

**セルフウェステージ現象解明のための試験手法の開発
—セルフウェステージ試験装置 (SWAT-2R) の
開発と試験手順の検討—**

Development of Experimental Method for Self-wastage Behavior
in Sodium-water Reaction

- Development of Test Rig (SWAT-2R) and Study for Experimental Procedure -

阿部 雄太 下山 一仁 栗原 成計

Yuta ABE, 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

July 2014

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

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

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

セルフウェステージ現象解明のための試験手法の開発
ーセルフウェステージ試験装置 (SWAT-2R) の開発と試験手順の検討ー

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

阿部 雄太、下山 一仁、栗原 成計

(2014年5月22日受理)

ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器内に配置されている伝熱管に生じた微細な貫通き裂(初期欠陥)から水/蒸気がリークすると、ナトリウムと水との化学反応に伴い、初期欠陥自体が自己損耗により拡大するセルフウェステージ現象が起こる。セルフウェステージ現象が継続すると、初期欠陥孔が拡大し、伝熱管群内の健全な伝熱管へ影響を及ぼす程度の水リークに進展する。このため、原子力機構では、安全評価を目的として多次元ナトリウム-水反応解析コードを用いたセルフウェステージ解析手法を開発している。

過去のセルフウェステージ試験ではクラック型孔の試験体等が用いられてきたが、再現性がある同形状の試験体を製作するのが困難であった。そのため、孔形状の再現性がよく現象の個々の要因の効果の評価が可能な試験が望まれていた。本報告書では、過去の試験において曖昧だった腐食影響因子をできるだけ分離して、セルフウェステージ解析手法の検証に資するための基礎データを取得することを目的としたセルフウェステージ試験装置 (SWAT-2R) の開発、微細孔型試験体の開発、試験概要と手順についてまとめた。

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、原子力機構が実施した平成23年度及び平成24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

**Development of Experimental Method for Self-wastage Behavior in Sodium-water Reaction
—Development of Test Rig (SWAT-2R) and Study for Experimental Procedure—**

Yuta ABE, 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 May 22, 2014)

In case of water leak from a penetrated crack on a tube of steam generator in the sodium cooled fast reactor (SFR), self-wastage, that increases the size of leak, may take place by corrosion related to chemical reaction between sodium and water. If the self-wastage continues in a certain period of time, the intact tube bundle may be damaged as a result of enlarged leak. For the safety evaluation of the accident, JAEA has been developing the analytical method of self-wastage using the multi-dimensional sodium-water reaction code.

Experiments conducted so far used mainly crack-type test pieces. However, reproducibility was limited and it was difficult to evaluate individual effects of the phenomena in detail. This report describes the development of new experimental rig (SWAT-2R). SWAT-2R enables to examine corrosion effecting factors that were ambiguous in the previous studies. The report includes description of development of micro-leak test piece, examination of experimental procedure. The results will provide fundamental data for validation of the self-wastage analytical method.

Keywords: Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), Steam Generator (SG), Sodium-water Reaction, Self-wastage, Micro-leak, Experimental Rig, Experimental Procedure, SWAT-2

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 2013 and 2014 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. 緒言	1
2. セルフウェステージの事象進展と過去の試験の概要	2
2.1 セルフウェステージの事象進展について	2
2.2 過去に実施されたセルフウェステージ試験の概要	2
3. セルフウェステージ試験装置	5
3.1 ナトリウム (Na) 系	5
3.2 注水系	8
3.2.1 液面計測	8
3.2.2 注水制御	9
3.3 カバーガス系	10
3.4 保護ガス系	10
3.5 計測制御設備	11
3.6 安全対策設備	11
3.6.1 ナトリウム (Na) 漏えい対策	11
3.6.2 操作盤制御不能対策	11
3.6.3 停電対策	12
4. 微細孔型試験体	13
4.1 微細孔型試験体の仕様	13
4.2 微細孔型試験体の加工方法の選定	13
4.3 微細孔型試験体の加工精度	14
4.3.1 微細孔型試験体の形状確認	14
4.3.2 微細孔型試験体の粗さ測定	14
4.3.3 微細孔型試験体の孔径精度	14
5. 試験概要と手順	15
5.1 セルフウェステージ試験の主なフロー	15
5.1.1 試験準備	15
5.1.2 試験運転	15
5.1.3 試験後	16
5.2 セルフウェステージ試験手順	16
5.2.1 ナトリウム (Na) チャージ	16
5.2.2 注水試験	16
5.2.3 ナトリウム (Na) ドレン	18
6. まとめ	19
謝辞	19
参考文献	20

Contents

1 . Introduction	1
2 . Event progress of self-wastage and previous work	2
2.1 Event progress of self-wastage	2
2.2 Summry of previous work.....	2
3 . Self-wastage experimental rig	5
3.1 Sodium (Na) system	5
3.2 Water injection system	8
3.2.1 Liquid level measurement.....	8
3.2.2 Water injection control	9
3.3 Cover gas system	10
3.4 Protective gas system.....	10
3.5 Measurement and control system.....	11
3.6 Safety measures system	11
3.6.1 Sodium-leak.....	11
3.6.2 Loss of operational control	11
3.6.3 Blackout.....	12
4 . Micro-leak test piece	13
4.1 Specification	13
4.2 Selection of machining process	13
4.3 Maching accuracy	14
4.3.1 Shape measurement	14
4.3.2 Roughness measurement	14
4.3.3 Hole diameter accuracy	14
5 . Experimental overview and procedure	15
5.1 The main flow of the self-wastage experiment	15
5.1.1 Preparation	15
5.1.2 Experiment.....	15
5.1.3 Post-experiment.....	16
5.2 Self-wastage experimental procedure.....	16
5.2.1 Sodium (Na) charge	16
5.2.2 Water injection	16
5.2.3 Sodium (Na) drain	18
6 . Summary	19
Acknowledgment	19
References	20

表リスト

表 1 過去のセルフウェステージ試験における試験条件	21
表 2 セルフウェステージ試験装置 (SWAT-2R) の主要系統の仕様	22
表 3 計測点リスト	23
表 4 インタロック作動一覧	24
表 5 微細孔型試験体の孔径測定結果	25
表 6 注水試験の停止条件一覧	26

図リスト

図 1 セルフウェステージ現象によるき裂拡大 ^[1]	27
図 2 セルフウェステージ進展挙動概念図	27
図 3 セルフウェステージ試験で取得する物理量	28
図 4 セルフウェステージ試験装置(SWAT-2R)系統図	29
図 5 セルフウェステージ試験装置(SWAT-2R) ナトリウム (Na)系 鳥瞰図	30
図 6 試験容器 構造図	31
図 7 ナトリウム供給タンク 構造図	32
図 8 ナトリウムドレンタンク 構造図	33
図 9 注水系 構造図	34
図 10 微細孔型試験体 組立図	35
図 11 微細孔型試験体 断面写真	36
図 12 微細孔型試験体 表面粗さ鳥瞰図	37
図 13 微細孔型試験体 等高線表示	37
図 14 微細孔型試験体 粗さ測定結果	38
図 15 セルフウェステージ試験フロー	39

写真リスト

写真 1 微細孔型試験体 外観写真	40
写真 2 微細孔部拡大写真	40

This is a blank page.

1. 緒言

ナトリウム冷却高速炉（Sodium Cooled Fast Reactor、以下 SFR と記す）の蒸気発生器（Steam Generator、以下 SG と記す）に配置されている伝熱管に生じた微細な貫通き裂（初期欠陥）から水/蒸気がリークすると、ナトリウム（以下、Na と記す）と水との化学反応に伴い、初期欠陥自体が自己損耗により拡大するセルフウェステージ現象が起こる¹⁾⁴⁾。セルフウェステージ現象が継続すると、初期欠陥孔が拡大し、伝熱管群内の健全な伝熱管へ影響を及ぼす程度の水リークに進展する。

セルフウェステージ現象に関しては、1975年から1988年にかけて小リーク・Na-水反応試験装置（以下、SWAT-2 と記す）及び微小リーク・Na-水反応試験装置（以下 SWAT-4 と記す）を使用し、数種類の伝熱管材及び形状の試験体を用いて試験が実施されてきた。しかし、それらの試験では試験体の人工孔の製作性の制約のため、セルフウェステージ現象を把握する上で重要な個々の腐食影響因子について Na 環境下で起こる極微細な現象を検証するための基礎データを取得するのが難しかった。

これまでの安全設計においては、既存の試験技術、計測技術、数値解析技術、更に既知の現象解明の範囲で、想定すべき事故・事象に応じて実施された試験結果を利用してきた。しかしながら、今後の安全設計においては、種々の設計上の選択肢に対してより汎用性があるアプローチを取ることが望ましい。設計の最適化を可能とし、安全審査における説明性向上に資するためには、Na-水反応現象のメカニズムに基づく汎用性の高い評価手法の整備が必要である。その中で、実証炉 SG の伝熱管材料として有望な Mod.9Cr-1Mo 鋼を用いて、伝熱管の初期欠陥が自己損耗により拡大するセルフウェステージ現象のメカニズムを明らかにし、その解析手法（評価コード等）を整備することが安全評価上重要である。

原子力機構では、SG に対する伝熱管破損時の現象解明及び安全評価に適用できるマルチフィジックス評価システムの開発を目的として、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である「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」を進めている。本報告のセルフウェステージ試験は、その受託事業の一環として実施するウェステージ現象解明実験の一つとして位置づける。

本報告書は、セルフウェステージ現象における腐食影響因子をできるだけ分離した基礎データの取得のため開発されたセルフウェステージ試験装置（SWAT-2R）及び微細孔型試験体についてまとめたものである。

2. セルフウェステージの事象進展と過去の試験の概要

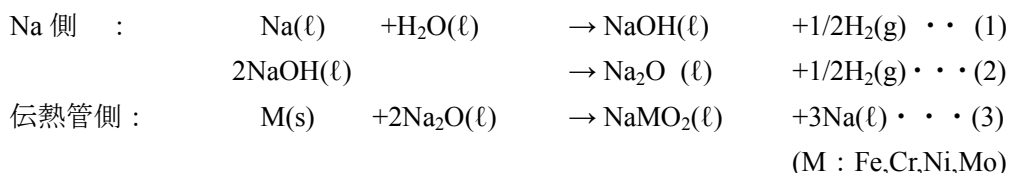
2.1 セルフウェステージの事象進展について

SFR の SG の伝熱管において微細な貫通き裂（初期欠陥）から伝熱管の内側に存在する水/蒸気がリークすると伝熱管外側の Na 中で Na-水反応により、図 1 のように初期欠陥が自己損耗し拡大（セルフウェステージ）することでリーク量が増大することが知られている¹⁾。図 2 に示すように、水漏えい初期には微小なリーク規模（ $\sim 10^{-2}$ g/s）で Na 中へ水が漏えいし、伝熱管材料側の腐食進展に伴って水リーク規模が拡大し（ ~ 10 g/s）、SG 内の影響範囲が広がる可能性がある。

セルフウェステージ現象は、図 2 に示すように、以下のような順に進展すると考えられる。

- ① 初期欠陥が発生する。
- ② 伝熱管外表面で Na とリークした水/蒸気が反応する。
- ③ Na と水の反応界面が Na 側から水側へ進行する。
- ④ 反応界面の進行により、リーク孔が損耗する。
- ⑤ 内圧により、リーク孔が拡大する。

伝熱管のリーク孔の拡大が Na 側からの腐食支配で進行すると考えた場合、セルフウェステージ現象に関わる腐食反応式は以下の組み合わせと予想される²⁾。



諸外国における SFR SG での Na-水反応の経験でも、伝熱管溶接部近傍の初期欠陥（施工不良）からのセルフウェステージに起因して SG 伝熱管の 2 次破損等に至ったケースが多い。

2.2 過去に実施されたセルフウェステージ試験の概要

原子力機構では、SFR の SG に対するセルフウェステージ現象を把握するために、1975 年から 1988 年にかけて SWAT-2 及び SWAT-4 を用いた試験が実施されてきた¹⁾⁴⁾。これらの試験では、実機 SG 伝熱管で想定される初期欠陥形状を考慮し、以下に示すような 3 種類の試験体が用いられた。

[微細孔試験体]

肉厚 0.5mm から 3.6mm の板に放電加工でほぼ真円に開孔された微細孔（直径 0.04～0.25mmφ）を有する微細孔試験体が製作された。なお、厚肉（3.6mm）の微細孔試験体では、直径の大きな（0.25mmφ）しか加工できなかつた。

[人工ヘアークラック型試験体]

肉厚 3.2mm 及び 3.8mm の板にドリル孔加工で開孔後、プレス加工によってヘアークラックに塑性変形させた人工ヘアークラック型試験体が製作された。

[疲労クラック型試験体]

肉厚 2.6mm の 9Cr 系 3 鋼種 (Mod.9Cr-1Mo 鋼、9Cr-2Mo 鋼、9Cr-1Mo-Nb-V 鋼) の板に、繰り返し荷重をかけることで、疲労クラック型試験体が製作された。与える繰り返し荷重の大きさや回数でクラック形状をある程度コントロールされているが、貫通経路にはばらつきがあった。なお、疲労クラック型試験体は、対象としている部位に、応力を集中させ、き裂を発生させるよう、予め伝熱管の表面に放電加工で深さ 0.5mm (または 0.2 mm) のスタータノッチを入れていた。

表 1 に過去の実験における主な試験条件を示す。各々についての試験結果は、文献 1) から 4) に詳細に論じられている。文献 4) には各材料についてのセルフウェステージ率 [mm/s] (=肉厚/リーク孔拡大時間) が、初期水リーク率とナトリウム温度をパラメータとした実験式としてまとめられている。微小リーク領域においては、Mod. 9Cr 系鋼のセルフウェステージ率が低く (即ち、耐セルフウェステージ性に優れている)、次いで SUS231、2¼Cr-1Mo 鋼の順であった。また、文献 4) では、人工ヘアークラック型と疲労クラック型の比較が行われており、ばらつきがあるもののセルフウェステージ率は人工ヘアークラック型の方が低かったこと (5~10 倍の差) が報告されている。

このように、SG 伝熱管の材料や想定される初期欠陥形状に対して、セルフウェステージ率、及び初期欠陥孔拡大比等が評価されてきた。また、実用炉 SG では、高温・高圧条件での運転や二重伝熱管の採用が検討されており、これまで同様にモックアップ的アプローチでセルフウェステージ評価手法を構築 (適用範囲を拡大) するのではなく、できるだけ影響因子を分離した基礎試験の知見に基づいて、汎用的な評価手法を開発することが必要である。そこで、下に掲げるようなセルフウェステージ現象に影響を及ぼす因子を考慮しながら、できるだけこれらの影響因子を分離評価できるようなセルフウェステージ試験装置やその試験手法を検討した (図 3)。

【Na 側】

- 初期 Na 純度
- Na の状態 (温度、圧力、体積)
- 腐食面における付着物の化学組成及び組成割合 (【伝熱管側】と重複項目)
- 反応熱 (生成物の温度)

※初期欠陥が微細なため本試験では測定が困難である。したがって、【伝熱管側】「材料の熱的影響」で補う。

【伝熱管側】

- 材料組成（伝熱管材質）
- 材料の熱的影響
- 材料腐食層の化学組成及び組成割合（【Na 側】と重複項目）
- 損耗体積（または損耗質量、損耗深さ）
※内圧による残存肉厚の破損も含む。
- 初期欠陥形状

【水/蒸気側】

- 腐食面での相状態（温度、圧力）
- 注水率（腐食面近傍での流速及び供給した水/蒸気量）

3. セルフウェステージ試験装置

2.2 項での検討に基づき、SWAT-2R を開発した。SWAT-2R の系統図を図 4 に示す。本試験装置は、Na 系（試験容器を含む）、注水系、保護ガス系及びカバーガス系を有している。表 2 に SWAT-2R における主要系統の仕様（温度、圧力）を示す。

3.1 ナトリウム (Na) 系

Na 系は、試験容器、Na 供給タンク、Na ドラム缶、Na ドレンタンク及びそれらを接続する配管・弁類からなる。Na 系の鳥瞰図を図 5 に示す。各容器には専用のカバーガス（アルゴン、以下 Ar と記す）供給ラインと大気放出ラインが取り付けられる。また、Na 系における弁は全て手動で操作される。

また、Na を保有する試験容器、Na 供給タンク及び Na ドレンタンクに対する耐震設計は、危険物施設に求められている水平震度 0.2G に 1.5 を乗じた 0.3G とした。

(1) 試験容器（図 6）

試験容器は、外径 165.2mm、高さ 813mm、内容積 約 15ℓ の縦置円筒型容器であり、試験容器内部で、セルフウェステージ試験を実施するため、セルフウェステージに起因する注水率の急拡大による試験容器の圧力上昇にも耐えられる構造設計とした。試験毎に試験体を交換できるように、試験容器上部はフランジ構造とした。この上部フランジには、Na チャージ・ドレンライン、接点式液面計、試験容器圧力計、熱電対及び以下に示す微細孔型試験体と連結される注水系や保護ガス系等を固定している。

試験開始時の Na 液位を基準として試験運転時の Na 液面変化を確認できるように、上 (H)、中 (M)、下 (L) の 3 点接点式液面計を取り付けた。試験容器内部には、カバーガス温度及び Na バルク温度を計測する熱電対をそれぞれ 1 点取り付けた。

試験容器の側壁にはカバーガス系及び圧力開放系（放出系）の配管を接続した。セルフウェステージ試験後には反応生成物を含む Na が付着・残留するため、試験容器を Na 洗浄エリアへ移動して洗浄できるように、カバーガス系及び Na チャージ・ドレンラインを継手構造で接続した。試験容器の仕様は以下のとおりである。

寸法	: 165.2mmφ、 5.0mmt (Sch20S) ×813mmH	
内容積	: 約 15×10 ⁻³ m ³	
Na 保有量	: 8kg	
材質	: SUS304	
最高使用温度	: 600℃	
最高使用圧力	: 0.5MPa	
上部フランジ規格	: 10kgf/cm ² (約 1MPaG)	
加熱方式	: 電気ヒータによる外部加熱方式	
カバーガス	: Ar ガス	
計装機器	: 連成式圧力伝送器(0.0~0.5MPaG)	[試験容器カバーガス圧力測定]
	接点式液面計 3 点(H,M,L)	[Na チャージ時の液面測定]

[内訳] L : 試験容器入口から 385mm	[Na チャージ時の Na 液位]
M : 試験容器入口から 351mm	[試験条件作成時の Na 液位]
H : 試験容器入口から 325mm	[試験容器内 Na 液位の上限]

※圧力開放系配管下部より 100mm 下方に、Na 液面「H」を設定した。

K 型シース熱電対 7 点

Na 中 1 点、カバーガス空間 1 点、ヒータ制御 2 点

安全装置 : Na 受皿、Na 漏えい検出器
設置数 : 1 基

(2) Na 供給タンク (図 7)

Na 供給タンクは、試験で利用する Na を Na ドラム缶から補充・保管し、試験時に試験容器へ Na チャージするための機器である。Na 供給タンクは、3 回の試験が行える最大 25kg の Na を保有する縦置円筒容器で、上部フランジに Na 補充ライン、Na チャージライン、液面計及び温度計等を固定し、Na チャージ後に内部の Na を効率的に冷却できるように冷却管を設けた。この管は Na 中不純物を捕獲するコールドトラップ機能も兼ね備える。

Na 供給タンクの仕様は以下のとおりである。

寸法	: 318.5mmφ、6.5.mmt (Sch20S) ×約 520mmH	
内容量	: 約 34×10 ⁻³ m ³	
Na 保有量	: 25kg	
材質	: SUS304	
最高使用温度	: 300℃	
最高使用圧力	: 0.19MPa	
上部フランジ規格	: 10kgf/cm ² (約 1MPaG)	
加熱方式	: 電気ヒータによる外部加熱方式	
カバーガス	: Ar ガス	
計装機器	: 連成式圧力伝送器 (0.0~0.5MPaG) [Na 供給タンクカバーガス圧力測定] 接点式液面計 2 点 (H、M) [Na 補充時の液面測定] K 型シース熱電対 3 点 Na 中 1 点、カバーガス空間 1 点、ヒータ制御 1 点	
安全装置	: Na 受皿、Na 漏えい検出器	
設置数	: 1 基	

また、Na 供給タンクへ Na の補充を行うために Na ドラム缶を接続している。Na ドラム缶には、Na 補充用のサイフォン管及び Na 温度測定用さや管付熱電対等の内部構造物を据え付けている。

寸法	: 約 570mmφ×約 890mmH
内容量	: 約 0.2 m ³
胴肉厚	: 1.2mm
材質	: SUS304
最高使用温度	: 150℃

最高使用圧力	: 0.15MPa
加熱方式	: バンドヒータによる外部加熱方式
カバーガス	: Ar ガス
計装機器	: 連成式圧力伝送器 (0.0~0.2MPaG) [Na ドラム缶カバーガス圧力測定] K 型シース熱電対 1 点 Na 中 1 点
安全装置	: Na 受皿
設置数	: 1 基

(3) Na ドレンタンク (図 8)

Na ドレンタンクは、試験後に試験容器から Na 及び反応生成物をドレンするための容器である。また Na ドレンタンクは、試験時で利用した Na 及び試験で発生した反応生成物を保有できる仕様 (試験 1 回分で最大 8kg の Na が保有可能) とした。また、Na ドレンタンクに回収した Na 及び反応生成物は、Na 洗浄エリア等で燃焼処理または蒸気洗浄を行うため、燃焼処理での作業性を考慮した皿 (キャップ) 型を採用した。上部フランジには、Na ドレンライン、液面計、圧力計及び熱電対を固定し、Na ドレンラインは Na 洗浄時に着脱ができるよう継手構造で接続されている。

寸法	: 355.6 mmφ、8.0mmt (Sch20S) × 約 190mmH
内容量	: 約 $11 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Na 保有量	: 8kg
材質	: SUS304
最高使用温度	: 300℃
最高使用圧力	: 0.19MPa
上部フランジ規格	: 10kgf/cm ² (約 1MPaG)
加熱方式	: 電気ヒータによる外部加熱方式
カバーガス	: Ar ガス
計装機器	: 連成式圧力伝送器 (0.0~0.5MPaG) [Na ドレンタンクカバーガス圧力測定] 接点式液面計 1 点 (H) [Na ドレン時の液面測定] K 型シース熱電対 2 点 カバーガス空間 1 点、ヒータ制御 1 点
安全装置	: Na 受皿
設置数	: 1 基

(4) Na 配管

試験容器及び Na ドレンタンクは、試験毎に切り離して Na 処理を施し、新たな試験体を組み込んだ後、再び Na 配管を接続するため、Na 配管接続部を試験毎に交換する必要がある。したがって、作業を効率的に行うため、Na 流量制御装置内の弁及び配管接続部は、Na が通過するが部位ではあるが、スウェージロック継手 (5 箇所) を採用している。ただし、スウェージロック継手を使用している Na 流量制御装置については、継手部からの Na 染み出しを想定して、最大 5 箇所 (1 箇所約 17g と推定) から同時に Na が染み出したとしても、染み出した全量の Na が回収可

能で、かつ N₂ ガス供給により強制的に窒息させる安全対策機能を有している。

3.2 注水系

注水系は、微細孔から流出した水/蒸気の量を測定する液面計測ライン、微細孔型試験体に N₂ ガスで加圧された水/蒸気を供給する加圧ライン (N₂ ガス系ライン)、注水ライン、保水管及びそれらを接続する配管・弁で構成している。なお、差圧管内の水を注水圧力まで加圧する N₂ ガス系も注水系に含まれる。(図 9)

3.2.1 液面計測

(1) 差圧管

差圧管は、試験時に試験容器内に設置した微細孔型試験体へ水を供給するための SUS304 製の配管で、液面計測用の差圧伝送器や実験中に差圧管へ水を補充する保水管等を付帯する。差圧式伝送器で測定した差圧から液位を算出し、その時間変化率を注水率と定義している。セルフウェステージ試験では、対象となる注水範囲が広いことから、注水率の計測分解能をより高めるために、断面積の異なる 3 種類の差圧管を試験条件に応じて使い分けられるようにした。

差圧管の仕様は以下のとおり。

寸法	(No.1)	: 6.35mmφ×1.65mm×3000mmH
	(No.2)	: 12.7mmφ×2.1mm×3000mmH
	(No.3)	: 19.1mmφ×2.41mm×3000mmH
内容量	(No.1)	: 約 $2.2 \times 10^{-5} \text{m}^3$
	(No.2)	: 約 $17 \times 10^{-5} \text{m}^3$
	(No.3)	: 約 $48 \times 10^{-5} \text{m}^3$
材質		: SUS304
最高使用温度		: 常温
最高使用圧力		: 22.0MPa
カバーガス		: N ₂ ガス
計装機器		: 連成式圧力伝送器 (0.0~20.0MPaG) 1 点 [加圧ガス圧力測定] 差圧式伝送器 (詳細仕様は 3. 2.1(2)) [液位測定] K 型シース熱電対 1 点 [水温測定]
設置数		: 3 基 (No.1~No.3)

(2) 差圧式伝送器

差圧式伝送器で、差圧管内の水頭圧 (差圧) から液位を計測する。差圧管は常温の純水を保有するため、実験前に校正された 1V あたりの保有水質量、試験時に降下した液位に相当する電圧、及び試験対象時間より、式(4)を用いて算出する。

なお、上記の差圧管と本差圧式伝送器では $4.0 \times 10^{-5} \text{g/s}$ 程度の注水率まで測定可能である。差圧管の断面積を小さくして、単位質量あたりの液面降下長さを大きくすることで、差圧伝送器の測定範囲での分解能を高めたもので、実験時には、 $4.0 \times 10^{-5} \text{g/s}$ 程度の注水率は 10^{-3}V オーダーで判断できる。

差圧式伝送器（横河電気株 EJ130）の標準仕様は以下のとおりである。

メーカー	: 横河電気株
測定スパン	: 3.3～130 kPa
測定範囲	: -130～130 kPa
出力信号	: 1～5VDC
精度	: スパンの 0.01%

注水率の算出には次式を用いる。

$$L_R = \frac{R \cdot \Delta V}{t} \dots \dots \dots (4)$$

ここで各記号は次のとおりである。

R^*	: 1V あたりの水の質量	[g/V]
ΔV	: 単位降下電圧	[V]
t	: 差圧式液面計電圧 ΔV 降下するのに要する時間	[s]
L_R	: T 間の平均注水率	[g/s]

※ R は液面計の校正結果から算出。

3.2.2 注水制御

(1) 加圧ライン (N₂ ガス系ライン)

加圧ライン (N₂ ガス系ライン) は、差圧管内の水を試験条件の注水圧力まで加圧するためのラインである。セルフウェステージによる微細孔拡大に伴う注水率増大時の急激なガス流入を防ぐため、ガス供給入口部にはオリフィス (30mmφ、2 mmt、孔径 1.3mm、SUS304) を設置している。

(2) 注水ライン

注水ラインは、差圧管から試験体までの 1/4inch 配管であり、最高使用圧力は 22MPa である。注水弁の下流側 (試験容器入口部) には、試験体の微細孔を閉塞させる恐れがある不純物等を取り除くため、水系フィルタ (SUS316 製、焼結フィルタ、ポア・サイズ: 0.5 μm) を取り付けている。なお、差圧管から供給される常温の水は、試験容器内の Na 中に浸漬された配管部で熱交換され、試験体の微細孔部から過熱蒸気状態で噴出される。

(3) 保水管

保水管は、差圧管とカバーガスを導通させて、必要な注水量を水頭圧により差圧管に充填する。また、試験中に差圧管内の保水量が差圧伝送器の検出下限値を下回りそうになった場合に、差圧管へ水を再充填する機能も有している。

保水管の仕様は以下のとおりである。

寸法	: 約 49mmφ、5.1mmt × 約 1000mmH
内容量	: 約 $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

材質	: SUS304
最高使用温度	: 常温
最高使用圧力	: 22MPa
カバーガス	: N ₂ ガス
設置数	: 1 基

3.3 カバーガス系

カバーガス系は、カバーガス供給ライン、圧力開放ライン及びそれらを接続する配管・弁類から構成される。注水試験中は試験容器に取り付けた圧力計の信号を受けて試験容器内のカバーガス圧力を以下のように自動制御する。

- 1) 圧力制御範囲の下限設定値（デフォルト値 0.025MPaG）より低くなった場合は、カバーガス供給ラインの弁（GV-9）を開けて供給弁閉の設定圧（デフォルト値 0.030MPaG）まで Ar ガスを供給する。
- 2) 圧力制御範囲の上限設定値（デフォルト値 0.045MPaG）を超えた場合は、圧力開放ラインの弁（GV-13）を開けて開放弁閉の設定圧（デフォルト値 0.040MPaG）になるまで大気に放出する。

またカバーガス系は、試験容器が負圧にならないよう防止する機能とともに、注水試験で発生した水素ガスを燃焼下限値以下に希釈して大気放出する機能を有している。

(1) カバーガス供給ライン

カバーガス供給ラインは、試験容器に Ar ガスを供給するためのもので、主な構成部品は、Ar ガスポンプ、減圧弁、ベーパートラップ及び真空ポンプである。真空ポンプは試験容器に Ar ガスを供給する前の真空置換及び試験容器に Na をチャージする前の準備段階で容器内のガスを排気する時に用いる。

(2) 圧力開放ライン

圧力開放ラインは、圧力開放弁、ラプチャディスク、逆止弁、ベーパートラップ等で構成される。圧力開放弁は、予熱温度の上昇時によるガスの膨張あるいは注水試験の Na-水反応により生成される水素ガスによって、試験容器内の圧力が設定値（0.04MPaG）を超えた時に圧力を大気へ開放するためのものである。また、微細孔拡大等により急激に注水率が増加して圧力が急に上昇した場合は、圧力開放弁と並列に配置されたラプチャディスク（設定圧 0.35MPaG）により圧力が開放される。逆止弁は試験容器内への外気侵入を防止するもので、閉止圧は 0.002MPaG である。

3.4 保護ガス系

保護ガス系は、試験運転中に微細孔部から水系へ Na が侵入しないように、注水配管から試験体の微細孔部へヘリウムガス（以下、He と記す）を供給するためのものである。主な構成部品は、He ガスのポンプ、減圧弁、He 用マスフローメータ、He バイパスライン及びそれらを接続する配管・弁類である。

He 保護ガスは注水圧力以下に設定されるが、注水試験時に高圧の水が保護ガス系に流れ込まな

いように、注水弁（WV-2）の開信号を受けて保護ガス供給弁（GV-7）が閉となるインタロックを設定している。仮にインタロックが動作しない場合を想定して、保護ガス系の下流側には逆止弁を設置している。また、注水試験終了後には、注水配管内の残水を He ガスでブローするために保護ガス系を用いることができる。

さらに、過去のセルフウェステージ試験では、Na チャージ後に微細孔部が閉塞する挙動も見られた。この知見から、Na による He ガスの閉塞挙動が見られたら He バイパスラインを用いて、高圧の He ガスを微細孔部に向け、閉塞を回避するラインも設置した。

3.5 計測制御設備

セルフウェステージ試験装置の計測制御設備は、データ収録装置、セルフウェステージ試験装置操作盤及び予熱電源盤より構成される。

各計測データはデータ収録システム（キーエンス製 NR-500）によって収録され、そのデータは PC 内の HDD に保存される。表 3 に各制御項目とそれに対応する制御設備を記載する。

セルフウェステージ試験装置操作盤は、注水系、保護ガス系、カバーガス系及び試験容器を操作する盤であり、3.6 安全対策に記す安全保護系と一体になっている。また本操作盤は操作・監視に必要な信号の入出力、及び制御を行うことができ、停電時にも無停電電源（UPS）を介して監視とデータ収録が可能である。なお、UPS の稼働時間は数十分である。

予熱電源盤は、試験容器及び Na ドラム缶以外の Na 系全ての予熱制御を行う。

3.6 安全対策設備

SWAT-2R において試験装置の運転時における異常対策は、Na 漏えい時の受皿等のハード対応だけでなく、注水を停止することを目的とした表 4 のようなインタロック等が組み込まれている。

3.6.1 ナトリウム (Na) 漏えい対策

Na 漏えい対策として、Na 受け皿や Na 漏えい検知器を設置した。Na 受け皿は、試験容器下部、Na 供給タンク、Na ドレンタンク、Na ドラム缶及び Na チャージ・ドレン配管の下部に設置されている。Na 漏えい検知器は、Na 漏えいが起こりやすいと想定した試験容器下部溶接線、Na 供給タンク下部溶接線及び Na 保有ラインに取り付けられている。

Na 漏えい検知器が発報した際は、運転員による確認（①目視、②周辺の温度上昇、③臭い、④音（燃焼音、異常音等））を実施し、Na 漏えいを判断する。

Na 漏えいが発生した際には、装置運転を停止し、容器内のカバーガスのブローや配管内の Na を早期にドレンする等の Na 漏えいの拡大防止を行う。なお、Na 漏えい火災が発生した場合には、Na 専用の消火剤（日本ドライケミカル社：ナトレックス）等を用いて消火を行う。

3.6.2 操作盤制御不能対策

操作盤が制御不能状態に陥った場合には、シーケンサーからの信号が遮断され、フェールセーフ状態（ヒータ等は電源 OFF、弁類は閉）となる。なお、これらは非常停止（制御盤の非常停止ボタンを押した場合）と同様の状態である。

試験装置の停止後は、運転員が監視を継続し、手動でガス圧をコントロールする。なお、一旦注水試験を停止すると微細孔に Na が浸入して閉塞してしまうため、たとえ短時間で注水試験の再開ができて一定の注水率を得ることが困難となることから、原則として注水試験の再開は行わない。

3.6.3 停電対策

注水試験中に停電が発生した場合、全ての機器が停止し、ヒータ等は電源が OFF、弁類はフェールセーフ（閉）状態となる（非常停止と同様）。試験装置は UPS により数十分間の電源が確保されることから、操作盤による監視とデータ収集が継続される。試験容器以外の Na 系は、ヒータ及び弁類全てが手動操作であるため、停電により停止した機器はその設定値を「0」または OFF にして復電を待つこととなる。

4. 微細孔型試験体

本試験では、セルフウェステージ現象における腐食影響因子をできるだけ分離した基礎データの取得を目的としている。過去のセルフウェステージ試験では、実際に発生する伝熱管の欠陥をできるだけ模擬するように、人工加工または疲労加工のクラック型試験体が多く用いられてきた。しかしクラック型試験体は、初期欠陥のばらつきが多いため、分離効果試験を行う上で重要な不確定因子の排除（初期条件を合わせる等）が難しい。一方、本試験の目的である基礎データの取得のためには初期欠陥のばらつきを小さくする必要があり、そのためには注水流路が単純なものである必要がある。したがって、円孔が貫通している形状の微細孔型試験体を選定した。

4.1 微細孔型試験体の仕様

微細孔型試験体は、内容積 $5.76 \times 10^{-6} \text{m}^3$ で、試験容器上部フランジに固定している注水配管と連結している。また微細孔型試験体は、SUS304 製の固定治具（全長 90mm、肉厚 5mm）に U ボルトで固定している。この構造により、微細孔型試験体は試験毎にほぼ同一箇所に固定できるうえ、固定治具からの着脱もできる。また注水配管及び試験体の内容積は、注水後の残水量として試験の誤差となるため、厚肉の注水配管（肉厚：1.65mm）を採用し、試験体も栓材を設けることで内容積を減らしている。

微細孔型試験体の組立図を図 10 に示す。微細孔型試験体は $50\mu\text{m}\phi$ のドリルで 1 箇所貫通させ製作された。微細孔型試験体の材質は SFR の SG の伝熱管材料として有望な Mod.9Cr-1Mo 鋼を用いている。微細孔型試験体の仕様は以下のとおり。

試験体形状	: 外形 31.4mm (-0.03,+0mm)、長さ 12.1mm ($\pm 0.2\text{mm}$)
微細孔部の孔径	: $50\mu\text{m}\phi$ (+10,-0 μm)
微細孔部の肉厚	: 0.75mm (+0.05,-0mm)
試験体材質	: Mod.9Cr-1Mo 鋼
設計圧力	: 4MPa
設計温度	: 520°C

4.2 微細孔型試験体の加工方法の選定

注水時間をパラメータに腐食影響因子をできるだけ分離した試験を行う上で、初期条件を合わせることが重要である。初期条件のうち、微細孔型試験体の製作によって排除できる不確定因子は以下の 3 つがある。これらを考慮し、微細孔型試験体の加工方法を選定する。

- 注水流路等の初期条件を考慮した初期欠損形状
- 欠損部への熱的影響（加工時に発生する熱等による相転移等）
- 加工精度（孔径、内容積等）

微細孔型試験体の製作には、主に放電加工とドリル孔加工の 2 種類の加工方法がある。放電加工でも、ドリル孔加工でも、微細孔を開ける場合は、厚肉の孔加工が不可能であることは共通し

ている。試験への使用実績は、微細孔型試験体が従来まで放電加工によってほぼ真円に加工されていた¹⁾のに対し、ドリル孔加工は少ない。しかし、ドリル孔加工における微細孔の開孔例は、他分野を含めると加工実績が多い。一方で、Mod.9Cr-1Mo 鋼をはじめとする伝熱管候補材料は750°C近傍で相転移が起こるため⁵⁾、発熱の多い放電加工ではなく、ドリル孔加工（以下、本報告の試験体についてはキリ加工と呼ぶ）を採択した。

4.3 微細孔型試験体の加工精度

4.3.1 微細孔型試験体の形状確認

写真1と2は注水試験前の微細孔型試験体及び円孔部拡大写真である。また、図1-1は微細孔型試験体断面写真である。写真2より、微細孔出口端部には、キリ加工時にキリのテーパ部が当たって生じたと思われるテーパが確認されるが、ほぼ真円に近い状態で微細孔が加工されていることがわかる。

図1-1より、非常に滑らかな微細孔が作成されていることがわかる。拡大した写真からは、内表面にはキリ加工時のおくりを細かくする影響で幾重の筋が生じているが、その粗さは全体的に滑らかである。図1-1で、軸方向中央部でやや括れているように見えるが、断面観察時の研磨作業による影響である。

図1-2及び図1-3に、図1-1のB部について測定した微細孔型(50 $\mu\text{m}\phi$)試験体の表面粗さの鳥瞰図及び等高線を示す。図1-2及び図1-3では、X-Y平面を同じ基準で示している。図から断面形状が均等に連続していることがわかり、写真2で見たほぼ真円の孔が伝熱管内面まで到達している。

4.3.2 微細孔型試験体の粗さ測定

図1-4に、図1-1のB部について測定した微細孔の内面における粗さ測定の結果を示す。微細孔型試験体の粗さは、軸方向に0.030 μm 、周方向に0.057 μm であり、非常に滑らかな内表面であることが確認できる。図1-4において、周方向の両端が乱れているが、散乱の影響によるものである。

4.3.3 微細孔型試験体の孔径精度

表5に今回製作された孔径の測定結果を示す。表から分かるように50.2~59.2 $\mu\text{m}\phi$ の範囲で微細孔型試験体が製作できている。参考として、微細孔出口端部に生じたテーパ深さを測定した結果、半数以上が測定下限値5 μm 以下で最大は11 μm であった。

5. 試験概要と手順

セルフウェステージによる事象進展を把握するには、セルフウェステージ現象による損耗で微細孔拡大が起こるまでの時間スパンを対象に、注水時間をパラメータとした試験を行う必要がある。

微細孔拡大が起こるまでの間に注水時間を数ケースパラメータに設定するには、貫通破損データに基づいて導出された過去のセルフウェステージ相関式から損耗深さを推定し、本試験の試験時間を設定する。また、試験体は反応生成物等で損耗するため、損耗形状を正確にとらえるためには、注水終了後のNaへの浸漬時間を短くすることも重要である。

そこで、過去の試験から得られているセルフウェステージ率を基に、試験時間を3時間以内におさえかつNaチャージ～試験～Naドレンを1日以内で行う試験手順とした。セルフウェステージ試験手順の概略を以下に示す。

5.1 セルフウェステージ試験の主なフロー

セルフウェステージ試験のフローを図15に示す。以下、図中の①から⑩について説明を加える。

5.1.1 試験準備

①試験体、差圧管の組込み：

試験体組込みにおいては、微細孔の形状確認が取れている試験体の微細孔近傍に、試験条件に合わせて熱電対及びボイド計等を取り付け、試験容器へ組込む。試験容器フランジ部から引き出されている注水配管と差圧管を接続して注水ラインを完成させる。また、Na液面計や熱電対等の計測・制御系の配線を接続し、試験容器フランジ部に断熱材を施工する。

②差圧管への水充填：

あらかじめ実施された液位校正結果から、試験条件に合わせた注水質量を差圧管へ封入する。その際、校正結果より単位当たりの注水質量の値を求める。

また、必要に応じてNa供給タンクへ必要量のNa充填等を実施する。

5.1.2 試験運転

③～⑥保護ガス(He)による微細孔の閉塞防止とNaチャージ昇温：

Naチャージ、昇温及び差圧管の加圧による注水圧力の設定までの期間(④～⑥)は、保護ガス(He)による微細孔の閉塞防止(③)により、試験装置の保護ガス系を使って微細孔部からHeガスを常時噴出し、注水前に微細孔部が閉塞することを防ぐ。微細孔部の閉塞状況はHeガス用マスフローメータの流量で確認する。

⑦注水試験開始：

弁の開閉によってラインを保護ガス系から注水に切換えて、試験体に注水を開始する。注水中は降下する差圧管液位、反応によって上昇するNa温度やカバーガス圧力等を監視すると共に、それらの実験データを収録する。

⑧注水試験終了：

注水弁を閉にすることにより注水試験を終了する。

⑨降温/Na ドレン、差圧管ガスブロー

注水停止後には、試験容器の降温、Na ドレン、差圧管ガスブローの作業を順次行う。また微細孔部の拡大によって試験が終了した場合は、注水弁を閉止するだけでなく、Na 逆流を防止するため試験容器カバーガス圧力以上の保護ガスを試験体に供給する。

5.1.3 試験後

⑩試験体の解体、洗浄

試験体を試験容器から引き上げ、解体・洗浄する。また、試験容器、Na ドレンタンク及びそれらを接続する配管も洗浄・検査する。

⑪試験後分析・評価

試験後の試験体については、セルフウェステージ環境を保存できる場合は、Na 付着状態のままグローブボックスへ移動して保管しておく。その後、試験体の分析・評価を行う。

5.2 セルフウェステージ試験手順

5.2.1 ナトリウム (Na) チャージ

試験当日の Na チャージは、試験容器、Na 供給タンク、Na ドレンタンク及び配管を予熱し、Na チャージ条件に達してから実施する。また、Na チャージの際に試験体の微細孔部への Na 侵入を保護するため、He ガスを供給し、微細孔からの流量を確保する。約 200°C、6.6kg の Na を Na 供給タンクから試験容器へチャージする。Na チャージの完了は、試験容器に設置した接点式液面計 (L) の点灯までとする。Na チャージ後、配管内の Na を取り除くため、ドレンタンクから試験容器側への Ar ガスブローを行う。

5.2.2 注水試験

試験容器の Na を試験条件温度 (520°C) まで加熱した後、差圧管から水を試験体に供給して、Na 中に噴出させる。試験容器内の注水配管に流れる水/蒸気は、Na 及び Ar ガスからの入熱により、Na 中に噴出するときの温度は、ほぼ Na と同一になる。

(1) 試験条件設定

試験条件での注水率を達成できる初期注水圧力値を設定する。本試験は、初期注水率を一定に整合させるため、試験目標値に達しない場合は、加圧ライン (N₂ ガス系ライン) の減圧弁を調整して、安定した注水率を設定する。ただし、圧力調整は注水初期の 10 分以内とする。注水時間は、過去の相関式を基に予想減肉量を算出し設定する。その他、Na 系の条件 (初期 Na 温度、カバーガス圧力等) は全ケースともある程度一定で行うよう操作盤等で調整する。

また微細孔型試験体は、微細孔の径が 50µmφ と極微細の構造となっているため、試験条件を作成する間に Na の浸入等によって閉塞することが予想される。微細孔の閉塞は、保護ガス (He) 流量により監視する。

(2) 注水試験

「装置起動・停止 SW」により、注水弁 (WV-1 及び WV-2) を連続「開」、保護ガス供給弁 (GV-7) を「閉」とし、注水試験を開始する。

注水試験中は、Na-水反応に伴い発生する水素ガスによりカバーガス圧力が上昇し、0.02～0.04MPaG 範囲内に保つよう自動で制御される。注水率の変化は差圧式液面計にて監視し、試験体の反応部付近に設置した熱電対で反応温度を計測する。

(3) 注水試験の停止条件

注水試験の停止条件は「計画停止」と「異常停止」がある (表 6)。「計画停止」とは、実験条件 (試験時間、注水率「高」等) の要求に基づいて計画的に停止するものである。「異常停止」とは、注水試験中に Na 漏えい、停電及び地震等その他異常事態が発生した場合の停止であり、自動または手動にて試験を中止する (3.6 項安全対策を参照)。

本試験では微細孔が拡大する前の途中段階で注水を停止し、微細孔の損耗過程を推察するため、試験時間の経過が主な停止条件となる。その他、微細孔の拡大により注水率「高」となった場合、または微細孔閉塞や注水率の大きな変動等によって実験データ採取に問題がある場合には、実験計画を変更して停止することがある。

1) 計画停止

● 試験時間 (手動)

試験終了時間の経過を受けて、「装置起動・停止 SW」で停止させ、注水弁 (WV-1 及び WV-2) を「閉」、保護ガス供給弁 (GV-7) を「開」とする。

● 注水率「高」(自動)

差圧式液面計から算出する注水率が 1g/s 以上でインタロックにより自動停止する。差圧管 No.2 の場合、6 秒以内に液位が 100mm 降下すると注水率が 1g/s 以上になる。

● 差圧管液位「低」(自動)

差圧管の液位が不足した場合に停止するインタロックで、差圧管液位「低」(30mm 以下) を受けて自動停止する。

● ラプチャディスク破裂 (自動)

微細孔の拡大に伴い急激に注水率が増加すると、それに伴い水素ガスの発生も増加して、試験容器内のカバーガス圧力が上昇する。自動制御によりカバーガス圧力は一定に制御されるが、それを上回る水素ガスの発生があった場合、試験容器圧力 0.35MPa でラプチャディスクが破裂して水素ガスを放出する。また、破裂信号を受けて、インタロックにより試験装置が自動停止する。

● 試験容器温度「高」(自動)

注水率の増大に伴って試験容器内の Na 温度が上昇し、試験容器外壁で 560℃^{*}を超えた場合、試験装置は自動停止される。

^{*} 自動停止後、注水配管内の残水 (最大 18cc (=1.8×10⁻⁵ m³)) が瞬時に反応しても試験容器の設計温度 (600℃) を超えない温度とした。

2) 異常停止

- Na 漏えい (手動・自動)

Na 漏えいの判断があった場合には手動で「非常停止 SW」を操作し装置を停止する。また、試験容器の防護枠に設けた熱電対が通常温度+50℃に至るとインタロックにより自動停止する機能も持つ。

- 停電

停電時は商用電源が遮断されるため、試験装置は強制停止する。予熱ヒータは全て OFF、注水弁などの空気操作式弁は自動「閉」となる。

- 地震等その他の異常

地震時 (体感震度 5 以上) は「非常停止 SW」の手動操作により、試験装置を強制停止する。その他異常事態においても基本的には「非常停止 SW」の手動操作により試験装置を強制停止する。

5.2.3 ナトリウム (Na) ドレン

Na ドレンは、試験容器内の Na 温度を 250℃以下に降温してから Na ドレンタンクに移送する。注水実験で生成される反応生成物の影響でドレン配管が閉塞する可能性があるものの、スウェージロック継手部からの Na 漏えい防止の観点で、Na ドレン温度は 250℃以下に設定した。試験容器内の全 Na を保有できるドレンタンクへの Na 移送は、ガス巻き込みまで実施する。

6. まとめ

セルフウェステージ現象に対する基本検証データ（損耗深さ、損耗体積等）の取得を目的とした、セルフウェステージ現象解明試験手法を開発した。実施した項目は以下のとおりである。

1) セルフウェステージ試験装置（SWAT-2R）の開発

過去に行われた小リーク・Na-水反応試験装置（SWAT-2）及び微小リーク・Na-水反応試験装置（SWAT-4）を基に、基本検証データが高精度で計測が可能なセルフウェステージ試験装置（SWAT-2R）を開発・製作した。

2) 微細孔型試験体の開発

微細孔型試験体は、微細孔（50 $\mu\text{m}\phi$ ）がほぼ真円のまま貫通しており、微細孔の内面が滑らかな表面形状だということが確認できた。また微細孔型試験体の孔径は、50.2～59.2 $\mu\text{m}\phi$ の範囲で製作できた。この微細孔型試験体を用いることで、セルフウェステージ環境に関する基本検証データを採取することができる。

3) セルフウェステージ現象解明のための試験手順の検討

セルフウェステージによる事象進展を把握するには、セルフウェステージ現象による損耗で微細孔拡大が起こるまでの時間スパンを対象に、注水時間をパラメータとした試験を行う必要がある。過去の相関式から本試験の試験時間を設定し、セルフウェステージ時間以外の影響を緩和するための試験手順を立案した。

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、原子力機構が実施した「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」において実施された。

本試験手法の開発に当たっては、吉田英一氏、田辺裕美氏から貴重な助言を得た。また、装置の設計・製作においては、東興機械工業株式会社の鈴木和右氏に多大なご尽力をいただいた。

参考文献

- 1) 黒羽光男、井上設生、大後美道、佐藤稔、高速炉蒸気発生器伝熱管 2¼Cr-1Mo 鋼のリーク自己孔拡大試験(微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第1報)、PNC TN941 80-135、1980.
- 2) Kuroha, M. and Shimoyama, K., MICRO-LEAK BEHAVIOR ON LMFBR MONJU STEAM GENERATOR TUBE MATERIALS - Studies of Micro-Leak Sodium-Water Reaction (3) -, PNC TN9410 86-027, 1986.
- 3) 黒羽光男、佐々木和一、川辺浩康、山田敏雄、佐藤稔、高速炉蒸気発生器伝熱管損傷リーク孔の自己拡大試験(微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第2報)、PNC TN941 82-101, 1982.
- 4) 下山一仁、田辺裕美、姫野嘉昭、高クロム系 SG 伝熱管材のセルフ・ウェステージ特性 (微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第4報)、PNC TN9410 88-140, 1988.
- 5) ステンレス協会編、ステンレス鋼便覧 第3版、日刊工業新聞社、1995.

表 1 過去のセルフウェステージ試験における試験条件

材質	試験装置	試験体形状	肉厚 (孔径) [mm]	Na 温度 [°C]	注水圧力 [MPaG]
2 ¹ / ₄ Cr-1Mo 鋼 ^{1),2)}	SWAT-2	微細孔	0.5(0.04)、1.0(0.08)	480	5.0~4.0
			2.3(0.09)、3.6(0.2~0.25)		
SUS321 ^{2),3)}	SWAT-4	人工へアークラック型	約 3.8	470	13
			約 3.5	505	
			3.2	460	
9Cr 系鋼 ⁴⁾ (Mod.9Cr-1Mo 鋼、9Cr-2Mo 鋼、9Cr-1Mo-Nb-V 鋼)		疲労クラック型	2.6	425	

1) PNC TN941 80-135, 1980, 2) PNC TN9410 86-027, 1986, 3) PNC TN941 82-101, 1982, 4) PNC TN9410 88-140, 1988

表 2 セルフウェステージ試験装置 (SWAT-2R) の主要系統の仕様

	単位	Na 系	試験容器	注水系	保護ガス系	カバーガス系
最高使用圧力	MPaG	0.2	0.5	22.0	22.0	0.2
常用使用圧力	MPaG	0.02~0.05	0.02~0.05	(試験圧力 ~4)	(試験圧力 ~4)	0.02~0.05
最高使用温度	°C	300	600	常温	常温	常温
常用使用温度	°C	250	550	常温	常温	常温

表 3 計測点リスト

名 称		NR-500 CH	備考
Tag.No	取付場所		
TIC-1	試験容器温度	1	制御熱電対(HE-1)
TIC-4	圧力開放系 V/T 温度	2	制御熱電対(HE-4)
TIC-5	Na 系ライン温度	3	制御熱電対(HE-5)
TE-6	水系ガス温度	4	
TE-7	水温度	5	
TE-8	試験容器 Na 温度	6	
TE-9	防護枠温度	7	
TE-10	試験容器ガス温度	8	
TE-11	注水温度 (ノズル内部)	9	
TE-12	反応温度-45°(ノズル出口)	10	
TE-13	反応温度 0°(ノズル出口)	11	
TE-14	反応温度 45°(ノズル出口)	12	
TE-20	Na 供給タンク Na 温度	18	
TE-21	Na 供給タンクガス温度	19	
TE-22	Na ドレンタンク内温度	20	
TE-23	ドラム缶 Na 温度	21	
TIC-24	Na 供給ライン	22	制御熱電対(H-1)
TIC-25	Na 供給タンクフランジ	23	制御熱電対(H-7)
TIC-26	Na 供給タンク	24	制御熱電対(H-2)
TIC-27	Na ドレンライン	25	制御熱電対(H-3)
TIC-28	Na ドレンタンクフランジ	26	制御熱電対(H-4)
TIC-29	Na ドレンタンク	27	制御熱電対(H-5)
TIC-30	Na 補充ライン	28	制御熱電対(H-6)
PT-1	差圧管圧力	29	
PT-2	試験体注水圧力	30	
PT-3	カバーガス圧力	31	
LT-1	差圧式液面計	32	
FI-1	保護ガス流量	33	
WV-1	注水弁 1 の開閉信号	34	
WV-2	注水弁 2 の開閉信号	35	

表 4 インタロック動作一覧

現象	設定値	計測対象箇所	インタロック作動
試験容器 「高」	560℃以上	試験容器外壁温度(TIC-1)	注水弁(WV-1,2) 「閉」 試験容器ヒータ OFF 保護ガス供給(GV-7) 「開」 試験容器カバークラス圧力調整
試験容器内 Na 温度 「高」	600℃以上	試験容器内 Na 温度(TE-8)	
防護枠温度 「高」	試験時通常温度+50℃		
注水率 「高」	1g/s 以上	差圧式伝送器(LT-1)	
差圧管液位 「低」	30mm 以下	差圧式伝送器(LT-1)	
ラプチャディスプレイスク破裂	0.35MPaG 以上	破裂検知器(RD-1)	
停電	—	—	
Na 漏えい	—	Na 漏えい検知器	
差圧管ガス圧力 「低」	試験毎に設定	差圧管ガス圧力(PT-1)	警報
試験体注水圧力 「低」	試験毎に設定	試験体注水圧力(PT-2)	
試験容器圧力 「高」	0.2MPaG	試験容器圧力(PT-3)	

※注水弁などの主要な弁はすべて空気作動弁になっているため、停電に伴い全ての弁が「閉」となる。

表 5 微細孔型試験体の孔径測定結果

試験体 No.	測定数	測定値 [μm]	測定誤差 [μm]	入口部テーパ 深さ(参考)
1-1	5	56.6	+1.4,-0.6	5 μm 以下
1-3	6	56.6	+1.4,-1.6	6 μm
1-4	5	56.4	+0.6,-1.4	5 μm 以下
1-5	6	57.1	+0.9,-1.1	5 μm 以下
1-6	6	56.5	+1.5,-0.5	5 μm 以下
1-9	4	56.7	+1.3,-1.7	5 μm 以下
2-1	5	51.8	+0.2,-0.8	5 μm 以下
2-2	5	51.2	+1.8,-1.2	10 μm
2-3	6	54.1	+1.9,-1.1	9 μm
2-4	5	50.2	+0.8,-0.2	5 μm 以下
2-5	5	53.0	+2.0,-3.0	5 μm 以下
2-6	6	57.8	+1.2,-1.8	11 μm
2-8	4	59.2	+1.8,-3.2	5 μm 以下

※入口部のテーパ深さは、5 μm が測定下限値である。

表 6 注水試験の停止条件一覧

項目		自動 or 手動操作	設定値
計画停止	試験時間	手動操作 「装置起動・停止 SW」 OFF	試験毎に設定
	注水率「高」	自動	1g/s
	差圧管液位「低」	自動	30mm
	ラプチャ破裂	自動	0.35MPa
異常停止	防護枠温度「高」	自動	通常温度+50℃
	停電	自動	—
	地震	手動操作 「非常停止 SW」 OFF	—
	その他異常時	手動操作 「非常停止 SW」 OFF	—

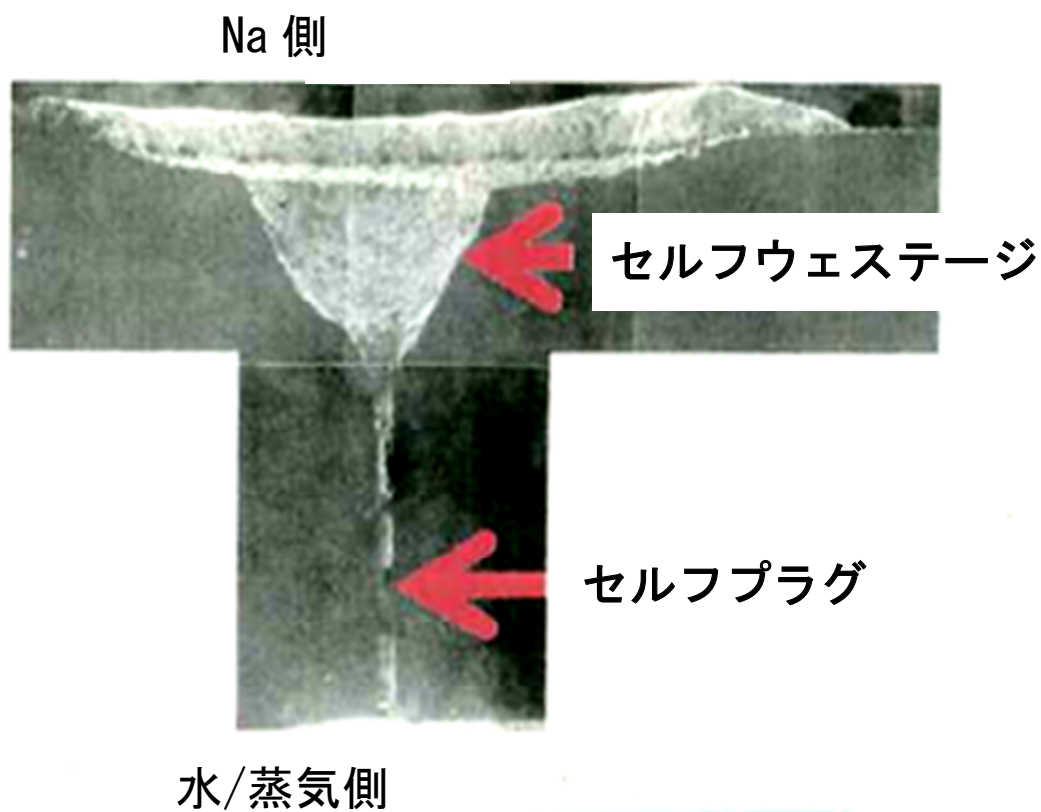


図 1 セルフウェスティング現象によるき裂拡大^[1]

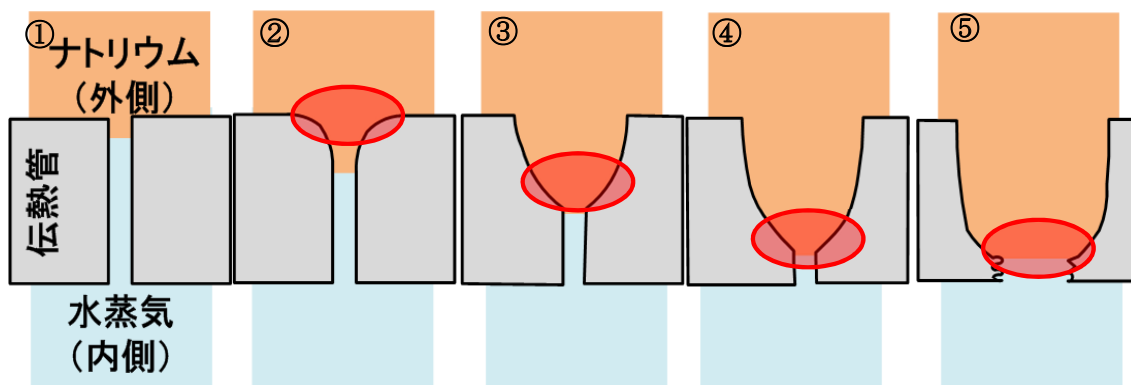


図 2 セルフウェスティング進展挙動概念図

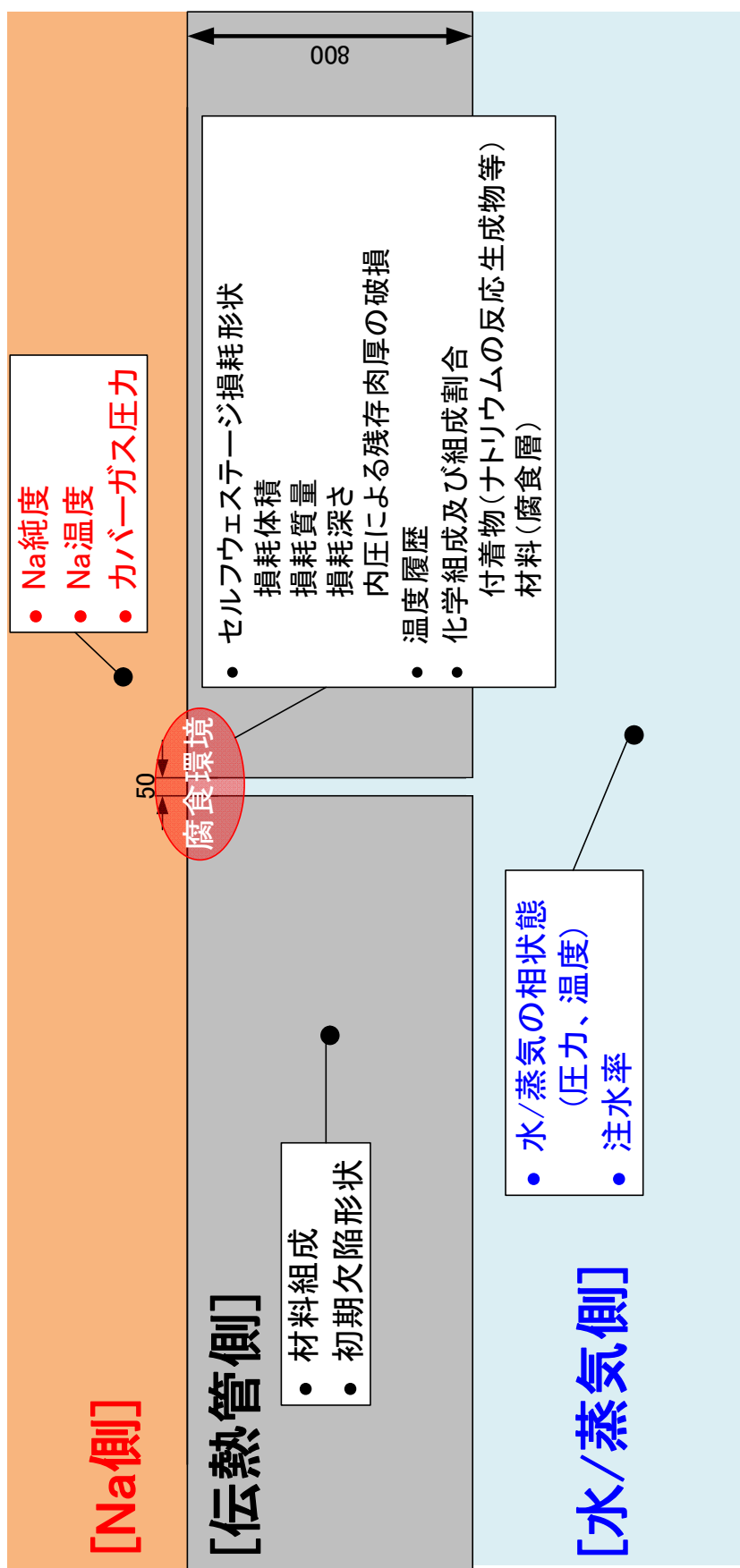


図 3 セルフエステージ試験で取得する物理量

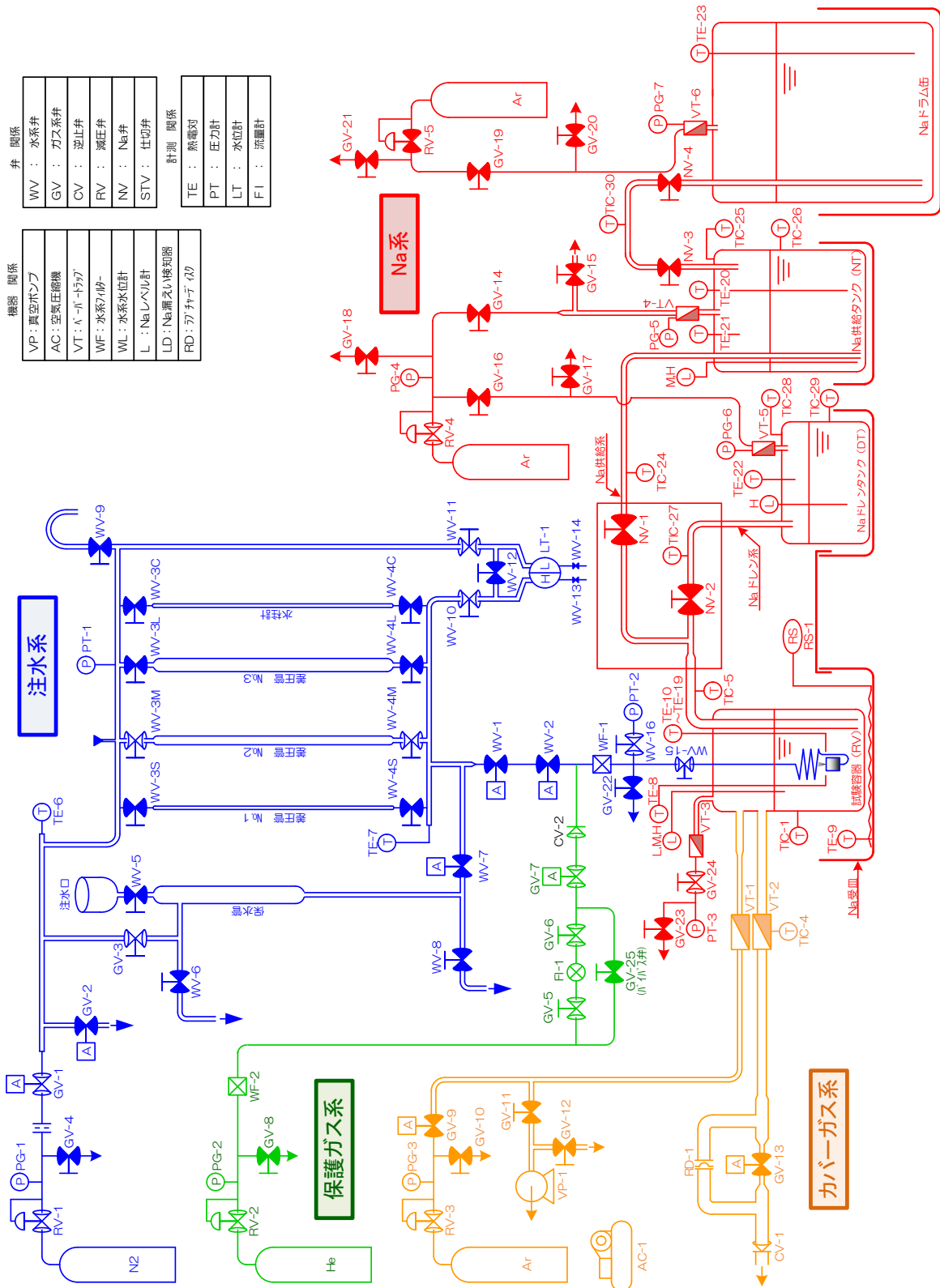


図 4 セルフウェステージ試験装置(SWAT-2R)系統図

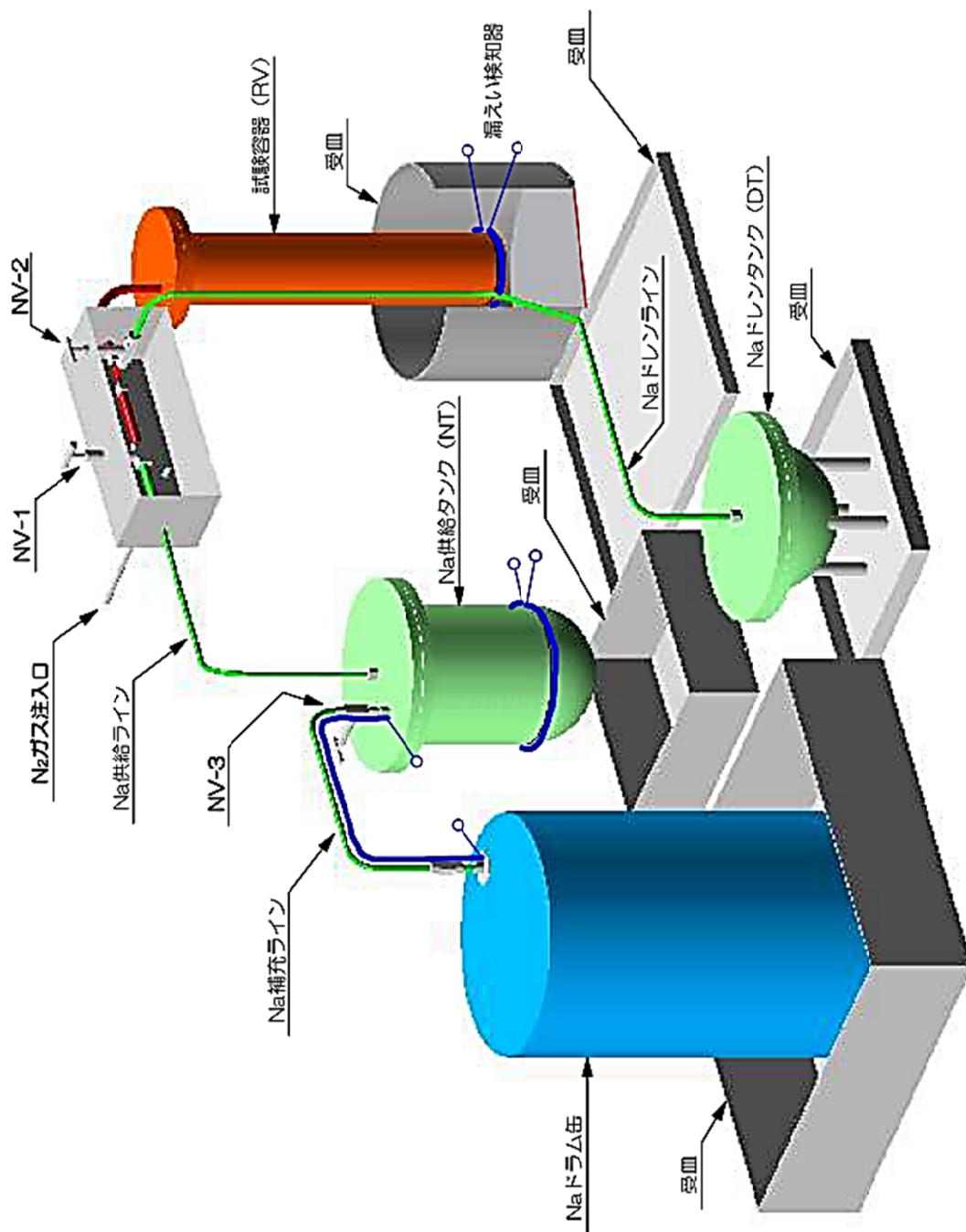


図 5 セルフェステージ試験装置(SWAT-2R) ナトリウム (Na)系 鳥瞰図

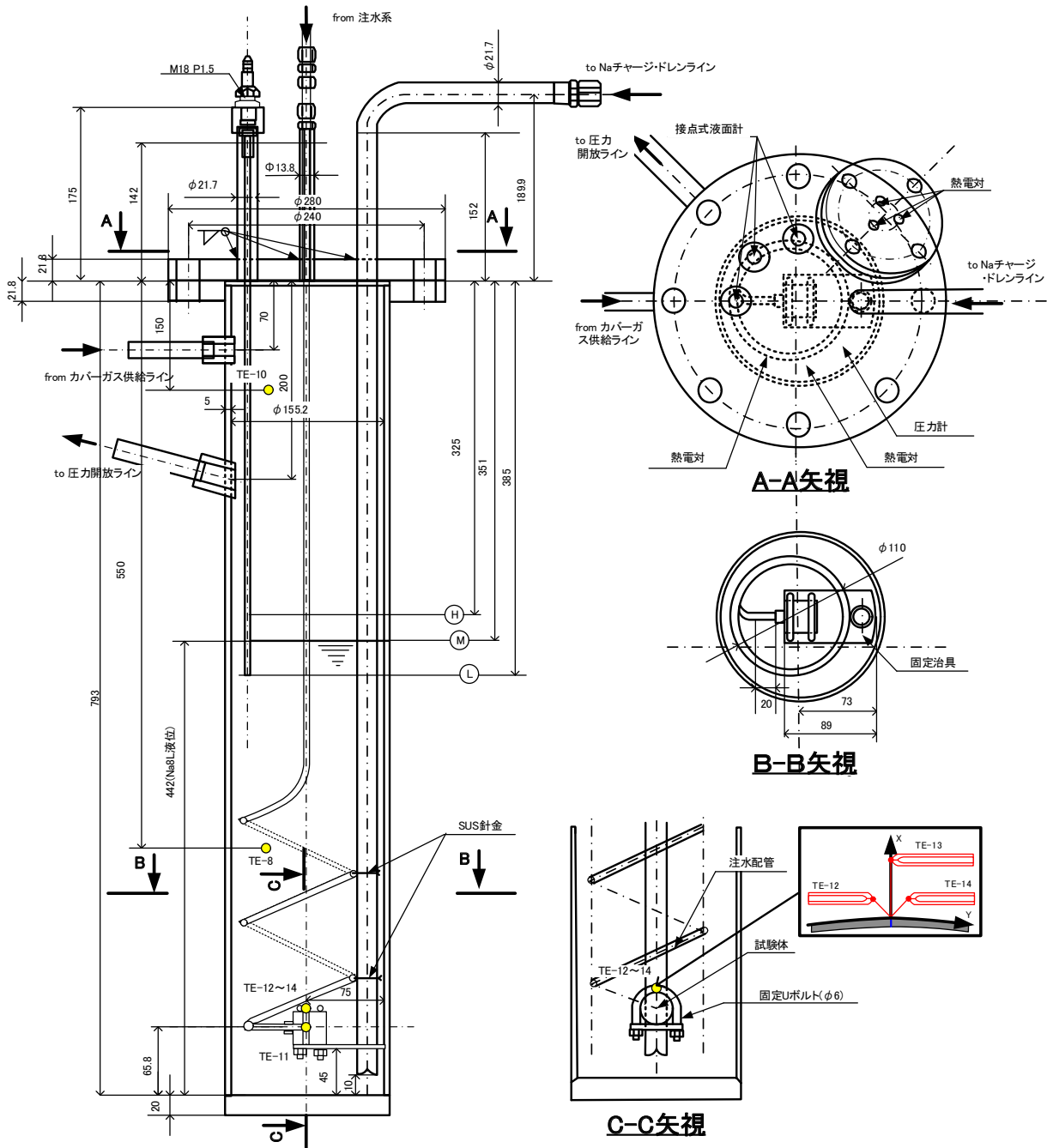


図 6 試験容器 構造図

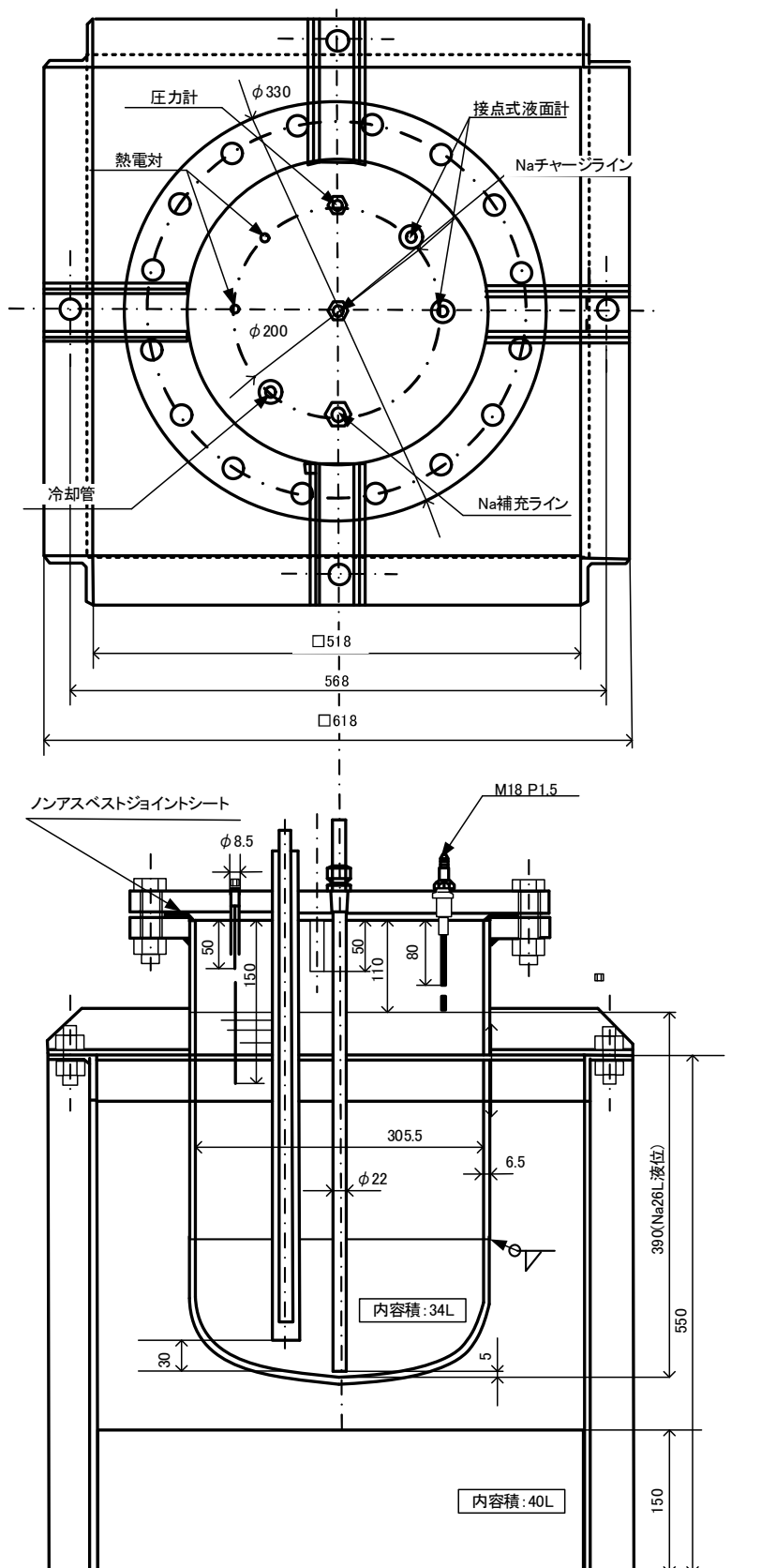


図 7 ナトリウム供給タンク 構造図

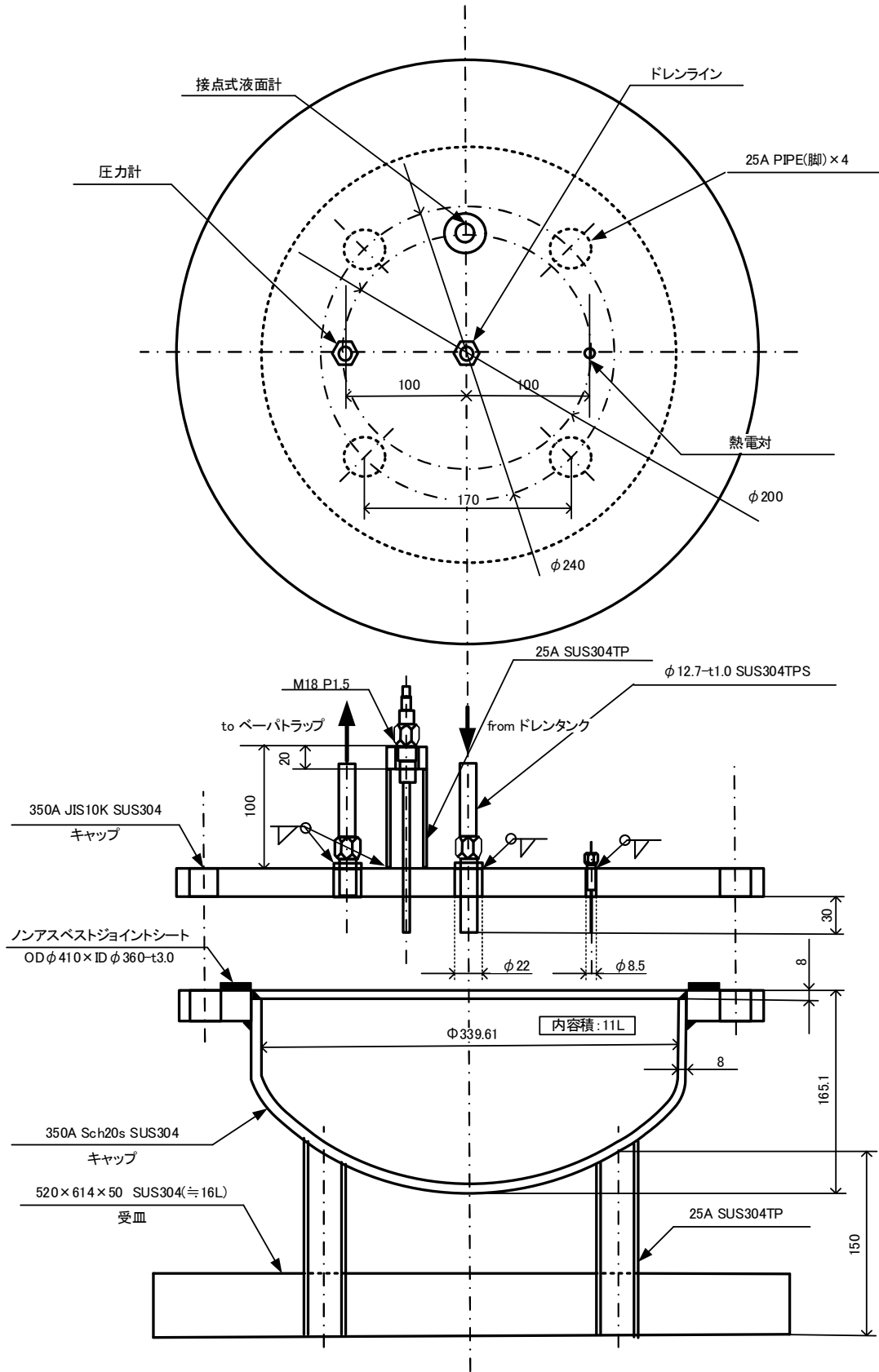


図 8 ナトリウムドレンタンク 構造図

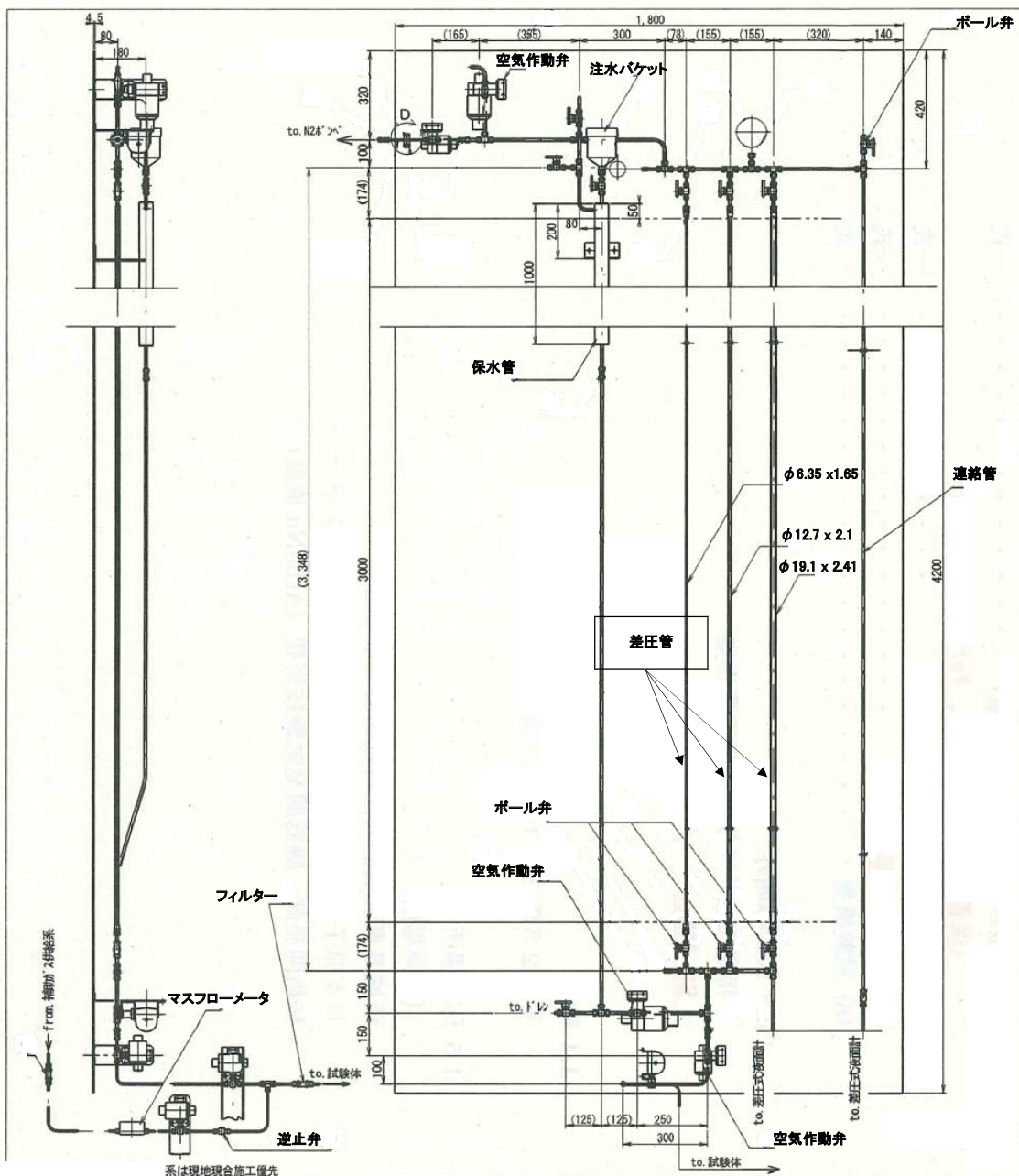


図 9 注水系 構造図

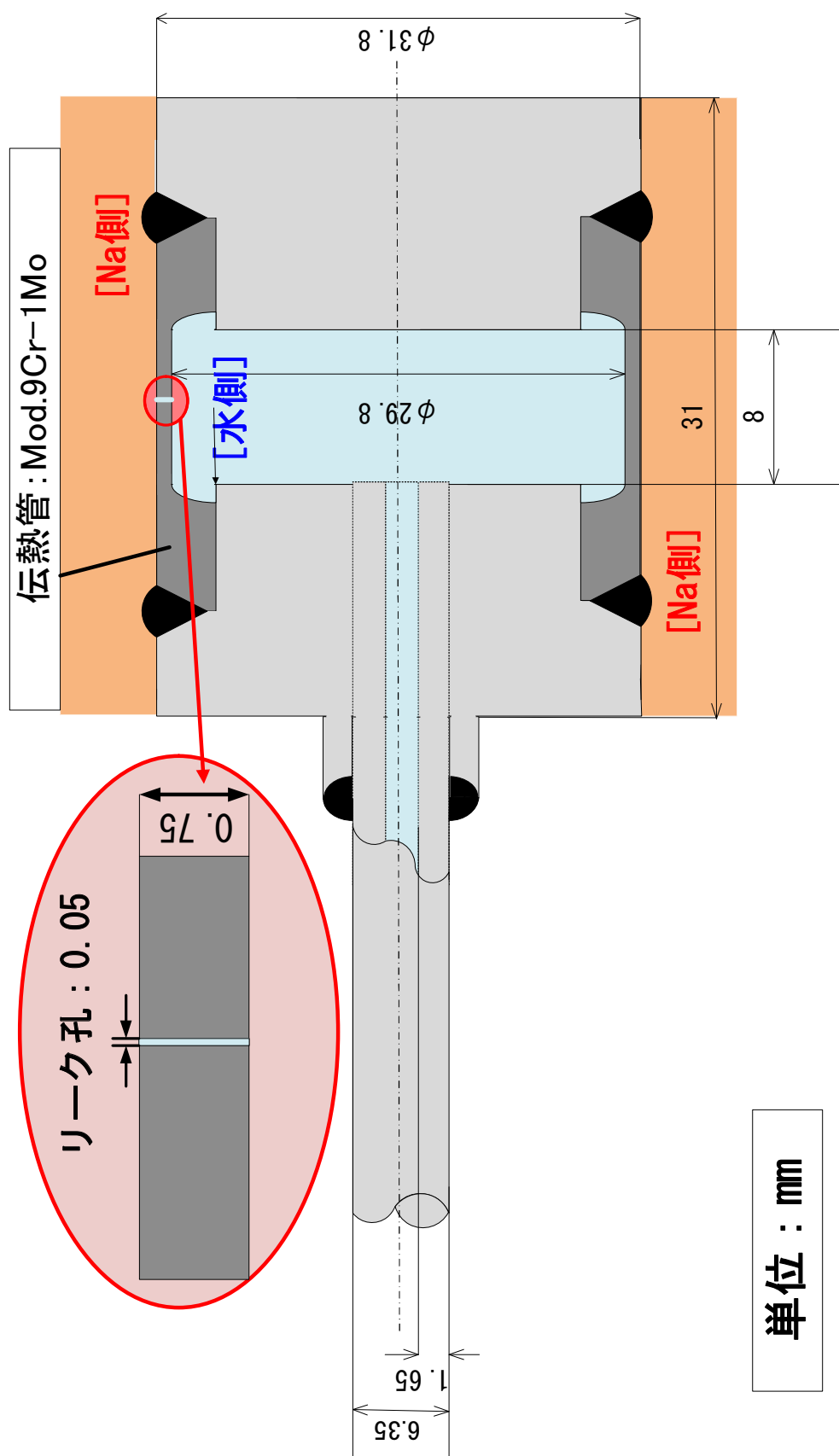


図 10 微細孔型試験体 組立図

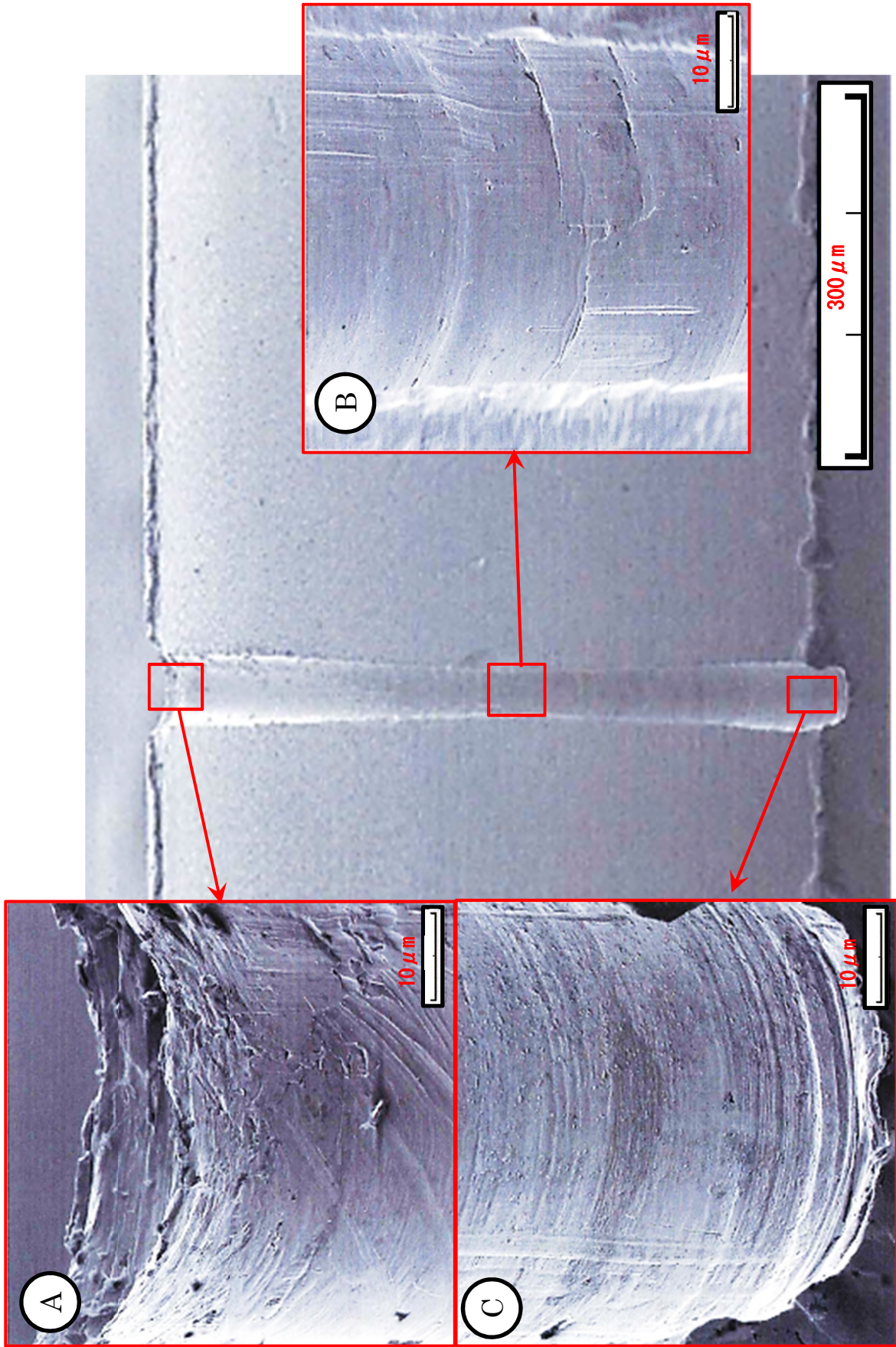


図 11 微細孔型試験体 断面写真

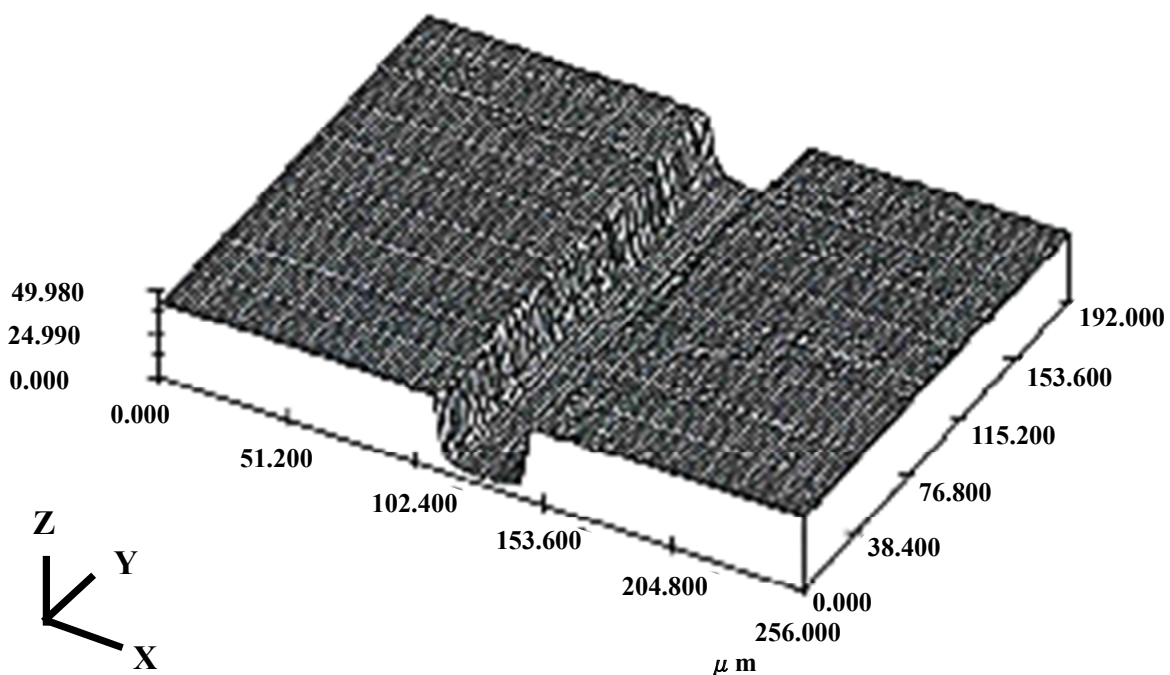


図 12 微細孔型試験体 表面粗さ鳥瞰図

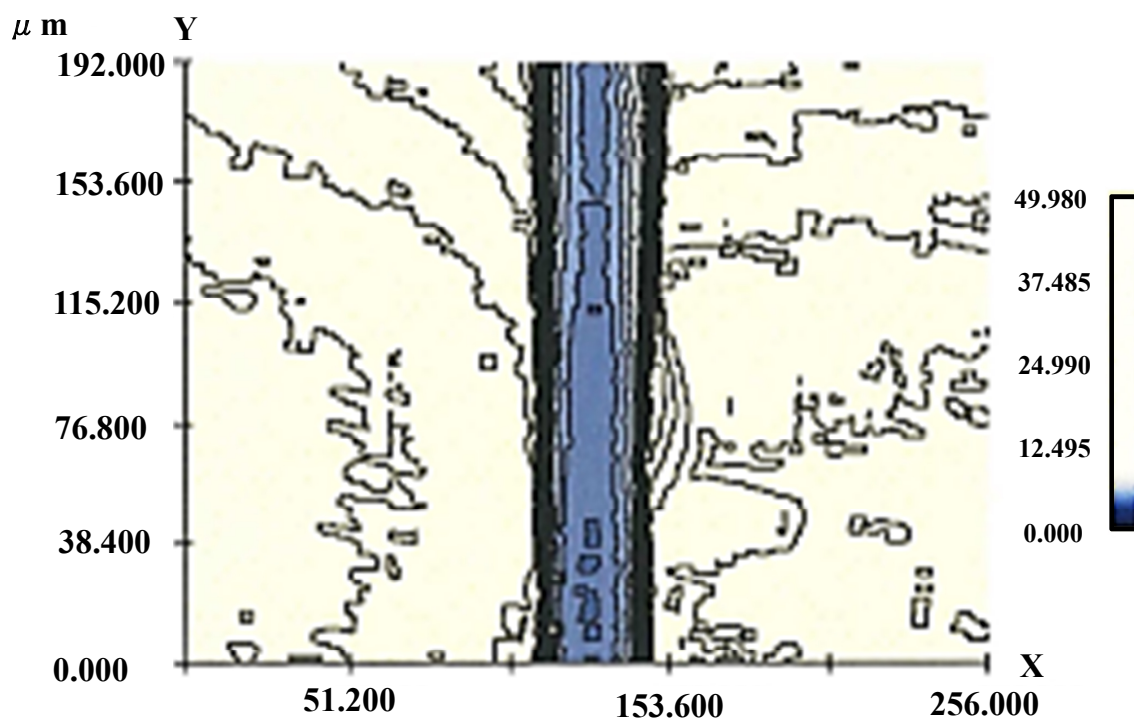


図 13 微細孔型試験体 等高線表示

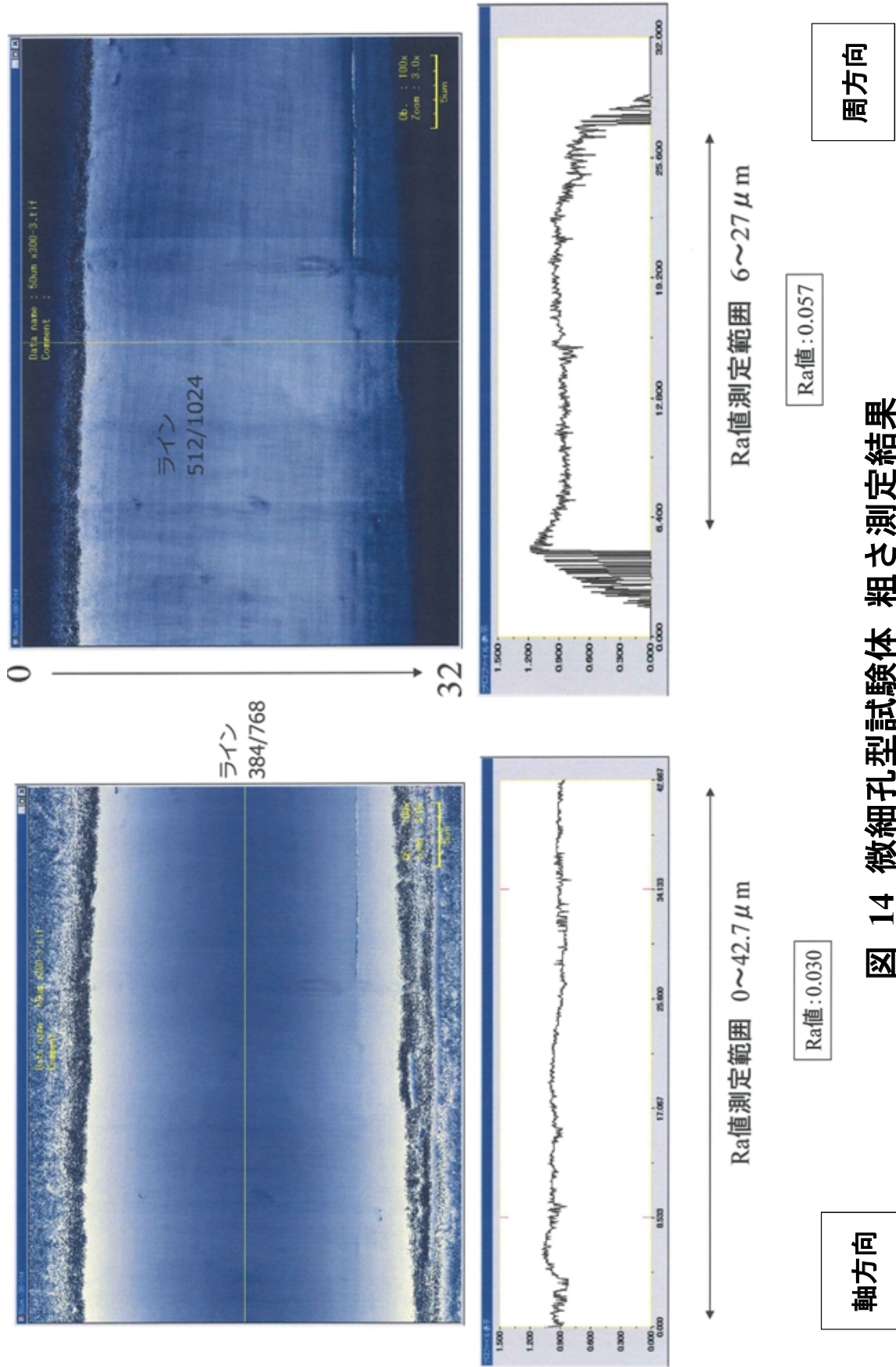


図 14 微細孔型試験体 粗さ測定結果

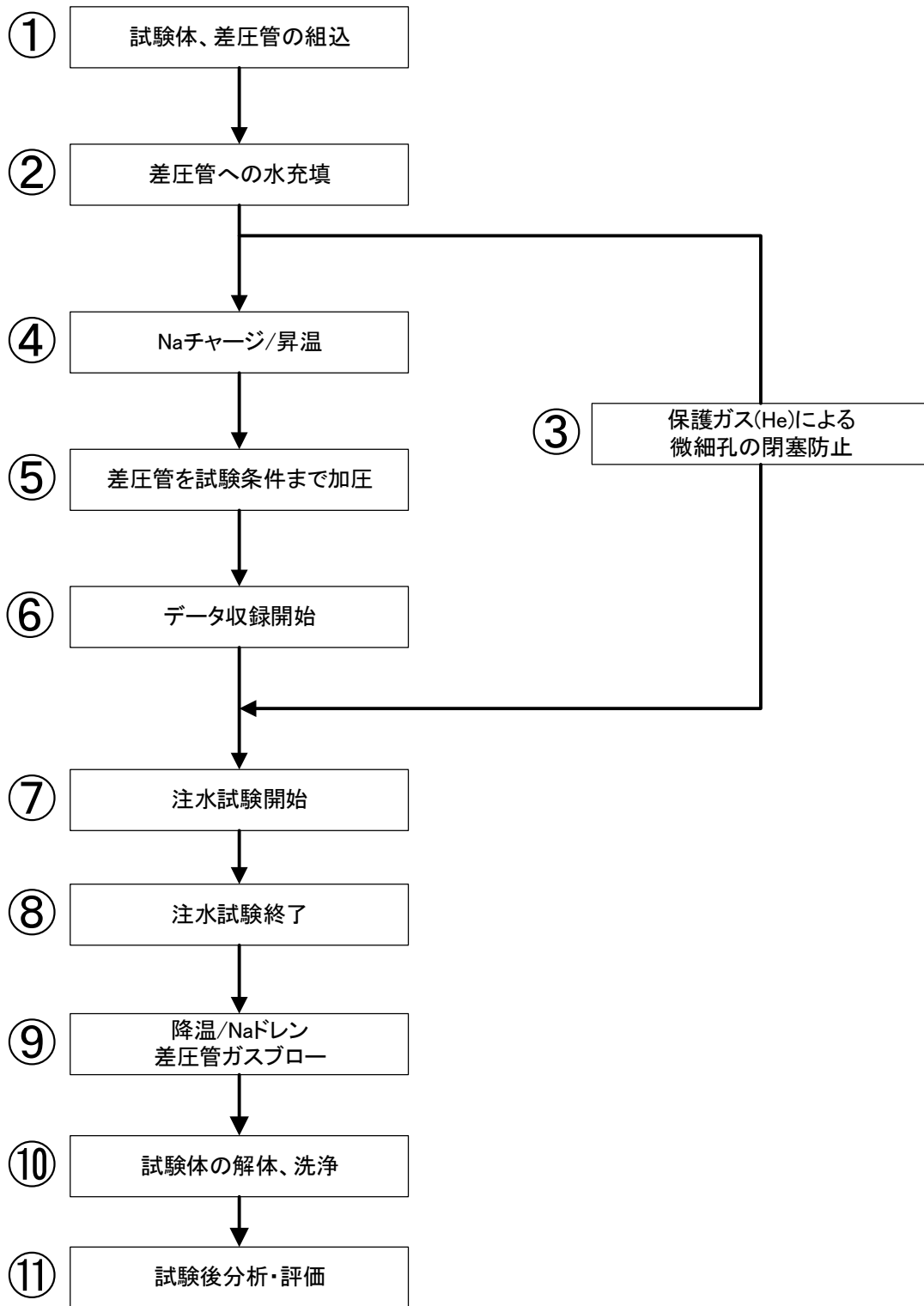


図 15 セルフウェステージ試験フロー



写真 1 微細孔型試験体 外観写真

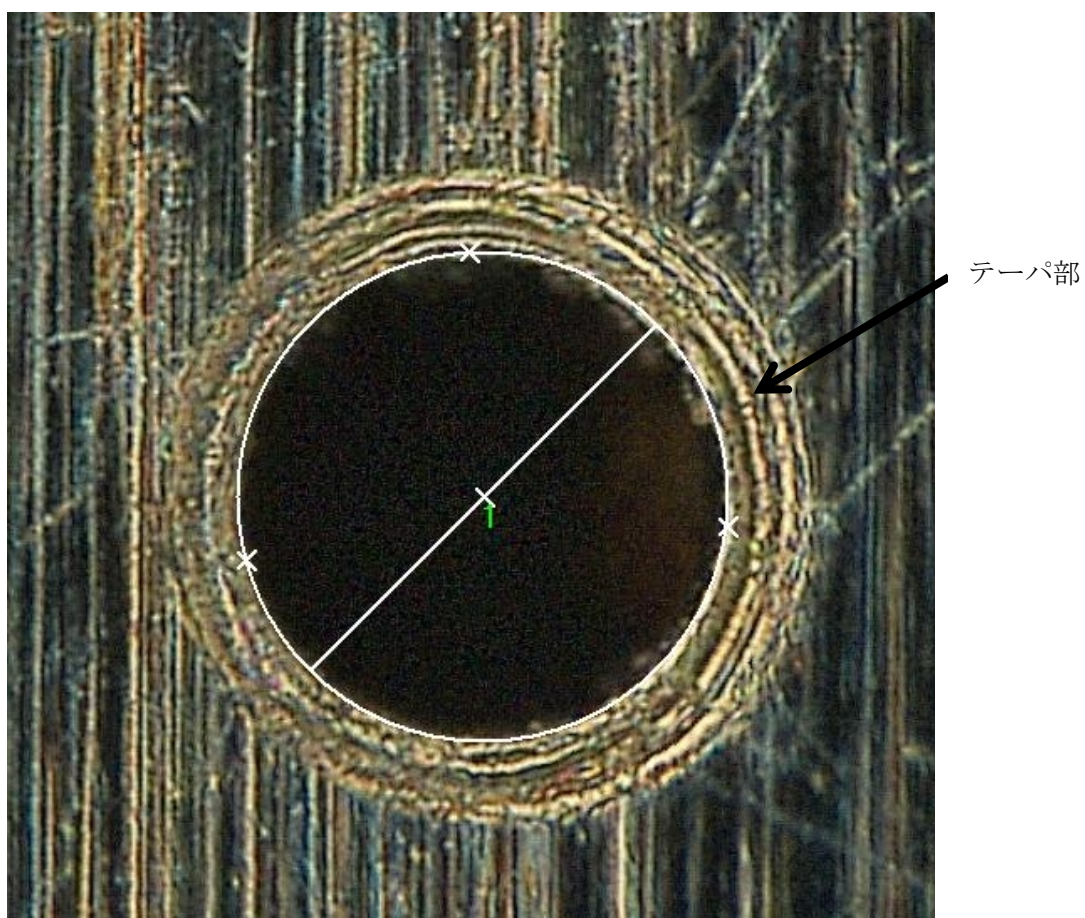


写真 2 微細孔部拡大写真

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

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

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

