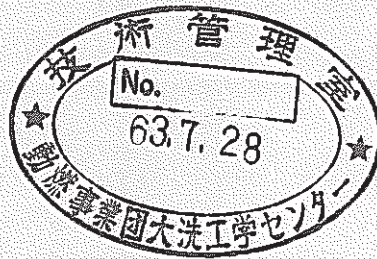


高速実験炉「常陽」運転経験報告書

2次補助プラグ計不具合原因の検討及び第3の不純物の調査



1988年3月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 88-045
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速実験炉「常陽」運転経験報告書

2次補助プラグ計不具合原因の検討及び第3の不純物の調査

道野 昌信, 中村 正人, 郡司 泰明
甲高 義則, 野口 浩二, 相川 幸司
軽部 浩二, 堀米 利元, 小澤 健二
山下 芳興

要 旨

「常陽」2次補助冷却系には、ナトリウムの純度監視のためプラグ計が設置されている。本プラグ計には、設置以来数々の不具合現象が発生しその都度対処してきたが、現在においても依然として不具合現象は発生している。この対策を検討するために、100 MW第1サイクルから第14サイクルの間に発生した不具合現象を調査しその原因を推察した。

不具合原因は次に示すものであると考えられる。

1. 原子炉運転中のプラグ温度の上昇は、系統機器・配管から溶出する酸素、水素以外の第3の不純物の析出によって発生する。
2. ノイズ状の流量変動は、系統ナトリウム中へのガス巻き込みによって発生する。
3. 不純物の析出・溶解ではない流量変化は、ナトリウム温度変化に起因する電磁流量計出力電圧の変化によって発生する。

これらの対策を講ずるためには、さらに解明しなければならない点があり引続き調査するとともに、その根本的対策を検討していくことにしている。

Operation Report on Experimental Fast Reactor "JOYO"
Investigation of the Trouble and the Unknown Impurity on Plugging
Meter in JOYO Secondary Auxiliary Cooling System

M. Mchino, N. Nakamura, Y. Gunji,
Y. Kohtaka, N. Noguchi, K. Aikawa,
K. Karube, T. Horigome, K. Ozawa and
Y. Yamashita

Abstract

The Plugging Meter is used in JOYO Secondary Auxiliary Cooling System to monitor the sodium purity.

This Plugging Meter have been operated more than 12 years since the coolant sodium was charged into JOYO Secondary Auxiliary Cooling System in 1975. Since its operation, some trouble conditions were observed and countermeasures have been taken.

For these presume, the state of occurrence trouble conditions were investigated from 100MW 1st cycle operation to 100MW 14th cycle operation.

The cause of some trouble conditions are as follows.

1. Increase of plugging temperature during Reactor operation is supposed to be caused by unknown impurity precipitations except oxygen or hydrogen one. The unknown impurity is transferred from piping and component material in Secondary Auxiliary Cooling System after Reactor Power-up.
2. Sodium flow changes in Plugging Meter, like electric noise, are caused by gas into system sodium flow.
3. Sodium flow changes in Plugging Meter, in case that is not concerned with impurity precipitation, are caused by output voltage changes of the electromagnetic flow meter. This output voltage is shifted by sodium temperature changes.

The researches and investigations of Plugging Meter in this system are continued to clear above and other specified matters, and take basically countermeasures.

目 次

1. はじめに	1
2. 系統説明	2
2.1 2次補助冷却系	2
2.2 プラグ計	5
3. 経 過	16
4. 不具合原因の検討	24
4.1 原子炉運転中にみられるプラグ温度の上昇	24
4.2 ノイズ状の流量変動及び流量低下	45
4.3 不純物の析出・溶解に起因しない流量変化	47
5. 第3の不純物の調査	63
5.1 第3の不純物のプラグ温度	63
5.2 第3の不純物の析出速度	66
5.3 2次純化系コールドトラップバイパス試験	70
5.4 第3の不純物元素の調査	80
6. ま と め	87
7. 謝 辞	89
8. 参考文献	90

図・表リスト

図 2.1.1	2次補助冷却系系統図	4
図 2.2.1	プラグ計の基本構成図	9
図 2.2.2	プラグ計の作動原理説明図	10
図 2.2.3	飽和温度測定法	11
図 2.2.4	二重ブレイク現象	12
図 2.2.5	二重ブレイク現象が生じる条件	13
図 2.2.6	2次補助プラグ計全体図	14
図 2.2.7	2次補助プラグ計系統図	15
図 4.1.1 (1)~(2)	出力上昇時のプラグ計温度, 流量の変化	28~29
図 4.1.2	出力運転中のプラグ計温度, 流量の変化 (100 MW第9サイクル)	30
図 4.1.3	出力運転中のプラグ計温度, 流量の変化 (100 MW第14サイクル)	31
図 4.1.4 (1)~(6)	出力降下時のプラグ計温度, 流量の変化	32~37
図 4.1.5 (1)~(4)	2次補助充填弁開, 閉に伴うプラグ計温度, 流量の変化	38~41
図 4.1.6	プラグ温度の変動現象モデル	42
図 4.1.7	ナトリウム技術開発室で観察された第3の不純物のプラグ計記録	43
図 4.1.8	プラグ計温度, 流量の変動原因説明図	44
図 4.2.1	100 MW第1サイクル運転時にみられたノイズ状の流量変動	47
図 4.2.2.(1)~(14)	系統昇温時のプラグ計チャート	49~55
図 4.2.3	2次補助冷却系内ガス溜り	56
図 4.3.1	測定開始時のプラグ計温度, 流量の変化	59
図 4.3.2	ナトリウム温度変化に伴う電磁流量計出力電圧の変化	61
図 5.1.1	原子炉運転日数と第3の不純物のプラグ温度との関係	65
図 5.2.1	オリフィス部ナトリウム温度 150℃保持時のプラグ計温度, 流量の変化	68
図 5.2.2	オリフィス部ナトリウム温度 250℃保持時のプラグ計温度, 流量の変化	69
図 5.3.1	100 MW第5サイクル運転中の2次主プラグ計温度, 流量の変化	73
図 5.3.2	2次純化系コールドトラップバイパス試験時の系統図	74
図 5.3.3	コールドトラップバイパス時の2次主プラグ温度変化	75
図 5.3.4	コールドトラップバイパス時の2次補助プラグ温度変化	77
図 5.3.5	第3の不純物析出によるプラグ温度の上昇条件	79
図 5.4.1	2次補助プラグ計出・入口フィルタ付着粒状物写真	82
図 5.4.2	金属元素等の濃度変化 (ナトリウムサンプリング分析結果)	83

図 5.4.3	各元素のナトリウム中溶解度曲線	85
図 5.4.4	ナトリウム中各種不純物の溶解度	86
表 3.1 (1)~(5)	2次補助プラグ計運転状態	19~23
表 5.4.1	2次補助プラグ計出・入口フィルタ付着粒状物分析結果	81
表 6.1	2次補助プラグ計における不具合原因とその対策	88

1. はじめに

「常陽」2次補助冷却系に設置されているプラグ計には、設置当初から種々の不具合が発生しており、その都度対応しながら現在に至っている。しかし、現在においても依然として不具合現象が発生しており、安定したプラグ温度測定が行えない状態である。

プラグ温度を安定に測定するためには、これらの不具合原因を究明するとともに、根本的対策を講ずる必要がある。

本報告書は、昭和58年（100 MW第1サイクル運転）から昭和62年（100 MW第14サイクル運転）の間に発生した不具合現象並びにその原因究明のため行った調査結果を検討し、その原因を推察するとともに講ずべき対策案を報告するものである。

2. 系 統 説 明

2.1 2次補助冷却系

(1) 設備の目的

2次補助冷却系設備は、主冷却系設備にて炉心の崩壊熱除去ができなくなった緊急炉心冷却時に於いて、1次冷却系から伝えられる原子炉の崩壊熱を除去することを目的として設置されている。

(2) 設備概要

2次補助冷却系設備は、電磁ポンプ、電磁流量計、補助中間熱交換器、空気冷却器、補助送風機、膨張タンク、プラグ計ユニット、配管、弁類より構成されており、配管材質は2次主冷却系と同様の低合金鋼（ $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo）である。

図2.1.1に2次補助冷却系系統図を示す。

ナトリウムドレン時以外は、2次補助冷却系ナトリウムは電磁ポンプにより定格流量（65m³/h）で循環運転されている。原子炉通常運転中は、2次主冷却系で必要な熱除去が行われているため、2次補助冷却系は待機状態にある。

2次補助冷却系で炉心冷却を行う場合は、補助送風機を起動し、補助冷却器出口ナトリウム温度を一定に保持することによって、一次補助冷却系より伝えられた炉心の熱を補助冷却器にて大気に放出する。

本系統に設置された膨張タンクは、自由液面を有しておりプラント起動・停止等に伴う系統温度の変化によるナトリウムの体積変動を吸収する他、2次補助冷却系系統内ナトリウムの純化時、純化されている2次主冷却系ナトリウムを補助系へ流入させ本タンクのオーバフローノズルより余分なナトリウムをダンプタンクへ戻す働きをしている。

(3) 2次補助冷却系の運転状態

① ナトリウム充填・ドレン

2次補助冷却系は、2次補助充填弁（V 32.2-3）を介して2次主冷却系とつながっており、2次補助冷却系へナトリウムを充填する時は、2次補助充填弁を微開としダンプタンクから純化系を介して汲み上げられる2次主冷却系内のナトリウムを充填する。補助中間熱交換器、電磁ポンプ、プラグ計、補助空気冷却器、配管等への充填が終了すると、余分なナトリウムは膨張タンクオーバフロー配管を経由して2次ダンプタンクへ戻る。

ナトリウム充填後は、電磁ポンプを起動しナトリウムを約20m³/hで循環運転しながらベント弁（V 35.2-10）を開とし、2次補助冷却系内のガス抜きを行う。その後定格流量循環運転に移行する。

2次補助冷却系のナトリウムドレンは、系統に設けられたドレン弁（V 35.2-5）を開と

することにより、自重で2次ダンプタンクにドレンしている。

② 原子炉停止中（温態待機状態）

原子炉停止中の2次補助冷却系は、電磁ポンプにより定格流量で循環され、補助送風機は自動起動しないようにロックされている。系統内ナトリウム温度は、2次補助冷却系主配管の予熱ヒータによって 240 ± 10 °Cに制御される。

2次補助冷却系は独自の純化装置を持たないため、原子炉停止中に2次補助充填弁（V32.2-3）を約2%開として2次純化系で純化された2次主冷却系内ナトリウムを2次補助冷却系へ供給し、膨張タンクオーバフロー配管よりダンプタンクへオーバフローさせる循環によって純化を行っている。なお、2次補助充填弁より流入するナトリウム流量は確認できないが、総合機能試験時2次主ポンプが定格運転状態で2次補助充填弁を4%開した時 $1.7 \text{ m}^3/\text{h}$ であった実績から、2%開では $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度と予想される。

2次補助充填弁開中、2次補助冷却系でナトリウム漏洩が発生した時、または2次純化系がトリップした時は2次主循環ポンプ吐出圧により、2次補助冷却系へナトリウムが供給され続け2次主冷却系のナトリウム液位が低下するので、この様な時は2次補助充填弁を全閉にしなければならない。

③ 原子炉運転中（100 MW定格出力運転中）

原子炉運転中の2次補助冷却系は、定格流量で循環され補助送風機は自動待機状態にある。系統内ナトリウム温度は、1次補助冷却系からの伝熱により、ホットレグ側は約 410 °Cとなる一方、コールドレグ側は、補助空気冷却器の自然通風制御により、コールドレグ側機器・配管の設計温度（ 400 °C）よりわずかに低い 398 °Cに制御している。

これは、炉容器内の1次補助冷却系ナトリウム出入口ノズルが炉内ナトリウム（約 500 °C）中を貫通しており、ここでの熱応力を低減させる目的から1次補助冷却系ナトリウムと炉内ナトリウムとの温度差を極力小さくするためである。

2次補助冷却系は工学的安全設備に属し、常に主冷却系とは独立していることが要求されることから、原子炉運転中は2次補助充填弁を全閉状態としている。

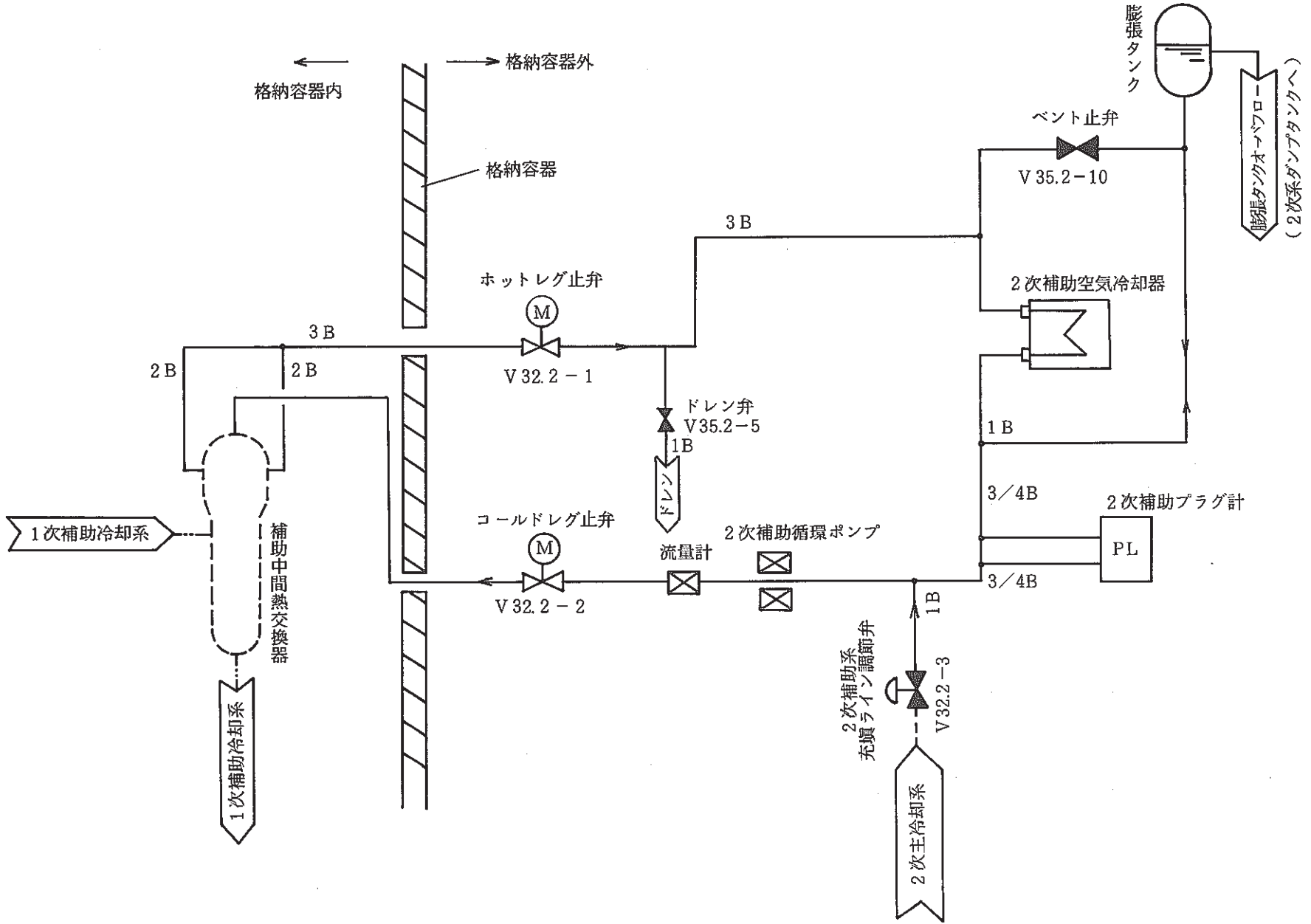


図 2.1.1 2 次補助冷却系系統図

2.2 プラグ計

(1) 測定原理⁽¹⁾

プラグ計は、コールドトラップと同様にナトリウム中の不純物の溶解度が温度により異なることを利用したナトリウム純度測定装置である。その測定原理は、流入ナトリウムを冷却器で冷却し、オリフィス孔に不純物を析出させ部分的に閉塞させることによりナトリウム流量を低下させ、その時の流量変化とオリフィス部の温度からプラグ温度を求める。このプラグ温度とナトリウム中不純物（主に酸素、水素）の飽和溶解度曲線よりナトリウム中不純物濃度を求める。

図 2.2.1 にプラグ計の基本構成図を示す。

① 飽和温度測定の原理

図 2.2.1 で、プラグ計に一定流量（一般に $1 \sim 3 \text{ l/min}$ ）で流入したナトリウムは冷却されプラグオリフィスで最低温度となる。この温度が不純物の飽和温度以下になるとプラグオリフィスに不純物が析出し、ナトリウムの流量減少が生じる。流量減少開始の温度をプラグ温度という。また、不純物が析出した状態からナトリウム温度を上昇させていくと、流量増加を生じる温度がある。この温度をアンプラグ温度という。

以上の現象を図 2.2.2 にて模式的に説明する。図 2.2.2(a)に不純物の溶解度曲線を示す。今、未飽和状態のナトリウムを P 点から冷却していくと、過冷却現象のため A 点で不純物は析出せず少し遅れた B 点で不純物の析出が開始され、更に冷却すると不純物の析出が続く。Q 点から温度を上昇させると A 点までは析出が続き、A 点以上の温度では析出していた不純物はナトリウム中に溶解するが溶解の開始に時間遅れがあるため A 点を過ぎた C 点から溶解が始まる。したがってプラグ計のプラグオリフィス部の温度と流量の関係は模式的に図 2.2.2(b)のような変化を示す。このとき、 T_B がプラグ温度、 T_C がアンプラグ温度である。このようにプラグ計で測定されるプラグ、アンプラグ温度は飽和温度とは必ずしも一致せず、これらの温度と飽和温度との差は各プラグ計及び測定条件により異なるが、一般にプラグ温度は飽和温度より低く測定され、アンプラグ温度は飽和温度より高く測定される。プラグ計で測定される飽和温度はプラグ温度又はアンプラグ温度、若しくは平均プラグ温度で表示されているが、飽和温度を正確に得るには、これらの測定温度と飽和温度との関係を校正しておくことが必要となる。

② 測定法

ナトリウム中不純物の飽和温度を測定する方法として次の 3 法がある。

図 2.2.3 に飽和温度測定法を示す。

(a) 手動式測定法

プラグオリフィスに不純物が析出していない状態から、手動操作によりオリフィス温度を下げ、オリフィスに一部分不純物を析出させた後、再びオリフィス温度を上昇させるこ

とにより、プラグ温度やアンプラグ温度を測定する方法。(図 2.2.3(a)参照)

この測定法では、冷却ブロアのオン・オフ、冷却・加熱速度の制御を手動操作で行う。

ナトリウムの冷却・加熱速度の制御は、冷却器部ヒータの出力や、ダンパの開度又は冷却ブロアの回転数による風量調節で行う。

手動式測定法は手動操作でオリフィス温度調整や冷却ブロアのオン・オフを行うため、充填直後で未純化のナトリウムの飽和温度を知る場合や、プラグ計の自動運転の前段階での飽和温度測定に適用できる。しかし、飽和温度を連続的に測定するには適さない。

(b) 自動振動式測定法

プラグオリフィスの流量に設定値を設けておき、オリフィス流量がその設定値以下ではオリフィスの加熱を、また、設定値以上ではオリフィスの冷却をそれぞれ自動的に行う。この温度制御によりオリフィス温度は飽和温度の上下を、ナトリウム流量は設定流量の上下を振動する。(図 2.2.3(b)参照)

この測定法はプラグ計の制御が比較的容易で、連続的な測定が可能であることから、プラグ計の最も一般的な測定法である。

(c) 自動連続式測定法

プラグオリフィスの流量に設定値を設けておき、オリフィス流量が常にその設定値に維持されるよう冷却・加熱量(冷却風量又はヒータ発熱量)を自動的に制御し、オリフィス部で不純物の析出と溶解が平衡した状態(半プラグ状態)が維持されるようにする。

この場合のオリフィス温度は飽和温度に相当すると考えられる。

この方法は飽和温度が連続的にしかも直接指示される(図 2.2.3(c)参照)ため、原理的には飽和温度を測定するのに最も優れた方法といえる。

しかし、現在までに得られている性能では指示温度に $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度の温度ゆらぎがあるなど、温度(流量)制御の面での難しさがある。

また、ナトリウム中に飽和温度の異なる複数の不純物が存在する場合、最も高い飽和温度の不純物がオリフィス部で析出と溶解が平衡した状態を維持する為、この方法で指示される温度は最も高い不純物飽和温度となり、これ以外の不純物飽和温度は測れない。

③ 多重ブレイク現象

多重ブレイク現象の生じる条件

ナトリウム中に多種類の析出性不純物が異なる飽和温度で存在しているとき、プラグ計を手動式測定法又は自動振動式測定法で運転すると多重ブレイク現象が現われることがある。

図 2.2.4 で二重ブレイクの例について説明する。(a)図に示すようにナトリウム中に A 及び B という 2 種類の析出性不純物があり、溶解度曲線が ℓ_A 及び ℓ_B 、濃度が C_A 及び C_B であるとす。 (b)図に示すようにオリフィス温度を T_p から下降させてゆくと温度 T_A にて不純物 A が析出し始める。さらに、 T_B まで下がると不純物 B も析出し始め、 T_B 以下では A、B 両不純物が析

出を続ける。温度 T_Q より上昇させてゆくと T_B 以上では不純物 A は析出を続けるが不純物 B は溶解し始める。図では u 点にて不純物 B は完全に溶解し、 uv 間には不純物 A のみの析出が続く、オリフィス温度が T_A 以上になると不純物 A も溶解し始め、その後流量は元の状態にもどる。

それでは 2 種類の析出性不純物が異なる飽和温度でナトリウム中に存在すれば必ず二重ブレークがこの図のように明確に現われるかというところではない。不純物によりその析出、溶解速度は異なるので、今仮に不純物 A、B のこの速さを比較して B の方が著しく（約 10 倍）速いとする。図 2.2.5(a) は不純物 A の飽和温度の方が高い場合 ($T_A > T_B$) であり、オリフィス温度 $P \rightarrow Q \rightarrow P'$ の変化に対して流量は $R \rightarrow S \rightarrow T \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow W$ となり、前述の図 2.2.4 と同様の軌道となり、二重ブレークが明瞭である。

一方、図 2.2.5(b) は不純物 B の飽和温度の方が高い場合 ($T_A < T_B$) である。この場合析出・溶解速度の遅い不純物 A による流量減少 ($S \rightarrow T$)、回復 ($T \rightarrow V$) はごく僅かであり、實際上これを不純物 B による減少分 ($S \rightarrow V$ の破線) から区別することはできない。このような場合は二重ブレーク現象は図より読み取ることはできない。

すなわち、多種類の析出性不純物が異なる飽和温度でナトリウム中に存在しても、析出・溶解速度の著しく速い不純物の飽和温度が最も高い場合には多重ブレークは明瞭に現われない。そして現在まで明らかにされている酸素、水素、及びこれら以外の第 3 の不純物についての析出、溶解の速さは (水素) > (酸素) > (第 3 の不純物) であるため、水素の飽和温度が他の不純物よりも高い場合には多重ブレークは現われず、逆に多重ブレーク現象が生じた場合、最高の飽和温度を示す不純物は水素ではないと判断される。

(2) 2 次補助プラグ計

2 次補助冷却系に設置されているプラグ計（以後 2 次補助プラグ計と略す）は、電磁ポンプ、電磁ポンプ出口流量計、オリフィス流量計、プラグオリフィス、バイパスオリフィス、冷却器等から構成され、ナトリウムの冷却は冷却ブローにより行い、その制御は冷却ブロー出口ダンパの開閉により行う構造となっている。

図 2.2.6 に 2 次補助プラグ計の全体図を図 2.2.7 にその系統図を示す。

プラグオリフィスは直径 1 mm の穴を 2 ケ、5 mm の板材に開けた構造で、プラグ計配管の出入口部にはフィルタを設けて異物による閉塞を防止している。

またプラグオリフィス部には、CA 型熱電対が取り付けられており、これによりプラグオリフィスを流れるナトリウムの温度を測定している。

プラグ計を流れるナトリウム流量は、2 基の冷却器の間とプラグ計電磁ポンプ出口側に設けられた電磁流量計により測定し、系統側の流量外乱によるプラグオリフィス部の流量変化をキャンセルするために、それぞれの流量信号の比をとって検出する構成となっている。また、プラグオリフィス及び冷却器をバイパスするバイパスオリフィスにプラグ計電磁ポンプ出口流量

とプラグオリフィス流量の差分を流しておくことにより、プラグオリフィス部の流量の安定化を図っている。

なお、通常プラグ温度測定は、オンタイムで測定できより正確な不純物飽和温度を示す自動連続式測定法で行っている。

以下に2次補助プラグ計主要目を示す。

2次補助プラグ計主要目

型 名	PL - CA 型 (三菱原子力工業製)
型 式	空冷式自動連続指示型
測定範囲 (自動測定)	プラグ温度 250 °C ~ 120 °C
入口ナトリウム温度	300 °C ~ 500 °C
ナトリウム流量	約 3 l / min (オリフィス流量 約 0.5 l / min)
設計圧力及び温度	- 1 ~ 10 kg / cm ² g , 500 °C
使用時雰囲気温度及び湿度	最高 40 °C 及び最大 80 %
ナトリウム系材質	SUS 27 または相当品
測定方法	手動測定, 自動振動測定, 自動連続測定 いずれも可

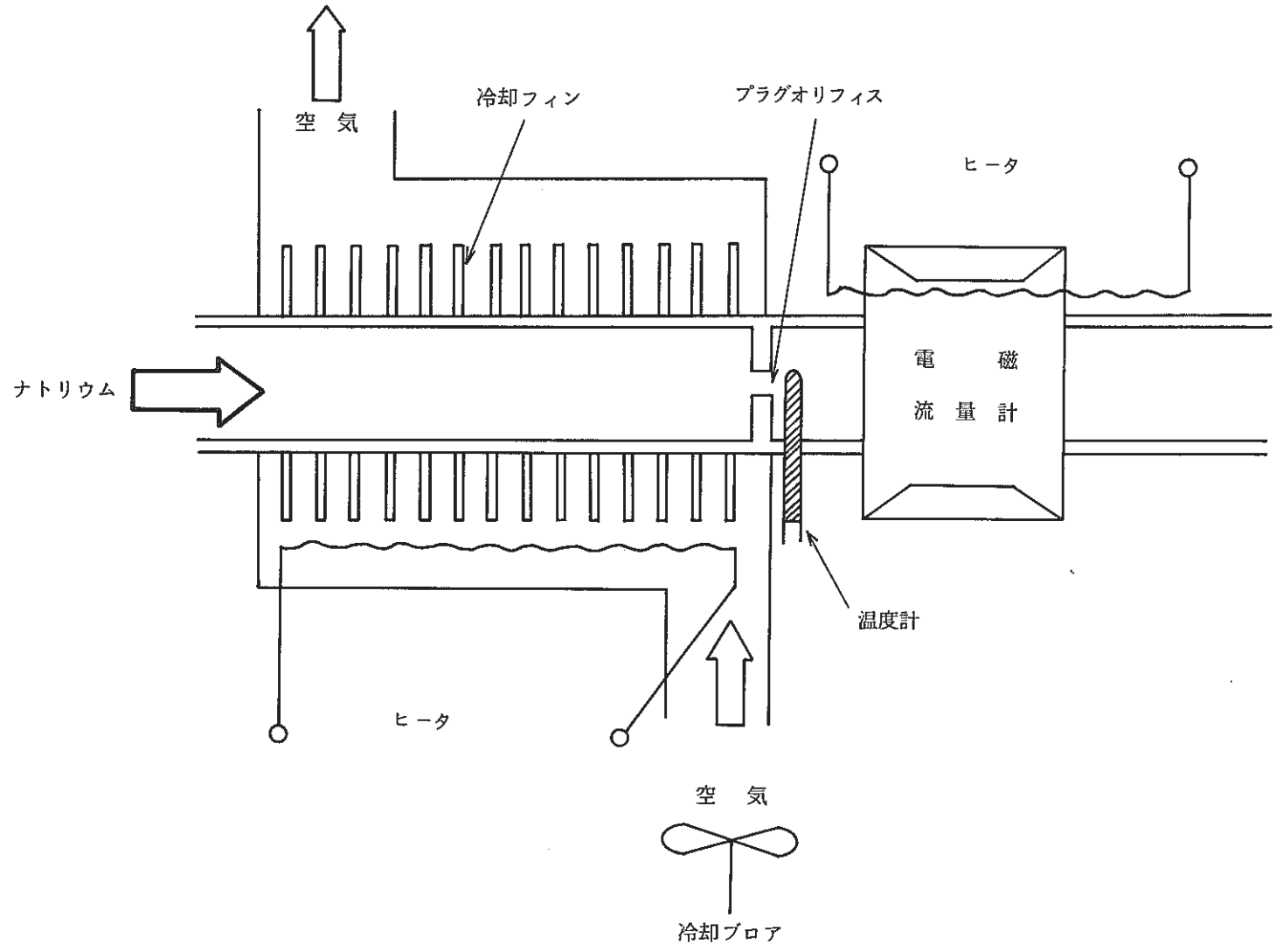
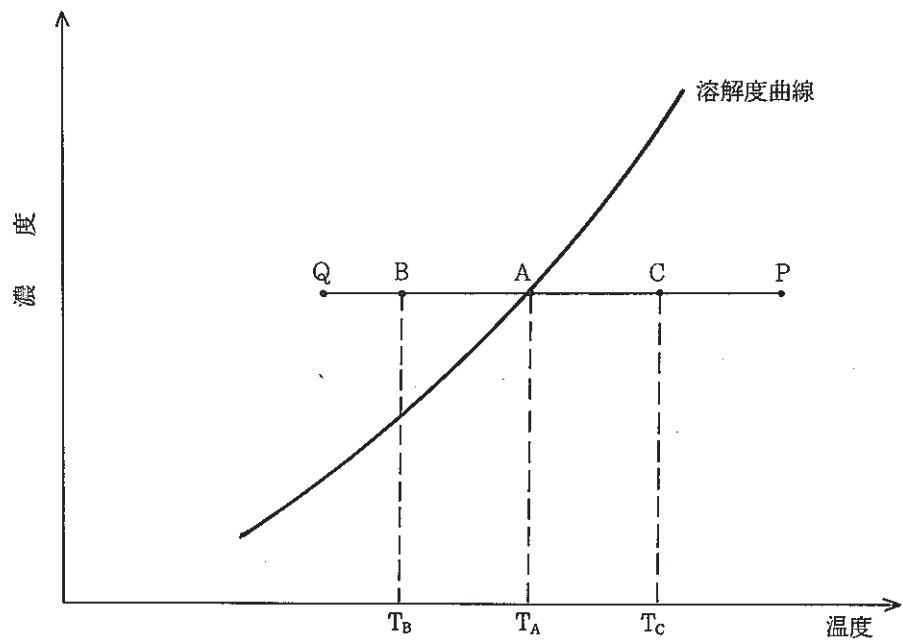
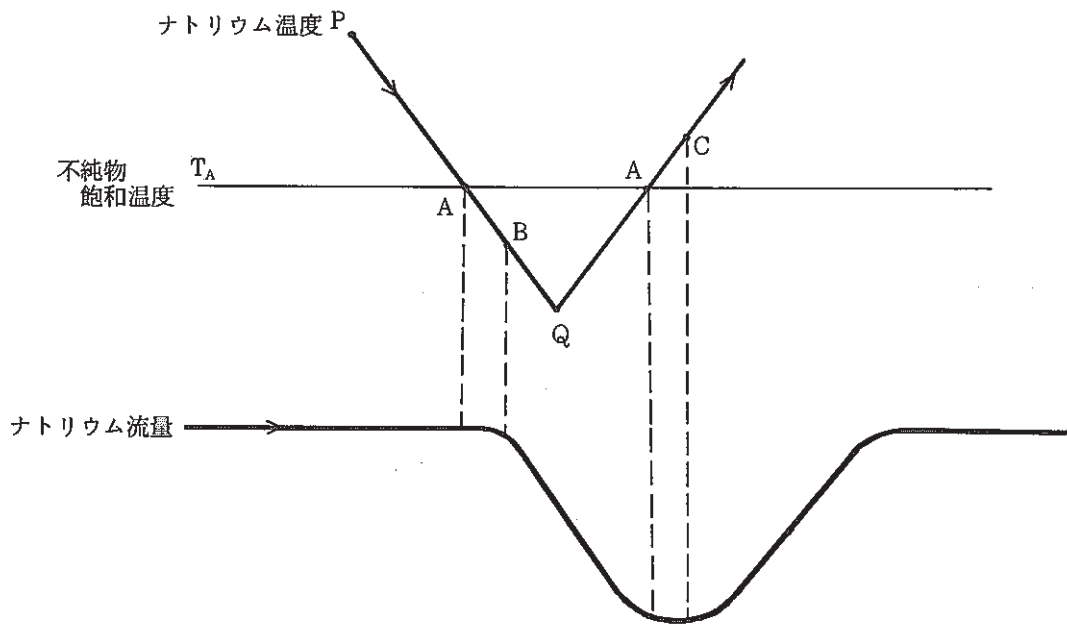


図2.2.1 プラグ計の基本構成図

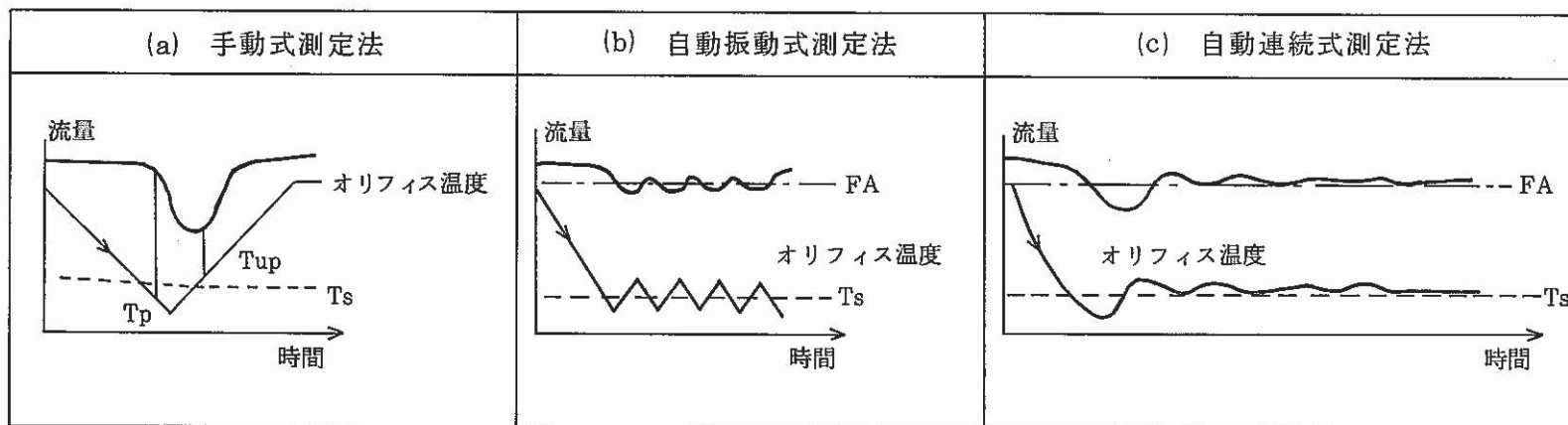


(a) 不純物の溶解度曲線



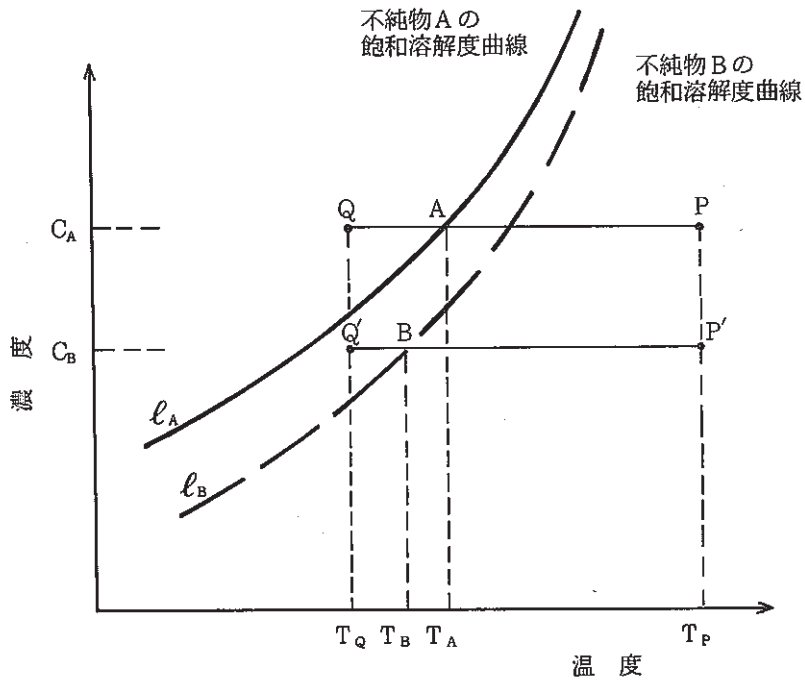
(b) プラグ計の温度-流量変化

図 2.2.2 プラグ計の作動原理説明図

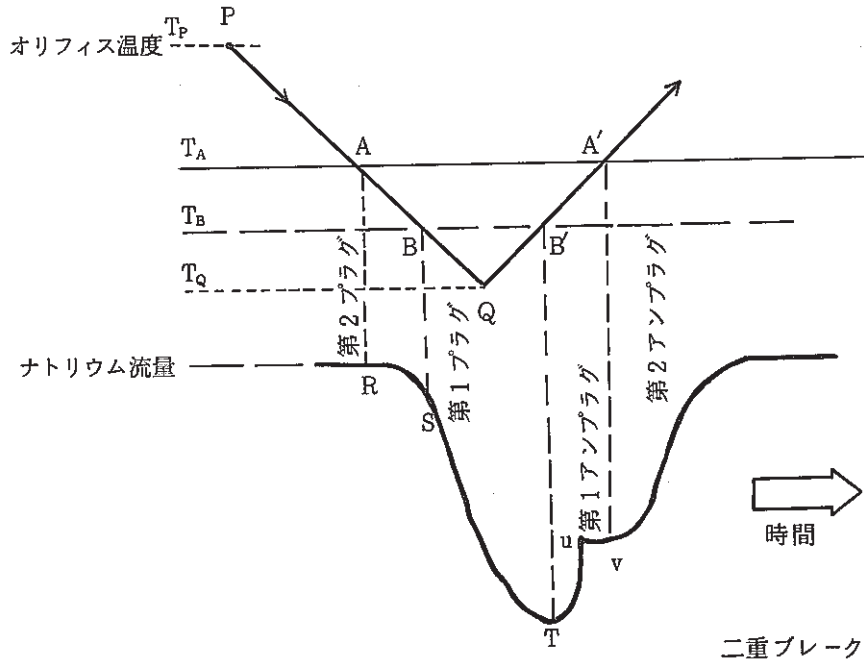


(FA: 流量設定値, Ts: 不純物飽和温度)

図 2.2.3 飽和温度測定法

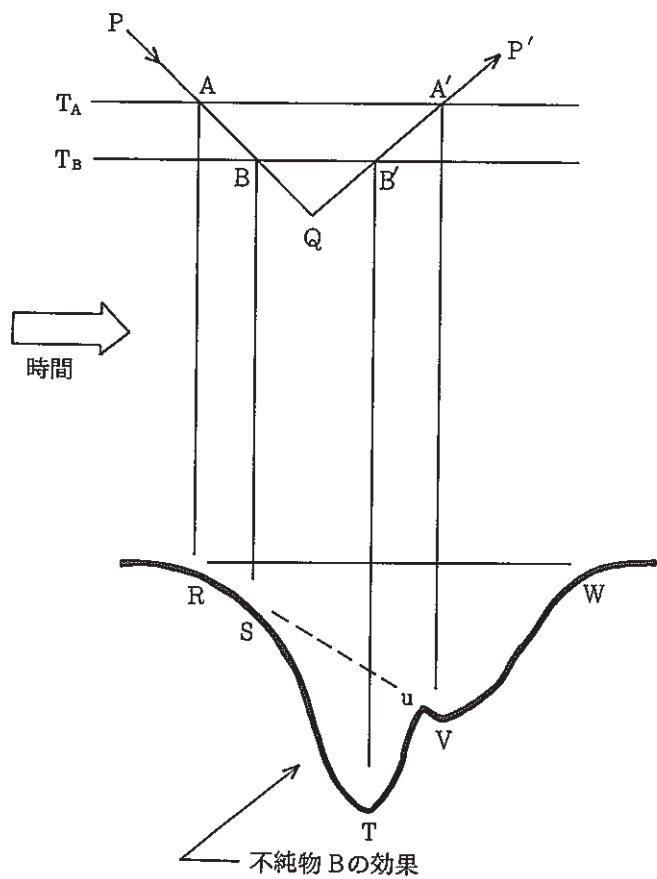


(a) 2種類の不純物の溶解度曲線

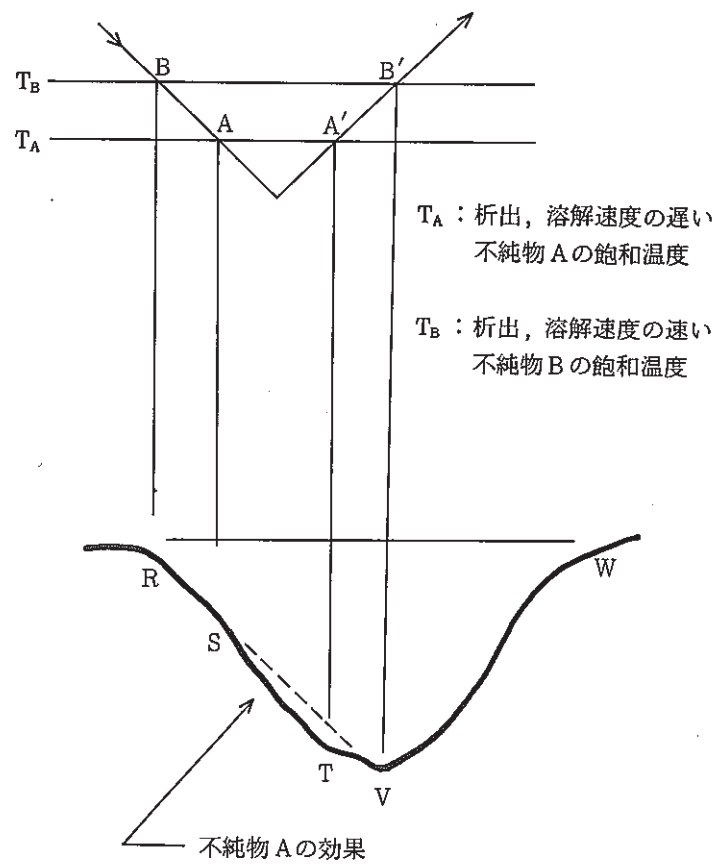


(b) 二重ブレイク

図 2.2.4 二重ブレイク現象

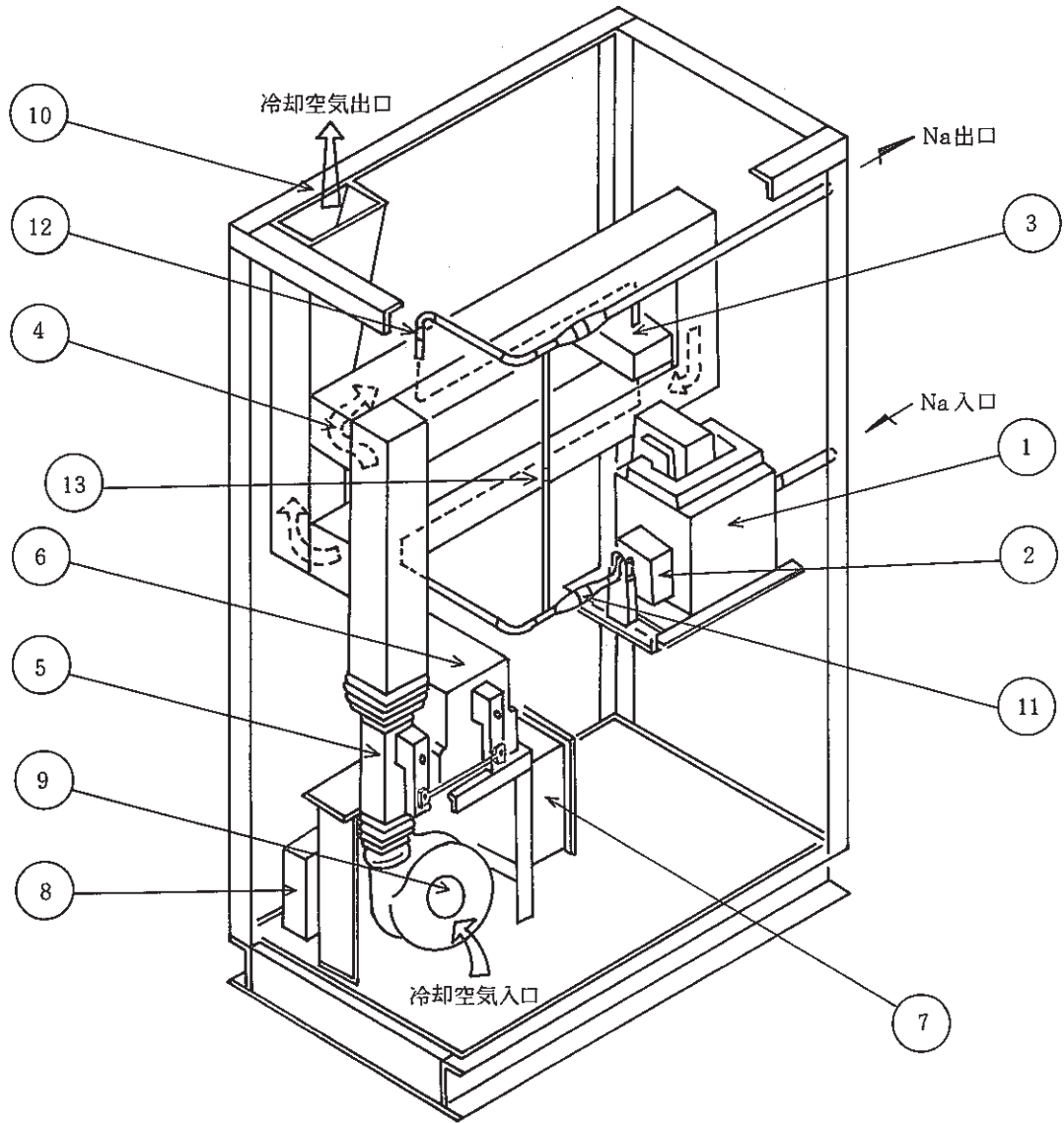


(a) 二重ブレイクが明確な場合



(b) 二重ブレイクが明確でない場合

図 2.2.5 二重ブレイク現象が生じる条件



符号	名称
1	電磁ポンプ
2	ポンプ出口流量計
3	プラグオリフィス流量計
4	冷却器
5	ダンパ
6	ダンパドライブユニット
7	コントロールアダプタ
8	コンデンサ
9	冷却ブローア
10	架合枠
11	フィルター
12	プラグオリフィス
13	バイパスオリフィス

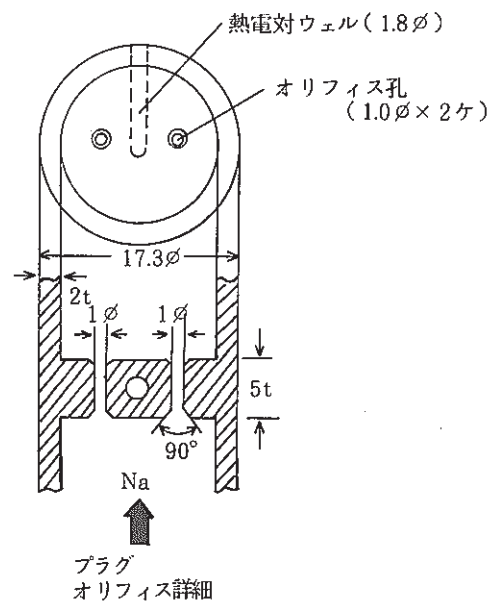
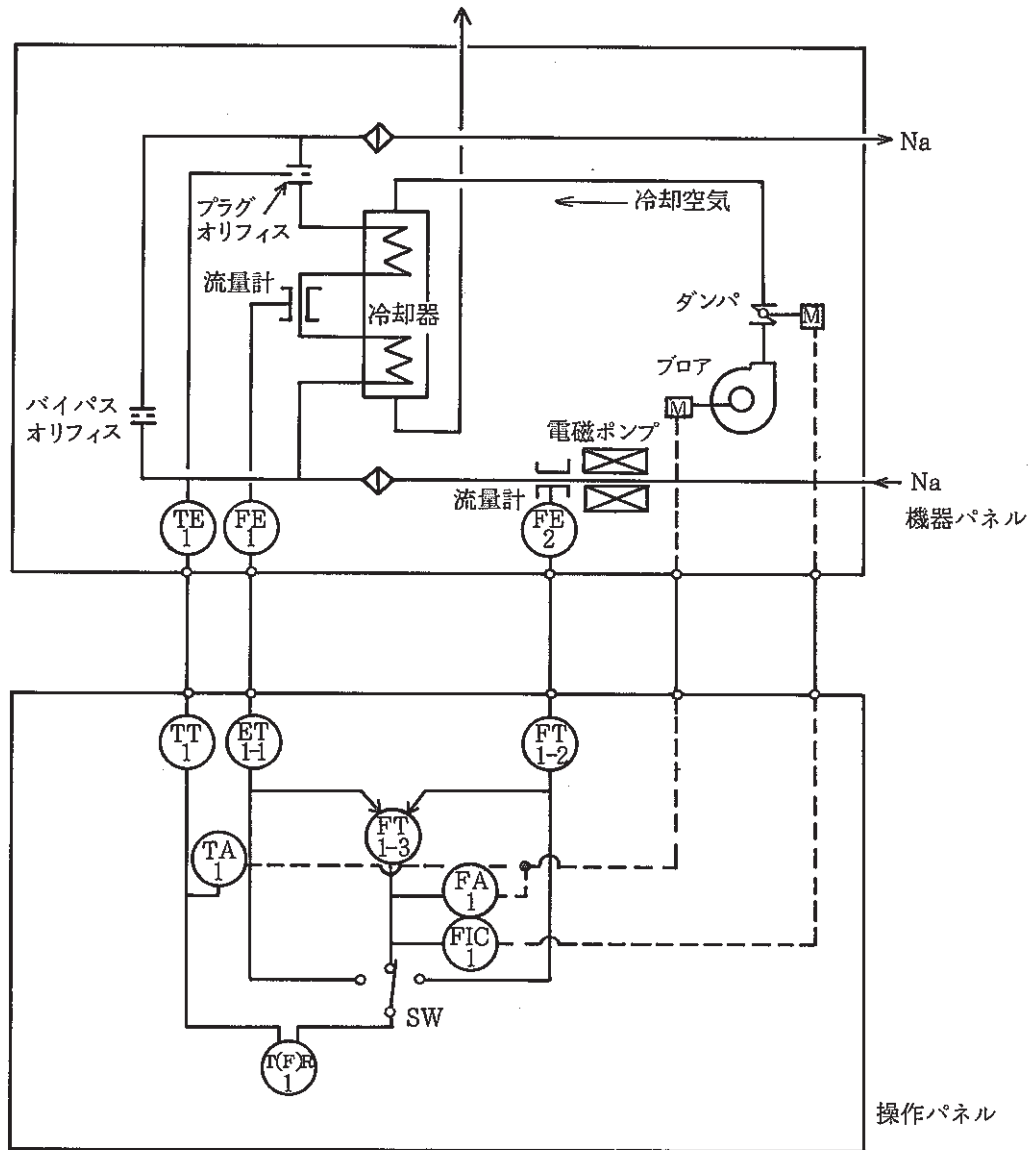


図 2.2.6 2次補助プラグ計全体図



記号説明

記号	名称
TE, FE	温度検出器, 流量検出器
TT, FT	温度変換器, 流量変換器
TA, FA	温度設定器, 流量設定器
FIC	流量比指示調節計
T(F)R	温度, 流量記録計
SW	記録計入力切換スイッチ

図 2.2.7 2次補助プラグ計系統図

3. 経 過

表 3.1 (1)～(5)に 2 次補助プラグ計運転状態を示す。

第 1 サイクル

昭和58年 7 月31日に 2 次補助冷却系にナトリウムを充填した後プラグ計が運転され、8 月 9 日に 100 MW 第 1 サイクル運転が開始された。原子炉起動に先立ち 2 次補助充填弁は閉とされた。

原子炉起動後の系統昇温に伴いプラグ計流量にノイズ状の流量変動が現われた。この変動は原子炉運転中連続して発生しており、原子炉停止に伴う系統ナトリウム温度降下時なくなった。(図 4.2.1 参照)

プラグ温度は、原子炉起動数日後から変動しながら上昇し安定した測定が行えず、第 1 サイクル中頃はほとんど測定できなかった。

第 2 サイクル

第 2 サイクルについても第 1 サイクルとほぼ同様で、ノイズ状の流量変動は少なくなったものの安定した測定が行えず、サイクル中頃はほとんど測定できなかった。

第 2 サイクル運転終了後、第 4 回定期検査に伴い 2 次補助冷却系のナトリウムドレン・充填が行われた。

第 3 サイクル

昭和59年 4 月19日に第 3 サイクル運転が開始された。プラグ計には第 1 サイクル運転と同様、系統ナトリウム温度の上昇に伴ってノイズ状の流量変動が現われた。プラグ温度の上昇及び変動はあるものの、そのままの状態では測定は続けられた。

第 3 サイクル運転終了後、2 次補助プラグ温度の上昇原因調査のため 2 次純化系コールドトラップバイパス試験を行い、ナトリウムを純化しない状態での 2 次主プラグ温度の変化を確認したが、系統ナトリウム温度が低い状態ではプラグ温度の上昇はなかった。

第 4 サイクル

昭和59年 6 月25日から第 4 サイクル運転が開始された。系統ナトリウム温度上昇に伴うプラグ計流量の変動はないものの、原子炉起動数日後からのプラグ温度の上昇は相変わらず発生しており、原子炉運転中ほとんどプラグ温度は測定できなかった。

第 5 サイクル

第 5 サイクル運転では、第 4 サイクル運転と同様にプラグ温度の上昇はあったがプラグ計は連続して運転(測定)された。

第 5 サイクル運転終盤に、系統ナトリウム温度が高い状態での 2 次純化系コールドトラップバイパス試験を実施した。この結果、2 次主プラグ温度にも上昇がみられ、析出する不純物は 2 次補助冷却系のみならず 2 次主冷却系の系統機器・配管から溶出してくるものと推察された。

第6サイクル

第6サイクル運転中頃（昭和59年12月11日）、プラグ計流量が突然零となった。流量を回復させるため、プラグ計予熱ヒータ設定値の変更操作、プラグ計電磁ポンプ印加電圧の昇・降圧操作、プラグ計電磁ポンプの停止・起動及び逆流運転（以後逆転と略す）操作等行ったが回復せず、第6サイクル運転終了後、2次補助充填弁を開とした約1ヶ月後の昭和60年2月8日に正常状態に回復した。

第7サイクル

第7サイクル運転においても、系統ナトリウム温度昇温終了後突然プラグ計流量が零となり、第6サイクル時に実施した回復操作を行ったが回復しなかった。

プラグ計流量が低下した原因は、プラグ計ナトリウム流量（規定量）を得るためにプラグ計電磁ポンプ印加電圧が年々増加していることから、プラグ計出・入口フィルタ部が容易に溶解しない不純物で閉塞しているものと推察された。このため、第5回定検時にプラグ計出・入口フィルタを交換した。また、「常陽」2次冷却系モックアップ試験ループに設置されていたプラグ計の解体結果では、オリフィス部にも不純物が付着していたことから、測定オリフィス及びバイパスオリフィスも交換した。これによりプラグ計流量は回復し、プラグ計電磁ポンプ印加電圧25Vで規定流量が得られ、第8サイクル運転開始までプラグ温度は安定に測定できた。

第8サイクル

第8サイクル運転では、系統ナトリウム温度の昇温に伴い第1サイクルと同様プラグ計流量にノイズ状の変動が現われた。この流量変動は、プラグ計内へのガス巻き込みによるものと考えられ、ガス抜きを目的としてプラグ計電磁ポンプの逆転を行った。しかし、逆転から正転に戻したらプラグ計流量が出なくなった。このため、第6サイクル時に実施した回復操作を行ったがそれでも回復しなかった。第6サイクル運転終了後、2次補助冷却系内ナトリウムの純化のため2次補助充填弁を開とした後に流量が回復した経験から、第8サイクル運転終盤に2次補助充填弁を開とした。その5日後、プラグ計流量が回復し第12サイクル運転まではノイズ状の流量変動は現れなかった。

第10サイクル

第10サイクル運転では、プラグ温度の上昇及び変動によりその指示が純度管理基準値の225℃を超える時もあった。プラグ計運転（測定）開始後数時間は安定した測定ができるため、この安定時のデータを採取（パトロール記録）するようになった。このため、これ以後の原子炉運転中は毎日フラッシングを行うようになった。

第12サイクル

第12サイクル運転では、プラグ計運転直後プラグ計ナトリウム温度の低下に伴い、不純物の析出前に流量比が設定値近くまで降下してしまうため、安定した測定が行えなかった。このため、フラッシング中の流量比を規定値（100%）より多い104%に調整し、ナトリウム温度低下に伴う流量比の降下を補正した。

第6回定期検査に伴い、昭和62年2月26日から6月3日の間、2次補助冷却系のナトリウムはドレンされた。

第13サイクル

第13サイクル運転では、系統ナトリウム温度の昇温によりプラグ計流量に第1サイクル運転時と同様のノイズ状の変動が現われた。プラグ温度は相変わらず上昇し原子炉起動後約2週間は毎日フラッシングが行われたが、その後はプラグ温度の上昇はなくなり安定した。また、この頃からプラグ計流量のノイズ状の変動もなくなった。これは、2次補助充填弁にシートリークがあったため、2次補助冷却系内ナトリウムが2次主冷却系の純度の良いナトリウムと置換されたため、昭和62年10月14日ナトリウムの流動音及び配管予熱温度の変化によりシートリークを確認した。

第14サイクル

第14サイクル運転当初も2次補助充填弁のシートリークがあるためプラグ温度の上昇はみられなかった。しかし、2次補助冷却系膨張タンクのオーバフローラインが接続される2次ダンプタンクドレンヘッド部での熱応力増加が懸念されたため、原子炉起動約10日後(12月9日)に2次補助充填弁を増締めした。これによってシートリークはなくなったが、約1週間後からプラグ温度が上昇し再び毎日フラッシングを行うようになった。

表 3.1(1) 2次補助プラグ計運転状態

昭和 58 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
プラント状態	<p>照射用炉心性能試験 (1月 - 8/9)</p> <p>100 MW 第1サイクル運転 (8/9 - 9/30)</p> <p>100 MW 第2サイクル運転 (10/12 - 11/30)</p>											
2次補助PL計運転	<p>運転(測定) (8/9, 9/30, 10/12, 11/30)</p>											
2次補助充填弁	<p>閉 (6月 - 7/31)</p> <p>開 (7/31 - 8/9, 9/30 - 10/12, 11/30 - 12/19)</p>											
2次補助系状態	<p>ドレン (7/8 - 7/31)</p> <p>充填 (7/31 - 12/2)</p>											
その他												

表 3.1(2) 2次補助プラグ計運転状態

昭和 59 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
プラント状態	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;">第 4 回定期検査</div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 100MW 第 3 サイクル運転 4/19 ~ 6/10 </div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 100MW 第 4 サイクル運転 6/25 ~ 8/12 </div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 100MW 第 5 サイクル運転 9/3 ~ 10/22 </div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 100MW 第 6 サイクル運転 11/26 ~ </div> </div>											
2次補助PL計運転	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 運転(測定) </div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%; text-align: right;"> 流量出ず 測定 不可 </div> </div>											
2次補助充填弁	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%; text-align: center;">開</div> <div style="width: 20%; text-align: center;">閉</div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> </div>											
2次補助系状態	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> ドレン 2/2 ~ 3/12 </div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 充填 3/12 ~ </div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> </div>											
その他	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 2次C/Tバイパス試験 </div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%; text-align: center;"> 2次C/Tバイパス試験 </div> <div style="width: 20%;"></div> </div> <p style="text-align: center;">△ (PL計EMP電圧72V)</p>											

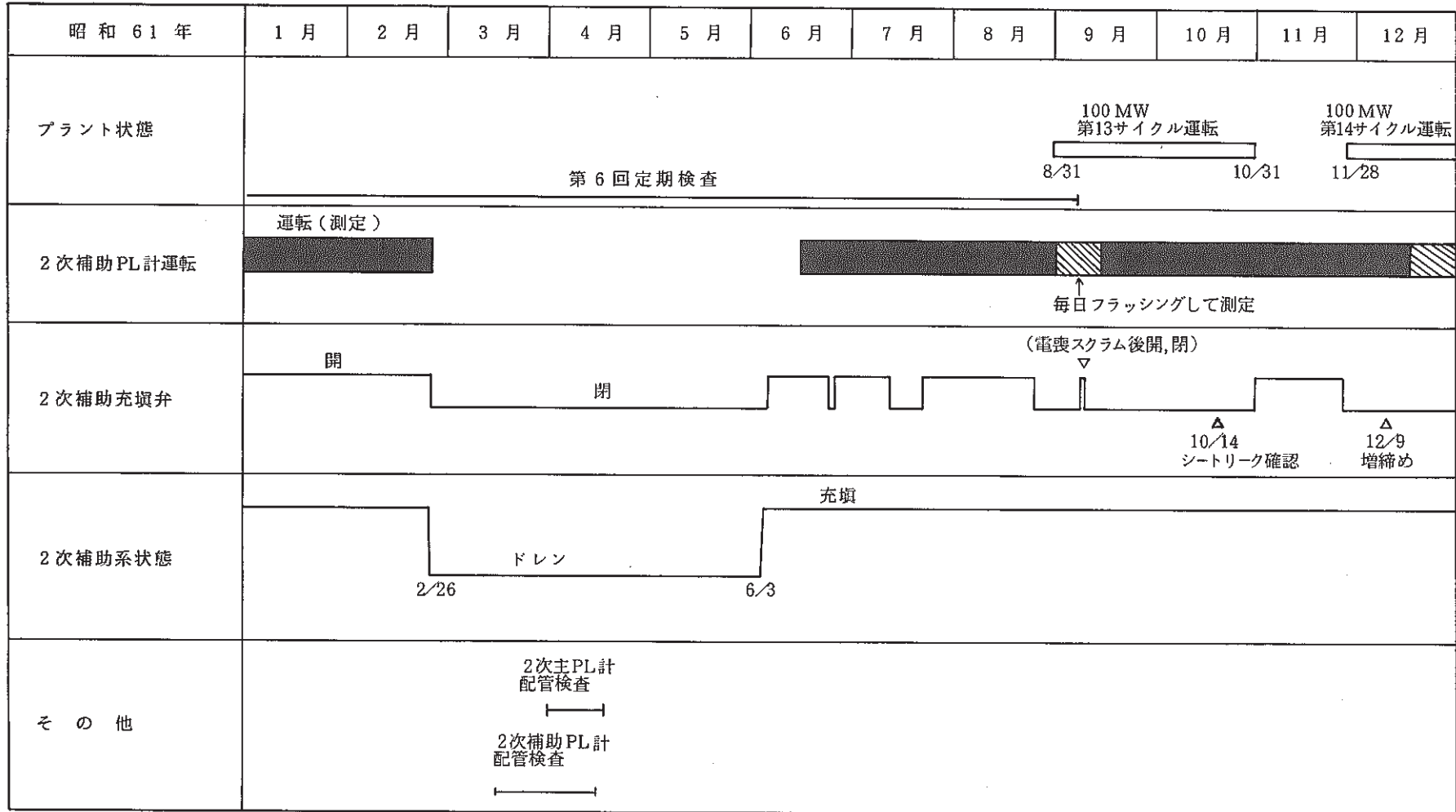
表 3.1(3) 2次補助プラグ計運転状態

昭和 60 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
プラント状態	1/13	100MW 第7サイクル運転		FFDL 試験 3/31 4/17 4/19	第5回定期検査						100MW 第8サイクル運転	12/3
2次補助PL計運転	流量出ず 測定不可	運転(測定)	流量出ず測定不可								流量出ず 測定不可	
2次補助充填弁	開	閉										
2次補助系状態	充填					6/1	ドレン			10/1		
その他	△ 2/8 PL計流量回復 (EMP電圧120V)						PL計改造工事 (出入口フィルタ, オリフィス交換)			△ (PL計EMP電圧25V)		

表 3.1(4) 2次補助プラグ計電転状態

昭和 60 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
プラント状態		100 MW 第 9 サイクル運転 1/20 ~ 3/31		100 MW 第 10 サイクル運転 4/25 ~ 6/11		100 MW 第 11 サイクル運転 7/4 ~ 8/20		100 MW 第 12 サイクル運転 9/13 ~ 10/29		B4M 照射 フィードバック反応度 特性試験 (I) (II)		
2次補助PL計運転	流量出ず 測定不可	運転(測定) 毎日フラッシングして測定										
2次補助充填弁	開 閉											
2次補助系状態	充 填											
そ の 他	△ 1/15 PL計流量回復 (EMP電圧34V)				△ 運転指示書発行 (測定開始直後の安定し たデータを採取する)				△ PL計流量比調整 99 → 104%			

表 3.1(5) 2次補助プラグ計運転状態



4. 不具合原因の検討

2次補助プラグ計の不具合現象は次に示す3つの現象に分類できる。

- (i) 原子炉運転中にみられるプラグ温度の上昇
- (ii) ノイズ状の流量変動及び流量低下
- (iii) 不純物の析出・溶解に起因しない流量変化

この章では、各現象についてその原因の推察並びに対策案を検討した結果を示す。

4.1 原子炉運転中にみられるプラグ温度の上昇

(1) 現象

「常陽」運転開始以来現在まで、原子炉運転中には2次補助プラグ温度が上昇、変動し安定な測定が行えない現象がある。

以下に特徴的な現象例を示す。

① 出力上昇（ナトリウム温度上昇）時のプラグ温度変化

100MW第4サイクル出力上昇時のプラグ計温度、流量の変化を図4.1.1(1)～(2)に示す。

6月25日22:30から核加熱が開始され、6月26日4:55主系統ナトリウム温度は370℃（2次補助系のナトリウム温度は350℃）に上昇した。この間、2次補助充填弁は2%開保持され、26日9:04出力上昇前に全閉とされた。

原子炉起動前及び起動後しばらくの間は、プラグ温度は2次純化系コールドトラップ運転温度及び2次主プラグ温度と同温度で安定していた。しかし、原子炉出力の上昇すなわち系統ナトリウム温度が上昇するとプラグ温度が変動しながら上昇した。この変動周期はしだいに短くなり、原子炉起動後約1週間でプラグ温度指示は200℃以上となった。また、プラグ温度が上昇し始めた頃から析出不純物のはく離と思われる流量比のステップ状の回復がみられるようになった。

② 出力運転中のプラグ温度変化

100MW第9サイクル出力運転中のプラグ温度、流量の変化を図4.1.2に示す。この図は、100MW第9サイクル中頃、プラグ計をフラッシングから自動連続測定開始した時のものである。

プラグ温度は、測定開始後しばらくは原子炉起動前とほぼ同温度で安定した指示を示したが、約7時間後から変動しながら上昇した。この変動間隔は、原子炉起動初期に比べると短かいがこれ以上短くなることはなく一定であった。

100MW第14サイクル出力運転中のプラグ温度、流量の変化を図4.1.3に示す。これも100MW第14サイクル中頃、フラッシングから自動連続測定を開始した時のものであるが、

プラグ温度の上昇はあるものの第9サイクルのような変動はみられない。これは、プラグ温度調節計の制御定数を変更したことにより高い温度を示す不純物のプラグ温度を安定に測定できたことによるものである。そのプラグ温度は約225℃であった。

③ 出力降下(ナトリウム温度降下)時のプラグ温度変化

100MW第3サイクル出力降下時のプラグ計温度流量の変化を図4.1.4(1)～(6)に示す。6月9日16:2130MW出力運転から制御棒一斉挿入により原子炉は停止され、20:35に系統温度は250℃に降温された。出力運転中のプラグ温度は200℃以上で流量と共に変動が激しい。系統降温後は110℃～210℃の範囲でゆっくりと変動しており、第1プラグ温度と第2プラグ温度の両方を同時に測定しているようである。また、原子炉停止後は流量の変動(ステップ状の回復)もなくなった。

6月14日20:00に2次補助充填弁を2%開とした。開直前からプラグ温度が上昇しているのは、恐らく第2プラグ温度が現われたためと思われる。2次補助充填弁開から約11時間後、プラグ温度は、2次純化系コールドトラップ温度及び2次主プラグ温度とほぼ同温度(140℃)となり、以後第4サイクル開始まで安定していた。

④ 2次補助充填弁開、閉による影響

100MW第3サイクル出力運転中に実施した2次補助充填弁開、閉に伴うプラグ計温度、流量の変化を図4.1.5(1)～(5)に示す。2次補助充填弁開以前のプラグ温度は170℃～240℃の範囲で変動しているが、2次補助充填弁を1.5%開とした後は徐々に低下し、14時間後2次主プラグ温度とほぼ同温度(140℃)で安定した。

2次補助充填弁閉後のプラグ温度は、約3日間140℃で安定していたが、徐々に変動しながら上昇していき、1週間後には2次補助充填弁開以前と同じ状態となった。

また、100MW第4サイクル終了後の原子炉停止中(59年8月23日～59年9月1日)に、2次補助充填弁を閉として系統ナトリウム温度が低い状態(250℃)でのプラグ温度変化を調査したが、プラグ温度の上昇はなかった。

⑤ 現象のまとめ

2次補助プラグ温度の変動現象のモデルを図4.1.6に示す。

- a) プラグ温度は原子炉出力上昇すなわち系統温度の上昇によって上昇する。
- b) 原子炉出力運転中、2次補助充填弁を開とし、2次主系統の純化ナトリウムと置換することによりプラグ温度は降下する。再度2次補助充填弁を閉とするとプラグ温度は上昇する。
- c) 原子炉停止、すなわち系統温度の降下によってプラグ温度は低下する。
- d) プラグ温度が上昇すると流量も変動し、ステップ状の流量回復がみられる。
- e) 系統温度が低い状態では2次補助充填弁の開閉に関係なくプラグ温度の上昇はない。

(2) 原因の検討

最近まではプラグ計に析出する不純物は酸素もしくは水素であると考えられていた。このことから、系統温度の上昇によりプラグ温度が上昇することを単純に考えると、系統温度の上昇により系統機器・配管に付着していた酸素もしくは水素が溶出していると考えられるが、これまでの経験から、機器・配管表面に付着している酸素・水素は、一旦系統温度が上昇するとそのほとんどは溶出しきってしまうことから、10年以上も運転を行っている系統から今だに酸素・水素が溶出しているとは考えづらい。

また、2次補助冷却系に不純物が混入するラインとして唯一カバーガス系が考えられるが、供給されるアルゴンガスに含まれる酸素・水素は無視できる量であること、及びカバーガスサンプリング分析結果にも有意な上昇はないことからカバーガスからの混入は考えられない。

よって、プラグ計に析出するプラグ温度200℃以上の不純物は酸素、水素以外の元素で、系統温度の上昇により2次補助冷却系機器・配管から溶出してくるものであると推察される。

ナトリウム技術開発室でのプラグ計特性試験中に、酸素、水素以外の“第3の不純物”がプラグ計に析出することが報告されている⁽²⁾。この不純物の飽和温度は225℃以上で、その析出速度は酸素、水素に比べ非常に遅く、またプラグ計流量はステップ状に回復する。この現象は、原子炉運転中における「常陽」2次補助プラグ計の現象に良く似ていることから、2次補助プラグ計に析出する不純物はこれと同じ第3の不純物である可能性が高い。

図4.1.7にナトリウム技術開発室で観察された第3の不純物のプラグ計記録を示す。

この第3の不純物の存在で100MW第9サイクル出力運転中のプラグ計温度、流量の変化が説明できる。

図4.1.8にプラグ計温度、流量の変動原因説明図を示す。連続測定開始直後は酸素もしくは水素の析出により流量比は急速に降下する。しかし、第3の不純物の析出速度は遅いためこの時点でプラグ計流量変化を支配するのは酸素もしくは水素である。このためしばらく(約7時間)は酸素もしくは水素のプラグ温度140℃を指示している^(注)。しかし、オリフィス部ナトリウム温度は第3の不純物のプラグ温度以下であるため、オリフィス部に第3の不純物が徐々に析

注) 連続測定開始時の流量降下及び140℃のプラグ温度が酸素もしくは水素によるものであることは、下記に示す100MW第9サイクル前後におけるナトリウムサンプリング分析結果から判断できる。

	ナトリウム分析結果	プラグ温度換算
第9サイクル前 (2次補助充 填弁開状態)	酸素 1.3 ppm	127℃(Eichelbergerの式による)
	水素 0.13 ppm	141℃(Vissersの式による)
第9サイクル後 (同上)	酸素 2.5 ppm	146℃(同上)
	水素 0.11 ppm	137℃(同上)

出してくる。この析出によってプラグ計流量比がその設定値(90%)より低下するため(約7時間後)、流量比を回復させるために温度が上昇し、第3の不純物のアンプラグ温度が現われる。その後は、プラグ温度調節計の制御定数が第3の不純物の析出・溶解速度に適していないため、プラグ温度及び流量は変動すると考えられる。

また、これとは別にプラグ計ナトリウム流量を規定量得るために電磁ポンプ電圧は年々増加しており、この現象は2次主プラグ計よりも2次補助プラグ計の方が顕著であることから、第3の不純物もしくはその化合物がプラグ計出・入口フィルタに徐々に析出(固着)していることが考えられる。

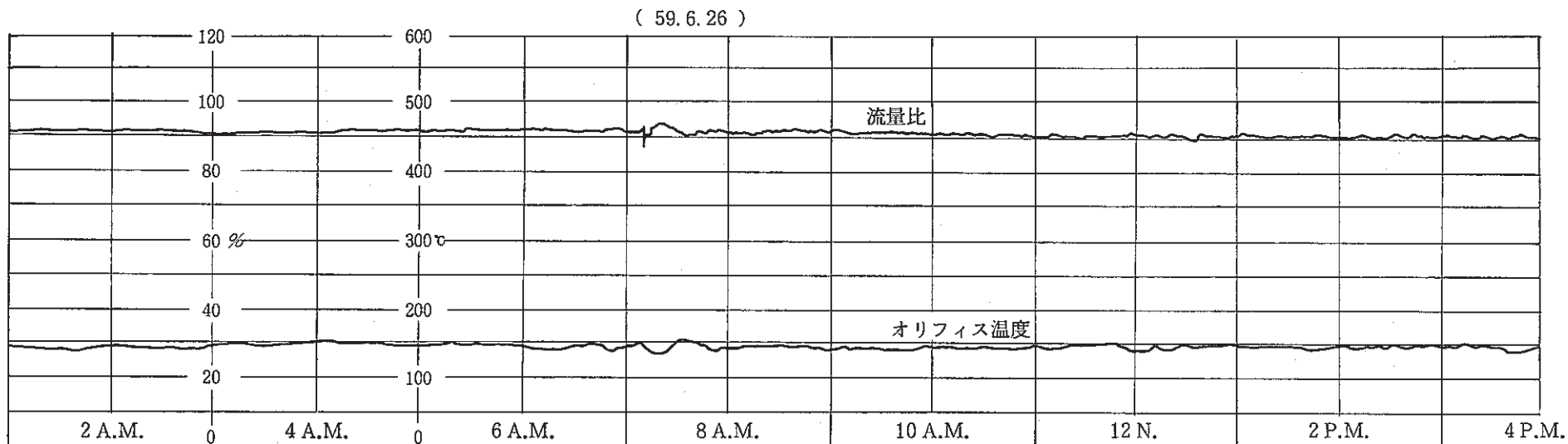
(3) 対 策

「常陽」2次冷却材ナトリウムの維持基準として、構造材の腐食量抑制等の観点からナトリウム中の酸素濃度20ppm以下を根拠に、プラグ温度225℃以下が決められている。

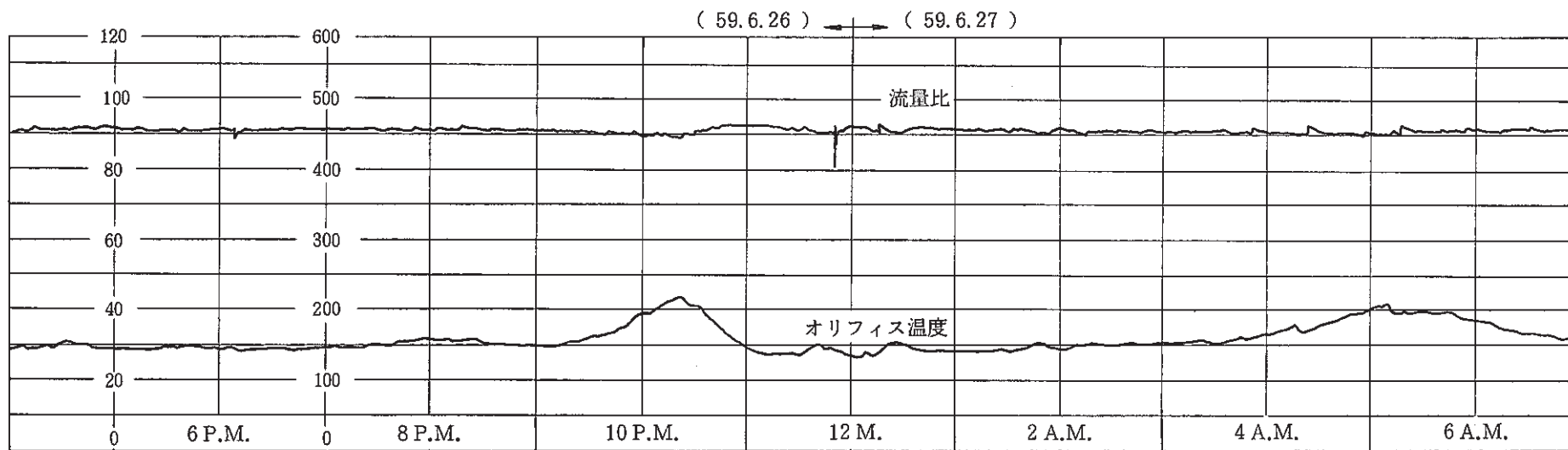
原子炉運転中に2次補助プラグ計を連続して測定を続けると、第3の不純物の析出に伴いプラグ温度は上昇し酸素不純物のプラグ温度測定が不可能となる。このため、現在、原子炉運転中におけるプラグ温度上昇の対応策として毎日プラグ計のフラッシングを実施している。これは、フラッシングを実施した後の測定において、測定開始後の数時間は比較的安定した酸素不純物(もしくは水素不純物)のプラグ温度が測定できることからやむなく実施しているものである。

このまま何も根本的対策を講じない場合、安定したプラグ温度の測定が行えないばかりか、プラグ計出・入口フィルタへの第3の不純物の析出(固着)によりプラグ計流量が確保できなくなり、プラグ計の運転そのものも行えなくなる可能性がある。また、2次補助冷却系内の低温部分(弁座、空気冷却器伝熱管等)への第3の不純物の析出により、系統の正常な機能を妨げることも懸念される。

これらを防止するためには、この第3の不純物を除去する必要がある。そのためには、①2次補助冷却系へのコールドトラップの設置、もしくは②2次補助充填弁開状態での原子炉運転を行わなければならない。しかし、これらはいずれも一長一短がありどちらを採用するかはさらに検討していかねばならない。また、これらを検討するためにも第3の不純物元素が何であるか、系統からの溶出量はいかほどか究明していかねばならない。



↑ 2次補助系 Na 温度 350 °C
 4 : 55 系統昇温終了 (370 °C)
 9 : 04 充填弁閉
 10 : 37 出力上昇開始



↑ 2次補助系 Na 温度 368 °C
 16 : 58 原子炉出力
 30 MW 出力保持

図 4.1.1 (1) 出力上昇時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 4 サイクル)

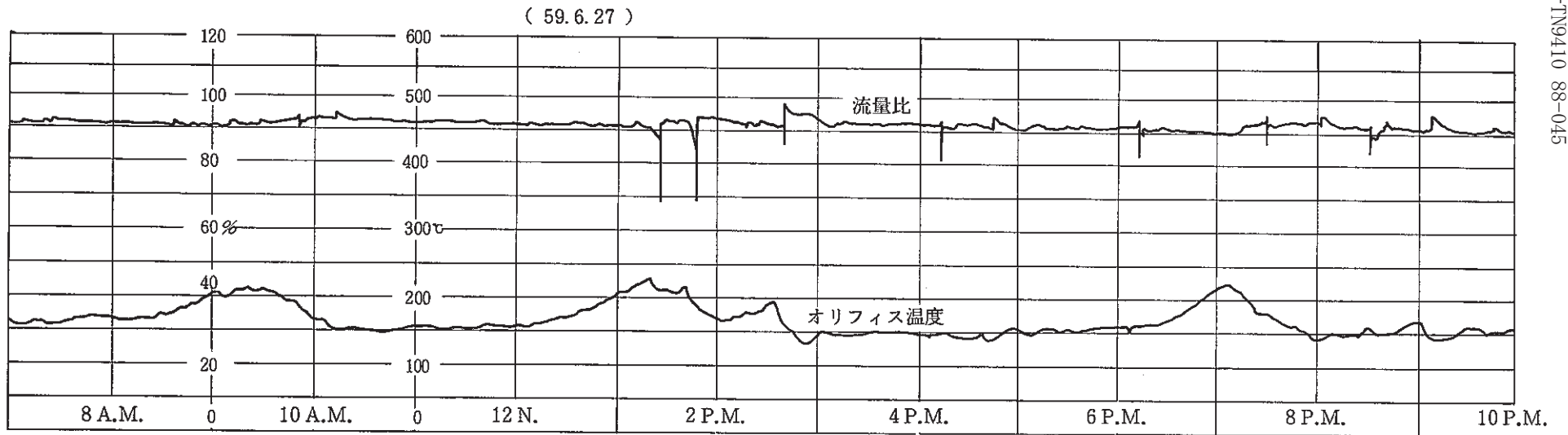
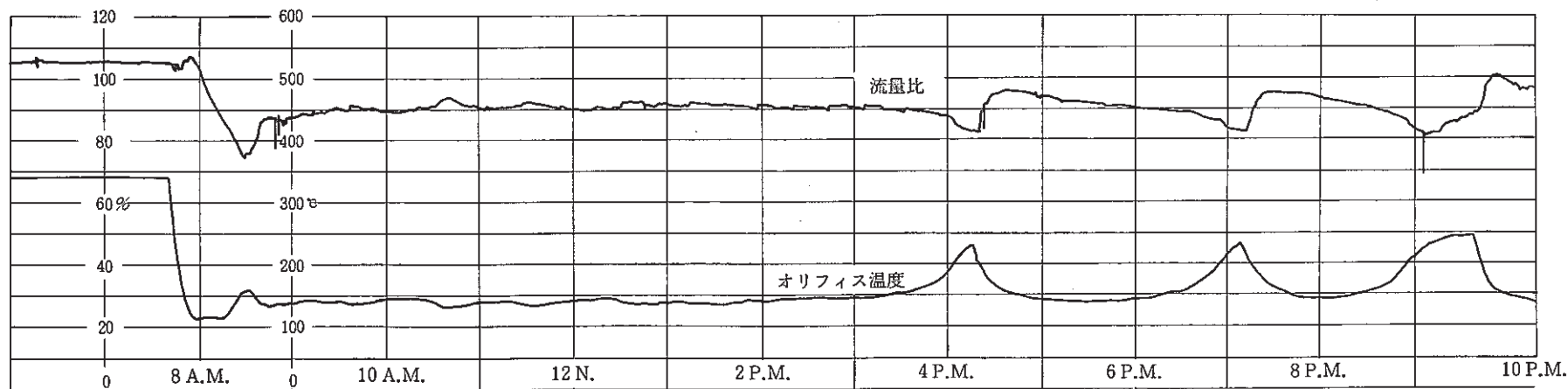


図 4.1.1(2) 出力上昇時のプラグ計温度，流量の変化（100 MW 第4サイクル）

(61. 3. 5)



↑
フラッシング→自動連続測定

図 4.1.2 出力運転中のプラグ計温度、流量の変化 (100 MW 第 9 サイクル)

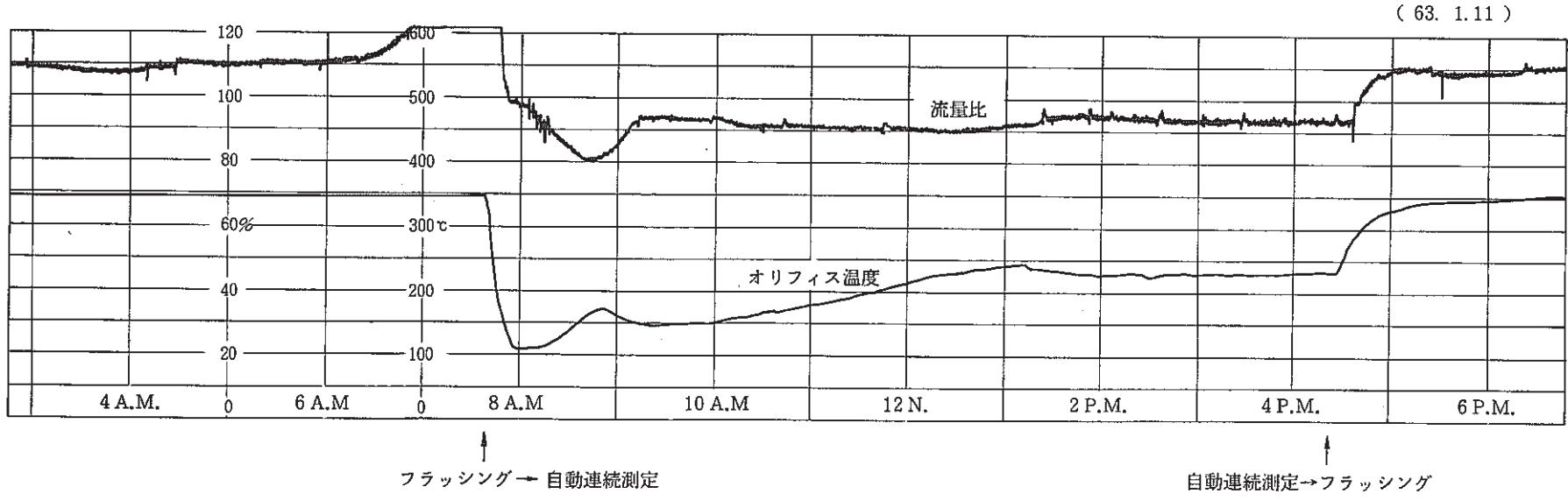
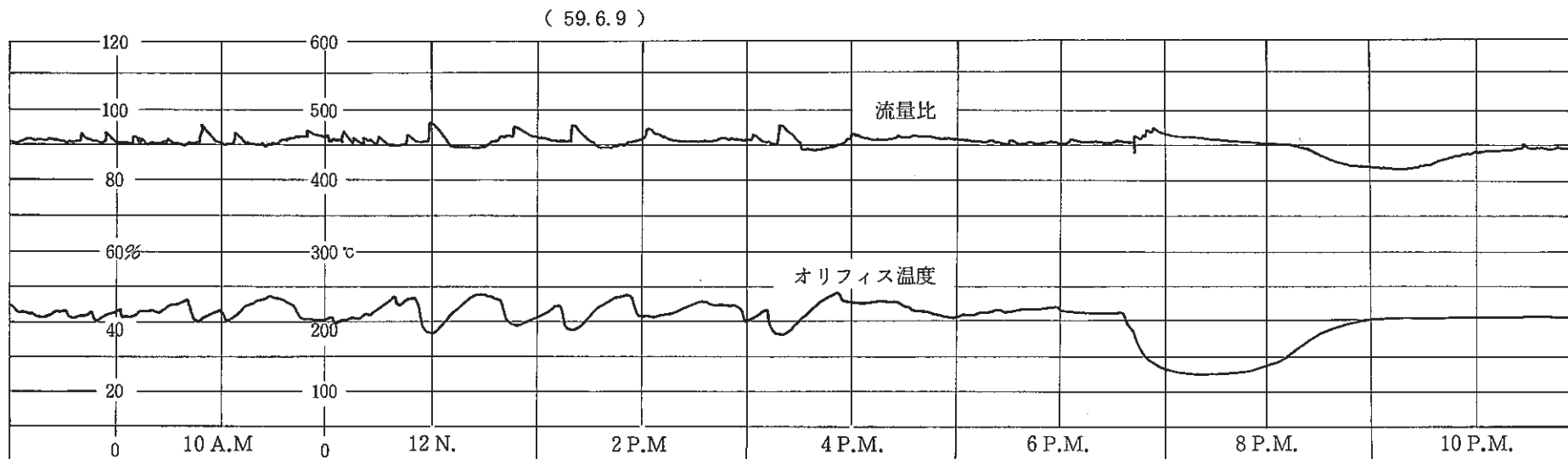


図 4. 1. 3 出力運転中のプラグ計温度、流量の変化 (100 MW 第 14 サイクル)



↑ 16:21 30 MW より原子炉停止
 ↑ 20:35 系統降温完了 (250 °C)

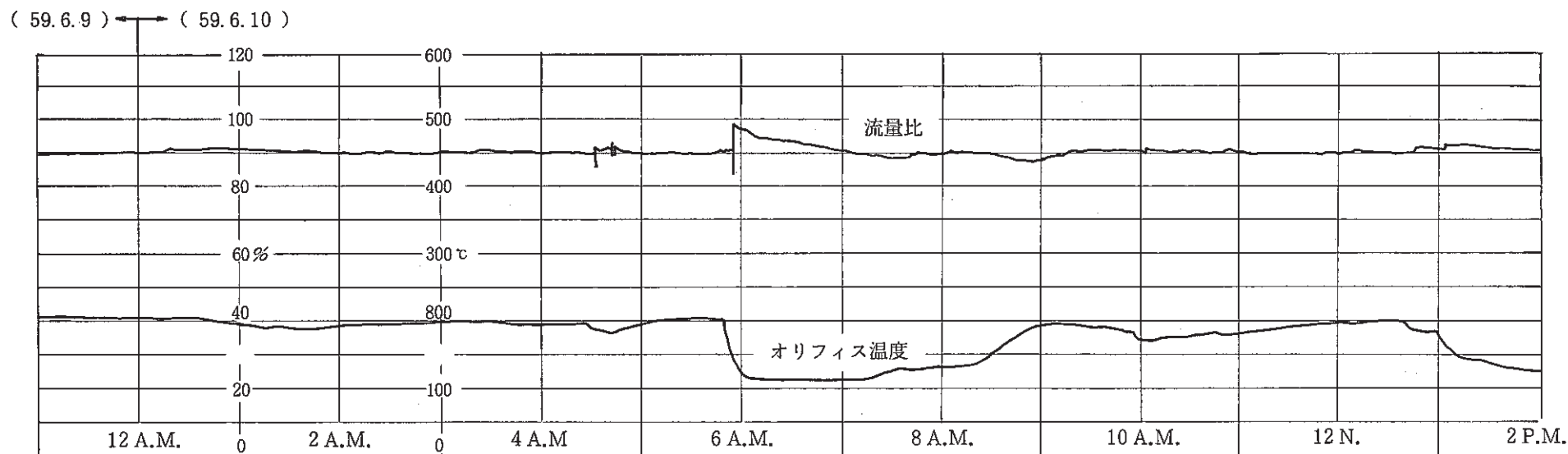


図 4.1.4 (1) 出力降下時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)

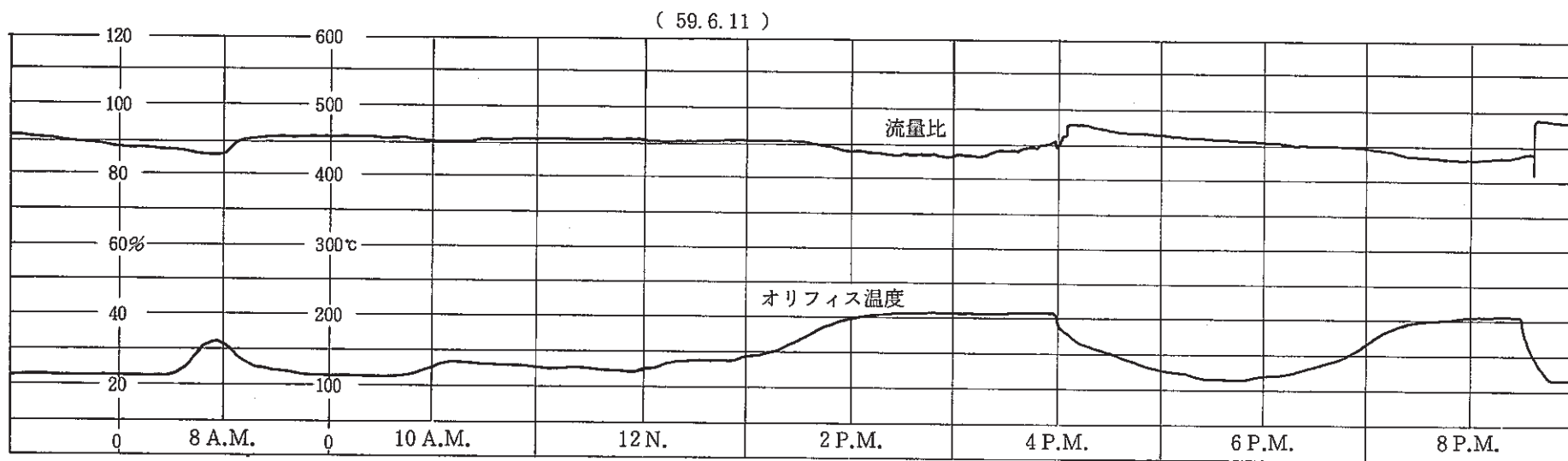
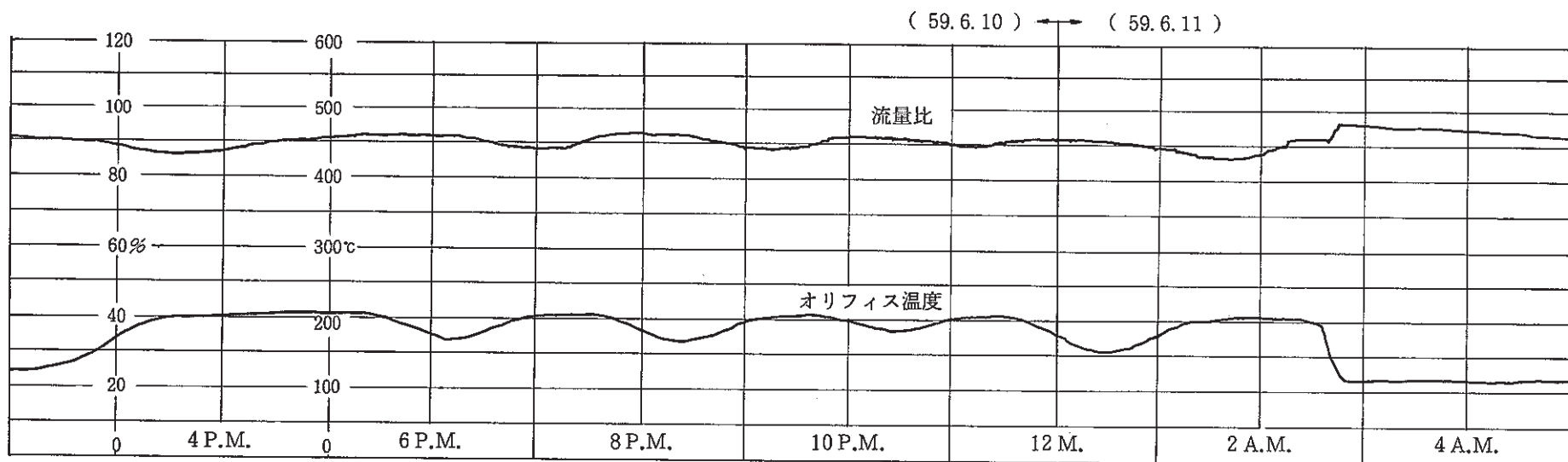


図 4.1.4(2) 出力降下時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)

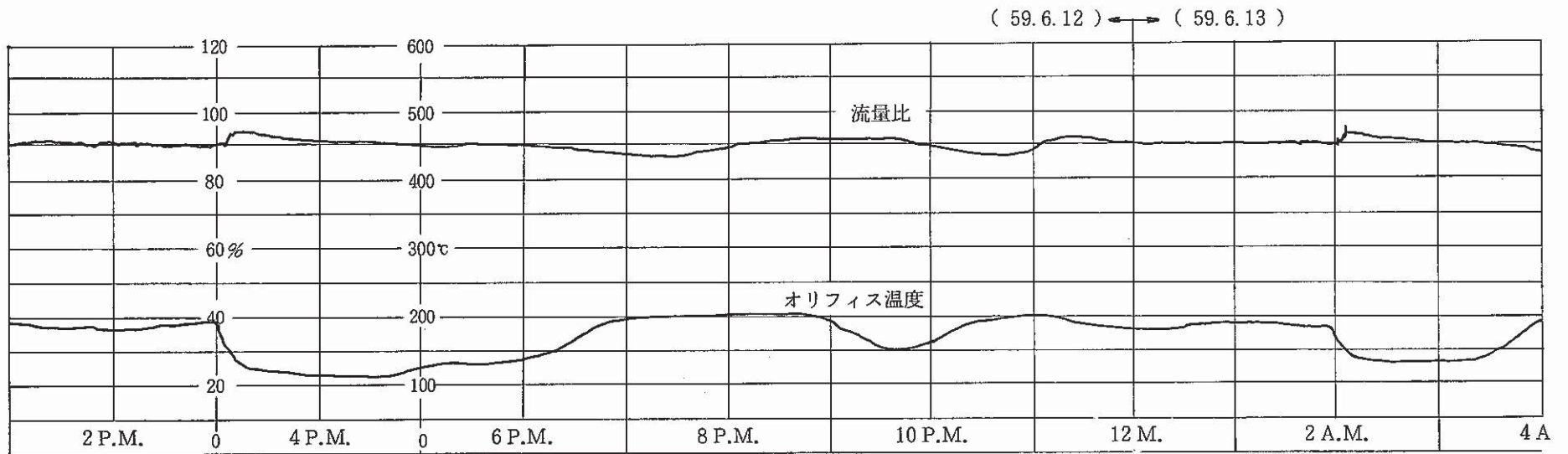
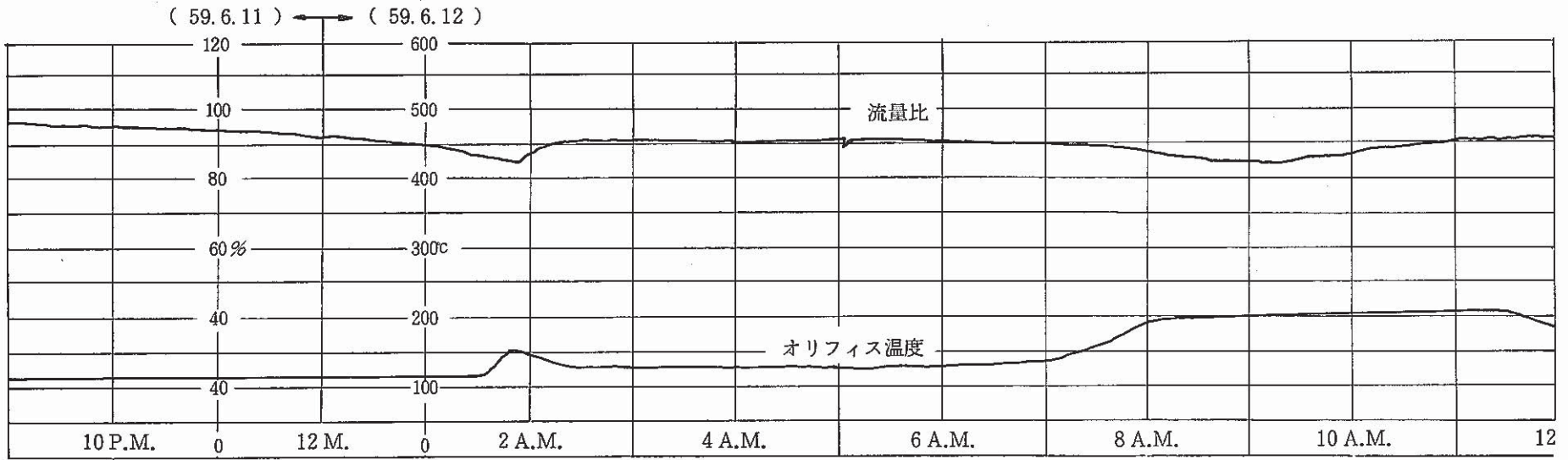
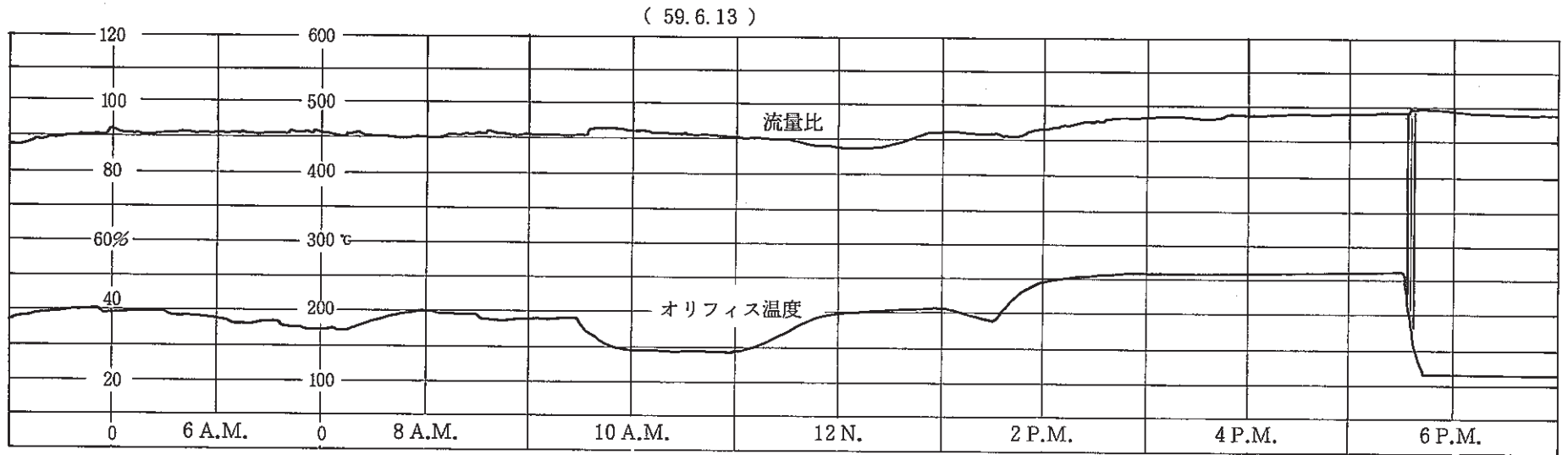


図 4.1.4 (3) 出力降下時のプラグ計温度、流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)



↑ 13:30 自動連続測定 → フラッシング
↑ 17:30 フラッシング → 自動連続測定

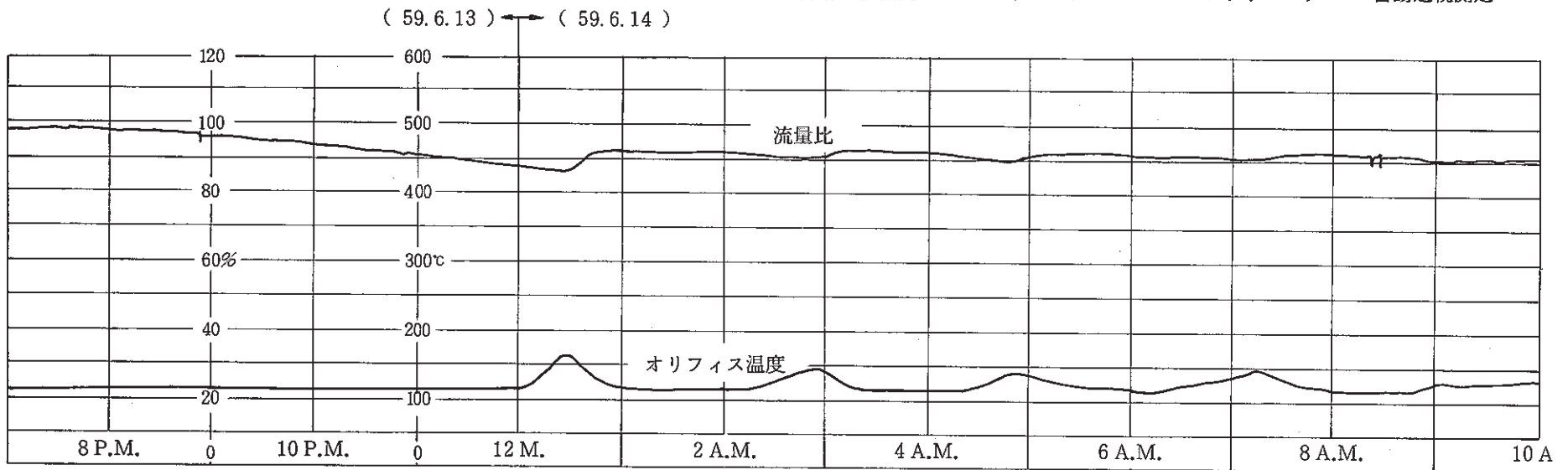
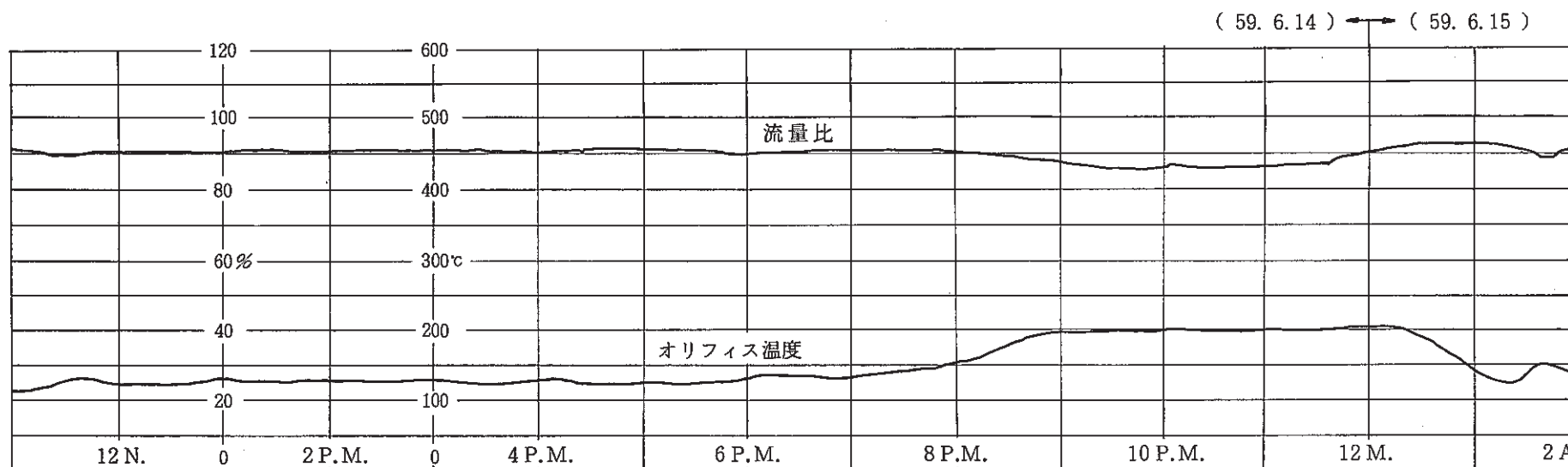


図 4.1.4(4) 出力降下時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)



↑
20:00
充填弁 2%開

(59. 6. 15)

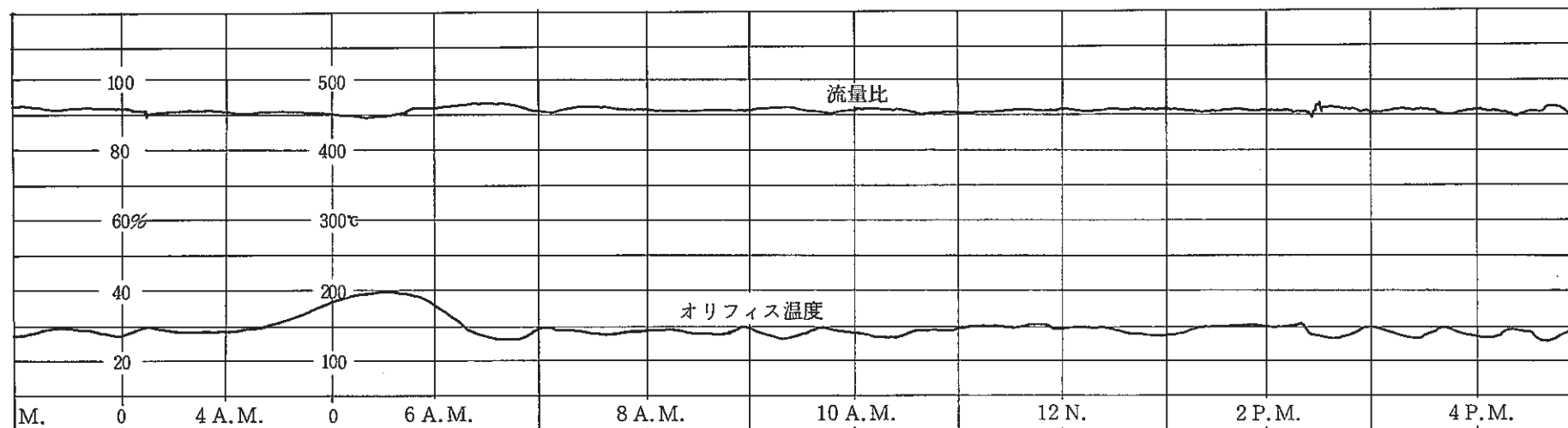


図 4. 1. 4 (5) 出力降下時のプラグ計温度, 流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)

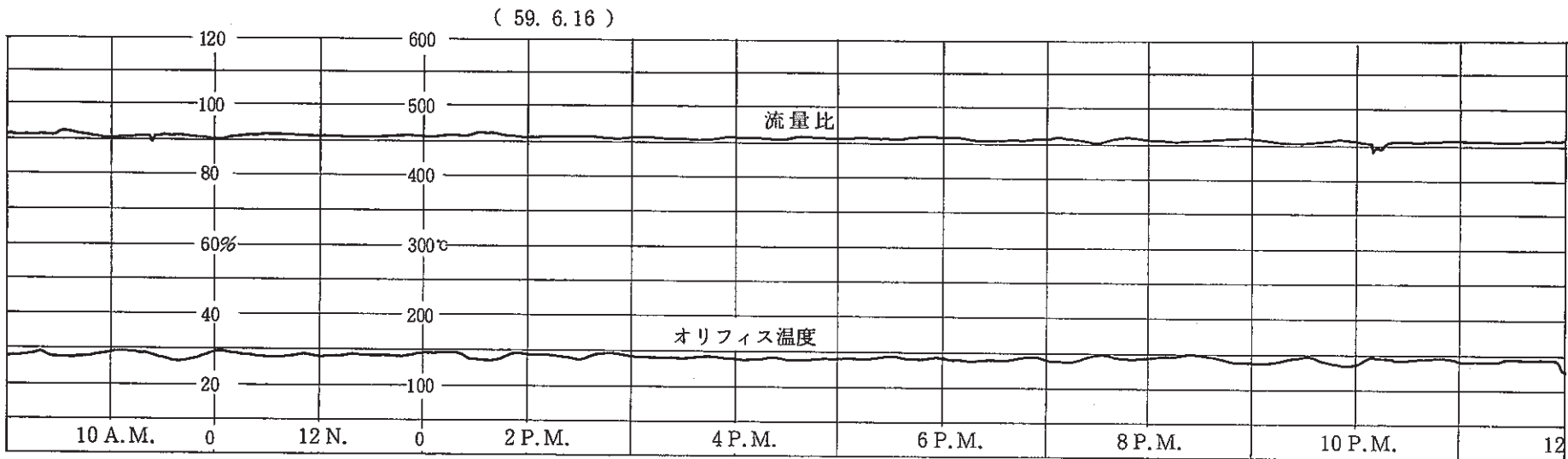
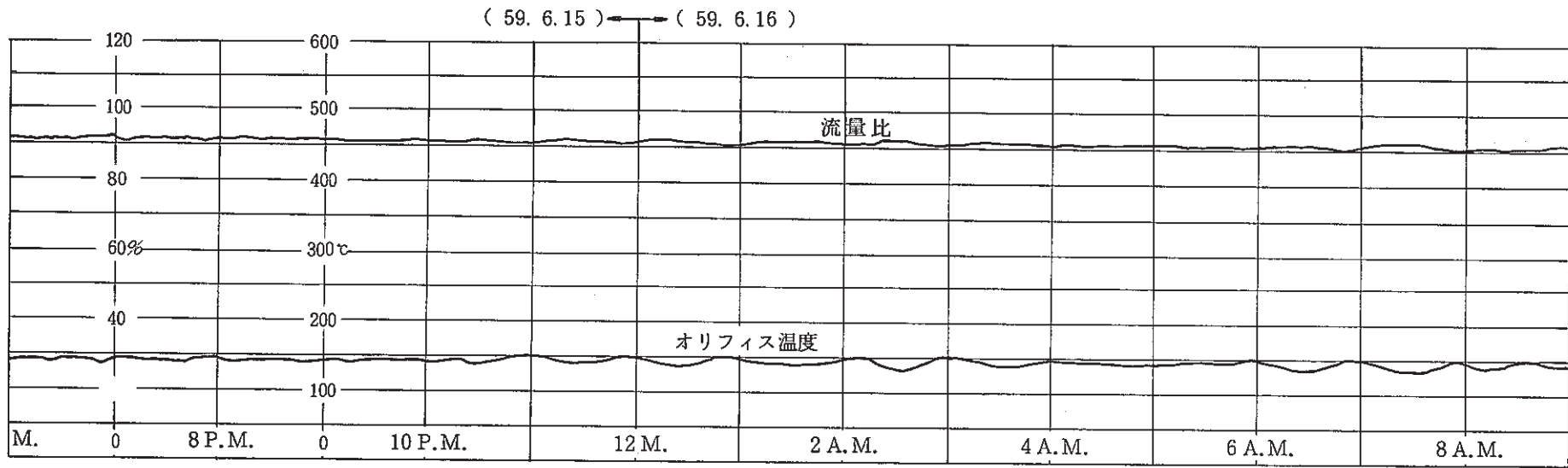
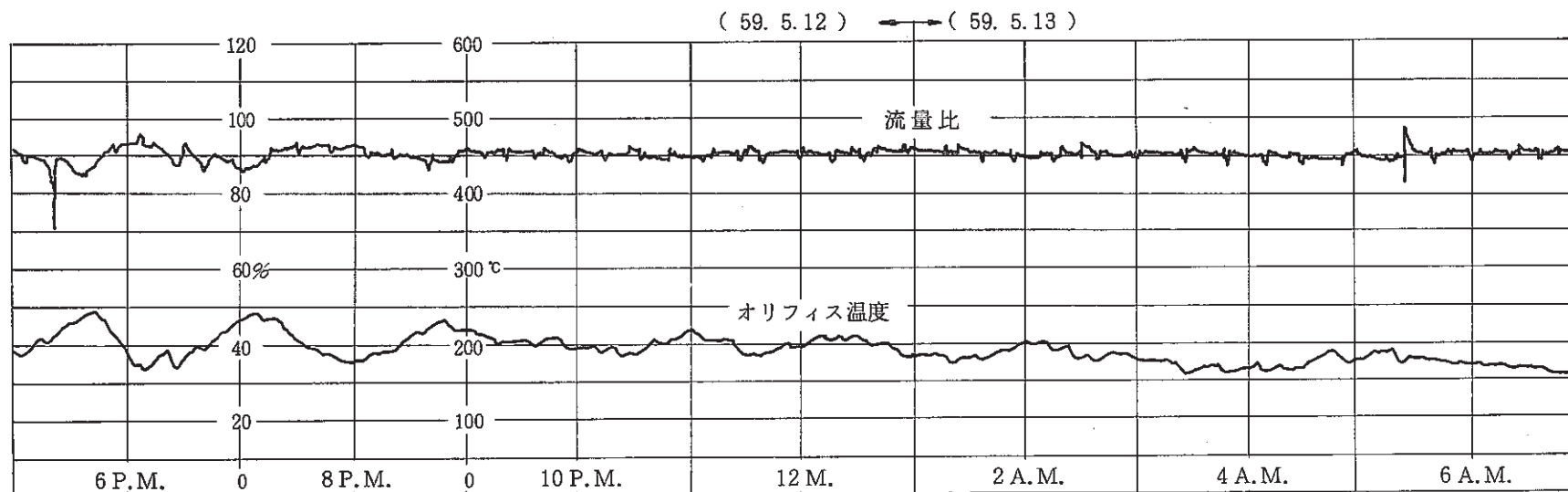
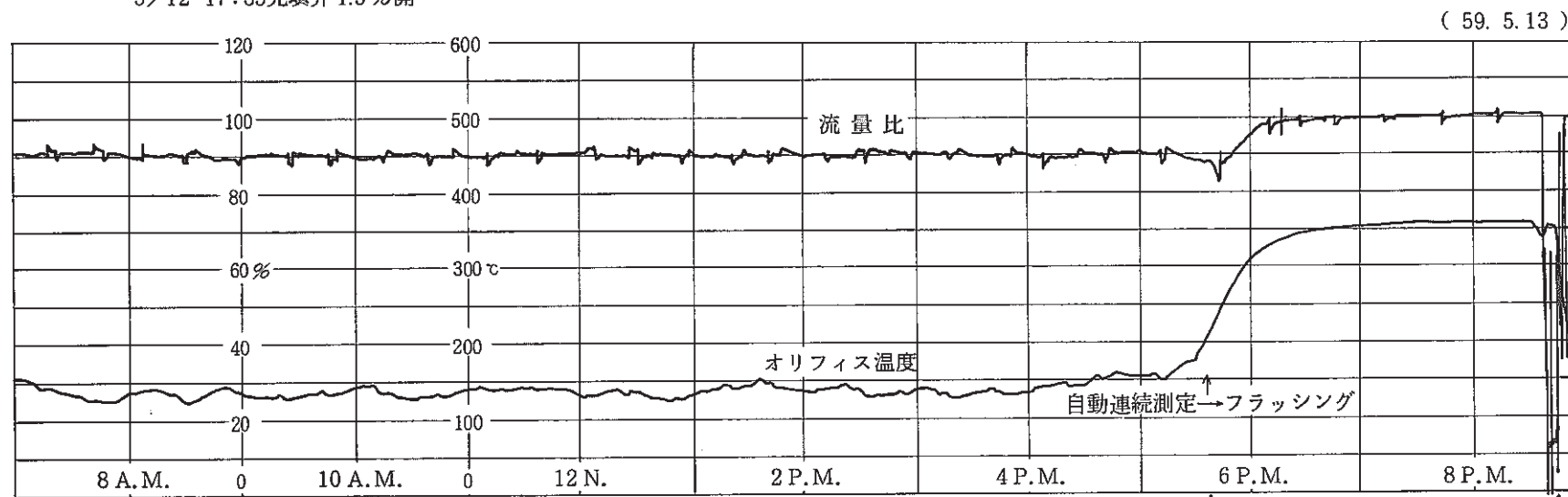


図 4. 1. 4 (6) 出力降下時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 3 サイクル)



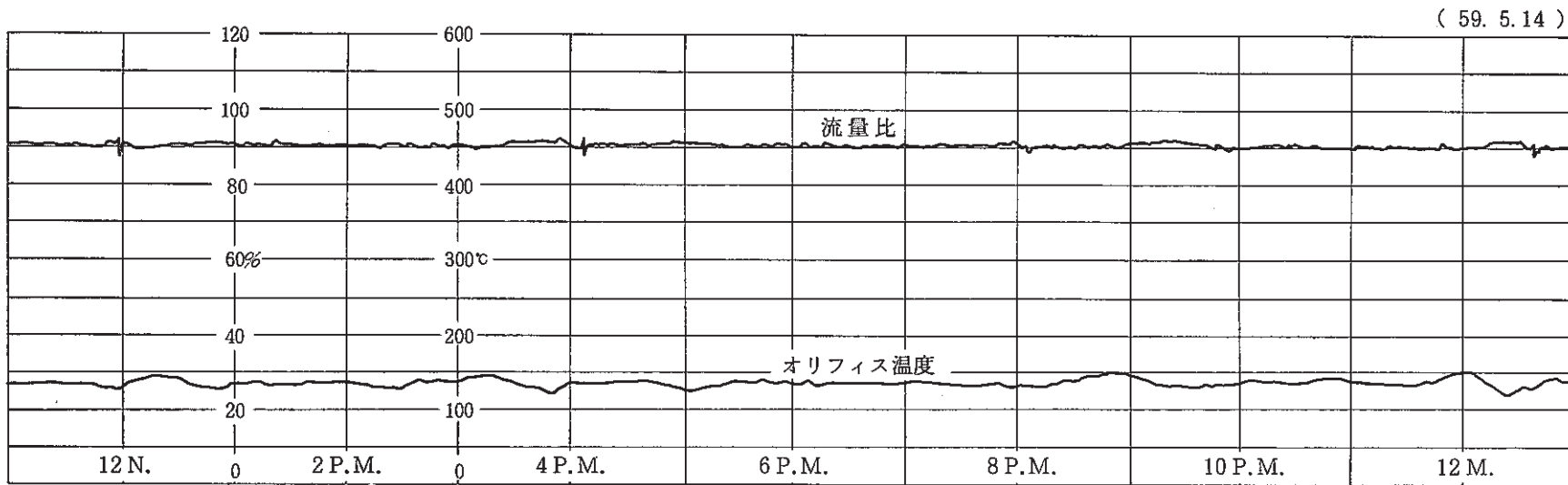
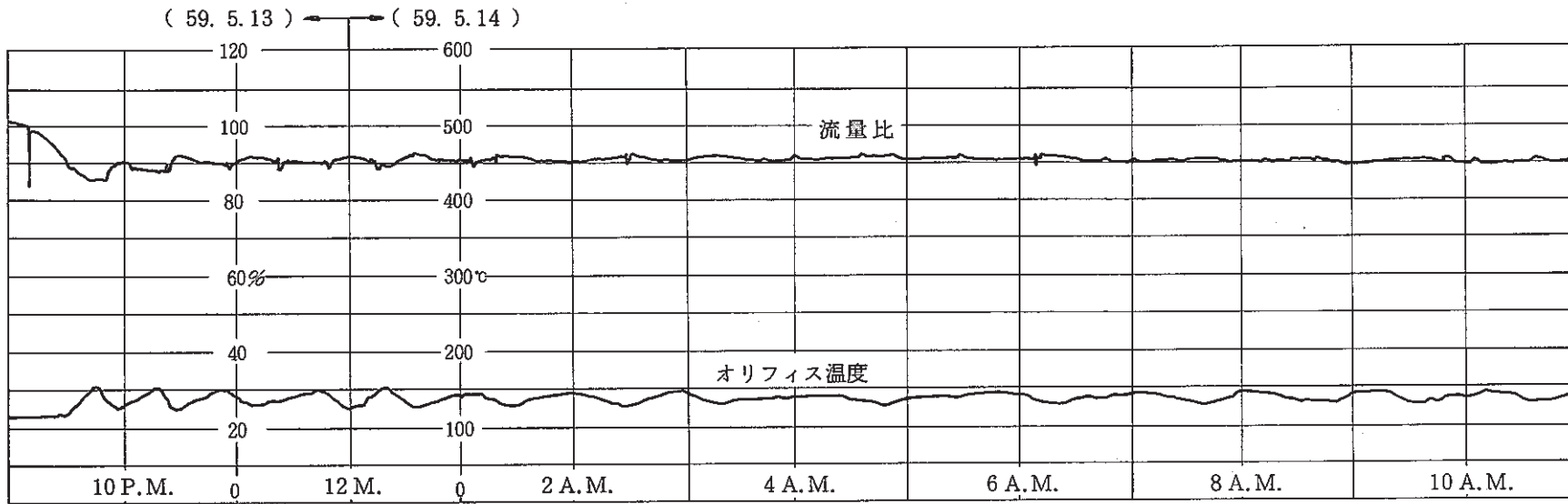
5/12 17:35 充填弁 1.5% 開



5/13 16:50 充填弁 開

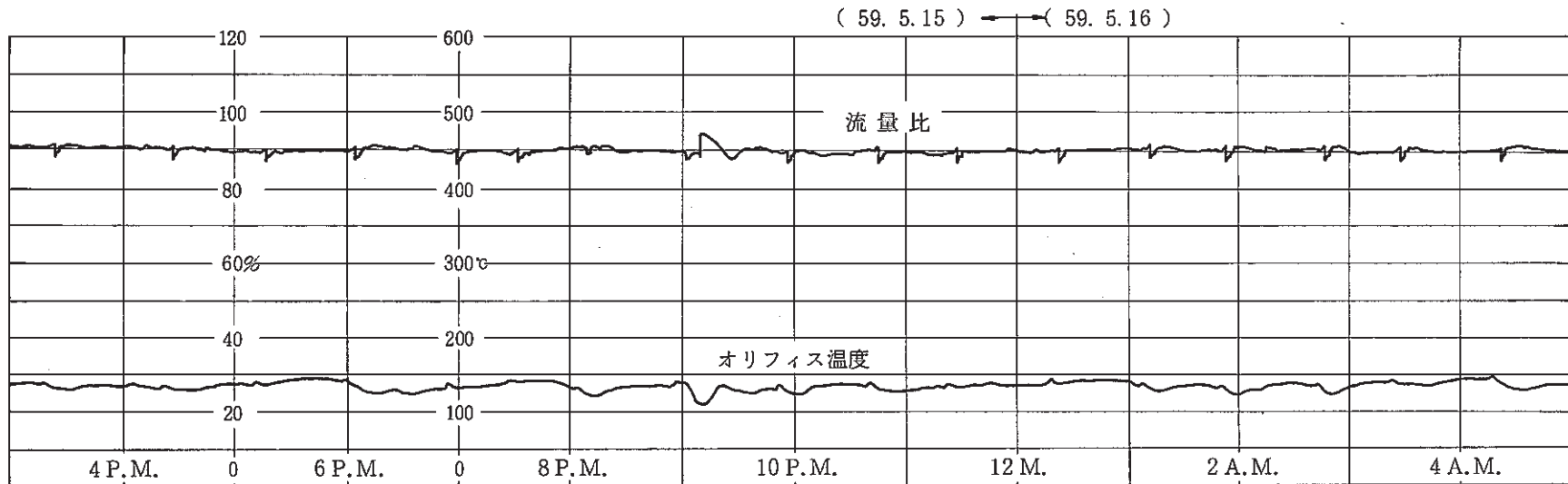
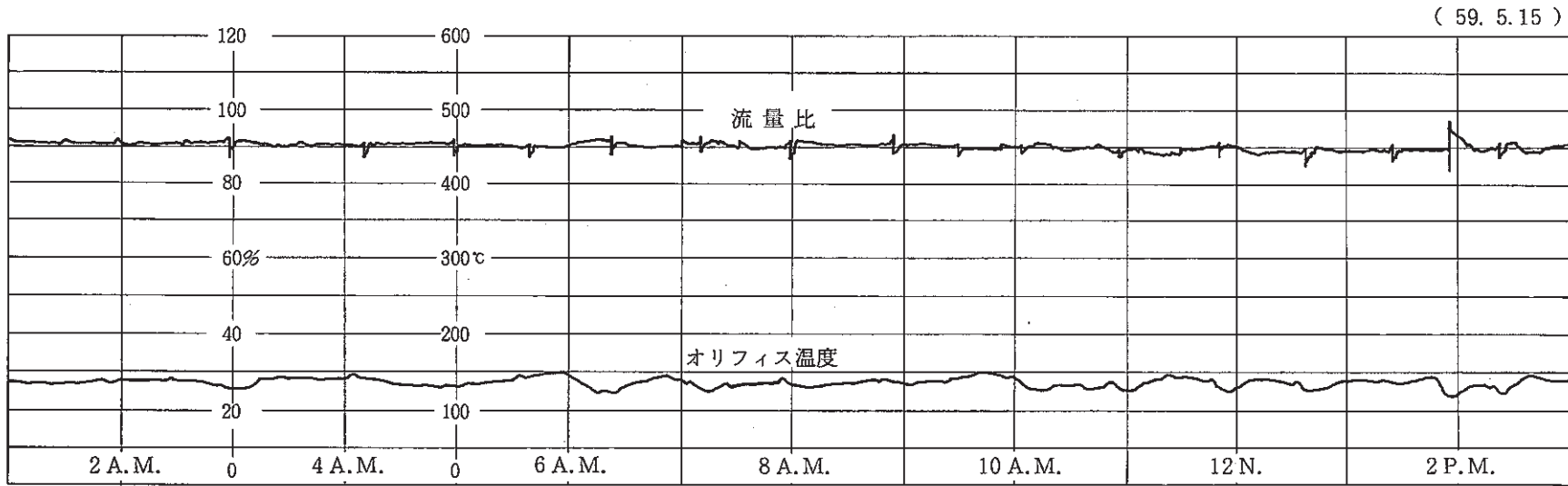
フラッシング → 自動連続測定

図 4.1.5(1) 2次補助充填弁開, 閉に伴うプラグ計温度, 流量の変化
(100 MW 第 3 サイクル)



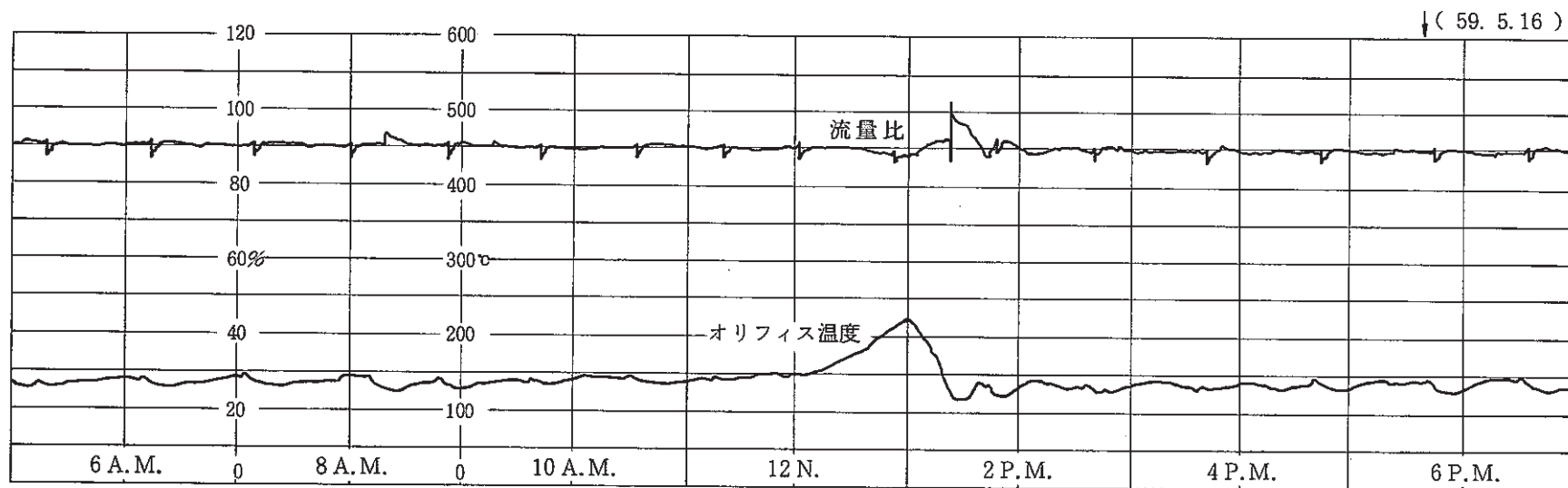
↑
5/14 16:50
充填弁閉 1日経過

図 4.1.5 (2) 2次補助充填弁閉, 閉に伴うプラグ計温度, 流量の変化
(100 MW 第3 サイクル)



↑
5/15 16:00
充填弁閉 2日経過

図 4. 1. 5 (3) 2次補助充填弁開, 閉に伴うプラグ計温度, 流量の変化
(100 MW 第3サイクル)



5/16 16:50
 充填弁閉 3日経過

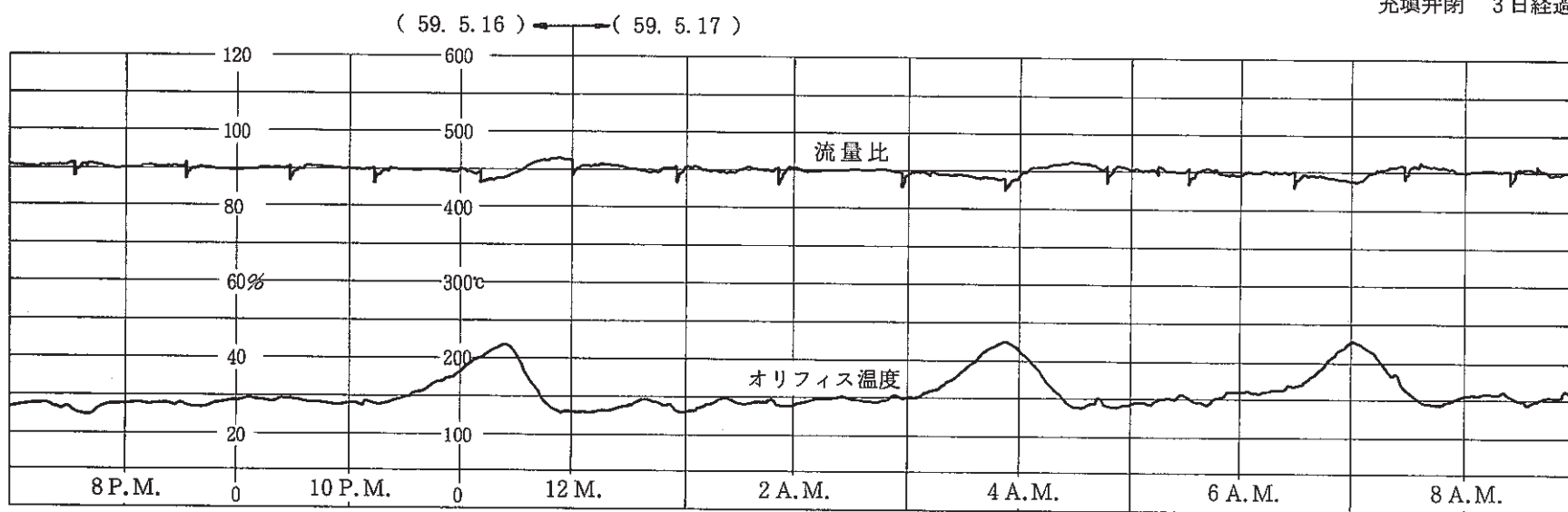


図 4. 1. 5 (4) 2次補助充填弁閉, 閉に伴うプラグ計温度, 流量の変化
 (100 MW 第3サイクル)

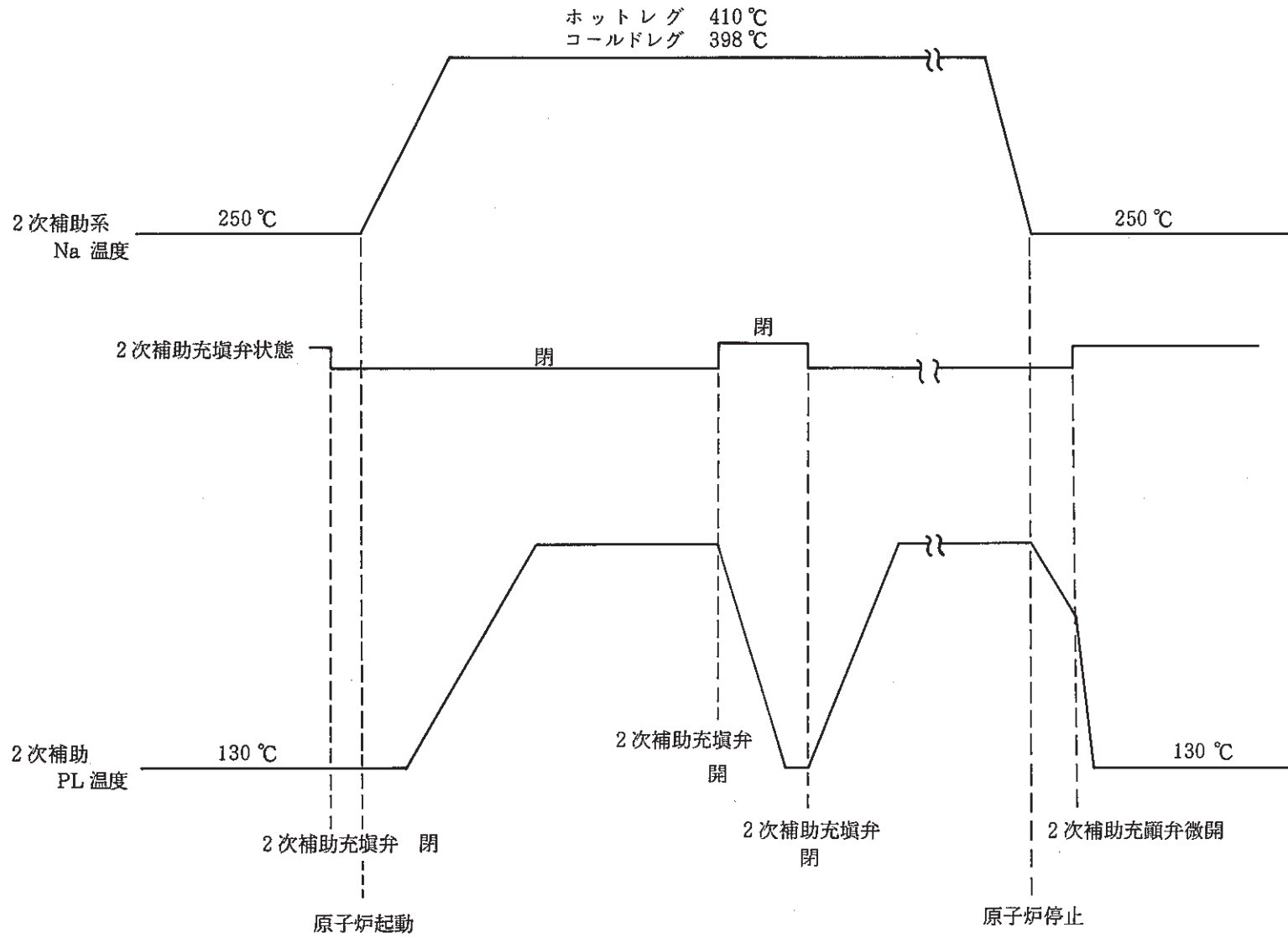
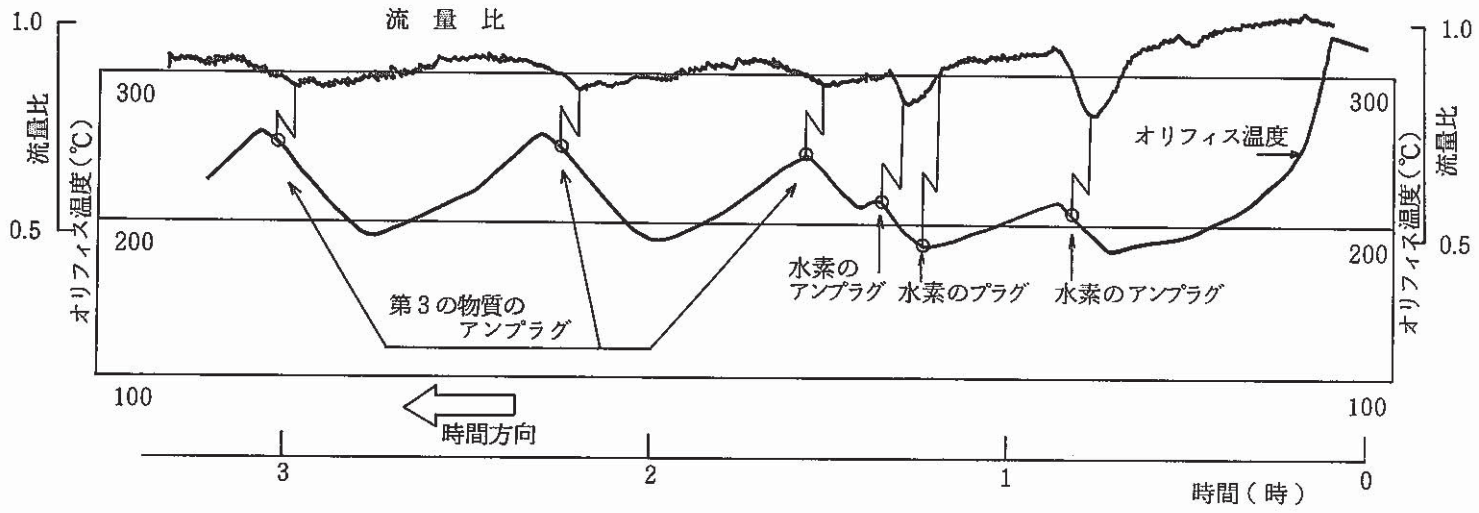
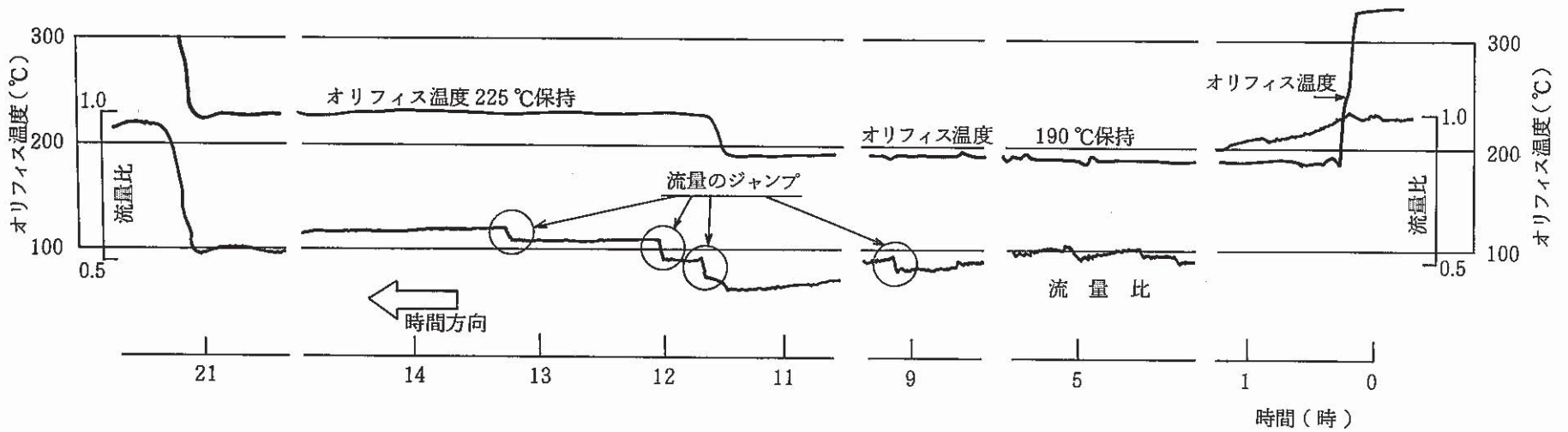


図 4.1.6 プラグ温度の変動現象モデル



PI-2 振動法運転時に観察された第3の不純物によるブレイク



PI-1 で観察された第3の不純物による流量減少

図 4.1.7 ナトリウム技術開発室で観察された第3の不純物のプラグ計記録

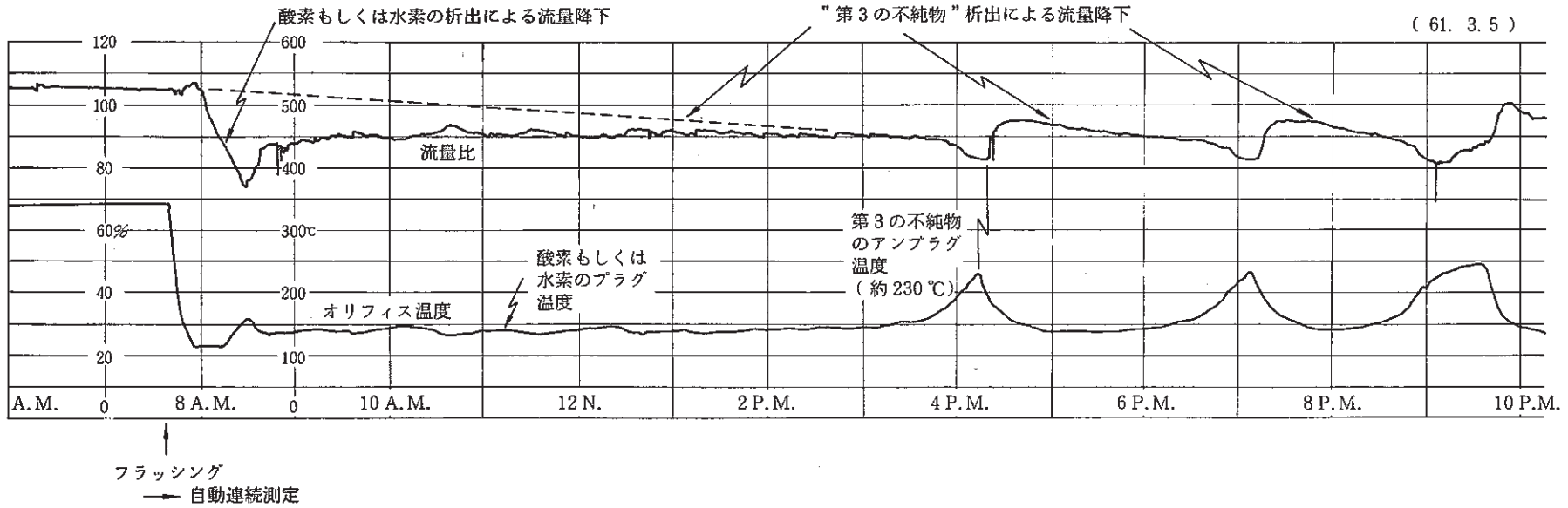


図 4.1.8 プラグ計温度, 流量の変動原因説明図

4.2 ノイズ状の流量変動及び流量低下

(1) 現象

原子炉起動後、系統ナトリウム温度の上昇に伴いプラグ計流量にノイズ状の変動が発生する現象がある。

図 4.2.1 に 100 MW 第 1 サイクル運転時にみられたノイズ状の流量変動を示す。この図から解かるように、原子炉起動前（系統ナトリウム温度が低い時）流量比は安定していたが、原子炉起動後の系統ナトリウム温度の昇温に伴いノイズ状の変動が発生した。この変動は、原子炉運転中も連続して発生しており、原子炉停止後の系統ナトリウム温度の降下に伴いなくなった。

このような流量変動は、100 MW 第 1, 第 3, 第 8, 第 13 サイクルに顕著に現われた。

図 4.2.2 (1)～図 4.2.2 (14) に 100 MW 第 1 サイクル～100 MW 第 14 サイクルの系統昇温時のプラグ計記録チャートを示す。

この流量変動は、プラグ計電磁ポンプの電圧上昇、逆転、及び ON-OFF による流動ショックによっても回復させることはできなかった。

また、これとは別に 100 MW 第 6 サイクルと第 7 サイクル運転中には、プラグ計流量が突然零になるという現象もみられた。さらに、100 MW 第 8 サイクル運転においては、前述したノイズ状の流量変動が発生したため、プラグ計電磁ポンプをしばらく逆転とした後正転に戻したらプラグ計流量が出なくなるという現象もあった。

(2) 原因の検討

2 次補助冷却系への初充填時（昭和 51 年 1 月 27 日）、2 次補助プラグ計の流量が出ずプラグ計を起動できなかったこと、及び運転途中で突然流量が零となる現象があった。これらは、2 次補助冷却系が加圧充填であることから、プラグ計電磁ポンプダクト内に正常にナトリウムが充填されていなかったこと、及び図 4.2.3 に示すように補助中間熱交換器頂部、補助空気冷却器出口ヘッダ部にガス溜りが有り、このガスが 2 次補助冷却系循環ナトリウムを介してプラグ計に巻込まれることが原因であると推定された⁽⁸⁾。本件に関しては特別な処置は行わず、2 次補助冷却系のガス抜き及びプラグ計電磁ポンプの逆転、ON-OFF 等の運転操作により回復した実績がある。

これらのことから、100 MW 第 6 サイクル～第 8 サイクル運転時の流量低下は初充填時と同様プラグ計電磁ポンプ内へのガス巻込みであろうと考えられる。

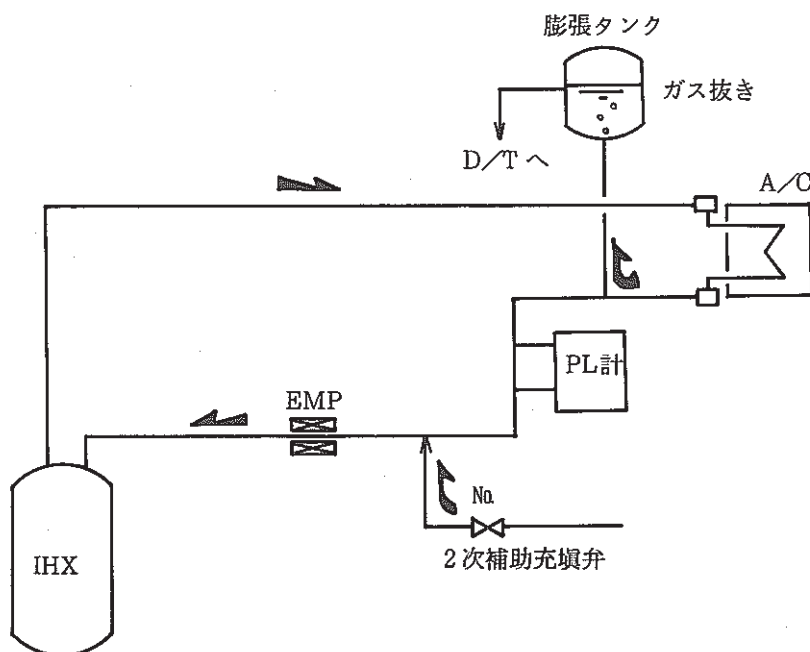
また、100 MW 第 1, 第 3, 第 8, 第 13 サイクル運転時顕著に現われたノイズ状の流量変動に関しても、表 3.1 から解かるように、第 1, 第 3, 第 8, 第 13 サイクル運転前にはいずれも 2 次補助冷却系のナトリウム充填が行われている。このことから、補助中間熱交換器頂部及び補助冷却器出口ヘッダ部に溜まったガスが系統昇温に伴い膨張し、系統ナトリウム中に巻込まれたものがプラグ計に引込まれるため、もしくは、2 次補助冷却系電磁ポンプ内に入り主系統の流量変動を引き起こし、この影響を受けてプラグ計流量が変動するものと考えられる。この

ことは、第13サイクル運転時、プラグ計ナトリウム出・入口配管が接続する補助冷却器出口垂直配管上部のエルボ部（図4.2.4 A部）でガス巻き込みと思われる流動音が確認でき、この流動音はノイズ状の流量変動現象がみられなかった第14サイクル運転時はほとんど確認できなかったことから推察できる。

(3) 対 策

2次補助冷却系充填時、ガス溜りをなくす方法としては真空充填が最も有効である。ただし、操作が複雑となりアルゴンガス系への過充填の危険性が増すことからその実施方法は十分な検討が必要である。

また別の方法としては、第6サイクル及び第8サイクル運転時プラグ計流量が出なくなった時2次補助充填弁を開とした後回復したこと、並びにノイズ状の流量変動は2次補助冷却系ナトリウム充填後の原子炉運転1サイクルのみであり、その次のサイクルにはみられずこの間（原子炉停止時）には2次補助充填弁を開としていること及び第13サイクルでは2次補助充填弁のシートリークによりノイズ状の流量変動がなくなったことから、2次補助充填弁開によるガス抜き効果も期待できる。具体的には、系統ナトリウム温度が高い状態すなわち2次補助冷却系循環ナトリウム中にガス巻き込みがある状態で2次補助充填弁を開とし、2次補助充填弁→2次補助冷却系→膨張タンク間にナトリウムの流れをつくり、これにより2次補助冷却系循環ナトリウム中のガス抜きを行う方法である。これに関しても、原子炉運転中における2次補助充填弁開による系統分離思想の崩れ、並びに膨張タンクオーバフローラインの熱衝撃の問題等がありその実施には十分な検討が必要となる。



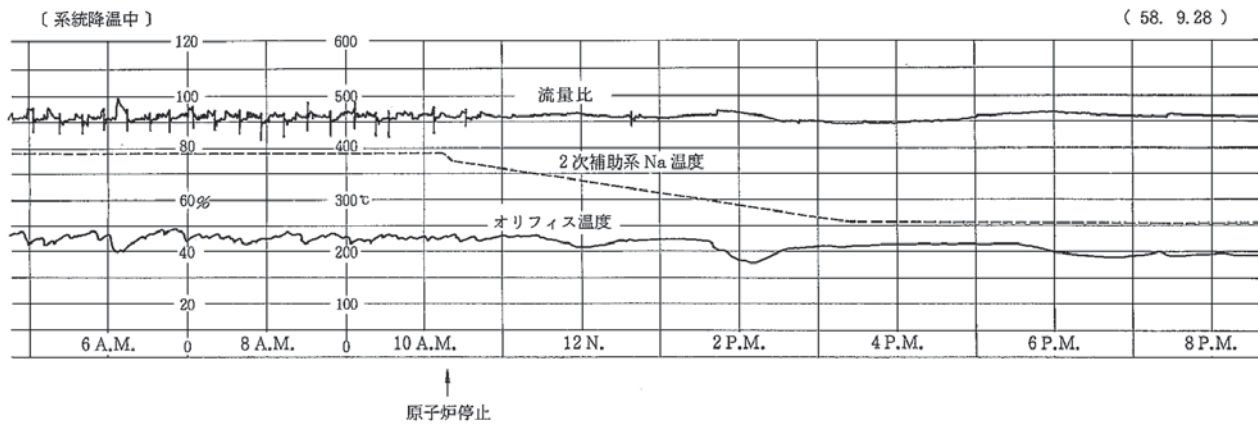
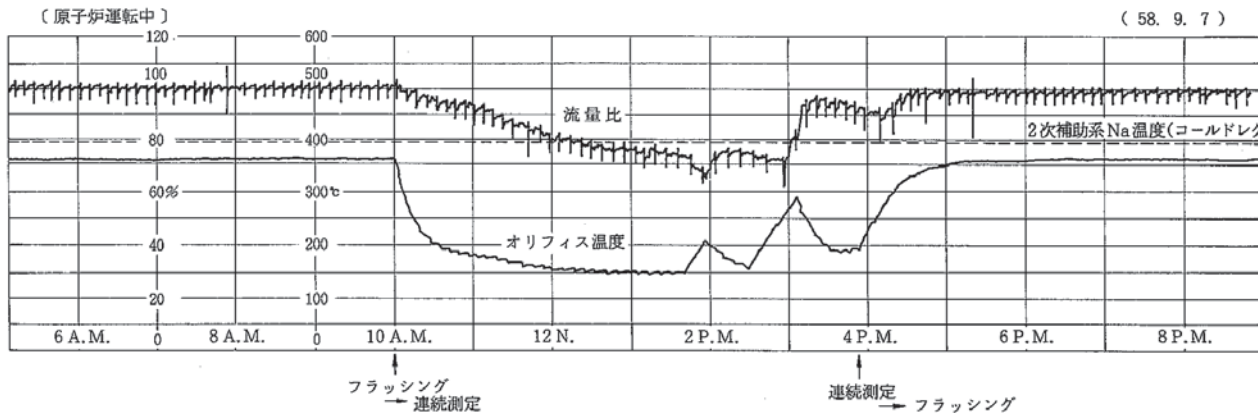
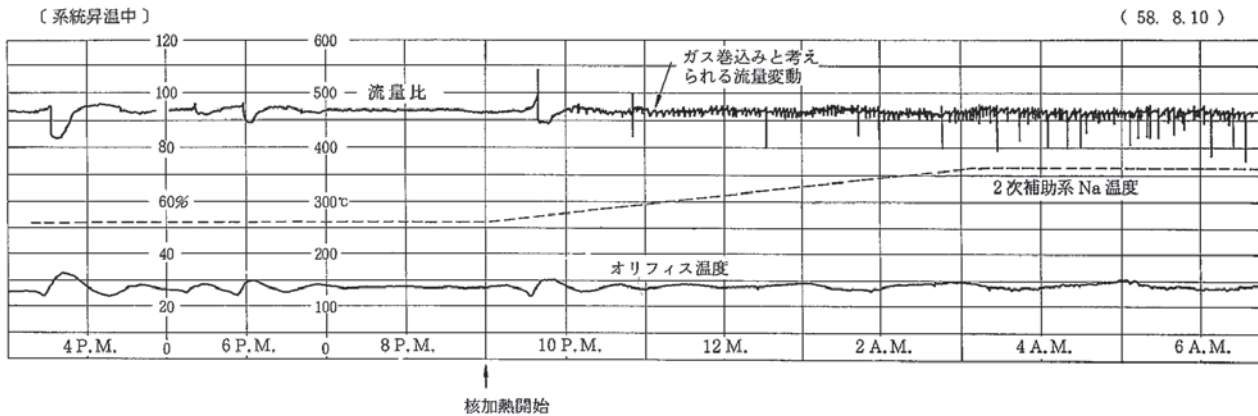


図 4. 2. 1 100 MW 第 1 サイクル運転時にみられたノイズ状の流量変動

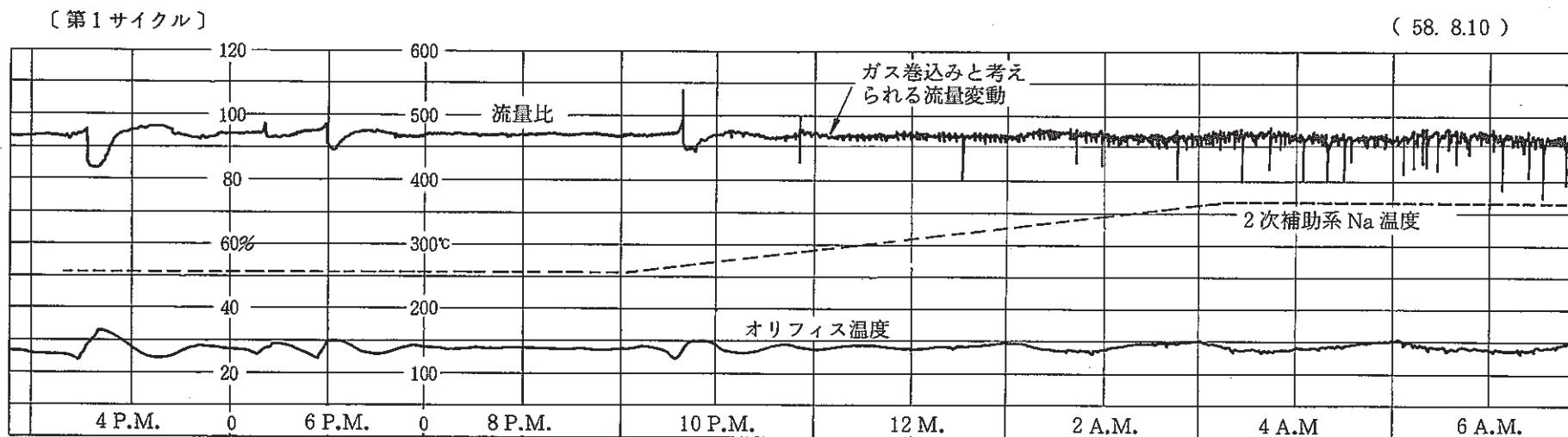


図 4.2.2 (1) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第1サイクル)

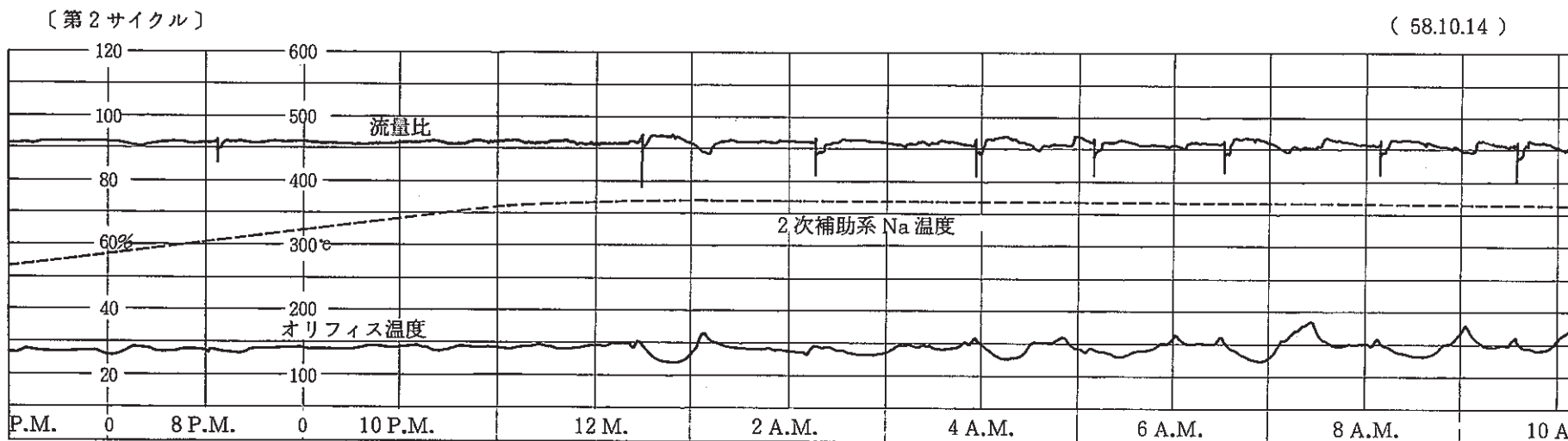


図 4.2.2 (2) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第2サイクル)

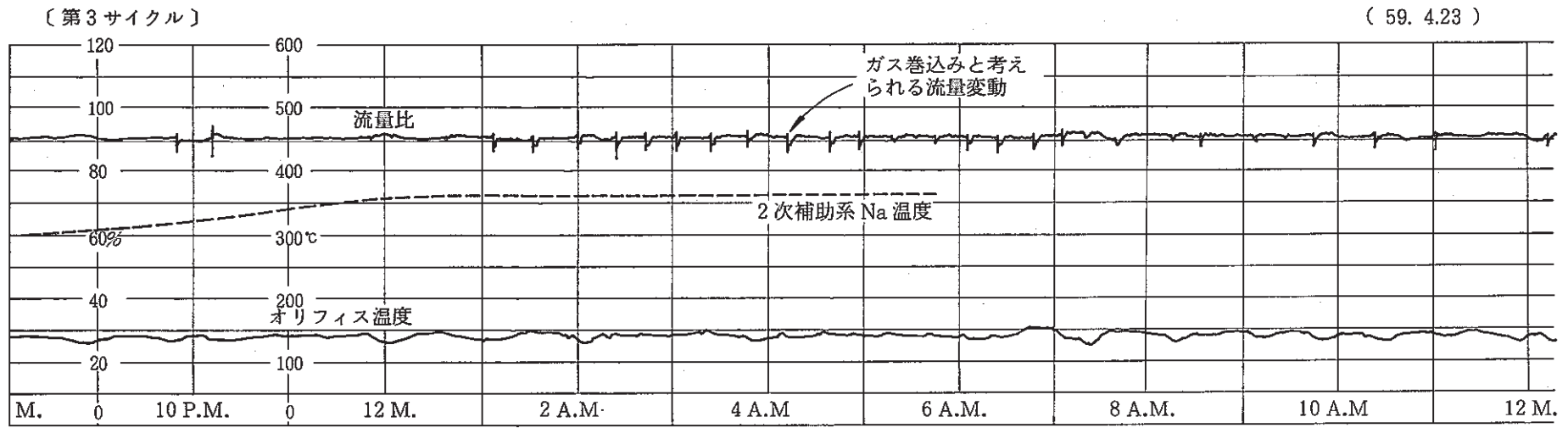


図 4. 2. 2 (3) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 3 サイクル)

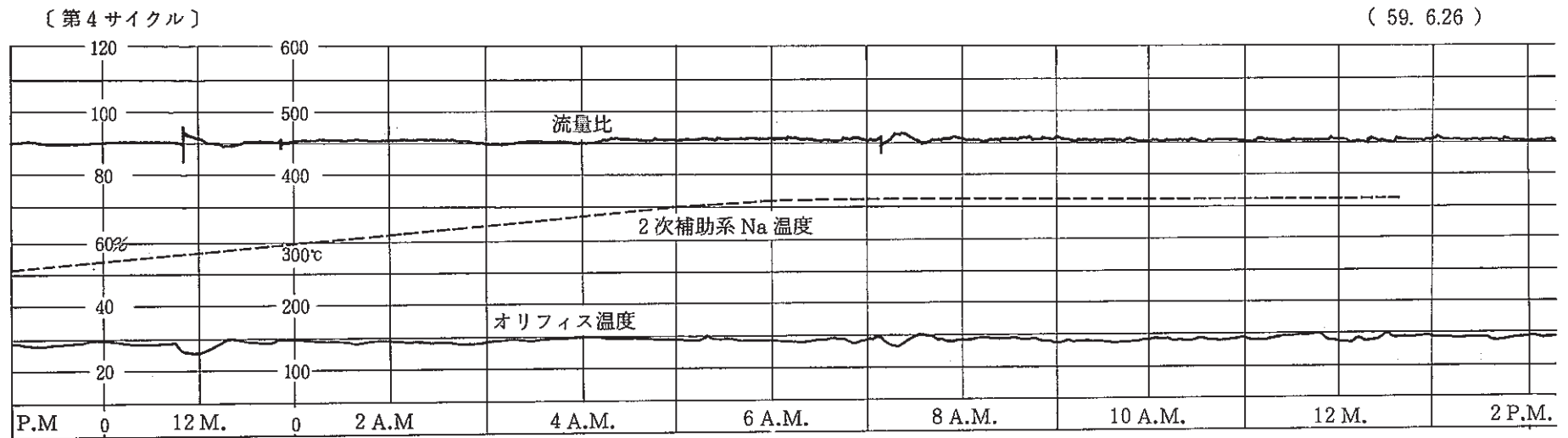


図 4. 2. 2 (4) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 4 サイクル)

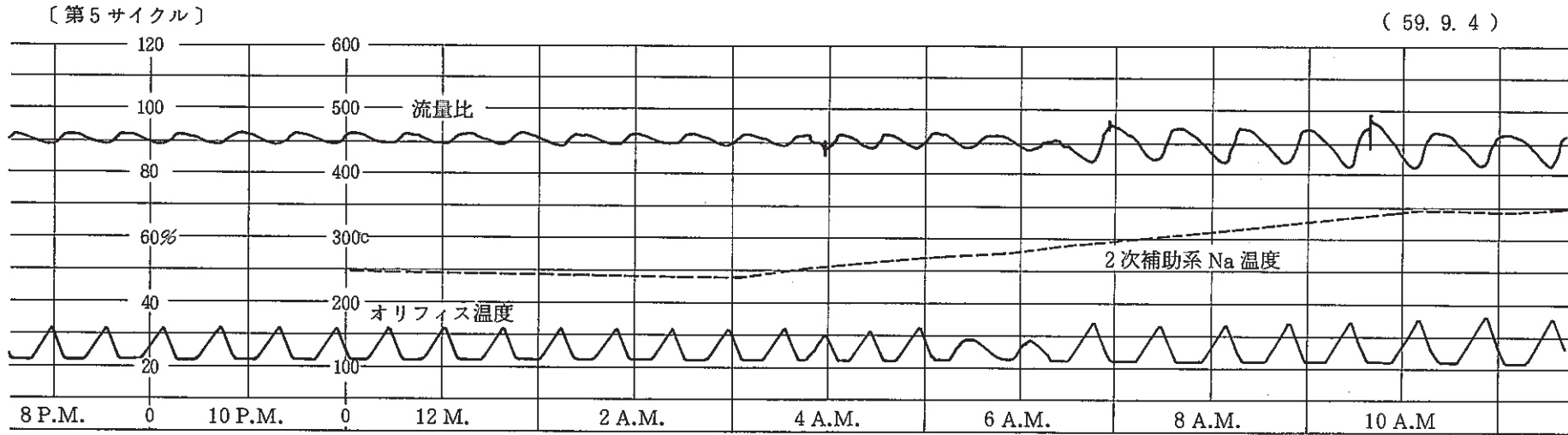


図 4. 2. 2 (5) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第5 サイクル)

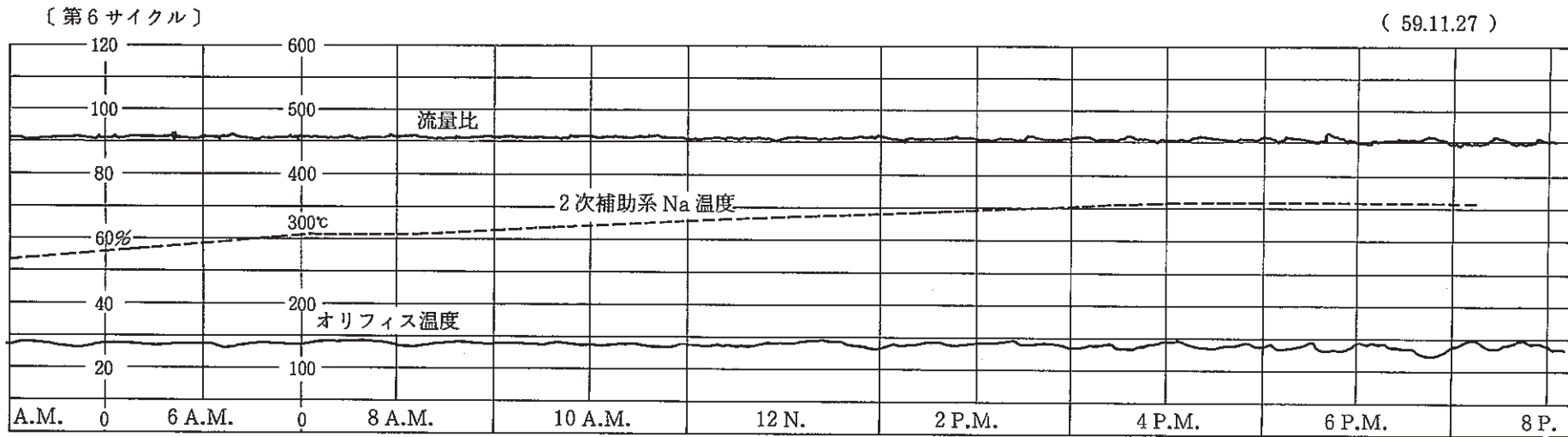


図 4. 2. 2 (6) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第6 サイクル)

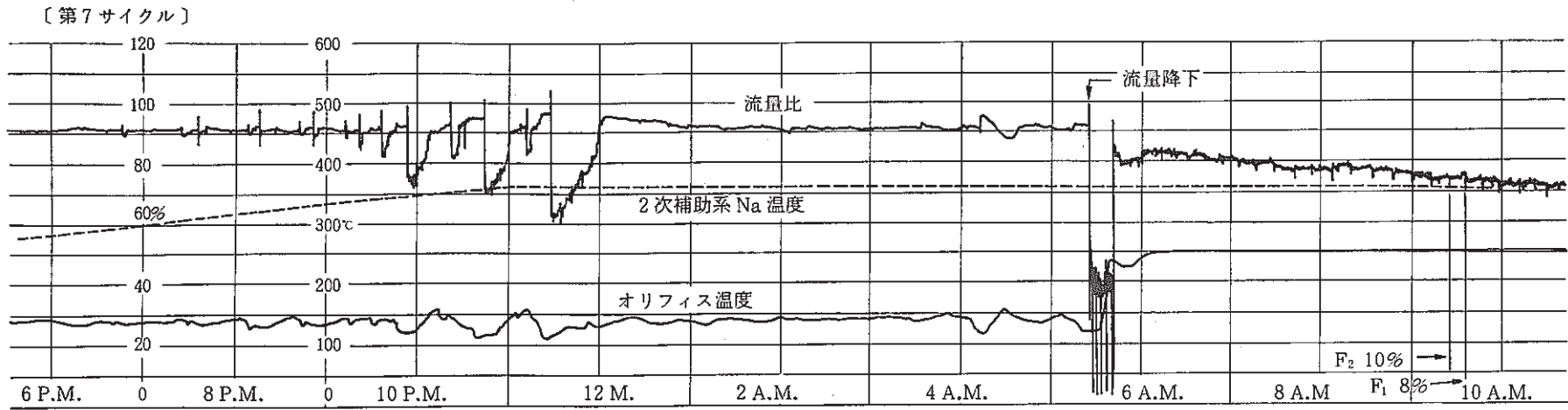


図 4.2.2 (7) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第7サイクル)

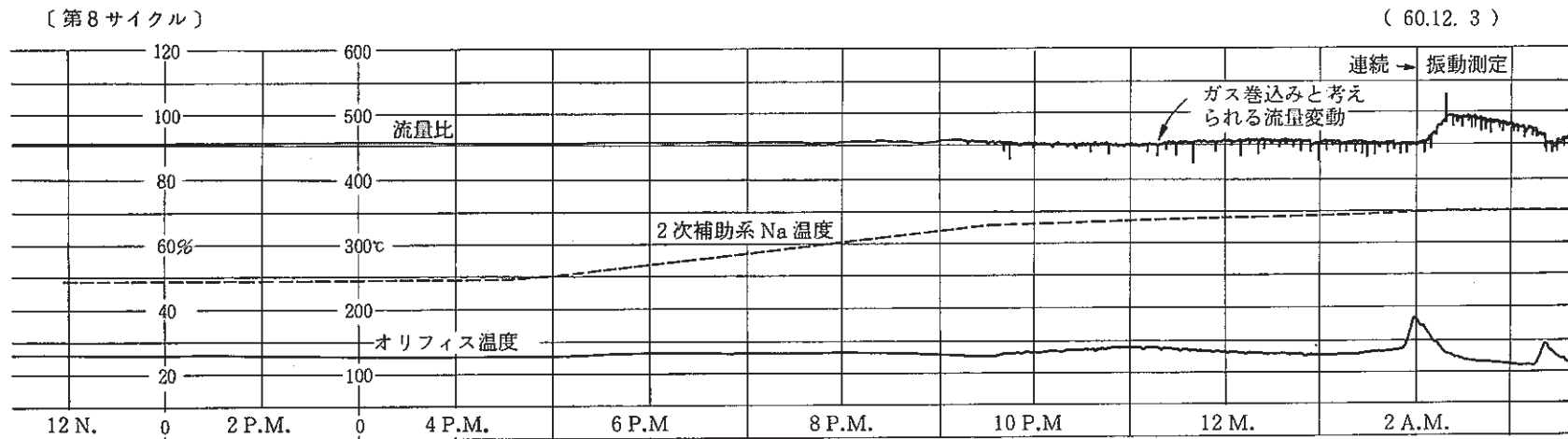


図 4.2.2 (8) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第8サイクル)

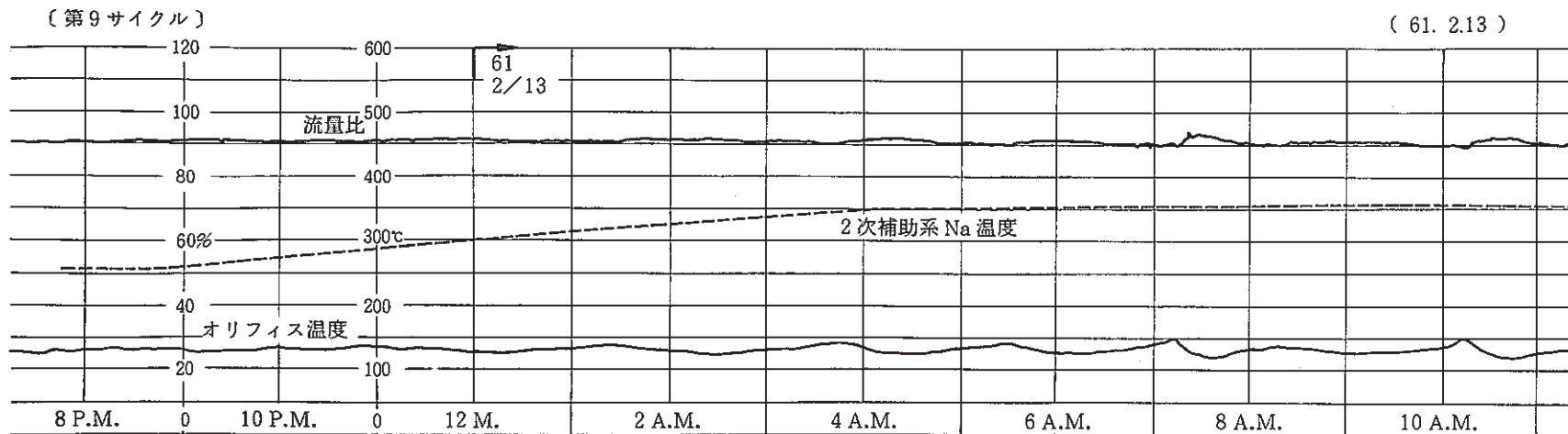


図 4. 2. 2 (9) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 9 サイクル)

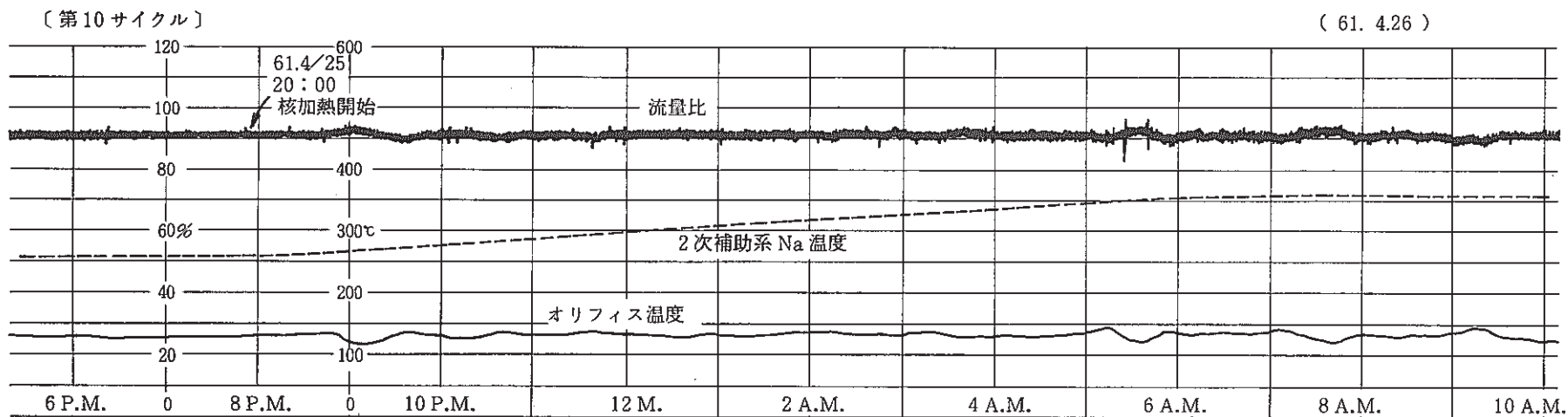


図 4. 2. 2 (10) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 10 サイクル)

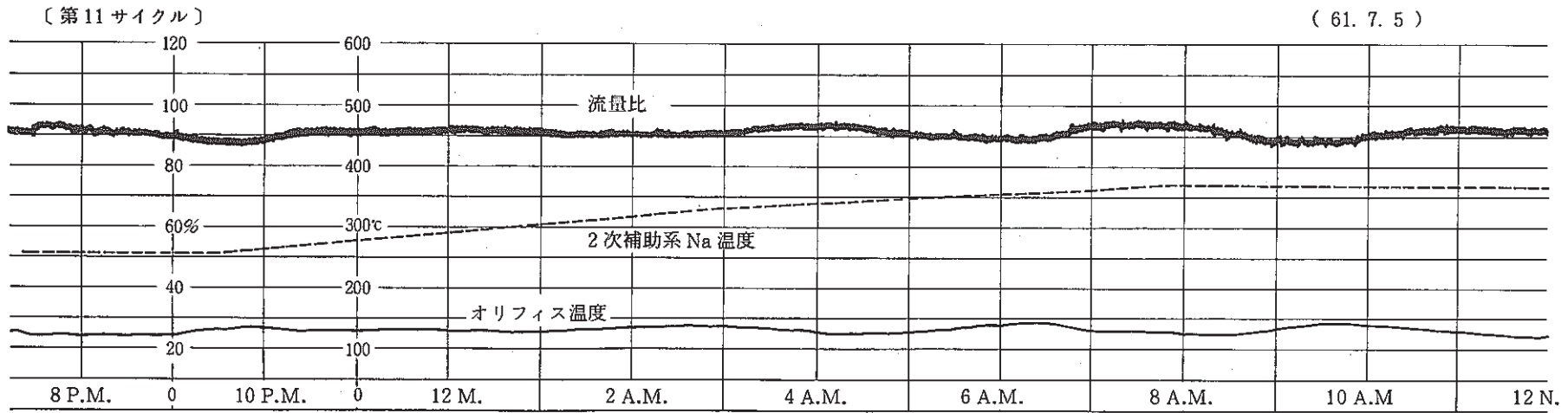


図 4. 2. 2 (11) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第11 サイクル)

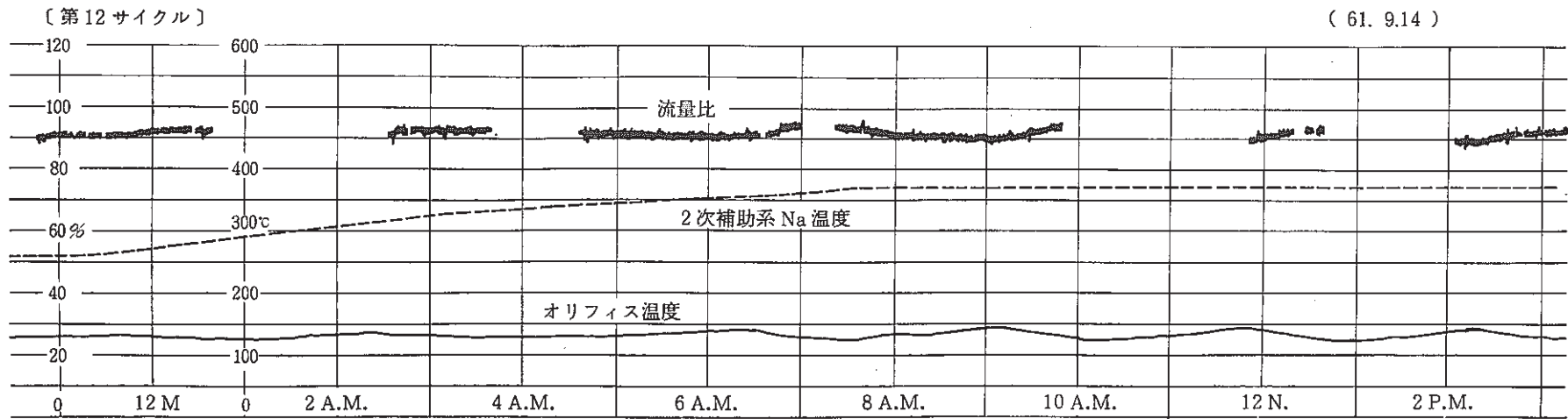


図 4. 2. 2 (12) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第12 サイクル)

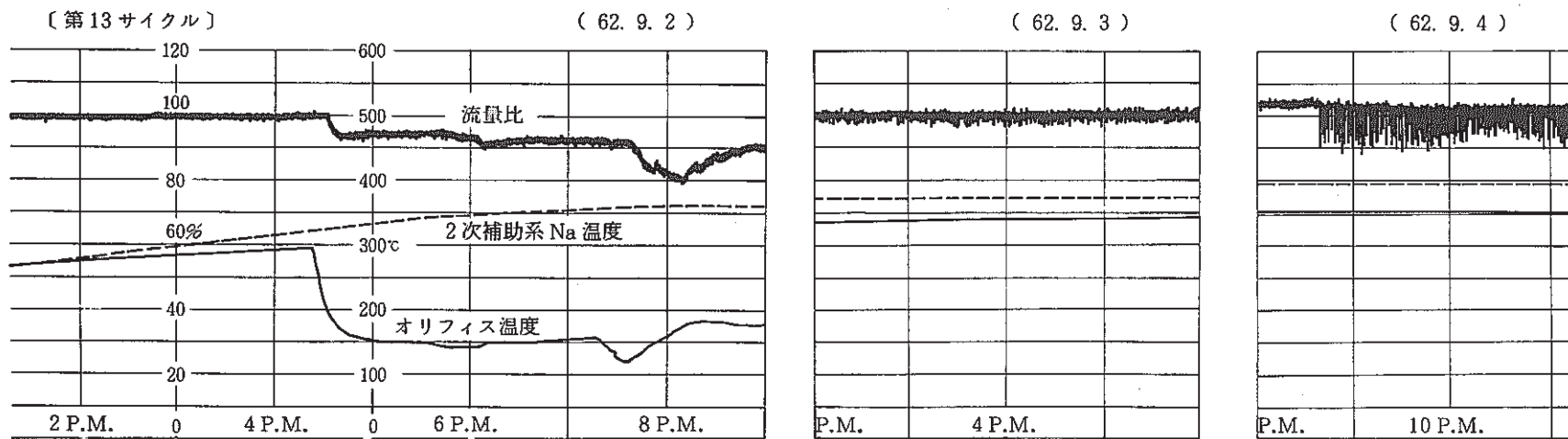


図 4.2.2 (13) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 13 サイクル)

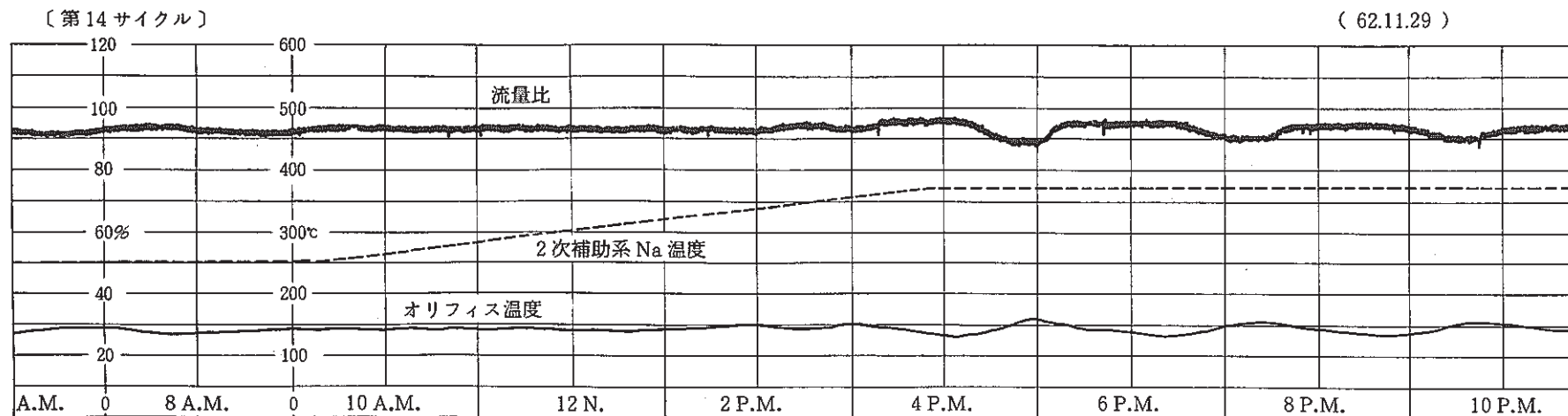


図 4.2.2 (14) 系統昇温時のプラグ計記録チャート (100 MW 第 14 サイクル)

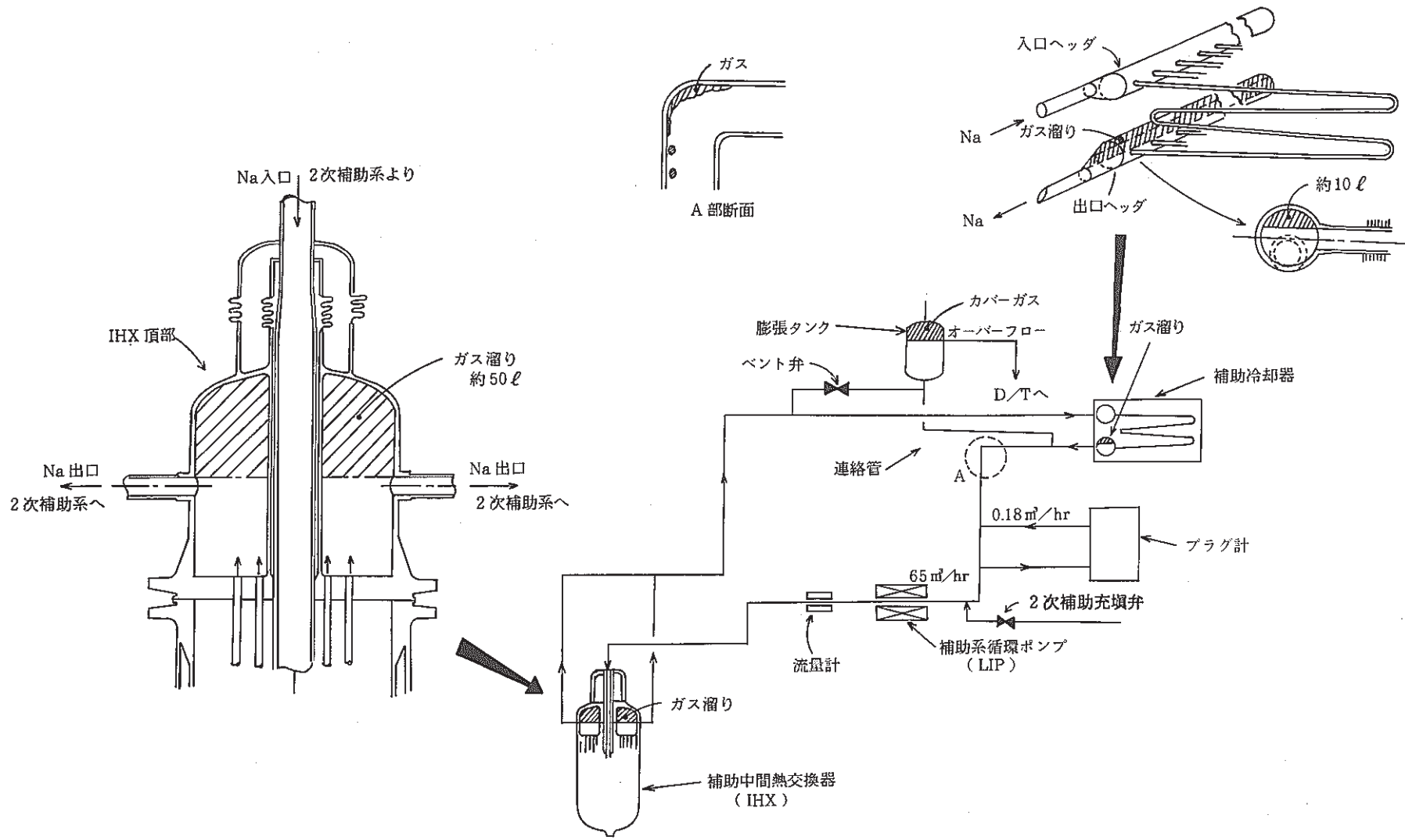


図 4.2.3 2次補助冷却系内ガス溜り

4.3 不純物の析出・溶解に起因しない流量変化

(1) 現象

プラグ計測定開始時、不純物の析出・溶解とは関係ない流量変化がある。

図 4.3.1 に測定開始時のプラグ計温度、流量の変化を示す。この図から解かるように、フラッシング時オリフィス温度 330℃ で 98% であった流量比が、測定開始（冷却開始）と同時に降下していき、オリフィス温度約 270℃ で 93% となり、その後 99% まで上昇した。

不純物の析出の場合、流量比は温度降下に伴い降下はするが上昇することはない。また、2 次補助冷却系に存在する不純物の中で最も高いプラグ温度を示す第 3 の不純物でもそのプラグ温度は 210℃～230℃ 程度であり、270℃ 以上で析出するものはない。これらのことから、測定開始時にみられる流量変化は不純物の析出・溶解によるものではないと判断できる。

また、昭和 63 年 1 月 2 日～3 日に実施した第 3 の不純物の析出速度調査では、オリフィス部ナトリウム温度を第 3 の不純物が析出しない 250℃ に保持したが、この時 352℃ から 250℃ に冷却しただけで流量比は 109% から 101% に降下し、250℃ 保持中（約 4 時間）は 101% のまま変化しなかった。調査終了後オリフィス部ナトリウム温度を上昇させたことにより流量比も調査前の 109% まで上昇した現象があった。（図 5.2.2 参照）

250℃ 保持時流量比が一定であったということは、不純物が析出していないということであり、オリフィス温度の 352℃ ↔ 250℃ の変化によって変化した流量比は前述したことと同様、不純物の析出・溶解によるものではないと考える。

(2) 原因の検討

この不純物の析出・溶解によらない流量変化の原因として考えられることは、プラグ計測定時変化するパラメータはナトリウム温度だけであることから、ナトリウム温度変化に起因する電磁流量計出力信号の変化である。

実際に、プラグ計オリフィス流量計は 2 基ある冷却器の間に設置されており、ここを通過するナトリウムの温度は大きく変化するため、この影響を受けるものと考えられる。

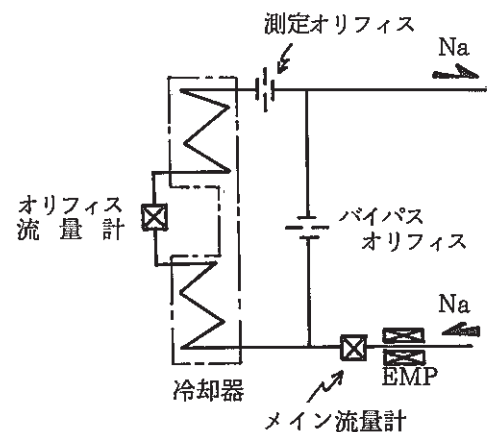
一般に、電磁流量計の出力電圧（発生起電力） e は次式で表わされる。

$$e = KBDU_m$$

K = 導管の電導性磁界の不均一性、端効果、温度等の補正係数

B = 磁束密度、 D = 電極間距離、 U_m = 平均流速

この式から、電磁流量計出力電圧は温度に影響されることが解かる。



これらのことから、ナトリウム温度と電磁流量計出力電圧との関係を昭和63年3月5日（100 MW第15サイクル運転中）に調査した。この結果を次に示す。

図4.3.2にナトリウム温度変化に伴う電磁流量計出力電圧の変化を示す。

オリフィス流量計出力電圧は冷却開始と同時に降下し始め、流量計ナトリウム温度（実際には流量計入口配管表面温度）が315℃から260℃に降下することにより0.75 mV（流量換算0.48 l/min）から0.675 mV（0.43 l/min）に降下した。さらに、235℃まで降下したが流量計出力電圧はほぼ一定であった。その後、235℃から265℃に加熱することで0.68 mV（0.44 l/min）から0.73 mV（0.47 l/min）に上昇し、それ以後温度が上昇しても流量計出力電圧はほぼ一定であった。

この間、メイン流量は約3 l/minでほとんど一定であることから、このオリフィス流量計出力電圧の変化は、不純物の析出・溶解による実際の流量変化ではなく（不純物の析出・溶解であればメイン流量もある程度変化すると考えられる）オリフィス流量計を通過するナトリウム温度変化によって流量計出力電圧が変化したものといえる。

しかし、冷却開始及び加熱開始と同時に流量計出力電圧が変化していること、並びにその変化する温度域（冷却時315℃～260℃、加熱時235℃～265℃）が異なることから、流量計出力電圧の変化は単純な流体（ナトリウム）温度のみによるものではなく、流量計本体と流体との温度差等にも影響されるようである。

(3) 対 策

不純物の析出・溶解以外でプラグ計流量比が変化すると、手動測定及び振動測定時の誤認となるとともに、連続測定においても制御性が悪化するばかりでなく、温度降下により流量比が設定値の90%まで降下した場合、不純物が析出しない状態で測定することになりこれによってもプラグ温度を誤認する可能性がある（図4.3.1に示した第3の不純物のアンプラグ温度以降（AM 10：15以降）がこれに当るものと考えられる）。

これらの対策としては

- ① オリフィス流量計装ループへの温度補正回路の追加
- ② 冷却、加熱による温度変化の影響を受けない位置へのオリフィス流量計の移設が考えられる。

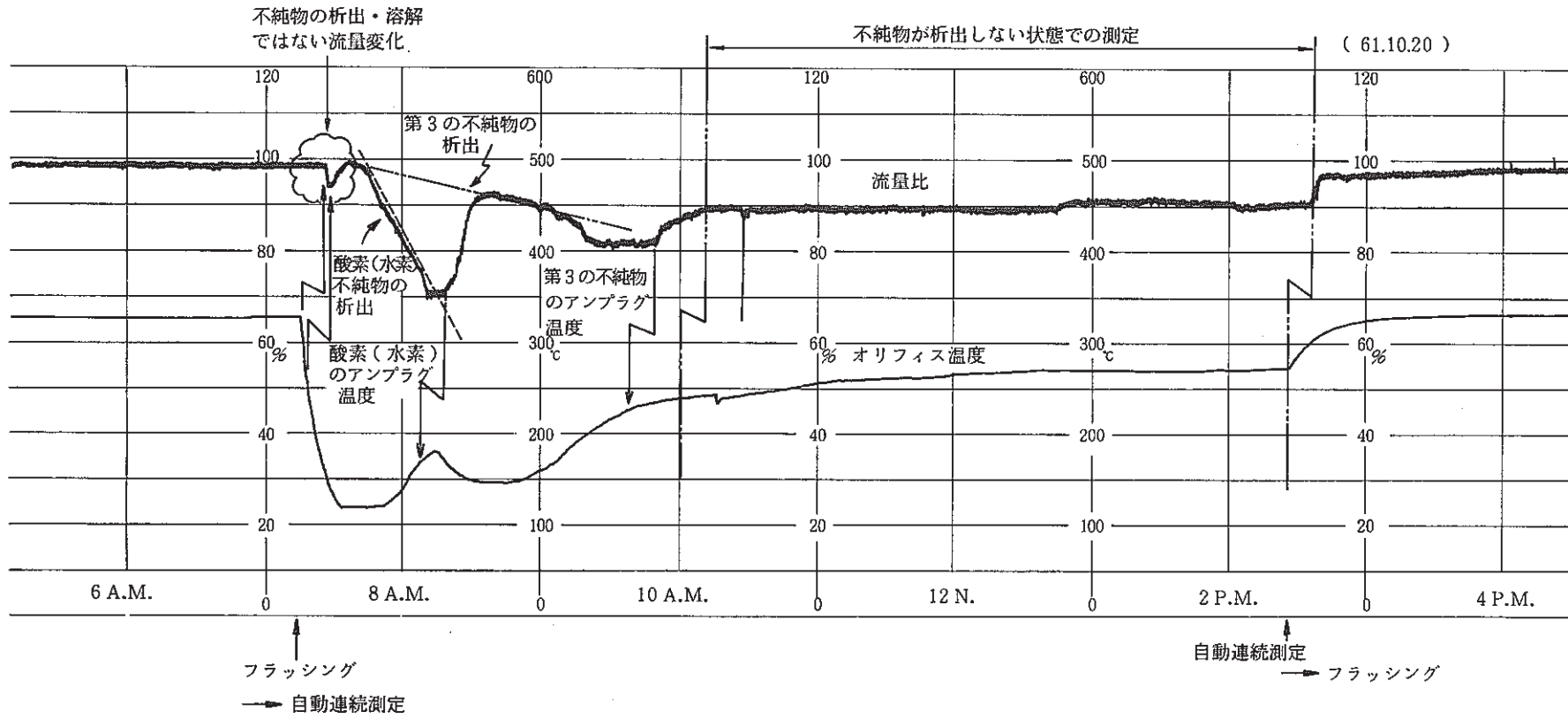


図 4.3.1 測定開始時のプラグ計温度，流量の変化 (100 MW 第 12 サイクル運転中)

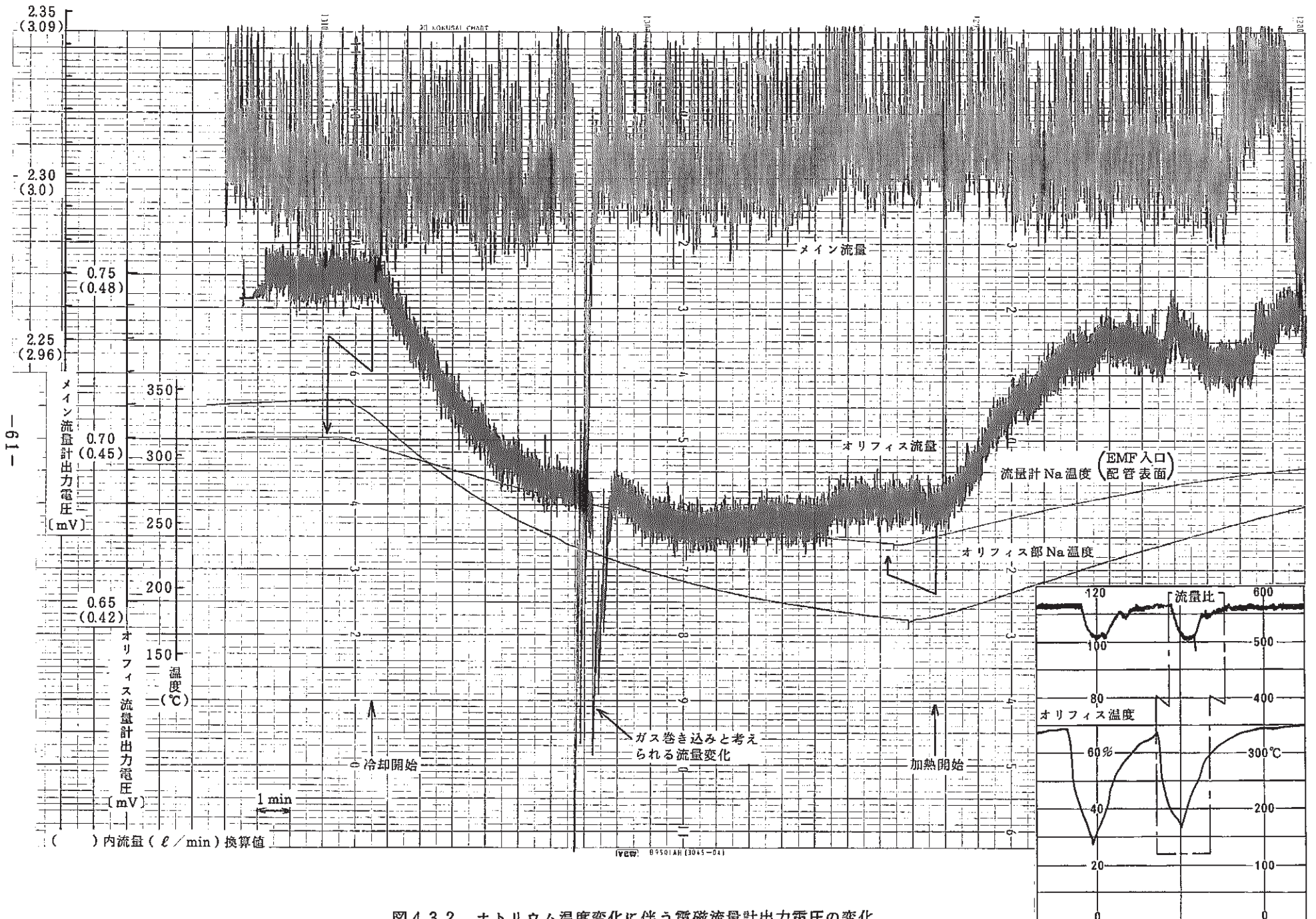


図 4.3.2 ナトリウム温度変化に伴う電磁流量計出力電圧の変化

5. 第3の不純物の調査

前章で述べたように、系統ナトリウム温度の上昇によるプラグ温度の上昇原因は第3の不純物の析出によるものと推察した。この章では、これまでに行われた第3の不純物に関する調査結果を述べる。

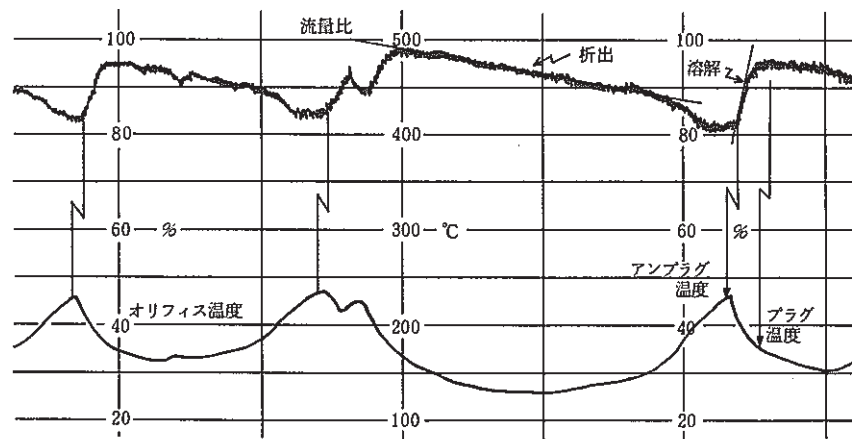
5.1 第3の不純物のプラグ温度

原子炉運転日数と第3の不純物のプラグ温度との関係を図5.1.1に示す。100 MW第1サイクルでは、原子炉起動後及び停止前の数日間は比較的安定したプラグ温度（自動連続測定）が測定できた。100 MW第9サイクルでは、連続測定にもかかわらずプラグ温度、流量共変動しており、その変動記録からプラグ、アンプラグ温度を読み取った。

プラグ計の連続測定は、その測定原理が不純物の析出・溶解の平衡した温度を測定しているため、不純物飽和温度に近い温度を示すといわれている⁽¹⁾。このことから、安定した測定ができた第1サイクル時のプラグ温度は第3の不純物の飽和温度に近いと考えられる。この温度は、第9サイクル時測定されたアンプラグ温度（オリフィス部から不純物が溶け出す温度）に近いことから、第9サイクルにおける第3の不純物の飽和温度はアンプラグ温度に近いと考えられる。

また、このことは第9サイクル時のプラグ計流量記録からも推察できる。プラグ、アンプラグ温度にはそれぞれ過冷却度、過熱度があり、これはそれぞれ析出速度、溶解速度が速いほど小さくなるものである。^{注)}

下図に第9サイクル時のプラグ計温度、流量記録を示すが、その溶解速度は析出速度に対し非



100 MW第9サイクル時のプラグ計温度、流量記録

注) プラグ計における過冷却度は、オリフィス部ナトリウム温度を不純物飽和温度より低い温度にしないと不純物が析出開始しないこと、及びオリフィス部に不純物が析出開始してからナトリウム流量を減少させるだけの量が析出するまでの間によけいに冷却されることで、実際の不純物飽和温度よりもプラグ温度が低くなるものでこの温度差をいう。過熱度はこの逆である。

常に速いものであることから、アンプラグ温度の過熱度は小さい（逆に過冷却度は大きい）と考えられる。以上のことから第3の不純物の飽和温度はアンプラグ温度に近くなると考えられる。

原子炉運転日数と第3の不純物のプラグ温度との関係を見ると、図5.1.1に示すように、原子炉起動後2～3日間はプラグ計に析出してこない。これは、ナトリウムの第3の不純物の濃度がきわめて低いためであると考えられる。原子炉起動後約1週間は顕著にプラグ温度が上昇しているが、1週間経過後からは非常にゆっくりと上昇しているようである。

原子炉運転中（45日サイクル）の第3の不純物のプラグ温度（飽和温度）は図5.1.1から210℃～230℃であるといえる。

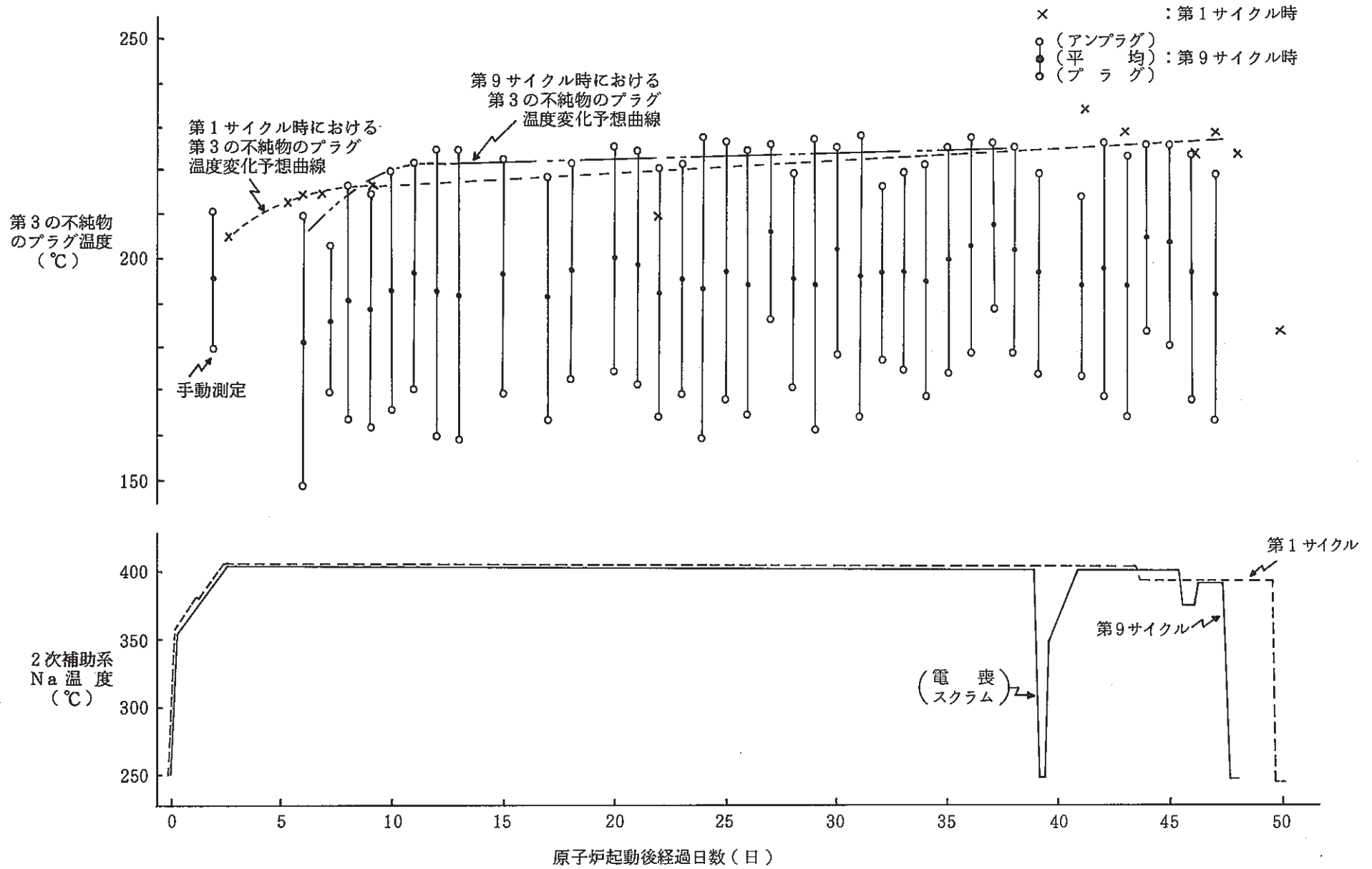


図 5.1.1 原子炉運転日数と第3不純物のプラグ温度との関係

5.2 第3の不純物の析出速度

100 MW第14サイクル運転時、2次補助プラグ計を用いて第3の不純物の析出速度を調査した。

(1) 期 間

100 MW第14サイクル運転中

昭和62年12月26日～昭和62年12月27日（150℃保持）

昭和63年1月2日～昭和63年1月3日（250℃保持）

(2) 方 法

第3の不純物のプラグ温度が210～230℃であること、及び酸素（もしくは水素）不純物のプラグ温度が130℃であることから、第3の不純物のみを析出させるためプラグ計オリフィス部ナトリウム温度を150℃一定に保持し、その析出によるプラグ計流量降下率から析出速度を求める。

また、150℃に保持した時の流量降下が第3の不純物によるものであるかどうかの比較のため、第3の不純物が析出しないと考えられる250℃保持のデータも採取した。

(3) 結 果

① 150℃保持

図5.2.1にオリフィス部ナトリウム温度150℃保持時のプラグ計温度、流量記録を示す。フラッシング時0.49 ℓ/minであったオリフィス部ナトリウム流量は、運転後のプラグ計内ナトリウム温度降下に伴う電磁流量計出力電圧の変化（4.3項参照）により0.44 ℓ/minまで急速に降下した。その後、オリフィス部ナトリウム温度を150℃に保持することにより約6時間で0.38 ℓ/minまで降下した。

② 250℃保持

図5.2.2にオリフィス部ナトリウム温度250℃保持時のプラグ計温度、流量記録を示す。150℃保持時と同様、運転直後のプラグ計内ナトリウム温度変化に起因する流量降下があり、0.5 ℓ/minから0.46 ℓ/minに急速に降下した。その後、オリフィス部ナトリウム温度を250℃に保持したが、4時間経過した後も流量降下はなかった。

以上のことから、オリフィス部ナトリウム温度を150℃に保持した時の流量降下は、第3の不純物の析出によるものと判断する。オリフィス部ナトリウム温度を150℃に保持した時の流量変化からオリフィス部への第3の不純物の析出速度を算出してみる。

第3の不純物析出前のオリフィス部ナトリウム流速Vは、

$$\begin{aligned} V &= F/A \\ &= 0.44 \times 10^6 \div \left(\frac{\pi}{4} 1^2 \times 2 \right) \\ &= 280112.7 \text{ (mm/min)} \end{aligned}$$

A：オリフィス断面積（ $\frac{\pi}{4} 1^2 \times 2 \text{ mm}^2$ ）

F：第3の不純物析出前のオリフィス部ナトリウム流量（0.44 ℓ/min）

第3の不純物析出後のオリフィス断面積 A' は流速一定とすると,

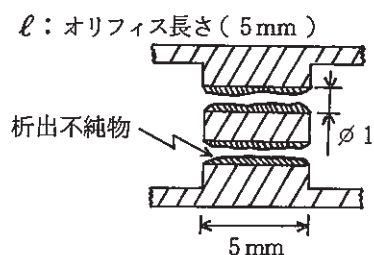
$$\begin{aligned} A' &= F'/V \\ &= 0.38 \times 10^6 \div 280112.7 \\ &= 1.35 \text{ (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

F' : 第3の不純物析出後のオリフィス部ナトリウム流量 (0.38 ℓ/min)

オリフィス長さ方向に均一に析出したとすると, その析出量 M 及び析出速度 Z は,

$$\begin{aligned} M &= (A - A') \times \ell \\ &= \left(\frac{\pi}{4} 1^2 \times 2 - 1.35 \right) \times 5 \\ &= 1.1 \text{ (mm}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= M/T \\ &= 1.1 \div 6 \\ &= 0.18 \text{ (mm}^3/\text{hr)} \end{aligned}$$



T : 時間 (6 hr)

以上の計算結果から, オリフィス部のみに析出した不純物量は 1.1 mm^3 となり, その析出速度は $0.18 \text{ mm}^3/\text{hr}$ (at $0.44 \ell/\text{min}$, 150°C 保持) となる。

実際には, プラグ計冷却器~オリフィス間のナトリウム温度も第3の不純物の飽和温度以下であり, この間の構造材表面にもある程度析出すると考えられるため, プラグ計内で析出する第3の不純物は上記の値より大きくなる。

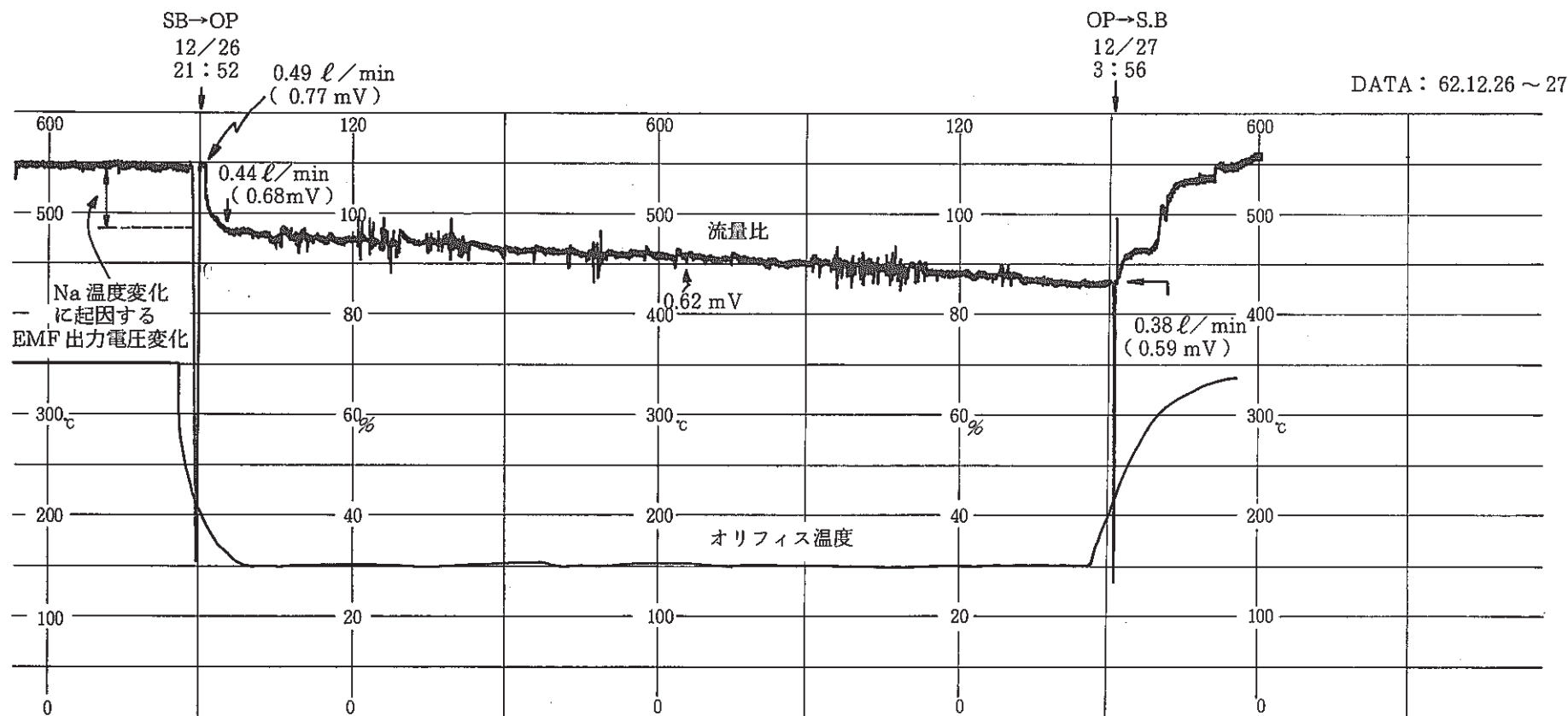


図5.2.1 オリフィス部ナトリウム温度 150°C保持時のプラグ計温度、流量記録
(第3の不純物の析出速度調査)

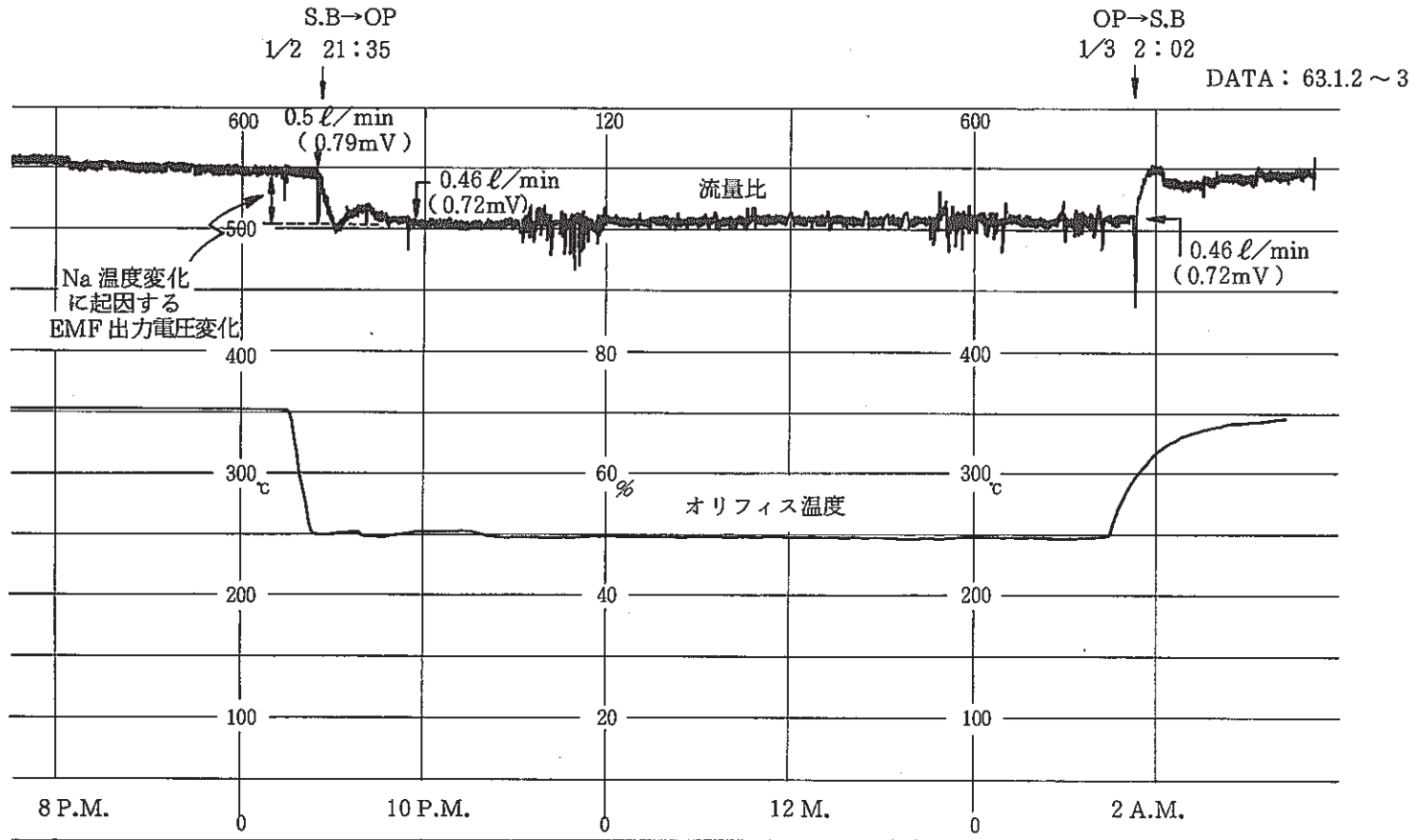


図 5.2.2 オリフィス部ナトリウム温度 250°C 保持時のプラグ計温度、流量記録
(第 3 の不純物の析出速度調査)

5.3 2次純化系コールドトラップバイパス試験

第3の不純物の析出によると考えられるプラグ温度の上昇は、2次補助プラグ計のみならず2次主プラグ計にもみられる。

図5.3.1に100 MW第5サイクル運転中の2次主プラグ計温度、流量の変化を示す。

2次主プラグ温度の上昇は、2次補助プラグ計と同様系統温度が低い時はみられないが、原子炉起動後の系統温度が高い時には約1週間に1回程度の割合でみられる。また、プラグ計流量にもステップ状の回復がみられる。

これらのことから、2次主冷却系においても第3の不純物の溶出が考えられるため、2次補助冷却系と同条件のナトリウムを純化しない(コールドトラップバイパス)状態でプラグ温度の変化を確認した。

尚、コールドトラップバイパス試験は、原子炉停止中の系統温度が低い状態と、原子炉運転中の系統温度が高い状態の2ケース実施した。また、2次主プラグ温度と2次補助プラグ温度の比較のため2次補助充填弁は開(2%)状態とした。

図5.3.2に2次純化系コールドトラップバイパス試験時の系統図を示す。

(1) 原子炉停止中におけるコールドトラップバイパス試験結果

① 試験実施時期

100 MW第3サイクル終了後(59.6.21～59.6.25)

② 試験状態

2次主冷却系ナトリウム温度 : 250℃等温

2次補助冷却系ナトリウム温度 : 250℃等温

2次ダンプタンクナトリウム温度 : 250℃

③ 結 果

コールドトラップバイパス中においても、2次主プラグ温度及び2次補助プラグ温度はコールドトラップバイパス前と同温度の140℃で安定しており、プラグ温度の上昇はみられなかった。

このことは、原子炉停止中の系統温度が低い状態では2次補助プラグ温度の上昇がないことと同様の現象であり、系統温度が低い状態では第3の不純物の溶出はほとんどないものと考えられる。

(2) 原子炉運転中におけるコールドトラップバイパス試験結果

① 試験実施時期

100 MW第5サイクル運転中(59.10.10～59.10.20)

② 試験状態

2次主冷却系ナトリウム温度 ホットレグ : 450℃

(Aループ) コールドレグ : 330℃

2次補助冷却系ナトリウム温度 ホットレグ : 402℃
 コールドレグ : 398℃
 2次ダンプタンクナトリウム温度 : 350℃

③ 結 果

図 5.3.3 にコールドトラップバイパス時の 2 次主プラグ温度変化を、また図 5.3.4 にコールドトラップバイパス時の 2 次補助プラグ温度変化を示す。コールドトラップバイパス前の 2 次主プラグ温度及び 2 次補助プラグ温度は、コールドトラップ運転温度とほぼ同温度の約 130℃であった。

コールドトラップバイパス後、2 次主プラグ温度及び 2 次補助プラグ温度はそれぞれ約 23 時間後、約 36 時間後に上昇した。その上昇率は日ごとに大きくなっていったが、バイパスから 6 日経過した時点（10月16日）からは上昇率がほぼ飽和したように見え、約 20 時間の測定で 130℃から 180℃に上昇するようになった。

また、プラグ計流量にはステップ状の流量回復もみられた。

尚、試験条件としてプラグ温度 180℃以上ではフラッシングするようにしたため、第 3 の不純物の安定したプラグ温度は測定できなかった。

本試験中、2 次補助充填弁を 2%開としていたことから、第 3 の不純物は 2 次補助系のみで溶出しそれが 2 次主プラグ計に析出することも疑われるが、通常運転（2 次補助充填弁閉）状態でも 2 次補助プラグ温度が第 3 の不純物のプラグ温度で安定するのに約 1 週間要しており、2 次補助冷却系のみからの溶出である場合、2 次補助冷却系と 2 次主冷却系のナトリウム容量比が 1 : 48 であることから約 6 日間ではほぼ飽和するとは考えづらい。また、2 次主冷却系と 2 次補助冷却系の配管材質は同一（2 1/4 Cr - 1 Mo）のものであることから、2 次主冷却系からも第 3 の不純物は溶出していると考えられる。

コールドトラップ通液後、2 次主プラグ温度は 26 時間後にフラッシングとするまでは徐々に低下していき、約 50 時後、自動連続測定開始した時は 130℃で安定しており上昇することはなかった。また、2 次補助プラグ温度も 27 時間後にフラッシングとするまでは徐々に低下していった。約 57 時間後、自動連続測定開始した時、一旦は 180℃まで上昇したものの徐々に低下しその後は上昇することはなかった。

コールドトラップ通液後プラグ温度が低下すること、及び通常の原子炉運転中コールドトラップが運転されている 2 次主冷却系のプラグ温度の上昇頻度が、コールドトラップのない 2 次補助冷却系プラグ温度の上昇頻度よりきわめて少ないことから、第 3 の不純物はコールドトラップで捕獲されるものと考えられる。

(3) 第 3 の不純物析出によるプラグ温度の上昇条件

コールドトラップバイパス試験結果及び 2 次補助プラグ計の運転経験から、第 3 の不純物の析出によるプラグ温度の上昇条件を考察する。

図 5.3 に第 3 の不純物析出によるプラグ温度の上昇条件を示す。まず、第 3 の不純物が溶出する系統構造材材質は、低合金鋼 ($2\frac{1}{4}\text{Cr} - 1\text{Mo}$) である。このことは、第 3 の不純物によるプラグ温度の上昇は、系統構造材材質が低合金鋼である 2 次主冷却系及び 2 次補助冷却系でしか発生しておらず、ステンレス鋼である 1 次冷却系では発生しないことから判断できる。

次に、プラグ温度を上昇させるだけの量の第 3 の不純物を溶出させるには、系統ナトリウム温度が高温でなければならない。第 3 の不純物の溶出開始温度は、第 3 の不純物の存在がプラグ計でしか確認できないこと及び原子炉起動後の系統昇温は 250°C から 370°C まで $20^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ で一気に昇温すること等から判断できない。しかし、少なくとも系統ナトリウム温度が低い状態 (250°C 以下) ではプラグ温度を上昇させるだけの量の第 3 の不純物は存在 (溶出) しない。

さらに、プラグ温度を上昇させるには、ナトリウム中の第 3 の不純物濃度がある程度高くななければならない。第 3 の不純物はコールドトラップに捕獲されることから、コールドトラップ運転中にはひんばんにプラグ温度を上昇させるだけの量の第 3 の不純物は存在しなくなる。

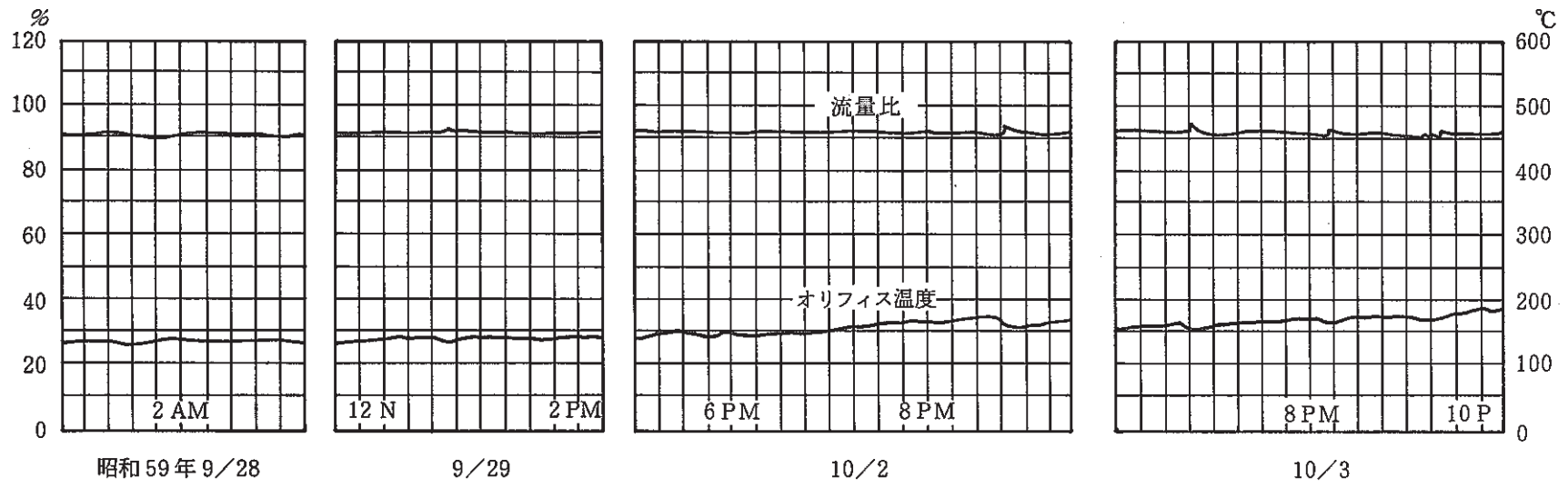


図 5.3.1 100 MW 第5 サイクル運転中の2次主プラグ計温度，流量の変化
(第3の不純物の析出)

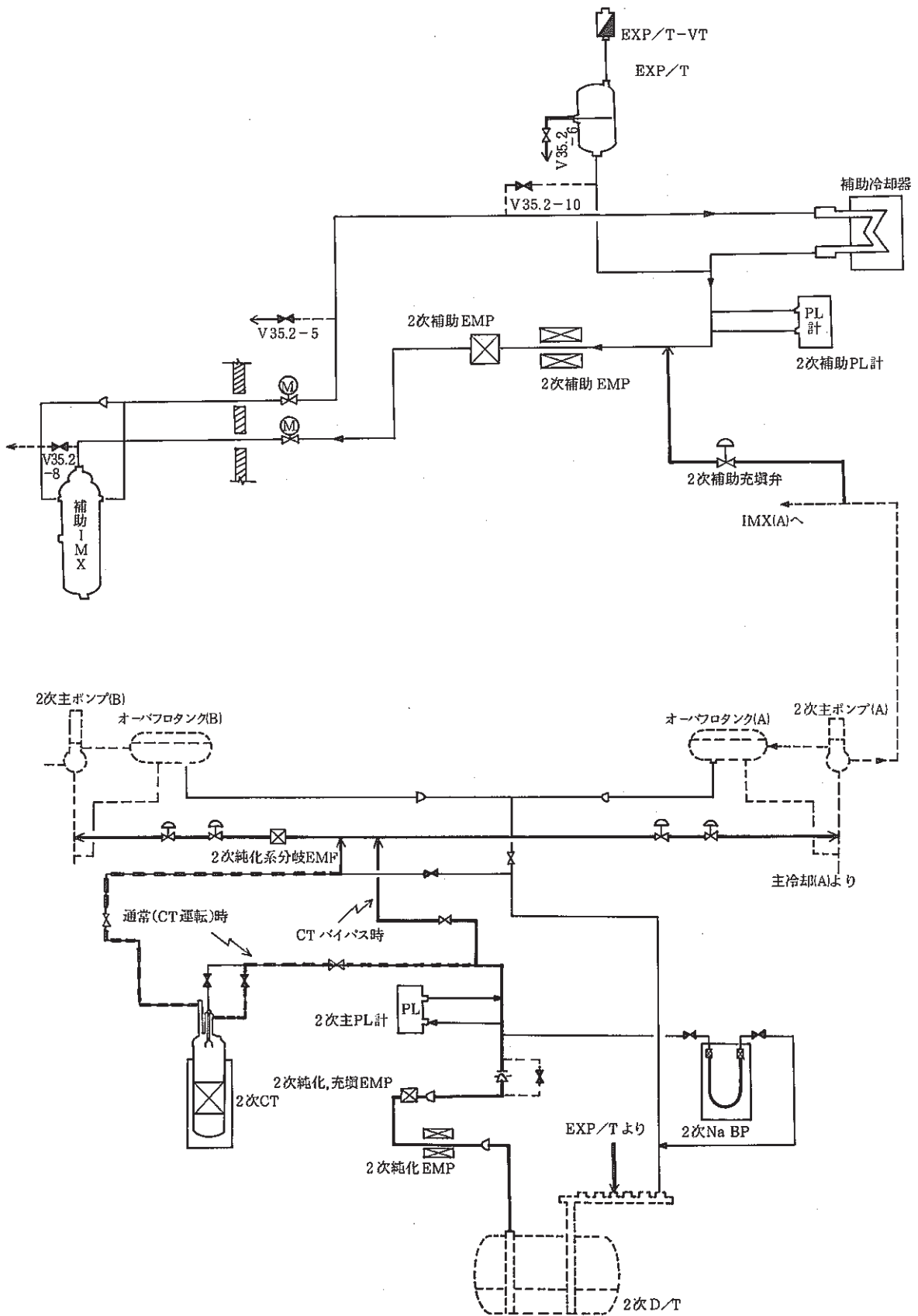


図 5.3.2 2次純化系コールドトラップバイパス試験時の系統

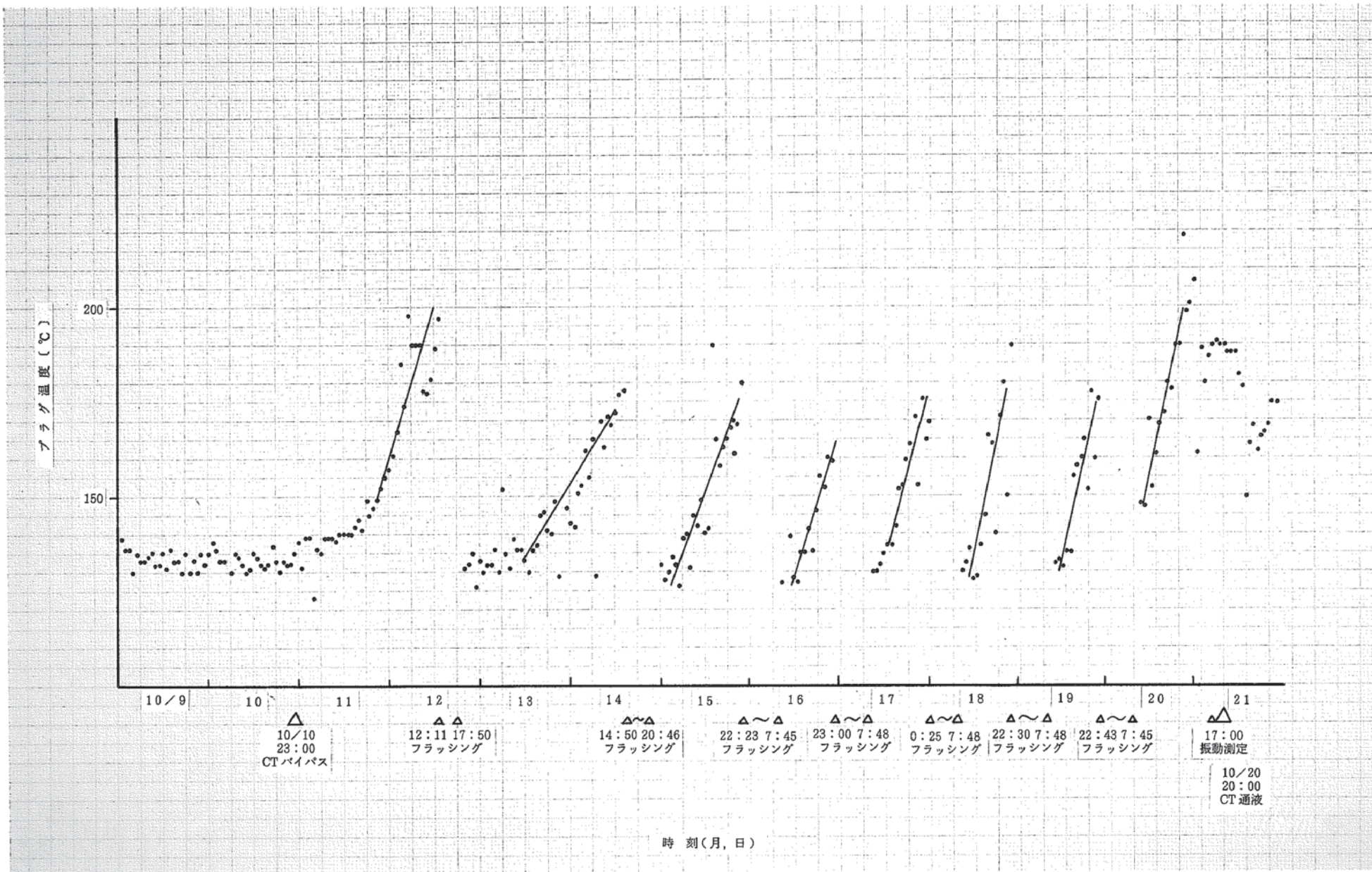


図 5.3.3 コールドトラップバイパス時の2次主プラグ温度変化

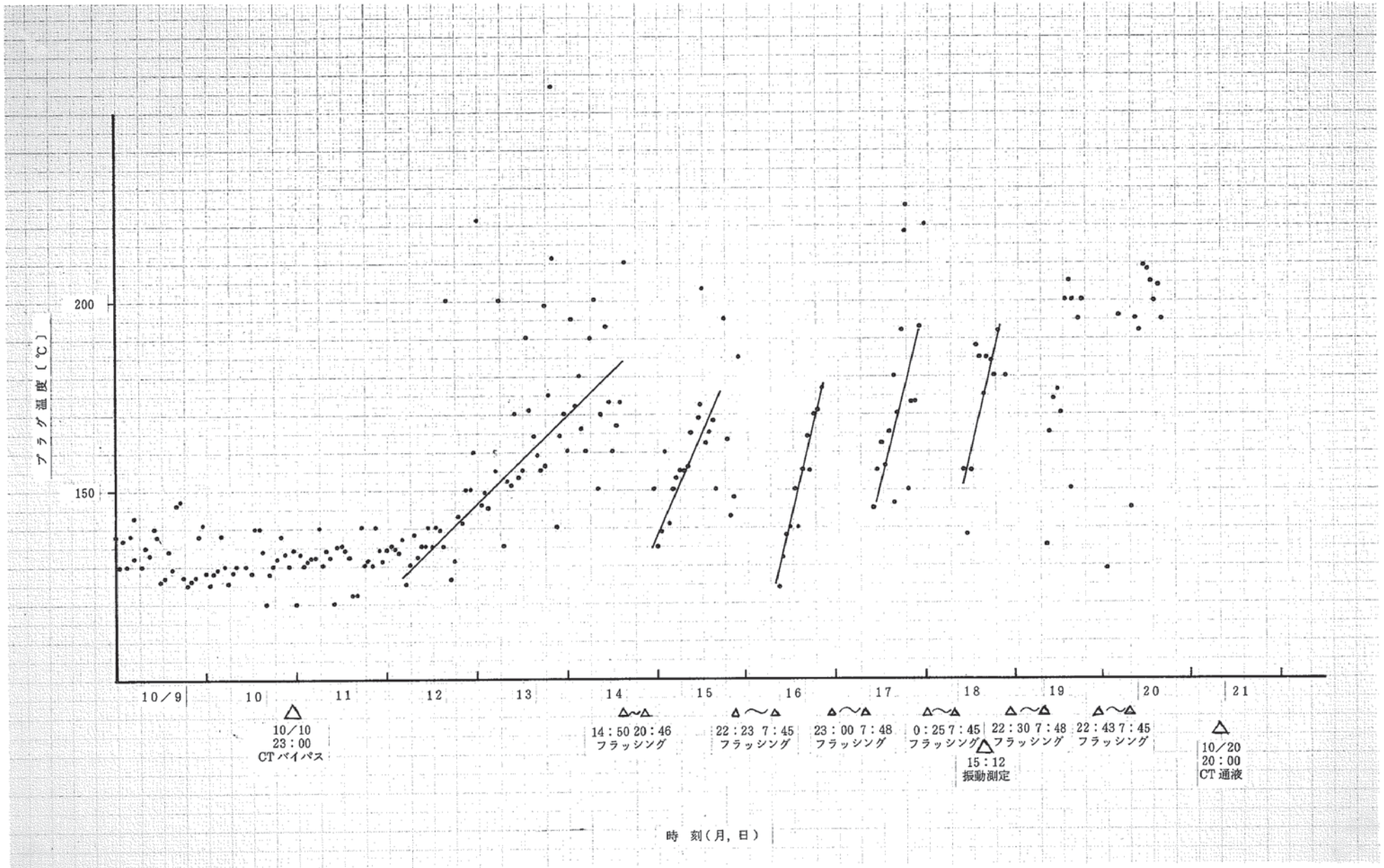


図5.3.4 コールドトラップバイパス時の2次補助プラグ温度変化

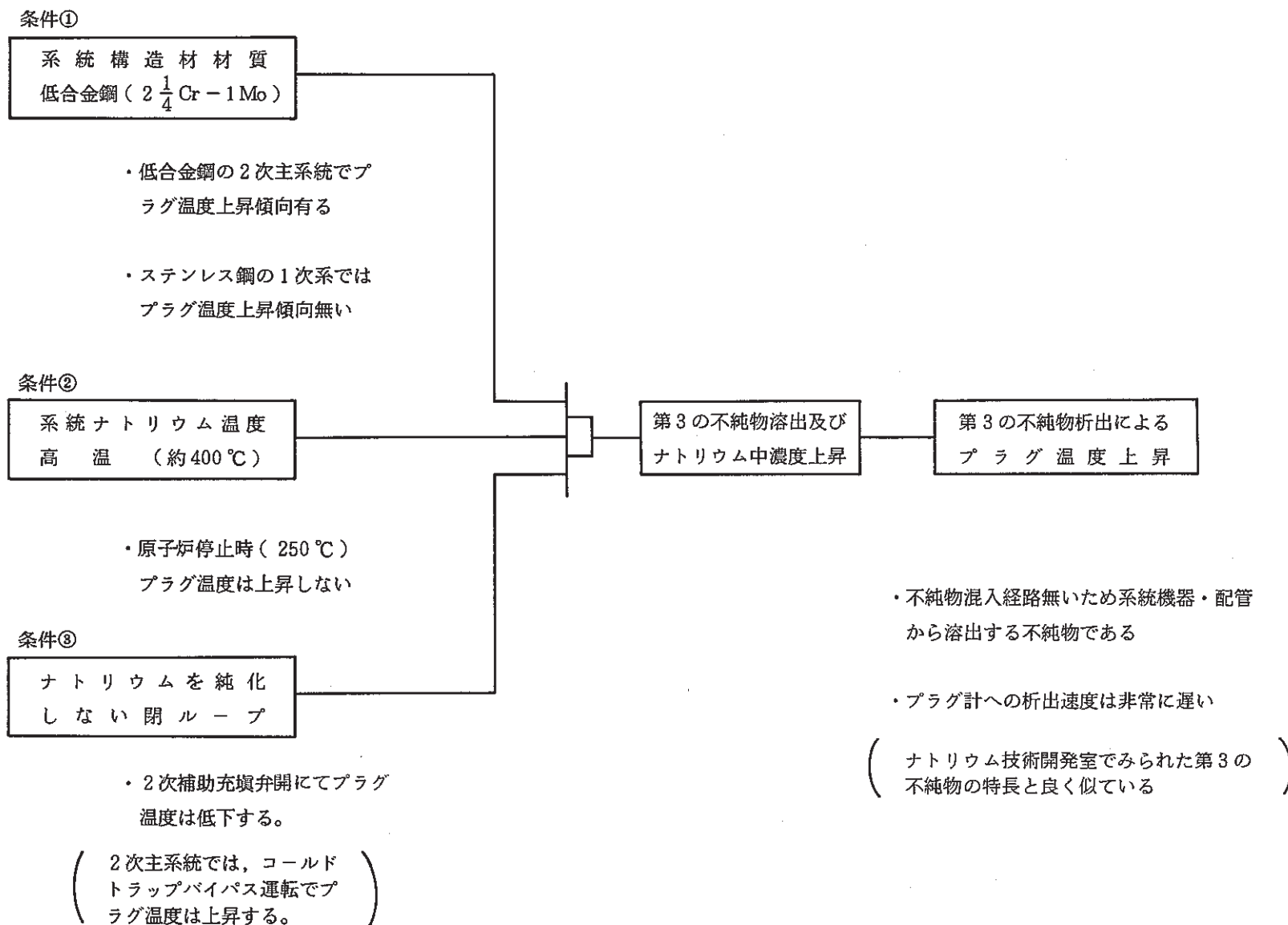


図 5.3.5 第3の不純物析出によるプラグ温度の上昇条件

5.4 第3の不純物元素の調査

第3の不純物はいかなる元素あるいは化合物であるかは現在のところ不明である。

「常陽」における第3の不純物は、系統構造材が低合金鋼（ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ ）である2次冷却系にみられ、ステンレス鋼である1次冷却系ではみられないことから、低合金鋼特有のものと考えられる。

低合金鋼ループで使用されたコールドトラップの解体結果をみると、

- ① 「フェライト鋼ループ用コールドトラップの解体結果（その2）」（SN941 77-117）では、鉄、クロム等の金属元素がコールドトラップ上段に多量に捕獲されており、これらはフェライト鋼ループから徐々に溶出していると推察された。⁽³⁾
- ② 「常陽2次ナトリウム純化系仮設コールドトラップ解体検査」（SN941 77-27）では、鉄、クロム、モリブデン等の金属元素が捕獲され、それらはメッシュ入口部（コールドトラップ内の高温部）に分布していた。⁽⁴⁾

との報告がある。

また、HEDLにおけるFFTF用燃料集合体のナトリウム中耐久試験（SN260 78-16）では、テスト部を親ループに対して低温に保つと圧力損失が著るしく増加し、また逆にテスト部を親ループに対し高温に保つと圧力損失が減少し元に戻る現象があり、この圧力損失変化は配管材料から溶出したけい素がナトリウム化合物の形で燃料ピン表面に沈着することが主原因であるとの報告もある。⁽⁵⁾

昭和60年8月に閉塞ぎみのため交換された2次補助プラグ計出・入口フィルタに付着していた粒状物の化学分析を行ったところ、鉄、ニッケル、けい素等が確認された。

表5.4.1に2次補助プラグ計出・入口フィルタ付着粒状物分析結果を、図5.4.1にフィルタ付着粒状物写真を示す。

また、これより先の「常陽」2次冷却系機器モックアップ試験ループとして建設された耐久試験装置の解体に際し、これに設置されていた「常陽」2次補助プラグ計と同一仕様のプラグ計の解体検査（耐久ループプラグ計の解体検査報告（MAPI資料））でも、プラグ計出・入口フィルタに黒色の付着物があり、その成分は鉄（フェライト組織）が最も多く、クロム、ニッケル、マンガン、炭素の存在も確認されたとの報告がある。⁽⁶⁾

以上のことから、第3の不純物は金属元素もしくは材料中の不純物（けい素）及びそれらの化合物である可能性が高い。

このことから、通常の2次系ナトリウム分析結果のうち金属元素及びけい素について原子炉運転中、停止中について調査したが、図5.4.2に示す如く有意な関係はみられない。しかし、金属元素及びけい素のナトリウム中飽和溶解度は、図5.4.3ならびに図5.4.4に示すように極めて低くまた、そのサンプリングには偏析の問題があり一概に判断できない。

表 5.4.1 2次補助プラグ計出・入口フィルタ付着粒状物分析結果

分 析 報 告 書

昭和 60 年 3 月 12 日

No.	60 - 76	046 / その他
-----	---------	-----------

分 析	プラグング計出入フィルタ付着粒状物			試料番号	プラグング計出入口フィルタ
サン プ ラ ー 形 状	円筒多孔板構造フィルタ	No.	1	分析成分	Fe, Ni, Cr, Mn, Si
1. 分析結果 (単位: %)					
	フィルタ付着粒状物			備 考	
Fe	58.86			◦ 計算法 Fe, Ni, Cr, Mn, Si の分析絶対量の合量を 100 として、各元素の割合を求めた。 ◦ 分析試料 「JOYO」2次補助冷却系、プラグング系出入口フィルタ付着粒状物	
Ni	30.45				
Cr	0.02				
Mn	0.04				
Si	10.62				
2. 特記事項					
◦ 二次サンプリングはフィルタ付着粒状物の内の 1 粒状物について酸溶解、化学分析を行ったもので、微量のためサンプリング重量の測定は出来なかった。					

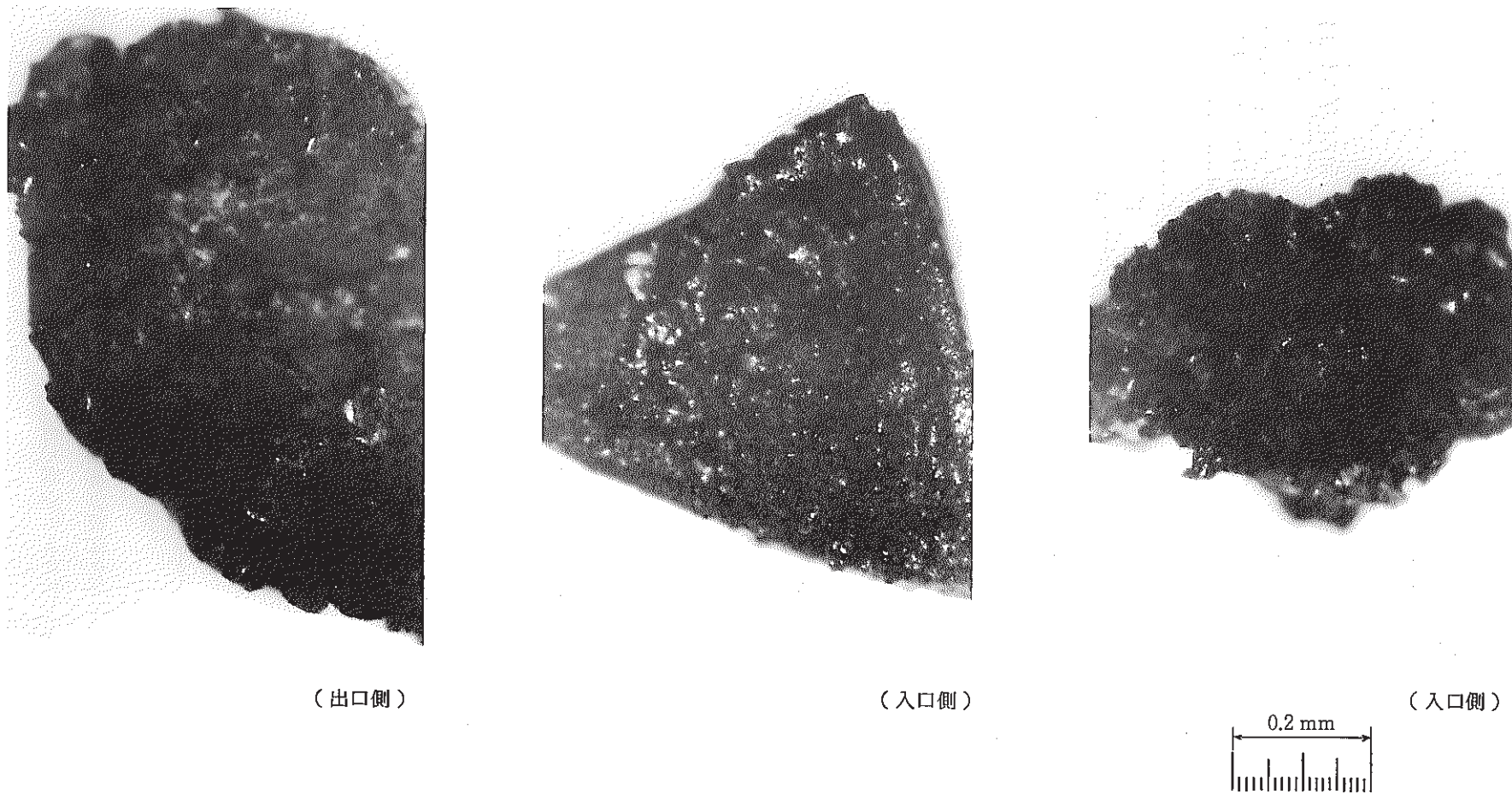


図 5.4.1 2次補助プラグ計出・入口フィルタ付着粒状物写真

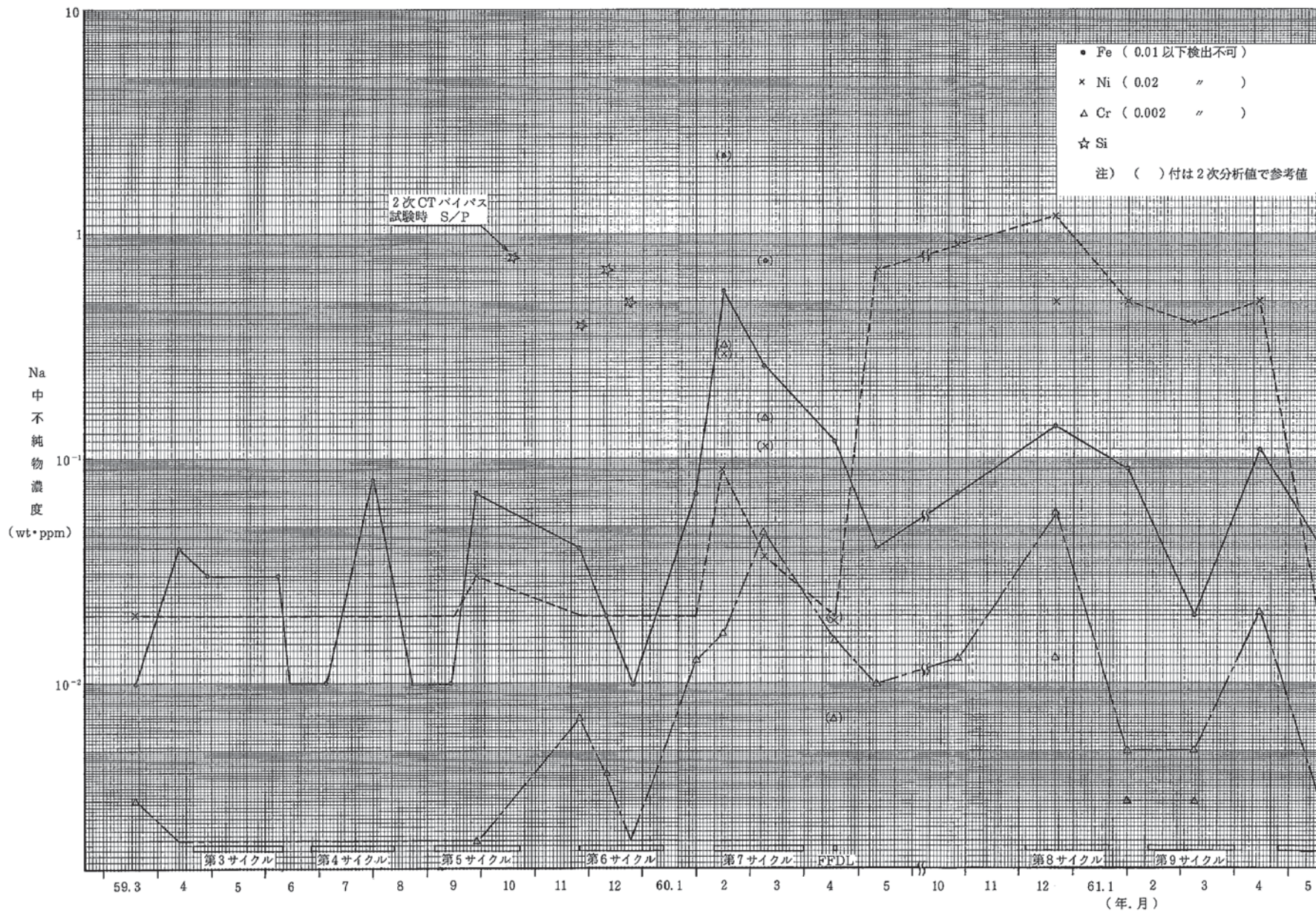


図 5.4.2 金属元素等の濃度変化(ナトリウムサンプリング分析結果)

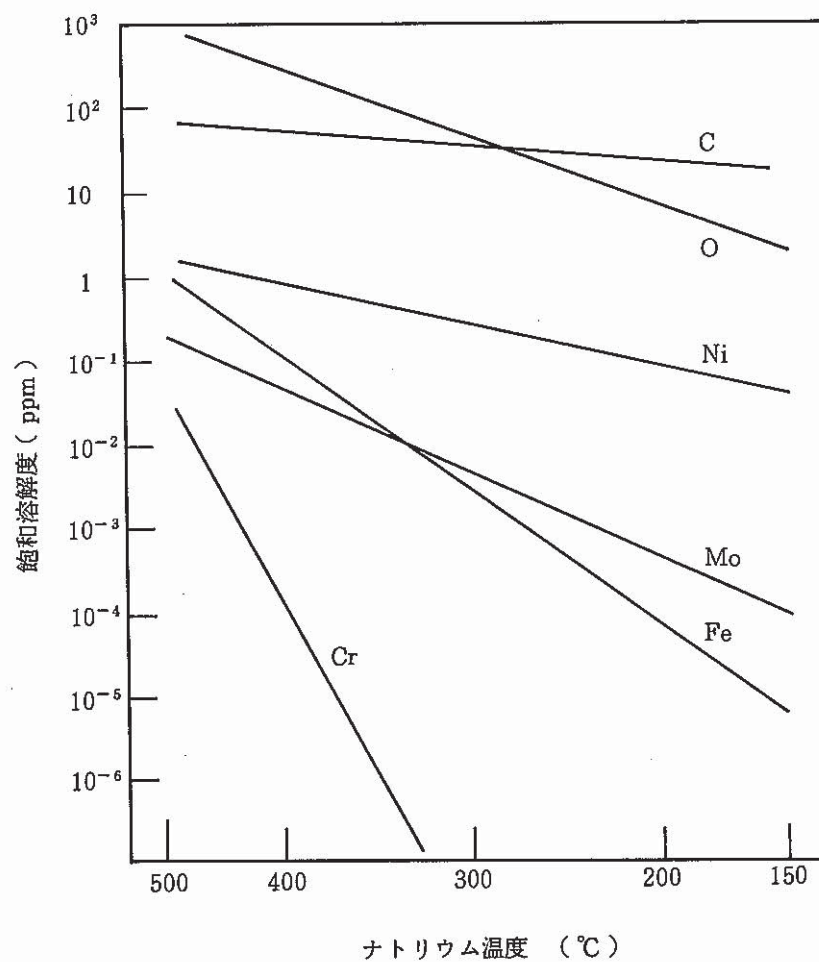


図 5.4.3 各元素のナトリウム中溶解度曲線

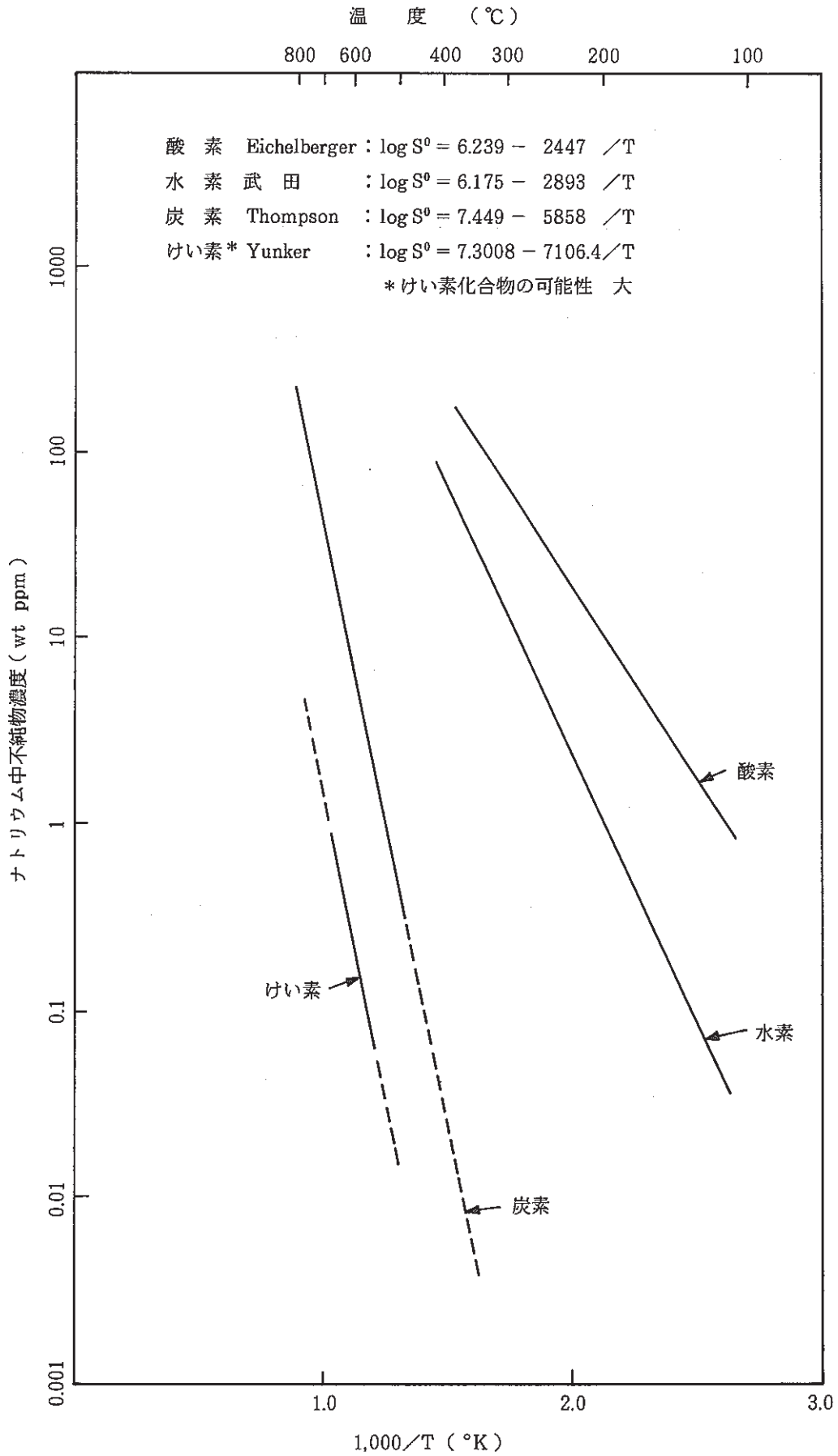


図 5.4.4 ナトリウム中各種不純物の溶解度

6. ま と め

これまでの2次補助プラグ計における運転経験において以下に示す不具合現象が確認された。

- (1) 原子炉起動数日数からみられる酸素、水素以外の第3の不純物の析出によるプラグ温度の上昇
- (2) 2次補助冷却系へのナトリウム充填後のサイクルに顕著にみられるガス巻込みによる流量変動
- (3) プラグ計内ナトリウム温度変化に起因する流量計出力電圧の変化

このような不具合現象が発生したが、必要の都度対応（系統内ガス抜き、流量比調整、フラッシング操作等）を講ずることによりなんとか1日1回のプラグ温度測定を行ってきた。

しかし、第3の不純物に関してはその元素名すら解かっているのが現状である。このような不具合、原因等貴重な経験は「もんじゅ」等将来炉に反映することが「常陽」の使命でもあり、また、2次補助プラグ計を安定に測定するためにも明確となっていない事象、原因等については可能な限り試験等を行い解明し、対策を講ずる必要がある。

表 6.1 に2次補助プラグ計における不具合原因とその対策案を示す。

表 6.1 2次補助プラグ計における不具合原因とその対策

現象	原因(推定)	不具合点	対策(案)	対策に当たっての必要事項
原子炉運転中にみられるプラグ温度の上昇	系統温度の上昇により機器・配管から溶出する酸素, 水素以外の第3の不純物の析出	(1) 酸素(水素)不純物の安定したプラグ温度の測定が困難 (2) プラグ計出・入口フィルタの閉塞 (3) フラッシング回数の増加	(1) 2次補助充填弁「開」による運転 (2) 2次補助系への純化設備の設置	(1) 第3の不純物究明及び定量評価 (2) サンプルング技術及びその方法 (3) 2次補助充填弁「開」に伴うリスク評価 (4) 純化設備仕様, コストの評価
ノイズ状の流量変動	ナトリウム充填に伴う系統ナトリウム中へのガス巻込み	安定したプラグ温度の測定不可	(1) 真空充填の実施 (2) 2次補助充填弁「開」による運転(ガス抜き)	(1) 真空充填方法の検討 (2) 2次補助充填弁「開」に伴うリスク評価
不純物の析出・溶解に起因しない流量変化	プラグ計内ナトリウム温度変化に起因する電磁流量計出力信号の変化	プラグ温度測定時の誤認及び制御性の悪化	(1) 電磁流量計の移設 (2) 電磁流量計温度補正回路の設置	(1) 移設に伴うコスト評価 (2) 電磁流量計温度特性の調査

7. 謝 辞

本報告書を執筆するに当って、御助言と御協力を頂いた実験炉部技術課前田課長代理をはじめとする分析グループの方々、原子炉第2課小川研究員、原子炉第1課2グループ諸先輩方及び2次補助プラグ計ワーキンググループの方々に深く感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- (1) SN 2410 86-001 ナトリウム不純物計に関する技術資料(I)プラグ計に関する技術資料
- (2) SN 941 80-99 ナトリウム純度管理に関する試験研究(第15報)プラグ計特性試験(IV)酸素および水素不純物の識別
- (3) SN 941 77-117 「常陽」ナトリウム冷却系耐久試験装置(XII)フェライト鋼ループ用コールドトラップの解体検査(2)
- (4) SN 941 77-27 2次ナトリウム純化系コールドトラップ解体検査
- (5) SN 260 78-16 PNC/USDEプラントコンポーネント水流動試験に関する専門家会議報告
- (6) 三菱原子力工業編 「耐久ループプラグ計の解体検査結果報告書」
- (7) 同 上 「PL-CA型自動連続式プラグ計取扱説明書」
- (8) 三菱重工編 「2次補助冷却系補助プラグ計流量異常について」
- (9) 日立製作所編 「電磁流量計取扱説明書」
- (10) PNC 実験炉部 「常陽」2次補助プラグ計検討ワーキンググループ第1回打合せ資料
- (11) PNC 実験炉部原子炉第1課2 Crメモ
 - 2180 「2次補助PL計不具合調査結果について」
 - 2184 「2次純化系コールドトラップバイパス試験結果について」
 - 2198 「2次補助PL計の不具合原因について」
 - 2260 「未知の不純物究明及び定量評価について」
 - 2261 「2次補助PL計への未知不純物の析出速度調査結果」