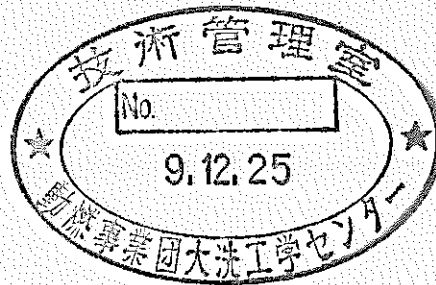


区 分 交 更	
変更後資料番号	1116
決議年月日	平成13年7月31日

動燃及び海外における ナトリウム洗浄事例の調査

— アルコール及び蒸気等を利用したナトリウム除去法について —

1997年6月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

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

製,
下さ



動燃及び海外における ナトリウム洗浄事例の調査

— アルコール及び蒸気等を利用したナトリウム除去法について —

山本 晋平*

要 旨

本報告書は、今後の動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃）のナトリウム洗浄技術の維持と向上を図ることを目的として作成した。

過去の動燃内及び海外における代表的なナトリウム洗浄実績についてまとめるとともに、動燃内で利用の頻度が高いアルコール循環洗浄法と密閉型蒸気洗浄法の安全上及び技術上の重要事項をまとめた。

* 大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

【目 次】

1. 緒 言	1
2. 洗浄実績	2
2. 1 アルコール洗浄	2
2. 2 蒸気洗浄	10
2. 3 その他のナトリウム洗浄実績関連図書	18
3. 海外の洗浄実績	19
4. 洗浄技術	23
4. 1 アルコール循環洗浄	23
4. 2 密閉型蒸気洗浄	25
5. 結言及び提言	28
6. 謝 辞	29
7. 参考文献	30
付録-1	78

【表目次】

表2. 1. 1	エキネンF-1の成分	2
表2. 1. 2	もんじゅ中間熱交換器の洗浄工程	31
表2. 1. 3	ソルミックスAP-7成分表	4
表2. 1. 4	一体貫流型蒸気発生器の洗浄工程	32
表2. 1. 5	FHM、RMのナトリウムの洗浄結果	33
表2. 1. 6	変性イソプロピルアルコールの成分表	5
表2. 2. 1	50MW1号SGの洗浄工程表	34
表2. 2. 2	50MW2号SGの洗浄工程表	35
表2. 2. 3	インナーケーシング洗浄実績工程表	36
表2. 2. 4	インナーケーシング洗浄操作データ	37
表3. 1. 1	各国のアルコール洗浄法	21
表3. 1. 2	各国の真空蒸気洗浄法	22
表4. 1. 1	アルコール循環洗浄法と密閉型蒸気洗浄法の比較表(1/2)	38
表4. 1. 1	アルコール循環洗浄と水蒸気洗浄の比較(2/2)	39

【図目次】

図2. 1. 1	中型アルコール洗浄装置	40
図2. 1. 2	中型蒸気洗浄装置	41
図2. 1. 3	もんじゅ中間熱交換器洗浄用架台	42
図2. 1. 4	アルコール洗浄時のナトリウム溶解量経時変化	43
図2. 1. 5	水・温水沸騰洗浄時のナトリウム溶解量経時変化	44
図2. 1. 6	温水減圧沸騰洗浄組立図	45
図2. 1. 7	水・アルコール洗浄装置	46
図2. 1. 8	一体貫流型蒸気発生器の洗浄用架台	47
図2. 1. 9	洗浄終了判定パラメータの経時変化	48
図2. 1. 10	FHM、RMアルコール洗浄装置	49
図2. 1. 11	2重管SG洗浄装置	50
図2. 1. 12	小規模アルコール循環洗浄装置の全体配置図	51
図2. 1. 13	小規模アルコール循環洗浄装置系統図	52
図2. 2. 1	50MW蒸気発生器1号機洗浄装置	53
図2. 2. 2	50MW1号SG(SH)洗浄経過	54
図2. 2. 3	50MW1号SG(EV)洗浄経過(1/2)	55
図2. 2. 3	50MW1号SG(EV)洗浄経過(2/2)	56
図2. 2. 4	50MW蒸気発生器2号機洗浄装置	57
図2. 2. 5	50MW蒸気発生器2号機洗浄経過	58
図2. 2. 6	ジェットガン洗浄装置系統図	59
図2. 2. 7	ポンプ洗浄エリア配置計画図	60
図2. 2. 8	大型ポンプ洗浄装置系統図	61
図2. 2. 9	洗浄容器及び架台外形図	62
図2. 2. 10	スチーム洗浄処理経過(1/3)	63
図2. 2. 10	スチーム洗浄処理経過(2/3)	64

図 2. 2. 10	スチーム洗浄処理経過 (3/3)	6 5
図 2. 2. 11	水洗浄処理経過 (1/2)	6 6
図 2. 2. 11	水洗浄処理経過 (2/2)	6 7
図 2. 2. 12	温水減圧沸騰洗浄処理経過 (1/3)	6 8
図 2. 2. 12	温水減圧沸騰洗浄処理経過 (2/3)	6 9
図 2. 2. 12	温水減圧沸騰洗浄処理経過 (3/3)	7 0
図 2. 2. 13	常陽洗浄設備	7 1
図 2. 2. 14	模擬燃料集合体洗浄装置	7 2
図 2. 2. 15	ナトリウムポンプ洗浄装置	7 3
図 2. 2. 16	第 2 次 1 MWSG 洗浄装置	7 4
図 3. 1. 1	M S G アルコール洗浄装置	7 5
図 4. 2. 1	ヒドラジンのボイラ用鋼材に対する防食効果	7 6
図 4. 2. 2	ヒドラジン水溶液中における炭素鋼試験片の腐食減量とヒドラジン減少量	7 7

1. 緒言

高速増殖炉のメンテナンス技術として、ナトリウム機器の洗浄技術は重要な項目の一つであり、これまで動燃内においても多くの洗浄を経験してきた。また、動燃内における過去の実績からは、特筆すべき事故事例は報告されておらず、これまでは比較的安全に実施されてきたといえるだろう。

しかしながら、ナトリウム洗浄は、ナトリウム固有の危険性または洗浄の多くが化学反応による方法であるとの観点から潜在的な危険性を有している。また、近年については老朽化施設の解体により洗浄機会は増加する傾向にある一方、安全性について一層重要視されつつある。

以上のことから、今後のナトリウム洗浄における技術の維持・継承を行うと共に、より一層の安全性の向上を図るため、過去のナトリウム洗浄実績から安全上及び技術上の重要事項を本報告書においてまとめた。

2. 洗浄実績

2.1 アルコール洗浄

主たる、アルコール洗浄例を以下に示す。

(1) もんじゅ中間熱交換器熱衝撃試験体

① 洗浄期間

1980年8月29日 ~ 9月4日

② 洗浄装置

洗浄は、ナトリウム処理室においておこなわれた。アルコール洗浄は、図2.1.1に示す中型アルコール洗浄装置を使用し行われた。また、減圧沸騰洗浄は、図2.1.2に示す中型蒸気洗浄装置を使用し行われた。

③ 洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有しており、インターロック等は有していなかった。また、運転温度は、最大70℃とし水素濃度は最大3%で監視・制御している。

- ・ 希釈ガス系
- ・ 水素ガス濃度計
- ・ 酸素濃度計
- ・ 冷却器 (容量: 10kw)

④ 被洗浄体仕様

中間熱交換器は、もんじゅ実機の1/2.5スケールにて製作されたものである。本機は、ドレン温度400℃でドレンを行い、その後、予熱温度を400℃とし、38時間保持された。

- ・ 運転期間: 1980年5月~1981年6月
- ・ 外 径: 2060H (ノズル長含まず) × 1224D
- ・ 伝熱管 : 486本 (φ21.7×1.2t)
- ・ 材 質: SUS304
- ・ 容 量: 1.7m³

⑤ 使用アルコール

洗浄用のアルコールは、工業用変性エタノールである”エキネンF-1”を使用した。アルコールの成分は表2.1.1に示す。洗浄に使用したアルコールは約2m³であった。

表2.1.1 エキネンF-1の成分

配 合 成 分	配合割合 (kg)
エチルアルコール	143.3
イソプロピルアルコール	7.0
メチルエチルケトン	3.0
オクタ・アセチル化しよ糖	0.1

⑥ 洗 浄

洗浄において、中間熱交換器は図2.1.3に示すように専用の洗浄用架台に縦置きに設置さ

れ、ローリーより直接中間熱交換器にアルコールを充填した。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄の終了判定は、中和滴定のみによって行われた。洗浄の工程表を表2.1.2に、図2.1.4、図2.1.5にナトリウム溶解量の経時変化図を示す。

- (a) 洗浄時の循環流量は150～200 l/minとし約24hr洗浄を行った。
- (b) 中和滴定において、ナトリウム溶解量が一定になったことを確認し、純水5%を添加し約3hr洗浄を行った。
- (c) アルコールをドレン後、純水を注入し約3hr循環洗浄を行った。
- (d) 系統内を約80 torrまで真空引きし、充填温度約65℃で減圧沸騰させ約17hr洗浄を行った。(図2.1.6 温水減圧沸騰洗浄組立図)

⑦ナトリウム処理量

- ・アルコール洗浄・・・2.1 kg
- ・水 洗 浄・・・0.18 kg
- ・温水減圧沸騰洗浄・・・0.05 kg

⑧洗浄結果

アルコール洗浄の開始直後、約10℃の温度上昇が見られた。また、洗浄の結果、管束貫通部等の隙間部に残留ナトリウムは確認されなかった。

⑨報告書番号：SN941 81-152 高速原型炉「もんじゅ」中間熱交換器試験体の解体と洗浄
ナトリウム機器の熱衝撃試験 (X X V I)

(2) Mod.9Cr-1Mo鋼を使用した一体貫流型SG

①期 間

1988年12月9日～20日

②洗浄装置

洗浄は、ナトリウム処理室においておこなわれた。アルコール洗浄は、図2.1.7に示す水・アルコール洗浄装置を使用して行われた。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有しており、インターロック等は有していなかった。また、運転温度は、最大40℃とし酸素濃度は最大3%で監視・制御していた。

- ・希釈ガス系
- ・酸素濃度計
- ・冷却器

④被洗浄体仕様

本機は、ドレン温度390℃でドレンを行い、その後、予熱温度を390℃とし、48時間保持された。

- ・運転期間：1987年11月～1988年11月 (浸漬時間約7600hr)
- ・外 径：10310H (ノズル長含む) ×1022D
- ・伝熱管 : 2本+5本 (ダミー管)
- ・材 質：9Cr-1Mo鋼
- ・容 量：3.0 m³

・伝熱面積：6.1 m²

⑤使用アルコール

洗浄用のアルコールは、工業用変性エタノールである”ソルミックスAP-7”を使用した。アルコールの成分は表2.1.3に示す。洗浄に使用したアルコールは約3.5 m³であった。

表2.1.3 ソルミックスAP-7成分表

配 合 成 分	配合割合 (%)
エチルアルコール	85.9
イソプロピルアルコール	4.9
ノルマルプロピルアルコール	9.6
水 分	0.2以下

⑥洗 浄

洗浄において、蒸気発生器は図2.1.8に示すように水素溜まりを防止するため専用の洗浄用架台に斜め横置きに設置され、ローリーより直接アルコールを充填した。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄の終了判定は、中和滴定によるナトリウム溶解量の静定、水素気泡の完全な停止、導電率の静定により行われた。なお、表2.1.4に洗浄の工程表、図2.1.9に洗浄時の各洗浄終了判定パラメータの経時変化図を示す。

- (a) 洗浄時の循環流量は250 l/minとし約18.5hr（夜間保持を含めると32h）r洗浄を行った。
- (b) ある程度反応が安定した時点において、純水83 l（約2.5%）を添加し約3hr洗浄を行った。

⑦ナトリウム処理量

約2.0 kg

⑧洗浄結果

アルコール洗浄の開始直後、約10℃の温度上昇が見られた。また、洗浄の結果、ネジ部及び内筒支持用ラグを除き、完全にナトリウムを除去することが可能であった。

⑨報告書番号：SN9410 89-048 ” Mod.9Cr-1Mo鋼を使用した一体貫流型蒸気発生器伝熱管の健全性評価研究” 蒸気発生器洗浄結果

(3) もんじゅ燃料交換機フルモックアップ試験体

①洗浄期間

(a) もんじゅ燃料交換機 (FHM)

- ・1回目：1975年11月29日 ～ 12月13日
- ・2回目：1976年 6月16日 ～ 6月25日
- ・3回目：1976年 9月30日 ～ 10月 5日

(b) 模擬燃料回転装置 (RM)

- ・1回目：1976年 6月28日 ～ 7月 2日
- ・2回目：1976年 7月 7日 ～ 7月13日

②洗浄装置

洗浄は、ナトリウム機器構造試験室においておこなわれた。洗浄装置は、図2.1.10に示す専用のアルコール洗浄装置（SN941 76-13 もんじゅ燃料交換機フルモックアップ試験I試験装置、洗浄装置の建設及び試験体の製作）を使用し行われた。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックとしては、アルコール温度高（40℃）による循環ポンプトリップが設けてあった。また、運転温度は、最大40℃とし酸素濃度は最大0.2%で監視・制御している。また、特徴的な設備として、常陽の洗浄設備を見本として窒素ガスバフリング系（洗浄効果の促進のため）を有していた。

- ・希釈ガス系
- ・酸素濃度計
- ・フレイムアレスタ

④被洗浄体仕様

もんじゅ燃料交換機フルモックアップ（FHM）及び模擬燃料回転装置（RM）のドレンは、ナトリウム液面上100～500mmAqのカバーガス中に保持して行われた。FHM、RMのナトリウム中浸漬時間は表2.1.5に示す。

⑤使用アルコール

洗浄用のアルコールは、変性イソプロピルアルコールを使用した。アルコールの成分は表2.1.6に示す。洗浄に使用したアルコールは約2m³であった。

表2.1.6 変性イソプロピルアルコールの成分表

配 合 成 分	配合割合 (%)
エチルアルコール	88.18
イソプロピルアルコール	10.0
メチルエチルケトン	1.66
オクタ・アセチル化しよ糖	0.16
水 分	0.3以下

⑥洗 浄

FHM、RMは専用の洗浄用容器に縦置きに設置し、アルコールはタンク内に保管したものを再使用し洗浄を行った。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄終了判定は、主として導電率の静定によって行われた。

- (a) 洗浄時の循環流量は1～6.7m³/Hとし洗浄時間は表2.1.5の通りに行った。
- (b) 導電率が安定した時点で窒素ガスによるバフリング洗浄を行った。
- (c) アルコールをドレン後、真空乾燥を各4回（約9～17hr）行った。

⑦ナトリウム処理量

表2.1.5にFHM、RMのナトリウム付着量の測定結果を示す。

⑧洗浄結果

アルコールの温度上昇は殆ど見られなかった。また、洗浄の結果、グリッパ機構内部やポット軸受け部の隙間部のナトリウムが除去されないため、グリッパの開閉機構やポットの駆動機構に動作不良を引き起こしたことが確認された。

窒素バブリングによる洗浄の促進に、明瞭な効果は見られなかった。

真空乾燥は、比較的容易に終わることができた。

⑨報告書番号

・SN941 76-37 もんじゅ燃料交換機フルモックアップ試験(II)アルコール洗浄試験(その1)

・SN941 77-142 もんじゅ燃料交換機フルモックアップ試験—第6報—
アルコール洗浄試験 (その2)

(4) 2重管型蒸気発生器

①洗浄期間

1996年3月18日～3月23日

②洗浄装置

洗浄は、小型蒸気発生器試験室においておこなわれた。洗浄装置は、図2.1.11に示す装置を使用し行われた。なお、洗浄装置は洗浄時のみ一時的に設置されたものである。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックとしては、アルコール温度高高(50℃)・圧力高高(4kg/cm²)による循環ポンプトリップ、水素濃度高高(2%)による放出系弁閉が設けてあった。

また、各運転における制限値(警報発報)は、アルコール温度40℃、水素濃度1.0%、圧力3kg/cm²としている。

- ・希釈ガス系
- ・可燃性ガス検知器(屋外漏洩監視用)
- ・水素ガス検知器(アルコール/水素の混合ガス濃度を検知する)
- ・酸素濃度計
- ・アルコール回収装置(熱交換器:8500kcal/h)
- ・アルコール冷却系(建屋付帯の凝縮器)
- ・フレームアレスタ

④被洗浄体仕様

本機は、ドレン温度380℃でドレンを行い、その後、予熱温度を350℃とし、52時間保持された。

- ・運転期間:1991年10月～1995年12月(浸漬時間約13440hr)
- ・外 径:18600H×267.4D
- ・伝熱管 :10本+3本(ダミー管)
- ・材 質:9Cr-1Mo鋼
- ・容 量:0.73m³
- ・内表面積:64m²

⑤使用アルコール

洗浄用のアルコールは、変性エタノール(ソルミックスAP-7、表2.1.3参照)を使用した。洗浄に使用したアルコールは約2.4m³であった。

⑥洗 浄

SG洗浄は、架台上に設置されたままの状態で行われた。アルコールはローリーから一端タンクへ充填し、ポンプによりSGへ充填された。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄終了判定は、導電率、中和滴定、圧力の静定によって行われた。

(a) 洗浄時の循環流量は75ℓ/minとし約18hr洗浄を行った。

(b) 導電率が安定した時点でアルコールをドレン後、伝熱管循環水をSG入口給水温度を60℃とし窒素ガスによるブロー乾燥を約24hr実施した。

⑦ナトリウム処理量

約0.77kg

⑧洗浄結果

アルコールの温度上昇は殆ど見られなかった。また、洗浄の結果、ボルトネジ部のナトリウムは洗浄されていなかったが、タイロッドや伝熱管貫通部等の間隙部は完全に洗浄が行われていた。

⑨報告書番号

PNC ZN9450 96-049 2重管型蒸気発生器のアルコール洗浄

(5) 50MWSG大型ナトリウム弁の洗浄

①洗浄期間

1996年9月～1997年1月(延べ49日)

②洗浄装置

洗浄装置は、主として50MWSGの撤去に伴う移設・流用品の洗浄のため、ナトリウム処理室において従来使用していた水循環洗浄装置及び上記(4)項の2重管蒸気発生器洗浄装置を流用して新規に製作され、ナトリウム処理室に設置された。

図2.1.12に洗浄装置配置図、図2.1.13に洗浄装置系統図を示す。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックとしては、アルコール温度高高(50℃)・圧力高高(4kg/cm²)による循環ポンプトリップ、水素濃度高高(2%)による放出系弁閉を設置していた。

また、各運転における制限値(警報発報)は、アルコール温度40℃、水素濃度1.0%、酸素濃度3.0%(高)4.0%(高高)、圧力3kg/cm²としている。

- ・希釈ガス系
- ・可燃性ガス検知器(屋外漏洩監視用3台)
- ・水素ガス検知器(アルコール/水素の混合ガス濃度を検知する)
- ・酸素濃度計
- ・アルコール回収装置(熱交換器:8500kcal/h)
- ・アルコール冷却器(16700kcal/h at 20℃)
- ・フレイムアレスタ

④被洗浄体仕様

- ・ナトリウム弁（1 B～1 2 B）・・・5 8 台
- ・電磁流量計（1 / 2 B～1 2 B）・・・2 0 台

⑤使用アルコール

洗浄用のアルコールは、変性エタノール（ソルミックスAP-7、表2.1.3参照）を使用した。

洗浄に使用したアルコールは約2.0 m³であり、ナトリウム濃度が約2.5%になるまで再使用した。

⑥洗 浄

被洗浄体は、アルコール漏洩防止のため受皿上に配置され洗浄された。

洗浄は、ナトリウム弁又は電磁流量計を、1台～数台直列に接続して行い工程の短縮を図った。洗浄終了判定は、導電率、中和滴定の静定によって行われた。

⑦洗浄結果

洗浄において、アルコールの温度上昇は殆ど見られなかった。

洗浄に要した時間（アルコール循環時間）は数時間～10hr程度であり、夜間はアルコールタンクに一旦全てのアルコールをドレンし、被洗浄物内は窒素ガス置換し保管された。

なお、ナトリウム洗浄の結果（付着状況）は、ナトリウム弁の健全性調査において分解調査する計画となっているため詳細は不明である。

⑧報告書番号

- ・なし
- ・小規模アルコール循環洗浄装置については、「ナトリウム処理室ハンドブック」に追加編集して登録する予定である。

(6) その他

①常陽1次系ポンプ耐久試験装置

- ・装置名：フリーズ弁、ベローズ弁
- ・運転時間：16000hr
- ・洗浄場所：ナトリウム処理室
- ・洗浄方法：アルコール循環洗浄
- ・アルコール量：イソプロピルアルコール180ℓ+エタノール168ℓ（1回目）、エタノール306ℓ（2回目）、水洗浄（3回目）
- ・洗浄日数：17hr（1回目）、6hr（2回目）、0.5hr（3回目）
- ・処理ナトリウム量：約16kg
- ・報告書番号：SN941 77-143 大型ナトリウムポンプ試験装置の解体・洗浄

②TTS低温高架槽

- ・期 間：1993年3月
- ・装置名：TTS低温高架槽
- ・使用アルコール：変成アルコール
- ・アルコール量：4.5 m³
- ・洗浄場所：ナトリウム処理室（アルコール循環洗浄装置）
- ・洗浄時間：アルコール循環時間；40hr、アルコールドブ漬時間；34時間
- ・ナトリウム処理量：約8kg

- ・特記事項：タンク底部に残留したナトリウムの洗浄経験を得た。循環開始までに時間を費やしてしまい、ドブ潰状態で2時間半の間反応したが、アルコール温度の上昇は、8℃から24℃までであった。
- ・報告書番号：ZN9440 94-003

2.2 蒸気洗浄

密閉型（不活性ガス中）蒸気洗浄例を以下に示す。

(1) 50MWSG1号機

① 洗浄期間

1975年4月1日～5月12日

② 洗浄装置

洗浄は、50MW蒸気発生器試験室において行われた。洗浄は、一部既設の設備を改造・流用するなどして図2.2.1に示す装置を使用し行われた。なお、この洗浄装置は洗浄時のみ一時的に設置された。

③ 洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックは、設置されていなかったようである。

また、各運転における制限値は、水素濃度2.0%、圧力4kg/cm²としている。蒸気温度については、120℃にて制御予定だった様であるが、SG自体の熱容量の問題から明確に定められていなかった。運転記録では、洗浄装置出口温度は、235℃で、SG注入温度は最大160℃となっている。

- ・希釈ガス系
- ・水素ガス濃度計
- ・フレイムアレスタ
- ・ブリーザ弁（空気の流入防止用）・・・設定圧：40mmAq

④ 被洗浄体仕様

本機は、ドレン温度300℃でドレンを行い、その後、予熱温度を300℃とし、47時間保持された。

- ・運転期間：1974年6月～1975年3月（浸漬時間約4200hr）
- ・外 径：10800H×2250D（EV）、9400H×2044D（SH）
- ・伝熱管：75本（EV）、65本（SH）
- ・材 質：21/4Cr-1Mo鋼（EV）、SUS304（SH）
- ・内表面積：500m²（EV）、400m²（SH）

⑤ 洗 浄

SG洗浄は、50MWSG施設の架台上に設置されたままの状態で行われた。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄終了判定は、SG内部温度、中和滴定、水素濃度静定によって行われた。また、材料への影響の配慮からPHは10以下を目標値としていた。

表2.2.1に洗浄工程表、図2.2.2及び図2.2.3（1/2）、（2/2）にSHとEVの洗浄経過を示す。

- SG内へのArガス注入
- 蒸気+Arガス注入を行いつつ、潮解液のドレンを行った。その間、蒸気流量は2～60kg/hの範囲で徐々に増加させ、一方のArガスは8.5～23m³/hの範囲で減少させた。SGの洗浄時間は、EVは9hr、SHで26hrを要した。
- 蒸気洗浄終了後、炭酸ガスを注入し安定化処理を行った。

⑥ナトリウム処理量

- ・EV：10kg
- ・SH：6kg

⑦洗浄結果

- ・SH、EVともに、洗浄の結果は良好であったが、クビスの洗浄は不可能であった。
- ・SH洗浄においては、初期蒸気注入量が多く(12.5kg/h)、水素濃度は一時約10%付近まで上昇した。その結果をもとに、EV洗浄では、初期蒸気注入量を絞り(2kg/h)、また、洗浄開始初期の蒸気増加量も減少させたことで、水素濃度は2%以下に制御できた。
- ・内部温度監視による、反応状況の推察はSGの熱容量の問題から困難であり、従って、それをもとに洗浄終了判定を行うことは不可能であった。
- ・SH管束部の一部に錆がみられた。また、潮解液中には、SHで400g、EVで500gの重金属が溶出されており、アルカリ腐食があったものと思われる。
- ・洗浄液のPH値は目標値10に対し、PH12.8であった。

⑧報告書番号

PNC SN941 75-57 50MW蒸気発生器解体洗浄工事 報告書

(2) 50MWSG2号機(蒸発器)

①洗浄期間

1980年3月18日～4月1日

②洗浄装置

洗浄は、50MW蒸気発生器試験室において行われた。洗浄は、一部既設の設備を改造・流用するなどして図2.2.4に示す装置を使用し行われた。また、洗浄容器はEV管束の洗浄兼輸送用容器として用いられた。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックは、有していないが、水素濃度及び管束温度に警報点を設置していた。また、蒸気供給弁は緊急時のため遠隔操作可能としていた。各運転における制限値は、蒸気温度70℃、水素・酸素濃度1.0%としている。

- ・洗浄用器への観察用窓の設置
- ・希釈ガス系
- ・水素ガス濃度計
- ・酸素濃度計
- ・ミストセパレータ(NaOHの屋外流出防止用)
- ・フレイムアレスタ
- ・ブリーザ弁(空気の流入防止用)

④被洗浄体仕様

本機は、ドレン温度400℃でドレンを行い、その後、予熱温度を400℃とし、47時間保持された。

- ・運転期間：1976年1月～1979年12月(浸漬時間約16548hr)
- ・外径：11856H×2130D
- ・伝熱管：33本

- ・材 質：2 1/4Cr-1Mo鋼
- ・内表面積：5 2 2 m²

⑤洗 浄

SG洗浄（管束のみ）は、50MWSG施設のSG室に新規に設置された、洗浄用容器に設置され行われた。洗浄は以下の手順により行われ、洗浄終了判定は、中和滴定、水素濃度、導電率、湿分計（安定化処理時）によって行われた。

表2.2.2に洗浄工程表、図2.2.5に洗浄経過を示す。

- (a) SG内への窒素ガス蒸気注入による1次洗浄を行った。蒸気量は、0.3～2.2 kg/hで6段階に増加させた。1次洗浄に要した時間は、40hrであった。
- (b) 純水により冷水洗浄、減圧沸騰洗浄、温水循環（目標値50℃）、温水減圧沸騰の手順で2次洗浄を行った。また、図2.2.6に示すジェットガンを使用し純水を噴射させ、セーフエンド部の洗浄を行った。2次洗浄に要した時間は、69hrであった。
- (c) 洗浄終了後、炭酸ガスを注入し安定化処理を行う。3次洗浄に要した時間は、83hrであった。

総 合：192時間（洗浄に要した時間）、洗浄実績日数：14日間

⑦ナトリウム処理量

- 1次洗浄：7 kg
- 2次洗浄：0.16 kg

⑧洗浄結果

- ・ボルトネジ部の洗浄は不可能であったが、それ以外における洗浄の結果は良好であった。
- ・ジェットガンを使用しての、セーフエンド部の洗浄はかなりの効果があった。
- ・管束部の一部に錆がみられた。これは、2次洗浄において純水の脱気を行わなかったこと、純水PH値が低かったこと、ヒドラジン処理を行っていないことが原因であると考えられる。
- ・3次洗浄の終了判定に湿分計を用いるのは不適切であった。（安定化において発生する湿分量を測定することが困難）

⑨報告書番号

- ZN941 80-220 SGメンテナンス技術の実証試験
- ZJ222 80-18 SGメンテナンス技術の実証試験（1） 総合報告書

(3) もんじゅ1次主循環ポンプ（モックアップ）

①洗浄期間

1983年4月4日～4月16日

②洗浄装置

洗浄装置は、大型ポンプ専用の洗浄装置として製作されたが、当初第2ナトリウム処理室の建設が予想されていなかったため、洗浄装置本体は屋外に設置された。そのため、ポンプの洗浄は、第1ナトリウム処理室の東側空地において行われた。

図2.2.7にポンプ洗浄エリア配置計画図、図2.2.8に大型ポンプ洗浄装置系統図、図2.2.9に洗浄容器及び架台外形図を示す。なお、洗浄容器はナトリウムポンプの保管、洗浄兼輸送用

容器として用いられた。

③洗浄装置概要

装置は以下の安全設備を有している。インターロックは、有していないが、水素濃度（1%以上）、酸素濃度（3%以上）及び洗浄容器圧力（ $0.5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ 以上）に警報点を設置していた。各運転における制限値は、洗浄容器圧力 $1.9 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ 、洗浄容器表面温度 95°C 、ポンプ表面温度 150°C 、水素濃度4%、酸素濃度5%としている。

- ・希釈ガス系
- ・水素ガス濃度計（洗浄容器、排気系）
- ・酸素濃度計（洗浄容器、排気系）

④被洗浄体仕様

- ・運転時間：約23000hr
- ・型式：堅型自由液面式遠心ポンプ
- ・定格揚程：90mNa
- ・定格流量： $21 \text{ m}^3/\text{min}$ (at 390°C)
- ・主要材質：SUS304

⑤洗浄

洗浄は以下の手順により行われた。洗浄終了の判定は、水素濃度（蒸気洗浄）、水素イオン濃度（水洗浄、温水減圧沸騰洗浄）、中和滴定（温水減圧沸騰洗浄）または、規定回数の洗浄の終了（全ての洗浄手順）によって行われた。

表2.2.3に洗浄工程表、表2.2.4に洗浄操作データ表、図2.2.10～12に各洗浄手順における洗浄経過を示す。

(a) 蒸気洗浄

蒸気注入量を $120\sim290 \text{ kg/h}$ 、窒素ガス量を $60\sim11 \text{ Nm}^3/\text{h}$ に増減させ洗浄をおこなった。蒸気洗浄工程では、2日間に渡り10ステップに分けて洗浄を行った。

(b) 水洗浄

水洗浄は、水酸化ナトリウムの除去と蒸気洗浄にて処理できなかった細部ナトリウムの除去を目的とし行われた。第1回水洗浄は、洗浄容器内に水（水道水）を充填し、 800 又は 1000 l/min の流量にて2日間（夜間及び土、日の2日間は、水充填したまま保持）循環させた。この時、PH値は12で静置し水洗浄を終了した。

第2回水洗浄は、第1回水洗浄終了から温水減圧沸騰洗浄開始迄の期間（夜間を含め）を利用し、洗浄容器内に水を徐々に注入し、循環洗浄は行わなかった。

(c) 温水減圧沸騰洗浄

温水減圧沸騰洗浄は、ネジ部等の隙間部のナトリウムの除去を目的とし、計7回（目標値4回以上）実施された。洗浄は、洗浄容器の水位を 1750 mm 以下とし、水温 $30\sim40^\circ\text{C}$ （目標値 80°C ）とし、容器内を約 -38 Torr （目標値 10 Torr ）まで真空引きした。真空状態の保持は、15分以上を目標とし行った。

温水減圧沸騰洗浄の合間に、加圧洗浄（実績3回）、窒素バブリング洗浄（実績1回）及び温水循環洗浄（実績8回）を適宜行った。加圧洗浄は、洗浄容器内を $0.75 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ （目標値 $0.7 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ ）まで加圧し、約30分（目標値15分以上）保持した。バブリング洗浄は、洗浄容器に $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の窒素ガスを、約14分（目標値15分以上）を注入することで行われた。温水循環洗浄は、洗浄容器内のPH値の均一化することを目的とし行われ、循環流量は約 1000 l/h とした。

(d) 乾燥

洗浄容器内に、蒸気（最大300kg/h）を注入し、ポンプ本体を昇温（目標値、実績値とも100℃、制限値150℃）した。昇温完了後は、蒸気の注入を停止しポンプ本体に急激な温度変化を与えないよう窒素ガス流量を（最大60Nm³/h）徐々に増大させ乾燥を行った。窒素ガス乾燥終了後は、1日以上自然乾燥を行った。

⑦ナトリウム処理量

蒸気次洗浄：8.8kg

水洗浄：2.49kg

温水減圧沸騰洗浄：1.51kg

⑧洗浄結果

- ・第7～9ステップの蒸気洗浄において、水素濃度が一時制限値の4%（平均1.6%）を超える状況が発生した。
- ・ポンプ表面温度は、最大105℃（平均75℃）であり、制限値150℃に対し十分に温度制御が可能であった。このため、アルカリ腐食等の問題も無かったものと思われる。
- ・インペラナットのネジ部、ベアリングハウジングのネジ部等にナトリウムが残留していた（推定約0.3kg）ことから、温水減圧沸騰洗浄の効果は余りなかったと考えられる。その原因は、洗浄容器のインベントリが大きかったため、真空到達度及び温水温度が目標値に達しなかったことによる。
- ・残留ナトリウムは、ポンプ下部軸受け周りのネジ部に集中していることが判った。温水減圧沸騰洗浄の効果を得るためには、核沸騰領域がポンプ下部軸受け周りになるようにする必要がある。従って、洗浄容器は縦置きので自由液面を持ち、真空到達度及び温水温度をより高くするとともに、長尺の被洗浄物の場合は水を変化させて洗浄を行う必要がある。

⑨報告書番号

SN941 85-28 もんじゅ1次主循環ポンプ（モックアップ）の試験 インターナルの引き抜き、洗浄、分解及び改造（2）

(4) 常陽一次主循環ポンプB号機

- ・期 間：1982年3月
- ・運転時間：約37000hr
- ・洗浄場所：常陽メンテナンス建屋
- ・洗浄装置：図2.2.13 常陽洗浄設備図参照
- ・洗浄方法：蒸気と窒素ガスの混合ガス、水洗浄（ドブ漬け+窒素ガスのバブリング）空気による乾燥、蒸気洗浄は2回に分けて実施（第1回洗浄槽内温度40℃、第2回洗浄槽内温度80～90℃）
- ・ナトリウム処理量：4.08kg (²²Naの放射能濃度 $1.3 \times 10^{-1} \mu\text{Ci/g}$ から、蒸気洗浄と水洗浄によるナトリウム処理量を求めた)
- ・洗浄日数：本体洗浄1日、部分洗浄3日
- ・特記事項：部分洗浄においては、従来の窒素ガス加熱による予熱法から蒸気投入による予熱法に変更した。

反応状況の監視用として、0～20%レンジの水素濃度計は全く役に立たなかった。このため0～1及び0～5%のダブルレンジの水素計に交換する計画を立案した。

ポンプを洗浄槽から取り出し分解した結果、微小隙間、ボルト穴等（ディフューザ、イ

パ、シャフト等) ナトリウムが残留していた。このため、部分洗浄を蒸気洗浄、水洗浄を再度実施した。このときのナトリウム量は約0.24kgであった。

- ・ 報告書番号：SN941 83-93 高速実験炉常陽第3回定期点検報告

(5) 模擬燃料集合体洗浄性試験

- ・ 洗浄装置：図2.2.14 模擬燃料集合体洗浄装置図参照
- ・ 浸漬時間：炉心・ブランケット燃料=19898hr、特殊燃料=12768hr
- ・ ドレン方法：ドレン温度200℃
- ・ 洗浄場所：ナトリウム処理室
- ・ 洗浄方法：蒸気洗浄、水洗浄に加え温水減圧沸騰洗浄（水温40℃、真空度15Torr）を実施。
- ・ ナトリウム処理量：約10g
- ・ 特記事項：温水減圧沸騰洗浄法により、従来洗浄の困難であった、通常の間隙部（ラッパー管とエンランスノズルの結合部等）を含め、ネジ部についてもほぼ完全な洗浄が可能であった。
- ・ 報告書番号：SN941 82-33 模擬燃料集合体の洗浄試験 温水減圧沸騰洗浄法を用いた洗浄

(6) 常陽1次主循環ポンプモックアップ

- ・ 期間：1975年4月
- ・ 装置名：常陽実規模一次主循環ポンプモックアップ
- ・ 運転時間：13000（ナトリウム浸漬120hr）
- ・ 洗浄場所：常陽メンテナンス建屋
- ・ 洗浄方法：蒸気と窒素ガスの混合ガス、水洗浄（ドブ漬け）、空気による乾燥を行った。蒸気及び水洗浄は2回に分けて実施した。
- ・ ナトリウム処理量：2.21kg（蒸気洗浄と水洗浄の総合）
- ・ 洗浄日数：本体洗浄2日、部分洗浄1日
- ・ 特記事項：ポンプを洗浄槽から取り出し分解した結果、微小隙間、ボルト穴等ナトリウムが残留していた。このため、蒸気または水による部分洗浄を再度実施した。これらのナトリウム量は約0.5kg程度と推定された。
- ・ 報告書番号：SN941 75-96 「常陽」一次主循環ポンプモックアップ（Ⅲ）
解体洗浄据付（第3回）

(7) 常陽2次主循環ポンプモックアップ

- ・ 期間：1976年1月～2月
- ・ 装置名：常陽実規模2次主循環ポンプモックアップ
- ・ 運転時間：13000hr
- ・ ドレン方法：250℃ドレン、予熱温度250℃で20hr保持
- ・ 洗浄場所：ナトリウム処理室
- ・ 洗浄装置：・ 洗浄装置：図2.2.15 ナトリウムポンプ洗浄装置図参照
- ・ 洗浄方法：蒸気と窒素ガスの混合ガス、水洗浄（窒素ガスのバブリング）、窒素雰囲気による乾燥を行った。蒸気及び水洗浄はそれぞれ3回と2回に分けて実施した。
- ・ ナトリウム処理量：3.1kg（蒸気洗浄と水洗浄の総合）
- ・ 洗浄日数：蒸気洗浄1hr、水洗浄11hr
- ・ 特記事項：ポンプを洗浄槽から取り出し分解した結果、微小隙間、ボルト穴等ナトリウムが残留していた。このため、蒸気または水による部分洗浄を再度実施した。これらのナトリウム量は約0.3kg程度と推定された。
運転上の制限値はインターナル温度を150℃、水素4%、酸素3%としいずれも制限値以下に制御された。

- ・ 報告書番号：SN941 76-52 「常陽」ナトリウム冷却系機器耐久試験装置 2次主循環ポンプ（モックアップ）の引き抜き・洗浄・解体（第1回）

- (8) 第2次1MW蒸気発生器
 - ・ 期 間：1975年7月26日～29日
 - ・ 装置名：第2次1MWSG（一体貫流型ヘリカル式）
 - ・ 運転時間：約10000hr、
 - ・ ドレン方法：ドレン温度350℃でドレンを行い、その後、予熱温度を290℃とし、47時間保持された。
 - ・ 洗浄場所：小型蒸気発生器試験室
 - ・ 洗浄装置：図2.2.16 第2次1MWSG洗浄装置
 - ・ 洗浄方法：Ar+蒸気による密閉型洗浄、炭酸ガスによる安定化处理
 - ・ 処理ナトリウム量：10.5kg
 - ・ 洗浄日数：4日（蒸気洗浄2日、安定化处理2日）
 - ・ 特記事項：運転上の制限値は、水素濃度3%としていたが一時的に5%を越えることが多々あった。
 - ・ 報告書番号：SN941 77-104 第2次1MW蒸気発生器試験報告書 運転経過及び洗浄解体検査

- (9) 常陽1次系ポンプ耐久試験装置
 - ・ 装置名：ポンプアウターケーシング
 - ・ 運転時間：16000hr
 - ・ 洗浄場所：ナトリウム処理室
 - ・ 洗浄方法：密閉型スチーム洗浄後、水洗浄
 - ・ 処理ナトリウム量：約1.2kg
 - ・ 洗浄日数：95min
 - ・ 特記事項：洗浄中に小爆発が3回認められた。スチーム内への空気混入が原因と見られる。
 - ・ 報告書番号：SN941 77-143 大型ナトリウムポンプ試験装置の解体洗浄

- (10) 常陽燃料集合体
 - ・ 装置名：常陽模擬燃料集合体、模擬制御棒
 - ・ 洗浄場所：常陽燃料洗浄設備
 - ・ 洗浄方法：蒸気とArガスの混合ガス、氷洗浄2回
 - ・ 処理ナトリウム量：模擬燃料集合体約50～60g、模擬制御棒約28g
 - ・ 洗浄日数：約1hr
 - ・ 報告書番号：ZN941 78-02 高速実験炉「常陽」総合機能試験報告書

- (11) 50MWSGナトリウムポンプ
 - ・ 洗浄期間：1983年7月
 - ・ 被洗浄体：50MWSG一次系ナトリウムポンプ
 - ・ 運転時間：約30000hr
 - ・ ドレン方法：200℃ドレン、予熱温度200℃で164hr保持
 - ・ 洗浄場所：ナトリウム処理室
 - ・ 洗浄装置：図2.2.15 ナトリウムポンプ洗浄装置図参照
 - ・ 洗浄方法：ポンプ洗浄用容器にインターナルを挿入し密閉型洗浄を行った。蒸気と窒素ガスの混合ガス洗浄、水洗浄、温水減圧沸騰洗浄
 - ・ 処理ナトリウム量：蒸気洗浄（9回実施）約16kg、水循環洗浄（1回実施）0.06kg、温水減圧沸騰洗浄（1回実施）0.007kg

- ・洗浄結果：ディフューザー取り付けボルト12本中の4本にナトリウムが残っていた。クレビス部（静圧軸受け等）は洗浄されていた。アルカリ腐食割れを防止するため、本体温度を70℃以下で計画したが制限値を越えてしまった。運転上の制限値（水素ガス2%、酸素ガス3%）は、ほぼ制御可能であった。
- ・報告書番号：N94I 84-94 50MW蒸気発生器試験施設ナトリウムポンプ引き抜き検査

2.3 その他のナトリウム洗浄実績関連図書

(1) アルコール洗浄

・アルコール

SN9370 86-01 ナトリウム処理室年報 昭和60年度・・・もんじゅ炉容器 熱過渡強度試験用供試体

・アルコール+水+減圧沸騰

N937 83-01 ナトリウム処理室年報 昭和57年度・・・7集合体試験部

・アルコール+アルコール減圧洗浄

SN9370 86-01 ナトリウム処理室年報 昭和60年度・・・50MWSGラプチャーディスク

・アルコールドブ漬け

N937 83-01 ナトリウム処理室年報 昭和57年度・・・50MWSG空気冷却器伝熱管

ZN941 77-85 高速実験炉「常陽」総合機能試験報告書

(1)燃料つかみ部洗浄試験(燃料出し入れ機) (2)ドブ漬け上のナトリウム溜量確認試験

ZN941 77-85 高速実験炉「常陽」総合機能試験報告書

燃料つかみ部洗浄試験(燃料交換機)

(2) 蒸気洗浄

・密閉式蒸気洗浄+水

SN941 73-15 ナトリウム冷却系主循環ポンプの分解、洗浄、据付

SN941 75-43 「常陽」一次主循環ポンプモックアップ(Ⅱ) 耐久試験後の解体洗浄試験

SN941 78-02 高速実験炉「常陽」総合機能試験報告書 燃料洗浄設備試験(常温空气中、ナトリウム中)

N937 83-01 ナトリウム処理室年報 昭和57年度・・・もんじゅ燃料出入機グリッパ(モックアップ)洗浄

N937 84-01 ナトリウム処理室年報 昭和58年度・・・SITR炉容器

SN941 84-105 「常陽」炉容器モックアップ試験装置解体撤去報告書

・開放式蒸気洗浄、燃焼、水洗浄

SN9370 86-01 ナトリウム処理室年報 昭和60年度・・・もんじゅ再生熱交換器モックアップ

SN9370 87-001 ナトリウム処理室年報 昭和61年度・・・熱衝撃試験装置ストレージタンク

SN9370 87-001 ナトリウム処理室年報 昭和61年度・・・50MWSG1次ナトリウム系オーバーフロータンク

(3) パラフィン洗浄

SN941 82-103 ベローズのナトリウム洗浄効果

SN9370 86-01 ナトリウム処理室年報 平成2年度・・・TTS熱抵抗体

3. 海外の洗浄実績

(1) MSG 洗浄

- ・ 期 間：1973年11月15日～1974年1月11日
- ・ 装置名：MSG (Modular Steam Generator)
- ・ 使用アルコール
 - ①洗 浄 用：Dowanol PM (プロピレングリコールメチルエーテル)
 - ②フラッシング 用：エタノール (エタノールを主成分としイソプロピルアルコール、メチルチルトンを含んでいる)
- ・ アルコール量：4200ℓ (洗浄用として使用したDowanol PMのみの使用量)
- ・ 洗浄場所：SCTI (Sodium Component Test Installation)
- ・ 洗浄装置：図3.1.1 参照
- ・ 洗浄方法：洗浄は、
- ・ ナトリウム処理量：9.2kg
- ・ 洗浄時間：36日間
- ・ 洗浄結果：ルビス部及びネジ部にナトリウムの痕跡は見られなかった。
- ・ 特記事項：洗浄時に見られた黒い残留物は、21/4Cr-1Mo鋼とナトリウムの酸化皮膜が化学的に還元されたものであると確認した。アルコールの乾燥は、約66～82℃に加熱させたArガスのパージにより300ppmの濃度になるまで乾燥させた。
- ・ 報告書番号：DOE-SF-824-T-8 「MSG test report - removal of residual sodium」

(2) ナトリウム受け入れタンクの洗浄 (ラプソディー事故)

- ・ 期 間：1994年3月31日 (事故発生日)
- ・ 装置名：ナトリウム受け入れタンク
- ・ 使用アルコール：エチルカルビトール
- ・ アルコール量：推定4000ℓ
- ・ ナトリウム処理量：推定約100kg
- ・ 洗浄時間：不明 (数日程度と思われる)
- ・ 特記事項：タンク内にアルコールを注入後、数日間放置しナトリウム洗浄を行っていた。1994/3/31爆発が発生した。事故の発生原因はアルコール注入の数日後、熱分解と触媒作用の反応が起こり、タンク内の温度が300℃以上となり、水素、エチレン、炭化水素が発生し爆発に至ったものと報告されている。
- ・ 報告書番号：不明 (CEAの報告による)

(3) その他

本項に記述した洗浄実績は全て、以下の資料から抜粋・引用したものである。

本資料でも示されている通り、この資料の作成された時点では各国ともナトリウムの洗浄方法は主として大型機器は蒸気洗浄とし、小型の機器はアルコール洗浄法を採用している。

洗浄方法については、国によりハンドリング方法や洗浄条件にある程度の差異はあるものの、従来事業団内において実施されてきた洗浄手法 (安全上のポイントも含めて) とほぼ同様である。

LUTTON J M, COLBURN R P

「Sodium removal and decontamination of LMFBR components for maintenance」

1980 vol.18 No.4 P815～892 Energy Rev 発行

(a) 水/蒸気洗浄法

①France

洗浄法：水噴霧洗浄法 (水素濃度監視による反応制御法) + 純水洗浄

洗浄条件：タンク内酸素濃度1%以下、水素濃度4%以下、内部最高温度60℃

(e x) PHENIX中間熱交換器, RAPSODDIE

②UK

洗浄法 : 水噴霧洗浄法

特記事項: 蒸気温度は40℃以下に制御された。ピストンリングシール部のクビスの洗浄性は効率的ではなかったため、60℃の純水による洗浄後、空気乾燥を行った。

(e x) PFR一次系ポンプ (Dounreay)

③Germany

洗浄法 : 蒸気洗浄

特記事項: 水素濃度0.8%以下、純水リンス時は不活性ガスのとの混合を行う。洗浄は、回転皿(2回転/分)の上に乗せられ行われる。

(e x) KNK (Interatom)

- ・ベローズ弁
- ・電磁ポンプ
- ・cyclone separator

④USSR

洗浄法 : 蒸気洗浄

特記事項: 酸素濃度0.1%以下、窒素により150℃まで加熱し140℃の加熱蒸気を加える。蒸気/窒素の流量比は10%以下に制御している。リンス洗浄は80℃の水によって行った。

(e x) BN-350

- ・HX
- ・SG (EV) . . . SGは設置状態のまま、蒸気と不活性ガスは第2及び第3ループより注入した。
- ・2次系ポンプ . . . 腐食等の問題も無く、洗浄後ポンプは再利用された。

⑤USA

洗浄法 : 水噴霧洗浄

特記事項: 水素濃度2.0%以下、水噴霧温度65~90℃、水噴霧濃度1~15vol%、リンス洗浄クビス洗浄は85~90℃の純水によって行う。

(e x)

- ・EBR-II Fuel
 - ・CRBR
 - ・CLIRA(Closed Loop In-Reactor Assembly)
 - ・Fermi 2次系ポンプ
 - ・FFTF
- モックアップIVHM(In vessel handling Machine)、ポンプ、HX

(b) アルコール洗浄法

表3.1.1に、各国のアルコール洗浄法の概要と実績を示す。

①GERMANY

メチルアルコール中にドライアイスを投入する。開放型洗浄。

②ITALY

周期的に減圧させるアルコール洗浄法は、クビスの洗浄に有効であった。
重アルコールの使用は反応により望ましくない副産物が凝縮した。

③USA

密閉型循環洗浄、アルコール温度 60℃を制限値
ボルト隙間や焼きばめ部の洗浄は不可能であった。
幾つかのケースは、設置状態のまま洗浄を行った。
洗浄開始前容器内条件：酸素濃度 1 vol%以下、水分0.005vol%以下
リンス洗浄：60℃のアルコールまたは 82℃の水
洗浄終了判定は、水素及び溶液中のナトリウムイオンの静定によって行われた。

④UK・・・Dounreay高速原型炉機器、PFRポンプ

洗浄終了判定は、水素及び溶液中のナトリウムイオンの静定によって行われた。
PFRポンプ：60%butyl-cellosolve, 40%Buthanol、クビス及びインターナルホケットのナトリウムは洗浄は不可能であった。

表 3.1.1 各国のアルコール洗浄法

国名	アルコール種類	温度	添加物	型式	リンス液	適用先
GERMANY ・KNK ・Karlsruhe ・Interatom	メタノール	低温	ドライアイス	開放	水	gravtools, valve, sampling vessels
	エタノール	常温	5%水	開放	水	bellows, valve, etc.
	エタノール	常温	—	開放	水	small components only
ITALY	Butyl-cellosolve	40℃	真空 10-1torr	密閉	アルコール	Laboratory test results
U K	エタノール	—	無水	密閉	—	Planned for small to medium-sensitive components PFR pumps, control rod mechanism
	Butyl-cellosolve +n-butanol	常温	無水	密閉	—	
USA	エタノール	常温 -121℃	無水	密閉	—	FFTF pump-dump heat exchanger SRE comp., dev. items

Butyl-cellosolve：エチレングリコール n-ブチルエーテル (Dowanol-EB)

(c) 非反応処理法 (真空蒸発法)

表 3.1.2 に、各国の真空蒸発洗浄法の概要と実績を示す。この段階では、Netherlandを除き各国とも実用レベルでの使用に至ってない。しかしながら、研究レベルでは洗浄条件によっては微小隙間の洗浄も十分に行えかつ、廃棄物の低減に非常な有効であり、有望な洗浄法であるといえる。

①FRG・・・Interatomにおいてモックアップ燃料

②Netherlands・・・50MWSG (Hengelo) を据え付け状態にて洗浄。洗浄期間は15日であった。

③USA・・・小型の機器について実験規模で使用された。非常に小さいクビス及び高トルクボルトにおいても洗浄可能であった。

表 3.1.2 各国の真空蒸発洗浄法

国名	真空度	温度	適用先
F R G	40~250Pa	550℃	Fuel element cleaning; gas flow-vaccum cycle
JAPAN	9.1Pa	430~520℃	Regenerative heat exchanger
Netherlands	0.1~10Pa	400~560℃	pump, valve, evaporator(28MW straight-tube), steam generator(50MWhelical-tube)
USA	1.3×10 ⁻³ ~ 1.3×10 ⁻⁴ Pa	326℃	small components

4. 洗浄技術

以下に、アルコール循環洗浄及び密閉型蒸気洗浄法における安全上及び技術上の留意すべき点を記述する。なお、表4.1.1 (1/2), (2/2) に各洗浄法の比較表を示す。

4.1 アルコール循環洗浄

①使用アルコール

洗浄に使用するアルコールは、前述の3.項に記述したとおり、各国によって異なる。動燃内においては、エタノールまたは変性エタノールを使用しており。その他メチルアルコール等の使用実績は無い。

アルコールの選定において重要な点は、高温またはナトリウム環境下（高アルカリ・酸性下）における安定性である。アルコールが分解した場合、前述3.(2)項の様に予期不能な化学分解反応が起こる可能性があるためである。UNION Carbide社の試験によれば、変性エタノールはナトリウム環境下で約220℃まで安定性が保たれるとの結果を示しており問題はないといえる。次に重要な点は、アルコール/ナトリウムの反応速度である。種々のアルコールの反応速度は、USA R I社⁽¹⁾⁽²⁾によって示されているのでそちらを参照願いたい。

②可燃性ガス（水素、アルコール）濃度

水素ガスは空気中で濃度4～7.5 vol%、エタノールは3.3～1.9 vol%で存在すると燃焼・爆発する。

水素またはアルコールの可燃性ガスが系外に放出される時、大気と混合して爆発・燃焼性の混合気を形成する恐れがあるため、放出前に不活性ガスにより希釈しておく必要がある、そのため、従来動燃内においては、放出時の可燃性ガス濃度は2 vol%前後を制限値として用いている。

可燃性ガス濃度を測定するための装置としては、ガスクロ計や熱伝導式または接触燃焼式の可燃性ガス計を使用している。

最近の洗浄装置⁽⁴⁾では、これら可燃性ガス濃度計からの信号により放出ガス弁を自動閉とするインターロック回路を設置し、警報値：1 vol%、インターロック作動値：2 vol%としている。また放出系にはアルコールの回収装置や逆火防止のためのフレームアレスタを放出口に設置している。

③酸素濃度

洗浄装置内及び放出系は点火源が万一発生した場合の対策として、不活性ガスで管理し、酸素濃度を極力低減すべきである。水素-酸素-窒素の三成分系における、水素の爆発性消失の限界酸素濃度は約5.0 vol%⁽³⁾とされており、従来動燃内においては2 vol%前後を制限値として用いている。

④アルコール温度

無水エタノールの沸点は1気圧で78.3℃であり、変性エタノールもそれに近いと考えられる。動燃内においては、アルコール温度はエタノールの沸点以下である50～60℃としている。

洗浄においては、事前のナトリウム量とアルコールの温度上昇量の評価により、洗浄開始時のアルコール運転温度を決めることが望ましい。ハード上では、アルコールの冷却設備やインターロックによる洗浄の自動停止装置等を組み込むことが望ましい。

比較的以前の洗浄実績では、アルコール中への水の添加（ドブ漬け+水洗浄については、現在も行われている）やアルコール減圧沸騰洗浄を行っていたが、近年では安全性の優先から余り行われていない。従って、現在では主としてアルコールを予め低温に保持した後洗浄を開始し、ナトリウムの反応が安定した時点で高温にてクレビス洗浄を行う手法が取られている。

⑤アルコール循環流量

アルコール循環流量に対する、安全上の留意すべき事項はない。

万一ポンプがトリップした場合、局部的にアルコール-ナトリウム反応によりアルコールが加熱沸騰する危険性がある。このため、ハード上ではポンプトリップ時の自動ドレン機能を持たせることが望ましい。

⑥圧力

水素ガス及びアルコールの系外漏洩防止、さらに大気系の内漏れ込みによる燃焼爆発性混合気の形成防止を考慮すると、洗浄時の系内圧力は大気圧に近い微正圧状態で運転した方が漏洩の早期発見及び災害の拡大防止には有利であると思われる。

また、水素ガス放出を停止しての運転や安全弁の故障などを考慮し、ナトリウムが全量溶解した場合の内圧上昇の事前評価することが望ましい。

アルコール洗浄における内圧上昇の原因としては、アルコール-ナトリウムの異常反応のみが考えられる。(アルコールの熱分解等の可能性は4.1①項で記述したようにエタノール又は変性エタノールを使用する限り、考慮する必要は無いと思われる。)従ってハード上では、反応を停止させるための自動ドレン機能及びアルコールの冷却設備を持たることが望ましい。

⑦洗浄終了判定

洗浄終了判定には、以下の様なパラメータが用いられた経験があるが、アルコールタンク圧力、水素ガス濃度、水素気泡発生状況については、計器の感度等による問題から余り重要視されていない、近年では中和滴定及び導電率が主として用いられている。

- ・ 中和滴定
 - 測定した3データが飽和状態(研究成果による明確な根拠は無い)
- ・ 導電率⁽³⁾
 - 2時間以上の飽和状態(研究成果による明確な根拠は無い)
- ・ アルコールタンク圧力
- ・ 水素ガス濃度
- ・ 水素気泡発生状況

⑧アルコールの乾燥

アルコール洗浄後の乾燥においては、最適な方法は確立されていない。過去のPNC実績では、真空乾燥法(2.1(3)項参照)が最も有効であったと思われる。但し、アルコールのドレン状況により変化するため注意が必要である。なお、2重管SG洗浄(2.1(4)項参照)では、ブロー乾燥(水側60℃、最終の可燃性ガス濃度0.18%)に20hrを要したが乾燥はできなかった。

⑨水素ガスの滞留

装置の構造上、水素溜まりが発生する場合がある。この場合ナトリウムが全く除去できなくなると共に、装置内に可燃性ガスが滞留するなどの問題が発生する。運転上の対処法としては、アルコール循環方向の逆転や窒素ガスによるバブリング洗浄が挙げられるが、可能であれば計画初期(装置の設計や洗浄の計画等)から対処すべきである。

⑩クレビス(隙間部)洗浄性

アルコール循環洗浄法では、クレビスの洗浄は殆ど困難である。従って、動燃内においては、水洗浄や減圧沸騰洗浄を併用して行った実績がある。

なお、クレビスの洗浄性については過去に幾つかの基礎試験報告書⁽¹⁾⁽²⁾が提出されているのでそちらを参考にして頂きたい。

⑪安全上の設備

- ・漏洩ガス検知設備
- ・防爆機器の使用
- ・アルコール漏洩対策用防油堤
- ・静電気対策（装置、人体のアース除去）

4.2 密閉型蒸気洗浄

①水素ガス濃度

蒸気洗浄においても、水素ガス濃度の制限値は、前項のアルコール循環洗浄と同様である。

ハード的には取り扱う流体が蒸気であることから耐湿性を有したもの（または、ミストラップなどの構造を有したもの）であることが必要である。また、インターロックについては、水素濃度高による、蒸気供給自動停止インターロックを設けることである。さらに、蒸気洗浄では蒸気の注入を停止してもある程度反応は持続するため、アルコール洗浄よりも内圧が上昇する可能性が高い。そのため、水素濃度高で放出弁を自動閉とすると、タンク内の内圧が上昇する可能性がある。従って、タンク側には安全弁を設けると共に、安全弁の放出側を（希釈ガス系やフレイムアレスタを有する）放出系に接続する等の配慮をすることが望ましい。

また、50MW 2号SGの洗浄装置等に見られる放出系の弁は、ブリーザー弁（自動弁の一種）を使用している実績が有るが、放出水素の濃度をコントロールするためには、遠隔式調節弁を使用することがより望ましいと思われる。

②酸素濃度

蒸気洗浄においても、酸素濃度の制限値は、前項のアルコール循環洗浄と同様である。但し、蒸気洗浄の場合の酸素濃度の監視は、水素ガスの燃焼・爆発という理由以外に被洗浄材料の発錆を防ぐための意味も有している。しかしながら、発錆と装置内の酸素濃度の関係は明確にされていないようである。

③蒸気温度（洗浄タンク内温度）

蒸気温度条件は、ナトリウム－蒸気の反応速度よりもSCCの低減または排除を重点として決定される。動燃実績では、炭素鋼のSCC発生下限値である90℃⁽⁵⁾に対し余裕値を加え、70℃としているものが最も厳しい条件である。

但し、蒸気温度の制御は一般的に困難であり、しばしば温度制限値を越えてしまうことが過去の実績で多く見られる。再使用されない機器であれば洗浄の効率を図るためにも、目的に応じた蒸気温度を決定することが重要である。

なお付録-1にSCCの概要について記述した。

④蒸気流量

蒸気流量条件は、ナトリウムの反応量に大きく影響する。初期の蒸気注入量が多すぎると、水素濃度が制限値を越えてしまう可能性が非常に大きくなるため注意が必要である。また、ハード上においては、蒸気供給弁は洗浄タンク近傍に取り付けることが望ましい。これは、過去の実績において水素濃度高で蒸気供給停止しても、蒸気供給弁～洗浄タンク間の余剰蒸気により反応が継続し制限値を越える等の状況が見られたためである。

反応開始時の蒸気供給条件は、過去の実績⁽⁵⁾では、単位時間当たりに供給された蒸気中の水分が、ナトリウムと全て反応したと仮定した時、希釈ガス供給量の1vol%を越えないものとした条件が最も安全側であるといえる。また、反応開始時以降の蒸気供給量は、初期蒸気量に対し約2倍ずつ6ステップで増加させることで、前述の温度条件を満足できた実績⁽⁵⁾を有している。

⑤圧力

アルコール循環洗浄と同様である。（自動ドレン機能及び冷却設備は除く）

⑥洗淨終了判定

蒸気洗淨は、アルコール循環洗淨と異なり、幾つかの洗淨法を組合せ行われる。従って、洗淨終了判定は、各々の洗淨段階で異なる。

代表的な洗淨終了判定法⁽⁵⁾を以下に示す。これらの条件は、最適値ではない。またこの洗淨終了判定方法の実績をもとに、別途報告書⁽⁶⁾にて検討・評価されているので併せて参照願いたい。

- ・一次洗淨（蒸気洗淨） 水素濃度・・・100ppm以下
- ・二次洗淨（純水洗淨） 導電率・・・20 μ S/cm以下、ナトリウム濃度・・・1ppm以下
- ・三次洗淨（安定化处理） 排ガス湿分濃度・・・1000ppm以下

⑦乾燥

アルコール循環洗淨と同様、確立されていない。ナトリウムポンプについては大気暴露による乾燥法が多く用いられている。

⑧鉄系材料の発錆及び腐食について

蒸気洗淨により発生するNaOHにより、洗淨対象である材料の表面は非常に活性化されやすい状態となっている。従って、材料の発錆を防止するためには、蒸気洗淨の次の洗淨段階である水洗淨の水質管理が非常に重要な項目となる。

水質管理のポイントは、過去の実績⁽⁵⁾⁽⁶⁾から純水の十分な脱気（ヒドラジン処理）が必要であるとされている。ヒドラジンの適正濃度は明確になっていないが、50MW 2号SGでは50ppmでは効果が無いことが確認されており、ボイラ用鋼材等では200～500ppm（図4.2.1、4.2.2参照⁽⁵⁾）で防食効果があるとされている。また、腐食の防止については、以下のような研究成果⁽⁷⁾が報告されている。（付録-1参照）

・温度

密閉系では温度上昇と共に腐食量は増大し続けるが、開放系では約80℃に鉄の腐食の最大がある。

・PH濃度

低温（22～40℃）では、PH4～10で鉄の腐食は小さく、PHが10以上となれば鉄酸化物の生成を促進させるため腐食は更に小さくなる。

・D.O（溶存酸素）濃度

水温50～100℃でD.O約50ppb以下では活性溶解液となり鉄の腐食は大きい。D.O50～500ppbで鉄の不動態が保持され腐食は小さい。D.O500ppb以上では、孔食腐食を伴い腐食が大きくなる。

・Cl⁻濃度

水道水のような、Cl⁻含有流動水中での腐食速度はCr量の増加とともに低下する傾向にあり、耐食性は9Cr-1Mo>5Cr-0.5Mo>21/4Cr-1Mo鋼の順である。

⑨安定化处理

NaOHの炭酸安定化は、材料のSCCを防ぐために重要な工程である。炭酸安定化は、材料のSCCを防止するためにも蒸気洗淨後遅滞無く行われるべきであり、特に水酸化ナトリウムの凝縮や乾燥固化は避けなければいけない。

水洗浄後の炭酸安定化に要する最適時間を決定するのは困難である。

50MW2号SGでは湿分濃度にて終了判定は行っているが、この方法は妥当では無く、基礎試験から終了判定時間決定することが適切であるとされている。ただし、安定化については、過去に幾つかの試験報告書⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が提出されているが、いずれも終了判定の適正値を求めうる研究は成されていない。

⑩減圧沸騰洗浄

蒸気洗浄においては、再利用される機器は減圧沸騰洗浄法が併用されることが多い。これは、クレビスのナトリウム洗浄効果を高め、SCCを防止するためである。基本的には、減圧沸騰洗浄法はクレビスを含む全てのナトリウムを（ネジ部を除く）殆ど完全に除去可能であるが、50MW2号SGの様にガス層を有するものは、被洗浄物内に直接蒸気ノズルを挿入し洗浄するなどの手法が用いられたこともある。

5. 結言及び提言

5.1 結言

これまで実施されたナトリウム洗浄技術についての調査を行った。動燃内で広く用いられているアルコール循環洗浄法と密閉型蒸気洗浄法については、洗浄時に留意すべき重要事項についてまとめた。

アルコール循環洗浄法については、安全上、可燃性ガス濃度、圧力及びアルコール温度の監視と制御が重要である。密閉型蒸気洗浄については、水素及び酸素濃度、圧力の監視が必要である。また、ナトリウムと水の反応により生成する水酸化ナトリウム及び腐食に留意する必要がある。

いずれの洗浄法においても、洗浄前に付着ナトリウム量の評価や被洗浄機器の構造による洗浄法の選定や洗浄機器の設置方法を十分に検討すべきである。

5.2 提言

過去のナトリウム洗浄技術及び実績をまとめた結果、以下のような安全上・技術上の課題が明らかにされた。

(1) アルコール循環洗浄法

アルコール循環洗浄法については、現在ナトリウム処理室にて設置されている小規模アルコール循環洗浄装置システム⁽¹⁾（但し、系内の酸素濃度測定設備は無い）に示されるように、ほぼ確立されており重要な項目はないが、残された課題としては以下の通りである。

- ①アルコール乾燥の終了判定方法
- ②クレビスの洗浄性は小さいため、水洗浄等を併用し行う場合は、以下の蒸気洗浄と同様の課題が発生する。

(2) 密閉型蒸気洗浄

- ①発錆と装置内の酸素濃度の関係
- ②純水洗浄における、ヒドラジンの適正濃度
- ③安定化処理における終了判定時間の適正值
- ④乾燥の終了判定方法

なお、蒸気洗浄における水素濃度、水洗浄における伝導度の終了判定値の定量化は困難であり、洗浄に応じて決定する必要がある。

6.謝辞

本報告書作成において、原子炉工学室の関係者の方々に多大なる御協力と御助言を頂いたことに厚く御礼申し上げます。

7.参考文献

- (1) WELCH F H, STEEL OP III, HILL E 「SODIUM REMOVAL AND DECONTAMINATION OF COMPONENTS」 DOE - SF - 91001 - T - 7 1975年
- (2) WELCH F H, STEEL OP III 「SODIUM TECHNOLOGY : TASK1. SODIUM REMOVAL AND DECONTAMINATION OF COMPONENTS」 DOE - SF - 91001 - T - 4 1975年
- (3) 柳生昭三著 水素混合ガスの安全性に関する研究 (I) 講演予稿
(社) 産業安全技術協会
- (4) 山本晋平 赤井昌紀 谷田部敏男 仲井悟
「2重管型蒸気発生器のアルコール洗浄」
ZN9450 96-049 1996年 10月
- (5) 小杉敏夫、谷田部敏男他
「SGメンテナンス技術の実証試験 50MW蒸気発生器2号機(蒸発器)洗浄試験」
ZN941 80-220 1980年 12月
- (6) 清川輝行、浜田勝彦他
「SGメンテナンス技術の実証試験 (1)総合報告書(受託研究)」
ZJ222 80-18(1) 1980年 11月
- (7) 山中和夫、幸英昭、永田三郎 「アルカリ腐食・脆化に関する調査」
SJ9009 88-001 1988年 1月
- (8) 小貫修 鹿納栄他 「常陽 炉容器モックアップ試験装置解体撤去報告書」
SN941 84-105(1) 1984年7月
- (9) 八木隆
「SG洗浄・再使用のための予備試験 (第Ⅱ期試験) 成果報告書」
ZJ222 79-18 1979年 11月
- (10) 八木沢秀治、鹿志村洋一他 「50MW蒸気発生器解体洗浄工事」
SN941 75-57 1975年 7月
- (11) 小貫修、萩谷昭男 「ナトリウム処理室ハンドブック」
SN952 85-31 1985年 11月(1997年6月改訂)

表2. 1. 2 もんじゅ中間熱交換器の洗浄工程

内 容	月		8				9			
	日	時	29	30	1	2	3	4		
			12	24	12	24	12	24		
洗 浄 準 備			■	■						
ア ル コ ー ル 洗 浄					■					
純 水 洗 浄						■				
温 水 減 圧 沸 騰 洗 浄							■			
真 空 乾 燥								■		
水 蒸 気 洗 浄								■		
解 体 検 査								■ ■		
組 立 て								■		

表2. 1. 4 一体貫流型蒸気発生器の洗浄工程

月 日	1988年 12月											
	9	10	⑪	12	13	14	15	16	⑰	⑱	19	20
1. 洗浄準備・事前点検	■											
2. 処理室へSG搬入		■										
3. 洗浄準備				■								
4. SG洗浄						■						
5. 撤去配管等の蒸気洗浄							■					
6. SG内部乾燥								■			■	
7. SG内部点検								■				
8. SG搬出												■

表2. 1. 5 FHM、RMのナトリウムの洗浄結果

		F	H	M	R	M
		第1回目洗浄 (S5.0.12月)	第2回目洗浄 (S5.1.6月)	第3回目洗浄 (S5.1.10月)	第1回目洗浄 (S5.1.6月)	第2回目洗浄 (S5.1.7月)
Na 中 浸 せ き デ イ タ	ナトリウム温度	200~280℃	270~280℃	190~200~280℃	270~280℃	270~280℃
	ナトリウム純度 (PL温度)	約150℃	140~185℃	130~152℃	140~180℃	140~185℃
	ナトリウム切り時間	17.5時間	1時間	3.5時間	1時間	1時間
	ナトリウム中浸せき時間	約26.5時間	約550時間	約140時間	約550時間	約550時間
	ナトリウムとの接触面積	ナトリウム高液面 (T/T段付レベルより約+7000mm) 一定				
洗 浄 デ イ タ	使用アルコール量	1830ℓ	1820ℓ	2110ℓ	2155ℓ	2160ℓ
	アルコール液温	12~15℃	16~24℃	19~24℃	16~20℃	16~29℃
	アルコール循環洗浄時間	2時間55分	3時間10分	6時間32分	3時間40分	6時間2分
	N ₂ ガスバブル洗浄時間	0	約40分	0	25分	2時間42分
	アルコール洗浄時間 (合計)	約24時間	約27時間	約66時間	約25時間	約64時間
	アルコール液の洗浄使用回数	1	2	5	3	4
	洗浄アルコールの種類	変性エチルアルコール (エチルアルコール88%, イソプロピルアルコール10%他)				
洗 浄 結 果	中和滴定による	1790gr	1337gr	1498gr	560gr	—
	洗 浄 推 移 Na 量 (電 導 度)					
	作業日数 (移動→ガス置換→洗浄→乾燥→移動)	10日	10日	6日	6日	6日
洗浄後観察状況	<ul style="list-style-type: none"> 表面は比較的きれいに洗浄された。 ハメアイ部、表面仕上げの荒い部分に白い(一部黄色)生成物が認められた。 グリッパ筒内部には約100gr程度の未洗浄Naが残っていた。 	<ul style="list-style-type: none"> 表面 (Na接液部) には黒色の生成物が認められ、まだ模様が付着していた。それは水平部に堆積していた。 前回同様白い生成物も認められた。 グリッパ筒内部には未洗浄Naが多量に残存し、数100grと思われる。 	<ul style="list-style-type: none"> 表面は比較的きれいに洗浄された。 アルコール液面付近に白い生成物が認められた。 グリッパ筒内部にはほとんどNaが残っていなかった。 瓜開閉軸ハメアイ部には黄色の生成物が詰まっていた。 	<ul style="list-style-type: none"> ポット軸受部に数100grの未洗浄Naが残っていた。 表面に白い生成物が見られた。 FHMの2回目に黒色生成物が付着していたがRMICには付着していなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 表面は非常にきれいである。 ポット軸受部に付着していたNaはきれいに洗浄できていた。 	
洗浄後の動作チェック メンテナンスピット 大気中	<ul style="list-style-type: none"> ・バンタ開閉 可 ・感知機構 可 ・グリッパ瓜開閉 (1週間後不可) 	<ul style="list-style-type: none"> ・バンタ開閉 可 ・感知機構 不可 ・グリッパ瓜開閉 不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・バンタ開閉 可 ・感知機構 不可 ・グリッパ瓜開閉 不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポット回転 不可 ・ポット上下 不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポット回転 可 ・ポット上下 可 	

表 2. 2. 1 50MW 1号SGの洗浄工程表

項 目	3月		4月						5月			
	31	1日	5	10	15	20	25	30	1日	5	10	15
○ SH 解体洗浄												
1 作業準備 (足場保温解体)												
2 計表電線撤去												
3 計器類撤去												
4 洗浄装置据付												
5 SH廻り配管切断												
(水蒸気, Na, カバーガス)												
6 SH洗浄												
○ EV 解体洗浄												
1 洗浄装置移設												
2 EV廻り配管切断												
(水蒸気, Na, カバーガス)												
3 EV 洗浄												
○ SH EV 搬出その他												
1 洗浄装置撤去												
2 架台解体												
3 管束引抜 ビニールカバー 取付												
4 管束搬出保管												
5 切断配管のNa 洗浄												
6 残材等清掃												
7 完了立会												

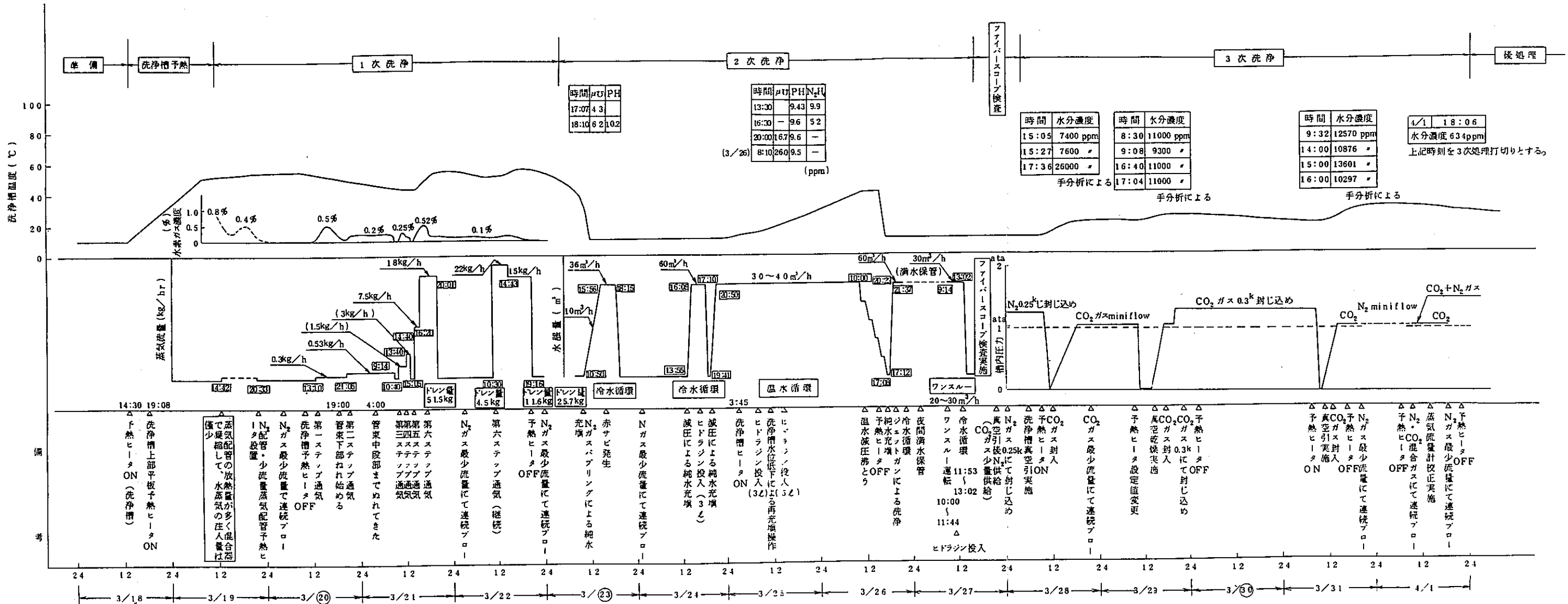


表 2. 2. 2 50MW 2号SGの洗淨工程表

表 2. 2. 3 インナーケーシング洗浄実績工程表

	1983, 4月(S58. 4月)															
	4 (月)	5 (火)	6 (水)	7 (木)	8 (金)	9 (土)	10 (日)	11 (月)	12 (火)	13 (水)	14 (木)	15 (金)	16 (土)			
洗 浄 準 備	洗浄装置組立															
ス チ ーム 洗 浄				第 1 回 ~ 第 10 回												
水 洗 浄						注水	循環	循環	浸漬	ドレン						
温水減圧沸騰洗浄											温水準備	水注水	昇温 (温水, steam)	減圧, 加圧, 循環	ドレン	浸漬
乾 燥												steam 供給	N ₂ 供給			
解 体													配管取外			
運 搬													運搬			

表 2. 2. 4 インナーケーシング洗浄操作データ

項目		スチーム洗浄										水洗浄		温水減圧沸騰洗浄			
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	循環	満水保管	減圧+(加圧)+(循環)	バブリング+(循環)	水供給及循環	満水保管
洗浄回数	回	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	7 (3) (2)	1 (1)	2 (2)	1
スチーム供給場所	部分	DIF 右下	DIF 右下	DIF 左下	DIF 左上	DIF 右上	DIF TSP	DIF 全体	SC	SC	全 体 ノ ズ ル 切 換						
スチーム量	Kg/h	120	120	180	180	180	180	210~ 260	210~ 235	180~ 250	220~ 290						
N ₂ ガス量	Nm ³ /h	60	60	60	60	60	60	60	54	34	11~29				15	6	
容器内圧力最高	Kg/cm ² g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.15	-0.95 (0.75)	0.15	0.15	0.15
容器温度最高	℃	42	48	56	61	60	87	81	74	73	99	26	17	41	37	42	38
ポンプ温度最高	℃	37	49	70	72	71	106	102	94	95	101	23	17	42	38	42	38
水素濃度	平均	Vol %															
	最高	1.1	1.7	1.4	1.8	1.8	1.7	2.7	2.3	1.0	0.4						
酸素濃度最高	%	2.4	2.6	2.9	3.3	3.0	3.3	4.0≤	4.0≤	4.0≤	1.2						
PH	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
容器内液位	mm											10.6~12.0	11.8				
循環水量	ℓ/min											1900	1900	1750~1900	1750~1900	0~1900	1900
水温	℃											800~1000		1000	1000	1000	
ドレン回数	回											13~22	8~17	33~42	37	11~42	30~38
ドレン量	ℓ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1			8		
ナトリウム処理量	g	6.4	10.4	13.7	8.2	38	61.2	25.4	46	693	16250			40430			
洗浄時間	分	410	330	240	180	280	430	1300	960	4670	2100	390	300 (30)	50	1110	20	
洗浄速度	g/分	6	10	17	18	11	34	35	8	28	395	428	2400	505 (85) (159)	30 (14)	1398	900
Na除去量小計	Kg	25.6	19.4	13.3	16.4	8.2	12.3	165.2	34.3	11.8	4.9	0.16	0.6 (0.19)	1.14	0.79	0.02	
合計	Kg	8.8										2.49		0.38		1.13	
												12.8					

※ DIF:ディフューザ部 TSP:熱遮蔽板部 SC:サクシオン部 左右, 上下: SC側カラ見テ (): 加圧洗浄 (): 循環

表 4.1.1 アルコール循環洗浄法と密閉型蒸気洗浄法の比較表 (1/2)

	アルコール循環洗浄	水蒸気洗浄
1. 洗浄方法	<p>洗浄機器内部にアルコールを循環させ、ナトリウムをアルコラートにして除去する。</p> $\text{Na} + \text{ROH} \rightarrow \text{RONa} + 1/2\text{H}_2$	<p>洗浄機器内部に水蒸気十不活性ガスを送り、ナトリウムをNaOHにして除去する。</p> $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2\text{H}_2$
2. 洗浄手順	<p>(1) アルコール循環洗浄 (2) フレッシュアルコールによるリンス</p>	<p>(1) 水蒸気十不活性ガス洗浄 (2) 純水によるリンス (3) 炭酸ガスによる安定化</p>
3. 洗浄流体	アルコールまたは変性アルコール	水蒸気十不活性ガス
4. 洗浄温度	アルコール温度で反応速度を調節可。 13℃～60℃ (アルコールの沸騰を避ける)	<p>SCCを避けるために厳密な温度コントロールが必要。(最高120℃)</p> <p>洗浄時：71～88℃ リンス時：82±6℃ 乾燥時：99±6℃</p>
5. 反応速度	<p>反応生成物は、大量のアルコールに連続的に溶解するため、反応生成物がナトリウムの表面に残って反応を抑制することはない。反応速度はナトリウム付着状況、アルコール種類、アルコール温度等により異なる。洗浄時間は水蒸気洗浄に比べて短い。</p> <p>(1) プール状ナトリウムの反応速度 ～50mm/h r (60℃) (2) クレビス部ナトリウムの反応速度 幅0.33mmで～50mm/h r (60℃) (3) ナトリウムフロストが存在すると急激な反応速度となるが、沸点以上の温度上昇はない。</p>	<p>ナトリウムと蒸気が反応すると、NaOHのバリアーが形成されて次の反応を抑制する。次の蒸気によってNaOHが希釈され、バリアーが溶けて次の反応に進む。反応速度はナトリウム付着状況、洗浄流体条件によって異なる。洗浄時間はアルコール洗浄より長い。</p> <p>(1) プール状ナトリウムの反応速度 ～0.5mm/h r (7.5～15vol%66℃) (2) クレビス部ナトリウムの反応速度 幅0.33mmで1.3mm/h r (71℃) (3) ナトリウムフロストが存在するとNaOH層が形成され反応が進まず、リンス時にNa-水反応を生じる。</p>
6. 洗浄完了	排気ガス中のH2ガス濃度低、アルコール中のNa濃度と電気伝導度の上昇終了。	排気ガス中のH2ガス濃度低 (蒸気洗浄時)

表4.1.1 アルコール循環洗浄と水蒸気洗浄の比較 (2/2)

	アルコール循環洗浄	水蒸気洗浄
7. SCC	RI社の実験で、アルコール洗浄プロセスがCCを生じることも促進することもないことが確認された。また、洗浄不十分で残されたナトリウムもSCCに奇与することはない。	NaOH濃度が30～50 wt%で110℃以上の場合、ステンレス鋼にSCCの可能性がある。HEDLの実験では204℃で1.0hr、149℃でも10日でSCCが発生したため、余裕をみて20℃を上限値とするよう提言した。蒸気洗浄終了後、SCC回避のために炭酸ガスによる安定化処理が必要。
8. その他の注意事項	<p>(1) 可燃物であるアルコールの取扱い (消防法に基づく設備対応が必要)</p> <p>(2) 発生水素の処理 (爆発限界以下の濃度で大気放出、漏洩水素検出、防爆構造の設備等の対応が必要)</p> <p>(3) 廃アルコールの処分 (再生装置により再使用可)</p>	<p>(1) 発生水素の処理 (爆発限界以下の濃度で大気放出、漏洩水素検出、防爆構造の設備等の対応が必要)</p> <p>(2) NaOHの乾燥固化による配管の閉塞に注意 (水蒸気供給速度、水蒸気温度を制御)</p> <p>(3) 洗浄時に潮解液の適宜ドレン要。</p> <p>(4) 洗浄後の排水処理が必要 (中和処理で対応)</p>
9. 作業性	アルコールとナトリウムの反応は穏やかで、温度による調節が可能のため、余裕のある運転作業が可能である。	複雑な被洗浄物では洗浄時の温度管理が困難。洗浄→リンス→炭酸ガス処理と複数のシステムでの運転作業が必要となる。
10. 実績	<ul style="list-style-type: none"> ・ Mod.9Cr-1Mo鋼一体貫流型蒸気発生器 ・ 42B口径配管ベロース+試験体 他 米国での実績多し。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 50MWSG1号機 (EV, SH) ・ 50MWSG2号機 (EV) ・ 燃料交換機取付台 他
11. 総合評価	実績が多く洗浄技術は確立している。SCCの可能性がないため、再使用または材料試験を行う機器のナトリウム洗浄には最適の方法である。水蒸気洗浄に比べて洗浄時間は短い。	実績が多く洗浄技術はほぼ確立している。複雑な被洗浄物では温度管理が難しくSCC、発錆の可能性を完全に除去できない。

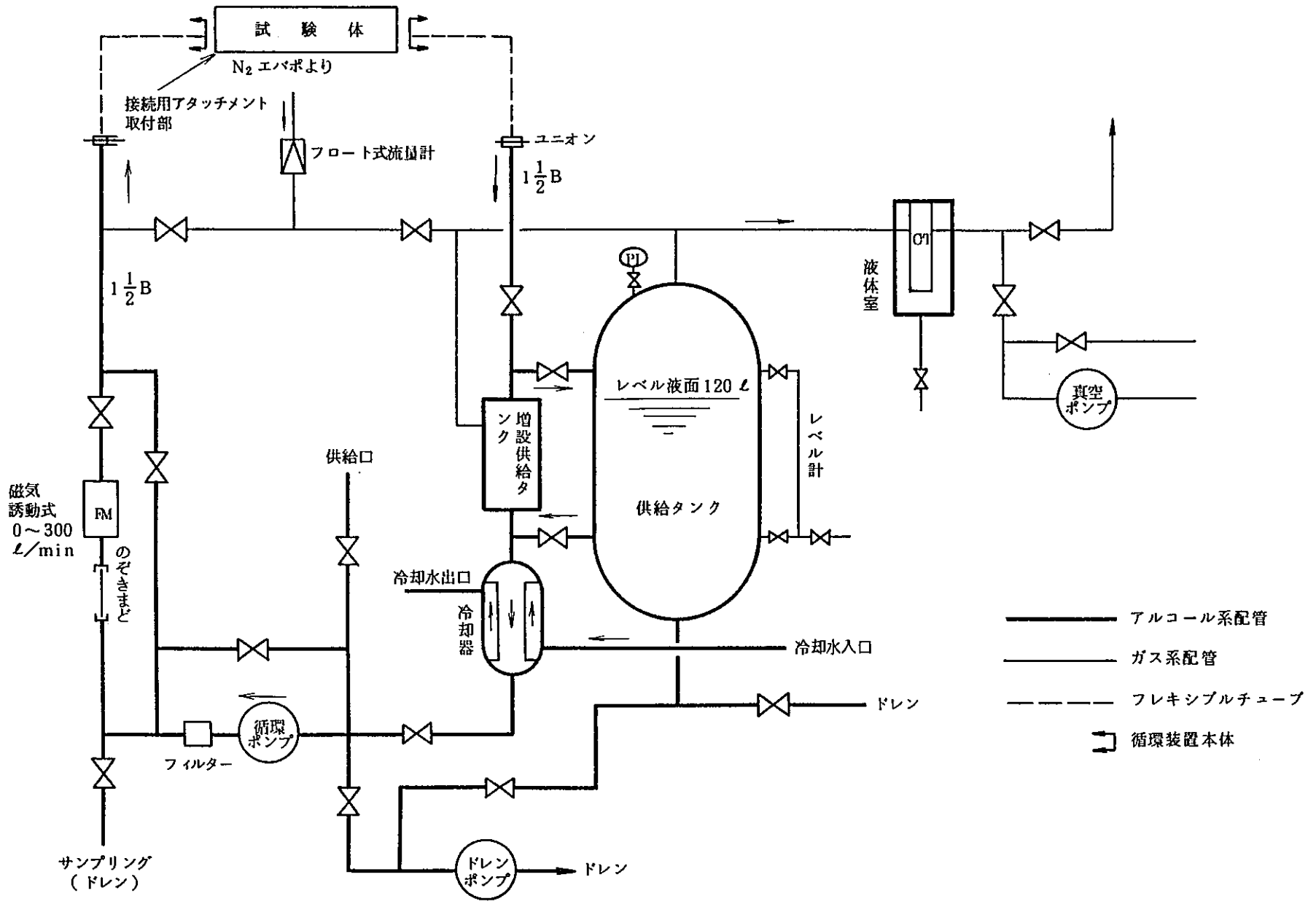


図 2. 1. 1 中型アルコール洗浄装置

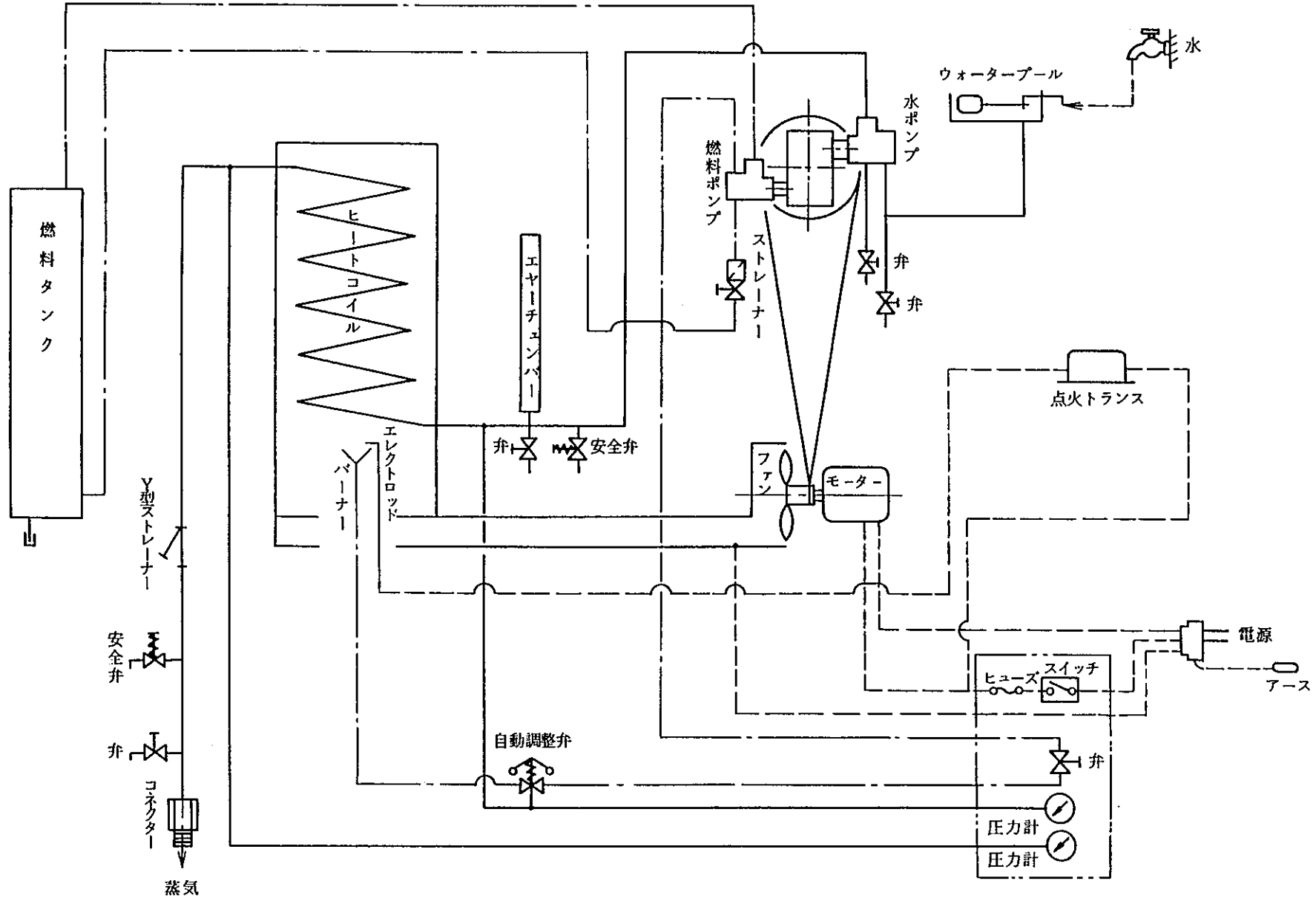


図 2. 1. 2 中型蒸気洗淨装置

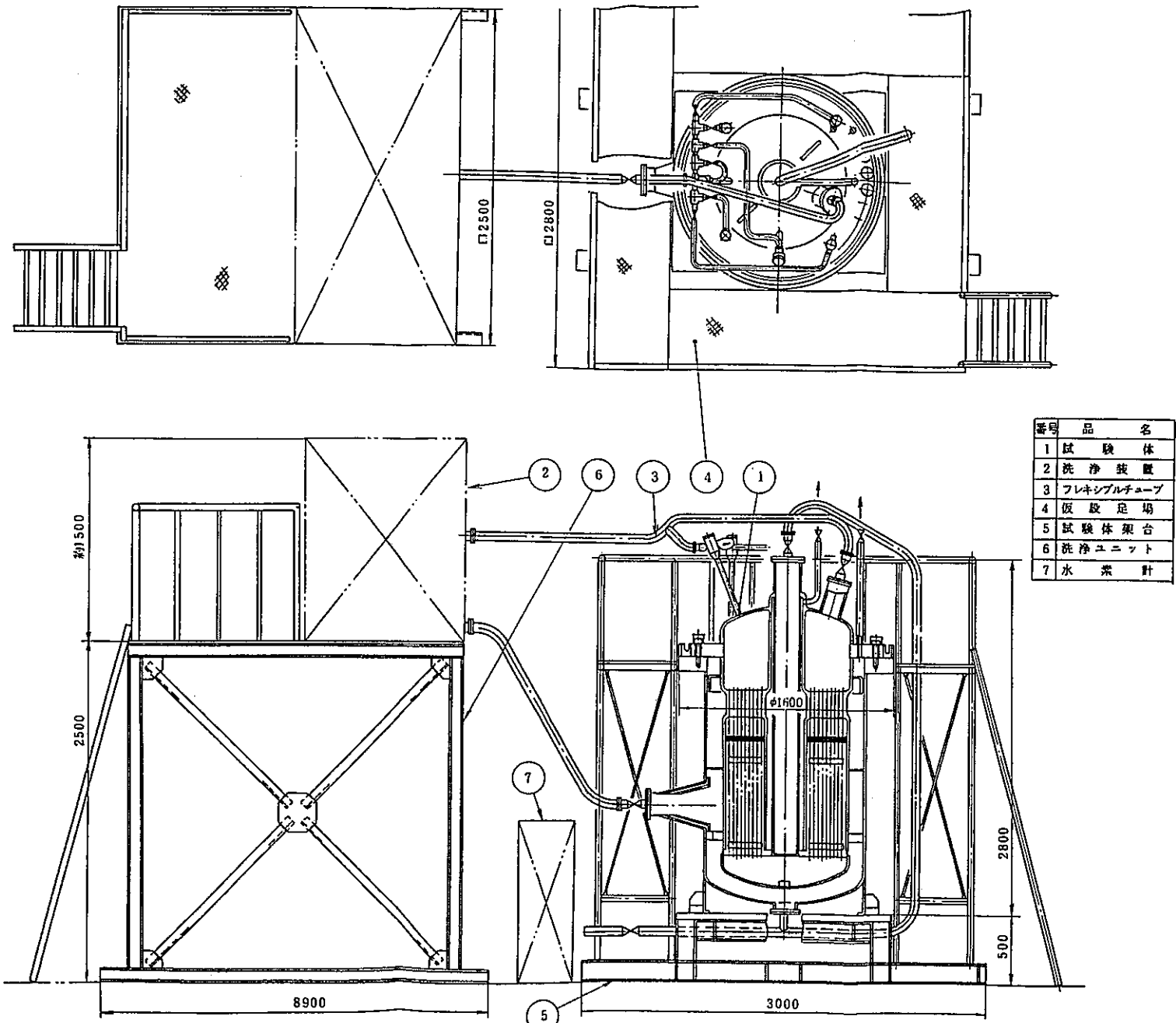


図 2. 1. 3 もんじゅ中間熱交換器洗浄用架台

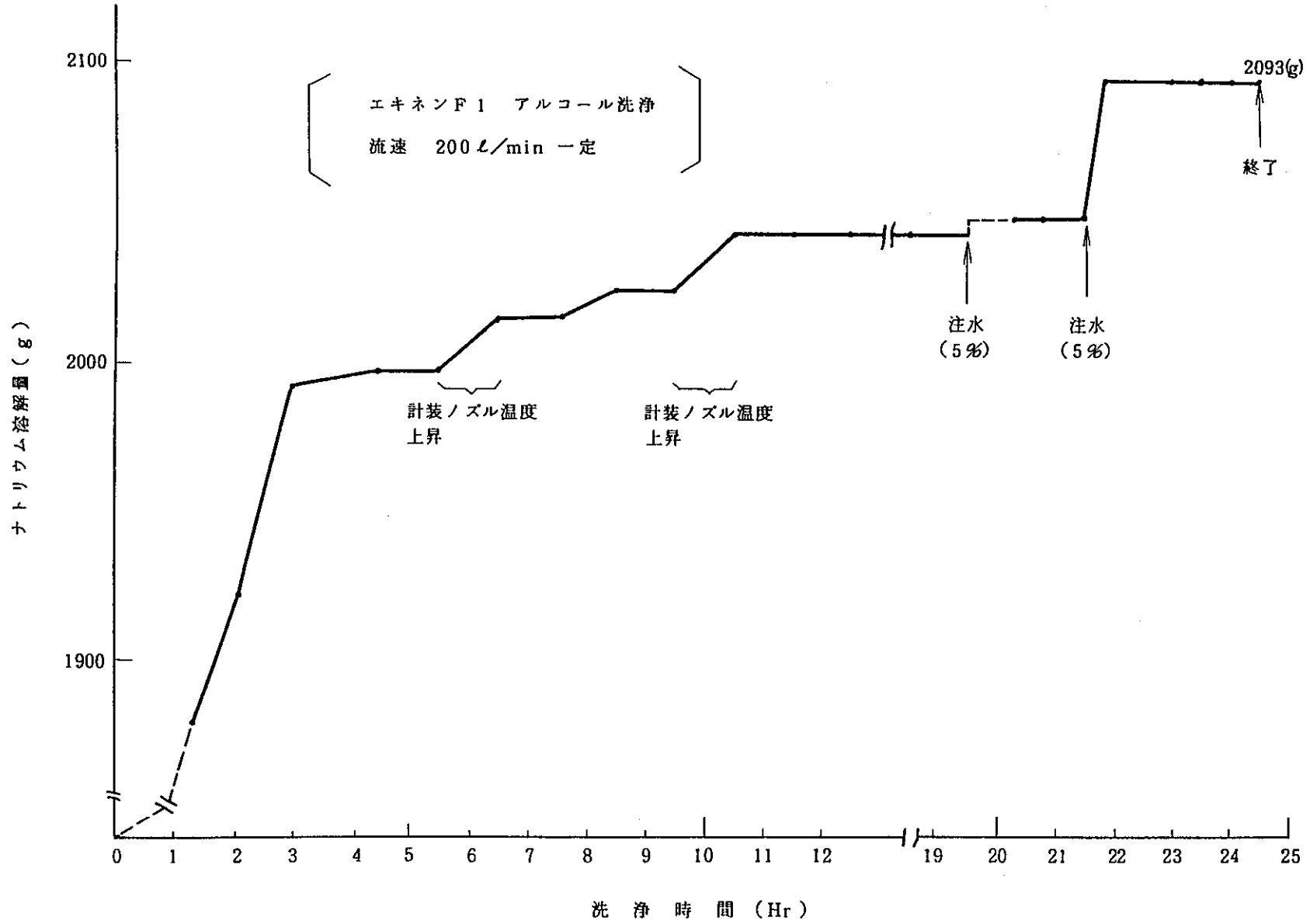


図2. 1. 4 アルコール洗浄時のナトリウム溶解量経時変化

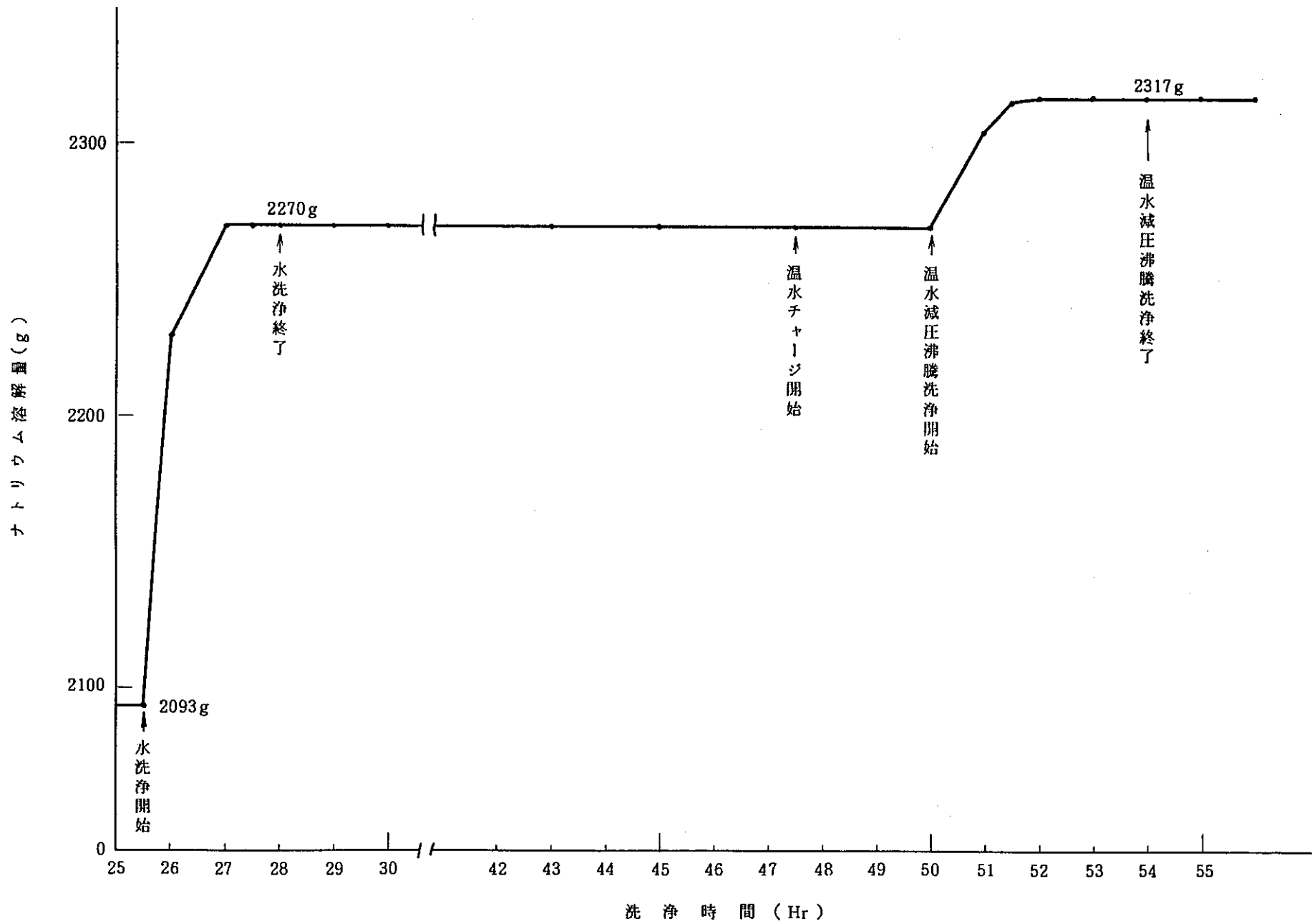


図2. 1. 5 水・温水沸騰洗浄時のナトリウム溶解量経時変化

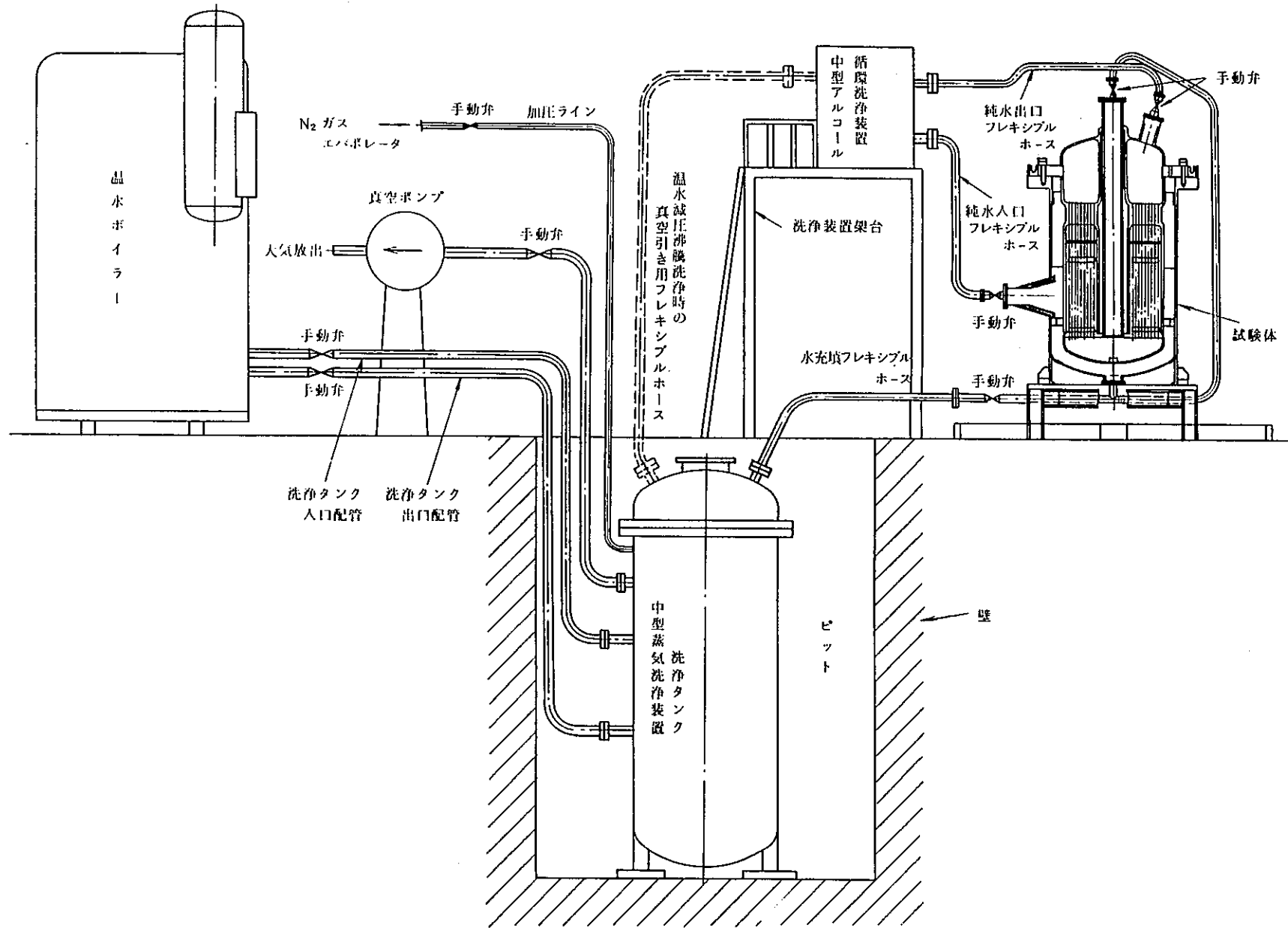


図 2. 1. 6 温水減圧沸騰洗浄組立図

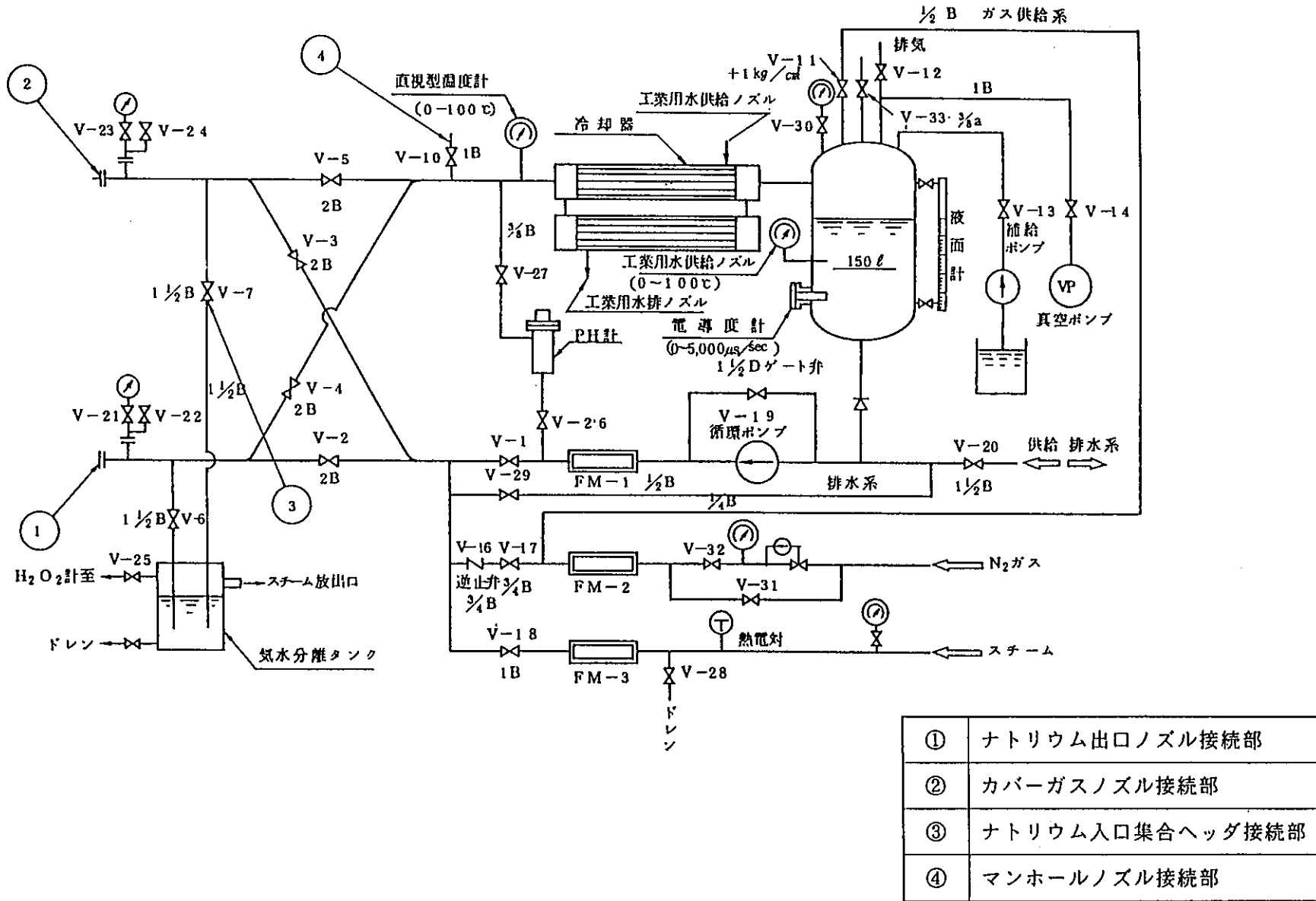
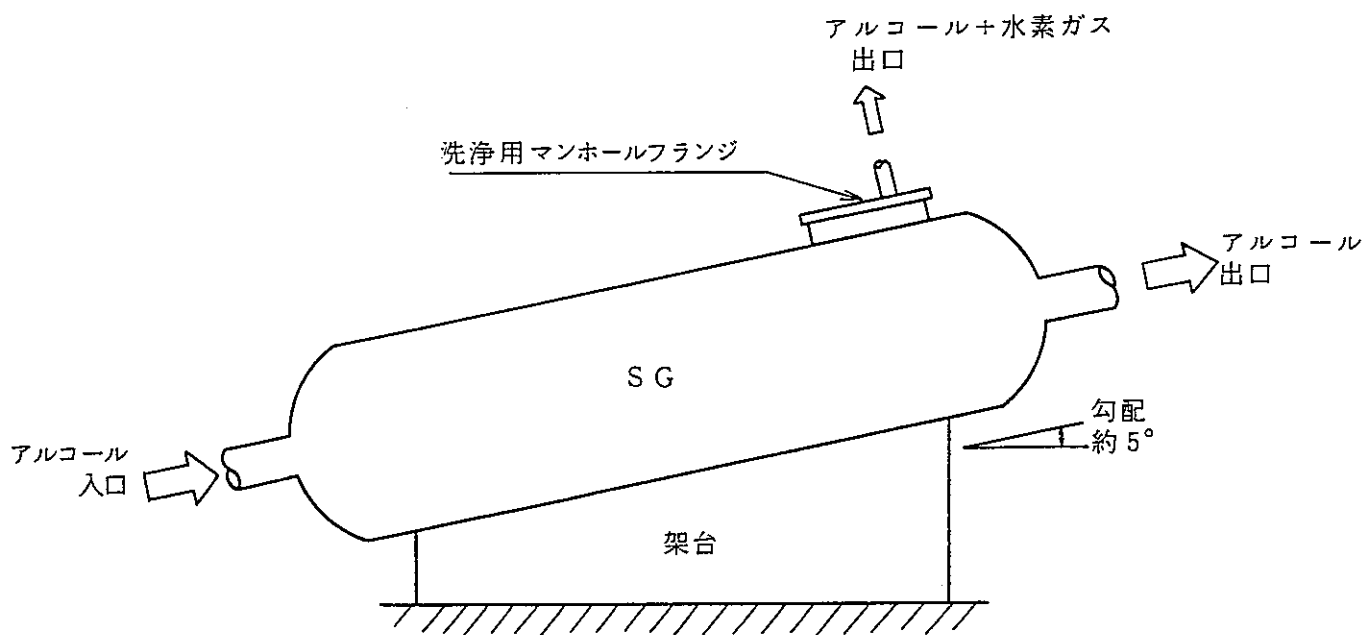
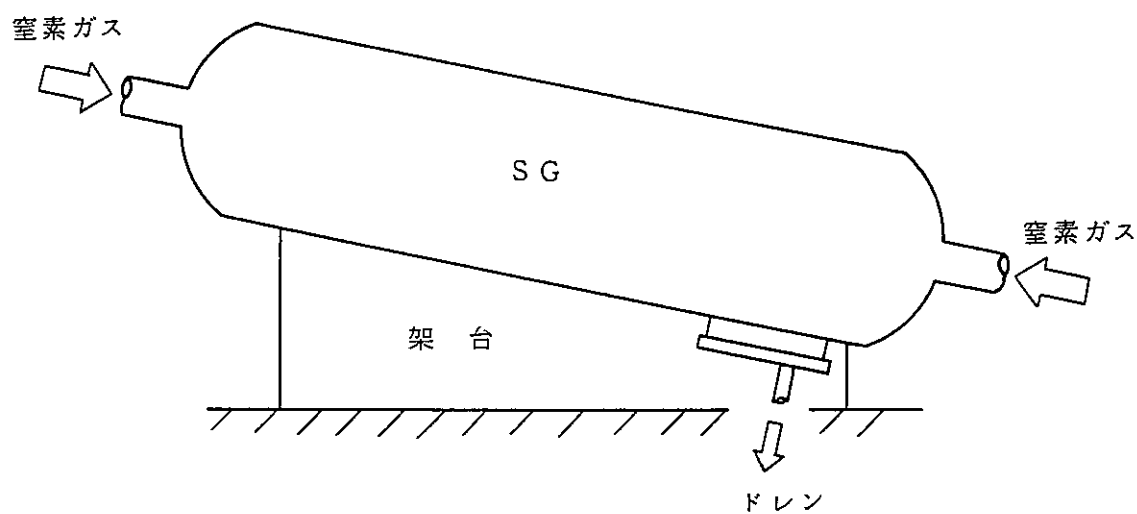


図2. 1. 7 水・アルコール洗浄装置



(a) SG据付方法



(b) アルコールドレン方法

図2. 1. 8 一体貫流型蒸気発生器の洗浄用架台

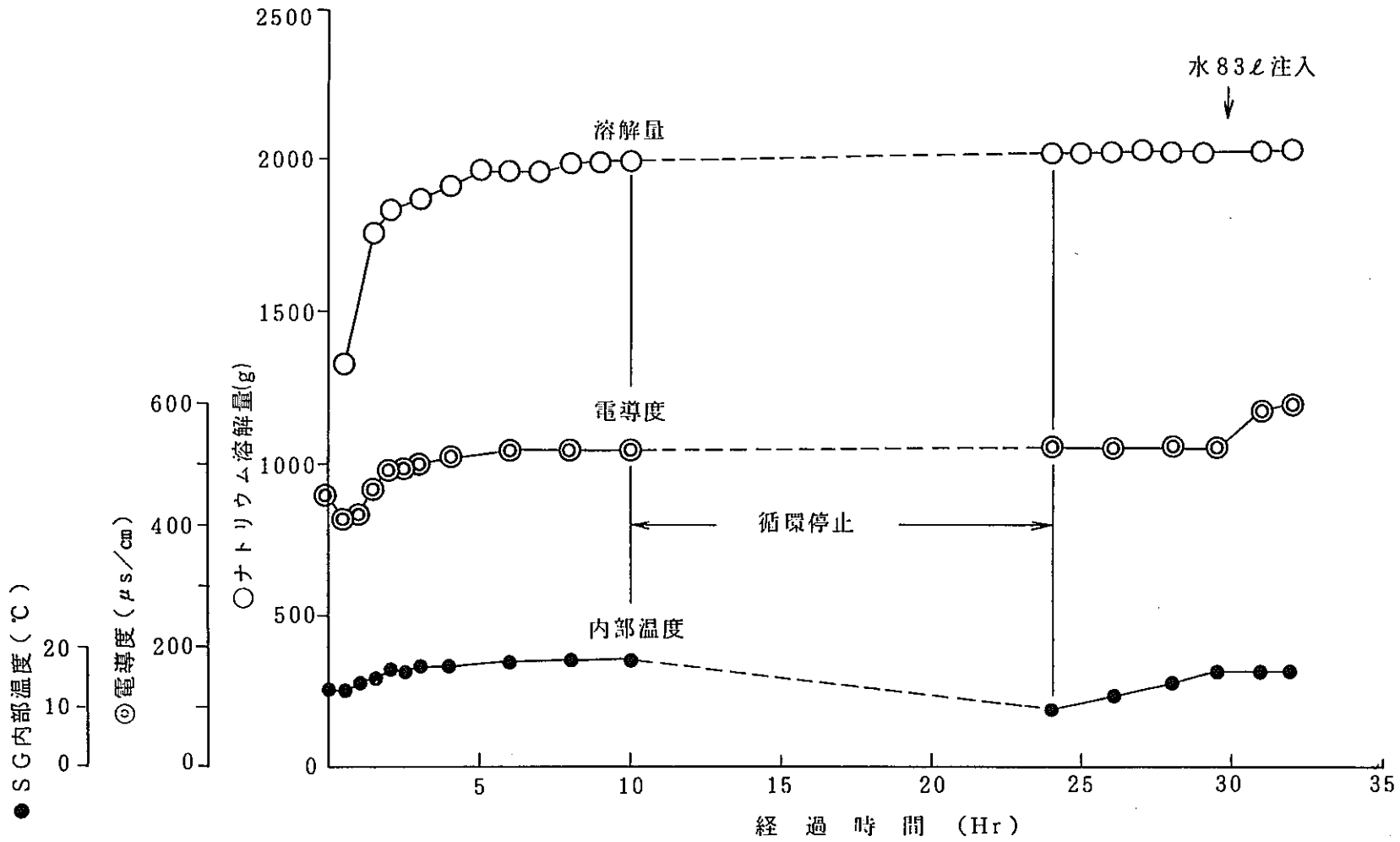
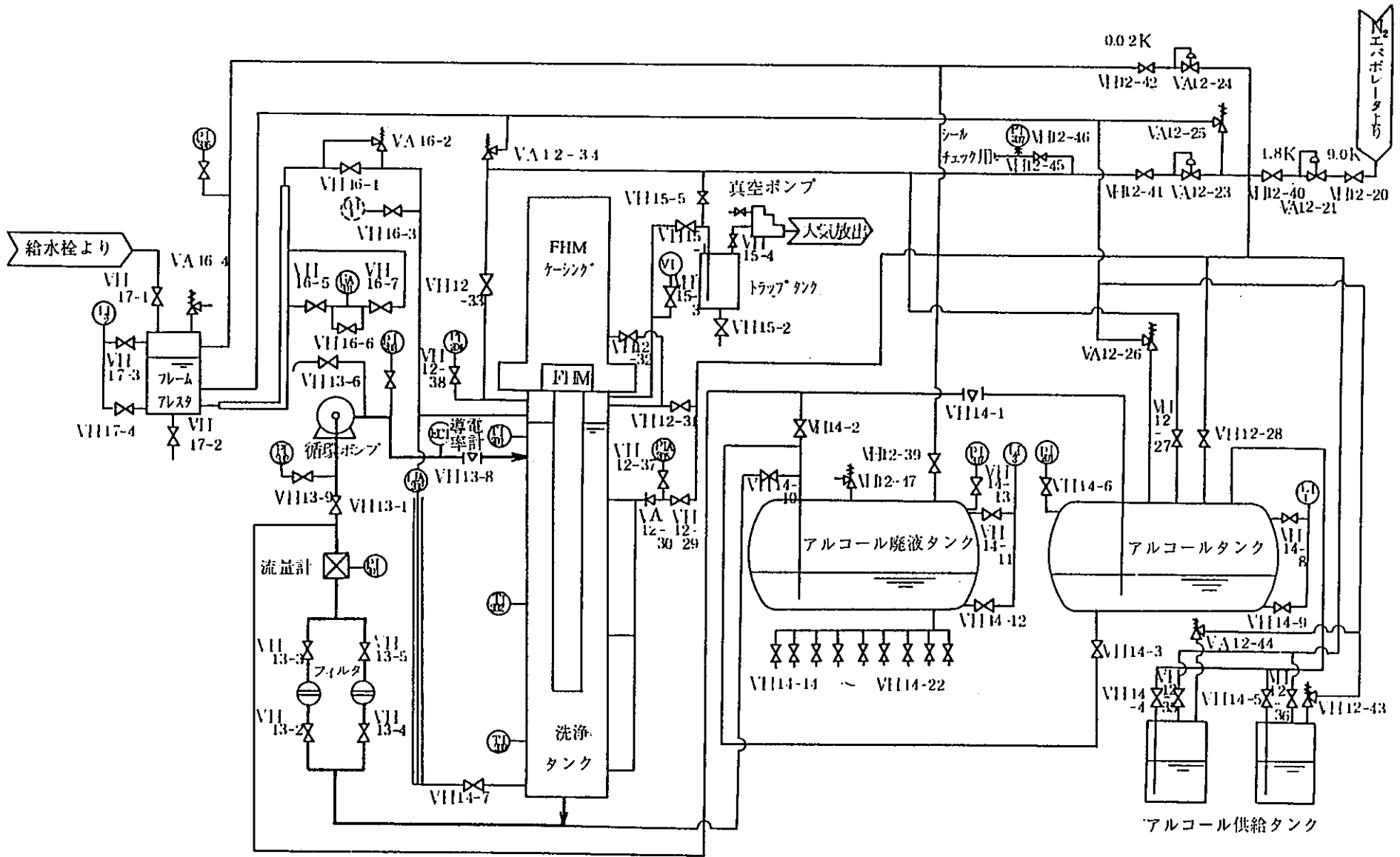


図 2. 1. 9 洗浄終了判定パラメータの経時変化



太線：アルコール循環ライン

図2. 1. 10 FHM、RMアルコール洗浄装置

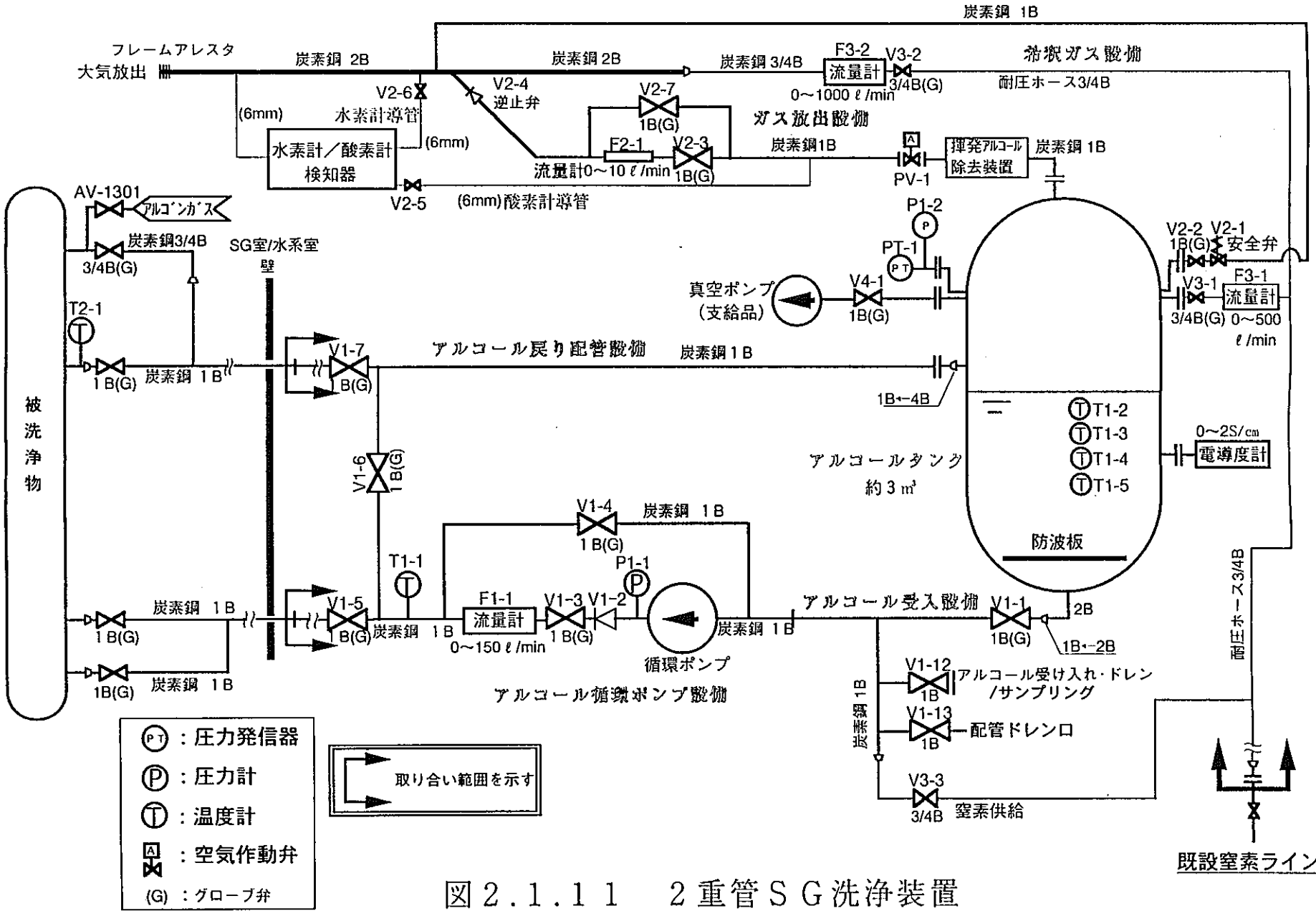


図 2.1.1 1 2重管SG洗浄装置

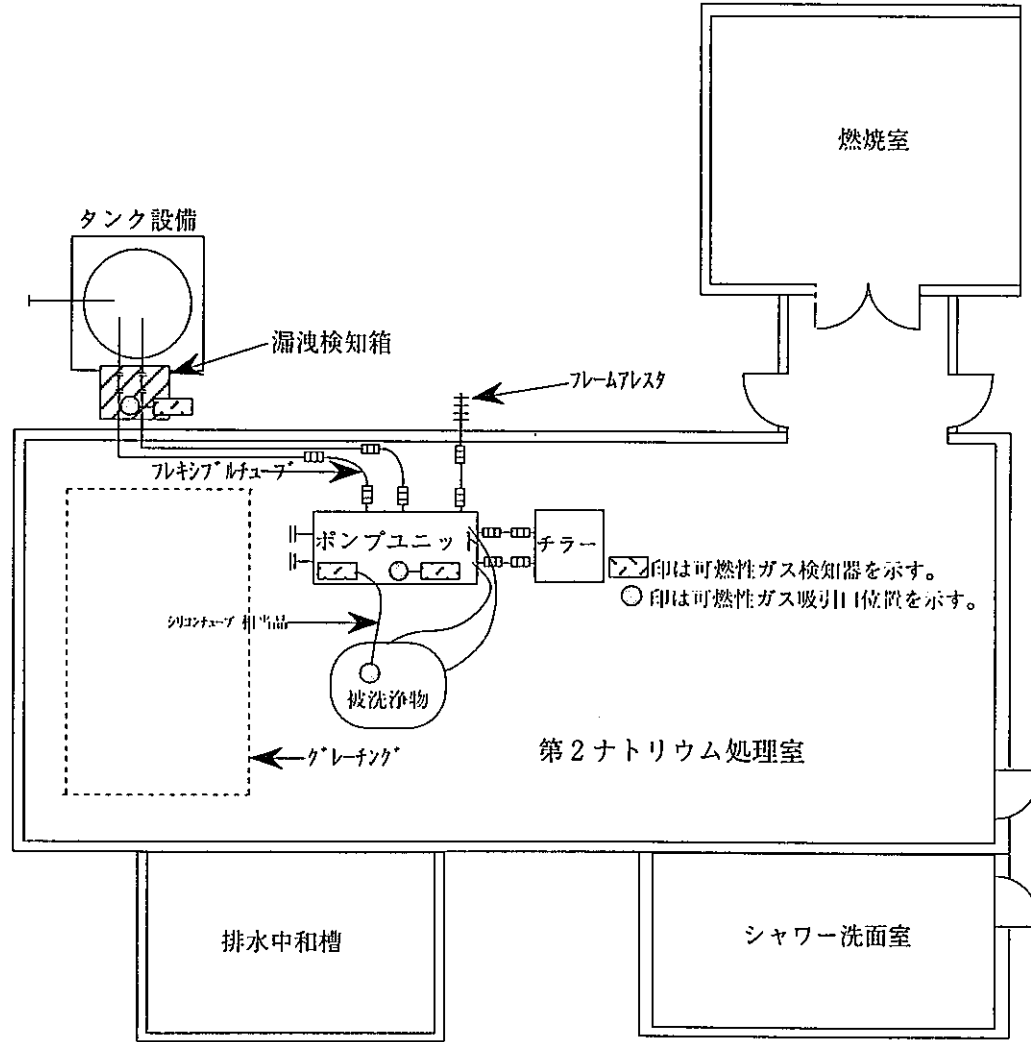


図2.1.12 小規模アルコール循環洗浄装置の全体配置図

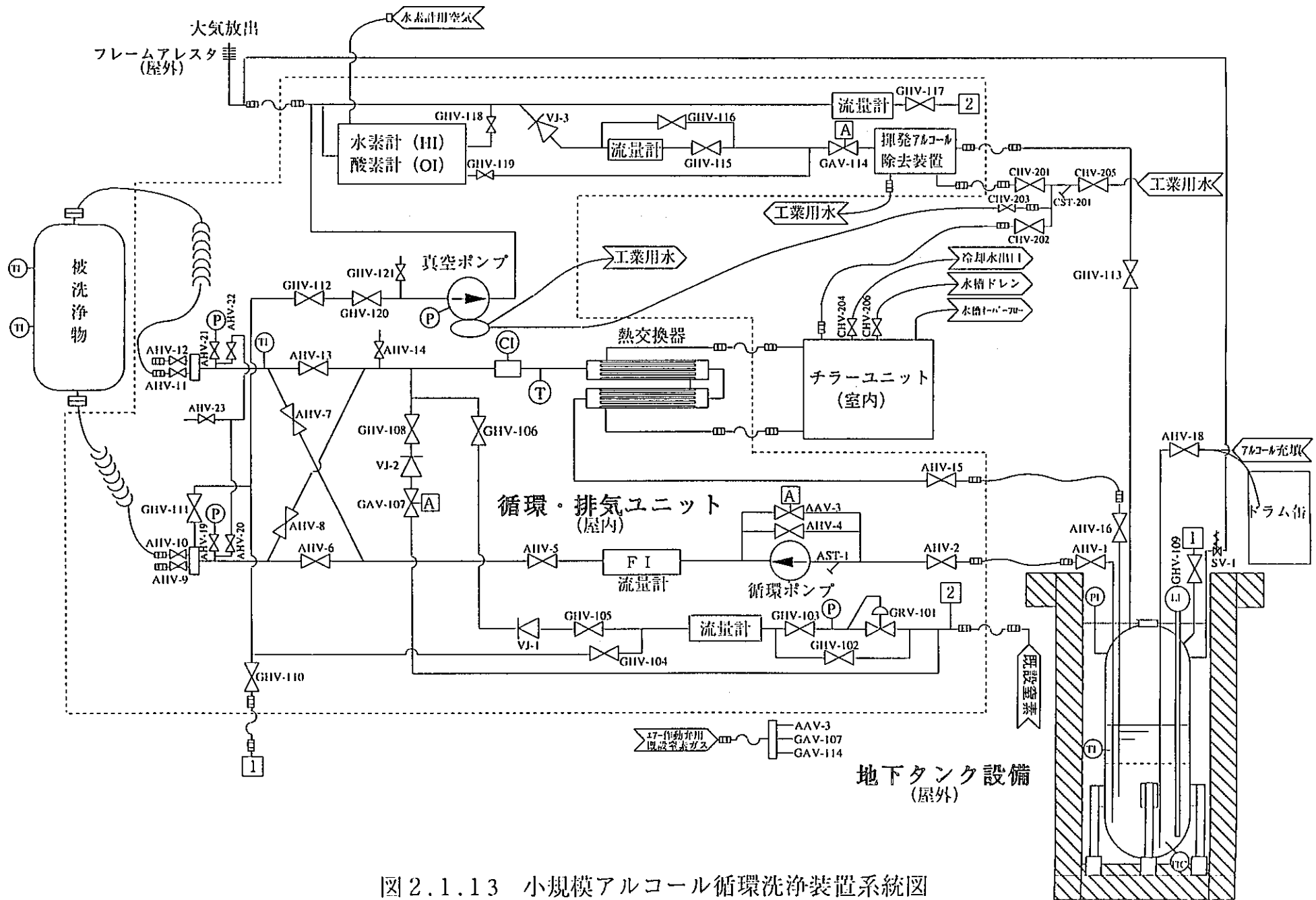


図 2.1.13 小規模アルコール循環洗浄装置系統図

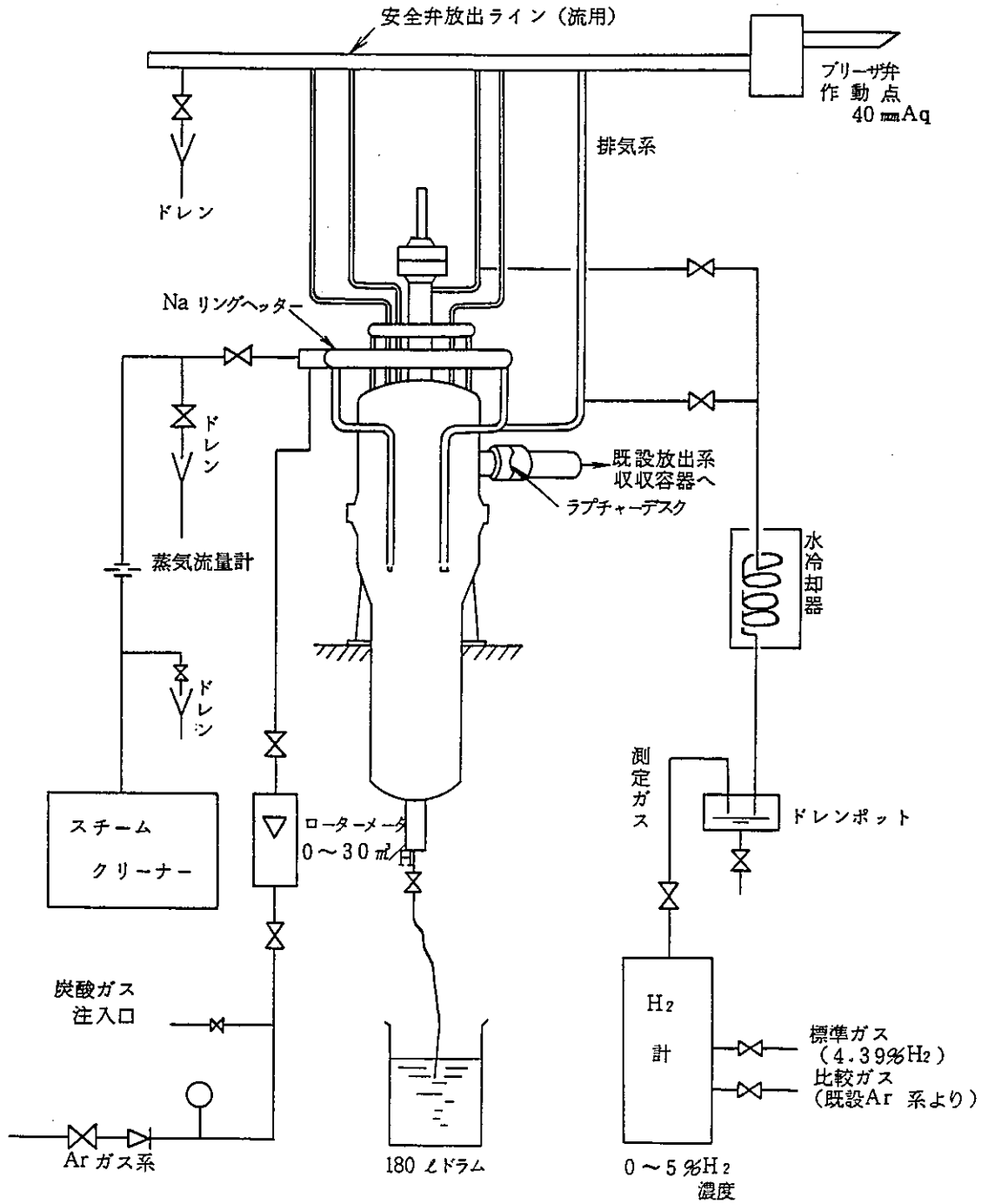


図 2. 2. 1 50MW蒸気発生器 1号機洗浄装置

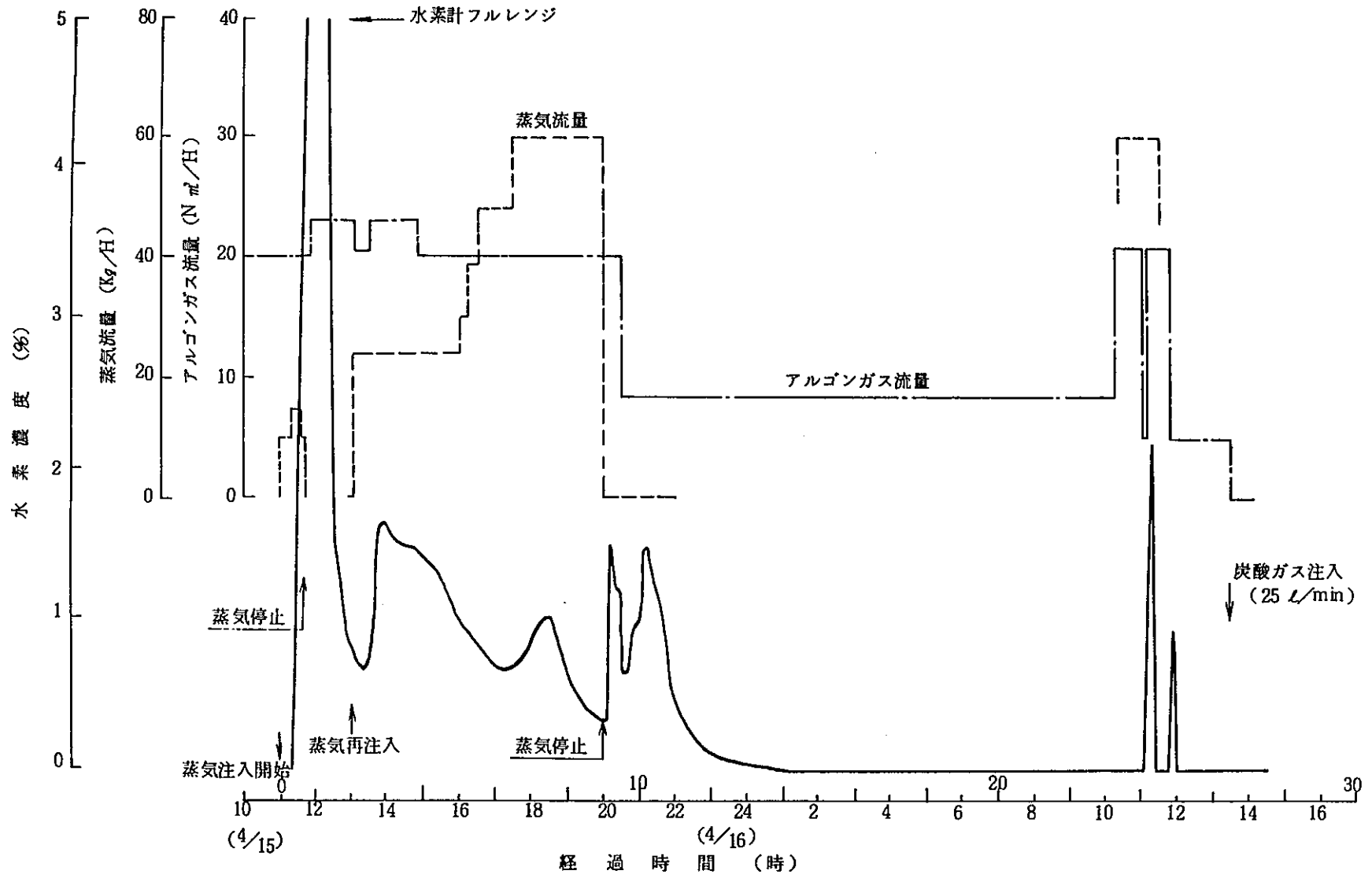


図 2. 2. 2 50MW 1号SG (SH) 洗浄経過

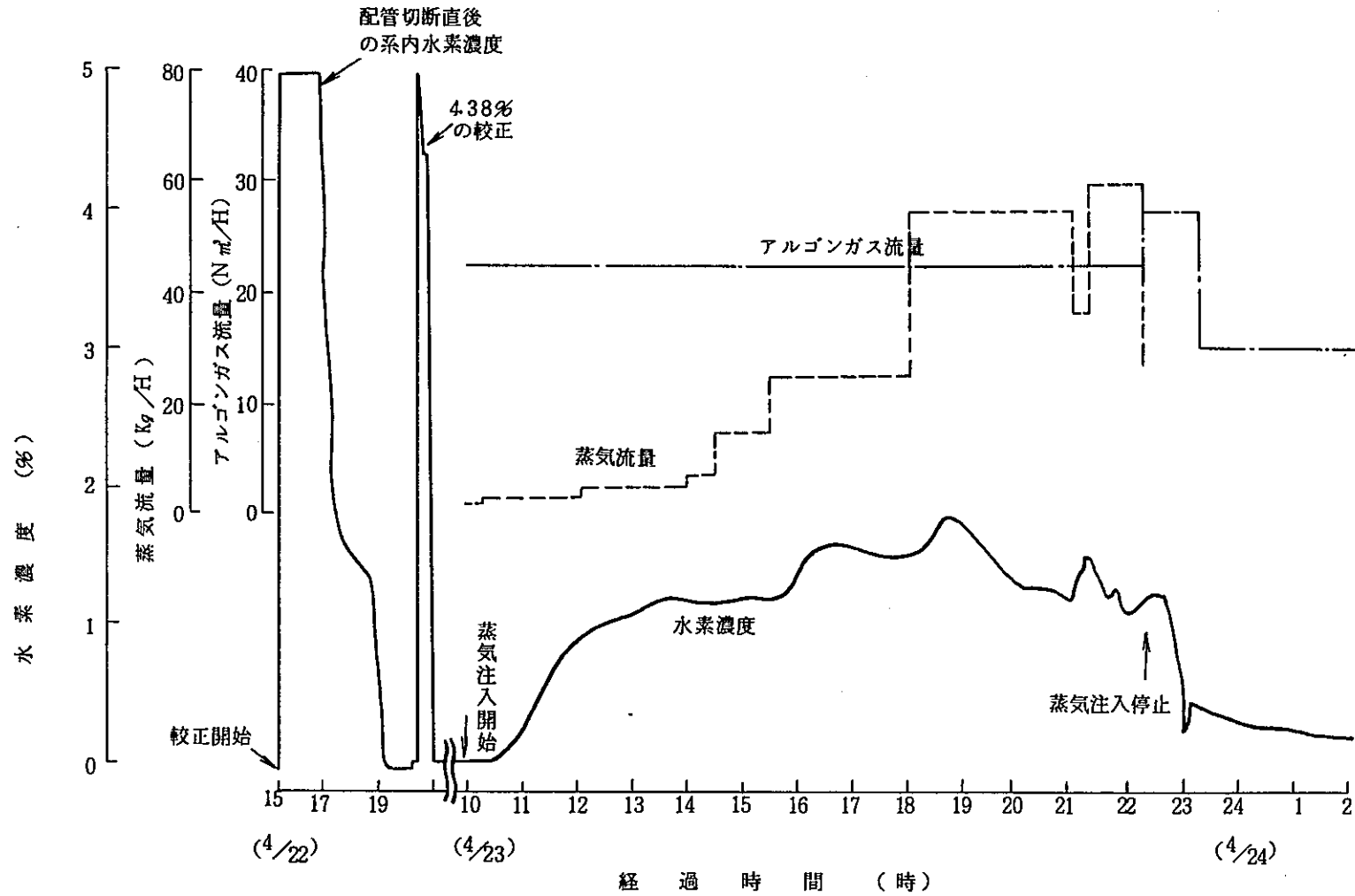


図 2. 2. 3 50MW 1号SG (E V) 洗浄経過 (1/2)

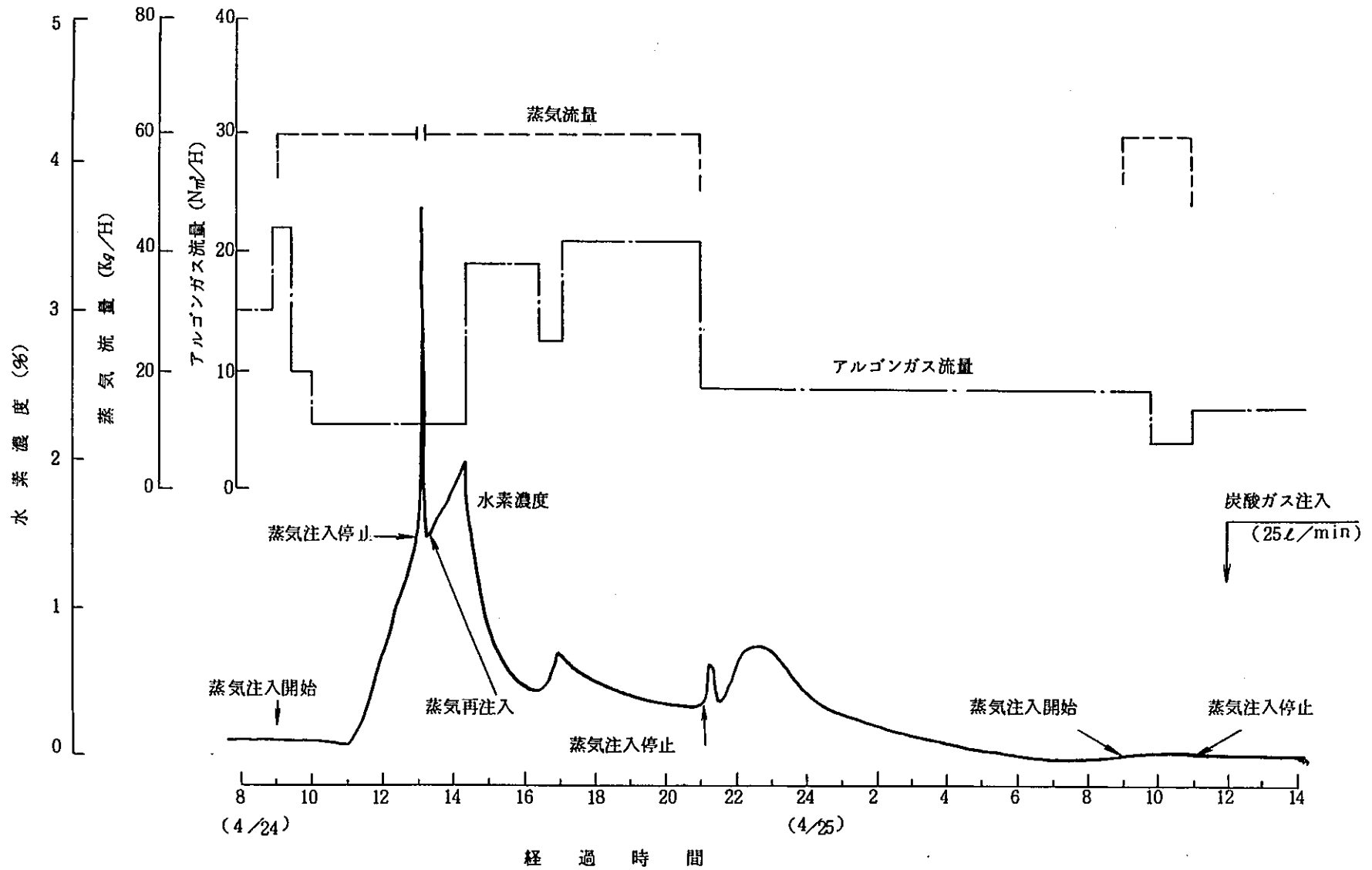
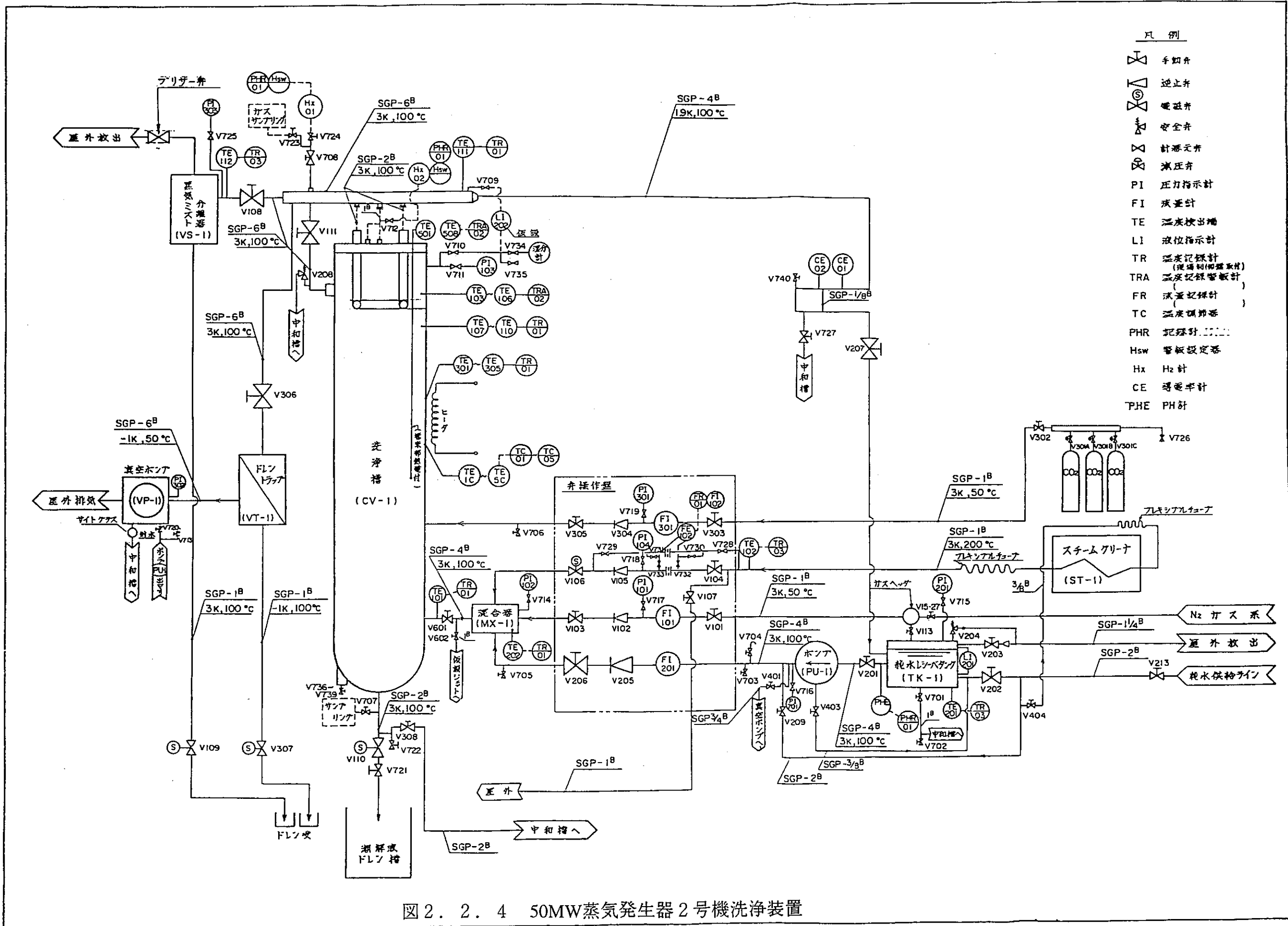


図 2. 2. 3 50MW 1号SG (E V) 洗浄経過 (2/2)



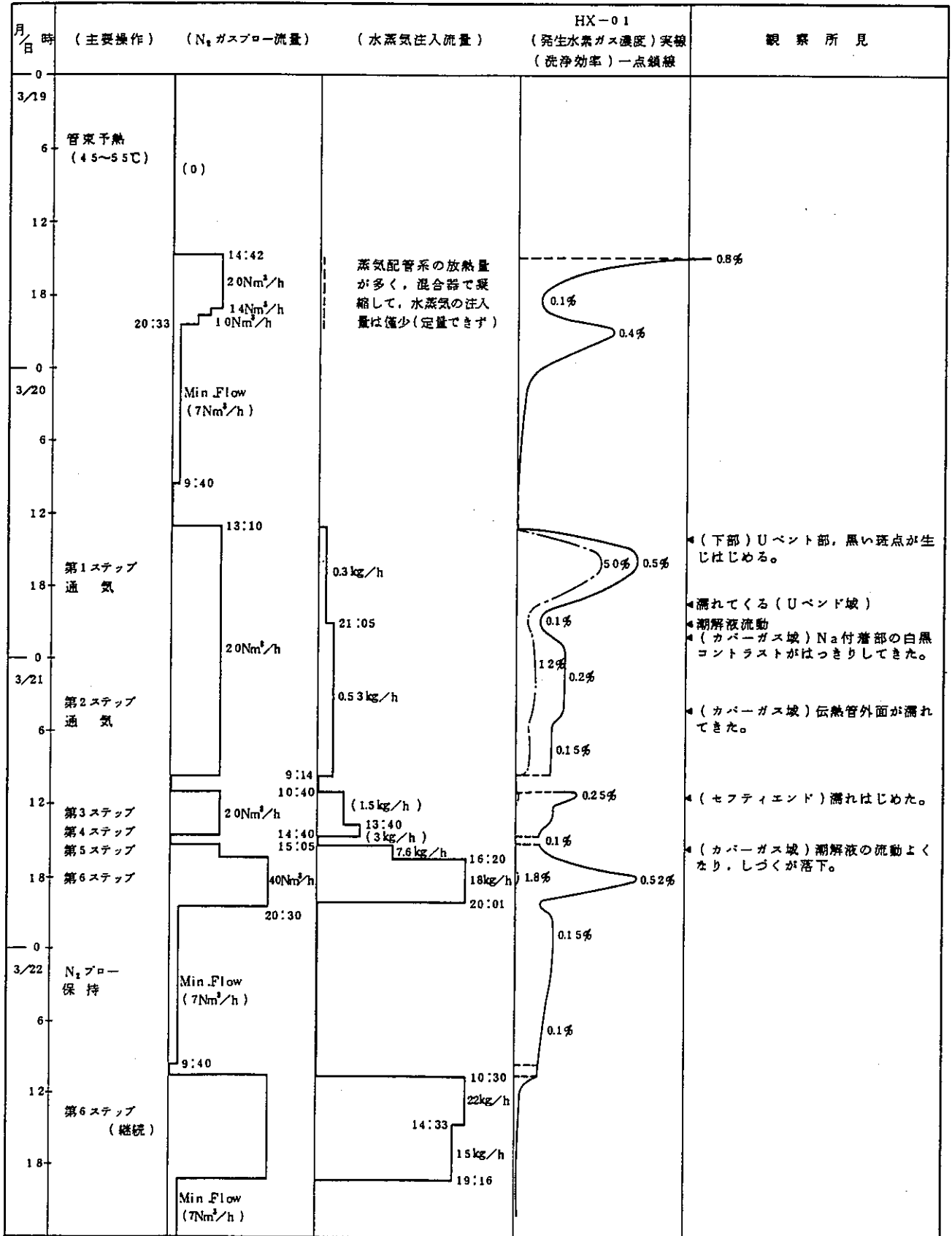


図 2. 2. 5 50MW蒸気発生器 2号機洗浄経過

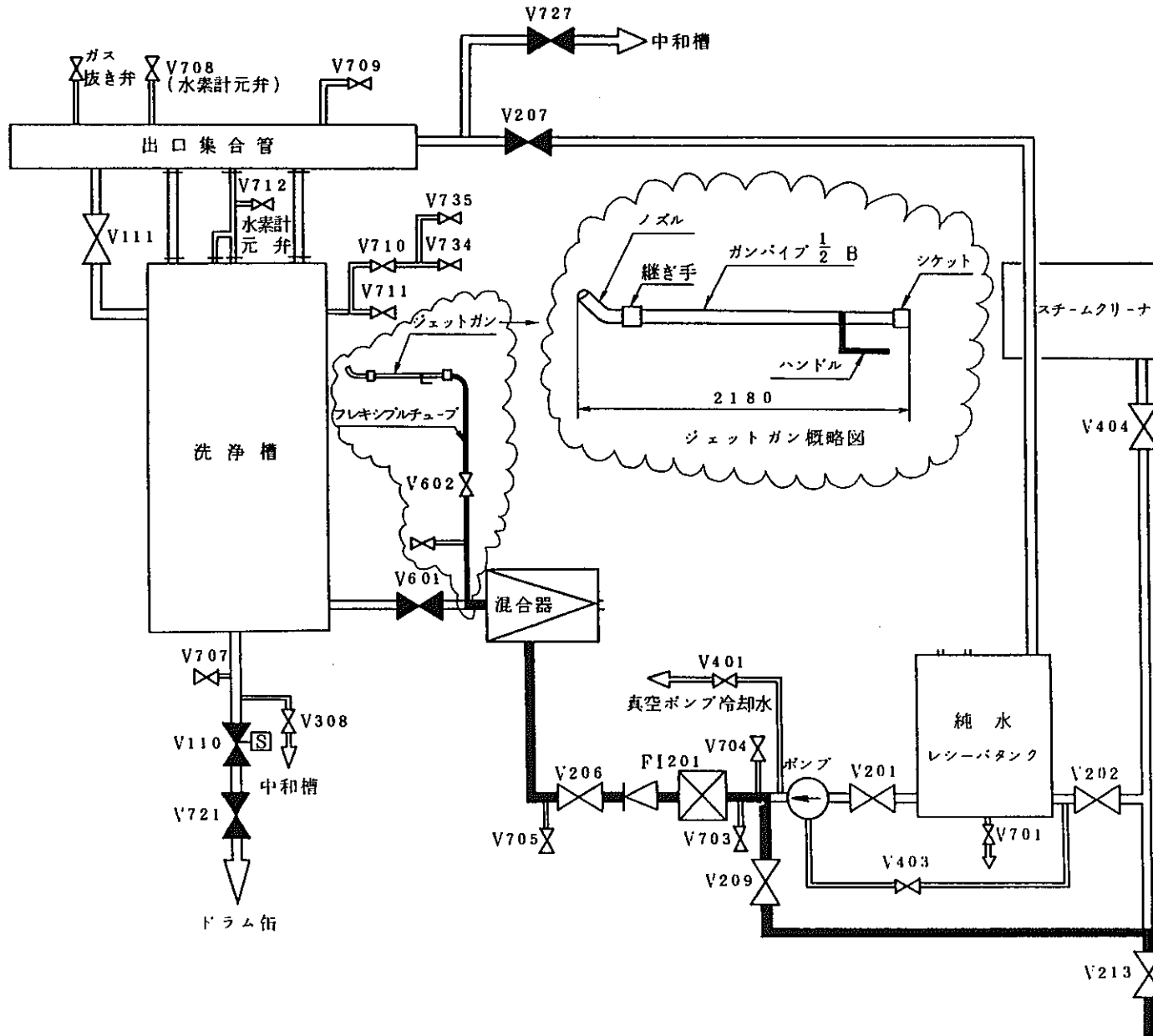


図 2. 2. 6 ジェットガン洗浄装置系統図

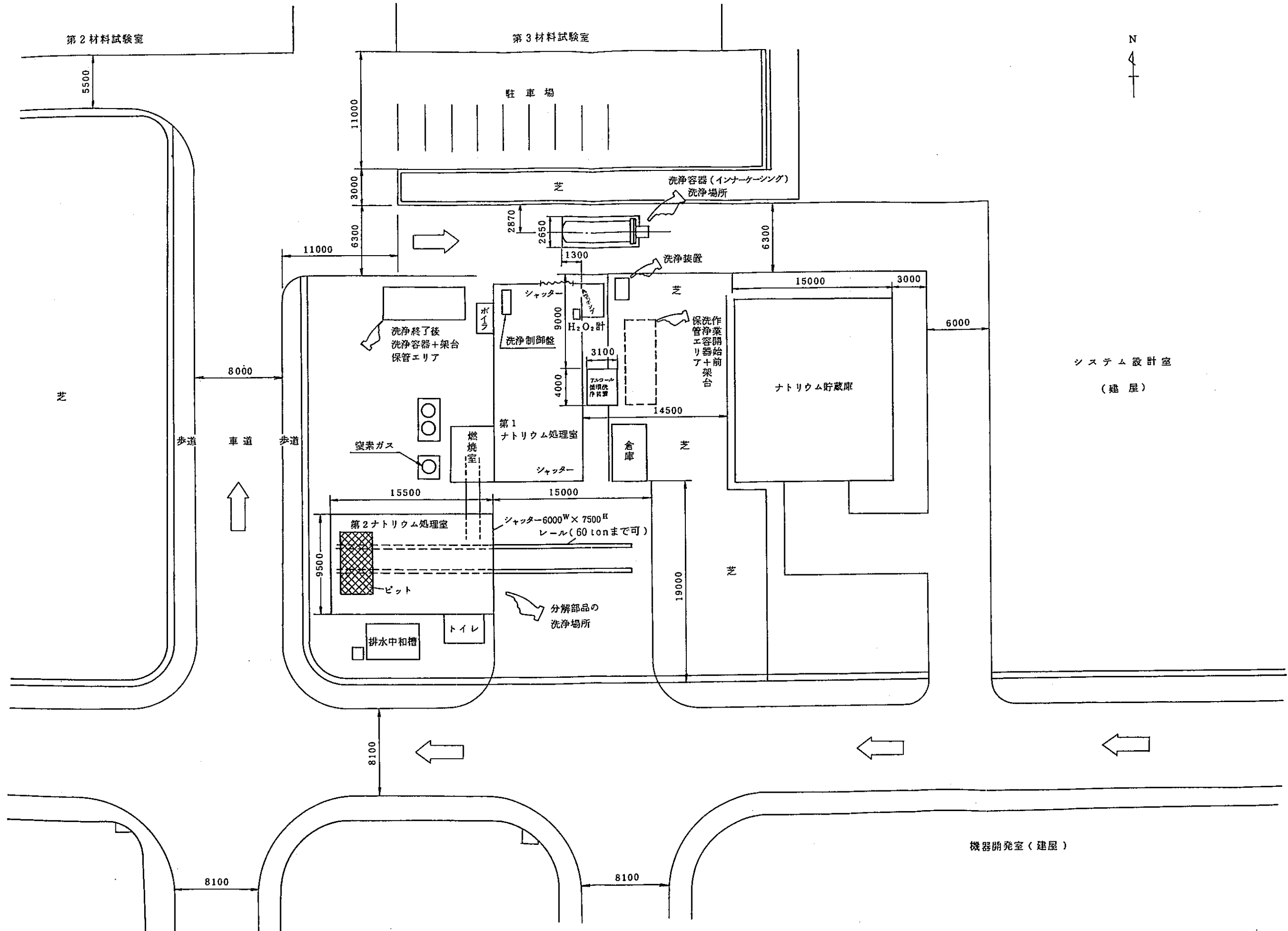
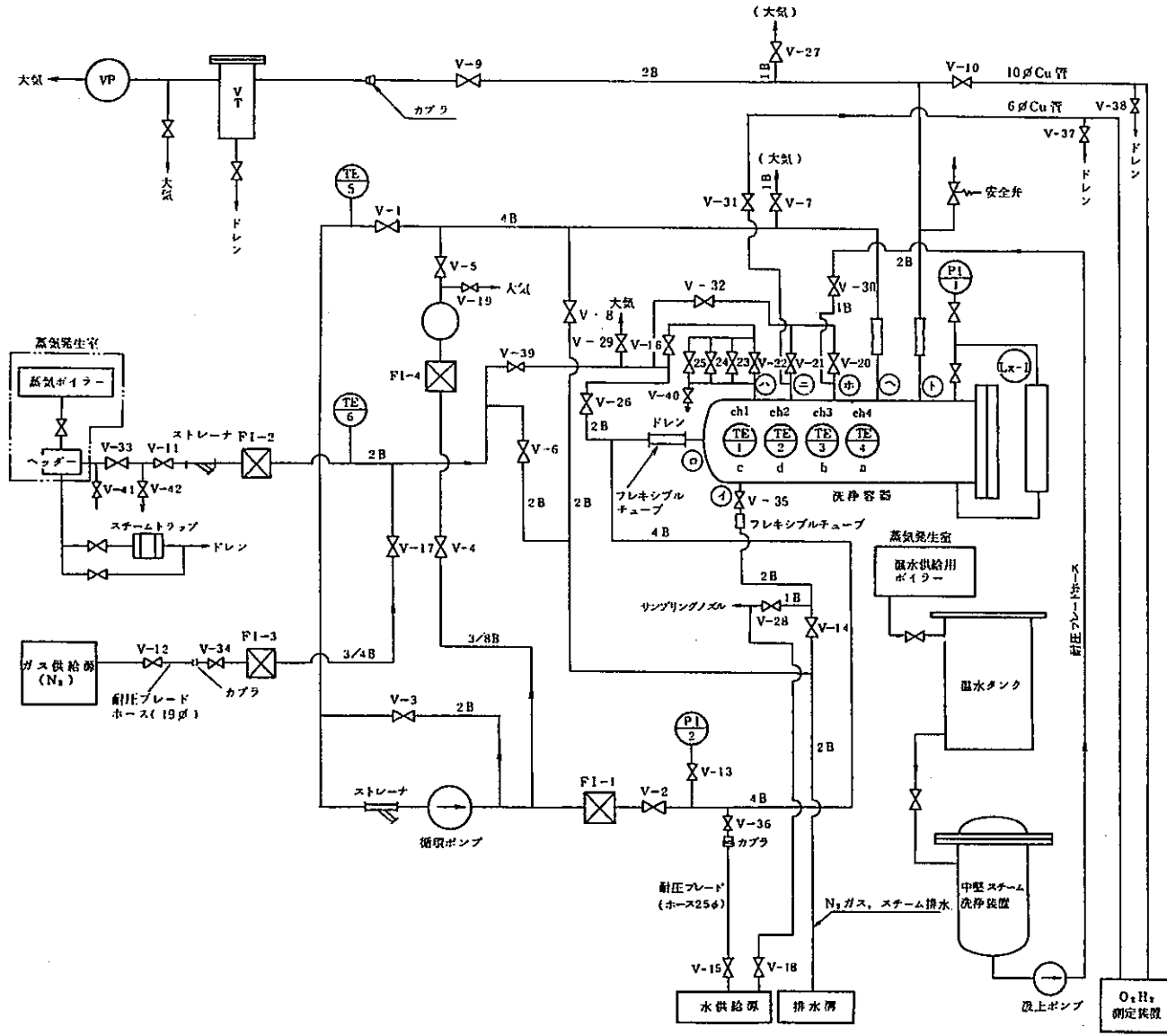


図2. 2. 7 ポンプ洗浄エリア配置計画図

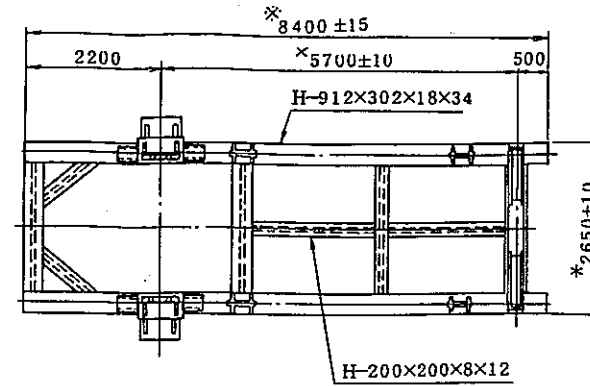
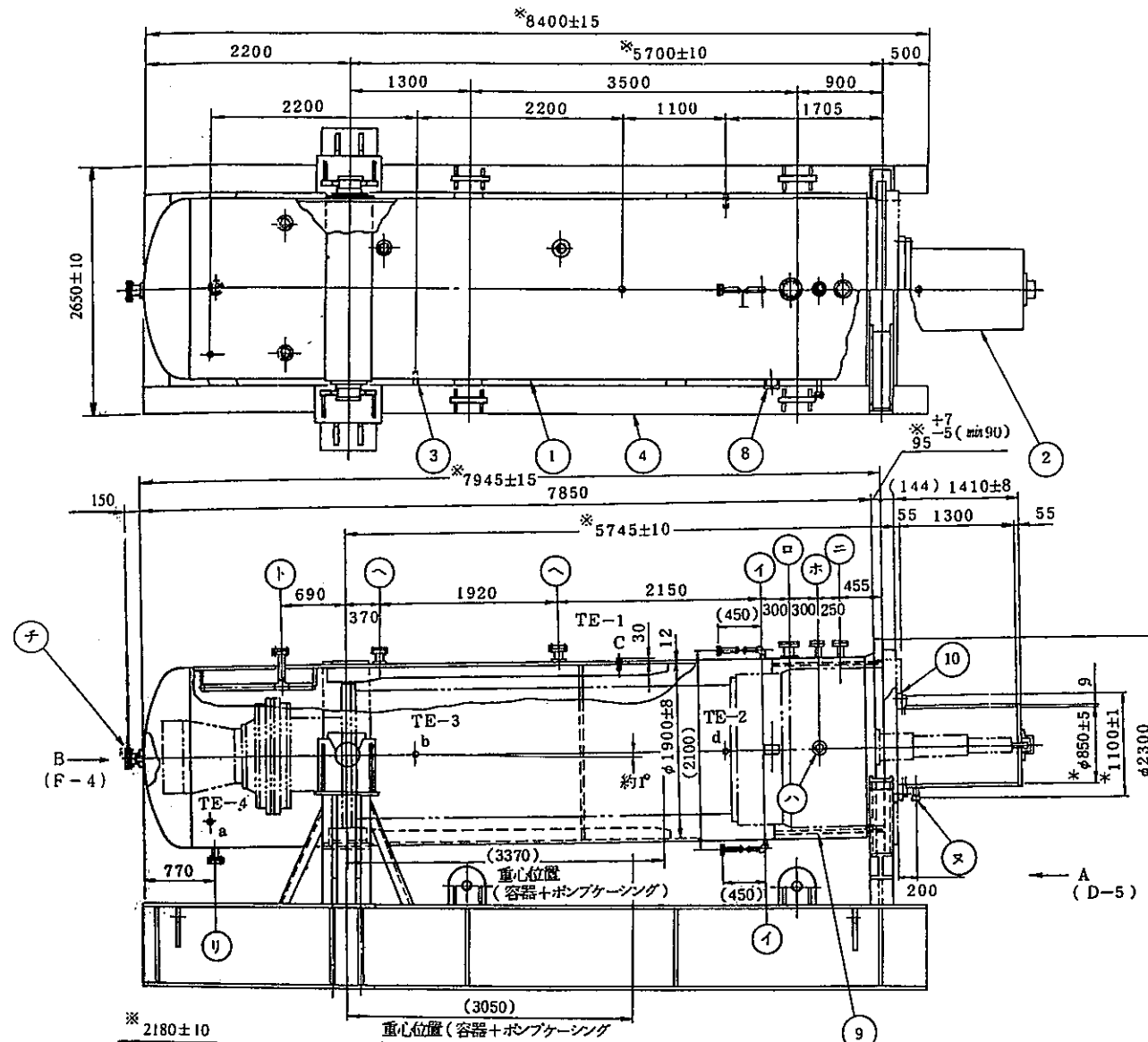


ノズル一覧表

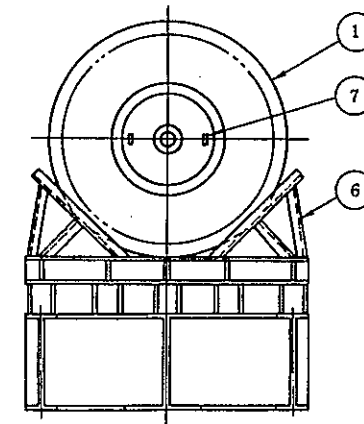
No	ノズル名称	管径	長さ
イ	排水ノズル	2 B	1
ロ	純水供給ノズル	4 B	1
ハ	スチーム供給ノズル	2 B	4
ニ	純水供給ノズル	3 B	1
ホ	純水供給ノズル	3 B	1
ヘ	循環水戻りノズル	4 B	1
ト	真空排気ノズル	2 B	1

No	図中/記号表示	名称	仕様
1	[Valve Symbol]	手動弁	材質-鋼鉄 3/8B
2		"	" " 3/4B
3		"	" " 1 B
4		"	" " 2 B
5		"	" " 4 B
6	[Check Valve Symbol]	ミニチェック弁	材質-黄銅
7	[Strainer Symbol]	ストレーナ	材質-鋼鉄 4 B
8		ストレーナ	" " 2 B
9	FI-1	流量指示計	流量0.12~1.2m³/min
10	FI-2	"	" 0.5~5 時/min
11	FI-3	"	" 0.1~1.0cl/min
12	FI-4	流量指示計	流量0~2ℓ/min
13	pH	pH計	pH 0~14
14	TE-1~6	熱電対	非接地型C A
15	LX-1	液面計	
16	PI-1.2	圧力計	
17	[Pump Symbol]	循環ポンプ	揚程~12m 流量~1000ℓ/min

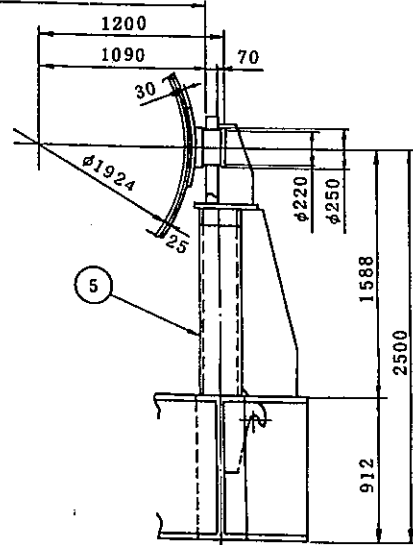
図 2. 2. 8 大型ポンプ洗浄装置系統図



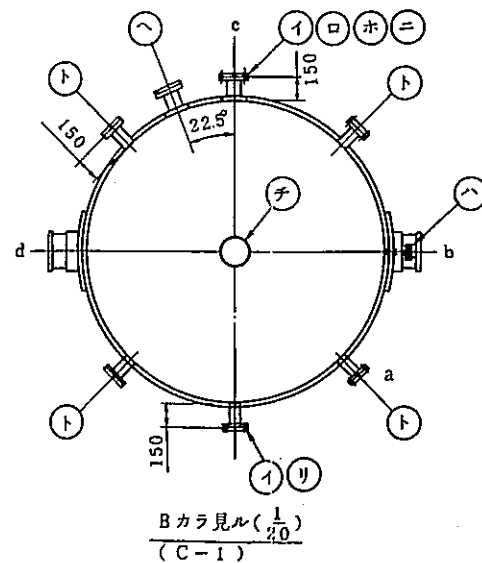
架台詳細 (1/50)



Aカラ見ル (1/50) (D-4)



軸受部詳細 (1/20)



Bカラ見ル (1/20) (C-1)

仕様	
設計温度	200 °C
設計圧力	内圧 5 kg/cm ² G
	外圧 1 kg/cm ² G
最高使用温度	95 °C
最高使用圧力	1.9kg/cm ² G
洗浄容器内容積	22 m ³

試験・検査(工場内): 洗浄容器

No	試験・検査		適用範囲	区分	備考(判定基準等)
	項目	細目			
1	材料検査	-	耐圧部=使用スル材料	○	ミルシートノ提出, 確認
2	員数検査	-	部品類	○	承認図との合致
3	外観検査	-	外観	Ⓜ	承認図との合致・有害ナ傷ノナイコトシマス。
4	寸法検査	-	主要部(*印部)	Ⓜ	承認図トノ合致
5	溶接部検査	液体浸透探傷試験	耐圧溶接部	○	通産省令第81号 第12条=ヨリマス。
		放射線透過試験	耐圧部突合せ溶接部	Ⓜ	フィルム顕立合, JISを3106 1級以上トシマス。
		開先検査		○	公差内デアルコトシマス。
6	耐圧試験	-	耐圧部	Ⓜ	6.25kg/cm ² G(気圧)=テ, 漏洩ノナイコトシマス。

試験・検査(工場内): 洗浄容器架台

No	試験・検査		適用範囲	区分	備考(判定基準等)
	項目	細目			
1	員数検査	-	部品類	○	承認図トノ合致
2	外観検査	-	外観	Ⓜ	承認図トノ合致, 有害ナ傷ノナイコトシマス。
3	寸法検査	-	主要部(*印部)	Ⓜ	承認図トノ合致
4	溶接部検査	液体浸透探傷試験	強度に係ワル溶接部	○	通産省令第81号, 第12条=ヨリマス。
5	組合せ検査	-	洗浄容器トノ組合せ操作試験	○	所定ノ機能ヲ有スルコトシマス。

注記

- : 社内検査(成績書提出要)
- Ⓜ: 動燃団殿御立会
- 図示中, *印ハ寸法検査箇所ヲ示シマス。
- 重量: 洗浄容器一式(11t但し, 盲蓋1.5tを含) ; 架台一式(11t)

ノズル一覧表

記号	ノズル名称	管径	員数	材質	備考
イ	差圧式液面計用ノズル	1/2B	2	SUS304	
ロ	循環水戻りノズル	4 B	1	"	
ハ	炭素ガス供給ノズル	1/2B	1	"	
ニ	真空排気ノズル	2 B	1	"	
ホ	検出器用ノズル	1 B	1	"	
ヘ	純水供給ノズル	3 B	2	"	
ト	スチーム供給ノズル	2 B	4	"	
チ	純水供給ノズル	4 B	1	"	
リ	排水ノズル	2 B	1	"	
ヌ	ドレンノズル	1 B	1	"	(カバー用)

番号	品名	員数	材質	備考
10	スベーサ	1	SUS304	
9	スカート	1	SUS304	
8	銘板	1	SUS304	
7	アイボルト	2	炭素鋼	
6	受台	1	"	
5	受台	1	"	
4	受台	1	炭素鋼	
3	熱電対用ウエル	4	SUS304	記号a~d
2	カバー	1	"	
1	洗浄容器	1	SUS304	

図2. 2. 9 洗浄容器及び架台外形図

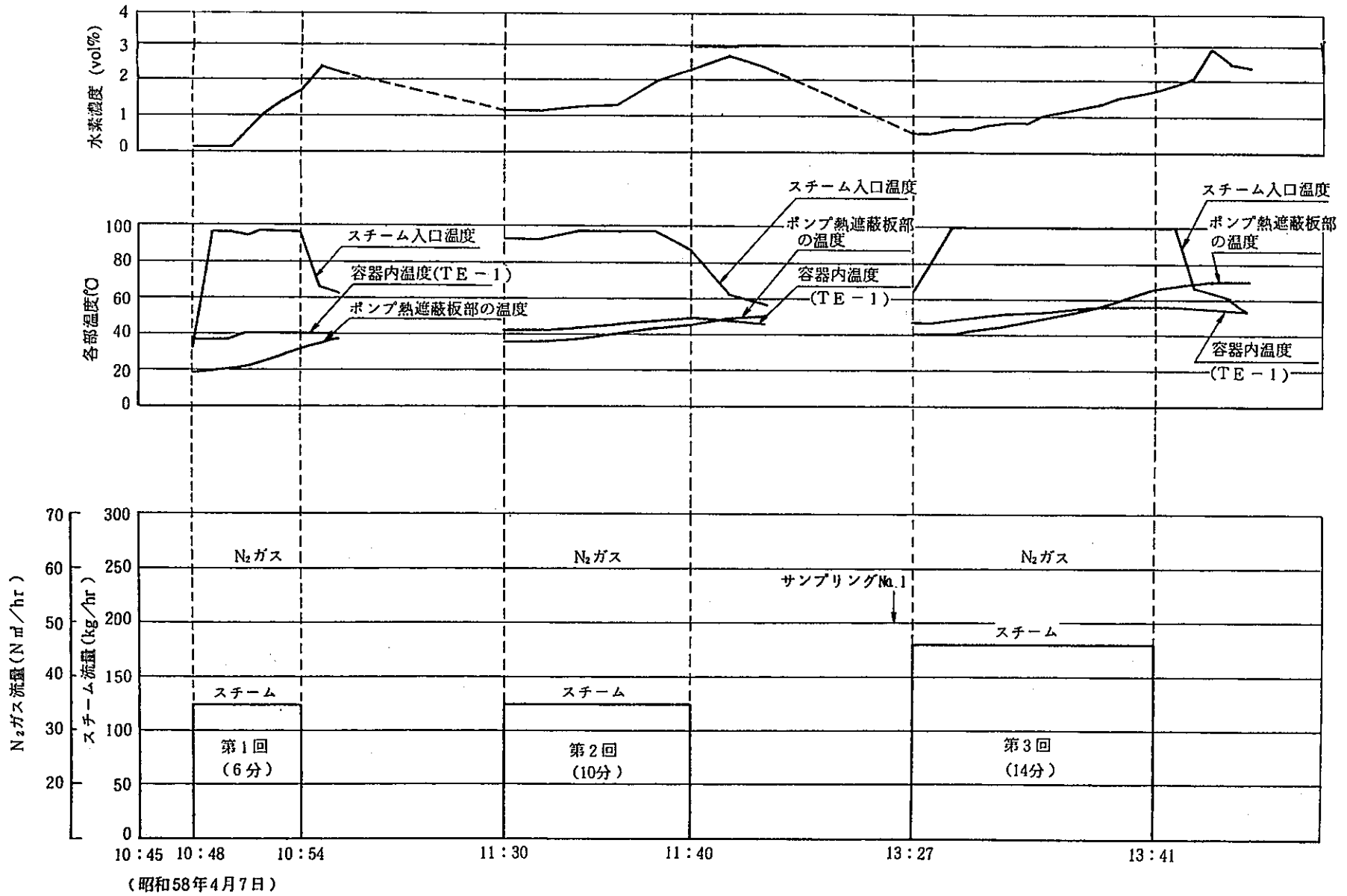


図 2. 2. 10 スチーム洗浄処理経過 (1/3)

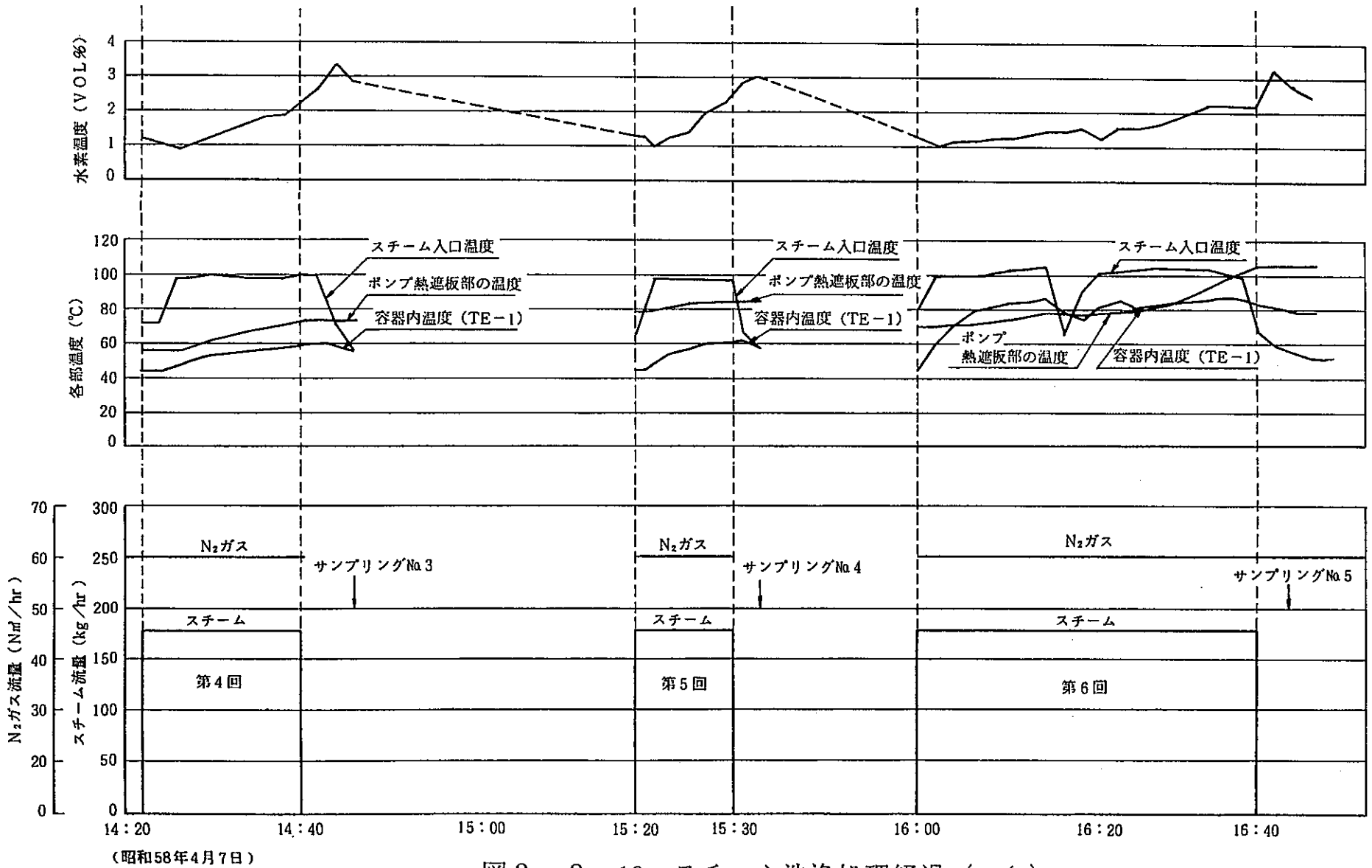


図 2. 2. 10 スチーム洗浄処理経過 (2/3)

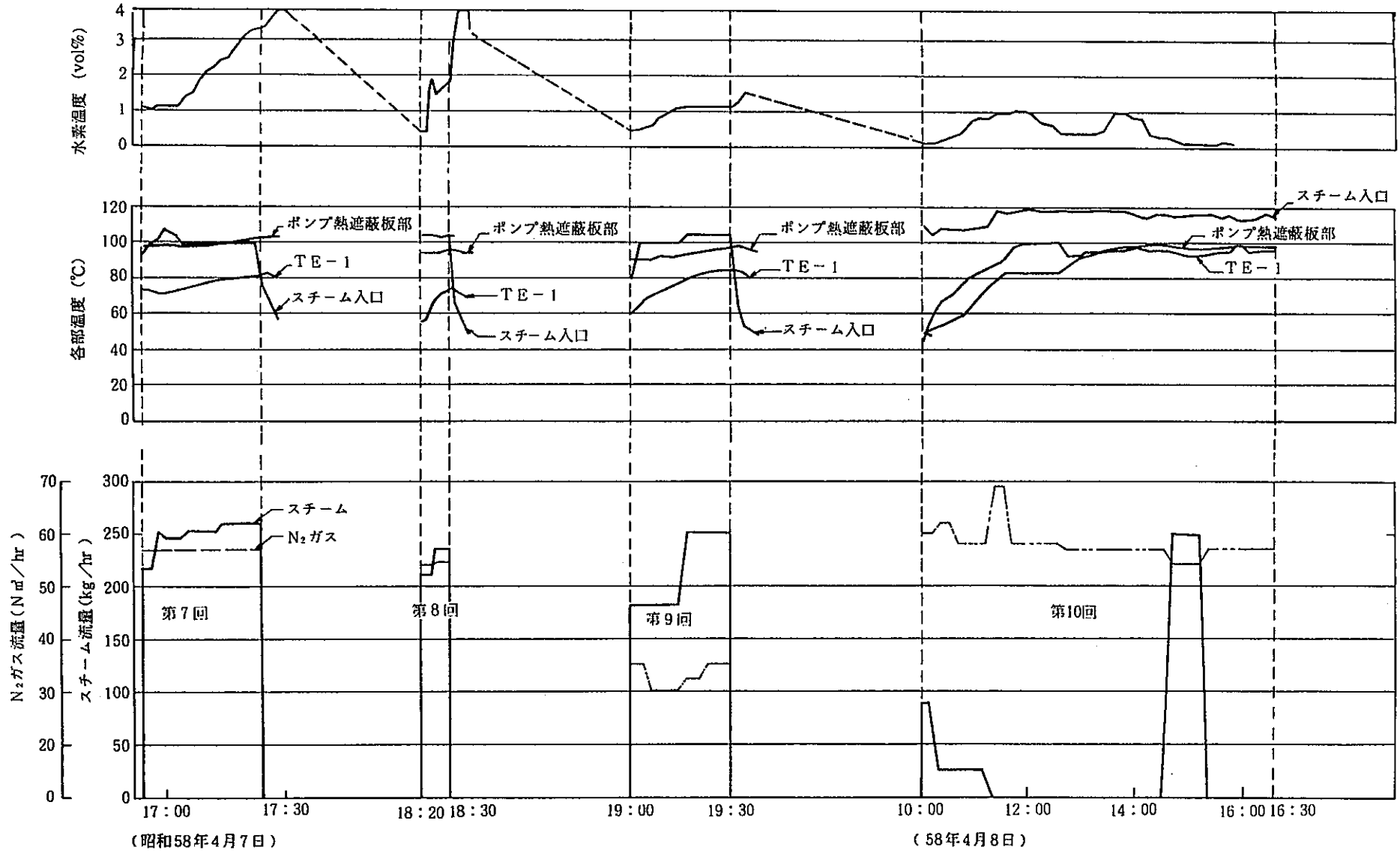
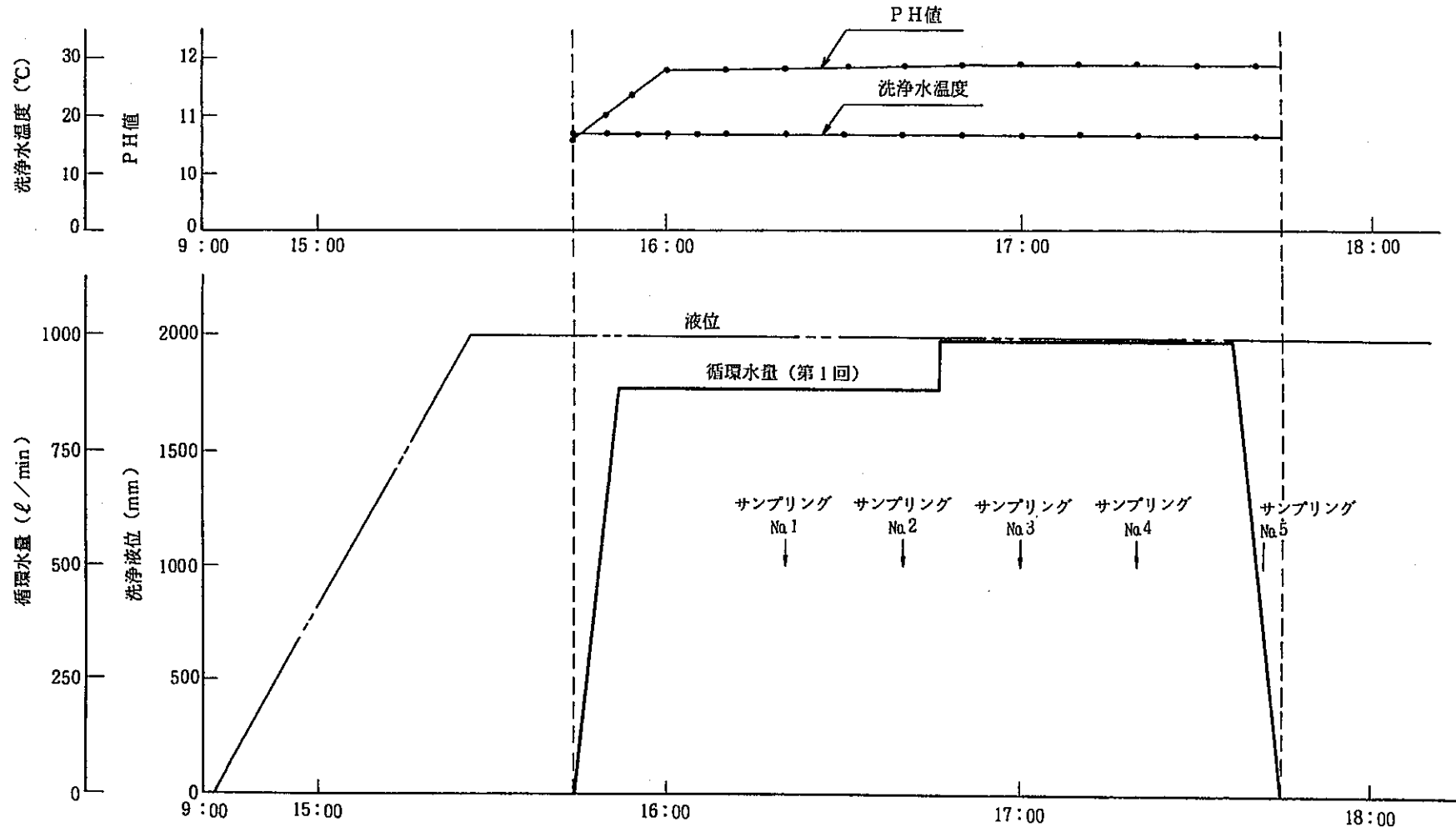


図 2. 2. 10 スチーム洗浄処理経過 (3/3)



(昭和58年4月9日)

図2. 2. 11 水洗浄処理経過 (1/2)

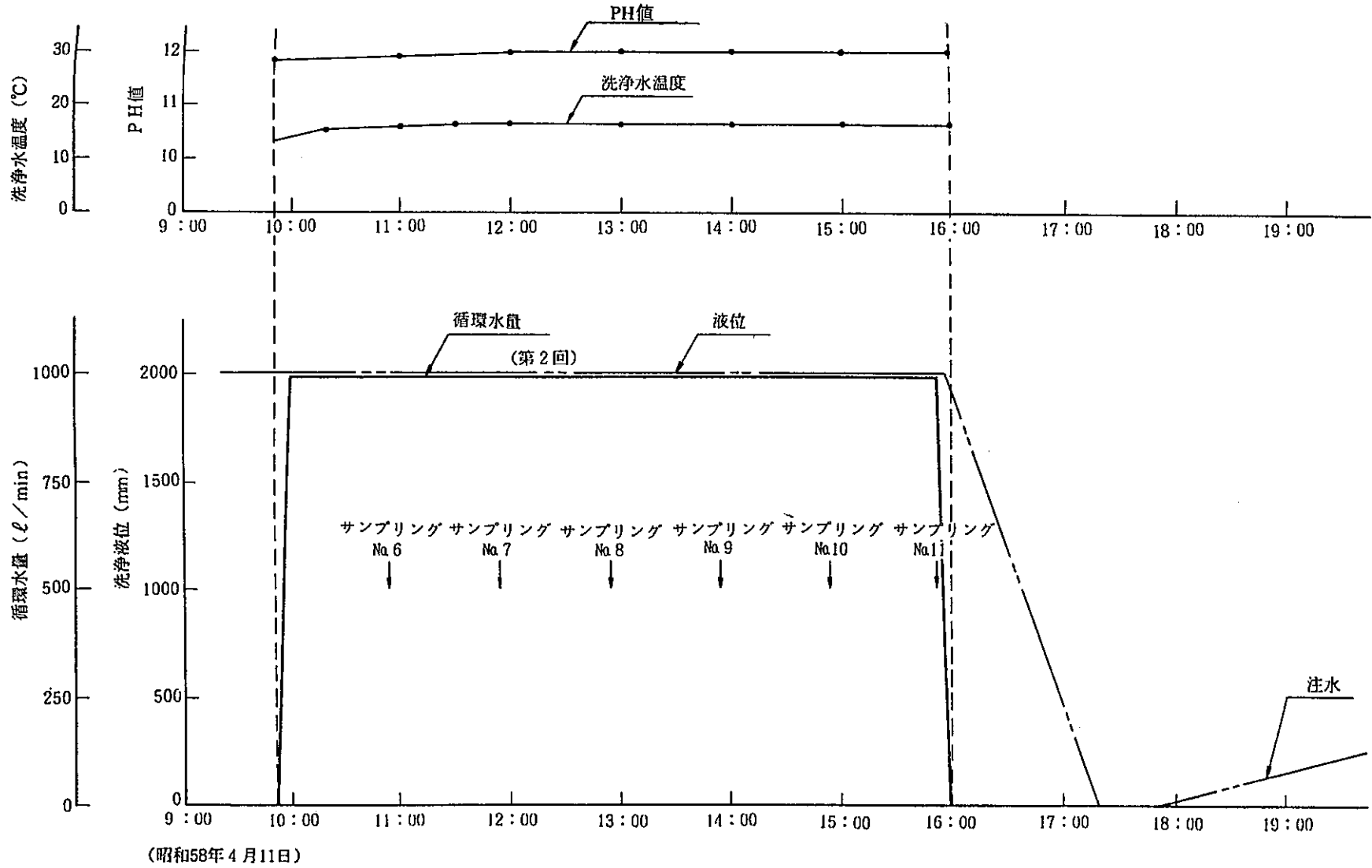


図 2. 2. 11 水洗浄処理経過 (2/2)

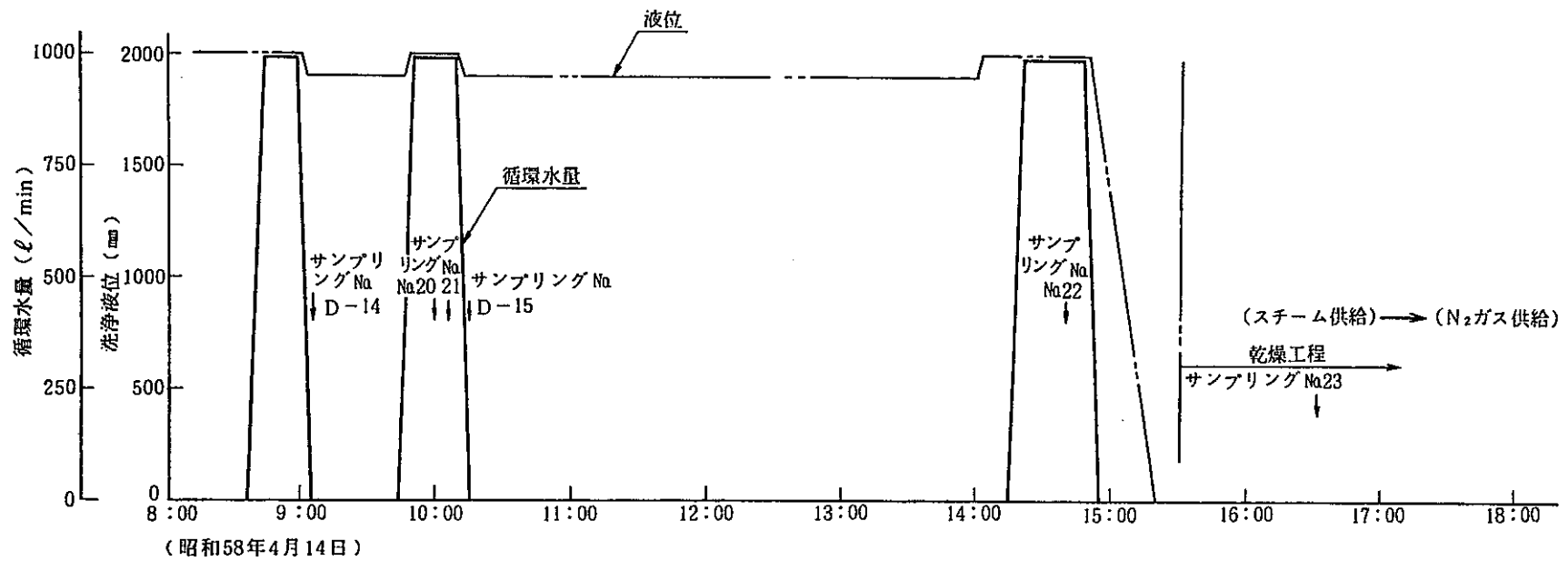
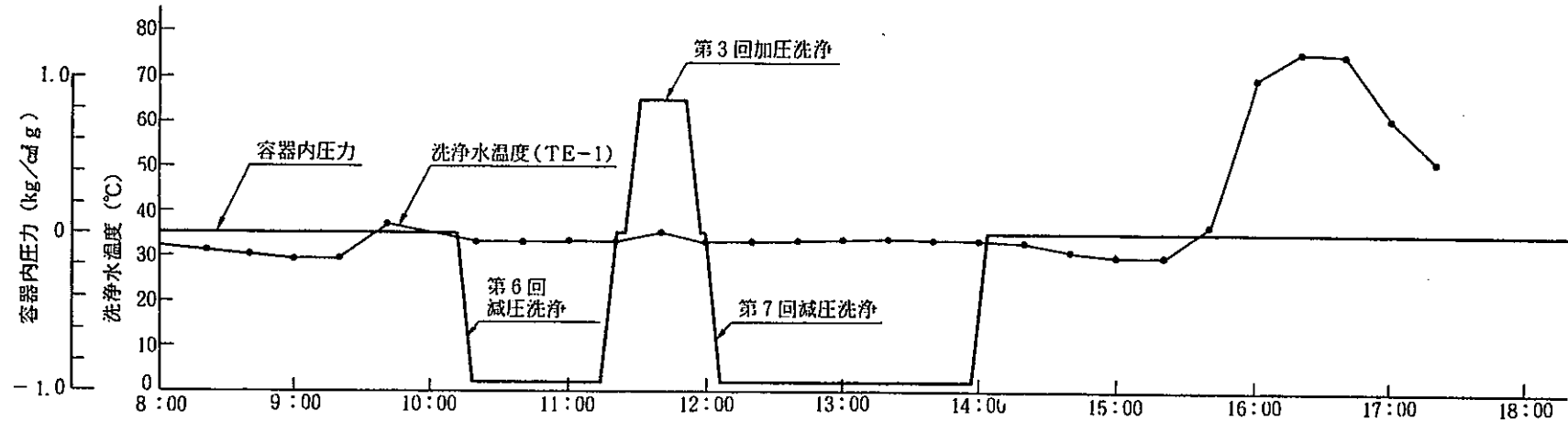


図 2. 2. 12 温水減圧沸騰洗浄処理経過 (1/3)

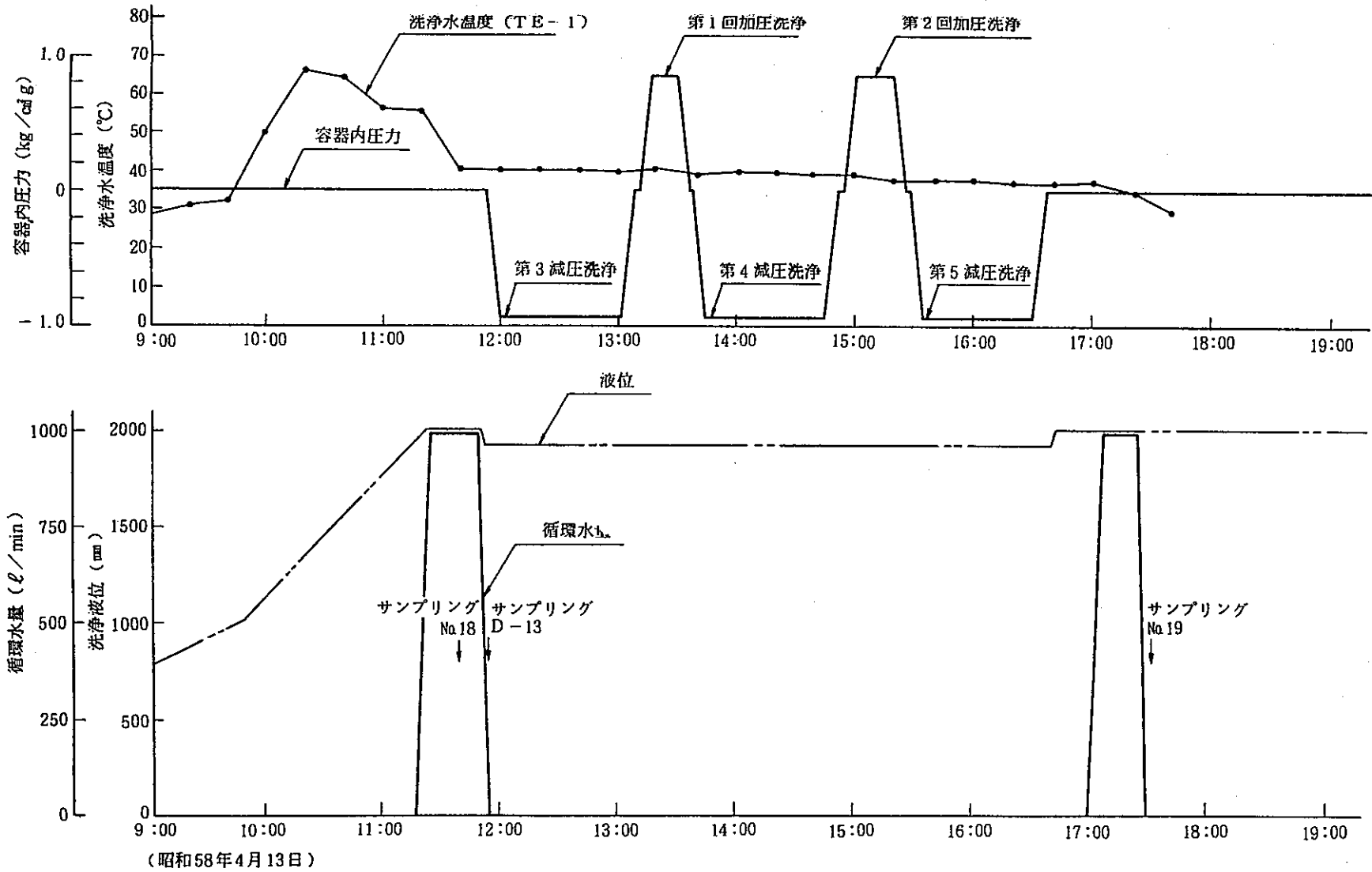


図 2. 2. 12 温水減圧沸騰洗浄処理経過 (2/3)

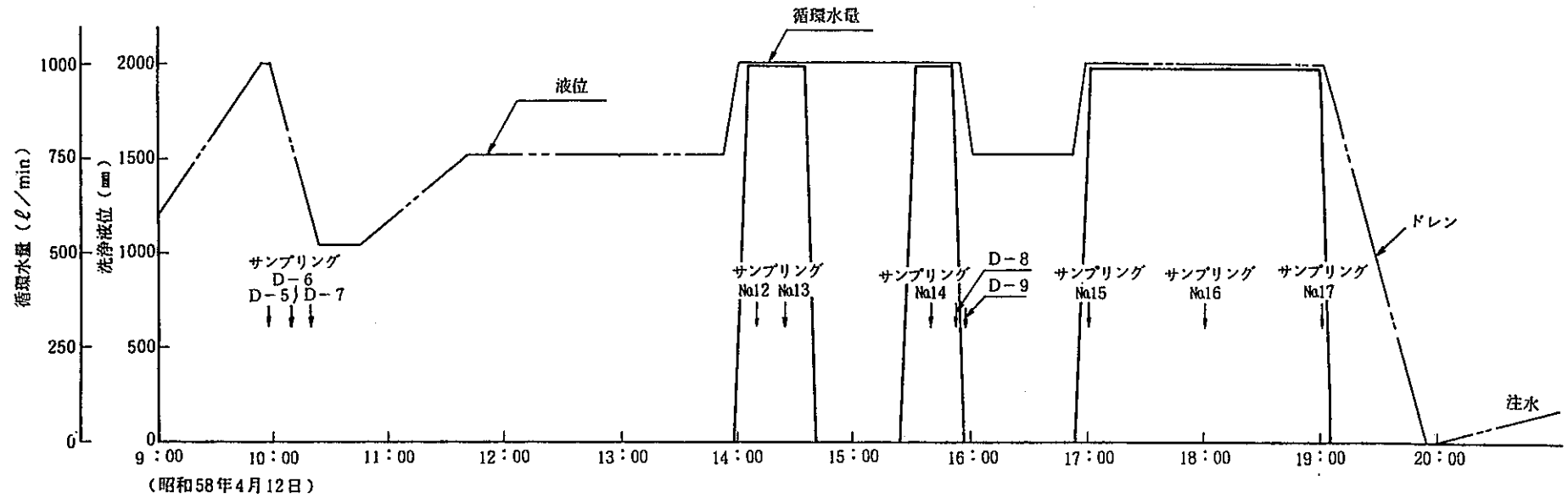
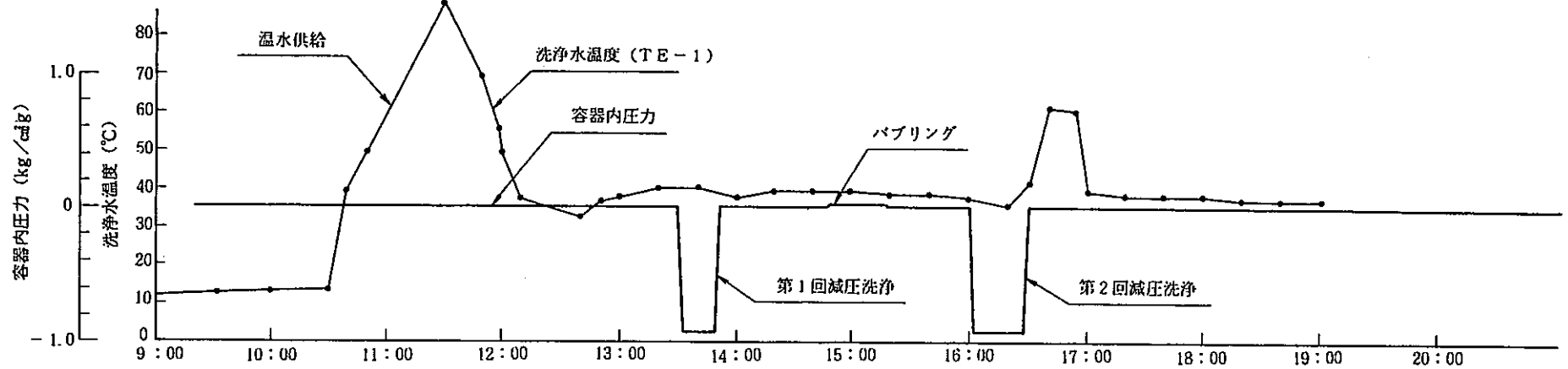


図 2. 2. 12 温水減圧沸騰洗浄処理経過 (3/3)

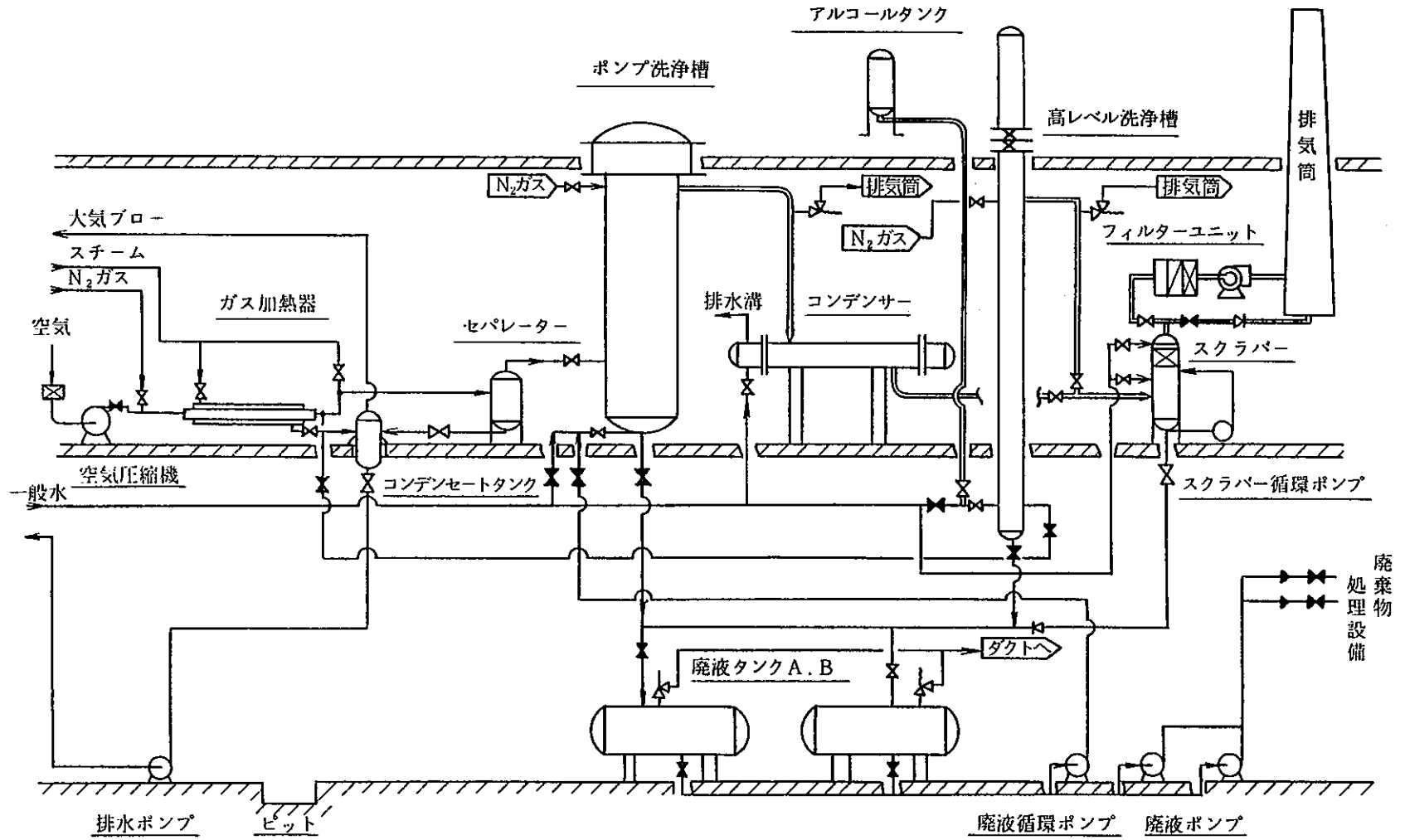
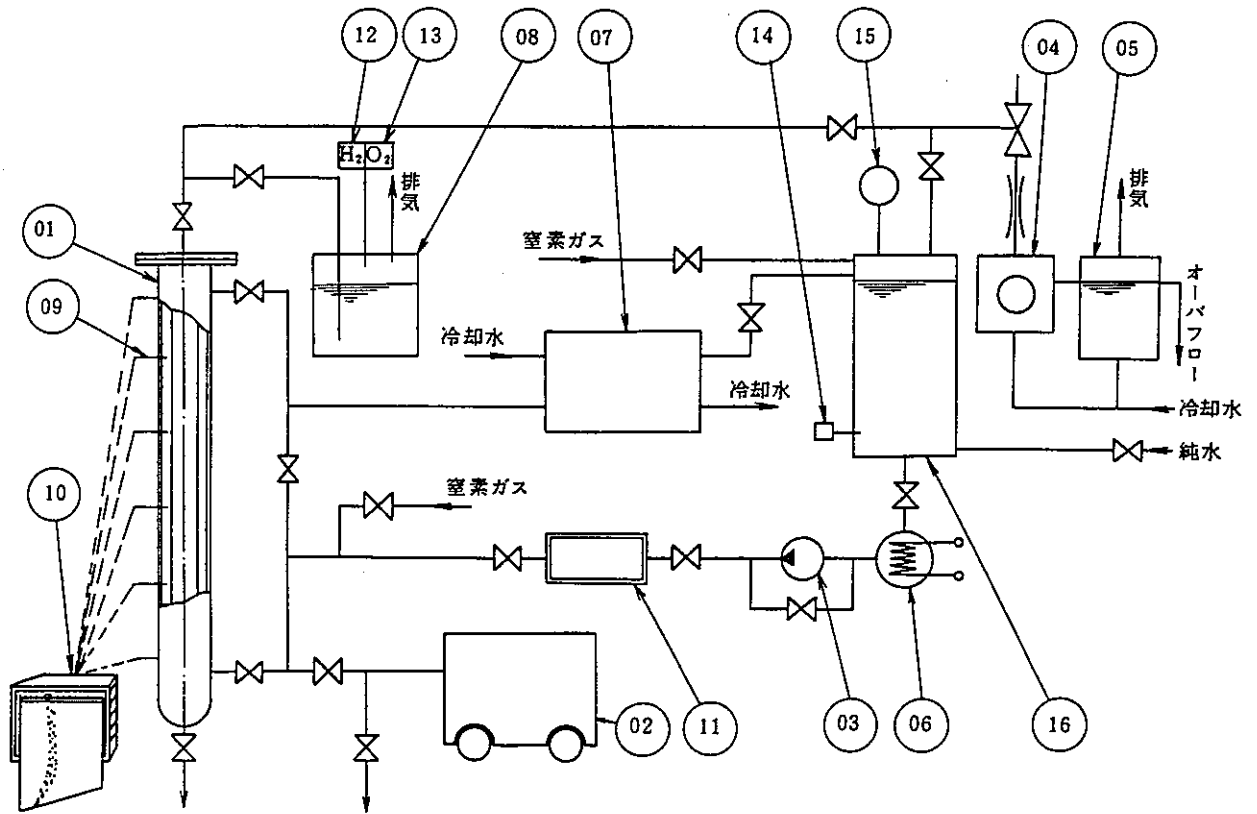
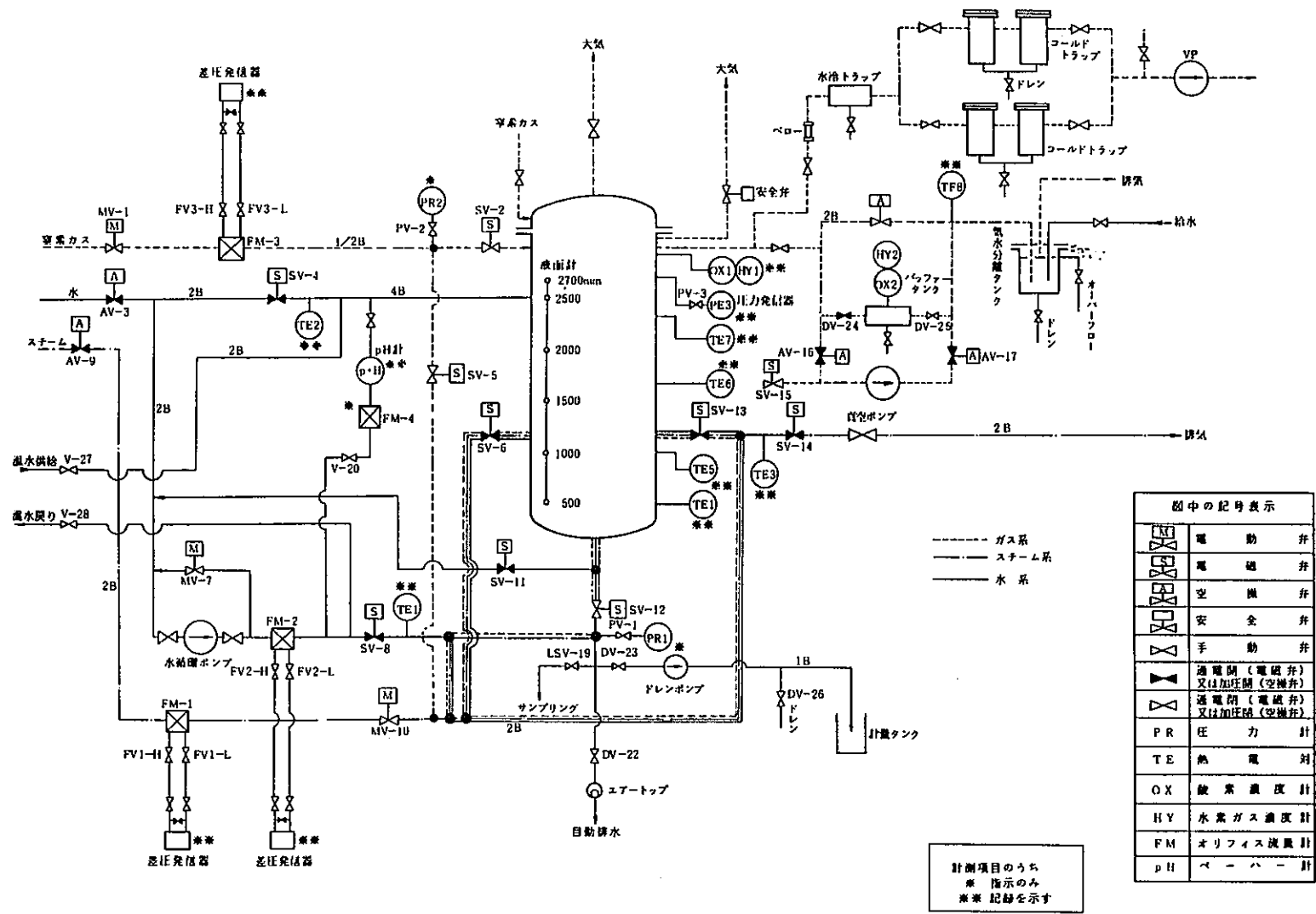


図 2. 2. 13 常陽洗浄設備



No	名 称	メ ー カ	主 な 仕 様
01	洗浄槽	(有)原子力技術サービス	本文中記載
02	スチーム発生器	(株)日産自動車販売	送水量 0 ~ 1 ℓ/min
03	純水循環ポンプ	(株)日機装	循環流量 90 ℓ/min 動力 1.5 kw
04	水封式真空ポンプ	(株)椋山工業	排気速度0~100 ^{m³} /h,到達真空度10Torr,動力2.2kw
05	冷却水オーバーフロータンク	(有)原子力技術サービス	容量 10 ℓ
06	加熱器	(株)富岡産業	温度 常温 ~ 80℃ 動力 6 kw
07	冷却器	(有)原子力技術サービス	交換熱量 10 Kcal / sec
08	気水分離器	(有)原子力技術サービス	容量 200 ℓ
09	熱電対	(株)助川電気	CA ^T /C. φ 1.6 0℃ ~ 300℃
10	打点温度記録計	(株)大倉電気	6打点式 0 ~ 600℃
11	流量計	東京フローメータ研究所	20 ~ 230 ℓ/min
12	水素濃度計	(株)理研工業	0 ~ 4 Vol %
13	酸素濃度計	(株)理研工業	0 ~ 25 Vol %
14	電導度計	(株)大倉電気	50 ~ 5000 μS/cm
15	圧力計	(株)長野計器	-1 ~ 1 kg/cm ²
16	純水タンク	(株)日立設備工業	容量 100 ℓ

図 2. 2. 14 模擬燃料集合体洗浄装置



図中の記号表示

	電 動 弁
	電 磁 弁
	空 機 弁
	安 全 弁
	手 動 弁
	通電弁 (電磁弁) 又は加圧弁 (空機弁)
	通電閉 (電磁弁) 又は加圧閉 (空機弁)
PR	圧 力 計
TE	熱 電 対
OX	酸素濃度計
HY	水素ガス濃度計
FM	オリフィス流量計
pH	ペーハー計

計測項目のうち
* 指示のみ
** 記録を示す

図 2. 2. 15 ナトリウムポンプ洗浄装置

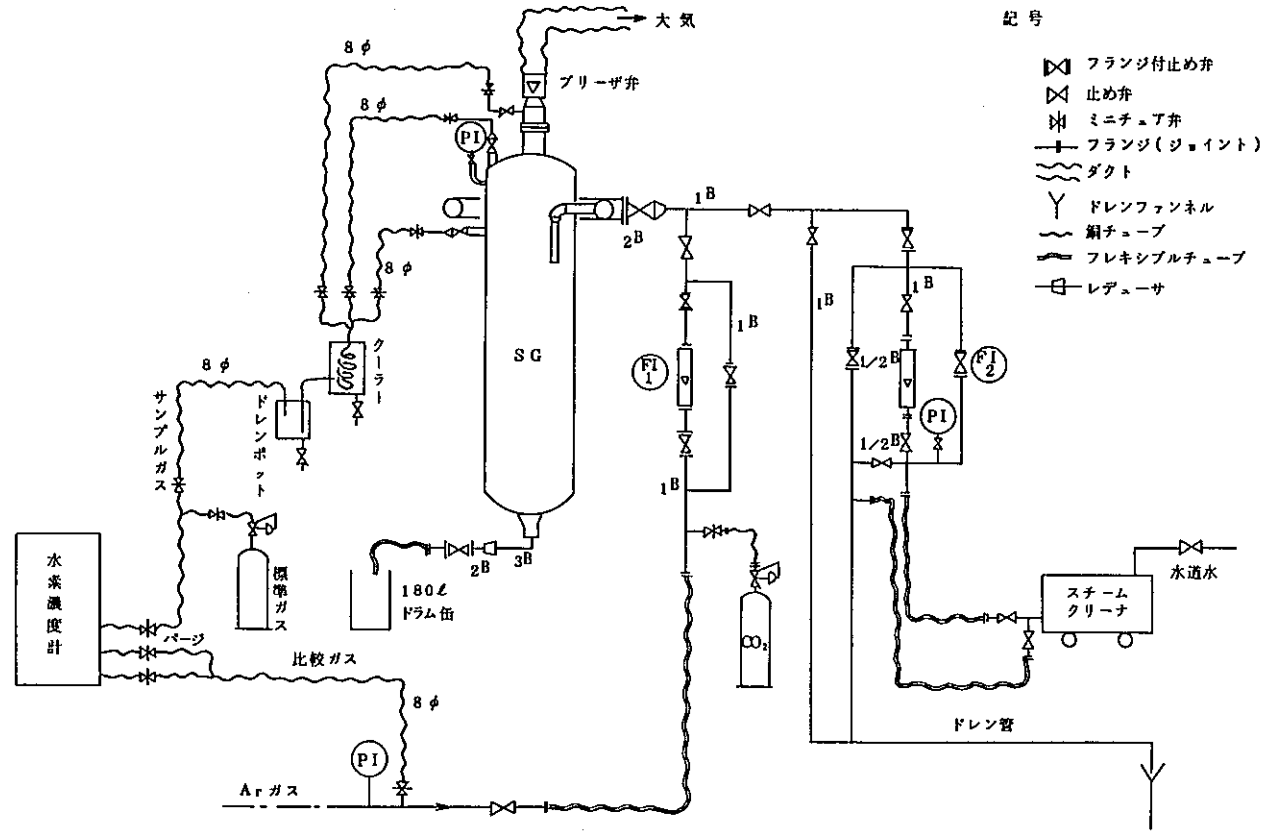
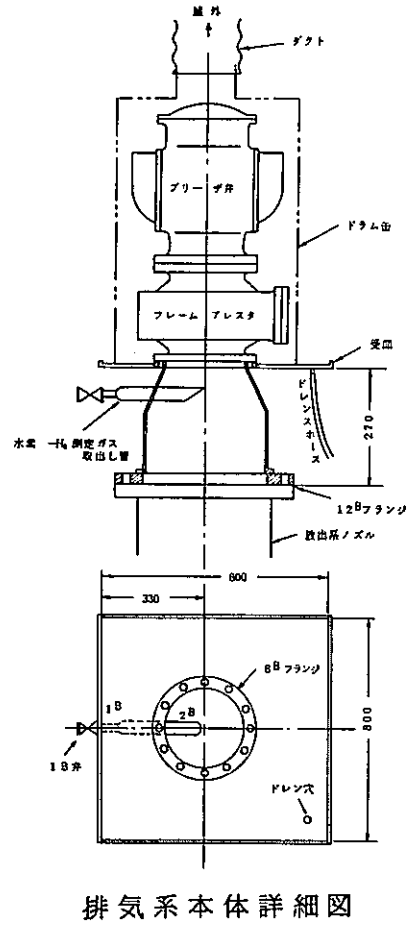


図 2. 2. 16 第2次1MWSG洗浄装置

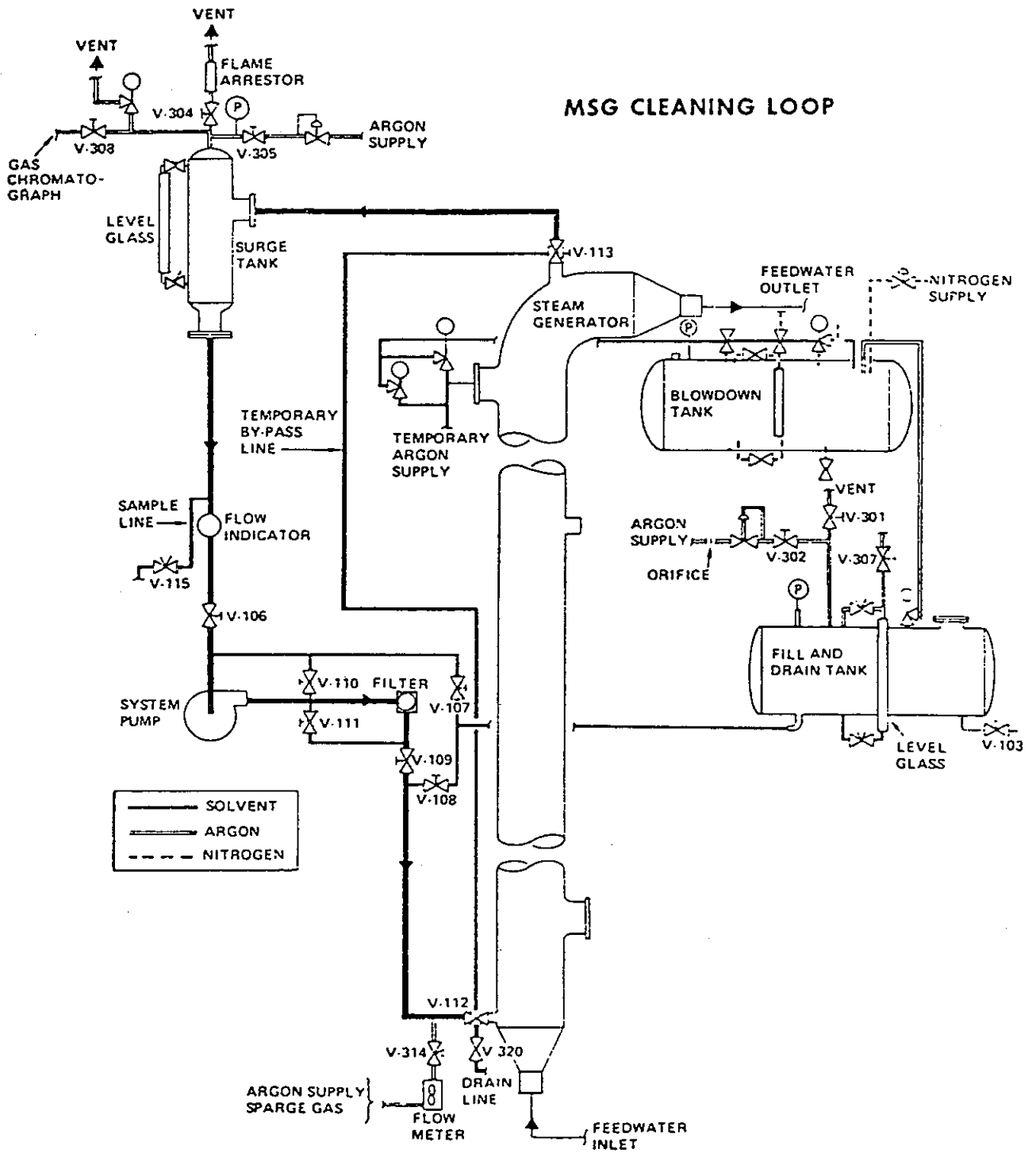


図 3. 1. 1 MSGアルコール洗浄装置

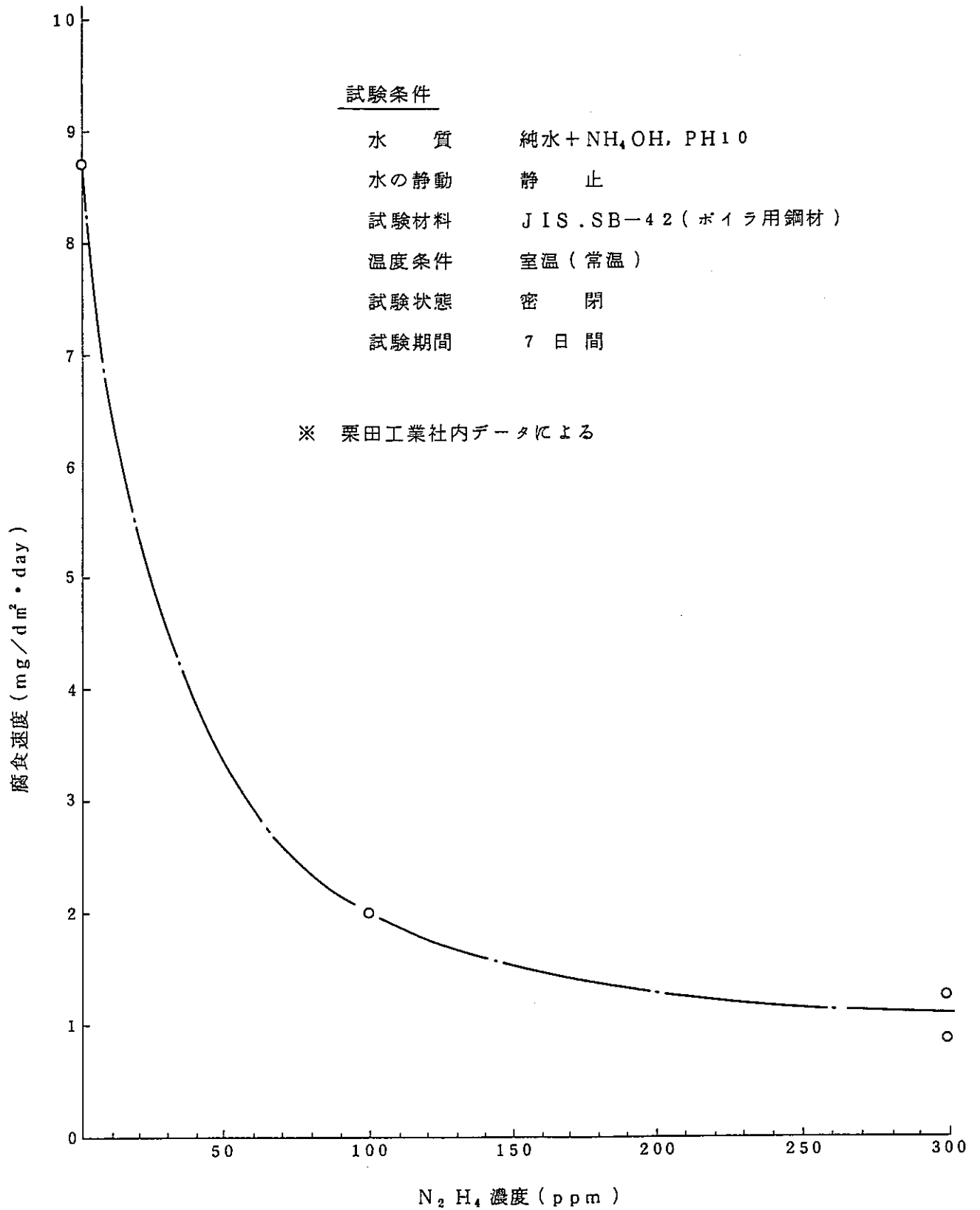


図4. 2. 1 ヒドラジンのボイラ用鋼材に対する防食効果

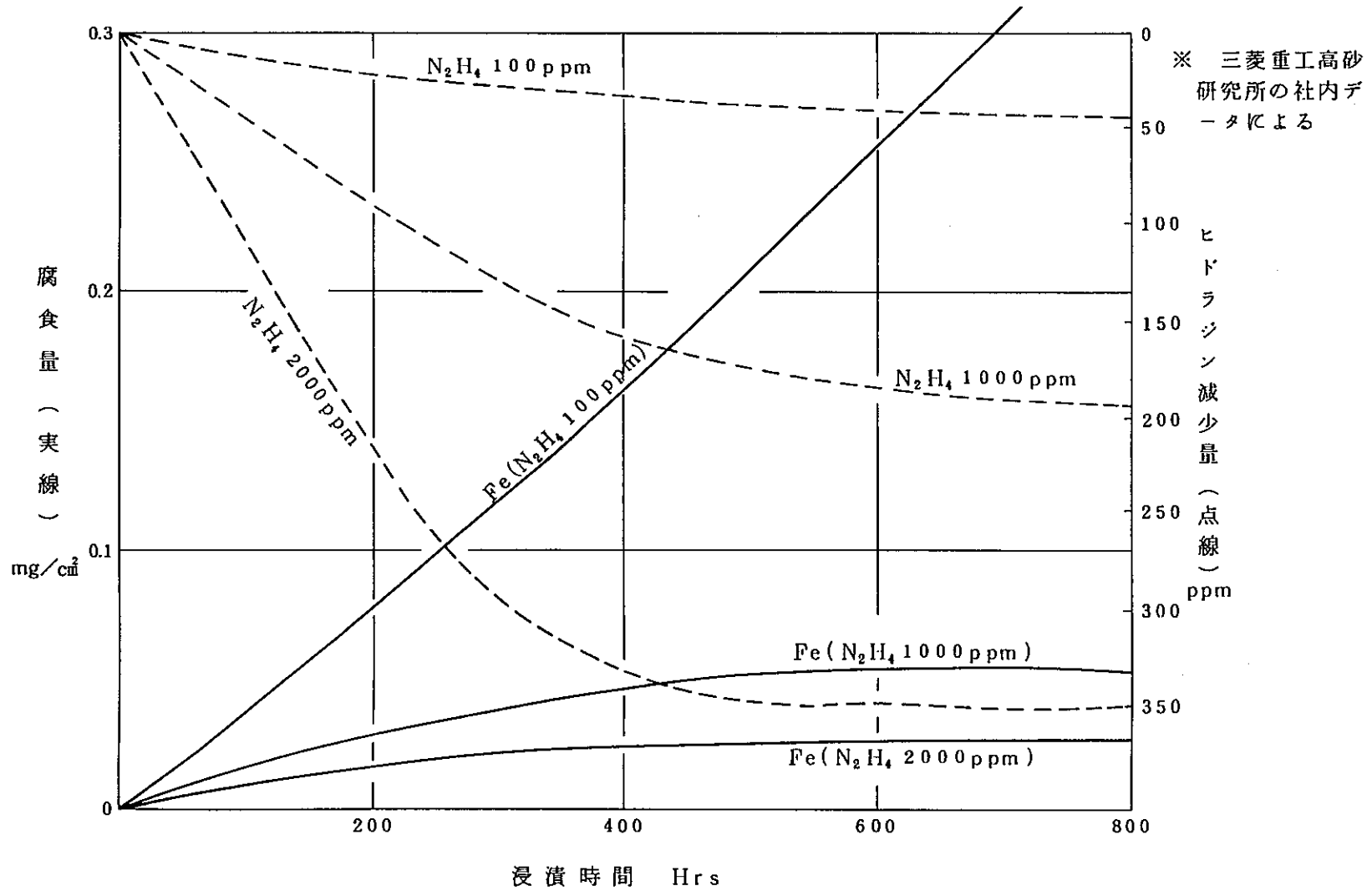


図4. 2. 2 ヒドラジン水溶液中における炭素鋼試験片の腐食減量とヒドラジン減少量

付録－1

応力腐食割れについて

(1) 洗浄における材料への影響

図-1に海外、図-2に国内⁽¹⁾におけるアルカリ応力腐食割れ領域線図を示す。

なお、アルカリ応力腐食割れについての詳細な調査成果は、PNC報告書⁽²⁾にて報告されているのでそちらを参考にして頂きたい。

①オーステナイト系ステンレス鋼のアルカリ腐食

SUS304及びSUS316の腐食速度を図から概算すると、100℃でおよそ0.1mm/y、300℃で2mm/y、500℃で5mm/yとなる。

②オーステナイト系ステンレス鋼のアルカリ腐食割れ

- ・フェライト鋼に比べると耐SCC特性が劣る。
- ・SUS304は、低濃度（約5～40%）NaOHでも約180℃以上の湿度でSCCを発生しうる。
- ・高濃度（約40%以上）中では、約60℃以上でSCCを発生しうる。
- ・SUS316鋼は、低濃度領域では、SUS304より耐SCCが良好であるが、高濃度領域では大差ない。

③フェライト鋼（21/4Cr-1Mo鋼）のアルカリ腐食割れ

- ・低濃度中（10%以下）では温度に関わらずSCCは発生しない。
- ・高濃度領域中でも約100℃以上の温度で耐力以上の応力が存在しないと発生しない。

④フェライト鋼（21/4Cr-1Mo鋼）のアルカリ腐食

- ・NaOH濃度が10%～50%程度の約100℃以下の腐食速度は約0.5mm/y以下である。
- ・150℃以上になると濃度によらず腐食速度は、1.25mm/y以上と大きくなる。

(2) フェライト鋼（21/4Cr-1Mo鋼）の洗浄時の発錆及び腐食について

①50MWSG1号機⁽³⁾

- ・蒸発器伝熱管（STBA24）の管外表面において、SEM、金属組織検査によって表面の肌荒れがほとんど全領域に亘ってみられた。
- ・肌荒れの一部には、最大深さ約50μmのピッチング認められた。
- ・ピッチングの生成原因として、高濃度NaOHの環境化での腐食の可能性が高い。

②50MWSG2号機⁽⁴⁾

- ・2次洗浄における純水中の溶存酸素によると思われる発錆が認められた。
- ・伝熱管への錆の発生量は、約0.1～0.5mg/mm²であり、主成分は水酸化鉄、マグネタイトであった。

(1) 日本材料学会TG 「腐食事例」 応力腐食割れ事例の収集と解析”

日本材料学会、腐食防食部門委員会、P56 1977年

(2) 山中和夫、幸英昭、永田三郎 「アルカリ腐食・脆化に関する調査」

SJ9009 88-001 1988年 1月

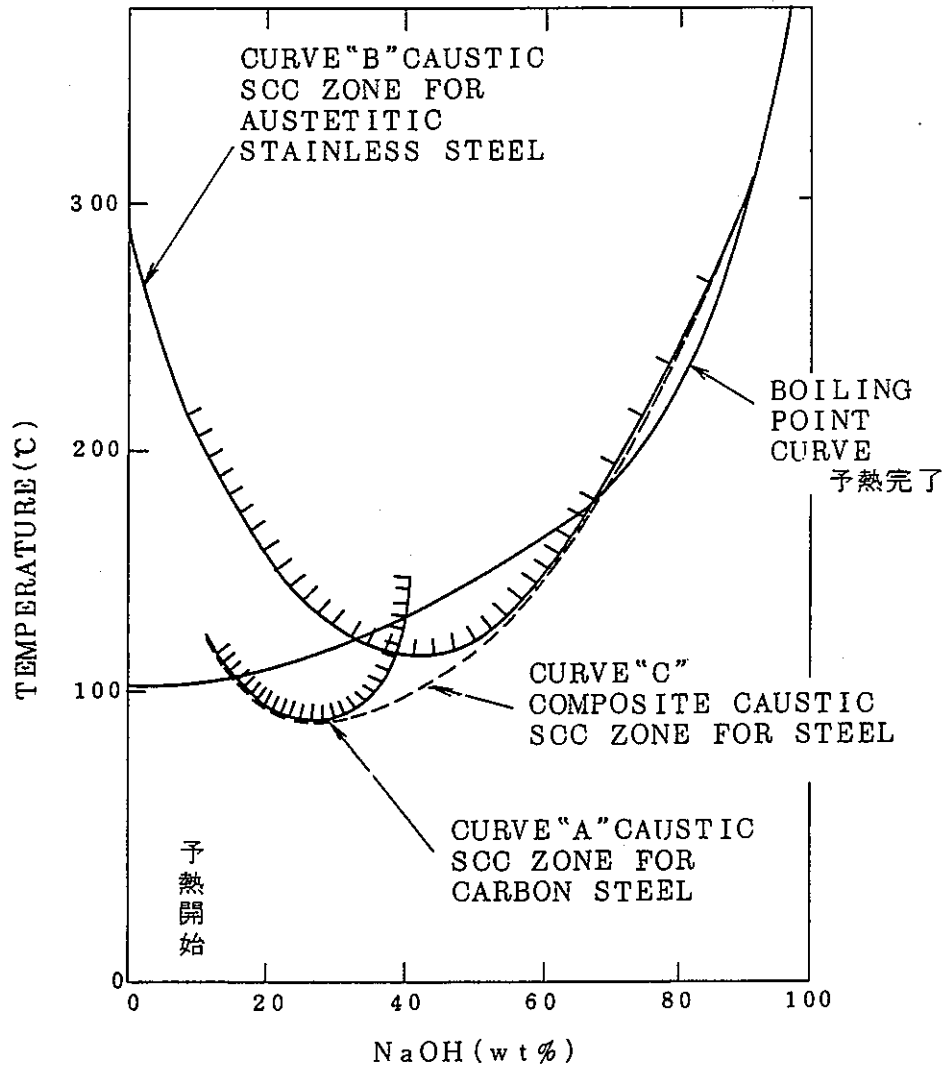
(3) 黒羽光男、佐々木徹、岡本俊二他

「蒸気発生器伝熱管材料試験総合報告書－1号50MW蒸気発生器および2号1MW蒸気発生器－」

SN941 77-175 1977年11月

(4) 清川輝行、浜田勝彦、阿部義人他 「SGメンテナンス技術の実証試験－(1)総合報告書」

ZJ222 80-18(1) 1980年11月



A.A.Berk and W.F.Waldeck;
Chem.Eng. P235, 1950

図-1 アルカリ応力腐食割れ温度・濃度線図 (海外)

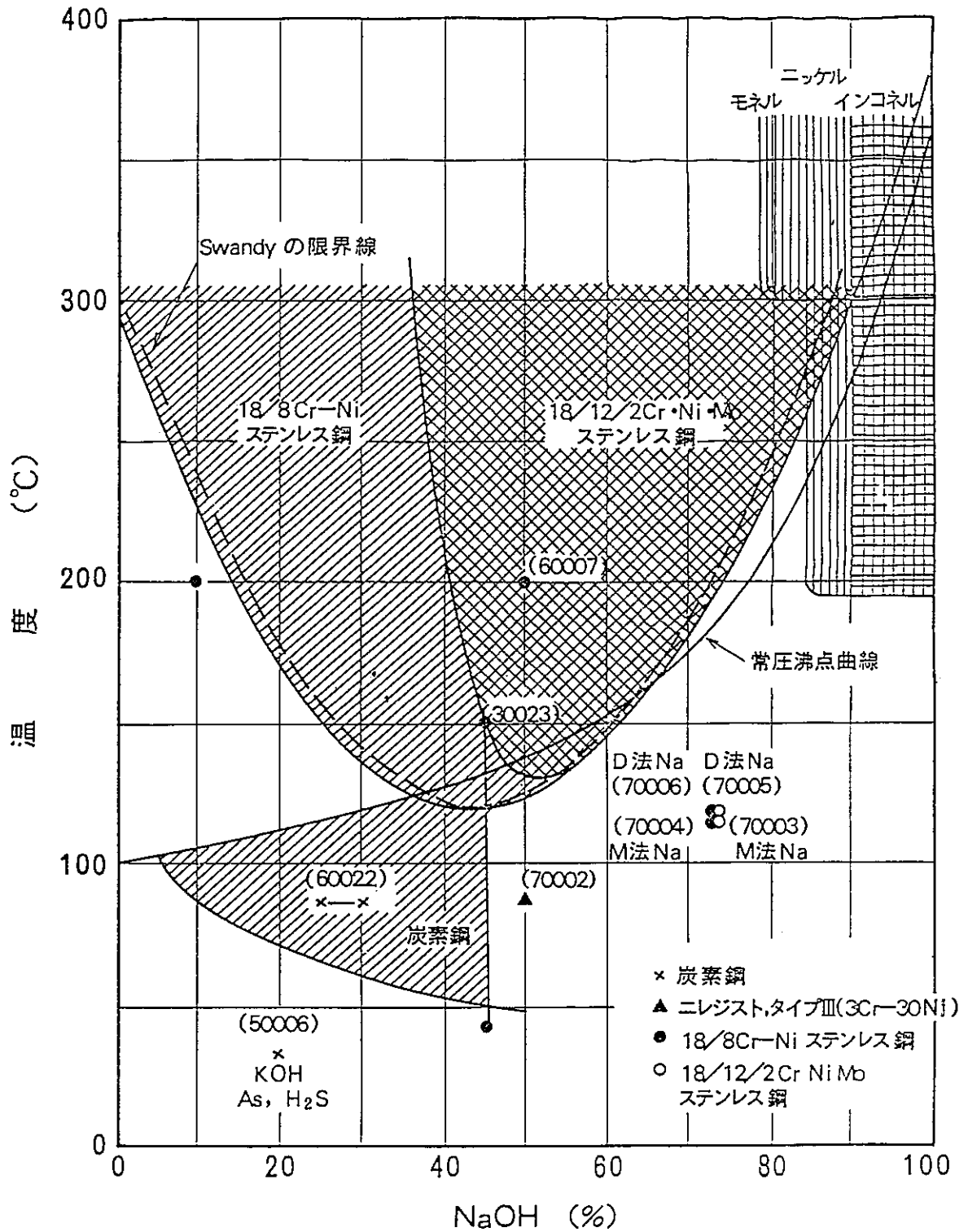


図-2 アルカリ応力腐食割れ温度・濃度線図 (国内)