

オリフィス付Na中水素計の性能特性試験  
および最適設計の検討

(リーグ検出計開発試験 第1報)

1979年10月

動力炉・核燃料開発事業団

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)

1979年10月

# オリフィス付Na中水素計の性能特性試験および最適設計の検討

## (リーケ検出計開発試験 第1報)

黒羽光男<sup>\*</sup>, 井上設生<sup>\*</sup>  
大後美道<sup>\*\*</sup>, 佐藤稔<sup>\*</sup>

期間 1978年12月～1979年10月

目的 オリフィス付Na中水素計の動的平衡法による試験結果およびPNC型Na中水素計2号機の動的室にオリフィスを適用した場合の最適設計値を検討したので報告する。

要旨 もんじゅ用蒸気発生器の水リーケ検出計として開発され, SWAT-2 装置にて試験されているPNC型Na中水素計2号機真空系の動的室に対し, その超高電離真空計とイオンポンプ間にオリフィスを取付けた。これは従来まで困難であったイオンポンプの排気速度を動的平衡運転時に実測できるようにするためである。

この結果, Ni膜の水素透過率Kを正確に評価することができた。得られたKの値は従来の値と比較して圧力依存性が小さく, 約  $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ Torr}^{1/2} / \text{sec}$  であった。さらにNa中水素濃度-真空系水素圧力の較正曲線で  $1/2$  乗則に合わないのは, 主としてKの圧力依存性に原因していることが判った。

また, もんじゅ用蒸気発生器運転時のNa純度条件を考慮してPNC型Na中水素計2号機MK-III型の動的室にオリフィスを適用する場合のNi膜およびオリフィスコンダクタンスの最適値を検討した。この結果, Ni膜面積を  $1/4$  以下に縮少することができると共に, イオンポンプの経年的劣化による較正曲線の変化を1年間は全く生じないようにすることが可能となることを示した。

\* 大洗工学センター・蒸気発生器開発部・蒸気発生器安全性試験室

\*\* FBR開発本部・蒸気発生器グループ

Oct., 1979

Investigations of the Vacuum System with a Orifice in the  
Hydrogen Concentration Meter

Studies of Leak Detector Developments on LMFBR's SG

Mitsuo Kuroha\*,  
Setsunari Inoue\*,  
Yoshimichi Daigo\*\* and  
Minoru Sato\*

Abstract

One of PNC designed in-sodium type hydrogen meters which have been developed to use as the water leak detectors for the Monju's steam generators was modified in the vacuum system in order to measure the pumping speed of the ion pump during the operation. The modification was to increase the pressure drop between the ionization vacuum gauge and the ion pump by installing a orifice in front of the ion pump.

As the result, it could be attained to estimate accurately the permeability factor K for the hydrogen through Ni membrane. The factor of K obtained is  $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ Torr}^{1/2}/\text{sec}$ , and the pressure dependence in the low pressure range is rather smaller than published datas. It is found through the discussions that the relationship between  $P_{NH}$  (partial pressure of hydrogen in sodium) and the measured pressure  $P_N$  (pressure in vacuum side) is not expressed empirically by the half-power law, but followed by the pressure dependence of K reported.

The best pair of the Ni membrane area and the orifice conductance is discussed to dynamic vacuum system of the PNC designed in-sodium hydrogen meter. Also, it is concluded for the in-sodium hydrogen meter with a orifice using in the Monju's operation conditions that less than a quarter of Ni membrane area adopted at present is useful, and more than one year of the ion pump operation period without the change of the calibration curve can be attained.

---

\* Steam Generator Safety Section, Steam Generator Development Division,  
O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Fast Breeder Reactor Development Project, Steam Generator Group.

## 目 次

1. まえがき	1
2. オリフィス付 Na 中水素計の性能特性試験	2
2.1 試験装置	2
2.1.1 SWAT-2 装置の概要	2
2.1.2 O-H モジュール・リーク検出計	2
2.1.3 O-H モジュール・Na 中水素計	3
2.2 オリフィスの選定	3
2.2.1 オリフィスの仕様	4
2.2.2 オリフィスの取付作業	4
2.3 試験結果	6
2.3.1 較正試験	6
2.3.2 ヌードゲージ部およびイオンポンプ部の排気速度	7
2.3.3 Ar ポンバード処理の効果	8
2.3.4 Ni 膜の水素透過率 K	8
2.3.5 水注入時の応答	8
2.4 試験結果の検討	9
2.4.1 オリフィス付水素計の動的平衡関係式	9
2.4.2 理論式との対応	11
2.4.3 オリフィス付・ヌードゲージセンサ型の水素計と従来型との比較	12
3. オリフィス付 Na 中水素計の最適設計検討	38
3.1 基本設計	38
3.2 測定範囲・感度の決定	38
3.2.1 測定範囲	38
3.2.2 測定感度	38
3.3 最適設計のための検討	39
3.3.1 K 値の考察	39
3.3.2 低濃度側からの考察	39
3.3.3 高濃度側からの考察	40
3.3.4 イオンポンプ回復処理からの考察	40
3.3.5 オリフィスコンダクタンスの考察	41
3.3.6 決定仕様	42
4. まとめ	44
5. 参考文献	45

## 1. まえがき

Na加熱蒸気発生器（以下SG）を有する高速増殖炉（以下FBR）プラント2次冷却系には、小リーク・Na-水反応検出用機器として水素濃度計（以下水素計）が設置される。この水素計については内外の多くの報告がなされ、その設計、製作および運転経験の積み重ねが行われている。

動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃）でも、小リーク・Na-水反応試験装置（以下SWAT-2）を中心に水素計の開発研究を進めてきた。この成果の一つとして、Ni膜-イオンポンプ型水素計の設計に用いる「最適設計法」<sup>1)</sup>をとりまとめた。さらに、その設計法の妥当性を検証する目的で「PNC型Na中水素計1号機」<sup>2)</sup>を試作し、特性試験を行った。この試作1号機の経験から運転手法の簡易化、較正精度の向上を計るために、真空系を動的室と静的室に分離した「PNC型Na中水素計2号機」<sup>3)</sup>を設計、製作し性能試験を実施した。

これら1号機および2号機の運転経験から、真空ポンプであるイオンポンプの出力電流から真空度を読みとろうとする方式の水素計にとって、次のような問題がおきることが判った。すなわちイオンポンプ排気速度の経時的劣化とそれに伴うノイズの増加である。まず前者はNa中水素濃度と水素計出力（イオンポンプ電流）の関係つまり較正曲線に経時変化を生じさせると共に、高濃度側の測定上限を低下させる。後者はリーク検出計としての感度を、また濃度計としての読み取り精度を低下させる。これらの解決策として、イオンポンプ吸入口にコンダクタンスオリフィスを設け、センサとしてイオンポンプのかわりにオリフィスの上流側に設置したヌード型超高電離真空計（以下ヌードゲージ）を使用することが考案された<sup>4), 5)</sup>。ヌードゲージの信号出力ノイズはイオンポンプに比較してはるかに小さく、イオンポンプの寿命および発生ノイズに対しても無関係である。またオリフィスの効果によりヌードゲージ部の実効排気速度が安定し、Na中水素濃度と真空計の出力の関係に経時変化が生じにくくなるはずである。

この考案の有効性を確認するために、SWAT-2装置に設置してある「O-Hモジュール・リーク検出計」中の水素計（2号機の動的室と同一仕様）にオリフィスを取付け、その効果の確認試験を行った。本報告はオリフィス取付け作業と確認試験にて得られた知見をまとめたものである。さらに得られた知見と2号機動的室の設計仕様を基に、オリフィス付ヌードゲージセンサ型Na中水素計の設計を発展させ、"もんじゅ"プラントでの使用を想定してイオンポンプ寿命を考慮した場合のNi膜面積およびオリフィスコンダクタンスの最適値を検討した。この結果も併せて記してある。

## 2. オリフィス付Na中水素計の性能特性試験

### 2.1 試験装置

#### 2.1.1 SWAT-2 装置の概要

特性試験を行ったSWAT-2の構成を図2.1に示す。ループは主循環系、純化系、リーク検出系、水-蒸気系、ガス系、ドレン系から構成されている。

主循環系は電磁ポンプ、主加熱器、反応容器、空気冷却器などから構成され、注水実験（ウェステージ実験）時には、水-蒸気系から高温、高圧の蒸気が反応容器内に注入される。

純化系はエコノマイザとコールドトラップから構成され、リーク検出計の試験や注水実験時のNa純度を管理する。

リーク検出系としては、PNC型Na中水素計2号機MK-III<sup>3)</sup>、Na中酸素計（WH社製1基、GE・東芝社製1基）およびO-Hモジュール・リーク検出計が各ループに設置されている。

今回、オリフィス付水素計の性能特性を調査する目的で、このO-Hモジュール水素計の真空計にオリフィスが取付けられた。

運転時にはダンプタンクよりループに約600ℓのNaをチャージし、Na温度を所定の温度まで昇温する。SWAT-2の試験には、注水試験とNa中水素計特性試験がある。前者の場合、コールドトラップ温度約120°CでNaを純化し、コールドトラップ隔離の後反応容器内に蒸気を注入して、材料ウェステージとリーク検出計の応答が試験される。後者の場合は、コールドトラップ温度を一定に保ち、Na中不純物濃度を一定にした状態でNa中酸素計の基礎特性試験や較正試験が行なわれる。

なお詳細な装置や運転法の説明は小リーク・ナトリウム・水反応試験研究第1報<sup>6)</sup>、第2報<sup>7)</sup>を参照されたい。

#### 2.1.2 O-Hモジュール・リーク検出計

SWAT-2装置の主循環系には、反応容器をバイパスして較正試験ループが設けられており、このラインにO-Hモジュール・リーク検出計が取り付けられている。この検出計はPNC型Na中水素計2号機MK-I<sup>3)</sup>の静的室を取り外し、その換りにGE・東芝製の電気化学式Na中酸素計を設置して、水素計と酸素計を一体化したものである。

この系統図を図2.2に示す。主系統配管から導びかれたNaは、ポンプを経て主ヒータ内臓エコノマイザの内管および主ヒータ間のアニュラス型流路を下って500°Cまで昇温さ

れる。Naを左右の方向に分岐する形でNaディストリビュータが配置されており、Naはこのディストリビュータ内側を通り、Ni膜および酸素計センサ先端でUターンし、エコノマイザ部へ戻る。Na中水素はこのNi膜部で真空側へ拡散移行する。エコノマイザのアニュラス部を通って、降温されたNaは出口配管部へ入り、流量計を通り主系統配管へ戻る。

Na系、Ni膜部および真空系の構造部の設計仕様を表2-1、2-2および2-3に示す。Na系およびNi膜部の詳細は小リーク・ナトリウム・水反応試験研究第15報<sup>3)</sup>に記述されている。酸素計の基本仕様を表2-4に示す。酸素計は本報告の主旨ではないので、詳細な記述は割愛する。

### 2.1.3 O-Hモジュールの水素計

図2.3にO-Hモジュール・Na中水素計の構造部組立て図を示す。Ni膜によってNaと仕切られた真空構造部は、動的圧力測定のためのヌードゲージ⑥、UHVメタルバルブ④を経て小容量イオンポンプ（アベンデージポンプ）③、さらに大容量イオンポンプ（スペッタイオポンプ）②が④を介して設置されている。その他、④とパックレスバルブ⑤が接続されており、粗引き系として機能する。この粗引き系にはPNC型Na中水素計2号機MK-Iの時代にフレッキシブルチューブが接続されていたが、O-Hモジュールとして改造された時に不要なので盲にされた。以上のものはフランジ⑦によってNa系と接続される。

イオンポンプおよびヌードゲージの出力は一般的に窒素ガスに対して正しく指示するよう製作されている。水素ガスに対する正確な測定は水素ガス較正試験によって較正值を求めなければならない。較正試験で得られたイオンポンプの出力電流と水素ガス圧力の関係を図2.4に示す。また、ヌードゲージの水素ガス較正曲線を図2.5に示す。なお、これらの較正試験方法の詳細は小リーク・ナトリウム・水反応試験研究第14報<sup>2)</sup>に記述されている。

## 2.2 オリフィスの選定

2.1.3項で記述した水素計に使用するためのオリフィスは、

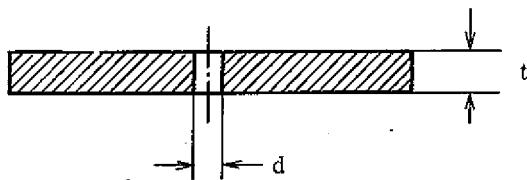
- (1) 大容量イオンポンプ排気速度  $S_{IP}$  のカタログ値が約  $30 \ell / sec$  であるので、ヌードゲージ部の実効排気速度  $S_N$  を約  $3 \ell / sec$  以下にすると、 $S_{IP}$  の変化が  $S_N$  に与える影響を相当軽減できる。
  - (2) Ni膜面積を変更せずに  $S_N$  だけ  $1 \ell / sec$  以下にすると、ヌードゲージの使用圧力の上限である  $10^{-3}$  Torr がイオンポンプよりも先にクリティカルになり、測定可能な範囲が小さくなってしまう。
- の2点の理由により、オリフィスコンダクタンスは約  $2 \ell / sec$  のものが選択された。

## 2.2.1 オリフィスの仕様

## (1) 材質、個数

無酸素銅 (O F H C), 1 個

## (2) 形状 (写真 2.1 (a) 参照)



## (3) コンダクタンス

上記形状のオリフィスコンダクタンス  $C_F(\ell/S)$  は下記の式で表わされる。<sup>8)</sup>

$$C_F = R \cdot 3.64 \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.1)$$

ここで、Tは通過するガスの温度(°K)、Mはガスの分子量で、Rはクラウジング係数と呼ばれ、 $t/d$  の関数である。(d は cm の単位)

25°C の水素に対しては、

$$C_F = 3.49 R d^2 \quad (2.2)$$

で表わされる。

実際に製作されたオリフィスの  $t$ 、 $d$  の実測値は、

$$d = 0.33 \text{ cm}$$

$$t = 0.21 \text{ cm}$$

であった。従って、 $t/d = 0.636$  となるので、クラウジングの数表<sup>8)</sup> から R を求めると、 $R = 0.620$  となる。よって (2.2) 式より、

$$C_F = 3.49 \times 0.620 \times (0.33)^2 = 2.36 \ell/\text{sec}$$

となる。

## 2.2.2 オリフィスの取付作業

オリフィスの取付位置は図 2.3 に示すところの大容量イオンポンプ②と隔離弁④との間にあるフランジ部とした。このため本作業は、当初フランジ部にあったパッキンと 2.2.1 項で記述したオリフィスとの交換作業ということになる。

図 2.6 にベーカアウトおよび Ar ボンバード処理の系統図を示す。図中荒引系の V<sub>4</sub> の後流にあるパックレスバルブをはずして、本系統を接続した。具体的な手順は下記の通りであ

った。

(1) オリフィスの交換

Arガス導入系を排気する。

(i)  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_7, V_9, V_{10}$  閉,  $VLV, V_5, V_6, V_8$  開。

(ii) ロータリポンプ "ON"。 $V_9$  開で排気を開始する。

(iii) 排気完了をもって、 $V_8$  を閉とする。

大容量のイオンポンプを含めた真空系内部に Ar ガスを導入する。

(iv)  $V_{10}$  開にて Ar ガスを  $V_4$  の手前まで充填する。圧力計  $G_1$  の指示  $0.1 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$  にて  $V_{10}$  閉。

(v)  $V_1, V_3, V_4$  開。

(vi)  $V_{10}$  を再び開いて  $G_1$  の指示を  $0.1 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$  に保つ。その後  $V_{10}$  を閉。

その後、大容量イオンポンプと  $V_1$  との間のフランジを解体し、内にあったパッキンとオリフィスを交換した。写真 2.1(b)にこの時の様子を示す。従ってこのオリフィスはフランジ部のパッキンの働きもする。

(2) ベークアウト処理

真空系を復帰させるために、ベークアウトと排気処理を行った。

(i)  $VLV, V_5, V_6$  閉。

(ii)  $V_8, V_9$  開、ロータリポンプを "ON" にして、真空系の Ar ガスを排気(約 10 分間)

(iii) ソープショーンポンプを液体  $N_2$  で冷却し、 $V_9$  を閉。

(iv) 図 2.6 の点線部をテープヒーターで  $200 \sim 250^\circ\text{C}$  のベークアウトをする。同時にソープショーンポンプに液体  $N_2$  を約 30 分毎に補給しながら、約 4 時間連続排気する。

(v) イオンポンプを "ON" にして、コントローラ指示が  $3.5 \text{ kV}$  以上になったら、ベークアウト終了とし、 $V_8$  を閉にする。

(3) Ar ボンバード処理

イオンポンプ内の Ti 陰極表面を活性化するための処理である。これによってイオンポンプ排気速度の回復も可能である。

(i)  $V_5, V_6$  開。

(ii) イオンポンプを "ON" のまま、 $VLV$  を微開にし、Ar ガスを真空系に導入する。導入量は圧力が  $2 \sim 5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  の範囲になるように調節し、約 20 分間この状態で保持する。

(iii) Ar ボンバード処理終了。 $V_3, V_4, VLV$  閉。

以後、O-H モジュール水素濃度計にオリフィスを取付けた本水素計をここではオリフ

ィス付 Na 中水素計と称する。

## 2.3 特性試験結果

昭和54年1月11, 12日に微小リーク試験 Run 2014 が行なわれ、併行して Na 中水素分圧 (Na 中濃度) とオリフィス付 Na 中水素計出力の関係等が調べられた。

### 2.3.1 較正試験

試験は Run 2014 の注水を開始する前にコールドトラップ温度を約 120 °C に制御し、Na 中水素濃度が一定になった時点のオリフィス付 Na 中水素計の動的平衡状態を測定した。本水素計にはシュルツ型電離真空計 (以下シュルツゲージ) を有する静的室が無いため、Na 中水素分圧は PNC 型 Na 中水素計 2 号機 MK-III<sup>3)</sup> の静的平衡圧の測定から求めた。2 号機 MK-III のシュルツゲージの対水素圧力較正曲線を図 2.7 に示す。この測定は注水試験中にノズルが閉塞し、注水が中断した時点でも行われ、前述の動的および静的平衡状態が測定された。なお系内の Na 中水素濃度が一定になったことは、各水素濃度計の出力が一定になったことで判定した。

表 2.5 に各較正試験の試験結果を示す。データ No. 2014-1 ~ 4 が注水直前のデータであり、No. 2014-5 ~ 8 が注水試験時のデータがある。これらのデータは水素計較正試験データ処理コード HYDAC-1<sup>3)</sup> によって、一括して処理された。HYDAC-1 の機能はイオンポンプ、ヌードゲージおよびシュルツゲージの各出力値を図 2.4, 2.5 および 2.7 の各較正曲線に従って、水素ガスの指示に変換するものである。またサーマルトランスピレーション効果およびシュルツゲージの自己排気速度により、静的平衡圧力に与える影響も考慮して Na 中水素分圧を計算するようになっている。

以上にして求めた Na 中水素濃度とそれに対応するオリフィス付水素計の動的平衡状態でのイオンポンプ電流、圧力およびヌードゲージ部圧力の関係を図 2.8 に示す。Na 中水素濃度は Sieverts の法則により (2.9), (2.10) 式を用いて Na 中水素分圧から求めた。Na 中水素濃度  $C_{NH}$  とヌードゲージ部圧力  $P_N$  の間には次の関係が得られた。

$$C_{NH} = 3.156 \times 10^3 \quad P_N^{0.799} \quad (2.3)$$

ここに  $C_{NH}$  : Na 中水素濃度 (ppm)

$P_N$  : ヌードゲージ部圧力 (Torr)

これがオリフィス付水素計の場合の較正曲線である。図 2.8 中 No. 2014-2 のデータはばらついている。これはオリフィス交換作業による放出ガスの増加が原因で、Na 系と真空系との間で動的平衡がとれなかったものと思われる。しかしこれも初期だけの現象であり

以後のデータのはらつきは少ない。同図からヌードゲージの使用上限である  $1 \times 10^{-3}$  Torr 以内では、Na中水素濃度で約10ppmまで計測が可能であることがわかった。

Na中水素濃度  $C_{NH}$  とイオンポンプ部圧力  $P_p$ との関係は次式で示された。

$$C_{NH} = 3.04 \times 10^4 P_p^{0.802} \quad (2.4)$$

ここに  $P_p$  : イオンポンプ部圧力 (Torr)

また対イオンポンプ電流  $A_{IP}$  との関係は次式で示された。

$$C_{NH} = 2.93 \times 10^{-2} A_{IP}^{0.755} \quad (2.5)$$

ここに  $A_{IP}$  : イオンポンプ電流 ( $\mu A$ )

(2.5) 式が、今までの Ni 膜-イオンポンプ型水素検出計の較正曲線と呼ばれたものである。

### 2.3.2 ヌードゲージ部およびイオンポンプ部の排気速度

オリフィスを取付けた場合のヌードゲージ部の実効排気速度  $S_N$  およびイオンポンプ部の排気速度  $S_p$  を求めた。 $S_N$  および  $S_p$  は次の関係式により求められる。

$$S_N = C_{NP} (1 - P_p/P_N) \quad (2.6)$$

$$S_p = S_N \cdot P_N/P_p \quad (2.7)$$

ここで、各記号は次のとおりである。

$C_{NP}$  : ヌードゲージとイオンポンプ間のコンダクタンス ( $cm^3/sec$ )

$P_p$  : イオンポンプ部圧力 (Torr)

$S_N$  : ヌードゲージ部実効排気速度 ( $cm^3/sec$ )

$S_p$  : イオンポンプ部排気速度 ( $cm^3/sec$ )

$C_{NP}$  は理論的に求まるオリフィスコンダクタンス  $C_F$  にはば規定され、 $P_p$  および  $P_N$  は本試験で実測され、その比  $P_p/P_N$  は約 0.1 のオーダである。従って、以前よりもはるかに正確に  $S_N$  および  $S_p$  を算出することができる。

附録(I)で求められた  $C_{NP} = 2.28 (\ell/sec)$  を使用して、 $S_N$  および  $S_p$  を算出した結果を図 2.9 に示す。イオンポンプ部は約 3.5 ( $\ell/sec$ ) の排気速度であり、高圧力側になる程わずかに排気速度が低下する傾向であった。これに対して  $S_N$  はオリフィスの効果により、ほとんど圧力依存性が無く一定値の 2.15 ( $\ell/sec$ ) が得られた。

### 2.3.3 Ar ボンバード処理の効果

2.2.2 項に記述したようにオリフィス取付作業の最終工程として、Ar ボンバード処理によるイオンポンプ排気速度の回復を行った。

図 2.10 は Ar ボンバード処理前の Run 3003 (1978年6月30日実施) と処理後である今回の較正曲線 ( $C_{NP} - P_p$  曲線) を示したものである。図 2.9 および図 2.10 により次のことが明らかとなった。

- (1) 本処理により、この型式のイオンポンプ排気能力の最大にまで回復することができる。
- (2) この結果、本処理後の較正曲線は処理前のものと比べて低圧力側へシフトしたが、傾きはあまり変化しない。
- (3) このシフト幅はイオンポンプ部圧力比で約 0.55 であるので、もし Ni 膜の水素透過率が Run 3003 と Run 2014 試験の間に低下していないとすれば、処理前のイオンポンプ排気速度は  $35 \times 0.55 = 19 (\ell/\text{sec})$  程に低下していたと推定される。

### 2.3.4 Ni 膜の水素透過率 K

動的平衡関係式の (2.14) 式を使用して、 $P_{NH}$  に対する K の関係を求めたのが図 2.11 である。 $P_{NH}$  は PNC 型 Na 中水素計 2 号機 シュルツゲージの静的平衡値  $P_G$  より、サーマルトランスピレーション値を介して求めた。この際 シュルツゲージの自己排気速度  $S_F$  をパラメータとし、真空壁面からの放出ガス率  $Q^*$  は無視した。

図 2.11 より明らかなように K の水素圧力依存性が観察され、 $S_F = 0$  のとき  $P_{NH} - K$  の関係は次式で示された。

$$K = 2.23 \times 10^{-4} P_{NH}^{0.103} \quad (2.8)$$

オリフィスを設置する前の同水素計によって測定された K 値も図 2.11 に示した。これは Run 3003 の結果である。オリフィスが無い場合、ヌードゲージ部の排気速度が不明なため、式 (2.14) の  $S_N$  は排気速度の劣化が無いとして工場出荷時の値  $23 \ell/\text{sec}$  を用いた。これによると Run 3003 と Run 2014 の K 値を比較すると、Run 3003 の K 値の方が約 2 倍程大きく、圧力依存性が小さい。これは K 値自身の変化によるものかあるいは 2.3.3 項で記述したように  $S_F$  の劣化によるものかは明確でない。圧力依存性の変化については少なくとも K 値自身に原因がある可能性が強い。

### 2.3.5 水注入時の応答

図 2.12 にはオリフィス取付け後の O-H モジュール・リーク検出計の微小リーク試験

(Run 4012) における応答図で、ヌードゲージ出力および酸素計出力(mV)の変化を示したものである。ヌードゲージ出力が注水弁以前になだらかに上昇しているのは、コールドトラップを隔離したために系内からの不純物移入によるバックグラウンド水素濃度が増大しているのが原因である。この量は図2.8の較正曲線によると約 $1 \times 10^{-12}$  g(H<sub>2</sub>) / secである。酸素計の方は1000 mV F.S.と感度が小さいため指示としては変化せず、この間での系内酸素不純物の移行量は不明である。注水弁開後、ヌードゲージおよび酸素計の両指示はほとんど同時に応答しており、応答の早い酸素計と比べて特にヌードゲージの応答が遅いということはなかった。注水弁開から両濃度計が応答するまでに約5分以上かかるのは、注水ノズルが最初閉塞していたためである。Na輸送時間は注水ノズルから検出点まで約1分弱であるので、この時間を考慮するとノズルの閉塞は注水弁を開いて約4分後には開孔したと思われる。図2.13は同一試験時におけるPNC型Na中水素濃度計2号機MK-IIIイオンポンプの応答図である。この検出計はO-Hモジュール・水素計と比べてオリフィスが無いこと以外は構造が全く同じであるので、オリフィスが付いた時のヌードゲージ出力とオリフィス無しのイオンポンプ出力の応答性を比較できる。これらによると両者は大きな差は無く、水素検出のセンサとしてヌードゲージは応答性の点でも充分使用できると思われる。

## 2.4 試験結果の検討

ここでは、2.3項に述べられた試験の結果により、以下の項目に対して検討を行った。

- (1) オリフィス付水素計の動的平衡関係式の検討
- (2) 理論式との比較
- (3) オリフィス水素計と従来系との比較

### 2.4.1 オリフィス付水素計の動的平衡関係式

図2.14はオリフィス付水素計の動的平衡状態を概念的に描いたものである。オリフィスを取付けた結果、ヌードゲージ部の圧力P<sub>N</sub>が増加する。この増加率はイオンポンプ部排気速度S<sub>P</sub>とヌードゲージ部排気速度S<sub>N</sub>の比にはほぼ相当する。ヌードゲージ部圧力が増加した分だけNi膜真空側圧力P<sub>M</sub>も増加し、従ってNa中水素分圧P<sub>NH</sub>が同じ場合はNi膜の水素透過流量Q<sub>H</sub>は減少し、イオンポンプ部圧力P<sub>P</sub>も減少することが定性的に説明される。

オリフィス付水素計は水素検出のセンサとしてヌードゲージを用いるため、最終的にはNa中水素濃度C<sub>NH</sub>とヌードゲージ指示P<sub>N</sub>の関係が必要である。このためにはNa中水素分圧P<sub>NH</sub>とP<sub>N</sub>の関係を知る必要がある。これは次式で示される。

( Sieverts の法則)

$$C_{NH} = K_H \cdot P_{NH}^{1/2} \quad (2.9)$$

ここで,  $C_{NH}$  : Na 中水素濃度 (ppm) $P_{NH}$  : Na 中水素分圧 (Torr) $K_H$  : Sieverts 定数 (ppm/Torr<sup>1/2</sup>)この  $K_H$  は実験的にいくつか求められており, Vissers らのものを使用すると,

$$\log K_H = 0.86 - \frac{12.20}{T} \quad (2.10)$$

ただし,  $T$  : Na 温度 (°K)

$$30 \text{ ppb} \leq C_{NH} \leq 1 \text{ ppm}$$

また,  $P_{NH}$ ,  $P_N$  および  $Q_H$  の関係は次式が成立する。

$$Q_H = K \cdot \frac{A}{d} (P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}) \quad (2.11)$$

ここで,  $Q_H$  : Ni 膜の水素ガス透過流量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{Torr} / \text{sec}$ ) $K$  : Ni 膜の水素透過率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{Torr}^{1/2} / \text{sec}$ ) $A$  : Ni 膜面積 ( $\text{cm}^2$ ) $d$  : Ni 膜厚さ (cm) $P_M$  : Ni 膜真空側圧力 (Torr) $P_M$ ,  $P_N$  および  $Q_H$  の間には次式が成立する。

$$Q_H = C_{MN} (P_M - P_N) \quad (2.12)$$

また  $P_N$ ,  $S_N$  および  $Q_H$  の間には次式が成立する。

$$Q_H = P_N \cdot S_N \quad (2.13)$$

ここで,  $C_{MN}$  : Ni 膜とヌードゲージ間のコンダクタンス ( $\text{cm}^3 / \text{sec}$ ) $S_N$  : ヌードゲージ部の実効排気速度 ( $\text{cm}^3 / \text{sec}$ )上記 (2.11), (2.12) および (2.13) の 3 式から  $Q_H$ ,  $P_M$  を消去することになり  $P_{NH}$  と  $P_N$  の関係が次式のように求まる。

$$P_{NH}^{1/2} = \frac{d}{K} \cdot \frac{S_N}{A} \cdot P_N + \left(1 + \frac{S_N}{C_{MN}}\right)^{1/2} \cdot P_N^{1/2} \quad (2.14)$$

(2.14) 式を (2.9) 式に代入することにより, 当初の目的である  $C_{NH}$  と  $P_N$  の関係を求めることができる。

$$C_{NH} = K_E \left\{ \frac{d}{K} \cdot \frac{S_N}{A} \cdot P_N + \left( 1 + \frac{S_N}{C_{MN}} \right)^{\frac{1}{2}} P_N^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.15)$$

これがポンプを作動させた状態での動的平衡状態を表わす式であり、Ni膜-ヌードゲージ型水素計の設計基本式である。従って本式はポンプの種類に無関係に成立する。

#### 2.4.2 理論式との対応

$K$ は実験式(2.8)式にあるように一般的には  $K = K^* P_{NH}^{\frac{m}{2}}$  と与えられる。これを前述の  $P_{NH}$  と  $P_N$  の理論的関係式(2.14)式に代入すると次式のようになる。

$$P_{NH}^{\frac{1}{2} + \frac{m}{2}} = \frac{d S_N}{K^* A} P_N + \left( 1 + \frac{S_N}{C_{MN}} \right)^{\frac{1}{2}} P_N^{\frac{1}{2}} P_{NH}^{\frac{m}{2}} \quad (2.16)$$

各定数、 $K^*$ および $m$ の実際の値を上式に代入して、右辺第1項と第2項の大小を比較すると、第1項は第2項の約10倍( $P_N$ が $10^{-6}$  Torrのとき)から約400倍( $P_N$ が $10^{-4}$  Torrのとき)である。このことから、(2.16)式右辺の第2項を無視すると、半理論的な次の近似式が成立する。

$$P_{NH}^{\frac{1}{2} + \frac{m}{2}} = \frac{d S_N}{K^* A} P_N$$

$$\therefore P_{NH}^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{d S_N}{K^* A} \cdot P_N \right)^{\frac{m}{2} + \frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

本式は  $P_{NH}$  と  $P_N$  がいわゆる  $\frac{1}{2}$  乗則に従うか否は  $m$  の値によって決定されることを示すものである。本実験では  $m$  値は 8.87 であったが、 $m$  値が大きい程  $P_{NH}^{\frac{1}{2}} \propto P_N$  に近づく。従来の  $P_{NH}$  と  $I_p$  (イオンポンプ電流) の関係が  $\frac{1}{2}$  乗則からずれていた原因として考えられるのは次のとおりである。

- (1)  $K$  値に圧力依存性があること。
- (2)  $P_p$  と  $I_p$  は 1 次の関係でなく、 $P_p = a I_p^b$  ( $a, b$  は定数で、 $0.9 < b < 1$ ) が一般的であること。図 2.4 参照。
- (3)  $S_p$  は図 9 およびイオンポンプ経時特性試験<sup>9)</sup> で実測されたように圧力が大きい程低下する傾向にあり、一般的には  $S_p = a P_p^b$  ( $a, b$  は定数で、 $-0.1 < b < 0$ ) と表示されること。
- (4) 式(2.16)の右辺第2項を無視していること。

オリフィスを取付けて、水素検出センサとしてヌードゲージを使用する本水素計の場合、上記のうち(2)と(3)とは無関係である。よって  $P_{NH}$  と  $P_N$  の間に  $\frac{1}{2}$  乗則が成立しない原因是、大部分  $K$  の圧力依存性によるものであり、わずかに(2.16)式の右辺第2項の分まで第1項だけで表示していることも影響していることが明確となった。

以上の検討から  $K^*$ ,  $m$  の値がわかれば、実用上さしつかえない程にまで較正曲線を予測し得る。また  $K$  の値は水素計の真空系設計 (Ni 膜の面積、イオンポンプの排気能力) に大きな影響を及ぼす。このように重要な  $K$  値は図 2.16 に示されるように各測定者によってかなりばらついており、圧力依存性の度合も異なる。図 2.15 中最近のデータは⑤、⑥および⑩であり、全て PNC 型 Na 中水素計 2 号機タイプの Na 中データである。これらの特徴は今までの PNC および東芝のデータよりも圧力依存性が小さいことで、Na 中水素濃度をより広範囲に測定することができる。

図 2.16 に示されるように測定者によって  $K$  値が異なる原因として考えられるのは、

- (1) Ni 膜の製造方法 (材質、熱処理等)
- (2) Na 運転中の Ni 膜表面の変質 (表面層の酸化、Na デポジット等)

であるが、明確でない。特に(2)は  $K$  値の経年変化すなわち較正曲線の経年変化に深く関係するものであり、今後のデータの蓄積が望まれる。

#### 2.4.3 オリフィス付・ヌードゲージセンサ型の水素計と従来型との比較

オリフィスの無い従来型の水素計と比較して、今まで記述してきたイオンポンプとヌードゲージの間にオリフィスを設け、ヌードゲージを水素検出のセンサにする型の水素計には一般的に寿命とノイズの点から次の長所がある。

##### (1) 寿命

(i) カタログ品としてイオンポンプの排気速度  $S_p$  が限定されていても、オリフィス口径を (2.1) 式に従って適当に選択することにより、真空圧力計部の実効排気速度  $S_n$  をかなり広範囲に、しかも連続的に調整することが可能である。Ni 膜厚が定められている場合、水素計の特性は  $S_n$  と Ni 膜面積  $A$  との比  $S_n/A$  で決まるので、 $A$  も  $S_n$  に応じて自由に選択することができるようになる。 $A$  の大小は即イオンポンプの寿命に影響することを考えると、ここにオリフィスを設けることによって  $S_n$  と  $A$  の最小化が図れ、従ってイオンポンプの寿命を延ばすことが可能となる。

(ii)  $S_n$ ,  $S_p$  および  $C_{NP}$  には  $S_n = C_{NP} / (1 + C_{NP} / S_p)$  の関係が成立する。従って  $C_{NP} / S_p \ll 1$  となるように  $C_{NP}$  を選択すれば、 $S_n$  は  $S_p$  の低下にある程度不感となり、センサであるヌードゲージの指示も  $S_n$  の経時変化によるドリフトを相当小さくできる。

(iii) イオンポンプ出力電流は圧力に換算することができる。従ってイオンポンプと真空圧力計間に既知のオリフィスコンダクタンス値のオリフィスを設けることは流量計を備えることに匹敵する。このため  $S_p$  を運転中正確に算出できるため、イオンポンプの回復処理の時期を判断することができる。

(2) ノイズ

- (1) イオンポンプへの供給電圧が多少変動した場合、ポンプの出力電流は直接影響を受けるが、排気速度および圧力には無関係である。<sup>9)</sup>
- (ロ) 一般的にノイズの大きさはヌードゲージの方がイオンポンプと比べてはるかに小さい。<sup>7)</sup>
- (ハ) PNC型Na中水素計にはイオンポンプ用200V定電圧装置を備えつけているにもかかわらず、図2.16に示すような突変的なドリフトを起すことが観察された。この原因は明らかでない。このドリフト幅は記録紙上で最大2目盛であるので、最悪の場合で20%のドリフト幅となることが考えられる。現在、もんじゅSGのリーク・アラーム点はバックグラウンド水素濃度の10%変化で計画されており、上述の10%をオーバーするシフトアップが計器側の原因で生じるのは問題である。
- (二) イオンポンプは経年的にカソード板の表面の凹凸が激しくなってくることによって電界放射が生じたり、内部碍子がスパッタされた金属被膜でおおわれることによって絶縁状態が不良となり、電圧を負荷しただけで電流が流れことがある。図2.17はこの一例で、PNC型水素計の長期性能試験<sup>11)</sup>に使用されているイオンポンプ出力電流とヌードゲージ出力を示したものである。これによるとヌードゲージ出力は $10^{-9}$  Torrレンジで徐々に低下しているにもかかわらず、イオンポンプは約8μAレンジで真空度の変化に無関係な指示であり、ノイズも大きい。この約8μAの指示はほとんどが上述の原因による高圧漏電である。この対策としてインダクションコイルで放電処理を行った結果、図2.18に示されるようにイオンポンプの出力はヌードゲージのそれと対応した変化を示し、指示値も約0.5μAと正常に復帰した。

表 2 - 1 O - H モジュール・Na 中水素計 Na 系設計仕様

番号	項 目	単 位	仕 様
1	基 本 系 統		ヒータ内蔵エコノマイザ型 主要構成機器は以下のとおり (a) 主ヒータ 1 基 (b) ヒータ内蔵エコノマイザ 1 基 (c) 電磁ポンプ 1 基 (d) 電磁流量計 1 基 (e) Na 出入口弁 2 基 (f) 配管, 予熱ヒータ保温 1 式 (g) Ni 膜制御用熱電対 11式
2	設 計 溫 度	°C	520
3	設 計 圧 力	kg/cm <sup>2</sup> g	10
4	主 要 材 質	-	J I S SUS304 相当
5	Na 溫 度 制 御	°C	500 ± 1
6	系 Na 入 口 溫 度	°C	Na チャージ時：200 通常運転時：320 ~ 450
7	熱 流 力 設 計 条 件		
	Na 入 口 溫 度	°C	200
	Ni 膜 溫 度	°C	500
	Na 出 口 溫 度	°C	270 但し、通常運転条件中で出入口温度差を 50 °C以下にする。
	Na 流 量	kg/h	系入口から Ni 膜部までの Na 到達時間を 10 秒 以内とし、Na 流量は 5 kg/h 以上とする。
8	構 造 設 計 適 用 規 格		労働省第一種圧力容器構造規格

表 2-2 O-H モジュール Na 中水素計 Ni 膜部設計仕様

番号	項目	単位	仕様
1	設計温度	°C	500
2	設計圧力	kg/cm <sup>2</sup> g	10
3	材質	—	Nickel 201相当
4	形状	—	内圧円筒片持型
5	厚さ	mm	0.5
6	面積	cm <sup>2</sup>	150
7	基數	基	1
8	運転温度	°C	500 ± 1

表 2-3 O-H モジュール・Na中水素計真空系設計仕様

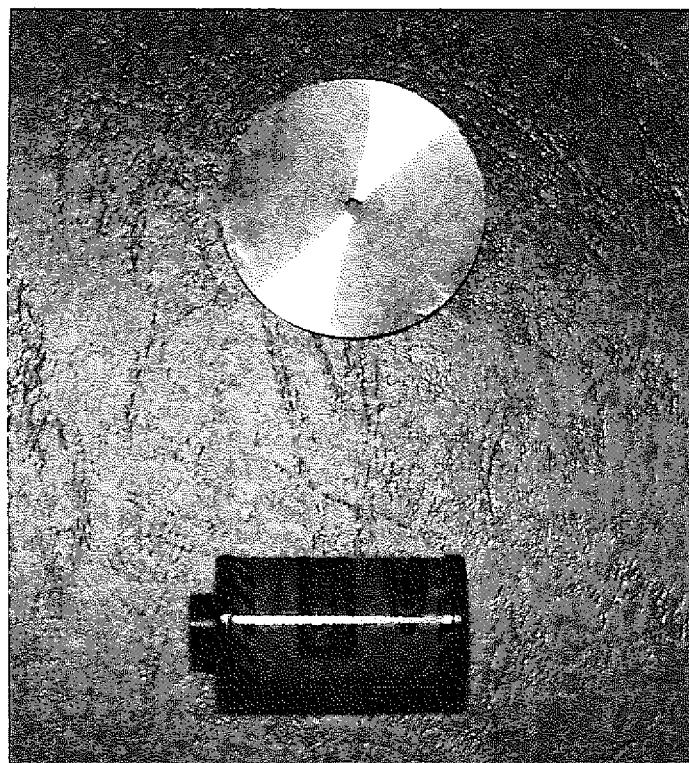
No	項目	単位	仕様
1	基本系統		イオンポンプ 2基を有する 2排気系 主要構成機器は以下のとおり (a) イオンポンプ 2基 (b) 電離真空計 1基 (c) 止弁、配管 一式
2	設計圧力	kg/cm <sup>2</sup> g	~ 1 ~ 10
3	設計温度	°C	保温のかぶる部分 : 520 その他の部分 : 室温
4	イオンポンプ 型式 排気速度	l/sec	スパッタイオンポンプ 2 および 30
5	真空計測定範囲	Torr	超高電離真空計 : $10^{-10} \sim 10^{-3}$
6	真空系 容積 表面積 放出ガス率	cm <sup>3</sup> cm <sup>2</sup> Torr · l/ sec · cm <sup>2</sup>	500 以下目標 350 " 上記条件にて $1 \times 10^{-11}$ 以下目標

表 2-4 O-H モジュール・酸素計基本仕様

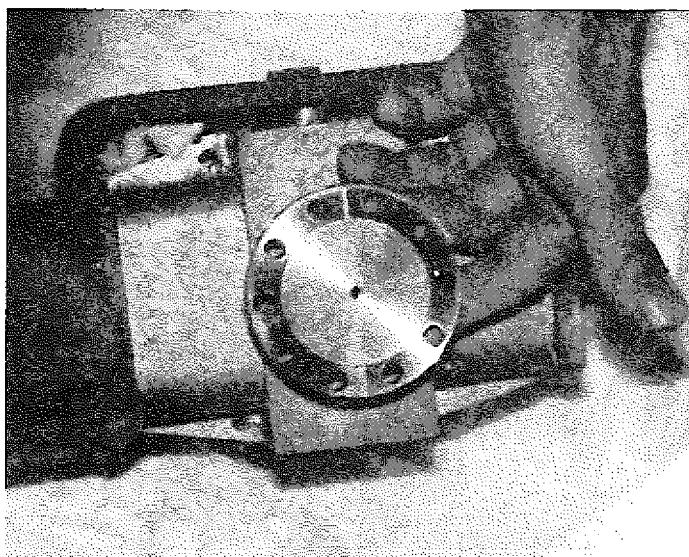
No	項 目	単 位	仕 様
1	検 出 方 式	—	電気化学式 固体電解質 7.5% Yttia Doped Torria 比較電極 In / $In_2O_3$
2	最高 使用 温 度	°C	530
3	標準 使用 温 度	°C	500
4	測 定 流 体	—	液体金属ナトリウム
5	測 定 濃 度 範 囲	—	C T 温度 200 °C
6	Na 流 量	$\ell / min$	1 ~ 5

表 2-5 Run 2014 調正試験結果

データ No.	測定日 年 月／日	主循環系	オリフィス付Na中H <sub>2</sub> 計				PNC型Na中H <sub>2</sub> 計 2号機MK-III			
			Na温度 [°C]	CT温度 [°C]	備考	Na流量 [ℓ/min]	センサ温度 [°C]	IP電流 [μA]	電離真空計 [Torr]	シリルツゲージ [°C]
2014-1	1979 1/11	11:00	480	121		3.15	502	498	6.65	1.05 × 10 <sup>-6</sup>
2014-2	"	14:00	480	121		3.16	502	498	5.8	3.05 × 10 <sup>-5</sup>
2014-3	1/12	9:50	480	122		3.2	502	498	9.68 × 10 <sup>-7</sup>	6.5
2014-4	"	11:31	480	122		3.22	502	498	2.9	1.82 × 10 <sup>-4</sup>
2014-5	1/11	480	—			3.22	502	498	5.21 × 10 <sup>-7</sup>	—
2014-6	"	480	—			3.22	502	498	5.15 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-4</sup>
2014-7	"	480	—			3.22	502	498	4.15 × 10 <sup>-5</sup>	1.55 × 10 <sup>-1</sup>
2014-8	"	480	—			3.22	502	498	3.30	1.83 × 10 <sup>-1</sup>
										70
										70



(a) オリフィス



(b) オリフィスが取付けられたイオンポンプの外観

写真1 オリフィスの取付作業

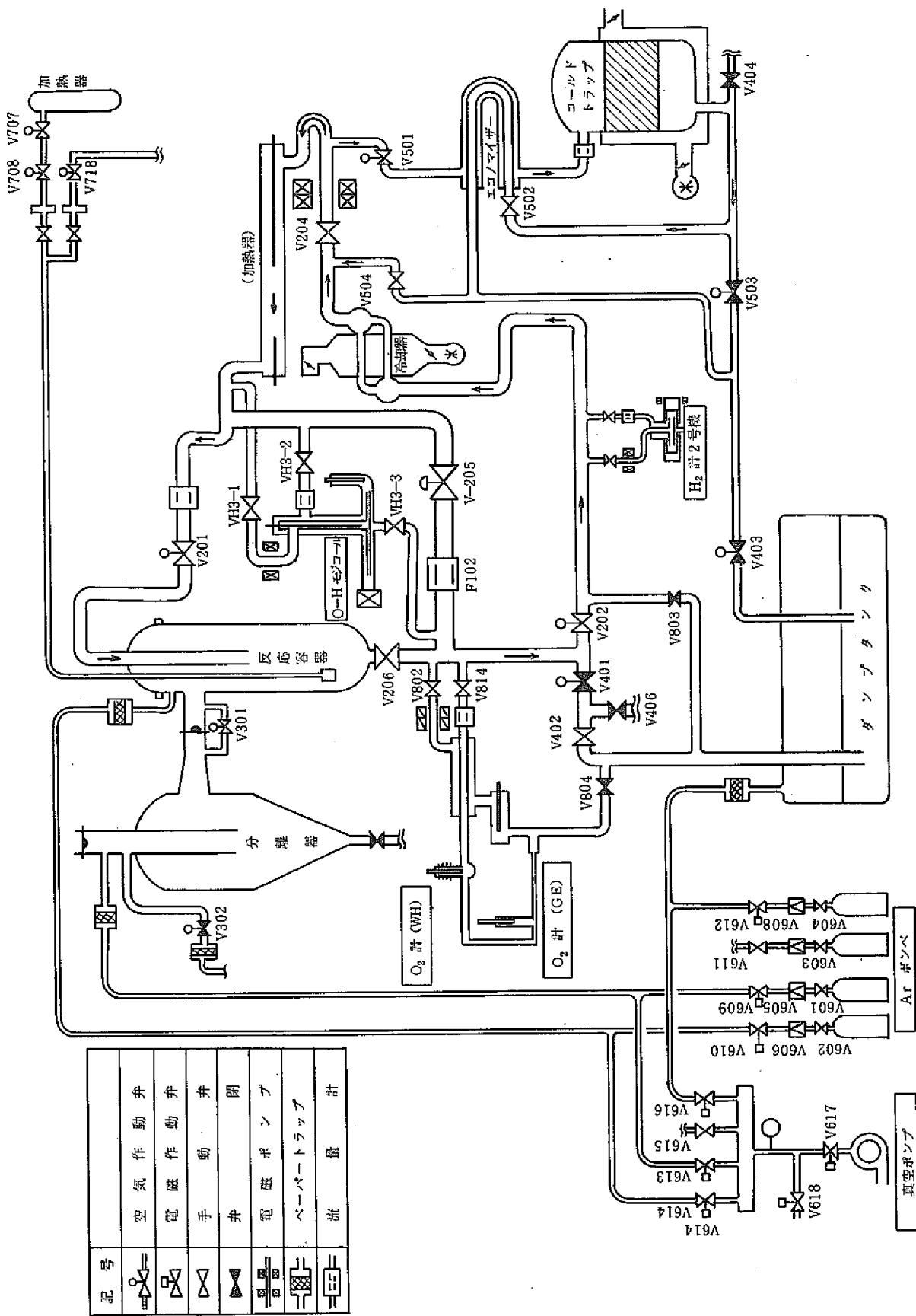
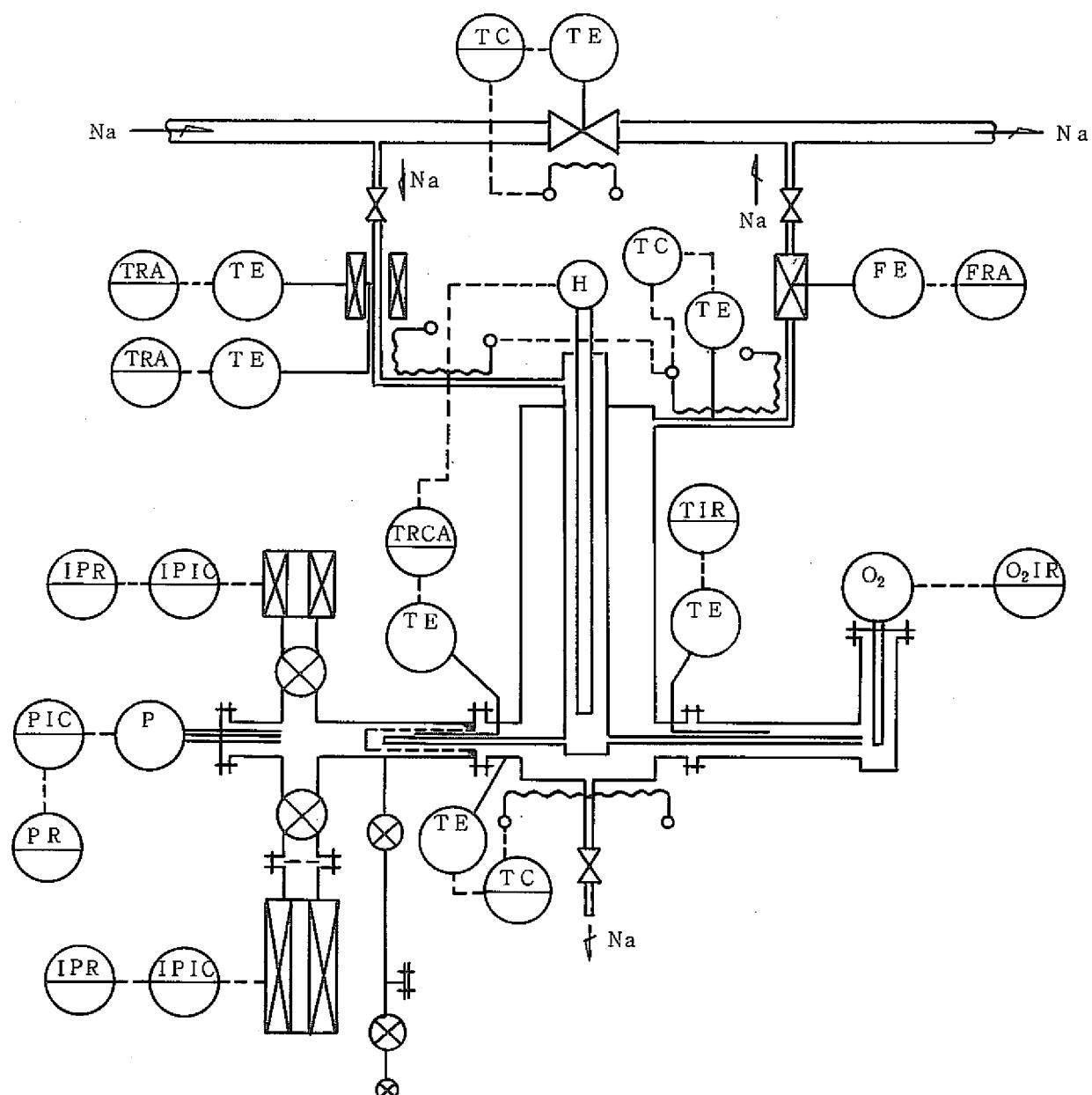


図 2.1 : SWAT-2 フローシート



	電気ポンプ		Na 主ヒータ		Na弁
	電磁流量計		予熱ヒータ		Ni膜
	オリフィス		イオンポンプ		真空止弁
P	圧力(真空圧力)	F	流 量	T	温 度
E	測 定 端	C	調 節	R	記 録
O <sub>2</sub>	酸 素 計			A	警 告

図 2.2 O-H モジュール・リーク検出計系統図

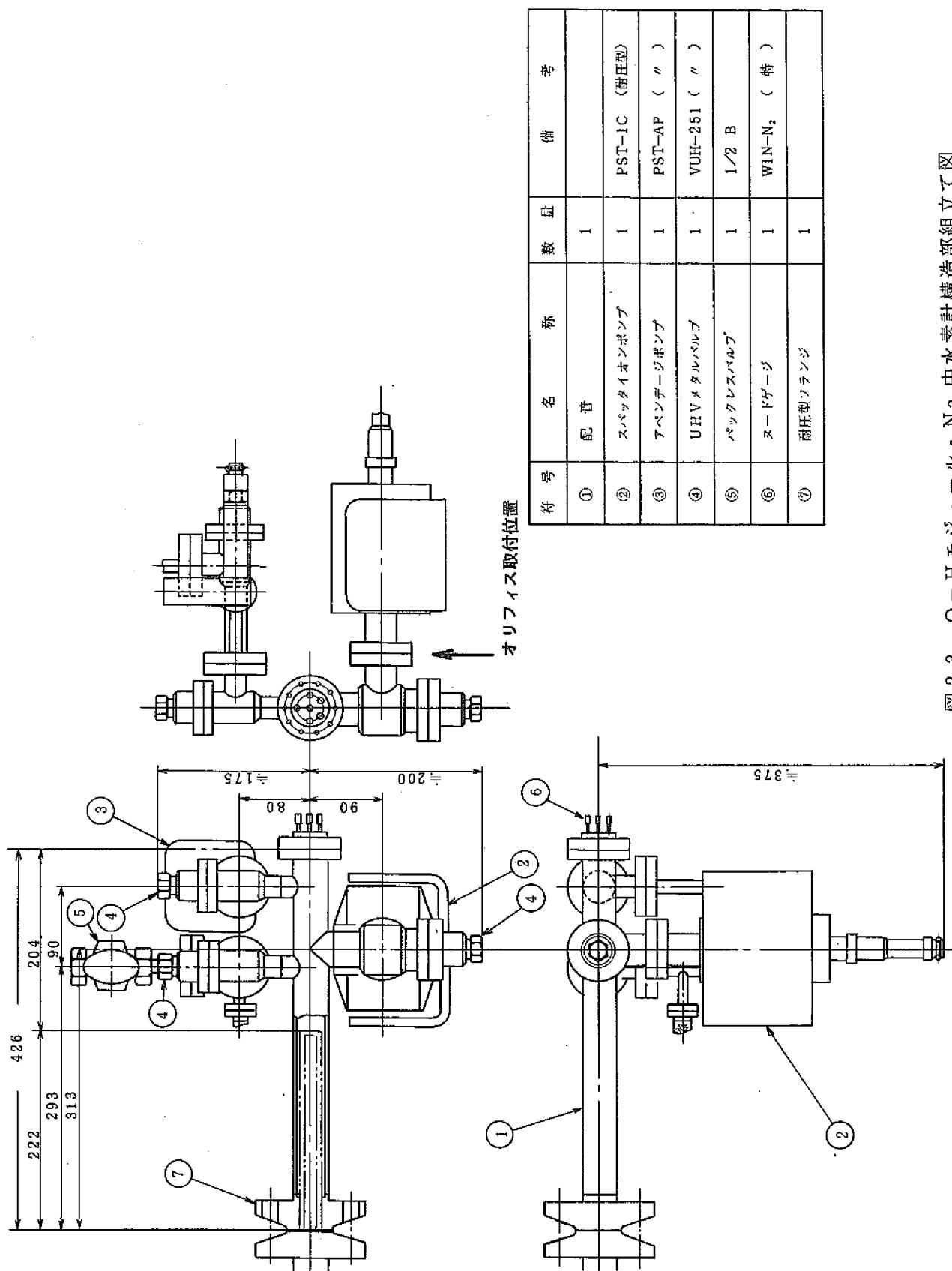


図 2.3 O-H モジュール・Na 中水素計構造部組立て図

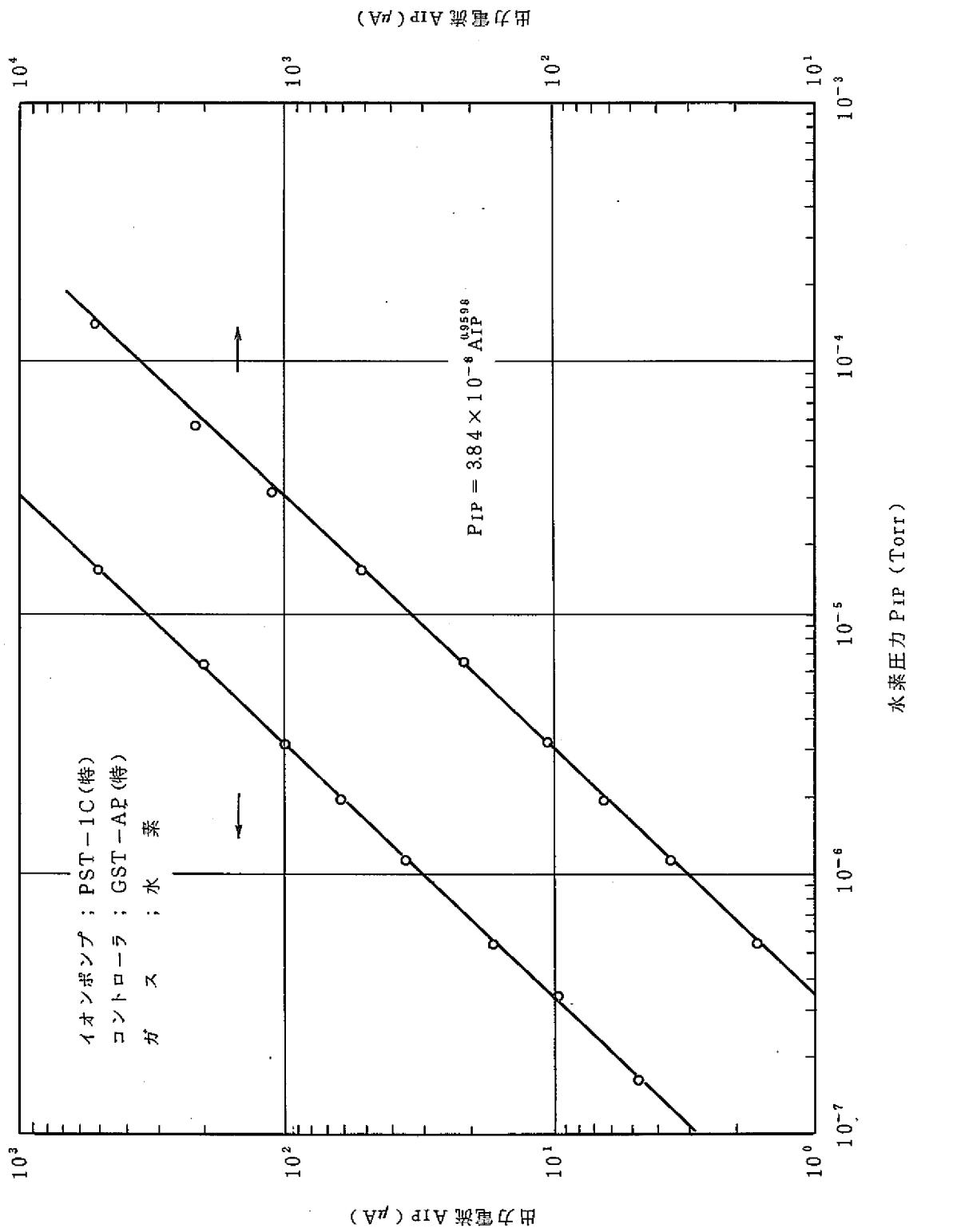


図 2・4 大容量イオンポンプ (PST-1C(特)) の圧力較正曲線

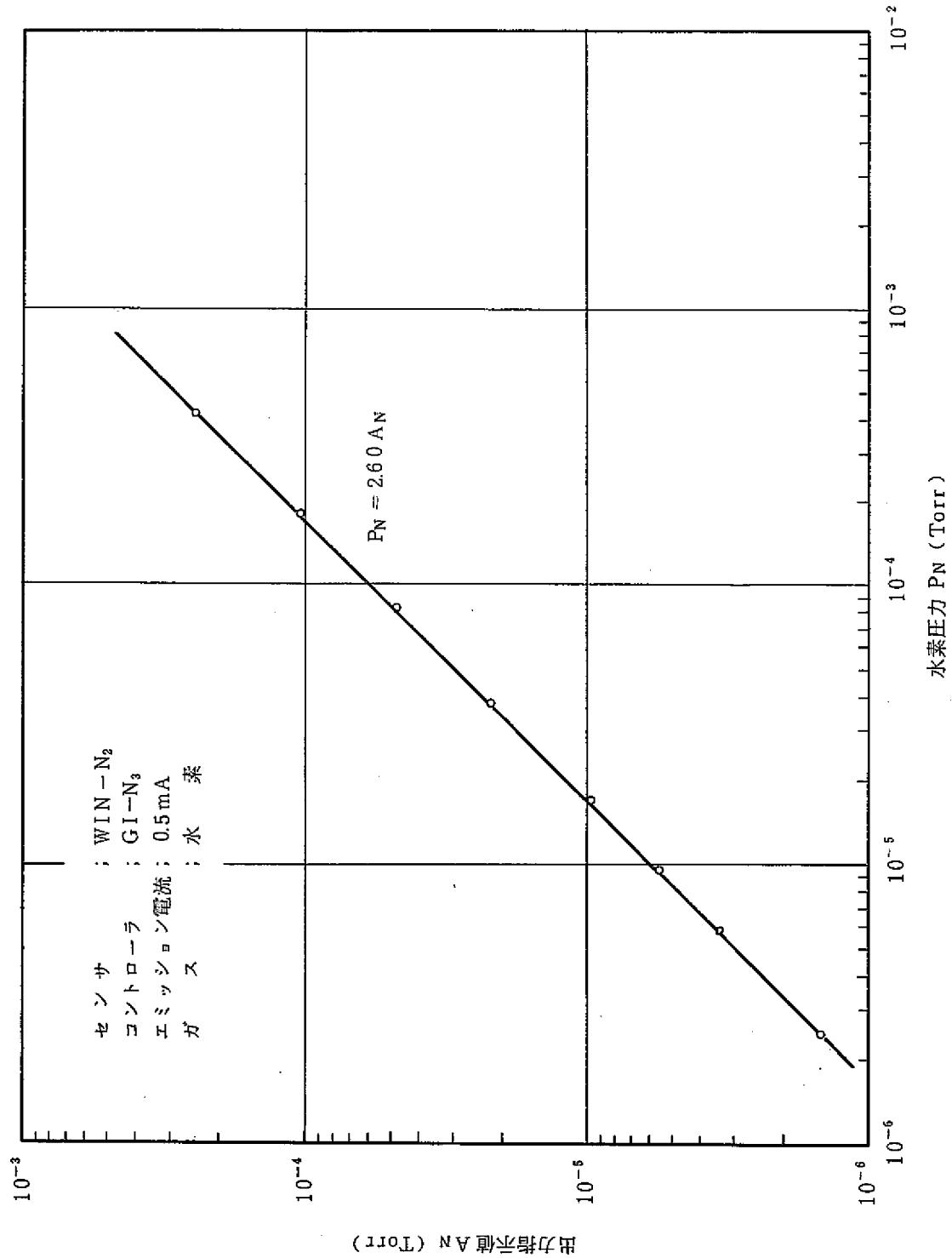


図 2・5 タードゲージ (WIN-N<sub>2</sub>) の圧力較正曲線

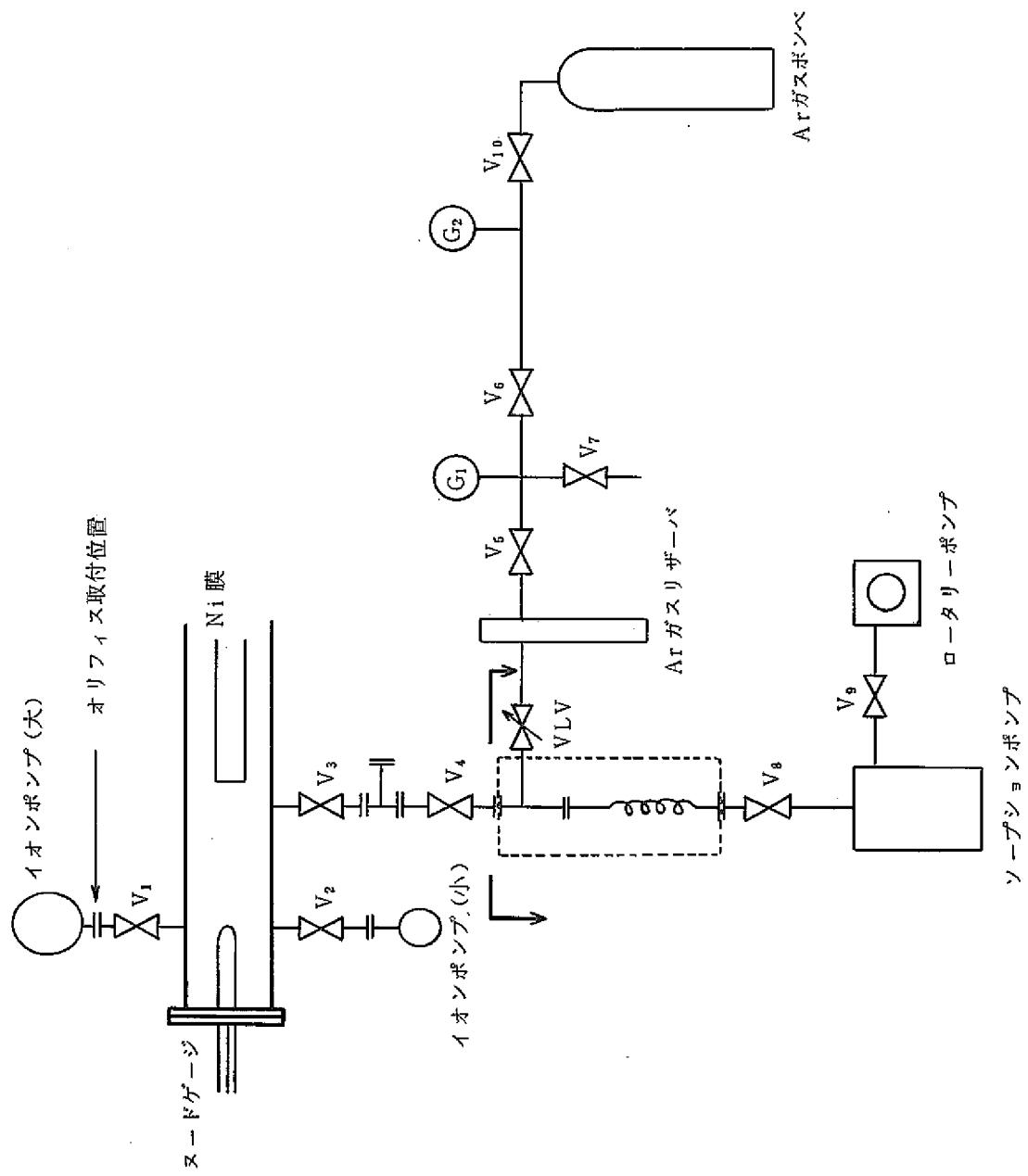


図 2・6 ベーカーアウトおよび Ar ボンバード処理装置の系統図

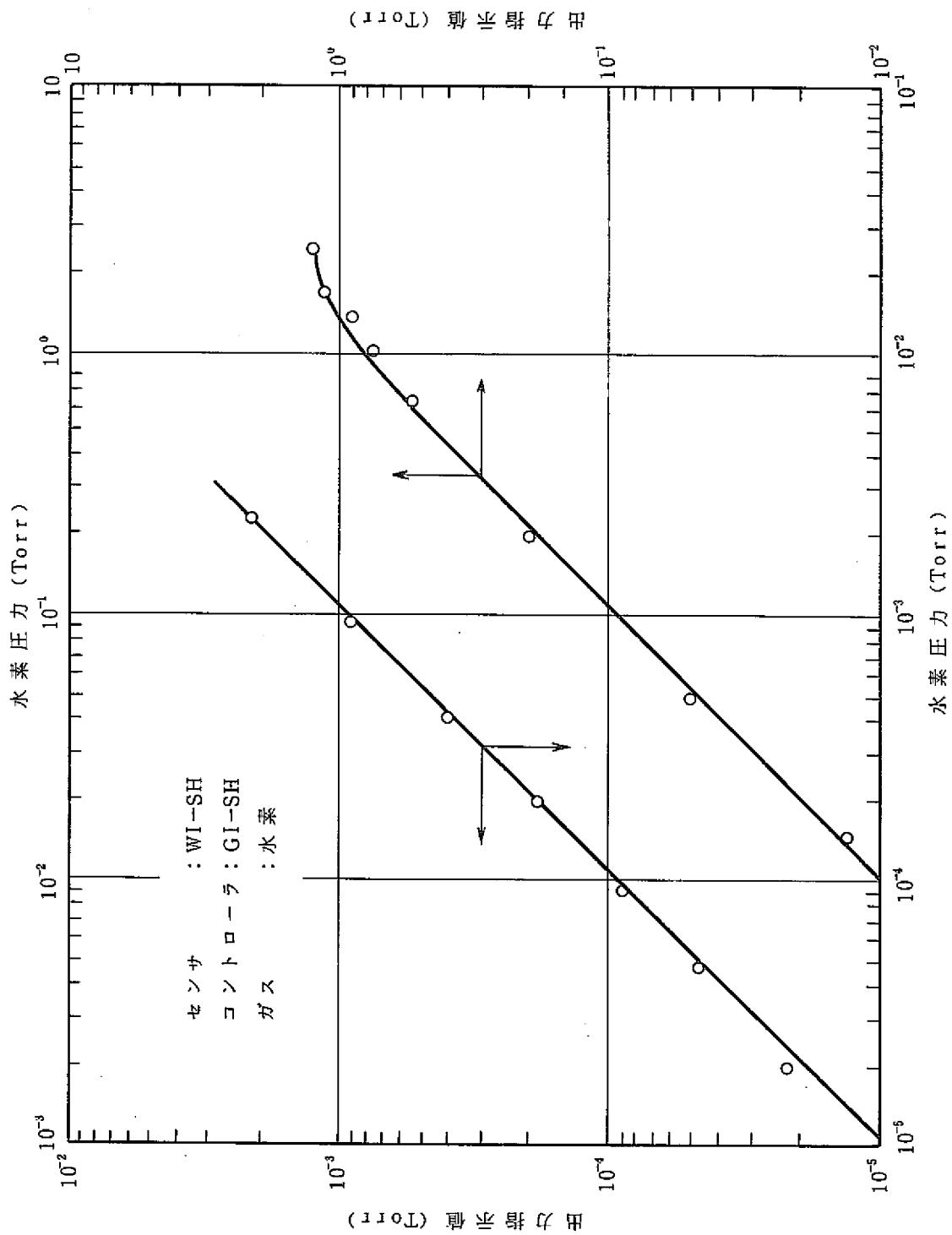


図 2.7 PNC型Na中水素計(2号機)Mk-IIIシユルツケージ較正曲線

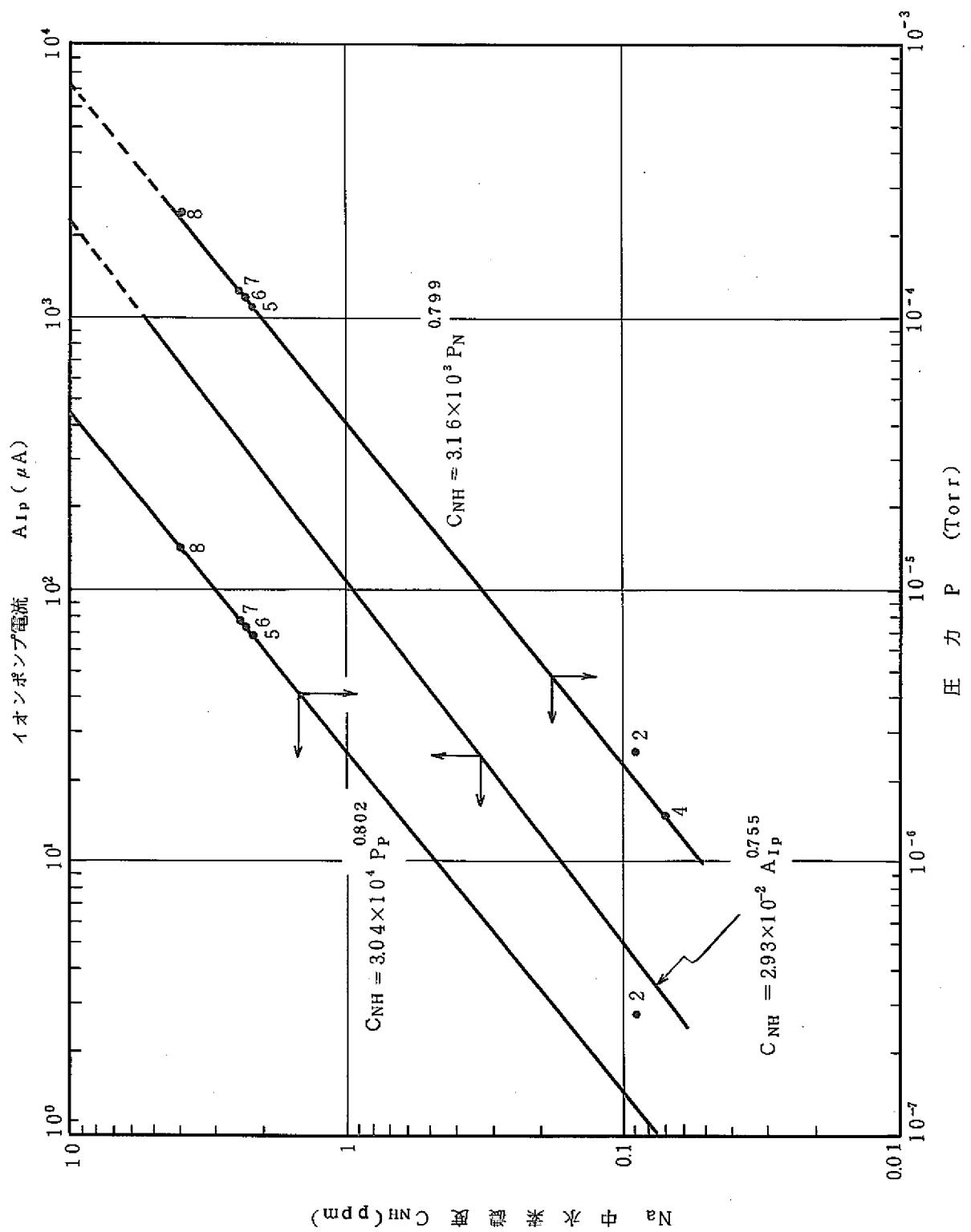


図 2.8 調正曲線 (Run 2014-2~8)

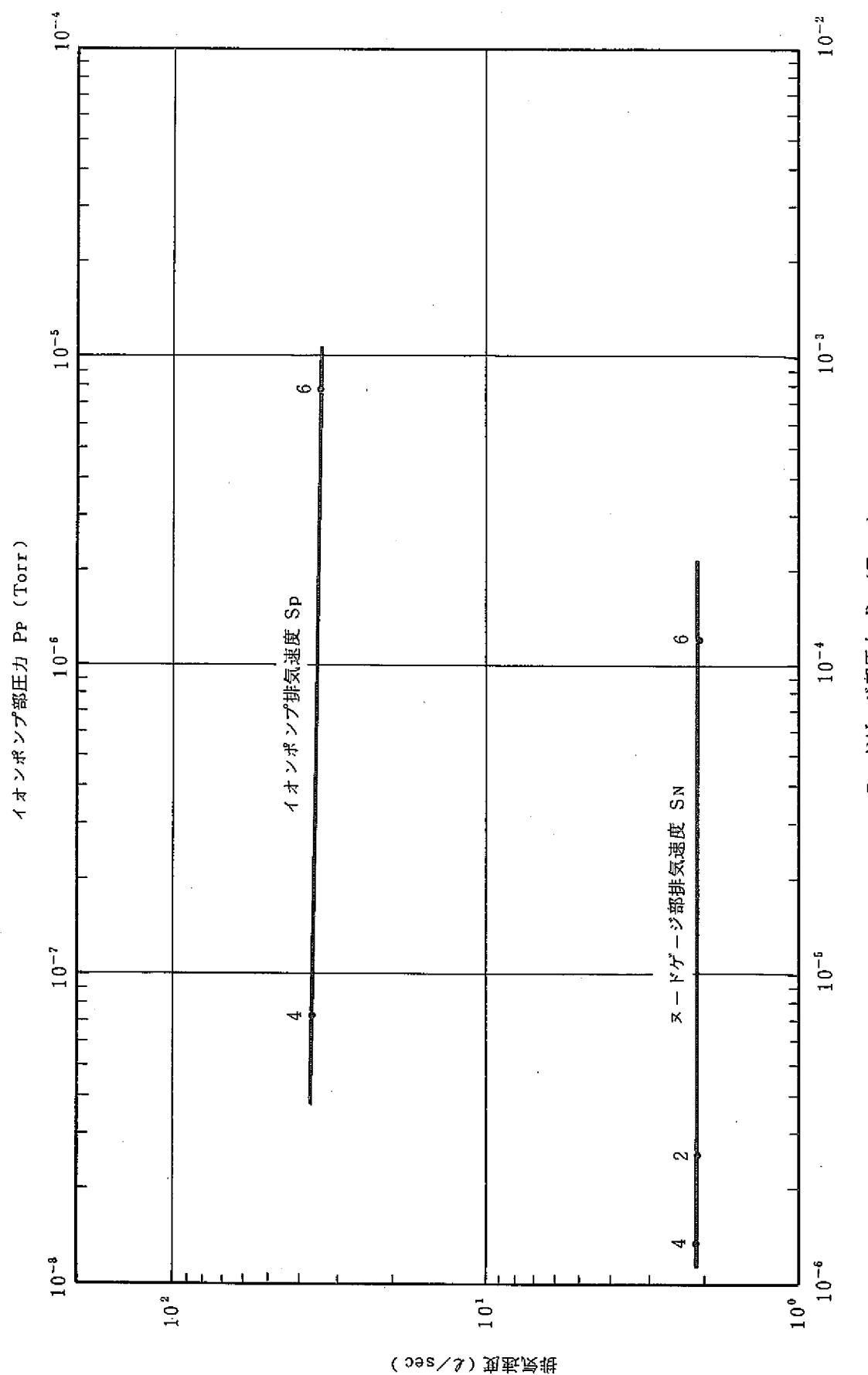


図 2・9 イオンポンプ部およびヌードゲージ部排気速度の圧力依存性

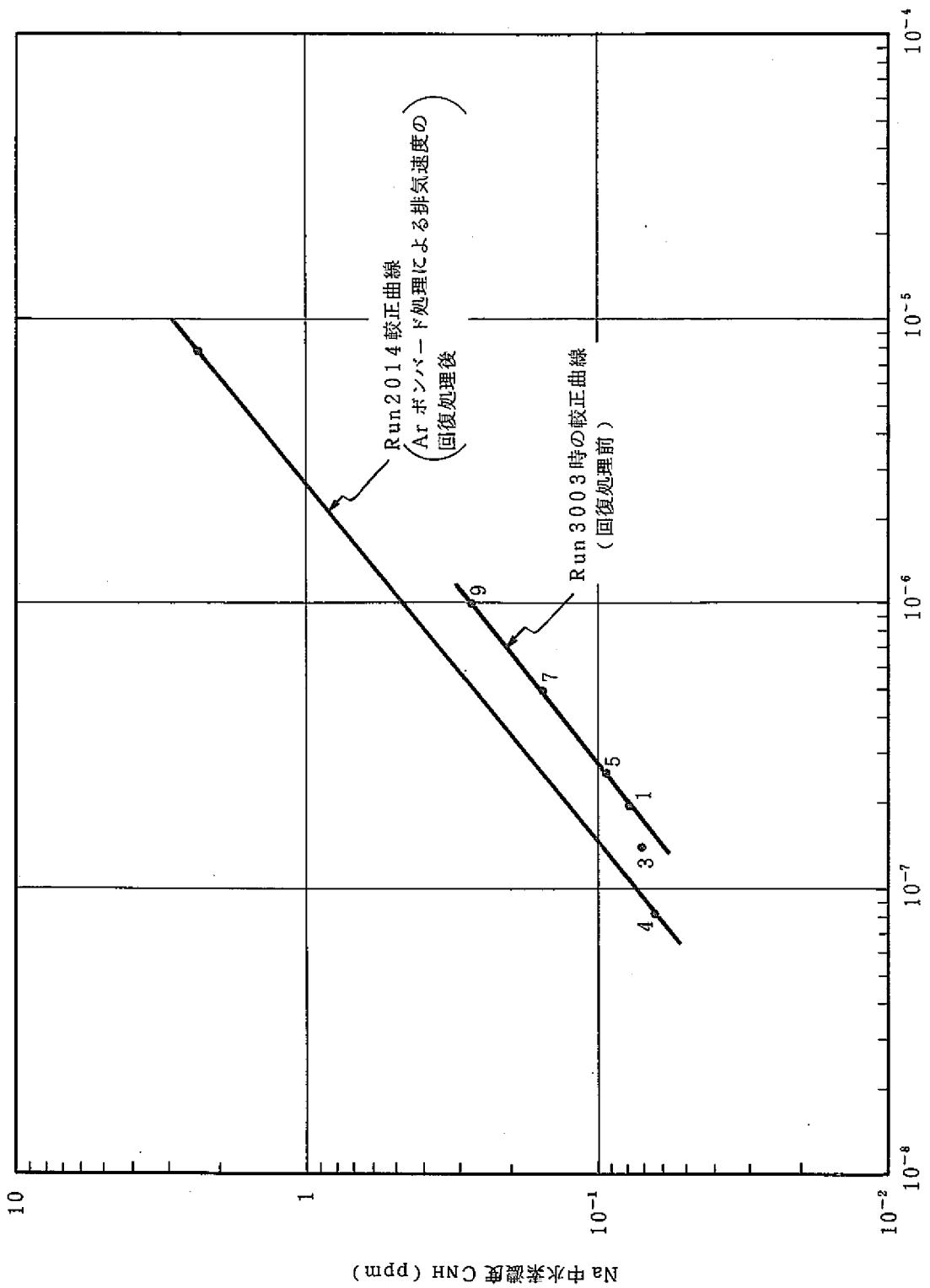


図 2・10 Ar イオンポンプ処理の較正曲線に及ぼす影響

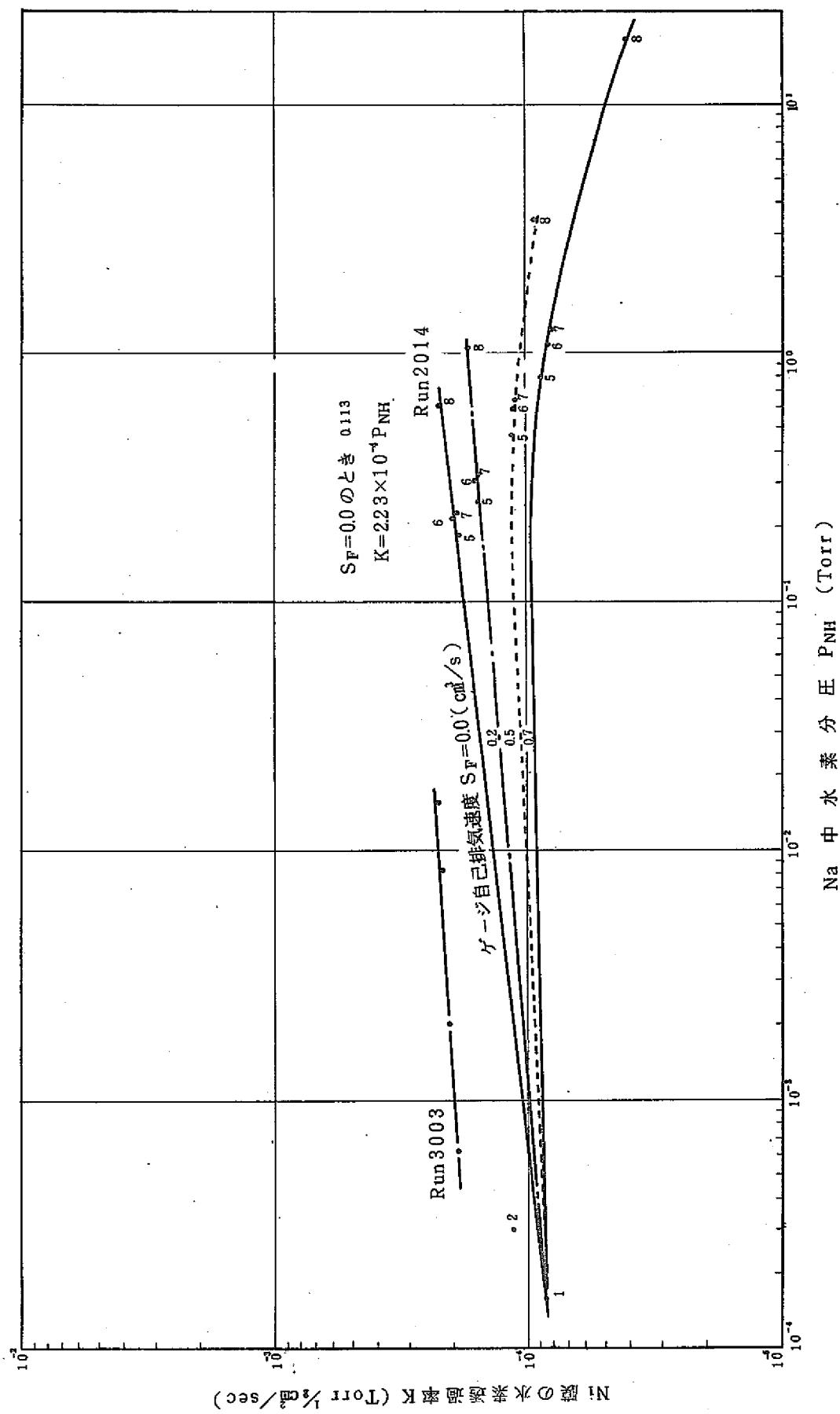
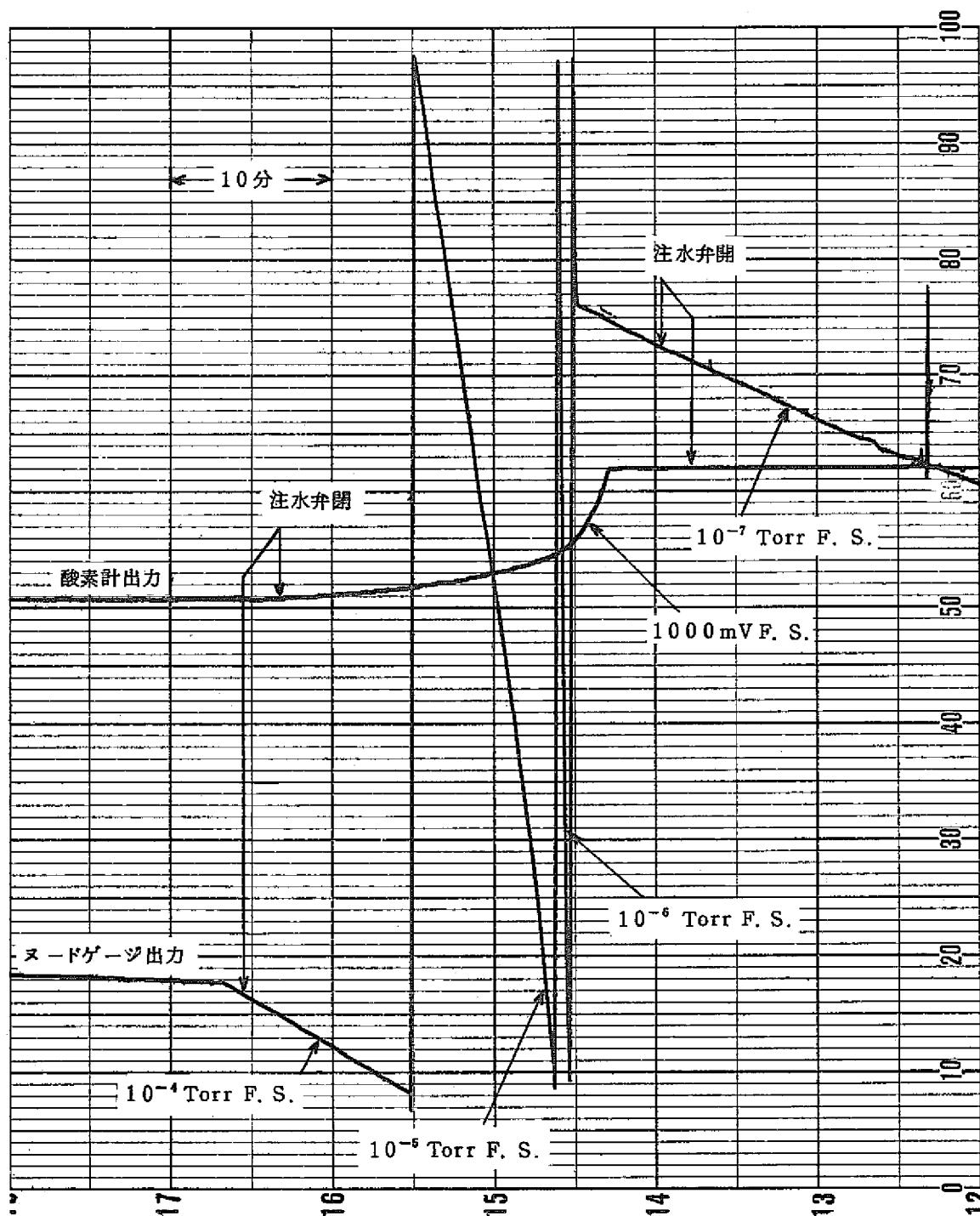


図 2・11  $P_{\text{NH}}$ ,  $S_F$  の  $K$  に及ぼす影響 (Ni 膜温度 500 °C)



試験番号 2014 (54年1月12日実施)  
 注水率 約 0.03 g/sec  
 Na 湿度 480 °C  
 注水弁閉時間 25分41秒  
 主Na流量 200ℓ/min

← 時間

図 2・12 O-H モジュール・リーク検出計の水注入時応答  
 (オリフィス付)

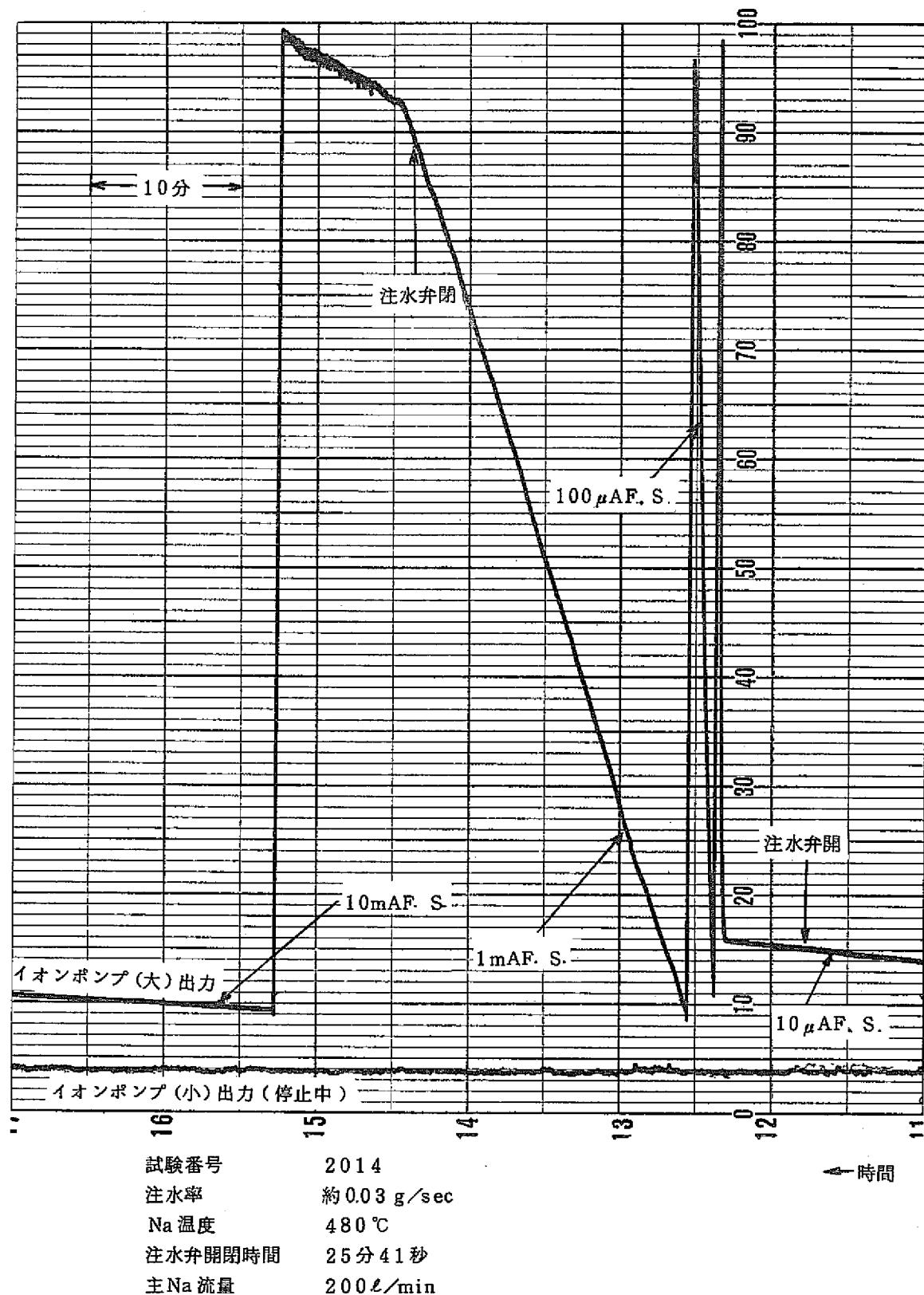
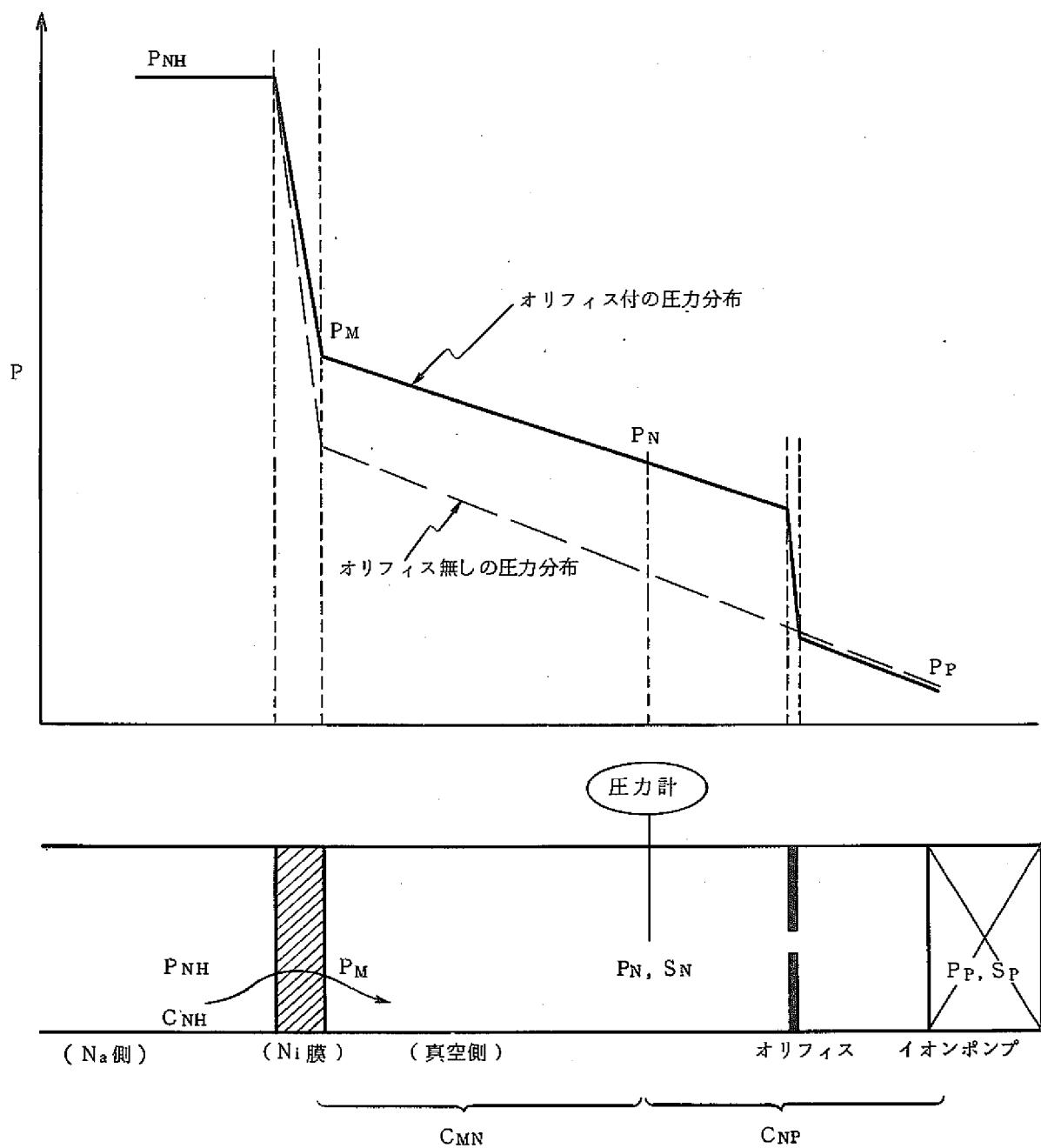


図 2・13 PNC型 Na 中水素計 2号機 MK III の水注入時応答



$P_{NH}$  : 水素分圧

$C_{NH}$  : 水素濃度

$P_M$  : Ni 膜部圧

$P_N$  : 圧力計部圧力

$S_N$  : 圧力計部の排気速度

$P_P$  : イオンポンプ部圧力

$S_P$  : イオンポンプの排気速度

$C_{NP}$  : 圧力計とポンプ間のコンダクタンス

$C_{MN}$  : Ni 膜と圧力計間のコンダクタンス

図 2.1.4 オリフィス付 Na 中水素計動的平衡状態図

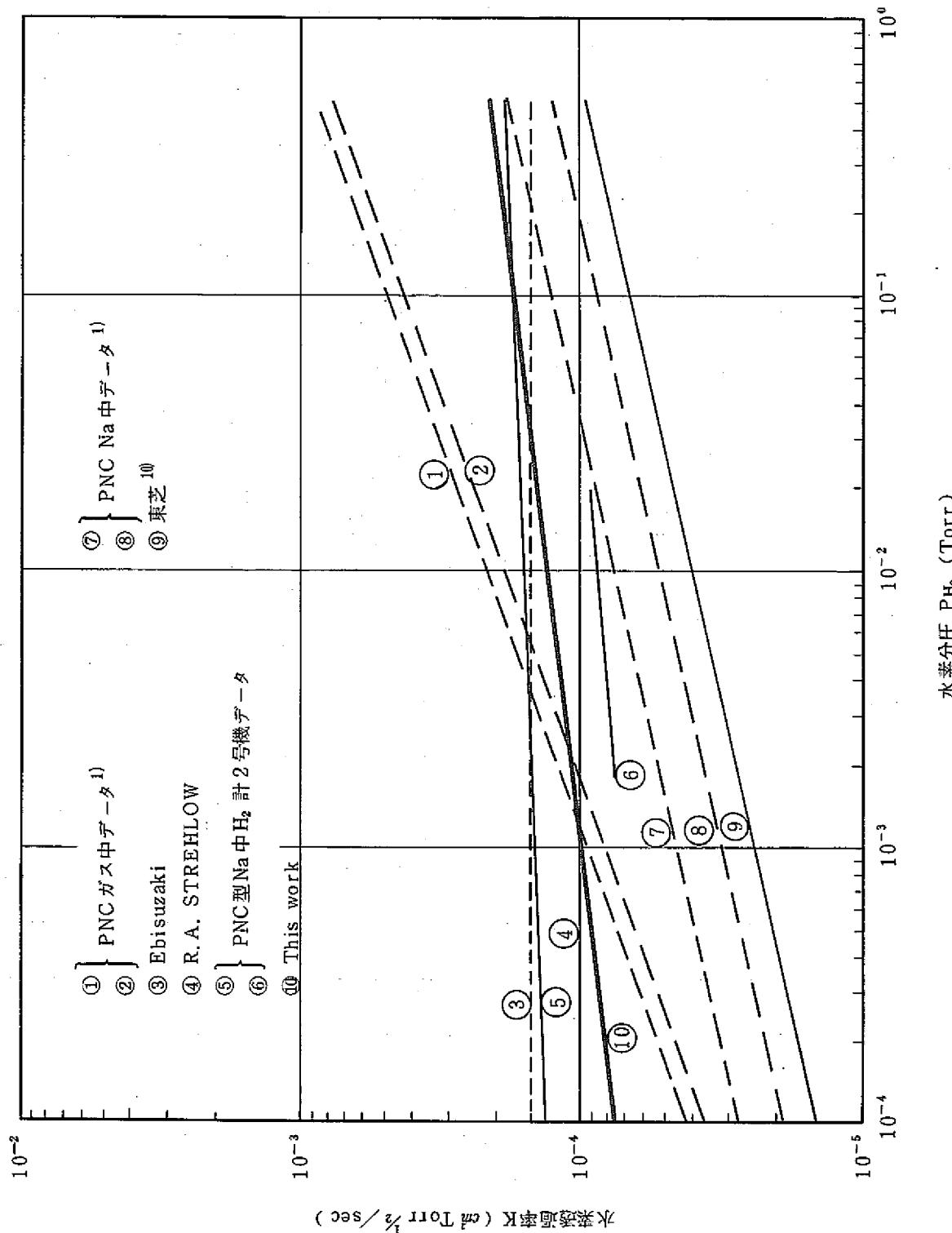
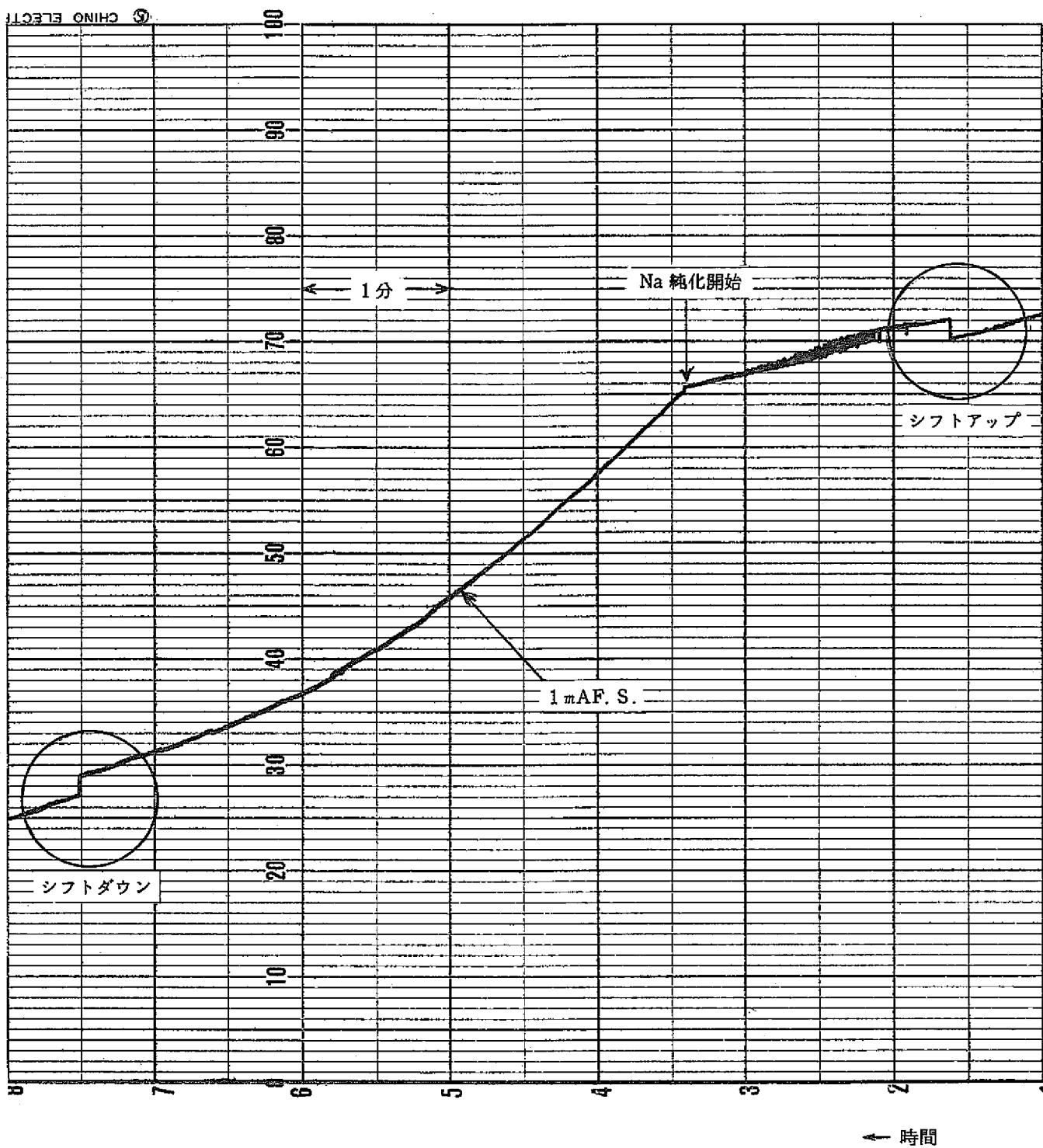


図 2・15 低圧力領域における Ni 膜の水素透過率



第5回微小リーク試験(52年9月1日)

PNC型Na水素計2号機MK-II

図2・16 イオンポンプの突変的ドリフト現象

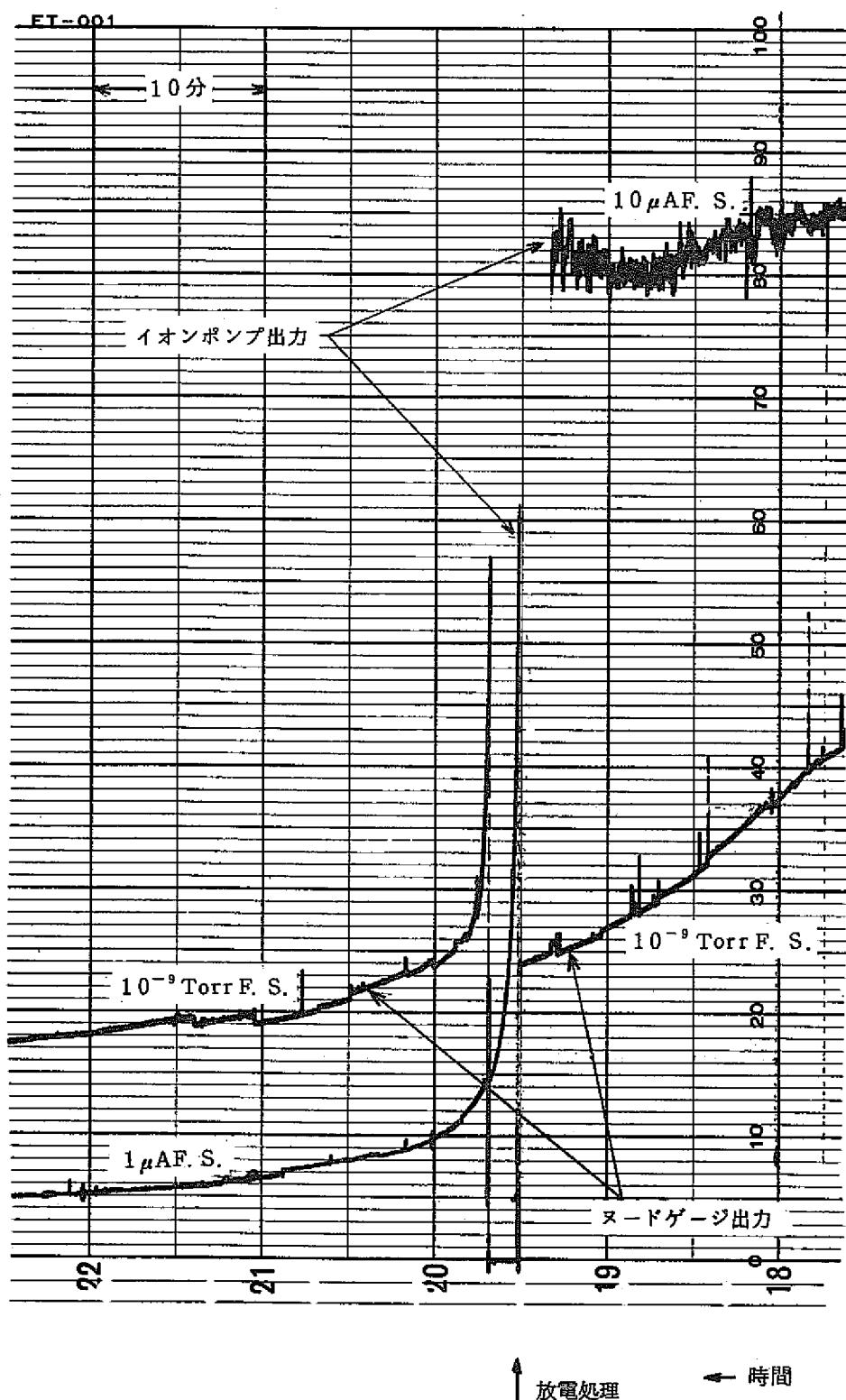


図 2・17 イオンポンプの漏電に対する放電処理の効果

### 3. オリフィス付Na中水素検出計の最適設計検討

本章は第2章で多くの長所が確認されたオリフィスの効果をPNC型Na中水素計2号機MK-IIIタイプに適用して、本水素計イオンポンプの排気速度回復処理時期をも考慮した場合の、Ni膜面積Aおよびオリフィスコンダクタンス値 $C_F$ 等の最適値を検討したものである。

#### 3.1 設計基本方針

本設計は従来の基本方針<sup>1)</sup>である下記(1)～(3)を基にし、さらに(4)を加えて検討した。

- (1) 実プラント（具体的にはもんじゅプラント）に組込み、リーク検出計としての機能をはたせること
- (2) SWAT-2 および 50 MWSGT Fに組込み、リーク検出計としての機能および水素挙動追跡のための濃度測定機器としての機能を有すること。
- (3) 本水素計はNa側も含め小型化をはかることを目標とすること。
- (4) 実プラントの運転条件において、少なくとも1年間の連続運転に対してイオンポンプの排気速度が劣化しないこと。

#### 3.2 測定範囲・感度の決定

本項は、基本方針(1)～(4)に従って決定されるものであるが、第10報<sup>1)</sup>によって既に決定されている。前項の基本方針(4)が加えられても、基本方針(1)および(2)から要求される本項の値に影響するものではないので、従来の値を踏襲する。これらの値が決定された詳細な理由は第10報<sup>1)</sup>に記述されているので、ここでは省略する。

##### 3.2.1 測定範囲

測定の上限値は、いわゆるウェステージ率が最大となると言われる水リーク率 $10 \text{ g/sec}^{12,13}$ の場合の初期ステップ応答の絶対濃度が測定できるようにとの考え方から10 ppmとする。

測定の下限値は、50 MWSGT Fおよびもんじゅプラントの主2次冷却系用コールドトラップ底部運転温度115 °Cおよび120 °Cの飽和水素濃度すなわち45 ppbを測定範囲下限に対応する濃度とする。

従って測定範囲は45 ppbから10 ppmとする。

##### 3.2.2 測定感度

測定感度および応答時間については、膜の水素透過率およびNa中水素濃度変動幅、真空

系のバックグランドノイズ等から評価すべきである。ここでは従来どうり<sup>3)</sup>、系内水素濃度バックグランド値に対し±10%のステップ変化が膜部に生じた場合10~30秒内にその変化が可能であることを目標感度とする。

### 3.3 最適設計のための検討

$A$ および $C_p$ を決定する上で重要な値となってくる膜厚は従来<sup>3)</sup>と同一の0.5 mmとした。さらに検討すべき重要な値は膜の水素透過率 $K$ である。

#### 3.3.1 K値の考察

今までに測定されたNi膜の500°CのK値を図3.1に示す。図3.1には内外国のデータとともに、最近のPNC型Na中水素計2号機長期性能試験<sup>1)</sup>からのデータ2点(図中⑤、⑥)と、第2章のオリフィス付水素検出計からのデータ(図中⑩)の3点を示した。これら3点のNi膜はPNC型Na中水素計2号機のNi膜製造法に従って製作されたものであり、 $1 \times 10^{-4}$  Torr  $\frac{1}{2} \text{cm}^2/\text{sec}$  前後のバラツキである。本検討にはこの3点のデータだけを採用すれば充分であると思われるが、設計上は安全側に考えて、図3.1中の全Na中データを考慮することにする。つまり低濃度側では最小の、高濃度側では最大のK値を採用する。図3.1中の太い破線は以上のようにして決定した便宜的な曲線である。

- Na中水素分圧  $P_{NH} \geq 0.5$  Torr のとき、

$$K = 2 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

- Na中水素分圧  $P_{NH} \leq 0.5$  Torr のとき、

$$K = 2.41 \times 10^{-4} P_{NH}^{0.27}$$

この値を使うことによって、充分余裕のある設計となる。

#### 3.3.2 低濃度側からの考察(図3.2使用)

本項はバックグランドレベルの推定が重要である。超高電離真空計(ヌードゲージ)をセンサにした場合のバックグランド圧力は、真空側内壁からの放出ガス量によって規定される。水素計製造時のベーカーアウトは $1 \times 10^{-11}$  Torr  $\cdot \ell/\text{cm}^2/\text{sec}$  のガス放出率になるまで実施することが、現在製造方法として確立されている。従って、この到達ガス放出率 $q^*$ 、真空壁面積 $A_v$ およびヌードゲージ部の実効排気速度 $S_N$ とすれば、その時のバックグランド圧力 $P_N$ は次式から求まる。

$$P_N = q^* \cdot A_v \cdot S_N \quad (3.1)$$

$A_v$ を530 cm<sup>2</sup>(PNC型Na中水素計MK-IIIの実績値<sup>3)</sup>)とした時の $P_N - S_N$ をバックグ

ランド圧力曲線として図3.2に示した。図3.3に $A_v$ と $S_N$ がバックグラウンド圧力に及ぼす影響を参考的に示した。また図3.2には排気速度とNi膜面積との比 $S_N/A$ をパラメータにして、Na中水素濃度 $C_{NH}$ とNa中水素分圧 $P_{NH}$ とヌードゲージ部圧力 $P_N$ の関係も図示した。設計のベースとなるコールドトラップ底部温度115°Cのときの $C_{NH}$ に対応する $P_N$ は $S_N/A = 10 \sim 100$ の範囲で、 $3.5 \times 10^{-8} \sim 3.5 \times 10^{-7}$  Torrである(図3.2中の点線矢印)。これによりオリフィスコンダクタンスが $1 \ell/\text{sec}$ 以上であれば、 $S_N/A$ が100以下の範囲では $P_N$ はバックグラウンド圧力と比較して1~2オーダーも高い指示となり、充分なS/N比が得られる。

### 3.3.3 高濃度側からの考察(図3.4使用)

図3.4は高濃度側における $C_{NH}-P_{NH}-P_N$ 曲線であり、図3.2と同様に $S_N/A$ をパラメータにしたものである。高濃度側の限界はヌードゲージあるいはイオンポンプの使用上限によって左右される。PNC型Na中水素計に使用されるヌードゲージはこの値が $1 \times 10^{-3}$  Torrであり、イオンポンプは $4.5 \times 10^{-4}$  Torrである。この値から判断すると、イオンポンプの方がクリティカルになるように思われるが、オリフィス付水素計の場合は圧力分布が図2.14のようになるため、ヌードゲージ部の方が常時イオンポンプ部よりも圧力が1桁以上高い。このため高濃度側の測定限界はヌードゲージの $1 \times 10^{-3}$  Torrによって定まる。これに対応する $C_{NH}$ は図3.4によると、 $S_N/A$ が10以上であれば第3.2.1項の測定範囲である10 ppmを充分に満足する。

### 3.3.4 イオンポンプ回復処理からの考察

イオンポンプ排気速度の回復処理は水素の総排気量が $500 \sim 1000 \text{ Torr} \cdot \ell$ に達した時期が良いということがイオンポンプ経時特性試験で報告されている<sup>9)</sup>。イオンポンプの排気速度の劣化は即較正曲線に影響してくるため、イオンポンプの有効運転時間はこの値によって制限される。保守の観点から、この $500 \text{ Torr} \cdot \ell$ は時間に換算して少なくとも1年以上ある必要があり、またそのように運転時のイオンポンプ部平均圧力を規定しなければならない。イオンポンプの排気速度 $33 \ell/\text{sec}$ 、1年間 $365 \times 24 \times 3600 \text{ sec}$ の条件で運転された場合に $500 \text{ Torr}/\ell$ 以下の総水素排気量にとどめるにはイオンポンプ部の平均運転圧力 $P_P$ は $500 / 33 / 365 \times 24 \times 3600 = 4.8 \times 10^{-7}$  Torr以下である必要がある。

次に、もんじゅプラント2次冷却系の1年間における平均的な $C_{NH}$ 値の見積りが必要である。この値を正確に評価することは現在かなり困難であるが、2次冷却系のNa純化運転の変遷は次の3段階に分類されると考える。

- (1) 製作中に生じた系内の初期汚れをNa洗浄するための、SGに通水しないNa等温運転で

あり、Na温度は200 °Cから徐々に350 °Cまで昇温される。この期間のC<sub>NH</sub>は、1MWSGおよび50MWSGの運転経験<sup>14,15)</sup>では最高約3 ppm(プラグ温度240 °C)にまでなることが予想されるが、最終的にはC<sub>NH</sub>が約50 ppb(プラグ温度120 °C)程度になるまで純化される。また、この期間を利用して各Na中水素計の較正試験を実施し、較正曲線が作成される。

- (2) (1)の段階が終了し、系内のバックグラウンド水素濃度が充分低下した時点でSG内に通水され、定格運転に入る。SGの初期運転時には伝熱管からの拡散水素量が大きいため、系内の水素濃度は750 ppb(プラグ温度200 °C)程度になるであろうとの報告<sup>16)</sup>がある。Royらの調査結果では、この初期の大きな拡散水素量( $7 \sim 8 \times 10^{-11} \text{ gH}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )は初期通水後2,000時間程継続すると報告している<sup>17)</sup>。
- (3) 通水して2,000時間以降は、拡散水素量は減少して $1.8 \sim 2.2 \times 10^{-11} \text{ gH}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ に安定する<sup>17)</sup>。コールドトラップの不純物捕獲能力にも依存するが、もんじゅ製作準備設計(II)ではこの時の系内バックグラウンド水素濃度は170 ppbになると計算されている。以後定期検査で停止するまではこの濃度で連続運転される。

以上(1)の期間をおおよそ3週間と推定し、1年間におけるC<sub>NH</sub>の平均値を算出すると、約500 ppbである。

C<sub>NH</sub>が500 ppbのときにP<sub>P</sub>が前述の $4.8 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ 以下になるようにするために、次の動的平衡状態の基本式に従ってNi膜面積Aが制限される。このときに使用するNi膜透過率Kは最大値の $2 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$ 一定値を採用するのが最も安全側の見積りである。

基本式

$$C_{NH} = K_H \cdot \frac{d}{K} \cdot \frac{S_P}{A} \cdot P_P$$

上式に

$$C_{NH} = 0.5 \text{ ppm}$$

$$K_H = 5.04 \text{ ppm/Torr}^{1/2} \text{ (at } 500 \text{ °C)}$$

$$K = 2 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$$

$$d = 0.05 \text{ cm}$$

を代入すると、Aは40 cm<sup>2</sup>である。従って、保守の観点からはAの値は40 cm<sup>2</sup>以下であることが望しい。

### 3.3.5 オリフィスコンダクタンスの考察

オリフィスの効果を有効的にするために、ヌードゲージ部の実効排気速度S<sub>N</sub>がイオンポンプ部の排気速度S<sub>P</sub>の $1/10$ 以下になるようにオリフィスコンダクタンスを決定する必

要がある。 $S_p$ は $33 \ell/\text{sec}$ であるので、 $S_N$ は $3.3 \ell/\text{sec}$ 以下とする。また $C_{NH}$ が $45 \text{ ppb}$ のときの対バックグラウンド比を大きくするために、図3.2より $S_N$ は $1 \ell/\text{sec}$ 以上が望ましい。

図3.5はオリフィスコンダクタンス $C_F$ が $1, 2$ および $3 \ell/\text{sec}$ のときに、 $S_p$ の低下が $S_N$ に及ぼす影響を調査したものである。これらは $\frac{1}{S_N} = \frac{1}{C_F} + \frac{1}{S_p}$ の関係式から算出された。 $S_p$ が低下して半分の能力になった時でも、 $S_N$ の受ける影響は $C_F$ が $1 \ell/\text{sec}$ の場合約 $5.7\%$ の低下であり、 $C_F$ が $3 \ell/\text{sec}$ の場合約 $15.4\%$ の低下にとどまり、充分オリフィス効果が働くことになる。

### 3.3.6 決定仕様

以上3.3.1～3.3.4項の考察により、次のことが明らかとなった。

- (1)  $S_N/A$ の有効範囲は $10 \sim 100$ である。
- (2) イオンポンプの寿命の観点から言えば、 $A$ は $40 \text{ cm}^2$ 以下であることが望ましい。
- (3)  $C_F$ は $S_N$ が $1 \sim 3.3 \ell/\text{sec}$ であれば、オリフィスの効果が有効である。

これらの結果をまとめるために、 $S_N/A$ をパラメータにとった $S_N$ と $A$ の関係を図3.6に示した。図中の点線は上記(1), (2), (3)の制限条件を考慮した境界線である。この境界以内にあれば、 $S_N$ と $A$ の組合せは測定範囲 ( $C_{NH} = 45 \text{ ppb} \sim 10 \text{ ppm}$ ) と寿命 (1年間は排気速度が低下しない) の要求を満足するであろう。

リード検出計として推しよう値をあげるとすれば、低濃度側の $S/N$ 比を重要視して次の値が最適と思われる。

$$A = 40 \text{ cm}^2$$

$$S_N = 1 \ell/\text{sec}$$

(従って、 $S_N/A = 25$ )

現在のPNC型Na中水素検出計2号機は、Ni膜面積が $150 \text{ cm}^2$ であり、長さは約 $225 \text{ mm}$ である。このNi膜構造図を図3.7<sup>3)</sup>に示す。図に示されているようにフランジとNi膜とが接触する約 $30 \text{ mm}$ の部分は、真空的にデッドゾーンとなり水素ガスの透過にはほとんど寄与していない。しかもベーキング時には厚肉のフランジ部がout gasの主な源となり、ベーキングに多大の時間を費やす原因になる可能性がある。従ってこれを改良するためにフランジ部とNi膜とを切り離し、Ni膜の有効面積を前述の $40 \text{ cm}^2$ にしたのが図3.8である。これによって、Ni膜円筒の長さは約 $\frac{1}{4}$ に短縮され、全体の真空壁面積が減少することから同じベーキング処理であれば、壁面からの放出ガスによるバックグラウンド圧力も約 $\frac{1}{4}$ に低下させることができる。

$S_N$ を $1 \ell/\text{sec}$ にするためのオリフィス口径 $d$ を求める。 $S_p$ は $33 \ell/\text{sec}$ であるので、イオンポンプとヌードゲージ間のオリフィスも含めた真空配管の総合コンダクタンス $C_T$ は、

$1/S_N = 1/C_T + 1/S_P$  から求められ、 $C_T$  は 1.03 にしなければならない。オリフィスを含めない真空配管だけのコンダクタンス  $C_P$  は附録(I)により算出されており、 $102 \ell/\text{sec}$  である。従ってオリフィスコンダクタンス  $C_F$  は、 $1/C_T = 1/C_F + 1/C_P$  の式から、 $C_F$  は 1.04 となる。このときのオリフィス口径  $d$  は、(2.2) 式から逆算して求められる。

$$C_F = 3.49 R d^2 \quad (2.2)$$

オリフィスの肉厚  $t$  は 2  $\mu\text{m}$  とする。R は  $t/d$  の関数<sup>8)</sup>で表わされるため、R と  $d$  の繰返し計算をしなければならない。この結果、 $t/d$  が 0.714 のときに R は 0.408 となり、 $d$  は 2.7  $\mu\text{m}$  となる。

これらの Ni 膜面積およびオリフィスを PNC 型 Na 中水素計に適用した場合の Ni 膜部設計仕様および真空系設計仕様を表 3.1, 3.2 に示す。

#### 4. まとめ

O-Hモジュール水素計の真空部を改善し、オリフィスを付けた場合の水素計の特性を評価した。またもんじゅSGに使用されるPNC型Na中水素計2号機の真空部に対して同様にオリフィスを適用し、イオンポンプの寿命を考慮した場合のNi膜面積およびオリフィスコンダクタンスの最適値を検討した。

得られた結論は次の通りである。

- (1) オリフィスを付けた結果、排気速度およびNi膜の水素透過率を正確に評価できた。
- (2) Arボンバード処理後のイオンポンプ排気速度は能力の最大まで回復した。
- (3) Ni膜の水素透過率Kは従来の値と比較して圧力依存性が小さく、それらの平均値は $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ Torr}^{1/2} / \text{sec}$ 前後であった。
- (4)  $C_{\text{NH}} - P_N$ 較正曲線が $1/2$ 乗則に合わないのは、Kの圧力依存性に主要因があることを明白にした。
- (5) オリフィス付水素計の動的平衡運転から考えられる設計仕様決定特性図として“検出特性図”を作成した。同特性図の使用によって、オリフィス付水素計がイオンポンプの寿命をも考慮した場合に要求されるNi膜面積、オリフィスコンダクタンスの有効範囲を決定することが可能である。
- (6) 上記の検出特性図から推しうる値を決定し、これをPNC型Na中水素計2号機の動的室に適用し、その設計仕様を明示した。この結果Ni膜面積を相当縮小することができた。これによってイオンポンプ排気速度の劣化による較正曲線の変化を防ぐことができる。今後に残された課題としては、Ni膜の水素透過率の経年変化特性を得ることであり、今後の内外の多くの研究成果が期待される。

## 5. 参考文献

- 1) 鐘ヶ江, 池本, 橋口, 堀 “Ni膜-イオンポンプ型Na中水素検出計におけるNi膜および真空部最適設計法” (小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第10報)  
SN941 76-30 (1976).
- 2) 鐘ヶ江, 池本, 大後, 井上, 堀 “PNC型Na中水素検出計1号機” (小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第14報) SN941 78-85 (1978).
- 3) 鐘ヶ江, 池本, 大後, 井上, 堀 “PNC型Na中水素検出計2号機-動的室・静的室分離型” (小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第15報) SN941 78-91 (1978).
- 4) 法月, 小杉 “拡散膜を利用した濃度測定方法” 昭和52年5月20日特許願 No.445.
- 5) 宮地, 佐藤他, “水リーク検出システムの開発(Ⅲ)Na中水素計の改良” 原子力学会 昭和53年春
- 6) 根井, 大内, 大島, 堀 “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).
- 7) 根井, 大内, 氏原, 大島, 井上, 堀, 中山 “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).
- 8) 中川, 小宮 “真空装置” 真空技術講座5 日刊工業新聞社
- 9) 八木, 越田, 大輪, 君島 “イオンポンプ経時特性試験” PNC-SJ299 (1978).
- 10) 50MWSGT隔膜式カバーガス中水素検出計 決定図書 東芝 S 51.12.
- 11) 近刊予定 “PNC型Na中水素検出計長期性能試験” (リーク検出計開発試験第2報)
- 12) 根井, 氏原, 大内, 橋口, 大島, 井上, 堀 “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) SN941 74-45 (1974).
- 13) 鐘ヶ江, 橋口, 池本, 大内, 井上, 堀 “ウエステージに対する距離の効果と関する試験とその検討およびリーク孔拡大 (セルフウエステージ) に関する一考察 (小リーク・ナトリウム反応試験研究 第7報)” SN941 76-27 (1976).
- 14) 山田, 八木沢, 永瀬他 “1MW蒸気発生器試験施設運転記録-第1次1MW蒸気発生器試験- N952 74-07 (1974).
- 15) 高橋, 法月, 岡田他 “50MW蒸気発生器試験施設運転報告書” SN941 75-72 (1975).
- 16) 東芝KK “もんじゅ調整設計(I)設計書” O/# 1964020  
ZJ201-74-25B(8) (1974).

表 3.1 P N C 型 Na 中水素計（オリフィス付）Ni 膜部設計仕様

番号	項目	単位	仕様
1	設計 温 度	°C	500
2	設計 圧 力	kg/cm <sup>2</sup> g	10
3	材 質	—	Nickel 201相当
4	形 状	—	内圧円筒片持型
5	厚 さ	mm	0.5
6	面 積	cm <sup>2</sup>	40 (動的室) 150 (静的室)
7	基 数	基	動的室、静的室用各々1基づつ
8	運 転 温 度	°C	500 ± 1

表 3.2 PNC型Na中水素計(オリフィス付)真空系設計仕様

No.	項目	単位	仕様
1	基本系統		動的平衡室, 静的平衡室分離型 イオンポンプ2基を有する2排気系 主要構成機器は以下のとおり (a) イオンポンプ 2基 (b) シュルツゲージ 1基 (c) 電離真空計 1基 (d) 止弁, 配管 一式
2	設計圧力	kg/cm <sup>2</sup> g	-1~10
3	設計温度	°C	保温のかぶる部分: 520 その他の部分 : 室温
4	イオンポンプ 型式		スパッタイオンポンプ
	排気速度	ℓ/sec	2および33
5	真空計測定範囲	Torr	シュルツゲージ: $10^{-5} \sim 3$ 電離真空計 : $10^{-10} \sim 10^{-3}$
6	オリフィス 口 径	mm	2.7
	幅	mm	2.0
7	真空系 容積	cm <sup>3</sup>	500以下目標
	表面積	cm <sup>2</sup>	350 "
	放出ガス率	Torr · ℓ / sec · cm <sup>2</sup>	上記条件にて $1 \times 10^{-11}$ 以下目標
8	真空計自己排気量	ℓ/sec	$4.5 \times 10^{-6}$ 以下目標

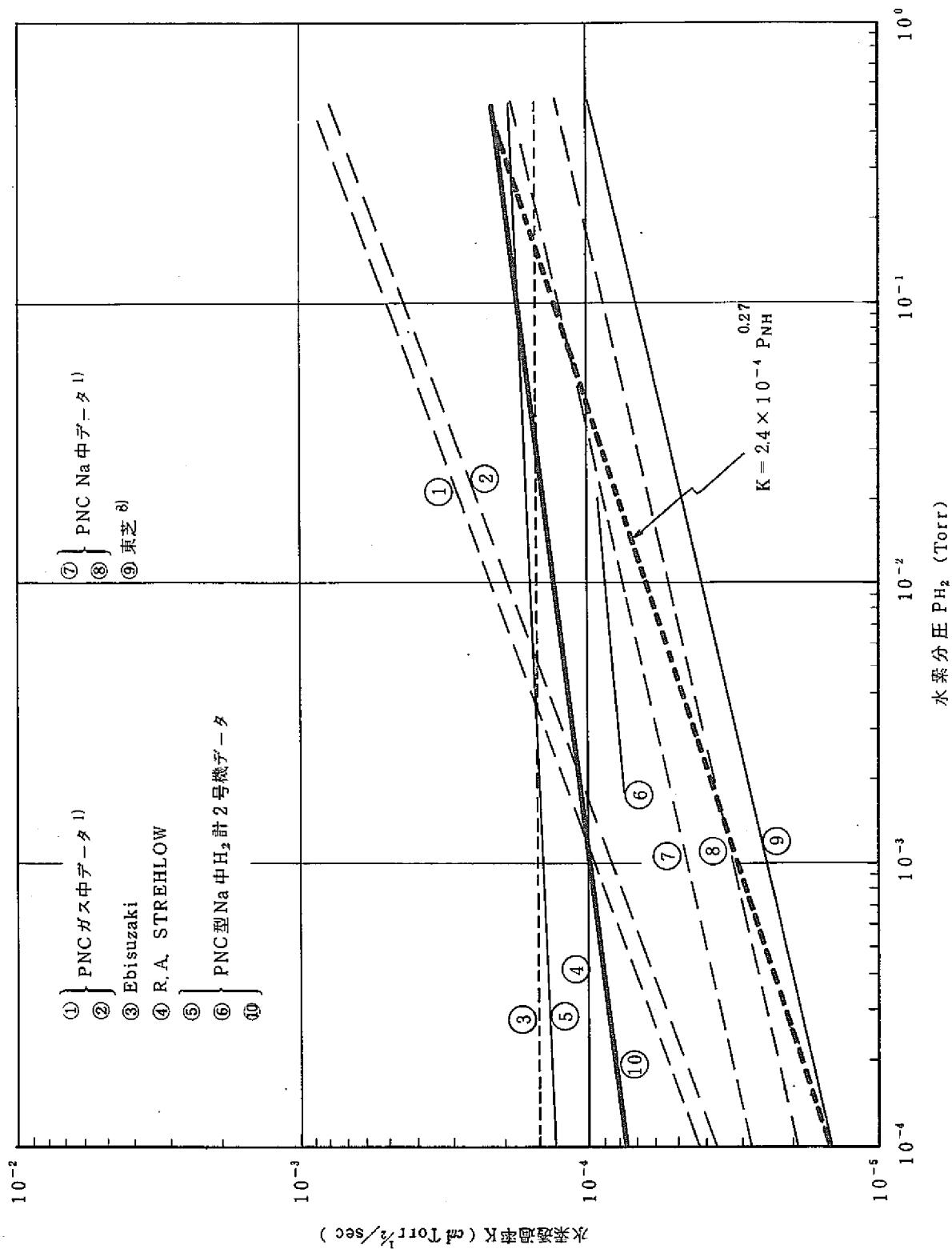


図 3・1 低圧力領域における Ni 膜の水素透過率

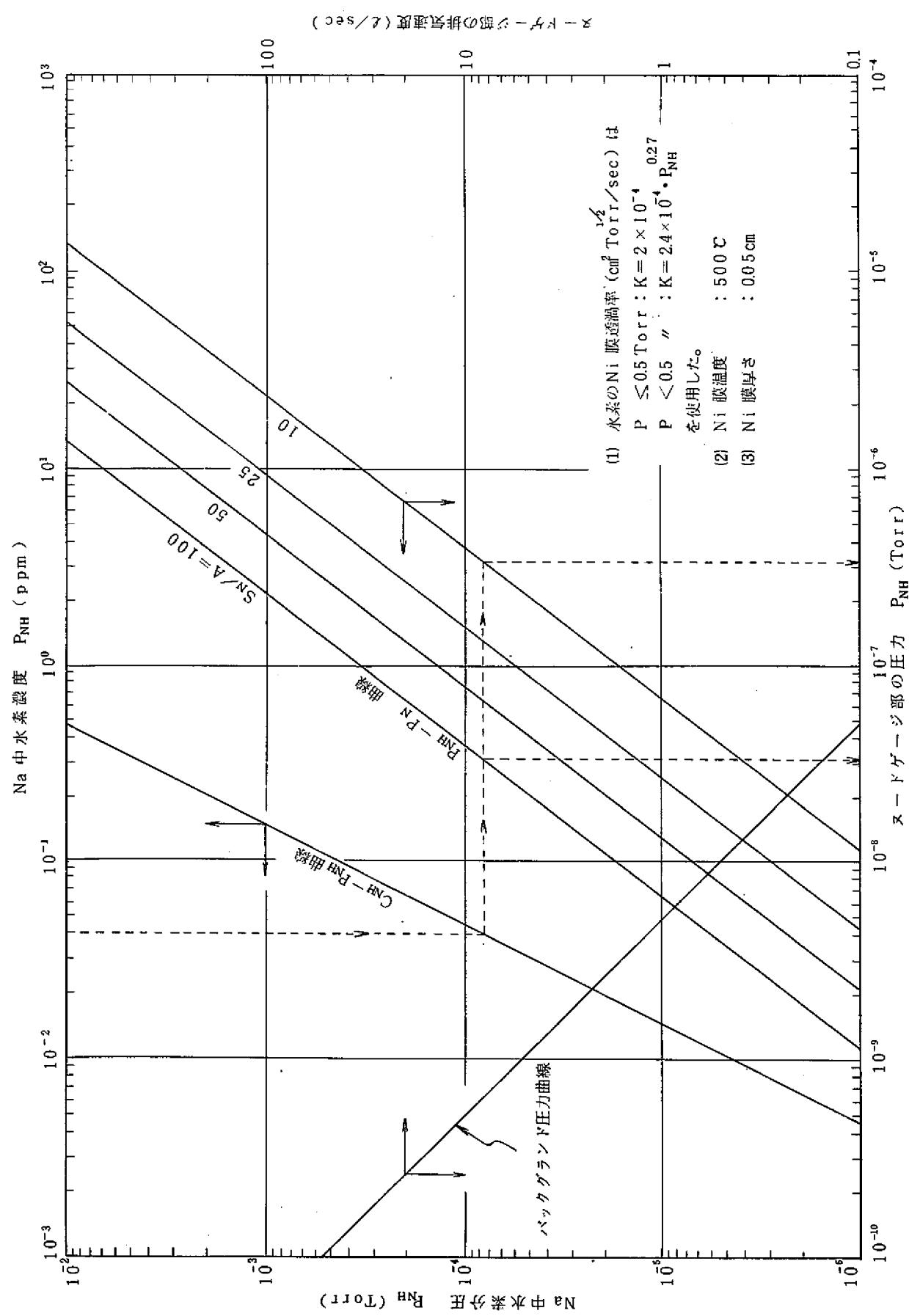
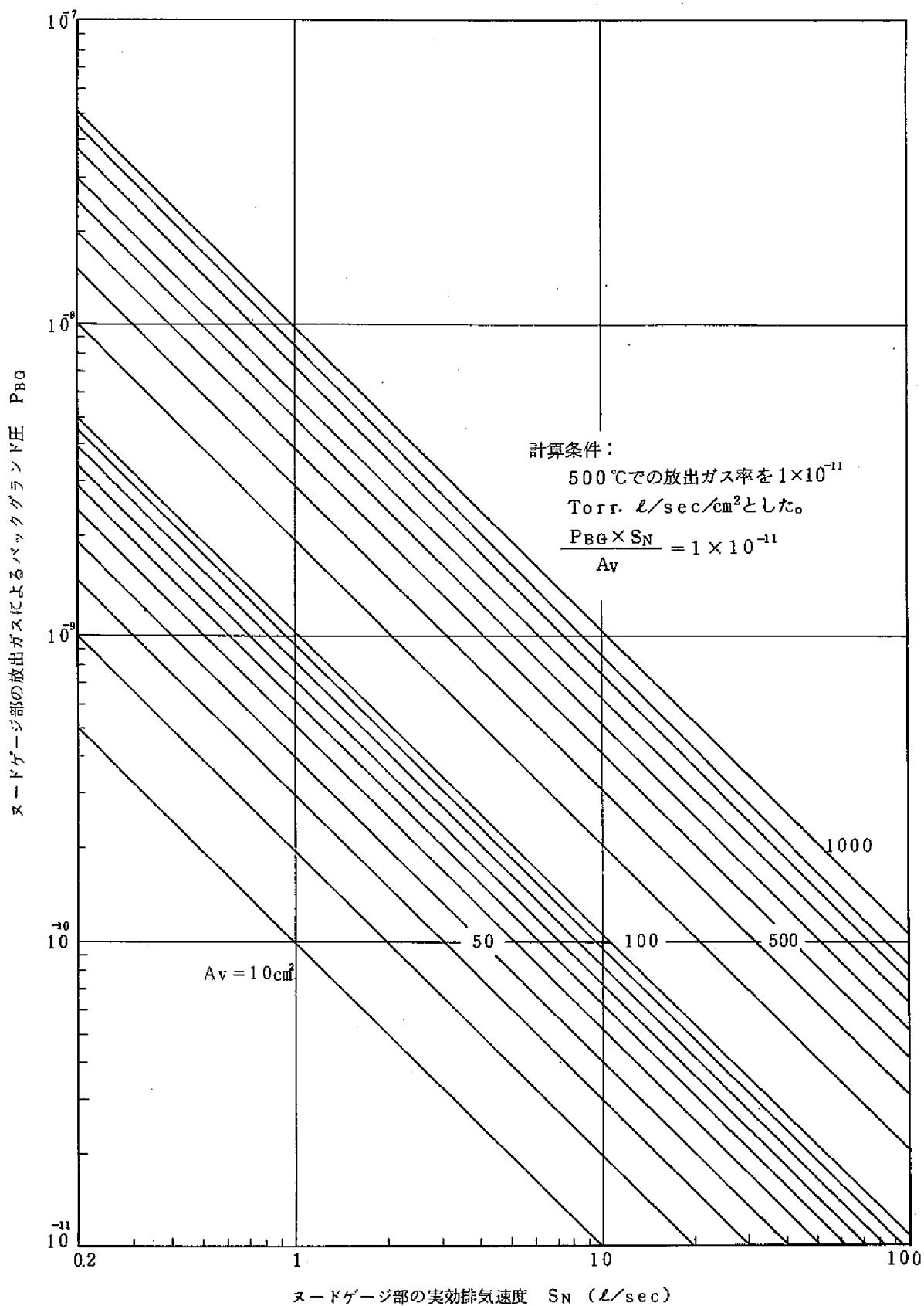


図 3.2 検出特性図（低濃度用）

図 3.3 真空壁の全面積  $Av$  と  $S_N$  がバックグラウンド圧力に及ぼす影響

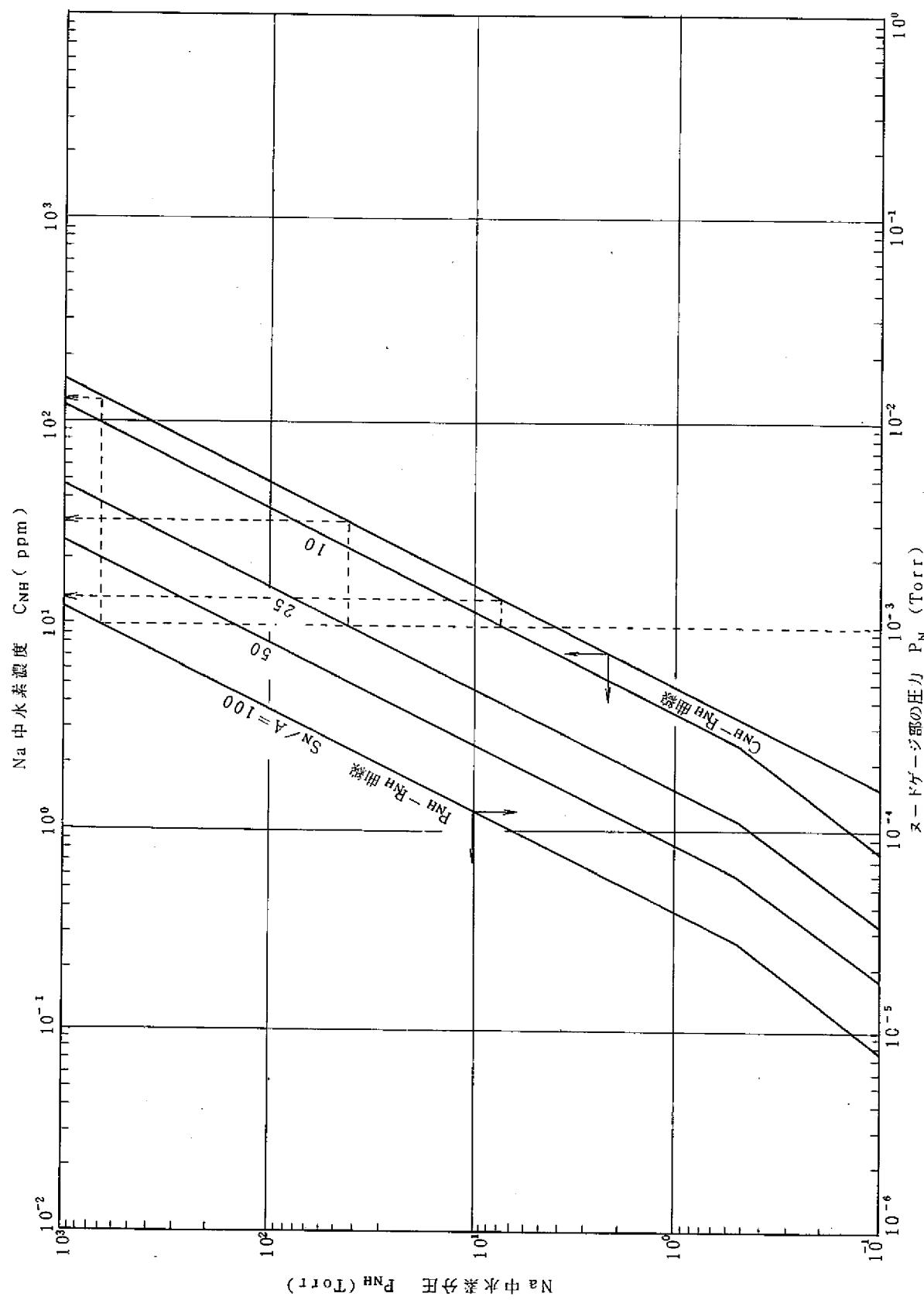


図 3.4 検出特性図（高濃度用）

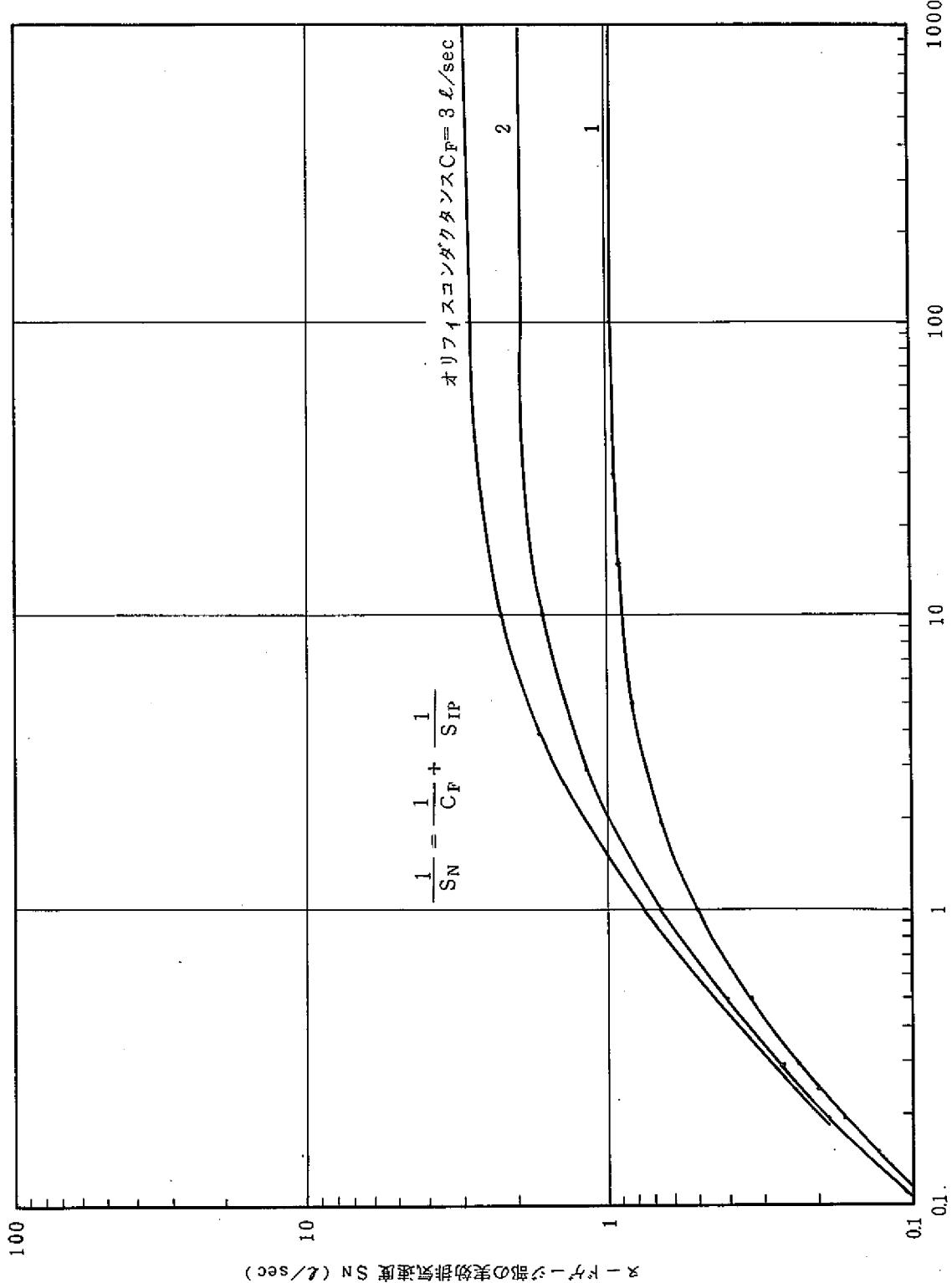


図 3・5 オリフィスコンダクタンスによる  $S_{IP}$  と  $S_N$  の関係

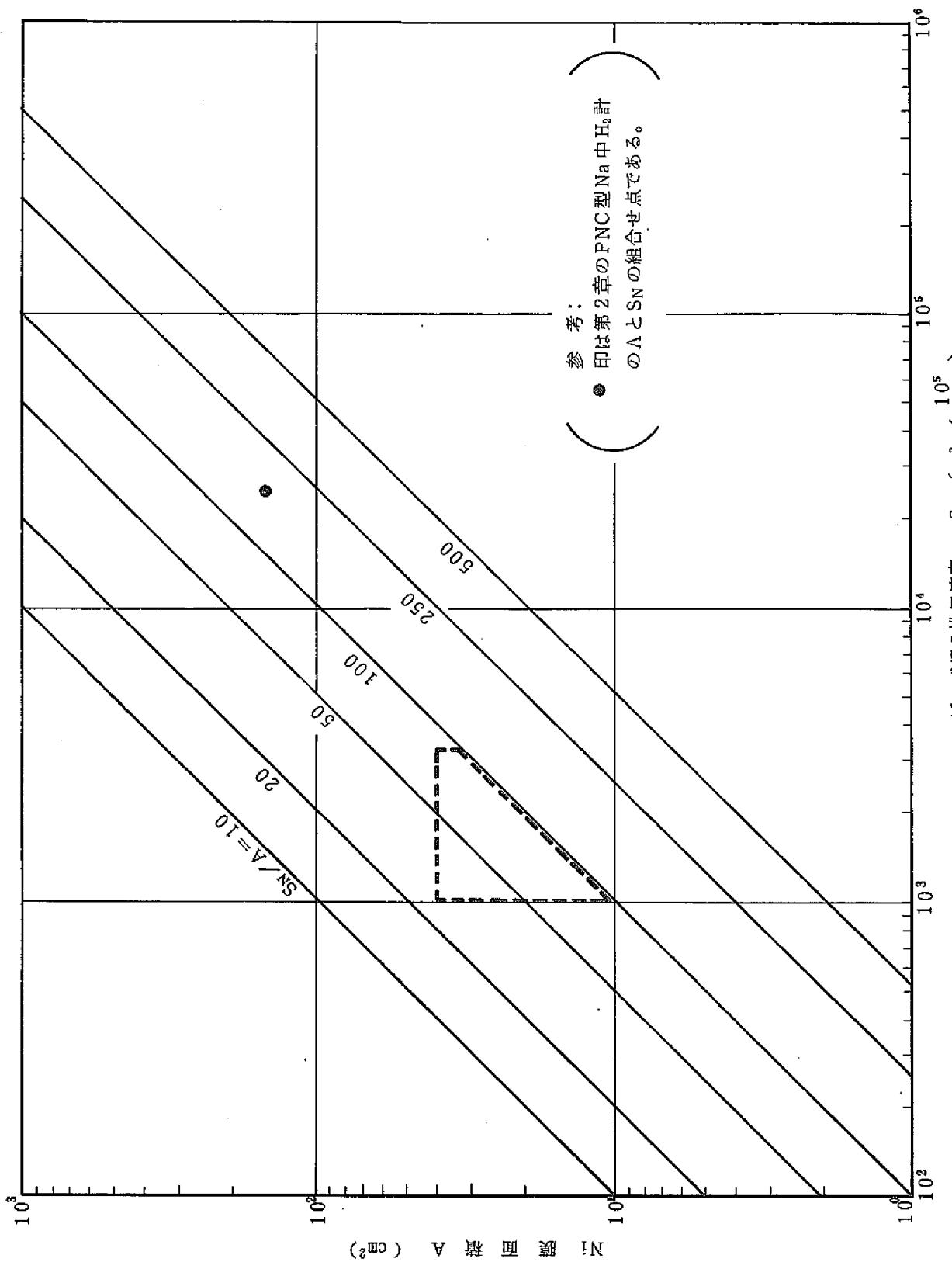


図 3.6 Ni膜面積とヌードゲージ部排気速度の有効範囲

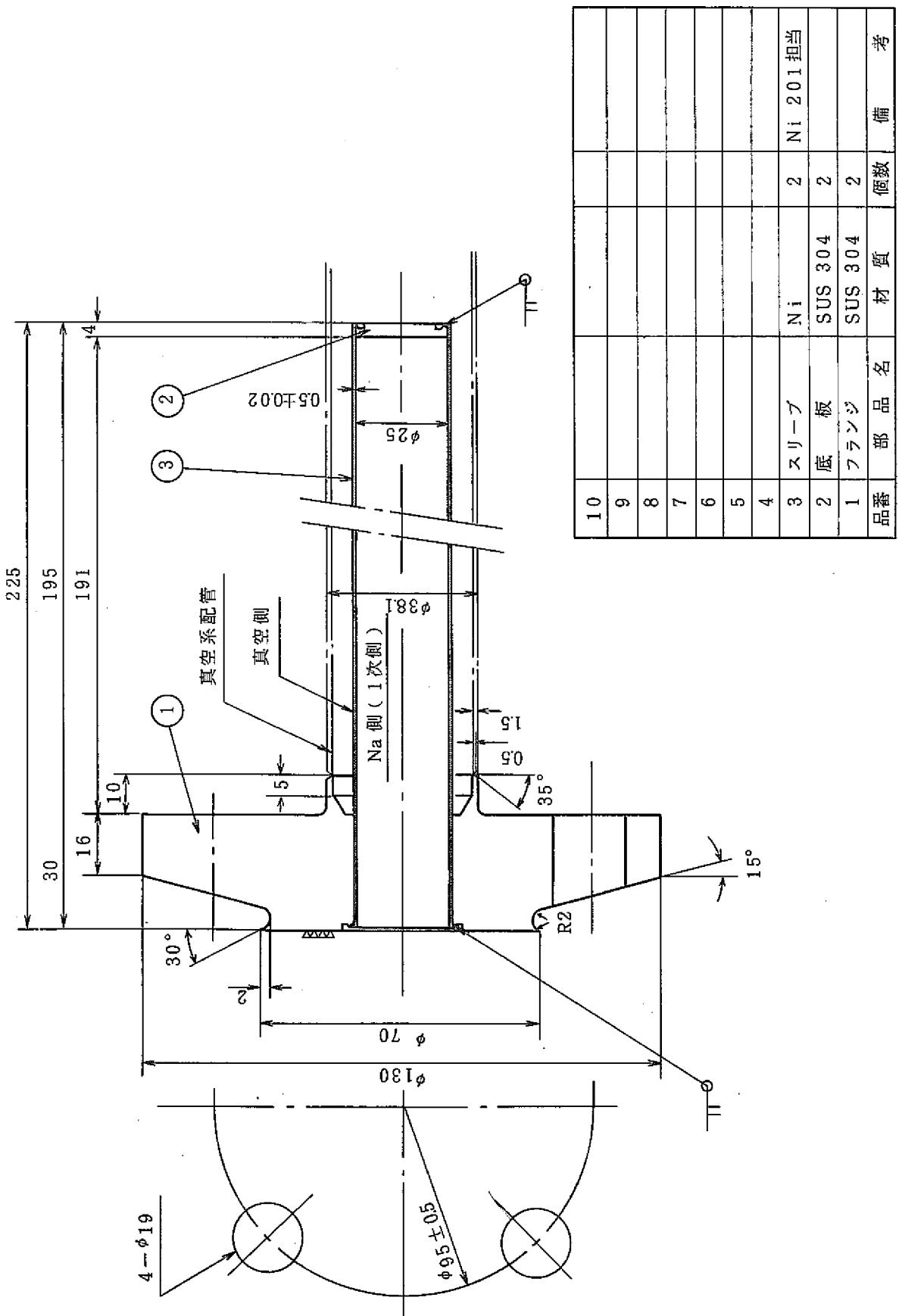
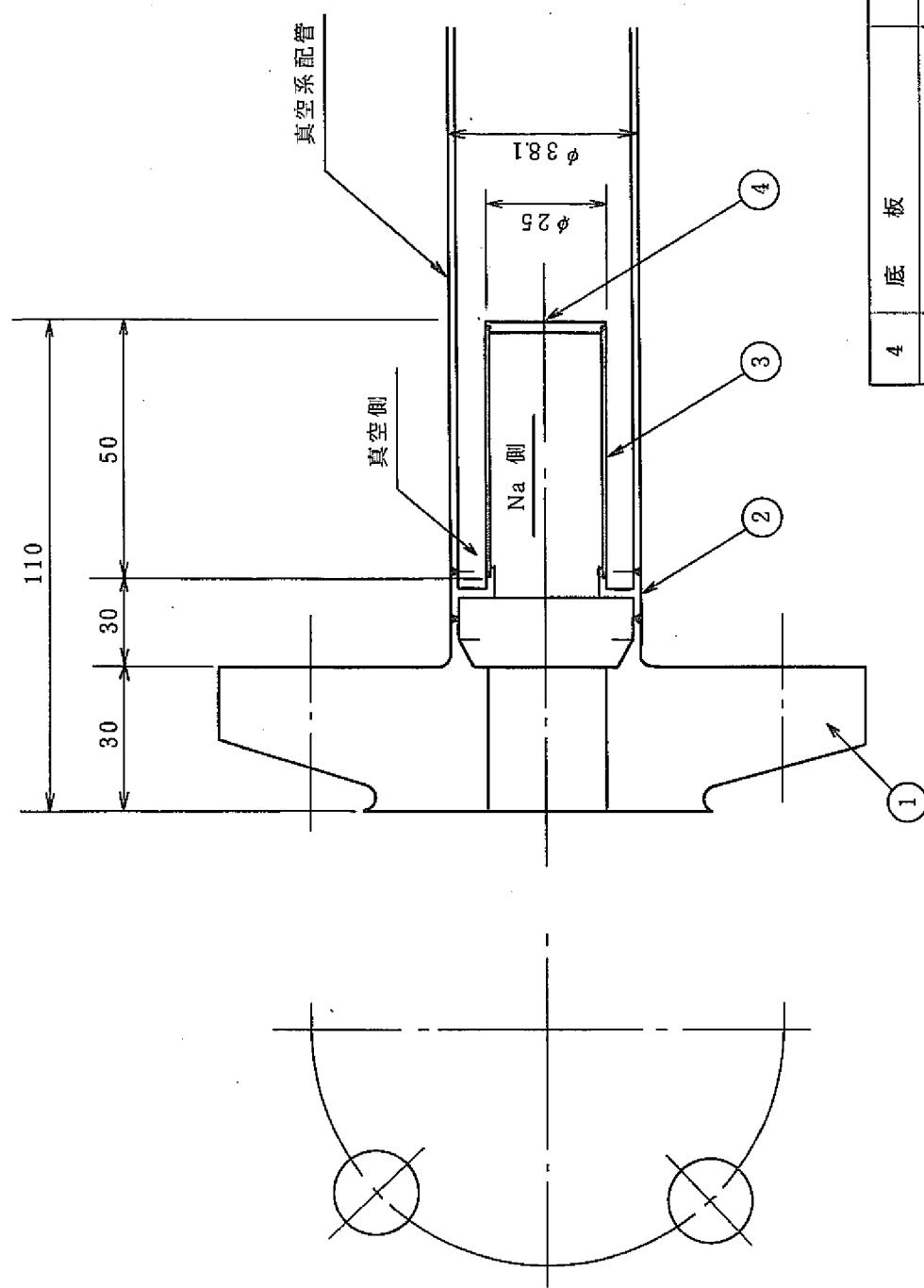


図3・7：PNC型Na中水素計（2号機）Ni膜構造図



品番	部品名	材質	寸法	個数
4	底板	SUS 304	1	
3	シリーブ	Ni 201相当	1	
2	座	SUS 304	1	
1	フランジ	SUS 304	1	

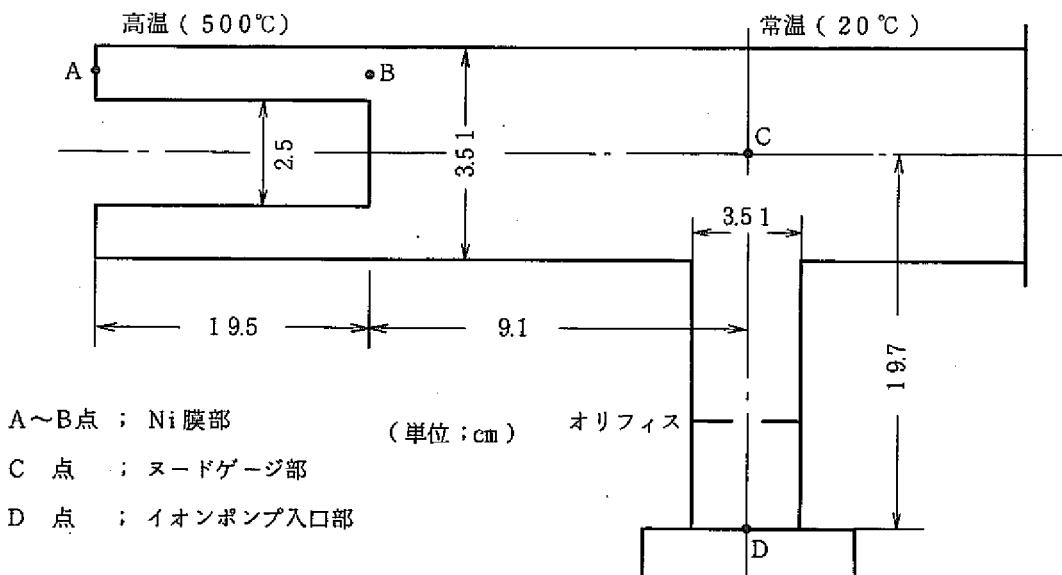
図3・8 オリフィスを適用した場合のNa中水素計(動的室用)のNi膜構造図

## 附 錄

### 配管コンダクタンスの計算

## I. 配管コンダクタンスの計算

コンダクタンスの計算に必要な配管形状は本水素計の場合下図のようになっている。



(1) A B 間のコンダクタンス  $C_{AB}$  は、円心円筒の中間環状部のコンダクタンス式<sup>8)</sup>

$${}_M C_L = 3.78 K_A \cdot \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{\ell} \cdot \frac{T}{M} \quad (\ell / \text{sec}) \quad (1)$$

に  $T = 773^{\circ}\text{K}$ ,  $d_1 = 3.51$ ,  $d_2 = 2.5$ ,  $\ell = 19.5$ ,  $K_A = 1.26$  ( $d_2/d_1 = 0.712$  のとき) を代入すると、 $C_{AB} = 29.4$  ( $\ell/\text{sec}$ ) が得られた。

(2) B C 間のコンダクタンス  $C_{BC}$  は長い円管のコンダクタンスの式<sup>8)</sup>

$${}_M C_L = 3.87 \cdot \frac{d^3}{\ell} \cdot \frac{M}{T} \quad (\ell / \text{sec}) \quad (2)$$

に、 $d = 3.51$ ,  $\ell = 9.1$  を代入する。温度  $T$  は B 点から C 点まで  $500^{\circ}\text{C}$  から  $20^{\circ}\text{C}$  に直線的に変化するとして、近似計算した。この結果  $C_{BC} = 292$  ( $\ell/\text{sec}$ ) が得られた。

(3) 従って A C 間のコンダクタンスである  $C_{MN}$  は、

$$\frac{1}{C_{MN}} = \frac{1}{C_{AB}} + \frac{1}{C_{BC}}$$

の関係式により  $C_{MN} = 26.8$  ( $\ell/\text{sec}$ ) が得られた。

(4) C D 間配管だけのコンダクタンス  $C_p$  は(2)式に  $d = 3.51$ ,  $\ell = 19.7$ ,  $T = 293^{\circ}\text{K}$  を代入して

求められ、102 ( $\ell/\text{sec}$ ) である。従って、2.2.1項で求めたオリフィスコンダクタンス  $C_F = 2.36$  ( $\ell/\text{sec}$ ) と合成して、

$$\frac{1}{C_{NP}} = \frac{1}{C_F} + \frac{1}{C_P}$$

から、 $C_{NP} = 2.28$  ( $\ell/\text{sec}$ ) となる。