



水蒸気改質処理試験装置の腐食対策

Corrosion Countermeasure for Demonstration Scale Steam Reforming System

中西 良樹 青山 佳男 野中 一晴 曾根 智之
中澤 修 田代 清

Yoshiki NAKANISHI, Yoshio AOYAMA, Kazuharu NONAKA, Tomoyuki SONE
Osamu NAKAZAWA and Kiyoshi TASHIRO

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
環境技術管理部

Waste Management Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2012

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

水蒸気改質処理試験装置の腐食対策

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部
中西 良樹・青山 佳男・野中 一晴・曾根 智之・中澤 修・田代 清

(2011年 12月 28日 受理)

焼却処理が困難なウランで汚染されたリン酸トリブチルとノルマルドデカンの混合廃溶媒の減容処理を行うため、水蒸気改質処理法の開発を行っている。

この混合廃溶媒を処理したところ、処理試験装置のガス化装置に孔食状の腐食が発生した。このため、原因調査及び試験を行った。この結果、ガス化装置に発生した腐食の原因は処理の過程で発生する残渣による隙間腐食であると分かった。よって、この隙間腐食に対する防食法の検討を行い、本装置の防食法として、犠牲陽極方式のカソード防食法を採用した。

この腐食対策を施した装置を用いて、混合廃溶媒の連続処理試験を行ったところ、638時間の処理でガス化装置に隙間腐食が発生しなかったことから、実施した対策が有効であることが分かった。

Corrosion Countermeasure for Demonstration Scale Steam Reforming System

Yoshiki NAKANISHI, Yoshio AOYAMA, Kazuharu NONAKA, Tomoyuki SONE,
Osamu NAKAZAWA and Kiyoshi TASHIRO

Waste Management Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 28, 2011)

Steam reforming technology has been developed to reduce the volume of liquid uranium waste such as a Tri-n-butyl phosphate adding n-dodecane solvent (TBP/nDD), which is difficult to incinerate.

The localized corrosion like pitting corrosion occurred on the inner surface of the gasification chamber of the demonstration scale steam reforming system during the treatment of TBP/nDD. Therefore we conducted the tests to identify the form of corrosion. It is found that the form of corrosion is crevice corrosion which caused by the residues generated by treatment of TBP/nDD. The corrosion protection methods were studied, and the cathodic protection system using a galvanic anode was selected as the protection method of the gasification chamber.

The continuous treatment test of TBP/nDD was conducted using the steam reforming system with the cathodic protection system. As a result, the crevice corrosion did not occur during 600 hours continuous treatment of TBP/nDD, and the effectiveness of the protection method was verified.

Keywords: Steam Reforming, TBP, Crevice Corrosion, Cathodic Protection

目次

1. はじめに.....	1
2. 腐食原因調査	1
2.1 腐食状況	1
2.2 腐食原因の調査	4
3. ガス化装置の腐食対策	20
3.1 隙間腐食対策の検討	20
3.2 処理試験装置への適用.....	22
3.3 隙間腐食対策の効果の実証試験	24
3.4 試験結果	25
4. まとめ	30
参考文献	31

Contents

1. Introduction.....	1
2. Investigation of cause of corrosion.....	1
2.1 Corrosion condition	1
2.2 Investigation of cause of corrosion	4
3. Corrosion countermeasures for gasification chamber.....	20
3.1 Investigation of crevice corrosion protection methods	20
3.2 Application to the system	22
3.3 Verification test	24
3.4 Result.....	25
4. Conclusion	30
References	31

表リスト

Table 1 試験に用いた試薬の化学的性質

Table 2 ステンレス鋼で想定される腐食形態

Table 3 廃溶媒の分析結果

Table 4 基礎試験装置による試験条件

Table 5 基礎試験装置を用いた UNS N08028 の腐食試験結果

Table 6 インナー厚さの最適化試験の試験条件

Table 7 インナー厚さの最適化試験結果

図リスト

- Fig.1 ガス化装置
- Fig.2 ライナーの腐食量
- Fig.3 試験後のライナー(腐食部)
- Fig.4 孔食の発生メカニズム
- Fig.5 隙間腐食の発生メカニズム
- Fig.6 ライナー表面写真(モータ側開口部から 70cm)
- Fig.7 基礎試験装置模式図
- Fig.8 腐食試験体系図(ガス化部)
- Fig.9 隙間腐食試験体系図
- Fig.10 試験後の状況(試験 1 : TBP, 水蒸気雰囲気)
- Fig.11 試験後の状況(試験 2 : TBP, 窒素雰囲気)
- Fig.12 試験後の状況(試験 3 : 85%リン酸, 水蒸気雰囲気)
- Fig.13 試験後の状況(試験 4 : 85%リン酸, 窒素雰囲気)
- Fig.14 試験後の状況(試験 5 : 85%リン酸, 水蒸気雰囲気, 隙間作成)
- Fig.15 試験における隙間腐食のモデル
- Fig.16 腐食温度の推定
- Fig.17 95%リン酸中における UNS N10276 の腐食温度の温度依存性
- Fig.18 電気化学測定装置の模式図
- Fig.19 100%リン酸中における隙間を持つ UNS N10276 の動電位分極曲線
- Fig.20 外部電源方式の装置への適応模式図
- Fig.21 インナーを挿入したガス化装置模式図
- Fig.22 インナー及びライナーの働き
- Fig.23 ライナーの腐食量 (試験①:インナーの厚さ 1mm)
- Fig.24 ライナーの腐食量 (試験②:インナーの厚さ 2mm)
- Fig.25 ライナーの腐食量 (試験③:インナーの厚さ 3mm)
- Fig.26 インナー厚さの最適化試験後のインナー
- Fig.27 インナー厚さの最適化試験のライナーの腐食速度
- Fig.28 実廃溶媒処理試験のライナーの腐食速度

1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、焼却処理が困難なリンやハロゲンを含む有機溶媒、機械油等の有機系液体廃棄物を保管している。この有機系液体廃棄物は埋設処分に際して廃棄体への混入が禁止されている。このため、廃棄体化前に無機化処理を行う必要がある。また、極力減容し環境負荷および処分コストの低減を図ることが必要である。しかし、一般的な無機化減容技術である焼却法では、リンやハロゲンを含む溶媒等を処理した場合、装置の腐食、配管の閉塞、大量の二次廃棄物の発生等の問題がある。

環境技術管理部処理技術課では、有機系液体廃棄物であるウランで汚染された TBP (Tributyl-Phosphate,リン酸トリブチル) と n-ドデカンの混合廃溶媒(以下、「TBP 廃溶媒」という。)の無機化減容処理を行うため、水蒸気改質処理法の開発を行ってきた¹⁾。水蒸気改質処理法は、有機系液体廃棄物と過熱水蒸気の接触により難燃物の分解・ガス化を行う水蒸気改質プロセスと、水中で燃焼を行う液中燃焼プロセスを組み合わせた処理法である。

これまで、TBP 廃溶媒処理試験中に、試料の分解、ガス化を行う装置(以下、ガス化装置という)に腐食の発生が問題となっていた。そのため、各種材料の文献調査、リン酸への浸漬腐食試験を行い、リン酸に対する耐食性を有する高耐食ニッケル合金(UNS N10276)をガス化装置に使用し、定期的に交換する腐食対策を行うこととされた¹⁾。また、ガス化装置を保護するための UNS N10276 製の保護管(以下、「ライナー」という。)を挿入し、ガス化装置の長寿命化を図った。この対策の効果を確認するため、ウランを含んでいない TBP と n-ドデカンの混合物(以下、「模擬 TBP 廃溶媒」という。)を処理したところ、浸漬腐食試験で得られた腐食速度よりもはるかに大きい速度でライナーが腐食した。

そこで、腐食状況を確認し腐食形態について調査し、原因を特定する試験を行った。原因として明らかとなった隙間腐食の対策を検討し、犠牲陽極方式のカソード防食を用いることとした。採用したカソード防食の効果を実証するため、実廃溶媒試験を行った。

本報告書では、ライナーに発生した腐食の原因調査と腐食原因特定試験の結果と、原因である隙間腐食の対策を検討するとともに、試験装置の腐食対策を実施して実廃溶媒試験を行い、その隙間腐食対策の効果についてまとめた。

2. 腐食原因調査

2.1 腐食状況

模擬 TBP 廃溶媒を用いた腐食対策確認試験中にライナーに発生した腐食原因を調査するため、試験後のライナーの腐食状況を確認した。試験は Fig.1 に示すようにライナーをガス化装置に挿入して行われた。また模擬 TBP 廃溶媒として、Table 1 に示す試薬を用いて TBP が 40wt%、n-

ドデカンが 60wt%となるように調製した。TBP（大八化学工業）及び n-ドデカン（日鉱石油化学）は試薬特級を使用した。処理時間を 50 時間、電気炉及びヒータの温度は 600°Cとした。ガス化装置以外の試験条件は過去の TBP 廃溶媒処理試験と同じである¹⁾。

試験後にライナー底面を超音波厚さ計（JFE アドバンテック社製 TI-65C）で測定した結果を Fig.2 に示す。試験の結果、位置基準点からおおむね 60cm～90cm の範囲で大きく腐食され 70cm の位置では貫通孔が生じた。腐食速度は処理時間 50 時間で厚さ 3mm のライナーに貫通孔が生じたことから 0.06 mm/h 以上であると考えられる。これは、浸漬腐食試験で得られた腐食速度 (0.002 mm/h)¹⁾ に比べ大幅に大きい速度である。また、Fig.3 に試験後のライナーに生じた腐食の写真を示す。Fig.2 の腐食量測定結果と Fig.3 の写真からこの腐食が局部腐食であることが分かる。実際の腐食では局部腐食が発生し、浸漬腐食試験では全面腐食であったため、このような速い腐食速度となったものと考えられる。

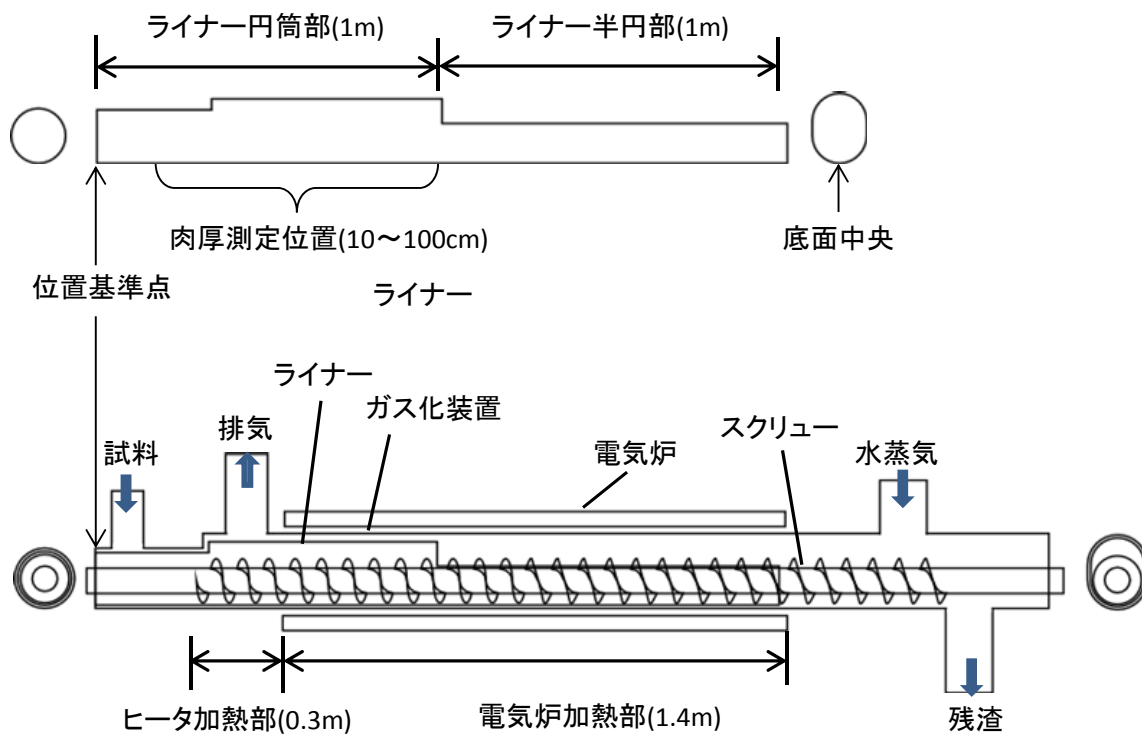


Fig. 1 ガス化装置

Table 1 試験に用いた試薬の化学的性質

名称	成分	沸点 (°C)	密度 (g/cm ³)
TBP	[CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ O] ₃ PO	269 (分解)	0.979
n-ドデカン	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃	215	0.749

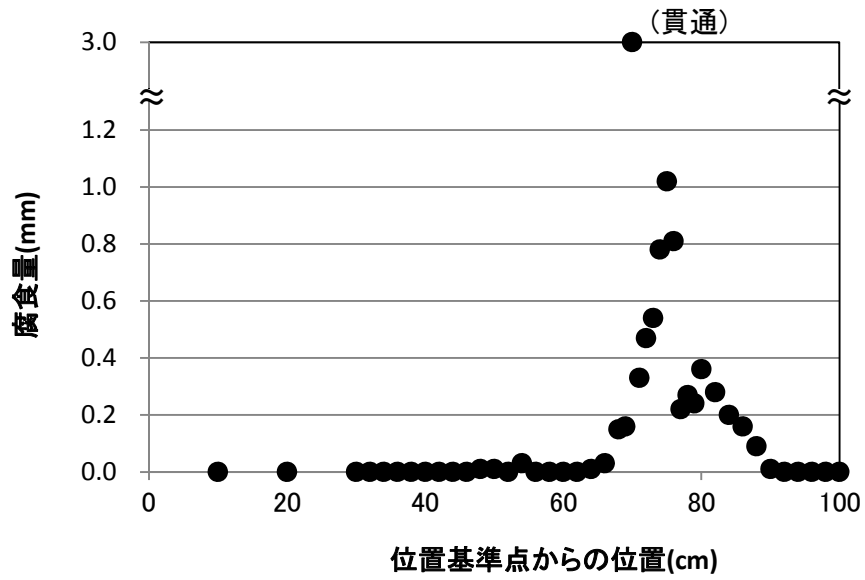


Fig.2 ライナーの腐食量

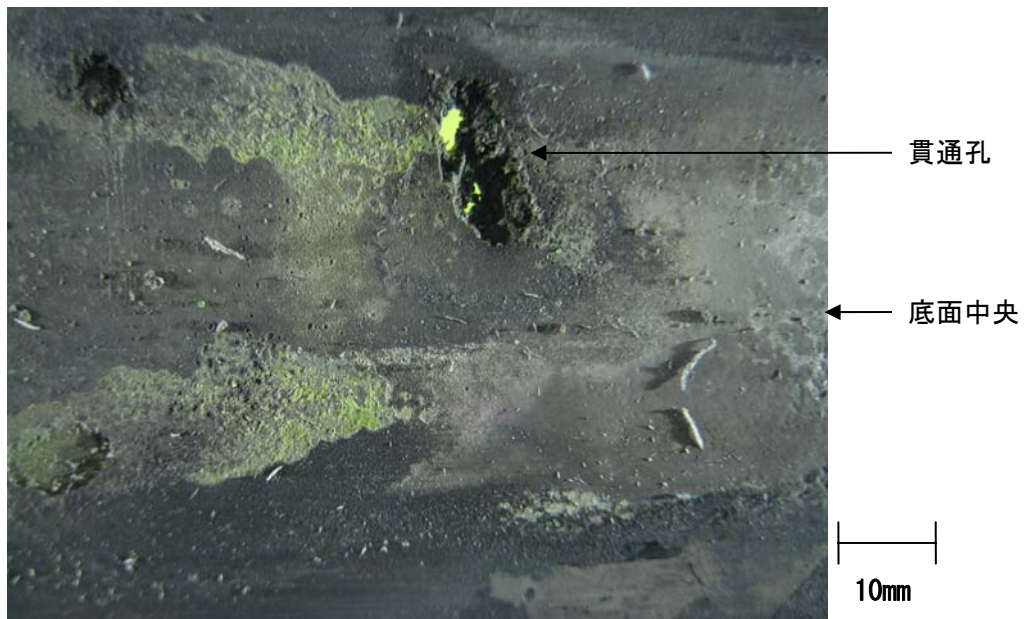


Fig.3 試験後のライナー(腐食部)

2.2 腐食原因の調査

腐食状況より、ガス化装置の腐食は局部腐食であった。金属の腐食形態²⁾のうち、UNS N10276で想定される腐食形態を調べ、ガス化装置内で発生する可能性について検討した。その結果をTable 2にまとめた。検討結果より孔食及び隙間腐食の可能性が考えられた。このため、(1)、(2)にそれぞれの可能性について評価を行った結果を示す。

Table 2 ステンレス鋼で想定される腐食形態

腐食形態	検討結果
粒界腐食 ステンレス鋼等を 550~800℃に加熱するとクロムの炭化物が析出し、クロム濃度が低下した結晶粒界に沿って選択的腐食が進行する。	× 腐食発生場所の装置外面の温度は500℃程度であるため、装置内面温度は500℃以下であると考えられる。よって、クロムの炭化物の析出が発生しないため、この形態の可能性はない。
孔食 主に塩素イオンが存在する環境で金属表面の不動態化被膜の一部が破壊され、腐食孔を生じる。	○ 試料にハロゲンが含まれれば発生するため、発生の可能性はある
応力腐食割れ 引張応力と腐食環境との相互作用によって亀裂が発生し、腐食が進行する	× 応力が集中する部位ではなく、応力腐食割れに特有の亀裂状の腐食ではないため、この形態の可能性はない。
隙間腐食 金属表面上の付着物との隙間に濃淡電池が発生するか pH の低下が発生して腐食が進行する。	○ 残渣を起点として発生している可能性がある

○：可能性のある腐食形態 ×：可能性のない腐食形態

(1) 孔食の評価

孔食のメカニズムを Fig.4 に示す。孔食発生部では M^{n+} のイオン濃度が増大し、孔食内部の電気的中性を保つために溶液内の陰イオン(主に Cl^- などのハロゲン) が泳動し、孔食部内で濃化する。濃化した Cl^- は M の溶解を促進するため、孔食が進行する³⁾。

そこで、蛍光 X 線分析装置(島津製作所製 EDX-720)で TBP 廃溶媒の元素分析を行い、ハロゲンなどの孔食の原因となる元素の有無を確認し、局部腐食が孔食によるものであるかを判断した。

元素分析の結果を Table 3 に示す。TBP 廃溶媒から検出された主な元素はリン(P)であり、

孔食を促進させるハロゲン等の元素は検出されなかった。以上に示した結果から今回の腐食は、TBPの熱分解で生成したリン酸により進行していたものと考えられ、塩素等のハロゲンによる孔食ではないと推察される。

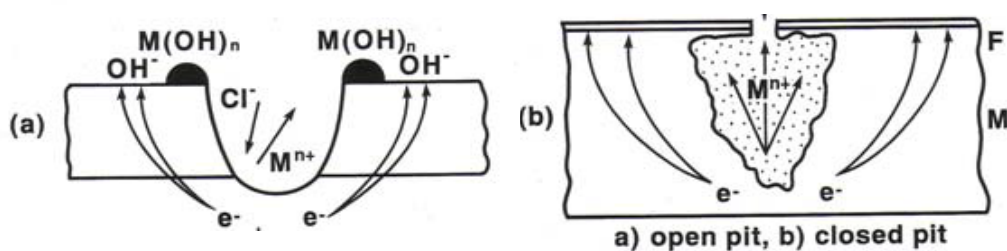


Fig. 4 孔食の発生メカニズム

損傷事例で学ぶ腐食・防食(1990)より引用

Table 3 廃溶媒の分析結果

		(wt%)
元素	試料名	TBP 廃溶媒
	P	
Cr		ND
Fe		ND
Ni		ND
Si		3.57
Al		ND
K		ND
Cu		0.07
Cl		ND
U		ND

(2) 隙間腐食の評価

隙間腐食のメカニズムを Fig.5 に示す³⁾。隙間腐食は大別して孔食と同様のハロゲンによるもの、隙間内部と外部の金属又は酸素の濃淡電池によるものに分けられる。濃淡電池による隙間腐食の進行は、腐食反応により、隙間内の金属濃度が上昇すると相対的に金属濃度が低い隙間外と金属濃淡電池を形成して腐食が進行する。または隙間内部の酸素が欠乏すると、酸素還元反応（カソード反応）は相対的に高い電位である外表面で起こるようになり、隙間内部ではアノード反応のみが優先して起こるようになる。さらに、溶出した金属イオンが隙間内部で高濃度になると、水酸化物を生成し、局部的に pH が下がる現象も発生し、腐食は隙間内部で急激に進行する。

ガス化装置では、装置内に残渣が堆積することで隙間が発生すると考えられる。そこで、試験後のライナー表面を観察したところ、スクリューで残渣をかき出す機構になっているにもかかわらず、Fig.6 に示すように残渣の堆積が見られる。残渣の堆積によって、隙間腐食の発生する環境になっていたと考えられる。

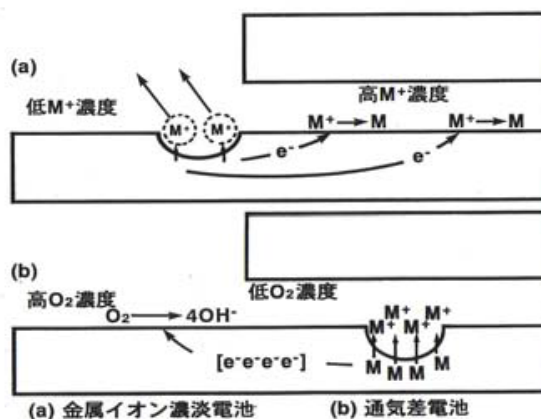


Fig.5 隙間腐食の発生メカニズム

損傷事例で学ぶ腐食・防食(1990)より引用

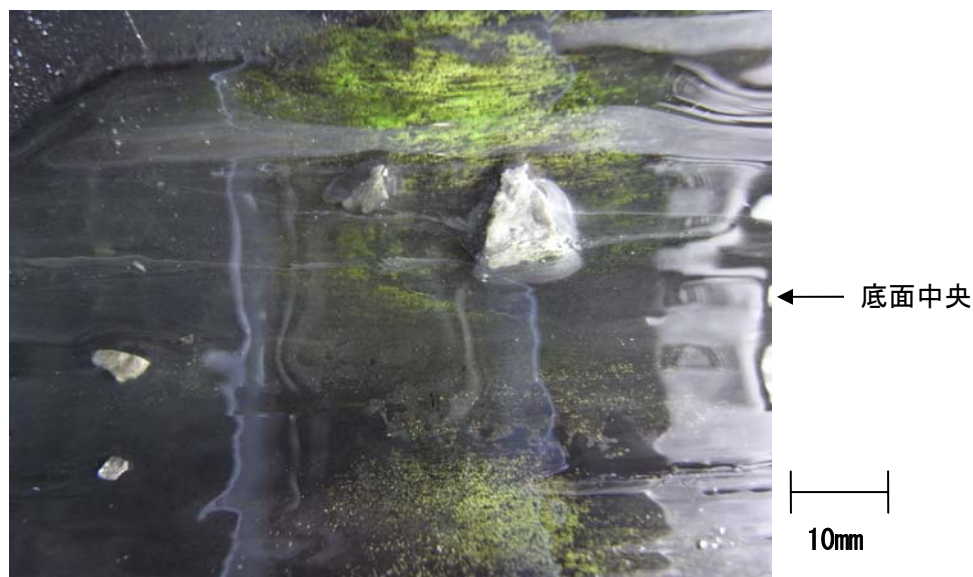


Fig. 6 ライナー表面写真(モータ側開口部から 70cm)

次に隙間腐食の再現試験を行い、ガス化装置の腐食原因の特定を行った。試験は小型の水蒸気改質処理試験装置（以下、基礎試験装置という。）を用いて腐食試験を行った。基礎試験装置の模式図を Fig.7 に、腐食試験体系図を Fig.8 に示す。

腐食試験は、試験片を UNS N10276 製ライナーに入れて TBP 又はリン酸を試料として処理しながら加熱した。電気炉の中心温度は 650℃に設定し、試験時間は 5 時間とした。試験終了後に試験片を取り出して表面の付着物を取り除き、厚さを測定し、その変化から腐食速度を評価した。

なお、試験片は、ライナーの材料である UNS N10276 製では試験時間内での腐食が見られなかったため、加速試験とするために UNS N10276 に比べ耐食性が低い高ニッケル合金の UNS N08028 を使用した。

隙間腐食の原因になる隙間の原因として TBP の熱分解で生成するリン酸による腐食生成物を含む残渣が考えられる。また、濃淡電池の形式としてリン酸に溶解した金属による金属濃淡電池と水蒸気中の酸素による酸素濃淡電池が考えられた。このため、TBP をリン酸に変えた試験及び水蒸気投入の有無による隙間腐食の発生状況を確認した。試験条件を Table 4 に示す。また、試験 5 では試験片と同じ材質を用いて予め隙間を造った試験片を用いて試験を行い、隙間に沿って隙間腐食が発生することを確認した。試験 5 の体系図を Fig.9 に示す。

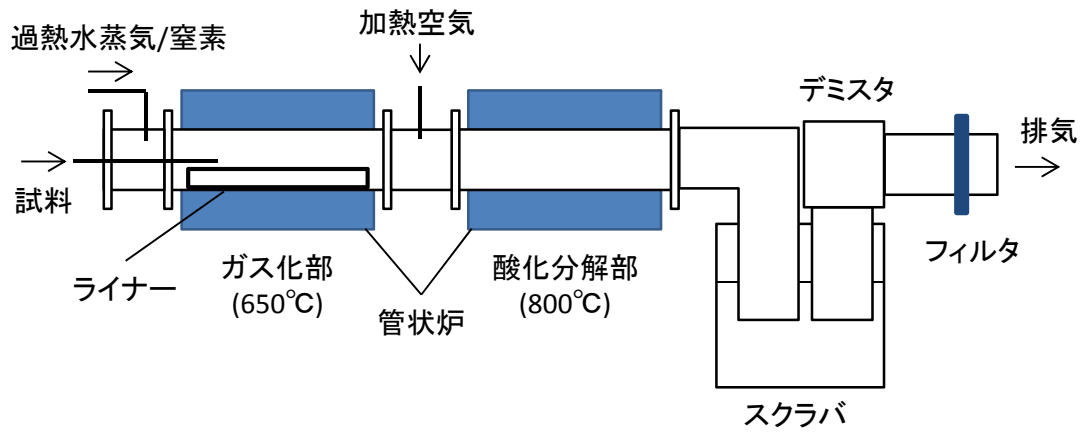


Fig. 7 基礎試験装置模式図

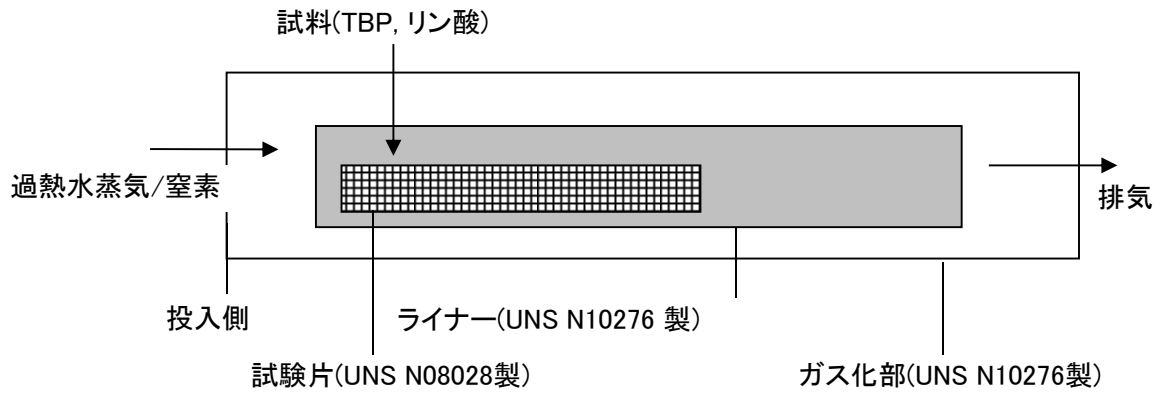


Fig. 8 腐食試験体系図(ガス化部)

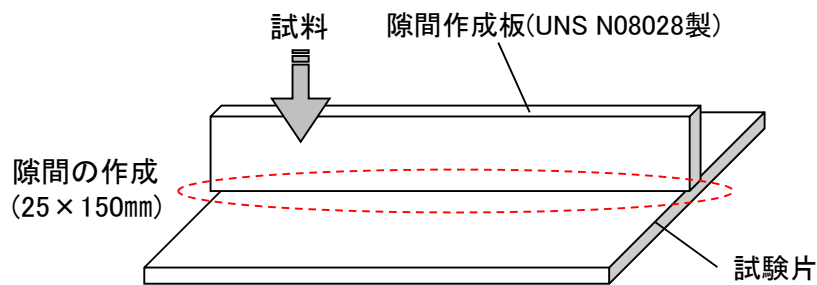


Fig. 9 隙間腐食試験体系図

Table 4 基礎試験装置による試験条件

試験番号	処理試料	窒素	水蒸気	隙間
1	TBP	無	2L/min	無
2	処理量 0.25ml/min	2L/min	無	無
3	リン酸 (85%) 処理量 0.05ml/min	無	2L/min	無
4		2L/min	無	無
5		無	2L/min	有

試験で得られた腐食状況及び腐食速度を Table 5 に、試験後の腐食状況及び腐食量を Fig.10～14 に示す。水蒸気を入れた試験では残渣が少ないのに対し、窒素を入れた試験では、試験後の試験片にタール状の残渣が多く残った。これは、窒素を入れた試験では試料を処理しきれなかったことによると考えられる。また、リン酸を処理した試験では緑色の残渣に覆われており、この残渣は水洗浄によって取り除くことが出来た。このことから、残渣は金属のリン酸塩とポリリン酸が混合したものと推定される。水洗浄後の試験片には緑黄色のリン酸塩のスケールと見られる残渣が付着していた。これをやすりで取り除いた後、試験片を観察し、マイクロメータを用いて厚さを測定して、減少分を試験時間で除して腐食速度をもとめた。

試験後の試験片の観察及び厚さ測定によって全ての試験片に局部腐食が発生していることが確認された。局部腐食は試験片の投入側から 5cm 前後の位置に集中していた。また、予め隙間を造った試験 5 では、Fig.14 に示すように隙間作成板の外周に沿って 4cm 程度の筋状の局部腐食が試験片及び隙間作成板の両方に見られた。

腐食速度は全面腐食部で約 0.02～0.04mm/h、局部腐食部で 0.06～0.10mm/h の範囲となり、すべての試験で局部腐食部の腐食速度が概ね全面腐食部の 2～3 倍であった。一方で、水蒸気投入の有無により腐食速度に違いが見られた。これは、水蒸気がリン酸のポリマー化を抑制し、ポリリン酸による腐食を減少させたためと考えられる。

局部腐食の原因を考察すると、TBP を処理した試験とリン酸を処理した試験で腐食速度及び局部腐食の発生状況に差が見られないことから、隙間の生成は、リン酸による腐食生成物を含む残渣によるものであることが分かった。また、水蒸気を投入した試験と窒素を投入した試験で局部腐食の腐食速度に差がみられないことか、隙間腐食は酸素濃淡電池によるものではなく、リン酸中に溶解した金属による金属濃淡電池によるものと推定される。

さらに、局部腐食が見られるのは残渣下部及び人工的に作成した隙間内に限られていた。これは、残渣が堆積して隙間が生成し、そこにリン酸が供給されることで溶解した金属を含む金属濃淡電池が形成されて局部腐食が進行したためと考えられる。また、より高温になるとリン酸のポリマー化がさらに進行しリン酸が隙間内部へ供給されにくくなるため、局部腐食が進行しにくくなると推定される。この腐食モデルを Fig.15 に示す。隙間を作成した試験 5 では予め作成した隙間に沿って投入側から約 1cm～5cm の位置で局部腐食が発生するが、それよりも高温側のリン酸の

ポリマー化が進行したと見られる残渣が堆積している部分では局部腐食が進行していないこともこの腐食モデルの妥当性を裏付けている。

以上をまとめると、ガス化装置で発生した局部腐食は、TBP が分解するときに生じるリン酸がガス化装置を腐食させ、生成したリン酸スケールとガス化装置の間に生じた隙間にリン酸が入り込むことで生じる隙間腐食であると推定される。

Table 5 基礎試験装置を用いた UNS N08028 の腐食試験結果

試験番号	処理試料	水蒸気	隙間腐食の発生位置	腐食形態(腐食速度)
1	TBP	有	投入側より 5cm	全面腐食 (0.04mm/h) 局部腐食 (0.10mm/h)
2	TBP	無	投入側より 5cm	全面腐食 (0.02mm/h) 局部腐食 (0.07mm/h)
3	リン酸 (85%)	有	投入側より 5cm	全面腐食 (0.02mm/h) 局部腐食 (0.04mm/h)
4	リン酸 (85%)	無	投入側より 5cm	全面腐食 (0.02mm/h) 局部腐食 (0.06mm/h)
5	リン酸 (85%)	有	投入側より 3~7cm	全面腐食 (0.04mm/h) 局部腐食 (0.08mm/h)

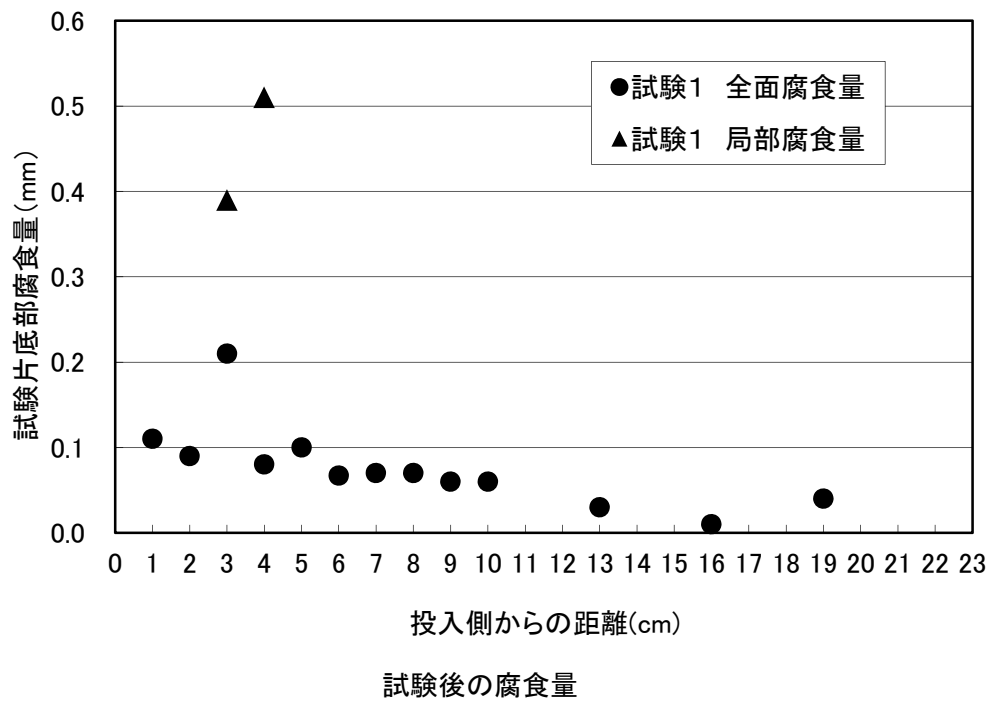
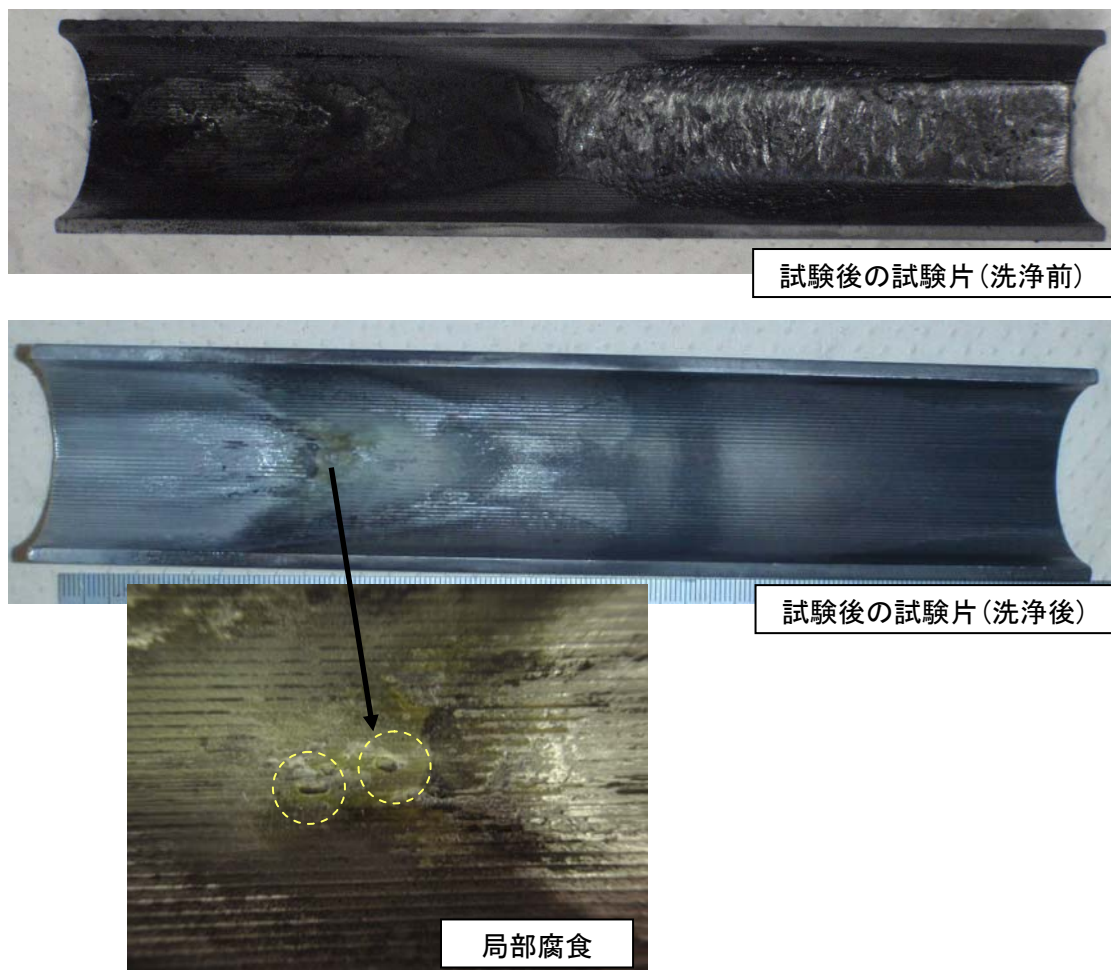


Fig. 10 試験後の状況 (試験 1 : TBP, 水蒸気雰囲気)

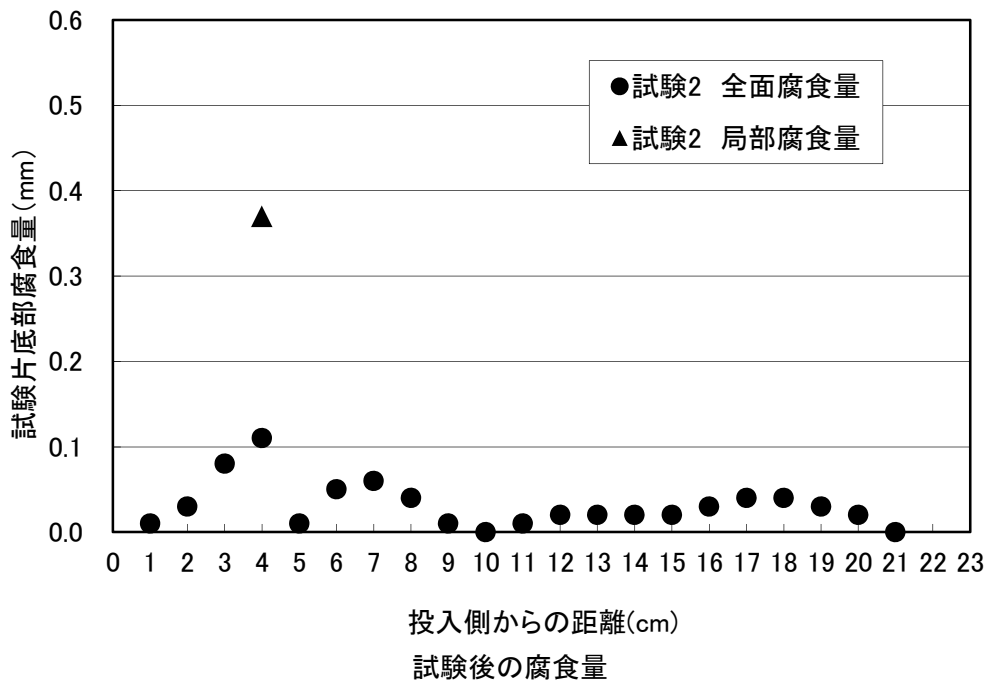
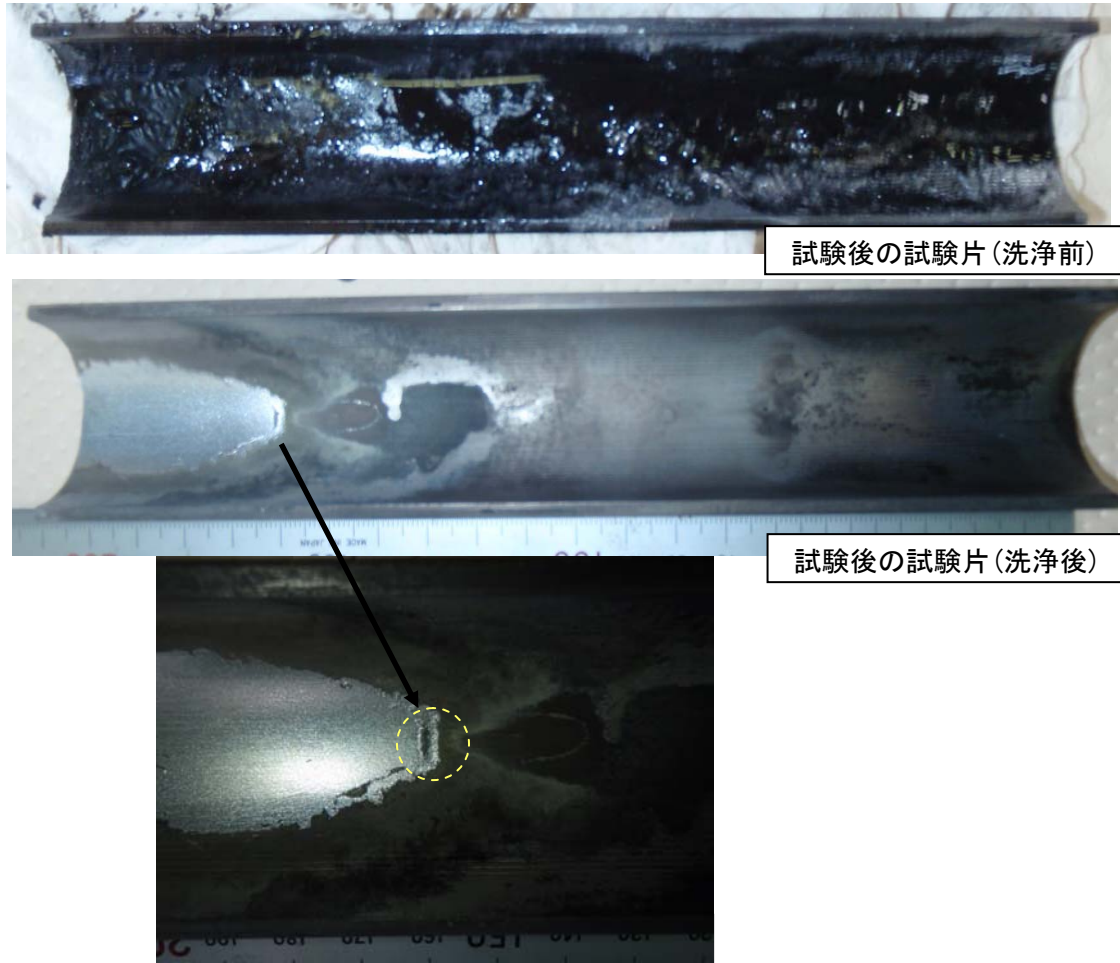


Fig. 11 試験後の状況 (試験 2 : TBP, 窒素雰囲気)

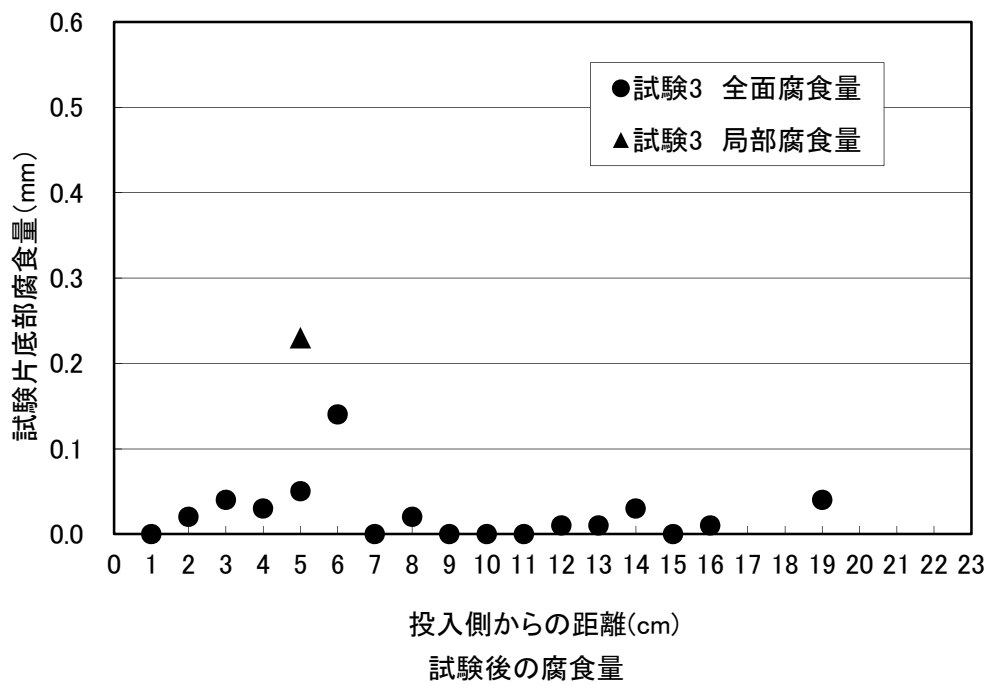
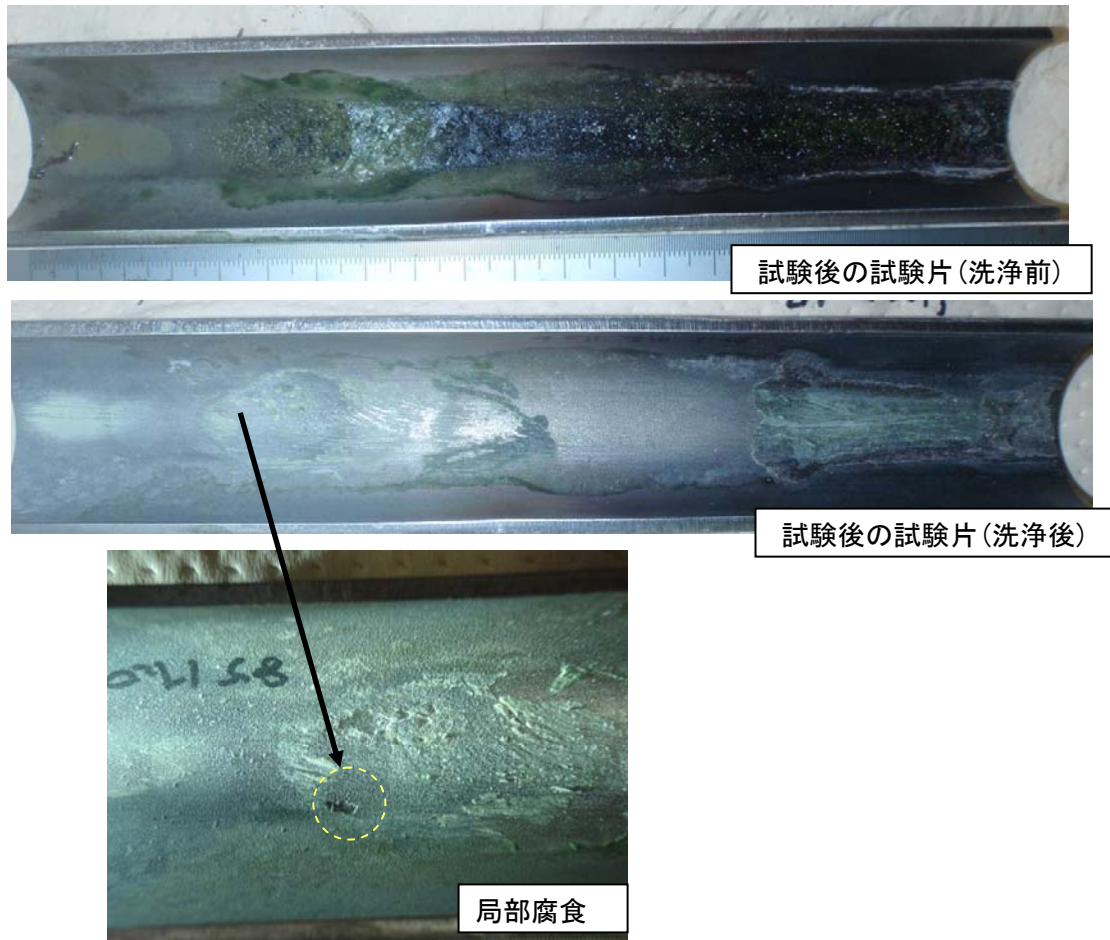


Fig. 12 試験後の状況 (試験3: 85%リン酸, 水蒸気雰囲気)

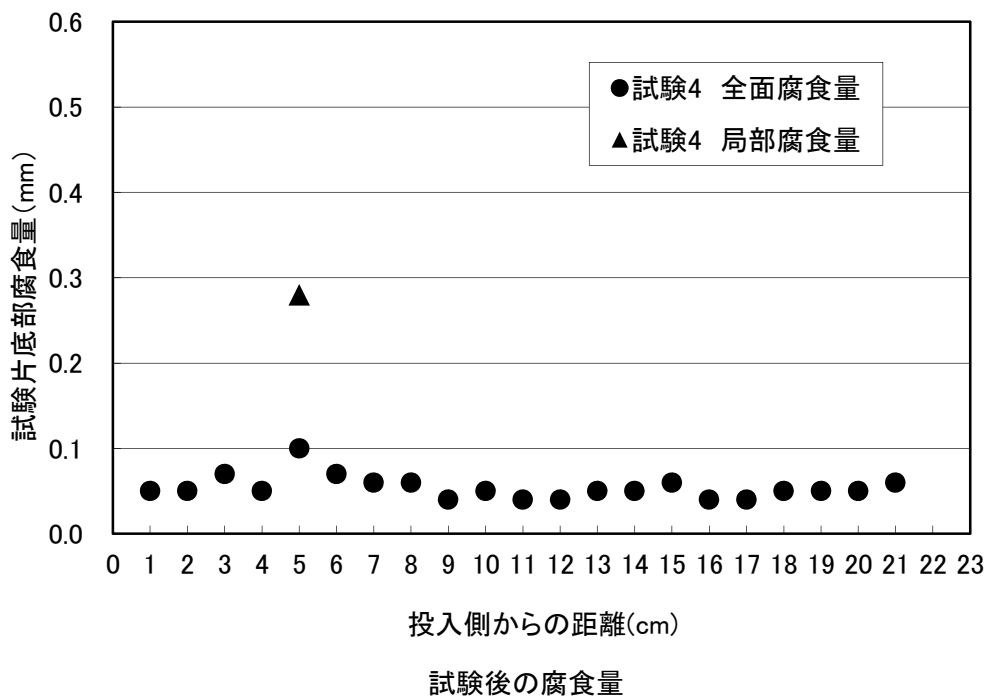
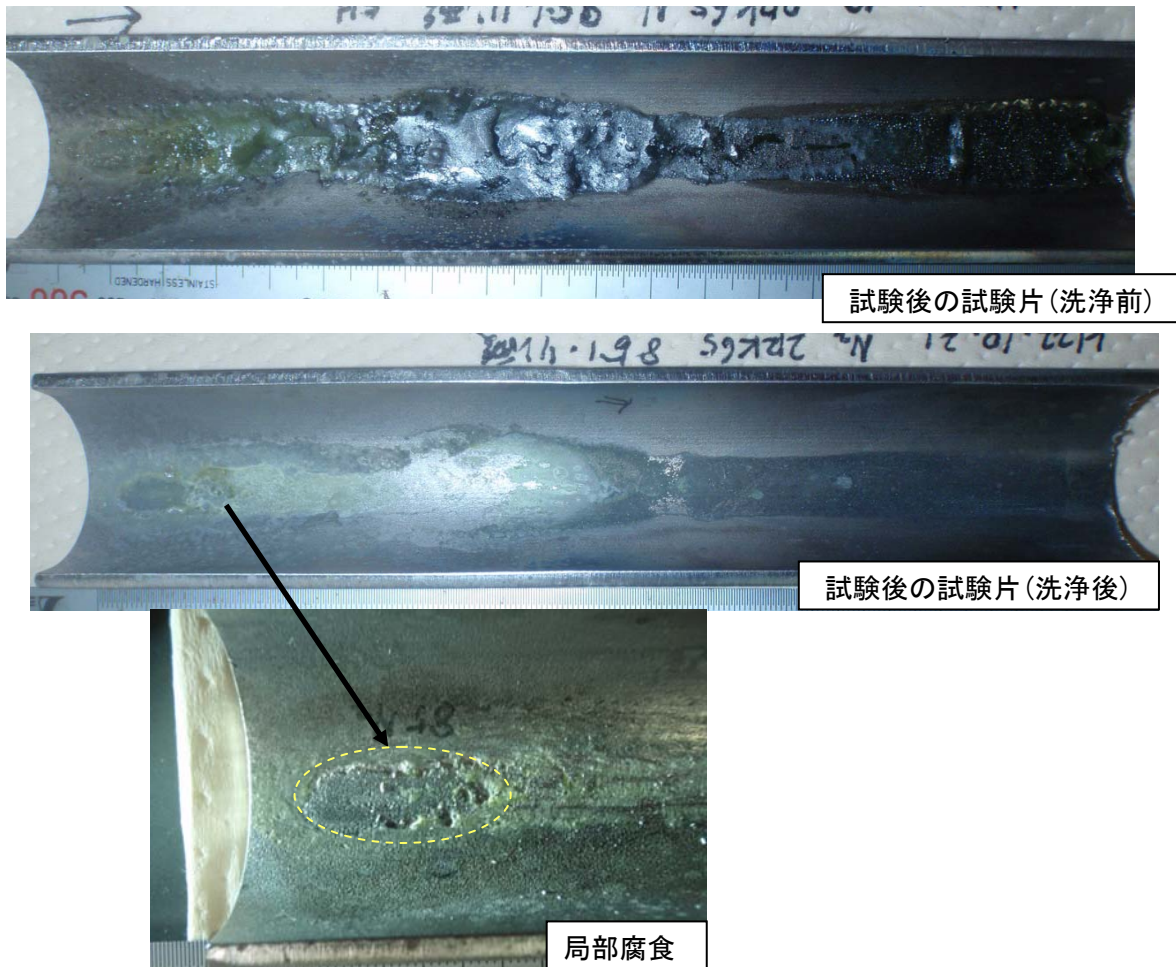
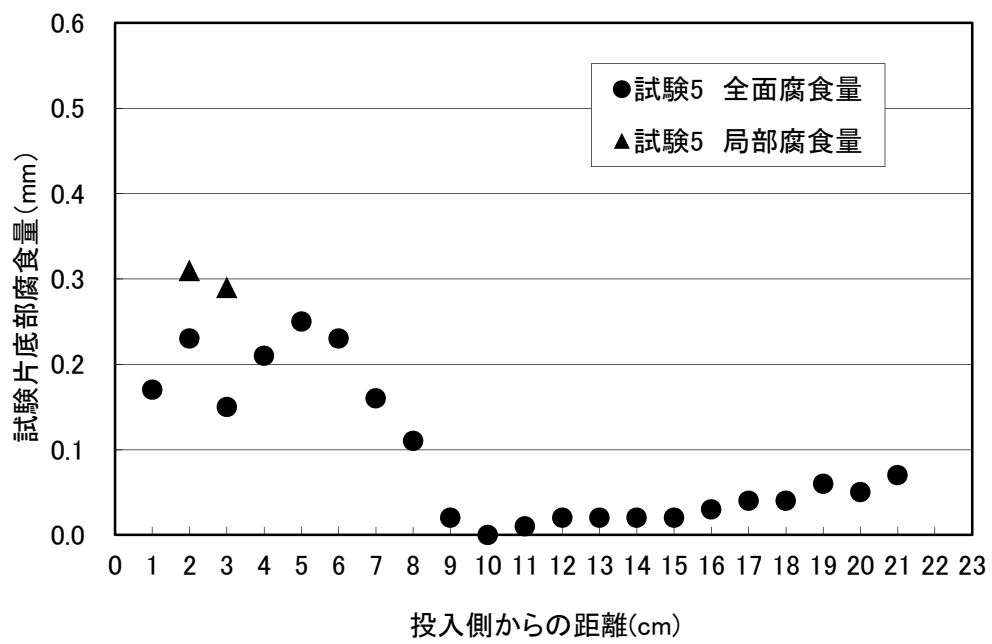
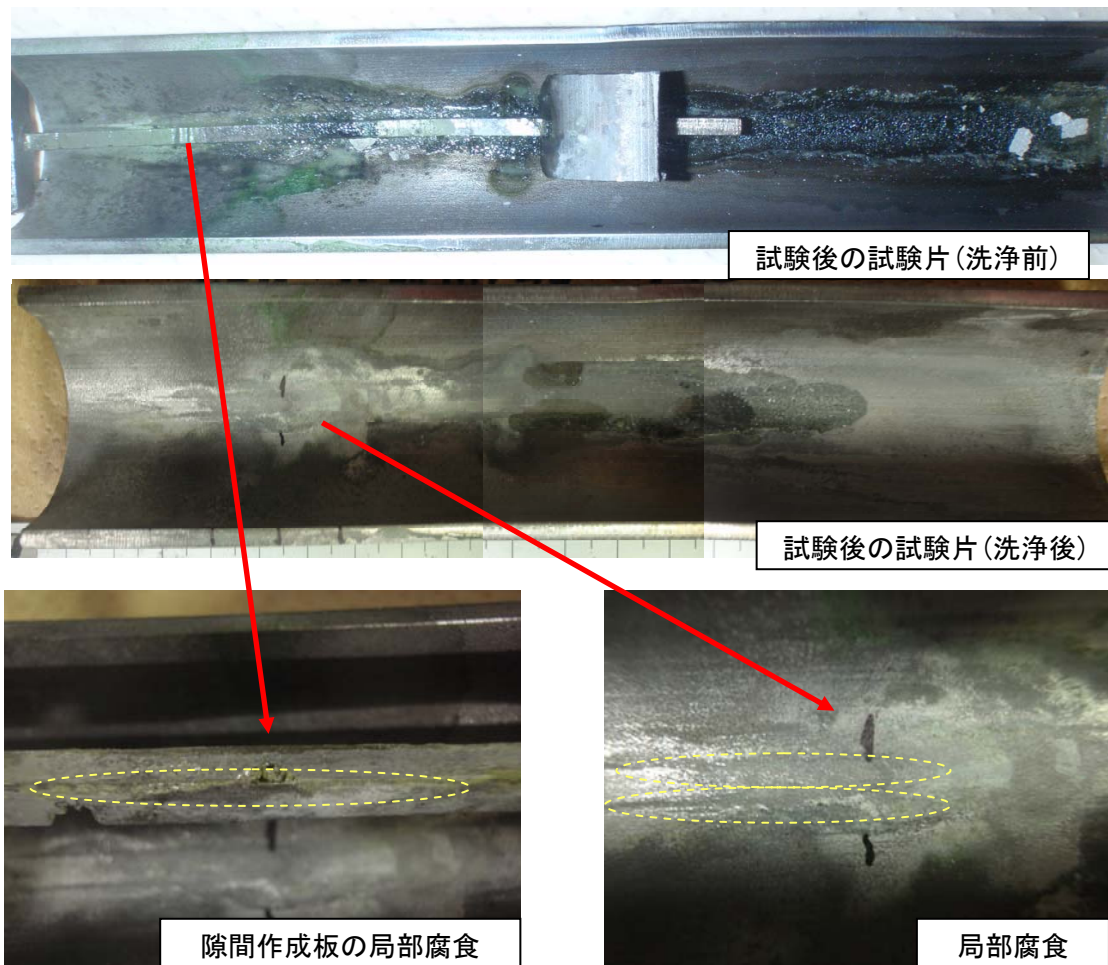


Fig. 13 試験後の状況 (試験4: 85%リン酸, 窒素雰囲気)



試験後の腐食量

Fig. 14 試験後の状況(試験5: 85%リン酸, 水蒸気雰囲気, 隙間作成)

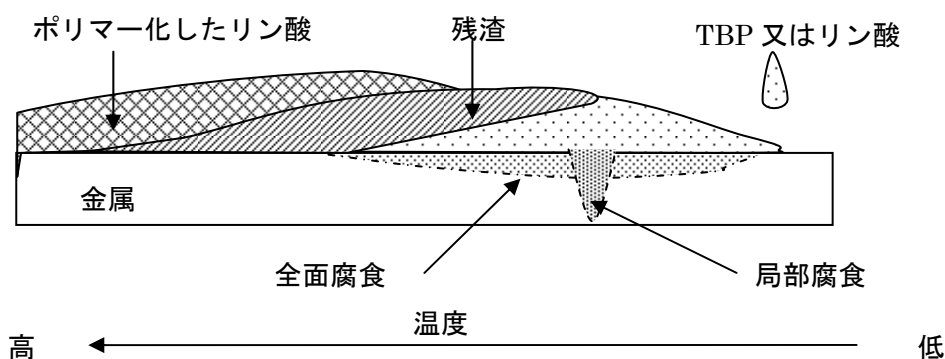


Fig. 15 試験における隙間腐食のモデル

隙間により局部腐食が発生することが確認された。これにより、隙間腐食の発生位置は腐食反応が発生し、隙間があるか、残渣が堆積する場所であれば場所を限定しないと考えられる。

一方で Fig.16 に示すように基礎試験装置による腐食試験の結果では隙間腐食の発生位置は常に同じであることから、この位置の条件が隙間腐食を発生させる要因を含んでいると推定でき、常に同じ条件であるのは温度であるため、この部分の温度が隙間腐食の発生温度であると考えられる。そこでガス化装置内の温度状況を推定した。

Fig.16 に示す基礎試験装置のガス化装置内部底面の温度分布を見ると電気炉中心部を 650°C に設定した場合、ガス化装置は 200°C から 650°C の温度勾配が起きている。腐食片の隙間腐食が発生している位置は投入側から約 5cm であり、ここは試料を処理しない状態で約 300°C であった。この部分の試料投入中の温度は、試料を投入中の外部表面下部温度が試料を処理しない状態に比べ約 30°C 低下していることから 270°C 程度と推定できる。

UNS N10276 製ライナーに発生した貫通孔について考察すると、Fig.17 に示すリン酸中の UNS N10276 の浸漬試験による結果より 270°C での全面腐食速度は 0.004mm/h であり、この温度で隙間腐食が発生することで寿命が 50 時間となり想定 の 750 時間より短くなったと推定される。しかし、このときの腐食速度は 0.06mm/h (全面腐食速度の 15 倍) と UNS N08028 の全面腐食と局部腐食速度の比 (2~3 倍) と比べ非常に大きい。そこで、電気化学測定により UNS N10276 のリン酸中での腐食挙動を調査した。

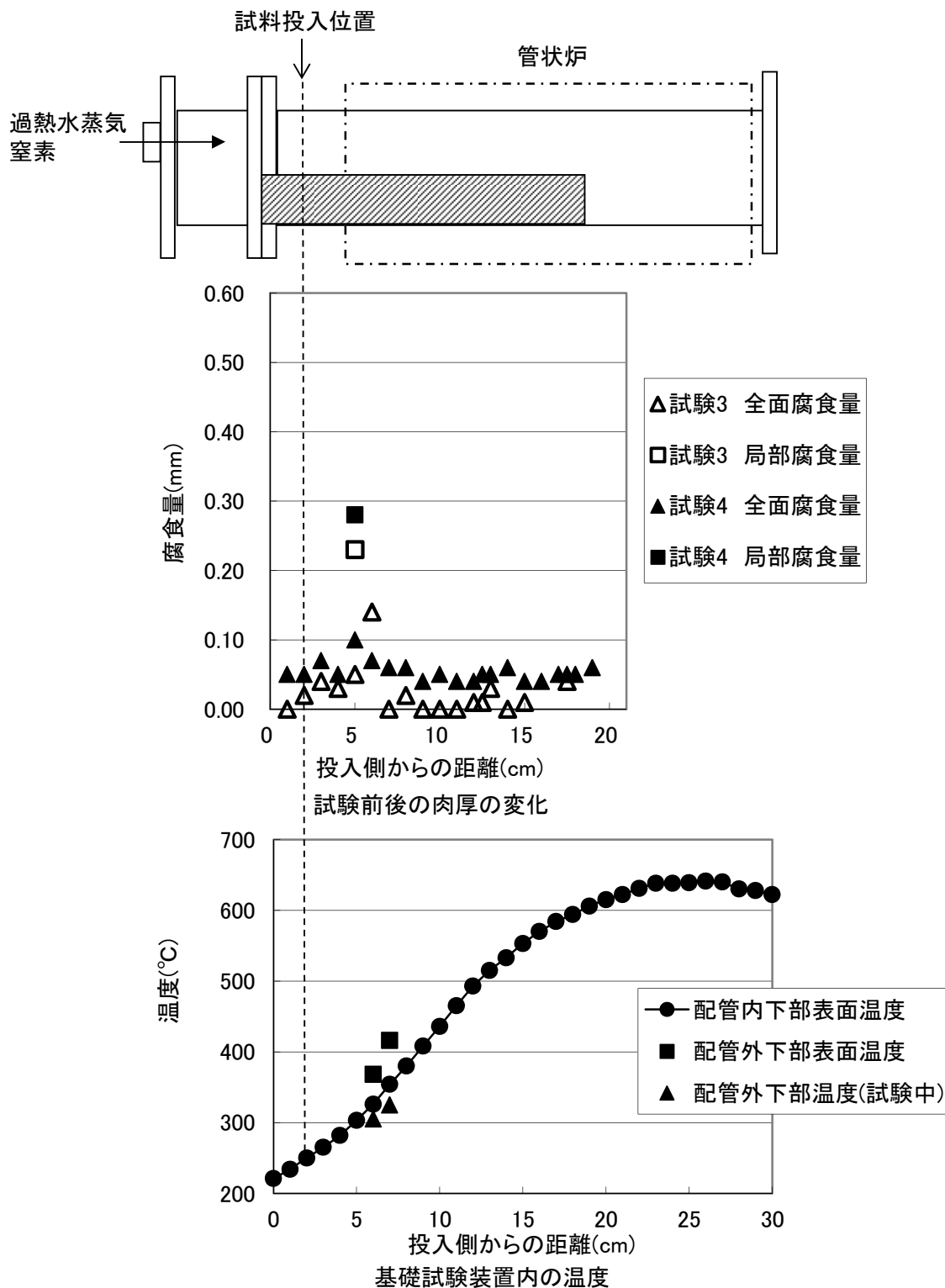


Fig. 16 腐食温度の推定

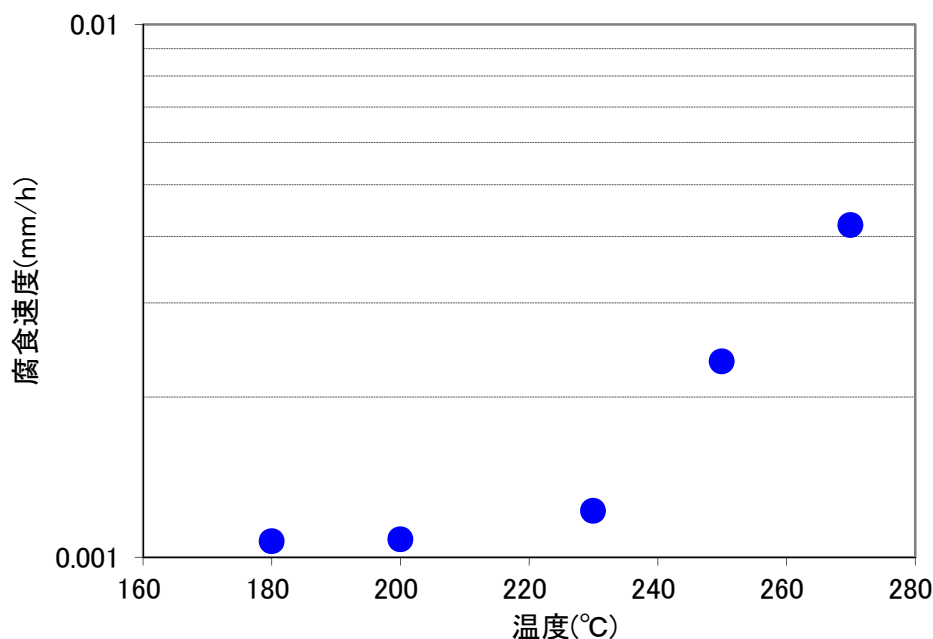


Fig. 17 95%リン酸中における UNS N10276 の腐食温度の温度依存性

(3) 電気化学測定による腐食挙動の確認

隙間を持った UNS N10276 の腐食挙動を確認するために電気化学測定を行った。試験は特定の温度における動電位分極測定を行い、温度と腐食量を示す電流値の差を確認した。動電位分極曲線は外部から電位を与え、金属の酸化還元を行わせるものであり、動電位分極曲線からは金属が溶液中で不導態化するか否か、及び不導態を維持する電位範囲がわかる。

分極特性測定用の試験試料として、寸法が 20×30mm 及び 10×10mm で厚さ 1mm の UNS N10276 製の板の表面を 800 番までのエメリ紙で研磨し、純水中で超音波洗浄したものを使用した。これらを重ねて隙間を造り、大きい試験試料の先端部分に白金線を固着して作用電極とした。参照極には Ag/AgCl 電極を使用し、対極には白金電極を用いた。腐食液としては、腐食試験では、リン酸が濃縮されて高濃度になると考えられるため、85%リン酸に 5 酸化 2 リンを添加して 95%以上の濃度に調整したものを使用した。空気中の水分によるリン酸濃度の低下及び空気中の酸素による通気差電池の生成の抑制のため、装置内には窒素を通気した。これらをテフロン製容器に設置し、オートマチックポラリゼーションシステム（北斗電工製 HSV-110）を用いて測定した。装置の模式図を Fig.18 に示す。

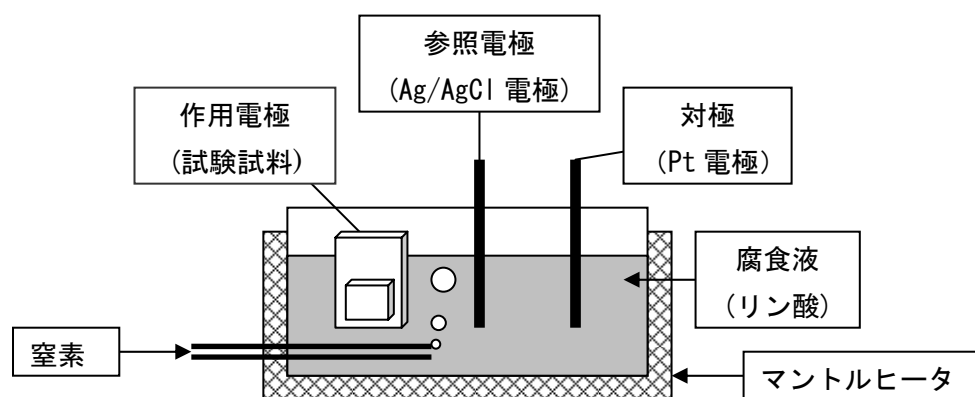


Fig. 18 電気化学測定装置の模式図

Fig.19 に試験試料を 100℃、150℃及び 200℃で動電位分極測定した結果を示す。電圧は 2mV/s で走査した。

測定結果を見ると -0.25V から 0V (vs Ag/AgCl) 付近 (-0.25:100℃, -0.08:150℃, 0.00:200℃) にみられる電流密度の低下は、試料を腐食液中に浸漬したときに示す電位であり、この時の試料表面ではアノード反応とカソード反応が平衡状態にある。このときの電位を自然電極電位と呼ぶ。自然電極電位は温度の上昇とともに貴な方向にシフトしているのがみられている。自然電極電位が局部腐食の臨界電位を超えると局部腐食が発生することから、温度上昇によって局部腐食が発生しやすくなるのが分かる。この電位から貴の電位の方向に走査すると、それぞれ +0.1V 走査した付近で電流密度の増加が現われる。この部分が不動態の生成による不動態化域である。

100℃では電流密度の弱い極大が見られるのは -0.2V (vs Ag/AgCl) 近傍でありこの後は 1.0V (vs Ag/AgCl) 付近まで電流の顕著な増加は見られない。1.0V (vs Ag/AgCl) 付近の電流増加は表面の不動態が破壊され全面腐食が進む過不動態域である。一方で 150℃、200℃では第 2 の電流増加が観測されている。この増加が隙間腐食の発生を示していると考えられる。150℃では 0.5V (vs Ag/AgCl) 付近だが、200℃では 0.2V (vs Ag/AgCl) で電流が増加しており、温度の上昇により腐食反応が活発になっていることが分かる。また、電流密度は腐食量に比例するため、0.5V (vs Ag/AgCl) 以上の領域では、150℃から 200℃へ温度が上がると電流密度が最大で 10 倍になっていることから腐食速度も最大で 10 倍の値を示すと考えられる。

以上より、UNS N10276 のリン酸中の腐食挙動として、150℃以上で隙間腐食と考えられるピークが見られ、200℃になると 150℃に比べて 10 倍近い腐食速度を示すことがわかった。

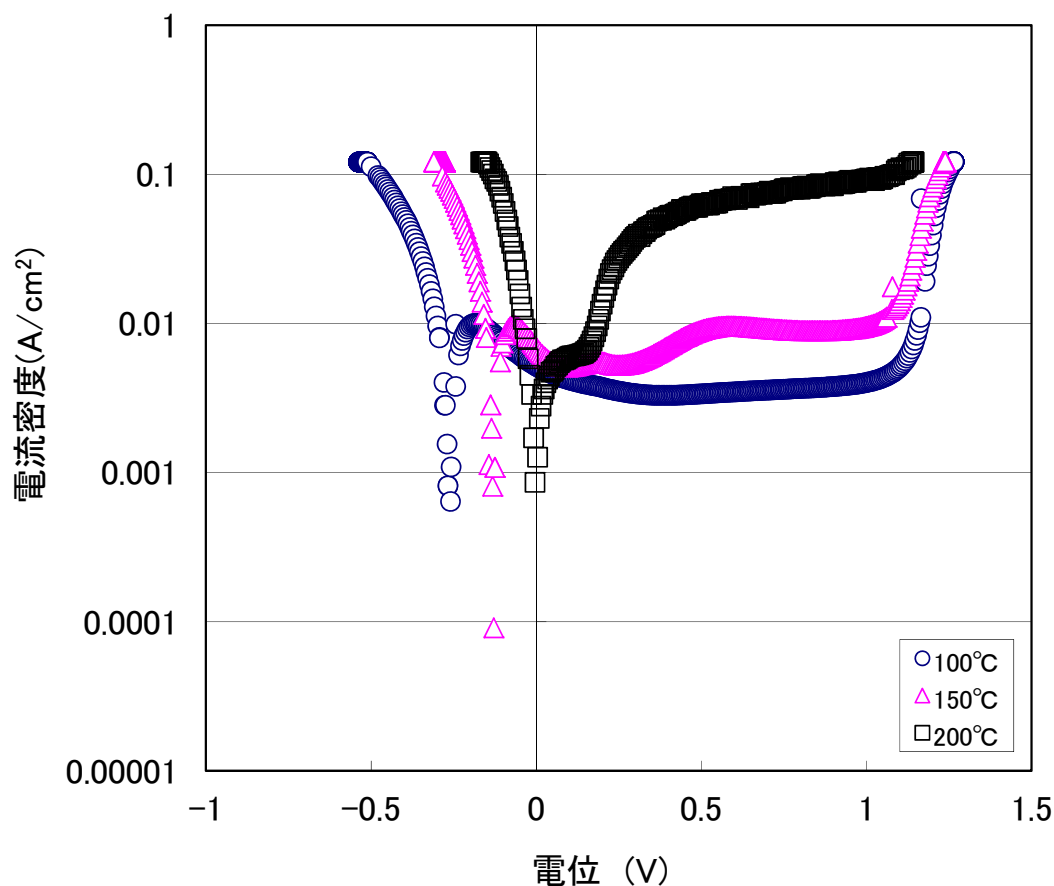


Fig. 19 100%リン酸中における隙間を持つUNS N10276 の動電位分極曲線

3. ガス化装置の腐食対策

3.1 隙間腐食対策の検討

ガス化装置で発生した局部腐食は、TBP が分解するとき生じるリン酸がガス化装置を腐食させ、生成した残渣とガス化装置の間に生じた隙間にリン酸が入り込むことで生じる隙間腐食であり、隙間内部でリン酸中に溶解した金属の金属濃淡電池が形成されることで進行することが分かった。

この隙間腐食を防ぐため、防食法を調査した。その結果、防食構造への改造、耐食材の使用、カソード防食法(外部電源方式、犠牲防食方式)が挙げられた²⁾。

以下にそれぞれの防食方法について検討した結果を示す。

(1) 防食構造への改造

隙間腐食は隙間が存在することで発生する腐食であるから、隙間のできない構造へ改造することや金属表面に異物が堆積しないようにすることで防ぐことができる⁴⁾。残渣は、TBP 廃溶媒中のガス化されない成分と装置が腐食された際に発生する腐食生成物からなり、処理試験中、ガス化装置内にあるスクリーによって掻き出される。一方、スクリーとガス化装置の接触を避けるため、ガス化装置の内径に対しスクリーの径がわずかに小さくなっている。これにより残渣がすべて掻き出されず、隙間を形成される。スクリーとガス化装置の隙間をなくすることはできないため、防食構造への改造は困難である。

(2) 耐食材の使用

防食法として、耐食材をガス化装置の材料に使用することにより、隙間の原因となる腐食生成物の発生を抑えることが考えられる。高温高濃度リン酸による全面腐食に対する種々の材質の耐食性について、過去の報告書で文献調査が行われている¹⁾。その報告では、リン酸に対する耐食性を持つ材質は白金、モリブデン、タンタル、銀、銅、銅合金、ハステロイであり、そのうち、白金は非常に高価であり、ハステロイ以外のモリブデン、タンタル等の高耐食金属は脆化等の問題で本装置に使用することができないため、UNS N10276 を使用することとしている。

しかし、隙間腐食に対する防食効果について考える場合、UNS N10276 は腐食速度が速いため、腐食生成物が多く生成され、これにより隙間が形成されると考えられる。このため隙間腐食を防ぐことができない。

また、白金をガス化装置にめっきすることで比較的安価に防食効果を得ることが考えられる。しかし、ガス化装置内には残渣を掻き出すためのスクリーがあり、試験中は常に回転し、一部はガス化装置内面に接触している。このため、めっきが剥がされ防食効果が失われると予想される。さらに、めっきが剥がされた部分が選択的に腐食されることになると考えられるため、めっきを使用することができない。

このように、適切な耐食材の選定は困難である。

(3) カソード防食法

カソード防食法とは、防食対象に直流電流(カソード電流)を印可し腐食を防止する方法である。防食対象の電位を卑方向にシフトさせ不感域にもたらし、防食対象が腐食することを防ぐ。直流電流の電源を外部の電源に求める外部電源方式と、低電位な金属との組み合わせによる電池に求める犠牲陽極方式に分類される⁵⁾。

外部電源方式は、直流電源と陽極および防食対象で電気回路を作り、直流電源装置より防食電流を流し、不溶性のアノードを通して防食電流を印可する。外部電源方式は、直流電源装置により防食電流の調整ができ、電極の不溶性が十分ならば半永久的な施工が可能となる。

外部電源方式の適用法として、Fig.20 のように、スクリーを陽極として利用することが考

えられる。防食するためには陽極が電解質の液（試料）に接している必要がある。しかし、スクリーと装置の間には隙間があり、また、試料が装置内に多く滞留しないため、スクリーと試料の接触が十分に行われないと考えられる。また、新たに陽極をガス化装置内に挿入することを考えた場合、ガス化装置の外に配置される電源と回路を構成することが困難であると考えられる。よって、外部電源方式のカソード防食を本装置に適用することはできない。

犠牲陽極方式は、金属のイオン化傾向の高低を利用したものである。防食対象を陰極として、イオン化傾向の高い卑な金属を犠牲陽極として電池を完成させ、防食電流を印可する方法である。防食対象が腐食する代わりに、犠牲陽極を腐食させることにより防食対象の腐食を防ぐ。犠牲陽極法は、犠牲陽極が腐食されるため一定期間ごとに交換する必要があるが、比較的安価な卑な金属を用いればよく、電源等の装置を必要としないため、安価に対策を行うことができる。

犠牲陽極方式の適用法として、犠牲陽極をガス化装置底面に配置することが考えられる。底面に陽極を配置することで十分に試料に接触させることが可能となる。また、ガス化装置内で回路を構成することができるため、構造が容易である。一方、犠牲陽極が腐食されるため定期的に交換する必要があるが、処理試験終了後に装置を分解清掃する際に交換すればよく、実際の試験装置に適用可能であると考えられる。

(1)～(3)から、ガス化装置に適用可能な防食法として犠牲陽極方式のカソード防食を選択することとした。

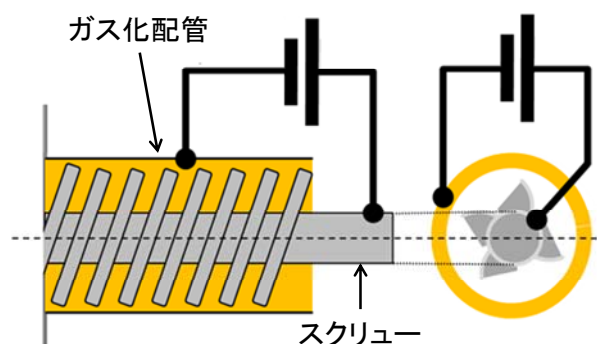


Fig. 20 外部電源方式の装置への適応模式図

3.2 処理試験装置への適用

実際の対策として、円筒を半分に割った形状の犠牲陽極（以下、「インナー」という。）を Fig.21 に示すようにライナーに挿入した。この形状により、インナーがライナーの内径に沿って配置され、試料と十分に接触させることができる。さらに、試料と接しやすくするため、インナー底部に等間隔に穴をあけた。このインナーは、UNS N10276 製のライナーより卑な金属である UNS S31008 を採用した。インナーをガス化装置に挿入するため、スクリーのフィンにインナーの

内径に縮小した。

インナーによるカソード防食のみとした場合、長時間に及ぶ廃溶媒の処理ではインナーが腐食されなくなり、ガス化装置を防食できなくなる可能性がある。そこで、ガス化装置が腐食することを防ぐため、インナーとライナーをガス化装置に挿入し、インナーによるカソード防食が十分でなくなった場合であってもガス化装置を保護できるようにした。

このインナーとライナーを組み合わせた対策により Fig.22 に示すように、インナーがライナーをカソード防食し、インナーによる防食効果が無くなった場合でもライナーによりガス化装置を保護することができる。

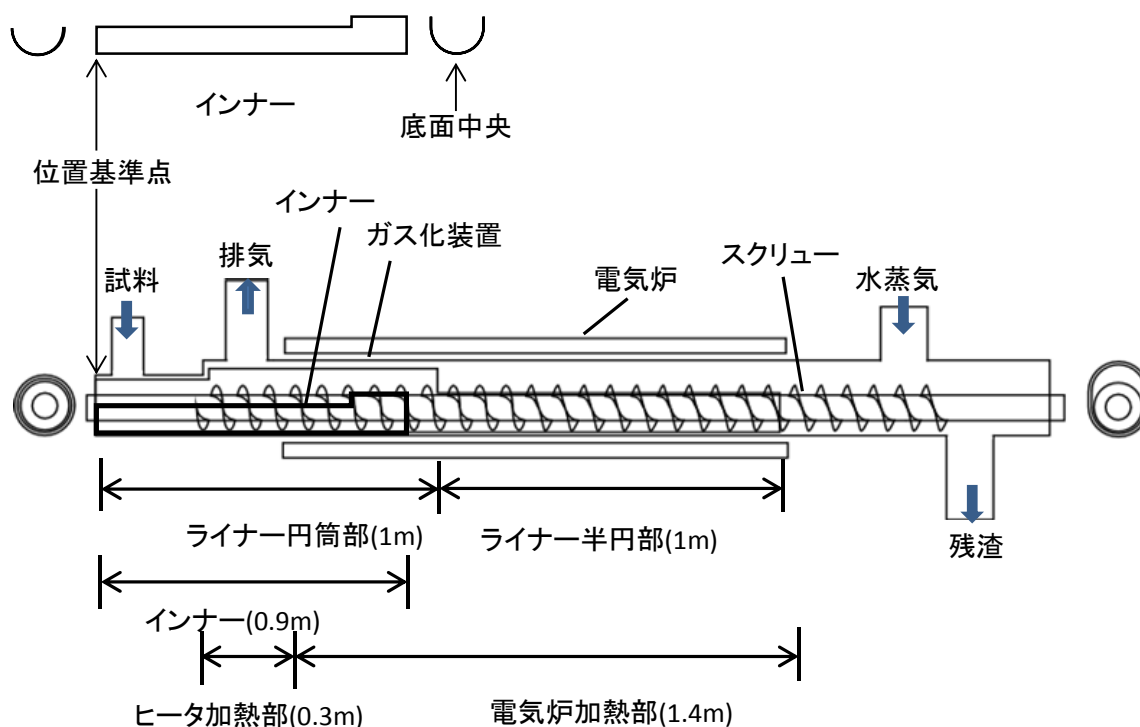


Fig. 21 インナーを挿入したガス化装置模式図

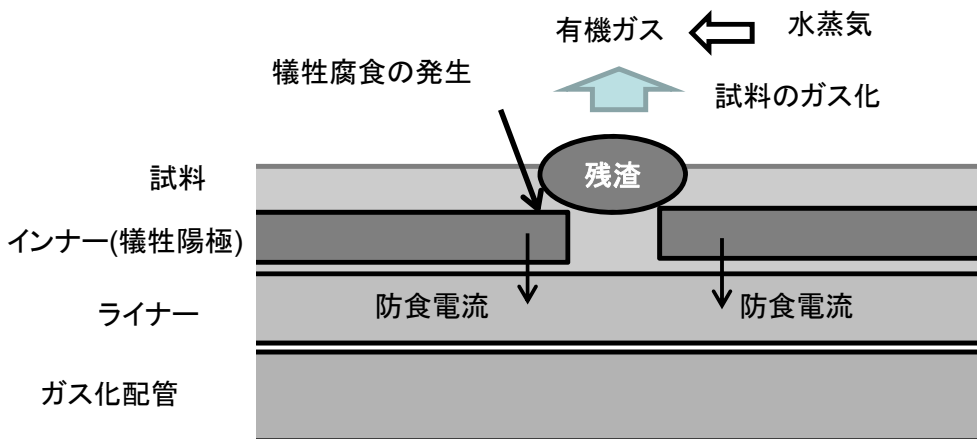


Fig. 22 インナー及びライナーの働き

3.3 隙間腐食対策の効果の実証試験

(1) インナー厚さの最適化試験

TBP 廃溶媒処理試験は、最大 5 日間の連続処理を予定しており、装置の起動、及び終結作業を除くと処理時間は約 95 時間となる。インナーの厚さが十分でない場合、試験中にインナーが過大に腐食し、カソード防食の効果が得られなくなる。また、ライナーが腐食され、貫通孔を生じ、ガス化装置が腐食される。そこで、犠牲防食法を実機に適用するにあたって、インナーの厚さを最適化するため厚さを 1mm、2mm、3mm と変えて試験を行った。

インナーの厚さの最適化条件は連続 95 時間(5 日間)の処理後においてもライナーに腐食を生じさせないこととした。

処理時間は、Table 6 に示すように、試験①のインナーの厚さ 1mm の場合は 20 時間(2 日間)、試験②の 2mm の場合は 50 時間(3 日間)、試験③の 3mm の場合は 95 時間(5 日間)とした。

試験には、2 章に述べた腐食が発生した試験と同じ模擬 TBP 廃溶媒を使用した。

試験後は、超音波厚さ計でライナーの厚さを測定した。測定箇所は過去にガス化装置に隙間腐食が発生した場所の近傍である位置基準点から 40cm~80cm の底面中央を 2cm 間隔で測定した。また、底面中央以外に顕著な減肉が確認された場合はその箇所の厚さを測定した。

Table 6 インナー厚さの最適化試験の試験条件

試験	①	②	③
インナーの厚さ	1mm	2mm	3mm
処理時間(h)	20	50	95

(2) 実廃溶媒処理試験

(1) 項で検討した腐食対策を実証するため、厚さを最適化したインナーを用いて、ウランを含む TBP 廃溶媒の処理試験を行った。TBP 廃溶媒中のウラン濃度は 0.08~2.68g/L、TBP 濃度は 30~40wt% である。試料以外の試験条件はインナー厚さの最適化試験と同じである。インナー及びライナーは試験時間が 95 時間を超える前に交換し、合計 638 時間の処理試験を行った。

3.4 試験結果

(1) インナー厚さの最適化試験

Table 7 に試験①~③終了後のライナーの腐食量と試験時間から求めた腐食速度を示す。インナーの肉厚が厚くなるごとに腐食速度が低下していることが分かる。次に、試験中のガス化装置の温度の関係を Fig.23~25 に示す。インナーを挿入している場合、厚さが 1mm、2mm の場合、ガス化装置温度が 300°C から 400°C の範囲でごくわずかな範囲が腐食され、3mm ではほとんど腐食されていない。これに対して、インナーを挿入せずにライナーのみとした場合 (Fig.2) には、60cm から 90cm の範囲にわたって広く激しく腐食された。

試験後のインナーの写真を Fig.26 に示した。写真の中のスケールは位置基準点からの距離を示している。試験①~③のインナーともに 50cm~60cm の位置に腐食による穴が開いており、Fig.23~25 に示した腐食箇所と一致している。また、腐食による穴の開口部の面積は厚さ 1mm と 2mm のインナーに比べて、厚さ 3mm のインナーが少し小さい。インナーが腐食され穴がある大きさ以上となるとライナーに腐食が発生すると考えられる。

次に、インナーの厚さとライナー腐食速度の関係を Fig.27 に示す。インナーが厚くなるごとに腐食速度が低下している。厚さが 3mm の場合には、95 時間処理した後であってもほとんど腐食していないのに対して厚さが 1mm と 2mm の場合、処理時間が 95 時間となる前にライナーの腐食が始まっている。インナーを挿入していない試験では急速に腐食され 50 時間処理した後ではライナーに貫通孔を生じている。このことから、インナーの厚さ 1mm と 2mm の場合では、95 時間処理する前にカソード防食の効果が失われており、これ以降はインナーを挿入しない場合の試験のような腐食速度でライナーが急激に腐食され、試験途中で貫通孔が生じる恐れがある。よって、1 週間連続処理を行うためには 95 時間処理した後であってもライナーに腐食がほぼ起こっていないインナーの厚さ 3mm が妥当であると考えられる。

Table 7 インナー厚さの最適化試験結果

試験	①	②	③
インナーの厚さ	1mm	2mm	3mm
処理時間 (h)	20	50	95
ライナー最大腐食量 (mm)	0.23	0.40	0.05
ライナー腐食速度 (mm/h)	0.012	0.008	0.001

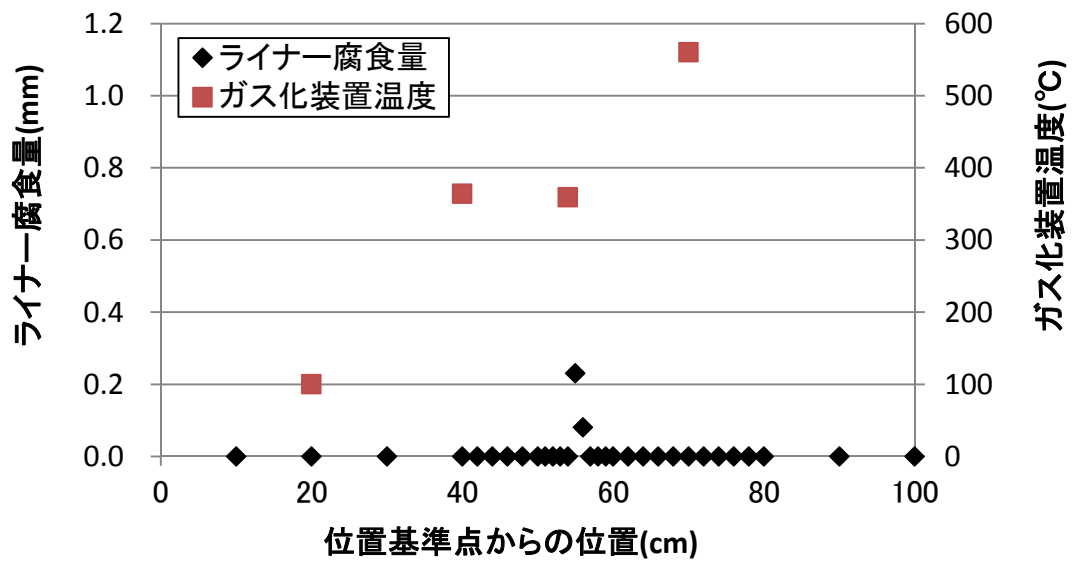


Fig. 23 ライナーの腐食量 (試験①:インナーの厚さ 1mm)

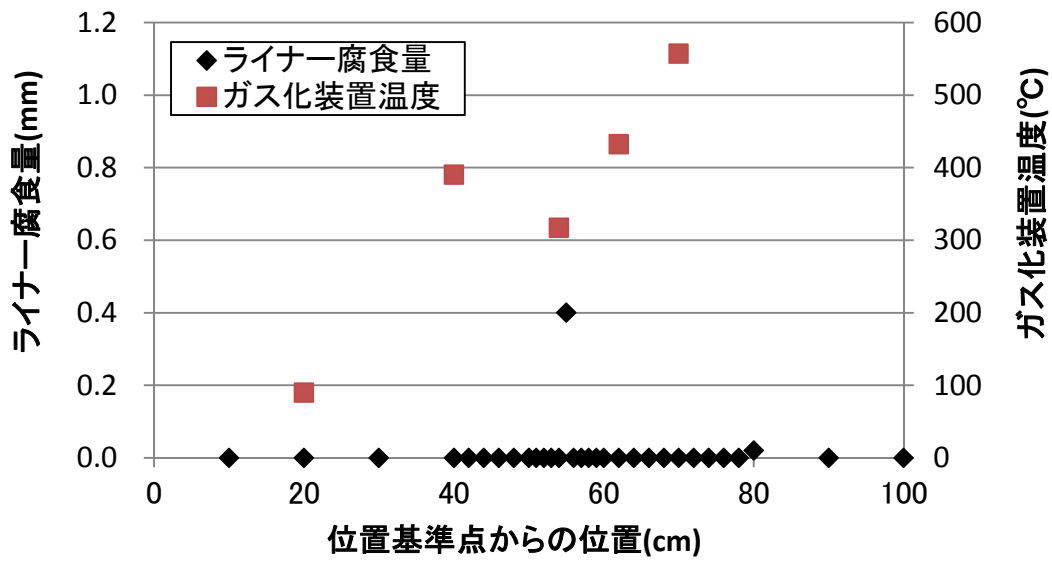


Fig. 24 ライナーの腐食量 (試験②:インナーの厚さ 2mm)

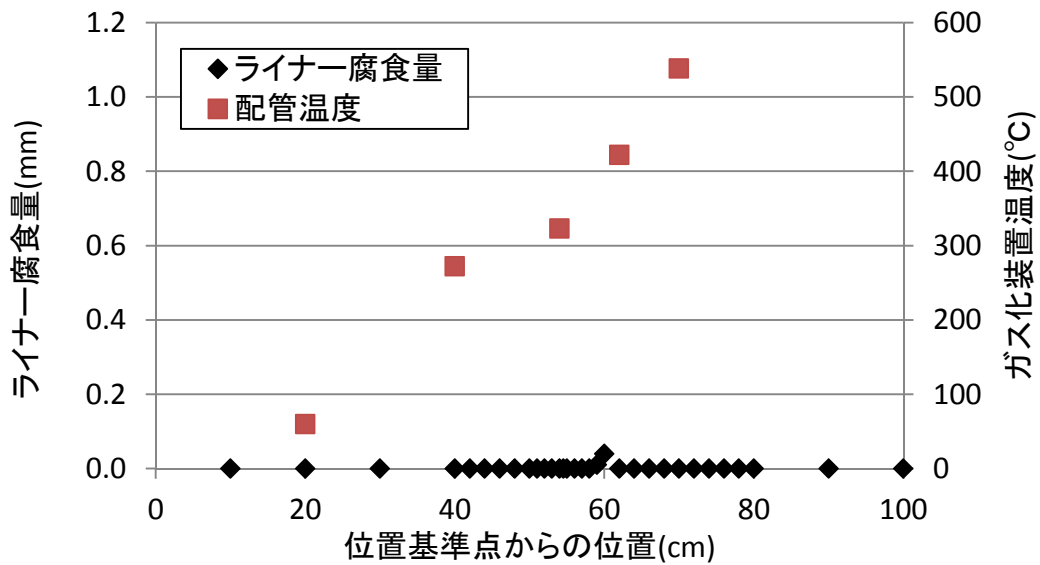
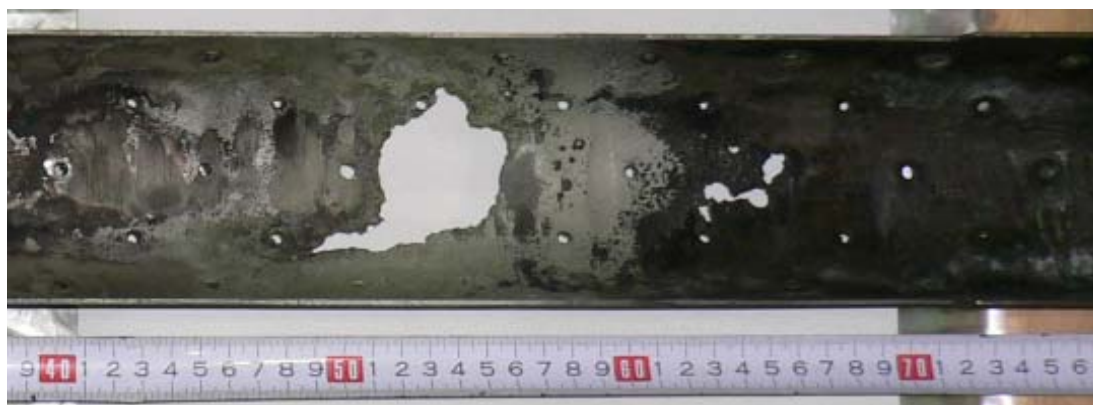


Fig. 25 ライナーの腐食量 (試験③:インナーの厚さ 3mm)



(a) 試験① (インナーの厚さ 1mm、20 時間処理後)



(b) 試験② (インナーの厚さ 2mm、50 時間処理後)



(c) 試験③ (インナーの厚さ 3mm、95 時間処理後)

Fig. 26 インナー厚さの最適化試験後のインナー

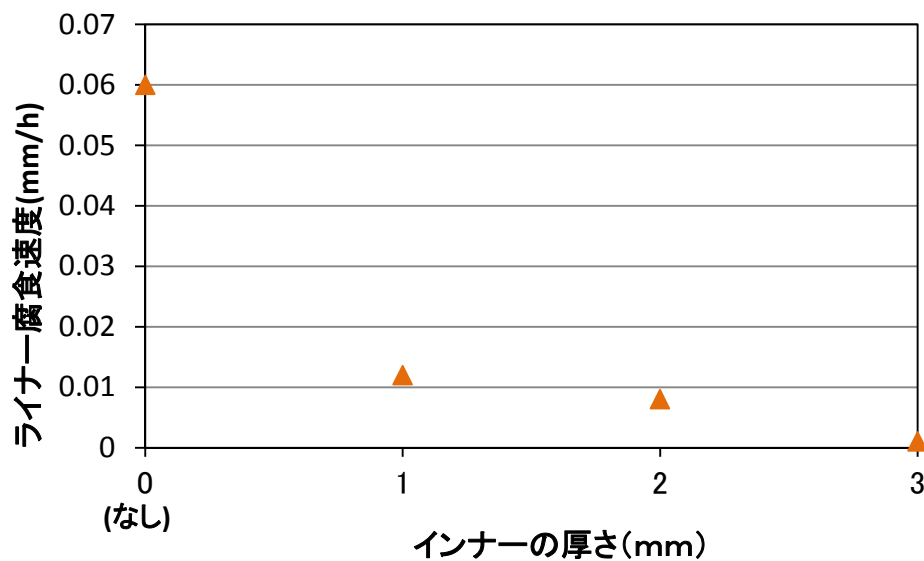


Fig. 27 インナー厚さの最適化試験のライナーの腐食速度

(2) 実廃溶媒処理試験

TBP 廃溶媒処理試験時のライナーの腐食速度を Fig.28 に示す。最大腐食速度は 0.003mm/h であり、ライナーに腐食がほとんど見られなかった。今回、ライナーもインナーと同様に 95 時間を超える前に交換した。しかし、ライナーの厚さが 3mm あり、最大腐食速度が 0.003mm/h であるとわかったことから、ライナーに貫通孔ができるまで約 1000 時間かかると考えられる。このことからライナーの交換までの時間はもっと長くすることができると考えられる。

実廃溶媒処理試験によって、最大連続 94 時間、合計 638 時間の処理することができ、インナーによるカソード防食とカソード防食の効果が得られなくなった場合、ライナーで保護するという対策によって、隙間腐食によるガス化装置の腐食を防ぐことができた。

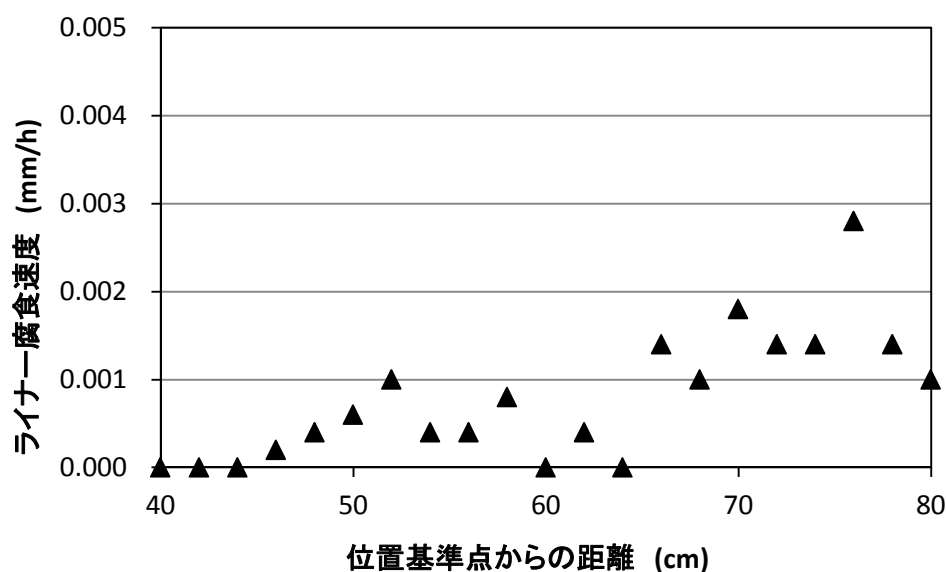


Fig. 28 実廃溶媒処理試験のライナーの腐食速度

4. まとめ

TBP 廃溶媒を処理する際に問題となっていた局部腐食の原因調査を行い、隙間腐食であることが判明した。この腐食を解決するため防食法を検討し、犠牲陽極方式のカソード防食を選択した。実機に適用するにあたって、犠牲陽極として UNS S31008 製のインナーを挿入し、さらに、犠牲陽極が腐食され、カソード防食の効果が得られなくなった場合であってもガス化装置を保護できるようにライナーを挿入した。

95 時間（5 日間）の連続試験に耐えることを目標に、インナーの厚さを最適化するため、厚さを変えて試験を行った結果、連続処理試験をするためにはインナーの厚さは 3mm が適当であることが分かった。

インナーの厚さを最適化した防食対策を施した水蒸気改質試験装置で、最大連続 94 時間、合計 638 時間の TBP 廃溶媒を処理した結果、腐食問題を起こすことなく処理することができた。

犠牲陽極として UNS S31008 製のインナーを用いたカソード防食法と耐食性を有する UNS N10276 製のライナーによる、ガス化装置の保護により、TBP 廃溶媒の処理中に発生するリン酸による隙間腐食対策が確立された。

参考文献

- 1) 中川明憲,曾根智之,佐々木紀樹,中澤修,田代清:”水蒸気改質処理法によるウランで汚染された廃 TBP/n-ドデカン処理技術開発”,JAEA-Technology 2010-014,(2010)
- 2) H.H.ユースリック, R.W.レヴィー:”腐食反応とその制御(第3版)”,産業図書(株),(1989)
- 3) 社団法人腐食防食協会編:”腐食・防食ハンドブック”,丸善(株),(2000)
- 4) 小若正倫:”金属の腐食損傷と防食技術”,(株)アグネ承風社,(1983)
- 5) 伊藤伍郎:”腐食科学と防食技術”,(株)コロナ社,(1969)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

