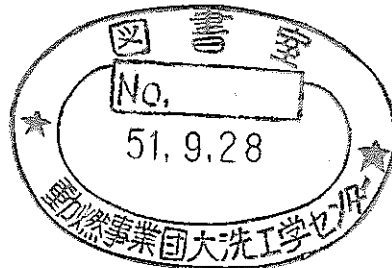
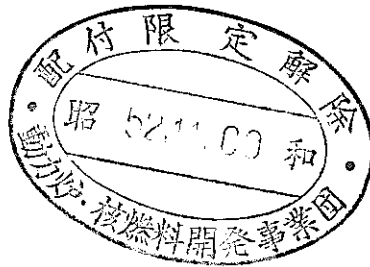


区 分 変 更	
変更後資料番号	XXXX
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

小リークナトリウム水反応試験研究

第 3 報

蒸気ウェステージと検出計の応答



1973年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N943 73-02
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

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

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

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

2
8N943 73-02
1973年8月23日



小リーク・ナトリウム・水反応試験研究

第 3 報

蒸気ウェステージと検出計の応答

報告者 高速炉安全性試験室
根井弘道
氏原幸三朗
大内義弘
大島巖
井上設生
堀雅夫

期 間 1972年9月1日～1973年8月31日

目 的 蒸気注入によるターレット管のウェステージ結果と各種リーク検出計の応答特性
についての試験結果を報告する。

要 旨 もんじゅの蒸気発生器を模擬して、次の様な試験条件で試験をおこなった。

ターレット部の流速	0.24 m/s
ノズル・ターレット間距離	1.75 mm
ノズル径	0.3～0.7 mm
ナトリウムと蒸気の温度	280～530℃

蒸気圧力は20～170 atm の範囲でかえたが、データをリーク率で整理し、圧力の影響は特に考慮しなかった。リーク率0.1～6 g/sec の範囲で、ウェステージ率はリーク率とともに増大した。2-1/4 Cr-1Mo 鋼はステンレス鋼にくらべて、5倍程ウェステージが大きい。Na 温度480℃のウェステージ率は330℃にくらべて10程大きい。この温度による違いを考慮すると、APDAで得られた水のウェステージと我々の蒸気の結果はそれ程大きな差はない。

Na 中とカバーガス中の水素計の検出感度について検討を加えた。応答時間は両者とも 30～40 秒程度であった。

連続式プラグイン計は良好な水反応時の応答を示した。このプラグイン計により、水注入後のループの平衡プラグイン温度と注入水量との関係をとった。

各種のピエゾ式音響検出器により反応音を測定することにより、リーク率により S/N 比は 2～10 程度であること、ナトリウム温度 480℃では 280℃の時の 2 倍程度の音響出力がでることなどがわかった。周波数スペクトルは導波管等構造物の影響を強く受けるのではないかと思われた。

水反応時には、反応容器の液面が水素ガスにより振動するのが液面計により観測された。実際の蒸気発生器でリークが起った時のこの振動の大きさを推定するための考察を加えた。

Z
BN943 73-02
23, Aug. 1973



STUDIES OF SMALL LEAK
SODIUM-WATER REACTIONS

(3)

STEAM WASTAGE AND RESPONSES OF LEAK DETECTORS

August, 1973

Hiromichi NEI
Kozaburo UJIHARA
Yoshihiro OHUCHI
Iwao OHSIMA
Shetsunari INOUE
Masao HORI

ABSTRACT

This report is a summary of the technical progress in the period September 1972 through July 1973.

The objective of the task is to determine the effects of various parameters on material wastage during small leak of super-heated steam into sodium. The additional purpose is to examine the responses of various leak detectors after the steam injections into sodium.

The following test conditions were chosen simulating the conditions of the prototype FBR "MONJU" steam generator:

Sodium velocity past target, 0.24 m/sec
Spacing between nozzle and target, 1.75 mm
Injection nozzle diameter, 0.3~0.7 mm
Sodium and steam temperature, 280~530°C

The injection pressure had no significant effect on the wastage rate over the pressure range of 20~170 atm if the data were correlated by the leak rate. In the leak rate range of 0.1~6 g/sec, the wastage rate is increased by increasing the leak rate. Type 304 stainless steel is more resistant to wastage by factors about 5 over that for 2-1/4Cr-1Mo steel.

The wastage rates at the sodium temperature of 480°C are about 10 times higher than that of 330°C . Considering the difference of sodium temperature, there are not large differences between our steam wastage data and the water wastage data obtained in APDA.

The hydrogen leak detectors in sodium and in cover gas were tested and the discussions are given about the sensitivities of each detectors. The response times of both hydrogen detectors were about 30~40 seconds.

The continuous plugging indicator showed the attractive characteristics for monitoring water leaks. The available relation between the equilibrium plugging temperature and the amount of injected water was obtained using the plugging indicator.

The acoustic signals were measured by various piezoelectric transducers during the sodium-water reactions. The signal-to-background noise ratios were 2~10 depending on the leak rate. The output value of acoustic signal at the sodium temperature of 480°C was about 2 times as high as that at 280°C . The spectra detected are considered to be the resonance frequencies of the wave-guide rods and other structural members.

The oscillations of sodium surface in the reaction vessel were observed by the continuous level gauge during the sodium-water reaction. The records of oscillation were investigated for estimating the magnitude of oscillation due to the formation of hydrogen bubble in an actual steam generator.

目 次

1	まえがき	1
2	蒸気注入法	3
3	ウェステージ	5
3.1	ウェステージ試験方法	5
3.2	Na 水反応試験条件とウェステージデータ整理法	5
3.3	ウェステージ結果	7
3.4	接線方向のウェステージ	11
3.5	水噴出ノズルの拡大	13
4	Na 中水素検出計	15
5	Ar 中水素検出計	21
6	プラグ計	24
6.1	プラグ計特性	24
6.2	Na 水反応後のプラグ温度	29
6.3	まとめ	32
7	音響検出計	33
7.1	音響信号	33
7.2	周波数分析結果	35
7.3	まとめ	36
8	発生水素の溶解割合	37
9	液面振動によるリーク検出	40
10	おわりに	44
	参考文献	47

図 リ ス ト

- 図 2 - 1 S W A T - 2 反応容器組立図
- 図 2 - 2 S W A T - 2 フローシート
- 図 2 - 3 大気中への蒸気噴出試験による噴出量較正
- 図 2 - 4 加熱蒸気の臨界流量の理論式と実験結果の比較
- 図 3 - 1 ターゲット伝熱管と水噴出ノズル
- 図 3 - 2 CROSS SECTION OF TARGFT ASSEMBLY, TEST № 1 0 ~ 4 9
- 図 3 - 3 ターゲット管表面の接線方向に水を噴出した場合の温度変化
- 図 3 - 4 ウェステージ率に与えるリーク率, 材質及び Na 温度の影響
- 図 3 - 5 ノズル径, Na 温度及び材質をパラメータとしたときのリーク率と重量損率の
関係
- 図 3 - 6 ウェステージ率に与える注入蒸気平均圧力の影響
- 図 3 - 7 4 8 0 °C を基準にした相対ウェステージ率に対する Na 温度の影響
- 図 3 - 8 相対ウェステージ率と絶対温度の逆数の関係
- 図 3 - 9 温度の違いを考慮しておこなった A P D A のウェステージ率との比較
- 図 3 - 1 0 損耗比とリーク率との関係
- 図 3 - 1 1 損耗比のナトリウム温度による影響
- 図 3 - 1 2 損耗比と絶対温度の逆数の関係
- 図 3 - 1 3 水反応時のダミー伝熱管上の温度変化
- 図 3 - 1 4 接線方向に噴出した場合のウェステージ分布 (1)
- 図 3 - 1 5 接線方向に噴出した場合のウェステージ分布 (2)
- 図 3 - 1 6 ターゲット管上の温度変化と水注入状況
- 図 3 - 1 7 ターゲット管の接線方向に噴出した場合のウェステージ率
- 図 3 - 1 8 連続水反応試験後のノズルの拡大状態
- 図 4 - 1 ノーブル・ポンプの出力 (Ni 膜温度 5 5 0 °C, 主循環 Na 温度 4 8 0 °C, 水注
入時刻は 2 0 秒)
- 図 4 - 2 質量分析器の出力 (Ni 膜温度 5 5 0 °C, 主循環 Na 温度 4 8 0 °C, 水注入時刻
は 2 0 秒)
- 図 4 - 3 水のリーク率とノーブル・ポンプ出力の初期勾配 (Ni 膜温度 5 5 0 °C)
- 図 4 - 4 水のリーク率と質量分析器出力の初期勾配 (Ni 膜温度 5 5 0 °C)
- 図 4 - 5 ノイズレベル (ノーブル・ポンプ) に相当する Na 中水素濃度変化の計算値。パ
ラメータは水注入前の Na 中水素濃度

- 図4-6 全注水量と第一ピーク高さ(ノーブル・ポンプ)(Ni膜温度550℃)
- 図4-7 全注水量と第一ピーク高さ(質量分析器)(Ni膜温度550℃)
- 図4-8 注水時間とスペクトル(質量分析器)の立上り点から第一ピーク点までの時間の関係
- 図4-9 Na中水素検出系
- 図4-10 Na流量の逆数とNa中水素検出計の応答時間
- 図4-11 Ni膜本体近傍の構造
- 図4-12 高温ヘリウム漏洩試験装置
- 図5-1 Naペーパーラップ改造前のカバーガス中水素検出器の出力(Pd膜温度450℃, 主循環Na温度480℃, 水注入時刻は20秒)
- 図5-2 Na付着写真,(上)Naペーパーラップ 入口配管(下)バルブ
- 図5-3 Naペーパーラップの従来型(上)と改造型(下)
- 図5-4 Naペーパーラップ改造後のカバーガス中水素検出器の出力(Pd膜温度450℃, 主循環Na温度480℃, 水注入時刻は20秒)
- 図5-5 水のリーク率とカバーガス中水素検出器の初期勾配(Pd膜温度450℃)
- 図5-6 Ar中水素検出計のフローシート
- 図5-7 カバーガス流量の逆数とカバーガス中水素検出計の応答時間
- 図6-1 プラッキング計フローシート
- 図6-2 コールドトラップ出口温度とプラグ計指示値の関係
- 図6-3 プラグ計の測定例
- 図6-4 物質移動係数の時間変化
- 図6-5 物質移動係数の平均値とレイノルズ数の関係
- 図6-6 物質移動係数の最大値とレイノルズ数の関係
- 図6-7 物質移動係数と冷却速度の関係
- 図6-8 物質移動係数とサイクル時間の関係
- 図6-9 プラグ計, 流量温度の時間変化
- 図6-10 Na-水反応時のプラグ計応答
- 図6-11 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化
- 図6-12 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化
- 図6-13 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化
- 図6-14 Na-水反応によるプラグ計応答時間
- 図6-15 プラグ温度とNa中水素計指示
- 図6-16 注水量とプラグ温度

- 図6-17 注水量より計算した酸素濃度とプラグ温度
- 図6-18 注水量より計算した水素濃度とプラグ温度
- 図7-1 加速度計出力の時間変化
- 図7-2 リーク率と加速度計出力の関係
- 図7-3 リーク率と加速度計出力の関係
- 図7-4 リーク率とNa 中マイク出力の関係
- 図7-5 リーク率と加速度計出力
- 図7-6 リーク率と加速度計出力
- 図7-7 リーク率とNa 中マイク出力
- 図7-8 出力の温度による影響
- 図7-9 周波数分析結果
- 図7-10 Na 中マイクの周波数分析結果
- 図7-11 周波数分析結果
- 図7-12 周波数分析結果
- 図8-1 水反応によりループ内のNa に溶解した水素の割合
- 図9-1 Na-水反応時のNa 液面の振動
- 図9-2 液面の平均上昇値と水リーク率の関係
- 図9-3 Ar ガス噴出時の液面上昇の推定値と測定値との関係
- 図9-4 液面の平均上昇値と振巾の関係
- 図9-5 Na 水反応時とAr ガス噴出時の液面振動の周波数
- 図9-6 液面振動ノイズのNa 流量による影響
- 図9-7 フルード数で整理した液面振動のノイズ振巾
- 図9-8 液面振動の振巾と水リーク率の関係

1. ま え が き

高速炉の蒸気発生器はNaから水へ直接熱を伝える構造となっているため、伝熱管壁に欠かんが生じると、Na中に水がリークし、Na-水反応事故が発生する。管壁に生じる欠かんは、初めピンポールのような極く小さなものであることが多いと考えられる。水のジェットは高温の反応生成物を作り、隣接伝熱管をウェステージにより破損し、大リーク事故につながる恐れがある。従って、出来るだけ早期にかつ確実に小リークを検出し、適切な処置をとることが重要である。

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ェ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月末に完成し、引き続き調整運転、Na中水素計特性試験をおこなった。その後Na-水反応試験に入り、1972年7月末までに4回の水反応試験をおこなった。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。この第4回目までの試験は、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、結果を第2報にまとめている。²⁾

その後、試験を経続し、1973年7月末までに計49回の水反応試験をおこなった。試験の回数は、ウェステージを調べるためのターゲットを基準にしてつけてある。試験の目的は、過熱蒸気のリーク率を変化させた際の各リーク検出計の応答特性を調べること、2-1/4Cr-1Mo鋼とステンレス鋼のウェステージ量を求めること及び各種リーク検出計の応答特性を調べることである。

もんじゅの蒸発器の伝熱管はクロモリ鋼を使うことになっているが、過熱器と再熱器はステンレス鋼である。蒸発器の出口付近では水は過熱蒸気になる。一方、APDAの試験結果によると、^{3), 4)}クロモリ鋼はステンレス鋼にくらべて、ウェステージ率が20~30倍大きい。従って、ウェステージ率に影響するパラメータの効果をはっきりつかむため、まず、過熱蒸気によるクロモリ鋼のウェステージを調べることにし、その後ステンレス鋼についても試験した。

Na中水素計とAr中水素計は、検出感度と遅れ時間を定量的につかみ、長時間使用後の経

時変化や、保守上の問題点を明らかにする事を目的とした。

連続式プラグイン計は、リーク検出器としてどの程度の水リーク率まで検出できるかを調べるためのデータをとることを目標とした。また、水注入後、プラグイン温度、従ってNa中の不純物量が如何に変化するかを調べた。

音響検出計は、まずS/Nを改善することに力を入れ、本装置に取り付けた状態で、水リーク率と音響出力の関係をみた。周波数分析により、取り付け方や容器の構造の影響も考察した。

水注入後、反応容器の液面が水素気泡により振動するのが記録されたので、液面計によりリーク検出が可能かどうかの検討を加えた。

これらの他、水注入により発生する水素ガスがどの程度の割合でNa中に溶解するかを調べるために、ループを循環するNa中の水素濃度が時間的に一定になる値を求めた。

試験は今後も同じ様な目的で経続されるが、一応、試験開始後1年以上経過したので、Progress Reportとして成果をまとめた。

2. 蒸気注入法

試験装置は第1報に詳細に記述してあるが、系統図と反応容器の図をあらためて、図2-1と図2-2に示す。この系統図はSWAT-2完成時のものであるが、Na系はその後ほとんど変更はない。しかし、水系は色々な理由により図2-1よりかなり変わっている。

変更した点は次のごとくである。

- 1) 水注入後、ノズルを保護するためのアルゴンガス噴出ラインとして、従来のV-704のラインの他に、さらに高い圧力をかけられるような(従来は10 atg以下)系統をつけた。
- 2) 注水管の体積をへらし、注水弁閉後の注水管内残留蒸気の影響を少なくするように、ブルドン管式の圧力計をとりはずし、ひずみ式の圧力計を注水管のすぐわきにとりつけた。
- 3) 水の外気へのリークをなくするように、加圧器本体のフランジ部をシール溶接構造にするとともに、注水配管もできるだけ溶接構造とした。
- 4) 注水バルブと加圧器本体間の注水配管で、所定温度の蒸気にならないで低温の水が残る部分があったため、そこにヒータを増設した。
- 5) 加圧器内をできるだけ均一な温度、圧力条件にするため、特に必要でなかった直視式液面計を取りはずした。

水反応実験時の蒸気の注入量は、注入前後の加圧器内の蒸気条件と加圧器内にしめる蒸気の体積とから計算で求めた。現在までの実験では、注入前後の加圧器の圧力変化は約20%以内であり、温度はほとんど変化しない。

噴出量Gは次式で与えられる。

$$G = V \left\{ \frac{1}{v_1 (P_1, T_1)} - \frac{1}{v_2 (P_2, T_2)} \right\} \quad (2-1)$$

ここで、Vは加圧器内の蒸気体積、 v_1 、 v_2 は注入前後の比体積である。

この方法による噴出量をチェックするため、大気中に噴出する較正試験をおこなった。噴出した蒸気は、すべてビニール袋に集め、重量測定し、噴出蒸気量を求めた。図2-3に圧力差から求めた蒸気量と重量測定による蒸気量との比較を示す。少しばらつきが大きいのが、ほとんどの両者は一致しているのがわかる。両者の違いが大きいのは、比較的噴出時間が短い場合に多い。

この試験の結果と臨界流を仮定して計算した流量との比較を図2-4に示す。実験データは、

重量測定より求めた流量と、噴出前後の平均圧力とでプロットしてある。計算式は次式による。

$$G_m = A \sqrt{g k r_m^{\frac{k+1}{k}} P_1 / v_1} \quad (2-2)$$

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_1 ：水圧力， v_1 ：比体積。さらに r_m は，

$$r_m = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2-3)$$

で与えられる。

実験結果と理論式と比較して、0.7 mmのノズルで圧力が高いところで、実験の方が高めにでているのは、加圧器下部に所定の過熱蒸気になっていない水が残っていて、それができて来たことによるものと考えられる。ノズル径0.5 mmの場合は、AとBの2個のノズルを使い2回試験したが、Aは理論値より高く、Bは低い。Aは一樣に高いので、ノズル径が設計値0.5 mmより大きくなっていったか、あるいは噴出ノズル直前の温度が低くなっていたことによるのではないかと考えられる。Bは極端に低いので、ノズルのつまりが原因ではないかと考えられる。この図にのせた以外の実験で、0.5 mm以下のノズルでは、明らかにつまりの原因と考えられる極めて低いリーク率になることが、たびたびあった。

全体としてデータのばらつきが大きいのが、問題点は、大気中噴出のためノズル近傍の温度がおさえられない、ノズル径の変化またはつまりがある、などであると考えられる。Na中に噴出する場合は、反応容器内のNaに加熱され、ノズル近傍はNaの温度と等しい加圧器内の温度になっているので、上記の原因によるばらつきはない。ノズル径の変化またはつまりはリーク率には影響するが、噴出量の計測値には影響しない。これらの事から、加圧器内の圧力変化から求めた蒸気注入量は±20%以内におさえられていると云える。

3. ウェステージ

3.1 ウェステージ試験方法

水噴出ノズルと模擬伝熱を含むターゲットアセンブリの模造を図3-1に示す。これは試験№9までに使用した試験部で、№10以後は図3-2に示す連続式のターゲットアセンブリを使用した。

水噴出方向は№1～6及び№8はNaの流れ方向と同じ下向きで、ノズル先端から17.4 mm離れたターゲット管に垂直にぶつけた。№7と9は、図3-3に示す様にノズルの下にあるターゲット管に対して、その面の接続の方向に水を噴出させた。№10以後は、Naの流れに対し直角な水平方向に水を噴出させ、垂直に並べてあるターゲット管にぶつけた。

連続式ターゲットは3列に並んだ伝熱管群の1列の中央部に、長さ50 mmの試験片を縦に1列に並べたもので、水噴出点の上下にガイド管があり、上端のワイヤーにぶらさがっている。このワイヤーは反応容器の上部カバーガス中にある貫通孔から外部に出ている。貫通孔はテフロン製のグランドパッキンでシールされているが、一回の水噴出試験が終わったあと、グランドパッキンをゆるめ所定の長さだけ上へ引きぬく。この操作はNaループ運転中におこなった。

水注入弁が閉じ、注入管の圧力がある値までさがったあと、注入管保護のArガスを注水管に送り込み、ノズルからNaが逆流してこないようにする。Arガスを送り込むのが遅すぎるとノズルがつまり、またあまり早すぎ圧力が高い時にArガスを入れると水注入状態がおかしな事になる。試験では約30 atmに圧力がさがった時にArガスを導入させることが多かった。

水反応試験直後は、ターゲット管を引きあげようとしても、あがらないことがたびたびあった。その様な時は、ループのNa温度をあげるか、コールドトラップで精製するたにより、引きあがるようになった。従って、これは水反応によってできた反応生成物がターゲット管附近に附着したことによるものと考えられる。

3.2 Na - 水反応試験条件とウェステージデータ整理法

試験№49までのNa - 水反応試験時の条計は要約すると表3-1のようになる。このなかで、特に変化させたパラメータは、Na温度とそれに等しくとった水温、ノズル径、注水

時間、ターゲット材質、水噴出方向などである。水圧力、全注水量、推定リーク率などはお互に関連し合っているが、最終的にはリーク率によって整理できると考えている。

カバーガス圧力はウェステージにはほとんど影響しないと考えられるので、その時の実験の都合により0～0.3 atmの範囲におさえた。ターゲット部のNa流速と液深はほぼ一定の値に保った。ターゲット伝熱管の外径は27.2mmを基準にしたが、No.20以後は都合により26.5mmのものを使った。ノズルとターゲット間の距離は約17.5mmの一定値に保った。

各試験ごとのNa系と水系の条件を表3-2に示す。Na温度は反応容器内のNa温度であり、ほぼ反応点の温度に等しい。流速はターゲット管群を保持しているわくでかこまれた流路(図3-1 140×100mm)でNa流量を割った値であり、管群の影響は考慮していない。水系の温度、圧力は加圧容器内の計測値である。

水噴出とターゲット関係のデータを表3-3に、ウェステージ結果は表3-4にまとめてある。ノズル径は公称寸法を記入してある。試験前の実測値は少しこの値と違っている。また試験後は相当径が拡大していたが、これについては後で述べる。注水時間は、注水バルブ開閉信号から読みとることを建前としたが、注水バルブが閉になった後、注水配管に残存している水の影響が相当大きい時は、反応音、反応による温度変化、注水バルブ内圧力変化等を考慮して最も妥当と考えられる時間をとった。大半の場合、特に試験番号No.20以後はバルブ開閉時間が注水時間になっている。リーク率は全注水量を注水時間で割った値である。

ウェステージ部のへこみは、No.9までは特別に設計製作した表面測定器により測定した。これはターゲット管の上を針がトラバースし、針の上下の動きを差動トランスの原理で記録計に信号を送るものである。最大深さは、へこみ部の最も深いところの深さである。No.10以降は、この表面測定器を使わず、顕微鏡の焦点変化から最大深さを読みとった。No.9は二度水を噴出させたので、それによる合計のウェステージが計量されている。No.11～13及び15はウェステージ部がへこまず、逆に附着物により盛り上りを示したので、最大深さは測定されていない。No.15～19は5回連続水反応試験であるが、このうちNo.16以後はターゲットが引きあがらず、No.16のターゲットに4度水を噴出させる結果となった。

重量変化量は水噴出ノズルに最も近いターゲット管の試験前後の重量差を示す。初期の試験では、ターゲットが溶接構造であったため、重量変化が計測されていない。重量変化量がプラスになっているのは、附着物により重量が増加したことを示す。ウェステージ率は最大

深さを注水時間で割ったものである。重量損率は重量変化量を注水時間で割ったものである。損耗比はウェステージ率を注水率で割った値である。

3.3 ウェステージ結果

試験№1～9のターゲットについては、科学技術庁金属材料技術研究所に委託し、外観観察、へこみ分布測定、断面の組織観察、硬度測定等をおこなっている。⁵⁾それによってわかった事を列並すると次の様になる。

- ① へこみ形状はノズルから遠くにあるターゲット程、平べいになる。
- ② へこみの深さはまちまちで、パラメータの影響をみるまでには到らない。
- ③ ウェステージ部の色は、特に初期の場合に、色々な色を示しているが、この原因は不明である。
- ④ ターゲット管上に、噴出水又は反応生成物のジェットをさえぎるもの、具体的には表面にそわせた熱電対とそれをしばりつけた針金、があるとその下の表面はへこみが少なく、影になって残る。
- ⑤ 断面の組織は、ターゲット管のウェステージを受けた表面直下と、そこと反対側の円周上の組織とは著しい差がみられない。
- ⑥ また組織と同じ位置で比較した硬度の差も、ほとんど違いがない。

№10以後の試験片の検査は今後行なう予定になっている。№10以後の試験片は№1～4等、試験初期に現われた様な色の変化はほとんどなく、あっても銀色がかった光沢が出るかどうかであった。

図3-4はNa温度とターゲット材質をパラメータにして表わしたウェステージ率とリーク率との関係である。ノズルターゲット間距離は約17.5mmで一定、水噴出方向はターゲット面に直角である。Naと蒸気とは、ほとんど同じ温度にして実験がおこなわれている。設定温度は480℃を基準にし、50℃ごとに変化させてある。2-1/4 Cr-1Mo鋼とステンレス鋼(SUS27, 以下同じ)のいずれも、基準温度480℃におけるデータの数が多く、かつ比較的まとまっているので、図中各々1本の曲線で、データの集まりを示している。480℃のウェステージ率は2-1/4 Cr-1Mo鋼(以下クロモリと略す)とステンレス鋼(以下SUSと略す)、いずれもリーク率とともに増大するが、5g/s前後で飽和する傾向にある。さらにリーク率が大きくなった場合は、次の二の理由よりウェステージ率はさざると予想される。

- ① リーク率4g/sec 前後以上ではウェステージ面の形状はピット状からトロイダル状に

かわっている。従って、ウェステージ部の体積は増大しても、中心部の深さは深くならない。

② 後で比較するように、APDA でとられた水のウェステージの場合、5～8 g/sec 程度のところで極大のウェステージ率を示す。

図3-5は重量損率とリーク率との関係を見たものである。この図では、Na 温度と材質の他に水噴出ノズルの内径をパラメータとしてとってある。ノズルは試験後かなり拡大している場合があったので、この図中には、定格値で示してある。各データのわきに書いてある数字は試験番号を示す。図中に示した直線はノズル径一定のデータに対して、45°の勾配で引いたものである。45°の勾配をとったのは、リーク率と重量損が比例するのではないかと云う仮定によっている。試験No 35が温度が低いにもかかわらず、重量損がかなり高いのは、ノズル径が拡大したことによる影響がでているのではないかと考えられる。(表6参照)。ノズル径が小さくなると、リーク率が小さくなり重量損率が減少するので、温度480℃のクロモリのデータを全体的にみると、リーク率の減少により、ほぼ一様に重量損率が減少している。

図3-6は注入蒸気の平均圧力の影響を見たものである。ターゲット材質はクロモリ, Na 温度は480℃, リーク率2.3～4.1 g/secのデータを集めてある。データの数が十分でないが、蒸気圧力はウェステージ率に直接は影響しないようである。

図3-7はウェステージ率と温度の関係を見たものである。図3-4で、クロモリとSUSの480℃のデータの上に引いた曲線を基準にし、ウェステージ率の測定値をそれと同じリーク率の曲線上の基準値に対する比で表わしたのが相対ウェステージ率で、図3-7のたて軸にとってある。従って480℃の相対ウェステージ率は1.0を中心にして集まっている。クロモリとSUS, いずれも, Na 温度380℃と480℃とで比較すると、ウェステージ率は3～4倍違う。

図3-8は図3-7の結果の横軸を絶対温度の逆数で書きなおしたものである。かなり離れた点もあるが、全体のデータの中心に直線を引くと図中のようになり、相対ウェステージ率を η とすると次式で表わされる。

$$\eta = 3.53 \times 10^9 e^{-\frac{6150}{T}} \quad (3-1)$$

Tは絶対温度であり、 $480^{\circ}\text{C} = 753^{\circ}\text{K}$ を入れると $\eta = 1.0$ となる。

図3-9は 480°C のクロモリのウェステージ率をAPDAの結果と比較したものである⁴⁾。
 480°C はほぼ 900°F に相当する。APDAの 900°F のデータは蒸気によるウェステージ率であり、 600°F は水による結果である。(3-1)式から 600°F の相対ウェステージ率を求めると0.101になるので、この温度による違いを考慮して、APDAとPNCの 900°F のウェステージ率を10分1にして図中に示した。この図から次の様なことが明らかになる。

- ① 900°F の蒸気のウェステージ率を10分1にすると 600°F の水のウェステージ率に大よそ等しくなる。
- ② いずれの場合も、リーク率 10^2 lb/sec 附近にウェステージ率のピークがありそうである。
- ③ APDAとPNCの 900°F の蒸気のウェステージ率は大体よい一致を示す。但しリーク率が小さくなると、APDAの結果の方が高くなる。
- ④ この違いはノズルとターゲットとの間かく (Spacing) が $1/4 \text{ in}$ と 0.69 in とで違うことによるものと考えられる。 600°F の $1/4 \text{ in}$ と 1 in のSpacingの結果でも、リーク率が小さくなると間かくが小さい方がウェステージ率は大きくなっている。
- ⑤ 温度差からの10分1の違いが妥当なものであるとし、かつノズル、ターゲット間かくの影響を考慮して、蒸気と水の結果を比較すると、蒸気のウェステージ率はリーク率が小さいところで水の場合より大きくなっている。逆にリーク率が高いところでは蒸気の方が低くなっている。

図3-10はウェステージ率をリーク率で割った損耗比を示す。損耗比は単位注水量で受ける損耗部の深さを示す。図3-10によると、損耗比はリーク率 0.7 g/sec 附近にピークがある。損耗比が大きいと少量の水で深くえぐられることになる。伝熱管の厚さが一定で、ある厚さまでウェステージを受けると破損するとすれば、損耗比がピークを示す条件で最も少量の水で伝熱管が破損する。一方、SG内にリークして来る水の積分値を指示する様な不純物検出計があったとすると、この損耗比最大の点で、リーク検出計としての最小感度と応答時間を設計しておけば、少なくともこのピーク値に相当するリーク率以下のリークに対しては総てカバーできる。水リークによるNaの反応生成物の積分値を検出する型のリーク検出計としては、カバーガス中の水素計などが考えられる。また、Na中水素計やブラギング計などが、比較的小リークに対してSG系統全体の不純物レベルの上昇を検出する場合がこれに相当する。

図3-11はNa温度を横軸にして、損耗比を表わしたグラフである。この結果にはリーク率の影響が入っているが、図3-10にみるように、リーク率0.1~6 g/secの全範囲にわたり、同じ温度の損耗比はそれほど大きな違いを示さないので、図3-11ではかなり明確に温度の影響をみることが出来る。図3-11から次の様なことが云える。

- ① クロモリの損耗比は温度が高くなると極めて大きくなる。
- ② SUSの480℃の損耗比はクロモリの380℃の場合と同じ程度である。
- ③ もんじゅの過熱器又は再熱器と蒸発器とを出口条件で比較すると、SUSの520~530℃とクロモリの330~380℃にあたり、むしろSUSを使った過熱器の方が損耗比が大きくなることありうる。

図3-12は損耗比を絶対温度の逆数で整理した結果である。クロモリのデータを直線でフィットすると次式で表わされる。

$$y = 240 e^{-\frac{6,170}{T}} \quad (3-2)$$

ここでyは損耗比〔mm/g-H₂O〕、TはNa温度〔°K〕である。(1)式と比較するとわかるように、ウェステージ率と損耗比の温度依存性、すなわち図3-8と図3-12の直線の勾配はほとんど等しい。同様に図3-12のSUSのデータを直線でフィットすると、図中の破線のごとくになり、次式で表わされる。

$$y = 1270 e^{-\frac{8,330}{T}} \quad (3-3)$$

また、SUSに対してもクロモリの場合と同じ勾配で直線を引き、式を求めると、

$$y' = 60 e^{-\frac{6,170}{T}} \quad (3-3)'$$

となる。(3-2)式と(3-3)'式を比較すると、クロモリとSUSでは、損耗比が4倍違うことになる。(2)式と(3)式を次式で表わされるArrheniusの表示をする。

$$y = A e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (3-4)$$

但し、Aは定数、Qは活性化エネルギー、Rはガス定数である。ウェステージの場合は、Naと水の反応と、反応生成物のジェットとターゲット材の相互作用の二者が組み合わさってい

て、後者は化学反応によるものかどうかはわかっていないので、(3-4)式の活性化エネルギーはあまり意味を持たないかもしれない。しかしながら、(3-2)式と(3-3)式とから活性化エネルギーを求め比較すると、SUSの方がクロモリより大きくなり、このことは一般の金属の高温酸化が、高温酸化に強い材質程、活性化エネルギーが大きい⁶⁾と云うことと同じ傾向にあり、興味深いことである。

試験№10以後の連続式ターゲットでは、ターゲットを毎回移動するため、ターゲット管上には熱電対をとりつけなかった。直接水をぶつけるターゲット管のわきには対称の位置に4本のダミーのターゲット管がならべてあり、その上に熱電対が各々1本ずつそわせてある。ノズルからの距離は、水噴出方向に31mm、水噴出方向と直角の水平方向に27.5mm、垂直方向に6.5mmである。この4点の熱電対により水反応時に測定されたNa温度との温度差を図3-13に示す。温度差は4点の平均値で示した。リーク率に対してほぼ直線的に温度差が大きくなるが、Na温度の影響はそれ程顕著ではない。このことは、水とNaが接触する所に出来ると考えられる反応面からかなり離れた点で測定しているため、反応面の温度のNa温度による違いをあまり反映していないと云うことが考えられる。リーク率とともに温度差が増大するのは、反応生成物のジェットがリーク率とともに遠くまで飛び、反応面の温度に近づくことに他ならない。従って図3-13から、Na温度によって反応面の温度がどれ程影響されるかはわからない。

3.4 接線方向のウェステージ

図3-14はターゲット管の接線方向に水を噴出した場合のターゲット管上のへこみ状況を示す。へこみの状況は、ターゲット管上で測定された最も深い点を通る断面を示す。深さ方向はその他の寸法に対して5倍に拡大して示している。最も深い点は、ターゲット管の軸方向に対し、ノズルのある面とほぼ同一面上にあり、その面に対する位置は図中に示す様な点である。ノズルに最も近いターゲット管上のへこみは、最も深い点に対してジェットの流れ方向の側がよけいにへこんでいて、ジェットの流動の状況をよく表わしている。このターゲットの斜め左のターゲット管はノズルの中心軸に近い面より少し違った方向の面にへこみが表われている。これはジェットが第1のターゲットにぶつかったことによりその進路が少しまげられ、第2のターゲットには斜め方向と云うよりはむしろ垂直に近い方向からぶつかったことを示している。この2本のターゲット以外はほとんどへこみが観測されないので、ジェットは第2のターゲットにぶつかった事により散乱してしまったか、あるいは、これ以上遠いところにあるターゲットにはジェットのウェステージを引きおこす力が及ばないことを示している。

図3-15は図3-14に示した第1のターゲットと第2のターゲット面上のウェステージ分布を示す。同心環状にえがいた線は等深線を示し、0.1mmの深さごとにむすんである。この等深線図にかさねて、最も深い点を通る軸方向の断面図もえがいてある。左に示した第1のターゲット上のウェステージ分布は、図の下から上の方向にジェットがぶつかっている事が、等深線図からわかる。最も深い点は1.65mmで、その左右はほとんど対称形をしている。図の右に示した第2のターゲット上のへこみは、かなり平たい形をしている。このウェステージ面の中心より2~3mm上に、図の左から外径1mmのシース熱電対がターゲット管の表面にそわせてある。この熱電対で影になった部分が、台地状になって残っている。

接線方向に水を噴出した実験では、図3-3にA~Jで示した点の温度を測定する様に、熱電対をターゲット管表面に各々そわせてある。図3-3には試験№9-1の水噴出時に計測された温度変化の分布を示してある。温度変化が少ない所では、ウェステージがほとんど観測されず、へこみの大きいところでは、熱電対B, C, D, H, Iの様に700~800℃以上の温度になっている。図3-16に水反応時の温度の記録例を示す。これは試験番号熱電対D(図3-3)にあたる。図3-16には注水管内の圧力も同時に示してあるのでこれにより、水のNa中への注入の状態がわかる。水注入と同時に、非常に急激な温度上昇があり、注水弁閉により注水管の圧力降下とともに、温度もさがっている。最高温度は900℃から950℃に達している。この例では比較的注水時間が短かいが、さらに長くなっても、それほど最高温度の時間的変動はみられなかった。直接ジェットにぶつかるターゲット管上に熱電対をそわせて、温度を測定した試験の回数は多くないが、最高温度は高く900℃前後であった。熱電対の位置により極端に大きい温度の違いが観測された。

図3-17は試験№7と№9の2回おこなった接線方向に水を噴出した場合のウェステージ率を、垂直にぶつけた場合のウェステージ率と比較したものである。№7の場合は、ノズル方向、ターゲット方向、ターゲット配列いずれも№9の場合と同じに組み立てたが、第1のターゲットのウェステージ率は№9に較べて極端に小さくなっている。第2のターゲットは、№7と№9でそれ程違わないので、№7の場合の噴出方向が少し第1のターゲットから離れた方向にずれていたため、第1のターゲット上にはジェットがあまりあたらなかったのではないかと考えられる。いずれにしても、ターゲット管上にジェットが直撃した時に比べて、接線方向にあった時の方がウェステージが大きくなると云うことは、この2回の実験からは観測されなかった。しかし、接線方向に水を噴出するとノズルとターゲット間の距離が大きくなるため、もっと径の大きなノズルから水を噴出させると、現在のノズルターゲット間の距離で直撃した時よりもウェステージ率が大きくなることはあり得るかもしれない。

3.5 水噴出ノズルの拡大

水噴出ノズルは第2報²⁾の図7に示した構造をしている。水反応試験後、このノズルの前面を顕微鏡で観察すると、先端部附近の表面が非常に荒れているのが見られた。そして孔径がかなり拡大していた。拡大した様子の例を図3-18に示す。このノズルは、10回の連続水注入実験に使用したものであるが、試験前0.75mmの内径であったものが、試験後、先端部では1mm以上になっていた。孔は丸い円ではなく、でこぼこした不規則な様子を示している。この先端部から少し奥の方では、先端部より径が小さく、それ程拡大していないところがみられる。ここはある程度はっきりした段になっているが、先端から何mmぐらい奥であるか、また、そのさらに奥はどうなっているかは、まだよくわからない。

表3-5に使用したノズルの径の変化をまとめた。測定していないもの、測定できなかった場合は数値で示していない。試験後の実測値“奥”と云うのは、ノズルの奥の方で段になっているのがはっきりしている場合の内径を示す。ほとんどの場合、かなり径が拡大しているのがわかる。

なぜこの様にノズルが拡大するのか、その原因として次の二が考えられる。

- ① 高温の蒸気が高速で通過することによるエロージョン。
- ② ノズル内径部にNaが入りこみ、それが水と反応して出来る反応生成物が噴出して来ることによるウェステージ。

この①が原因であるとする、Na中に蒸気を噴出する場合でなくても、同じ現象が起るはずであるので、大気中に蒸気を噴出する実験をおこない、そのノズルを調べた。ノズル先端部は、Na-水反応に使用したノズルと同じように変色し、酸化した様子がみられた。内面はある程度、荒れた様子を示していた。内径も少し大きくなっている様ではあったが、違いを数値で出す程ではなかった。従って①の原因だけでは説明がつかないと考えられる。

②の現象は、水噴出後、ノズル保護のArガスがうまく出なかった時に起りうると考えられる。水注入弁を閉じた後、送り込むArガスの圧力が低すぎた時、実験の都合上やむをえずArガスの圧力を一時上げた時、ミス操作でArガス圧力がさがってしまった時など、何度かNaが侵入したのではないかと思われる事を経験した。又、実際に実験後、注水管の圧力計とりつけ部のようなところからNaがみつかったことがあった。先端部の方の損耗が大きいのは、ノズル内で膨張して流速が大きくなっているからとも考えられる。

ノズル径が拡大した事に関連し、特記しておかなければならないのは、ターゲット表面がウェステージによりへこまずに、逆に付着物により盛り上りを示すことがあったことである。試験No 11～13, 15～19のターゲット面に付着物がみられた(表3-4参照)。付着物は固く、アルコールと水による洗浄後、金属状になって残っていた。大きさは大きいもので厚さ0.5 mm, 径5 mm前後である。中には、一たんウェステージにより表面がへこんだところに付着した様子を示しているものもあった。この様な付着物はおそらく、ノズル内面でけずりとられたものが高温の反応生成物と一緒にターゲット面にぶつかって出来るのではないかと考えられる。

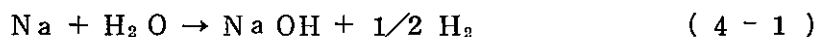
ノズル内面のもっと詳細な観察と、ターゲット面の付着物の金属学的検査は、まとめて早急におこなう予定であるので、これ以上の検討はその結果をまっておこなうことにする。

4. Na 中水素検出計

Na 中水素検出系の装置は第 2 報²⁾に記したのでここでは省略する。水反応試験を行なったときのノーブル・ポンプ及び質量分析器 (H₁ : 質量数 1) のスペクトルの、水のリーク率を変えたときの例を図 4-1, 図 4-2 に示す。

主循環 Na 温度 480℃, Ni 膜温度 550℃ である。水注入時刻は 20 秒である。スペクトルは見やすくするために縦軸方向に適当にシフトしてある。

1 番目と 4 番目のスペクトルの立上り初めが遅れているのは、両検出器の応答時間の、バイパス路内の Na 流量依存性 (後に詳しく述べる) を調べるために、バイパス路内の Na 流量を意図的に少くしたためである。2 番目のスペクトルのピーク高さが 3 番目のそれよりも高いのは、前者の注水量が後者のそれよりも多いためと思われる。S/N 比は質量分析器がノーブルポンプよりも約 20 倍良好である。リーク率の大きいところではスペクトルのうねりが観測されている。これは、その周期 (約 40 秒) は、Na がループを一巡する周期とほぼ等しいことから、Na がループを一巡してきたことによるものと思われる。うねりの振幅は、質量分析器がノーブル・ポンプよりも大きい、つまり、感度は前者が後者よりも良好であることを示している。シグナルの立上りの勾配は水のリーク率が大きいほど大きいことが図 4-1, 図 4-2 からうかがえる。リーク率に対して立上りの初期勾配を、両検出器についてプロットした結果を図 4-3, 図 4-4 に示す。主循環 Na 温度と Ni 膜温度が同じものについては、両検出器共に、リーク率が大きいほど初期勾配が大きいことが分かる。同じリーク率に対しては、質量分析器の勾配がノーブル・ポンプのそれよりも常に大きい。又、主循環 Na 温度が 380℃ 以下になると、初期勾配は、リーク率が同じ場合、主循環 Na 温度 480℃ の場合のそれよりも常に小さい。つまり、Na 温度 380℃ 以下では、Na 中水素濃度が、Na 温度 480℃ のときよりも低いことを暗示している。これは、Ford⁷⁾ が主張しているように、カセイソーダの融点 (318.4℃) 以下では、



の反応が支配的であり、融点以上では、



の反応が支配的であるため、言いかえると、Na 温度が 318.4℃ 以下の場合、水 1 mol から 1/2 mol の水素しか生成されないのに対して、Na 温度が 318.4℃ よりも高いと水 1 mol から 1 mol の水素が生成されるためと推測される。これと同じ現象が Ar 中水素検出計でも観測された (後述)。

Ni 膜温度が低い (450℃) と、膜を通過する H₂ 量が減少するので、上昇の勾配は低くなる。

質量分析器のスペクトル中のパルスは、装置の測定系及び制御系に多くのリレー回路が用いられているために、その信号が入ってくるためである。

Na 中水素検出計の感度をノーブル・ポンプについて考察する。ここでいう感度とは、スペクトルのノイズ・レベルの変動幅を Na 中水素濃度の変動幅に換算したものと、して定義する。第 2 報²⁾ で述べたように、Na 中水素濃度 C_H (ppm) とノーブル・ポンプの読み P (Torr) の間には

$$C_H = 4.26 \left\{ \left(\frac{P}{0.46} \right) \exp \left[\frac{6740}{T} \right] + 0.324 \left(\frac{P}{0.46} \right)^{1/2} \right\} \quad (4-3)$$

の関係がある。ここで、0.46 は水素への換算係数である。一方、P とノーブル・ポンプの出力 D (mV) には

$$P = 1.556 \times 10^{-12} \exp [2.784 D] \quad (4-4)$$

の関係がある。(4-4) を (4-3) に代入し整理すると、

$$C_H = 144.1 \times 10^{-12} \exp \left[\frac{6740}{T} \right] \exp [2.784 D] + 25.4 \times 10^{-6} \times \exp [1.392 D] \quad (4-5)$$

$$\therefore \frac{dC_H}{dD} = 401.1 \times 10^{-12} \exp \left[\frac{6740}{T} \right] \exp [2.784 D] + 35.4 \times 10^{-6} \exp [1.392 D]$$

T = 550℃ = 823 °K では

$$\frac{dC_H}{dD} = 1.46 \times 10^{-6} \exp [2.784 D] + 35.4 \times 10^{-6} \times \exp [1.392 D] \quad (4-6)$$

D をパラメータとして dD と dC_H の関係を図 4-5 に示す。コールドトラップ温度 160℃ で Na を精製すると、つまり水注入前の Na 中水素濃度は約 0.3 ppm (D = 4.7 mV) である。また、図 1 から分かるように、ノーブル・ポンプ出力のノイズレベルの変動幅が 0.2 mV であるから、dC_H (ここでいう感度) は 0.15 (ppm) となる。

この水素濃度変化は、水 1 mol から水素 1 mol が発生し、発生した水素は全部 Na 中に溶けると仮定したとき、約 0.5 g の水を注入したことに相当する。

質量分析器の感度は、真空系の圧力 P と質量分析器の出力 D の関係が分かっていないので、計算することができない。しかし、質量分析器の S/N 比はノーブル・ポンプのそれよりも約 20 倍良好であるので、感度はノーブル・ポンプよりも 1 ケタ程度良くなることが予想される。

SWAT-2 の Ni 膜温度は $550 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で制御されている。この温度のゆらぎに相当する Na 中水素濃度のゆらぎは、水注入前の Na 中水素濃度が 0.3 ppm のとき ± 0.0025 ppm である。

図 4-5 から感度は、水注入前の Na 中水素濃度が高ければ悪くなると、低ければ良くなることわかる。

ノーブル・ポンプあるいは質量分析器スペクトルの第 1 ピーク高さは全注水量と密接な関係があることが分かった。その様子を図 4-6, 図 4-7 に示す。全注水量が多いほどピーク高さは高くなる。また、質量分析器の高さがノーブル・ポンプのそれよりも常に大きい。ここでも質量分析器がノーブル・ポンプよりも感度の良いことが示されている。主循環 Na 温度が低くなるとピークは小さくなる。温度が低くなると反応 (4-1) が支配的になるためと推察される。

注水時間とスペクトル (質量分析器) の立上り点から第 1 ピーク点までの時間の関係を図 4-8 に示した。バルブ開閉時間が長いほどピーク点に達する迄の時間が長いことは、Ni 膜を通過する水素分子 (あるいは原子) の流束がまだ定常状態に達していないことを暗示している。

Na 中水素検出計の応答時間について考察する。Na 中の水素を検出するフローシートを図 4-9 に示す。ノズルから噴出された水は反応容器中で Na と反応し水素が生成される。生成された水素の一部は Na 中に溶け、水素は反応容器、主循環路、バイパス路、Ni 膜、真空系の順序で運ばれる。今、上述のそれぞれの輸送路で費される時間を τ_R , τ_M , τ_B , τ_{Ni} , τ_V とする。輸送時間の合計 τ_T は

$$\tau_T = \tau_R + \tau_M + \tau_B + \tau_{Ni} + \tau_V \quad (4-7)$$

で表わせる。バイパス路の容積を V_B (ℓ), バイパス路内の Na 流量を Q_B (ℓ/min) とすれば

$$\tau_B = \frac{V_B}{Q_B} \quad (4-8)$$

で表わせる。(4-8)を(4-7)に代入すると

$$\tau_T = \tau_R + \tau_M + \frac{V_B}{Q_B} + \tau_{Ni} + \tau_V \quad (4-9)$$

バイパス路には電磁ポンプが備えられており、 Q_B を0～15 (ℓ/min) の範囲で任意に制御することができる。 Q_B を変えたときの τ_T を測定し、 τ_T と $1/Q_B$ をプロットすることにより、その勾配からバイパス路の容積 V_B が、また $1/Q_B \rightarrow 0$ に外挿したときの τ_T の値から $\tau_R + \tau_M + \tau_{Ni} + \tau_V$ が求まる。 τ_T と $1/Q_B$ をプロットした結果を図4-10に示す。図4-10から $V_B = 6.7 (\ell)$ 、 $\tau_R + \tau_M + \tau_{Ni} + \tau_V = 7.8 (\text{秒})$ が得られた。設計図から計算される $V_B = 8 (\ell)$ であった。また、第2報で述べたように $\tau_{Ni} \approx 6 (\text{秒})$ であり、 τ_M を主循環路の容積と主循環Na流量から求めると $\tau_M \approx 0.4 (\text{秒})$ であるから $\tau_R + \tau_V = 7.8 - (6 + 0.4) = 1.4 (\text{秒})$ となる。応答時間は、 $Q_B = 15 (\ell/\text{min})$ で約35秒である全輸送時間のうちバイパス路で費される時間割合は、バイパス路中のNa流量 Q_B に依存するが、例えば $Q_B = 15 (\ell/\text{min})$ の場合で約8割となる。

次にNa中水素検出計の問題点を、過去17ヶ月運転の経験から箇条書きにする。

ノイズ・ポンプ

- 1) ノイズが多いこと。

質量分析器

- 1) 対数アンプのドリフトが大きいこと、あるいは加速電圧のドリフトがあること、あるいは両方のドリフトがあること。

SWAT-2を運転し始めてから13ヶ月目にNi膜が破れ、Naが真空系へリークしたことをNa中水素検出系内のNaリーク検出のアラームから発見した。ただちにNa中水素検出系を切離し、Ni膜が破れた原因を調査したのでここに報告する。

Ni近傍の構造を図4-11に示す。Ni膜とSUS配管の間のジャケット部に約1/2～2/3のドレンできないNaが残っていた。Ni膜内はきっかりとNaが詰まっていた。そのためトーチランプにてジャケット部を加熱しNaを溶かし出した。約300gのNaが出た。次に流動パラフィンを加熱(150～170℃)した桶にセンサーを入れNaを溶し出した。ジャケット及びNi膜本体から約70gのNaが出た。本体からのNa排出量が少ないので本体内部に1mmの針金を挿入したところ途中で挿入困難になった。このことで本体内部では偏平があるか異種金属(SUS, Ni)溶接部のたれ込み等があることが考えられた。次にパラフィンが残存Na表面及び内管表面を被覆している

ので、ブタノール洗浄を約4時間行なった。さらに、エタノール洗浄を2日間、Naとの反応状況によりエタノールの交換を適時行なった。このアルコール洗浄では激しい反応はなくパラフィンによる加熱で残存Naはほとんどなかった様であった。エタノールとの反応が全く見られなくなってからエタノール中に水道水を混合させ徐々に水の比率を増し最終的に水100%にした。この後水槽に2日半投入しておいた。Na-水反応は全く見られなかった。水洗浄後、乾燥した。Ni膜の外観は、完全に偏平に押しつぶされていた(図4-11の点線)。ジャケット部とNi膜本体とを切離し肉眼でリーク個所を調べたが発見できなかった。耐圧(2Kg/cm²)バブル検査を実施したがリーク個所は見当らなかった。真空吹付法にてヘリウム漏洩検査をしたが、リーク個所は認められなかった。以上のようにリーク個所は認められなかった。これは漏洩個所がNaあるいはNa化合物によってふさがったためではないかと推測し、それらを溶かし出すために図4-12の様な高温でのヘリウム・リーク試験装置を設け、ヘリウム漏洩試験を実施した。常温から170℃までリークは全く測定できなかったが、170℃を越すと少量リークを検出し始めた。300~400℃になると急激にリーク量が増したので、昇温により貫通部が生じたことが確認できた。ヒータをOFFにしてNi膜本体を取り出し常温下で再度ヘリウム漏洩検査を実施した。その結果、Ni膜下側溶接部(0.5mm薄肉厚と1.5肉厚)に貫通部が存在することが判明した(図4-11)。

Ni膜に貫通部が出来た原因とNi膜本体が偏平に座屈した原因が同じであるかは分からない。今、別々に起こったとしてその原因を考えると次のことが考えられる。

貫通部生成の原因

- 1) Ni膜を550℃で使用しているためにNi結晶粒の粗大化が起きた。
- 2) NiとH₂(あるいはH, H⁻)との反応によるぜい化。
- 3) クリープ
- 4) 結晶粒界のき裂
- 5) Naによる粒界腐蝕

座屈の原因

- 1) ジャケット内のNaがドレインできなかったために、再加熱したとき、局所的な融解が起これ大きな応力がNi膜に加わった。
- 2) 550℃という高温でNi膜の強度が外圧に対して耐えきれなかった。

真空系の配管にはガスの流れが直接当たる場所にNaが膜状に付着していた。また、真空系内のバルブ、ノーブル・ポンプに少量のNaが膜状に付着していた。そのために、配管、バルブ、ノーブル・ポンプはアルコール洗浄、続いて水の洗浄を実施した。質量分析器の分析管は取換

えた。また、ロータリポンプの分解洗浄及びオイル交換、コールドトラップ洗浄も実施した。乾燥後、各機器及び配管を組立て到達真空度を調べたら 10^{-7} Torrに達した。

5. Ar 中水素検出計

Ar (カバーガス) 中水素検出系の装置はすでに第2報に記したのでここでは省略する。図4-1, 図4-2のスペクトルと同じ試験での, Ar 中水素検出計の出力を図5-1に示す。Na 中への水注入時刻は横軸の20秒の点である。Pd 膜温度は450℃である。ノーブル・ポンプや質量分析器とは対照的に, 信号は徐々に出るのもあれば, 急激に出るのもあれば, 全然出ないものもある。これは, Ar 中水素検出系の配管, Na ベーパトラップ, バルブなどに Na あるいは Na 化合物が多量に付着したためと考え, その真偽を調べてみた。予想した通り図5-2に示した写真で分かるように, Na ベーパトラップ入口配管, Na ベーパトラップ, Na ベーパトラップ出口の先に備えられたバルブ, にぎっしりと Na あるいは Na 化合物が付着していた。Na ベーパトラップは図5-3の上部に示した構造である。

このような状況のもとでは Ar 中水素検出計の感度, 応答時間等の性能を十分に把握することができない。そこで Na ベーパトラップの改造を試みた。Na ベーパトラップは, ① Na ベーパを完全に補捉すること。② Na が詰まりすぎないこと。の相矛盾する特性を有していることが最も望ましい。このような条件を比較的満足すると思われる Na ベーパトラップの構造としては, トラップされた Na を, 逐次, 反応容器内に戻してやる方法いわゆる還流式が考えられる。しかし, 還流式ベーパトラップの製作には多くの経費と時間が必要である。したがって, 改造にあたっては, 条件①を満足することを第1義的に考え Na ベーパトラップを製作した。構造を図5-3の下部に示す。従来のベーパトラップと違う主な点は, 1) 径を6Bから2Bに小さくしたこと。2) 3種類のメッシュ(10, 30, 50)の金網を用いたこと(従来のものは10メッシュのみ), また, 金網の枚数を100枚から300枚に増やしたこと, などである。

Na ベーパトラップ改造後, 連続10回(試験No 40~49)水注入実験を行なった。水のリーク率をパラメータにしたときの Ar 中水素検出計のスペクトルを図5-4に示した。主循環 Na 温度480℃, Pd 膜温度450℃である。水注入時刻は横軸の20秒の点である。スペクトルは見やすくするために縦軸方向に適当にシフトしてある。信号が頂点に達してから急激に降下しているのは, Ar 中水素検出計である電離真空計がトリップしたためである。

図5-4から非常にS/N比の良いスペクトルが得られることが分かる。

信号の立上りの勾配は, Na 中水素検出計と同様に水のリーク率が大きいほど大きいことが

見ただけで分かる。リーク率に対して立上りの初期勾配をプロットした結果を図5-5に示す。主循環Na温度が380℃よりも低くなると、Na中水素計と同様に、立上りの勾配が小さくなる。これは、主循環Na温度が380℃よりも低くなると、水素の生成が式(4-1)による反応が支配的になるために、すなわち、水1molから水素が1/2molしか生成されないためと推察される。

Ar中水素検出計の感度をNa中水素検出計と同じ様にして計算する。Ar中水素濃度 C'_H (ppm)とAr中水素計指示値 P' (Torr)の関係を第2報⁷⁾の図21に示した。Pd膜温度450℃について C'_H と P' の関係を数式化すると

$$C'_H = 1.76 \times 10^5 P'^{1.195} \quad (5-1)$$

で表わせる。(5-1)式を P' で微分すると

$$\frac{dC'_H}{dP'} = 2.10 \times 10^5 P'^{0.195} \quad (5-2)$$

今、水注入前のAr中水素濃度 P' が20ppm(そのときの $P' = 5 \times 10^{-4}$ Torr)のとき、ノイズレベル dP' は約 3×10^{-8} (mV) = 3×10^{-6} (Torr)であるので、(5-2)式から $dC'_H = 0.14 \approx 0.2$ (ppm)となる。つまり、感度は約0.2ppmとなる。

Ar中水素検出計の応答時間について考察する。

Ar中水素検出計のフローシートを図5-6に示す。反応容器出口、バイパス路、Pd膜、真空系で費される時間をそれぞれ τ_{R_C} , τ_{B_C} , τ_{P_d} , τ_{V_C} とする。輸送時間の合計 τ_C は

$$\begin{aligned} \tau_C &= \tau_{R_C} + \tau_{B_C} + \tau_{P_d} + \tau_{V_C} \\ &= \tau_{R_C} + \frac{V_{B_C}}{Q_C} + \tau_{P_d} + \tau_{V_C} \end{aligned} \quad (5-3)$$

で表わせる。ここで V_{B_C} はバイパス路の容積(ℓ)、 Q_C はバイパス路内のArガスの流量(ℓ/min)である。 τ_C と $1/Q_C$ をプロットした結果を図5-7に示す。直線の勾配 $V_{B_C} = 1.9$ (ℓ)、 $1/Q_C \rightarrow 0$ にした値から $\tau_{R_C} + \tau_{P_d} + \tau_{V_C} \approx 2.5$ (秒)が得られた。

Naベーパーラップの空隙率を0.5と仮定して、バイパス路の容積を設計図から求めると2(ℓ)であった。実験値との一致は良好である。

平板の固体中を気体が拡散するときの遅延時間Lは

$$L = \frac{S^2}{6D}$$

で表わせる。⁸⁾ ここでSは固体の厚さ (cm), Dは気体の拡散係数 (cm²/sec)である。本装置で使用しているPd膜中の水素の拡散係数Dは不明であるので、DをパラメータとしてLを求めてみた。(S = 0.03 cm, Pd膜温度450℃)。

D (cm ² /sec)	L (sec)
7×10^{-6} (純Pd) ⁹⁾	2.1
5×10^{-6}	3.0
3×10^{-6}	5.0

純Pdでさえ約2秒の遅れがあるので、現在使用中のPd膜でも2秒の遅れはさけられないと思われる。また、 $\tau_{R_0} \approx 1.5$ 秒, $\tau_{V_0} < 0.5$ 秒程度であると思われる。したがって、 $\tau_{P_d} + \tau_{R_0} + \tau_{V_0} \approx 4 \sim 5$ 秒程度となり、実験値との一致はあまり良好ではない。

応答時間は、バイパス路内のArガス流量5 (ℓ/min)で約30秒である。

試験番号が多くなると(No. 46~49), 応答時間が遅れている(図5-7)のは、NaベーパトラップにNaが付着してきたためと考えられる。第49回の試験後にNaベーパトラップを調べてみたら予想通り、ベーパトラップの入口にNaあるいはNa化合物が付着していた。

Ar中水素検出計はNaベーパトラップの良し悪しによってその性能が決まる感じを強く持った。

6. プラキ ング 計

SWAT-2 に取り付けられているプラキ ング計により, Na-水反応時及び反応後等のプラキ ング温度を測定している。(プラグ計の概要は第1報)その目的は

- a) リーク検出器としての可能性を調べる。
- b) Na-水反応時の不純物挙動を調べることである。

リーク検出計として使用するためには, どのようなプラグ計の操作によるのがよいかということを知るためにプラグ計の特性を調べた。

Na-水反応時の不純物の状態を調べるために水注入量とプラグ温度の関係を調べた。

6.1 プラキ ング計特性

現在, SWAT-2 で使用しているプラグ計のフローシートを図6-1に示す。プラグ計の操作としては振動法を採用し, その温度の最高値と最低値の平均の値をプラグ温度としている。振動はオリフィス部流量が数パーセント減少した所で冷却用のブロアを入切して起している。

プラグ計の指示値とコールド・トラップ出口温度の関係を図6-2に示す。図によりコールド・トラップ出口温度が320℃以下ではプラグ計指示値とよく一致することがわかる。つまりコールド・トラップ出口温度で飽和になった何らかの不純物がプラグ計オリフィスを閉塞させる原因となり, そのプラグ計の指示は不純物の飽和温度に等しいということを示している。その不純物が Na_2O であると仮定して物質移動係数を求め, 流量や冷却速度の影響を調べてみる。又320℃以上で直線からはずれるがその原因としてはNaループ中の不純物量が少なかったとか, 320℃以上という NaOH の溶解点以上では温度の低い場合と異なった状態になっている等が考えられるが結論は下せない状態である。

物質移動係数を求めるために次のような仮定をし式をたてた。

- 1) 附着する不純物は Na_2O とし, その飽和濃度はClaxton⁽¹⁰⁾の式による。

$$\log (W / 10^4) = 1.21 - 1770 / T$$

W : 酸素濃度 (ppm)

T : 温度 (°K)

- 2) オリフィス部不純物附着量は, Na中の不純物濃度と, オリフィス部の温度に相当する酸素のNaに対する飽和濃度との差に比例する。

3) 不純物の附着はオリフィスの長さ方向に一様である。

4) オリフィス部の圧力損失は一定

このような仮定により，オリフィス部の不純物附着量 M (g) の時間変化は

$$dM/dt = k \cdot S \cdot \{ W_N(t) - W_o(t) \} \quad (6-1)$$

k : 物質移動係数 (g/cm²·sec·ppm)

S : オリフィス部表面積 (cm²)

W_N : Na 中の不純物濃度 (ppm)

W_o : オリフィス部の温度に相当する不純物飽和濃度 (ppm)

又不純物はオリフィス壁面に長さ方向に一様に附着するという仮定より，不純物附着量は

$$M = \pi/4 \cdot (D_o^2 - D^2(t)) \cdot L \cdot r_o \cdot n \quad (g) \quad (6-2)$$

D_o : オリフィス部の直径 (cm)

L : オリフィス部の長さ (cm)

r_o : 不純物の比重 (g/cm³)

n : ノズルの孔数

(6-1) 式と微分した (6-2) 式より

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{2k}{r_o} \{ W_N(t) - W_o \} \quad (6-3)$$

積分すると

$$D(t) = D_o - \int \frac{2k}{r_o} \{ W_N(t) - W_o \} dt \quad (6-4)$$

又オリフィス部での圧力損失 ΔP は

$$\Delta P = n \lambda \frac{L}{D(t)} \frac{U^2}{2g} r_n \quad (6-5)$$

λ : 摩擦係数

U : Na 流速 (cm/sec)

r_n : Na の比重 (g/cm³)

又オリフィス部流量 W (cm³/sec) は

$$W = n \frac{\pi D^2}{4} U \quad (6-6)$$

閉塞していない時の流量 W_o との比は

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{D(t)^2}{D_0^2} \cdot \frac{U(t)}{U_0} \quad (6-7)$$

圧力損失一定の仮定より(6-5)式を代入すると

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{D(t)}{D_0} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$(6-4) \text{式より} = \left[1 - \frac{2}{D_0} \int \frac{k}{r_0} \{ W_N(t) - W_a \} dt \right]^{\frac{5}{2}} \quad (6-8)$$

又SWAT-2のプラグ計は次のような測定をしている。閉塞させるためのオリフィス部の流量を W 、ポンプでの流量を W_T とすると、プラグ計操作時には流量比 W/W_T を測定している。(図6-1)又オリフィスが閉塞していない時の流量 W_0 に対して流量比 f は

$$f_0 = \frac{W_0}{W_T} = 1$$

したがって、測定している流量比は

$$f = \frac{W}{W_T} = \frac{W/W_0}{W_0/W_T}$$

$$(6-8) \text{式より} = \left[1 - \frac{2}{D_0} \int \frac{k}{r_0} \{ W_N(t) - W_0 \} dt \right]^{\frac{5}{2}} \quad (6-9)$$

(6-9)式を微分して

$$\frac{df}{dt} = -f^{\frac{5}{3}} \frac{5k}{r_0 D_0} (W_N(t) - W_0) \quad (6-10)$$

(6-10)式により、プラグ計の流量と温度から物質移動係数 k が求まる。通常の実操作時は図6-3のようなチャートが得られている。プラグ計の特性を調べるためにオリフィス部の流量を一定にして冷却速度を変化させたデータと、冷却速度を一定にしてオリフィス部流量を変化させたデータをとった。

○ 物質移動係数とレイノルズ数

オリフィスが閉塞していく過程で物質移動係数 k がどのように変化するかを調べた(図6-4)。図6-4より k の値は、流量変化の最も大きい所で最大値をもつことがわかる。

一回のサイクルの間にこのように変化する k の値のどれで代表させるかということがまず第一の問題である。流量の落ちはじめでの k 、流量が最低になる時の k 、及び k の最大値の三者の平均値で整理したのが図(6-5)である。又 k の最大値を採用したのが図(6-6)である。図(6-5)と図(6-6)を比較すると、図(6-6)つまり k の最大値で代表させた場合はデータのばらつきが少ない。その原因は k の最大値、つまり流量変化の最大の所では計算誤差は入りにくい、平均値の場合データの読みとり誤差が入りやすいことであろう。又 k の最大値で整理した場合、Mcpheeters⁽¹¹⁾の実験結果と非常によく一致していることがわかる。Mcyheeters は物質移動係数はレイノルズ数の0.8乗に比例するという結論を出しているが、ここで得られたデータもほぼ同じ結果が得られた。したがって、報告で今後使用する k の値は最大値の図(6-6)の値を使用する。

○ 物質移動係数と冷却速度

k と冷却速度の関係を図(6-7)に示す。図中に黒く塗った点はレイノルズ数が 0.9×10^4 で一定のデータであるが、これをみると冷却速度は $5 \sim 12$ °C/分の範囲ではほとんど k の変化はなく、やや冷却速度の上昇とともに上りぎみである。又 1.6 °C/分と冷却速度が低い場合は k の値は特に低くなっている。その原因を考えると、今報告では不純物附着量はオリフィス部の温度に相当する飽和濃度と Na 中の不純物濃度との差に比例するという仮定をしているが、図(6-4)からわかるように濃度差の小さい所ではこのような仮定に基いて計算した場合 k は小さな値をとる。つまり濃度差の小さな時には不純物は附着しにくいということがこの原因であると考えられる。又この濃度差による k の評価が今後必要であろう。

○ プラグ計の操作

二つのプラグ温度が測定されるというダブル・ブレイク現象が他に報告されているが、我々のプラグ計操作においても観測される。図(6-3)の a はダブル・ブレイクが出ない場合、b は出る場合の代表例である。我々のプラグ計の通常操作は前述のように、Na を冷却し流量がフロアのトリップ点以下にまで落ちると Na を加熱しはじめ、流量が同じフロアのトリップ点以上に回復すると冷却しはじめるということを行っている。図6-3の a と b を比較すると、a では流量は一回の振動のたびに元の流量に回復する、つまり100%にもどるが、b では流量の回復するレベルが徐々に下がりやがてフロアのトリップ点以下になっている。この現象は現時点では、十分考察しえないが、次のような解釈で現象を説明できる可能性がある。

プラグ計のオリフィスを閉塞させる原因となる不純物が二つあったと仮定し、物質移動係数の大きい方をA、小さい方をBとし、通常プラグ温度を測定しているのをAであるとする。BのNa中での濃度に相当する飽和温度がAより高い場合には、Aの飽和温度の上下にオリフィスの温度が振動しAはオリフィス部で析出溶解をくりかえすが、その温度はBの飽和温度より低いためにオリフィスにBが附着してくるがBの物質移動係数は小さいため徐々に附着していく。やがてAがオリフィスに附着していないにもかかわらずBによりオリフィスが閉塞し、Bの飽和温度以上に加熱しないと流量が元に回復しない。又Aの飽和温度よりBの方が低いか又は等しい場合には、Bは析出しえないか又は析出溶解をくりかえしているがAによる流量の振動にかくれて観測されない。以上のことで図(6-3)のbは説明できるかもしれない。

Na中の不純物濃度の急激な変化たとえばNa中への水のリーク等を測定するためには一回の測定のサイクル時間が短い必要がある。これまでのデータから冷却速度及び加熱速度が大きくなるほどサイクル時間が短くなる傾向を示しているが、データから判断するにはばらつきが大きい。つまりそのためには冷却速度が一定で加熱速度の異ったデータ又はその逆のデータを必要とするが現在はまだ得ていない。又流量の大きいつまり物質移動係数の大きい程サイクル時間は短いという傾向がでている。この傾向はデータから整理するのは困難なため、計算機によるシミュレーションを試みた。前述の物質移動係数を求める計算でたてた仮定と式からプログラムを作成し次のようなデータを入力し流量；温度を計算した。

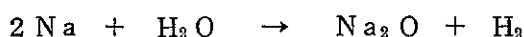
- 加熱，冷却速度
- Na中の不純物濃度
- 物質移動係数……………k

プラグ計から得た実際の加熱冷却速度を計算機に入力し、kの値を変化させて計算を行った。kによるサイクル時間の変化を図6-8に示す。図よりkを大きくするとサイクルは短くなるが、あるkの値以上ではほとんど変化しない。又データとのサイクル時間を一致させるためにこのモデルではデータの約半分にkの値をしなければならない。その計算結果を図(6-9)に示す。図(6-9)からわかることは、計算の方が流量の落こみが小さい。その原因は計算に使用したkの値が小さいこと、オリフィス部の熱容量による温度が最も低く濃度差が最も大きく不純物附着が最も大い所での温度上昇のなまりを十分にシミュレートしていないことによる。又この計算では不純物附着量は濃度差に比例するという仮定で行っているが図(6-3)で説明したように濃度差の影響とオリフィス部の熱容量を加味することにより、測定値と計算値のちがいをなくすことができるであろう。又このよう

な改造の後プログラムを逆に使用する。つまり温度と流量を入力としてその時の不純物濃度を刻々表示させることが可能になるはずである。

○ 水注入時のプラグ計応答

SWAT-2においてNa-水反応試験を行う時、プラグ計を次のような状態にしている。水注入前のプラグ温度と注入後の予想プラグ温度との中間の温度で一定の状態にオリフィスをしておく。水注入後数十秒の後オリフィスは閉塞しはじめるがその代表例を図(6-10)に示す。その時の流量の時間変化を刻々求めることにより前述のkを使用することにより、Na-水反応により流れてくる不純物濃度の時間変化が計算できる。その代表例を図(6-11)、(6-12)、(6-13)に示す。又水注入開始から応答が表われるまでの時間と、注入した水がすべて



の反応で Na_2O が生成しオリフィスへ流れこむであろうと考えられる Na_2O の濃度とオリフィス部の温度に相当する Na_2O の濃度との濃度差の関係を図(6-14)に示す。反応容器からオリフィス部までの輸送時間は30数秒と考えられ、又濃度差の大きいほど応答時間は短いと考えられるが図(6-14)からばらつきは非常に大きいとその傾向はわかる。水注入後のプラグ計の応答時間やプラグ計による不純物濃度の時間変化はまだ十分整理されていない。これまで述べて来たのはプラグ計により測定しているのは Na_2O であり水反応により水1モルに対し Na_2O 1モルできると仮定しているが、プラグ計により測定している不純物は何かそしてその不純物はNa-水反応によりどのように生成されるかをもっと追求する必要がある。又不純物の正体がかめなくとも、Na-水反応によりプラグ計のオリフィスに附着する何らかの不純物がどのように生成するかわかるだけで、プラグ計のNa-水反応時の応答を考える上で一ステップ前進することができるであろう。その評価を次に行う。

6.2 Na-水反応後のプラグ温度

Na中に水を注入し、1時間から4時間程度経過した後のプラグ温度を測定している。そのプラグ温度から、注入された水より生成される不純物について考えてみる。

水注入前、注入後のプラグ温度を表6-1に示す。又プラグ温度測定と水注入の時間間隔及び水注入量を同時に記した。

水注入後のプラグ温度が、どんな不純物の濃度を示しているか知ることがまず必要である

が、そのためにSWAT-2に取り付けられているNa中水素計の指示値とプラグ温度の関係を調べた。(図6-5)コールド・トラップで精製しながら行った特性試験では、Na中水素計の指示値とプラグ温度の関係は図6-15の飽和曲線上にあったが、図6-15の水注入後の関係は飽和曲線上にあるとは断定しがたい。つまり水注入後のプラグ温度は、図6-15の関係からは、水素の濃度を指示しているとも、酸素の濃度を指示しているとも決定しがたい。又、Na中水素計がこわれたためにデータが20点しかないことが、決定を下せない原因の一つとなっている。

そこで水注入のプラグ温度が示している不純物が水素であると考えた場合と、酸素であると考えた場合について調べる。

まずNa中に水を注入した場合のプラグ温度の上昇を図6-16に示す。横軸に水注入量、縦軸にプラグ温度を示し、水注入前のプラグ温度が約160℃のデータだけをプロットした。連続注入の場合、つまりNaの精製をせずに試験を行った場合は、注入量としてトータルの水の量を採用した。又厳密にはNaの量とか温度の影響があるはずであるがそれは無視している。黒く塗った点はNaの温度が480℃の場合、他の点は連続注入の途中で温度を変化させたため単純に整理できないデータ、又小さな点はSWAT-2試験初期の水注入量が正確でなかった時のデータである。データはややばらついているが、480℃と条件のそろったデータからその傾向を知ることができる。又実際のSGにおいても、プラグ温度は同様に上昇すると考えられる。

しかし、Naの温度や水の注入状態が異った場合にこのまま適用することはできない。そのためにはプラグ計ではどのような不純物を測定しているかを調べ、その不純物の生成がNaの温度や水の注入状態の影響をどのように受けるかを調べる必要がある。前述のように水素であるか、酸素であるか断定しがたいことから、まず酸素であると仮定し、後に水素であると仮定してデータを整理してみる。

まず、プラグ計で測定しているのが酸素であると仮定して、水注入量からNaループ中の酸素濃度上昇量が計算できる(表6-2)。注入された水の中の酸素はガス中へ逃げるとは考えにくく、何らかの形(NaOH, Na₂O等)でNa中に存在すると考えられる。水注入前のコールド・トラップで精製された状態での酸素濃度は、その時のプラグ温度からClaxtonの式より求めた。又連続注入の場合は、トータルの注入量より求めた。図6-17に水注入量から計算される酸素濃度と水注入後プラグ温度の関係を示す。黒く塗った点はNaの温度

が480℃の場合、他の点は連続注入の途中で温度を変化させた等の条件のそろっていないデータ、又小さな点はSWAT-2試験初期の水注入量が正確でなかった時のデータである。図中の実線はClaxtonの式によるもの、一点鎖線はWilliams⁽¹²⁾等によるNaOHという形でNa中に酸素が溶けこんだ時の溶解度曲線、点線は同様にWilliams等によるNaOHとNa₂Oの混合物の形の場合である。データの傾向としては水注入量の大きい所でClaxton等の曲線からはずれ、又全体としてClaxton等の曲線より上にある。つまり水の注入量に比してプラグ温度は低いという結果になっている。Na中への酸素の溶解がNa₂Oの形になっている場合には、データはClaxtonの直線上にのると考えられるが、プラグ温度が低くなっている原因としては、水注入によって生成した酸素化合物は一旦反応容器内容物に付着し徐々にNa中に溶けこむためにプラグ温度を測定した時点ではNa中の濃度が均一になっていなかった事等が考えられる。しかし、Na中へ酸素はNa₂O、NaOHの両方の形で存在すると考えられる。又Williams等の実験によるとNaOHの加わった状態では酸素の溶解度は上昇するという結果がでている(図6-17点線)。低めのプラグ温度が測定されていることに対し、NaOHの生成が大きく影響していることは十分考えられる。Naと水の反応が温度によって異なるという世の中の通説によれば、NaOHの生成は温度の影響を受けると考えられプラグ温度も反応時のNa温度の影響が考えられるが、現在のデータからそれらを類推するには、データが不足している。又このような定性的な類推を定量的な考察へ進めるには、Naの分析がぜひ必要である。

水注入後のプラグ温度が水素濃度であると仮定して、前述の酸素と同様の関係を調べた。注入された水の水素がすべてNa中に溶けこんだと仮定して水注入量から水素濃度を求めた。図6-18にその水素濃度とプラグ温度の関係を示す。黒く塗った点や小さな点は酸素の場合と同様である。図中の直線はNa中水素計を使用して行った特性試験で確かめた水素飽和濃度曲線である。水素は酸素の場合と異りカバーガス中へ逃げるガス状の水素を考慮しなければならない。一点鎖線はNa中に注入した水中の水素の50%が溶けこんだとしてデータとの相対的な関係を示す線であり、縦軸の水素濃度の値を1/2で読む必要がある。又点線は25%を仮定した線である。黒丸で示したNa温度480℃と条件のそろったデータを見ると、注入量の少ない所では約25%程度の溶解割合、注入量の多い所では約40%の溶解割合に低い傾向を示している。又その傾向は、酸素を仮定した場合には酸素の溶解度曲線から注水量にしたがいはずれていったが、この水素の場合には水素の飽和濃度曲線と同様の傾向をもっている。又温度の影響等に関して十分な考察が得られないのは酸素の場合と同様である。

6.3 まとめ

プラグ計特性試験結果により、不純物の物質移動係数とレイノルズ数の関係はMcpheeters等の実験結果とよく一致した。不純物附着量は濃度差に比例するという仮定ではオリフィス部の流量パターンを十分シミュレートできないことがわかった。応答時間はオリフィス部のレイノルズ数、加熱冷却速度、冷却システムの熱容量等の影響を受け、短縮するためのデータが得られた。

水注入によりプラグ温度の上昇するデータが得られ、初期プラグ温度の低い状態では少量の注水によりプラグ温度は大きく上昇することがわかった。その関係は注水量の小さい領域では Na_2O 、 NaOH 等の溶解度曲線に近い上昇をし、 320°C の NaOH の溶解度以上では特異な傾向を示すことがわかった。

又最後にリーク検出器としてのプラグ計の可能性について述べてみたい。今報告に述べたように、プラグ計はプラグ温度の低いシステムでは感度がよく安定性にすぐれた検出器であるが、応答時間の点でおとる。しかし、応答時間は現在のプラグ計で十数分、又その短縮は十分可能であることから、プラグ計の低リーク率での有効性は非常に高いと考えられる。

プラグ計のリーク検出を考えるために簡単なモデルでの概算を行ってみる。プラグ計の指示で 5°C の変化は十分読みとれ、その変化は酸素濃度で約 1.5 ppm である（水素濃度では約 0.1 ppm の変化）。そのリーク量はSWAT-2システムで約 0.4 g である。（低い注水量のデータがないため注水量の小さい時はほぼClaxtonの酸素飽和濃度曲線に近い上昇を示すという結果が得られているため、そのデータを使用。）文珠SG等はSWAT-2容器の約 300 倍と考え、 5°C の感度では約 120 g のリーク量に相当する。 0.2 g/sec のリーク率の場合を考えるとウェステージ率は約 $4 \times 10^{-3}\text{ mm/sec}$ であり、ウェステージが約 3 mm になった時隣接伝熱管がやぶれるとするとその時間は約 13 分である。又プラグ計の検出感度まで水がリークする時間は約 10 分である。検出感度を 2.5°C とすると約 5 分となる。

以上の計算のようにリーク率の小さい領域、つまり水素計等ではドリフト等により安定性が低くリークと判断しにくい長い時間をかけて、じわじわ不純物濃度が上昇していく領域では非常に有効であろう。

又これらを確認するためにはNa中に微少の水を注入したデータ、SGシステムでの不純物の挙動についての考察が必要であり、今後調べていく予定である。

7. 音響検出計

音響検出計はウェステージ率が大きく、不純物モニター型のリーク検出計では時間的に間に合わない領域において、ぜひとも開発の必要な検出計である。使用している検出器及び計測システムの概要は第一報において述べたが試験番号5以後変更した検出器があるので、表7-1にそれらをまとめた。

検出器として使用している、加速度変換器やNa中微小圧力計(Na中マイク)からの信号をどのように処理し、それからどのようにNa中への水リークのアラームを得るかということが最も重要な問題である。Na-水反応固有の音、つまり固波数をみつけ、SG壁の振動の中からその固波数成分をモニターすることにより水リークを検出するという方法が、第一に考えられる。SWAT-2で約一年半Na-水反応固有の音を捜し求めていまだによく解らない。又APDA等においても同様であり、世に「音響検出計は使いものにならないのでは」などの声が出はじめ、文珠において水素計では応答時間が長すぎる領域をみすてるかどうかという責任を音響検出器が負った場合、何らかの結論を早急に出す必要がある。

そこでこの報告では、信号のオーバーオールレベルからリーク検出器として可能性を考え、又周波数分析による信号成分の検討について述べる。

7.1 音響信号

Na-水反応時に得られる信号をみた場合そのRMS値は注水率とよく対応している。図7-1にNa-水反応時の注水配管圧力の時間変化と、反応容器壁に溶接づけした棒の先端に取り付けた加速計信号のRMS値の時間変化を示す。注水管圧力によりNa中への水の注入状態を知ることができるが、図7-1より水注入量の減少とともに加速度計信号のレベルが低くなっている様子を知ることができる。

RMS値の測定は、「NF回路設設ブロック製高感度交流電圧計・M-172TA型」により行っている。又交流電圧計で測定する信号は一旦データレコーダーに記録再生した信号を使用している。

Na-水反応試験時の注水率と音響計信号のRMS値の関係を図7-2、図7-3、図7-4に示す。図7-2は150mmの棒に取り付けた加速度計、図7-3は200mmの棒に取り付けた加速度計、図7-4はNa中マイクによる図である。

バックグラウンド・レベルはほとんど電氣的なノイズである。金属製の加速度計の金属棒にネジどめした場合、信号線のマイナス側は反応容器壁を通してアースされ、又記録するデータ・レコーダ側でもアースされるため二点接地の状態になり、装置と制御室間の電位差によるノイズを捨てることになる。その解決方法としては中間に浮かせるためのアンプを入れる。又は加速度計を電氣的に浮かせて取りつける等が考えられる。SWAT-2では後者を採用し、セラミックの磚子とテフロンシールテープによる小細工によりノイズレベルを低くすることに成功している。

Na 中マイクの場合、検出器はNa と接しており浮せることはできないのでアンプを入れているが測定状態によりノイズレベルの変化しているのが図7-4からわかる。この測定状態というのは、Na 中マイク信号の増幅を現場で行ったり、現場にプリアンプだけを残し制御室で増幅を行ったりしていることをさしている。

注水率とRMS値の関係を調べるために、Na-水反応時の信号のRMS値からノイズレベルを差引いた値とリーク率の関係を両対数で図7-5、図7-6、図7-7に示す。丸で示したのが480℃のデータ、三角が280℃～430℃のデータである。直線は480℃のデータの傾向を調べるために引いたものであり、その傾きは二種の加速度計及びNa 中マイクにおいてすべてよく一致している。又APDA⁽¹³⁾による加速度計信号を同様に整理した場合の傾きは図7-5、図7-6と一致している。APDAによるデータは、今報告に示した蒸気注入とは異なり、水注入の場合で注水率はほぼ一ケタ大きい領域であり両者を合わせると0.1 g/sec ~ 50 g/sec のほぼ三ケタの範囲にわたりこの傾向があると考えることができる。

図7-5、図7-6、図7-7をみると、三角で示した温度の低いデータは、480℃のデータに比例し、そのRMS値が低いことがわかる。その温度による影響を調べるために、480℃の直線との比と温度の関係を加速度計の場合について図7-8に示す。二種の加速度計の結果はこのような温度による整理をした場合よく一致したため、図7-8は両者を同時に表わした。

Na 中マイクについても図7-7から温度による影響のあることが考えられるが、整理した結果同様の傾向はみられるが、ばらつきが大きいことがわかった。その原因は、加速度計の信号に比してNa 中マイクの信号はS/N比が約1/5しかないことによるであろう。又ノイズは低周波成分が強いので、フィルターを使用することによりS/N比が向上しデータ

のばらつきが少くなると考えられる。今報告では、オーバーオール signals レベルについてまとめた結果、加速度計については約 2 ~ 10 という S/N 比が得られている。

7.2 周波数分析結果

SWAT-2 試験初期のデータは S/N 比が低く、その周波数分析結果は再現性はあまりよくなかった。しかし前述のような改善の後には十分再現性のあるものとなっている。

加速度計の場合、二点接地の状態で使用すると非常に奇妙なノイズが混入する。それを周波数分析した結果を図 7-9 に示す。図に示した矢印が後の周波数分析において顕著なピークのある周波数であるがよくわからない。

Na 中マイクの場合、ノイズは大半が低周波成分であり、バックグラウンド・ノイズの周波数分析結果を図 7-10-a に示す。図により、低周波の成分が大きく他は電氣的に浮かせるために使用している増幅器の特性そのものという結果がわかる。

図 7-10-b に示した Na-水反応時の周波数分析結果には非常に顕著なピークがいくつかあるが、その内約 2.5 KHz のピークは Na 中圧力計へ微小圧力変動を導びくためのパイプの共鳴周波数と一致している。又他のピークのどれかが Na-水反応によるという可能性が考えられるが、現時点ではそれを決定するに至っていない。又これらのピークは他の試験においても同様にみられる。しかし最近のデータでは図 7-10 に示したほど顕著ではなく、その原因としてパイプの不純物のツマリが考えられ、切断して確認する予定である。

又共鳴周波数とかパイプのツマリ等のように、パイプで引き出して測定しているための弊害をなくすために Na 中ヘッドブ付けタイプの高温微小圧力計を入手したため、今後そのデータと合せて整理する予定である。

加速度計の周波数分析結果は前述のように電氣的ノイズ混入した状態では、理解に苦しむチャートが得られる。しかし通常の状態では再現性のある結果が得られておりその代表例を図 7-11, 図 7-12 に示す。150 mm の棒で約 6 KHz, 200 mm の棒で約 3 KHz の顕著なピークがみられるが、その関係は棒の横方向の固有振動数は棒の長さの二乗に反比例するという関係とよく一致している。しかしその周波数の絶対値は計算値の方が高い値になるが、それは先端に取り付けた加速度計による影響と考えられる。又他のピークについては、Na 中マイクの場合と同様に、どのような原因によるか考察されていない。

7.3 まとめ

加速度計のNa - 水反応時の信号の周波数分析結果は顕著な棒の固有振動と考えられるピークがあり、他のピークについてはNa - 水反応固有のものであるという確証は得ていない。そのオーバーオール信号レベルはリーク率とよく対応し、その関係はAPDAによる結果とよく一致した。又温度による影響のあることがわかった。

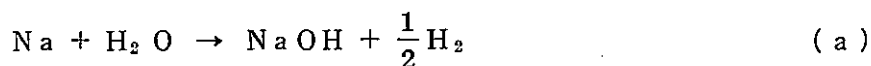
Na 中マイクについても加速度計と同様の結果が得られ、そのパイプの共鳴周波数と考えられるピークがみられた。最後に音響検出器の実際のSGにおける可能性と、今後の方向について述べたい。

音響検出器の開発とは、SG内のどこかでリークがあった時とリークのない場合の信号レベルの比という意味でのS/N比をどのようにしたら改善できるかということだと考えられる。SWAT-2の場合には、計測システムをうまく組上げることにより、電源ノイズすら落さずに十分なS/N比が得られることを確認した。実際のSGでは、機械式ポンプや水のボイリングノイズの混入するためオーバーオール信号ではS/N比を十分とれないと考えられる。IMWSGでボイリングノイズを測定するための準備をしているが、その結果と、加振器的な振動をすると考えられポンプの周波数等を考え合わせて、そのレベルをモニタするのに最適な領域をみいだしたいと考えている。今報告では、データのレベルについて、現在までに確認したことについて主に述べたが、今後は実際のSGにどのように適用するかという点をつきつめていく予定である。

8. 発生水素の溶解割合

Na 中に水を注入する時は、ループの浄化系を切離して主循環系の Na をまわしておく。水反応後、しばらくして、主循環系の全 Na が均一な不純物濃度になったと思われる時に、Na 中水素計で Na 中水素濃度を測定する。水注入前に測定した Na 中水素濃度とこの値との差から、水注入によりどれだけの水素が Na 中に溶解したかが求まる。この水素の溶解割合は、蒸気発生器の内側で水リークが起った際に、Na 中水素計とカバーガス中水素計が各々どの程度の割合の水素を検出することになるかを推定する上で役に立つ。また、水リークが起ったあとの、各々の検出器の濃度変化から、蒸気発生器内の液面からリークの発生した点までの Na の深さを推定するのに手助けとなることが考えられる。

図 8-1 は Na 中水素計が故障する前までの水注入実験前後の水素計濃度変化から求めた水素の溶解割合である。試験 No. 1 ~ 19 のうち、水素計がトリップして測定できなかった場合と、明らかにおかしな結果が得られた場合は除いてある。図 8-1 の縦軸は水素濃度差とループ内で循環している全 Na 量とから求めた水素量であり、横軸は注入した水の中の水素量である。Na 温度は 280 ~ 480 °C、リーク率は 1 ~ 6 g/s の範囲で変化しているが、いずれもはっきりした影響は認められない。全体のデータは図に示したように 5 ~ 15 % 程度の範囲でばらついている。なお、この水素の溶解割合に影響するのではないかと考えられる水注入点から液面までの Na の深さは、約 780 mm で一定してある。なお、この溶解割合は、先にプラグ計を使って推定した水素量より全体的に小さいが、この原因はよくわかっていない。Na と水が反応する際の反応式は次の二つが最も普通に起るとされている。



(a) は Na 温度が比較的低い時、(b) は高い時に支配的になるとされている。我々の実験では、400 °C 以上の Na 温度で水注入実験が多いので、ほとんど水素はガスになり一部が Na 中に溶解すると考えられる。水素ガスは瞬間的に発生し、気泡となって Na 液中を上昇中に溶解すると考え、若干の考察をおこなってみる。

次の仮定をたてる。

- ① 水素はすべて等しい半径 r_0 の球に瞬間的になる。その数を n とする。
- ② その後液中を一定速度で上昇する。その時もすべての気泡は等しい径を持つ。
- ③ 水素気泡が上昇中に溶解する際の物質移動係数を一定とする。

一般に物質移動量は次式で表わされる。

$$\dot{m} = k \rho_{\ell} (W_S - W_{\infty}) \quad (8-1)$$

ここで、 \dot{m} : 物質移動量 [g/cm² s]

k : 物質移動係数 [cm/s]

ρ_{ℓ} : 密度 [g/cm³]

W : 質量濃度 [-]

今の場合、 W_S は気泡に接している Na 中の水素濃度、その時の温度の飽和溶解度で飽和した濃度になっているとみなす。 W_{∞} はそこからかなり離れた Na 中の水素濃度で、水注入前の Na 中水素濃度をとることができる。密度は Na の密度をとる。発生水素ガス量は、水素ガス密度を ρ_v とすると

$$\frac{4}{3} \pi n r_0^3 \rho_v, \quad [g]$$

である。気泡の上昇速度を U [cm/s] とすると、 dx を上昇する間に溶解する量は；

$$k \rho_{\ell} (W_S - W_{\infty}) \cdot n 4 \pi r^2 \frac{dx}{U} \quad [g]$$

一方これにより気泡体積が減少するので、その質量変化量は、

$$- \frac{d}{dx} \left(\frac{4}{3} \pi n r^3 \rho_v \right) dx \quad [g]$$

この両方が等しいことから、

$$- 4 \pi n \rho_v r^2 dr = k \rho_{\ell} (W_S - W_{\infty}) \cdot n 4 \pi r^2 \frac{dx}{U}$$

$$\therefore \frac{dr}{dx} = - \frac{k \rho_{\ell} (W_S - W_{\infty})}{\rho_v U} \equiv - \alpha \quad (8-2)$$

この α は、仮定により気泡上昇中は一定と考えているので、

$$r - r_0 = - \alpha (x - x_0) \quad (8-3)$$

従って完全に気泡が溶解してしまうまでの深さ、 L^* は

$$L^* = r_0 / \alpha \quad (8-4)$$

となる。

液面までの深さを L とし、この間に気泡が溶解してしまわない、すなわち、 $L < L^*$ の場合

の水素の溶解割合 ϕ は、次式の様に求まる。

$$\begin{aligned}\phi &= -\int 4\pi nr^2 \rho_v dr / \frac{4}{3}\pi nr_0^3 \rho_v \\ &= 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 \\ &= 1 - \left(1 - \frac{\alpha L}{r_0}\right)^3\end{aligned}\quad (8-5)$$

但し、 r は液面に到達した水素気泡の半径で、(8-3)式から、 $r = r_0 - \alpha L$ である。

(8-5)式から大体の溶解割合を推定してみる。物質移動係数は適当なデータがないので、炭素ガスの単一気泡が水中を上昇する時に求めた k の値を使う。⁶⁾ 気泡径 0.5 ~ 4 mm の時

$$k = 0.02 \sim 0.04 \text{ cm/s}$$

であったとしているので、 0.03 cm/s とする。その他実験条件から、 $\rho_g \approx 0.8 [\text{g/s}]$ 、 $\rho_v \approx 3.2 \times 10^{-4} [\text{g/cm}^3]$ 、 $L = 78 [\text{cm}]$ 、 $W_g - W_\infty \approx 300 [\text{ppm}]$ 。又、後で述べる様に液面計の指示変動から推定された大体の上昇速度は $U \approx 100 \text{ cm/s}$ であるので、これらの値を入れると $\alpha \approx 2 \times 10^{-3}$ 。さらに式(8-5)から、溶解割合 ϕ を求めるには気泡径が必要である。ここでは逆に実験データから得られた $\phi = 0.15$ とした時の気泡径を求めてみると、気泡径は約 1 cm となる。

同じ Na 側の条件で気泡の発生状態も同じであるとする、水素の溶解割合は液の深さだけの関数となる。深さ L の時に溶解割合が ϕ であったとすると、溶解割合が 1 になる液の深さは、(8-4)と(8-5)から

$$L^* = L / \left\{ 1 - (1 - \phi)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (8-6)$$

となる。 $\phi = 0.15$ 、 $L = 78 \text{ cm}$ とすると $L^* = 1480 \text{ cm}$ である。従ってこの結果によると、“もんじゅ”の蒸発器の伝熱管部の Na 液面からの深さは 10 m 以下であるから、リークが起ると、必らずカバーガス中にも水素ガスが出て来ることになる。このモデルでは気泡が一定で、水リーク率は気泡の数 n にきいて来るとしているため、溶解割合はリーク率に影響されないことになる。しかし、気泡数が非常に多くなると気泡の合体の影響で、全体として気泡径が大きくなるのにくらべて、リーク率が小さいところでは気泡径が相対的に小さいままで上昇するので、溶解割合は大きくなることがあるのではないかと考えられる。

9. 液面振動によるリーク検出

Na 中に水を注入する実験をおこなった際、まず最初に、そして最も確実に、水が注入された事を確認する方法は、反応容器の連続指示の液面計をみることであった。液面計は EE (English Electric) 製の誘導式液面計で、指示の時間遅れは 0.1 秒以下であると云われている。

図 9-1 は水注入時の液面振動の記録例である。記録は計算機の磁気テープでおこなった。ほとんどの水反応実験で、この図と類似の結果がえられたので、この振動状態の特徴として次の様なことが云える。

- ① 水注入弁を開にするとほぼ同時に液面は上昇し始める。
- ② τ_0 時間後に液面は h_0 だけ上昇し、その後その値とほぼ等しい S のレベルを中心に振動する。
- ③ 振動はかなり不規則であるが、水注入弁開放中は大体同じ程度の振幅 A で振動する。
- ④ 弁閉後は振幅及びレベルが小さくなっていくが、アルゴンガスを噴出しているの、ある一定の値に落ち着く。
- ⑤ 振動の周期はほぼ一定である。

この結果から次の様な事が起っているであろうと推察される。

- ① 水注入と同時に水素ガスが発生し始め、注入水量とともに水素ガス量は増大する。
- ② 時間 τ_0 かけて水素ガスは液面に到達する。
- ③ レベル変化 h_0 は最初の気泡が液面に到達した時点での、液面下に存在する水素ガスのホールドアップによってきまる値である。
- ④ その後のレベル上昇値 h が h_0 とほぼ同じであることから、最初の気泡の発生と上昇の状態はその後も持続する。

なお、反応容器は図 1 に示した様に、内部に内筒があり、水噴出点附近では流路がせばまっている。液面のある点での内筒の内径は 370 mm で液面計は中心から 130 mm の所に垂直に入っている。液面の中心には上部から 2B の Na 流入管が入っている。従ってこれらの形状効果、Na の流動状態が水素気泡の上昇状態、液面の振動の様子に複雑に影響する。

図 9-2 は平均液面上昇 h を各実験結果から読みとり、その時のリーク率に対してプロットしたものである。リーク率が増大すると、液面下に存在する水素の体積が増え、液面の盛り上

り方が大きくなる。液面が振動する振巾はこの液面上昇が大きくなると、当然大きくなる。実際のSGで比較的大きなリークが起った時は、液面計の振動を読みとってリークの検出をおこなわせることができるかもしれない。以下、その可能性を調べるためと、実験結果を分析するためにおこなった考察について述べる。

まずArガスをNa中に噴出させ、噴出ガス量と液面変動巾を調べた。図9-3は液面の平均的上昇高さの測定値と推定値の比較である。推定値は下記の式による。

$$h_T = \frac{fG L/U}{S_0} (1 - \phi) \frac{P_a}{P} \times \frac{T}{T_0} \quad (9-1)$$

ここで h_T : 平均液面上昇 [cm]
 f : 標準状態の発生ガス比体積 [cm³/g]
 G : 注入率 [g/s]
 L : 液面からの深さ [cm]
 U : ガスの上昇速度 [cm/s]
 ϕ : ガスの溶解割合 [-]
 S_0 : Naの液表面積 [cm²]
 P_a/P : 圧力補正 [-]
 T/T_0 : 温度補正 [-]

Arガス噴出の場合、臨界流を仮定して(2-1)から注入量を求めた。 f はArガスの比体積である。 ϕ は0とした。 L/U は気泡上昇時間に相当するので図9-1でみられる τ_0 の値を各実験から読みとった。推定値 h_T と実測値 h_M とを

$$h_M = K_1 h_T \quad (9-2)$$

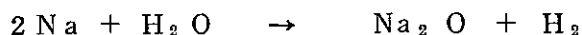
と表わしたとき、 $K_1 = 0.48$ となっている。この違いは、液面が均一に盛り上らないことによるもので、反応容器の形状が影響していると考えられる。

図9-4は液面の平均上昇の測定値とその時の振動の振巾との関係である。Arガス噴出の場合と、Na-水反応の時と両方同時にプロットしてある。その両者に差はない。振巾をAとすると、

$$A = K_2 h_M \quad (9-3)$$

と表わした時に $K_2 = 1.4$ 程度になっている。

Na - 水反応時は、(9-1)において、次の様な値をとった。f は反応式として



を仮定して、 2.49×10^3 [cm³/g - H₂O] をとった。G は水のリーク率である。L/U は各実験結果の τ_0 を平均して、0.5 [sec] とした。溶解割合は前節の実験結果を考慮して、 $\phi = 0.1$ とした。その他、平均的な実験条件を入れると、

$$h_M = 2.7 K_1 G \quad (9-4)$$

となる。ここで $K_1 = 0.46$ としたのが図9-2の直線である。

図9-5は液面振動の周波数を読みとったもので、各実験中はほぼ一定であり、かつ図からわかるように、振動の大小にも、振動の原因となるガスの種類にもよらない。振動の形態を重力波であるとする、液深の深い場合は波長 λ は

$$\lambda = \frac{g}{2\pi n^2} \quad (9-5)$$

で表わされる。g は重力加速度、n は振動数である。n = 1.8 を入れると波長は反応容器内筒の内径の約1.5倍になり、波動はこの内筒で規定された波で振動していると考えられる。

図9-6は定常運転時のNa液面の振動ノイズの記録を示す。パラメータとしてNa流量をとってある。流量0では計測系の信号ノイズのみで、液面がほとんど静かである。流量が増大すると明らかに振動が増大している。図9-7はこの定常時の振動のノイズ振巾の流量の影響をみたものである。横軸には議論を一般化するためにFroud数で表わしてある。代表長さは内筒の内径である。内径の影響がFroud数で表わされるようにきいて来るかどうか、問題が残るが、今仮に、図9-7の関係が外そうされるとすると、もんじゅのSGでの定格条件では10mm程度の振巾の液面振動が現われる。

実際の蒸気発生器で液面が水素気泡で振動するのを検出するとすれば、液面上昇値ではなく振巾を読みとることになるので、振巾とリーク率の関係で整理したものが図9-8である。式(9-1)、(9-3)、(9-4)からえられる振巾Aと実験時の流量に相当するノイズ振巾を加えて表わしたのが図中の式と直線である。この式でLとS₀のみを表9-1に示したもんじゅの平均直な設計寸法でおきかえ、その他は同じであると仮定して引いたのが“MONJU”の直線である。但し、Lは液中の伝熱管部全長の1/2をとった。先に推定したノイズ、10mmと比較すると、10g/sec以上のリークになると液面計に認められることになる。

以上、相当乱暴な仮定や、議論に飛躍が多いが、今後の実験や解析の手がかりをつかむためには有効な考察になるものと考えられる。問題点を列並すると、次の様になる。

- ① 形状の効果をつかむ実験が必要である。これは水とガスを使った模擬実験で十分である。
- ② 図9-2, 図9-8でわかるようにリーク率が大きくなると振動は直線からはずれて来る傾向にあるので、もっとつっこんだ内容のモデルを立てる必要がある。
- ③ 実際のSGでのノイズ・レベルを知る必要がある。

10. お わ り に

SWAT-2による試験開始前には多くの未知の問題があり、試験開始後も大小のトラブル、困難な点が出て来たが、一応各々解決し、かなり有益な多くのデータが得られた。データの数が膨大であるため、その解析に時間がかかり、今まで得られた結果もまだ総ては整理されていない。しかし、結果をできるだけ早く、“もんじゅ”やその前の50MWSGに反映されるため、一応の検討を加えた試験の結果をなるべく多く本報告書にまとめた。

試験の結果は各節ごとにまとめられているが、ここで再度整理し、箇条書きにする。

試験方法

- ① Na中への蒸気の噴出量は、大気中への噴出、較正試験により、±20%以内の精度で計算されることを確認した。
- ② 噴出量の実測値は臨界流から計算される値に大体一致した。

ウェステージ

- ① 連続式ターゲットにより能率的に多くのデータがえられた。
- ② ほとんどの場合、ターゲット管上にはピット状のウェステージが観察され、規定された孔径のノズルから蒸気を噴出した場合に得られる最も激しいウェステージ状態が実現されていると考えられる。
- ③ ウェステージ率はリーク率とともに増大し、数 g/sec 前後に極大になる傾向を示す。
- ④ 重量損率はノズル径が一定であるとリーク率に比例する。リーク率の広い範囲にわたってみると、重量損率はリーク率とともに一様に増大し、極大値を示さない。
- ⑤ ウェステージ部の形状が大体一樣であるので、ウェステージ率と重量損率のデータとから、へこみの広がり大体もとまる。この結果は、内圧に対する強度の評価をする際有益であると考えられる。
- ⑥ ウェステージ率と重量損率はNa温度に大きく存在し、いずれも温度とともに増大する。
- ⑦ ウェステージ率又はウェステージ率をリーク率で割った損耗比は、Na温度に対して、指数関数の形で整理された。
- ⑧ Na温度による違いを考慮すると、我々のウェステージ率のデータは、APDAの水の結果と大体オーダが一致したので、水と蒸気のウェステージの違いは、主として温度であると推定される。
- ⑨ 損耗比はリーク率に対して0.7 g/sec 附近にピークがあり、この点はある種の、例えばAr中水素計のような検出器の設計目標点として意味があると考えられる。

- ⑩ SUS 27は2-1/4Cr-1Mo鋼より数倍ウェステージに強い。
- ⑪ 接線方向のウェステージは、垂直の場合より大きくなかった。計測されるへこみは噴出方向にみて、第2番目のターゲット管上まで観測された。
- ⑫ 噴出ノズルは、試験後ほとんどの場合、その内径が拡大していた。
- ⑬ ターゲット管のウェステージ面に附着物が出来ることがあった。

Na 中水素計

- ① ノーブル・ポンプの感度は、水注入前のNa中水素濃度が0.3 ppmのとき、0.15 ppmと計算された。
- ② 質量分析器のS/N比は、ノーブル・ポンプのそれよりも約20倍良好である。
- ③ 応答時間は、バイパス内のNa流量15 l/minで約35秒である。
- ④ ノーブル・ポンプ及び質量分析器の信号の初期上昇勾配は水のリーク率を反映している。リーク率が大きいほど勾配は大きい。
- ⑤ 信号の第1ピーク高さは全注水量を反映する。全注水量が多いほどピーク高さは大きくなる。
- ⑥ 主循環Na温度が380℃よりも低くなると、Na-水反応は水1 molから水素1/2 molが生成する反応機構が支配的になると推測されるスペクトルが観測された。
- ⑦ ノーブル・ポンプはノイズが大きいこと、質量分析器は対数アンプあるいは、加速電圧のドリフトが将来の問題として残る。
- ⑧ SWAT-2を運転し始めてから13ヶ月目にNi膜に貫通部(ピンホール)ができた。また、Ni膜は完全に扁平に座屈していた。その原因はまだわかっていない。

Ar 中水素計

- ① Ar中水素計の感度は、水注入前のAr中水素濃度が20 ppmのとき、約0.2 ppmと計算された。
- ② 応答時間は、水素計へのArガス流量5 l/minで約30秒である。
- ③ Ar中水素計の信号の初期上昇勾配は水リーク率を反映している。リーク率が大きいほど勾配は大きい。
- ④ 主循環Na温度が380℃よりも低くなると、Na-水反応は水1 molから水素1/2 molが生成する反応機構が支配的になると推測されるスペクトルが観測された。
- ⑤ Ar中水素計の性能(感度や応答時間)はNaベーパートラップの良し悪しによって強く影響される。Naを完全にトラップすること、Naがつまりすぎないことなどが、ベーパートラップとして重要である。

ブラッキング計

- ① 使用したブラッキング計の定常運転時の特性より計算した物質移動係数は Mcpheeters らの結果と一致した。
- ② ブラッキング計を振動法により作動させたときに得られた温度記録の平均値から求めた温度は、コールドトラップの出口温度とよく一致した。
- ③ 振動法は、特にブラッキング温度の低いところで連続指示法より信頼性がある。
- ④ 振動法による応答時間は、レイノルズ数等を大きくすることにより短縮できることがわかった。
- ⑤ 水注入量とループのブラッキング温度上昇との関係のデータがえられた。注入量が少ない時には Na_2O 、 NaOH の溶解度曲線に近い上昇を示し、 NaOH の溶解点、 320°C 以上では特異な傾向を示す。
- ⑥ 水リーク率の小さい場合には、ブラッキング計をリーク検出器として働かせることができると推定された。

音響検出計

- ① 加速度計型の検出器はアースのとり方を工夫することにより、 S/N の良い信号を得ることができた。リーク率により S/N は $2 \sim 10$ がえられた。
- ② リーク率と音響信号との関係は両対数グラフ上で直線で表わされ、その勾配は各検出器とも一定で、かつ、APDA で得られた結果と一致した。
- ③ Na 温度が高くなると音響出力レベルも大きくなる。
- ④ 周波数分析結果によると、周波数スペクトルの中には検出器取り付け状態による共鳴周波数によるピークが観察された。
- ⑤ リーク検出器として使えるかどうかは、実際の SG でどの程度の S/N が得られるかにかかっている、その為のデータが必要と考えられる。

発生水素の溶解割合

- ① 水注入後、ループの Na で平衡に達した時の Na 中水素計から求めた水素の溶解割合は、水 1 mol から水素 1 mol 発生するとすると、約 $5 \sim 15\%$ である。
- ② 水素気泡が Na 液中を上昇する間に Na 中へ溶解すると考えたモデルにより、 Na 中とカバーストーム中にわかれる水素ガスの割合についての考察をおこなった。

液面振動

- ① 水反応時には規則的な液面振動が観察され、リーク率ととも振動の振幅は大きくなる。

- ② 液面は全体的に盛りあがるので、この大きさは、液面下に存在する水素ガス量によると考えられる。
- ③ 振動の周波数はArガス噴出の場合を含め、ほぼ一定であった。
- ④ 定常運転時の液面の波だちの大きさは、Na流量とともに直線的に増大する。
- ⑤ 水素ガスのホールドアップ量の推定から求めた実験式により、もんじゅのSGでリークがあった時の液面振動の大きさを推定した。

以上、本プロジェクトにより現在まで得られた成果をまとめたが、SG内での水リーク事故は、FBR開発上でのかなめとなると考えられるので、今後も強力に開発研究を遂行する必要がある。関係各位の御支援、御批判を御願います。

参考文献

- 1) 根井, 他, “小リークナトリウム水反応試験研究, 第1報, 試験装置の概要” SN941 72-08(1972)
- 2) 根井, 他, “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” SN941 72-14(1972)
- 3) APDA-254
- 4) APDA-262
- 5) 金属材料技術研究所, “高速炉用蒸気発生器伝熱管のNa-H₂O反応による損耗に関する研究(第2次)”(1973)
- 6) H. H. ユーリック, “腐食反応とその制御”, 産業図書, (1970)
- 7) Ford J. A., APDA-167, March 15 (1965)
- 8) Crank J., “The Mathematics of Diffusion”, Oxford at the Clarendon Press (1965)
- 9) 松本要, 私信, (1972)
- 10) 古川和男, JAERI memo 第2759号(1967)
- 11) Mcpheeters, C.C., NUCLEAR APPLICATIONS., 6, 573-581, JUNE(1969)
- 12) Williams, D.D., J. Phys. Chem., 63, 68-71 (1959)
- 13) Barkhoudarian S, APDA-256, MAY(1970)
- 14) 化学工学協会, “気泡液滴工学”, 日刊工業 (1972)

表 3 - 1 Na - 水反応試験条件

<u>Na系</u>	温度	280~530℃
	カバーガス圧力	0~0.3 kg/cm ²
	ターゲット部Na流速	0.24 m/sec (下向)
	水注入点のNa液深	780 mm
<u>水系</u>	温度	280~530℃
	圧力	15~160 kg/cm ²
	ノズル径	0.3, 0.5, 0.7 mm
	注水時間	5~97 sec
	全注水量	16~160 g
	推定リーク率	0.3~7 g/sec
<u>ターゲット系</u>	ターゲット伝熱管径	27.2, 26.5 mm
	材質	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo, SUS27
	ターゲット管内流体	N ₂ , Na
	ノズル-ターゲット間距離	17.4~17.75 mm
	模擬伝熱管ピッチ	40 mm
	水噴出方向	下向 : Test No.1~6,8 斜め下向 : No.7, 9-1, 9-2 水平方向 : No.10~49
	<u>リーク検出系</u>	反応前プラグ温度
反応後プラグ温度		~380℃
Na中水素計センサ部温度		550℃
# 流量		8~15 l/min
Ar中水素計センサ部温度		300~450℃
# Arガス流量		~1~6 l/min
音響検出計センサ		KISTLER 808A Endevco 233E×2個 Toshiba HAD MK-4

表3-2 Na系と水系の試験条件

試験番号	試験日	Na系				水系		
		温度 〔℃〕	流 深 〔mm〕	流 速 〔m/S〕	カバーガス 圧 力 〔kg/cm ² 〕	温 度 〔℃〕	注 水 前 力 〔kg/cm ² 〕	注 水 後 力 〔kg/cm ² 〕
1	5/24/72	519	778	0.239	0	525	102	84
2	6/21/72	510.5	788	0.236	0	507	100	76
3	7/1/72	353	777	0.236	0	360	114	75
4	7/26/72	487.5	783	0.236	0.25	522	82	55
5	9/27/72	483.5	778	0.236	0.3	470	111.9	93.8
6	10/20/72	470	699	0.236	0.1	472	107.5	76.3
7	11/9/72	477.5	781	0.236	0.15	472	106	
8	11/30/72	487.5	788	0.236	0.8	472	112.4	106.6
9-1	12/19/72	480	710	0.236	0.3	480	128	109
9-2	12/20/72	484	702	0.236	0.2	485.5	105	85
10	1/23/73	482	780	0.243	0.04	481	132	119.5
11	1/24/73	381	716	0.236	0.11	442	103	92
12	1/25/73	479.5	764	0.236	0.33	480	92	70
13	1/26/73	290	796	0.236	0	280	38	27
14	1/27/73	481.5	769	0.236	0	480	25	20
15	2/20/73	477	790	0.24	0.3	470	159	150
16	2/21/73	478	792	0.239	0	470	148	134
17	2/21/73	380	780	0.236	0	380	112	92
18	2/22/73	391.5	794	0.236	0	386.5	88	66
19	2/23/73	283	792	0.236	0	283	53	49
20	4/11/73	378.5	898	0.227	0	380	160	148
21	4/12/73	378.5	810	0.229	0	381	145	138
22	4/12/73	480	748	0.231	0	478	166	144
23	4/12/73	477.5	773	0.224	0	480	130	121
24	4/13/73	480	758	0.226	0	480	120	108
25	4/13/73	480	716	0.226	0	481	107	97
26	4/13/73	479	706	0.224	0	484	95	87
27	4/13/73	480	698	0.220	0	484	85	78
28	4/13/73	487.5	768	0.223	0	489	73	65
29	4/13/73	480	761	0.227	0.1	489	63	46
30	5/16/73	389.5	798	0.238	0	385	158	148
31	5/17/73	437	758	0.238	0	438	157	141

試験番号	試験日	Na系				水系		
		温度 〔℃〕	流 深 〔mm〕	流 速 〔m/S〕	カバーガス 圧 力 〔kg/cm ² 〕	温 度 〔℃〕	注 水 前 圧 力 〔kg/cm ² 〕	注 水 後 圧 力 〔kg/cm ² 〕
32	5/17/73	483.5	782	0.233	0	476	145	123
33	6/12/73	386	778	0.256	0	380	177	168
34	6/14/73	334.5	783	0.247	0	330	92	86
35	6/14/73	430	781	0.256	0	436	93	80
36	6/15/73	527	823	0.25	0	517.5	87	75.5
37	6/15/73	272	768	0.236	0.05	293.5	42	37
38	6/15/73	381.5	788	0.256	0.1	375.5	42.5	36
39	6/15/73	540	798	0.251	0.05	526.5	39	136
40	7/11/73	428	778	0.235	0	422.5	148	136
41	7/11/73	477	803	0.233	0.02	489.5	142	131
42	7/11/73	529	788	0.232	0	530.5	130	119
43	7/12/73	330	778	0.222	0.1	330	63	57.5
44	7/12/73	373	816	0.235	0.1	377	60	54
45	7/12/73	476	823	0.229	0	477.5	61	54
46	7/13/73	480	768	0.232	0.03	479	44	37
47	7/13/73	479.5	756	0.229	0.05	479.5	35	28
48	7/13/73	480	778	0.231	0.02	480	27	20
49	7/13/73	480	793	0.236	0.07	479.5	18	13

表 3-3 水噴出条件

試験番号	ノズル径 〔mm〕	ノズル・ターゲット 間距離 〔mm〕	水噴出 方 向	注水時間 〔sec〕	全注水量 〔g〕	リーク率 〔g/S〕	備 考
1	0.3	32.4	垂直,下向	72	47.9	0.587	
2	0.7	17.4	"	65	62.4	3.1	
3	0.3	"	"	*	158	**0.70	* 測定不能 ** 推定値
4	0.5	"	"	53	64.4	1.64	
5	0.3	"	"	79	49.3	0.62	
6	0.5	"	"	20.6	84.1	4.08	
7	0.5		接線方向	11.7	59	5.04	
8	0.7	17.4	垂直,下向	9.0	28.9	3.21	
9-1	"		接線方向	6.9	57.8	8.38	同じターゲットに2度水を 噴出
9-2	"		"	9.0	"	6.42	"
10	0.5	17.75	水平,横向	9.6	35.8	3.73	№10~14 5回連続式タ ーゲット
11	"	"	"	8.7	37.4	4.30	
12	"	"	"	29.1	52.7	1.81	
13	"	"	"	19.5	49.3	2.53	
14	"	"	"	26.7	22.8	0.85	
15	0.7	"	"	6.0	27.0	4.51	№15~19 5回連続
16	"	"	"	11.4	46.95	4.12	№16~19 は同じターゲ ット
17	"	"	"	18.3	81.87	—	蒸気がガスラインに流入し たためリーク率不明
18	"	"	"	21.9	77.4	—	"
19	"	"	"	14.7	18.4	1.25	
20	"	"	"	11.40	69.7	6.31	№20~29 10回連続
21	"	"	"	5.28	31.6	5.98	
22	"	"	"	12.0	52	4.33	
23	"	"	"	6.08	26.1	4.29	
24	"	"	"	8.8	34.2	3.89	
25	"	"	"	8.88	29.1	3.28	
26	"	"	"	8.8	21.2	2.41	
27	"	"	"	8.8	16.8	1.91	
28	"	"	"	8.72	20.2	2.32	
29	"	"	"	26.56	41.3	1.55	
30	0.5	"	"	20.96	61.6	2.94	№30~32 3回連続
31	"	"	"	16.24	49	3.02	
32	"	"	"	14.96	36	2.41	

試験番号	ノズル径 〔mm〕	ノズル・ターゲット 間距離 〔mm〕	水噴出 方 向	注水時間 〔sec〕	全注水量 〔g〕	リーク率 〔g/S〕	備 考
33	0.3	17.75	水平,横向	57.6	63.9	1.11	No. 33~39 7回連続
34	"	"	"	56.8	29.9	0.53	
35	"	"	"	64.8	45.6	0.70	
36	"	"	"	50.8	27.5	0.54	
37	"	"	"	30.6	18.2	0.59	
38	"	"	"	89.6	18.2	0.20	
39	"	"	"	99.2	6.9	0.07	
40	"	"	"	36	42	1.17	No. 40~49 10回連続
41	"	"	"	23.7	32	1.35	
42	"	"	"	22.9	28	1.22	
43	"	"	"	46.2	21	0.45	
44	"	"	"	35.7	17	0.48	
45	"	"	"	50.1	18	0.36	
46	"	"	"	75.9	16	0.21	
47	"	"	"	99.8	16	0.16	
48	"	"	"	70.1	16	0.23	
49	"	"	"	99.9	11	0.11	

表 3-4 ウェステージ結果

試験 番号	ターゲット 材 質	最大深さ (mm)	重量変化量 (%)	ウェステージ率 (mm/sec) $\times 10^2$	重量損率 (%/sec) $\times 10^{-2}$	損 耗 比 (mm ² /g ² H ₂ O) $\times 10^3$	備 考
1	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	0.02		0.327		2.09	
2	"	0.45		4.28		7.21	
3	"	0.35		1.67		2.22	
4	"	2.5		12.1		38.82	
5	"	0.025		0.125		0.51	
6	"	4.2		20.4		49.9	
7	"	0.2		1.71		3.39	
8	"	1.3	-0.61	14.5	6.78	44.9	
9	"	1.65		10.4		14.3	
10	"	1.65	-0.33	17.2	3.44	46.1	
11	"						ウェステージ部 に付着物あり
12	"						"
13	"						"
14	"	2.0	-0.17	7.49	6.42	87.7	
15	"						ウェステージ部 に付着物あり
16	"						"
17	"						"
18	"						"
19	"						"
20	"	1.2	-1.134	10.9	10.2	17.2	
21	"	0.545	-0.617	10.3	11.7	17.2	
22	SUS-27	0.525	-0.385	4.37	3.21	10.1	
23	"	0.225	-0.152	3.7	2.5	8.62	
24	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	1.35	-0.746	15.3	8.48	39.8	
25	SUS-27	0.32	-0.135	3.6	1.52	11.0	
26	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	1.28	-0.522	14.5	5.93	60.4	
27	SUS-27	0.32	-0.0835	3.64	0.948	19.1	
28	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	1.68	-0.304	19.3	3.48	83.2	
29	SUS-27	1.29	-0.188	4.86	0.706	31.2	
30	"	0.41	-0.179	1.96	0.854	6.66	
31	"	0.62	-0.263	3.28	1.62	12.65	
32	"	0.32	-0.208	2.14	1.39	8.89	
33	"	0	-0.01496	0	0.026	0	

試験 番号	ターゲット 材 質	最大深さ (mm)	重量変化量 (%)	ウェステージ率 (mm/sec) $\times 10^{-2}$	重量損率 (mm/sec) $\times 10^{-2}$	損 耗 比 ($\frac{\text{mm}}{\text{g}} \text{H}_2\text{O}$) $\times 10^3$	備 考
34	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	0	-0.03837	0	0.068	0	
35	"	2.1	-0.51131	3.24	0.789	45.05	
36	"	3.0	-0.42855	5.91	0.844	109.1	
37	SUS-27	0	+0.00225	0	-	0	
38	"	0.07	-0.01458	0.078	0.0162	3.85	
39	"	0	-0.00035	0	0.000353	0	
40	"	0.13	-0.02662	0.361	0.0739	3.1	
41	"	0.7	-0.06747	2.95	0.2847	21.86	
42	"	1.06	-0.05436	4.63	0.237	37.86	
43	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	0.18	-0.01057	3.90	0.0229	8.57	
44	"	0.4	-0.01280	1.12	0.0359	23.53	
45	"	1.44	-0.06397	2.87	0.128	80	
46	SUS-27	0.41	-0.00033	0.54	0.000435	26.63	
47	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	0.87	-0.03019	0.87	0.0303	54.38	
48	SUS-27	0.29	-0.00045	0.414	0.000642	18.13	
49	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	0.41	-0.02635	0.41	0.0264	37.27	

表 3-5 水噴出ノズル径の変化

単位 mm

試験番号	設計値	試験前実測値	試験後実測値	
			先端部	奥
1	0.3	—	—	—
2	0.7	—	0.72	—
3	0.3	—	—	—
4	0.5	—	—	—
5	0.3	—	2.0	—
6	0.5	—	—	—
7	0.5	—	1.80	0.63
8	0.7	—	2.10	0.63
9	0.7	—	1.25	—
10~14	0.5	—	1.40	—
15~19	0.7	—	0.91	0.74
20~29	0.7	0.705	1.17	—
30~32	0.5	0.56	0.69	—
33~39	0.3	0.30	1.10	0.67~0.8
40~49	0.3	0.30	1.1	0.8~1.0

表 6-1 水注入前後のプラグ温度

試験番号	注入前 プラグ温度 (℃)	注入後 プラグ温度 (℃)	測定時期 注入前 (min)	測定時期 注入後 (min)	水注入量 (g)	水注入量より計 算した酸素濃度 上昇量
1	119	257	—	—	47.9	177.0
2	135	274	—	66	62.4	230.0
3	130	303	—	—	158	564.0
4	230	330	—	—	64.4	237.5
5	155	250	—	270	49.3	181.8
6	152	292	—	—	84.1	310.2
7	162	268	10	210	59.0	217.6
8	159	210	20	335	28.9	106.6
9-1	155	287	—	約300	57.8	213.2
9-2	160	287.5	—	約500	57.8	213.2
10	160	268	—	529	35.8	137.2
11	160	269	—	120	37.4	139.1
12	152	290	100	366	52.7	196.8
13	160	298	10	240	49.3	171.9
14	164.5	305	88	87	22.8	85.2
15	168	289	80	160	27.0	99.6
16	167	286.2	110	175	46.95	173.2
17	161	316	60	465	81.87	294.6
18	165	290	35	50	77.4	276.3
19	169	279	215	175	18.4	63.89
20	164	331	—	195	69.7	263.6
21	331	341	146	170	31.6	119.5
22	341	376.5	148	416	52.0	202.3
23	167	239.5	82	103	26.1	101
24	239.5	319.5	39	84	34.2	133
25	319.5	331.5	32	79	29.1	113
26	331.5	346.5	32	78	21.2	82
27	346.5	350	30	40	16.8	65
28	295	318	80	89	20.2	78
29	318	343	31	60	41.3	161
30	162.5	351.5	60	150	61.6	233
31	351.5	361.5	30	150	49	186

試験番号	注入前 プラグ温度 (℃)	注入後 プラグ温度 (℃)	測定時間 注入前 (min)	測定時間 注入後 (min)	水注入量 (%)	水注入量より計 算した酸素濃度 上昇量
32	165	296	50	127	36	140
33	162	325	45	250	63.9	241
34	160.5	264.5	80	120	29.9	112
35	258	300	50	45	45.6	173
36	309.5	321	40	65	27.5	109
37	152	269.5	—	113	18.2	67
38	269	300	159	—	18.2	69
39	300	311.5	—	70	6.9	27
40	161	282.5	243	157	42.0	160
41	282.5	306.5	179	66	32.0	125
42	306.5	321.5	133	56	28.0	111
43	155	260	168	139	21.0	79
44	260	282.5	164	61	17.0	64
45	282	294	39	56	18.0	70
46	160	256.5	37	152	16.0	62
47	256.5	279	27	71	16.0	62
48	279	291	35	41	16.0	62
49	291	303	35	81	11.0	43

表7-1 使用した変換器

	変換器		取り付け
1	Kistler	815A	16D×200mmステンレス棒
2	Kistler	808A	16D×150mmステンレス棒
3	Kistler	808A	16D×200mmステンレス棒
4	Na 中 マイク		17iD×224mmステンレスパイプ

表9-1 SWAT-2と各蒸気発生器の寸法の比較

項目	SWAT-2	IMWSG	50MWSG	もんじゅSG (M社案)	もんじゅSG (H社案)	もんじゅSG (T社案)
容器内径	200φ	1000φ	2200φ 1450φ	3024φ	3300φ 2350φ	2496φ
容器長さ	2487mm	9500mm	8052mm	10459mm	13000mm	14450mm
Na液面 (底部より)	1320mm	7600mm	5350mm	7350mm	9050mm	10700mm
Na容量	0.16m ³	5.6m ³	11.0m ³	50.92m ³	41.71m ³	48.82m ³
ガス空間量	0.154m ³	1.31m ³	9.13m ³	19.2m ³	30.66m ³	16.72m ³
中心筒 表面積	0.11m ²	0.43m ²	0.48m ²	0.517m ²	0.472m ²	0.723m ²
伝熱管部 表面積	—	0.10m ²	0.708m ²	4.08m ²	2.938m ²	3.107m ²
伝熱管外 表面積	0.013m ²	0.157m ²	2.172m ²	2.55m ²	0.92m ²	1.07m ²

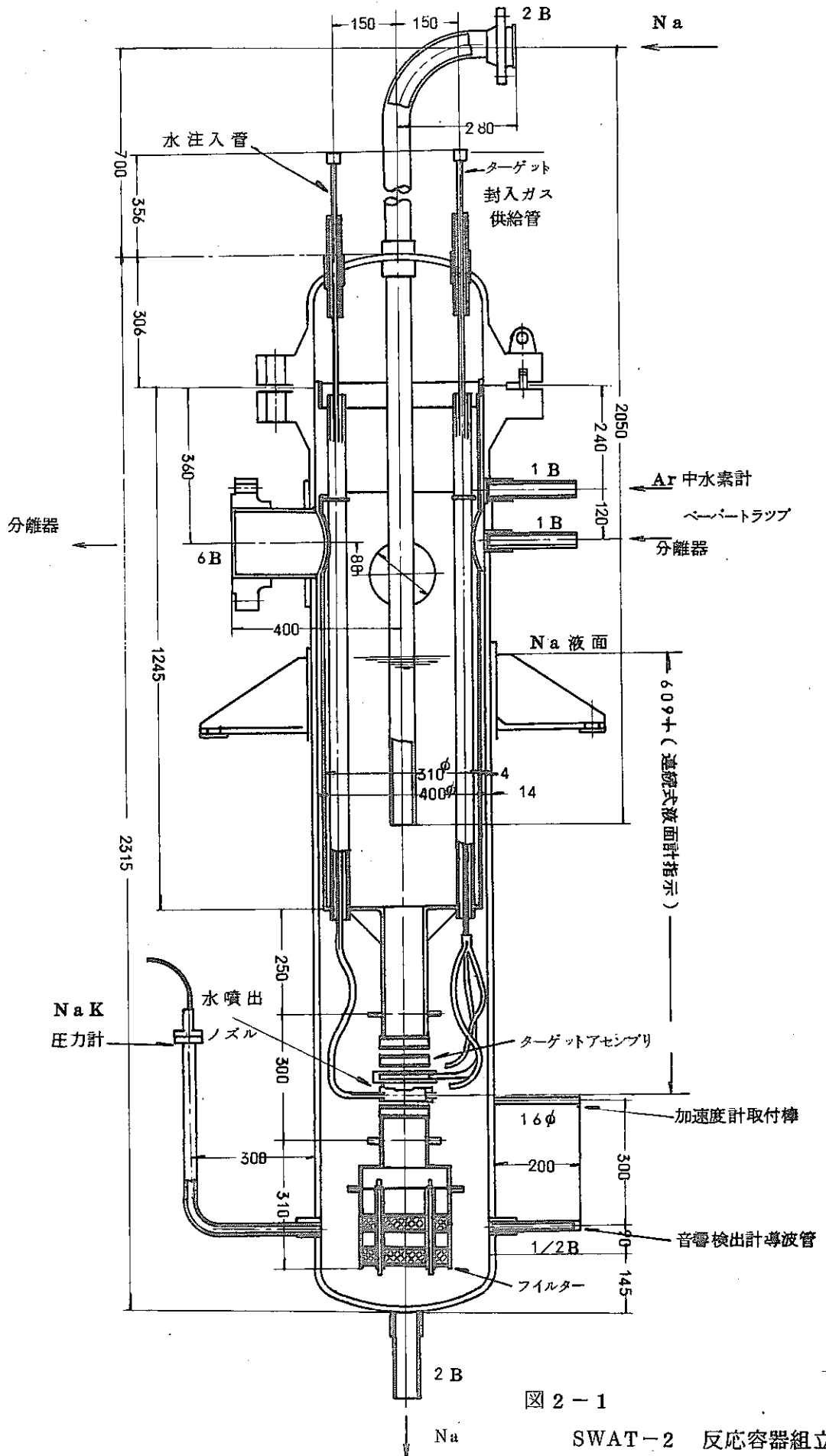


図 2-1

SWAT-2 反応容器組立図

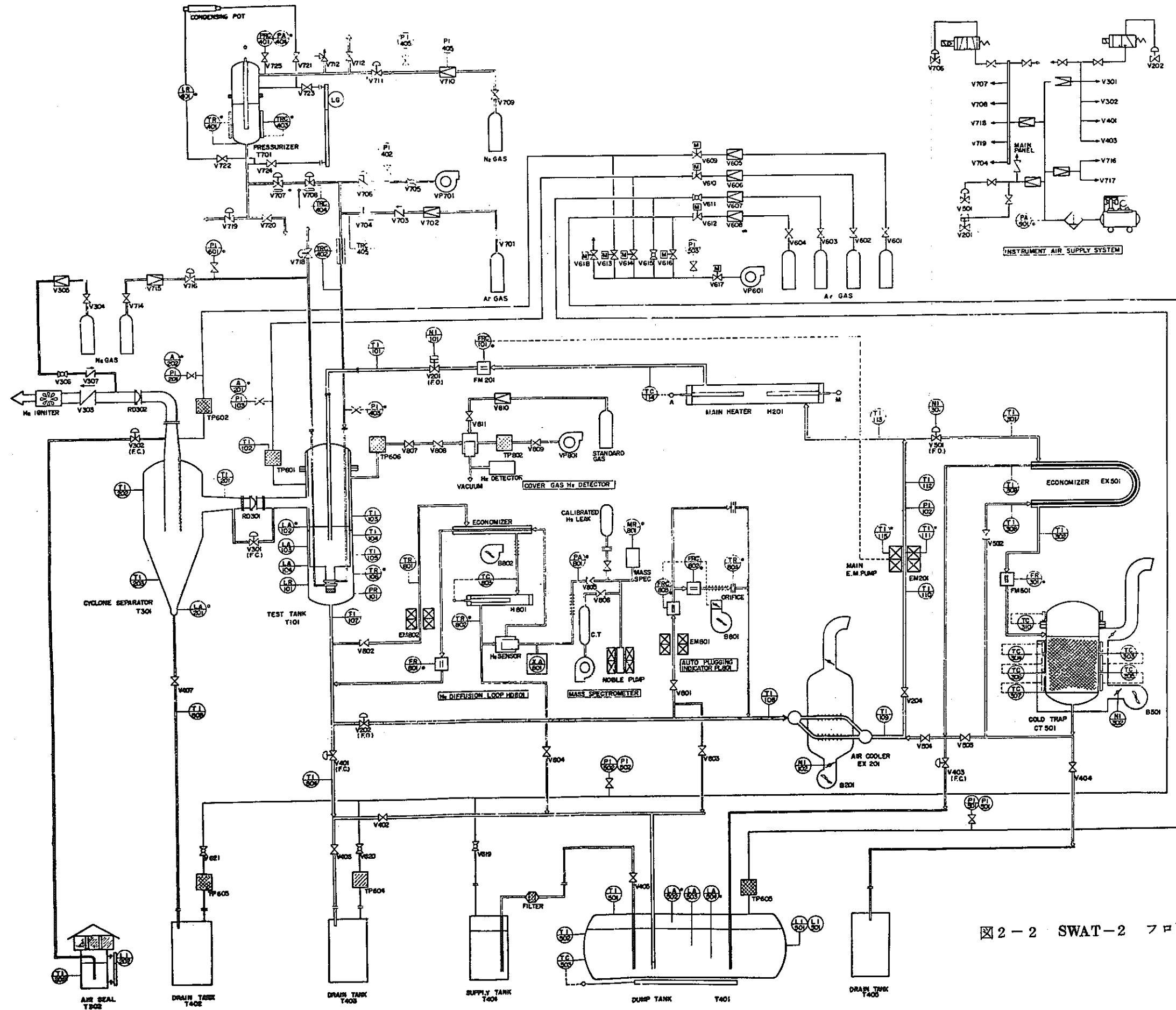


図 2-2 SWAT-2 フロニシート

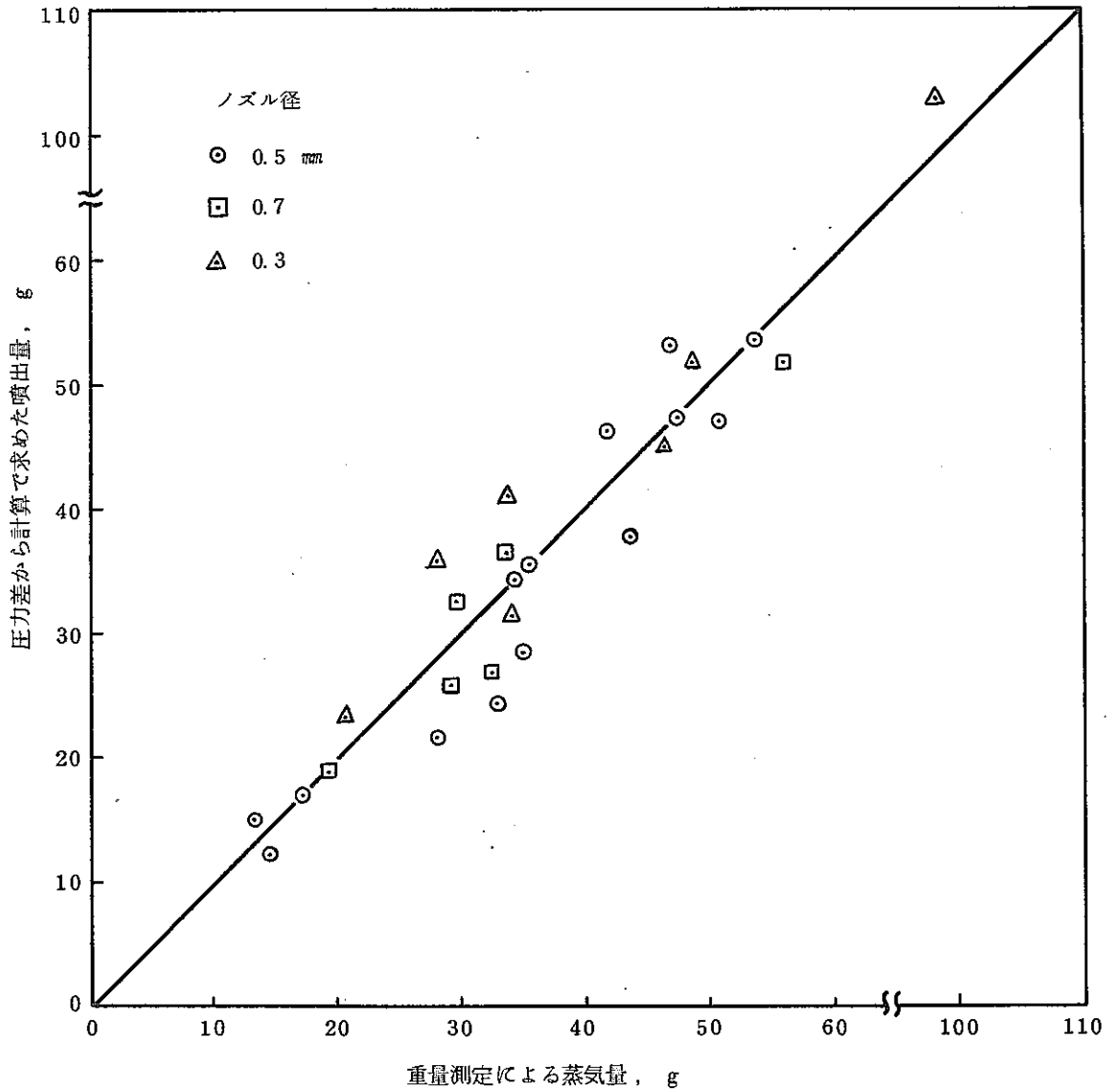


図 2 - 3 大気中への蒸気噴出試験による噴出量較正

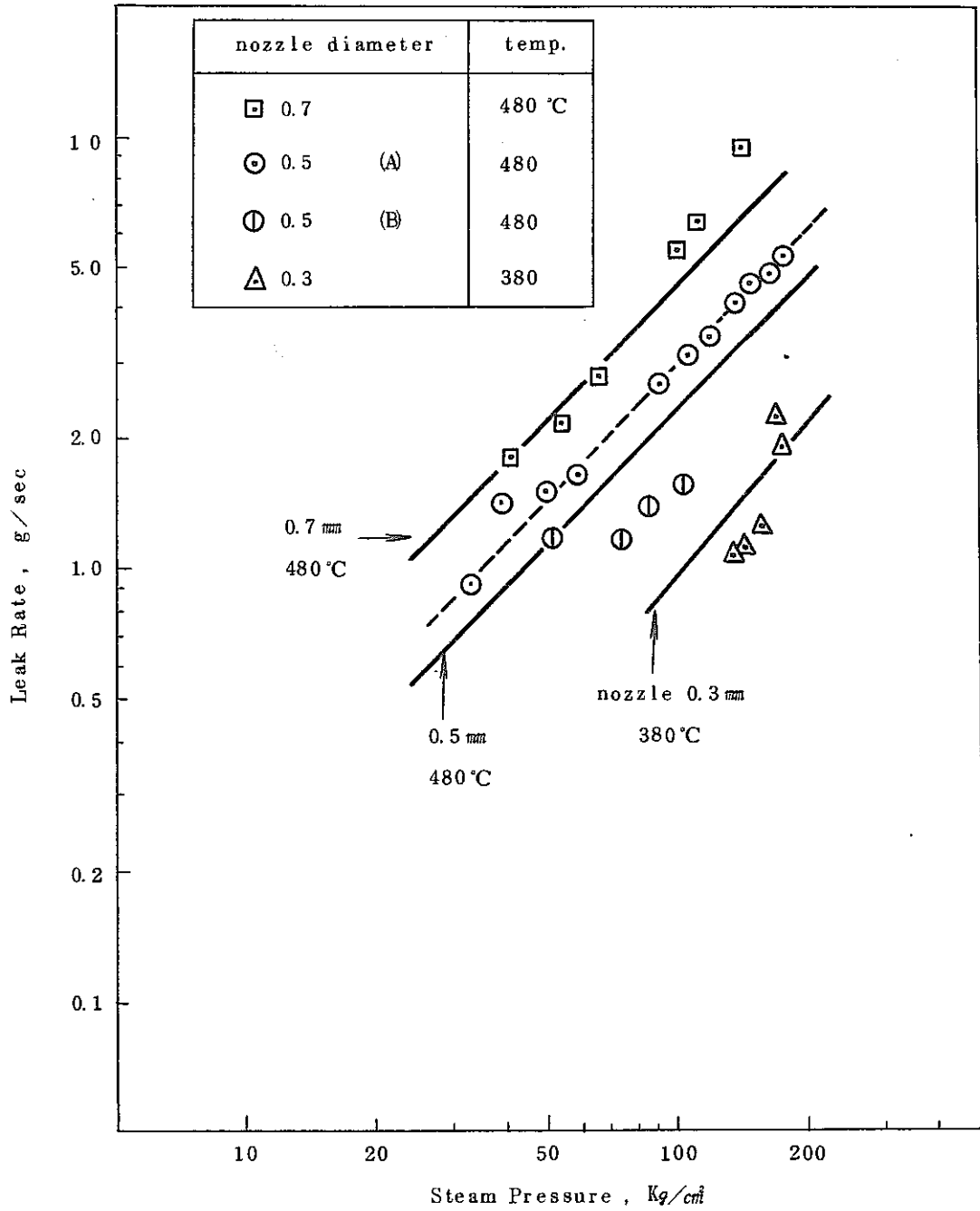


図 2 - 4 過熱蒸気の臨界流量の理論式と実験結果の比較

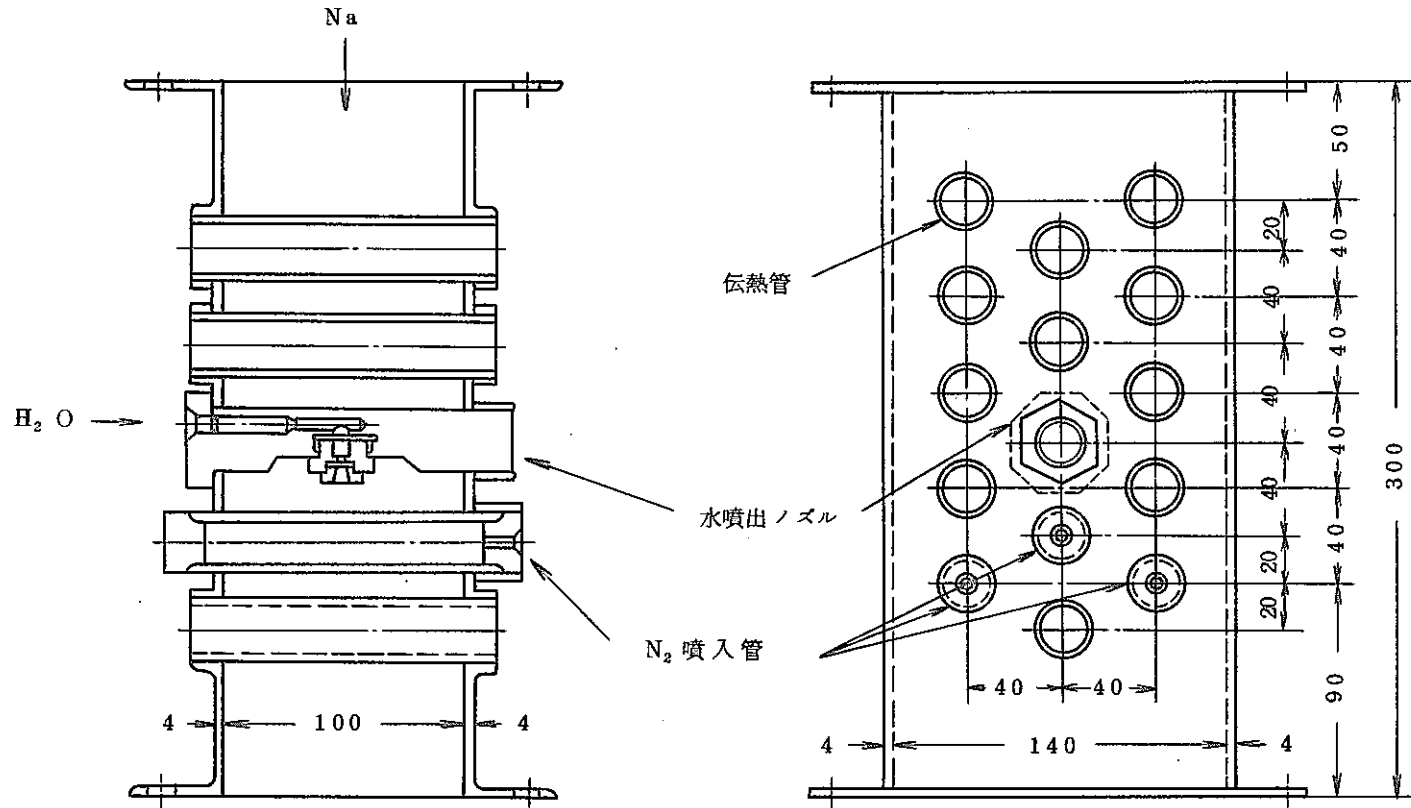


図 3-1 ターゲット伝熱管と水噴出ノズル

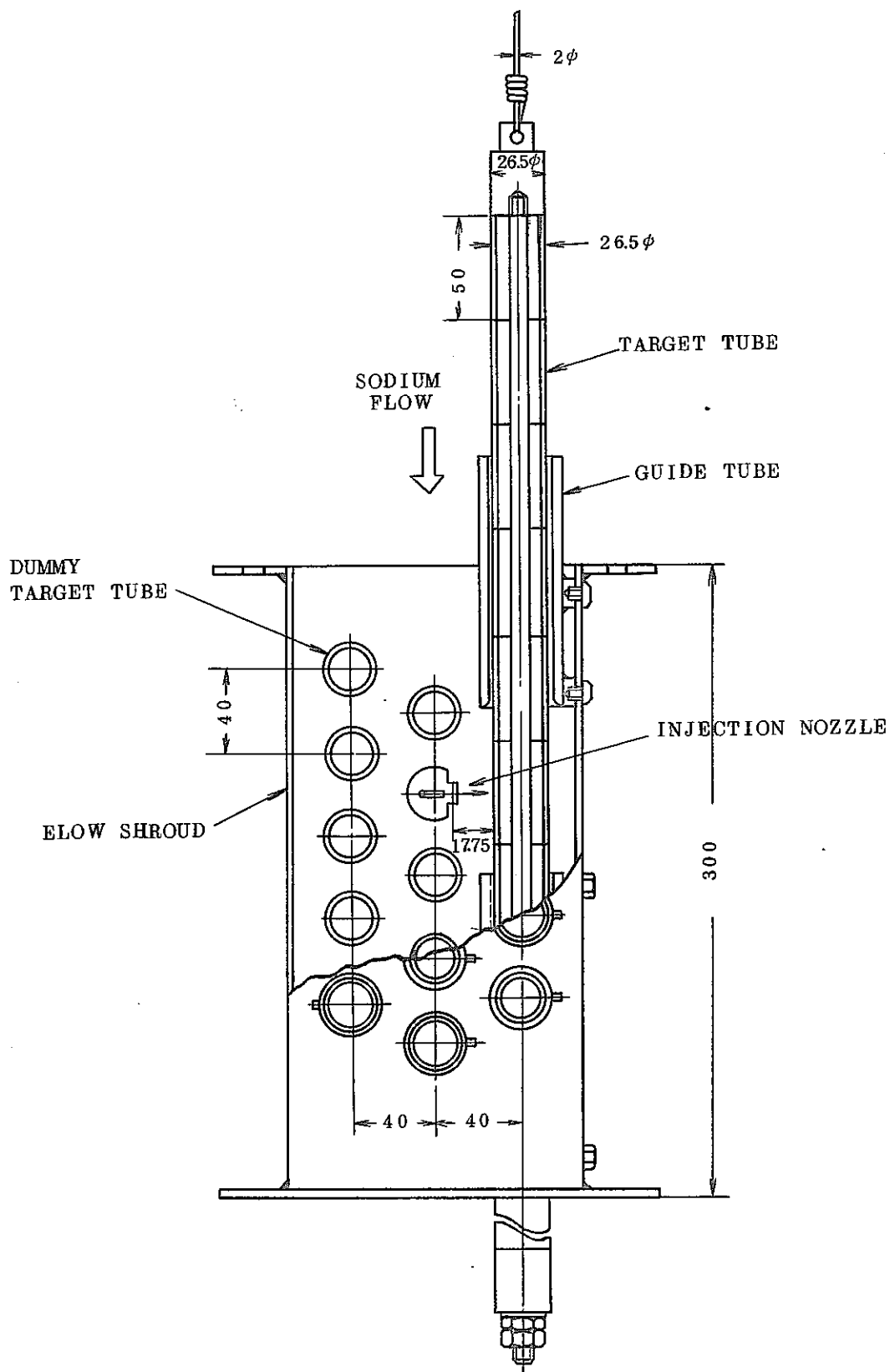


图 3 - 2 CROSS SECTION OF TARGET ASSEMBLY, TEST № 10~49

試験 9-1

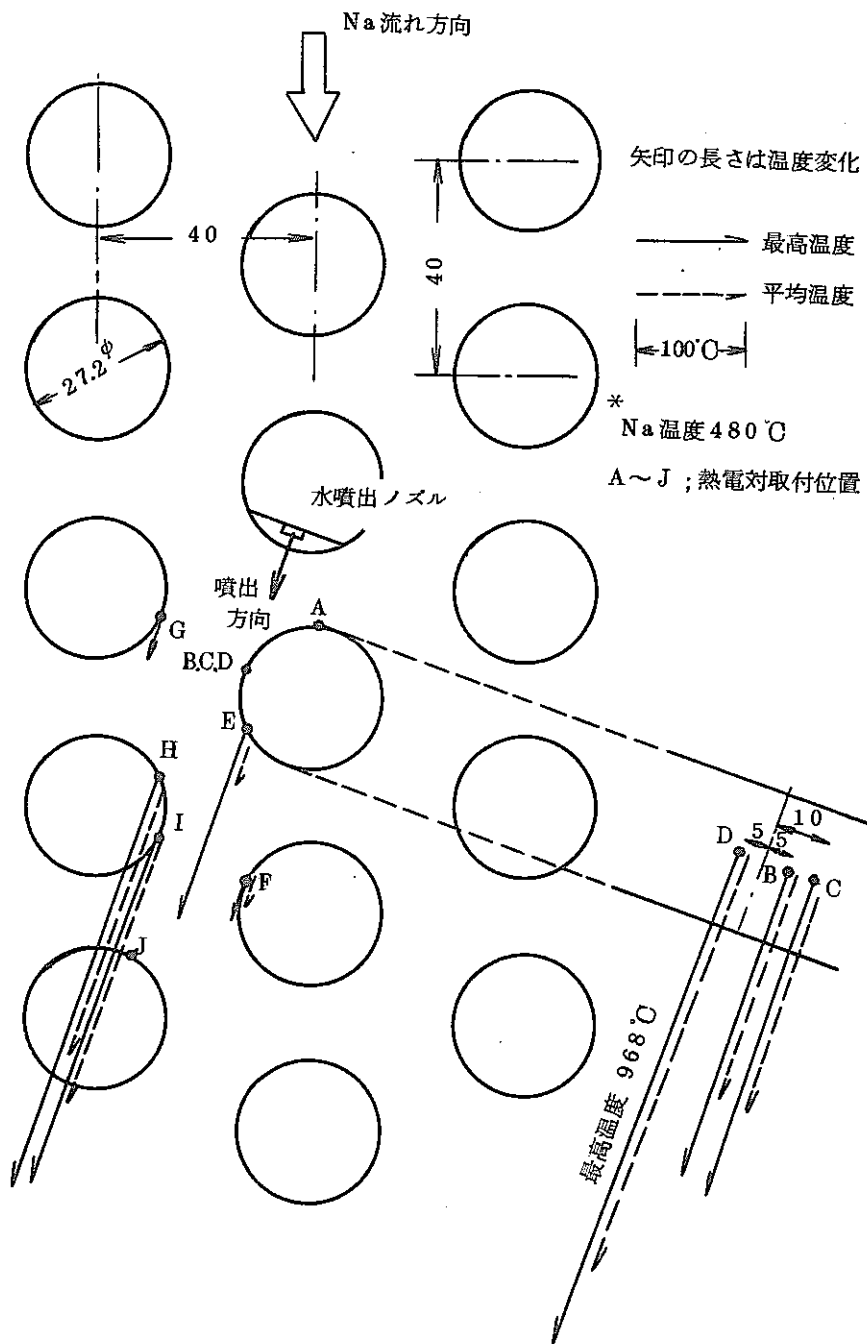


図 3-3 ターゲット管表面の接線方向に水を噴出した場合の温度変化

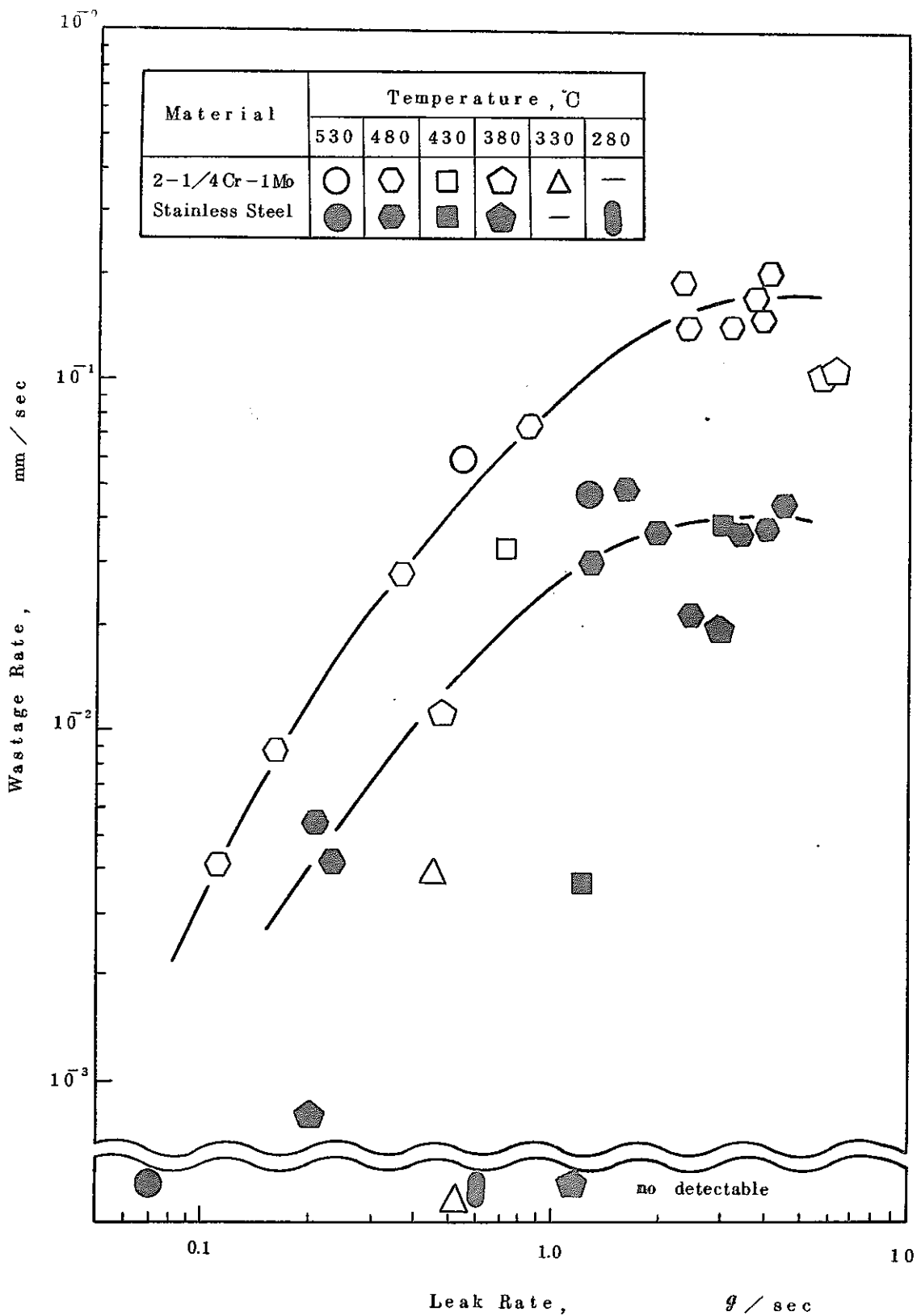


図 3-4 ウェステージ率に与えるリーク率材質及びNa温度の影響

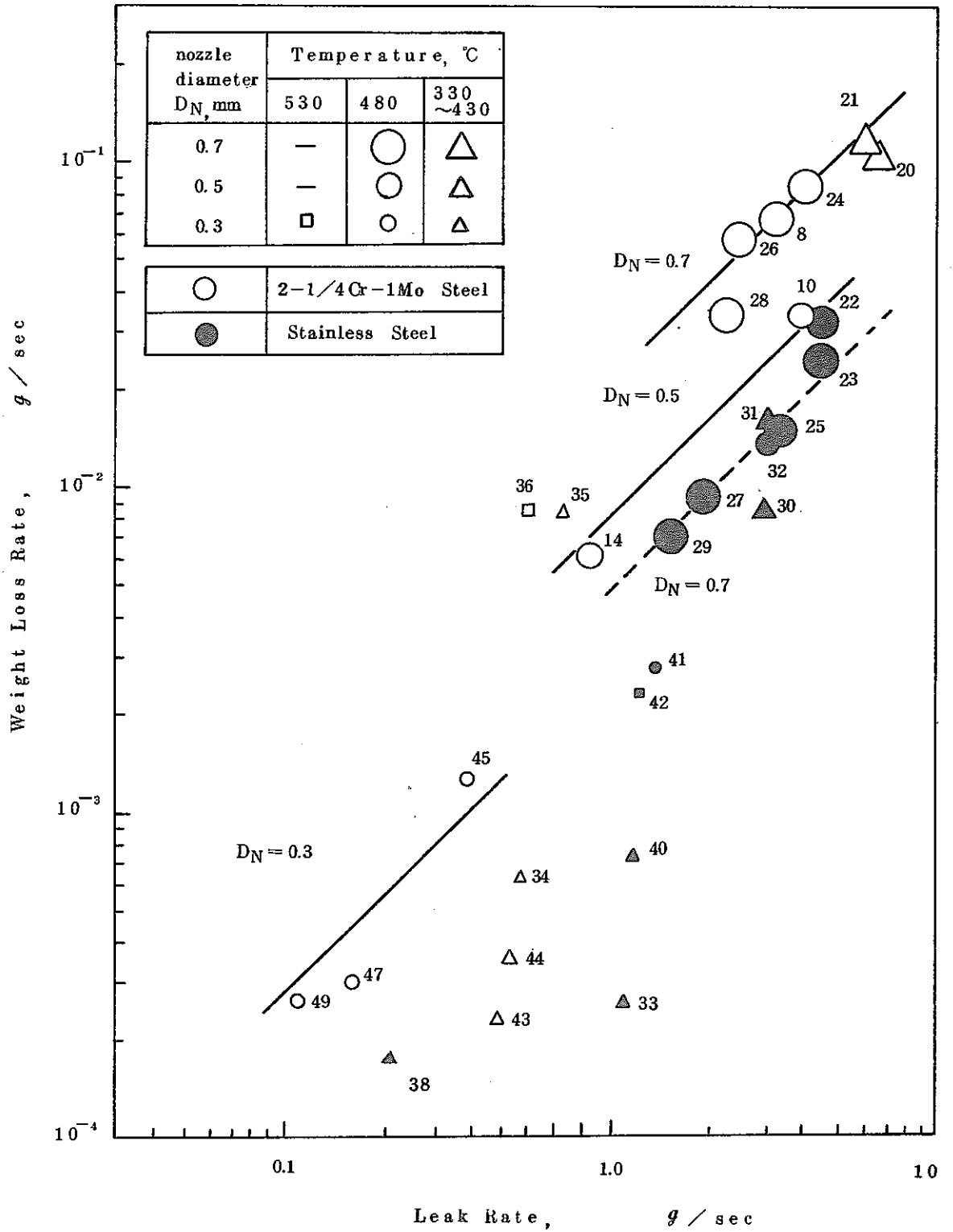


図 3-5 ノズル径, Na温度及び材質をパラメータとしたときの
リーク率と重量損率の関係

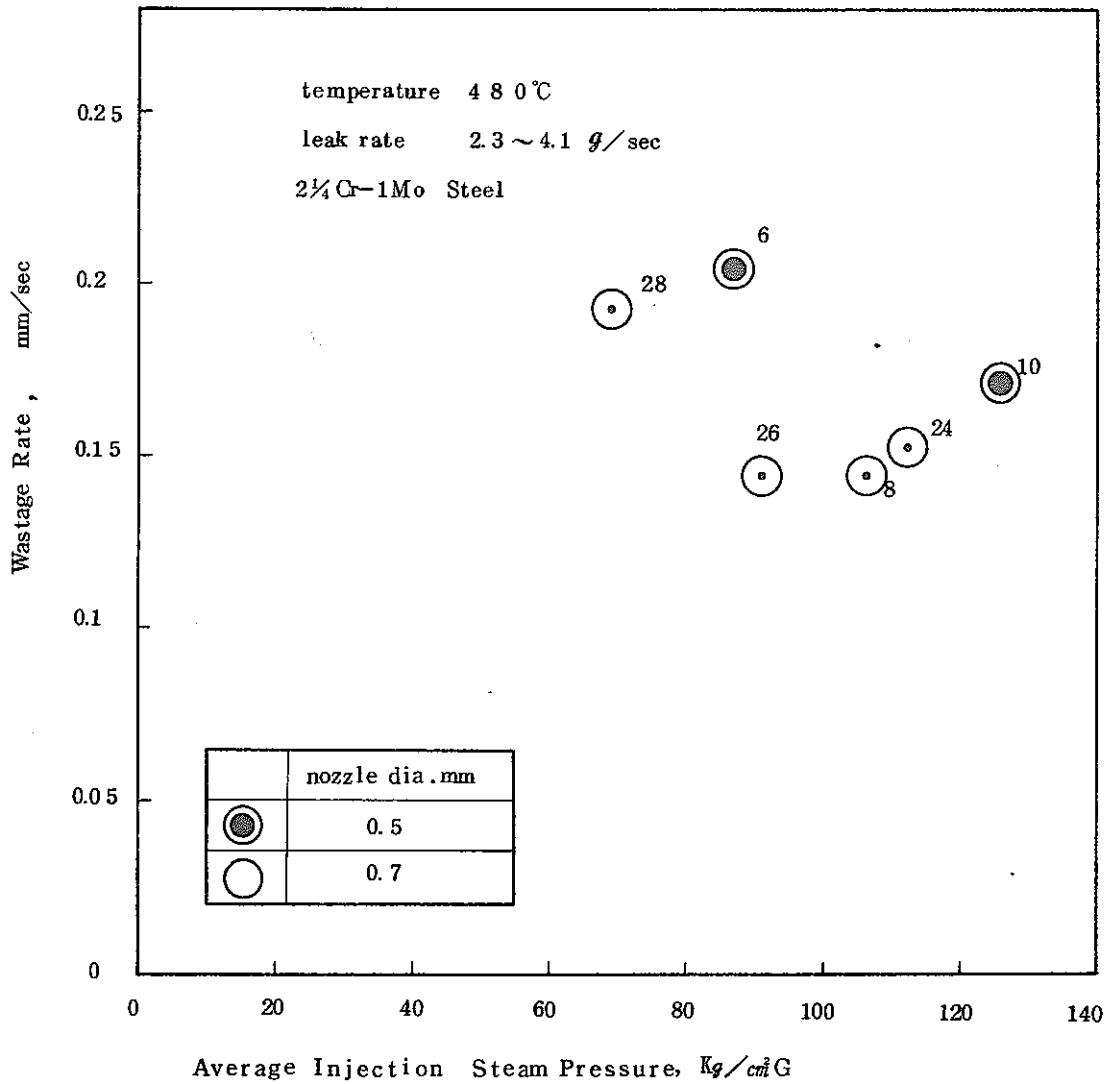


図 3 - 6 ウェステージ率に与える注入蒸気平均圧力の影響

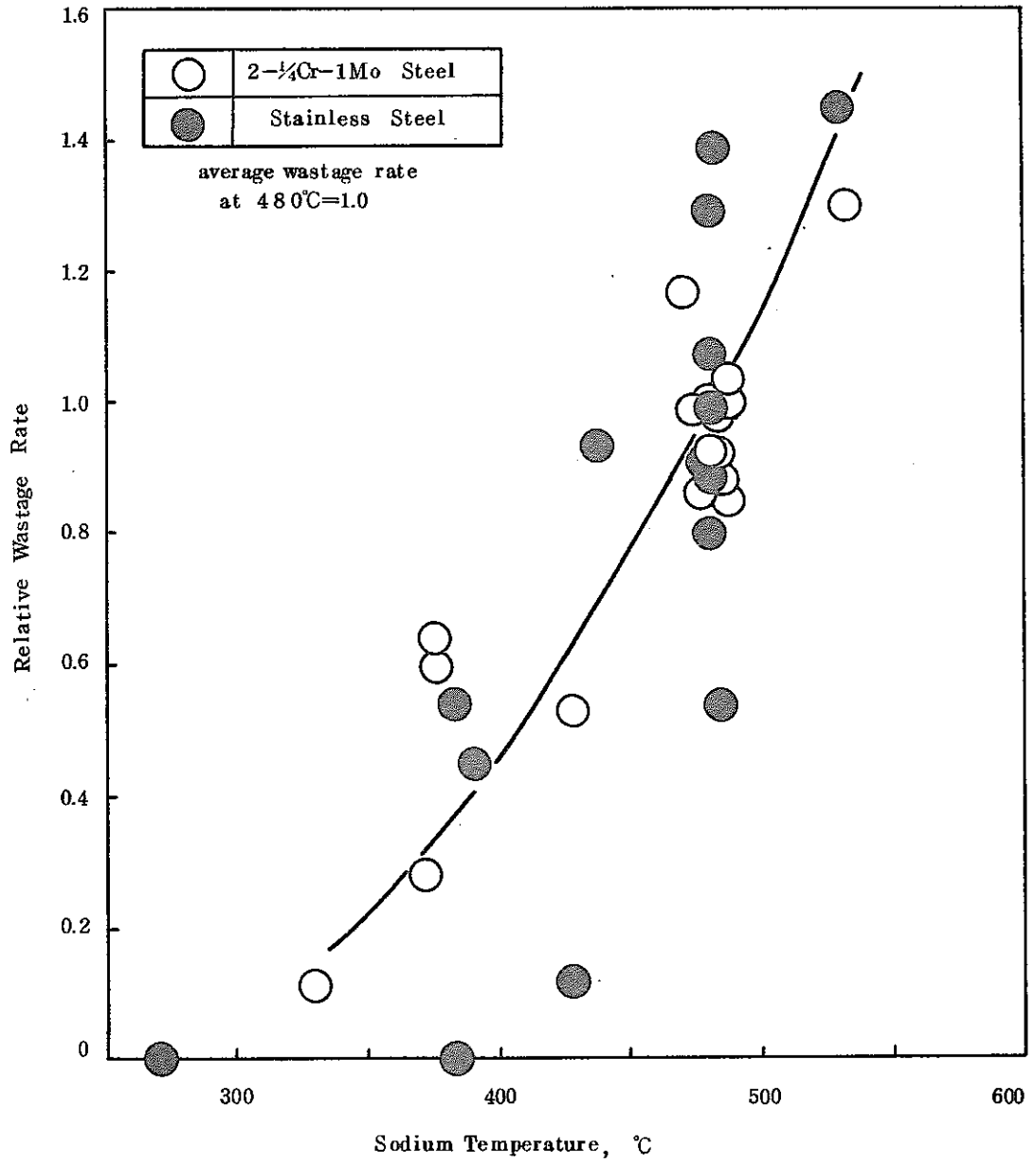


図 3-7 480°Cを基準にした相対ウェステージ率に対するNa温度の影響

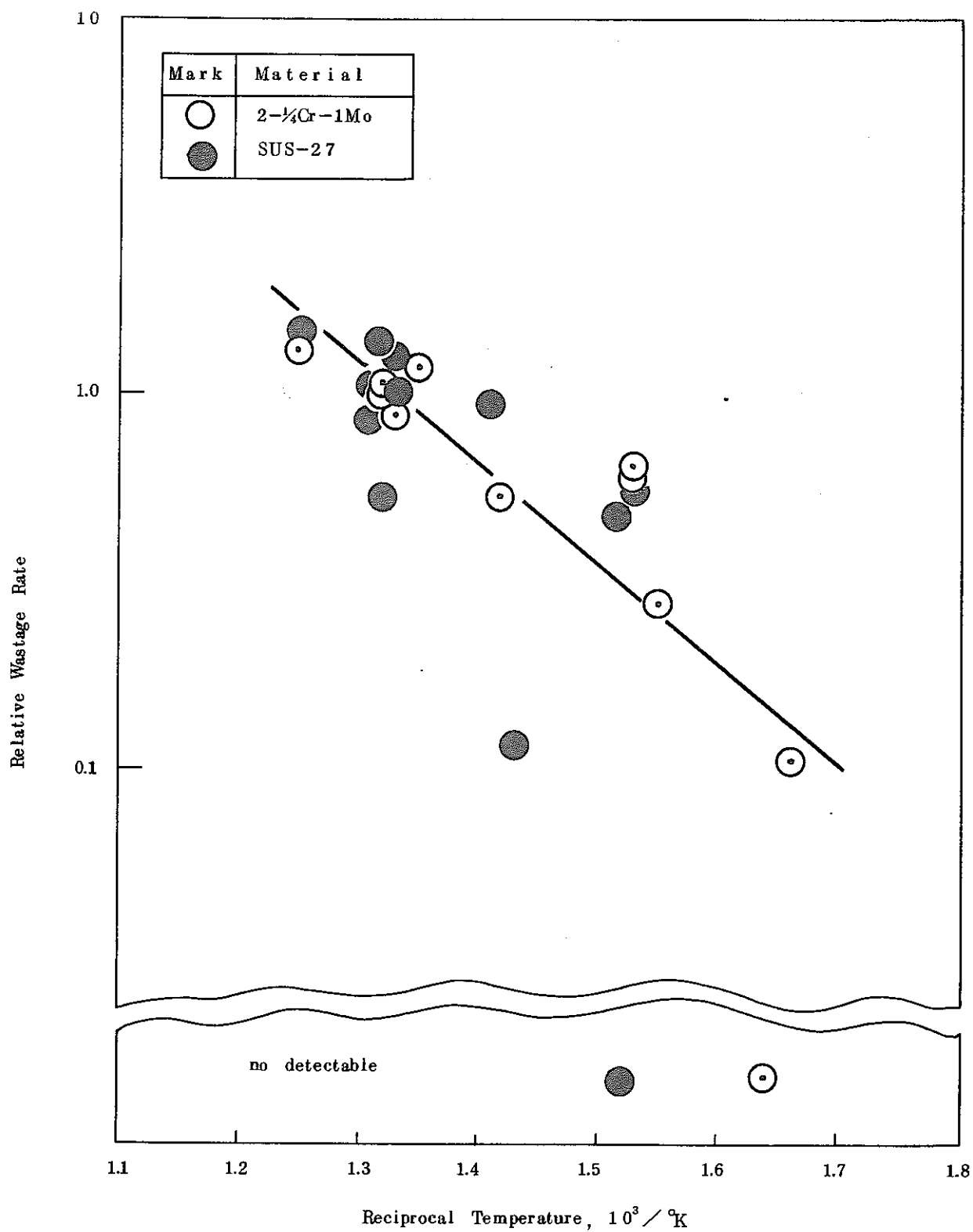


図 3 - 8 相対ウェステージ率と絶対温度の逆数の関係

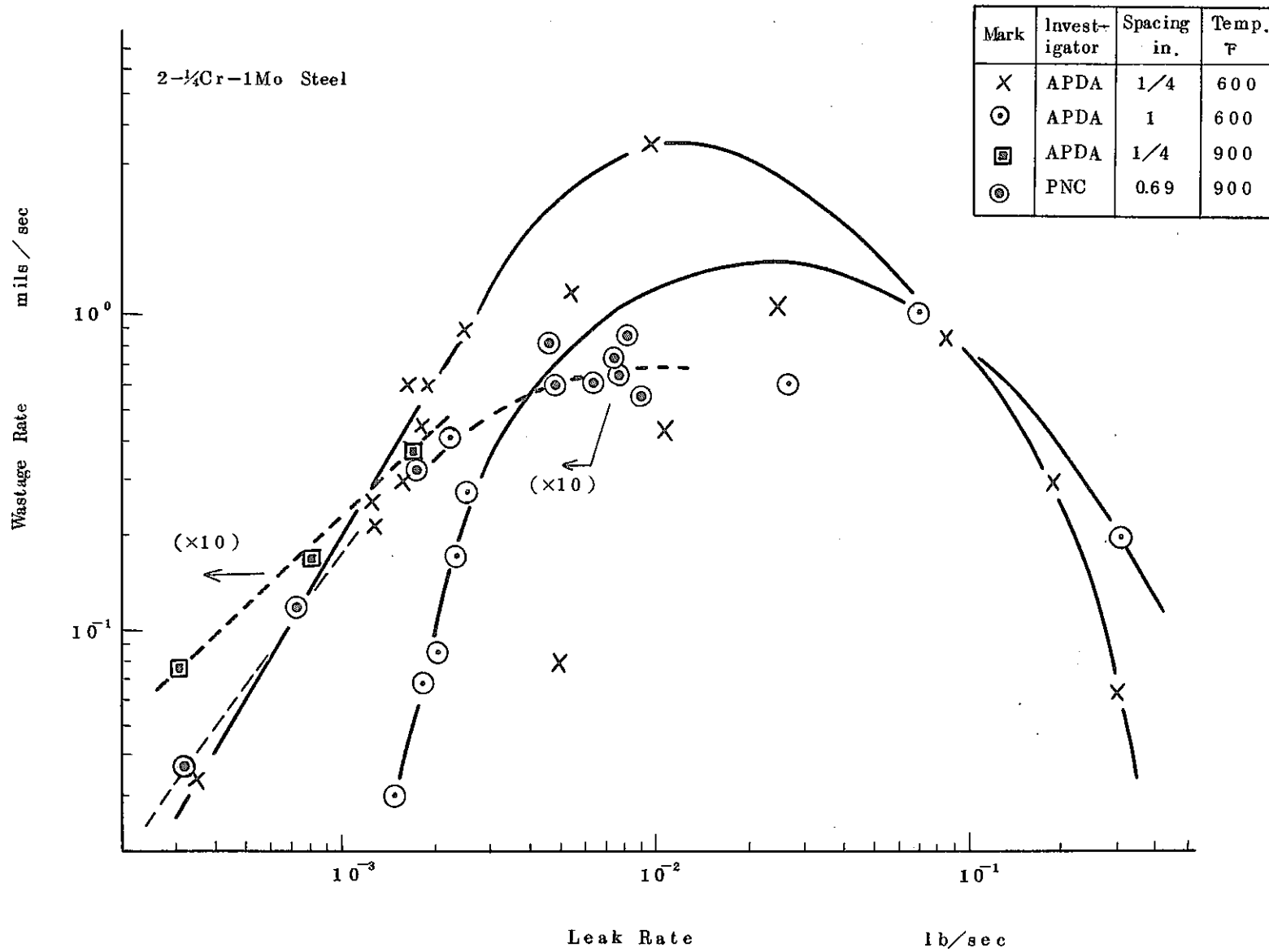


図3-9 温度の違いを考慮しておこなったAPDAのウェステージ率との比較

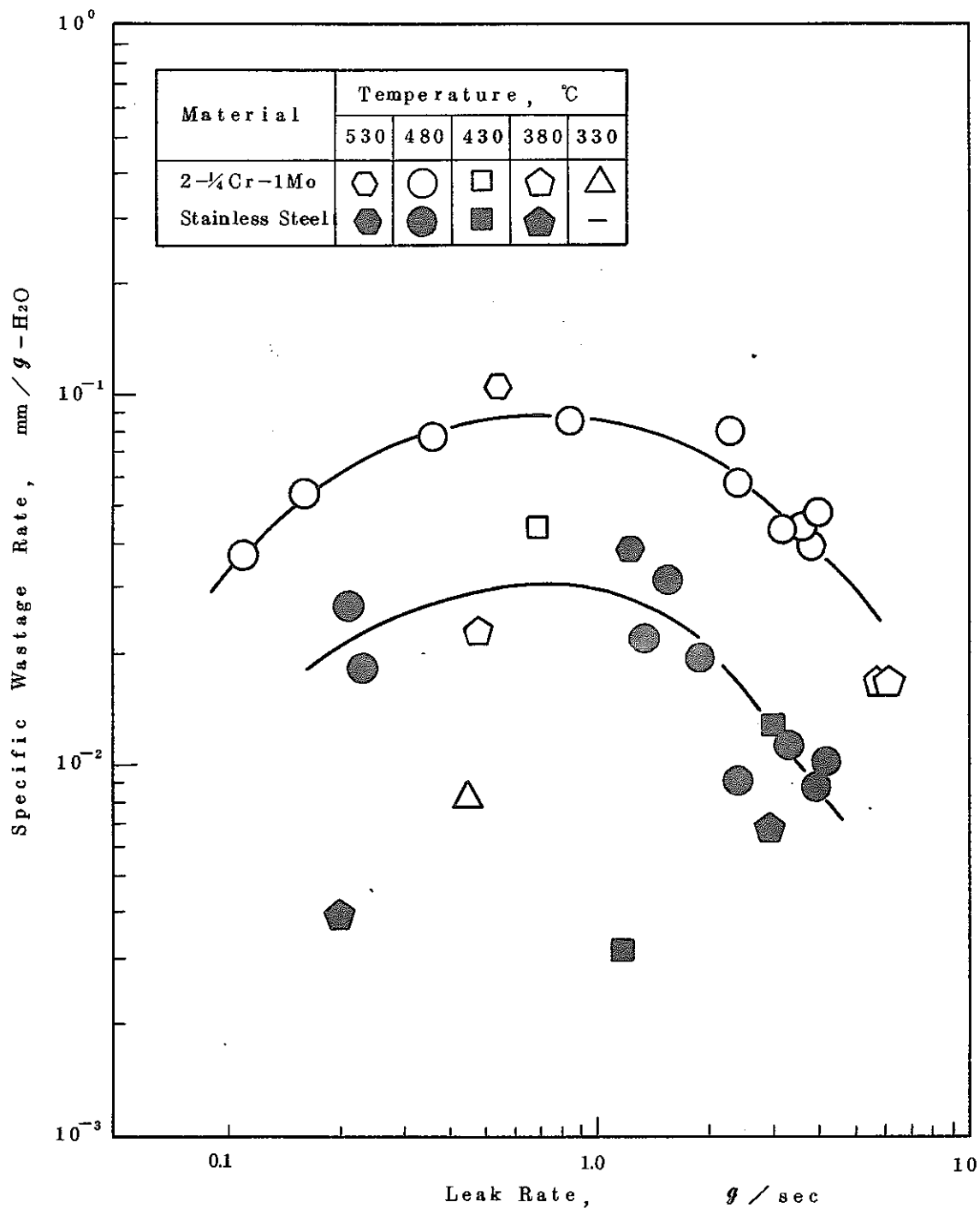


図3-10 損耗比とリーク率との関係

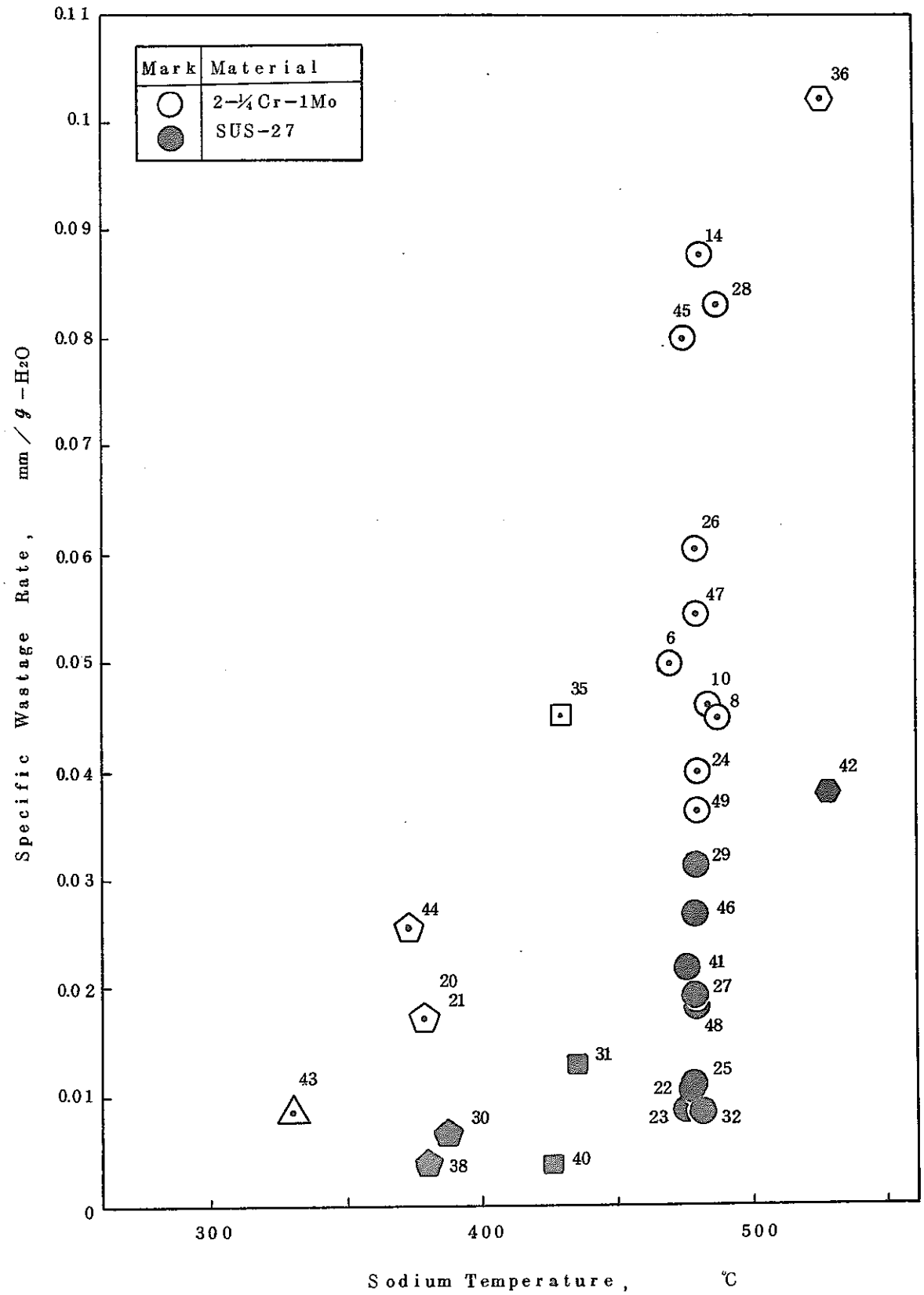


図3-1f. 損耗比のナトリウム温度による影響

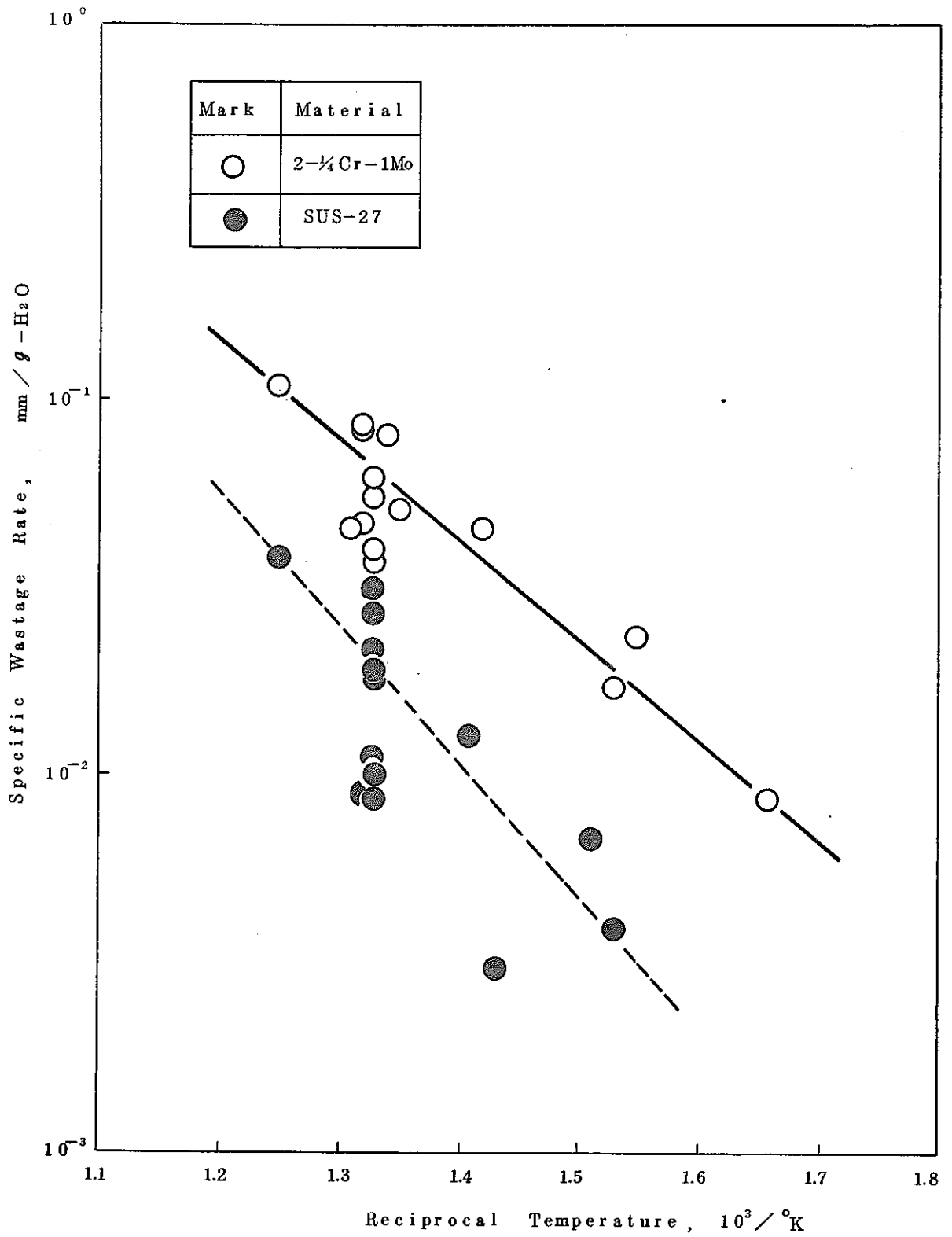


図 3 - 12 損耗比と絶対温度の逆数の関係

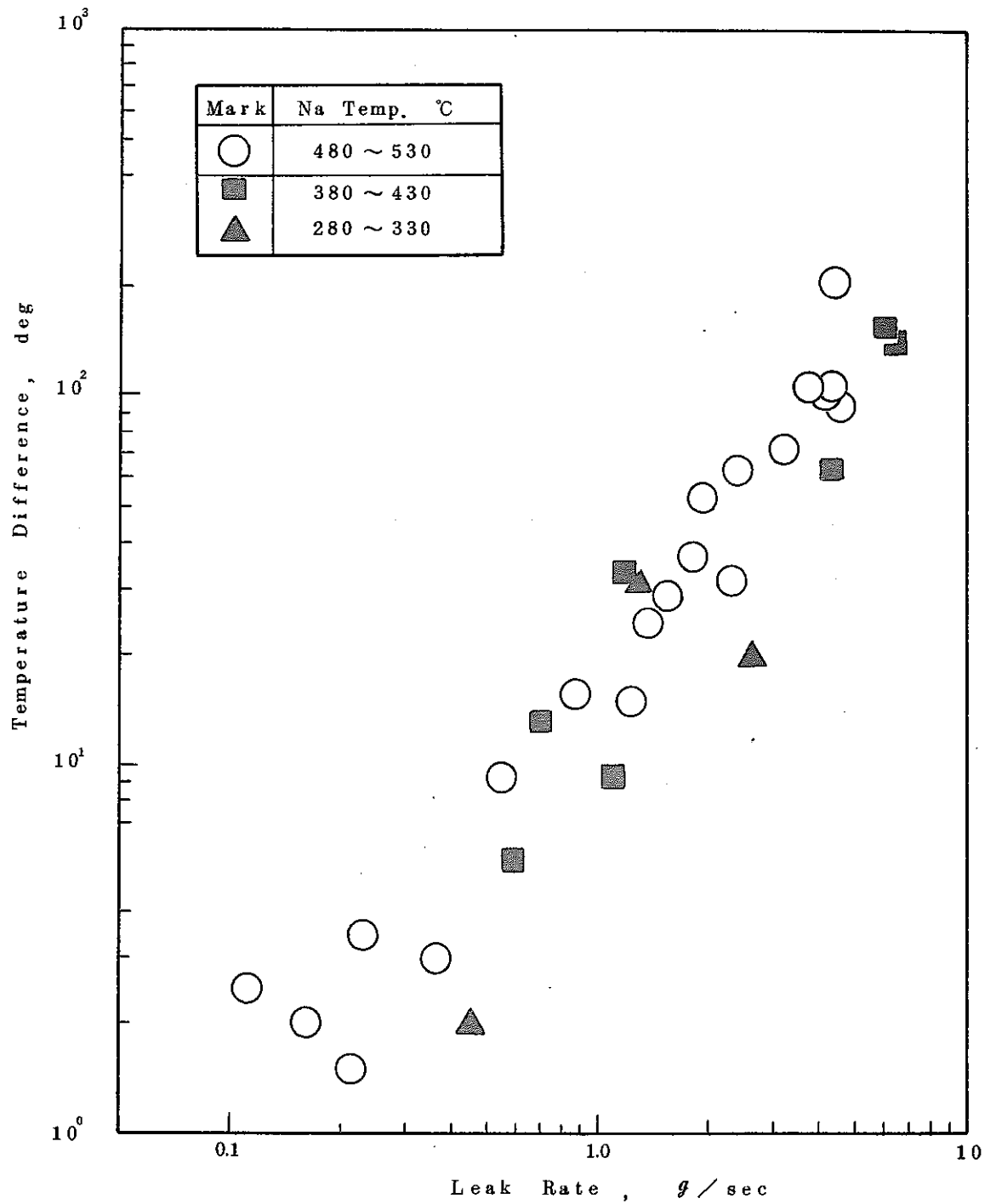


図 3-13 水反応時のダミー伝熱管上の温度変化

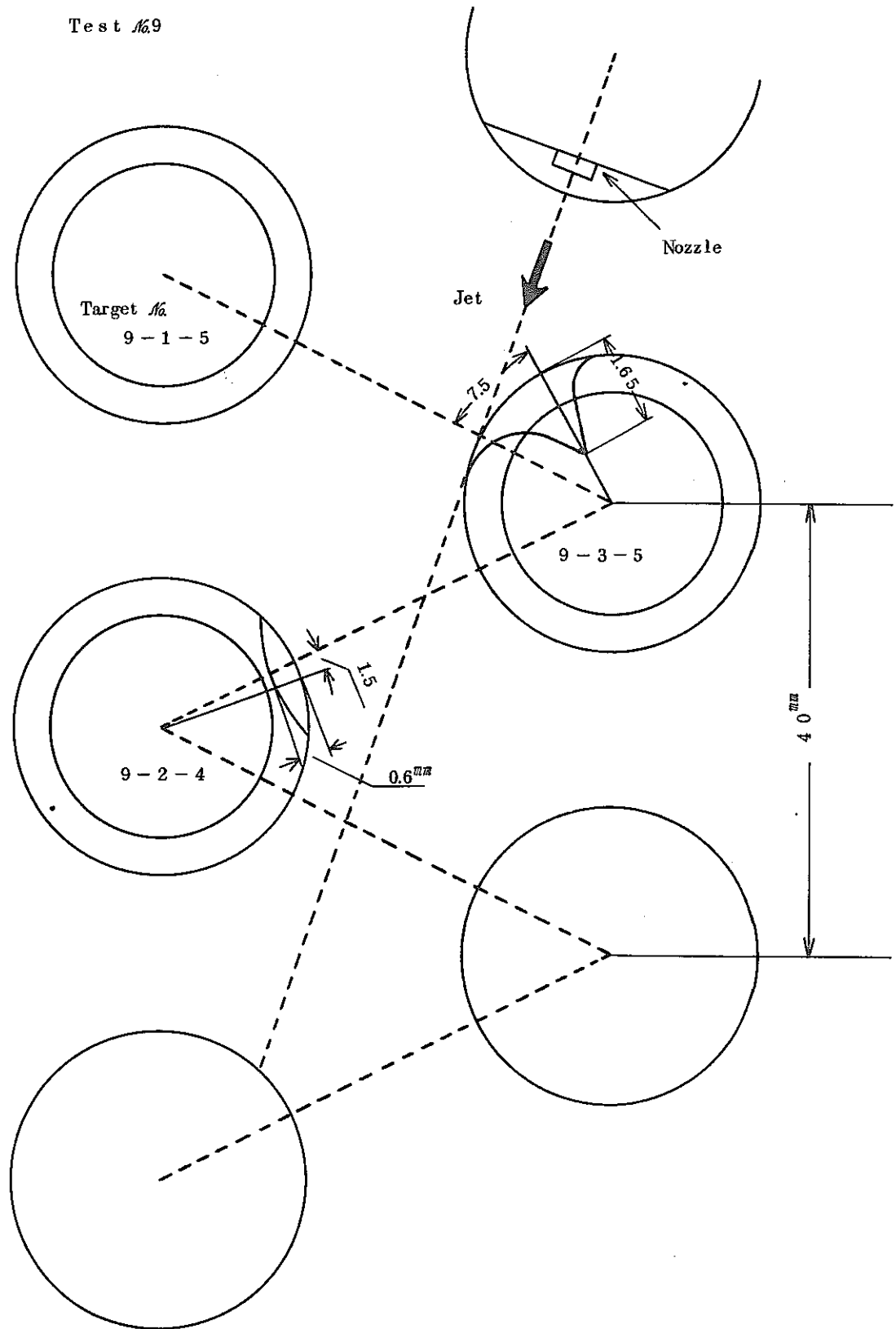


図 3-14 接線方向に噴出した場合のウェステージ分布 (1)

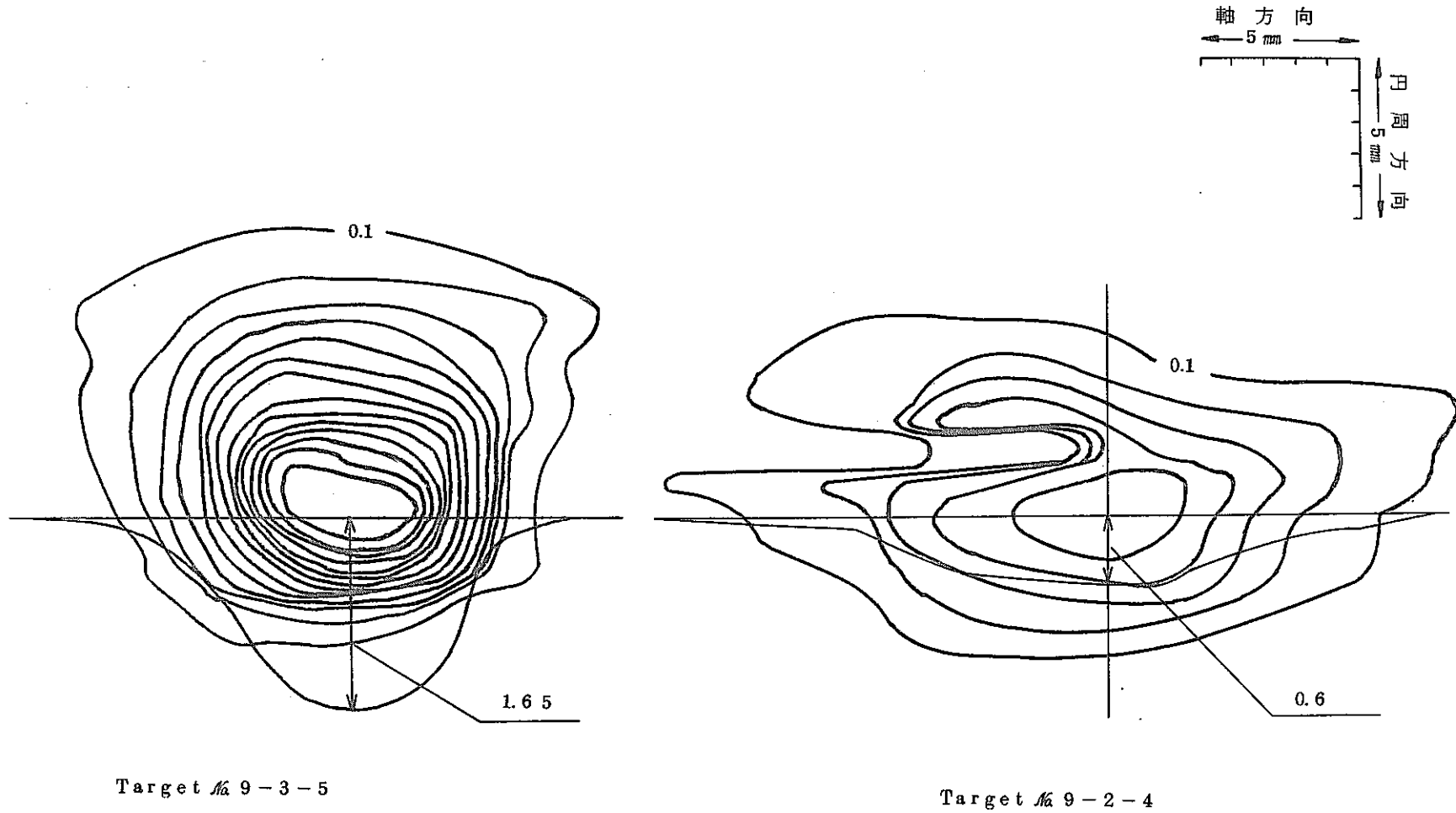


図 3-15 接線方向に噴出した場合のウェステージ分布 (2)

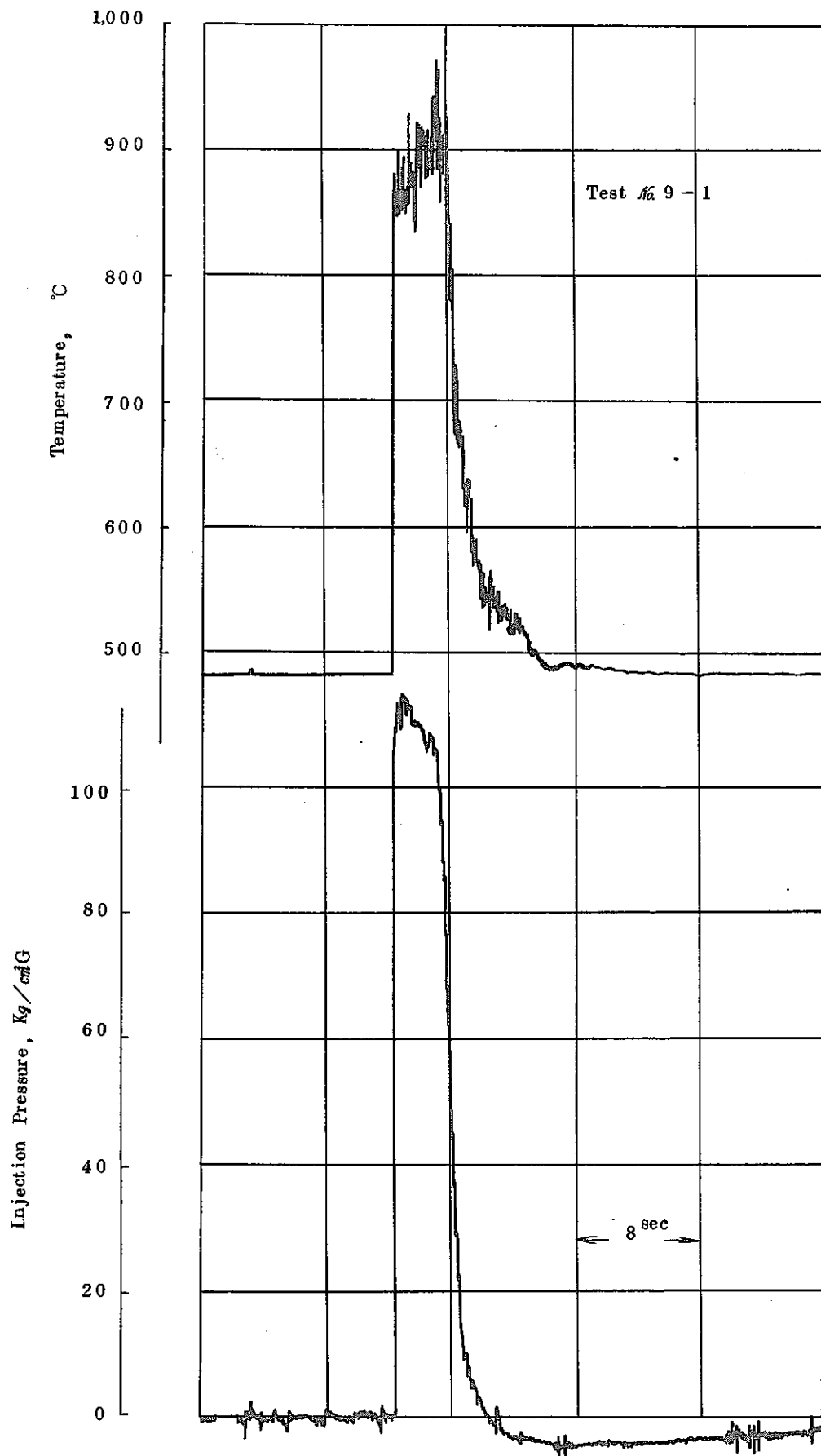


図 3-16 ターゲット管上の温度変化と水注入状況

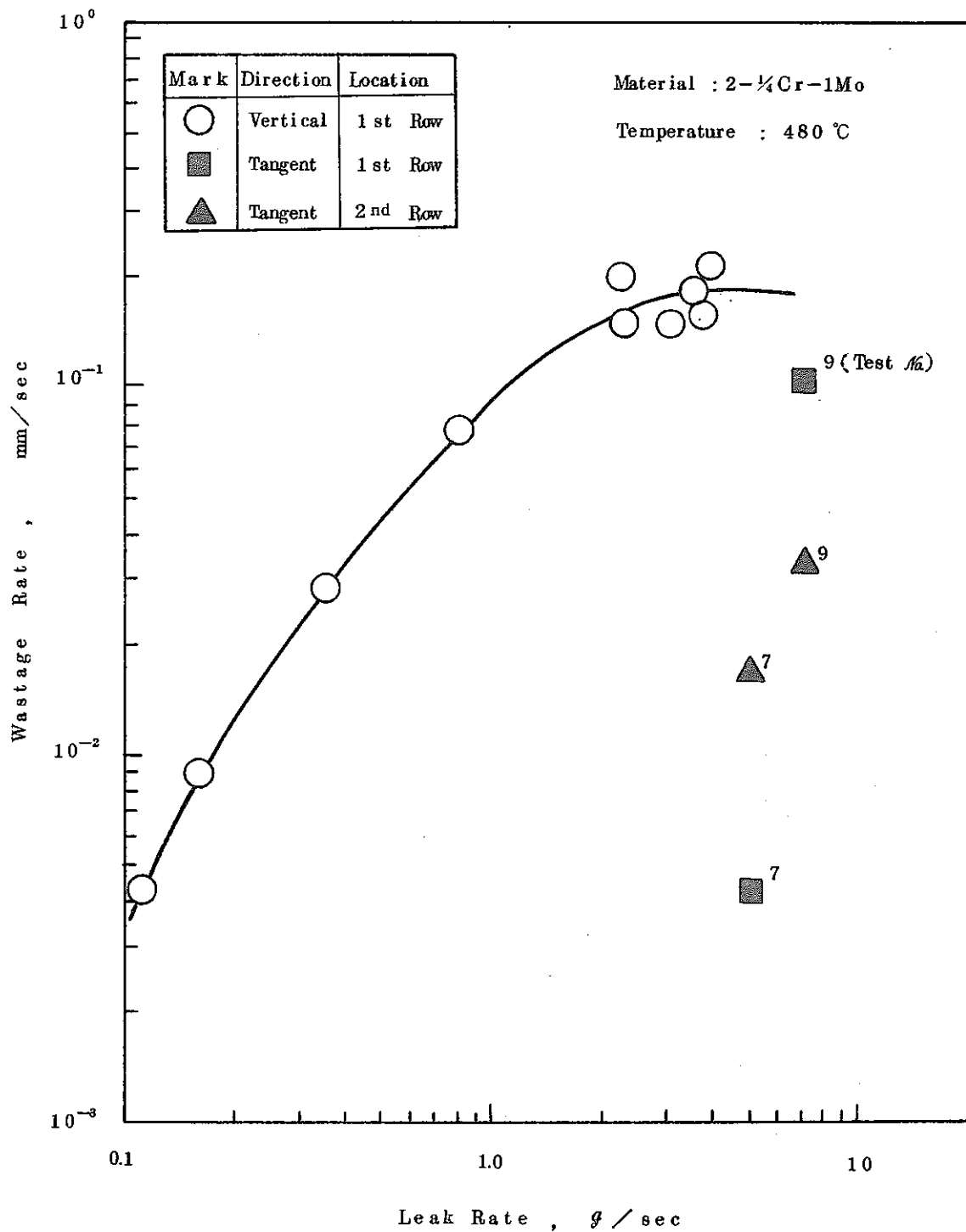


図 3 - 17 ターゲット管の接線方向に噴出した場合のウェステージ率

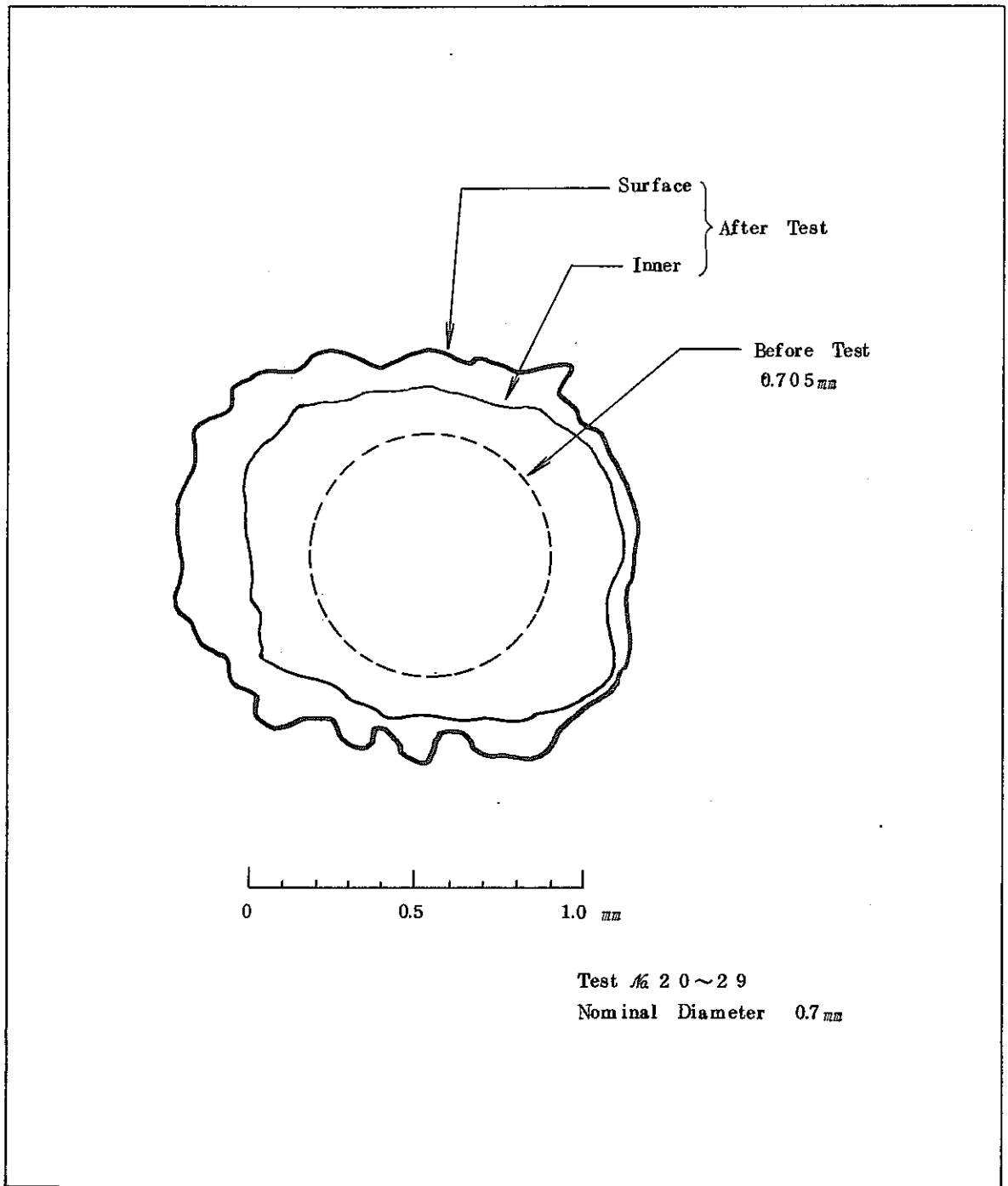


図 3 - 18 連続水反応試験後のノズルの拡大状態

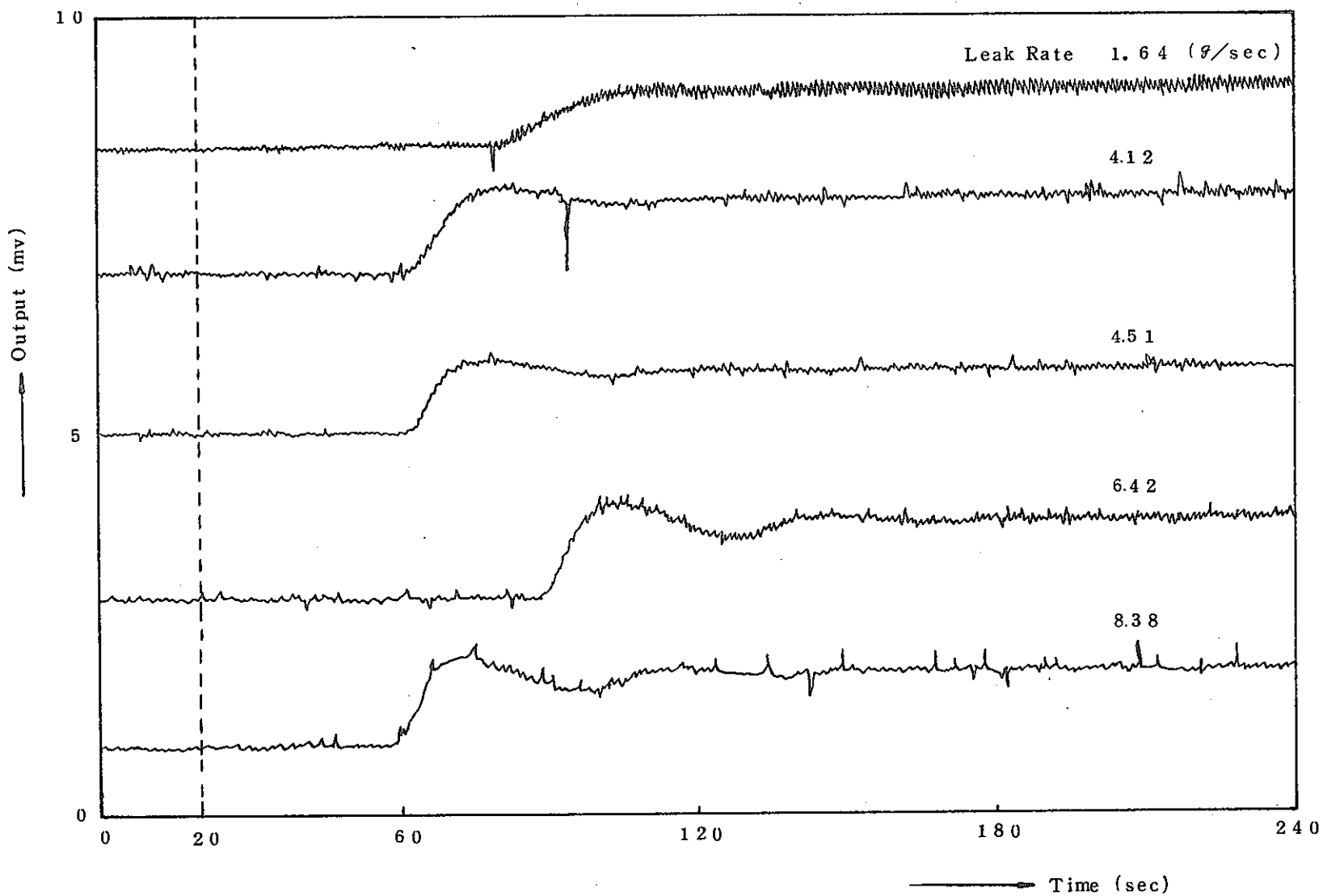


図4-1 ノーブル・ポンプの出力 (Ni 膜温度 550°C, 主循環 Na 温度 480°C, 水注入時刻は 20 秒)

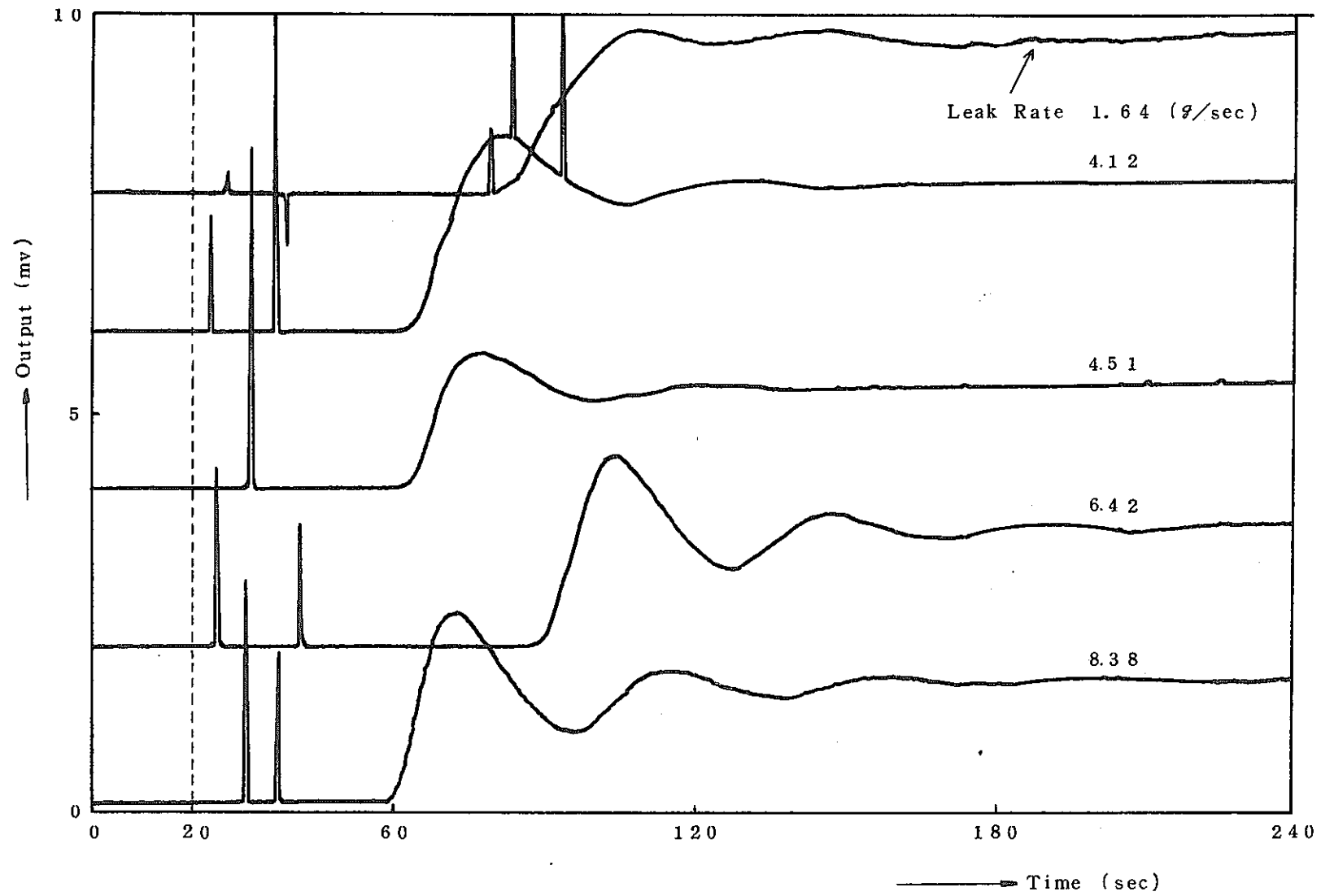


図4-2 質量分析器の出力 (Ni膜温度550℃, 主循環Na温度480℃, 水注入時刻は20秒)

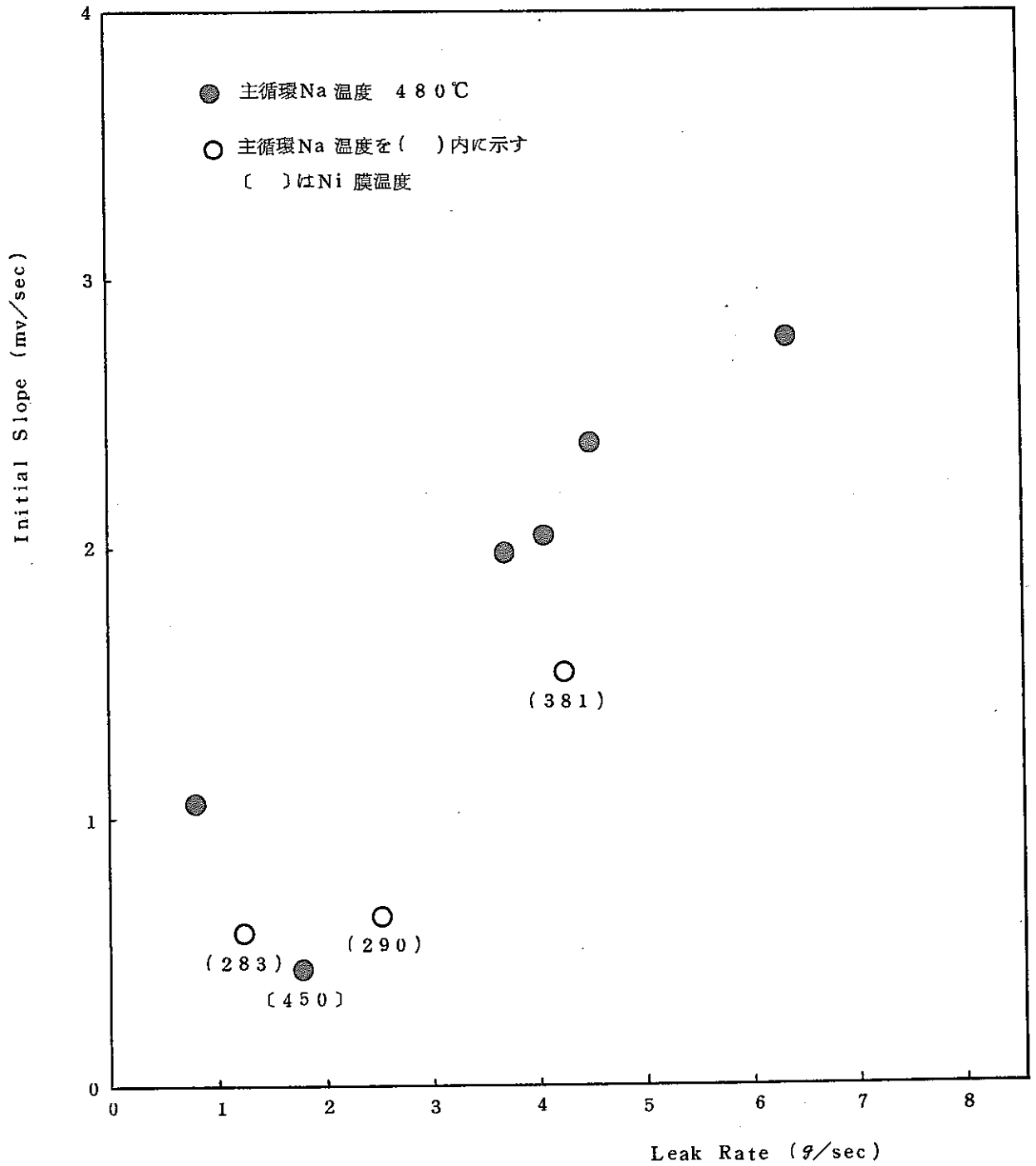


図4-3 水のリーク率とノーブル・ポンプ出力の初期勾配
(Ni膜温度550℃)

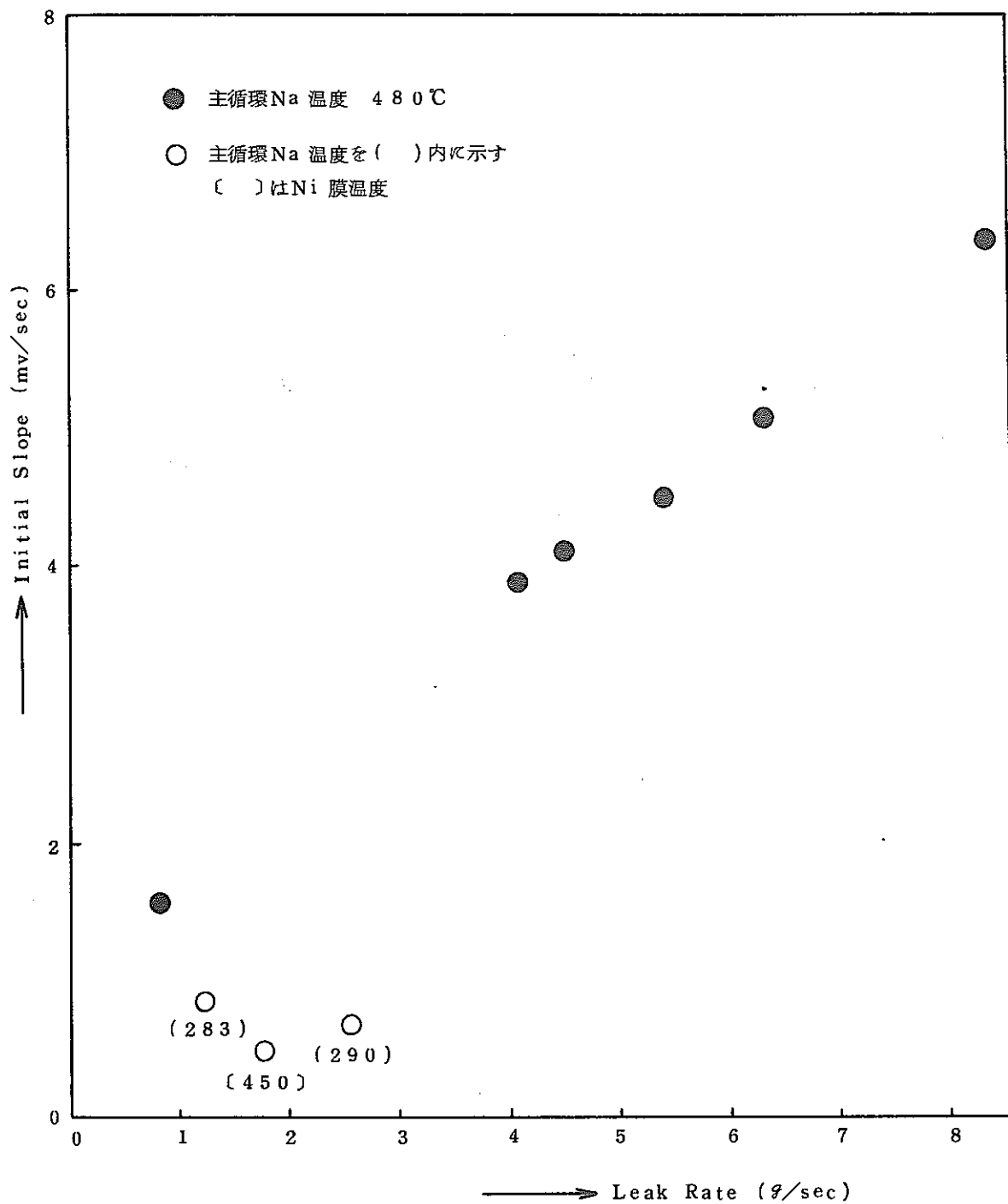


図4-4 水のリーク率と質量分析器出力の初期勾配
 (Ni 膜温度 550℃)

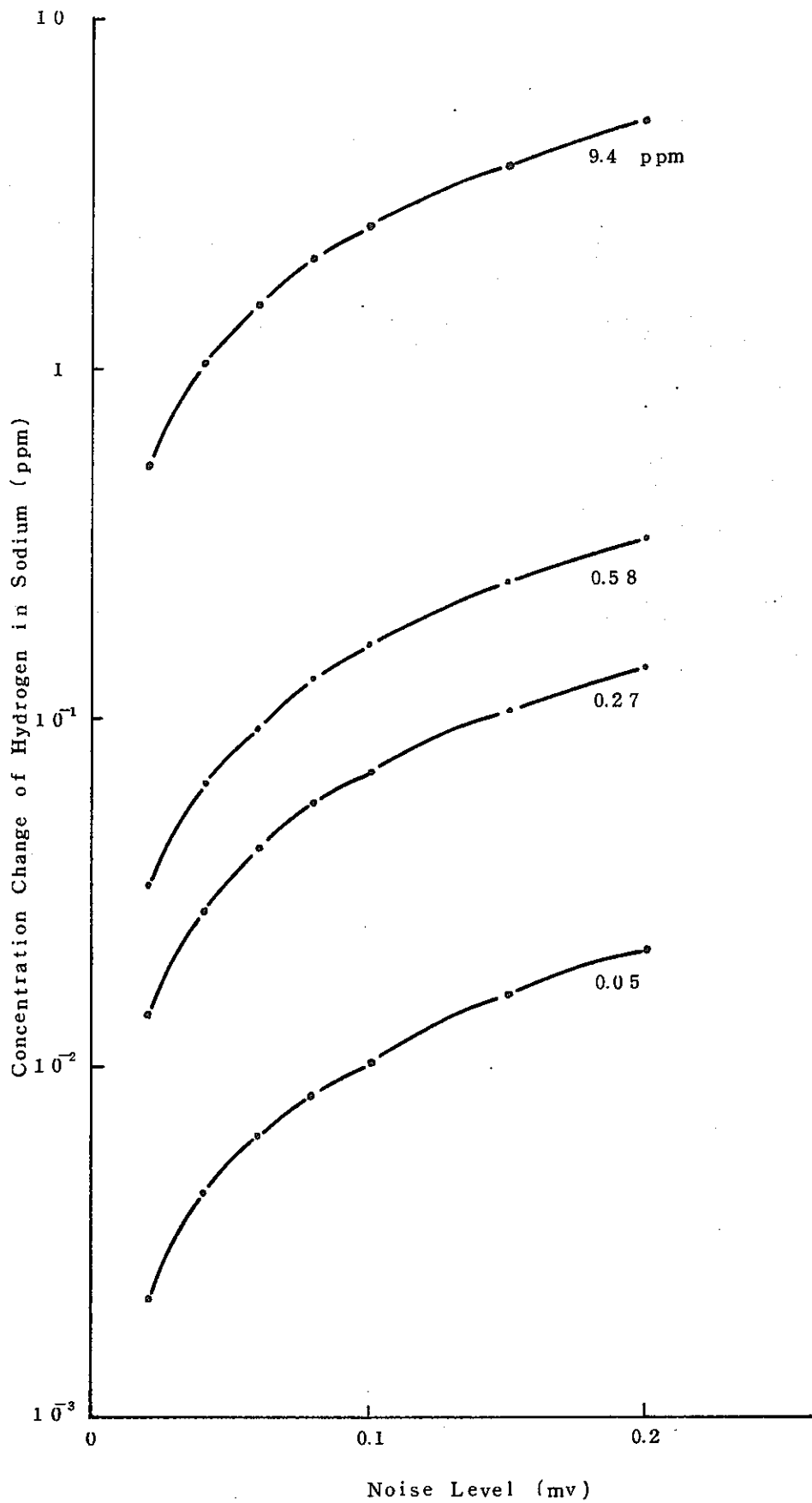


図4-5 ノイズレベル(ノーブル・ポンプ)に相当するNa中水素濃度変化の計算値。パラメータは水注入前のNa中水素濃度

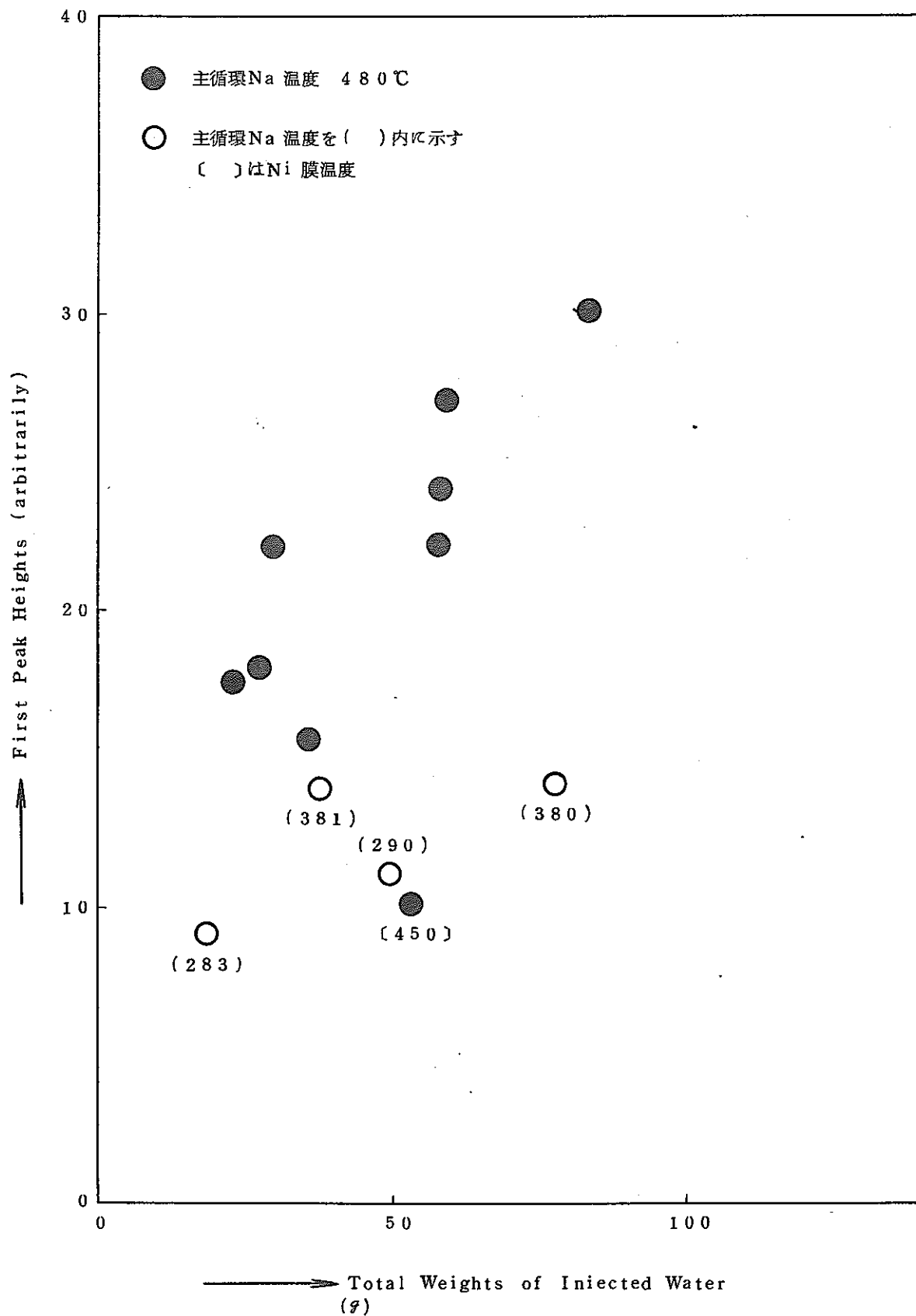


図4-6 全注水量と第一ピーク高さ(ノーブル・ポンプ)
(Ni膜温度550℃)

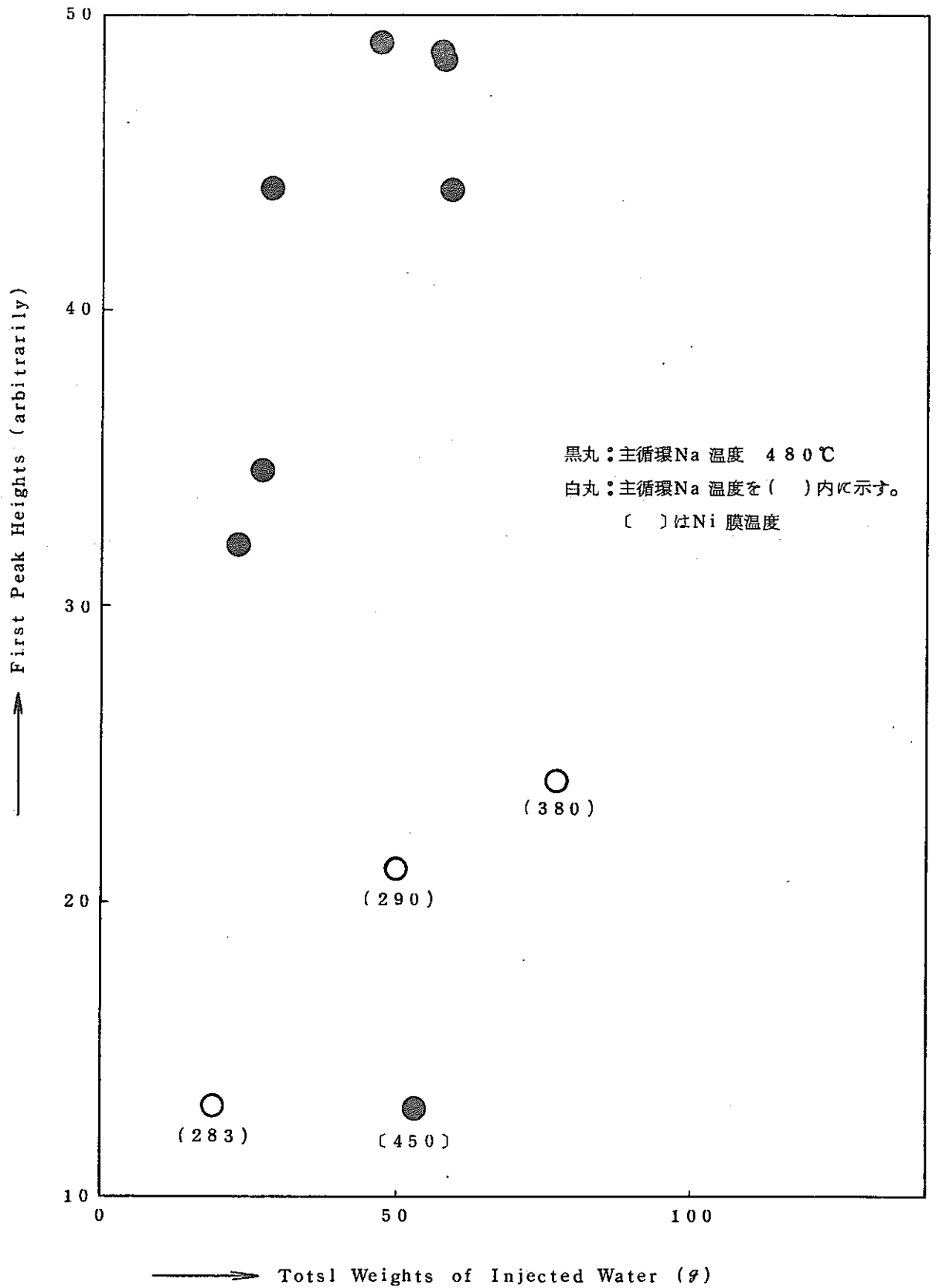


図4-7 全注水量と第一ピーク高さ (質量分析器)
 (Ni 膜温度 550℃)

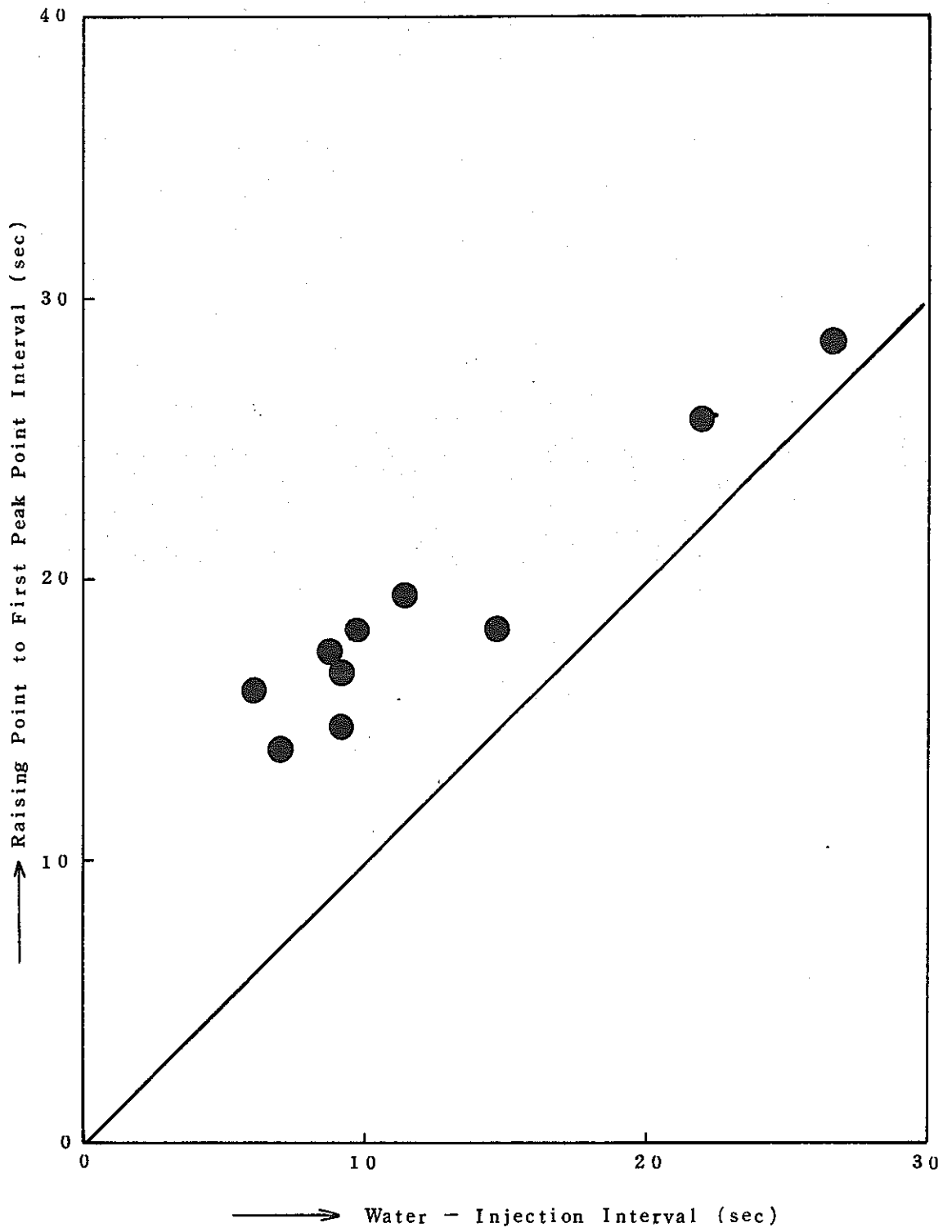


図4-8 注水時間とスペクトル(質量分析器)の立上り点から第一ピーク点までの時間の関係

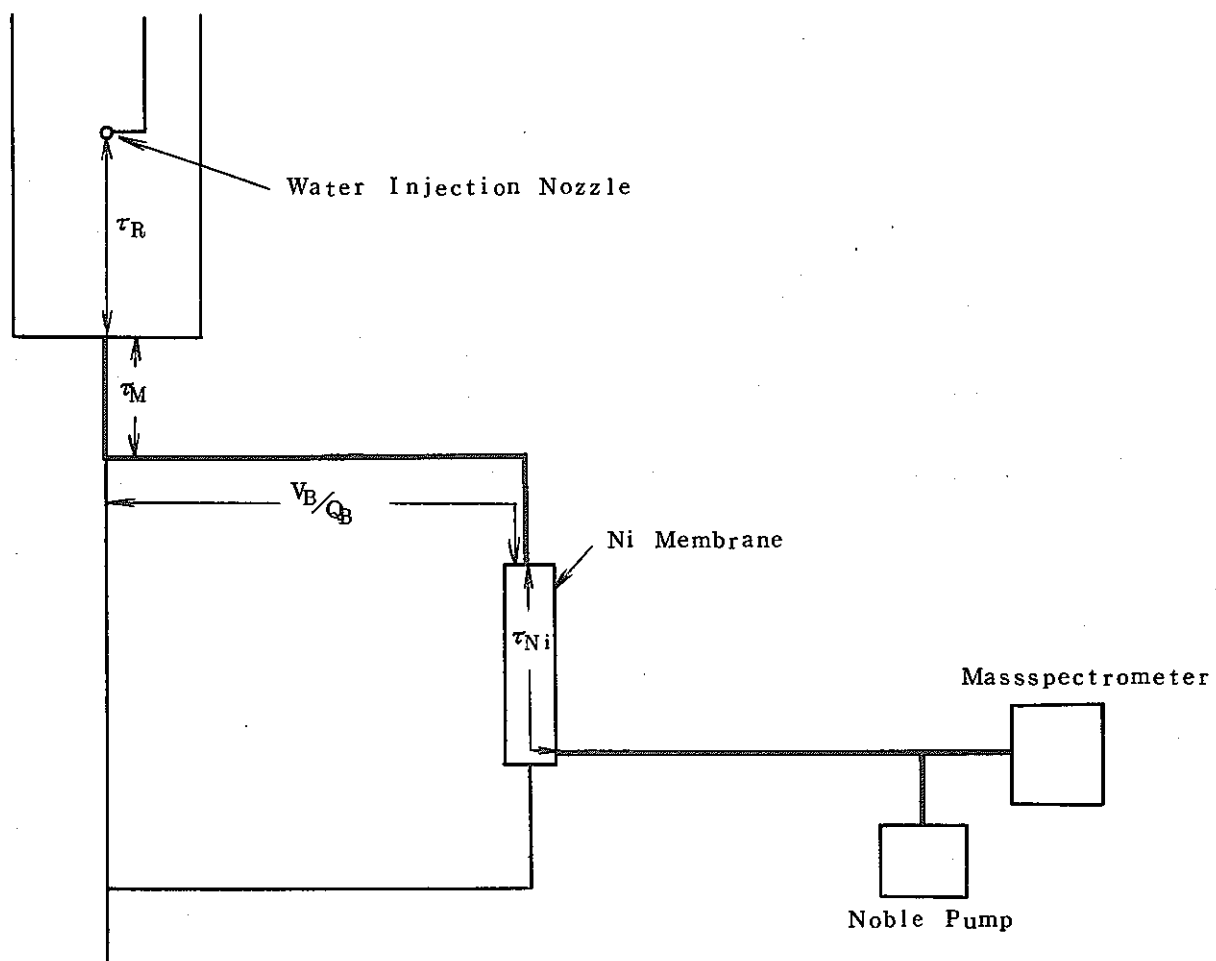


图 4-9 Na 中水素検出系

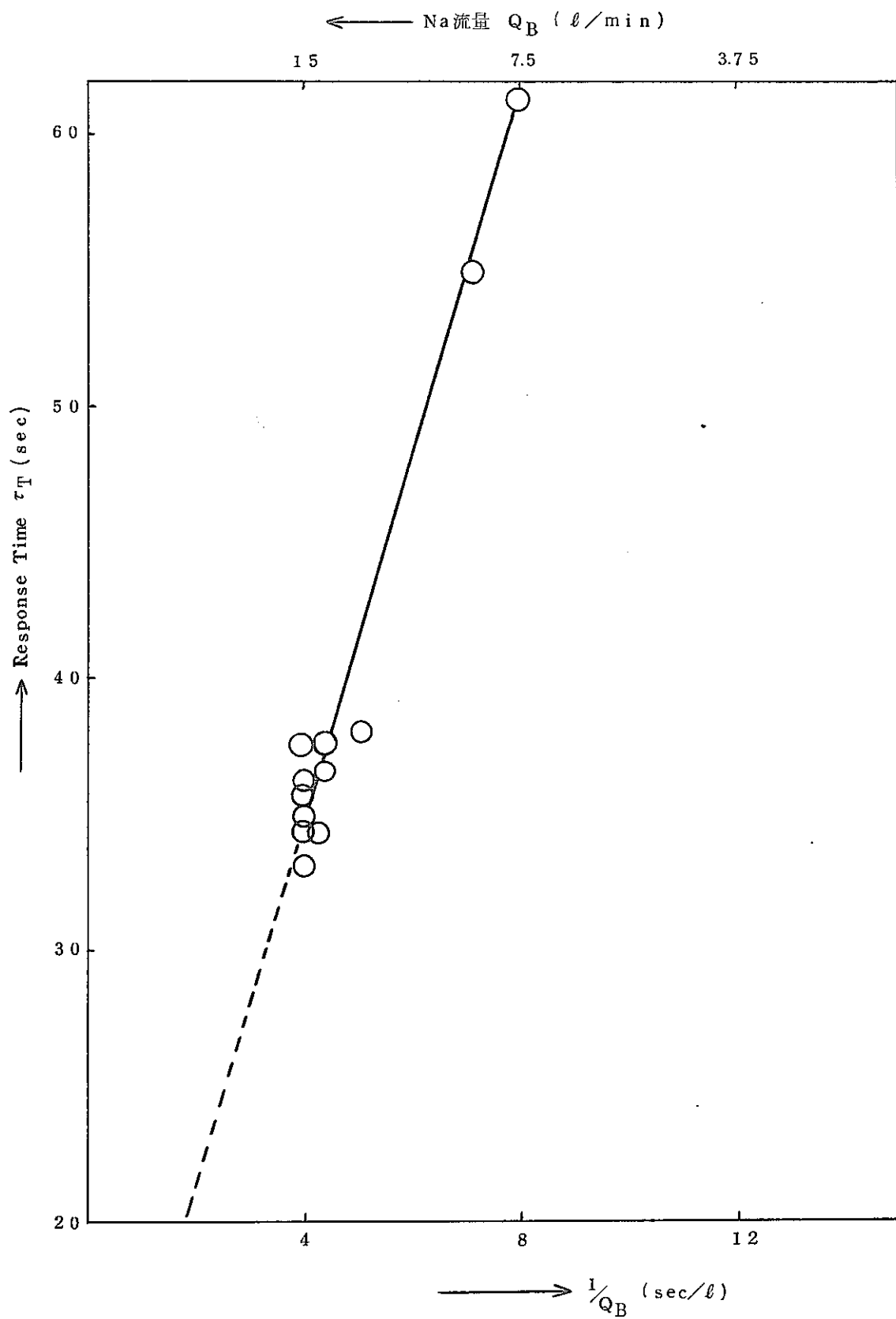


図 4 - 10 Na 流量の逆数と Na 中水素検出計の応答時間

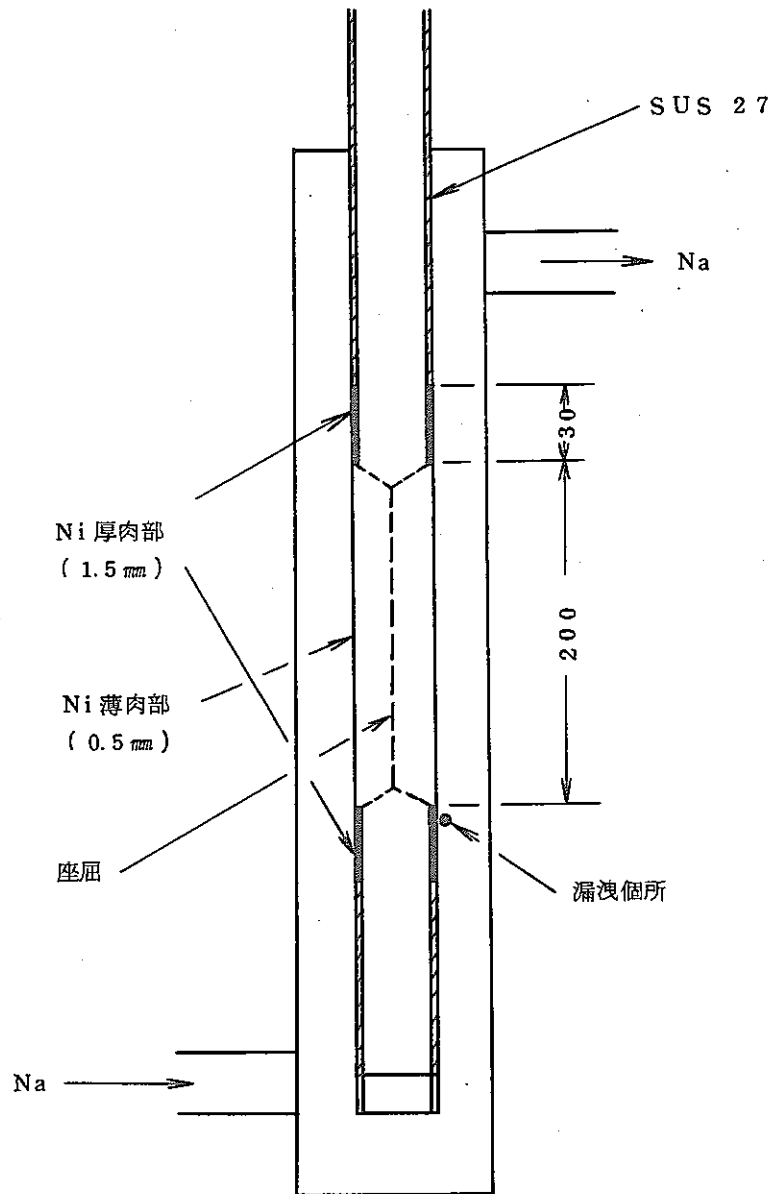


図 4 - 11 Ni 膜本体近傍の構造

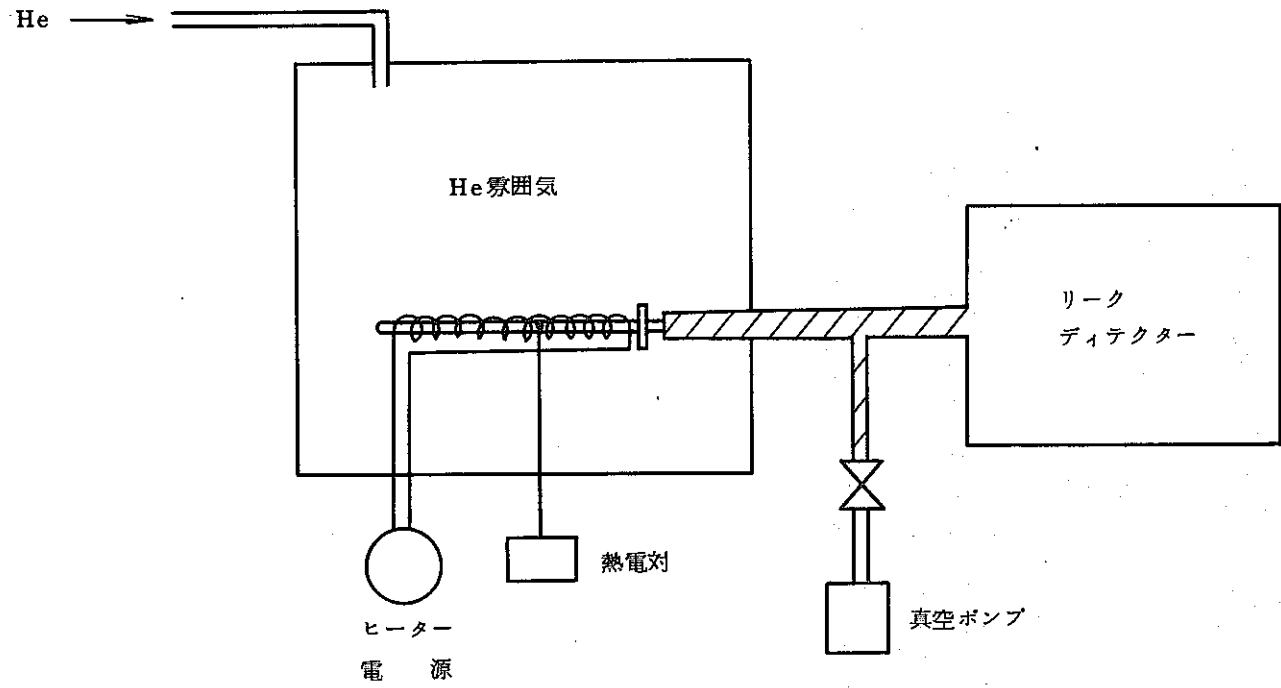


図 4-12 高温ヘリウム漏洩試験装置

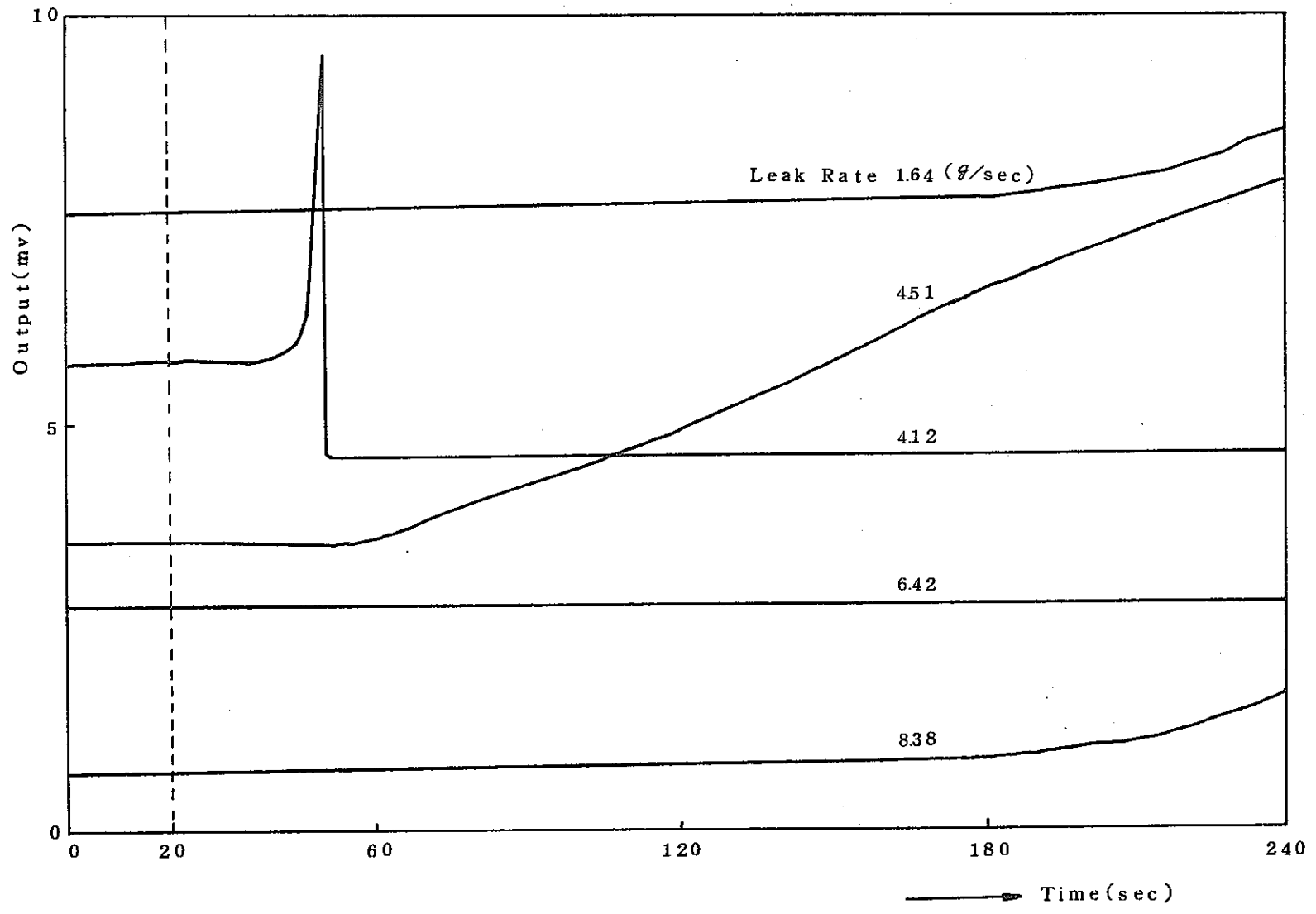


図 5-1 Na ベーパトラップ改造前のカバーガス中水素検出器の出力 (Pd 膜温度 450℃, 主循環 Na 温度 480℃, 水注入時刻は 20 秒)

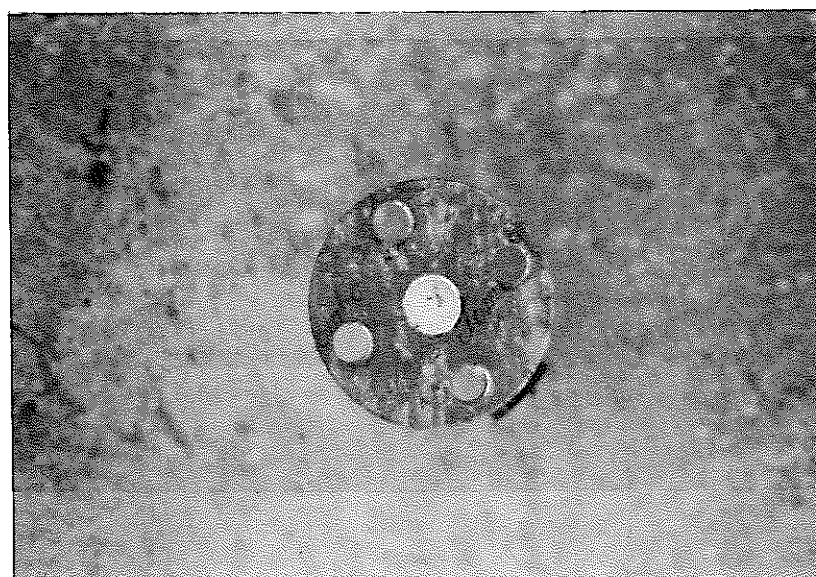
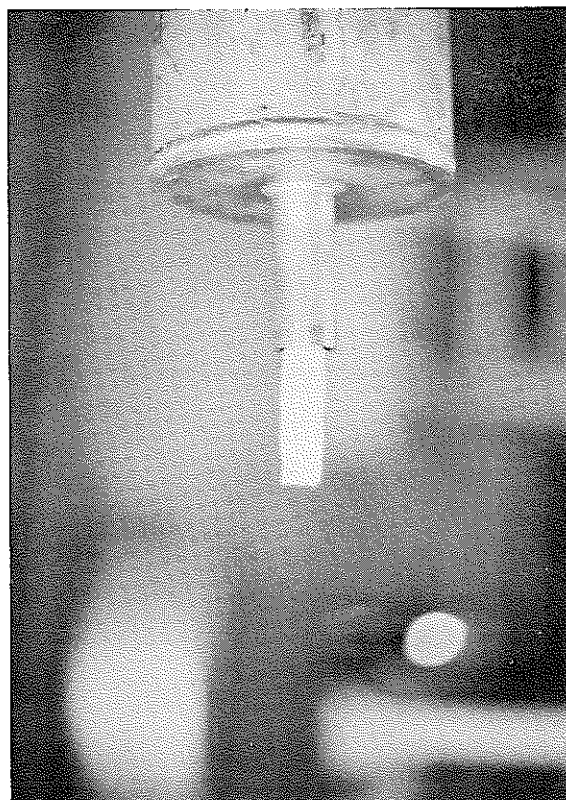


図5-2 Na 付着写真, (上) Na ベーパトラップ
入口配管, (下) バルブ

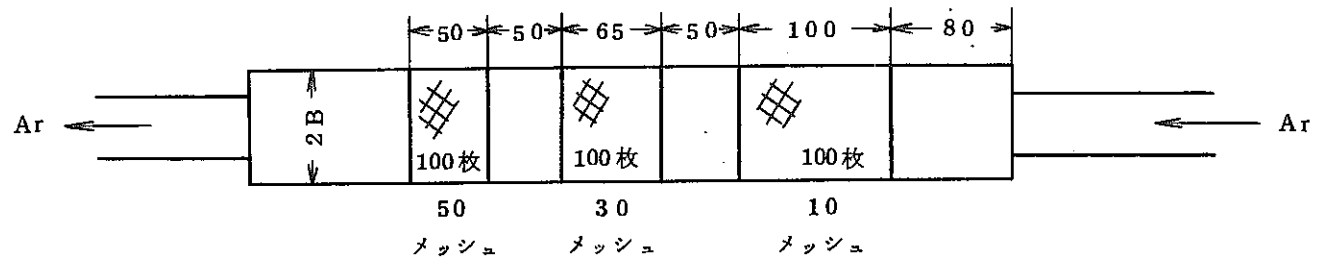
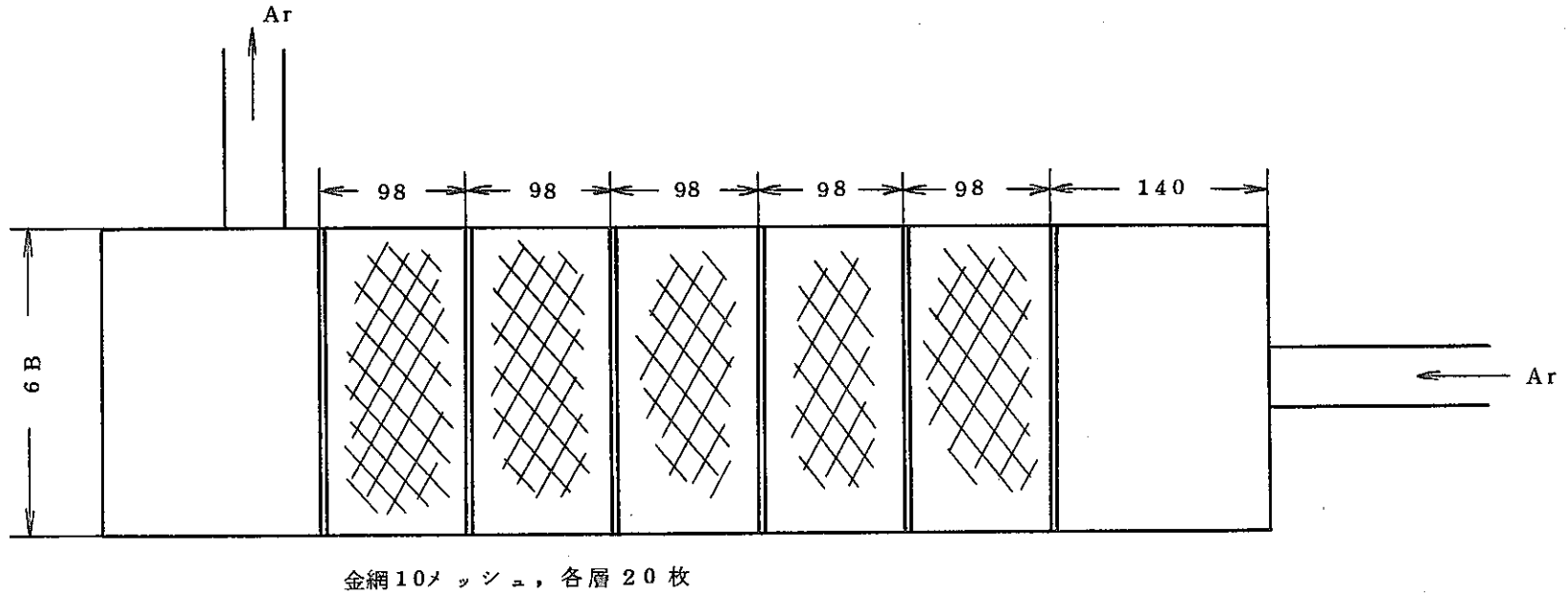


図5-3 Naベーパーラップの従来型(上)と改造型(下)

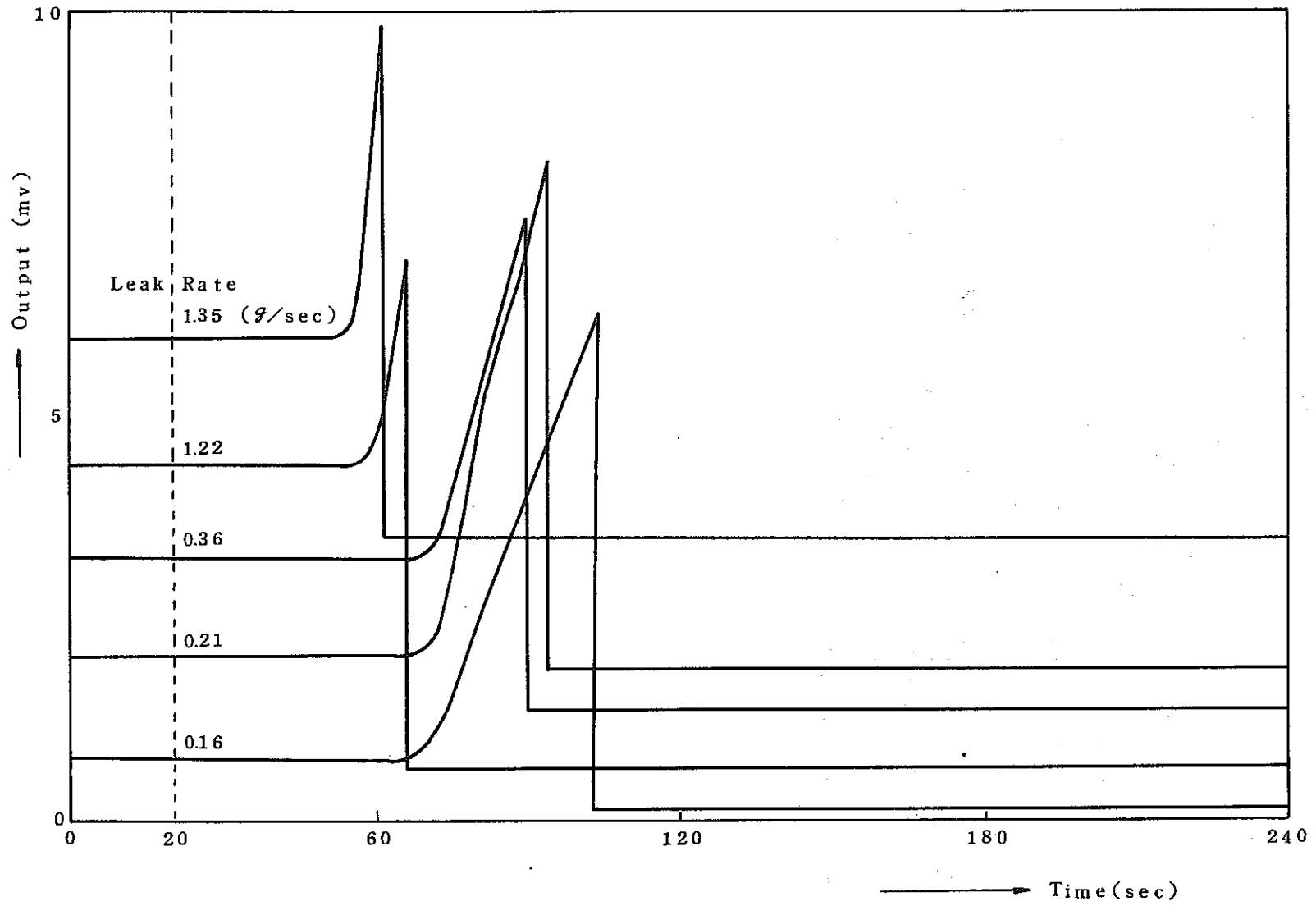


図 5-4 Na ベーパトラップ改造後のカバーガス中水素検出器の出力 (Pb 膜温度 450℃, 主循環 Na 温度 480℃, 水注入時刻は 20 秒)

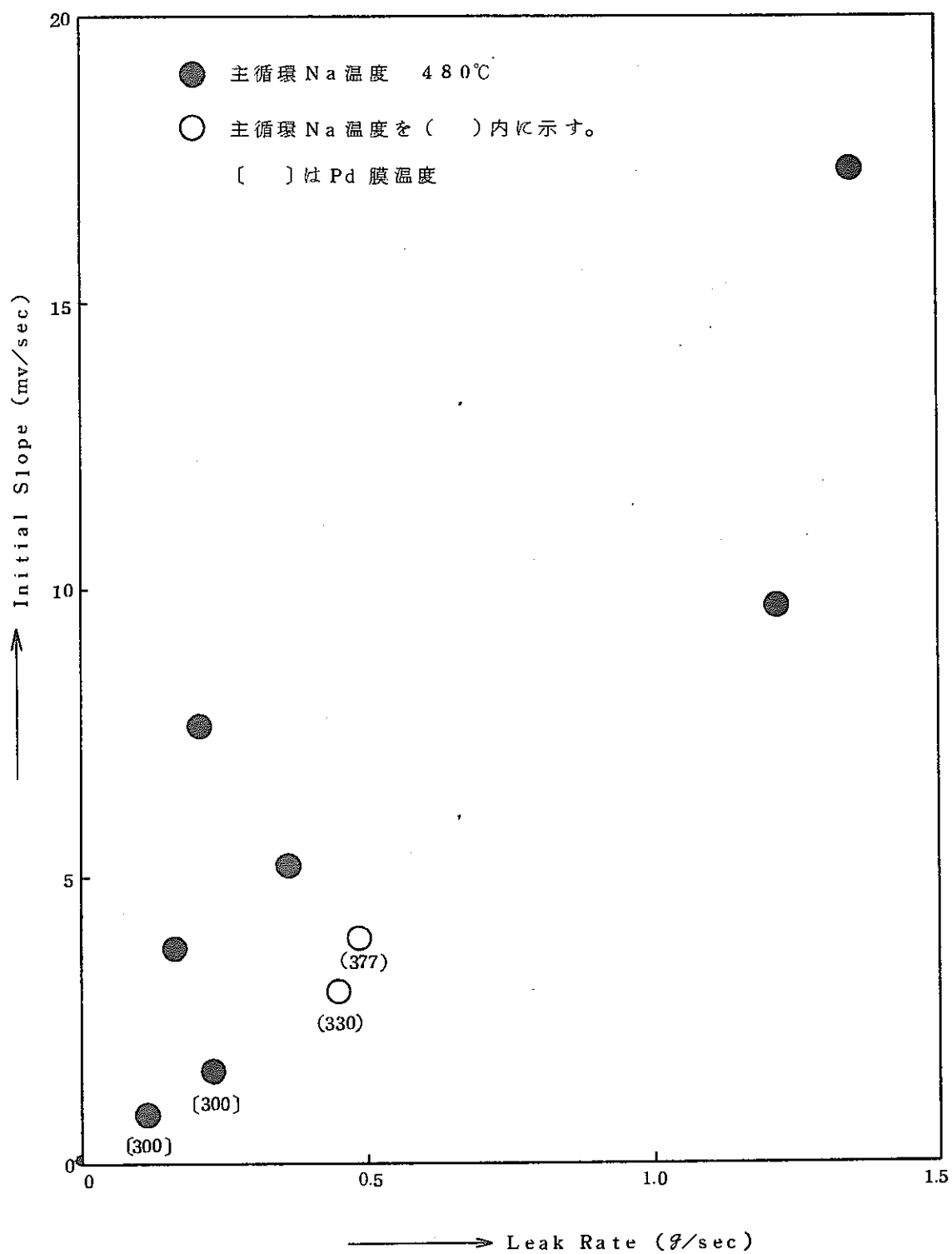


図 5-5 水のリーク率とカバーガス中水素検出器の初期勾配 (Pd 膜温度 450°C)

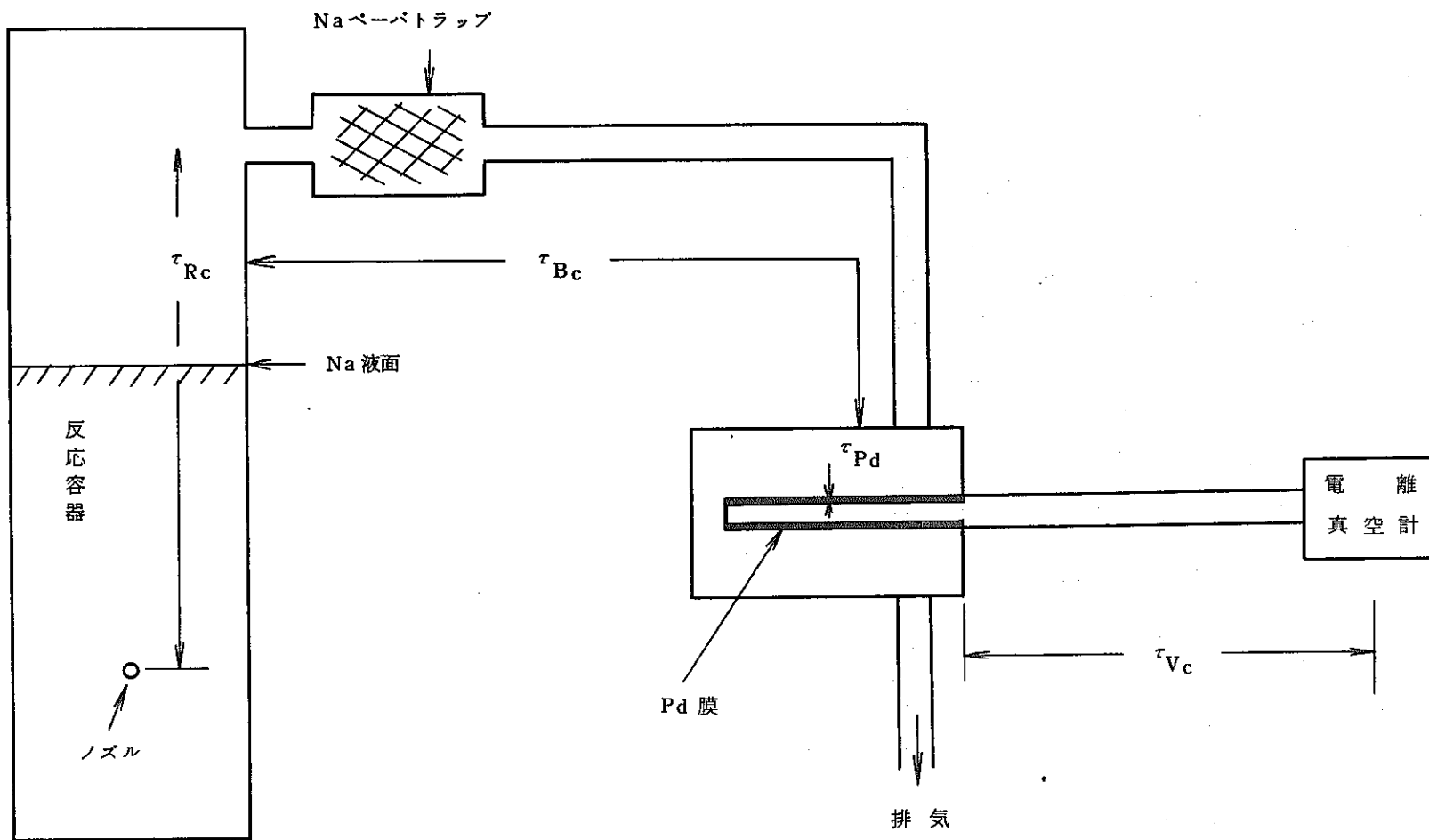


図 5-6 Ar 中水素検出計のフローシート

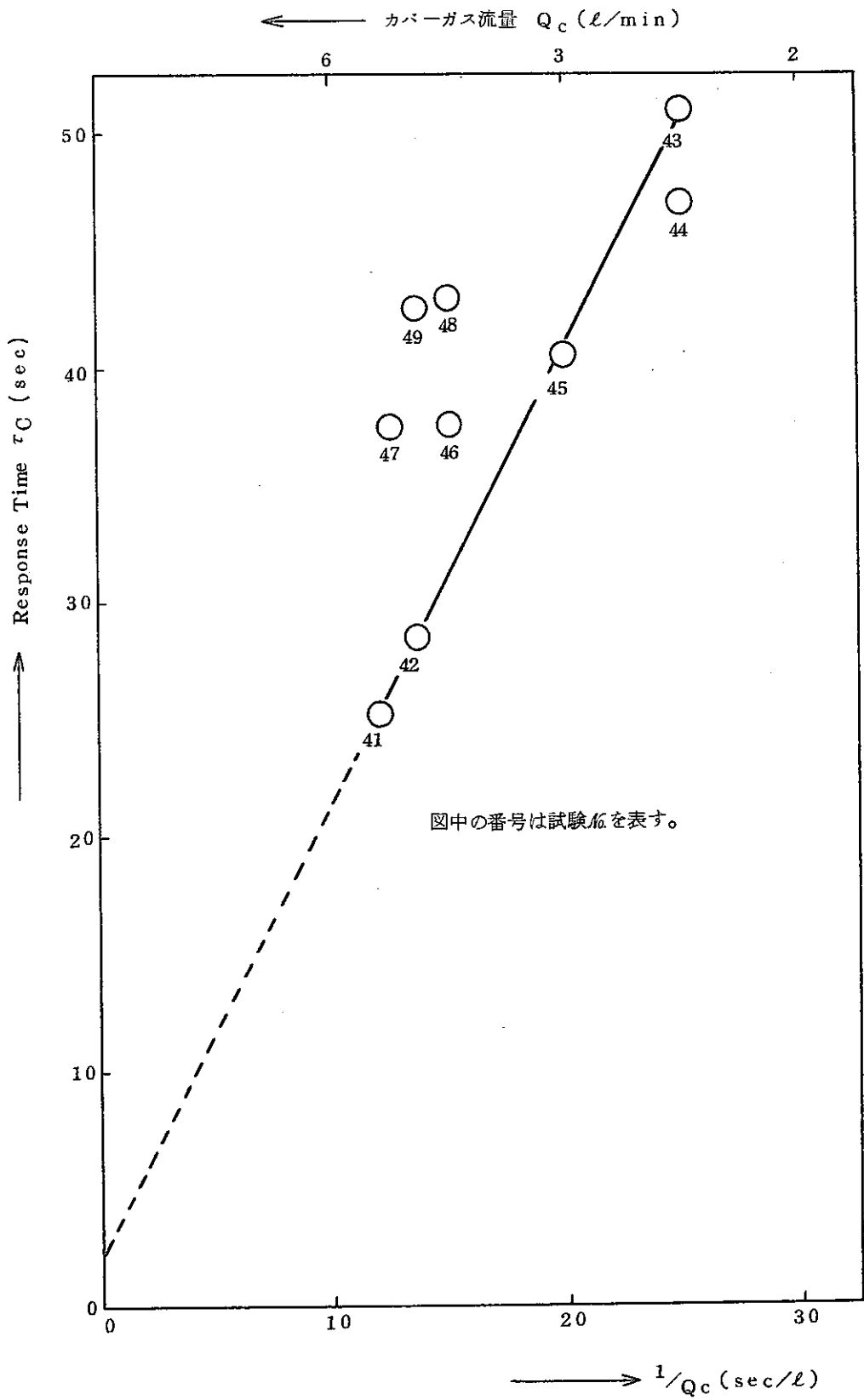


図 5-7 カバ-ガス流量の逆数とカバ-ガス中
水素検出計の応答時間

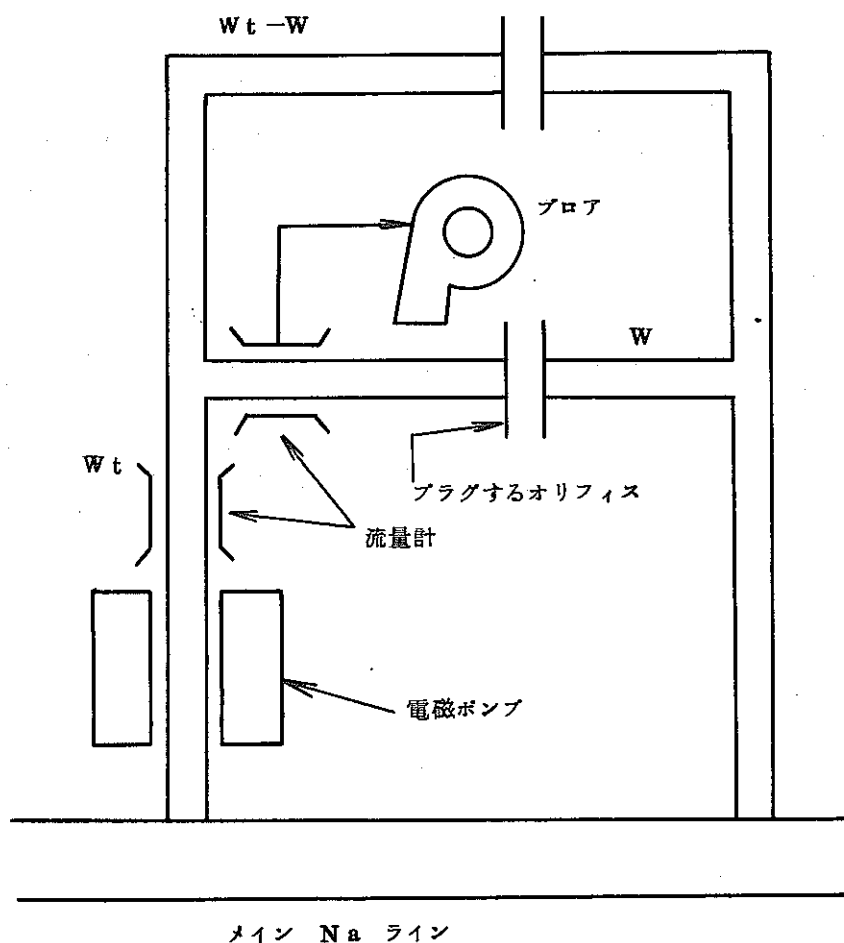


図6 - 1 プラギング計フローシート

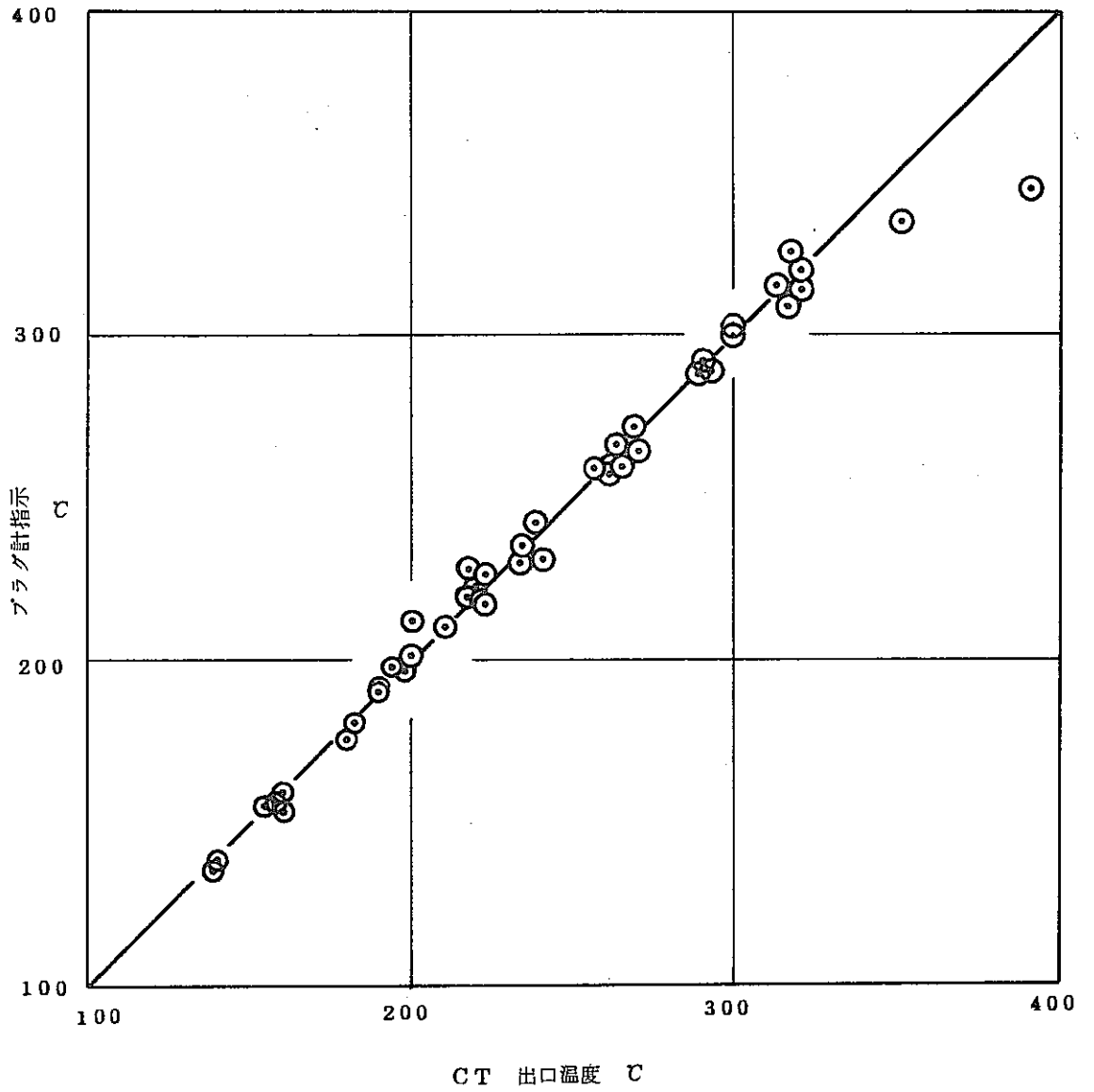


図6 - 2 コールドトラップ出口温度とプラグ計指示値の関係

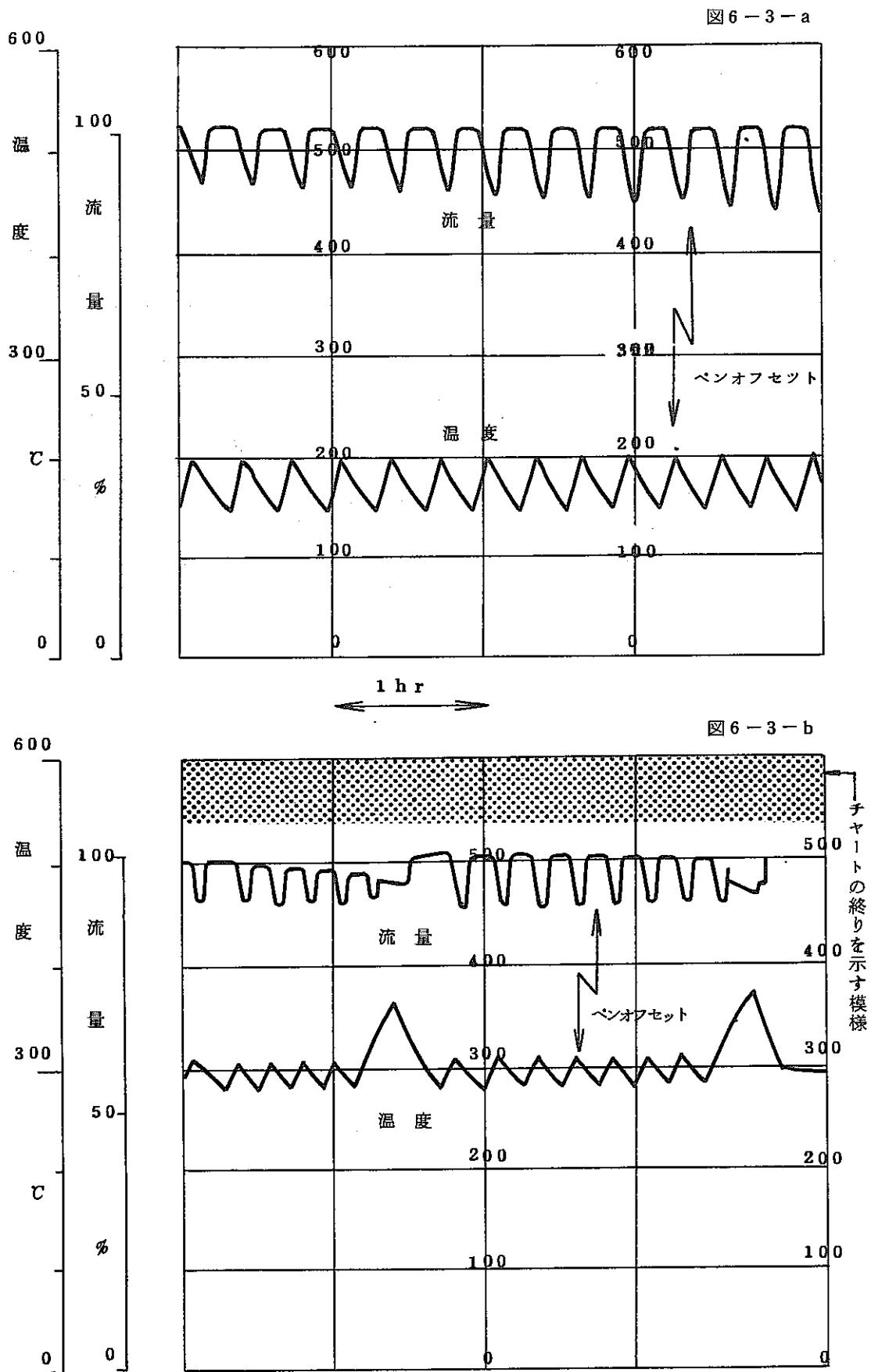


図6-3 プラグ計の測定例

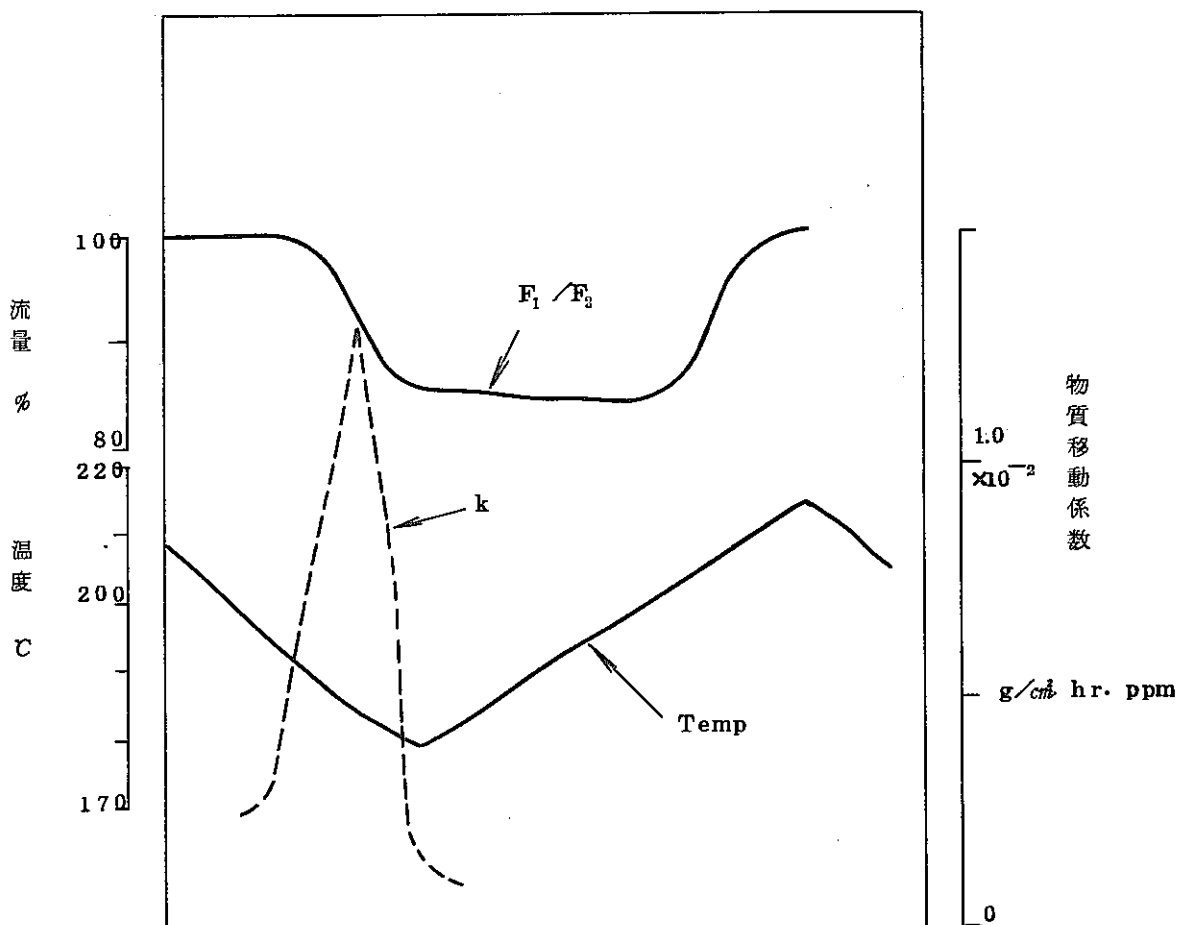


図 6 - 4 物質移動係数の時間変化

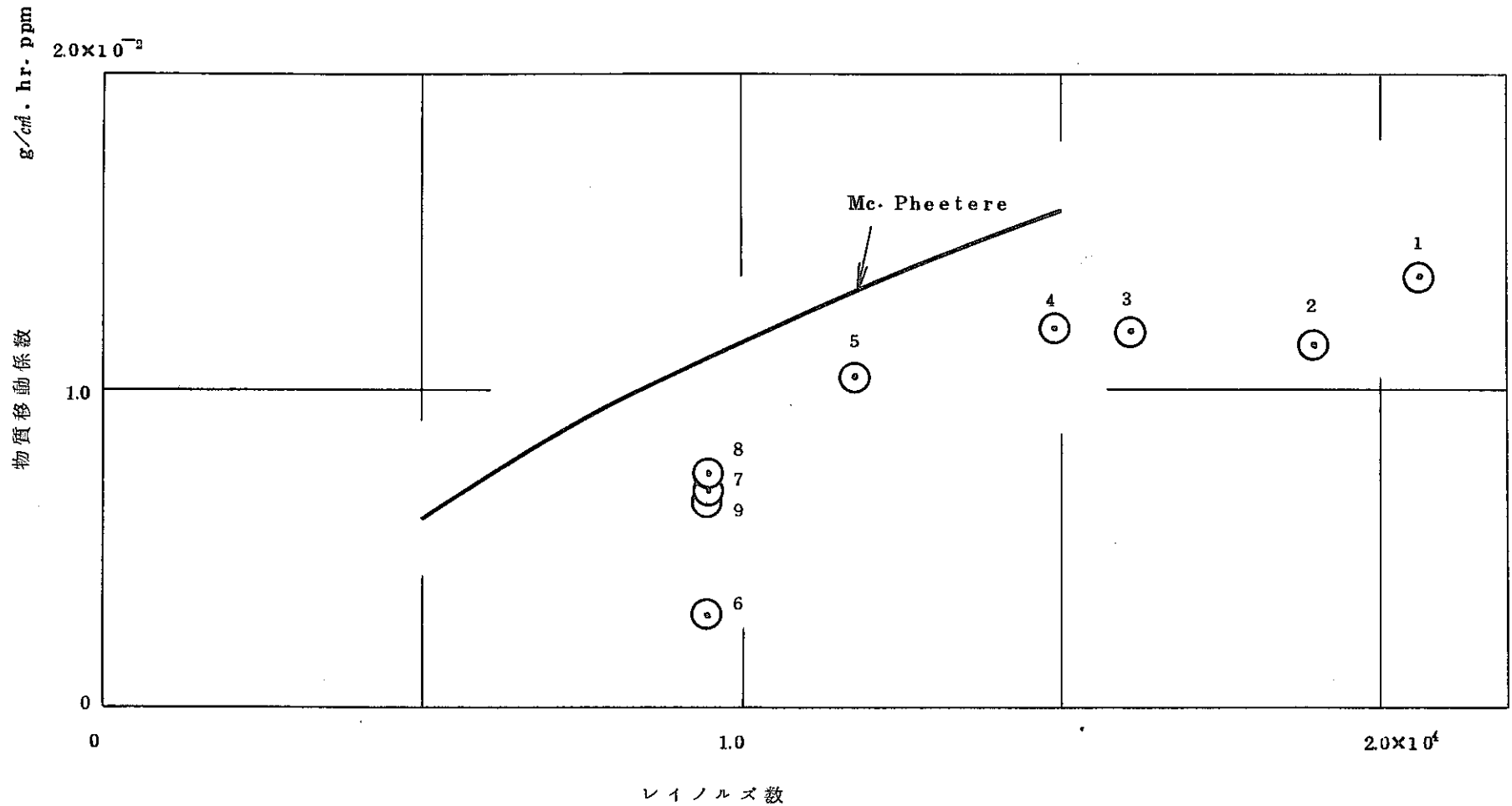


図 6 - 5 物質移動係数の平均値とレイノルズ数の関係

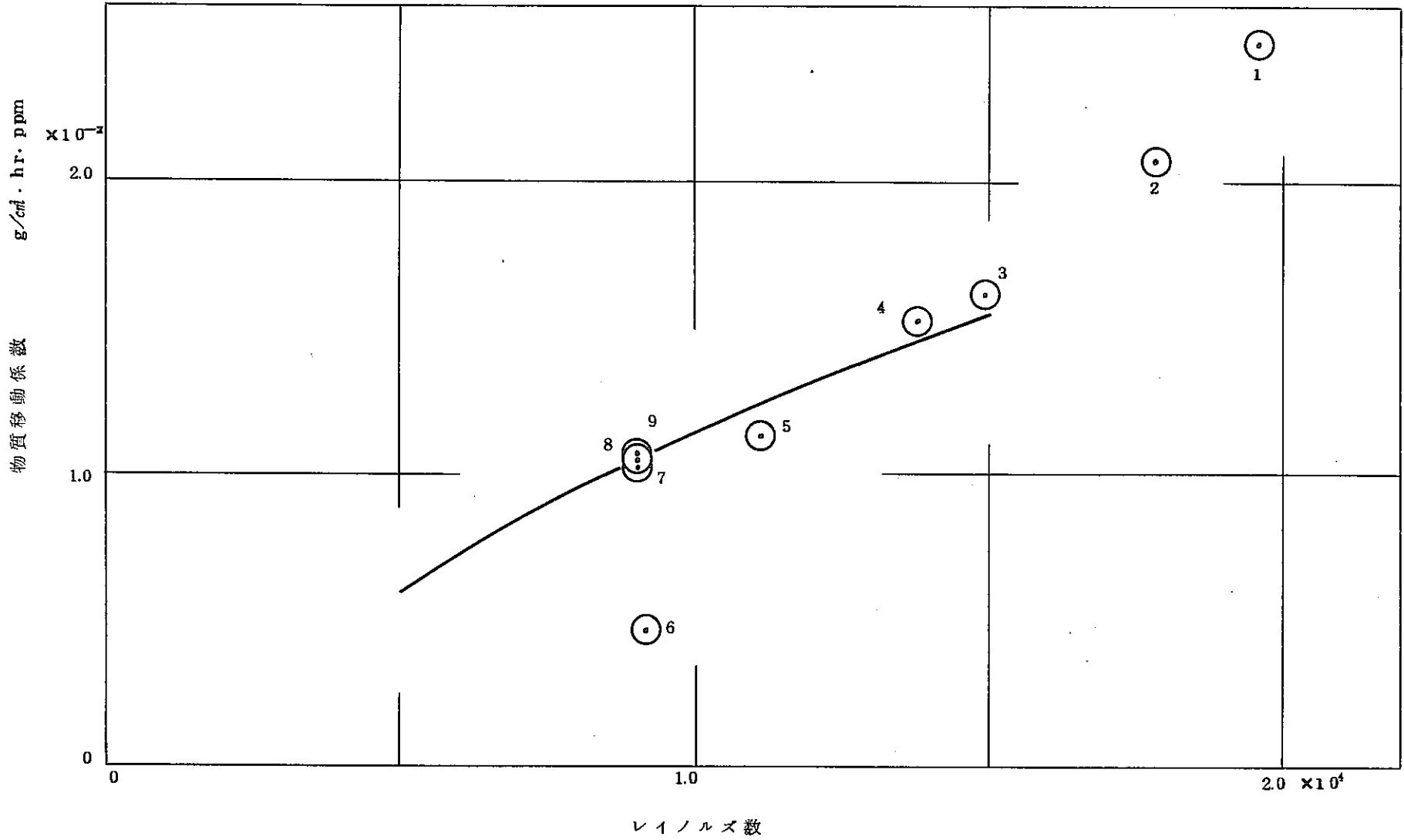


図 6 - 6 物質移動係数の最大値とレイノルズ数の関係

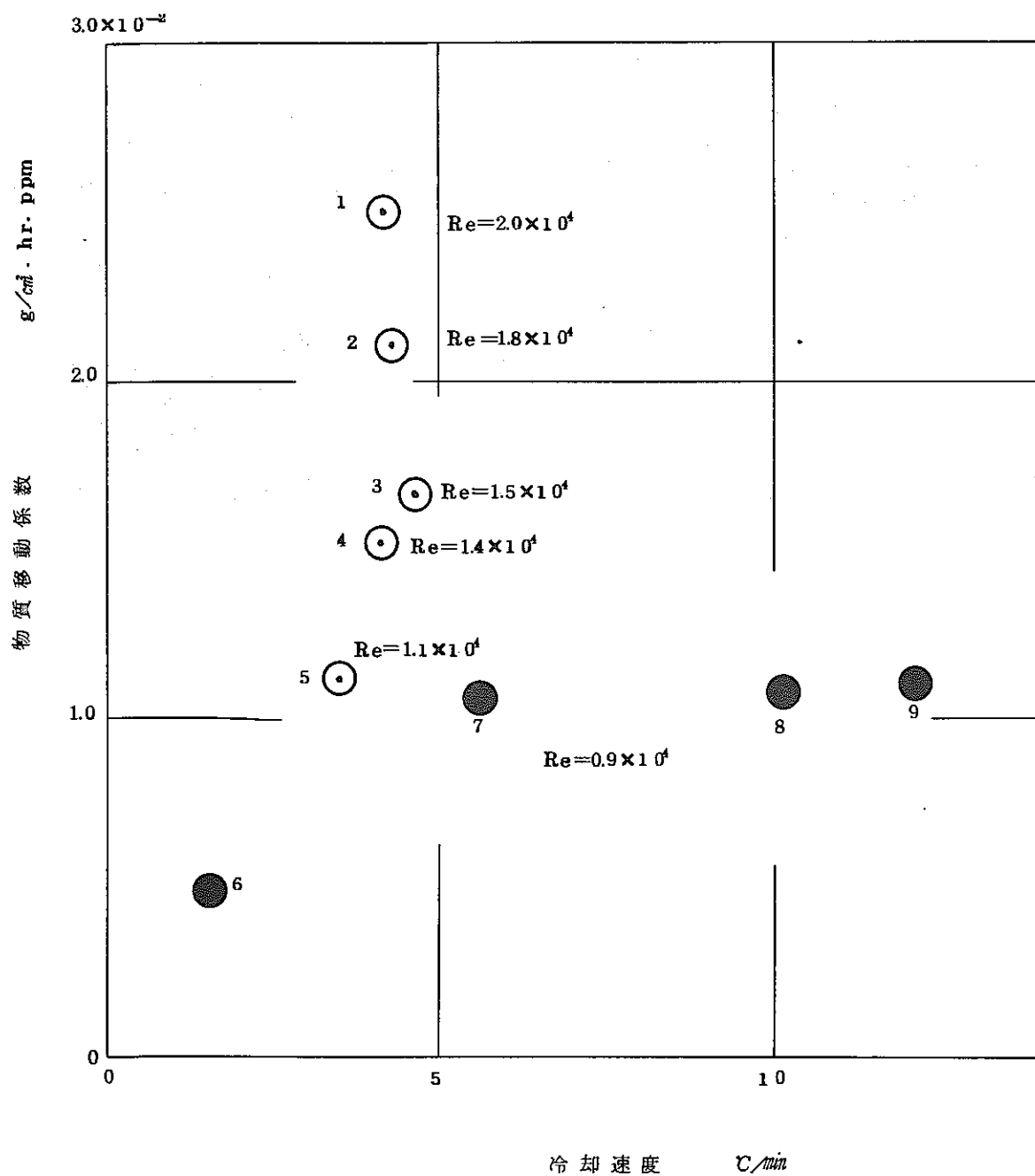


図6 - 7 物質移動係数と冷却速度の関係

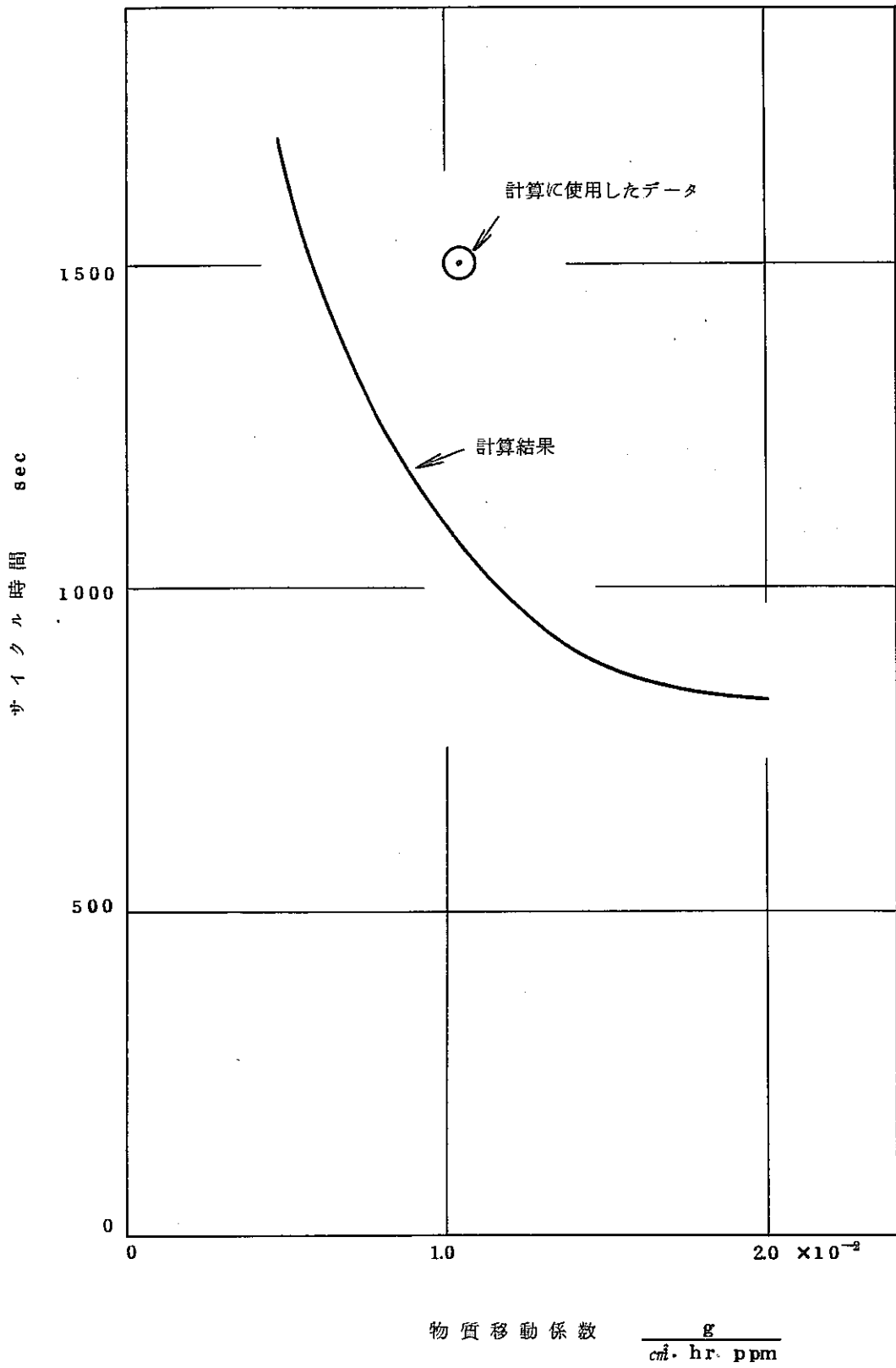


図6-8 物質移動係数とサイクル時間の関係

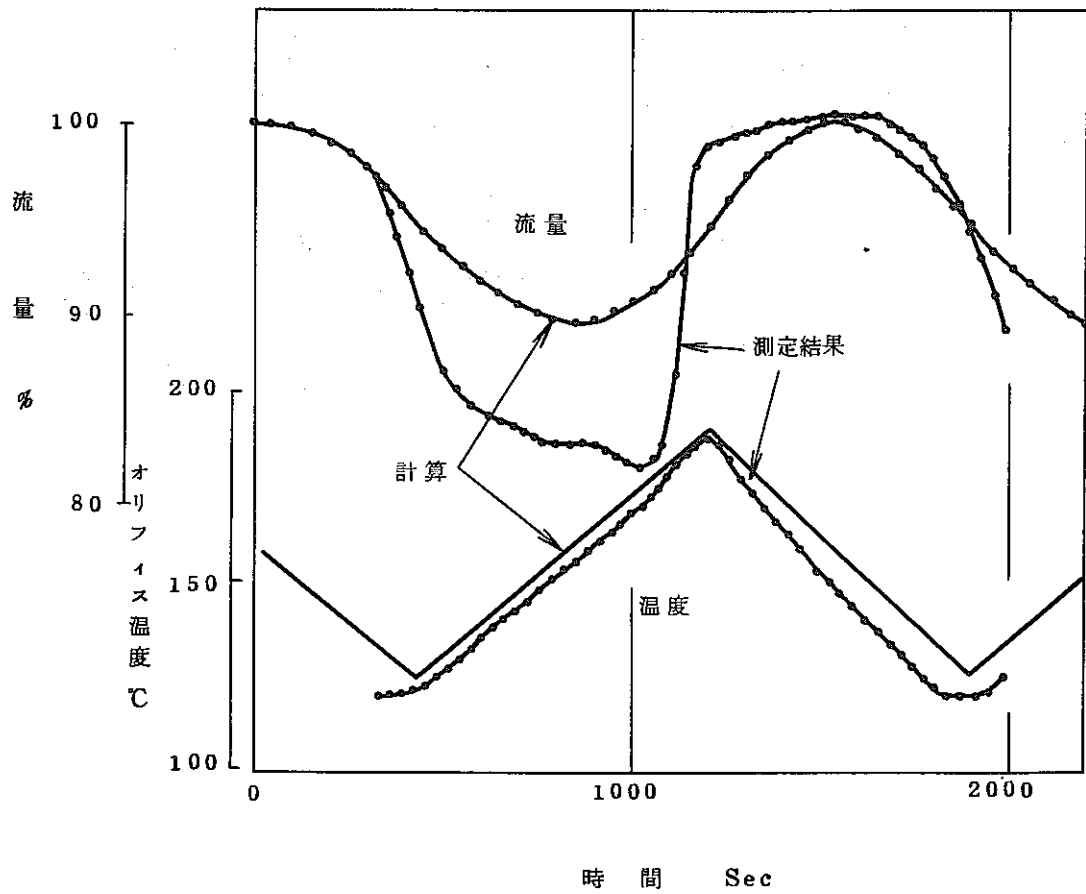


図 6 - 9 プラグ計, 流量温度の時間変化

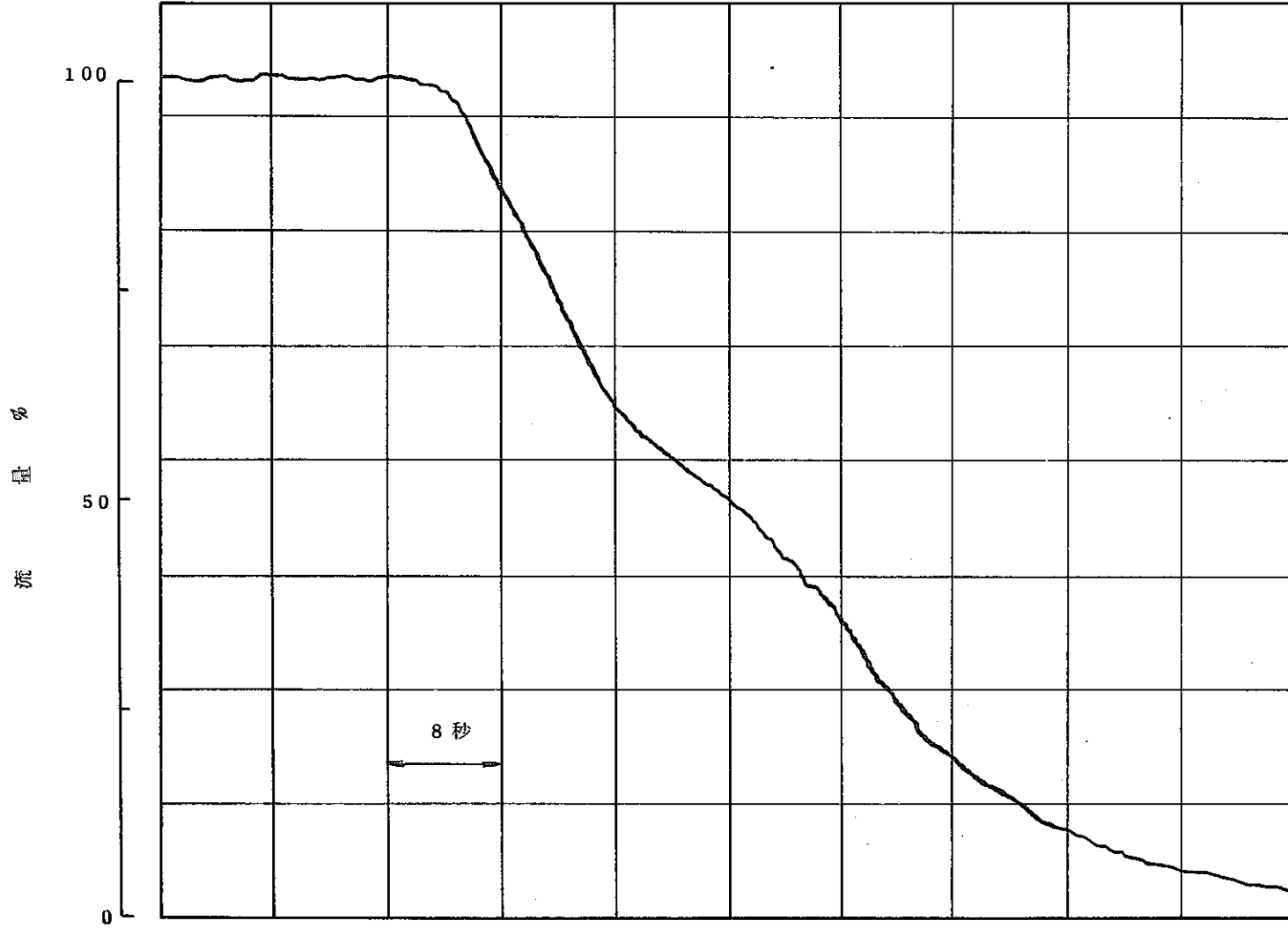


図 6 - 1 0 Na + 水反応時のプラグ計応答

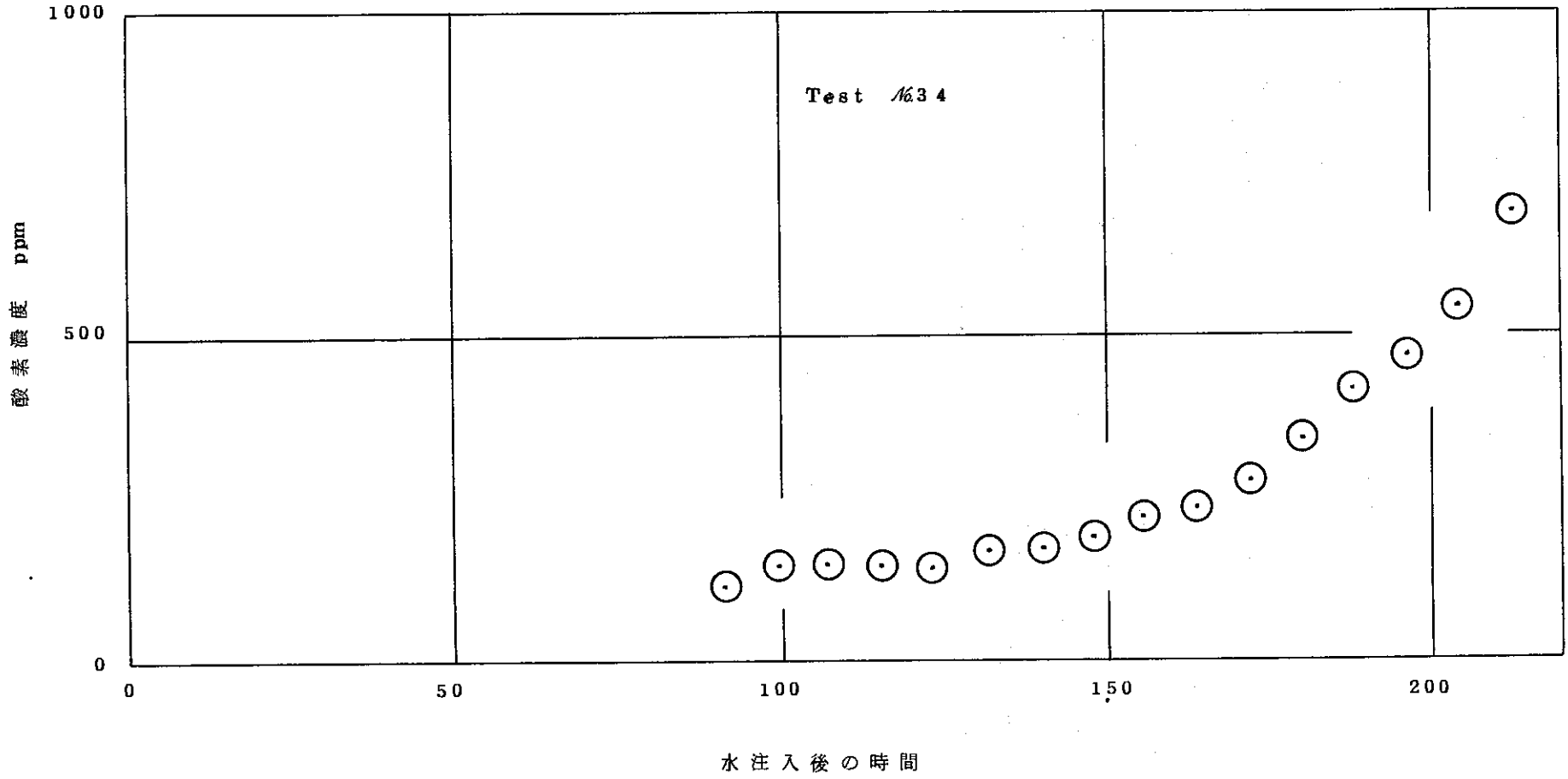


図6-11 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化

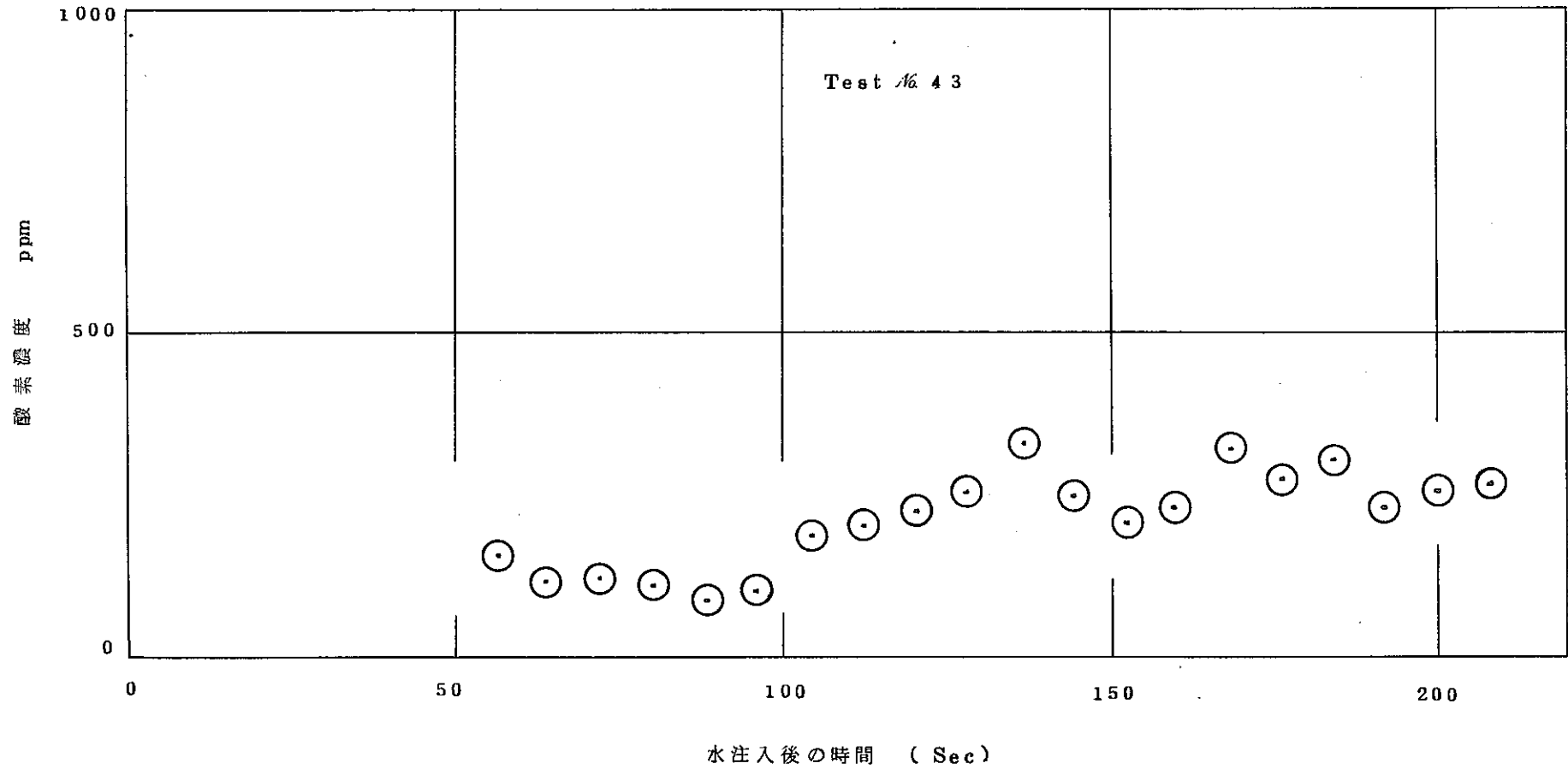


図6-12 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化

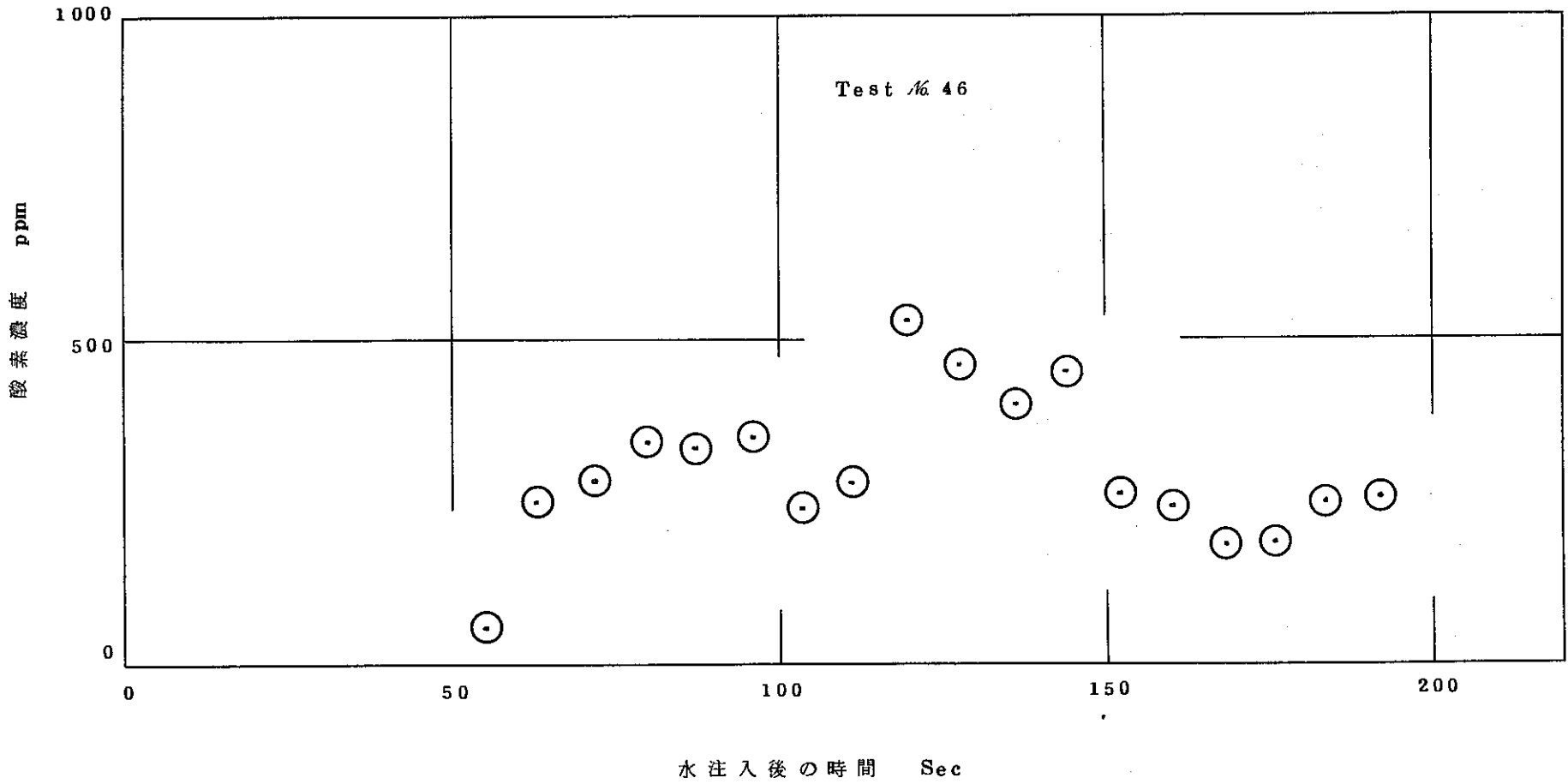


図6-13 Na-水反応時のプラグ計オリフィスでの不純物濃度時間変化

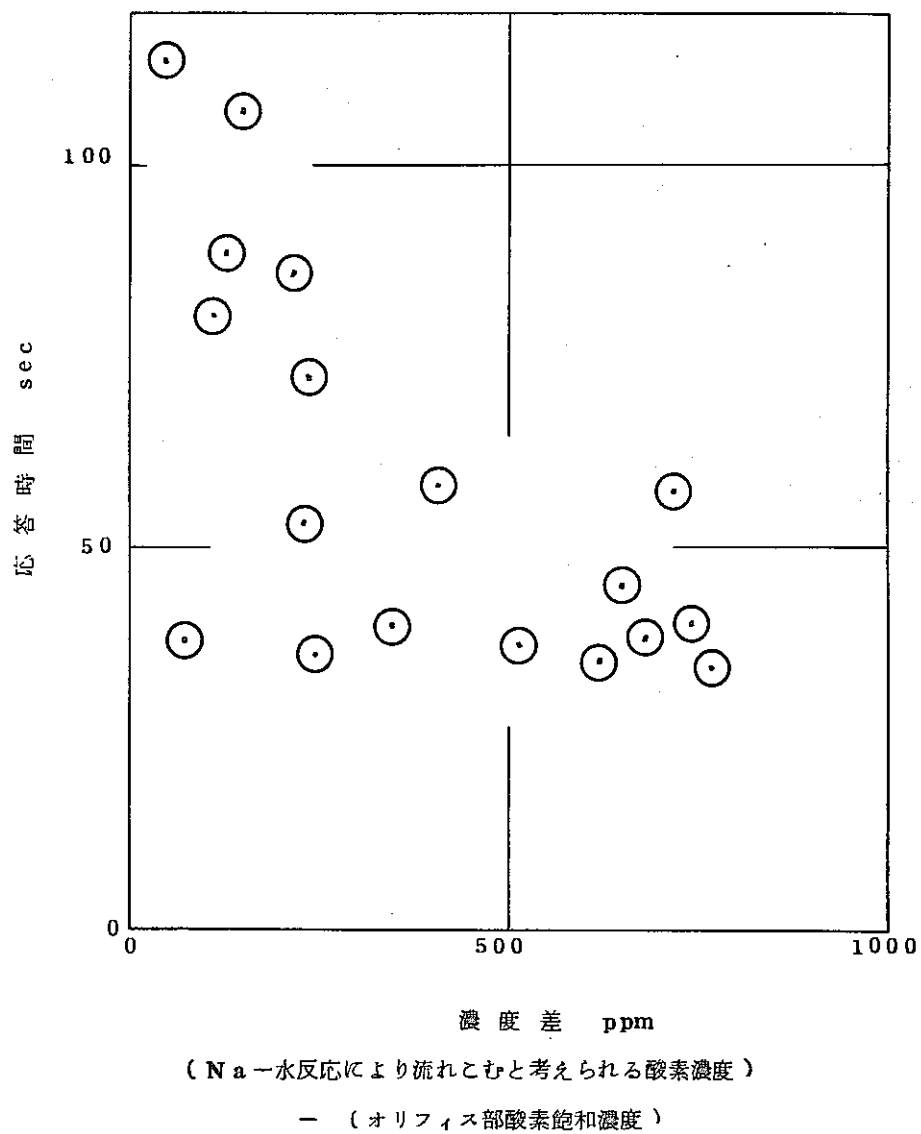


図6-14 Na-水反応によるプラグ計応答時間

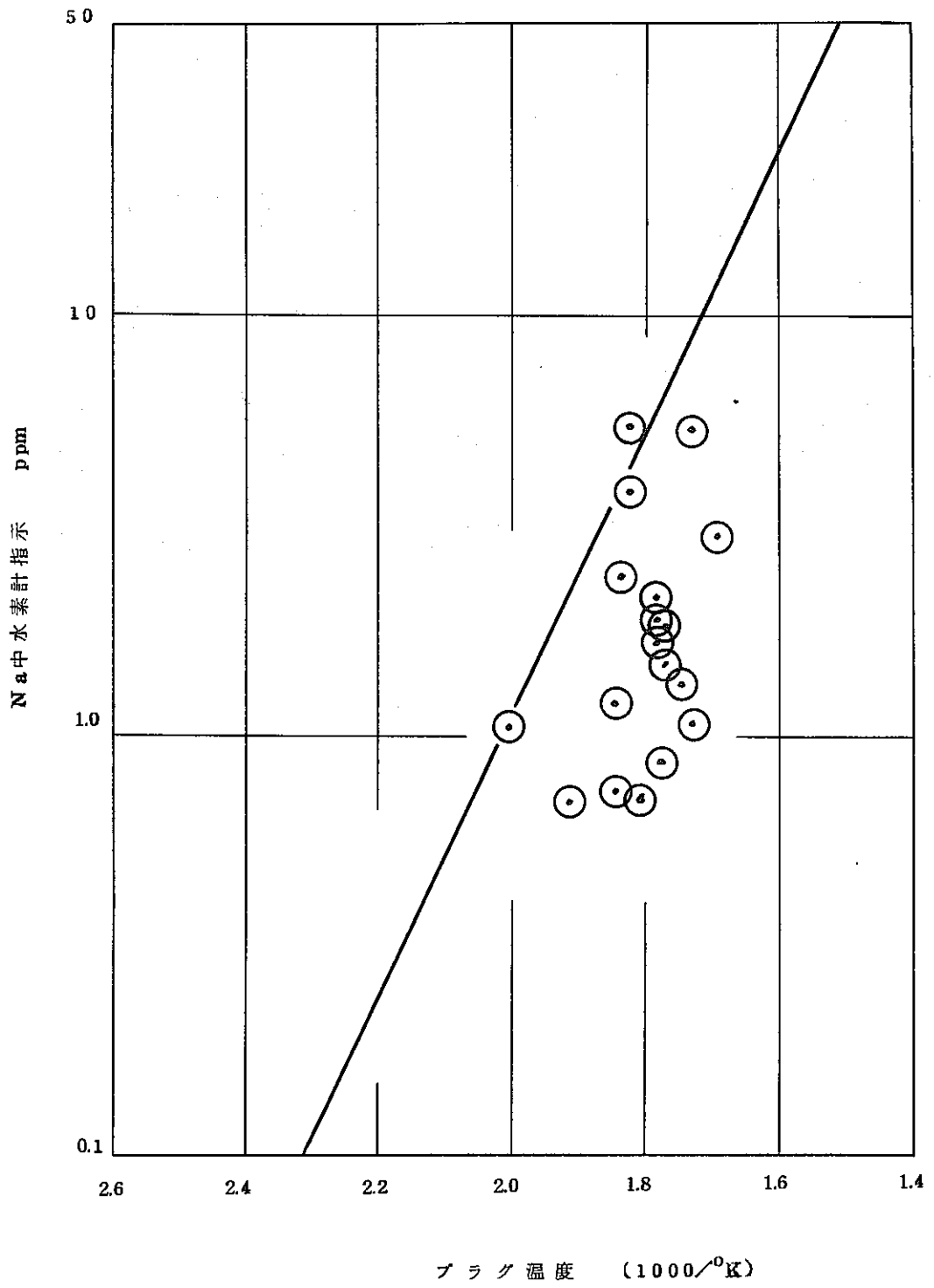


図6-15 プラグ温度とNa中水素計指示

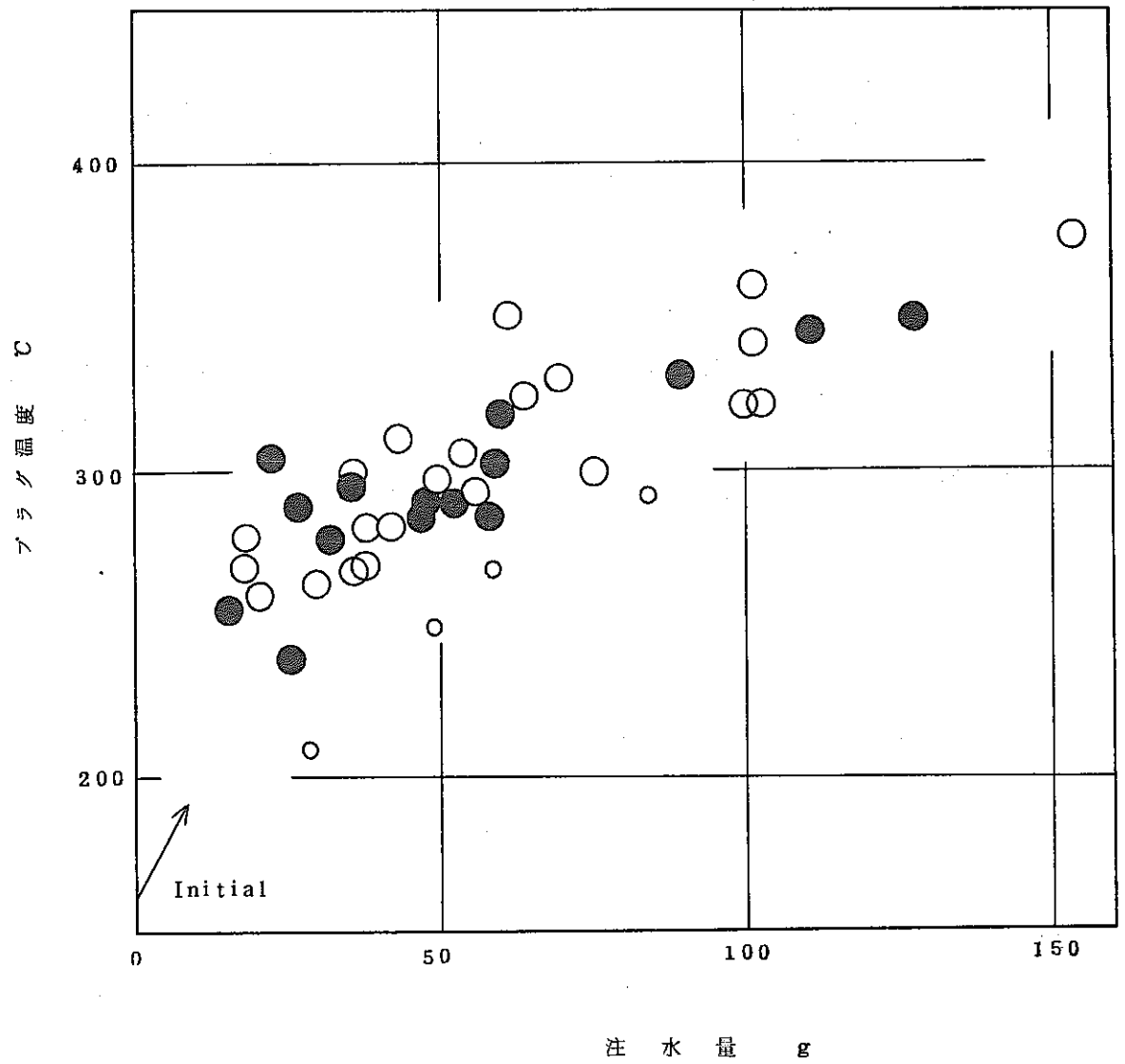


図6-16 注水量とプラグ温度

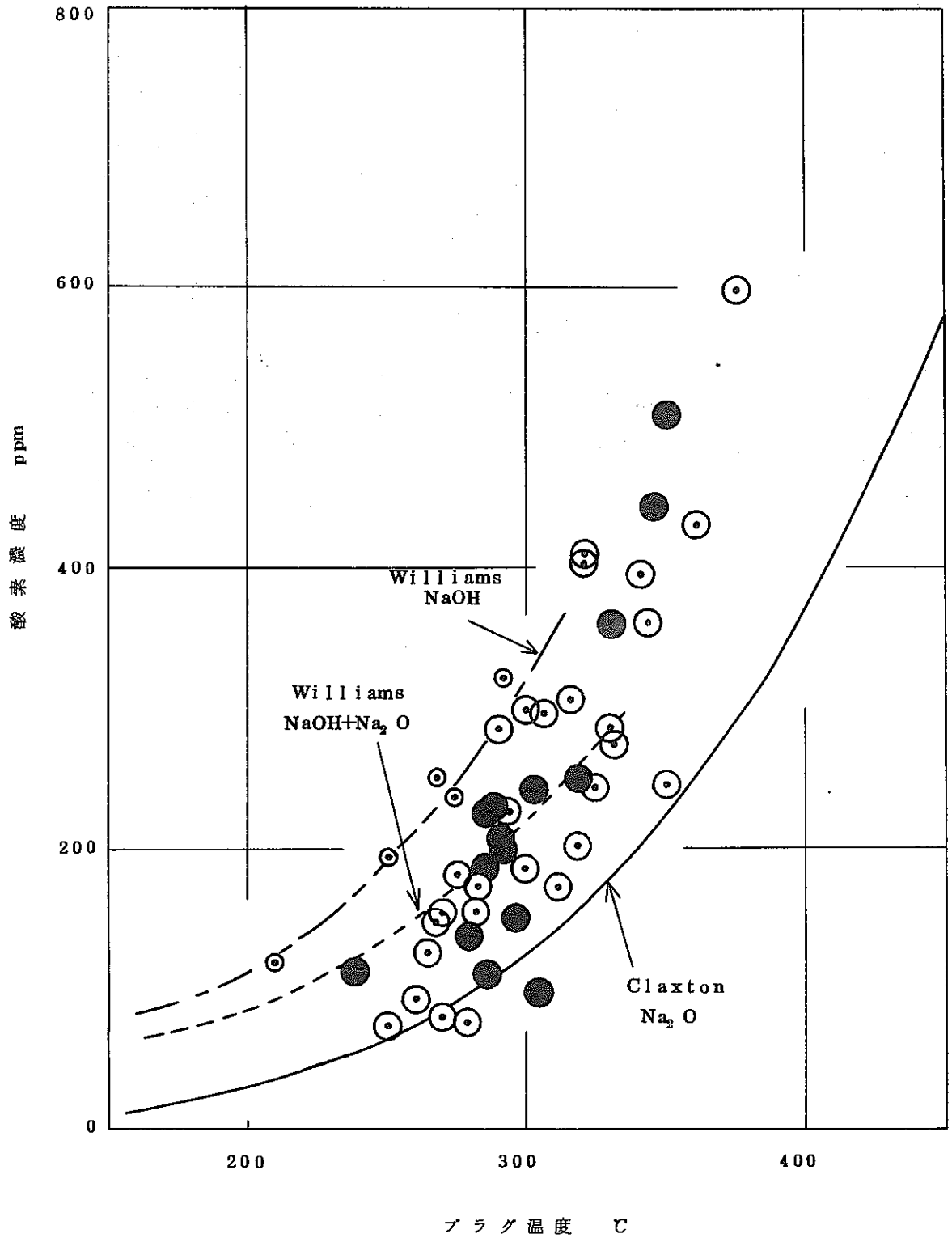


図 6-17 注水量より計算した酸素濃度とプラグ温度

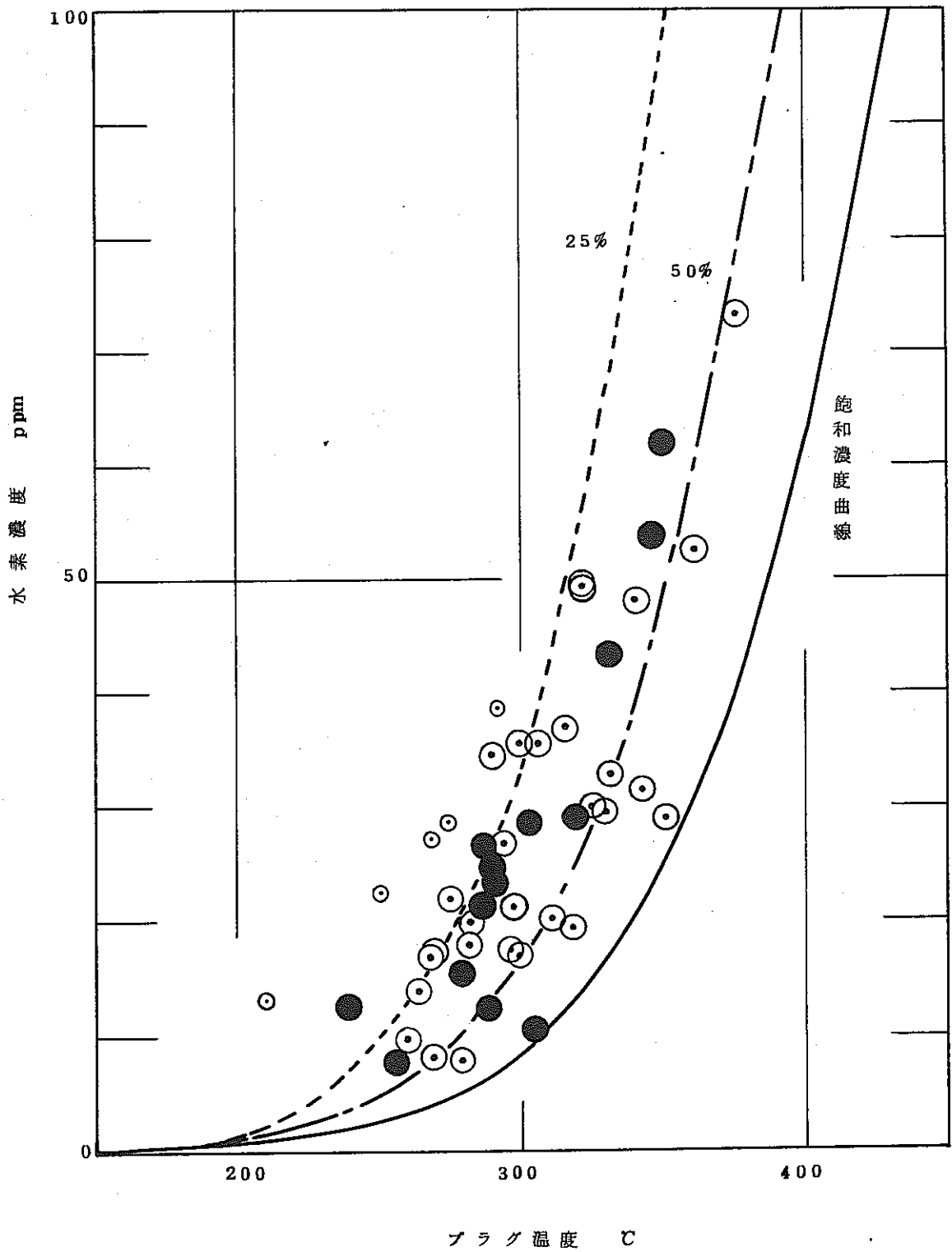


図 6-18 注水量より計算した水素濃度とプラグ温度

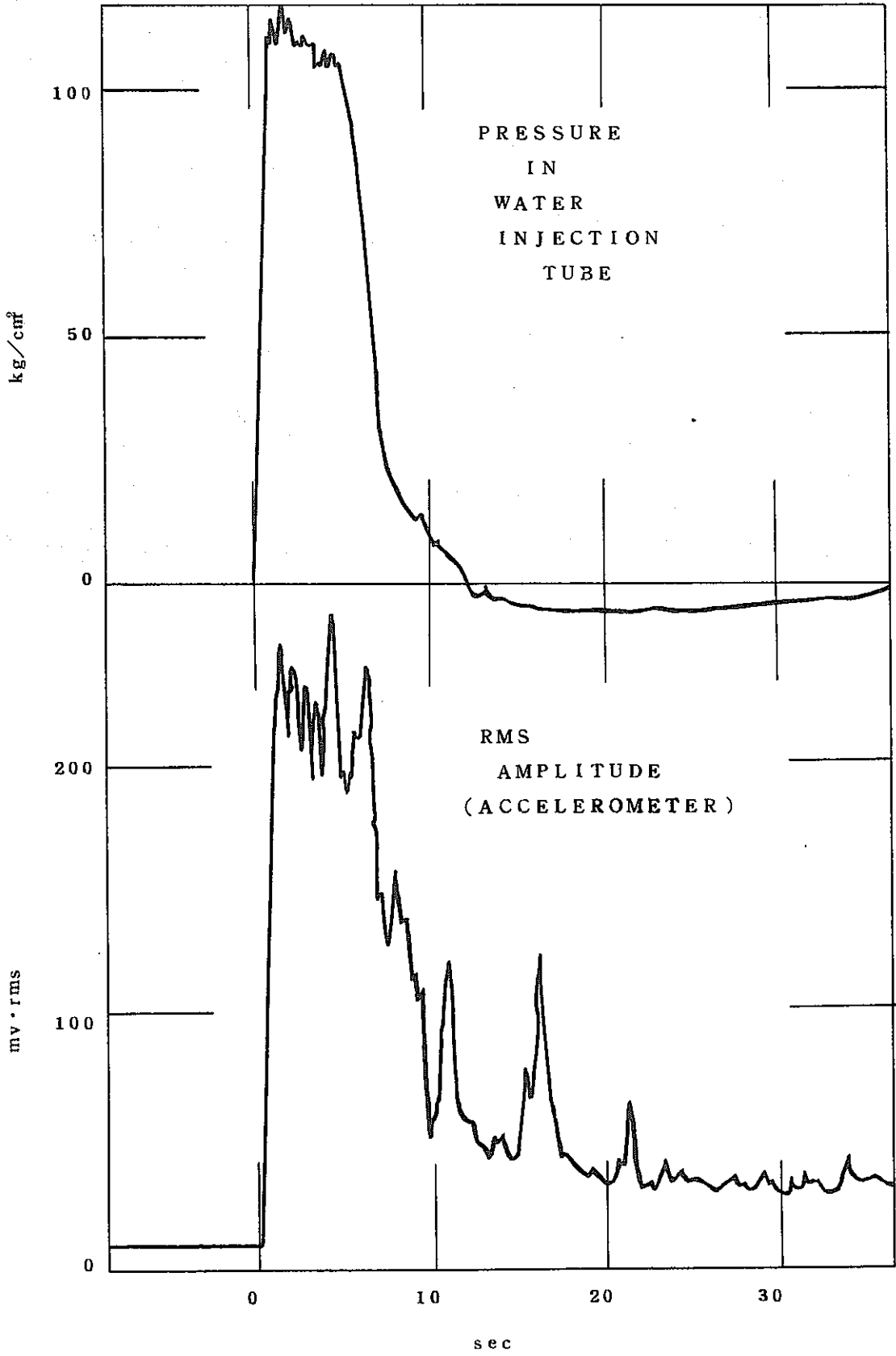


図 7 - 1 加速度計出力の時間変化

Transducer; Kistlu 808A

Rod ; 16D×150mm

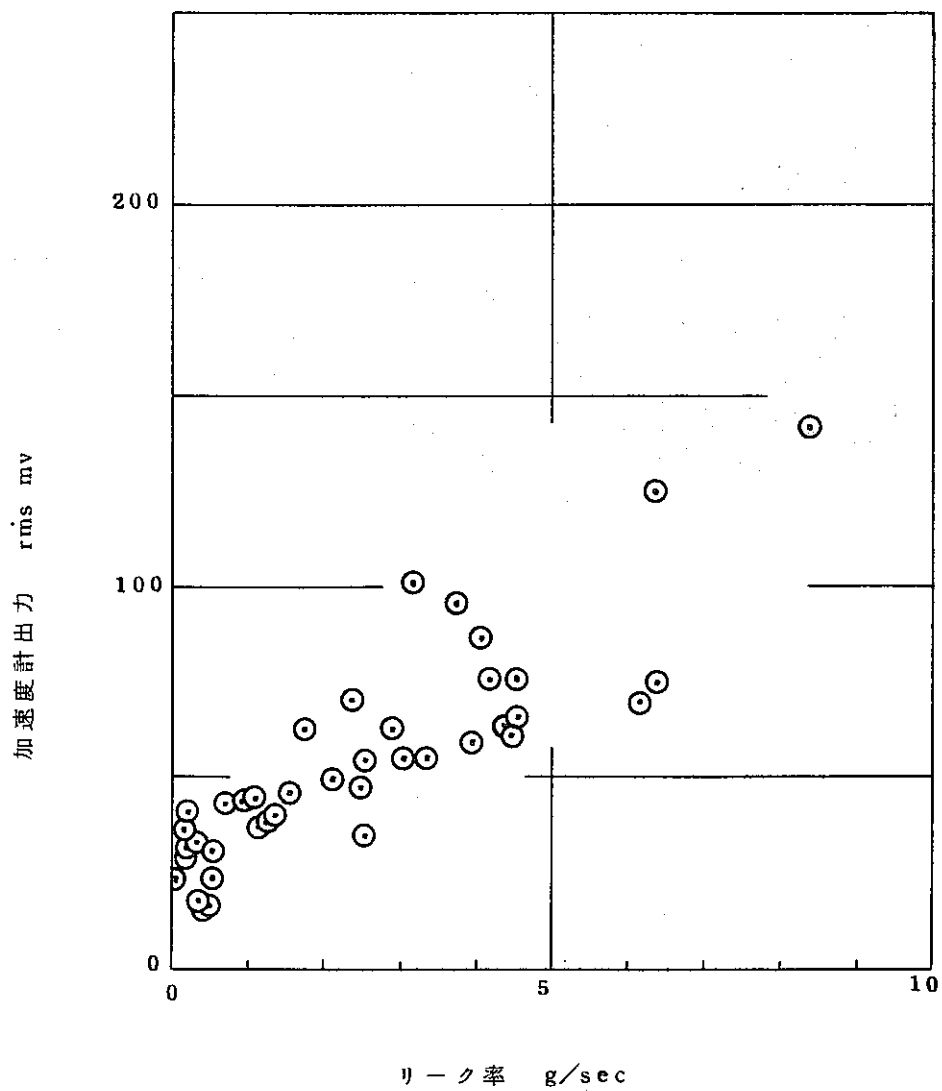


図 7-2 リーク率と加速度計出力の関係

Transducer ; Kistler 815A

Rod ; 16D×200mm

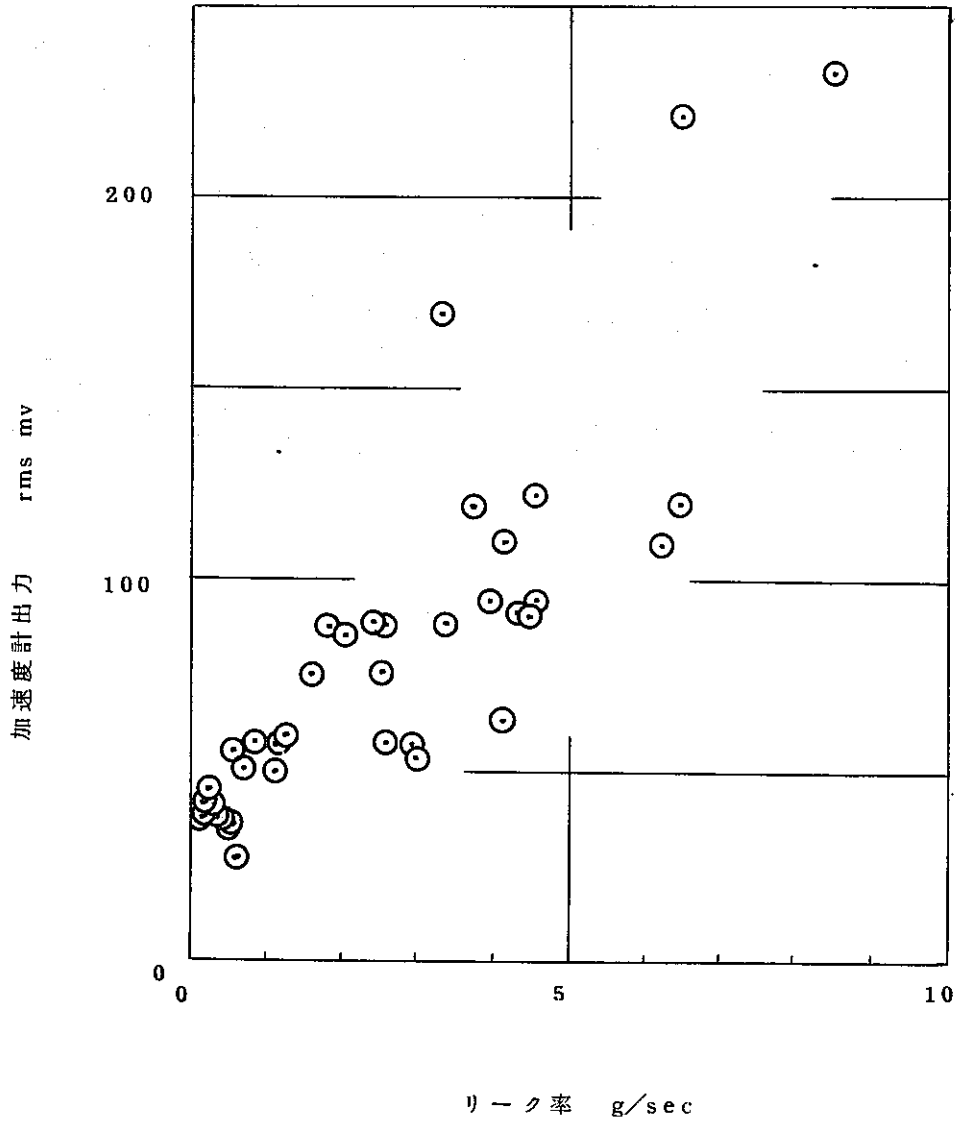


図7-3 リーク率と加速度計出力の関係

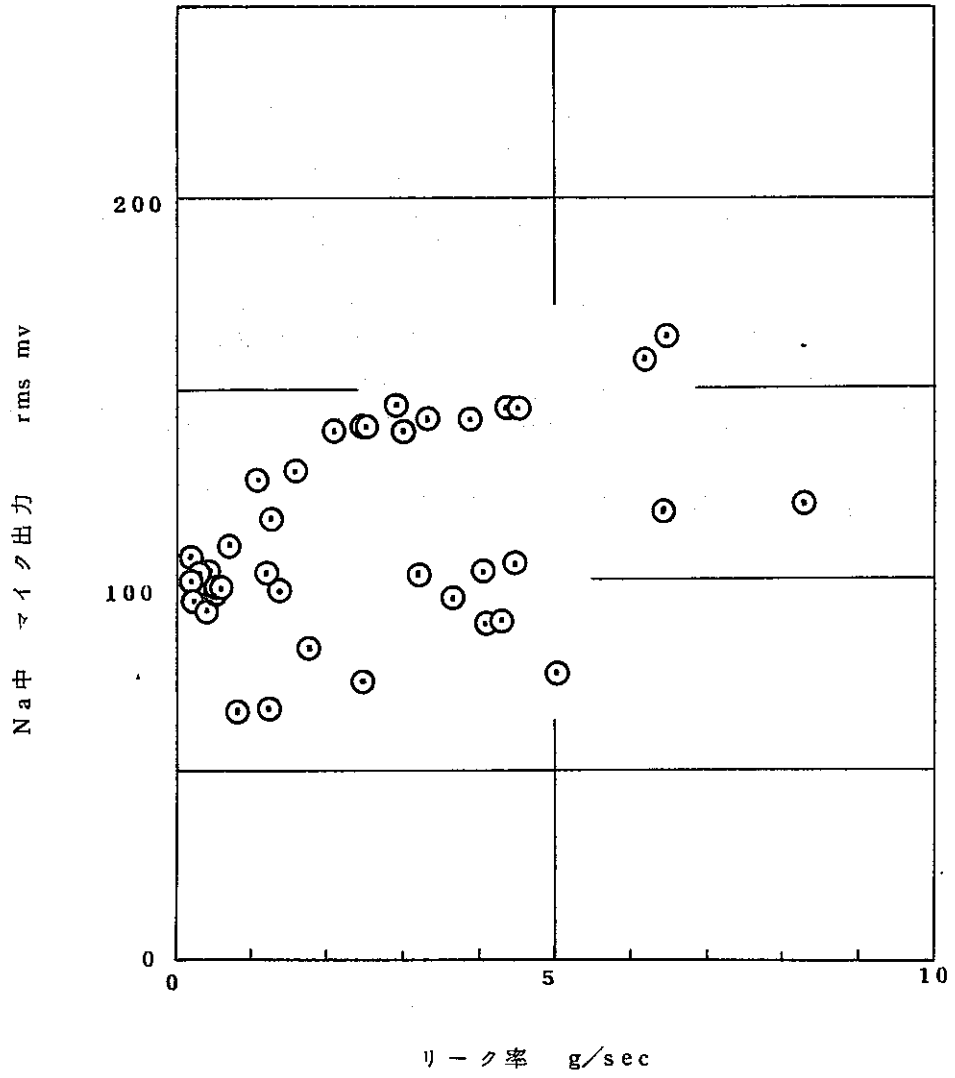


図7-4 リーク率とNa中マイク出力の関係

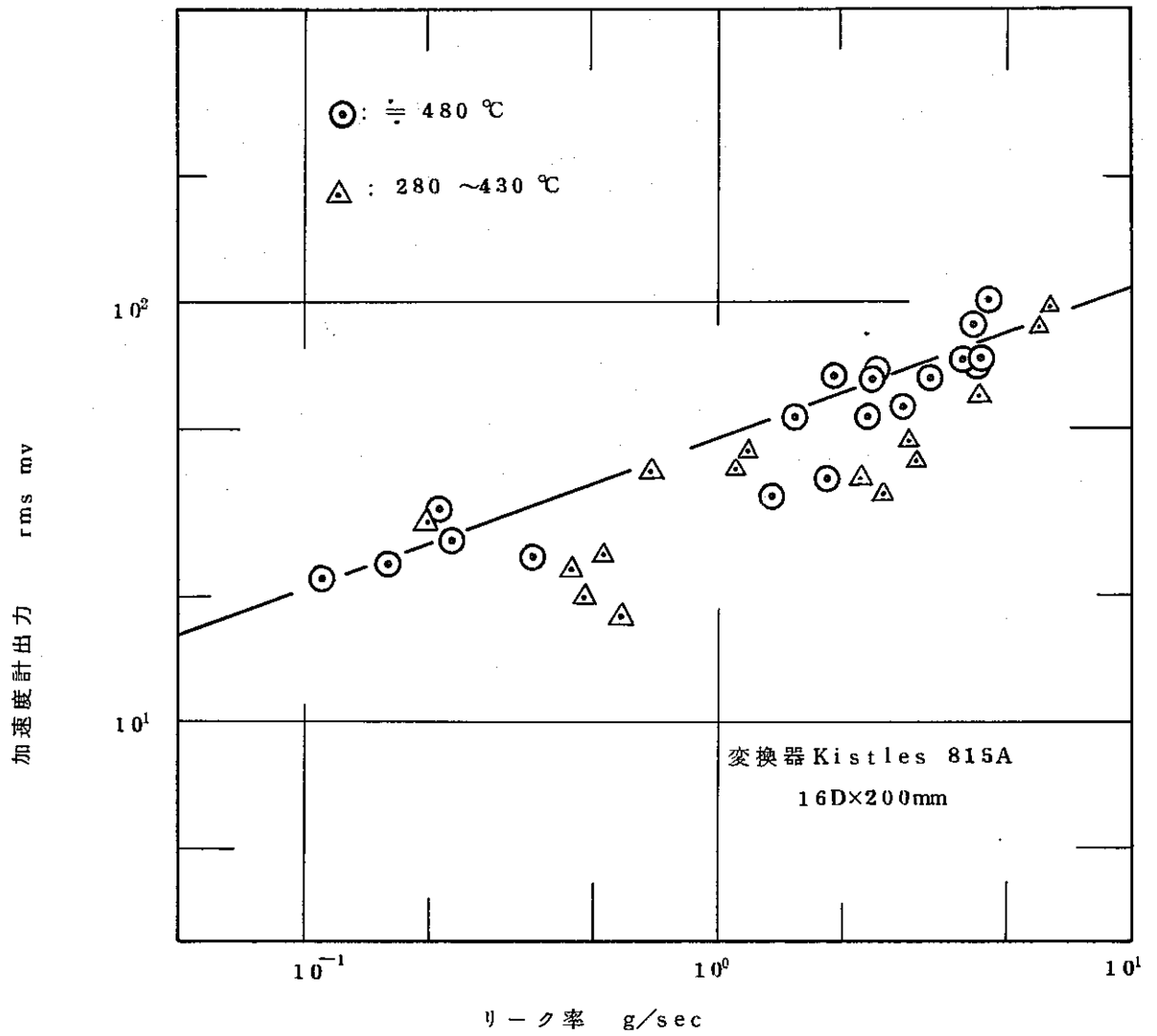


図 7-5 リーク率と加速度計出力

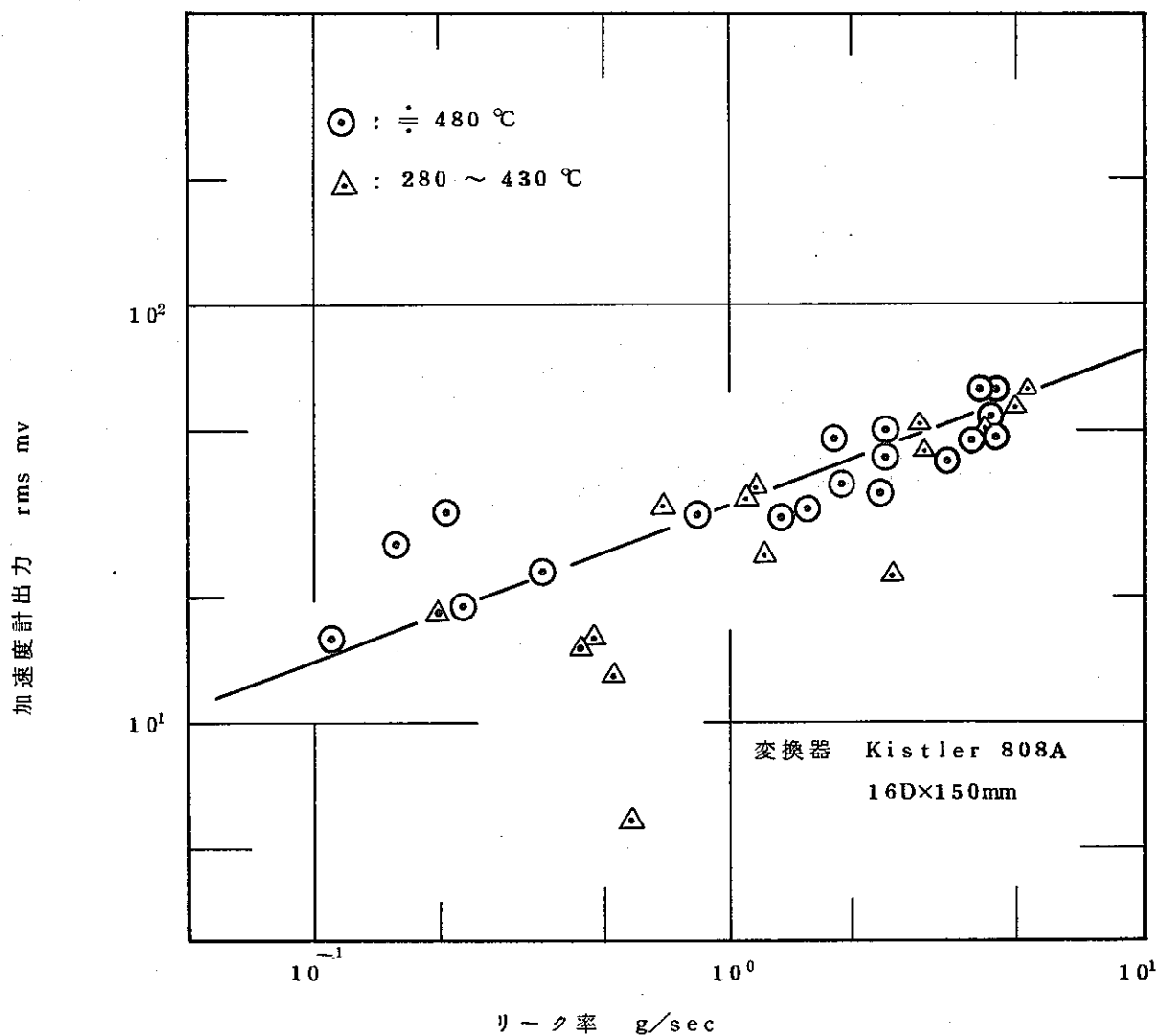


図 7-6 リーク率と加速度計出力

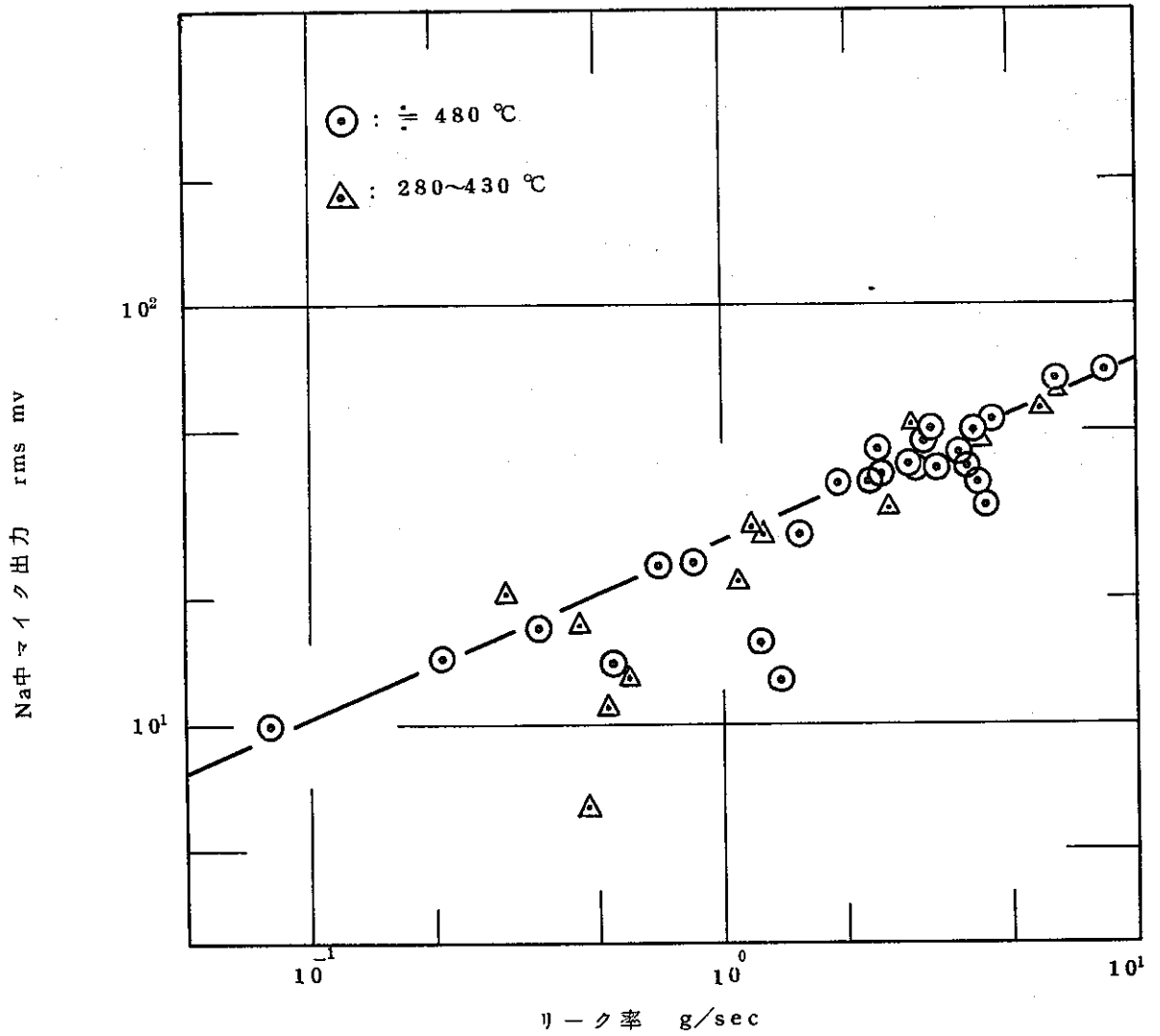


図7-7 リーク率とNa中マイク出力

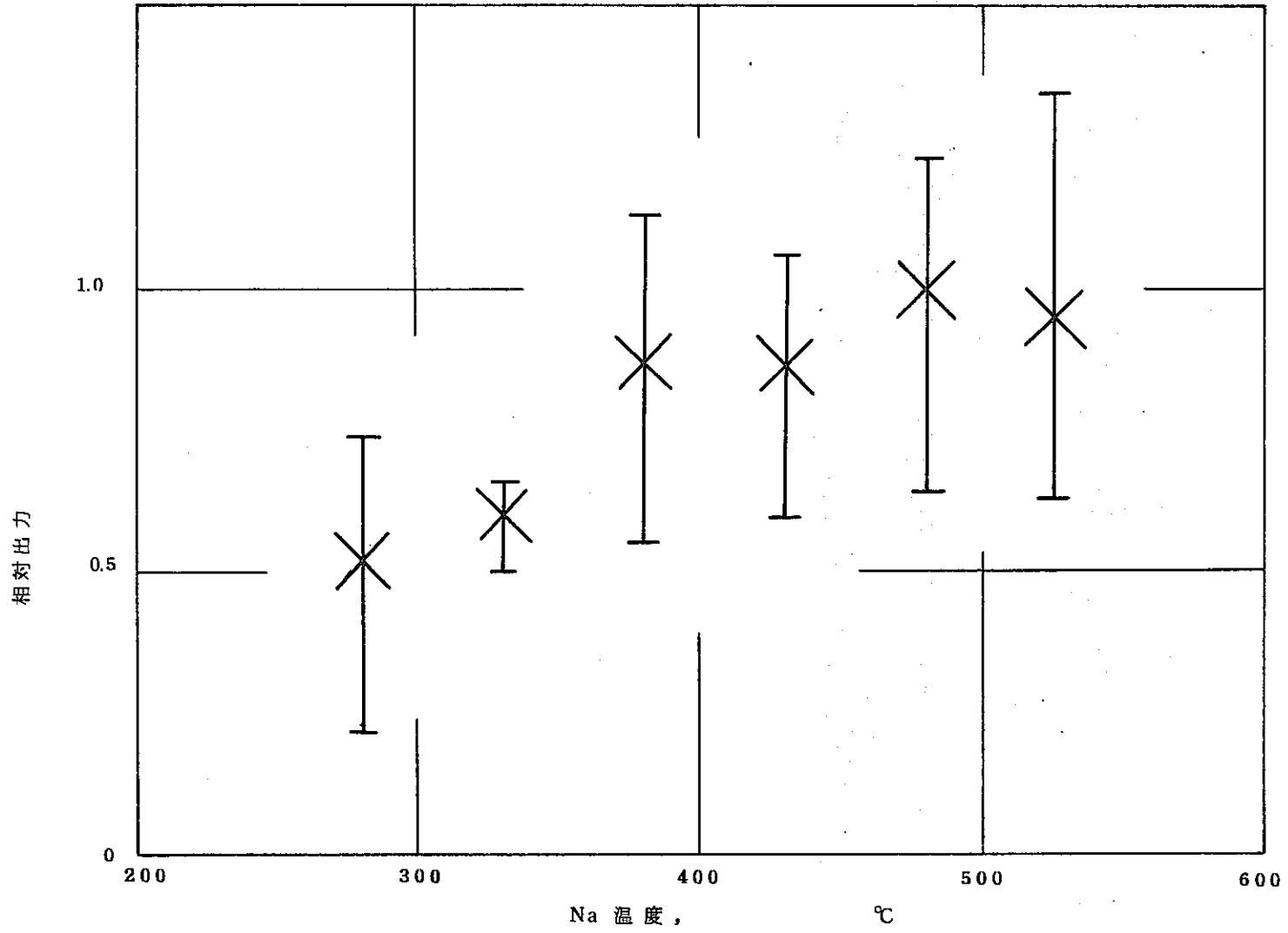


図 7-8 出力の温度による影響

变换器 ; ENDEVCO 233 E
16D × 200mm

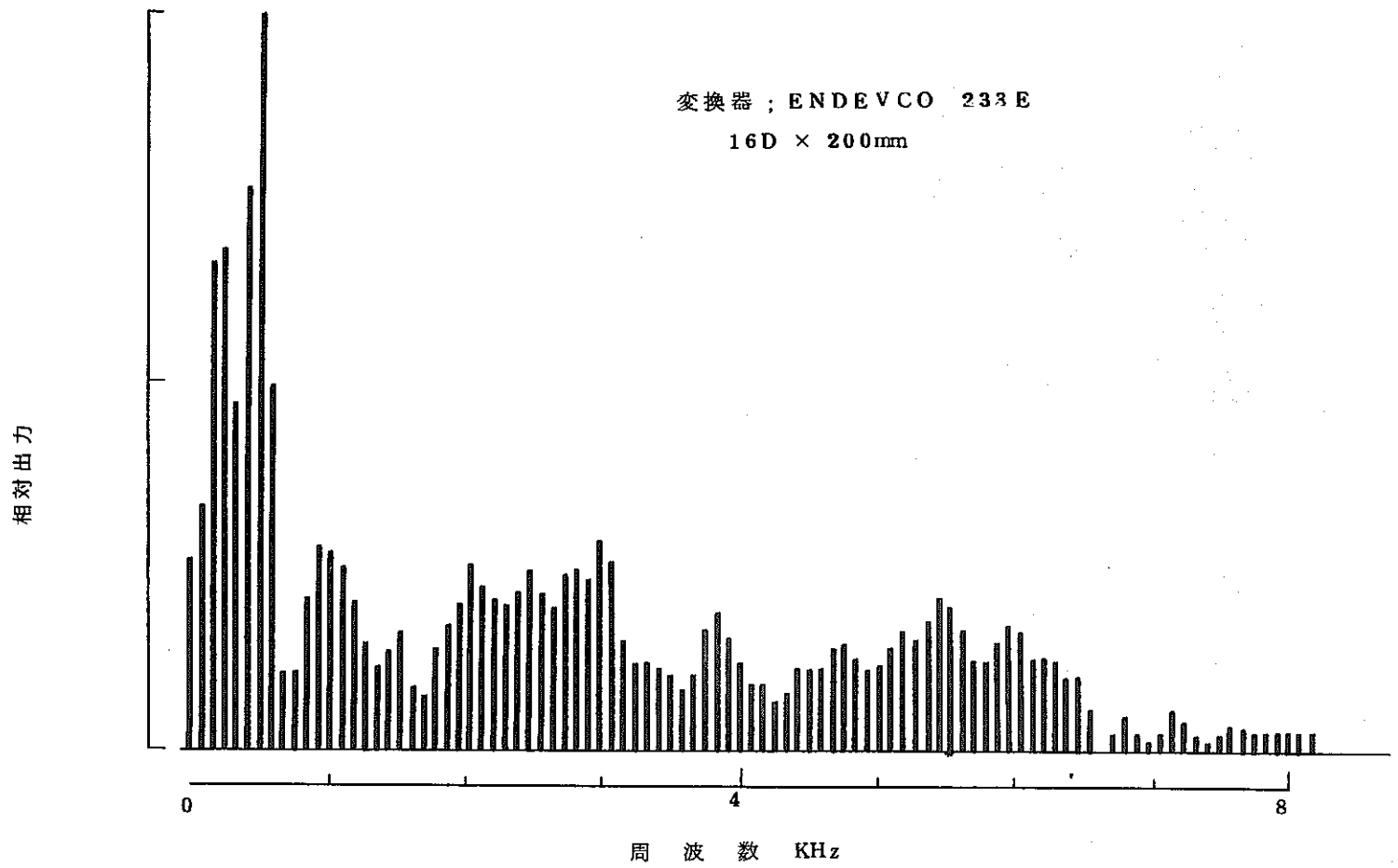


图 7-9 周波数分析结果

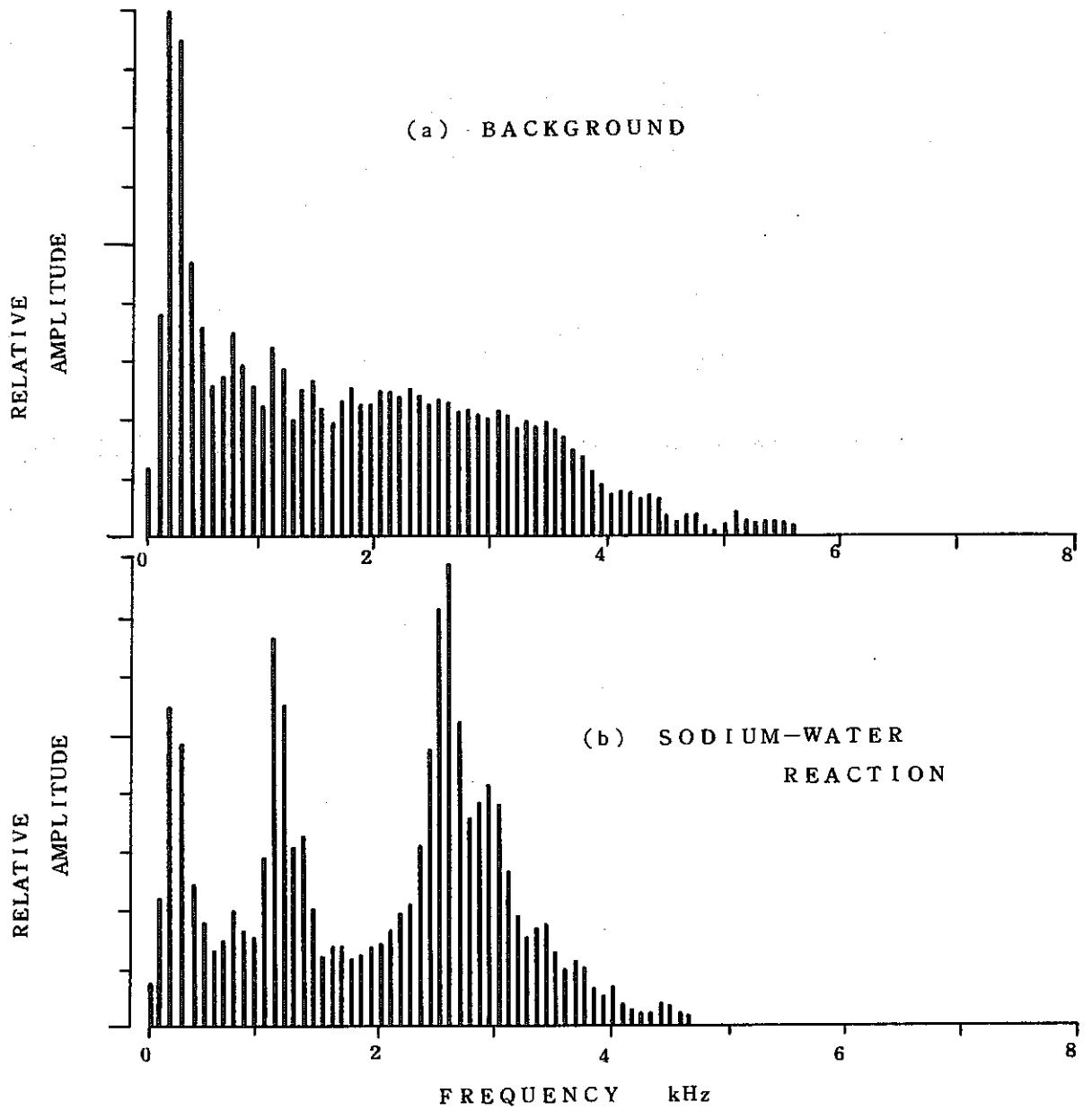


図7-10 Na中マイクの周波数分析結果

TEST # 16
TRANSDUCER
KISTLER 815A
ACCELEROMETER
ROD 16D x 200mm

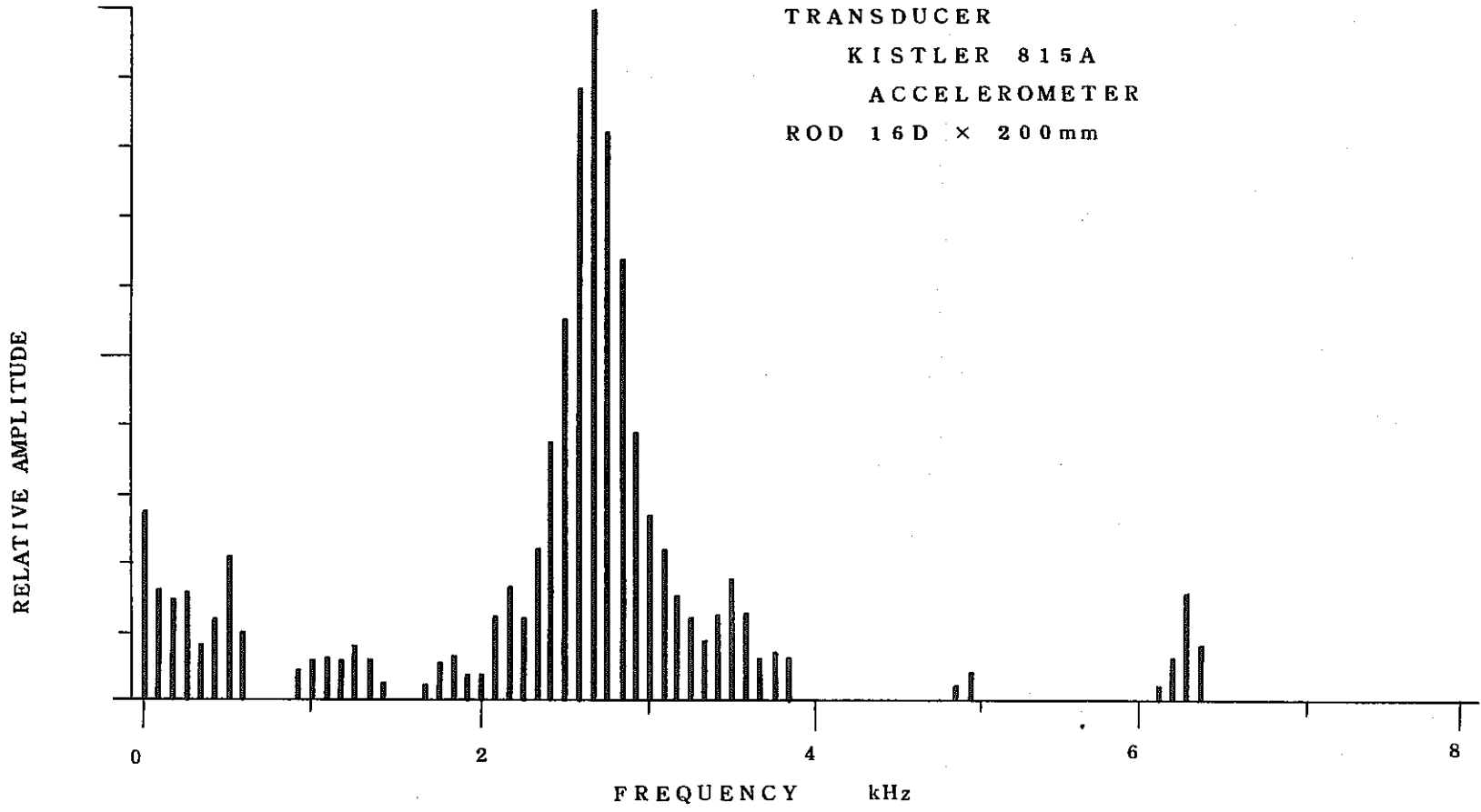


图 7-11 周波数分析结果

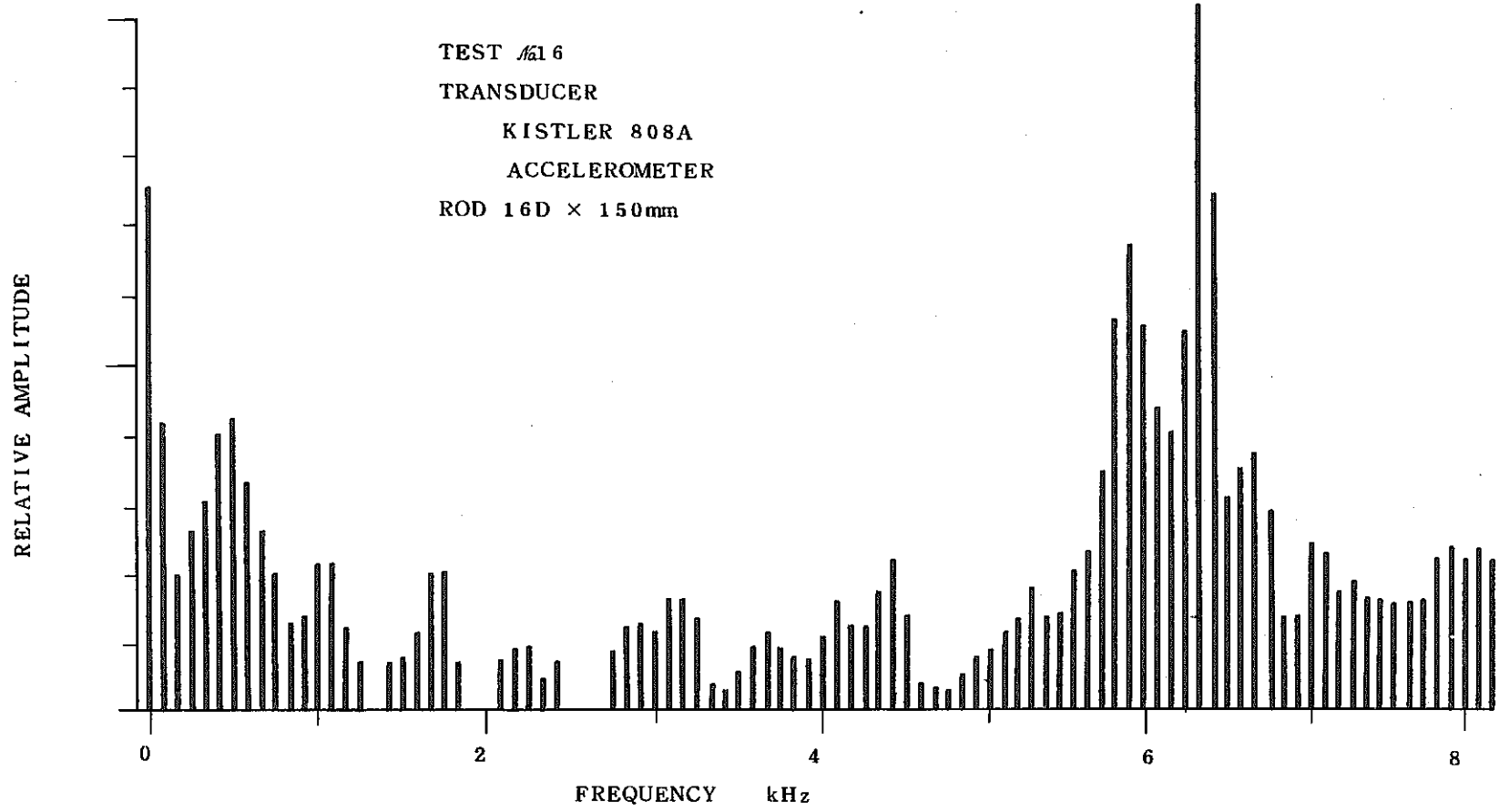


图 7-12 周波数分析结果

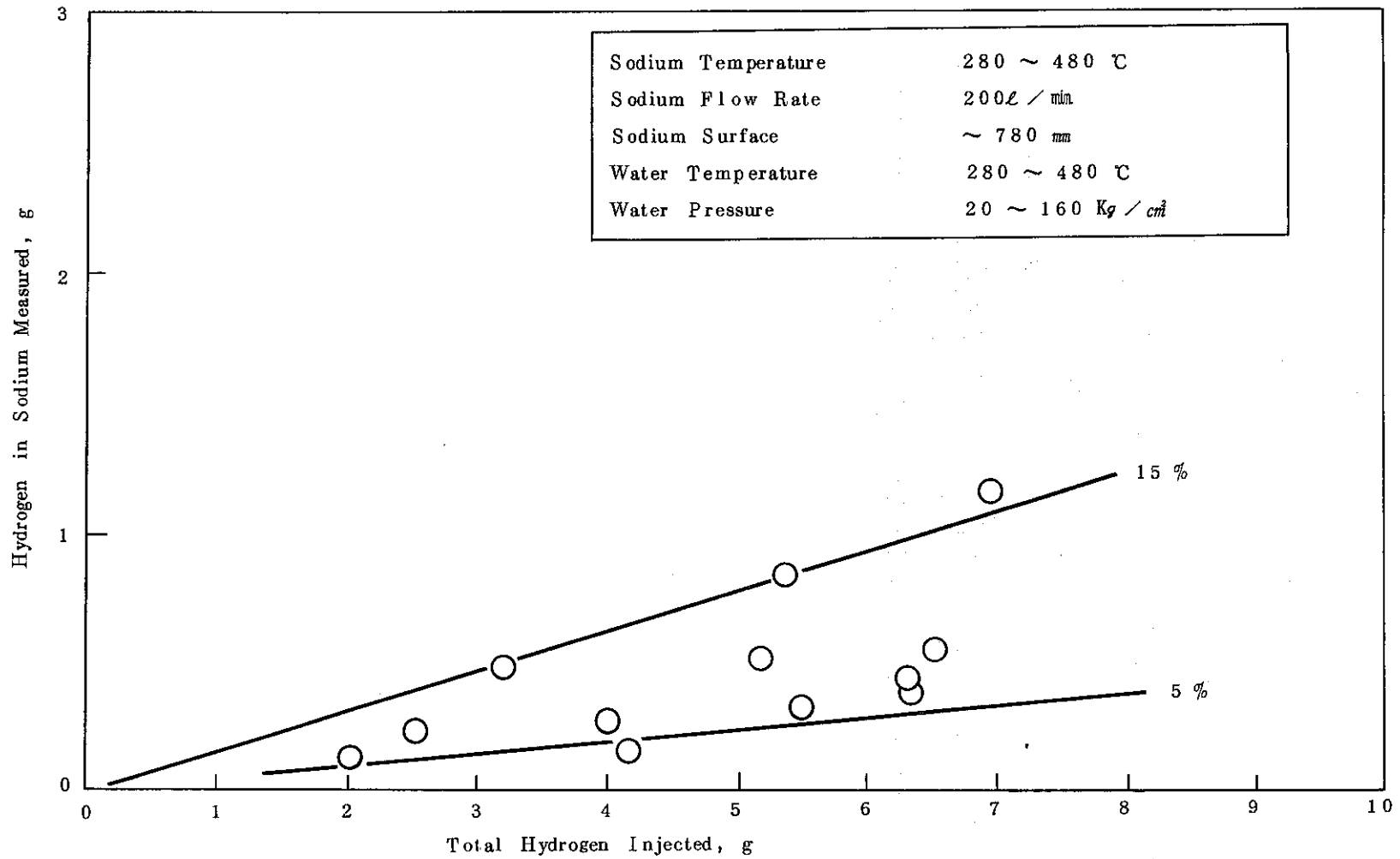


図 8 - 1 水反応によりループ内の Na に溶解した水素の割合

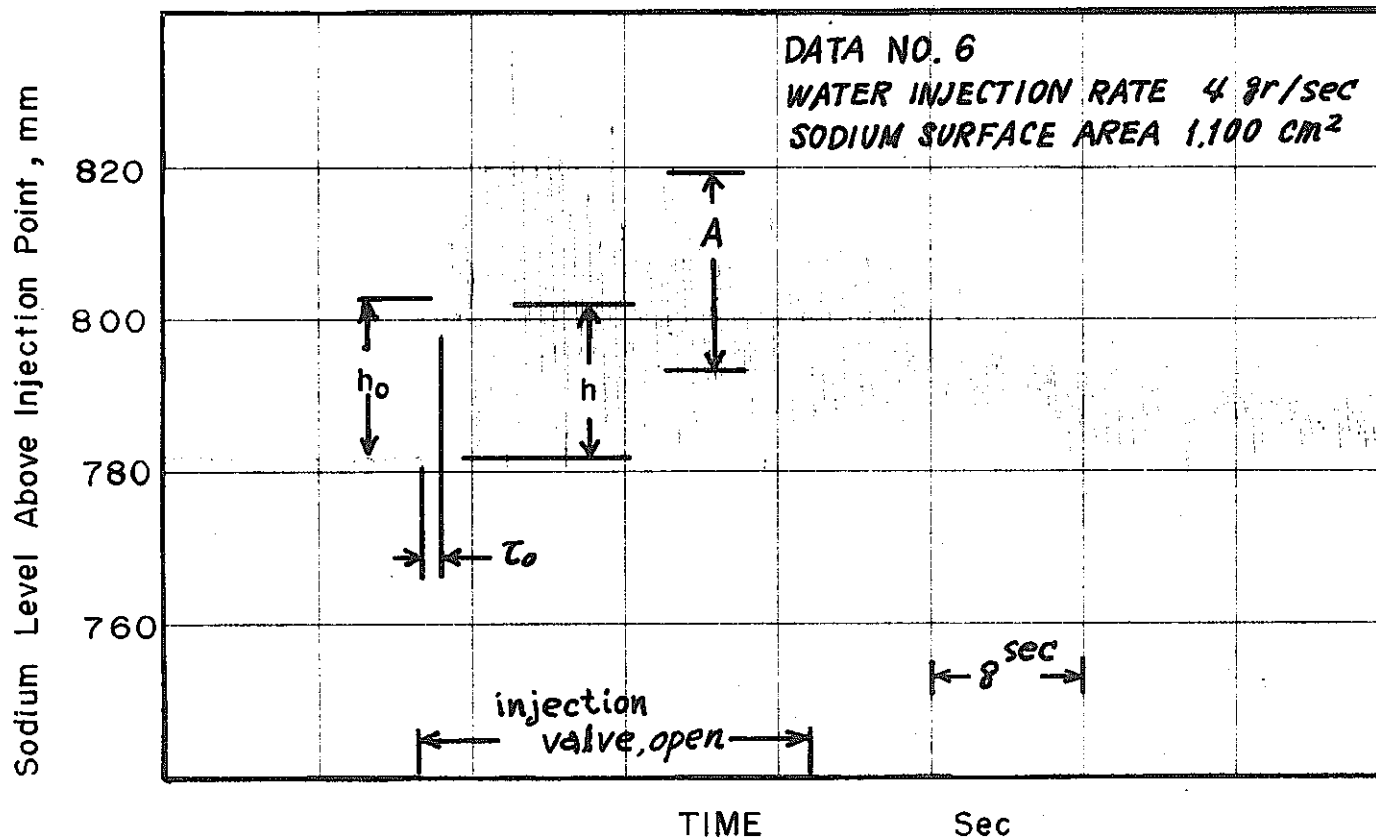


図 9 - 1 Na - 水反応時のNa 液面の振動

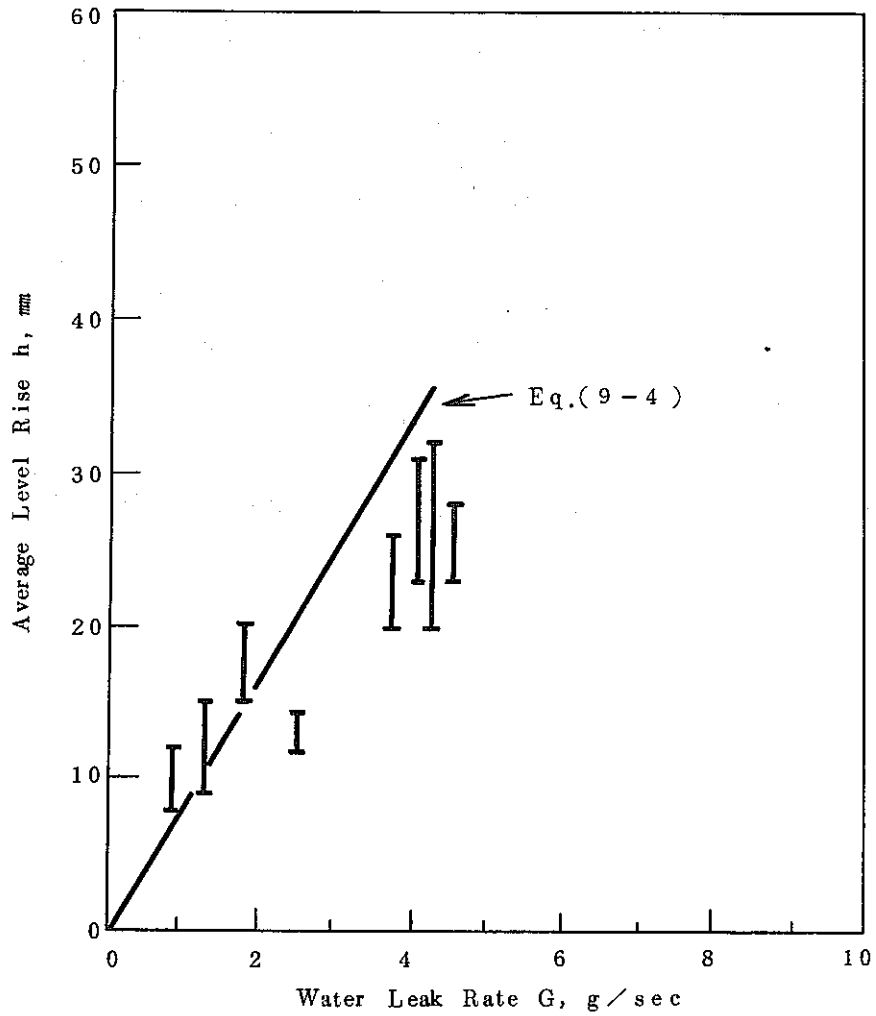


図 9 - 2 液面の平均上昇値と水リーク率の関係

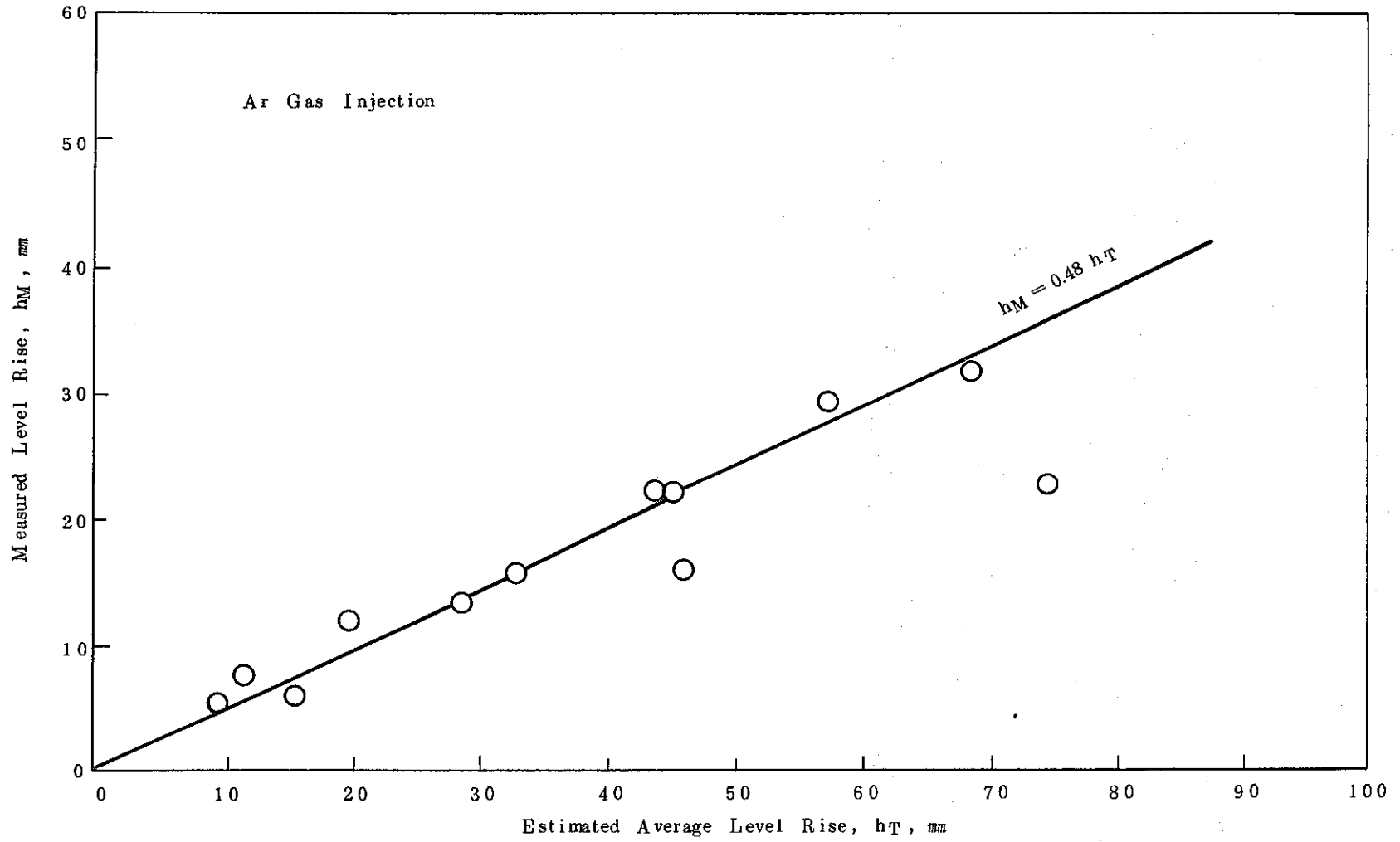


図 9 - 3 Ar ガス噴出時の液面上昇の推定値と測定値との関係

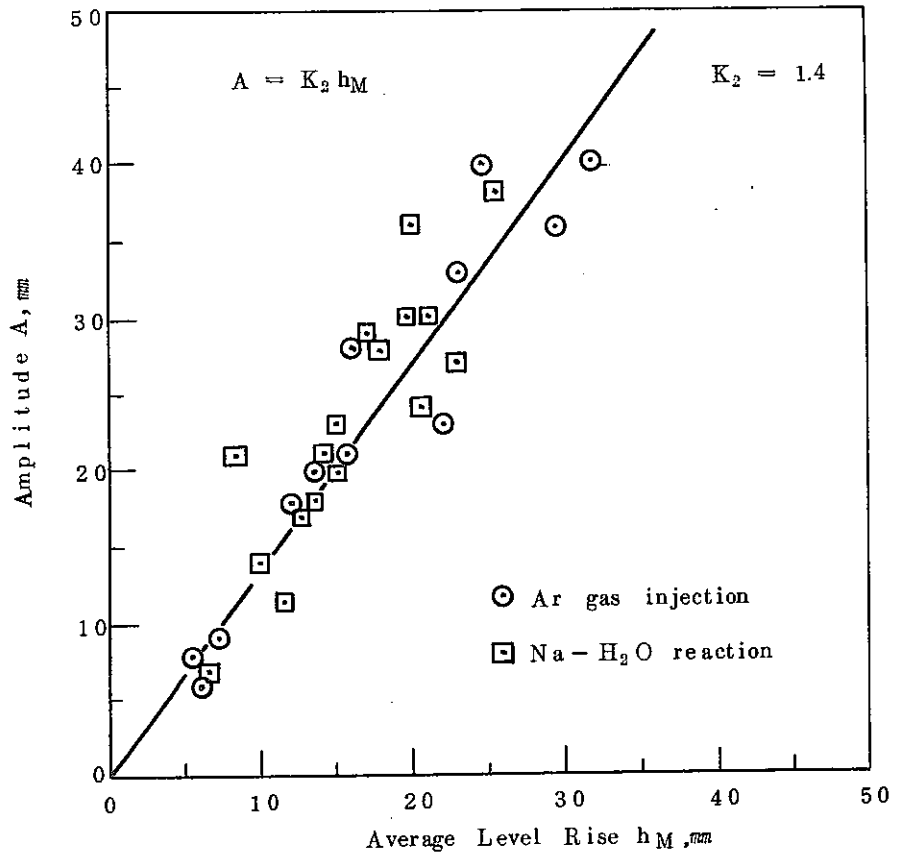


図 9 - 4 液面の平均上昇値と振巾の関係

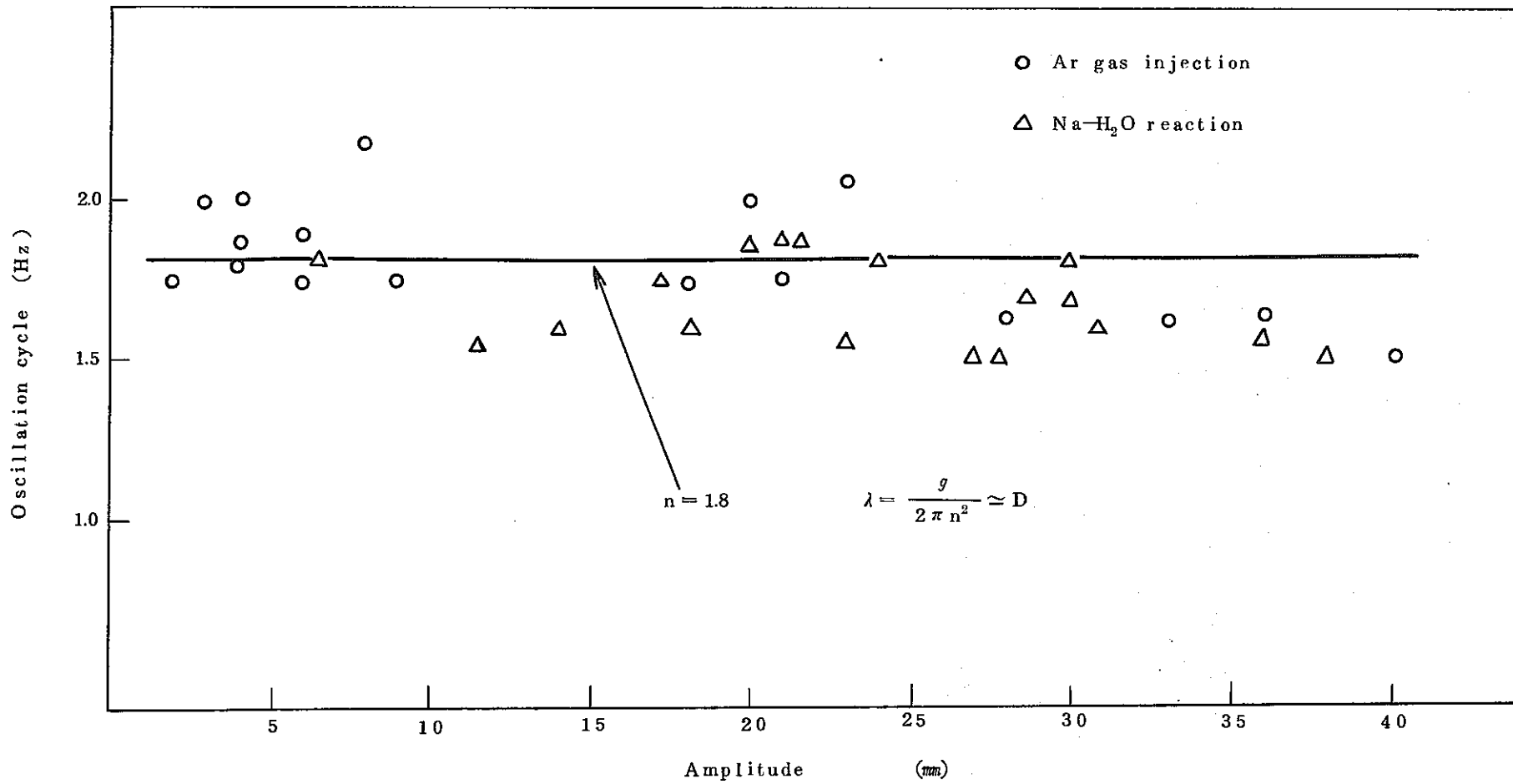


図9-5 Na水反応時とArガス噴出時の液面振動の周波数

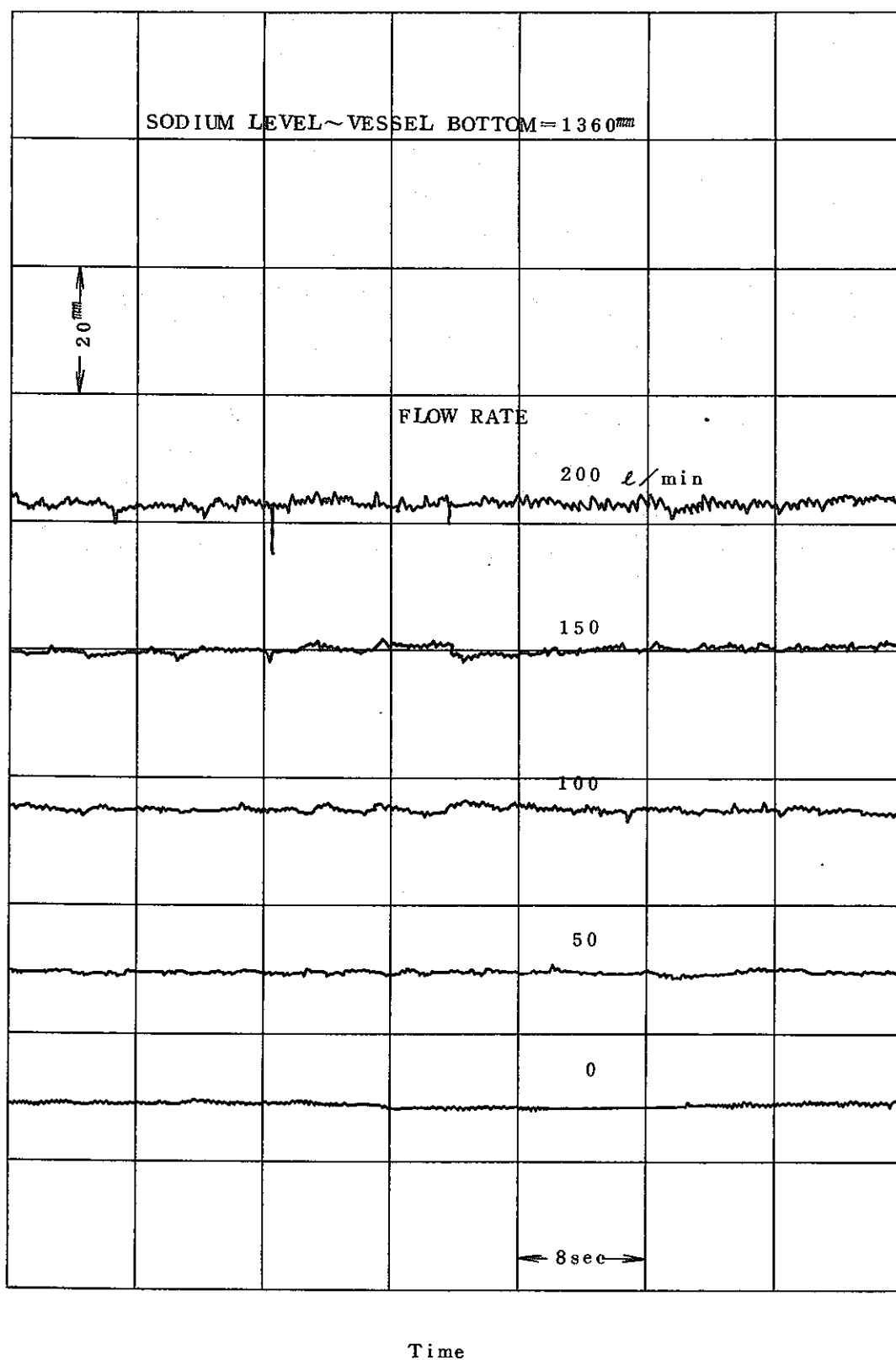


図 9 - 6 液面振動ノイズのNa 流量による影響

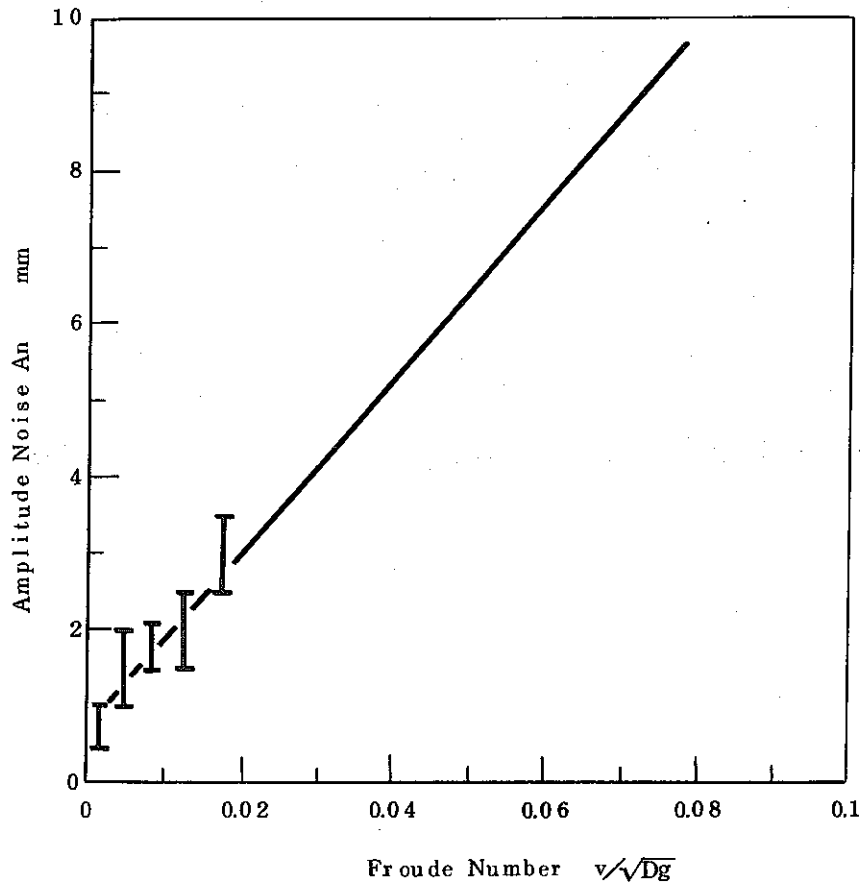


図 9-7 フルード数で整理した液面振動のノイズ振巾

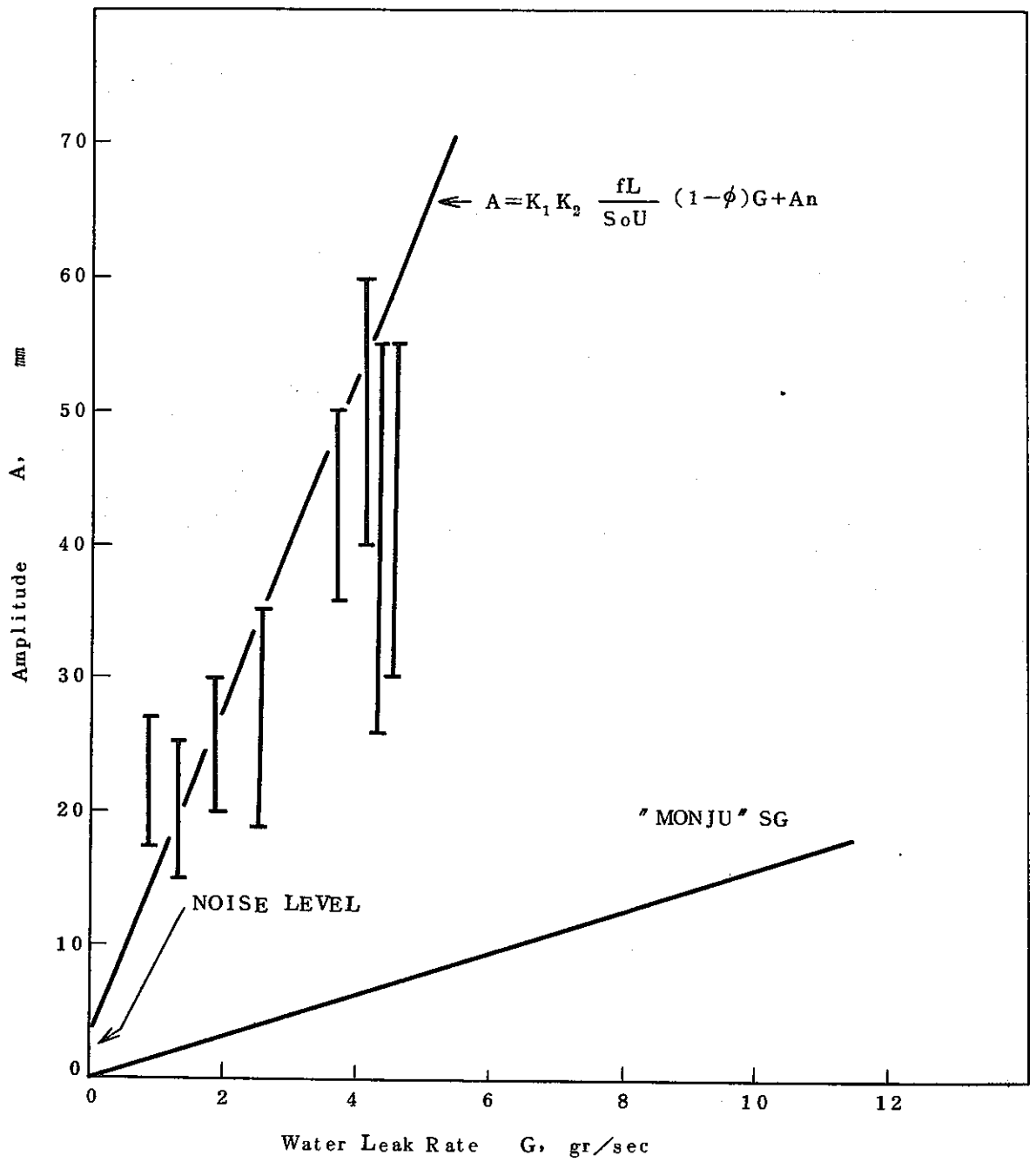


図 9 - 8 液面振動の振幅と水リーク率の関係