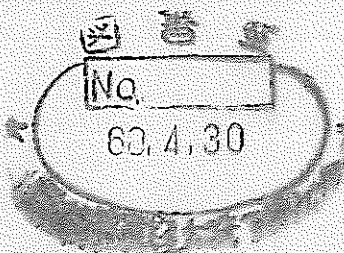


区 分 変 更	
資料登録番号	二二二
決算年月日	平成 13年 7月 31日

50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験
—第9報—

コールドラップ効率試験、バックグラウンド水素濃度試験、拡散水素量評価試験



1985年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N 941 85-22
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	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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 挨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)



社内一般

PNC T N 941 85 - 22

1985年2月

50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験—第9報—

コールドトラップ効率試験、バックグラウンド水素濃度試験、拡散水素量評価試験

金子 義久* 錦見 正和* 白土 清一*
土屋 每雄** 福田 達*

要旨

「もんじゅ」プラントの蒸気発生器における小リークのナトリウム—水反応検出システムを開発するため、50MW蒸気発生器試験施設を用いて一連の水リーク検出システム評価試験が実施されている。

本報では、通常運転時の水素挙動を明らかにするために、1976年10月から1983年7月までの間に実施した2次系コールドトラップの水素除去効率、バックグラウンド水素濃度、蒸気発生器伝熱管から2次系ナトリウム中への拡散水素量の試験結果について報告する。

主な試験結果は、以下の通りである。

- (1) コールドトラップの水素除去効率は、70~80%であった。しかし、コールドトラップと主系統との水素濃度差が小さい場合、コールドトラップの水素除去効率が小さくなる傾向がみられた。
- (2) 通常運転時の拡散水素量は、50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験の第1報で得られた値より低い値であった。
- (3) 当施設の2次系ナトリウムのバックグラウンド水素濃度が十分低いことを確認した。
- (4) 「もんじゅ」プラントの2次系ナトリウムのバックグラウンド水素濃度を評価し169 ppbより低くなる見通しを得た。

* 高速炉機器開発部システム設計開発室

** (現) 高速炉機器開発部



OFFICIAL USE ONLY
PNC N941 85-22
Feb. 1985

Experiments on the Water Leak Detection Systems in
the 50MW Steam Generator Test Facility -9-

Cold Trap Efficiency Test, Hydrogen Background
Concentration Test, Hydrogen Flux through Tube Test

Yoshihisa Kaneko*, Masakazu Nishikimi*,
Seiichi Shirato*, Tsuneo Tsuchiya**,
Tohru Fukuda*

Abstract

Series of tests on water leak detection system for Monju steam generators have been excuted in the 50MW Steam Generator Test Facility (50MW SGTF).

This paper describes the test results about the removal efficiency of hydrogen by the secondary cold trap, the hydrogen background concentration and hydrogen flux through heat transfer tubes to secondary sodium in steam generator (SG) in order to make clear the hydrogen behavior during ordinary plant operation from October in 1976 to July in 1983.

Main results from these tests are:

- (1) The removal efficiency of hydrogen by the cold trap is 70~80 percents, but it shows tendency to decrease when difference between hydrogen concentration at cold trap and that in secondary main loop is small.
- (2) Hydrogen flux through tubes is smaller than the value which is reported in the first report of these series reports.
- (3) It is found that the hydrogen background concentration in the secondary main loop of 50MW SGTF is thoroughly low.
- (4) It is estimated that the hydrogen background concentration in the secondary main loop in Monju plant is lower than 169 ppb.

* Systems Development Section, FBR System & Component Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Presently, FBR System & Component Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置	2
2.1 50 MW蒸気発生器試験施設の概要	2
2.2 コールドトラップ	3
2.3 ナトリウム中水素計	3
2.4 カバーガス中水素計	5
2.5 水素計の校正方法	6
2.5.1 ナトリウム中水素計の校正	6
2.5.2 カバーガス中水素計の校正	7
2.6 水素挙動基礎式	7
3. コールドトラップ水素除去効率	10
3.1 コールドトラップ水素除去効率評価方法の経緯	10
3.2 コールドトラップ水素除去効率の算出概要	10
3.3 試験方法	11
3.4 試験結果	12
3.5.1 発生状況および処置	13
3.5.2 推定原因	13
3.5.3 2次系コールドトラップの推定捕獲量と差圧変化	14
3.5.4 コールドトラップ性能低下時の差圧挙動	15
3.6 評価・検討	16
3.6.1 コールドトラップ水素除去効率について	16
3.6.2 コールドトラップの寿命評価	16
3.6.3 「もんじゅ」用2次系コールドトラップの寿命	16
4. バックグラウンド水素濃度	18
4.1 ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度	18
4.1.1 50 MW SGTFにおけるナトリウム中のバックグラウンド水素濃度	18
4.1.2 ナトリウム中水素濃度の温度の影響	19
4.1.3 まとめ	19
4.2. カバーガス中のバックグラウンド水素濃度	20

4.2.1 蒸発器カバーガス中の水素濃度	20
4.2.2 過熱器カバーガス中の水素濃度	22
4.3 評価・検討	22
4.3.1 ナトリウム中水素濃度の平衡値とその時間	22
4.3.2 ナトリウム中水素濃度が変化する要因	23
5. 蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量	25
5.1 試験概要	25
5.2 試験方法	25
5.3 運転および試験経過	26
5.4 試験結果	31
5.4.1 拡散水素量とヒドラジン濃度	31
5.4.2 拡散水素量とナトリウム温度	32
5.4.3 過熱器伝熱管からの拡散水素量	33
5.4.4 蒸発器メンテナンス実証試験後の拡散水素挙動	34
5.4.5 拡散水素量の経年変化	34
5.5 評価・検討	35
5.5.1 拡散水素量の温度依存性の検討	35
5.5.2 水側からの拡散水素量の推定	37
5.5.3 他国の発表例	37
5.5.4 まとめ	38
6. 総合評価	39
7. あとがき	41
8. 謝　　辞	42
9. 参考文献	43

図表リスト

—表リスト—

表 2-1	ナトリウム中水素計主仕様	45
表 2-2	カバーガス中水素計主仕様	46
表 3-1	コールドトラップ水素除去効率測定試験工程	47
表 3-2	2次系コールドトラップ推定水素捕獲量	48
表 3-3	「もんじゅ」2次系のコールドトラップ仕様	48
表 4-1	50 MW SSGと「もんじゅ」の比較	49
表 4-2(1)	ナトリウム中水素濃度データ整理表	50
表 4-2(2)	ナトリウム中水素濃度データ整理表	51
表 4-3	蒸発器カバーガス中水素濃度整理表	52
表 5-1	第3期拡散水素量評価試験および運転経過	53
表 5-2	第4期拡散水素量評価試験および運転経過	54
表 5-3	第5期拡散水素量評価試験および運転経過	55
表 5-4	第6期拡散水素量評価試験および運転経過	56
表 5-5	第7期拡散水素量評価試験および運転経過	57
表 5-6	第8期拡散水素量評価試験および運転経過	58
表 5-7	第9期拡散水素量評価試験および運転経過	59
表 5-8	第10期拡散水素量評価試験および運転経過	60
表 5-9	第11期拡散水素量評価試験および運転経過	61
表 5-10	第12期拡散水素量評価試験および運転経過	62
表 5-11	給水水質状態	63
表 5-12	各国における蒸気発生器からの拡散水素量	64

—図リスト—

図 2-1	50 MW 蒸気発生器試験施設の概略系統	65
図 2-2	蒸発器の構造	66
図 2-3	過熱器の構造	67
図 2-4	水素計の設置位置	68
図 2-5	コールドトラップの構造	69
図 2-6	EV-HNa系統図	70
図 2-7	EV-HNaニッケル膜構造図	71
図 2-8	SH-HNa系統図	72
図 2-9	SH-HNaニッケル膜構造図	73

図 2-10	EV-HAr系系統図	74
図 2-11	EV-HAr サンプリングノズル位置	75
図 2-12	EV-HAr ニッケル膜の構造	76
図 2-13	SH-HAr 系統図	77
図 2-14	SH-HAr サンプリングノズル位置	78
図 2-15	SH-HAr ニッケル膜の構造	79
図 2-16	カバーガス中水素計の校正系統図	80
図 3-1	Case CT 03 におけるコールドトラップの水素除去効率 (コールドトラップ底部温度変更後 1 時間 30 分経過)	81
図 3-2	Case CT 03 におけるコールドトラップの水素除去効率 (4 ~ 5 時間経過)	83
図 3-3	Case CT 03 におけるコールドトラップの水素除去効率 (7 ~ 8 時間経過)	85
図 3-4	CT 04におけるコールドトラップの水素除去効率 (コールドトラップ底部温度設定変更後 ~ 1 時間 30 分経過)	87
図 3-5	CT 04におけるコールドトラップの水素除去効率 (4 ~ 5 時間経過)	89
図 3-6	CT 04におけるコールドトラップの水素除去効率 (7 ~ 8 時間経過)	91
図 3-7	CT 05におけるコールドトラップの水素除去効率 (コールドトラップ底部温度設定変更後 ~ 1 時間 30 分経過)	93
図 3-8	CT 05におけるコールドトラップの水素除去効率 (1 時間 40 分 ~ 2 時間 40 分経過)	95
図 3-9	CT 水素除去効率と CT 底部温度変更後の経過時間との関係	97
図 3-10	CT 水素除去効率と CT 初期温度との関係	98
図 3-11	コールドトラップ異常時のプラントプロセス値(3)	99
図 3-12	コールドトラップの差圧変化	100
図 3-13	コールドトラップ異常時のプラントプロセス値(1)	101
図 3-14	コールドトラップ異常時のプラントプロセス値(2)	102
図 3-15	コールドトラップ水素除去効率の経時変化	103
図 3-16	「もんじゅ」 2次系系統概略図	104
図 4-1(1)	蒸気発生器起動・停止時のナトリウム中水素濃度挙動	105
図 4-1(2)	蒸気発生器起動・停止時のナトリウム中水素濃度挙動	106
図 4-2	通常運転中のナトリウム中水素濃度挙動	107

図 4-3	ナトリウム中水素濃度と温度の関係	108
図 4-4	1980年10月～12月のEVカバーガス中水素濃度	109
図 4-5	1981年5月～6月運転のEVカバーガス中水素濃度	110
図 4-6	1982年6月～7月のEVカバーガス中水素濃度	111
図 4-7	ナトリウム中のバックグランド水素濃度(50MW SGTF)	112
図 5-1(1)	50MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過	113
図 5-1(2)	50MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過	115
図 5-1(3)	50MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過	117
図 5-2	拡散水素量評価試験方法フローチャート	119
図 5-3	拡散水素量とヒドログリジン濃度の関係	120
図 5-4	拡散水素量とナトリウム温度の関係	121
図 5-5	拡散水素量とナトリウム温度(第1, 2期試験)	122
図 5-6(1)	結合運転での拡散水素挙動(第5期)	123
図 5-6(2)	結合運転での拡散水素挙動(第5期)	124
図 5-7	結合運転での拡散水素挙動(第8期)	125
図 5-8	結合運転での拡散水素挙動(第9期)	126
図 5-9	結合運転での拡散水素挙動(第11期)	127
図 5-10	SG起動時拡散水素挙動	128
図 5-11	蒸気発生器起動時の拡散水素挙動	129
図 5-12(1)	拡散水素量の経年変化	130
図 5-12(2)	拡散水素量の経年変化	131
図 5-12(3)	拡散水素量の経年変化	132
図 5-13(1)	拡散水素量の経年変化(蒸気発生器起動時データを含む)	133
図 5-13(2)	拡散水素量の経年変化(蒸気発生器起動時データを含む)	134
図 5-14	蒸気浸漬側(管内面)スケールの生成量測定結果	135
図 5-15	プラントトリップ後の拡散水素挙動(第6期)	136
図 5-16	ナトリウム中不純物濃度とナトリウム温度との関係	137
図 5-17	水素上昇率とナトリウム温度の関係(ナトリウム等温運転時のデータ)	138
図 5-18	第4期の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動	139
図 6-1	ナトリウム中のバックグランド水素濃度(もんじゅ)	140

List of Tables

Table 2-1	Specification of In-Sodium Hydrogen Meters
Table 2-2	Specification of In-Cover Gas Hydrogen Meters
Table 3-1	Test Process of Measurement of Removal Efficiency by the Secondary Cold Trap
Table 3-2	Assumed Quantity of Captured Hydrogen by the Secondary Cold Trap
Table 3-3	Specification of the Secondary Cold Trap for Monju
Table 4-1	Comparison of 50MW SGTF with Monju Plant
Table 4-2(1)	Arrangement Table of Hydrogen Concentration in Sodium
Table 4-2(2)	Arrangement Table of Hydrogen Concentraion in Sodium
Table 4-3	Arrangement Table of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator
Table 5-1	The Third Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-2	The Fourth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-3	The Fifth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-4	The Sixth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-5	The Seventh Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-6	The Eighth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-7	The Ninth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-8	The Tenth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-9	The Eleventh Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-10	The Twelfth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation
Table 5-11	Quality Condition of Feed Water
Table 5-12	The Hydrogen Flux through Tubes in Foreign Steam Generator

List of Figures

- Fig. 2-1 Schema of 50MW Steam Generator Test Facility
Fig. 2-2 Schema of Evaporator
Fig. 2-3 Schema of Superheater
Fig. 2-4 Location of Hydrogen Meters
Fig. 2-5 Schema of Cold Trap
Fig. 2-6 System of EV-HNa
Fig. 2-7 Structure of Nickel Membrane for EV-HNa
Fig. 2-8 System of SH-HNa
Fig. 2-9 Structure of Nickel Membrane for SH-HNa
Fig. 2-10 System of EV-HAr
Fig. 2-11 Position of Sampling Nozzle for EV-HAr
Fig. 2-12 Structure of Nickel Membrane for EV-HAr
Fig. 2-13 System of SH-HAr
Fig. 2-14 Position of Sampling Nozzle for SH-HAr
Fig. 2-15 Structure of Nickel Membrane for SH-HAr
Fig. 2-16 System of Calibration Loop for In-Cover Gas Hydrogen Meters
Fig. 3-1 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT03 (90 Minutes Pass after Changing CT Bottom Temperature)
Fig. 3-2 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT03 (4~5 Hours Pass)
Fig. 3-3 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT03 (7~8 Hours Pass)
Fig. 3-4 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT04 (90 Minutes Pass after Changing CT Bottom Temperature)
Fig. 3-5 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT04 (4~5 Hours Pass)
Fig. 3-6 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT04 (7~8 Hours Pass)
Fig. 3-7 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT05 (90 Minutes Pass after Changing CT Bottom Temperature)
Fig. 3-8 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT05 (100~160 Minutes Pass)

- Fig. 3-9 The Relation between Removal Efficiency of Hydrogen by CT and the Time Elapsed since Changing CT Bottom Temperature
- Fig. 3-10 The Relation between Removal Efficiency of Hydrogen by CT and CT Initial Temperature
- Fig. 3-11 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (3)
- Fig. 3-12 Change of Differential Pressure of CT
- Fig. 3-13 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (1)
- Fig. 3-14 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (2)
- Fig. 3-15 Change with Passage of Time of Removal Efficiency of Hydrogen by Ct
- Fig. 3-16 Schema of Monju Secondary System
- Fig. 4-1(1) Change of Hydrogen Concentration in Sodium at Start and Stop of SG
- Fig. 4-1(2) change of Hydrogen Concentration in Sodium at Start and Stop of SG
- Fig. 4-2 change of Hydrogen Concentration in Sodium during Ordinary Operation
- Fig. 4-3 The Relation between Hydrogen Concentration in Sodium and Temperature
- Fig. 4-4 Change of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator from October to December in 1980
- Fig. 4-5 Change of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator from May to June in 1981
- Fig. 4-6 Change of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator from June to July in 1982
- Fig. 4-7 Hydrogen Background Concentration in Sodium (50MW SGTF)
- Fig. 5-1(1) Detail of Operation and Tests for Hydrogen Flux through Tubes in 50MW SGTF
- Fig. 5-1(2) Detail of Operation and Tests for Hydrogen Flux through Tubes in 50MW SGTF
- Fig. 5-2 Flow Chart about Method of Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
- Fig. 5-3 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes and Hydrazine Concentration

- Fig. 5-4 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes and Sodium Temperature
- Fig. 5-5 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes and Sodium Temperature (The First and Second Tests)
- Fig. 5-6(1) Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Fifth Test)
- Fig. 5-6(2) Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Fifth Test)
- Fig. 5-7 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Eighth Test)
- Fig. 5-8 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Ninth Test)
- Fig. 5-9 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Eleventh Test)
- Fig. 5-10 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up SG
- Fig. 5-11 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up Steam Generator at Ninth Test
- Fig. 5-12(1) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes
- Fig. 5-12(2) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes
- Fig. 5-12(3) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes
- Fig. 5-13(1) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes (Including Data in Starting up SG)
- Fig. 5-13(2) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes (Including Data in Starting up SG)
- Fig. 5-14 Weight and Thickness Changes of Deposited Scale on Steam Side Surface of Test Tubes
- Fig. 5-15 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes after Plant Trip (The Sixth Test)
- Fig. 5-16 The Relation between Impurities Concentration in Sodium and Sodium Temperature
- Fig. 5-17 The Relation between Rising Rate of Hydrogen Concentration and Sodium Temperature
- Fig. 5-18 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up SG for Forth Test
- Fig. 6-1 Hydrogen Background Concentration in Sodium (Monju)

1. まえがき

高速増殖炉用蒸気発生器は、ナトリウムと水・蒸気が伝熱管を介して共存している。このため、万一伝熱管から水リークが発生した場合、早期かつ確実に水リークを検出しひとりに至る前に蒸気発生器を安全に停止させることが要求される。水リーク検出計としては、種々のものがあるが現時点ではナトリウム-水反応の際に発生する水素を検出する水素計が信頼性が高いため使用されている。水リークを早期かつ確実に検出するためには、水素計の開発はもちろんのこと水リーク時の水素挙動を十分解明しておくことが重要である。水素計については、動燃大洗工学センター内のプラント安全工学室において研究・開発^{1)～5)}がなされ性能向上が計られてきた。また、50MW蒸気発生器試験施設（以下50MWSGTFと称す）において水リーク模擬試験（注水および注水素試験）を実施し水素計の性能および検出特性評価、^{6)～8)}水リーク時の水素挙動の解明⁸⁾を進めている。水リーク時の水素挙動を解明するためには、通常運転状態（水リークがない状態）での水素挙動を把握する必要がある。従って、水素挙動の基本的要素となるコールドトラップの性能および蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量を定量的に評価しなければならない。

このため、「もんじゅ」プラントの2次冷却系と同じ構成となっている50MWSGTFを用いて以下の試験を実施した。すなわち、2次冷却系内の水素濃度を変化させコールドトラップの効率を求める試験を実施した。また系内水素挙動とともに水リーク時のリーク率評価に重要となる伝熱管からの拡散水素量を求める試験を蒸気発生器の運転前後の水素濃度差から評価する方法により実施した。このほか、水素計の設計や水リーク警報値の決定に重要な通常運転時のナトリウム中およびカバーガス中のバックグラウンド水素濃度測定試験についても実施した。

上記試験結果をもとに、1976年10月以降のコールドトラップの水素除去効率および運転中に発生したコールドトラップの性能低下についての検討、蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量の経年変化の評価、ナトリウム中およびカバーガス中のバックグラウンド水素濃度について検討した。（1976年10月以前のコールドトラップの性能および蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量についてはすでに報告⁹⁾している。）なお、従来の試験結果をふまえ総合的に評価し、実機プラントへの適用についても検討した。

2. 試験装置

2.1 50 MWSGTF の概要

50 MWSGTFは、原型炉発電設備「もんじゅ」プラントの2次系と同じ構成でかつ、熱過渡試験などを実施できるよう計画されている。すなわち、50 MWSGTFは、図2-1に示す様な系統となっており次の様な機能を持っている。

- ① ナトリウム加熱器：「もんじゅ」プラントの原子炉に相当し、LPGを燃焼させてナトリウムを加熱している。
- ② 1次ナトリウム系：ナトリウム加熱器での発生熱量を取り出し運搬するための系統で熱過渡のために、コールドバイパス、ホットバイパス、クーラーバイパスを有している。
- ③ 2次ナトリウム系：1次ナトリウム系からの熱を蒸気発生器に運搬するための系統で、ナトリウム流量の急激な変動試験ができるようナトリウム流量調節弁を設けてある。さらに、これまでの試験に加え、原子炉の崩壊熱を除去する補助冷却システム評価試験装置を昭和57年6月に設置し異常時の冷却系の運転制御に関する試験開発を行っている。
- ④ 水・蒸気系および冷却水系：蒸気発生器に任意の温度の給水を供し、蒸気発生器発生蒸気を減圧冷却し、復水とし、循環使用する系統で蒸気流量急変等、発電用タービンを模擬するためのタービン模擬弁を設けてある。また、冷却水系は、蒸気発生器発生蒸気を冷却・凝縮させるために、冷却水を循環させている。

以上の系統構成は、試験開始当初より基本的には、変化はないが、蒸気発生器は、1975年～1976年に1号器から2号器に交換され、現在まで継続して運転している。図2-2に2号蒸発器の構造図を、図2-3に2号過熱器の構造図を示す。50 MWSGTFは、2次ナトリウム系に蒸気発生器を有しており万一、水リークが発生した場合の早期検出のため水リーク検出器として過熱器出口、蒸発器出口、2次ナトリウム循環ポンプ出口にそれぞれナトリウム中水素計が、過熱器および蒸発器のカバーガス部にそれぞれカバーガス中水素計が設置されている。このほか2次系のコールドトラップ効率を測定するために、コールドトラップ出口にナトリウム中水素計が設置されている。これらのリーク検出装置の取付け位置を図2-4に示す。ナトリウム系内の水素濃度は、水リークの早期検出の感点から極力低くする必要があり、ナトリウム中の不純物除去、純度維持にはコールドトラップを使用している。コールドトラップは1次、2次ナトリウム系共に1基ずつ設置されており、弁の切替によって1次系、2次系のいずれにも使用できるようになっているが、運転上そのような使い方はせず、それぞれの系の専用機として用いている。

2.2 コールドトラップ

50 MWSGTFにおけるナトリウム純化装置は、エコノマイザー内蔵のワイヤーメッシュ充填型コールドトラップを使用しており、1次、2次ナトリウム系に同型のものをそれぞれ独立に設置している。このコールドトラップの構造図を図2-5に示す。

純化系を流れるナトリウムの流路は、ループから純化系に入り、その高温のナトリウムは、先ずエコノマイザーにてコールドトラップからの戻りの低温ナトリウムと熱交換して温度が下げる。次いでコールドトラップ本体に入り上部にある内蔵エコノマイザーでさらに降温され充填物のワイヤーメッシュ間を通過していく。ナトリウムは充填物間を下降していくうちにさらに降温され、最終的にはコールドトラップ底部制御温度値に等しくなる。ナトリウム中の不純物は、このワイヤーメッシュ間を通過する時に捕獲される。純化されたナトリウムは、内筒を上昇し、再び内蔵エコノマイザーで昇温されコールドトラップを出て行く。内蔵エコノマイザーの他に外部エコノマイザーを設けることによって、配管、機器類の熱応力の発生を小さくし、コールドトラップ本体の大きさを小さくするのに役立っている。

コールドトラップは、空気によって冷却しており、底部温度の制御は、空気流入口に設置されているダンパによって行っている。

1次、2次純化系の位置は、各冷却系のナトリウム主循環ポンプの吐出側より分岐し、吸込側に戻すように設置されている。このことは、ナトリウム中の不純物捕獲が進みコールドトラップの圧力損失が増加し、閉塞に至ることをできるだけ避ける為、主循環系において圧力差が最大にとることができる位置を選んだものである。

コールドトラップ内充填物のワイヤーメッシュは、材質SUS 304、線径 0.254 mm/m (SWG 33)、充填密度 192 kg/m^3 、充填容量 2 m^3 である。また、定格流量 10 T/h を流した時の充填物層間の平均流速は 42 mm/sec 、充填層内ナトリウム滞留時間は、約10分である。

2.3 ナトリウム中水素計

ナトリウム中水素計は、1号蒸気発生器用としてニッケル膜-質量分析器・イオンポンプ型から2号蒸気発生器用のニッケル膜-イオンポンプ型へと発展し、さらに校正時に水素計としての機能を失なうことのないように静的室と動的室を分離した水素計や真空系にオリフィスを設けイオンポンプの排気速度変化の影響を極力おさえた水素計へと改良され校正精度および検出感度向上が計られてきた。これらの詳細については、白土らが報告¹⁰⁾している。ここでは、1982年10月に蒸発器および過熱器出口に設置した水素計について記述する。

図2-6に蒸発器出口ナトリウム中水素計(以下EV-HNaと称す)の系統を示す。EV-HNaのナトリウム系統は、電磁ポンプ、主ヒータ内蔵エコノマイザ、ニッケル膜、流量計等から構成されている。ナトリウムは、電磁ポンプによって $3\ell/\text{min}$ の流量で主ヒータ内蔵エコノマイザに導かれここで $500\text{ }^\circ\text{C}$ に昇温されてニッケル膜部を通過する。通過したナトリウムは、

主ヒータ内蔵エコノマイザで若干降温され流量計を介して主系統配管へ戻る。ナトリウム系統構成の特徴は、ニッケル膜が動的室用と静的室用の2個あり、またニッケル膜を含む主ヒータ内蔵エコノマイザのナトリウムをドレンできるようドレン配管を設けていることである。図2-7にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜の形状は、円筒型のもので動的室用は、外径25mm、長さ50mm、表面積37.3cm²である。静的室用は、外径25mm、長さ191mm、表面積148cm²で膜厚はいずれも0.5mmである。ニッケル膜は、円筒の両端を座と底板に差し込み電子ビームによって溶接している。底板側は、支持していないためニッケル膜の熱膨張を自由に逃がすことができる。

真空系は、ニッケル膜が2つあるため動的室と静的室の2系統ある。動的室は、超高電離真空計、隔離弁、オリフィス、イオンポンプ、粗引きラインによって構成されている。従来の水素計と異なっている点は、超高電離真空計とイオンポンプの間に孔径0.3mm、コンダクタンス2.5ℓ/secのオリフィスを設けたことである。このためニッケル膜の面積を小さくすることができイオンポンプの寿命を長くすることができる。また、イオンポンプの排気速度が変動しても水素計の出力に影響を与えない等の利点がある。静的室は、シュルツゲージ、隔離弁（バリアブルリーク弁）、イオンポンプ、粗引きラインによって構成されている。静的室は、水素計の校正用として静的平衡圧を測定するために設置されている。従って、通常運転中は濃度測定用としては機能していない。

図2-8に過熱器出口ナトリウム中水素計（以下SH-HNaと称す）の系統を示す。ナトリウム系統は、EV-HNaの構成機器のほかダンプタンク、ベーパトラップ、ガスおよび真空系があり1つのループが構成されており主系統と切り離して単独で運転することができる。図2-9にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜の形状は、EV-HNaとかなり異なっており長さ50mm、厚さ0.5mmの全半球円すい形状で内側をナトリウムが流れる内圧型で表面積は19.4cm²である。ニッケル膜は、真空配管と電子ビーム溶接で接続されている。本水素計のナトリウム流量は、1.0ℓ/minでニッケル膜部は、500℃±1℃（EV-HNaも同様）になるようサイラリスト制御している。このほか、本水素計には酸素計センサーが取付け可能な構造になっている。

真空系は、EV-HNaの動的室と同じ構成となっており特徴として真空計が1個のみであることおよびオリフィスが設けられていることである。このため、静的平衡圧の測定は、超高電離真空計の測定上限圧力5×10⁻³Torr以下に限られる。オリフィスは、孔径0.2mm、コンダクタンス1.0ℓ/secのものでガスケットを兼用している。真空系には、このほか超高電離真空計を冷却するファンが設置されている。

なお、EV-HNa・SH-HNa共に水素計の出入口サンプリング配管の熱応力の逃げを考慮する必要がなく配管長さが短縮されている。従って、ナトリウムの輸送時間が短縮でき水リーグ検出計として有利である。

表2-1に50 MWSGTFに設置しているナトリウム中水素計の主仕様を示す。

2.4 カバーガス中水素計

カバーガス中水素計は、従来から蒸発器と過熱器にガスクロ型の水素計が設置されていたがガスクロ型は、応答速度が遅く間欠的測定という欠点がある。このため、蒸発器および過熱器にナトリウム中水素計と同じ原理のニッケル膜-イオンポンプ型の水素計を設置した。

図2-10に蒸発器カバーガス中水素計（以下EV-HArと称す）の系統を示す。また、図2-11に水素計のサンプリングガスノズルの位置を示す。カバーガス系は、ニッケル膜ハウジング、ベーパトラップ、ガス循環ポンプ、バッファタンク、流量計より構成されている。蒸発器カバーガス部からのサンプリングガスは、ナトリウム蒸気およびミストを含んだ状態で入口配管に設けたヒータによって500°Cに加熱・温度制御されニッケル膜部に導かれる。その後、還流型ベーパトラップによってナトリウム蒸気およびミストを除去しガス循環ポンプによって蒸発器カバーガス部へ戻る。なお、サンプリングガス流量は、20ℓ/minである。図2-12にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜は、外径10mm、長さ68mm、厚さ0.25mm、表面積20cm²の片持円筒型（先端半球状）でニッケル膜の内側を真空に引き外側を水素を含んだサンプリングガスが流れりわゆる外圧型である。

真空系の構成は、SH-HNaと同様であるが電離真空計にミリトルゲージを使用している。また、オリフィスは、孔径1mm、コンダクタンスが0.188ℓ/secのものを設置している。

なお、この水素計は、1983年の7月まで運転したが1983年8月にニッケル膜の形状・膜厚を変更するとともに真空系全体を交換している。

図2-13に過熱器カバーガス中水素計（以下SH-HArと称す）の系統を示す。また、図2-14に水素計のサンプリングガスノズル位置を示す。カバーガス系の構成は、基本的にEV-HArと同様であるためここでの説明を省略する。図2-15にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜は、外径25mm、長さ265mm、厚さ0.5mm、表面積208cm²で形状は、EV-HNaと同様の片持円筒型で内側をサンプリングガスが流れる内圧型である。真空系は、ニッケル膜、超高電離真空計、シュルツゲージ、隔離弁、イオンポンプおよび粗引き系より構成されている。真空系の特徴は、イオンポンプが低濃度測定用と高濃度測定用の2台設置されていることおよびニッケル膜の破損検出用に真空配管に熱電対が取付けられていることである。イオンポンプを2台設置した理由は、水素濃度によって使い分けることを考えたためである。しかし、実際には高濃度測定用のイオンポンプのノイズレベルが予想以上に低いため通常運転での水素濃度程度では十分測定可能であり低濃度用イオンポンプは使用していない。なお、表2-2にカバーガス中水素計の主要な仕様を示す。

2.5 水素計の校正方法

2.5.1 ナトリウム中水素計の校正

50 M WSGTF の運転は、年 2 ~ 3 回実施しており、1 サイクルの運転期間は 2 ~ 3 ヶ月である。ナトリウム中水素計の校正は 1 サイクルの運転で必ず行っている。このナトリウム中水素計の校正を行うことは、ナトリウム中水素濃度を正確に知ることができ、注水素試験等の解析評価を行うために重要である。また、ナトリウム中水素計自身の経時変化の有無を確認することができる。

ナトリウム中水素計の校正は、次の方法で行っている。

- ① ナトリウム温度を 350 °C 一定とし、等温循環運転状態でコールドトラップ底部温度を任意で運転する。
- ② ナトリウム中の水素濃度が一定したら、ナトリウム中水素計の超高電離真空計圧力あるいは、イオンポンプ電流を測定する。これを動的平衡状態という。
- ③ 次に、真空系の隔離弁を閉にし、ナトリウム中の水素分圧をシュルツゲージで測定する。これを静的平衡状態という。
- ④ コールドトラップ底部温度を変更し、ナトリウム中水素濃度を変化させ一定したら①~③を繰り返す。

ナトリウム中水素分圧と、ナトリウム中水素濃度との間には Sieverts の法則により次のような関係がある。

$$C_{NH} = K_H \cdot P_{NH}^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

C_{NH} (ppm) : ナトリウム中水素濃度

P_{NH} [Torr] : ナトリウム水素分圧

K_H [ppm/Torr^{1/2}] : Sieverts 定数

Sieverts 定数 K_H は、多くの研究者により実験的に求められているが、ここでは特に低水素濃度を対象として実験を行った Vissers らの値を使用した。

$$\log K_H = 0.86 - \frac{122.0}{T_N} \quad (2-2)$$

T_N [K°] : ニッケル膜部の温度

以上のようにナトリウム中水素分圧を知ることによりナトリウム中水素濃度が求まり、ナトリウム中水素濃度と超高電離真空計あるいは、イオンポンプの出力の関係が求められる。

また、同時にコールドトラップによって系内のナトリウム中水素濃度を制御している為、コールドトラップ底部温度から求まる飽和水素濃度からも校正することができる。

以上のようにナトリウム中水素計の校正方法には、2 つの方法があり 50 M WSGTF の場合

は、両者の間により一致がみられる。従ってどちらの方法でも正しい校正が可能であるが、ここでコールドトラップ底部温度から求まる飽和水素濃度から校正する方法を用いた。

通常の校正は、コールドトラップ底部温度を 110 °C ~ 170 °C の範囲で変化させ 5 ~ 6 点データを採取し約 10 日間かけて行っている。

2.5.2 カバーガス中水素計の校正

カバーガス中水素計の校正は、ナトリウム中水素計の校正と異なり、コールドトラップのような不純物濃度をコントロールするものがないため図 2-16 に示すカバーガス中水素計校正装置を用いてカバーガス中の水素濃度を変更し、校正装置に接続されているガスクロマトグラフの指示値と比較校正する方法を採用している。（この理由として、カバーガス中水素計の場合もナトリウム中水素計と同様に静的平衡法による校正が可能であるが、カバーガス中の水素濃度が高くなると水素分圧が計器（シュルツゲージ、ミリトルゲージ）の測定上限を越えてしまう問題があるためである。）

- ① カバーガス中水素計を校正ラインとし、タンクに水素を注入し適当な水素濃度とする。
(低濃度から実施する)
 - ② あらかじめ標準ガスで校正されているガスクロマトグラフの指示値を測定する。同時に水素計の超高電離真空計・ミリトルゲージの圧力、あるいはイオンポンプ電流を測定する。
 - ③ タンクに水素を注入し水素濃度を変更し、②を行う。これを繰り返す。
- 以上の操作により、ガスクロマトグラフの指示から、カバーガス中水素濃度が求まり、この時の水素計の出力から校正曲線が得られる。

2.6 水素挙動基礎式

50 M WSGTF のように蒸気発生器を有する系統内のナトリウム中水素濃度は、主に下記の 3 つの要素によって支配され系統内水素濃度変化は 2-3 式のように表わされる。同式は、系統内水素濃度を 1 点近似した場合の単純化された基礎式であり系統各部に各々濃度分布が存在する場合はさらにその区分毎に本式を適用しなければならない。

- (a) 蒸気発生器伝熱管からナトリウム側へ透過拡散する水素((2-3) 式右辺第 1 項)
- (b) 水リーク時に発生する水素(同上第 2 項)
- (c) コールドトラップの運転によって、増加、減少する水素(同上第 3 項)

$$\frac{dC}{dt} = \frac{St \cdot At}{W} + \frac{\phi \cdot g}{W} - \eta \frac{G}{W} (C - C_{\infty}) \quad (2-3)$$

ここで C (ppm) : 時刻 t における水素濃度

St (kg/h·m²) : 伝熱管表面積からの拡散水素量

At (m^2) : 伝熱管表面積
 W (kg) : 系内ナトリウム容量
 g (kg/h) : 水リーク時の発生水素量
 ϕ (-) : 発生水素のうちナトリウム中へ溶解する割合
 η (-) : コールドトラップ効率 ($C - Co / C - C_\infty$)
 G (kg/h) : 純化系ナトリウム流量
 Co (ppm) : コールドトラップ出口ナトリウム中水素濃度
 C_∞ (ppm) : コールドトラップ底部温度における飽和水素濃度
 t (h) : 時間

上記式の一般解は、次のとおりである。

$$C = C_\infty + \frac{St \cdot At}{\eta \cdot G} + \frac{\phi \cdot g}{\eta \cdot G} - (C_\infty - Cs + \frac{St \cdot At}{\eta \cdot G} + \frac{\phi \cdot g}{\eta \cdot G}) e^{-\eta \frac{G}{W} t} \quad (2-4)$$

ここで Cs (ppm) : 初期 ($t = 0$) における水素濃度

これ等の関係式中の全ての値が定量的に判れば系内水素挙動は基本的に判明することになるが、このうち At , W , G は系統の構造等から既知の値であるからその他の $\eta \cdot St \cdot \phi$ を実験的に求めて行く必要がある。なお、 ϕ については水リークを模擬した注水・注水素試験によって求められるものであり本試験からは除いた。

次にこのような水素濃度の定量追跡が可能な状態で行う試験の条件および得られるであろう結果について 2-3 式と 2-4 式との関連で捉え説明する。

まず、蒸気発生器の運転を停止し系統内をナトリウムのみで循環している場合を考えると、当然水リークもなく伝熱管からの拡散水素もない状態であるから 2-3 式に 2-5 式の条件を代入することにより 2-6 式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} g = 0 \\ G = 0 \end{array} \right\} \quad (2-5)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{At}{W} \cdot St \quad (2-6)$$

上式において At , W は既知の値であるから系内水素の濃度上昇率 (dC/dt) を測定することにより伝熱管からの拡散水素量の評価が可能である。

また、蒸気発生器とコールドトラップを同時に運転し水リークがない状態で水素濃度変動を 0 にする系内状態を形成すれば 2-3 式に 2-7 式の条件を代入し 2-8 式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} g = 0 \\ \frac{dC}{dt} = 0 \end{array} \right\} \quad (2-7)$$

$$C = C_{\infty} + \frac{S_t \cdot A_t}{\eta \cdot G} \quad (2-8)$$

上式は、伝熱管からの拡散水素量とコールドトラップによる除去水素量が平衡になった状態を示すものでコールドトラップ効率が既知のものになったとすれば次式からも伝熱管からの拡散水素量の評価が可能である。

$$S_t = \frac{\eta \cdot G}{A_t} \cdot (C - C_{\infty}) \quad (2-9)$$

2-6式と2-9式から判かるように S_t を求める場合、前者の方が不確定要素がなくより直接的にすなわち水素計の指示値から測定できるため、本試験では2-6式を用いて評価した。

3. コールドトラップ水素除去効率

3.1 コールドトラップ水素除去効率評価方法の経緯

従来、コールドトラップ水素除去効率は、3-1式により手計算で求めていた。

$$\eta = \frac{1}{t} \cdot \frac{W}{G} \ell n \frac{C - C_{\infty}}{C_s - C_{\infty}} \quad \dots \dots \dots \quad (3-1)$$

η : コールドトラップ水素除去効率

C : 時刻 t における水素濃度 (ppm)

C_s : 初期水素濃度 (ppm)

C_∞ : コールドトラップ底部温度における水素濃度 (ppm)

t : 時間 (h)

W : 系内ナトリウム容量 (kg)

G : 純化系ナトリウム流量 (kg/h)

この方法ではコールドトラップ流量を一定にし、コールドトラップ底部温度をステップ変化させて効率を算出しているが、以下のような欠点がある。

- ① 系内の水素濃度を一点近似したもので系内に濃度分布があると水素計はループ中の特定の点の水素濃度を指示し合わなくなる。
- ② コールドトラップ底部温度をステップ変化させる際に、制御系が追従せず振動する。
- ③ 主配管、検出系の時間遅れを考慮に入れていない。
- ④ コールドトラップ流量が変化すると計算できなくなる。

これらの欠点を補うためコールドトラップ効率計算コード NANCY を開発⁹⁾した。NANCY では、2次主冷却系を8点に区分けし、各配管区分での流動遅れ、合流混合、コールドトラップによる収支を考慮に入れ時間を追って8点での水素濃度を計算し各効率ごとの計算値と実際の水素計を比較することによりコールドトラップ効率を求めている。

その後、1978年10月に水リーク検出システム評価試験装置として2次系ナトリウム循環ポンプの出口と2次系コールドトラップ出口に水素計および酸素計が設置された。このため、2次系ナトリウム循環ポンプ出口の検出計と2次系コールドトラップ出口の検出計によりコールドトラップ水素除去効率を正確に測定することが可能となった。(3.2項参照)

3.2 コールドトラップ水素除去効率の算出概要

コールドトラップ水素除去効率は以下の式より定義されている。

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in} - C_{\infty}} \quad \dots \dots \dots \quad (3-2)$$

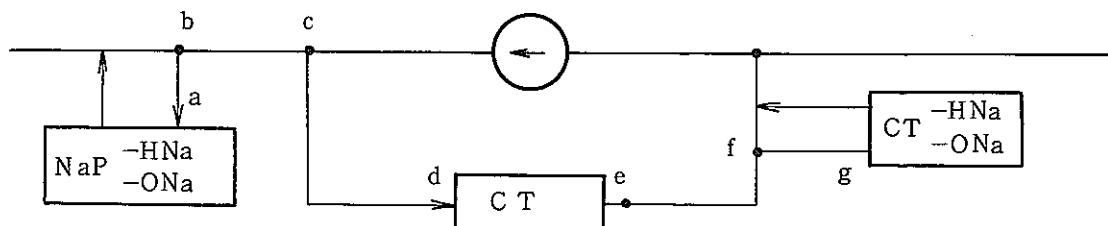
C_{in} : コールドトラップ入口水素濃度

C_{out} : コールドトラップ出口水素濃度

C_{∞} : コールドトラップ底部温度に対する飽和水素濃度

従来まではコールドトラップ入口及びコールドトラップ出口の水素濃度は測定することができなかったが、ナトリウム循環ポンプ出口およびコールドトラップ出口に水素計が設置されたことにより 3-2 式の C_{in} は 2 次ナトリウム循環ポンプ出口水素計指示値、 C_{out} は 2 次コールドトラップ出口水素計指示値より直接コールドトラップ水素除去効率を算出できる。

下図にコールドトラップ廻りの系統図を示す。



コールドトラップ水素除去効率を正確に算出するには、移送時間の遅れを考慮する必要がある。上図 abc間に要する時間を T_1 分、 cde間に要する時間を T_2 分、 efg間に要する時間を T_3 分とすると、コールドトラップ出口の水素計指示値は、 $(T_2 + T_3 - T_1)$ 分前のナトリウムポンプ出口の検出計の指示値と対応する 3-2 式は下式のように書くことができる。

$$\eta = \frac{(T_2 + T_3 - T_1) \text{ 分前のナトリウムポンプ出口検出計指示値} -}{(T_2 + T_3 - T_1) \text{ 分前のナトリウムポンプ出口検出計指示値} -}$$

$$\frac{\text{コールドトラップ出口検出計指示値}}{T_3 \text{ 分前の } C_{\infty}} \quad \dots \dots \dots \quad (3-3)$$

なお、コールドトラップ水素除去効率の計算に必要なコールドトラップ流量、底部温度、ナトリウムポンプ出口およびコールドトラップ出口検出計の出力は、2 秒毎に計算機 MT に収集される。これらのデータを使用し、計算機にて 3-3 式よりコールドトラップ水素除去効率を計算させその結果を時系列でプロッター出力させている。

3.3 試験方法

表 3-1 にコールドトラップの水素除去効率の工程を示す。コールドトラップ水素除去効率試験方法は、2.5.1 項で記述したナトリウム中水素計の校正試験と同様であるため、ここでは

作業手順について記述する。

- ① コールドトラップ運転状態で各水素計指示により系内の水素濃度が一定になっていること。
- ② 小リーク用MTを起動しコールドトラップの水素除去効率算出に必要なデータを収録する。
- ③ 小リーク用MT起動1時間後にコールドトラップ底部温度をステップ的に20～30℃の変化幅で降下させる。
- ④ 10時間データ収録後、小リーク用MTを停止する。
- ⑤ 試験ケース数により①～④を繰り返す。

なお、試験番号は次の通りである。

コールドトラップ底部温度	試験番号
170 ℃ → 150 ℃	CT03
150 ℃ → 130 ℃	CT04
130 ℃ → 110 ℃	CT05

3.4 試験結果

試験ケース CT03 は、コールドトラップ底部温度を 170 ℃ から 150 ℃ までステップ変化させたデータである。図 3-1 から図 3-3 は、それぞれコールドトラップ底部温度変更後から 1 時間 30 分まで、コールドトラップ底部温度変更後 4 時間から 5 時間まで、コールドトラップ底部温度変更後 7 時間から 8 時間までのコールドトラップ水素除去効率を示す。コールドトラップ水素除去効率は、コールドトラップ出口のナトリウム中水素計が変化した時点で 0 から徐々に上昇し 1 時間 30 分後には約 80 % になっている。この間は、コールドトラップ底部温度が静定していないためコールドトラップ水素除去効率も若干変動している。その後のコールドトラップ水素除去効率は、75 % ではほぼ一定であった。

試験ケース CT04 は、コールドトラップ底部温度を 150 ℃ から 130 ℃ までステップ変化させたデータである。図 3-4 から図 3-6 は、それぞれコールドトラップ底部温度変更後から 1 時間 30 分まで、コールドトラップ底部温度変更後 4 時間から 5 時間まで、コールドトラップ底部温度変更後 7 時間から 8 時間までのコールドトラップ水素除去効率を示す。コールドトラップ水素除去効率は、試験ケース CT03 と同様の傾向を示しコールドトラップ底部温度変更 1 時間 30 分後には 90 % まで上昇している。その後のコールドトラップ水素除去効率は、85% ではほぼ一定であった。

また、コールドトラップの水素除去効率は、コールドトラップ底部温度をステップ的に変化させて求めているため底部温度変更前は 0 ~ 100 % と大きく変動している。これは、コールドトラップ水素除去効率が $\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in} - C_{\infty}}$ で定義されていることから主系統の水素濃度 (C_{in}) とコールドトラップ底部温度に相当する水素濃度 (C_{∞}) との差が少ない場合、コールドトラップ底

部温度や水素計の微少な変化（ノイズも含む）でコールドトラップ水素除去効率が大きく変化するためである。つまり実際にコールドトラップ水素除去効率がこのように変化しているのではない。

試験ケース CT 05 は、コールドトラップ底部温度を 130 °C から 110 °C までステップ変化させたデータである。図 3-7 から図 3-8 は、それぞれコールドトラップ底部温度変更後 1 時間 30 分まで、コールドトラップ底部温度変更後 1 時間 40 分から 2 時間 40 分までのコールドトラップ水素除去効率を示す。本ケースのコールドトラップ水素除去効率もこれまでのケースと同様にコールドトラップ底部温度変更後、0 から 65 % まで徐々に上昇しコールドトラップ底部温度変更 1 時間以降は、65 % から 70 % の範囲であった。

これらの結果をまとめると次のことがいえる。①コールドトラップ水素除去効率はコールドトラップ底部温度をステップ変化させた直後は、徐々に上昇し 1 時間から 1 時間 30 分程度でほぼ安定な値を示す。ただし、コールドトラップ底部温度が変動するとコールドトラップ水素除去効率も若干変動する傾向にある。②コールドトラップ底部温度が安定した後のコールドトラップ水素除去効率は、70 ~ 80 % 程度と思われる。なお、図 3-9 にコールドトラップ水素除去効率とコールドトラップ底部温度変更後の経過時間との関係を、図 3-10 にコールドトラップ水素除去効率とコールドトラップ初期温度との関係を示す。

3.5 2 次系コールドトラップ性能低下について

3.5.1 発生状況および処置

1983 年 1 月 26 日に 2 次系へのナトリウムチャージを実施した。このときのプラギング温度は、226 °C と非常に高かった。このため、コールドトラップを底部温度 190 °C、流量 6.5 T/H で運転しナトリウムの純化運動を行った。しかし、図 3-11 に示すようにナトリウム中の水素計と指示が降下せずナトリウムの純化がされなかった。このときのコールドトラップ流量およびコールドトラップ差圧には異常は認められなかった。このような状況からコールドトラップの性能低下と判断しコールドトラップを 2 次系ナトリウムループと隔離した。その後、2 次系ナトリウムの純化を 1 次系のコールドトラップによって行った。2 次系のコールドトラップは、約 20 日間 250 °C で予熱保持した。その後、プラントを一旦停止し 3 月 15 日に再度運転を開始し 3 月 21 日に 2 次系へのナトリウムチャージを実施した。このとき 2 次系のコールドトラップの性能を確認するためコールドトラップを底部温度 170 °C、流量 7 T/H にて運転した結果ナトリウム純化ができるることを確認した。

3.5.2 推定原因

コールドトラップ流量およびコールドトラップ出入口差圧が正常な値を示していたことは明らかにコールドトラップ内にナトリウムが流動していたことを意味する。これらの状態を矛盾

なく説明できかつ性能が低下する原因としては、コールドトラップ内で何らかの原因でコールドトラップ底部のメッシュ部をバイパスする流路が形成されたことおよびコールドトラップ内のメッシュ部のナトリウム流速が異常に増加しトラップ効率が低下したことがあげられる。前者については、コールドトラップのこれまでの運転方法や構造上から非現実的である。後者については、プラギング温度が 226 °C と高かったにもかかわらずコールドトラップ底部温度を 190 °C でコールドトラップ内へナトリウムを流動させていることから判断すると過冷却のためコールドトラップ底部付近の外壁側のメッシュ部にナトリウムが凍結閉塞（局部的に）することが十分予想される。このため、メッシュ部の流路断面積が狭くなりナトリウム流速が増しトラップ効率が低下したことおよびメッシュ部の不純物捕獲面積の低下によりコールドトラップの性能が低下したものと思われる。コールドトラップ内を約 250 °C、20 日間予熱保持後、性能が回復していることからも、後者の理由であったと考える。

3.5.3 2次系コールドトラップの推定捕獲量と差圧変化

表 3-2 は、1974 年 1 月から 1983 年 7 月までの 2 次系コールドトラップの水素捕獲量をまとめたものである。不純物源は、施設停止中の定期点検・改造工事による空気の混入と施設運転中の蒸気発生器伝熱管からの拡散水素や注水・注水素試験によるものがある。施設停止中に混入する不純物の量は、施設起動時にプラギング温度から Vissers の水素飽和溶解度曲線より捕獲量を求めている。本来ならばナトリウム中の水素計から求めるべきである。しかし、当施設の運転方法としてナトリウムチャージ後、プラギング温度を測定してすぐにナトリウム純化に移行するためこの間の短い時間内ではナトリウム中水素計のニッケル膜部を 500 °C まで昇温し測定状態にすることが不可能なためである。また、注水・注水素試験で注入した水素は、すべてコールドトラップで捕獲されたものとして計算した。これらを合計すると、1983 年 7 月までのコールドトラップの全水素捕獲量は 4930.3 g と推定できる。

コールドトラップの水素捕獲可能量を酸素の捕獲可能量と同じ考え方を適用すると次式¹¹⁾ より求まる。

$$\text{メッシュ部流入断面積} \times 0.3 \times (\text{NaH密度}) \times \frac{\text{H}}{\text{NaH}} \quad (3-4)$$

本式に数値を代入すると

$$0.729 \times 0.3 \times 920 (\text{kg/m}^3) \times \frac{1}{24} = 8.38 (\text{kg}) \text{ となる。}$$

ゆえに、コールドトラップの水素に対する負荷は、59 % である。

図 3-12 にコールドトラップの差圧変化を示す。本図は、コールドトラップ流量 6 T/H 一定のデータであり 2 次系運転積算が約 27400 時間（～1983 年 4 月）までは、ほぼ 0.1 ～ 0.2 kg/cm²g の範囲で落ちている。

しかし、運転積算で約28600時間（1983年5月以降）以降は明らかにコールドトラップ内の差圧が上昇している。この傾向は、コールドトラップの推定水素捕獲量から考えて（3.6.2項参照）納得できる現象である。今後、コールドトラップの運転に際しては、差圧の動向に十分注意するとともにコールドトラップの交換の可能性を考慮しておく必要がある。

3.5.4 コールドトラップ性能低下時の差圧挙動

図3-11および図3-13～14は、コールドトラップ性能低下過程のコールドトラップ出入口差圧、流量およびナトリウム中水素濃度である。

図3-13は、1月28日にコールドトラップ底部温度を小刻みに下げた時の各指示変化を示す。差圧は、徐々に上昇しあるところで急激に降下する挙動を繰り返している。この挙動は、コールドトラップ底部温度変化に対応している。従来は、コールドトラップ底部温度を変化させても差圧が変化することはなかった。一方、ナトリウム中水素濃度は、明らかに低下しており純化されていることがわかる。

図3-14は、コールドトラップ底部温度を130°Cから150°Cに変更した後の各指示変化を示す。このときの差圧は、9時ごろから若干だが上昇しており図3-13と異なった挙動を示している。ナトリウム中水素濃度は、コールドトラップ底部温度の変更に従ってゆっくり上昇している。

図3-11は、コールドトラップの性能低下を確認した時の各指示変化を示す。このときの差圧は、特異な現象がなく一定値を示している。ナトリウム中水素濃度は、図3-13と同様にゆっくり上昇し落ち着かなかった。このため、コールドトラップを停止し水素濃度の上昇勾配を調査しコールドトラップ起動中のそれと比較した。この結果それほど大きな違いがなくコールドトラップの性能低下と判断した。その後、1次系のコールドトラップを2次系のコールドトラップ底部温度と同じにして起動しており2次系のナトリウムが純化されている様子がわかる。

このように、コールドトラップの性能が低下する過程で差圧の挙動がさまざままで当初予想していた挙動と異なっていたことから差圧計によって性能低下を判断することができなかった。今回の場合、ナトリウム等温運転中であったことから水素計の指示値によってコールドトラップの性能低下を確認できた。しかし、実機プラントでは蒸気発生器の運転がほとんどであるため水素計指示のみではコールドトラップの性能低下と水リークとの区別が困難である。従って、水素計に期待しないでコールドトラップの性能低下を発見する手段が必要である。差圧計は、その最も可能性のある計器と考えられるが前述のように今回の経験からは必ずしも満足できるものではなかった。しかし、コールドトラップ性能低下時に正常時にみられない特異な現象があることから今後さらに差圧のデータを蓄積する必要がある。

3.6 評価・検討

3.6.1 2次系コールドトラップの水素除去効率

コールドトラップの水素除去効率は、コールドトラップ出口およびナトリウム循環ポンプ出口の水素計により直読し評価した。これは、従来の評価方法に比べ不確定要素が少なく信頼性が高い。また、コールドトラップ水素除去効率を時系列で求められる特徴がある。この方法で得られたコールドトラップの水素除去効率は、主系統とコールドトラップ出口の水素濃度との差が大きい場合 70 ~ 80 %で NANCY コードで評価した 70 %とほぼ一致している。図 3-15 は、コールドトラップ水素除去効率の経年変化を示す。本図より 2 次系の運転約 25000 時間経過でのコールドトラップ水素除去効率に経年変化はみられなかった。

3.6.2 コールドトラップの寿命評価

現在の 2 次系コールドトラップの負荷 59 % (水素に対して) は、(3-4) 式の捕獲可能量に対する実捕獲量を負荷率 (%) で表わしたものであり、負荷率に余裕があるにもかかわらずコールドトラップの差圧が上昇し、現象的には、コールドトラップが捕獲限度に到達しているものと考えられる一方、根井らは、コールドトラップの水素捕獲可能量は、メッシュ部容積の 6.5 ~ 7.2 %と評価しており一旦差圧が上昇し始めると急激に増加すると報告²⁾している。根井の報告値に従って実捕獲量 (4.93 kg) を再評価するとコールドトラップに対する負荷率 (%) は、92 % ~ 99 %となりコールドトラップの水素捕獲能力に限界がきていることになる。現在の状況から判断してほぼ妥当といえる。従って、実際のコールドトラップの水素捕獲可能量はコールドトラップの設計指針の酸素の捕獲可能量の考え方を適用して求めた水素捕獲可能容量より少ない量と考えられる。また、コールドトラップの寿命を検出する手段として差圧計があるが、3.5.4 項で述べているように必ずしも万全とはいえない。現在は、差圧計によらぬ方法を別途検討中である。

3.6.3 「もんじゅ」 2 次系コールドトラップの寿命

図 3-16 に「もんじゅ」 2 次系の概略系統を示す。コールドトラップは、汲み上げラインに 2 基 (1 ループ当たり) 設置予定でナトリウムの純化方式として間接汲み上げ方式を採用している。この方式は、系統の温度・流量変化の影響を受けにくい利点がある。表 3-3 に「もんじゅ」 2 次系のコールドトラップ仕様を示す。「もんじゅ」 2 次系のコールドトラップの運用としては蒸気発生器初期運転にコールドトラップを 2 基運転し、通常運転では 1 基を使用し他の 1 基を予備とすることが考えられている。また、50 MWSGTF と異なりプラント運転中にコールドトラップを停止したリコールドトラップ内に捕獲されている不純物を系統内に放出するような運転は行わずコールドトラップ底部温度 120 °C 一定で連続運転が考えられている。このため、コールドトラップ内部の温度分布 (勾配) の変化がほとんどなく局部的な不純物の捕獲が考えら

れ 50 MWSGTF の結果より低い負荷量で寿命がくることが予想される。

現状での「もんじゅ」2次系コールドトラップの設計上の水素捕獲容量は、メッシュ部容量の 10% とされ 1 基当たり 19.6 kg である。しかし、水素捕獲容量は、50 MWSGTF の運転実績 (3.5.3 項および 3.5.4 項参照) から「もんじゅ」の設計値より低くメッシュ容量の 7~8% と考えられる。このデータ（きびしく評価するため 7% とする）から水素捕獲容量を求める 13.7 kg となる。さらに第 5 章で得られた拡散水素量の最大値 ($1 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$) から「もんじゅ」の通常運転時のコールドトラップ寿命を評価すると 1427 日で寿命がくる。ここで、「もんじゅ」の運転を 8 ヶ月／年と仮定すると約 6 年で寿命となる。一方、従来の設計値でコールドトラップの寿命を評価すると 2042 日（約 8.5 年）で寿命となる。従って、コールドトラップメッシュ部の有効割合によってコールドトラップの寿命が大きく左右されることがわかる。

4. バックグラウンド水素濃度

本章では、50 M WSGTF の運転実績をもとに 2 次系のナトリウム中およびカバーガス中のバックグラウンド水素濃度について整理したものである。

ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度の測定は、蒸気発生器の起動から出力上昇、停止に至るまでとコールドトラップ流量を下げた場合（「もんじゅ」の運転条件に近づけた）の 2 ケースについて実施している。後者は、「もんじゅ」2 次系のナトリウム中のバックグラウンド水素濃度を把握するために実施している。このほか、ナトリウム中バックグラウンド水素濃度のナトリウム温度の影響、水素濃度の平衡と平衡に達するまでの時間、水素濃度の変動要因について検討している。なお、カバーガス中のバックグラウンド水素濃度については、カバーガス中の水素挙動に不明確な点が多いため、ここでは測定結果のみを記述する。

4.1 ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度

4.1.1 50 M WSGTF におけるナトリウム中のバックグラウンド水素濃度

図 4-1 に 1982 年 7 月の蒸気発生器の起動から出力上昇、停止（プラントトリップ）までのナトリウム中水素濃度の挙動を示す。ナトリウム中水素濃度は、蒸発器通水前に 34.3 ppb であったが出力上昇に伴なって 49.5 ppb まで上昇し一定している。この間の水素濃度の上昇傾向として 2 段階に分かれており蒸発器通水から過熱器通気までの約 3 日間は、比較的上昇が急でそれ以降平衡に達するまでは、かなり緩やかな上昇であった。なお、ナトリウム中水素濃度が平衡に達したのは、蒸発器通水後約 10 日間要した。このときコールドトラップ流量は、5T/H 一定であった。

7 月 20 日 8 時ごろにコールドトラップ流量を 5T/H から 8 T/H に同日 20 時に 8 T/H から 6 T/H に変更したことおよび蒸気発生器停止に向けて出力降下（ナトリウム温度を 405 °C から 220 °C まで降温後プラントトリップ）させたことにより 49.5 ppb で落ち着いていたナトリウム中水素濃度は、35.5 ppb まで低下した。その後は、ナトリウム等温循環運転での水素挙動を示しているが、ナトリウム中水素濃度は系統のナトリウム温度の影響を強く受けていることがわかる。すなわち、ナトリウム中バックグラウンド水素濃度が変化しうる要因として蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量のみでなくナトリウムループの配管、機器等に付着している不純物も影響しているといえる。

図 4-2 は、1983 年 6 ~ 7 月の蒸気発生器運転中のナトリウム中水素濃度である。これは「もんじゅ」プラント 2 次ナトリウム系蒸気発生器運転での水素濃度を把握するため実施したものである。

コールドトラップ流量は、「もんじゅ」体系に相似させる（蒸気発生器伝熱管から拡散する水素量に対するコールドトラップの純化量の割合に対応させる）ため $1.6 \text{ T}/\text{H}$ 一定とした。表 4-1 に 50 M WSGTF と「もんじゅ」とのナトリウム容量、蒸発器伝熱面積、コールドトラップ流量の比較を示す。

本図よりナトリウム中水素濃度は、若干変動しているが 52 ppb で落ち着いている。コールドトラップの底部温度は、この試験期間を通して 110 ~ 113 °C の範囲で制御されていた。「もんじゅ」の場合 2 次系のコールドトラップ底部温度は、120 °C で運転されており通常の 2 次ナトリウム系のバックグラウンド水素濃度は約 170 ppb と予想されている。この値と比べると今回の結果がかなり低い値であることがわかる。なお、6月 29 日から 6月 30 日にかけて水素濃度が徐々に低下している。これは、6月 26 日に蒸発器本体内に水素を注入したため系統のナトリウム中水素濃度が上昇したものでナトリウム純化の過程である。

4.1.2 ナトリウム中水素濃度の温度の影響

表 4-2 は、1979 年 1 月から 1982 年 7 月までの運転期間におけるナトリウム中水素濃度についてまとめたものである。また、図 4-3 にそのプロット図を示す。本図より運転時期によって若干傾向が異なるが全体的にナトリウム温度が高くなるに従ってナトリウム中水素濃度が上昇している。これを運転状態別にまとめると以下の通りである。

ナトリウム等温運転 (200 °C)	27.5 ppb
ナトリウム等温運転 (350 °C)	33.0 ppb
蒸発器単体運転 (470 °C)	38.0 ppb
蒸発器+過熱器結合運転 (500 °C)	38.0 ppb

ここで、ナトリウム等温運転では、系内への水素混入源がないため、ナトリウム温度に関係なく水素濃度は一定となる。しかし、実際にはナトリウム温度によってナトリウム中水素濃度が変化している。この理由としては、ナトリウムループに不純物源がありそこから水素がナトリウム中に溶け込んでいるためと思われる。また、蒸気発生器運転中のナトリウム中水素濃度の絶対値が前述の結果に比べ低い値となっているが、これはコールドトラップの流量が多いいためである。

4.1.3 まとめ

以上のことから、50 M WSGTF における蒸気発生器運転中のナトリウム中水素濃度は、コールドトラップ底部温度 110 °C 運転で 38 ~ 52 ppb (コールドトラップ流量 $1.6 \sim 10 \text{ T}/\text{H}$) であった。また、ナトリウム中水素濃度は、コールドトラップの運転温度から求まる水素濃度に対して 10 ~ 15 ppb 程度高い値であった。蒸発器通水から出力上昇・定常運転でのナトリウム中水素濃度の挙動は、出力上昇時にピークに達しその後徐々に低下し平衡することを予想し

たが、実際には最大のナトリウム中水素濃度になった時点でのまま平衡している。平衡に達するまでの日数は10日間であったがこれはコールドトラップ流量により変化するものである。ナトリウム中水素濃度は、2-8式に示すように水リークがない場合蒸気発生器伝熱管からの拡散水素によって決定される。しかし今回の結果から運転初期のナトリウムループに存在する不純物の影響も無視できないことがわかった。蒸気発生器の定常運転状態でのナトリウム中水素濃度の変動（ゆらぎ）については定常運転状態が短かかったため認められなかった。

なお、「もんじゅ」の2次ナトリウム系の通常運転状態でのバックグラウンド水素濃度は、従来の値（約170 ppb）より低いと予想される。

4.2 カバーガス中のバックグラウンド水素濃度

4.2.1 蒸発器カバーガス中の水素濃度

蒸発器のカバーガス中のバックグラウンド水素濃度の測定は、1980年10月～12月、1981年5月～6月、1982年6月～7月の計3回実施した。

図4-4は1980年10月～12月の運転中の蒸発器カバーガス中水素挙動を示す。この期間での運転は、停止期間中に蒸気発生器メンテナンス工事等を実施しており2次ナトリウム系内が汚れていた。このため2次系へのナトリウムチャージは、10月30日にナトリウム温度250°C（通常は200°C）にて行った。このときのプラギング温度は、242°Cであった。2次系へのナトリウムチャージ時のカバーガス中水素濃度は、カバーガス中水素計が運転モードになつていなかつたため測定できなかつた。カバーガス中の水素濃度の測定は、11月5日より開始した。このときのカバーガス中水素濃度は、ナトリウム温度320°Cで197.1 ppmであった。その後はナトリウム温度一定でカバーガス中水素濃度は徐々に低下している。11月8日にナトリウム温度を350°Cまで昇温したためカバーガス中水素濃度は、70 ppmから363.5 ppm（昇温後約1日遅れ）まで上昇している。しかし、その後はカバーガスからナトリウム中への水素移行や2次ナトリウム循環ポンプシールガス供給によるカバーガスの希釈効果によりカバーガス中水素濃度が徐々に低下しナトリウム温度昇温後約8日で40 ppm程度で平衡に達している。

11月29日からは蒸気発生器出力運転に移行しているが、このときのカバーガス中水素挙動はナトリウム等温循環運転の初期の昇温時に比らべ水素濃度の上昇が少なかつた。また、カバーガス中水素濃度は変動（変動巾50 ppm）しながら徐々に低下し蒸発器通水後13日を過ぎても平衡しなかつた。なお、11月29日から12月9日の間は、蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量評価試験のためコールドトラップは停止していた。12月9日に蒸気発生器一定出力運転においてカバーガス中水素濃度が30 ppmから180 ppmまで急上昇し元に戻っているが、これについてはニッケル膜部の温度変化もなく原因が不明である。

図4-5は1981年5月～6月の運転中の蒸気発生器のカバーガス中水素挙動を示す。2次系へのナトリウムチャージは、5月25日にナトリウム温度200°Cにて行った。このときのプラギン

ガ温度は、165 °Cで2次系内はそれほど汚れていなかった。ナトリウムチャージ時のカバーガス中水素濃度は、10 ppmでその後、徐々に上昇し200 °C ナトリウム等温循環運転が短く平衡ではないが64.4 ppmまで上昇し（まだ上昇傾向）その後、ナトリウム温度を200 °Cから300 °Cまで昇温しカバーガスの純化を行っている。昇温に伴なってカバーガス中の水素濃度は、170 ppmまで上昇し時間経過と共に徐々に低下している。この現象は、1980年10月から12月の挙動と同様であった。また、6月6日の350 °Cナトリウム等温循環運転においてカバーガス中水素濃度が30 ppmから170 ppmに急上昇しているが、この現象も1980年12月9日と同様であり原因が不明である。なお、6月8日から6月11日にかけて蒸発器本体注水素試験を実施したためカバーガス中水素濃度はかなり高くなっているその後のナトリウム等温循環運転では蒸発器通水に備え純化運転を行っている。

6月15日に蒸発器へ通水し出力運転に移行しているが、蒸発器通水時のカバーガス中水素濃度は8 ppmまで下がっていた。その後、蒸気発生器出力上昇に伴なってカバーガス中水素濃度が上昇しているが上昇幅はナトリウム等温循環運転での最初の昇温時（200 °Cから350 °Cまで）に比らべ少なかった。蒸気発生器出力運転時のカバーガス中水素濃度の平衡値については、蒸発器本体に注水素試験を実施していることおよび6月29日以降にカバーガス中水素計イオンポンプコントローラが不調になったことから確認することができなかった。

図4-6は、1982年6月～7月までの運転中の蒸発器カバーガス中水素挙動についてプロットしたものである。2次系へのナトリウムチャージは、6月8日にナトリウム温度215 °Cで実施した。このときのプラギング温度は、206 °Cで2次系内がかなり汚れていた。これは停止期間中に2次ナトリウム系に補助冷却システム評価試験装置を設置したためである。ナトリウムチャージ時のカバーガス中水素濃度は、196.7 ppmでその後若干ナトリウム温度が上昇しているがカバーガス中水素濃度は徐々に低下している。6月14日から6月17日までは、カバーガス中水素計の校正を行っているためナトリウム温度を310 °Cから350 °Cまで昇温したときのカバーガス中水素挙動は確認できなかった。ナトリウム温度350 °C一定時のカバーガス中の水素濃度は、徐々に低下しナトリウム温度昇温6日後に20 ppmで平衡に達している。6月25日にカバーガス中水素濃度が20 ppmから200 ppmまで急上昇している。これは、補助冷却システム評価試験のため蒸気発生器へのナトリウム流動を停止し蒸気発生器の予熱を200 °Cから330 °Cに上げたため蒸気発生器内壁に吸着されていた水素がカバーガス中に移行したものと考える。

7月4日に蒸発器へ通水し出力運転に移行しているが、このときのカバーガス中水素濃度は、6 ppmで蒸気発生器出力上昇に伴なって19 ppmまで上昇している。その後は、徐々に低下し蒸発器通水8日後に5 ppmでほぼ平衡に達している。なお、この間の7月9日にプラントトリップが発生しているがカバーガス中水素濃度に大きな変動はなかった。

以上の結果をまとめると以下の通りである。なお、表4-3に整理表を示す。

① 蒸発器のカバーガス中水素濃度は、ナトリウム温度（カバーガス温度）に依存し運転初期

ほどその依存性が大きい。

- ② 蒸発器のカバーガス中の水素はカバーガス圧力制御による希釈およびナトリウム中への水素移行により純化される。
- ③ 蒸気発生器出力運転での蒸発器のカバーガス中水素濃度は、出力上昇に伴なって上昇しその後は、徐々に低下し平衡する。平衡するまでの日数は、運転初期のカバーガスの汚れの程度、純化日数、出力上昇率によって異なるが蒸発器通水後 8 日以上必要と思われる。

4.2.2 過熱器カバーガス中の水素濃度

過熱器カバーガス中水素濃度は、1981年5月から6月の運転に限り測定されている。この理由は、過熱器カバーガス中水素計イオンポンプの排気速度の低下が著しいため運転開始前にイオンポンプの回復処置（アルゴンポンバードとベーキング）を行ったためである。その他の運転期間については、校正試験時に過熱器カバーガス中水素計のイオンポンプが暴走し校正式が得られずカバーガス中水素濃度を測定することができなかった。

図4-5に蒸気発生器のカバーガス中水素挙動を示すが、過熱器のカバーガス中水素濃度は、蒸発器に比べ低くナトリウムチャージの運転初期で約5 ppm、その後は、ナトリウム温度の影響をそれほど受けず1 ppm前後であった。これは、過熱器カバーガスのみ2次系カバーガスと隔離されているため蒸発器本体への注水素（特にカバーガス部への注水素）による汚れたガスが過熱器カバーガス部に混入しないためと考える。

6月15日より蒸発器へ通水し蒸気発生器の出力運転に移行している。過熱器カバーガス中水素濃度は、出力上昇に伴って徐々に4.5 ppmまで上昇し、その後緩やかに低下し蒸発器通水後13日で1.5 ppm程度ではほぼ一定している。この現象は、蒸発器のカバーガス中水素挙動と同様な傾向を示している。

4.3 評価・検討

4.3.1 ナトリウム中水素濃度の平衡値とその時間

ナトリウム中水素濃度の変化は、蒸気発生器運転によって200 °Cナトリウム等温循環運転の35 ppbより10～15 ppb上昇し平衡に達している。「もんじゅ」では、コールドトラップ底部温度を120 °Cで運転した場合のナトリウム中水素濃度は、200 °Cナトリウム等温循環運転で54.8 ppb、蒸気発生器出力運転では169 ppbまで上昇し平衡に達すると予想されている。（ただし、ナトリウム中水素濃度上昇は、蒸気発生器伝熱管からの拡散水素のみと考えている。）「もんじゅ」と比較するとナトリウム中水素濃度の上昇はかなり小さな値であった。これは、当初50 MWSGTFの2次系ナトリウム容量に対しコールドトラップ容量が大きいためと考えたが実際に「もんじゅ」体系に相似させて試験を実施してもナトリウム中水素濃度変化に大きな差がなかった。「もんじゅ」に比べナトリウム中水素濃度がかなり小さかったのは、第5章

で述べているように当初得られた蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量より低くなっているためである。

また、蒸気発生器運転初期のナトリウム中水素濃度は、後述のようにナトリウムの純化の程度によってかなり影響度が異なるため、今回の結果はナトリウム等温循環運転時の純化が十分でナトリウムループ中の不純物（機器・配管等に付着している不純物）の影響が少なかったことも原因していると思われる。

図4-7は、50 MWSGTFでのナトリウム中水素濃度を蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量をパラメータとして2-3式を用いて求めプロットしたものである。

拡散水素量は、以下の値を用いた。

$$2 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{「もんじゅ」設計値})$$

$$1 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{第5章で得られた最大値})$$

$$6.3 \times 10^{-12} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{実測値から求めた値})$$

本図から、「もんじゅ」の設計値で求めたナトリウム中水素濃度は、約80 ppbで実測値の約50 ppbに比べ高くなっている。これは、前述のように拡散水素濃度が低下しているためである。また、ナトリウム中水素濃度が平衡に達するまでの時間は、計算結果では約100時間に対し試験結果では約200時間と長くなっている。この理由として、系統のナトリウム中水素濃度とコールドトラップから求まる水素濃度との差が少ないため第3章で得られた効率より低かったことが考えられる。

4.3.2 ナトリウム中水素濃度が変化する要因

2-8式からナトリウム中水素濃度は、コールドトラップの水素除去効率と蒸気発生器伝熱管からの拡散水素およびコールドトラップ流量によって変化するがこれは、ナトリウムループが十分純化されてナトリウムループ中に不純物がなくなることが前提である。実際には、一旦汚れたナトリウムループを完全に純化するにはかなり高温にしナトリウム中に不純物を溶解させる必要がある。しかし現実的には装置上の制約があり限界がある。50 MWSGTFのナトリウム純化方法を簡単に説明すると200°Cでナトリウムチャージ後、コールドトラップにより底部温度110°Cまで徐々に下げてナトリウム中水素濃度が平衡するまで純化を行う。その後ナトリウム温度を350°Cまで昇温しナトリウム中水素濃度が再度平衡するまで純化を継続する。これまでの実績では、初期のナトリウムの汚れの程度によって若干異なるが10日前後ナトリウム純化に要している。

試験結果では、ナトリウム等温循環運転中にもかかわらずナトリウム中水素濃度が変化しておりナトリウムループ中の不純物が温度変化により溶解・析出しているものと思われナトリウム中水素濃度変化の要因の1つと考えられる。このほか、カバーガス中からナトリウム中への水素移行も考えられる。「もんじゅ」でのナトリウム初期純化運転がどのような方法で行われるか明

確でないがナトリウム温度 200 °Cで純化し昇温純化しないようであれば蒸気発生器運転初期のナトリウム中水素濃度上昇は、不純物の影響によりかなり高い値となり平衡に達する時間も 4.3.1 項で検討した結果より長くなることが予想される。

このほか、ナトリウム中水素濃度が変化する要因としてコールドトラップ底部温度のゆらぎが考えられる。これは、特にナトリウム中水素濃度が平衡に達してからのゆらぎとして問題になる。コールドトラップ底部温度は、通常運転で 110 ~ 113 °C の範囲で制御されており温度の変化率がかなり緩やかになっているためコールドトラップ底部温度のゆらぎが直接ナトリウム中水素濃度変化と対応して検出されなかった。つまり、コールドトラップ底部温度がこの程度の緩やかなゆらぎであれば特に問題ないといえる。

コールドトラップ底部温度がゆらぐ原因は、コールドトラップを冷却する空気温度が昼夜によって差がでるためと思われる。一方、コールドトラップ底部温度がステップ的に変化する場合は、ランプ的に変化する場合に比べナトリウム中水素濃度への影響は大である。しかし、これまでの運転経験では通常運転においてコールドトラップ底部温度が過渡的に変化することはない。プラントトリップ等の事故時に限られる。50 MWSGTF では、コールドトラップ流量を2次ナトリウム循環ポンプで確保しているためプラントトリップが発生すればコールドトラップ流量がなくなりコールドトラップ底部温度は過渡的に変化するがナトリウム中水素濃度は変化しない。「もんじゅ」では、図 3-16 よりコールドトラップ流量を汲み上げポンプで確保しているのでプラントトリップが発生してもコールドトラップ流量はほとんど一定と思われる。またオーバフロータンクを介して汲み上げられているためループの温度変化に対しエコノマイザ入口ナトリウム温度はなまる。これらのことから、「もんじゅ」でプラントトリップが発生してもコールドトラップ底部温度は一定と思われる。以上のことから、ナトリウム中水素濃度が変化する要因は蒸気発生器伝熱管からの拡散水素とナトリウムループ中の不純物が支配的であると考える。

5. 蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量

5.1 試験概要

これまでの蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量評価試験は、2号蒸気発生器の運転開始から現在に至るまで12期に分けて行なわれた。図5-1(1)～(3)は、第1期から第12期までの試験目的および概略的な試験経過を示す。このうち、第1期と第2期の試験結果についてはすでに報告されており、それらの主な結果は以下の通りである。⁹⁾

- ① 初期（蒸発器初通水後10～15日まで）の拡散水素量は、 $6 \sim 10 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ である。
- ② 蒸発器初通水後50日以降の拡散水素量は $1 \sim 2 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ である。
- ③ 拡散水素量は、給水流量、蒸気圧力の依存性が認められなかった。
- ④ 拡散水素量は、ナトリウム温度の上昇とともに増加する。
- ⑤ 過熱器伝熱管からの拡散水素量は、無視できるほど小さい。

第3期以降は、主に給水水質（ヒドラジン）、ナトリウム温度の効果の把握と拡散水素量の経年変化の追跡に着目した試験を実施している。

5.2 試験方法

2次系のナトリウム中水素濃度の変化を正確に把握するためには蒸気発生器の伝熱管を通して水側からナトリウム側に透過・拡散してくる水素量を定量的に求めることが必要である。

拡散水素量は、2.6項で述べているように次の式で求めることができる。

$$St = \frac{W}{At} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (5-1)$$

ここで、 $At = 237 \text{ m}^2$ （第10期以降は 222.6 m^2 ） $W = 50 \times 10^3 \text{ kg}$ であり、コールドトラップを停止して単位時間あたりの水素濃度の上昇率を測定することにより拡散水素量を計算できる。

以下に蒸気発生器起動時の伝熱管からの拡散水素量評価試験方法を示す。また、図5-2にそのフローチャートを示す。

- ① ナトリウム等温循運動中に2次系ナトリウムをコールドトラップにより純化しナトリウム中水素濃度を十分下げ（コールドトラップ底部温度 $110 \sim 115^\circ\text{C}$ ）一定濃度とした後コールドトラップを停止する。
- ② コールドトラップ停止状態で5～6時間保持し、ナトリウム中水素濃度の変化がないこと

をナトリウム中水素計の指示値により確認する。

③ 蒸気発生器を運転し伝熱管からの拡散水素量を測定する。

④ 蒸発器運転開始またはコールドトラップ停止 10 日後に試験終了とする。なお、10 日以内にナトリウム中水素濃度が 500 ppb 以上になつたらその時点で試験終了とする。

蒸気発生器運転中の拡散水素量評価試験方法は、上記①のナトリウム等温循環運転中を蒸気発生器運転中に置き換える。

また、②項の操作を除く。

なお、上記の②は、第 1 期～第 7 期までは、ナトリウム温度 200°C の状態で確認しているが、試験結果からこの方法では系統の配管、機器から溶解する水素の影響を無視できないと判断し、第 8 期以降は、ナトリウム温度 350°C に上げ、ナトリウム中水素濃度の変化の有無を確認している。

5.3 運転および試験経過

本項では第 1 期、第 2 期を除く第 3 期から第 12 期の試験で行なわれた各試験でその詳細な運転および試験経過を述べる。

① 第 3 期拡散水素量評価試験

表 5-1 に第 3 期の試験期間および詳細な運転の試験経過を示す。第 3 期試験は、拡散水素量の経年変化追跡および、蒸気圧力、給水流量、ナトリウム温度の影響を確認する目的で行なった。

10 月 13 日に 2 次系にナトリウムチャージを実施し、この時のプラギング温度は 187°C と高かった。これは停止期間中に、過熱器出口に注水素試験装置を新設したために、系内が汚れることになる。その後ナトリウム温度を 200°C から 300°C まで昇温しナトリウム中注水素試験を行った。その後、ナトリウム温度 350°C、コールドトラップ底部温度 120°C にて約 5 日間ナトリウム純化を実施している。

第 3 期での拡散水素量評価試験は 4 回実施している。第 1 回目は 11 月 10 日の蒸発器通水から 11 月 15 日までの蒸気発生器起動時のものでこの間、11 月 11 日に過熱器に通気、隔離を行い、11 月 12 日に再び過熱器に通気している。これは、蒸気発生器起動時の拡散水素挙動を解明するために実施している。また、同時に第 1、2 期の試験結果より温度依存性が確認されていることからナトリウム温度を 200°C、300°C、400°C と変更し温度依存性の再確認試験も兼ねている。第 2 回目は、蒸気発生器が定常運転中の状態で 11 月 25 日から 11 月 30 日までの試験を行ったもので、この間も過熱器の隔離・通気を行っている。第 3 回目は、蒸気発生器の運転停止直前の 12 月 13 日から 12 月 16 日にかけて行っている。第 4 回目は、途中施設が約 1 ヶ月停止し 2 月 4 日に蒸発器に通水し、蒸気発生器での運転を再開した後の 2 月 12 日から 2 月 25 日まで試験を行った。この間、2 月 13 日と 2 月 15 日に 2 次ナトリウ

ム主循環ポンプ異常停止のためプラントトラップし、2月14日と2月15日に蒸発器に再通水している。

② 第4期拡散水素量評価試験

表5-2に第4期の試験期間および詳細な試験経過を示す。第4期試験では、拡散水素量の経年変化、蒸気発生器起動時の挙動、給水水質で特にヒドラジン濃度の影響について試験を行なった。

1977年4月16日2次系にナトリウムをチャージした時のプラギング温度は151.5°Cであった。これは、停止期間中ナトリウム配管に圧力損失評価試験装置を設置した為系内が汚れたものと思われる。ナトリウム等温循環運転中にナトリウム中注水素試験を行なったため、拡散水素量評価試験前にナトリウム温度200°C、コールドトラップ底部温度110°Cにて約2日間純化を行なっている。第4期での拡散水素量評価試験は2回実施している。第1回目は5月11日の蒸発器通水から5月13日まで行なっている。第2回目は、ヒドラジン濃度の影響を調べるために、6月15日から6月21日まで、蒸発器単体100%出力一定運転で行なっている。

③ 第5期拡散水素量評価試験

表5-3に第5期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

2次系へのナトリウムチャージを1977年10月18日に行ない、この時のプラギング温度は201°Cと高かった。これは、停止期間中に蒸気発生器放出管のナトリウム除去作業を行なっているため系内が汚れたものと思われる。

第5期の拡散水素量評価試験は、4回実施している。第1回目は、蒸気発生器起動時の拡散水素挙動を把握するために10月31日の蒸発器通水から11月14日まで実施しておりこの間、11月1日と11月8日の2回プラントトリップが発生し、また、過熱器の通気・隔離等があり安定な運転状態ではなかった。

第2回目の試験は、蒸気発生器起動時の拡散水素挙動および経年変化の追跡のためプラントトリップ後の11月26日の蒸発器再通水から12月4日までの10日間行なっている。なお、11月29日17時25分以降は、蒸発器+過熱器の結合運転である。

施設は、約1ヶ月停止し、1978年1月25日に再び2次系にナトリウムをチャージし運転を開始した。

第3回目の試験は、拡散水素の温度依存性を確認するため2月5日蒸発器通水から2月15日にかけて実施している。この期間中にもプラントトリップが発生している。

第4回目の試験は、経年変化の追跡のため2月22日から2月28日にかけて実施している。途中、2月25日から2月27日までは蒸発器単体運転でその他は、蒸発器+過熱器の結合運転である。

④ 第6期拡散水素量評価試験

表5-4に第6期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

1978年5月23日に2次系にナトリウムチャージを行い施設の運転を開始した。ナトリウムチャージ後の不純物濃度はかなり高くプラギング温度で約220°C（水素計指示値では180°C）であった。これは、停止期間中に2次系ナトリウムポンプのシールカートリッジ取替作業を実施したため、系内が汚れたものと思われる。その後、コールドトラップによるナトリウムの純化運転を行ない5月29日から6月1日にかけて蒸発器内のダウンカマおよびカバーガス中に注水素試験を実施している。その後は、蒸発器本体の注水素試験での水素の影響を極力少なくするためナトリウムの純化を行なっている。

第6期の拡散水素量評価試験は2回実施している。第1回目は、蒸気発生器起動時の拡散水素挙動と温度依存性を確認するため6月7日の蒸発器通水から6月17日までの10日間行なっている。蒸発器通水からの数日間は、プラントトリップが3回発生しており蒸気発生器の運転は安定な状態ではなかった。

第2回目は、拡散水素量の経年変化を追跡するもので6月27日から7月2日まで実施した。この間はすべて蒸発器+過熱器の結合運転でトリップ等の過渡的変化はなかった。この試験は、7月7日まで行なう予定であったが、7月2日に蒸発器のナトリウム中水素計のイオンポンプ出力が180 μA付近（プラギング温度153°C）で暴走したため試験を途中で中止している。

⑤ 第7期拡散水素量評価試験

表5-5に第7期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

1979年1月24日に2次系にナトリウムチャージを行ない運転を開始した。チャージ後のナトリウム中不純物濃度は、かなり高くプラギング温度で約212.5°Cであった。これは、停止期間中にリーク検出システム装置を2次系に設置したことおよび供用期間中の健全性確認のため蒸発器の管束部を引抜いたため系統内が汚れたものである。このため、コールドトラップによるナトリウム純化を行なったがナトリウム温度350°Cでの純化は約2日間と短く不十分なものであった。

2月13日から2月19日にカバーガス中注水素および注水試験を行なっている。系統内に注入された水素は8.65gでその中で、5.8gが検出されたが残りの3.07gは何らかのかたちで系統内に存在する結果となった。このため、拡散水素量評価試験に先立ちナトリウム純化運転を、ナトリウム温度350°Cコールドトラップ底部温度110°Cで約2日間実施している。

第7期の拡散水素試験は2回実施している。第1回目は、2月24日蒸発器通水から2月26日までに蒸気発生器起動時の拡散水素挙動で特に温度の効果を確認するために従来の方法と同様にナトリウム温度を200°C, 300°C, 400°Cと変更して行なっている。試験中の2月26日に系統のプラギング温度が180°Cを越えたためコールドトラップを起動し拡散水素試験を中止した。この間はすべて蒸発器の単体運転である。第2回目は経年変化の追跡のため、3月1日から3月12日まで行なっている。この間、過熱器は通気、隔離後、再通気している。3月6日以降は、拡散水素量評価試験と同時に蒸気発生器の動特性試験を行なっているため、蒸気発

生器は多少不安定な状態であった。

⑥ 第8期拡散水素量評価試験

表5-6に第8期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

第7期までの試験結果によれば、施設停止後の蒸気発生器再起動時に拡散水素量がナトリウム温度上昇と共に急激な上昇を示している。拡散水素量は、2.6項で述べているように、ナトリウム中の水素濃度上昇幅によって算出し評価していることからナトリウム等温運転時のナトリウム純化の良否が拡散水素量にかなり影響する。これまでの運転経験では、施設停止後の運転で系統のプラギング温度が非常に高くナトリウムが汚れている。従って、蒸気発生器を起動する前に十分ナトリウムを純化しないと系統内の機器・配管等に付着していた不純物（水素化合物）が蒸気発生器の起動後の温度上昇によってナトリウム中に溶け込みナトリウム中水素濃度を上げたため見掛け上拡散水素量が上昇したものと考えられる。上述の影響を極力少なくするためには可能な限りナトリウム温度を高くして純化することが望ましい。しかし、施設の運転上の制約（等温運転循環時）から、ナトリウム温度は350°Cが上限である。このため第8期試験以降は拡散水素量評価試験準備として蒸発器通水直前にナトリウム温度を350°Cまで上げコールドトラップ底部温度110°Cで可能な限り純化を行なっている。また、第7期までは、ナトリウム中水素濃度一定の確認を蒸発器通水前のナトリウム温度200°Cで行なっていたが、今期以降は、従来の方法に加えナトリウム温度350°Cでもナトリウム中水素濃度の変動の有無を確認している。

1979年5月15日2次系にナトリウムチャージを行ない運転を開始した。このときのプラギング温度は162.5°Cであった。第8期試験前のナトリウム等温循環運転時には、かなりのケースのナトリウム中注水およびカバーガス中への注水素試験を実施している。注水および注水素試験で系統内に注入された全水素量は、22.6gで検出された水素は12.4gであった。このため、蒸発器通水前に注水および注水素試験で検出されなかった水素と施設停止中に系統内に混入した不純物（水素化合物）の影響を少なくするためにナトリウム温度を350°Cまで上げコールドトラップ底部温度110°Cで約3日間純化を行なった後、同じナトリウム温度で水素濃度の上昇率を測定している。このときの水素濃度の上昇率は0.3ppb/hであった。

第8期の拡散水素量評価試験は3回実施している。第1回目は、蒸気発生器再起動時の拡散水素挙動が従来の結果とどの程度異なっているのか確認するため、6月8日の蒸発器通水から6月15日まで行なっている。また、第2回目は、蒸発器単体運転で6月28日から7月8日まで、第3回目は蒸発器+過熱器結合運転で7月14日から7月20日のトリップ試験までそれぞれ経年変化の追跡のため試験を行なっている。

⑦ 第9期拡散水素量評価試験

表5-7に第9期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

1979年10月23日に2次系へのナトリウムチャージを行ない施設の運転が開始された。

このときのプラギング温度は179°Cであった。第9期のナトリウム等温循環運転中は、第8期と同様にナトリウム中への注水およびカバーガス中への注水素試験を実施し、その後ナトリウム温度350°Cコールドトラップ底部温度110°Cで約4日間純化している。このときの水素の上昇率は0.27ppb/hであった。

第9期の拡散水素量評価試験は3回実施している。第1回目の試験は、蒸気発生器起動時の拡散水素挙動の把握のため11月14日の蒸発器通水から11月23日まで行なっている。しかし、この間、LPG圧力極低と全数バーナ消炎によりプラントトリップが2回発生しており運転は安定な状態ではなかった。第2回目は、経年変化追跡のため11月28日から12月7日まで行なっている。この間、ナトリウム-水反応時の蒸気発生器まわりの運転手法検討試験のため過熱器の通気・隔離を数回行なっている。第3回目の試験は、主に蒸発器+過熱器結合運転で12月9日から12月14日のトリップ試験まで行なっている。

⑧ 第10期拡散水素量評価試験

表5-8に第10期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

施設運転開始に先立ち、施設停止期間中に蒸気発生器メンテナンス実証試験のため蒸発器管束引き抜きおよび洗浄を行なっており2次系ナトリウムは非常に汚れていることが予想された。2次ナトリウム系へのチャージは1980年10月29日にナトリウム温度250°Cで実施しこのときのプラギング温度は242°Cであった。10月30日にナトリウムをドレンし再度チャージを実施している。プラギング温度が非常に高かったことからナトリウム等温循環運転でのナトリウム純化には14日間の日数を費やした。その後、蒸発器本体への注水素試験を4ケース実施したので、蒸発器通水前に再度ナトリウム純化をナトリウム温度350°C、コールドトラップ底部温度110°Cで約4日間行なった。なお、最終的なナトリウム純化状態を把握するため一時的にコールドトラップを停止し、水素の上昇率を測定した。水素上昇率はナトリウム温度が350°Cで0.9ppb/h、200°Cでは0.18ppb/hの割合で水素がナトリウム中へ溶解していることがわかった。

第10期の拡散水素量評価試験は、蒸発器伝熱管の2本をプラグしたため伝熱面積が237m²から227.6m²に減少したことおよび伝熱管の一部が新管になっているため、特に蒸気発生器起動時の拡散水素挙動に着目して11月29日の蒸発器通水から12月9日まで実施している。この間の運転状態は、12月5日に過熱器通気、12月8日に過熱器隔離を行なっている。

なお、経年変化の追跡を目的とする拡散水素評価試験については、蒸気発生器運転期間が短かったため省略した。

⑨ 第11期拡散水素量評価試験

表5-9に第11期の試験期間および詳細な運転・試験経過を示す。

1981年5月25日に2次系にナトリウムチャージを実施しこのときのプラギング温度は165°Cであった。その後ナトリウム等温循環運転中に蒸発器本体への注水素試験を行ったので蒸発器

通水前にナトリウムの純化をナトリウム温度 350 °C, コールドトラップ底部温度 110 °C で約 3 日間実施した。最終的なナトリウムの純化状態を把握するため一時的にコールドトラップを停止し水素の上昇率を測定した。水素の上昇率は、ナトリウム温度が 350 °C のとき 0.17 ppb/h, 300 °C では 0.1 ppb/h の割合で水素がナトリウム中に溶解していることがわかった。ナトリウム温度が 200 °C では、水素のナトリウム中への溶解はみられなかった。

第 1 1 期の拡散水素量評価試験は、3 回実施している。第 1 回目は、6 月 1 5 日の蒸発器通水から 6 月 1 9 日までの蒸発器単体運転、第 2 回目は、7 月 1 1 日から 7 月 1 2 日といずれも試験期間が短い。これは、蒸気ドラム水位高でプラントトリップしたためである。第 3 回目は、蒸気発生器停止直前の 7 月 1 8 日から 7 月 2 3 日の蒸発器隔離までとなっている。この間の試験は、いずれも拡散水素量の経年変化の追跡を目的としている。

⑩ 第 1 2 期拡散水素量評価試験

表 5-10 に第 1 2 期の試験期間および詳細な運転・試験経過は示す。第 1 2 期試験の主目的は、拡散水素量の経年変化追跡であった。

1983 年 3 月 2 1 日に 2 次系にナトリウムチャージを実施し、この時のプラギング温度は 185 °C であった。その後、4 月 1 1 日に 2 次系のナトリウムをドレンしている。これは、2 次系のナトリウム循環ポンプの軸封オイルのリーク量が増大したためである。シールカートリッジ交換後 4 月 1 3 日に再度 2 次系にナトリウムチャージした。

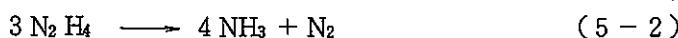
第 1 2 期では、蒸気発生器起動時の拡散水素量評価試験を実施しなかったため、蒸発器通水前のナトリウム純化運転は行なわなかった。4 月 1 8 日に蒸発器に通水し、負荷運転に移行したが、この間蒸発器本体内へのナトリウム中注水素試験を数ケース実施している。

第 1 回目の拡散水素量評価試験は、蒸気発生器が定常運転となった 5 月 2 日から 5 月 1 0 日のトリップ試験まで行なっている。この間、5 月 6 日に過熱器へ通気し結合運転を行なっている。第 2 回目は、第 1 回目と同じく蒸気発生器の定常運転時の 6 月 2 2 日から 6 月 2 5 日まで行なっている。この間は、すべて蒸発器単体運転である。第 1 回目と第 2 回目の試験間隔が長くなっているのは、この間に、1 次系のナトリウムドレンおよびチャージを行なっていることや、プラントトリップの発生など運転状態がめまぐるしく変化しており、また、蒸気発生器運転中に頻繁に蒸発器本体内へのナトリウム中注水素試験を行なったためである。

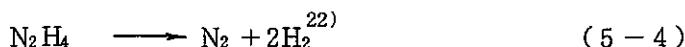
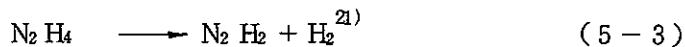
5.4 試験結果

5.4.1 拡散水素量とヒドラジン濃度

50MWSGT では、水側の脱酸素剤としてヒドラジン (N_2H_4) を使用している。給水中に残留しているヒドラジンは、給水の温度によって異なるが、主として (5-2) 式のように分解する。

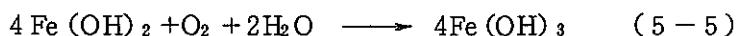


しかし、このほかにある条件によっては次のような反応も起こることが考えられる。

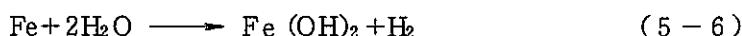


このようにして水側で生成した水素が蒸気発生器伝熱管を透過・拡散してナトリウム側に移行していくものと思われる。

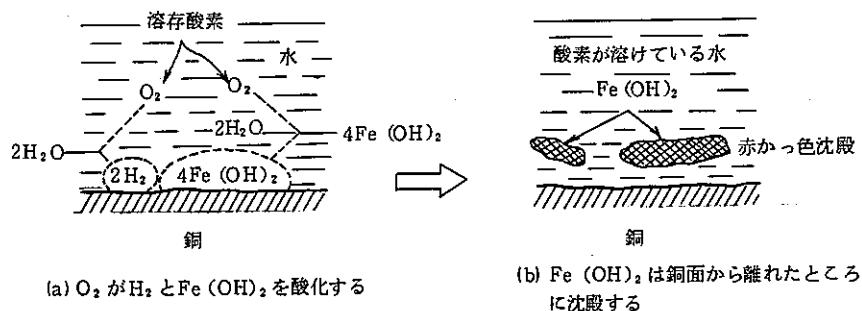
このため、第4期試験では蒸発器単体100%出力運転中に給水中のヒドラジン濃度を変化させ拡散水素量への影響を調査した。表5-11に給水水質の状態を図5-3に拡散水素量とヒドラジン濃度の関係を示す。本図より、ヒドラジン濃度が10~50PPbの範囲では拡散水素量に与える影響はほとんどなくむしろヒドラジン濃度が上昇すると拡散水素量がわずかに減少している。この原因として給水中に溶存酸素があると下図に示すように鋼面にしっかりと被覆していた Fe(OH)_2 が酸化され



となり鋼面から剥離し鋼面と給水が触れるようになり



の反応が起り腐食が進行する。



この腐食を促進する溶存酸素がヒドラジンによって化学的に除去されるため腐食作用が抑制され発生する水素が減少したことおよび試験が蒸気発生器運転後30日経過した時点で実施している（拡散水素量は、蒸気発生器運転初期では安定せず時間が経過するに従って徐々に低下する傾向を示す）ためと考えられる。しかし、前者の場合は試験期間を通じ溶存酸素が0であることから後者の影響が強いと思われる。いずれにしても蒸気発生器運転中に変化しうるヒドラジン濃度範囲内（50PPb以下）では、拡散水素量に直接影響を与えないことがいえる。

一方、EBR-IIにおいては、ヒドラジン濃度を13から150PPbに増加させたらナトリウム側への拡散水素量が0.34から0.97g/dayに増加したとの報告¹³⁾があり本試験の結果と大きく異なっている。

5.4.2 拡散水素量とナトリウム温度

拡散水素量のナトリウム温度の影響を正確に把握するには、拡散水素量が安定した時点（拡

散水素量が平衡する時点)で実施することが望ましい。しかし、実際には拡散水素量に経時変化がありどの程度蒸気発生器を運転すれば安定するか明確でなかったことおよび50MW SGTFの運転が2~3ヶ月運転しては停止するパターンで1サイクルの蒸気発生器運転期間が短かったことから、次の方法で拡散水素量のナトリウム温度の影響を調査した。すなわち、蒸気発生器起動時に蒸気発生器入口ナトリウム温度を200°C, 300°C, 400°Cと変化させそれぞれの拡散水素量を測定した。なお、他の不確定な要素を除くため第3期から第11期まで同一条件(蒸気発生器入口ナトリウム温度)で行ない評価した。

図5-4に拡散水素量とナトリウム温度の関係を示す。本図で、第8期以降のデータは、5.1項で述べているように試験手順(ナトリウム中の不純物の影響を極力少なくする方法に変更している)が若干異なっているため従来のデータと区別し黒く塗ってある。本図より第1期から第7期までのデータは、温度が上昇すると拡散水素量が増加する傾向を示しているが、第8期以降のデータはむしろ温度上昇に伴なって拡散水素量が減少している。いずれにしても試験期間ごとによって傾向が異なっておりまたデータのばらつきも大きく第1報で述べているようなArrheniusの式⁹⁾

$$D = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (5-7)$$

ここで D : 拡散係数

A : 定数

E : 活性化エネルギー

R : ガス定数

T : 温度

にはほぼ従っているとはいひ難い。図5-5は、第1期および第2期の拡散水素量と温度の関係であり試験の条件が若干異なっているが図5-4と同じようにデータのばらつきが大きくまた、低い温度でのデータが少ない。

5.4.3 過熱器伝熱管からの拡散水素量

図5-6~9に蒸発器単体運転から結合運転に移行した時の拡散水素挙動を示す。図5-6(1), (2)および図5-7は、第5期および第8期のデータでありいずれも蒸発器単体運転の拡散水素量に比べ結合運転での拡散水素量は若干上昇傾向を示している。図5-8および図5-9は、第9期および第11期のデータであるが過熱器運転による拡散水素量の増加は認められなかった。このように過熱器からの拡散水素は、試験ケースごとに若干異なった挙動を示しているが蒸発器の拡散水素に比べかなり少ないとと思われる。

5.4.4 蒸発器メンテナンス実証試験後の拡散水素挙動

蒸発器メンテナンス実証試験後の拡散水素量の測定は、第10期試験として実施している。蒸発器のメンテナンスでは、管束を引き抜き伝熱管2本をプラグしたほかヘリカルコイル部の第6層の伝熱管7本とダウンカマ管の28本（このほか3本は旧管のまま）、U字管部のすべて31本を新管にしている。このため、伝熱面積が 237 m^2 から 222.6 m^2 に減少しこのうち、29%が新管となった。

図5-10に第10期の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動を図5-11に第9期の蒸気発生起動時の拡散水素挙動を示す。第10期の拡散水素量は、第9期の結果に比べ若干だが全体的に高い値を示している。また蒸気発生器運転初期のナトリウム昇温時に拡散水素量が急激に増加しその後、時間と共に低下している。このような傾向が伝熱管の約30%が新管で伝熱管内面にマグネタイト層が生成されていないための影響とは一概にいいきれない。その理由として第9期のナトリウム 350°C 等温循環運転での水素上昇率が 0.27 PPb/h に対し第10期では 0.9 PPb/h と3倍以上高い。また、ナトリウム温度昇温時には、さらに高い水素上昇率であると考えられる。このことは、系統内から水素がナトリウム中へ溶解している割合が大きいことを意味し拡散水素量が多めに見積られてしまう。（詳細は、5.5.1項の温度依存性の検討を参照のこと）以上のこと踏まえると伝熱管の約30%を新管に取り替えても拡散水素量はそれほど変化していないと考えられる。

5.4.5 拡散水素量の経年変化

図5-12(1), (2)は、蒸気発生器の正味運転日数と拡散水素量の関係である。本図において第3期以降の蒸気発生器再起動時のデータは、プロットしていない。この理由は、5.5.1項で述べているようにナトリウム中の不純物の影響が大きく真の拡散水素量でない可能性が強いためである。

拡散水素量は、蒸気発生器運転初期には $1 \times 10^{-10}\text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ と高くその後、130日頃までは、 $1 \sim 2 \times 10^{-11}\text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ まで低下し、それ以後から現在までは $1 \times 10^{-11}\text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ 以下となっている。全体的にデータのばらつきが大きいが、この原因の1つとして50MWSGTFの1サイクルの蒸気発生器の連続運転が短く起動・停止が多いことおよび種々の試験を実施しているため過渡的な運転が多いことが考えられる。

蒸気発生器運転初期の拡散水素量が、通常運転時のそれに比べ1桁程度大きい結果が得られているがこれは、蒸気発生器の伝熱管が新しいため腐食反応が激しいことからある程度予想される現象である。しかし、図5-17のように第1期での蒸気発生器運転前のナトリウム純化が十分でない（5.5.1項参照）ことから真の拡散水素量は、試験で得られた値よりかなり小さいと思われる。

5.5 評価・検討

5.5.1 拡散水素量の温度依存性の検討

9)

第1報では拡散水素量に温度依存性があることを述べている。しかし、図5-4および図5-13(1), (2)をみてわかるように拡散水素量に温度依存性があるのは施設の長期停止後の蒸気発生器起動時に限っている。これらの原因を以下の2項目に絞り、検討・評価した。

① 蒸気発生器の通常起動・停止およびプラントトリップの温度変化によるマグネタイト層の剥離

② ナトリウム系統内の不純物（水素化合物）による影響

① マグネタイト層の剥離について

蒸気発生器の伝熱管内面は、水・蒸気との腐食作用によってスケールが生成し伝熱管内面に付着する。スケールの生成は、一般に高温蒸気中では放物線則に従うことが知られている。¹⁴⁾

$$y = k \cdot \sqrt{t} \quad (5-8)$$

ここで y : スケール厚さ (μ)

k : 定数

t : 時間 (h)

スケールの剥離は、スケールの厚さが 100μ 以上になると起こるとの報告¹⁴⁾がある。蒸発器メンテナンス実証試験での材料試験結果を図5-14に示す。このときの蒸発器の運転時間は、約9500時間であるがスケールの厚さは、試料採取位置によって異なり最大でも 32μ 程度で 100μ に比べるとかなり小さな値である。また、蒸気発生器1号機の材料試験結果¹⁵⁾からスケールの成分は、ほとんどがち密で硬いマグネタイト (Fe_3O_4) である。

このほか、これまでの試験結果から拡散水素量の温度依存性が顕著でしかも拡散水素量が多くなっているのは、施設停止後の蒸気発生器起動時に限られておりプラントトリップによる急激な温度変化後（通常起動・停止時の温度変化より激しい）の蒸気発生器再起動時に拡散水素量の温度依存性および拡散水素量の増加がみられない（図5-15参照）。以上のことから、現段階では施設停止後の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動がスケールの剥離によるものではないと考える。

② ナトリウム系統内の不純物による影響について

図5-16にナトリウム中水素濃度とナトリウム温度の関係を示す。これは、コールドトラップで2次系統内の水素濃度を一定にし、その後コールドトラップを停止しナトリウム温度を段階的に昇温させて系統内の水素濃度変化を調べたものである。この間は、ナトリウム等温循環運転である。本図からわかるようにナトリウム温度上昇に伴なって明らかに水素濃度が上昇している。これは、ナトリウム配管および機器内表面に付着していた不純物がナトリウム中に溶解したためと考える。

図5-17に不純物の溶解率^{*}とナトリウム温度の関係を示す。これは、蒸気発生器起動時の拡散水素量評価試験前のナトリウム等温循環運転のナトリウム純化時に、ナトリウム温度を一定にしてコールドトラップを数時間停止しその時の水素上昇率から不純物の溶解率を測定したものである。本図よりナトリウム温度が高いほど不純物のナトリウム中への溶解率が高くなっている。不純物の溶解率は、いいかえるならばナトリウム等温循環運転時の系内の純化の程度を表わしていることになる。つまり、溶解率が高ければ系内の純化が不十分であることを示している。第1期から第7期までは、試験前の水素濃度一定の確認をナトリウム温度200°Cで行なっており確認方法としては好ましくなくまた、拡散水素量としても多めに見積っていた可能性が強い。今、この溶解率を1.0 PPb/hとしてこの全量が蒸気発生器伝熱器からの拡散水素によると仮定すると次の通りとなる。

	溶解率 (PPb/h)	拡散水素換算 (g/cm ² ·sec)
第1期～第9期	1.0	** 5.86×10^{-12}
第10期～第12期	1.0	** 6.24×10^{-12}

**換算値が異なる理由は、伝熱管プラグによる伝熱面積の減少による。

第10期のナトリウム温度350°Cにおける溶解率は0.9PPb/hであり拡散水素量に換算すると 5.62×10^{-12} g/cm²·secとなり通常の拡散水素量と比較するとかなり影響することがわかる。

これらのことから不純物の挙動が、これまでの施設停止後の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動（温度依存性が顕著、拡散水素量が高い）とよく似ている。また、スケールの剥離で述べているようにプラントトリップ後の蒸気発生器再起動では上記の現象が表われていないことから施設停止後の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動原因是、ナトリウムの純化不足による配管・機器等に付着している不純物が影響していたものと思われる。

以上の検討結果をふまえて拡散水素量の温度依存性について再評価した。まず、試験前のナトリウム純化が不十分で系内に付着している不純物量が多い状態であると拡散水素量の温度依存性がみられしかも拡散水素量が高い値を示す。これは、図5-4の拡散水素量とナトリウム温度の関係からみてもわかるように第1期から第7期まではナトリウム温度の上昇と共に拡散水素量が増加する傾向でかつ拡散水素量が高くなっていることからいえる。図5-18は、ナトリウムの純化が不十分な場合の蒸気発生器再起動時の代表的な拡散水素挙動である。つまり、拡散水素量を拡散水素と不純物として捕らえている。第8期以降は、ナトリウム純化を十分行

*ナトリウム等温運転で水素濃度が上昇してゆくことから系内に付着していた水素がナトリウム中に溶出する割合を溶解率と呼ぶこととする。

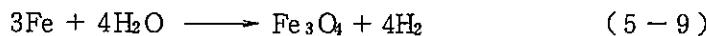
ない系内に付着している不純物の量を低減した後のデータで第1期から第7期までの結果と異なっており拡散水素量の温度依存性もみられず拡散水素量も少ない。図5-11は、ナトリウムの純化が十分な場合の代表的な拡散水素挙動がある。つまり、ナトリウム純化によって不純物の影響が少なくなり真の拡散水素量に近くなっている。

なお、第1報では拡散水素量に温度依存性があると述べているが第1報での試験は、蒸気発生器設置後の運転初期のものであり経時的な変化が大きい時期である。また、当初は系内の純化にそれほど気を配っていないことおよびナトリウム温度が低いデータが少ないと問題点として上げられる。

これらを総合すると、拡散水素量の温度依存性についてほとんど認められない。また、温度依存性があるとしても（水素の鋼中への拡散は（5-7）式で示されるように温度依存性があることが知られている¹⁶⁾）データのはらつきの範囲内であり実際上は無視してよいと考える。

5.5.2 水側からの拡散水素量の推定

拡散水素量の測定方法は、2.6項で述べているほか、水側伝熱管のスケール量から求めることも可能である。高温水・水蒸気中での鋼の腐食反応は、一般的に以下の通りと考えられている。



腐食によって生成するスケールは、これまでの蒸気発生器伝熱管の材料試験結果からほとんどがち密な Fe_3O_4 ^{15),17)}と報告されている。腐食反応によって発生する水素がすべてナトリウム中に拡散すると仮定し蒸気発生器メンテナンス実証試験での約9500時間運転後の伝熱管平均スケール重量 8.5 mg/cm^2 から拡散水素量を求める $8.61 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となりナトリウム側から求めた拡散水素量と良く一致している。

5.5.3 他国の発表例

表5-12は、各国における蒸気発生器から拡散水素量を整理したものである。この表から、EBR-II, KNK-IIを除き拡散水素量は $2 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ 程度のデータが多い。このうち、EBR-IIの拡散水素量が極端に小さくなっているが、これは蒸気発生器の伝熱管が2重管であるためと思われる。50MW SGTFのデータと他国のデータを比較することは、蒸気発生器の運転時間や拡散水素量の評価方法が不明確であり無理があるかもしれないが、50MW SGTFでの蒸気発生器3120時間(130日)運転までの拡散水素量は、前述の値とよく一致していた。しかし、その後蒸気発生器の運転時間が経過すると共に拡散水素量が低下しており現在では、 $1 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ を越えることがなくむしろKNK-IIの値に近くなっている。

5.5.4 まとめ

これまでの拡散水素量評価試験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 通常運転時の拡散水素量は、蒸気発生器の運転が経過すると共に徐々に低下し約3000時間運転後は、 $1 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ を越えることはない。
- 2) 拡散水素量の温度依存性は、ほとんど認められない。
- 3) 過熱器伝熱管からの拡散水素量は、無視できるほど小さい。
- 4) ヒドラジンは、通常運転での濃度範囲 ($\sim 50 \text{ PPb}$) 内では拡散水素量に影響しない。
- 5) 長期停止後の蒸気発生器再起動時（蒸気発生器の初めての起動も含む）の拡散水素量を正確に求めるためにはナトリウムを高温（350°C以上）にし純化を十分行なうことが重要である。
- 6) 水側から求まる拡散水素量は、本試験結果と良く一致する。
- 7) 蒸発器の伝熱管全体の約30%を新管に交換したが、拡散水素量に変化はみられなかった。

6. 総合評価

(1) コールドトラップの性能評価

コールドトラップの水素除去効率は、70~80 %で第1報とほぼ同じ結果が得られた。しかし、主系統のナトリウム中水素濃度とコールドトラップ底部温度から求まる飽和水素濃度との差が小さい場合は、水素除去効率が小さくなっている。この結果の裏付けとして図4-7のナトリウム中水素濃度変化の試験データと拡散水素量を $6.3 \times 10^{-12} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ として計算した結果から水素濃度が平衡に達するまでの時間が試験データのほうが長くなっている。つまり、時間が変化する要素は、(2-4)式からコールドトラップの流量、系統内のナトリウム容量、コールドトラップの水素除去効率がありこのうちコールドトラップ流量と系統内のナトリウム容量は一定である。従って、コールドトラップの水素除去効率が計算に使用した値(70%)に対して約1%となっていることがわかる。また、コールドトラップの水素除去効率は、約25000時間運転後もほとんど一定で(同一のコールドトラップ運転状態において)経年変化はみられなかった。このほか、コールドトラップの水素捕獲容量は、50 MWSGTFの運転経験から「もんじゅ」での設計値(メッシュ部容量×10%)より若干低いと予想できる。

(2) 蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量評価

蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量は、通常運転時の拡散水素量においてデータのばらつきが大きいものの第1報で得られた値より低くなってしまっており $3 \sim 10 \times 10^{-12} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ 程度であった。この値は、水側の腐食反応から求めた結果およびナトリウム中のバックグラウンド水素濃度結果からほぼ妥当といえる。また、第1報では、初期の拡散水素量を $1 \times 10^{-10} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ と報告しているがその後の検討によりナトリウム中に存在している不純物の影響が大きく実際にはかなり低い値であると考えられる。拡散水素量の温度依存性についても第1報では、温度の上昇と共に拡散水素量が増加するとしている。これは、蒸気の腐食速度および蒸気発生器伝熱管材料の拡散係数¹⁶⁾に温度依存性があるため定性的には当然予想できる。しかし、今回の試験結果からは、温度依存性が認められなかった。第1報での評価データは、初期の拡散水素量を使っており前述と同様にナトリウム中の不純物の影響を強く受けているため正確な評価を行なっているとはいひ難い。このほか、拡散水素量に影響を与える因子として給水流量、蒸気圧力、ヒドラジン濃度について評価したが依存性は認められなかった。また、過熱器伝熱管からの拡散水素量は、ほとんどなく実用上0と考えてよい。

(3) 「もんじゅ」2次系のナトリウム中バックグラウンド水素濃度の推定

図6-1は、コールドトラップ効率および蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量試験結果とともに「もんじゅ」のナトリウム中バックグラウンド水素濃度を求めたものである。本図は、拡散

水素量を $2 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ （「もんじゅ」の設計値）， $1 \times 10^{-11} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ （第5章で得られた拡散水素量の上限値）， $6.3 \times 10^{-12} \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^2$ （ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度を（2-8）式に代入し求めた値）としてナトリウム中水素濃度を求めた。従来、「もんじゅ」の水リーク検出システムを設計する場合、ナトリウム中水素濃度は、169PPbとして考えていた。しかし、拡散水素量が当初より低くなってしまいナトリウム中水素濃度は90～110 PPb程度で落ち着くことが予想できる。

一方、コールドトラップの水素除去効率は、2次系統内のナトリウム中水素濃度とコールドトラップ底部温度から求まる飽和水素濃度との差が少ない場合、水素除去効率が悪くなる傾向である。「もんじゅ」ではコールドトラップの運転温度は120°C（54.8PPb）で水素濃度差として35～55PPbあり70%程度の水素除去効率は期待できると考える。また、ナトリウム中水素濃度が落ち着くまでの時間は、500時間程度と推定できる。しかし、初めての蒸気発生器運転の場合は、初期のナトリウム中水素濃度が600PPb程度まで上昇する（ナトリウム中の不純物の影響が支配的）ことが考えられ落ち着くまでに長時間必要と思われる。ただし、これは、初期ナトリウム純化の程度によって大きく異なる。すなわち、初期ナトリウム純化を50 MWSGTFのようにナトリウム温度を上げ（350°C）て行なえるようであれば初期のナトリウム中水素濃度もかなり低くなり落ち着くまでの時間も短縮でき水リーク検出の観点からは有効である。

7. あとがき

50MWSGTFにおける水リーク検出システム評価試験の一環として通常運転時の水素挙動を解明するために長期に渡って試験を実施し数多くの有益なデータを得ることができた。本書では、これらのデータを基にコールドトラップの性能、蒸気発生器伝熱管からの拡散水素量を経年的に評価するとともに第1報で述べている結果を再検討し通常運転時の水素挙動を明らかにした。また、運転中にコールドトラップの性能が低下する現象を経験しコールドトラップの寿命評価を一部行なった。

このほか、現在注水素試験(Ⅲ)、水リーク警報システムの実証について報告書を作成中でありこれらの成果は、実機プラントでの水リーク検出システム設計に十分反映できるものと考える。

8. 謝 辞

本試験は、長期に渡っておりこの間試験を実施しデータを採取していただいたシステム設計開発室試験グループの各位には多大の協力をいただいた。また、報告書をまとめるにあたりデータ整理を常陽産業の鈴木重哲氏に、コールドトラップ水素除去効率の計算プログラムを仲井悟研究員を作成・協力していただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

9. 参考文献

- 1) 鐘ヶ江, 他「ニッケル膜イオンポンプ型ナトリウム中水素計におけるニッケル膜および真空部最適設計法」(小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第10報) PNC SN 941 76-30 (1976)
- 2) 鐘ヶ江, 他「PNC型ナトリウム中水素検出計1号機」(小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第14報) PNC SN 941 78-85 (1978)
- 3) 鐘ヶ江, 他「PNC型ナトリウム中水素検出計2号機-動的室・静的室分解型」(小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第15報) PNC SN 941 78-91 (1978)
- 4) 黒羽, 他「オリフィス付ナトリウム中水素計の性能特性試験および最適設計の検討」(リーク検出計開発試験第1報) PNC SN 941 79-188 (1979)
- 5) 黒羽, 他「PNC型ナトリウム中水素検出計の長期性能試験」(リーク検出計開発試験第2報) PNC SN 941 81-49 (1981)
- 6) 法月, 他「50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験-第5報-」注水素試験 PNC SN 941 78-50 (1978)
- 7) 小杉, 他「50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験-第7報-」注水試験 PNC SN 941 81-23 (1981)
- 8) 錦見, 他「50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験-第8報-」注水素試験(II) PNC SN 941 81-259 (1981)
- 9) 法月, 他「50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験-第1報-」PNC SN 941 77-45 (1977)
- 10) 白土, 他「50 MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験-第11報」水素計の使用経験 PNC SN 941 83-136 (1984)
- 11) 「コールドトラップ設計指針」コールドトラップ委員会答申 PNC SN 241 79-21 (1979)
- 12) 根井, 他「コールドトラップによるナトリウム中水素の除去に関する基礎研究(II)」SJ 201 77-15 (1977)
- 13) P. Roy, et al., "Hydrogen Burden from the Steam Side Corrosion in Sodium-Heated Steam Generators", Nuclear Technology, Vol.39, p.213 (1978)
- 14) 鈴木, 他「ボイラ過熱器管内面スケールの生成および剥離」火力原子力発電Vol.27 No.1 (1976)

- 15) 「50MW蒸気発生器・蒸発器材料試験成果報告書」
SJ 213 76-03 (1976)
- 16) 藤井, 他「金属防蝕技術便覧 -新版-」 日刊工業新聞社発行 (1972)
- 17) 作本, 他「SG×ンテナンス技術の実証試験(3)50Mw SG 2号機蒸発器伝熱管板管材の材料試
験成果報告書」 SJ 222 80-18(3) (1980)
- 18) J. M. McKee, et al., "Hydrogen Flow Through LMFBR Steam Generator
Systems", First Joint U.S./Japan LMFBR Steam Generator Seminar,
CONF-780203, Vol.1, p.16-12 (1978)
- 19) 黒羽, 他「IAEA-IWGFR蒸気発生器の安全性に関する専門家会議出張報告書」 PNC
SN 960 84-03 (1984)
- 20) 「ステンレス鋼便覧」 日刊工業新聞社発行 (1973)
- 21) J. Chem. Phys., Vol.64, No.12, 15 June (1976)
- 22) 「ボイラ水管理の実際」 日本ボイラ協会

表 2-1 ナトリウム中水素計主仕様
Table 2-1 Specification of In-Sodium Hydrogen Meters

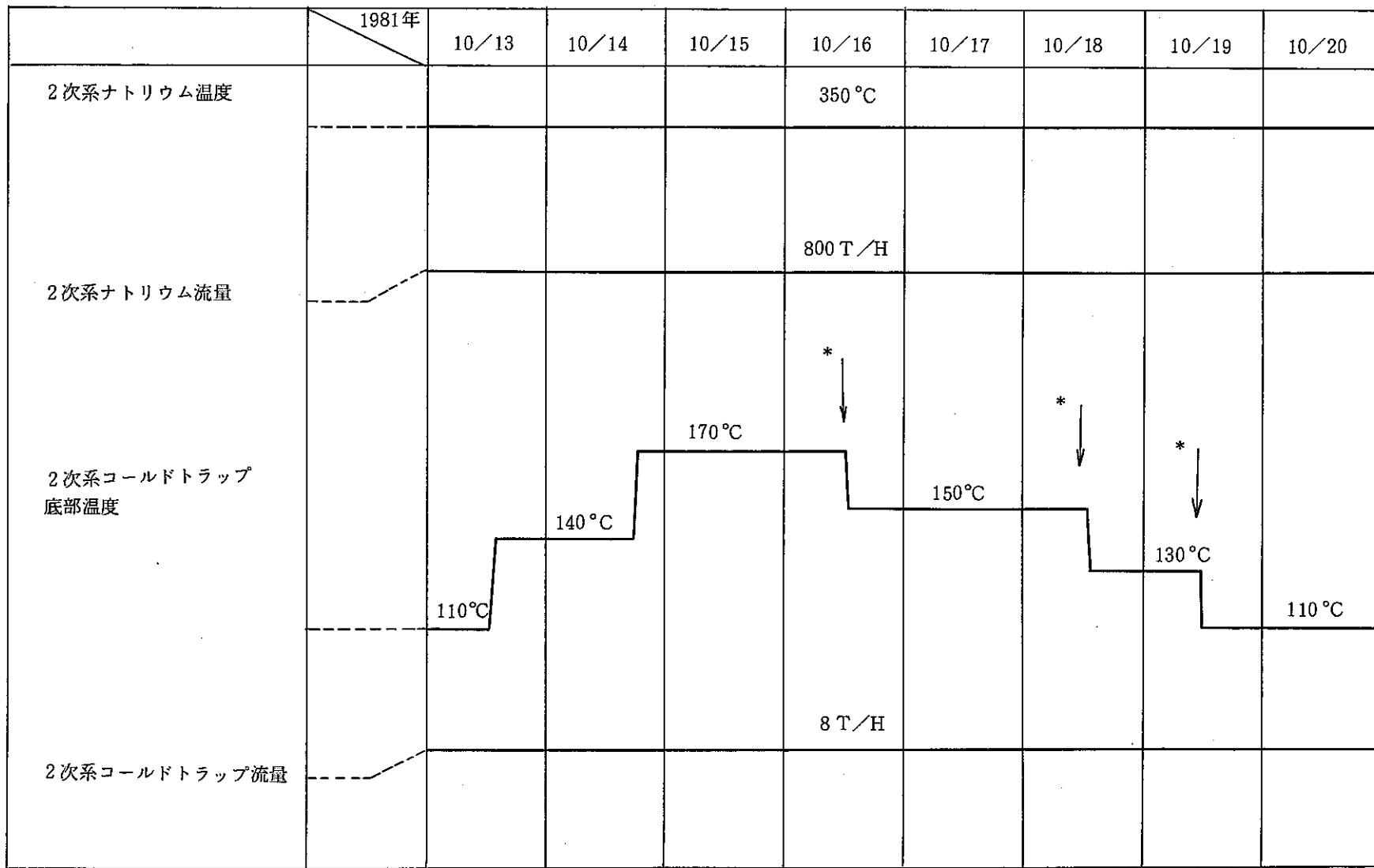
項 目	EV-HNa	SH-HNa	NaP-HNa, (CT-HNa)
設 計 温 度 (Na系)	520°C	同 左	550°C
設 計 壓 力 (Naおよび真空系)	-1~10kg/cm ² G(真空構造部を除く)	同 左	-1~10kg/cm ² g
Ni膜			
1) 厚 さ	0.50mm	同 左	同 左
2) 外 径	25.0 mm	19.0 mm	25.0 mm
3) 面 積	37.3cm ² (動的室), 148.0cm ² (静的室)	19.4cm ²	208cm ²
イオンポンプ排気速度 (水素)	33ℓ/sec (動的室), 2.8ℓ/sec (静的室)	10 ℓ/sec	33 ℓ/sec
超高電離真空計測定範囲	5×10 ⁻³ ~ 1×10 ⁻¹⁰ Torr	同 左	同 左
シュルッゲージ測定範囲	1 ~ 1×10 ⁻⁵ Torr	—	1 ~ 1×10 ⁻⁵ Torr
真空系内容積	動的室 静的室		
1) 全 体	472cm ³	352 cm ³	864cm ³
2) 静的平衡圧測定部	346cm ³	180 cm ³	766cm ³
真空系内表面積	動的室 静的室		
1) 全 体	606 cm ²	527 cm ²	1482 cm ²
2) 静的平衡圧測定部	518 cm ²	297 cm ²	1302 cm ²
真空系コンダクタンス	—	5.5ℓ/sec (Ni膜~オリフィス前まで)	32.8 ℓ/sec
オリフィスコンダクタンス	2.49 ℓ/sec	1.0 ℓ/sec	—
測 定 範 囲	45ppb ~ 10ppm	同 左	50 ppb ~ 10 ppm
検 出 感 度	± 10 %濃度変化の検出	同 左	同 左
応 答 速 度	検出系入口から水素濃度まで 30 秒以内	同 左	検出系入口から水素濃度表示まで 40 秒以内

表2-2 カバーガス中水素計主仕様
Table 2-2 Specification of In-Cover Gas Hydrogen Meters

項目	EV-HAr	SH-HAr
設計温度(Na系)	600°C	550°C
設計圧力(Na系)	-1~10kg/cm ² g	同 左
Ni膜寸法	Φ10×68.0mm	Φ25×265mm
Ni膜厚さ	0.25mm	0.50mm
有効Ni膜面積	20.0 cm ²	208 cm ²
イオンポンプ排気速度(水素)	10 ℥/sec	33 ℥/sec
イオンポンプ使用圧力範囲	5×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻⁸ Torr	3×10 ⁻⁵ ~5×10 ⁻⁸ Torr
真空系コンダクタンス	5 ℥/sec	32.8 ℥/sec
真空系内表面積		
1) 全体 (イオンポンプは除く)	516 cm ²	1482 cm ²
2) 平衡圧測定部	254.5 cm ²	1302 cm ²
真空系内容積		
1) 全体	—	864 cm ³
2) 平衡圧測定部	168 cm ³	766 cm ³
オリフィスコンダクタンス	0.188 ℥/sec	—
測定範囲	1~10 ⁴ VPPM	1~1000 VPPM
検出感度	±10%濃度変化の検出 検出計入口から水素濃度表示まで 約40秒	同 左
応答速度		同 左

表 3-1 コールドトラップ水素除去効率測定試験工程

Table 3-1 Test Process of Measurement of Removal Efficiency by the
Secondary Cold Trap



* コールドトラップ水素除去効率測定

表 3-2 2次系コールドトラップ推定水素捕獲量

Table 3-2 Assumed Quantity of Captured Hydrogen by the Secondary Cold Trap

	水素捕獲量 (g)	備考
ナトリウム受入	60	
調整試運転	119	
施設起動・停止	911.4	定検・改造工事等による不純物の混入
注水・注水素試験	1239.5	
運転中の拡散水素量	2600.5	
合計	4930.4	

表 3-3 「もんじゅ」2次系のコールドトラップ仕様

Table 3-3 Specification of the Secondary Cold Trap for Monjū

形 式	外側強制空冷アニュラス形立置式
滞留時間(分)	約 25 (充填部)
ナトリウム流量(T/H)	通常 10, 初期純化 15
ナトリウム最低温度(°C)	120
メッシュ材質	SUSワイヤメッシュ
メッシュ粗さ	5~10 メッシュ
捕獲部容量(m³)	約 5.1
不純物捕獲量(kg)	H ₂ 換算 / 1基 → 18, O ₂ 換算 / 1基 → 280
効率	0.7 (H ₂) 0.5 (O ₂)
寸法(mm)	胴外形 → 1.840, 全高さ → 4.860
設計温度(°C)	400 (内圧作用時), 230 (外圧作用時)
設計圧力(kg/cm²g)	6.0 (内圧), 1.0 (外圧)
員 数	2基 / 1 ループ 計 6 基
温度調整方式	プロワの駆動モータ回転数による風量制御

表4-1 50MWSGと「もんじゅ」とのプラント比較

Table 4-1 Comparison of 50MWSGT with Monju Plant

	50MW SG	もんじゅ
E V 伝熱管面積	222.6 (m ²)	1113.0 (m ²)
* ² 2次系Naインベントリー	50 (ton)	224.6 (ton)
2次 C T 流量	10 (ton/h)	10 (ton/h)

* 2 Na 流動部

ただし「もんじゅ」はA ループで計算した。

表 4-2(1) ナトリウム中水素濃度データ整理表

Table 4-2(1) Arrangement Table of Hydrogen Concentration in Sodium

年月日時	運転状態	SG入口 Na温度	SG入口 Na流量	2次系コール ドトラップ 温 度	2次系コール ドトラップ 流 量	NaP-HNa イオンポン プ電流	校正式 からの 水素濃度	2次系コール ドトラップ 底部温度より 補正した 水素濃度
54.2.10 9	等温	270°C	770 t/H	110°C	10 t/H	1.4 μA	35.2PPb	←
54.2.15 8	"	200	780	"	"	"	"	←
54.3.14 16	EV+SH	500	550	109	8.1	1.55	37.5	39.3
54.5.18 13	等温	353	750	110	10	1.55	37.9	←
54.5.27 8	"	355	"	"	"	1.05	28.7	←
54.5.29 5	"	300	"	"	"	"	"	←
54.6.7 6	"	350	760	"	"	1.45	36.1	←
54.6.8 3	"	195	670	"	"	1.1	29.7	←
54.6.18 10	"	200	280	"	5.8	"	"	←
54.6.28 6	EV 単体	450	200	"	7.7	1.55	37.9	←
54.7.12 14	"	475	630	115	10	1.8	42.2	33.2
54.11.3 13	等温	345	750	110	10	1.2	31.6	←
54.11.5 12	"	300	"	"	"	1.05	28.7	←
54.11.9 10	"	200	760	"	"	1.0	27.7	←
54.11.13 7	"	358	220	109	"	1.15	30.6	32.4
54.11.19 10	EV 単体	405	260	112	7.5	1.4	35.2	31.6
54.11.30 14	"	440	590	111	10	1.6	38.8	37.0
55.11.20 12	等温	355	390	110	10	1.2	31.6	←
55.11.28 12	"	"	440	"	9.8	1.3	33.4	←
56.2.22 7	等温	355	740	110	8.9	1.2	32.4	←
56.3.9 9	"	215	400	"	6.1	1.05	29.3	←
56.3.14 9	"	355	820	112	9.5	1.4	36.3	32.7
56.3.16 16	"	270	420	"	8.0	1.2	32.4	28.8

表4-2(2) ナトリウム中水素濃度データ整理表
Table 4-2(2) Arrangement Table of Hydrogen Concentration in Sodium

年月日時	運転状態	SG入口 Na 温度	SG入口 Na 流量	2次系コール ドトラップ 温 度	2次系コール ドトラップ 流 量	NaP-HNa イオンポンプ電流	校正式 からの 水素濃度	2次系コール ドトラップ 底部温度 より補正 した水素 濃度
56.6.8 10	等温	360	800	110	6.8	1.3	33.3	←
56.6.14 9	"	350	400	"	7.8	1.25	32.4	←
56.6.23 10	EV 単体	450	"	"	6.2	1.65	39.7	←
56.6.29 17	"	468	380	111	5.8	1.5	37.0	35.2
56.7.1 6	等温	200	360	110	"	1.0	27.5	←
56.7.4 11	EV 単体	450	400	"	"	1.6	38.8	←
56.7.10 6	"	470	280	"	5.9	"	"	←
56.7.11 4	"	478	320	"	"	1.65	39.7	←
56.7.16 7	EV+SH	503	280	111	4.9	1.6	38.8	37.0
56.7.18 4	"	510	225	110	3.9	1.9	44.0	←
56.7.28 11	等温	273	410	111	6.5	1.6	38.8	37.0
56.10.20 12	等温	350	800	112	7.8	1.82	37.2	33.6
56.10.22 8	"	200	"	111	"	1.22	27.8	26.0
56.11.23 10	EV 単体	450	"	110	"	1.75	36.2	←
56.11.28 6	"	463	350	"	6.1	1.85	37.7	←
56.12.3 6	"	482	740	"	6.0	1.85	37.7	←
56.12.9 6	EV+SH	500	250	110	4.9	2.05	40.6	38.8
57.6.18 2	等温	345	840	110	8.0	2.0	36.9	←

表 4-3 蒸発器カバーガス中水素濃度整理表

Table 4-3 Arrangement Table of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator

	1980年 10月～12月	1981年 5月～7月	1982年 6月～7月
運転初期 (200°C)	* ¹ 197.1 PPm	64.4 PPm	196.7 PPm
350°C 等温運転平衡値	42 PPm	* ³ _____	20 PPm
350°C 等温運転平衡に達するまでの日数	8 日	* ³ _____	6 日
EV 通水前	28 PPm	10.4 PPm	5.8 PPm
SG負荷上昇運転最大値	100 PPm	4.5 PPm	18 PPm
最大値になるまでの日数	1 日	5 日	2 日
SG定常運転平衡値	* ² 20 PPm	* ² 20 PPm	5 PPm
SG定常運転平衡値に達するまでの日数	* ³ _____	* ³ _____	8 日
校正式	$0.0272 I_p^{1.51} \cdot 1.7$	$0.1048 I_p^{1.41} \cdot 1.7$	$0.3938 I_p^{1.37} \cdot 1.7$

* 1 : Na 温度 320°C

* 2 : 徐々に低下中

* 3 : データ採取不可

表 5-1 第3期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-1 The Third Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

		1976年						1977年						
		10月			11月			12月			1月			
運転	試験	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	▲
		△ 2次系ナトリウムチャージ	▲ プラントトリップ	▲ EVSH通気	▲ EVSH通気	▲ SH隔離	▲ EVSH通気	▲ SH隔離	▲ EVSH通気	▲ SH隔離	▲ EV通水	△ 2次系ナトリウムチャージ	▲ EV通水	▲ EV隔離
		ムチヤージ	トトリ	ラントリッジ	ラントリッジ	隔離	ラントリッジ	ラントリッジ	ラントリッジ	ドレン	ムチヤージ	EV通水	ムチヤージ	EV隔離
		△△△△ ナトリウム純化	△△△△ 水素計校正試験	△△△△ ナトリウム中注水素試験	△△△△ 拡散水素試験	△△△△ ナトリウム純化	△△△△ 拡散水素試験	△△△△ ナトリウム中注水素試験	△△△△ 拡散水素試験	△△△△ ナトリウム中注水素試験	△△△△ 拡散水素試験	△△△△ ナトリウム中注水素試験	△△△△ 拡散水素試験	△△△△ ナトリウム中注水素試験
備考		• case 101~106 110~111 113~116 121~134	• $T_{Na} = 350^{\circ}\text{C}$ • $T_{CT} = 120^{\circ}\text{C}$		• case 201~203					• case 301 302				
		2次系プラグ温度 187°C												

表 5-2 第4期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-2 The Fourth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

1977年											
運転	4月			5月			6月				
	施設停止中	△ 2次系ナトリウム チャージ	20	30	10 △EV通水	△SH通気	20 △EV通水 ナラントリップ	△SH通気	30 △ 2次系ナトリウム チャージ ナラントリップ	△ 2次系ナトリウム チャージ ナラントリップ	△EV通水 ナラントリップ
試験		△	△△	△△	△△	△△	△△	△△	△△△△	△△△△	△△△△
		ナトリウム純化	ナトリウム中注水素試験	ナトリウム中注水素試験	拡散水素試験	ナトリウム純化	ナトリウム中注水素試験	ナトリウム中注水素試験	ナトリウム純化	ナトリウム中注水素試験	拡散水素試験
備考	• 2次系プラグ温度 151.5°C	• $T_{Na} = 350^{\circ}\text{C}$ • $T_{OT} = 110^{\circ}\text{C}$ 130°C 150°C 170°C 185°C	case 401 405	case 503 508	• ハードトラップ温度 110°C	case 501 502	ヒドラジン濃度	6/15 19.2 ppb 6/16 21.5 ppb 6/17 28 ppb 6/18 33 ppb 6/19 37.9 ppb 6/20 43.7 ppb 6/21 50.4 ppb			

第5-3 第5期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-3 The Fifth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes and Detail of Operation

		1977年						1978年							
		10月			11月			12月			1月				
運転		△ 2次系ナトリウム チャリウム EV通水	30 △ EV通水	△ EV通水	10 △ EV通水	△ SHSH 通気隔離	20 △ EV通水	△△ EV通気	30 △ SH隔離	10 △ SH隔離	20 △ SHSH 通気隔離	△ ナトリウムチ ヤジ	30 △ EV通水	10 △ EV通水	△ SHSG 通気隔離
試験		△ ナトリウム中水素計校正試験	△ ナトリウム純化	△ 拡散水素試験	△ 拡散水素試験	△ ナトリウム中注水素試験	△ ナトリウム中注水素試験	△ ナトリウム中水素計校正試験	△ ナトリウム中水素計校正試験	△ ナトリウム中水素計校正試験	△ 拡散水素試験	△ 拡散水素試験	△ EV通水前 T _{CT} =110°C	△ EV通水前 T _{CT} =110°C	
備考		• 2次系ナトリウム チャリウム EV通水前 T _{CT} =110°C で純化	case 601 604	• 2次系ナトリウム チャリウム EV通水前 T _{CT} =110°C で純化											

表 5-4 第6期拡散水素評価試験および運転経過

Table 5-4 The Sixth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

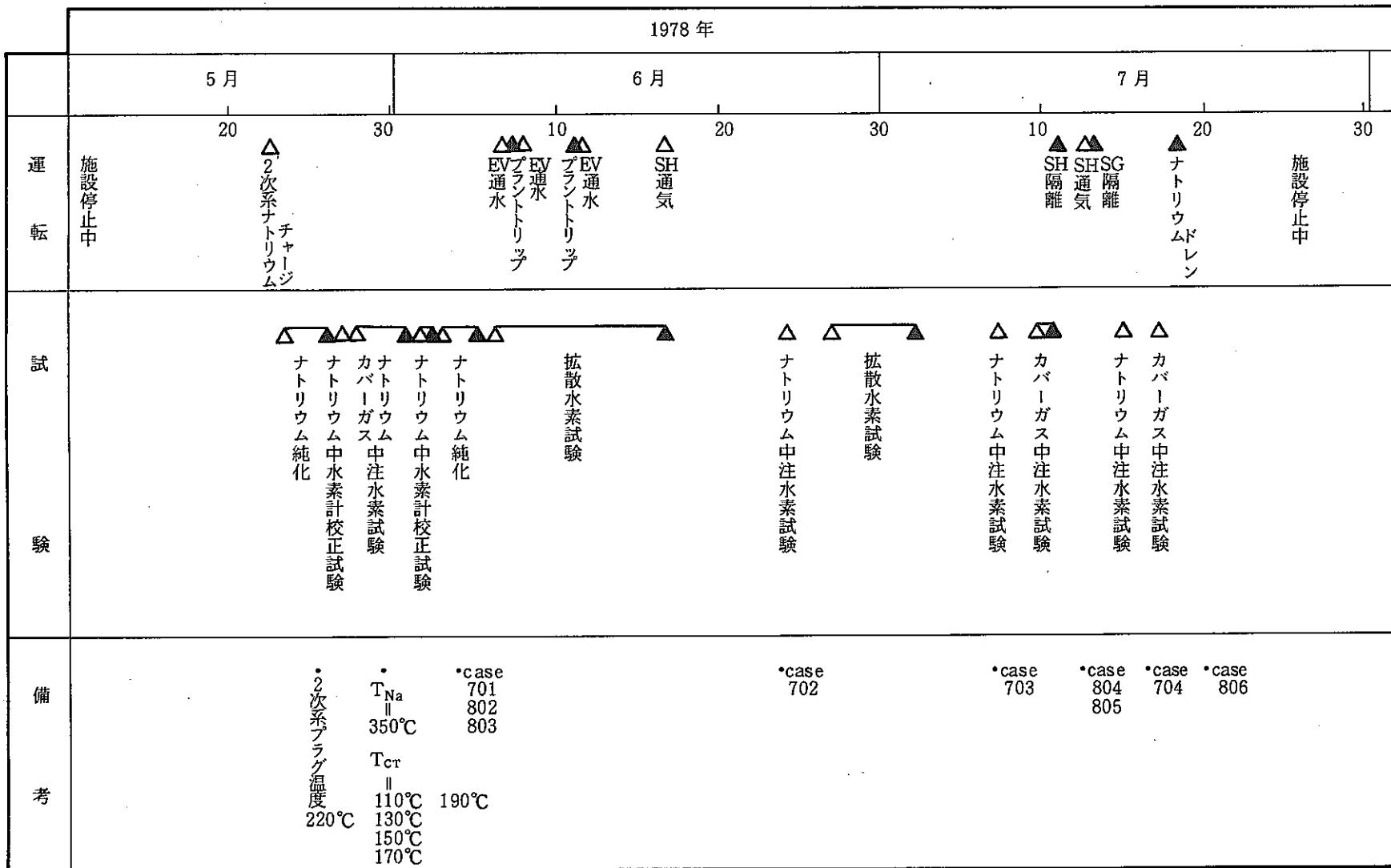


表 5-5 第7期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-5 The Seventh Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

1979年			
	1月	2月	3月
運転	△ 施設停止中 2次系ナトリウム チャージ	30 10 △ EV通水 ノバメント	20 28 △ SH通気 SH隔離 SG隔離 △ 施設停止中 ナトリウムドレン
試験	△ ナトリウム純化 ナトリウム中水素計校正試験	△△ カバーガス中注水素試験 △△ 注水試験 △△ ナトリウム純化 △ 拡散水素試験	△ 拡散水素試験
備考	• 2次系プラグ温度 212.5°C	• $T_{Na} = 270^{\circ}\text{C}$ • $T_{ct} = 110^{\circ}\text{C}$ 130°C 150°C 170°C 140°C 110°C • case 807 808 • W-101 W-102 W-103 • ループ内残留水素 3.07g	

表 5-6 第8期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-6 The Eighth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

		1979年													
運転	施設停止中	5月				6月				7月				施設停止中	
		20	30	10	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水	EV通水		
△ 2次系ナトリウム チャージ	△ プランクトリック	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ EV通水	△ SC圧縮	
試験	△ ナトリウム純化	△ 水素計校正試験	△ 注水試験	△ ナトリウム純化	△ カバーガス中注水素試験	△ 拡散水素試験	△	△	△ 拡散水素試験	△ 注水試験	△	△ 拡散水素試験	△		
備考	• $T_{Na} = 350^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 110^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 140^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 170^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 195^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 150^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 130^{\circ}\text{C}$ • $T_{cr} = 110^{\circ}\text{C}$ 2次系プラグ温度 162.5°C	• W-104 • W-105 • W-107 • W-106 • W-108	{	• case $T_{Na} = 350^{\circ}\text{C}$ 809 $T_{cr} = 110^{\circ}\text{C}$ • case 上昇率 810 0.3 ppb/n	W-109										

表 5-7 第9期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-7 The Ninth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

1979年									
	10月			11月			12月		
運転	20	30		10	20		10	16	
施設停止中	△△ 1次系ナトリウムジチャウム 2次系ナトリウム純化			△ EV通水 プラントリップ	△△△ SH通気隔離 SHEV通水	△△ EV通水 プラントリップ	△△△△ SH通気隔離 EVSH通気 SHSG施設停止中	△△ SH通気	
試験	△△△ ナトリウム純化	△△△ 水素計校正試験	△△△ 注水試験	△△△ ナトリウム純化	△△△△△ カバーガス中注水素試験	△△△△△ 拡散水素試験	△△△△△ カバーガス中注水素試験	△△△△△ 拡散水素試験	△△△△△ トリップ試験
備考	2次系プラグ温度 179°C	T _{Na} =350°C T _{CT} 110°C 135°C 160°C 195°C 180°C 170°C 160°C 130°C 150°C 110°C	注入量 W-110, 350°C, 5.44g W-110A 350°C, 5.36g W-111 310°C, 1.10g W-112 200°C, 0.27 ppb/h W-113 200°C, 1.18g W-113A 200°C, 1.01g	検出量 H ₂ 上昇率	*case • W-114 812				

表 5-8 第10期拡散水素量評価試験および運転経過
Table 5-8 The Tenth Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes
and Detail of Operation

1980年																
		10月					11月					12月				
運転	停止中 (アベレーリング)	10月			11月			12月			SGEV通水 隔離			SGEV通水 隔離		
		△ 施設 設次 停系 止ナチ 中トナ 中リヤ ウジ	△ 2次 次系 ナチ トナチ トナ トナ トナ	30 " " " "	5	10	15	20	25	30	△ EV 通水	△ SH 通気	△ SH 隔離	△ SG 通水 隔離	△ SG 通水 隔離	△ 施設 設停 止中 (アベレーリング)
試験		△ ナトリウム純化			△ △ 水素計校正試験		△ △ カバーガス中 SG本体		△ △ ナトリウム純化		△ △ ナトリウム純化		△ △ 注水素試験		△ △ カバーガス中 SG本体	△ △ 注水素試験
備考	2次系プラグ温度 242°C (チャージ温度 250°C)	T _{Na} =250~350°C T _{cT} =110°C 最終純化状態 (H ₂ 上昇率) 2.5 ppb/h (350°C)	case 705 902 903 706	T _{Na} =250°C T _{cT} =110°C H ₂ 上昇率 0.9 ppb/h (350°C) 0.19 ppb/h (200°C)	case 904 707											

表 5-9 第 11 期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-9 The Eleventh Evaluation Test for Hydrogen Flux through
Tubes and Detail of Operation

		1981 年														
		5月			6月			7月			8月					
運 転	施設停止中	20	30	10	EV 通水	20	30	EV 隔離	EV 通水	10	EVSH 通気	SHSHSH 隔離	EV 隔離	30	ナトリウムドレン	施設停止中
		△ 2次系ナトリウム チャージ			△ EV 通水			△ EV 隔離	△ EV 通水	△ EVSH 通気	△△△ EVSH 通気	SHSHSH 隔離	△△△ EV 隔離		△ ナトリウムドレン	施設停止中
試 験		△ 水素 酸素 計校正試験	△△△△△ SG 本体 カバー ガス 中注水素試験	△△ 拡散水素純化	△△ SG 本体注水素試験		△△ SG 本体注水素試験		△△ SG 本体注水素試験		△△ 拡散水素試験	△△ SG 本体 注水素試験	△△ ナトリウム 中注水素試験			
備 考	2 次系 プラグ 温度 165°C	• $T_{Na} = 355^{\circ}\text{C}$ • $T_{CT} = 110^{\circ}\text{C}$ 110°C 170°C 185°C 165°C 150°C 130°C 110°C	case 913 814 815	$T_{Na} = 350^{\circ}\text{C}$ $T_{CT} = 110^{\circ}\text{C}$ H ₂ 上昇率 0.17 ppb/h (350°C) 0.1 ppb/h (300°C) 0.0 ppb/h (200°C)	case 914 915 916	case 917 918 919	case 920	case 921 922 923	case 708							

表 5-10 第 12 期拡散水素量評価試験および運転経過

Table 5-10 The Twelfth Evaluation Test for Hydrogen Flux through
Tubes and Detail of Operation

1983 年											
	3月	4月			5月			6月			7月
運転	△ 2次系不 ^{チヤリ} 施設停止中 △ 2次系ナトリウム ドレン	30	10	△ EV通水	△ SH通気	▲ SG隔離	△ 1次系ナトリウム ドレン	△ EV通水	△ EV通水	△ SH通気	△ 全電源喪失試験
試験	△ Na中水素計校正試験		△ SG本体注水素試験	△ SG本体注水素試験	△ SG本体注水素試験	△ 拡散水素試験	△ Na中水素計校正試験	△ Na中水素計校正試験	△ SG本体注水素試験	△ SG本体注水素試験	△ SG本体注水素試験
備考	• $T_{Na} = 355^{\circ}\text{C}$ • $T_{CT} = 110^{\circ}\text{C}$ 2次系プラグ温度 185°C	case 930 140°C 170°C 150°C 130°C 110°C	case 935 l 936 934	case 937 l 939	$T_{CT} = 110^{\circ}\text{C}$ $T_{CT} = 150^{\circ}\text{C}$	$T_{CT} = 110^{\circ}\text{C}$ $T_{CT} = 130^{\circ}\text{C}$ $T_{CT} = 150^{\circ}\text{C}$ $T_{CT} = 170^{\circ}\text{C}$	case 940 l 947	case 944 l 950	case 948 l 954	case 952 l 959	case 958 l 955 l 957

表5-11 給水水質状態
Table 5-11 Quality Condition of Feed Water

月/日	PH		溶存酸素 (PPb)	ヒドラジン (PPb)			電導度 (μ /cm)	シリカ(PPb)	全 鉄 (PPb)		
	SG 入口	復水器出口		復水器出口	脱気器出口	SG 入口			SG 入口	復水器出口	脱気器出口
6/15	9.27	9.15	↑	10 以下	10 以下	10 以下	↑	3.4	13	10 以下	10 以下
6/16	9.28	9.1	↑	13.5	25	21.5	↑	3.6	16	13	18
6/17	9.22	9.1	0	18	31.5	28	0.1	4.2	18	16	11.5
6/18	9.15	9.1	↑	18	37	33	↓	4.2	16	15.6	12.5
6/19	9.2	9.1	↑	13	48	43.5	↓	4.0	25	16.5	16
6/20	9.3	9.15	↓	11.5	52.5	50.5	↓	3.8	18	23.5	20.5
6/21	9.15	9.18	↓	11.5	52.5	50.5	↓	3.0	18	23.5	20.5

SG の運転条件 (EV単体運転)

SG 入口Na温度	470°C	SG 出口蒸気圧力	132kg/cm ² g
SG 出口Na温度	320 °C	試験前のCT底部温度	120°C
2次系Na流量	800T/H		
SG 出口蒸気温度	390 °C		
SG 入口給水温度	200 °C		
給水流量	80T/H		

表 5-12 各国における蒸気発生器からの拡散水素量

Table 5-12 The Hydrogen Flux through Tubes in Foreign Steam Generator

試験施設	*1 拡散水素量 (g / sec · cm ²)	バックグラウンド水素濃度 (PPb)	備考
EBR-II	1.1×10^{-12}	80~120	2重管SG 文献18)
* MSG	2.0×10^{-11}	80	文献18)
*3 GE-DNB	$1.7 \sim 3.3 \times 10^{-11}$		拡散水素量は腐食量からの計算値 文献18)
Phenix	2.1×10^{-11}	80~100	文献18)
PFR	$2.2 \sim 4.3 \times 10^{-11}$	250~500	バックグラウンド水素濃度の変動は、CT の断続的運転による。 文献18)
KNK-II	7.5×10^{-12}	80以下	文献19)

* 1 通常運転時の拡散水素量

* 2 SCTI(米国) 試験装置内のModular Steam Generator

* 3 GE社(米国) のDNB試験装置

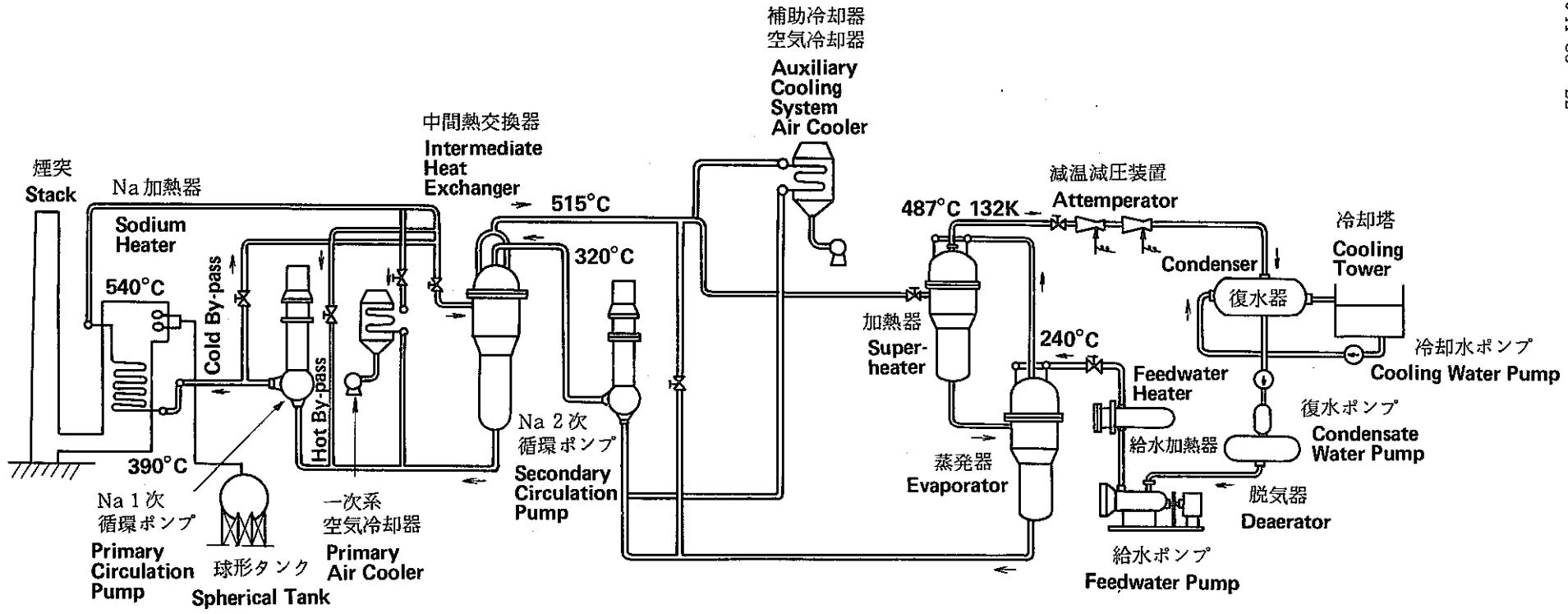
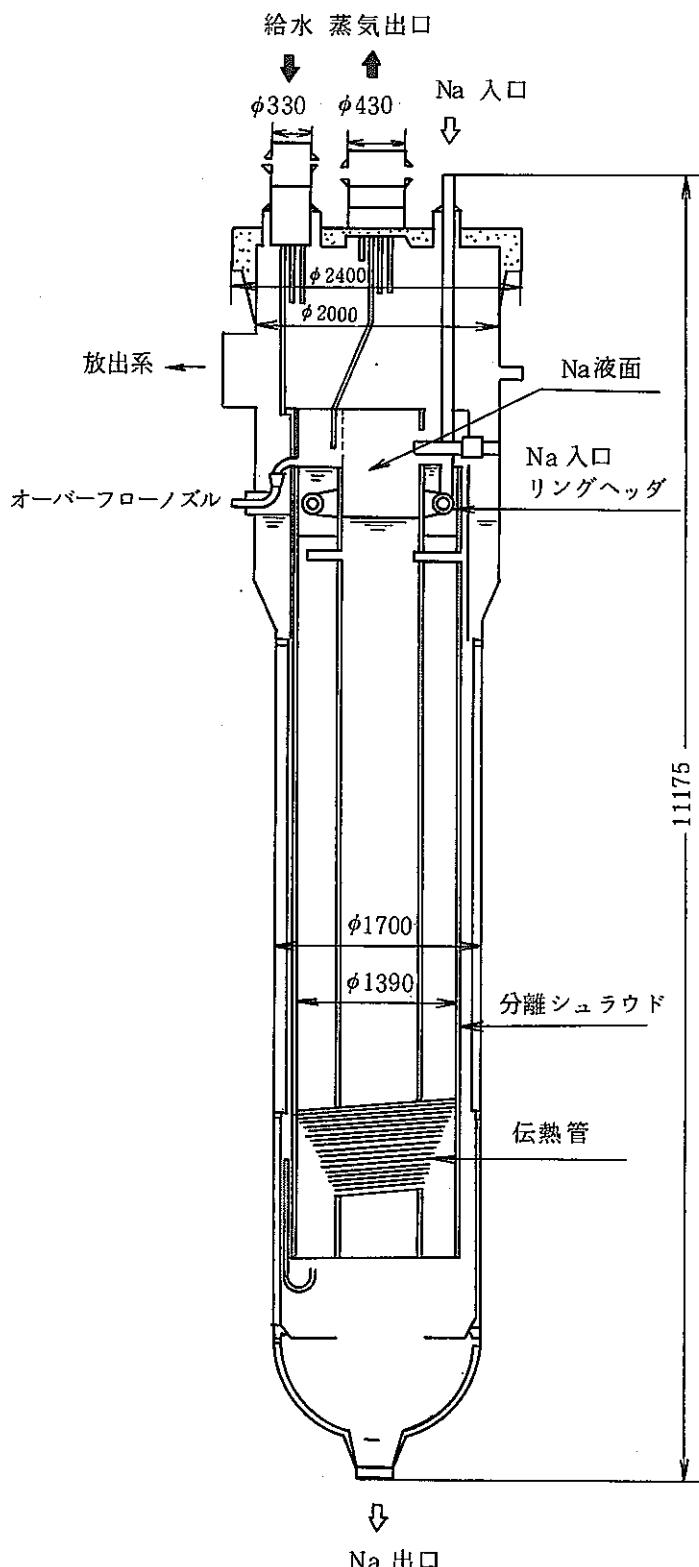


図 2-1 50 MW 蒸気発生器試験施設の概略系統

Fig. 2-1 Schema of 50MW Steam Generator Test Facility



	単位	蒸発器
定格運転出力	Mwt	40.2
基 数	-	1
構 造	-	ヘリカルコイル
管 側 流 体	-	水／蒸気
設 計 条 件	atg × °C	155×480
洞 側 流 体	-	ナトリウム
設 計 条 件	atg × °C	10×485
伝 热 面 積	m ²	237
圧力損失(水側)	kg/cm ²	3.53
” (ナトリウム側)	kg/cm ²	-0.62
内部シュラド外径	m	0.7112
外部シュラド内径	m	1.350
ヘリカルコイル最内径	m	0.780
” 最外径	m	1.280
全長(シェル外側)	m	11.856
洞 板	-	SA387Gr.D
伝 热 管	-	STBA 24
” 本数	本	33
” 外径	mm	31.8
” 厚さ	mm	3.8
コイル層数	-	6
配列ピッチ(軸方向)	mm	50
” (半径方向)	mm	50
有効長さ	m	68.1
水蒸気入口温度	°C	240
出口	°C	366
出口圧力	atg	138
流量(1基当たり)	T/H	79.6
Na入口温度	°C	476
出口 ”	°C	320
流量(1基当たり)	T/H	723
液面制御方式		カバーガス圧力及びオーバーホロー

図2-2 蒸発器の構造

Fig. 2-2 Schema of Evaporator

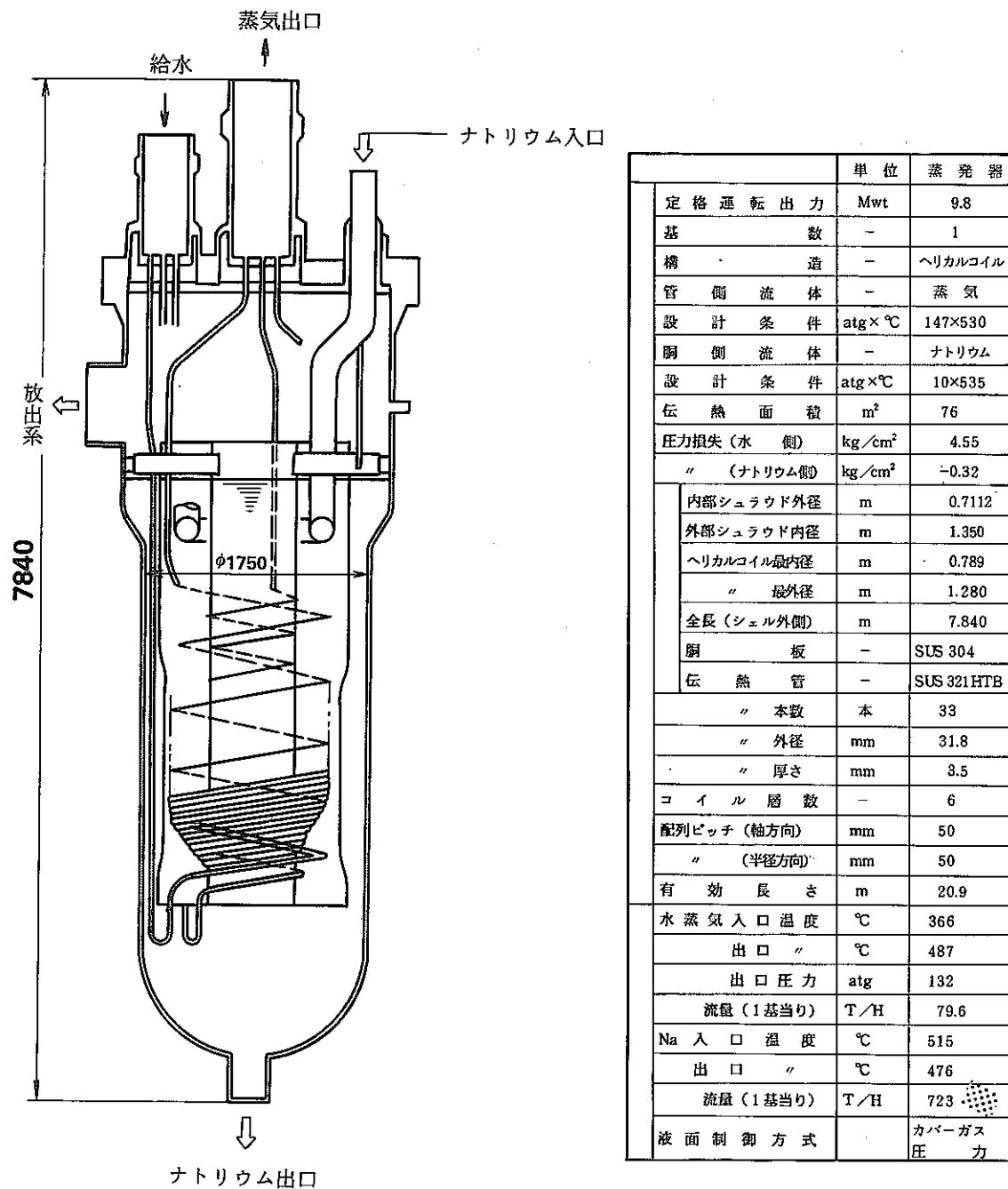


図 2-3 過熱器の構造

Fig. 2-3 Schema of Superheater

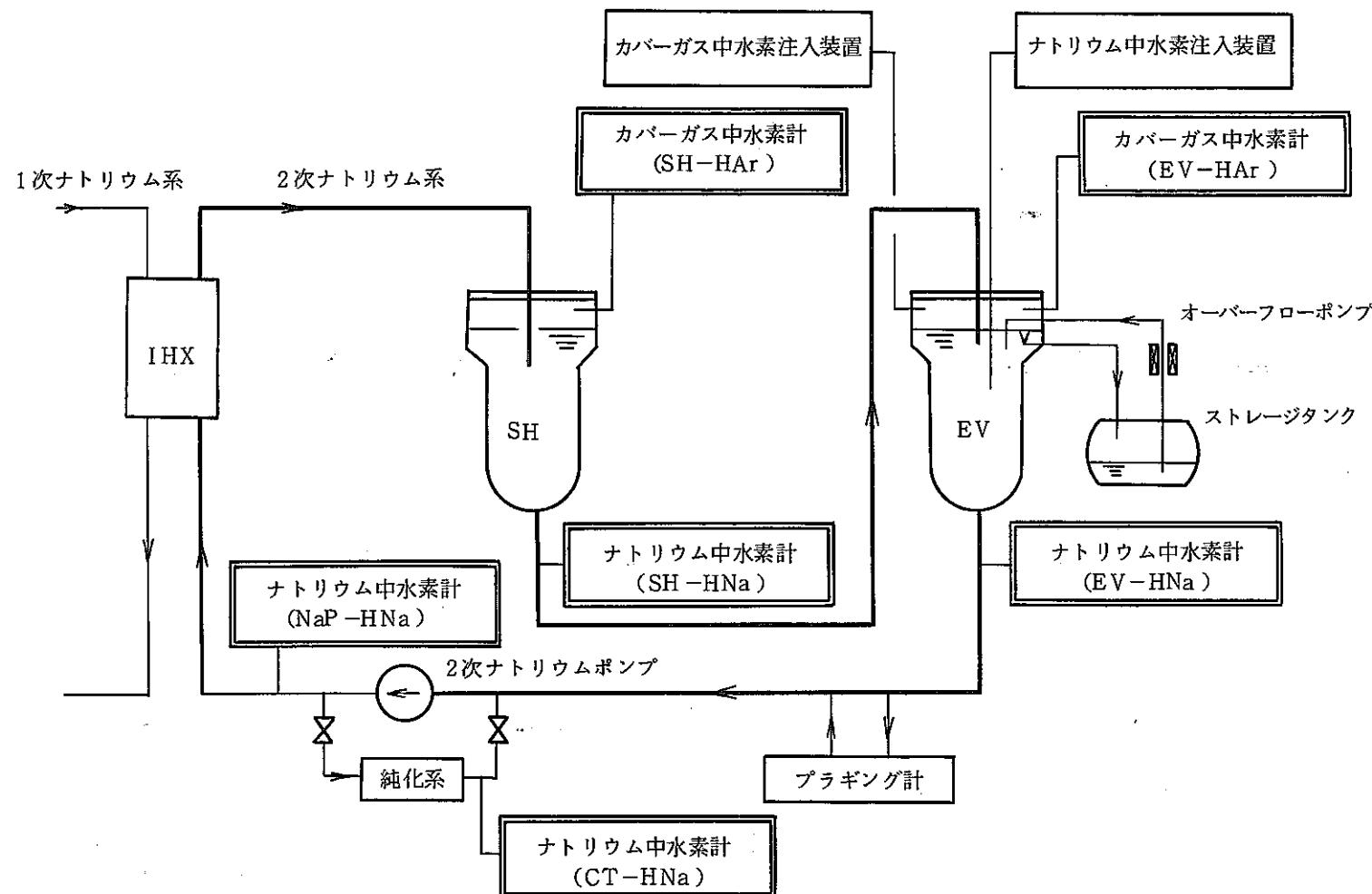


図 2-4 水素計の設置位置

Fig. 2-4 Location of Hydrogen Meters

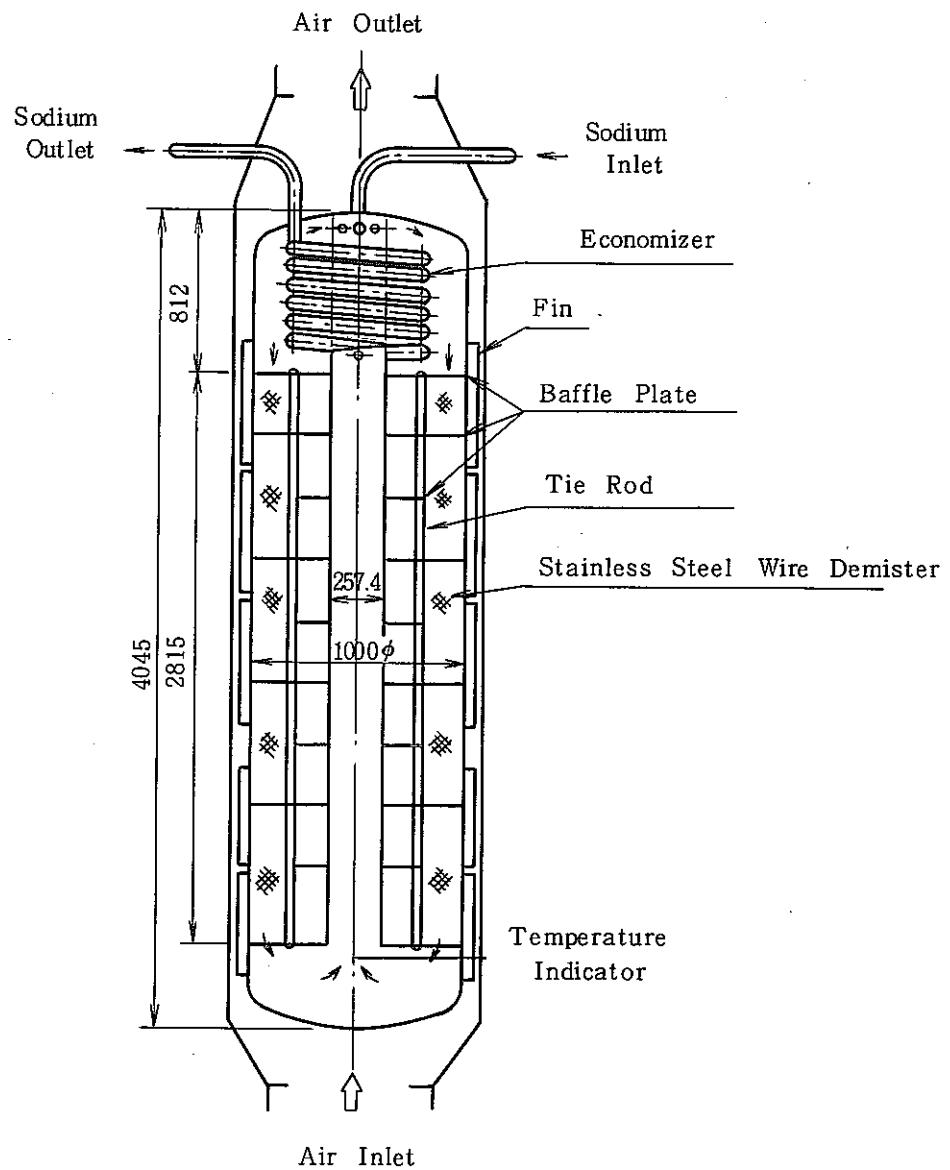
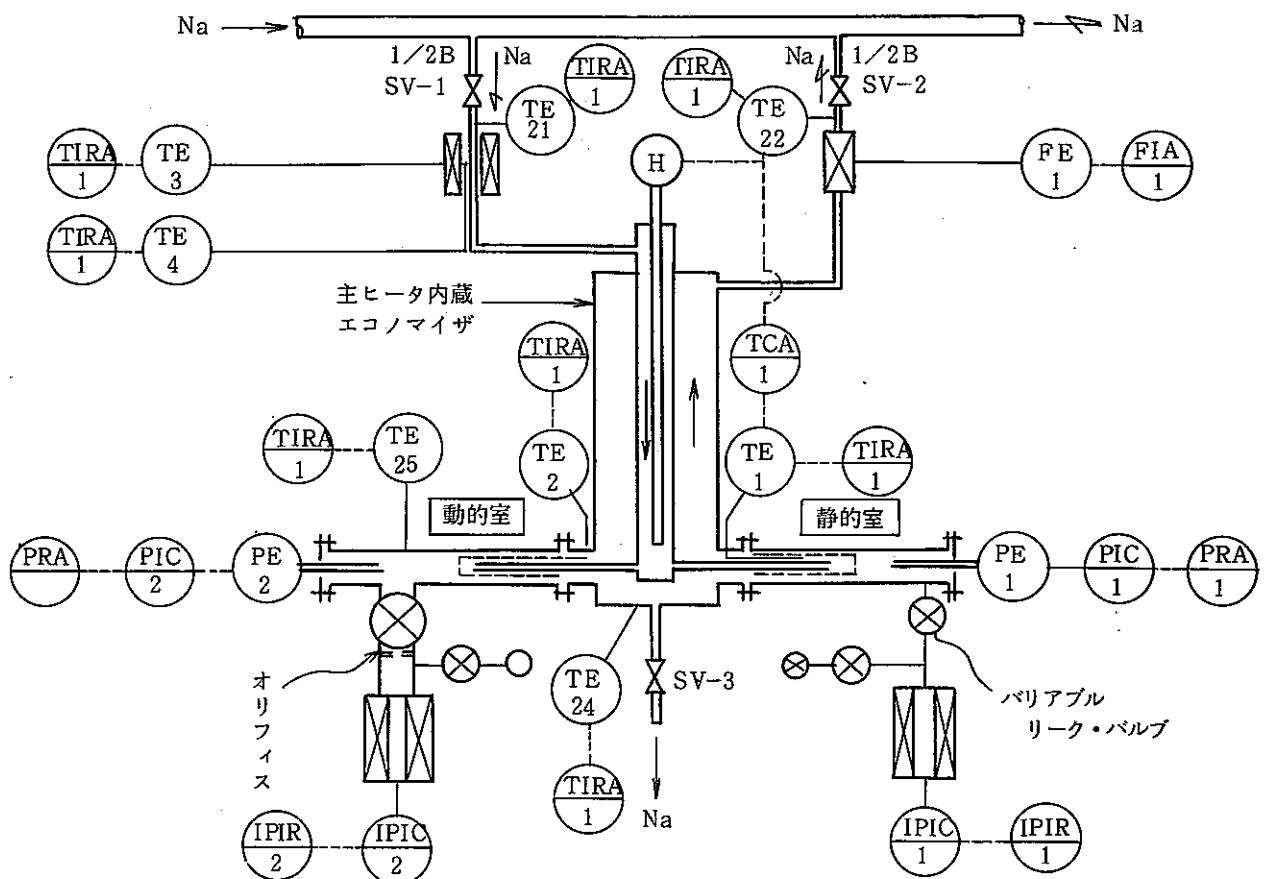


図 2-5 コールドトラップの構造

Fig. 2-5 Schema of Cold Trap



	電磁ポンプ		Na主ヒーター		イオンポンプ
	電磁流量計		ニッケル膜		真空止弁
	フランジ		Na止弁		カットバルブ
	真 空 計		コントローラ		熱電対
	現場計装	P	圧力(真空)	F	流 量
	中制盤計装	IP	イオンポンプ	C	制 御
E	測 定 端	I	指 示	A	警 報
				T	温 度
				R	記 录

図 2-6 EV-HNa 系統図

Fig. 2-6 System of EV-HNa

P No.	部品名称	材質
1	フランジ	SUS 304
2	座	SUS 304
3	ニッケル膜	Ni 201 相当
4	ニッケル膜	Ni 201 相当
5	底板	SUS 304
6	真空パイプ	SUS 304

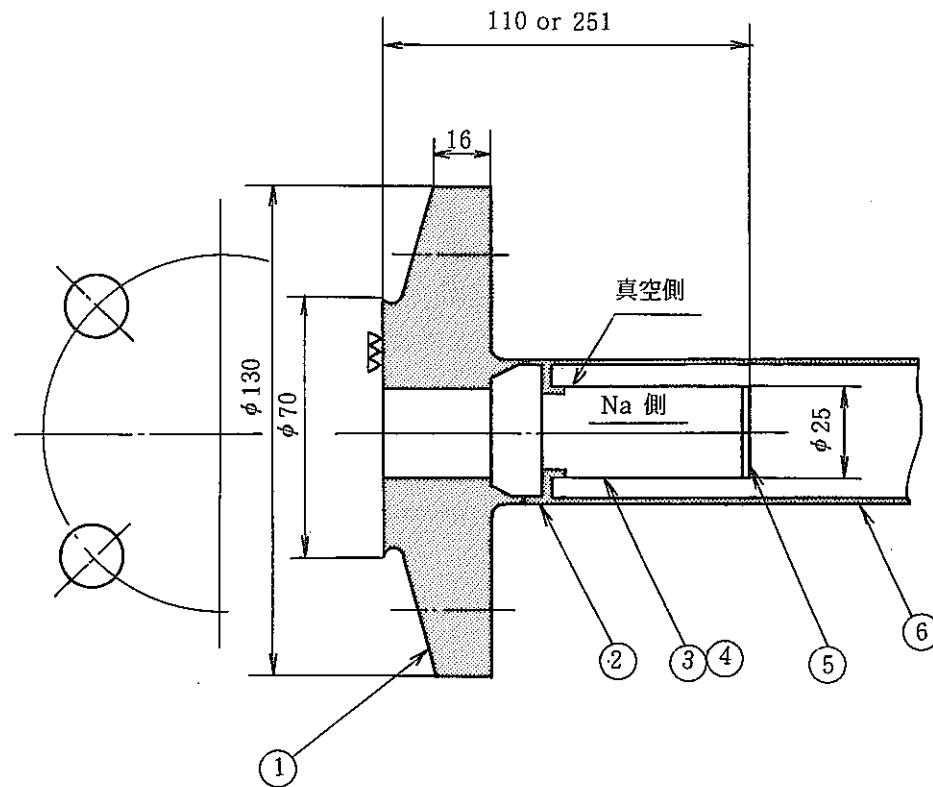
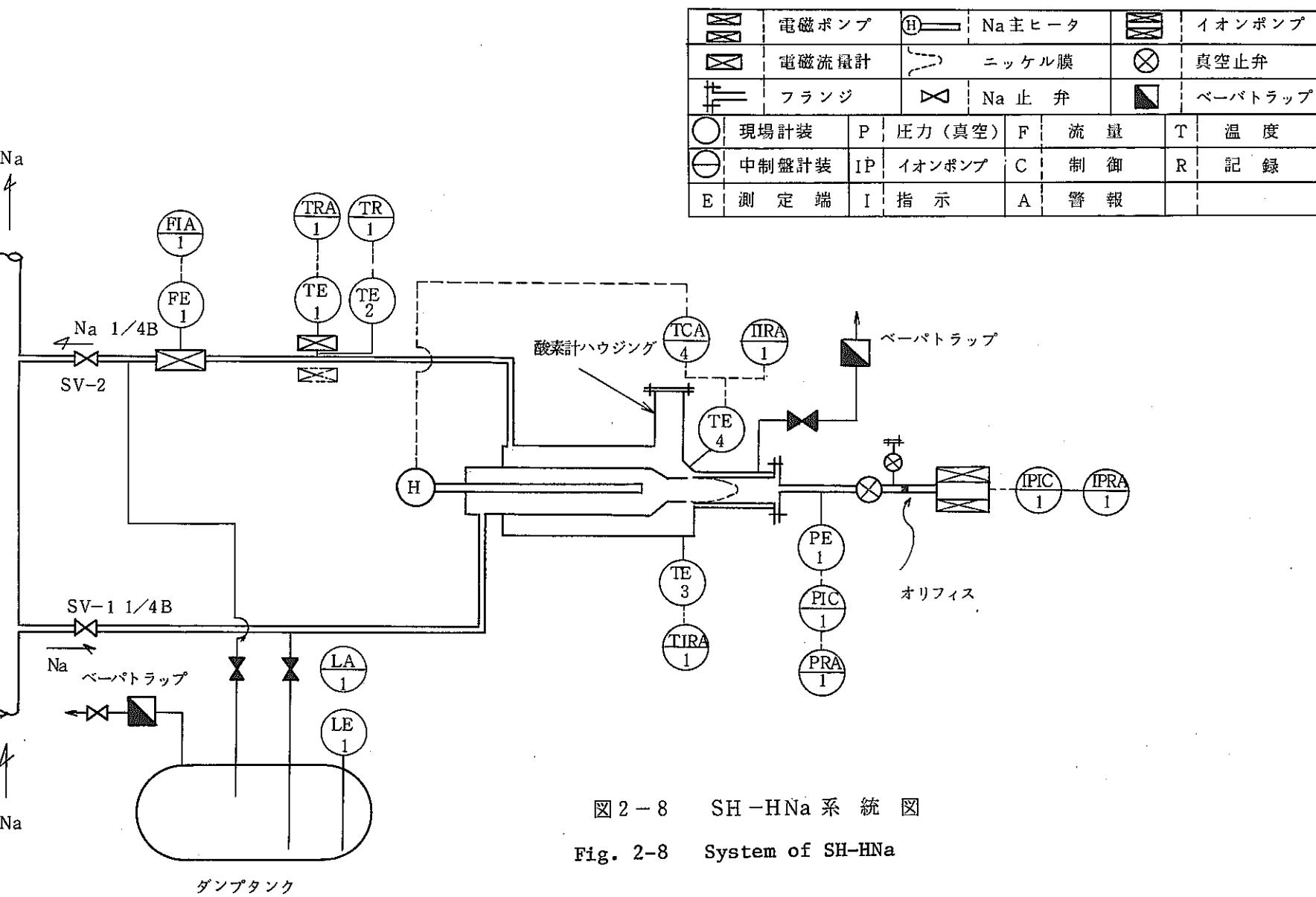


図 2-7 EV-HNa ニッケル膜構造図

Fig. 2-7 Structure of Nickel Membrane for EV-HNa



Ni 膜 = Ni 201 相当

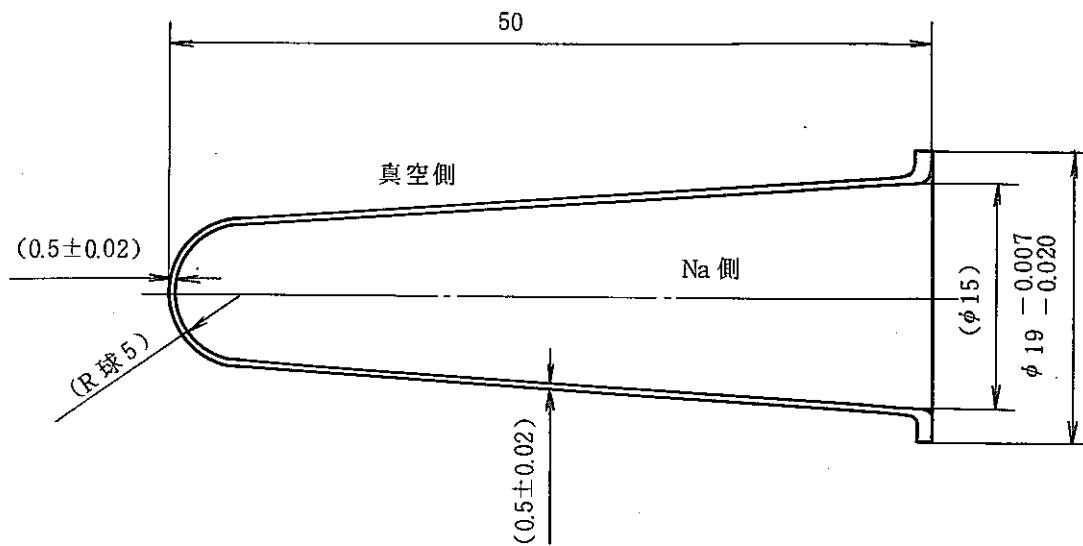


図 2-9 SH-HNa ニッケル膜構造図

Fig. 2-9 Structure of Nickel Membrane for SH-HNa

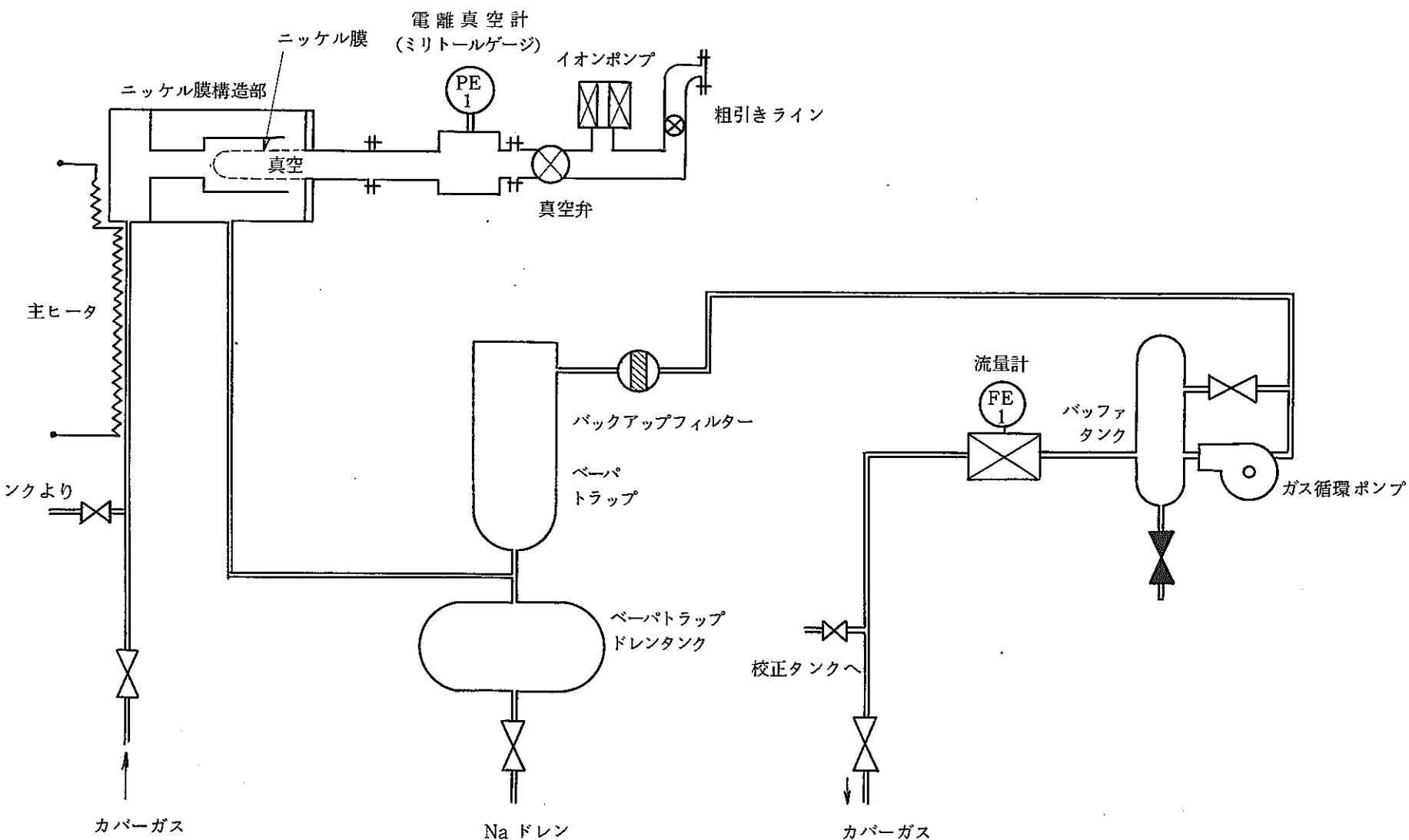
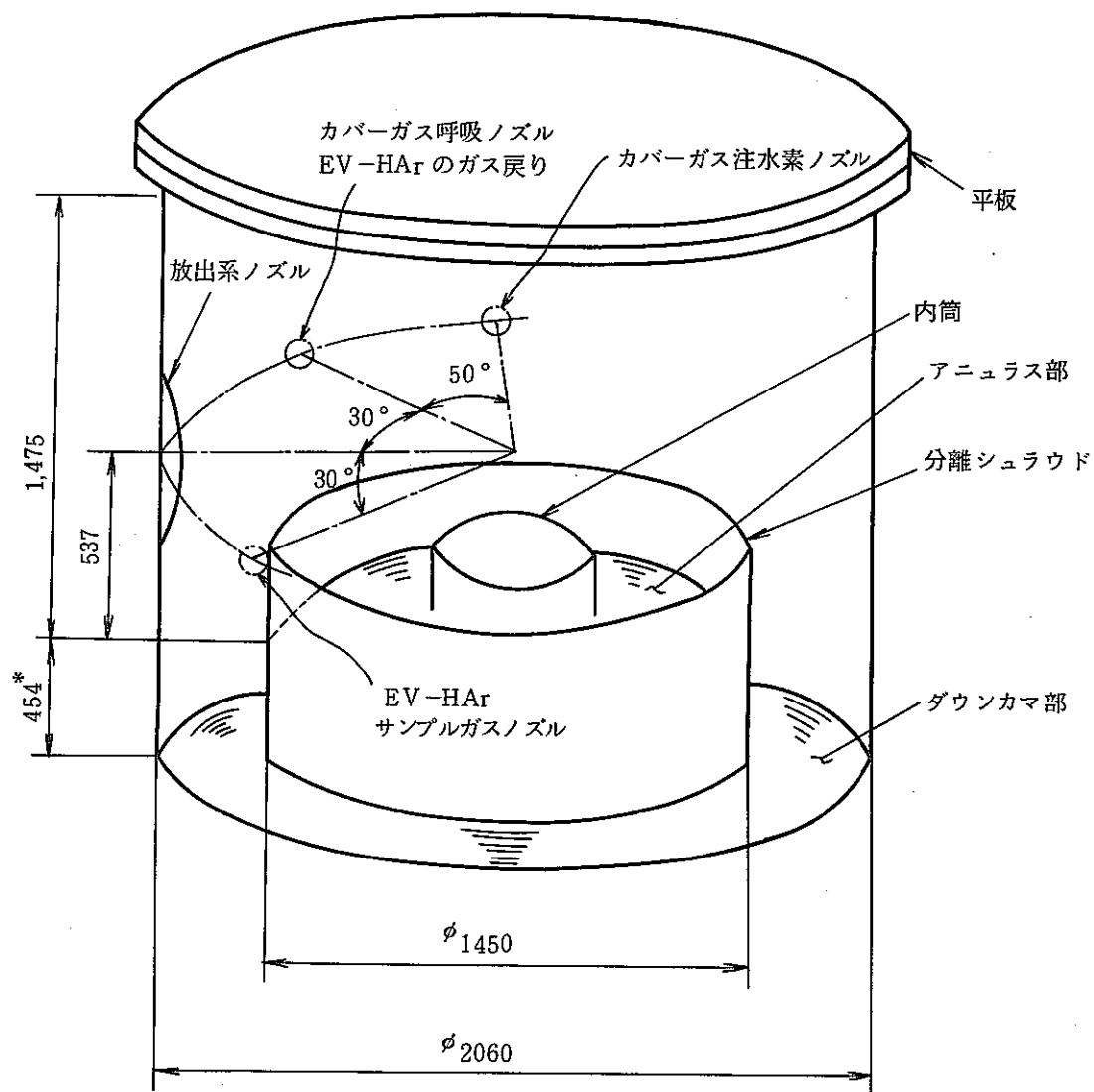


図 2-10 EV-HAr 系統図

Fig. 2-10 System of EV-HAr



* 定格流量 (800T/H) 時

図 2-11 EV-HAr サンプリングノズル位置

Fig. 2-11 Position of Sampling Nozzle for EV-HAr

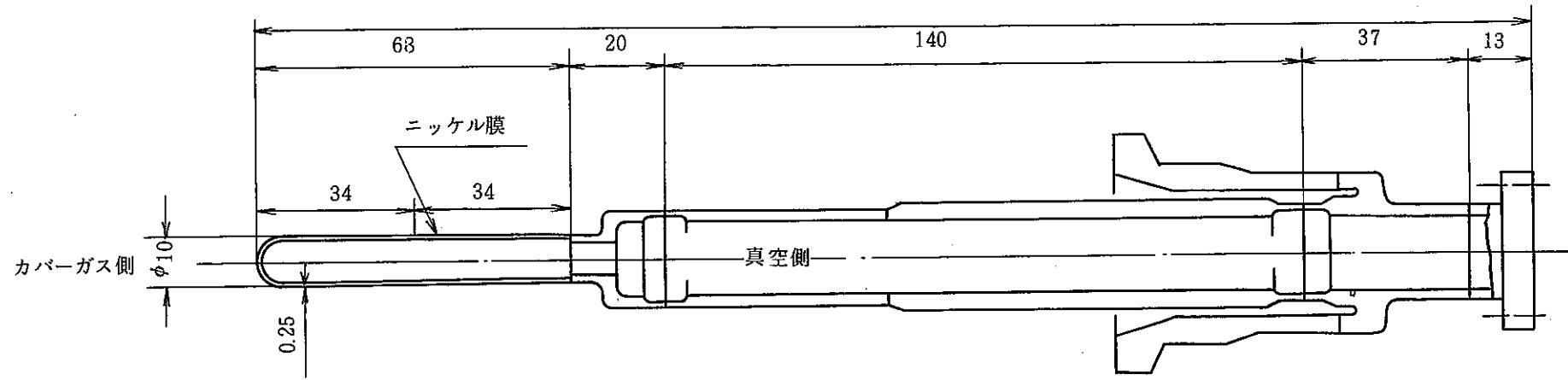


図 2-12 EV-HAr ニッケル膜の構造

Fig. 2-12 Structure of Nickel Membrane for EV-HAr

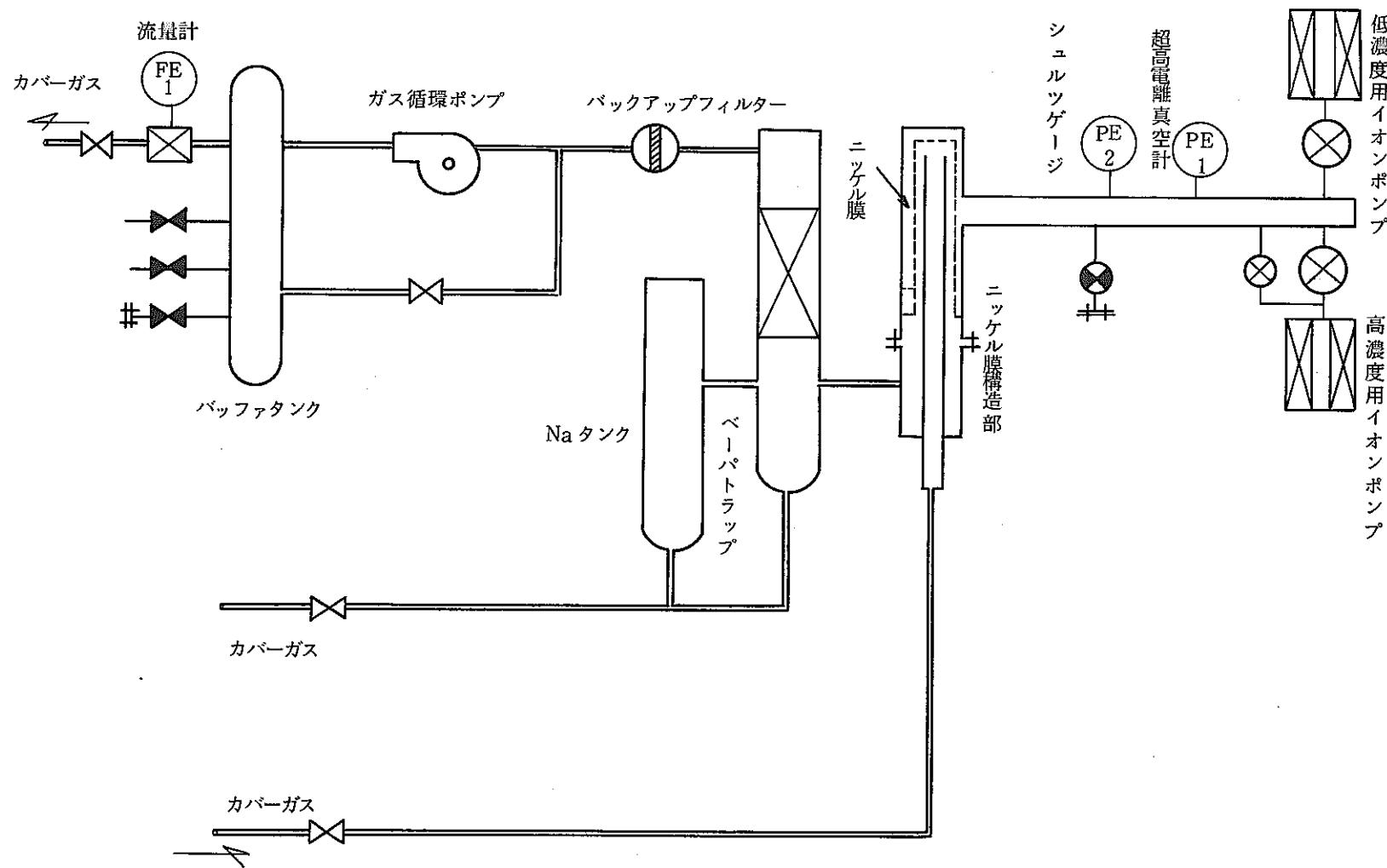


図 2-13 SH-HAr 系統図

Fig. 2-13 System of SH-HAr

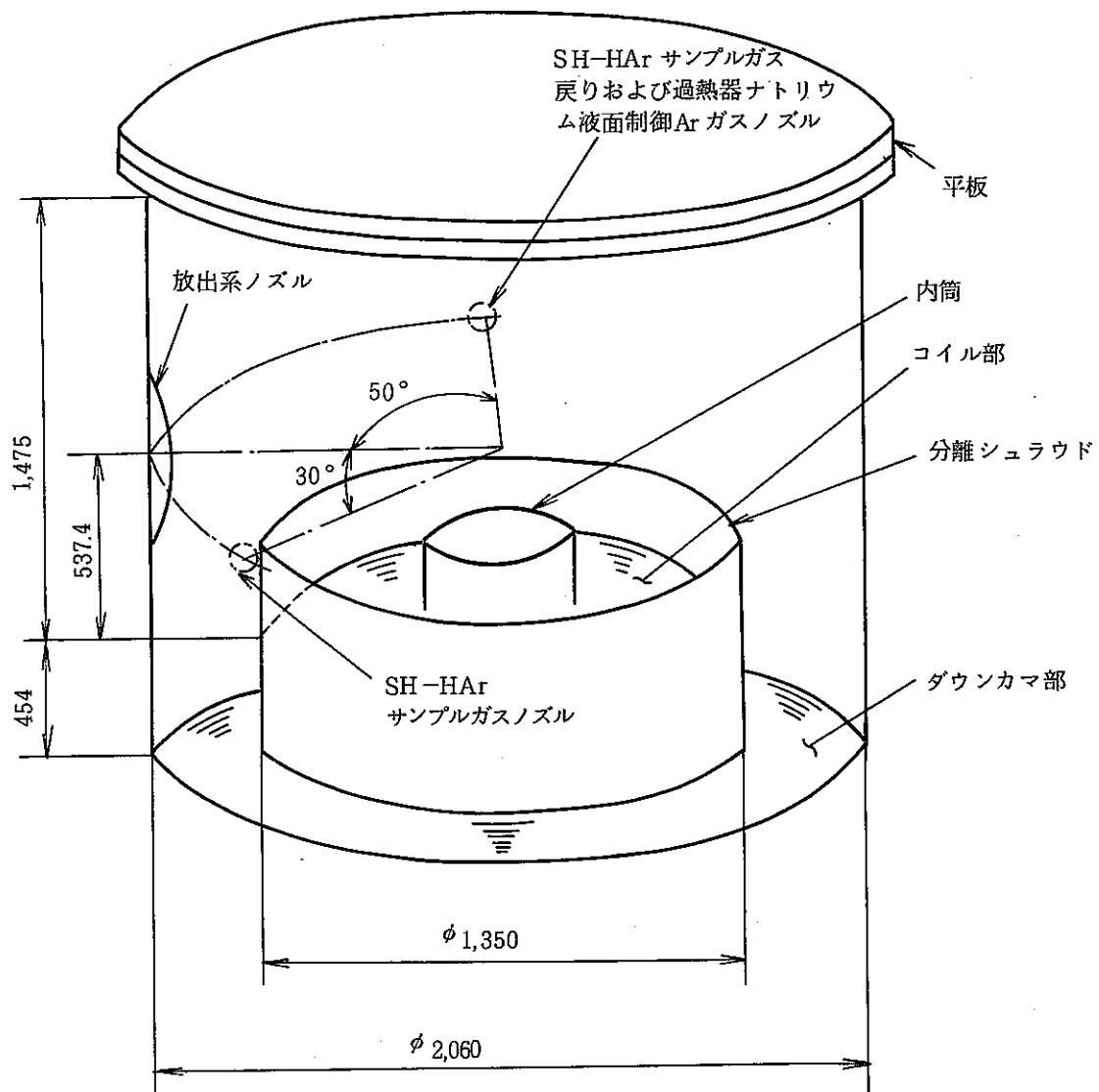


図 2-14 SH-HAr サンプリングノズル位置

Fig. 2-14 Position of Sampling Nozzle for SH-HAr

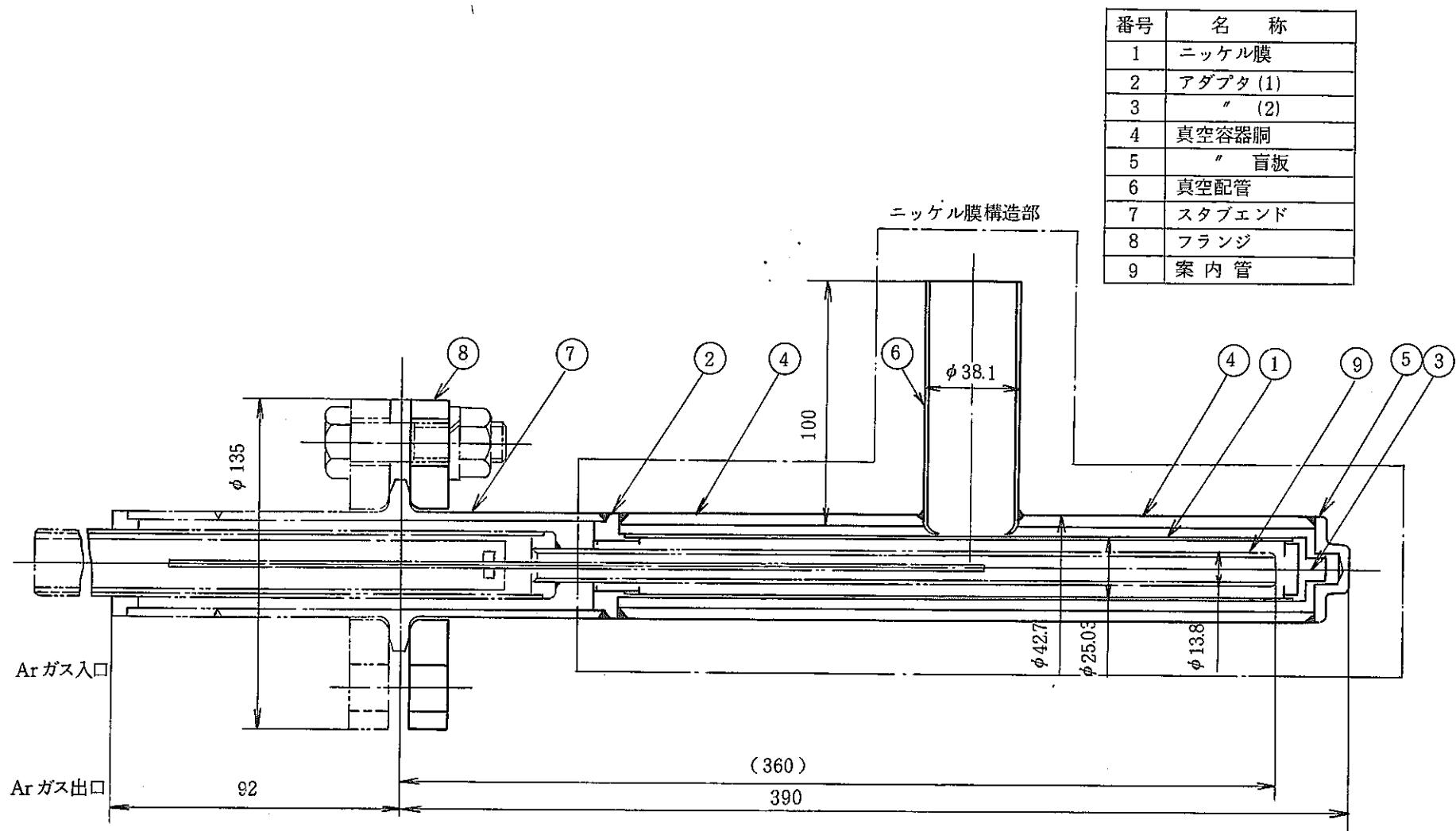


図 2-15 SH-HAr ニッケル膜部の構造

Fig. 2-15 Structure of Nickel Membrane for SH-HAr

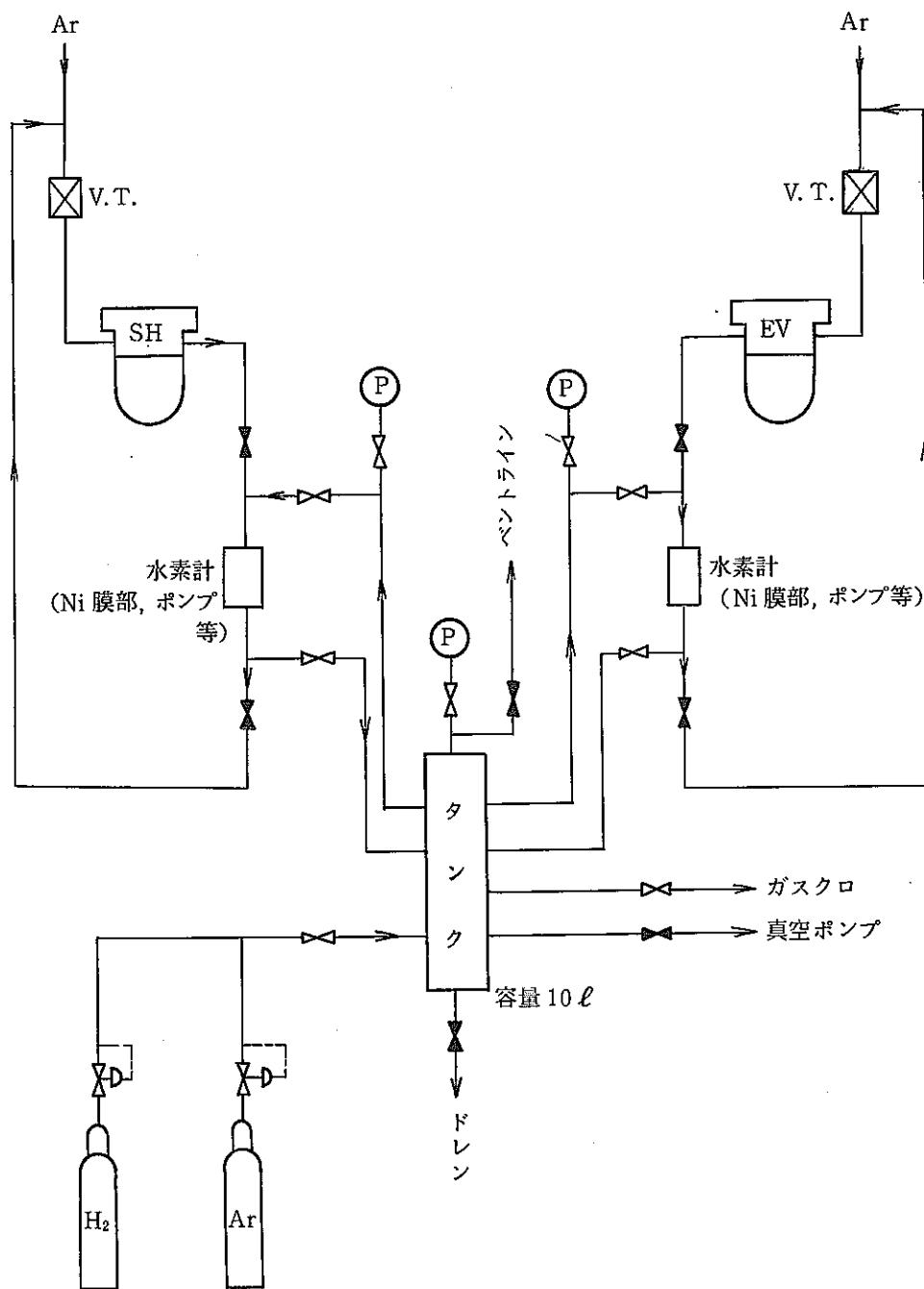


図 2-16 カバーガス中水素計の校正系統図

Fig. 2-16 System of Calibration Loop for In-Cover Gas
Hydrogen Meters

この頁は PDF 化されていません。

**内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理
担当箇所で原本冊子を参照して下さい。**

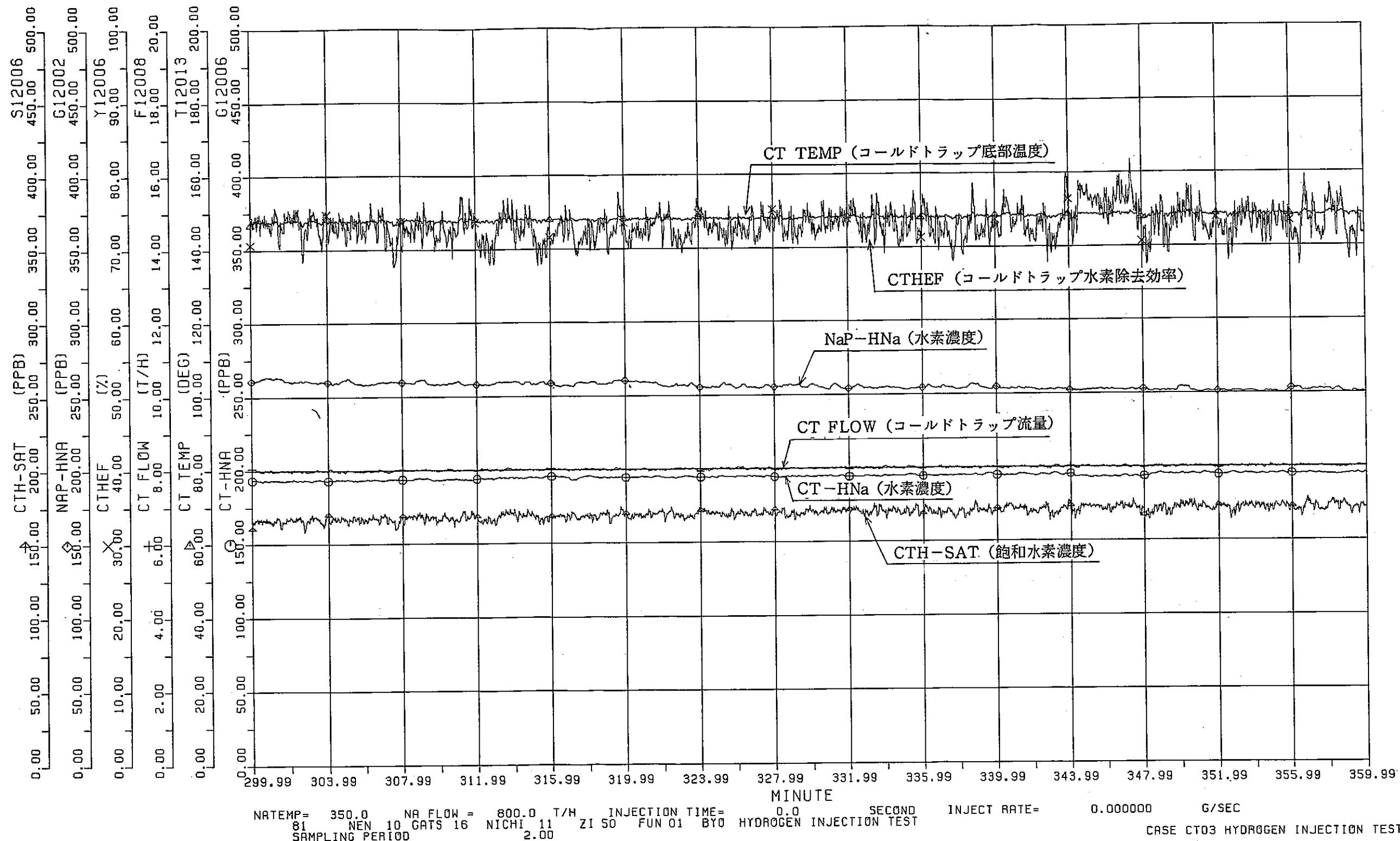


図3-2 Case CT 03におけるコールドトラップの水素除去効率（4～5時間経過）

Fig. 3-2 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT03 (4~5 Hours Pass)

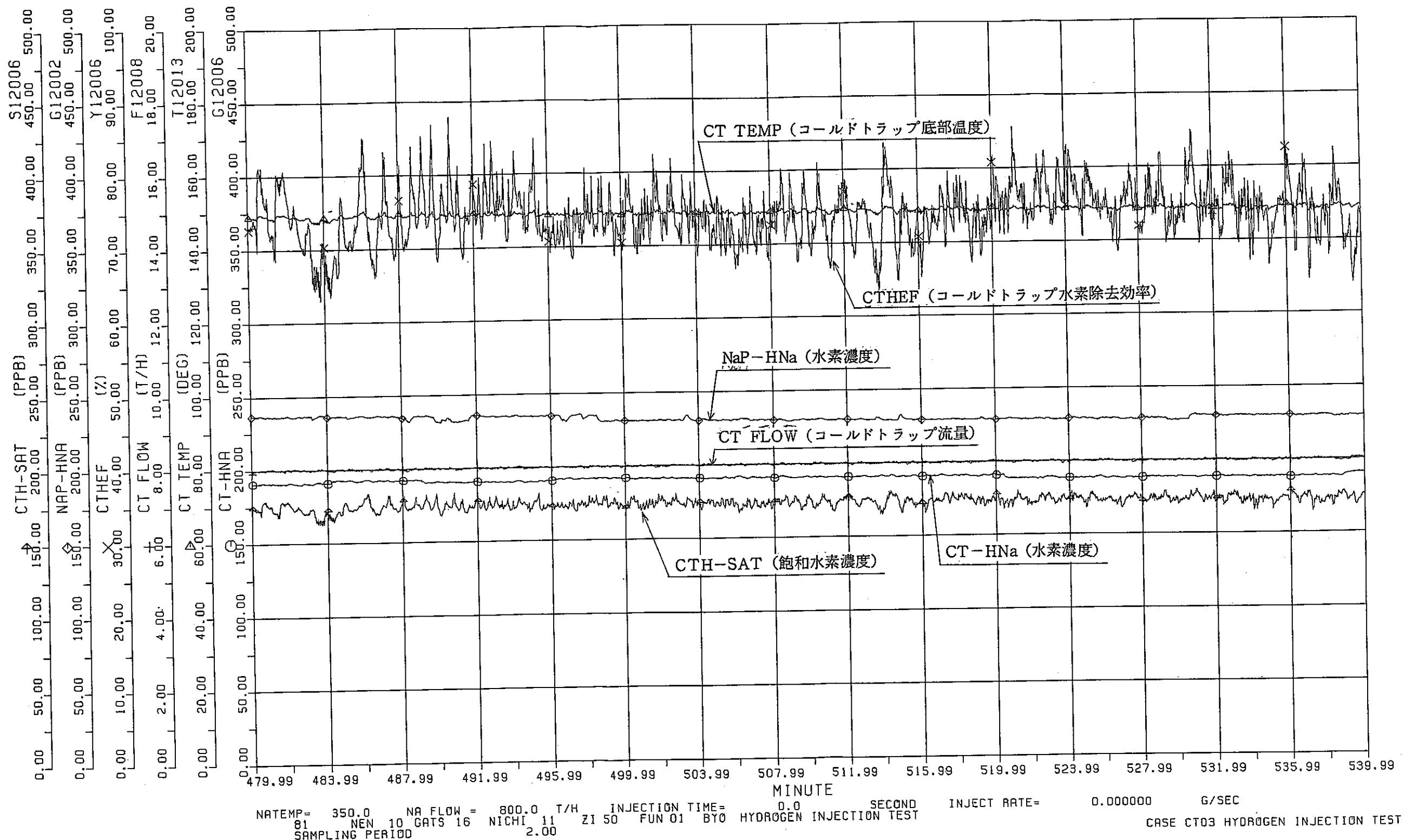


図 3-3 Case CT 03 におけるコールドトラップの水素除去効率 (7~8 時間経過)

Fig. 3-3 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT03 (7~8 Hours Pass)

この頁は PDF 化されていません。

**内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理
担当箇所で原本冊子を参照して下さい。**

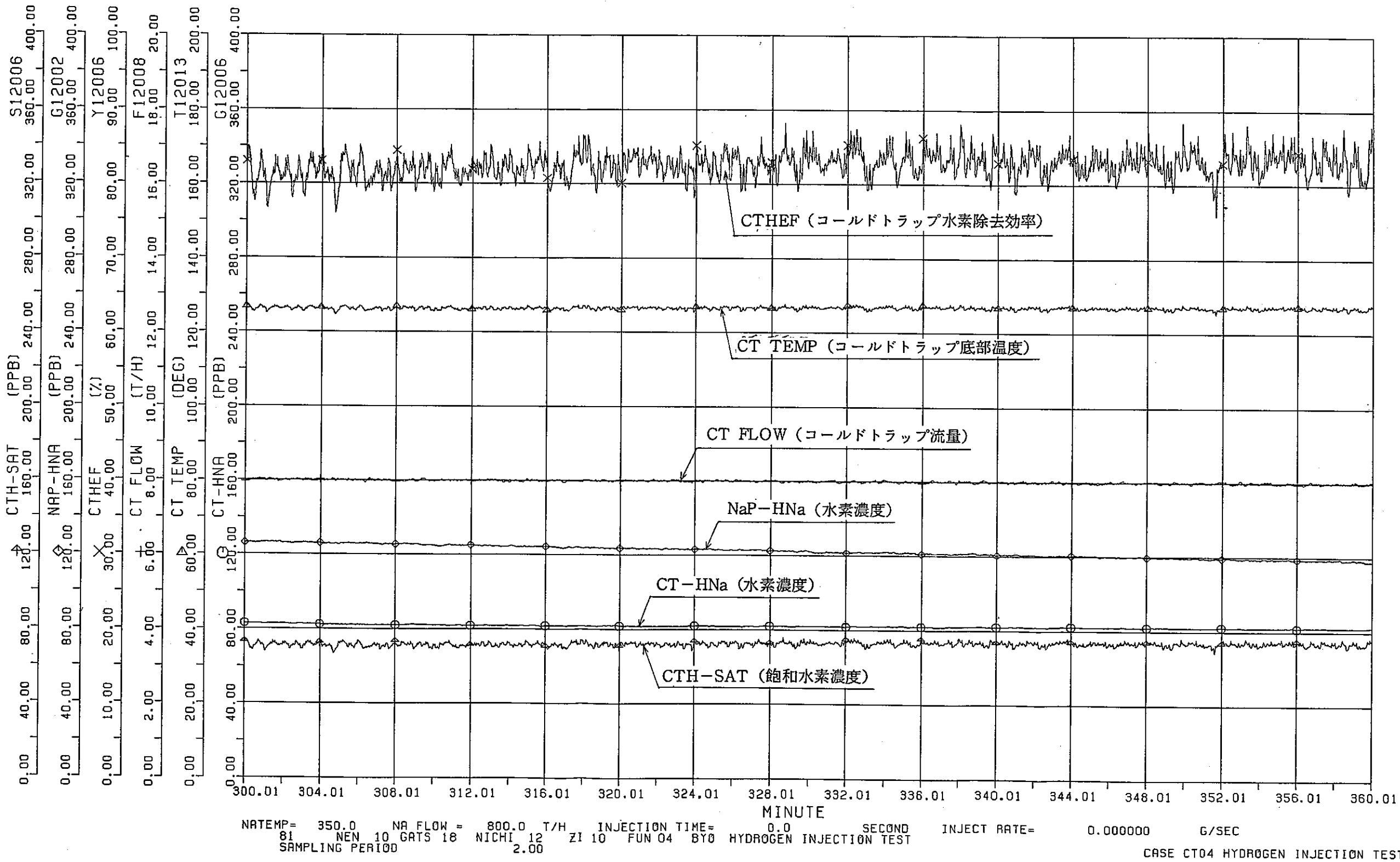


図3-5 CT04におけるコールドトラップの水素除去効率（4～5時間経過）

Fig. 3-5 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT04 (4~5 Hours Pass)

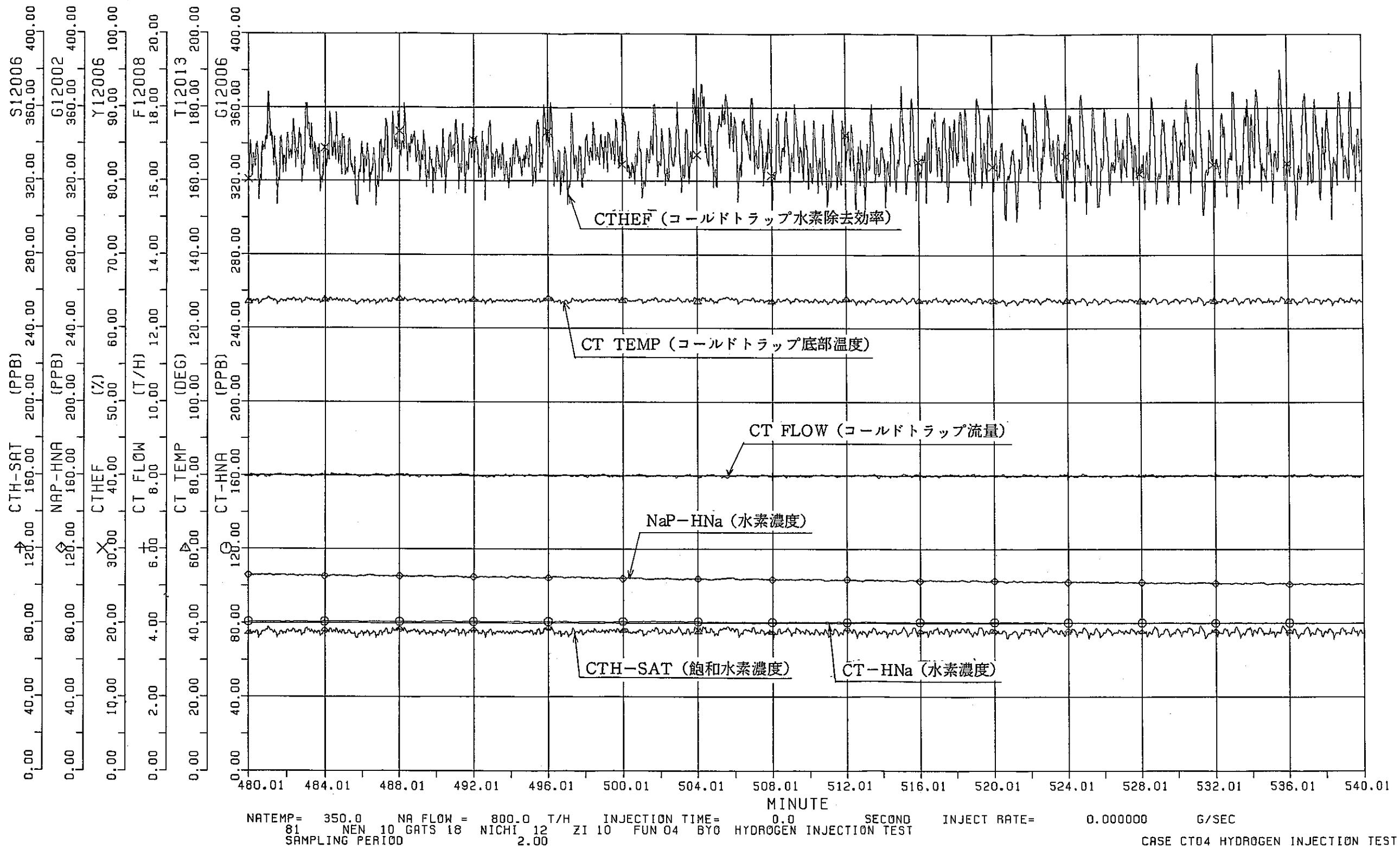


図3-6 CT04におけるコールドトラップの水素除去効率（7～8時間経過）

Fig. 3-6 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT04 (7~8 Hours Pass)

この頁は PDF 化されていません。

**内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理
担当箇所で原本冊子を参照して下さい。**

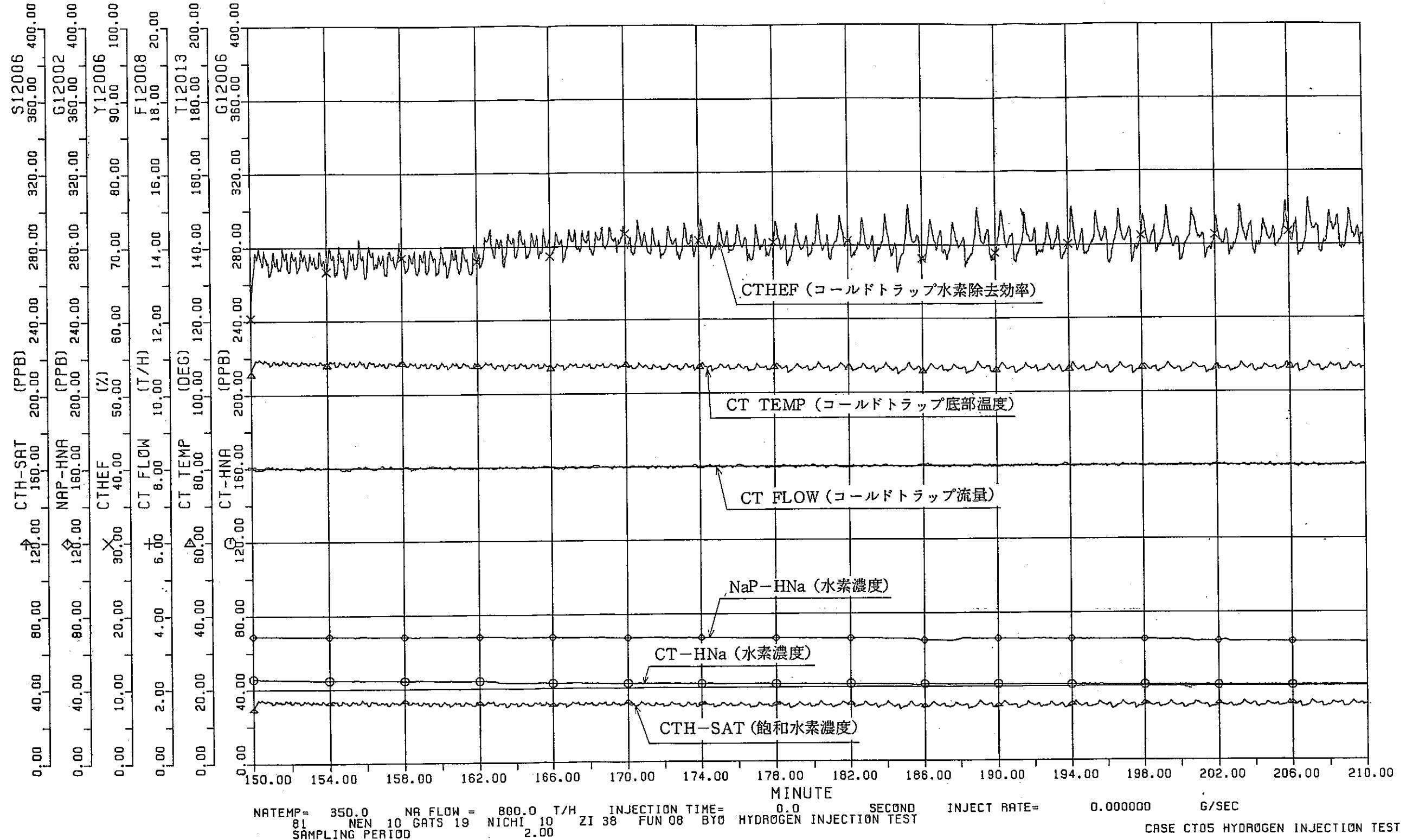


図3-8 CT05におけるコールドトラップの水素除去効率(1時間40分～2時間40分経過)

Fig. 3-8 Removal Efficiency of Hydrogen by the Secondary Cold Trap in Case CT05 (100~160 Minutes Pass)

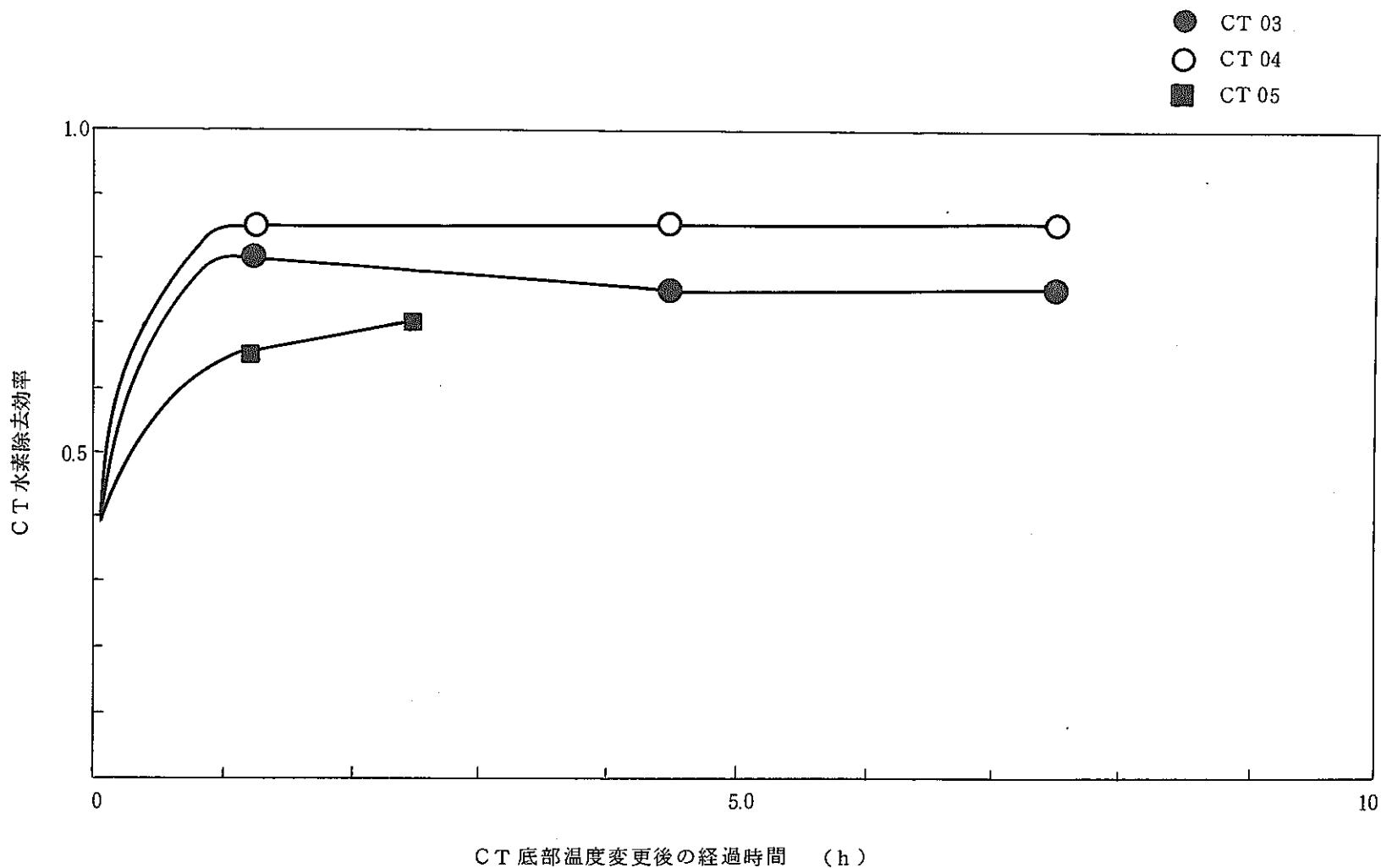
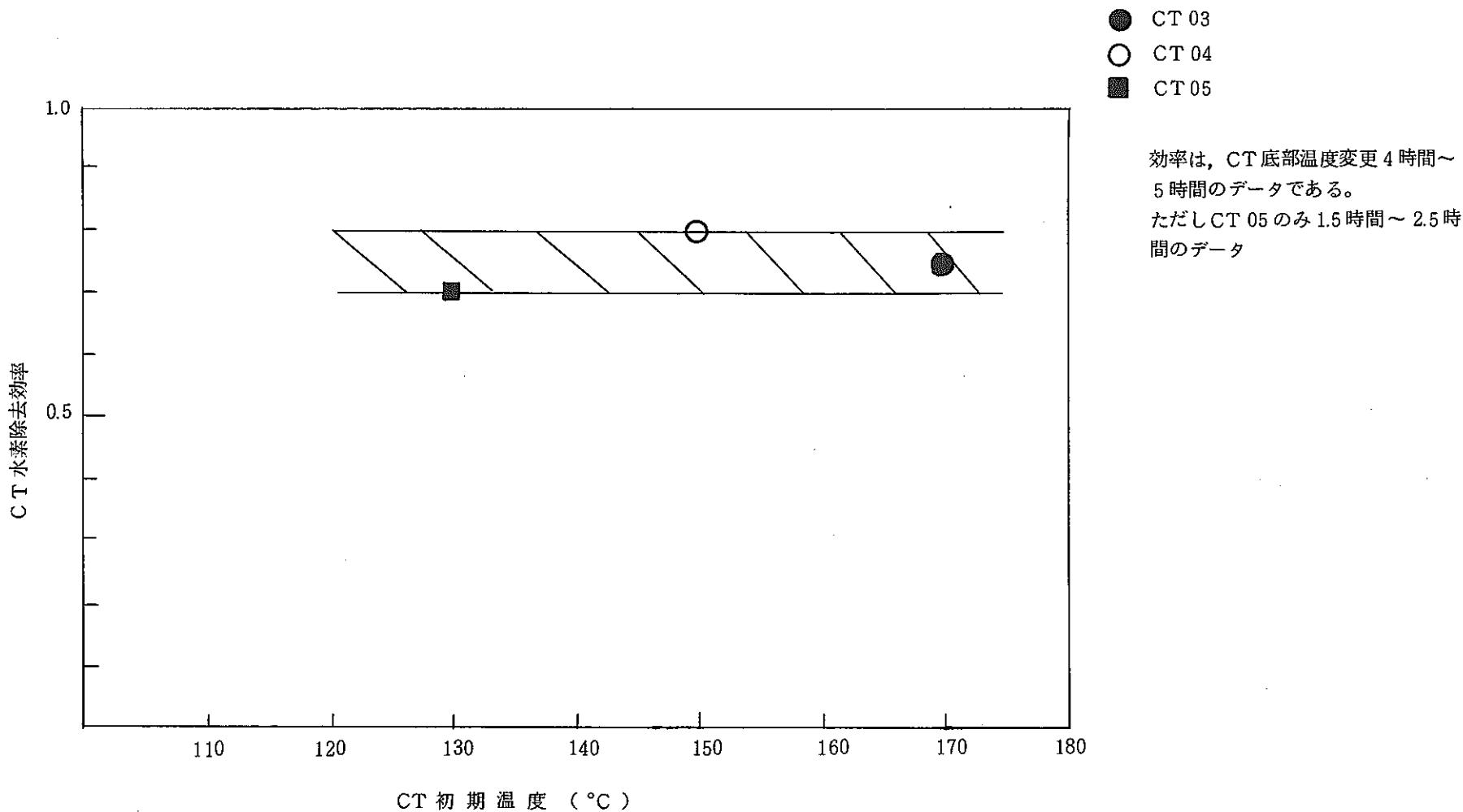


図 3-9 CT 水素除去と CT 底部温度変更後の経過時間との関係

Fig. 3-9 The Relation between Removal Efficiency of Hydrogen by CT
and the Time Elapsed since Changing CT Bottom Temperature



効率は、CT 底部温度変更 4 時間～
5 時間のデータである。
ただし CT 05 のみ 1.5 時間～2.5 時
間のデータ

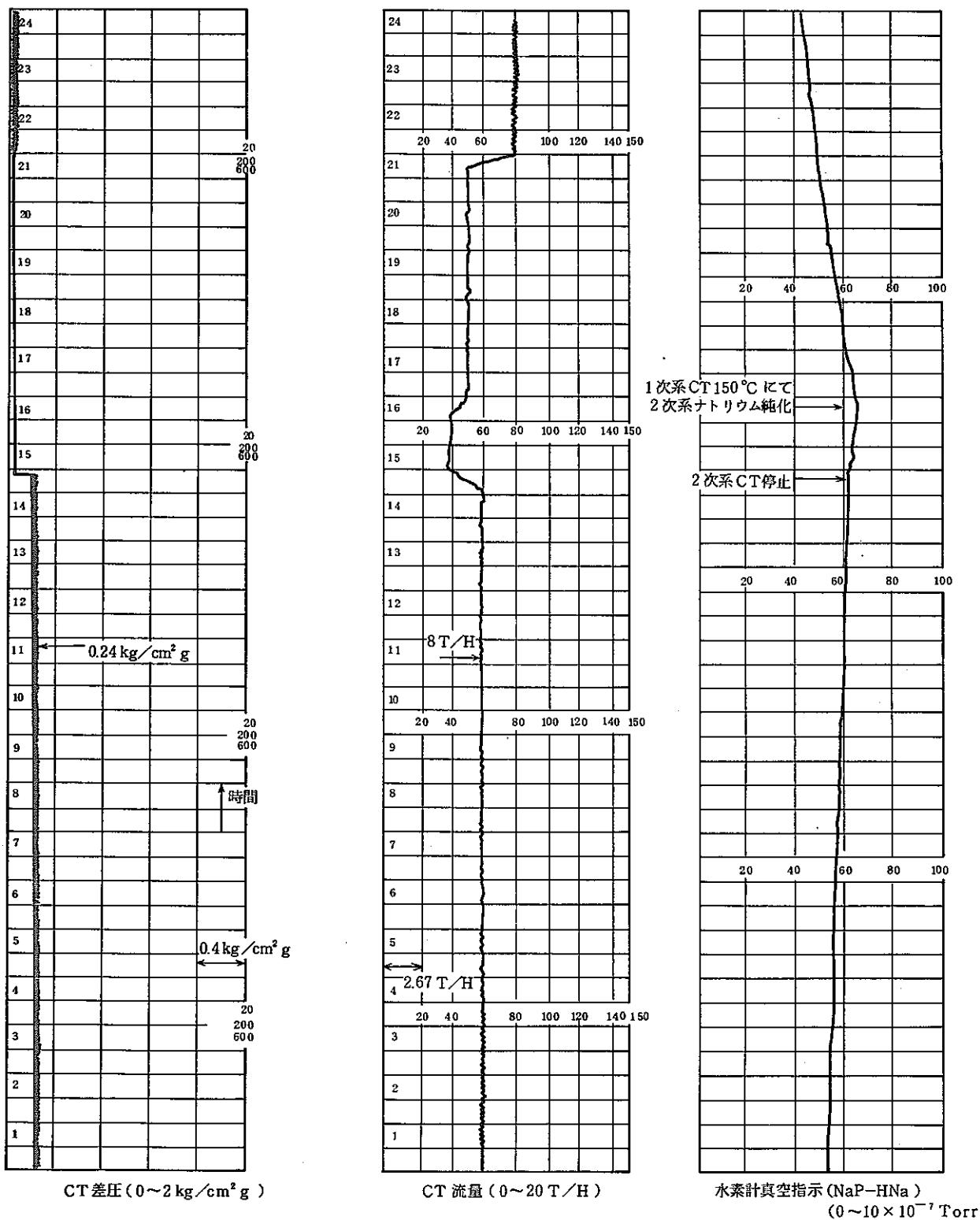


図 3-11 コールドトラップ異常時のプラントプロセス値(3)

Fig. 3-11 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (3)

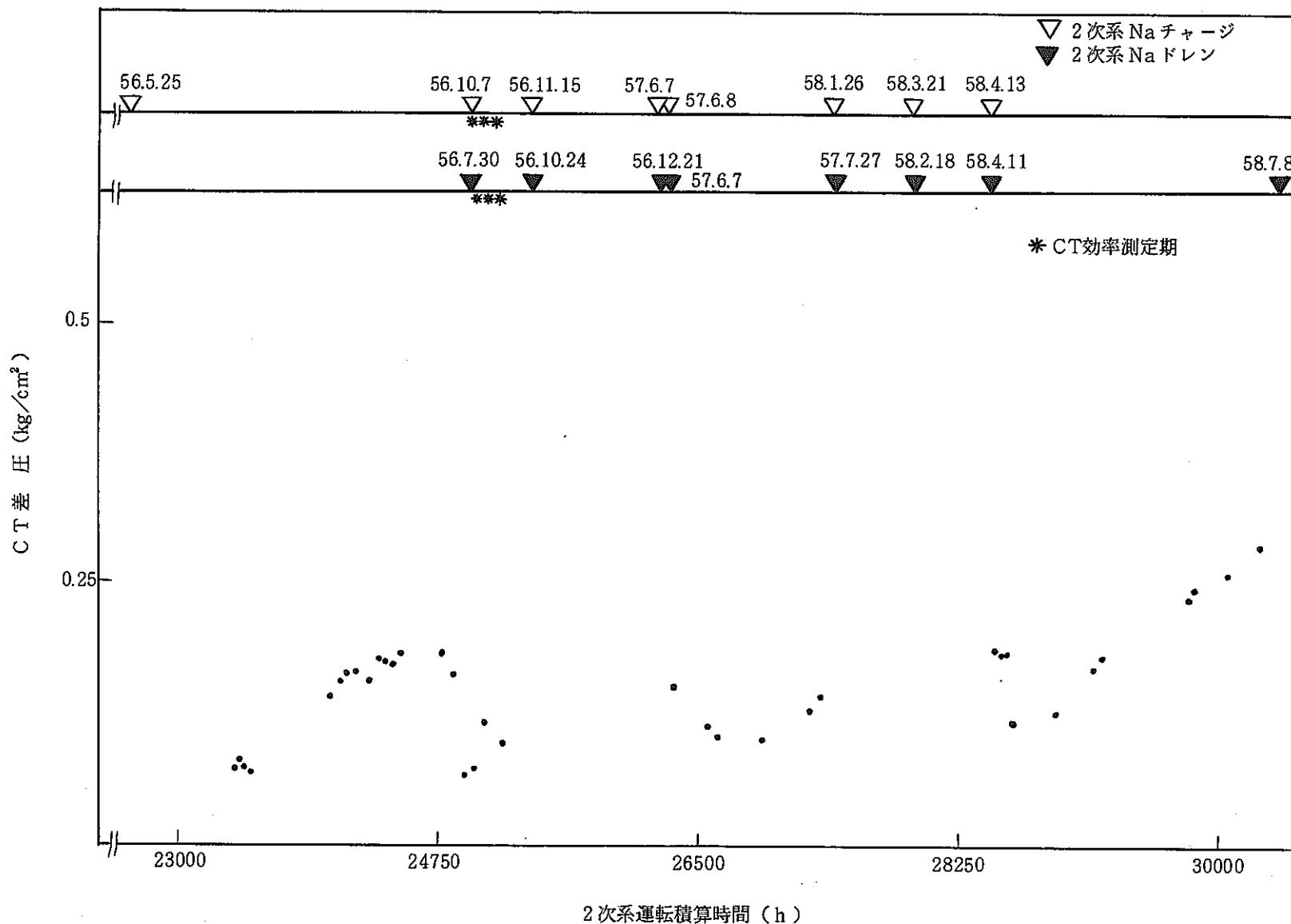


図 3-12 コールドトラップの差圧変化

Fig. 3-12 Change of Differential Pressure of CT

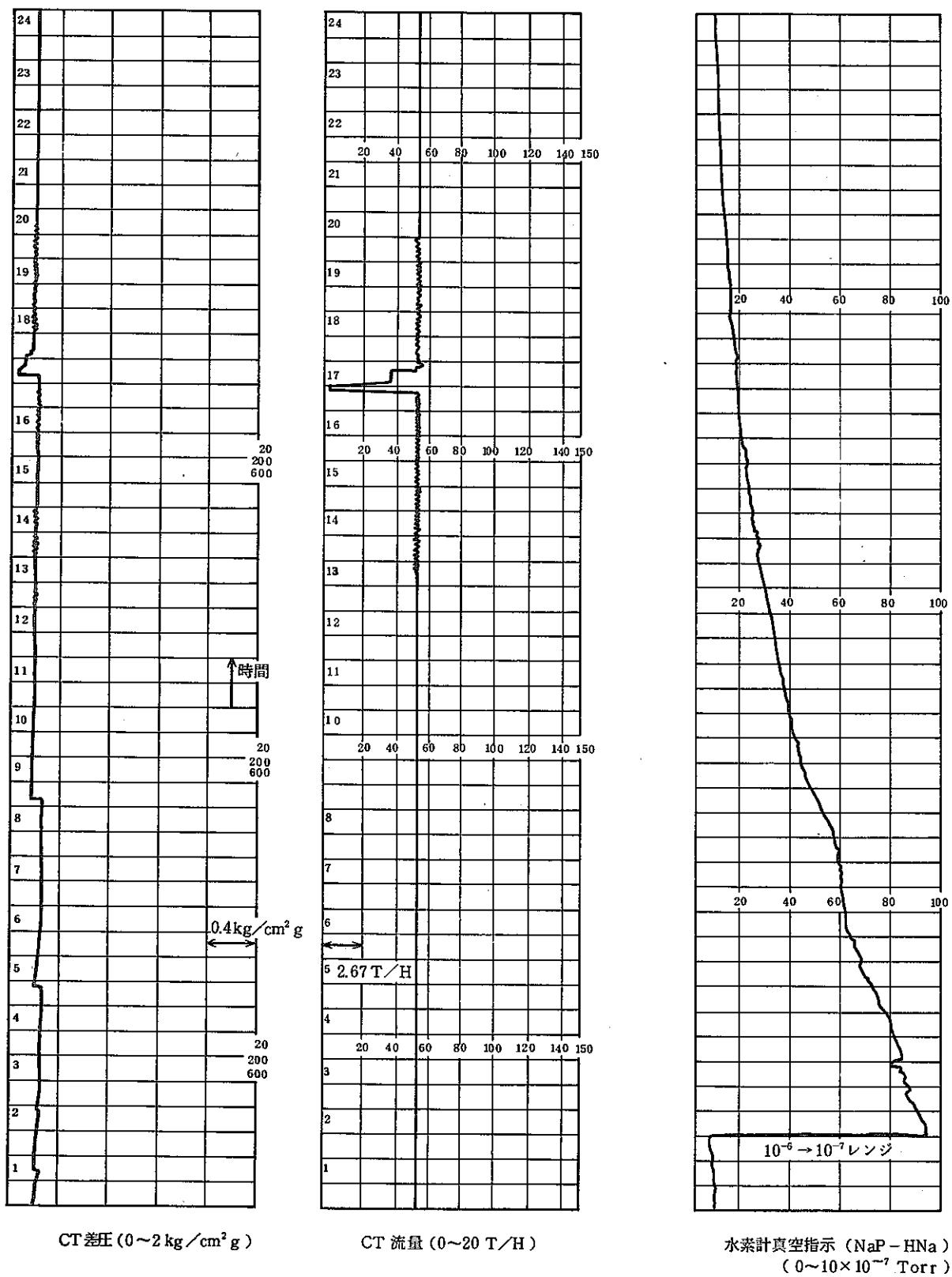


図 3 - 13 コールドトラップ異常時のプラントプロセス値(1)

Fig. 3-13 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (1)

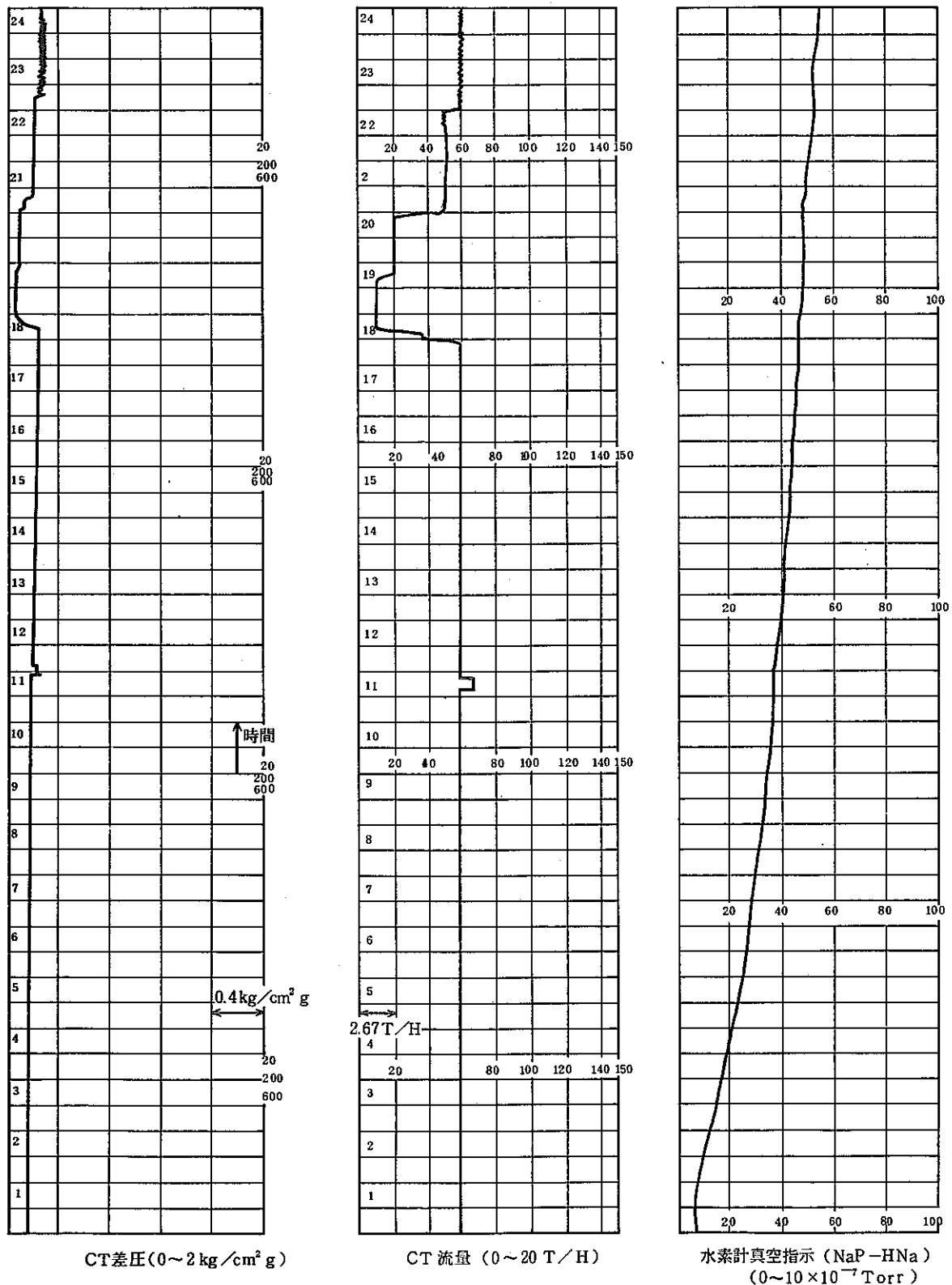


図 3-14 コールドトラップ異常時のプラントプロセス値 (2)

Fig. 3-14 Plant Process Indication in the Abnormal Situation for CT (2)

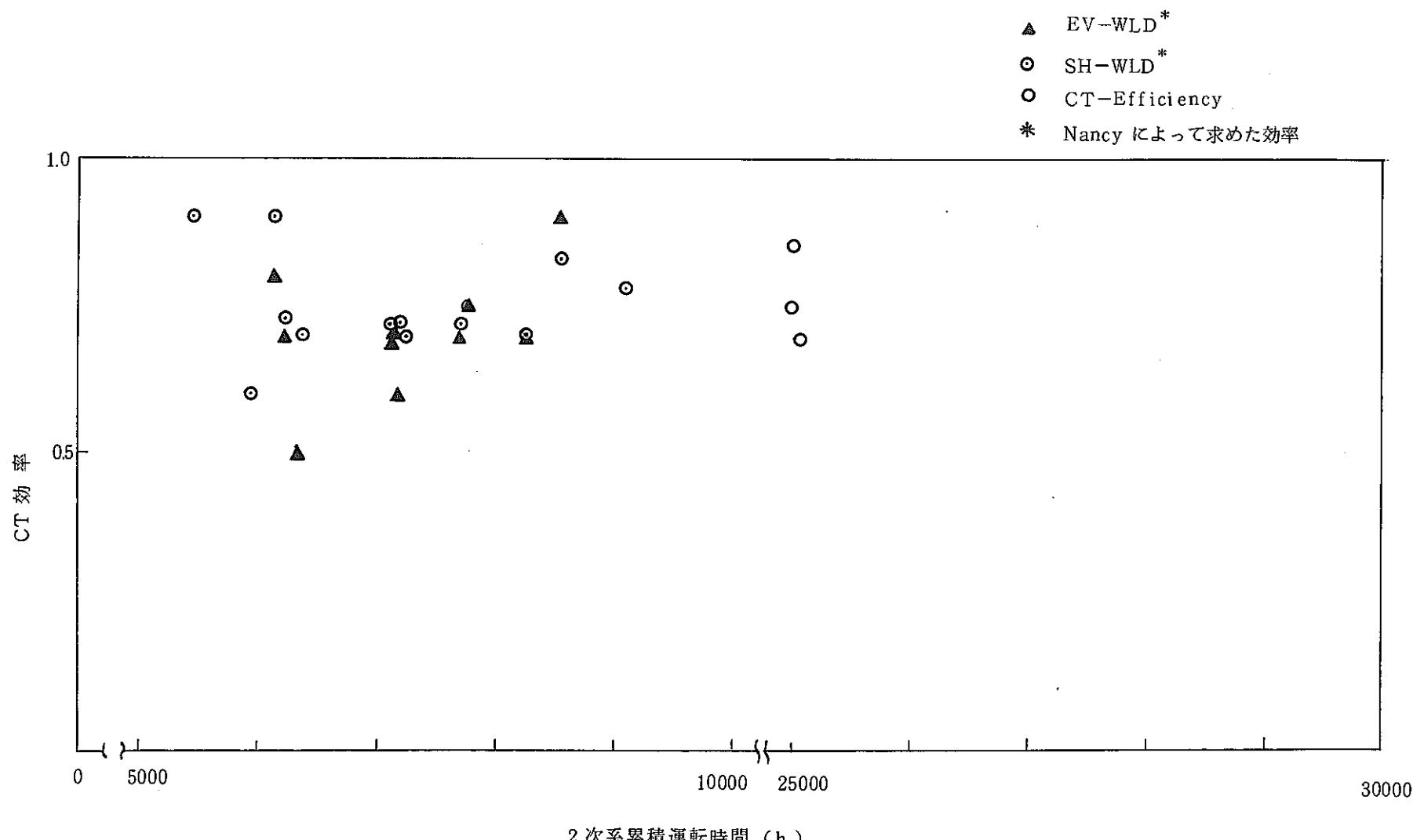


図 3-15 コールドトラップ水素除去効率の経時変化

Fig. 3-15 Change with Passage of Time of Removal Efficiency of Hydrogen by CT

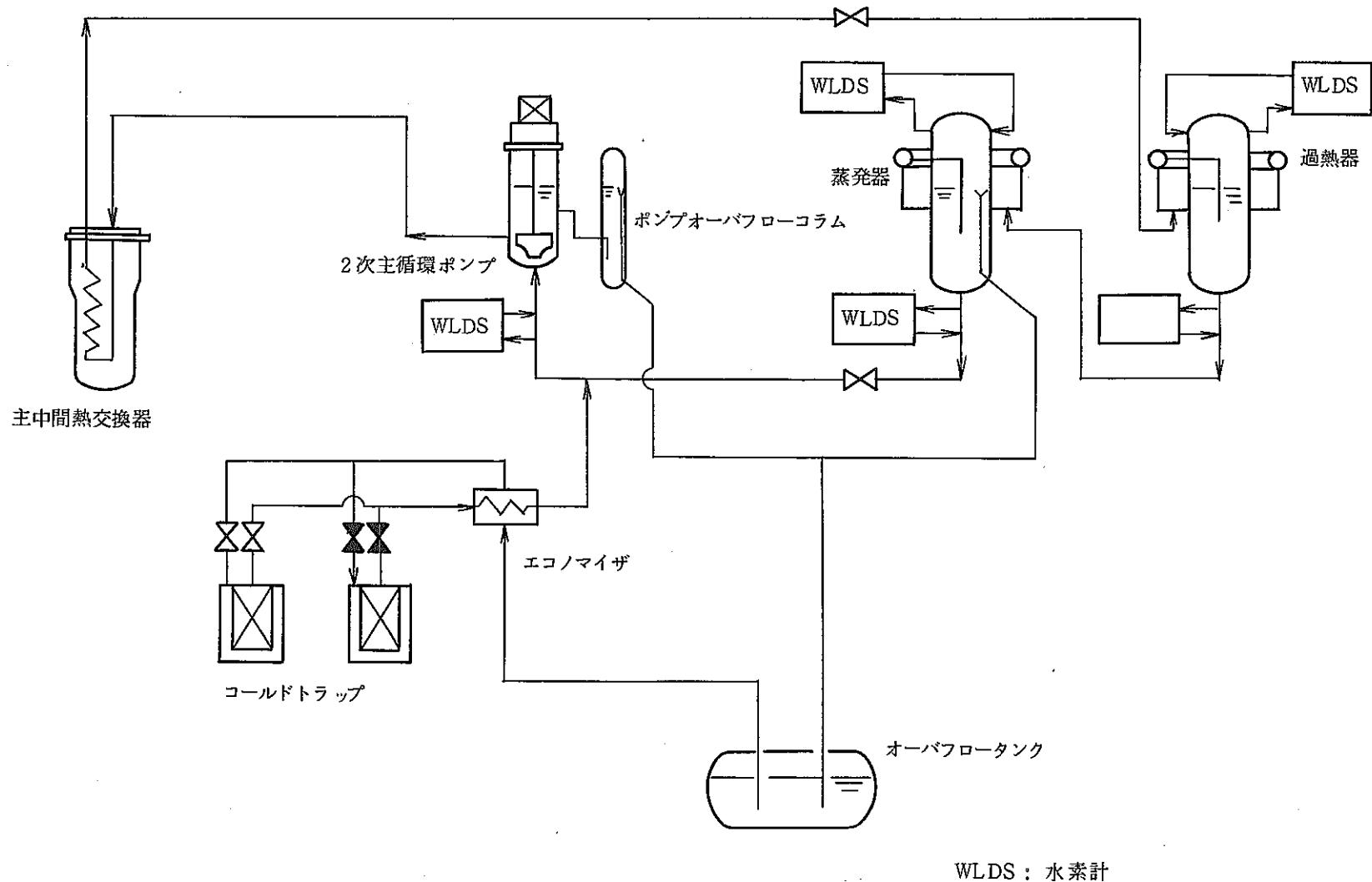
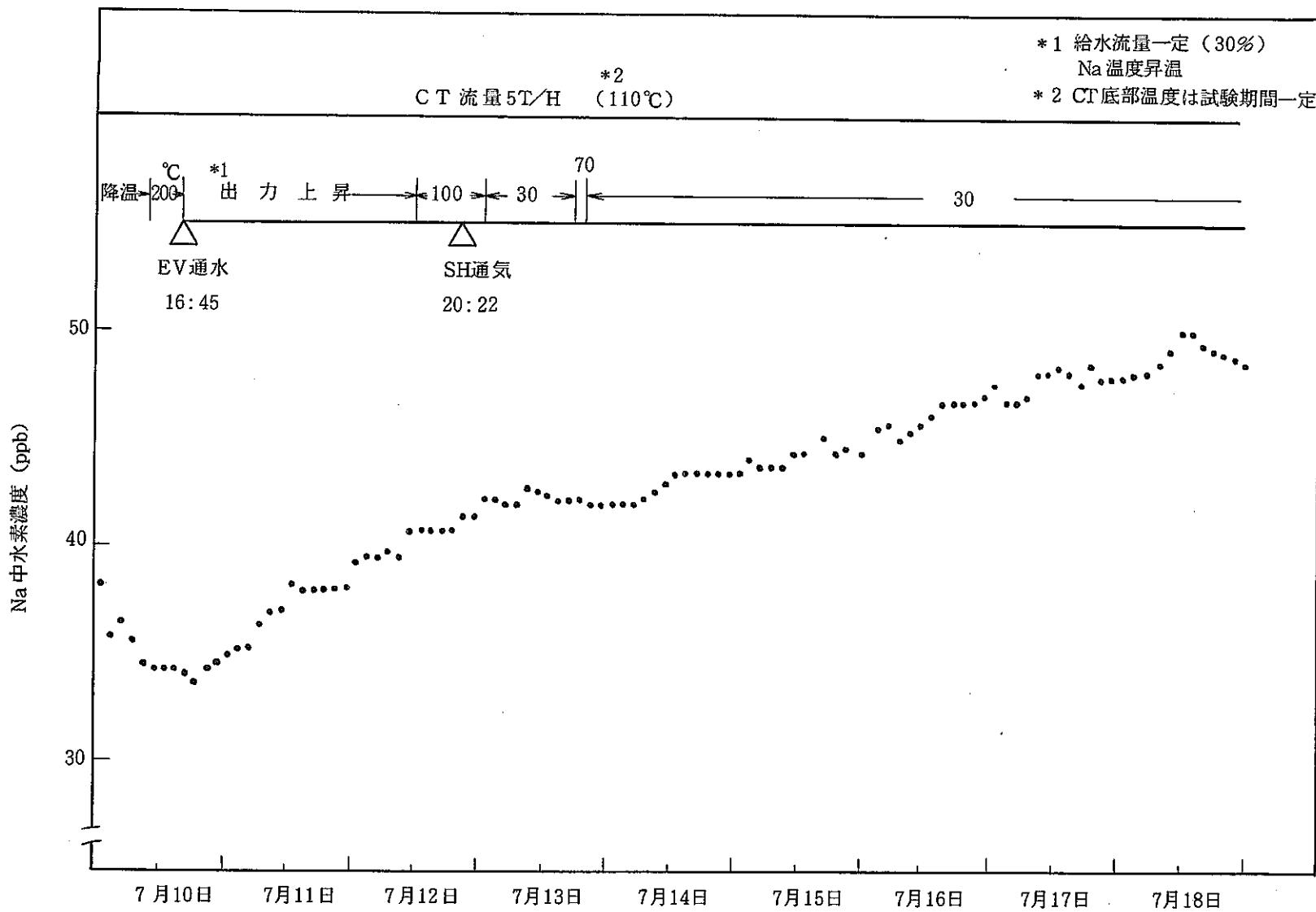


図 3-16 「もんじゅ」 2次系系統概略図

Fig. 3-16 Schema of Monju Secondary System



1982年

図 4-1(1) 蒸気発生器起動停止時のNa中水素濃度挙動

Fig. 4-1(1) Change of Hydrogen Concentration in Sodium at Start and Stop of SG

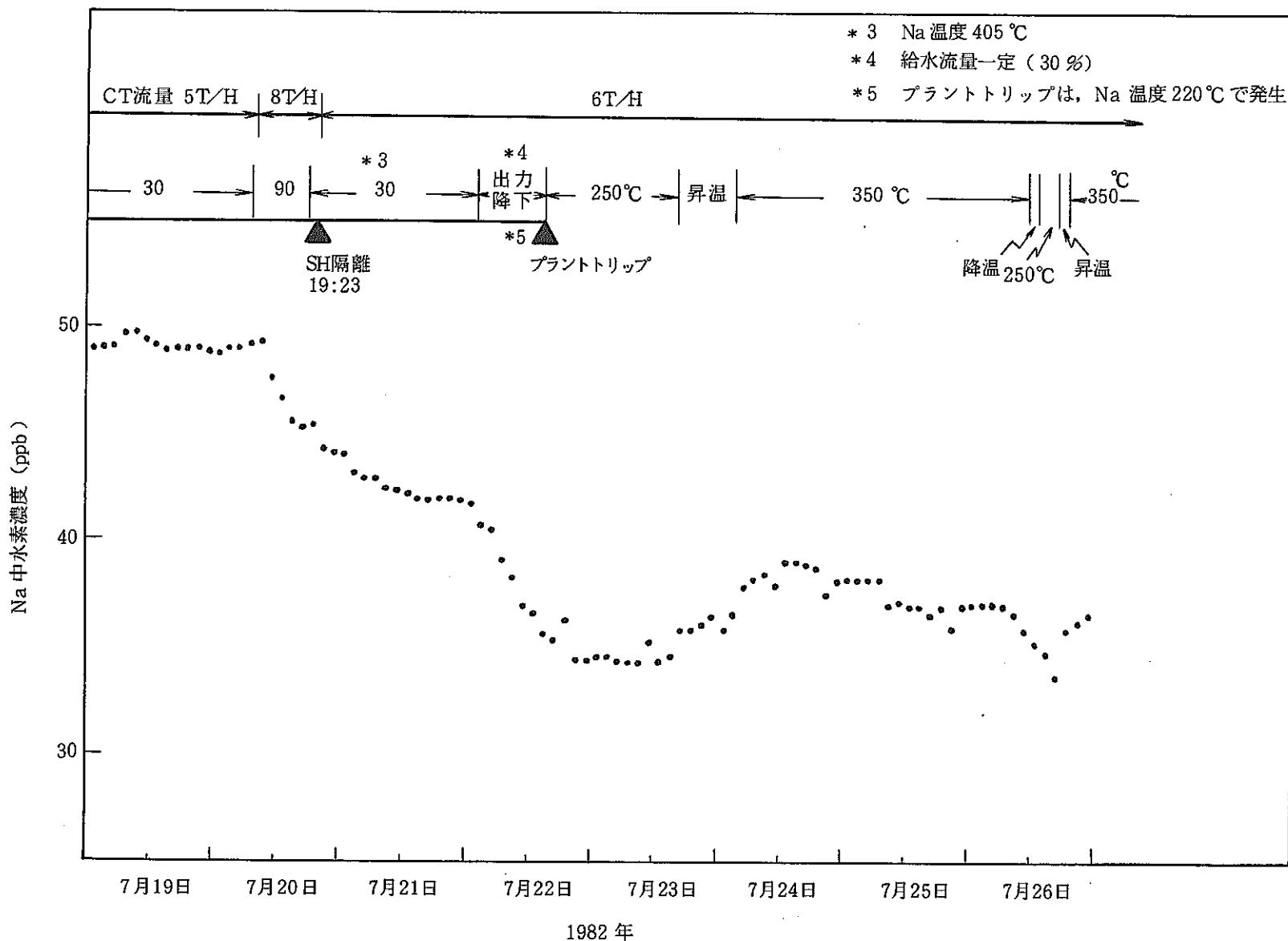


図 4-1(2) 蒸気発生器起動停止時の Na 中水素濃度挙動

Fig. 4-1(2) Change of Hydrogen Concentration in Sodium at Start and Stop of SG

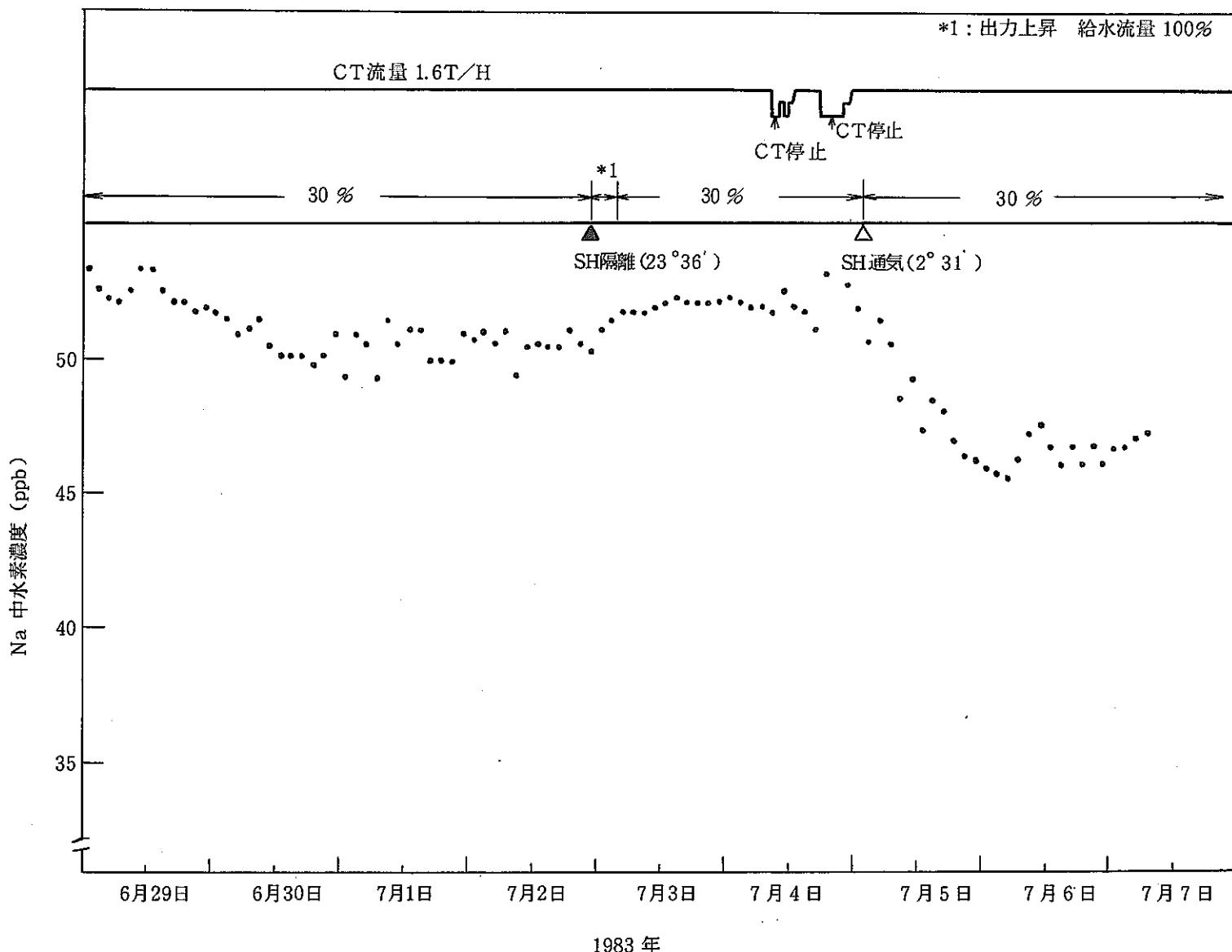


図 4-2 通常運転中のナトリウム中水素濃度挙動

Fig. 4-2 Change of Hydrogen Concentration in Sodium during Ordinary Operation

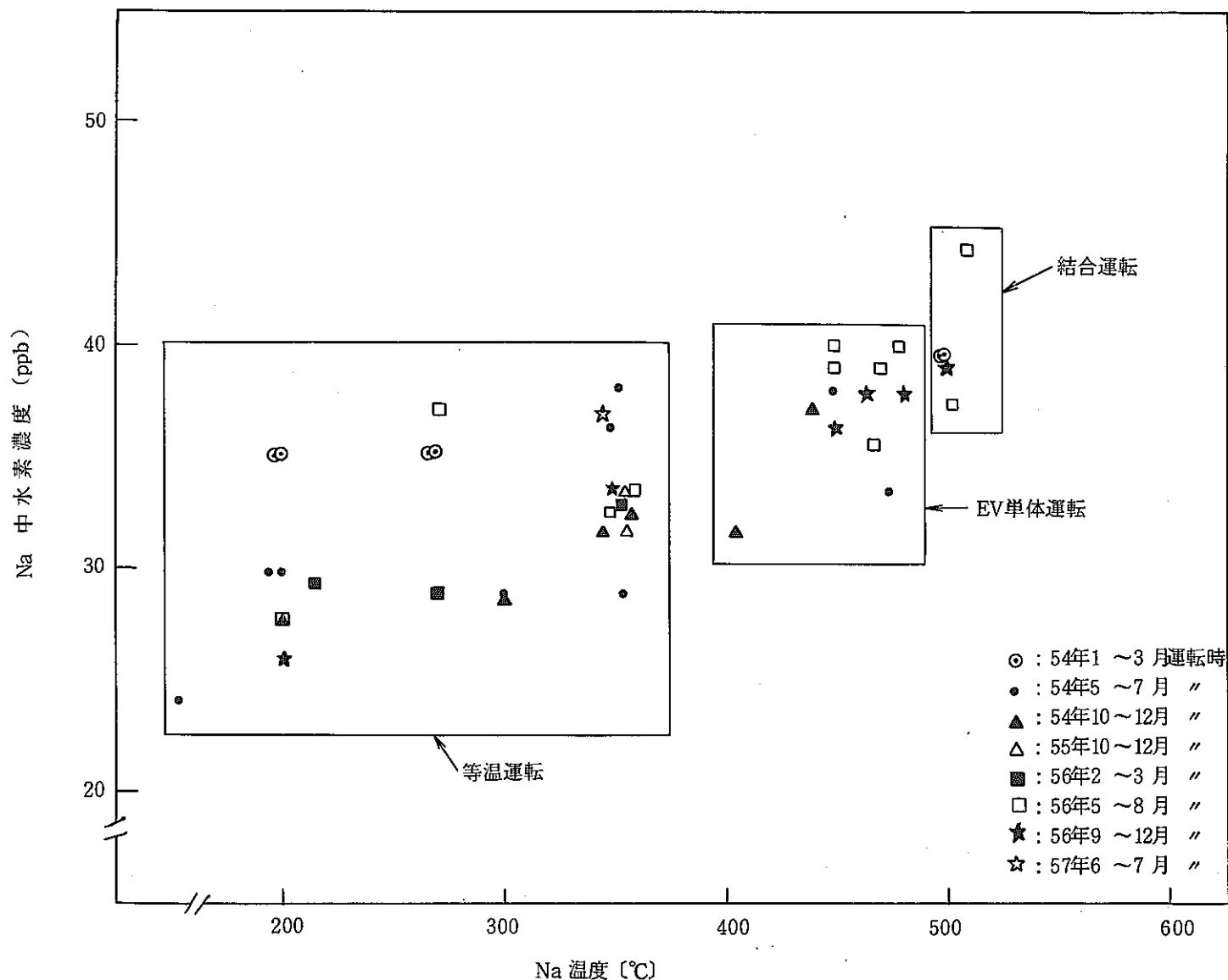


図 4-3 ナトリウム中水素濃度と温度の関係

Fig. 4-3 The Relation between Hydrogen Concentration in Sodium and Temperature

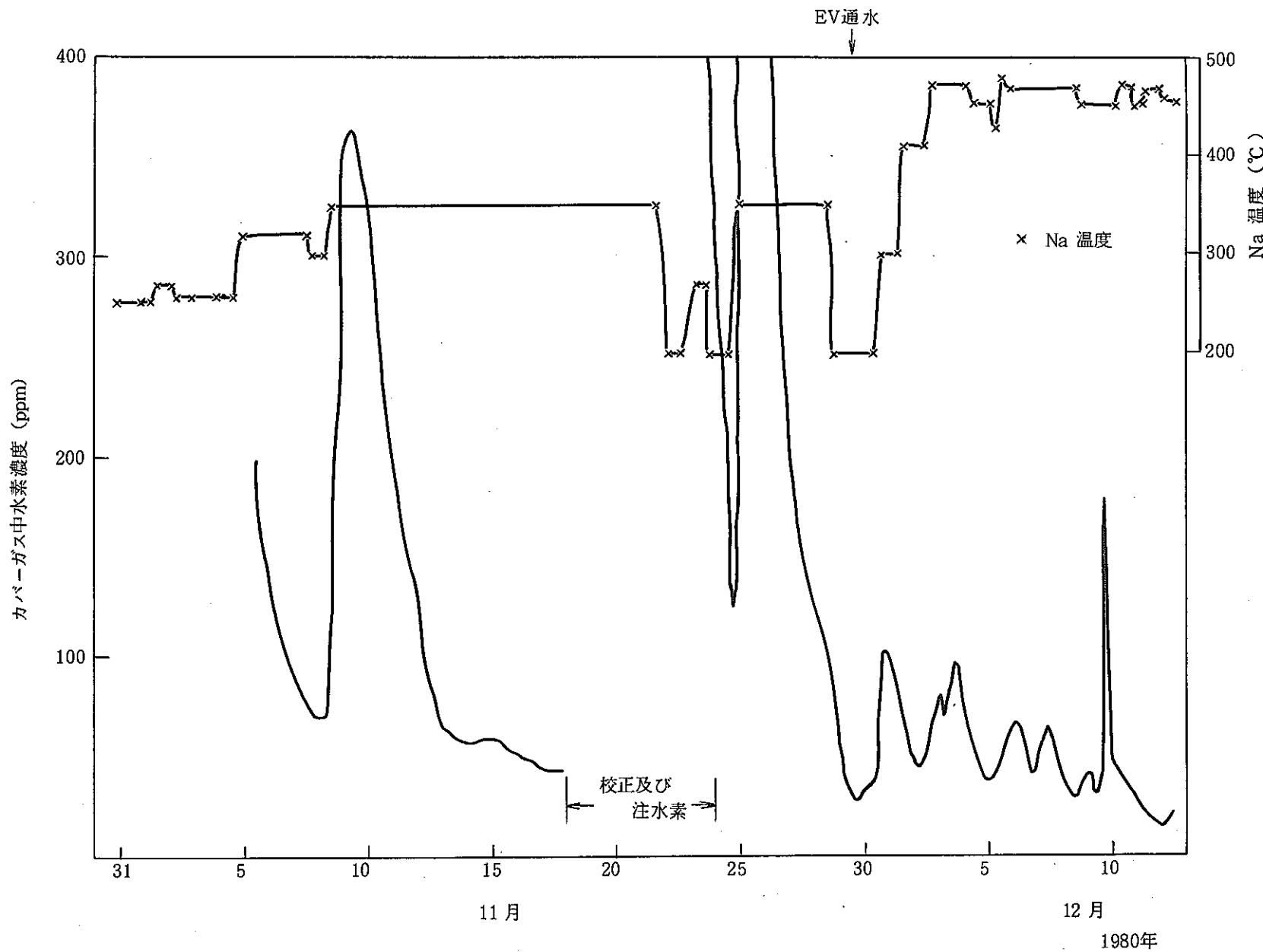
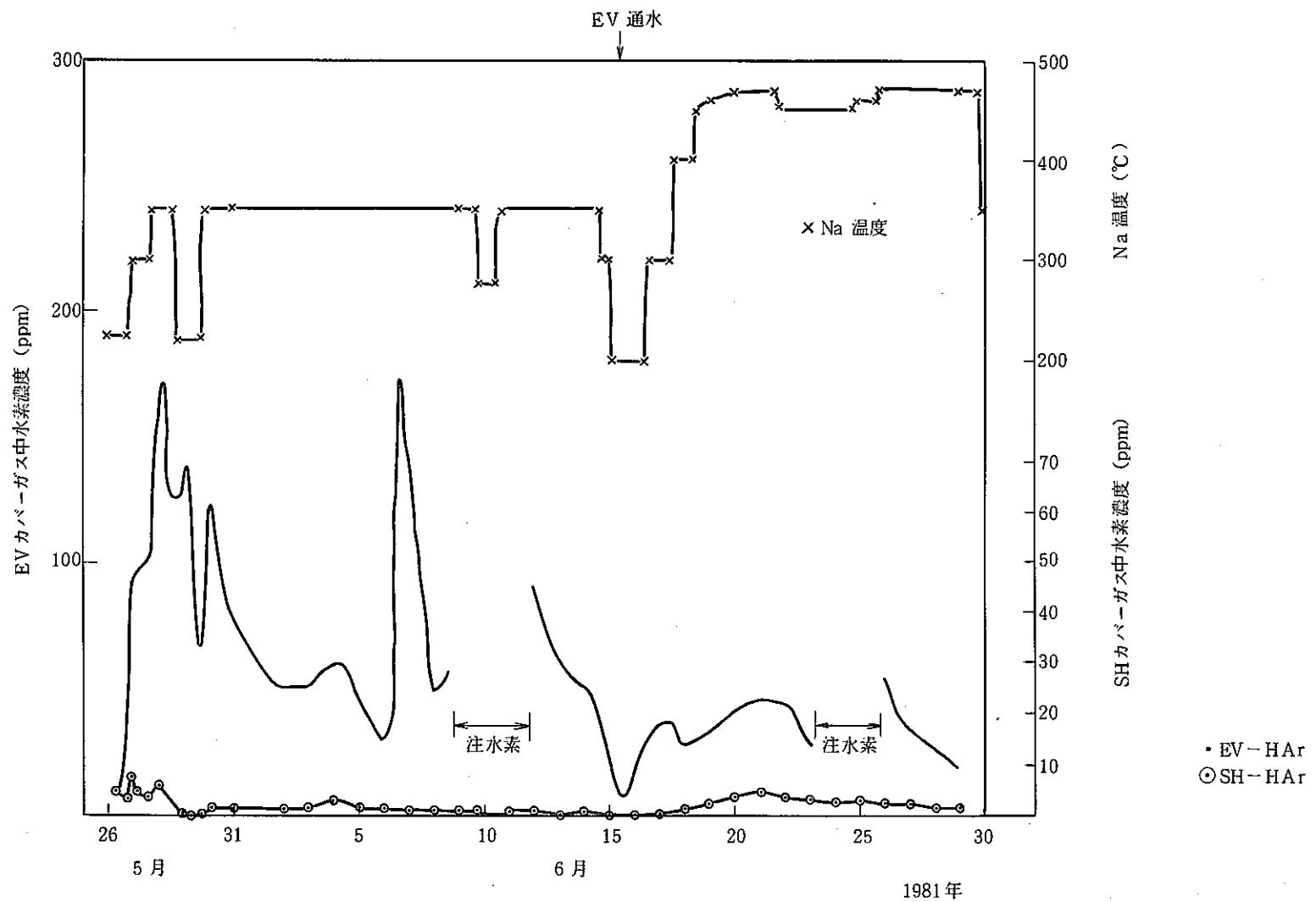


図 4-4 1980 年 10 月～12 月の EV カバーガス中水素濃度

Fig. 4-4 Change of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator
from October to December in 1980



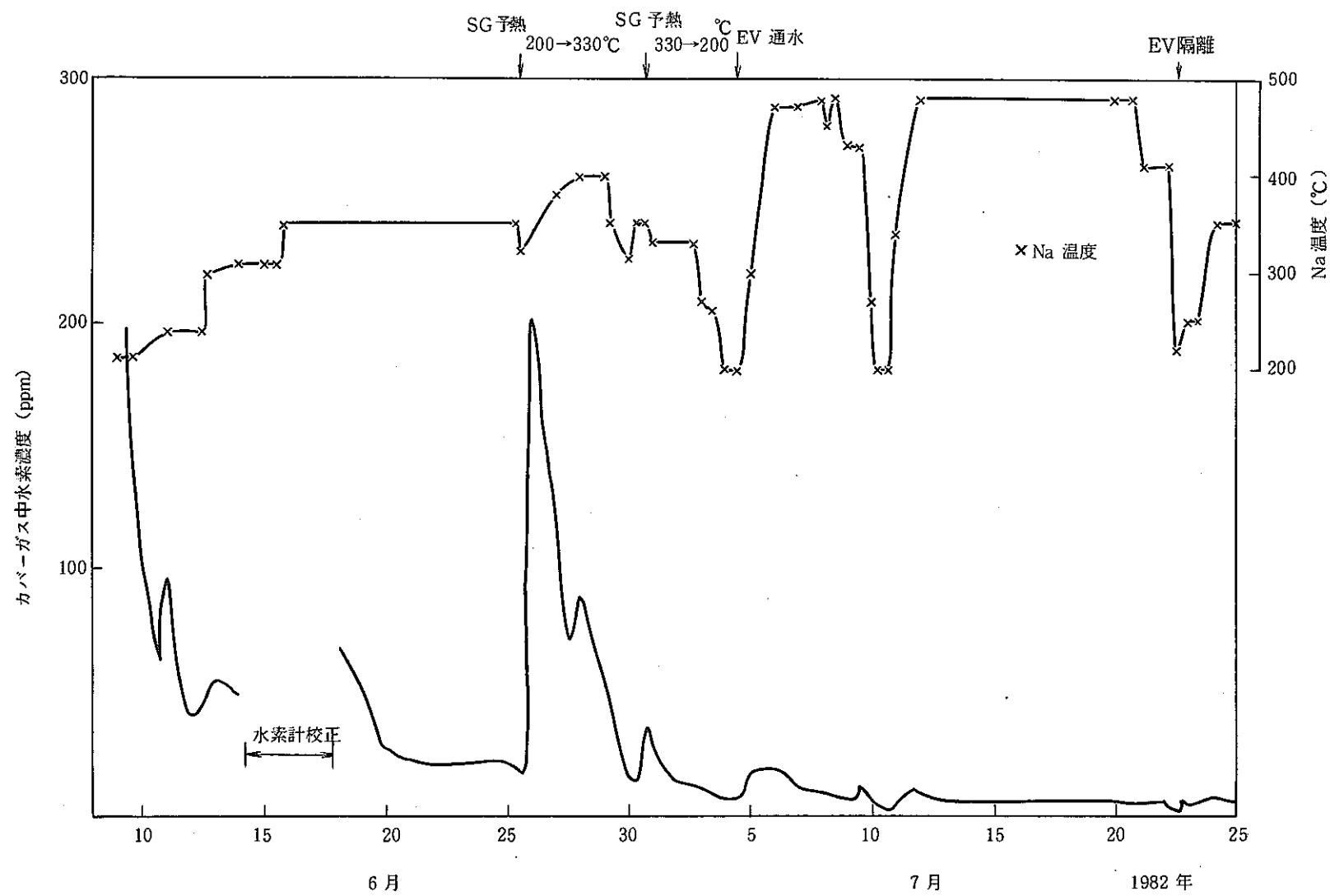


図4-6 1982年6月～7月のEVカバーガス中水素濃度

Fig. 4-6 Change of Hydrogen Concentration in Cover Gas in Evaporator
from June to July in 1982

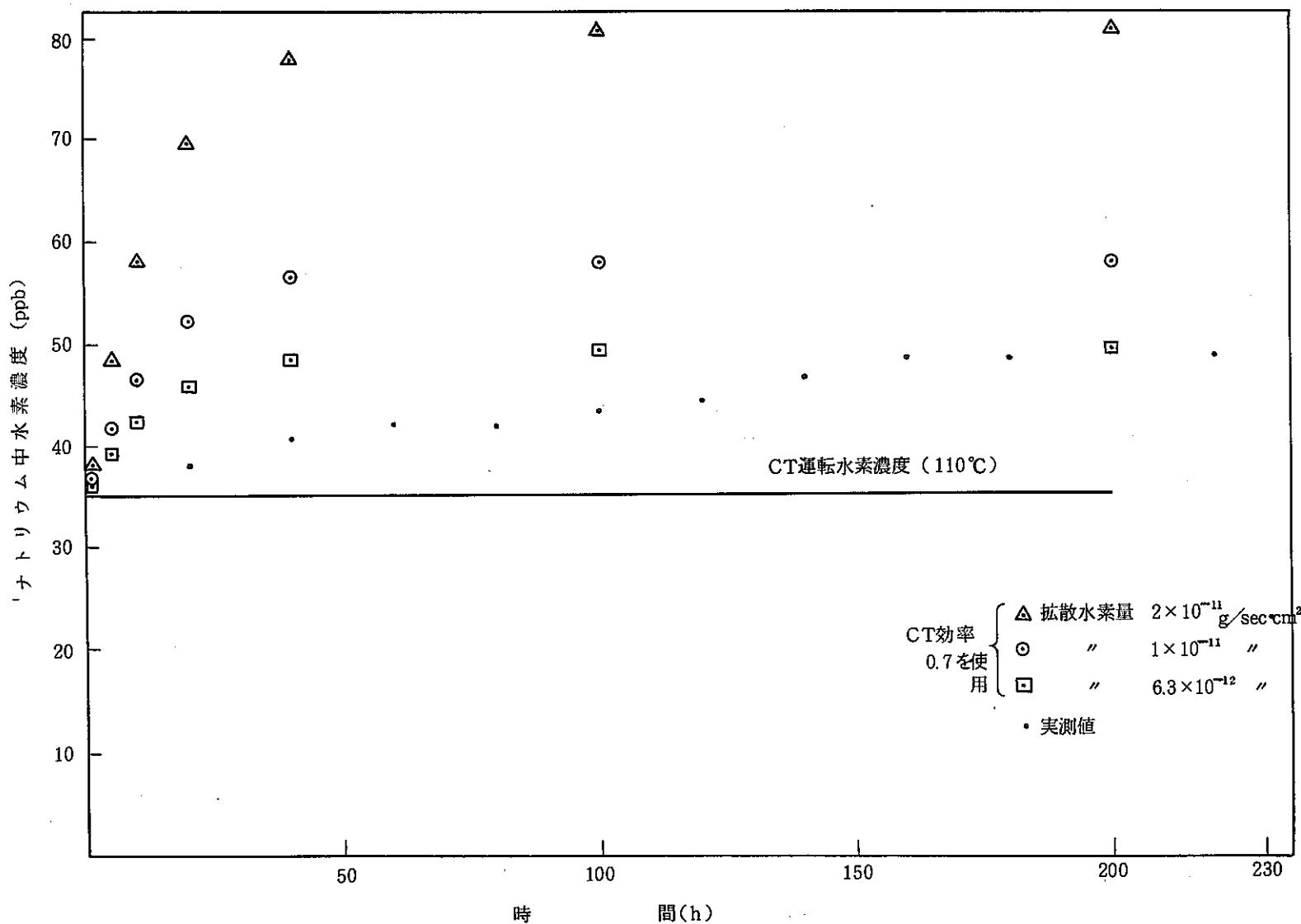


図4-7 ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度 (50MW SGTF)

Fig. 4-7 Hydrogen Background Concentration in Sodium (50MW SGTF)

	1976												1977												1978												備 考																																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																
運転状態	プラントトリップ												プラントトリップ												プラントトリップ												プラントトリップ																																															
試験期間	プラントトリップ												プラントトリップ												プラントトリップ												プラントトリップ																																															
第1期試験																																																																																				
第2期試験																																																																																				
第3期試験																																																																																				
第4期試験																																																																																				
第5期試験																																																																																				
第6期試験																																																																																				

図 5-1(1) 50MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過

Fig. 5-1(1) Detail of Operation and Tests for Hydrogen Flux through
Tubes in 50MW SGTF

- 主目的
 - ・拡散水素量の経年変化
 - ・拡散水素量と蒸気圧力、給水流量、ナトリウム温度の依存性。
- 特記事項
 - ・チャージ後のプラグ温度 141.5°C
 - ・校正 $C_H = 19 I_p^{0.76}$ (EV-HNa)
 - $C_H = 17 I_p^{0.82}$ (SH-HNa)
- 主目的 同上
- 特記事項
 - ・チャージ時のプラグ温度 141.5°C
 - ・校正式 $C_H = 31.9 I_p^{0.552}$ (EV-HNa)
 - $C_H = 48.8 I_p^{0.552}$ (SH-HNa)
- 主目的 同上
- 特記事項
 - ・チャージ後のプラグ温度 187°C
 - ・校正式 $C_H = 31.9 I_p^{0.552}$ (EV-HNa)
 - $C_H = 48.8 I_p^{0.552}$ (SH-HNa)
- 主目的
 - ・拡散水素量の経年変化
 - ・蒸気発生器起動時の挙動
 - ・給水水質の拡散水素への影響
- 特記事項
 - ・プラグ温度 151.5°C
 - ・2次NaP不調の為プラント停止
 - ・校正式 $C_H = 47.5 I_p^{0.223}$ (EV-HNa)
 - $C_H = 31.5 I_p^{0.608}$ (SH-HNa)
- 主目的 その1 201°C
 - ・プラグ温度 その2 120°C
 - ・試験中プラントトリップ多発
 - ・校正式 $C_H = 16.1 I_p^{0.804}$ (SH-HNa)
 - その1 $C_H = 7.7 I_p^{0.703}$ (EV-HNa)
 - その2 $C_H = 26.6 I_p^{0.689}$
 - $C_H = 14.5 I_p^{0.601}$
- 主目的 同上
- 特記事項
 - ・プラグ温度 120°C
 - ・第1回目試験で3回全系トリップ
 - ・第2回目試験で蒸発器水素計イオンポンプが 180 μA で暴走。
- ・校正式 $C_H = 14.0 I_p^{0.508}$ (SH-HNa)

図 5-1(2) 50 MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過

Fig. 5-1(2) Detail of Operation and Tests for Hydrogen Flux through Tubes in 50MW SGTF

	1982												1983												備 考													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12														
運転状態 試験期間	プラントトライアップ												プラントトライアップ																									
第 12 期 試 験																									○主目的 ・拡散水素量の経年変化 ○特記事項 ・プラグ温度 185°C ・校正式 ・ $C_H = 1.08 \times 10^9 (IG)^{1.11}$ (EV-HNa) ・ $C_H = 26.54 (IP)^{0.763}$ (Nap-HNa)													

図 5-1(3) 50 MW蒸気発生器試験施設における運転および拡散水素試験経過

Fig. 5-1(3) Detail of Operation and Tests for Hydrogen Flux through
Tubes in 50MW SGTF

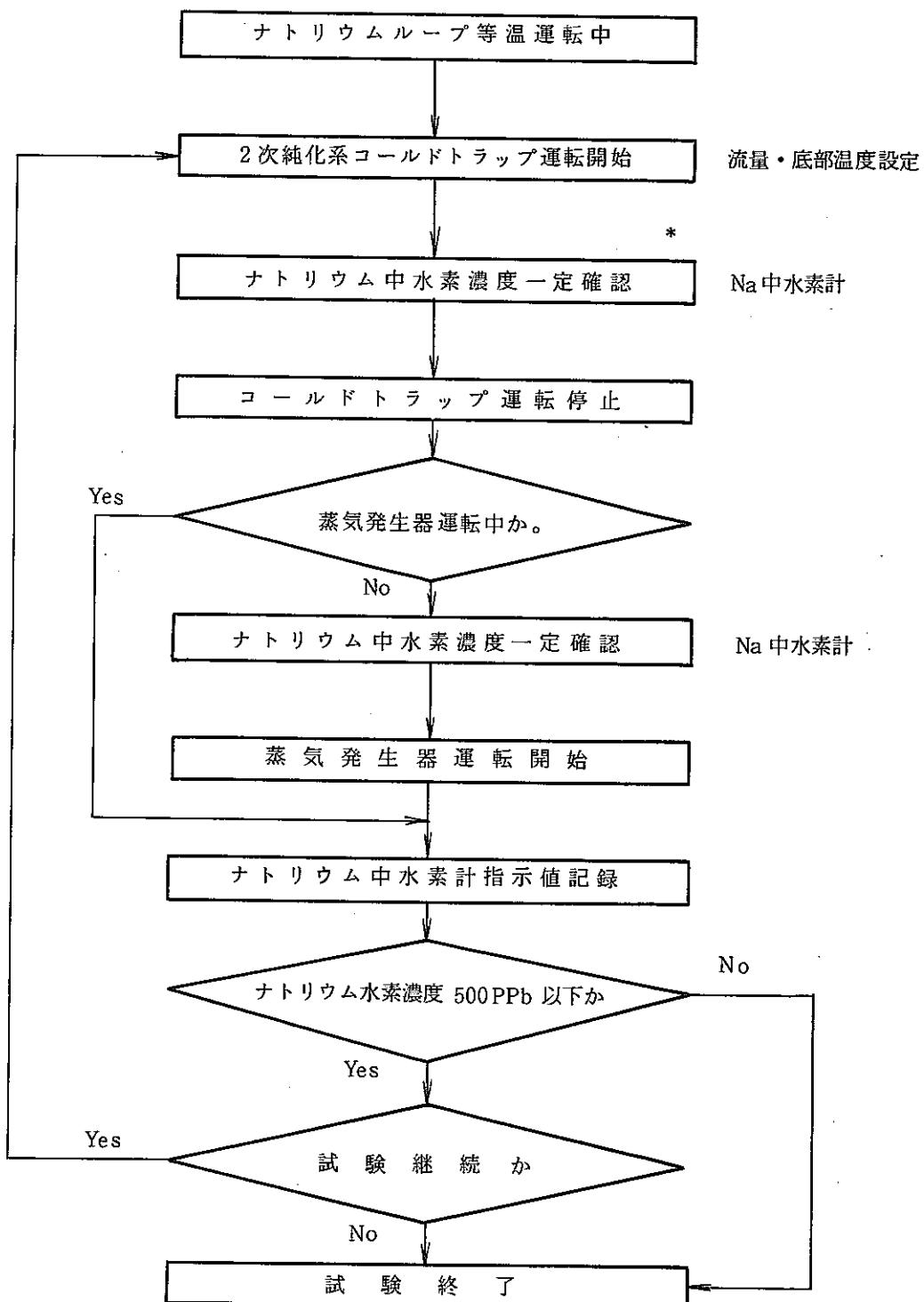


図 5-2 拡散水素量評価試験方法フローチャート

Fig. 5-2 Flow Chart about Method of Evaluation Test for Hydrogen Flux through Tubes

* ヒ ド ラ ジ ン 濃 度 10 PPb 以 下

ナ ト リ ュ ム 温 度 470°C

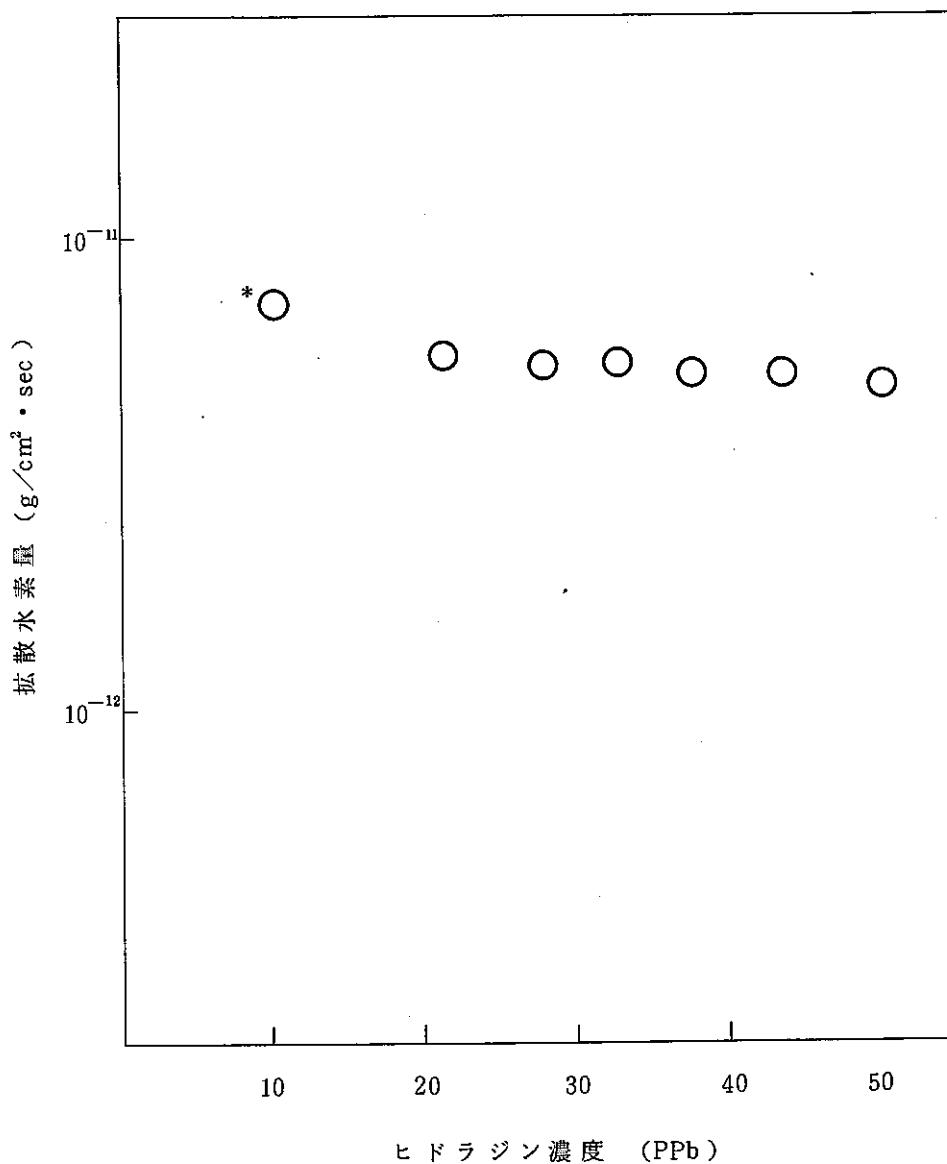


図 5-3 拡散水素量とヒドライジン濃度の関係

Fig. 5-3 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes
and Hydrazine Concentration

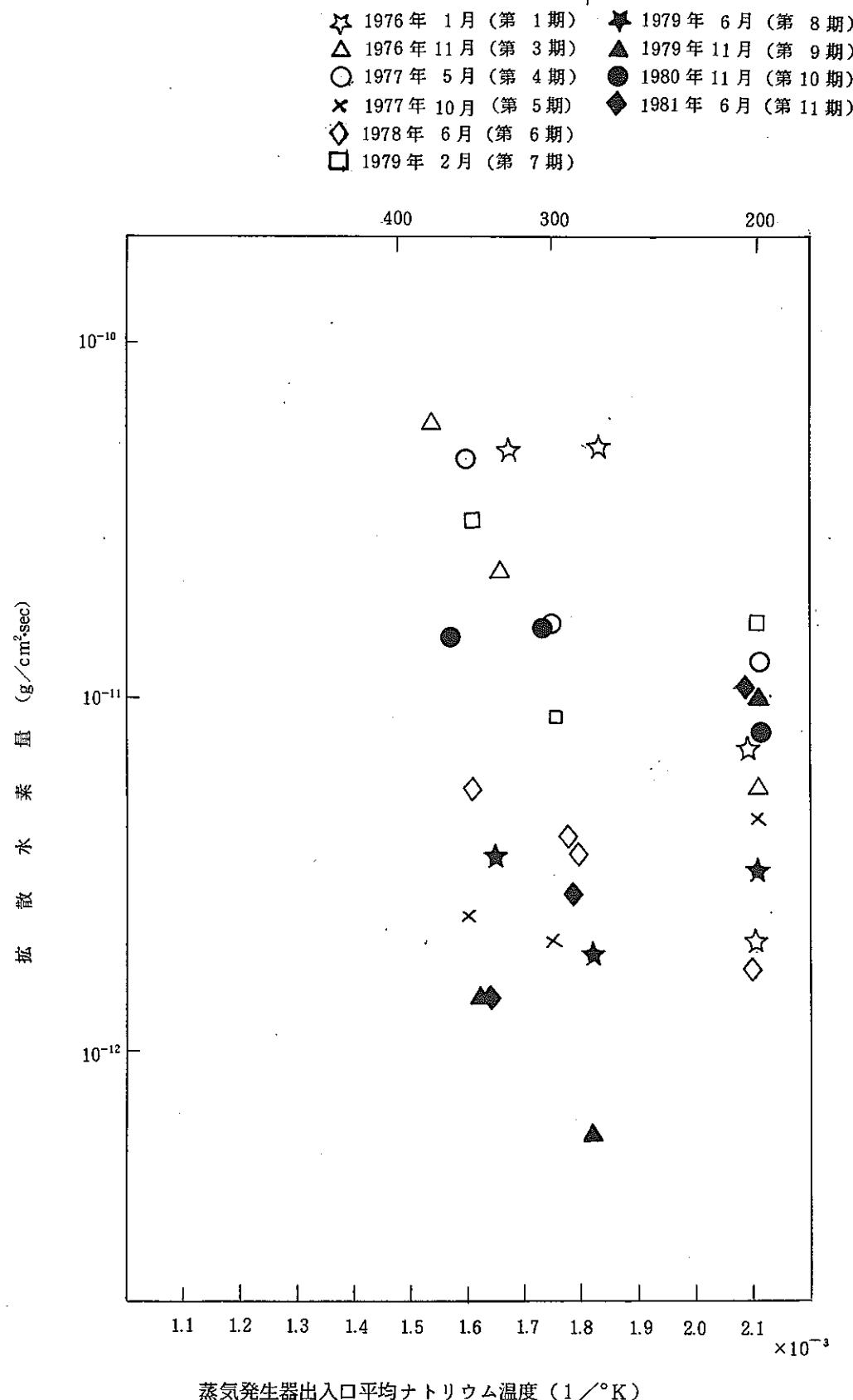


図 5-4 拡散水素量とナトリウム温度の関係

Fig. 5-4 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes and Sodium Temperature

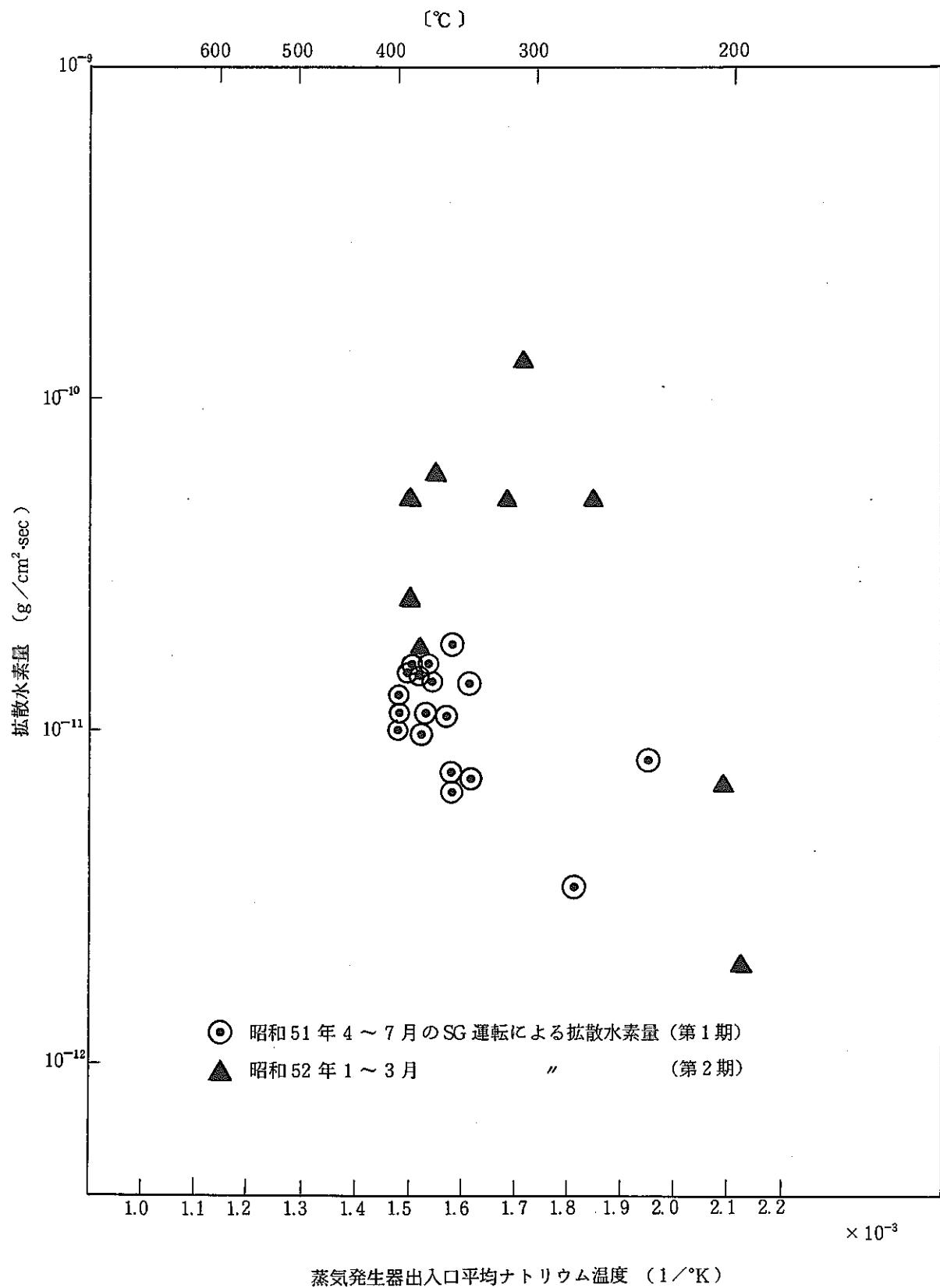


図 5-5 拡散水素量とナトリウム温度の関係（第 1.2 期試験）

Fig. 5-5 The Relation between Hydrogen Flux through Tubes and Sodium Temperature (The First and Second Tests)

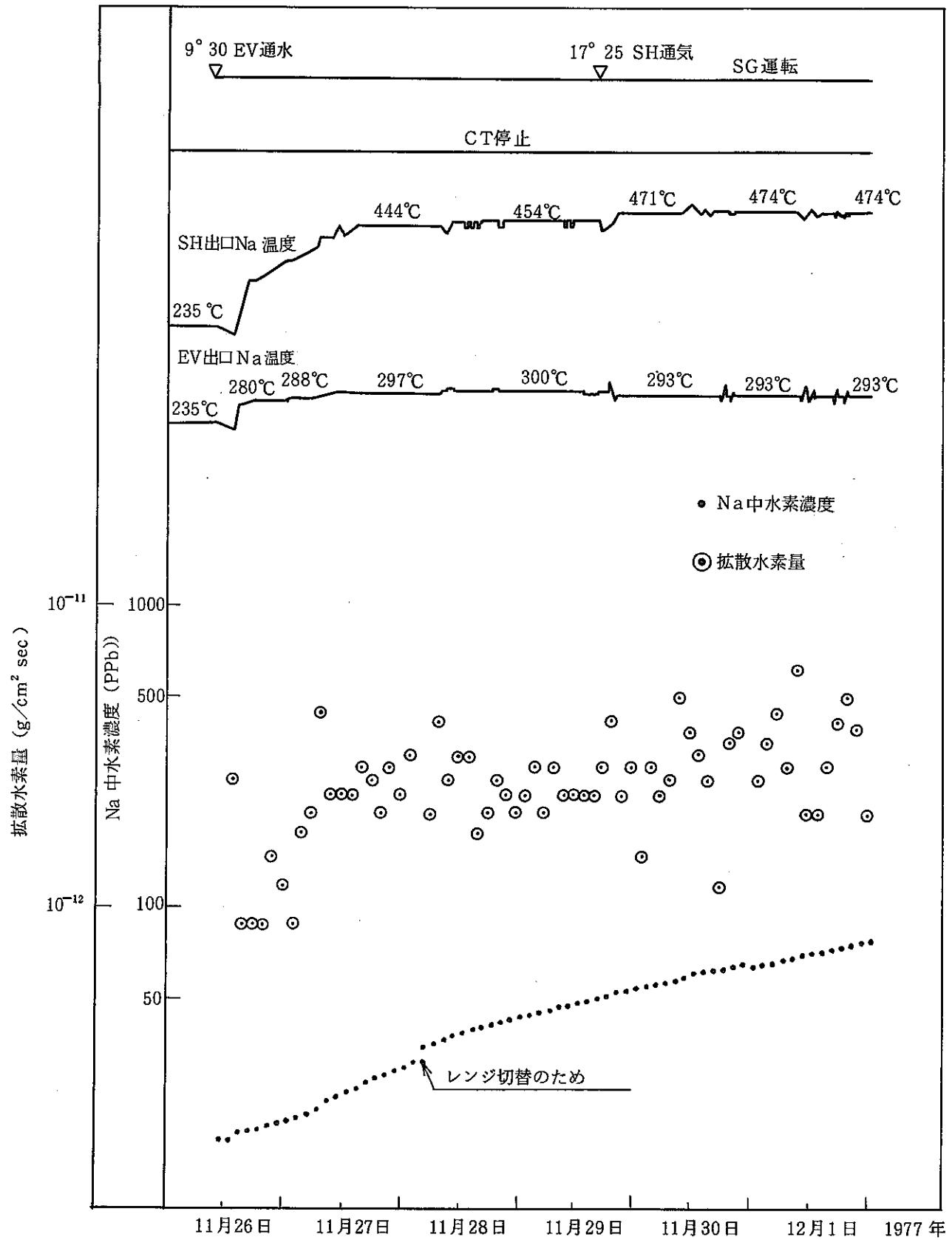


図 5-6(1) 結合運転での拡散水素挙動（第5期）

Fig. 5-6(1) Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Fifth Test)

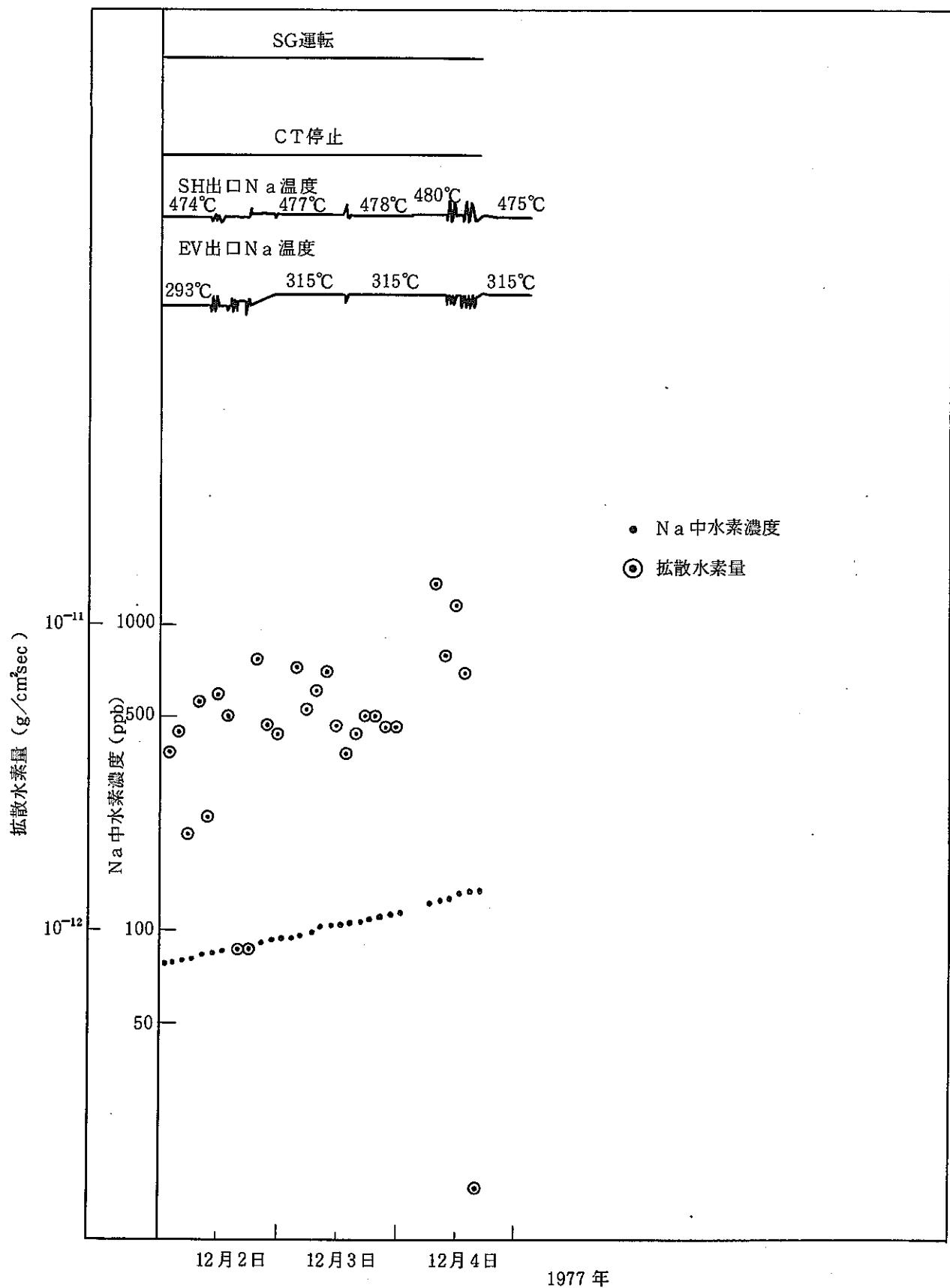


図 5-6(2) 結合運転での拡散水素挙動（第5期）

Fig. 5-6(2) Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Fifth Test)

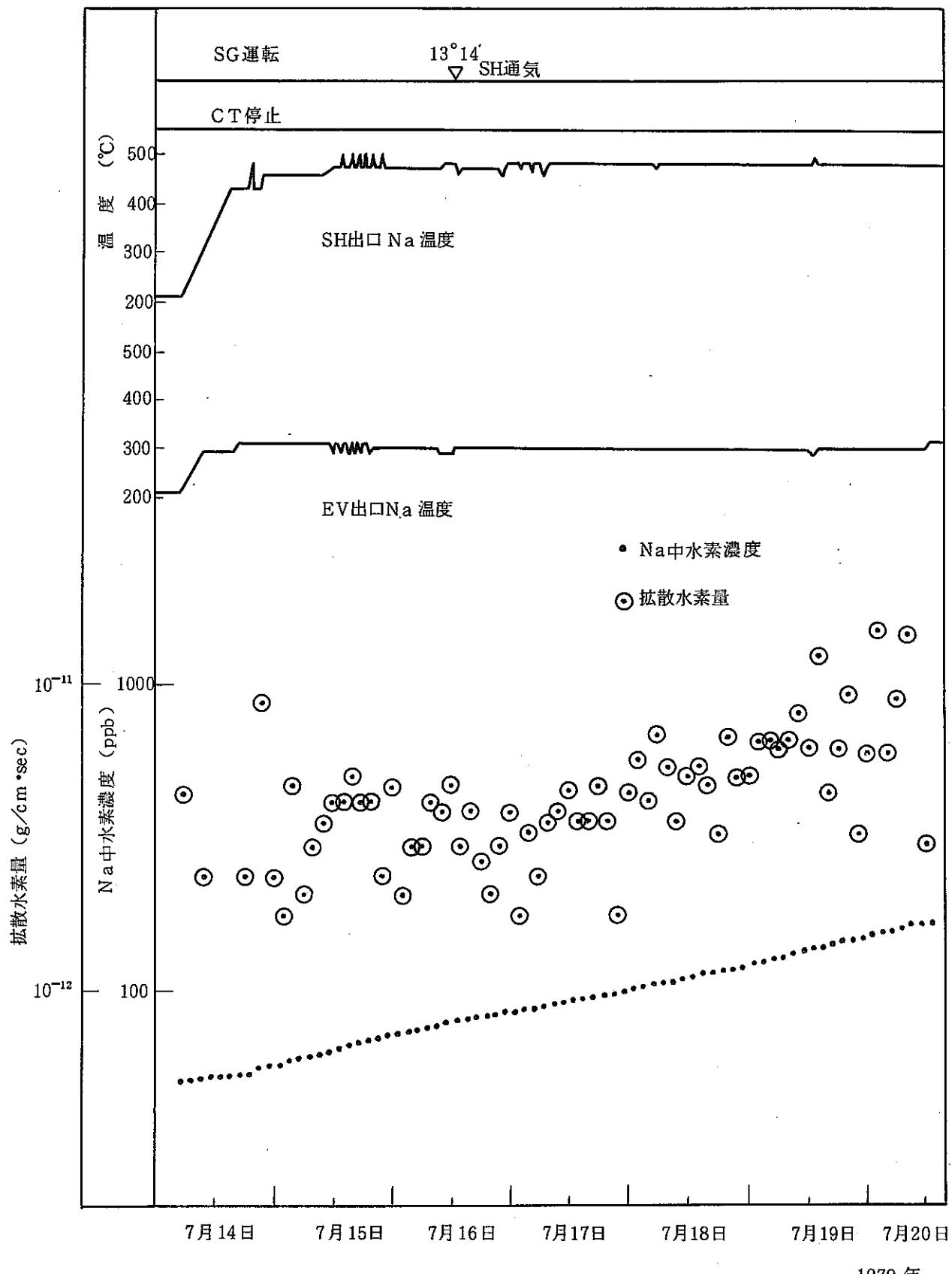


図 5-7 結合運転での拡散水素挙動（第 8 期）

Fig. 5-7 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Eighth Test)

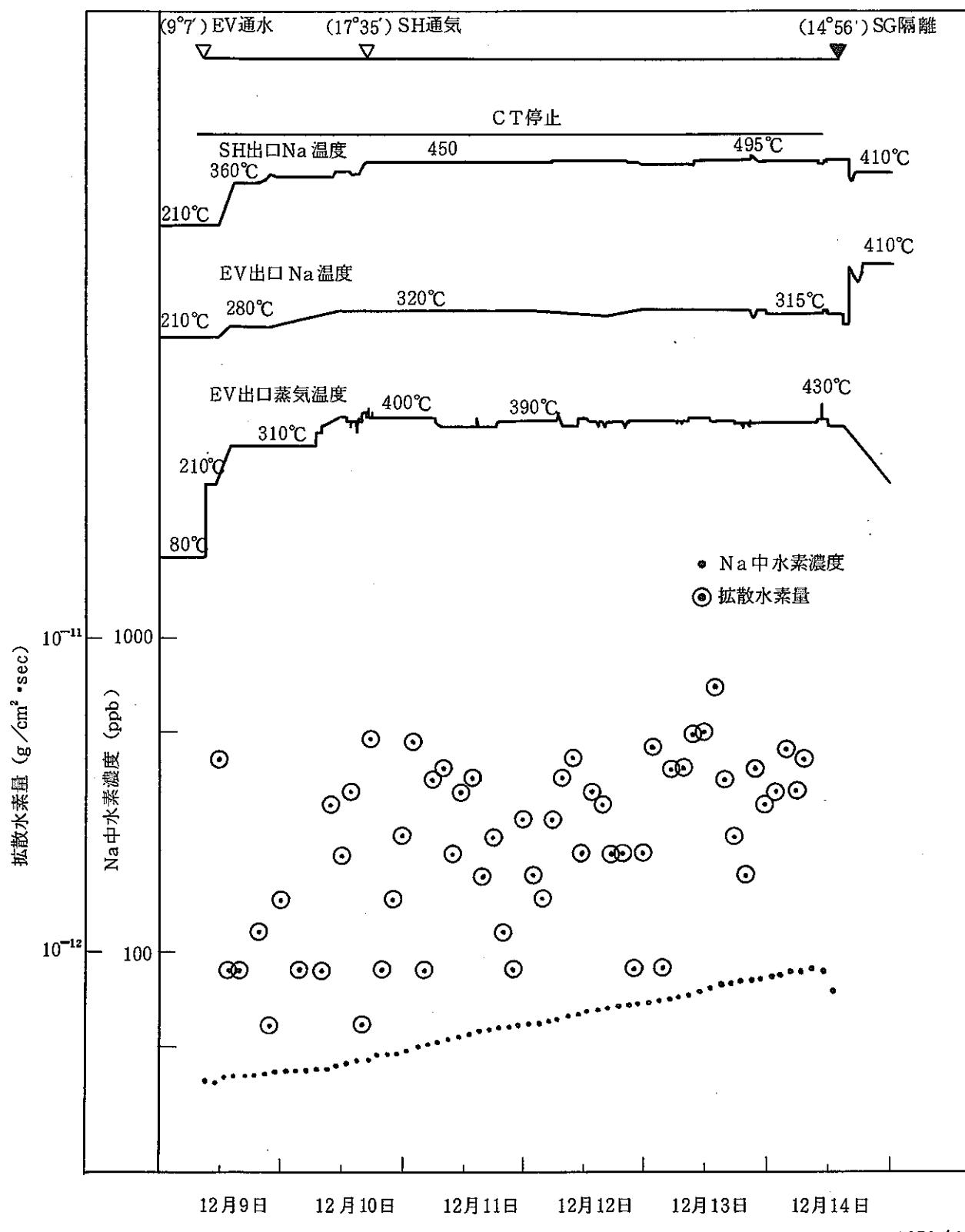


図 5-8 結合運転での拡散水素挙動（第9期）

Fig. 5-8 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Ninth Test)

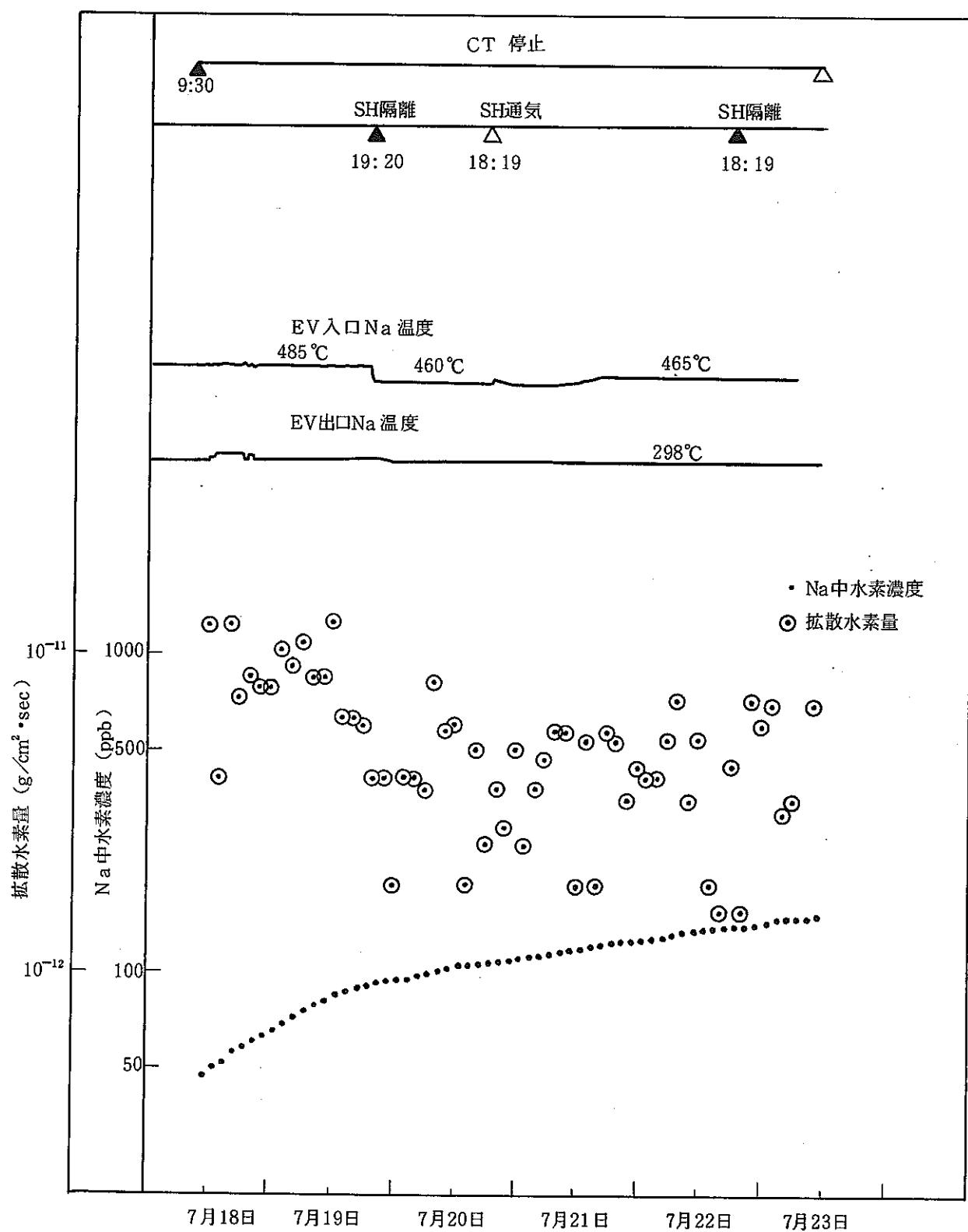


図 5-9 結合運転での拡散水素挙動（第 11 期）

Fig. 5-9 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes during EV+SH Operation (The Eleventh Test)

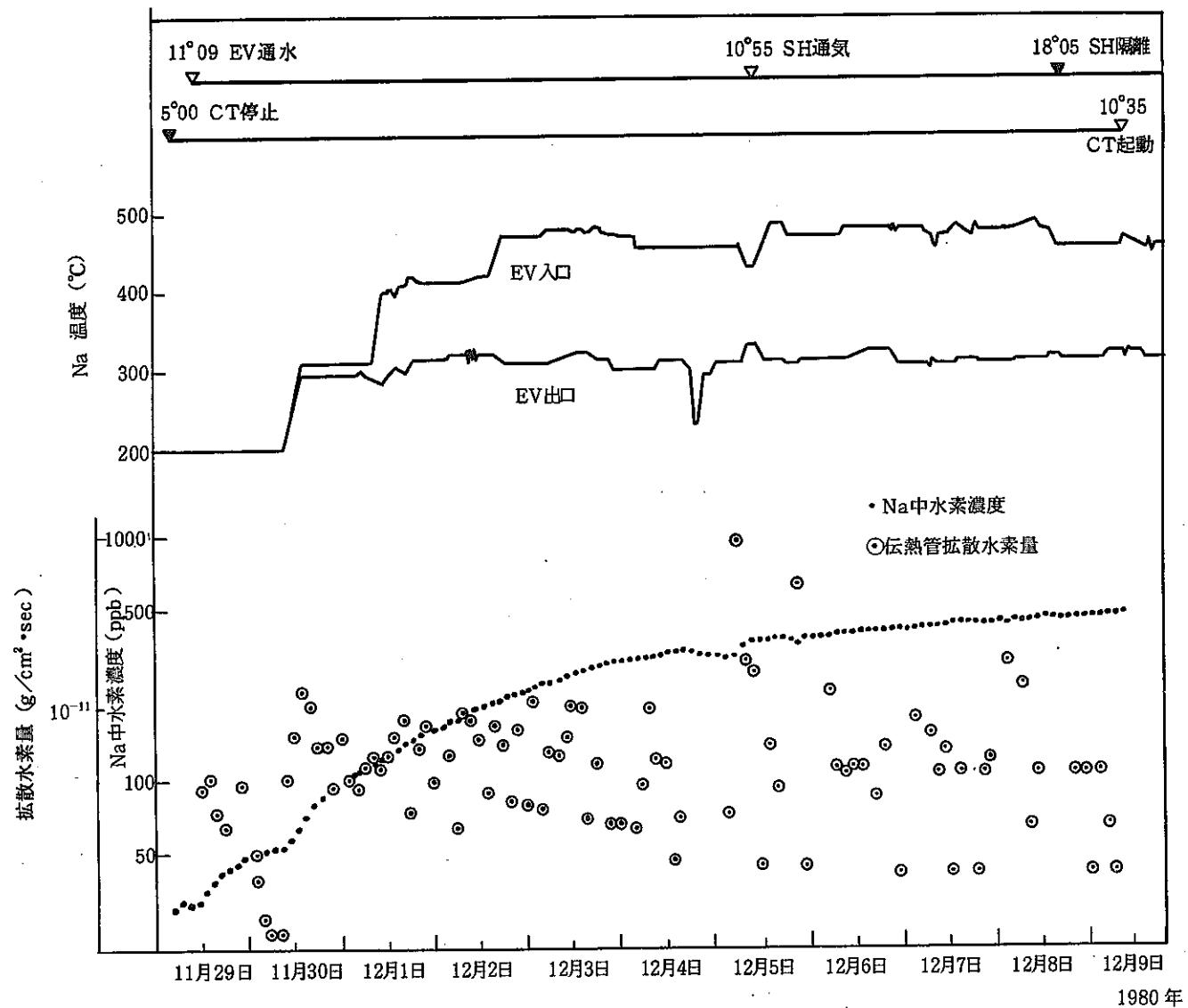


図 5-10 SG 起動時拡散水素挙動（第 10 期）

Fig. 5-10 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up SG

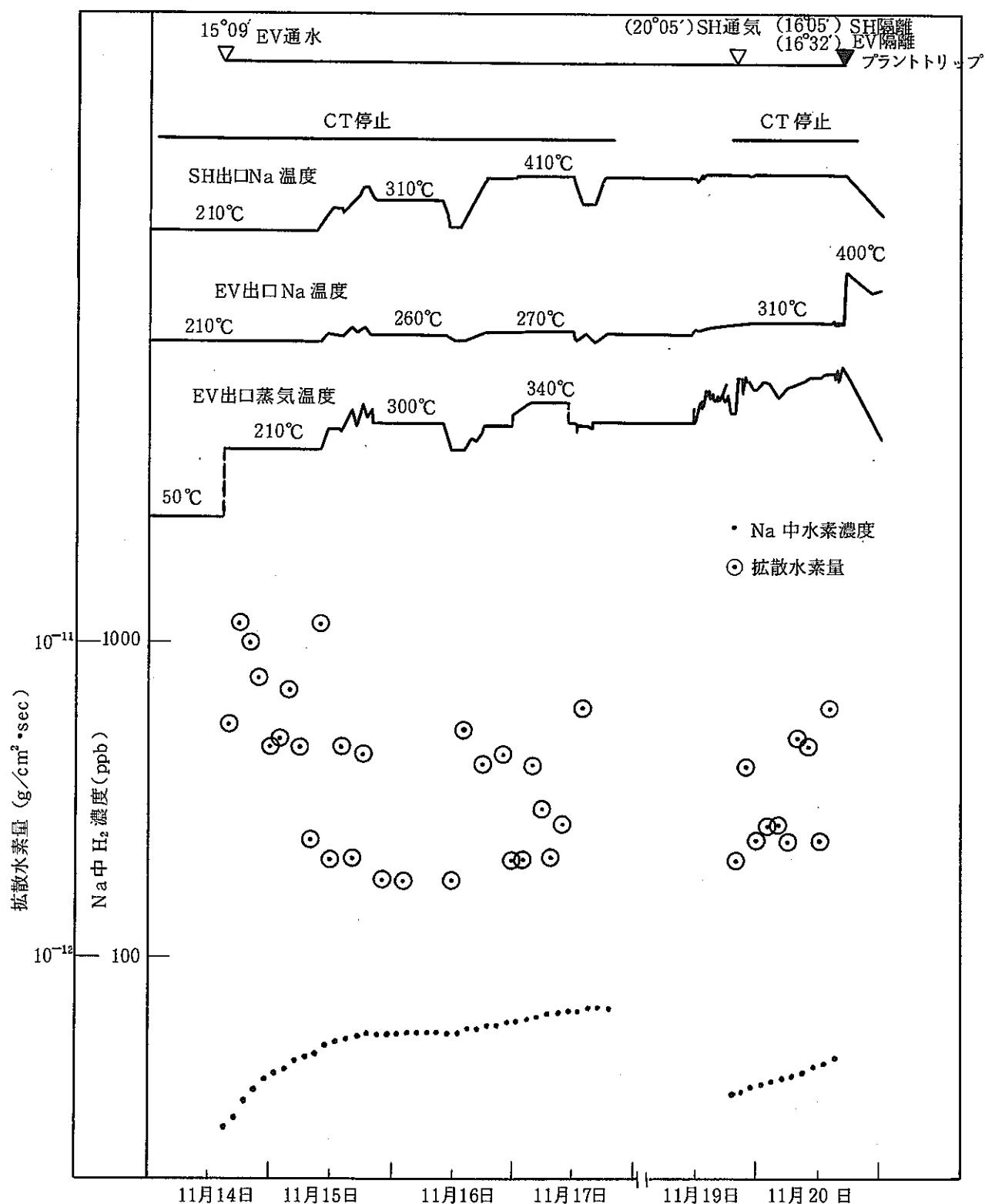


図 5-11 第9期蒸気発生器起動時の拡散水素挙動

Fig. 5-11 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up Steam Generator at Ninth Test

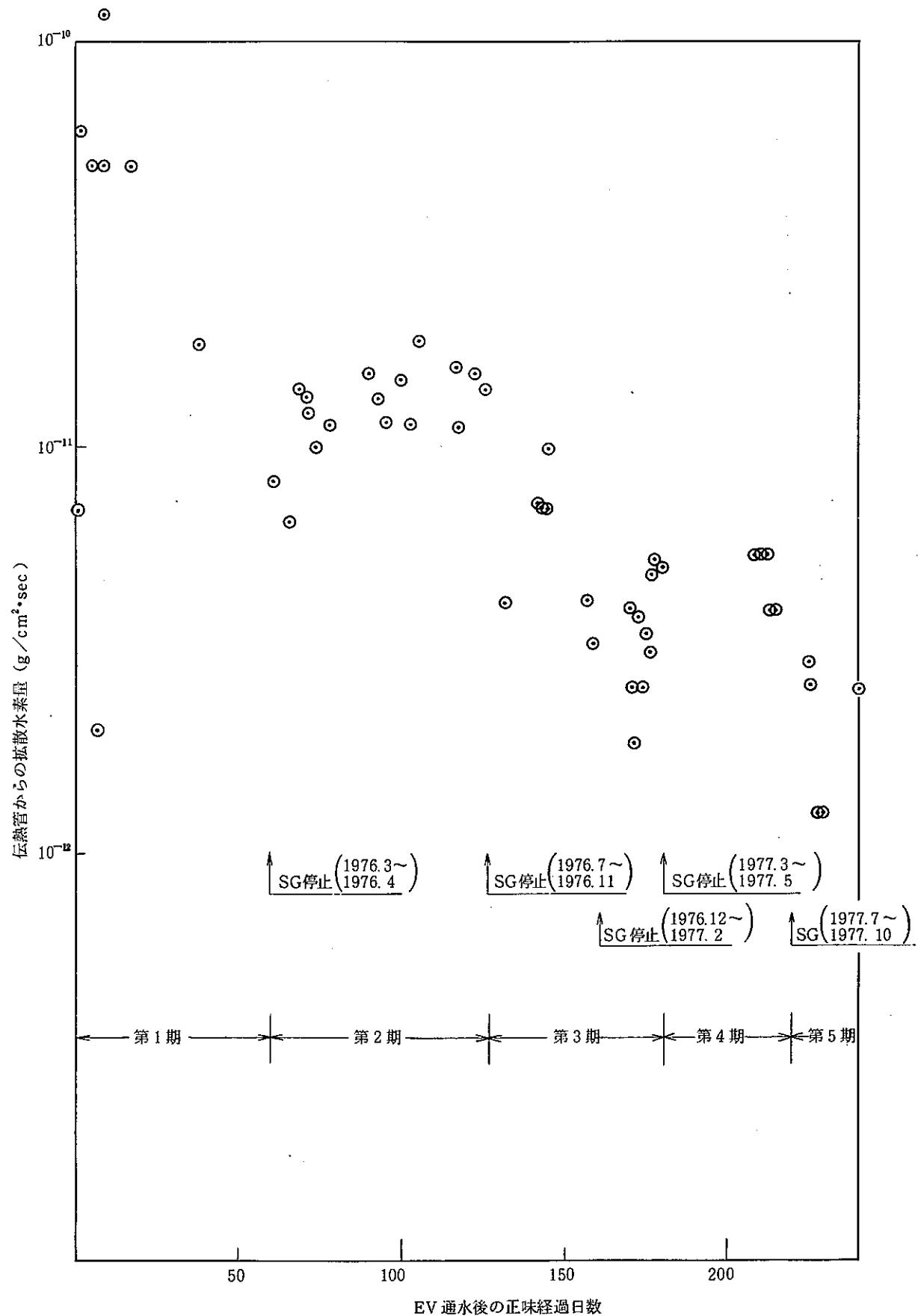


図 5 - 12(1) 拡散水素量の経年変化

Fig. 5-12(1) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes

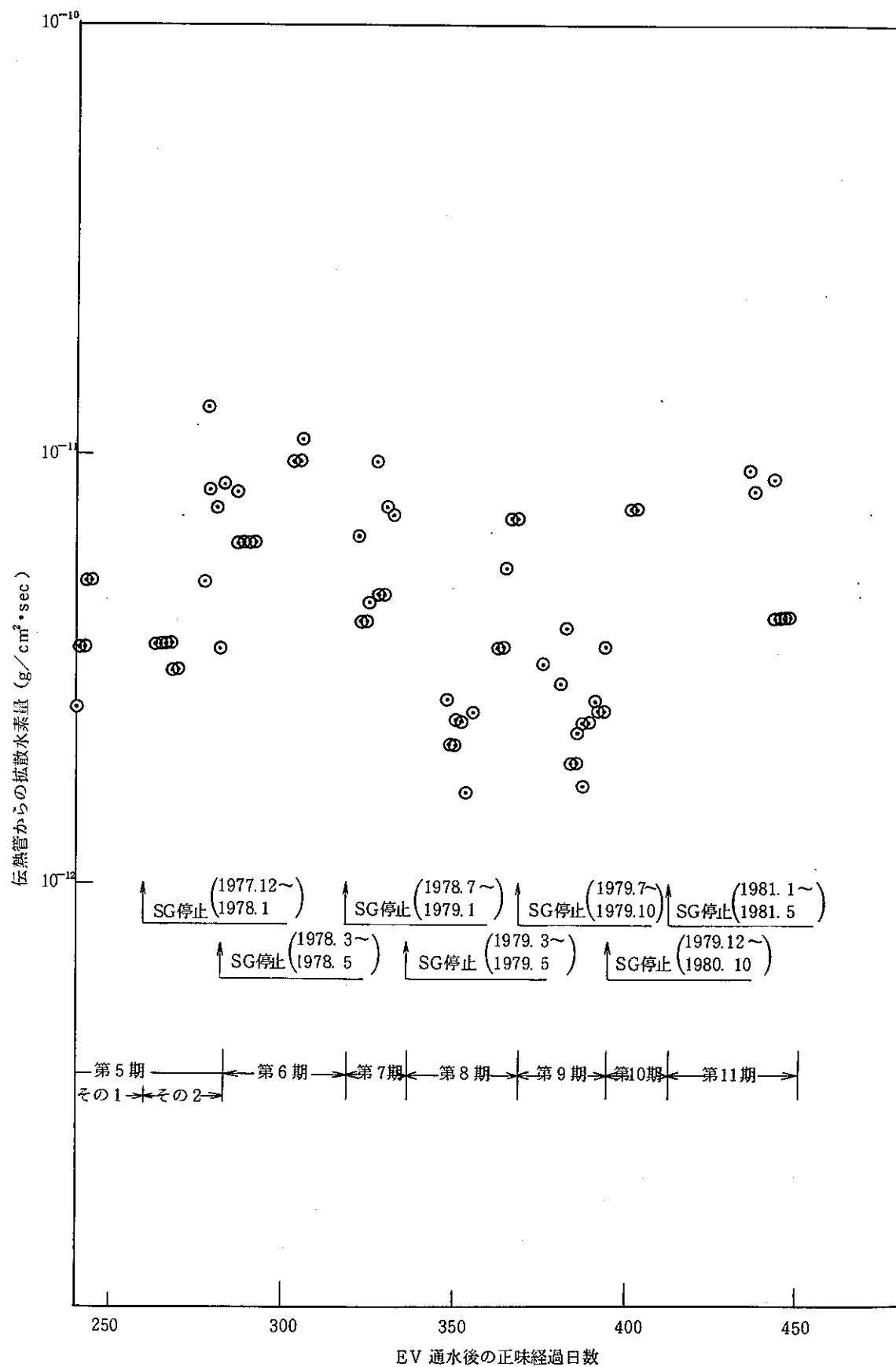


図 5-12(2) 拡散水素量の経年変化

Fig. 5-12(2) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes

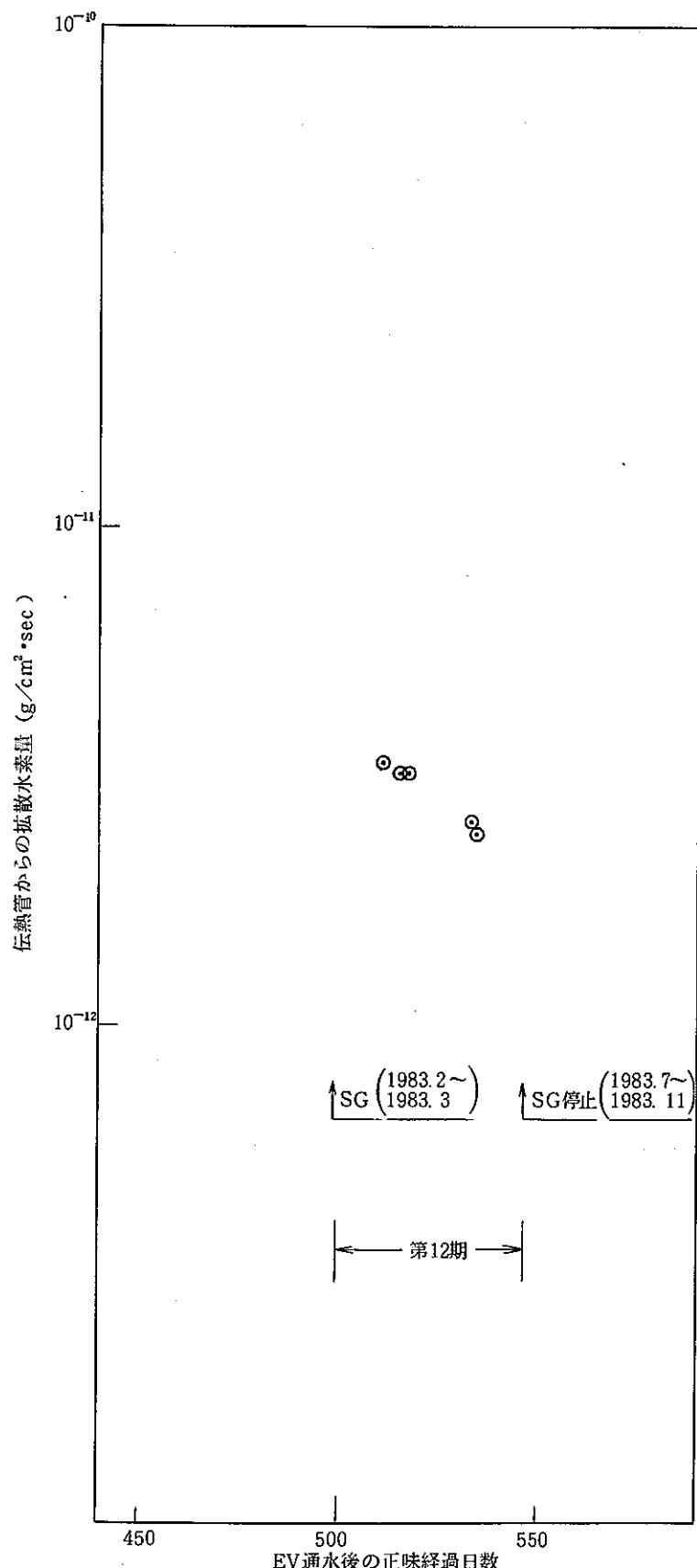


図 5-12(3) 拡散水素量の経年変化

Fig. 5-12(3) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes

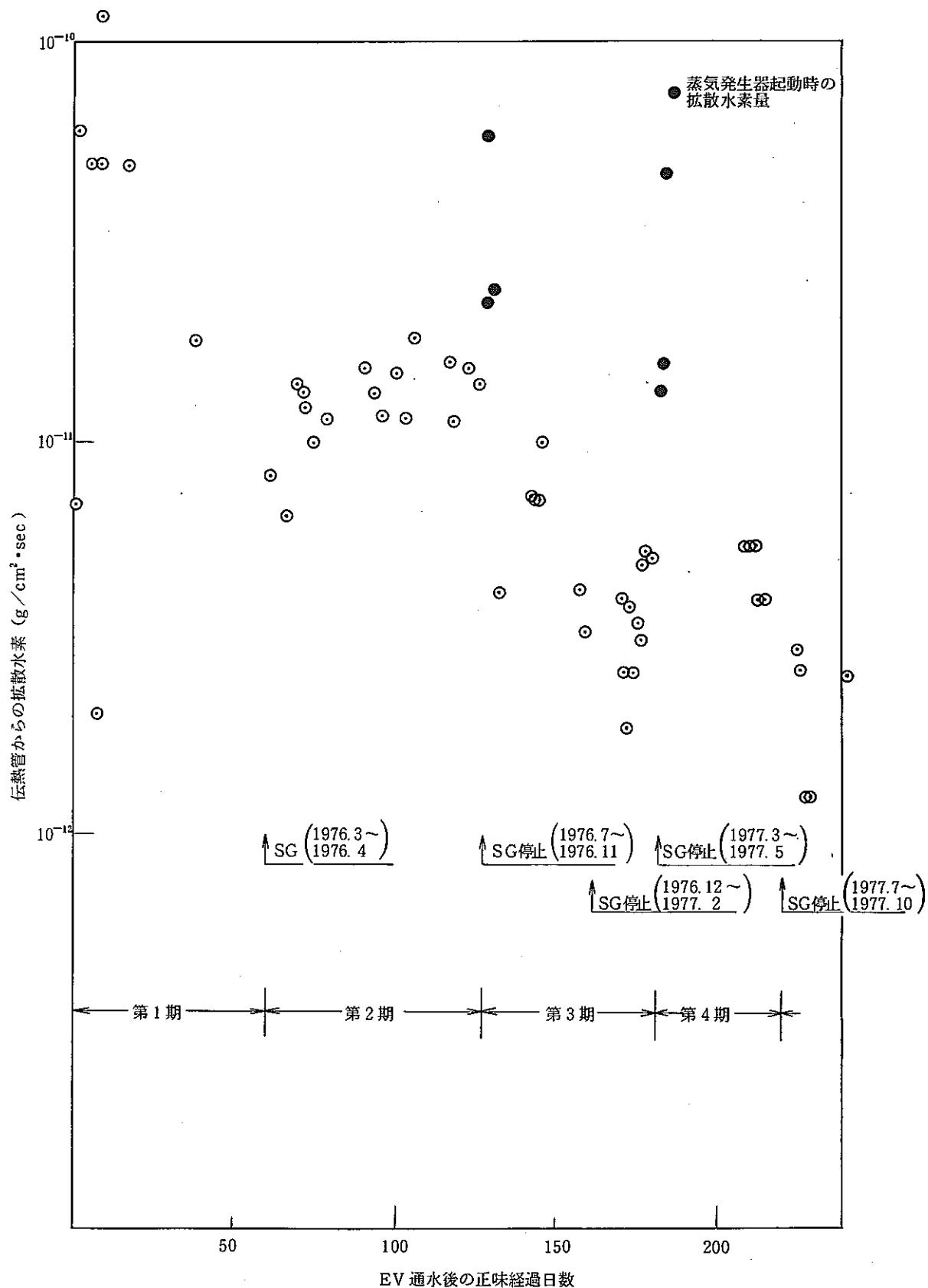


図 5-13(1) 拡散水素量の経年変化（蒸気発生器起動時データを含む）

Fig. 5-13(1) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes
 (Including Data in Starting up SG)

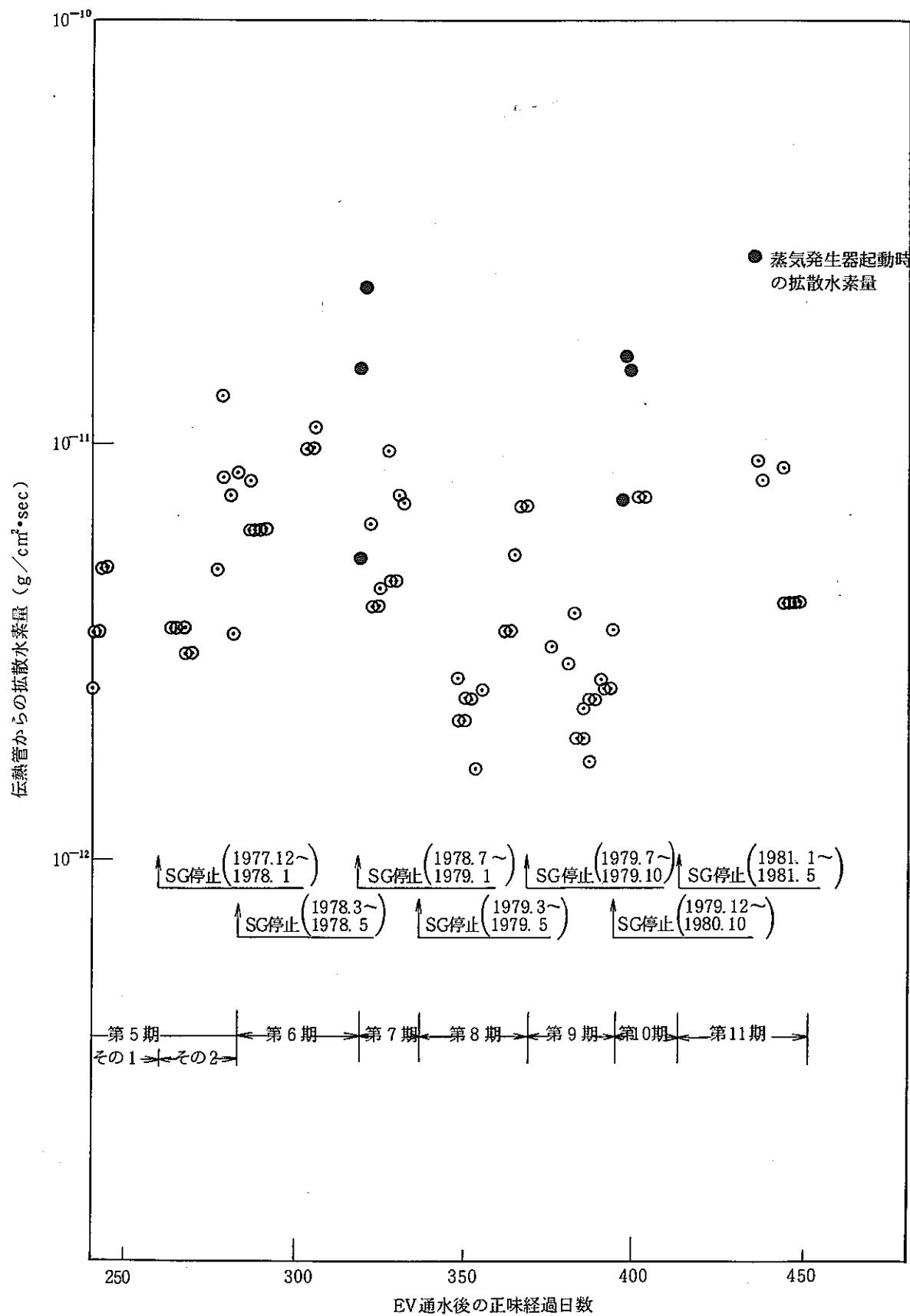


図 5-13(2) 拡散水素量の経年変化（蒸気発生器起動時データを含む）

Fig. 5-13(2) The Secular Change of Hydrogen Flux through Tubes
 (Including Data in Starting up SG)

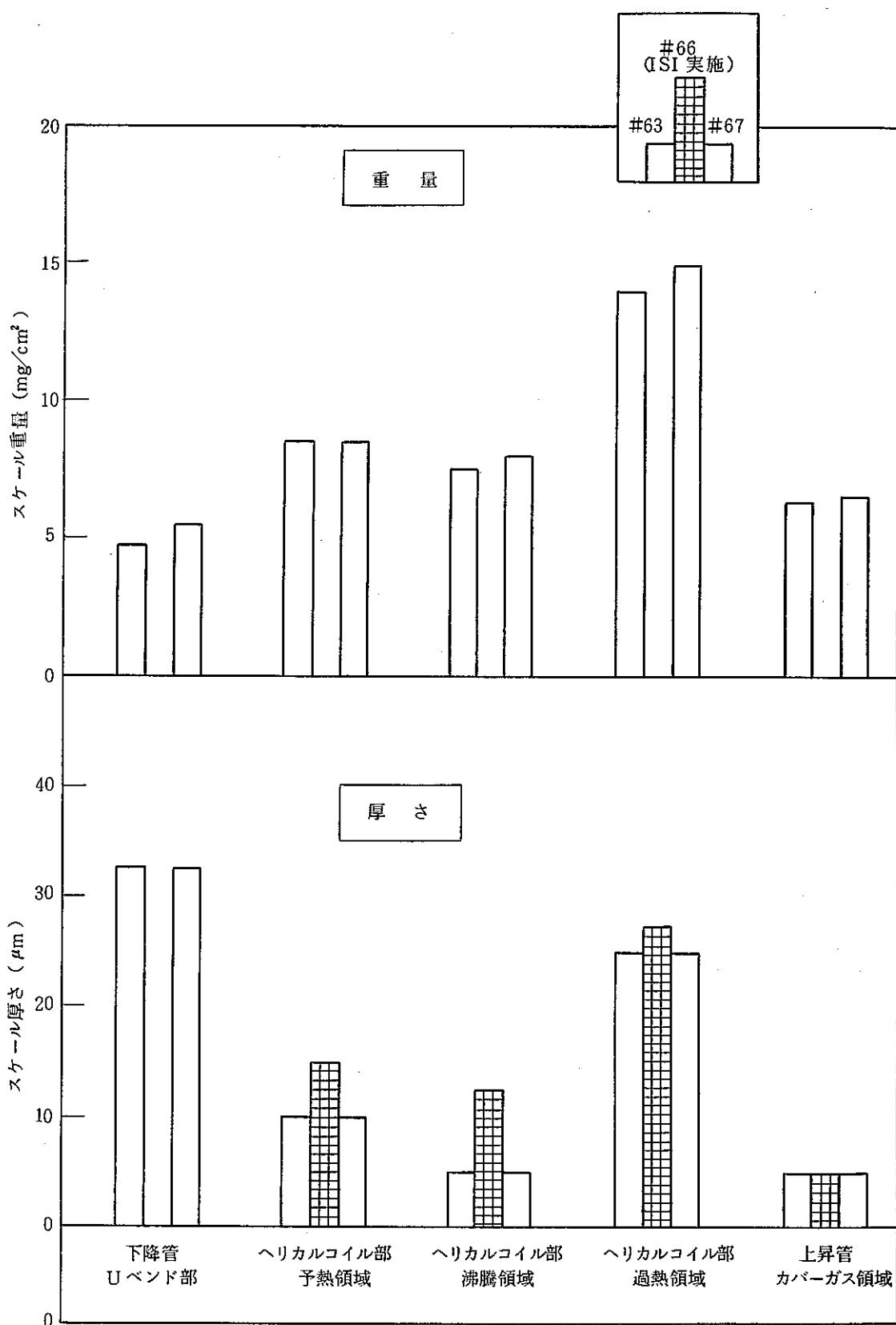


図 5-14 蒸気浸漬側（管内面）スケールの生成量測定結果

Fig. 5-14 Weight and Thickness Changes of Deposited Scale on Steam Side Surface of Test Tubes

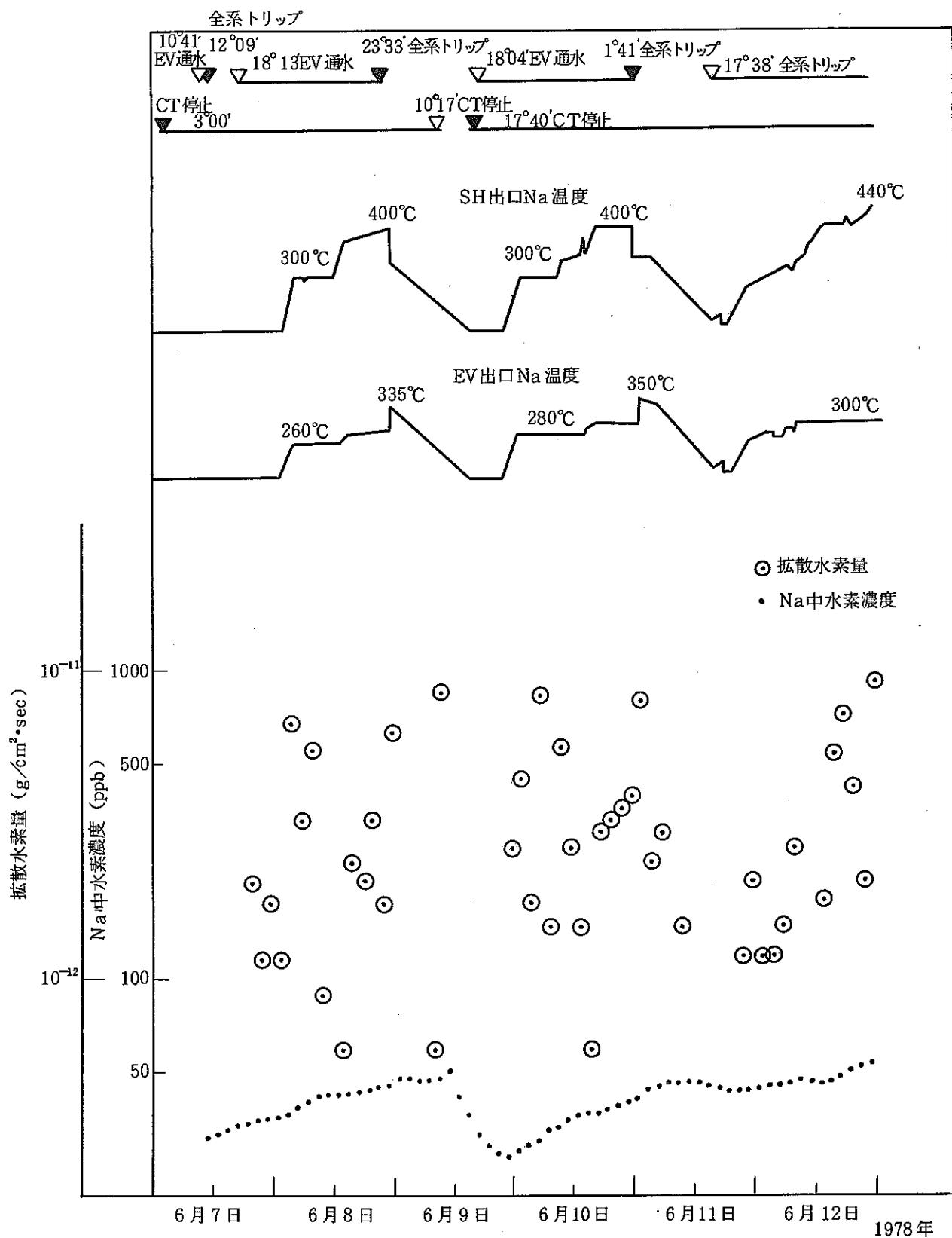


図 5-15 プラントトリップ後の拡散水素挙動（第6期）

Fig. 5-15 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes after Plant Trip
(The Sixth Test)

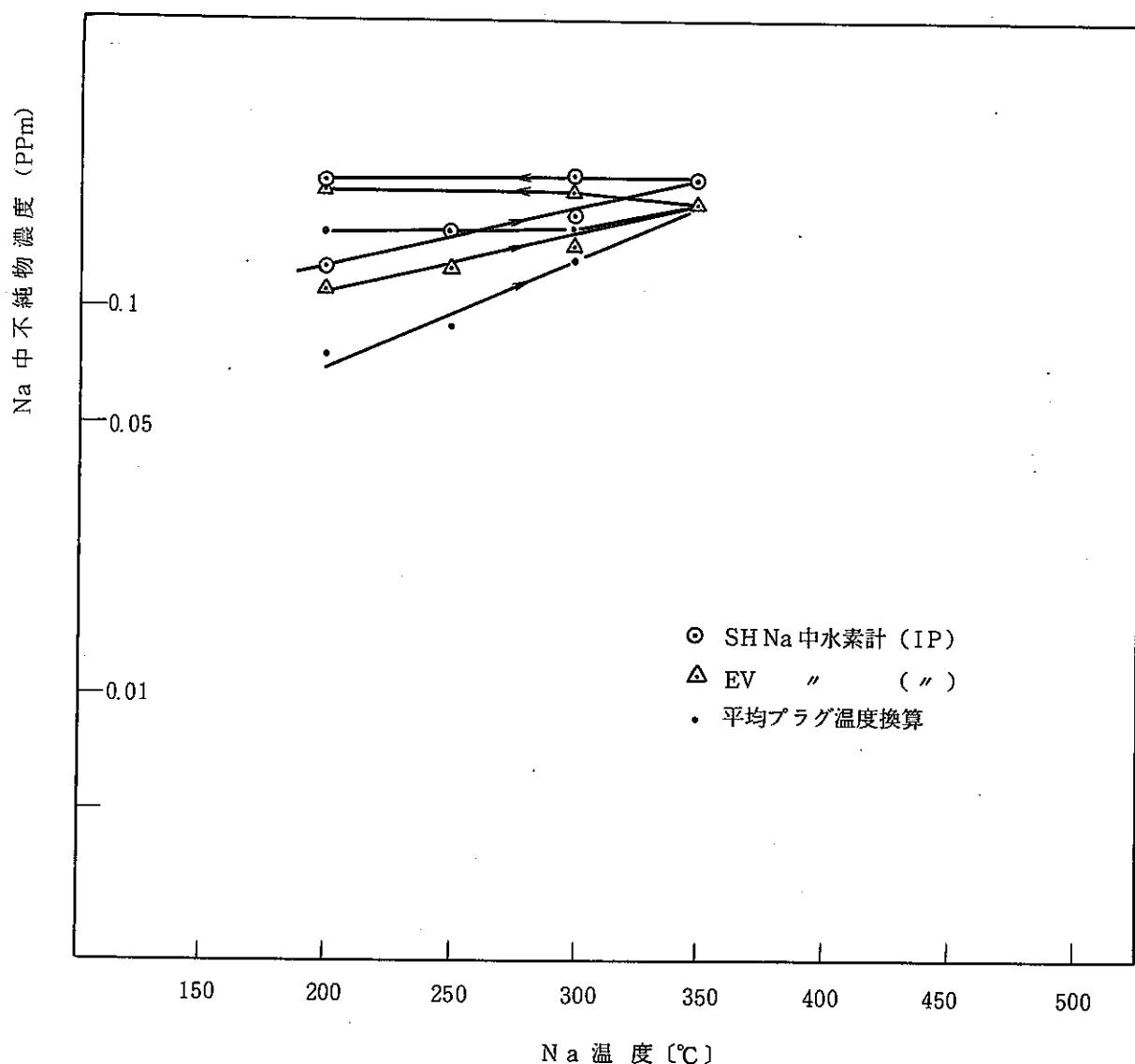


図 5-16 Na 中不純物濃度と Na 温度の関係

Fig. 5-16 The Relation between Impurities Concentration in Sodium and Sodium Temperature

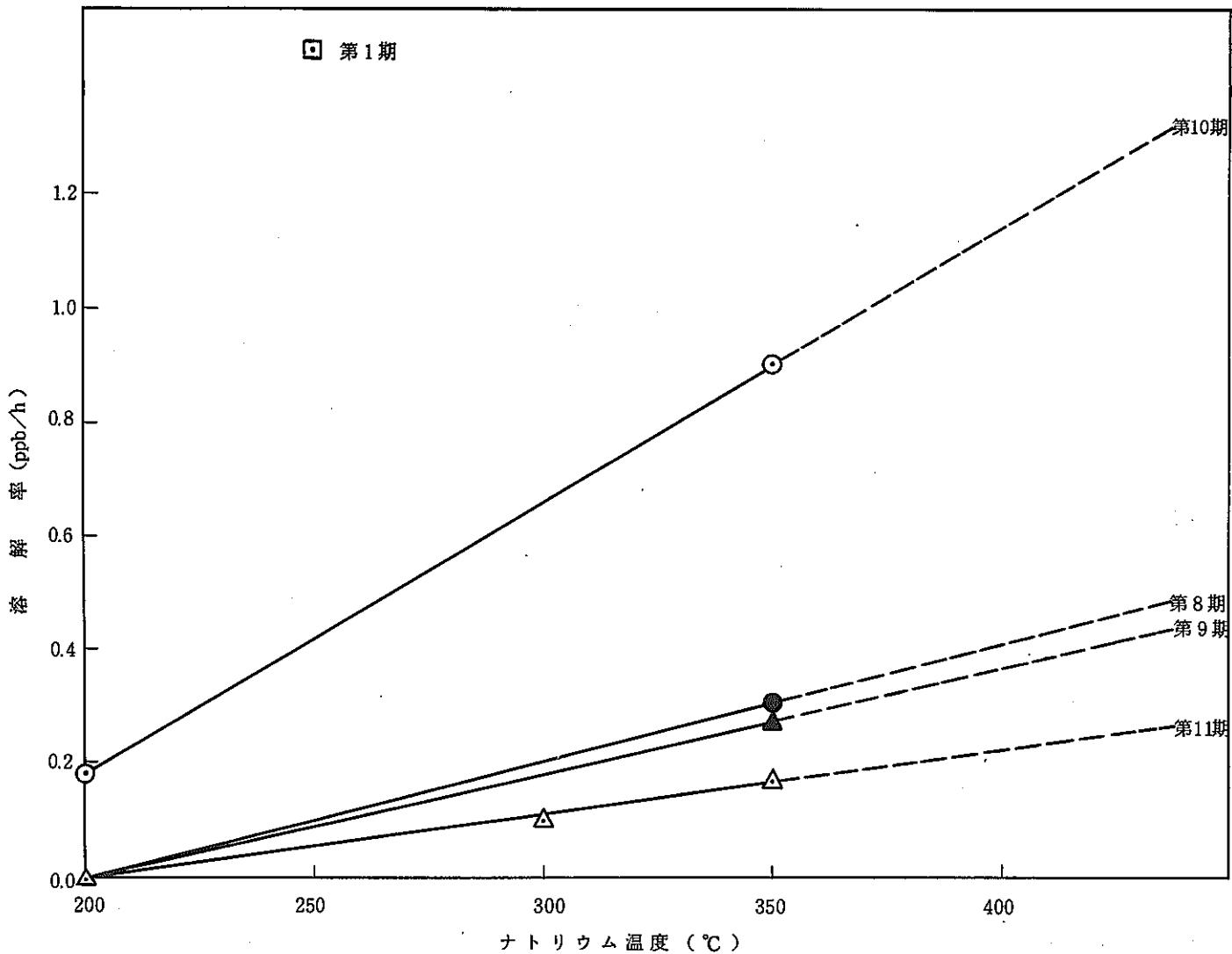


図 5-17 水素上昇率と Na 温度の関係 (Na 等温運転時のデータ)

Fig. 5-17 The Relation between Rising Rate of Hydrogen Concentration
and Sodium Temperature

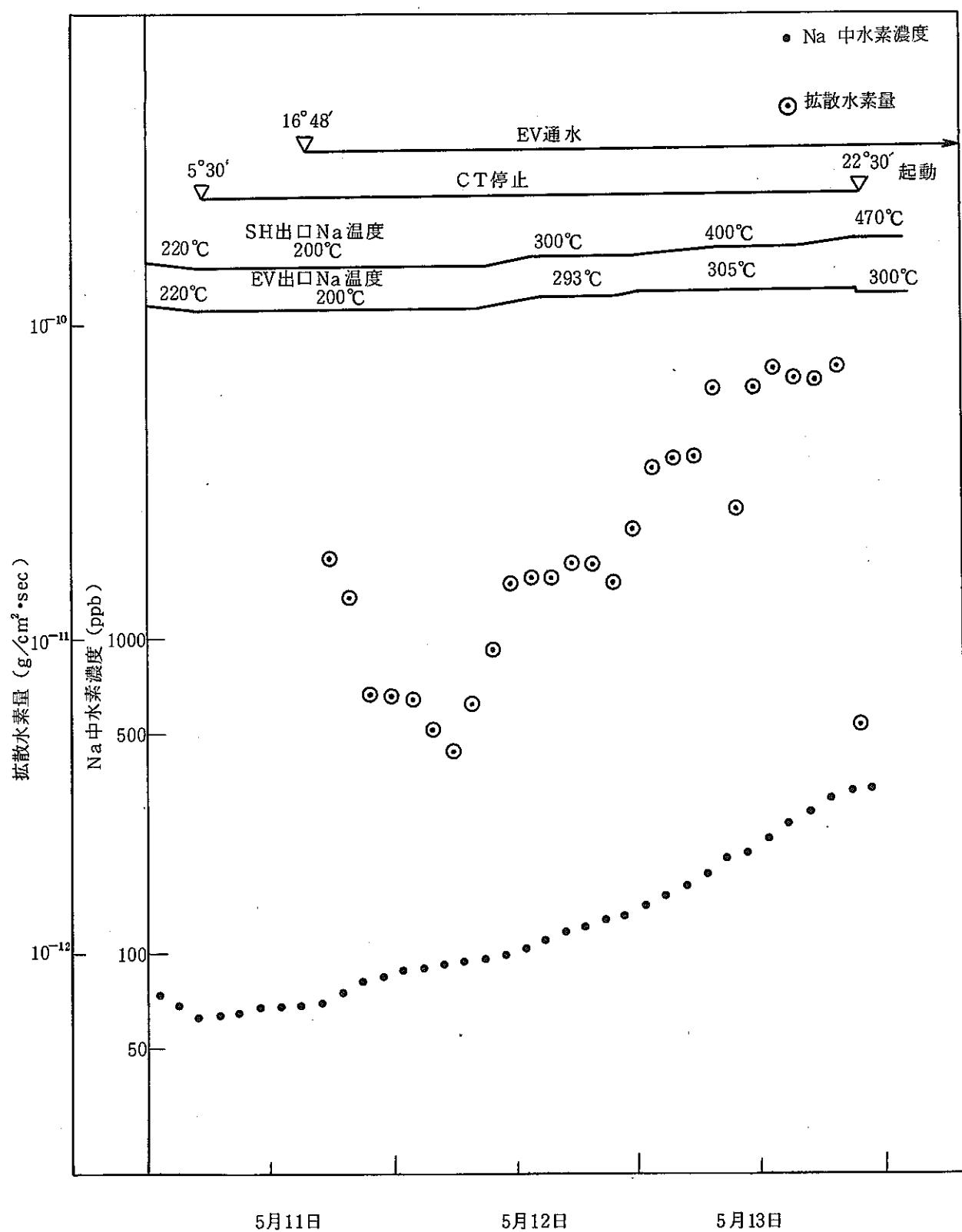


図 5-18 第 4 期の蒸気発生器起動時の拡散水素挙動

Fig. 5-18 Behavior of Hydrogen Flux through Tubes in Starting up SG
for Forth Test

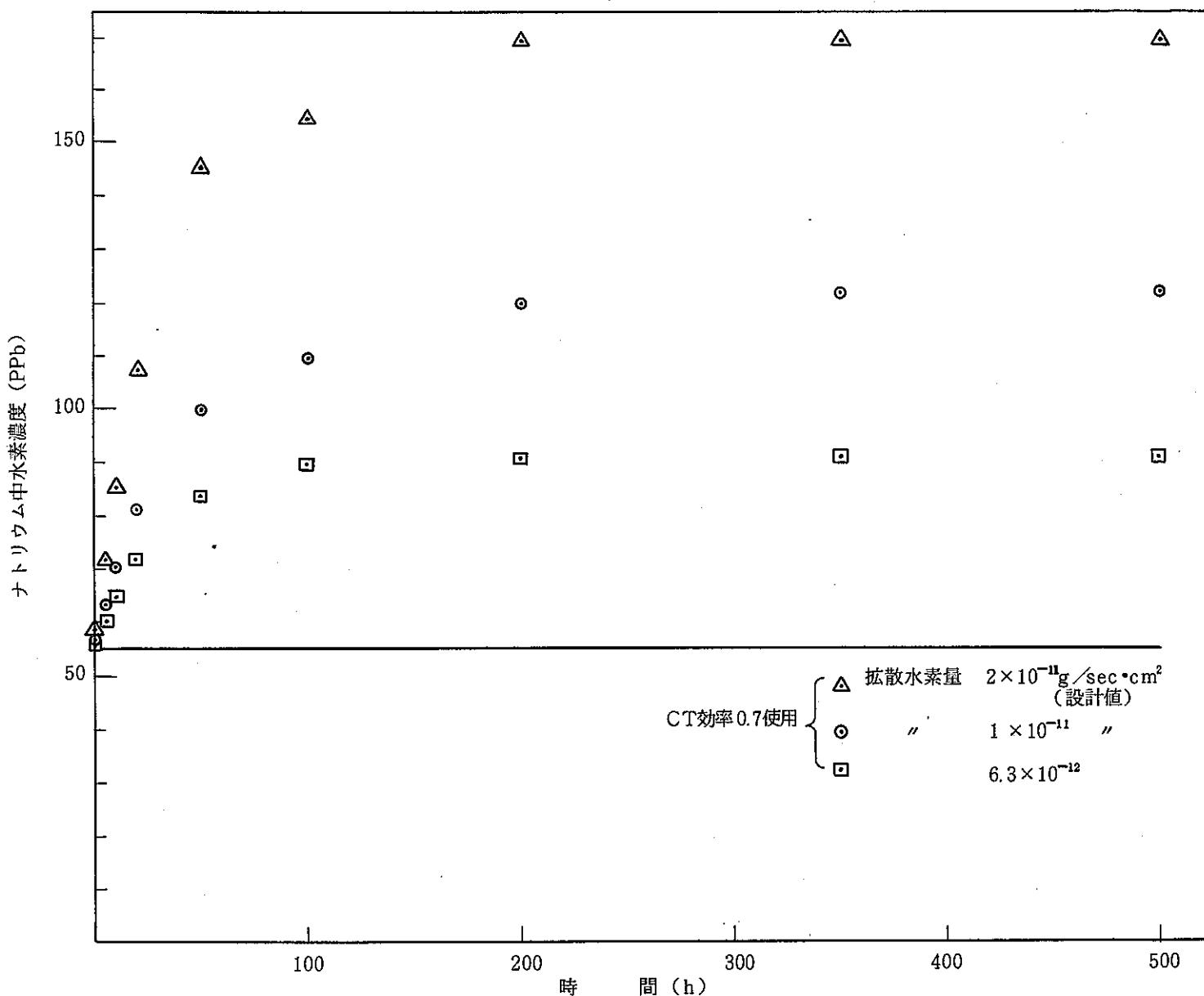


図6-1 ナトリウム中のバックグラウンド水素濃度（もんじゅ）

Fig. 6-1 Hydrogen Background Concentration in Sodium (Monju)