

## 高速炉蒸気発生器伝熱管の ターゲットウェステージ現象説明実験

－流れを伴う高温水酸化ナトリウム環境での腐食実験－

Phenomenon Elucidation Experiment for Target Wastage Caused  
in Steam Generator of Sodium-cooled Fast Reactor  
-Corrosion Experiment in Flowing High-temperature  
Sodium Hydroxide Environment-

梅田 良太 下山 一仁 栗原 成計

Ryota UMEDA, Kazuhito SHIMOYAMA and Akikazu KURIHARA

高速炉研究開発部門  
大洗研究開発センター  
高速炉技術開発部

Fast Reactor Technology Development Department  
Oarai Research and Development Center  
Sector of Fast Reactor Research and Development

August 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, 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, 2017

## 高速炉蒸気発生器伝熱管のターゲットウェステージ現象解明実験 －流れを伴う高温水酸化ナトリウム環境での腐食実験－

日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター  
高速炉技術開発部

梅田 良太、下山 一仁、栗原 成計

(2017年6月12日 受理)

ナトリウム冷却高速炉(SFR)の蒸気発生器(SG)では、低圧のナトリウムから伝熱管を介して高圧の水/蒸気に熱交換される。その伝熱管が破損して水蒸気が漏えいした場合、発熱反応を引き起こし、ナトリウム中に反応ジェットが形成される(ナトリウム-水反応)。反応ジェットは高温・高圧噴流で高アルカリ環境を形成し、この環境に曝された隣接伝熱管は、局所的な減肉により損傷を受け(ターゲットウェステージ)、SG内での影響範囲が拡大する可能性がある(伝熱管破損伝播)。SFR SGの経済性並びに設計時の安全性・信頼性向上のためには、ナトリウム-水反応の現象論に基づいた解析評価手法の開発が不可欠である。

従来のターゲットウェステージに関する研究開発では、実機SG条件を部分的に模擬したモックアップ試験に基づき、反応ジェットを形成する周囲の環境因子である、初期ナトリウム温度、水漏えい率、破損孔径及び破損孔-ターゲット管距離でウェステージ率が評価されてきた。しかし、この評価アプローチでは、適用条件を越える範囲への適用性(外挿性)に課題が残ることから、現象論に基づいた汎用性の高い評価を行うため、ウェステージ環境に着目した新たな評価手法の開発を進めている。

本報告書では、ターゲットウェステージ現象解明を目的として、ナトリウム-水反応時の主要な反応生成物である高温の水酸化ナトリウムと副次的な生成物である酸化ナトリウム(試料)を用いて、ターゲットウェステージの環境因子(試料温度、衝突速度、試料組成割合等)を分離評価できる実験装置及び実験手法を開発した。また、開発した実験装置を用いて流れを伴う高温水酸化ナトリウム及び酸化ナトリウム環境下における腐食実験を実施し、腐食特性に及ぼすターゲットウェステージの環境因子の影響を定量的に評価するとともに、平均腐食速度を定式化した。

---

本報告書は、エネルギー対策特別会計に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成22年度から平成25年度「蒸気発生器伝熱管破損伝播に係るマルチフィジックス評価システムの開発」の成果を含む。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

**Phenomenon Elucidation Experiment for Target Wastage Caused in Steam Generator  
of Sodium-cooled Fast Reactor  
-Corrosion Experiment in Flowing High-temperature Sodium Hydroxide Environment-**

Ryota UMEDA, Kazuhito SHIMOYAMA and Akikazu KURIHARA

Fast Reactor Technology Development Department  
Oarai Research and Development Center  
Sector of Fast Reactor Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 12, 2017)

In case of the water leak into in a steam generator (SG) of sodium-cooled fast reactors (SFRs) due to tube failure, reaction jet forms highly alkaline environment with high temperature and high pressure, which cause local thinning of adjacent heat transfer tubes (target wastage). In the previous study, target wastage rate has been evaluated by the macroscopic influencing factors based on the mock-up experiment partially simulated the practical SG conditions. However, there remains the problem of applicability for the region exceeding the application range (extrapolation) in this mockup approach. Thus, new evaluation method on target wastage has been developed for high versatility based on phenomenology. In this report, to elucidate the target wastage phenomenon, the authors developed the experimental apparatus and experimental technique which enable the separate evaluation on influence factors of wastage by using high temperature NaOH and Na<sub>2</sub>O. In addition, the impingement corrosion experiments have been conducted by using NaOH and Na<sub>2</sub>O. Based on the corrosive data, authors quantitatively evaluated the influence factors of wastage and formulated the average corrosive equation.

Keywords: Steam Generator, Sodium-water Reaction, Target Wastage, Corrosion

This report describes a part of the entrusted research results of “Development of Evaluation Methods for Multi-Physics Phenomena under Tube Failure Accident in Steam Generator of Sodium-Cooled Fast Reactor.” The work has been conducted in 2010 - 2013 under the contract with Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) as the Special Account for Energy Measurement in Japan.

目 次

1. 序論	1
2. 高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置の開発	2
2.1 実験装置の開発	2
2.1.1 試験部	2
2.1.2 ガス系統	5
2.1.3 ミストトラップ	6
2.1.4 冷却水循環装置	7
2.1.5 制御装置	7
2.2 実験手法（手順）の開発	7
2.2.1 実験前	7
2.2.2 実験	9
2.2.3 後処理	10
3. 実験条件	11
4. 実験結果	13
4.1 静的腐食実験結果	13
4.2 噴射衝突基礎実験結果	15
5. 結論	18
謝辞	19
参考文献	19

Contents

1. Introduction ..... 1

2. Development of flow-accelerated high temperature caustic corrosion experimental equipment ..... 2

    2.1 Development of experimental equipment ..... 2

        2.1.1 Testing component ..... 2

        2.1.2 Gas supplying system ..... 5

        2.1.3 Mist trap ..... 6

        2.1.4 Cooling water circulation system ..... 7

        2.1.5 Control system ..... 7

    2.2 Development of experimental method ..... 7

        2.2.1 Before the experiment ..... 7

        2.2.2 Experiment ..... 9

        2.2.3 Post experimental treatment ..... 10

3. Experimental conditions ..... 11

4. Experimental results ..... 13

    4.1 Static corrosion experiment ..... 13

    4.2 Injection experiment ..... 15

5. Conclusion ..... 18

Acknowledgement ..... 19

References ..... 19

表リスト

表 1	試験カプセル仕様	20
表 2	供試体の材料データ	20
表 3	静的腐食実験条件	21
表 4	噴射衝突基礎実験条件	22
表 5	計測項目(静的腐食実験)	23
表 6	計測項目(噴射衝突基礎実験)	24
表 7.1	静的腐食実験結果(平均腐食速度等)	25
表 7.2	静的腐食実験結果(形状データ)	26
表 7.3	静的腐食実験結果(平均腐食速度等)	27
表 7.4	静的腐食実験結果(形状データ)	28
表 8.1	噴射衝突基礎実験結果(試料組成割合、試料封入量、温度、圧力、噴射時間等)	29
表 8.2	噴射衝突基礎実験結果(供試体質量、腐食速度等の結果)	30

図リスト

図 1	高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置 フロー図	31
図 2	静的腐食実験熱電対設置箇所(概略図)	32
図 3	静的腐食実験熱電対設置箇所(詳細図)	33
図 4	静的腐食実験用試験カプセル(小容量型)	34
図 5	静的腐食実験用試験カプセル(大容量型)	35
図 6	噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(概略図)	36
図 7	噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(詳細図 1)	37
図 8	噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(詳細図 2)	38
図 9	噴射衝突基礎実験用試験カプセル(小容量型)	39
図 10	噴射衝突基礎実験用試験カプセル(大容量型)	40
図 11	静的腐食実験用供試体	41
図 12	噴射衝突基礎実験用供試体	41
図 13	蒸気回収フィルター	42
図 14.1	静的腐食実験結果(HC-Case11)	43
図 14.2	静的腐食実験結果(HC-Case11)(時間軸拡大)	44
図 15	実験前後の供試体外観(HC-Case4)	45
図 16	実験前後の供試体外観(HC-Case5)	46
図 17	実験前後の供試体外観(HC-Case7)	47
図 18	実験前後の供試体外観(HC-Case8)	48
図 19	実験前後の供試体外観(HC-Case9)	49
図 20	実験前後の供試体外観(HC-Case10)	50

図 21	実験前後の供試体外観(HC-Case11)	51
図 22	実験前後の供試体外観(HC-Case12)	52
図 23	実験前後の供試体外観(HC-Case13)	53
図 24	実験前後の供試体外観(HC-Case14)	54
図 25	実験前後の供試体外観(HC-Case15)	55
図 26	実験前後の供試体外観(HC-Case16)	56
図 27	実験前後の供試体外観(HC-Case17)	57
図 28	NaOH 単体試料環境における平均腐食速度	58
図 29	NaOH-Na <sub>2</sub> O 混合試料環境における平均腐食速度	59
図 30	噴射衝突基礎実験結果(PC-Case21)	60
図 31	実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 600℃)	61
図 32	実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 800℃)	62
図 33	実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 1000℃)	65
図 34	実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 1200℃)	67
図 35	噴射衝突基礎実験の腐食速度算出方法の模式図	68
図 36	腐食速度と衝突速度の結果	69
図 37	腐食速度に対する速度依存性	70
図 38	温度ごとの腐食速度に対する速度依存性	70
図 39	アレニウスプロットした速度依存性	70

Tables list

Table 1	Specifications of test capsules .....	20
Table 2	Mill sheet of the test piece .....	20
Table 3	Experimental conditions of static corrosion experiment .....	21
Table 4	Experimental conditions of impinging experiment .....	22
Table 5	Measurement items(Static corrosion experiment) .....	23
Table 6	Measurement items(Impinging experiment) .....	24
Table 7.1	Experimental result of static corrosion experiment(Average corrosion rate) .....	25
Table 7.2	Experimental result of static corrosion experiment(Shape data) .....	26
Table 7.3	Experimental result of static corrosion experiment(Average corrosion rate) .....	27
Table 7.4	Experimental result of static corrosion experiment(Shape data) .....	28
Table 8.1	Experimental result of impinging experiment(Results of sample composition ratio, sample inclusion amount, temperature, pressure, injection time etc.)-	29
Table 8.2	Experimental result of impinging experiment(Results of specimen mass, corrosion rate etc.) .....	30

Figures list

Fig.1	Flow diagram of flow accelerated high temperature caustic corrosion test facility .....	31
Fig.2	Thermocouple installation location of static corrosion experiment(Outline) .....	32
Fig.3	Thermocouple installation location of static corrosion experiment(Detail) .....	33
Fig.4	Test capsules for static corrosion experiment(Small capacity) .....	34
Fig.5	Test capsules for static corrosion experiment(Large capacity) .....	35
Fig.6	Thermocouple installation location of impinging experiment(Outline) .....	36
Fig.7	Thermocouple installation location of impinging experiment(Detail 1) .....	37
Fig.8	Thermocouple installation location of impinging experiment(Detail 2) .....	38
Fig.9	Test capsules for impinging experiment(Small capacity) .....	39
Fig.10	Test capsules for impinging experiment(Large capacity) .....	40
Fig.11	Specimen for static corrosion experiment .....	41
Fig.12	Specimen for impinging experiment .....	41
Fig.13	Vapor recovery filter .....	42
Fig.14.1	The experimental results of static corrosion(HC-Case11) .....	43
Fig.14.2	The experimental results of static corrosion(HC-Case11) (Expand time axis) .....	44

Fig.15	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case4)	45
Fig.16	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case5)	46
Fig.17	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case7)	47
Fig.18	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case8)	48
Fig.19	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case9)	49
Fig.20	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case10)	50
Fig.21	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case11)	51
Fig.22	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case12)	52
Fig.23	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case13)	53
Fig.24	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case14)	54
Fig.25	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case15)	55
Fig.26	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case16)	56
Fig.27	Surface of the specimen before and after the experiment(HC-Case17)	57
Fig.28	Average corrosion rate in NaOH	58
Fig.29	Average corrosion rate in NaOH·Na <sub>2</sub> O	59
Fig.30	The experimental results of impinging experiment(PC-Case21)	60
Fig.31	Surface of the specimen before and after the experiment(Sample/Specimen temperature 600°C)	61
Fig.32	Surface of the specimen before and after the experiment(Sample/Specimen temperature 800°C)	62
Fig.33	Surface of the specimen before and after the experiment(Sample/Specimen temperature 1000°C)	65
Fig.34	Surface of the specimen before and after the experiment(Sample/Specimen temperature 1200°C)	67
Fig.35	Schematic diagram of corrosion rate calculation method of impinging experiment	68
Fig.36	Result of corrosion rate and impinging speed	69
Fig.37	Rate dependence on corrosion rate	70
Fig.38	Rate dependence on corrosion rate per temperature	70
Fig.39	Rate of dependence on Arrhenius plot	70

## 1. 序論

ナトリウム冷却高速炉(Sodium-cooled Fast Reactor、以下 SFR)の蒸気発生器(Steam Generator、以下 SG)では、低圧のナトリウム(以下 Na)から伝熱管を介して高圧の水/蒸気に熱交換される。その伝熱管が破損して水蒸気が漏えいした場合、発熱反応を引き起こし、Na 中に反応ジェットが形成される(Na-水反応)。Na-水反応時の主要な生成物は、菊地ら<sup>1)</sup>によって水酸化ナトリウム(以下 NaOH)及び酸化ナトリウム(以下 Na<sub>2</sub>O)であることが確認されている。反応ジェットは高温・高圧噴流で高アルカリ環境を形成し、局所的に破損口からの噴出速度(水蒸気臨界速度)が約 600m/s、隣接伝熱管表面近傍の液相平均速度が 30m/s 相当<sup>2)</sup>となり、伝熱管材料に受ける反応温度は 900℃相当<sup>3)</sup>となる。この環境に曝された隣接伝熱管は、局所的な減肉により損耗を受け(ターゲットウェステージ)、SG 内での影響範囲が拡大する可能性がある(伝熱管破損伝播)。SFR SG の経済性並びに設計時の安全性・信頼性向上のためには、Na-水反応の現象論に基づいた解析評価手法の開発が不可欠である。

従来のターゲットウェステージに関する研究開発では、下山ら<sup>4)</sup>による高クロム系 SG 伝熱管溶接部のウェステージ特性評価において、実機 SG 条件を部分的に模擬したモックアップ試験に基づき、反応ジェットを形成する周囲の環境因子である、初期 Na 温度、水漏えい率、破損孔径及び破損孔・ターゲット管距離でウェステージ率が評価されてきた。しかし、この評価アプローチでは、適用条件を越える範囲への適用性(外挿性)に課題が残ることから、現象論に基づいた汎用性の高い評価を行うため、ウェステージ環境に着目した新たな評価手法の開発を進めている<sup>5)</sup>。

ターゲットウェステージ現象は、反応ジェットに随伴される高温 NaOH 等による液滴衝突のエロージョン(Liquid Droplet Impingement erosion、以下 LDI)作用と、流れを伴う複合酸化型腐食(Composite Oxidation-type Corrosion with Flow、以下 COCF)促進作用が重畳して生じると考え、本研究ではターゲットウェステージ環境に及ぼす局所的な環境因子を定量評価するために分離効果実験を実施した。

本報告書では、Na-水反応時の主要生成物である高温の NaOH と副次的な生成物である Na<sub>2</sub>O の試料を用いて、NaOH のみの単体試料環境及び NaOH と Na<sub>2</sub>O の混合試料環境にて COCF の促進作用に着目した噴射基礎実験手法について検討した。噴射基礎実験では、実機 SG の伝熱管と同材である供試体を浸漬させ、静定状態で実験を行う静的腐食実験と、供試体に噴射・衝突させて COCF の促進作用を模擬した噴射衝突基礎実験の手法を検討した。また、これらの実験手法を用いて静的腐食実験では腐食速度に対する試料/供試体温度、試料組成割合の影響を、噴射衝突基礎実験ではそれらに加え、試料衝突速度の影響を定量評価するとともに、平均腐食速度を定式化した結果について述べる。

## 2. 高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置の開発

Na-水反応時の COCF に対する主要な環境因子は、反応生成物である NaOH と Na<sub>2</sub>O の組成割合、伝熱管周囲での反応生成物の流体速度及び反応生成物やウェステージ面での温度であり、これらをできるだけ分離評価するために、高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置(Flow AcceLerated high temperature caustic COrrOsion test rig、以下 FALCO)を開発した。FALCO では、試料となる NaOH-Na<sub>2</sub>O を反応ジェットと同等の高温条件にて、実機 SG の伝熱管と同材である供試体を浸漬させて静定状態で実験を行う、静的腐食実験(High-temperature static Corrosion、略称 HC)と試料を供試体に噴射・衝突させて COCF の促進作用を模擬した噴射衝突基礎実験(Pressurized impingement Corrosion、略称 PC)の 2 種類の実験が可能である。

### 2.1 実験装置の開発

図 1 に FALCO のフロー図を示す。FALCO は、試験部、ガス系統、放出系(ミストトラップ)、冷却水循環装置及び制御装置等で大別される。試験部は試験カプセル、加熱装置、保護管及び窓板、実験チャンバー及び供試体等で構成され、実験準備時の組立作業や実験後における分解作業が容易に行えるようスウェージロック製継手を採用している。また、ガス系統は主にカバーガス供給系統(真空・加圧)、試験ガスライン、赤外線加熱炉保護ガス系で構成される。

#### 2.1.1 試験部

##### (1) 静的腐食実験用試験カプセル

静的腐食実験用試験カプセルの仕様を表 1 に示す。試験カプセルに設置した熱電対設置箇所を概略を図 2 に、その詳細を図 3 に示す(代表として HC-Case11 を示す)。試験カプセルは、実験時に高温の試料と供試体(2.1.1(7)項)を封入するための容器で、全体を赤外線加熱炉(2.1.1 (3)項)の上部より出し入れできる。試験カプセル外表面の加熱部中心(TI-2)と試料液面近傍(TI-3)に R 型シース熱電対を、試験カプセル外表面の上部(TE-6)及び供試体最下部近傍(TE-7)に K 型シース熱電対(測温部)を SUS 箔でスポット溶接にて固定している。加熱部中心(TI-2)に設置した熱電対は赤外線加熱炉の温度制御を行う。また、試験カプセル外表面上部(TE-6)と同じ高さにおいて、赤外線加熱炉内上部雰囲気温度(TE-2)を K 型シース熱電対で計測し、制御熱電対の剥離による異常過熱を監視できるようにした。試験カプセル上部には、試験カプセル内部のカバーガス圧力を測定する圧力計と、真空置換時に計測する連成圧力計を設置した。試験カプセルには、ガス系統(2.1.2 項)及び放出系のミストトラップ(2.1.3 項)を接続している。

実験環境において、試験カプセルの腐食等による試料の疲弊状態を把握するため、試料封入量を 70g から 200g まで変化させた実験が必要となる。そのため、試料封入量に合わせた小容量型(図 4)及び大容量型(図 5)の試験カプセルを採用した。

## (2) 噴射衝突基礎実験用試験カプセル

噴射衝突基礎実験用試験カプセルの仕様を表 1 に示す。試験カプセルに設置した熱電対設置箇所の概略を図 6 に、その詳細を図 7 及び図 8 に示す(代表として PC-Case21 を示す)。試験カプセル下部に試料を供試体(2.1.1 (7)項)に噴射させる噴射ノズルを設けた点が、静的腐食実験用試験カプセルとの違いである。また、噴射ノズル部の温度が雰囲気で冷却され試料が閉塞しないように、噴射ノズル加熱用にボビンヒータを取付けた。噴射ノズル部の中心部には、ボビンヒータの温度制御用に R 型シース熱電対を設置した。噴射ノズル部先端には、実験チャンバー上部の雰囲気温度を計測するために K 型シース熱電対を設置した。その他の熱電対については静的腐食実験と同様である。

試験カプセル内部には整流用の多孔板を設け、先細のノズル形状にした。実験開始前に噴射ノズル部から試料が漏えいしないように、かつ適切に噴出・停止操作を行うことができるように噴射ノズル部には長軸の弁型(弁棒)の噴射機構を設けた(ノズル弁駆動機構)。長軸システムの高温座屈を抑制するために、その駆動には微圧エアシリンダを採用した。

静的腐食実験の結果を踏まえて試料封入量は 100g を基本とした。また、念のため試料の疲弊及びエロージョンがどの程度作用しているかを把握するため、静的腐食実験での最大条件である 200g の試料質量で実験を実施した。そのため、試料封入量に合わせて小容量型(図 9)及び大容量型(図 10)の試験カプセルを準備した。

## (3) 加熱装置

本実験装置には、供試体加熱用の赤外線集光加熱炉、試験カプセル加熱用の赤外線加熱炉及び噴射ノズル加熱用のボビンヒータの 3 種類の加熱装置を取付けた(図 1、図 6、図 7)。

### ①赤外線集光加熱炉

赤外線集光加熱炉(アルバック理工製 HSH-φ200-MR-100(100V-2kW))は実験チャンバー(2.1.1(5)項)下部に設置され、実験チャンバーの試料台に置かれた供試体(2.1.1(7)項)だけを最高 1300℃まで加熱する能力を有する。本加熱炉は噴射衝突基礎実験においてのみ使用され、供試体に挿入した R 型シース熱電対により温度制御を行った。また、赤外線集光加熱炉の内部を水冷するため、冷却水循環装置(2.1.4 項)を設置した。

(赤外線集光加熱炉仕様)

名称	:ハロゲンスポットヒータ集光型
最大温度上昇速度	:100℃/min (SUS304 の外径 40mm×肉厚 2mm の供試体に対して)
冷却水量	:4.5L/min 以上
冷却エア	:0.3MPa 以上
動作電力	:200V,3.5kVA
全長/ミラー長/ミラー幅	:210mm/110mm/外径 200mm
照射距離/照射幅	:100mm/外径 50mm
ヒータ容量	:2000W

## ②赤外線加熱炉

赤外線加熱炉(アルバック理工製 P610CP 特型)は試験カプセル内の試料及び静的腐食実験時の供試体を最高 1300℃まで加熱する能力を有する。また、赤外線加熱炉内部は、赤外線集光加熱炉と共用の冷却水循環装置によって水冷され、加熱炉ランプの温度上昇による破損防止をするため空気冷却用の配管を接続した。試験カプセルを不活性雰囲気中に保ちながら赤外線加熱を行うため、赤外線加熱炉と試験カプセルの間に保護管(2.1.1(4)項)を取付けた。実験前には保護管と試験カプセルの間から実験チャンバー内を真空引きし、アルゴン(以下 Ar)ガスで置換した。Ar ガスはガス系統(2.1.2 項)より供給される。

(赤外線加熱炉仕様)

名称	:赤外線ゴールドイメージ炉
最大温度上昇速度	:100℃/min (SUS304 の外径 40mm×肉厚 2mm の供試体に対して)
最大投入電圧/消費電力	:200V/12kW
冷却水量	:4.5L/min 以上(カタログ値 6L/min)
冷却エア	:0.3MPa 以上
動作電力	:200V,18kVA(ランプ 1 本の電力 3kW×ランプの本数 6 本)
全長/発光長	:361mm/265mm

## ③ボビンヒータ

ボビンヒータは試験カプセルの噴射ノズル部を加熱するためのヒータで、実験チャンバーの上部に固定される。ボビンヒータは、アルミナ製の円筒の外周に直径 0.3mm の白金-ロジウム線を巻いたもので、常用最大温度 1200℃、ヒータ容量 1500W で加熱できる。

(ボビンヒータ仕様)

最大温度上昇速度	:10℃/min 以下
室温時の抵抗	:約 7Ω(直径 0.3mm の白金-ロジウム線)
動作電力	:160V(最大 18kVA)
全長/外径	:180mm/24mm
材質	:アルミナ(ボビン)、白金-ロジウム線(ヒータ)

## (4) 保護管及び窓板

保護管(全長 512mm、外径 80mm、肉厚 3mm、材質石英ガラス)によって試験カプセル加熱部の外部境界を作り、実験体系(試験カプセルから実験チャンバー)内部を Ar ガス雰囲気に保った。なお、この保護管の最高使用圧力は 0.2MPa である。保護管は赤外線加熱炉の上部水冷ジャケットと下部水冷ジャケットの間に設置される(図 6、図 7)。

また、赤外線を透過する窓板(外径 150mm、肉厚 8.5mm、材質石英ガラス)を用いて実験チャンバーの外部境界を作り、その内部を Ar 雰囲気に保持した(図 8)。

## (5) 実験チャンバー

実験チャンバー(外径 410mm、高さ 88mm、材質 SUS304)は噴射衝突基礎実験を実施する小規模の実験室であり、冷却用の水冷設備、保護管を固定する治具、供試体を高速度カメラで撮影するための二つの観察窓(外径 40mm、肉厚 4mm、材質石英ガラス)及びミストトラップを取付けた(図 1、図 6)。さらに、実験チャンバー内の雰囲気 Ar ガスに置換できるようにガス系統に接続している。実験チャンバーにはチャンバー内の圧力及び温度を測定するために連成圧力計及び K 型シース熱電対を取付けた。

## (6) 試料台

試料台(外径 292mm、高さ 29mm、材質 SUS304)は供試体の固定台であり、実験チャンバーの下部に設置される(図 1、図 6、図 8)。試験カプセルから噴射された試料が、試料台と供試体の隅間を介して赤外線集光加熱炉側への侵入しないようにシール構造(耐圧 0.2MPa)となっている。また、窓板と試料台との間の閉空間を真空引きし、Ar ガスで置換できるようにガス系統に接続され、空間内の圧力を測定するための連成圧力計を取付けた。供試体の着脱及び実験後の洗浄が簡単に行えるよう、アタッチメント式の供試体押え板を設けた(図 8)。

## (7) 供試体

### ① 静的腐食実験用

図 11 に静的腐食実験用の供試体を示す。供試体は 15mm 角、肉厚 3mm の直方体で、中心部には固定用のステムに通すために直径 7mm の孔を設けた。供試体の材料は改良 9Cr-1Mo 鋼で、表 2(1)に化学成分データを、表 2(2)に引張試験データを示す。

### ② 噴射衝突実験用

図 12 に噴射衝突基礎実験用の供試体を示す。供試体は直径 30 mm、厚さ 2 mm の円盤型であり、供試体側壁には熱電対を挿入するために直径 1.0mm、深さ 15mm と 10mm の孔を設けた。静的腐食実験用供試体と同じ改良 9Cr-1Mo 鋼を用いた。

供試体中央の衝突点直下(深さ 15mm)まで挿入した R 型シース熱電対によって、赤外線集光加熱炉の温度制御を行うとともに、実験時に試料が衝突した際の表面温度を推定した。また、供試体の径方向の温度分布を把握するため、K 型シース熱電対を深さ 10mm まで挿入した。

## 2.1.2 ガス系統

ガス系統は、真空排気系統、カバーガス供給系統(試験ガスラインも含む)、赤外線加熱炉保護ガス系、赤外線ランプ保護用空気供給系、エア作動弁用空気供給系の 5 系統からなる(図 1)。

**(1) 真空排気系統**

真空排気系統は、実験装置(ここでは保護管内部から実験チャンバー内部の閉空間)内部を真空引きするための設備であり、真空ロータリーポンプ(アルバック理工製 GLD-136C)、真空破壊弁等で構成される。実験時には、実験装置内部を 10Pa 以下まで減圧する(図 1)。

実効排気速度	:135L/min
到達圧力	: $6.7 \times 10^{-2}$ Pa
電源	:単相 AC100V-120V
質量	:26kg
外形寸法	:全長 488mm×幅 170mm×高さ 250mm

**(2) カバーガス供給系統(試験ガスライン)**

カバーガス供給系統は真空引きした実験装置内部へ Ar ガスを供給するための設備であり、高圧 Ar ガス供給系(20MPa)と一般 Ar ガス供給系(15MPa)で構成される。配管、継手、弁等はスウェージロック製で、外径 6.35mm の SUS 製を使用した。

本系統は試験カプセル内を実験条件まで加圧する試験ガスラインを兼ねている(図 1)。

**(3) 赤外線加熱炉保護ガス系**

赤外線加熱炉保護ガス系は、赤外線集光加熱炉及び赤外線加熱炉の雰囲気 Ar ガスを調整するための設備であり、一般 Ar ガス供給系(15MPa)に接続される。カバーガス供給系統と同じ配管、継手及び弁類を使用している(図 1)。

**(4) 赤外線ランプ保護用空気供給系**

赤外線ランプ保護用空気供給系は、赤外線加熱炉を熱的な損傷から保護するための空気冷却設備である。試験用プレハブ外部に設置されたスクロールコンプレッサー(アネスト岩田製 SLP-22EB)から圧縮空気(吹出し圧力 0.65~0.8MPa、吹出し空気量 250L/min)を供給することができる。同時に冷却エア圧力「低」信号により、加熱装置が自動停止する仕組みとなっている(図 1)。

**(5) エア作動弁用空気供給系**

エア作動弁用空気供給系は、空気作動式弁を駆動させる圧縮空気を供給する設備であり、エア作動弁用空気供給系用のベビーコンプレッサー(日立産機システム製 0.2LE-8S)より圧縮空気(吹出し圧力 0.8MPa、吹出し空気量 20L/min)を供給する(図 1)。

**2.1.3 ミストトラップ**

実験運転や実験時に発生する NaOH 等(ミスト)を回収するため、試験カプセル用ミストトラップ(MT-1)と実験チャンバー用ミストトラップ(MT-2)(それぞれ、外径 216.3mm、高さ 500mm、容積約 18L、材質 SUS304)を設置した(図 1)。MT-1 は試料を封入した試験カプセ

ルの昇温中に生じるミストを、MT-2 は試験カプセルから供試体及び実験チャンバーへ試料を噴射した際に生じるミストを捕集する役割を有する。また、実験前にはミストトラップ内に水を封入してミストを希釈する役割を有する。

さらに屋外には、MT-1 及び MT-2 で回収しきれなかったミストを蒸気回収フィルター(外径 610mm、高さ 882mm、容積約 210L、材質 SUS304)へ導く仕組みとなっている(図 13)。蒸気回収フィルターは容器内部に充填した水をポンプで循環させ、スプレーノズルを用いてデミスター全体を湿らせる構造となっている。ミストはデミスター下部から侵入し、湿り気のあるデミスターを通過させて回収する装置である。

#### 2.1.4 冷却水循環装置

冷却水循環装置は赤外線集光加熱炉、赤外線加熱炉及び実験チャンバーを水冷するための設備であり、冷却水循環装置(オリオン機械製 RKED2200A-V)及び各加熱炉への冷却水配管で構成される(図 1)。冷却水配管にフローモニターが設置されており、規定量(流量 28L/min)の冷却水を流すことができるとともに冷却水流量「低」信号により、加熱装置が自動停止する仕組みとなっている。

(冷却水循環装置仕様)

冷却能力	:7.9kW
質量	:240kg(水槽空)
電源	:三相 200V±10%
電源容量	:6.9kVA
外形寸法	:全長 960mm×幅 730mm×高さ 1440mm

#### 2.1.5 制御装置

本装置の運転制御機能は試験用プレハブ内の制御盤等に集約され、各加熱装置の温度制御、試験カプセル噴射機構の駆動操作、空気作動式弁の開閉操作及び真空ポンプの ON-OFF 操作等を行うことができる。また、制御盤には、保護管内、実験チャンバー内、試験カプセル内の温度・圧力等の表示器を設置し、監視機能も具備している。制御用熱電対の剥離などによる加熱装置の異常過熱等に対しては、自動インターロックが作動し、安全に装置を停止することができる。

## 2.2 実験手法(手順)の開発

FALCO を用いた実験手法(手順)を以下に示す。

### 2.2.1 実験前

#### (1) 供試体

初めに供試体をアセトンで洗浄し、表面に付着した油脂等の不純物を除去した。その後、静的腐食実験用供試体の肉厚(矩形の角部 4 箇所)及び穴径(縦及び横 2 方向)、並びに噴射衝突基礎実験用供試体の肉厚(21 箇所)及び外径(2 方向)を、マイクロメータ(ミットヨ製

M110-25 及び M15-25)及びノギス(ミットヨ製 N15)を用いて計測した。さらに、卓上型万能投影機(ニコン製 V-12BSC)を用いて肉厚及び寸法測定を実施するとともに、3次元測定器(キーエンス製 KS-1100 及び LK-G32)による3次元形状測定を実施した。実験前には、精密天秤(メトラー・トレド製 AT21、最小目盛 1 $\mu$ g)を用いて供試体質量を3回測定し、その平均値を初期質量と定義した。これらの測定が終了した後に再度供試体をアセトンにて洗浄した。

噴射衝突基礎実験用の供試体には、前述(2.1.1(7)②)した位置に熱電対を設置し、供試体を試料台ホルダーに置いて供試体押え板で固定し、この試料台を実験チャンバーに取付けた。この後、試料が赤外線集光加熱炉へ侵入しないようにSUS箔で隙間を覆った。実験チャンバーには試料の外部漏えいを防ぐためにSUS板の堰を設置した。

## (2) 試験カプセル

超音波厚さ計(OLYMPUS 製 35DL)を用いて、試験カプセルの周方向(2箇所)、軸方向(9箇所)で肉厚を測定するとともに胴部の外径を測定し、実験前後における減肉や変形の有無を確認した。さらに、試験カプセル内部の不純物や異物を除去するため、アセトンで洗浄した。同時に噴射衝突基礎実験用の試験カプセルは、噴射ノズル部から試料がコラム状に噴射するようにアセトンを用いて洗浄した。内部洗浄が終了した後、試験カプセル外表面に熱電対を設置し、赤外線加熱炉の上部より試験カプセルを組込んだ。

噴射衝突基礎実験では実験チャンバー上部にボビンヒータを固定し、試験カプセルの噴射ノズル部をボビンヒータに挿入しながら、試験カプセルの位置決めを実施した。位置決め後、試験カプセル上部にノズル弁駆動機構及び閉止栓を取付け、ノズルの作動状態(締め付け具合)を確認した。

## (3) 試験部

供試体や試験カプセルを設置した後に、システムを真空引きして真空保持状態を確認するとともに、システム内を加圧して気密漏えい確認を行った。

## (4) 試料

試験カプセル内でのNaOH-Na<sub>2</sub>O混合状態をできるだけ均一にするため、Arガス雰囲気中に保たれたグローブボックス内で、市販されている顆粒状のNaOHを細粒化した。その後、精密天秤(メトラー・トレド製 AE200、最小目盛 0.1mg)を用いて、試料の質量を3回測定して、密封容器に封入した。実験装置全体をバッチ式で真空引き・Arガス置換後(G2グレードのArガスを用いて酸素濃度 0.3ppm以下に管理)、簡易ビニールバッグを取付けた試験カプセル試料封入口から封入した。また、市販されているNa<sub>2</sub>Oは粒が細かいため細粒化せずにグローブボックス内で質量を測定し、試験カプセル内に封入した。

なお、NaOHはMERCK製の純度99wt%以上、Na<sub>2</sub>OはALFA AESAR製の純度85.37wt%のものを使用した。

## (5) その他

ミストトラップ(MT-1,MT-2)及び蒸気回収フィルター内に水を入れ、封入した水の質量及び pH を測定した。

## 2.2.2 実験

## (1) 系統真空

赤外線ランプ保護用の冷却エアースクロールコンプレッサー、加熱炉等の冷却水循環装置、弁駆動用ベビーコンプレッサー、排気ファン、循環ポンプを起動して系統の真空前準備を行った。真空引きの際は、ミストトラップ(MT-1,MT-2)の仕切弁(V301,V302)の弁座漏えいによる水の巻込みを防止するため、系統接続部を予め取外して処置した。

その後真空ポンプを起動して、試験カプセル、実験チャンバー、ガス系統の真空引きを実施した。真空ポンプの圧力計(VP-3)が目標圧力(-0.1MPa・g)に到達したら真空ポンプ仕切弁(V105)を閉め、ガス系統より試験カプセルと実験チャンバーへの Ar ガス置換を開始した。試験カプセル内、実験チャンバー内の圧力が規定値(PS1:0.010MPa・g、PS2:0.015MPa・g)に到達したら放出系仕切弁が開き、Ar ガスが放出される。真空引きとガス置換操作は原則 3 回行い、系統内の酸素濃度を 0.3ppm 以下に管理した。その後、真空ポンプを停止させ、系統の真空引きを完了した。

## (2) 系統昇温

試料台に設置した供試体及び試験カプセル内の試料を赤外線集光加熱炉及び赤外線加熱炉で昇温した。試験カプセルノズル部はボビンヒータで加熱し、赤外線加熱炉と同様の温度制御を行った。加熱制御中に試験カプセル内の試料が実験チャンバー内へ漏えいし、漏えいした試料が試料台から赤外線集光加熱炉側へ侵入することを防止するため、赤外線集光加熱炉雰囲気圧力、実験チャンバー内圧、試験カプセル内圧の順で圧力差を設けた。また、加熱制御中に試験カプセルの噴射ノズルから試料が漏れて実験チャンバー雰囲気温度で冷却されると、実験時の噴流形状に影響を及ぼすことから、監視カメラにて適時目視にて漏えいの有無を確認した。

加熱制御の昇温速度(設定値)は 10°C/min で、昇温温度の設定変更後(SV 値)は各ヒータの異常電流の有無を確認するためクランプメータにて出力値(MV 値)を確認した。

加熱制御中は試験カプセル供給弁(V101)とミストトラップ(MT-1)の仕切弁(V301)を開けて、試験カプセル内で生成されるミストをミストトラップにて回収した。加熱制御中の実験チャンバー内圧は仕切弁(V302)の自動開閉により調整される。

装置の運転データはデータ収録装置にサンプリング速度 1 秒で収録された。

## (3) 実験

供試体温度及び試験カプセル内の試料温度が実験条件に到達・静定した後に、試験カプセル内部を噴射速度に相当する圧力まで加圧して、仕切弁(V301)を閉めた。

実験では、試験カプセルの微圧エアシリンダを作動させ、噴射ノズル部の弁棒を引抜い

て、試験カプセル内の試料を実験チャンバー内の供試体に向けて噴射・衝突させた。

このときの衝突面温度、試験カプセル及び実験チャンバー内部圧力等を測定した。

また、実験チャンバー側部の観察窓を介して、試料が供試体へ衝突する様子を高速度ビデオカメラ等にて撮影した。

### 2.2.3 後処理

実験後は、試料が付着している装置部品(試験カプセル、実験チャンバー、放出系)を水洗浄して、実験チャンバーより供試体を取り外した。取り外した供試体は超音波で洗浄し、洗浄液(蒸留水)の pH に変化がなくなるまで継続した。洗浄後の供試体を乾燥させ、実験前と同様にマイクロメータ、ノギス及び卓上型万能投影機を用いて肉厚・寸法を測定し、3次元測定器による3次元形状測定を実施して表面の減肉様相を観察した。さらに、精密天秤(メトラー・トレド製 AT21、最小目盛 1 $\mu$ g)を用いて供試体質量を3回測定して、その平均値を実験後の質量と定義した。質量欠損量は実験前後での供試体質量の差分とした。

また、実験後の試験カプセルは2.2.1(2)項で記載した健全性確認を行った。

### 3. 実験条件

表 3 に静的腐食実験、表 4 に噴射衝突基礎実験の実験条件を示す。表 5 に静的腐食実験の計測項目を示し、表 6 に噴射衝突基礎実験の計測項目を示す。以下で述べる試料/供試体温度、試料組成及びその割合の設定根拠については、静的腐食実験と噴射衝突基礎実験は同じである。

#### (1) 試料・供試体温度

過去の Na-水反応実験において、実験後にウェステージ損耗を受けたターゲット伝熱管に対してフォーモスタ(冶金学的)検査を実施し、ウェステージ損耗面の熱影響温度は約 900°C<sup>3)</sup>であることが確認されている。

このため、SG 運転時の Na 温度から水漏えい事故時に反応ジェットの熱的な影響を受けると想定される温度域までを考慮して、本実験での温度条件を 600°C、800°C、1000°C とした。

#### (2) 試料組成及びその割合

機構論的に Na-水反応の化学反応経路が評価され、一次反応で Na と水との化学反応により NaOH と水素が、副次反応で NaOH と周囲の Na で Na<sub>2</sub>O が生成されると推察されている<sup>4)</sup>。したがって、本実験では Na 化合物として NaOH 及び Na<sub>2</sub>O を対象とした。

また、Na-O-H の擬二元相態図<sup>5)</sup>より、NaOH:Na<sub>2</sub>O の組成分率は 1000°C で約 8:2 であることを踏まえ、試料混合比(NaOH:Na<sub>2</sub>O)を、10:0、9:1、8:2 とした。さらに、Na<sub>2</sub>O 過多となる環境での腐食速度を評価するために、Na-水反応での副次反応を模擬した Na+NaOH でも実施した。

#### (3) 噴出圧力(試験カプセル内部加圧圧力)

噴射衝突基礎実験では、供試体への試料の噴出速度に相当するように試験カプセル内部圧力を加圧した。

これまでの反応ジェットからターゲット伝熱管へ移行する熱伝達率評価において、ターゲット伝熱管周囲の(液相)流体速度は 30m/s のオーダーであることが実験的に確認されている<sup>2)</sup>。従って、本実験において供試体への試料の最大噴出速度を 100m/s と設定した。供試体衝突部で試料速度を計測することが困難であったことから、試験カプセルの噴射ノズル端での噴出速度を基準にした。ノズル部の圧力損失に関しては、同じ試験カプセルを用いて実施した水実験の結果に基づき、以下の Hermann 式を使用した。

また、液相の NaOH 及び Na<sub>2</sub>O を用いるため非圧縮性を仮定し、試験カプセル内に封入した試料質量と噴射時間から平均質量流量を計算した。試験カプセル内部と実験チャンバ内部の圧力差にノズル部の圧力損失を加味して、式(1)の連続の式を適用して、試験カプセルの噴射ノズル端での噴出速度[m/s]を計算した。

$$\lambda = 0.0054 + 0.369 \text{Re}^{-0.3} \quad \text{Re} \leq 1.5 \times 10^5$$

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\frac{m}{t} = \rho u A = \rho \sqrt{\frac{2(P_{in} - P_{out} - \Delta P)}{\rho}} A \quad (1)$$

ここで、 $m$  は試料封入質量[kg]、 $t$  は試料噴射時間[s]、 $u$  は噴出ノズル端の噴出速度[m/s]、 $P_{in}$  は試験カプセル内部圧力[Pa]、 $P_{out}$  は実験チャンバー内部(試験カプセル外部)圧力[Pa]、 $\Delta P$  は噴出ノズル部(内径 1mm、長さ 10mm)での圧力損失、 $\rho$  は試料密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $L$  は噴出ノズル部長さ 0.01m、 $d$  は噴出ノズル内径 0.001m、 $A$  はノズル断面積[m<sup>2</sup>]、 $v$  は噴出ノズル部の平均速度[m/s]である。計算の収束条件は  $u=v$  とした。

#### (4) 噴出形態

噴射衝突基礎実験では、試料が供試体の同一箇所連続的に衝突するように、噴出形状としてコラム状態を採用した。

## 4. 実験結果

### 4.1 静的腐食実験結果

表 7.1 から表 7.4 に実験結果を示す。表 7.1 及び表 7.3 には、実験時の試料・供試体温度、実験前後の供試体質量、浸漬時間、平均腐食速度等の結果を示す。また、表 7.2 及び表 7.4 には、実験後の形状データ(外形、肉厚、穴径、表面積)の結果を示す。

#### (1) 実験時の温度変動

実験の一例として、図 14.1 及び図 14.2 に HC-Case11(試料/供試体温度 995.3℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O(10:0)、NaOH 封入量 200.6g)における、赤外線加熱炉上部雰囲気温度(TE-2)、試験カプセル内部試料温度(TE-4)及び試験カプセル外表面上部温度(TE-6)を示す。実験開始前は試験カプセル上部のボアードスルー型スウェージロックを開いて、供試体をカバーガス空間に待機させた。同図の時刻ゼロ秒において、カバーガス空間の供試体を試料中に浸漬させたため、試験カプセル内部試料温度(TE-4)が僅かに低下した。約 30 秒後には実験開始時の試料温度まで回復した。さらに、この試験カプセル内部の試料温度変化に伴う赤外線加熱炉の熱入力によって、赤外線加熱炉上部雰囲気温度(TE-2)及び試験カプセル外表面上部温度(TE-6)が僅かに上昇していることが確認できる。この温度変化は、実験中の実験温度×実験時間積算値に対して約 0.02%のばらつきであり、実験には影響しないと判断した。また、この温度変動は全ての実験で観察された。

#### (2) 実験前後の供試体外観

図 15 から図 27 に、実験前後の供試体の外観を示す。図中には実験前の供試体外形寸法である 15mm の矢印を記載した。

これらの外観写真から、NaOH 単体試料環境(例;HC-Case9、試料・供試体温度 605.0℃、NaOH 封入量 100.0g)の腐食実験後は、全体的に茶褐色化しており、温度の上昇によって供試体中央の孔径が大きくなり、腐食が進行している様子がみられた。

また、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境(例;HC-Case12、試料・供試体温度 597.3℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 160.0g:40.0g(4:1))の腐食実験後は、全体的に銀白色化しており、温度の上昇によって供試体中央の孔径が大きくなり、腐食が進行している様子がみられた。さらに NaOH-Na 混合試料環境においても全体的に銀白色化しており、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境と同様な腐食様相であると推察される。

これら外観の腐食様相の違いは、腐食機構の違いによるものと推察される。

#### (3) 平均腐食速度

実験前後の質量欠損量から、平均腐食速度 CR[mm/s]を算出した。

$$CR = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \cdot \frac{1000}{\rho} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta m$  は実験前後の供試体の欠損質量[g]、A は実験前の供試体の表面積(内部の穴

部表面積を含む) $[\text{mm}^2]$ 、 $t$  は実験時間 $[\text{s}]$ 、 $\rho$  は供試体材料密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、分子の 1000 は単位換算値である。

図 28 に NaOH 単体試料環境における平均腐食速度を試料・供試体の絶対温度の逆数に対してプロットした。腐食速度は絶対温度の上昇に伴い増加傾向を示し、アレニウス型でプロットできることが分かる。このことから、本実験条件においては試料質量の影響は見られなかった。また、同図に NaOH 単体試料環境で計測された、SUS304<sup>7)</sup>及び 2.25Cr-1Mo 鋼<sup>8)</sup>の平均腐食速度もプロットした。本実験で得られた平均腐食速度と同じ腐食曲線上にプロットされ、本実験範囲においては鋼種に対する平均腐食速度の違いがないことが分かる。

図 29 に NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境での平均腐食速度を示す。NaOH 単体試料環境に比べ、Na<sub>2</sub>O 混合により平均腐食速度が増加することが認められた。本実験で得られた 10% 以上(混合割合 9:1 及び 8:2)の Na<sub>2</sub>O 混合下での平均腐食速度は、混合割合によって差が見られるものの、低炭素鋼での Na-Fe 複合酸化型腐食速度の 95%信頼上下限の領域<sup>9)</sup>に含まれ、データのばらつきの範囲内にあることが分かった。

これまでに得られた結果から、NaOH 単体試料環境における平均腐食速度を、式(3)のように定式化した。NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境における平均腐食速度は、式(4)の Na-Fe 複合酸化型腐食速度を用いた。

① NaOH 単体試料環境

$$CR_{\text{NaOHave}}[\text{mm}/\text{s}] = 47.925 \times \text{Exp}(-140090/RT) \quad (3)$$

ここで、 $R$  は一般気体定数  $[\text{J}/\text{mol}/\text{K}]$ 、 $T$  は絶対温度 $[\text{K}]$ で、温度の適用範囲は  $400 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  である。

② NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境

$$[\text{Fe}]^{1.75} = 0.201 \times \text{Exp}(-17100/R^*T)t \quad (4)$$

ここで、 $R^*$  は一般気体定数 $[\text{cal}/\text{mol}/^\circ\text{C}]$ 、 $T$  は絶対温度 $[\text{K}]$ 、 $[\text{Fe}]$  は Fe の単位面積あたりの反応モル数 $[\text{mol}/\text{cm}^2]$ 、 $t$  は時間 $[\text{h}]$ で、温度の適用範囲は  $400 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  である。

式(4)に対して、0.5 時間(実験中の浸漬時間)における平均腐食速度は、以下のように導出できる。

$$[\text{Fe}] = (0.201 \times 0.5)^{1/1.75} \times \text{Exp}(-17100/1.75R^*T) \quad (5)$$

ここで、 $R^*$  は一般気体定数 $[\text{cal}/\text{mol}/^\circ\text{C}]$ 、 $[\text{Fe}]$  は 0.5 時間での単位面積あたりの反応モル数 $[\text{mol}/\text{cm}^2/(0.5\text{h})]$ であり、両辺を Fe の原子量 $[1\text{mol}=55.845\text{g}]$ 及び密度  $7.874[\text{g}/\text{cm}^3]$  及び  $1\text{cal}=4.184\text{J}$  で単位換算すると、単位時間あたりの腐食深さ $[\text{mm}/\text{s}]$ は、次式となる。

$$[Fe]_{mm/s} = [Fe]_{mol/cm^2} \times \frac{55.845}{7.874} \times \frac{10}{1800} = (0.201 \times 0.5)^{1/1.75} \times \frac{55.845}{7.874} \times \frac{10}{1800} \times \text{Exp}\left(\frac{-17100}{1.75RT} - \frac{4.184}{1}\right)$$

$$[Fe]_{mm/s} = 0.0106 \times \text{Exp}\left(\frac{-40884}{RT}\right) \quad (6)$$

ここで、R は一般気体定数 [J/mol/K]、T は絶対温度[K]である。

従って、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境での平均腐食速度は、次式で与えられる。

$$CR_{NaOH/Na_2O[mm/s]} = 0.0106 \times \text{Exp}(-40884/RT) \quad (7)$$

ここで、R は一般気体定数 [J/mol/K]、T は絶対温度[K]である。

## 4.2 噴射衝突基礎実験結果

表 8.1 から表 8.2 に噴射衝突基礎実験の実験結果を示す。表 8.1 には、試料組成割合、試料封入量、温度、圧力、噴射時間等の結果を示し、表 8.2 には、供試体質量、腐食速度等の結果を示す。

### (1) 実験時の温度及び圧力変動

実験の一例として、図 30 に PC-Case21(試料・供試体温度 800°C、NaOH 単体試料環境、試料噴射速度 71.6m/s)における、試験ガスライン圧力(P-1)、試験カプセル内部圧力(P-5)、スタートシグナル(S.S)、供試体内部温度(TI-1 及び TE-5)及び試験カプセル内部試料温度(TE-4)を示す。

噴射開始時刻は、試験カプセルのノズル弁駆動の弁棒と連動する仕切弁(V101)の開信号のスタートシグナル(S.S)、及び試験カプセル内部圧力(P-5)の増加又は降下より判断し、噴射終了時刻は試験カプセル内部圧力(P-5)の降下より判断した。本実験ケースでは、試験カプセルの上流側に仕切弁(V101)を設置し、仕切弁(V101)の開操作と同時に試験カプセルの微圧シリンダを引き上げた。このため、図 30 において、実験開始とともに、試験ガスライン圧力(P-1)は一時的に低下し、試験カプセル内部圧力(P-5)は急上昇していることがわかる。さらに、試料が供試体へ衝突し、供試体内部温度(TI-1 及び TE-5)が若干低下している。

また、約 1.4 秒において、試験カプセル内の試料が全量噴射されたため、試験ガスライン圧力(P-1)及び試験カプセル内部圧力(P-5)が若干減少傾向を示しており、供試体に試料噴射終了後に高圧 Ar ガスが噴射されて、供試体内部温度(TI-1 及び TE-5)が低下している。

その後、約 4 秒で仕切弁(V101)を閉操作したため、試験ガスライン圧力(P-1)及び試験カプセル内部圧力(P-5)が急激に減少した。

### (2) 実験前後の供試体外観

図 31 から図 34 に、実験前後の供試体の外観を示す。NaOH 単体試料環境及び NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境を 600°C から 1200°C まで温度別に示した。これらの図より、供試体表面中央部に試料が衝突し、僅かに減肉されている様子が観察できる。また、試料温度が上昇するにつれて、減肉の影響が大きく現れているように見受けられる。静的腐食実

験と同様で NaOH 単体試料環境は、全体的に茶褐色化しており、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境は、全体的に銀白色化している様子がみられた。供試体裏面の変色については、赤外線集光加熱炉の局所的な加熱の影響を受けた様子が観察できる。

### (3) 腐食速度

噴射衝突基礎実験の腐食速度は、以下の三通りの方法で実験的に算出することが可能であり、これらの適合性を検討した。図 35 に三通りの方法の模式図を示す。

- ① 供試体の最大減肉深さを試料噴射(衝突)時間で割る。
- ② 静的腐食実験と同じ式(2)で算出する。ただし、供試体の腐食面積は衝突面全面積を基準にする。
- ③ 静的腐食実験と同じ式(2)で算出する。ただし、供試体の腐食面積は 3 次元光学計測で判断される実効的な腐食面積を基準にする。

$$CR = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \cdot \frac{1000}{\rho} \quad (2)$$

噴射衝突基礎実験後の供試体は、赤外線集光加熱炉による供試体中心部への局所過熱に伴う熱的なひずみの影響によって、中央部が僅かに凸状に変形する。この変位を補正することが難しく、最大減肉深さを厳密に判断することができない。従って、①の手法は不採用とした。

また、赤外線集光加熱炉による供試体中心部への局所過熱の影響によって、供試体の径方向に大きな温度分布が生じることから、衝突面の全面積を基準とすることは合理的ではない。従って、②の手法も不採用と判断した。

以上より、本実験において③の手法が最適であると判断した。そこで、実験後の供試体表面状態を観察し、表層の腐食膜が欠落している領域、あるいは、滑らかに窪んでいる領域を形状解析ソフト(キーエンス製 KS-H1A)で計測し、評価対象となる腐食面積を求めた。平均腐食速度は、計測された腐食面積にて重量変化量が生じているものとして算出した。

図 36 は、腐食速度を試料衝突速度でプロットした図である。ここで、衝突速度「0」は静的腐食試験から求めた値である。同図より、衝突速度の増加に伴い、腐食速度は増加傾向を示すことが確認できる。特に、衝突速度の有無によって腐食速度に有意な差異が生じていることがわかる。また、腐食速度はデータのばらつきが見られるが、試料温度の上昇に伴い、徐々に大きくなる傾向が見られる。さらに、静的腐食実験と同様に NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境の場合においては、NaOH 単体試料環境における腐食速度よりも、腐食速度は僅かに増加していることが見て取れる。

NaOH 単体試料環境における腐食速度は、式(8)のように定式化した。

① NaOH 単体試料環境

$$CR_{COCF-NaOH[mm/s]} = 1.383 \times \text{Exp}(-61379.9/RT) \times V^n \quad (8)$$

$$n = 11633 \times (1/T)^{1.3764}$$

ここで CR は COCF 速度[mm/s]、R は一般気体定数 [J/mol/K]、T は絶対温度[K]、V は試料衝突速度[m/s]である。

② NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境

NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境では、腐食速度に対して試料温度の影響が顕著に表れないため、得られた全腐食データを速度でプロットし、衝突速度の依存性を定量評価した。図 37 に腐食速度に対する速度依存性を示す。同図より、腐食速度に対して速度の 0.81074 乗に比例することが確認できる。温度 T と速度 V は独立変数であることから、腐食速度は、式(9)で表すことができる。

$$CR_{COCF-NaOH-Na_2O[mm/s]} = A(T) \times V^{0.8107} \quad (9)$$

ここで A(T)はある温度関数、V は試料衝突速度[m/s]である。さらに図 38 には、温度ごとの腐食速度に対する速度依存性をプロットした。式(9)の A(T)を表 8.2 のデータを基に温度ごとにアレニウスプロットし(図 39)、一般気体定数で換算すると式(10)を得ることができる。

$$CR_{COCF-NaOH-Na_2O[mm/s]} = 2.37 \times 10^{-2} \times \text{Exp}(-16308/RT) \times V^{0.8107} \quad (10)$$

ここで R は一般気体定数 [J/mol/K]、T は絶対温度[K]、V は試料衝突速度[m/s]である。

以上より、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境における COCF 速度を、式(10)のように定式化した。

## 5. 結論

Na-水反応時の主要生成物である NaOH 及び Na<sub>2</sub>O を用いて、ウェステージ環境因子の影響を分離評価可能な噴射基礎実験装置を開発し、静的腐食実験及び噴射衝突基礎実験の実験手法を検討した。また、これらより NaOH 単体試料環境及び NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境における腐食実験を実施し、腐食速度の定式化を検討した。

### 1. 実験装置及び実験手法の開発

Na-水反応時の COCF に対する主要な環境因子は、反応生成物である NaOH と Na<sub>2</sub>O の組成割合、伝熱管周囲での反応生成物の流体速度及び反応生成物やウェステージ面での温度であり、これらをできるだけ分離評価するために、高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置 FALCO を開発した。

FALCO では、試料となる NaOH-Na<sub>2</sub>O を反応ジェットと同等の高温条件にて、実機 SG の伝熱管と同材である供試体を浸漬させて静定状態で実験を行う、静的腐食実験と試料を供試体に噴射・衝突させて COCF の促進作用を模擬した噴射衝突基礎実験の 2 種類の実験を実現した。

### 2. 実験結果

NaOH 単体試料環境及び NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境において静的腐食実験および噴射衝突基礎実験を実施し、ウェステージ環境因子である、試料温度、試料組成割合及び試料衝突速度を分離評価し、腐食速度を定式化した。

静的腐食環境と噴射衝突基礎実験における基本的な特徴として、NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合環境における腐食速度は、NaOH 単体試料環境に比べ、Na<sub>2</sub>O 混合により腐食速度が増加すること、NaOH 単体試料環境における腐食速度は、試料衝突速度の増加に伴い、緩やかな上昇傾向を示すことが確認できた。

## 謝辞

本研究は、エネルギー対策特別会計に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成 22 年度から平成 25 年度「蒸気発生器伝熱管破損伝播に係るマルチフィジックス評価システムの開発」の成果である。

本実験手法の開発及び実験実施においては、高速炉技術開発部の吉田英一氏、東興機械工業株式会社の宮内勇一氏、深作和男氏、吉田高広氏、平野勝也氏、関根知洋氏、鈴木和右氏、落合直人氏、小沼靖典氏に多大なご尽力をいただいた。関係各位に深謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 菊地晋、清野裕、栗原成計、大島宏之、“高速炉蒸気発生器におけるナトリウム-水反応機構に関する実験的研究と速度論的検討”、日本機械学会論文集(B 編)79 巻 799 号、No.2012-JBN-0575、2013、pp.271-275.
- 2) 栗原成計、梅田良太、下山一仁、阿部雄太、菊地晋、大島宏之、“高速炉蒸気発生器伝熱管周りに形成されるナトリウム-水反応ジェットの熱伝熱特性”、日本機械学会論文誌(B 編)79 巻 808 号、No.2013-JBN-0644、2013、pp.2640-2644.
- 3) 西村正弘、下山一仁、栗原成計、清野裕、“ナトリウム-水反応時の熱的影響確認試験”、JNC TN9400 2003-014、2003、157p.
- 4) 下山一仁、小林十思美、宇佐美正行、萩茂樹、田辺裕美、吉田英一、“高クロム系 SG 伝熱管材溶接部のウェステージ特性”、PNC TN9410 91-288、1991、62p.
- 5) 内堀昭寛、菊地晋、栗原成計、浜田広次、大島宏之、“高速炉蒸気発生器の伝熱管破損時事象に対する解析評価手法の開発”、日本機械学会論文集(B 編)79 巻 808 号、No.2013-JBN-0671、2013、pp.2635-2639.
- 6) 斉藤淳一、天藤雅之、青砥紀身、“ナトリウム化合物( $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{Na}_2\text{O}_2$  および  $\text{NaOH}$ )の擬 3 元系状態図の研究”、PNC TN9410 97-101、1997、36p.
- 7) 吉田英一、矢口勝己、青砥紀身、“ $\text{NaOH}$  水溶液中におけるステンレス鋼[SUS304]の腐食特性”、JNC TN9400 2004-061、2004、42p.
- 8) C. F. Knights, R. Perkins,“Corrosion of steels by the molten products of the  $\text{Na}/\text{H}_2\text{O}$  reaction,” HARWELL Rep., United Kingdom Atomic Energy Authority, AERE-R 9521(1979).
- 9) Kazumi AOTO, Yasushi HIRAKAWA, Tetsuhiro KURODA,“Corrosion Test of Mild Steel in High-Temperature Sodium Compounds”,Proc.Symp.on High Temperature and Materials Chemistry,98-9(1998),pp.275-286.

表 1 試験カプセル仕様

仕様	単位	静的腐食実験用		噴射衝突基礎実験用	
		小容量型	大容量型	小容量型	大容量型
設計温度	℃	1200.0			
設計圧力	MPa	0.2(25℃)			
全長	mm	470.5		694.0	693.0
カプセル材質	-	SUS304	純Ni	SUS304	
カプセル全容積	cm <sup>3</sup>	220.0	639.0	298.0	675.0
カプセル外径	mm	34.0	48.6	34.0	48.6
カプセル肉厚	mm	4.5	3.0	3.0	
ノズル先端外径	mm	-	-	13.8	
ノズル先端肉厚	mm	-	-	2.0	
ノズル径	mm	-	-	外径2.0/内径1.0	
ノズル材質	-	-	-	SUS304	
ノズル弁駆動圧力	MPa	-	-	0.3~0.7 (調整範囲:0.01~0.8)	
ノズル作動距離	mm	-	-	約12.0	
ノズル弁駆動材料	-	-	-	SUS304	

表 2 供試体の材料データ

## (1) 化学成分データ(単位:%)

製鋼番号 SX3071	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	V	T	N
規格※1	0.08	0.26	0.45	0.006	0.001	0.10	8.89	0.95	0.08	0.22	0.006	0.0663
分析値	0.10	0.26	0.42	0.006	0.001	0.10	8.84	0.96	0.08	0.22	0.005	0.0677

※1:ASTM A387 Grade91

熱処理:焼きならし(1060℃×60min)

焼き戻し(760℃×60min)

(2) 引張試験データ(単位 応力:N/mm<sup>2</sup>, 伸び/絞り:%)

製鋼番号 SX3071	採取位置・方向 標点距離	降伏応力	引張応力	伸び	絞り
分析値	正面・直角方向 丸形試験片(50mm)	581.5	735.5	25	75

規格:ASTM A387 Grade91

熱処理:焼きならし(1060℃×60min)

焼き戻し(760℃×60min)

表 3 静的腐食実験条件

Run No.	試料組成	試料温度	供試体温度	試料封入量
	NaOH:Na <sub>2</sub> O	℃	℃	NaOH/Na <sub>2</sub> O(g)
HC-Case4	10:0	800	800	70
HC-Case5	10:0	800	800	100
HC-Case7	10:0	1000	1000	100
HC-Case8	10:0	800	800	100
HC-Case9	10:0	600	600	100
HC-Case10	10:0	1000	1000	200
HC-Case11	10:0	1000	1000	200
HC-Case12	4:1	600	600	160/40
HC-Case13	4:1	800	800	160/40
HC-Case14	4:1	1000	1000	160/40
HC-Case15	9:1	600	600	180/20
HC-Case16	9:1	600	600	180/20
HC-Case17	Na:NaOH モル比 2:1	600	600	90/80

※HC-Case は静的腐食実験の略称とする。

表 4 噴射衝突基礎実験条件

Run No.	NaOH:Na <sub>2</sub> O	試料温度	供試体温度	試料封入量	噴射圧力	噴射形態
		℃	℃	g	MPa・g	
PC-Case2-2	10:0	800	800	100	0.1	コラム
PC-Case3	10:0	1000	1000	100	0.1	コラム
PC-Case6	10:0	800	800	100	1.0	コラム
PC-Case7	10:0	1000	1000	100	1.0	コラム
PC-Case8	10:0	800	800	100	3.0	コラム
PC-Case9	10:0	1000	1000	100	3.0	コラム
PC-Case10	10:0	1200	1200	100	0.1	コラム
PC-Case11	10:0	1000	1000	100	10.0	コラム
PC-Case12	10:0	1000	1000	100	10.0	コラム
PC-Case13	10:0	800	800	100	10.0	コラム
PC-Case14	10:0	800	800	100	10.0	コラム
PC-Case15	10:0	800	800	150	10.0	コラム
PC-Case16	10:0	800	800	200	10.0	コラム
PC-Case17	10:0	800	800	100	4.0	コラム
PC-Case18	10:0	600	600	100	10.0	コラム
PC-Case19	10:0	600	600	100	5.0	コラム
PC-Case20	10:0	600	600	100	8.0	コラム
PC-Case21	10:0	800	800	100	4.5	コラム
PC-Case22	10:0	800	800	100	4.5	コラム
PC-Case23	10:0	1000	1000	100	5.0	コラム
PC-Case24	10:0	800	800	100	2.0	コラム
PC-Case25	8:2	600	600	100	5.0	コラム
PC-Case26	8:2	1000	1000	100	5.0	コラム
PC-Case27	8:2	1000	1000	100	10.0	コラム
PC-Case28	8:2	800	800	200	5.0	コラム
PC-Case29	8:2	1000	1000	200	5.0	コラム
PC-Case30	8:2	600	600	200	5.0	コラム
PC-Case31	8:2	800	800	200	5.0	コラム
PC-Case32	8:2	1000	1000	200	5.0	コラム

※PC-Case は噴射衝突基礎実験の略称とする。

表 5 計測項目(静的腐食実験)

Tag No.	計測部位	測定範囲	備考
P-1	試験カプセル内部圧力	0~20MPa・g	0~5V
VP-3	試験カプセル内部圧力真空度	-0.1~0.9MPa・g	0~5V
TI-2	試験カプセル外表面温度 (赤外線加熱炉温度制御用)	0~1600℃	R型シース熱電対
TI-3	試験カプセル外表面温度 (試験カプセル内 NaOH 液面近傍)	0~1600℃	R型シース熱電対
TE-2	赤外線加熱炉内上部雰囲気温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-4	試験カプセル内 NaOH(Na <sub>2</sub> O)温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-6	試験カプセル外表面温度 (TE-2 近傍)	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-7	試験カプセル外表面温度 (供試体最下部)	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-8	MT-1 ミストトラップ温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-9	MT-2 ミストトラップ温度	0~1200℃	K型シース熱電対

表 6 計測項目(噴射衝突基礎実験)

Tag No.	計測部位	測定範囲	備考
P-1	試験ガスライン圧力	0~20MPa・g	0~5V
P-2	実験チャンバー内圧力	-0.1~0.9MPa・g	0~5V
VP-3	試験カプセル内部圧力真空度	-0.1~0.9MPa・g	0~5V
P-4	供試体下部空間圧力	-0.1~0.9MPa・g	0~5V
P-5	試験カプセル内部圧力	0~20MPa・g	0~5V
TI-1	供試体内部温度(15mm) (赤外線集光加熱装置温度制御用)	0~1600℃	R型シース熱電対
TI-2	試験カプセル外表面温度 (赤外線加熱炉温度制御用)	0~1600℃	R型シース熱電対
TI-3	噴射ノズル外表面温度 (ノズル部ポピンヒータ温度制御用)	0~1600℃	R型シース熱電対
TE-1	試料台下部空間温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-2	赤外線加熱炉内上部雰囲気温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-3	噴射ノズル端温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-4	試験カプセル内 NaOH(Na <sub>2</sub> O)温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-5	供試体内部温度(10mm)	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-6	試験カプセル外表面温度 (TE-2 近傍)	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-8	MT-1 ミストトラップ温度	0~1200℃	K型シース熱電対
TE-9	MT-2 ミストトラップ温度	0~1200℃	K型シース熱電対
S.S	S.S 信号(噴射ノズル「開」信号)	0~5V	

表 7.1 静的腐食実験結果(平均腐食速度等)

Run No.	試料組成		試料封入量(g)		試料温度(°C)	供試体温度(°C)	供試体質量(g)			浸漬時間(min)	欠損質量流束(g/mm <sup>2</sup> /s)	平均腐食速度(mm/s)
	NaOH:N <sub>2</sub> O	NaOH	Na <sub>2</sub> O	実験前			実験後	欠損				
HC-Case4	10:0	70.42	0.00		802.41	802.41	4.554794	4.519524	0.035270	29.95	3.08E-08	3.956E-06
					802.41	802.41	4.555616	4.518384	0.037232	29.95	3.25E-08	4.175E-06
					802.41	802.41	4.477279	4.426846	0.050433	29.95	4.44E-08	5.711E-06
HC-Case5	10:0	100.11	0.00		804.71	804.71	4.479022	4.401688	0.077334	30.02	6.80E-08	8.745E-06
					804.71	804.71	4.414522	4.333025	0.081497	30.02	7.20E-08	9.263E-06
					804.71	804.71	4.449290	4.350439	0.098851	30.02	8.70E-08	1.119E-05
HC-Case7	10:0	100.33	0.00		999.01	999.01	4.240981	3.977607	0.263374	29.83	2.37E-07	3.051E-05
					999.01	999.01	4.384976	4.135566	0.249410	29.83	2.23E-07	2.864E-05
					999.01	999.01	4.265620	4.265728	-0.000108	29.83	-	-
HC-Case8	10:0	100.47	0.00		999.56	999.56	4.634546	4.634372	0.000174	30.41	1.49E-10	1.914E-08
					999.56	999.56	4.388717	4.388558	0.000159	30.41	1.39E-10	1.787E-08
					999.56	999.56	4.612953	4.612905	0.000048	30.41	4.12E-11	5.293E-08
HC-Case9	10:0	100.00	0.00		604.95	604.95	4.336234	4.334644	0.001590	29.63	1.43E-09	1.845E-07
					604.95	604.95	4.449641	4.448406	0.001235	29.63	1.11E-09	1.424E-07
					604.95	604.95	4.431360	4.430464	0.000896	29.63	8.01E-10	1.030E-07
HC-Case10	10:0	200.58	0.00		1026.73	1026.73	4.477770	2.026619	2.451151	30.93	2.07E-06	2.660E-04
					1026.73	1026.73	4.481508	2.013845	2.467663	30.93	2.08E-06	2.676E-04
					1026.73	1026.73	4.544777	1.980479	2.564298	30.93	2.19E-06	2.814E-04

表 7.2 静的腐食実験結果(形状データ)

Run No.	供試体形状(mm)										供試体表面積 (mm <sup>2</sup> )
	縦	横	肉厚①	肉厚②	肉厚③	肉厚④	平均厚さ	穴径			
HC-Case4	15.20	15.15	3.058	3.052	3.078	3.082	3.068	6.95	637.86		
	15.15	15.20	3.071	3.075	3.069	3.065	3.070	6.95	638.07		
HC-Case5	15.00	15.20	3.052	3.068	2.071	3.049	2.810	6.95	631.76		
	15.15	14.95	3.097	3.095	3.099	3.098	3.097	6.95	631.19		
	15.15	14.95	3.063	3.048	3.053	3.069	3.058	6.95	627.99		
HC-Case7	15.15	15.00	3.059	3.067	3.075	3.071	3.068	6.95	630.61		
	15.10	15.20	2.870	2.869	2.863	2.866	2.867	6.90	620.14		
	15.05	15.15	2.972	2.976	2.979	2.978	2.976	6.90	625.51		
HC-Case8	15.05	15.15	2.903	2.903	2.898	2.898	2.901	6.90	619.29		
	15.15	15.05	3.220	3.138	3.119	3.195	3.168	6.95	640.66		
	15.05	15.15	3.003	2.969	2.968	3.030	2.993	6.95	626.84		
	15.05	15.15	3.171	3.139	3.148	3.135	3.148	6.95	639.04		
HC-Case9	15.05	15.05	3.005	2.978	3.019	3.000	3.001	6.95	623.27		
	15.05	14.95	3.079	3.070	3.099	3.089	3.084	6.90	627.12		
	15.05	15.05	3.045	3.072	3.055	3.085	3.064	6.90	629.11		
HC-Case10	15.20	15.20	3.059	3.060	3.058	3.059	3.059	7.00	638.37		
	15.20	15.20	3.058	3.058	3.060	3.057	3.058	6.95	638.92		
	15.15	15.10	3.090	3.010	3.015	3.010	3.031	6.95	631.23		

表 7.3 静的腐食実験結果(平均腐食速度等)

Run No.	試料組成	試料封入量(g)		試料温度(°C)	供試体温度(°C)	供試体質量(g)			浸漬時間(min)	欠損質量流束(g/mm <sup>2</sup> /s)	平均腐食速度(mm/s)
		NaOH	Na <sub>2</sub> O			実験前	実験後	欠損			
HC-Case11	10:0	200.58	0.00	995.29	995.29	4.344135	3.334830	1.009305	30.32	8.83E-07	1.136E-04
				995.29	995.29	4.329821	3.346904	0.982917	30.32	8.60E-07	1.106E-04
				995.29	995.29	4.492932	3.464882	1.028050	30.32	9.00E-07	1.157E-04
HC-Case12	4:1	160.04	40.02	597.25	597.25	4.432185	3.873695	0.558490	30.07	4.97E-07	6.389E-05
				597.25	597.25	4.419736	3.849381	0.570355	30.07	5.03E-07	6.463E-05
HC-Case13	4:1	160.00	40.00	804.53	804.53	4.670980	4.085621	0.585359	29.92	5.10E-07	6.561E-05
				804.53	804.53	4.443920	3.800852	0.643068	29.92	5.70E-07	7.334E-05
HC-Case14	4:1	160.00	40.00	1005.86	1005.86	4.348132	3.178127	1.170005	29.82	1.05E-06	1.354E-04
				1005.86	1005.86	4.358595	3.212725	1.145870	29.82	1.03E-06	1.328E-04
HC-Case15	9:1	180.01	20.00	600.21	600.21	4.352774	4.170232	0.182542	29.98	1.63E-07	2.095E-05
				600.21	600.21	4.362488	4.182379	0.180109	29.98	1.61E-07	2.070E-05
				600.21	600.21	4.351896	4.149527	0.202369	29.98	1.81E-07	2.324E-05
HC-Case16	9:1	180.00	20.01	602.93	602.93	4.339074	4.198271	0.140803	30.00	1.26E-07	1.617E-05
				602.93	602.93	4.359815	4.215976	0.143839	30.00	1.28E-07	1.651E-05
				602.93	602.93	4.350935	4.194953	0.155982	30.00	1.39E-07	1.793E-05
HC-Case17	Na:NaOH モル比 2:1	92.64 (Na)	80.31 (NaOH)	587.73	587.73	4.351189	3.489617	0.861572	30.00	7.64E-07	9.820E-05
				587.73	587.73	4.360432	3.682705	0.677727	30.00	6.03E-07	7.757E-05
				587.73	587.73	4.347804	4.078589	0.269215	30.00	2.40E-07	3.085E-05

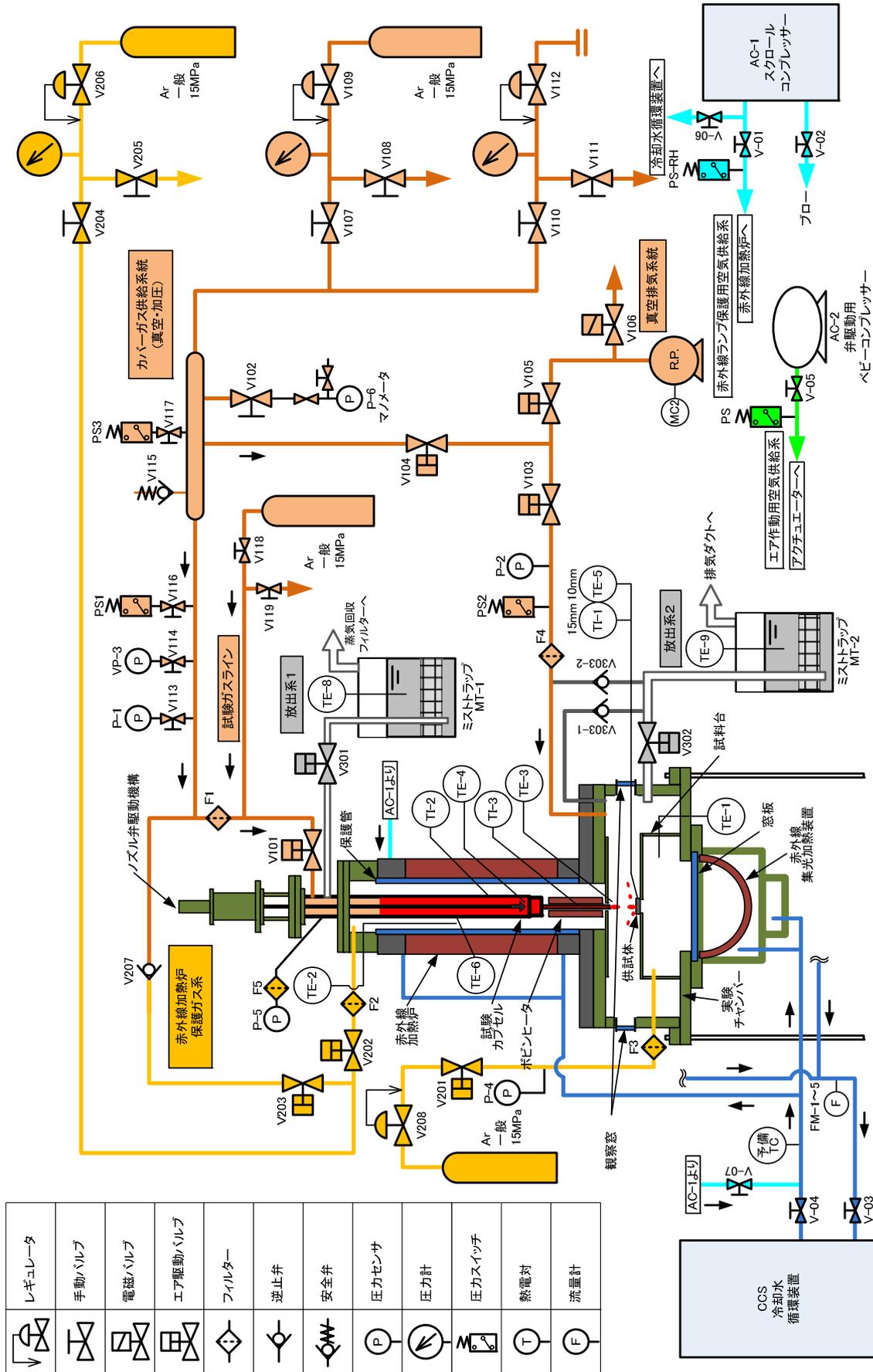
表 7.4 静的腐食実験結果(形状データ)

Run No.	供試体形状(mm)										供試体表面積 (mm <sup>2</sup> )
	縦	横	肉厚①	肉厚②	肉厚③	肉厚④	平均厚さ	穴径			
HC-Case11	15.10	15.10	3.045	3.033	3.036	3.039	3.038	6.97	628.06		
	15.10	15.10	3.045	3.033	3.036	3.039	3.038	6.97	628.06		
	15.10	15.10	3.045	3.033	3.036	3.039	3.038	6.97	628.06		
HC-Case12	14.93	15.11	3.038	3.033	3.051	3.026	3.037	7.01	623.02		
	15.02	15.14	3.056	3.039	3.044	3.031	3.043	6.96	628.95		
	15.05	15.05	3.208	3.184	3.193	3.207	3.198	6.98	639.01		
HC-Case13	15.14	15.05	3.035	3.027	3.026	3.033	3.030	7.03	628.02		
	15.07	14.95	3.023	3.014	3.012	3.011	3.015	7.01	620.90		
	14.90	15.60	3.034	3.019	3.030	3.032	3.029	6.98	620.18		
HC-Case14	15.04	15.03	3.018	3.024	3.019	3.009	3.018	7.02	622.64		
	15.03	15.04	3.004	3.006	3.006	3.001	3.004	7.02	621.89		
	15.04	15.04	3.010	3.009	3.004	3.002	3.006	7.02	622.28		
HC-Case15	15.02	15.03	3.010	3.013	3.019	3.020	3.016	7.02	621.88		
	15.04	15.04	3.007	3.008	3.010	3.014	3.010	7.03	622.27		
	15.02	15.04	3.015	3.009	3.001	3.003	3.007	7.02	621.42		
HC-Case16	15.10	15.09	3.021	3.018	3.011	3.014	3.016	7.02	626.70		
	15.05	15.04	3.049	3.015	3.021	3.014	3.025	7.02	624.08		
	15.05	15.05	3.024	3.008	3.009	3.014	3.014	7.03	623.35		

表 8.1 噴射衝突基礎実験結果(試料組成割合、試料封入量、温度、圧力、噴射時間等)

Run No.	試料組成割合		試料封入量(g)		試料温度 (°C)	試料密度 (kg/m <sup>3</sup> )	試料粘性係数 (Pa·s)	圧力(MPa)		噴射時間 (s)	Heat1 切断時間 (s)	噴射速度 (m/s)	
	NaOH:Na <sub>2</sub> O	NaOH	Na <sub>2</sub> O	試験カプセル				実験チャンパー	差圧				
PC-Case2	10:0	100.2190	0.0000	0.0000	799.01	1562.95	5.35.E-04	0.054	0.007	0.046	12.7	240.9	6.87
PC-Case3	10:0	100.1000	0.0000	0.0000	994.87	1480.40	2.89.E-04	0.059	0.008	0.051	16.8	276.4	7.52
PC-Case6	10:0	100.2200	0.0000	0.0000	800.43	1562.33	5.33.E-04	0.853	0.002	0.851	4.0	269.0	30.33
PC-Case7	10:0	100.6000	0.0000	0.0000	994.69	1480.47	2.89.E-04	0.888	0.003	0.885	3.8	303.7	32.08
PC-Case8	10:0	100.4600	0.0000	0.0000	796.49	1564.04	5.40.E-04	1.927	0.104	1.823	2.4	359.2	44.64
PC-Case9	10:0	100.5000	0.0000	0.0000	997.83	1479.19	2.86.E-04	1.802	0.106	1.696	2.3	338.3	44.62
PC-Case10	10:0	101.1200	0.0000	0.0000	1043.71	1460.50	2.51.E-04	0.044	0.003	0.042	16.5	16.4	6.84
PC-Case11	10:0	100.6200	0.0000	0.0000	997.33	1479.39	2.87.E-04	7.149	0.003	7.146	1.2	304.3	92.36
PC-Case12	10:0	100.3500	0.0000	0.0000	994.86	1480.40	2.89.E-04	8.817	0.009	8.808	1.3	11.0	102.62
PC-Case13	10:0	100.3600	0.0000	0.0000	799.79	1562.61	5.34.E-04	8.428	0.005	8.422	1.2	4.3	97.01
PC-Case14	10:0	100.4600	0.0000	0.0000	799.38	1562.78	5.35.E-04	8.923	0.007	8.916	1.1	4.8	99.84
PC-Case15	10:0	150.0051	0.0000	0.0000	801.87	1561.71	5.30.E-04	9.671	0.005	9.666	1.7	4.9	104.05
PC-Case16	10:0	201.8400	0.0000	0.0000	807.05	1559.47	5.21.E-04	9.301	0.003	9.298	2.1	3.8	102.12
PC-Case17	10:0	100.2400	0.0000	0.0000	804.32	1560.65	5.26.E-04	4.086	0.005	4.080	1.5	4.4	67.26
PC-Case18	10:0	100.4200	0.0000	0.0000	611.86	1646.12	1.08.E-03	9.295	0.006	9.289	1.0	4.5	98.42
PC-Case19	10:0	100.5600	0.0000	0.0000	606.71	1648.47	1.11.E-03	4.793	0.004	4.789	1.4	4.6	70.24
PC-Case20	10:0	100.3000	0.0000	0.0000	601.35	1650.92	1.13.E-03	6.832	0.004	6.827	1.2	3.9	84.01
PC-Case21	10:0	95.7700	0.0000	0.0000	806.51	1559.70	5.22.E-04	4.624	0.009	4.615	1.4	1.4	71.62
PC-Case22	10:0	100.4900	0.0000	0.0000	797.91	1563.42	5.37.E-04	4.738	0.005	4.733	1.4	1.3	72.43
PC-Case23	10:0	100.4000	0.0000	0.0000	995.51	1480.13	2.88.E-04	4.692	0.005	4.687	1.5	1.4	74.61
PC-Case24	10:0	100.3900	0.0000	0.0000	805.49	1560.14	5.24.E-04	2.154	0.003	2.151	2.1	4.9	48.63
PC-Case25	8:2	80.0059	20.0059	0.0000	596.67	1653.06	1.16.E-03	3.721	0.004	3.717	1.4	4.0	61.63
PC-Case26	8:2	80.0045	20.0544	0.0000	996.71	1479.64	2.87.E-04	3.793	0.004	3.789	1.4	1.5	67.02
PC-Case27	8:2	80.0070	20.0040	0.0000	990.24	1482.30	2.93.E-04	8.476	0.006	8.470	0.9	1.6	100.53
PC-Case28	8:2	160.0028	40.0027	0.0000	797.28	1563.69	5.39.E-04	4.640	0.004	4.636	2.6	5.8	71.67
PC-Case29	8:2	160.0057	40.0022	0.0000	999.26	1478.60	2.85.E-04	4.713	0.004	4.709	2.7	5.9	74.83
PC-Case30	8:2	160.0039	40.0010	0.0000	594.09	1654.24	1.17.E-03	4.613	0.003	4.609	2.4	6.2	68.71
PC-Case31	8:2	160.0016	40.0040	0.0000	799.24	1562.84	5.35.E-04	4.654	0.004	4.650	2.4	5.8	71.80
PC-Case32	8:2	160.0063	40.0005	0.0000	1001.96	1477.49	2.83.E-04	4.719	0.004	4.715	2.5	5.8	74.91





レギュレータ	手動バルブ	電磁バルブ	エア駆動バルブ	フィルター	逆止弁	安全弁	圧力センサ	圧力計	圧ガススイッチ	熱電対	流量計

図 1 高温水酸化ナトリウム噴射基礎実験装置 フロー図

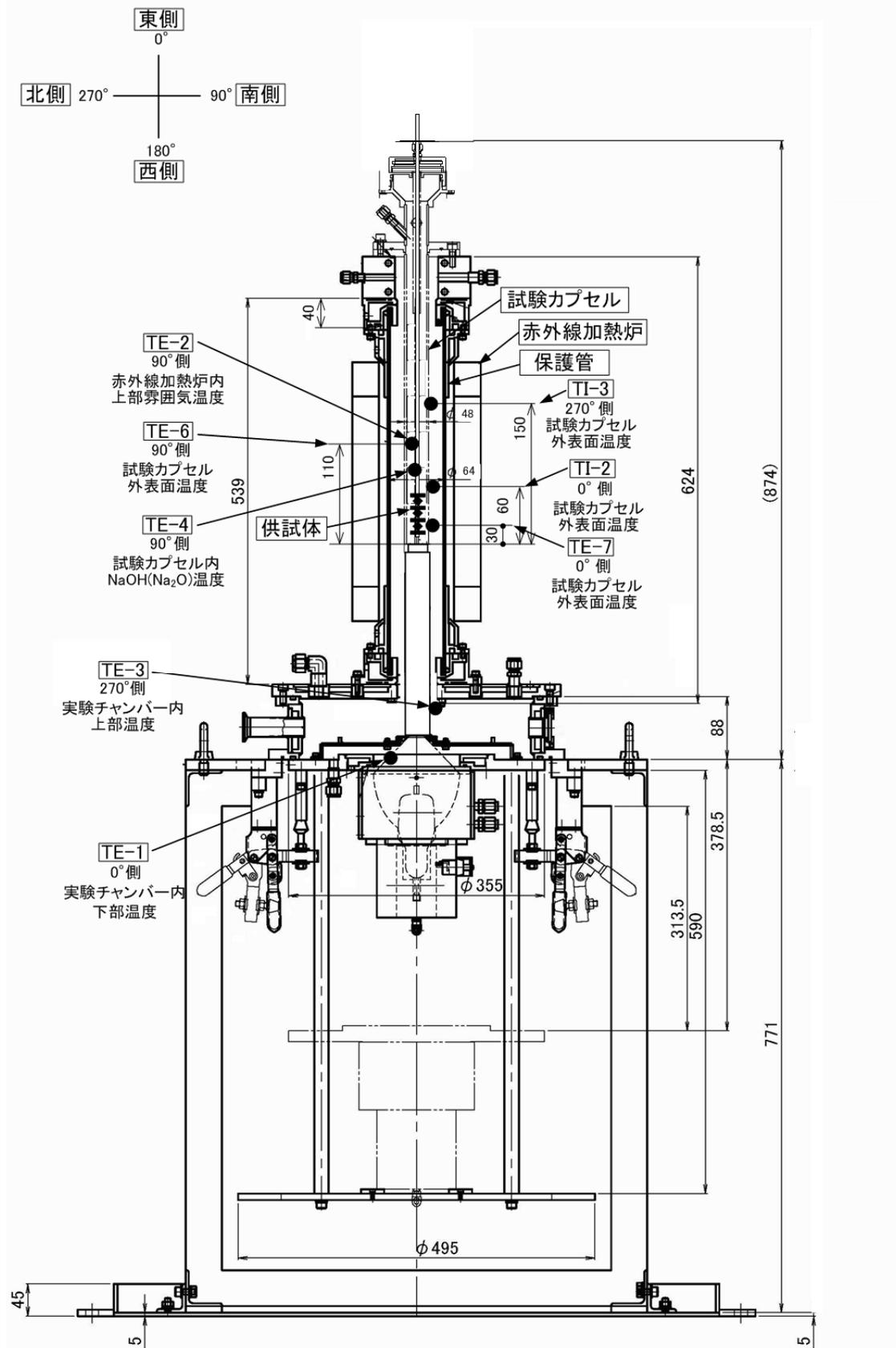


図 2 静的腐食実験熱電対設置箇所(概略図)

単位は【mm】

※HC-Case11 の熱電対設置箇所

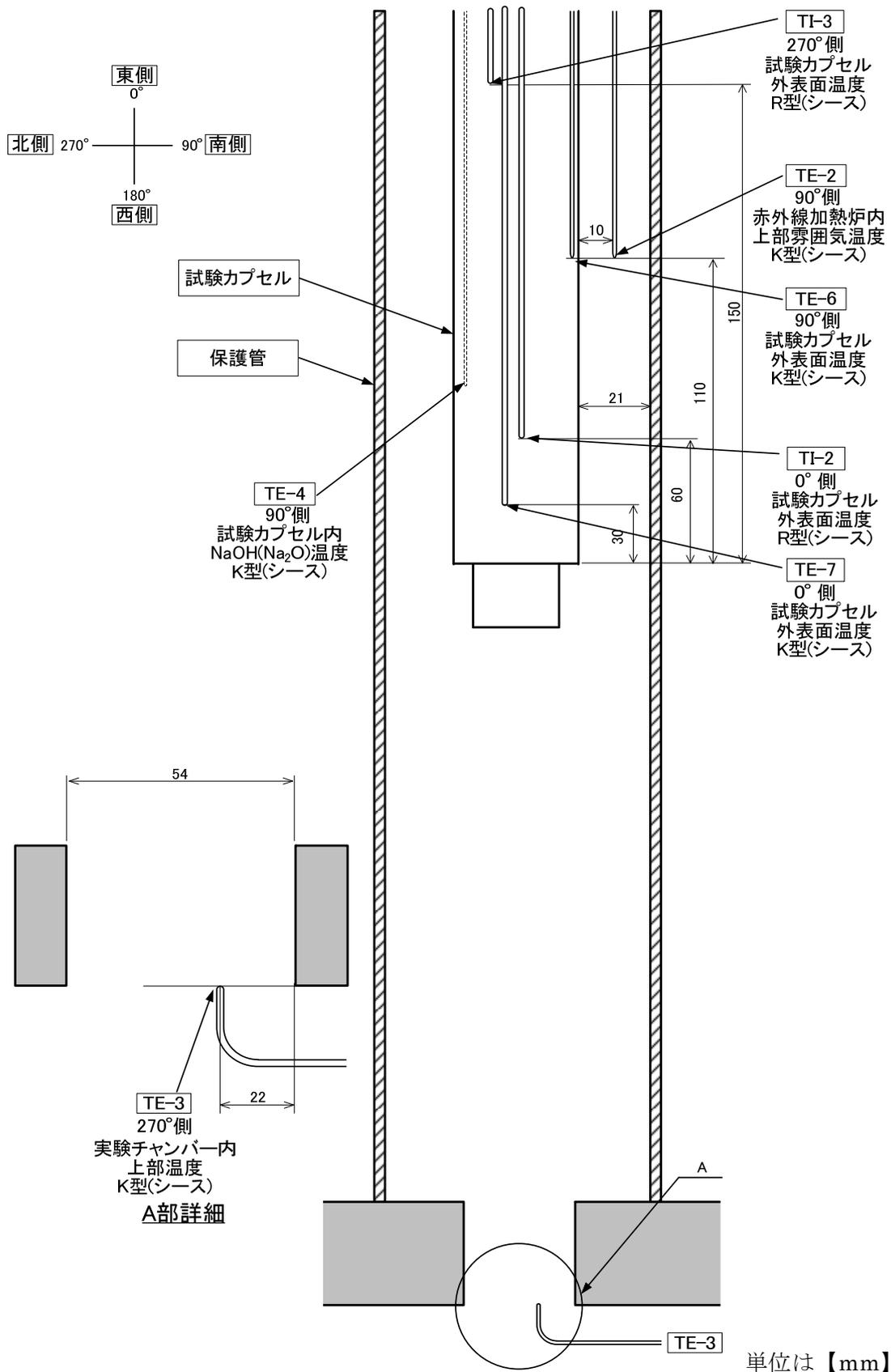
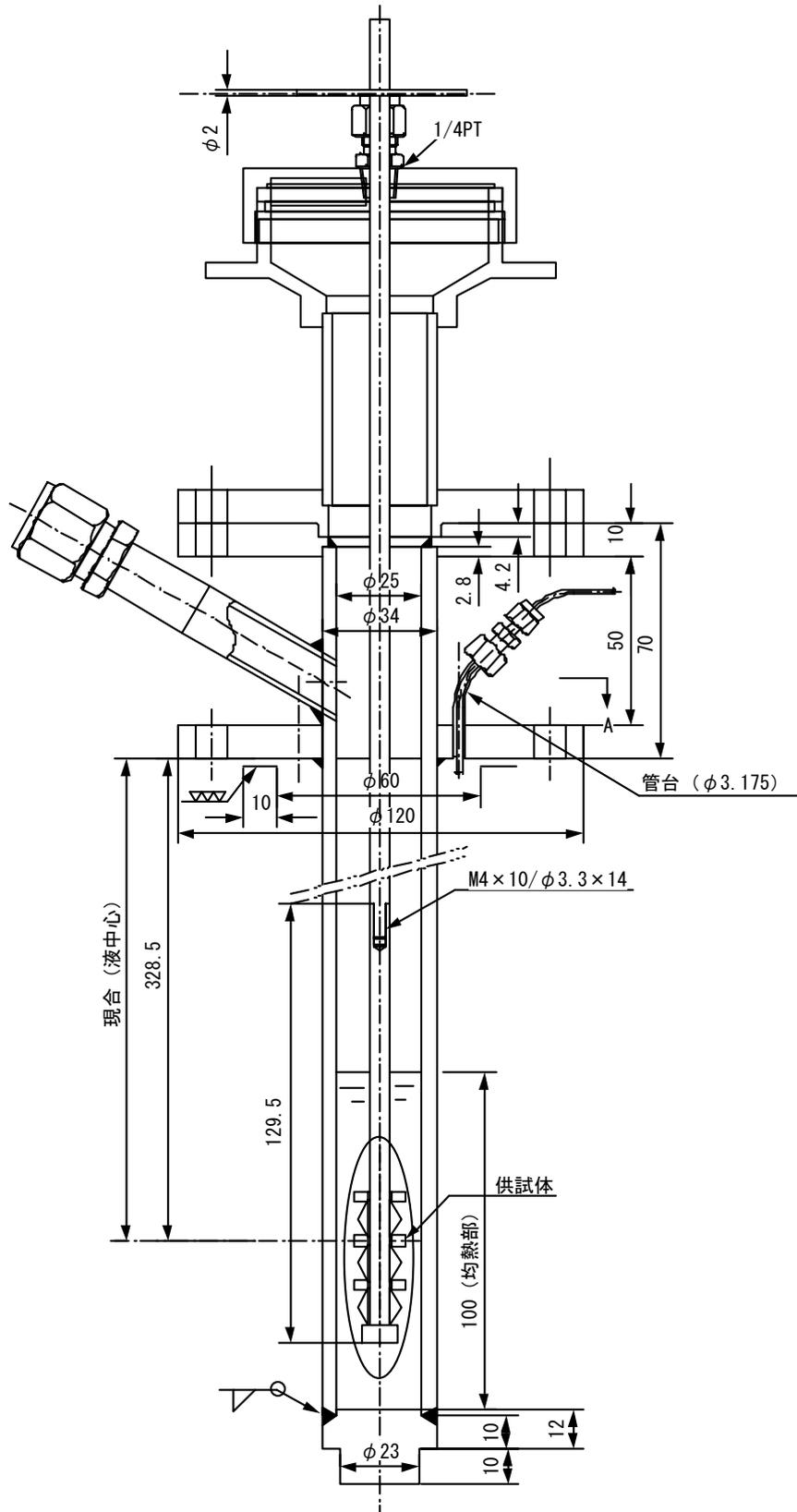


図3 静的腐食実験熱電対設置箇所(詳細図)

※HC-Case11での熱電対設置箇所



単位は【mm】

図 4 静的腐食実験用試験カプセル(小容量型)

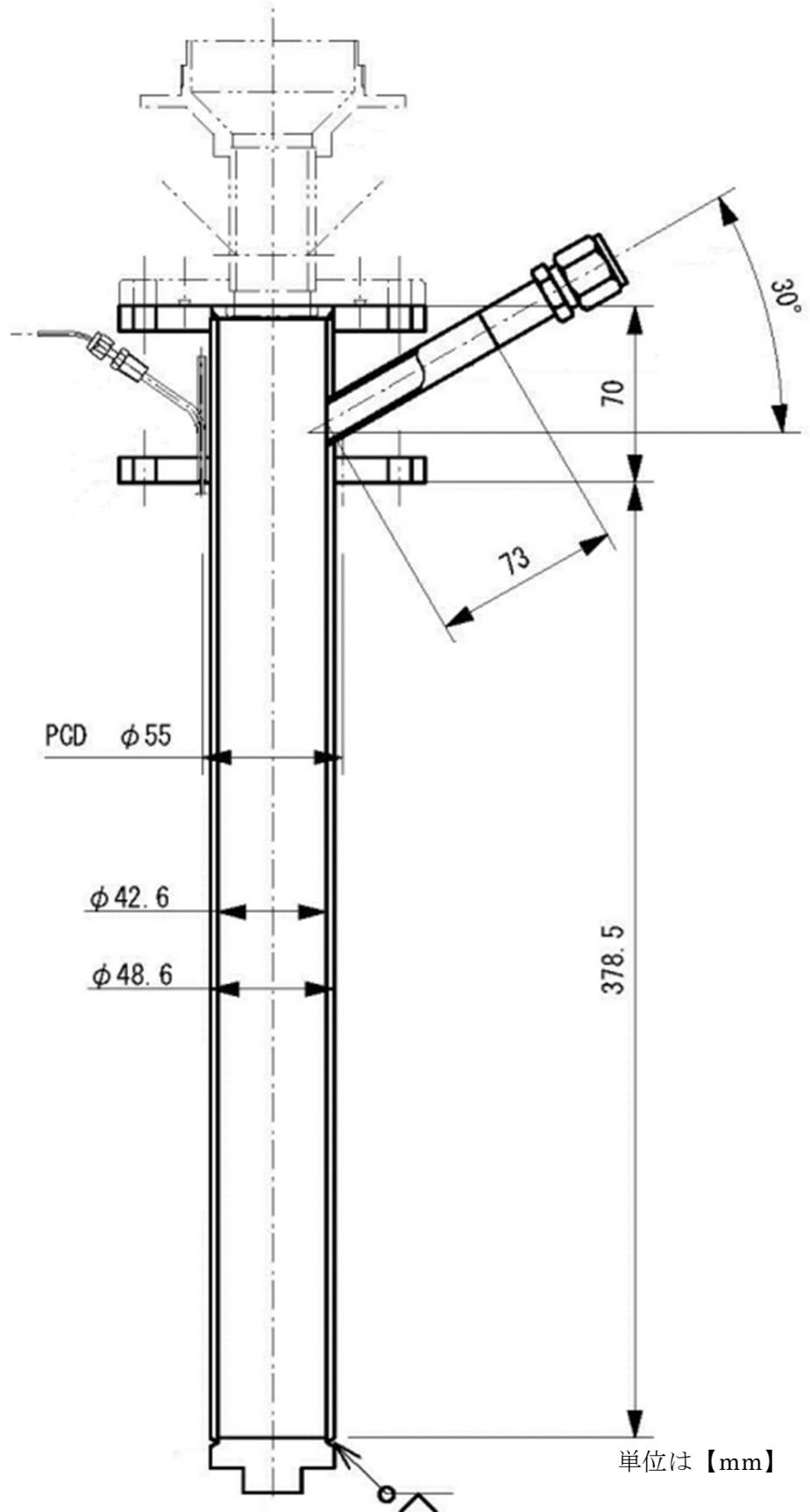


図5 静的腐食実験用試験カプセル(大容量型)

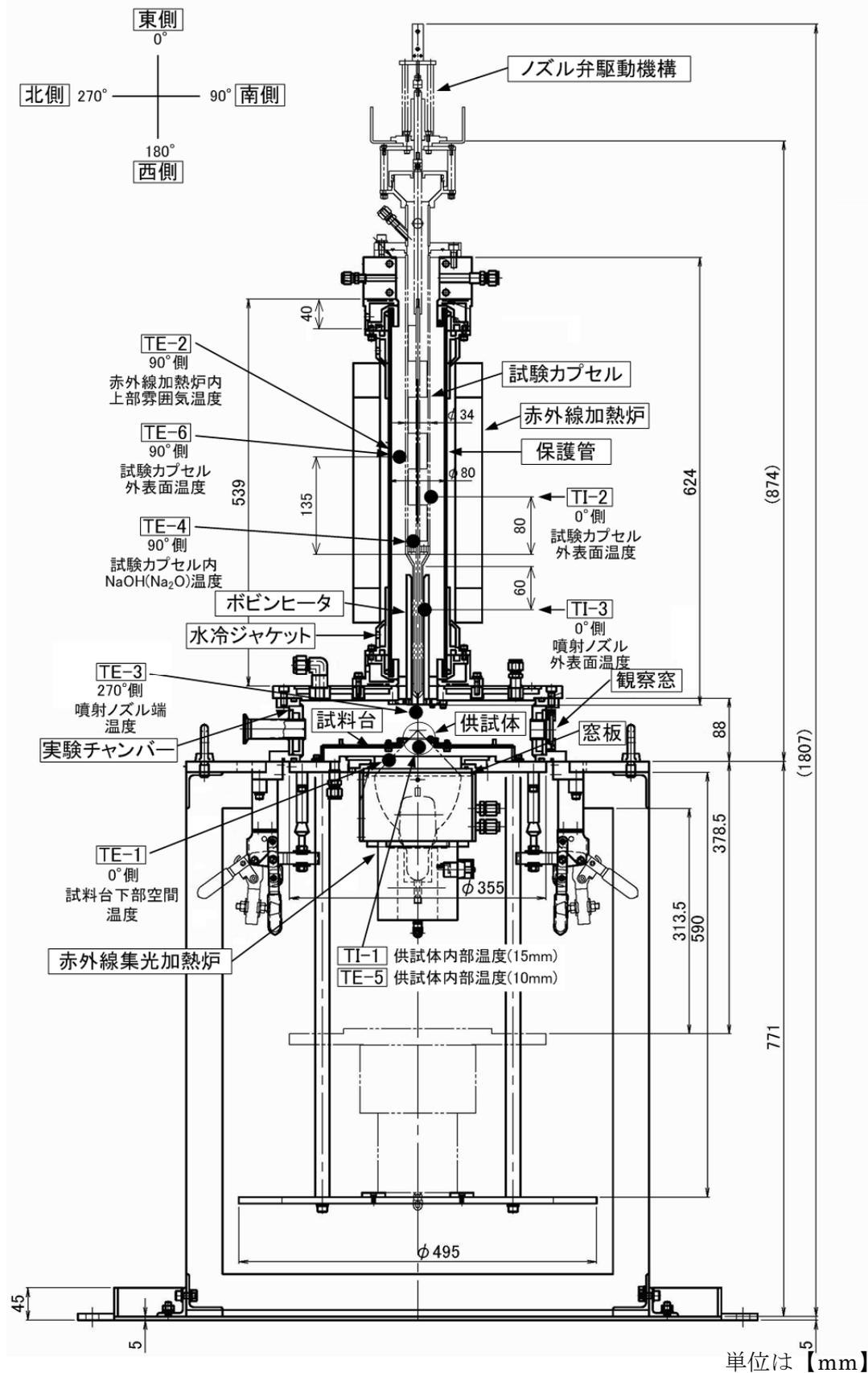


図 6 噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(概略図)

※PC-Case21 の熱電対設置箇所

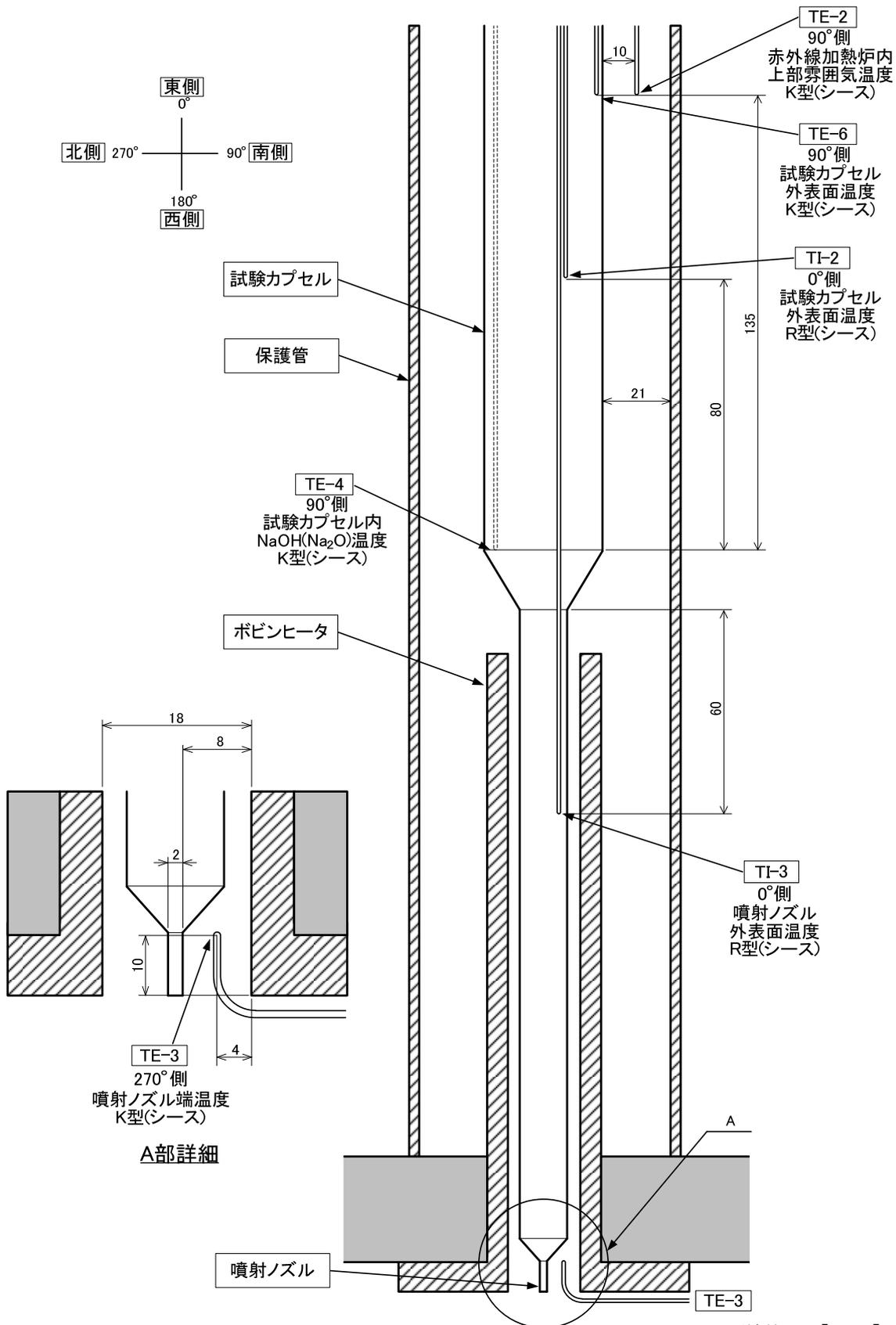


図7 噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(詳細図1)

※PC-Case21の熱電対設置箇所

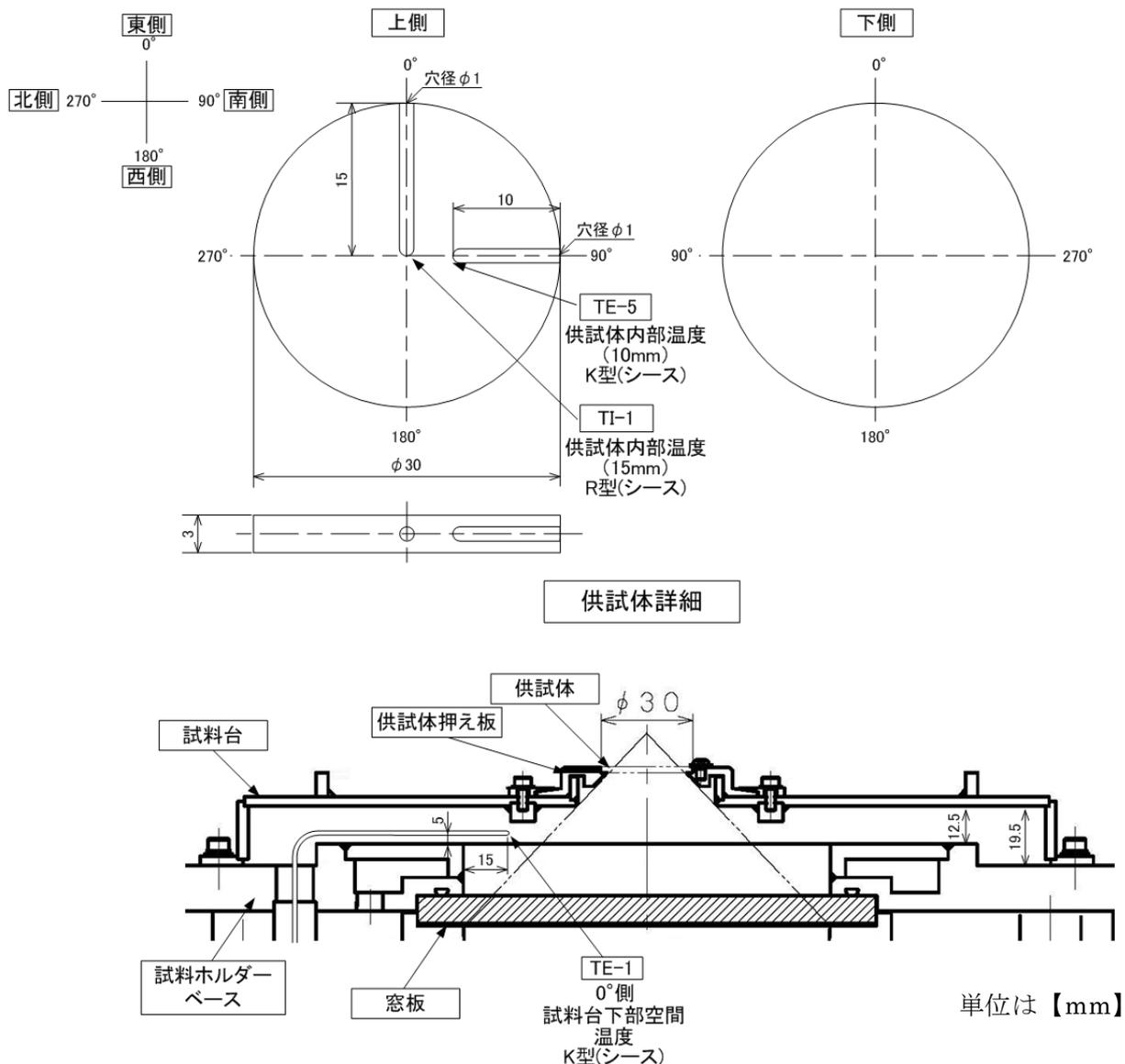
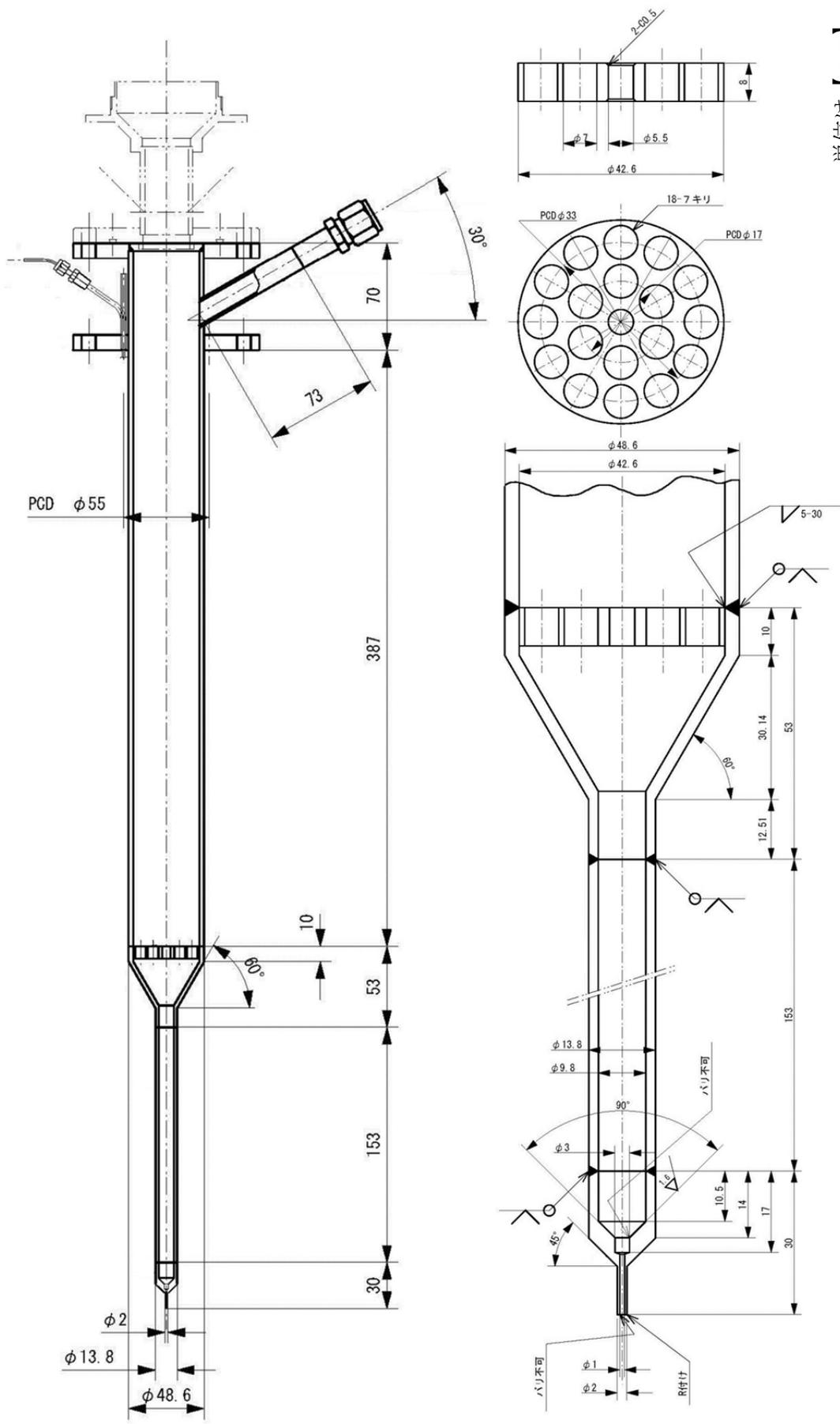


図 8 噴射衝突基礎実験熱電対設置箇所(詳細図 2)

※PC-Case21 の熱電対設置箇所





単位は【mm】

図 10 噴射衝突基礎実験用試験カプセル(大容量型)

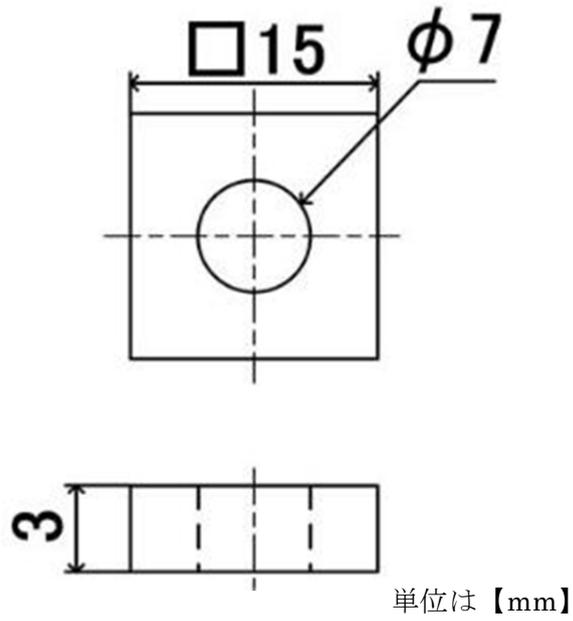


図 11 静的腐食実験用供試体

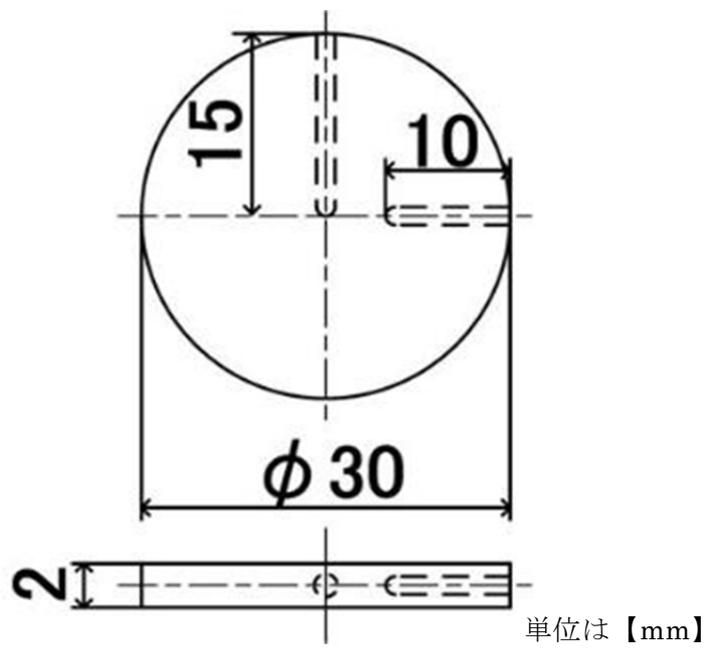


図 12 噴射衝突基礎実験用供試体

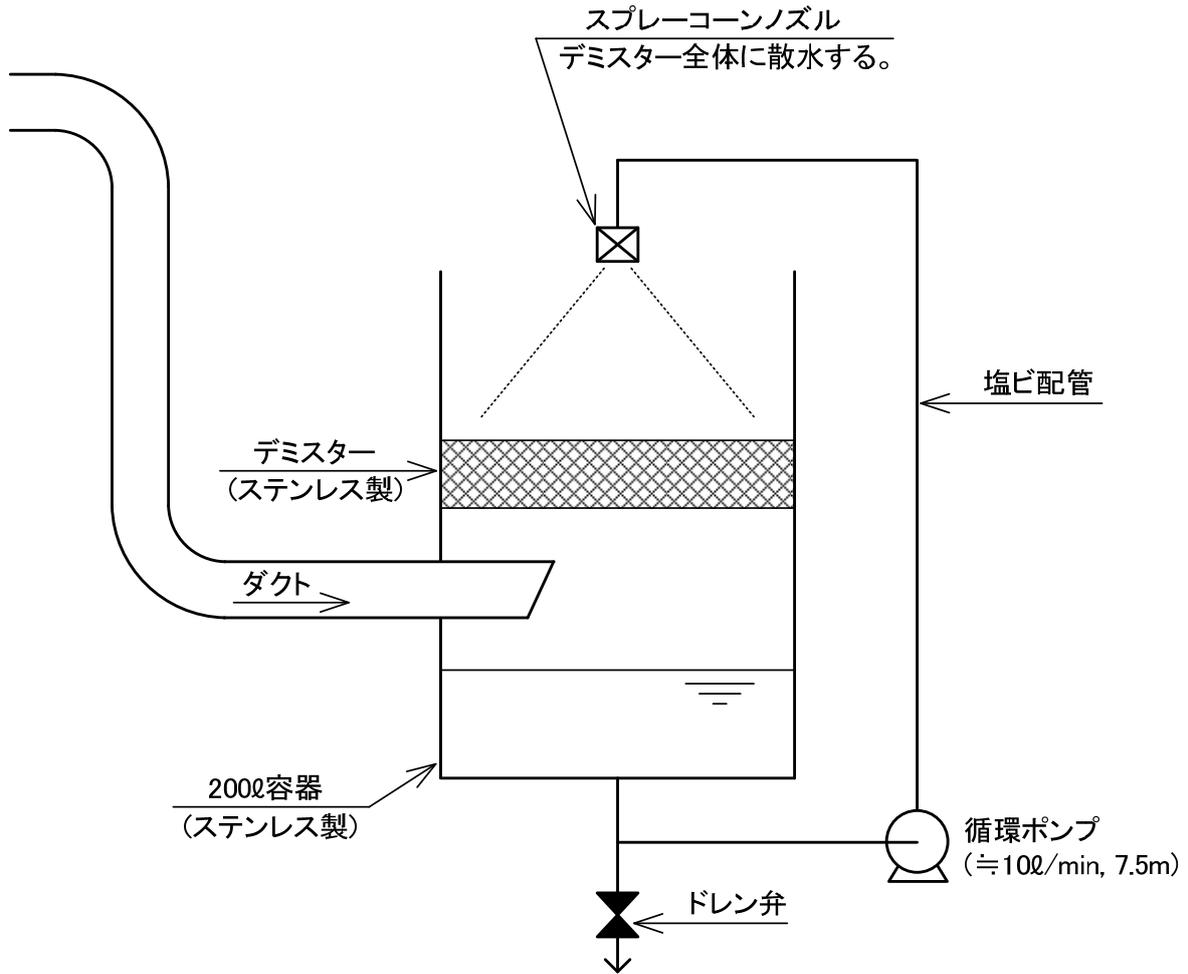


図 13 蒸気回収フィルター

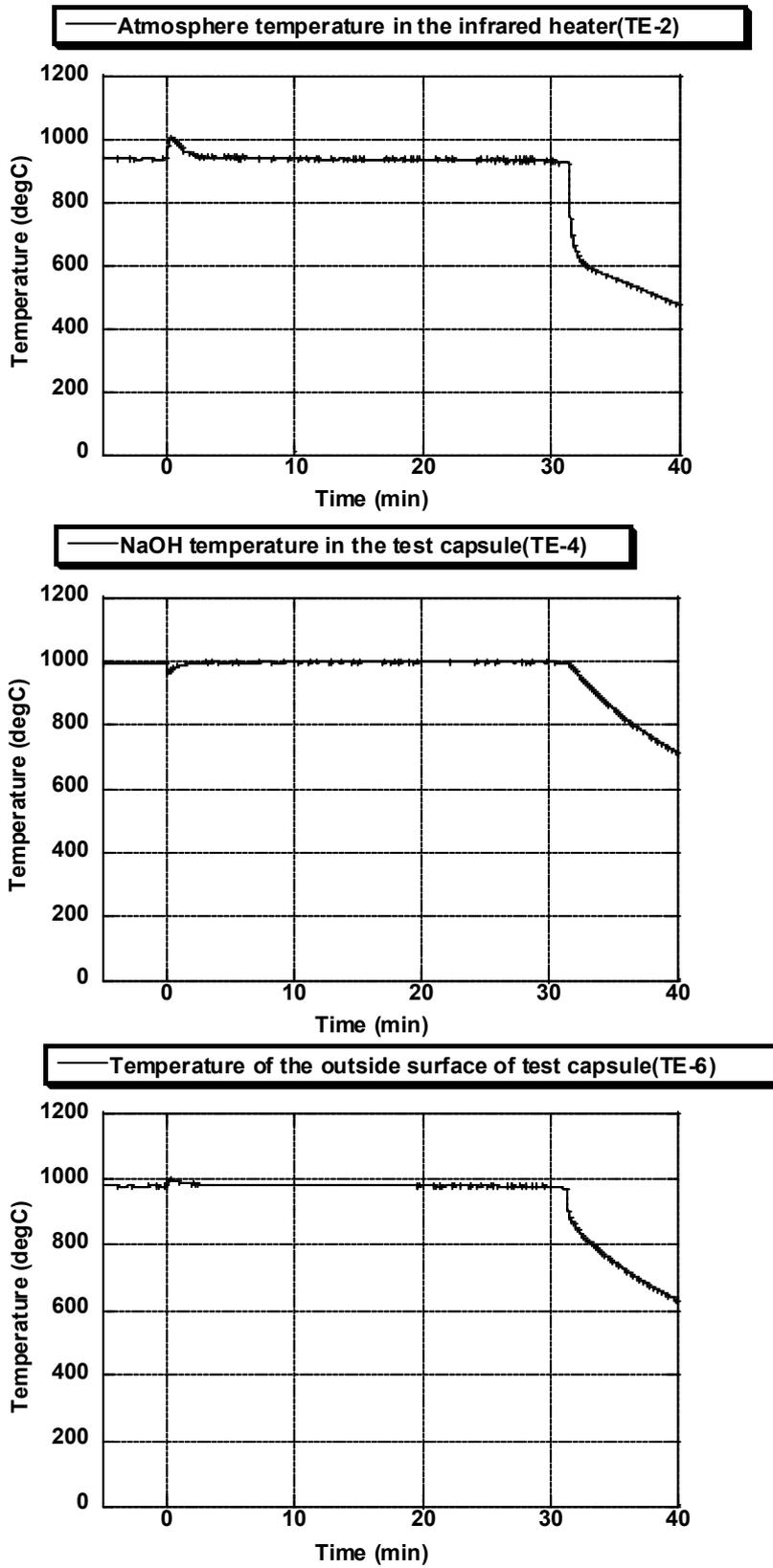


図 14.1 静的腐食実験結果(HC-Case11)

※試料/供試体温度 995.3℃、NaOH 封入量 200.6g

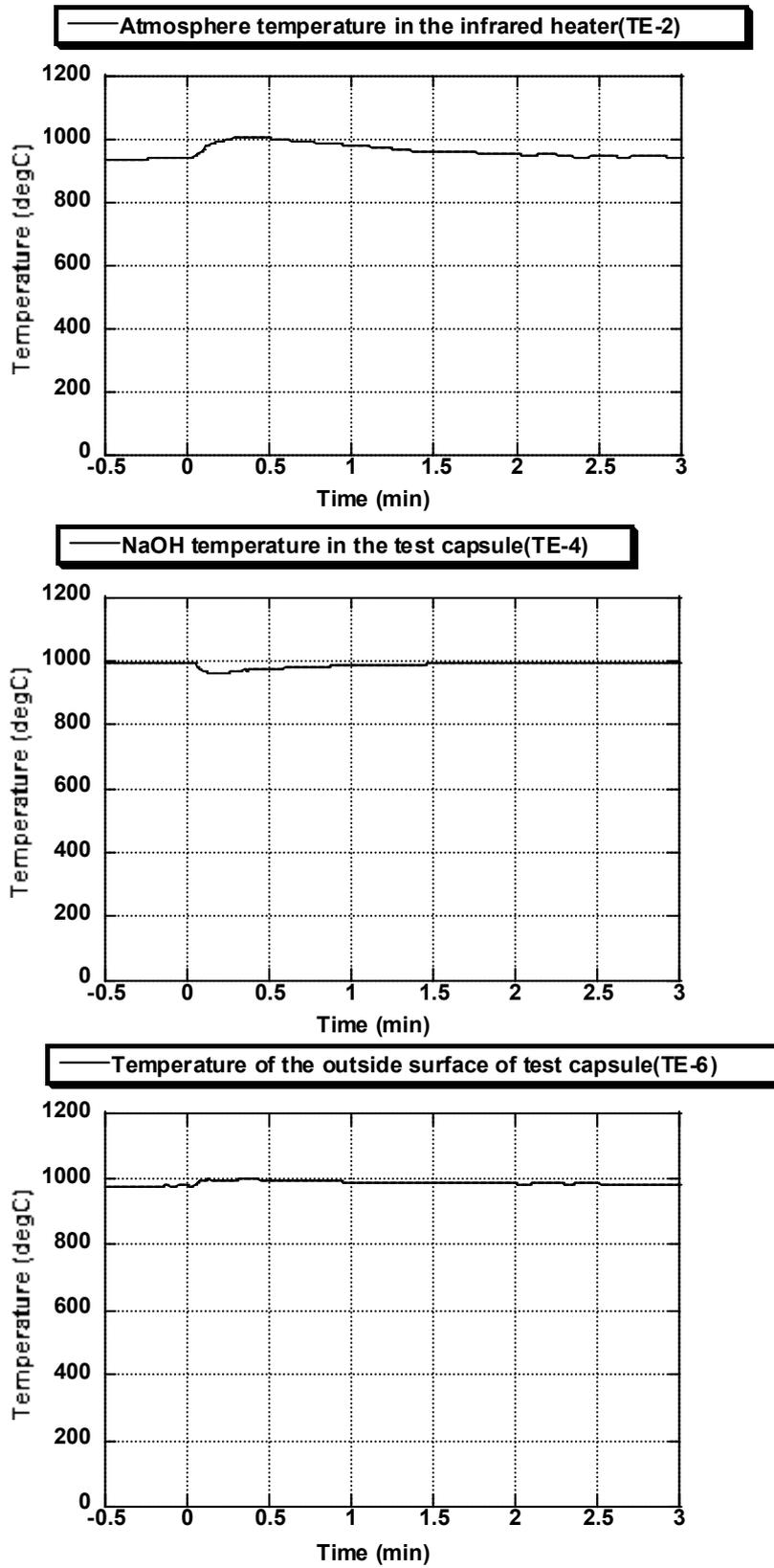


図 14.2 静的腐食実験結果(HC-Case11)(時間軸拡大)

※試料/供試体温度 995.3℃、NaOH 封入量 200.6g

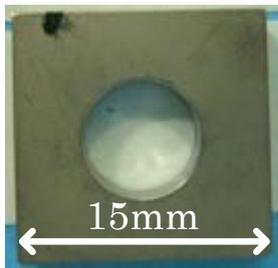


実験前

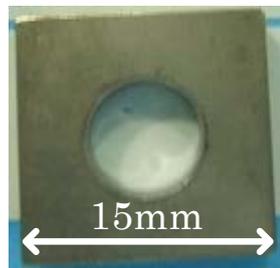


実験後

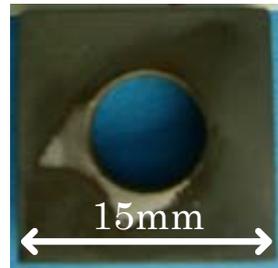
表面



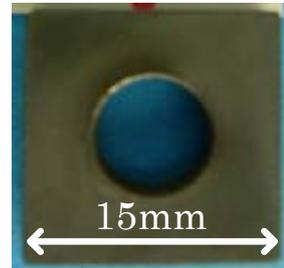
裏面



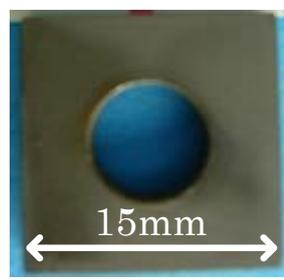
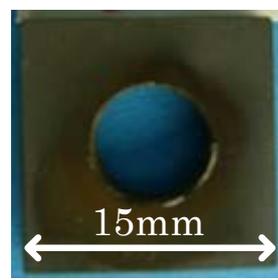
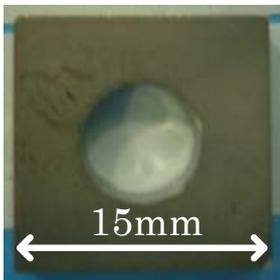
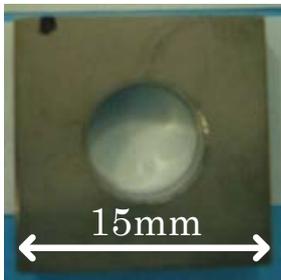
表面



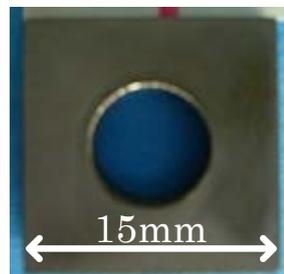
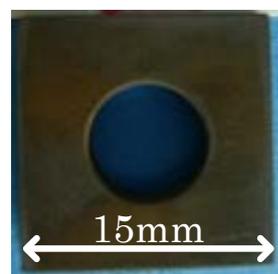
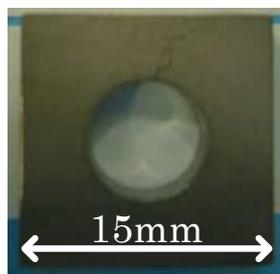
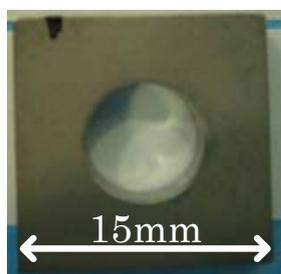
裏面



HC-Case4 No.1



HC-Case4 No.2



HC-Case4 No.3

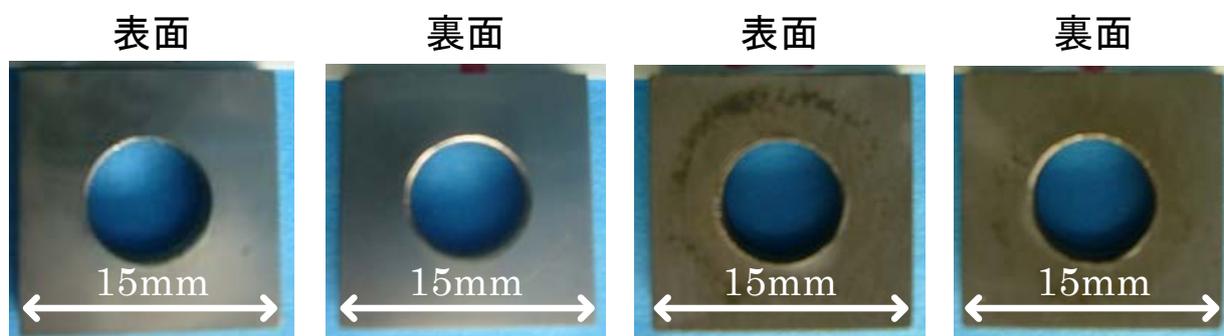
図 15 実験前後の供試体外観(HC-Case4)  
※試料/供試体温度 802.4℃、NaOH 封入量 70.42g



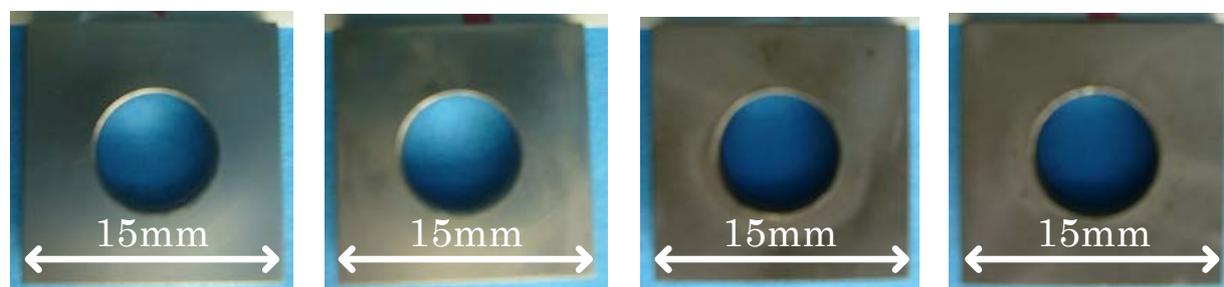
実験前



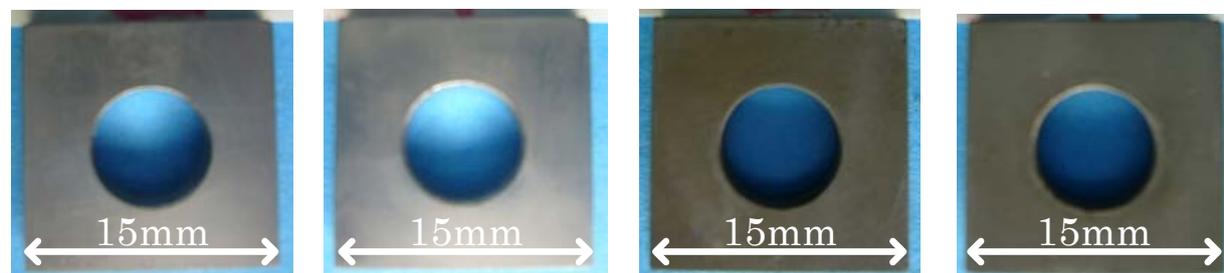
実験後



HC-Case5 No.1



HC-Case5 No.2



HC-Case5 No.3

図 16 実験前後の供試体外観(HC-Case5)  
※試料/供試体温度 804.7℃、NaOH 封入量 100.11g

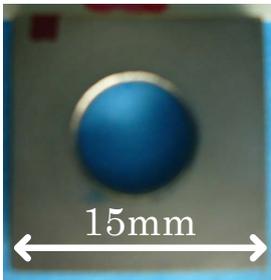


実験前

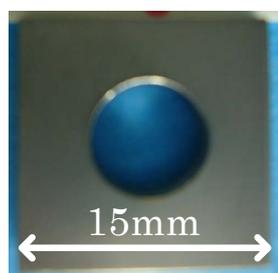


実験後

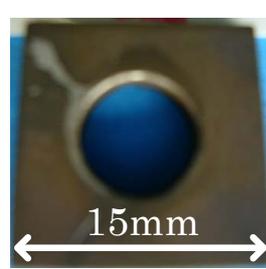
表面



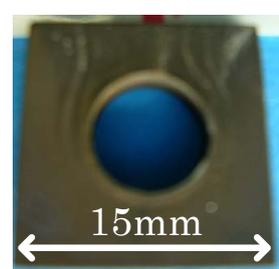
裏面



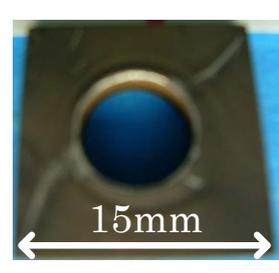
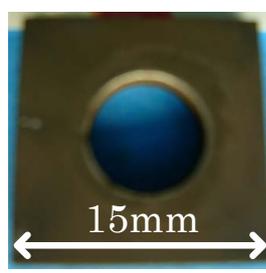
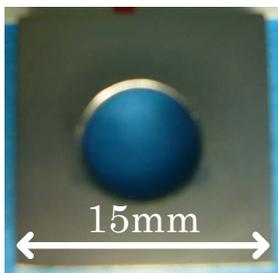
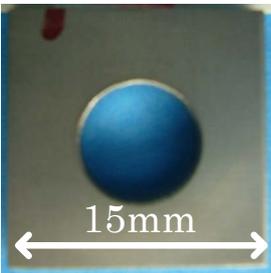
表面



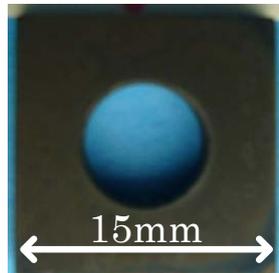
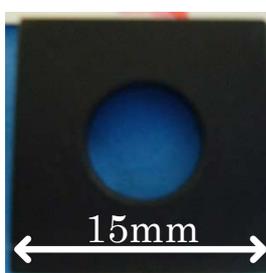
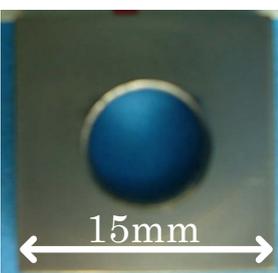
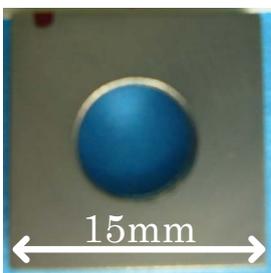
裏面



HC-Case7 No.1



HC-Case7 No.2



HC-Case7 No.3

図 17 実験前後の供試体外観(HC-Case7)  
※試料/供試体温度 999.0℃、NaOH 封入量 100.3g

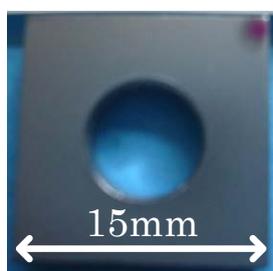


実験前

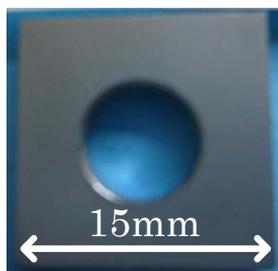


実験後

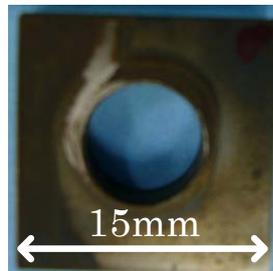
表面



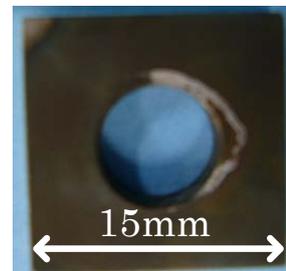
裏面



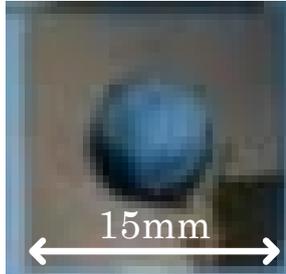
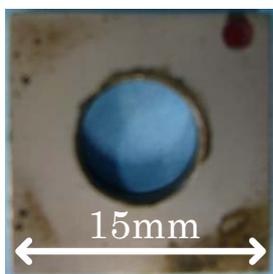
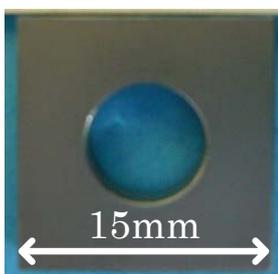
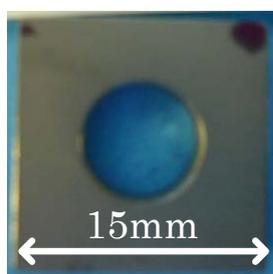
表面



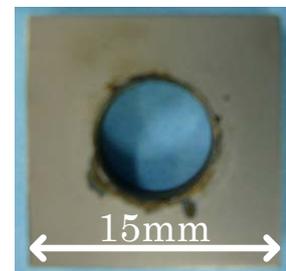
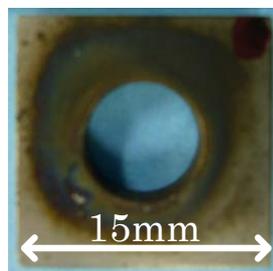
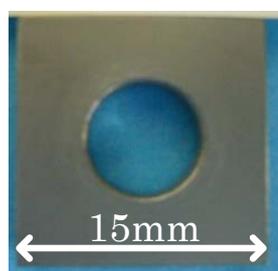
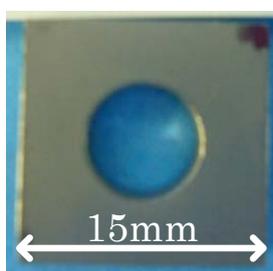
裏面



HC-Case8 No.1



HC-Case8 No.2



HC-Case8 No.3

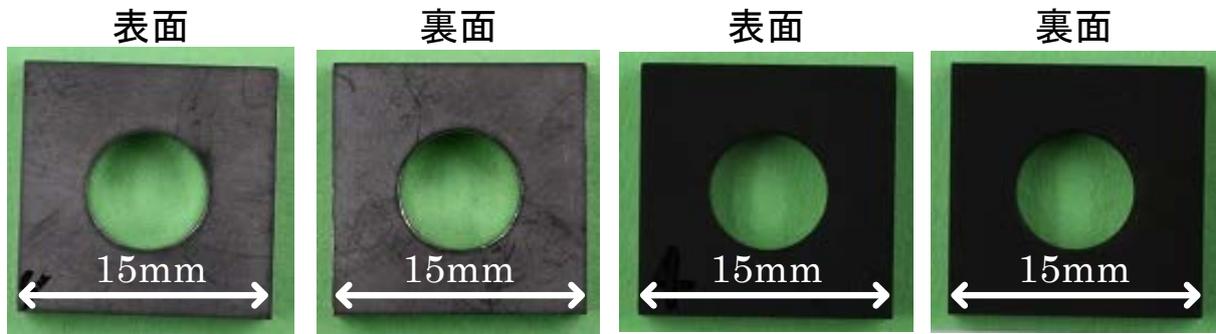
図 18 実験前後の供試体外観(HC-Case8)  
※試料/供試体温度 999.6℃、NaOH 封入量 100.5g



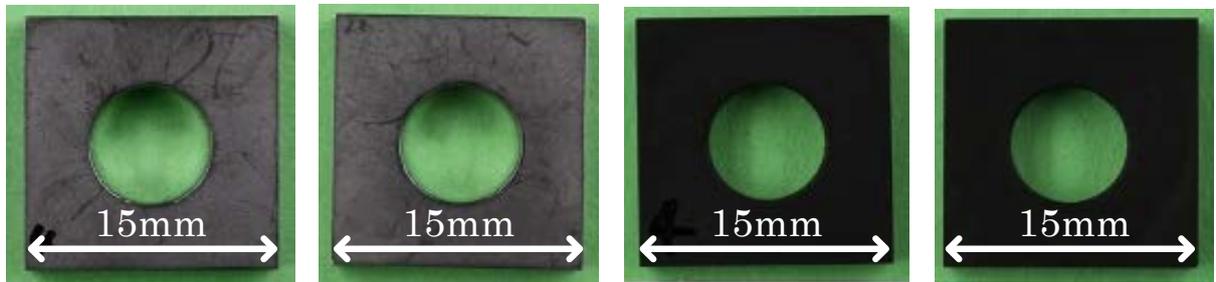
実験前



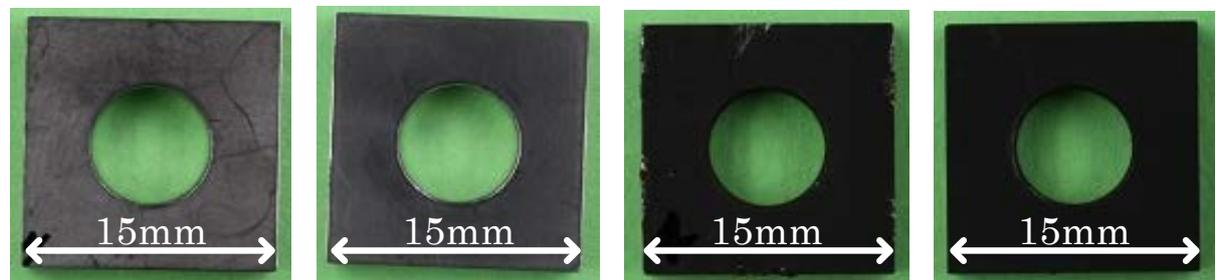
実験後



HC-Case9 No.1



HC-Case9 No.2



HC-Case9 No.3

図 19 実験前後の供試体外観(HC-Case9)  
※試料/供試体温度 605.0℃、NaOH 封入量 100.0g

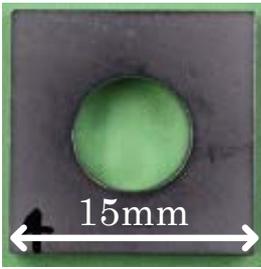


実験前

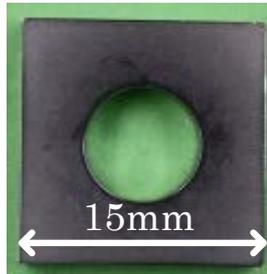


実験後

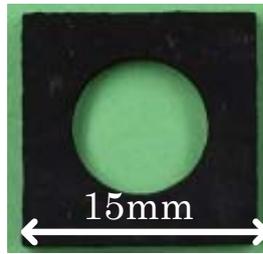
表面



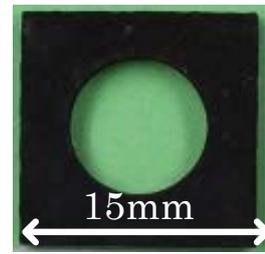
裏面



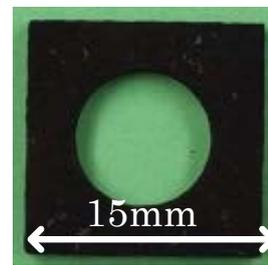
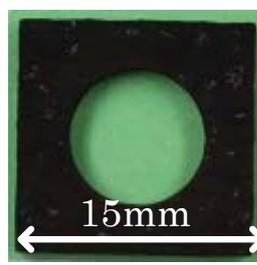
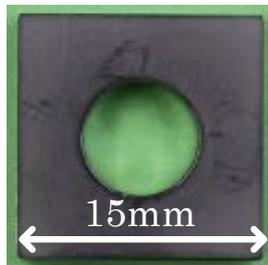
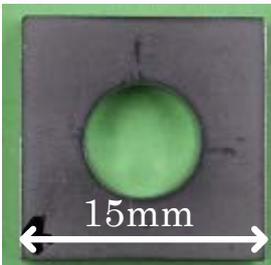
表面



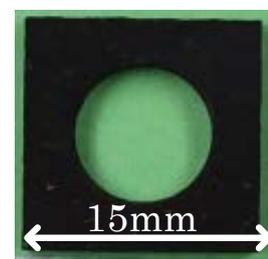
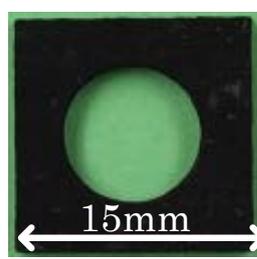
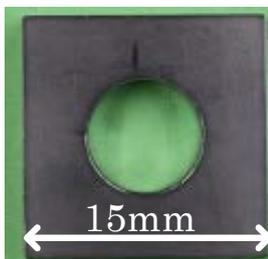
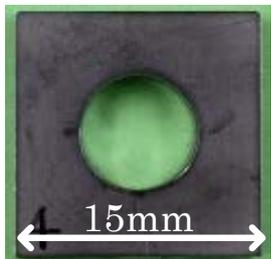
裏面



HC-Case10 No.1



HC-Case10 No.2



HC-Case10 No.3

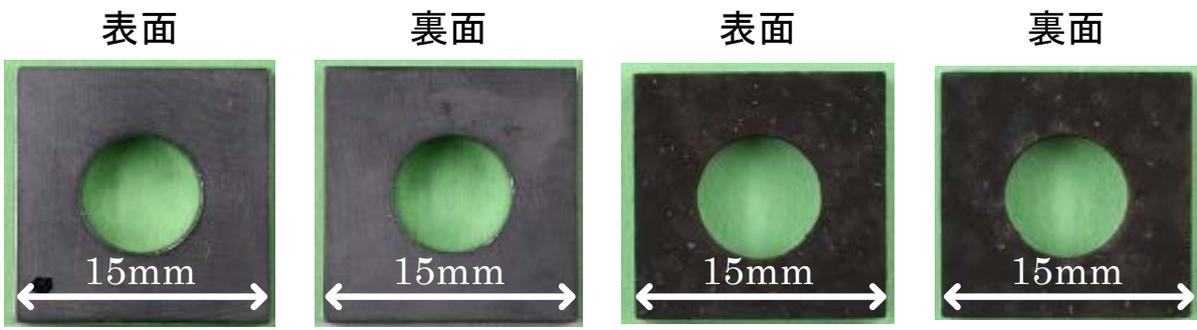
図 20 実験前後の供試体外観(HC-Case10)  
※試料/供試体温度 1026.7℃、NaOH 封入量 200.6g



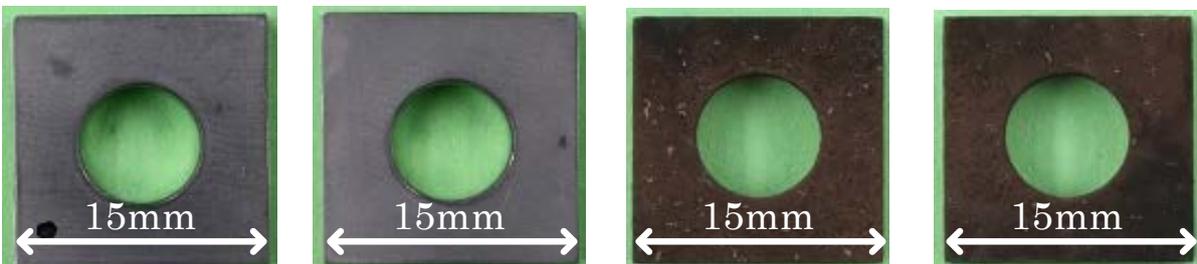
実験前



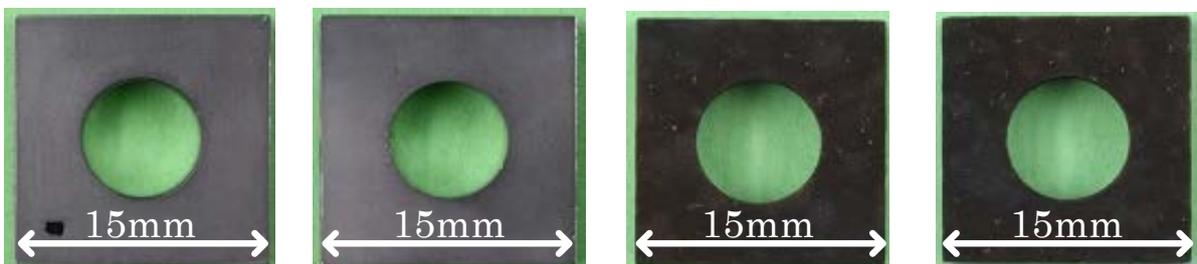
実験後



HC-Case11 No.1



HC-Case11 No.2



HC-Case11 No.3

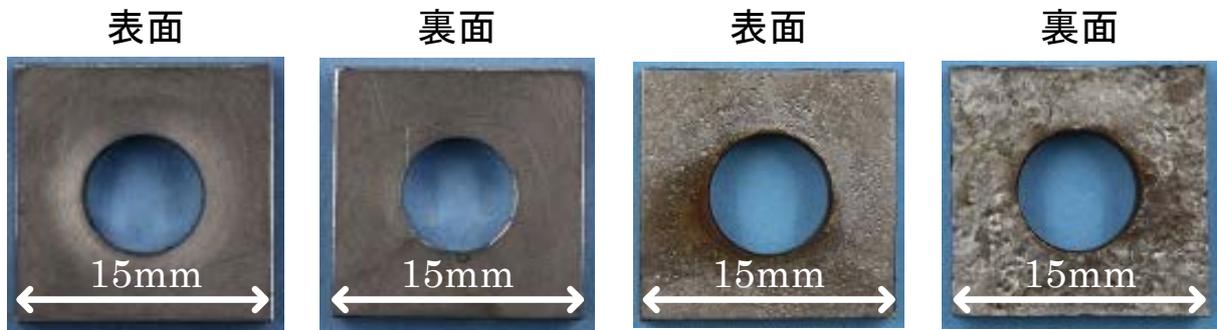
図 21 実験前後の供試体外観(HC-Case11)  
※試料/供試体温度 995.3℃、NaOH 封入量 200.6g



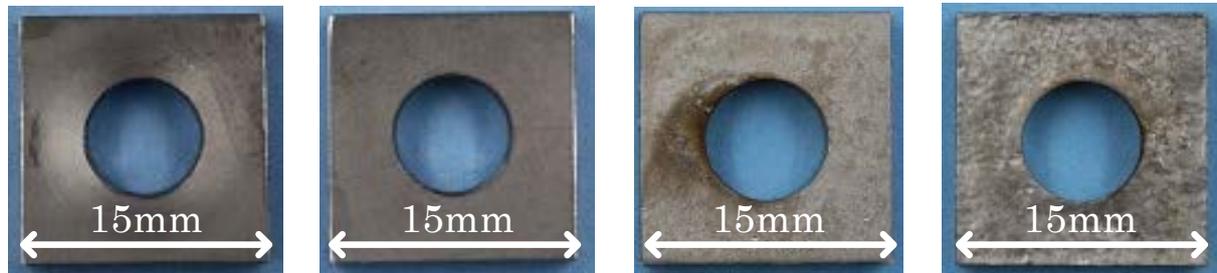
実験前



実験後



HC-Case12 No.1



HC-Case12 No.2

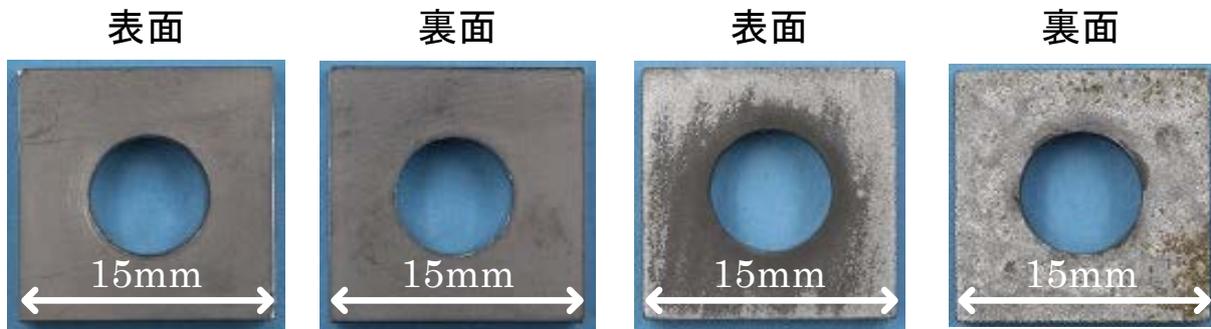
図 22 実験前後の供試体外観(HC-Case12)  
※試料/供試体温度 597.3℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 160.0g:40.0g



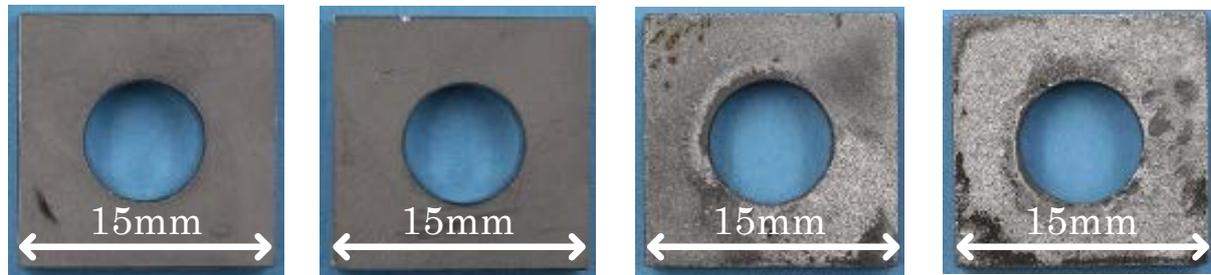
実験前



実験後



HC-Case13 No.1



HC-Case13 No.2

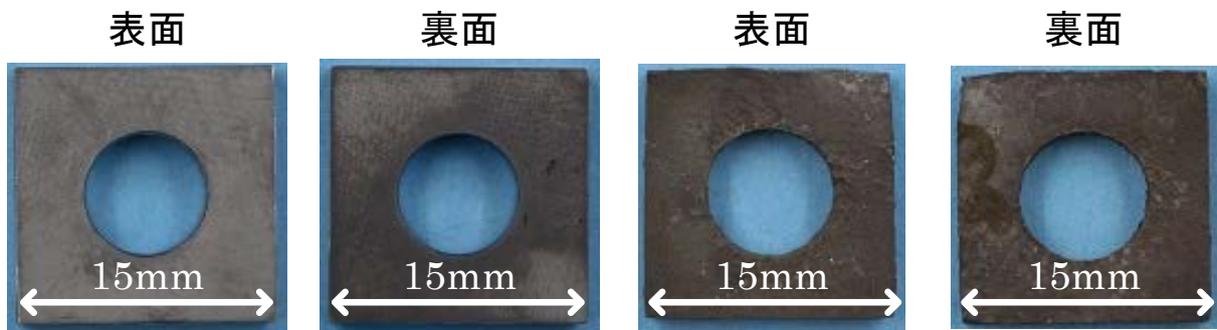
図 23 実験前後の供試体外観(HC-Case13)  
※試料/供試体温度 804.5℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 160.0g:40.0g



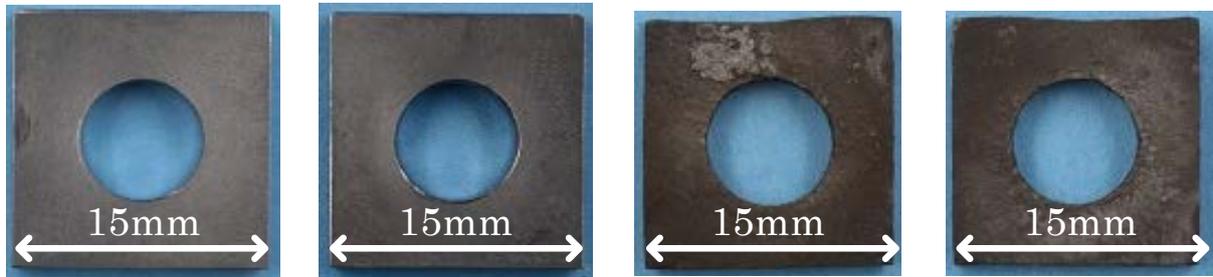
実験前



実験後



HC-Case14 No.1



HC-Case14 No.2

図 24 実験前後の供試体外観(HC-Case14)

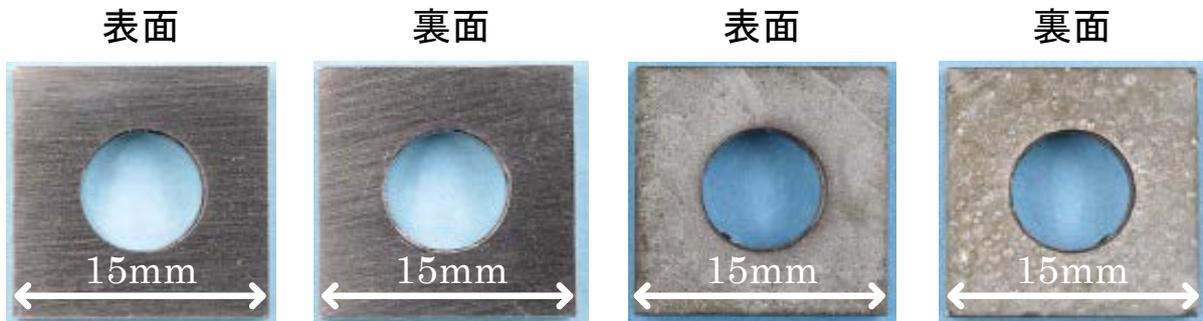
※試料/供試体温度 1005.9℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 160.0g:40.0g



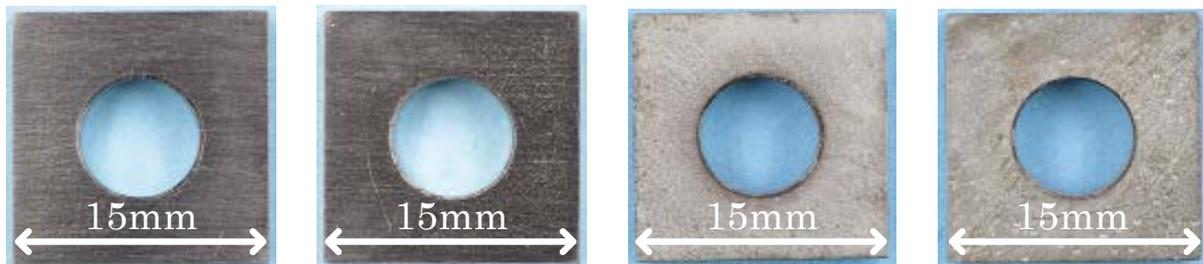
実験前



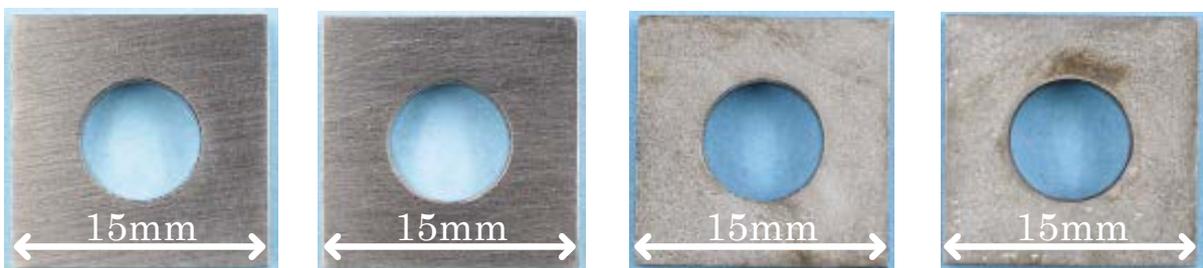
実験後



HC-Case15 No.1



HC-Case15 No.2



HC-Case15 No.3

図 25 実験前後の供試体外観(HC-Case15)  
※試料/供試体温度 600.2℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 180.0g:20.0g

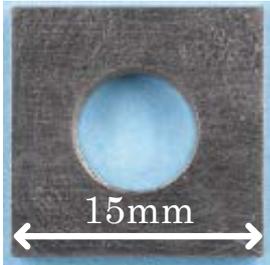


実験前

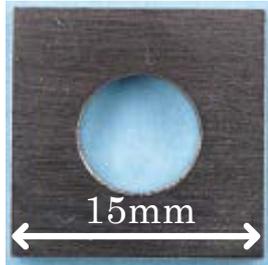


実験後

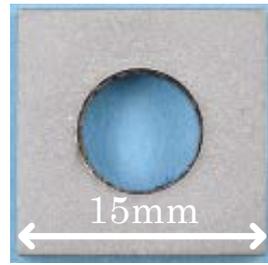
表面



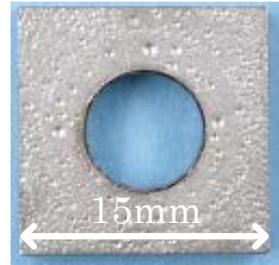
裏面



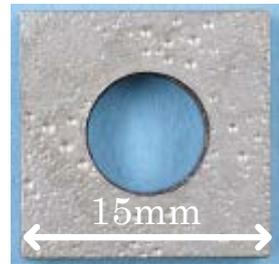
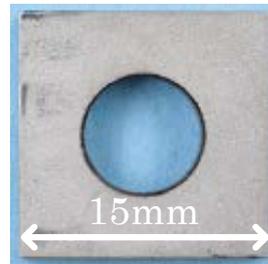
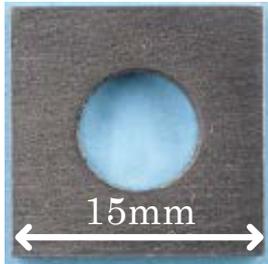
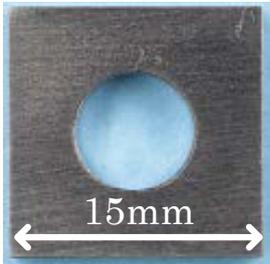
表面



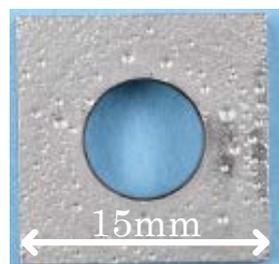
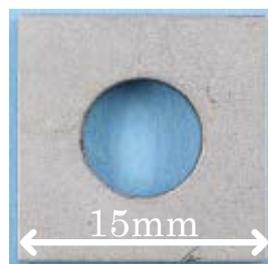
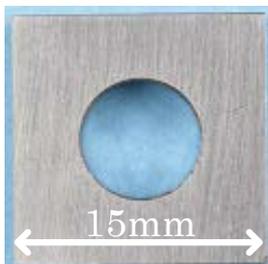
裏面



HC-Case16 No.1



HC-Case16 No.2



HC-Case16 No.3

図 26 実験前後の供試体外観(HC-Case16)

※試料/供試体温度 602.9℃、NaOH:Na<sub>2</sub>O 封入量 180.0g:20.0g



実験前

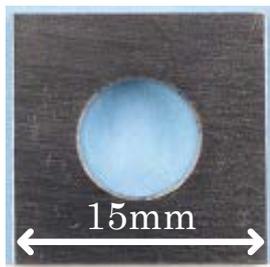


実験後

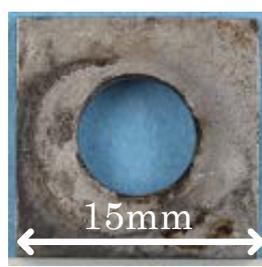
表面



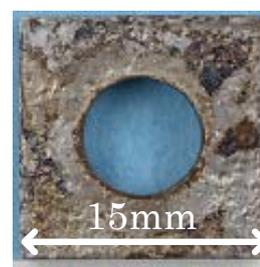
裏面



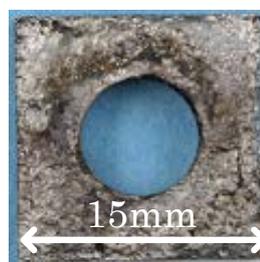
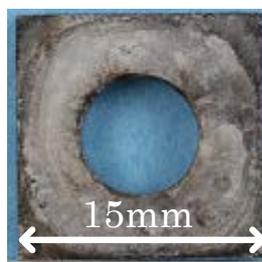
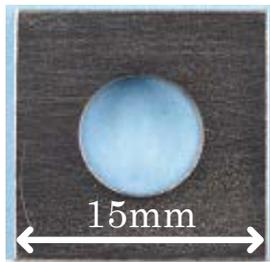
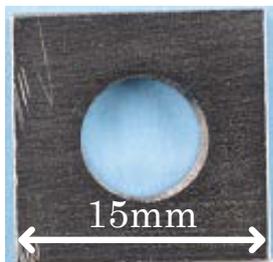
表面



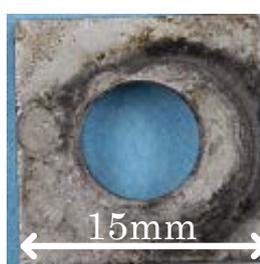
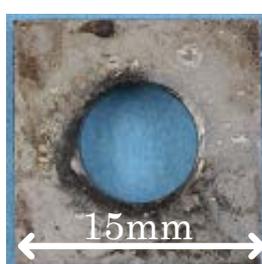
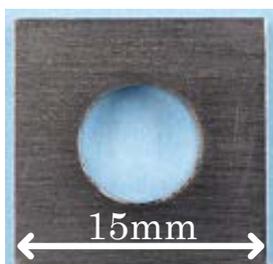
裏面



HC-Case17 No.1



HC-Case17 No.2



HC-Case17 No.3

図 27 実験前後の供試体外観(HC-Case17)  
※試料/供試体温度 587.7℃、NaOH:Na 封入量 80.3g:92.6g

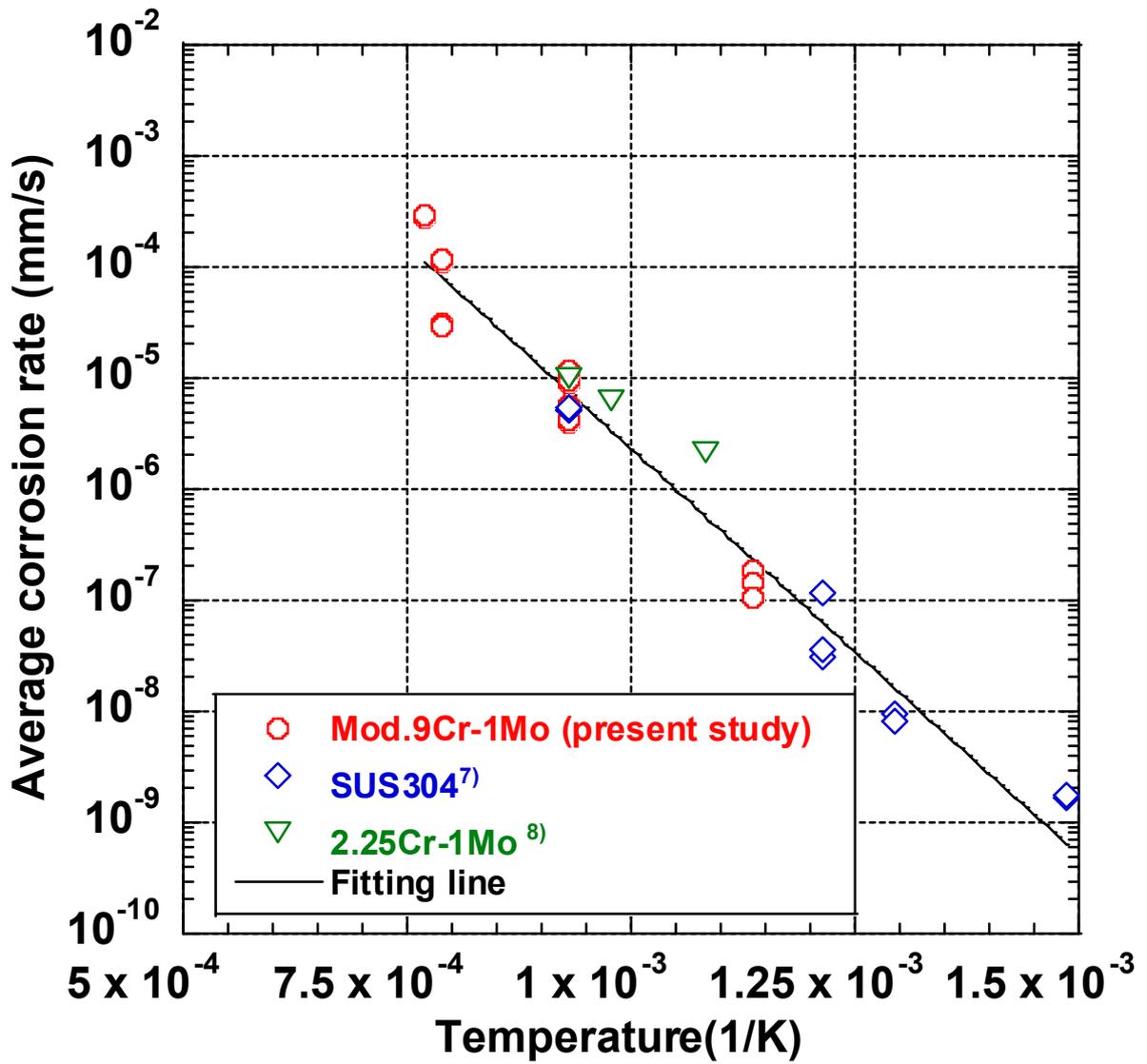


図 28 NaOH 単体試料環境における平均腐食速度

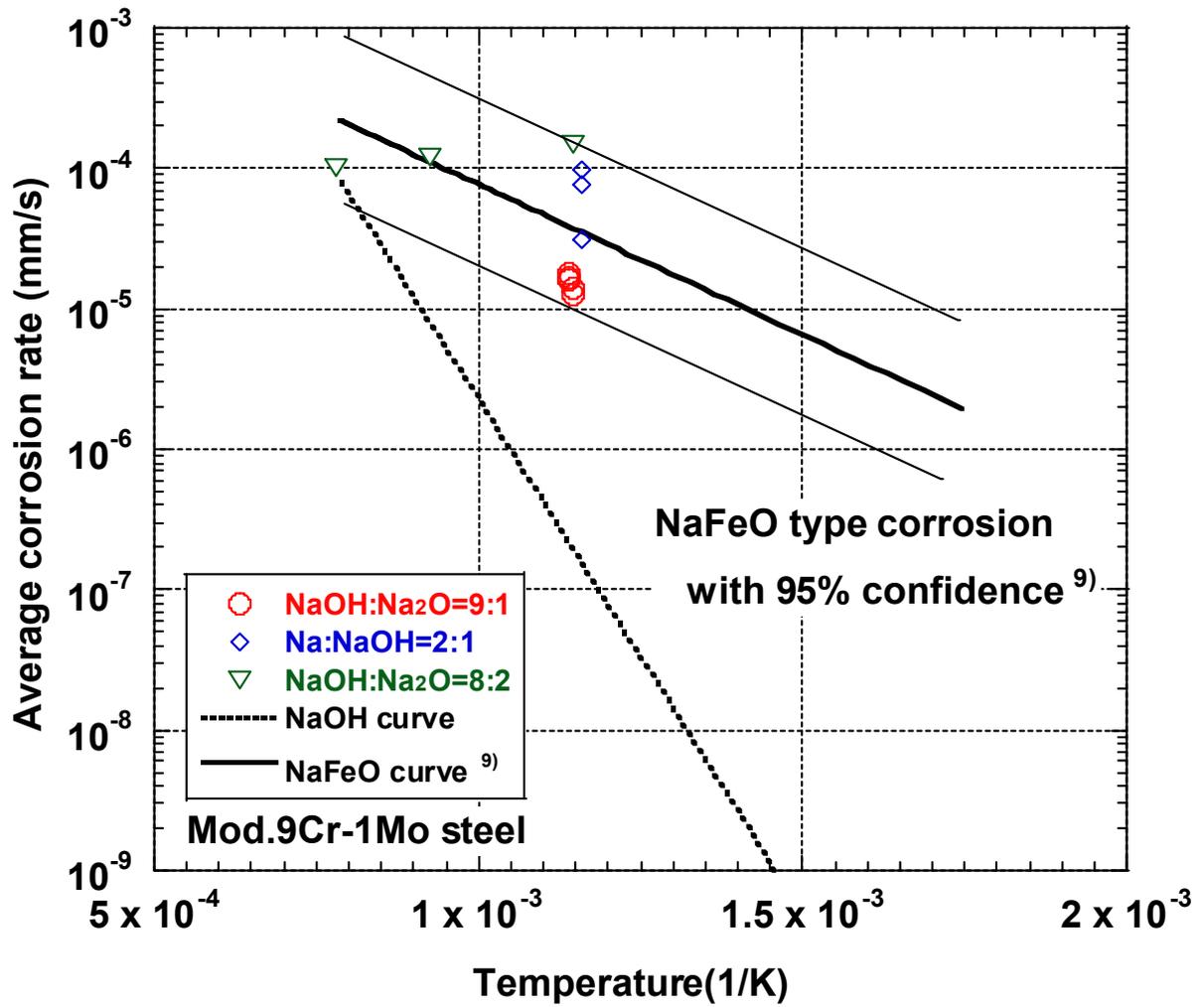


図 29 NaOH-Na<sub>2</sub>O 混合試料環境における平均腐食速度

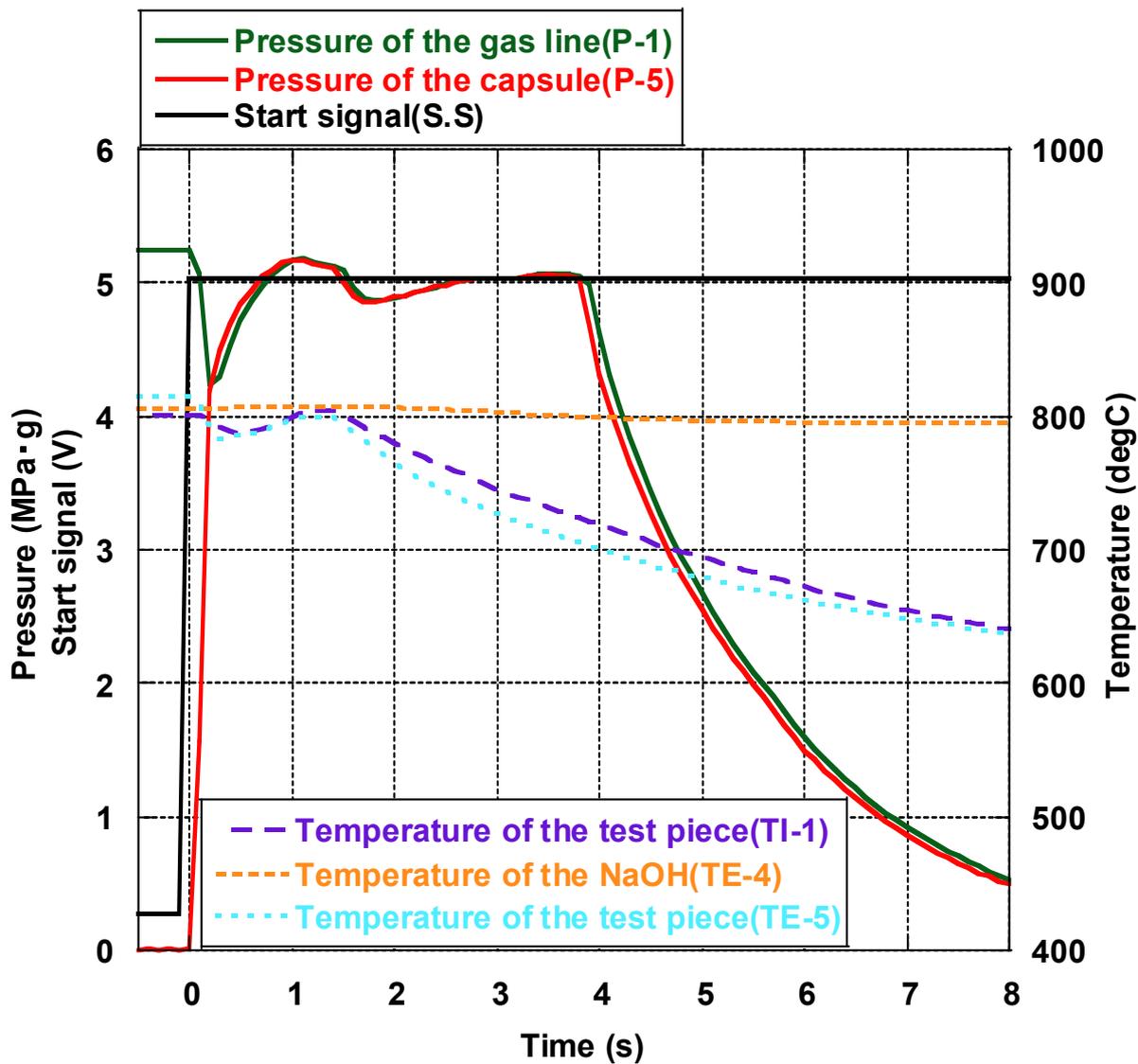


図 30 噴射衝突基礎実験結果(PC-Case21)

※試料/供試体温度 800°C、NaOH 単体試料環境、噴射速度 71.6m/s

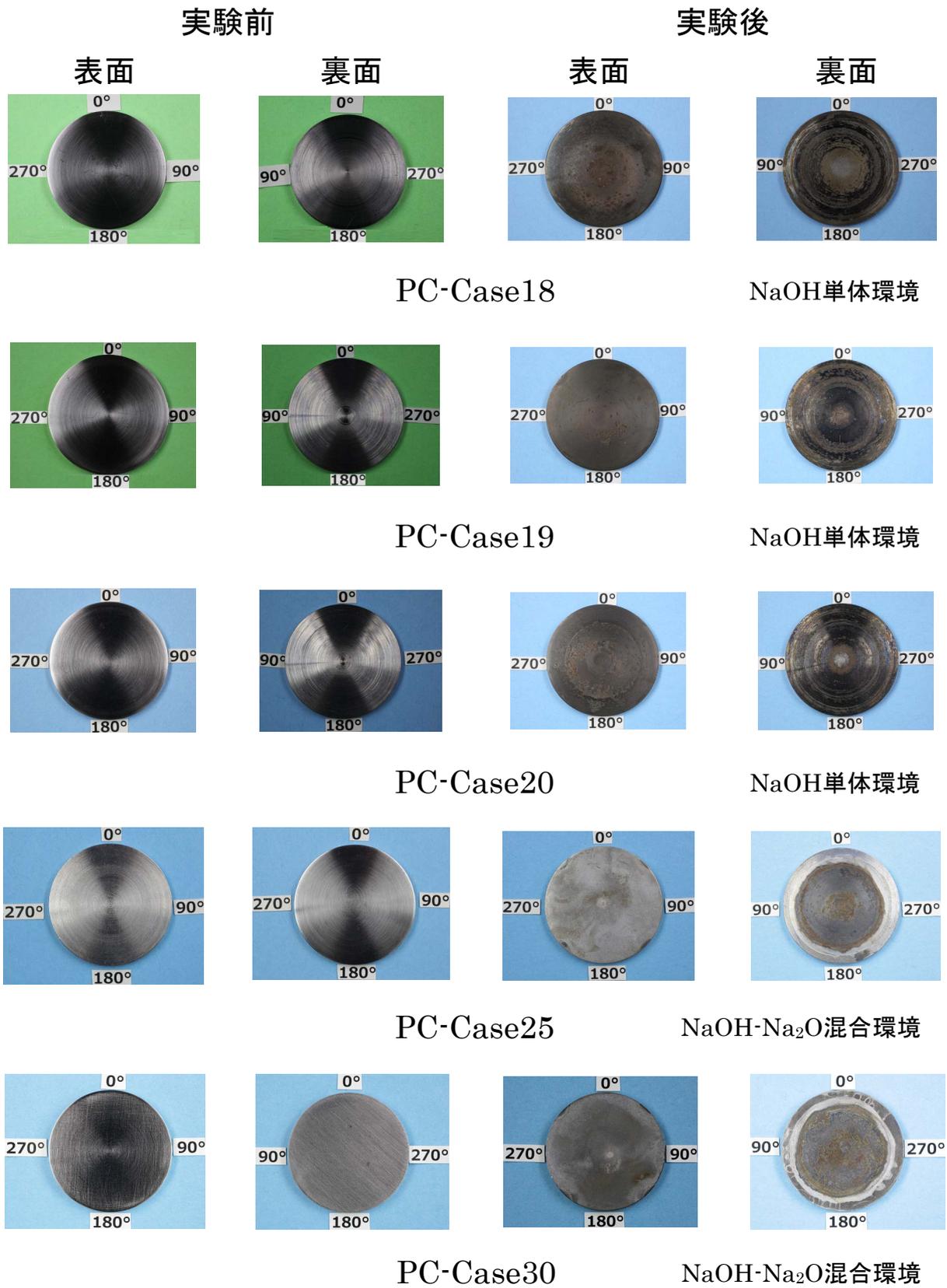


図 31 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 600°C)



図 32 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 800°C)(1/3)

※PC-Case2-2 の実験前の供試体裏面は未撮影

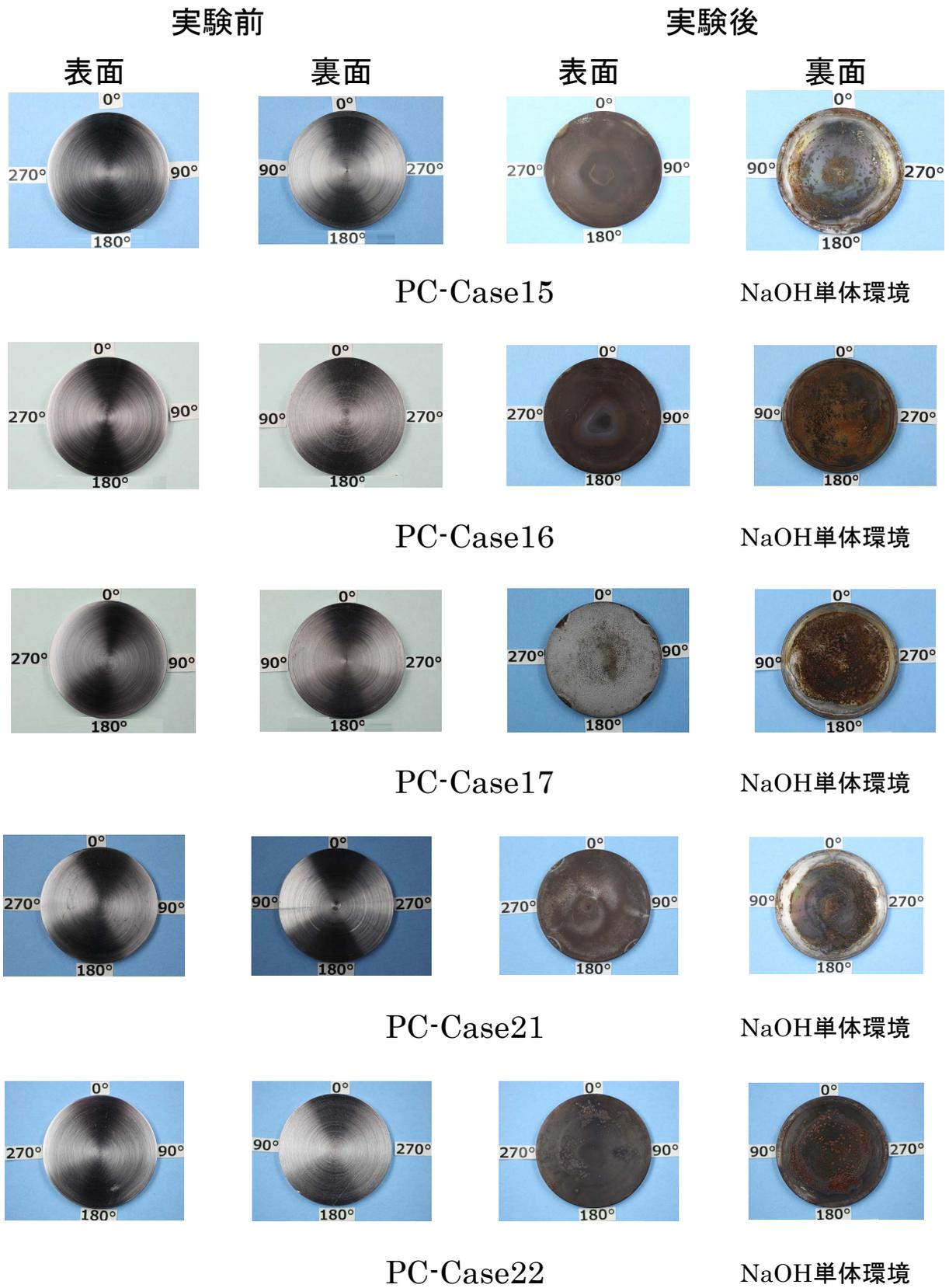


図 32 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 800°C)(2/3)

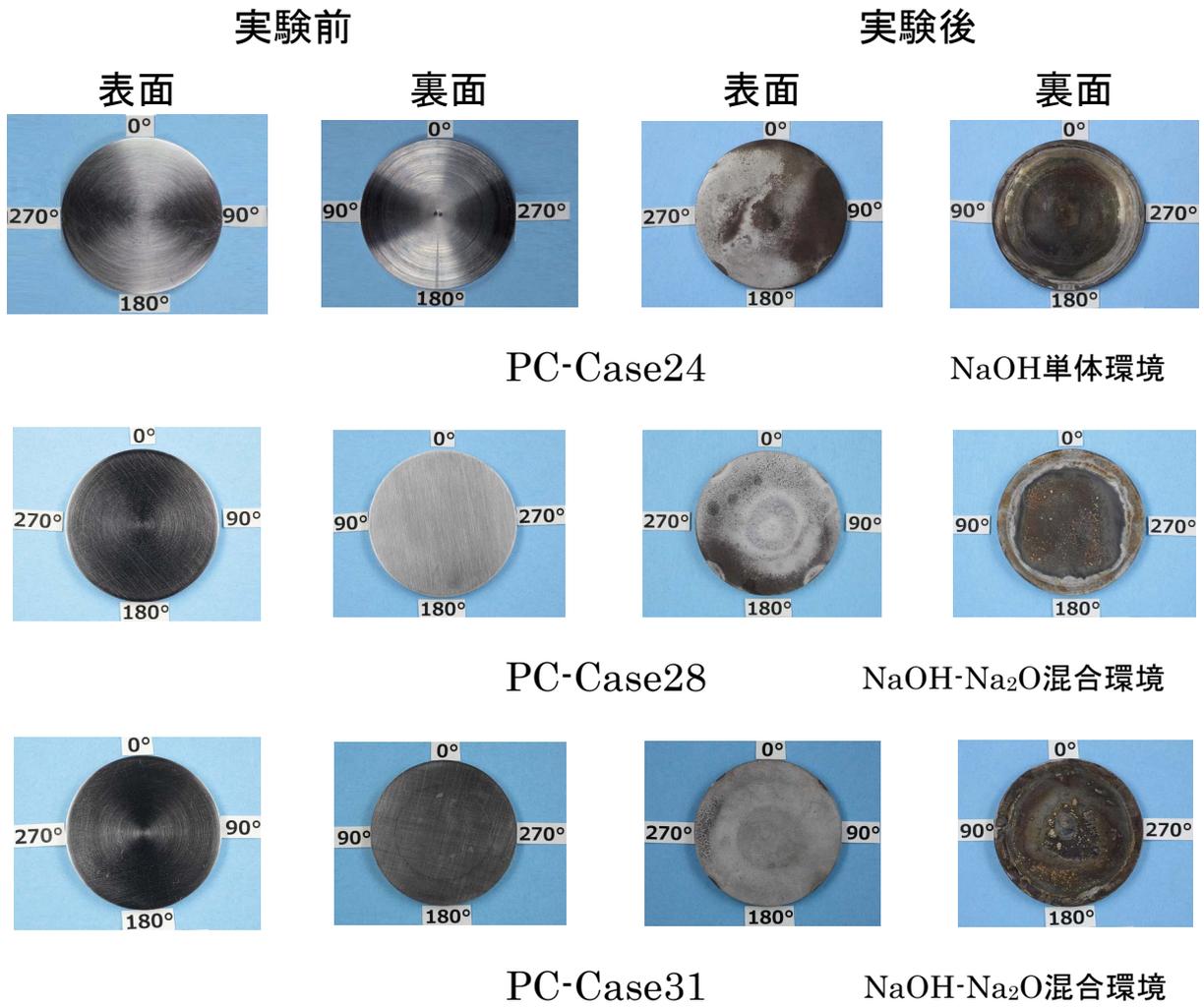


図 32 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 800°C)(3/3)

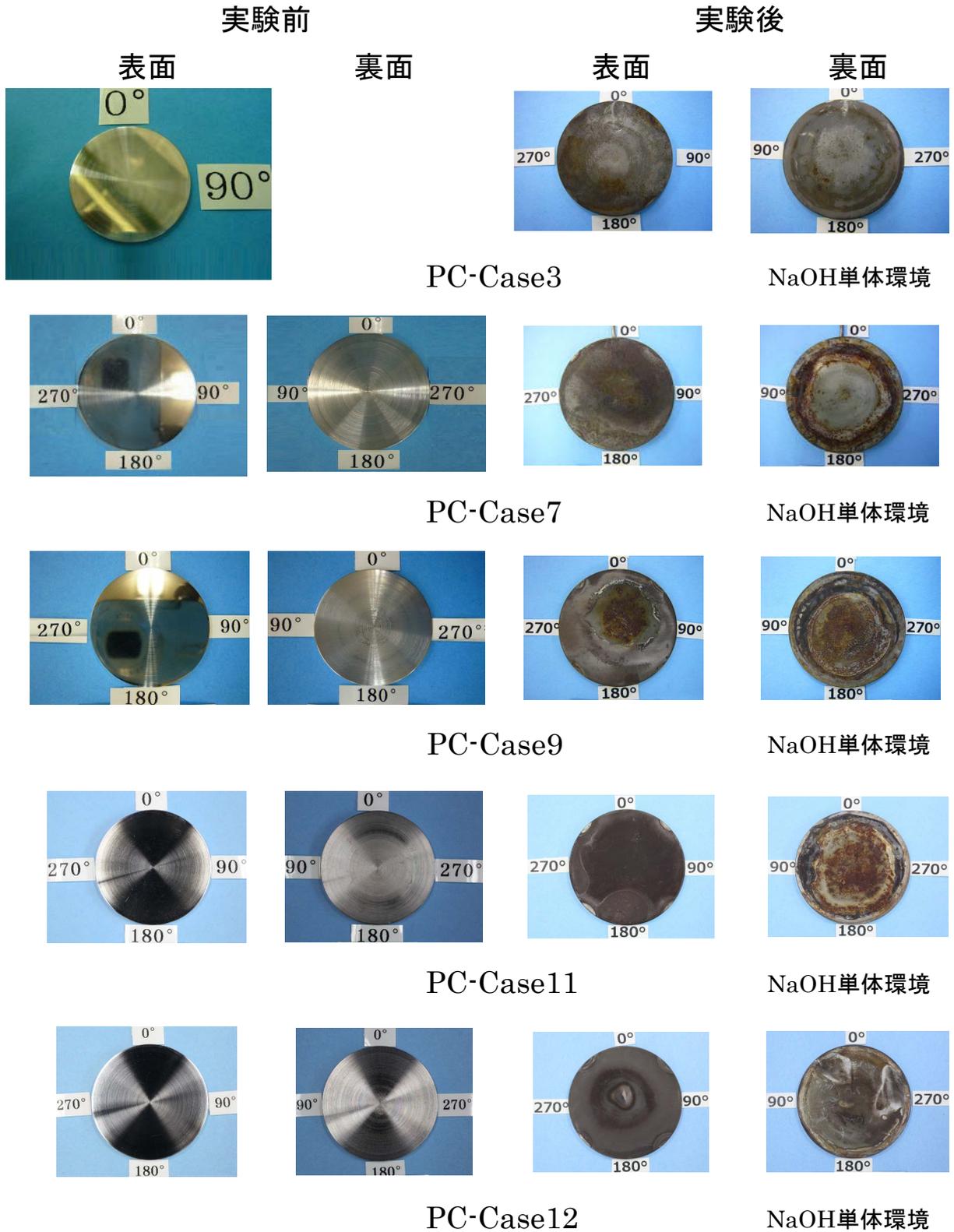


図 33 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 1000℃)(1/2)

※PC-Case3 の実験前の供試体裏面は未撮影

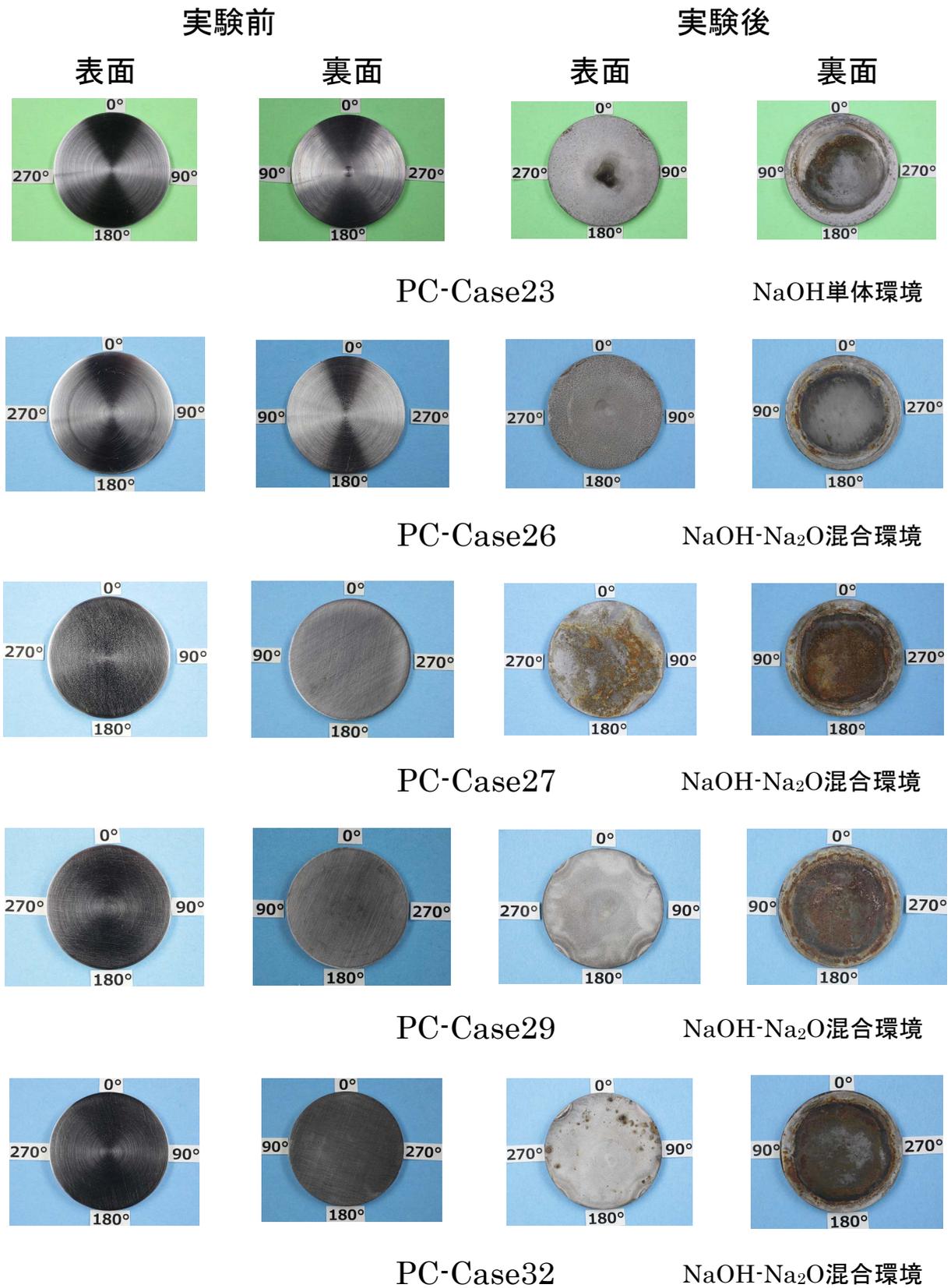


図 33 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 1000°C)(2/2)

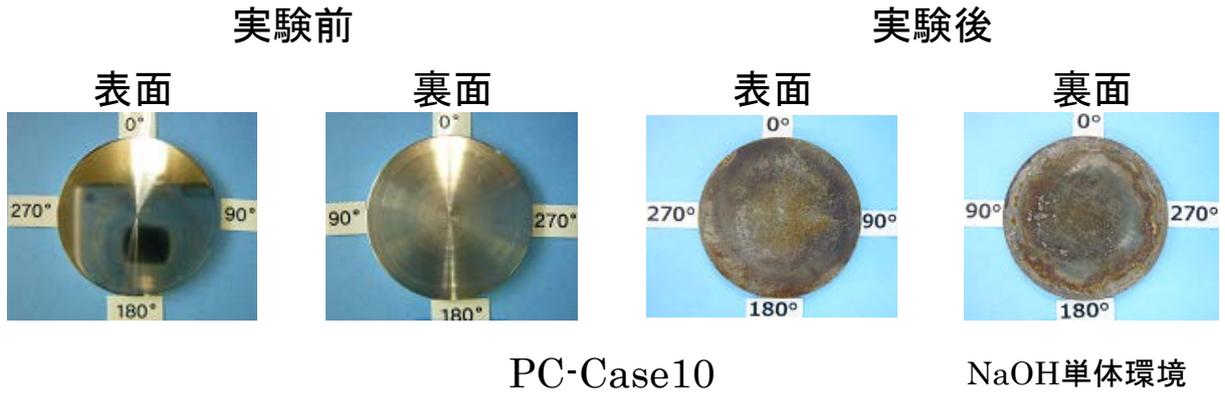


図 34 実験前後の供試体外観(試料/供試体温度 1200°C)

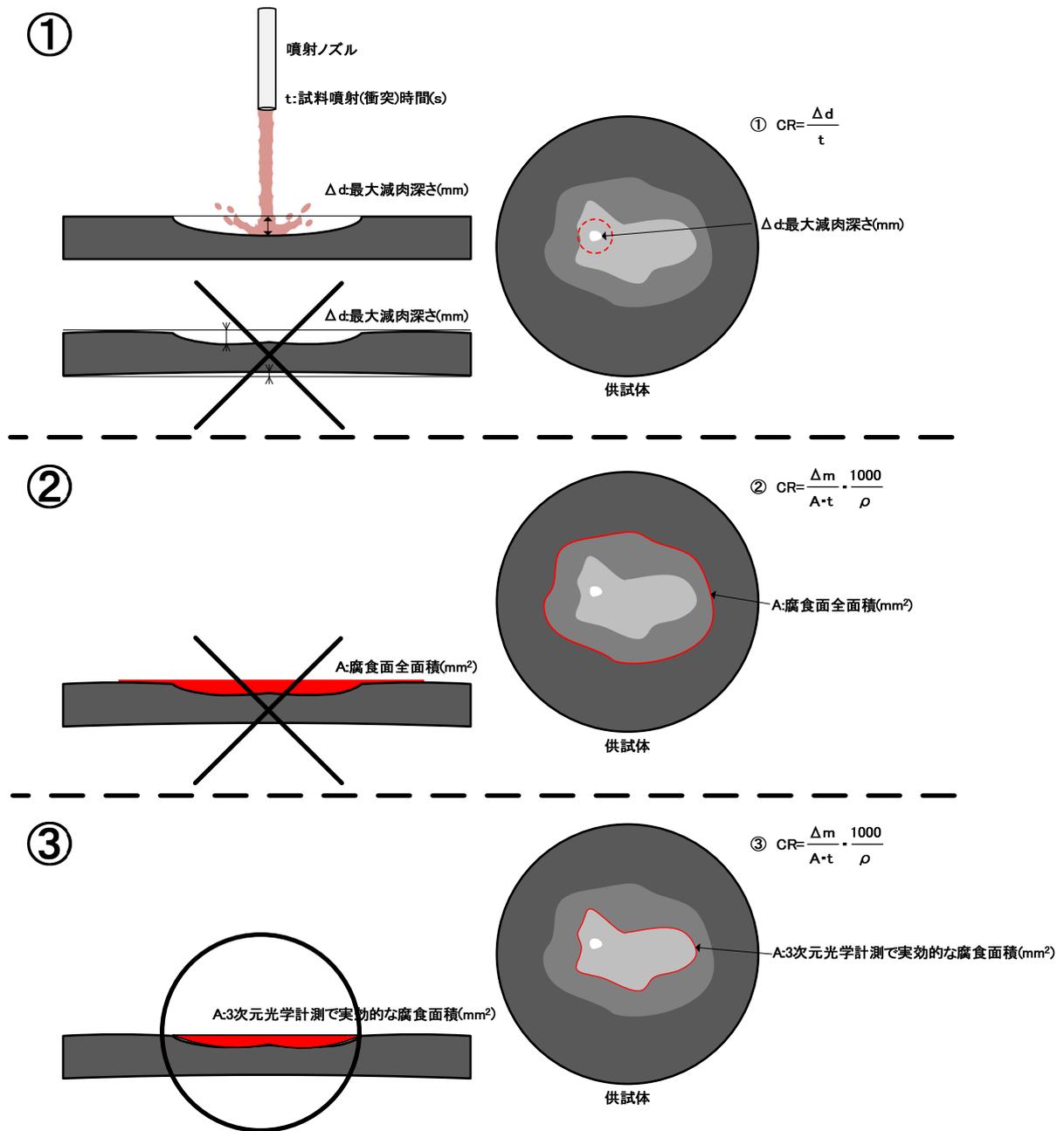


図 35 噴射衝突基礎実験の腐食速度算出方法の模式図

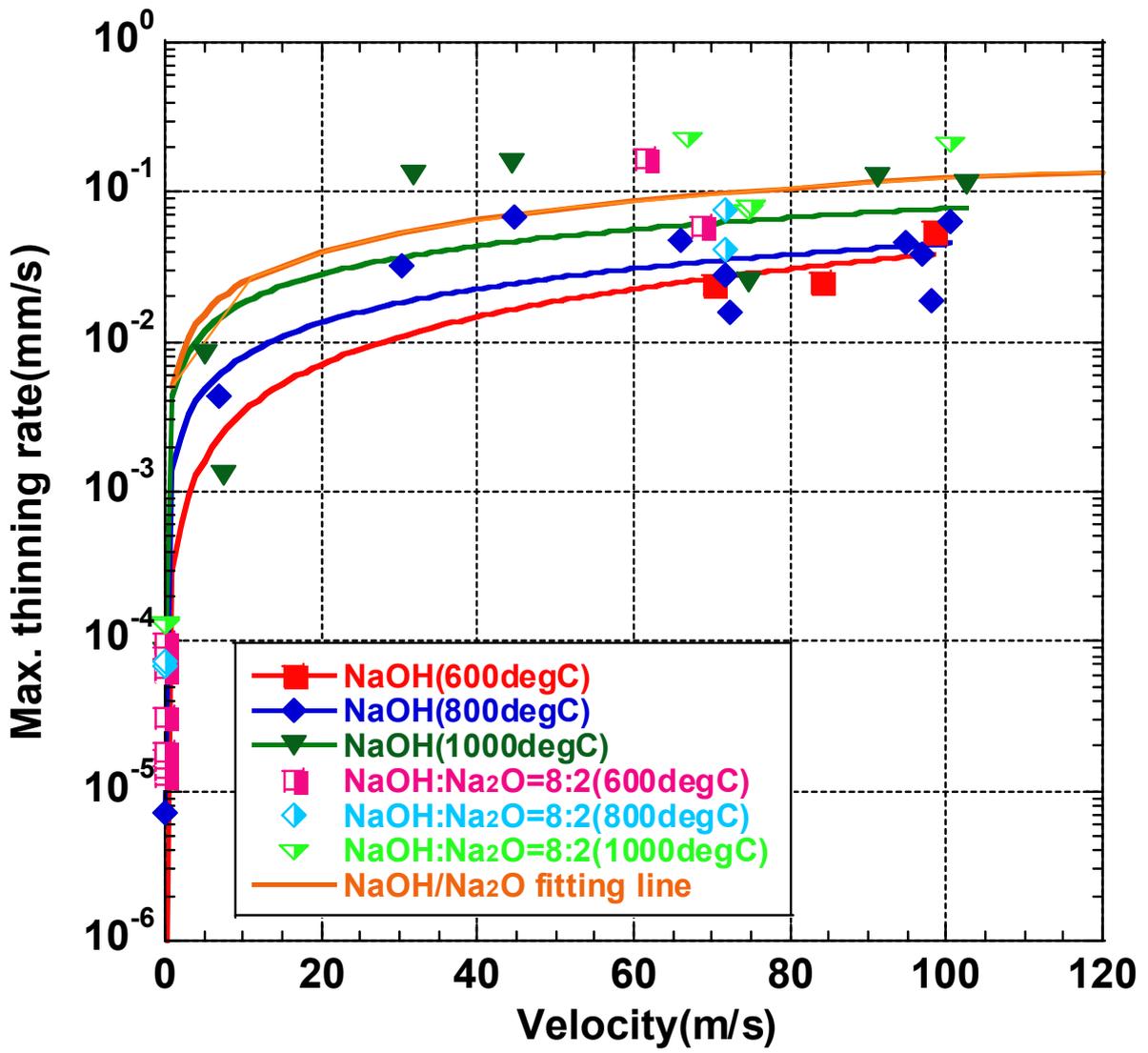


図 36 腐食速度と衝突速度の結果

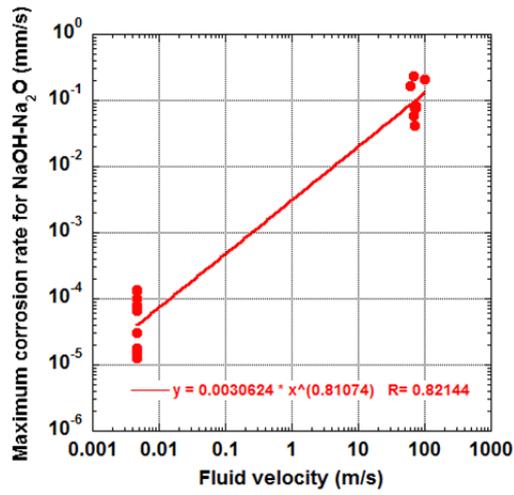


図 37 腐食速度に対する速度依存性

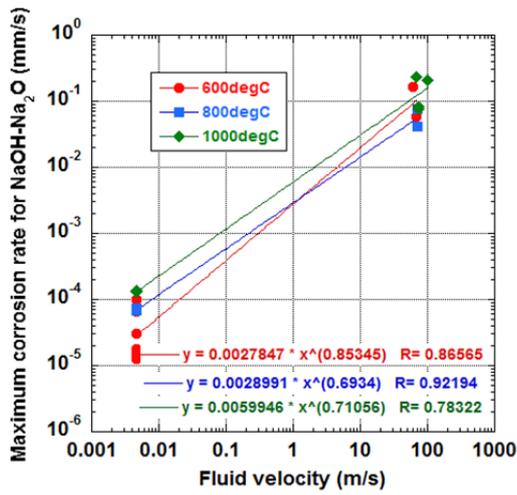


図 38 温度ごとの腐食速度に対する速度依存性

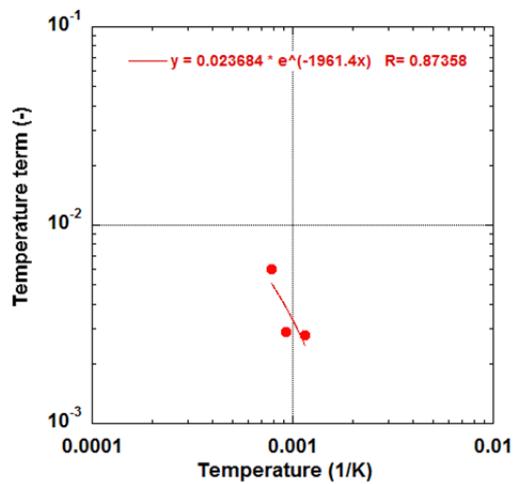


図 39 アレニウスプロットした速度依存性

# 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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化濃度	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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大きさは同一である。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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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。
ベレル	B	
デシベル	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
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> 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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

