

小リーク・ナトリウム・水反応試験研究

第4報

蒸気ウェステージと検出計の応答

1974年7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4報

蒸気ウエ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

橋 口 功

大 島 巖*

井 上 設 生

堀 雅 夫

*現, 日本原子力事業(株)

期 間 1973年8月1日～1974年5月31日

目 的 蒸気注入によるターゲット管のウエステージに及ぼす種々のパラメータの影響を定量的に把握することおよびリーク検出計の応答特性を調べること。

要 旨 今期間中次の項目の試験をした。(1) 破損伝播実験, (2) ターゲット管上の温度分布測定, (3) 内径0.2mmのノズルによる小リークウエステージ, (4) キャプセルによる微小リーク試験時の水素検出計の応答。

破損伝播実験により, 破損孔の大きさ, 破損に至るまでの時間を知ることができた。さらに, 破損に到るまでのへこみの成長の過程を考察した。ウエステージ部のへこみ測定から, へこみ分布は正規分布をすることがわかった。ターゲット管表面の温度分布の形状はへこみ分布の形状とよく似ていた。

ウエステージ率をリーク率とNa温度で表す実験式をクロモリ鋼とステンレス鋼について作った。

Na中水素検出計として新たに電離真空計(B-Aゲージ)をとりつけた。ノーブルポンプ, 質量分析器, B-Aゲージのうち, B-Aゲージの性能が最も良好であることがわかった。B-Aゲージの感度は, Na中水素濃度が100ppbのとき, 3ppbと計算された。

ノーブルポンプ及びB-Aゲージの応答を理論的に解析した。理論値と実測値はよ

く一致した。この解析から、Na 中への水素の溶解割合を知ることができた。

Ar 中水素計では還流式 Na ベーパトラップの性能をしらべた。

STUDIES OF SMALL LEAK
SODIUM-WATER REACTIONS

(4)

STEAM WASTAGE AND RESPONSES OF LEAK DETECTORS

July, 1974

Hiromichi NEI

Kozaburo UJIHARA

Yoshihiro OHUCHI

Koh HASHIGUCHI

Iwao OHSHIMA

Setsunari INOUE

Masao HORI

ABSTRACT

This report describes the results of the thirty five test runs conducted by the small-leak sodium-water reaction test loop (SWAT-2) in the period of August 1973 through May 1974.

The objectives of the work is to determine the effects of various parameters on material wastage during small leak of super heated steam into sodium and to examine characteristics of the responses of various leak detectors after the steam injections into sodium.

The following tests were made in the period described above.

- (1) Full penetration of a target tube by wastage.
- (2) Measurement of temperature on a target tube surface during sodium-water reactions
- (3) Wastage rate of a target tube with use of a nozzle with 0.2 mm diameter
- (4) Responses of detectors of hydrogen in sodium or argon gas after super-small leaks of steam into sodium by using capsule

Material wastage tests with steam injections into sodium have been performed. The test conditions of sodium velocity past target, of spacing between nozzle and target, and, of sodium and steam temperature were same as ones described in previous report. ¹⁾ The nozzle diameter was 0.2~1.0 mm. A target material was a 2-1/4Cr-1Mo steel and stainless steel.

Inspection of the contour map and sectional view of wastage area showed that the depth distribution was expressed by a normal curve of error for most ranges of leak rate tested. Tube penetration tests were conducted to evaluate the size of penetration hole on the target tube, and time which is from starting of steam leaks to tube failure. A process of the propagation of tube failure was discussed assuming the depth distribution of wastage area to be a normal curve of error.

An experimental equation was presented to predict the wastage rate as a function of the leak rate and the sodium temperature for 2-1/4Cr-1Mo steel and stainless steel respectively .

Temperature distributions on the target tube were very similar to the wastage patterns. Maximum temperature measured on the target tube was about 1150 °C .

An ionization gauge (B-A gauge) was installed in the system of the detector of hydrogen in sodium.

Performance of each hydrogen detector in sodium such as noble pump, massspectrometer and B-A gauge was examined. B-A gauge was most efficient of these hydrogen detectors in sodium. Sensitivity of B-A gauge was calculated to be 3 ppb if hydrogen concentration in sodium was 100 ppb.

Recordings of B-A gauge and noble pump during and after steam injections into sodium were analysed. Agreements between calculated and observed spectra were very good. Portions of hydrogen dissolved in sodium, which is generated by sodium-water reactions, were obtained from the analysis.

A circulation-type vapor trap of sodium was installed in the system of the detector of hydrogen in argon gas and its performance was investigated.

目 次

1	まえがき	1
2	ウェステージ	3
2.1	破損伝播実験	3
2.2	ウェステージ実験式	6
2.3	ウェステージパターン	8
2.4	破損孔の考察	10
2.5	噴流の温度分布	13
2.6	径0.2mmのノズルによるウェステージ	15
3	N a 中水素検出計	17
3.1	改造後のN i 膜構造	17
3.2	電離真空計のとりつけ	17
3.3	N a 中水素検出計応答の比較	18
3.4	応答の解析	18
3.5	各検出器の感度	23
4	A r 中水素検出計	26
5	おわりに	28
	参考文献	30
	附 録	32

図 リ ス ト

図 2-1	破損伝播試験(№ 5.0)におけるターゲット管内圧の様子	42
2-2	破損伝播試験のターゲット管外観(1)	43
2-3	" (2)	44
2-4	破損伝播試験によるウェステージ部の断面図	45
2-5	リーク率とウェステージ率の関係	46
2-6	リーク率と重量損率の関係	47
2-7	ウェステージ率の計算値(式 2.5 及び式 2.6)と実測値	48
2-8	ウェステージ率の計算値(式 2.9 及び式 2.10)と実測値	49
2-9(1)	ウェステージ部のパターン	51~52
2-9(2)	ウェステージ部のパターン	53~54
2-9(3)	ウェステージ部のパターン	55~56
2-10	正規分布	57
2-11	リーク率と $\frac{a}{x}$ の関係	58
2-12	重量損の計算値(式 2.14)と実測値	59
2-13	2-1/4Cr-1Mo 鋼の高温での引張強さ	60
2-14	ウェステージによる貫通孔の大きさ, 測定値と計算値	61
2-15	壁厚と貫通時間の関係(ソ連の実験結果)	62
2-16	温度分布測定用試験部	63
2-17	噴流の温度分布, Test №53~59	64
2-18	噴流の温度分布, Test №63~68	65
2-19	噴流の温度分布	66
2-20	ウェステージ分布と噴流の広がり角	67
図 3-1	改造後のセンサー部の構造	68
3-2	Na 中水素計系統図	69
3-3	各検出器の出力(リーク率 10.97g/sec, Ni 膜温度 500℃)	70
3-4	主循環 Na 温度 330℃, 水注入時刻は 20 秒)	71
3-5	微小リークに対するノーブル・ポンプの応答(上) 0.1 g, (下) 0.5 g, (Ni 膜温度 500℃, 水注入時刻は 20 秒)	72
3-6	微小リークに対する B-A ゲージの応答(上) 0.1 g, (下) 0.5 g, (Ni 膜温度 500℃, 水注入時刻は 20 秒)	73
3-7	試験部と水リーク検出系	74

図 3 - 8	混合の効果	75
3 - 9	水素の Ni 膜拡散	76
3 - 10	Na 中水素濃度とブラッキング温度の関係	77
3 - 11	応答に及ぼすパラメータの影響	78
3 - 12	応答に及ぼすパラメータの影響	79
3 - 13	(上) 実測値(実線)と計算値(点線)(ノーブル・ポンプ, Ni 膜温度 550 °C) (下) Na 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_{ℓ} : 遅れ時間(秒) t_0 : 水注入時間(秒), u : リーク率(g/sec)	80
3 - 14	(上) 実測値(実線)と計算値(点線)(ノーブル・ポンプ, Ni 膜温度 500 °C) (下) Na 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_{ℓ} : 遅れ時間(秒) t_0 : 水注入時間(秒), u : リーク率(g/sec)	81
3 - 15	(上) 実測値(実線)と計算値(点線)(B-Aゲージ, Ni 膜温度 500 °C) (下) Na 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_{ℓ} : 遅れ時間(秒) t_0 : 水注入時間(秒), u : リーク率(g/sec)	82
3 - 16	(上) 実測値(実線)と計算値(点線)(B-Aゲージ, Ni 膜温度 500 °C) (下) Na 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_{ℓ} : 遅れ時間(秒) t_0 : 水注入時間(秒), u : リーク率(g/sec)	83
3 - 17	リーク率に対する水素の溶解割合(ノズルから Na 液面までの距離 71~79 cm)	84
3 - 18	ノイズの変動幅に相当する Na 中水素濃度変化の計算値 実線(ノーブル・ポンプ), 点線(B-Aゲージ)。パラメータは水注入前の Na 中水素濃度。	85
3 - 19	ノーブル・ポンプの圧力 P_N (Torr) と質量分析器(H_1) の電流値の関係	86
図 4 - 1	還流式 Na ベーパートラップ	88
4 - 2	還流式 Na ベーパートラップを使用した時のカバーガス中水素検出器の出力 (Pd 膜温度 450 °C, 水注入時刻は 20 秒)	89
4 - 3	金網への Na の付着状況	90

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-水反応が発生する。管壁に生じる欠かんは、初めピンホ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、高速で隣接伝熱管にぶつかるため、いわゆるウェステージにより、2次破損をひきおこす恐れがあることが知られている。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。²⁾

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。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た。アルゴンガス中水素計は、1972年5月末に取付完了し、第2回目の水反応試験からテストされた。また、音響検出計もとりつけられて試験が続けられた。これらの結果は第2報としてまとめてある。³⁾特に第2報では、水素検出計の設計に関する指針がまとめられてある。

その後、試験を継続し、1973年7月末までに計49回の水反応試験をおこなった。この間の試験の目的は、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であった。特に蒸気によるウェステージは水のウェステージにくらべて非常に激しいと云われていたが、あまりその原因や、その定量的な違いがわかっていなかったため、蒸気ウェステージを定量化することに重点をおいた。この結果については第3報としてまとめてある。¹⁾

第3報で報告したリーク検出計の結果は、Na中水素計とArガス中水素計についての他、連続式ブラギング計、音響検出計、さらに液面計についてまとめてある。連続式ブラギング計は、リーク検出計としてどの程度の水の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、水注入量とブラギング温度の変化の対応データをとった。音響計はS/N比の改善をおこない、水リーク率と音響出力の関係をとった。周波数分析もおこなった。液面計については、水注入量と液面振動の大きさの関係をまとめ、考察を加えた。

試験はその後にも継続し、1974年5月末までに合計84回の水反応試験をおこなった。第3報に報告した1973年7月末までの試験の後、1973年8月から1974年5月末まで

には35回の水反応試験をおこなった。この間おこなった主な試験項目は、

- (1) 破損伝播実験
- (2) Na温度と反応面温度分布
- (3) 内径0.2mmのノズルを使った小リークウェステージ
- (4) 微小リークキャプセルによる水素計感度試験

などである。破損伝播実験は、ターゲット伝熱管内をArガスで加圧し、ウェステージにより管壁が貫通した時に注水を停止することにより、破損孔の大きさと破損状態及び破損に到るまでの時間を調べるものである。Na温度と反応面の温度分布は、ウェステージ量とNa温度の關係に理論的な裏づけをするためと、ターゲット面上の温度が水反応時に相当上昇しないとウェステージしないことから、温度分布を式で表わすことにより、ウェステージの及ぶ範囲を明確にしようとしたものである。0.2mmのノズルは、それまで0.3mmのノズルが最小であったのを、実験のリーク率範囲を広げたものである。微小リークキャプセル試験は、Na中にあらかじめ少量の水を入れたキャプセルを沈めておき、それを外部から破り、水素計の応答感度を調べるためにおこなった。

これらの試験の他に、Na中水素計に関しては、応答特性を解析し、計算コードによって実験結果と比較した。Ar中水素計については、ベーパートラップを種々改造し、水反応時の応答を改善することと、長時間Naベーパーをトラップすることが出来るようなものを作ることをねらった。また、音響計については、Na中又は水中にArガスを噴出した時の音響出力をNa-水反応時の出力と比較した。さらにSWAT-2にとりつけられているコールドトラップの効率を測定し、水素計の流出感度に直接きいて来るNa中水素のバックグラウンド濃度をコントロールするために必要な基礎資料を得た。

ウェステージ試験のターゲットと水噴出ノズルは三菱原子力工業(株)で金属学的な検査をおこなった。サンプルは試験炉10から53までである。検査の結果は別に報告書⁴⁾が出されている。

音響検出器に関する報告は、別の報告書でまとめる予定であるので、本報告から除外した。

2 ウェステージ

2.1 破損伝播実験

2.1.1 目的

ターゲット管壁を完全に貫通させないウェステージ試験のデータから、管壁が貫通する‘破損伝播’の時間は大約推定できる。しかし、ウェステージによるへこみが深くなってくるとウェステージ率が変化するかもしれない。また、壁の厚さがまだかなり厚く残っている時に破損してしまい事も考えられる。このような場合には破損に到る時間はかわって来ることになる。ウェステージによるへこみが深くなって来た時にウェステージ率が変化するかどうかは、直接調べられたデータはみあたらない。水噴出時間の影響はAPDAで調べられている⁵⁾。それによると、水噴出時間が長くなると、ウェステージ率は少し低下している。ターゲット管に内圧が加わっている場合の貫通時間への影響は、ほとんどわかっていない。

破損した瞬間にどのような破れ方をするかは破損伝播による2次Na-水反応事故の規模を決定する上で重要である。特に大リークNa-水反応において、初期圧力パルスが、Naと水が最初に接触する面積によって決まるのではないかと考えられるため、破損瞬間の破損孔の大きさは安全評価の上で重要な意味を持っている。破損孔径が、種々の条件を考慮し、実際の場合にある大きさ以上にならないという事が云えれば、現在進められている蒸気発生器内の伝熱管が瞬時ギロチン破断すると云う仮定から、かなり前進することになる。さらに瞬時に複数本の伝熱管が破損することが有り得るかどうかと云う事が問題になる。これに対する解答を出すことは非常に難しいと考えられる。実際問題として完全に瞬時に複数破損と云う事は有りえない訳で、時間巾としてどの程度を問題にするかということになる。大リークNa-水反応実験によると、⁶⁾初期圧カスパイクは1 msecオーダーの時間巾である。従って1 msec程度以内に複数本の伝熱管が破損することが有り得るかどうかと云う事になる。ウェステージによる破損に関しては、リーク率、距離、水の伝熱管にぶつかる角度などが複雑に影響するが、ある程度目やすがえられることが期待される。例えば、リーク検出との関連で、確立としてどの程度で起りうるかをつかむことができるかもしれない。

以上まとめると、破損伝播実験の目的は、

① ウェステージにより伝熱管が破損するまでの時間を求めること。

② 破損した瞬間の孔径、孔の破損状態をみること

である。

2.1.2 試験方法

使用したターゲットアセンブリは、第1報²⁾又は第2報³⁾に示した構造のもので、第3報¹⁾でまとめてある連続式のアセンブリではない。水を直接ぶつけるターゲット管の中にはArガスを封入した。ウェステージにより破損した瞬間を出来るだけ早く検出するため、Arガスの体積は出来るだけ小さくした。ターゲット管内に約30cc、圧力計と配管部は約35cc、合計70cc弱である。封入Arガス圧は100atgとした。破損後、この圧力が95atg以下にさがったら、水注入弁を閉とした。

試験は4回おこなったが、使用したターゲットはいずれも2-1/4Cr-1Mo鋼である。Naと蒸気の温度は約480℃一定とした。水噴出ノズルは0.3, 0.5, 0.7mmの三種を使った。ノズルターゲット間距離は17.5mm一定とした。但し、ノズル径0.7mmでターゲット管に対して接線方向に蒸気をおつける試験を一度おこなった。その他の条件はほぼ一定で、得られた結果と一緒にまとめて表1に示してある。

2.1.3 試験結果

図2-1は破損伝播試験の水噴出状態を示した記録例である。'Injection valve signal'が立ち上がった点が水噴出開始を示す。水噴出と同時に、反応容器にとりつけられている誘導式液面計による'Sodium surface'の振動がみられる。'Pressure in target tube'がさがり始めた点がウェステージによりターゲット管が破損した瞬間である。ほぼ同時にInjection valveが閉となっている。また、破損した後、Na液面が、破損前より若干高く飛び上っているのは、ターゲット管内に封入したArガスが出てきたことによるものである。水噴出中にターゲット管内の圧力が若干上昇している。(103 Kg/cm² Gが104 Kg/cm² G程度にあがっている)のは、高温の反応生成物がぶつかったため、加熱され内圧が上昇したためであろうと考えられる。この図では、あまりはっきりした圧力変化ではないが、他の試験でも同様な記録がえられた。

図2-2と図2-3とにターゲット管のウェステージ部の外観写真を示す。図2-4はウェステージ中心部の断面図である。Test No 50の外観写真で、ウェステージ部が白くなっているのは、試験後レプリカをとるために流し込んだものが付着しているためである。No 50, 51, 62は内圧の影響を受けてターゲット管内面がふくれている。この事はNa-水反応時にはターゲット管の温度が非常に上昇していることを示している。No 51では貫通孔が2ヶ所にみられる。No 62はターゲット管表面に対して、ノズルからの水を接線の方向にぶつけた場合である。図2-4に示した貫通孔の大きさは概略値である。これら4回の結果からは、貫通孔の径は3mm以下であった。観測されている貫通孔は、貫通瞬間の大きさよりは若干大きくなっていることが考えられる。それは、圧

力低下を検出する検出遅れと水注入弁を閉じる時間及び閉じた後も注水管内に残留する蒸気が出て来る事による影響があるからである。従って観測されている貫通孔に近い大きさの孔が、破損の瞬間にあいたか、あるいは破損の瞬間はもっと小さな孔であったかは、今のところ断定はつけがたい。但し、ターゲットアセンブリの下部にとりつけられているフィルターの金網には貫通孔の破片らしいものはトラップしていなかった。また Test № 51 にみられる 2 個の孔も、内圧破損だけで 2 個が同時にあくことは物理的に考えられないので、1 個の破損孔があいてから他方がさらにウェステージによりあいて大きくなったものであろうと推測される。結論としては、破損瞬間の孔径はそれ程（例えば 2～3mm 以上に）大きくはなかったと云うことができる。

破損伝播実験によりえられたウェステージデータをリーク率とウェステージの関係でまとめたのが図 2-5 で、他の破損させない場合のデータと一緒に示してある。破損させない場合のデータには、すでに第 3 報にまとめたノズル径 0.3, 0.5 及び 0.7 mm の結果の他に、後で述べるように、本報告書の期間中におこったノズル径 0.2 mm の結果が含まれている。本報告書の期間中のデータには、Test № が示されている。破損伝播実験のデータは 'Full Penetration' の記号で示してある。図中の曲線は第 3 報でまとめたように、Na 温度 480℃ のウェステージ率を結んだものである。破損させたデータはいずれも Na 温度 480℃ であるが、破損させない場合にくらべて、ウェステージ率は小さくなっている。Test № 62 はターゲットの表面に対して接線方向に水を噴出した場合で、この図 2-5 に示した他のデータはすべて垂直にぶつけた場合であるので単純には比較できない。接線方向に噴出させて、破損させなかったウェステージ実験の結果は第 3 報の図 3-17 にのせた Test № 7 と 9 である。このうち № 7 は水噴出方向がターゲットの接線方向よりずれていたために、ウェステージ率が特に低くなったと考えられた。そこで № 9 と № 62 を比較するとやはり接線方向の場合でも破損させた場合のほうが破損させない場合よりウェステージ率は低くなっている。

図 2-6 は重量損率で整理したものである。ウェステージ率の場合と同様、他の破損させない場合と一緒に示してある。Test № 52 が破損させない場合にくらべて特に重量損率が大きくなっている他は、№ 50 と № 51、さらには № 62 とも破損させない結果と比較的同じ重量損率を示している。破損させない場合にくらべて破損させた場合のウェステージ率が小さくなっているにもかかわらず、重量損率は変らなると云う結果は興味深い事である。

2.2 ウェステージ実験式

破損伝播実験の結果に検討を加える前に、第3報で報告した破損させないウェステージ試験の結果から実験式を作ったので、ここにまとめておく。

ウェステージに関する理論的な考察はある程度こころみられているが、ウェステージのメカニズムについては現在まだほとんどわかっていない。ウェステージを表わす式についても、いくつか出されてはいるが、関係するパラメータの影響をみるに必要なデータ数が少ない事と、そのメカニズムがわかっていないことにより、十分なものは無い。ここでは、得られた結果を出来るだけ忠実に式としてまとめるために最小2乗法を使うことにした。

今まで得られたウェステージ率のデータの中に含まれている主なパラメータは、リーク率、Na温度及びターゲット材質である。従って、実験式もこの3者をパラメータとする。この他ノズル径と蒸気圧力が変化しているが、ウェステージ率をリーク率で整理すればこの2者のウェステージ率に与える影響は、比較的小さいと考えられる。

式の形を決めるうえで次の3点を考慮した。

- ① ウェステージ率とリーク率は、両対数グラフ上で2次曲線に近い関係にある。
- ② Specific Wastage Rate のリーク率依存性は比較的小さい。
- ③ Specific Wastage Rate の温度依存性は指数関数的である。

これらの根拠は第3報を参照されたい。①の事から、ウェステージ率は次の様に表示される。

$$W = A e^{-B \left(\ln \frac{G}{C} \right)^2} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここでA, B, Cはリーク率以外のパラメータから決まる定数、Gはリーク率である。Specific Wastage Rateはウェステージ率をリーク率で割った値として定義されているので、②と③の事から次の様に表わされる。

$$\frac{W}{G} = K_1 e^{-K_2 / T} \dots \dots \dots (2.2)$$

(2.1)と(2.2)式をくらべると、(2.2)式では(2.1)式の様に表示されるリーク率の影響を直線におきかえて温度依存性をみていることになる。図2-5にみるようにリーク率とウェステージ率の関係はNa温度480℃の場合のデータが多く、かつまとまっている。そこで、まずNa温度480℃近くのデータについて(2.1)式をフィットさせ、それから(2.2)式を使って温度依存性をみる。対照とするデータは第3報の報告期間中にえられたTest No. 6からNo. 49までとした。ターゲット管に対して垂直にあてた場合のみにし、接線方向は除いた。またウェステージ率が0と測定された場合は使

用しなかった。また、ターゲット材質に関しては、2-1/4Cr-1Mo 鋼とステンレス鋼とについて別々に式を作ることにした。

Na 温度 480°C の場合のウェステージ率を W_{480} とすると、あるリーク率でのウェステージ率と温度の関係は次の様に表わされる。

$$\frac{W}{W_{480}} = \frac{(W/G)}{(W/G)_{480}} = \frac{K_1 e^{-K_2/T}}{K_1 e^{-K_2/753}} \dots\dots\dots (2.3)$$

従って(2.1)式を使って480°Cの場合について求めた定数 A, B, C と(2.2)式を使って求めた定数 K_2 を次式に入れることにより、ウェステージ率を表わす式が決定される。

$$W = e^{K_2/753} A e^{-B(\ln \frac{G}{C})^2 - K_2/T} \dots\dots\dots (2.4)$$

得られた式は、2-1/4Cr-1Mo 鋼について、

$$W = 252 e^{-\{0.255(\ln \frac{G}{5.12})^2 + \frac{5460}{T}\}} \dots\dots\dots (2.5)$$

ステンレス鋼, SUS304 について

$$W = 526 e^{-\{0.287(\ln \frac{G}{3.19})^2 + \frac{7180}{T}\}} \dots\dots\dots (2.6)$$

この両式によって計算されたウェステージ率と測定値との比較を図2-7に示す。

リーク率と温度の効果を別々にしないで、一括して考えることもできる。ここではウェステージ率を次式でおいた。

$$W = A_1 e^{-\{A_2 (\ln \frac{G}{A_3})^2 - A_4/T\}} \dots\dots\dots (2.7)$$

これを線型化すると次の様になる。

$$\ln W = \ln A_1 - A_2 (\ln G)^2 + 2 A_2 \ln A_3 \cdot \ln G - A_2 (\ln A_3)^2 - A_4/T \dots\dots\dots (2.8)$$

$\ln W$ は $\ln G$ の2次式及び $1/T$ の1次式の合成として考えられることになる。従って上式より各パラメータを最小二乗法によって求めると次のようになる。

2-1/4Cr-1Mo

$$W = 463 e^{-\{0.135(\ln \frac{G}{34})^2 + 5330/T\}} \dots\dots\dots (2.9)$$

SUS304:

$$W = 8470e^{-\left(0.0602\left(\ln \frac{G}{1240}\right)^2 + 7520/T\right)} \dots\dots\dots (2.10)$$

この式によって計算されたウェステージ率と測定値との比較を図2-8に示す。この結果と先の図2-7とを比較すると、計算値と測定値の違いは両図で大差ない。

2.3 ウェステージパターン

2.3.1 へこみ測定

Test № 10 から № 49 までのターゲットにつきウェステージ部のへこみ状態を測定した。このウェステージパターンの測定の目的はふたつある。第一はへこみの分布からウェステージされた体積を求め、重量損とウェステージ率を関係づけることにより、将来ある程度理論的なウェステージの式を作る時の資料とすること。第二はウェステージにより伝熱管が破損（破損伝播）した際の破損孔の大きさを評価するための資料を得ること。

測定は特別に製作した‘表面測定器’と計算機によった。表面測定器はトラバースする針の上下運動を差動トランスで電気信号にかえ記録するものである。試料としては現在使用しているターゲット管状のもの他、平板状のものも使える。針を左右にトラバースさせるのはモーターにより自動的におこなうが、管又は板を1ピッチ回転又は移動させるのは手動による。記録計に直接書かせると、管の場合、円周方向各点の軸方向断面図が直接描かれる。今回の測定では、信号を計算機に入れ、X, Y, Zをデジタルで出力し、それから手書きで等深線図を作成した。作図も計算機でやらせるようなプログラムはIBMなどにすでにあるが、相当経費がかかる。

測定された等深線図と断面図を図2-8(1)~(3)に示す。等深線図上の×印は最大深さ又は極大深さの点を示す。断面図はこの最大深さ又は極大深さの点を通り、等深線図に示した直線で切断したウェステージ分布を示す。円周方向にとった断面図はターゲット管表面の曲がり直線におきかえ、表面からの深さを示す。№ 15 と 16 でプラスで示されているのは、ウェステージ部が逆にもりあがっているのを示す。Test № で欠番になっているのは、ウェステージ部が測定される程へこんでいないか、又はへこみが急で針がトラバースできなかった場合である。

Test № 20, 22 などはウェステージ中央部より少し離れたところが深くなっていて、云わゆるトロイダル状であるのがわかる。№ 23 の如く、かなり平らな形状もあるが、全体的にみると、№ 28 にみられるように正規分布状のものが多い。そこで、ウェステージ部が正規分布表わされるものとし解析してみる。

2.3.2 ウェステージ分布

噴流の速度分布も正規分布に近い形をしているので、ウェステージが噴流によるものであることを考え、ここではウェステージ分布を次式でおく。

$$l = l_0 \cdot e^{-\frac{(a r / x)^2}{2}} \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、 l は半径 r の点での深さ、 r は中心からの距離、 x はノズルターゲット間距離、 l_0 は最大(中心点)深さ、 a は実験的に求まる定数である。(図2-10)

軸対称流の速度分布の場合は $1/a$ は 0.066~0.08 の値をとると云われているが、ここでは a/x を定数と考え、それをウェステージのへこみ分布から逆に求める。この理由は、噴流とウェステージの関係が単純でないこと、ノズル・ターゲット間距離 x の影響をウェステージ試験で現在までに調べていないことによる。 a/x を求める手順は次のようにした。

- ① l_0 はウェステージ部の最大深さの実測値を使う。
- ② ウェステージ部の各深さの等深線について、その等深線でかこまれた部分の面積を求め、それを円でおきかえた時の等価半径を r とする。
- ③ その時の深さ l と r から、式(2.11)を使って a/x を計算する。
- ④ 各 l に対して得られた a/x の値をひとつのウェステージ部について平均する。

このようにして各 Test 毎ごとに得られた a/x の値を横軸にしてプロットすると図2-11の様になる。リーク率が大きくなると a/x は小さくなる傾向を示す。図中に示した直線は便宜的に求めたリーク率と a/x の関係を示し、次式で表わされる。

$$a/x = 0.64 G^{-0.53} \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで、 G はリーク率で $[g/s]$ 、 a/x の単位は $[mm^{-1}]$ である。図2-10にはノズル径をパラメータにして示してあるが、これを見てわかるように、 a/x がリーク率の影響を受けると云うより、むしろ、ノズル径によって影響されていると考えられる。ノズル径 $0.3mm$ の場合の a/x の値を平均し、 x に実験条件のノズルターゲット間距離 $17.5mm$ を入れると $1/a$ は約 0.07 となる。ノズル径が 0.5 又は $0.7mm$ になると $1/a$ はもつと大きくなる。ノズル径 $0.3mm$ の場合はかなり発達した反応生成物のジェットがターゲットにぶつかり、その速度分布に比例したウェステージ分布が生成されるが、ノズル径が大きくなると反応が完全に終わっていないことが多く、ウェステージパターンがトロイダル状に近く、平坦であるため、それを正規分布と仮定して求めた $1/a$ の値が理想的な軸対称流の場合より大きくなるのであろうと考えられる。

2.3.3 ウェステージ部体積

ウェステージ部の断面が(2.11)式で表わされるとすると、その体積Vは次の様に解折的に求まる。但し、ターゲット管の曲率の影響を考えないことになる。

$$V = \int_0^{\ell_0} \pi r^2 d\ell \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

(2.11)を微分すると

$$d\ell = -\ell_0 \left(\frac{a}{x}\right)^2 r e^{-\frac{(ar/x)^2}{2}} \cdot dr$$

(2.13)に入れて

$$V = \pi \ell_0 \left(\frac{a}{x}\right)^2 \int_0^{\infty} r^3 e^{-\frac{(ar/x)^2}{2}} dr$$

しかるに

$$\int_0^{\infty} r^3 e^{-\frac{(ar/x)^2}{2}} dr = 2 \left(\frac{x}{a}\right)^4$$

よって

$$V = 2\pi \ell_0 \left(\frac{x}{a}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

ここに(2.12)式を入れ、ターゲット材の比重rを乗ずると重量損が求まる。

この様にして計算された重量損と実測値との比較を図2-12に示す。この図で中程度の重量損の場合実測値と計算値は比較的よくあっているが、大きい場合と小さい場合には実測値の方が大きくなっている。重量損が大きい場合には、ウェステージ分布がトロイダル状などになり正規分布からずれているためである。小さい場合には、正規分布で表わされた中心近く以外の、かなり広い範囲にわたってウェステージされているのではないかと考えられる。

2.4 破損孔の考察

2.4.1 内圧破損孔径

破損伝播実験で得られた破損孔の大きさを考察する。ターゲット管の内部にはガス圧力Pが加えられているので、ウェステージにより管壁の厚さhが薄くなって来ると内圧で破損する。その時の破損孔の半径をrとし、強度式として次式が成立するとする。

$$2\tau h = Pr \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

ここで τ は引張強さである。破損は次の関係が満足した時に起るとする。

$$h \leq \frac{P_r}{2\tau} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

ウェステージの分布は先に求めた正規分布であるとする

$$\delta - \ell_{oe} - \frac{(a_r/x)^2}{2} \leq \frac{P_r}{2\tau} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

ここで δ はターゲット管壁厚さである。この関係を満足する最小の r を求める。少々計算が複雑であるが

$$r_R = \frac{1}{2b} - \sqrt{\frac{1}{4b^2} - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

が求める内圧破損による孔の半径である。ここで

$$b = \frac{P}{2\tau\delta} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

とにおいてある。破損時の厚さは (2.16) 式に (2.18) 式を入れて求まる。

$$h_R = \frac{P}{2\tau} r_R \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

破損後もウェステージ率 w_R が一定であり、破損孔はウェステージのみによって拡大するとすれば、破損後 $\Delta t = h_R / w_R$ 後に破損孔が拡大し始め、次式で表わされる。

$$r(t) = \frac{x}{a} \sqrt{2\ell_n \left(1 + \frac{w_R}{\delta} t\right)} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

ここで t は内圧破損がなく、単にウェステージのみにより貫通孔が出来るとした時の貫通瞬間からの時間を示す。

内圧破損孔の大きさを (2.18) 式を使って求めるには、管壁の高温での引張強さが必要になる。ウェステージを受けている時の管壁の温度は 1000℃ を越していると考えられるが、そのような高温での、強度は求められていない。図 2-13 に 2-1/4 Cr-1Mo 鋼の引張強さの一例を示す。ここでは実験で得られた破損孔から逆に (2.18) 式を使い τ の値を推定した。

図 2-14 は実験で得られた貫通時間、ウェステージ率を使い、(2.18) ~ (2.21) 式から推定した貫通孔の拡大する様子を示したものである。ここでは $\tau = 1 \text{ Kg/mm}^2$ とした。図中に示した観測値は平均的な内径で示してある。この結果からのみ云うと、破損瞬間後 2 ~ 3 分間で破損孔径は 2 倍くらいに広がるが、数 mm 以上には広がらない。

2.4.2 破損伝播時間

先にみたように破損伝播実験では、破損させない場合に比べてウェステージ率が小さくなっている。この原因としては色々考えられる。

- ①ウェステージ部が深くなることにより単位深さ当りウェステージする速度が遅くなること、
- ②ノズルからの距離が遠くなることなどである。

図2-15はソ連で得られたターゲット板厚さと貫通時間との関係で、⁸⁾やはり板厚が大になると貫通時間が大きくなり、ウェステージ率が低下する事を示している。

ここでは上にあげた二つの原因を前提に考察してみる。ウェステージ部体積は式(2.14)で表わされるとする。ノズル・ターゲット間距離 x の影響もこの式で表わされるとする。単位時間当りに重量が減少していく割合は一定であるとする。(2.14)式を微分して

$$\frac{dv}{dt} = \dot{V} = 2\pi \frac{d\ell_0}{dt} \left(\frac{x}{a}\right)^2 + 2\pi \ell_0 \frac{2x}{a^2} \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots (2.22)$$

ここでウェステージ率は

$$W_R = \frac{d\ell_0}{dt} = \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots (2.23)$$

となるから

$$W_R = \frac{a^2 \dot{V}}{2\pi(x^2 + 2x\ell_0)} \dots\dots\dots (2.24)$$

ここで x はウェステージ面とノズル間の距離で

$$x = x_T + \ell_0 \dots\dots\dots (2.25)$$

x_T はノズルとターゲット前面(ウェステージ開始前)の距離である。 $\ell_0 \rightarrow 0$ 附近でのウェステージ率を W_{R0} とすると

$$\frac{W_R}{W_{R0}} = \frac{x_T^2}{(x_T + \ell_0)(x_T + 3\ell_0)} \dots\dots\dots (2.26)$$

従って、ウェステージ部の深さ ℓ_0 が x_T に比べて大になるとウェステージ率が低下していくことになる。

貫通時間は(2.26)式の逆数を積分したもので表わされる。ウェステージ深さ0附近でのウェステージ率から推定した貫通時間と実際の貫通時間との比 ω は

$$\omega = \frac{1}{s} \int_{L_0=0}^{L_0=\delta} W_{No} / W_R dL = \left(1 + \frac{\delta}{X_T}\right)^2 \dots \dots \dots (2.27)$$

従って破損実験の平均ウェステージ率の深さ0附近のウェステージ率に対する比は(2.27)式の逆数で表わされる。実験条件である $\delta = 3.675mm$, $X_T = 17.5mm$ を入れると $1/\omega = 0.683$ となる。図2-5に示したNo.50などのウェステージ率がさがっている割合は、この値に近い。

2.5 噴流の温度分布

ウエステージ率は800~900℃以下で
はじけ出し

2.5.1 試験目的及び方法

先におこなったウェステージ試験から、第3報でまとめたように、Na温度はウェステージ率に非常に大きな影響を与えることがわかった。ウェステージ率はNa温度とともに指数関数的に上昇する。実際にウェステージを支配するのは噴流の反応生成物の温度である。各所でおこなわれているウェステージ試験からも、ターゲット面上にとりつけた熱電対の指示がかなり上昇しなければウェステージもされないと云う事がわかっている。従って、Na温度と噴流の温度との関係がつかめれば、ウェステージ現象を定量化するうえで、大きな前進となる。また、噴流の温度分布とウェステージ分布との関係が得られると、温度の測定からウェステージ量の推定がつく事になる。以上の目的で、Na温度と噴流の温度分布の関係を確かむ試験をおこなった。

使用した試験部を図2-16に示す。熱電対は噴流の温度を直接推定できるように噴流と平行にならべてある。噴流の圧力でまがらないようにサポートで支持しているが、そこから熱電対先端までの距離は3mmである。熱電対のシース外径は1.0mm、ピッチは1.5mmである。ノズルから熱電対先端までの距離は、ウェステージ試験のターゲット面までの距離と等しく17.5mmとした。

熱電対で反応点附近の温度を測定する上で最大の問題は熱電対自身がウェステージでやられてしまうことである。従ってできるだけ短時間の水噴出で温度を測定してしまふ必要がある。定常的な温度に到達するまでの過渡時間を考え、ここでは水噴出時間は4秒とした。ターゲット管のような比較的広い面にぶつかる場合と違い、熱電対のような細い線のウェステージ率は局所的なものであり、小さいのではないかと考えられた。SWAT-1において、細い棒状のターゲットを使用した局所的ウェステージ率を測定したところ、一般に出されているバルクなウェステージ率にくらべて約10分の1であると云う結果が得られている。これを考慮して、同じターゲットに、Na温度を変化させ、数回水を噴出して温度分布を測定することにした。ノズル径はいず

れも 0.5 mm とした。水噴出方向はNa流に対して直角の水平方向である。周囲はダミーのターゲット管が並んでいる。一連の試験を3回おこなった。1回目は表1のNo.53からNo.59まで、2回目はNo.63からNo.68まで、3回目はNo.81からNo.83までである。

2.5.2 試験結果と検討

1回目の結果を図2-17に、2回目の結果を図2-18に示す。3回目は水系のトラブルで測定できなかつた。

1回目はステンレスシースの熱電対を直接並べたもので、図2-16の様に3回の水噴出で中央部の熱電対がやられてしまっている。Na温度はNo.53からNo.59まで約 330°C から 480°C まで、約 25°C ごとに変化させてある。なお、図2-16は4秒間に記録された各点の最高温度を示す。No.53の噴流温度は 800°C 前後で、他の場合と比べて低くなっている。これは水及びNaの温度が 332°C と低いということと、加圧器下部にたまりやすい水が一連の水注入実験の初期にNa中に入りがちになっている事によるものではないかと考えられる。

No.54は最高温度 1100°C 、No.55は 1150°C を記録している。No.56以後は $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 以上を示した熱電対がウェステージによりやられて、温度を示さなくなっている。Na温度と反応温度との関係は、この2~3点の結果からは傾向をつかむことはできない。No.55の温度分布は図2-19に拡大して示してある。これらの結果から温度が高くなる反応領域の中は約 10 mm ($\pm 5\text{ mm}$)程度であることがわかる。

この温度分布とウェステージ分布との関係を調べる。ノズル径 0.5 mm でウェステージ分布が得られているのはNo.10, 30, 31, 32及びNo.50である。これらのウェステージ断面図において、 0.05 mm 以上へこんでいる部分の中は、図2-20に示すように各々、 8.5 , 6.5 , 10 , 9 , 11 mm である。これらを平均すると 9 mm となる。図2-17でNo.54と55について、温度がたちあがっている部分の中が、 9 mm の点における両側の温度を読むと 850 ないし 900°C である。この温度は、先に述べたように、No.56以後の熱電対がウェステージされて指示を示さなくなった温度 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ と一致している。以上の事から、ウェステージはターゲットの温度が 800 ないし 900°C 以上に上昇した時に、はげしくなると結論される。

図2-20からわかるように、ノズルターゲット間距離 17.5 mm で 9 mm の中を持つ噴流の広がり角は約 30° である。

一方、一般に軸対称の自由噴流が持つ速度分布の広がり角を調べる。(2.11)式で代表されるような正規分布を持つとすると、周囲の流速0の境界は明確にはならないが、次の誤差関数

$$\phi(\xi_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} e^{-\frac{\xi^2}{2}} \cdot d\xi \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

において $\xi_0 = 3.0$ をとると $\phi(\xi_0) = 0.0027$ となる。この時の広がり角は、

$$\frac{r}{x} = \frac{\xi}{a} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

において $1/a = 0.07$ とすると 24° となる。又、Tollmien⁸⁾によると、噴流の中心軸から噴流の境界までの距離 y_{max} は次式で与えられる。

$$\frac{y_{max}}{R_0} = 3.4 \left(\frac{x}{aR_0} + 0.29 \right) \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

ここで R_0 はノズルの半径である。この場合も $1/a = 0.07$ とすると、広がり角は 27° である。よって、Na-水反応時の噴流の高温領域の広がり角は一般の自由噴流の場合より、やや大きい 30° 程度である。たゞ問題は、ノズル内での乱れが多い時やウォール噴流になる事による影響などで、Na-水反応時に測定された高温域の巾が大きくなる事が考えられる点である。

次に、第2回目の温度分布測定実験では、ウェステージを防ぐため、インコネルシースの熱電対(外径 1.0 mm)に外径 1.5 mm のステンレス製ウェルをかぶせた。この結果は図2-18である。Test No. 63 と 64 には最高温度の他に平均温度を示してある。第1回目と比較しての大きな違いは、全般に温度が低い事、ノズル中心軸から離れた外周部で Na 温度に近くなっている点である。全般的に温度が低いのは、ノズル出口に反応生成物が付着してしまい、水が正常に出なかったためと考えられる。これは試験部を引き抜いた時点で観察された。第1回目の周辺部が Na 温度になっていないのは、熱電対のサポートにあたったジェットがウォールジェットとなって熱電対の並んでいる方向に流れたため、第2回目はその影響がなかったからであろうと推測される。図2-18でわかるように各回のリーク率が違っているため、Na 温度とリーク率の影響を分離することができないこともあり、結果的には第2回目においても Na 温度の影響をみる事ができなかった。

以上、Na 温度と噴流の温度分布との関係をみる試験は十分な結果が得られなかったため、当初の目的を達成するにはさらに実験が必要である。

2.6 径 0.2 mm のノズルによるウェステージ

2.6.1 試験目的及び方法

以前おこなったウェステージ試験では、ノズル径 0.7, 0.5 及び 0.3 mm までであつ

たが、パラメータ範囲を広げるために、 0.2mm のノズルを使ってのウェステージ試験を行なった。ターゲットアセンブリは第3報に示した連続式のターゲットと同じである。その試験方法も同じである。ターゲット材としては $2-1/4\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼とSUS304ステンレス鋼とを使用した。調べたパラメータはNa温度とリーク率である。リーク率は蒸気圧力をかえることにより変化させた。その他の試験条件、Na液深、ノズル・ターゲット間距離等は、以前と同じである。試験条件の一覧をウェステージ結果と一緒に表1.に示す。データ数は8点である。

2.6.2 試験結果

今回のノズル径 0.2mm 試験の水噴出条件をまとめると次の様になる。

注水時間	35~600	sec
全注水量	16~120	g
リーク率	0.039~1.96	g/s

ウェステージ率の結果を図2-5に示す。'Test No.'のついたデータのうち、'Full Penetration'以外が 0.2mm のノズルによるものである。 $\#73$ 以外はいずれも従来の結果より相当低いウェステージ率になっている。問題は、得られたリーク率がかなり大きい事である。ノズル径 0.2mm からの臨界流から計算されるリーク率の4倍程度になっている場合がある。この原因については現在検討中である。

図2-6は重量損率とリーク率の関係を示したものである。ここでは、材質とNa温度の他にノズル径もパラメータとして示している。データの数の多いNa温度 480°C の場合、ノズル径が一定であれば、重量損率とリーク率は比例する事が示されていたが、ノズル径 0.2mm の場合もその傾向があることがわかる。しかも、ノズル径 0.7 0.5 及び 0.3mm と小さくなるにつれ重量損率は同図において平行移動してさがつて来ていたが、 0.2mm 場合も同じ程度の割合でさがつている。

以上の結果は、将来さらにノズル径の小さい場合の実験をやるなどして、確認、検討していく予定である。

3 Na中水素検出計

3.1 改造後のNi膜構造

1)
前報で報告したようにNi膜は完全に偏平に座屈し、かつ、薄肉部に貫通孔ができ、使用不可能になった。これらの事故が再び起こらないように、いくつかの構造的な改良を加えて、センサー部を製造した。改造後のセンサー部の構造を図3-1に示す。主な改良点は次のことである。(1)Ni膜の座屈を防ぐために、Ni膜円筒部の内側に10ヶのリング(材質Ni)を挿入して、力学的補強をした。(2)配管とNi膜円筒管の間にあるNaがドレインされ易いように、配管下部にレデューサーを設けた。(3)Ni膜薄肉部と厚肉部の溶接に万全の注意を払った。(4)Na入口配管に以前よりも勾配をつけた。

新しいセンサーをループに取付けて7ヶ月後に、Ni膜部のX線写真の目視観察を行った結果、この時点では、Ni膜は座屈も変形もしていなかった。この間のNi膜部の使用最高温度は500℃であった。

3.2 電離真空計の取り付け

日電パリアン社製広帯域電離真空計(NI-10, ヌードイオンゲージNIG-1F)をNa中水素検出計の真空度測定器の1つとして取り付けた。以後この電離真空計をB-Aゲージと呼ぶ。B-Aゲージを含む各種水素検出計の配置を図3-2に示す。真空計配管に取り付けたヌード・ゲージ部の冷却はしなかった。制御器本体はヌード・ゲージから約30m離れた制御室に据えつけた。ヌード・ゲージでは、レンジ(4~10)の切換えにより $10^{-4} \sim 10^{-11}$ (Torr)の範囲の圧力が連続測定できる。各レンジごとにFull scale 12 mvの出力がでる。B-Aゲージの圧力の読み P_B (Torr)と出力 D_B (mv)の間には、各レンジごとに

$$P_B = D_B \times 10^{-R} \quad R: \text{測定器のレンジ}$$

10)
の関係がある。水素に対するB-Aゲージの相対感度は諸説があり明確には分からないが、本報告書では、Reynolds¹⁰⁾の提案した相対感度0.46を採用した。(N₂が標準)したがって、水素の真の圧力Pは、

$$P = \frac{P_B}{0.46}$$

となる。B-Aゲージのその他の特徴としては、IC使用による高安定性、電氣的ノイズが小さいこと、装置全体が小型軽量であること、などがあげられる。

3.3 Na中水素検出計応答の比較

微量(1g以下)の水蒸気を注入するために図3-4に示すような円筒管を作製した。円筒管内にあらかじめ決められた量の水を入れておき、円筒管全体を反応容器内のNa中に浸しNa温度で水を加熱した。円筒管の先端に取り付けた細い管(外径3.2φ)にあらかじめ切傷をつけておき、反応容器上部に導かれた針金を引張ることにより切傷部に急激にトルクをかけ、細管を完全破断させることにより水蒸気をNa中に注入した。大気中での微小リーク試験から水蒸気は一瞬のうちに注入されることを確認した。これまで、1.0, 0.5, 0.1gの微小リーク試験を行なった。そのときのNa中水素検出計の応答を図3-5(ノーブルポンプ), 図3-6(B-Aゲージ)に示す。質量分析器が故障していたために、微小リークに対する質量分析器の応答を観察することはできなかった。図3-5と図3-6の比較から、B-Aゲージの応答はノーブル・ポンプのそれよりも非常に良好であることがわかる。

3.4 応答の解析

リーク検出計の応答を解析するためSWAT-2の試験部と水検出計をモデル化して図3-7に示す。ノズルから出た水はNaと反応し、生成された水素の一部は領域W(g)のNaに瞬間的に溶けこむものとする。残りの水素はカバーガス中に逃げる。領域W内のNa中水素濃度 C_1 は

$$W \times 10^{-6} \frac{d c_1}{d t} = \frac{2 \alpha U}{18} + Q C_0 \times 10^{-6} - Q C_1 \times 10^{-6} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$(0 < t \leq T_0)$$

$$W \times 10^{-6} \frac{d c_1}{d t} = Q C_0 \times 10^{-6} - Q C_1 \times 10^{-6} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$(t_0 < t \leq 40)$$

によって表わされる。ここで、

- C_1 : 領域W内のNa中水素濃度 (ppm)
- C_0 : 水注入前のNa中水素濃度 (ppm)
- W : 生成した水素が均一に溶けこむ領域 (g)
- Q : Na流量 (g/sec)
- α : Na中に溶けこむ水素の割合
- U : 水のリーク率 (g/sec)

t_0 : 水注入時間 (sec)

この方程式はNaがループを1巡(約40秒)するまでの時間に適用される。1巡後のNa中水素濃度を表す方程式は、反応容器上部でのNaの混合が複雑なので、現段階では考慮しなかった。

濃度 C_1 で領域Wを流れ出たNaはそのままの濃度で内部シェル出口まで輸送される。反応容器内の内部シェル下部を出たところでは、水素が反応容器側面方向に拡散するため、Na中の水素濃度は薄められる。内部シェル出口近傍の拡大図を図3-8に示す。濃度の薄まりは次の(3.3)、(3.4)式によって表わされる。

$$QC = QC_1 - (C_1 - \bar{C}) F \rho L \frac{\pi (D_1 + D_2)}{2 \ell} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\rho V_R \frac{dC}{dt} = (C_1 - \bar{C}) F \rho L \frac{\pi (D_1 + D_2)}{2 \ell} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、

ρ : Na密度 (g/cm³)

V_R : 左下りのハッチングした部分の体積 (cm³)

\bar{C} : よどみ部での平均のNa中水素濃度 (ppm)

C : 主配管入口でのNa中水素濃度 (ppm)

F : 水素の拡散係数 (cm²/sec)

D_1 , D_2 , ℓ , L は図中に示した部分の長さで、それぞれ $D_1 = 20.8$, $\ell = 17.25$, $L = 6.5$ (単位はいずれもcm)である。 C の濃度でNi膜までピストン輸送されると仮定する。

Na中水素濃度 C' とNaに接触しているNi膜表面の水素濃度 C_H^{Ni} の関係を求める。Na中の水素と平衡にある水素分圧 P' は、

$$P' = bC'^2 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

によって表わされる。¹¹⁾ここで、

P' : 水素分圧 (atm)

C' : Na中水素濃度 (ppm)

$b = 6.6 \times 10^{-5}$ (atm)

また、水素分圧 P' にさらされているNi膜表面の水素濃度 C_H^{Ni} は、ヘンリーの法則から、

$$C_H^{Ni} = kP'^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで、 k は溶解度であり、

$$k = \frac{K}{D}$$

で表わすことができる。ここで、 K は透過率であり、

$$K = 1000 \exp\left(-\frac{13400 \text{ cal}}{RT}\right) \quad \left[\text{cm}^3 \text{ -mm/cm}^2 / \text{atm}^{\frac{1}{2}} / \text{hr}\right] \quad (12)$$

T : Ni 膜温度 (°K)

R : ガス定数

である。 D は Ni 膜中の水素の拡散係数であり、

$$D = 5.22 \times 10^{-3} \exp(-9.56 \text{ kcal}/RT) \quad (\text{cm}^2 / \text{sec}) \quad (13)$$

である。(3.5), (3.6) から

$$C_{\text{H}}^{\text{Ni}} = k \sqrt{b} C' \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

が得られる。 C_{H}^{Ni} を [g/cc], C' を [ppm] で表すと

$$C_{\text{H}}^{\text{Ni}} = 2.015 \times 10^{-8} \times \frac{1}{D} \times \exp\left(-\frac{13400}{RT}\right) \times C' \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

となる。

次に、厚さ $\ell_0 (=0.05 \text{ cm})$ の Ni 膜を水素が真空側へ拡散する問題を考える。これを図 3-9 に示す。Ni 膜中のある時刻 t , ある場所 x での水素濃度 C は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

で与えられる。ここで、

C : 時刻 t , 場所 x での Ni 膜中水素濃度 [g/cc]

また、フィックの法則から、

$$q = D \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=\ell_0} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

q : 単位時間, 単位面積当り Ni 膜から真空側へ拡散する水素量 [g/sec/cm²]

q の単位を室温 (27°C) での [cc·Torr/sec/cm²] に直すと、

$$Q = 9354000 \times q \quad (\text{cc} \cdot \text{Torr} / \text{sec} / \text{cm}^2) \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

真空系の状態方程式は、Ni 膜表面近傍の圧力 P_e とノーブル・ポンプ位置での圧力 P との間に一次の関係があるとする

$$V \frac{d(Pe + P)}{2dt} = AQ - SP \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

となる。ここで

V : 真空系の容積 (=2700) [cm³]

A : Ni膜の拡散面積 (=100) [cm²]

S : ノーブル・ポンプの排気速度 (=16000) [cm³/sec]

Pe : Ni膜近傍での真空系の圧力 [Torr]

P : ノーブル・ポンプ位置での圧力 [Torr]

Ni膜表面近傍とノーブル・ポンプの位置の間のコンダクタンスを C_{PeP} (=1870) [cm³/sec] とすれば、

$$C_{PeP} (Pe - P) = SP$$

が成立する。したがって

$$Pe = \left(\frac{S}{C_{PeP}} + 1 \right) P \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

真空計の圧力 P_N [Torr] と記録計の出力 D_N [mv] との間には、ノーブル・ポンプの場合

$$P_N = 1.556 \times 10^{-12} \exp(2.784 D_N) \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

B-Aゲージの場合

$$P_B = D_B \times 10^{-R} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

R : 制御器の圧力レンジ (R=4~10)

の関係がある。

第3報¹⁾で述べたように、水注入前のNa中水素濃度 C₀ [ppm] は、ノーブル・ポンプで測定された圧力 P_N [Torr] から

$$C_0 = 42.6 \left\{ \left(\frac{P_N}{0.46} \right) \exp\left(\frac{6740}{T} \right) + 0.324 \left(\frac{P_N}{0.46} \right)^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$P = \frac{P_N}{0.46} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

によって求めることができる。

(3.16)式から求めたNa中水素濃度が妥当であるかを調べてみた。ブラギング温度¹¹⁾から求めた水系の溶解度とそのブラギング温度でのノーブルポンプの読み P_N から、

(3.16)式を用いて計算したNa中水素濃度を図3-10に示す。白丸は第2報³⁾、図18で既に報告したもので、最近の計算結果を黒丸(ノーブルポンプ)、三角(B-Aゲージ)で示す。溶解度と計算から求めた値は良好であると思われる。

(3.16)式から求められるNa中水素濃度を初期値として、(3.1)~(3.4)式からNi膜部を通過するNa中水素濃度の時間変化を求めることができる。したがって、(3.8)式から、Naと接触しているNi膜表面の水素濃度を知ることができる。Ni膜表面の水素濃度の時間変化を求めるプログラムを附録のプログラム1に示す。水注入直前のノーブル・ポンプ、あるいは、B-Aゲージの読み P_0 (Torr)を初期値として、(3.9)~(3.13)式から真空系の圧力の時間変化を計算し、(3.14)~(3.15)式から、それぞれの検出計の出力を計算した。これをプログラム2に示す。尚、(3.10)式を解くのに陽解法¹⁴⁾を用いた。計算した結果をプロッターに描かせるプログラムをプログラム3に示す。用いた計算機はHP 2116Cで、時間間隔20msec、空間間隔0.001cmで計算した。各プログラムはYHP, DOS-M用に作成した。

ノーブル・ポンプの応答に及ぼす種々のパラメータ(W, F, V, U, α , T)の影響を調べた。これを図3-11, 図3-12に示す。その他のパラメータの値を図の下方に示した。Wの影響: Wが小さいほど急激に立上がり、最高値に達してからはより速く下降する。W=14000(g)は図3-7の左下りのヘッチングした領域のNa量に相当する。W=0は、Na中水素濃度がパルス状の時間変化をすることに対応する。Fの影響: Fの値が大きいほどNa中水素濃度は薄められるから、出力は小さい値となる。F=5(cm²/sec)以下の値では出力は一致する。Vの影響: Vの値が小さいほど急激に立上がる。SWAT-2の場合V=2700(cm³)であるが、真空系の容積が2倍、あるいは、半分になった場合の応答を示してある。Uの影響: リーク率が大きいほど出力は大きくなる。Tの影響: Ni膜の温度550℃と500℃の場合を比較した。Ni膜の温度の影響を強くうけることがわかる。

リーク率を変えたときの実測値と計算値の比較を図3-13, 3-14(ノーブル・ポンプ)、図3-15, 3-16(B-Aゲージ)に示す。計算を行うにあたりパラメータのうち未知のものはW, F及び α である。これらの未知パラメータのいろいろな組合わせを検討した結果、W=3000(g), F=5以下(cm²/sec)(計算上はF=0とおいた) α に適當な値を用いることによって、実測値と計算値の間に、図3-13~図3-16に示した一致が得られた。そのときのNa中水素濃度の時間変化を図の下方に示した。SWAT-2のウェステージ試験から、ノズルから約10cm離れた距離まで水が飛散していることが確認されている。したがって、水の飛散領域にあるNa量は $\frac{4}{3}\pi \times 10^3 \approx 4000$ (cc) ≈ 3000 (g)と計算されるため、W=3000(g)という値は妥當な値であると考えられ

る。また、図3-7 に示した $L = 6.5 \text{ cm}$ で、ここでの Na の滞留時間は約 2.5 (秒) であり、流れの乱れもそんなに大きくない。したがって、反応容器下部での Na 中水素濃度の薄まりは少ない、すなわち、 $F = 5 (\text{cm}^2 / \text{sec})$ 以下という値は合理的ではないかと思われる。

実測値と計算値の一致から、 Na 中に溶けこむ水素の割合 (水素の溶解割合と呼ぶ) 及び Ni 膜による応答の遅れ時間を知ることができる。水素の溶解割合が水のリーク率によってどのように変化するかを図3-17に示した。リーク率が小さくなるにしたがって水素の溶解割合が大きくなることわかる。 Na 温度 480°C 、リーク率約 11 g/sec のとき水素の溶解割合は約 2% であるのに対し、リーク率 0.04 g/sec のとき溶解割合は約 60% に達する。リーク率が小さいほど発生した水素気泡の大きさが小さいため、これらの水素は短時間に Na に溶けこんでしまうためと推察される。 Na 温度 $330 \sim 380^\circ\text{C}$ では水素の溶解割合は、リーク率にあまり影響されず、約 2~6% である。

$5 (\text{g/sec})$ のリーク率で水を注入したときの Na 中水素濃度は、そのときの水素の溶解割合が Na 温度 480°C で 10% 弱、 Na 温度 350°C で約 5% であることから、前者では $\frac{5 \times \frac{1}{18} \times 0.1}{3,000} \times 10^6 \approx 20 (\text{ppm})$ 、後者では $10 (\text{ppm})$ となる。一方、 Na 温度 480°C 及び 350°C での水素飽和濃度は、Meacham¹⁰⁾ によると、それぞれ 200, 25 (ppm) である。したがって、水注入後の Na 中水素濃度は飽和に達していないことがわかる。

Ni 膜による応答の遅れ時間 (Na 中の水素が Ni 膜表面に到達してから応答スペクトルが立上がるまでの時間) は、 Ni 膜温度が 550°C のとき 5.3 秒であり、 500°C のとき 9~10 秒である。

3.5 各検出器の感度

B-Aゲージの感度について考察する。感度とは、第3報で定義したように、ノイズの変動巾を Na 中水素濃度の変動幅に換算したもの、として定義する。 Na 中水素濃度 $C_H (\text{ppm})$ と B-Aゲージの読み $P_B (\text{Torr})$ の間に、ノーブル・ポンプの場合と同様に、

$$C_H = 42.6 \left\{ \left(\frac{P_B}{0.46} \right) \exp \left(\frac{6740}{T} \right) + 0.324 \left(\frac{P_B}{0.46} \right)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots (3.18)$$

の関係が成立するものとする。(10^{-7} レンジでは、 P_B は P_N とほぼ一致する)

(3.15) を (3.18) に代入し、 $T = 500^\circ\text{C} = 773 \text{ }^\circ\text{K}$ で整理すると、

$$C_H = 5.67 \times 10^{5-B} \times D + 2.035 \times D^{1/2} \times 10^{-\frac{R}{2}} \quad \dots\dots (3.19)$$

$$\frac{dC_H}{dD} = 5.67 \times 10^{5-R} + 10.18 \times D^{-\frac{1}{2}} \times 10^{-\frac{R}{2}} \quad \dots\dots(3.20)$$

C_H をパラメータとして dD と dC_H の関係を図3-18に示す。B-Aゲージのノイズの変動幅は0.05(mv)であるから、水注入前のNa中水素濃度 C_H が1.0(ppm) のとき dC_H (感度)は0.03(ppm), C_H が0.5~0.1(ppm) のとき dC_H は0.003(ppm) となる。ノーブル・ポンプの感度を $T=500^\circ\text{C}$ で求める(第3報では $T=550^\circ\text{C}$ の場合を記述した)。(3.14)を(3.16)に代入し、 $T=500^\circ\text{C}$ で整理すると、

$$C_H = 8.82 \times 10^{-7} \exp(2.784D) + 2.54 \times 10^{-5} \exp(1.392D) \quad \dots\dots(3.21)$$

$$\frac{dC_H}{dD} = 2.45 \times 10^{-6} \exp(2.784D) + 3.53 \times 10^{-5} \exp(1.392D) \quad \dots\dots(3.22)$$

C_H をパラメータとして dD と dC_H の関係を図3-18に示す。ノーブルポンプのノイズの変動幅は0.2(mv)であるから、水注入前のNa中水素濃度が1.0, 0.5, 0.1(ppm) のとき、 dC_H はそれぞれ0.56, 0.3, 0.06(ppm) となる。上に述べたことから分かるように、B-Aゲージの感度は、Ni膜温度が500℃のとき、ノーブル・ポンプよりも約10~20倍良好である。質量分析器の電流値(H_1)とノーブル・ポンプの読み P_N との関係を図3-19に示す。両者は、 $3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ Torrの範囲で1次の関係にあることがわかる。質量分析器の出力は各レンジ(9, 10, 11)ごとに電流値と比例しており、Full scale は各レンジについて10mvである。したがって、ノーブル・ポンプの読み P_N (Torr)と質量分析器の出力 D_M (mv)の間には、図3-19の直線から、

$$10^{-9} \text{ (A)レンジ} \quad P_N = 1.80 \times 10^{-6} D_M \frac{17}{30} \quad (3.23)$$

$$10^{-10} \text{ (A)レンジ} \quad P_N = 4.87 \times 10^{-7} D_M \frac{17}{30} \quad (3.24)$$

$$10^{-11} \text{ (A)レンジ} \quad P_N = 1.33 \times 10^{-7} D_M \frac{17}{30} \quad (3.25)$$

の関係が成立する。(3.23)~(3.26)を(3.16)に代入し、 $T=500^\circ\text{C}$ で整理すると、

$$10^{-9} \text{ (A)レンジ} \quad C_O = 1.02 D_M \frac{17}{30} + 0.027 D_M \frac{17}{60} \quad (3.26)$$

$$10^{-10} \text{ (A)レンジ} \quad C_O = 0.28 D_M \frac{17}{30} + 0.014 D_M \frac{17}{60} \quad (3.27)$$

$$10^{-11} \text{ (A)レンジ} \quad C_O = 0.075 D_M \frac{17}{30} + 0.0074 D_M \frac{17}{60} \quad (3.28)$$

が得られる。故に

$$10^{-9} \text{ (A) レンジ} \quad \frac{dC_o}{dD_M} = 0.58 D_M^{-\frac{13}{30}} + 0.0076 D_M^{-\frac{43}{60}} \quad (3.29)$$

$$10^{-10} \text{ (A) レンジ} \quad \frac{dC_o}{dD_M} = 0.16 D_M^{-\frac{13}{30}} + 0.0079 D_M^{-\frac{43}{60}} \quad (3.30)$$

$$10^{-11} \text{ (A) レンジ} \quad \frac{dC_o}{dD_M} = 0.0425 D_M^{-\frac{13}{30}} + 0.0021 D_M^{-\frac{43}{60}} \quad (3.31)$$

水注入前の Na 中水素濃度が 100 ppb ($P_N = 1.65 \times 10^{-7}$ Torr) のとき, $dD_M = 0.05$ (mv) であるから, (3.29)~(3.30)式から,

$$10^{-9} \text{ (A) レンジ} \quad dC_o \simeq 0.2 \quad (\text{ppm})$$

$$10^{-10} \text{ (A) レンジ} \quad dC_o \simeq 0.02 \quad (\text{ppm})$$

$$10^{-11} \text{ (A) レンジ} \quad dC_o \simeq 0.002 \quad (\text{ppm})$$

が得られる。すなわち, 質量分析器の感度は, Na 中水素濃度が 100 ppb のとき, 2 ppbとなる。

SWAT-2を運転し始めてから2年2ヶ月が経過した。Na中水素計の特性や問題点を表3にまとめた。表3の測定範囲は P_N の測定範囲 ($1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$ Torr) から求めた。応答時間は, 水を注入した時刻から応答が立ち上がるまでの時間で, 実測の応答から求めた。

4 Ar 中水素検出計

1)

前報で報告したように、Ar 中水素検出計の性能はNa ベーベトラップにかかっていると言っても過言ではないと思われる。Na ベーベトラップは、①Na ベーベを完全に捕捉すること ②Na が詰まりすぎて、ベーベトラップで水素が捕捉されないこと の特性を有していることが理想的である。このような条件を比較的満足すると思われるNa ベーベ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Na ベーベトラップが考えられる。そこで図4-1に示すようなNa ベーベトラップを製作し、その性能を調べてみた。還流式Na ベーベトラップの特長の主な点は次のとおりである。(1)全長(1320 mm)の約1/3の長さの範囲にヒータ及び保温を取りつけ、温度制御ができる。(2)ヒータ取り付け部には3種類のメッシュ(Na 入口側から10, 30, 50メッシュ)の金網を挿入した。(3)径は2Bである。(4)金網、バッファプレートなどの内部構造物は、出口側のフランジを取りはずすことによって、外部に取り出すことができる。

還流式Na ベーベトラップを据えつけてのNa-水反応試験はこれまで23回(No.63~85)行なった。金網入口部温度350℃、金網出口部温度80~180℃での応答の教例を図4-2に示す。スペクトルは見やすいように縦軸方向に適当にシフトしてある。水注入は約20秒の時点で行なった。図4-2からわかるように、鋭い応答をするものもあれば、除々に上昇するスペクトルもあれば、全然応答しないものもある。要するに信頼性に乏しい。23回の試験のうち、鋭い応答を示したものの2回、除々に上昇する応答を示したものの6回、全然応答を示さなかったものの15回であった。その原因はわからないが、あえてあげるとすれば、Na ベーベトラップ入口部空間でNa 密度が非常に高く、しかも高温(約350℃)になっているために、水素がそこを通過するときNa と反応したりあるいはNa にトラップされるためではないか、ということが考えられる。

試験後 金網へのNa の付着状況を目視観察したら、第2層目(30メッシュの金網)の中間部までしかNa は届いていないことが判明した。第1層目(10メッシュの金網)への付着状況も、ぎつしりという感じではなく、金網1枚く同志がいとも簡単には剥がれないう程度であった。(図4-3)

Ar 中水素計のフローチャート及び膜部の外観を第2報、第3報で報告した。ここでは、Ar 中水素計の基礎になる数値を整理列挙する。

(1)膜

材 質	パラジウム合金
厚 さ	0.25(mm)

拡散面積 $18.8 (\text{cm}^2) (3\phi \times 200\text{mm})$

拡散定数 未知 但し純Pd $7 \times 10^{-5} (\text{cm}^2/\text{sec})$

(II) 排気速度

油回転ポンプ $300 (\text{l}/\text{min})$

油拡散ポンプ $100 (\text{l}/\text{sec})$

(III) Pd 膜と電離真空計 (上流側)

間の排気コンダクタンス $300 (\text{cc}/\text{sec})$

(IV) 電離真空計の容積 $150 (\text{cc})$

(V) ハウジングの容積 $857 (\text{cc})$

5 おわりに

SWAT-2の試験にもだいぶん経験を積み、初期の頃よりも仕事の能率があがった。試験のたびに個々のトラブルはあったが、一応各々克服した。本期間中に得られた試験結果をまとめて箇条書きにする。

ウェステージ

- ① 4回の破損伝播実験においては、破損瞬間の孔径は2～3mm以下であった。
- ② 破損伝播時間は、破損させないウェステージ実験から推定した時間より長かった。
- ③ 第3報にまとめたデータを対照にして、2-1/4Cr-1Mo鋼とステンレス鋼を別々にウェステージ率を表わす実験式を作成した。パラメータはリーク率とNa温度である。
- ④ ウェステージ部のへこみの形状は正規分布状で表わされるものが多い。
- ⑤ 正規分布の広がりを表わす常数をウェステージのデータから決定した。
- ⑥ 正規分布を仮定して、最大深さから重量損を求める式を作成し、実験結果と比較したところ、よい一致をみた。
- ⑦ 実験的に求めた正規分布の式を使い、破損孔がさらに拡大していく様子を計算した。
- ⑧ 破損伝播実験のように、ウェステージ部の深さが深くなるとウェステージ率が低下するのは、ウェステージ分布が変わらず、単位時間当りにウェステージされる重量が一定であるからではないかと考察された。
- ⑨ 熱電対を並べたターゲットによる温度分布の測定結果と、ウェステージ分布とを比較することにより、ターゲットの温度が800ないし900℃以上に上昇した時にウェステージが激しくなることがわかった。
- ⑩ ターゲットの温度分布とウェステージ分布から、反応生成物のジェットの広がり角は約30°であることがわかった。
- ⑪ 径0.2mmのノズルによるウェステージ結果は、先におこなった0.3、0.5及び0.7mmのノズルによる結果と比較して低めになったが、この理由は明らかではない。

Na中水素検出計

- ① 機械的強度を補強した新しいNi膜を製作した。
- ② Na中水素検出器の1つとして電離真空計(B-Aゲージ)を据えつけ、ノーブルポンプや質量分析器の性能と比較した。B-Aゲージは、電氣的ノイズが小さく、アンプのドリフトもなく、3種類の検出器の中では最もすぐれた性能を有していることがわかった。
- ③ B-Aゲージの感度は、Na中水素濃度が100ppbのとき、3ppbと計算された。

- ④ ノーブンプとB-Aゲージの応答について理論的解析をした。理論値と計算値は非常によく一致した。
- ⑤ この解析から、Na-水反応によって生成する水素の、Na中への溶解割合をすることができた。水素の溶解割合は、リーク率が小さいほど大きくなり、例えば、0.04g/secのときには溶解割合は約60%であった。また、溶解割合はNa温度が高いほど大きいことがわかった。
- ⑥ Ni膜を通過するときの応答の遅れ時間をすることができた。

Ar中水素検出計

- ① 還流式Naベーパーラップを製作し、その性能を調べた。性能の良し悪しの結論はまだでていない。

参 考 文 献

- 1) 根井弘道, 氏原幸三朗, 大内義弘, 大島巖, 井上設生, 堀雅夫, "小リークナトリウム水反応試験研究, 第3報" SN943 73-02(1973)
- 2) 根井弘道, 大内義弘, 大島巖, 堀雅夫, "小リークナトリウム水反応試験研究, 第1報" SN941 72-08(1972)
- 3) 根井弘道, 大内義弘, 氏原幸三朗, 大島巖, 井上設生, 堀雅夫, 中山憲太郎 "小リークナトリウム水反応試験研究, 第2報", SN941 72-14(1972)
- 4) 大沢安隆, 中島宣雄, "損耗材料検査" SJ206 74-04(1974)
- 5) H.V.chamberlain, J.A.Cameron, J.H.Coleman, M.K.Deora, J.A.Ford, T.Iguchi, L.R.Kovac, G.H.Reicks, J.Wooton, APDA-254(1970)
- 6) 佐藤稔, 原崎, 山田敏雄, 田中信夫, 大高仁護, 大内義弘, 大島巖, 堀雅夫, "SWAT-1試験装置による大リークナトリウム-水反応試験研究, 第2報" SN941 72-17(1972)
- 7) G.N.Abramovich, "The Theory of Turbulent Jets", p116, MIT Press(1963)
- 8) B.V.Kulpin, A.S.Mazarov, "Analytical and Experimental Investigation of Reaction Sodium-Water Flow", Specialists' Meeting on Sodium-water Reaction, Melekess, USSR, May (1971)
- 9) 原崎, 田中信夫, 大島仁護, 佐々木和一, 山田敏雄, 堀雅夫, "SWAT-1試験装置による大リークNa-水反応試験研究, 第3報" (1974)
- 10) 熊谷寛夫, 富永五郎編著 "真空の物理と応用" P 333 (1971)
- 11) S.A.Meacham, E.F.Hill, A.A.Gordus, "The Solubility of Hydrogen in Sodium", APDA-241, (1970)
- 12) J.A.Coleman, "Loop Evaluation of the APDA In line Detector for Hydrogen in Sodium", APDA-252, (1970)
- 13) Y.Ebisuzaki, W.J.Kass, M.O Keeffe, J.Chem.phys., 46, 1378 (1967)
- 14) G.D.スミス著(藤川洋一郎訳) "電算機による偏微分方程式の解法", P 10, サイエンス社 (1972)

付記 インプットデータの入れ方

プログラムは全て対話型式に作ってある。各項目の“問”がテレタイプに打ち出される。そのつど適当な値をテレタイプからインプットする。数値はすべて実数型で入れること。

(1) プログラム 1 (SMCN2)

“問”	意	味
W	発生した水素が瞬時に溶けこむNa量 [g] , 通常は 3000。	
NI TEMP., C DEG.	Ni膜温度 [°C]	
VALVE INTERVAL	注水時間 [sec]	
INITIAL PRESSURE, TORR	水注入前のノーブルポンプ圧 [Torr]	
WATER LEAK RATE	リーク率 [g/sec]	
SOLUBLE RATIO	溶解割合	
MIXING FACTOR, CM2SEC-1	混合部の拡散定数 [cm ² /sec] 通常は 0 .	

(2) プログラム 2 (SMPO2)

“問”	意	味
INITIAL PRESSURE, TORR	水注入前のノーブルポンプ圧 [Torr]	
NI TEMP., C	Ni膜温度 [°C]	
VOLUME	真空系の容積 (= 2700) [cm ³]	

(3) プログラム 3 (SMPLT)

インプットするデータはない。RUNするとプロッターに図を描く。

附録 プログラム 1

FTN4, L

```

PROGRAM SMCN2
DIMENSION IBUF(128), A(64), IFNA(3)
EQUIVALENCE (A(1), IBUF(1))
DATA IFNA(1), IFNA(2), IFNA(3)/2HCH, 2HNI, 2H /
WRITE(1, 10)
10 FORMAT("W")
READ(1, *) W
WRITE(1, 20)
20 FORMAT("NI TEMP. , C DEG. ")
READ(1, *) T
T=T+273.
Q=2790.
G=17.87/1.87
GGG=SQRT(760.)
B=SQRT(0.000066)
AA=13400./1.987/T
A=EXP(AA)
GG=SQRT(G)
WRITE(1, 100)
100 FORMAT("VALVE INTERVAL")
READ(1, *) TO
TTO=TO/0.02
ITTO=TTO
ITTO=ITTO+1
WRITE(1, 200)
200 FORMAT("INITIAL PRESSURE, TORR")
READ(1, *) PRESS
PRESS=PRESS/0.46
PPPP=SQRT(PRESS)
CHO=16.*273./300./760.*18.*PRESS*A/B+GG/B*PPPP/GGG
WRITE(1, 300)
300 FORMAT("WATER LEAK RATE")
READ(1, *) U
WRITE(1, 400)
400 FORMAT("SOLUBLE RATIO")
READ(1, *) RATIO
WRITE(1, 700)
700 FORMAT("MIXING FACTOR, CM2SEC-1")
READ(1, *) F
DIF=-9560./1.987/T
DIFUS=EXP(DIF)
DIFCO=0.00522*DIFUS
PER=-13400./1.987/T
PER1=EXP(PER)
PER2=1000.*PER1
PER3=PER2/36000.
SOL1=PER3/DIFCO
SOLBL=SOL1*760.*2./62.36/1000./273.
CHEX=CHO
I3=0
CINF=CHO
1000 CONTINUE

```

```

      IF(ITTO-64) 500,500,600
500  I1=0
501  I1=I1+1
      DCH=0.02*(RATIO*U/9./W*1000000.+Q*CHO/W-Q*CH/W)
      CH=CH+DCH
      CINF=CINF+0.0000135913*0.04*(CH-CINF)*F
      CHEX=CH-0.00467061*F*(CH-CINF)
      CHNA=SOLBL*B*CHEX
      A(I1)=CHNA
      IF(I1-ITTO) 501,502,502
502  I1=I1+1
      DCH=0.02*Q/W*(CHO-CH)
      CH=CH+DCH
      CINF=CINF+0.0000135913*0.04*F*(CH-CINF)
      CHEX=CH-0.00467061*F*(CH-CINF)
      CHNA=SOLBL*B*CHEX
      A(I1)=CHNA
      IF(I1-64) 502,503,503
503  CONTINUE
      CALL EXEC(15,102B,IBUF,128,IFNA,I3)
      I3=I3+1
      GO TO 2000
600  I2=0
601  I2=I2+1
      DCH=0.02*(RATIO*U/9./W*1000000.+Q*CHO/W-Q*CH/W)
      CH=CH+DCH
      CINF=CINF+0.0000135913*0.04*F*(CH-CINF)
      CHEX=CH-0.00467061*F*(CH-CINF)
      CHNA=SOLBL*B*CHEX
      A(I2)=CHNA
      IF(I2-64) 601,602,602
602  CALL EXEC(15,102B,IBUF,128,IFNA,I3)
      I3=I3+1
      ITTO=ITTO-64
      GO TO 1000
2000 IF(I3-32) 2001,3000,3000
2001 I4=0
2002 I4=I4+1
      DCH=0.02/W*Q*(CHO-CH)
      CH=CH+DCH
      CINF=CINF+0.0000135913*0.04*F*(CH-CINF)
      CHEX=CH-0.00467061*F*(CH-CINF)
      CHNA=SOLBL*B*CHEX
      A(I4)=CHNA
      IF(I4-64) 2002,2003,2003
2003 CALL EXEC(15,102B,IBUF,128,IFNA,I3)
      I3=I3+1
      GO TO 2000
3000 CONTINUE
      STOP
      END
      END$

```

附録 プログラム 2

FTN4, L

```

PROGRAM SMP02
DIMENSION IBUF(128), SPX(51), SPY(51), A(64), D(64), IFNB(3),
1 IFNC(3), IIBUF(128)
EQUIVALENCE (A(1), IBUF(1))
EQUIVALENCE (D(1), IIBUF(1))
DATA IFNB(1), IFNB(2), IFNB(3)/ZHCH, ZHNI, ZH /
DATA IFNC(1), IFNC(2), IFNC(3)/ZHSM, ZHDD, ZH /
5000 WRITE(1, 200)
200 FORMAT("INITIAL PRESSURE, TORR")
READ(1, *) PRESS
WRITE(1, 500)
500 FORMAT("NI TEMP. , C")
READ(1, *) T
T=T+273.
PRESS=PRESS/0. 46
DIF=-9560. /1. 987/T
DIFUS=EXP(DIF)
DIFCO=0. 00522*DIFUS
DC=16. *PRESS/DIFCO/62. 36/300000.
DDC=DC/50.
G=17. 87/1. 87
GGG=SQRT(760. )
B=SQRT(0. 000066)
AA=13400. /1. 987/T
A=EXP(AA)
PER=-13400. /1. 987/T
PER1=EXP(PER)
PER2=1000. *PER1
PER3=PER2/36000.
SOL1=PER3/DIFCO
SOLBL=SOL1*760. *2. /62. 36/1000. /273. /GGG
GG=SQRT(G)
PPPP=SQRT(PRESS)
CH=16. *273. /300. /760. *18. *PRESS*A/B+GG/B*PPPP/GGG
CHNA=SOLBL*GGG*B*CH
I1=0
J1=0
C1=0
201 J1=J1+1
SPX(J1)=CHNA-C1*DDC
C1=C1+1
IF(J1-51) 201, 202, 202
202 WRITE(1, 1300)
1300 FORMAT("VOLUME")
READ(1, *) V
PP=PRESS
PPV=17. 87/1. 87*PP
PPVV=SQRT(PPV)
J3=0
3000 J6=0
J8=0
1000 CALL EXEC(14, 102B, IBUF, 128, IFNB, J3)

```

```

      J2=0
      J7=0
300  J2=J2+1
      J6=J6+1
      J7=J7+1
      J4=1
      SPY(J4)=A(J2)
203  J4=J4+1
      SPY(J4)=SPX(J4)+20000. *DIFCO*(SPX(J4+1)-2. *SPX(J4)+SPX(J4-1))
      IF(J4-50) 203,204,204
204  SPY(51)=SOLBL*PPVV
      Q=DIFCO*(SPY(50)-SPY(51))/0.001
      QQ=9354000. *Q
      DP=0.02*(2. *187. *QQ/V/19.74-32000. *1.87*PP/V/19.74)
      PP=PP+DP
      PPV=17.87/1.87*PP
      PPVV=SQRT(PPV)
      J2=J2+1
      J5=1
      SPX(J5)=A(J2)
205  J5=J5+1
      SPX(J5)=SPY(J5)+20000. *DIFCO*(SPY(J5+1)-2. *SPY(J5)+SPY(J5-1))
      IF(J5-50) 205,206,206
206  SPX(51)=SOLBL*PPVV
      Q=DIFCO*(SPX(50)-SPX(51))/0.001
      QQ=9354000. *Q
      DP=0.02*(2. *187. *QQ/V/19.74-32000. *1.87*PP/V/19.74)
      PP=PP+DP
      PPV=17.87/1.87*PP
      PPVV=SQRT(PPV)
      J2=J2+1
      J5=1
      SPY(J5)=A(J2)
207  J5=J5+1
      SPY(J5)=SPX(J5)+20000. *DIFCO*(SPX(J5+1)-2. *SPX(J5)+SPX(J5-1))
      IF(J5-50) 207,208,208
208  SPY(51)=SOLBL*PPVV
      Q=DIFCO*(SPY(50)-SPY(51))/0.001
      QQ=9354000. *Q
      DP=0.02*(2. *187. *QQ/V/19.74-32000. *1.87*PP/V/19.74)
      PP=PP+DP
      PPV=17.87/1.87*PP
      PPVV=SQRT(PPV)
      J2=J2+1
      J5=1
      SPX(J5)=A(J2)
209  J5=J5+1
      SPX(J5)=SPY(J5)+20000. *DIFCO*(SPY(J5+1)-2. *SPY(J5)+SPY(J5-1))
      IF(J5-50) 209,210,210
210  SPX(51)=SOLBL*PPVV
      Q=DIFCO*(SPX(50)-SPX(51))/0.001
      QQ=9354000. *Q
      DP=0.02*(2. *187. *QQ/V/19.74-32000. *1.87*PP/V/19.74)
      PP=PP+DP
      PPV=17.87/1.87*PP
      PPVV=SQRT(PPV)

```

```
      PPP=PP
      D(J6)=0.3592*ALOG(PPP)+9.9248
      IF(J7-16) 300,400,400
400   J3=J3+1
      J8=J8+1
      IF(J8-4) 401,700,700
401   CONTINUE
      GO TO 1000
700   CONTINUE
      IF(ISSW(1)) 701,701,702
701   WRITE(6,703) (D(I2), I2=1,64)
703   FORMAT(7F12.7)
702   CONTINUE
      CALL EXEC(15,102B,IIBUF,128,IFNC,I1)
      I1=I1+1
      IF(I1-8) 3000,2000,2000
2000  CONTINUE
      STOP
      END
      END$
```

附録 プログラム 3

```
PROGRAM SMPLT
DIMENSION IBUF(128), D(64), IY(512), IFNA(3)
EQUIVALENCE (D(1), IBUF(1))
DATA IFNA(1), IFNA(2), IFNA(3)/2HSM, 2HDD, 2H /
IX=0
I1=0
J2=0
J3=0
CALL RECH(3)
CALL PLOT(0, 400, 500)
CALL STCK(0)
300 CONTINUE
J1=0
CALL EXEC(14, 102B, IBUF, 128, IFNA, I1)
100 J1=J1+1
J2=J2+1
IY(J2)=D(J1)*2000. /10. +500.
IF(J1-64) 100, 200, 200
200 I1=I1+1
IF(I1-8) 300, 400, 400
400 IXX=IX+400
500 J3=J3+1
IF(IY(J3)-2500) 910, 910, 911
910 IF(IY(J3)-10) 912, 919, 919
911 IY(J3)=2500
GO TO 919
912 IY(J3)=10
GO TO 919
919 CONTINUE
CALL LINE(1, IXX, IY(J3))
IXX=IXX+1
IF(J3-512) 500, 600, 600
600 CONTINUE
CALL STCK(1)
STOP
END
END$
```

表 1. SWAT-2 ウェステアージターター 一覧表

試験番号	試験日	温度 ℃	Na系		水系		ノズル径 mm	ターゲット アセンブリ 構造	ターゲット (材質)	水噴出 方向	注水時間 sec	全注水量 g	リーク率 g/sec	最大粒径 mm	重量変化値 g	ウェスター シ率×10 ² mm/sec	直達流量 g/sec ×10 ²	損耗比 ×10 ³ mm/多H ₂ O	備考
			液深 mm	流速 m/s	カーガスト力 kg/cm ²	温度 ℃													
50	8/22/73	482	748	0.250	0	472.5	140	108	垂直下向	3.67	91.5	2.49	3.675(4)	-2.32	10.01	6.32	40.16	破損	
51	9/28/73	485	780	0.255	0	475.5	122	67	"	55.52	149.2	2.69	"	-2.56	6.62	4.61	24.63	"	
52	10/23/73	484.5	774	0.255	0	480	153	111	"	17.37	64.33	0.365	"	-1.09	2.12	0.628	58.03	"	
53	11/13/73	482	785	0.244	0	352	103.04	95	水	4	43.86	10.97	"	-	-	-	-	温度分布	
54	"	487	780	0.253	0.05	357	105.6	100.14	"	4	24.67	6.17	"	-	-	-	-	"	
55	"	486.5	778	0.242	0.02	392.5	105.75	100.48	"	4	18.66	4.67	"	-	-	-	-	"	
56	11/14/73	412.5	778	0.258	0.05	413.5	85.63	83.7	"	4	19.48	4.87	"	-	-	-	-	"	
57	"	488.5	784	0.237	0.08	438.5	98.04	90.77	"	4	22.63	5.66	"	-	-	-	-	"	
58	"	455	778	0.259	0.01	454.5	94.23	83.81	"	4	18.19	4.8	"	-	-	-	-	"	
59	"	480	778	0.258	0.1	488	81.72	75.75	"	4	17.96	4.49	"	-	-	-	-	"	
60	12/4/73	481	793	0.258	0	481(1)	-	-	垂直下向	-	(5)	-	"	-	-	-	-	微小リーク	
61	"	472.5	778	0.258	0	478.5(1)	-	-	"	-	(5)	-	"	-	-	-	-	"	
62	12/5/73	485	750	0.256	0	480	133.4	46.6	逆	97.2	228.93	2.56	2-Cr-1Mo管	-2.28	3.79	2.96	1.685	破損	
63	1/24/74	330	773	0.233	0.1	330	117	115	水	4	14.46	3.62	"	-	-	-	-	温度分布	
64	"	385.5	788	0.238	0.28	373	114.05	108.02	"	4	28.51	6.58	"	-	-	-	-	"	
65	"	430	798	0.237	0	441	87.27	80.06	"	4	15.2	3.8	"	-	-	-	-	"	
66	"	480	780	0.253	0.1	485.5	88.83	83.79	"	4	10.57	2.64	"	-	-	-	-	"	
67	"	480	788	0.235	0.1	490	86.89	82.94	"	4	8.08	2.02	"	-	-	-	-	"	
68	1/25/74	530	785	0.258	0.1	525	86.95	82.06	"	4	13.24	1.26	"	-	-	-	-	"	
69	2/20/74	380.5	784	0.238	0.3	372	140	116	"	10.52	132.4	1.26	"	-	-	-	-	"	
70	"	474	791	0.244	0.3	468.5	146.31	133.52	"	61.12	113.78	1.96	2-Cr-1Mo管	-0.13197	0.753	0.216	3.84	縦式 ターゲット	
71	"	472.5	793	0.245	0.2	465.5	134.02	115.63	"	36.32	40.81	1.12	"	-0.08473	2.37	0.233	21.07	"	
72	2/21/74	480	780	0.242	0.33	476	64.86	31.35	"	70.96	58.42	0.795	"	-0.01571	0.564	0.0221	7.09	"	
73	"	480	773	0.245	0.37	469	34.68	10.37	"	50.01	83.64	0.167	"	-0.00345	0.08	0.00069	4.78	"	
74	3/19/74	490	780	0.235	0.38	490(1)	-	-	垂直下向	330	59.54	0.18	2-Cr-1Mo管	-0.18954	0.9	0.0574	49.88	"	
75	"	490	780	0.234	0.38	490(1)	-	-	"	-	0.5	-	"	-	-	-	-	微小リーク	
76	"	471.5	778	0.238	0.4	471.5	171.91	145.64	"	35.44	89.32	2.52	2-Cr-1Mo管	-0.15073	2.68	0.425	10.64	縦式 ターゲット	
77	3/20/74	481	1078	0.232	0.08	-	-	-	垂直下向	-	0.1	-	"	-	-	-	-	微小リーク	
78	"	495.5	1078	0.233	0.05	478	143.76	138.25	水	481.6	16.68	0.346	"	-0.00025	0	0.000519	0	縦統式 ターゲット	
79	"	486	778	0.232	0.2	460.5	47.91	38.58	"	600	23.3	0.0388	"	-0.00292	0	0.000487	0	"	
80	4/18/74	435	781	0.258	0.22	435(1)	-	-	垂直下向	-	0.1	-	"	-	-	-	-	温度分布(2)	
81	4/25/74	430	790	0.25	0	-	-	-	水	-	-	-	"	-	-	-	-	"	
82	"	430	774	0.25	0.1	-	-	-	"	-	-	-	"	-	-	-	-	"	
83	"	533	818	0.252	0.1	-	-	-	"	-	-	-	"	-	-	-	-	"	
84	5/21/74	480	-	0.24	0.2	473	116.2	113.7	垂直下向	150.92	58.63	0.395	2-Cr-1Mo管	-1.009	0.769	0.669	19.45	全 ウェスター	

注(1) キャセメントNa中に取付た為、Naと何温度とみなした。
 注(2) 注水ノズルがつかつた為、噴出できなかつた。
 注(3) 逆縦式液面計設置の為、ターゲターをし。
 注(4) 縦統式ターゲットアセンブリ構造は、第3巻図5-1参照。
 注(5) 逆統式ターゲットアセンブリ構造は、第3巻図3-2参照。
 注(6) ターゲット圧線管線電圧は、本巻図2-15(A)参照。
 注(7) ターゲット圧線管線電圧は、本巻図2-15(B)参照。

表2 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 (℃)	水注入量 (g)	水注入量より計 算した酸素濃度 上昇量 (ppm)
50	—	312	91.5	343
51	—	350	149.2	553
52	—	304	63.33	235
53	161	272.5	43.86	155
54	—	374.5	24.67	88.1
55	—	369	18.66	67.2
56	160	256	19.48	70.7
57	256	280	22.63	82.4
58	280	296.25	19.19	70.5
59	297	304	17.96	66.5
60	178	179	(5)	(18.4)
61	131.5	131.5	(5)	(18.5)
62	144	335	228.93	858
63	250	256.8	14.46	51.4
64	—	—	26.31	94.3
65	—	—	15.2	55.1
66	—	—	10.57	39.1
67	—	—	8.08	29.9
68	—	—	13.24	49.4
69	275	—	119.78	429
70	345	—	40.81	150
71	—	—	56.42	207
72	301	—	83.64	310
73	—	—	59.54	221
74	130	199	0.5	1.85
75	201	219	1.0	3.70
76	220	273	89.32	329
77	152	—	0.1	0.33
78	152	249.8	16.68	54.9
79	250	283	23.3	86.3
80	146	156	0.1	0.366
81	163	—	—	—
82	170	—	—	—
83	198	—	—	—
84	193.5	301	59.63	—

()内の値は信頼性に乏しい。

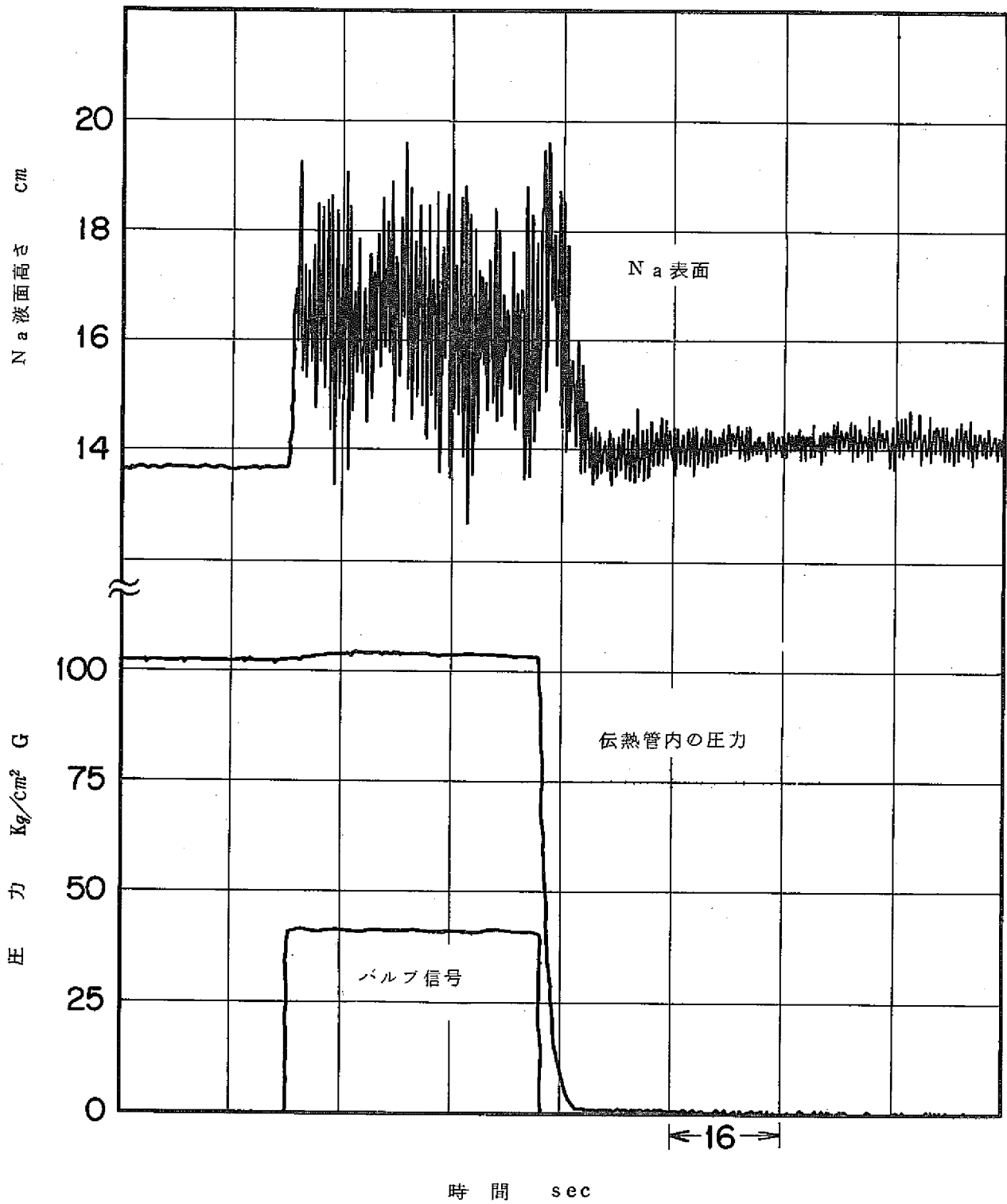
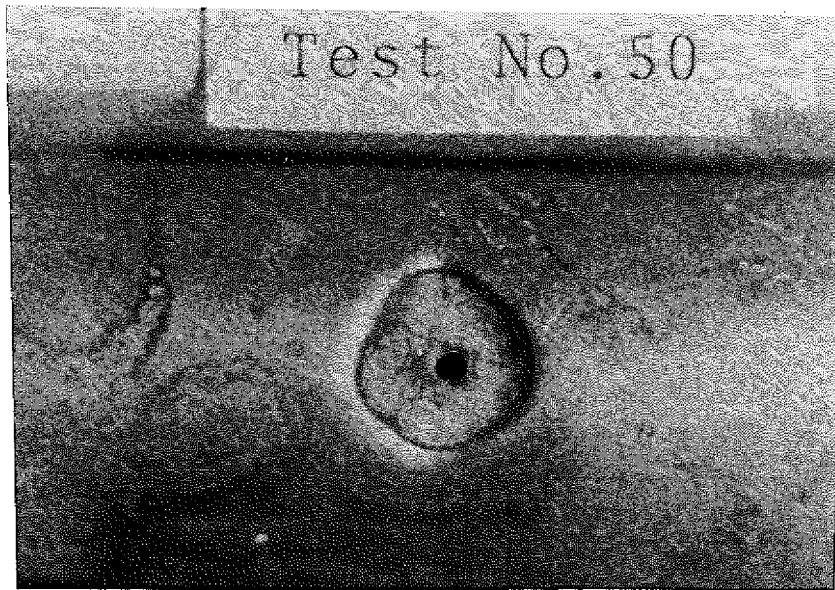
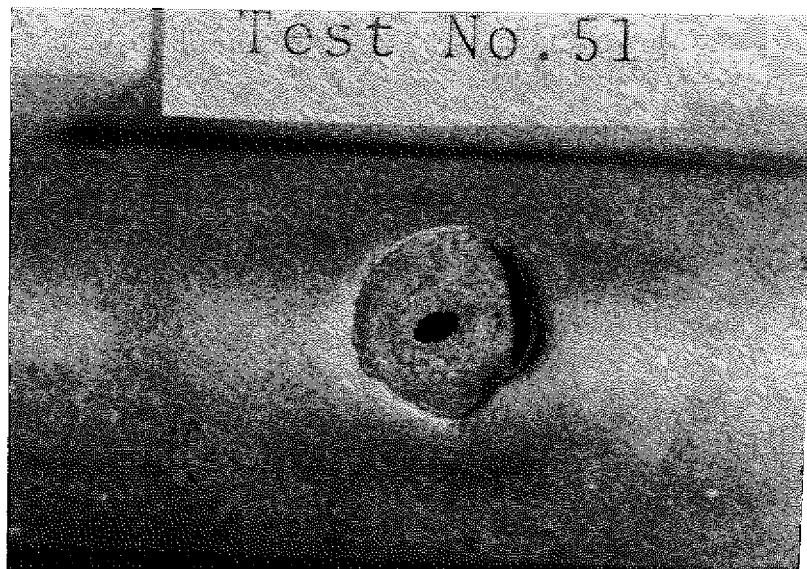


図 2 - 1 破損伝播試験 (圧 50) におけるターゲット管内圧の様子

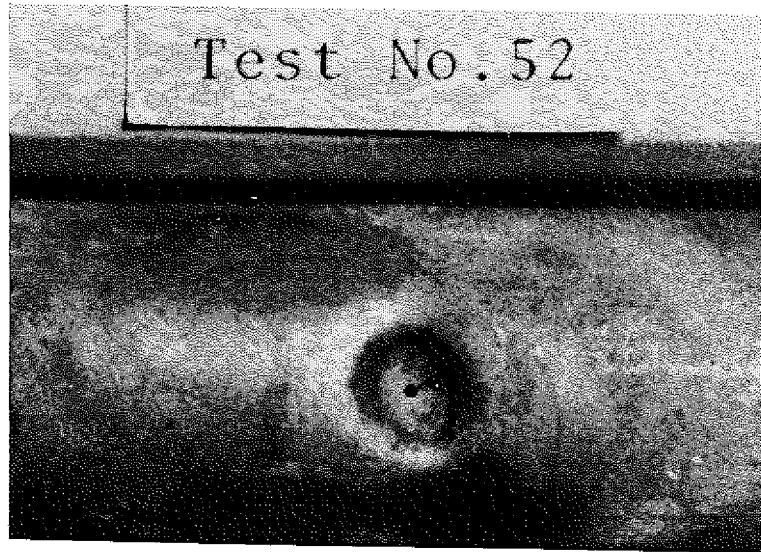


(A) Test № 50

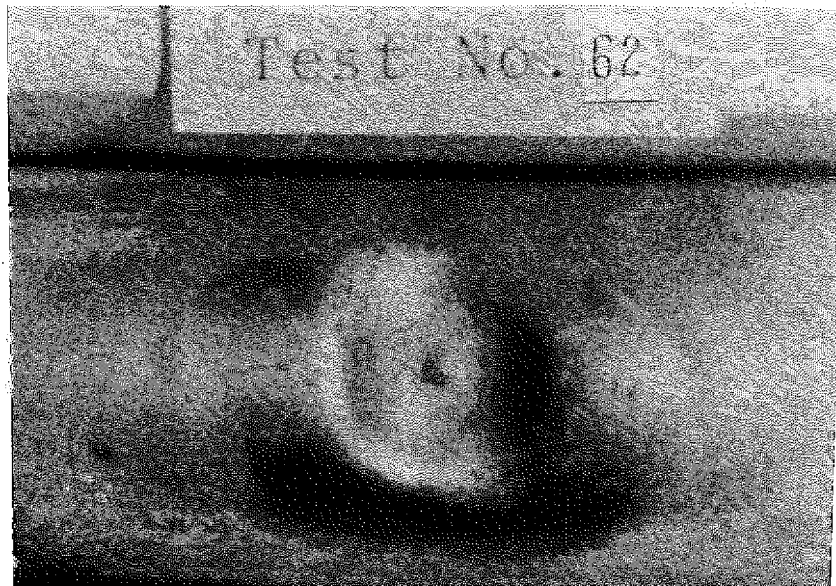


(B) Test № 51

図 2 - 2 破損伝播試験のターゲット管外観 (1)



(A) Test No. 52



(B) Test No. 62

図 2 - 3 破損伝播試験のターゲット外観 (2)

5
19.77

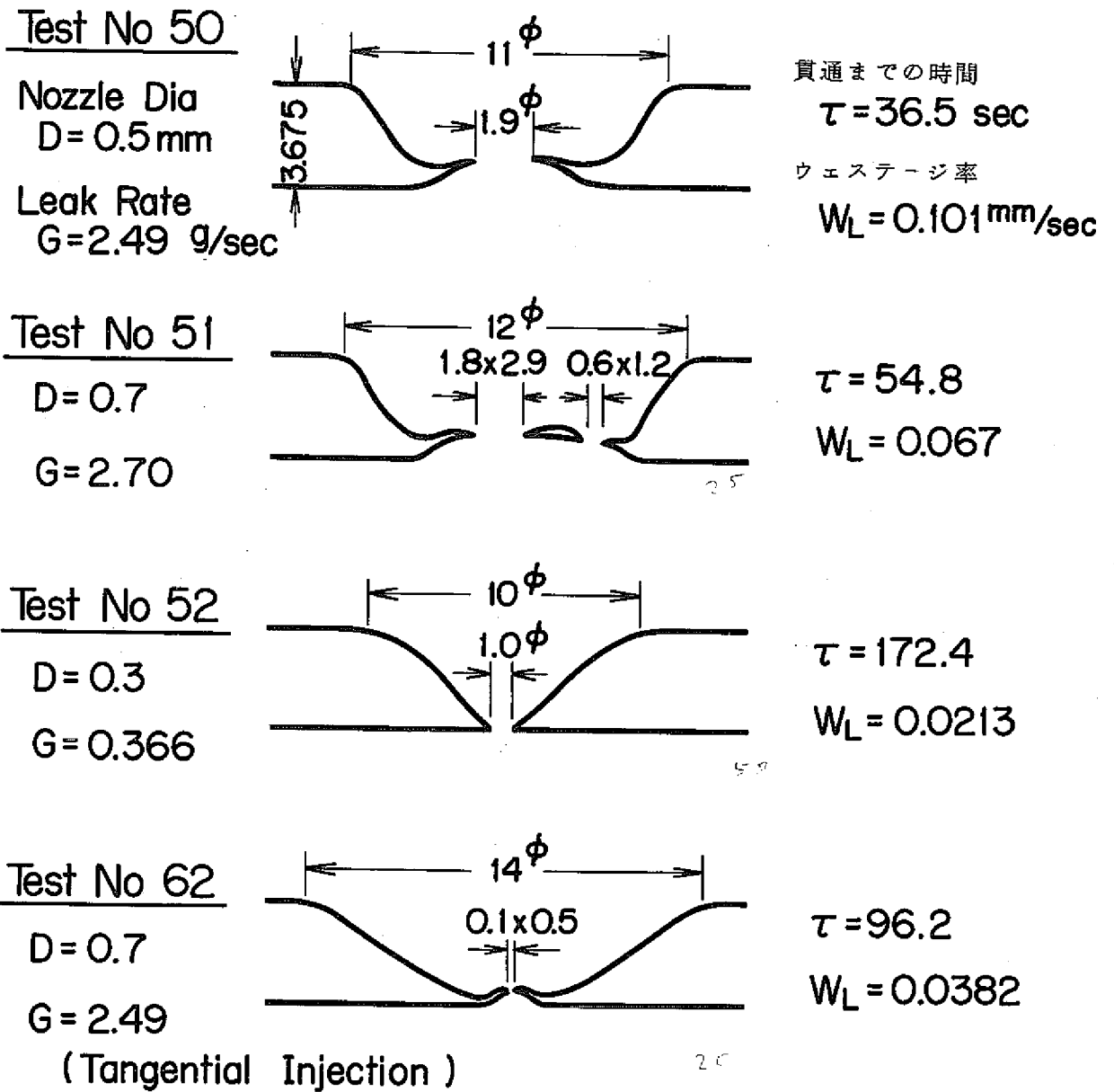


図 2 - 4 破損伝播試験によるウェステージ部の断面図

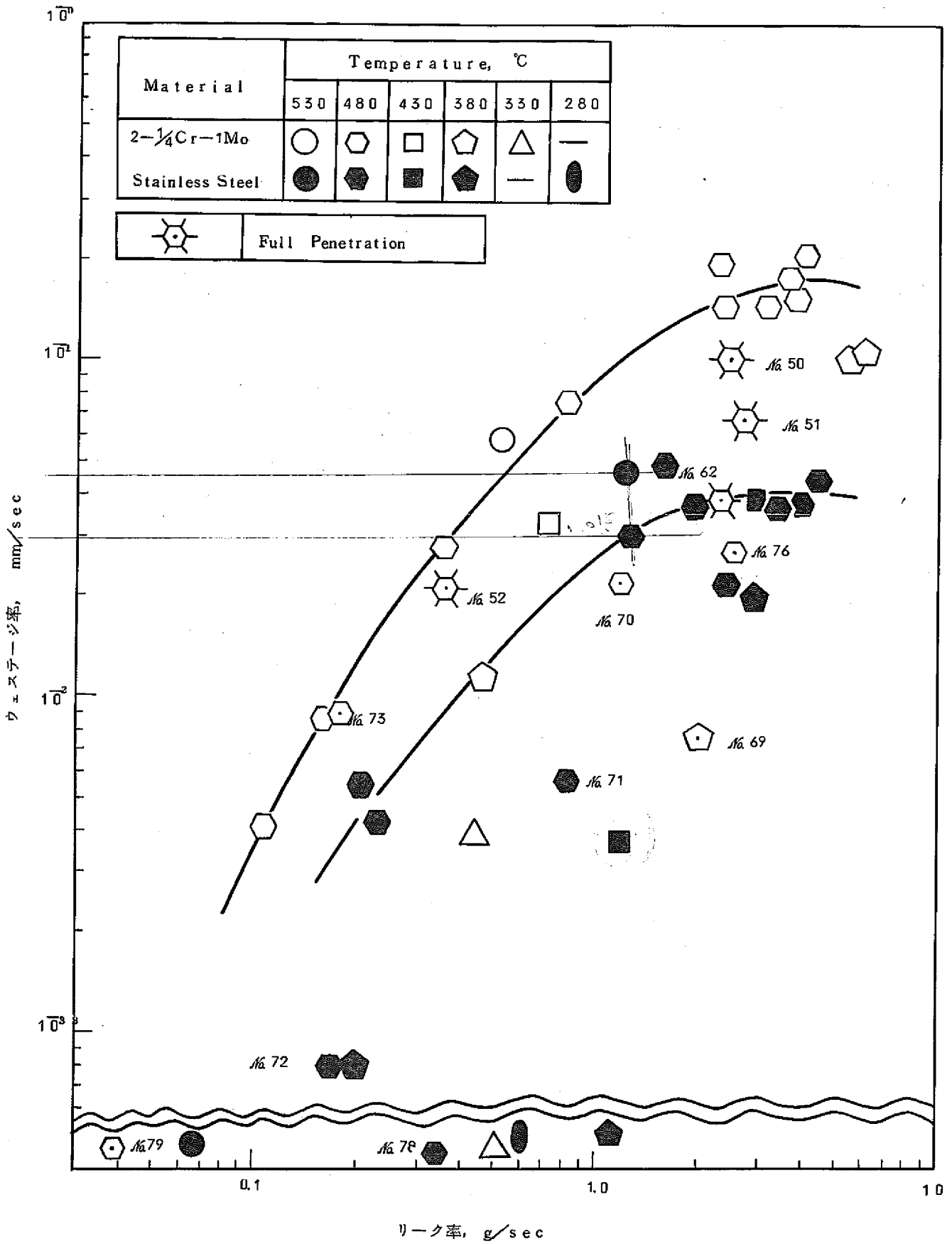


図 2-5 リーク率とウェステージ率の関係

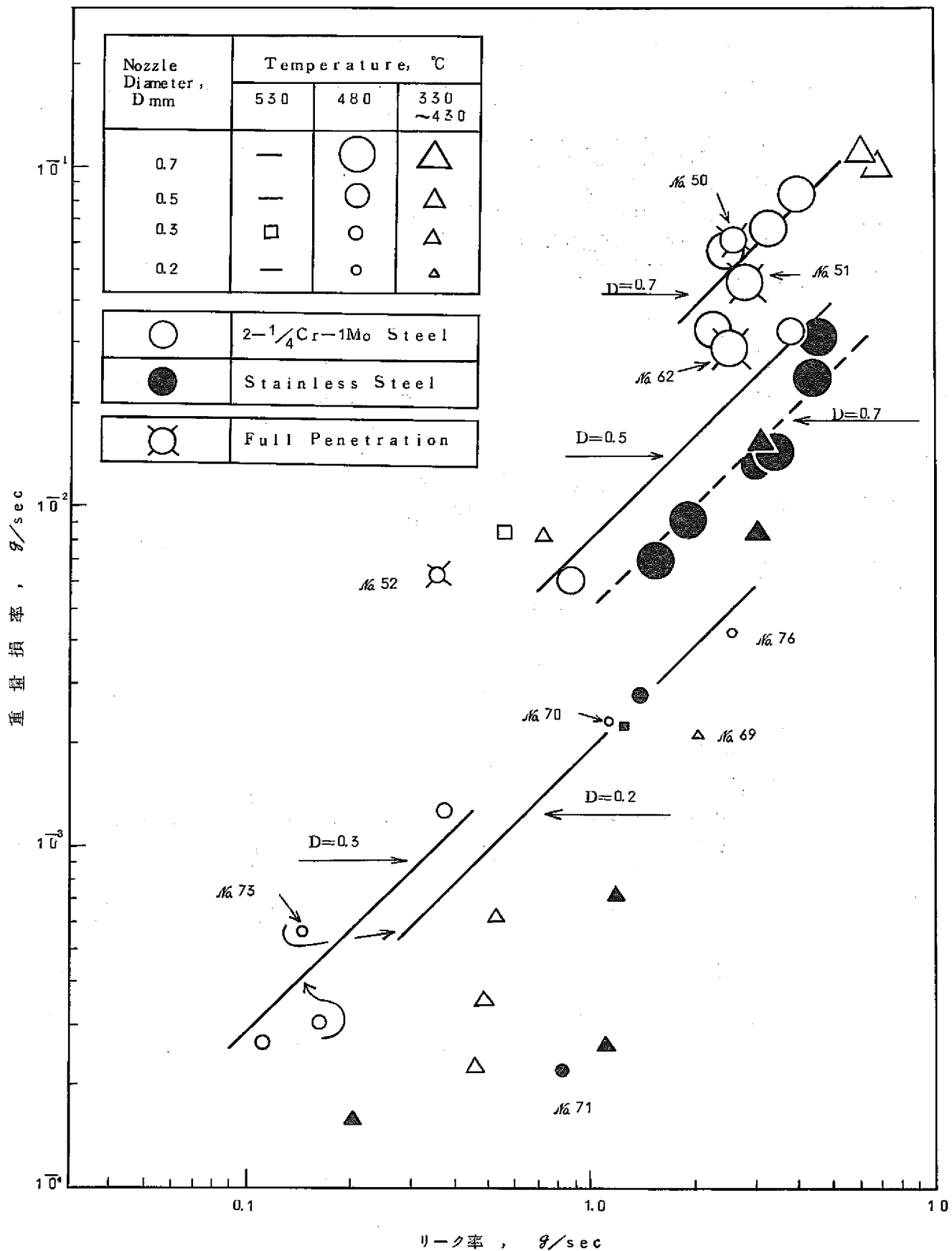


図 2-6 リーク率と重量損率の関係

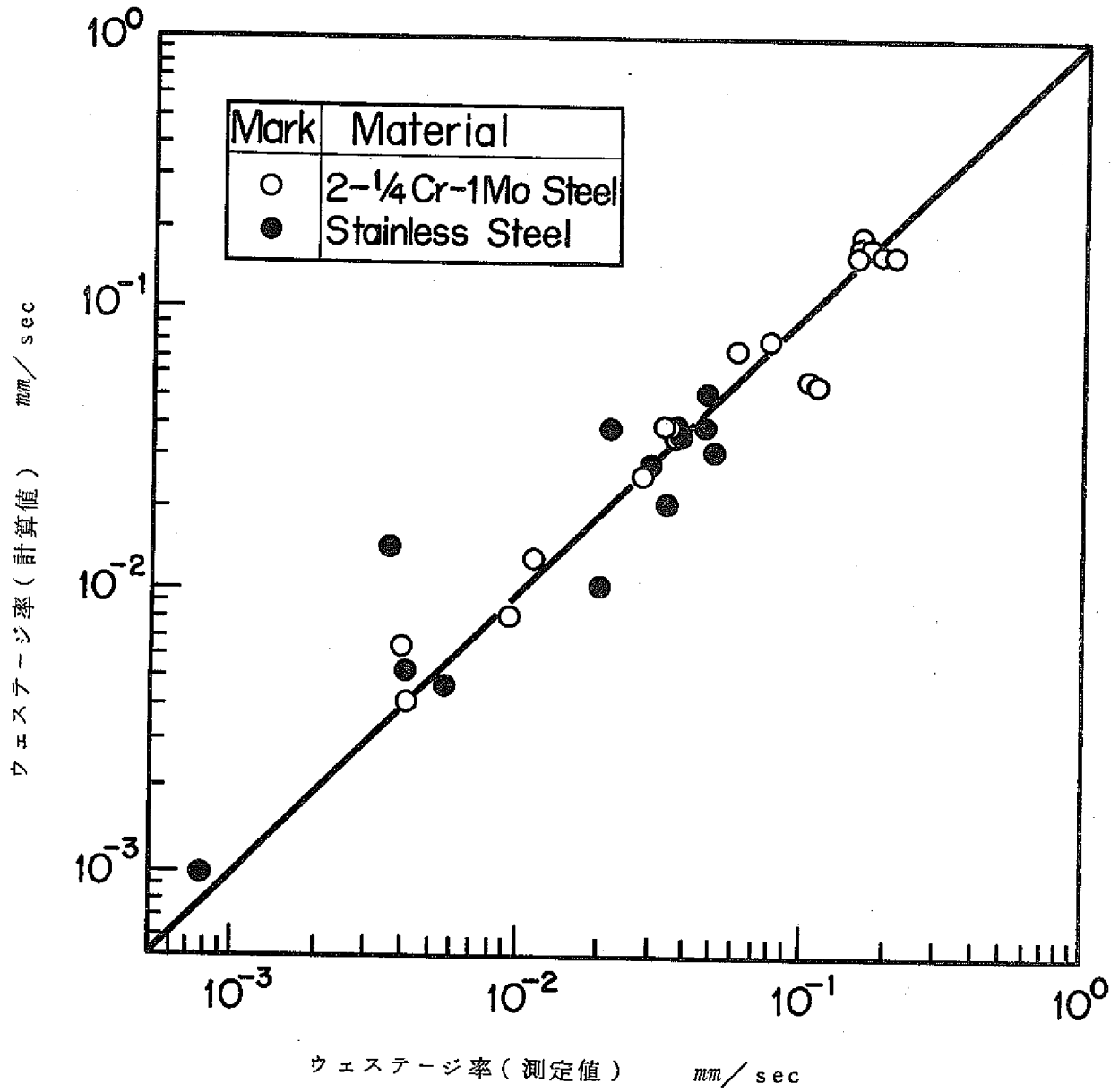


図 2-7 ウェステージ率の計算値 (式 2.5 及び式 2.6) と実測値

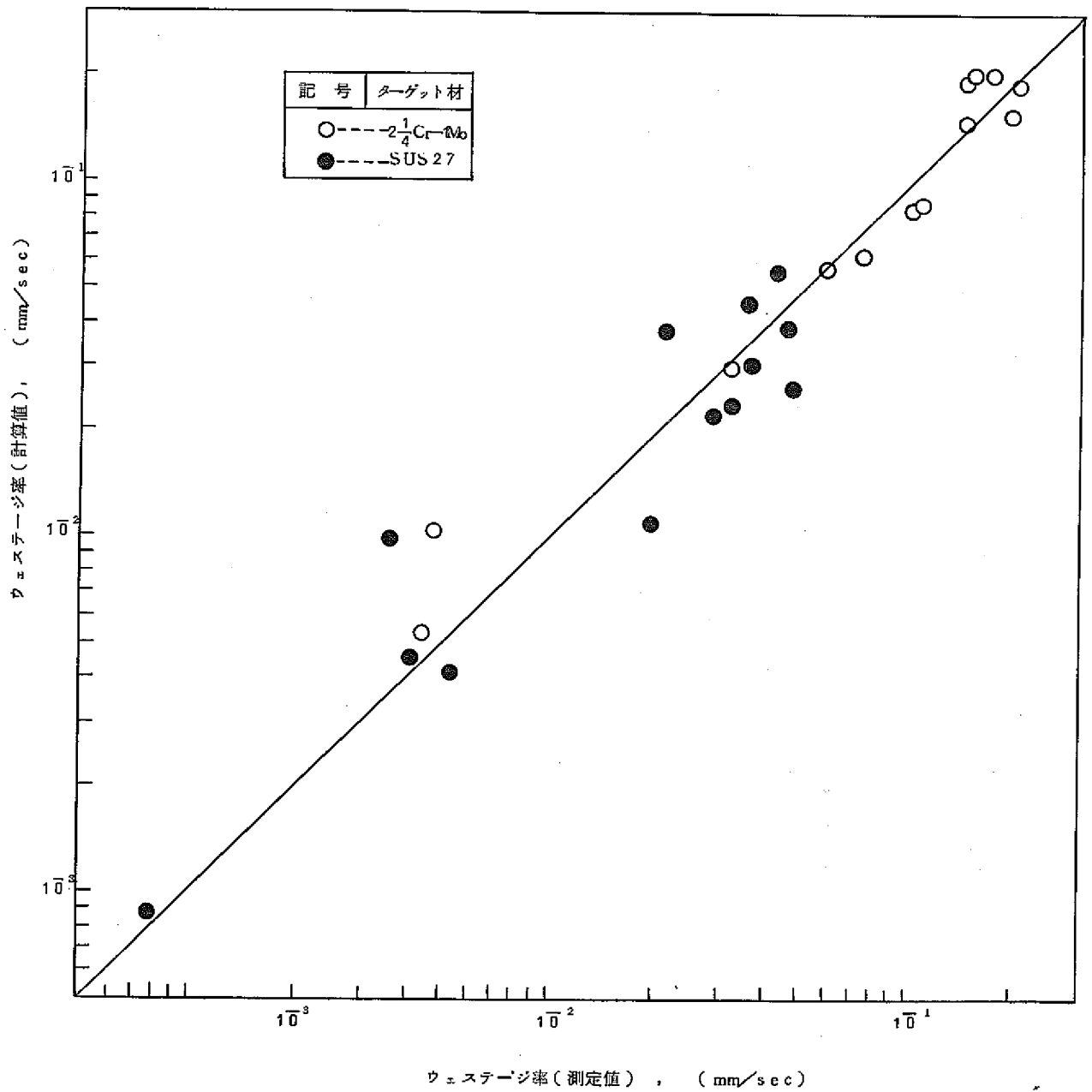


図 2 - 8 ウェステージ率の計算値(式 2.9 及び式 2.10)と実測値

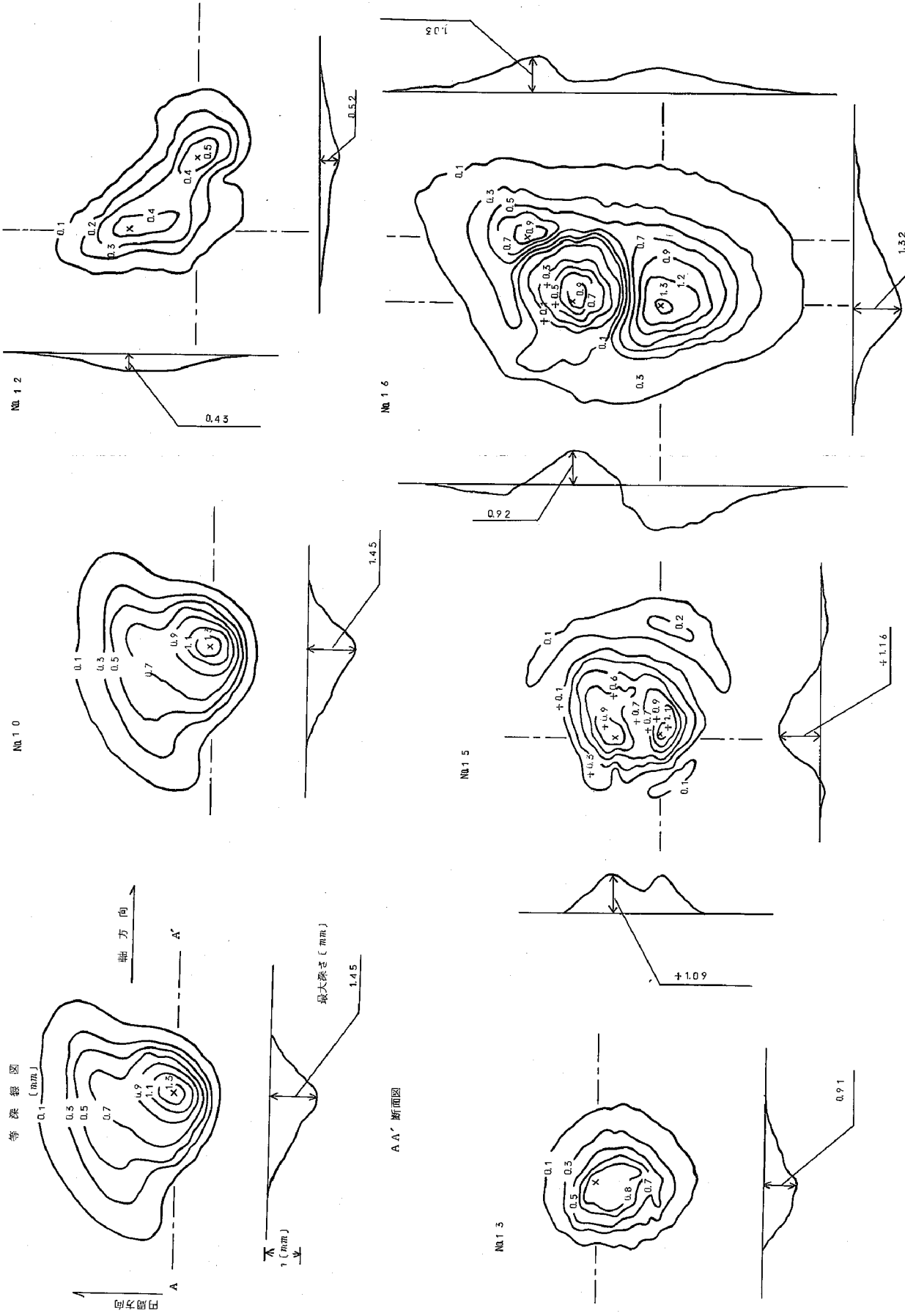


図 2-9(1) ウェステージ部のパターン

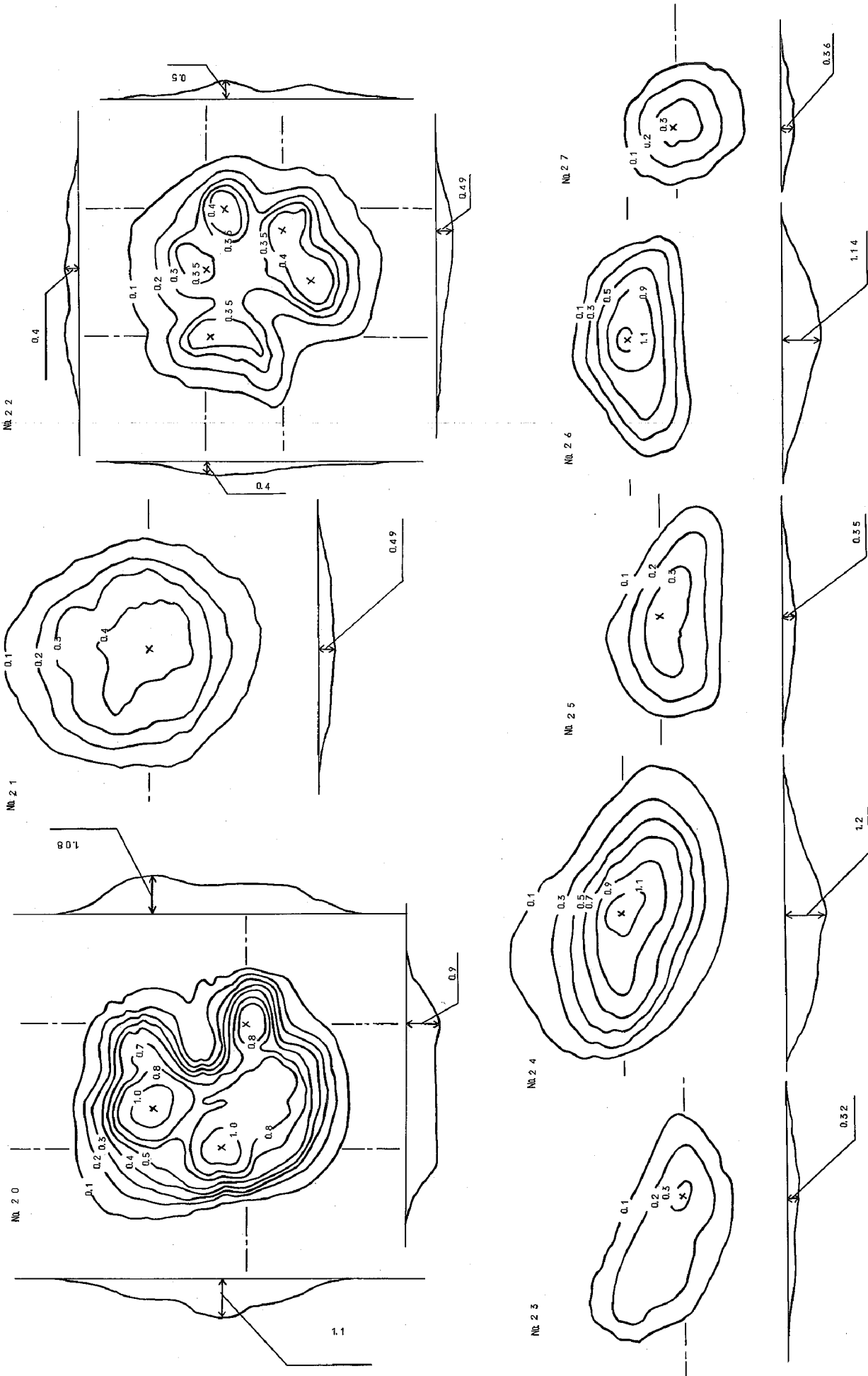


図 2-9(2) ウェスチーパットのパターン

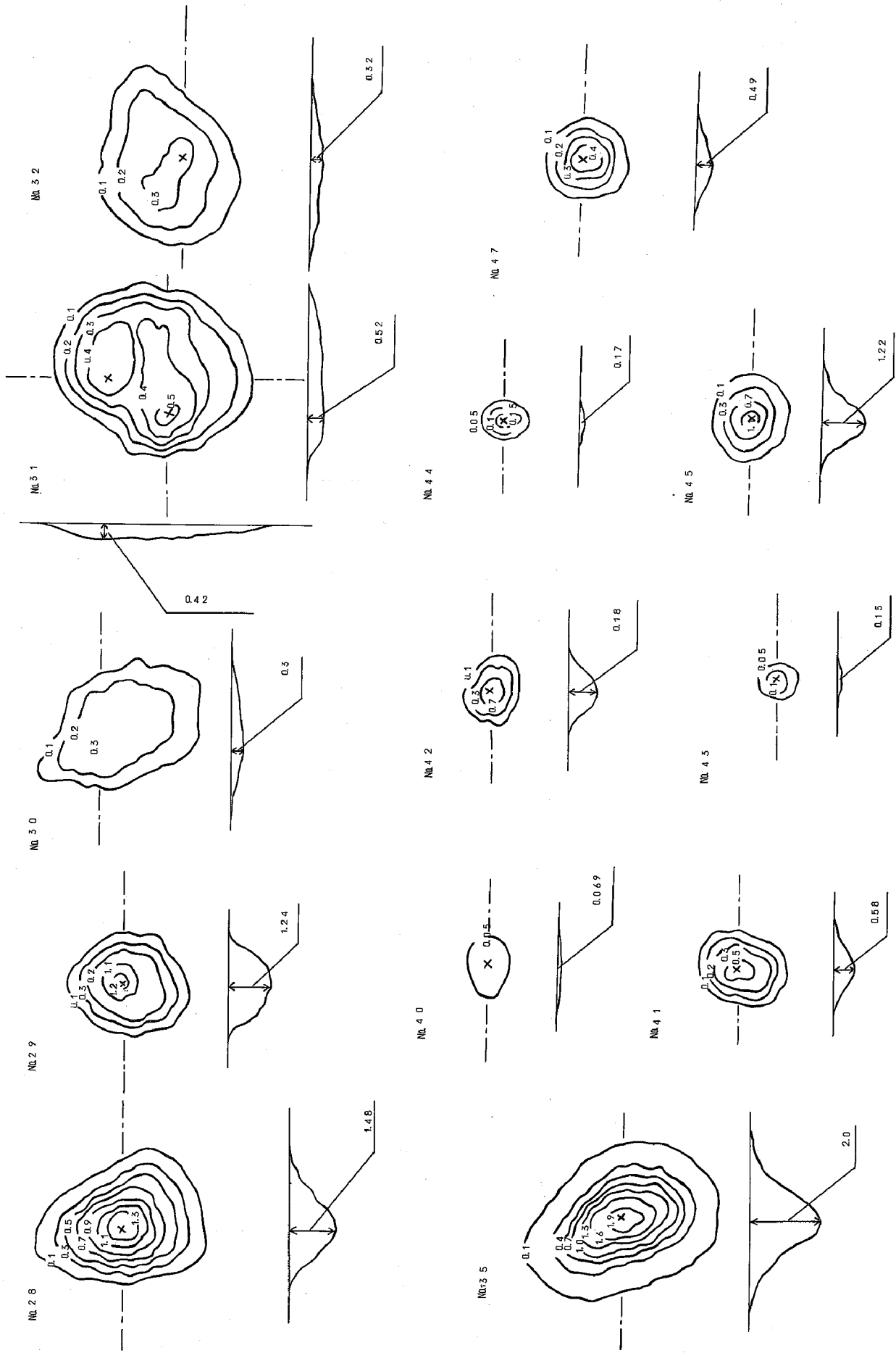


図 2-9 (8) ウェスタンジ部のパターン

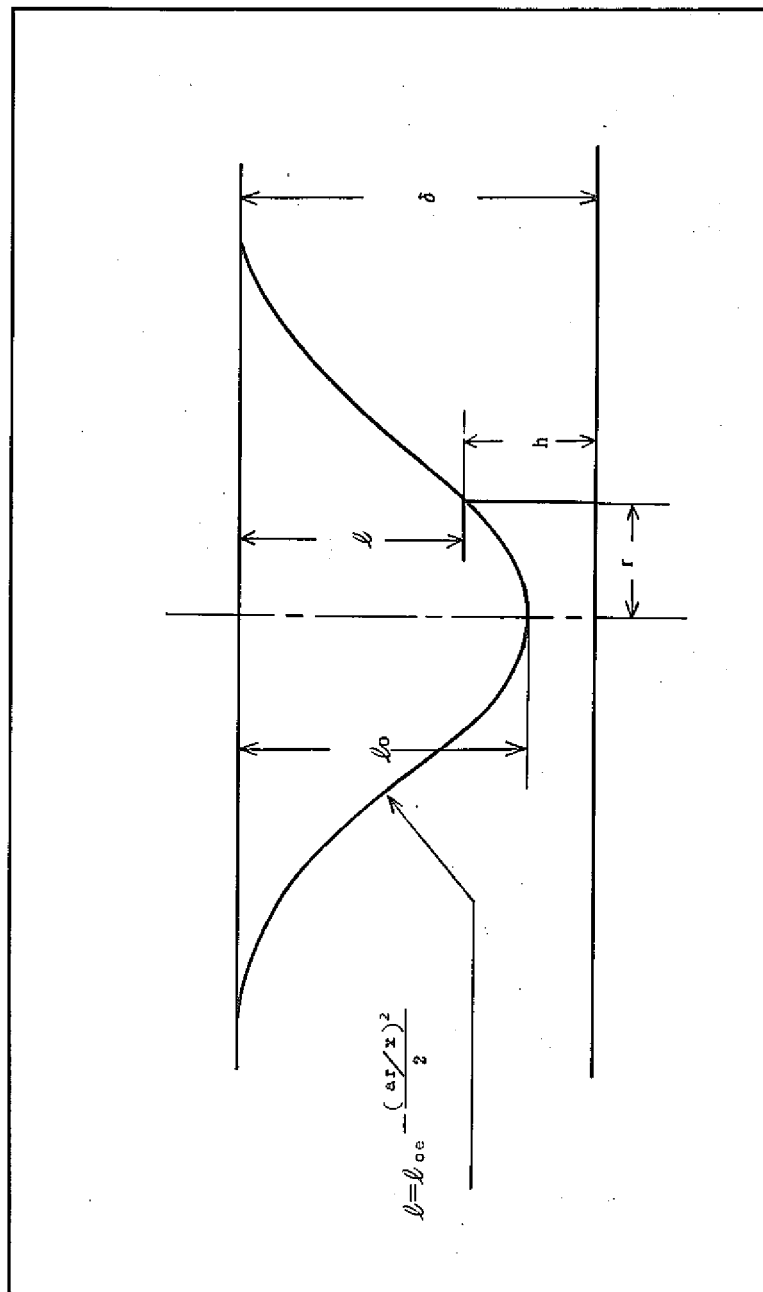


图2-10 正 規 分 布

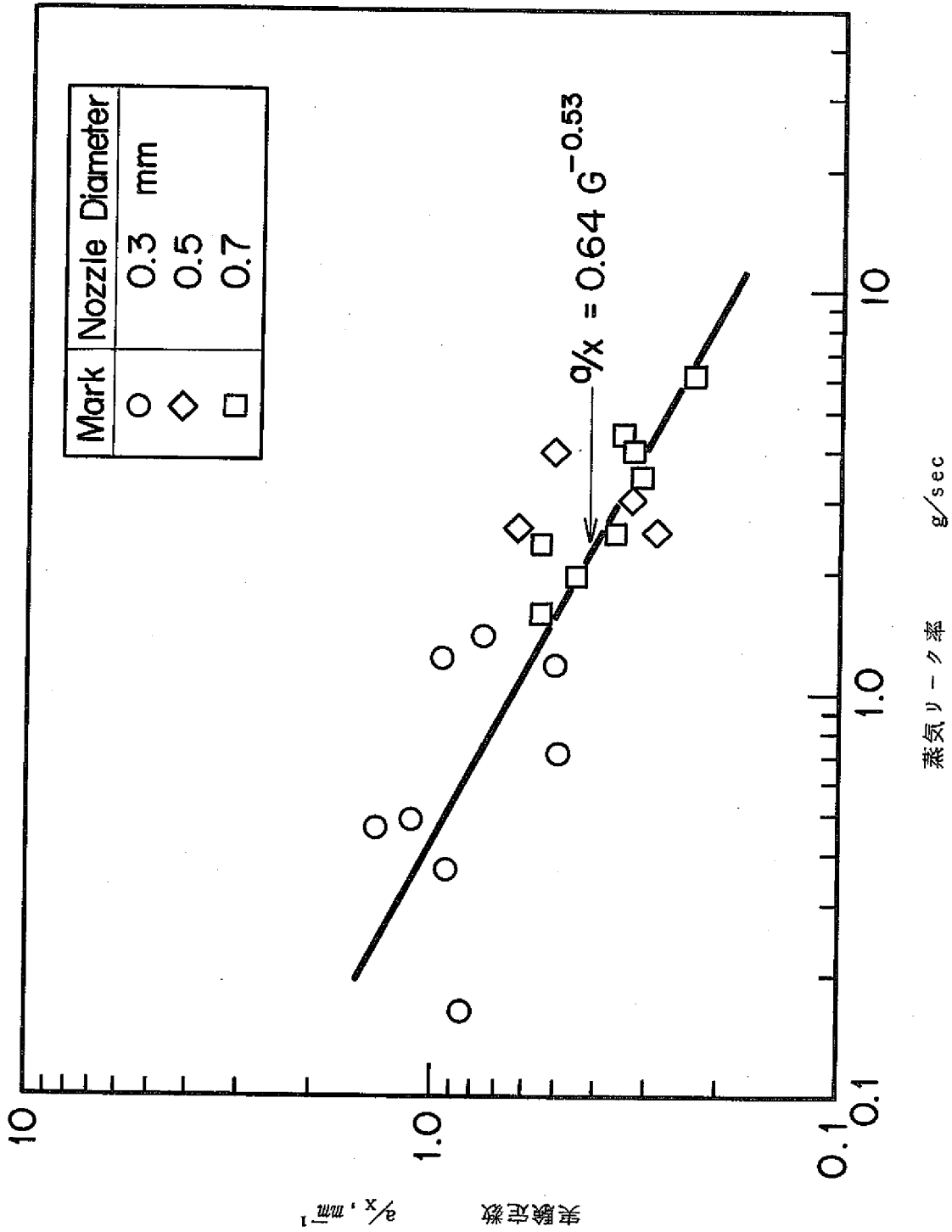


図2-11 リーク率と a/x の関係

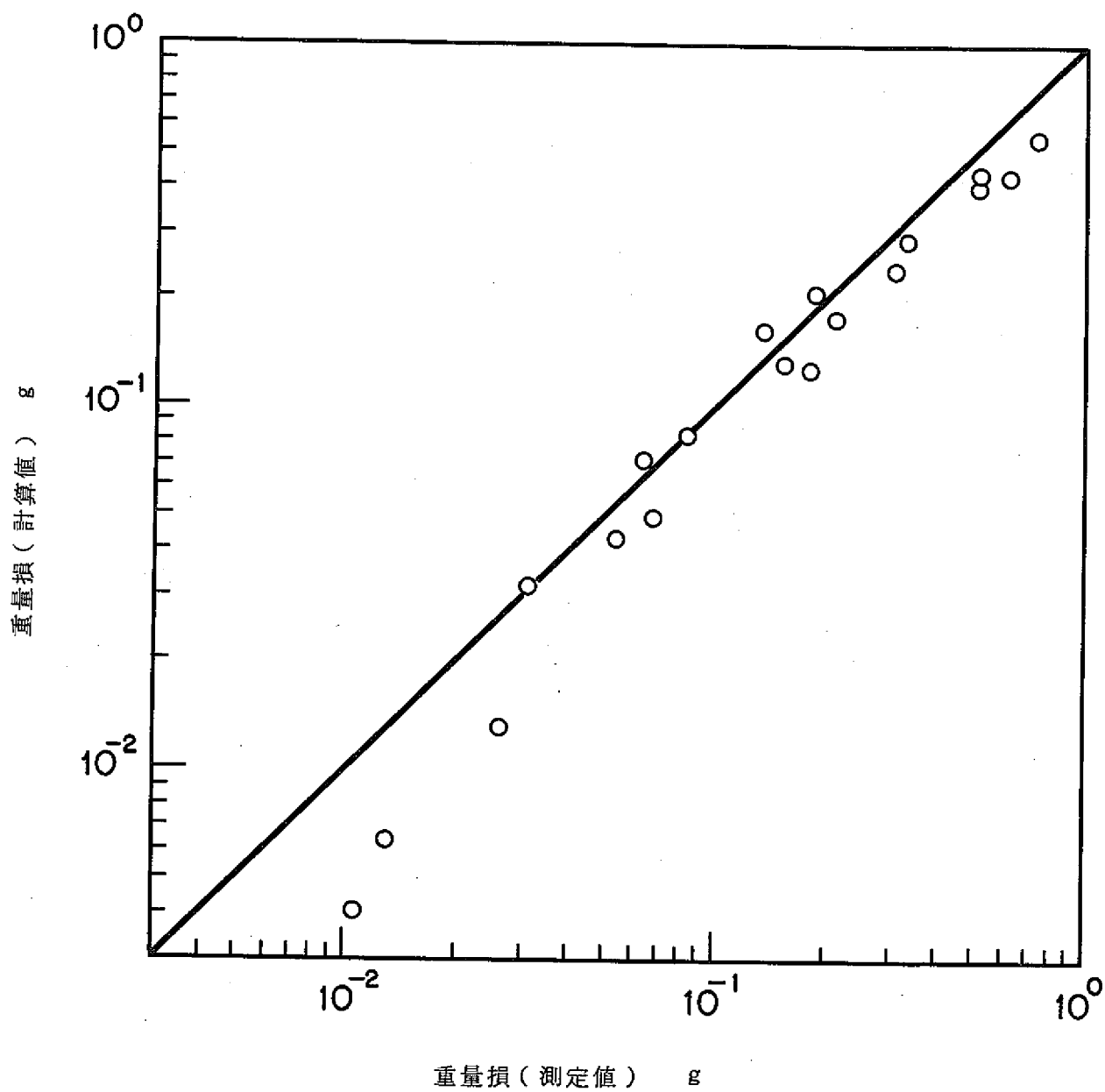


図2-12 重量損の計算値(式2.14)と実測値

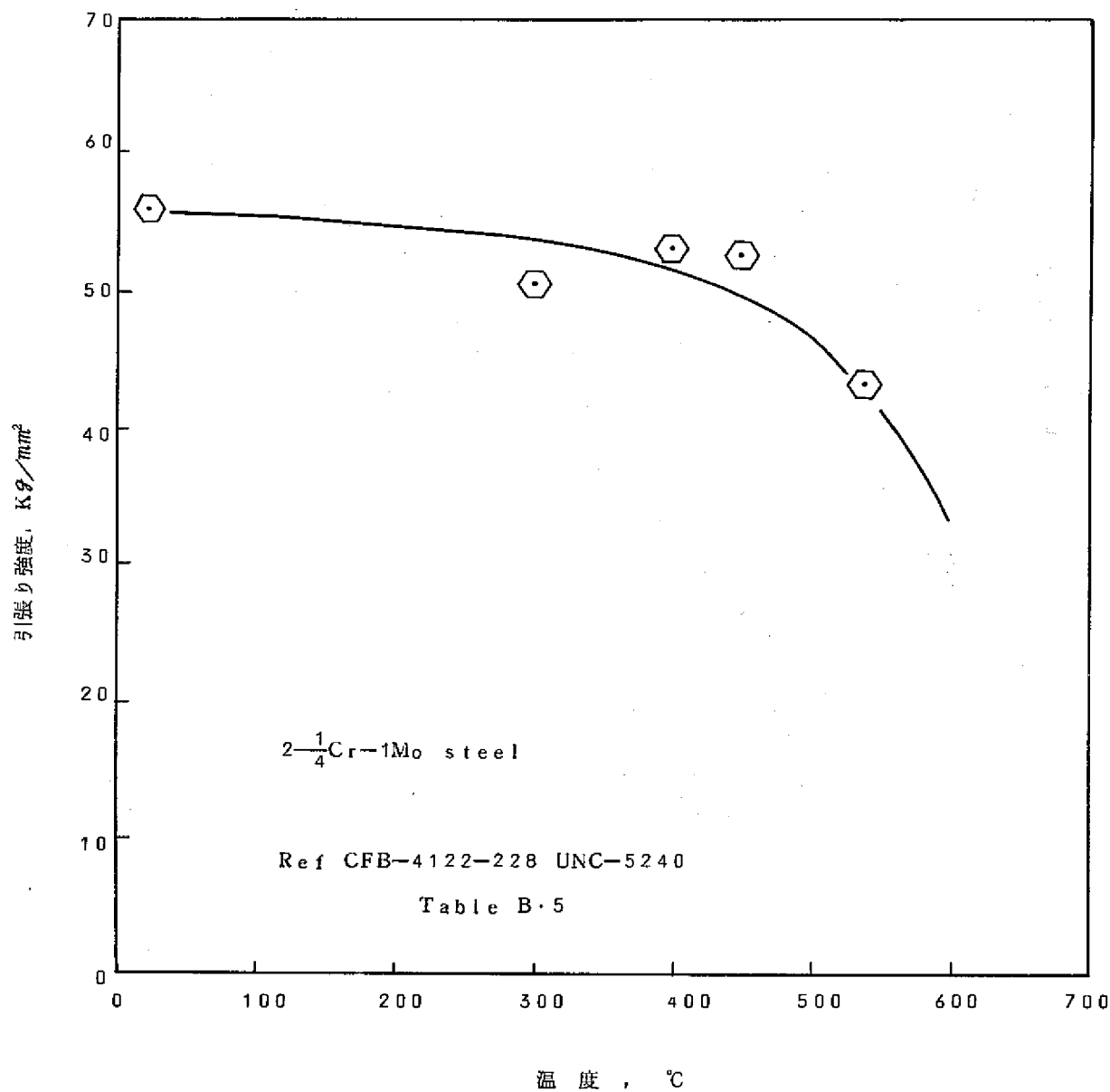


図2-13 2- $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の高温での引張強さ

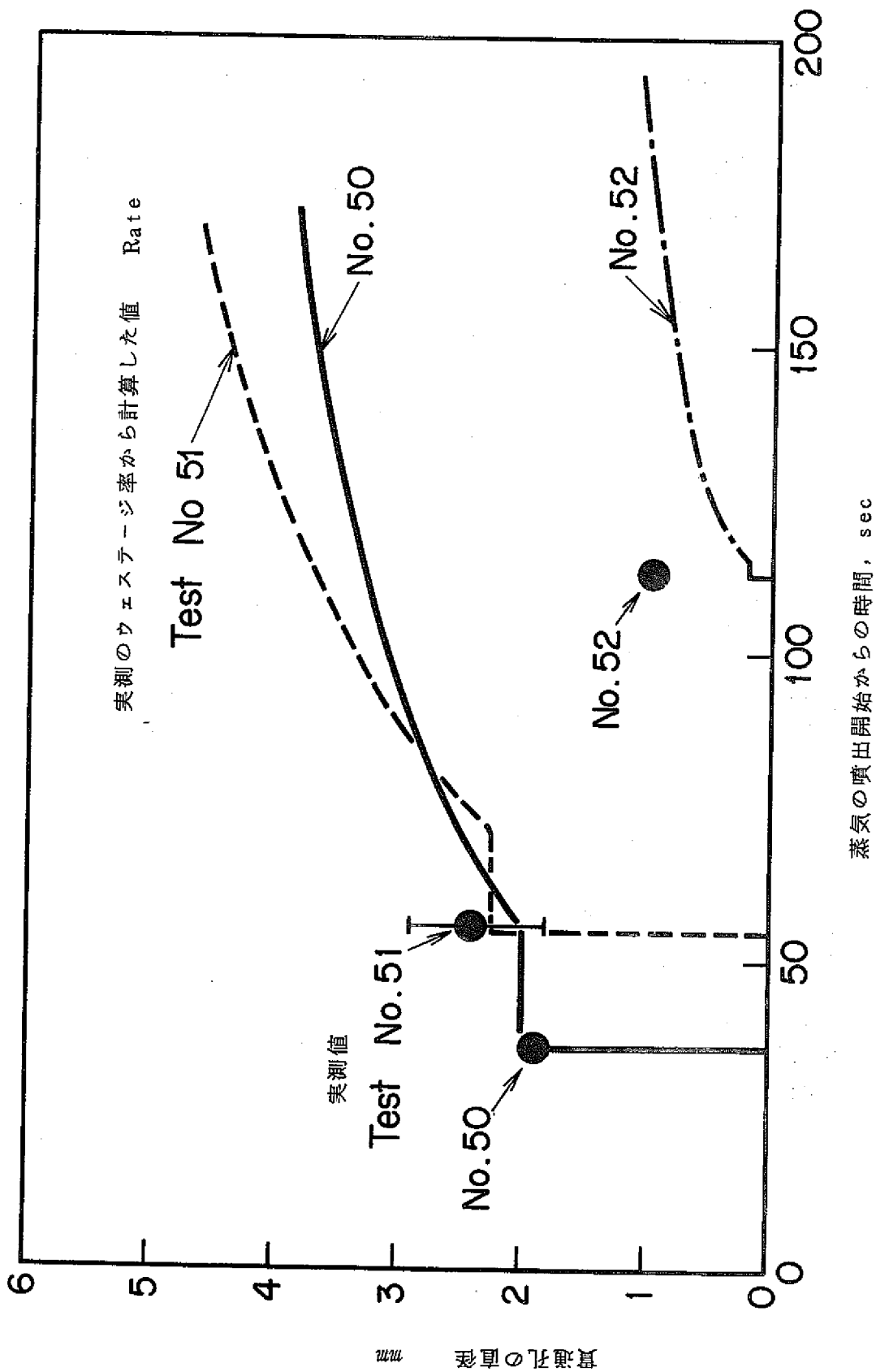


図2-14 ウェステージによる貫通孔の大きさ, 測定値と計算値

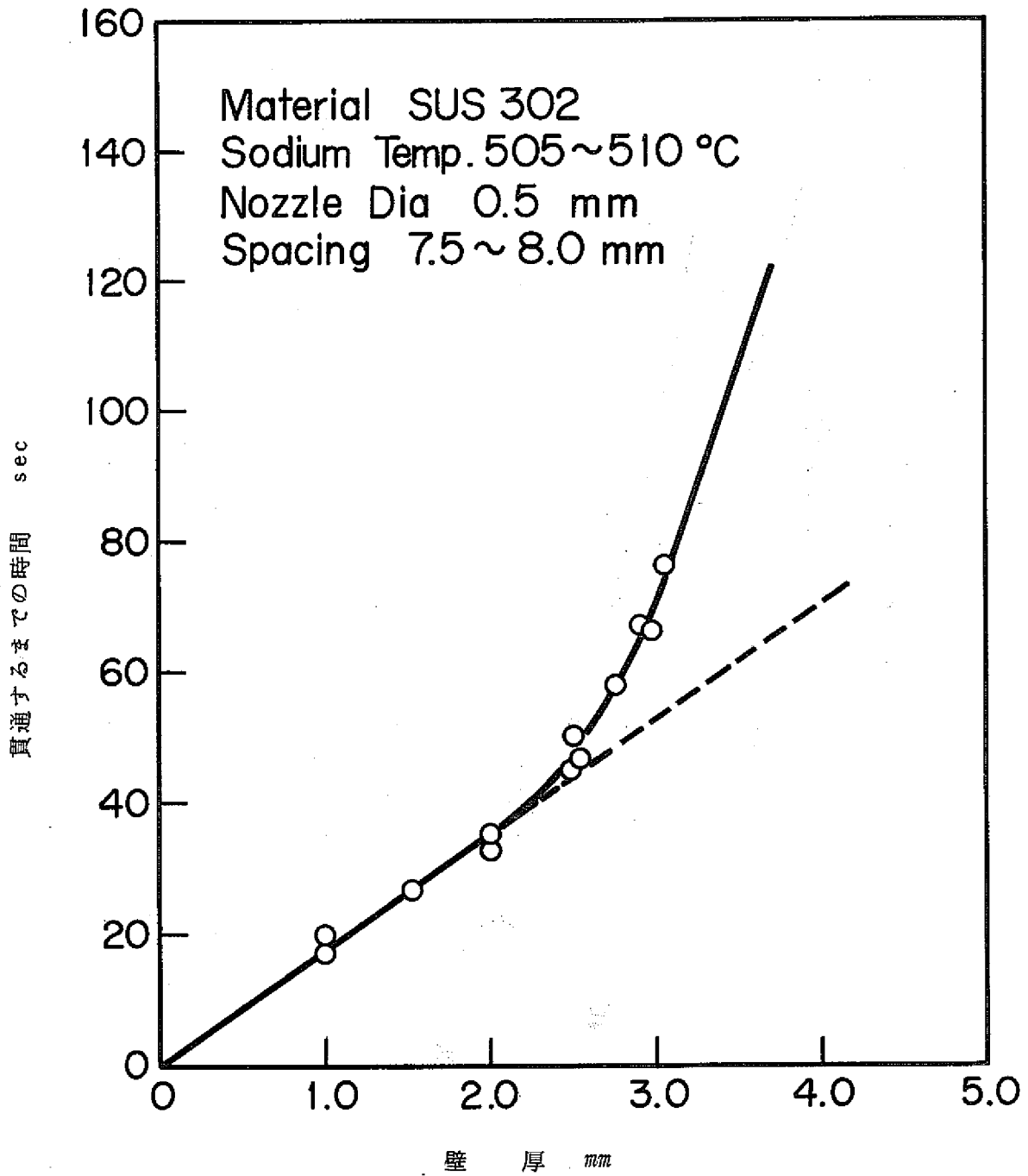
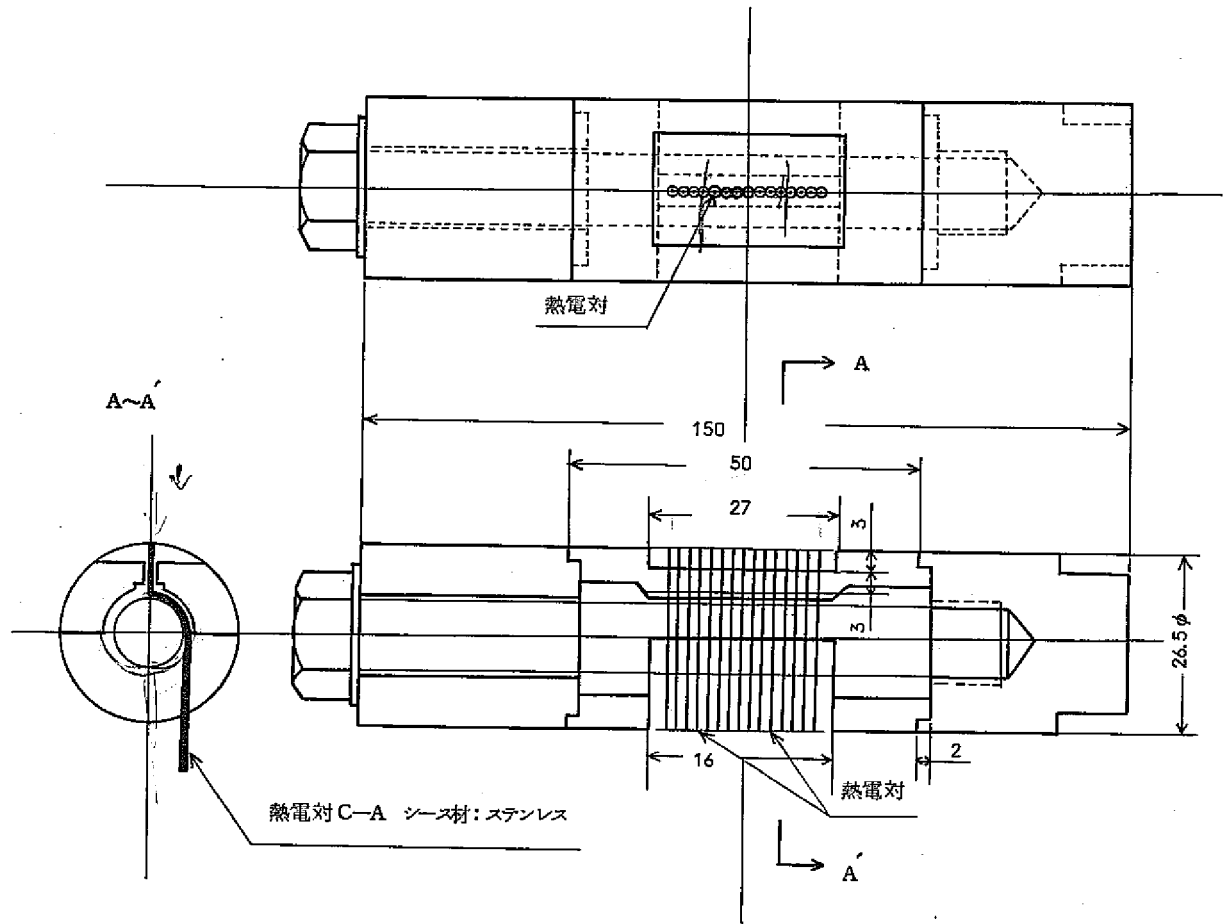
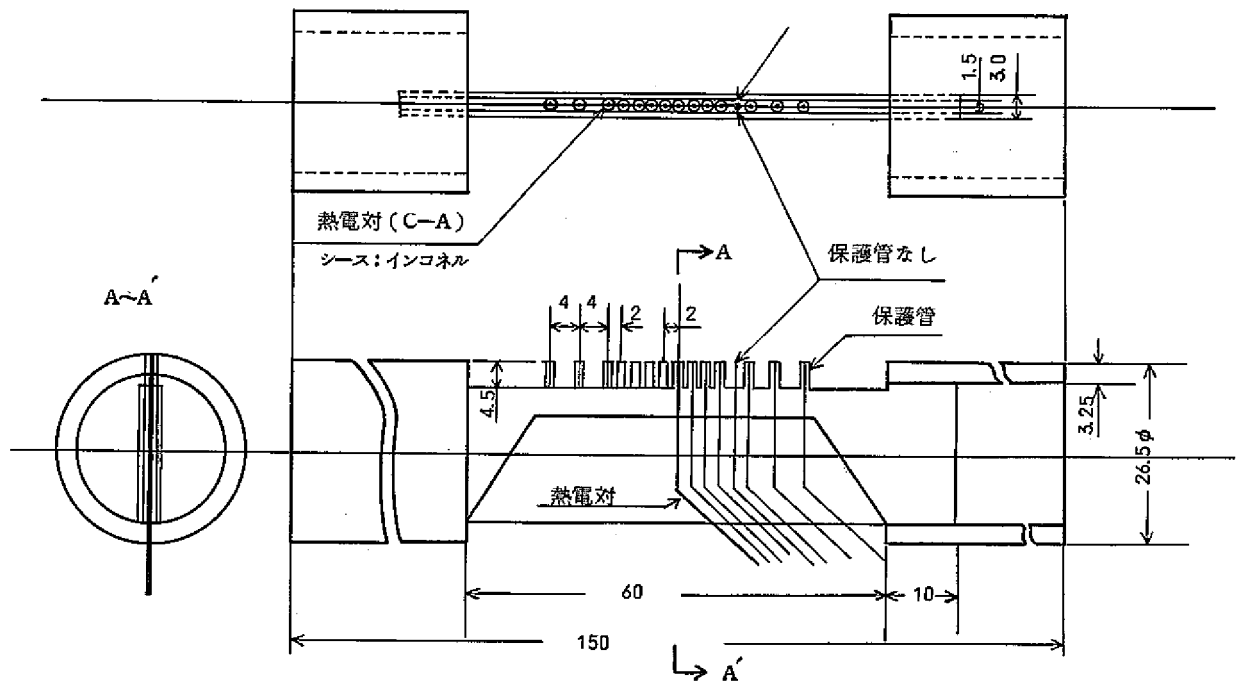


図2-15 壁厚と貫通時間の関係(ソ連の実験結果)



(A) Test No 53~59用管型試験部



(B) Test No 63~68用板型試験部

図2-16 温度分布測定用試験部

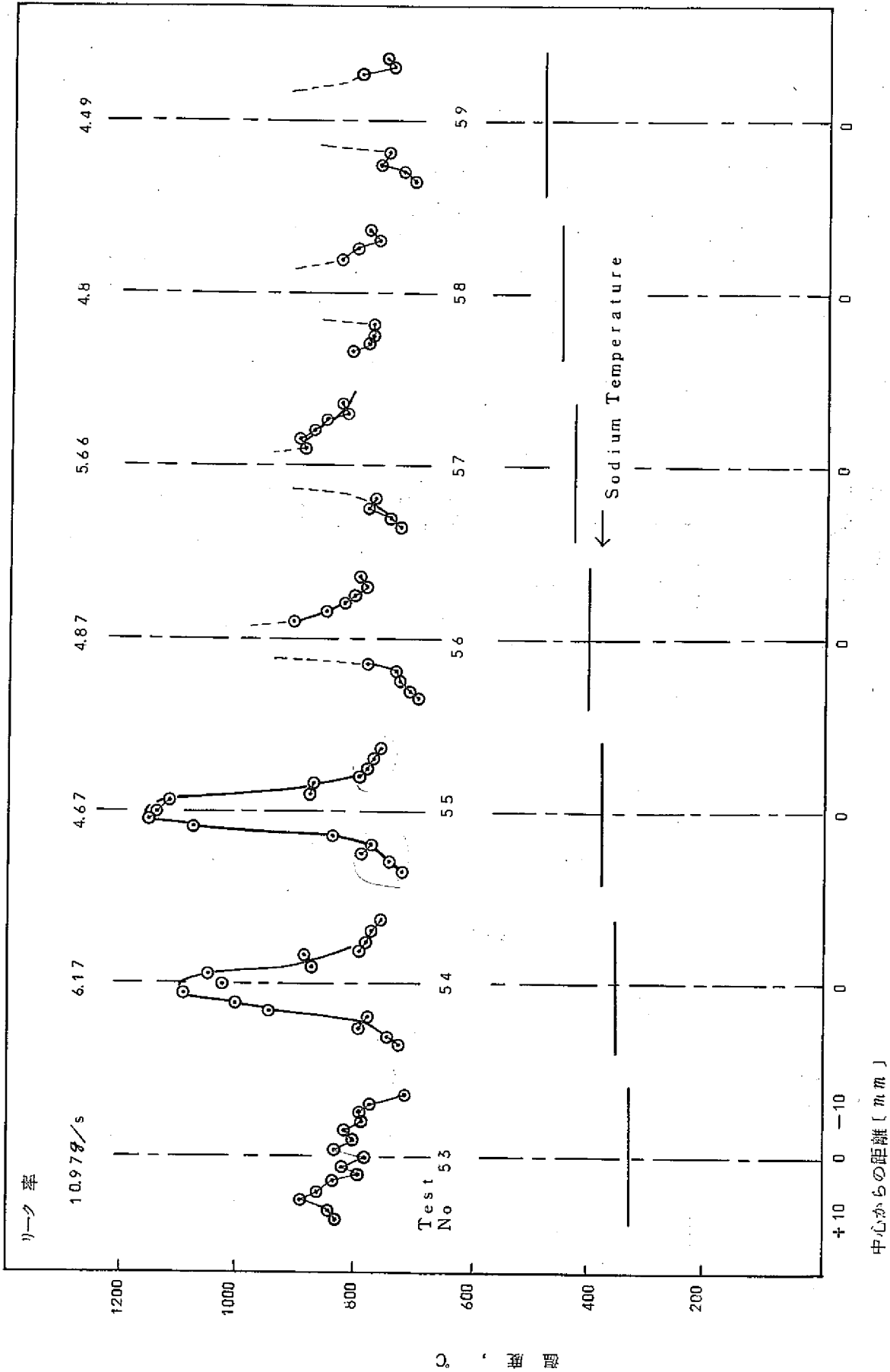


図2-17 噴流の温度分布. Test No 53~59

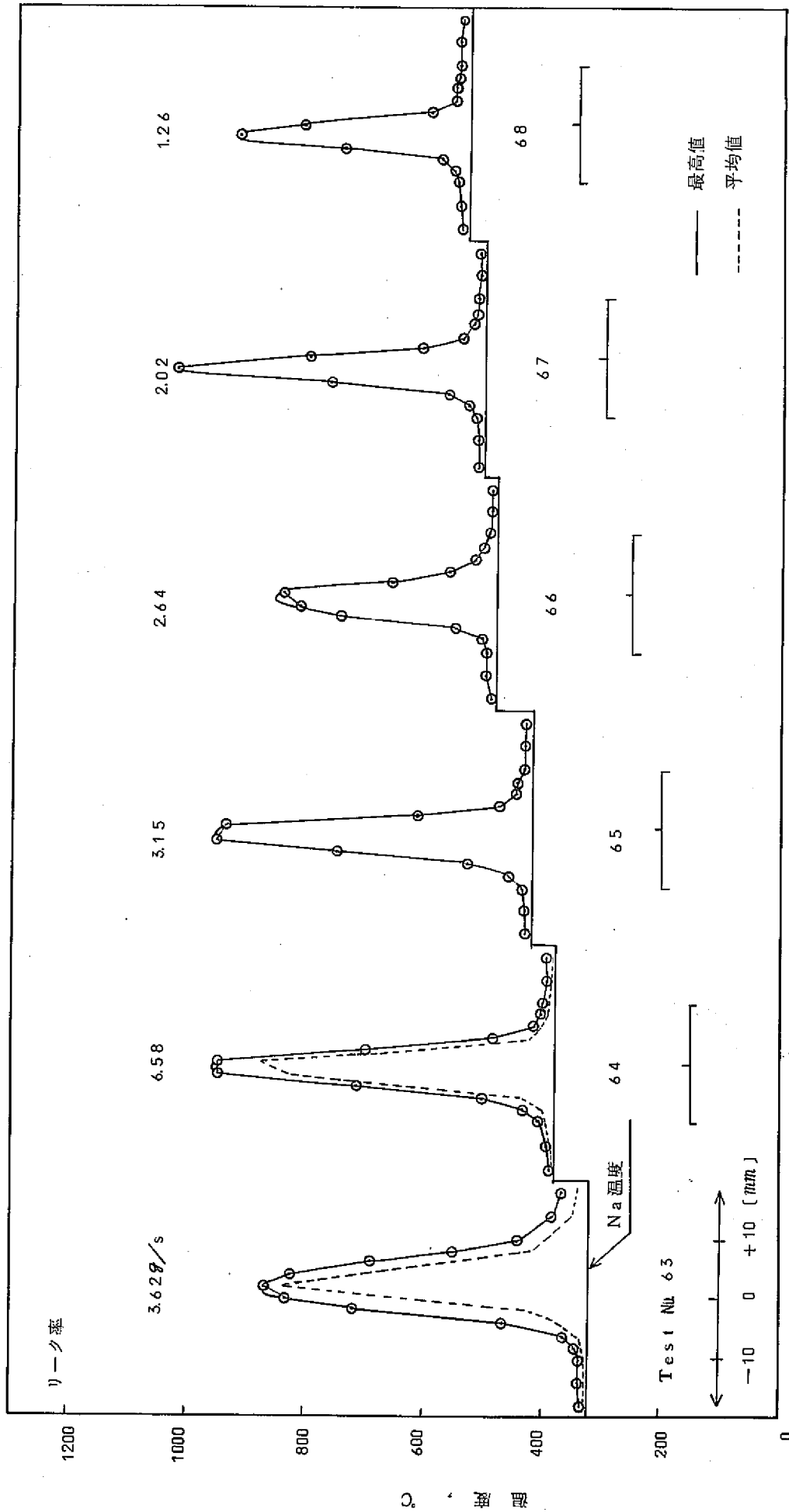


図2-18 噴流の温度分布, Test No. 63~68

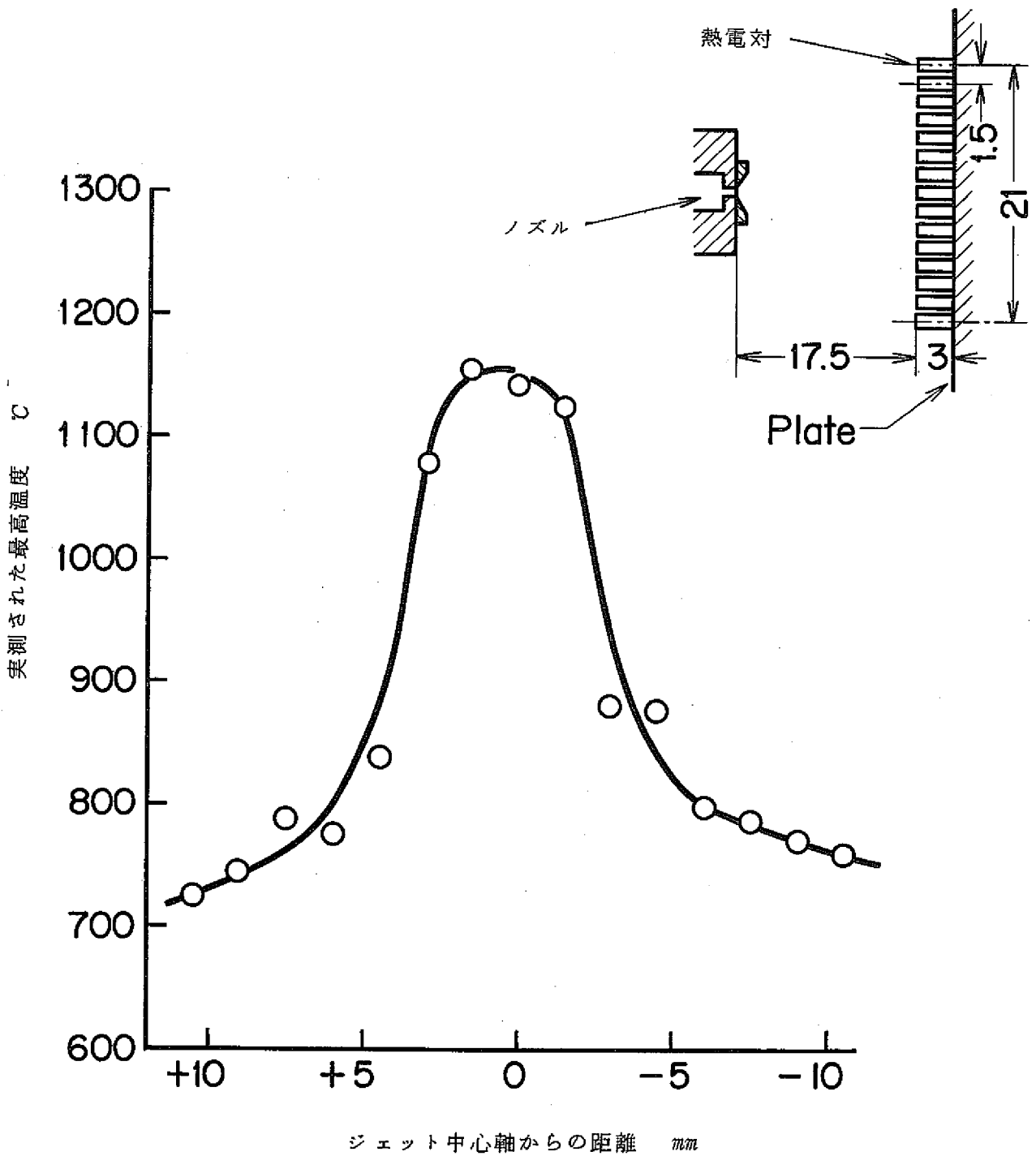


図2-19 噴流の温度分布

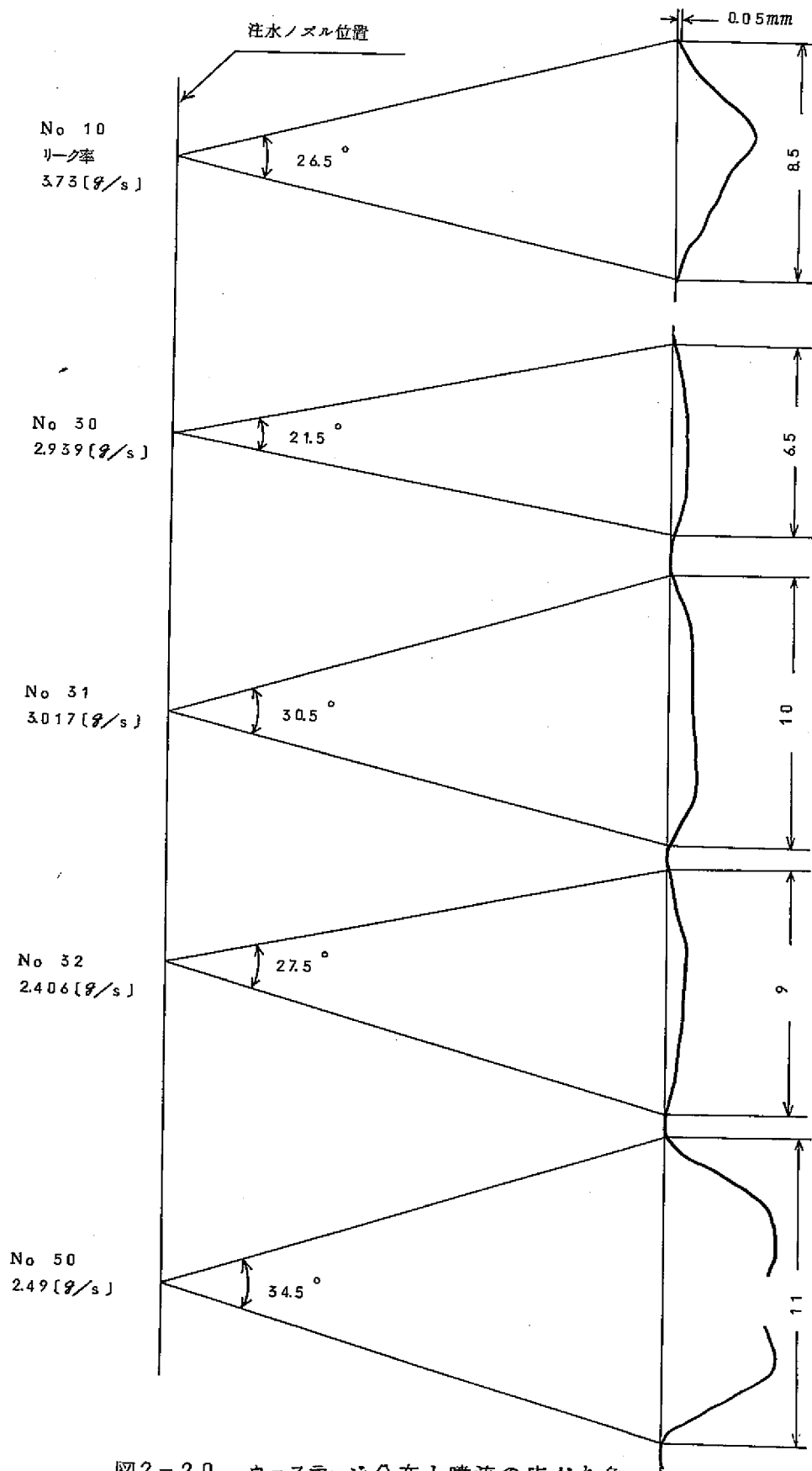


図2-20 ウェステージ分布と噴流の広がり角

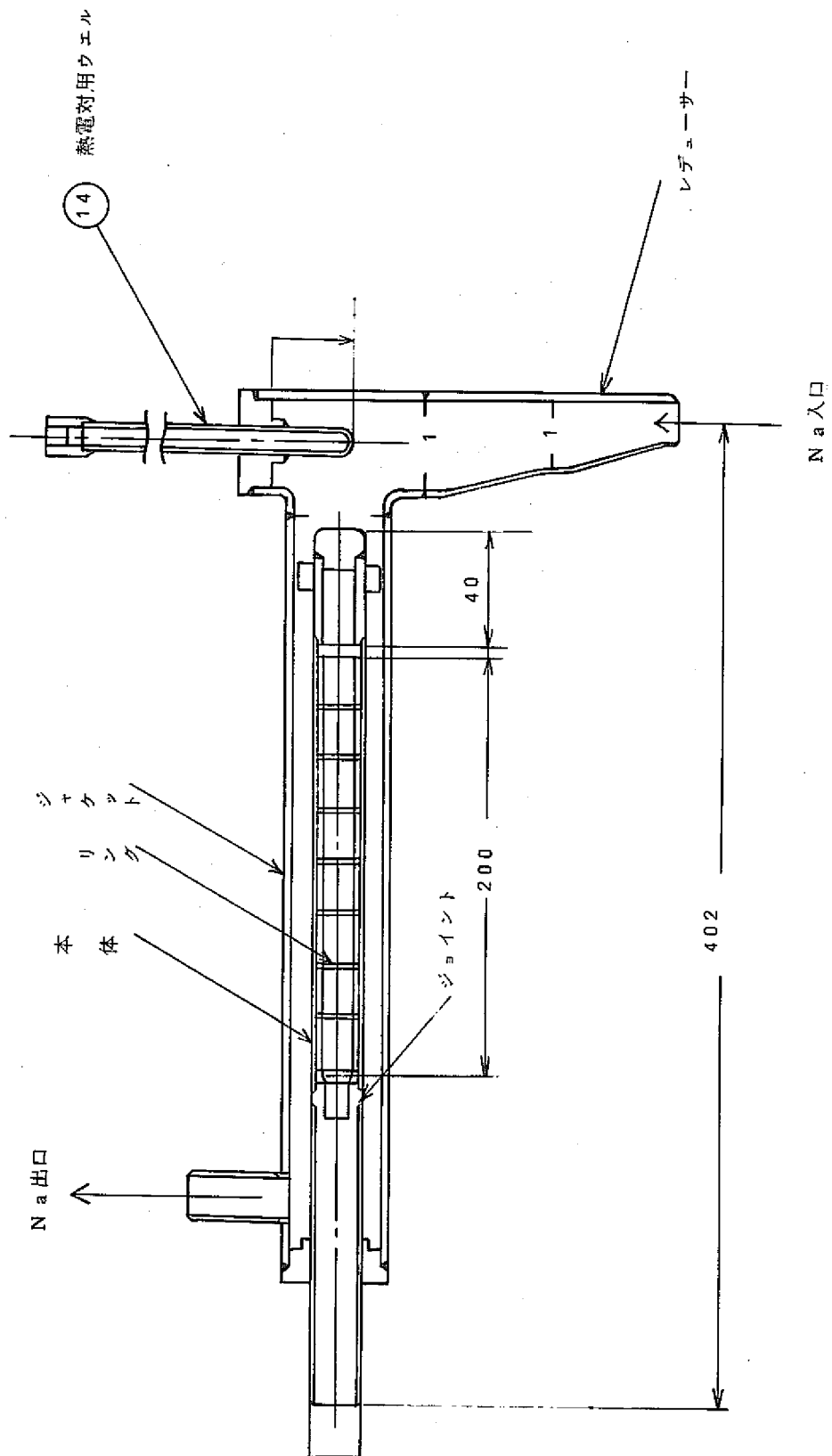


図 3-1 改造後のセンサ部の構造

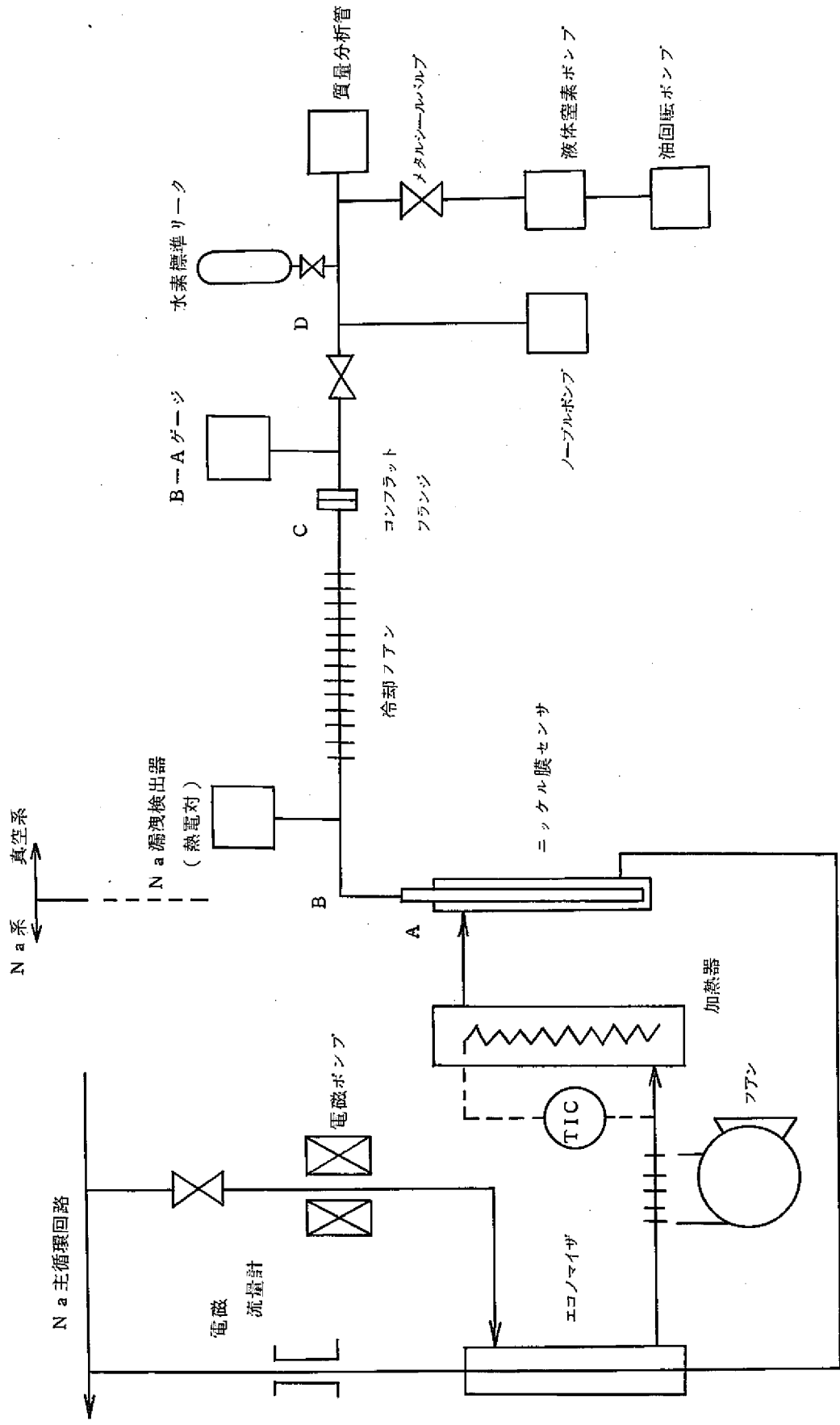


図 3-2 Na 中水素計系統図

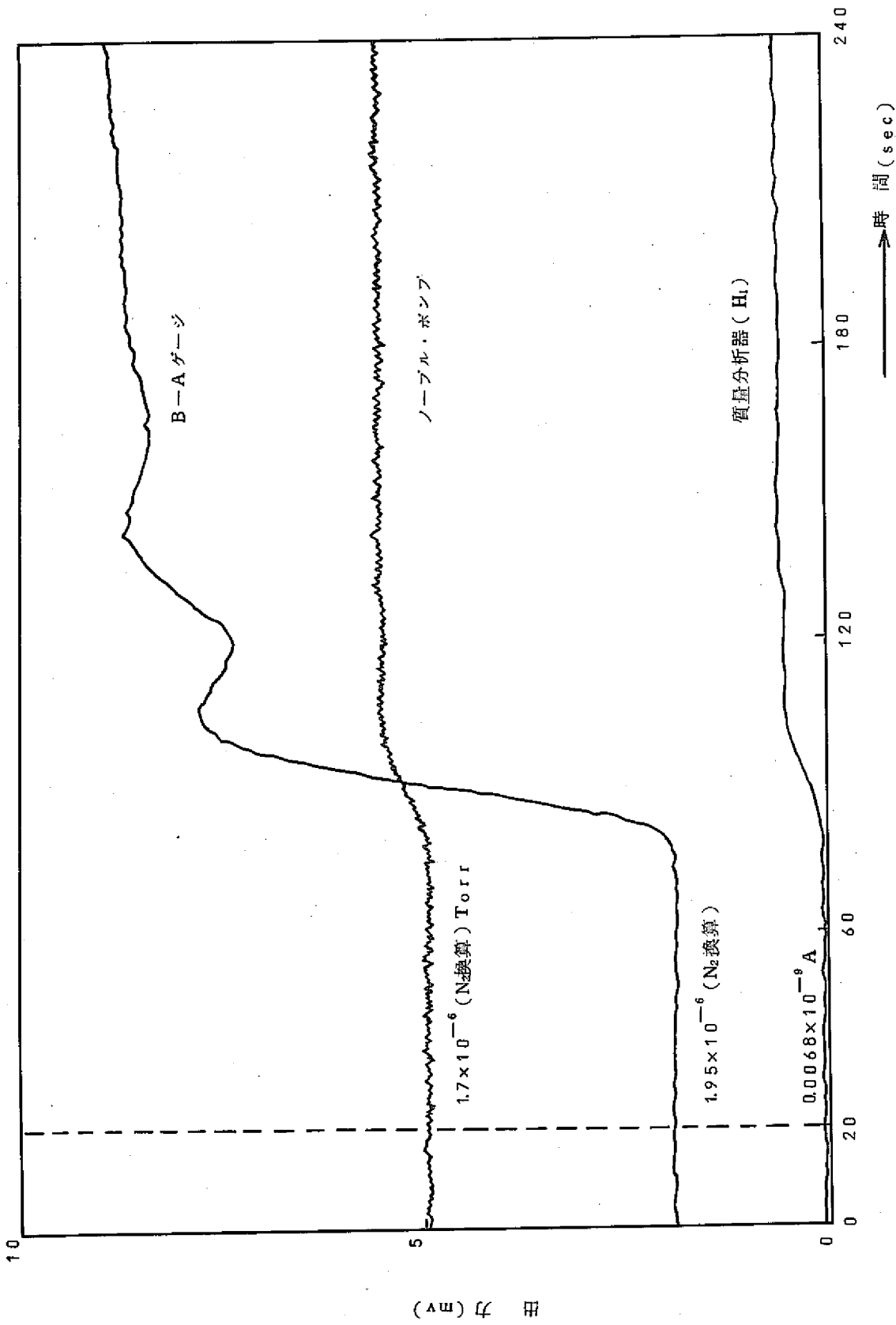
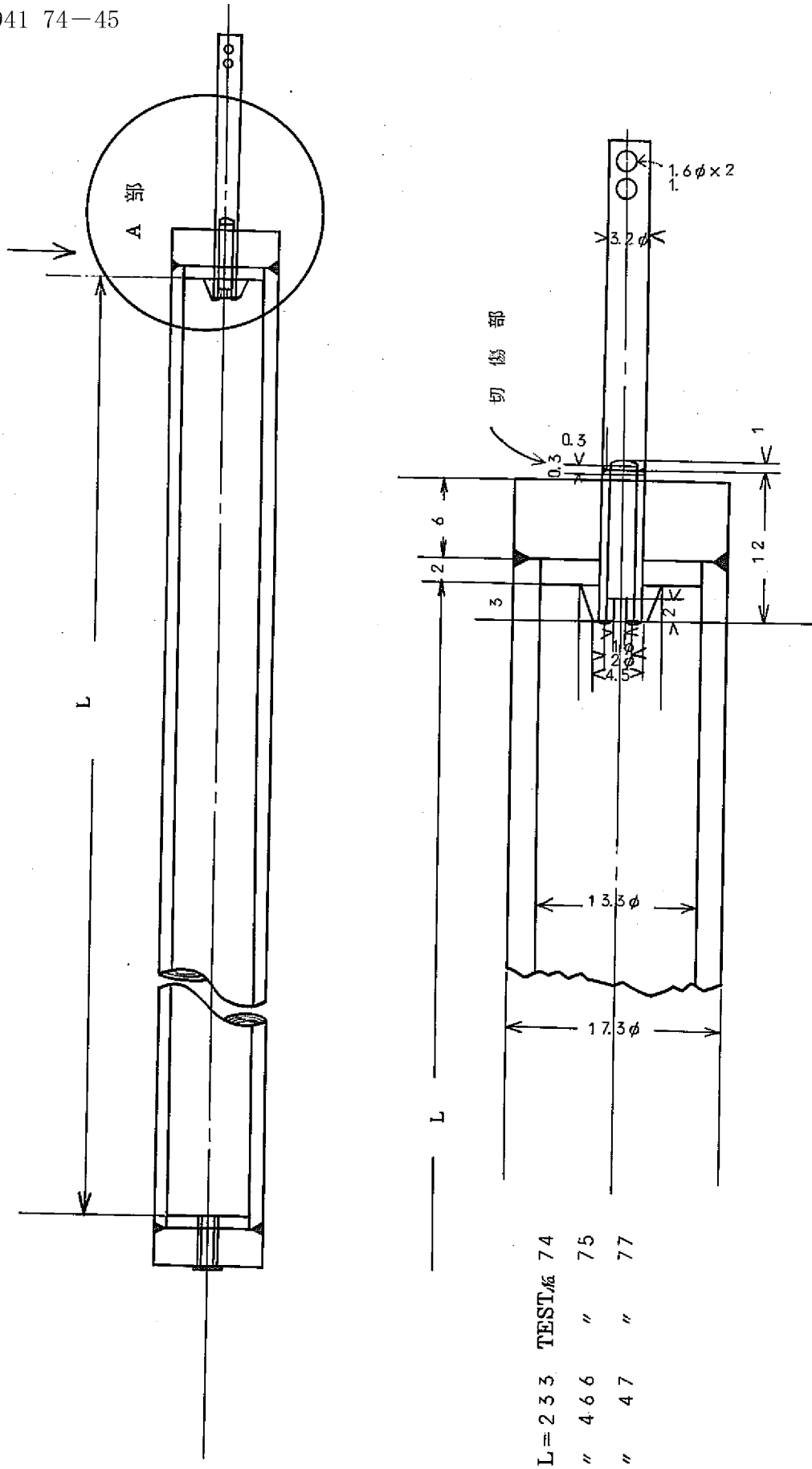


図 3-3 各検出器の出力 (リーク率 10.97 g/sec, Ni 膜温度 500°C, 主循環 Na 温度 330°C, 初期 Na 中水素濃度 0.99 ppm, 水注入時刻は 20 秒)



A部詳細(2/1)

図3-4 微小リーク用キャプセル

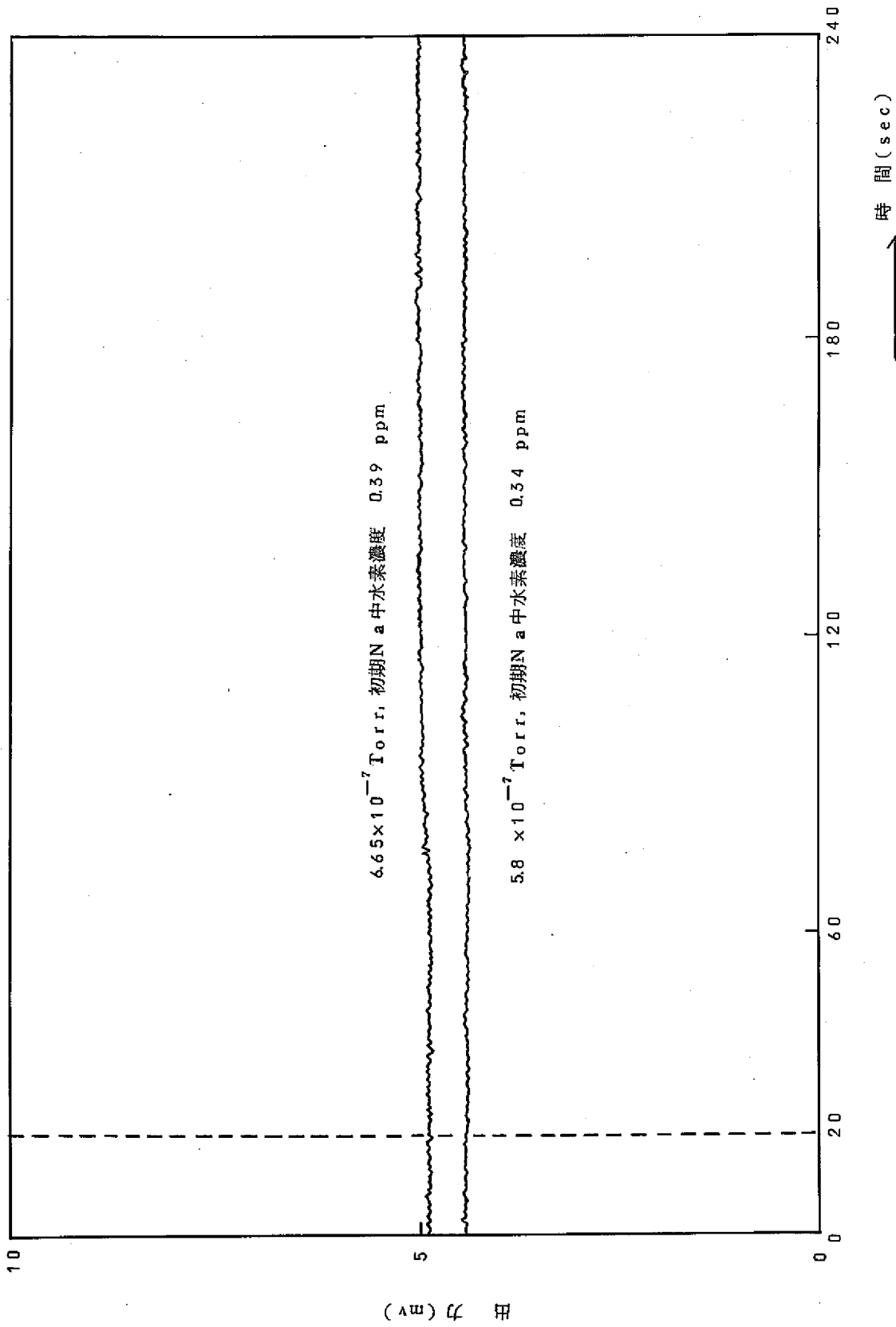


図3-5 微小リレーに対するノープル・ポンプの応答(上)0.5g, (下)0.1g (Ni膜温度500℃, 水注入時刻は20秒)

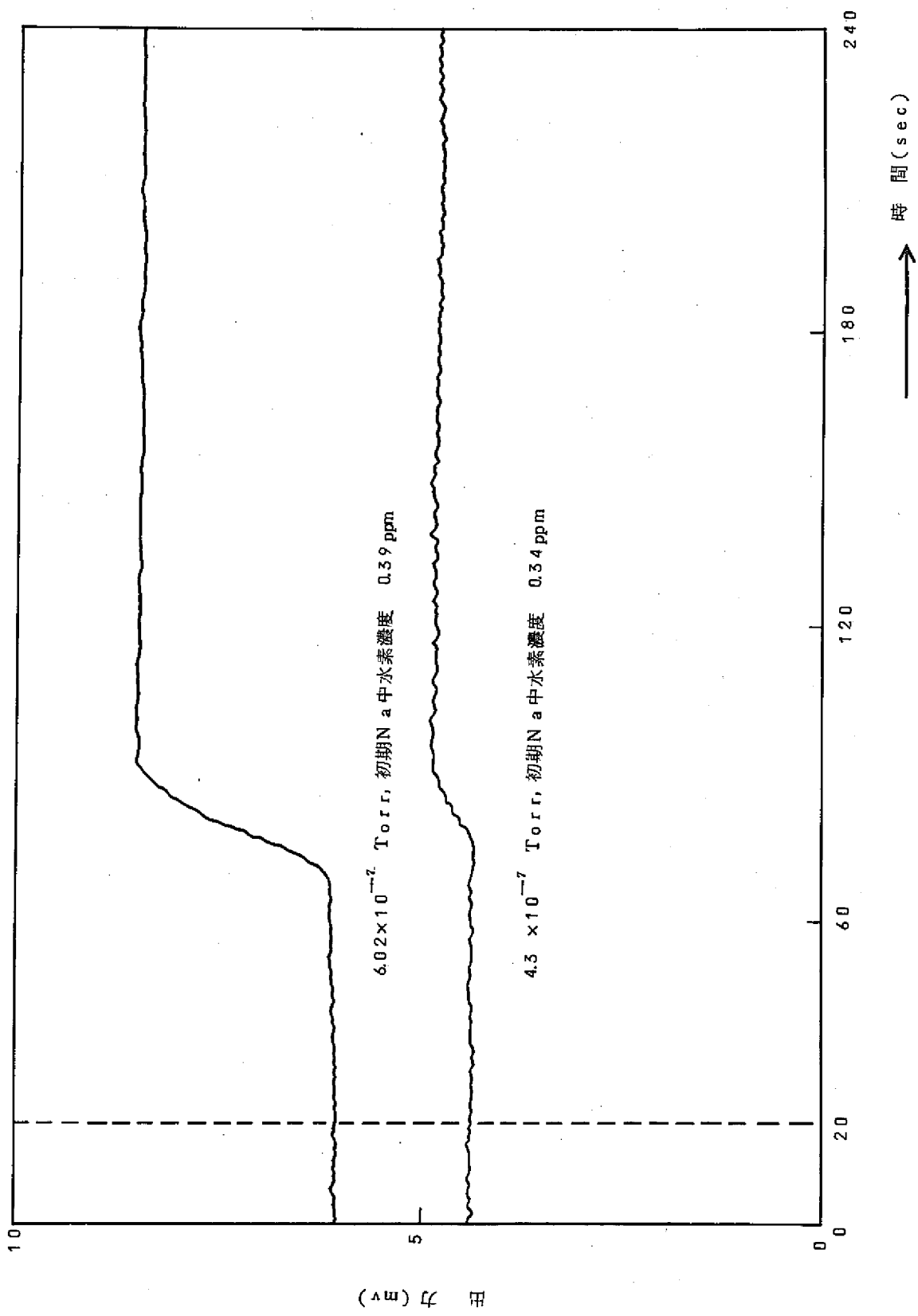


図3-6 微小リークに対するB-Aゲージの応答(上)0.5g、(下)0.1g(Ni膜温度500°C, 水注入時刻は20秒)

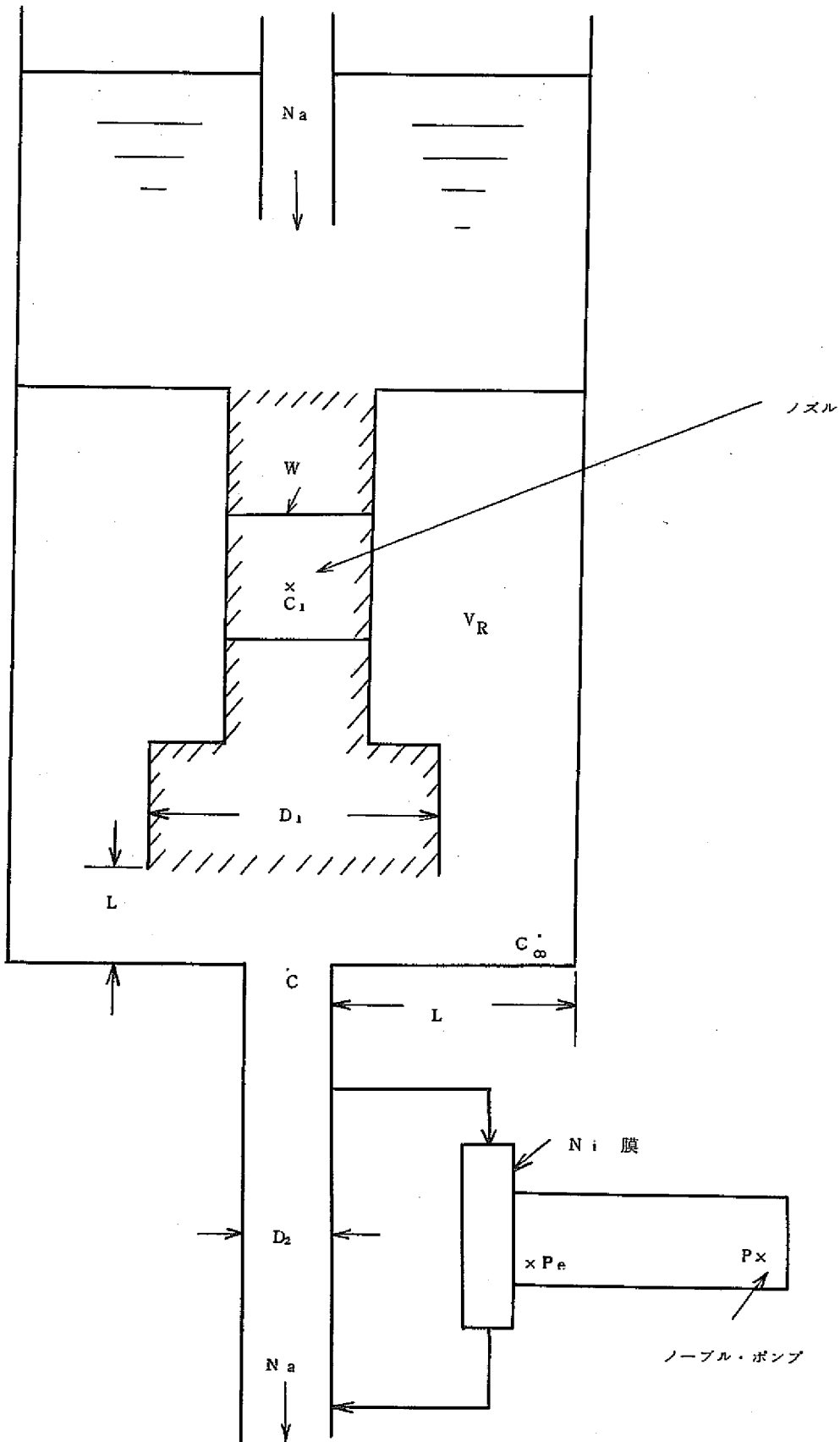


図 3-7 試験部と水リーク検出系

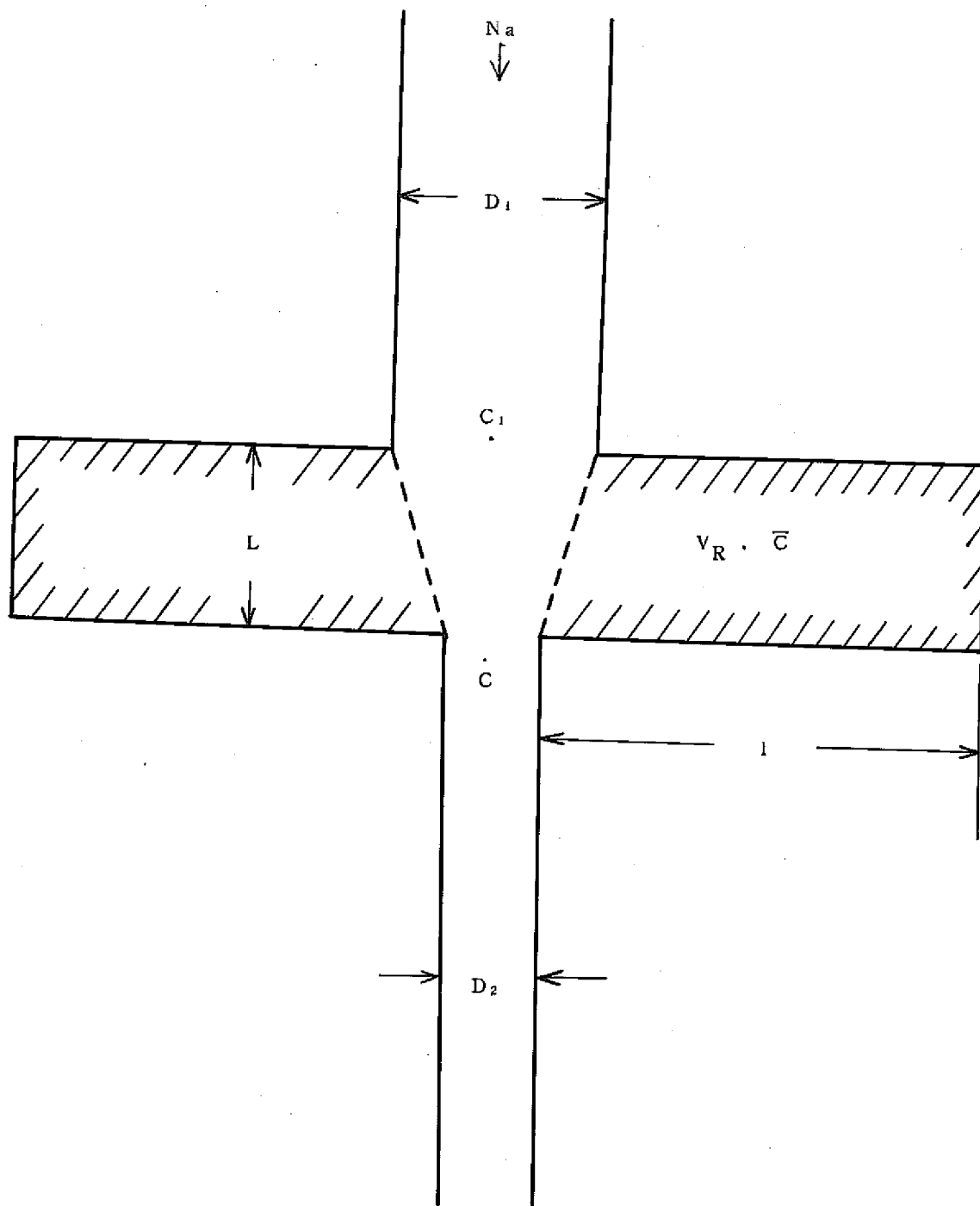


图 3-8 混合の效果

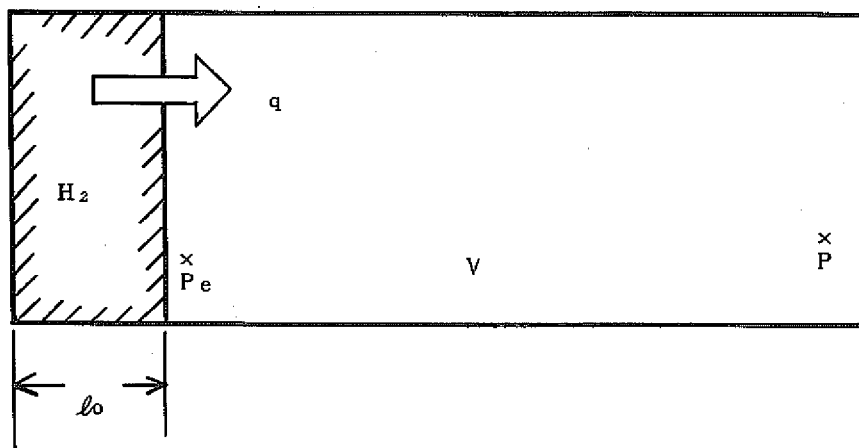


図 3 - 9 水素のNi膜拡散

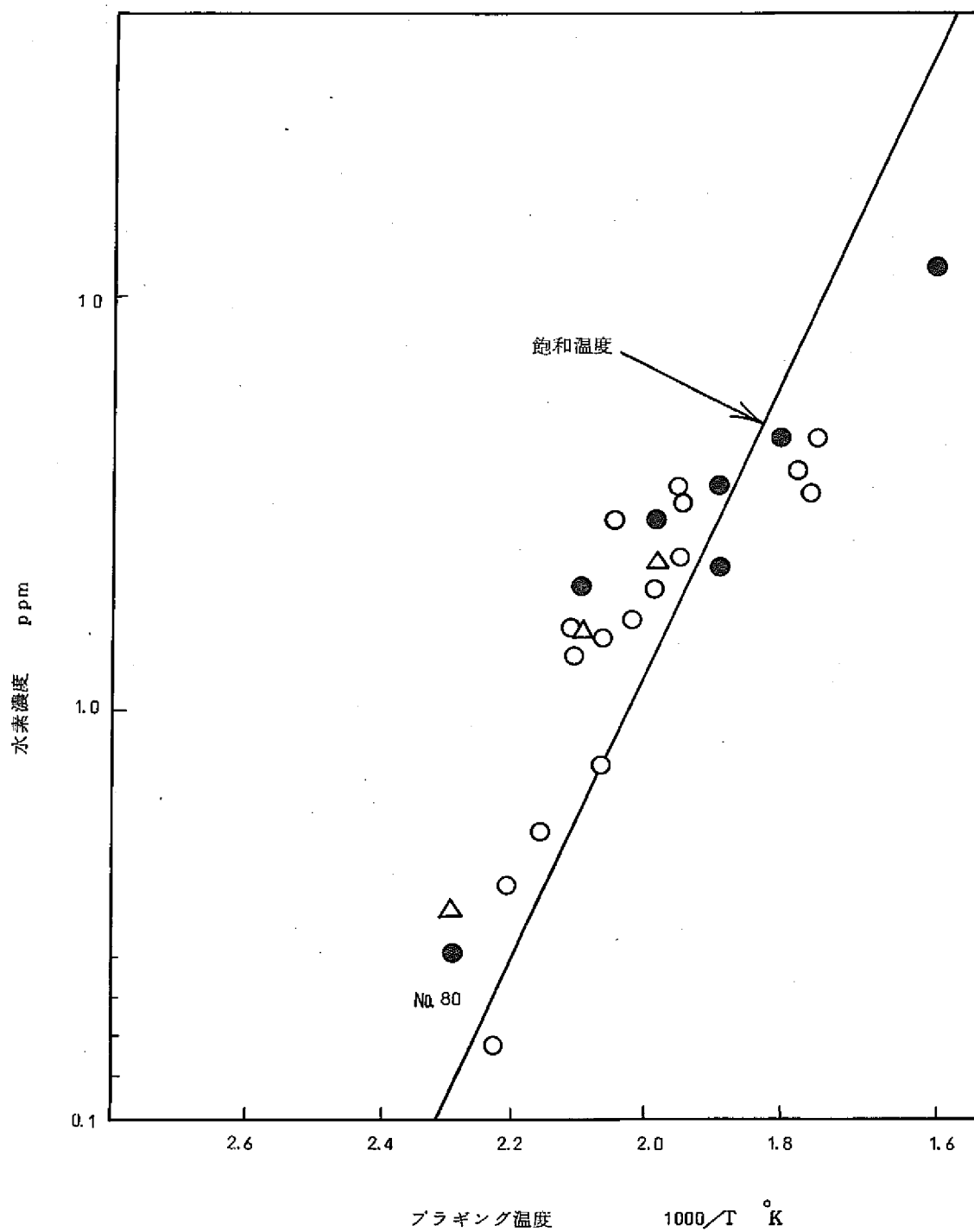


図3-10 Na中水素濃度とブラギング温度の関係

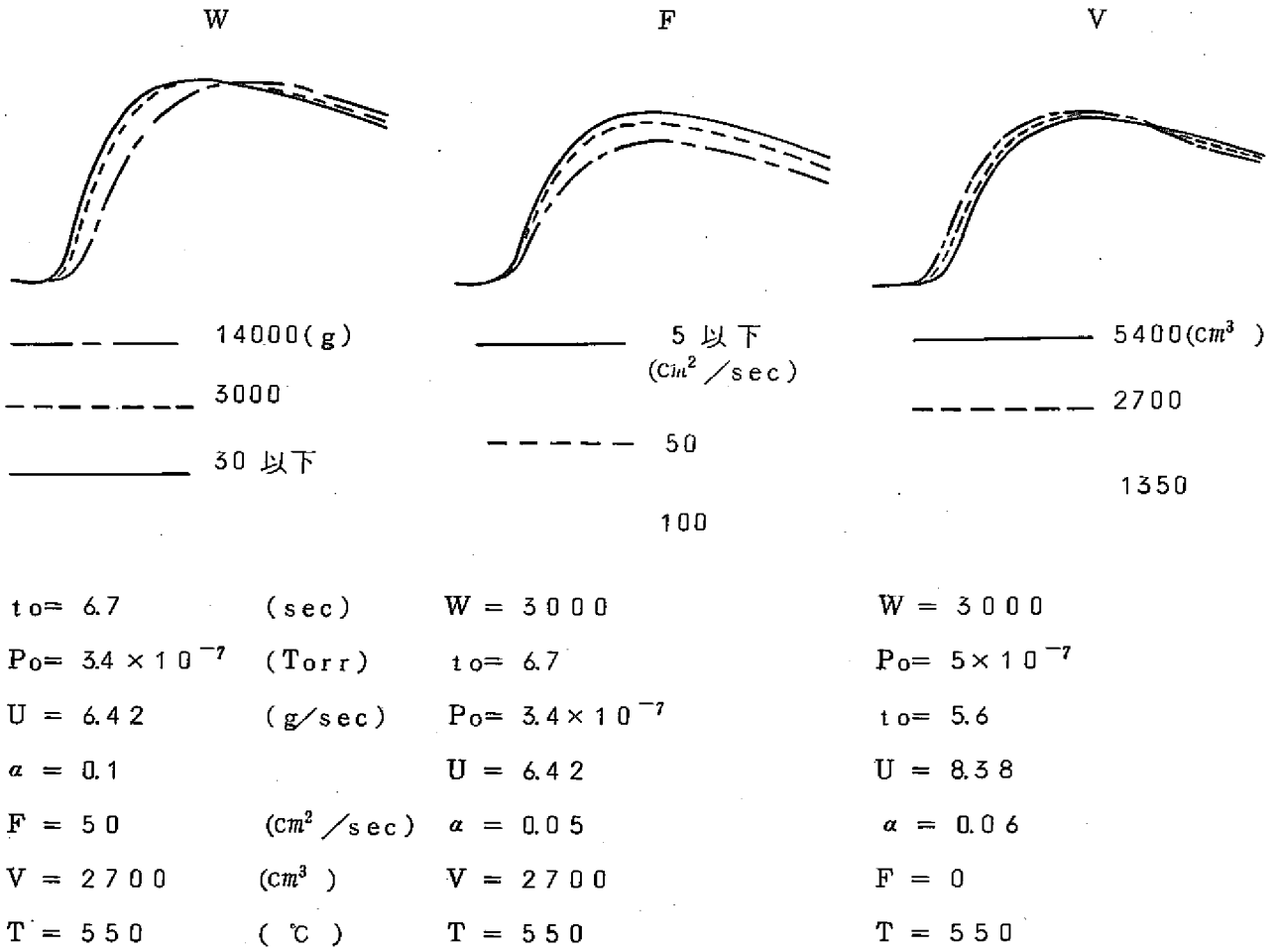


図3-11 応答に及ぼすパラメータの影響

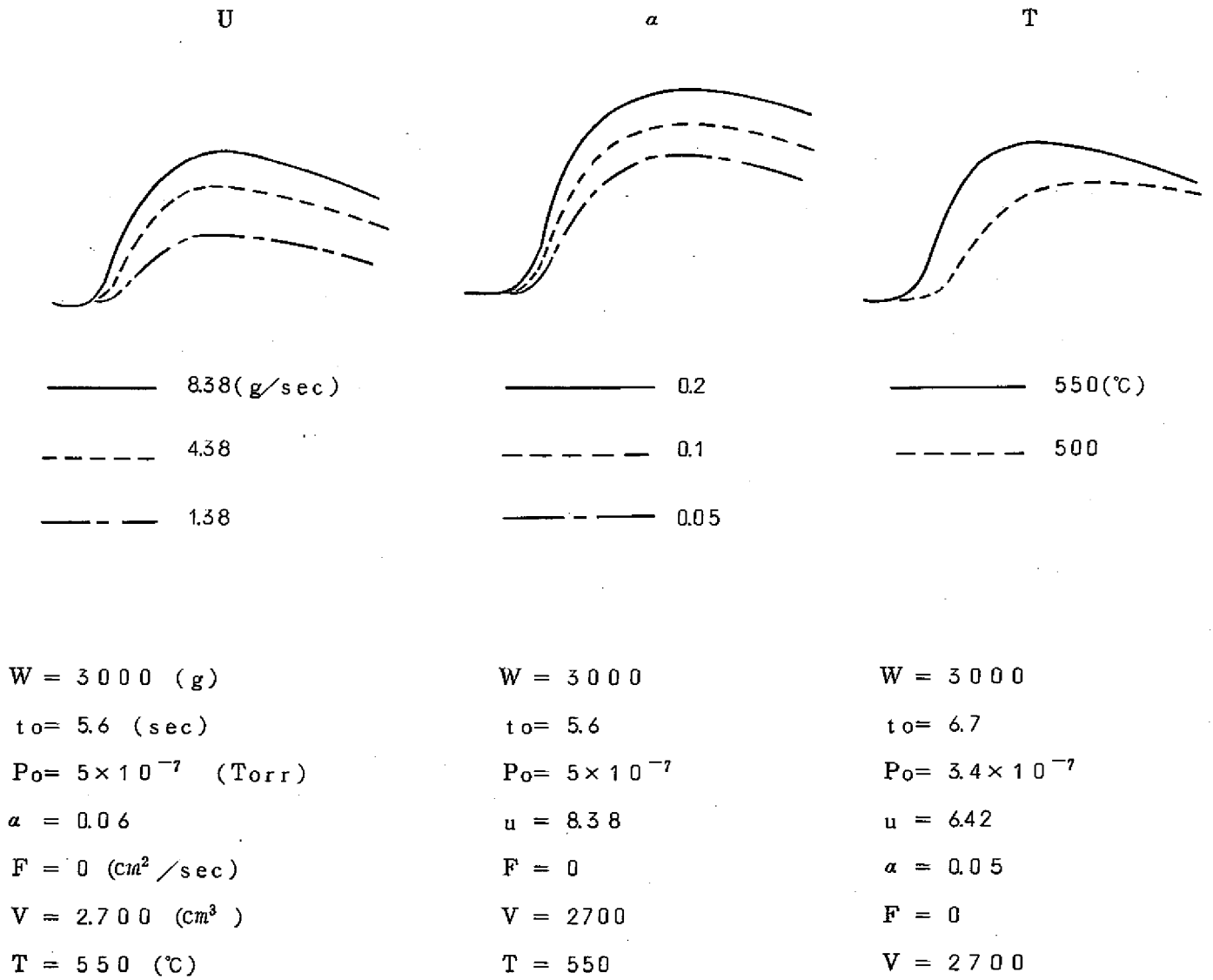
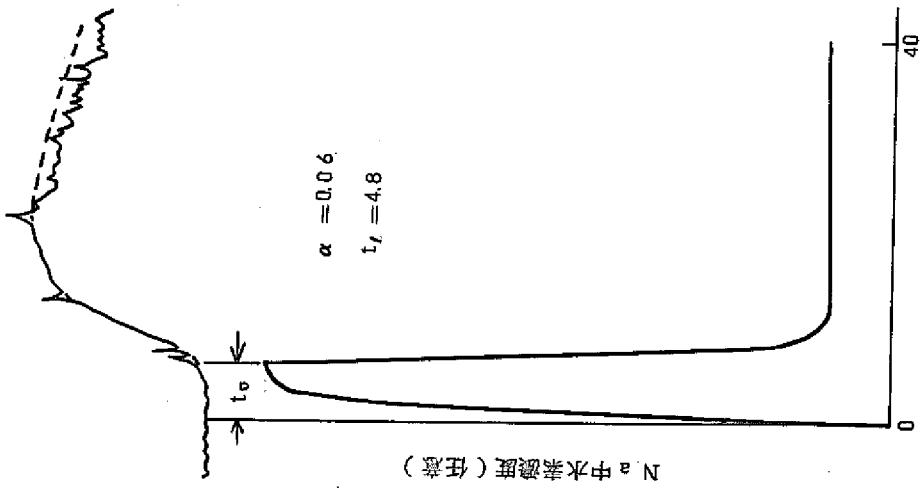


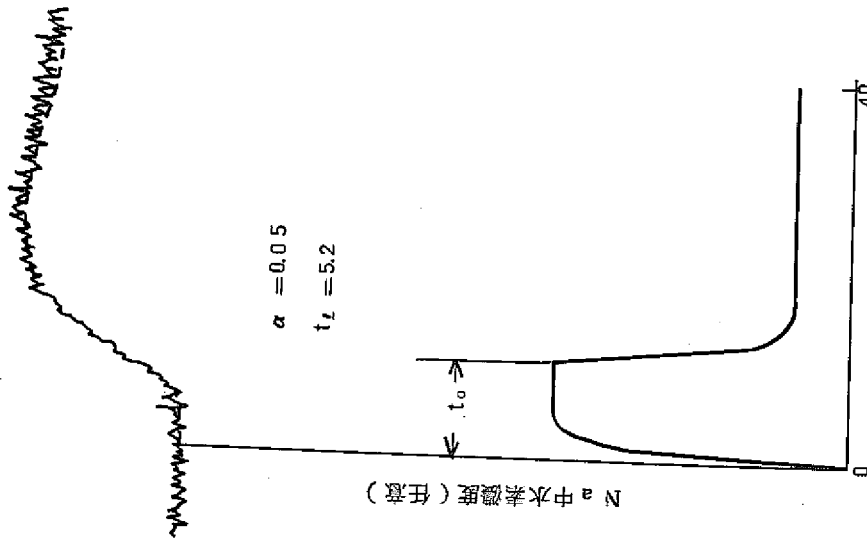
図3-12 応答に及ぼすパラメータの影響

$u=8.38$



時間 (sec)

$u=4.12$



時間 (sec)

$u=1.64$

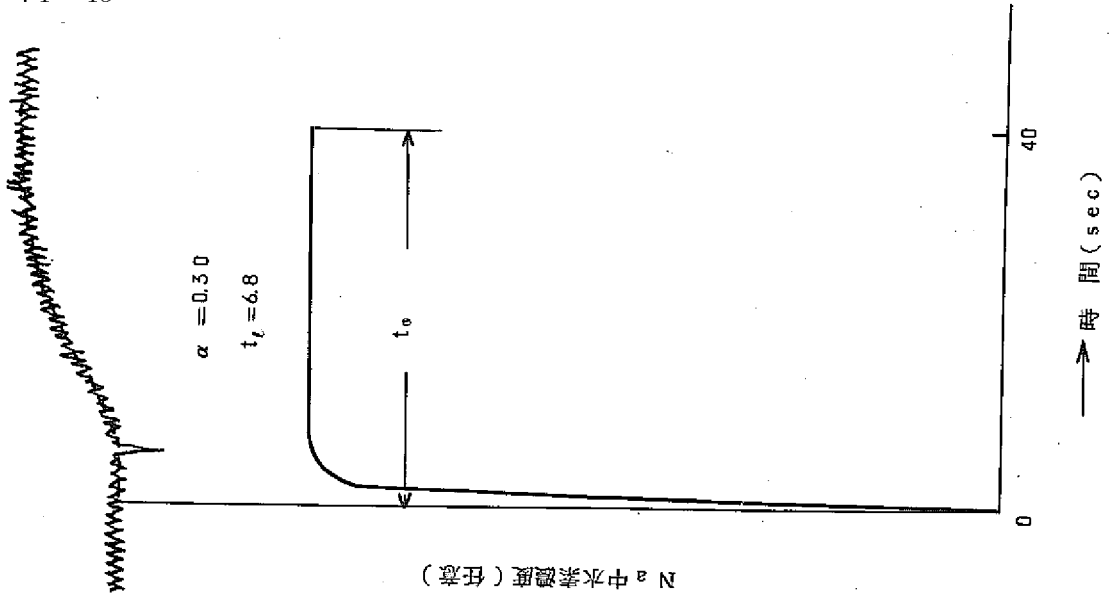


図3-13 (上) 実測値(実線)と計算値(点線)(ノープル・ポンプ・Ni膜温度550°C)
 (下) Na中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_l : 遅れ時間(秒),
 t_0 : 水注入時間(秒), u : リーク率(g/sec)

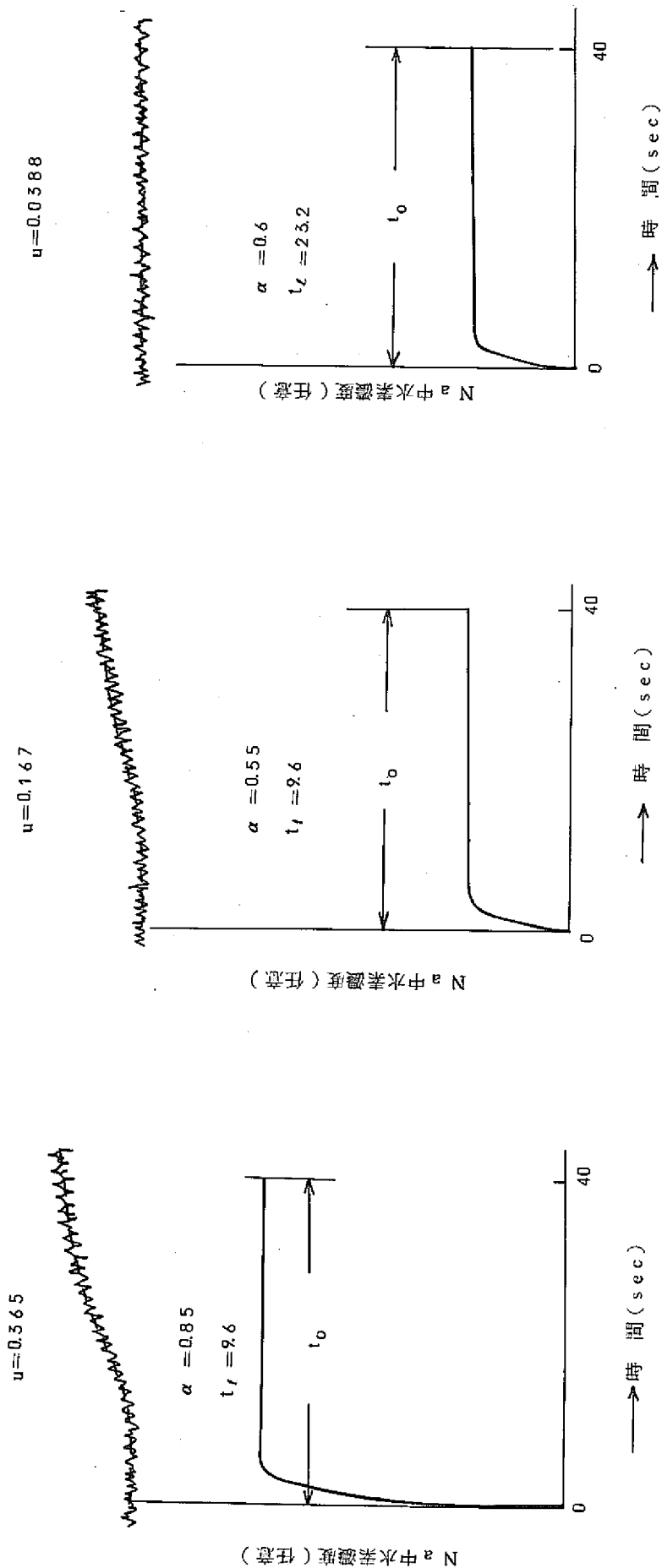


図3-14 (上) 実測値 (実線) と計算値 (点線) (ノズル・ポンプ, N_i 膜温度 500°C)
 (下) N_a 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_l : 遅れ時間 (秒), t_0 : 水注入時間 (秒)
 u : リーク率 (g/sec)

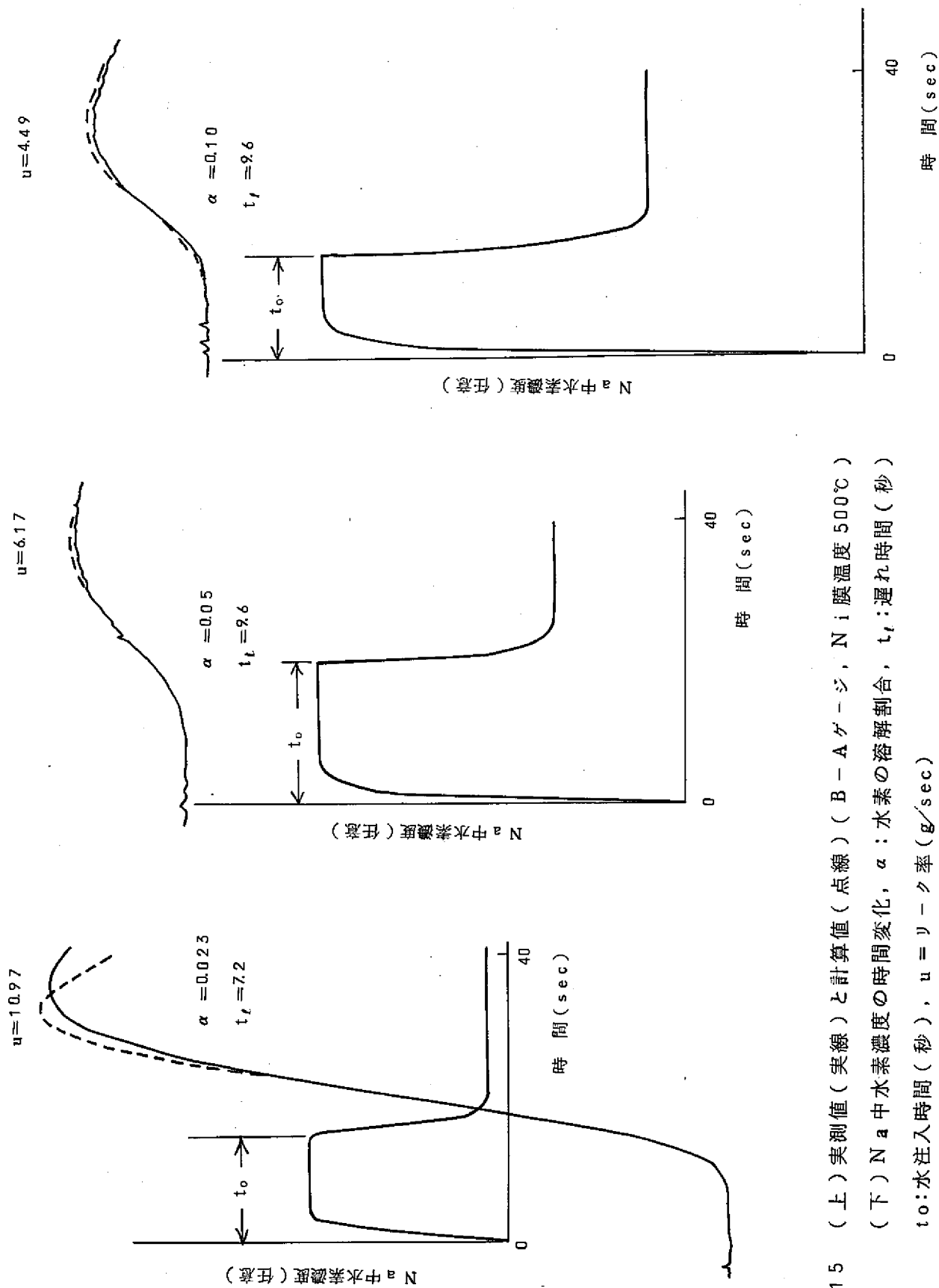


図3-15 (上) 実測値(実線)と計算値(点線)(B-Aゲージ, Ni膜温度500°C)
 (下) N_a 中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_i : 遅れ時間(秒)
 t_0 : 水注入時間(秒), $u =$ リーク率 (g/sec)

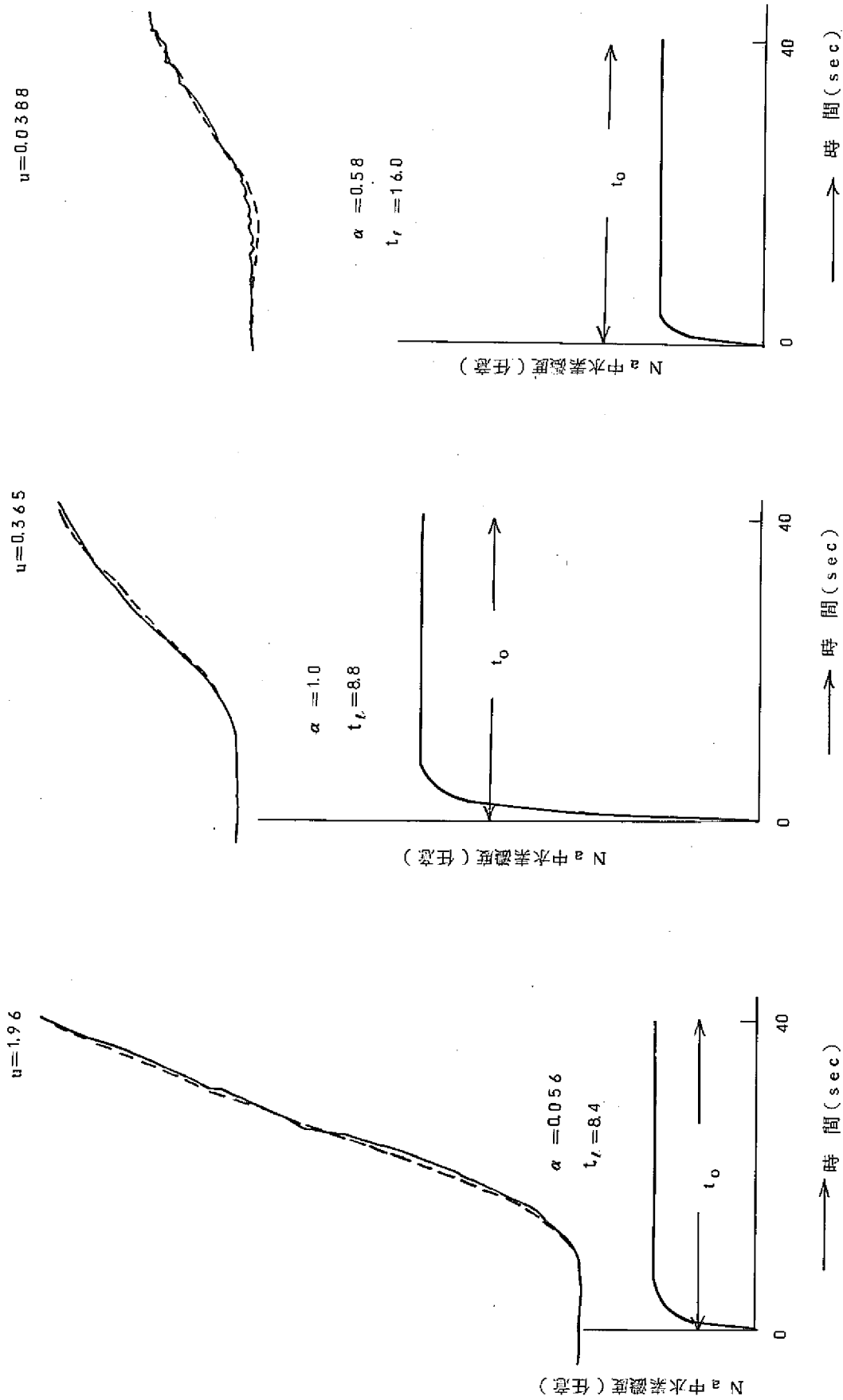


図3-16 (上) 実測値 (実線) と計算値 (点線) (B-Aゲージ, Ni膜温度 500°C)
 (下) Na中水素濃度の時間変化, α : 水素の溶解割合, t_r : 遅れ時間 (秒),
 t_0 : 水注入時間 (秒), u : リーク率 (g/sec)

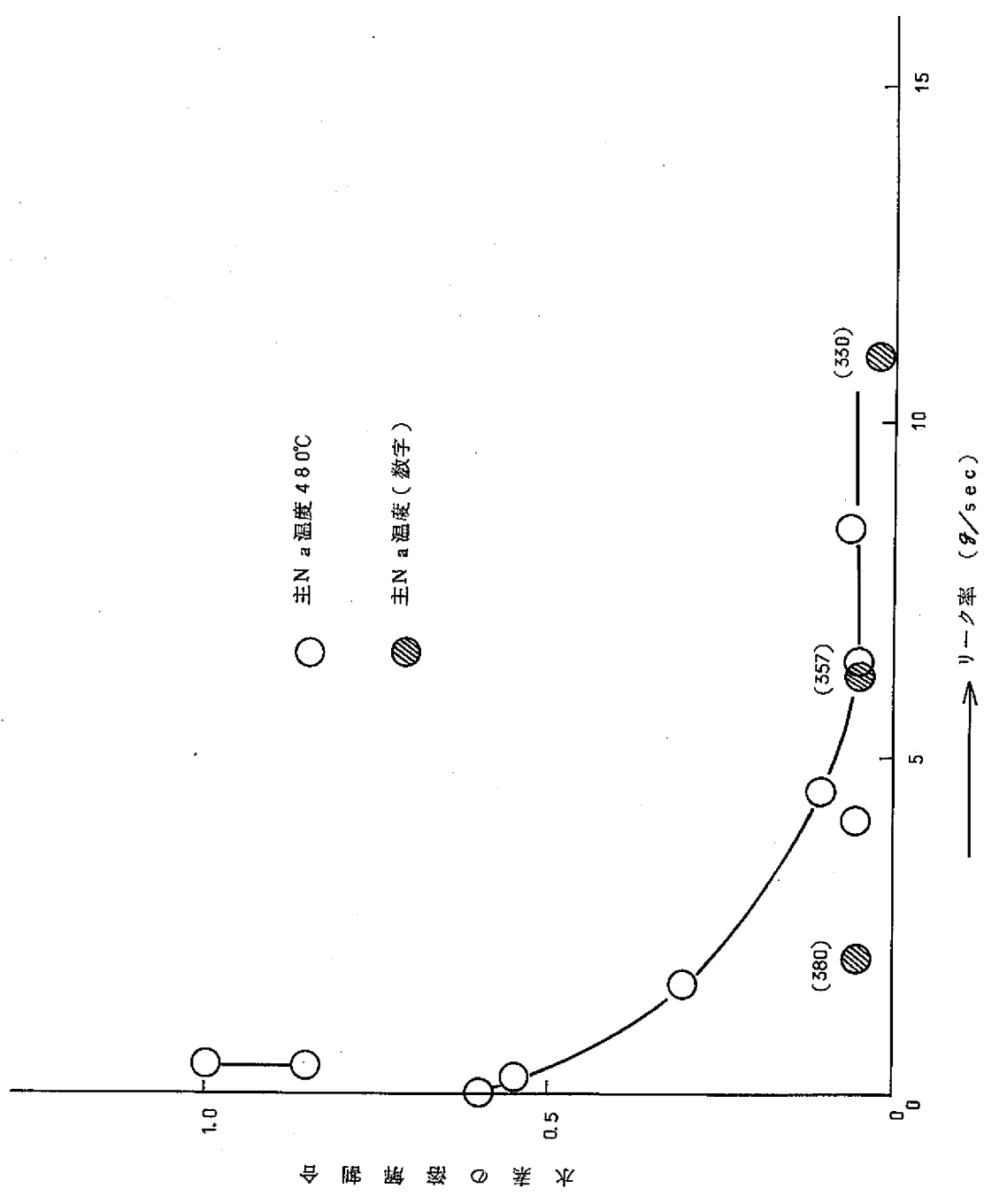


図3-17 リーク率に対する水素の溶解割合(ノズルからNa液面までの距離71~79cm)

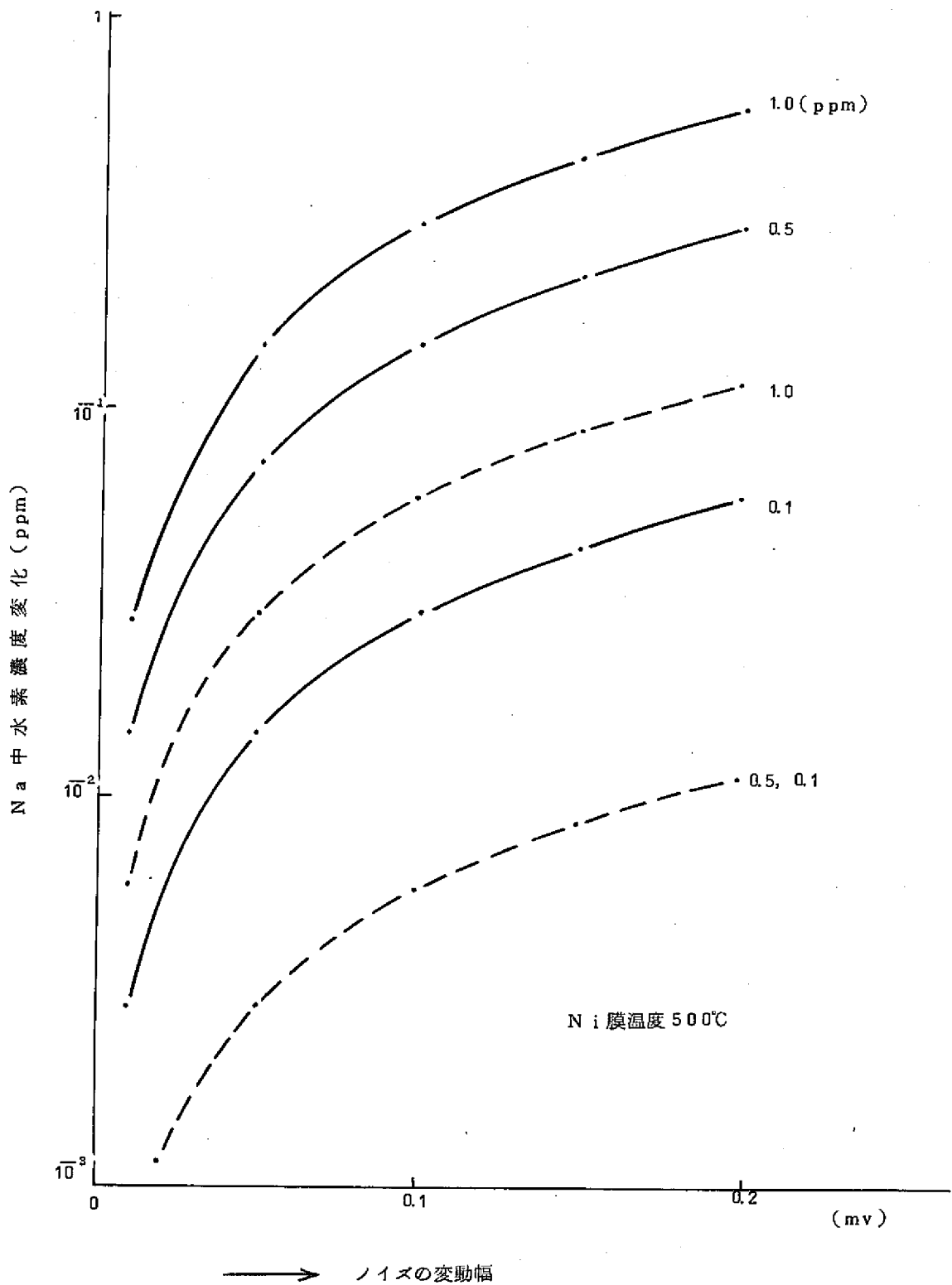


図3-18 ノイズの変動幅に相当するNa中水素濃度変化の計算値。実線（ノベール・ポンプ），点線（B-Aゲージ）。パラメータは水注入前のNa中水素濃度

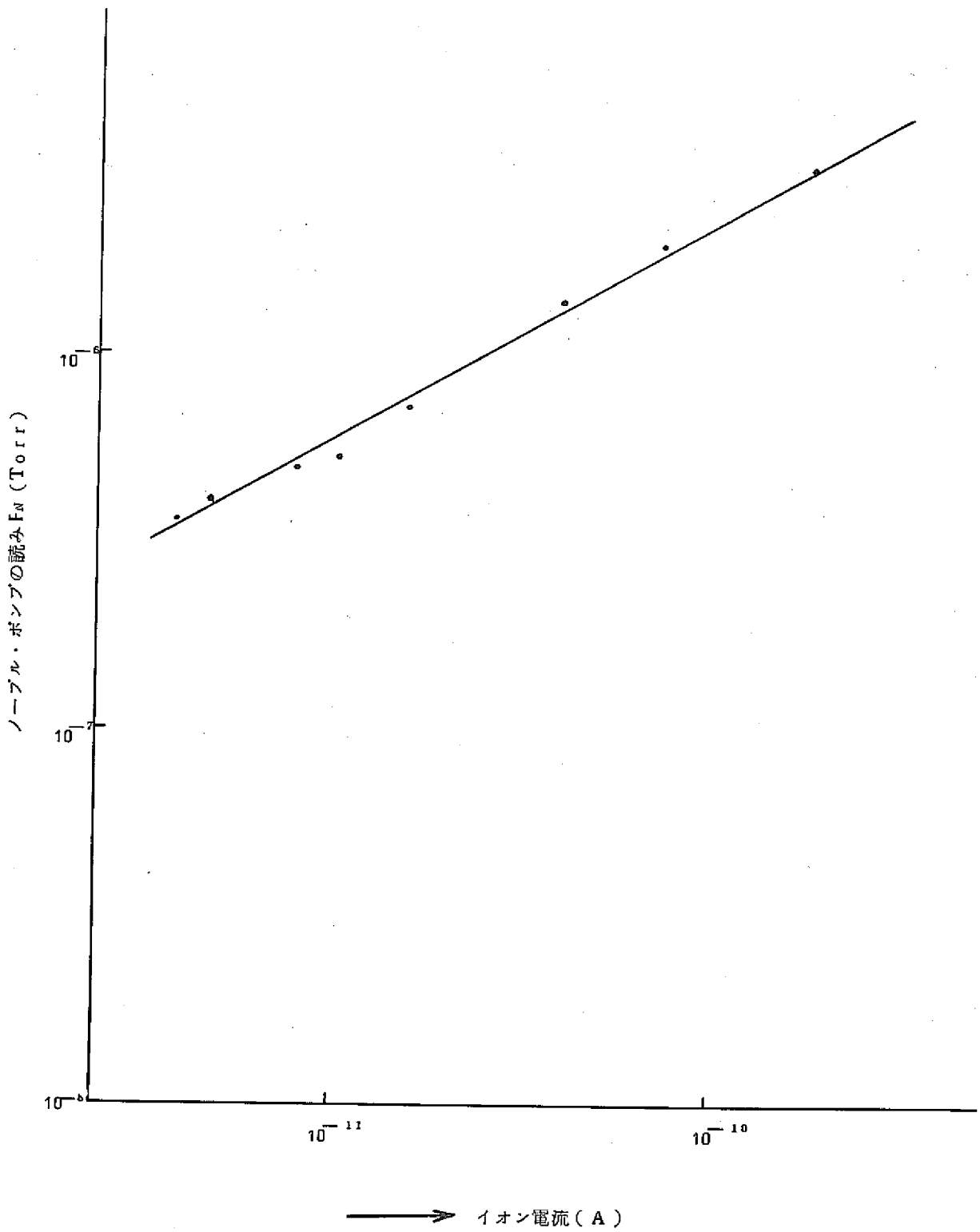


図3-19 ノブール・ポンプの読み F_N (Torr) と質量分析器 (H_1) の電流値の関係

表3 Na中水素計の特性

	ノーブルポンプ	質量分析器	B-Aゲージ
感度(100 ppbのとき) (ppb)	60	2	3
測定範囲 (ppm)	0.1~50	0.1~50	0.1~50
応答時間 (sec)	35	35	35
寿命	使用経験2年 時々、電気系の 故障	使用経験2年 時々、電気系の 故障	使用経験10ヶ月 特になし
経時変化	特になし	特になし	特になし
問題点	ノイズが大きい	加速電圧 or/and アンプのドリフ トが大きい	特になし

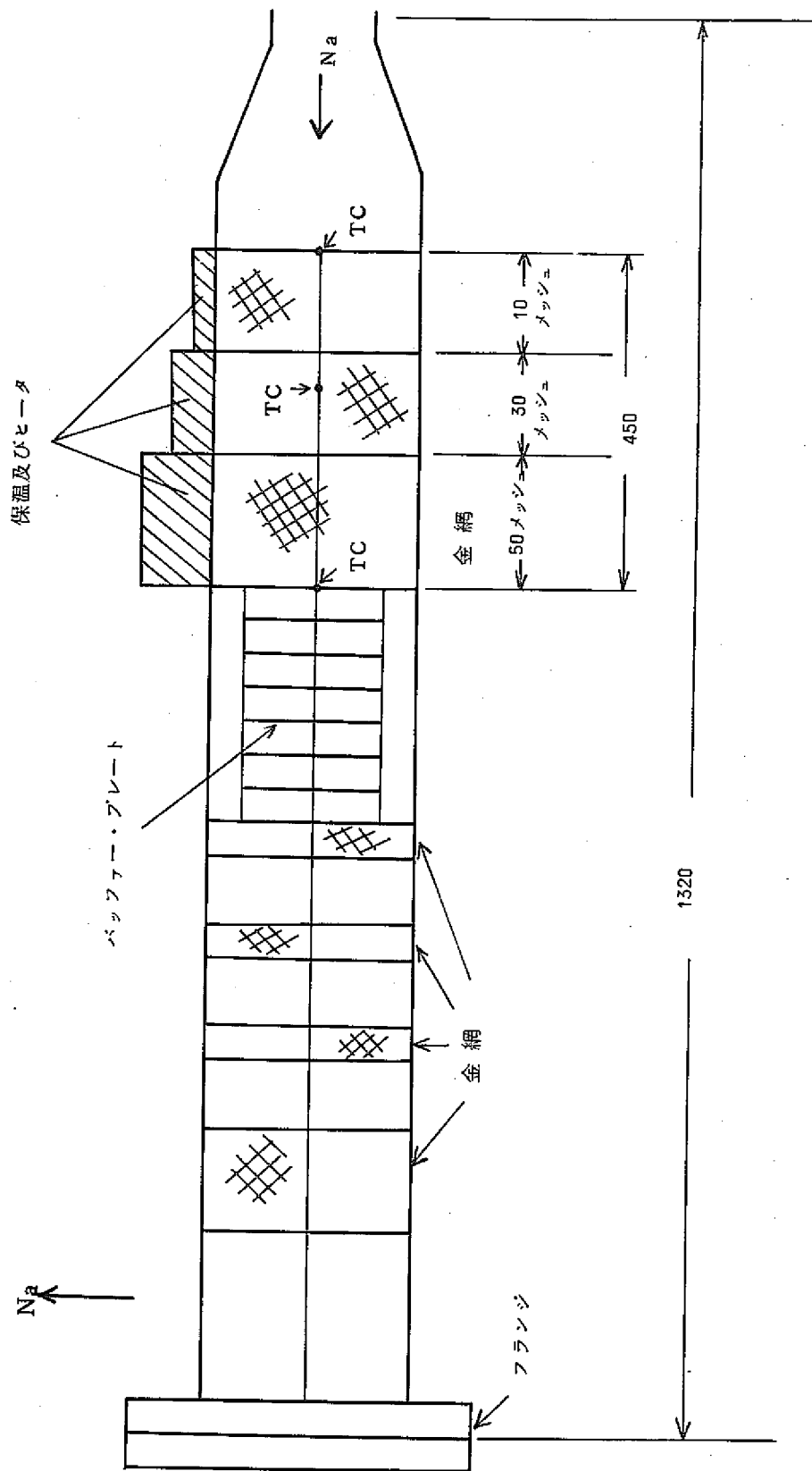


図 4-1 選流式 Na ベーバートラップ

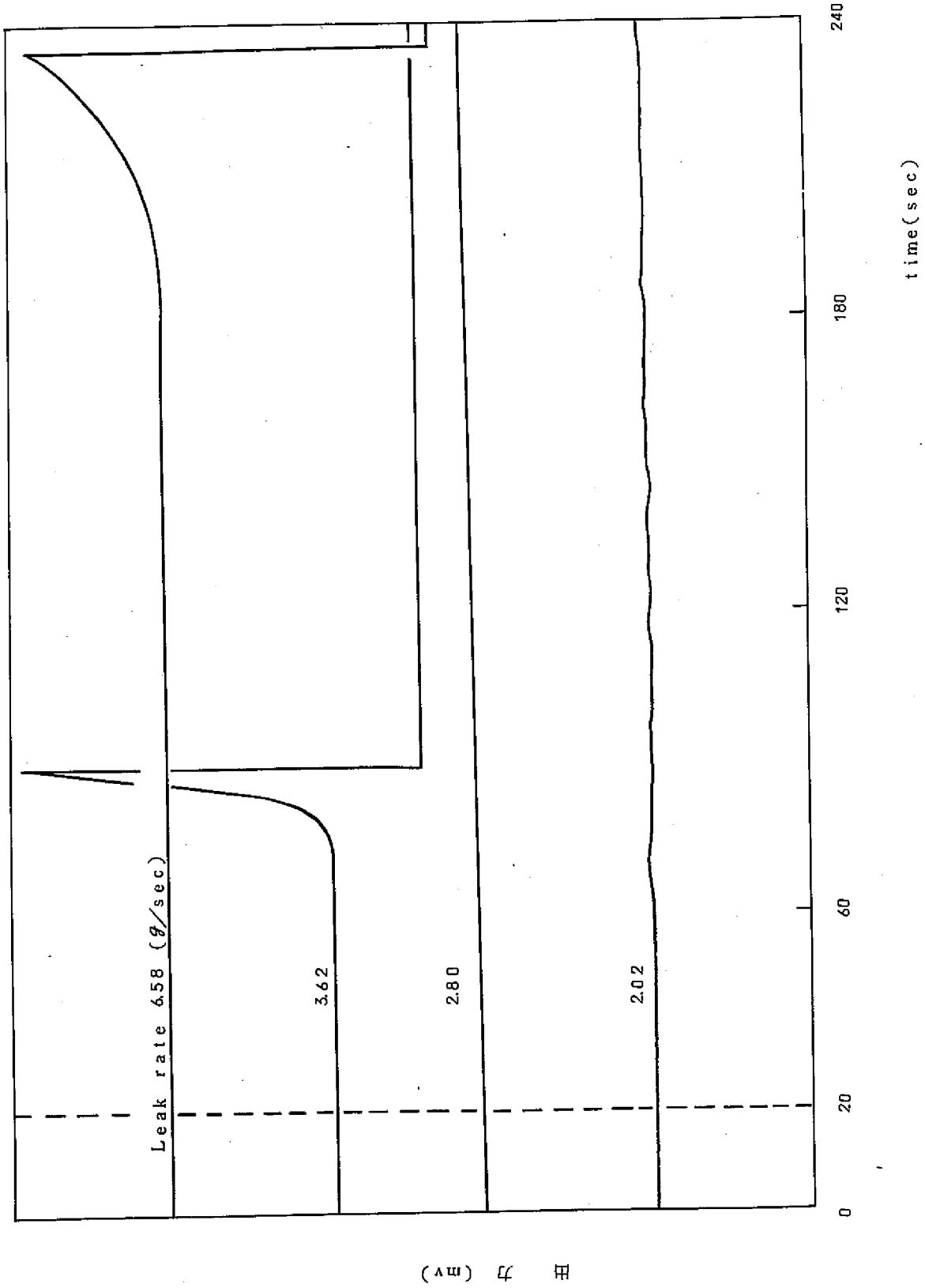


図4-2 還流式Naベータトラップを使用したときのカバークラス中水素検出器の出力 (Pd膜温度450°C, 水注入時刻は20秒)

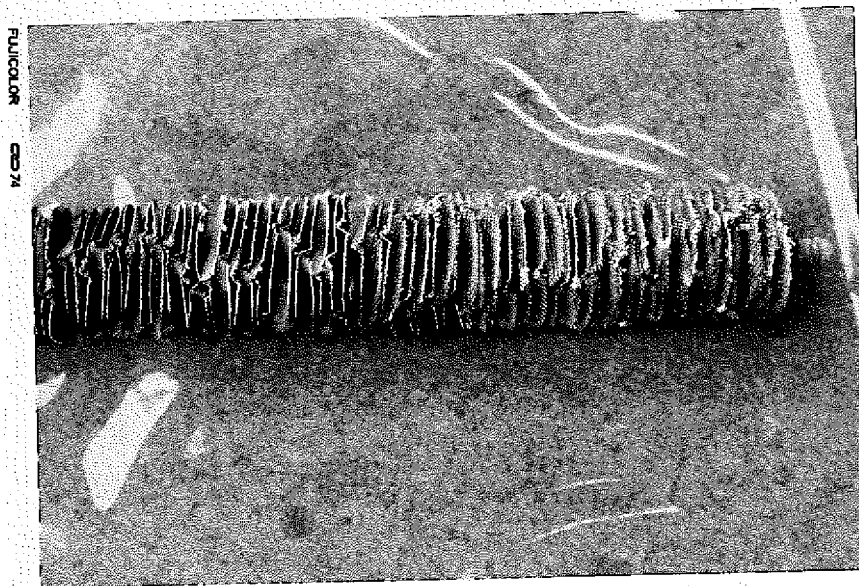


図 4 - 3 金網へのNaの付着状況