



# 再処理施設酸回収工程スチームジェットの故障要因調査

清水 亮 高谷 暁和 白水 秀知 内田 直樹  
田中 康介\* 山口 彰\*<sup>1</sup> 青砥 紀身\*<sup>1</sup> 綿引 優

東海事業所 再処理センター 処理部  
\*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部  
\*<sup>1</sup>大洗工学センター 要素技術開発部

Investigation of Causes of the Failed Steam Jet in the Acid Recovery Process of Tokai Reprocessing Plant.

Ryou SHIMIZU Akikazu TAKAYA Hidetomo SHIROUZU Naoki UCHIDA  
Kousuke TANAKA\* Akira YAMAGUCHI\*<sup>1</sup> Kazumi AOTO\*<sup>1</sup> Masaru WATAHIKI

Reprocessing Operation Division, Tokai Reprocessing Center, Tokai Works  
\* Fuels and Materials Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center  
\*<sup>1</sup> Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

東海再処理施設の酸回収工程において送液装置であるスチームジェット（273J202）で生じた故障の原因について調査した。回収されたスチームジェットの観察結果から、スチームジェット吸引室内の蒸気ノズル付け根付近を起点に、構造体内部を貫通する腐食による欠陥が生じたことがわかった。

このような形態の故障に至った要因を解明するため、スチームジェットの使用条件について調査し、また使用環境を模擬した試験、解析等を実施して事象の把握を試みた。

その結果、スチームジェット材料の元素分析及び腐食試験の結果から使用材料には加工に起因すると考えられる異質性が確認され、これと合わせて使用時の構造体内部での温度条件が腐食による欠陥の進展に対して主たる要因であることを明らかにした。以上、スチームジェットが故障に至った要因を調査した結果について報告する。

*The cause of the failure, which had occurred in the steam jet (273J202) in the acid recovery process of Tokai reprocessing plant, was investigated. Observation of the retrieved steam jet revealed that a defect by corrosion, which penetrated the inside of the structure, arose from the steam nozzle root in the suction room of the steam jet.*

*To ascertain why such failure occurred, examinations to investigate the operating condition of the jet, an analysis to simulate the ordinary environmental condition, etc. were conducted.*

*Consequently, anisotropy of the material, possibly originating in the manufacturing process, was observed from the result of the elemental analysis and corrosion examination of the steam jet material. Temperature conditions inside the structure also clearly showed that they were the main factor in progressing the defect by the corrosion within the jet.*



\*<sup>2</sup>現在：環境保全部 処理第三課

\*<sup>3</sup>現在：技術部 技術開発課

\*<sup>4</sup>現在：処理部 化学処理第一課

\*<sup>5</sup>現在：施設管理部 分析第一課 課長代理

## キーワード

再処理，スチームジェット，硝酸溶液，加工フロー腐食，オーステナイト系ステンレス，異方性，偏析，温度分布，温度解析，腐食試験

*Reprocessing, Steam Jet, Nitric Acid, Tunnel Corrosion, Austenitic Stainless Steel, Anisotropy, Segregation, Temperature Distribution, Temperature Analysis, Corrosion Examination*

## 1. はじめに

使用済燃料の再処理施設では，溶解，分離・精製から廃液処理までの多くの工程が硝酸を扱うプラントであり，機器・配管等に使用される材料としては耐食性の高いSUS304L等のオーステナイト系ステンレス鋼を用いるなど，使用環境に応じた適切な材料の選定が求められる。

東海再処理施設においては，これまで約25年にわたる設備の運転実績を通じて加熱機器である酸回収蒸発缶や濃縮ウラン溶解槽の溶接箇所など，より厳しい環境条件で使用される機器において腐食による故障を経験し，その対策として材質の変更や施工技術の改良・開発を行ってきた。<sup>1)</sup>

今回報告する酸回収工程スチームジェットの事例においても，同様に硝酸を使用する加熱環境で発生した腐食による故障事例であったが，この事象はスチームジェットの蒸気供給配管側で発生した欠陥からの漏えいによって確認され，当該設備の調査を行ったのち，現在ではより耐食性の高い材料に更新されている。

設備更新の際に回収したスチームジェットについては，故障要因を解明するための詳細な調査を実施した。調査は故障したスチームジェット(273J202)と，比較のために予備機(273J203)及び同工程のスチームジェット(273J204)の合計3基を対象とし，マクロ観察，金属組織観察，元素分析，温度解析，腐食試験などの結果から故障が発生した要因及び環境条件との相関を明らかにした。故障要因の解明に至るまでの調査フローを図1に示す。本報告ではこれら一連の調査結果について述べる。

## 2. 概要

### 2.1 酸回収工程の概要

酸回収工程は，分離精製工場において使用した硝酸を回収して再利用するために，硝酸廃液の濃縮及び精留を行う工程である。酸回収蒸発缶供給系の概要を図2に示す。酸回収中間貯槽(273V20)

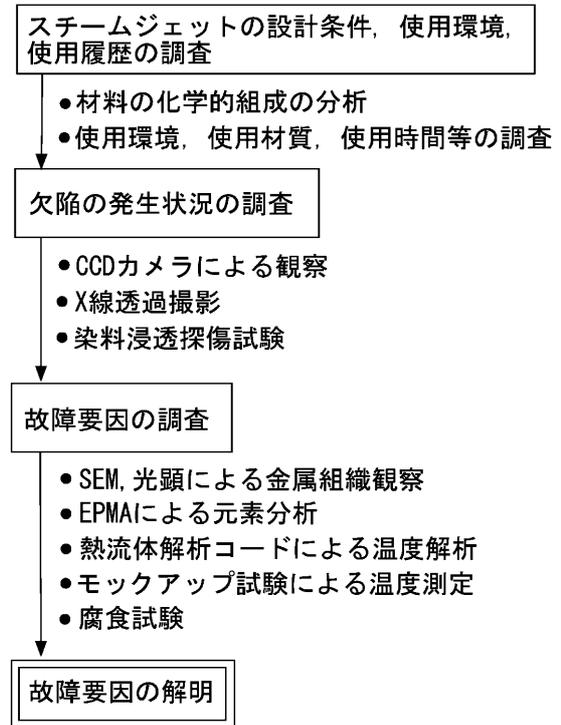


図1 スチームジェットの調査フロー図

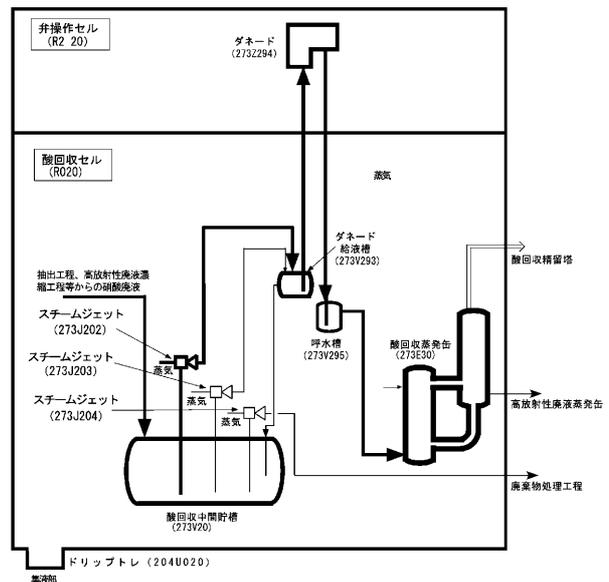


図2 酸回収蒸発缶供給系概要図

に集められた硝酸廃液は、スチームジェット (273J202) により酸回収蒸発缶 (273E30) へ送られ蒸発濃縮される。この送液系統には、予備のスチームジェット (273J203) が設けられている。濃縮された硝酸廃液は高放射性廃液蒸発缶へ送られる。酸回収蒸発缶からの硝酸蒸気は酸回収精留塔に送られ、濃硝酸として回収し、試薬調整工程へ送り再利用される。スチームジェット (273J204) は、酸回収中間貯槽から廃棄物処理工程へ送液する場合に用いられる。

## 2.2 スチームジェットの概要

スチームジェットは流体を輸送するための装置である。吸引室、ディフューザー、ノズルで構成され、駆動流体として蒸気をノズルから噴出することにより吸引室が減圧されて液体を吸引し、これがディフューザーへ吐出される。スチームジェットの断面構造の一例を図3に示す。本工程において使用に供されたスチームジェットはフランス Saint-Gobain 社製のものである。JIS-SUS304L 相当の材料を用い、鋼塊を鍛造または圧延により一定方向へ引伸ばした丸棒からの削り出しにより

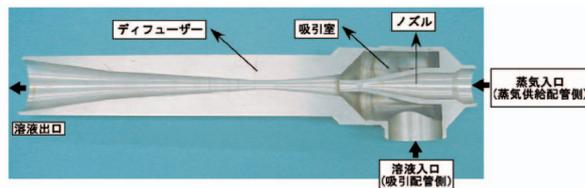


図3 スチームジェットの構造

製作されている。材料の化学的組成については分析により改めてその値を確認した。JIS-SUS304Lの規格値、ミルシート記載値及び分析値の比較を表1に示す。

次に、当該スチームジェットの使用環境を以下に示す。

- 1) 駆動流体の蒸気温度：約170  
(蒸気圧力0.7MPaG)
- 2) 送液される廃液の温度：約40
- 3) 廃液中の硝酸濃度：約2 mol/l
- 4) 設計流量：4 m<sup>3</sup>/h

送液する廃液の組成は処理する使用済燃料のタイプにより若干異なるが代表的な液組成は表2の通りである。

また、スチームジェット (273J202, J203, J204) の使用時間については、故障が確認された J202 が約59,000時間と特に長く、J203については約3,000時間、J204については約10時間であった。

## 3. スチームジェット故障箇所の観察

### 3.1 観察手順

故障が生じたスチームジェット (273J202) とともに、同じ材料で製作され使用時間のみ異なるスチームジェット (273J203, J204) について観察を実施した。CCDカメラ、染料浸透探傷試験 (PT試験) によりスチームジェットの外表面及び吸引室内表面の観察を実施し、欠陥の状況を確認した。次に、X線透過試験 (RT試験) で構造体内部の欠陥の状況を確認し、その後スチームジェットを8

表1 スチームジェット材料の化学的組成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
JIS-SUS304L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	9.00 / 13.00	18.00 / 20.00
ミルシート (SGN)	0.027	0.47	1.67	0.024	0.010	9.26	17.68
分析値 (実施)	0.025	0.387	1.73	0.026	0.009	9.19	17.60

表2 スチームジェット移送液の液組成

	硝酸 (mol/l)	U (g/l)	Pu (mg/l)	Ru* (mg/l)	Np (mg/l)	Fe (mg/l)	Cr** (mg/l)	Ni (mg/l)	備考
1	2.77	<0.01	<0.05	0.0071	0.4	3.4	0.95	0.62	ATR 燃料処理時
2	2.45	<0.01	<0.05	0.0059	1.54	3.3	0.87	0.44	BWR 燃料処理時
3	2.27	<0.01	<0.05	0.0047	1.0	5.3	1.29	0.9	PWR 燃料処理時

(中間貯槽 273V20の分析値：2000年11月～2001年10月)

\* Ru106の放射能分析結果から、Ru全量をORIGEN2により計算した値。

\*\* 全Cr：Cr ( )のみ。Cr ( )は検出されず。

分割して切断面の状況について観察した。

### 3.2 マクロ観察結果

#### 3.2.1 CCDカメラによる観察

##### (1) 外表面観察結果

外表面観察の結果、J202のスチームジェット本体の蒸気供給配管側に4箇所の欠陥が確認された。欠陥部を図4に拡大した様子を図5に示す。

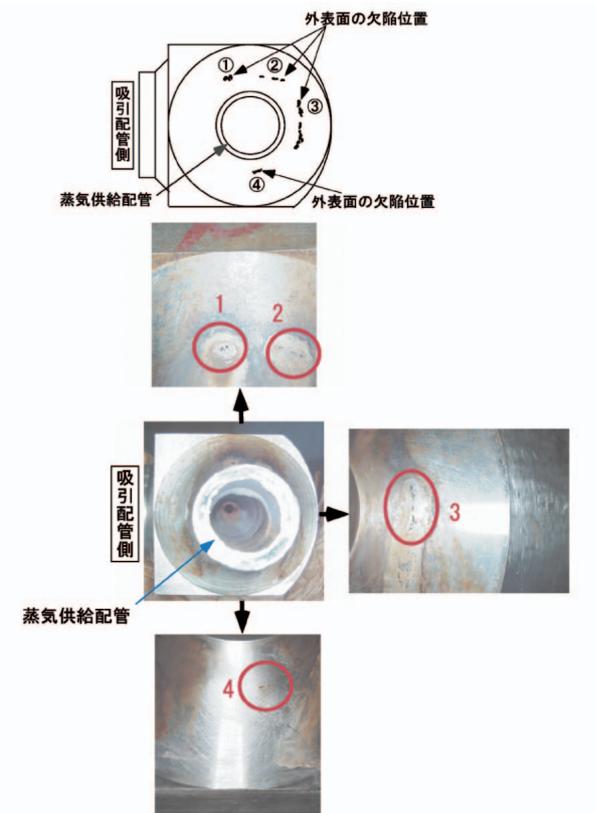


図4 J202外表面の欠陥部

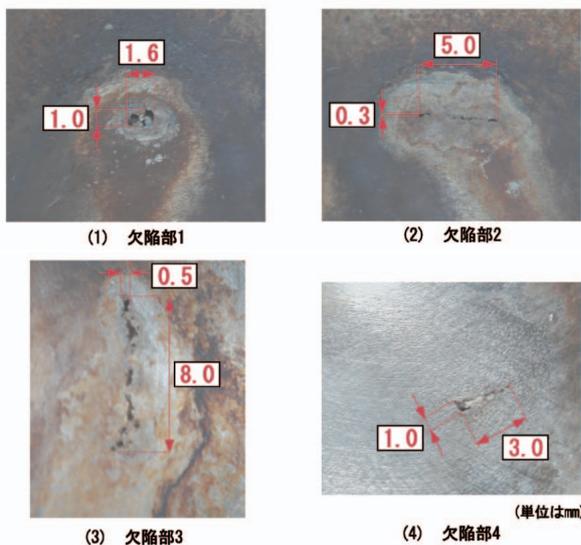


図5 J202外表面の欠陥部拡大

欠陥部には、それぞれ複数の孔が観察され、孔の直径は大きいもので1 mm程度であった。4箇所の欠陥は、蒸気供給配管からの距離が8.5mmから10mmのほぼ同心円上にあり、吸引配管側以外の箇所に位置していた。

##### (2) 吸引室内表面観察結果

スチームジェット3基の吸引室部分を図6のように切断し、吸引室内部の観察を実施した。

CCDによる拡大観察の結果を図7に示す。J202蒸気ノズルの付け根に沿って、吸引配管の反対側が半円周にわたり茶褐色に変色し、多数の微小な孔状の窪みが観察された。

#### 3.2.2 PT試験による観察

##### (1) 外表面観察結果

観察結果を図8(1)に示す。J202において、外表面観察で確認された蒸気供給配管側の4箇所に欠陥を示す赤色指示が確認され、外表面での漏え

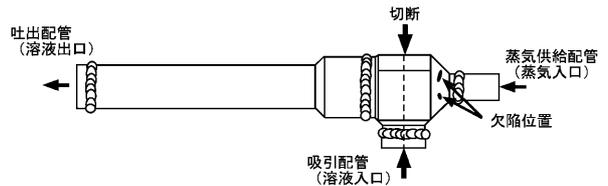


図6 スチームジェットの切断箇所

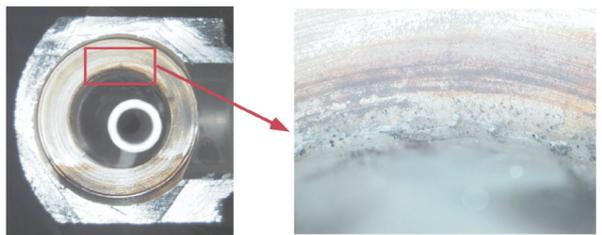


図7 J202蒸気ノズル付け根部の拡大観察

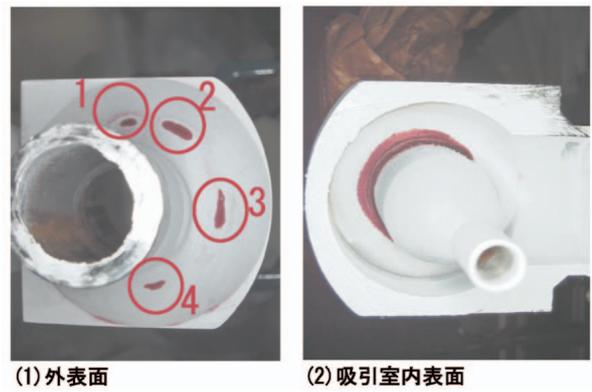


図8 染料浸透探傷試験結果

い箇所が特定された。孔の周り及びその他の部分にき裂状の欠陥は認められなかった。

また J203及びJ204には欠陥は確認されなかった。

### (2) 吸引室内表面観察結果

スチームジェット J202吸引室内部のPT 試験結果を図8(2)に示す。蒸気ノズルの軸を中心として 吸引配管側を除く蒸気ノズルの付け根に沿った 4分の3周にわたり、赤色指示が認められた。

吸引室内表面においては、この部分に欠陥が集中して存在している様子が確認された。

また、外表面での観察結果と同様 J203及びJ204では欠陥は確認されていない。

### 3 2 3 RT 試験による観察

欠陥部の細断前にスチームジェット J202のX線透過試験を行い、構造体内部の状況を調査した。図9に蒸気ノズルの正面方向から撮影した結果を

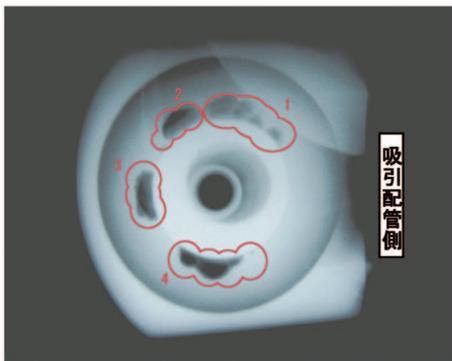


図9 J202 X線透過試験結果

示す。外表面で確認された欠陥部位4箇所に対応する位置に影が見られ、構造体内部では欠陥が広がって存在している様子が確認された。

### 3 2 4 欠陥断面の観察

スチームジェットの吸引室を8分割してその断面を観察した。図10に断面の写真を示す。構造体内部に空洞部が確認され、形状はいずれも翼の断面のような形状をしていた。また、空洞部はいずれも蒸気ノズル付け根からやや内部に入ったところから広がり始めており、空洞部はこの蒸気ノズル付け根付近を起点に外側に向かって構造体内部を貫通している様子が観察された。

断面の拡大を図11に示す。特徴的なこととしては、蒸気ノズルの先端方向(外表面側とは逆方向)にも空洞部が進行している様子が確認された。

### 3 3 マクロ観察結果のまとめ

以上のJ202の観察結果から明らかなように、今回の事象は、溶液入口側の約4分の1周を除いた蒸気ノズルの付け根部分に欠陥が生じ、スチームジェットの内部を蒸気配管からやや離れるように外側に向かって外表面まで進行した結果、その部位から溶液が漏えいしたものと考えられた。内表面及び外表面に確認された欠陥は孔状の欠陥であり、孔の廻りには亀裂を示すワレは確認されておらず、内部に空洞を形成していた様子から、欠陥は腐食により生じたものと考えられた。

なお、J202の使用時間は約59,000時間と長いも

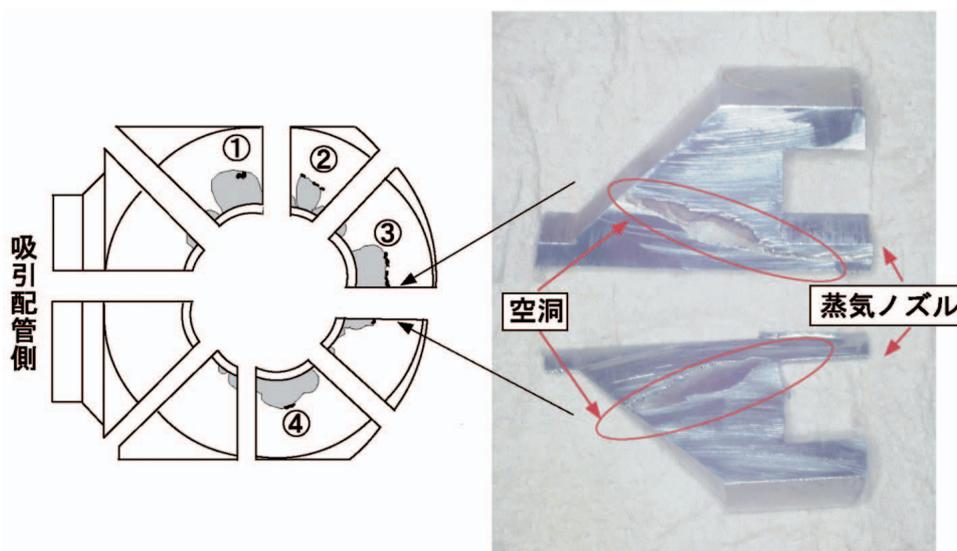


図10 J202切断箇所と切断面

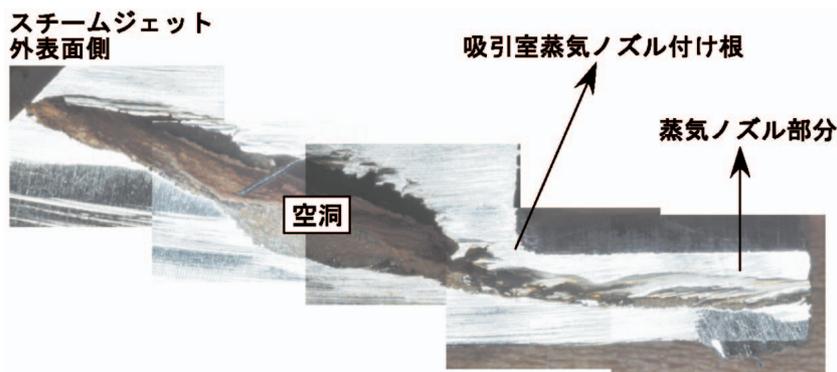


図11 J202切断面と拡大

のであったが、それと比べて使用時間が短いJ203（約3,000時間）及びJ204（約10時間）のCCDカメラによる観察及びPT試験結果では、欠陥は確認されなかった。

以上、CCDカメラなどによるマクロ観察結果から欠陥部は腐食により生じたことがほぼ確認されることとなったが、このような形態の欠陥が腐食により発生したことの要因を解明するために、腐食が進行したと思われる温度などの環境条件や材料に起因する要因について調査し、腐食状況との相関について検討した結果を以下に述べる。

#### 4. 金属組織観察

腐食部位のより詳細な特徴を観察するため、光学顕微鏡及び電子顕微鏡（SEM）により金属組織観察を実施した。観察は、腐食による欠陥が生じたJ202と、比較のためにJ203の吸引部から切出した試料を対象とした。

##### 4.1 吸引室内表面の観察結果

J202吸引室内表面の光学顕微鏡による観察結果を図12に示す。蒸気ノズル付近に比較的大きな孔が観察され、蒸気ノズル付け根から離れるとともに数も少なく、大きさも小さくなっていることがわかる。また、図13にSEMによる拡大観察像を示す。蒸気ノズル付け根付近で多くの小孔が観察され、腐食により結晶粒界が現われている。結晶粒界の腐食は蒸気ノズル付け根付近が最も激しく、蒸気ノズルから離れるとともに現われる粒界は不明瞭で、外周部近くではほとんど認められない状態であった。J203吸引室内表面の光学顕微鏡による観察結果を図14に示す。J202と比較するとJ203では使用時間が短いこともあってJ202のような深

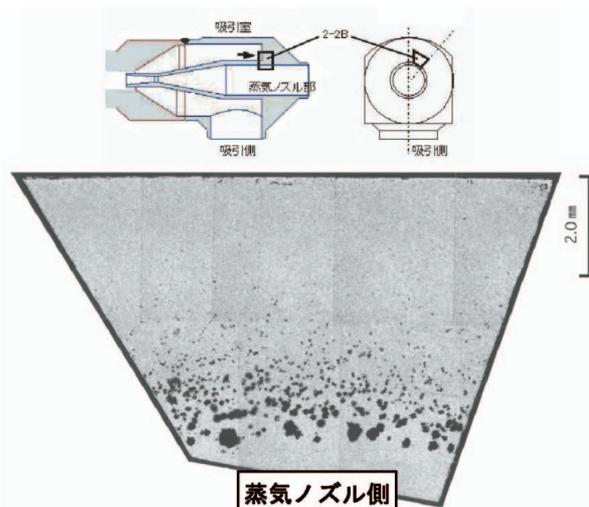


図12 光学顕微鏡によるJ202ノズル近辺の観察

い腐食部は認められないが、蒸気ノズル付け根部付近に多くの微小孔が現われている。J203においても吸引室内部ではわずかではあるが腐食が進行しており、その形態としてはJ202と変わらないものであることがわかった。

##### 4.2 欠陥断面の観察結果

光学顕微鏡によるJ202断面の観察結果を図15に示す。図中には進行過程にある数多くの腐食孔の断面が観察されているが、いずれも材料の加工フロー方向（鍛造方向）に沿って直線的に進行している様子がわかる。また、腐食部の先端は結晶粒界に沿って進展している様子が観察された。

次に、J203断面の観察結果を図16に示すが、J203においてもJ202と同様にわずかではあるが蒸気ノズル付け根部付近から加工フロー方向へ腐食が進行している様子が観察された。

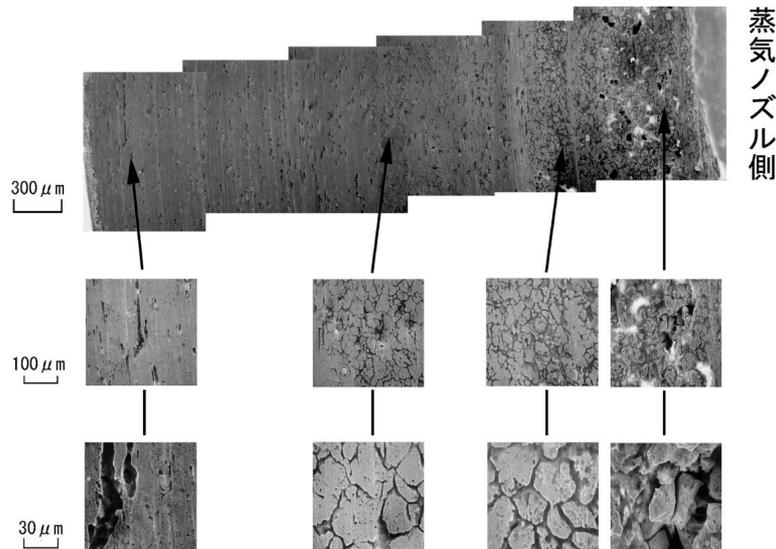


図13 J202吸引室内表面のSEM二次電子像

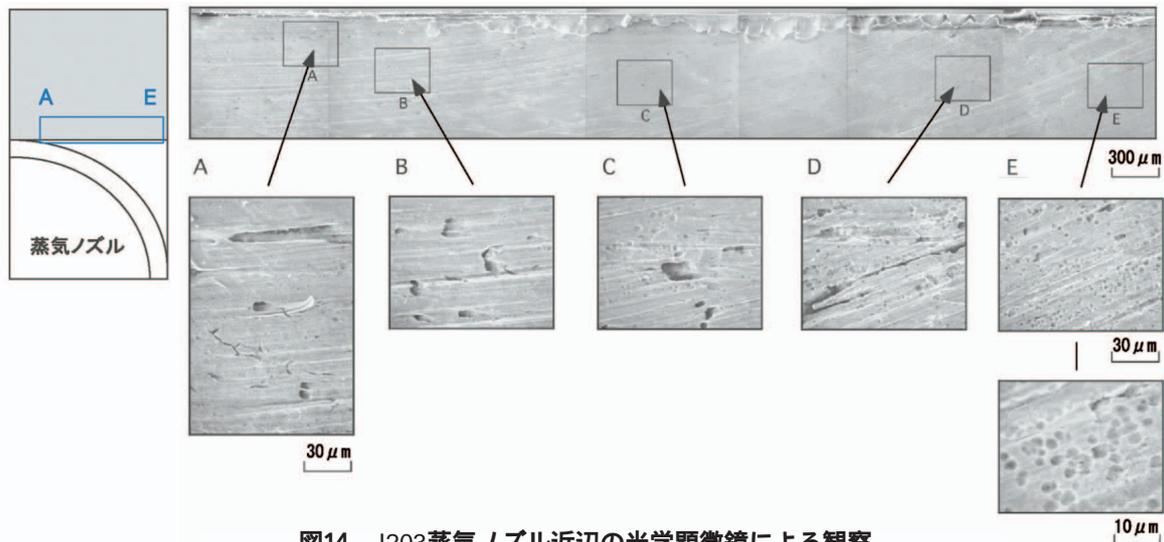


図14 J203蒸気ノズル近辺の光学顕微鏡による観察

## 5. X線マイクロアナライザーによる元素分析

先に示したスチームジェット材料の分析結果においては規格を逸脱する有意な不純物元素は認められなかったが、ここでは材料中での元素の偏析の有無を調査するためにX線マイクロアナライザー（EPMA）を用いた元素分析を実施した。

まず、局所的に腐食孔の周辺及び断面の粒界腐食部を分析した結果、硫黄（S）及びリン（P）などの不純物元素に有意な偏析は確認されず、粒界に沿ったクロム（Cr）、ニッケル（Ni）の濃化や欠乏なども認められなかった。

次に、腐食の進行が材料の加工方向と一致していることから、複数の箇所加工方向及びそれと

直交する方向の元素分布を比較した。図17にEPMAによる線分析結果の一例を示す。いずれの測定箇所においても加工方向と直交する方向においてNiの強度変化が顕著であり、Crについてはこれと相補的な強度変化を示している。一方で、加工方向と平行な方向では測定強度はほぼ平坦であり、EPMAの分析結果からも元素分布の状態が加工フローと関連しているものと考えられた。

その他、MnS系、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系の介在物が加工方向と平行した線状相や点状相として材料全般に偏りなく観察されたが、腐食部との有意な関連は見られず材料の持つ特徴と考えられた。

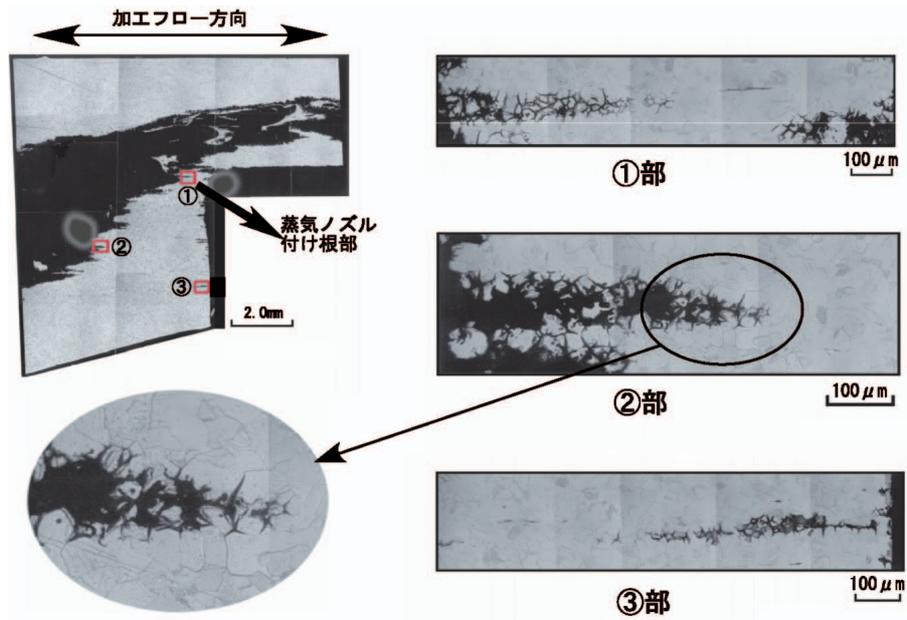


図15 光学顕微鏡によるJ202吸引室断面の観察（エッチング処理）

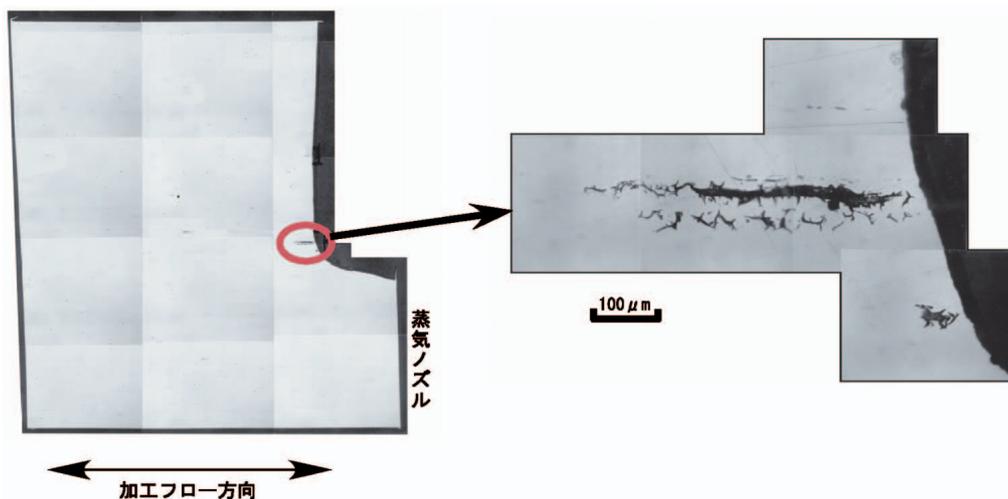


図16 J203光学顕微鏡による吸引室断面の観察

## 6. 温度評価

観察結果から、腐食は蒸気ノズル周辺から生じ、構造体内部ではある勾配に沿って進行し、外表面まで達したものと推測された。

一般的に腐食速度は温度との相関が高いことから、蒸気ノズル周辺部及び構造体内部の温度分布と腐食状態との関連を明らかにするため、計算コードを用いた数値解析により温度評価を実施した。

また、実機と同構造のスチームジェットを製作し、解析結果の検証も含め、作動時の構造体内部及び外表面の温度測定を実施した。

### 6.1 数値解析による温度評価

スチームジェットをモデル化し、溶液及び駆動用蒸気の温度条件を与え、内部流動状態及び構造体の温度解析を実施した。解析には汎用熱流体解析コードFLUENTを用い、スチームジェットを約14万メッシュに分割し、溶液温度40℃、蒸気ノズル内壁温度170℃一定条件のもとスチームジェットの温度分布を評価した。

吸引室内部流体の温度分布を図18に示す。蒸気ノズルに接する部分の流体温度が高く、溶液入口反対側では止水域となるため温度が最も高くなっていることがわかる。蒸気ノズル付け根部で温度

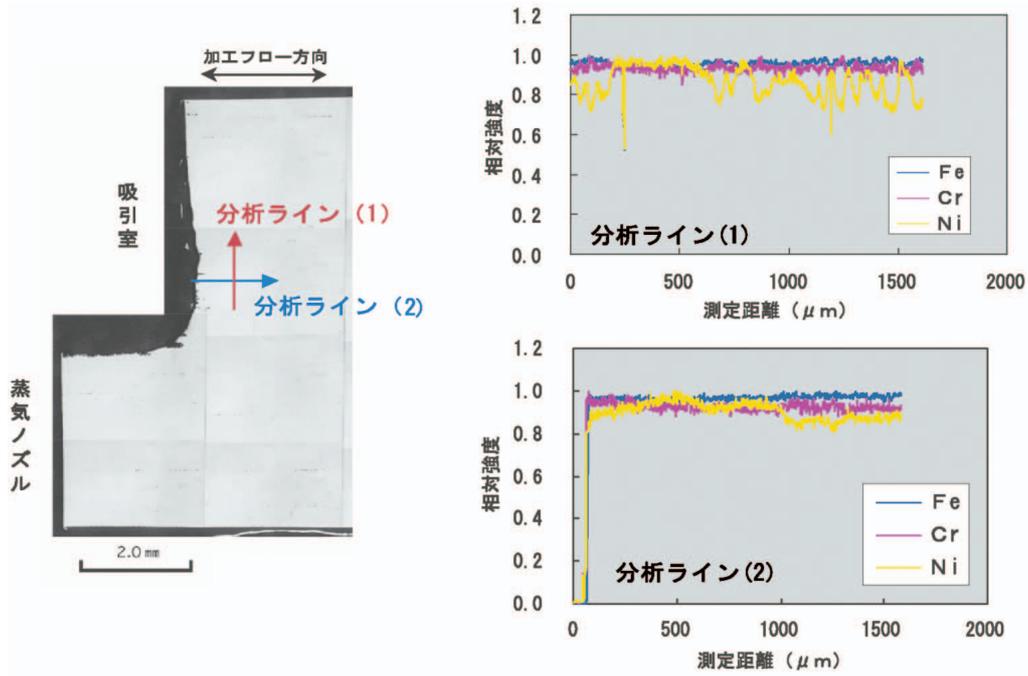


図17 J202マトリックスのEPMAによる元素分析結果

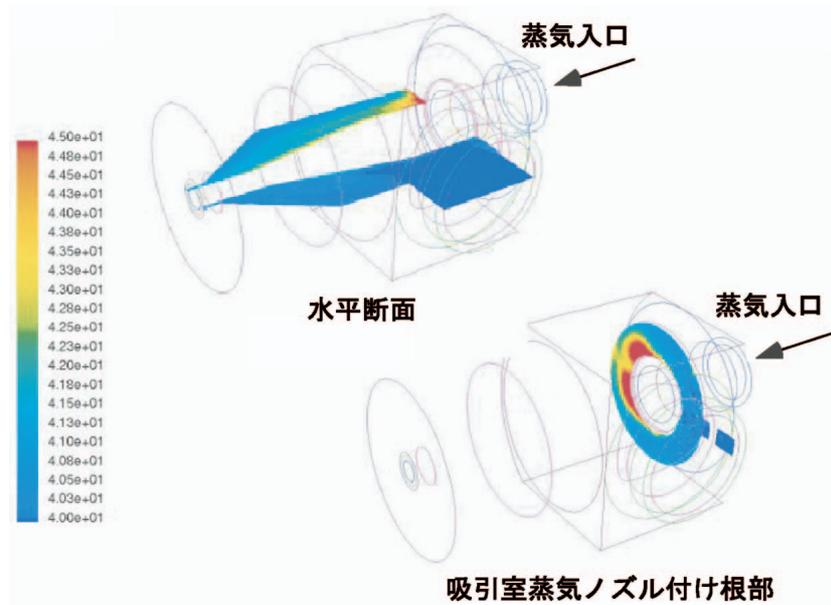


図18 吸引室内部流体の温度分布解析

の高い箇所は、先に観察された腐食が著しい部分とほぼ対応している。

次に、スチームジェット構造体の温度分布の解析結果を図19に示す。スチームジェットの等温面は、蒸気ノズルを軸として同軸円錐状に分布している。吸引室の蒸気供給側表面では蒸気ノズル付け根付近で約100℃、構造体の内部で空洞部が確認された部分は120℃～130℃の温度範囲となって

いる。

また、この温度領域は蒸気ノズルの付け根付近から蒸気ノズルの先端方向へも連続して分布していることが確認できた。

## 6.2 温度測定試験

実機的设计を基に同寸法、同等材料(SUS304L)で製作したスチームジェットを温度測定試験に用

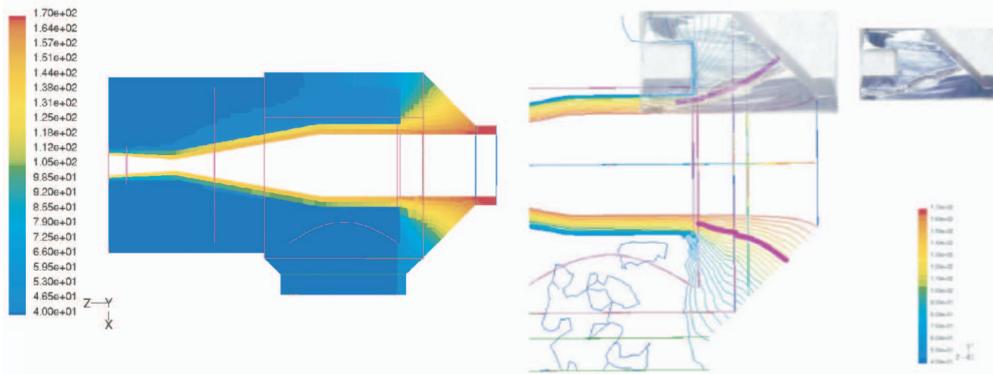


図19 スチームジェットの温度分布解析

いた。試験条件は蒸気圧力及び溶液温度を解析条件と合わせ、溶液の密度はほぼ  $1.0\text{g/cm}^3$  であることから流体には水を使用した。温度測定は構造体の上下左右に各6ヶ所の熱伝対測定用の孔(直径2mm)を空け、合計24ヶ所の内部位置と外表面4ヶ所の温度測定を実施した。測定結果と解析値との比較を図20に示す。測定結果によると、構造体内部に生じた腐食孔の位置は110~120の温度範囲にあることが確認できた。

解析では熱電対孔の構造を考慮して評価を実施している。測定値と解析値とを比較すると、上下左右の位置の違いによる傾向はほぼ一致している

が、解析値のほうが各部位とも高く、5~20の差が生じている。

測定値と解析値の違いの要因については、熱電対のわずかな位置のずれや、解析では外表面を断熱条件として評価していることなどが考えられるが、傾向として良い一致を示している。

また、外表面については、サーモグラフィによる温度測定も実施しており、その結果を図21に示す。サーモグラフィの測定値は、熱電対による測定ポイントと比較すると5程度低い値を示しているが、蒸気供給配管を中心として同心円状の温度分布を示していることが確認できた。

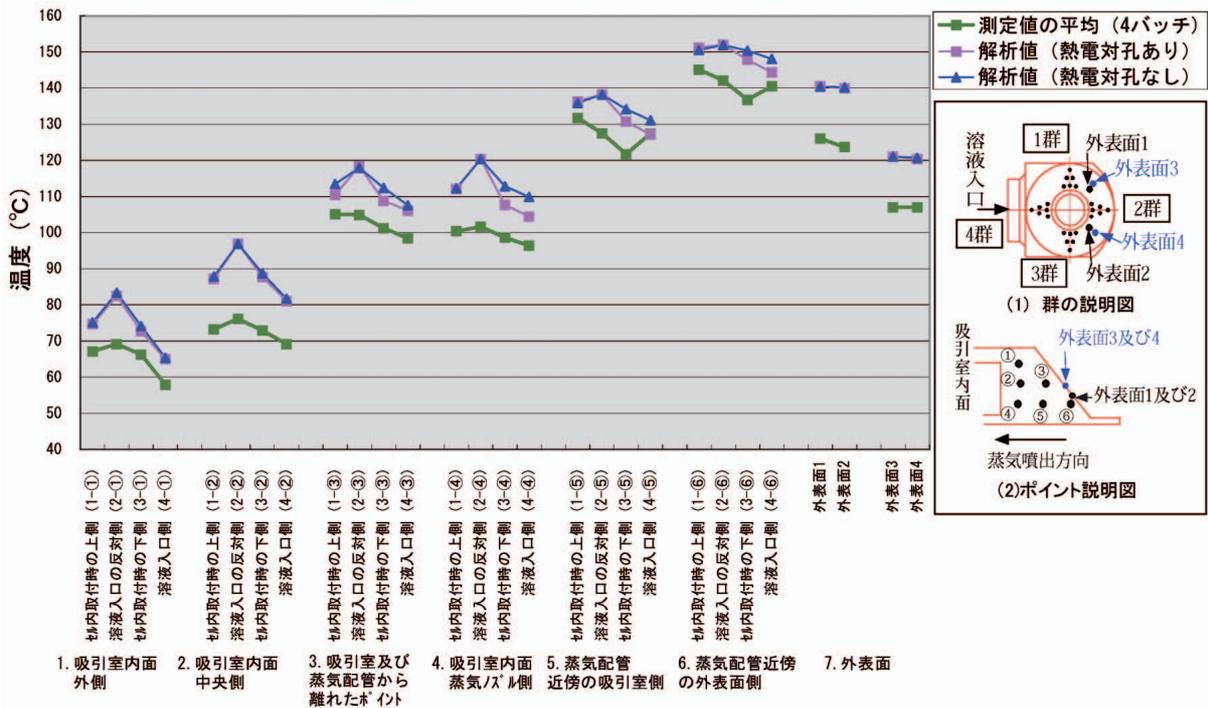


図20 測定値と解析値の比較



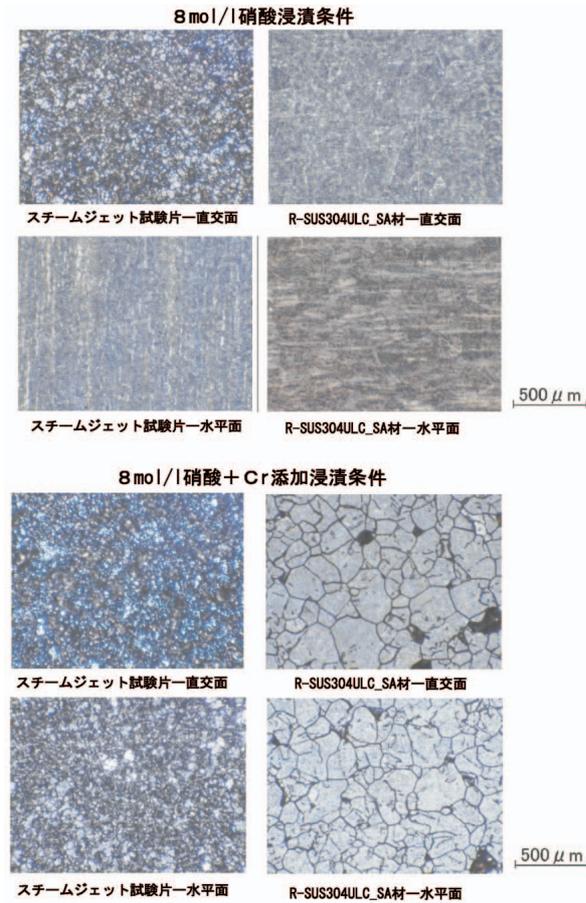


図23 浸漬試験後の表面状態

て脱粒が生じたが、平行する面では腐食は観察されるものの脱粒は生じない程度であった。R-SUS304ULC (SA材) では、両方向とも腐食はほとんど観察されていない。

クロム添加条件では、スチームジェット材料の直交面で脱粒が激しく、一部に深い腐食孔が観察された。平行面では、全面的に粒界腐食が生じて

いるものの腐食孔は認められなかった。

R-SUS材では、粒界腐食が観察されるが腐食孔はなく異方性も見られない。これらの表面状態の観察結果は、重量変化の測定で得られた傾向と良い一致がみられた。

加工フローに直交するスチームジェット材料試験片の断面写真を図24に示す。図は8 mol/l硝酸での浸漬試験を終えたものの断面である。腐食は加工フロー方向(紙面の上下方向)に沿って深く進行しており、その形状は故障したスチームジェットの腐食部分と同様の形態となっていることが確認された。

## 8. 故障要因の考察

スチームジェットの欠陥部の調査結果を踏まえ、腐食によって欠陥が発生したことの要因について検討した。

### (1) 腐食の発生原因について

スチームジェット腐食部の各種観察、腐食試験及び温度解析結果から以下の点が確認された。

PT試験の結果、吸引室内表面には溶液の入口側を除いて蒸気ノズルを取り囲むように欠陥の存在を示す赤色指示部が確認された。

この部位の詳細観察を行った結果、蒸気ノズル近傍に多数の孔があることが観察され、蒸気ノズルから離れた位置でも、小孔が分布している様子が確認された。また、孔の径は、蒸気ノズルに近いほど大きなものであった。

運転時におけるこの部位の表面温度は、温度解析の結果から蒸気ノズル付け根で約100 と推定される。

吸引室の断面の観察結果では、小孔は粒界に

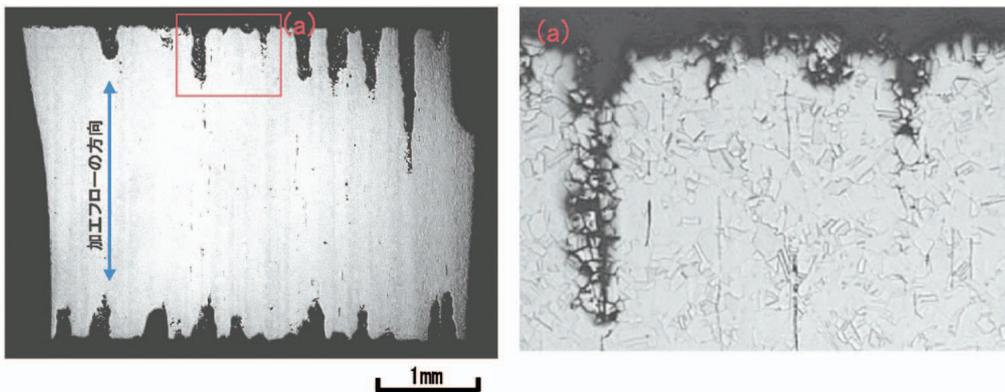


図24 腐食試験片の断面

沿って直線的に成長しており、その方向は、加工フロー方向（鍛造方向）と一致していた。

硝酸による腐食試験の結果では、スチームジェットの場合は腐食に対して大きな異方性を持ち、加工フロー方向に対して著しく腐食し易く、縦穴状に進行することを確認しており、吸引室断面の観察結果と一致している。

これら断面で観察された腐食の形状は、過去に報告された酸回収精留塔の過熱蒸気配管等での加工フロー腐食の形状とも類似したものであった。<sup>12)</sup>

以上のことから、スチームジェットの腐食は、加工フローに直交する吸引室の蒸気供給側表面で小孔状の加工フロー方向への粒界腐食が多数発生し、それらの中で温度が高い蒸気ノズル近傍の腐食孔が成長し、内部の腐食への起点となったと推測される。

## (2) 空洞の形成について

腐食は表面では小孔状であるが、内部では空洞を形成していた。また、空洞の広がりには小孔とは異なり、蒸気ノズル軸に対し10~20°の傾きを持って外表面に向けて成長しており、一部の空洞は蒸気ノズル側へも進行していた。

この空洞の形成要因としては、温度との相関が高いと考えられた。スチームジェット内部の温度解析の結果、空洞形成箇所の温度分布は120~130°の等温線の領域とほぼ重なる結果となっており、その特徴は一部蒸気ノズル側へと進行した空洞部分も含め、全体的な空洞の形成状態と良く一致するものであった。

スチームジェットの内部の温度分布については、温度解析結果が実測値よりも5~20°高い値となることをモックアップによる測定結果から確認しており、空洞の形成部分には実際には110~120°の領域にあったと考えられる。

空洞の形成要因としては、加工フローに沿って成長した小孔状の腐食が、スチームジェット内部の温度の高い領域（110~120°）に達すると、そこでの温度条件により腐食が促進されて空洞を形成し、吸引室との液の移動が制限された空洞の中では、硝酸の濃縮及びCr(VI)イオンの生成によりさらに厳しい腐食条件となり得たものと推測される。硝酸は約120℃、約15mol/lが硝酸-水溶液系の共沸点温度であり<sup>3)</sup>、溶液として存在できる最高温度であったことも、腐食が温度分布に沿っ

て進行した要因として挙げられる。

## (3) 材料の要因について

J204については使用時間も極端に少なく、そこから採取された試験片は材料の初期の特徴をそのまま持ち合わせているものと考えられる。J204の試験片を用いた腐食試験の結果から、スチームジェットに用いられた材料は大きな異方性を持つものであることが明らかとなった。

スチームジェットから試料を採取して成分分析を実施した結果では、不純物濃度（Mn, Si, P, S）ともJIS-SUS304Lの化学成分の許容変動値の範囲内であり、問題は認められなかった。

また、断面の観察結果では、アルミナ系と考えられる点状の介在物、MnSと考えられる加工方向に伸びた線状の介在物が観察され、これらの存在が腐食の起点・進行ルートになったのではないかと考えられたが、腐食部との有意な関連は認められなかった。

EPMAを用いた不純物の観察は、S及び加工フロー腐食に影響があるとの報告のあるP<sup>4)</sup>を対象に実施したが、有意な偏析を確認することはできなかった。しかし、マトリックス元素であるFe, Cr, Niについて濃度の変動があることが確認され、加工フローに直交する面で濃度の変動が顕著であることが明らかとなった。

以上より、材料の腐食に対する異方性の原因は、材料製造時に形成されたマトリックス元素の偏析が、その後の鍛造等により加工フロー方向に引き伸ばされたことが原因と考えられた。このため、加工フロー方向に直交する断面での耐食性に差が生じ、弱い部分が選択的に腐食されたものと考えられた。

加工フロー腐食は、微量に残留するP等の不純物元素の偏析<sup>4)</sup>及びCr負偏析<sup>5)</sup>により生じると考えられているが、本スチームジェットの材料においては、製造時に生じたマトリックス元素も含めた偏析によって生じたものと考えられる。

加工フロー腐食対策として有効とされるESR等の2次溶解法により製造されたR-SU304ULC(SA)材について腐食試験を実施した結果は、スチームジェット材料と比較して腐食量は少なく、腐食に対する異方性も認められなかった。

腐食試験の結果から見ても、R-SU304ULCは加工フロー腐食対策として有効な材料であることが確認された。

## 9. 調査結果の反映

スチームジェットの故障要因について調査した結果を踏まえ、東海再処理施設にある約400基のスチームジェットを対象として、予防保全上の観点から講じた対策について以下にまとめた。

### 9.1 他のスチームジェットの使用状況

今回故障が発生した273J202については、蒸発缶の運転にあわせて連続的に送液するジェットであるため、使用時間は他のジェットと比べて特に長いものであった。他のスチームジェットの多くは貯槽間の液移送に使用されているため、数千時間のものが5基あることを除いては、概して使用時間は500時間未満となっている。

しかし、現在使われている多くのスチームジェットは故障したスチームジェットと同等の材料で製造されており、また温度条件となる蒸気の使用圧力も同様であることから、使用時間が長くなれば同様の腐食が進行するものと考えられる。

### 9.2 予防保全上の対策とその根拠

今回の腐食の過程には、吸引室内の蒸気ノズル部から材料の加工フロー方向に直線的に進行する部分と、構造体内部の約120の温度領域に空洞を形成しながら進行する部分の二つの特徴があると考えられた。腐食については、進行過程にあった273J203の腐食状況の観察結果から、その進行速度を概算することが可能である。273J203の使用時間は約3,000時間であり、観察で確認された腐食孔の深さは最大で約0.5(mm)であったことから、

$$0.5(\text{mm}) \div 3,000(\text{h}) = 2 \times 10^{-4} (\text{mm/h})$$

の速度で吸引室内の蒸気ノズル部から加工フロー方向に進行すると考えることができる。図25に寸法の概略を示すが、この腐食が130(計算解析による温度)付近となる2(mm)まで進行するものと考えると、その時間は10,000(h)となる。

その後、腐食が進行して約20mmの構造体を貫通したことになり、その時間はの時間も含めて59,000時間であった。

よって腐食速度は

$$20(\text{mm}) \div [59,000(\text{h}) - 10,000(\text{h})]$$

$$4.5 \times 10^{-4} (\text{mm/h})$$

程度と見積もることができる。

スチームジェットの構造上、厚みは少なくとも10(mm)程度はあるので、この種の方向性をもって進行する腐食の速度で見積もった場合においても、約20,000(h)の使用には耐えるものと考えられる。予防保全の観点からは欠陥が貫通に至る前に腐食の進行具合を把握しておく必要があり、この意味からも運転時間が約10,000時間に達した段階でスチームジェットの健全性を確認することを対策として講じることとした。

## 10. おわりに

スチームジェット(273J202)で発生した腐食は、吸引室内の蒸気ノズル付け根部分を起点として加工フローに沿った小孔状の粒界腐食が発生し、内部の高温域で腐食が促進されて空洞を形成したが、この際には硝酸、Crイオンの濃縮によりさらに厳しい条件で腐食が進行したとも考えられ、長時間の使用により外部までの貫通に至ったものと推定された。

起点での加工フローに沿った腐食は、製造時に

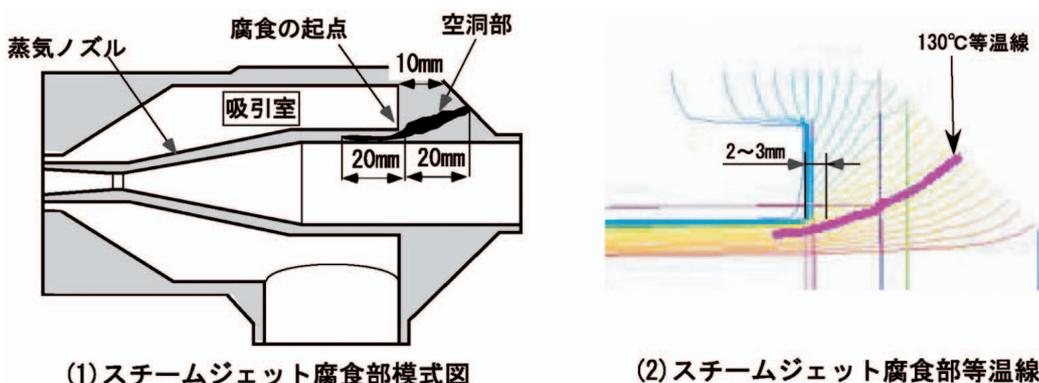


図25 腐食速度の見積もりに係る寸法の概略

生じた元素の偏析によって局部的に腐食に弱い部分が存在したため発生したものと考えられ、また腐食の進行が方向性を持って空洞の形成に至った過程には、スチームジェット構造体内部での温度条件が大きく影響したものと推定された。

スチームジェット材料が腐食に対して示した異方性については、母材が約30年前の海外生産品であることから、その詳細な製造過程を調査することは出来なかったが、各種観察及び試験による客観的事実からスチームジェットの故障要因を解明することができた。

以上の様に、この種の欠陥の発生に関わる要因を整理できたことは、単に事象を解明するだけに留まらず、今後とも既存の施設の設備保全を効果的に計っていくという観点からも有用な技術的知見になり得るものと考えられる。

#### 謝 辞

今回のスチームジェット故障要因の調査にあ

たっては、機構内外の有識者で構成される技術評価会議を設け、調査計画の段階から幅広い技術的知見を反映しつつ調査を進めてきた。東京工業大学教授小林英男先生、東北大学教授杉本克久先生、日本溶接技術センター教授入江宏定先生には評価委員として技術評価会議に参加して頂き、助言、評価をして頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 榎, 東海再処理施設の腐食環境と腐食速度評価, サイクル機構技報 No.14 (2002)
- 2) 住友化学工業(株), 再処理施設耐食安全性実証試験検討委員会・腐食専門部会報告書(1987)
- 3) Purex technical manual, RHO-MA-116 (1980)
- 4) 金子, 阿部, ステンレス鋼の加工フロー腐食機構の解明と防止対策の確立, CAMP-ISIJ Vol.3(1990), p811
- 5) 長野, 梶村, 原田他, 高酸化性硝酸中におけるステンレス鋼の腐食形態と耐食性 材料学会学術講演会, 37巻(1988), p196 - 198