PNC TN941 76－30

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）

1976年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

PNC TN941 76－30
1976年3月22日

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）

報告者* 鐘ケ江 直道
池本 一郎
橋口 功
堀 雅夫

期 間 1975年1月～1976年3月

目 的 これまでいくつか試みられて来たNa中水素検出計の設計法に対し，SWAT－2試験および考察等で得られた検討結果をまとめ最適設計法の一般化を試みた。

要 旨 最適設計法を最も一般化し汎用性，簡易性を持たせた特性図を作成した。

(1) 検出特性図：本特性図は検出計に要求される測定範囲，精度を満足するためのNi膜面積およびイオンポンプ排気速度等基本構成に関する仕様を決定する時用いるもので，動的平衡運転からの要求項目をまとめたものである。

(2) 静的平衡測定特性図：本特性図は検出計の較正を精度良く実施するために必要な真空計構造（容積，表面積，表面処理）および真空計自已排気量に対する仕様を決定する時用いるもので，静的平衡運転からの要求項目をまとめたものである。

これ等の特性図の使用例を示すと同時に現在動燃団で設計製作中の水素検出計基本仕様を明示するためのモデル設計を試みた。

* 大洗工学センター高速炉安全性試験室

PNC TN941 76−30
March 1976

How to Design a Nickel Membrane−Ion Pump Type Hydrogen Meter Leak Detector in Sodium

—— Studies of Small Leak Sodium Water Reactions (10) ——

Naomichi Kanegae*,
Ichiro Ikemoto*,
Ko Hashiguchi*
and Masao Hori*

ABSTRACT

This report describes the suitable way how to design a nickel membrane−ion pump type hydrogen meter or how to select nickel thickness, area, ion pump speed, their combination, volume of vacuum system and surface of vacuum side. These are based on the test results obtained from the Small Sodium-Water Reaction Test Facility (SWAT−2) of PNC using several types of hydrogen meter in sodium.

In conclusion, two characteristic diagrams of designing are obtained as follows.

(1) Characteristic diagram for dynamic equilibrium mode; The area (A) and thickness of nickel and the ion pump speed (S) or the best combination value (S/A) for a required hydrogen concentration level and it's change are determined from this diagram. That is, this diagram includes all essentials for the dynamic equilibrium mode operations of the hydrogen meters.

(2) Characteristic diagram for static equilibrium mode; The area of vacuum system, the volume of vacuum side and the necessary grade of surface treatment of the vacuum pipe are determined by this diagram for a required accuracy of calibration. That is, this diagram iucludes all essentials for the static equilibrium mode operations of the hydrogen meters.

In addition, a design process of model case which indicates the basic specification of the PNC Type Hydrogen Meter now unbermanufacturing are described using these characteristic diagram.

---

*Fast Reactor Safety Section, O−arai Engineering center, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation.

目　　次

図・表目次

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検出計が設置される。この水素検出計の必要性，運転経験および設計製作法等に関してこれまで内外の多くの報告がなされて来た。動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃）に於いても，小リーク・ナトリウム・水反応試験装置（以下SWAT－2）および50MW蒸気発生器試験施設（以下50MWSGTF）等における設計，製作および試験結果を基にしたいくつかの報告を行って来た。（SWAT－2に関しては参考文献1）～6），50MWSGTFに関しては7）～17）等参照）

これ等の報告からNa中水素検出計に関して共通して言えることは，Ni膜を使用している点であり，Ni膜を介してNa中の水素を真空側に透過させ，真空側に生ずる圧力および濃度等の変化を測定することによりNa中水素濃度および濃度変化を知ることがその共通した測定原理である。1方，その測定法に関しては質量分析器使用のもの[1,7,18]真空計使用のもの[4,19]さらにイオンポンプ使用のもの[20,21,22,23,5,11]等種々の型式についての報告がなされておりそれ等の特徴についても比較検討がなされて来た。近年実機FBRプラントおよびSGを有する試験施設の運転経験が得られさらに，原型炉級FBRプラントの設計進捗とともに，要求測定水素濃度範囲が低濃度，高精度（例えば50ppb±10％）になって来た。このため，小型でしかも精度のよいNi膜－イオンポンプ型水素検出計が脚光をあびるようになった。さらに，真空側の小型化に併行して，Na側機器もこれまでの検出系（システム）的な扱いから加熱器，熱交換器等を一体とする小型化への方向が取られるようになり，[23]Na側真空側を含めて検出器的な設計に変わりつつあるのが現状である。

この中で，Na系機器の設計に必要なNa流量および温度条件は真空側の基本仕様に従って決められる要素が多く，したがって検出器全体の最適設計を行うには，先づNi膜および真空部の最適設計がなされねばならない。このためには，要求される水素濃度範囲，精度に対して最も適当なNi膜構造（厚さ，面積）と真空排気特性（ポンプ排気速度等）の関係を見出すことがまず必要となる。これまで製作された同種水素検出計[5,11,24]もそれぞれの時点で最適条件を求め設計されたと考えられるが，系統的に最適設計の評価検討を明示したものは見当らない。

本報告は，これまで主に動燃で得られた経験および検討結果を集約し，首題最適設計を系統的に行う手法について記述するものであり，得られた結論は全て設計用の特性図として表示しまとめた。

同時に，同特性図を用いた設計例を記載し現在動燃で試作中のPNC型水素検出計の基本仕様について明示し，完成後の試験結果との比較のための基礎資料とするとともに，今後のNi膜－イオンポンプ型Na中水素検出計設計のための一資料とするものである。

2．最適設計のために考慮すべき項目

水素検出計にイオンポンプを用いることはそれが排気能力と真空計としての機能を有していることからきわめて有利な事であり，近年内外のＦＢＲプラント用水素検出計のほとんどにNi膜－イオンポンプ型の使用を計画し，試作および使用経験の積み重ねを行っている。例えば，日本の動燃におけるＳＷＡＴ－２[5)]および50ＭＷＳＧＴＦ用[15)]水素検出計の系統図は図２－１，図２－２のとおりであり，米国ＡＮＬに於ける試作[21)]のものに図２－３，図２－４等があり，ＳＣＴＩに設置された[25)]ものは図２－５等がある。また欧州でも同様であり，西独のＳＮＲ－３００用[23)]の試作品が図２－６，さらにＴＮＯ（Hengelo の５0ＭＷＳＧＴＦ）で開発試作中のもの[26)]は図２－７のとおりである。

これ等の構造を比較すれば判るとおり，Ｎｉ膜以後真空側の基本構成は図２－８のようになる。

最適設計は，要求される測定水素濃度範囲および検出精度を満足する仕様を持つ図２－８の機器構成を見出すためになされるものであり，水素検出計の使用状態すなわち運転状態から要求される仕様を反映して考慮されねばならない。この運転状態には，通常運転と較正運転の２つに大別出来，前者はいわゆる動的平衡運転を継続させるもので，後者は動的および静的平衡運転のくり返しを行うものである。（動的，静的運転法の説明も含めた較正試験法の概要説明については付録－Ｉ[5)]を参照のこと。）

したがって，水素検出計の最適設計を検討する場合は，先づ次の２つの項目を満足した仕様を見出す必要がある。

(1) 動的平衡運転からみた必要項目

(2) 静的平衡運転からみた必要項目

本章ではまずこの２項目から要求される仕様を最も一般化した″特性図″の形に整理することによってまとめた。この特性図は新たに設計する場合はもちろん，既存のものの性能評価が簡単に行えるものであり，きわめて一般性のあるものである。

また，最適設計の方向としては小型化を考える必要があり，例えば図２－４，図２－６等ではＮａ 系も含め１体化されたものとなっている。しかしこのＮａ 側条件は温度，流量が決ればほぼその形状が決るものであり，小型化を目標とする場合でも先づ真空側条件の最適化を行い，Ｎａ 側条件（温度，流量）を反映させ小型化設計を行えばよいと考えられる。

以上本章では最適設計に必要な条件のうち真空側に対するものを示し，基本仕様の決定法について記述した。この結果を基として詳細仕様を決めるには更に多くの具体的検討評価が必要となるが，次章にその具体例を記述し上記特性図の使用例および詳細仕様決定の具体的考察を記載する。

2.1 動的平衡運転からみた必要項目

本項では，水素検出計の通常運転状態，つまり検出器として使用している場合に必要な性能についての諸関係式および特性等について記述する。これ等の関係式を組合せることにより2.2項に記載する〝検出特性図〟が得られる訳である。また，個々の式の説明等はこれまで多くの文献にも載せられていることが多い。そこで説明が冗長になるのを避けるため，巻末の付録にそれ等の抜粋を載せ本文中では細かい説明は略した。

2.1.1 Na中水素濃度C_{NH}とNa中水素分圧P_{NH}の関係

C_{NH}とP_{NH}の間には次式のようにSievertsの法則が成立する。

$$C_{NH} = K_H \cdot P_{NH}^{1/2} \qquad (2.1)$$

ここで　C_{NH} ： Na中水素濃度　〔ppm〕
　K_H ： Sieverts定数　〔$ppm/mmHg^{1/2}$〕
　P_{NH} ： Na中水素分圧　〔mmHg〕

このSieverts定数は実験的にいくつか求められているが，付録－IIの検討の結果本書では次のVissers等の式を用いることとする。

$$\log K_H = 0.86 - \frac{1220}{T_N} \qquad (2.2)$$

ここで　T_N ： Na温度　〔°K〕
　$30\,ppb \leq C_{NH} \leq 1\,ppm$
　$370℃ \leq T_N \leq 500℃$

2.1.2 Na中水素分圧P_{NH}とイオンポンプ部圧力P_{IP}の関係

P_{NH}とP_{IP}の間には，付録－III[6]に詳細説明を示したように次式の関係が成立する。

$$P_{NH}^{1/2} = \frac{d}{K} \cdot \frac{S}{A} \cdot P_{IP} + \left(1+\frac{S}{C_{MP}}\right)^{1/2} P_{IP}^{1/2} \qquad (2.3)$$

ここで，　d ： Ni膜厚　〔cm〕
　S ： イオンポンプ排気速度　〔cm^3/sec〕
　K ： 水素のNi膜透過率　〔$cm^3 \cdot mmHg^{1/2}/sec$〕
　A ： Ni膜面積　〔cm^2〕
　C_{MP} ： 真空側コンダクタンス　〔cm^3/sec〕

他の記号は既出。

2.1.3　水素のＮｉ膜透過率Ｋ

水素検出計設計に於いて，Ｎａ水素分圧（＝濃度）の低い領域に対しては透過率の圧力依存性を考慮せねばならないことは，動燃ＳＷＡＴ－２の報告として参考文献６）に詳しく記述したとおりである。（その結論の概要を付録－Ⅳ[6]に示す）。同検討結果を基に圧力依存性の無い領域での透過率Ｋおよび依存性の有る領域での透過率K^*を次式で表わす。

$P_{NH} \geq P_p$ の領域で　　$K = k \exp(-E/RT_{Ni})$　　（2.4）

$P_{NH} \leq P_p$ の領域で　　$K^* = K \cdot b \cdot P_{NH}^{1/m}$　　（2.5）

ここで			
K	：	高圧領域透過率	〔$cm^3 \cdot mmHg^{1/2}/sec$〕
K^*	：	低圧領域透過率	〔$cm^3 \cdot mmHg^{1/2+1/m}/sec$〕
P_p	：	透過率の圧力依存性の生ずる境界圧力（Ｎａ中水素分圧）	〔 mmHg 〕
k	：	透過常数	〔$cm^3 \cdot mmHg^{1/2}/sec$〕
E	：	透過の活性化エネルギ	〔Kcal／mol〕
R	：	気体常数	〔Kcal／mol °K〕
T_{Ni}	：	Ｎｉ膜温度	〔 °K 〕
b, m	：	圧力依存性に関する定数	〔 － 〕

このうち圧力依存性に関する定数ｂおよびｍは付録－Ⅳより各々（2.6）式のとおりである。ｂについては付録－Ⅳに示した値が現在得られている唯一のものであり，ｍについてはＳＷＡＴ－２[5]，５０ＭＷＳＧＴＦ[6)15)16)17]およびＳＣＴＩ[25]，Ｐｈｅｎｉｘ[18]の結果で報告されたｎ値（付録－Ⅳ参照）から同Ⅳ－５式より求まる値の範囲を示した。

$$b = 1.25 \qquad m = 2.44 \sim 6.0 \qquad (2.6)$$

１方，（2.4）（2.5）式の具体的数値については現在でも必ずしも明確に得られていないと云って過言ではなく，製作された水素検出計はＮａ中の較正試験を必ず実施せねばならない理由もこの点にある訳である。事実（2.4）式で示される圧力依存性のない領域での透過率Ｋの温度依存性についてもこれまで報告された値を比較すると付録－Ｖのようになる。Ｎｉ膜の材質が必ずしも同一でない場合も含まれてはいるが，１～２オーダも異っていることが判る。

そこでａ）実用の水素検出計のＮｉ膜温度は５００℃一定とするのが常識的である。ｂ）５００℃近傍における実験結果は動燃において広い濃度範囲にわたって得られている。[5)16)16)]

この２点を基に，本書の検討では表２－１に示した４条件による透過率をその考察範囲とする。同表の条件は５０ＭＷＳＧＴＦ用水素検出計によるガス中試験結果[15]（表中①②）およびＮａ中試験結果[16]（表中③④）からの値であり，蒸発器（ＥＶ）用過熱器（ＳＨ）用各々があり全部で４ケースとなっている。

2.1.4 真空配管形状の効果

真空配管形状で考慮せねばならないのは，(1)配管コンダクタンスC_{MP}〔㎤／sec〕又は〔ℓ／sec〕 (2)真空系壁表面からの全放出ガス量Q^*〔mmHg･㎤／sec〕又は〔mmHg･ℓ／sec〕の2項目である。このうち(1)については後述するように，現実的な形状に於いてはあまり考慮しないで良い項目であり，(2)については動的平衡運転よりはむしろ静的平衡運転に於ける考察の方が重要となる（2.3節参照）。以上のことから，本項では真空配管を直管と做した場合の値を1つの目安値として把握することとする。

直管配管の20℃におけるコンダクタンスは次式で与えられる[44)]等

$$C_{MP} = \frac{65}{\sqrt{M}} \cdot \frac{D_P^3}{\ell_P} \qquad (2.7)$$

ここで　C_{MP}：配管コンダクタンス〔ℓ／sec〕，M：気体分子〔g/mol〕

D_P：配管径〔cm〕　ℓ_P：配管長〔cm〕

また，真空系壁表面からの全放出ガス量Q^*は次式で与えられる

$$Q^* = A_P \cdot q^* \qquad (2.8)$$

ここで　Q^*：壁表面からの全放出ガス量〔㎤･mmHg/sec〕，A_P：壁表面積〔㎠〕

q^*：単位壁表面からの放出ガス量〔㎤･mmHg／sec･㎠〕

直管部（径D_P，長さℓ_P）のみを対象とすれば，（2.8）式は次式のとおりとなる。

$$Q^* = \pi \cdot D_P \cdot \ell_P \cdot q^* \qquad (2.9)$$

このQ^*を設計に反映させるには，測定範囲内でのイオンポンプ部圧力P_{IP}が，次式で表わされるバックグランド圧力P_{IP}^*より充分大きいかを判断すればよい。

$$P_{IP}^* = \frac{Q^*}{S} \qquad (2.10)$$

ここで　P_{IP}^*：イオンポンプ部バックグランド圧力〔mmHg〕，Q^*,S は既出

さて，ここで最も重要な値はq^*であり，これは表面処理の方法によって大きく異る値であると同時に，それに対する報告値も多くの研究者によってなされているが同じ材料であっても測定法や測定条件によってかなりの差があり，一定したものではない。付録－Ⅵにステンレス材におけるq^*値の報告例を挙げたが，実際製作時には表面処理法に充分考慮を払わねばならない（2.3節参照）。

配管形状の効果を大略つかむための目安として図2－9を示す。同図はたて軸に管径(D_P)，横軸に管長(ℓ_P)を取り，コンダクタンスC_{MP}（（2.7）式適用），全放出ガス量Q^*((2.9)式を適用）を示したものである。このうち（2.9）式のq^*には付録－Ⅵで番号13の値（$q^* = 8 \times 10^{-11}$ mmHg・ℓ／sec・㎠）を用いた。

2.1.5　イオンポンプの特性

イオンポンプは排気ポンプとしての能力と真空計としての能力を兼ねていることが，水素検出計に使用する際最も有利な点であることは前にも述べたとおりである。その使用限界条件は真空計としての能力限界とポンプ自体の寿命の２つの点から考慮されねばならない。

先づ真空計としての能力限界についてであるが，一般にイオンポンプ圧力 P_{IP} とイオンポンプ出力 I_P には図２－10に示す関係がある。同図でＡ領域をプラズマ放電領域，Ｂ領域を中和効果領域，Ｃ領域を電子飽和領域，Ｄ領域を平衡領域と言い，直線則に乗るＣ領域に於いてのみイオンポンプ出力 I_P から真空度 P_{IP} を知ることが可能である。このＣ領域の範囲は一般に次のとおりである。

$$10^{-9} < P_{IP} < 4 \sim 5 \times 10^{-4}\ [\mathrm{mmHg}] \qquad (2\cdot11)$$

また，イオンポンプ排気特性はイオンポンプ部圧力に依存するが，その一般特性は図２－11に示すとおりであり，$P_{IP} = 10^{-3}$ mmHg 程度になるとその排気速度は約半分になることが判る。したがって，$P_{IP} < 10^{-4}$ mmHg の領域で使用すれば，例えば（2・3）式による評価の際は" S＝一定 "と做して良いこととなり計算が簡単になる利点はある。しかし，水素による単体較正試験のなされたイオンポンプであって，図２－11 の特性を充分把握したものを使用する限り，10^{-4} mmHg以上まで使用しても上記（2・11）式の範囲内であれば真空計として使用することは可能である。

以上記述したことは，真空計としての使用限界に対し高圧側（Na中水素濃度の高濃度領域）からの限界条件を示すものであるが，低圧側（低Na中水素濃度域）からの条件が水素検出計としての測定精度を支配する重要な項目となる。低圧側ではイオンポンプ出力 I_P が小さくなり，イオンポンプ自体のノイズレベル I_{PN} と区別出来ないような領域では当然使用が不可能である。さらに，水素濃度の変化 ΔC_{NH} に対応するイオンポンプ部圧力変化 ΔP_{IP} もノイズレベルより充分大きい領域でなければ使用出来ない。すなわち要求測定精度が可能か否かの判断は，このイオンポンプノイズレベルの条件によって行うべきものである。

付録－Ⅶに一般に使用されているイオンポンプの特性を示したが，その中に記されているノイズレベル I_{PN} と上記 ΔP_{IP} を比較するためには，次式により I_{PN} に対応する圧力値 P_{IPN} を求め ΔP_{IP} と比較すればよい

$$P_{IPN} = \frac{I_{PN}}{B_{IP}} \qquad (2\cdot12)$$

ここで，　I_{PN}　：イオンポンプノイズレベル〔μA〕
　　　　　P_{IPN}：I_{PN} に対応する圧力〔mmHg〕
　　　　　B_{IP}　：イオンポンプ電流出力〔μA/mmHg〕

ポンプの寿命については，一般的に図２－12のような寿命曲線が得られる。

2.2 検出特性図

本項では，前項に記述した必要項目を反映させた水素検出計設計のための設計チャートとも云える検出特性図について記述する。

前にも述べたようにこの特性図はいわゆる動的平衡運転から要求される項目を集約したものであるが，水素検出計としての性能を評価する場合先づ必要な事項が示されており，新たに設計する場合はもちろん既製のものの性能評価も簡単に出来るものである。

以下検出特性図についての説明を図2－13,図2－14を用いて行うが，実用の特性図すなわち前項で検討した定量値を用いて計算し完成した特性図は図2－15（低濃度用）および図2－16（高濃度用）に示した。

2.2.1 検出特性図の構成（図2－13，図2－14参照）

(1) C_{NH} － P_{NH} 曲線

本書（2.1）式,（2.2）式を図示したもので膜温度一定にした場合の測定水素濃度（C_{NH}）とNa中水素濃度（P_{NH}）の関係が判る曲線（直線）である。

(2) P_{NH} － P_{1P} 曲線

本書（2.3）式を図示したもので，同式中Ni膜条件である厚さdおよび透過率Kは（2.4）（2.5）式等で決まっているとして〔S／A〕をパラメータにして記載される。また（2.3）式を正確に表言するには〔S／C_{MP}〕の項が入る訳であるが実用水素検出計の範囲ではC_{MP}の値が1オーダ異る場合でもほとんどP_{NH}－P_{1P}曲線は変って来ないので実用的な曲線としては同式右辺の第2項目は無視出来る。

P_{NH}－P_{1P}曲線からは水素検出計の動的平衡運転時（通常運転時）のNa中水素分圧とイオンポンプ部圧力の関係が判るもので，水素検出計として最も重要な項目である排気速度Sと膜面積Aの比との関係で確認出来る。

なお，Sの単位は〔cm^3／sec〕，Aは〔cm^2〕，したがって〔S／A〕の単位は〔cm／sec〕である。

(3) W．B．G.曲線

本書（2.8）（2.10）式を図示したもので，使用イオンポンプSと壁面からの放出ガスによる圧力の上昇値P_{1P}^{*}の関係が判る。この曲線を計算する場合には，壁表面積A_Pや単位壁面からの放出ガス量q^{*}が判っていなければならないが，これ等の値はむしろ完成した後に詳細値が判るものであり，設計前には目安程度に使用するものとなる。さらに，例えばA_Pが1000〔cm^2〕，q^{*}が10^{-11}〔mmHg・ℓ／sec・cm^2〕Sが10ℓ／secの様な場合を想定すると（2.8）（2.10）式よりP_{1P}^{*}は10^{-9}〔mmHg〕程度となり，動的平衡運転としてはあまり問題にならない。

したがって，検出特性図の中ではW. B. G.曲線はあくまでも１つの目安を付けるためのもので，次項のI. P. B. G.曲線が重要な曲線となる。

なお，壁表面からの放出ガスの効果は前にも述べたとおり静的平衡運転からの要求事項としては重要なものであり，この点に関しては2.3節に於いてくわしく記述する。

(4)　I. P. B. G.曲線

付録Ⅶの表Ⅶ－１のI_{PN}値を（ 2.12 ）式を用いP_{IPN}に直し図示したもので，使用イオンポンプの排気速度Sが決まればその時のイオンポンプノイズによる圧力値が判る。

なお，W. B. G.曲線，I. P. B. G.曲線とも低濃度の場合にのみ必要なものであるので，図２－14（高濃度用）には記していない。

(5)　U. L. I. P.点

イオンポンプを水素検出計として用いる場合の使用限界点を示すもので（ 2.11 ）式のうち高濃度部に対し図示する。この点は高濃度部において必要なものであるので，図（２－13）（低濃度用）には記していない。

2.2.2　検出特性図の読み方（図２－13，図２－14参照）

水素検出計の測定仕様を例えば次の値であると仮定する。

測定濃度範囲　：　A ppbからX ppm

測　定　精　度　：　最低A± appb

この時はまず，A± appbに対し低濃度用検出特性図（図２－13）を用いる。同図中にも記したようにA± aに対し，$C_{NH}-P_{NH}$曲線および$P_{NH}-P_{IP}$曲線を経て，例えばS/Aが10の場合にイオンポンプ部圧力値はC ± c（又はc′）であることが判る。１方，使用イオンポンプ排気速度Sとすれば，I. P. B. G.曲線からそのときのイオンポンプノイズによるP_{IPN}値がDであることが判る。

ここでC値とD値を比較すると１オーダ以上の差があり測定濃度範囲のうち低濃度値であるAppbは充分満足していることが判り，W. B. G.曲線を考慮しても問題ないことが判る。

１方，c又はc′がD値よりも充分大きくなければ，要求濃度変化値を知ることは不可能となる訳であり，両者の比c/D（SN比に相当する）が大きければ大きい程精度のよい水素検出計であることが判る。

これ等の判断から先づ低濃度側から要求される排気速度SおよびS／Aの値，したがってNi膜面積Aの値が判明する。

１方水素検出計のNi膜部にステップ状の濃度変化が生じた場合の応答（具体的にはイオンポンプ出力値変化）については，付録－Ⅷに記したとおりであるが，ここで得られた

応答曲線図Ⅷ－１によれば，例えば cppbの変化が生じた時に，水素検出計に cppb分の変化が現われるまでには，膜温度が500℃の場合でも50秒～100秒程度もかかることとなりり，検出計の機能としては満足出来ない。

そこで実用水素検出計で警報信号を発する様な場合には，その設定は濃度変化にともなうイオンポンプ出力変化が確認出来る下限の処におくようにする。例えば，図Ⅷ－１において水素透過流速の比が0.5 の処に警報設定したとすれば，Ｎｉ厚さ 0.5㎜の 場合でも，約30秒程度でＳＧ内でのリーク発生の確認が可能となる訳である。

しかし，例えば低濃度領域でイオンポンプ出力のノイズレベルが上記0.5 に対する値より大きい様な場合には，そのような設定は不可能になる訳である。したがって，上記ＳＮ比が２程度では不充分と云え，最低条件としては

$$\text{SN比} > 3 \qquad (2.13)$$

が要求される。

次に高濃度部からの検討であるが，図2－14から判るとおり，Ｘppmに対し $C_{NH} - P_{NH}$ 曲線および $P_{NH} - P_{IP}$ 曲線を用いると，Ｓ／Ａが10の時はイオンポンプ部圧力 P_{IP} が Z_1，Ｓ／Ａが100の時は Z_2 であることが導かれる。この値がU. L. I. P.点より大きければ，真空計としてのイオンポンプの使用は不可能であり，同図からはＳ／Ａ＝100の組合せの水素検出計でなければならないことになる。

以上のように検出特性図で判断すると首題測定仕様を満足する検出計としてＳ／Ａが10であれば高濃部に対し満足せず，100の場合には逆に低濃度側で不充分となり，両者の中間の値を更に見出さねばならないことになる。逆に云えば，このようにして最適設計値を得ることが可能となる訳である。

2.2.3 実用検出特性図（図２－15，図２－16）

2.1節で検討した具体的数値をあてはめ作成した検出特性図が図２－15，図２－16であり，その計算条件および2.3の考察を以下記述する。

(1) 計算条件

(a) Ｎｉ膜温度……………………………500℃一定

(b) Ｎｉ膜厚………………………………0.5㎜一定

(c) 配管コンダクタス……………………無　　視

(d) 透過率…………………………………表２－１の４ケース

(e) パラメータ……………………………Ｓ／Ａ＝10と100

(f) イオンポンプの圧力依存性…………図2－11に従う

(2) 計算条件に対する説明

(i) Ni膜温度を500℃一定としたのはそれが現状ではきわめて一般的であり，Ni膜の強度（詳細は3章参照）を考えても可能な値であるため。

(ii) Ni膜厚を0.5㎜一定としたのは，例えば0.25㎜のを知りたい時には同図でS/A値を1/2にした時の曲線を見ればよい訳で簡単に換算が出来るためである。

(iii) 配管コンダクタンスを無視した理由は2.2.1の(2)を参照されたい。

(iv) 透過率については，動燃で実施した実験結果が著者らとしては最も使用しやすく，特に透過率の圧力依存性に関しても系統的な測定結果を持っているからである。

(v) パラメータS/Aは上記2ケースのみとしたが，更に詳細に載せて評価も出来る。しかし透過率を4ケース取ったので，図面が煩雑となる。

(vi) 高濃度部に効いて来るイオンポンプ排気速度特性は個々のポンプによって異なる値を持つであろうが上記のように図2−11を基に10^{-4} mmHgまで100％一定，10^{-3}まで直線的に50％まで落ちるとした。

(vii) 本検出特性図には，W. B. G.曲線は載せていない。これは2.2.1項等に述べたように同曲線はむしろ仕様決定後に確認用に用いるべきであるからである。

(3) 考　察

(i) 図2−15（低濃度用）に於いては，透過率の圧力依存性が効いて，いわゆる1/2乗則に乗っていないことが判る。すなわち$P_{NH}-P_{IP}$曲線と$C_{NH}-P_{NH}$曲線とは平行でなくなって来る。

(ii) しかし，圧力依存性の効き方（付録−Ⅳのm値）に相異があるため，P_{NH}が10^{-4}〜10^{-5} mmHgでは4ケースとも大差がない値となっている。

(iii) 図2−16（高濃度用）ではP_{IP}＞U. L. I. P.点（5×10^{-4} mmHg）の領域での$P_{NH}-P_{IP}$曲線は無意味であるが，単純な計算結果としてそのまま載せた。

(iv) 上の図の領域では，透過率とイオンポンプ排気速度の圧力依存性の相乗効果が表われて来る。すなわち次のような組合せから成っている。

P_{NH} ＼ P_{IP}	＜10^{-4}〔mmHg〕	＞10^{-4}〔mmHg〕
＜0.5 mmHg	透過率圧力依存のみ	透過率およびイオンポンプの圧力依存性が生ずる。
＞0.5 mmHg	1/2乗則に乗る（両者の圧力依存性なし）	イオンポンプの圧力依存性のみ

(v) 図2−15では各曲線に大きな差がないが高濃度部では透過率絶体値（表2−1参照）の違いがそのまま効いて来るため①②と③④では大きく異っている。

2.3 静的平衡測定からみた必要項目

前項ではいわゆる動的平衡運転からの要求事項を汎用性ある検出特性図にまとめ説明したが本項では，静的平衡運転から必要と考えられる次の3点について検討する。

(1) サーマル・トランスピレーション効果

(2) 真空壁面からの放出ガス量

(3) 真空計の自己排気量

このうち，(1)では静的平衡時にNi膜部（ 500 ℃ ）と真空計（常温）との間に温度差があるため，真空計の読みにサーマル・トランスピレーション効果による補正を加えねばならないことを記述する。また，(2)では，真空系内が静的平衡状態となったとしても壁面からの放出ガスが真空系容積や到達平衡圧等に比して無視出来ぬ場合は正しいNa中水素分圧が測定出来ないこととなり，この現象は低圧すなわち低濃度領域で重要であることを記述する。一方，(3)は高圧すなわち高濃度領域で重要な項目であって，真空計自身の水素排気能力が無視出来ない場合には，Ni 膜からの水素透過量と真空計の排気量がつり合う処で平衡となり，実際の値より低い値をNa中水素分圧と誤って読んでしまう恐れがあることに対する検討である。

なお，(2)(3)についてはそれぞれ汎用性のある特性図（静的平衡測定特性図と呼ぶ）にまとめた。

2.3.1 サーマル・トランスピレーション効果

付録－Ⅸに詳しく記述したように，静的平衡時の真空計部圧力P_GとNi 膜部圧力P_Mの間には次式の関係が成立する。したがって，測定値P_Gに対し次式による補正を行わねばならない。

$$\frac{P_G}{P_M} = F_t = \frac{AX^2 + BX + C\sqrt{X} + \sqrt{T_G / T_{Ni}}}{AX^2 + BX + C\sqrt{X} + 1} \qquad (2.14)$$

ここで，F_t ：サーマルトランスピレーション値 〔－〕

T_G ：真空計部温度 〔°K〕

T_{Ni} ：Ni 膜温度 〔°K〕

X ：$P_G \cdot D_P$ 〔mmHg・mm〕

A ：$A^* \cdot T_{AV}^{-2}$

B ：$B^* \cdot T_{AV}^{-1}$

C ：$C^* \cdot T_{AV}^{-1/2}$

（A^*, B^*, C^*は表Ⅸ－1 参照）

T_{AV} ：$(T_{Ni} + T_G)/2$ 〔°K〕

図2－17はSWAT－2[5]用水素検出器における補正例である。

2.3.2 真空系壁面からの放出ガス量の効果

静的平衡運転に関する関係式については，付録－Xに記したとおりであり，Ni膜における拡散時間おくれ，真空計の自已排気量および真空系壁面からの放出ガス量の効果を無視出来る場合には，動的平衡運転から静的平衡運転に切り換えた時点（イオンポンプを停止，あるいは隔離弁を閉……この時をt＝0とする）からの，真空系圧力上昇は次式で表わされる。

$$\sqrt{\frac{P_M}{P_{NH}}}+\mathrm{In}\left(1-\sqrt{\frac{P_M}{P_{NH}}}\right)=-\frac{K\cdot A}{2\cdot V\cdot d\cdot P_{NH}^{1/2}}\cdot t \qquad (2.15)$$

ここで	P_M	：Ni膜真空側圧力	〔mmHg〕
	P_{NH}	：Na中水素分圧	〔mmHg〕
	K	：水素のNi膜透過率	〔$cm^2\cdot mmHg^{1/2}/sec$〕
	A	：Ni膜面積	〔cm^2〕
	V	：真空系（隔離弁－Ni膜間）容積	〔cm^3〕
	d	：Ni膜厚	〔cm〕
	t	：時　間	〔sec〕

ここで注意しなければならないのは，上式はNi膜真空側（≃500℃）圧力P_Mで整理されているが，実際に測定者は真空計（≃常温）による指示値P_Gによってしか真空側圧力を確認出来ない事である。したがって，特に$P_M=P_{NH}$の時（この時にNa中水素分圧と真空系圧力が同一となり，Na中水素濃度を知ることが出来る）読み取ったP_Gに対し，前項で記述したサーマル・トランスピレーション値Ftによる補正を，（2.14）式によって施すことを忘れてはならない（図2－17参照）。

一方，真空壁面からのガス放出量が一定の場合には，時間Δt後における放出ガスのみによる圧力上昇値ΔP_Mは次式で与えられる。

$$\Delta P_M=\frac{A_p\cdot q^*}{V}\cdot\Delta t=\frac{\dot{Q}^*}{V}\cdot\Delta t \qquad (2.16)$$

ここで	Ap	：真空系壁全表面積	〔cm^2〕
	q＊	：単位真空壁表面からの放出ガス量	〔$mmHg\cdot cm^3/sec\cdot cm^2$〕
	Q＊	：真空系壁表面からの全放出ガス量	〔$mmHg\cdot cm^3/sec$〕

したがって，q＊あるいはQ＊による静的平衡圧測定値誤差への効き方は，（2.15）式から求まる$P_M\cong P_{NH}$となるまでの時間（理論的には無限時間であるが，実際的には例えば$P_M/P_{NH}=0.98$等で評価）に，（2.16）式によって求まる放出ガスによる圧力上昇分がどの程度であるかを判断すればよい訳である。また両式を比較すれば，この壁面からのガス放出量の効果は低圧（低濃度）において最も効いてくることが判る。

2. 3. 3　真空計自已排気速度の効果

静的平衡圧測定用の圧力計としては電離真空計が用いられるが，この電離真空計はフィラメント部での放電により水素ガスがイオン化され，容器壁に吸着されることによる排気速度を持っている。[48]

この真空計自已排気速度の効果は，動的平衡運転時においてはイオンポンプ排気速度が大きいため無視出来るが，静的平衡運転時には無視出来ない項目である。

静的平衡運転における関係式を示した付録－Xの（X－2）式において，壁面からの放出ガス量Q^*を無視すれば（幸いなことにQ^*は低圧側で重要なのに対し，後述するように真空計自已排気速度S_Fは高圧側＝高濃度側で考慮せねばならない項目であり，この仮定は実用上正しいと考えられる），静的平衡状態になった時点すなわち（X－2）式においてdP_M／dt＝0となった処では次式が成立する。

$$\frac{K \cdot A}{d}\left(P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}\right) = S_F \cdot P_G \qquad (2.17)$$

P_MとP_Gにはサーマル・トランスピレーション値Ftを介して（2.14）式の関係があるから，（2.17），（2.14）式よりP_{NH}は次式のようになる。

$$P_{NH} = \left(P_M^{1/2} + \frac{d \cdot S_F}{K \cdot A} \cdot \frac{P_M}{Ft}\right)^2 \qquad (2.18)$$

すなわち，$S_F = 0$であれば，真空側到達平衡圧力P_M（測定値としては$P_G = P_M \cdot Ft$）はP_{NH}と等しくなる訳だが，$S_F \fallingdotseq 0$の時は右辺第2項分の誤差を含むことになる。(2.18)式を書き直すと次のようになる。

$$\frac{P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}}{P_M} \cdot Ft = \frac{d \cdot S_F}{K \cdot A} \qquad (2.19)$$

すなわち，Ni膜厚d，透過率KおよびNi膜面積Aが決まっている場合に，P_{NH}とP_Mの差（1／2乗値での差）とS_Fとは比例する訳であり，精度良くNa中水素分圧を測定するためにはS_Fは小さければ小さい程良いと云える。また，（$P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}$）の値が一定であっても上式の分母であるP_Mが大きければ大きい程，S_Fが小さくなければならない。

すなわち，静的平衡圧力測定時に真空計自已排気速度の効果が効いて来るのは，高圧部＝高濃度部に於いてである。

2.3.4 静的平衡測定特性図

前項までに記述した静的平衡運転で考慮せねばならない項目のうち，低濃度測定時に効いて来る効果………真空系壁面からの放出ガス量，および高濃度測定時に効いて来る効果………真空計自己排気速度の効果，を前節と同様に一般性のある特性図に整理し本節のまとめとする。

得られた特性図を〝静的平衡測定特性図〞と呼ぶが，本図による評価は水素検出計構造の詳細（真空系配管の形状，表面処理法等）に関するものが主であり，検出計の最終的な最適化を左右する重要な項目である反面，正確に定量的におさえることのむずかしい内容を含んでいる。たとえば，付録－Ⅶにも記したとおり表面処理法と表面からの放出ガス量については現在でも明確に定量化されていない，又真空計の自己排気速度についても水素検出計が対象とする低圧＝低濃度に対して正確な値は得られていないのが現状である。

しかし，得られた特性図はNi膜面積A，厚さd，真空系壁表面積Ap，体積Vおよび壁からの放出ガスq^*等を変数としてまとめてあり，同図に現在得られている測定結果をあてはめ性能評価が可能であると同時に，不確定値（q^*，S_F等）に対し更に精度良い値を見出すべく要求点の評価を行うことも出来る。

以下，得られたNi膜温度500℃における静的平衡測定特性図（図2－18が低濃度用，図2－19が高濃度用），計算条件および2.3の考察を記述する。

(1) 静的平衡測定特性図（低濃度用）：図2－18

本図は2つの曲線（直線）から構成されており，1つはA／d－t直線で他はA／d－Ap直線である。厚さd，面積AのNi膜を使用したNa中水素検出計に対し，前者はA／d値と静的平衡圧までの到達時間tの関係を，真空系容積Vをパラメータとして示したものであり，後者はその時の到達平衡圧力値の誤差（真のNa中水素分圧値P_{NH}との差）を5％におさえるのに必要なA／dとApの関係を真空系壁単位面積あたりの放出ガス量q^*をパラメータとして示したものである。

(i) 計算及び計算条件

A／d－t直線は，（2.15）式を次の条件で図示したものである。

$$\left.\begin{array}{ll}(a) & P_{NH}=8\times10^{-5}\ [\mathrm{mmHg}]\ (\text{Na中水素濃度}\ C_{NH}=45\ \mathrm{ppb})\\ (b) & P_M/P_{NH}=0.98\ [-]\\ (c) & K=1.81\times10^{-5}\ [\mathrm{cm^2\cdot mmHg^{1/2}/sec}]\end{array}\right\}\quad(2.20)$$

（表2－1中④に上記(a)の条件を代入し求めた値）

前述のとおり本特性図は低圧部に対するものであるから上記条件(a)(c)は最もきびしい低圧点を選んで決めたものである（但し45 ppb選定の理由詳細は第3章を参照のこと）。また，$P_M=P_{NH}$すなわち真空側圧力P_MがNa中水素分圧P_{NH}と全く等しく

なるためには（ 2.15 ）式に於いて $t=\infty$が必要であるが，Na 中水素分圧の 98 ％に達した処で平衡と考えた上記(b)の条件は実用上（運転上）は充分妥当と考えられる。

したがって，A／d − t 直線は計算結果である次式を t ，V，(A／d ）を変数として図示したものである。

$$\frac{t}{V}\cdot\frac{A}{d}=3.57\times10^{3} \qquad (2.21)$$

一方，A／d −Ap 直線は，（ 2.21 ）式から求まる t を（ 2.16 ）式の Δt としてその時間内での壁面からの放出ガスによる圧力上昇 ΔP_M を Na 中水素分圧 P_{NH} の 5 ％以内におさえるために必要な関係を示すものであり，（ 2.16 ）式に次の条件をあてはめ図示するものである。

$$\left.\begin{array}{ll}\text{(a)} & \Delta t=3.57\times10^{3}\cdot V\cdot(d/A)\\ \text{(b)} & \Delta P_M<4\times10^{-6}\ (=8\times10^{-5}\times0.05)\end{array}\right\}\qquad(2.22)$$

したがって，A／d − Ap 直線は計算結果である次式の境界線を図示したものである。

$$Ap\cdot q^{*}\cdot\frac{d}{A}<1.12\times10^{-9} \qquad (2.23)$$

(ii) 特性図の読み方の例

今，例えば次のような形状の水素検出計を考えるとする

Ni 膜面積 $A = 150\ cm^2$

Ni 膜厚さ $d = 0.025\ cm$

真空壁面積 $Ap = 1000\ cm^2$

真空系容積 $V = 1000\ cm^3$

この時の平衡圧到達時間大と真空系壁面表面処理によって得なければならない放出ガス量 q^{*} の値を求めると,

$A/d=6\times10^{3}$，$V=10^{3}$ より $t\simeq600$

$A/d=6\times10^{3}$，$A_p=10^{3}$ より $q^{*}\simeq8\times10^{-9}$

となり，測定時間は約 10 分，表面処理は 8×10^{-12}(mmHg・ℓ/sec）以上が得られるまで施されていなければならないことが判る。

(2) 静的平衡測定特性図（高濃度用）：図 2 − 19

本図は静的平衡圧測定時に，真空計による自己排気速度 S_F による誤差（真の Na 中水素分圧値 P_{NH} との誤差）を 5, 10, 15 ％におさえるのに必要な関係を示すものであり，（ 2.19 ）式を図式化したものである。

(i) 計算及び計算条件

（ 2.19 ）式において次の条件を用いた

(a)　$P_M > \left(1 - \frac{x}{100}\right) P_{NH}$　〔mmHg〕（ x：5, 10, 15 ）

(b)　$Ft = 1.0$　〔－〕　（ 2.24 ）

(c)　$K = 1.18 \times 10^{-4}$　〔$cm^2 \cdot mmHg^{1/2}/sec$〕

上記のうち x は5 %，10 %，15 %に対応する値であり，Kは図2－18と同じ条件で高濃部での値を用いた。またFtは図2－17および（ 2.14 ）式を参照すれば判るとおり，1 mmHg以上ではほとんど効かない，すなわち1と做して良いので上記の条件で計算した。

また，前にも述べたように真空計の自巳排気速度は高濃度において重要な項であり，本特性図でもNa中水素濃度が1 ppm（ $P_{NH} = 3.8 \times 10^{-2}$ mmHg ），10 ppm（ $P_{NH} = 3.8$ mmHg ）および50 ppm（ $P_{NH} = 10^2$ mmHg ）に対し図示した。

(ii)　特性図の読み方の例

前述のような形状の水素検出計，すなわち$A/d = 6 \times 10^3$の場合に50 ppmを5 %以内の誤差でおさえるためには，1.8×10^{-3}〔$cm^3 \cdot mmHg/sec$〕以下の排気量しか真空計には許されないことが判る。同じ条件の膜構造の場合10ppmを誤差5 %以内で測定する場合には，8×10^{-3}〔$cm^3 \cdot mmHg/sec$〕以下であればよいことが判る。

以上，静的平衡測定に関する特性図について記述したが，同特性図では測定誤差を何%におさえるか等によってそれぞれ異って来るものであり，個々の設計において独自に作成評価せねばならないものである。例えばSWAT－2試験の静的平衡試験に関しては参考文献5）において上記特性図による考察を詳しく述べてあり，同様の検討を個々の検出計に対し行い明確にせねばならない。

3. 実際の設計例

本章では，1つのモデルケースを考えて前章で記述した各種特性図を用い実際の設計手順を確認し，その過程で生ずるいくつかの検討項目について記述する。

ここで述べる例はあくまでも3.1項の基本方針に基づいた1つの設計例であり，現在動燃で製作中の水素検出計の基本仕様を示すものであるが，別の設計ではその測定範囲，精度等も異って来ると考えられ，本書を基に更に詳細の検討が必要であろう。

3.1 設計基本方針

本設計は以下の基本方針の基に検討する。

(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50MWSGTF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) 本検出計（系）はNa側も含め小型化をはかることを目標とすること。

3.2 測定範囲・感度の決定

本項では，基本方針を出発点とした首題項目を，以下の図を参照して決定して行く。

図3－1：G_{H_2}，G_{H_2O} と C_{IN} の関係図（水素および水がリークした場合リーク率 G_{H_2}，G_{H_2O} と初期ステップ応答として形成される濃度 C_{IN} の関係を示した図）

図3－2：W_{H_2}，W_{H_2O} と C_E の関係図（水素および水がリークした場合の総リーク量 W_{H_2}，W_{H_2O} とそれが系内に均一に分布する時の定静後濃度 C_E の関係を示した図）

上記図には，各濃度に対応する飽和温度 T_C（プラグ温度に相当する）を参考に示したが，用いた水素のNa中飽和溶解度曲線は，付録－XIの検討を基に決めたVissers[22]の式である。

対象とした装置はもんじゅプラント，50MWSGTFおよびSWAT－2であるが，個々の装置固有の値に限定せず範囲で図示した。

3.2.1 測定範囲上限

図3－1から判るとおり，いわゆるウェステージ率が最大となる[4)49)]と云われる水リーク率数 g／sec を考慮して G_{H_2O} ＝10 g／sec の場合を考えると，初期ステップ応答はもんじゅプラントで1～3 ppm，50 MWSGTFでは4.5～20 ppm の範囲となる。水素検出計としてこの初期ステップ応答の絶対濃度が測定出来なければならない必要は一般的に

はないであろう（上昇率での警報設定等で充分機能ははたせる）が，検出計のNa中較正曲線はいずれの場合にも数ppmまで取る必要がある。特にSGを有するプラント初期運転時には，伝熱管からの拡散水素量が大きいため，系内水素濃度は750 ppbにもなるのではないかと報告されている。[50]

一方，実験用機器としての機能の面から考えると，少なくとも50 MWSGTFによる注水素，注水実験を行うとすればその時には初期ステップ応答値の絶対値を知る必要がある訳で，この点から考え定格運転時（約800 t／h）の半分の流量の場合にも数g／sec，の水リーク率に対しても絶対値を知りたいとの考慮から10 ppmをその上限値と考えたい。

また，SWAT－2（定格200 ℓ／min）の場合は図3－1から明白なように，10 ppmの場合でもG_{H_2O} = 0.35 g／secまでしか絶対応答の確認は出来ない訳だが，これは装置の特徴上やむを得ないとせざるを得ない。しかし，コールドトラップによる純度設定により種々の検討，評価は可能である。

また，図3－2よりリーク発生後にリーク量あるいは静定後のNa中水素濃度の絶対評価をする場合でも上限10 ppmであれば，もんじゅプラントで35 Kg，50MWSGTFで7 Kg，SWAT－2で700 gの水量まで評価可能である。

3.2.2　測定範囲下限

測定下限値は，リーク率とその時の濃度値の関係よりむしろ系内Na中の水素バックグランド値から評価すべきである。

このバックグランド水素濃度値はコールドトラップの能力，SGが設置されているか否か等プラントの特性によって異って来るものであり，考えられる最低濃度に対し充分測定可能であればよいこととなる。この値をコールドトラップ底部温度115 ℃（因みに，もんじゅプラント設計における主2次冷却系用コールドトラップ底部温度は120 ℃，50MWSGTFでは115 ℃）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。

注意しなければならないのは，この45 ppbと云う値は系内の水素濃度バックグランド値がこの値と云うことで，検出能力（感度）を示す値ではない。すなわち例えば図3－1でもんじゅプラント定格3600 t／h Na流量の場合45 ppbの点がG_{H_2O} = 0.45 g／secに対応するからと考え，それ以下リーク率検出は系内Na循環2循後にしか行えないと云うことではない。（なお，参考として各装置のNa 1循環時間を図3－3に示した。同図でも各装置の条件前後の値も含め図示した）。

3.2.3 測 定 感 度

測定感度および応答時間については，膜の拡散率およびNa中水素濃度変動巾，真空系のバックノイズ等から評価すべき点であり，本書2.2.2項等の考察を基とし，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秒内にその変化の測定が可能であることを目標感度とする。

したがって，測定可能の最低濃度上昇値は前項より4.5 ppbとなり，図3－1より

もんじゅプラント定格運転（3600 t／h ）で0.042 g／sec・H_2O

50 MWSGTF 定格運転（ 800 t／h ）で0.009 g／sec・H_2O

SWAT－2 定格運転（160 Kg／min）でそれ以下

の水リーク率に対し1循環以内に（最初にNi膜に変化が生じた時点で）検出可能である。

3.3 Ni膜面積Aとイオンポンプ排気速度Sの決定（検出特性図の使用例）

本項以後に前項までの考察を反映させ具体的形状決定の過程を記述するが，ここで対象とする水素検出計はNi膜厚さ0.5 mm，膜温度500 ℃のみとする。これはこの条件を1つのモデルケースと考えたまでで後述のNi膜強度の面からも安全な値であると同時に，例えば0.25 mmのものの使用の場合には本書考察結果で得られる2倍の感度が得られると云うことにもなり，強度上問題がなければ更に良い検出計が得られることである。

3.3.1 低濃度からの考察（図2－15使用）

3.2項の考察から低濃度部に対し45ppb±10％の測定が可能でなければならない。

図2－15から直感的に判るとおり，S／Aはなるべく小さくする必要がある。このためにはイオンポンプ排気速度Sは小さくし，Ni膜面積Aは大きくしなければならない訳だがSについては付録－Ⅷより2 ℓ／sec位が使用最低限界であり，この場合例えばS／A＝1とするためにはA＝2000 cm^2 が必要で非現実的な構造となり，

$$S/A = 10 \qquad (3.1)$$

が設計的な意味で最適と考える。

この場合に±4.5 ppbの変化はイオンポンプ出力変化ΔP_{IP}は最もきびしい透過率（図2－15で④の$P_{NH}-P_{IP}$曲線）を選んだ場合で約±5×10^{-8} mmHgとなる，一方イオンポンプ排気速度Sが2 ℓ／secの時のノイズによる圧力値P_{IPN}は1.7×10^{-8} mmHgであるから，この場合のSN比は

$$\text{SN比} \cong \frac{5\times10^{-8}}{1.7\times10^{-8}} \simeq 3 \qquad (3.2)$$

となり，（ 2.13 ）式を満足し，首題仕様の測定は可能である。一方，他の透過率（ 例えば同図中①の $P_{NH}-P_{IP}$ 曲線 ）によるSN 比を見ると

$$\text{SN比} \simeq \frac{1.7\times10^{-7}}{1.7\times10^{-8}} \simeq 10 \qquad (3.3)$$

となり，きわめて精度の良い設計であることが判る。

以上のことから低濃度部に対しては次の仕様を満足する必要がある。

$$S=2\ \ [\ell/\mathrm{sec}],\ A=200[\mathrm{cm}^2] \qquad (3.4)$$

3.3.2　高濃度からの考察（ 図2－16使用 ）

3.2.1 項から高濃度部の測定は，10 ppm が可能でなければならない。

図2－16から直感的に判るとおり，S/A 値は逆に大きく取る必要がある。例えば，前項で決ったS/A＝10 で 10 ppm の測定を行う場合を考えて図2－16を見ると④の曲線であっても $P_{IP}\simeq7.5\times10^{-4}$mmHgとなりU. L. I. P. 点を超えることとなり測定不可能であるが，S/A＝100 の $P_{NH}-P_{IP}$ 曲線ではいずれの透過率を選んでも測定可能である。逆に云えば，膜厚0.5 mm，膜温度 500 ℃一定の本モデルケースに於いてS/A値を10 一定にして 45 ppb ± 10 ％から 10 ppmまでを測定することは不可能なことである。

この場合，完成した検出器でその運転（ 濃度 ）条件に合わせて膜面積Aや膜厚dを可変にする事は実際上無理なことである。一方膜温度を変えること（ 50 MWS GTFの設計条件[15]は 50 ppb ± 10 ％～50 ppmであるため高濃度測定時には膜濃度を 300 ℃に下げて使用 ）は，運転上好ましい事とは云えず，膜温度は 500 ℃一定としたい。

そこで本モデル設計では同一イオンポンプを使用してS/A値を大きくするために2台のイオンポンプ使用を考え，低濃度用と高濃度用に使い分けを行うことにより問題を解決することとする。ここで，このように10 ppmまでの絶対値測定を考慮しイオンポンプ2台を用いる様な設計を試みているのは，あくまで3.1 節，設計基本方針の(2)に示した内容，すなわち測定機器としての機能を持たせることを考えているからであり，リーク検出計としての機能のみを考える場合は又異った仕様になるであろう。

さて，$C_{NH}-P_{NH}$ 曲線および $P_{NH}-P_{IP}$ 曲線を介して C_{NH}＝10 ppm で P_{IP} がU. L. I. P.点となるのは，①の透過率を用いてもS/A＝150 であれば充分となる。A＝200 ㎠ は変えられない訳であるから，表Ⅶ－1より

$$S=30\ \ell/\mathrm{sec} \qquad (3.5)$$

の条件であれば測定可能であることが判る。ここで，S＝60 あるいは 120 ℓ/secのものを用いれば更に確実に測定されることが判るが，この場合イオンポンプの重量は約50 ㎏以上，接続口径は≃150 mm φ 程度となり，3.1 章基本方針の(3)小型化からはなれる恐れ

があり，上記値を決定値とする。

ここで，上記検討に於いて　$P_{IP} > 10^{-4}$mmHgすなわちイオンポンプ排気速度に圧力依存が生ずる領域での使用条件が含まれているにもかかわらず上記30 ℓ／secの値を決定値としたように少し荒い評価で設計値を決めたのは次の考慮も含んでいるからである。

(a) 検出器としてはやはり低濃度部を最もきびしく評価したい。（本検討では最悪の場合でもSN比は3，最高SN比は10まで得られ低濃度に対しては充分の評価である）

(b) 高濃度部は，主に実験計測用でありその使用時間も少い。

(c) 2.1.5項にも記述したとおり，使用イオンポンプの排気速度圧力依存性についての較正曲線を予め確認しておけばリーク検出用としてはもちろん，濃度測定用実験機器としてもその機能は充分はたせる。

(d) 前にも述べたように，リーク検出計専用の計器として用いるような場合には，ここまで高濃度に対し要求はされないであろう。

3.4 真空系構造および使用真空計への要求（静的平衡測定特性図の使用例）

3.4.1 低濃度からの考察（図２－18使用）

前にも述べたように，図２－18による評価は具体的な設計図が得られた後すなわち，真空壁表面積A_P，真空系体積V等が判った処で初めて正確な答が得られるものであり，.ここでは１つの目安値を求めることとする。

まず，真空系体積Vに対する要求点であるが，例えば静的平衡圧測定を15分（＝900sec)で行う設計をしたいとすれば，同図中A／d－t直線に$A=200cm^2$，$d=0.05cm$すなわち

$$\left.\begin{aligned} A/d &= 4\times10^3 \quad [cm] \\ t &= 900 \quad [sec] \end{aligned}\right\} \qquad (3.6)$$

をあてはめればVは次の範囲になければならないこととなる。

$$V < 1000 \quad [cm^3] \qquad (3.7)$$

１方，真空系壁面面積Apに対しては，例えば付録－Ⅵの表Ⅵ－１を参考としてガス放出量q＊を8×10^{-12}（mmHg・ℓ／sec）におさえる表面処理をほどこすとして評価すれば，同図中A／d－Ap直線に，

$$\left.\begin{aligned} A/d &= 4\times10^3 \\ q* &= 8\times10^{-9} \end{aligned}\right\} \qquad (3.8)$$

の条件を入れると，Apが次の範囲にあれば５％誤差で測定可能である。

$$Ap < 1000 \quad [cm^2] \qquad (3.9)$$

3.4.2 高濃度からの考察（図２－19使用）

真空計の自已排気速度S_Fに対する要求点を求める。図２－19に次の条件

$$\left.\begin{aligned} A/d &= 4\times10^{-3} \\ C_{NH} &= 10ppm \end{aligned}\right\} \qquad (3.10)$$

目標測定誤差＝５％

をあてはめると

$$S_F < 6\times10^{-3} \quad [cm^3\ mmHg/sec] \qquad (3.11)$$

を必要とすることが判る。

しかし，この真空計の自已排気速度は用いる真空計の種類によっても異る以前にその排気量が明確につかめていない。今後の検討項目の１つと考える。

3.5 Ni膜材質と強度とその構造

本項では具体的なNi膜構造決定に必要な検討項目を記述し，膜構造詳細設計への橋わたし部を明記する。なお，Ni膜使用材質として用いられるNickel 200, Nickel 201に関する諸特性は付録－XIIに示したので参照されたい。

先づ基本的構造として外圧型（NaがNi膜の外側に来る）か内圧型にするかの検討が必要である。従来の構造の多くは外圧型（例えば図2－3，図2－4，図2－5，図2－6，等）が多いいが，50MWSGTF用のNi膜構造は内圧型（図2－2参照，詳細は参考文献15)，17)等参照）を採用している。構造強度上は明らかに内圧型の方が有利であり，以後の検討も内圧型をその対象とする。

次に一般的形状としては円筒部あるいは半球部が考えられ，その設計圧力と肉厚の関係が問題となる。肉厚強度計算は参考資料52)等を用いるとすれば次のとおりとなる。

(1) Ni膜円筒部強度計算

(a) 適用式 ： 労働省第1種圧力容器構造規格 第32条1項

$$d = \frac{P \cdot D_P}{200 \cdot \alpha x \cdot \eta - 2P(1-k)} + \alpha \qquad (3.12)$$

(b) 使用値

P ： 最高使用圧力 〔kg/cm^2g〕＝11

D_P ： 胴の内径 〔mm〕＝パラメータ

αx ： 材料の許容張り強さ〔kg/mm^2〕＝2.81 （500℃の値）

η ： 溶接継手効率 〔－〕＝1

k ： 使用温度による係数〔－〕＝0.4

α ： くされ代 〔mm〕＝0

d ： 板の最小厚さ 〔mm〕

(c) 結果 ： 図3－4に示す。

(2) Ni膜全半球部強度計算

(a) 適用式 ： 労働省第1種圧力容器構造規格 第43条1項

$$d = \frac{P \cdot R_P \cdot W}{200 \cdot \alpha x \cdot \eta - 0.2P} + \alpha \qquad (3.13)$$

(b) 使用値

P，αx，α，η，dは（3.12）式と同じ

R_P ： 全半球形鏡板の内半型〔mm〕＝パラメータ

W ： 形状係数 〔－〕＝1

(c) 結果 ： 図3－4に示す。

これ等の結果から判るとおり，$d = 0.5$ mmを使用するとすれば，円筒部で最大$D_P \simeq 25$ mmϕ，全半球部で最大$R_P \simeq 25$mm以内にする必要がある。

最後に，前項で決定した$A = 200 cm^2$を守るための構造であるが，上記と同様に円筒型，全半球型をその考察の対象とするとそれぞれの形状による外表面積A_C，A_R〔cm^2〕は次式で与えられる。

$$A_R = \frac{2\pi R_{PO}^2}{100} \qquad (3.14)$$

$$A_C = \frac{2\pi R_{PO} L_P}{100} \qquad (3.15)$$

ただし　A_C　：　円筒型Ni膜外表面積　〔cm^2〕

　　　　A_R　：　全半球型Ni膜外表面積〔cm^2〕

　　　　R_{PO}　：　Ni膜部外半径　〔mm〕

　　　　L_P　：　円筒型Ni膜長さ　〔mm〕

上式の関係を，図３－５，図３－６にそれぞれ示す。

以上Ni膜構造決定に対する基本関係を示す図３－４，図３－５，図３－６を用い，構造を可能な限り小さくする方向で形状を決定すればよい訳である。

3.6　必要Na流量の検討

本書は，冒頭にも述べたようにNi膜－イオンポンプ型Na中水素検出計の最適設計として先づ必要と考えられる点としてNi膜面積，イオンポンプ等真空側条件について記述して来た。しかし，3.1節の(3)に記した基本方針“Na側も含め小型化をはかる”事を満足するためには，Na側条件………温度，流量に対して検討を加えておく必要がある。

このうち，Na温度はNi膜温度と等しいと考えねばならず一義的に本モデルケースとしては500℃と決まって来るもので，むしろ温度制御を例えば±２℃以内におさえるといった事の方が重要となる。すなわち，Na系を小型化するためにはNa流量がどこまで小さく出来るかと云う点が最大の問題となる。

この必要Na流量に対し以下のように評価する。

(1)　評価法

流量Q_N〔g／sec〕のNaで運ばれて来る水素量をQ_{HN}〔g／sec〕とし，Niから真空系へ拡散する（Na側から失われる）水素量をQ_H〔g／sec〕とする。この時のQ_{HN}とQ_Hの比$Q_H / Q_{NH} = R_H$が１％以下の条件を見出す。

(2) 評価条件

Ni 膜面積 $A = 200$ 〔cm^2〕

Ni 膜厚さ $d = 0.05$ 〔cm〕

値過率 $K = 1.81 \times 10^{-5}$〔$cm^2\ mmHg^{1/2}/sec$〕

（注：低濃度部を対象とする。）

(3) 評価

真空側へ拡散する水素量Q_H はこれまで〔$mmHg \cdot cm^3/sec$〕の単位で評価して来たが，1 $mmHg \cdot cm^3$の水素の重さは，

$$\frac{1}{760} \cdot \frac{1}{10^3} \cdot \frac{2}{22.4} = 1.17 \times 10^{-7}\ 〔g(H_2)〕$$

で与えられる故，Q_H は（一般式である付録－Ⅲの（Ⅲ－3）式において右辺第2項を無視すれば，）上記の条件を入れて次式のとおり〔g・/sec〕の単位で表わされる。

$$Q_H = 1.81 \times 10^{-5} \cdot \frac{200}{0.05} \cdot 1.17 \times 10^{-7} \cdot P_{NH}^{1/2}\ 〔g/sec〕 \qquad (3.16)$$

1方，P_{NH} とNa中水素濃度C_{NH}〔ppm〕との間には（2.1）式の関係があり，Siverts定数K_H は（2.2）式で与えられる（500℃では$K_H = 5.04$〔$ppm/mmHg^{1/2}$〕）故，（3.16）式は次式のようになる

$$Q_H = \frac{8.47 \times 10^{-9}}{5.04} C_{NH} = 1.6 \times 10^{-9}\ C_{NH}\ 〔g/sec〕 \qquad (3.17)$$

1方，Ni 膜部のNa 流量がQ_N〔g/sec〕でその時の濃度がC_{NH}〔ppm〕であるとすれば膜部に運ばれて来る水素量Q_{NH}〔g/sec〕は次式のとおりである

$$Q_{NH} = Q_N \cdot C_{NH} \times 10^{-6}\ 〔g/sec〕 \qquad (3.18)$$

（3.17）式（3.18）式からNi 膜部でNa側から供給される水素量と拡散において失われる水素量の比R_H が次式のように求められる

$$R_H = \frac{Q_H}{Q_{NH}} = \frac{1.6}{Q_N} \times 10^{-3}\ 〔－〕 \qquad (3.19)$$

したがって

$$Q_N = \frac{1.6}{R_H} \times 10^{-3}\ 〔g/sec〕 \qquad (3.20)$$

が得られる。

今，$R_H = 0.01$すなわちNaによって運ばれる水素量に対しNi 膜から拡散して真空側に失われる水素量の比を1％におさえるためには

$$Q_N = 1.6 \times 10^{-1}\ 〔g/sec〕$$
$$\simeq 580\ 〔g/hr〕$$

となり0.5 kg/hrのNa 流量でも充分であることが判る。

以上の計算は低濃度部（45ppb）すなわち透過率Kの小さい領域で行なったものであるが，高濃度部（10ppm）においてK＝1.18×10^{-4}〔$cm^2 mmHg^{1/2}/sec$〕を考慮してもせいぜい$Q_N\simeq3800$〔g／hr〕となり5 ℓ／hr のNa流量でも充分その影響を1％以内におさえることが可能である。

3.7　決定基本仕様

モデル設計として3章で検討した結果を表3－1，表3－2に示し，本章のまとめとする。

4. ま と め

Ni 膜－イオンポンプ型水素検出計設計に対しこれまでSWAT－2において検討された項目（その多くは付録－Ⅰ～Ⅻにまとめた）を集約し設計用の特性図にまとめることが出来た。同特性図は新たに設計する場合はもちろん既設の水素検出計の性能評価が簡単に行え，きわめて一般性のあるものである。

本書で得られた結論を以下記述する。

(1) 動的平衡運転から考えられる設計仕様決定用特性図として〝検出特性図〟を作成した。同特性図の使用によって水素検出計として要求される測定濃度範囲および精度を満足するNi 膜面積，厚さおよびイオンポンプ排気速度を決定することが可能である。

(2) 静的平衡運転から考えられる設計仕様決定用特性図として〝静的平衡測定特性図〟を作成した。同特性図の使用によって較正試験を精度良く実施するために必要な，真空系容積表面積，表面処理および真空計自己排気量に対する要求仕様を決定することが可能である

(3) 上記２つの特性図を実際に用いてモデル設計を行い，その使用例を示すとともに現在動燃団で製作中の水素検出計の基本仕様を明示した。

(4) これまでSWAT－2の技術報告書等で検討された事項は付録－Ⅰ～Ⅻまでに簡明にまとめて記述したが，実際に設計製作する場合には更にこれ等を深く検討する必要もあると考えられる。この付録は設計用のチェックリストとしての機能も持たせた。

(5) 更に深く実験，検討を加えねばならない項目のうち透過率，真空計自己排気速度，表面処理と放出ガス量の関係等は特に重要であると考えられ，今後の内外多くの研究成果を期待する。

5. 使用記号説明

A	cm^2	Ni 膜面積
A_C	cm^2	円筒表面積
A_P	cm^2	真空系壁表面積
A_R	cm^2	全半球表面積
B_{IP}	$\mu A/mmHg$	イオンポンプ電流出力
C_B	ppm	系内均一分布濃度
C_{IN}	ppm	初期ステップ濃度
C_{MP}	cm^3/sec 又は ℓ/sec	真空系コンダクタンス
C_{NH}	ppm 又は ppb	Na 中水素濃度
D	cm^2/sec	拡散係数
D_P	cm	配管内径
E	$Kcal/mol$	活性化エネルギー
Ft	———	サーマル・トランスピレーション値
G_{H2}	g/sec	水素リーク率
G_{H2O}	g/sec	水リーク率
I_P	μA	イオンポンプ出力
I_{PN}	μA	イオンポンプノイズレベル
K	$cm^2 \cdot mmHg^{1/2}/sec$	水素のNi 膜透過率又は高圧領域透過率
K^*	$cm^2 \cdot mmHg^{1/2+1/m}/sec$	圧力依存領域での水素のNi 膜透過率
K_H	$ppm/mmHg^{1/2}$	Sieverts 定数
L_P	cm	長　さ
M	g/mol	気体分子
P	kg/cm^2g	強度計算における最高使用圧力
P_G	mmHg	真空計部圧力
P_{IP}	mmHg	イオンポンプ部圧力
P_{IP}^*	mmHg	イオンポンプ部バックグランド圧力
P_{IPN}	mmHg	I_{PN} に対応する圧力
P_M	mmHg	Ni 膜真空側圧力
P_{NH}	mmHg	Na 中水素分圧
P_P	mmHg	透過率の圧力依存性の生ずる境界Na 中水素分圧
Q^*	$mmHg \cdot cm^3/sec$	真空系壁表面からの全ガス放出量

Q_H	$mmHg \cdot cm^3/sec$	Ni 膜透過水素量
Q_N	m^3/h 又は g/sec	Na 流量
Q_{NH}	g/sec	流量 Q_N のNaに運ばれる水素量
R	$Kcal/mol \cdot °K$	気体定数
R_H	——	$= Q_H / Q_{NH}$
R_P	mm	配管内半径
R_{PO}	mm	配管外半径
S	cm^3/sec 又は l/sec	イオンポンプ排気速度
S_F	$mmHg \cdot cm^3/sec$	真空計自巳排気速度
T_{AV}	℃又は°K	$= (T_{Ni} + T_G)/2$
T_C	C°又は°K	水素のNa中飽和温度
T_G	C°又は°K	真空計部温度
T_N	℃又は°K	Na 温度
T_{Ni}	C°又は°K	Ni 膜温度
V	cm^3	真空系容積
W	——	強度計算における形状係数
W_{H2}	g	総リーク水素量
W_{H2O}	g	総リーク水量
b	——	透過率の圧力依存性に関する定数
d	cm	Ni 膜厚
k	$cm^2 \cdot mmHg^{1/2}/sec$	透過常数
k	——	強度計算における使用温度における係数
l_P	cm	真空配管長さ
m	——	透過率の圧力依存性に関する定数
n	——	$= 1/2 + 1/m$
q_H	$mmHg \cdot cm^3/sec \cdot cm^2$	単位時間，面積あたりの水素透過量
q^*	$mmHg \cdot cm^3/sec \cdot cm^2$	単位時間，面積あたりの真空壁からの放出ガス量
t	sec	時　間
αx	kg/mm^2	強度計算における材料の許容　強張り強さ
η	——	強度計算における溶接継手効率
α	mm	強度計算におけるくされ代

6. 参 考 文 献

1） 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）

2） 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）

3） 根井，氏原，大内，大島，井上，堀〝小リーク・ナトリウム・水反応試験研究　第３報〟（蒸気ウェステージと検出計の応答）SN943　73－02（1973）

4） 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〟（蒸気ウェステージと検出計の応答）SN941　74－45（1974）

5） 池本，橋口，大内，井上，鐘ケ江，堀〝Na中水素計の動的および静的平衡法による試験結果（小リーク・ナトリウム・水反応試験研究　第８報）〟SN941　76－28（1976）

6） 鐘ケ江，池本，橋口，堀，他〝Ni膜型水素検出計設計における水素透過率の圧力依存性に関する考察（小リーク・ナトリウム・水反応試験研究　第９報）〟SN941　76－29（1976）

7） 藍，山本，小池，桜間，河原〝蒸気発生器ナトリウム中水素検出計の開発（その１）〟－水素検出法の検討－原子力学会昭和49年秋の分科会予稿集（II）C－7

8） 松岡，三好，山本，藍，阿部〝蒸気発生器ナトリウム中水素検出計の開発（その２）〟－水素ガスによる校正法－原子力学会昭和49年秋の分科会予稿集（II）C－8

9） 桜間，坂口，佐藤，阿部〝蒸気発生器ナトリウム中水素検出計の開発（その３）〟－ナトリウム中試験－原子力学会昭和49年秋の分科会予稿集（II）C－9

10） 鐘ケ江，橋口，火山，吉川，堀〝50MW蒸気発生器試験施設における水素挙動（第１報）〟－基礎的検討－昭和50年日本原子力学会年会要旨集　C－29

11） 築地，鐘ケ江，山本，藍〝50MW蒸気発生器試験施設における水素挙動（第２報）〟－Na中水素検出計の改良－昭和51年日本原子力学会年会要旨集　第１分冊　B－48

12） 藍，山本，築地，鐘ケ江〝50MW蒸気発生器試験施設における水素挙動（第３報）〟－検出計ガス中試験－昭和51年日本原子力学会年会要旨集　第１分冊　B－49

13） 池本，法月，岡田，鐘ケ江〝50MW蒸気発生器試験施設における水素挙動（第４報）〟－水素検出計Na中試験－昭和51年日本原子力学会年会要旨集　第１分冊　B－50

14） 鐘ケ江，法月，藍，山本〝50MW蒸気発生器試験施設における水素挙動（第５報）〟－透過係数の圧力依存性に関する考察－昭和51年日本原子力学会年会要旨集　第１分冊　B－51

15） 近　刊〝50MW蒸気発生器試験施設におけるNa－水反応関係試験報告第１報〟

16） 近　刊〝50MW蒸気発生器試験施設におけるNa－水反応関係試験報告　第２報〟

17) 鐘ケ江，池本，橋口，堀，他〝Ni膜型水素検出計における水素透過率の圧力依存性に関する考察〟（50MW蒸気発生器におけるNa－水反応関係試験報告　第3報）
SN941　76－29（1976）

18) E. Cambillard et. al.〝Tests Carried out on the PHENIX Steam Generator Leak Detection Systems〟IAEA Bensberg Meeting Report (1974)

19) 氏原，根井，大内，橋口，大島，井上，堀〝小リークNa－水反応試験（第11報）Na中水素計の特性と水素の溶解割合〟原子力学会昭和49年秋の分科会予稿集（II）　D－21

20) D. R. Vissers et. al.,〝A Hydrogen Monitor for Detection of Leaks in LMFBR Steam Generators〟Nuclear Technology, Vol. 12, (1971)

21) D. R. Vissers et. al.,〝Hydrogen－Meter Leak Detector for LMFBR Steam Generators〟ANL－8047(1973)

22) D. R. Vissers et. al.,〝A Hydrogen－Activity Meter for Liquid Sodium and It's Application to Hydrogen Solubility Measurements〟Nuclear Technology Vol. 21, (1974)

23) K. Dumm et. al.,〝Small Leak Detection Requirement for SNR－300 Steam Generator Operation〟IAEA Bensberg Meeting Report(1974)

24) 宮地，佐藤，古村，合志，大島，大谷，根井〝蒸気発生器水リーク検出用Na中水素検出器の開発（I）－水素検出器の試作および試験－〟昭和51年日本原子力学会年会要旨集　第I分冊　B－46

25) J.M. Mckee et. al.,〝Evaluation of Steam to Sodium Leak Detectors in the Sodium Compornents Test Facilty (SCTI)〟IAEA Bensberg Meeting Report (1974)

26) M. Hissink〝Leak Detection in Steam－Generators with Hydrogen Monitors Using Diffusion Membrane〟IAEA Bensberg Meeting Report (1974)

27) S. A. Meacham〝The Solubility of Hydrogen in Sodium〟APDA－241 (1970)

28) A. C. Whittingham〝The Liquid Sodium－Hydrogen System Equilibrium and Kinetic Measurements in the Temperature Range 610－677°K〟CEGB RD／B／N2550 (1974)

29) M. L. Hill et. al., Acta. Met. 3 (1955)

30) K. H. Lieser et. al., Z. Phys. Chem. 202 (1954)

31) R. W. Webb〝Permeation of Hydrogen Through Metals〟NAA－SR－10462 (1965)

32) Y. Ebisuzaki et. al., 〝Diffusion and Solubility of Hydrogen in Single Crystals of Nickel and Nickel-Vanadium Alloy〟 J. Chem. Phys., Vol. 46. NO4 (1967)

33) P. Roy et. al., 〝Characterization of a Diffusion Tube Hydrogen Detector in a Dynamic Sodium System〟 Nuclear Technology Vol. 12 (1971)

34) H. Schenck et. al., Arch Eisenhütt 37 (1966)

35) 日刊工業新聞社〝真空技術常用諸表〟真空技術講座12 真空技術常用諸表編集委員会編

36) 日本真空技術株式会社〝超高真空技術入門〟NO501 規格品事業部UHV

37) Blears et. al., Adrances in Vac. Sci (1960)

38) B. B. Dayton, 1959 6th Natl. Vac. Symp. Vac. Technol. Trams. (Pergamon. 1960)

39) F. A. Flecken et. al., 1961 Trans. 8th Natl. Vac. Symp. 2nd Intern. Congr. Vac. Sci. Technol. ed. L. E. Preuss (Pergamon, 1962)

40) Das. AF. 49(600)923(1961)

41) N. Basalaeva: Soviet Phys.-Tech. Phys. 3. 1027 (1958)

42) R. J. Connor et. al., 1961 Trans. 8th Natl. Vac. Symp. 2nd Inter. Congr. Vac. Sci. Technol. ed. L. E. Preuss (Pergamon. 1962)

43) 小宮：〝第7回真空技術夏期大学テキスト（真空協会, 1967）〟

44) 富永，辻〝真空工学の基礎〟真空技術講座1 日刊工業新聞社

45) 熊谷，富永〝真空の物理の応用〟物理学選書11，裳華房（1970）

46) H. S. Carslaw et. al., 〝Conduction of Heat in Solids〟 Oxford at the Clarendon Press (1971)

47) 高石〝サーマルトランスピレーションについて〟真空 第6巻第9号 (1963)

48) J. H. Singleton 〝Errors in Pressure Measurement and Impurity Generation in Hydrogen Using Bayard-Alpert Ionization Gauges〟 J. Vac. Sci. Technol., Vol. 4, NO3 (1966)

49) 鐘ケ江，樋口，池本，大内，井上，堀〝ウェステージに対する距離の効果に関する試験とその検討およびリーク孔拡大（セルフウェステージ）に関する一考察（小リークナトリウム・水反応試験研究 第7報）〟SN941 76－27 (1976)

50) 東芝KK〝もんじゅ調整設計（I）設計書〟 O/# 1964020 ZJ201－74－25B(8)(1974)

51) ASME Boilor and Pressure Code. Section Ⅷ. (1962)

52) 労働省，第1種圧力容器構造規格

表２－１　検討対象とした５００℃における透過率

条件＼領域＼番号	圧力依存性の無い領域における透過率K ($cm^2 \cdot mmHg^{1/2}/sec$)	圧力依存性の有る領域における透過率K＊ ($cm^2 \cdot mmHg^{1/2+1/m}/sec$)	出　典
	$P_{NH} \geq 0.5$mmHg	$P_{NH} \leq 0.5$mmHg	参考文献 6)
①	$K=9.0\times10^{-4}$	$K^*=K\cdot1.25\cdot P_{NH}^{1/2.8}$	参考文献 6) 15)
②	$K=7.8\times10^{-4}$	同　上	同上
③	$K=1.7\times10^{-4}$	$K^*=K\cdot1.25\cdot P_{NH}^{1/4.5}$	参考文献 6) 16)
④	$K=1.18\times10^{-4}$	同　上	同上

但し　P_{NH}：Na中水素分圧（mmHg）

表３－１　真空系基本仕様一覧

No.	項　　目	単　位	仕　　様	備　　考
1	測定範囲	ppb	45 ～ 10^4	
2	測定精度	――	Ｎｉ膜部に上記値の±10%変化がステップ状に生じた場合，10～30秒内にその変化を確認出来，Ｎａ 系も含め系の入口に変化が生じてから40秒以内に検出可能とする。	
3	基本系統	――	イオンポンプ２基を有する２排気系とする。	
4	構成機器 (必要コントローラも含む)	――	イオンポンプ　２基 同上止弁　２基 シュルツゲージ　１基 電離真空計　１基 荒引き系　１系統 Ni膜部　１式	バリアブルリーク弁付
5	Ni膜　材　質 面　積 厚　さ 温　度	―― cm² mm °C	Nickel 201 相当 200 0.5 500	
6	イオンポンプ排気速度	ℓ/sec	(A)　2.0 (B)　30	低濃度測定用 高濃度測定用および排気用
7	真空系　容　積 表面積 表面処理	cm³ cm² mmHg・ℓ/sec	1000以下を目標 1000 〃 〃 8×10^{-12} 〃	
8	真空計自己排気量	mmHg・ℓ/sec	6×10^{-6} 以下を目標	
9	設計圧力	kg/cm²・g	−1～10　(全系)	
10	設計温度	°C	520°C (但し，Ni膜は500°C 真空系ポンプ側は常温とする。ベーキング温度には充分耐えられること)	これ等の値の詳細区分は，設計の進捗にともない評価する。

表3－2　Na系基本仕様一覧

No.	項目		単位	仕様
1	設計温度		°C	520
2	設計圧力		kg/cm²g	運転時：10 予熱時：－1
3	材質		――	JIS SUS 304 相当
4	Na温度	膜部	°C	膜部において500°C±2°Cの制御が可能なこと。
		入口	°C	Na系への入口温度条件は 設計値：200°C 運転時：320～450°C
5	Na流量		kg/hr	Na系入口からNi膜部までの到達時刻を10秒以下にする。また，必要Na流量は5kg/hr以上とする。
6	基本系統		――	ヒータ内蔵エコノマイザ型
7	構成機器		――	Na出入口止弁　2基 ヒータ　1基 エコノマイザ(ヒータ含)　1基 電磁ポンプ　1基 電磁流量計　1基 保温，予熱ヒータ　1式 その他必要な計器　1式
8	適用規格		――	労働省　第1種圧力容器構造規格

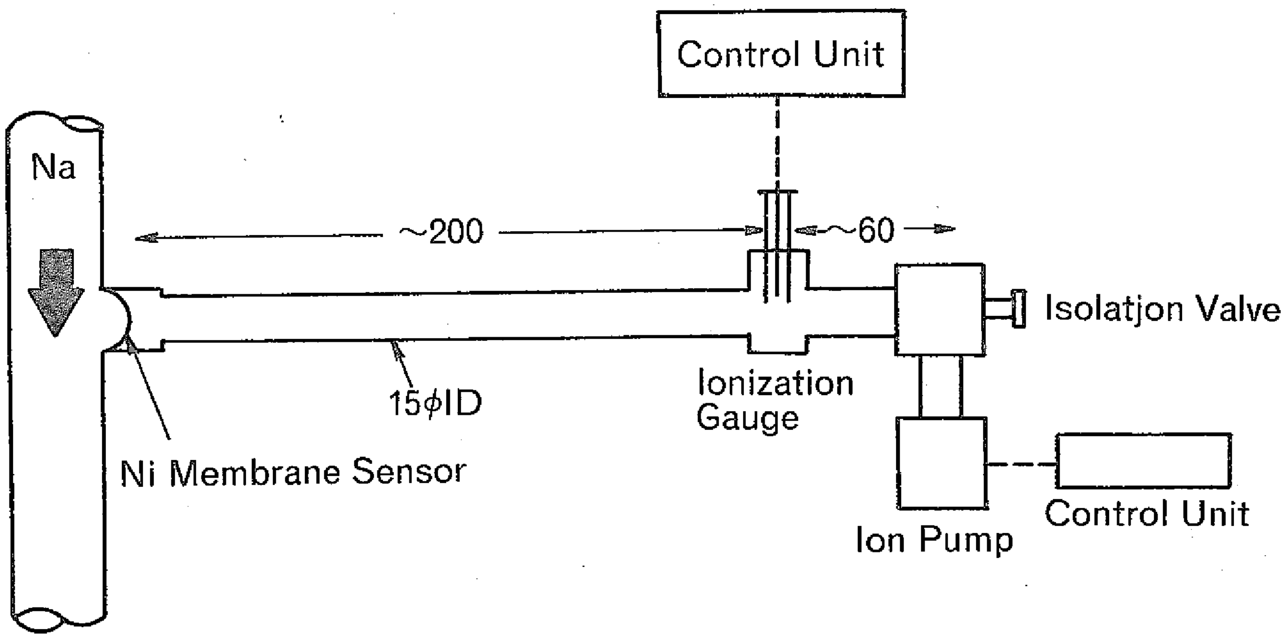


図２－１　SWAT－２用Na中水素検出計系統図[5)6)]

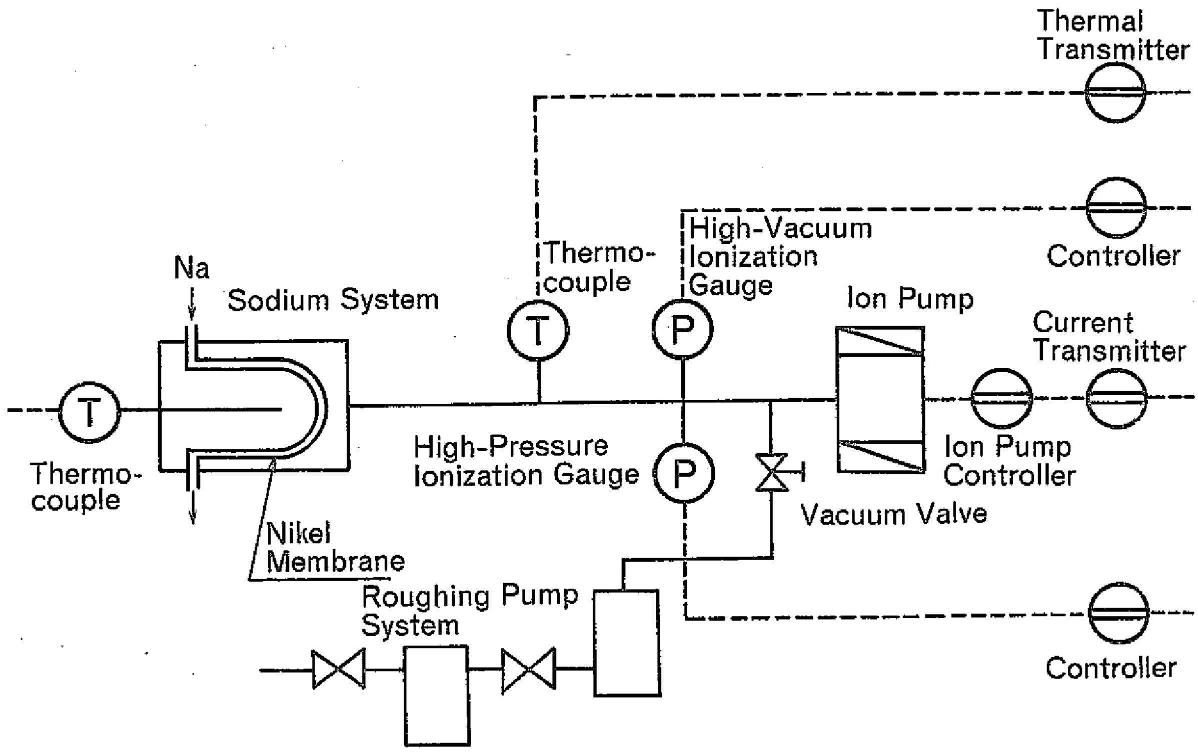


図２－２　50MWSGTF用Na中水素検出計系統図[6)15)]

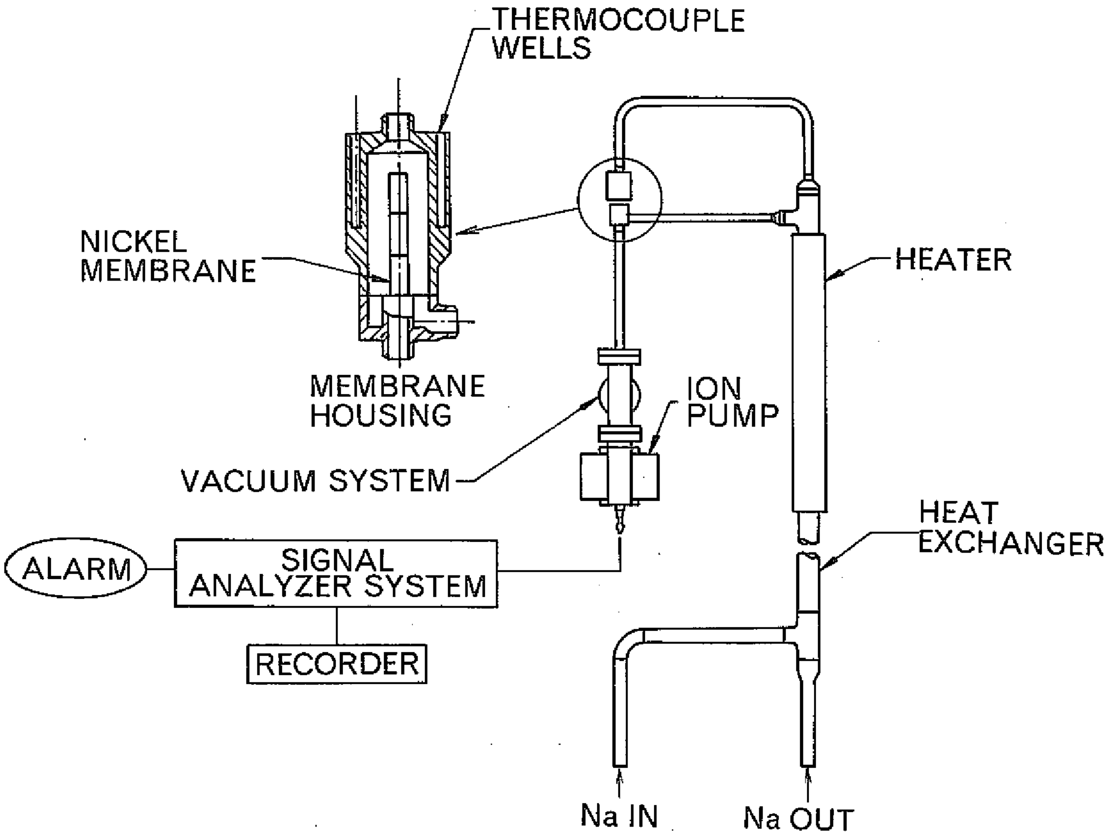


図２－３　ANL試作Na中水素検出計系統図（その１）[21]

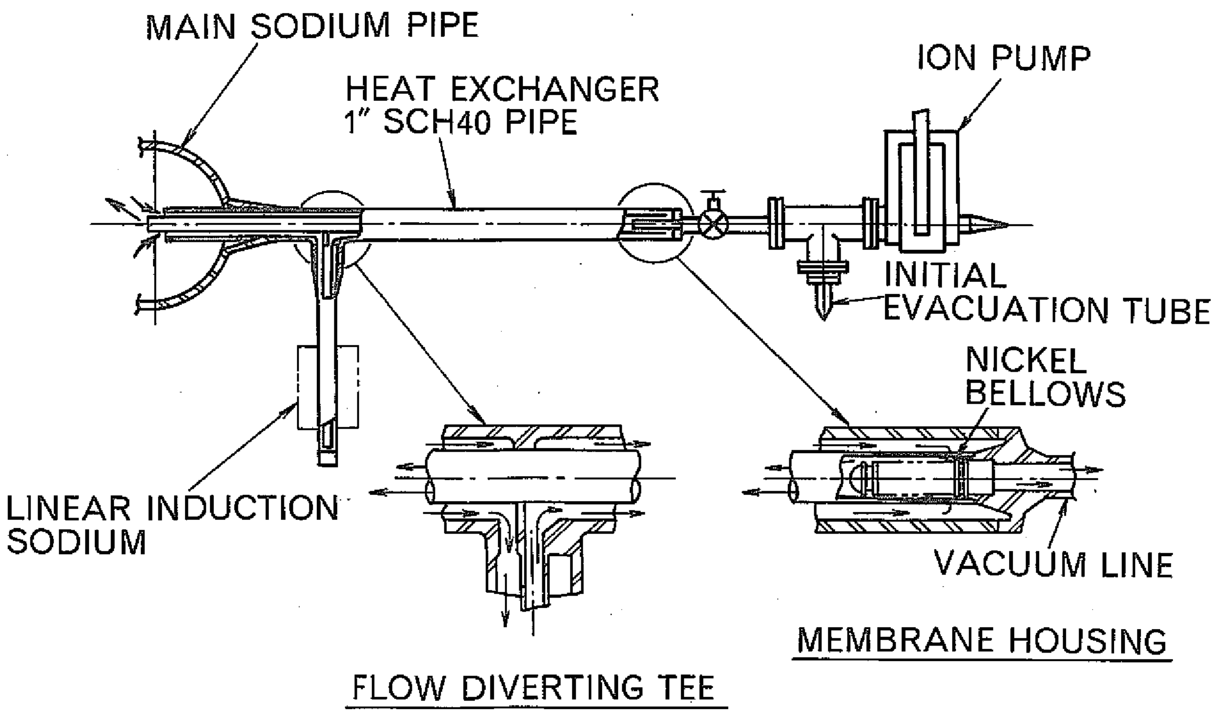


図２－４　ANL試作Na中水素検出計系統図（その２）[21]

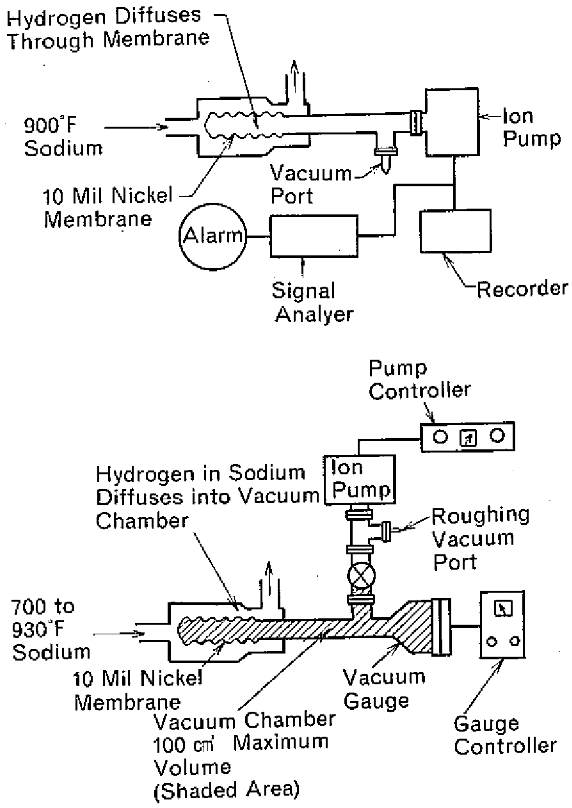


図2-5　SCTI用Na中水素検出計系統図[25)]

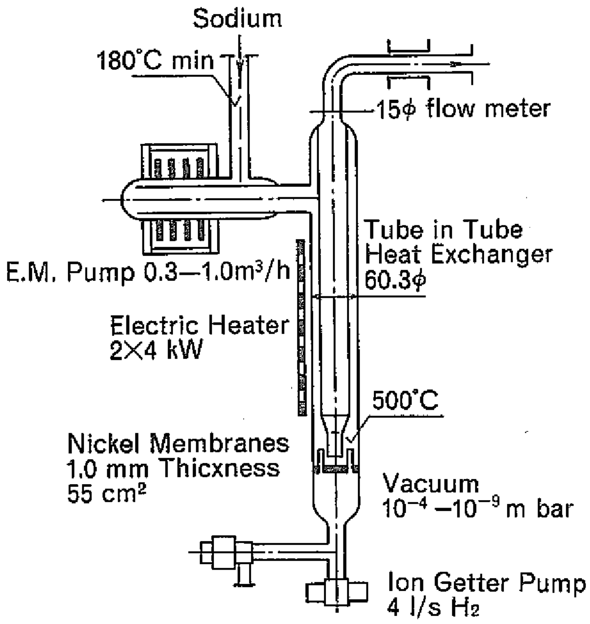


図2-6　SNR-300用Na中水素検出計系統図[23)]

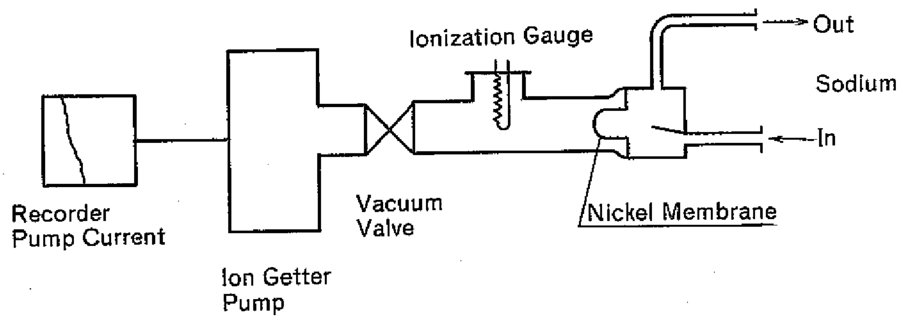


図2-7　TNO開発中，Na中水素検出計系統図[26)]

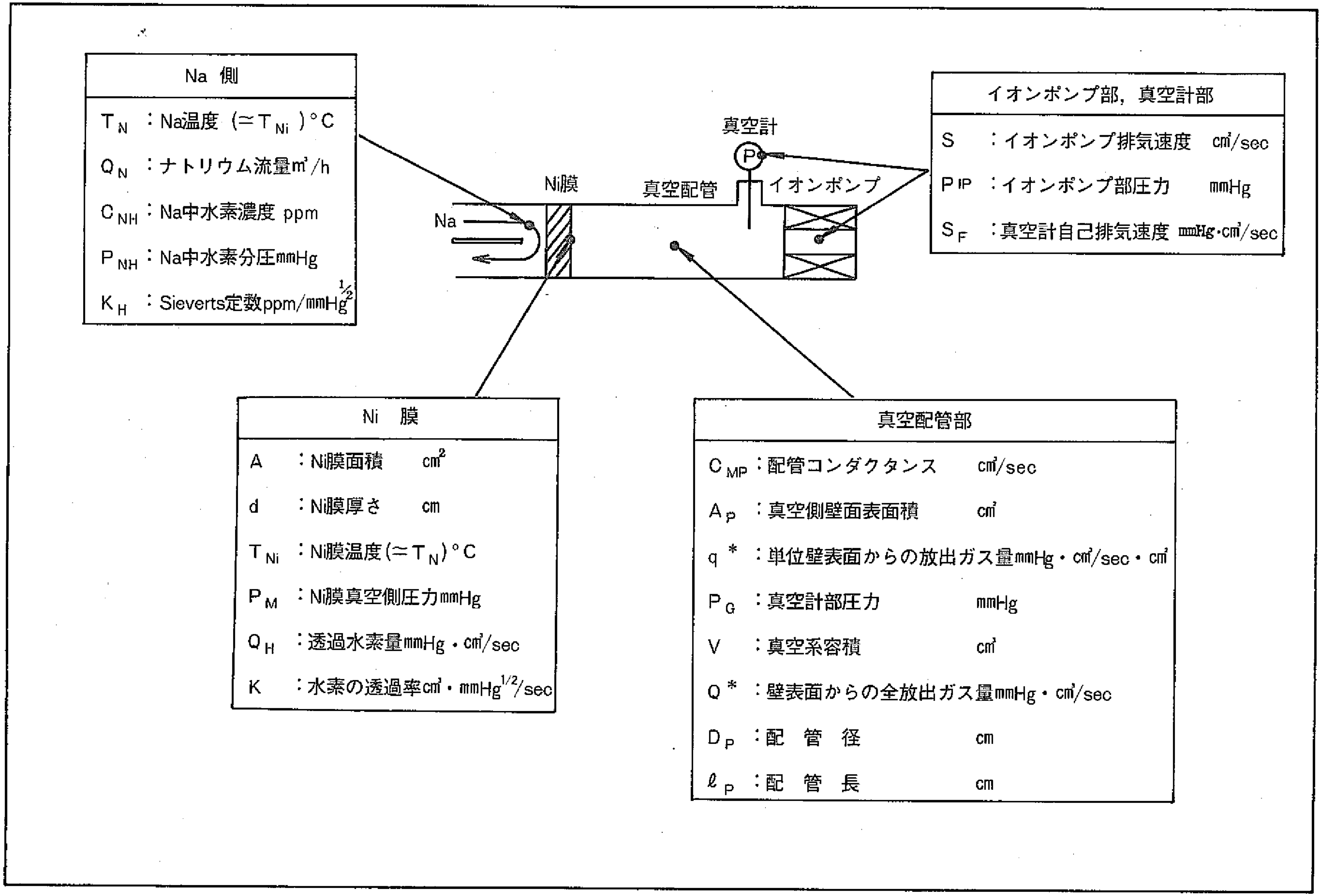


図２－８ Ni膜－イオンポンプ型水素検出計概念図

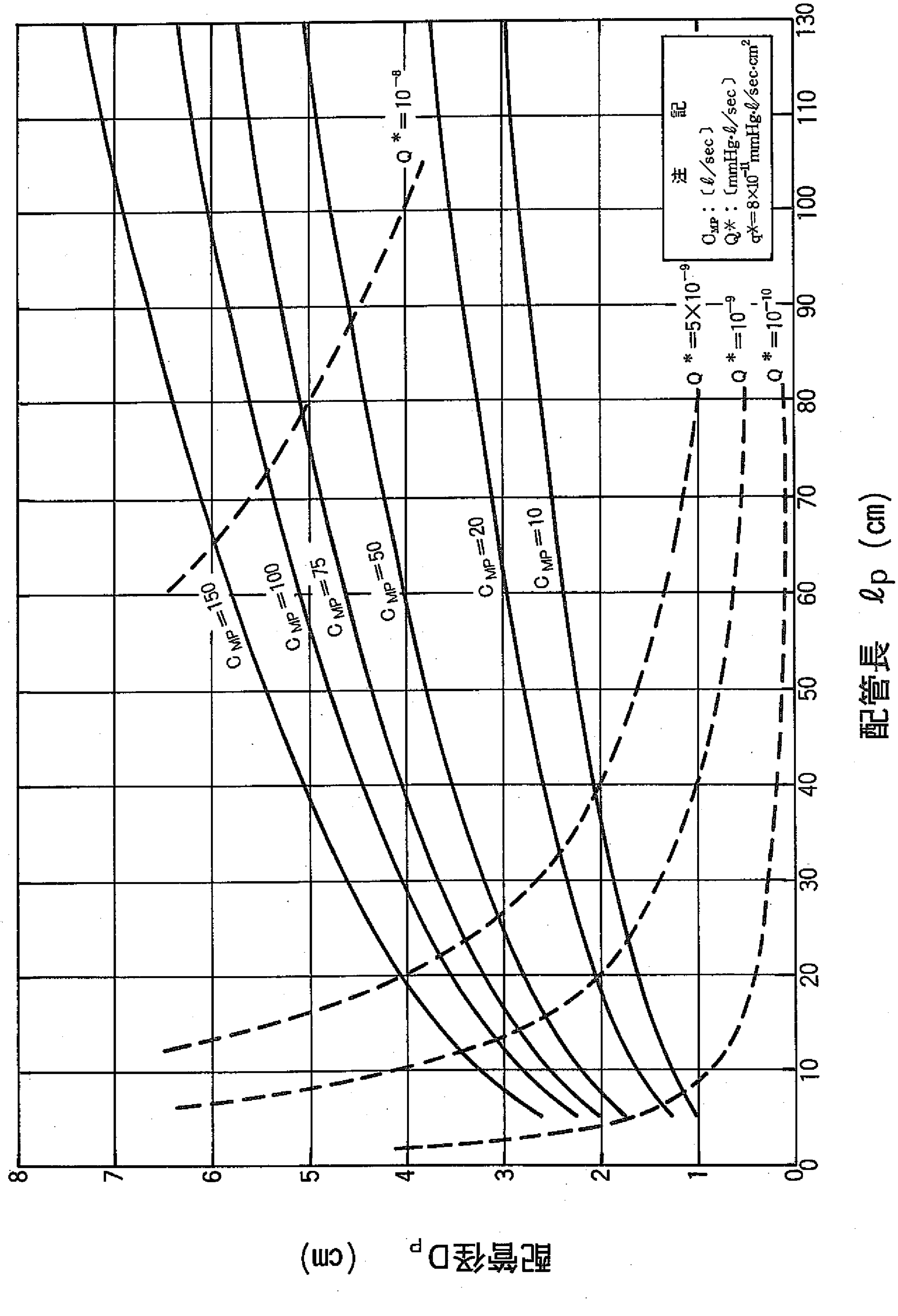


図2−9 単管形状における配管コンダクタンス C_{MP} および放出ガス量 Q^* の関係

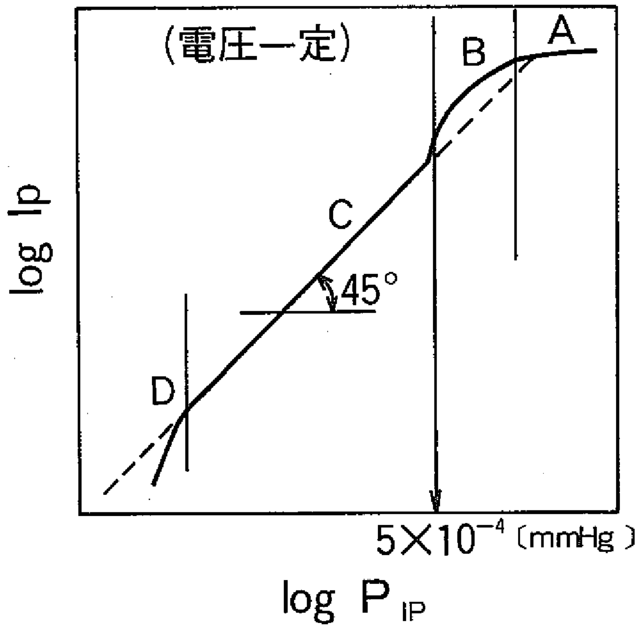


図2－10　イオンポンプの圧力P_{IP}と
イオンポンプ出力I_Pの関係

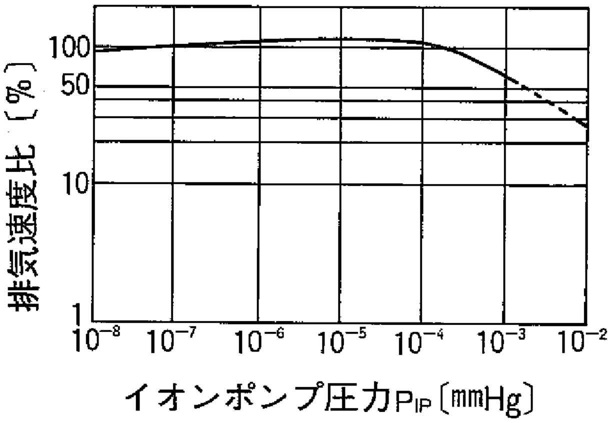


図2－11　イオンポンプ排気量の
圧力依存性

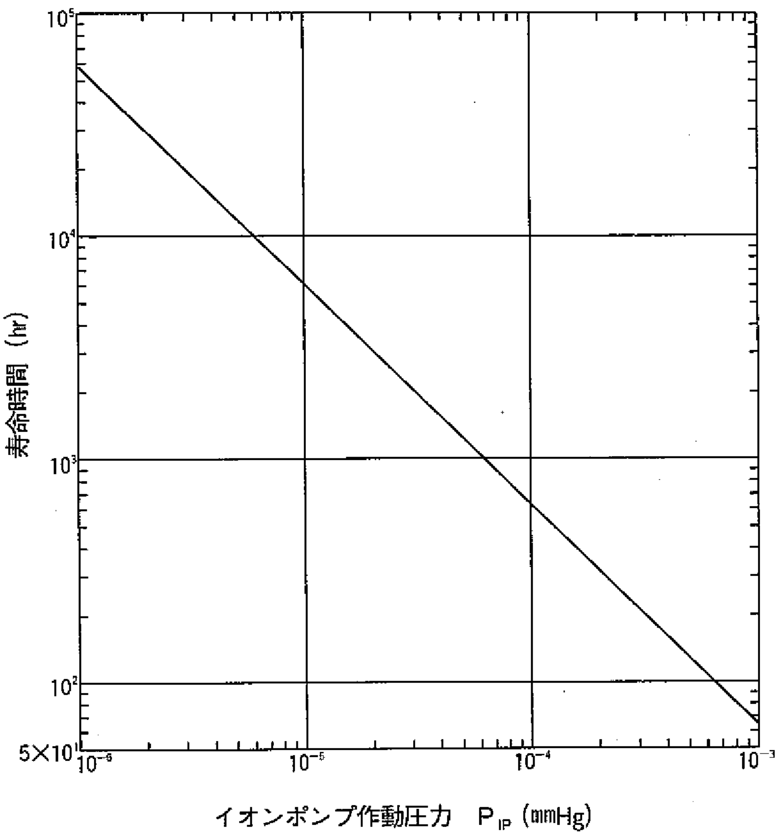
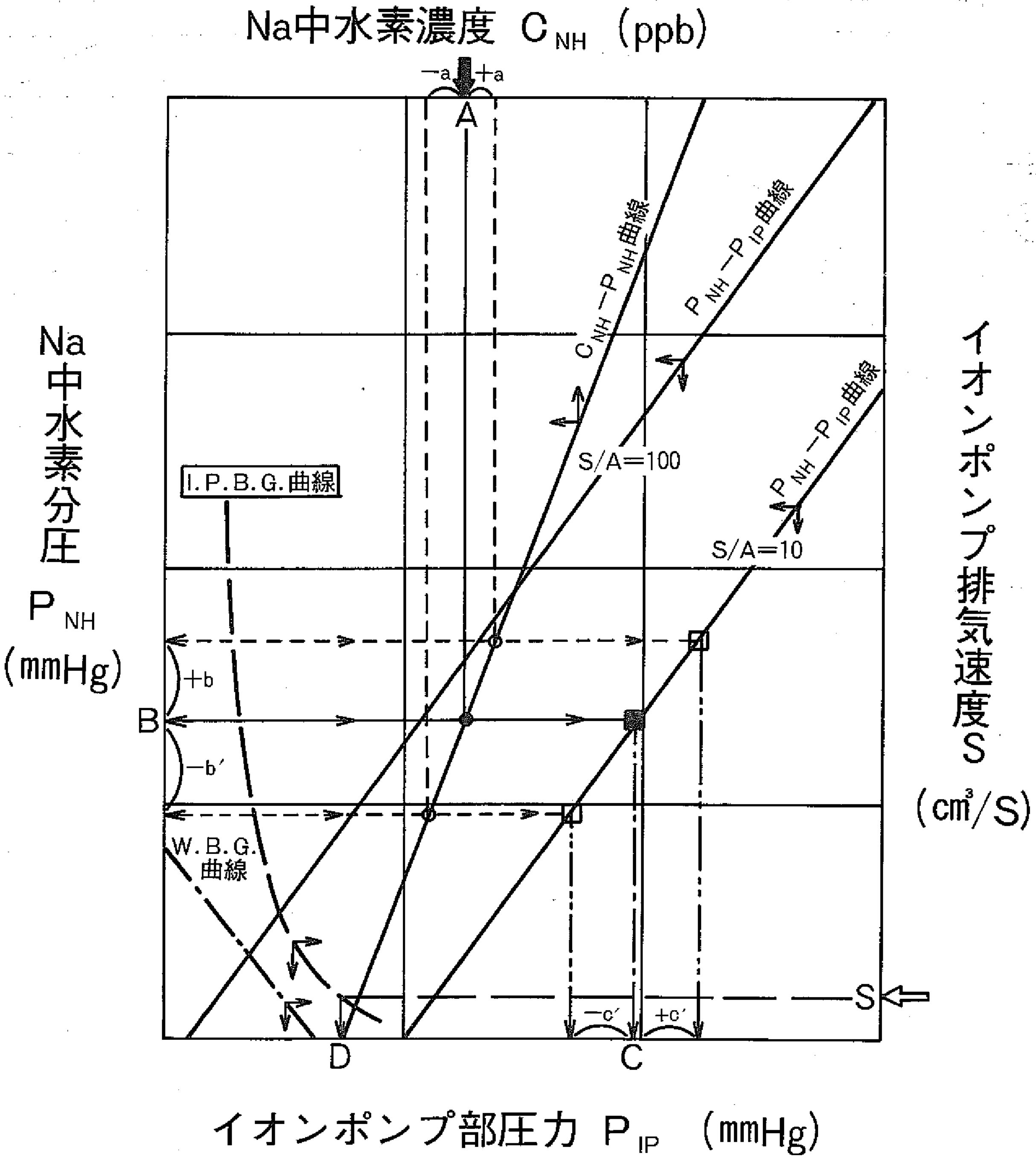
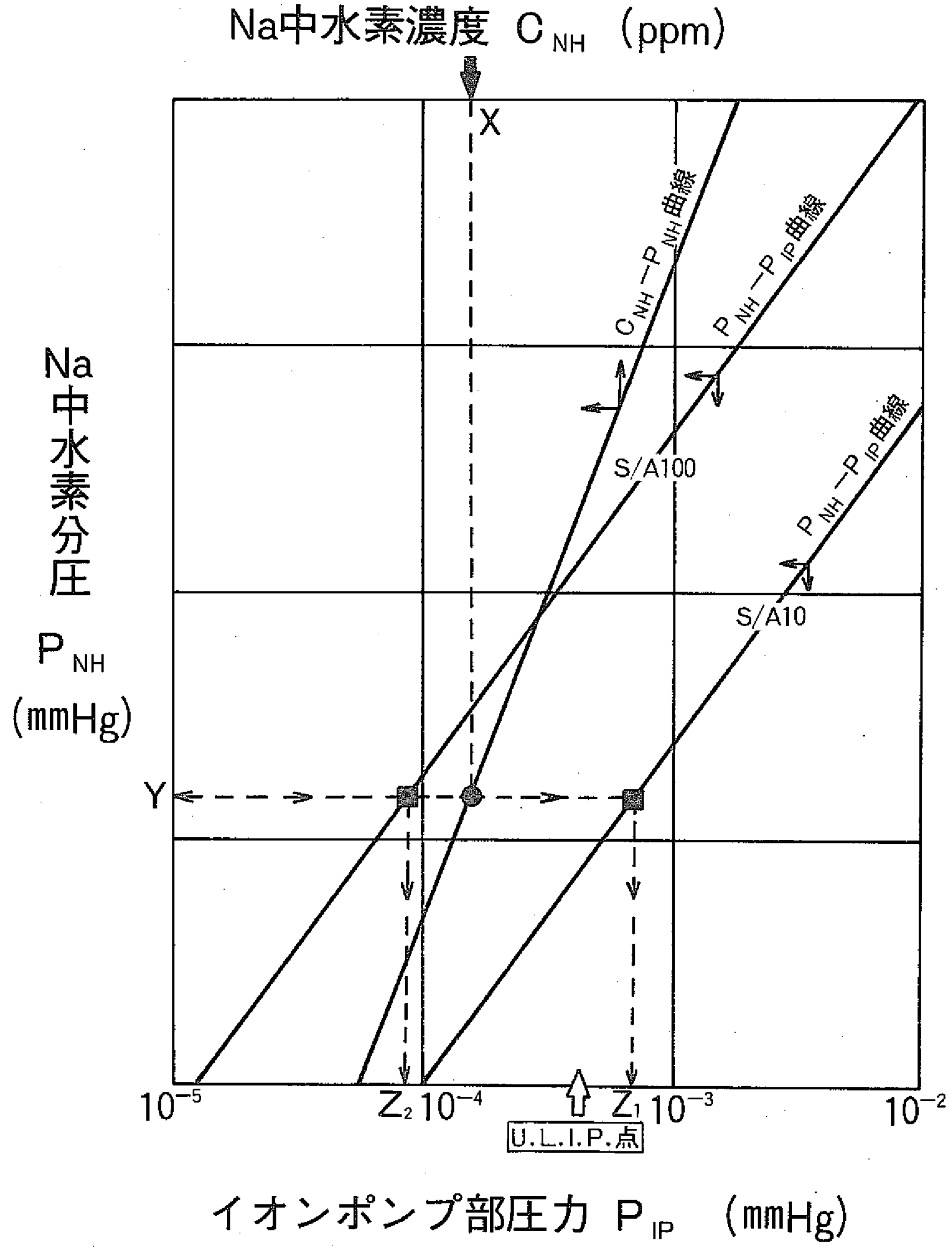


図2－12　イオンポンプの寿命



設問：Na中水素濃度がAppbの時±ａppbの変化が測定可能か？
条件：膜厚温度は一定，排気速度はS. とする。
方法：A± aとC$_{NH}$−P$_{NH}$曲線の交点からNa中分圧の範囲B±b(orb′)が判る。
S/A=10を選べばB±b(orb′) と P$_{NH}$−P$_{IP}$曲線よりイオンポンプ部圧力値の範囲C±c (or c′)が判る。1方使用イオンポンプ排気速度S値とI.P.B.G.曲線からB. G値Dが判る。このD値よりもc, c′値が充分大きければ，測定可能である。
S/A=100の場合は，同様にたどると測定不可能であることが判る。

図２－１３　検出特性図の読み方（低濃度用）



設問：Na中水素濃度が X ppmの時測定可能なSとAの関係は何か？
条件：膜厚温度は一定，イオンポンプ使用限界圧力をU. L. I. P点とする。
方法：X値とC_{NH}−P_{NH}曲線よりNa中水素分圧P_{NH}，Yが判る。
YとP_{NH}−P_{IP} 曲線よりイオンポンプ部圧力P_{IP}が，S/A＝10の時Z_1，S/A＝100の時Z_2であることが判る。U. L. I. P点より大きいZ_1の場合は測定不可能，Z_2の場合は可能であることが判る。

図２－１４　検出特性図の読み方（高濃度用）

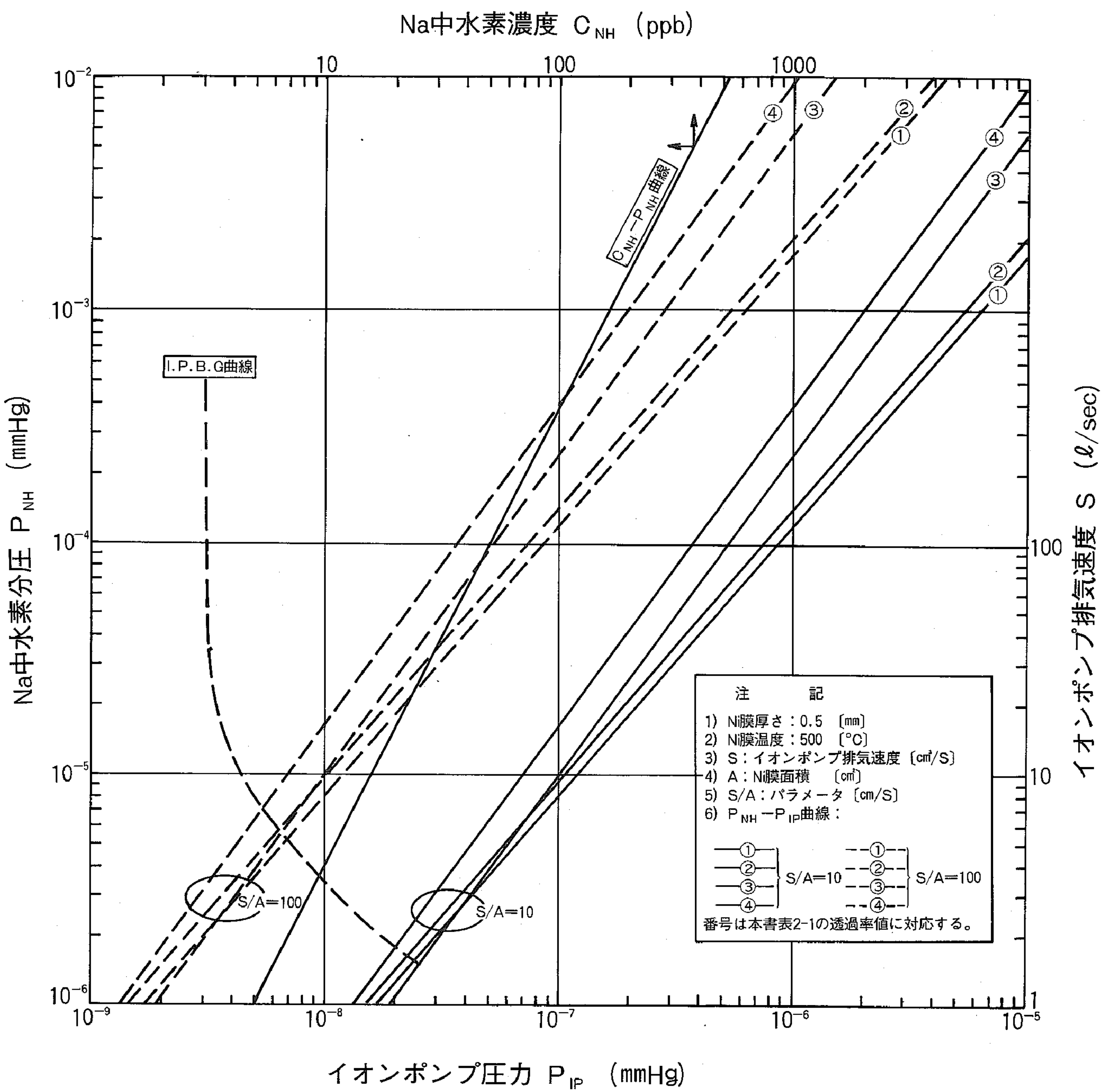


図２−15　検出特性図（低濃度用）

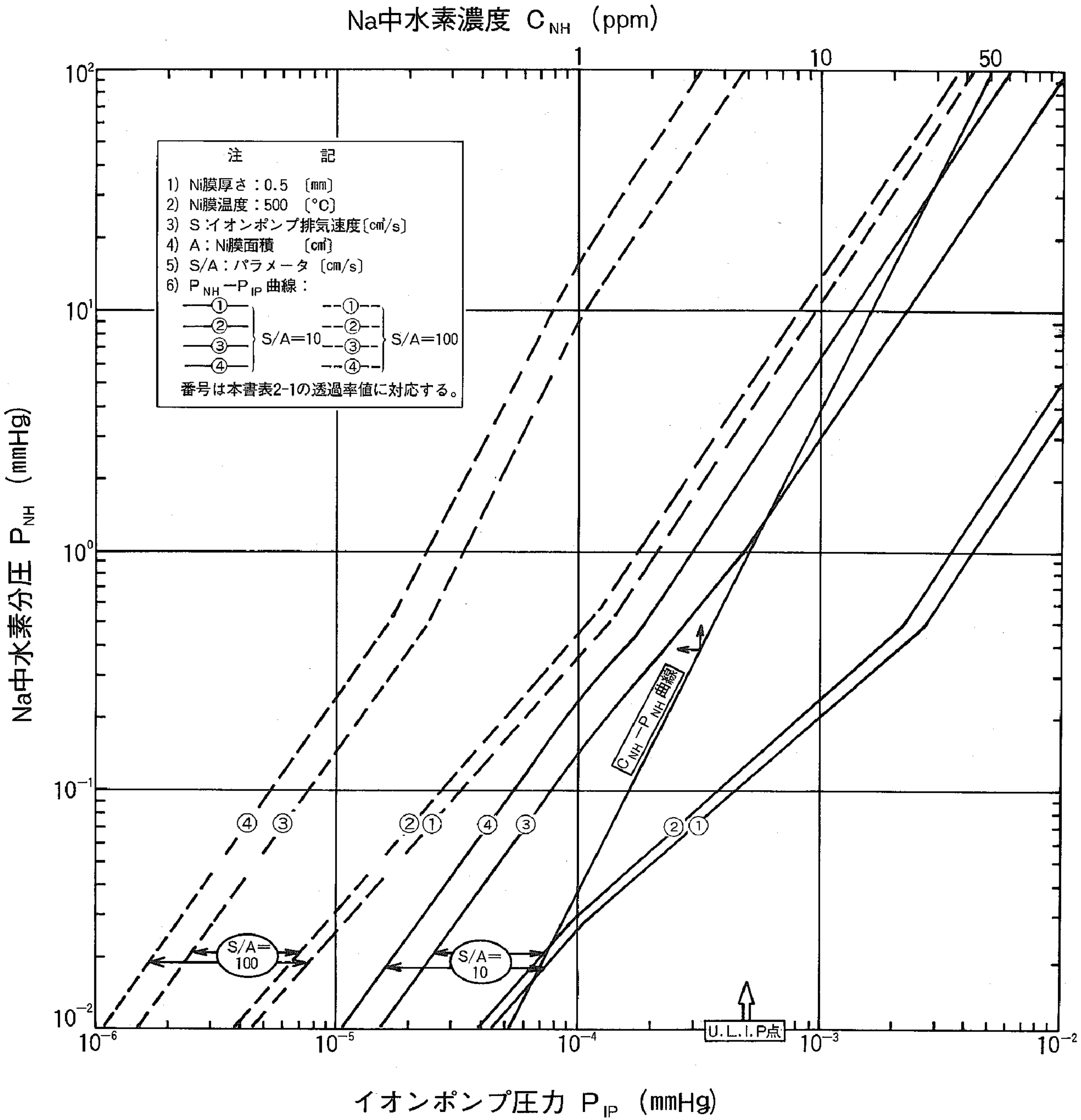


図２−１６ 検出特性図（高濃度用）

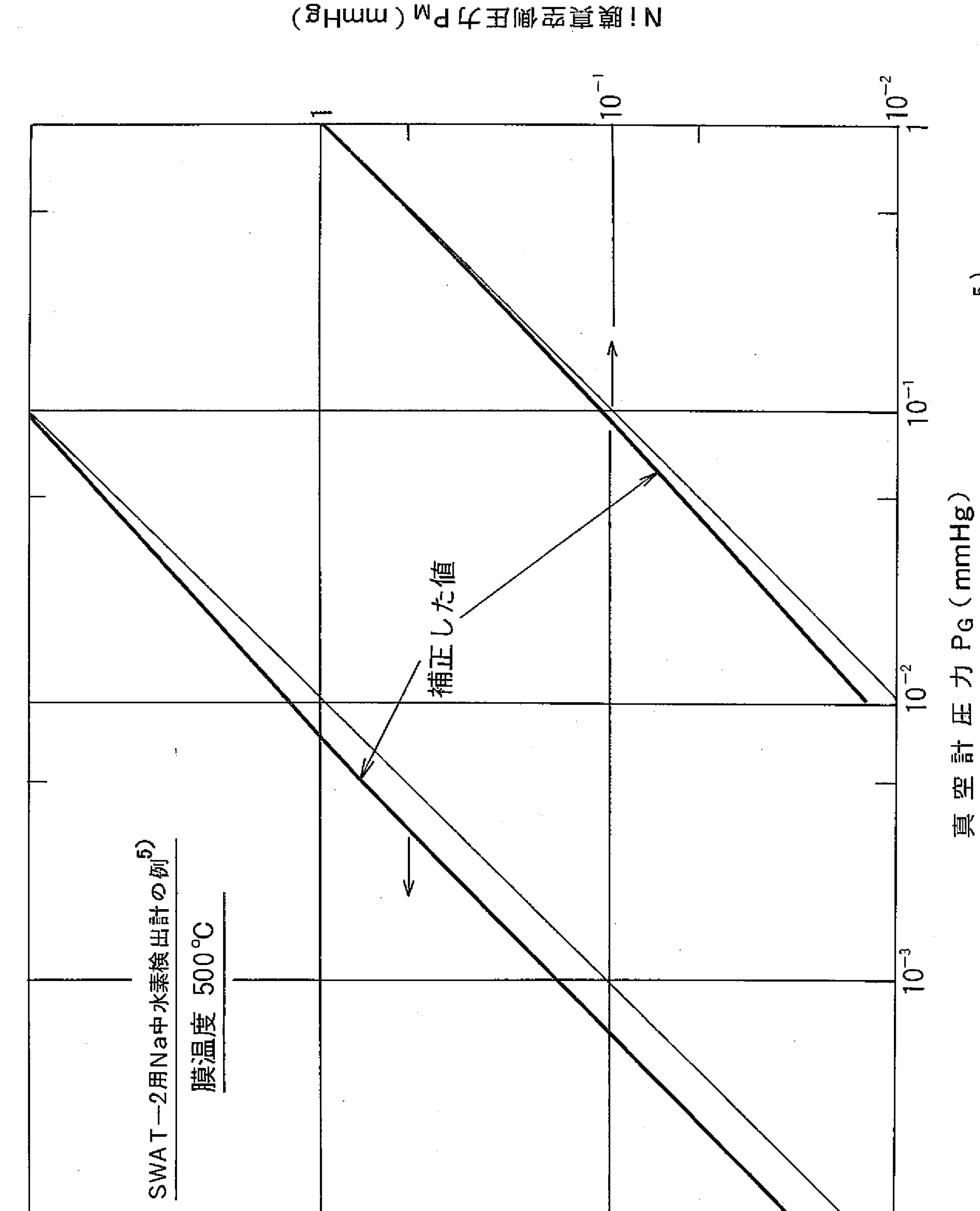
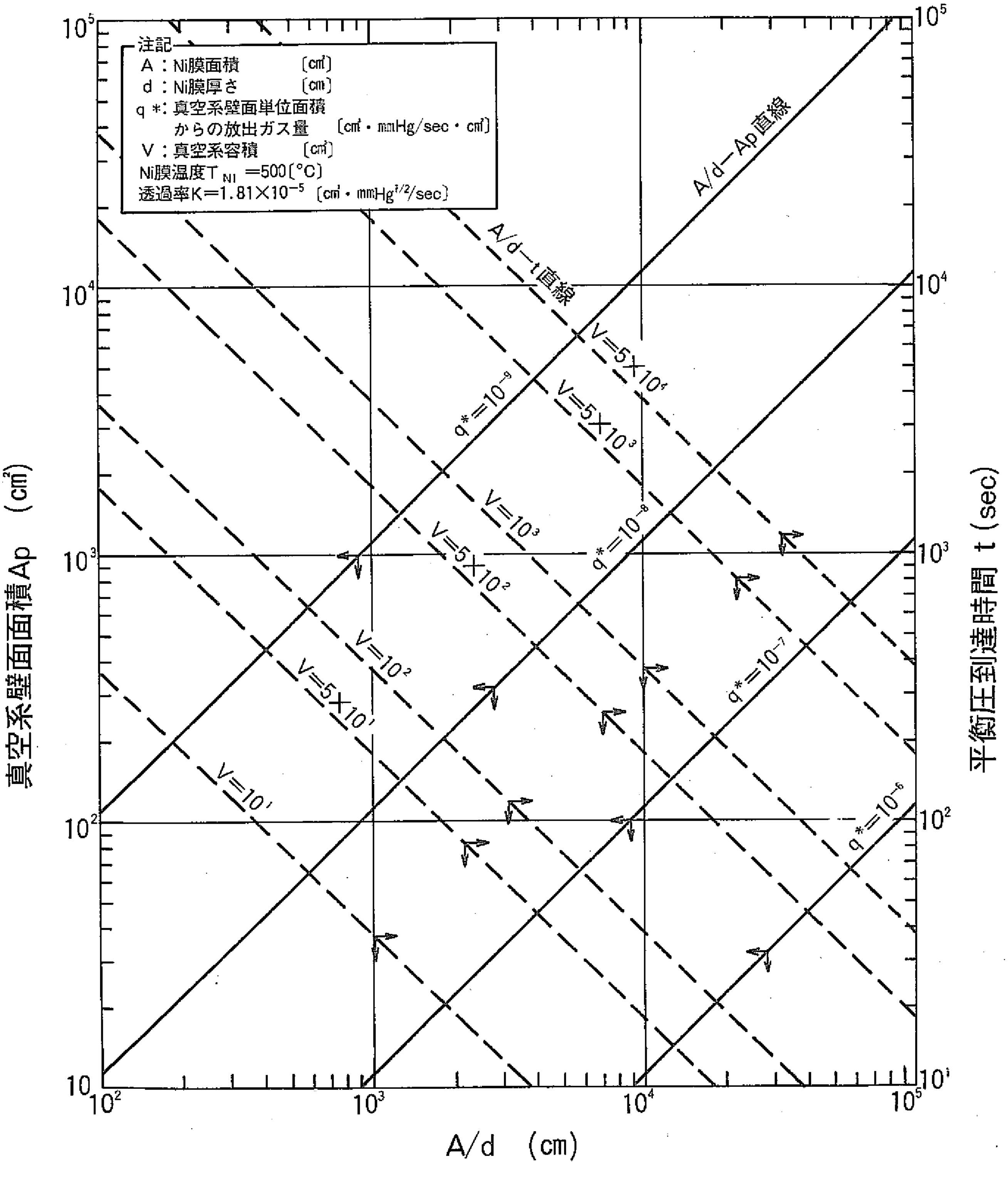
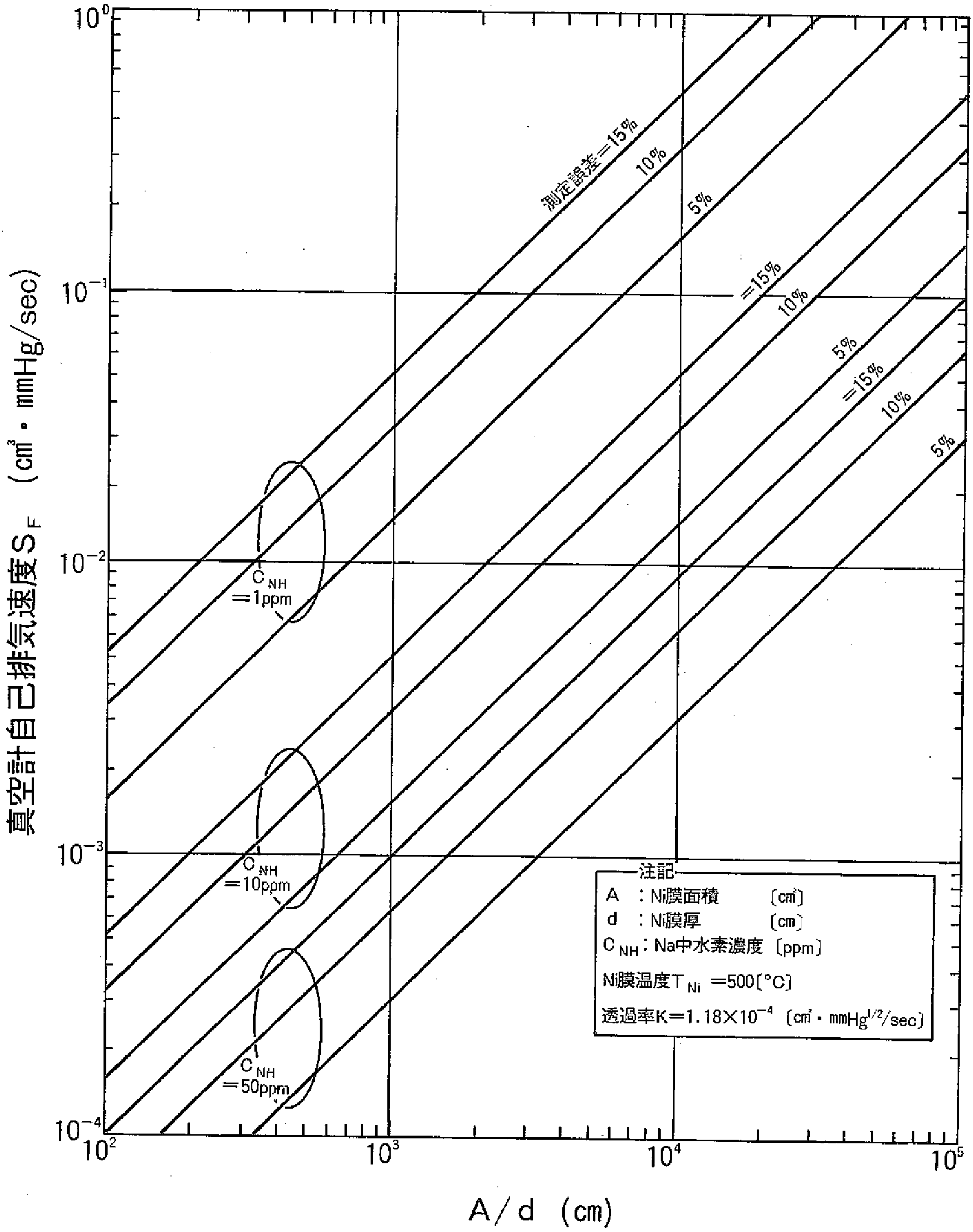


図2－17　サーマル・トランスピレーションによる圧力補正例[5)]



説明：Na中水素分圧 $P_{NH} = 8 \times 10^{-5}$ mmHg ($C_{NH} = 45$ ppb)における静的平衡（ P_{NH} の98％値で平衡と做す）測定時の測定必要時間と，真空系壁面からの放出ガスによる測定認差を5％におさえるための関係。

図2－18　静的平衡測定特性図（低濃度用）



説明：Na中水素濃度１，１０，50ppm内における静的平衡測定時に，真空計自己排気速度による測定設差を５，１０，１５％におさえるために必要な関係。

図２－１９　静的平衡測定特性図（高濃度用）

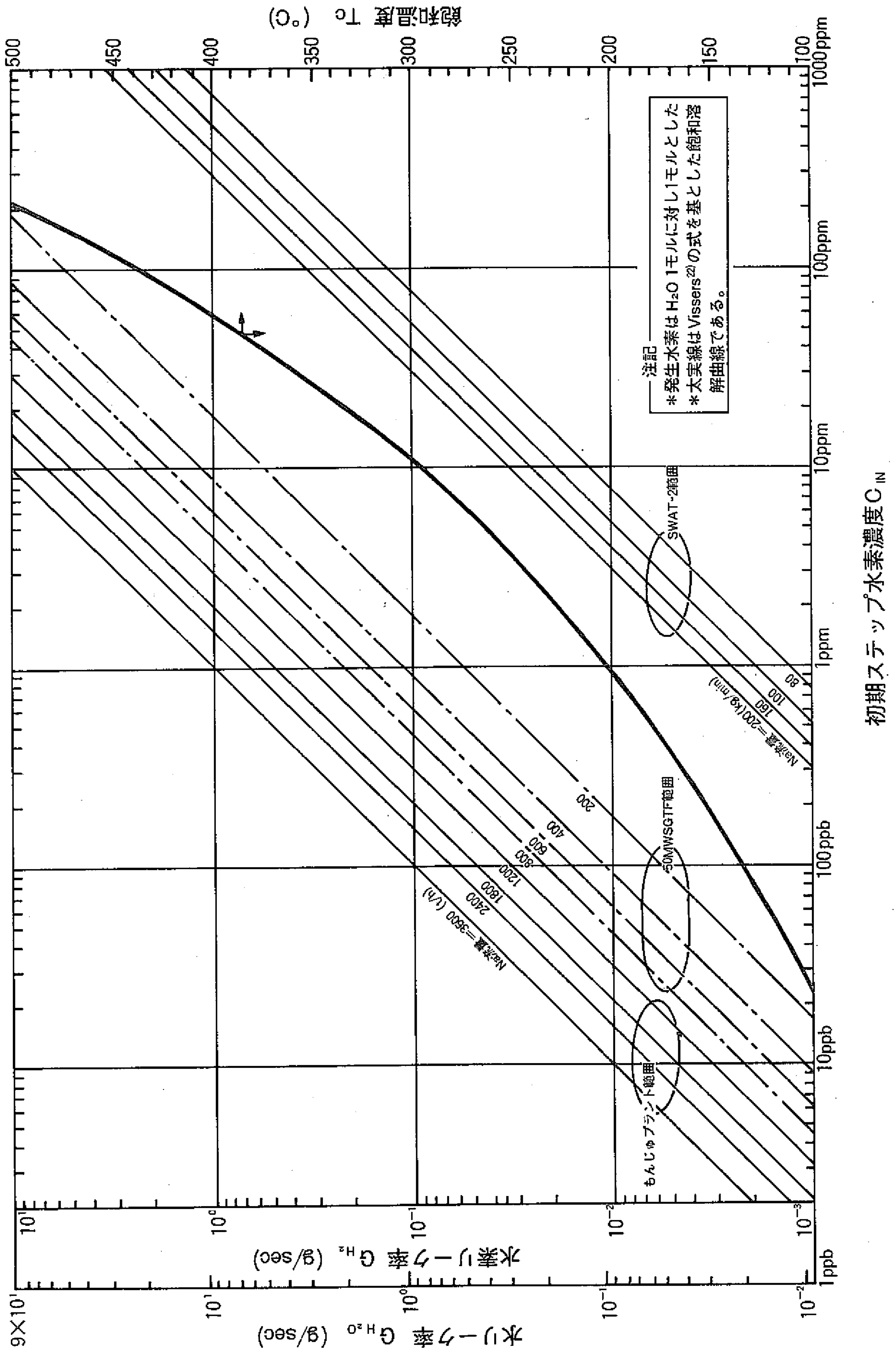


図3－1　G_{H2}，G_{H2O} と C_{1N} の関係

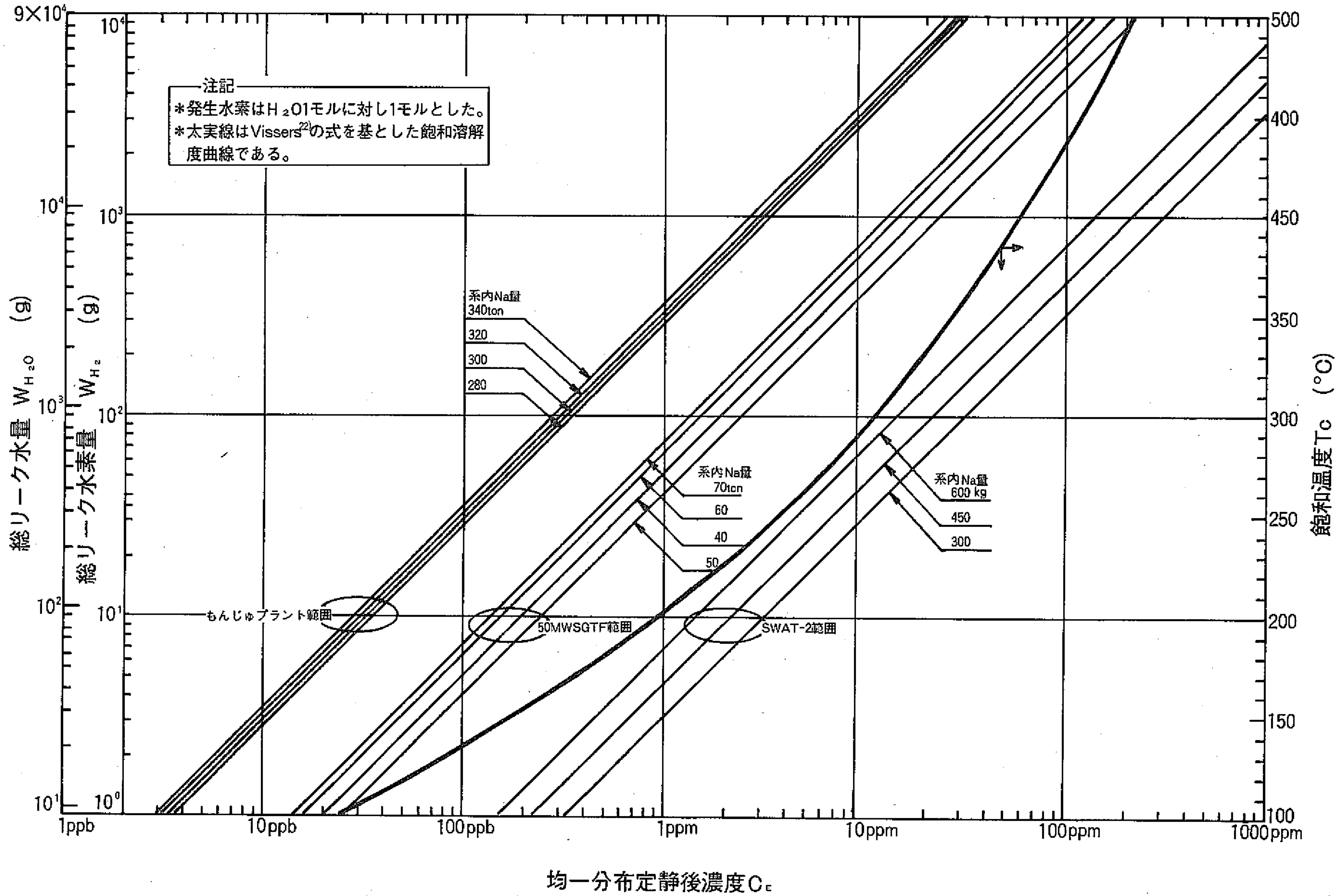


図３－２　W_{H2}，W_{H2O} と C_E の関係

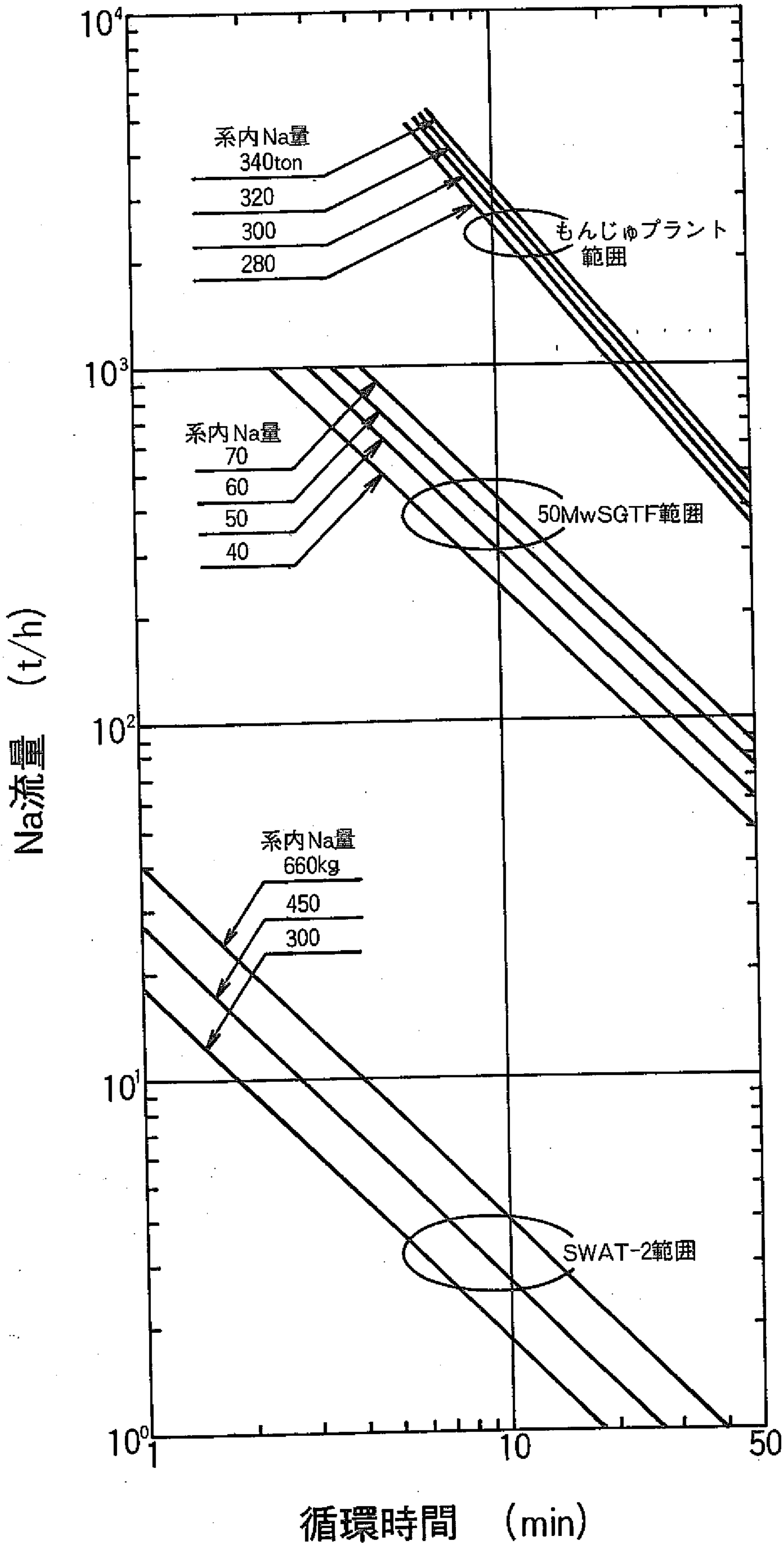
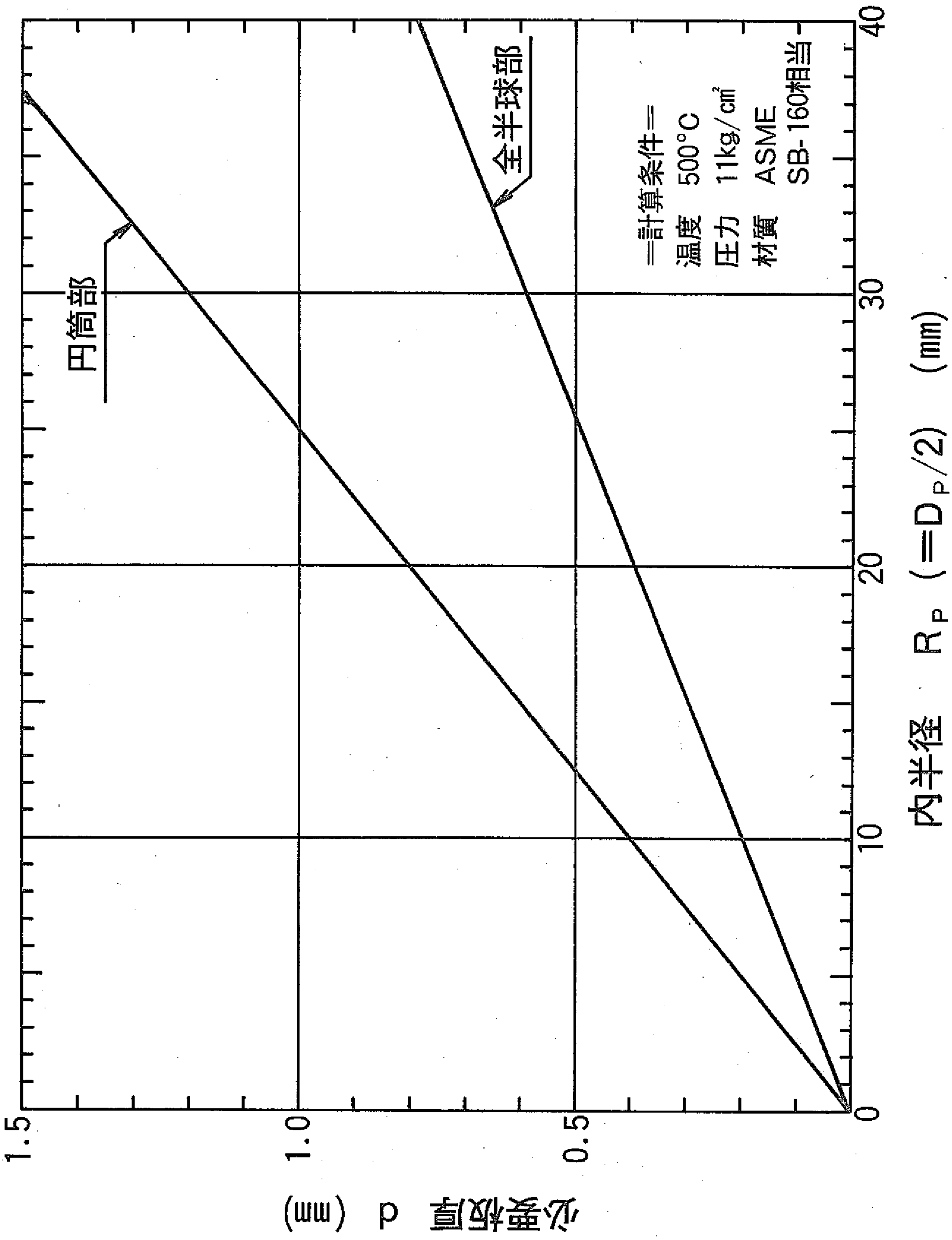


図３－３　Na流量と系内循環時間の関係



円筒部
全半球部
一計算条件一
温度 500°C
圧力 11kg/cm²
材質 ASME
SB-160相当
内半径 R_P (＝D_P/2) (mm)
必要板厚 d (mm)
0
10
20
30
40
0.5
1.0
1.5

図3－4 Ni膜必要肉厚

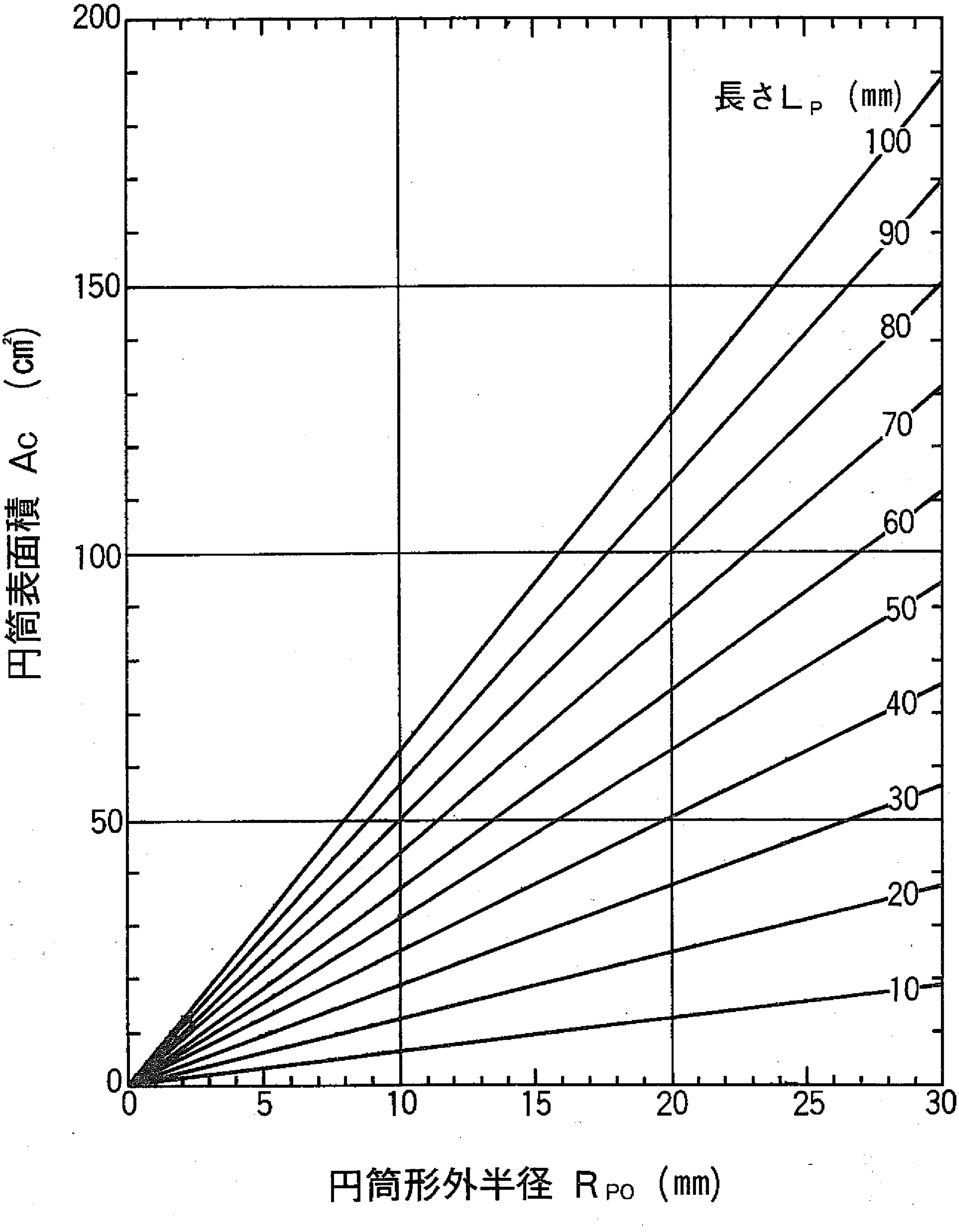

200
150
100
50
0
円筒表面積 Ac (cm²)
長さＬₚ (mm)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
5
10
15
20
25
30
円筒形外半径 Rₚₒ (mm)

図３－５　円筒表面積

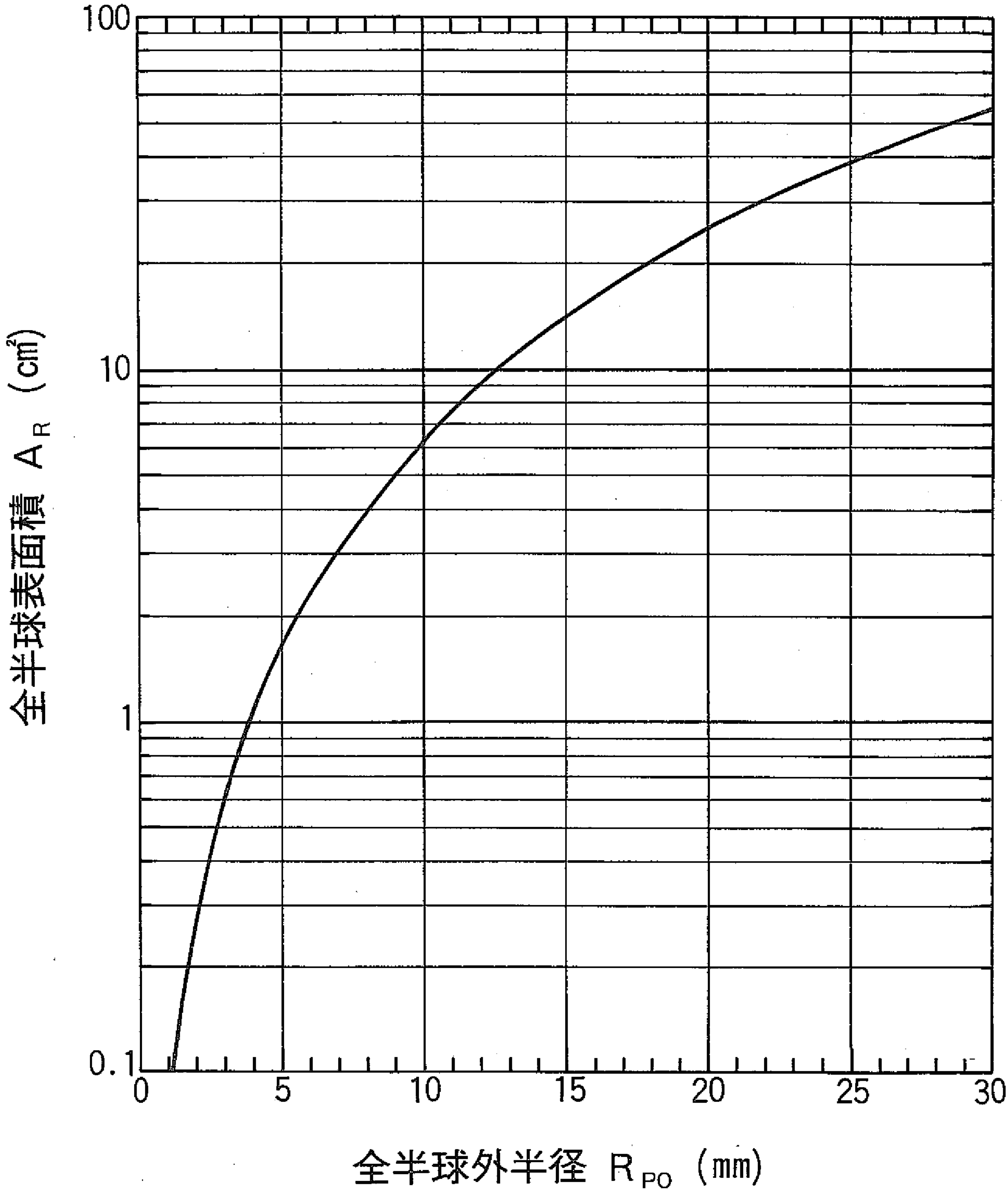


図３－６　全半球表面積

付　　　録

付録－I　較正試験の概要[5)]

較正試験とは，Na 中水素分圧 P_{NH} あるいはNa 中水素濃度 C_{NH} とNa 中水素計の出力の関係を求めるもので，系内Na 中水素濃度 C_{NH} を段階的に変えて行き各濃度に対する水素計出力値，たとえばイオンポンプ電流 I_P との関係を図示することにより，較正曲線を得るために実施するものである。

したがって，まず系内水素濃度を各段階で一定に保つことおよびその時のNa 中水素分圧値あるいは水素濃度値を正確に知る必要がある。このためには，コールドラップ温度を一定にして運転し，系内Na 中水素濃度を一定にした上で水素計を静的平衡状態にする。この静的平衡状態とは，イオンポンプを停止あるいはイオンポンプ隔離弁を閉じること等により水素計真空側の排気能力を停止し，Ni 膜を通して透過する水素により真空側圧力がNa 中水素分圧と等しくなった状態をいう。すなわち，この静的平衡状態における真空側圧力がNa 中水素分圧そのものの値となる。

その後，真空部の排気を行なえば，Ni 膜を介してNa 中水素分圧と真空側圧力の間に，イオンポンプ排気能力に応じた圧力分布が形成される。この状態を動的平衡状態という。これより同一Na 中水素濃度における動的平衡状態での水素計出力と，上記静的平衡法により求められるNa 中水素分圧が測定される。以上の手順と水素計出力の変化を模式的に下図に示す。

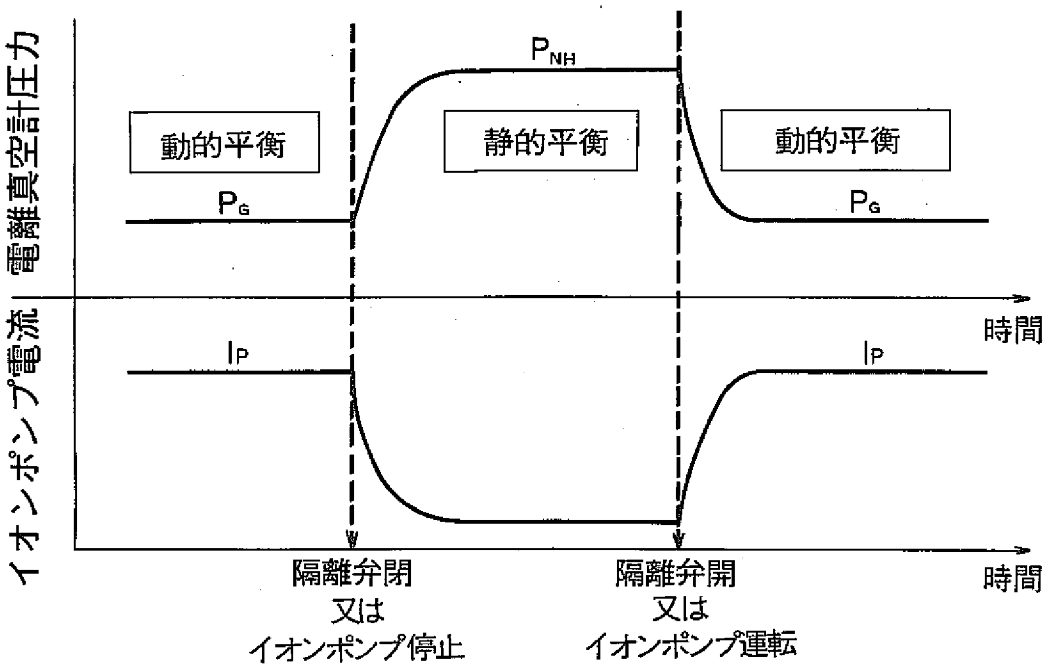


図 I － 1　較正試験手順概念図

付録－Ⅱ　Sieverts 定数 K_H の検討

SWAT－2装置では，上記定数を求める実験研究は実施していない。したがって内外データのうち最も信頼性あるものを用いざるを得ない。本項ではこれ等主要データの比較を行い使用定数の確認を行う。

1. 比較検討

① 比較の対象とした値を表Ⅱ－Ⅰに，500℃におけるNa中平衡水素分圧 P_{NH} と濃度 C_{NH} （$=K_H \cdot P_{NH}^{1/2}$）の関係を図Ⅱ－1に示す。

② Vissers等の値はその適用範囲が実用的であり，実験も温度の効果を充分考慮し式に導入している。

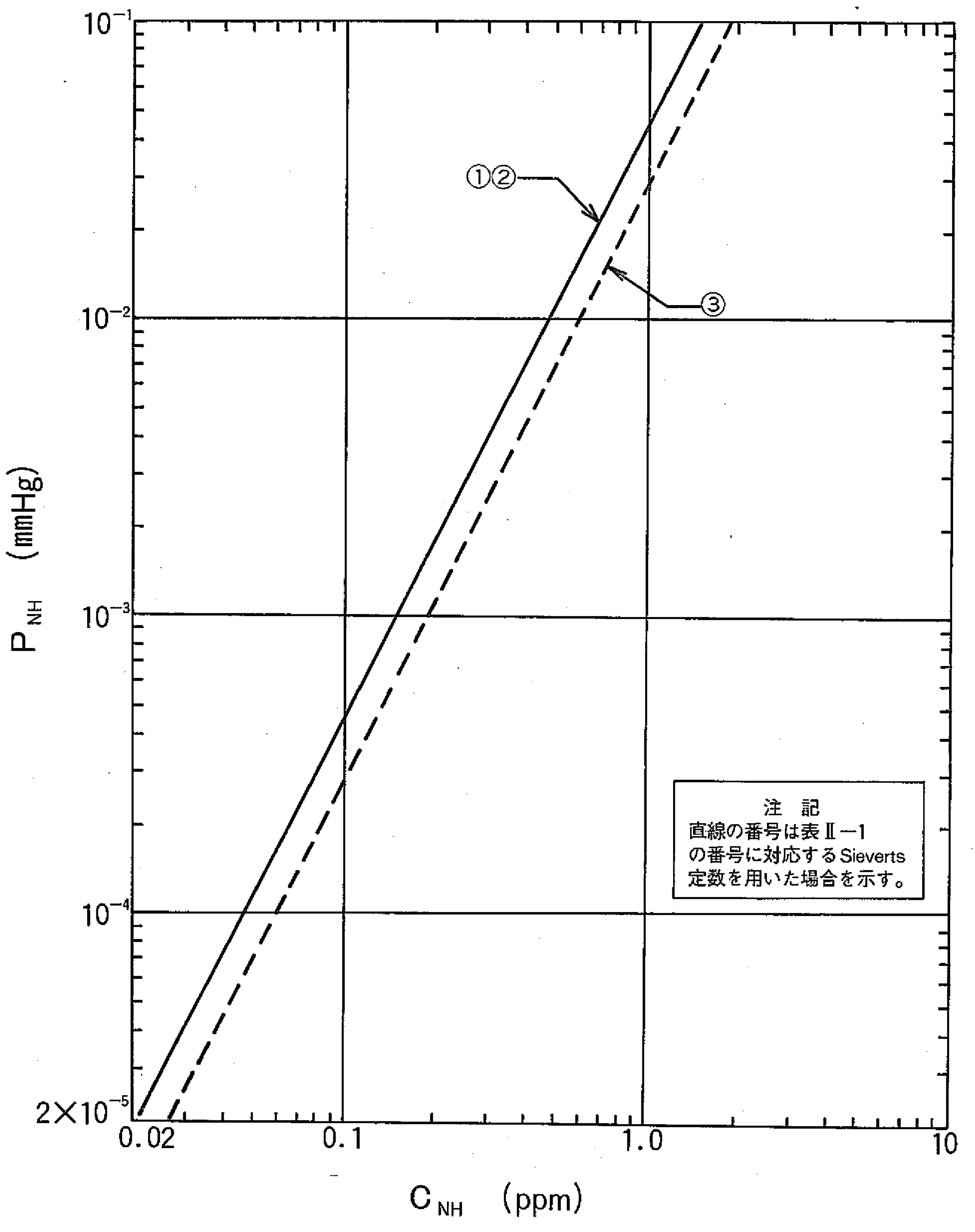
③ Vissers等以外のものは濃度範囲，温度範囲が充分でなく，温度の項を式として入れていない。

2. 結　論

Vissers等の式を用いる。

表Ⅱ－1　Sieverts定数一覧

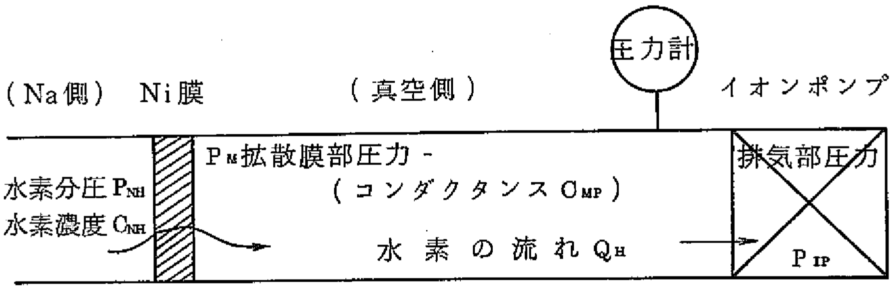
番号	適用値（式） (単位は出典のまま使用)	適用範囲	出典
①	$K_H=14.8$ 〔$ppm \cdot cmHg^{-1/2}$〕 $=4.68$ 〔$ppm \cdot mmHg^{-1/2}$〕	$10^{-4}\leqq$ 水素分圧 $\leqq 25cmHg$ 290°C≦温度≦400°C 7ppm≦酸素濃度≦25ppm	参考文献27) APDAの式
②	$K_H=12.5(\pm 0.4)$〔$ppmKN^{-1}m^2$〕 $=4.6(\pm 0.2)$〔$ppm\ mmHg^{-1/2}$〕	610°K≦温度≦677°K	参考文献28) Whittingamの式
③	$\log_{10}K_H=0.860-\frac{122.0}{T}$ K_H：〔$ppm\ mmHg^{-1/2}$〕 T：　°K	0.03ppm≦Na中水素濃度≦1ppm 370°C≦温度≦500°C	参考文献22) Vissersの式



図Ⅱ－1　500℃におけるC_{NH}とP_{NH}の関係(Sierets常数の比較)

付録－Ⅲ　Ｎｉ膜－イオンポンプ型水素検出計における動的平衡関係式[6]

Ｎａ中Ｎｉ膜－イオンポンプ型水素計における関係式を整理すると以下のとおりとなる。同検出計の概念図は下図のとおりである。



図Ⅲ－1　Ｎｉ膜－イオンポンプ型水素検出計概念図

検出計の機能として最終的に必要な関係は，Ｎａ中の水素濃度C_{NH}とイオンポンプ部の圧力P_{IP}の関係であるが，このためにはP_{NH}とC_{NH}の関係を知る必要がある。これは次式により示される。（Ｓｉｅｖｅｒｔｓの法則）。

$$C_{NH} = K_H P_{NH}^{1/2} \qquad (Ⅲ-1)$$

ここで，C_{NH} ： Na中水素濃度 〔ppm〕

P_{NH} ： Na中水素平衡圧力 〔mmHg〕

K_H ： Sievevts定数 〔$ppm/mmHg^{1/2}$〕

このK_Hは実験的にいくつか求められており[22)27)28)]，たとえば次式で表わされる。[22)]

$$\log K_H = 0.86 - \frac{122.0}{T} \qquad (Ⅲ-2)$$

ただし　T ： Na温度 〔°K〕

30ppb ≦ Na中水素濃度 ≦ 1ppm

また，P_{NH}, P_MおよびQ_Hの間には次式が成立する。

$$Q_H = K \cdot \frac{A}{d}\left(P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}\right) \qquad (Ⅲ-3)$$

P_M, P_{IP}およびQ_Hの間には次式が成立する。

$$Q_H = C_{MP}(P_M - P_{IP}) \qquad (Ⅲ-4)$$

P_{IP}と排気ポンプ（＝イオンポンプ）の排気速度Ｓには次の関係が成立する。

$$Q_H = P_{IP} \cdot S \qquad (Ⅲ-5)$$

ここで，（Ⅲ−3）式，（Ⅲ−4）式，および（Ⅲ−5）式の記号説明を明記すれば，

Q_H	：Ni膜の水素ガス透過流量	〔$cm^3 \cdot mmHg/sec$〕
K	：水素のNi膜透過率	〔$cm^2 \cdot mmHg^{1/2}/sec$〕
A	：Ni膜面積	〔cm^2〕
d	：Ni膜厚	〔cm〕
P_{NH}	：Na中水素平衡圧（分圧）	〔mmHg〕
P_M	：Ni膜真空側圧力	〔mmHg〕
P_{IP}	：イオンポンプ部圧力	〔mmHg〕
C_{MP}	：真空側コンダクタンス	〔cm^3/sec〕
S	：イオンポンプ排気速度	〔cm^3/sec〕

上記3式からQ_H，P_Mを消去することによりP_{NH}とP_{IP}の関係が次式のように求まる。

$$P_{NH}^{1/2} = \frac{d}{K} \cdot \frac{S}{A} P_{IP} + \left(1 + \frac{S}{C_{MP}}\right)^{1/2} P_{IP}^{1/2} \qquad (\text{Ⅲ}-6)$$

（Ⅲ−6）式を（Ⅲ−1）式に入れることにより，当初の目的であるC_{NH}とP_{IP}の関係を求めることが出来る。

$$C_{NH} = K_H \left\{ \frac{d}{K} \cdot \frac{S}{A} P_{IP} + \left(1 + \frac{S}{C_{MP}}\right)^{1/2} P_{IP}^{1/2} \right\} \qquad (\text{Ⅲ}-7)$$

この最終の式（Ⅲ−6）式あるいは（Ⅲ−7）式が，イオンポンプを作動させた状態での平衡状態を表わす式であり，Na中Ni膜−イオンポンプ型水素計設計の基本式である。

付録－Ⅳ　透過率の圧力依存性に関する検討要旨[6)]

水素のNi膜透過において，いわゆる1/2乗則が成立し測定される1次側水素分圧P_{NH}と真空部圧力P_{IP}の間には$P_{NH}^{1/2} \propto P_{IP}$の関係が成り立つ筈であるがこれまでSWAT－2からの報告も含めいくつかの報告に上式と異る測定結果が提示されている。

この現象は水素検出計設計においてきわめて重要と考えられるが，50MWSGTF用水素計（Ni膜厚0.25㎜，面積≃150㎠）を用いて実施したガス中試験（水素分圧10^{-4}～10^{2}㎜Hg・膜温度216～505℃）から，以下のように透過度Kの低圧に於ける圧力依存補正式を導出することが出来た。

(1)　$P_{NH} > 0.5$㎜Hgでは圧力依存性はなく，透過率Kは次式のように表わされる。

$$K = k\exp(-E/RT) \qquad (\text{Ⅳ}-1)$$

ここでkは定数，Eは活性化エネルギー，Rは気体定数，Tは温度である。

(2)　$P < 0.5$㎜Hgにおける透過率K^{*}は次式で表わされることが判った。

$$K^{*} = K \cdot b \cdot P_{NH}^{1/m} \qquad (\text{Ⅳ}-2)$$

ここでKは上記(1)で示した式であり，b・mは定数である。これは，低圧においてはFreundlichの吸着等温式$(= b \cdot P_{NH}^{1/m})$による補正が可能であることを示しており，試験結果から補正式中の定数は各々次の値であることが判った。

$$\left.\begin{aligned} b &= 1.25 \\ m &= 2.8 \end{aligned}\right\} \qquad (\text{Ⅳ}-3)$$

(3)　今，測定されたP_{NH}とP_{IP}の間に1/2乗則でなく

$$P_{IP} \propto P_{NH}^{1/n} \ (n \fallingdotseq 2) \qquad (\text{Ⅳ}-4)$$

の関係が得られた時，mとnとの間には次の関係が成立する。

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{m} + \frac{1}{2} \qquad (\text{Ⅳ}-5)$$

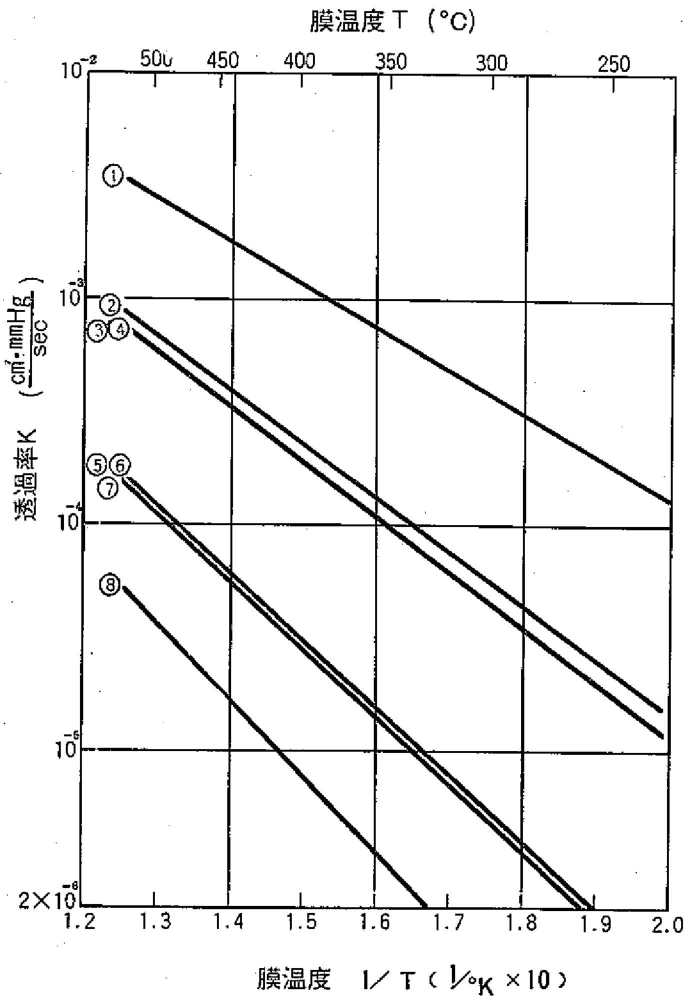
上記nの値に対し，SWAT－2[5)]，50MWSGTF[6)15)16)17)]，SCTI[25)]およびPhenix[18)]におけるNa中水素計より報告された結果および，50MWSGTF用水素計ガス中試験結果を比較すると次の範囲でよい一致を見た。

$$1.1 < n < 1.5 \qquad (\text{Ⅳ}-6)$$

付録－V　圧力依存性の無い領域における透過率値の比較

これまでの多くの報告で示された，水素のNi膜透過率Kは，付録Ⅳの（Ⅳ－1）式のように表わされるものが主であり，温度依存性のみを示したものである。本項ではこの領域に於けるKの報告値を比較し，その値に1～2オーダの違いがあることを確認する。

図V－1は横軸にNi膜温度，たて軸に透過率K（圧力依存性の無い領域での値）を図示したものである。使用Ni膜の材質は異るものも含め図示してあるので，単純な比較は危険であろうが，その値に大きな巾があることが判る。なお，50MWSGTF用の値はNi膜1次側水素分圧が0.5㎜Hg以上の場合の値すなわち圧力依存性の無い領域での値のみを結んだ線である。



番号No.	報告者	出典
1	Hill et. al.	参考文献 29)
2	50MWSGTF用（EV）	参考文献 15)
3	50MWSGTF用（SH）	参考文献 15) 17)
4	Lieser et. al.	参考文献 30) 17)
5	Webb	参考文献 31)
6	Ebisuzaki et. al.	参考文献 32)
7	Roy	参考文献 33)
8	Schenck et. al.	参考文献 34)

図V－1　透過率Kの比較

付録−Ⅵ　ステンレス材からの放出ガス量[35)36)]

材料からの放出ガス量については多くの研究者によって報告されてはいるが，表面処理法や同一材料の場合でも測定法，測定条件等の相異によってかなりの差がある。本項では水素検出計の真空配管として実用的なステンレス材に対し参考文献35）36)等から引用した値の一覧を表Ⅵ－1にまとめ検討用資料とする。

表Ⅵ－1　ステンレス材からの放出ガス量

番号	処理		ガス放出量（mmHg・ℓ/sec・cm²）				出典
	処理温度	処理法	1時間後	5時間後（4時間後）	10時間後	100時間後	
1	——	——	2×10^{-7}	——	2×10^{-8}	——	37)
2	——	磨，溶媒蒸気脱脂	——	——	1.4×10^{-9}	——	38)
3	450°C	——	6.4×10^{-7}	——	——	——	39)
4	450°C	脱　脂	4×10^{-7}	——	——	——	39)
5	450°C	焼　鈍	5.3×10^{-8}	——	——	——	39)
6	——	——	——	7.6×10^{-10}	——	1.1×10^{-10}	40)
7	——	——	——	——	1.2×10^{-8}	——	40)
8	200°C	24時間ベーク	——	——	1.5×10^{-10}	——	40)
9	400°C	12時間ベーク	——	——	9.3×10^{-13}	——	40)
10	——	未処理	1.7×10^{-7}	——	——	——	41)
11	——	脱　脂	3×10^{-10}	——	2×10^{-10}	9×10^{-11}	42)
12	——	加熱，脱気せず	9×10^{-8}	3×10^{-8}	——	——	43)
13	150°C	70～80%大気にさらした後　1時間加熱	1×10^{-10}	8×10^{-11}	——	——	43)
14	250°C	同上　1時間加熱	5×10^{-11}	4×10^{-11}	——	——	43)
15	250°C	同上　5時間加熱排気	1×10^{-11}	8×10^{-12}	——	——	43)
16	350°C	同上　5時間加熱排気	2×10^{-12}	2×10^{-12}	——	——	43)

付録－Ⅶ　イオンポンプ特性一覧

イオンポンプの原理等については専門の図書を参照してもらうこととして，本項では実用のイオンポンプの排気速度，ノイズレベル等に対し市場に出ている製品の値を示し参考資料とする。

一般のイオンポンプを水素検出計に用いる場合には可能な限りノイズレベルの低い状態で使用することと，水素に対する排気速度を知ることが必要がある。（もちろん，本文中にも記したとおり最終的には水素による単体較正試験を実施せねばならない）。この点を考慮しまとめたのが表Ⅶ－1である。

表中A項は市場にあるイオンポンプの特性のうち排気速度，使用電圧および電流出力を示したもので全て窒素(N_2)ガス基準で示してある。B項は水素検出計用にノイズレベルを下げるために定格使用電圧を下げて使用した場合の上記各項とノイズレベル値を示した。

同表から次のことが判る。

『番号①のポンプを使用するとすれば，一般使用条件は7.5KVであるが，水素検出用として用いる場合は，3.5KV定格とすることが可能であり,その時の水素排気速度は2ℓ/secとなる。また，3.5KV仕様とすることにより，ノイズレベル I_{PN} は0.2μAとすることが可能となり，電流出力 B_{IP} が8A/mmHgであるからノイズレベルに対応する圧力 P_{IPN} は 2.5×10^{-8} mmHgとなる。』

表Ⅶ－1　イオンポンプ特性表

番号	(A)イオンポンプ一般特性			(B)水素検出計に用いる場合の条件例			
	排気速度 (N_2 基準) 〔ℓ／S〕	定格電圧 〔KV〕	電流出力 〔A/mmHg〕	排気速度 (水素基準) 〔ℓ／S〕	使用電圧 〔KV〕	電流出力 (水素基準) 〔A/mmHg〕	ノイズレベル I_{PN} 〔μA〕
①	1	7.5	10	2	3.5	8	0.2
②	10	7.5	100	15	5	80	0.3
③	20	7.5	200	30	5	160	0.5
④	40	7.5	400	60	5	320	1.0
⑤	80	7.5	800	120	5	640	2.0
⑥	160	7.5	1600	240	5	1280	4.0
⑦	320	7.5	3200	480	5	2560	8.0

付録－Ⅷ　水素検出計の応答曲線

Na中水素検出計が動的平衡状態にあり，時刻 t＝0 でNa中水素濃度がステップ状に変化した場合のNa中水素検出計の応答について考える。Ni 拡散膜内の水素は拡散によって移動すると考えられるため，拡散膜内の水素濃度Cの変化を一次元で表わすと，

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (Ⅷ-1)$$

となる。この拡散方程式をステップ応答の初期条件，境界条件で解き，

$$q_H = D\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} \qquad (Ⅷ-2)$$

より拡散膜表面における水素透過量を求めて，水素透過量の変化すなわちNa中水素検出計出力の変化を求めると次式のようになる。[2)45)20)46)] 図Ⅷ－1は計算結果[20)]を図示したものである。

$$\frac{q_H(t)-q_H(0)}{q_H(\infty)-q_H(0)} = 1+2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \exp\left(\frac{-n^2\pi^2 D}{d^2}t\right) \qquad (Ⅷ-3)$$

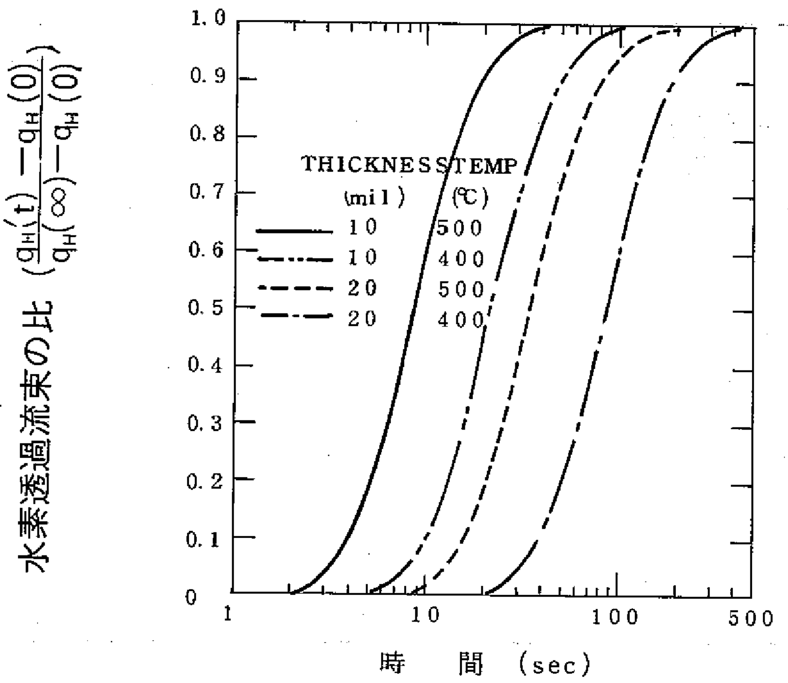
ここに $q_H(t)$ ：　任意の時刻における単位面積，単位時間あたりの水素透過量 (mmHg・cm³/sec・cm²)

$q_H(0)$ ：　t＝0 における　〃

$q_H(\infty)$：　t＝∞ における　〃

D　：　拡散係数 (cm²/sec)

d　：　Ni 膜厚 (cm)

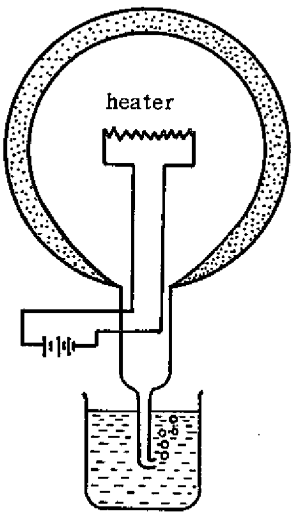


図Ⅷ－1　応答曲線

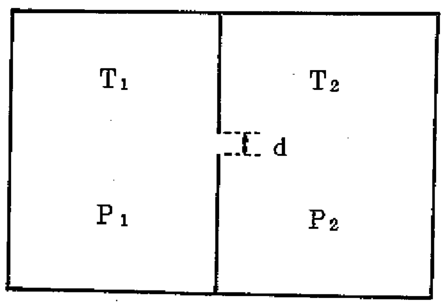
付録－Ⅸ　サーマル・トランスピレーションについて[47]
（本項は参考文献47）の抜萃である）

細い管で結ばれた2つの容器からなる閉ぢた系があり，2つの容器（1および2と番号をつける）が異った温度T_1，T_2に保たれている。この系中のガス圧が高ければ，流体力学の法則に従って系中の圧力は何処でも同じになる。圧力が段々低くなって，連結管の管径dとガス分子の平均自由行路λとが同程度になると，分子流領域に入って流体力学の法則が成立しなくなり，2つの容器中の圧力に差異が生ずる。これをサーマル・トランスピレーション効果，または熱分子流効果（thermo-molecular flow effect），熱分子圧差（thermo-molecular pressure difference）等と呼んでいる。最近では，サーマル・トランスピレーション効果と呼ぶ人が多い。飽和蒸気圧や吸着の測定では，一般に圧力ゲーヂと被測定物容器の温度が異るので，正しい結果を得るためにはこの効果の補正をしなければならない。

系が閉ぢていないときは，細管を通って低温側から高温側へと定常的な気体の流れが生ずる。Knudsenは図Ⅸ－1のような系をつくり,この流れを直接観測した。図中の球状容器は素焼き製で細孔が多い。球中のニクロム線を通電加熱すると器内外に温度差ができる。これが圧力差を生ずるが，圧力差が系の末端にかかる水圧より大きくなると，空気は気泡となって系外に流出する。気泡は定常的に発生するから，球中の空気の一時的熱膨張によるものではない。すなわち，サーマル・トランスピレーション効果によることがわかる。そして1分間に100cc 位流す こともできる。この効果は天然現象でも重要な役割を果している。植物



図Ⅸ－1　開いた系のサーマル・トランスピレーション



図Ⅸ－2　理想化した系のサーマル・トランスピレーション効果

中の空気の新陳代謝もサーマル・トランスピレーションによると考えられる。また大地の太陽にあたる部分と日蔭の部分との間にサーマル・トランスピレーションが起り，土中の空気の入れ換えが起るとされている。このように重要な現象であるから，サーマル・トランスピレーションの研究は1910年頃から行われてきた。

この効果の生ずる原因を簡単に説明しよう。図Ⅸ－2のように，2つの容器が円形細孔をもつ隔壁で仕切られており，両者の温度がT_1，T_2であるとする。 系中の圧力が低く，$d<\lambda$なる場合を考える。（dは細孔の直径）。

容器1から2に飛び込む分子数n_1は

$$n_1=\frac{\pi d^2}{4}\cdot\frac{P_1}{\sqrt{2\pi mk\ T_1}}$$

である。ここにmは分子の質量とする。逆に容器2から1に飛び込む分子数n_2は

$$n_2=\frac{\pi d^2}{4}\cdot\frac{P_2}{\sqrt{2\pi mk\ T_2}}$$

となる。定常状態では

$$n_1=n_2$$

であるから，結局次の関係が成立する。

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_2}} \qquad (Ⅸ-1)$$

容器が細管で連結されている場合も，積分によって上式と同一結果を得る。

（Ⅸ－1）式の成立する領域をKnudsen領域といい，$\sqrt{T_1}/\sqrt{T_2}$をKnudsen値，P_1/P_2をサーマル・トランスピレーション値と呼ぶ。圧の高い領域では$P_1/P_2=1$となるので，この領域を正規領域と称する。これら2つの領域の中間では

$$\sqrt{T_1}/\sqrt{T_2}>P_1/P_2>1$$
$$(\text{或は}\sqrt{T_1}/\sqrt{T_2}<P_1/P_2<1)$$

となるが，この時のP_1/P_2を理論的に求めることは難しく，実験的に求めるより仕方がない。従って，実験値をよく表現する経験式を求め，その式が温度やガス分子の種類によってどう変るか調べることが，研究の主題になる。

1910年，Knudsenは水素についてサーマル・トランスピレーション効果を測り，同時にこの現象の起る根拠を理論的に示した。$d/\lambda>10$の領域において

$$\left.\begin{aligned}\frac{P_1}{P_2}&=P_2\left[\frac{b+(b^2+2bT_1/P_2+T_1T_2/P_2{}^2)^{\frac{1}{2}}}{2bP_2+T_2}\right]\\ b&=\frac{d}{\lambda_0}\frac{273}{760}\end{aligned}\right\}\qquad (Ⅸ-2)$$

なる半ば経験的半ば理論的な式を得た。ここにλ_0はN. T. P. におけるガス分子の平均自

由行路とする。この式はやや複雑であるし，適用範囲も限られているので，利用度は低い。
1951年Liangは，簡単な経験式を提案した。すなわち，

$$\left.\begin{aligned}\frac{P_2}{P_1}&=\frac{AX^2+BX+\sqrt{T_2/T_1}}{AX^2+BX+1}\\X&=P_2d\end{aligned}\right\}\quad(\text{IX}-3)$$

ここに，A，Bは圧に依存しない数である。彼は各種ガスについてA，Bの値を求め，ガス分子の衝突半径とA，Bとの関係を経験的に求めた。その経験的関係はLangmuirの仮定を否定している。

1952年以降，色々な人がLiangの式の適用性を検討したが，低圧部ではLiangの式は適用できないことがわかった。ことにPodgurskiとDavisの精密な測定はこの問題に結着をつけた。

この欠点を改良し，全領域で使用できる経験式として，高石と泉水は次式を得ている。

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{AX^2+BX+C\sqrt{X}+\sqrt{T_1/T_2}}{AX^2+BX+C\sqrt{X}+1}\qquad T_1<T_2\qquad(\text{IX}-4)$$

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{AX^2+BX+C\sqrt{X}+\sqrt{T_2/T_1}}{AX^2+BX+C\sqrt{X}+1}\qquad T_1>T_2\qquad(\text{IX}-5)$$

$$X=P_2d$$

ここにサフィックス2は室温部に関する量を示し，A，B，CはXに依存しない量である。これらの式は10^{-3}mmHgから数mmHg間の広領域で適用でき,かつ正確な測定値のある全ガス種について適用できることが示されている。従って許容誤差1％では上式は最終決定版と考えてよい。

さて（IX－4）（IX－5）式におけるA，B，Cの温度依存性が分ればサーマル・トランスピレーション値の温度依存性も分る。

水素，ネオン，アルゴン，クリプトン，メタンについてA，B，Cの温度依存性を求めると，次式が成立する。

$$\left.\begin{aligned}A&=A^*\overline{T}^{-2}\\B&=B^*\overline{T}^{-1}\\C&=C^*\overline{T}^{-1/2}\end{aligned}\right\}\quad(\text{IX}-6)$$

ここに$\overline{T}=(T_1+T_2)/2$とする。

水素に関するデータが最も豊富であるから，この場合の$A\overline{T}^2$, $B\overline{T}$, $C\sqrt{\overline{T}}$対$\overline{T}$のプロットを図IX－3に例示する。上記以外のガスについても利用できるデーターを解析してA^*, B^*, C^*を求めることができる。得られたA^*, B^*, C^*の値を表IX－1にまとめて示す。

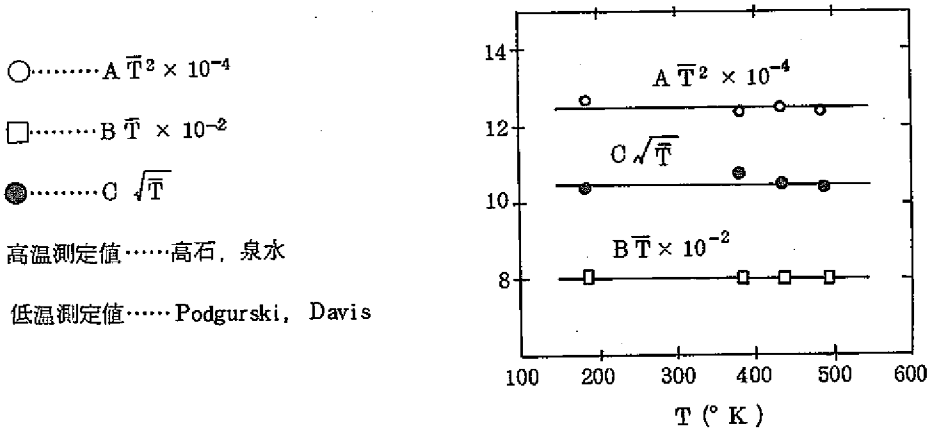
（IX－4）（IX－5）と（IX－6）式から

$$\frac{1-(P_1/P_2)}{1-\sqrt{T_1/T_2}}=\frac{1}{A^*X^{*2}+B^*X^*+C^*\sqrt{X^*}+1}\qquad T_1<T_2\qquad(\text{IX}-7)$$

$$\frac{1-(P_1/P_2)}{1-\sqrt{T_2/T_1}} = \frac{1}{A^*X^{*2}+B^*X^*+C^*\sqrt{X^*}+1} \qquad (\text{IX}-8)$$

ここに$X^* = X/\overline{T}$,

を得る。



図IX－3　水素における$A\overline{T}^2$,$B\overline{T}$,$C\overline{T}^{1/2}$の温度依存性

表IX－1　A^*,B^*,C^*の値

ガス	$A^*\times 10^{-5}$	$B^*\times 10^{-2}$	C^*	分子の衝突直径* D(Å)	温度領域
H_2	1.24	8.00	10.6	2.68～2.69	14°K～673°K
Ne	2.65	1.88	30.0	2.55	20.4°K～673°K
A	10.8	8.08	15.6	3.55～3.60	77°K～673°K
Kr	14.5	15.0	13.7	4.04～4.08	77°K～673°K
CH_4	14.5	15.0	13	4.09	478°K～673°K
Xe	35	41.4	10	4.62～4.78	77°K～ 90°K
He	1.4～1.6	1.2～1.1	18～20	2.15～2.17	42°K～ 90°K
N_2	12	10	10～18	3.64～3.70	77°K～195°K
O_2	9～7	16～19	－	3.92～3.98	77°K

圧力mmHg，　直径をmmで表わしたときの値とする。
*)KestinとLeidenfrostの　性係数から計算して求めた。

付録－X　Ni膜－イオンポンプ型水素計における静的平衡関係式[5)]

本項ではNa中水素検出計が動的平衡状態にある時，時刻 $t=0$ で隔離弁を閉じた場合の関係式すなわち静的平衡状態になるまでの関係式について記述する。

拡散膜における拡散時間遅れ（付録－Ⅷ参照）を無視すると，拡散膜を通してNa側から真空側に拡散して来る水素量 Q_H は付録－Ⅲの（Ⅲ－3）式と同様に次式で与えられる。

$$Q_H = \frac{K \cdot A}{d}\left(P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}\right) \qquad (X-1)$$

ここに　Q_H　：拡散膜の透過水素量〔mmHg·cm³/sec〕

A　：拡散膜面積　〔cm²〕

K　：拡散膜の水素透過率〔cm²·mmHg$^{1/2}$/sec〕

d　：拡散膜厚さ　〔cm〕

P_{NH}　：Na中水素分圧　〔mmHg〕

P_M　：真空系拡散膜部圧力〔mmHg〕

真空計の自己排気速度 S_F と真空系壁面からのガス放出量 Q^* を考慮すると，真空系拡散膜部の圧力上昇は次式で表わされる。

$$V\frac{dP_M}{dt} = \frac{K \cdot A}{d}\left(P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}\right) - S_F \cdot P_G + Q^* \qquad (X-2)$$

ここに　V　：拡散膜－隔離弁間の真空系容積　〔cm³〕

t　：時　間　〔sec〕

S_F　：真空計の自己排気速度　〔cm³/sec〕

P_G　：真空計部圧力　〔mmHg〕

Q^*　：真空計壁面からのガス放出量　〔mmHg·cm³/sec〕

いま，（X－2）式において真空計の排気速度およびガス放出量が無視できる場合には，$S_F=0$，$Q^*=0$ とおき，$t=0$ のとき $P=0$ の初条件で解くと，次式のようになる。

$$\sqrt{\frac{P_M}{P_{NH}}} + \mathrm{In}\left(1-\sqrt{\frac{P_M}{P_{NH}}}\right) = -\frac{K \cdot A}{2 \cdot V \cdot d \cdot P_{NH}^{1/2}} \cdot t \qquad (X-3)$$

（X－3）式の場合，充分時間が経過すると，$P_M = P_{NH}$，つまり拡散膜部圧力はNa中水素分圧と等しくなりNa中水素分圧を知ることができる。また圧力上昇率よりNi膜中の水素の透過率Kを求めることもできる。

付録−XI　水素のNa中飽和溶解度曲線の検討

SWAT−2装置では，上記曲線を求める実験研究は実施していない。したがって内外のデータのうち最も信頼性あるものを用いざるを得ない。本項ではこれ等主要データの比較を行い使用曲線の確認を行う。

1　比較検討

① 比較の対象とした値を表XI−1に，飽和温度Tcと Na中水素濃度C_{NH} の関係を図XI−1，図XI−2に示す。

② このうちAPDAの結果は測定範囲が高濃度部に限られており，Whittingamも同様に高濃度部が主で，データ整理（他のデータを最小2乗法で処理）の中に低濃度部の測定値が含まれていない。

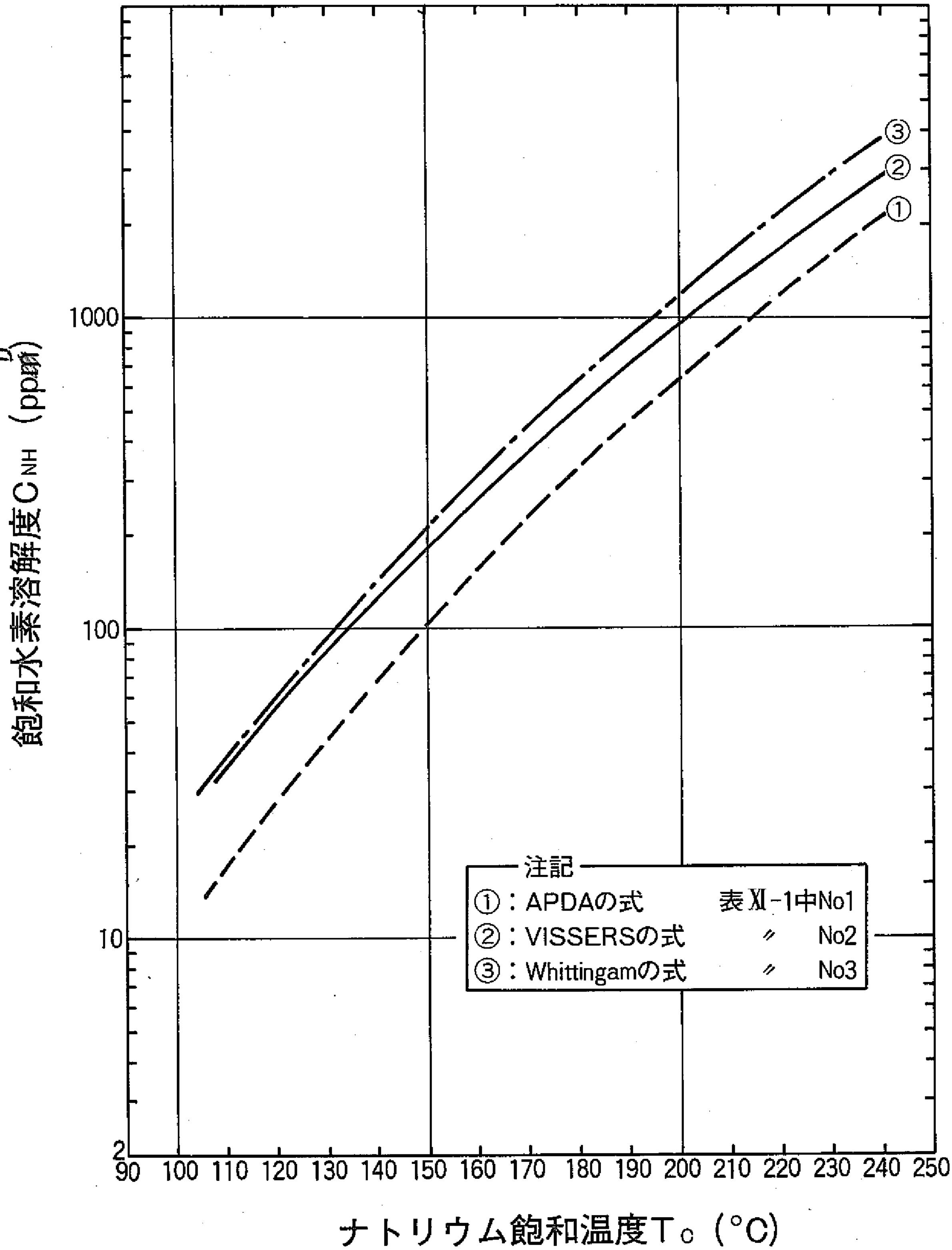
③ Vissers の式はその対象範囲がはっきりしており，低濃度中心の実験も行っている。

2　結　論

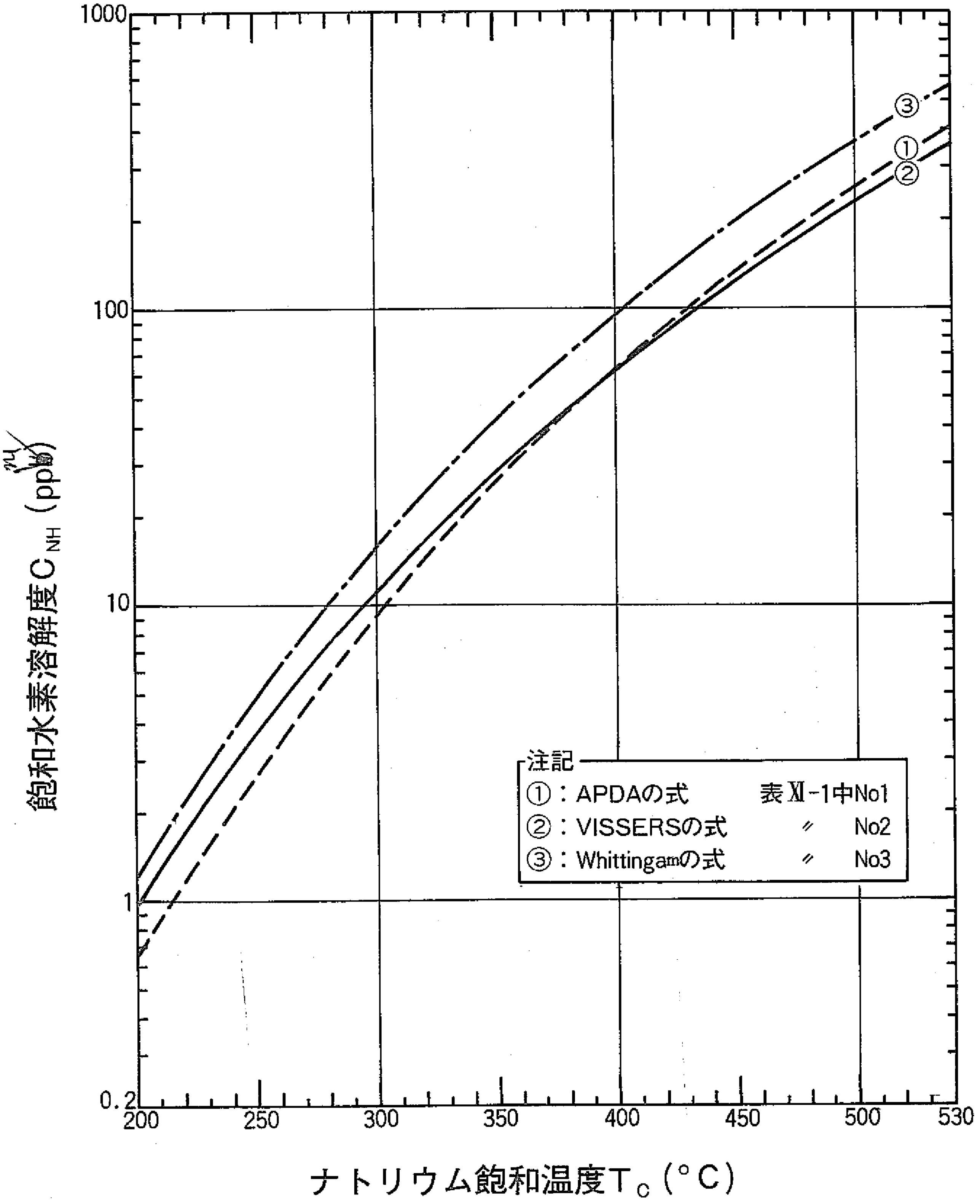
Vissers の式を用いる。

表XI−1　水素のNa中飽和溶解度曲線一覧

No.	適用式	適用範囲	特徴	出典
1	$\log_{10}C_{NH}=6.52-\frac{3180}{Tc}$ (C_{NH}：ppm　Tc：°K)	酸素 25ppm以下で $C_{NH}>0.5$ppm	APDAでの実験をベースにした値であるが，少々古い。	参考文献 27) APDAの式
2	$\log_{10}C_{NH}=6.067-\frac{2880}{Tc}$ (C_{NH}，Tc同上)	70ppm$>C_{NH}>$30ppb	低濃度部（1ppm以下）を対象に実験し，高濃度部に他のデータを使用し式を導入	参考文献 22) Visssersの式
3	$\log_{10}C_{NH}=6.467-\frac{3023}{Tc}$ (C_{NH}，Tc 同上)	100ppm$>C_{NH}>$300ppb	高濃度部を対象に実験し，低濃度も含め他のデータから最少2乗法で式を導入。	参考文献 28) Whittingamの式



図XI－1 Na中水素飽和溶解度曲線（その1）



図XI－2　Na中水素飽和溶解度曲線（その２）

付録－XII　Nickel 200とNickel 201の特性

本項では，Ni膜材質として最も一般的でありかつ構造規格例えば参考文献51)等との関連が明確にされている　Nickel 200 およびNickel 201 に関する諸特性について記述する。

表XII－1は，化学成分，物理的性質，機械的性質，耐食性および該当規格についてまとめたもので，Ni製作メーカの資料から抜萃したものである。

一般に両者共，機械的性質および耐食性はすぐれており，高温における強度と低温での靱性に特徴がある。しかし，Nickel 201 はNickel 200 に比して炭素含有量が低いため（最大0.02％），300℃から700℃までの温度に長時間さらされた場合でも，直接炭素を含んだものに接触していなければ，黒鉛の粒間析出による問題は生じない。そのため300℃を越える場合はすべての用途において，Nickel 201 の使用が好ましい。

表XII－2は，ASME Code[51] から抜萃した設計応力値を示したものであり，表XII－1からこれ等の値はNickel 200, Nickel 201 の設計における使用値である。

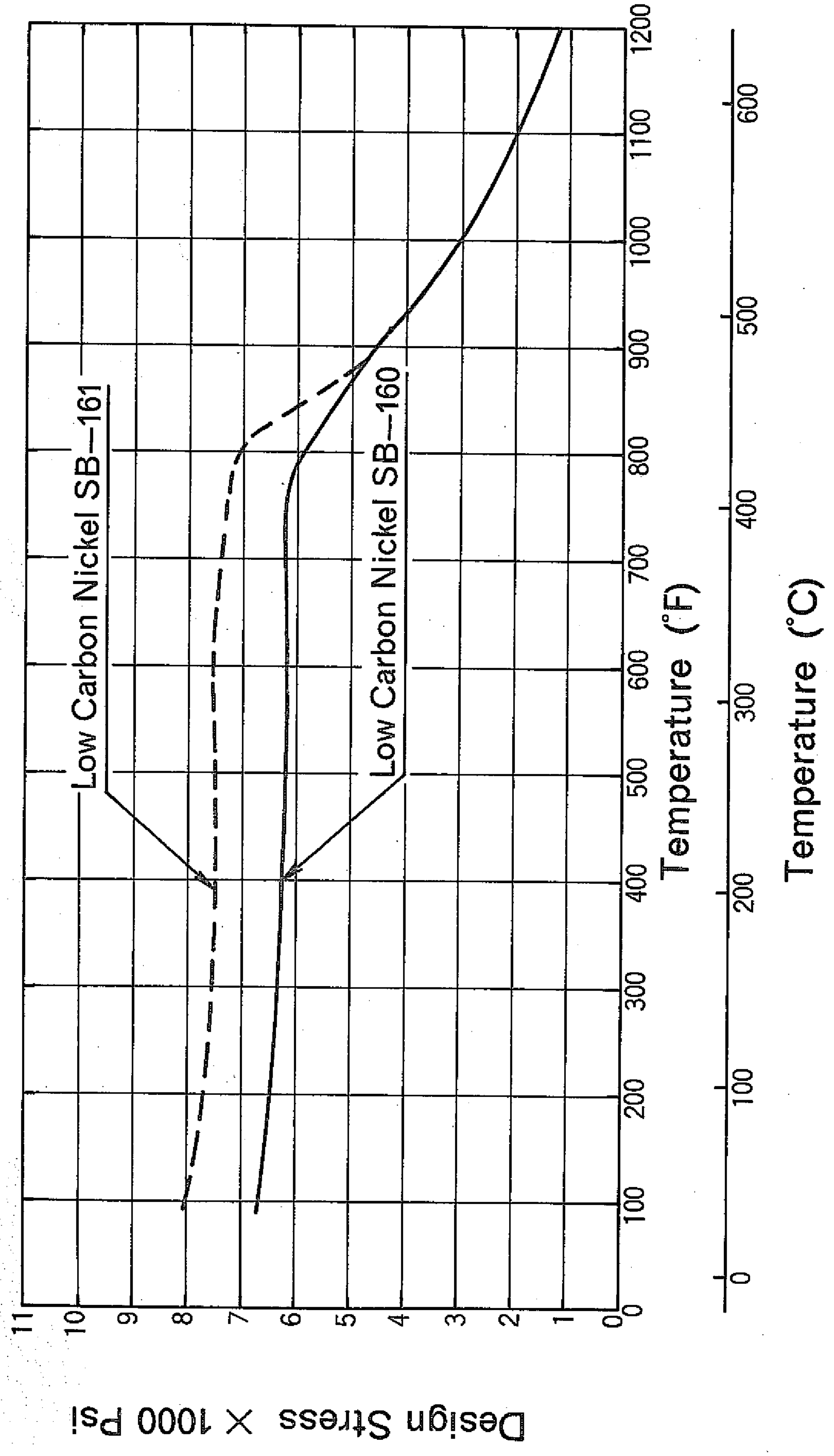
図XII－1は，表XII－2のうちLow Carbon Nickel, SB161 のPipe or Tubingの該当応力値を図示したものである。

表XII－1　Niの諸特性表

分類	項目	Nickel 200						Nickel 201					
化学成分	ニッケル（+コバルト）	99.0 (%) 以上						99.0 (%) 以上					
	炭素	0.15 〃 以下						0.02 〃 以下					
	マンガン	0.35 〃 〃						0.35 〃 〃					
	鉄	0.40 〃 〃						0.40 〃 〃					
	硫黄	0.01 〃 〃						0.01 〃 〃					
	珪素	0.35 〃 〃						0.35 〃 〃					
	銅	0.25 〃 〃						0.25 〃 〃					
物理的性質	密度	8.89 (g/cm³)						8.89 (g/cm³)					
	弾性係数 E	22.0×10^{-3} (kg/mm²)						21 (kg/mm²)					
	弾性係数 G	11.2×10^{-3} (〃)						―					
	ポアソン比	0.26						―					
	溶融温度	1.435～1.446 (°C)						―					
	比熱 (21°C)	0.109						0.109					
	キュウリー温度	360 (°C)						360 (°C)					
	°C	21	100	300	500	800	1100	21	100	300	500	800	1100
	線膨張係数 ($\times10^{-6}$/°C)	10.4	13.3	14.3	15.2	16.1	17.1	13.3	―	―	―	―	―
	熱伝導率 (cal/cm・sec・°C)	0.17	―	0.14	0.14	0.15	―	0.19	0.18	0.15	0.14	0.15	―
	電気伝導度 (μΩ・cm)	9.5	―	25.2	36.1	46.0	54.2	8.5	12.4	24.9	36.6	―	53.1
機械的性質	条件	熱間加工のまま		冷間加工後		焼鈍後		熱間加工のまま		冷間加工後		焼鈍後	
	引張り強さ (kg/mm²)	42～60		45～77		38～56		35～42		42～70		35～42	
	0.2%耐力 (kg/mm²)	10～32		28～70		10～21		7～17		25～63		7～17	
	伸び (%)	55～35		35～10		55～40		60～40		35～10		60～40	
	カタサ (HBN)	90～150		140～230		90～120		75～100		125～200		75～100	
耐食性	硫酸	普通						同左					
	塩酸	〃											
	沸化水素酸	良好											
	燐酸	普通											
	硝酸	不可											
	有機酸	良好											
	アルカリ類	〃											
	塩類	〃											
	海水	〃											
	応力腐食割れ	〃											
該当規格	ASTM	B160, B161, B162, B163						B160, B161, B162, B163					
	ASME	S B160, S B161, S B162, S B163						S B160, S B161, S B162, S B163					
	JIS	H4501, H4511						H4502, H4572					

表Ⅻ－2　Niの許容応用値

Material	Specification	Form	Condition	Min. Specified Tensile Strength, psi	Min. Specified Yield Strength (0.2% Offset), psi	Design Stress × 1000, psi For Metal Temperatures Not Exceeding, F: 100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Nickel	SB-160	Bar, Rods & Shapes	Hot or Cold Worked—Annealed	55,000	15,000	10	10	10	10	10	10	—	—	—	—	—	—
	SB-160	Bar, Rods & Shapes	Hot Rolled or Forged—Hot Finished	60,000	15,000	10	10	10	10	9.5	8.3	—	—	—	—	—	—
	SB-160	Bolting	Hot or Cold Worked—Annealed	55,000	15,000	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	—	—	—	—	—	—
	SB-160	Bolting	Hot Rolled or Forged—Hot Finished	60,000	15,000	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.4	—	—	—	—	—	—
	SB-160	Bolting	Cold Drawn—All Sizes—All Products	65,000	40,000	10	9.6	9.6	9.6	9.5	9.2	—	—	—	—	—	—
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Annealed—5 in. OD & Under	55,000	15,000	10	10	10	10	10	10	—	—	—	—	—	—
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Annealed—Over 5 in. OD	55,000	12,000	8	8	8	8	8	8	—	—	—	—	—	—
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Hard, Stress Relieved	65,000	40,000	16.2	15.3	15	15	14.5	14	—	—	—	—	—	—
	SB-163	Condenser Tubing	Seamless—Annealed	55,000	15,000	10	10	10	10	10	10	—	—	—	—	—	—
	SB-163	Condenser Tubing	Seamless—Stress Relieved	65,000	40,000	16.2	15.3	15	15	14.5	—	—	—	—	—	—	—
	SB-162	Plate, Sheet or Strip	Hot or Cold-Rolled—Annealed	55,000	15,000	10	10	10	10	10	10	—	—	—	—	—	—
	SB-162	Plate	Hot Rolled—As Rolled	55,000	20,000	13.3	13.3	13.3	13.3	12.5	11.5	—	—	—	—	—	—
Low Carbon Nickel	SB-160	Bar, Rods & Shapes	Hot Finished, Hot or Cold Worked—Annealed	50,000	10,000	6.7	6.4	6.3	6.2	6.2	6.2	6.2	5.9	4.5	3	2	1.2
	SB-160	Bolting	Hot Rolled or Annealed	50,000	10,000	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	22.3	2.3	2.2	2.1	2	1.8	1.2
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Annealed—5 in. OD & Under	50,000	12,000	8	7.7	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.2	4.5	3	2	1.2
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Annealed—Over 5 in. OD	50,000	10,000	6.7	6.4	6.3	6.2	6.2	6.2	6.2	5.9	4.5	3	2	1.2
	SB-161	Pipe or Tubing	Seamless—Hard, Stress Relieved	60,000	30,000	15	14.2	13.8	13.5	13.5	13	—	—	—	—	—	—
	SB-163	Condenser Tubing	Seamless—Annealed	50,000	12,000	8	7.7	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.2	4.5	3	2	1.2
	SB-163	Condenser Tubing	Seamless—Stress Relieved	60,000	30,000	15	14.2	13.8	13.5	13.5	13	12	11	10	—	—	—
	SB-162	Plate, Sheet or Strip	Hot Rolled and Hot or Cold Rolled—Annealed	50,000	12,000	8	7.7	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.2	4.5	3	2	1.2



図Ⅻ－1　Niの許容応力値（ASME　Sec.Ⅷ）