

資料センター

分類	第1	03
コード	第2	09
	第3	02 第 4
ファイルNo.	1109	

本資料は〇〇年 3月 24日付で登録区分、
変更する。

[技術情報室]

ナトリウム化合物付着による補助冷却設備空気冷却器伝熱管材料健全性確認試験

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1997年10月

株式会社 東芝

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。については、複製、
転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。
また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合わせは下記に願います。

〒914 福井県敦賀市白木2-1

動力炉・核燃料開発事業団
高速増殖炉もんじゅ建設所
技術課

登録区分
00.3.24
変更表示

社内資料

P N C ~~T~~J2164 97-004
1997年10月

ナトリウム化合物付着による補助冷却設備空気冷却器伝熱管材料健全性確認試験

福田敬則*、村山志郎**
大嶋巖***、中村武則***

要 旨

高速増殖原型炉もんじゅの2次系ナトリウム漏洩事故の際に空気中に漏出したナトリウム化合物が、補助冷却設備空気冷却器フィン付き伝熱管表面に付着した。その後の分析で表面に付着したナトリウム化合物は炭酸ソーダ(Na_2CO_3)、重炭酸ソーダ($NaHCO_3$)である事が確認された。機器の寿命期間中の構造健全性を確認するために試験を実施した。本試験は空気冷却器フィン付き伝熱管の実機の運転温度を模擬した環境下での外部高温腐食のデータを明らかにするものであり、SUS316の外部高温腐食速度及びナトリウム化合物の変化を明らかにすることを目的としている。

試験の結果次の結果が得られた。

- (1) 付着ナトリウム化合物の量による影響が見られない。
- (2) 一般腐食速度はほぼ1/2乗則によって表される。
- (3) 一般腐食に対する、寿命期間における伝熱管の健全性の確認。

なお、高温保持腐食試験の結果から粒界部での優先酸化が見られ材料の経年変化に伴う粒界部での優先酸化については今後より詳細な調査をする計画となった。

本報告書は(株)東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。
契約番号: 09C0141

事業団担当部課室および担当者: もんじゅ建設所 プラント第2課
大田 裕之、伊藤 健司

* : 石川島播磨重工業(株)技術研究所 材料研究部

** : 石川島播磨重工業(株)原子力事業部 開発プラント設計部

*** : (株)東芝 もんじゅ対策推進部



Official use only
PNC PJ2164 97-004
October, 1997

Corrosion performance of the finned tube of the air cooler in the auxiliary cooling system under sodium carbonate environment

Takanori Fukuda*, Shiro Murayama **
Iwao Ohshima***, Takenori Nakamura ***

Abstract

Deposition of chemical compound (sodium carbonate and sodium acid carbonate) on the surface of finned tubes of the air cooler in the auxiliary cooling system was found after the secondary loop sodium leak accident in the fast breeder prototype reactor "Monju".

To confirm the reliability of auxiliary cooling system in service life, the experimental works were conducted.

This report described the work and findings of our study on the external high temperature corrosion of the finned tube in simulated auxiliary cooling system environment of the "Monju".

The purpose of this works was to evaluate external high temperature corrosion rate of type 316 finned tube and identify the change of chemicals on the tubes.

In this study following results were obtained.

- (1) Influence of quantity of sodium chemicals were not observed.
- (2) Time dependency of general corrosion rate could be described by the power law.
- (3) General corrosion penetration of the finned tubes in the service life could not threat to reliability of auxiliary cooling system.****

**** : In this study selective oxidation of grain boundary and sensitization of the material were observed. The study for the phenomena has been starting as an another program.

Work performed by TOSHIBA Corporation under contract with power reactor and nuclear fuel development corporation.

Contract number: 09C0141

PNC liaison: Maintenance Engineering Section
Hiroyuki Ota, Kenji Ito

* : Materials Technology Department, Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

** : Nuclear Power Division Advanced Plant Design Department, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd..

*** : M Project Gr., Toshiba Corporation



目 次

1. まえがき	.....	1
2. 試験計画	.....	2
2. 1 試験目的	.....	2
2. 2 期間	.....	2
2. 3 体制	.....	2
2. 4 工程	.....	2
3. 試験方法	.....	3
3. 1 模擬腐食試験の基本的考え方	.....	3
3. 2 供試材	.....	3
3. 3 試験方法	.....	3
4. 試験結果及び考察	.....	5
4. 1 高温保持試験結果	.....	5
4. 2 高温すきま試験結果	.....	6
4. 3 热サイクル試験結果	.....	6
4. 4 フィンの密着強度	.....	7
4. 5 E P M A結果	.....	7
4. 6 材料の経年変化と腐食速度への影響	.....	7
5. まとめ	.....	8

表・図目次

図-1 热サイクル・高温保持試験用試験片形状	10
図-2 高温保持・すきま部観察用腐食試験片形状	10
図-3 実機模擬熱サイクル	11
図-4 試験装置ブロックダイヤグラム	11
図-5 引張試験片形状と試験要領図	12
図-6 試験片の腐食減量とサイクル数、時間の $1/2$ 乗の関係	13
図-7 経過時間-平均侵食深さの関係	14
図-8 引張強度の分布状況	15
 表-1 試験体調査項目一覧表	16
表-2-1 試験結果の概要（高温保持試験：1000時間）	17
表-2-2 試験結果の概要（高温保持試験：3600時間）	18
表-2-3 試験結果の概要（熱サイクル試験：1サイクル（105時間））	19
表-2-4 試験結果の概要（熱サイクル試験：16サイクル（1680時間））	20
表-2-5 試験結果の概要（熱サイクル試験：36サイクル（3780時間））	21
表-2-6 試験結果の概要（熱サイクル試験：60サイクル（6300時間））	22
表-3 (1/2) 高温保持試験による腐食量	23
表-3 (2/2) 高温保持試験による腐食速度	23
表-4 (1/2) 热サイクル試験による腐食量	24
表-4 (2/2) 热サイクル試験による腐食速度	24
表-5 すき間腐食試験後の侵食量	25
表-6 サイクル試験による表面粒界侵食深さ	26
表-7 高温保持試験による表面粒界侵食深さ	26
 写真-1 高温保持試験結果（外観写真）	27
写真-2 (1/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性 (3600時間高温保持試験結果) フィン部	28
写真-2 (2/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性 (3600時間高温保持試験結果) 伝熱管部	29
写真-2 (3/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性 (熱サイクル試験結果(60サイクル)) フィン部	30
写真-2 (4/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性 (熱サイクル試験結果(60サイクル)) 伝熱管部	31
写真-3 (1/2) 高温すきま腐食試験結果(断面ミクロ) 1000時間	32
写真-3 (2/2) 高温すきま腐食試験結果(断面ミクロ) 3600時間	33
写真-4 热サイクル試験結果(外観写真)	34

写真-5 EPMA面分析(Na_2CO_3 3600時間)	35
写真-6 (1/3) 保持時間による腐食量の依存性(高温保持試験)	36
写真-6 (2/3) 保持時間による腐食量の依存性(熱サイクル試験) フィン部	37
写真-6 (3/3) 保持時間による腐食量の依存性(熱サイクル試験) 伝熱管部	38

1. まえがき

高速増殖原型炉もんじゅの2次系ナトリウム漏洩事故の際に空気中に漏出したナトリウム化合物が、補助冷却設備空気冷却器フィン付き伝熱管表面に付着した。その後の分析で表面に付着したナトリウム化合物は炭酸ソーダ (Na_2CO_3)、重炭酸ソーダ (NaHCO_3) である事が確認された。機器の長期間の構造健全性を確認するために付着したナトリウム化合物の構造材料へ与える影響を調査し影響の程度を明らかにする必要があるが、炭酸ナトリウム環境は一般的におだやかな環境である事から研究論文も少なく、特に高温環境下でのデータを明らかにすることが必要である。

また、空気冷却器伝熱管は高周波圧接にてフィンを伝熱管に取り付けている構造でありフィン取り付け部は形状、残留応力等フィン付き管特有の材料特性を有している。

このことから空気冷却器のフィン付き伝熱管の長期間の構造健全性を確認するため実機形状試験片による実機の運転温度を模擬した環境下でのナトリウム化合物による材料腐食試験を実施することとした。

試験は高温保持時間に依存する腐食速度、熱の繰り返しによる腐食速度への影響を調査する為の試験を実施し、光学顕微鏡、SEM^{*1}、X線回折、EPMA^{*2}を用いて試験片の表面、金属組織の変化、ナトリウム化合物の形態の変化、ナトリウム化合物の母材への拡散状況を確認することとした。

また、フィン付け根部についてはさらにすき間部での腐食及びフィン付着強度についても試験を実施することとした。

* 1 SEM：走査型電子顕微鏡

* 2 EPMA：電子線マイクロアナライザ

2. 試験計画

2. 1. 試験目的

もんじゅナトリウム漏洩事故の際にナトリウム化合物が付着した補助冷却設備空気冷却器の
フィン付き伝熱管のナトリウム化合物による腐食に対する長期健全性を模擬試験により確認す
ることを目的とする。

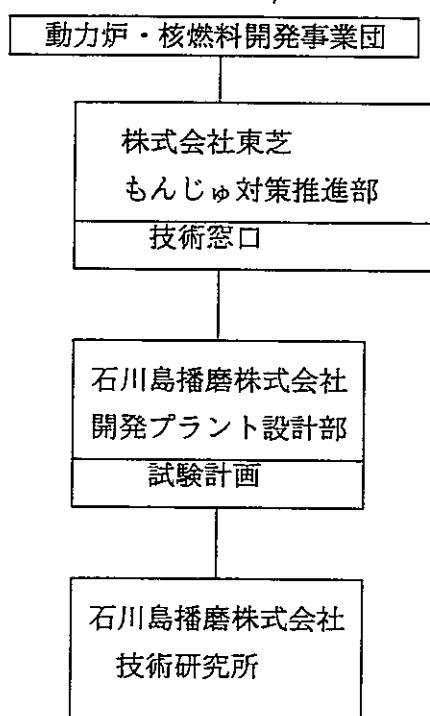
2. 2 試験期間

(自) 平成8年7月

(至) 平成9年8月

2. 3 体制

実施体制を示す。



2. 4 工程

試験実績工程を示す。

	H 8						H 9								
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
試験片製作															
高温保持試験															
高温保持すき間試験															
熱サイクル試験															

3. 試験方法

3.1 模擬腐食試験の基本的考え方

ナトリウム化合物が付着した実機フィン付き伝熱管の今後の使用における長期健全性を模擬試験により確認することから試験の基本方針を下記のとおりとした。

- ①供試材は実機と同様の材質、構造、工程で製造したフィン付き伝熱管より製作する。
- ②付着させるナトリウム化合物の種類およびその量は実機での調査結果を参考にして選定する。
- ③長期健全性予測に耐える基礎データを収集する為、試験片の腐食状況を μm オーダー レベルまで詳細に観察する。

3.2 供試材

SUS316-TB チューブに、SUS316-CS 板を高周波圧接により巻き付け、実機と同一寸法のフィン付き伝熱管（図 1 参照）を製作した。また、試験の前後ですきま部およびその近傍の変化を詳細観察するため図 2 に示す形状の試験片を製作した。

3.3 試験方法

3.3.1 試験片への予備酸化皮膜の付与

試験用のフィン付き伝熱管は、実機の運転履歴に相当する酸化皮膜を模擬するために、試験前に $485^{\circ}\text{C} / 800$ 時間の条件で予備酸化皮膜を付与した。

なお、高温保持 1000 時間での試験片（すきま部観察用試験片を含む）には、別途実施した試験片試験でのデータとの横並びを図るために予備酸化皮膜は付与しないで実施した。

3.3.2 ナトリウム化合物の付与

実機での調査結果を参考にして Na_2CO_3 、 NaHCO_3 を付与した。

なお、参考に NaOH を付与し試験した。

ナトリウム化合物の付着量は実機に付着したナトリウム化合物（清掃前）量の定量の結果、その平均的付着量は約 $400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。このため、試験でのナトリウム化合物の付着量は、 $4000 \mu\text{g}$ 、 $400 \mu\text{g}$ および $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の 3 水準に設定した。

3.3.3 腐食試験条件

試験は実機模擬熱サイクルを与え熱サイクルにより生ずる腐食を調査する熱サイクル試験^{*1}、実機での長期高温保持により生ずる腐食を調査する高温保持試験^{*2}並びにフィン付根部すきまを対象とした高温保持すきま試験^{*3}を実施した。

*1 热サイクル試験は実機伝熱管が受ける温度変化による腐食速度への影響の有無、程度を調査することを目的とする。

*2 高温保持試験は高温保持時間による腐食速度への影響の有無、程度を調査することを目的とする。

*3 高温保持すきま試験は特にフィン付根部すきまを対象に、高温保持時間による腐食速度への影響の有無、程度を調査することを目的とする。

試験マトリックスを表1に示す。

(1) 热サイクル試験試験条件

実機の温度を模擬した熱サイクル(200°C~505°C)を加え、伝熱管の健全性を確認する。高温状態(505°C)の保持時間を40時間、昇降温速度約15°C/h、1サイクルの試験時間を105時間とし最大60回^{*4}の熱サイクルを加える。

*4 : 热サイクル数は実機が1年に2回停止することを仮定し、その30年分として最大60回を設定した。

(図-3参照)

(2) 高温保持試験及び高温保持すきま試験条件

525°Cの高温に一定時間保持する。保持時間^{*5}は短期試験1,000時間と長期試験3,600時間とした。

*5 : 1000時間は別途実施した試験片試験のデータとの横並びのためで、3600時間は実機1サイクル分の半年の連続運転を念頭とした。

3.3.4 試験装置

装置概要を図-4に示す。

試験中、炉内が酸欠になる事態を避けるため、70%相対湿度(室温)の空気を流量100cc/minで炉内に導入した。

3.3.5 試験後の調査内容

試験後に光学顕微鏡、SEM、X線回折、EPMAを用いて試験片の表面、金属組織の変化、ナトリウム化合物の形態の変化、ナトリウム化合物の母材への拡散状況を確認した。但し、すきま部観察用腐食試験片は、試験前にすきま部の状況を金属顕微鏡およびSEMで観察することとし、試験後の同一場所を観察／照合し微細な変化を記録した。また、試験後に供試材より図5に示す試験片を製作し、フィンの密着強度を確認するための引張試験を実施した。

4. 試験結果及び考察

各試験結果の概要を表-2に示す。

各試験の要点を以下に示す。

4.1 高温保持試験結果

① 外観の変化

ナトリウム化合物を付与しない試験片（ブランク試験片）を3600時間高温に保持した後に観察された色調は薄茶色、濃青色が主体であった。1000時間試験で観察した色調は、淡青色、淡赤色であり両者に差が認められる。この差は高温保持時間の違いによる酸化皮膜厚さの差に対応するものであり、高温酸化試験結果^{*6}等で示唆されている色調の変化と矛盾しない。また、ナトリウム化合物を付与した試験片の色調は1000時間試験では赤褐色、濃紫が主体、付与したナトリウム化合物に対応すると考えられる黄色の付着物が認められた。3600時間試験結果では1000時間試験と同様に、さらに濃い色調となる。

試験後の試験片の表面には、ナトリウム化合物に対応すると考えられる淡黄色の付着物（ナトリウム化合物付与時は白色）が認められ、X線回折の結果、これらの成分は1000時間試験の場合と同様に全てNa₂CO₃であることが示された。

（写真-1、表-2参照）

*6：呂 戊辰、哀 本鎮：日本化学会誌、6、1054、（1987）

② 525°C条件での腐食量

ナトリウム化合物を付与しない条件で、0.2 μm/1年、ナトリウム化合物を付与した条件で1.7～4.8 μm/1年の範囲にある。NaOHの付与を除外した場合の腐食速度は1.7～4.6 μm/1年であり、全面腐食の観点ではマイクロコロージョンのレベルに留まる。

（表-3参考）

③ 観察された腐食量と付与したナトリウムの種類および量との関係は認められない。

（表-3、写真-2参考）

これは、付与したNaOH、NaHCO₃がNa₂CO₃に変化するため実質的な意味で種類の差がなかったことが原因と考えられる。

付着量の影響が認められない理由は、腐食反応に関与するバルクのナトリウム化合物の濃度が一定（100%）であること、ナトリウム化合物の付与量（40～4000 μg/cm²）がナトリウム化合物の金属表面側への拡散に影響を与える厚さを超えていたこと等が考えられる。

④ 高温保持試験での腐食減量と時間の1/2乗の間には良好な直線関係が認められる。

図中に併記した熱サイクル試験の結果も同様の傾向を示している。従って、本系での腐食速度は1/2乗則で取り扱えるものと考えられる。（図6参考）

金属の腐食反応が拡散に律速されている場合、腐食量と時間との間には1/2乗則が成り立つ。半無限体における非定常拡散の関係を解くと、

$$S = 2(Dt/\pi)^{1/2} (Cs - Co)$$
 となる。

D : 拡散定数 Cs : 界面での溶質濃度 Co : バルク溶質濃度

以上のことから、本系での腐食は拡散に律則されている可能性が高い。

4.2 高温すきま試験結果

すきま部の詳細観察用試験片を用い525°C条件で1000、3600時間保持した試験片のすきま部の侵食の加速はないものと判断された。

(表-5、写真-3参照)

すきま部での腐食は、液体として水が存在する場合に問題となる。一方、本試験／実機運転中は液体としての水分は存在しない。また、Na₂CO₃の溶融する温度より低いため溶融塩が水と類似した機能を果たせない環境条件である。したがって、すきま部の侵食を加速する環境条件が整っていないものと考えられる。

4.3 热サイクル試験結果

①試験片の色調の変化は高温保持試験の場合と同様で、試験サイクル数の増加に伴い薄赤色、淡濃青色から濃青色に変化している。また、試験後の試験片表面には付与したナトリウム化合物に対応すると考えられる淡黄色の付着物が認められた。淡黄色の付着物は、高温保持試験の場合と同様にNa₂CO₃であり1、16、60サイクルでの分析結果はすべて一致している。
(写真-4参照)

②腐食減量とサイクル数の1/2乗との間に良好な直線関係が認められる。したがって、本試験での腐食速度は基本的には1/2乗則で取り扱って良いものと考えられる。

(図-6参照)

③ナトリウム化合物を付与した熱サイクル試験での腐食量(1サイクル時間を105hrにとった場合)は高温保持試験に比して約1/3程度であることが判る。

酸化皮膜が厚く成長する場合、熱サイクルの付与により酸化皮膜に生じるクラックや皮膜の脱離により酸化が加速される可能性も考えられた。今回の結果は前述の事情により著しく酸化が加速されることはないことを示唆している。

3600hの高温腐食試験結果より推定した1年間の腐食減量と、60サイクルの熱サイクル試験結果より推定した1年間の腐食量の比較を下表に示す。

(表-4参照)

熱サイクル試験と高温保持試験結果より推定した1年間の腐食量(μm)

試験片の種類	高温保持試験 525°C/3600h	熱サイクル試験 60サイクル、 Max.505°C	高温保持/ 熱サイクル 腐食量比
Na化合物無付与	0.2	0.6	0.33
Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	4.6	1.7	2.7
Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	4.2	1.5	2.8
Na ₂ CO ₃ : 40 μg/cm ²		1.5	-
NaHCO ₃ : 400 μg/cm ²	1.7		-
NaOH: 400 μg/cm ²	4.8	1.7	2.8

④熱サイクル試験で、高温酸化が505°Cに保持した時のみに腐食が起ると仮定した場合、505°C／1年での腐食量は表の1.6倍(1.0~2.8 μm)となり、525°Cでの高温保持試験に比して7割程度の値となる。この差は温度等に起因するものと考えられる。(図7参照)

4.4 フィンの密着強度

熱サイクル試験、高温保持試験前後のフィンの密着強度の変化を図8に示す。

図8より、フィンの密着強度は試験条件によらず概ね25~33kg/mm²の範囲に分布し、付与したナトリウム化合物の種類、量にも影響されていないことが判る。

4.5 EPMA結果

ナトリウムの分布は腐食生成物の付着箇所に一致しており腐食生成物以外の箇所でのナトリウムの分布は認められない。したがって、ナトリウムもしくはその分解生成物が母材側に固相拡散して材料の劣化を招くことは想定し難い。

(写真-5参照)

4.6 材料の経年変化と腐食速度への影響

今回の試験のうち3600時間の高温保持試験、熱サイクル試験(16、36、60サイクル)で結晶粒界の優先酸化が認められた。

(表-6、7、写真-6参照)

この現象は試験計画時には予測していないため、速度の定量評価、経年変化との関係等未知な点が多い。粒界の優先酸化を評価する試験は別計画で実施する。

5. まとめ

もんじゅナトリウム漏洩事故の際にナトリウム化合物が付着した補助冷却設備の空気冷却器フィン付き伝熱管の長期健全性に資するための試験を含む検討を実施した。結果は以下にまとめられる。

5. 1 試験結果

- 1) ナトリウム化合物付与条件での材料の減肉量の予測式は以下にまとめられる。

なお腐食量の算定にあたっては管内面の酸化量をブランク材より推定しその影響を除いた条件で算定した。

a. 高温酸化試験 (525°C)

$$t \text{ 年後の減肉量 } (\mu \text{ m}) = 4.2 \sim 4.6 \times t^{1/2}$$

t : 時間 (年)

b. 热サイクル試験 (505°C)

- ①試験時間を 1 サイクル当たり 105 hr にとった場合

$$t \text{ 年後の減肉量 } (\mu \text{ m}) = 1.5 \sim 1.7 \times t^{1/2}$$

t : 時間 (年)

- ②試験時間を 1 サイクル当たりの高温 (505°C) 保持時間の 40 hr にとった場合

熱サイクル試験において 505°C 保持時間中に全ての高温酸化が起きたと仮定

t 年後の減肉量は以下の式で示される。

$$t \text{ 年後の減肉量 } (\mu \text{ m}) = 2.4 \sim 2.8 \times t^{1/2}$$

t : 時間 (年)

- 2) 高温保持条件ではすきま構造に起因した腐食の加速は認められなかった。これは、付与したナトリウムが全て Na₂CO₃ に変化すること、Na₂CO₃ は 525°C では溶融しないこと、液体としての水は存在しないこと等、すきま部の腐食を加速する因子が無いためと考えられた。
- 3) 母材へのナトリウムの拡散は認められなかった。
- 4) 热サイクル試験後のフィンの密着強度の低下は認められなかった。
- 5) 高温保持試験 (3600h)、热サイクル試験で材料の粒界の優先酸化現象が認められた。

5. 2 評価

上記試験結果の 1) 式より A/C 伝熱管の Na 化合物付着による腐食量を計算すると以下のよう に予測される。

①プラント寿命期間中の全面腐食した場合の腐食量：約 30 $\mu \text{ m}$ 以下

②粒界の優先酸化に伴う腐食量：約 300 $\mu \text{ m}$ 以下。

優先酸化に伴う腐食量について、これが粒界の Cr 欠乏の関与が考えられる。

別途実施された STPA 24 (21/4 Cr 鋼) での腐食試験データを 1/2 乗則に当てはめて計算すると上記の値となる。

これに対し伝熱管の肉厚は 2.9 mm であり、このうち耐圧による必要肉厚が 0.19 mm であるため上記腐食量は余裕代の範囲内であり、伝熱管の健全性に対しては問題ないと見える。

以上のことからNa化合物が付着した2次系CループA／C伝熱管は再使用可能であると考える。

5. 3 今後の展開

高温保持試験(3600h)、熱サイクル試験で材料の粒界の優先酸化現象が認められた。この粒界の優先酸化は試験開始前には予測されていなかった現象であり、材料の経年変化に伴う現象と考えられること並びに実機健全性を評価する為の根拠を明確にする観点から別途“結晶粒界の侵食速度評価試験”を実施することとしている。

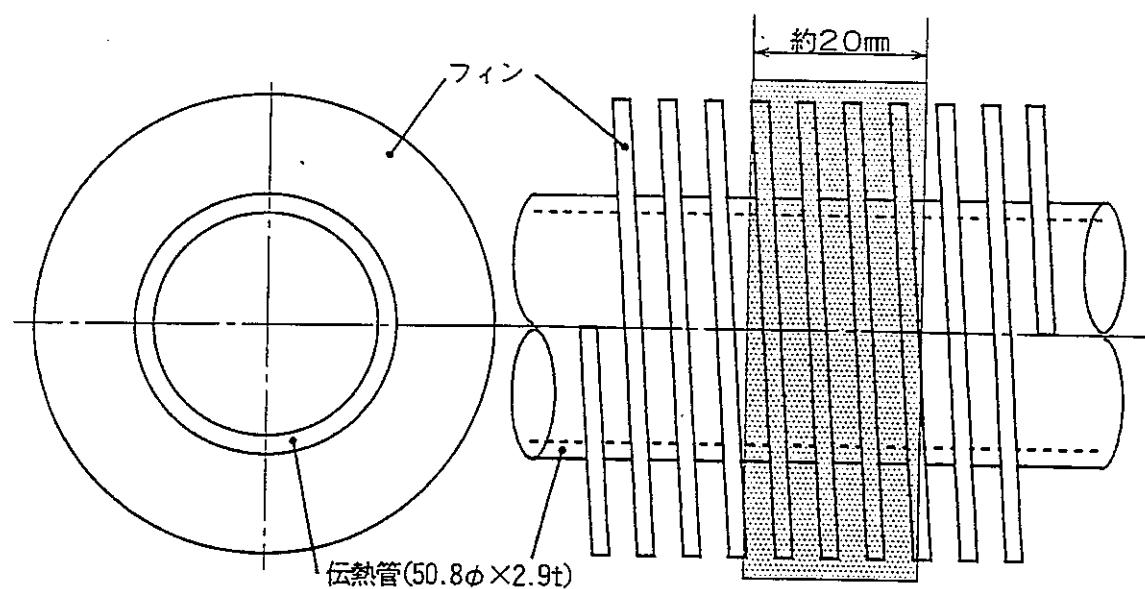


図1 热サイクル・高温保持試験用試験片形状

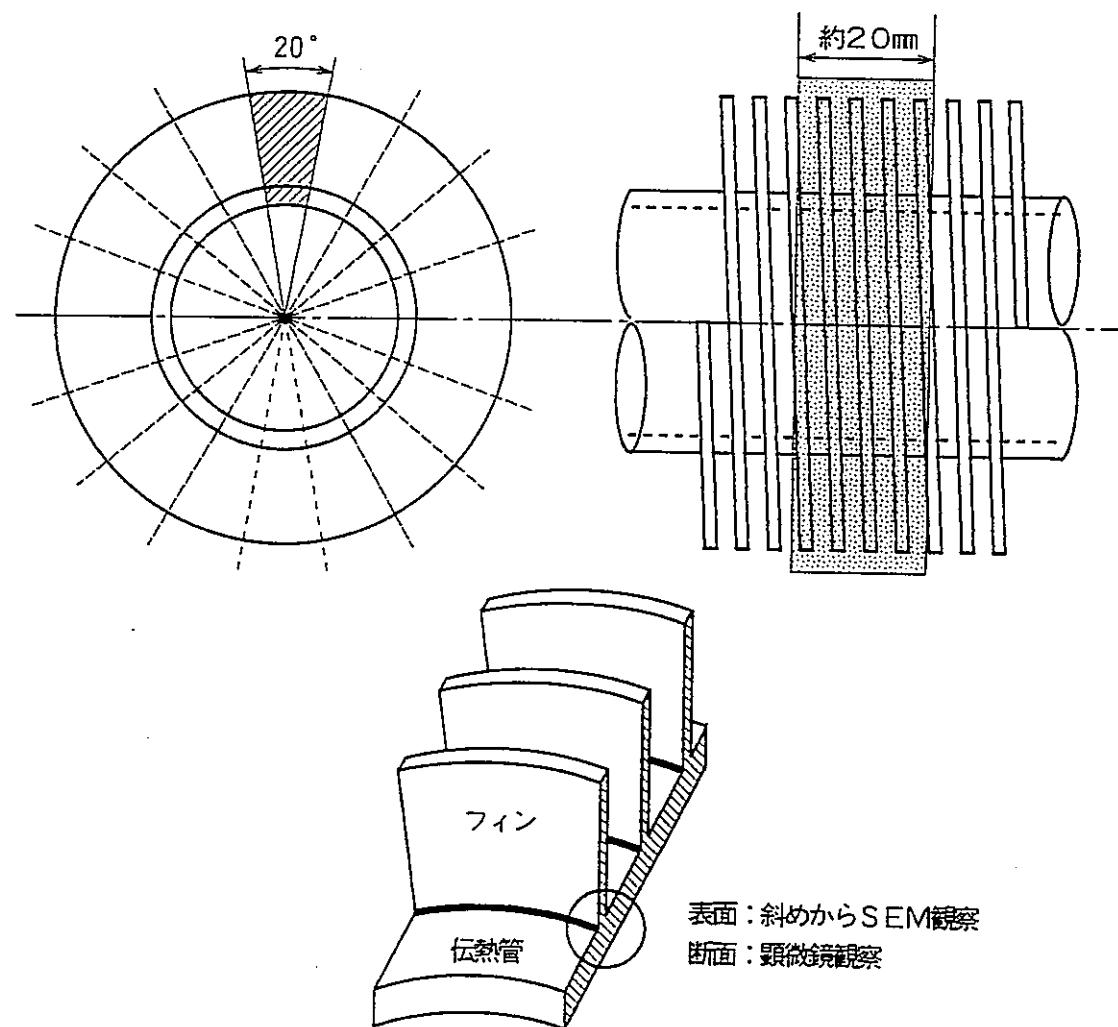


図2 高温保持・すきま部観察用腐食試験形状

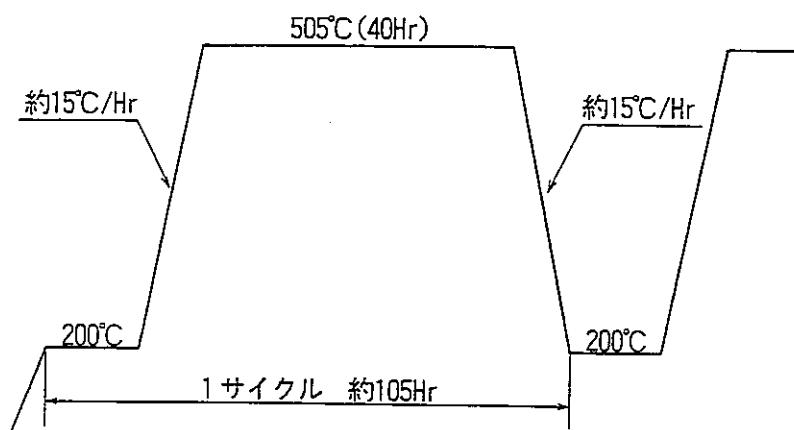
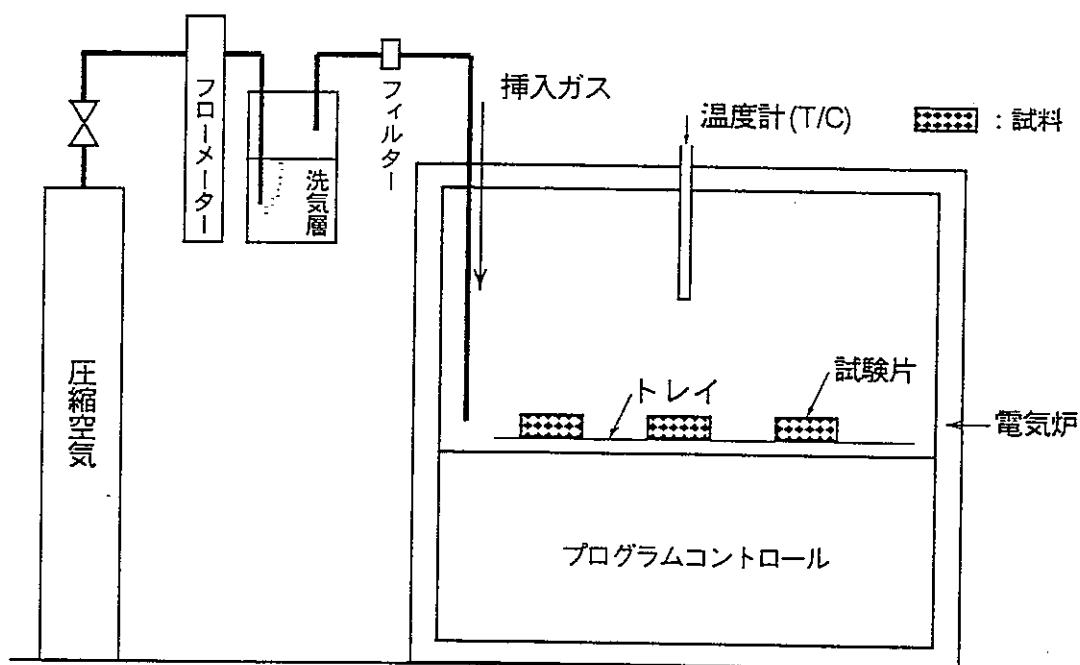


図3 実機模擬熱サイクル

熱サイクル・高温保持試験



* 挿入ガス流量 : 100 cc/min (炉容積量換算によるガス量 : 2回/day交換)

* 試料の搬出 : 所定の試験終了後、速やかにトレイ毎炉外に搬出

図4 試験装置のブロックダイヤグラム

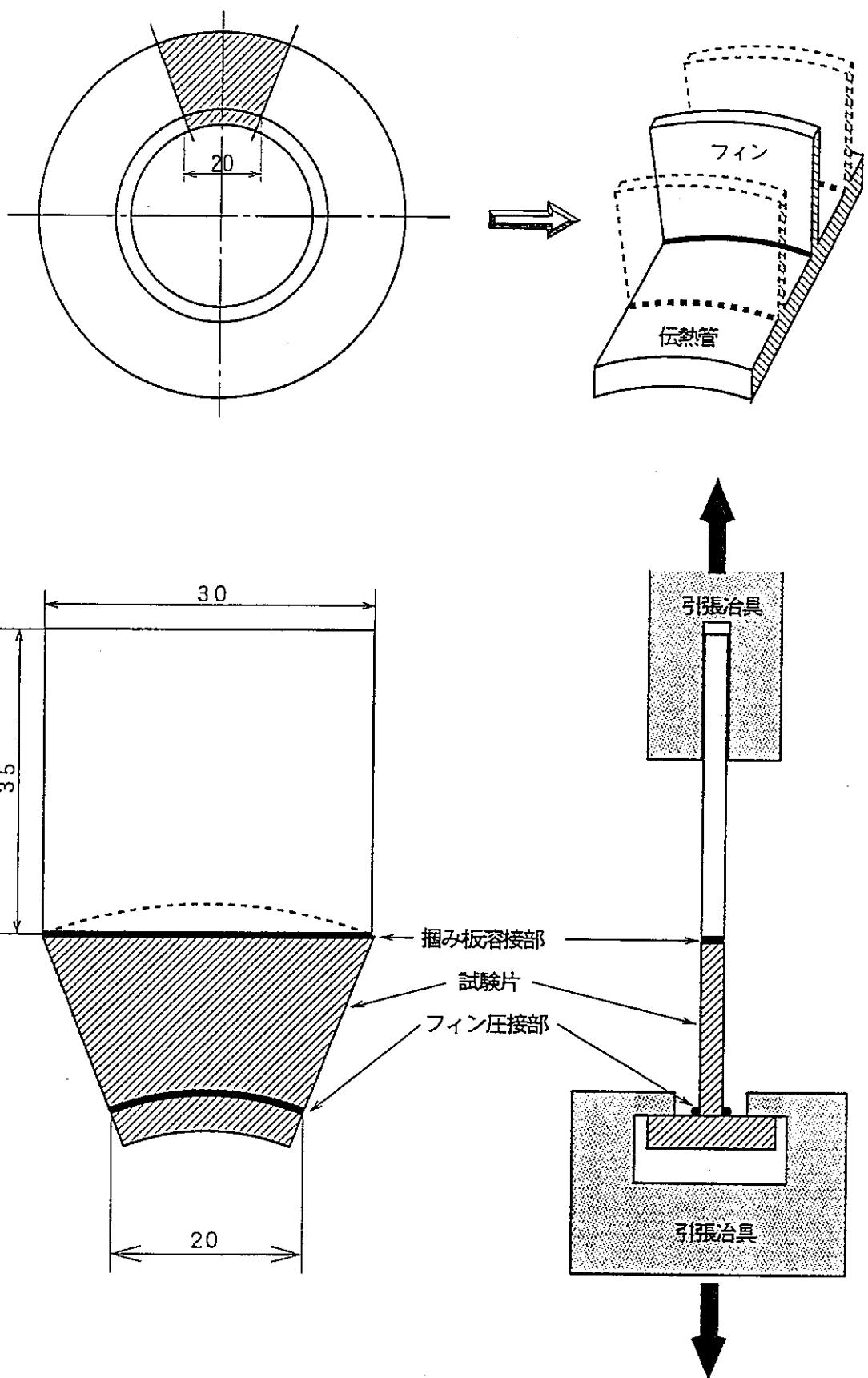


図5 引張試験片形状と試験要領図

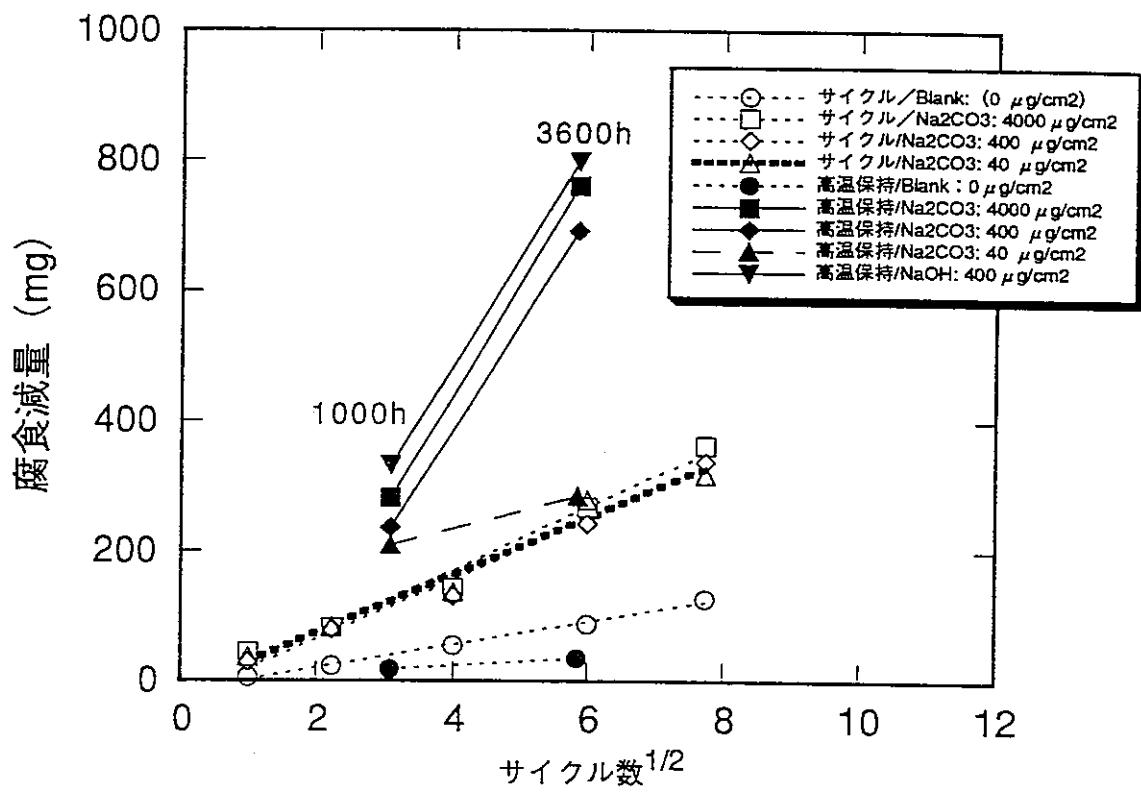


図6 試験片の腐食減量とサイクル数、時間の1/2乗の関係

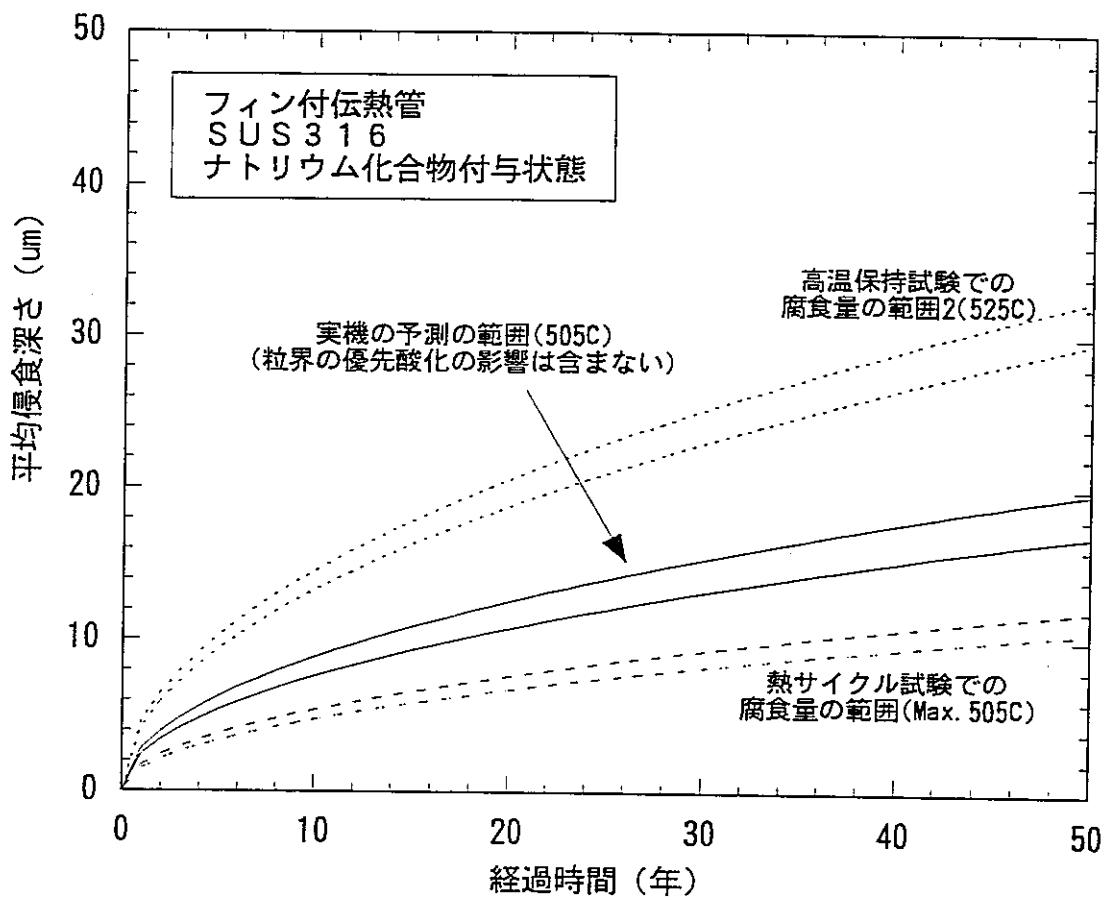


図-7 経過時間-平均侵食深さの関係

試験片名称と履歴		T. P No.	全平均 Kgf/mm ²
ブランク	受入れ材	未使用材	As. 27.1
熱サイクル試験	1サイクル (HC1)	基準片(Na付着なし)	1 27.2
		Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	2 28.9
		Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	3 30.5
		Na ₂ CO ₃ : 40 μg/cm ²	4 25.6
		NaOH : 400 μg/cm ²	5 29.8
	16サイクル (HC16)	基準片(Na付着なし)	1 26.7
		Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	2 25.5
		Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	3 26.7
		Na ₂ CO ₃ : 40 μg/cm ²	4 30.5
		NaOH : 400 μg/cm ²	5 26.6
高温保持試験	60サイクル (HC60)	基準片(Na付着なし)	1 27.8
		Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	2 30.1
		Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	3 27.7
		Na ₂ CO ₃ : 40 μg/cm ²	4 32.7
		NaOH : 400 μg/cm ²	5 28.0
	1000Hr (H1000)	基準片(Na付着なし)	1 27.5
		Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	2 27.3
		Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	3 29.0
		NaHCO ₃ : 400 μg/cm ²	4 25.7
		NaOH : 400 μg/cm ²	5 31.8
3600Hr (H3600)	3600Hr (H3600)	基準片(Na付着なし)	1 31.8
		Na ₂ CO ₃ : 4000 μg/cm ²	2 29.2
		Na ₂ CO ₃ : 400 μg/cm ²	3 30.1
		NaHCO ₃ : 400 μg/cm ²	4 26.5
		NaOH : 400 μg/cm ²	5 27.0

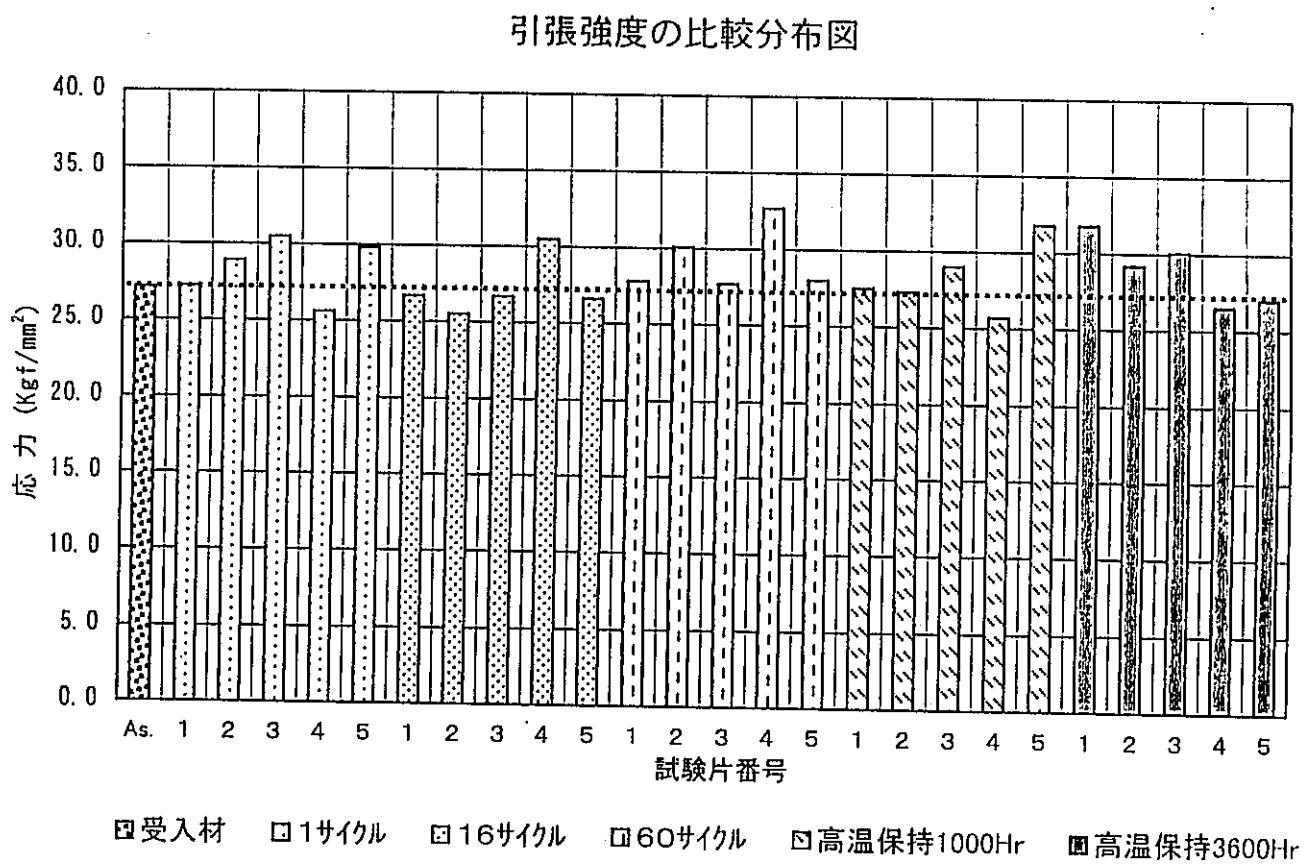


図 8 引張強度の分布状況

表一 試験体調査項目一覧表

熱サイクル試験																													
試験条件	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						NaOH *1 (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				Na ₂ CO ₃ (40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				基準試験片								
	1	4	16	36	60		1	4	16	36	60		1	4	16	36	60		1	4	16	36	60		1	4	16	36	60
付着Na成分分析	試験前																												
	試験後	O		O	O		O		O	O		O		O		O		O	O		O	O		O	O				
外観目視観察	試験前	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O				
	試験後	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O			
表面SEM	試験前																										O		
	試験後	O		O	O		O		O	O		O		O		O		O	O		O	O		O	O				
断面ミクロ観察	試験前																									O			
	試験後	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O				
EPMA	試験前																												
	試験後	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O				
引張り試験	試験前																												
	試験後	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O				
重量変化	試験前																												
	試験後	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O				
高温保持試験																													
試験条件	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				NaHCO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				基準試験片								
	1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h									
付着Na成分分析	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
外観目視観察	試験前	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
表面SEM	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
断面ミクロ観察	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
EPMA	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
引張り試験	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
重量変化	試験前																												
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
高温保持すきま試験																													
試験条件	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)						NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				NaHCO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				基準試験片								
	1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h		1000h	3600h									
付着Na成分分析	試験前																												
	試験後																												
外観目視観察	試験前																												
	試験後																												
表面SEM	試験前	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
断面ミクロ観察	試験前	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
	試験後	O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O		O	O					
EPMA	試験前																												
	試験後																												
重量変化	試験前																												
	試験後																												

* 1 :
NaOHの成分分析は1回目でNaOHが検出されなければそれ以降の試験は実施しません。もし検出されればNaOH成分がなくなるまで実施するものとします。

[試験前観察]

表2-1 試験結果の概要（高温保持試験：1000時間）

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{†1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
ブランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンバーカラー(赤色、金色等)が認められる。	フィン：酸洗による粒界のエッチング 伝熱管：酸洗による粒界のエッチング。 圧接部：全面酸化ムール付着。	フィン外面：粒界のエッチング (平均深さ：5.5 μm) 母材：段状組織 伝熱管外面：粒界のエッチング (平均深さ：6.3 μm) 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3～29.0		

[1000時間高温保持試験後]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{†1}	腐食速度 ^{†2}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に淡青色(テンバーカラー)および淡赤色のスケールが生成。	フィン：ほとんど変化無し 伝熱管：ほとんど変化無し 圧接部：ほとんど変化無し * 試験前と同様の表面状態	フィン外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 伝熱管外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.2	25.2～28.8		ブランクとして実施。
Na ₂ CO ₃	4000	スケール：フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：濃黄色。フィンおよび伝熱管部に分布。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 伝熱管外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	3.2	23.8～32.0	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
Na ₂ CO ₃	400	スケール：フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：黄色。スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。フィンには殆ど無し。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 伝熱管外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	2.7	27.7～31.0	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaHCO ₃	400	スケール：フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：黄色。スパッタ部の伝熱管に僅かに分布。フィンには殆ど無し。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 伝熱管外面：粒界侵食8.7 μm 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	2.4	22.6～30.5	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaOH	400	スケール：フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：黄色。スパッタ部と凹凸部に僅かに分布。フィンには殆ど無。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 (他条件より若干顕著) 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 (他条件より若干顕著) 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 伝熱管外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	3.8	28.7～34.2	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。

^{†1} 粒界侵食深さ：計算値(測定値の3点平均深さ－試験前の3点平均深さ)^{†2} 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

[試験前観察]

表2-2 試験結果の概要（高温保持試験：3600時間）

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{#1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
ブランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンパー色(紺色、金色等)が認められる。	フィン：酸洗による粒界のエッチング 伝熱管：酸洗による粒界のエッチング。 圧接部：全面酸化ムール付着。	フィン外面：粒界のエッチング (平均深さ：5.5 μm) 母材：段状組織 伝熱管外面：粒界のエッチング (平均深さ：6.3 μm) 母材：段状組織 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3～29.0		

[3600時間高温保持試験後]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{#1}	腐食速度 ^{#2}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に濃青色(テンパー色)および薄茶色のスケールが生成。 * 試験前と同様の表面状態	フィン：ほとんど変化無し 伝熱管：ほとんど変化無し 圧接部：ほとんど変化無し	フィン外面：粒界侵食≤5 μm 母材：炭化物析出・鋭敏化 伝熱管外面：健全、粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織・僅かに鋭敏化 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.2	29.8～34.8		ブランクとして実施。
Na ₂ CO ₃	4000	スケール：フィン、伝熱管とも赤褐色のムール。 付着物：薄黄色。 フィンおよび伝熱管部に分布。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：軽微な肌荒れ	フィン外面：粒界侵食10.8 μm 母材：炭化物析出・鋭敏化 伝熱管外面：粒界侵食6.2 μm 母材：段状組織・僅かに鋭敏化 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	4.6	26.4～33.5	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
Na ₂ CO ₃	400	スケール：フィンは茶褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：粒界侵食12.0 μm 母材：炭化物析出・鋭敏化 伝熱管外面：粒界侵食16.2 μm 母材：段状組織・僅かに鋭敏化 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	4.2	28.8～32.9	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaHCO ₃	400	スケール：フィンは茶褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：粒界侵食5.8 μm 母材：炭化物析出・鋭敏化 伝熱管外面：粒界侵食≤5 μm 母材：段状組織・僅かに鋭敏化 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.7	22.9～28.6	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaOH	400	スケール：フィンは茶褐色、伝熱管は濃い紫色のムール。 付着物：薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン：ミクロな肌荒れ状態 (他条件より若干顕著) 伝熱管：ミクロな肌荒れ状態 (他条件より若干顕著) 圧接部：基準片と同等の表面状態	フィン外面：粒界侵食≤5 μm 母材：炭化物析出・鋭敏化 伝熱管外面：粒界侵食8.0 μm 母材：段状組織・僅かに鋭敏化 圧接部付根：フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	4.8	22.7～30.3	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。

#1 粒界侵食深さ：計算値(測定値の3点平均深さ - 試験前の3点平均さ)

#2 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

[試験前観察]

表2-3 試験結果の概要(熱サイクル試験: 1サイクル(105時間))

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{#1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
プランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンパー色(紺色、金色等)が認められる。	フィン: 酸洗による粒界のエッチング 伝熱管: 酸洗による粒界のエッチング。 圧接部: 全面酸化ペースト付着。	フィン外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 5.5 μm) 母材: 段状組織 伝熱管外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 6.3 μm) 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3~29.0		

[1サイクル試験後: 105時間]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{#1}	腐食速度 ^{#2}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に淡青色(テンパー色)および淡赤色のスケールが生成。	フィン: ほとんど変化無し 伝熱管: ほとんど変化無し 圧接部: ほとんど変化無し * 試験前と同様の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 伝熱管外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.2	26.1~30.1		プランクとして実施。
	4000	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のペースト。 付着物: 薄黄色。フィンおよび伝熱管部に分布。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 伝熱管外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.6	26.7~29.3	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
Na ₂ CO ₃	400	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のペースト。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 伝熱管外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.0	28.9~30.8	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
	40	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のペースト。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 伝熱管外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.3	23.1~28.8	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaOH	400	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のペースト。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 伝熱管外面: 健全、粒界侵食≤5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.6	28.6~31.4	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。

#1 粒界侵食深さ: 計算値(測定値の3点平均深さ - 試験前の3点平均深さ)

#2 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

[試験前観察]

表2-4 試験結果の概要(熱サイクル試験: 16サイクル(1680時間))

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{#1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	断面EPMA
プランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンパー色(紺色、金色等)が認められる。	フィン: 酸洗による粒界のエッチング 伝熱管: 酸洗による粒界のエッチング。 圧接部: 全面酸化スケール付着。	フィン外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 5.5 μm) 母材: 段状組織 伝熱管外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 6.3 μm) 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3~29.0		

[16サイクル試験後: 1680時間]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{#1}	腐食速度 ^{#3}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	断面EPMA
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に淡青色(テンパー色)および淡赤色のスケール生成。	フィン: ほとんど変化無し 伝熱管: ほとんど変化無し 圧接部: ほとんど変化無し * 試験前と同様の表面状態	フィン外面: 粒界侵食 7.0 μm ^{#2} 母材: 段状組織・僅かに鋭敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 6.2 μm ^{#2} 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.5	23.0~31.5		プランクとして実施。
	4000	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のスケール。 付着物: 薄黄色。フィンおよび伝熱管部に分布。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織・僅かに鋭敏化 伝熱管外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.3	23.2~27.2	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
Na ₂ CO ₃	400	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のスケール。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織・僅かに鋭敏化 伝熱管外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.2	22.7~28.6	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
	40	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のスケール。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 粒界侵食 5.8 μm ^{#2} 母材: 段状組織・僅かに鋭敏化 伝熱管外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.2	26.3~37.5	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaOH	400	スケール: フィンは赤味を帯びた褐色、伝熱管は濃い紫色のスケール。 付着物: 薄黄色。 スパッタ部の凹凸部に僅かに分布。 フィンには殆ど無し。	フィン: ミクロな肌荒れ状態 伝熱管: ミクロな肌荒れ状態 圧接部: 基準片と同等の表面状態	フィン外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織・僅かに鋭敏化 伝熱管外面: 健全、粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.3	25.0~28.7	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。

#1 粒界侵食深さ: 計算値(測定値の3点平均深さ - 試験前の3点平均深さ)

#2 酸洗い時のものと判断される

#3 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

[試験前観察]

表2-5 試験結果の概要(熱サイクル試験:36サイクル(3780時間))

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{#1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
プランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンバーカラー(緑色、金色等)が認められる。	フィン: 酸洗による粒界のエッチング 伝熱管: 酸洗による粒界のエッチング。 圧接部: 全面酸化スケール付着。	フィン外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 5.5 μm) 母材: 段状組織 伝熱管外面: 粒界のエッチング (平均深さ: 6.3 μm) 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3~29.0		

[36サイクル試験後: 3780時間]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目					
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{#1}	腐食速度 ^{#2}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に淡青色(テンバーカラー)および淡赤色のスケールが生成。		フィン外面: 粒界侵食 6.5 μm 母材: 炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 ≤ 5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.5		
Na ₂ CO ₃	4000	スケール: フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物: 黄色。 フィンおよび伝熱管部に分布。		フィン外面: 粒界侵食 7.5 μm 母材: 炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 10 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.6		
	400	スケール: フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物: 黄色。 フィンおよびスパッタの凹凸部に分布。		フィン外面: 粒界侵食 14.5 μm 母材: 炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 10 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.4		
	40	スケール: フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物: 黄色。 フィンとスパッタの凹凸部に僅かに分布。		フィン外面: 粒界侵食 6.5 μm 母材: 炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 6.8 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.5		
NaOH	400	スケール: フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物: 黄色。 フィンおよびスパッタの凹凸部に分布。		フィン外面: 粒界侵食 10 μm 母材: 炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面: 粒界侵食 15.5 μm 母材: 段状組織 圧接部付根: フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.9		

#1 粒界侵食深さ: 計算値(測定値の3点平均深さ - 試験前の3点平均深さ)

#2 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

[試験前観察]

表2-6 試験結果の概要(熱サイクル試験:60サイクル(6300時間))

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織	腐食速度 ^{*1}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
ブランク	無	フィンおよび伝熱管表面とも金属光沢。フィン付根には溶接スパッタがあり、熱影響部にテンバーカラー(緑色、金色等)が認められる。	フィン:酸洗による粒界のエッチング 伝熱管:酸洗による粒界のエッチング。 圧接部:全面酸化スケール付着。	フィン外面:粒界のエッチング (平均深さ:5.5 μm) 母材:段状組織 伝熱管外面:粒界のエッチング (平均深さ:6.3 μm) 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織		24.3~29.0		

[60サイクル試験後:6300時間]

試験片	Na 付着量 μg/cm ²	観察項目						
		外観検査	表面SEM	ミクロ組織 ^{*1}	腐食速度 ^{*2}	引張強度(kg/mm ²)	X線回折	
基準片	無	フィンおよび伝熱管とも、全体的に淡青色(テンバーカラー)および淡赤色のスケールが生成。	フィン:ほとんど変化無し 伝熱管:ほとんど変化無し 圧接部:ほとんど変化無し * 試験前と同様の表面状態	フィン外面:粒界侵食 5.5 μm 母材:炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面:粒界侵食 6.8 μm 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	0.6	24.6~29.4		ブランクとして実施。
Na ₂ CO ₃	4000	スケール:フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物:薄黄色。 フィンおよび伝熱管部に分布。	フィン:ミクロな肌荒れ状態 伝熱管:ミクロな肌荒れ状態 圧接部:基準片と同等の表面状態	フィン外面:粒界侵食 10.5 μm 母材:炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面:粒界侵食 14.3 μm 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.7	27.2~32.0	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
	400	スケール:フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物:薄黄色。 フィンおよびスパッタの凹凸部に分布。	フィン:ミクロな肌荒れ状態 伝熱管:ミクロな肌荒れ状態 圧接部:基準片と同等の表面状態	フィン外面:粒界侵食 14 μm 母材:炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面:粒界侵食 12.5 μm 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.5	25.6~29.7	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
	40	スケール:フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物:薄黄色。 フィンとスパッタの凹凸部に僅かに分布。	フィン:ミクロな肌荒れ状態 伝熱管:ミクロな肌荒れ状態 圧接部:基準片と同等の表面状態	フィン外面:粒界侵食 8.8 μm 母材:炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面:粒界侵食 11.5 μm 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.5	28.2~36.4	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。
NaOH	400	スケール:フィンは茶褐色、伝熱管は濃い褐色のスケール。 付着物:薄黄色。 フィンとスパッタの凹凸部に僅かに分布。	フィン:ミクロな肌荒れ状態 伝熱管:ミクロな肌荒れ状態 圧接部:基準片と同等の表面状態	フィン外面:粒界侵食 6.5 μm 母材:炭化物析出・銳敏化 伝熱管外面:粒界侵食 10 μm 母材:段状組織 圧接部付根:フィン側は混合組織 伝熱管側は段状組織	1.7	24.5~31.3	Na ₂ CO ₃	母材へのNaの拡散は認められない。

^{*1} 粒界侵食深さ:計算値(測定値の3点平均深さ-試験前の3点平均深さ)^{*2} 腐食速度は1/2乗則に従うことを仮定して算出。(参考値: μm/1年)

表 3 (1/2) 高温保持試験による減肉量 (計算値: μm)

Hr	基準片 (Naなし)	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaHCO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1000	-0.0186	-0.2814	-0.2362	-0.2098	-0.3317
	0.07	1.09	0.92	0.81	1.29
3600	-0.0353	-0.7601	-0.6913	-0.2846	-0.7981
	0.14	2.95	2.68	1.10	3.10

上段: 腐食減量(g) , 下段: 減肉量(μm)

表 3 (2/2) 高温保持試験による腐食速度 ($\mu\text{m}/1\text{年}$)

Hr	基準片 (Naなし)	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaHCO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1000	-0.0186	-0.2814	-0.2362	-0.2098	-0.3317
	0.2	3.2	2.7	2.4	3.8
3600	-0.0353	-0.7601	-0.6913	-0.2846	-0.7981
	0.2	4.6	4.2	1.7	4.8

上段: 腐食減量(g) , 下段: 腐食速度($\mu\text{m}/1\text{年}$)

表4(1/2) サイクル試験による減肉量(計算値: μm)

サイクル数	基準片 (Naなし)	Na2CO3 (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na2CO3 (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na2CO3 (40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1	-0.0060	-0.0440	-0.0290	-0.0368	-0.0438
105Hr	0.02	0.17	0.11	0.14	0.17
4	-0.0230	-0.0817	-0.7794	-0.0834	-0.0755
420Hr	0.09	0.32	0.36	0.32	0.29
16	-0.0548	-0.1432	-0.1301	-0.1373	-0.1416
1680Hr	0.21	0.56	0.51	0.53	0.55
36	-0.0880	-0.2678	-0.2419	-0.2784	-0.3212
3780Hr	0.34	1.04	0.94	1.08	1.25
60	-0.1267	-0.3630	-0.3378	-0.3184	-0.3770
6300Hr	0.49	1.41	1.31	1.24	1.46

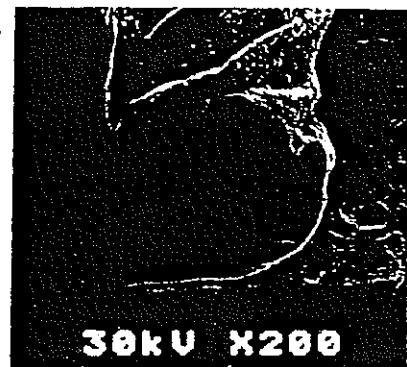
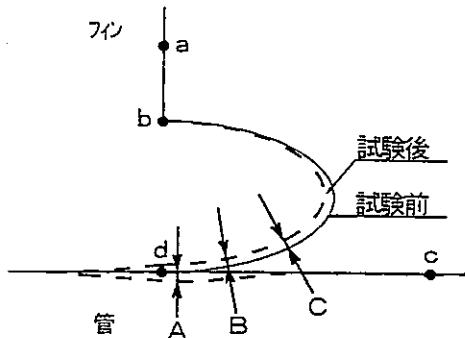
表4(2/2) 热サイクル試験による腐食速度($\mu\text{m}/1\text{年}$)

サイクル数	基準片 (Naなし)	Na2CO3 (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na2CO3 (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na2CO3 (40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1	-0.0060	-0.0440	-0.0290	-0.0368	-0.0438
105Hr	0.2	1.6	1.0	1.3	1.6
4	-0.0230	-0.0817	-0.0794	-0.0834	-0.0755
420Hr	0.4	1.4	1.4	1.5	1.3
16	-0.0548	-0.1432	-0.1301	-0.1373	-0.1416
1680Hr	0.5	1.3	1.2	1.2	1.3
36	-0.0880	-0.2678	-0.2419	-0.2784	-0.3212
3780Hr	0.5	1.6	1.4	1.5	1.9
60	-0.1267	-0.3630	-0.3378	-0.3184	-0.3770
6300Hr	0.6	1.7	1.5	1.5	1.7

上段: 腐食減量(g), 下段: 腐食速度($\mu\text{m}/1\text{年}$)

表5 すき間腐食試験後の浸食量

[観察(浸食量計測)要領]



試験前の試験片の隙間形状を記録し、a ~d を基準点として試験後の形状を重ね合わせ、隙間部近傍3箇所(A, B, C)の輪郭のギャップを計測し、その平均値を浸食量とした。

なお、ギャップ量には、実際の浸食量に試験後の研磨による僅かな位置のズレの影響が加算された値である。

[すき間腐食試験]

(μm)

保持時間	基準片 (Naなし)	Na ₂ CO ₃ (4000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Na ₂ CO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaHCO ₃ (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NaOH (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1000Hr	≤5	A : 7.0 B : 12.0 C : 11.0 平均: 10.0	A : 7.0 B : 5.0 C : 7.0 平均: 6.0	A : 10.0 B : 7.0 C : 10.0 平均: 9.0	A : 10.0 B : 10.0 C : 15.0 平均: 12.0
3600Hr	≤5	A : 15.0 B : 12.0 C : 15.0 平均: 14.0	A : 16.0 B : 16.0 C : 12.0 平均: 15.0	A : 12.0 B : 10.0 C : 11.0 平均: 11.0	A : 15.0 B : 20.0 C : 19.0 平均: 18.0

表6 サイクル試験による表面粒界浸食深さ(μm)

サイクル数		基準片 (Naなし)	Na2CO3 (4000 μg/cm ²)	Na2CO3 (400 μg/cm ²)	Na2CO3 (40 μg/cm ²)	NaOH (400 μg/cm ²)
1	フィン	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
105Hr	管	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
4	フィン	≤5.0	≤5.0	---	---	---
420Hr	管	≤5.0	≤5.0	---	---	---
16	フィン	7.0	≤5.0	≤5.0	5.8	≤5.0
1680Hr	管	6.3	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
36	フィン	6.5	7.5	14.5	6.5	10.0
3780Hr	管	≤5.0	10.0	10.0	6.8	15.5
60	フィン	5.5	10.5	14.0	8.8	6.5
6300Hr	管	6.8	14.3	12.5	11.5	10.0

表7 高温保持試験による表面粒界浸食深さ(μm)

		基準片 (Naなし)	Na2CO3 (4000 μg/cm ²)	Na2CO3 (400 μg/cm ²)	NaHCO3 (400 μg/cm ²)	NaOH (400 μg/cm ²)
1000Hr	フィン	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
	管	≤5.0	≤5.0	≤5.0	8.7	≤5.0
3600Hr	フィン	≤5.0	10.8	12.0	5.8	≤5.0
	管	≤5.0	6.2	16.2	≤5.0	6.2

*ブランク材(未使用材)の表面粒界浸食深さ(3点平均)

フィン: 5.5(μm) 管: 6.3(μm)

*試験後の深さは、ミクロ観察実施箇所の最大深さ

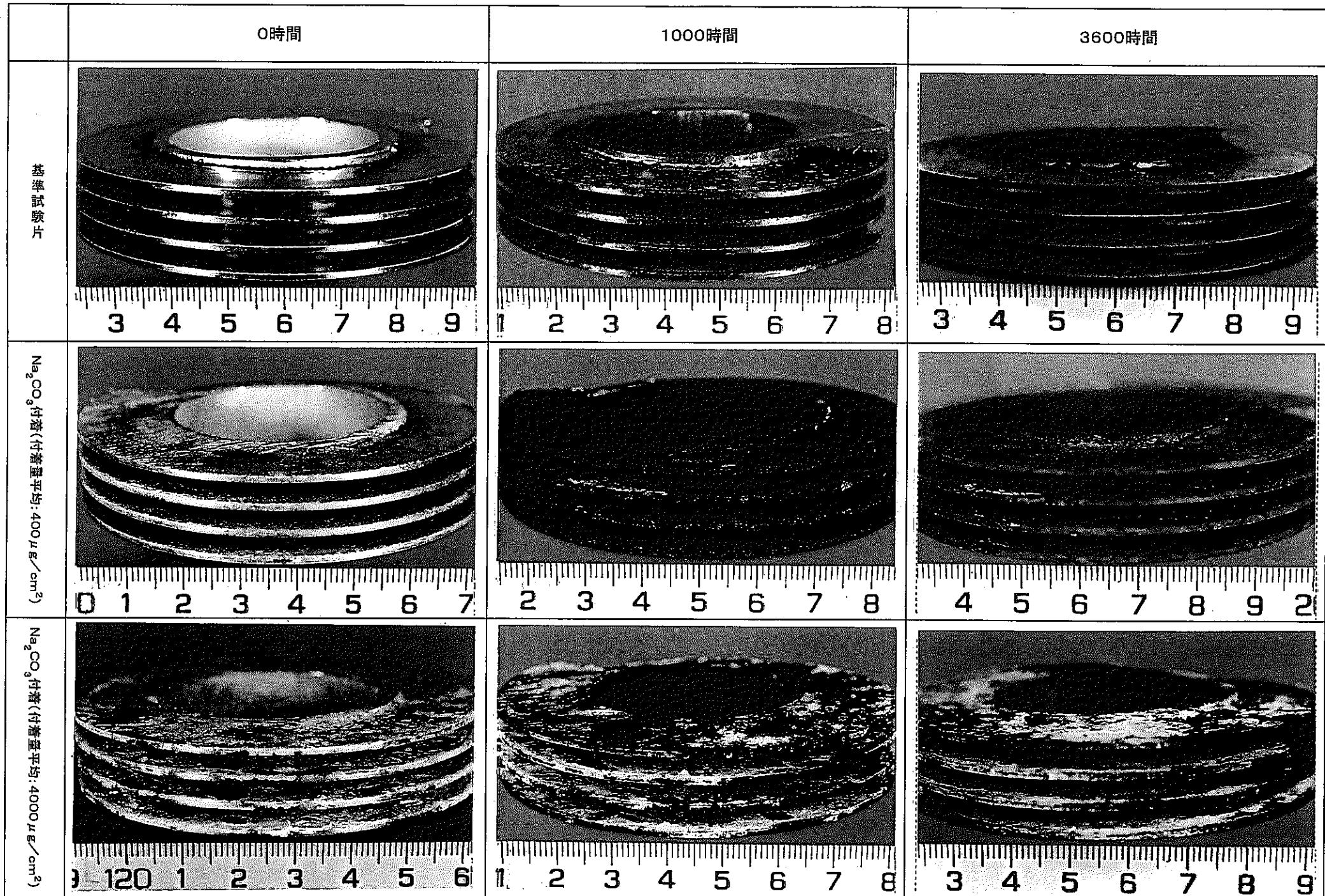


写真-1 高温保持試験結果(外観写真)

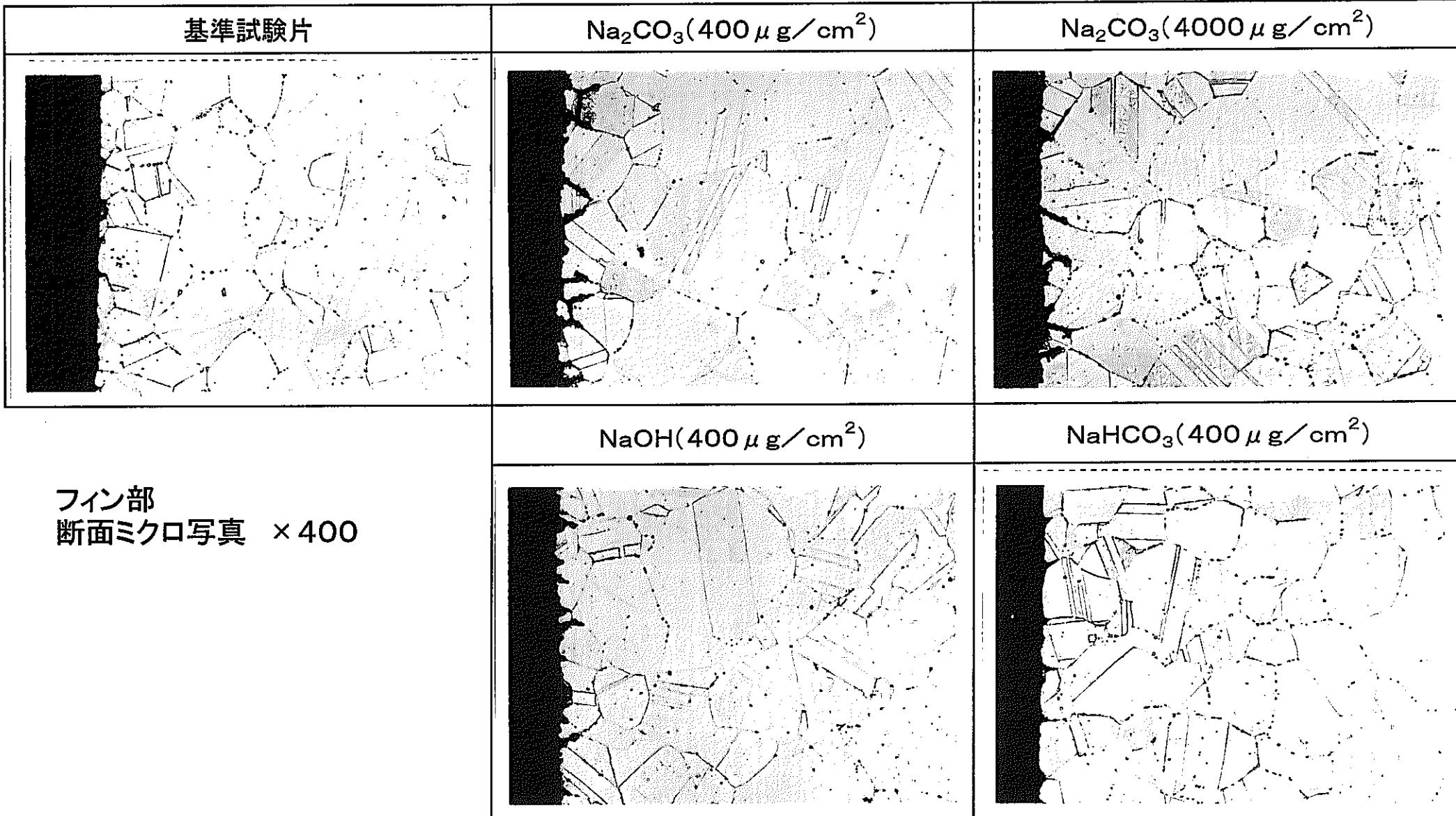


写真-2(1/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性
(3600時間高温保持試験結果)

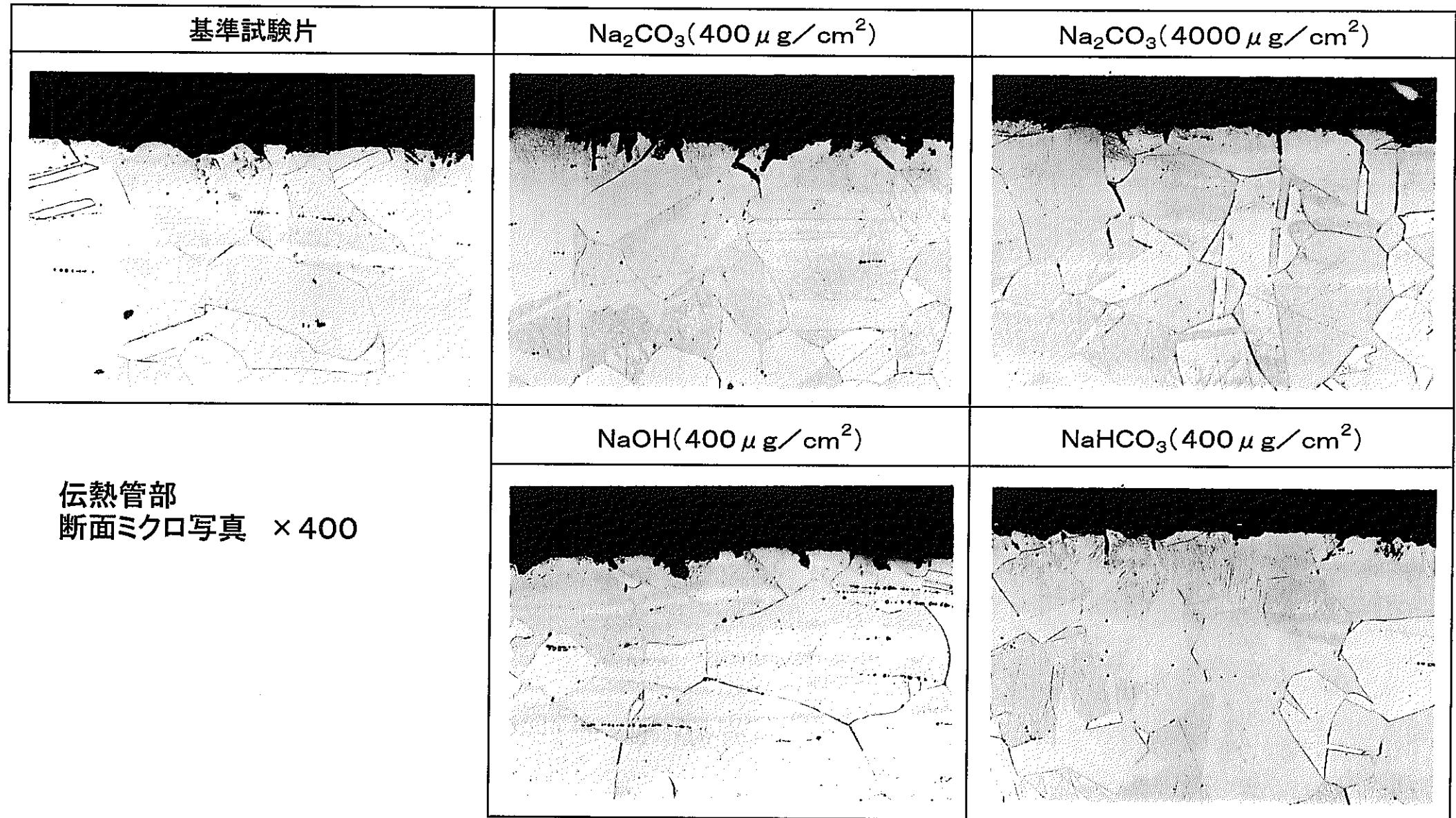
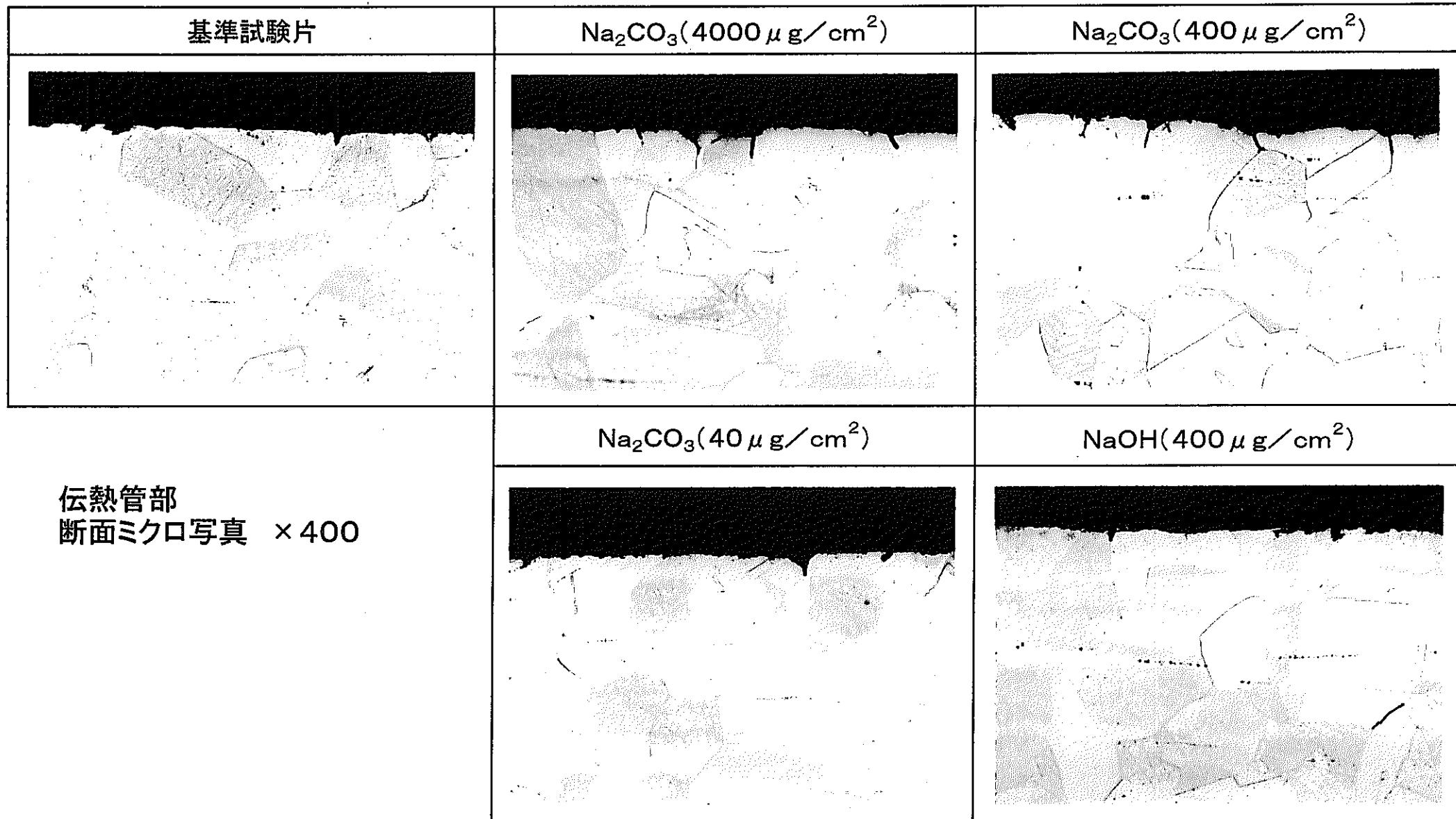


写真-2(2/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性
(3600時間高温保持試験結果)

基準試験片	$\text{Na}_2\text{CO}_3(4000 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$	$\text{Na}_2\text{CO}_3(400 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$
フイン部 断面ミクロ写真 ×400	$\text{Na}_2\text{CO}_3(40 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$	$\text{NaOH}(400 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$

写真-2(3/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性
(熱サイクル試験結果(60サイクル))



伝熱管部
断面ミクロ写真 $\times 400$

写真-2(4/4) ナトリウム化合物の種類及び量による腐食量の依存性
(熱サイクル試験結果(60サイクル))

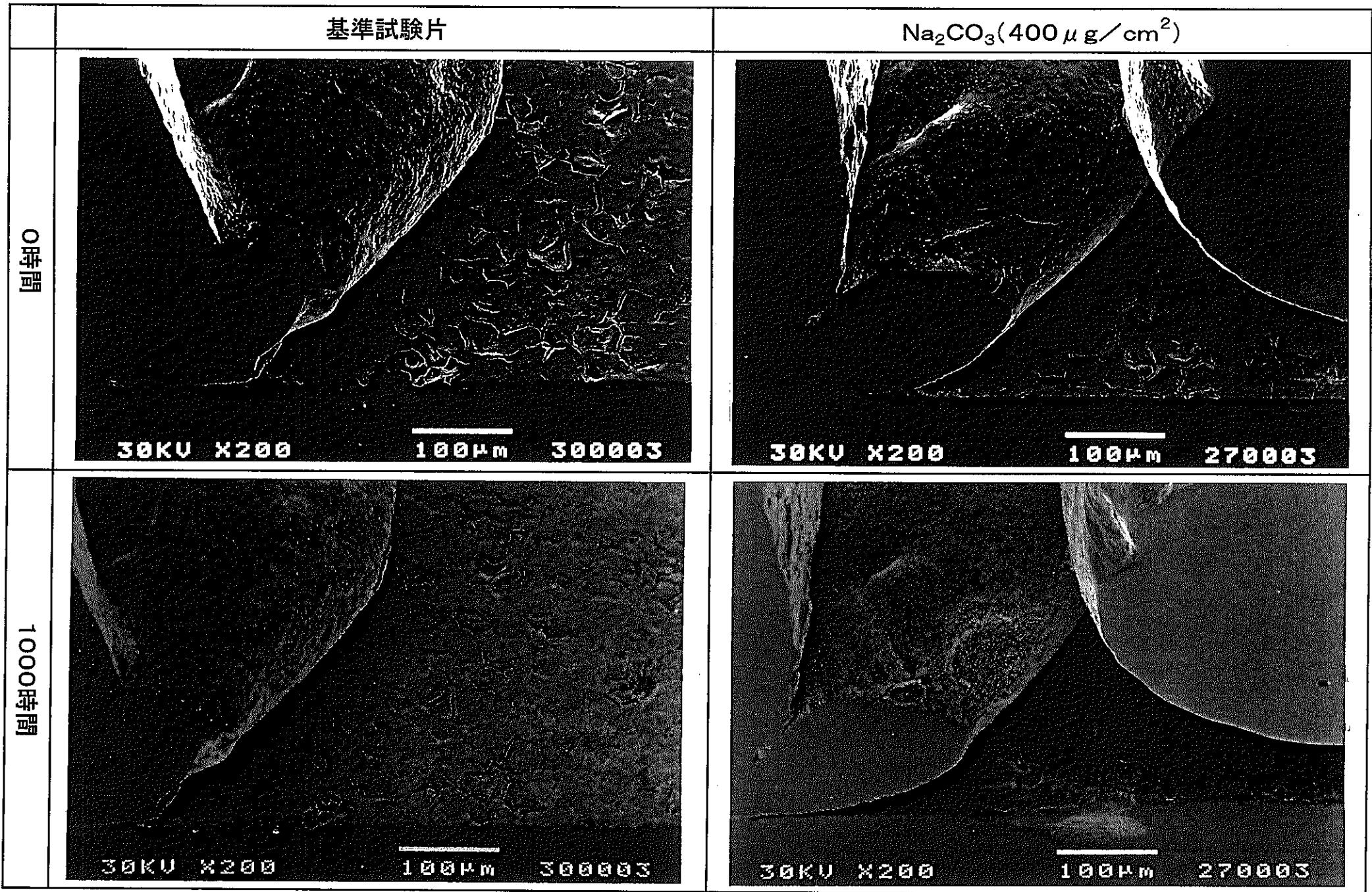


写真-3(1/2) 高温すきま腐食試験結果(断面ミクロ写真 × 400)

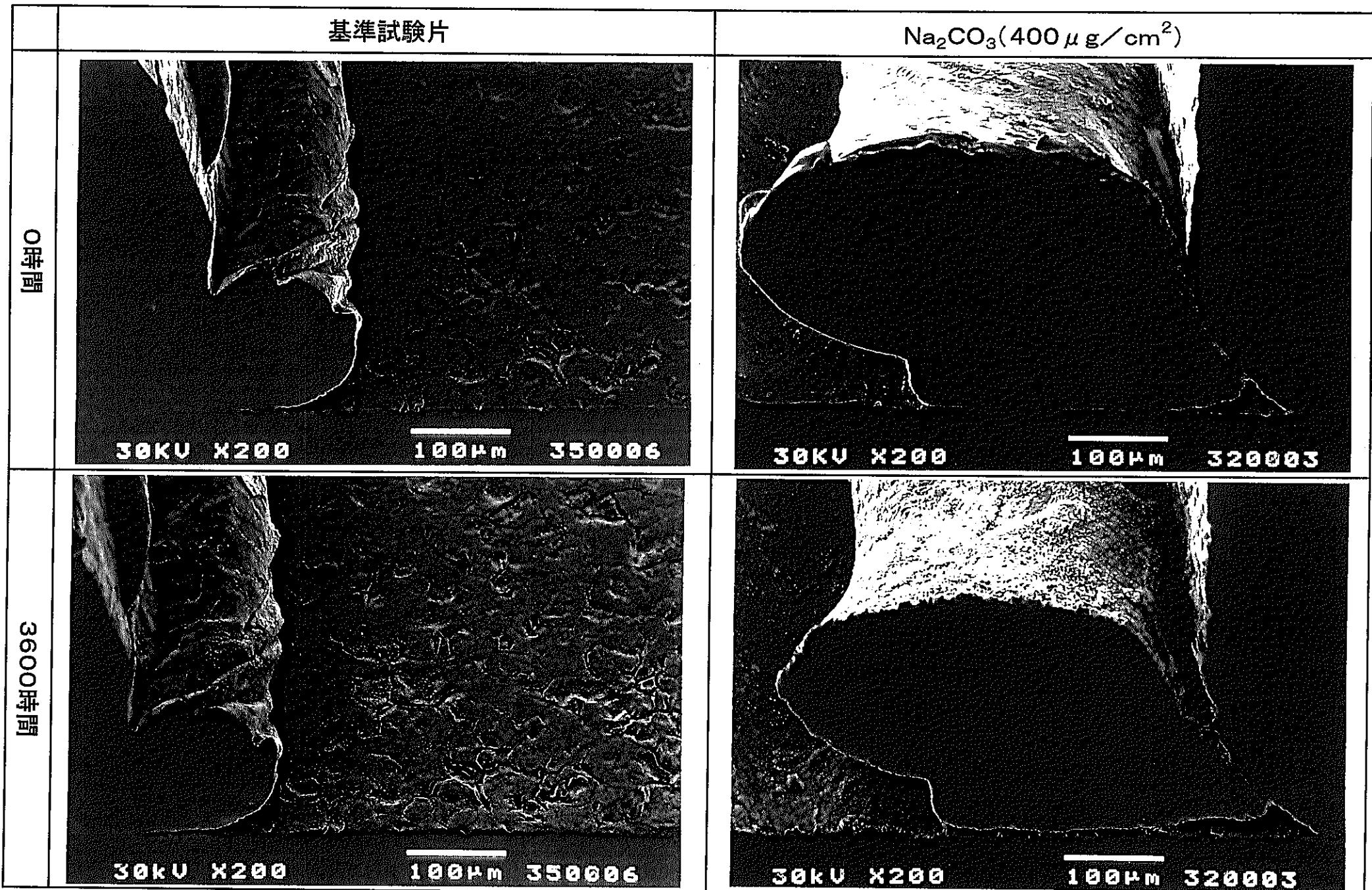


写真-3(2/2) 高温すきま腐食試験結果(断面ミクロ写真 × 400)

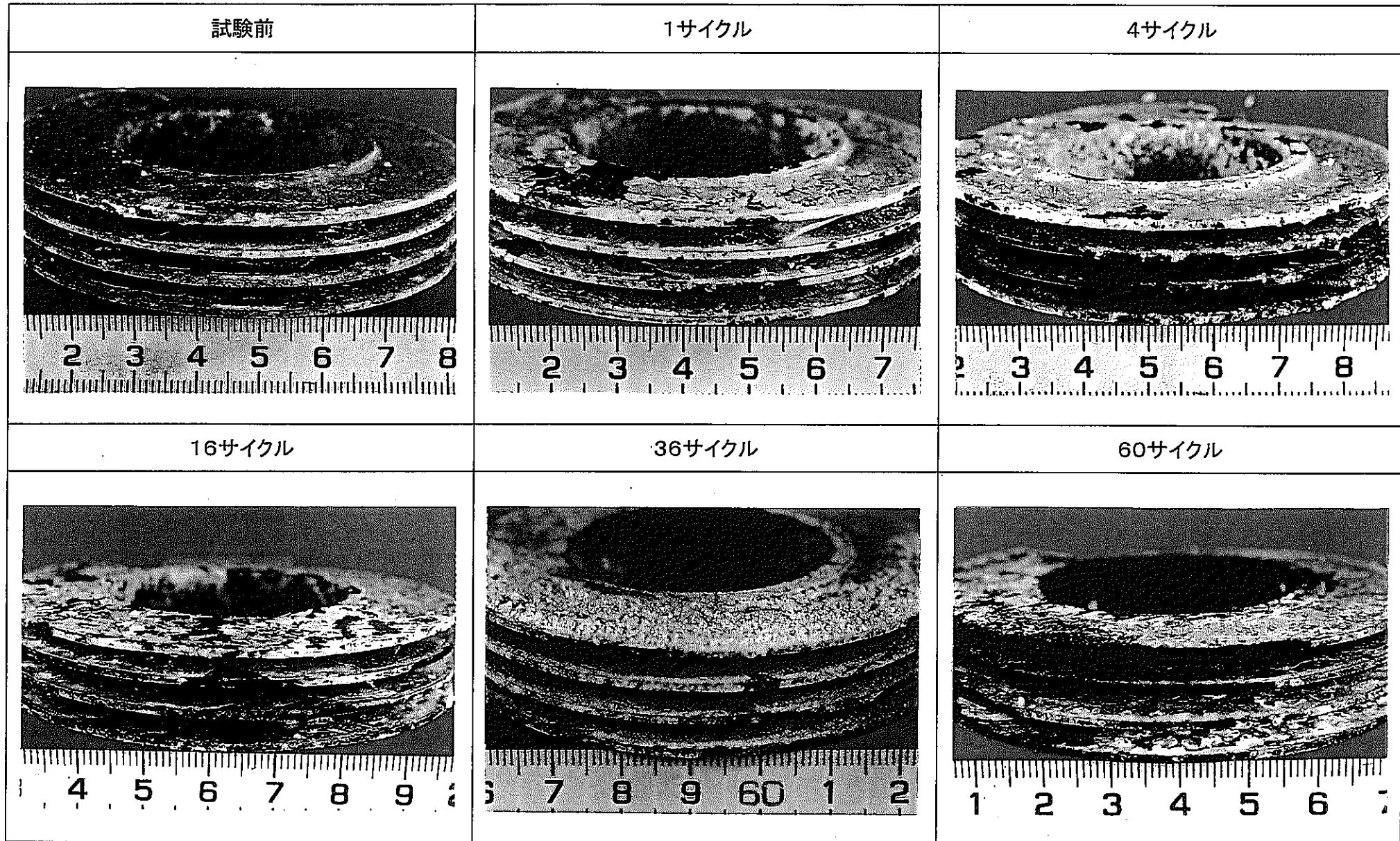
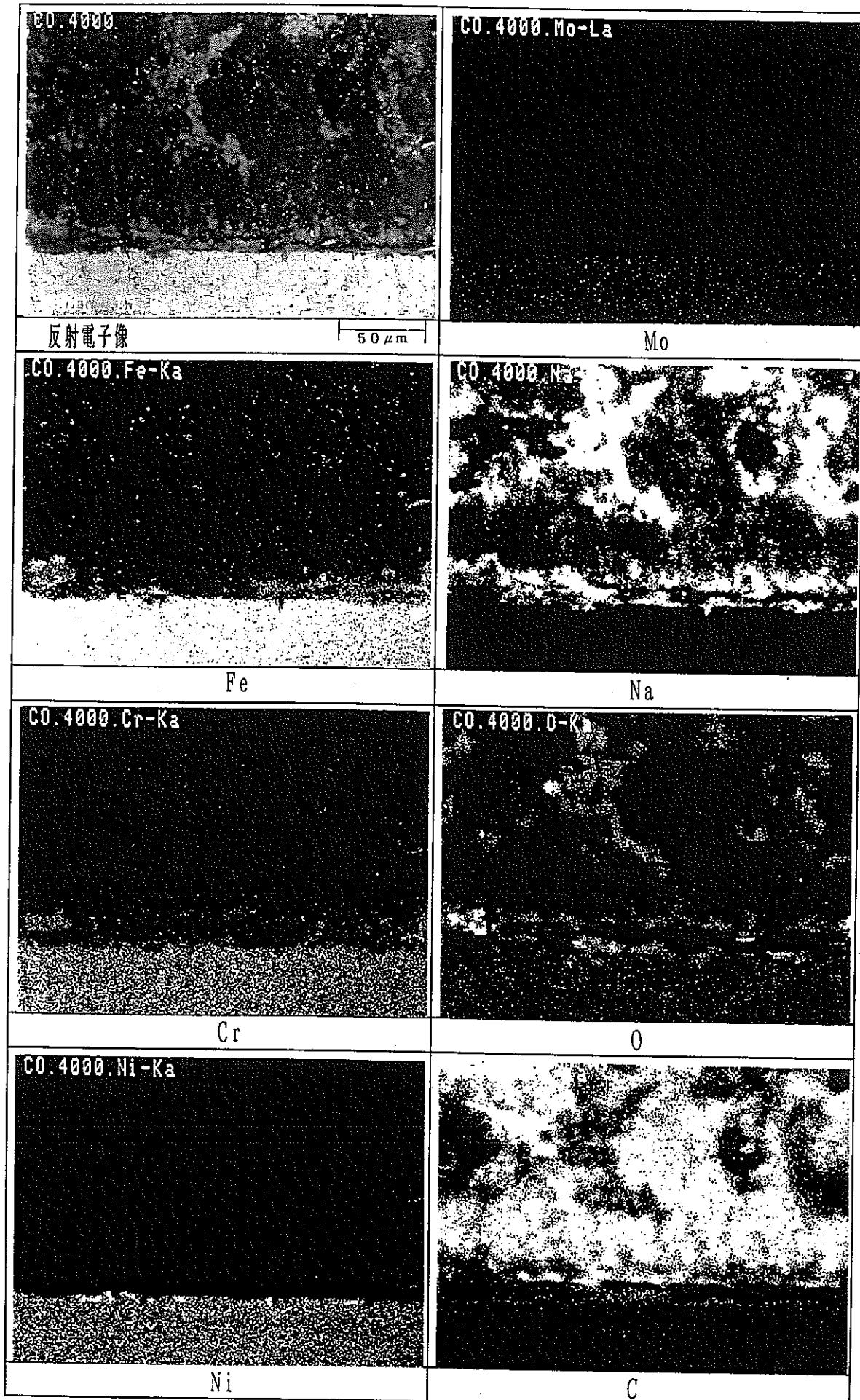


写真-4 热サイクル試験結果(外観写真)
(Na_2CO_3 : $4000 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)



試料: No. Na₂CO₃ 4000 μg/cm² 3600Hr

写真-5 EPMA面分析 (Na₂CO₃ 3600時間)

	0時間	1000時間	3600時間
観察位置: フィン部			
観察位置: 伝熱管部			

写真-6(1/3) 保持時間による腐食量の依存性
 (高温保持試験結果(Na_2CO_3 (400 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、断面ミクロ写真 $\times 400$))

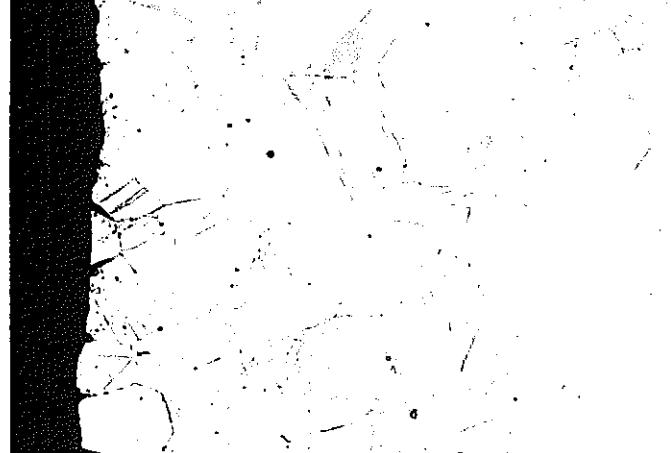
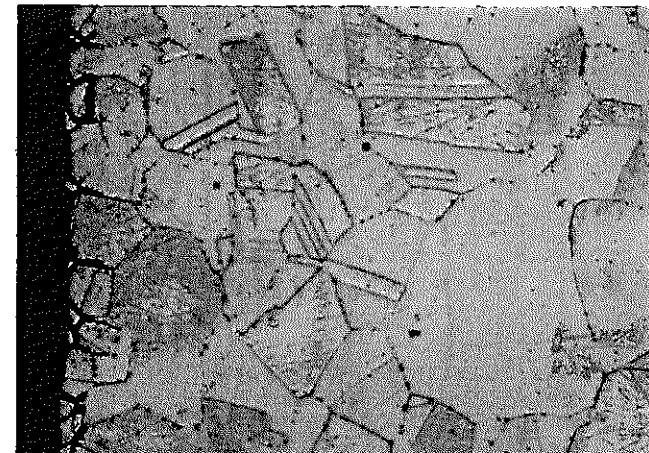
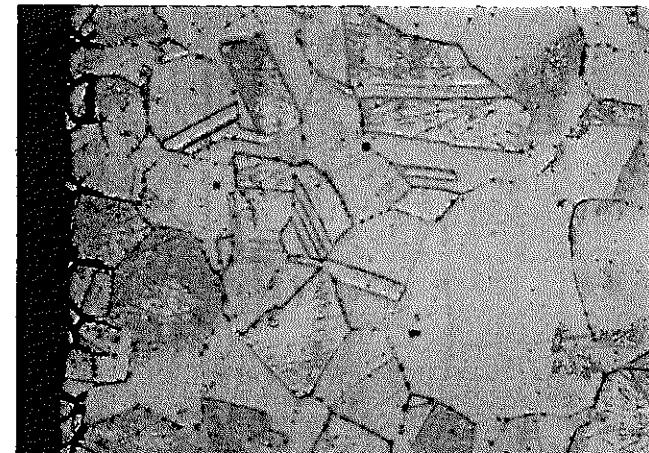
基準試験片	1サイクル(40hr)	16サイクル(640hr)
		
フイン部 断面ミクロ写真 ×400 ()内は、505°Cの保持時間 を示す。	36サイクル(1440hr)	60サイクル(2400hr)
		

写真-6(2/3) 保持時間による腐食量の依存性
(熱サイクル試験結果($\text{Na}_2\text{CO}_3(400 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$))

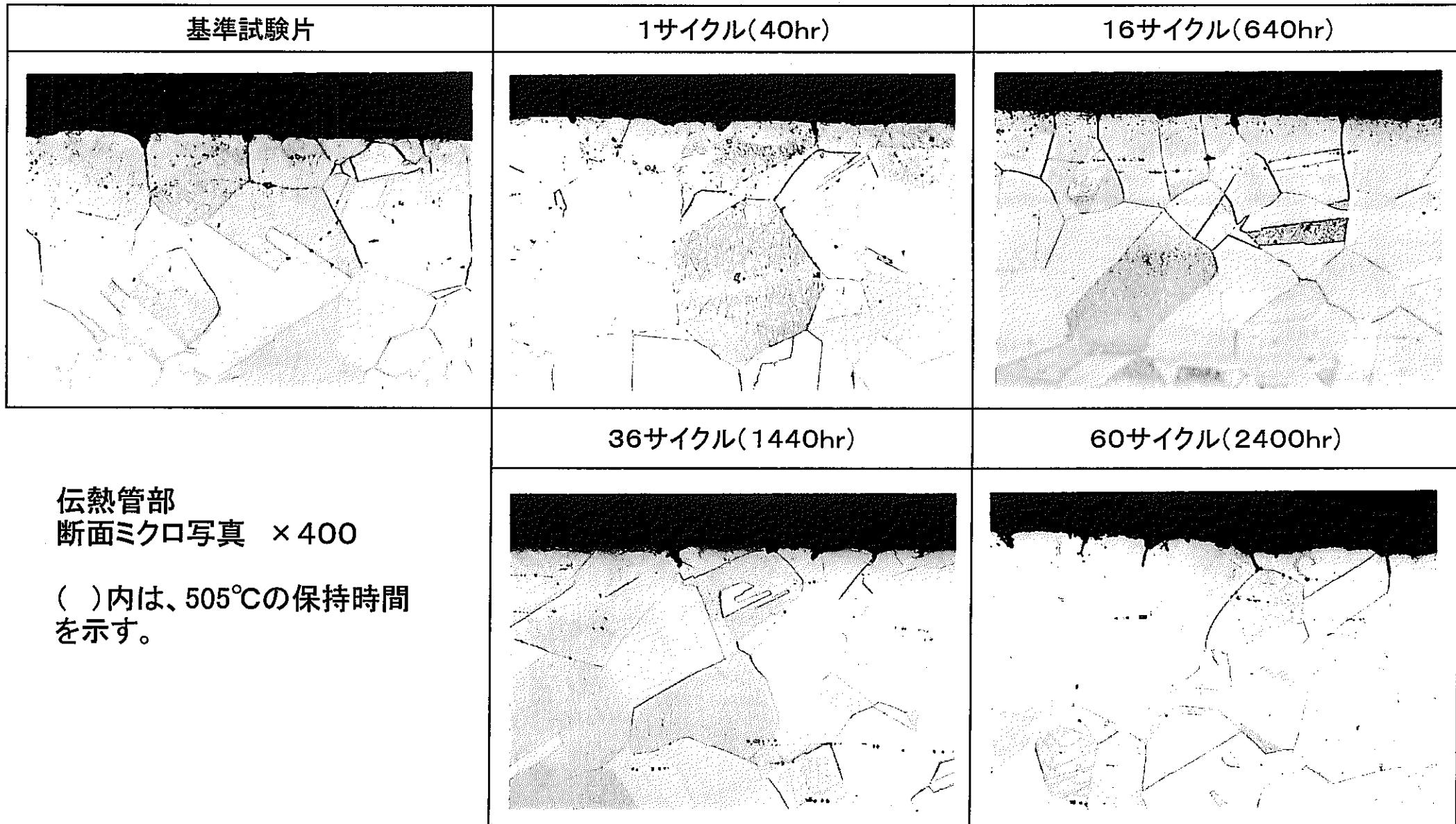


写真-6(3/3) 保持時間による腐食量の依存性
(熱サイクル試験結果($\text{Na}_2\text{CO}_3(400 \mu\text{g}/\text{cm}^2)$))