

## 保護管に高レベル廃液が浸入したことに対する評価

### 1. はじめに

損傷状況調査として、カメラでの保護管内の観察により、保護管内部に黒色の液が確認されたこと、また、保護管内に挿入されていた温度計表面の付着物の分析の結果、濃縮缶内の液に含まれる核種が確認された。このことから、保護管内に確認された液は、濃縮缶内から保護管内に浸入したものと考えられる。

その後、保護管内の液の拭き取り、洗浄を実施した後、損傷部位及び損傷の大きさを確認するため圧力降下確認を実施したが、圧力降下は見られなかった。このことから、保護管の損傷の大きさは非常に小さいことが推定される。

損傷の大きさが小さい場合、濃縮缶内液が保護管内に浸入する想定として、毛細管現象と保護管損傷部位にかかる圧力上昇が考えられる。以下に保護管内への液浸入の想定を示す。

#### (保護管内への液浸入の想定)

- ① 保護管に微細な損傷が生じることで、毛細管現象により損傷部位内の液が上昇する。
- ② 損傷部位を超えて保護管内に液が浸入すると、損傷部位が水没し、毛細管現象により生じる圧力はなくなる。そのため、濃縮缶側から保護管先端にかかる圧力（濃縮缶内気相部の圧力＋濃縮缶内液による圧力）が保護管内（先端）圧力（保護管内気相部圧力）よりも大きい場合は、損傷の大きさに応じた流量で保護管内に液が浸入する。

上記の想定に基づき、液浸入に対する評価を行うため、毛細管現象に係る確認、損傷の大きさと液浸入の流量の関係等について、ビーカスケール及び実規模スケールにおいて確認を行った。

## 2. 試験概要及び評価の流れ

### ① 【毛細管現象確認試験】 毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認

ガラス管を用いて毛細管現象による液体の流入を確認する。また、ガラス管内に圧力を加えることで、ガラス管内の液を押し込むことが可能であることを確認する。試験はガラス管を縦向きまたは横向きに設置した装置（損傷が縦向きと横向きの場合を想定）を用いて行う。

### ② 【ビーカ試験】 損傷の大きさと加圧する圧力の違いによる液の流出流量の確認

ガラス管を用いて、損傷の大きさ（ガラス管の孔径）と加圧する圧力の違いによる液の流出流量を確認する（保護管への液浸入の流量模擬）。試験はガラス管を縦向きまたは横向きに設置（損傷が縦向きと横向きの場合を想定）した装置を用いて行う。

### ③ 【実規模試験】 孔径と圧力の違いによる保護管への液の流入流量の確認

実機を模擬した装置により、孔径と圧力の違いによる保護管内への液浸入の流量を確認する。

### ④ ビーカ試験結果が実規模試験に適応できることの確認

②及び③の結果より、ビーカ試験と実規模試験の結果を比較したところ、ビーカ試験での加圧圧力及びガラス管長さの補正を行った後の流量と実規模試験での流量はほぼ同等と見なせることを確認したことから、ビーカ試験の結果が実規模試験にも適用できることを確認する。

### ⑤ 濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの関係の確認

### ⑥ 【ビーカ試験】 圧力降下量の確認

ガラス管を用いて空気の排出量を測定し、その排出量から実機での圧力降下量を評価する。試験はガラス管を縦向きまたは横向きにセットした装置を用いて行う。

3. 【毛細管現象確認試験】毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認

毛細管現象とは、細い管状物体の内側にある液体が管の中を上昇する現象である。毛細管現象の影響を確認するため、微小孔を持つガラス管内（孔径 100, 150, 200, 250  $\mu\text{m}$ ）に流入した水の液面が上昇する高さを確認する。そして、ガラス管内に毛細管現象により生じる圧力と同等の圧力を加えることによって、ガラス管内の液面がガラス管外の水面と同じ高さになることを確認し、ガラス管内に上昇した液が毛細管現象によるものであることを確認する。さらに、毛細管現象により生じる圧力を超える圧力をガラス管内に加えることによって、ガラス管内の液面がさらに下がることも併せて確認する。（図1 参照）

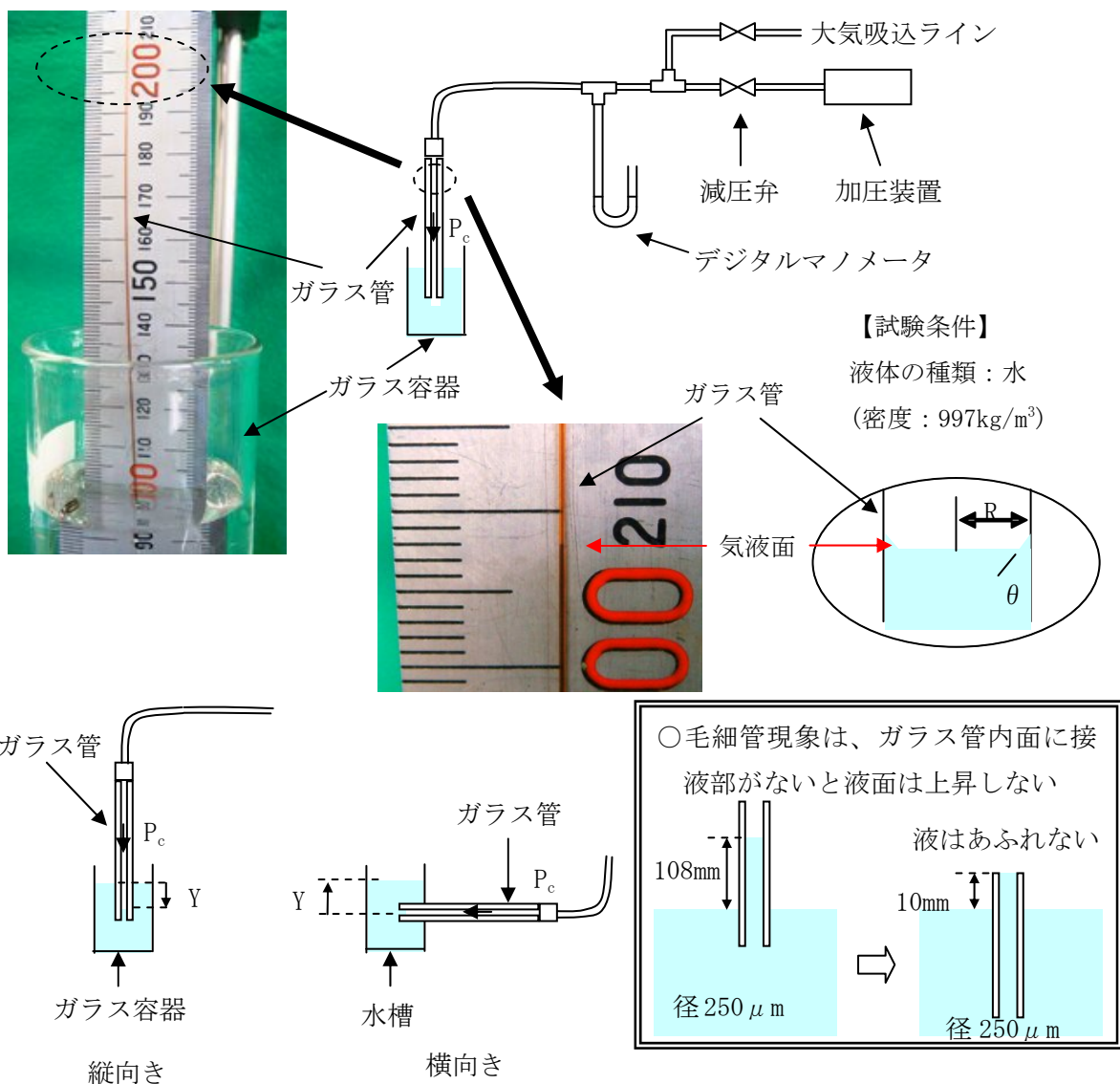


図1 試験装置概要

### 3.1 試験方法

〈ガラス管縦向き〉

- ① ガラス管を大気圧下で垂直に水面（ガラス容器）に浸し、ガラス管内に流入した水の高さを測定する。
- ② ガラス管内の液面がガラス容器の水面と同じ高さ（ $Y=0\text{mm}$ ）になる圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力となる。
- ③ ガラス管内の液面がガラス容器の水面から押し下がる高さ（ $Y=50, 100\text{mm}$ ）になる圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力+ガラス容器内の液による圧力となる。

〈ガラス管横向き〉

- ① 大気圧下でガラス管が水平にセットされた水槽にガラス管と同じ高さ（ $Y=0\text{mm}$ ）まで水を入れ、ガラス管内に水が流入したことを確認する。
- ② ガラス管内の水がガラス管の先端まで移動する圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力となる。
- ③ 水槽に  $Y=50\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$  まで水を入れ、ガラス管内に水が流入したことを確認する。
- ④ ガラス管内の水がガラス管の先端まで移動する圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力+ガラス容器内の液による圧力となる。

### 3.2 理論式<sup>1)</sup>

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{D} + \rho \cdot g \cdot Y$$

$\sigma$  : 表面張力[N/m]、 $\theta$  : 接触角、 $D$  : 孔の半径[m]

$\rho$  : 液体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]

$Y$  : 水面から圧力により液面を押し込む高さ[m]

横置きの場合は毛細管入口から水面までの長さ[m]

=毛細管現象により生じる圧力+ガラス容器内の液による圧力

1) 出典：「化学工学便覧 化学工学編（改訂五版）」

### 3.3 試験結果

理論値と試験結果<縦向き>の照合

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	ガラス管 内に流入 した液高 さ [mm]	Y=0mm になる圧力 [kPa] (毛細管現象により生じ る圧力)		Y=50mm になる圧力 [kPa]		Y=100mm になる圧 力 [kPa]	
		理論値	試験 結果	理論値	試験 結果	理論値	試験 結果
100	299	2.9	3.1	3.4	3.5	3.9	3.9
150	175	1.9	1.9	2.4	2.4	2.9	2.9
200	147	1.4	1.4	1.9	1.9	2.4	2.4
250	108	1.2	1.1	1.7	1.6	2.2	2.0

理論値と試験結果<横向き>の照合

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	Y=0mm になる圧力 [kPa] (毛細管現象により生じる圧力)		Y =50mm になる圧力 [kPa]		Y =100mm になる圧力 [kPa]	
	理論値	試験結果	理論値	試験結果	理論値	試験結果
100	2.9	2.9	3.4	3.4	3.9	3.9
150	1.9	1.9	2.4	2.5	2.9	2.9
200	1.4	1.4	1.9	1.9	2.4	2.4
250	1.2	1.1	1.7	1.6	2.2	2.0

試験の結果、以下を確認した。

- ・ 微小孔を持つガラス管を液に浸したところ、孔径が小さいほど、ガラス管内に流入した水の液面が高いことを確認した。
- ・ 毛細管現象により生じる圧力と同等の圧力をガラス管内に加えることにより、以下を確認した。
  - ① ガラス管が縦向きの場合、ガラス管内の液がガラス容器の水面と同じ高さになった。
  - ② ガラス管が横向きの場合、水槽にガラス管と同じ高さ (Y=0mm) まで液を入れた状態で、ガラス管内の液面がガラス管の先端まで移動した。
- ・ ガラス管の向きに関係なく、毛細管現象により生じる圧力は理論値と試験結果でほぼ一致した。

⇒ ガラス管内の液の上昇は毛細管現象によるものと確認した。

- ・ 毛細管現象による圧力を超える圧力をガラス管内に加えることにより、以下を確認した。
    - ① ガラス管が縦向きの場合、ガラス管内の液はガラス容器の水面より押し下げることができた。
    - ② ガラス管が横向きの場合、水槽の水面高さに応じてガラス管内に流入した液がガラス管の先端まで移動した。
  - ・ ガラス管の向きに関係なく、毛細管現象により生じる圧力とガラス容器内の液による圧力の合算値は理論値と試験結果でほぼ一致した。
- ⇒ ガラス管内に流入した液は、圧力を加えることにより押し出すことができることを本試験により確認した。

毛細管現象は、表面張力によって液が縮まろうとする方向に力が加わっていることで生じる現象であり、管の内面に接液部がなくなると上昇が止まる。よって、毛細管現象のみによる保護管内への液の浸入はなく、別の上昇圧力（気相圧や容器内の液による圧力）が加わることによって微細な損傷部位から保護管内に液が浸入することになる。

#### 4. 【ビーカ試験】 損傷の大きさと加圧する圧力の違いによる液の流出流量の確認

ガラス管を用いて、ガラス管の孔径と加圧圧力の違いによる液の流出流量を確認する。その結果から、孔径と流出流量の関係と加圧圧力と流出流量の関係を明確にする。さらに別紙に記載の評価式から得られた流量と本試験による流出流量の差を孔径との関係から明らかにする。

##### 4.1 ガラス管縦向き

ガラス管を縦向きにセットし、孔径と圧力の条件を変化させた試験をビーカスケールにて行い、流出流量を確認する（図2 参照）。

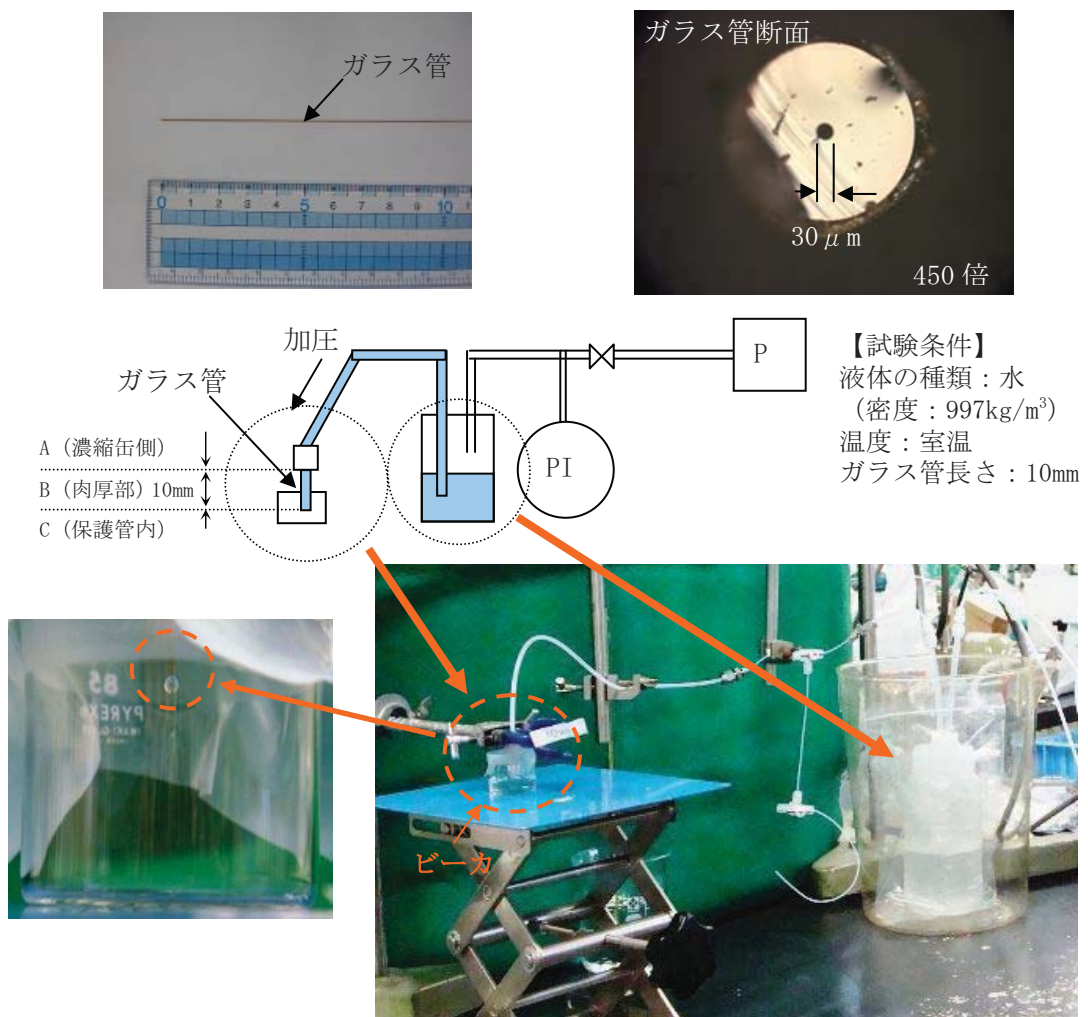


図2 ビーカ試験装置概要図（縦向き）

#### 4.1.1 試験方法

- ① 加圧して、ガラス管から水がでることを確認した後、試験圧力（55、または 101 kPa）に調整する。
- ② 予め風袋重量を測定したビーカを設置し、有意量の水が流出するまで加圧し続け（時間を計測）、ビーカ総重量を測定する。
- ③ ビーカの総重量と風袋重量の差から、溶液重量を算出し、密度を用いて流出容量に換算し、流出流量を算出する。

#### 4.1.2 試験結果

ガラス管を縦向きにセットし、加圧圧力を 55、101kPa に変化させた場合の各孔径に対する流出流量を以下のとおり確認した。

ビーカ試験（縦向き）の結果

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	加圧圧力 [kPa]	測定時間 [s]	流出容量 [ $\text{cm}^3$ ]	流出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
10	55	3600	0.0039	$1.1 \times 10^{-6}$
30		1800	0.2127	$1.2 \times 10^{-4}$
100		180	2.295	$1.3 \times 10^{-2}$
150		60	3.279	$5.5 \times 10^{-2}$
200		60	7.100	$1.2 \times 10^{-1}$
250		60	11.83	$2.0 \times 10^{-1}$
5	101	46800	0	流出なし
10		3600	0.0128	$3.6 \times 10^{-6}$
30		1200	0.3190	$2.7 \times 10^{-4}$

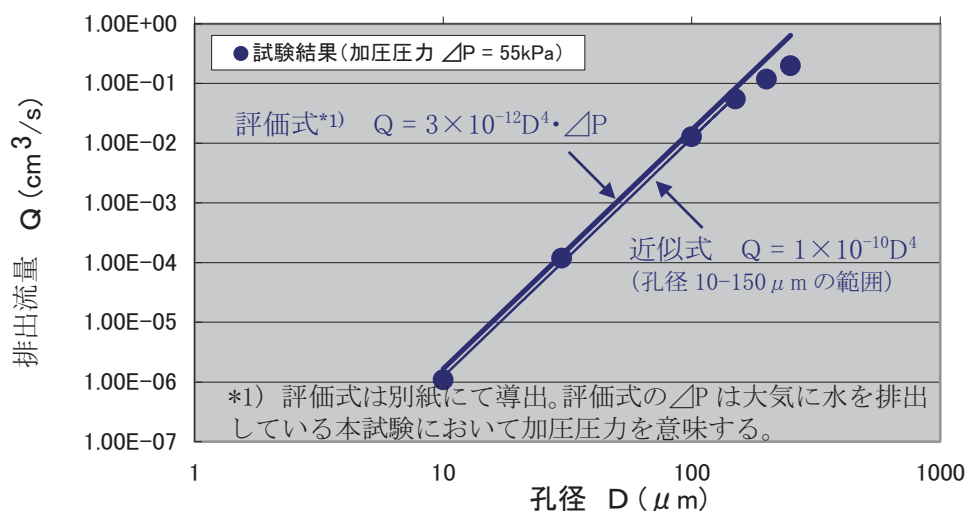


図3 加圧圧力 55kPa における流出流量と孔径の関係



図3より、試験結果である流出流量は、孔径 10-150  $\mu\text{m}$  の範囲でガラス管の孔径の4乗に比例（近似式  $Q = 1 \times 10^{-10} D^{4.0}$ ）した。また、別紙に記載の評価式からの流出流量と試験結果を比較した結果、孔径が 10-150  $\mu\text{m}$  の範囲ではほぼ一致していること、そして、孔径 200, 250  $\mu\text{m}$  であると、評価式からの流出流量は試験結果に比べ大きくなり、孔径が大きくなるに従い、それらの差が大きくなる傾向を示した。

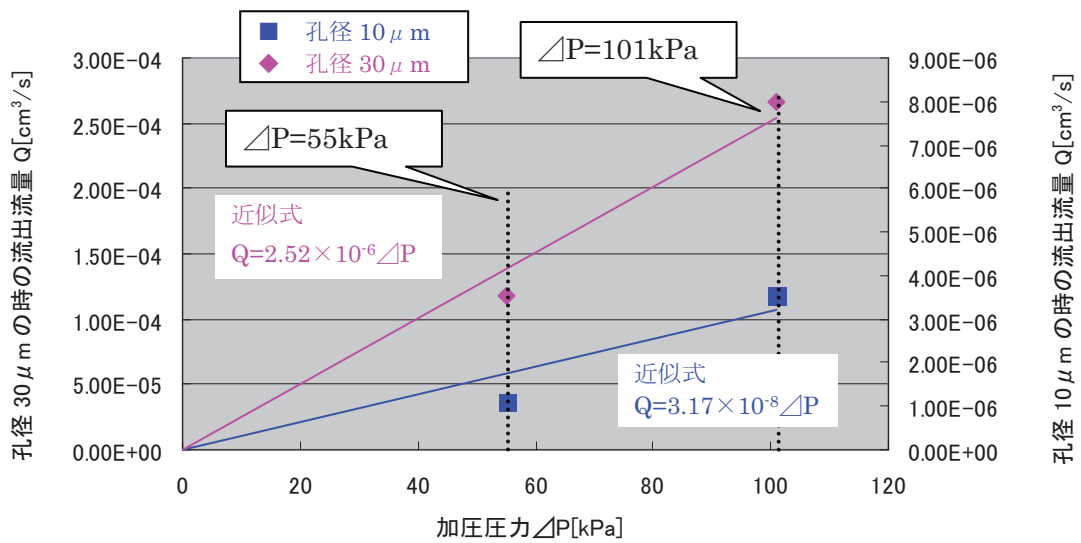


図4 孔径 10  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$  における流出流量と加圧圧力の関係

図4より、孔径 10  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$  とともに流出流量が加圧圧力にほぼ比例した。

## 4.2 ガラス管横向き

ガラス管を横向きにセットし、孔径と圧力の条件を変化させた試験をビーカスケールにて行い、流出流量を確認する（図5 参照）。

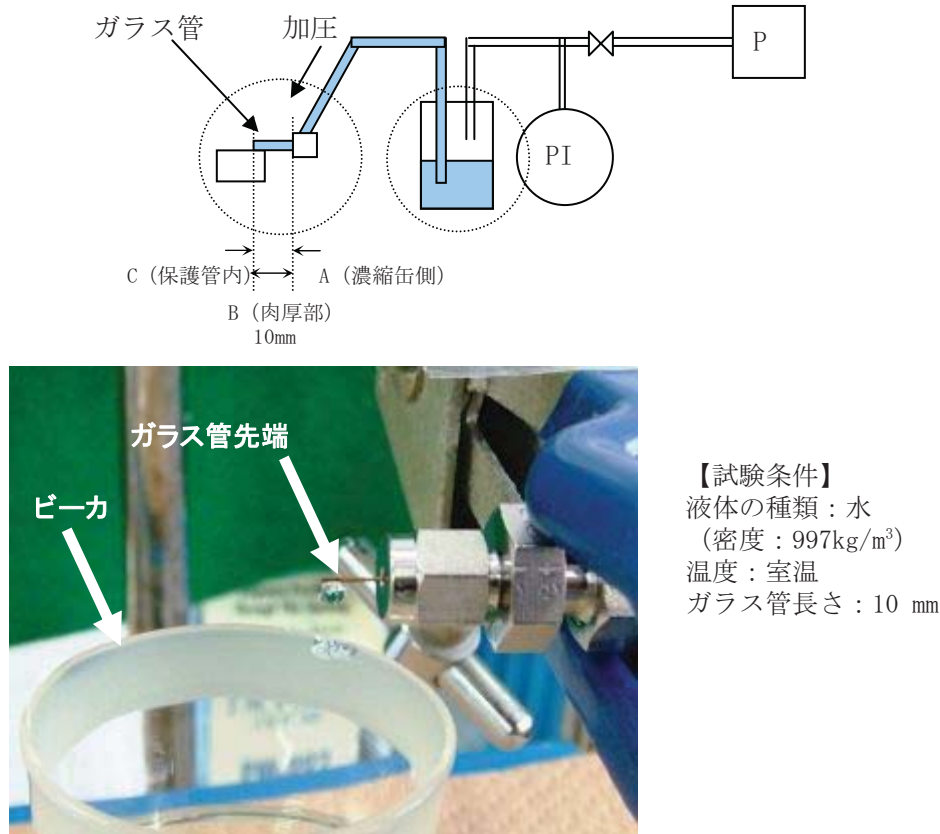


図5 ビーカ試験装置概要図（横向き）

### 4.2.1 試験方法

- ① 加圧して、ガラス管から水がでることを確認した後、試験圧力 (55 kPa) に調整する。
- ② 予め風袋重量を測定したビーカを設置し、有意量の水が流出するまで加圧し続け（時間を計測）、ビーカ総重量を測定する。
- ③ ビーカの総重量と風袋重量の差から、溶液重量を算出し、密度を用いて流出容量に換算し、流出流量を算出する。

#### 4.2.2 試験結果

ガラス管を横向きにセットし、加圧圧力を 55kPa とした場合の各孔径に対する流出流量を以下のとおり確認した。

ビーカ試験（横向き）の結果

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	加圧圧力 [kPa]	測定時間 [s]	流出容量 [ $\text{cm}^3$ ]	流出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
10	55	3600	0.0027	$7.5 \times 10^{-7}$
30		1800	0.2120	$1.2 \times 10^{-4}$
100		180	2.322	$1.3 \times 10^{-2}$
150		60	3.222	$5.4 \times 10^{-2}$
200		60	7.154	$1.2 \times 10^{-1}$
250		60	11.77	$2.0 \times 10^{-1}$

#### 4.3 ビーカ試験におけるガラス管の縦向きと横向きの比較

ビーカ試験における、ガラス管の縦向きと横向きの結果を比較したところ、いずれの孔径の場合においても、両者の流出流量はほぼ一致した。

ビーカ試験（縦向きと横向き）の比較

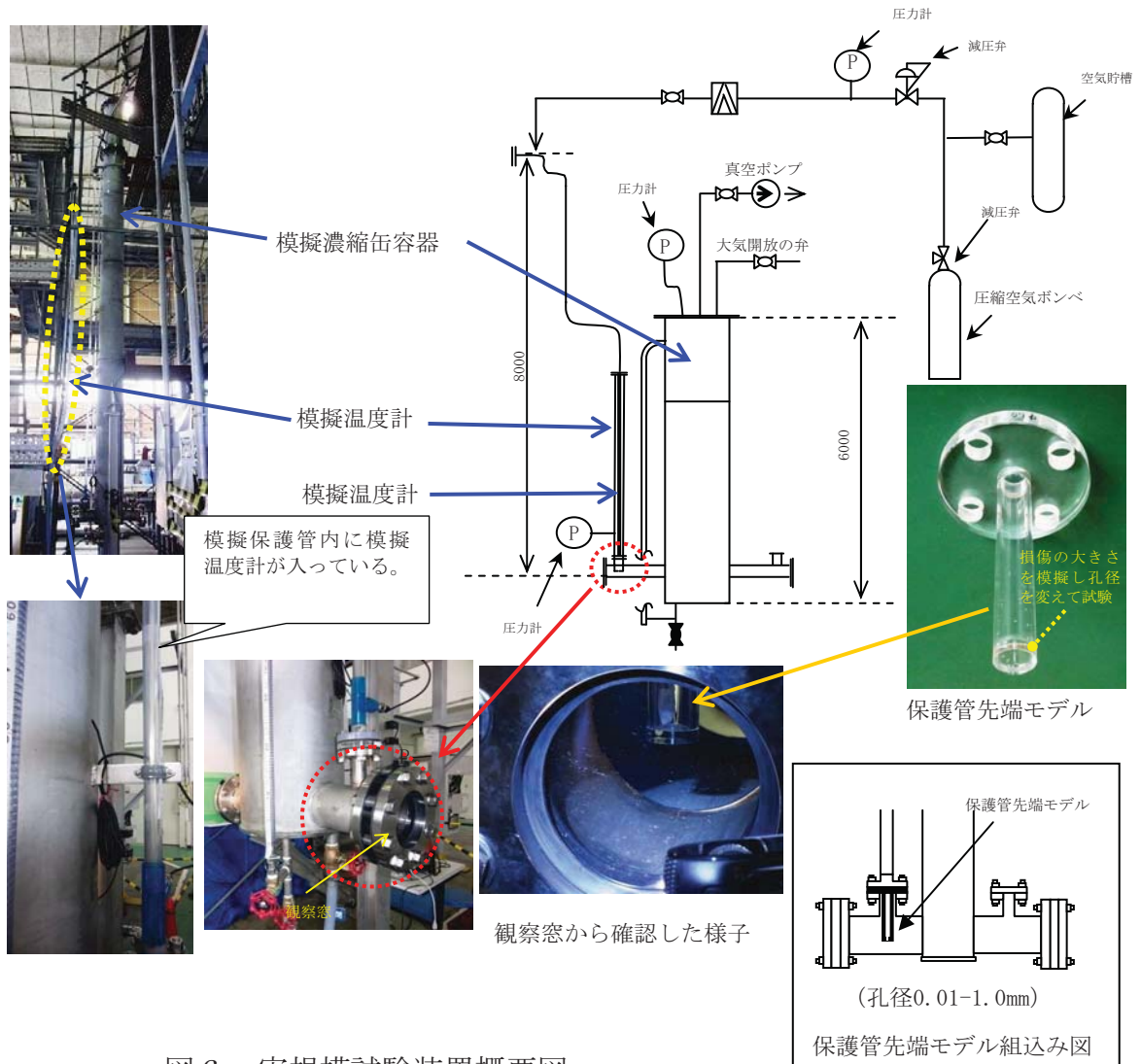
孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	加圧圧力 [kPa]	測定時間 [s]	縦向き		横向き	
			流出容量 [ $\text{cm}^3$ ]	流出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	流出容量 [ $\text{cm}^3$ ]	流出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
10	55	3600	0.0039	$1.1 \times 10^{-6}$	0.0027	$7.5 \times 10^{-7}$
30		1800	0.2127	$1.2 \times 10^{-4}$	0.2120	$1.2 \times 10^{-4}$
100		180	2.295	$1.3 \times 10^{-2}$	2.322	$1.3 \times 10^{-2}$
150		60	3.279	$5.5 \times 10^{-2}$	3.222	$5.4 \times 10^{-2}$
200		60	7.100	$1.2 \times 10^{-1}$	7.154	$1.2 \times 10^{-1}$
250		60	11.83	$2.0 \times 10^{-1}$	11.77	$2.0 \times 10^{-1}$

#### 4.4 ビーカ試験のまとめ

- ・ 図3より、試験結果である流出流量はガラス管の孔径の4乗にほぼ比例した。
- ・ 図3より、別紙に記載の評価式からの流出流量と試験結果を比較した結果は以下のとおり。
  - ① 孔径が10～150 $\mu\text{m}$ の範囲でほぼ一致した。
  - ② 孔径200, 250 $\mu\text{m}$ であると、評価式からの流出流量は試験結果に比べ大きくなり、孔径が大きくなるに従い、それらの差が大きくなる傾向を示した。
- ・ 図4より、孔径10 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$ ともに流出流量が加圧圧力にほぼ比例した。
- ・ ガラス管の縦向きと横向きを比較した結果、いずれの孔径の場合においても、両者の流出流量はほぼ一致した。

5. 【実規模試験】 孔径と圧力の違いによる保護管への液の流入流量の確認

実機を模擬した装置に保護管先端モデル（孔が縦向き）をセットし、そのモデルの先端にかかる圧力の違いと孔径の違いによる液の流入流量を確認する（図6 参照）。



5.1 試験方法

- ① 保護管先端モデル（以下、「先端モデル」という。）を装置に取付け、模擬濃縮缶容器に水を注入する。
- ② 先端モデルの先端に所定の圧力を加える。

【35kPa の場合】

先端モデルの先端に 35kPa がかかるまで模擬濃縮缶容器内に水を注入する。

【95kPa の場合】

先端モデル内を真空ポンプで減圧し、さらに模擬濃縮缶容器内に水を注入することで、先端モデルの先端に 95kPa を加える。

- ③ 有意量の水が先端モデルに流入するまで試験を継続し流入容量と経過時間を記録する。
- ④ 流入容量を確認する。

【孔径 10 μm の場合】

試験装置にセットする前に測定した先端モデルの重量と試験終了後の先端モデルの重量の差から算出する。なお、試験終了後に先端モデル内に流入した液がこぼれないように取り外して重量の測定を行った。

【孔径 30 μm の場合】

先端モデルに記載の目盛から流入高さを求め、流入高さで先端部の断面積<sup>※1</sup>をかけ合わせて、流入容量を算出する。

- ⑤ 試験後、模擬濃縮缶容器、先端モデル側ともに大気開放弁を開操作することにより大気開放する。

※1 先端モデルに外径 6 mm の温度計を挿入しているため、先端部の断面積は以下の数値となる。

$$\begin{aligned} \text{先端部の断面積} &= \text{先端モデルの断面積} - \text{温度計の断面積} \\ &= (12 \text{ mm}/2)^2 \pi - (6 \text{ mm}/2)^2 \pi = 84.8 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

5.2 試験結果

孔径の違いと先端モデルの先端にかかる圧力の違いにより、先端モデル内に流入した液の流入流量を以下のとおり確認した。

実規模試験の結果

孔径 [μm]	先端モデルの先端にかかる圧力 [kPa]	測定時間 [s]	流入容量 [cm <sup>3</sup> ]	流入流量 [cm <sup>3</sup> /s]
10	35	157200	0.2	1.3 × 10 <sup>-6</sup>
30		14827	1.9	1.3 × 10 <sup>-4</sup>
10	95	64800	0.2	3.3 × 10 <sup>-6</sup>
30		8300	2.8	3.3 × 10 <sup>-4</sup>

## 6. ビーカ試験結果が実規模試験に適応できることの確認

ビーカ試験のガラス管縦向きと実規模試験の結果を比較したところ、ビーカ試験での加圧圧力及びガラス管長さ補正を行った後の流量と実規模試験での流量はほぼ同等とみなせることを確認した。

ビーカ試験のガラス管縦向きと実規模試験の比較

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	ビーカ試験の縦向き				実規模試験	
	圧力差 <sup>※2</sup> [kPa]	流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	圧力差補正 後流量 <sup>※3</sup> [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	ガラス管長さ 補正後流量 <sup>※4</sup> [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	圧力差 <sup>※2</sup> [kPa]	流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
10	55	$1.1 \times 10^{-6}$	$6.9 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-6}$	35	$1.3 \times 10^{-6}$
30		$1.2 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$		$1.3 \times 10^{-4}$
10	101	$3.6 \times 10^{-6}$	$3.4 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-6}$	95	$3.3 \times 10^{-6}$
30		$2.7 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$		$3.3 \times 10^{-4}$

- ※2 圧力差とは、別紙に記載の微小すき間の式の $\Delta P$ に相当する圧力であり、ビーカ試験では加圧圧力となる。また、実規模試験では先端モデルの先端にかかる圧力である。
- ※3 別紙に記載の微小すき間の式から、流量は圧力差に比例するとし、55 kPaの結果から 35 kPa の流量を計算し、101 kPa の結果から 95 kPa の流量を計算した。
- ※4 別紙に記載の微小すき間の式から、流量はガラス管長さに反比例するとし、ビーカ試験（長さ 10 mm）の値を実規模試験（長さ 6 mm）に合わせて補正した。

7. 濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの関係の確認

別紙の⑤式において、濃縮缶の保護管への液浸入の流量 $Q$  [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]は保護管先端の圧力差 $\Delta P^{*5}$  [kPa]及び孔径 $D$  [ $\mu\text{m}$ ]は以下の関係式で表すことができる。

$$Q = 2 \times 10^{-12} \times D^4 \times \Delta P$$

※5 【保護管先端の圧力差 $\Delta P$ 】

= 【濃縮缶の気相部圧】 + 【濃縮缶の液による圧力】 - 【保護管内圧力】

この式から、保護管先端の圧力差を蒸発・濃縮運転中の代表圧である 37 kPa とした場合において、液量約 7  $\text{cm}^3$  が保護管内へ浸入するのに要する時間と損傷の大きさの関係は図 7 のようになる。

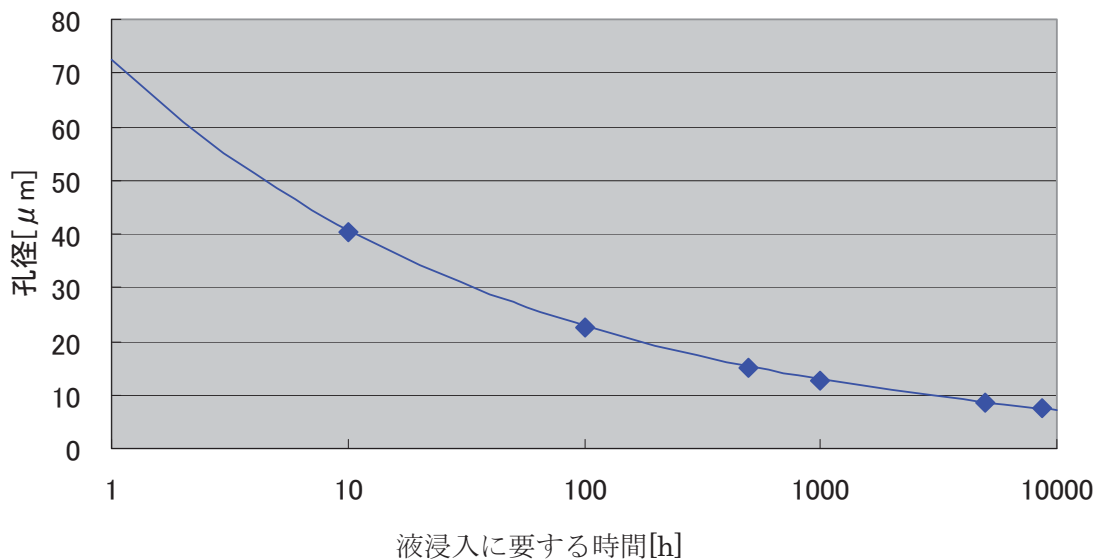


図 7 液浸入に要する時間と損傷の大きさとの関係 (溶液：高レベル廃液)

圧力差 37kPa で約 7 $\text{cm}^3$  の溶液が保護管内へ浸入するのに要する時間と推定孔径は以下のとおりになることを確認した。

液浸入に要する時間と推定孔径

浸入時間 [時間]	推定孔径 [ $\mu\text{m}$ ]
10	40
100	23
500	15
1000	13
5000	9
8760 (=1年)	7



## 8. 【ビーカ試験】 圧力降下量の確認

### 8.1 ガラス管縦向き

ガラス管を縦向きにセットし、55kPa で加圧した状態で空気がガラス管から排出する試験をビーカスケールにて行い、排出流量から圧力降下量を確認した（図8 参照）。

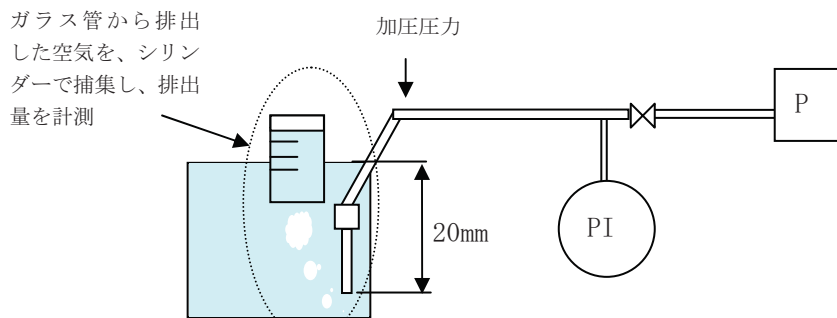


図8 ビーカスケールの圧力降下試験概要図

ビーカスケールの圧力降下試験

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	加圧 圧力 [kPa]	測定 時間 [s]	空気 排出量 [ $\text{cm}^3$ ]	排出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	100kPa での 排出流量 <sup>※6</sup> [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	24 時間後 の圧力の 変化率 [%] <sup>※7</sup>	検知 可否
10	55	57600	5.6	$9.7 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-4}$	0.2	不可
30	55	180	1.7	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-2}$	22.4	可

※6 加圧圧力 55kPa を 100kPa で補正。

※7 保護管とガイドパイプの容量  $3.4 \times 10^3 \text{cm}^3$  として計算。

上記結果によると孔径  $10 \mu\text{m}$  であると、空気は排出されるもののその変化率は 0.2%程度であり、有意な圧力降下は確認できない。一方、孔径  $30 \mu\text{m}$  であると有意な圧力変化が確認できる。

なお、本試験中においては、液がガラス管内へ流入していないことも併せて確認した。

### 8.2 ガラス管横向き

ガラス管を横向きにセットし、55kPa で加圧した状態で空気がガラス管から排出する試験をビーカスケールにて行い、排出流量から圧力降下量を確認した（図9 参照）。

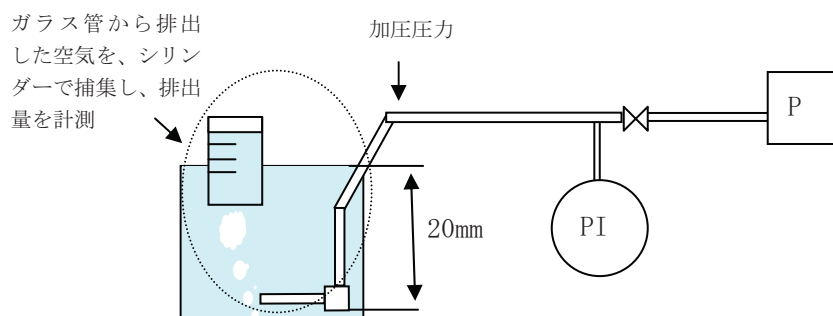


図9 ビーカスケールの圧力降下試験概要図

ビーカスケールの圧力降下試験

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	加圧 圧力 [kPa]	測定 時間 [s]	空気 排出量 [ $\text{cm}^3$ ]	排出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	100kPaでの 排出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	24時間後 の圧力の 変化率 [%]	検知 可否
10	55	57600	6.1	$1.1 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	0.3	不可
30	55	180	1.6	$9.0 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-2}$	20.4	可

上記結果によると孔径  $10\mu\text{m}$  であると、空気は排出されるもののその変化率は0.3%程度であり、有意な圧力降下は確認できない。一方、孔径  $30\mu\text{m}$  であると有意な圧力変化が確認できる。

なお、本試験中においては、液がガラス管内へ流入していないことも併せて確認した。

8.3 ビーカ試験での圧力降下試験（縦向きと横向き）の比較

下表のビーカ試験での圧力降下試験の結果を比較すると、ガラス管を縦向きと横向きにセットした場合での孔径と排出流量の関係はほぼ同等とみなせる結果となったことを確認した。

ビーカ試験の圧力降下試験（縦向きと横向き）の比較

孔径 [ $\mu\text{m}$ ]	縦向き		横向き	
	排出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	24時間後の 圧力の変化率 [%]	排出流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	24時間後の 圧力の変化率 [%]
10	$9.7 \times 10^{-5}$	0.2	$1.1 \times 10^{-4}$	0.3
30	$1.0 \times 10^{-2}$	22.4	$9.0 \times 10^{-3}$	20.4

## 9. 総合評価

保護管に高レベル廃液が浸入したことに對しては、以下のとおり評価できる。

### ① 毛細管現象

毛細管現象により損傷部位内の液が上昇する。また、損傷部位を超えて保護管内に液が浸入すると、毛細管が水没し、毛細管現象による液上昇がなくなる。

### ② 損傷方向

ガラス管を縦向きと横向きにセットした場合での流量の差はほぼ同等とみなせることから、損傷が保護管の下部及び側面にあった場合でも、液の流入流量に大きな違いは見られない。

なお、水中でガラス管を空気により加圧することで、液がガラス管内へ流入しないことを確認した。

### ③ 損傷部位における液浸入の流量

4. の結果より、流路が狭いほど、保護管内への液浸入の流量は小さくなる（孔径の4乗に比例して、液浸入の流量が低下する）。また、濃縮缶側からの圧力と保護管側からの圧力の差が小さいほど、保護管内への液浸入の流量は小さくなり、その圧力差にほぼ比例して液浸入の流量が低下した。

### ④ 圧力降下と損傷の大きさの関係

孔径が30 $\mu\text{m}$ の場合には、100kPa加圧下における24時間後の圧力低下率が20.4~22.4%となり、有意な圧力降下が生じた。一方、孔径が10 $\mu\text{m}$ の場合には、100kPa加圧下における24時間後の圧力低下率が0.2~0.3%となり、圧力降下は検知できなかった。

よって、実機の圧力降下試験では孔径が30 $\mu\text{m}$ の場合は圧力が有意に降下するが、孔径が10 $\mu\text{m}$ では有意な圧力降下が生じないと想定できる。

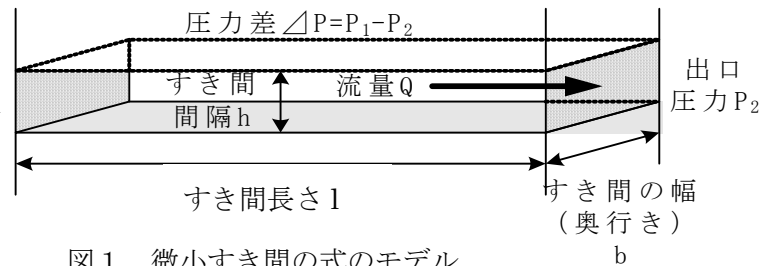
## 微小すき間における流量について

## 1. 微小すき間における流量

機械工学便覧 (A5 流体力学) より、微小すき間における流量 $Q$ は以下の式で表される。(図1 参照)

微小すき間の式：

$$Q = \frac{bh^3}{12\mu l} C_b \Delta P \quad \dots \textcircled{1}$$



ここで

$b$  : すき間の幅 (奥行き)

$h$  : すき間の間隔

$\mu$  : 粘性係数

$l$  : すき間の長さ

$\Delta P$  : 圧力差

$C_b$  : 流量補正係数

微小すき間の式①は、すき間の形状が異なる場合でも適用可能か、ビーカ試験 (添付資料-17 参照) により確認を行った。

## (1) 流量と孔径の関係性の確認

ビーカ試験にて、圧力差を 55 kPa として孔径を変化 (10~150  $\mu\text{m}$ ) させた時の流量を測定した。結果を図2に示す。

流量は孔径の4乗に比例する ( $Q = 1 \times 10^{-10} D^{4.00}$ ) ことを確認した。

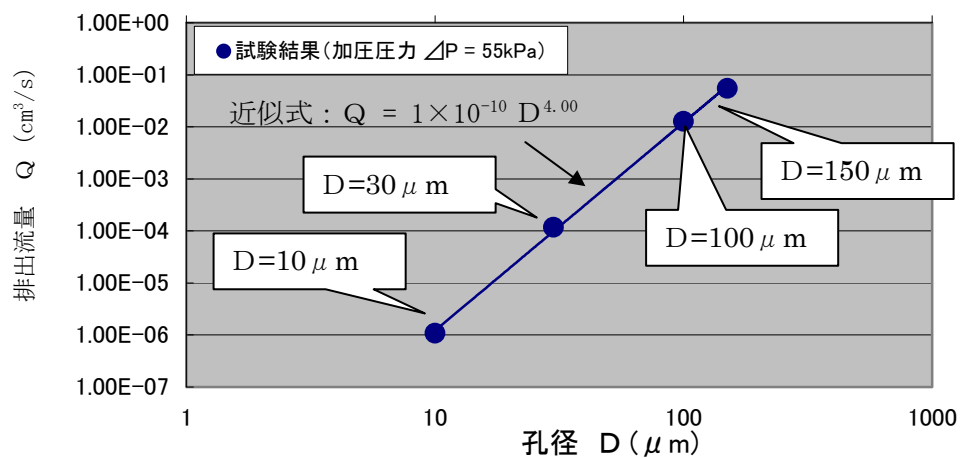


図2 圧力差 55kPa における流量と孔径の関係

(2) 流量が圧力差に比例することの確認

ビーカ試験にて、孔径を  $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$  として、圧力差を変化 ( $\Delta P=55\text{kPa}$  及び  $\Delta P=101\text{kPa}$ ) させた時の流量を測定した。結果を図3に示す。孔径  $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$  ともに流量が圧力差にほぼ比例することを確認した。

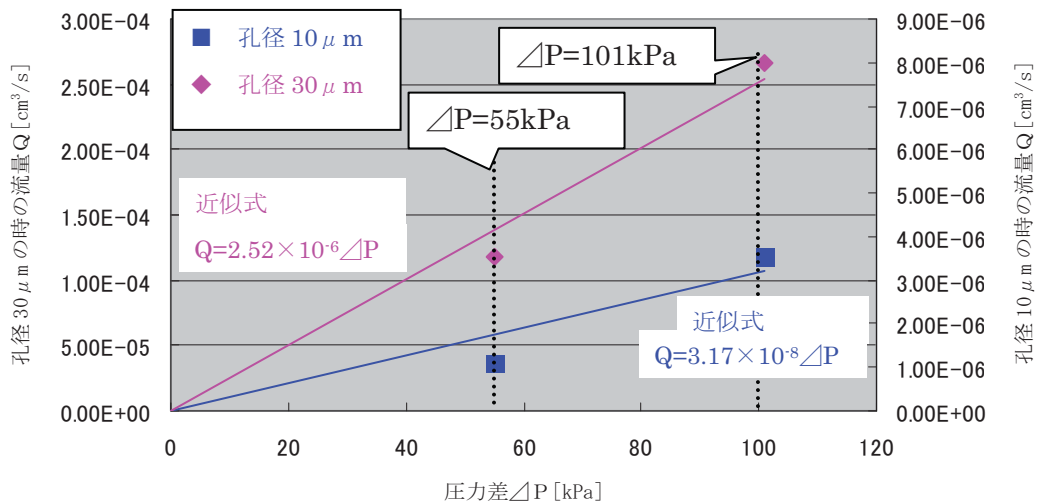


図3 孔径  $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$  における流量と圧力差の関係

(3) 微小すき間の式の適用性

(1) より流量  $Q$  が孔径  $D$  の4乗に比例すること及び(2)より流量  $Q$  が圧力差  $\Delta P$  にほぼ比例することから、微小すき間の式が試験で模擬した円形の損傷部位の場合にも適用できることを確認した。Aは比例定数。

$$Q = A \times D^4 \times \Delta P \quad \dots \textcircled{2}$$

2. 高レベル濃縮廃液の保護管内への液浸入流量の評価

(1) 水におけるAの値の評価

添付資料-17 「4. 【ビーカ試験】 損傷の大きさと加圧する圧力の違いによる液の流出流量の確認」における実験結果から、孔径  $10\mu\text{m}$  及び  $30\mu\text{m}$ 、圧力差  $55\text{kPa}$  及び  $101\text{kPa}$  において、Aの値を算出した。

算出した結果、Aは  $2 \times 10^{-12} \sim 4 \times 10^{-12}$  の範囲であり、Aは  $3 \times 10^{-12}$  とした。

(2) 高レベル濃縮廃液の保護管への液浸入流量に対するAの適用

②式の比例定数Aは、①式より粘性係数 $\mu$ 及びすき間の長さ $l$ に反比例する。

$$A \propto 1/(\mu \times l) \quad \dots \textcircled{3}$$

(1)にて求めたAを保護管への液浸入流量に適用するにあたり、以下の補正を行った。

① 粘性係数 $\mu$ の補正

Aを求めるにあたり、ビーカ試験では水を使用しているが、保護管内に浸入した液は高レベル濃縮廃液であることから粘性係数が異なる。③式において、Aは粘性係数 $\mu$ に反比例することから、Aの補正を実施した。なお、液を硝酸とした場合についても補正を行った。

② 保護管肉厚（ガラス管長さ） $l$ の補正

Aを求めるにあたり、ビーカ試験ではガラス管長さが10 mmに対し、保護管の肉厚は6 mmである。③式において、Aはすき間の長さ $l$ に反比例することから、Aの補正を実施した。

硝酸及び高レベル濃縮廃液で補正した比例定数A

	すき間の長さ $l$ [mm]	液の種類	粘性係数 $\mu$ [Pa · s]	補正係数 ※1	比例定数 A
ビーカ試験	10	水	0.0010	1	$3 \times 10^{-12}$
高レベル濃縮廃液の保護管内への浸入	6	硝酸	0.0013	1.28	$4 \times 10^{-12}$
		高レベル濃縮廃液	0.0025	0.67	$2 \times 10^{-12}$

※1 補正係数 = すき間の長さ補正 × 粘性係数補正

以上より、高レベル濃縮廃液の保護管への液浸入流量 $Q$  [cm<sup>3</sup>/s]と孔径 $D$  [ $\mu$ m]及び圧力差 $\Delta P$  [kPa]の関係は以下の通りとなった。

$$\text{硝酸} : Q = 4 \times 10^{-12} \times D^4 \times \Delta P \quad \dots \textcircled{4}$$

$$\text{高レベル濃縮廃液} : Q = 2 \times 10^{-12} \times D^4 \times \Delta P \quad \dots \textcircled{5}$$

廃液浸漬による温度計表面の変化の評価

温度計現品の外観観察及び表面観察の評価並びに保護管内への液の浸入時期の評価を行うにあたり、温度計表面が高レベル廃液と接することによりどのように変化するかを確認するため、以下の条件で廃液浸漬試験を実施した。

- 試験片：SUS316（温度計シースの材質）
  - 試験液：保護管内への漏えいが確認された時点で、濃縮缶内に保有していた液の性状を模擬  
（酸濃度：4.3 mol/L、濃縮度：高レベル濃縮廃液の約 1/10 の FP 濃度）
  - 試験温度：室温及び 55℃（濃縮缶加熱運転中の温度を模擬）の 2 ケース
  - 試験時間：100 時間
- 観察結果を図 1、図 2 に示す。

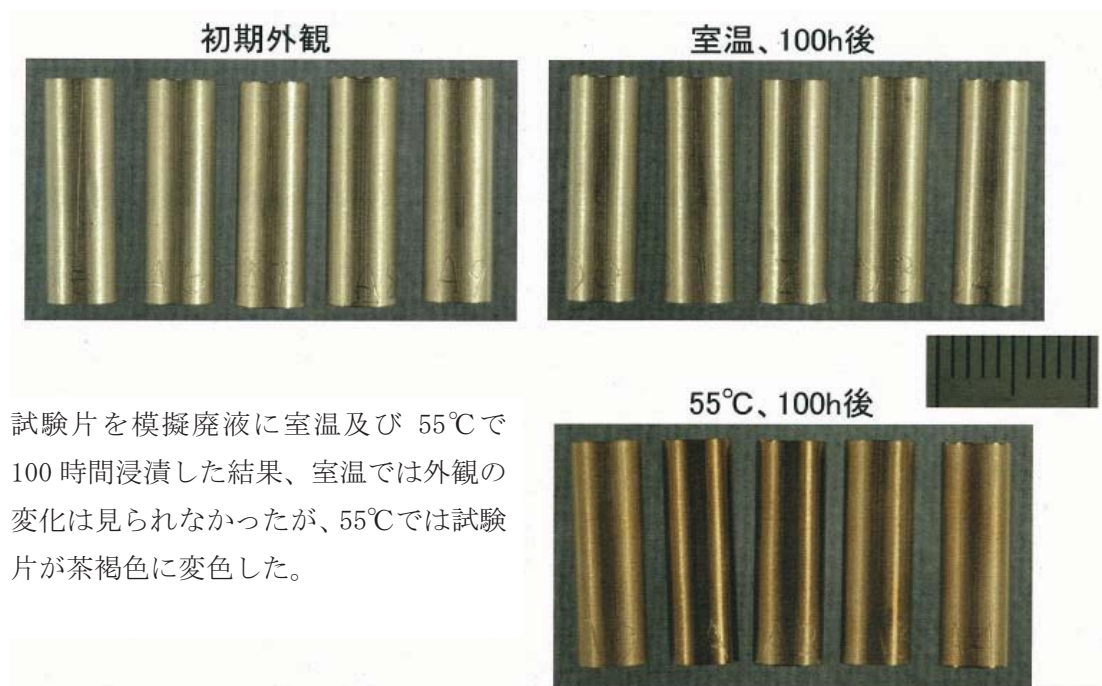
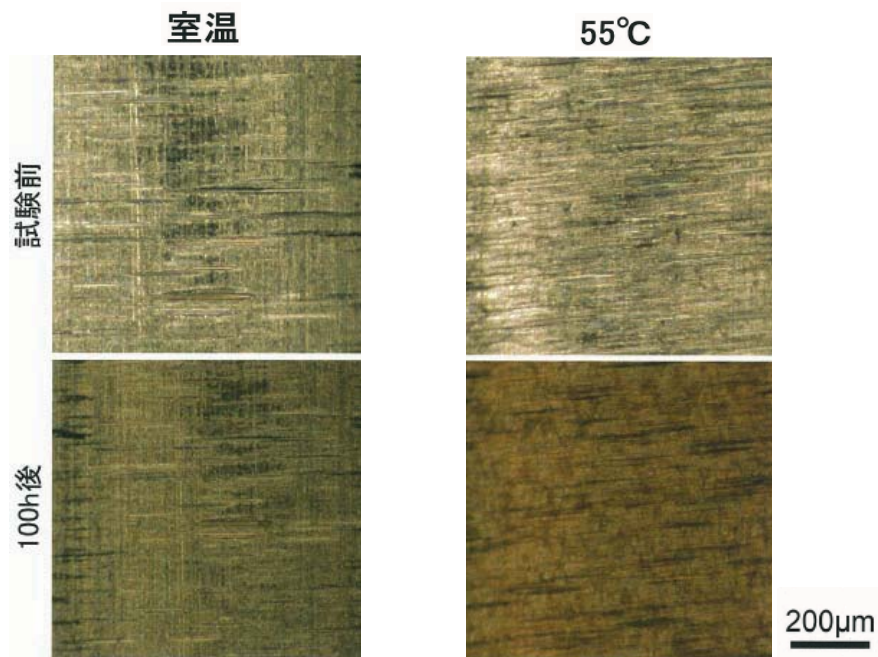


図 1 廃液浸漬試験の結果（外観観察）



模擬廃液中に室温で 100 時間浸漬した結果、試験片に変色や腐食痕は認められなかった。

(写真における色の違いは、撮影時におけるコントラストの違いによるもの)

模擬廃液中に 55°C で 100 時間浸漬した結果、試験片が茶褐色に変色し、試験片上の一部で腐食痕が認められた。

図2 廃液浸漬試験結果 (マイクロスコープ観察)

図1、図2に見られるように、浸漬から 100 時間後において、室温のケースでは外観及び表面に変化は見られなかったが、55°C のケースでは試験片が茶褐色に変色し、表面観察において一部で腐食痕が認められる結果が得られた。



仏国ラ・アーク再処理施設、英国セラフイールド再処理施設における温度計における類似事象

工場	発生年	施設	設備	発生事象の概要	原因
仏国 ラ・アーク 再処理施設	1993	UP3	中間ウラン濃縮缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部の加工フロー腐食
	1997				
	1997	UP3	不溶解残渣廃液貯槽	保護管への漏えい発生	推定：機械的疲労
	2000	UP2-400	中レベル放射性廃液蒸発缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部の加工フロー腐食
	2005	UP2-800	酸回収蒸発缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部の加工フロー腐食
	2006	UP2-400	濃縮廃液貯槽	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部の加工フロー腐食
	2005	—	溶解槽	温度計交換時における作業者の汚染	推定：保護管溶接部の局部腐食

事象	要因1	要因2	要因3	要因4	調査内容	検討・評価	
濃縮缶内の保護管内への漏し・べり液の漏し	設計	保護管の腐食防止のための材料選定	A-1-1 シームレス管の材料選定	表面調査 文献調査	第2回設計申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼であるR-SUS304Lを採用していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む溶液中において、ステンレス鋼の腐食は乾食腐食による膜食を伴う全面腐食として進行し、局所的に進行するとはならない。ステンレス鋼の耐食性を高めるには溶接時に酸化防止剤を添加する必要がある。高濃度の食塩水が十分に少ない材料においては、SCCの発生や局部腐食の要因となる「溶接時の熱影響による酸化化が起こりにくいこと」を文献により確認した。	×	
			A-1-2 溶接金属の材料選定	表面調査 文献調査	第2回設計申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」及び核燃料施設の技術基準に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼を指定していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む溶液中において、ステンレス鋼の腐食は乾食腐食による膜食を伴う全面腐食として進行し、局所的に進行するとはならないことを文献により確認した。	×	
			A-1-3 キャップの材料選定	表面調査 文献調査	第2回設計申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼であるR-SUS304Lを採用していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む溶液中において、ステンレス鋼の腐食は乾食腐食による膜食を伴う全面腐食として進行し、局所的に進行するとはならない。ステンレス鋼の耐食性を高めるには溶接時に酸化防止剤を添加する必要がある。高濃度の食塩水が十分に少ない材料においては、SCCの発生や局部腐食の要因となる「溶接時の熱影響による酸化化が起こりにくいこと」を文献により確認した。	×	
		A-2 保護管の機械的損傷(割れ)に対する考慮	表面調査 応力評価	濃縮缶の内部及び外部から保護管及びサポート溶接部にかかる応力と保護管内の内圧による応力、外荷重(地震、対流)による応力、運転時の熱応力等を考慮し、溶接部及びサポート溶接部にかかる応力は許容応力より十分小さいこと、また、運転中の繰り返し応力を考慮し、疲労強度より十分小さいことを確認した。	×		
	保護管の腐食に対する考慮	保護管と濃縮缶内の他構成部品との接触に対する考慮	A-3-1	表面調査	保護管はサポートにより溶接固定され、濃縮缶内の他の構成部品と接触しない設計としていることを設計図書により確認した。	×	
			A-3-2	文献調査	濃縮缶は物理的なくはんを行っていないことから、加熱による熱流動を考慮すると流速は1 m/s以下と考えられ、それに対して一般論として流速が0.5 m/s以下ではエロージョンは問題とならないことを文献により確認した。また、今回の事象を受け、他の文献調査を行い、スラリーを含む水をを用いた試験で3 m/sまでの流速でエロージョン速度が小さいという結果が得られていることを確認した。	×	
	保護管の腐食に対する考慮	厚肉の設計に対する考慮(シームレス管、キャップ)	A-4-1	表面調査	第4回設計申請書に記載されている「腐食に対する設計の基本方針」に基づき設計腐食速度から腐食(10 mm)が算出されていること、耐圧強度に必要な厚みに腐食代及び余裕を加味した肉厚(6.4 mm)に設定されていることを設計図書により確認した。 また、設計腐食速度を決定する際の前提となる腐食試験において、高レベル濃縮缶に腐食影響成分として代表的なものとして、核分裂生成物を含む溶液を模擬した腐食試験を実施し、その後、平成14年からネプチュームの効果も考慮し、当社高レベル濃縮液を模擬した試験液を用いて腐食試験を実施し、その腐食速度が設計想定した値より増加することが確認された。	△	
			A-4-2	表面調査	キャップとシームレス管は溶接、シームレス管とサポートは全面隙間溶接として、すき間腐食の発生を抑制する構造を設計していることを設計図書により確認した。	×	
			A-4-3	表面調査	温度計の測定端子(白金抵抗素子及びリード線)は絶縁性のMgOで絶縁された構造のものを採用し、温度計のシースと測定端子間の絶縁性を確保していることを設計図書により確認した。	×	
			A-4-4	表面調査	温度計の測定端子(白金抵抗素子及びリード線)は絶縁性のMgOで絶縁された構造のものを採用し、温度計のシースと測定端子間の絶縁性を確保していることを設計図書により確認した。	×	
	製作・施工不良	製作不良	シームレス管の不良	B-1-1-1	製造履歴調査	材料確認記録により設計どりの材料を使用していること、検査証明書による規定の65%硝酸腐食試験に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であることを、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。	×
				B-1-1-2	製造履歴調査	シームレス管の製作時に外観検査、UTに合格し有意な欠陥がないことを、検査証明書により確認した。	×
				B-1-2-1	製造履歴調査	材料確認記録により設計どりの材料を使用していること、材料試験成績書により規定の65%硝酸腐食試験に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であることを、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。また、UT-PTに合格し有意な欠陥がないこと及びEQA処理を行っていることを確認した。	×
				B-1-2-2	製造履歴調査	キャップの加工時に寸法検査を行い規定の寸法範囲内であることを、外観検査、UT、PTに合格していることを検査成績書により確認した。	×
			溶接部の不良	B-1-3-1	製造履歴調査	材料確認記録により設計どりの材料を使用していること、材料品質書による規定の65%硝酸腐食試験に合格していること、材料の化学成分が規格範囲内であることを、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。	×
				B-1-3-2	溶接記録調査 製造履歴調査	シームレス管とキャップの溶接箇所について、放射線透過試験成績書及び溶接履歴記録によりPTに合格していること、RTのフィルムにより欠陥がないことを確認した。また、前記「漏し」試験記録により、漏し発生に合格していること、仕上げ検査記録により溶接部外観が溶接の技術基準に適合していることを確認した。	×
温度計の不良			B-1-4	製造履歴調査	取扱説明書により、温度計は絶縁された構造のものであること、試験成績書により温度計のシースと測定端子間の設計どりの絶縁性が確保されていることを確認するための絶縁抵抗試験に合格していることを確認した。	×	
			B-2	溶接記録調査 製造履歴調査	保護管とサポートの溶接箇所について、すき間腐食を抑制する適切な溶接施工を行い、PTに合格していることを溶接作業記録書及び溶接履歴記録により確認した。また、漏し発生に合格していること、前記「漏し」試験記録及び仕上げ検査記録により確認した。	×	
施工不良		輸送における損傷	B-3-1	据付記録調査	前記「漏し」試験成績書により、据付後の前記「漏し」検査に合格していることを確認した。	×	
			B-3-2	据付記録調査	前記「漏し」試験成績書により、据付後の前記「漏し」検査に合格していることを確認した。	×	
		濃縮缶内への温度計の設置不良(腐食の発生)	B-3-3	据付記録調査	温度計据付チェックシートにより温度計の長さ及び保護管の長さ、温度計挿入後の絶縁抵抗に問題がないことを確認した。	×	
			B-3-4	据付記録調査	温度計据付チェックシートにより温度計の長さ及び保護管の長さ、温度計挿入後の絶縁抵抗に問題がないことを確認した。	×	
使用環境		濃縮缶内の機械的負荷	C-1-1	熱応力解析	濃縮缶下部の温度上昇が発生した場合に、その温度差によって発生する熱応力を解析し算出した結果、最大応力の発生箇所は保護管の先端サポート溶接部であり、その応力が地震・対流等により発生する応力を組み合わせても、疲労限度より十分小さいことを確認した。	×	
			C-2	熱流動解析結果調査	実運転条件を模擬した熱流動解析の結果から、最大の流速の場合でも、文献で示されているエロージョンの発生する流速の領域より十分に小さい領域であることを確認した。	×	
			C-3-1	腐食量評価 現場調査	保護管部の肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクチブ試験において測定した結果、減肉量は0.1~0.2 mm程度であった。	×	
		濃縮缶内の腐食影響	濃縮缶内における腐食影響成分の影響	C-3-1-1	腐食量評価 現場調査	保護管部の肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクチブ試験において測定した結果、減肉量は0.1~0.2 mm程度であった。	×
	C-3-1-2			文献調査	腐食影響成分であるネプチュームを考慮し、アクチブ試験の濃縮液からその腐食速度を評価する0.04 mm/年程度となり、運転開始前には到達しないことから、設計時に実施した腐食試験において評価した腐食速度は増加しているものの、ネプチュームの影響で加工腐食が発生した可能性はない。	×	
	C-3-1-3			文献調査	腐食イオンの存在による孔食(局部腐食)(シームレス管、溶接部、キャップ)	腐食イオン濃度が規定値以上になると孔食に対して腐食を抑制する作用があるため、腐食イオンの有無に関わらず孔食が発生しないことを文献により確認した。	×
	C-3-1-4			文献調査	濃縮液中の腐食イオン濃度について分析実績はないものの、腐食イオンが多量に存在した場合でも、腐食環境中では乾食腐食が支配的でSCCは発生しないことを文献により確認した。	×	
	C-3-1-5			試験評価	析出物共有下の模擬濃縮液中での腐食試験において、全面腐食の腐食速度は析出物の有無によってほとんど変化しないこと、孔食等の局部腐食は認められなかったことを試験評価により確認した。	×	
	濃縮缶内における温度による腐食影響		C-3-2-1	腐食量評価 現場調査	設計腐食速度に対して温度上昇の効果も考慮した腐食速度を算出した結果、2 mmであり、保護管部の肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクチブ試験において測定した結果、減肉量は0.1~0.2 mm程度であった。	×	
			C-3-2-2	文献調査	アクチブ試験において濃縮缶下部温度上昇が発生したことを踏まえ、腐食速度に対する評価を実施した結果、温度上昇が発生した際の腐食速度が0.1mm/年を上回ることを確認した。	○	
			C-3-2-3	文献調査	保護管の材料であるR-SUS304Lの溶接部については、規定の65%硝酸腐食試験の結果、母材と同等の耐食性であることが示されており、今この濃縮缶下部で発生する温度が上昇しても、酸化化による溶接部が優先的に腐食・腐蝕に侵食されることはない。また、保護管部の漏し試験でキャップ溶接部及び上下のシーリング加工部に浸れれ腐蝕が確認されなかった。なお、溶接部腐蝕の腐蝕試験で、キャップ溶接部付近から腐蝕が侵入した場合に浸れれ腐蝕の腐蝕が残り、ビデスコープによる観察で判別できる程度であることを確認している。以上より、腐食欠陥の発生に起因する可能性は低い。	×	

凡例 ○ 要因として確認できたもの  
 △ 直接の要因ではないが、事象の発生を誘発した可能性のあるもの  
 × 要因ではないことを確認できたもの

1) 庄瀬地、日本原子力学会「1994秋の大会」J70(1994)70  
 2) 明石地、防衛技術、33(1981)559-564  
 3) 安部地、原子力工業、38(1992)33-50  
 4) 腐食・防食ハンドブック

## 温度計保護管の機械的損傷に対する考慮の評価

## 1. 機械的損傷に対する考慮について

濃縮缶の設計時、その小型内部構造品である保護管に対しては、耐圧設計として、耐圧強度上必要な寸法に腐食代及び製作上の公差等を見込んだ裕度を加えて板厚寸法を設定した。また、耐震設計として、保護管が配管であることから、地震時に発生する応力が許容値を十分下回るよう配管の支持間隔を設定して剛構造となるよう設計した。これらにより、保護管の機械的損傷に対して十分余裕を見込んだ構造としている。

しかしながら、今回保護管に漏えいが発生したことから、保護管にかかる応力を算出し、機械的損傷に至った可能性について評価を実施した。

## 2. 荷重条件の設定

濃縮缶の内部及び外部から保護管及びサポート溶接部（図1 参照）に受ける荷重として、以下の項目が考えられる。

- ① 保護管の内圧による応力
- ② 外荷重による応力（図2 参照）
  - ・地震
  - ・対流
- ③ 運転時の熱応力

これらを考慮し、濃縮缶の通常運転状態において生じる応力を組み合わせて評価した。なお、濃縮缶がセルに設置されており外力を与えるような機器等が存在しないこと、濃縮缶内には機械的な駆動部がないことから、この他に外力を与える要素はない。

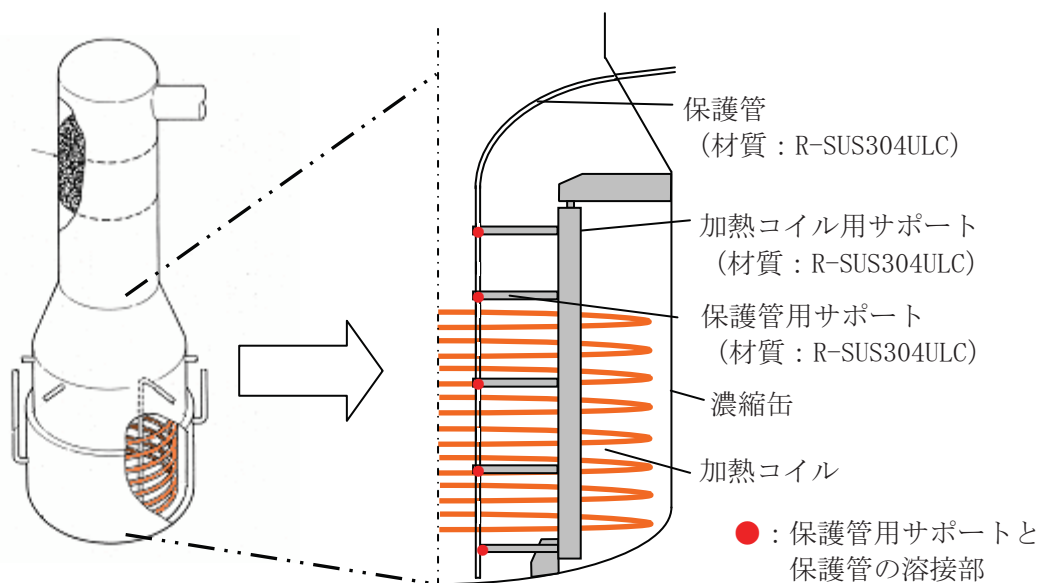


図1 濃縮缶内の保護管、サポート概要

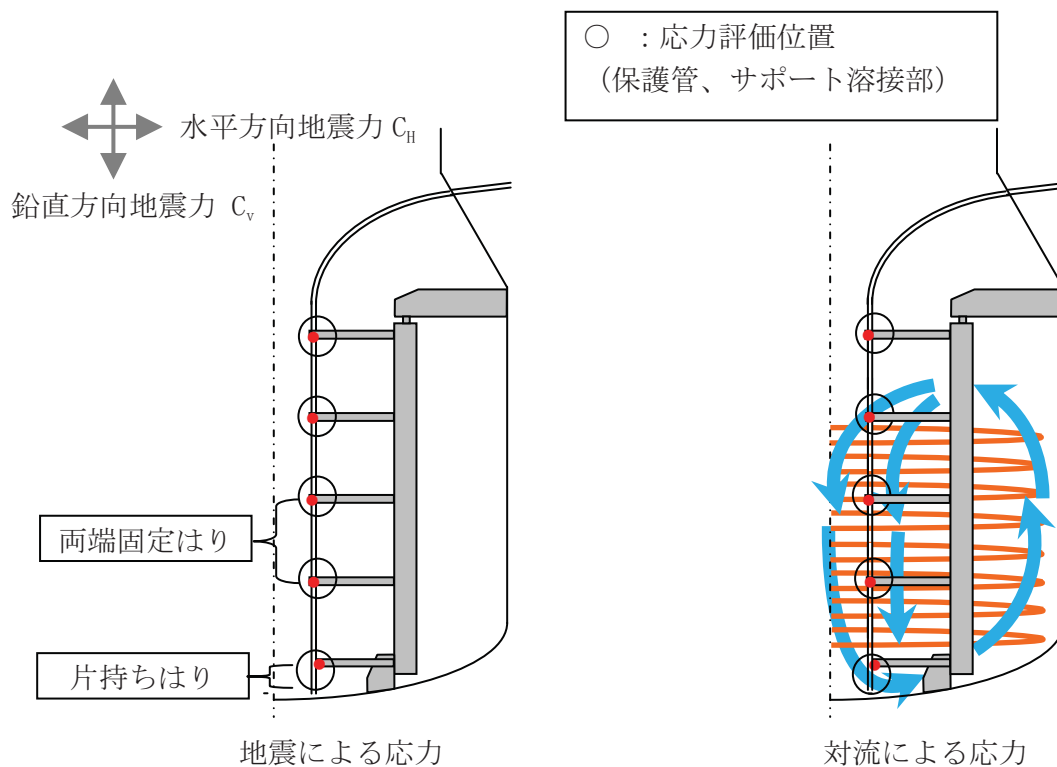


図2 外荷重による応力の概要

### 3. 保護管の内圧による応力の評価

保護管の内側はほぼ大気圧であり、濃縮缶内は設計上絶対真空の減圧下で運転を行うことから、保護管の内圧として大気圧を考慮する。

### 4. 外荷重による応力の評価

#### (1) 地震による荷重

地震力として水平方向と鉛直方向を考慮し、それぞれの荷重について評価した。地震力の設定としては、濃縮缶が設置されている箇所の基準地震動 $S_1$  (設計用最強地震により定まる地震力または静的地震力)、 $S_2$  (設計用限界地震により定まる地震力)のうち、水平方向及び鉛直方向ともに最も大きいものを採用した。

#### (2) 対流による流体力

濃縮缶の加熱コイル及び加熱ジャケットからの入熱によって、濃縮缶内の廃液には対流が起きる。このため、保護管とサポート溶接部には流体力が働く。

保護管まわりの流れの状況は、三次元熱流動解析結果 (添付資料-22 別紙参照) より図2のとおりである。

保護管に作用する流体力は、噴流が静止平板に当たった際に作用する力として、運動量保存の法則により求められる。

保護管及びサポート溶接部に作用する流体力：F

$$F = \rho Q v$$

[出典：機械工学便覧 流体力学 壁面に衝突する噴流による力]

ここで

$\rho$ ：廃液の密度

Q：流量（=  $v$ （流速） $\times$  A（投影面積））

$v$ ：濃縮缶内の流速

（0.5 m/s：熱流動解析から得られた中央部付近の最大流速（0.21 m/s）から、評価部位近傍での対流のばらつきを考慮した保守的な評価として設定）

### （3）評価モデル及び発生応力の評価方法

図3に保護管とサポートの取り付け詳細を示す。先端サポート部（B-B断面）は、2本の保護管用サポートが保護管に直接溶接固定されている。また、下から2番目のサポート部（A-A断面）は、保護管に溶接されたブレースに保護管と2本の保護管用サポートが溶接固定されている。より厳しい評価として、これらを、保護管用サポートを1本としてサポート溶接部で完全固定される「片持ちはり」及び「両端固定はり」にモデル化した。また、保護管用サポートについても「両端固定はり」にモデル化した（図3 参照）。

地震及び対流によって保護管とサポート溶接部に発生するせん断応力、曲げ応力及び圧縮/引張応力（図4、図5 参照）を算出し、それらを組み合わせて評価した。なお、保護管の圧縮/引張応力の算出の際には、地震による荷重に自重による荷重を加えて評価した。

## 5. 運転時の熱応力の評価

運転中における温度変化によって保護管に熱応力が生じることが想定される。しかしながら、通常運転時には濃縮缶内部の対流により溶液温度がほぼ均一となるよう設計されている。また、保護管、サポート及び濃縮缶本体を同一材質（R-SUS304ULC）としており、同じ線膨張係数を有していることから、温度差により大きな応力が発生しない設計としている。

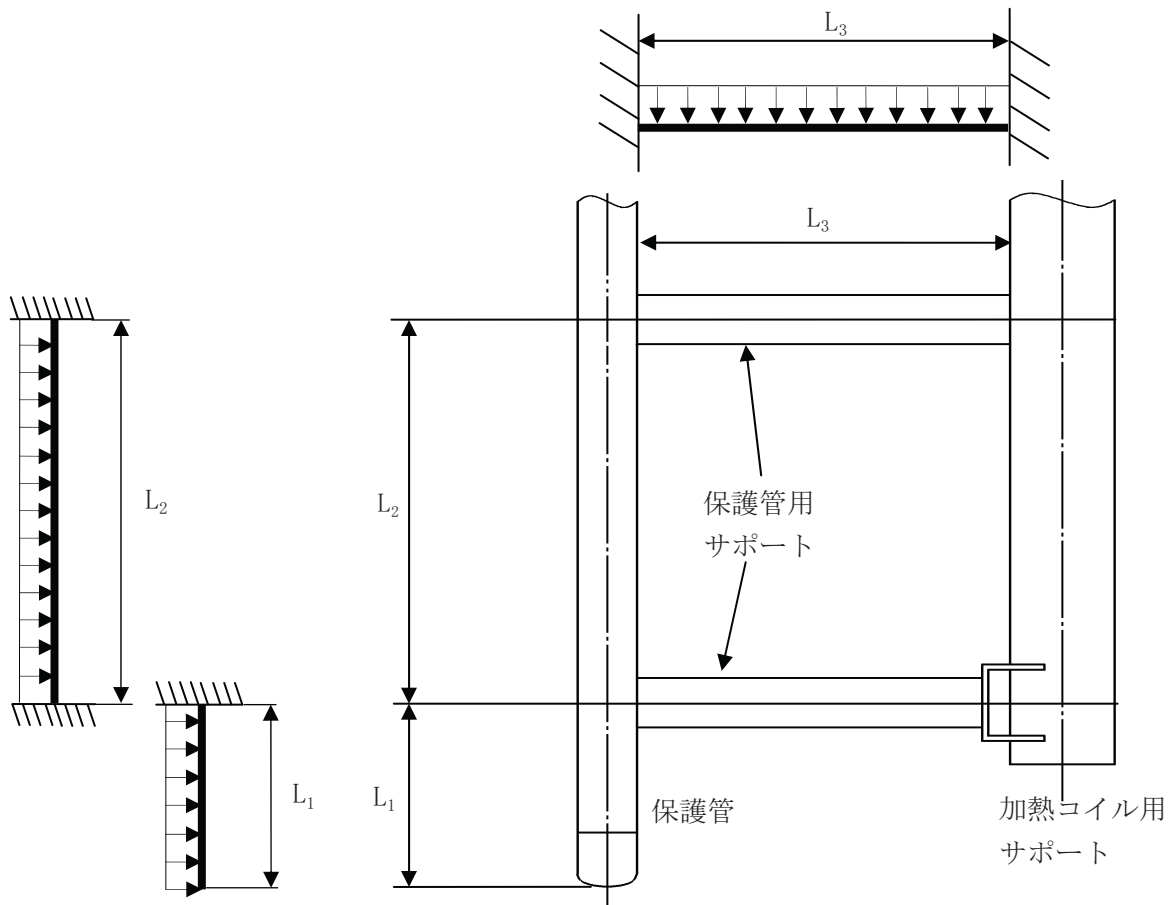
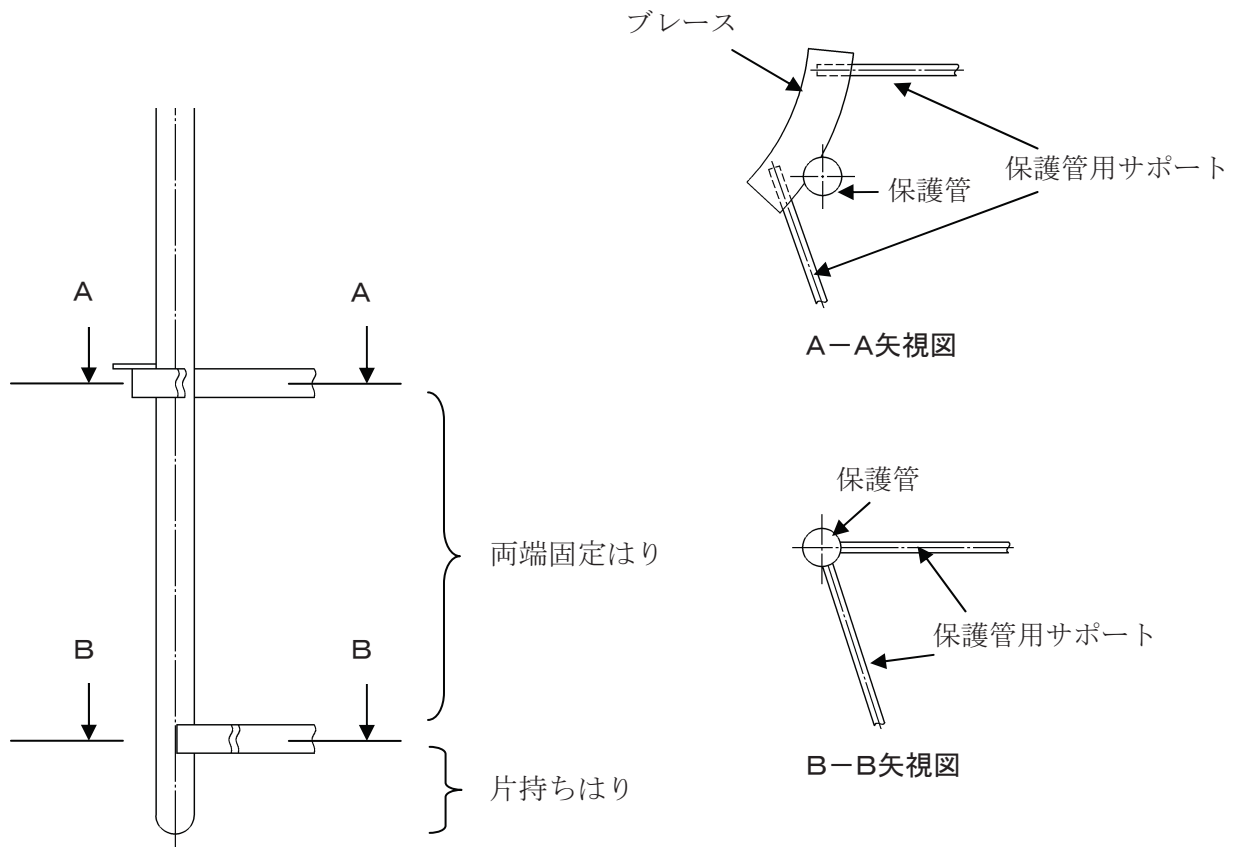


図3 保護管とサポートの取り付け詳細及びモデル化

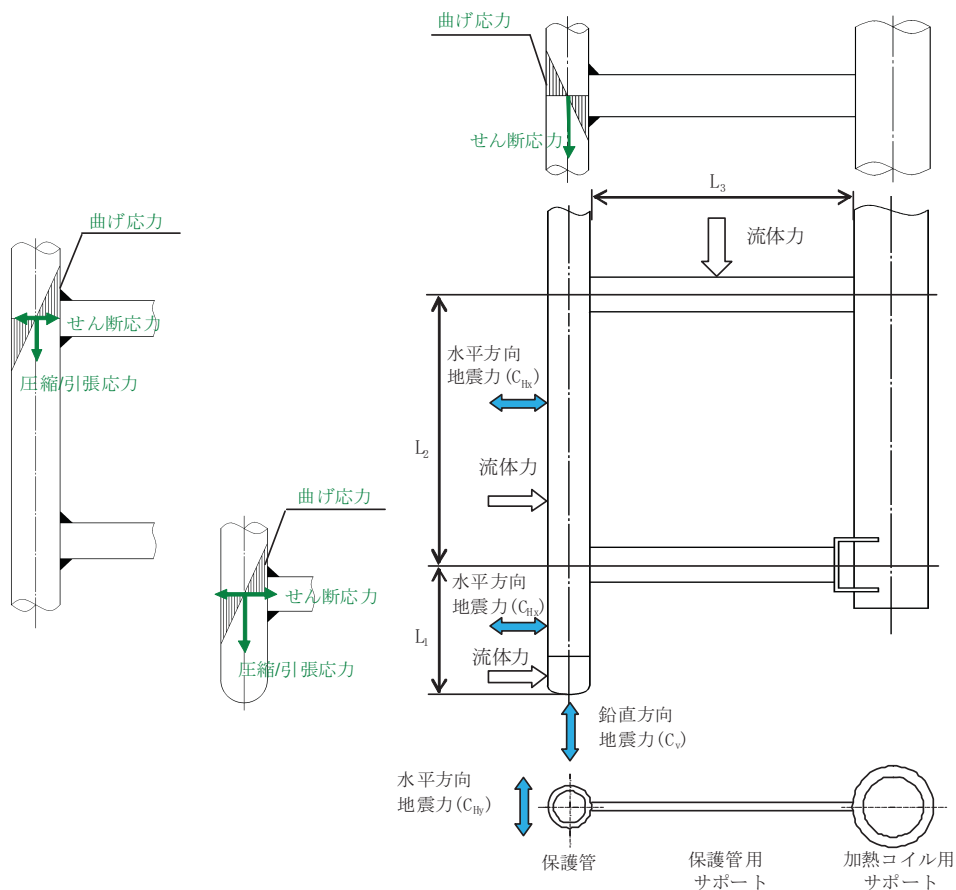


図4 保護管に作用する内圧、外荷重（地震、対流）による発生応力

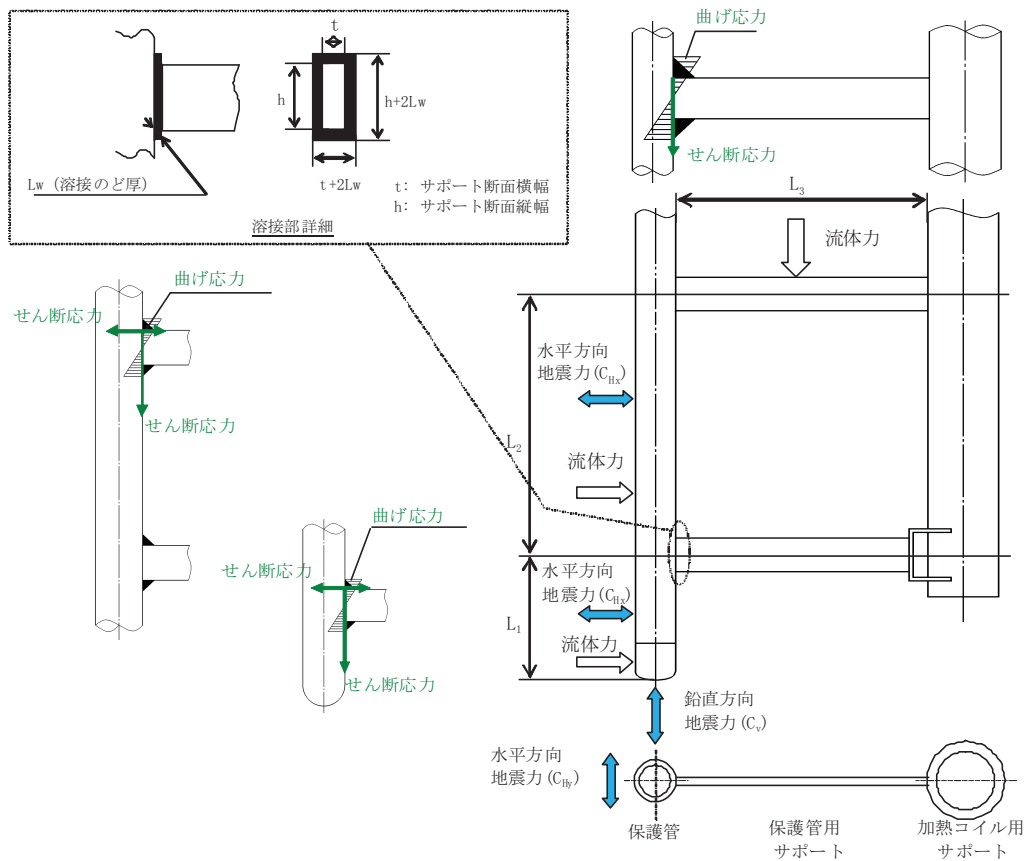


図5 サポート溶接部に作用する外荷重（地震、対流）による発生応力

## 6. 発生応力による機械的損傷の可能性評価

保護管の内圧、外荷重（地震、対流）により生じるせん断応力、曲げ応力及び圧縮/引張応力を組み合わせて評価した値を下表に示す。

		応力値 (MPa)		許容応力 (MPa)	根拠
保護管	片持ちはり	$P_m$	1	99	S ※1
		$P_L+P_b$	4	99	S ※1
	両端固定はり	$P_m$	1	99	S ※1
		$P_L+P_b$	5	99	S ※1
サポート 溶接部	片持ちはり	組合せ	2	117	ft ※2
	両端固定はり	組合せ	5	117	ft ※2

※1 保護管の許容応力 [R-SUS304ULC, 100℃]

発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) クラス 1 容器の許容応力とする。ただし、設計応力強さ ( $S_m$ ) を使用せず保守的に許容引張応力 ( $S$ ) とし、供用状態のうち最も許容応力の小さい値を使用する。

$P_m$  : 一次一般膜応力

$P_L+P_b$  : 一次曲げ応力

※2 サポート溶接部の許容応力 [R-SUS304ULC, 100℃]

発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) クラス 1 支持構造物の設計より、供用状態のうち最も許容応力が小さい値を使用する。

ft : 許容引張応力

以上から、保護管及びサポート溶接部にかかる応力はいずれも許容応力より十分小さい。また、運転中の繰り返し応力を考慮しても疲労限度<sup>1)</sup> 約 114 MPa 約より十分小さいことから、機械的損傷に至った可能性はない。

1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) PVB-3315 図 添付 4-2-2(1)



## 温度計保護管の磨耗に対する考慮及び 析出物との接触によるエロージョンに対する評価

エロージョンによる保護管の磨耗について、設計当時からの考え方を整理するとともに、三次元熱流動解析により得られている流速分布から、エロージョン発生の可能性を評価した。

### 1. エロージョンに対する考え方

設計当時、一般論として流速が 6 m/s 以下ではエロージョンは問題とならない<sup>1)</sup>ことを文献調査で確認していた。濃縮缶内は、物理的にかくはんを行っておらず、加熱により生じる熱流動のみであることから、一般的に流速は 1 m/s 以下と考えられ、よってエロージョンは問題にならないと評価した。

なお、その後の文献調査でも、スラリーとして平均粒径 200  $\mu\text{m}$  の球形天然珪砂（密度は下記のバリウム-ストロンチウム硝酸塩の密度より若干小さいものの、共有結合を有する硬い物質）を含む水を用いたサンドエロージョン試験において、3 m/s までの流速でエロージョン速度が小さいという結果が得られていることを確認した<sup>2)</sup>。

また、実燃料から調製された放射性物質を含んだ廃液を減圧下で濃縮した試験において、六ヶ所再処理工場の条件相当（45000 MWd/tU、L/tU）の濃縮液（ホット）で白色の浮遊しやすい固体の析出が確認され、同様の組成の模擬液（コールド）を用いた濃縮試験でも同じような析出が生じた。その析出はバリウム-ストロンチウム硝酸塩（イオン結晶）であり、固着性のもではなく、濃縮液を揺らすと容易に分散したので、エロージョンには影響しないと判断した。

実機における析出成分もバリウム-ストロンチウム硝酸塩が主成分と想定されることから、エロージョンについては問題ないと考えるが、実運転状態を模擬した三次元熱流動解析の結果から、エロージョン発生の可能性を再度評価した。

（三次元熱流動解析の結果については別紙参照）

## 2. エロージョン発生の可能性の評価

三次元熱流動解析から得られた最大流速は0.21 m/sであり、エロージョンが問題となるような流速ではなかった。なお、最大流速が確認された場所は、濃縮缶中心部付近（当該保護管とは異なる場所）であった。

また、濃縮缶の最大処理時の加熱量は設計上[ ]kWであり、熱流動解析条件(コイル3本での運転時)での加熱量[ ]kWの約[ ]倍となる。保守的に、濃縮缶内の対流による流速が加熱量に比例して増加する<sup>※1</sup>とした場合、最大処理時における濃縮缶内の最大流速は0.34 m/sとなる。このことから、処理量が多くなったとしてもエロージョンが問題となるものではないと評価した。

※1 加熱量の増加によるエネルギーが全て対流の駆動力（ヘッド）の増加に変化すると仮定する。また、対流によるヘッドの流動損失は流速の1乗～2乗に比例して変化するが、これを1乗に比例すると仮定することで、保守的な評価とした。

1) 原徹編「化工建設便覧」(化学工業社)

2) 「高クロム白鉄のサンド・エロージョン速度のスラリー速度依存性」

(日本金属学会誌, 57)

## 三次元熱流動解析結果

## (1) 解析目的

濃縮缶の熱対流による流動状態を数値的に予測し、濃縮缶内の流速分布、流れ方向及び淀み領域の有無を把握するため、三次元熱流動解析を実施した。

## (2) 解析対象

図1に示す範囲を解析対象とし、加熱コイル及び加熱ジャケットからの発熱を考慮し解析を行った。

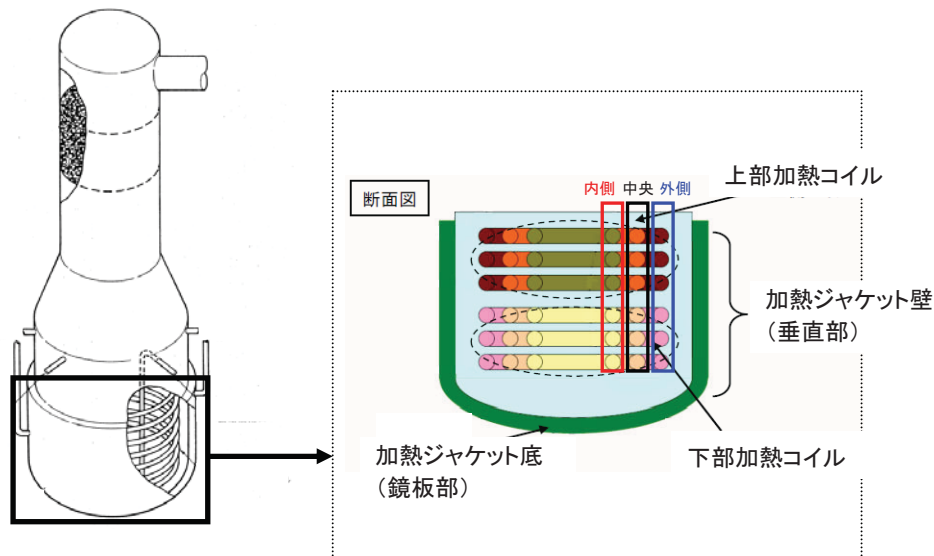


図1 解析対象

## (2) 解析条件

これまでの運転において恒常的に生じていた濃縮缶内の流速を評価するために、運転実績<sup>※1</sup>をふまえ、加熱コイル3本で運転した場合の解析を実施した。

なお、解析モデルの作成に際しては、濃縮缶内の廃液の流れを解析する目的のために、流動に支配的な影響を及ぼす大型内部構造品を実機形状寸法でモデル化した三次元CADデータを用いて、汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+によって三次元メッシュを作成した。その後、汎用熱流体解析プログラム STAR-CDによって、三次元熱流動解析を実施した(図2 参照)。なお、解析にあたって、濃縮終了時点での高レベル濃縮廃液の密度、比熱、熱伝導率、粘度といった物性値については設計図書に示される値を用い、解析ステップごとに算出される温度による物性値の変化を都度反映させ、濃縮缶内の流速分布図を求めた。

※1 濃縮缶は、6本あるコイルから使用するコイルを選択することにより、目標とする処理量 (m<sup>3</sup>/h) に応じて加熱量を調整している。アクティブ試験での運転実績では、コイル2本による運転時間が全体の約49%、コイル3本による運転が約

39%、コイル 4 本による運転が全体の約 12%であり、コイルの平均稼働本数は約 2.6 本であった。この平均稼働本数から、コイル 3 本での運転を解析条件として設定した。

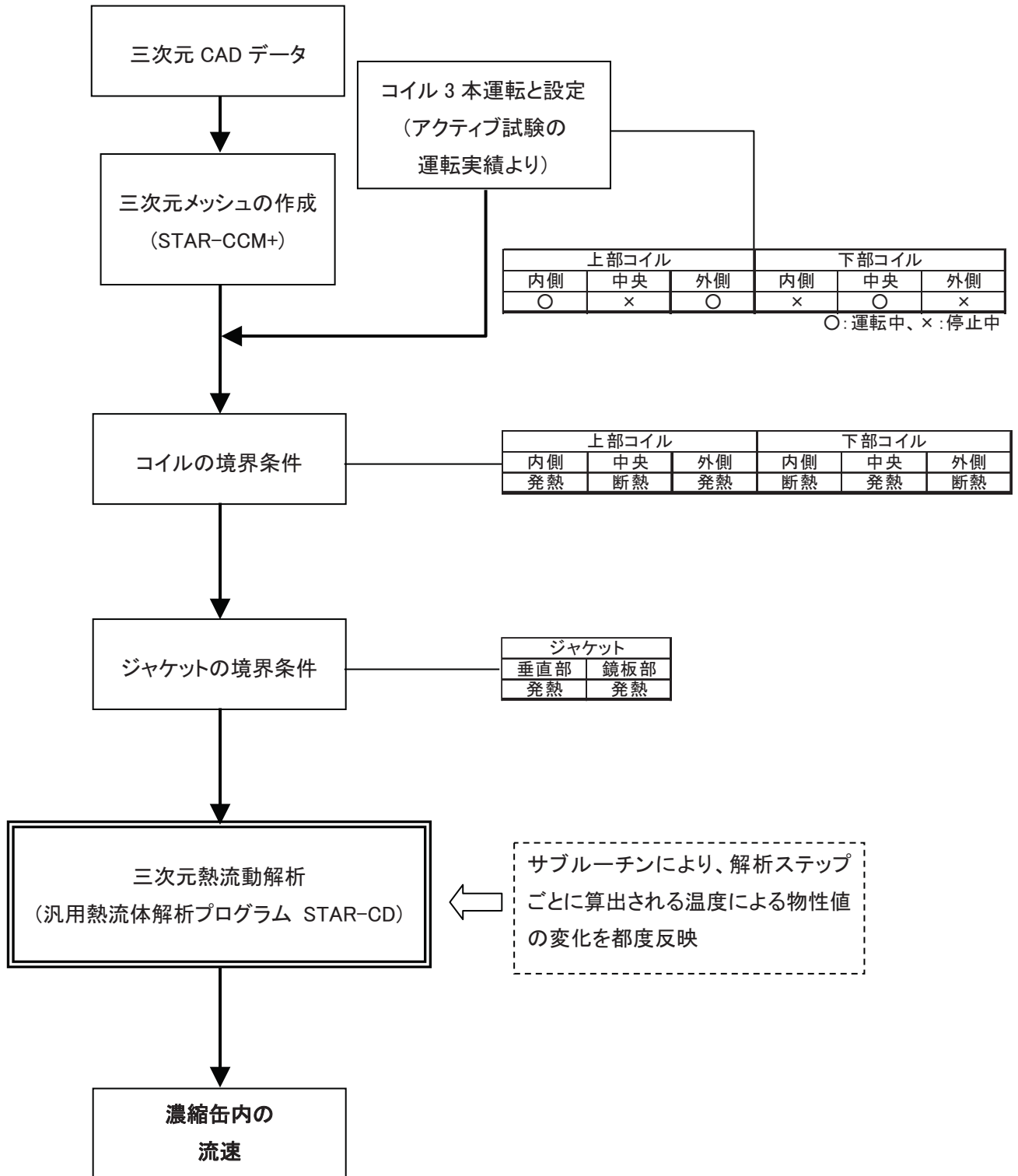


図 2 解析手順

(3) 解析結果

最大流速の発生箇所は濃縮缶中心部付近の下降流であり、その値は 0.21 m/s であった。(図3 参照)

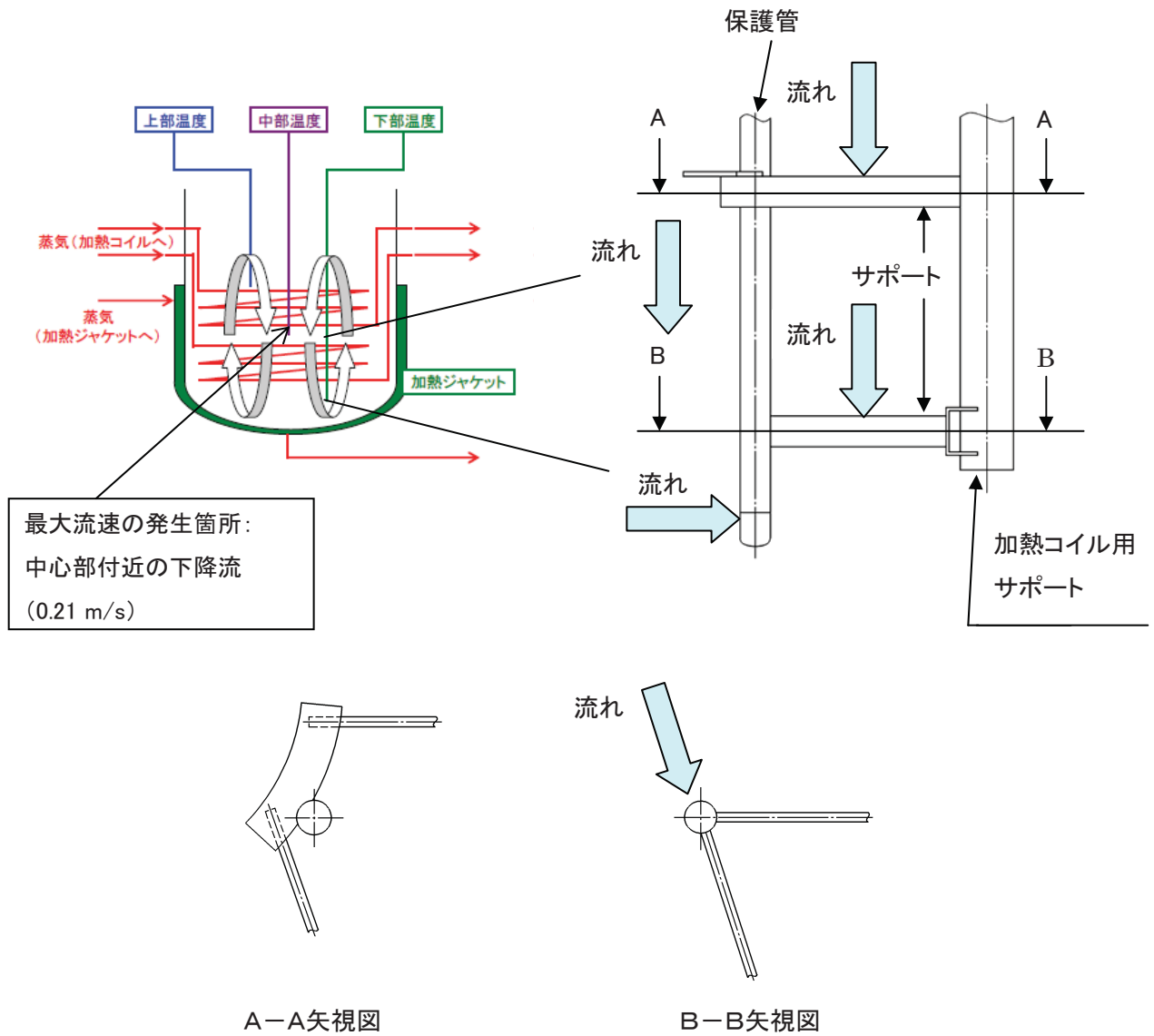


図3 保護管まわりの流れの状況図

## ネプツニウムによるステンレス鋼の腐食について

## 1. ネプツニウムがステンレス鋼の腐食に与える影響

再処理工場の主要機器では、腐食性の強い沸騰硝酸溶液を使用することから、耐食性に優れた再処理用ステンレス鋼(R-SUS304ULC等)を材料としているが、図1のように平成10年頃から、ネプツニウムが沸騰硝酸中でステンレス鋼の腐食を加速し、その濃度の上昇に応じて腐食速度が増加することが把握され始めた。<sup>1)</sup>

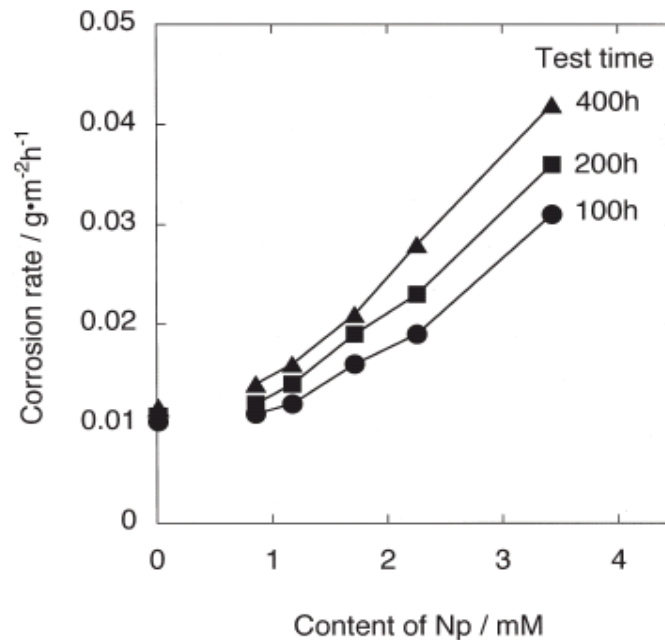


図1 Npの有無によるR-SUS304ULC腐食速度の比較  
(減圧下, 9 mol/L 沸騰硝酸溶液内)<sup>1)</sup>

1) 本岡、山本；材料と環境、57, 536-541(2008)

その後、平成14年から電力共通研究（以下、「電共研」という。）として、ネプツニウムの効果を考慮に入れ、当社再処理工場の高レベル濃縮廃液を模擬した試験液を用いて腐食試験を実施し、その腐食性が設計時の3倍程度あることが判明した。

本資料ではその詳細について述べる。

## 2. 設計時の評価

設計時に行った腐食試験で使用した試験液は、濃縮終了時点の高レベル濃縮廃液の状態を想定し、実燃料の溶解液から溶媒抽出によりウラン、プルトニウムを除去した抽出廃液にガドリニウム及び腐食生成物として含まれる鉄<sup>※1</sup>を添加後、蒸発濃縮して調製したものをを用いた。

図2に示すように再処理工程では、FP及び大半の超ウラン元素は抽出廃液に移行し、濃縮缶に供給される。しかし、ネプツニウムは、分離施設でウラン、プルトニウムと共に比較的抽出されやすいため、抽出廃液を経由する流れと精製施設を経由する流れの2つの流れで濃縮缶に供給される。

※1：鉄は使用済燃料に含まれるもの以外に、工程中で腐食生成物として発生するものがあり、高レベル濃縮廃液のような硝酸塩を含む環境中ではステンレス鋼の腐食に影響を与えることから、先行施設の経験より三価の鉄を5 g/L添加している。

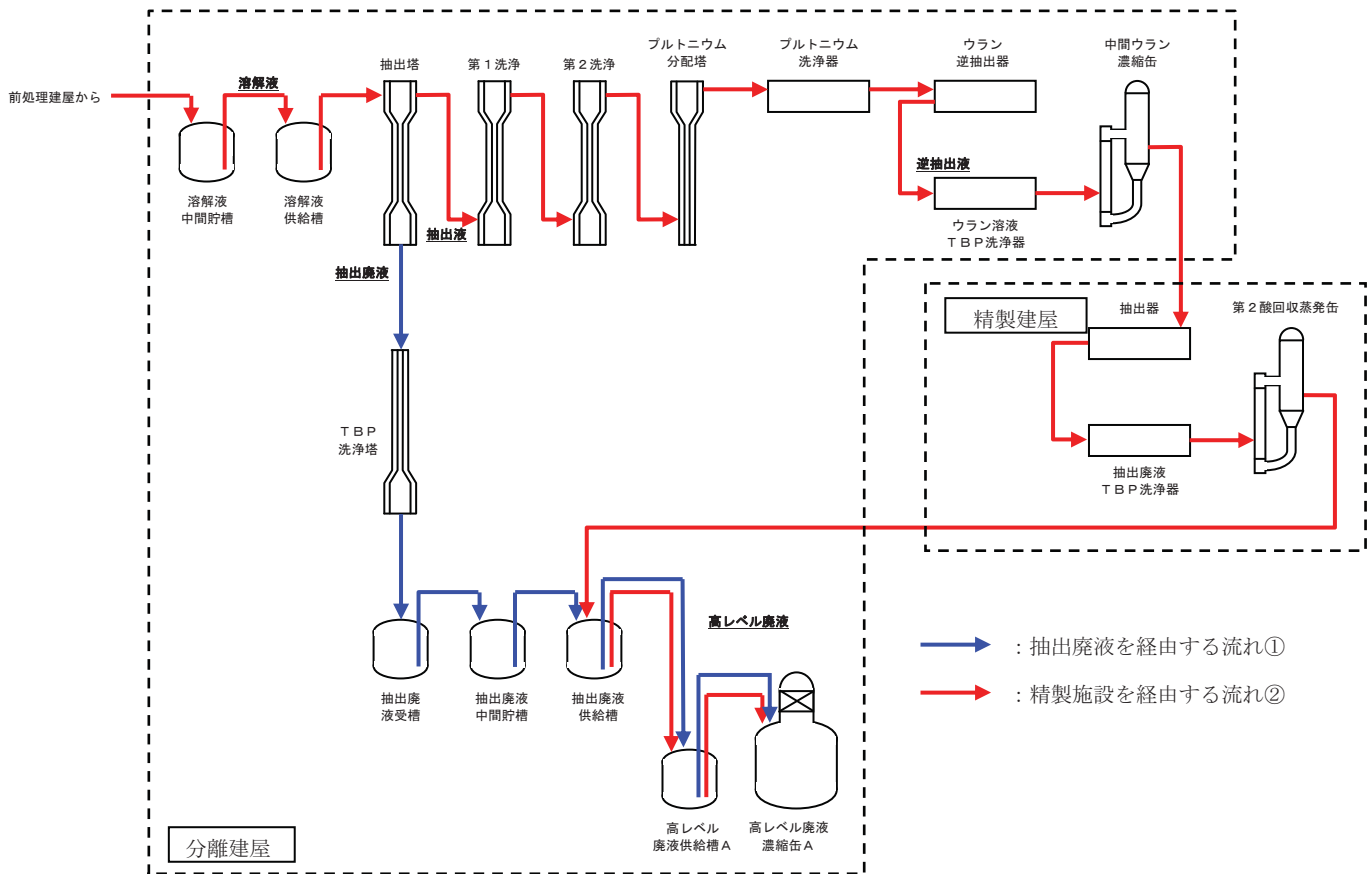


図2 濃縮缶に流入するネプツニウムの主な流れ

設計時には、ネプツニウムが腐食に影響を与えるという知見がなかったため、抽出廃液のみを用いて腐食試験液を調整しており、精製施設を経由して流入する分のネプツニウムが加味されていなかった。このため、ネプツニウム濃度が低くなっていた可能性があった。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無いことを確認した。

なお、この試験では腐食試験液に対する分析を行っていないため、ネプツニウムを含めた各元素の濃度は明確になっていない。

この試験液を用いた腐食試験の結果から、設計時の高レベル濃縮廃液の腐食速度補正係数<sup>※2</sup>は50と設定していた。

#### ※2 腐食速度補正係数

流体に含まれる酸化性イオンによる腐食の加速または抑制を表す係数。純硝酸中での腐食速度を基準にその倍率で求める。

### 3. 電共研の評価

平成14年から電共研で実施した試験では、実燃料を燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）で再処理して得られた高レベル廃液を用いた。溶液中に十分な量が含まれ腐食に寄与する元素として鉄、ルテニウム、セリウム及びネプツニウムを選定したが、全ての元素の分析値が目標濃度を下回っていたため、不足分を添加し、ネプツニウムは保守的に考え、1日当たり再処理する使用済燃料中に含まれる全量が濃縮缶内に流入し、高レベル濃縮廃液が最大濃度になったときの値である2.3 g/L以上になるように添加調整した。

調整後の腐食試験液を表1に示す。

なお、本事象を受け、電共研の腐食試験液の妥当性に関して再検討を行い、腐食上考慮すべき元素は他になく、結果、六ヶ所再処理工場の高レベル濃縮廃液の腐食性を保守的に模擬できていることを確認した。

表1 電共研試験液のうち腐食に寄与する元素とその化学組成（分析値）

H <sup>+</sup> (mol/L)	Fe (g/L)	Ru (g/L)	Ce (g/L)	Np (g/L)
8.1	4.98	11.8	13.9	2.46

この試験液を用いて85℃減圧沸騰の条件で腐食試験を行った結果から、1.03 mm/年の腐食速度が得られ、電共研の腐食試験液の腐食速度補正係数が150となることを確認した。

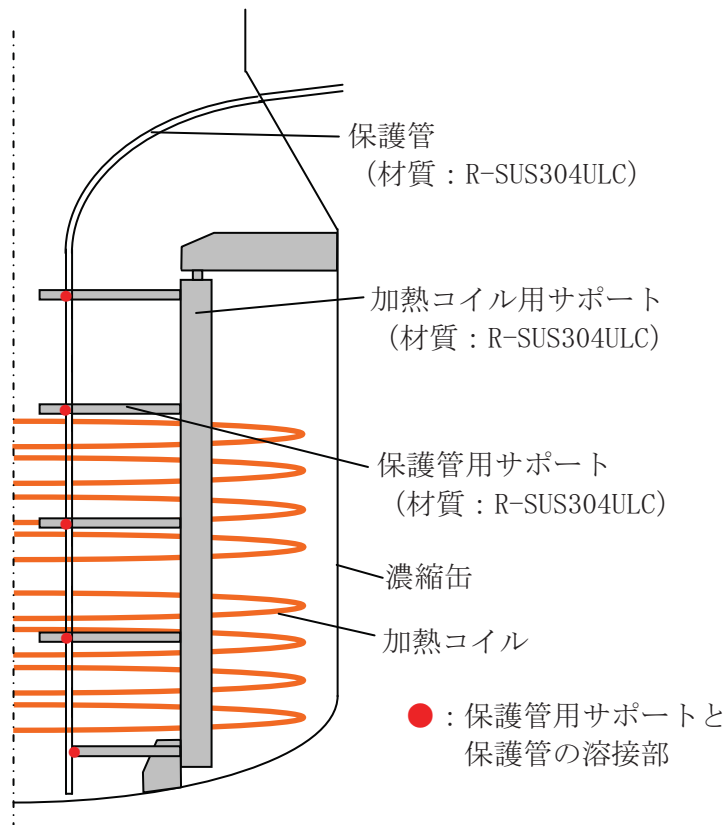
一方、前項で述べた腐食試験の結果から、設計時の腐食速度補正係数を50としているため、ネプツニウムの効果を考慮した電共研の腐食試験液の腐食性は設計時の3倍（=150/50）となる。

以上より、ネプツニウムの効果を考慮に入れ、当社再処理工場の高レベル濃縮廃液を模擬した試験液を用いて腐食試験を実施した結果、その腐食性が設計時の3倍程度あることを確認した。



温度上昇による温度計保護管とサポート溶接部の応力評価

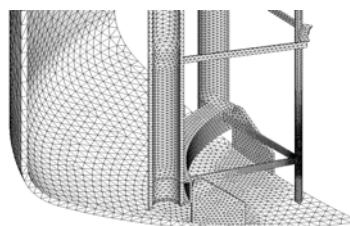
保護管、サポート、濃縮缶本体は同一材質（極低炭素ステンレス鋼である R-SUS304ULC）であり、同じ線膨張係数を有していることから、溶液温度がほぼ均一であれば大きな応力が発生することはないが、濃縮缶下部の温度上昇が発生した場合にその温度差によって発生する熱応力について、以下の解析により評価を行った。



濃縮缶概要図

① 解析モデル

構造の対称性を考慮し、1/6 分割の三次元ソリッドモデル（解析プログラム名: ABAQUS）とした。



解析モデル図

(1/6 分割の三次元ソリッドモデル)

② 解析条件

濃縮缶下部の温度上昇事象（添付資料－29参照）を受けて下部 200 mm<sup>※1</sup>の範囲を 100℃<sup>※2</sup>とし、他を 50℃<sup>※3</sup>とした場合に発生する熱応力を評価した。物性値として 50℃、75℃（中央値）、100℃の値を使用した。

※1 コールド試験により得られた析出物の発生量を実機の液位に換算して設定

※2 下部温度上昇を考慮した温度から設定

※3 通常運転時の溶液温度から設定

表1 極低炭素ステンレス鋼（R-SUS304ULC）の物性値

温度（℃）	50	75	100
熱伝達率（W/m <sup>2</sup> ℃） <sup>1)</sup>	665	870	1436
熱伝導率（W/m℃） <sup>1)</sup>	16.1	16.2	16.4
線膨張係数（1/℃） <sup>1)</sup>	$1.73 \times 10^{-5}$	$1.73 \times 10^{-5}$	$1.74 \times 10^{-5}$
縦弾性係数（MPa） <sup>2)</sup>	191000	191000	190000
ポアソン比（-） <sup>2)</sup>	0.3	0.3	0.3

1) 伝熱工学資料 改訂第5版

2) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）

- 熱応力解析条件：軸方向について、ラグにて濃縮缶本体が支持されていることから、支持箇所を基点（固定）とし、上下に移動可とした。周方向については構造の対称性から移動せず、半径方向については移動可とした。（図1 参照）

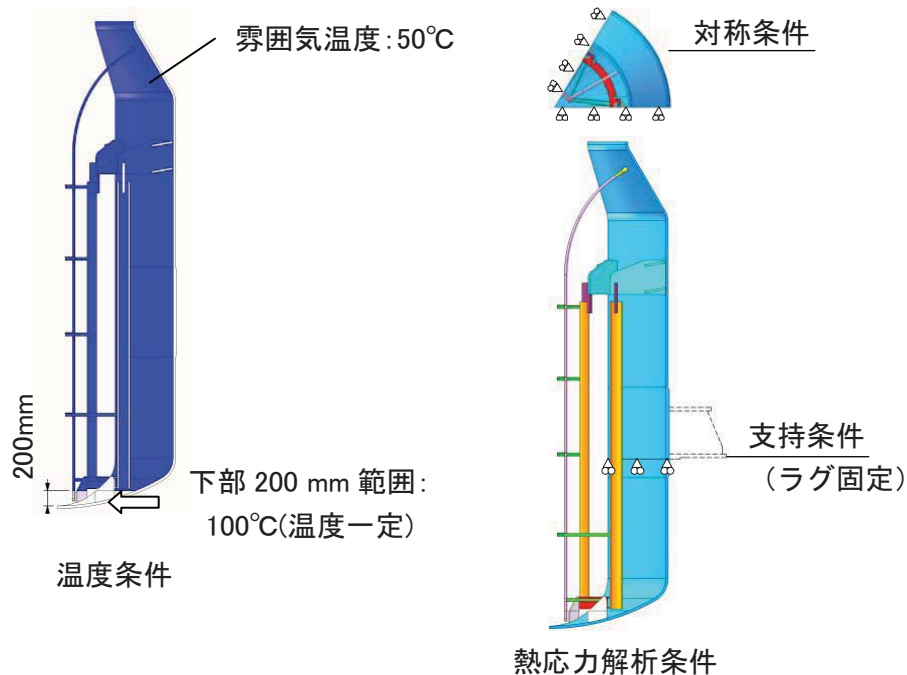


図1 解析条件図

### ③ 解析結果

熱応力の解析を行った結果、いずれの場合も保護管における最大応力発生箇所は先端サポート溶接部であり、その応力は約 15 MPa であった。

これに保護管の先端サポート溶接部にかかる地震・対流等による応力約 5 MPa (添付資料-2 1 参照) を組み合わせても、疲労限度<sup>1)</sup>約 114 MPa より十分小さい。(図 2 参照)

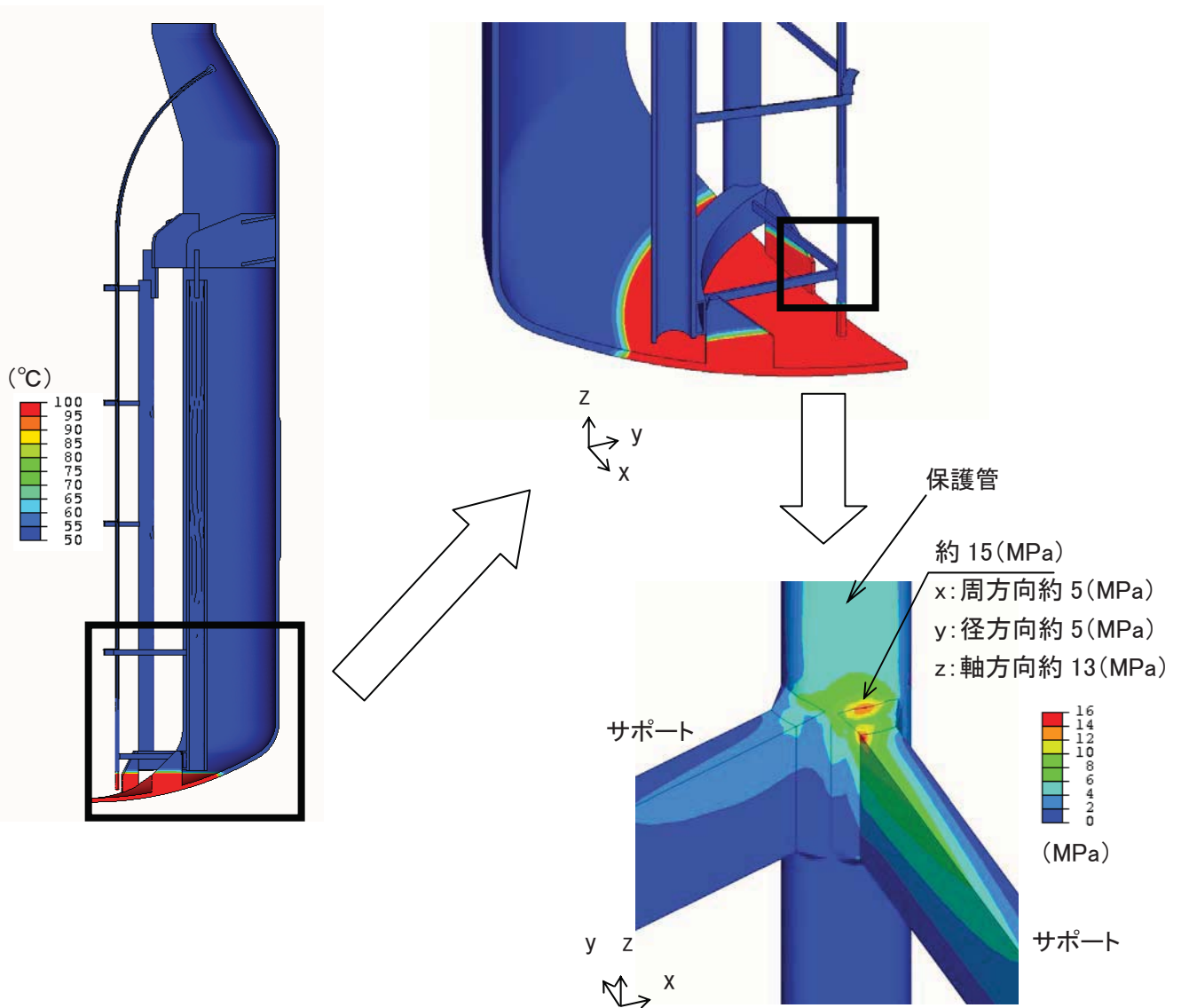


図 2 解析結果 (75°Cの物性値を使用した場合)

- 1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005)  
PVB-3315 図 添付 4-2-2(1)

## 腐食速度から見た加工フロー腐食の発生条件について

## 1. 電位と腐食速度の関係

高濃度硝酸中でのステンレス鋼の腐食は構成元素が金属イオンとして溶出する溶解反応であるため、鋼種毎に得られた分極曲線の電流密度は腐食速度と比例関係にある。分極曲線において腐食電流が急峻に立ち上がった領域が過不動態領域である。添付資料－ 9 に示したとおり、加工フロー腐食は過不動態領域で発生するため、材料の接液する環境が不動態領域にあることを確認できれば加工フロー腐食は発生しないと考えられる。

図 1 に R-SUS304ULC ステンレス鋼の硝酸環境中における分極曲線 (Polarization Curve) を示す。図 1 において、不動態領域と過不動態領域の境界は  $7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  にあり、これより小さい腐食電流であれば不動態領域であると言える。金属の腐食は溶解反応であるため、電流密度から腐食速度を計算すると図 1 に示すように、不動態領域と過不動態領域の境界は約 0.5 mm/年の腐食速度となる。腐食速度がこれより小さければ、不動態領域にあると考えられ、加工フロー腐食を生じないものと考えられる。しかし、不動態領域から過不動態への遷移領域の腐食試験である 65%硝酸腐食試験では、R-SUS304ULC の腐食速度は約 0.1 mm/年<sup>1)</sup>であり、保守的な考え方をすれば実験的に確認された約 0.1 mm/年以下の腐食速度を、加工フロー腐食が発生しない領域と考えた。

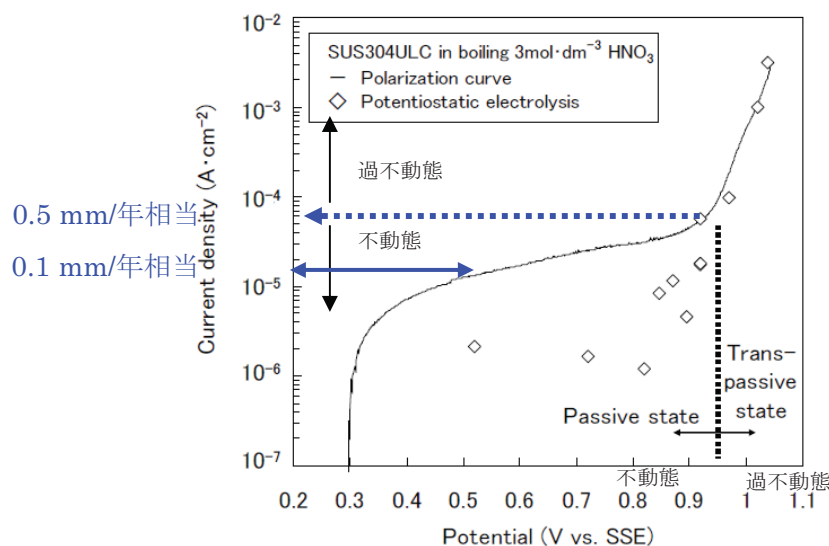


図 1 The results of a polarization curve and potentiostatic electrolysis measurement of SUS304ULC in boiling nitric acid

出典) 上野文義 他, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 9, No. 3, p. 279-287 (2010)

## 2. 再処理環境と腐食速度（電位）の関係

再処理環境において、ステンレス鋼を採用している機器は、不働態領域で使用することを設計の基本としているため、設計どおりの環境であれば加工フロー腐食が発生しない。しかし、濃縮缶の下部保護管においては、濃縮缶下部の温度が上昇して想定を超えたことから高温状態となり、電位が引上げられ、過不働態の領域に到達して加工フロー腐食の発生に至ったものと考えられる。なお、高い液温度が続いた期間における保護管先端の腐食速度は、0.5 mm/年程度と試算される。

- 1) 再処理施設用高純度ステンレス鋼の耐食性について，大平洋製鋼技報，No.1(1997)

アクティブ試験のネプツニウム濃度実績を考慮した  
高レベル濃縮廃液の腐食性評価について

ネプツニウムの効果を考慮した電共研の試験結果から、高レベル濃縮廃液の腐食性が設計当初の 3 倍程度あることを確認している（添付資料－ 2 3 参照）。本資料では、アクティブ試験における高レベル濃縮廃液の腐食性について、ネプツニウム濃度の実績を踏まえて評価した。

アクティブ試験時の高レベル濃縮廃液に含まれるネプツニウム濃度は、濃度の高かった第 6～第 10 バッチでも保守側に見積もって 1.4 g/L 程度であり、電共研試験液の半分程度であったので、濃度に応じた腐食速度の補正を行った。

図 1 に示すように使用済燃料中の FP 濃度はネプツニウムと一次式の関係で変動するため、高レベル濃縮廃液の FP 濃度をネプツニウム濃度で代表することにより、FP 濃度の増減に伴う高レベル濃縮廃液の腐食性の変化を補正することができると考えられる。

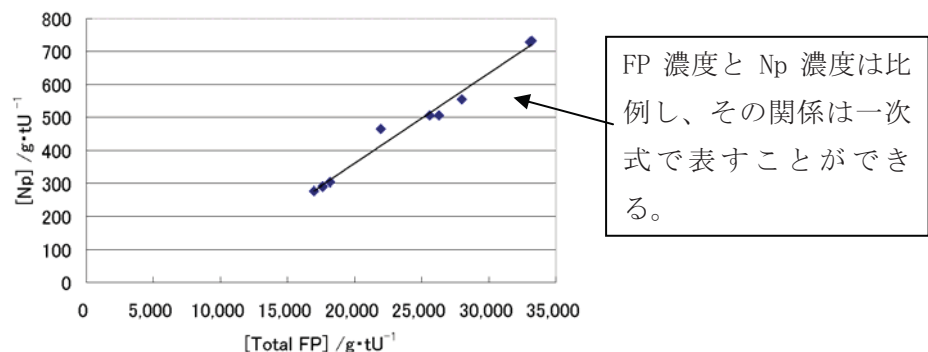


図 1 アクティブ試験で処理した燃料における Np 量及び FP 量の関係（ORIGEN 計算値）

腐食速度と FP 濃度は比例関係にあることが知られている。また、添付資料－ 2 4 の図 1 に示すように、硝酸溶液中にネプツニウムが存在した場合、その濃度の増加に伴い腐食速度は直線的に増加する。

以上のことから、高レベル濃縮廃液の腐食性はネプツニウム濃度で代表して補正することができる。

図 2 に示すように 85℃における腐食速度は、8 mol/L の純硝酸腐食速度から、電共研で得られた腐食速度まで、直線的に増加すると考えることができる。

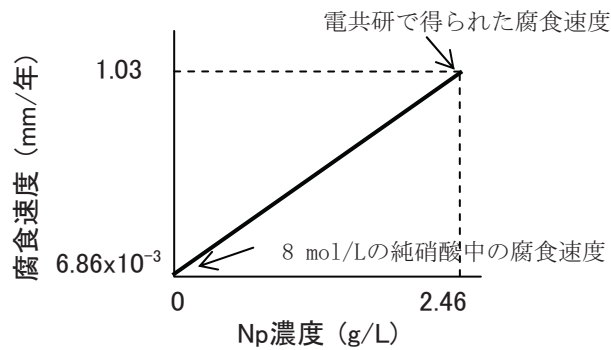


図2 高レベル廃液におけるFP濃度をNp濃度で代表した場合の腐食速度の変化  
(減圧沸騰85℃高レベル廃液中)

図2に示す関係を近似式化すれば

$$y = 0.416x + 0.00686$$

y : 腐食速度 (mm/年)

x : ネプツニウム濃度 (g/L)

となり、85℃におけるネプツニウム濃度に応じた腐食速度が求められる。

上式より、85℃におけるネプツニウム濃度が 1.4 g/L と 2.46 g/L の場合の腐食速度の比を求めると

$$(0.416 \times 1.4 + 0.00686) / 1.03 \div 0.58$$

となり、この比率は比較する温度が同じであれば成立する。

これより、アクティブ試験中の高レベル濃縮廃液の腐食性は、

$$3 \times 0.58 = 1.78$$

3 : 電共研での腐食速度補正係数の比 (電共研試験時/設計時)

0.58 : ネプツニウム濃度による腐食速度の比 (アクティブ試験時/電共研試験時)

となり、設計時の約 1.8 倍の腐食速度であったと試算できる。

以上より、ネプツニウムによって腐食速度が増大しても、アクティブ試験中の保護管の腐食速度は、設計腐食速度の 0.02 mm/年に対して 1.8 倍を乗じた 0.04 mm/年であったと推測される。

硝酸中での応力腐食割れ発生感受性

硝酸環境中で SUS304 系ステンレス鋼が応力腐食割れ（以下、「SCC」という。）を発生する可能性について、文献をベースに調査した結果を以下に示す。

ステンレス鋼の SCC は、一般的には塩素イオンの存在により、その感受性が高まるということが知られている。Petit らの文献<sup>1)</sup>によると、硝酸中に塩素イオンが共存したときの SCC 発生に関して、Petit らは図 1 に示すように、硝酸濃度を横軸に、塩素濃度を縦軸にして、SUS304 に生じる腐食形態のマップを提示している。これによると、SCC は硝酸濃度が 0.1 mol/L 以下且つ塩素濃度が 0.2 wt%以上で発生するが、硝酸濃度が 1.5 mol/L 以上では塩素濃度によらず粒界腐食となることが示されている。このことから当該温度計保護管がさらされている高濃度硝酸環境中では粒界腐食が支配的で、SCC は発生しないと考えられる。

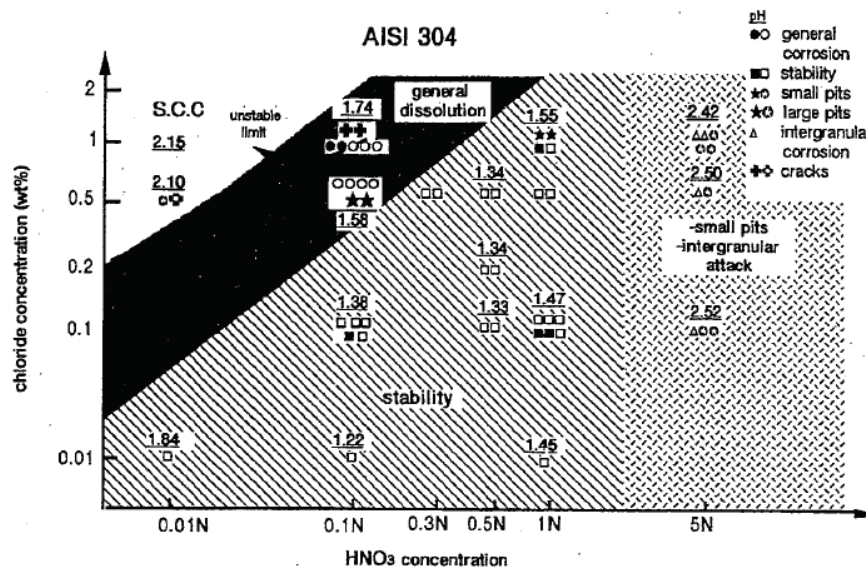


FIG. 13. AISI 304 stainless steel. The effect of the HNO<sub>3</sub> concentration and of the chloride concentration on the corrosion form observed on stressed material (white symbols: strain hardening 4%, applied stress 250 MPa; black symbols: strain hardening 0%, applied stress 250 MPa).

図 1 SUS304 の腐食挙動に及ぼす硝酸及び塩素の影響

- 1) M.C. Petit et al., "The electrochemical behavior of stainless steels in hot nitric solutions as related to the SCC phenomenon," Corrosion Science, 32(1991)1315-1329.



## 析出物存在下の模擬廃液中での腐食試験結果

## 1. 目的

析出物存在下での、全面腐食の腐食速度及び孔食等の局部腐食の有無に対する析出物の影響を評価する目的で試験を実施した。

## 2. 試験条件

試験は、以下の装置及び条件で実施した。

試験片：SUS304L (R-SUS304ULC 相当材)

溶液：模擬析出 (Ba 硝酸塩) を含む模擬廃液

温度：55、85、98℃

析出：有り、無し

時間：最大 2,200 時間

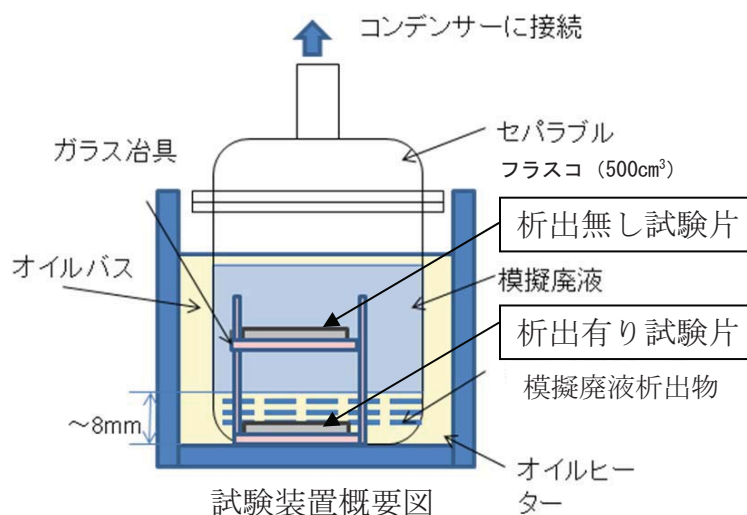
試験装置：下図参照

評価項目

- ・腐食速度
- ・試験片表面性状 (光学顕微鏡)

特記事項：

- ・98℃の温度条件は、計算上得られる析出層内の飽和温度（沸騰する直前の温度）である。
- ・溶液は、濃縮運転終了時の実機廃液を模擬しており、実機濃縮運転全体を通して考えると、本試験の方が腐食速度は大きい。

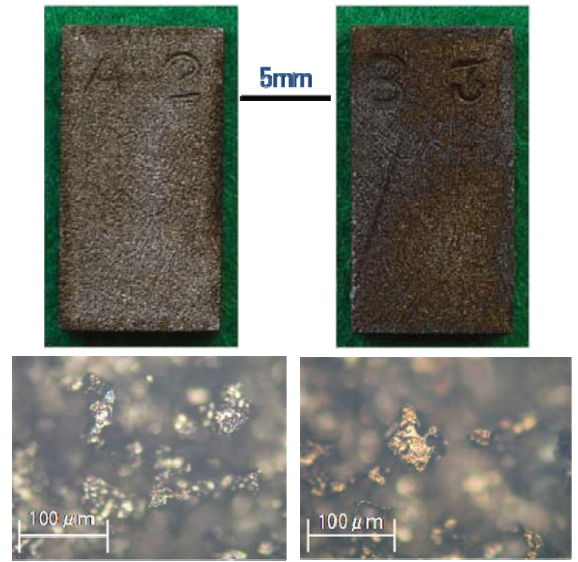
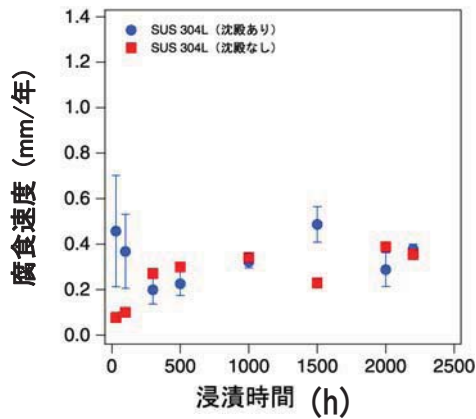


## 3. 試験結果

各試験結果を以下に示す。なお、本試験は 85℃における析出がある場合とならない場合の腐食速度を確認するために行ったものであり、55℃及び 98℃における

試験では腐食速度に変化がないことが確認できた段階で終了したことから、85℃とは浸漬時間が異なる。

(1) 温度：85℃、浸漬時間：2, 200 時間



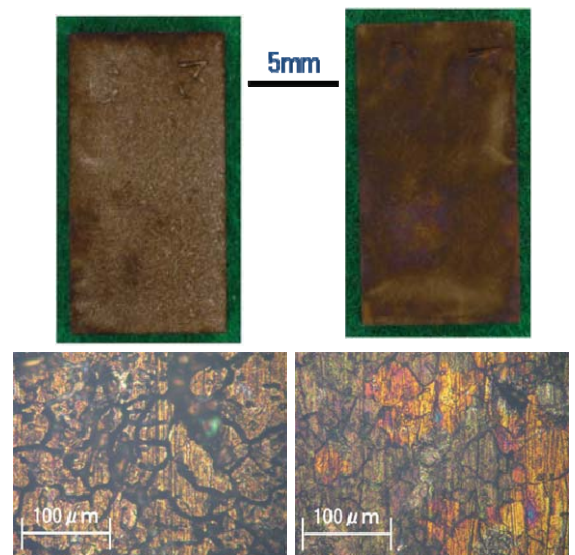
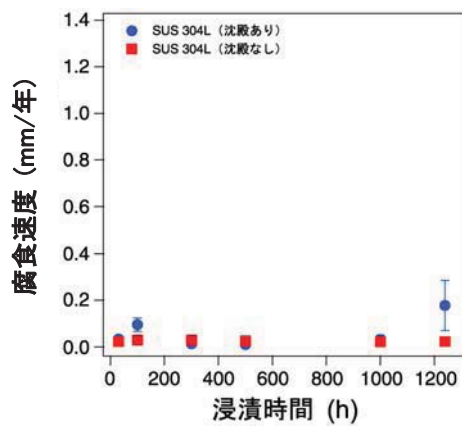
析出あり

析出なし

SUS304L 試験片表面写真(2,200時間)

⇒腐食速度：析出有 ≒ 析出無

(2) 温度：55℃、浸漬時間：1, 250 時間



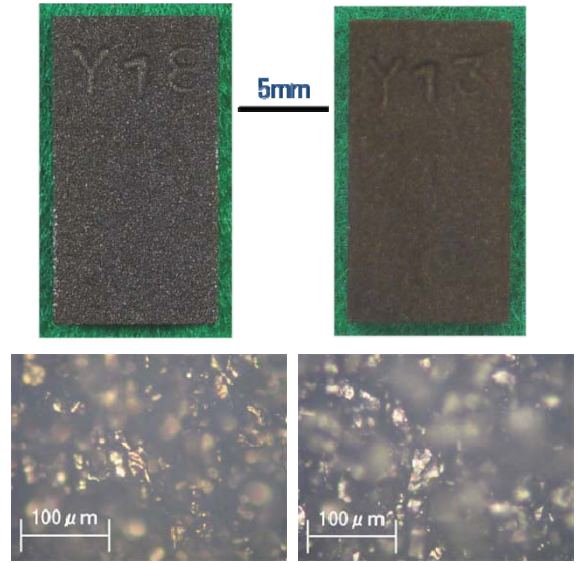
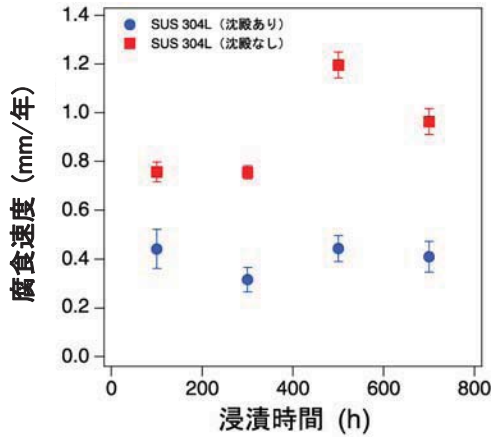
析出あり

析出なし

SUS304L 試験片表面写真(1,250時間)

⇒腐食速度：析出有 ≒ 析出無

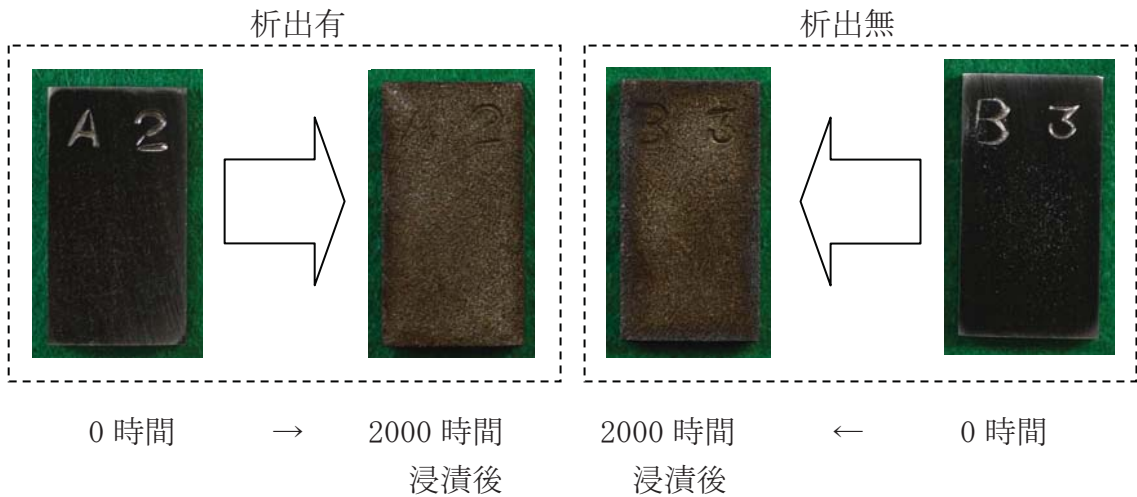
(3) 温度：98℃、浸漬時間：700 時間



析出あり                      析出なし  
SUS304L 試験片表面写真(700時間)

⇒腐食速度：析出無 > 析出有

(4) 温度：85℃、SUS304L 試験片の外観変化



SUS304L試験片の表面は全面腐食により荒れるものの、孔食等の局部腐食は認められなかった。

#### 4. 評価

析出があることによって全面腐食が加速する傾向は見られず、98℃においてむしろ抑制される傾向が見られた。これは、腐食により金属表面において酸化剤（硝酸等）が消費されるが、析出が新たな酸化剤の供給を妨げているためと考えられる。

また、55℃及び 85℃の全面及び局部腐食の速度は、析出有と析出無でほぼ同等の結果が得られ（図 1 参照）、析出物の影響による孔食等の局部腐食の発生がないことを確認した。

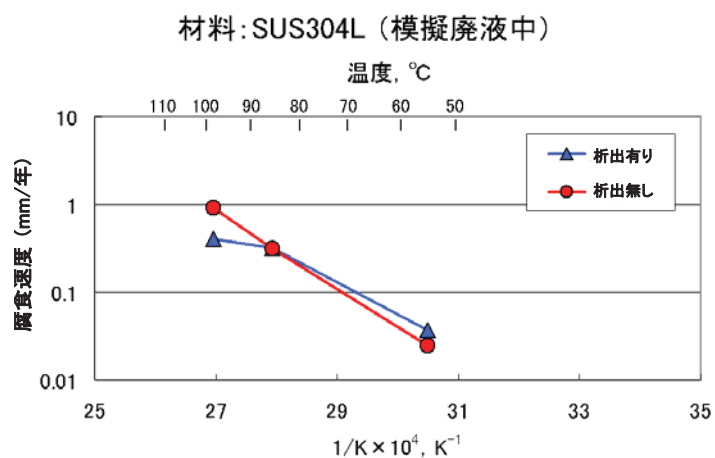


図1 析出の有無による SUS304L の腐食速度の違い  
(高レベル濃縮廃液中)