

小リークナトリウム水反応試験研究

オ 2 報
リーク検出計の特性試験

1972年8月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

小リークナトリウム水反応試験研究

第 2 報

リーク検出計の特性試験

報告者	高速炉安全性試験室	根 井 弘 道
		大 内 義 弘
		氏 原 幸三朗
		大 島 巖
		井 上 設 生
		堀 雅 夫
	蒸気発生器試験室	中 山 憲太郎

期間 1972年3月～1972年8月31日

目的 小リークナトリウム水反応試験装置 (SWAT-2) を使つておこなわれたリーク検出計の特性試験の結果, 及びその後, 1972年7月末までにおこなわれたナトリウム水反応試験の結果について報告する。また拡散式水素検出計の特性に関する考察についても述べる。

Studies of Small Leak Sodium-Water Reaction

(2)

Characteristic Tests of Leak Detectors

Abstract

Summarized herein are the results of the characteristic tests of leak detectors and the sodium-water reaction tests which have been conducted with the Small Leak Sodium-Water Reaction Test Rig (SWAT-2) until the end of July, 1972. This report is also a summary of discussion on the characteristics of a diffusion type hydrogen detector.

August, 1972	Hiromichi	Nei
	Yoshihiro	Ohuchi
	Kozaburo	Ujihara
	Iwao	Ohshima
	Kentaro	Nakayama
	Shetsunari	Inoue
	Masao	Hori

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要と試験方法	2
3. Na中水素計の特性	5
3.1 設計目標	5
3.2 水素検出の理論	5
3.3 Na中水素計の設計	7
3.4 特性試験結果	10
3.4.1 真空系特性試験	10
3.4.2 Na中特性試験	10
(1) 連続式ブラギング計の特性	10
(2) 質量分析管特性	11
(3) 拡散膜温度特性	12
(4) 不純物特性	12
4. Ar中水素計の特性	14
4.1 Ar中水素計の設計	14
4.2 較正試験結果	15
5. Na水反応試験結果	15
5.1 試験条件	17
5.2 Na流量, 圧力, 液面の変動	18
5.3 ブラギング計と水素計の応答	19
5.3.1 Na中水素濃度	19
5.3.2 Ar中水素計	20
5.4 音響式検出器	21
5.4.1 測定結果	22
5.4.2 検 討	22
5.5 ウエステージ	23
5.5.1 試験結果	23
5.5.2 考 察	24
5.6 試験部交換工事	25
6. 結 言	27
参考文献	30

図 表

図 1.	S W A T - 2 フローシート	3 2
図 2.	ターゲット伝熱管と水噴出ノズル	3 3
図 3.	水素検出器のモデル	3 4
図 4.	Na 中の水素濃度と分圧の関係	3 5
図 5.	各種金属中の水素の透過率	3 6
図 6.	Na 中水素計系統図	3 7
図 7.	Na 中水素濃度と分析管部の水素分圧	3 8
図 8.	拡散膜内の時間遅れ	3 9
図 9.	Na 中水素計現場機器	4 0
図 1 0.	Na 中水素計真空機器	4 0
図 1 1.	分析管の分解能	4 1
図 1 2.	分析管の感度と直線性	4 2
図 1 3 - 1	連続式ブラギング計測定状態(1)	4 3
図 1 3 - 2	" (2)	4 4
図 1 4.	ブラギング温度とコールドトラップ出口温度	4 5
図 1 5.	ノーブルポンプ圧力と分析管イオン電流	4 6
図 1 6.	拡散膜センサ部温度とノーブルポンプ圧力	4 7
図 1 7.	ノーブルポンプのバックグラウンド圧力	4 8
図 1 8.	Na 中水素濃度とブラギング温度の関係	4 9
図 1 9.	Ar 中水素計系統図	5 0
図 2 0.	Ar 中水素計センサ部外観	5 1
図 2 1.	Ar 中水素計の較正曲線, 水素濃度と温度依存性	5 2
図 2 2.	Ar 中水素計のガス圧力依存性	5 3
図 2 3.	Ar 中水素計のガス流量依存性	5 4
図 2 4.	水注入時の水系圧力変化	5 5
図 2 5.	ノズル径と注水率の関係	5 6
図 2 6.	平均注水率と計算値の比較	5 7
図 2 7.	Na 液面, 流量, 反応容器 Na 圧力の変動, 試験 # 1	5 8
図 2 8.	" # 2	5 9
図 2 9.	" # 3	6 0

図 3 0.	Na 液面, 流量, 反応容器 Na 圧力の変動, 試験 № 4	6 1
図 3 1.	水素検出計の応答, 試験 № 2	6 2
図 3 2.	" " " № 3	6 3
図 3 3.	" " " № 4	6 4
図 3 4.	質量分析計の応答, 試験 № 3	6 5
図 3 5.	" " " № 4	6 6
図 3 6.	音響式検出器取付け図	6 7
図 3 7.	音響式検出器系統図(1)	6 8
図 3 8.	音響式検出器系統図(2)	6 9
図 3 9.	加速度計の測定結果(1)	7 0
図 4 0.	加速度計の測定結果(2)	7 1
図 4 1.	加速度計, Na 中マイクの測定結果	7 2
図 4 2.	マイクの測定結果	7 3
図 4 3.	水噴出ノズル	7 4
図 4 4.	空気中への常温水の噴出試験	7 4
図 4 5.	上からみた伝熱管アセンブリ	7 5
図 4 6.	伝熱管アセンブリ外観	7 5
図 4 7.	試験 № 1 のウエステージ	7 6
図 4 8.	試験 № 2 のウエステージ	7 6
図 4 9.	試験 № 3 のウエステージ	7 7
図 5 0.	試験 № 4 のウエステージ	7 7
図 5 1.	各ウエステージ部のくぼみ状態	7 8
図 5 2.	ウエステージ率とリーク率, APDA のデータとの比較	7 9
図 5 3.	保温材を取った反応容器上部	8 0
図 5 4.	シール溶接部切断後の Na 流入管	8 0
図 5 5.	引き抜き直後の反応容器内部構造物	8 1
図 5 6.	水反応試験後の反応容器内部	8 2
図 5 7.	試験部出口フィルタの Na 付着状況	8 2
表 1.	Na 水反応試験結果(1), 試験条件	8 3
表 2.	" " (2), リーク検出計	8 4
表 3.	使用した音響式検出器	8 5

表 4. Na 水反応試験結果(3), 音響式検出器	86
表 5. Na 水反応試験結果(4), ウエステージ	87

1 緒 言

高速炉を開発するプロジェクトの中で蒸気発生器に関する部分はかなりウエートがおかれている。それは Na と水が伝熱管壁を境に共存していて、常に Na - 水反応の危険にさらされていると云う、特殊な条件下にあるからである。Na 中に水がリークする場合は、まず小規模、いわゆる小リークから始まって、その検出が遅れると隣接伝熱管のウエステージにより大リークに移ると考えられている。従つて如何に早く、確実に検出できるかということが重要である。

小リーク Na - 水反応試験装置 (SWAT-2) は、原型炉「もんじゅ」用蒸気発生器を当面の対象とし、そこで発生するであろうと考えられるウエステージ量の予想と、そこにとりつけるリーク検出計の開発をするために建設された。試験の目的、装置の概要については第 1 報として報告してある。⁽¹⁾

試験装置は、試運転も含めて 1972 年 3 月末完成し、引き続き調整運転、Na 中水素計特性試験を行なつた。その後 Na - 水反応試験に入り、7 月末までに 4 回の水反応試験をおこなつた。この 4 回の試験は主としてリーク検出計の作動を調べる目的でおこなわれた。

アルゴンガス中水素計は、5 月末装置に取付完了し、第 2 回目の水反応試験からテストされた。

音響式検出計としては、加速度計型の他に第 3 回目の水反応試験から Na 中マイクロホンを取付け試験した。

試験部は、ターゲット管のウエステージを調べるために、Na - 水反応試験ごとに交換する必要がある。反応容器の構造上、交換すべき試験部はかなり複雑になつているが、順調に交換工事が進んでいる。

本報告書においては、各リーク検出計の特性試験の結果と 7 月末までにおこなわれた 4 回の水反応試験の結果について報告する。試験はまだ始まつたばかりであるので、試験方法も必ずしも固まつているわけではなく、今後、これまでの結果を検討したうえで改良を加えていく。さらに得られた結果はまだ十分検討を加えていないので、今回の報告書には、ほとんど生のデータをのせることとし、今後の検討の資料としたい。

2 試験装置の概要と試験方法

小リーク Na-水反応試験装置は本試験研究の第1報⁽¹⁾にまとめられているので、ここでは簡単にフローシートについての説明と試験方法について述べる。

装置のフローシートは図1に示す。ダンプタンク (DUMP TANK) には Na が 1.3 ton チャージされている。主循環系, 純化系, リーク検出系, ドレン系および反応主成物放出系はすべて1台のスキヤニングコントローラで所定の温度まで予熱する。ダンプタンク内の Na 温度はあらかじめ所定の温度まであげておく。ダンプタンクからループへの Na のチャージは次の様におこなう。V401, 402, 403等ダンプタンクへの Na のドレン弁およびループ内の Na 弁はすべて開放状態にしておく。先にダンプタンクのガス圧力をループ側より約 0.3 Kg/cm² だけ低くしてから, ループ側とダンプタンクとを一緒にして真空に引く。約 10 mm Hg 以下の真空度になつたら, 両者のガス系を切り離し, ダンプタンク側だけにガスを送り, Na を押し上げていく。反応容器 (TEST TANK) の接点式液位計の最下位が点燈したら, 反応容器の下部から Na が入るバルブ (V-401, 202, 804) を閉じる。その後は残りのループ内に Na を満たし, 最後に反応容器の上部から下においている Na 流入管から反応容器に Na を入れる。所定の液面が反応容器内にできたら, V-803, 403 を閉じチャージを完了する。

運転中は緊急時のドレンを考え, ループ側とダンプタンク側のガス系を導通させておき, 均圧にしておく。主循環系と純化系の Na の循環は定格 300 l/min の主電磁ポンプ (MAIN EM PUMP) にておこなう。Na 中水素検出系 (H₂ DIFFUSION LOOP) と自動式プラグギング計回路 (AUTO PULLUGGING INDICATOR) とは各々独立した電磁ポンプ (EM802, EM801) にて Na を循環させる。主循環系の Na の昇温は 30 KW の主加熱器 (MAIN HEATER) にておこなう。また所定の温度に保てるよう加熱量を自動制御する。主循環系の Na 温度をさげるには, 最大容量 30 KW の冷却器 (AIR COOLER) にておこなう。

Na の純化は有効体積約 200 l のコールドトラップ (COLD TRAP) にておこなう。内部の金網部の洗浄により再生できるよう, コールドトラップはシール溶接されたフランジ構造になつている。

反応容器内の試験体はウエステージ結果が調べられるよう, 上部からつりさげられていて, フランジにてとりはずしできるようになつている。この際, Na 流入管はシール溶接されたフランジ部で切り離される。

反応容器内に注入する水は内容積約 8 l の加圧器 (PRESSURIZER) にて

所定の温度圧力まであげる。注入管と注入弁 (V707, 708) 等はあらかじめ、加圧器内の水と同じ温度まで予熱しておく。

図2は水噴出ノズルとその周囲のターゲット伝熱管のアセンブリを示す。噴出水があたりウエステージが最も起りやすいと考えられる伝熱管3本には、あらかじめ N_2 ガスを V-716 の系統から送つて内圧を加えておき、ウエステージにより伝熱管が破損した瞬間と破損状況をつかむことができるようになっている。現在までの実験では破損後大量の N_2 ガスが噴出して、主循環回路へのガスまきこみなどが起らないよう、封入圧は約 $20 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ とし V716 は閉じている。

水反応によつて生ずる H_2 ガスとその他の反応生成物とを分離し放出するのが分離器 (CYCLONE SEPARATOR) で、反応容器間とは $3 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ で破裂するラプチャ板 (RD301) とそれをバイパスするバルブ (V301) とでつながっている。この V301 はその時の実験条件、目的によつて開放しておく時と閉じておく時とがある。

分離器からさらに H_2 ガスを屋外に放出するには $1.5 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ で破裂するラプチャ板 (RD302), 逆止弁 (V303), 水素点火器 (H_2 IGNITER) を通して燃焼させるラインと、V302 を通りパラフィンを満たした液封装置 (AIR SEAL) から放出するラインがある。水注入実験前はこれらすべての系統は N_2 ガスまたは Ar ガスにて置換しておく。V302 は開放にしておく。

Na 中の水素濃度が所定の値になるまでコールドトラップで精製していく。ブラギング計の指示が安定し、コールドトラップの出口温度とほぼ等しくなることを確認する。

反応容器内の Na 温度, Na の液位, 試験部を通る流速等を所定の目標値にもつていく。

Na 中水素計のセンサ部 (H_2 SENSOR) の温度を所定値 (通常はできるだけ感度を良くするため, 550°C) に保つ。また流量を所定値にする。

カバーガス中水素計 (COVER GAS H_2 DETECTOR) と反応容器との間のバルブ V807, 808 を開放し, 所定の流量の Ar ガスを流す。反応容器内の圧力が大気圧近く, 所定の流量が出ないときは排気ポンプ (VP801) で引く。Ar ガスは大気に放出する。パラジウム膜のセンサ部の温度を所定値に制御する。また, センサ部の Ar ガス圧も若干水素検出計指示値に影響するので, センサ部前後のバルブで所定値に制御する。

音響式検出計の感度を設定し, データレコーダに入れる。水反応時に周囲の雑音をできるだけ少なくするため, コンプレッサ, ブロワ類を止める。

水注入後の Na 中の水素濃度の時間変化と Na 中に溶解した全水素量を測定するため, コールドトラップは V501 を閉じ主循環系と切り離す。

水注入弁 V707, 708 の開放時間をタイマーで設定する。水注入弁をタイマーで閉じ

る前にターゲット伝熱管内の N_2 ガス圧が低下（すなわち伝熱管が破損）した場合に自動的に弁を閉じることにもできるが、現在までは、この自動はかけていない。また、注水後、注水管内に Na が逆流して来るのを防ぐため、注水管保護の Ar ガス圧を V704 の手前まで加えておき、注水弁 V707, 708 を閉じた後、ある圧（約 $10 \text{ Kg/cm}^2 \text{ G}$ に設定）まで注水管内の圧がさがつた時、自動的に V704 が開く様に設定しておく。

主要な計測量は高速度データ集録装置に入れられているので、水注入約 1 分前からこのデータロガーを走らせる。水注入弁 V707, 708 を開とする。その後は自動的に水注入弁が閉じ、その後、注入管圧低下と共に V704 が自動的に開となる。なお、この注水管保護の Ar ガスのノズルからの噴出量があまり多いと主循環系へのガスのまきこみが起る恐れがあるので、出来るだけ流量は少なくするようにあらかじめ設定しておく。

主循環系内の Na 中の水素濃度が平衡に達したことを確認してから、コールドトラップで精製を始める。ある程度 Na 純度をあげた後、すべての Na をダンプタンクにドレンする。

水注入量は、蒸気注入の場合は注入前後の圧力差、水注入の場合は液面差から求める。さらに加圧器冷却後水をドレンし、加圧器へのチャージ量との差を求める。

3 Na 中水素計の特性

Na 中水素計の概要はすでに第1報⁽¹⁾に記してあるが、Na-水反応試験に入るまえにまず Na 中水素計の特性について試験をおこなったので、水素計の理論と設計法を試験結果とあわせてここにまとめておく。

3.1 設計目標

Na 中水素計の設計目標は、① Na 中の水素濃度 1~5 ppm に対してその 10 分の 1 の感度をもつこと。② 水素計入口部での濃度変化から検出計の応答まで 20 秒以下を目標とする。③ 水素計センサ部での温度をできるだけ一定に制御できること。④ 水素計センサ部の拡散膜が破壊した場合でも Na を分析器までの途中でフリーズすることができること。などである。設計条件としては、拡散膜部の最高温度 550℃、最高耐圧 5 Kg/cm²G をとつた。この耐圧は Na-水反応によつて生ずる衝撃圧を考慮したものであるが、水素の拡散の時間遅れを出来るだけ短くするため、主循環系やセンサ部以外の水素計 Na 回路の耐圧 10-Kg/cm²G よりは低くとつてある。

3.2 水素検出の理論

Na 中に溶解している水素を金属膜を通して真空中に拡散させ、真空度の変化を何らかの方法で検出する型の水素検出計は図3の様にモデル化することができる。Na 中の水素は金属拡散膜表面から金属中に溶解し、厚さ l の拡散膜内を拡散する。金属中の水素は反対側の膜表面から真空中に離脱する。排気システムは拡散膜のセンサ部から離れたところにある。その間の水素に対する排気コンダクタンスは C_2 とする。Na 中の溶解水素の分圧を P_1 、真空系のセンサ部とポンプ部の水素分圧を各々 P_2 、 P_3 とする。

一般に、気体の固体中への溶解は、固体中での気体分子（または原子）の濃度 C が低い間はヘンリーの法則

$$C = k P^n \quad (3.1)$$

にしたがう⁽²⁾。ここで k は溶解度 (solubility)、 P は外部の気体の圧力、 n は定数である。水素の様な 2 原子分子は金属中に溶解するとき原子に分かれるが、このとき質量作用の法則にしたがつて、 $n = 1/2$ となる。

厚さ l で十分大きな面積を持つ拡散膜の両側の圧力が P_1 、 P_2 に保たれていて、膜の表面のすぐ内側では溶解した気体の濃度が、気相の圧力と (3.1) 式の関係で平衡に達している。すなわち、表面のすぐ内側での気体の濃度は $C_1 = k P_1^n$ 、 $C_2 = k P_2^n$ である。

固体内の気体の拡散はフィックの法則にしたがう。1次元で定常状態では

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.2)$$

ここで Q は気体の流束 [cm^3 (STP) / cm^2 / sec], D は拡散係数 [cm^2 / sec] である。

(3.2) 式を積分して,

$$\int_0^{\ell} Q dx = -D \int_{C_1}^{C_2} dc$$

$$Q = Dk \frac{P_1^n - P_2^n}{\ell} = K \frac{P_1^n - P_2^n}{\ell} \quad (3.3)$$

ここで K は透過率 (permeability) [cm^3 / cm / sec / atm^n] で, 溶解度と拡散係数の積であり, 次式によつても表わされる。

$$K = A e^{-B/RT} \quad (3.4)$$

A は透過常数 (permeability constant) [cm^3 / cm / sec / atm^n], B は活性化エネルギー [cal / mole], R はガス常数 [cal / mole / $^{\circ}\text{K}$], T は絶対温度 [$^{\circ}\text{K}$]。

真空ポンプの排気速度 S [ℓ / sec] と気体の排気量 q [$\text{Torr} \cdot \ell$ / sec] との間には次式の様な関係がある。

$$q = C_{23} (P_2 - P_3) = S P_3 \quad (3.5)$$

C_{23} はセンサ部と真空ポンプ手前の圧力測定点間のすべてのコンダクタンスを合成したものである。

気体の透過量 Q と排気量 q とは次式の関係にある。

$$Q F = \frac{1000}{760} \times \frac{300}{273} q \quad (3.6)$$

ここで q は一般に室温 (27 $^{\circ}\text{C}$ とした) を基準にしているため, 温度補正をしてある。
 F は拡散膜の面積 [cm^2] である。

Na 中の水素ガスの濃度と分圧との関係は, 実験的に求められていて⁽³⁾ 図4の様になる。この結果はほぼ次式によつて表わせる。

$$P_1 = 6.6 \times 10^{-5} C_H^2 \quad (3.7)$$

単位は P_1 [atm], C_H [ppm] である。

以上の関係式を使うと真空ポンプ部の真空度から Na 中の水素濃度を求めることができる。

$$C_H = 123 \left\{ 1.44 \frac{S \ell}{A F} e^{\frac{B}{RT}} P_3 + \left(\frac{S}{C_{23}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot P_3^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3.8)$$

各種の金属中の水素の透過率は図5のごとく実験的にもとめられている⁽⁴⁾。この図からわかるようにパラジウムとニオブはきわめてよく水素を通す。ただし、ニオブは900°F以下の低温では水素化物を作り、ぜい化する。このため測定されたニオブの低温での透過率は小さくなっている。鉄とニッケル基の合金は大体において同じような透過特性を示し、その組成によらない。さらに、別な研究によると⁽⁴⁾、合金の透過率は各組成の透過率を重みつきで平均した値にほぼ等しいことがわかっている。

3.3 Na中水素計の設計

水素拡散型の検出器は基本的には図3のごとくなるが、水素を拡散させるセンサ部の材質と構造、水素を検知する方法又は計器の種類と選択のしかたによつて各種のリーク検出器が構成される。

拡散膜の材質の選択の基準としては、①水素の透過率が大いこと、②Naとの共存性がよいこと、③強度があること、などがあげられる。パラジウムはきわめて透過率が大いこと、Naとの共存性が悪いので、Na中には使えない。ただし、Na側にニッケル、真空側にパラジウムを二層にして使つた例はある⁽⁵⁾。ニッケルはNaとの共存性が良いので有力な材質である。Al, CEN等で使われた実績がある⁽⁵⁾。また、ステンレスはニッケルなどにくらべて透過率は小さいが、強度が大であるので薄くできるため、使われた例はある⁽⁶⁾。我々は、以上の事を考慮して、拡散膜の材質として、純ニッケル(純度98%以上)を使用することにした。

水素の検知器としては、①感度が良いこと、②応答時間が短いこと、または連続指示が可能であること、③水素のみに選択的に感応すること、④信頼性があること、などが選択の基準になる。

拡散膜内を真空にせず、アルゴンガスを流し、熱伝導セルで検出したり、アルゴンガス中に酸素を入れておき、拡散して来た水素ガスを酸化して、湿度計で検出する方法などが提案されている⁽⁷⁾。しかし、これらの方法は感度や長期間の安定性に問題があると考えられる。

真空内に拡散させる型では、ピラニゲージなどで真空度の低下を読みとる方法が、AI, ソ連⁽⁸⁾, APDAなどで検討されたが、感度が悪く、連続指示には不向きであるとされている。

質量分析器を使つて真空中の水素を検出する方法は高感度が期待できるが⁽⁵⁾、安定性に若干不安が残る。最近、スパッターイオンポンプで真空に引き、そのポンプのイオン電流が真空度に比例するところから、イオンポンプの電流値で直接水素拡散量を指示させる型が注目をあびてきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

我々は、スパッターイオンポンプと質量分析器とを併用した型を採用することにした。検出計システムの系統図を図6に示す。

主循環回路からのNaの温度は300～540℃の範囲でかわるものとし、センサ部を450～550℃の範囲でコントロールできる様にするため、エコノマイザ、冷却ファン、加熱器を通してセンサ部にNaを導いている。主循環回路からのNaの温度が変動しても、センサ部の温度をできるだけ一定に保つため、加熱器入口温度によつて加熱器入力を制御するフィードフォワード方式をとつている。なお、温度制御に関してはアナコンによる解析をおこなつた。

センサ膜から真空系へNaが漏洩した場合に、真空配管でNaがフリーズする様、1次元ピストン流を仮定して解析し、冷却フィン部を設計した。Na漏洩検出器としては、各種検討したが、高真空中である事を考慮し、最も簡単な熱電対によつてある設定温度以上になつた場合に警報を出す形式とした。

スパッターイオンポンプとしてはノーブルポンプを使つた。その他校正用の水素標準リーク、荒引き用の油回転ポンプ、液体窒素トラップ、低真空時の真空度測定用のピラニ真空計などから構成されている。

分析管の測定可能圧力は $10^{-4} \sim 10^{-8}$ Torrである。Na中の測定水素濃度範囲を5～0.05 ppmとし、両者を満足するように、(3.8)式を使いニッケル拡散膜の面積を決定する。ニッケルの水素透過率としては次の値を使つた⁽⁷⁾。

$$A = 1,000 \quad [\text{cc-mm/cm}^2/\text{atm}^{1/2}/\text{hr}]$$

$$B = 13,400 \quad [\text{cal/mole}]$$

$$R = 1.987 \quad [\text{cal/mole/}^\circ\text{K}]$$

なお、ニッケル膜の厚さは、温度590℃、外圧5 Kg/cmGが加わるパイプとして0.5 mmとした。なお、Naによるニッケルの腐食は650℃、25 ppm O₂の場合、4 mils/year⁽¹¹⁾とし、Na中使用期間1年として0.1 mmの腐食量をみこんでいる。拡散膜の面積は100 cm²、管外径16 mm、長さ200 mmとした。

排気コンダクタンスは図6において、A点(拡散膜出口部)とB点間、およびBC間(2 B sch 40、長さ1,000 mmの直管)は比較的簡単な形状をしているので計算で求まる。実際に水素分圧を測定するD点とC点間は複雑な形状をしているので実験で求めた。

ノーブルポンプの排気速度は窒素に対して20 l/min、水素に対して54 l/minと与えられているが、実際には実測してみないとわからないとされている。特に水素に対する排気速度はあまり明らかにはなつていない。窒素とほとんど違わないと云う報告もあ

る⁽¹²⁾。そこで実際に水素ガスを導入して実測した。測定法は、計算でコンダクタンスが求まる円管の両端の圧力を測定することにより、(3.5)式を使い排気速度Sを求める2ゲージ法によつた。

使用した円管は円径 $D = 0.96 \text{ cm}$ 、長さ $l = 40 \text{ cm}$ でコンダクタンスは

$$C = \frac{65}{\sqrt{M}} \cdot \frac{D}{l} \quad [l/\text{sec}] \quad (3.9)$$

で求まる。ここでMは分子量である。M=2を入れると、 $C = 1 \text{ l/sec}$ となる。測定結果によるとノーブルポンプの排気速度は 16 l/sec 、AD間の合成コンダクタンスは 1.87 l/sec となつた。

以上の値を(3.8)式に入れることにより、このNa中水素計の分析管部の真空度とNa中の水素濃度の関係は次式のごとく求まる。

$$C_H = 42.6 \left\{ P_s \exp \left[-\frac{6740}{T} \right] + 0.324 P_s^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3.10)$$

この式の計算結果を図7に示す。

設計に際しては、適当なコンダクタンス、排気速度を仮定し、強度計算から決定した膜厚を使い、使用予定温度範囲で、測定Na濃度と分析管部の圧力との対応が得られるように拡散膜面積を計算する。計算結果が適当でない場合、設計の結果コンダクタンスや排気速度が違つて来た場合等は計算をやりなおす。

拡散による時間遅れは次式により求まる⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

$$\frac{Q - Q_0}{Q_{\infty} - Q_0} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left[-n^2 \pi^2 Dt / l^2 \right] \quad (3.10)$$

ここで、Na中の濃度はステップ状に変わる、背圧は無視する、拡散膜内は拡散過程が律速とする、などの仮定を使つている。(3.10)を計算すると図8のごとくなる⁽¹⁴⁾。これによると、水素センサ部Na温度550℃では、分析管出力に何らかの応答が現われるのは6秒以後であり、ステップ変化がほぼ完全に出力として出て来るまでに約60秒かかる。

この時間遅れは当初の目標に比して満足すべき値ではないが、耐圧の安全性を考慮し、この膜厚を採用することにした。

図9はNa中水素計の現場機器を示し、左側のボックス内がNa系機器とセンサ部で、右側が真空機器と現場計測盤であり、その間をつないでいるのが、冷却フィンのついた真空配管である。図10は真空機器を示し、右側のバルブの下にあるのがノーブルポンプ、左側のバルブの下にぶらさがつているポンペが水素標準リーク、左側のバルブの奥

に分析管がある。上部のピラニゲージと配管にはベーキング用ヒータをカバーするアルミシートがまいてある。

3.4 特性試験結果

3.4.1 真空系特性試験

分析管の分解能は $M/e = 2$ のピークフォームにより $M/\Delta M$ の半値巾 (イオン電流がピーク値の半分になる加速電圧の巾) の値を測定した結果、図9に示すように55であつた。

分析管の感度と直線性は、実際に水素ガスを導入して測定した。図10参照。 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ Torrの圧力範囲では、 H_2 について

$$1.4 \times 10^{-4} \text{ A/Torr}$$

である。水素以外に H_2O , C, その他の残留ガスが分析されているが、くりかえしベーキングしたあとには、水素以外の原子又は分子はほとんど検出されない。

到達真空度は、コンフラットフランジより真空機器側だけを、48時間内に反復ベーキングを2回、その間終夜運転を2昼夜経過後、B-A電離真空計で測定して 3.5×10^{-9} Torrであつた。

3.4.2 Na中特性試験

リーク検出計を実際に使用する場合に最も問題になるのは、常時示している値が妥当なものであるかどうかである。その意味で、バックグラウンドの値がどの様に変動するかをつかまえておく事が重要である。

Na中水素計の場合、Na中の水素濃度と検出計指示値との間の関係を較正するのは、かなりめんどろな問題である。これは、はつきりわかつた水素濃度のNaを作ることが極めて困難であることによる。我々は、普通にチャージされたNaが水素と酸素をかなり含んでいると考えられるところから、そのNaをコールドトラップで精製していつた場合、コールドトラップの出口温度に相当する水素の飽和濃度が得られるものとし、その時のブラギング温度と検出計の指示値とを比較した。不純物濃度の高いNaを除々に精製していつた場合、Na中に水素と酸素とが両方含まれていても、精製されたNaは常に両者でコールドトラップの出口温度の状態において飽和されていると考えられる。

(1) 連続式ブラギング計の特性

使用したブラギング計は連続式のもので⁽¹⁾、まずその特性を実際に調べた。図13-1, 2は水素計の特性試験の間に測定された記録例である。図13-1の上側の記録に示すように、ブラギング温度が300℃近くを示すような場合には、

完全に自動にするのは難かしいようである。特に、主循環系 Na 温度とブラギング温度との差が小さい時は、ブロウによる冷却量の制御がうまくいかず、ブラギング温度を自動で示すことは困難である。この様な時には、流量比（ブラギングオリフィス部に不純物が付着して流量がさがった場合と、全く不純物が付着しない時との比）がある値（図 13-1 では 90%）までさがつたときに、ブロウをトリップするように設定することにより、振動測定をすることができる。ブラギングオリフィス部温度はコールドトラップ出口温度を中心に上下する。ブラギング温度としては、この上下する温度の上限と下限の平均値をとつた。平均値がブラギング温度に相当すると云う物理的根拠はないが、この値が常にコールドトラップ出口温度とほぼ等しいところからブラギング温度とみなした。本ブラギング計の構造では、流量比 90% 程度が不純物の付着開始と溶解開始とを検出するのに適当なバーシャルブラギングの状態になつてゐることによるものと思われる。

図 13-1 の下側は振動測定から自動測定に切換え、調整をおこなつた過程を示す。図 13-2 は図 13-1 の続きで、振動が完全におさまつた状態を示す。コールドトラップ出口温度が 120℃ 以下になるとブラギング計の温度における追従性はなくなる。ブラギング計を手動測定に切換えると、ブラギング温度が 120℃ 以下であることはわかる。

この連続式ブラギング計は、小リークの検出器として使えないかと云うねらいも持つている⁽¹⁾。それには応答時間が短いことが要求されるが、この結果から見る限り、目標とした応答時間よりかなり長いようである。

図 14 はブラギング温度とコールドトラップ出口温度とを比較したもので、両者は大体一致しているのがわかる。Na 中水素計の特性データをとる際には、常にこの両者が一致することを確認した。

(2) 質量分析管特性

Na 中水素計に Na をチャージする前に、くりかえしベージングした結果、真空装置内にはほとんど残留ガスがなくなり、Na チャージ後に検出されるのは水素のみとなつた。ノーブルポンプの電流値は、その点の全圧にほぼ比例するので、ノーブルポンプの電流値から分析管部の全圧が読みとれる。図 15 はノーブルポンプの圧力と、分析管で分析した原子状水素イオン H_1 と分子状水素イオン H_2 のイオン電流値との比較である。 H_2 は H_1 の 3~4 倍電流値が大きい。 H_1 が検出されるのは、分析管内で水素分子がフィラメントによりイオン化される時に原子状に解離することがあることによるものとみられる。

図15においてノーブルポンプ圧力が高いところでばらつきが大きいのは、分析管の安定度に原因があると考えられる。圧力が低いところで傾斜が急になつてゐるのは、ノーブルポンプの圧力が、あるバックグラウンド値で飽和していることによるのではないかと考えられる。従つて分析管の出力はノーブルポンプ圧力にくらべて安定度に問題があるが、感度は良いと云える。以上のことから当面は、分析管部の水素分圧としてノーブルポンプの圧力を使つて、Na中水素濃度を求めることにした。

(3) 拡散膜温度特性

拡散膜の温度によつて水素の透過率が大きく変わるので、できるだけ温度を一定に保つ必要がある。Na中の水素濃度が一定の時に、センサ部の温度が変わると、水素計の指示がどうなるかをみたのが図16である。

拡散膜の厚さが薄く、かつ拡散膜のパイプの内側が真空中で周囲のNaで加熱されているので、拡散膜全体が、そこを通過するNa温度になつてゐるとみなす。図中の直線は、ニッケルの透過率から求まる傾斜で引いたもので、よくデータに一致している。

この結果によると、500℃付近でNa温度が1℃かわると、Na中水素濃度が0.05 ppm変化したことに相当し、0.1 ppmの濃度変化を検出するには、Na温度を常に±2℃以内に制御する必要があることがわかる。

(4) 不純物特性

図15及び図16で示したノーブルポンプ圧力は、指示計の読みをそのままプロットしたものである。しかしながら、通常の真空計と同様に、この指示値は窒素換算の圧力である。水素の圧力を測定した場合は真の圧力と違つて来る。一般に、気体Aの圧力を窒素で較正した目盛で読んで P' Torr であるとき、真の圧力は、

$$P = \frac{1}{R_A} P' \quad (3.11)$$

となり、 R_A を相対感度と云う。ノーブルポンプの水素に対する相対感度はよくわかつてゐない。ノーブルポンプの相対感度は電離真空計の場合と同じに考えてよいとされている。電離真空計の水素に対する相対感度は、測定者により異なり、0.46, 0.52, 0.23, 0.4などと云う値が出されている⁽²⁾。ここでは0.46を採用した。

(3.7)式を使い、ノーブルポンプの圧力から水素濃度を求めるには、ノーブ

ルポンプ内のバックグランド圧力を測定値から差し引いてやらねばならない。バックグランド圧力としては、水素計センサ部に Na が無い時の圧力のある期間平均した値を使用した。図17はバックグランドの測定例である。

図18はこの様を補正を加えて求めた水素濃度を、その時のブラギング温度に対してプロットしたものである。測定は先に述べた様にコールドトラップの出口温度を順次さげていくことによりおこなったもので、図中の飽和曲線の近傍に集まっているので、測定値はほぼ妥当なものであると思う。

4 Ar 中水素計の特性

小リーク検出器として最近はNa中の水素計が注目されて来たが、カバーガス中に出て来る水素を検出するリーク検出器も、蒸気発生器にかかすことは出来ない。それは、保守、交換がNa中の検出器より容易であり、水のリークがカバーガス中で起つた場合などは応答が早い時がある、条件によつてはNa中の検出器より感度がよくなる、などの理由による。

カバーガス中の水素計として使われているのは、ほとんどガスクロ式のものである。ガスクロ式の検出器は、計器としての実積が十分あるため信頼性はあるが、欠点は測定が間欠的になるため、応答時間が遅くなることである。通常、ガスクロのサンプリング周期は2～3分で、改良によつては若干速くなるようである。

我々は、この欠点を除き、連続的にガス中の水素濃度を検出できる高感度のリーク検出計を開発した。

4.1 Ar 中水素計の設計

検出器の概要については第1報に述べてある。図19に系統図を示す。カバーガスをセンサまで導き排気する排気系、水素ガスが真空中へ拡散するセンサ部、真空を作りそこに拡散して来た水素を検出する真空系から構成されている。拡散して来た水素を連続的に検出できるように、センサ部と真空ポンプとの間にオリフィスを入れて、センサ部の真空度を適当にコントロールする様にしたのが特長である。

拡散膜にはパラジウム合金を使つた。外径3mm、長さ200mm、厚さ0.25mmで、内側を真空に引いてある。拡散膜内の温度とそこに導くガスの温度を最高500℃まで加熱できる様に、パラジウム膜部とそのまわりのスペーサ、さらにその外側のハウジングと三層にヒータがまかれていて、その間をガスがおりかえし流れる様になつている。図20にセンサ部附近の外観を示す。写真のほゞ中央にあるのがセンサ部で、その左側上方からガスが導入され、下部から排気される。パラジウム膜の内側はセンサ部の上方から真空に引かれる。

水素の検出には、電離真空計を使つている。オリフィス部の真空ポンプ側にも電離真空計がついている。真空ポンプとしては油拡散ポンプを使つている。

アルゴンガス中の水素濃度と分圧の関係は次の様になる。

$$\begin{aligned} P'_i &= xP_T \\ &\approx 20 \times 10^{-6} C_H' P_T \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、 P'_i はガス中の水素分圧 [atm]、 x は水素の分率、 P_T はガスの全圧 [atm]、 C_H' はアルゴンガス中の水素の重量濃度 [ppm] である。Naとアル

ゴンガスとが共存していて水素に関して平衡している場合には、(3.6)と(4.1)式から

$$P_1 = P_1' \quad (4.2)$$

になるから、Na中の水素濃度とアルゴンガス中の水素濃度の関係は、1気圧において、

$$C_H' = 3.3 C_H^2 \quad (4.3)$$

となる。従つて、Na中よりもアルゴンガス中の方が水素濃度は大きくなる。

アルゴンガス中の水素濃度の測定範囲は1~1,000 ppmとした。この値と、検出器として使用する電離真空計の測定範囲から、拡散膜の大きさと、オリフィスの抵抗を決める。アルゴン中水素計もモデル化すると、Na中水素計と同様図3のごとくなる。水素の検出は P_2 にておこなう。オリフィスはコンダクタンス C_{23} に相当する。

今仮りに、 $P_1 > P_2 > P_3$ とすると(3.3)、(3.4)、(3.5)、(3.6)、(4.1)から次式が求まる。

$$C_H' = \frac{10^6}{20 P_T} \left(1.44 \frac{C_{23} t}{A F} e^{\frac{B}{RT}} \cdot P_2 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.4)$$

使用したパラジウム合金膜を通過する水素の透過率はあまりはつきりしていない。

パラジウム合金は日本純水素(株)製で、Ag, Au, CuにPdが添加されている。nの値はこの場合0.5ではなく0.5~1.0の間の値をとる⁽¹⁵⁾とも云われていて明らかではない。設計に際しては、概略の推定値を使い、製作後標準ガスにて較正した。

4.2 較正試験結果

図2.1は標準ガスを使い水素計の指示を較正した結果である。水素計指示値は乾燥空気に対して較正された電離真空計による指示値(Torr)で、水素に対する圧力にするには(3.11)の相対感度 R_A で割る必要がある。45.0℃, 1,000 ppmの値が直線からはずれているのは、電離真空計が 3×10^{-3} 程度以上になると飽和して来ると考えられる。また真空度が悪くなると流れがクヌードセン流から分子流に変つて来て、油拡散ポンプの排気速度が変化する影響も入っているかもしれない。図2.1によるとnは0.85程度になつている。

図2.2はセンサ部に流入する標準ガスの圧力をかえたときの影響をみたものである。

(4.4)式から水素濃度一定であるから

$$P_2 \propto P_T^n \quad (4.5)$$

となるが、図2.2の傾向とよくあわないので検討中である。

図2.3は標準ガスの流量の影響をみたもので、流量が大きくなると若干水素計指示値

はさがつている。ガス流量は、パラジウム膜表面への水素の物質伝達率に影響すると考えられるが、この場合の変化はむしろ、ガス圧力測定点がセンサ部の上流にあることから、センサ部の圧力が流量増大とともにさがることによるのではないかと思われる。

応答時間を求めるため、検出計入口から10 ppmの標準ガスを流しておき、20 ppmに切換えてから、指示計が安定するまでの時間を測定した。この結果90%応答を示すまでの時間は約30秒となつた。この時間の内訳は次の様に推定される。ガス流量は2ℓ/minであるから、ガスがセンサに到達するまでの時間は、流路体積から計算すると25.7秒となる。残りが電離真空計の遅れとパラジウムを透過する遅れとなる。電離真空計の時定数は約0.5秒である。パラジウム合金膜を通過する水素の透過率が不明であるのではつきりした値はでないが、いずれにしても透過による遅れは数秒以内と推定される。

5 Na 水反応試験結果

5.1 試験条件

小リーク Na 水反応試験装置による水注入試験は現在(1972年8月)までに4回おこなつた。この4回の試験目的は、主として各種リーク検出計の応答を調べることであつた。ウエステージのデータをとることも当然目的に入っているが、試験条件を決めるにあつては水素計の応答に重点をおいた。注水条件は、当初は次の様な点を考慮してきめた。

- ① 「もんじゆ」の運転条件に近いこと。
- ② 水素計の予想性能により検出できること。
- ③ Na が不純物でかたまらない。
- ④ 注水中に試験条件があまり変わらないこと。
- ⑤ ウエステージのデータがとれること。
- ⑥ 注水量、注水率の測定ができること。

このうち③が初めはよくわからなかつた。適当な条件で水を注入すると、主循環系のブラギング温度がすぐ400℃を越えるほど汚れるため、どこかでNaがプラグすることが心配された。そこで注水率が小さく、比較的ウエステージが大きいとされている蒸気注入を先におこなうことにした。ただ、加圧器の容積が小さいため、水注入時に圧力が変化するのはこの際目をつぶることとした。

注水量は、加圧器にチャージした水量と試験後ドレンして計算した水量との差から求める予定であつたが、加圧器のフランジ部等から大気へのリークが若干あつたため、注水前後の加圧器内の温度と圧力の変化から求めた。

図24に注水時の加圧器圧力と注水管圧力の変化の様子を示した。 t_v が注水バルブ開の時間を示す。注水バルブを閉じた時の加圧器の圧力 P_2 は、注水管内の圧力の平均値にほぼ等しくなつているので、水注入圧力としてはこの P_2 を代表させた。注水バルブ閉の後、注水管内の圧力が除々に降下していくのは、注水管の圧力計導管に入りこんだ蒸気とそれが凝縮した水が残つていて、それらがナトリウム中に徐々に注ぎ込むためである。注水管圧力がある値までさがると注水管保護のArガスが導入され、最終的にはその圧力 P_G になる。

全注水量から注水バルブ閉時に注水管に残つたと考えられる水量を差し引き、その水量を t_v で割つた値を平均注水率とした。注水バルブ開から注水管の圧力が $P_2/\sqrt{5}$ になるまでの時間を全注水時間 t_T とした。 $P_2/\sqrt{5}$ としたはつきりした根拠はないが、全水量が注入し終つた時間がはつきりしない、注入圧力がかなりさがつた後の注入水が色々

な現象に与える影響は小さいと考えられる、等による。全注水量を Q で割った値を全注水率とした。

表1に試験条件をまとめて示した。Na系はすべて反応容器内の条件である。Na流量は一定で、 200 l/min である。第1回から3回目までは、反応容器と分離器との間のバルブV-301を開放しておいたが、第4回目ではこれを閉じたため、反応容器が大気圧よりあがっている。閉じた理由は、この程度の注水条件では反応容器の圧力上昇がほとんどないことと、水反応後カバーガス中に出て来た水素をすべてAr中水素計に導くようにしたためである。

水噴出方向はNaの流れと同じく下向である。ターゲット伝熱管はすべて図2と同じ形状である。図25にノズル径と平均注水率との関係を示した。ここでは各試験の水圧力の違いは考慮していない。図26は次式で求まる臨界流による流量と平均注水率との関係をみたものである。

$$G_m = A \sqrt{g k r_m \frac{k+1}{k} \cdot p / v} \quad (5.1)$$

ここでA：ノズル断面積，g：重力加速度，k：比熱比， r_m ：臨界条件における圧力比，p：水圧力，v：比体積，である。

5.2 Na流量，圧力，液面の変動

図27，28，29，30は第1回から第4回までの反応容器の液面，主循環流量，反応容器内のNa圧力，および注水管圧力の変化を，データロガーからプロッターで再生したものである。グラフ内に矢印で示した0点が，後に述べる音響計の信号から読み取った反応開始点である。No.1は改良前の板の厚いラブチャディスクを使っているため，注水管に水が導入されてから，ラブチャディスクが破れ，実際に反応が開始するまで約3秒，時間がかかっている。No.2～4では，ほとんど同時に反応が開始している。No.3では注水管の圧力は測定されていない。注水管の圧力上昇にかなり時間がかかっているのは，注水管とその圧力計の導圧管に内径が 3.175 mm の細いパイプを使っていることによる。さらにNo.1では注水管内に，外径 2 mm の棒をそう入し，その体積を減らしてあるため，特に圧力上昇がゆるやかになつている。

試験No.1では水注入と同時にNa中圧力計に小さなパルスがでている。その後約1秒たつてから，液面計にパルスが現われ，反応が続く間，液面が振動している。主循環流量は反応前後での違いはみられない。

液面の変動は図28に示した試験No.2では，No.1よりもはつきりと現われている。反応開始と同時に液面がもり上り始め，約2秒でピーク値を示す。これは，水注入と同時に

に蒸気と発生水素により液面が上昇し、その後水素が液面に到達してはじけ、液面の波立ちができることによるのではないかと考えられる。その後の液面はかなり一定の周期で振動する。液面の高さは発生水素量の大きさに比例すると考えられ、反応容器断面上での液面計の取付位置の影響を考慮することにより、発生水素量の絶対値がおおよそ推定できるものと思われる。

No.3, No.4ではさらに液面の変動が大きくなる。No.3の最大上昇値は4.5 cmである。No.3, 4の液面変動がNo.1, 2にくらべて著しく大きくなっている理由を解明するには今後のデータの蓄積が必要である。いずれにしても、実際のSGにおいても、水リークが起つた時に検出可能な程度の液面変動が起る可能性があり、リーク検出手段として利用できるかもしれない。

5.3 プラギン計と水素計の応答

Na水反応後の連続式プラギン計、Na中水素計およびカバーガス中水素計の応答記録を図3 1～3 3に示す。No.3では水注入管の圧力記録がないが、いずれの場合も、注水バルブは記録紙上の約20秒の点で開けられている。先に述べたように、2～4では注水バルブ開の点と反応開始点とはほとんど差がない。

5.3.1 Na中水素濃度

図3 1.～3 3.に示したNa中水素濃度はノーブルポンプの圧力により換算してある。試験No.2のNa中水素濃度は反応開始後36秒で立ち上りを示している。立ち上り直後のパルスは電氣的なノイズと考えられる。Na中水素濃度は反応前0.6 ppmであつたのが、水注入後最終的には6 ppmに落ち着く。水素濃度が高くなるにつれノイズが大きくなっているのは、ノーブルポンプの対数アンプの出力を直線目盛の濃度に換算したためである。No.3の水素濃度もNo.2と同じような変化を示している。濃度が階段上に上昇していくのは、主循環系をNaが一循して来ることにより、反応容器内へ水素濃度の高いNaが入りこみ、部分的に混合して出て来ることによる。

図3 4.は同じNo.3のNa水素濃度の変化を質量分析計の H_1 のイオン電流に比例する指示でみたものである。時間的な変化は図3 2.のノーブルポンプによる濃度と全く一致している。バックグラウンドノイズに対するS/Nはノーブルポンプより質量分析計の方がよいが、電気接点の開閉などによるパルス状のノイズの影響は、質量分析計の方が大きくうけることがわかる。

No.4では注水バルブ閉のあと、比較的短時間で注水管の水がNa中にでているのでNa中水素濃度の立ち上りは急で、その後はほゞねている。この様子は図3 5.に示した質量分析計の出力をみるとさらにはつきりする。

表2.に各検出計の試験条件の結果をまとめてある。Na水中素計のセンサ部温度は感度をあげるため、設計最高温度の550℃にしてある。Na流量は、Naによる輸送遅れをみるため、No.3, No.4で少なくしてある。No.4の応答時間が長いのはこのためである。反応後、主循環系内のNaで平均化された水素濃度は、No.3 No.4では測定限界以上になつたため測定できなかつた。

5.3.2 Ar中水素計

Ar中(カバーガス中)水素計は、0~10mV出力の記録計からとつていて、電離真空計の 10^{-4} Torrまたは 10^{-8} Torrの一桁が各々10mVにリニアに比例している。図3.1.では、150 sec 附近で 10^{-4} Torrから 10^{-8} Torrのレンジに切換わつている。260 sec 近くでは、この計器の測定限界である約 6×10^{-8} Torrに達したためトリップしている。図2.1.からわかるように、 6×10^{-8} Torrはセンサ部温度450℃の時、約1,000 ppmに相当する。

図3.2.のNo.3及び図3.3.のNo.4ではあらかじめ 10^{-8} Torrのレンジに設定されている。水注入後立ち上がり始めるまでの応答時間は、No.2とNo.3では75秒程度でほぼ同じであるが、No.4ではガス流量が小さいのと、センサ部温度を300℃にさげてあるため140秒と遅くなつている。センサ部温度を下げたのは、途中でトリップしないように膜の水素透過量をおさえるためである。

遅れ時間のかなりの部分が反応容器と水素計との間のベーパーラップを通過することによるものである。応答時間を短くするには、さらに小型で必要最少限の容量をもつベーパーラップにする必要がある。

5.3.3 ブラギング計

ブラギング計の流量比の応答を図3.1.~3.3.の③に示してある。水注入時には部分閉塞の状態である流量比約90%にしておく。水注入により不純物がブラギング計に到達すると、閉塞状態が急激に進み流量比は低下していく。

ブラギング計は自動測定状態になつているので、流量比低下とともにブロウによる冷却量は減らされるが、この程度の時間ではほとんど温度は上昇しない。No.2~No.4.のいずれも数分で完全に閉塞している。

流量比が低下し始めるまでの応答時間は、いずれも40秒前後と比較的短い。流量比が低下していく過程を図3.2, 図3.3.についてみると、Na中水素濃度と同じような波打ちを示しながら低下している。この場合も、この波打ち現象はNaが

主循環系を一循することに関係している。図3.3の No.4 の初期流量比が低いのは、試験前90%に制御できず、近い値で制御したまま水注入をおこなったためである。この場合も応答時間が他の場合と変わらないと云うことは、プラグ計の初期閉塞状態が、この様な応答時間にほとんど影響しないことを示している。

5.4 音響式検出器

音響式検出器は、Na中マイクロフォン、通常マイクロフォン、加速度計等により、Na-水反応を検知しようとするものでありNa中の水素濃度変化による検知に比して応答時間ゼロと考えられる点で注目されているものである。SWAT-2における音響式検出器の開発は、反応時の信号とバックグラウンドノイズと弁別を行いその信号が何に起因するものであるかを調べ、実機SGにおける有効性に対する結論を目的とするものである。反応音及び測定信号を構成するファクターとしては、①水素気泡の発生及び液面からの離脱②水の沸騰③水及び蒸気のジェット等が考えられ、又その他に容器の共鳴、変換器の共鳴、変換器の取付状態、変換器の特性、電氣的ノイズ等が大きく影響すると考えられる。SWAT-2においては、ナトリウム-水反応、ナトリウム中へのガスジェット、バックグラウンドノイズ等が測定できる。この他予備実験装置としてSWAT-2においては、ナトリウム-水反応、ナトリウム中へのガスジェット、バックグラウンドノイズ等が測定できる。この他予備実験装置としてSWAT-2Aがあり、これによつて水中へのガスジェット、水中への水ジェット、ノイズ等が測定できる。SWAT-2では、媒質がナトリウムであるための制約があり、変換器として加速度計、ナトリウム中マイク、通常マイク等を使用している。又SWAT-2Aではその他にピエゾ式圧力計を使用している。現在SWAT-2では加速度計3個、ナトリウム中マイク1個、通常マイク4個を図3.6のように設置している。

Position No.1, No.2, No.3は外径16mmのステンレス棒を反応容器外壁に溶接しその先端にネジ切りを行つたものである。

Position No.4は内径17mm長さ224mmのステンレスパイプの先端にナトリウム中マイクを取付けてある。

Position No.5はPosition No.1と共通である。

Position No.6, No.7は反応容器保温材外側に取付けてある。

Position No.8は注水バルブの開閉を検知するための注水バルブ近くに取付けてある。

磁気テープ記録システムは、FM記録のデータレコーダーと、ダイレクト記録のオーディオ用テープレコーダーの二系統ある。データレコーダーシステムは、図3.7の

ように配線されている。FMとDr（ダイレクト）との併用はデータレコーダー（AMP EX-FR-1300）のFM記録の周波数特性がDC~20KHZのため、20KHZ以上の高周波成分をDr記録しようとする目的と変換器の温度変化等により信号にドリフトがでた場合、DC成分をカットしてDr記録させるという記録の安全性を目的としている。

現在は、AMP EX-FR-2000（DC~80KHZ FM記録）を入手したため今後は、FR-2000を使用する予定である。又水注入バルブの開閉信号を記録しているのはデジタル記録の他の信号との時間軸の同期をはかるためである。（バルブの開閉表示信号をステップ信号に変換しているため実際のバルブ開と約0.12秒の遅れ時間がある。）テープレコーダシステムは図38のように配線されている。本報告の測定に使用した変換器の性能は第一報1)を参照のこと。

5.4.1 測定結果

過去4回の試験において、表3のような取付位置に変換器を取付け、測定を行った。図39は第1回試験の加速度計の信号を示し、バルブ開から反応開始まで約3.2秒かかるのはラブチャーディスクの背圧の上昇時間があるためである。（第1回だけ破裂圧の高いラブチャーディスクのついた水噴出ノズルを使用した。）図40は反応開始点の時間軸を拡大したもの。図41はデータレコーダーにFM記録した加速度計等の第3回試験結果である。図42はテープレコーダーにDr記録した通常マイクの第3回試験結果である。以下過去4回の試験においては図41、図42と同様の傾向を示した。又ノイズ、反応開始のピーク値、定常反応中の信号レベルを表4に示す。

検 討

現在これらの信号をもとに周波数分析等の解析を進めている。信号だけを見た場合、通常マイクより加速度計で壁の振動を測定したり、ナトリウム中マイクによりナトリウム中の音波を直接測定する方がバックグラウンドノイズと定常反応中の信号レベルとの差が大きく有効と考えられる。又通常マイクでの測定はPosition No.6, No.7よりは反応容器壁に取付けた棒の先端で測定する方が有効であると考えられる。

表4の反応開始点における加速度計のピーク値の異なりは、データレコーダーの記録アンプが約2Vに調整されており、Transducer Aは1g/V、Transducer B, Cは2g/Vの出力を出すようにアンプが調整されているため、Transducer Aでは約2gまでTransducer B, Cは約4

9までしか記録されていないためと考えられる。ただし図4.1からもわかるように、実効的にはほぼ等しいと考えられる。(この原因は、記録の目的は周波数分析等にあり、測定対象が定常反応中の記号にあるためである。)

反応開始点において信号が大きくなり、20 msec程度で減衰していくのは、反応開始時にラブチャードディスクが破裂する音、又その時発生する圧力波等が原因であり、それらの音が反応容器中で減衰するのに20 msec程かかるものと考えられる。

今後の課題は、これらの測定結果をもとに周波数分析、相関等の解析を進め、反応音を構成するファクターの判別を行うことである。又現在は、約10 KHzまでの可聴周波数領域を対象としているが、超音波領域の測定も必要であると考えられる。

5.5 ウエステージ

5.5.1 試験結果

ウエステージは水噴流の散乱程度に大きく影響される。噴流の散乱が大きく、スプレイ状に出る場合はウエステージ率が小さくなると云われている。従つて、安全性の上から考えると、最もウエステージが大きい状況を作り出して調べておく事が重要である。

図4.3.に製作した水噴出ノイズの外観を示す。詳細な構造は第1報を参照されたい。このノズルは試験No. 2から使われた。図4.4は大気中でおこなつた常温水の噴出試験の様子で、針状の噴流ができていのがわかる。この場合はノズル径0.7 mm、ラブチャードディスク破裂圧40kg/cm²G 噴出圧力100%Gである。

図4.5.と図4.6.に伝熱管のアセンブリを示す。主要寸法は図2.に示す。現在までおこなつた4回の試験はいずれも、図2.のごとく、水噴出方向は下向で、その直ぐ下のターゲット伝熱管に直接噴流をぶつけている。試験前の伝熱管は図4.5.のごとく、光沢のある金属面を持つている。

図4.7.は試験No. 1のターゲット伝熱管上にできたウエステージで、周囲は他の伝熱管と同様茶褐色になつているが、ノズル中心軸を中心にした直径約17 mmの円形部が銀色になつている。さらにその周囲に褐色のリングができていのがみられる。へこみの深さは表3.に示すように、最大0.02 mmである。

図4.8.はNo. 2の試験後のノズルと伝熱管を示し、中央がターゲット上にできたウエステージである。この場合はNo. 1と全く違つて、同心円状に色が変わつていっている。へこみの様子は図5.1.に示す。最大深さは0.45 mmである。周囲の伝熱管上には褐色の斑点ができていっている。斑点の様子は伝熱管の位置に関係なく全部の伝熱

管面上にあり、斑点の大きさはいずれも上側の面上が大きく、下側の面上が小さい。従つて直接Na-水反応の影響を受けたのではないようである。

図49はNo. 3の試験後のノズルと伝熱管を示し、中央がターゲット上にできたウエステージである。この場合はほとんど色の変化はみられない。へこみ工合は図51.にみるごとく、No. 2にくらべてやや平坦なくぼみを示している。最大深さは0.34mmである。

図50.はNo. 4のターゲット面上にできたウエステージである。周囲は暗褐色であるが、ウエステージのうけた附近のみ銀色ががった地はだがでている。この色の変化している部分の広がり工合と、へこみ工合が少しゆがんでいることから、若干ジェット方向がかたむくか、反応生成物が軸対称にならないでターゲットにぶつかつたことが考えられる。へこみ工合はおわん状を呈している。最大深さは2.73mmに達し、20秒間の水噴出であることを考えると、極めてはげしいウエステージであることがわかる。

5.5.2 考察

APDAで得られたウエステージのデータとの比較を図52.に示す。ウエステージ率としては、最大深さを表1.に示した全注水時間 t_T 及びバルブ開放時間 t_V で各々割つた値を使い、その平均値を中心に線の広がりて図中に示した。リーク率も表1.に示した全注水率と平均注水率との両者の平均値を中心に線の広がりて両者を示した。

APDAのデータのうち、斜線の引いた記号は蒸気によるウエステージである。試験No. 4のウエステージ率は、APDAで得られた最大の値とほぼ等しいかあるいはそれ以上であることがわかる。2¼Cr~1Mo鋼のウエステージ率の大きいデータを基準に考えると、試験No. 1~3のウエステージ率は比較的小さい。試験No. 1はノズルの構造が他と違つて適切でなかつたこと、ターゲット間隙が大きいことなどが原因と考えられる。

試験No. 2は、強いて云うと、ノズル径が0.7mmと大きく、リーク率が大きすぎることがあげられる。蒸気の場合も水注入の場合と同様、あるリーク率のところてウエステージが極大になることがあるとすれば、No. 2では蒸気の場合のウエステージ率極大を超えたリーク率であつたとみなされる。

試験No. 3では温度が比較的lowかつたのが他との違いとしてあげられる。温度の影響は、まだあまりよくわかつていないが、この場合のウエステージが低い原因が温度であるとするると注目すべき事である。

試験No. 1にできた約17mmの銀色のマークが、反応生成物のジェットがぶつかってできたものとみなし、自由噴流の境界層の大きさと比較してみる。軸対称の自由噴流の境界層の半径 Y_{max} は次式で与えられる。¹⁷⁾

$$\frac{Y_{max}}{R_0} = 3.4 \left(\frac{ax}{R_0} + 0.29 \right) \quad (5.2)$$

ここで R_0 はノズルの半径、 x はノズル出口からの軸方向距離、 a はノズル内の乱れの大きさによつて影響される実験常数で、0.066~0.08の値をとると云われている。乱れが大きいと a は大きくなるので、今の場合 $a = 0.08$ をとる。 x にはノズルターゲット間距離を入れると、 $2Y_{max} = 18\text{mm}$ となる。従つて、この様な反応を伴う噴流の場合も、境界層の広がりはそれ程大きくならないのではないかと考えられる。No.1以外のウエステージ部の形状についても、ウエステージ機構をさぐる手がかりとして、今後検討を加えていく。

5.6 試験部交換工事

反応容器の上部からその内部に入っている内部構造物は、ウエステージの結果を調べるため、水反応試験ごとに引き抜き交換する必要がある。試験部の構造は第1報に反応容器の図面があげられているので参照されたい。試験部の交換工事は次の様な順序でおこなわれた。

- ① 次回に試験する内部構造物の組立
- ② 反応容器上部の保温材、予熱ヒータはらし
- ③ 水注入管、計装線、液面計等の取りはずし
- ④ Na流入管の切断
- ⑤ 内部構造物の引き抜き、
- ⑥ 次回の内部構造物そう入
- ⑦ 引き抜いた内部構造物解体
- ⑧ 伝熱管試験部とフィルタの洗浄
- ⑨ Na流入管の溶接
- ⑩ 溶接部とパッキング部の加圧検査
- ⑪ 計装、予熱ヒータ、保温工事

図5.3は保温材、予熱ヒータを取りはずした反応容器上部附近を示す。図5.4は反応容器上部のNa流入管フランジのシール溶接を切断したところを示す。切断は内部からArガスを少しづつ流しながらおこない、外気が装置内に入りこむのを防いだ。

図5.5は引き抜き直後の反応容器内部構造物である。内筒表面でぬれている様子を示

しているのは、付着していた若干のNaが空気に接して直ぐにNaOHになり、さらに空気中の水分で潮解したものと考えられる。内筒の内部にもほとんどNaは付着していなかった。内部構造物は引き抜き後、試験部組立用の架台にのせられ、ビニールシートでつつむ。その後、試験部を洗浄するまで、ビニールシートの内部にArガスを送りながら一兩日放置する。

図5.6.は内部構造物を引き抜いた後の反応容器内部で、Na又はその酸化物等はほとんど付着していない。ただ、Naの液面があつたと思われるレベルより上が多少色が変わっている。

図5.7.は伝熱管アセンブリの下についているフィルターで、穴あき板の中にある金網にNaが付着しているのがみられる。金網に付着しているのはNaのみで、 Na_2O 、NaOH等は付着していないようである。

伝熱管アセンブリとフィルターを除いた内部構造物は、第2回から第4回の試験までは、洗浄せずそのまま再使用した。第5回目に使用する内部構造物は水で洗浄した。水は離れたところから噴流でかけて洗浄したが、特に反応する様子はなかった。

伝熱管アセンブリとフィルターはエチルアルコールとイソプロピルアルコールの混合液に3~4時間浸して反応させてから、約半日水につけた。

6 結 言

各リーク検出計の特性試験と4回のNa-水反応試験をおこなった結果、次の様な点が明らかとなった。

Na中水素計に関して

- ① 質量分析計の出力は感度はよいが安定性に問題があり、ノイズの影響を受けやすい。
- ② 拡散膜を透過して来るのは水素のみであり、また真空系に残留するガスも水素以外はほとんどないので、質量を分析する必要はない。
- ③ 使用したスパッターイオンポンプの電流値から真空度が読みとれるので、イオンポンプだけでも水素の拡散を検出できる。
- ④ Na中の水素濃度を求めるには、イオンポンプの排気速度、真空度の読みの水素に対する相対感度の値のデータが必要であるが、確かな値はわかっていない。
- ⑤ ニッケル膜の透過特性の経時変化は、今後もつと長時間使用してみないとわからない。
- ⑥ 過渡状態の最小感度は、今後リーク率をもつと極端に小さくした実験をおこなわないと確かめられない。
- ⑦ 指示変化が始まるまでの遅れ時間は、今までおこなわれた程度の水注入条件に対しては40秒前後であるが、水素計内のNaの流速をもつとあげる、拡散膜の構造を改造し薄肉のものを使う等の改良により、さらに短かくする事が可能である。

Ar中水素計に関して

- ① パラジウム合金を使つたセンサは高感度で、Ar中水素濃度で1ppmまで測定可能である。
- ② Ar中水素濃度の過渡変化に対して連続的に指示を示すが、刻々その時の濃度を示しているかどうかは、さらに解析してみる必要がある。
- ③ 指示値の較正は標準ガスにておこなつたが、ガスの流量、ガス圧力、センサ部温度によつて影響を受ける。
- ④ 較正式を作るには、使用したパラジウム合金の水素透過特性のデータが不足している。
- ⑤ パラジウム合金の経時変化を今後調べる必要がある。
- ⑥ 応答時間を短かくするには、反応容器出口のベーパーラップをもつと小型にする必要がある。
- ⑦ 実際にSGにとりつける際に保守の点などで改良すべき事が明らかとなった。

連続式ブラギング計に関して

- ① ブラギングオリフィス部の流量は、水のリークに対して早い応答を示す。

- ② 実際のSGにおいても検出可能かどうかは、さらに定量的な検討が必要である。

音響検出器に関して

- ① 水の噴出し始めた反応開始時は、かなり大きな信号が加速度計等の出力に出るが、その後の定常反応時の出力は小さく、ノイズレベルの2~10倍程度である。
- ② 加速度計とNa中マイクとの信号の大きさは大差ない。
- ③ 反応容器壁近くにおいた通常のマイクロホンにても、反応音の検出ができるが加速度計等より信号は小さい。
- ④ 加速度計取り付け棒の様な導波管(棒)の近くにおかれたマイクロホンの出力は、反応容器外壁に取り付けたマイクロホンよりも大きな信号を検出する。

その他の計測量に関して

- ① 反応容器Na圧力、主循環流量等にはNa水反応の影響は現われなかつた。
- ② 誘導式液面計には水素気泡の影響がはつきり現われ、リーク検出の一手段として利用できる可能性が示唆された。

ウエステージに関して

- ① 蒸気のウエステージは予想以上に激しい。
- ② 試験条件によつて、ターゲット伝熱面の色がいろいろ変わる。
- ③ 使用した水噴出ノズルは針状のジェット作り、これによりせまい範囲の円形のウエステージができる。

試験装置に関して

- ① 注水管の圧力測定が適切でなく、改良する必要がある。
- ② 加圧器のフランジ部からたびたび水のリークがあり、試験がやりにくい。
- ③ Na主循環系に関しては特に大きな問題はない。
- ④ 水注入を今後続けた場合、コールドトラップの容量が問題になりそうである。
- ⑤ リーク検出器の最小感度を調べるための、微量の水注入試験ができる様に改良するのが望ましい。
- ⑥ 引き抜いた試験部には、現在までのところ、ほとんどNaやその化合物は付着していない。

先に述べたように、本報告書は試験の経過報告として、ほとんど生の結果を整理したもので、十分な検討は加えられていない。従つて、今後試験を進めて行つた結果、その整理方法等を変更する可能性があるので、引用の際には留意されたい。

今後は、各種のデータを蓄積していくと共に、水反応後の水素計等の過渡特性の解析を進めていく予定である。また音響検出器の信号の周波数分析も行なう。

本報告書が、S Gの設計や運転のみでなく、類似の試験をおこなう上で少しでも役立てば幸いである。最後に、装置の製作と試験をおこなう上で協力を得た多くの諸氏に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 根井, 大内, 大島, 堀, "小リークナトリウム水反試験研究, 第1報, 試験装置の概要," 動燃報告書, (1972)
- 2) 熊谷, 富永, "真空の物理と応用," 物理学選書11, 裳華房(1970)
- 3) S, A, Meacham, et al, "The Solubility of Hydrogen in Sodium," APDA-241, (1970)
- 4) R, W, Webb, "Permeation of Hydrogen Through Metals," NAA-SR-10462, (1965)
- 5) A, Brachet, et al, "Detection of Small Leaks by Hydrogen Measurement in a Sodium-Heated Steam Generator," IAEA Meeting on Sodium-Water Reaction, Paper(1968)
- 6) 池本, "原型炉蒸気発生器における小規模漏洩の検出," 動燃事業団報告書, N94171-01, (1971)
- 7) J, A, Coleman, "Loop Evaluation of the APDA In-line Detector for Hydrogen in Sodium," APDA-252, (1970)
- 8) 品川清訳, "Na加熱蒸気発生器の漏洩検出に関する諸問題," IAEA シンポジウム(1970)
- 9) D, R, Vissers, "A Hydrogen Monitor for Detection of Leaks in LMFBR Steam Generators," Nuclear Technology, Vol. 12, Oct. (1971)
- 10) P, Roy, D, N, Rodgers, "Characterization of a Diffusion Tube Hydrogen Detector in a Dynamic Sodium System," Nuclear Technology, vol. 12, Dec. (1971)
- 11) A, I, "Sodium Technology", FPM 3606-1
- 12) J, H, Singleton, "Hydrogen Pumping Speed of Sputter-Ion Pumps," The Journal of Vacuum Science and Technology, Vol. 6, No. 2, (1968)
- 13) J, Cranic, "The Mathematics of Diffusion,"
- 14) 三菱原子力工業(株), "小リークNa-水反应用リーク検出計, 水素検出器性能計算書," SWAT2-0-036, (1972)
- 15) 後藤, 斉藤, "超高純水素の製造とその利用," 日本純水素(株)よりの私信

16) APDA-262, (1970)

17) 根井“小リークNa-水反応によるウェステージ現象と火炎状ジェットの構造,” 日本伝熱シンポジウム予稿集, 5月(1972)

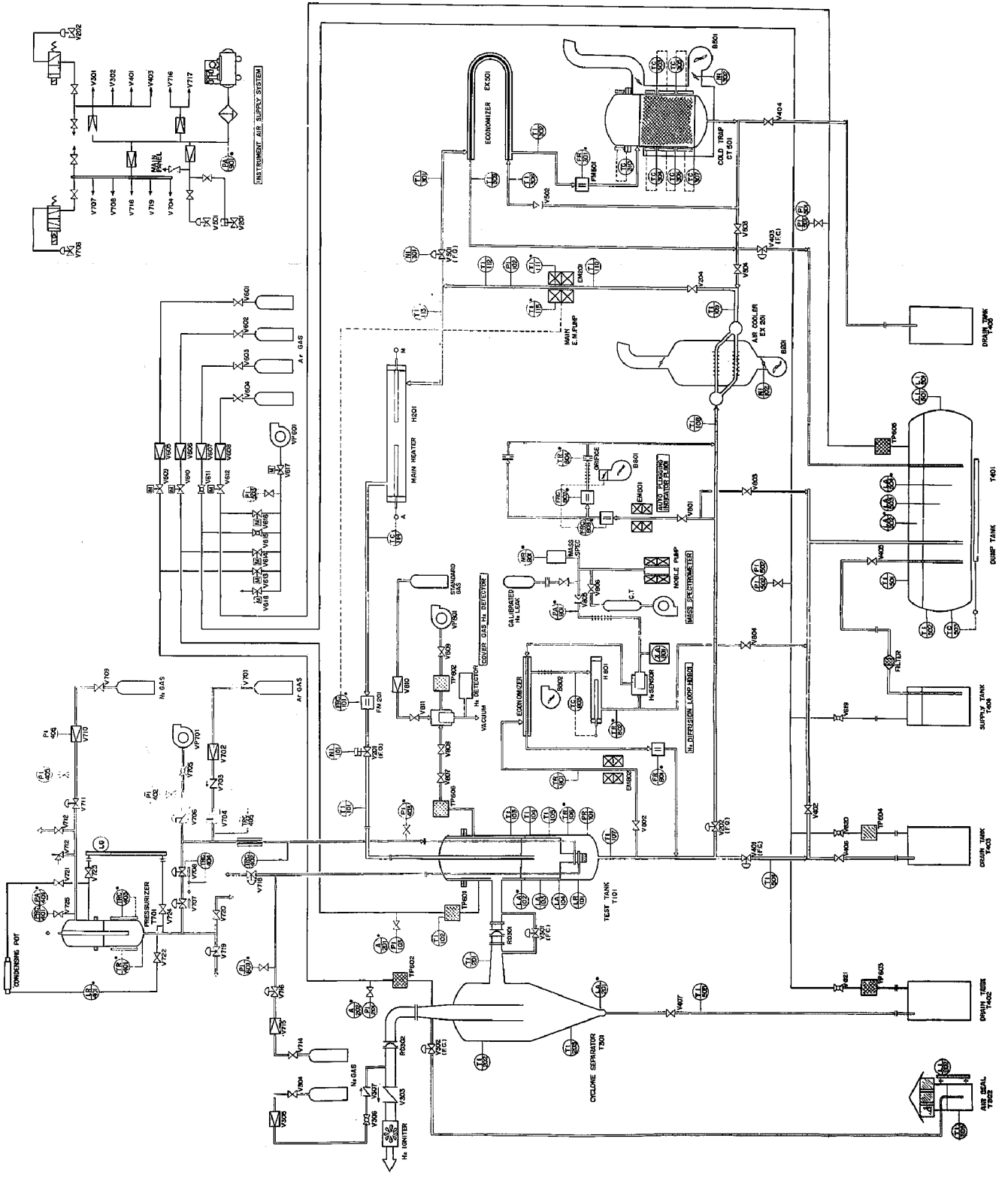


図1 SWAT-2 フロート (詳細図)

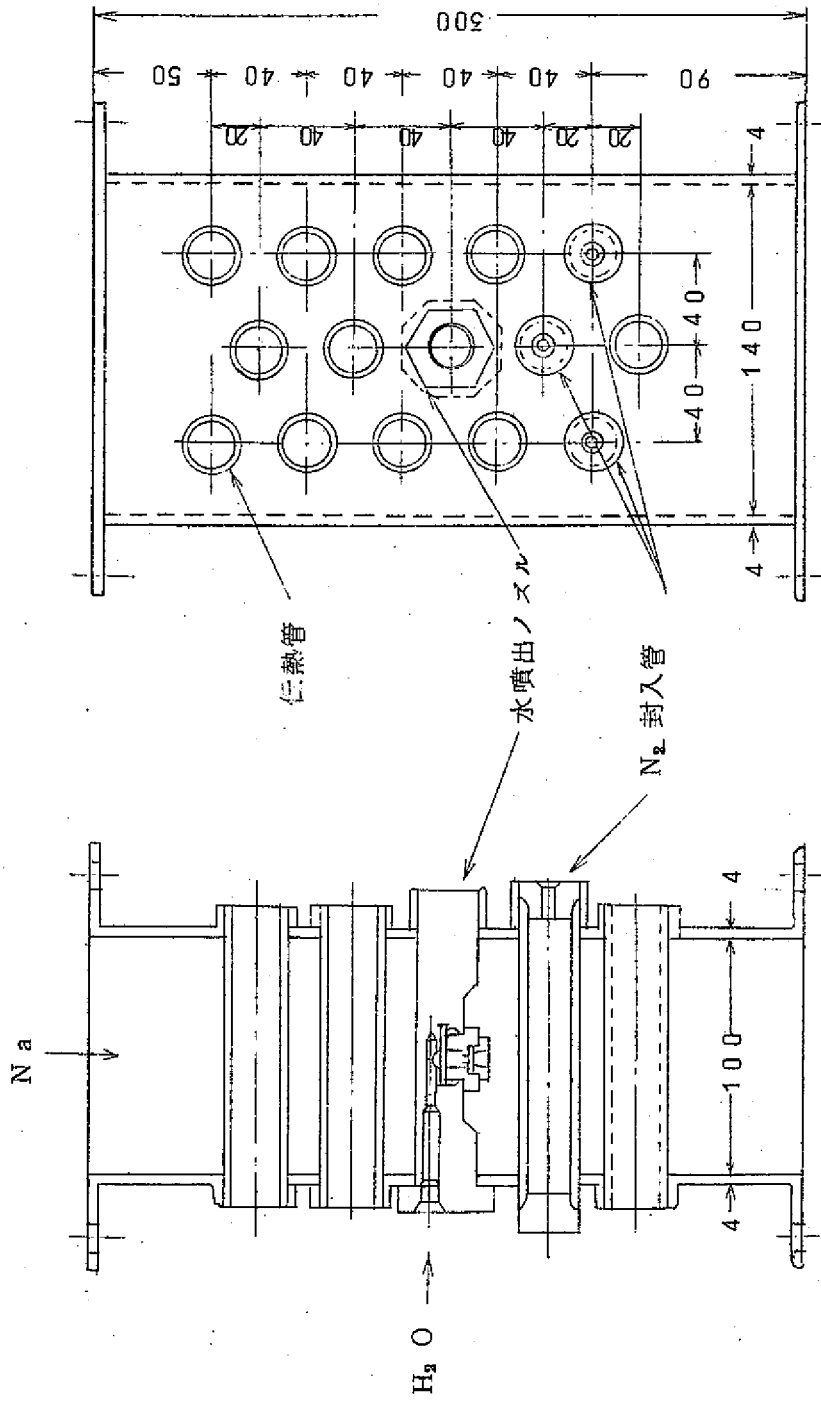


図2 ターゲット伝熱管と水噴出ノズル

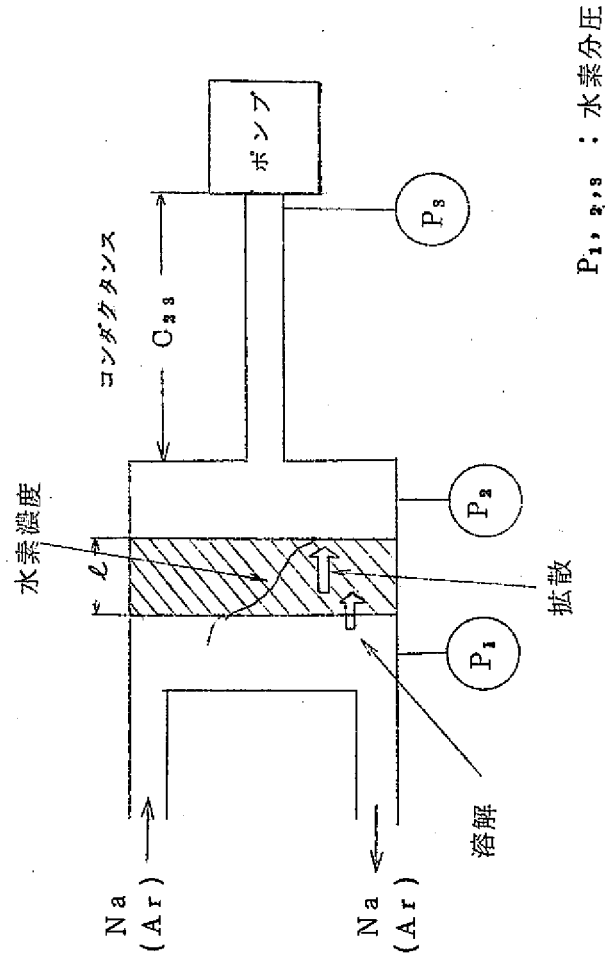


図3 水素検出器のモデル

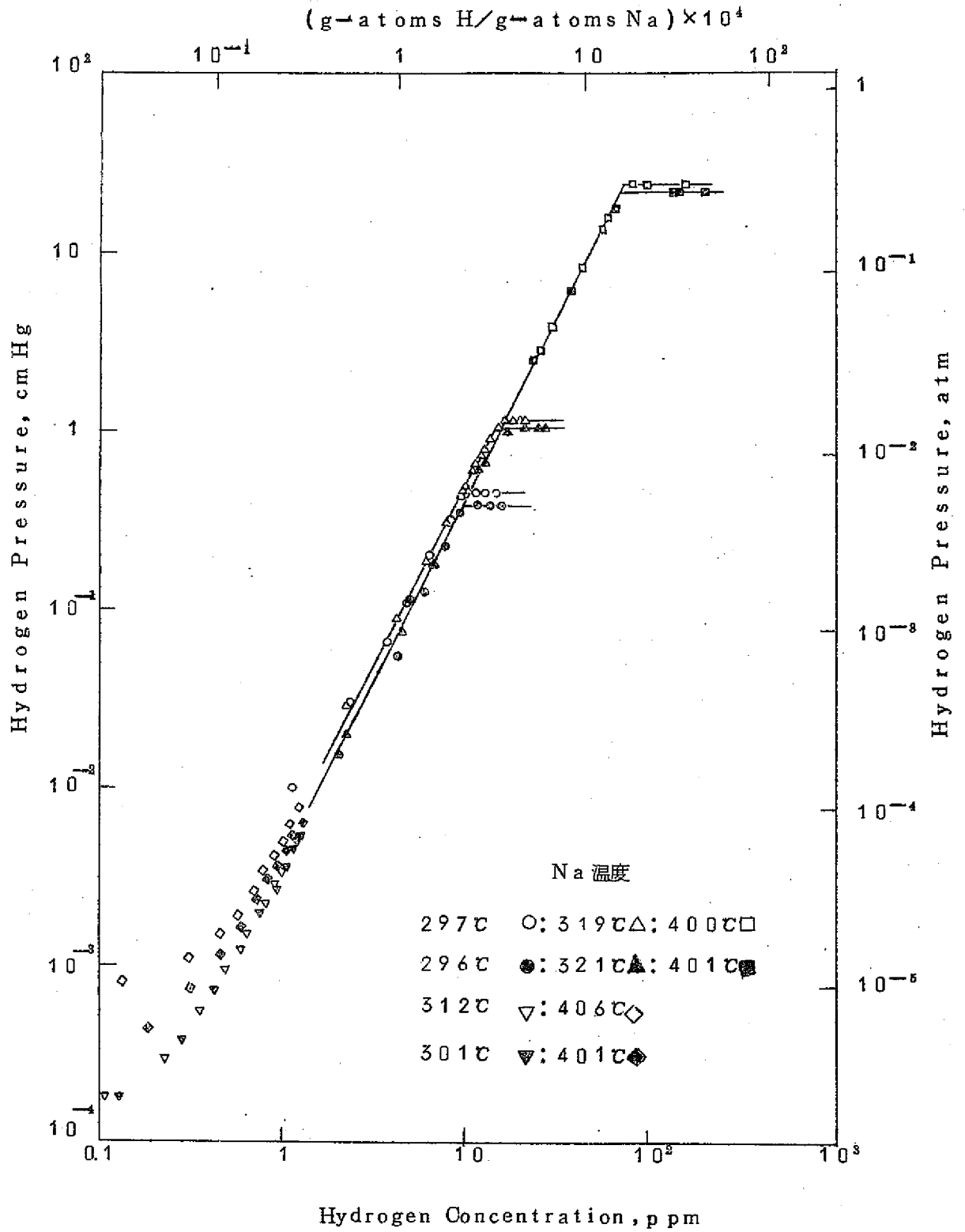


図4 Na中の水素濃度と分圧の関係

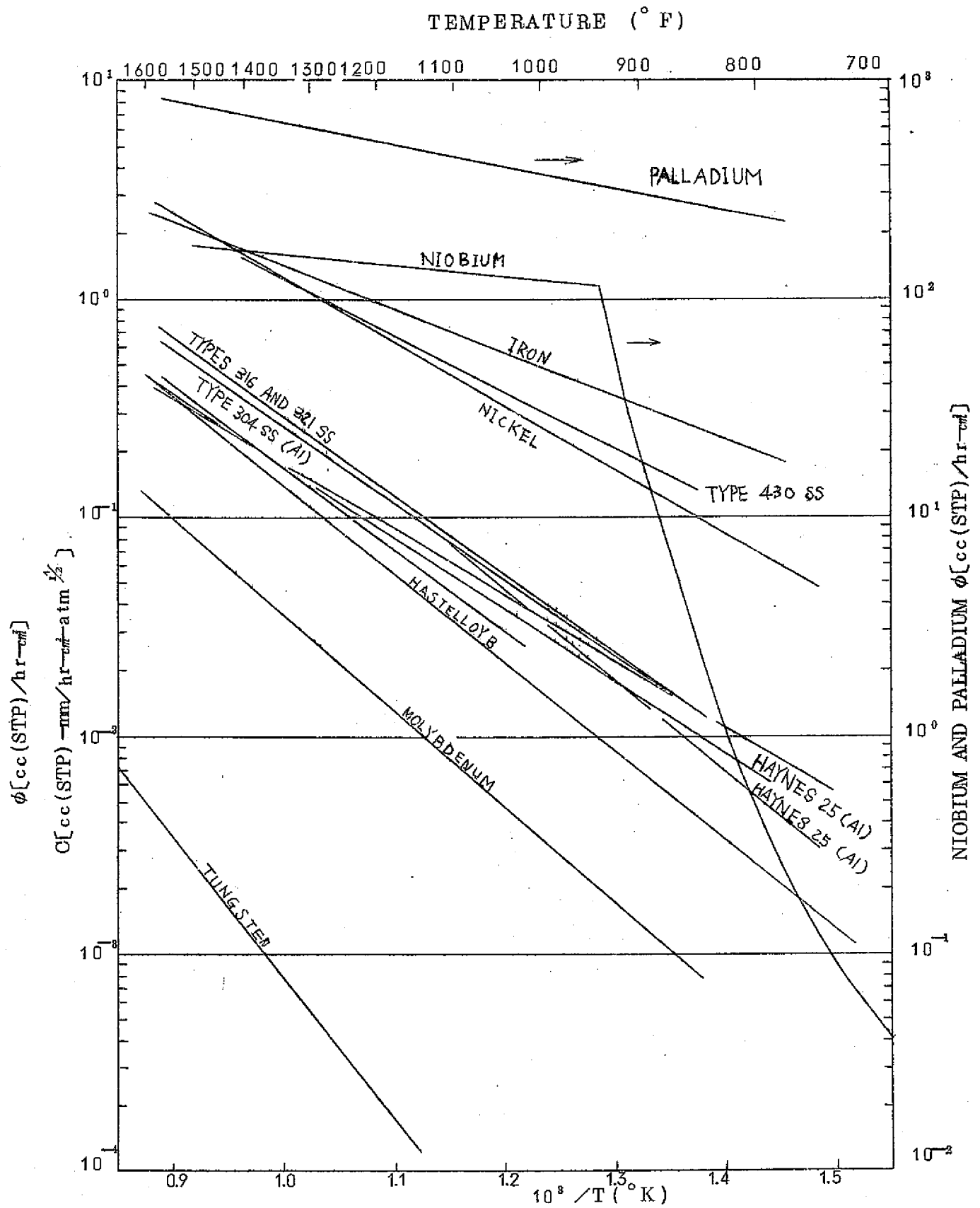


図5 各種金属中の水素の透過率

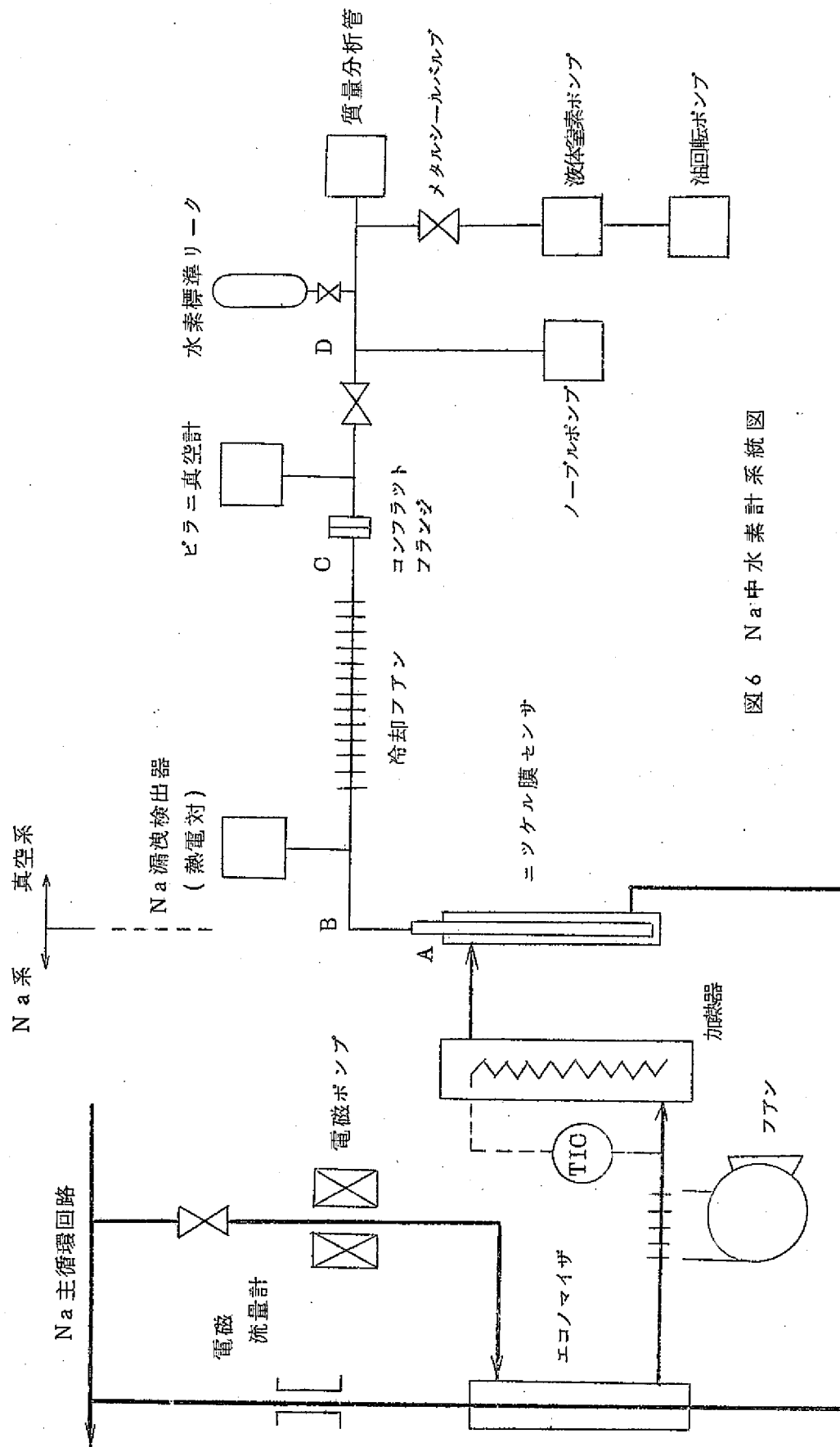


図6 Na中水素計系統図

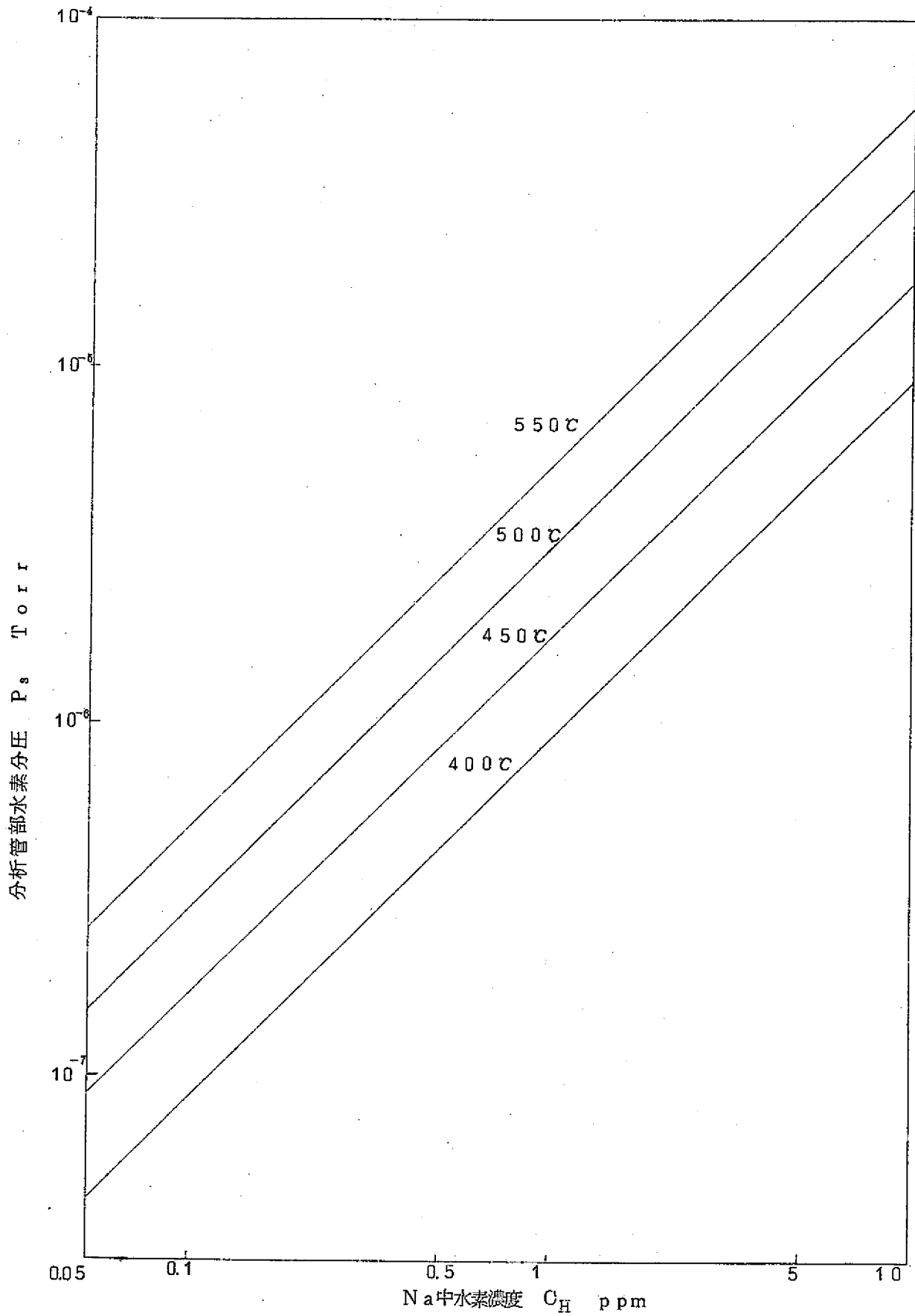


図7 Na中水素濃度と分析管部水素分圧

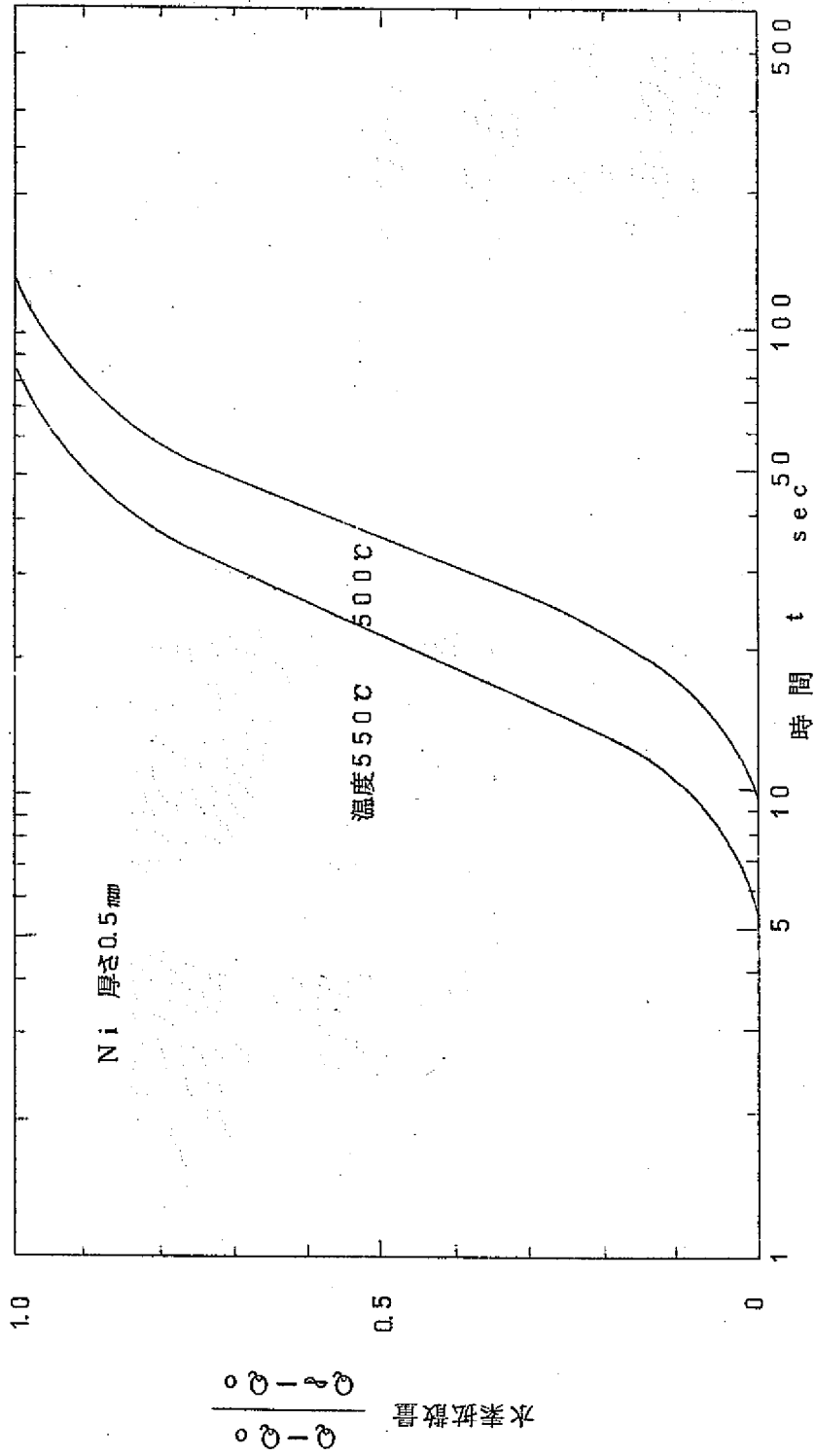


図8 拡散膜内の時間遅れ

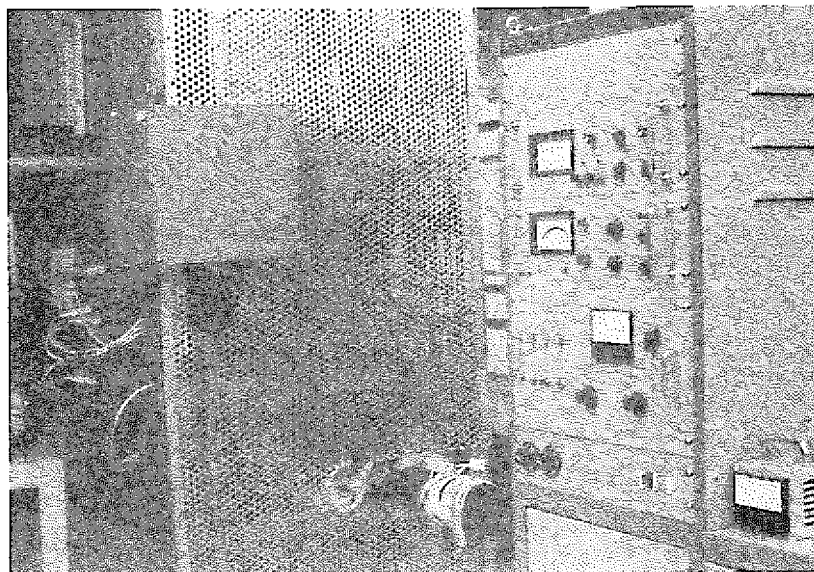


図 9 Na 中水素計現場機器

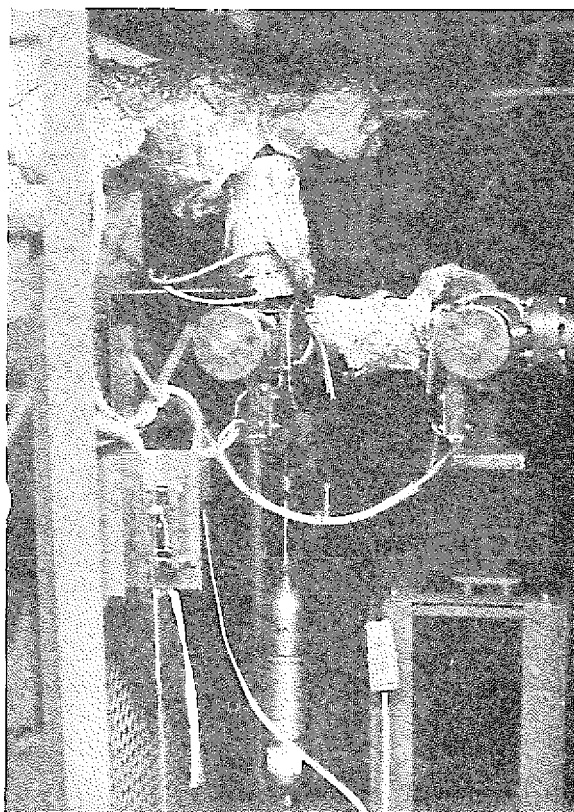


図 10 Na 中水素計真空機器

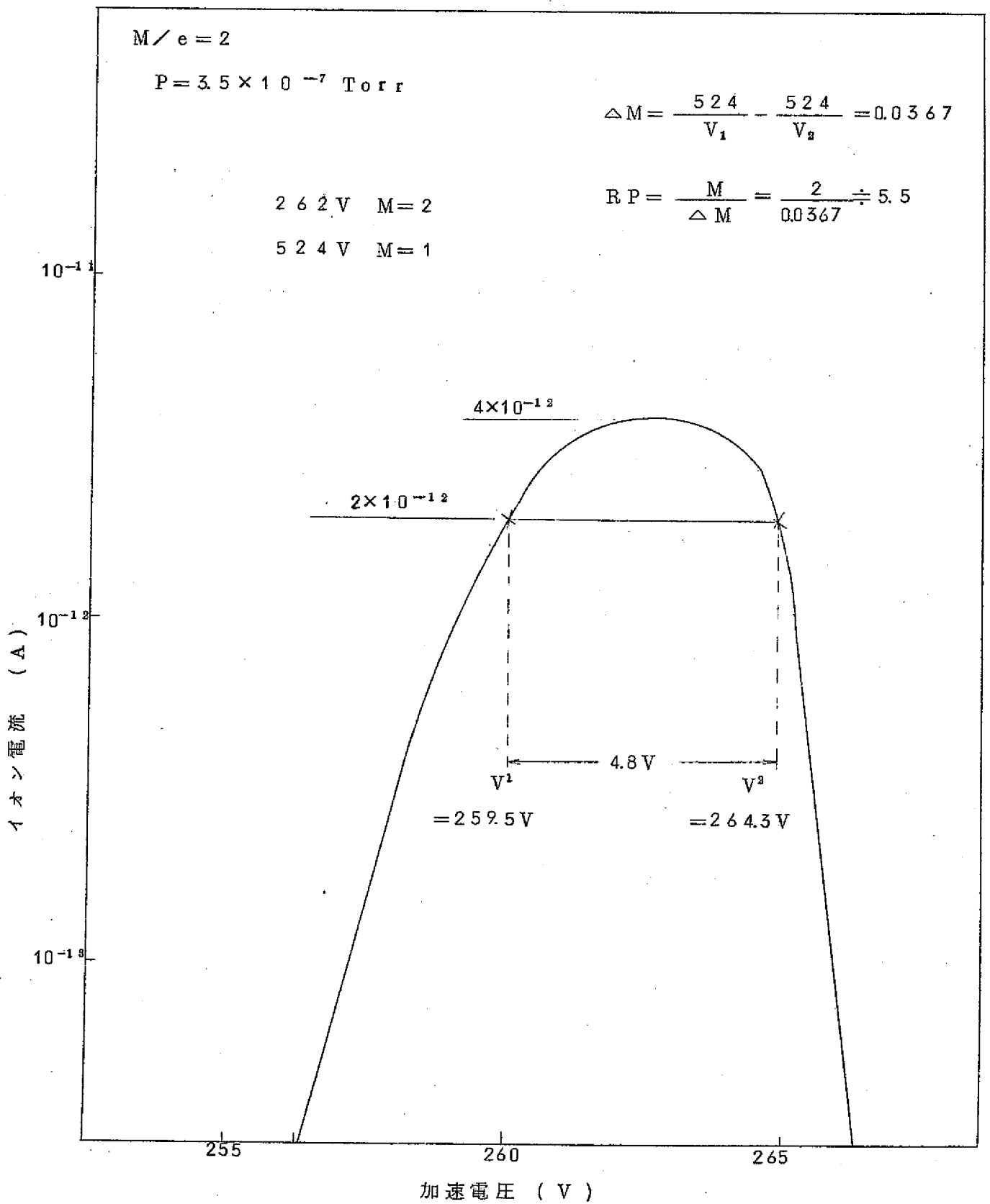


図 11 分析管の分解能

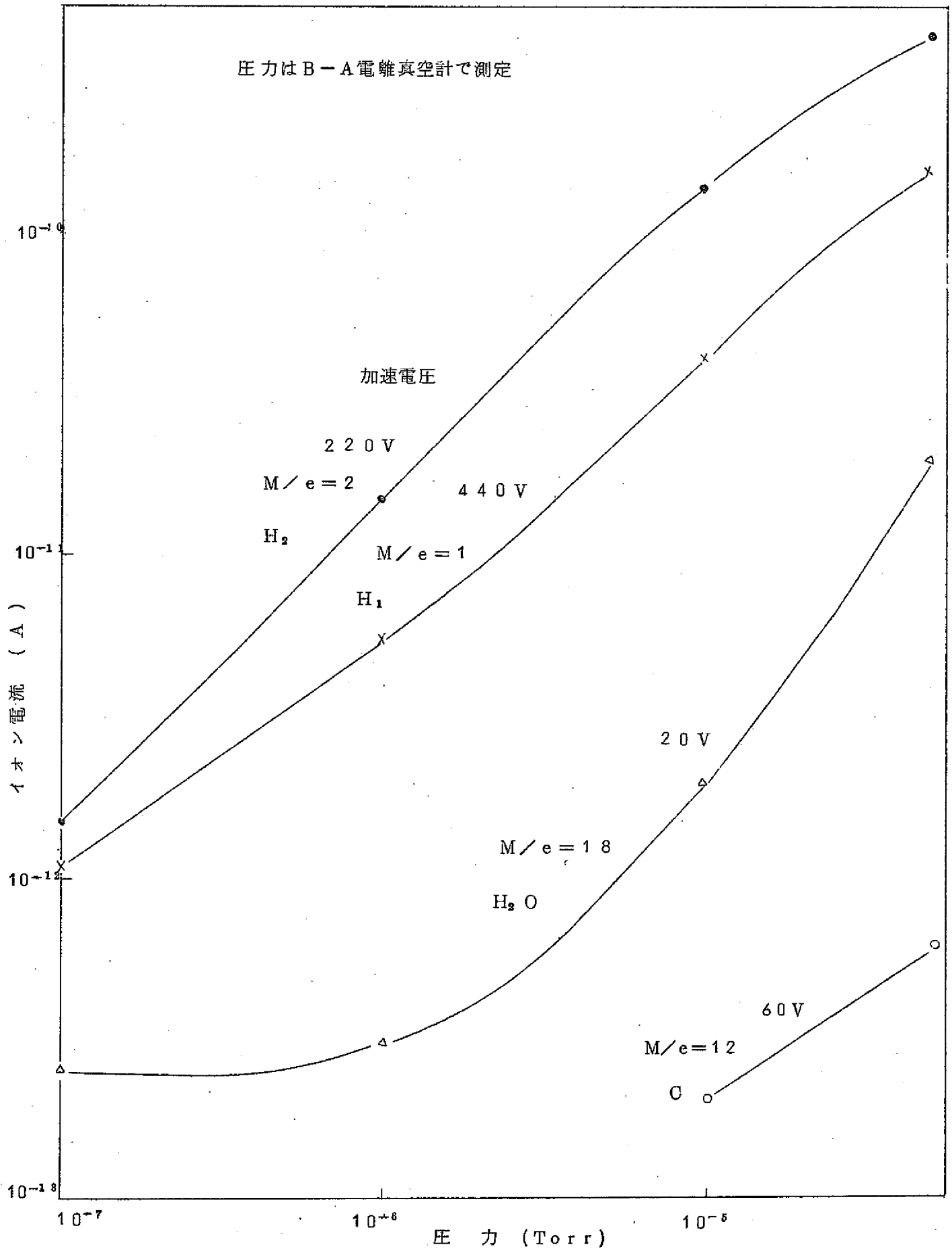


図12 分析管の感度と直線性

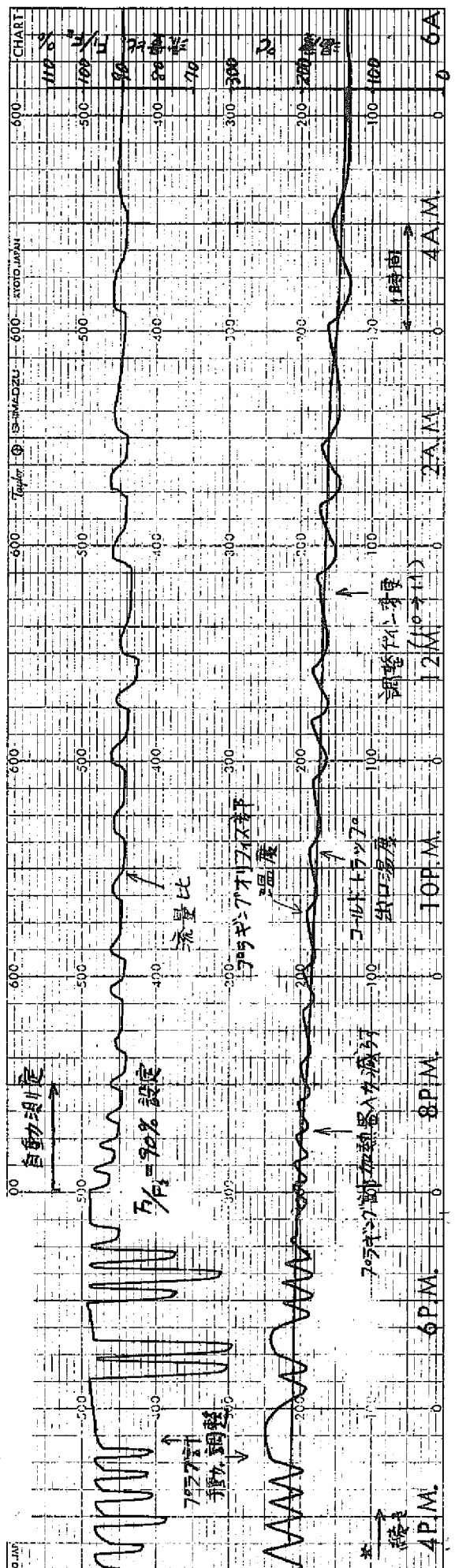
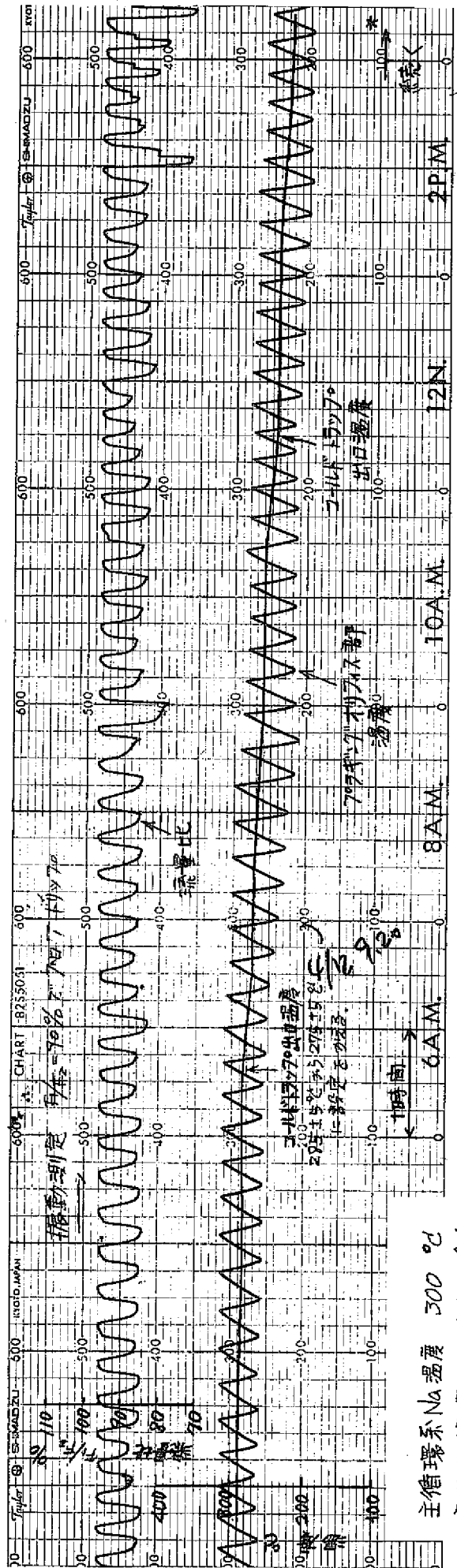


図13-1 連続式ブラッキング計測定状態(0)

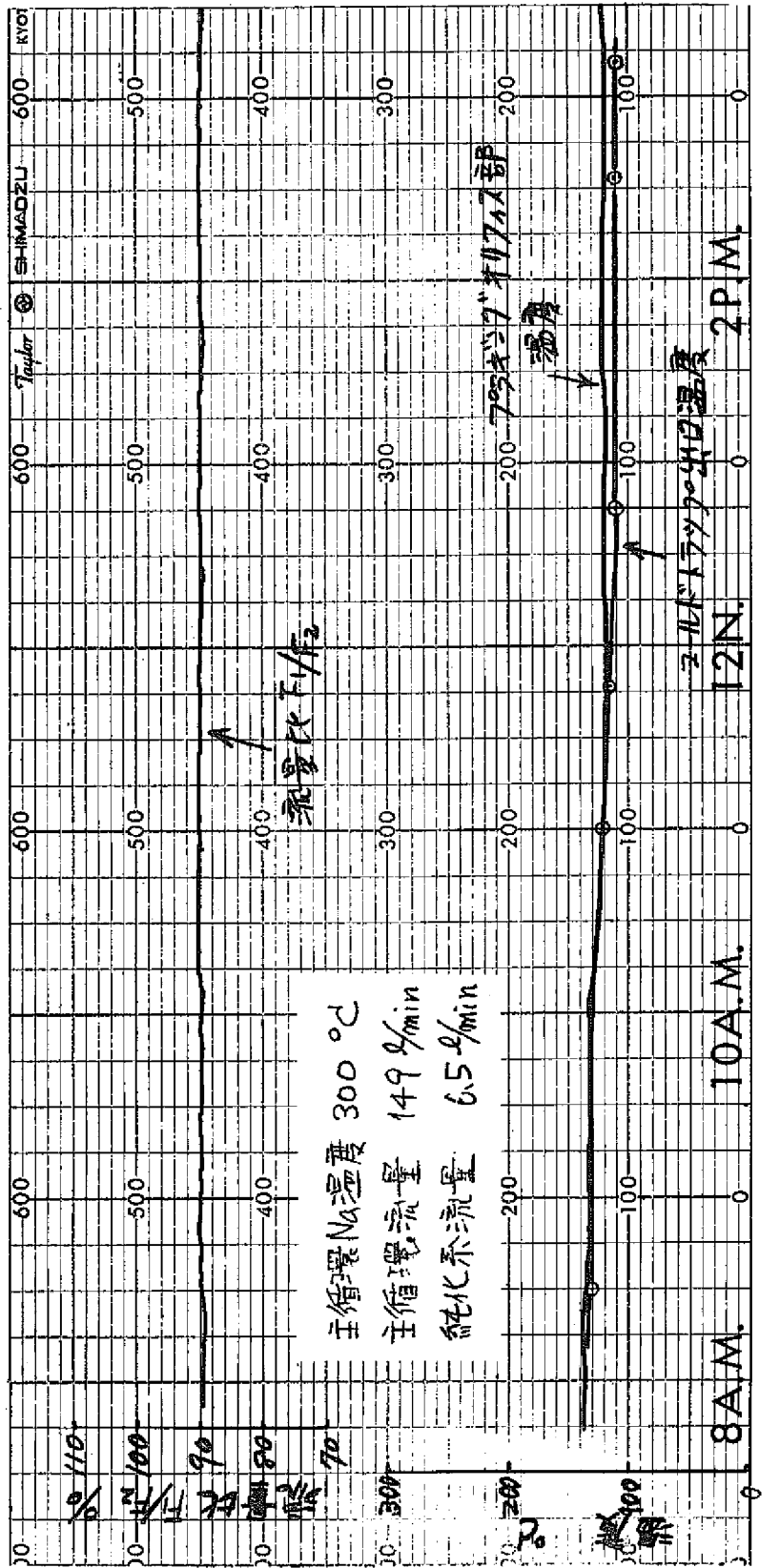


図13-2 連続式フラッキング計測定状態図

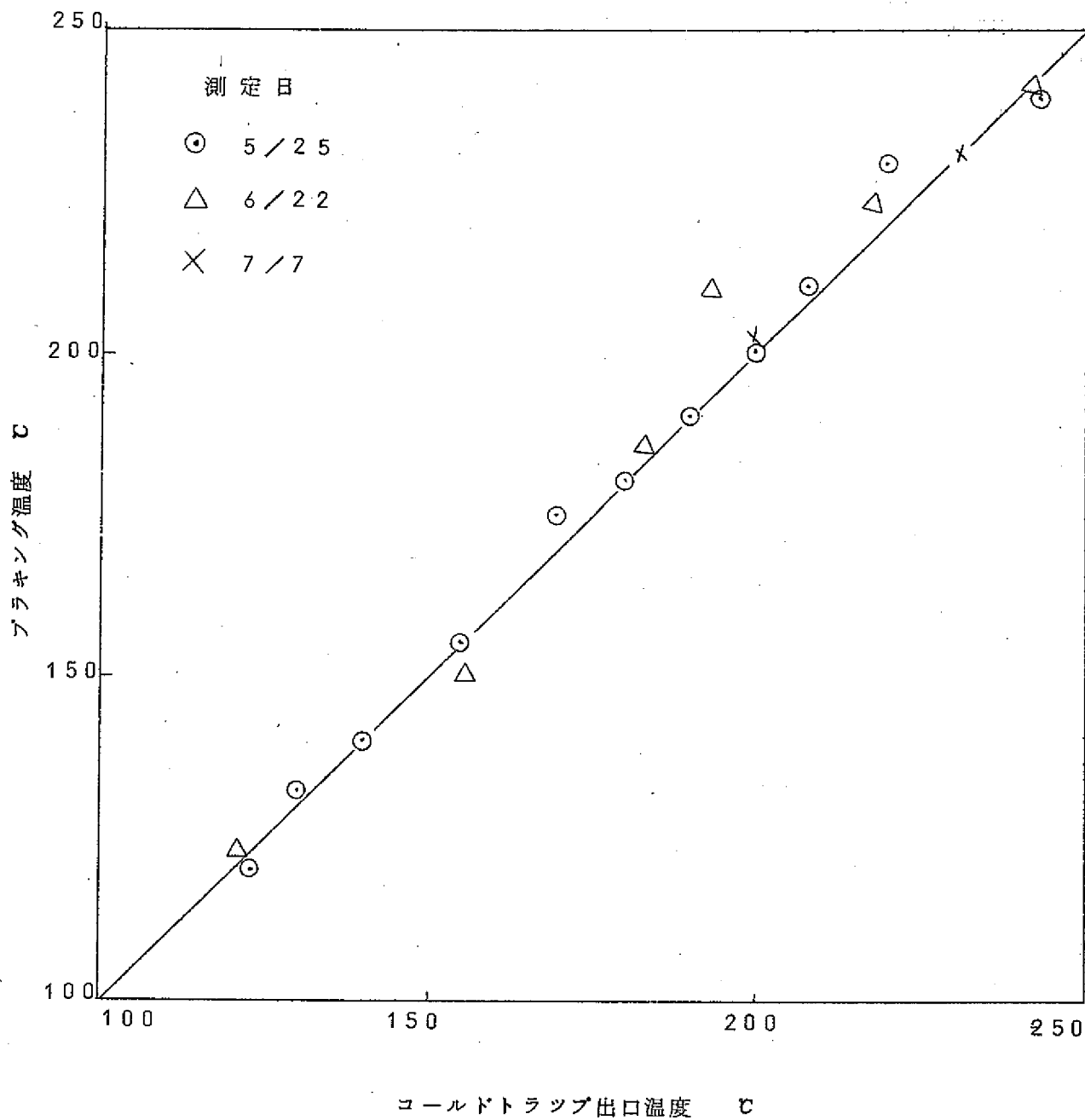


図14 ブラッキング温度とコールドトラップ出口温度

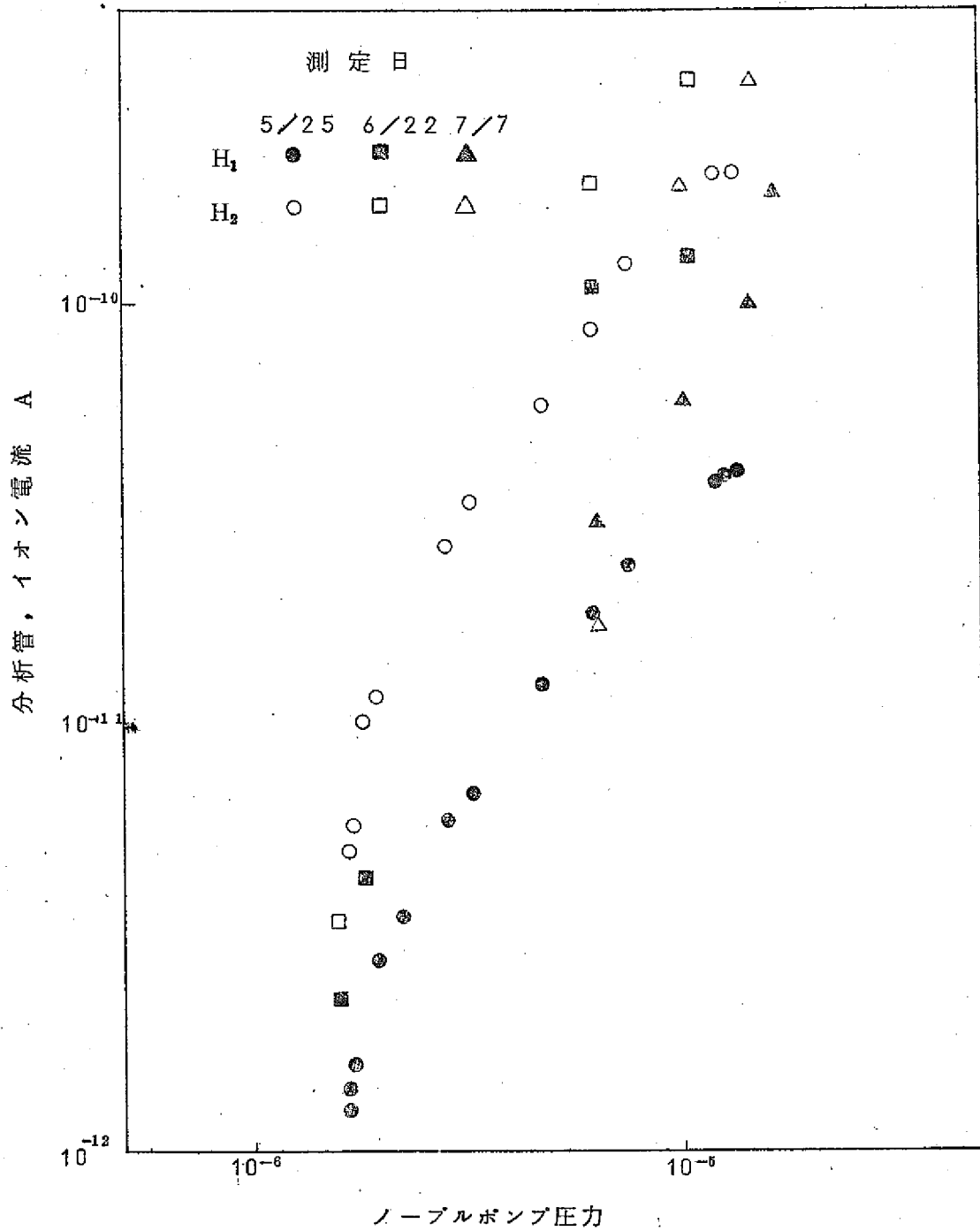


図 15 ノーブルポンプ圧力と分析管イオン電流

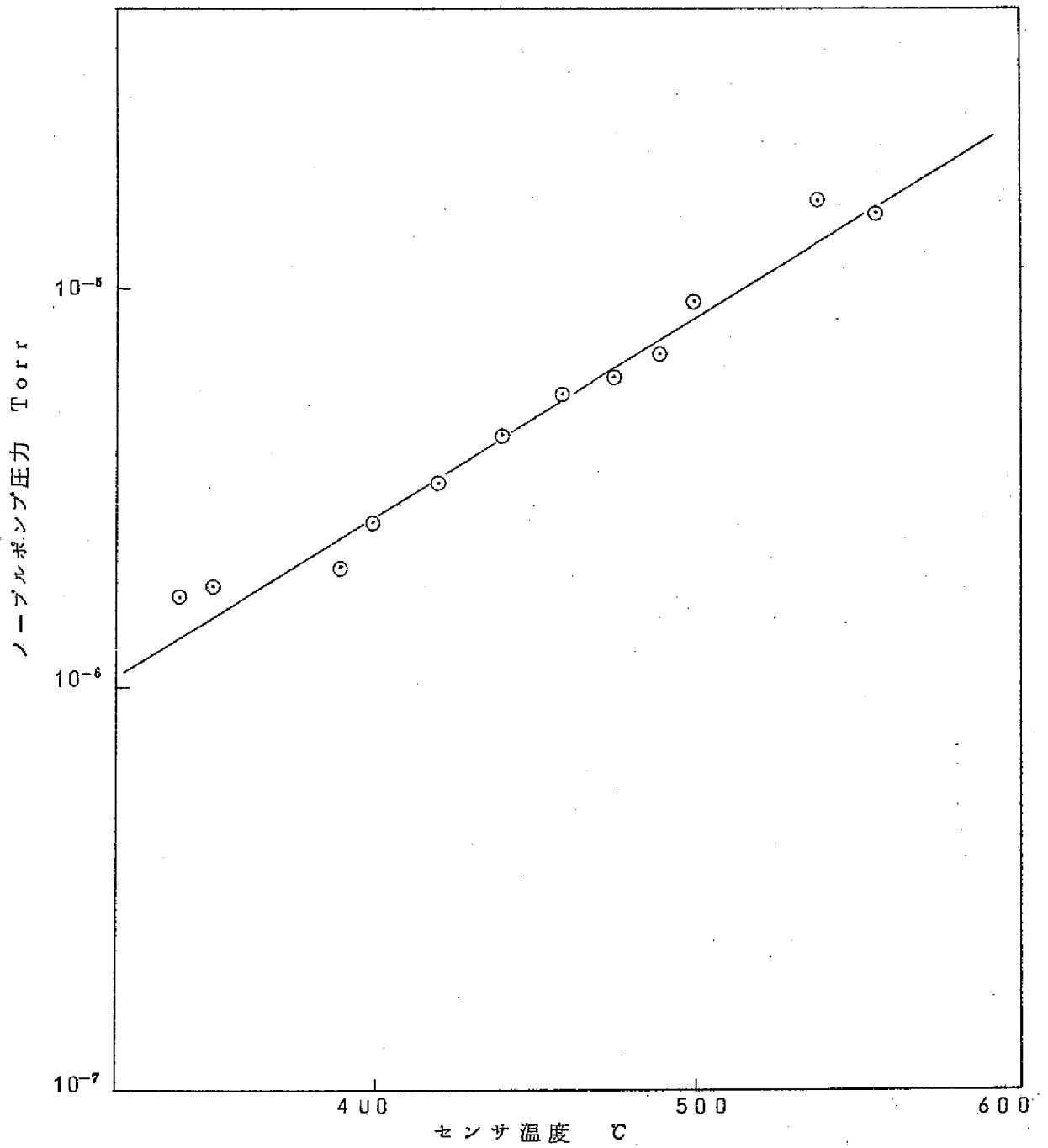
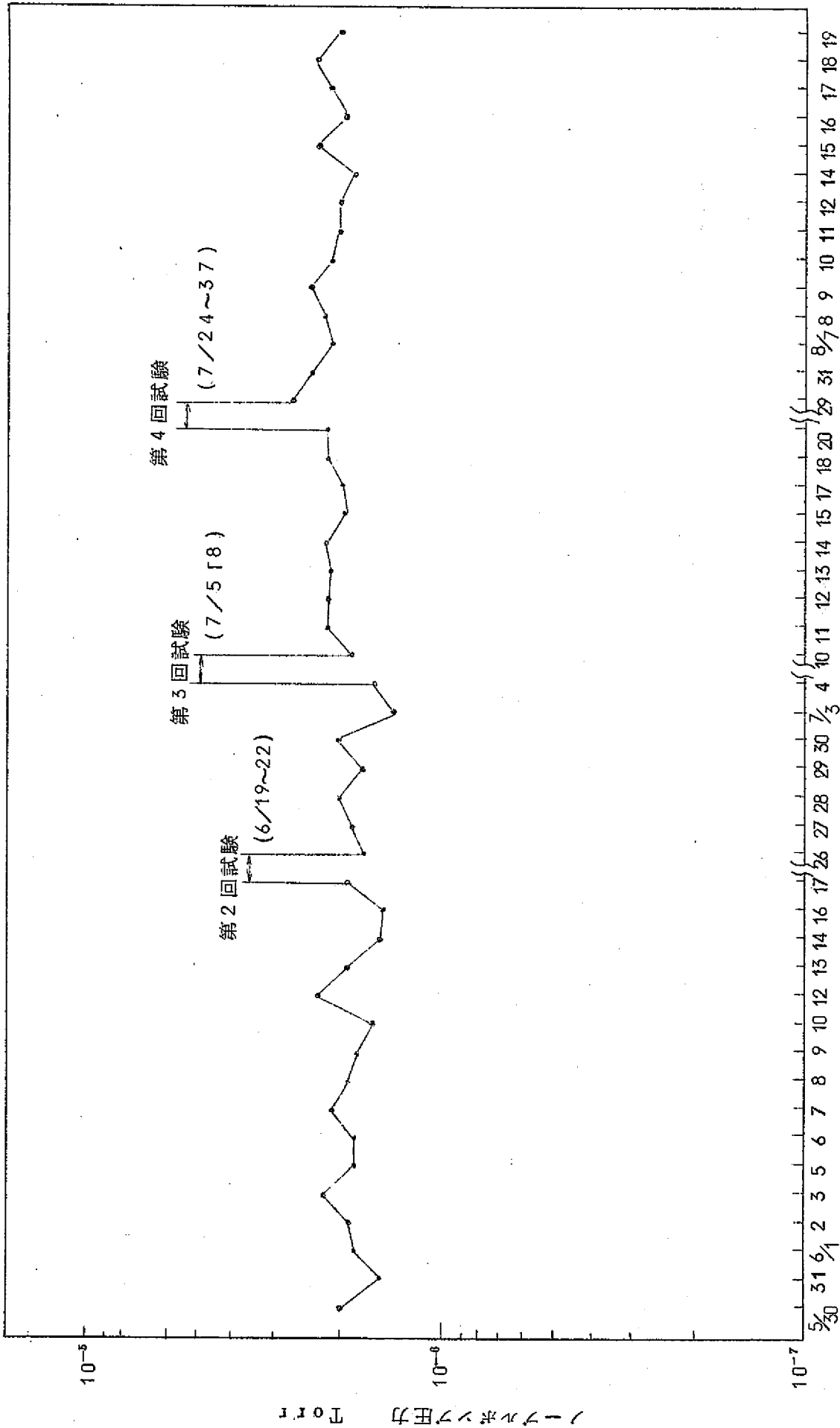


図16 拡散膜センサ部温度とノーブルポンプ圧力



測 定 月 日

図17図 ノーブルポンプのバックグラウンド圧力

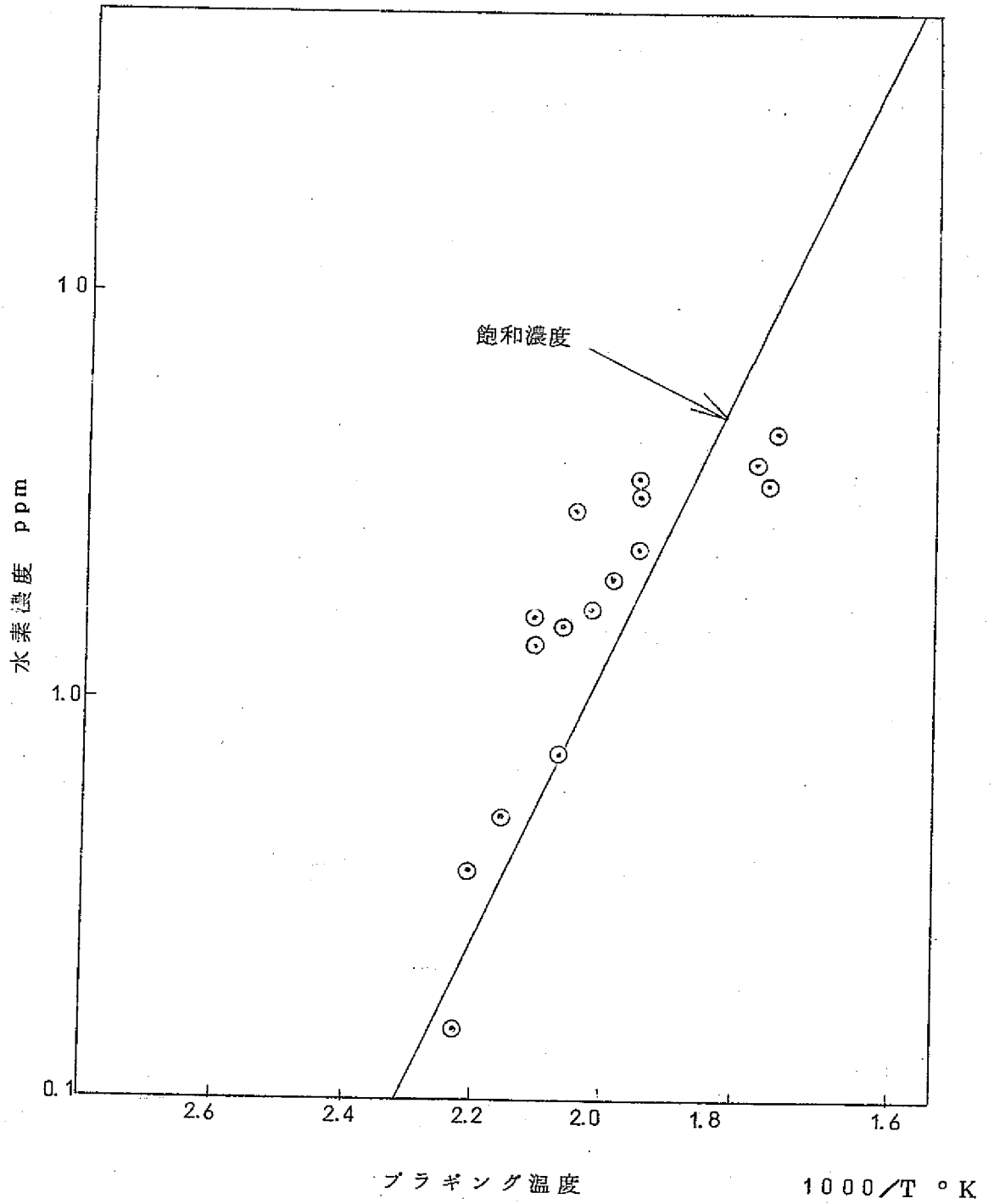


図18 Na中水素濃度とブラギング温度の関係

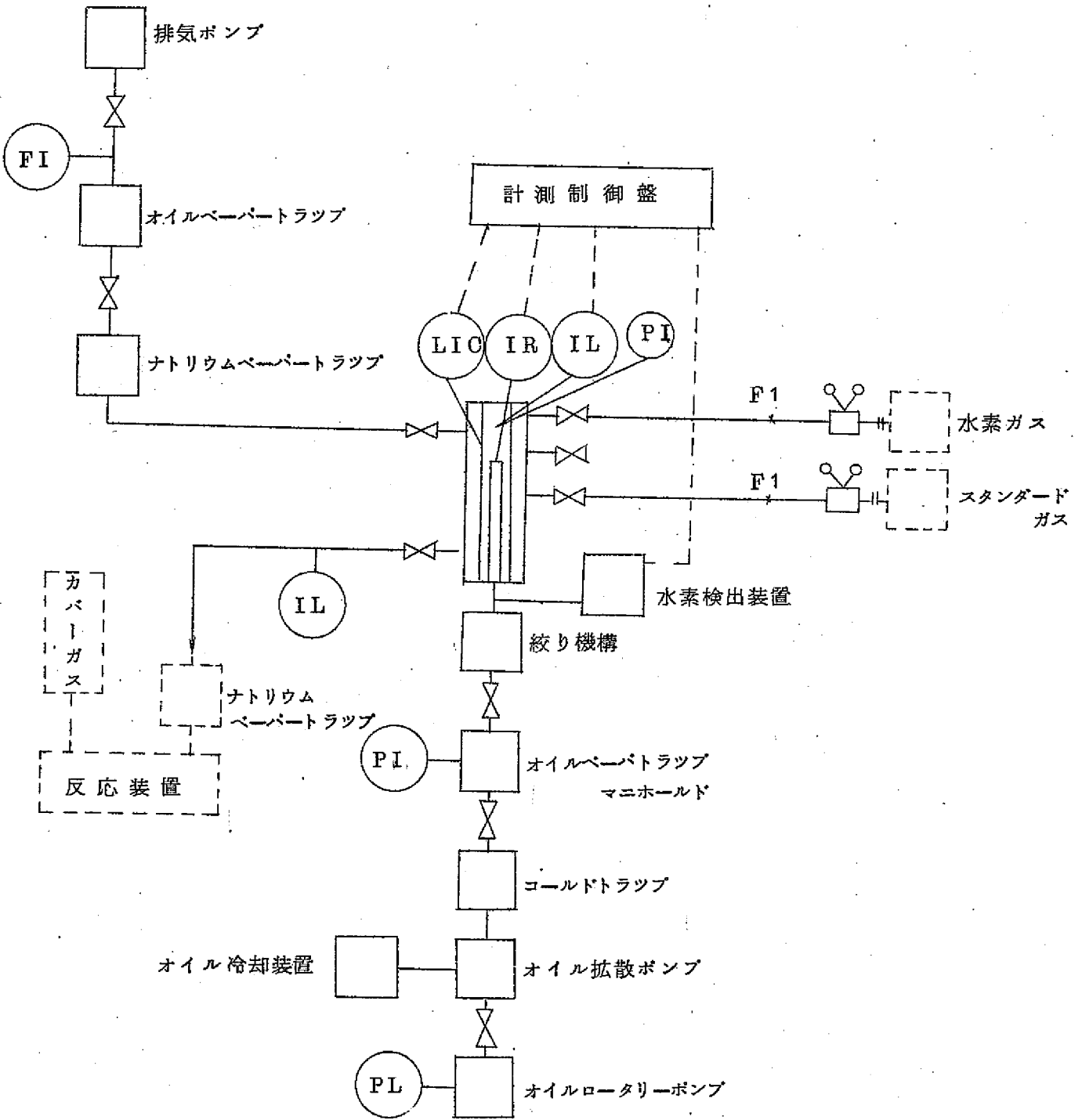
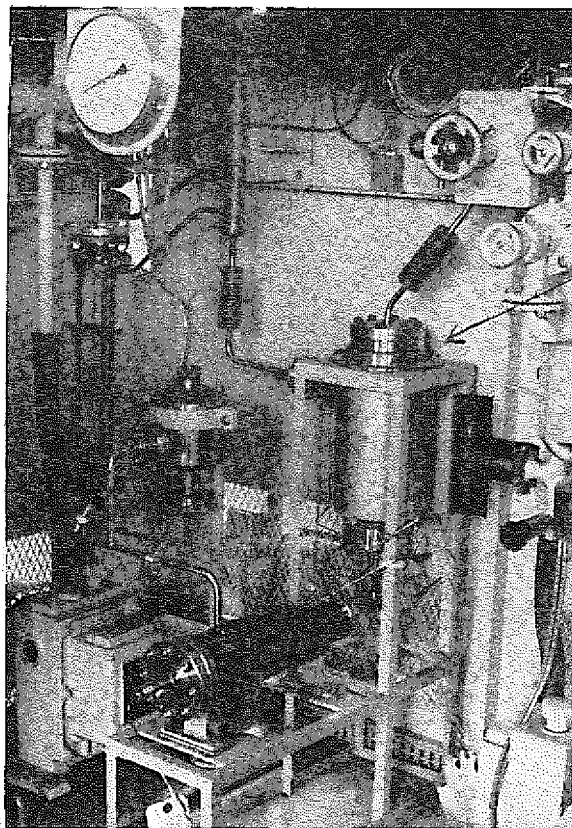


図 19 Ar 中水素計系統図



センサ部

図 20. Ar 中水素計センサ部外観

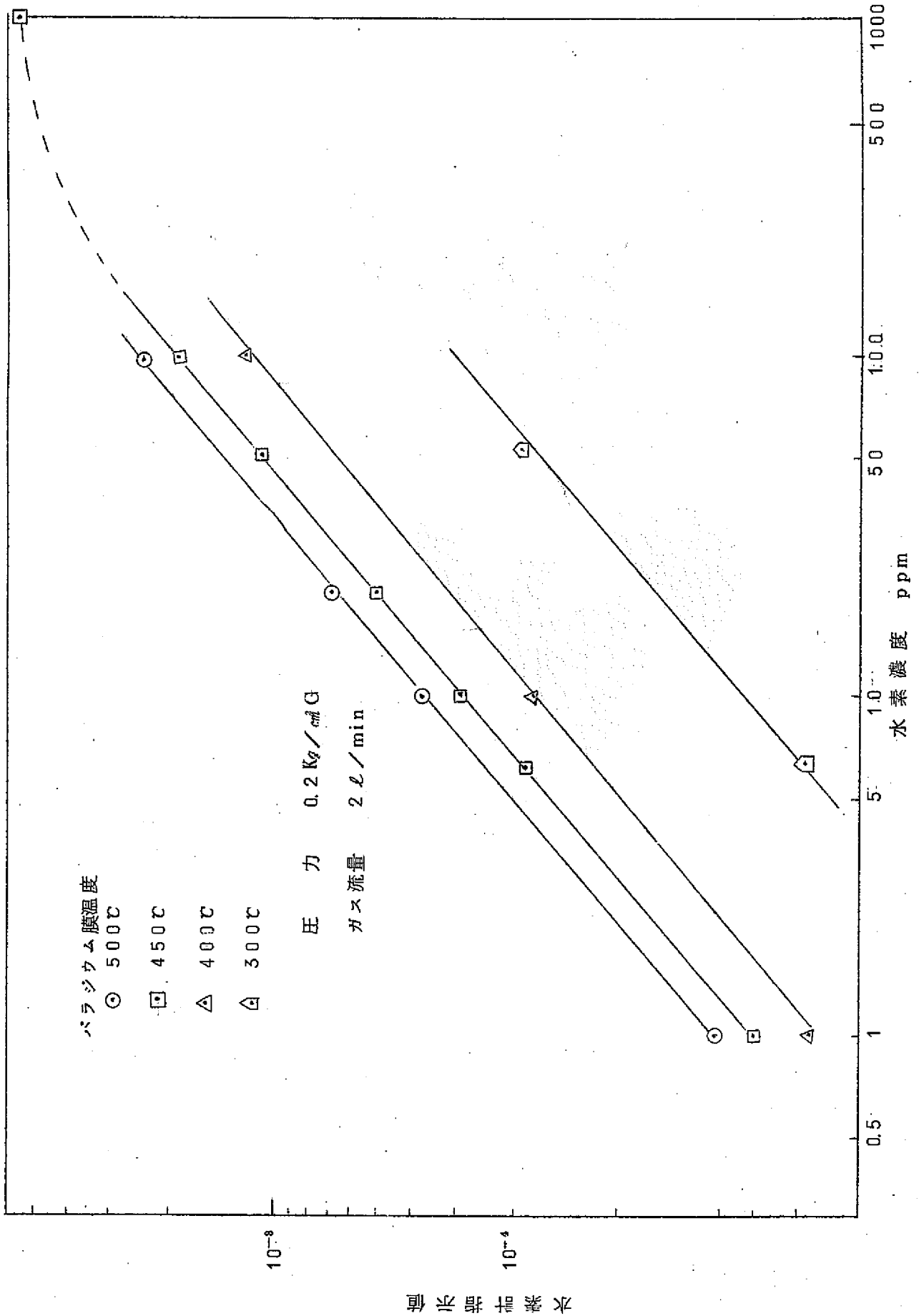


図 2.1 Ar 中水素計の較正曲線, 水素濃度と温度依存性

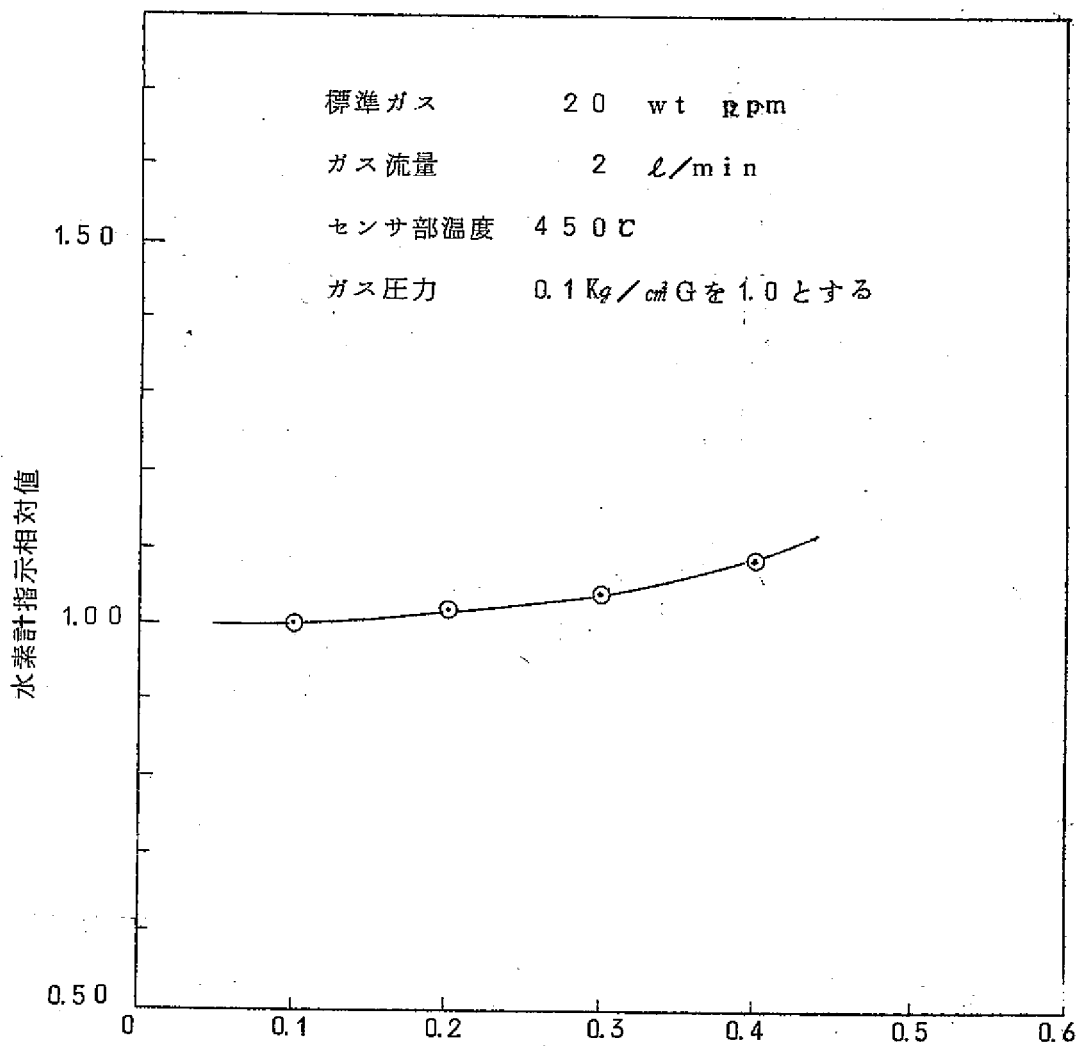


図 2 2 Ar 中水素計のガス圧力依存性

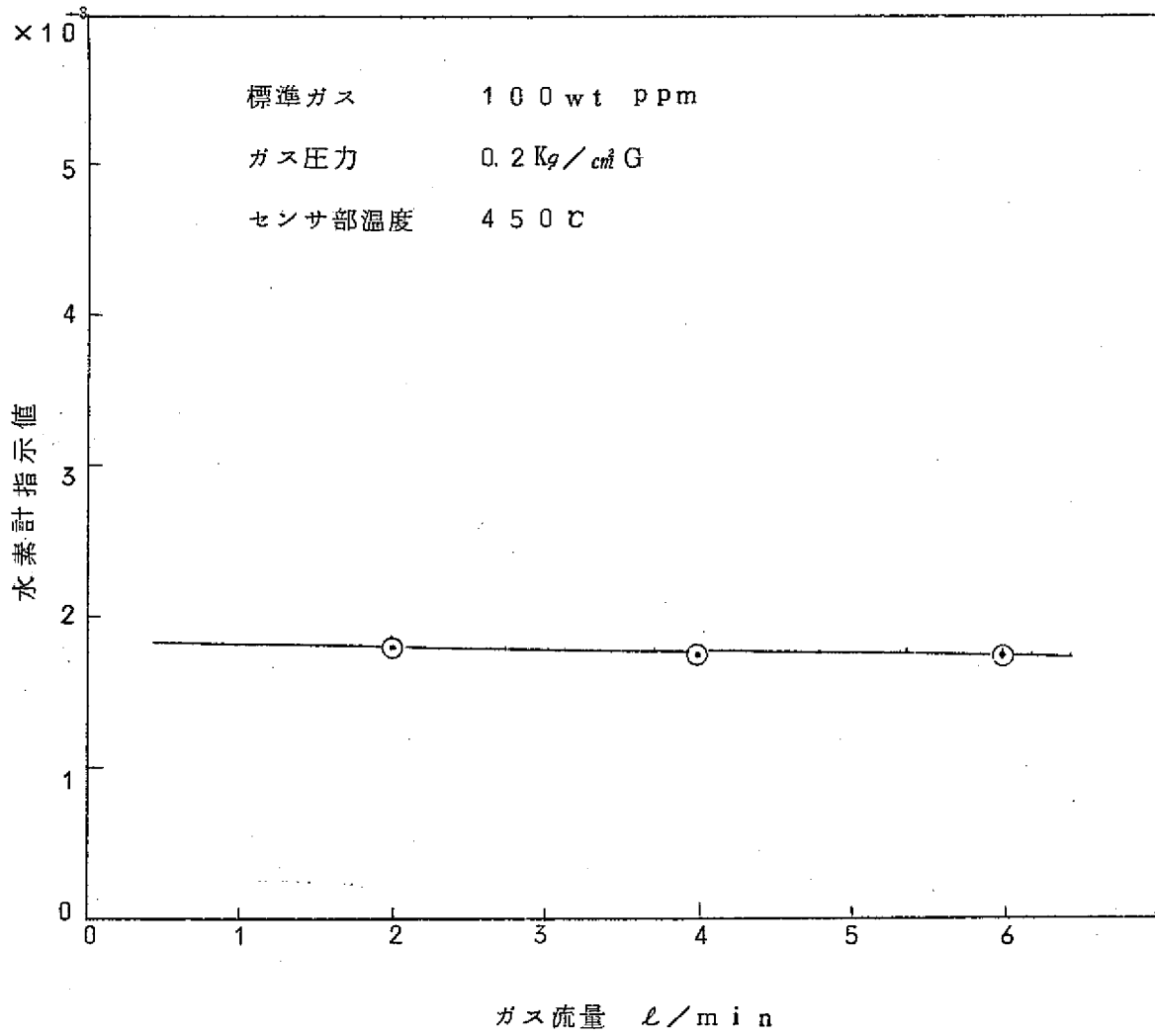


図 2 3 Ar 中水素計のガス流量依存性

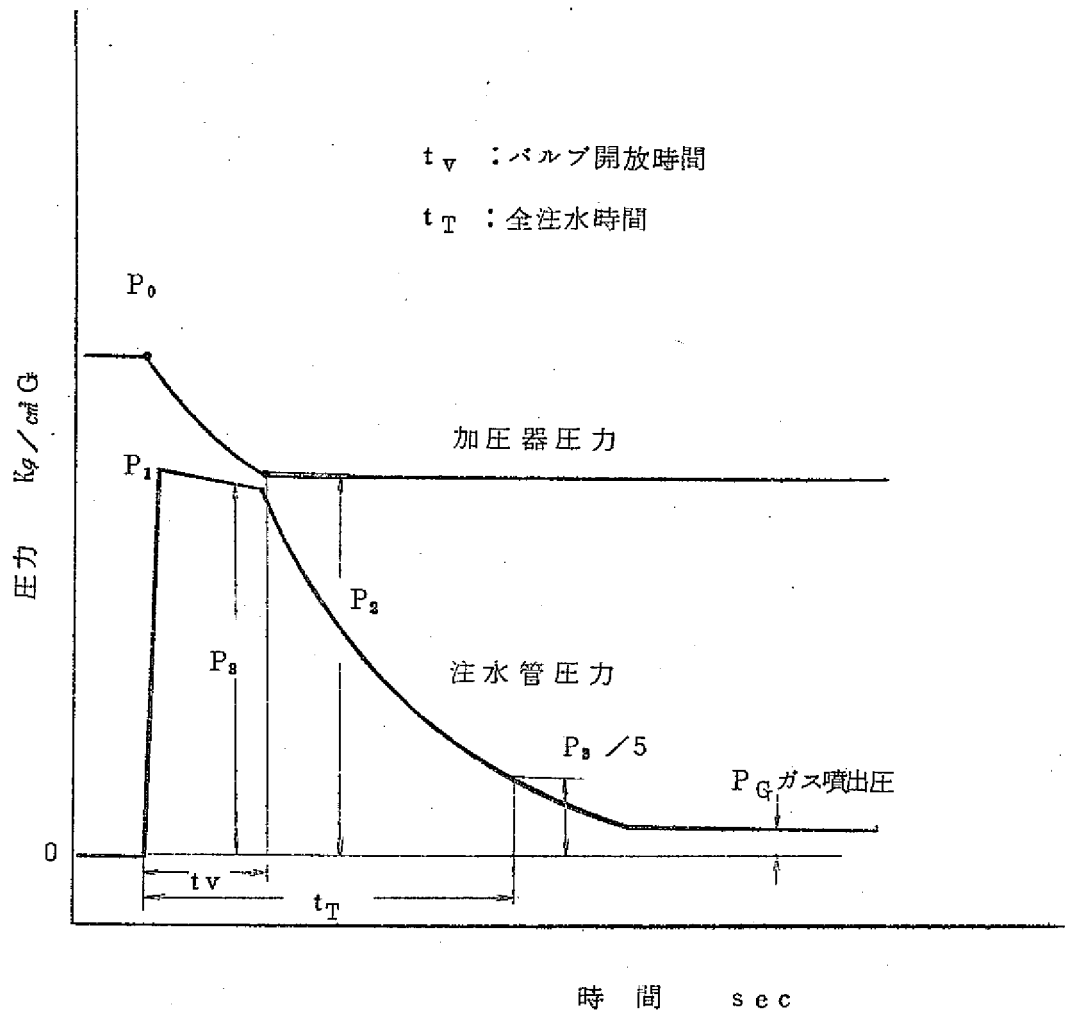


図 2 4 水注入時の水系圧力変化

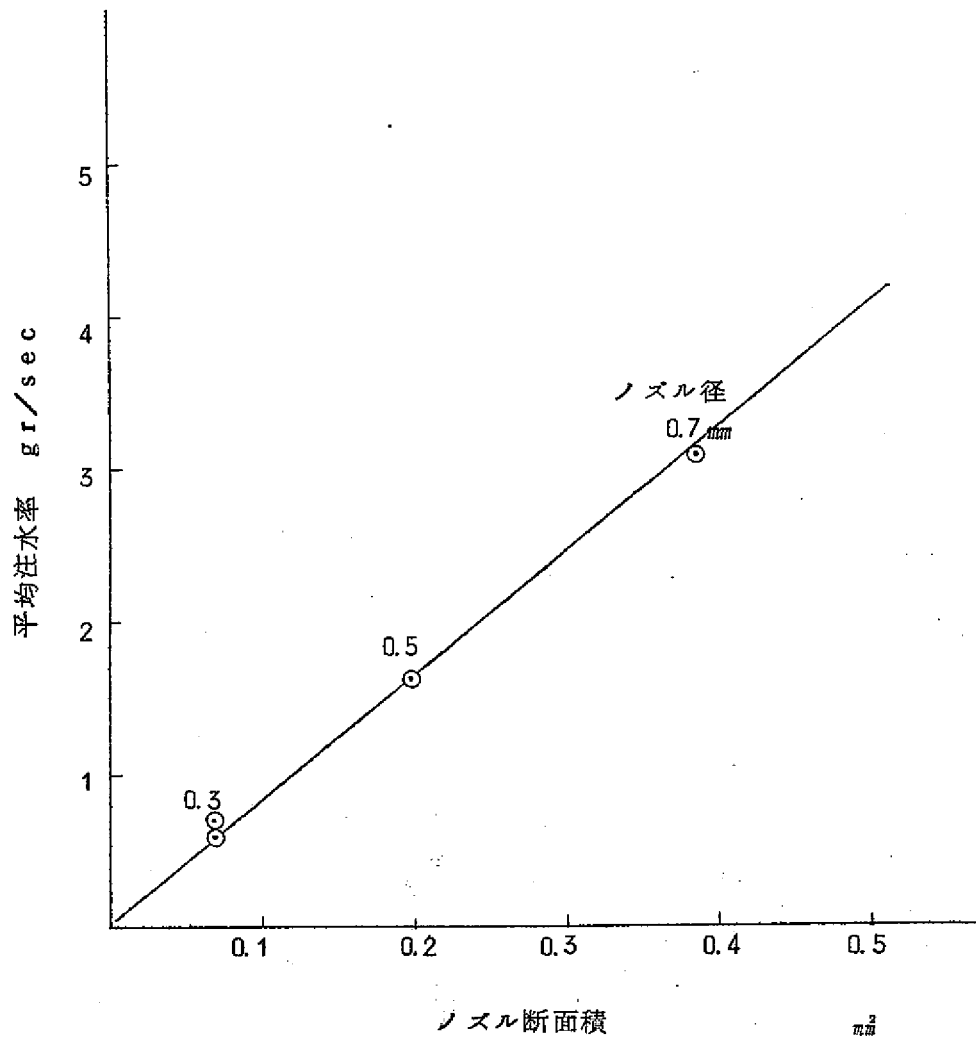


図 2 5 ノズル径と注水率の関係

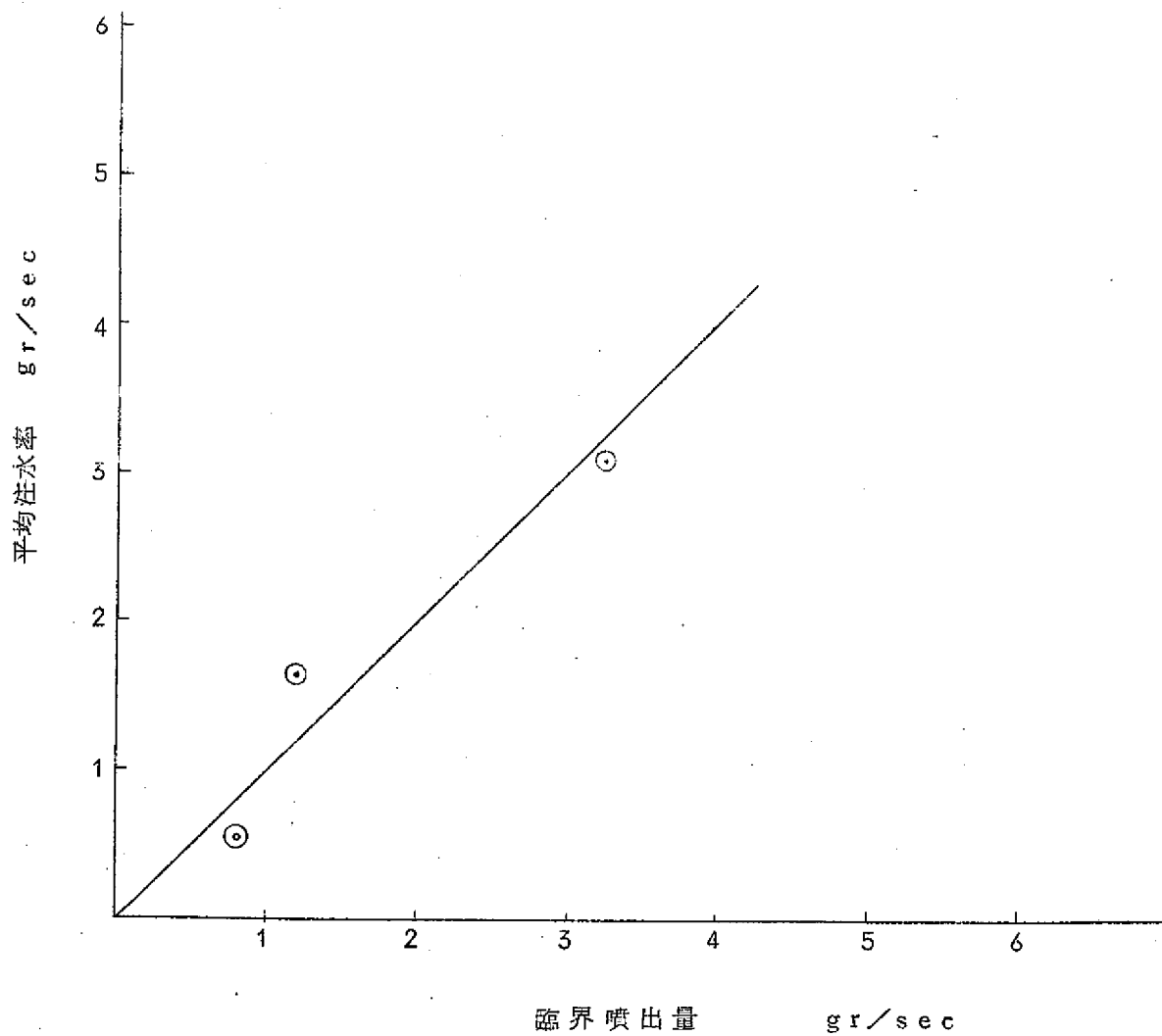


図 2 6 平均注水率と計算値の比較

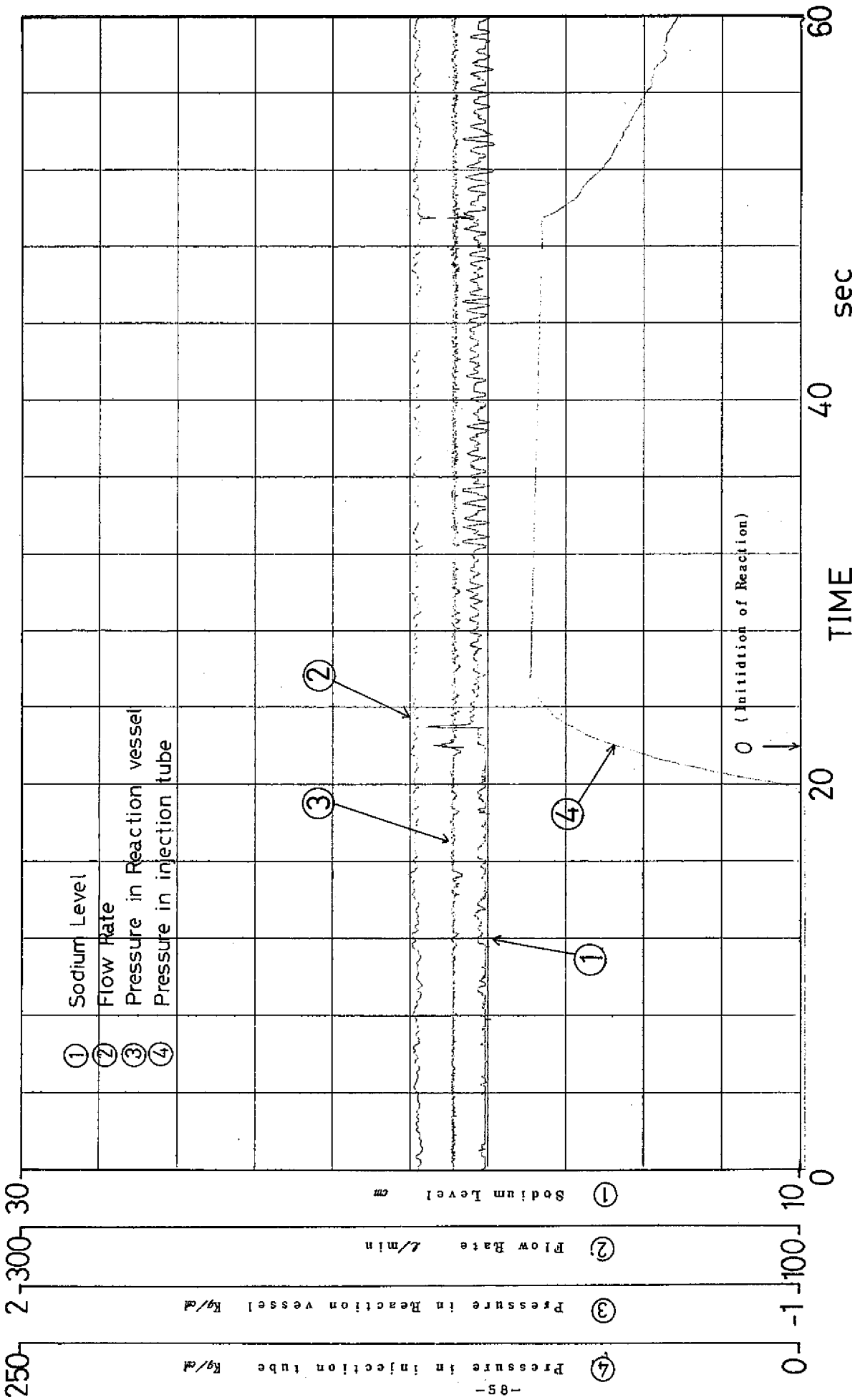


図27 Na液面，流量，反応容器Na圧力の変動，試験系1

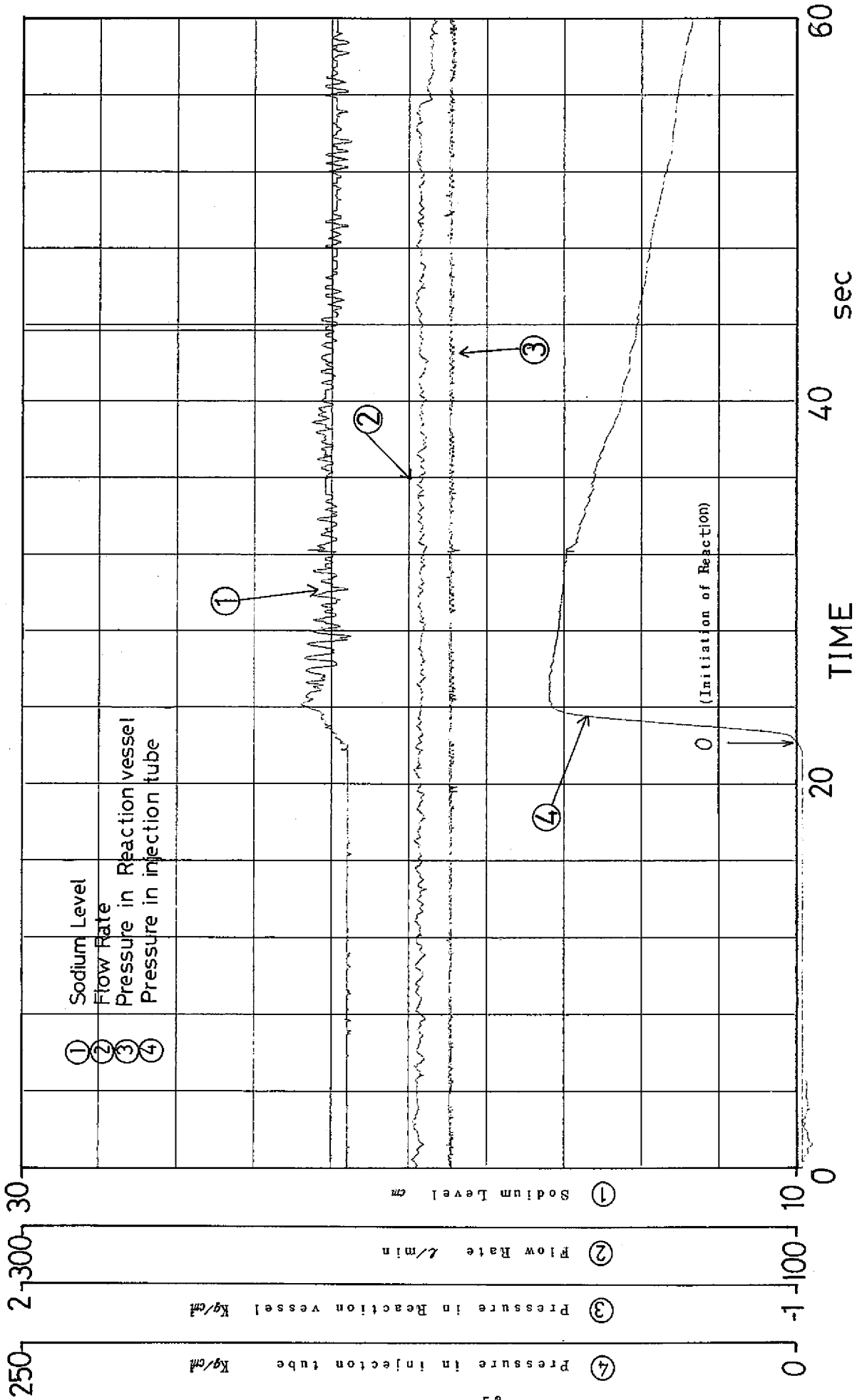


図28 Na液面，流量，反応容器Na圧力の変動，試験系2

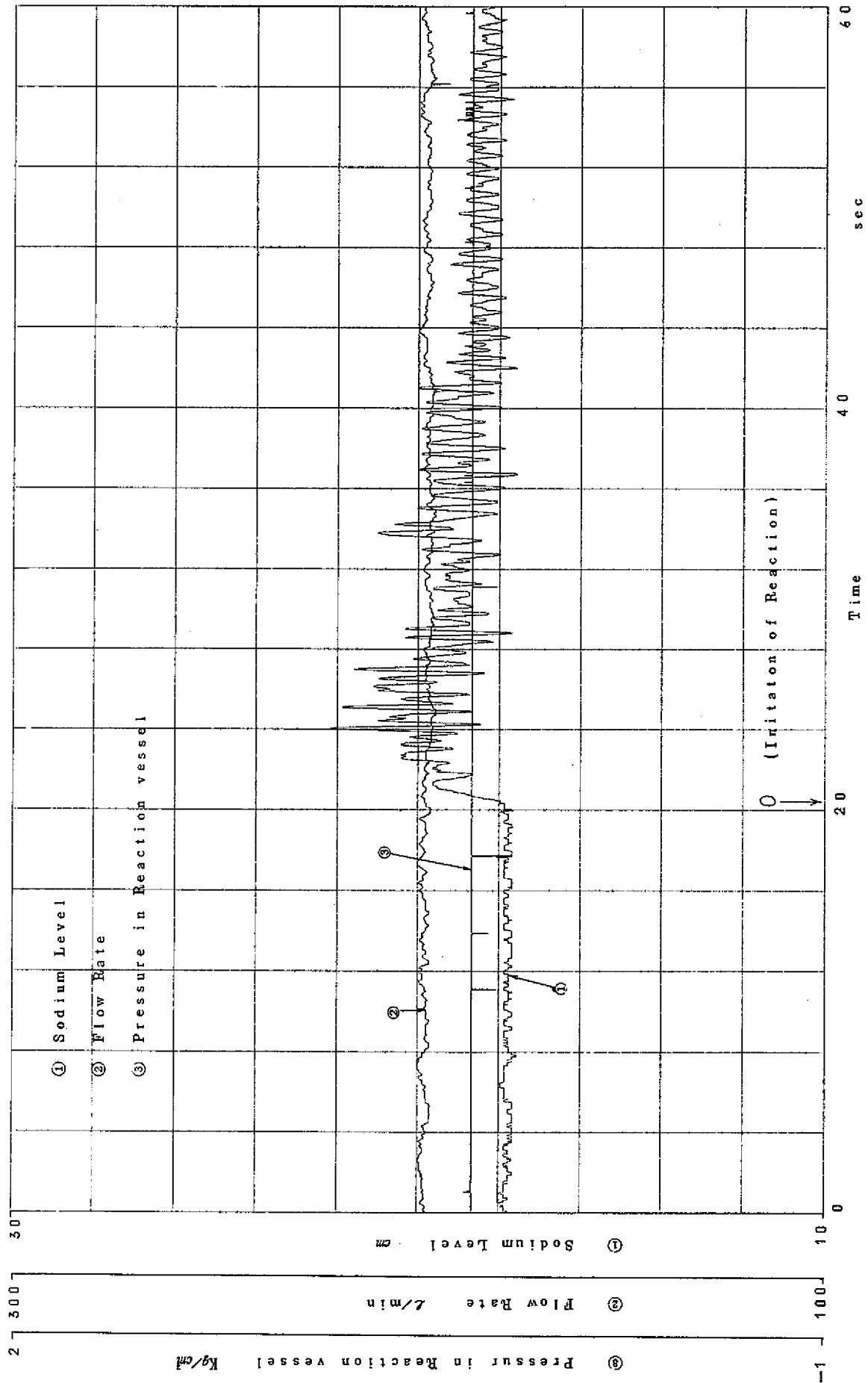


図 2.9 Na液面, 流量, 反応容器Na圧力の変動, 試験系3

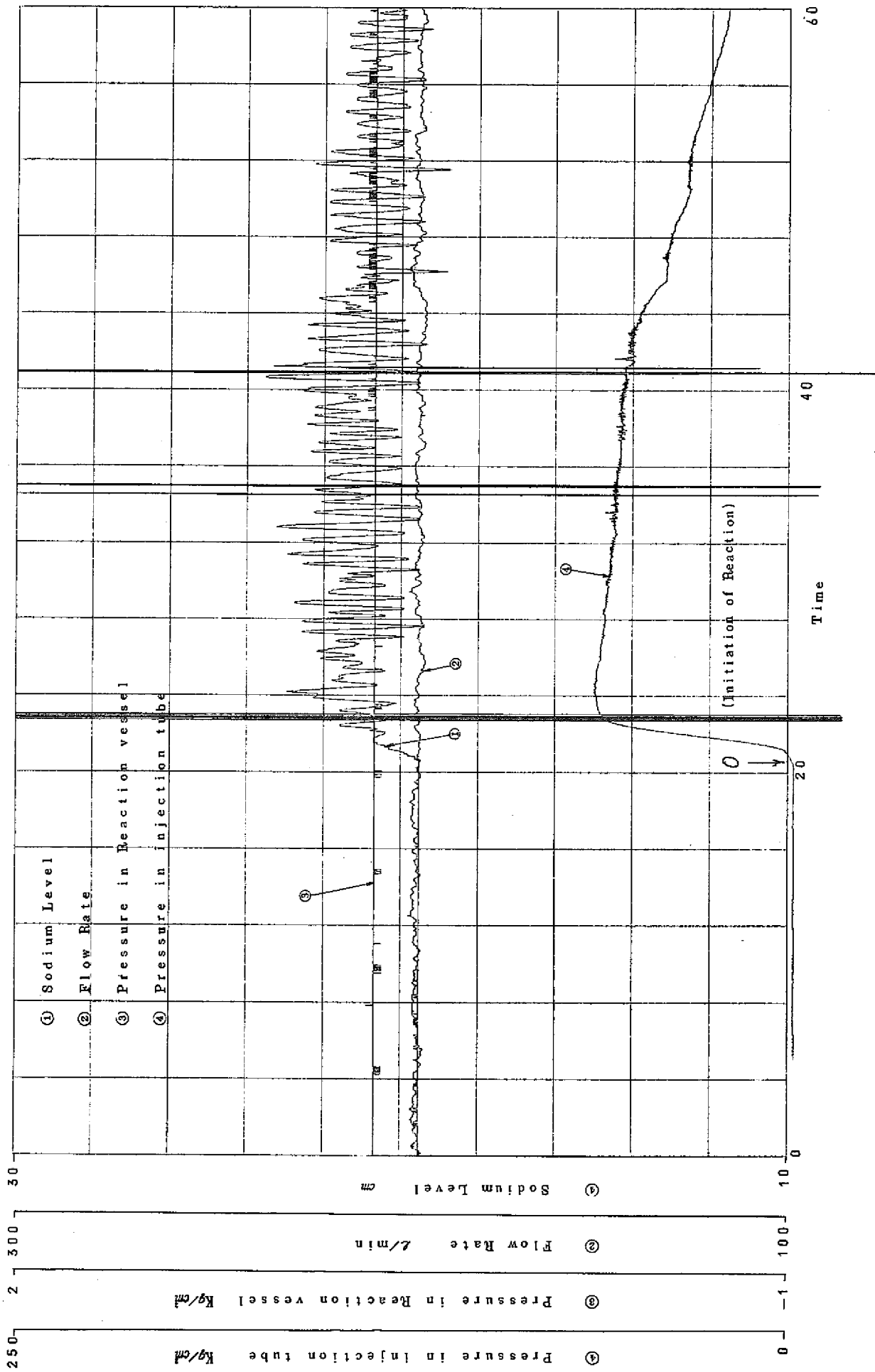


図30. Na液面, 流量, 反応容器Na圧力の変動, 試験No. 4

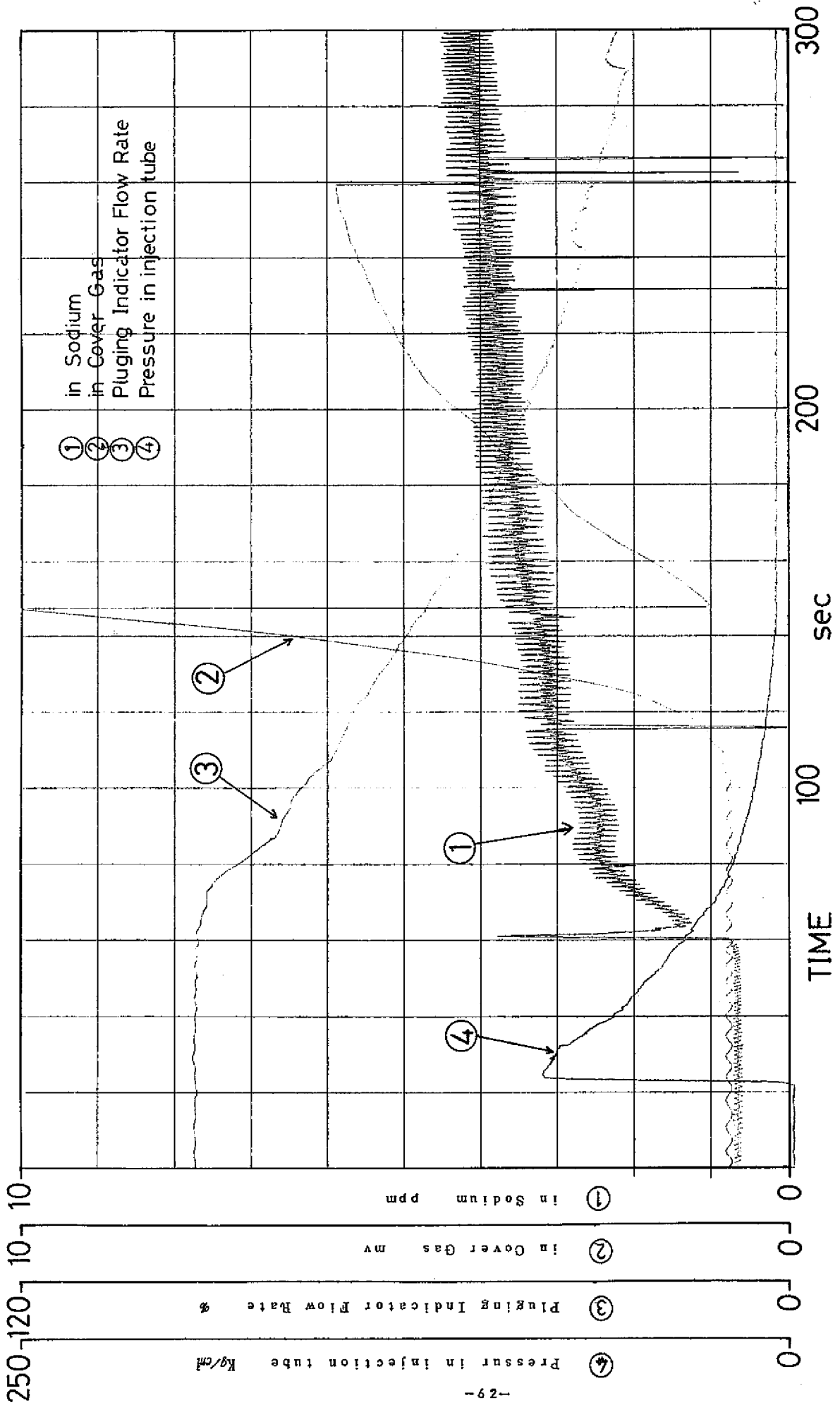


図 3 1 水素検出計の応答，試験系 2

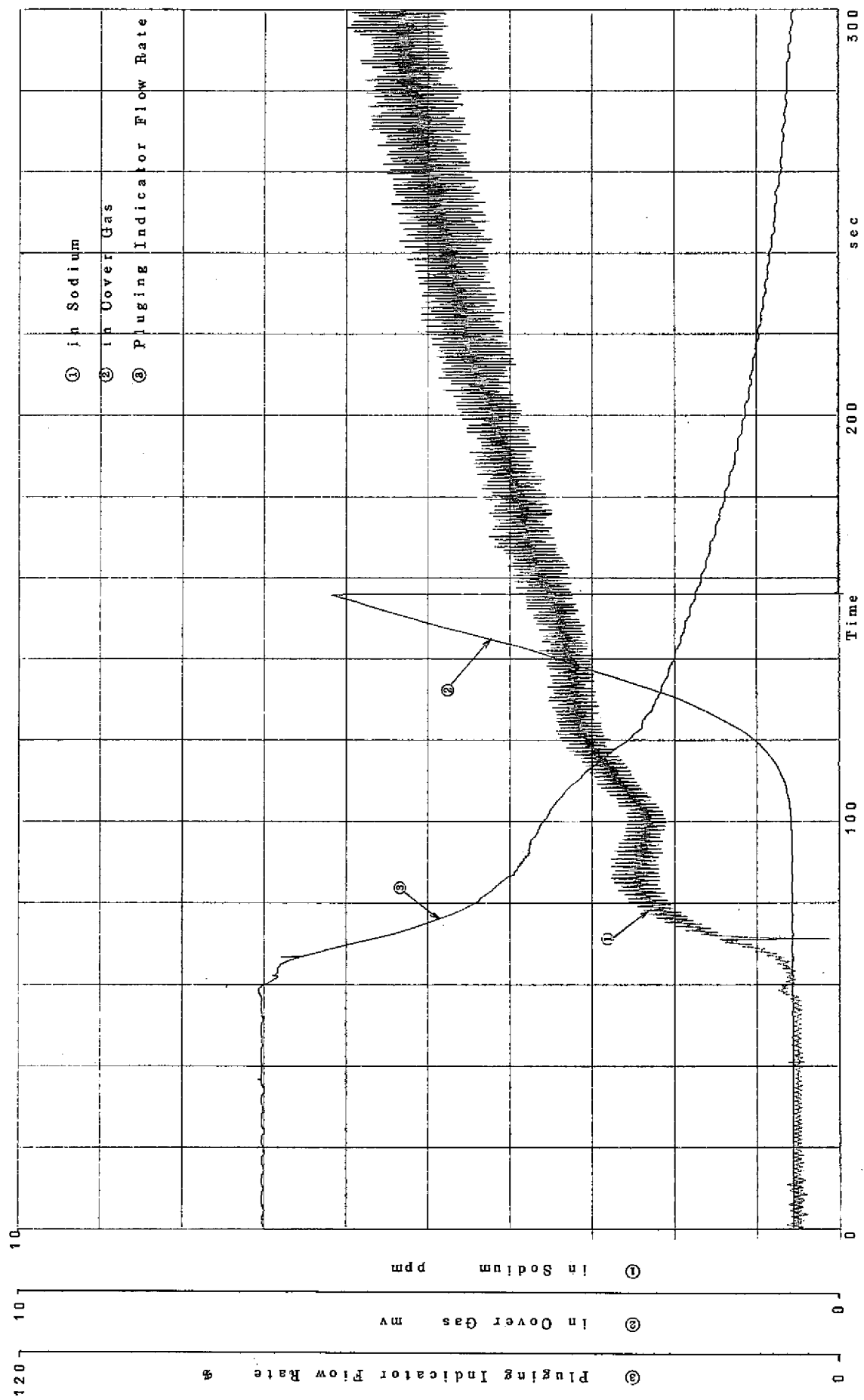


図 3 2 水素検出計の応答，試験 63

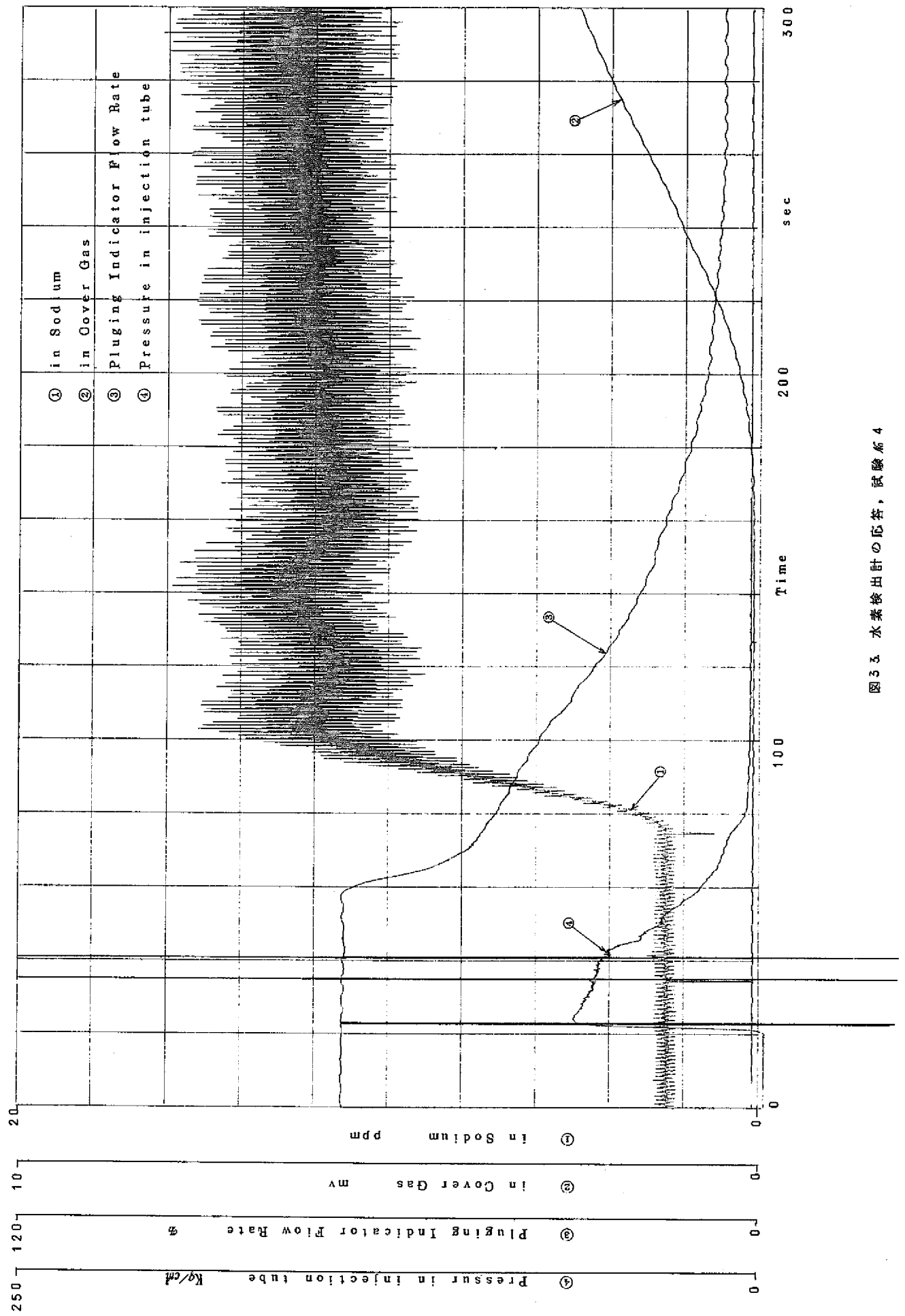
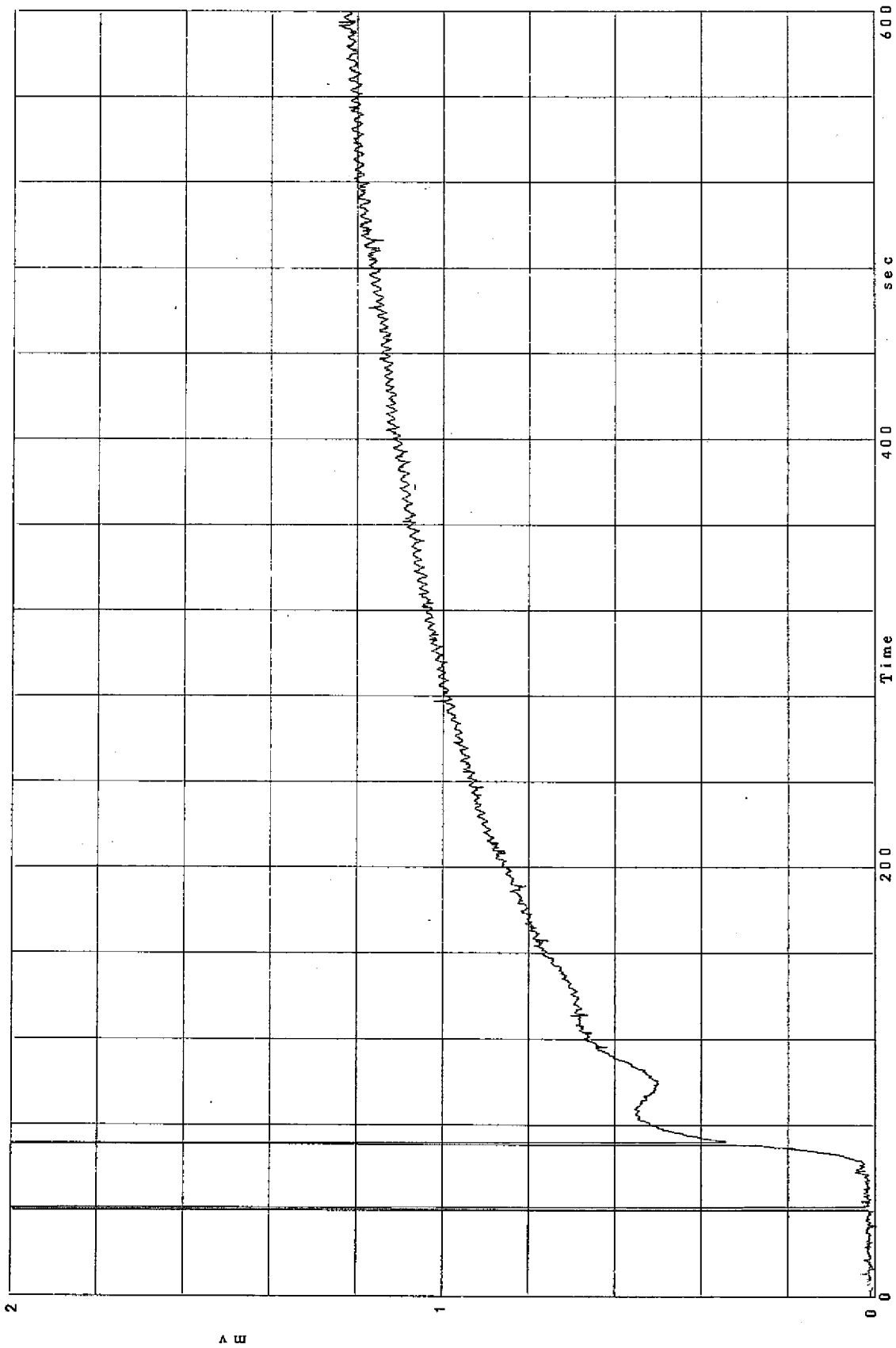


図5.3 水素検出計の応答，試験系4



MASS SPECTROMETER OUTPUT

図 5.4. 質量分析計の応答，試験 No 3

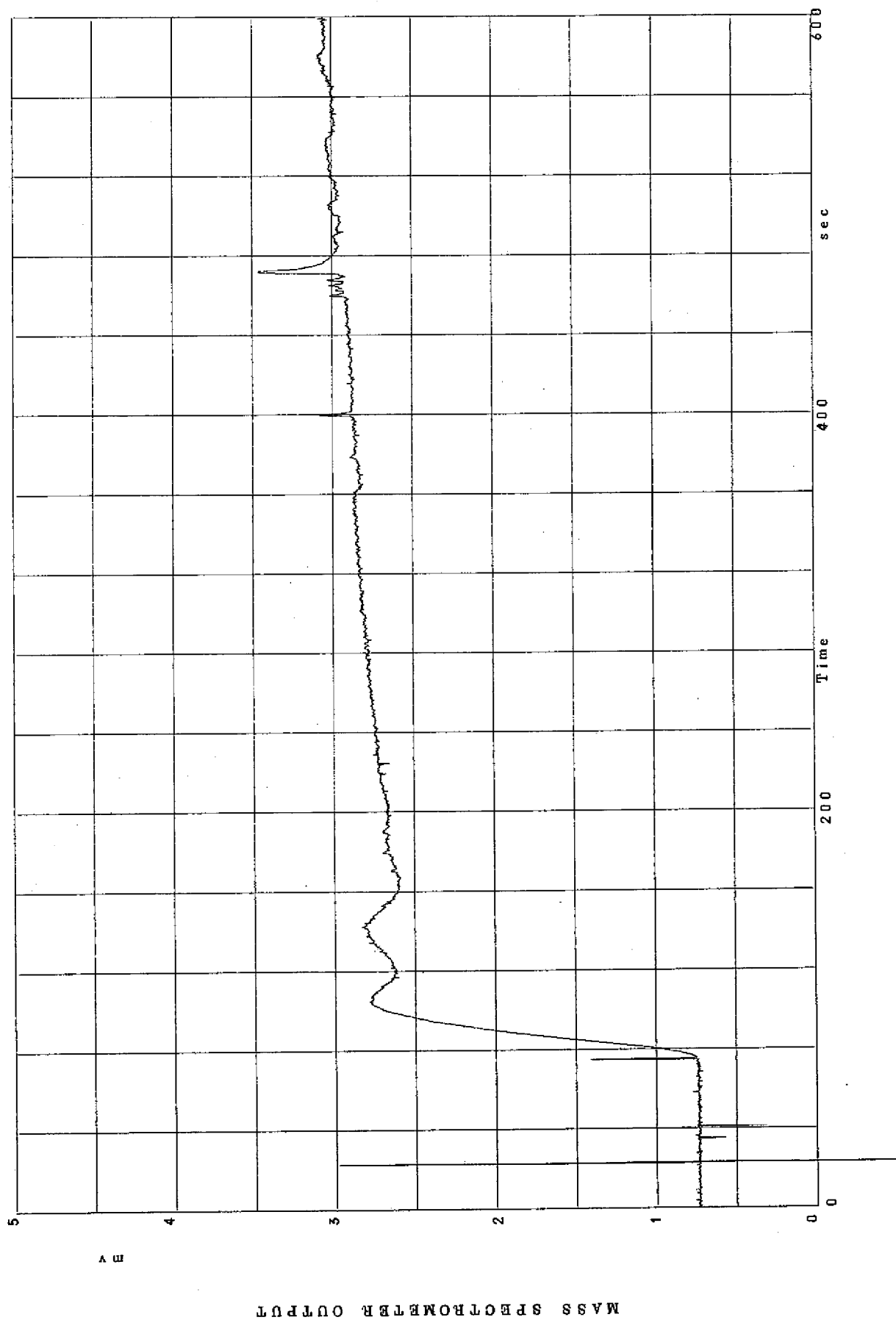


図 5.5 質量分析計の応答，試験 No. 4

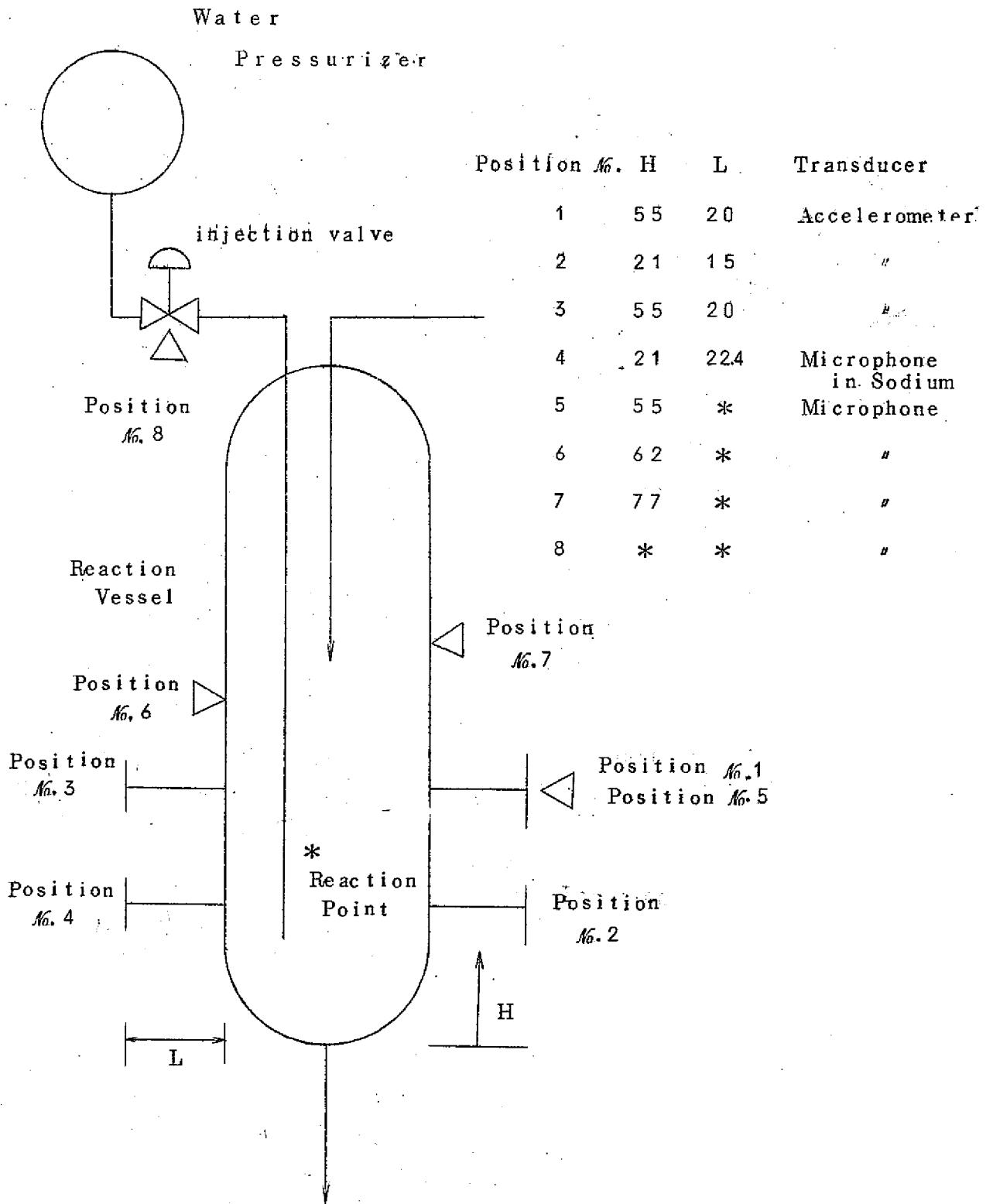
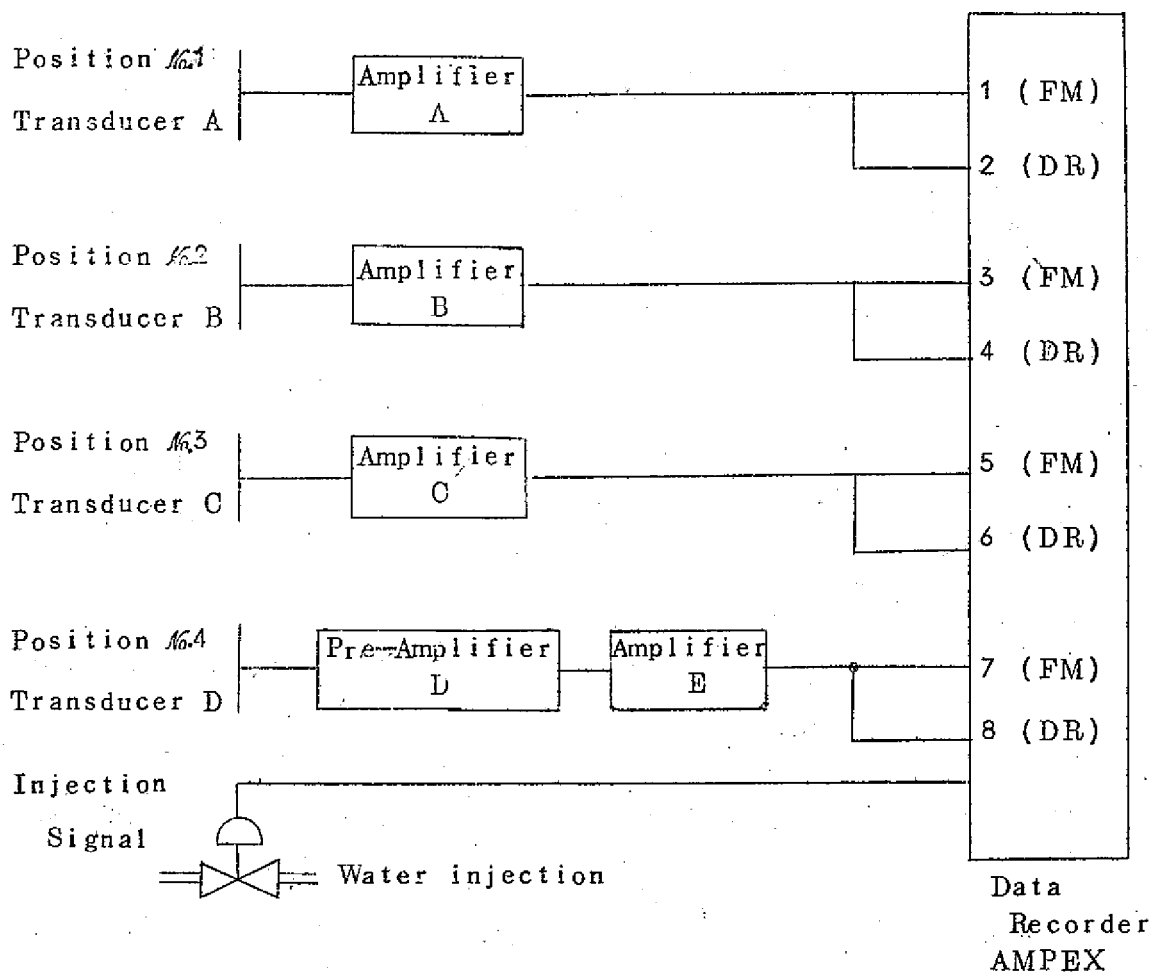


图 3 6 音響式検出器取付け図



<u>Transducer</u>	<u>Amplifier</u>
A Accelerometer Kistler, Model 808A	A Kistler Model -541D
B Accelerometer Endevco, Model 233E	B ENDEVCO Model -2720
C Accelerometer Endevco, Model 233E	C ENDEVCO Model -2720
D Microphone in Sodium Toshiba, HAD-MK-4	D HAD-PA
	E YOKOGAWA TYPE-3125

图37. 音響式檢出器系統圖 (1)

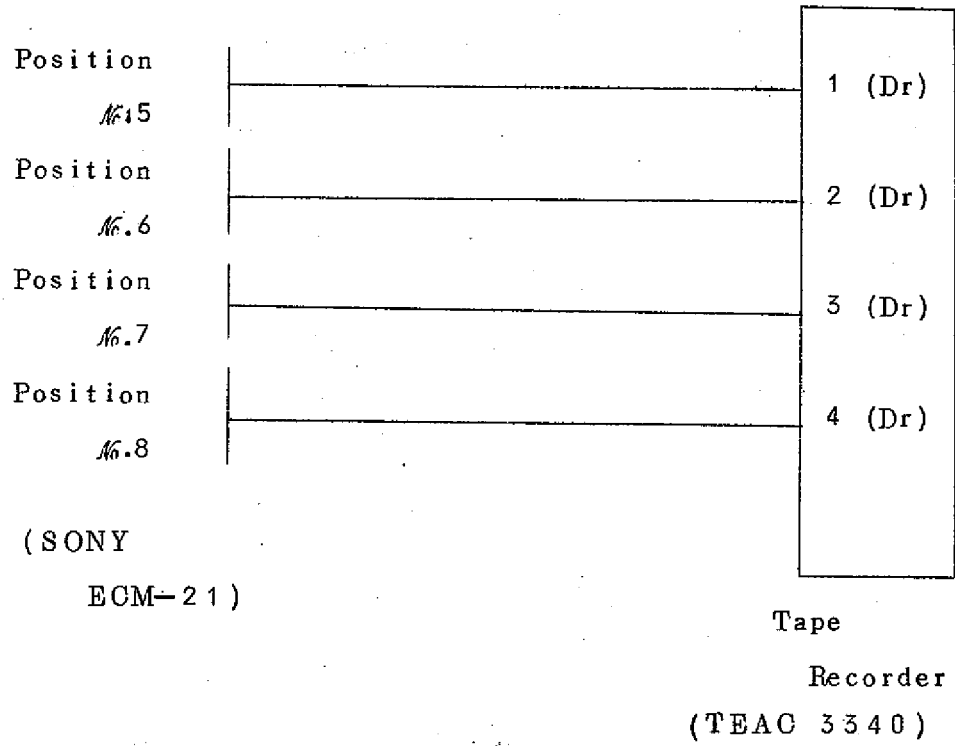


图 3 8 音響式検出器系統図(2)

図 5.9 加速度計の測定結果 (D), 試験 No. 1

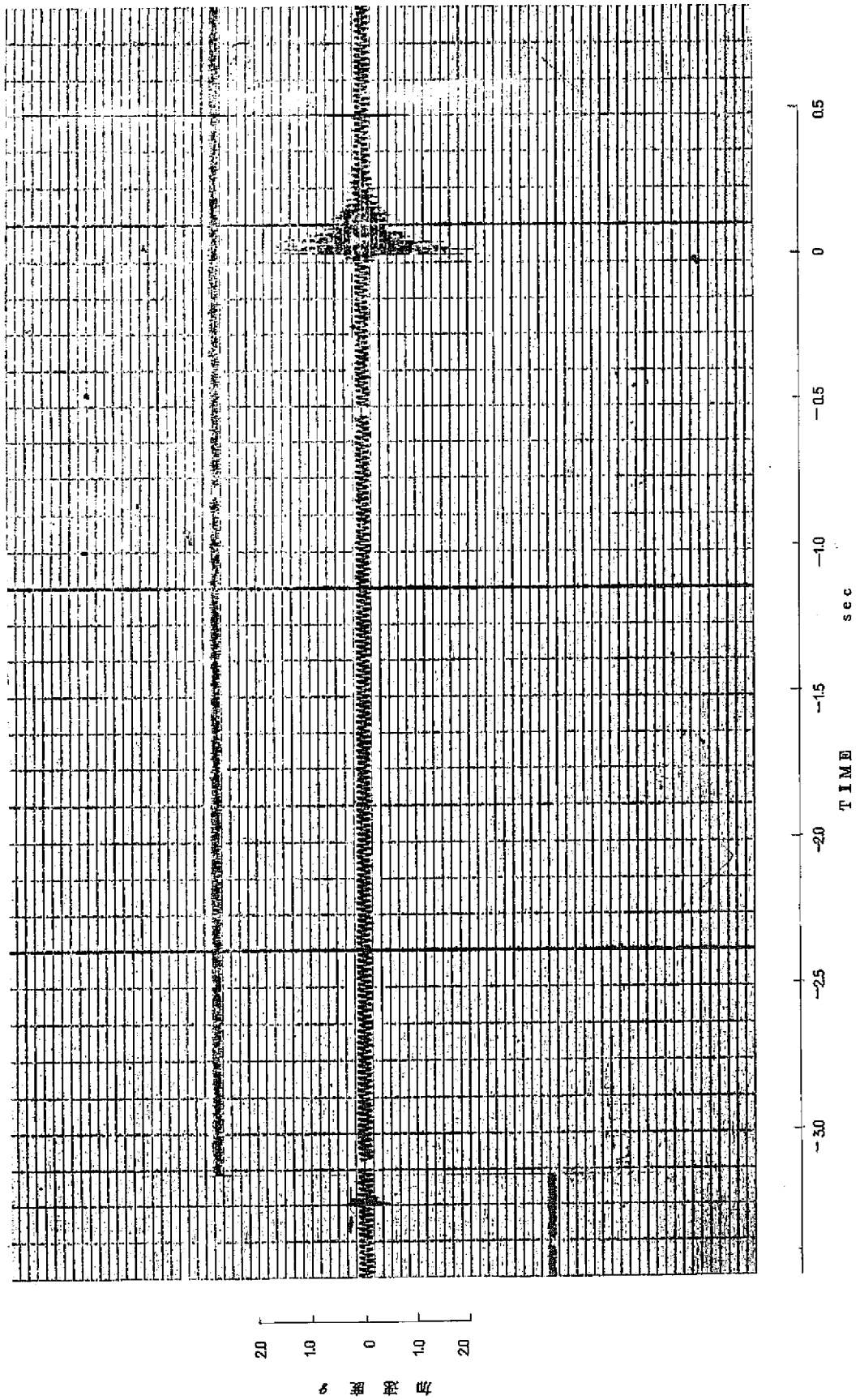


図4.0 加速度計の測定結果例，試験No.1

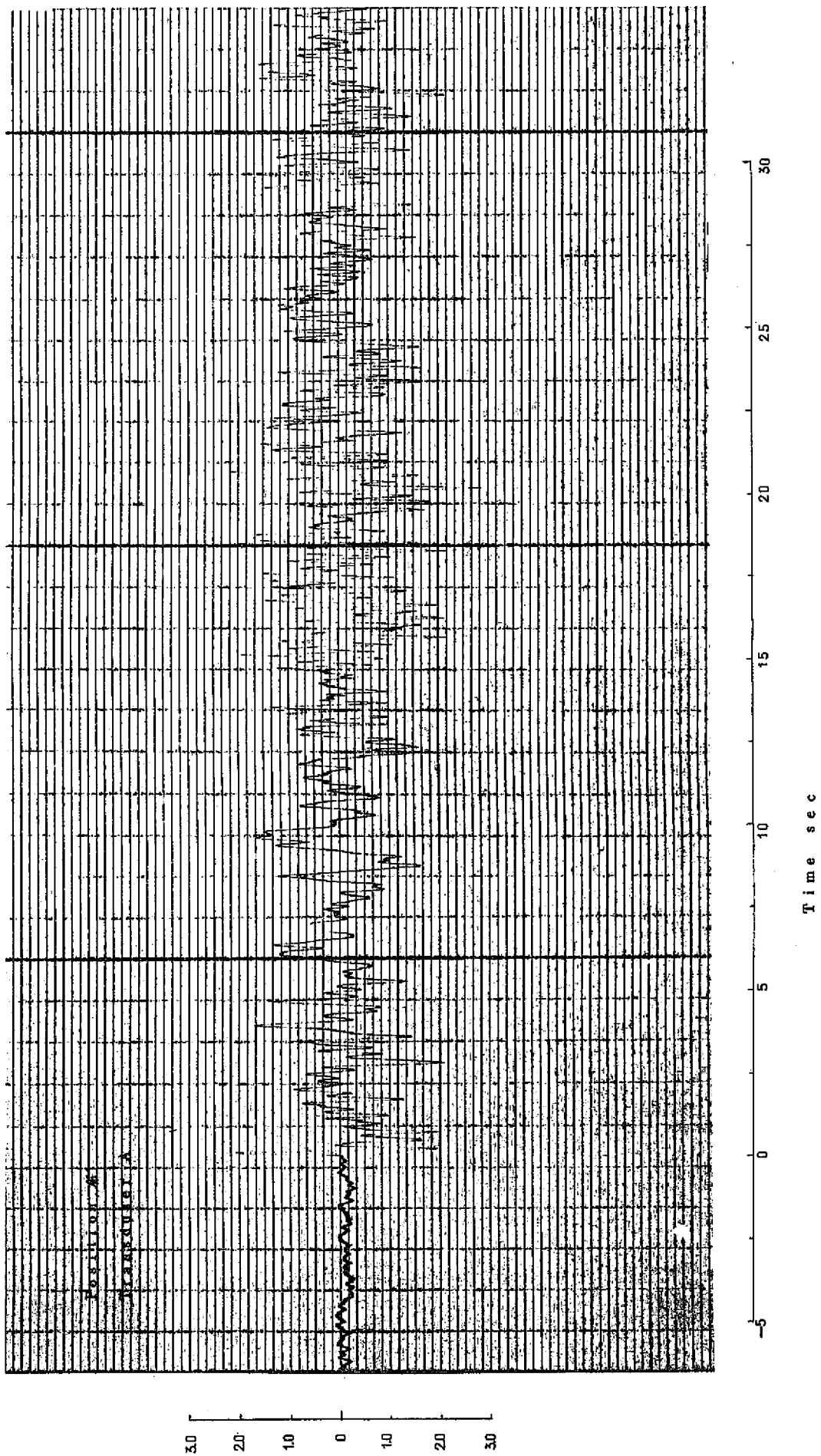


图 4-1 加速度計, Na中マイクの測定結果, 試験系 3

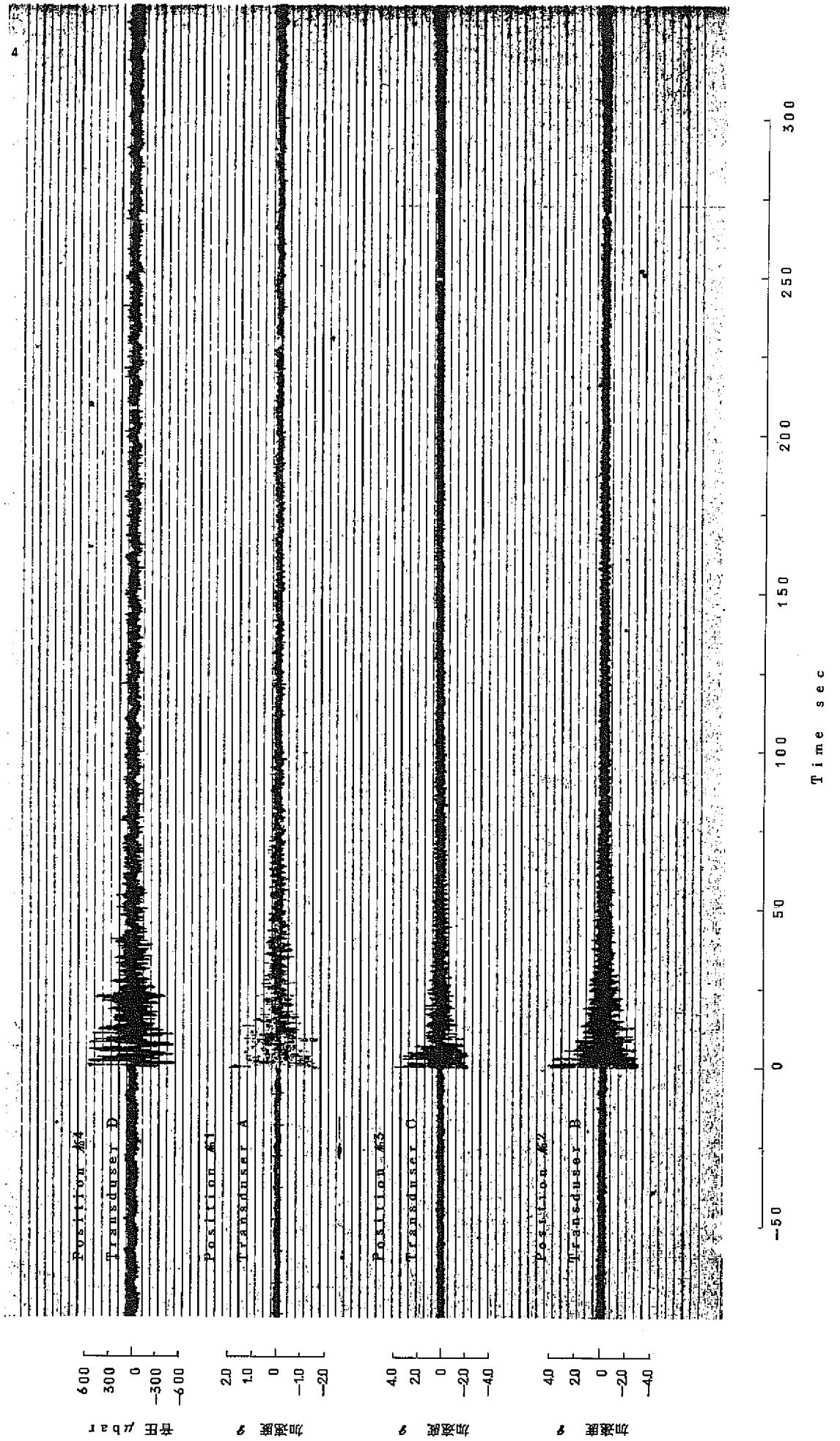
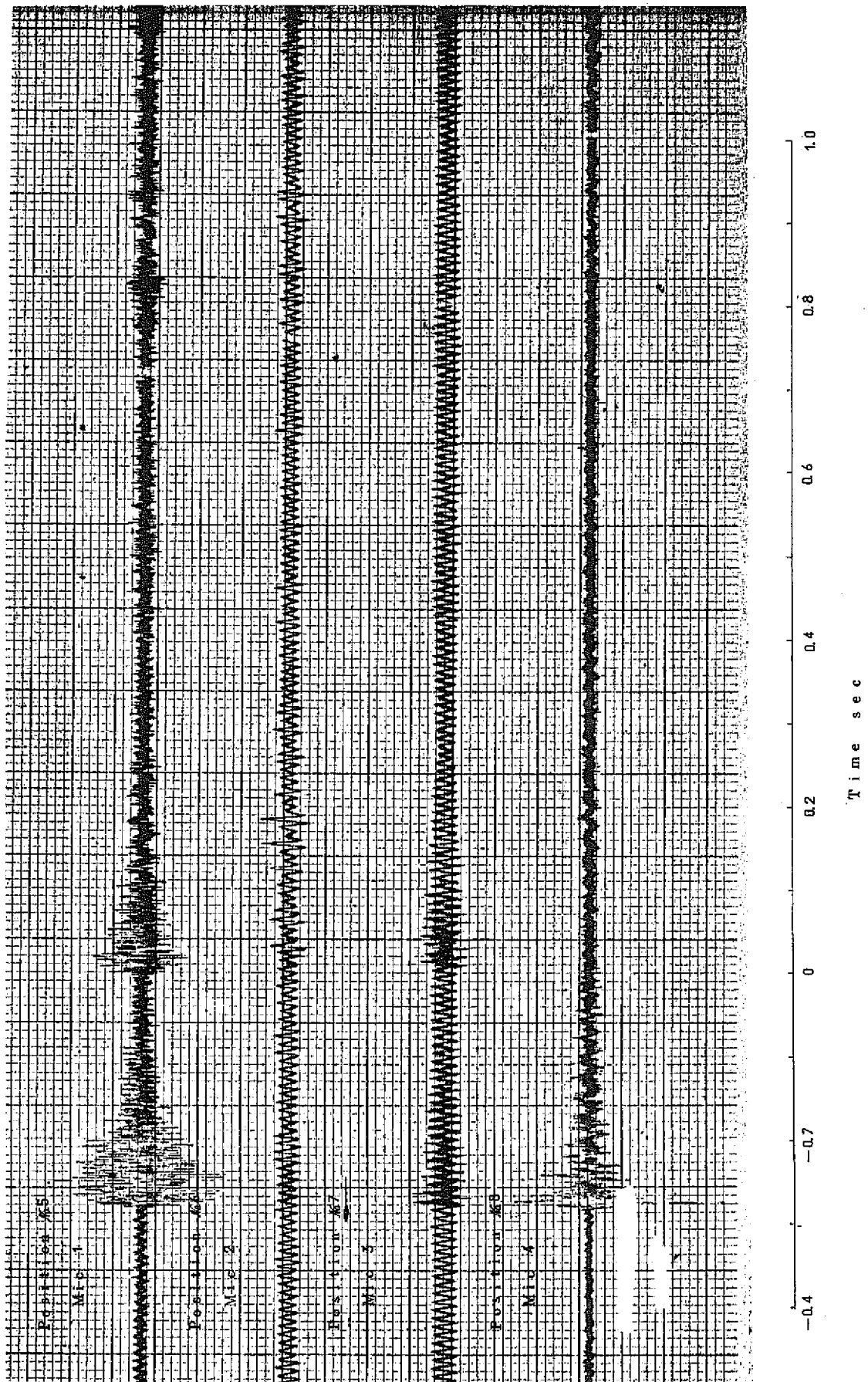


图42 マイクの測定結果，試験№3



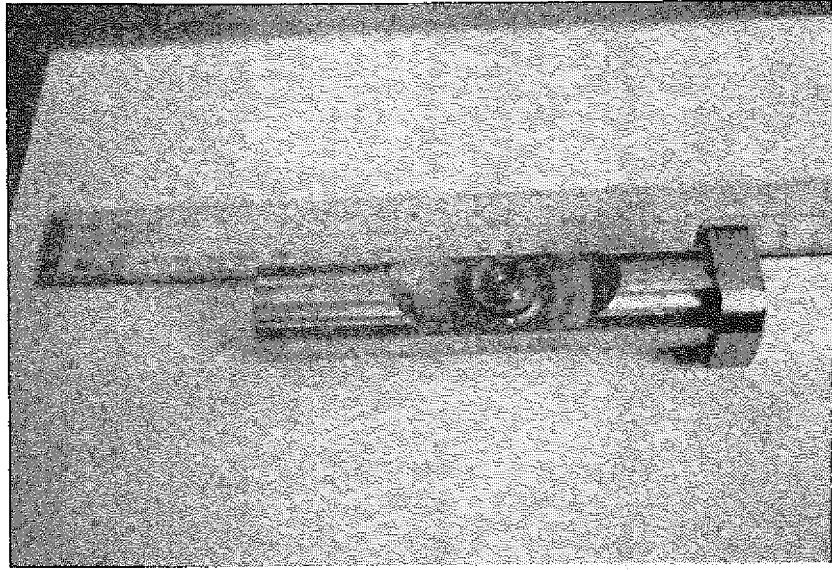


図 4 3 水噴出ノズル



図 4 4 空気中への常温水の噴出試験

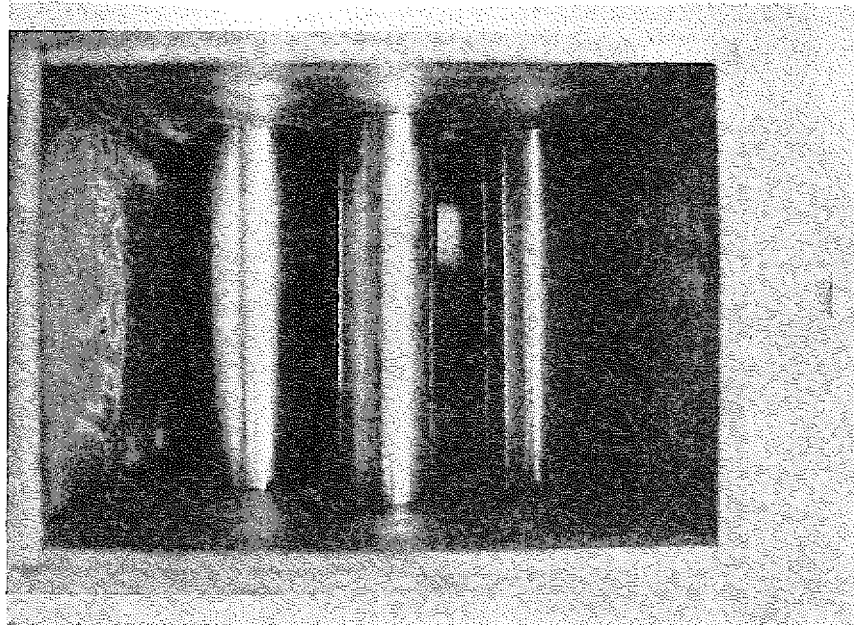


図 4 5 上からみた伝熱管アセンブリ

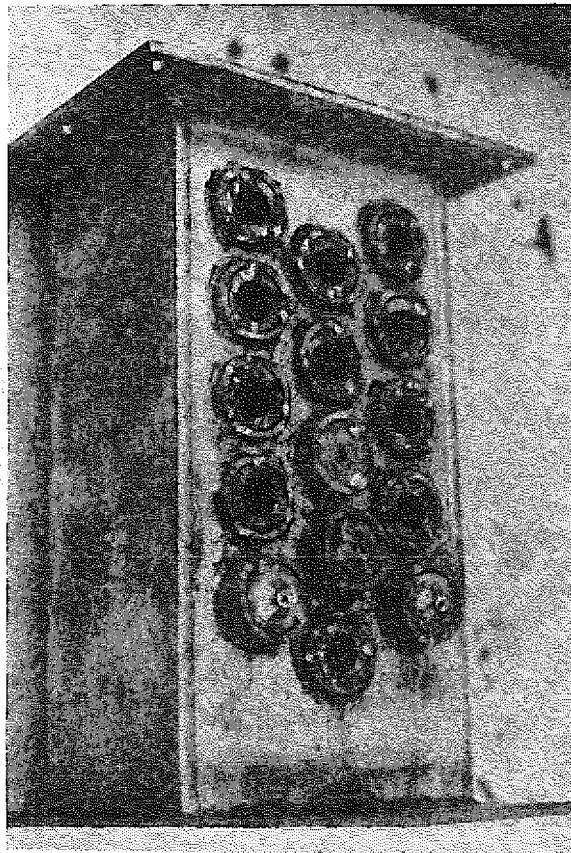


図 4 6 伝熱管アセンブリ外観

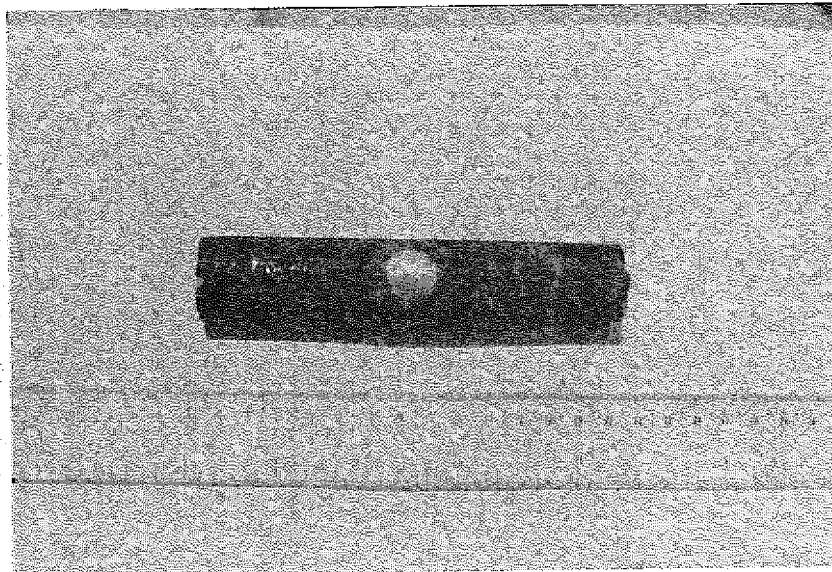


図 4 7 試験 No 1 のウエステージ

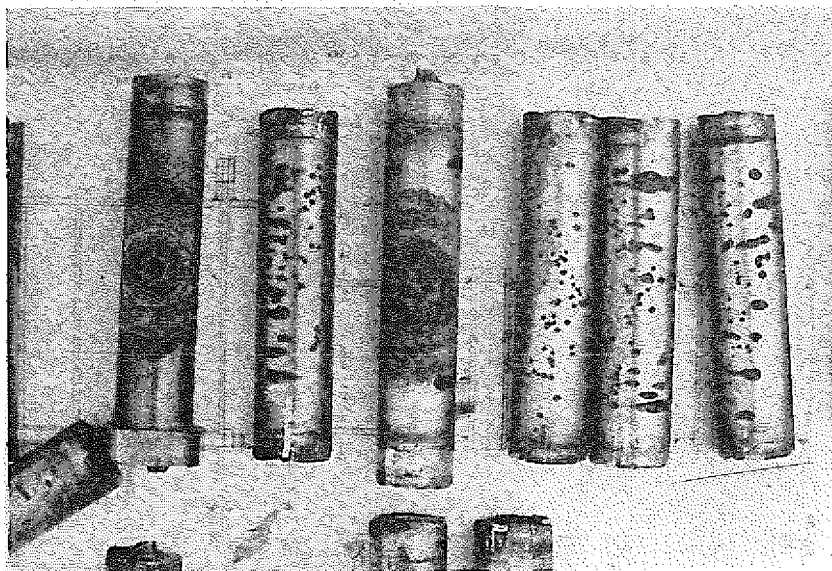


図 4 8 試験 No 2 のウエステージ

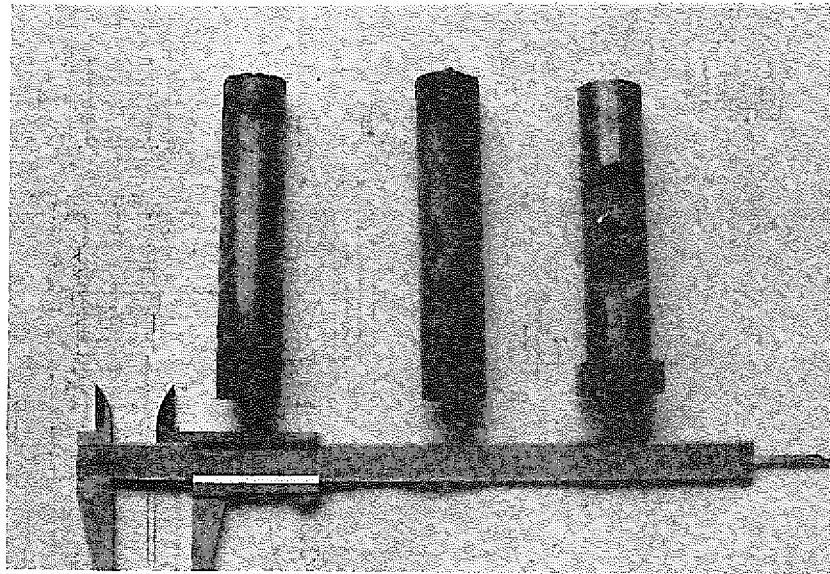


図 4 9 試験体 3 のウエステージ

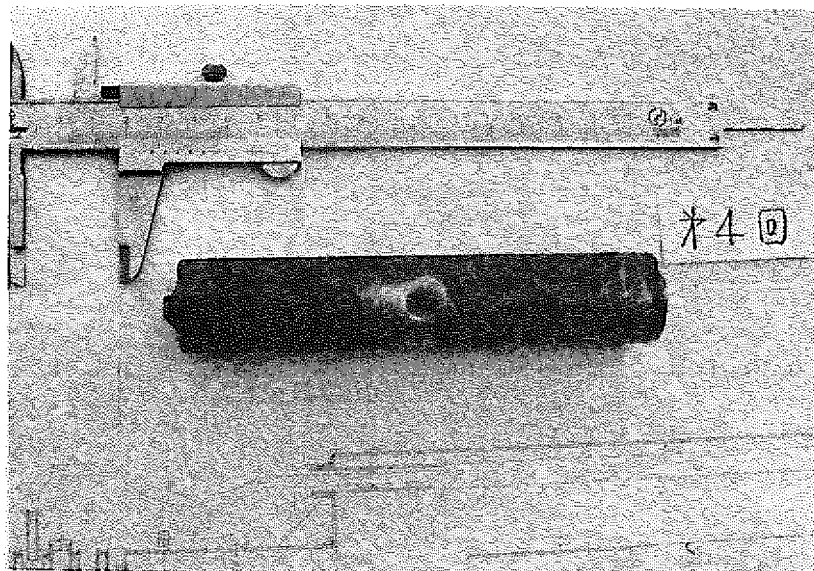
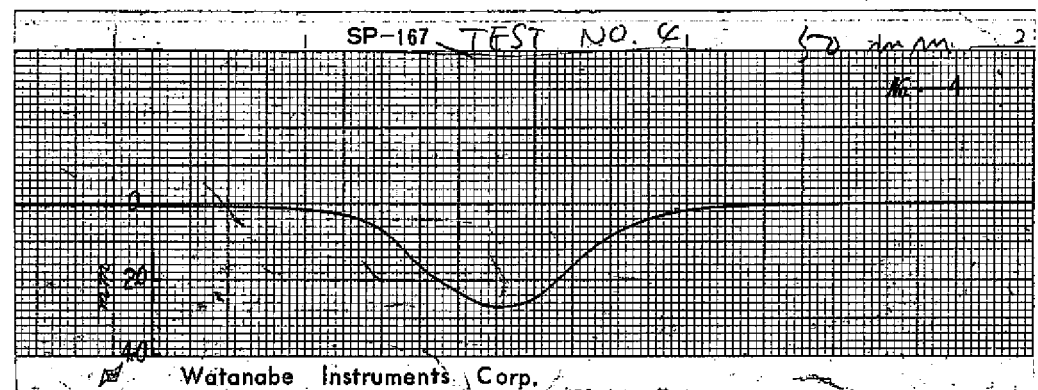
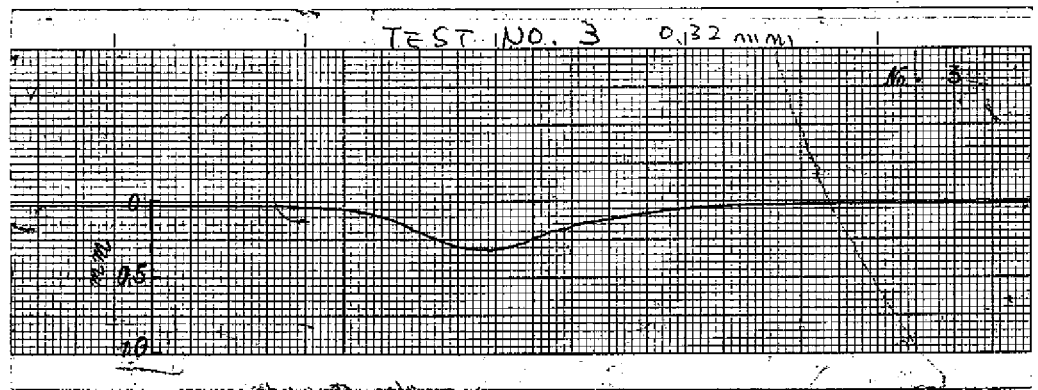
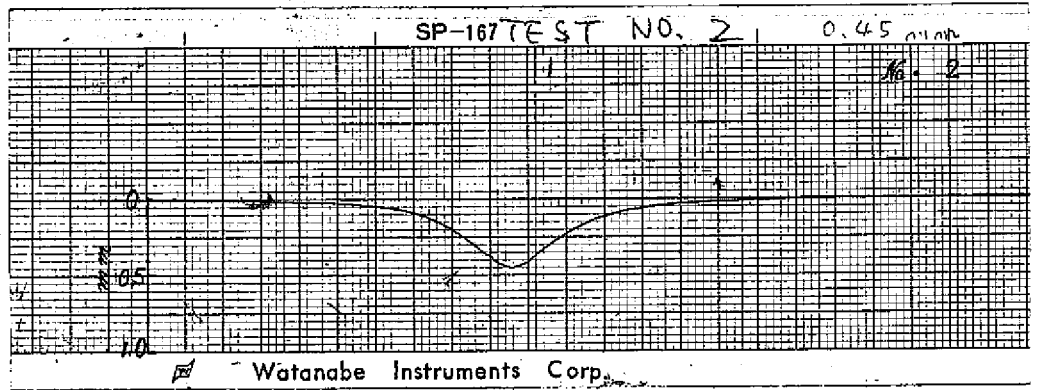
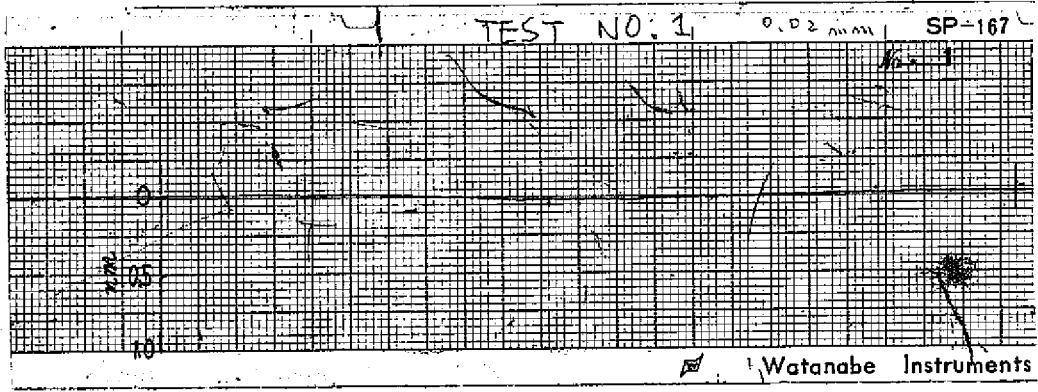


図 5 0 試験体 4 のウエステージ



10 mm

図 5 1 各ウエステージ部のくぼみ状態

記号	材質	ターゲット間隙 inch	温度 F	実験者
①	2%Cr-1Mo	1.07	980	DNC
②	"	0.606	940	"
③	"	"	680	"
④	"	1/4	600	APDA
	"	"	900	"
	"	1	600	"
	"	"	900	"
	Stainless Steel	1/4	600	"
	"	1/64	900	"
	Incoloy 800	1/4	600	"
	"	"	900	"

- ① : 試験 1
- ② : " 2
- ③ : " 3
- ④ : " 4

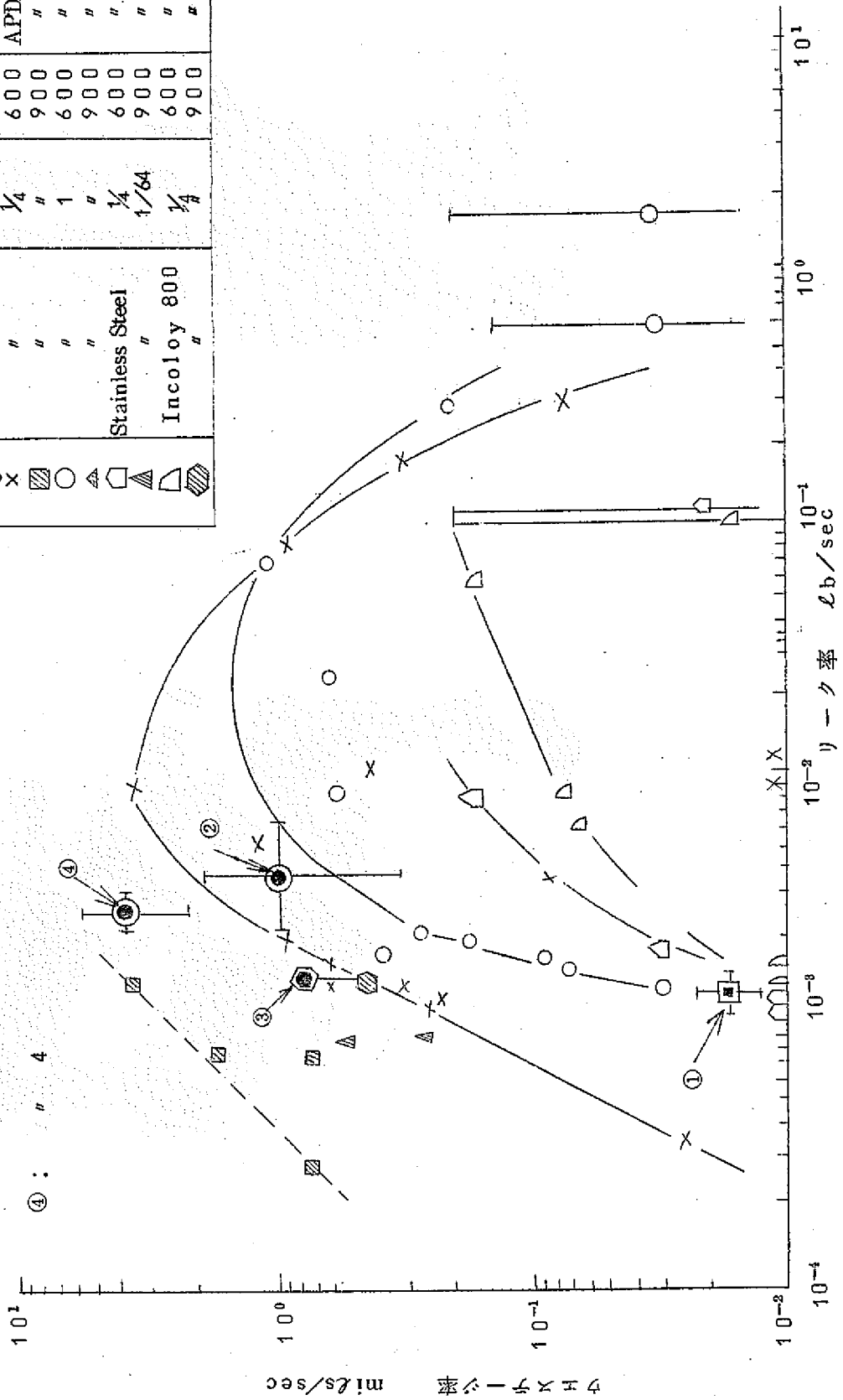


図 52 ウエスタージェ率とリーク率, APDAのデータ (16) との比較

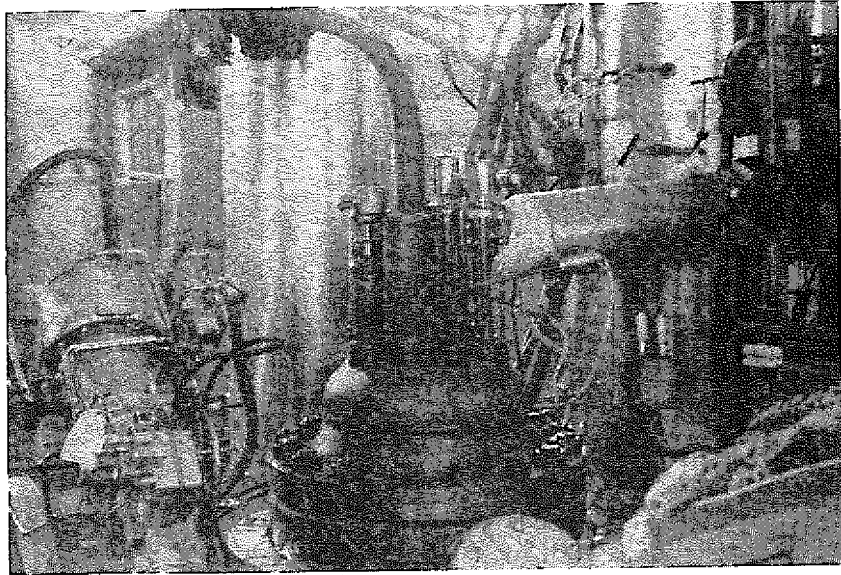


図 5 3 保温材を取つた反応容器上部

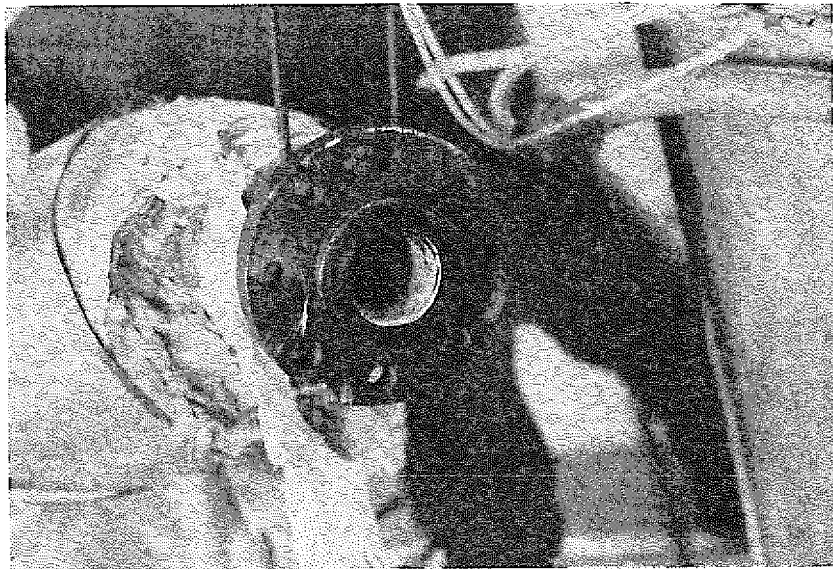


図 5 4 シール溶接部切断後の Na 流入管

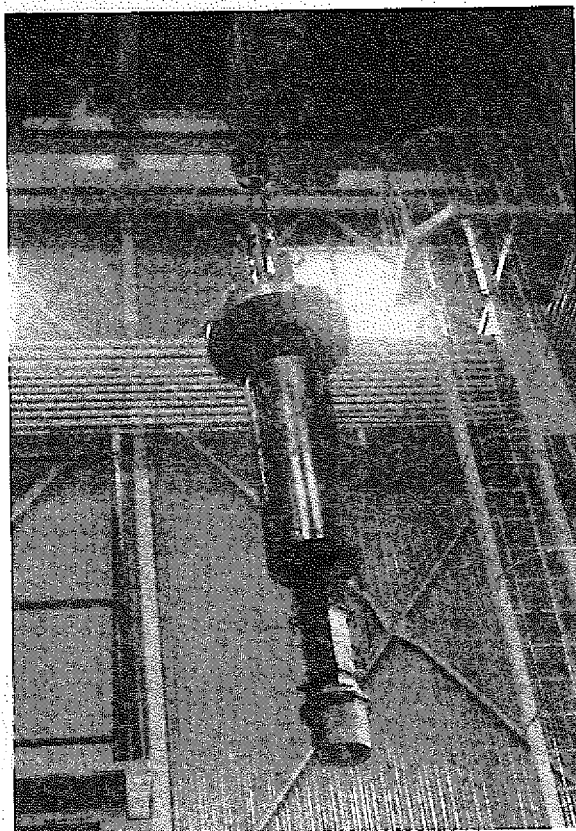


図 5 5 引き抜き直後の反応容器

内部構造物

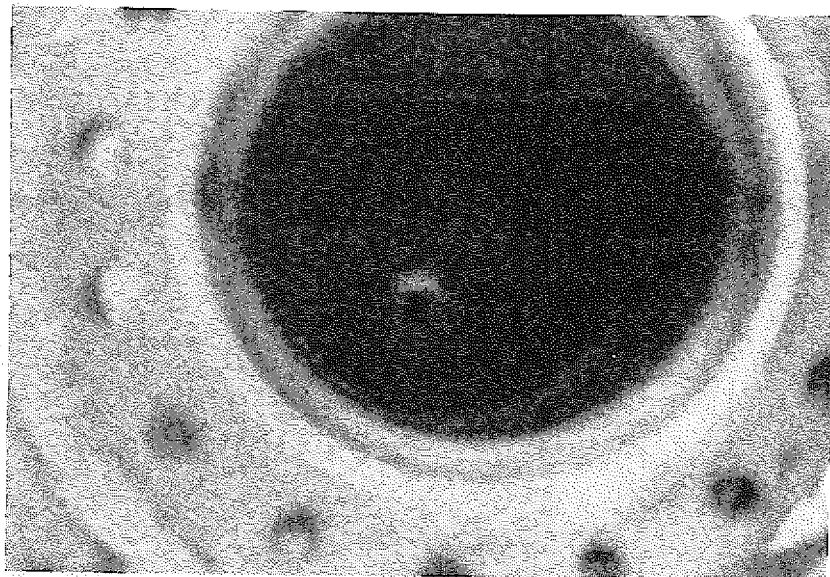


図 5 6 水反応試験後の反応容器内部

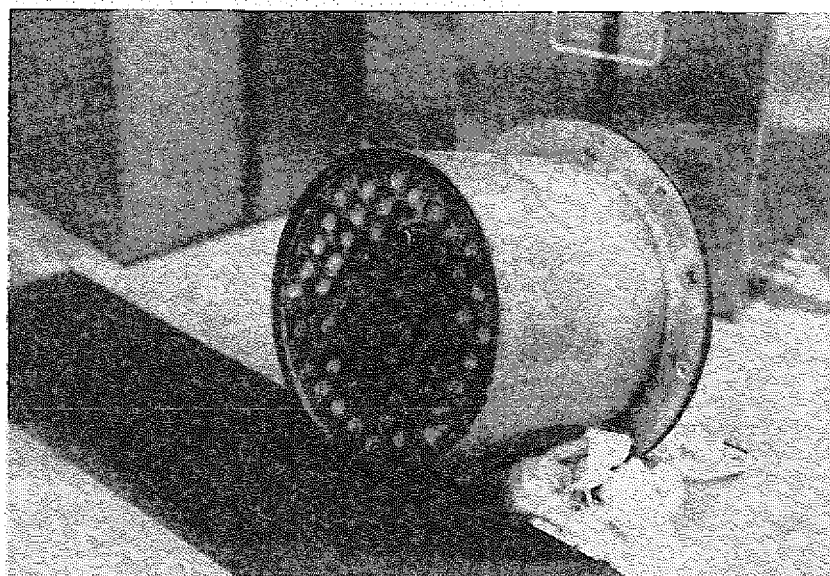


図 5 7 試験部出口フィルタのNa附着状況

表 1. Na - 水反応試験結果(1), 試験条件

試 験 番 号	1	2	3	4
試 験 日	'72-5-24	'72-6-21	'72-7-7	'72-7-26
<u>Na 系</u>				
温 度 T_s °C	480	490	353	483
カバーガス圧力 Kg/cmG	0	0	0	0.25
流 速 U_s m/s	0.24	0.24	0.24	0.24
液 面 L mm	778	788	777	783
<u>水 系</u>				
温 度 T_w °C	525	507	362	503
圧 力 P_w Kg/cmG	8.4	7.6	7.5	5.5
ノズル径 mm	0.3	0.7	0.3	0.5
全注水量 W_T gr	4.8	6.24	1.58	6.44
バルブ開放時注水量 W_V gr	1.8	3.24	(1.47) ^{****)}	3.44
全注水時間 t_T sec	7.2	6.5	- ^{***)}	5.3
バルブ開放時間 t_V sec	30.65	10.46	21.0	20.7
全注水率 W_T/t_T gr/sec	0.666	0.96	-	1.21
平均注水率 W_V/t_V gr/sec	0.587	3.1	(0.701) ^{****)}	1.64
<p>*) 試験部の流路(図2. 100×140 mm, 伝熱管無視)を基準。</p> <p>**) 水注入点から反応容器自由液面までの高さ。</p> <p>***) 水注入管圧力が測定されていないため求まらない。</p> <p>****) (5.1)式による推定値。</p>				

表2. Na-水反応試験結果(2), リーク検出計

試 験 番 号		1	2	3	4
<u>プラグイン計</u>					
反応前プラグ温度	℃	1 1 9	1 3 5	1 3 0	2 3 0
反応後 ^{*)} プラグ温度	℃	2 7 5	2 7 4	3 0 3	3 3 0
応 答 時 間 ^{**)}	sec	-	4 2	3 8	3 8
<u>Na 中水素計</u>					
センサ部温度	℃	5 4 6	5 5 3	5 5 0	5 5 0
Na 流 量	ℓ/min	1 5	1 5. 7	1 2	8. 5
反応前水素濃度	ppm	0. 4 5	0. 6	0. 7 3	3. 7 6
反応後 ^{*)} 水素濃度	ppm	4. 3 6	6. 0	6. 1 7	-
応 答 時 間 ^{**)}	sec	4 4	3 6	3 8	5 5
<u>Ar 中水素計</u>					
センサ部温度	℃		4 5 0	4 5 0	3 0 0
ガ ス 流 量	ℓ/min		6. 0	5. 9 5	3. 8
ガ ス 圧 力	kg/cm ² G	装置取付 前	0	0	0. 2
反応前水素濃度	ppm		1. 9	- ^{***)}	2 0
反応後 ^{*)} 水素濃度	ppm		-	-	-
応 答 時 間 ^{**)}	sec		7 5	7 8	1 4 0

*) "反応後"とは水注水後、主循環系において平衡に達した時をいう。

**) 指示が何らかの変化を示し始めるまでの時間。

***) バックグラウンドが高すぎて、指示値が正確でなかった。

試験 No	取付け位置								使用記録機
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Kistler Model 808A	/	/	/	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	AMPEX FR-1300 TEAC. A-3340
2	Kistler Model 808A	/	/	Toshiba HAD MK-4	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	AMPEX FR-1300 TEAC. A-3340
3	Kistler Model 808A	Endevco Model 233E	Endevco Model 233E	Toshiba HAD MK-4	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	AMPEX FR-1300 TEAC. A-3340
4	Kistler Model 808A	Endevco Model 233E	Endevco Model 233E	Toshiba HAD MK-4	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	SONY ECM-21	AMPEX FR-1300 TEAC. A-3340

(斜線部は変換器がなく測定できなかつた。)

表 3. 使用した音響式検出器

表4 Na-水反応試験結果(3), 音響式検出器

試 験 番 号	1	2	3	4
<u>加 速 度 計 *</u>				
反応開始点ピーク値	2.2	2.25	1.97	2.0
定常反応時	0.542	0.643	0.625	0.75
バックグラウンドノイズ	0.125	0.143	0.125	0.083
<u>加 速 度 計 **</u>				
反応開始点ピーク値	↑	↑	4.16	
定常反応時			1.28	◎
バックグラウンドノイズ			0.192	
<u>加 速 度 計 ***</u>				
反応開始点ピーク値	↓	↓	4.07	
定常反応時			1.17	◎
バックグラウンドノイズ			0.2	
ナトリウム中マイク ****				
反応開始点ピーク値		476.4	579.6	620.5
定常反応時		105.9	201.6	190.9
バックグラウンドノイズ		44.1	75.6	52.5

* Position No.1 Kistler 808A

** Position No.2 Endenco 233E-A42

*** Position No.3 Endenco 233E-A42

**** Position No.4 Toshiba HAD-MK-4

◎ Calibration 信号が記録されていないため値が正確に読めない。

↑ ↓ 加速度計がなかつたため記録なし。

表5 Na-水反応試験結果(4), ウエステージ

試験番号	1	2	3	4
ノズル径 mm	0.3	0.7	0.3	0.5
伝熱管外径 mm	27.2	同左	同左	同左
伝熱管肉厚 mm	4.0	同左	同左	同左
ノズル-ダーケツト間距離 mm	32.4	15.4	同左	同左
水噴出方向とダーケツト面との角度	直角	同左	同左	同左
ダーケツト管内の流体	N ₂	同左	同左	同左
ダーケツト材質	2¼Or-1Mo 鋼	同左	同左	同左
<u>ウエステージ</u>				
最大深さ mm	0.02	0.45	0.34	2.73
ウエステージ率* mm/sec	2.8~6.5 ×10 ⁻⁴	0.69×4.3 ×10 ⁻²	~1.6×10 ⁻²	0.52~1.3 ×10 ⁻¹
" mils/sec	1.1~2.6 ×10 ⁻²	0.27~1.7	~0.62	2.0~5.1
ウエステージ面の色	銀色	茶褐色	周囲と変わらず	銀色
ターゲット管周囲の色	茶褐色	茶褐色の斑点	薄茶褐色	褐色
*) 水噴出時間として, 表1の t _v , t _T を基準にした値を各々示す。				

表5 Na-水反応試験結果(4), ウエステージ

試験番号	1	2	3	4
ノズル径 mm	0.3	0.7	0.3	0.5
伝熱管外径 mm	27.2	同左	同左	同左
伝熱管肉厚 mm	4.0	同左	同左	同左
ノズルダークレット間距離 mm	32.4	15.4	同左	同左
水噴出方向とダークレット面との角度	直角	同左	同左	同左
ダークレット管内の流体	N ₂	同左	同左	同左
ダークレット材質	2½Cr-1Mo 鋼	同左	同左	同左
ウエステージ				
最大深さ mm	0.02	0.45	0.34	2.73
ウエステージ率* mm/sec	2.8~6.5 ×10 ⁻⁴	0.69×4.3 ×10 ⁻²	~1.6×10 ⁻²	0.52~1.3 ×10 ⁻¹
mil/sec	1.1~2.6 ×10 ⁻²	0.27~1.7	~0.62	2.0~5.1
ウエステージ面の色	銀色	茶褐色	周囲と変わらず	銀色
ダークレット管周囲の色	茶褐色	茶褐色の斑点	薄茶褐色	褐褐色
*) 水噴出時間として, 表1の t _v , t _T を基準にした値を各々示す。				