツニウムの腐食影響がある機器を抽出する。

上記の想定以上の温度上昇とネプツニウムの影響度を評価し、腐食速度の補正が必要な機器を判定する。

#### ③ 設計時の腐食速度0.1mm/年を超える機器か

設計時の腐食速度への影響がなく、腐食速度補正の必要がない場合でも、設計時の腐食速度が、加工フロー腐食発生可能性の指標である0.1mm/年を超える機器（添付資料－26参照）については、加工フロー腐食の観点で、鍛鋼品を使用している部位の詳細調査を実施する。

#### 【加工フロー腐食の観点での評価】

#### ④ 鍛鋼品を使用している部位の腐食速度が0.1mm/年を超える可能性があるか

腐食速度の補正が必要ありと判定した機器に対して、加工フロー腐食の観点で、鍛鋼品を使用している部位の腐食速度が加工フロー腐食発生可能性の指標である0.1mm/年を超えているかを評価する。

また、「鍛鋼品を使用している部位」は、当該濃縮缶下部の温度上昇のように、温度が高い箇所が機器の一部分のようなケースでは、腐食速度も部位により異なるため、「部位」単位とした。

なお、鍛鋼品以外の鋼材（板、管）を使用している部位については、加工フロー腐食の進展の起点となる金属が引き延ばされる方向に直交な面が接液することがないため、対象外とした。

⑤ 加工フロー腐食対策としてE S R処理のみの鍛鋼品か

④により腐食速度が0.1 mm/年を超えている部位として抽出された鍛鋼品について、鍛流線制御鍛鋼品を採用しているか、または鍛流線に直交な面へバタリング（肉盛溶接）を実施している場合は、加工フロー腐食の発生防止に有効であるため、予防処置対象外とした。

【全面腐食の観点での評価】

⑥ 設計寿命中に腐食代を超えるか

全面腐食の観点で、補正した腐食速度で、設計寿命中に腐食代を超えることがあるか評価する。

2. 予防処置等に係る対応方法

調査結果により予防処置が必要と判定された機器等に対する予防処置に係る考え方等を以下に示す。

- (1) 加工フロー腐食が生じる可能性があるとして判定された機器等については、その部位の温度を管理する措置を検討することとする。
- (2) 全面腐食の観点で腐食代以上の全面腐食が生じる可能性があるとして判定された機器等については、減肉管理を検討することとする。

3. 調査状況

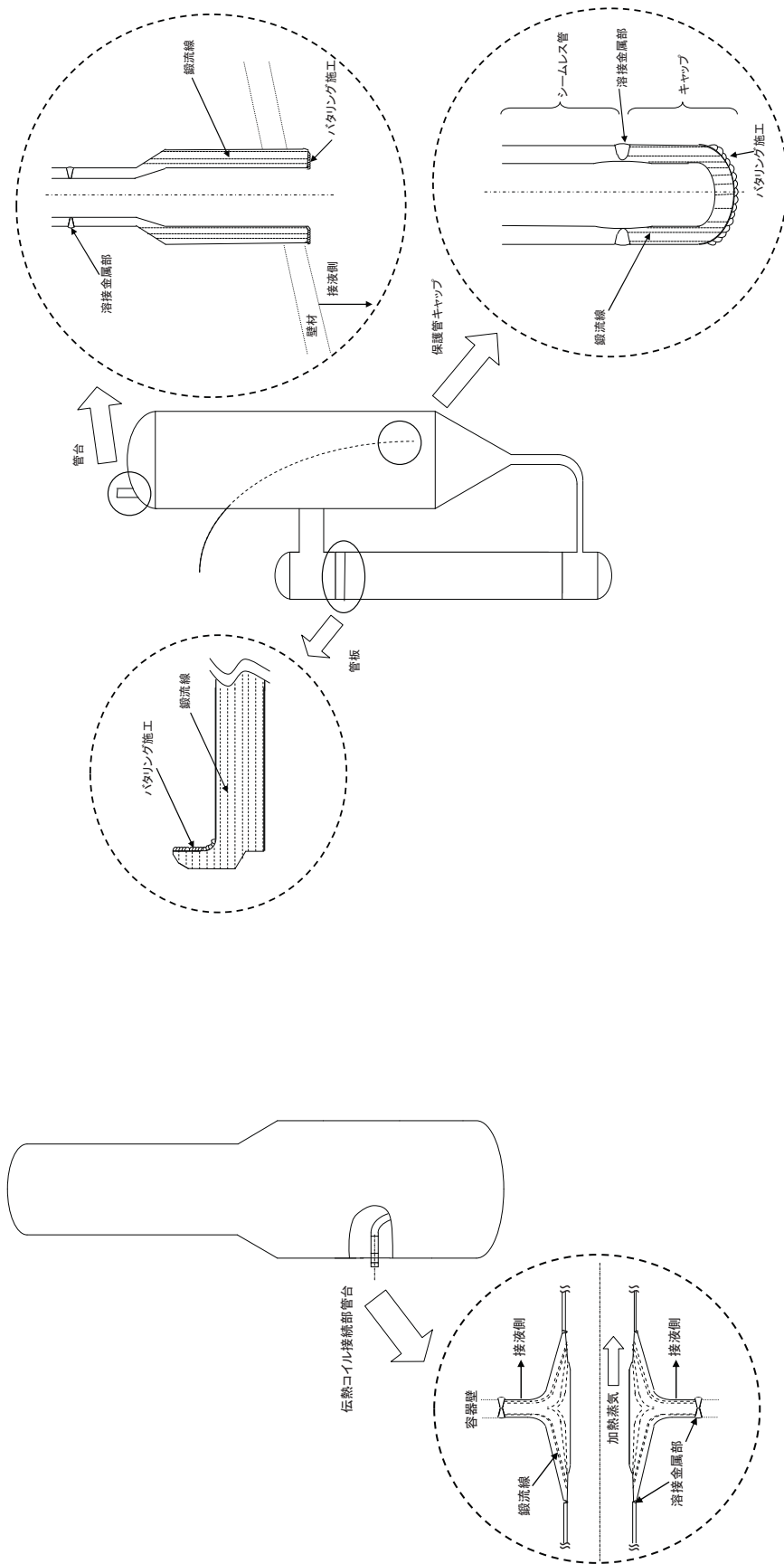
「1. 調査の考え方」に示した①～⑥の評価については実施中であるが、現時点での調査状況を以下に示す。

- ・加工フロー腐食の観点での評価において、鍛鋼品を使用している長期予備の伝熱コイル接続管台、ウラン濃縮缶（分離施設）の保護管キャップ、管台、管板については、ネプツニウムの影響により腐食速度が0.1 mm/年を超える可能性があるため、E S R処理以外の加工フロー腐食対策が施されているかを確認した。これらについては、鍛流線制御鍛鋼品の使用や鍛流線に直交な面へのバタリング（肉盛溶接）施工を確認した（図2 参照）。
- ・全面腐食の観点から、当該濃縮缶下部の温度上昇の影響により腐食速度の大きかった当該濃縮缶加熱ジャケット部の底面について、アクティブ試験期間中での腐食量の評価結果は0.6 mm程度であり、腐食代の5 mmを超えていないことを確認した。今後は当該濃縮缶に対して、「9.2 腐食環境緩和のための対策」に示したとおりの対策を行うため、大きな腐食は生じないものと見込まれる。



- ・設計時に考慮した以上のネプツニウムの影響があり、設計寿命中に、腐食代以上の全面腐食が生じる可能性がある機器として、長期予備、ウラン濃縮缶（分離施設）、第2酸回収蒸発缶が見込まれる。これらについては、減肉管理を検討することで対応を図ることとする。

なお、当該濃縮缶と同じ装置である長期予備については、「9. 2 腐食環境緩和のための対策」に示したとおり腐食環境緩和の対策を実施するが、運転する際には、念のための対応として、長期予備はセル内に人が入って作業が実施できることを考慮し、二重管方式等の他の方策についてモックアップにより検証を実施した上で、対応を検討することとする。



鍛流線制御鍛鋼品

鍛流線に直交な面へのバタリング

図2 ESR処理以外の加工フロー腐食対策