



# 東海再処理施設の腐食環境と機器の腐食速度評価

横 彰

東海事業所 再処理センター

Corrosion Circumstance in the Tokai Reprocessing Plant and Evaluation of the Corrosion Rate

Akira MAKI

Tokai Reprocessing Center, Tokai Works

再処理プロセスには、FP、U、Pu等の金属イオンの濃度、硝酸の濃度、環境温度が異なるなど様々な腐食環境が存在し、構成材料もその環境に応じて異なった材質となっている。

これまで、東海再処理施設においては、重要な機器の腐食故障が発生し、材質の変更や施工技術の開発などを行い、機器の更新や補修を行うとともに、故障した機器の調査を行ってきた。その知見から、Nb添加のステンレス鋼は、溶解槽における伝熱面では1 mm/yを超える腐食速度で、かつ、溶解槽及び酸回収蒸発缶の溶接部において微細な貫通孔が発生した。Ti-5Taについては、プルトニウム溶液蒸発缶の気相部において、0.1~0.3 mm/yの腐食速度を示したが、局所的な腐食は認められておらず、かつ、酸回収蒸発缶では腐食は観察されていない。

本報告では、上記のような腐食機器の調査結果や腐食試験の概要、機器の健全性確認として実施した肉厚測定結果について述べる。

*In the reprocessing plant, corrosive circumstances arise, because the major equipment contains a high concentration of the metal ions that originate from the fission products. They are also equipped in the various concentrations of nitric acid and various temperatures.*

*Based on failed experiments due to corrosion, repairing the equipment and exchanging materials, the corrosion rate of stainless steel containing Nb was measured over 1 mm/y in the heat transfer surface of the dissolver. Pin-holes in the weld zone of the heat conduction surface of the dissolver and the acid recovery evaporator were observed. Although the corrosion rate of Ti-5Ta in the vapor zone of the plutonium solution evaporator reached 0.1~0.3 mm/y, no local attacks were confirmed. On the other hand, the corrosion of Ti-5Ta was not observed in the acid recovery evaporator.*

*This report presents the survey result of the corrosion equipment and an outline of the corrosion tests, with the wall thickness measurement result obtained as a soundness confirmation of the equipment.*

## キーワード

腐食，チタン合金，オーステナイト系ステンレス鋼，硝酸，再処理，伝熱面，溶接部，溶解槽，酸回収蒸発缶，酸回収精留塔，プルトニウム溶液蒸発缶，核分裂生成物

*Corrosion, Titanium Alloy, Austenite Stainless Steel, Nitric Acid, Reprocessing, Heat Transfer Surface, Weld Zone, Dissolver, Acid Recovery Evaporator, Acid Recovery Distillate, Plutonium Solution Evaporator, Fission Products*



横 彰

技術主幹  
再処理施設の安全性確認、  
六ヶ所への技術支援などに  
従事

## 1. はじめに

現在工業規模で採用されている再処理方式はPurex法であり、溶媒としてリン酸トリブチル (Tri Butyl Phosphate: TBP) を、塩析材として硝酸を用い、原子力発電所からの使用済燃料を溶解し、核分裂生成物 (FP) を除去、ウラン (U) 及びプルトニウム (Pu) を回収するという化学処

理プロセスである。再処理プロセスでは、工程により、FP、U、Pu等の金属イオンの濃度、硝酸の濃度、温度が異なり、機器によって様々な腐食環境条件である。特に、金属イオンでみると、FPのうち特にRuが<sup>1)</sup>、TRU元素としてはNpが<sup>2)</sup>、核燃料物質ではPuが、硝酸によるステンレス鋼の腐食を促進する効果があり<sup>3)4)</sup>、Uはその効果が小さい<sup>5)</sup>といわれている。また、温度については、高ければ腐食速度が大きくなり、特に加熱機器の伝熱面での腐食が顕著である。こうした再処理プロセスの腐食環境に応じて、材料選定を行う必要がある。

東海再処理施設では、機器の構成材料として、SUS304Lを中心としたオーステナイト系ステンレ

ス鋼を用い、特に腐食環境の厳しい加熱機器では、含有炭素量の低いSUS310系のステンレス鋼やTiなどを用いているほか、硝酸ナトリウムやリン酸等を含む低レベルの放射性廃液を扱う工程ではSUS316Lを主に用いている。

これまで東海再処理施設においては、酸回収蒸発缶や濃縮ウラン溶解槽などの加熱機器の腐食故障が発生したが、材質の変更や施工技術の改良・開発などを行い、故障した機器の更新や補修を行ってきた(図1、表1参照)

本報告では、これまで東海再処理施設で経験してきた機器の腐食事例の概要とともに、更新工事において調査した機器の腐食状況、各種腐食試験

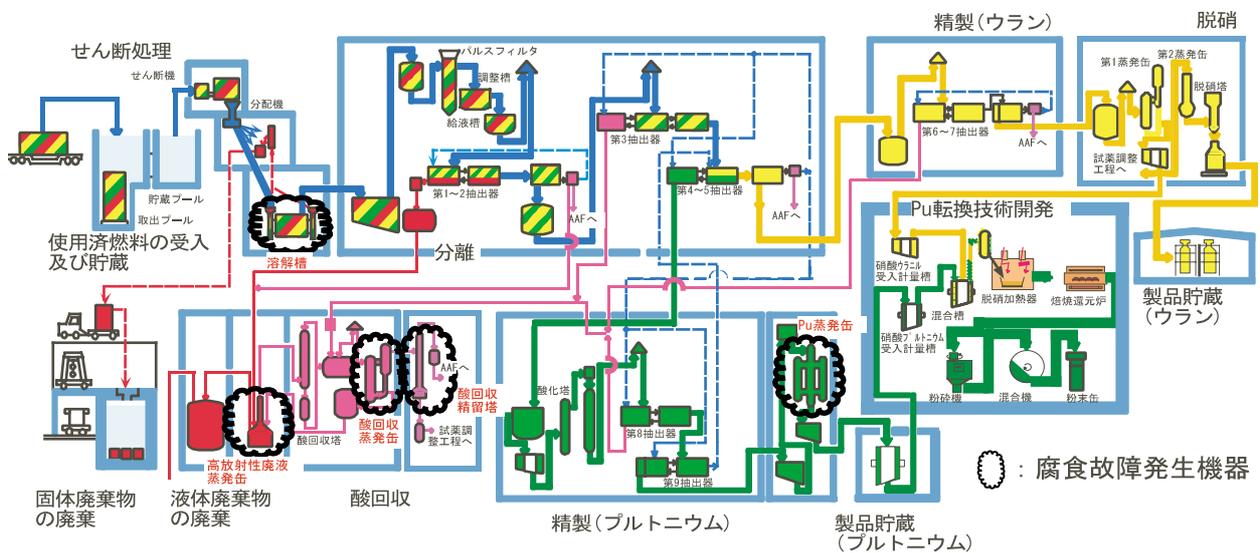


図1 東海再処理施設における主要な機器の腐食発生箇所概要図

表1 主な未臨界度測定技術と未臨界度モニタとしての適正評価

機器	材料	腐食部位		腐食状況	使用時間
		R10	バレルB		
ウラン溶解槽	ウラナス 65*1	R10	バレルB	溶接部に貫通孔	約4,100hr
		R11	バレルA	溶接部に貫通孔	約3,100hr
			バレルB	溶接部に貫通孔	
酸回収蒸発缶	ウラナス 65*1	上部管端溶接部		溶接部に貫通孔	約6,000hr
	クロニファ 25 25Nb*2	伝熱管母材(肉厚:4.95mm)		母材が減肉し貫通	約13,000hr
酸回収精留塔	SUS310ULC	加熱蒸気配管		加熱蒸気配管とサポート溶接部に貫通孔	約12,400hr
プルトニウム溶液蒸発缶	SUS304L(塔部) Ti(加熱部)	気相部(塔部)		記装配管ベルマウスに貫通孔	約11,000hr
高放射性廃液蒸発缶	ウラナス 65*1	中段加熱蒸気配管		-	約59,000hr
海中放出管	炭素鋼鋼管 アスファルト被覆	汀線付近		母材部に貫通孔	約17年

\* 1 フランス クロソワール社製 Cr : Ni : Nb = 25 : 20 : 0.25 C 0.02  
 \* 2 ドイツ V.D.M社製 Cr : Ni : Nb = 25 : 20 : 0.25 C 0.02

の結果，機器の健全性確認として実施した肉厚測定結果などについて述べる。

## 2. 機器の腐食事例

### 2.1 酸回収蒸発缶

酸回収蒸発缶は，分離第二サイクル以降の抽出工程からの抽出残液や高放射性廃液蒸発缶及び溶解槽の蒸発蒸気から回収した硝酸溶液など中レベルの放射性廃液を蒸発処理する加熱機器であり，加熱部と蒸発部から構成されているサーモサイフォン型の蒸発缶である。運転条件は，硝酸濃度が約8 mol/l，加熱蒸気温度が約130℃，溶液温度として約110℃である。この溶液中には，PuやRuが0.1～1 mg/l程度含まれており，Npは一桁程度大きく10～20 mg/l程度である。

酸回収蒸発缶は腐食対策としてこれまで3回の更新を行っており，更新ごとに材質も変更してきた。第一代の蒸発缶の材質は，ウラナス 65(フランスのクロソワール社製の材料で，Cr : Ni : Nb = 25 : 20 : 0.25)であったが，腐食による機器の更新のため，第二代はウラナス 65とほぼ同等のクロニファー 25 20Nb(西ドイツのV. D. M. 社製の材料でウラナス 65とほぼ同じ組成)，第三代がNAR310Nb(C, Si, P, Sなどの微量不純物を極力低減したSUS310系のオーステナイト鋼でNbを添加した国産材料<sup>6)</sup>。現在のR SUS310Nbに相当)，その後予防保全の観点から更新した第四代の蒸発

缶がR Ti 5Ta(現在設置されている蒸発缶)と変遷してきている。

第一代の蒸発缶は，約6,000時間の運転後に，加熱部における伝熱管と管板の溶接部の5箇所に貫通孔が発生し，第二代の蒸発缶は，約13,000時間の運転後に，伝熱管の母材部に貫通孔が発生した。

#### (1) 第一代酸回収蒸発缶の腐食状況

第一代の蒸発缶における貫通孔の腐食形態は，溶接ビード上のクレーター部(溶接の最終部)から貫通に至ったものと，管板と伝熱管の隅肉溶接部(2層盛)の初層の溶接金属から貫通に至ったものの2種類に大別される(写真1参照)。

加熱部やカラム部の内部表面については，細かい肌荒れが認められたが，カラム部，連通管等の減肉量は，超音波測定や渦流探傷における測定誤差あるいは製作誤差の範囲内であった。

伝熱管については，中央部の7本について渦流探傷を行ったが，測定精度(肉厚4.5mmの20%)の範囲内であった。

#### (2) 第二代酸回収蒸発缶の腐食状況

第二代の蒸発缶は，上記の知見を踏まえて，管板と伝熱管の溶接部はU字開先をとった3層盛の溶接とするとともに，初層及び第二層の溶接金属が露出しないように改良を施した。

第二代の蒸発缶では，195本ある伝熱管のうち2本に貫通孔が確認され，うち1本は下部管板より上方約1.1mの位置に小さな貫通孔が多数(当該部

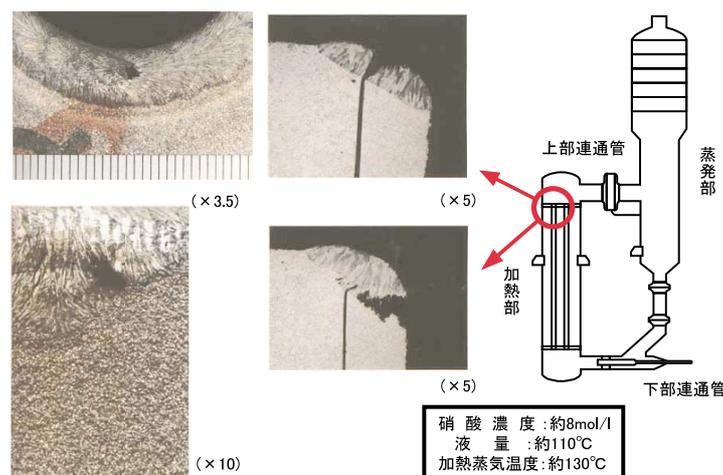


写真1 第一代酸回収蒸発缶の腐食概要

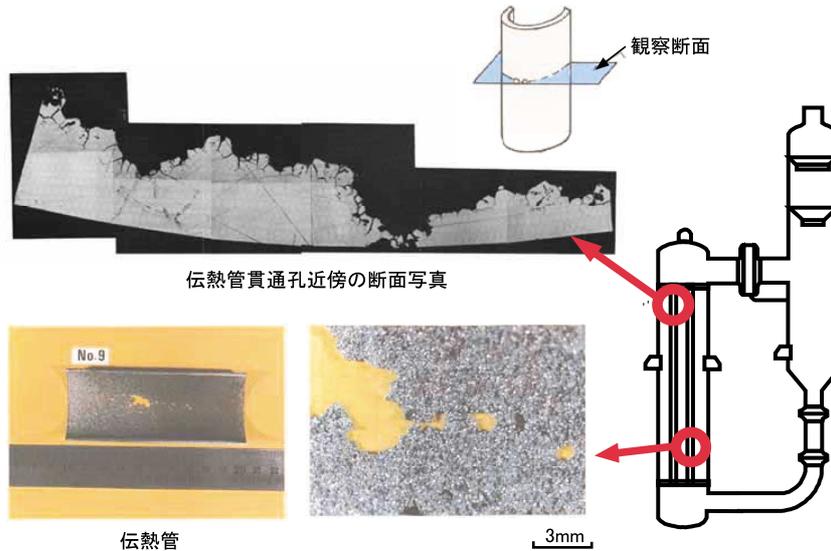


写真2 第二世代酸回収蒸発缶の腐食概要

分の肉厚は非常に薄くなっていた)他の1本は上部管板より下方約0.15mの位置に2個の小さな貫通孔(ただし、硝酸溶液側からみると1個)が確認された(写真2参照)。

その他、上部管板近傍において、伝熱管の端面から発したと思われる溝状の腐食(加工フロー腐食<sup>7)8)</sup>が進展した後に、酸回収蒸発缶内溶液により伝熱管表面から腐食が進行し、溝状となったもの)が多数観察され、下部管板では顕著な溝状の腐食は1本の伝熱管のみに認められ、かつ溝状の腐食のうち最も長く約6cmであった(写真3参照)。これを腐食速度に換算すると約40mm/yに相当する。

195本の伝熱管については、全数渦流探傷を行っており、その肉厚測定結果に基づく伝熱管全長にわたる肉厚プロフィールを図2に示す。この肉厚プロフィールから、残肉量の傾向は以下のとおりである。

加熱蒸気の入口付近から上部に至る伝熱管の残肉量が多く、下部方向に行くに従って残肉量が少なくなっている。

さらに、加熱蒸気出口(熱交換を終えた凝縮液の出口)付近及び下部管板付近において残肉量が多くなっている。

伝熱管も含めた各部位の腐食速度(超音波肉厚計による測定の結果と製作時の肉厚及び運転時間から腐食速度を求めた腐食速度)を表2に示す。腐食速度は、蒸発缶溶液の気相部が最も小さく、気液混相部、液浸部、伝熱面の順に大きくなっており、伝熱面の腐食速度は、液浸部の約3倍(貫通孔が生じ

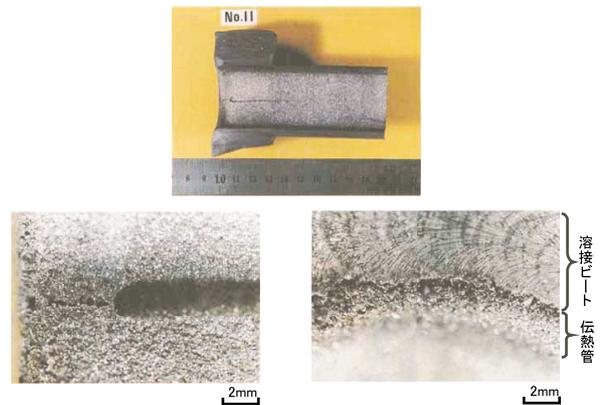


写真3 下部管板と伝熱管溶接部近傍に認められた加工フロー腐食の外観

た部位が最大で、約10倍)となっている。

また、腐食に関するデータを蓄積する観点で沸騰の8mol/l純硝酸溶液を用いた48時間のコールドの浸漬試験を行った結果、クロニファー25.20Nbの腐食速度は約0.03mm/yであった。この値と実機における液浸部の腐食速度を比較すると、約10倍となる。この違いは、48時間の浸漬試験であるために未だ脱粒に至らないが、実機の場合、浸漬時間が長く結晶粒の脱落が生じること、実機の溶液中存在するPuやRu(0.1~1mg/l程度)、Np(10~20mg/l程度)により腐食が加速されることなどによるものと考えられる。

加えて、第二代の材料であるクロニファー25.20Nbと第三代のNAR310Nbの伝熱管を夫々2本、合計4本の伝熱管を有する模擬蒸発缶を製作し、約8mol/lの硝酸に $Cr^{6+}$ を3~5g/l添加し

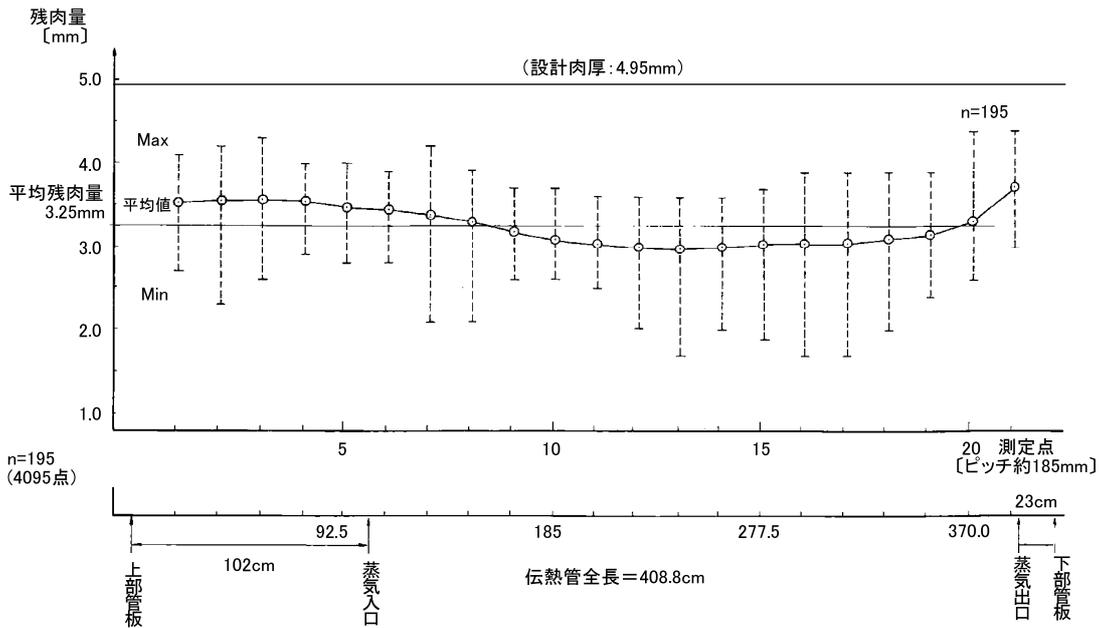


図2 第二代酸回収蒸発缶伝熱管軸方向残肉量分布(伝熱管195本全数での分布)

表2 第二代酸回収蒸発缶各部位における腐食速度

部 位	減肉量 (mm)	腐食速度 (mm/y)	備 考
伝 熱 管	平均1.7 (最大5.0)*	1.1(3.4)*	液浸条件 + 伝熱条件
上部連通管	平均0.54	0.36	液浸条件
下部連通管	平均0.37	0.25	液浸条件
加熱部鏡板	平均0.30	0.20	液浸条件
蒸 発 部	平均0.34	0.22	液浸条件
	平均0.23	0.15	気液混相
	平均0.16	0.11	蒸気相

\*貫通孔が生じた部位

た溶液による比較試験を行った(写真4参照)。この結果、クロニファー 25.20Nbの腐食速度はNAR310Nbの約2倍で、住友化学(株)で実施された酸回収蒸発缶実証機における結果<sup>6)</sup>と同程度であることが示され、かつ、クロニファー 25.20Nbの伝熱管に、第二代の酸回収蒸発缶で見られた溝状の腐食が確認された。この溝状腐食の先端部分についてX線マイクロアナライザーによる面分析を行ったところ、材料製造時に添加されていたLa, Ceと不純物として含まれているSの偏析が認められ(写真5参照)、この偏析が加工フロー腐食

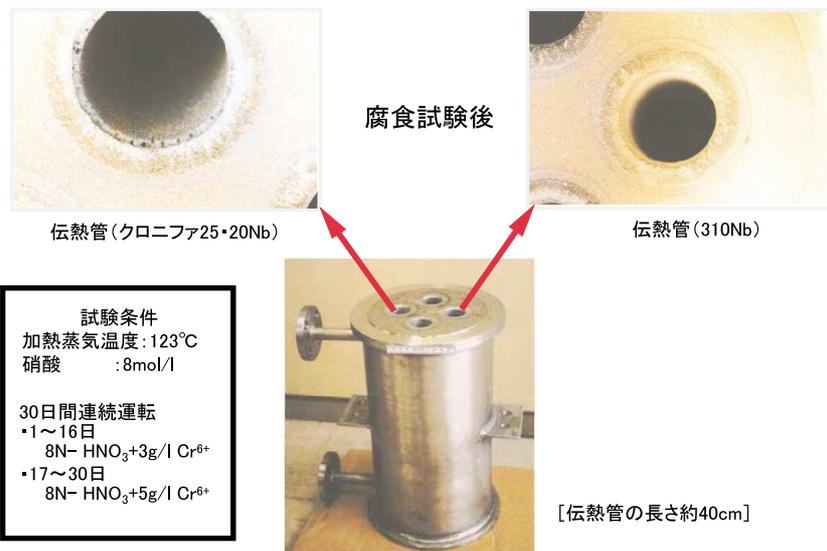
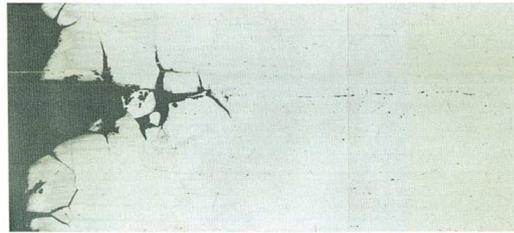
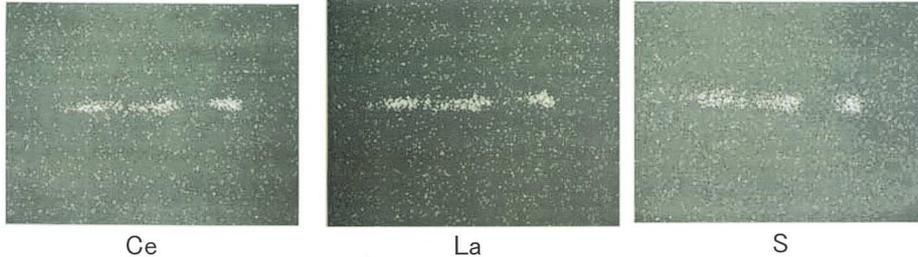


写真4 模擬蒸発缶腐食試験



加工フロー腐食伝熱管の断面組織(×100)



加工フロー腐食先端部(上記写真の中央部)におけるX線マイクロアナライザーによる面分析(×1000)

写真5 模擬蒸発缶で認められた加工フロー腐食(クロニファ 25.20Nb 鋼管)

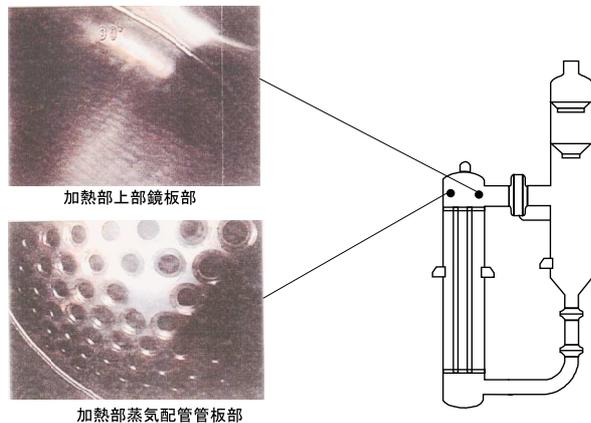


写真6 第四代酸回収蒸発缶内部観察結果

の要因となっていると推察された。

### (3) 第三代酸回収蒸発缶の腐食状況

NAR310Nbで製作した第三代の蒸発缶は、約10,000時間の運転を行った後に、予防保全の観点から、Ti 5Taで製作した第四代の蒸発缶に更新した。この更新工事では、第三代の蒸発缶の伝熱管7本について渦流探傷を行ったが、肉厚は製作公差や測定誤差の範囲内であり、有意な減肉は確認できなかった。

### (4) 第四代酸回収蒸発缶の腐食状況

Ti 5Ta製である第四代の蒸発缶についても、第二代の蒸発缶で腐食故障が発生した約13,000時間の運転経過後に、超音波肉厚測定装置や渦流探傷による検査を行ったが、カラム部、上部連通管及び伝熱管ともに減肉は確認できなかった。この検

査では蒸発缶の内部観察も併せて行ったが、その結果、金属光沢が認められ腐食は全く進行していないことが確認できた(写真6参照)。なお、現在までに、約25,000時間の運転を継続しているが、何ら問題は生じていない。また、小型酸回収蒸発缶による約40,000時間の実証試験<sup>9)</sup>においても、Ti 5Taの腐食速度は0.1mm/yを下回り、工学的に優れた耐食性を示すことが確認されている。

### (5) 酸回収蒸発缶の濃縮液を用いた腐食試験

酸回収蒸発缶の材質変更に伴い、酸回収蒸発缶の濃縮液(表3参照)を用いてSUS304L、Ti、Zr、Ti 5Taの各材料の腐食試験を行った。この結果、SUS304Lは約0.3mm/yの腐食速度を示したが、その他の材料は、溶接の有無にかかわらず優れた耐食性を示し(図3参照)<sup>10)</sup>、パブルメタルが酸回収蒸発缶環境において優れた耐食性を示すことが確認できた。ただし、Zrについては、定電位(1.5V)の腐食試験を行うと、初期段階において孔食状の腐食が始まり、時間の経過とともに全面に広がっていく腐食形態を示すことが確認された(写真7参照)。この現象は、酸回収蒸発缶内溶液だけではなく、純硝酸溶液においても生じ、1.4V以上の電位においてZr表面の酸化皮膜が破壊される現象として既に報告されている<sup>11)</sup>。

### (6) 異種材料の継手の開発

第四代の酸回収蒸発缶の材質にはTi 5Taを採用したが、既存の配管材料はステンレス鋼であるため、異種材料間の継手の開発を行った<sup>12)</sup>。この

表3 腐食試験に用いた酸回収蒸発缶内容液の組成

		分析値
硝酸濃度 (mol/ℓ)		6.17
金属不純物 (mg/ℓ)	Fe	325
	Cr	125
	Ni	100
核種 (Bq/ml)	<sup>144</sup> Ce	1.0 × 10 <sup>9</sup>
	<sup>137</sup> Cs	1.0 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>134</sup> Cs	1.9 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>106</sup> Ru	4.1 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>103</sup> Ru	< 3.7 × 10 <sup>9</sup>
	<sup>95</sup> Zr	< 3.7 × 10 <sup>9</sup>
	<sup>95</sup> Nb	< 3.7 × 10 <sup>9</sup>

開発の一環として、熱間圧延管継手の試験片 (Ti-5Ta 或いは Zr と SUS304L の熱間圧延管継手) を酸回収蒸発缶の濃縮液抜き出し配管内に設置し、約9,006時間の浸漬試験を行った。

その結果、Ti-5Ta や Zr は金属光沢を示し、SUS304L は光沢のある黒色に変化したものの異常は認められず、かつ染料探傷試験においても異材の界面を含めて赤色指示は認められなかった。このことから、蒸発缶への供給液のように常温に近い硝酸廃液の環境で熱間圧延管継手を使用することには問題ないものといえる。

2.2 濃縮ウラン溶解槽

濃縮ウラン溶解槽は、使用済燃料を硝酸で溶解

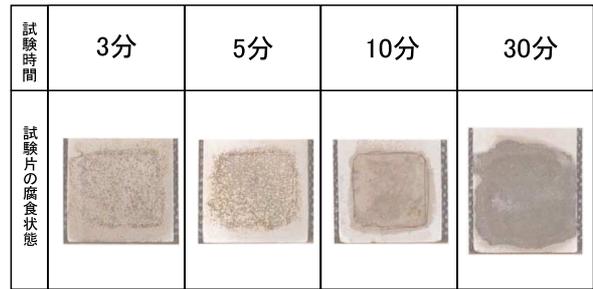


写真7 定電位 (1.5V) 腐食試験外観写真 (Zr)

する加熱機器で、2本の円筒状の溶解部と平板状の貯液部から構成されている (図4参照)。

基本的な運転モードは、以下のとおりである。溶解開始前に純水を供給した後、せん断した使用済燃料約400kg Uを溶解部に装荷し、さらに約10mol/ℓの初期硝酸を供給し硝酸濃度を約1mol/ℓとする。約180の蒸気で加熱を開始し、断続的に約10mol/ℓの硝酸を供給しながら7~10時間の加熱運転を行い、最終的にはウラン濃度約500g/ℓ、硝酸濃度約3mol/ℓの溶解液を得る。加熱運転中の溶液温度は、約104である。この溶液の中には、Puが約4g/ℓ、Ruは約1g/ℓ程度含まれている。

当初設置されていた溶解槽 (242R10, R11) は、1982年4月に242R11が約3,100時間の運転後に、1983年2月には242R10が約4,100時間の運転後に、加熱部の溶接線に腐食による貫通孔が発生したため、両溶解槽とも遠隔で補修するとともに、1984年には新たな溶解槽242R12を設置し、合計3

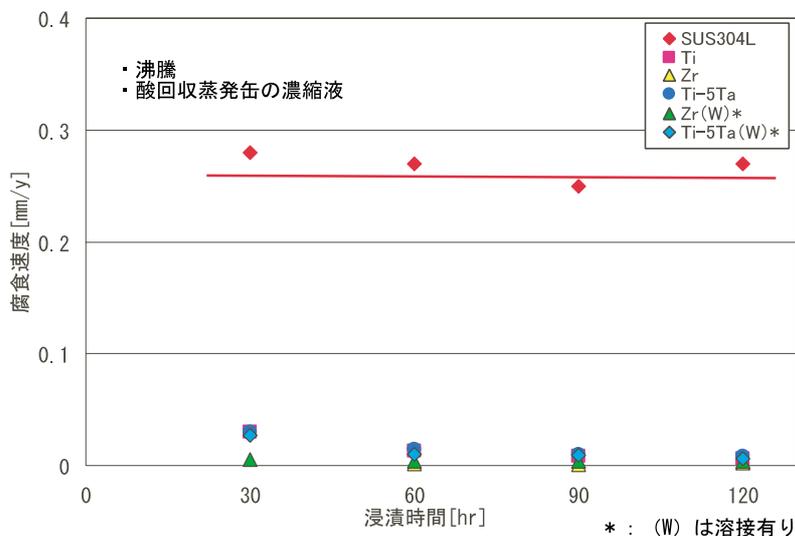


図3 浸漬時間と腐食速度の関係

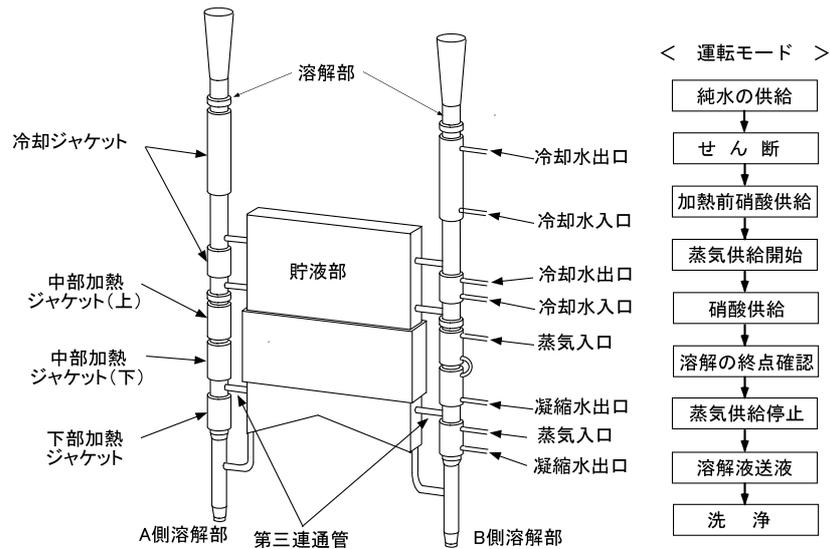


図4 濃縮ウラン溶解槽概要図

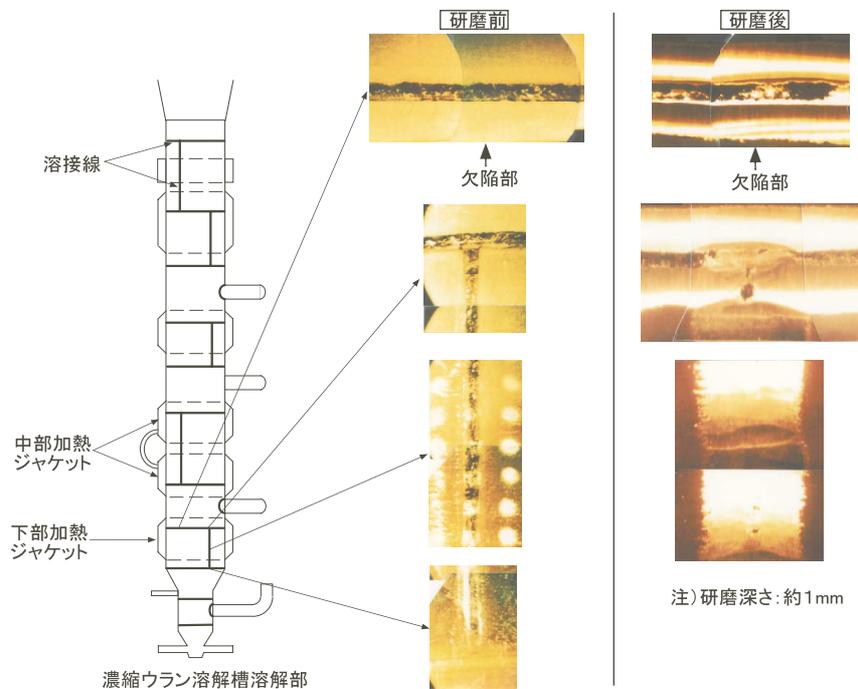


写真8 溶解槽の腐食状況

基となった。242R10及びR11の材料はウラナス65であり、242R12は第三代の酸回収蒸発缶と同じNAR310Nbを採用し、加熱ジャケットに覆われた部分の溶接線をなくすなどの改良を施した。

#### (1) 溶解槽の腐食状況

貫通孔が発生した箇所は、242R11では下部加熱ジャケットに覆われた溶接線及び第三連通管と溶解部との溶接部の2箇所、242R10では下部加熱ジャケットに覆われた溶接線1箇所であった。これらの貫通孔は外観観察では特定できず、発泡試

験で確認できる程度であり、その大きさは、オリフィスと仮定した場合の直径として0.01~0.03mm程度であり、微細なものであった。

腐食発生後に実施した外観観察の結果、溶接部(TIG溶接)は、下部加熱ジャケットで覆われた部位の腐食が著しく、加熱ジャケットから外れた溶接線の腐食は軽度であった(写真8参照)。母材部は微細な肌荒れが認められただけで特に異常は認められず、約1mm程度の研磨によって肌荒れが削除できる程度であり(写真8参照)、かつ、超音波

肉厚計による測定では有意な減肉は認められなかった。第三連通管と加熱部との接続箇所である溶接部（電子ビーム溶接）は、全周にわたって侵食されており、研磨によっても侵食箇所は削除できなかった。

こうしたTIG溶接による溶接線において特に著しい腐食が進行する要因は、以下のことが考えられる。

溶解液に接している部位は、溶接線の裏波であり、多層盛りの溶接線のうち初層に相当し、溶接の熱影響を受け、鋭敏化している可能性が最も高い。従って、母材部よりも耐食性に劣ることとなる。

溶接部で腐食が生じると、デンドライト組織であるために、粒状の結晶となっている母材部とは異なり、肉厚方向に対して比較的深い粒界腐食となる。

さらに、貫通孔が生じた溶接部は、加熱蒸気温度が約180℃、溶解液が約104℃の伝熱面であるため、肉厚方向の温度勾配が大きく（約6℃/mm）、デンドライト組織の先端部での温度が溶解液よりも更に高く、腐食速度は、腐食の進行とともに加速度的に増大していく。加えて、腐食が進行した先端部では、硝酸の沸点を超える温度条件となり、硝酸濃度の上昇やステンレス鋼から溶出したCrイオン等の濃縮も加わって、比較的短時間で貫通に至ったものと考えられる。設計肉厚及び加熱運転時間からこの溶接部における腐食速度を求めると30mm/yを超える値となる。

これに対して、電子ビーム溶接で施工されている第三連通管の溶接部は、加熱ジャケットで覆わ

れていないため、他のTIG溶接部よりは腐食環境としてマイルドであったことから腐食の進行は軽度あるといえるが、貫通に至る腐食が発生している。このことは、本機器は海外で製作されたため、溶接に関する品質管理記録が十分に残されておらず明確にはいえないが、内在欠陥が存在していた可能性もある。

## (2) 濃縮ウラン溶解槽の補修

これらの補修のために遠隔装置を開発し、貫通孔を含む溶接部、即ち下部加熱ジャケットに覆われたTIG溶接部及び第三連通管の電子ビーム溶接部について、外観検査、研磨、補修溶接、染料浸透試験、超音波試験の一連の補修作業を行った。さらに、予防保全の観点から中部加熱ジャケットに覆われた溶接部についても追加補修を行った。

## (3) 補修した溶解槽の点検結果

補修部位の健全性を確認するために、遠隔装置を用いて定期的に外観観察や肉厚測定などの検査を行ってきている。

溶接部の外観観察については、視覚的な情報から腐食の程度を比較・推定するために、溶接を施した試験片を製作し、Ruを添加した溶液による伝熱面の腐食加速試験を行った。その結果を表4に示す。なお、この試験では、実機での補修を模擬するとの観点から内在欠陥の上から肉盛り溶接を施した。この肉盛り溶接部については、表4に示す第三段階まで腐食が進行しても、溶接ビードから欠陥部位に至るような侵食はなく、閉じ込め性は確保できることも合わせて確認した。

写真9に補修溶接以降加熱運転を約4,800時間及び約6,100時間（現在）経過した時点での溶接部

表4 コールド試験で得られた腐食進行モデル

段 階	第1段階	第2段階	第3段階
写 真			
外観上の特色	金属光沢がなくなり肉盛り溶接ビード上のリップル線が消失	デンドライト組織の脱落により芝生状の外観へ変化	肉盛り溶接ビードが芝生状の外観を呈し、肉盛り溶接ビード幅減少
腐食の状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>デンドライト組織境界に沿った侵食</li> <li>明瞭なデンドライト組織</li> <li>デンドライト組織の脱落</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶接ビードのリップル線が消失</li> <li>デンドライト組織の脱落の進行</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>肉盛り溶接ビードの端部におけるデンドライト組織の脱落による肉盛り溶接ビード幅の減少</li> </ul>

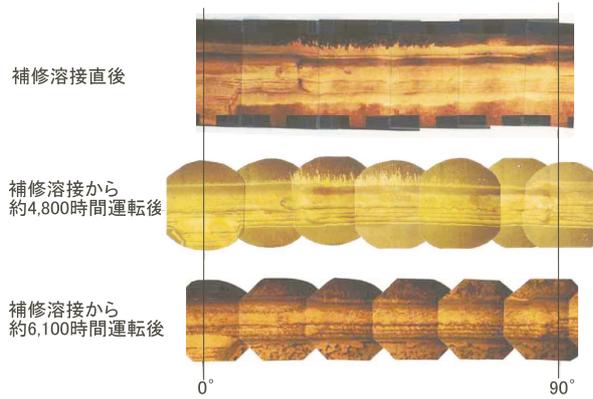


写真9 濃縮ウラン溶解槽下部加熱ジャケットの周溶接線

の観察結果を示すが、いずれも表4の第一段階にあるといえる。

超音波測定の結果として、最も減肉が進んでいる242R11の減肉の経時変化を図5に示す。図5のうちにポイント38~42は、加熱ジャケットに覆われておらず、伝熱面ではなく沸騰した溶解液に浸漬されているだけであり、減肉が1桁程度小さな値を示している。従って、溶解液が循環するだけの溶解槽の貯液部については減肉しているとしても軽度であるといえる。

このデータをもとに求めた減肉量と加熱時間の関係を図6に示す。このグラフから最小二乗法により求めた傾きが腐食速度であり、242R10及び

242R11の加熱ジャケットに覆われた伝熱面の腐食速度は、2.2~3.3mm/yとなることがわかる。なお、2mol/lの沸騰硝酸による48時間の浸漬試験により得られたウラナス65の腐食速度は約0.01mm/yであり、実機の腐食速度は、この値の100倍を超えることとなる。このことは、伝熱面及びPuやRuによる加速効果並びに長時間の腐食による脱粒によるものと考えられる。

一方、新たに設置した242R12については、最近測定を開始したためデータが少なく、かつ中部加熱ジャケットのみであり他の溶解槽に比べて信頼性は劣るが、設計肉厚と現時点における肉厚測定の結果から腐食速度を求めると約1.5mm/yとなる。従って、242R12の材料であるNAR310Nbは242R10やR11の材料であるウラナス65の約1/2の腐食速度であり、耐食性の向上が図られていることが分かる。

さらに、溶解槽に腐食故障が発生して以降、加熱時間の短縮などの運転モードの変更を行っているが、図6から、この運転モードの変更による腐食速度の低減傾向が見られる。

### 2.3 酸回収精留塔

酸回収精留塔は、9段の泡鐘段と3系統の加熱蒸気用蒸気配管を有する加熱部から構成されており、酸回収蒸発缶からの硝酸蒸気を下から4段目

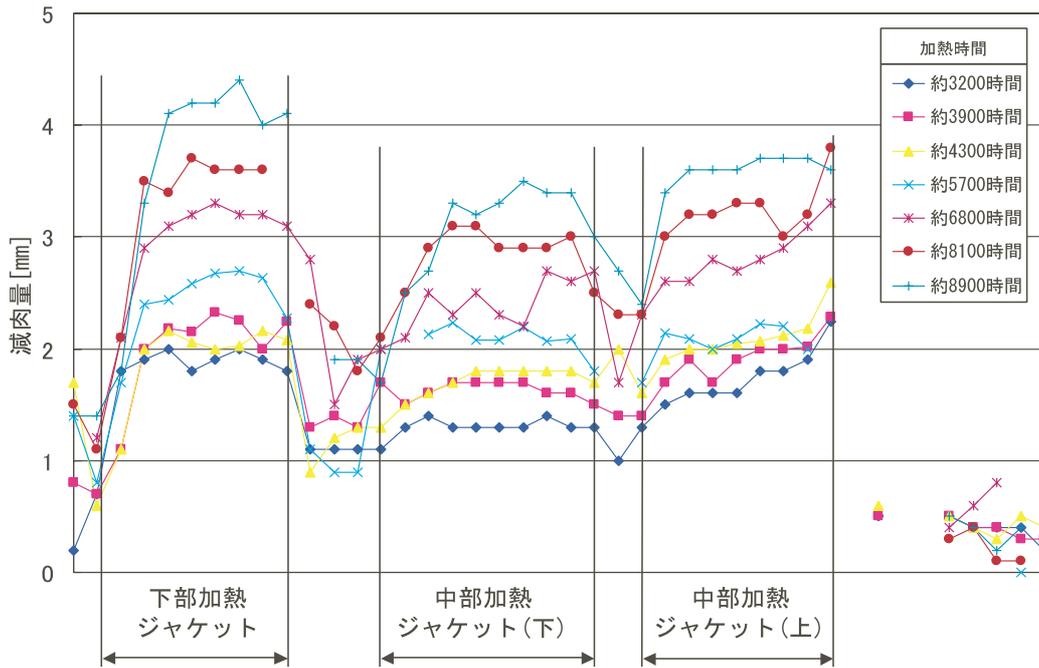


図5 濃縮ウラン溶解槽減肉状況の例

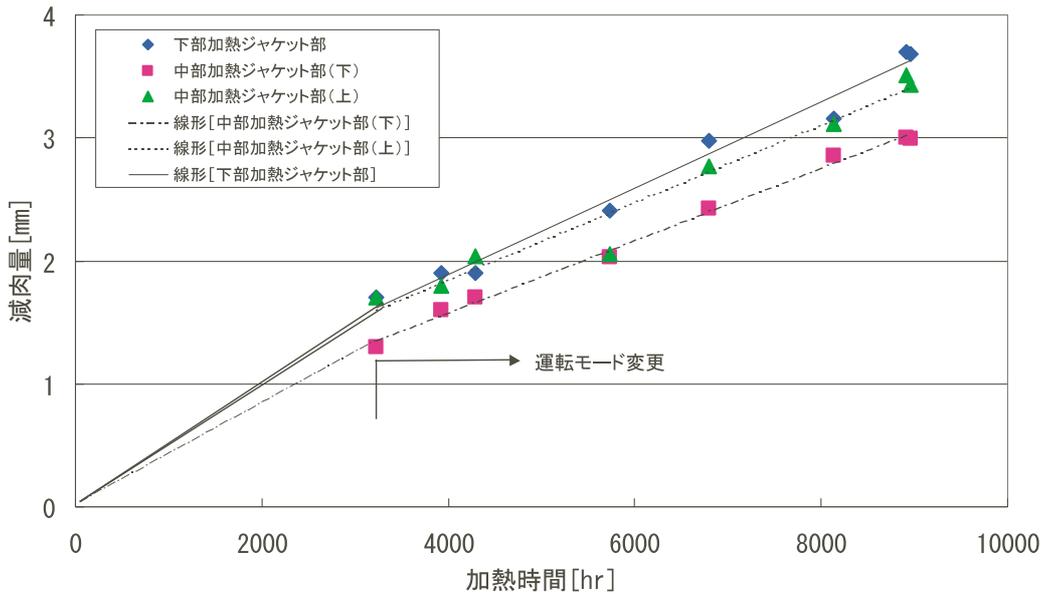


図6 濃縮ウラン溶解槽の腐食速度(242R11A側溶解部)

と5段目の泡鐘段の間に導入し、10~11mol/lの硝酸を回収する加熱装置である。材質は、泡鐘段部がSUS304Lで、加熱部はSUS310ULCであり、加熱蒸気温度は約183℃、加熱運転時の液温は約115℃である(図7参照)。なお、回収される硝酸中の放射性物質は、極微量である。

(1) 酸回収精留塔の腐食状況

当該精留塔は、1981年2月に、腐食による機器の故障が発生した(累積加熱運転時間は約12,400時間)。点検の結果、3系統ある加熱蒸気配管のうち2系統の溶接部3箇所に貫通孔が認められたことから(図8参照)、当該箇所の撤去・更新を行う

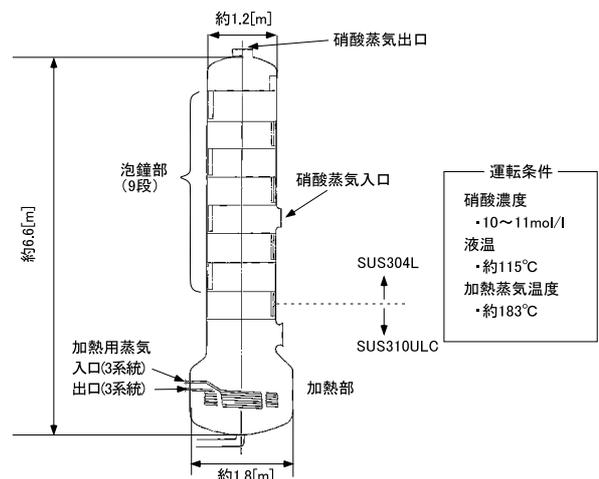
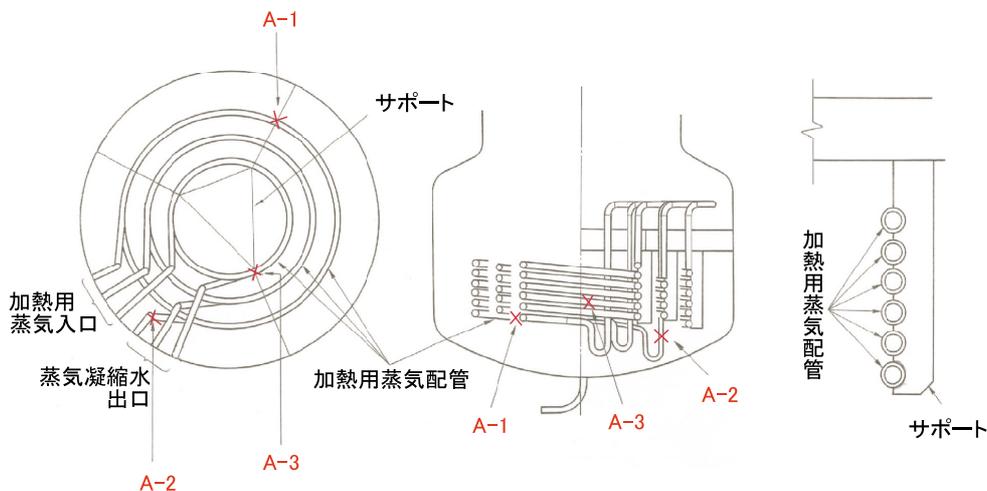


図7 酸回収精留塔概要図



( A-1, A-3: 加熱用蒸気配管とサポートの溶接部  
A-2 : 加熱用蒸気配管の突き合わせ溶接部 )

図8 酸回収精留塔異常部位(A1~A3)

た。撤去した箇所について断面観察などの破壊検査を行ったところ、どの貫通欠陥部も、ステンレス配管の軸方向への広がりをもった空洞が存在した(写真10参照)。これは、溶接部を起点として腐食が始まり、腐食の進行に伴って、ステンレス鋼内部に侵食が進展していくが、肉厚方向への腐食速度(約3.5mm/yに相当)に比べて管軸方向に沿った腐食速度(約40mm/yに相当)がはるかに大きいことにより生じたものと考えられる。

## (2) 酸回収精留塔における腐食試験

当該精留塔加熱部の材質であるSUS310ULCの耐食性を確認するために、以下の試験片を作成し、その試験片を当該精留塔に設置し約1,850時間の浸漬腐食試験を行った。

- ・配管材を突合わせ溶接したもの
- ・溶接ビードの余盛を研削したもの
- ・溶接ビードをバフ研磨したもの
- ・溶接ビード及び溶接ビード近傍に細孔(0.5mm)をあけたもの

この試験では、本環境における他の材料の耐食性についても確認するため、Ti, Zr, ウラナス65, SUS304Lの浸漬試験も併せて行った。その結果を図9に示す。

この結果から、SUS310ULCは、他のステンレス鋼よりも優れた耐食性を示し、かつ予め細孔をあけた試験片においても特に腐食の進展が認められなかった。なお、Tiは約0.25mm/yrとウラナス65

やSUS310ULCよりも大きな腐食速度を示すとともに、Zrは良好な耐食性を示した。

このように、浸漬だけの条件ではSUS310ULCの腐食速度は小さい。しかし、貫通欠陥が生じた箇所は伝熱面にある溶接部であり、加熱蒸気温度が約183℃で溶液温度が約115℃であるため、温度勾配が大きい(約14℃/mmであり濃縮ウラン溶解槽の約2倍)、溶接部におけるデンドライト組織の粒界腐食は粒状晶である母材に比べてより深い浸食となるため、一旦腐食が始まると腐食の先端部における温度が液温に比べて高いこと及び先端部において溶出したCrなどのイオンが濃縮すること、さらには、高温でかつ高濃度の硝酸によるCr<sup>6+</sup>への酸化<sup>10)</sup>等が生じることにより、溶接部において加速度的に腐食が進行したものと考えられる。また、腐食により生じた孔内部では、硝酸が侵入する孔が小径のため、硝酸の供給が制限され、かつ高温であるため、侵入した硝酸が濃縮される。この硝酸は、気液平衡曲線に沿って共沸組成(約15mol/l, 沸点約120℃)まで濃縮され酸化力が増加し、腐食が加速される。しかし、この温度を超えると気相となるため、腐食で生じた電子の授受を行う水溶液が存在しないため、腐食速度が逆に小さくなる。一方、加熱配管では、外表面が約115℃の硝酸溶液、内表面が約183℃の蒸気であるため、120℃を若干超える温度領域が管軸方向に沿って存在する。120℃よりも若干高い温度領域において

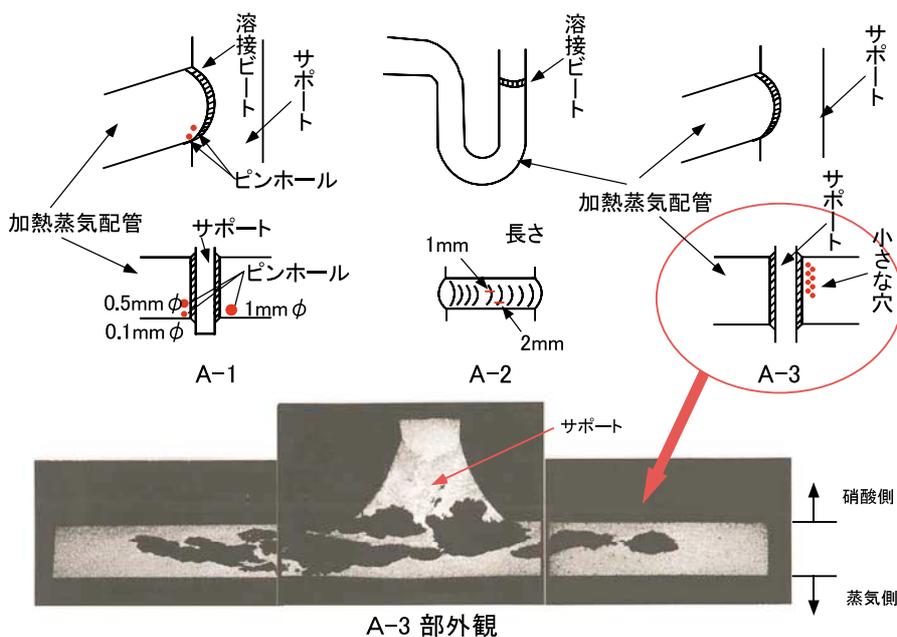


写真10 酸回収精留塔の加熱蒸気配管における各異常部位の概要

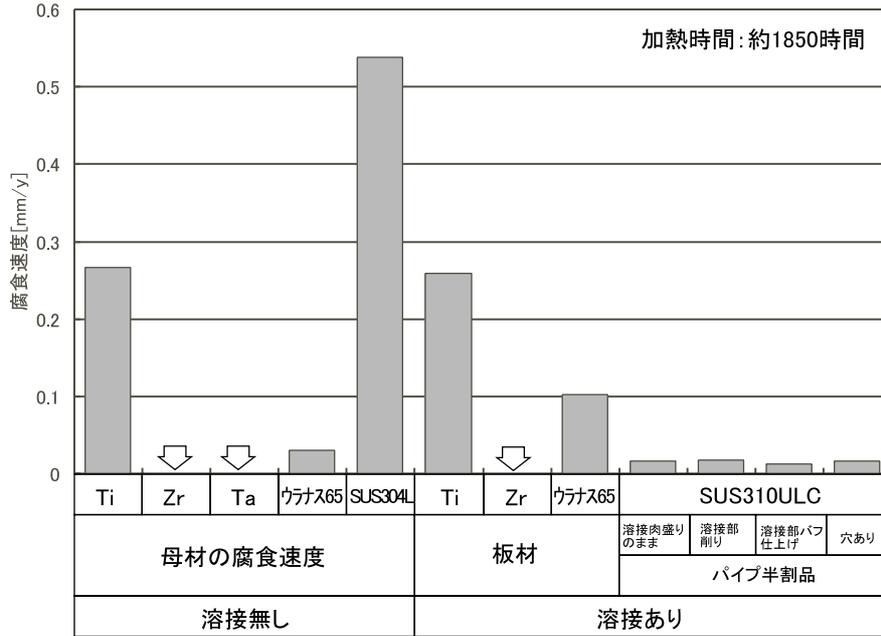


図9 酸回収精留塔内浸漬試験結果

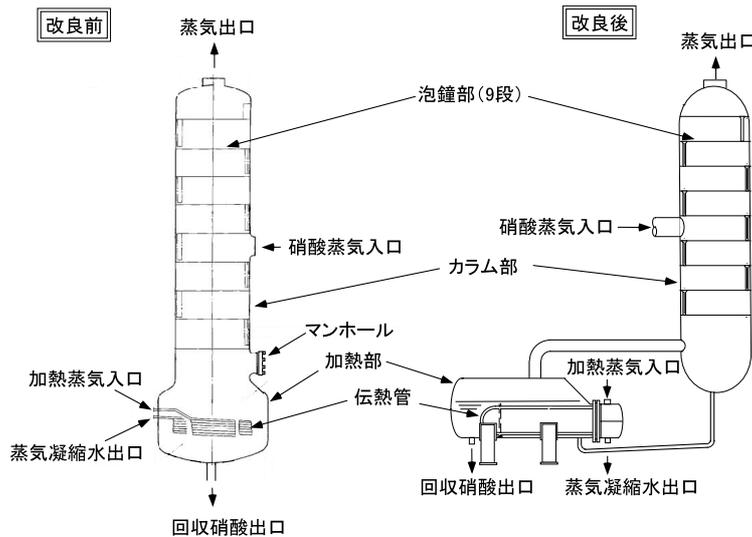


図10 酸回収精留塔の形状変更概要

腐食が進行し易く、かつ加工フローに沿っているため、写真10に示すような腐食孔の形状になったものと考えられる。

こうした事象にかんがみ、年2回の頻度で点検を行い、染料探傷試験により赤色指示が認められた箇所については、腐食が進展する前に除去するとの観点から、研磨などの対応を行うこととした。その後、1984年には予防保全として加熱部の更新を行い、さらに、1988年には、加熱蒸気配管の点検が効率的に行えるように型式変更を行った（図10参照）。これらの更新においては、材料は変更せ

ずに、SUS310ULCを用いていた。しかし、1991年以降は、伝熱管の材質を、金属イオンを含まない硝酸環境ではSUS310系のステンレス鋼よりも大きな腐食速度を示すものの、局部腐食が生じることがなく定期的な点検により寿命予測が可能なTi 5Ta製へと変更し、現在に至っている。

(4)酸回収精留塔環境におけるTi 5Taの腐食速度  
Ti 5Ta製の伝熱管については、これまで定期的に外径寸法測定を行ってきた。この結果をもとに、減肉量の経時変化として表したのが図11である。これから、最小二乗法によってTi 5Taの酸回収精

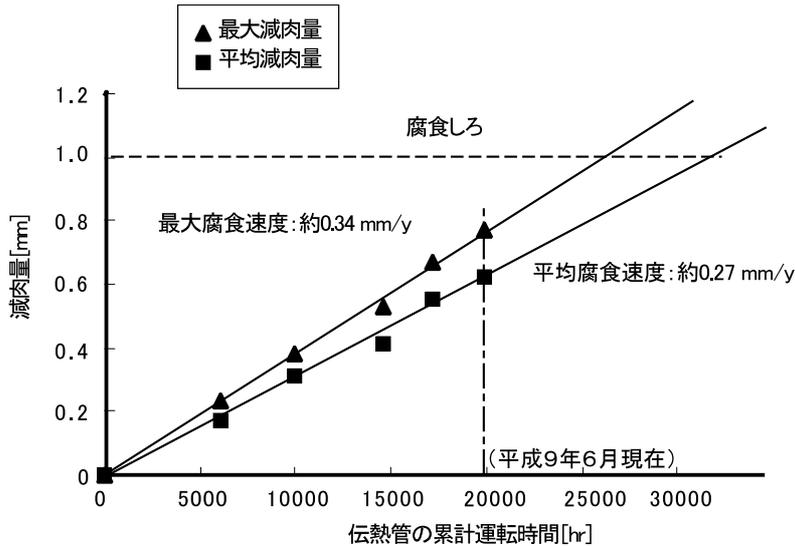


図11 酸回収精留塔伝熱管の減肉量の推移(寸法側測定結果)

留塔における伝熱面の腐食速度を求めると、約0.3 mm/yとなる。

佐藤<sup>14)</sup>は、4時間に6回の液更新という条件における約10 mol/lの沸騰硝酸中のTi-5Taの腐食速度を約0.3 mm/yと報告している。酸回収精留塔では、6.5時間に1回程度の液更新条件であるから、この値よりも小さな腐食速度となるはずであるが、同程度の値となっている。このことは、液更新頻度が小さいことに伴うTiイオンによるTi-5Taの腐食速度の低減効果と、伝熱面における腐食の促進効果が相殺されているためと考えられる。

#### 2.4 プルトニウム溶液蒸発缶

プルトニウム溶液蒸発缶は、抽出工程で精製されたプルトニウム溶液を約220 g Pu/lまで濃縮する加熱機器である。運転は、加熱開始前に約5 mol/lの硝酸を張り、その後加熱を開始し、溶液が沸騰した段階でプルトニウム溶液を供給する。溶液中のプルトニウム濃度が約220 g/lに達したら加熱を停止する。

材質は、5段の泡鐘段を有する塔部がSUS304L、加熱部がTiで構成されており、加熱蒸気温度は約120℃、溶液温度は約110℃、濃縮後の硝酸濃度は約7 mol/lである。この材料については、TiはPuのような金属イオンを含む硝酸溶液については優れた耐食性を示すが、気相部の硝酸蒸気の凝縮部のように純硝酸溶液では腐食されやすいこと、一方ステンレス鋼はTiと逆の腐食挙動を示すことから<sup>14)</sup>、各々の長所を生かして選定されている。

この蒸発缶は、1984年に、腐食対策として、初代と同じ材質であるが肉厚の増加や溶接線の減少を図るとともに、計装ノズルの位置を変更した予備品へと更新した。さらに、1988年には、予防保全の観点で、塔部のみをTi-5Ta製へと更新し、第三代の蒸発缶となった。この材質変更に伴い、従来はSUS304Lの塔部とTiの加熱部の接続はフランジであったが、TiとTi-5Taの溶接接続へと変更した。

##### (1) 初代プルトニウム溶液蒸発缶の腐食状況

1982年7月に塔部(SUS304L)の計装配管の接続部においてピンホールが発生し、プラグ溶接補修を行った。この時の加熱運転時間は約11,000時間であった。設計肉厚から腐食速度を求めると約2.8 mm/yとなる。

当該部位は、鍛造材から削りだしたもので、所謂、加工フロー腐食によって貫通孔が発生したものであった(図12参照)。この塔部においては、この他に、温度計の熱電対を挿入する配管の先端部も、丸棒から削りだして製作したものであり、機器の更新工事を行った時の観察において、同様な加工フロー腐食が認められていた。

1984年に行った更新工事の一環として、既設の蒸発缶の各部位について肉厚測定を行った。その結果をもとに、加熱運転時間を考慮して求めた各部位の腐食速度を図13に示す。この結果から、塔部においては、ステンレス鋼の腐食を加速する元素であるPuの影響から、プルトニウム溶液の飛沫同伴の影響がある加熱部に近い部位の腐食速度が大きな値を示している。一方、Ti製である加熱部

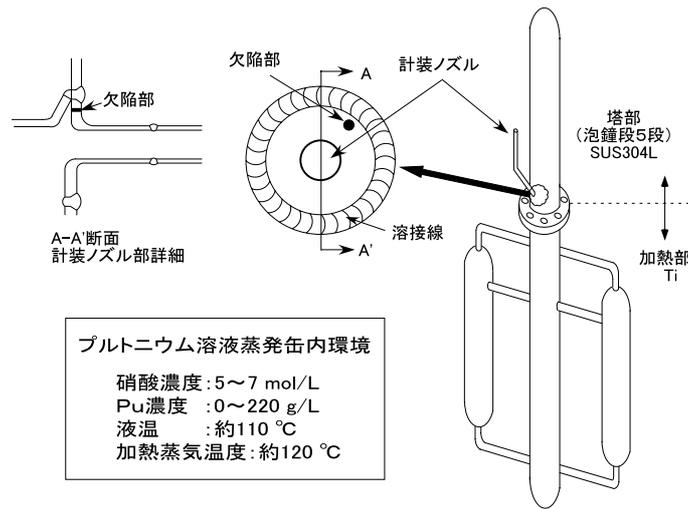


図12 初代プルトニウム溶液蒸発缶故障概要図

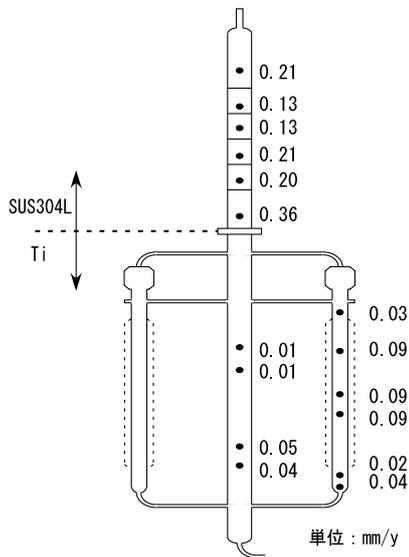


図13 初代プルトニウム溶液蒸発缶腐食速度 (腐食速度の値: 周辺方向4点の平均値)

については、伝熱面が最も大きく約0.1mm/y程度の腐食速度を示しているが、浸漬のみの条件となっている加熱部の中央部については、0.01~0.04mm/yである。

(2) 第三代プルトニウム溶液蒸発缶の腐食状況

第三代の蒸発缶については、機器の健全性を確認する目的で定期的に点検を行ってきている。塔部については、溶接線をはさんで上下40mmの位置及び塔頂部を、加熱部については上部を、各位置において周方向に90°ごとに4点、超音波肉厚計にて肉厚測定を行っている(図14参照)。

これらの測定結果の例として、Ti製である加熱部における測定結果を図15に、塔部のうちTi 5Ta製である測定点6,7の結果を図16 塔部のうちTi

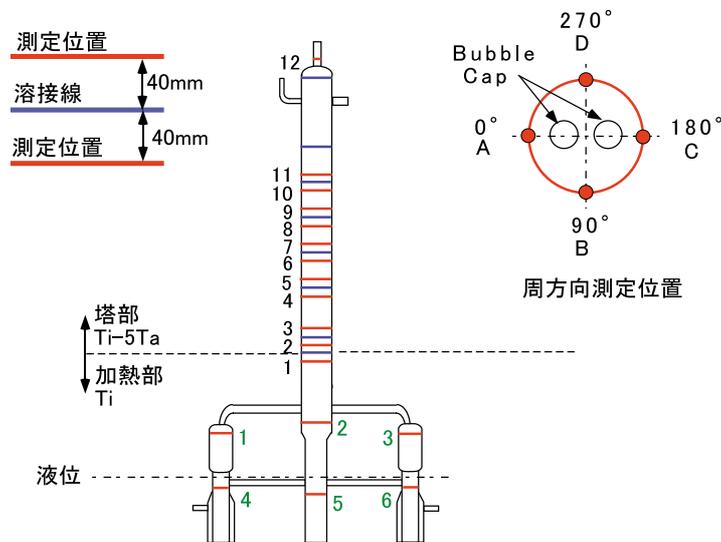


図14 プルトニウム溶液蒸発缶における肉厚の測定位置

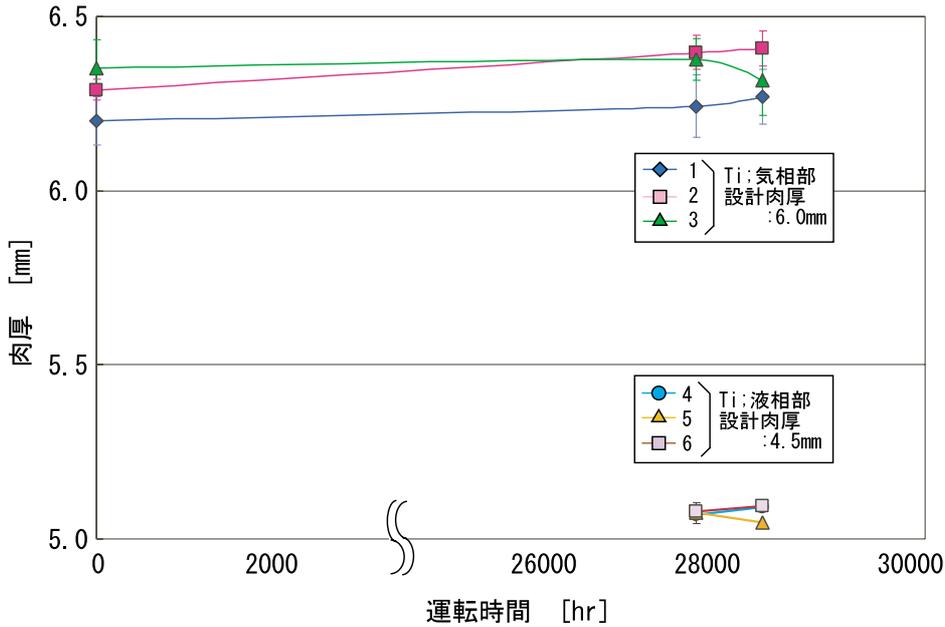


図15 プルトニウム溶液蒸発缶加熱部の肉厚測定結果

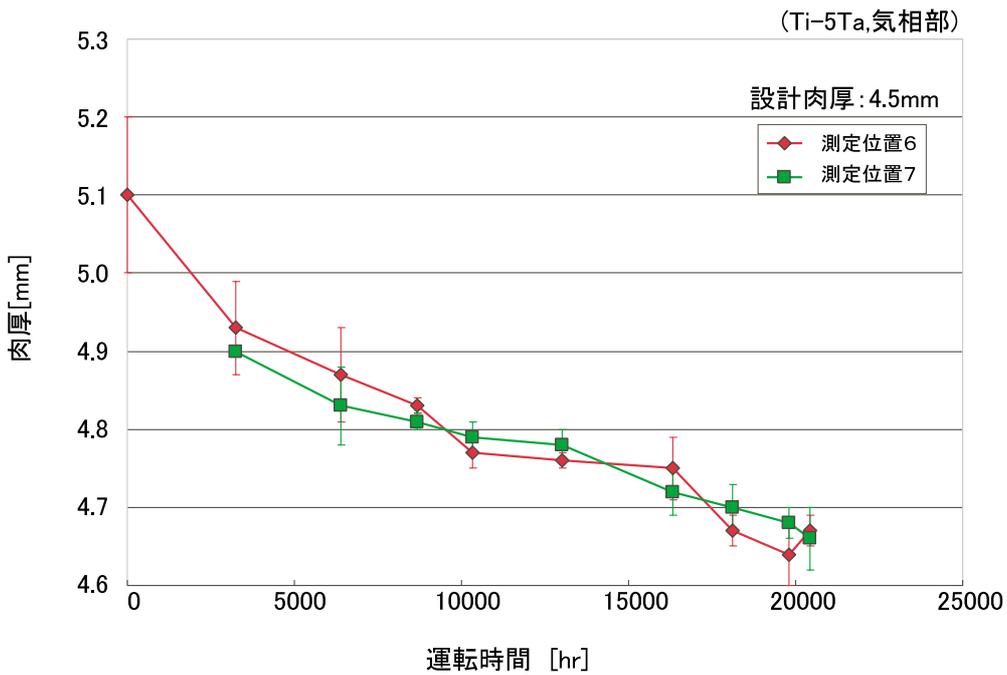


図16 測定位置 6 及び 7 における肉厚測定結果

製である測定点 1 における結果を図17に示す。

図15から、Ti製の加熱部は約28,000時間以上の加熱時間が経過した現在でも殆ど腐食が進行していないことがわかる。一方、図16及び図17から、塔部は初期の段階での減肉が大きいが、その後は小さく、一定の割合で減肉していることが分かる。また、図17に示すように、減肉傾向が大きい初期の値を除いた結果を用いて、最小二乗法により傾きを求め腐

食速度を評価した。各測定点における腐食速度を、気相部、洗浄液浸漬部及び泡鐘段気相部に区別して図18に示す。これは、図19に示すように、塔部の測定位置のうち、5, 7, 9, 11については、気相部に相当するが、4, 6, 8, 10については、泡鐘段の洗浄液に浸漬している部分(A, C, D)と気相部に相当する部位(B)があるためである。

Ti 5Ta製の塔部の腐食速度は、測定点 2 から測

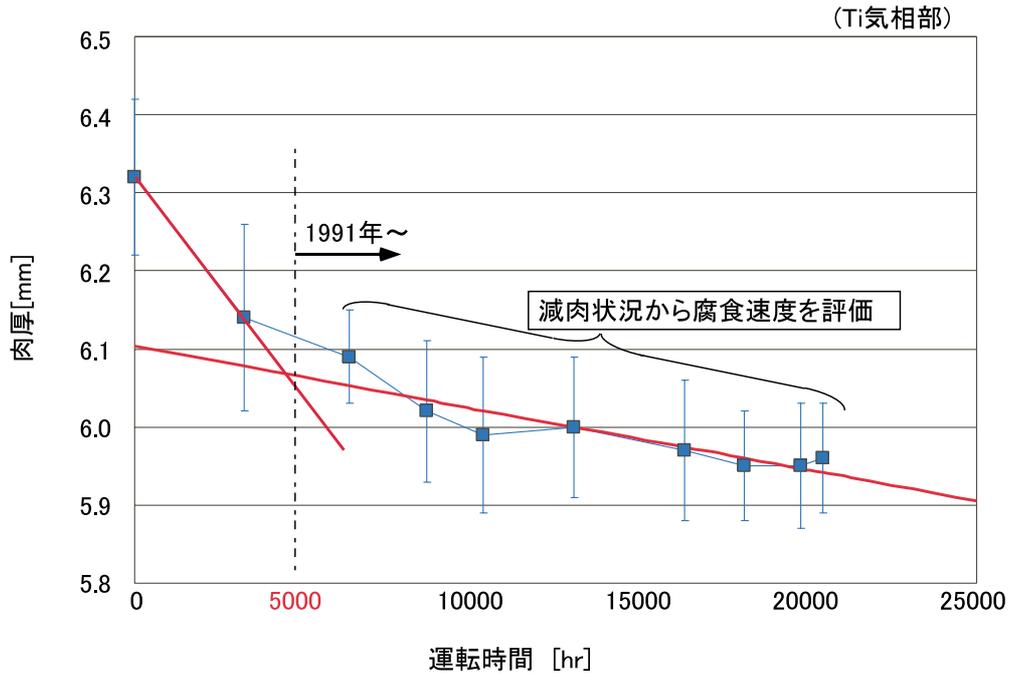


図17 測定位置1における肉厚測定結果

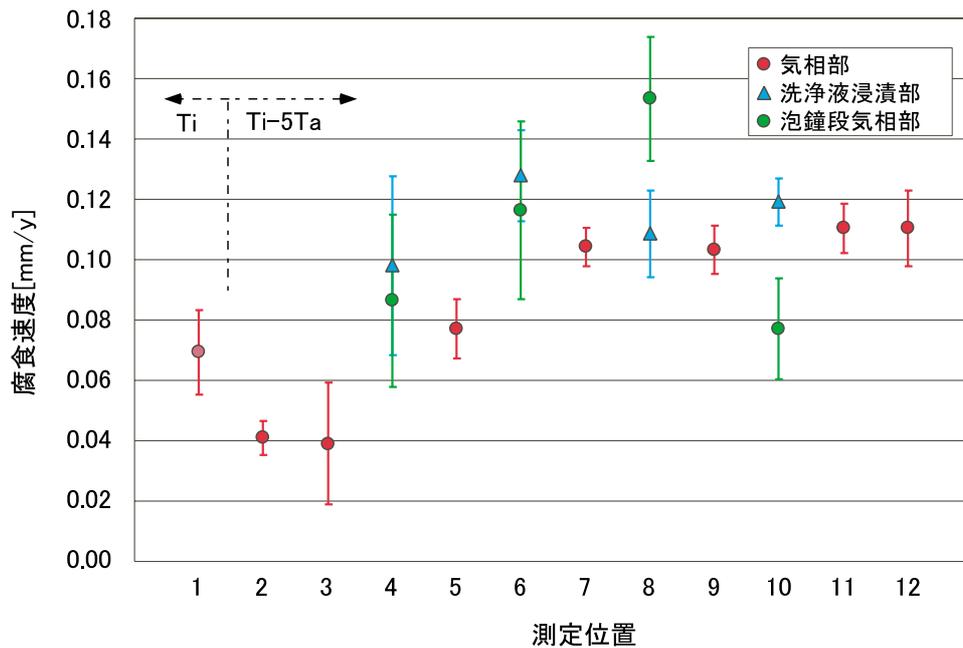


図18プルトニウム溶液蒸発缶塔部における腐食速度

定点8までは徐々に大きくなっているが、測定点9から測定点12までは、ほぼ一定となっている。Ti-5TaはTiと比較して耐食性は向上しているものの、主成分であるTiと類似の腐食挙動を示し、プルトニウム溶液の飛沫の影響がある下部ほど腐食速度が小さくなっている。このことは、蒸発濃縮によって発生するプルトニウムの飛沫が、5段ある泡鐘段のうち下部の3段でほぼ洗浄できている

ことを示している。

## 2.5 高放射性廃液蒸発缶

高放射性廃液蒸発缶は、使用済燃料中の殆どの核分裂生成物を含む分離第一サイクルからの抽出残液や分離第一サイクルの溶媒洗浄廃液、酸回収蒸発缶の濃縮液、パルスフィルタでろ過した不溶性残渣などを濃縮する加熱機器である。本蒸発

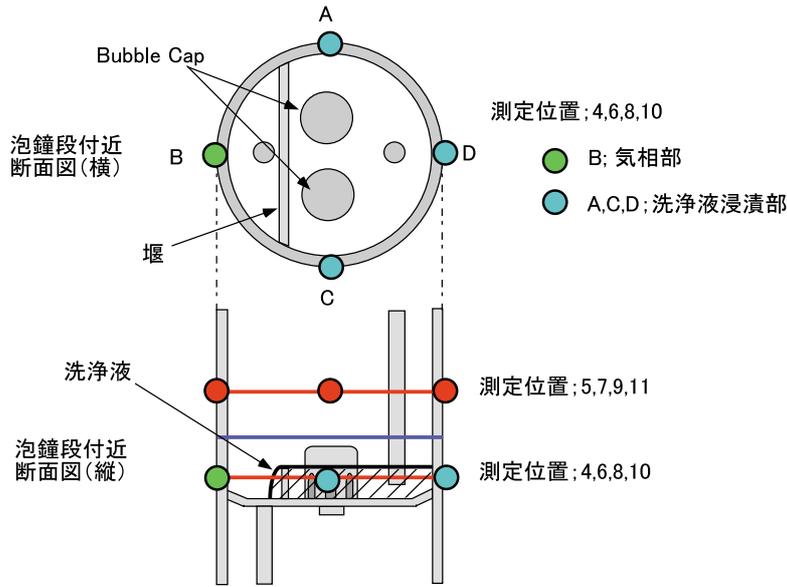


図19 泡鐘段近傍の肉厚測定位置

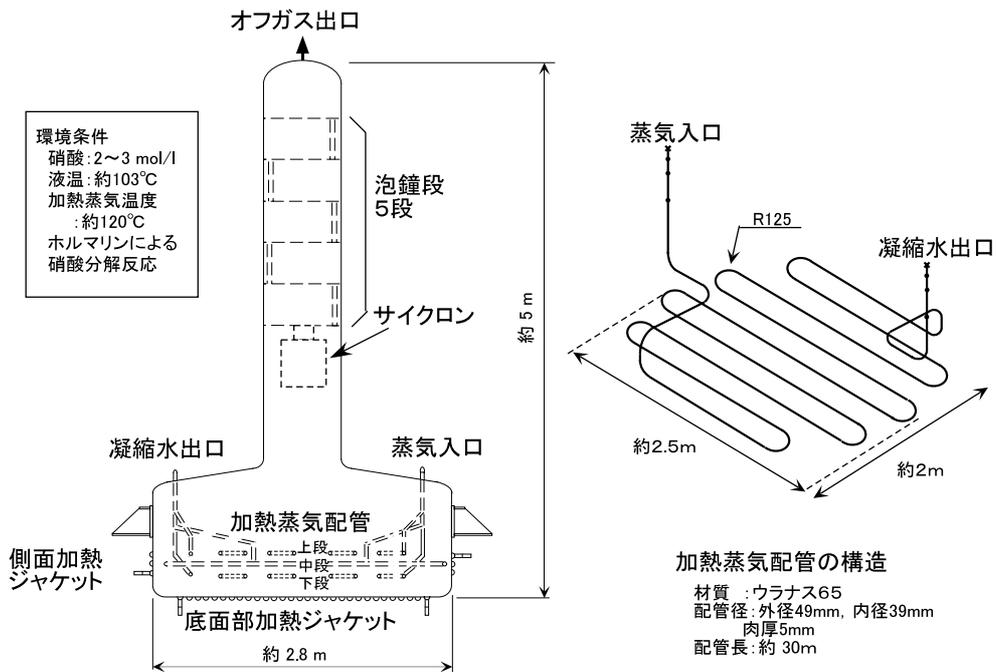


図20 高放射性廃液蒸発缶概要

缶では、これらの廃液を、ホルマリンを供給することによって硝酸分解を行いながら、缶内の硝酸溶液の濃度を約3 mol/l と一定に保ち、約120の蒸気で蒸発濃縮を行う。この廃液中には、Puが0.01~0.1 g/l程度、Ruが溶解槽と同程度の約1 g/l含まれている。

材料は、濃縮ウラン溶解槽や初代の酸回収蒸発缶と同様、ウラナス65である。本蒸発缶には、底部を外部から加熱する系統、側面を外部から加熱

する系統、及び内部に3系統(上,中,下)の蛇行した加熱蒸気配管の合計5系統の加熱蒸気の供給系がある。塔部には、蒸発蒸気などに同伴する放射性廃液の飛沫を除去するためのサイクロンと5段の泡鐘段が設置されている(図20参照)。

(1) 高放射性廃液蒸発缶の腐食状況

1995年に、中段部加熱蒸気配管に貫通欠陥が発生した。このときの累積加熱運転時間は約59,000時間である。この貫通欠陥は、オリフィスと仮定

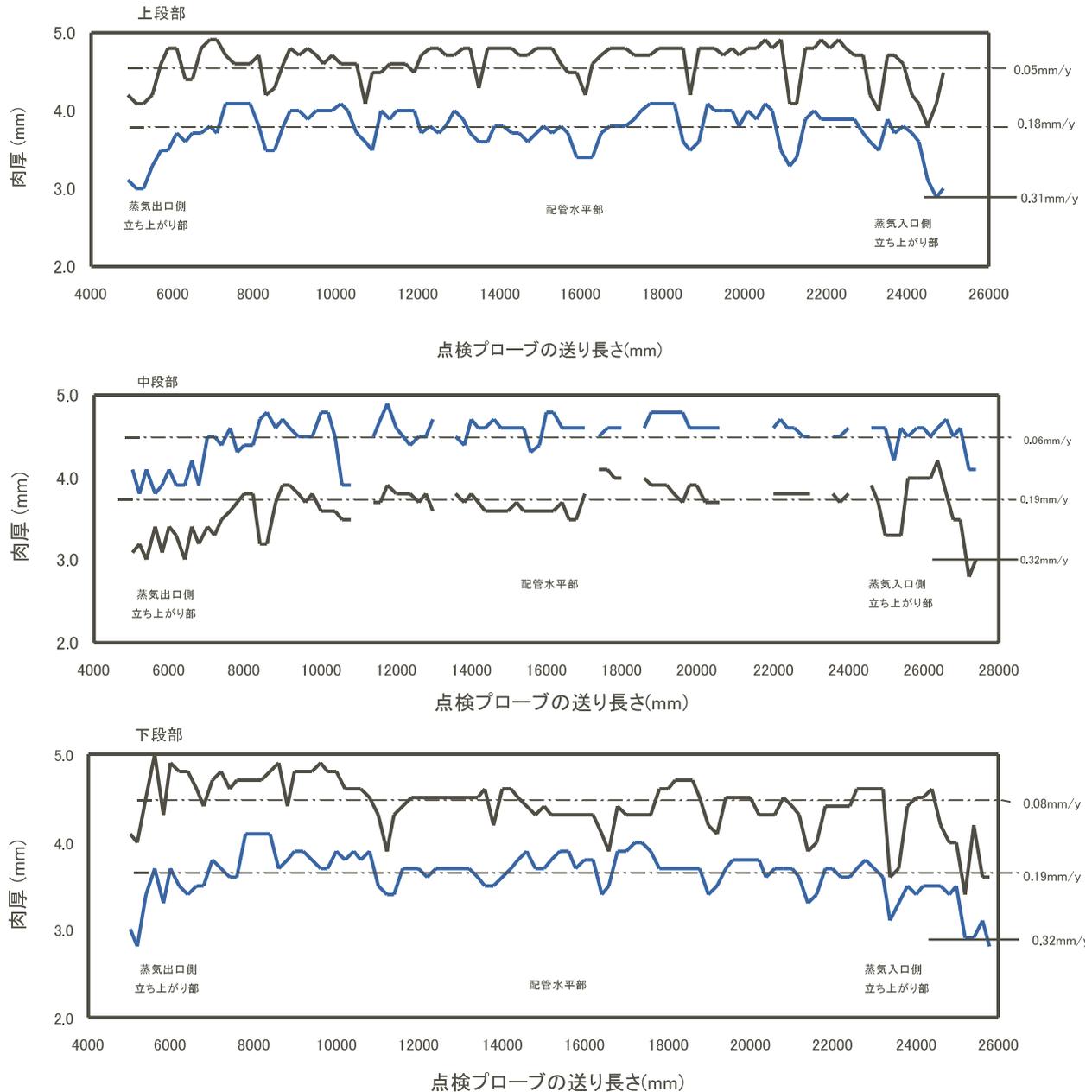


図21 加熱蒸気配管の肉厚プロファイル

すると直径0.01mm程度の微細な貫通孔と推定される。故障した蒸発缶は、予め設置されていた予備の蒸発缶に切り替えて運転に供している。

当該蒸発缶は、高放射性の廃液を扱う機器であることから、内部に設置されている加熱蒸気配管の肉厚測定は遠隔装置を用いて行った。上段、中段、下段加熱蒸気配管の肉厚プロファイルの測定結果を図21に示す。各々の図には、2つの肉厚プロファイルが示してあるが、加熱蒸気配管は蛇行した羊腸管であり、曲げ加工を施しているため周方向で必ずしも同一肉厚とはなっていないことが

ら、各測定点における超音波肉厚計の最大値と最小値をプロットした。この加熱蒸気配管の液浸部における平均残肉量から加熱運転時間で除した値として求めた腐食速度を同図に示したが、上段、中段、下段にかかわらず0.05~0.2mm/yの腐食速度となっている。また、加熱蒸気配管の立ち上がり部（高放射性廃液に浸漬していないために、加熱蒸気温度に近い温度となっていると推定される部位）における最小値を用いて腐食速度を求めると、約0.3mm/yとなっている。しかし、実際に貫通孔が発生していることから、腐食速度の最大値

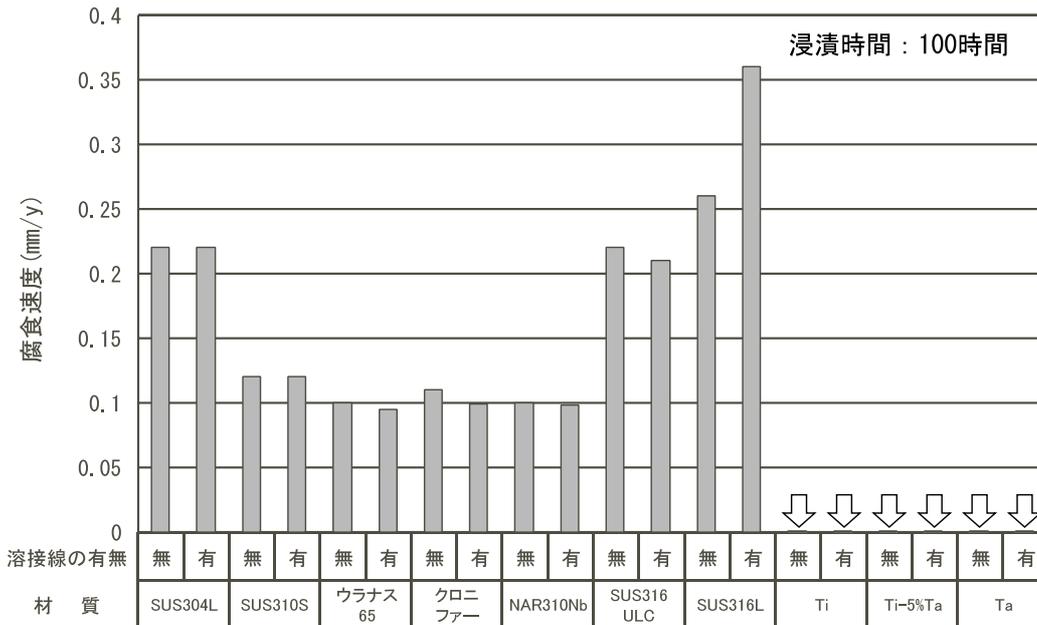


図22 高放射性実廃液による沸点での浸漬試験結果

表5 腐食試験に用いた高放射性廃液の組成

		濃度
硝酸濃度 (mol/l)		3
Fe (g/l)		3.3
Cr (g/l)		0.17
Ni (g/l)		0.25
核種 (Bq/ml)	<sup>241</sup> Am	3.7 × 10 <sup>13</sup>
	<sup>144</sup> Ce	3.7 × 10 <sup>15</sup>
	<sup>137</sup> Cs	5.9 × 10 <sup>15</sup>
	<sup>134</sup> Cs	2.1 × 10 <sup>15</sup>
	<sup>125</sup> Sb	4.8 × 10 <sup>15</sup>
	<sup>106</sup> Ru	1.7 × 10 <sup>15</sup>
	<sup>103</sup> Ru	< 3.7 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>95</sup> Zr	< 3.7 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>95</sup> Nb	< 3.7 × 10 <sup>10</sup>
	<sup>60</sup> Co	7.8 × 10 <sup>12</sup>

燃料の仕様

炉型：加圧水型 (PWR)

燃焼度：24459 MWD/t

冷却日数：694日

溶解液

溶媒抽出 (UPu除去)

濃縮

NaOH添加による酸度調整 (3 mol/l)

は、設計肉厚 5 mm と加熱運転時間から求めると約 0.7 mm/y となる。

(2) 高放射性廃液の腐食試験

各種材料の高放射性廃液による腐食試験 (沸点, 100時間浸漬) を行った結果を図22に示す。この試験で用いた高放射性廃液は、PWRの燃料 (燃焼度 24 459MWD/t, 冷却日数694日) の溶解液から溶媒抽出操作によりUとPuを除去した後 蒸発濃縮を行い、更に水酸化ナトリウム溶液を用いて硝酸濃度を 3 mol/l に調整したものである (表5 参照)。

この結果から、高放射性廃液蒸発缶の材料であるウラナス 65の腐食速度は、0.1mm/y程度であった。この浸漬試験で得られた腐食速度は、伝熱面である実機の加熱蒸気配管で得られた液浸部位の腐食速度 (0.05~0.2mm/y) とほぼ同程度となっている。本来であれば伝熱面の腐食速度の方が数倍大きくなるはずである。このことは、実機においてはホルマリンによる硝酸分解でNOxガスが発生するが、NOxによる腐食の低減効果と伝熱面の加速効果が相殺されているものと考えられる。また、この高放射性廃液を用いて室温における各種ステンレス鋼の約1,700時間の浸漬試験を行った結果を図23に示す。各材料ともに、0.03mm/yを下回る値となっている。

2.6 海中放出管

海中放出管は、再処理施設の各工程から発生する低放射性の廃液を蒸発処理や油分除去などを行った後海洋放出するための海中放出設備の一部であり 材料はアスファルト被覆の炭素鋼である。1991年 8月に定期自主検査の一環として海中放出管の漏えい試験 (放出口をフランジで閉止した状態で工業用水により加圧し、圧力降下の有無を確認するものであり、年1回の割合で実施している) を実施したところ、漏えいが認められた。

調査の結果、貫通孔は汀線近傍であり、アスファルト被覆を施してある外面から腐食が進行して、

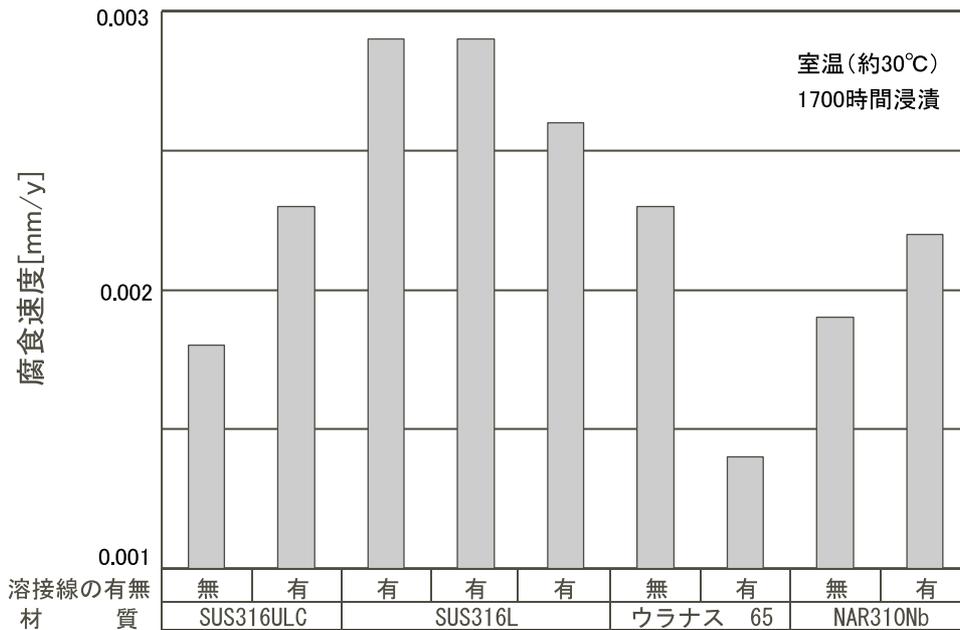


図23 高放射性実廃液による室温での浸漬試験結果

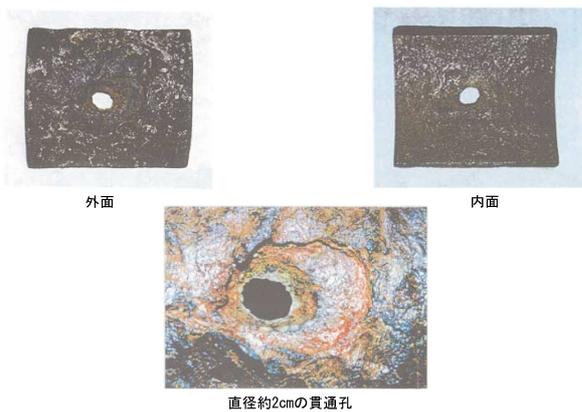


写真11 海洋放出管の腐食概要

直径約2cmの丸い貫通孔となっている(写真11参照)。大久保<sup>16)</sup>によれば、被覆を施した炭素鋼の海水による腐食試験の結果、空気を吹き込んだ条件では、直径約1mmの被覆の欠陥がある場合に最も腐食速度が大きくなり、15mm/yを超える値となることが報告されている(図24参照)。

海中放出管は、過去に海洋が荒れている時に海面から露出していることが確認されており、その時に砂礫などでアスファルト被覆に傷が付き、その部位から腐食が進展したものと推定した。

## 2.7 その他

### (1) ウラン溶液の蒸発缶

ウラン溶液を蒸発濃縮する蒸発缶は、以下の機器がある。

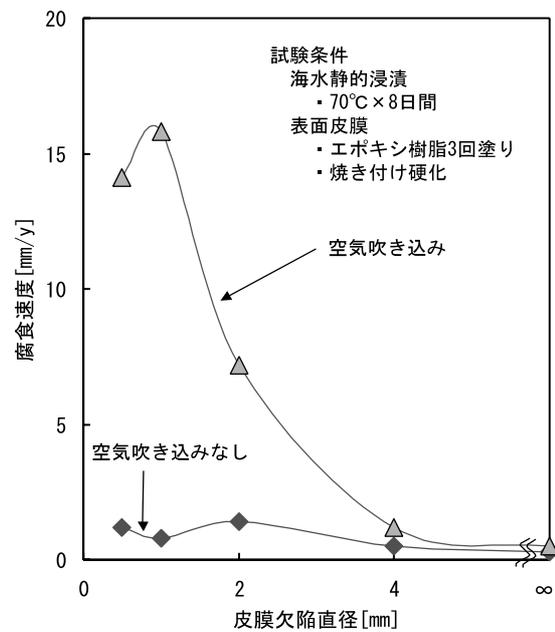


図24 鉄鋼中の海水腐食に及ぼす樹脂被膜欠陥の影響<sup>16)</sup>

ウラン濃度が約60g U/l、硝酸濃度約0.02mol/lの溶液を、約400g U/l、硝酸濃度0.1~0.2mol/lに濃縮するウラン溶液蒸発缶(第一段)、この濃縮液をウラン濃度約1,000g U/l、硝酸濃度約0.5mol/lまで濃縮するウラン溶液蒸発缶(第二段)がある。

第一段の蒸発缶は、サーモサイフォン型の蒸発缶で、約120の蒸気で加熱し、溶液温度が約102℃、材料はSUS304Lである。

第二段の蒸発缶は、内部に加熱コイルを有する円筒形の蒸発缶で、加熱は約130の熱媒を用い、空気による攪拌を行いながら濃縮する。溶液温度は約115で、材質はTiである。なお、この第二段の蒸発缶は、蒸気で加熱する方式の蒸発缶が別途設置されているが、材料は同じTi製である。

これらの蒸発缶では、腐食による故障は発生していないが、機器の健全性確認の観点で、以下の2基の蒸発缶について超音波肉厚計（測定精度：0.1mm）による測定を行った。

1) 第一段の蒸発缶については、沸騰したウラン溶液に浸漬している部位28箇所を測定したところ、製作時の測定結果と比較して以下の結果が得られた（累積加熱運転時間は約53,400時間）。製作時と今回の測定位置が完全に一致しているとは言いがたいことや測定精度を考慮すれば、殆ど減肉していないといえる。

- ・0.2mmの減肉：1箇所
- ・0.1mmの減肉：6箇所
- ・減肉なし：14箇所
- ・0.1mmの肉厚増加：7箇所

2) 2基のうち累積運転時間（約15,300時間）の長い第二段の蒸発缶について、沸騰したウラン溶液に浸漬している部位9箇所、気相部に相当する部位6箇所を測定したところ、製作時の肉厚測定結果と比較して、以下のように、殆ど減肉していないといえる。

（液浸漬部）

- ・減肉なし：3箇所
- ・0.1mmの減肉：6箇所

（気相部）

- ・0.1mmの減肉：5箇所
- ・0.1mmの肉厚増加：1箇所

（2）低放射性廃液の蒸発缶

低放射性廃液を処理する蒸発缶として、オフガス洗浄廃液や分析廃液などを処理する低放射性廃液第1蒸発缶、第2蒸発缶及び酸回収精留塔から発生した蒸発蒸気の凝縮液を主に処理する低放射性廃液第2蒸発缶及び低放射性廃液第3蒸発缶、廃溶媒の処理に伴って発生するリン酸溶液を処理するリン酸廃液蒸発缶がある。

材料はともにSUS316Lであり、各蒸発缶の主な運転条件とこれまでの累積加熱時間は以下のとおりである。

- ・低放射性廃液第1蒸発缶

供給液：0.1~0.5mol/lの硝酸酸性、  
あるいはアルカリ性廃液

濃縮液：約2mol/l

加熱蒸気温度：120~130

溶液温度：約102

累積加熱時間：約14,900時間

- ・低放射性廃液第2蒸発缶

供給液：0.1~0.2mol/lのアルカリ性廃液

濃縮液：約2mol/l

加熱蒸気温度：133~134

溶液温度：約102

累積加熱時間：約8,000時間

- ・低放射性廃液第3蒸発缶

供給液：0.1~0.2mol/lのアルカリ性廃液

濃縮液：約2mol/l

加熱蒸気温度：約125

溶液温度：約102

累積加熱時間：約33,700時間

- ・リン酸廃液蒸発缶

供給液：約150g/lのリン酸廃液

濃縮液：約600g/lのリン酸廃液（PH約4.5）

加熱蒸気温度：約120

溶液温度：約100

累積加熱時間：約1,500時間

これらの機器では、腐食による故障は発生していないが、健全性を確認するとの観点から、第1蒸発缶を除いて肉厚測定を行っている。そのうち、最も加熱時間の長い低放射性廃液第3蒸発缶及び、リン酸溶液を蒸発濃縮するリン酸廃液蒸発缶の測定結果を、図25及び表6に示す。

ともに、有意な減肉は認められていない。また、リン酸廃液蒸発缶については、内部点検を行ったところ、溶接線のリップル線も鮮明で金属光沢を有しており、健全である（写真12参照）。

### 3. まとめ

これまでの腐食故障が発生した機器の調査や各種腐食試験などから、東海再処理施設の各プロセス環境における構造材の腐食状況をまとめると以下のとおりである。

#### 3.1 酸回収蒸発缶環境

本蒸発缶の腐食環境としては、0.1~1mg/l程度のPu及びRu、その一桁高い濃度のNpなどを含む約8mol/lの沸騰硝酸環境である。

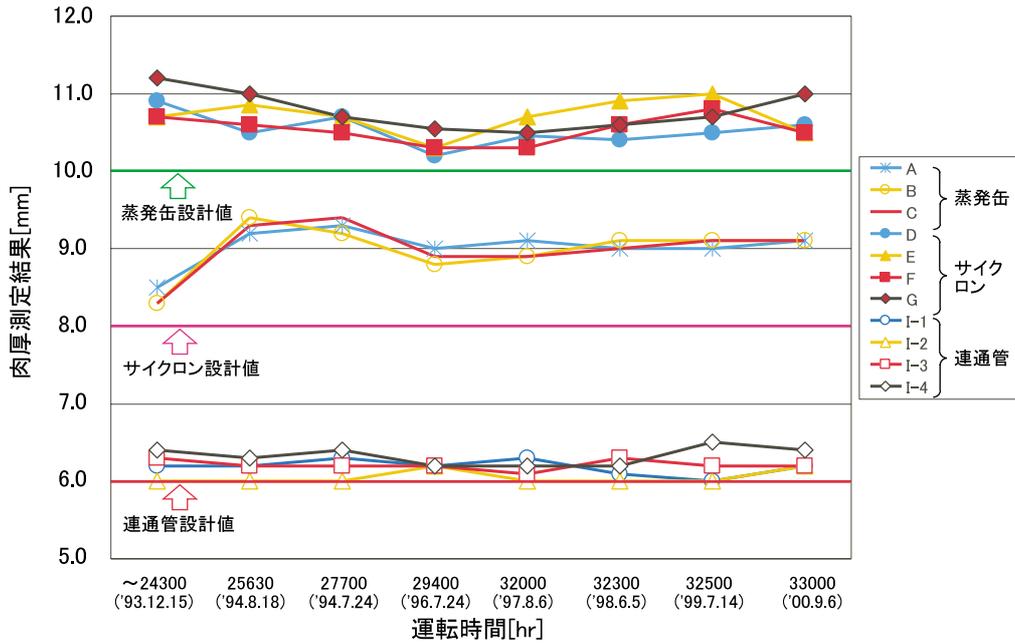
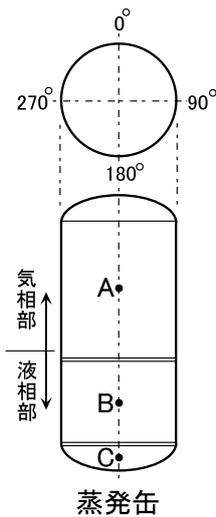


図25 低放射性廃液第3蒸発缶肉厚測定結果

表6 リン酸廃液蒸発缶肉厚測定結果



単位;mm

	0°		90°		180°		270°		公称板厚
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	
A	8.7	8.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.7	8.7	9.0
B	9.1	9.0	9.0	9.1	9.1	9.2	9.0	9.0	9.0
C	11.0	11.2	11.5	11.5	11.3	11.3	11.2	11.2	11.0

\* 測定時期：1回目；1987年12月（運転時間；約500時間）  
2回目；1994年1月（運転時間；約1,300時間）

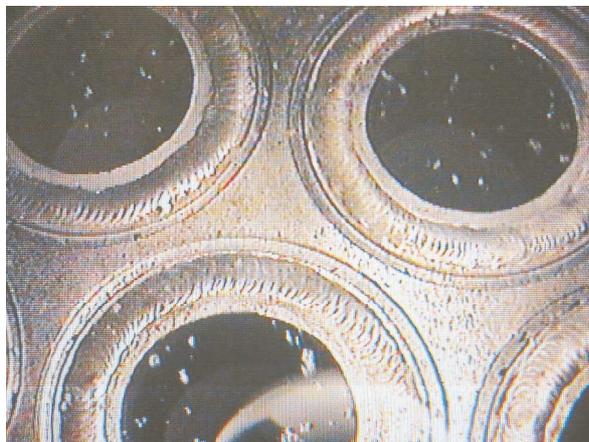


写真12 リン酸廃液蒸発缶の内部状況

Nbを添加したSUS310系のウラナス 65の溶接部については、伝熱管と管板の2層盛の溶接部の初層が露出した部位及び溶接ビード上のクレーター部から腐食が進展し貫通に至った。

ウラナスと同等のクロニファー 25.20Nb については、伝熱管の母材が腐食し貫通に至った。この腐食速度は、最大で約3.4mm/yとなり、平均としては約1.1mm/yである。その他の部位は0.2~0.4mm/yであり、伝熱面の加速効果としては、約3倍（貫通部としては約10倍）となる。伝熱面以外の部位でみると、8mol/lの硝酸による48時間のクロニファー 25.20Nbの浸漬試験における腐食速度

(約0.03mm/yr)に比べて、本蒸発缶環境では約10倍となり、その要因としては、Ru、PuやNpなどによる加速及び長時間の腐食による脱粒が考えられる。クロニファー 25.20Nbについては、Ce、La、とSの析出物が認められ、伝熱管における加工フロー腐食の速度は40mm/yを超えるものとなった。

Ti 5Taについては、現在まで約30,000時間の加熱運転を行っているが、問題となる事象は発生していない。

### 3.2 濃縮ウラン溶解槽環境

濃縮ウラン溶解槽の腐食環境としては、使用済燃料に含まれる殆どのFP、U、Puを含む0~3 mol/lの沸騰硝酸環境である(Puが約4 g/l程度、Ruが約1 g/l程度)。

伝熱面条件下において、ウラナス 65のTIG溶接部の裏波から進展した腐食及び連通管と加熱部の電子ビーム溶接部での腐食が発生し貫通に至った。この腐食速度は、30mm/yを超えるものであった。一方、伝熱面の母材部については、2.2~3.3 mm/y程度の腐食速度であった。これは、2 mol/lの硝酸の48時間浸漬試験の結果と比べると100倍を超えることとなり、PuやRuの加速と伝熱面の加速によるものと考えられる(ただし、Uの溶解に伴うNO<sub>x</sub>ガスによる腐食の抑制効果も含まれる)。なお、伝熱面でない部位については、これよりも1桁程度小さな値となる。

補修溶接を施した溶接部については、補修後約6,100時間の加熱運転を行ったが、リップル線が消失しつつある程度の腐食でとどまっている。

### 3.3 酸回収精留塔環境

本精留塔の腐食環境としては、約10 mol/lの沸騰硝酸環境である。SUS310ULCの伝熱面における溶接部において、腐食による貫通孔が発生した。この腐食においては、内部に空洞が生じており、管軸方向の腐食速度は約40mm/yとなる加工フロー腐食となり、肉厚方向については約3.5mm/yの腐食速度であった。

本精留塔に設置した各種試験片の浸漬試験の結果、SUS304Lは0.5mm/yを超える腐食速度を示し、SUS310ULCについては0.02mm/yを下回る腐食速度となった。

Ti 5Taについては、伝熱面の腐食速度として約0.3mm/yであり、SUS310ULCで見られた溶接部の

局部腐食は認められていない。

### 3.4 プルトニウム溶液蒸発缶環境

本蒸発缶の腐食環境は、Puを0~220 g/l含む5~7 mol/lの沸騰硝酸環境である。この環境におけるTiの腐食速度は、伝熱面で約0.1mm/y、浸漬条件で0.01~0.05mm/yであった。

気相部におけるSUS304Lの腐食速度は、Puの飛沫の程度によって異なるが、0.1~0.4mm/yであり、また、加工フロー腐食の速度は、約2.8mm/yであった。一方気相部におけるTi 5Taの腐食速度は、0.04~0.16mm/yであった。

### 3.5 高放射性廃液蒸発缶環境

本蒸発缶環境は、微量の核物質(Pu:0.01~0.1 g/l)と殆どのFP(Ru:約1 g/l)を含む約3 mol/lの硝酸環境であり、ホルマリンによる硝酸分解でNO<sub>x</sub>が発生している。

本蒸発缶の材料であるウラナス 65の伝熱面における腐食速度は、廃液に浸漬している部位としては0.05~0.2mm/y、気液界面は約0.3mm/yであった。ただし、貫通孔が生じたことから、最大の腐食速度としては約0.7mm/yとなる。

高放射性廃液を用いた浸漬試験の結果、ウラナス 65の腐食速度は約0.1mm/yであり、実機の伝熱面における浸漬部位の腐食速度と同程度であった。

このことは、NO<sub>x</sub>による腐食の抑制効果と伝熱面による腐食の加速効果が相殺されていると考えられる。なお、この腐食試験の結果から、SUS304LやSUS316ULCの腐食速度は0.2mm/y程度、NAR310NbなどのSUS310系の腐食速度は0.1mm/y程度、SUS316Lが0.25~0.35mm/y程度であり、TiやTi 5Taは優れた耐食性を示した。常温においては、SUS316系やNbを添加したSUS310系のステンレス鋼は0.03mm/yを下回る腐食速度であった。

### 3.6 その他

ウラン濃度約400 g/l、硝酸濃度約0.2 mol/lの沸騰溶液を扱うウラン溶液蒸発缶(第一段)の環境では、SUS304Lは殆ど減肉していない。

ウラン濃度約1,000 g/l、硝酸濃度約0.5 mol/lの沸騰溶液を扱うウラン溶液蒸発缶(第二段)の環境では、Tiは殆ど減肉していない。

低レベルの放射性廃液を蒸発濃縮する環境においては、SUS316Lは殆ど減肉していない。

#### 4. おわりに

東海再処理施設は、国内初の再処理施設として20年を超える経験を積んできた。その間、腐食による大型機器の故障に遭遇し、高線量環境下における機器の交換、遠隔補修技術の開発、高信頼性機器の開発などを行い、安定運転を行えるまでになってきている。

本報告は、これまで東海再処理施設で経験した腐食事例をまとめたものである。現在、青森県六ヶ所村において国内初の商業規模の再処理施設の建設が進められ、2003年から通水作動試験を開始するなど建設も大詰めの段階にあり、2005年度から開始される操業運転に向けて、本報告が少しでも参考になればと考える。

#### 参考文献

- 1) 武田誠一郎,他:材料と環境,第45巻,第5号(1996).
- 2) 鈴置昭,他:日本原子力学会「1997秋の大会」予稿集M30,p.843.
- 3) 武田誠一郎,他:材料と環境,第45巻,第1号(1995).
- 4) 武田誠一郎,他:材料と環境,第45巻,第11号(1996).
- 5) 武田誠一郎,他:日本原子力学会「1991春の年会」予稿集M16,p.618.
- 6) 長野博夫,他:日本原子力学会誌,vol.34,No.11,p.1063(1992).
- 7) R.D.Shaw and D.Elliott:Proc.Stainless Steels '84,p.395(1984).
- 8) 長野博夫,他:日本材料学会学術講演大会,37,p.196~198(1988).
- 9) 武田誠一郎,他:日本原子力学会誌,vol.42,No.12,p.1315(2000).
- 10) Tuji et al.:Proc.Int.Conf.on Nuc.Fuel Reprocessing and Waste Management,Aug.23-27(1984).
- 11) H.Kajimura and H.Nagano:Corrosion Science,31,246(1990).
- 12) 武田誠一郎,他:日本原子力学会誌,vol.36,No.12,p.1137(1994).
- 13) R.F.Maness,HW.72076,Jan.5(1962).
- 14) 佐藤広士:ケミカル・エンジニアリング,1984年2月号,p.32.
- 15) 武田誠一郎,他:動燃技報,No.67,p.64(1988).
- 16) 大久保勝夫:防錆管理/'73.10(1973).