

50MW蒸気発生器試験施設における 水リーク検出システム評価試験 — 第11報 —

水素計の使用経験



1984年10月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N941 84-136
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

50MW蒸気発生器試験施設における 水リーク検出システム評価試験

— 第11報 —

水素計の使用経験

白土清一 * 金子義久 *

古村史朗 ** 錦見正和 *

鈴木雅和 *** 土屋毎雄 ****

福田達 *

要旨

高速増殖炉では、蒸気発生器内で生じる水リーク（ナトリウム－水反応）を早期に検出する必要があり、水リーク検出用の水素計の開発が進められている。当50MW蒸気発生器試験施設でも、高速増殖原型炉“もんじゅ”用水リーク検出系へ反映させることを目的として、ナトリウム中水素計およびカバーガス中水素計の開発を進めている。本報告は、当室でこれまでに開発を進めてきた各水素計の開発経過、使用経験および性能評価について述べるとともに、これまでに得られた経験をもとに“もんじゅ”用水リーク検出系に対して設計、製作、運用および保守・補修等に対する改善提案についても提言している。

* 大洗工学センター高速炉機器開発部システム設計開発室

** 瞽託（川崎重工業技術研究所）

*** (現) パブリックエンジニアリングサービス茨城事業所

**** (現) 大洗工学センター高速炉機器開発部

Experiments on the Water Leak Detection Systems in the 50MW
Steam Generator Test Facility -11-

Operational Experience of Hydrogen Meter

Seiichi Shirato*, Yoshihisa Kaneko*, Shirou Komura**,
Masakazu Nishikimi*, Masakazu Suzuki***, Tsuneo Tsuchiya****
and Tohru Fukuda*

Abstract

It is necessary to detect the water leak (sodium-water reaction) as fast as possible in a steam generator for liquid metal fast breeder reactor, and hydrogen meter has been developed for detection of water leak. In-sodium hydrogen meter and in-cover gas hydrogen meter have been developed in 50 MW steam generator test facility for the purpose of leak detection system of LMFBR "Monju" plant. This paper reports the development of each hydrogen meter, operational experience and evaluation of performance. Some proposals for design, manufacture, operation and maintenance of "Monju" plant leak detection system are also described.

* Systems Development Section, FBR System & Component Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Non Regular Staff (Nuclear Energy Laboratory, Toshiba Corporation)

*** (Presently) Babu Hitachi Engineering Service Corporation

****(Presently) FBR System & Component Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. まえがき	1
2. 水素計の概要	2
2.1 ナトリウム中水素計	2
2.2 カバーガス中水素計	5
2.3 水素計による水リーク検出範囲	6
3. 動燃大洗工学センター内における水素計開発経過	7
3.1 ナトリウム中水素計	7
3.2 カバーガス中水素計	8
4. 水素計の構成および仕様	10
4.1 50MW SGTFでのナトリウム中水素計	10
4.1.1 50MW蒸気発生器1号機用ナトリウム中水素計	10
4.1.2 50MW蒸気発生器2号機用ナトリウム中水素計	11
4.1.3 改良型蒸発器用ナトリウム中水素計	11
4.1.4 PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計	12
4.1.5 東芝型過熱器用ナトリウム中水素計	13
4.1.6 PNC型2号機MKⅣ蒸発器用ナトリウム中水素計	14
4.2 50MW SGTFでのカバーガス中水素計	15
4.2.1 蒸発器用カバーガス中水素計	15
4.2.2 過熱器用カバーガス中水素計	17
4.2.3 ガスクロマトグラフ	18
4.3 他施設での水素計	18
4.3.1 PNC-MAP I型ナトリウム中水素計	18
4.3.2 バリアン型ナトリウム中水素計	18
4.3.3 PNC-MAP I改良型ナトリウム中水素計	19
4.3.4 ウェスチングハウス社製ナトリウム中水素計	19
4.3.5 PNC型1号機ナトリウム中水素計	19
4.3.6 PNC型2号機ナトリウム中水素計	20
4.3.7 SWAT-2でのカバーガス中水素計	21
4.3.8 1MW型蒸気発生器でのカバーガス中水素計	22
4.3.9 ナトリウム材料室での直浸式カバーガス中/ナトリウム中水素計	22
5. 性能特性評価	23
5.1 校正方法及び校正試験結果	23

5.1.1 ナトリウム中水素計校正方法	23
5.1.2 ナトリウム中水素計校正試験結果	24
5.1.3 カバーガス中水素計校正方法	24
5.1.4 カバーガス中水素計校正試験結果	24
5.1.5 実機における水素計の校正方法について	25
5.2 経時変化及び寿命の評価	25
5.2.1 ニッケル膜	25
5.2.2 イオンポンプ	26
5.2.3 真空計	27
5.3 最小検出感度	29
5.3.1 ニッケル膜の温度変動によるノイズ幅	29
5.3.2 イオンポンプおよび真空計からのノイズ幅	30
5.3.3 水素計全体としてのノイズ幅	30
5.4 オリフィスの有効性	31
5.5 ニッケル膜に対する水素の透過率	33
5.6 真空系内放出ガスの影響	34
5.7 イオンポンプの回復処理	35
6. 故障経験およびその処理	37
6.1 ニッケル膜の破損	37
6.1.1 ナトリウム中水素計におけるニッケル膜リーク	37
6.1.2 カバーガス中水素計におけるニッケル膜変形	38
6.1.3 カバーガス中水素計におけるニッケル膜リーク	41
6.1.4 カバーガス中水素計におけるニッケル膜のリーク及び変形	42
6.2 真空破壊	43
6.3 真空計のフィラメント破損及び電極部リーク	45
6.3.1 EV-HNaのシェルゲージフィラメント破損	45
6.3.2 CT-HNaのシェルゲージフィラメント破損	46
6.3.3 CT-HNaのヌードゲージフィラメント破損	47
6.3.4 CT-HNaのシェルゲージ電極部リーク	47
6.4 カバーガス中水素計用循環ポンプの故障	48
6.4.1 EV-HArでの循環ポンプ故障	48
6.4.2 SH-HArでの循環ポンプ故障	49
6.5 制御系の故障	50
6.5.1 イオンポンプ及び真空計コントローラの故障	50

6.5.2 ニッケル膜温度制御系故障	50
6.6 その他の故障	51
6.6.1 ニッケル膜ナトリウムリーク検知器の誤作動	51
6.6.2 EV-HAr電源回路の不具合	51
6.6.3 イオンポンプコントローラの誤操作	52
6.6.4 イオンポンプ出力不調	52
6.7 コールドトラップ出口ナトリウム中水素計の交換工事	54
7. 実機プラントへの提言	57
8. 結 言	58
9. 謝 辞	60
10. 参考文献	61
付録-I イオンポンプの回復処理方法および結果	221
1. 試験方法	222
2. 結 果	225
付録-II 水素計ペークアウト方法	227
1. P N C型 1号機改良型	228
2. P N C型 2号機MKIV	228
3. 東芝型ナトリウム中水素計	229
4. 50MW-CG-MKV	230
付録-III 50MWSGT Fでの各水素計のイオンポンプ及び 真空計の水素ガス校正曲線	231

List of Photographs

Photo. 5-1	Surface observation by S.E.M. and X-ray surface analysis (EV-HNa)	65
	SEMによる表面観察、X線面分析 (EV-HNa)	
Photo. 5-2	Surface observation by S.E.M. and X-ray surface analysis (EV-HNa)	66
	SEMによる表面観察、X線面分析 (EV-HNa)	
Photo. 6-1	Deformation of the nickel membrane in EV-HAr (50MW-CG-MKI)	67
	EV-HAr (50MW-CG-MKI) ニッケル膜変形状況	
Photo. 6-2	Deformation of the nickel membrane in EV-HAr (50MW-CG-MK III)	67
	EV-HAr (50MW-CG-MK III) ニッケル膜変形状況	
Photo. 6-3	The nickel membrane in CT-HNa (PNC type - I improvement model)	68
	CT-HNa (PNC型 1号機改良型) のニッケル膜全体写真	
Photo. 6-4	Weld portion of the nickel membrane	68
	ニッケル膜溶接部	
Photo. 6-5	Filament break of ultra high ionization vacuum gauge in CT-HNa	69
	CT-HNa 超高電離真空計 フィラメントの断線	

List of Tables

Table 2-1	Detection range of water leak detector in "Monju" plant	70
	「もんじゅ」プラントにおける水リーク検出器の検出範囲	
Table 2-2	Main items of the hydrogen meter for "Monju" plant	71
	もんじゅ水素計の主要目	
Table 3-1	Operational experience of in-sodium hydrogen meters	72
	ナトリウム中水素計使用状況	
Table 3-2	Comparison of specification of in-sodium hydrogen meters in Oarai Engineering Center PNC	73
	動燃大洗工学センターにおける各ナトリウム中水素計仕様比較表	
Table 3-3	Operational experience of in-cover gas hydrogen meters	74
	カバーガス中水素計使用状況	
Table 4-1	Basic specification of the in-sodium hydrogen meters in 50MW SGTF	75
	50MWSGTFにおけるナトリウム中水素計基本仕様	
Table 4-2	Basic specification of the in-cover gas hydrogen meters in 50MW SGTF	79
	50MWSGTFにおけるカバーガス中水素計基本仕様	
Table 4-3	Basic specification of the gas-chromatograph. 83	
	ガスクロマトグラフ基本仕様	
Table 5-1	Summary of the measured results of the pumping speed of ionization gauges	84
	電離真空計の排気速度測定結果一覧	
Table 5-2	Comparison of the conductance of orifices ... 85	
	各使用オリフィスの仕様	

Table 5-3	Permeability of hydrogen through nickel membrane	86
	ニッケル膜に対する水素の透過率（ガス中試験）	
Table 5-4	Influence of discharge gas	87
	従来の放出ガス量仕様値での影響比較例	
Table 6-1	(1/17~17/17) Failure and troubleshooting of hydrogen meters	88
	水素計故障およびその処置	
Table 6-2	(1/4~4/4) Operational history and failure of hydrogen meters	105
	水素計使用経過と故障状況	
Table 6-3	Measurement of crashed nickel membrane	109
	変形ニッケル膜寸測測定結果	
Table 7-1	(1/15~15/15) Proposal for prototype plant ..	110
	実機プラントへの提言	

List of Figures

Fig. 2-1	Schema of nickel diffusion type hydrogen meter	125
	水素計概念図	
Fig. 2-2	Relation between nickel membrane thickness and 63% response time	126
	ニッケル膜の厚さと 63%応答時間との関係	
Fig. 2-3	Schema of secondary in "Monju" plant	127
	もんじゅ 2次系の概略図	
Fig. 2-4	Water leak detection characteristic figure ..	128
	水リーク検出特性図	
Fig. 3-1	Development of in-sodium hydrogen meter	129
	ナトリウム中水素計の開発経過	
Fig. 3-2	Development of gas circulating type in-cover gas hydrogen meter in 50MW SGTF	130
	50MWSGT Fにおける循環式カバーガス中水素計開発経過	
Fig. 4-1	Schema of hydrogen meters location	131
	水素計設置位置	
Fig. 4-2	Schema of 50MW-MKI in-sodium hydrogen meter system	132
	50MW-MKIナトリウム中水素計系統図 (SH-HNa, EV-HNa)	
Fig. 4-3	Schema of nickel membrane of hydrogen meters of 50MW-MKI, -MKII and MKIII	133
	50MW-MKI, -MKII, -MKIIIのニッケル膜構造図	
Fig. 4-4	Schema of 50MW-MKII in-sodium hydrogen meter system (SH-HNa, EV-HNa)	134
	50MW-MKIIナトリウム中水素計系統図 (SH-HNa, EV-HNa)	

Fig. 4-5	Schema of 50MW-MKⅢ in-sodium hydrogen meter system (EV-HNa)	135
	50MW-MKⅢナトリウム中水素計系統図 (EV-HNa)	
Fig. 4-6	Schema of PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter system (Nap-HNa, CT-HNa)	136
	PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計系統図 (Nap-HNa, CT-HNa)	
Fig. 4-7	The economizer contained main heater of PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter	137
	PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計の主ヒータ内蔵エコノマイザの構造図	
Fig. 4-8	The nickel membrane in PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter	138
	PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計のニッケル膜構造図	
Fig. 4-9	Schema of Toshiba Type in-sodium hydrogen meter system (SH-HNa)	139
	東芝型ナトリウム中水素計系統図 (SH-HNa)	
Fig. 4-10	Schema of economizer contained main heater of Toshiba Type in-sodium hydrogen meter (SH-HNa)	140
	東芝型ナトリウム中水素計の主ヒータ内蔵エコノマイザ構造図 (SH-HNa)	
Fig. 4-11	The nickel membrane in Toshiba Type in-sodium hydrogen meter	141
	東芝型ナトリウム中水素計のニッケル膜構造図	
Fig. 4-12	Measure of an orifice for an ion pump	142
	イオンポンプ部オリフィス寸法	
Fig. 4-13	Installation of Toshiba Type in-sodium hydrogen meter	143
	東芝型ナトリウム中水素計取付図	

- Fig. 4-14 PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter 144
PNC型2号機MKIVナトリウム中水素計系統図 (EV-HNa)
- Fig. 4-15 The economizer contained main heater of PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter 145
PNC型2号機MKIVナトリウム中水素計の主ヒータ内蔵エコノマイザ構造図
- Fig. 4-16 The nickel membrane in PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter 146
PNC型2号機MKIVニッケル膜構造図
- Fig. 4-17 Measurement and signal flow of PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter 147
PNC型2号機MKIVの計装および信号処理フロー
- Fig. 4-18 50MW-CG-MKI in-cover gas hydrogen meter 148
50MW-CG-MKI カバーガス中水素計系統図 (EV-HAr)
- Fig. 4-19 The nickel membrane housing in 50MW-CG-MKII in-cover gas hydrogen meter 149
50MW-CG-MKII カバーガス中水素計のニッケル膜ハウジング部構造図
- Fig. 4-20 The nickel membrane housing in 50MW-CG-MKIV in-cover gas hydrogen meter 150
50MW-CG-MKIV カバーガス中水素計のニッケル膜ハウジング部構造図
- Fig. 4-21 The orifice in 50MW-CG-MKIII in-cover gas hydrogen meter 151
50MW-CG-MKIII オリフィスガスケット形状
- Fig. 4-22 PNC-CG-type-I (improvement model) in-cover gas hydrogen meter (SH-HAr) 152
PNC型-CG-1号機(改良型)カバーガス中水素計系統図 (SH-HAr)
- Fig. 4-23 Gas sampling line of gas-chromatograph 153
ガスクロマトグラフーサンプリングライン系統図

Fig. 4-24	PNC-MAPI type in-sodium hydrogen meter	.....	154
	PNC-MAPI型ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-25	In-sodium hydrogen meters in SWAT-2 test rig	.....	155
	SWAT-2 装置ナトリウム中水素計ループ		
Fig. 4-26	Varian type in-sodium hydrogen meter	.....	155
	バリアン型ナトリウム中水素計概略図		
Fig. 4-27	PNC-MAPI type in-sodium hydrogen meter (improvement type)	.....	156
	PNC-MAPI(改良型)ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-28	Westinghouse type in-sodium hydrogen meter	..	157
	ウェスティングハウス社製ナトリウム中水素計概略図		
Fig. 4-29	PNC type-I MKI and MKII in-sodium hydrogen meters	.....	158
	PNC型1号機(MK I及びMK II)ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-30	PNC type-II MKI in-sodium hydrogen meter	..	159
	PNC型2号機MK I ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-31	PNC type-II MKII in-sodium hydrogen meter	..	160
	PNC型2号機MK II ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-32	PNC type-II MK III in-sodium hydrogen meter	..	161
	PNC型2号機MK III ナトリウム中水素計系統図		
Fig. 4-33	Forced sampling type in-cover gas hydrogen meter in SWAT-2 test rig	.....	162
	SWAT-2でにおける強制サンプリング型カバーガス中水素計系統図		
Fig. 4-34	Direct insertion type in-cover gas hydrogen meter in SWAT-2 test rig	.....	163
	SWAT-2でにおける直接挿入型カバーガス中水素計系統図		
Fig. 4-35	Direct insertion type in-cover gas hydrogen meter in 1MW SG test loop	.....	164
	1MWでにおける直接挿入型カバーガス中水素計系統図		

- Fig. 4-36 Immersion and diffusion type in-sodium/in-cover gas hydrogen meter 165
直浸式ナトリウム中／カバーガス中水素計
- Fig. 5-1 Relation of hydrogen concentration by static equilibrium pressure and experimental equation (CT-HNa (PNC type-I improvement model)) 166
静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係
(CT-HNa, PNC型1号機改良型)
- Fig. 5-2 Relation of hydrogen concentration by static equilibrium pressure and experimental equation (Nap-HNa, (PNC type-I improvement model)) 167
静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係
(Nap-HNa, PNC型1号機改良型)
- Fig. 5-3 Relation of hydrogen concentration by static equilibrium pressure and experimental equation (50MW-MKIII, No.1) 168
静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係
(50MW-MKIII No.1)
- Fig. 5-4 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MKII) 169
EV-HNa (50MW-MKII) 校正試験結果
- Fig. 5-5 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MKIII No.1) 170
EV-HNa (50MW-MKIII No.1) 校正試験結果
- Fig. 5-6 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MK-III No.2) 171
EV-HNa (50MW-MKIII No.2) 校正試験結果
- Fig. 5-7 Result of calibration test of SH-HVa (50MW-MKII) 172
SH-HNa (50MW-MKII) 校正試験結果

Fig. 5-8	Result of calibration test of Nap-HNa (PNC type-I (improvement model))	173
	Nap-HNa [PNC型1号機 (改良型)]校正試験結果	
Fig. 5-9	Result of calibration test of CT-HNa (PNC type-I (improvement model))	174
	CT-HNa [PNC型1号機 (改良型)]校正試験結果	
Fig. 5-10	Result of calibration test of EV-HNa (PNC Type-II MK IV)	175
	EV-HNa (PNC 2号機-MK IV) 校正試験結果	
Fig. 5-11	Result of calibration test of SH-HNa (Toshiba Type)	176
	SH-HNa (東芝型) 校正試験結果	
Fig. 5-12	Calibration test equipment for in-cover gas hydrogen meter	177
	カバーガス中水素計校正試験装置	
Fig. 5-13	Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MKI)	178
	EV-HAr (50MW-CG-MKI) 校正試験結果	
Fig. 5-14	Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MK II)	179
	EV-HAr (50MW-CG-MK II) 校正試験結果	
Fig. 5-15	Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MK III)	180
	EV-HAr (50MW-CG-MK III) 校正試験結果	
Fig. 5-16	Result of calibration test of SH-HAr (PNC-CG-type-I (improvement model))	181
	SH-HAr [PNC-CG-1号機 (改良型)]校正試験結果	
Fig. 5-17	Indication of in-sodium hydrogen meter in initial operation	182
	設置後初期運転時のナトリウム中水素計指示	

Fig. 5-18 Tensile strength and soaked time of nickel membrane	183 ニッケル膜の引張強さと浸漬時間
Fig. 5-19 The relation between pressure and life of ion pump	184 イオンポンプの動作圧力と寿命の関係
Fig. 5-20 Self pumping speed of Schultz gauge	185 シュルツゲージの自己排気速度
Fig. 5-21 Noise of the ion pump	186 イオンポンプ出力のノイズ
Fig. 5-22 Noise of the vacuum gauge	187 真空計出力のノイズ
Fig. 5-23 An example of unforeseen noise of the vacuum gauge	188 真空計出力の突発的なノイズ例
Fig. 5-24 Conceptual figure of orifice type hydrogen meter	189 オリフィスタイプ水素計概念図
Fig. 5-25 Change of hydrogen indication by change of ion pumping speed	190 イオンポンプ排気速度変化にともなう水素計の指示変化
Fig. 5-26 The relation between hydrogen diffusion ratio and partial pressure in-sodium	191 水素透過率とナトリウム中水素分圧の関係
Fig. 5-27 The relation between hydrogen diffusion ratio and partial pressure in-cover gas	192 水素透過率とカバーガス中水素分圧との関係
Fig. 5-28 The test result of take out of PNC type in-sodium hydrogen meter	193 PNC型ナトリウム中水素検出計ベーカーアウト試験結果

Fig. 5-29 Pumping speed of after and before recovery treatment	194
イオンポンプ回復処理前後の排気速度	
Fig. 5-30 SP Versus QH ₂ after the treatment of Ar ion bombardment	195
アルゴンボンバード処理後のイオンポンプ排気速度と排気量	
Fig. 5-31 Calibration curve before and after ion pump exchange (EV-HNa MK III No.1)	196
イオンポンプ交換前後のEV-HNa MKIII No.1 校正曲線	
Fig. 5-32 Calibration curve before and after recovery treatment (SH-HAr)	197
イオンポンプ回復処理前後のSH-HAr 校正曲線	
Fig. 6-1 Operation time and frequency of trouble	198
運転時間とトラブル発生頻度	
Fig. 6-2 Start up times of hydrogen meter and frequency of trouble	199
水素計起動回数とトラブル発生頻度	
Fig. 6-3 Trouble frequency of each component of hydrogen meter	200
水素計構成機器別故障件数	
Fig. 6-4 Vacuum gauge indication at nickel membrane leak (CT-HNa)	201
CT-HNa ニッケル膜リーク時の真空計の出力記録	
Fig. 6-5 Crash of nickel membrane (EV-HAr (50MW-CG-MKI))	202
EV-HAr (50MW-CG-MKI) ニッケル膜潰れ状況	
Fig. 6-6 Measurement position of nickel membrane (EV-HAr (50MW-CG-MKI))	203
EV-HAr のニッケル膜寸法測定位置	

Fig. 6-7	In-cover gas hydrogen meter (EV-HAr (50MW-CG-MK I))	204
	EV-HAr (50MW-CG-MK I) ニッケル膜ハウジング及び真空系概略構成図	
Fig. 6-8	Conductance calculation model	205
	コンダクタンス計算モデル	
Fig. 6-9	Calibration curve change by nickel membrane transformation (calculation)	206
	ニッケル膜変形による水素計校正曲線の変化(計算例)	
Fig. 6-10	Calibration test result of EV-HAr (50MW-CG-MK I)	207
	EV-HAr (50MW-CG-MK I) 校正試験結果	
Fig. 6-11	Electric current of ion pump for EV-HAr (50MW-CG-MK II)	208
	EV-HAr (50MW-CG-MK II) イオンポンプ電流出力	
Fig. 6-12	Indication of millitorr gauge for EV-HAr (50MW-CG-MK II)	209
	EV-HAr (50MW-CG-MK II) ミリトールゲージ出力	
Fig. 6-13	Leak position in nickel membrane of EV-HAr (50MW-CG-MK II)	210
	EV-HAr (50MW-CG-MK II) ニッケル膜リーク部	
Fig. 6-14	Electric current of ion pump for EV-HAr (50MW-CG-MK III)	211
	EV-HAr (50MW-CG-MK III) イオンポンプ電流出力	
Fig. 6-15	Evacuation of static chamber for EV-HNa (PNC type-II MK IV)	212
	EV-HNa (PNC型2号機-MK IV) 静的室の排気	
Fig. 6-16	Static equilibrium pressure in static chamber (EV-HNa (PNC Type-II MK IV), (1983, 4, 15))	213
	EV-HNa (PNC 2号機-MK IV) 静的室静的平衡圧(1983.4.15)	

Fig. 6-17 Static equilibrium pressure in static chamber (EV-HNa (PNC Type-II MK-IV), (1983, 10, 26))	214
EV-HNa (PNC 2号機-MKIV) 静的室静的平衡圧 (1983.10.26)	
Fig. 6-18 The breaking of filament of Schultz gauge	215
シュルッゲージフィラメント線外れ状況	
Fig. 6-19 Failure condition of the nude gauge filament for CT-HNa	215
CT-HNa ヌードゲージフィラメント破損状況	
Fig. 6-20 Leak position at collector electrode of schultz gauge (CT-HNa)	216
CT-HNa シュルッゲージコレクタ電極部リーク箇所	
Fig. 6-21 Flow chart of exchange work of nickel membrane	217
ニッケル膜交換作業フロチャート	
Fig. 6-22 Adhesion state of sodium round nickel membrane	218
ニッケル膜構造部のナトリウム付着状況	
Fig. 6-23 Adhesion state of sodium in vacuum system	219
真空装置のナトリウム付着状況	
Fig. 6-24 Improvement figure of structures round nickel membrane	220
ニッケル膜構造部の改良図	
Fig. A1-1 Schematic diagram of the test apparatus	233
試験装置系統図	
Fig. A1-2 Outline of the test dome	234
試験部の概要	
Fig. A1-3 Schema of recovering ion pump (SH-HAr)	235
SH-HAr イオンポンプ回復処理系統図	

Fig. A1-4 The relation between current and pressure of ion pump	236
イオンポンプ電流とポンプ部圧力の関係	
Fig. A1-5 Sp Versus elapsed time without any recovery treatment	237
回復処理を施さない場合の排気速度と経過時間	
Fig. A1-6 Sp versus elapsed time after the treatment of the bakeout at 450°C	238
450°Cベーカウト処理後の排気速度と経過時間	
Fig. A1-7 Sp versus elapsed time after the treatment of Ar ion bombardment	239
アルゴンイオンボンバード処理後の排気速度と経過時間	
Fig. A1-8 The difference between A-type cathode and C type cathode	240
A型カソードとC型カソードの違い	
Fig. A1-9 Hydrogen solubility isobars of exothermic occluders at 1 atm.	241
1気圧における水素溶解度曲線	
Fig. A3-1 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (EV-HNa (50MW-MK III No.1))	242
EV-HNa (50MW-MK III No.1) シュルツゲージ水素校正曲線	
Fig. A3-2 Calibration curve of miltorr gauge by hydrogen (EV-HAr (50MW-MKI~MK III))	243
EV-HAr (50MW-CG-MKI~MK III) ミリトルゲージ 水素校正曲線	
Fig. A3-3 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (CT-HNa (PNC type-I improvement model No.1))	244
CT-HNa (PNC型1号機改良型No.1) シュルツゲージ 水素校正曲線	

Fig. A3-4 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (Nap-HNa (PNC type-I improvement model)) 245
N a p - H N a (P N C 型 1 号機改良型) シュルッゲージ水素校正曲線

Fig. A3-5 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (SH-HAr (PNC-CG-Type I)) 246
S H - H A r (P N C 型 - C G - 1 号機) シュルッゲージ水素校正曲線

Fig. A3-6 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (CT-HNa (PNC Type-I improvement model No.1)) . 247
C T - H N a (P N C 型 1 号機改良型 #1) ヌードゲージ水素校正曲線

Fig. A3-7 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (PNC type-I improvement model) 248
N a p - H N a (P N C 型 1 号機改良型) ヌードゲージ水素校正曲線

Fig. A3-8 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (SH-HAr (PNC-CG-Type I)) 249
S H - H A r (P N C - C G - 1 号機) ヌードゲージ水素校正曲線

Fig. A3-9 Calibration curve of schultz guage by hydrogen (EV-HNa (PNC type II MK IV)) 250
E V - H N a (P N C 型 2 号機 M K I V) シュルッゲージ
水素校正曲線

Fig. A3-10 Calibration curve of nude guage by hydrogen (EV-HNa (PNC type-II MK IV)) (PST-1C Type) ... 251
E V - H N a (P N C 型 2 号機 M K I V) ヌードゲージ水素校正曲線
(P S T - 1 C 型)

- Fig. A3-11 Calibration curve of ion pump by hydrogen
(EV-HNa (PNC type-II MK IV)) (PST-1C type) ... 252
EV-HNa (PNC型2号機MKIV) イオンポンプ水素校正曲線
(PST-1C型)
- Fig. A3-12 Calibration curve of nude gauge by hydrogen
(SH-HNa (Toshiba Type)) 253
SH-HNa (東芝型) ヌードゲージ水素校正曲線
- Fig. A3-13 Calibration curve of ion pump by hydrogen
(SH-HNa (Toshiba type)) 254
SH-HNa (東芝型) イオンポンプ水素校正曲線
- Fig. A3-14 Calibration curve of miltorr gauge by
hydrogen (EV-HAr (50MW-CG-MK IV)) 255
EV-HAr (50MW-CG-MKIV) ミリトルゲージ水素校正曲線
- Fig. A3-15 Calibration curve of ion pump by hydrogen
(EV-HAr (50MW-CG-MK IV)) 256
EV-HAr (50MW-CG-MKIV) イオンポンプ水素校正曲線
- Fig. A3-16 Calibration curve of schultz gauge by
hydrogen (PNC type-I improvement model
No.2) 257
CT-HNa (PNC型1号機改良型No.2) シュルツゲージ
水素校正曲線
- Fig. A3-17 Calibration curve of nude gauge by hydrogen
(PNC type-I improvement model No.2) 258
CT-HNa (PNC型1号機改良型No.2) ヌードゲージ水素校正曲線

記号表

C_{NH}	：ナトリウム中水素濃度	(ppm)
K_{NH}	：Sievert's 定数	(ppm/Torr ^{1/2})
P_{NH}	：ナトリウム中水素分圧	(Torr)
T_{Ni}	：ナトリウム(ニッケル膜部)温度	(K)
Q_H	：ニッケル膜部透過水素量	(Torr·cm ³ /sec)
S_P	：イオンポンプ排気速度	(cm ³ /sec)
P_{IP}	：イオンポンプ部圧力	(Torr)
K	：ニッケル膜の水素透過率	(cm ² ·Torr ^{1/2} /sec)
A	：ニッケル膜面積	(cm ²)
d	：ニッケル膜厚さ	(cm)
C_{NP}	：真空系のコンダクタンス	(cm ³ /sec)
D	：ニッケルに対する水素の拡散定数	(cm ² /sec)
t	：時間	(sec)
P_{IG}	：水素計真空系(真空計部)圧力	(Torr)
V	：ニッケル膜～真空バルブ手前までの容積 (静的平衡圧測定部容積)	(cm ³)
P_M	：ニッケル膜部圧力	(Torr)
T_G	：真空計部温度	(K)
T_{AV}	：($T_{Ni} + T_G$) $/2$	(K)
P_{GH}	：カバーガス中水素分圧	(Torr)
P_{Total}	：カバーガス圧力	(Torr)
C_{GH}	：カバーガス中水素濃度	(Vppm)
P_{Ar}	：不活性(アルゴンガス)圧力	(Torr)
T_c	：ナトリウム温度	(K)
S_{EN}	：感度	(Torr ⁻¹)
I_i	：イオン電流	(A)
I_e	：エミッション電流	(A)
S'_P	：真空計の排気速度	(cm ³ /sec)
F_t	：サーマルトランスピレーションの補正值	
k	：水素透過係数	(Torr ^{1/2} ·cm ² /sec)
E	：透過に要する活性化エネルギー	(cal/mol)
R	：ガス定数	(cal/mol·deg)

$C_{NP'}$	: ニッケル膜～オリフィス間のコンダクタンス	(cm ³ /sec)
P_H	: 被測定側水素分圧	(Torr)
P_N	: 超高真空計部圧力	(Torr)
C_{MP}	: オリフィスコンダクタンス	(cm ³ /sec)
$C_{MP'}$	: 実効コンダクタンス	(cm ³ /sec)
Q^*	: 真空壁表面からの放出ガス量	(Torr·cm ³ /sec)

1. まえがき

液体金属冷却高速増殖炉（LMFBR）用蒸気発生器は、液体金属ナトリウムと水との熱交換器である。もし何らかの原因により伝熱管に欠陥が発生した場合、伝熱管内の高温・高圧の水／水蒸気が液体金属ナトリウム中に漏洩（水リーク）し、いわゆるナトリウム－水反応が生じる。この反応は高温の腐食性生成物をともなうため、隣接する伝熱管を損耗（ウェステージ）し、ついには隣接伝熱管を破損させ、水リークの伝播・拡大へと発展する可能性のあることが知られている^{1)～4)}。このため、蒸気発生器には、水リークが発生した場合、確実かつ早期に水リークを検出できる信頼性の高い水リーク検出計が必要とされる。水リークを検出する手段としては種々の方法があるが、現在最も有効と考えられているものに、水リーク時にナトリウム中またはカバーガス中に生じる水素を検出する方法がある。その方法の中の一つにニッケル拡散膜式水素計があり、各国において開発・研究が実施されている^{5)～13)}。

50 MW蒸気発生器試験施設（50 MWSGT F）においても、1973年に水リーク検出用の水素計をナトリウム系に2基設置したものを初めとし、現在ではナトリウム系に4基、カバーガス系に2基設置されている。50 MWSGT Fではこれらの検出計を用いて水リーク模擬試験（注水試験および注水素試験）を実施し、水素計の性能特性評価^{14)～16)}はもちろんのこと、水リーク時の水素挙動の解明^{14), 17)}、水リーク検出計の信号処理等^{18), 19)}についても検討を進めている。また、ナトリウム中水素計は、蒸気発生器伝熱管からの水素拡散量の測定²⁰⁾やコールドトラップの水素捕獲効率を求める²⁰⁾ことなどにも利用されている。

本書は、これまでに50 MWSGT Fにおいて開発を進めてきたナトリウム中水素計ならびにカバーガス中水素計について、各水素計の構成・仕様の比較、性能特性評価等について述べるとともにこれまでに50 MWSGT Fで得られている水素計の使用経験などについて報告する。すなわち、第2章ではナトリウム中およびカバーガス中水素計の測定原理について、第3章では大洗工学センターで進められてきた水素計の開発経過について、第4章ではこれまでに開発を行なってきたナトリウム中およびカバーガス中水素計にて構成および仕様の比較について、第5章では各水素計の性能特性（校正結果、経時変化、寿命、感度、その他）評価について、第6章ではこれまでに50 MWSGT Fで水素計を使用して得られたトラブルとその対策等について、第7章では“もんじゅ”用水リーク検出計に対し50 MWSGT Fで得られたこれまでの経験をもとに、保守・補修に関する留意点について記述してある。

これら実機プラントに近い50 MWSGT Fにおける数多くの運転使用経験は、現在進められている原型炉「もんじゅ」の水素検出系の設計に直接反映させるべきものであり、さらに今後実証炉用システムを検討する上でも参考とすることができると考える。

2. 水素計の概要

蒸気発生器伝熱管に欠陥が発生した場合、高温・高圧の水／水蒸気がナトリウム中へ漏洩し、ナトリウム－水反応（水リーク）が生じる。この時以下の反応が起こる。



この反応により発生する水素を検出するのがニッケル拡散膜式水素計であり、ナトリウム中またはカバーガス中用があるが測定原理は同じである。またそれぞれの検出計は、ニッケル膜部を加熱・温度制御するための加熱器、ナトリウムまたはガスを循環させるためのポンプ、流量計などの機器を有している。構成に関する詳細な説明については4章で行なう。ニッケル拡散膜式水素計の測定原理の概要について以下に説明する。

水素計の拡散膜としては、水素の透過率が大きくかつナトリウムとの共存性がよい高純度ニッケル（Ni）が使用されている。このニッケル拡散膜の片面はナトリウムまたはカバーガスと接触し、もう一方の面は真空（ナトリウムまたはカバーガス中に含まれる水素分圧より十分に低い圧力）に保持されている。このため、ナトリウムまたはカバーガス中に含まれる水素は、ニッケル拡散膜を透過して水素計の真空室（以下真空系側）に流入する。この水素の透過量は、ナトリウムまたはカバーガス中に含まれる水素濃度に比例して変化するため、それにともなって真空系側の圧力も当然変化する。従って、真空系内の圧力変化を計測することにより、ナトリウム中またはカバーガス中に含まれる水素濃度を求めることが可能となる。

次に、ナトリウム中水素計およびカバーガス中水素計各々について具体的な説明を加える。

2.1 ナトリウム中水素計

図2-1にニッケル拡散膜式水素計の概念図を示す。すなわち水素計は、1)イオンポンプ、2)ニッケル膜、3)真空計、4)真空バルブ、5)真空配管等より構成されている。水素計の測定方法には、1)動的平衡法と2)静的平衡法との2つの方法がある。動的平衡法とは、水素計の通常運転モードで、ニッケル膜より透過してくる水素を連続的にイオンポンプにより排気している状態での真空系内の圧力値よりナトリウム中の水素濃度（C_{NH}）を測定する方法である。また静的平衡法とは、水素計の校正に利用される測定モードで、ニッケル膜とイオンポンプの間に設けられている真空バルブを閉じ、真空系内の圧力をナトリウム側の水素分圧（P_{NH}）と平衡にさせた後、その圧力値を真空計により測定しナトリウム中水素濃度（C_{NH}）を求める方法である。これら2つの方法は、カバーガス中水素計に関してもまったく同様である。まず、動的平衡法について簡単に説明する。

ナトリウム中に溶解する水素濃度は、

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

$$\log K_H = 0.86 - \frac{1220}{T_{Ni}}^{21} \quad (2-3)$$

ここで、 C_{NH} : ナトリウム中水素濃度 (ppm)

P_{NH} : ナトリウム中水素分圧 (Torr)

K_H : Sievert's 定数 (ppm/Torr^{1/2})

T_{Ni} : ナトリウム(ニッケル膜部)温度 (K)

で表わされる。また、ニッケル膜を透過してナトリウム側から水素計の真空系内へ流入してくる水素量は、次式で表わされる。

$$Q_H = S_P \cdot P_{IP} \quad (2-4)$$

$$= \frac{K \cdot A}{d} P_{NH}^{1/2} - \frac{K \cdot A}{d} \left(1 + \frac{S_P}{C_{NP}} \right)^{1/2} \cdot P_{IP}^{1/2} \quad (2-5)$$

ここで、 Q_H : ニッケル膜部透過水素量 (Torr·cm³/sec)

S_P : イオンポンプ排気速度 (cm³/sec)

P_{IP} : イオンポンプ部圧力 (Torr)

K : ニッケル膜の水素透過率 (cm³·Torr^{1/2}/sec)

A : ニッケル膜面積 (cm²)

d : ニッケル膜の厚さ (cm)

P_{NH} : ナトリウム中の水素分圧 (Torr)

C_{NP} : 真空系のコンダクタンス (cm³/sec)

一般に $P_{NH} \gg P_{IP}$ の状態にあるので、(2-5)式の第2項は無視でき以下の様に簡略化される。

$$Q_H = \frac{K \cdot A}{d} P_{NH}^{1/2} \quad (2-6)$$

従って、(2-2)式、(2-4)式および(2-6)式よりナトリウム中の水素濃度 C_{NH} と水素計真空系内(イオンポンプ部)圧力 P_{IP} は次式で関係付けられる。

$$C_{NH} = \frac{S_P \cdot d \cdot K_H}{K \cdot A} P_{IP} \quad (2-7)$$

また、水リーク早期検出の立場から、水素計の応答はできる限り速いことが望まれるが、ニッ

ケル拡散膜式水素計はニッケルを拡散する水素の拡散速度が律速となり図2-2に示す様な応答時間遅れを生じる。図の横軸はニッケル膜の長さ (mm), 縦軸は水素計が 63 %応答に達するまでに要する時間 (sec)である。式で示すと次式の様になる²²。

$$\frac{J(t)-J(0)}{J(\infty)-J(0)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp\left(\frac{-D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{d^2}\right) \quad \dots \quad (2-8)$$

ここで, $\frac{J(t)-J(0)}{J(\infty)-J(0)}$: 応答率

D : ニッケルに対する水素の拡散定数²³ (cm²/sec)

d : ニッケル膜の厚さ (cm)

t : 時間 (sec)

現在各国で使用されている水素計のニッケル膜の厚さは, Interatom の 1 mmを除き, 0.25 ~ 0.5 mm程度のものである。水素計の運転温度としては 500°C程度で運転が行なわれている。従って, 水素計の応答遅れ時間としては, 10秒 (0.25mm) ~ 40秒 (0.5mm)となる。50MW SGT Fで使用しているナトリウム中およびカバーガス中水素計ニッケル膜も 0.25mm と 0.5mm のものである。

次に静的平衡法について説明する。ナトリウム中に含まれる水素濃度がある値で一定している場合, 水素計真空系に設けられた真空バルブを閉じると, 水素計真空系内 (ニッケル膜~真空バルブ間) の圧力はある時間後ナトリウム中水素分圧 (P_{NH}) と平衡, すなわち等しくなる。式で示すと

$$\sqrt{\frac{P_{IG}}{P_{NH}}} + \ell \ln\left(1 - \sqrt{\frac{P_{IG}}{P_{NH}}}\right) = -\frac{K \cdot A}{2 \cdot V \cdot d \cdot P_{NH}^{1/2}} \cdot t \quad \dots \quad (2-9)$$

ここで, P_{IG} : 水素計真空系 (真空計部) 圧力 (Torr)

V : ニッケル膜~真空バルブ手前までの容積 (cm³)

t : バルブ閉後の経過時間 (sec)

となる。例えば, 真空系内の圧力がナトリウム中水素分圧の 95 % ($P_{IG}=0.95 P_{NH}$) 応答に要する時間 t は,

$$t = \frac{5.40 \cdot V \cdot d}{K \cdot A} P_{NH}^{-1/2} \quad \dots \quad (2-10)$$

である。短時間で静的平衡圧測定を行なうためには, 真空系の容積 V を小さくする必要がある。すなわち, コンパクトな設計が要求される。静的平衡圧法により求められる水素分圧は, ニッケル膜部と真空計測定部に温度差があるためナトリウム中水素分圧とは厳密には等しくなく, サマルトランスピレーションの補正が必要である。この関係式は Bennett²⁴, Liang²⁵,

Podgurski²⁶, Takaishi²⁷, Poulter²⁸などにより求められているが、例えば次式で示される²⁷。

$$P_M = \frac{AX^2 + BX + C\sqrt{X+1}}{AX^2 + BX + C\sqrt{X} + \sqrt{(TG/T_{Ni})}} P_{IG} \quad \dots \quad (2-11)$$

ここで、 P_M : ニッケル膜部圧力 (Torr)

P_{IG} : 真空計部圧力 (Torr)

A, B, C : 定 数 水素の場合

$$A = A^* \cdot T_{AV}^2 \quad A^* = 1.24 \times 10^{-5}$$

$$B = B^* \cdot T_{AV}^{-1} \quad B^* = 8.0 \times 10^{-2}$$

$$C = C^* \cdot T_{AV}^{-0.5} \quad C^* = 1.06$$

$$X : (2 \cdot P_{IG} \cdot D_p) / T_{AV} \quad \dots \quad (2-12)$$

D_p : ニッケル膜～真空計接続管内径 (mm)

T_{Ni} : ニッケル膜部温度 (K)

T_G : 真空計部温度 (K)

T_{AV} : $(T_{Ni} + T_G) / 2$ (K)

2.2 カバーガス中水素計

カバーガス中水素計は蒸気発生器内のナトリウムのスタグナント部、カバーガス空間またはナトリウム～カバーガス液面近傍で水リークが発生した場合、非常に有効な水リーク検出計となる。

カバーガス中水素計の測定原理はナトリウム中水素計と同一であり、動的平衡圧法のカバーガス中水素濃度 (C_{GH}) と水素計真空計内圧力 (P_{IP}) との関係は、(2-4)式および(2-6)式より以下の様に求めることができる。

$$C_{GH} = \frac{P_{GH}}{P_{Total}} \times 10^6 \quad \dots \quad (2-13)$$

$$P_{Total} = P_{GH} + P_{Ar} \quad \dots \quad (2-14)$$

ここで、 P_{GH} : カバーガス中水素分圧 (Torr) (ナトリウム中の場合、 P_{NH})

P_{Total} : カバーガス圧力 (Torr)

P_{Ar} : 不活性 (アルゴンガス) 圧力 (Torr)

$$C_{GH} (\text{Vppm}) = \left(\frac{10^3 \cdot S_p \cdot d}{K \cdot A \cdot P_{Total}^{1/2}} \right)^2 \cdot P_{IP}^2 \quad \dots \quad (2-15)$$

静的平衡法については、前項で述べたカバーガス中水素計と同様であるのでここでの説明は省略する。但し、50MWSGT Fの運転経験によるとカバーガス中の水素計の場合、ナトリウム中の水素計に比べ測定する水素分圧が高い（カバーガス中の水素分圧が高い一因としてカバーガス部へ供給されるアルゴンガス中の水素濃度が数十ppmであることが考えられる。また、他のナトリウムループにおいてもカバーガス中とナトリウム中の水素分圧が平衡に達しない例がある。）ため静的平衡圧測定時間が長くなる。そのため、一層のコンパクトな水素計真空系の設計が要求される。

2.3 水素計による水リーク検出範囲

蒸気発生器での水リークを検出する手段としては、水リーク率に対応して水素計・音響計・液面計・圧力計・圧力開放板の破裂信号とさまざまなものがある。この中で水素計は、その特性上水リーク率の小さいリーク検出に有効で「もんじゅ」の場合表2-1²⁹に示すように 10^{-3} g/secから 10^{-1} g/sec程度の範囲の水リークに対して早期かつ確実に検出することが要求されている。なお、ここで水リーク検出範囲の上限は、蒸気発生器伝熱管破損伝播が防止できる水リーク率とした。図2-3に「もんじゅ」の水素計の設置位置を示す。「もんじゅ」では、50MWSGT Fと同様にナトリウム中水素計が過熱器出口、蒸発器出口、2次系ナトリウム循環ポンプの入口（50MWSGT Fはポンプ出口）にそれぞれ設置される。また、カバーガス中水素計は、過熱器および蒸発器のカバーガス部に設置される。表2-2に「もんじゅ」の水素計の主要目を示す。なお、水素計による水リーク検出範囲は、上記の範囲で固定されるものではなくプラントの規模、蒸気発生器の伝熱管材質等によってその範囲は若干異なる。

水リークの検出範囲においての検出下限は、水素計の検出感度によってほぼ規定される。従来の水素計検出感度は、バックグラウンド水素濃度に対し±10%であったが最近では水素計の誤差（ノイズ）を低減することにより検出感度の向上が計られている。また、同じ検出感度であればプラント規模が小さいほど水リークの検出下限を下げることができる。

図2-4に検出特性図を示す。横軸は、水リーク発生時の初期水リーク率、縦軸は、検出時間である。図中の1点鎖線は、ウェステージ現象によって隣接伝熱管に破損が伝播する時間でいわゆる隣接伝熱管許容損耗時間を示す。水素計でこの破損伝播を阻止するためには、検出時間と検出後の運転員の判断・操作時間と蒸気発生器内水蒸気ブローダウン時間とを合わせた時間（許容検出時間）が隣接伝熱管許容損耗時間より早くなくてはならない。しかし、本図で初期水リーク率が0.2g/secでは、隣接伝熱管許容損耗時間と検出曲線が交差している。すなわち、初期水リーク率が0.2g/sec以上では水素計によって水リークを検出できても隣接伝熱管の破損を防止できない。従って、水リークの検出上限は、初期水リーク率における隣接伝熱管の許容損耗時間によって規定されているといえる。

3. 動燃大洗工学センタ内における水素計開発経過

動燃大洗工学センターでは1972年に小リーク・ナトリウム-水反応試験装置(SWAT-2)にて、ニッケル膜型ナトリウム中水素計を初めて設置し、その後、1MW蒸気発生器試験施設、50MW蒸気発生器試験施設、ナトリウム純度管理試験ループ、ナトリウム流動伝熱ループ、燃料ピン流動試験ループにて各型式の拡散膜型水素計(ほとんどニッケル拡散膜)を設置し、特性評価、系内水素濃度評価用あるいは蒸気発生器での水リーク検出器用として使用されている。それらの水素計は、実用的かつ信頼性のある水素計として、改良開発されてきたもので、本章では、その開発経過について記述する。

3.1 ナトリウム中水素計

動燃大洗でのナトリウム中水素計の設置および使用状況一覧(水素計の型式名称も示す。)を表3-1に示し、各ナトリウム中水素計の特色を表3-2に示す。

以下に、これまでのナトリウム中水素計の開発経過で大きな改良点について、時期を追って記述する。また図3-1にナトリウム中水素計の概略系統図による開発経過を示す。

- (1) 1974年頃までの水素計(バリアン型水素計以外)は質量分析器を真空系に設置しその出力により水素濃度を求める方式を採用していたが、ニッケル膜を透過して来る物質は水素のみであり、他の質量も計れる測定過程の複雑な質量分析器による測定は必要がなく、また真空計にくらべコストが高くなるため1975年以降の水素計では、イオンポンプ電流(真空度IC相当)からナトリウム中水素濃度を求める方式(ニッケル膜-イオンポンプ型)とした。
- (2) 1975年初期、それまで得られた各種水素計の特性評価結果等を基に鐘ヶ江らによりナトリウム中水素計の最適設計法³⁰⁾をまとめ、これを基にPNC型1号機ナトリウム中水素計が設計製作されている。

PNC型1号機ナトリウム中水素計は、ナトリウム側も含め従来のものより小型(主ヒータ内蔵エコノマイザを使用)であり、試作した水素計の詳細な構造、製作時に得た情報、ナトリウム中試験結果およびガス中試験結果については、1978年、鐘ヶ江により報告³¹⁾されている。

- (3) 前項までのニッケル膜-イオンポンプ型ナトリウム中水素計では、真空度から水素濃度を求める関係式(校正式)が経時変化し、校正データの採取が定期的に必要となっていた。そこで校正データを得る(静的平衡圧測定)時、水リーク検出器の機能を失なうことがなくかつ校正データの精度を向上させるため動的平衡圧測定室と、静的平衡圧測定室の2つの真空室を設けたPNC型2号機ナトリウム中水素計が、1976年に開発された。

本水素計は、MK-I~MK-IIIと真空系統がわずかに異なる各タイプが製作された。(わずかに異なる点については4.3.2項で記述) PNC型2号機ナトリウム中水素計の基本設計仕様、詳細な構造および校正試験結果等については、1978年に鐘ヶ江らにより報告³²⁾されている。

また長期運転した4基の本水素計で得られた経時特性および運転経験等は1981年に黒羽らにより報告³³されている。

- (4) 前項(3)での水素計ではイオンポンプ電流から真圧度を読みとる方式の水素計であり、次のような問題がおきることが判った。

イオンポンプ排気速度の経時変化(5.1.2項参照)および真圧計に比べイオンポンプ電流はノイズが大きい。

前者はナトリウム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、校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、水リーキ検出計としての感度および、濃度計としての測定精度を低下させる。

これらの解決策として、イオンポンプ入口にオリフィスを設けイオンポンプ電流のかわりにオリフィスと、ニッケル膜間に設置した真圧計を使用することが考案された。オリフィスの効果により、真圧計部の排気速度は安定し、また、オリフィスを設けた場合、真圧計部での真圧度をオリフィスなしの場合と同じ値に設計するとニッケル膜面積は小さくすることができる。ニッケル膜面積の、イオンポンプ排気量に影響し、ニッケル膜面積を小さくすることによってイオンポンプの寿命を延ばすことができる。

以上の有効性を確認するため1978年、PNC型2号機ナトリウム中水素計にオリフィスを付けたナトリウム中水素計(PNC型2号機MKIV)が試作され、50MWSGT中にても、1982年設置された。オリフィス付ナトリウム中水素計の性能特性は既に黒羽らにより報告³⁴されている。

50MWSGTでの使用経験および特性等は本書5章等で記述している。

なお、現在「もんじゅ」用ナトリウム中水素計としては、前述したPNC2号機MK-IVを採用することが計画されている。

3.2 カバーガス中水素計

表3-3に動燃大洗におけるカバーガス中水素計の設置および使用経過状況一覧(水素計の型式名称表示も示す)を示す。

動燃大洗でのカバーガス中水素計は1972年5月SWAT-2に初めて設置している。この場合、拡散膜にパラジウムを使用し、カバーガスを配管によりサンプリングしている。

50MWSGTでのカバーガス中水リーキ検出器は、1976年以前、ガスクロマトグラフ(ガスクロ)であったが、1977年1月に循環型ニッケル膜カバーガス中水素計が設置されている。ガスクロをカバーガス中水素計として使用する場合、短所として応答時間が長く連続測定できない。そして最大の欠点として、サンプリングラインおよびベーパートラップ部のナトリウムにより、サンプリング中の水素が、トラップされカバーガス中水素濃度の正確な測定が出きない問題があった。ニッケル膜カバーガス中水素計は上述したサンプリングラインで水素がトラップ

アされないよう、ニッケル膜をペーパートラップの前に設置し循環させる方式あるいは、カバーガス空間に直接ニッケル膜を挿入する方式があり、前者を強制循環型、後者を直接挿入型と言わ
れている。

強制循環型では、ガス循環ループが必要となり構成機器がふえ、水素検出おくれ時間が増加す
る等の問題があり、直接挿入型は、ニッケル膜部の精密な温度制御あるいは、ニッケル膜破損時
の保守性が問題となる。

水素計の測定原理および真空系の構成はナトリウム中水素計と同様であり、開発経過もニッケ
ル膜－イオンポンプ型から、オリフィステイプへと改良されている。

図3-2に50MWSGTFでの循環型カバーガス中水素計の開発経過を示す。

図3-2でのカバーガス中水素計は、1977年1月、蒸発器カバーガス部に50MW-CG-
MK Iとして設置したが、カバーガス水素濃度測定範囲を広げるためニッケル膜面積を少なくし
た50MW-CG-MK IIに改良した。その後、水素計の経時特性の向上を計るために、オリフィス
を追加設置した50MW-CG-MK IIIに改良し、さらに、ニッケル膜が変形しにくく内圧型の
ニッケル膜とした50MW-CG-MK IVに改良してきた。

カバーガス中水素計の場合、ナトリウム中水素計開発経過に見られる静的平衡圧測定のための
動的室、静的室の分離型は製作されてない。これは、ナトリウム中水素計での水素計校正試験が、
ナトリウム充填後でなければ行なえないのに對しカバーガス中水素計の校正試験は、水素計単独
で行なえる（サンプリングガスの水素濃度を変更できるラインが設置されている。）ため、校正
試験期間（水リーク検出器としての機能停止）が十分取れることによる。

なお、現在「もんじゅ」用カバーガス中水素計としては、オリフィス付強制循環型カバーガス
中水素計が計画されている。

4. 水素計の構成および仕様

本章では、50 MW SGTF および他試験施設でこれまでに使用して来たナトリウム中およびカバーガス中のニッケル膜式水素計の構造および仕様について記述する。図4-1に50 MW SGTFとの水素計の設置位置を示す。いずれもニッケル膜式の水素計で蒸気発生器を有する2次ナトリウム系に設けられている。ナトリウム中水素計は、過熱器出口（以下SH-HNaと称す）、蒸発器出口（以下EV-HNaと称す）およびナトリウム循環ポンプ出口（以下NaP-HNaと称す）に設置され、水リード検出器として使用されている。このほか、コールドトラップの性能評価のためにコールドトラップ出口（以下CT-HNaと称す）にも1基設置されている。

一方、カバーガス中水素計は、過熱器のカバーガス部（以下SH-HArと称す）と蒸発器のカバーガス部（以下EV-HArと称す）にそれぞれ1基設置されている。また、当初はカバーガス中水素計としてガスクロマトグラフ1台（過熱器、蒸発器の自動切換）を使用していたが、その応答速度が遅くしかもペーパトラップを介しているため測定誤差が大きいと考えられることから現在は、SH-HArおよびEV-HArの校正用のループに組込み基準計器として使用している。表4-1に50 MW SGTFで使用経験のあるナトリウム中水素計の基本仕様を表4-2に、カバーガス中水素計の基本仕様を示す。

4.1 50 MW SGTFでのナトリウム中水素計

4.1.1 50 MW蒸気発生器1号機用ナトリウム中水素計

蒸気発生器1号機用ナトリウム中水素計（以下50 MW-MKIと称す）として、過熱器出口と蒸発器出口に同型の水素計が設置されていた。

図4-2に50 MW-MKIの系統を示す。ナトリウムは、蒸気発生器出口配管から1/2 Bのサンプリング配管によってエコノマイザを通り、加熱器で昇温されたナトリウムと熱交換し500°Cとなりニッケル膜に導びかれる。水素濃度が測定された後、ニッケル膜を出たナトリウムは、1B配管によって加熱器に入りナトリウムを加熱後再びエコノマイザに戻る。熱交換し降温されたナトリウムは、蒸気発生器のドレン配管を流れ2次系ストレージタンクに戻っている。ナトリウム流量は、ヘッド差によって確保しているため水素計専用のポンプは設けていない。通常のナトリウム流量は、 $1.6 \text{ m}^3/\text{H}$ で流量調節弁で調節される。また、蒸気発生器内でのナトリウム-水反応の際、水素計を自動的に隔離できる空気作動式のしゃ断弁（VA14-1E, S）を設けている。このほか、水素計のナトリウム系統内に主系統とは別にアルゴンガスを封入するラインが設置されている。

一方、ナトリウム中からニッケル膜を透過した水素は、ナトリウム受、オリフィスを経て質量分析計に導びかれ、質量分析計のイオン電流によりナトリウム中水素濃度変化を検出する。質量分析計出力は、標準リークで校正できるようになっている。ナトリウム受と質量分析計隔離

弁 (V14-8) の間にある主排気系 (イオンポンプとソープショーンポンプ) は、質量分析計部での真圧度を測定領域まで下げる目的で設置されている。なお、真空系部の空気作動弁 (VA14-6E, S) はナトリウム受内の接点式ナトリウムリーク検知器が作動した場合に緊急しや断し真空系内へのナトリウム流入を防止するためのものである。

図4-3は、水素計で最も重要なニッケル膜の構造である。ニッケル膜は、外径8.6mm、厚さ0.25mmのチューブ型をした拡散膜で内部をナトリウムが流れる構造である。拡散膜チューブの本数は、4本で表面積は147.6cm²であり、いずれのチューブも溶接により製作されている。本水素計は、50MW蒸気発生器1号機運転中の1974年1月から1975年3月まで使用した。

4.1.2 50MW蒸気発生器2号機用ナトリウム中水素計

蒸気発生器2号機用ナトリウム中水素計（以下50MW-MKIIと称す）は、50MW-MKIと同様に過熱器出口と蒸発器出口に設置されていた。

図4-4に50MW-MKIIの系統を示す。ニッケル膜の形状はMKIと同様である（ただしニッケル膜は新しいものと交換した）がナトリウム系統はMKIに使用したものをおり真空系は改造を加えた。即ちニッケル膜、電離真空計、シュルツゲージ、イオンポンプ、粗引き系により構成されたコンパクトな真空系としている。電離真空計は、動的状態での真圧度を測定するため超高電離真空計を、静的状態での真圧度を測定するためシュルツゲージを採用しており $1 \times 10^{-10} \sim 1 \text{ Torr}$ の測定が可能である。イオンポンプは、ニッケル膜を透過した水素を排気するもので水素に対し33l/secの排気速度を持っている。イオンポンプ電流および真空計測定圧力によって水素を検出する。また、イオンポンプを停止し静的平衡法により、ナトリウム中水素分圧の測定から絶対校正が可能である。粗引き系には、ロータリーポンプとソープショーンポンプが設置されており水素計初期運転時の粗引きやイオンポンプ寿命を延ばすため静的平衡圧測定後の粗引き用に使用される。

真空系全体としてはバックグラウンド圧力を低減するため真空系内容積を可能な限り小さくしている。また、ニッケル膜破損検出を目的とした熱電対を真空系に設置している。

なお、蒸発器用は、1975年11月から1977年3月まで、過熱器用は、1975年11月から1982年7月まで使用した。

4.1.3 改良型蒸発器用ナトリウム中水素計

改良型蒸発器用ナトリウム中水素計（以下50MW-MKIIIと称す）は、50MW-MKIIが静的平衡圧測定時にイオンポンプ残留排気の影響を受ける欠点を解決するため図4-5に示すようにシュルツゲージとイオンポンプの間に隔離弁を設けた。このため、ニッケル膜を含む真空系を新たに製作し交換している。このほかに50MW-MKIIと異なる点は、次のとおりである。

- (1) ニッケル膜破損検出に熱電対の代りに接点式のナトリウムリーク検知器を設置している。

- (2) 静的平衡圧測定後の排気用にソープションポンプの代りにソーバックポンプを使用する。
- (3) イオンポンプの排気速度が 33 l/sec (PST-1C型) から 22 l/sec (PST-05A型) に変更されている。

なお、本水素計は、1977年4月から1982年7月まで使用したが、この間の1978年10月にイオンポンプが寿命（5.7項参照）となりポンプのみ交換（PST-05A型からPST-1C型）している。また、1980年8月に接点式のナトリウムリーク検知器が不良となったためリーク検知器を含むニッケル膜部を交換している。

4.1.4 PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計

PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計は、2次系ナトリウム主循環ポンプ出口と2次系コールドトラップ出口に設置されており、これまでに説明した蒸気発生器用ナトリウム中水素計に比べ構造・仕様共、かなり異なっている。図4-6にPNC型1号機改良型ナトリウム中水素計の系統を示す。ナトリウム系統は、主ヒータ内蔵エコノマイザ、ニッケル膜、電磁流量計、電磁ポンプから構成されている。ナトリウムは、主系統配管から分岐した1/2Bのサンプリング配管を流れ主ヒータ内蔵エコノマイザに導びかれる。主ヒータ内蔵エコノマイザでは、図4-7に示すように内管と主ヒータ間を通過し 500°C まで昇温され案内管を経てニッケル膜に至る。ニッケル膜を通過したナトリウムは、主ヒータ内蔵エコノマイザの内管と外管の間の流路を流れいくらか降温され出口ノズルより流量計を経て電磁ポンプによって主系統配管に戻る。主ヒータ内蔵エコノマイザには、ニッケル膜の温度制御用熱電対2本（1本予備）が挿入されており通常 $500^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ で制御されている。また、ナトリウム流量は、電磁ポンプの電圧によって 3 l/min に調節している。

図4-8にニッケル膜部の構造図を示す。ニッケル膜は、外径 25mm 、長さ 271mm 、厚さ 0.5mm の円筒型をしており表面積は 208cm^2 である。ニッケル膜のパイプは、継目なしで両端をアダプタに接続し、TIG溶接により差し込み溶接（溶接棒使用せず）している。また、ニッケル膜構造部は、ニッケル膜破損時の交換を容易にするため主ヒータ内蔵エコノマイザとフランジによって接続されている。ただし、接続部がナトリウムバウンダリーでありシール性を高めるためリップ溶接している。

真空系には、低濃度測定用と高濃度測定用の2台のイオンポンプが設置されておりそれぞれ静的平衡圧測定用の隔離弁を設けている。この点がこれまで説明した水素計と大きく異なっている。低濃度用イオンポンプの排気速度は 2.8 l/sec 、高濃度用の排気速度は 33 l/sec でナトリウム中水素濃度によって使い分けることができる。しかし、実際には高濃度用イオンポンプノイズレベルが予想以上に低かったため通常運転での水素濃度程度では高濃度用の一台で十分測定可能であり低濃度用イオンポンプは使用していない。このほか真空系には、ニッケル膜破損検出用に熱電対が、静的平衡圧測定後の排気時に高濃度用イオンポンプに急激な負荷を与えないようにバリアブルリーク弁がそれぞれ設置されている。粗引きラインはあるが、ロ

ータリーポンプ、ソープションポンプは設置していない。

本水素計は、ナトリウム系および真空系共に従来の水素計と比べ、かなり小型化されている。

NaP-HNaは、1979年1月以来現在まで使用されている。一方、CT-HNaは、1982年6月にニッケル膜が破損したため1983年8月にニッケル膜を含む真空系を交換している。この際、低濃度用イオンポンプは取りはずした。

4.1.5 東芝型過熱器用ナトリウム中水素計

東芝型過熱器用ナトリウム中水素計（以下東芝型と称す）は、SH-HNa50MW-MKIIと交換し設置したもので現在使用中である。図4-9にその系統を示す。ナトリウム系統は従来の水素計の構成機器のほかは、ダンプタンク、ガスおよび真空系、ベーパトラップがあり一つのループが構成されており主系統と独自に運転することができる。ダンプタンクには、接点式のレベル計が2本設置されベーパトラップには、フィルター型が使われている。なお、本水素計に使用している弁はすべて手動弁である。

図4-10に主ヒータ内蔵エコノマイザの構造を示す。ナトリウムは、入口ノズルから流入し主ヒータと内管の間を通り500°Cに昇温されニッケル膜に導びかれる。その後、内管と外管の間を流れ熱交換されながら出口ノズルへ流出する。ニッケル膜近傍には温度制御用の熱電対（ダブルエレメント）が挿入されている。また、酸素計センサーが取付け可能なように酸素計用ハウジングを設けている。（現在、センサーは取付けていない。）主ヒータ内蔵エコノマイザと主ヒータ、ニッケル膜は共に容易に交換が可能なようコノシール継手によって接続されている。図4-11にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜は、長さ50mm、厚さ0.5mmの全半球円すい形状で内側をナトリウムが流れる内圧型で表面積は19.4cm²である。ニッケル膜は、真空配管と電子ビーム溶接で接続されている。

本水素計のナトリウム流量は、1.0 l/minでニッケル膜部は、500°C±1°Cになるようサイリスタ制御している。真空系は、超高電離真空計、隔離弁、オリフィス・イオンポンプ粗引きラインによって構成されており特徴的な点は、真空計が1個のみであることおよびオリフィスが設置されていることである。このため、静的平衡圧測定は超高電離真空計の測定上限圧力 5×10^{-3} Torr 以下に限られる。また、オリフィスが設置されたことによりニッケル膜の面積が小さくなりイオンポンプの寿命を長くすることができるとともに流量計を設置したのと同じ効果がある。図4-12にオリフィスの形状を示す。オリフィスは、孔径2mm、コンダクタنس1.0 l/secのものでガスケットを兼用している。イオンポンプは、排気速度8 l/sec（窒素）を有する米国バリアン社製である。真空系には、このほか超高電離真空計を冷却するファンが設置されている。

本水素計は、コンパクトな設計となっており図4-13に示すように、主系統の配管に吊り下げる方式で取付けられる。このため、水素計出入口サンプリング配管の熱応力の逃げを考慮する必要がなく配管長さが短縮されている。この点、ナトリウムの輸送時間が短縮でき水リーク

検出計として有利である。

4.1.6 P N C 型 2 号機 M K I V 蒸発器用ナトリウム中水素計

P N C 型 2 号機 M K I V 蒸発器用ナトリウム中水素計（以下 P N C 型 2 号機 M K I V と称す）は、EV-HNa の 50 MW-MKIII と交換し設置され現在使用中である。本水素計は、ナトリウム系統構成が若干異なっているが、基本的には「もんじゅ」での使用が予定されているものと同型式と考えてよい。図 4-1-4 に本水素計の系統を示す。本水素計のナトリウム系統構成の特徴は、ニッケル膜が動的室用と静的室用の 2 個あり、またニッケル膜を含む主ヒータ内蔵エコノマイザのナトリウムをドレンできるような構造としドレン配管を設けていることである。なお、東芝型 SH-HNa と同様に本水素計の弁は、すべて手動弁である。図 4-1-5 に主ヒータ内蔵エコノマイザの構造を示す。主ヒータ内蔵エコノマイザは、たて置き型で電磁ポンプによって送られたナトリウムは主ヒータと内管の間を下降し 500 °C となって左右のディストリビュータから、各ニッケル膜に導びかれる。ニッケル膜を通過したナトリウムは、内管と外管の間を熱交換しながら上昇し出口ノズルへ至る。ディストリビュータの下部には、それぞれ動的室および静的室のニッケル膜温度を測定する熱電対が取付けられている。このうち静的室側の熱電対を温度制御用に使用している。ドレン配管は、主ヒータ内蔵エコノマイザの最下端に接続されている。また、ニッケル膜は P N C 型 1 号機改良型と同様の方法で取付られている。

図 4-1-6 にニッケル膜の構造を示す。ニッケル膜の形状は、P N C 型 1 号機改良型と同じ円筒型のもので外径 25 mm, 長さ 50 mm (動的室), 191 mm (静的室), 厚さ 0.5 mm で表面積は、37.3 cm² (動的室), 14.8 cm² (静的室) である。ニッケル膜は、円筒の両端を座と底板に差し込み電子ビームによって溶接している。底板側は、支持していないためニッケル膜の熱膨張を自由に逃がすことができる。

本水素計のナトリウム流量は、3.0 l/min でニッケル膜温度は、500 °C ± 1 °C になるようサイリスタによって制御される。

真空系は、ニッケル膜が 2 つあるため動的室と静的室の 2 系統ある。動的室は、超高電離真空計・隔離弁オリフィス、イオンポンプ、粗引きラインによって構成されている。図 4-1-2 にオリフィスの形状を示す。オリフィスは、孔径 3 mm, コンダクタンス 2.5 l/sec でガスケットを兼用している。イオンポンプは、排気速度が 33 l/sec のものを採用している。静的室側真空系は、シュルツゲージ・隔離弁 (バリアブルリーク弁)・イオンポンプ・粗引きラインによって構成されている。静的室のイオンポンプ排気速度は、2.8 l/sec であり通常運転中、濃度測定用としては機能させておらず排気専用に使用している。

本水素計の取付け方法は、SH-HNa の東芝型と同様に主系統配管に吊り下げる方式を採用している。図 4-1-7 に本水素計の計装および信号処理系の概略フローを示す。水素計のナトリウム計装は、電磁ポンプコイルおよびダクト温度、ニッケル膜温度、ナトリウム流量と数少ない。これらの信号は、いずれも中制に送られ中制での監視・制御・操作が可能である。しか

し、予熱温度は現場の制御盤にて制御するようになっている。一方、真空系の信号はすべて現場の真空系コントロール盤を介し中制まで送られている。真空計およびイオンポンプの出力は微少なイオン電流であることから真空系コントロール盤は検出端に近い現場置きにしている。また、真空系コントロール盤から中制間で各コントローラから出た電圧信号（DC 0～10 mV）を現場にて電流信号（DC 4～20 mA）に変換し中制にて再び電圧信号（DC 1～5 V）に変換している。

なお、真空系のレンジ切換は中制で行えるようになっている。真空系からの信号は、レンジ切換信号も含みすべて計算機に取り込んでいる。これらのデータは、必要に応じて磁気テープ（MT）に収録できる。

4.2 50 MW SGTFでのカバーガス中水素計

4.2.1 蒸発器用カバーガス中水素計

図4-18にEV-HArの系統図を示す。カバーガス系は、ニッケル膜構造部、ペーパトラップ、ガス循環ポンプ、バッファタンク、流量計から構成されている。蒸発器カバーガス部からのサンプリングガスは、ナトリウム蒸気およびミストを含んだ状態で入口配管に設けたヒータによって500°Cに昇温されニッケル膜構造部へ導びかれる。ニッケル膜構造部内では、図4-19に示すように入口ノズルから流入したサンプリングガスは、ニッケル膜構造部の内管を流れニッケル膜部でUターンし、外管を通り出口ノズルから流出する。なお、ニッケル膜部の温度は、ニッケル膜構造部外壁に設置したヒータによって500°C±2°Cにサイリスタ制御している。ニッケル膜構造部を出たサンプリングガスは、ペーパトラップおよびバックアップフィルターにてナトリウム蒸気・ミストを除去した後ガス循環ポンプによってバッファタンク、流量計を介し蒸発器カバーガス部に戻っている。

ペーパトラップは、還流型とフィルター型をシリーズに設置（一体型）したもので通常ペーパトラップの出口温度を80°Cに制御している。還流したナトリウムは、ドレンタンクに一旦溜めた後定期的に手動で蒸発器にドレンしている。

ガス循環ポンプは、定格流量19.8 l/min、設計圧力10 kg/cm²gのベローズ型のものを使用している。

なお、EV-HArの系統には水素濃度の変更ができ水素計の校正（ガスクロによる）が可能な校正ラインを持っている。なお、本水素計の詳細は、宮地らが報告している¹⁷⁾。

EV-HArは、1977年1月に蒸発器カバーガス部に50 MW-CG-MKIとして設置した。その後、50 MW-CG-MKII、50 MW-CG-MKIII、50 MW-CG-MKIVに改良されてきている。以下にこれらのタイプの水素計の特徴を説明する。

(1) 50 MW-CG-MKI

50 MW-CG-MKIの真空系は、ニッケル膜、イオンポンプ、電離真空計、真空弁およ

び粗引きラインから構成されている（図4-18，EV-HAr系図参照）。本水素計は、カバーガス中水素濃度をイオンポンプの出力電流によって測定しており、また、ニッケル膜とイオンポンプ間に隔離弁を設けているため静的平衡圧の測定が可能である。真空系は、表面積 516 cm^2 、このうち静的平衡部は、表面積 254.5 cm^2 、体積 168 cm^3 とコンパクトな設計になっている。

ニッケル膜は、いわゆる外圧型で外径 10 mm 、厚さ 0.25 mm 、長さ 200 mm 、表面積 62.8 cm^2 の片持円筒型（先端半球状）でニッケル膜の内側を真空に引き外側を水素を含んだサンプリングガスが流れる構造になっている。

イオンポンプは、ニッケル膜を透過した水素を排気するもので窒素に対し 8 l/sec 排気速度を持っている。

電離真空計は、米国バリアン社製のミリトルゲージを使用しており測定範囲は、 $0.6 \sim 1 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ である。なお、ミリトルゲージには、冷却効果を増すため冷却フィンが取付けられている。また、ニッケル膜の交換が容易にできるようグレイロックを採用している。

本水素計は、1977年1月から1979年7月まで運転した後MK-IIIC交換するためニッケル膜を引抜いた。このとき、ニッケル膜の変形を発見した。

(2) 50MW-CG-MKII

50MW-CG-MK Iでは、カバーガス中の水素濃度の測定範囲が $1 \sim 600\text{ V ppm}$ であり注水素試験等においては測定範囲を越えてしまう。このため、50MW-CG-MK IIは、ニッケル膜表面積を小さくし測定範囲を $1 \sim 10000\text{ V ppm}$ に広げた。また、ニッケル膜の交換に伴ないイオンポンプも交換している。

ニッケル膜は、外径 10 mm 、厚さ 0.25 mm 、長さ 68 mm 、表面積 20 cm^2 であり形状は、50MW-CG-MK Iと同じである。その他真空系の構成は、50MW-CG-MK Iと同じである。

本水素計は、1979年10月から1981年7月まで運転した。なお、運転停止前の水素計のイオンポンプおよびミリトルゲージの挙動が異常であったためニッケル膜を調査した結果リークを確認した。

(3) 50MW-CG-MKIII

50MW-CG-MK IIIでは、イオンポンプの排気速度が変化しても水素計の特性に影響を与えないようにミリトルゲージとイオンポンプの間にオリフィスを設けた。オリフィスは、厚さ 2 mm 、外径 4.8 mm 、孔径 1 mm 、オリフィスコンダクタンスが 0.188 l/sec のものでガスケットを兼用している。図4-21にオリフィスの形状を示す。なお、オリフィス設置に伴ないニッケル膜も50MW-CG-MK IIと全く同じものに交換している。その他真空系の構成も、50MW-CG-MK IIと同様である。

本水素計は、1981年10月から1983年7月まで運転した。なお、50MW-CG-

MK III から 50 MW-CG-MKIV に交換するためニッケル膜を引抜いたところ変形していた。

また、水素計運転停止前のイオンポンプおよびミリトルゲージの挙動が 50 MW-CG-MKII と同じであったためニッケル膜を調査した結果リークを確認した。

(4) 50 MW-CG-MKV

これまでの運転において、外圧型のニッケル膜は、2回の座屈による変形を起こしている。このため、50 MW-CG-MKV では、変形しにくい内圧型のニッケル膜に変更し、ニッケル膜構造部および真空系を新たに設計・製作している。真空系の構成は、50 MW-CG-MKIII と同じでオリフィスを設けている。図 4-20 にニッケル膜構造部を示す。ニッケル膜が内圧型のため膜部にサンプリングガスが有効に流れるようにノズルを設けている。また、ニッケル膜の交換を容易にするためコノシール継手を採用している。

ニッケル膜は、内圧型で全半球円やすい型の厚さ 0.5 mm, 長さ 55 mm, 表面積 21.2 cm² のものである。

オリフィスは、図 4-12 に示すように厚さ 2 mm, 外径 48 mm, 孔径 1.5 mm, オリフィスコンダクタンス 0.518 l/sec のものでガスケットを兼用している。

本水素計は、1983 年 8 月に設置し現在運転中である。

4.2.2 過熱器用カバーガス中水素計

SH-HAr の系統を図 4-22 に示す。

ガス系の構成は EV-HAr と同様である。なお、ガス循環ポンプにてリークが生じたため、1981 年にダイヤフラム型からベローズ型に交換した。これは、ダイヤフラム型は寿命がおよそ 2000 時間と短かく、頻繁にダイヤフラムを交換する必要があったためである。真空系およびニッケル膜構造部は、50 MW SGTF での CT-HNa および NaP-HNa (PNC 型 1 号機改良型ナトリウム中水素計) と同様の構成、仕様である。真空系には、低濃度測定用と高濃度測定用の 2 台のイオンポンプが設置されており、それぞれ静的平衡圧測定用の隔離弁を設けている。低濃度用イオンポンプの排気速度は 2.8 l/sec, 高濃度用のそれは 33 l/sec でカバーガス中水素濃度によって使い分けることができる。しかし、実際には 4.1.4 項で述べている理由により高濃度用イオンポンプのみ使用している。

真空計としては、動的状態での真空度を測定するヌードゲージと静的状態での真空度を測定するシュルツゲージの二種類があり測定範囲はヌードゲージが $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr, シュルツゲージが $1 \sim 1 \times 10^{-5}$ Torr である。

真空系にはオリフィスは設置されておらず、イオンポンプ出力で水素濃度を換算している。ニッケル膜は外径 25 mm, 長さ 265 mm, 厚さ 0.5 mm, 表面積 208 cm² の片持円筒型で内部にカバーガスを導入するいわゆる内圧型である。EV-HAr ニッケル膜は軸方向、横おきであるのに対し、SH-HAr は、ナトリウムドレン性を良くするため、たておきとした。図 4-22 に示すようにカバーガスは、ニッケル膜構造部を下部から入り、横から出る構造をしている。

4.2.3 ガスクロマトグラフ

図4-23にガスクロマトグラフ(ガスクロ)の系統図を表4-3に基本仕様を示す。

EVおよびSHのカバーガス中水素濃度測定は、1台のガスクロにて行なっているため、カバーガスサンプリングラインに三方電磁弁を設け交互に測定している。また、EVのカバーガス圧は、 $0.7 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ と低圧であり、サンプリングガスはペーパートラップを介しているためサンプリングラインに昇圧ポンプを増設している。

サンプリングガス量は、約 $2 \ell/\text{min}$ で1回のガス中水素分析時間は2分間である。

なお、現在のガスクロは、EV-HArおよびSH-HArの校正試験時に使用するサンプリングガスの水素濃度測定を行なっており、カバーガス中水リーク検出計としては使用されていない。

4.3 他施設での水素計

4.3.1 PNC-MAPI型ナトリウム中水素計

PNC-MAPI型ナトリウム中水素計は、1972年4月、SWAT-2装置に設置されたもので、図4-24に系統図を示し、以下に本水素計の特徴を記す。

- (1) ナトリウム側では、エコノマイザと加熱器間に冷却器が設けられている。これは、主循環回路のナトリウム温度水素計の通常運転(500°C)より高くなる(最大 540°C)ためである。
- (2) ニッケル膜部の温度制御は、加熱器入口温度によって加熱器出力を制御するフィードフォワード方式としている。
- (3) 真空系には、質量分析器が設置されている。
- (4) ニッケル膜のリーク検出器は、熱電対を使用しナトリウムリークの場合、真空配管でナトリウムがフリーズする様冷却フィンを設けている。
- (5) ニッケル膜は、円筒形で肉厚 0.5 mm 、表面積 100 cm^2 (管外径 16 mm 、長さ 200 mm)を使用している。

なお、本水素計の特性評価等については、1972年に根井らにより報告³⁵されている。

4.3.2 バリアン型ナトリウム中水素計

バリアン型ナトリウム中水素計は、1974年12月、SWAT-2装置に設置された。

本水素計は、既存のPNC-MAPI型ナトリウム中水素計のナトリウム側機器(加熱器、ポンプ、流量計等)を共用したもので、ニッケル膜を含む真空系が製作設置されたものである。

図4-25にPNC-MAPI型とバリアン型水素計の機器共用系統図を示し、図4-26にバリアン型ナトリウム中水素計、真空系の概略図を示す。

本水素計の特徴を以下に記述する。

- (1) 真空系は、非常にコンパクト(膜～隔離弁容積～ 70 cm^3)になっており静的平衡圧を測定

可能とするため、イオンポンプ部に隔壁弁が設けられている。

- (2) ニッケル膜は、半球形で肉厚 0.25 mm, 表面積 10 cm²である。

なお、本水素計の特性評価等については、1976年に池本らにより報告³⁰されている。

4.3.3 PNC-MAPI 改良型ナトリウム中水素計

1 MW 1号機ナトリウム中水素計は、1972年11月に1 MW蒸気発生器試験装置に設置された。

本水素計は、SWAT-2でのPNC-MAPI型ナトリウム中水素計で得られた経験をベースに、PNC-MAPI型ナトリウム中水素計を改良したものである。図4-27に系統図を示す。以下に主な改良点について記述する。

- (1) 1 MW SG施設の場合サンプリングナトリウムは、400°C以下のためナトリウム冷却器は設置していない。
- (2) ニッケル膜部でナトリウムリークが起った場合、PNC-MAPI型水素計では、真空系へ流入したナトリウムが凝固するよう真空配管部に冷却フィンを設けていたが、その効果は期待できないため本水素計では、冷却フィン部を設けていない。
- (3) ニッケル膜部の温度制御は、PNC-MAPI型水素計ではフィードフォワード方式としていたが、本水素計ではフィードバック方式とした。なお、現在の水素計では、ほとんどがフィードバック方式としている。

4.3.4 ウエスチングハウス社製ナトリウム中水素計

ウェスチングハウス社製ナトリウム中水素計は1975年末に現ナトリウム材料室の純度管理試験ループに設置され、水素計としての特性およびコールドトラップにより精製されたナトリウム中の水素分圧、ジーベルト定数の温度依存性を測定するために使用された。

図4-28にその構造概略図を示し、構成および特徴を以下に記述する。

- (1) ニッケル膜は、外圧型で肉厚 0.25 mm, 内径 6.35 mm, 長さ 63.5 (修理後 50.8) mmである。
- (2) ニッケル膜を含む真空系は、ナトリウム側とコノシールカップリングにて接続されている。
- (3) コノシールカップリング内側はアルゴンガスラインが設置され、ナトリウムとアルゴンカバーガス間のシール法はフリーズシールとしている。

なお、本水素計の特性評価等については、1979年に伊藤らにより報告³¹されている。

4.3.5 PNC型1号機ナトリウム中水素計

PNC型1号機ナトリウム中水素計は、MK I, MK II, 改良型の3タイプに分けられる。改良型については、4.1.4項で記述しているので、MK IおよびMK IIについて記述する。

PNC型1号機MK IおよびMK IIナトリウム中水素計は、1976年SWAT-2に設置された。本水素計は、それまでの各水素計 (50 MW-MK I, 50 MW-MK II, PNC-MAPI型, バリアン型) の評価、結果を基に設計製作されたものでナトリウム機器 (エコノマイザ, 加熱器

等)の配置および構造等を改良し、水素計全体が小型化されている。

機器の構成については前述した4.1.4項のPNC1号機改良型と同様なので本項では省略する。

図4-29にPNC型1号機MKI, MKIIの系統図を示し、特徴を以下に記述する。

(1) PNC型1号機MKI, MKIIのニッケル膜は、肉厚0.5mmの3本の指型構造(内圧型)で、前者はニッケル膜面積が200cm²、後者は150cm²である。

(2) また、製作時のペークアウト条件を評価するため、ペークアウト条件を500°Cにて、MKIの場合120時間、MKIIの場合700時間としている。

なお、MKI, MKIIは、ナトリウム側を含めて2台製作したのではなく、ニッケル膜部だけを2個製作したもので、ナトリウム側と真空系はフランジタイプ(リップ溶接)で取合っている。

水素計製作時の詳細な仕様等については、1978年鐘ヶ江らにより報告³¹⁾されている。

4.3.6 PNC型2号機ナトリウム中水素計

PNC型2号機ナトリウム中水素計は、PNC型1号機の経験から運転手法の簡易化、校正精度の向上を図るため真空系を動的室と静的室の2室としたナトリウム中水素計である。

本水素計は、初め真空系統がわずかに異なるPNC型2号機MKI, MKII, MKIIIの3種がSWAT-2にて試作され、その後オリフィスタイルのPNC型2号機MKIVが試作された。

また、PNC型2号機MKIIタイプは、ナトリウムの長期的運転が継続される現高速炉工学室の各ナトリウム試験ループに3基、現ナトリウム材料室のナトリウム純度管理ループに1基、計4基設置し、長期運転を実施した。

PNC型2号機MKI～MKIIIのナトリウム側構成およびニッケル膜の仕様等は前述した4.1.6項のPNC型2号機MKIVと同様なので本項では省略し、以下にMKI～MKIIIの主な特徴について記述する。

(1) PNC型2号機MKI

図4-30にPNC型2号機MKIの系統図を示す。動的室と静的室の真空系はフレキシブルチューブにより連通され、静的室の排気は動的室のイオンポンプで行なう方式としている。また、動的室のイオンポンプはPNC型1号機と同様、低濃度用と高濃度用の2台を設置している。

(2) PNC型2号機MKII

図4-31にPNC型2号機MKIIの系統図を示す。PNC型2号機MKIでの動的室低濃度用イオンポンプを取り外した方式としている。

(3) PNC型2号機MKIII

図4-32にPNC型2号機MKIIIの系統図を示す。MKI, MKIIでは静的室の排気を動的室イオンポンプを使用するため、静的平衡圧測定時(静的室を一度排気した後静的平衡

圧測定を行なう。)一時ではあるが水リーク検出器としての機能が失われる、そこで本水素計は静的室に小容量のイオンポンプを設置した方式としている。

なお、PNC型2号機の性能試験結果は、1978年に鐘ヶ江らにより報告³²され、PNC型2号機MKⅡの長期運転で得られた経時特性および運転経験等については、1981年に黒羽らにより報告³³されている。

4.3.7 SWAT-2 でのカバーガス中水素計

SWAT-2 では現在までに2基のカバーガス中水素計を試作し、特性評価を行なっている。

1基目は強制サンプリング型で、2基目は直接挿入型(直浸式)である。

(1) 強制サンプリング型カバーガス中水素計

図4-33にSWAT-2 での強制サンプリング型カバーガス中水素計の系統図を示す。

構成および特徴を以下に記述する。

- 1) 拡散膜に0.25mm肉厚のパラジウムを用い、その内部を油拡散ポンプで真空中に引いている。
- 2) パラジウム膜を拡散して来た水素は電離真空計で測定している。
- 3) 電離真空計部と油拡散ポンプとの間には、絞り機構を設け電離真空計部を適当な真空中度(測定範囲内)に保つことにより、連続指示を可能にしている。
- 4) パラジウムは、ナトリウムとの共存性に問題があり、拡散膜の前にベーパトラップを設置している。
- 5) 拡散膜を通過したサンプリングガスは被測定系にもどされず、オイルベーパトラップを介して大気放出している。

なお、本水素計での特性評価等については、1972年に根井らにより報告³⁴されている。

(2) 直接挿入型カバーガス中水素計

図4-34にSWAT-2 での直接挿入型カバーガス中水素計系統図を示す。

構成および特徴を以下に記述する。

- 1) ニッケル膜は、内圧型で厚さ0.25mm、表面積19.9cm²の全半球円錐型としている。
- 2) 真空系はイオンポンプ入口部にオリフィスが設けられている。また、静的平衡圧測定が行なえるよう真空計は測定範囲の異なる真空計2台を設置している。
- 3) カバーガスの流れは自然循環方式によるもので下方から流入する。主ヒータで加熱されたカバーガスが自然対流により上昇するようニッケル膜部およびその下部には真空断熱筒を設けている。

なお、この真空断熱筒は主ヒータの熱放散を防止する働きもある。

- 4) ニッケル膜部でのガス滞留を防止するため、ガス導入ノズルをニッケル膜下部に設置している。
- 5) ニッケル膜部の根元部分には、補助ヒータⅠが設けられ真空系への熱伝導による熱損失

を補い、かつニッケル膜の温度が、できるだけ均一になるよう温度制御している。

また、真空系のベークアウト用の補助ヒータⅡが設置されている。本水素計の特性評価等については、1981年に黒羽らにより報告³⁹されている。

4.3.8 1 MW蒸気発生器試験施設でのカバーガス中水素計

図4-35に1 MW蒸気発生器試験施設のカバーガス中水素計を示す。

本水素計は直接挿入型で、構造およびサンプリングガスの流路等は、前述の4.3.7(2)項SWAT-2での直接挿入型カバーガス中水素計とほぼ同じであるので、本項では主要相違点を以下に記述する。

- (1) ニッケル膜は外圧タイプで片持円筒（先端半球状）型で、肉厚0.25mm、外径10mm、表面積31.4cm²のものを使用している。
- (2) 真空系に真空計は1台で、オリフィスは設置していない。
- (3) ニッケル膜が外圧タイプのため断熱筒内にガス導入ノズルを設置していない。

なお、特性評価等については運転時間が短かく、あまり行なわれていない。

4.3.9 ナトリウム材料室での直浸式ナトリウム中/カバーガス中水素計

図4-36にナトリウム材料室での直浸式ナトリウム中/カバーガス中水素計の概略図を示す。

本水素計は、ナトリウムとカバーガス間の水素移行の動的挙動を解明するため、開発されたもので水リーク検出計としては使用してない。以下に主な特徴を記述する。

- (1) ニッケル膜を2つ設け、ナトリウム系内のナトリウムレベルを変えることにより、センサーをナトリウム中又はカバーガス中に設置することができる。
- (2) 真空系は、静的平衡圧と動的平衡圧の2つのモードで運転でき真空系弁（VALVE 3, 4）の切替によりナトリウム中およびカバーガス中水素分圧を交互に測定することができる。
- (3) ニッケル膜形状は、ナトリウム中およびカバーガス中水素計とも共通で外圧型、肉厚0.25mm、表面積約8cm²である。

本水素計の概要および試験結果等については、1983年3月に武田らにより報告⁴⁰されている。

5. 性能特性評価

水素計は被測定系よりニッケル膜を透過してくる水素量の変化を圧力変化として計測し、被測定系内に含まれる水素濃度を求める検出計である。水素計を構成する機器としては、被測定系より水素を透過させるためのニッケル膜、真空を保持させるためのイオンポンプ、真空中度を計測するための真空計、真空系内の排気量を一定にするためのオリフィスおよび前記した機器が設置される真空系がある。水素計はこれらの機器が正常に機能して初めて正規の性能を示す。そこで本章では、水素計に使用している各々の機器が水素計の性能または寿命等にどの様な影響を与えるかについて記述する。すなわち、5.1では50MWSGTFで得られているナトリウム中及びカバーガス中水素の校正結果について、5.2では水素計の経時変化および寿命について、5.3では水素計の最少検出感度について、5.4ではオリフィスの有効性について、5.5ではニッケル膜に対する水素の透過率について、5.6では真空系内放出ガスの影響について、そして最後の5.7ではイオンポンプの回復処理効果について述べる。

5.1 校正方法及び校正試験結果

5.1.1 ナトリウム中水素計校正方法

50MWSGTFにおけるナトリウム中水素計の校正は、2次系コールドトラップの温度を変化させることにより実施されている。すなわち、2次系コールドトラップの底部温度（最低温度）をある一定温度に保持し、2次ナトリウム系内に含まれる水素濃度をコールドトラップの最低温度に相当する飽和水素濃度に制御する。ナトリウム温度に対する飽和水素濃度の関係を(5-1)式に示す。水素計の指示が一定となったら、コールドトラップ温度とナトリウム中水素計の圧力指示（動的平衡圧）を読み、その後、水素計の真空系に設置されている真空バルブを閉めナトリウム中水素分圧（静的平衡圧）を測定する。以上の操作をコールドトラップ温度を変化させて繰返し、ナトリウム中水素計の校正曲線を作成する。ナトリウム中の水素濃度は前述した様にコールドトラップの最低温度からVischersらの計算(5-1)式を用いて求めるか、または静的平衡圧測定値(2-11)式の補正を行って求めている。

$$\log C_{NH} = 6.067 - \frac{2880}{T_c} \quad (5-1)$$

ここで C_{NH} ：ナトリウム中飽和水素濃度 (ppm)

T_c ：ナトリウム温度 ($^{\circ}$ K)

一例として、図5-1から図5-3に各水素ナトリウム中水素計について、静的平衡圧より求めた水素濃度と(5-1)式より求めた水素濃度との関係を示す。図よりわかるように、両者の間にはよい一致が見られ本施設の場合においてはいずれの方法によっても正しい校正が可能であることがわかる。以後に述べる校正試験結果では、水素濃度としてコールドトラップ設

定温度より(5-1)式を用いて算出した。

5.1.2 ナトリウム中水素計校正試験結果

図5-4から図5-11に各ナトリウム中水素計の校正試験より得られた結果を示す。それぞれのグラフの横軸はイオンポンプ電流(μA)または真空計の読み(Torr)で、縦軸は試験から得られたナトリウム中の水素濃度(pbb)であり、図中の各直線は試験データを最小自乗法で求めたものである。また図中には、各々の校正実施日とその時点における水素計の運転積算時間(hr)も示した。CT-HN aを除く他のイオンポンプタイプの水素計指示値は、各校正日により大きく変化している。これは、イオンポンプの排気速度の変化が原因していると思われる。それに比べ、図5-10および図5-11に示すオリフィスタイルの水素計の校正データは、よく一致しており安定した性能が得られている。この理由については5.4で詳しく述べるが、イオンポンプの排気速度変化の影響を低減させたオリフィスタイルの有効性が示されている。使用初期(使用を開始して8日目に得た校正結果)のズレについては、後項で説明する。

5.1.3 カバーガス中水素計校正方法

蒸発器または過熱器に設置されているEV-HArおよびSH-HArの校正是、図5-12に示す校正試験装置により実施している。校正装置は、水素ガスボンベおよびアルゴンガスボンベ、混合ガスとするためのタンク(容量10ℓ)、ガスクロマトグラフ、真空ポンプおよび各機器を接続するための配管等より構成されている。両者のカバーガス中水素計の入口出口はバルブを介して本装置に接続されており、混合ガスが循環する様になっている。標準ガスによりガスクロマトグラフを校正後、系内に混合ガス(水素+アルゴン)を入れて、カバーガス中の水素計の校正を実施する。混合ガス中の水素濃度はガスクロマトグラフにより測定し、その時の水素計の動的平衡圧と比較する。

5.1.4 カバーガス中水素計校正試験結果

図5-13から図5-16に、これまでに得られているカバーガス中水素計の校正試験結果を示す。図5-13に示すEV-HAr 50MW-CG-MK Iの校正結果は、運転開始してから約5,000hr後も再現性のある結果が得られている。しかし座屈後交換した50MW-CG-MK IIおよびSH-HAr(PNC型-CG-1号機)のイオンポンプタイプの校正結果は大きく経時変化している。この経時変化の原因についてはナトリウム中水素計の所でも述べたイオンタイプの排気速度の変化の他に、ガス中に含まれる不純物(酸素等)による影響(ニッケル膜の表面酸化等)やぬれ性の問題などが考えられる。

図5-15はオリフィスタイルの水素計(50MW-CG-MK IV)の校正結果である。イオンポンプタイプに比べ、校正結果がよく一致していることがわかる。多小の校正值のズレは、前述したガス中に含まれる不純物の影響やぬれ性の問題によるものと思われる。

5.1.5 実機における水素計の校正方法について

5.0MWSGTFでは、ナトリウム中およびカバーガス中水素計の校正は前述した様な方法をとっている。しかし、実機になるとナトリウム中およびカバーガス中水素計の校正を行なうために、2次系コールドトラップを使用して安易に2次系内の水素濃度を変えることはできないと思われる。そのため今後検討を要するものとして、オンラインでしかも精度よく水素計の校正が行なえるシステムを考えて行く必要がある。例えば米国では、CRBRP用の水素計モジュールにはニッケルチューブを用いてニッケル膜センサ上流部よりナトリウム中またはカバーガス中に一定量の水素を注入し、ニッケル膜部の水素濃度を変化させる様な校正装置が設置される様である。なお、前記したオンライン校正装置は全水素計に必要なく、1ループ当たりナトリウム中水素計1基、カバーガス中水素計1基にそれぞれ設置すればよく、他の水素計はそれらによって得られた値を補正するだけで十分であると考えられる。

5.2 経時変化及び寿命の評価

ニッケル拡散膜式水素計はすでに述べたよう様に、ニッケル膜を透過してくる水素の透過量より変化する水素計真空系内圧力変化を真空計またはイオンポンプ電流により計測し、ナトリウム中またはカバーガス中に含まれる水素濃度を測定している。本水素計のドリフト原因としては、水素計に使用している1)ニッケル膜、2)イオンポンプ、3)真空計、4)真空壁面の状態等を考えられる。また水素計の寿命を支配するものとしては、1)ニッケル膜、2)イオンポンプ等を考えられる。以下にそれぞれの要因について述べる。

5.2.1 ニッケル膜

水素計用のニッケル膜としては、Ni201またはNi270相当の高純度ニッケルが使用されている。一般に高純度ニッケルは化学的に安定であり、アルカリ金属に対しても影響されない性質を有している。

ニッケル膜が水素計のドリフトおよび寿命を支配する要因として、1)ニッケル膜の表面状態の変化、2)強度劣化等が考えられる。1)ニッケル膜の表面状態の変化については、水素計使用初期にニッケル表面に付着していた表面酸化膜等の離脱あるいはナトリウムによるぬれ性にともなう水素計指示変化と長期間使用することによりナトリウム側ニッケル膜表面に異種金属不純物が付着し、その結果ニッケル純度または有効膜面積およびニッケル膜の厚さ等が変化し水素計の指示が変化することが考えられる。前者については、米国においても問題となっており、⁴⁰プラント使用前にあらかじめ予備的に使用しておく必要があることを示唆している。前項で述べた様に1983年1月より使用を開始したSH-HNa(東芝型)、EV-HNa(PNC型2号機-MKIV)においても同様な使用初期ドリフトが観測されている。図5-17に長期使用後の安定した校正式により整理した初期使用時の水素濃度指示を示す。それによると、約1カ月程度ニッケル膜にナトリウムが浸漬後に他の水素計指示値と同指示となることが

分る。今後、ニッケル膜をナトリウム中またはカバーガス中で使用する前にニッケル膜表面の酸化膜を取除く様な操作（例えば、高温で水素処理を行うような操作）を行いその様な影響を極力小さくすることが必要であろう。ニッケル膜表面への異種金属付着については、これまであまり問題にされておらず、定量的なデータが不足している。しかしこの現象は水素透過率に大きく影響すると考えられ、当室ではこれらの問題も含め使用済または未使用材のニッケル膜の材料検査を積極的に進めている。これまでの試験結果で、ステンレス系配管のナトリウム系及びカバーガス系でニッケル膜を使用すると、多量の Fe, Cr, Mn, 等がニッケル膜表面に付着することがわかった⁴¹⁾。一例として、ナトリウム中で約 1 万時間使用したニッケル膜表面に付着した不純物の XMA 分析結果を写真 5-1 および写真 5-2 に示す。写真で白く見える所がその元素が付着している箇所である。Fe の付着量が他の物質に比べ圧倒的に多いことがわかる。この傾向はカバーガス中水素計についても同様である。この付着物は水素の透過率に對して大きな影響を及ぼすものと考えられるため、今後さらに使用時間の異なるナトリウム中およびカバーガス中水素計のニッケル膜について材料試験を実施してデータの蓄積をおこなって行く予定である。2)強度劣化については、後述する様に 50MWSGTF で使用してきた EV-HAr のニッケル膜（厚さ 0.25 mm）において、2 回座屈を経験している。この座屈したニッケル膜については、硬さ試験、引張試験等の材料試験を実施したが、特に強度が劣化している様なデータは得られず、明確な座屈原因については現在のところ不明である。またニッケルの座屈の他に 2 回のニッケル膜リーク（内 1 回は多量のナトリウムが真空系内に入っていた）を経験している。これらについては、ANL の EBR II に使用している水素計において同様な経験を得ており、座屈の防止対策として溶接部の設計見直しやニッケル膜内側に補強材を設ける等の手段を講じ、HPTL (High Pressure Test Loop) 等で耐久試験等が実施されている⁴²⁾。ニッケル膜がリークするとリーク部より真空系内にナトリウムが入りこみ、イオンポンプ、真空計等を破損させ、使用不可となるため水素計としては致命的である。2 回座屈（内 1 回はリークをともなう）を起こした EV-HAr のニッケル膜については、ステンレスと溶接する箇所を厚くした内圧型のニッケル膜（厚さ 0.5 mm）に変更し、現在順調に稼動中である。

図 5-18 にこれまでに実施した材料試験により得られているナトリウム中およびカバーガス中水素計で約 1 万時間まで使用したニッケル膜の引張試験結果を示す。この図から明らかなる様に、ニッケル膜を 1 万時間程度使用しても引張強度は一般的のニッケル材料とほとんど変わらない強度を有しており、強度劣化は無いものと考えられる。なお、当室ではさらに使用時間の長いニッケル膜についても同様な試験を実施しており、その結果については後日報告する予定である。

5.2.2 イオンポンプ

ニッケル膜式水素計では、真空系内の真空保持にイオンポンプが使用されている。またイオンポンプはペニング真空計と同様な放電機構をもっているため、イオンポンプの放電電流は圧

力に比例する。このことから、イオンポンプは真空系内の圧力測定にも利用されている。従来の水素計では、イオンポンプの排気速度は一定と仮定して、水素計の設計（ニッケル膜の面積等）を行なっているが、5.1.2項でも述べた様にイオンポンプの排気速度はゲッター表面状態、吸着水素量などにより大きく変動することが知られており^{43～45}、水素計に使用した場合、頻繁な校正が必要とされる（例えば月に1回）。この様な問題を解決するために、最近ではイオンポンプの上流部にイオンポンプの排気速度に比べ十分小さいコンダクタンスを持つオリフィスを設置し、イオンポンプの排気速度が変化しても水素計の指示には影響しないようにしたオリフィスタイプの水素計が開発・使用されている^{46,47}。現在、50MWSGTFのEV-HN a (P N C型 2号機MK-N) SH-HN a (50MW-MKIV) およびEV-HAr (50MW-CG-MK III) はオリフィスタイプの水素計が設置されており、前述した様に良好な結果が得られている。オリフィスの有効性については、後項でさらに詳しく説明する。

本来、水素計の寿命としては原子炉の寿命と同程度であるのが理想であるが、しかし真空保持用にイオンポンプを使用しているためイオンポンプがある量の水素を排気したら交換する必要がある。例えば、PNC型2号機MKIV、東芝型およびPNC-CG-1号機等で使用しているイオンポンプの寿命は動作圧力に依存し、カタログ値より図5-19に示す様な関係となる^{48,49}。図の横軸はイオンポンプの動作圧力 (Torr)、縦軸は寿命 (hr)である。バリアン社のイオンポンプで~1,150Torr·ℓ、日本真空㈱のイオンポンプで~2,900Torr·ℓ程度の排気容量を有していることになる。以前実施された日本真空㈱のイオンポンプ単体による水素ガスの排気容量測定試験結果では、カタログ値とほぼ同程度の排気容量が得られている⁵⁰。もし仮に、水素計の動作圧力をバックグラウンド170ppbで 5×10^{-7} Torr程度に設定すれば、図5-19よりイオンポンプの寿命は8万時間（約9年間）程度となる。50MWSGTFに使用している水素計のイオンポンプ排気積算量については、水素注入試験等を実施しているため水素バックグラウンドの変動が激しく、定量的なデータを出すことは現状ではむずかしい。実機に使用する水素計を考えた場合、イオンポンプの寿命を定量的に把握する必要があり、今後検討を要すると考えられる。

5.2.3 真空計

水素計では、真空系内の圧力測定に、超高真空計（動的平衡圧測定用）と高真空計（静的平衡圧測定用）が使用されている。これはいずれも電離真空計で、気体の圧力を測定する方法として電子流等を用いて気体分子を電離し、生じたイオンをコレクターに集め、このイオン電流から圧力を測定するような原理のものである。イオン電流はより精度で気体の分子密度と比例し、別の確実な方法により圧力との関係を校正（標準真空計を用いての校正等）することにより、正確な圧力を測定することができる。

電離真空計を用いた場合の圧力Pは

$$P = \frac{1}{S_{EN}} \cdot \frac{I_i}{I_e} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5-2)$$

ここで S_{EN} : 感度 (Torr^{-1})

I_i : イオン電流 (A)

I_e : エミッション電流 (A)

で表わすことができる。水素に対する感度 (S_{EN}) は、ゲージの校正時に求められる。従って I_e が一定であれば、 $P \propto I_i$ の関係が得られる。

電離真空計を使用する場合、十分注意しなければならない点として

1. 使用開始初期の指示変化
2. ゼロ点の移動
3. エミッション電流の変化
4. リーク電流の発生
5. 排気作用

等が挙げられる。

1.の使用開始初期の指示変化は、真空計ゲージ材料に吸着されていた水素ガスがフィラメントの点火とともに離脱し、それが放出ガスとなって現われるものである。2.のゼロ点の移動は真空計コントローラ側の問題であるが、指示計のゼロ点が移動し、その結果水素計の指示がその移動分だけズレてしまう。このため、定期的に0点チェックを行なうのが望ましい。3.のエミッション電流の変化については、(5-2)式で示した様に、エミッション電流が変化すると真空計の圧力指示が変化する。このため、定期的にエミッション電流値が規定の値になっていることを確認する必要がある。4.のリーク電流は、真空ゲージの電極材と絶縁材との間の絶縁不良やゲージ端子部の接触不良等が原因で発生し、これが生じると真空計の指示は正規の指示値にリーク電流分が加算される。このため水素計の指示は変化し、正常な指示は望めなくなる。これも定期的なチェックにより発生を防止する必要がある。5.の真空計の自己排気作用については従来静的平衡圧測定時に問題となると考えられている現象である。すなわち、真空計の自己排気速度はフィラメントによるガス吸着が原因し、次式で示される。

$$P_{NH} = \left(P_M^{1/2} + \frac{d \cdot S'_P \left(\frac{P_M}{F_t} \right)}{K \cdot A} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5-3)$$

ここで S'_P : 真空計の排気速度 (cm^3/sec)

A : ニッケル膜面積 (m^2)

P_{NH} : ナトリウム中またはカバーガス中水素分圧 (Torr)

d : ニッケル膜の厚さ (cm)

P_M : ニッケル膜部圧力 (Torr)

K : ニッケル膜に対する水素の透過率 ($\text{cm}^2 \cdot \text{Torr}^{-1/2} / \text{sec}$)

Ft : サーマルトランスピレーションの補正值

Berman⁵¹によってまとめられている従来の真空計の自己排気速度測定結果一覧を表5-1に示す。ただし本表には、水素に対するゲージの自己排気速度についての記載はあまりない。水素計に使用しているゲージが静的平衡圧測定時に自己排気を有していると、(5-3)式よりわかる様に真空計による測定値は真の水素分圧値からズレてくる。(第2項分の誤差を含んでくる)図5-20に、SH-HArで使用しているシュルツゲージの自己排気速度の測定結果の一例を示す⁵²。図の横軸は測定圧力(Torr), 縦軸はゲージの自己排気速度(ℓ/sec)である。本結果では、圧力が高くなるに従ってゲージの自己排気速度は減少する傾向が見られる。このゲージの自己排気速度は、フィラメントの材質・形状、使用時間、エミッション電流値または加速電圧等により変化すると考えられ、鐘ヶ江らは⁵³同一のシュルツゲージで圧力範囲 $10^{-2} \sim 5 \text{ Torr}$ において $\sim 1.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ という一定の自己排気速度を得ている。

しかし、5-1項で述べた様に 50 MW SGT F の水素計では、静的平衡圧より求めた水素分圧と計算より求めた水素分圧とはよく一致しており、(5-3)式の第2項分のシュルツゲンジの自己排気速度は無視できると思われる。

電離真空計の寿命についての定量的なデータはないが、EV-HArで使用のミリトルゲージは6年間問題なく使用できた。真空計の場合、ゲージの寿命よりもむしろコントローラ側の耐久性について検討を行なう必要がある。なお、真空計およびイオンポンプコントローラで発生したトラブル等については6章で述べている。

5.3 最小検出感度

水素計により水リーク検出を行なう場合、水素計から発生するノイズは最小限に止め、水素計の検出感度を上げる必要がある。水素計のノイズ源としては1.ニッケル膜の温度変動によるもの2.1オンポンプまたは真空計から発生するもの等がある。

5.3.1 ニッケル膜の温度変動によるノイズ幅

ニッケル膜を透過する水素は、ニッケル膜の温度に依存して変化する。水素の透過率 K は一般に次式で示される。

ここに K : 水素透過率 ($\text{Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$)

k : 水素透過係数 ($\text{Torr}^{-1/2} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$)

E : 透過に要する活性化エネルギー (Cal/mol)

R : ガス定数 (cal/mol · deg)

T_{NT}: ニッケル膜温度 (°K)

例えば, Ebisuzaki ²³ らは実験により k および E 値として

$$k = 8.63 \times 10^{-1} (\text{Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec})$$

$$E = 13,160 \text{ cal/mol}$$

を得ているが, これらの値を用いて水素透過率の温度依存性を計算すると, 運転温度 500°C に対して ±1°C ニッケル膜部が変動すると水素透過率も約 ±1% 变化する。現状の制御方法において, ニッケル膜を 500°C ±1°C 以内に制御することは十分可能であり, ニッケル膜の温度変動より発生するノズルとしては ±1% 程度と考えてよい。しかし何らかの原因 (二次系流量の変化, ニッケル膜加熱器の断線など) によりニッケル膜温度が突然的に変化することも考えられるため, 計算機処理を行なう場合はニッケル膜温度を補正するのが安全側である。

5.3.2 イオンポンプおよび真空計からのノイズ幅

水素計の真空系内の圧力測定には, イオンポンプまたは真空計が使用されている。これらの機器に関して, これまでにノズルに関する定量的なデータは少なく評価を行なうのは難しい。そのためここでは, 黒羽ら ³³ によって実施された結果および 50MWSGTF で得られている結果を基に評価を行なう。

真空計はイオンポンプに比べノイズの発生割合は少なく, またノイズレベルもはるかに小さい。通常運転時におけるノイズレベルとしては, 少量の余裕を見込んで

イオンポンプ ±10% 以内

真空計 ±2% 以内

と考えられる。黒羽らの結果によるとイオンポンプのノイズレベルとしてもっと大きな値を得ている。50MWSGTF でも SH-HNa のイオンポンプにおいて大きなノイズを経験したことがあるが, これはリーク電流 (絶縁不良) によるもので, イオンポンプ本来のノイズではなかった。図 5-21 および図 5-22 に EV-HNa (PNC 型 2 号機 - MK IV) のイオンポンプと真空計出力の一例を示す。イオンポンプ出力にはノコギリ状のノイズが見られる。ノイズレベルとしてはフルスケールの約 10% 程度に相当している。図 5-22 の真空計はイオンポンプのノイズの影響を受けることなく安定しており, ノイズは見られない。真空計出力の方がイオンポンプ電流値よりも信号としてすぐれているといえる。しかしこの図には現われていないが, 真空計の出力には突然的なヒゲ状のノイズが発生することがある。その一例を図 5-23 に示す。

5.3.3 水素計全体としてのノイズ幅

水素計全体としてのノイズ幅としては, 5.3.1 および 5.3.2 で述べたそれぞれのノイズの和で示すことができる。つまり以下の通りである。

信号形態	真空計出力	イオンポンプ出力
ニッケル膜温度変化分	±1%	±1%
真空計変化分	±2%以内	±10%以内
全体のノイズ幅	±3%以内	±11%以内

この結果より、水素計の出力としては真空計（超高真空計）出力がすぐれしており、水素計全体のノイズレベルとして±3%程度と考えられる。これはバックグラウンド170 ppbの水素濃度に対し±5.1 ppb程度に相当する。

従って、水素バックグラウンドの70%変化を十分検出可能である。ただし、先にも述べた様に真空計出力には突然的にヒゲ状のノイズが発生することもあり、この原因としては、供給電源側の影響などが考えられるが、原因について今後さらに検討する必要がある。

またシステム全体を見た場合、水素計から発生するノイズの他に、伝送器または計算器入出力インターフェイスなどから発生するノイズも考慮する必要がある。

5.4 オリフィスの有効性

前述した様にイオンポンプ電流を真空計として代用させるイオンポンプタイプの水素計は、信頼性等に問題があるため実機への適用はむづかしいと思われる。そこで、イオンポンプの排気速度が変動しても水素計の出力には影響を与えない信頼性の高いオリフィスタイプの水素計が開発されている。図5-24にオリフィスタイプの水素計の概念図を示す。従来のイオンポンプタイプの水素計と構成が異なる点は、

1. イオンポンプ前部にイオンポンプの排気速度に比べ充分小さなコンダクタンスを有するオリフィスの設置
2. 動的平衡圧は専用の超高真空計で測定

である。

動的平衡法の関係式は、

$$Q_H = K \cdot \frac{A}{d} (P_H^{-1/2} - P_M^{-1/2}) \quad \dots \dots \dots \quad (5-5)$$

$$Q_H = C'_{NP} (P_M - P_N) \quad \dots \dots \dots \quad (5-6)$$

$$Q_H = C'_{MP} \cdot P_N \quad \dots \dots \dots \quad (5-7)$$

$$C'_{MP} = \frac{C_{MP}}{1 + (C_{MP} / S_P)} \quad \dots \dots \dots \quad (5-8)$$

ここで Q_H : ニッケル膜部透過水素量 ($\text{Torr} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$)
 K : ニッケル膜の水素透過率 ($\text{cm}^2 \cdot \text{Torr}^{1/2} / \text{sec}$)
 A : ニッケル膜面積 (cm^2)
 d : ニッケル膜厚さ (cm)
 C_{NP}' : ニッケル膜～オリフィス間のコンダクタンス (cm^3 / sec)
 P_H : 被測定側水素分圧 (Torr)
 P_M : ニッケル膜部圧力 (Torr)
 P_N : 超高真空計部圧力 (Torr)
 C_{MP}' : オリフィスコンダクタンス (cm^3 / sec)
 C_{MP}' : 実効コンダクタンス (cm^3 / sec)
 S_P : イオンポンプ排気速度 (cm^3 / sec)

と、(2-2)式および(2-13)式より

ナトリウム中水素計の場合

$$C_{NH} (\text{ppm}) = K_H \cdot \left\{ \frac{d \cdot C_{MP}'}{A \cdot K} P_N + \left(1 + \frac{C_{MP}'}{C_{NP}'} \right)^{1/2} \cdot P_N^{1/2} \right\} \dots \dots \dots (5-9)$$

カバーガス中水素計の場合

$$C_{CG} (\text{Vppm}) = \left\{ \frac{d \cdot C_{MP}'}{A \cdot K} P_N + \left(1 + \frac{C_{MP}'}{C_{NP}'} \right)^{1/2} \cdot P_N^{1/2} \right\}^2 \cdot \frac{10^6}{P_{Total}} \dots \dots \dots (5-10)$$

となる。オリフィスタイプの水素計のイオンポンプ排気速度の影響は、(5-8)式により示すことができる。表5-2に50MWSGTFのオリフィスタイプの水素計に使用しているオリフィスの仕様を示す。また図5-25には、イオンポンプ排気速度変化にともなう水素計の指示変化割合の一例を、従来のイオンポンプタイプの水素計と比較して示す。図の横軸はイオンポンプの排気速度変化率で0の所が規定のイオンポンプ排気速度 ($33 \ell / \text{sec}$) である。縦軸はイオンポンプ排気速度変化にともなう水素計(真空計)の指示変化率である。水素計指示変化率0%がイオンポンプ排気速度変化率0%に対応する。この図よりわかる様に、オリフィスタイプはイオンタイプに比べイオンポンプの排気速度の影響が飛躍的に低減されることがわかる。

また、オリフィスの有効性に関しては、上記に述べた以外としてニッケル膜面積を小さくすることができ、これにより水素の真空系内への透過量を小さくできることからイオンポンプの長寿命化または真空系内の排気量が一定かつ明確なため水素透過率の定量化を行なうことができる等の大きな利点がある。

50MWSGTFで使用しているオリフィスタイプの水素計〔EV-HNa(PNC型2号機)

MKⅣ) SH-HNa (東芝型) およびEV-HAr (50MW-CG-MKⅢ)]は、前述した様に再現性のあるデータが得られており、今後さらに長期の信頼性を確認するため、データ蓄積を行なう予定である。

5.5 ニッケル膜に対する水素の透過率

金属に対する水素の透過については、近年核融合などでも注目され、これまでに各種金属に対する水素の透過・拡散等に関し多くの研究が行なわれている^{54~60}。ニッケル拡散膜式水素計の最適設計を行なう場合においても、ニッケル膜を透過する水素の透過率が重要なファクターとなる。しかし従来のイオンポンプタイプの水素計では、水素の透過率を求める場合、イオンポンプの排気速度という不確定要素があったため十分満足の行く評価を行なうことができなかつた。そのため、従来の水素計の設計では、ガス中で得られている水素透過率を採用していた。これまでにガス中で実施されて得られているニッケルに対する水素の透過率（透過係数と活性化エネルギー）の一覧を表5-3に示す⁶¹。各試験により、値は異なっているがRobertsonが求めた最適値は、

$$\text{透過係数} : 6.64 \times 10^{-1} \text{ Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$$

$$\text{活性化エネルギー} : 13.04 \text{ Kcal/mol}$$

である。これらの値と(5-4)式を用いて、500°Cにおける水素の透過率Kを求めると $K = 1.36 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$ となる。これは、佐野らが⁶²ナトリウム中で得ている値 $K = 1.3 \times 10^{-4} \text{ Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$ と一致している。

図5-26に50MWGTのナトリウム中の水素計より得られた水素の透過率を示す。また図5-27には、カバーガス中水素計より得られた水素の透過率を示す。それぞれのグラフの横軸はナトリウム中またはカバーガス中の水素分圧(Torr)，縦軸はニッケル膜に対する水素の透過率($\text{Torr}^{1/2} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$)である。水素透過率は次式から求めた。

イオンポンプタイプ：SH-HNa (50MW-MKⅡ), SH-HAr (PNC型-CG-1号機), CT-HNa (PNC型1号機改良型), (2-5)式より

$$K = \frac{d \cdot S_p \cdot P_{IP}}{\left(P_{NH}^{1/2} - \left(1 + \frac{S_p}{C_{NP}} \right)^{1/2} \cdot P_{IP}^{1/2} \right) \cdot A} \quad \dots \quad (5-11)$$

オリフィスタイプ：SH-HNa (東芝型), EV-HNa (PNC型2号機-MKⅣ)
EV-HAr (50MW-CG-MKⅢ),

$$K = \frac{d \cdot C'_{MP} \cdot P_N}{\left(P_{NH}^{1/2} - \left(1 + \frac{C'_{MP}}{C_{NP}} \right)^{1/2} \cdot P_N^{1/2} \right) \cdot A} \quad \dots \quad (5-12)$$

なお、イオンポンプの水素計で使用したイオンポンプ排気速度は、納入時の検査結果の値をそのまま使用した。

Na中水素計ではオリフィスタイルのSH-HNaがナトリウム中の水素分圧に依存せず $K = 9 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ Torr $^{1/2} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$ の値が得られている。また、カバーガス中水素計ではEV-HArがやはり水素分圧に依存せず $K = \sim 9 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-4}$ Torr $^{1/2} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$ の値を示しており、前述した従来値とよく一致している。この様にオリフィスタイルの水素計は、ニッケル膜に対する水素透過率の定量がイオンポンプタイプの水素計に比べ精度よく行なうことができる。

5.6 真空系内放出ガスの影響

水素計真空壁からの放出ガス量は動的平衡法および静的平衡法による水素分圧測定を実施する際の誤差の要因となるため、できる限り小さく抑える必要がある。静的平衡圧測定時における真空壁からの放出ガスの影響は次式で示すことができる。

$$V \frac{dP_M}{dt} = \frac{K \cdot A}{d} (P_{NH}^{1/2} - P_M^{1/2}) + Q^* \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5-13)$$

ここに V : 静的平衡圧測定部容積 (cm³)

K : ニッケル膜に対する水素の透過率 (cm² · Torr $^{1/2} / \text{sec}$)

A : ニッケル膜表面積 (cm²)

d : ニッケル膜厚さ (cm)

P_{NH} : ナトリウム中水素分圧 (Torr)

P_M : ニッケル膜部圧力

t : 時間 (sec)

Q^* : 真空壁表面からの放出ガス量 (Torr · cm² / sec)

従来の水素計では"ニッケル膜部 500°Cでの使用時における放出ガス率を 1×10^{-11} Torr · l / sec / cm² 以下とする"との仕様が与えられている。そのため、高温による長時間のベーキングを必要とするが、その結果の一例を図 5-28 に示す³²。

50MWSGTFに設置されているナトリウム中及びカバーガス中の水素計についても、上記の放出ガス量が水素計製作時の仕様値として採用されている。一例として、表 5-4 [C] PNC 型 2 号機-MKIV と 50MW-CG-MKIV について、従来の 1×10^{-11} Torr · l / sec / cm² を Ref 値として、動的および静的平衡圧測定時に影響する割合の計算結果を示す。表中に記した放出ガスの影響が最大となるのは、両者の水素計とも水素濃度測定範囲の下限値の時である。な

お、静的平衡圧測定時における放出ガス量の影響は、95%応答で計算したものである。ナトリウム中とカバーガス中水素計では、従来の仕様値である 1×10^{-11} Torr・l/sec/cm² の放出ガス量において、表5-4に示す様に放出ガスの影響に差が生じている。

以上から、従来の様な仕様の与え方は必ずしも適切ではなく、例えば、"動的および静的平衡圧測定に対して放出ガスの影響をある値(例えば1%)以下とする"とした方がより具体的であり、水素計の設計をおこなう上でも意味のあるものといえる。

5.7 イオンポンプの回復処理

イオンポンプの特性を把握することは、水素計の設計、運転法の確立、寿命を評価する上で重要である。作動原理から考えてイオンポンプの排気速度は経時変化(劣化)することが予想される。このようなイオンポンプの性能劣化を回復させる手段としてアルゴンポンバード処理およびベークアウト処理が効果的であるとされている。アルゴンポンバード処理とは、アルゴンガス圧力 $2 \sim 5 \times 10^{-5}$ Torr の範囲でイオンポンプを作動させて水素イオンを吸着しているカソード電極表面を削り排気速度の回復を計ることである。ベークアウト処理では、イオンポンプ本体を高温(例えば450°C)に加熱しカソード電極に吸着している水素を放出し排気速度の回復を計る。50MW SGTFにおいて水素計が数基設置・運転されておりこれまでにイオンポンプの排気速度が低下する現象を経験している。その中で1977年5月から1978年7月まで運転したイオンポンプ(蒸発器ナトリウム中水素計MK III No.1)と1979年1月から1981年5月まで運転したイオンポンプ(過熱器カバーガス中水素計)についてベークアウト処理+アルゴンポンバード処理の回復を行なったのでその結果を簡単に記述する。なお、イオンポンプの回復処理方法および詳細結果については付録1を参照されたい。

図5-29に50MW-MK III No.1用イオンポンプ排気排度(S_p)とイオンポンプ部圧力(P_p)の関係を示す。本イオンポンプの排気速度は、製作時の 22 l/sec に対し 3 l/sec に低下している。このポンプの水素吸収量は、使用中の運転実績から推定すると約 1020 Torr-l であり、カタログ値に比べかなり低い。2種類の回復処理を実施したが図からも明らかのように450°Cでの24時間ベークアウト処理では、排気速度の回復効果がない。アルゴンポンバード処理では、排気速度の面での回復がみられたが図5-30に示すように水素吸収量が増加すると再び排気速度が低下してしまうことがわかる。

アルゴンポンバード処理ではカソード表面を削りとる効果があるためカソード表面が不純物ガスで覆われている場合には非常に効果的である。しかし、バルク内にある不純物の除去という意味では効果がないといえる。水素吸収量が大きくなつたときのカソードの水素濃度は、表面から奥行き方向に大きな濃度勾配を持っていると考えられアルゴンポンバードによりその最も水素濃度が高い表面層の部分を削りとつてしまつたため新たな表面が飽和するまでは一時的に排気速度が上昇するが、すぐに飽和してしまう。以上のことからアルゴンポンバード処理は、本質的な回復処理効

果がなかつたといえる。

図5-31は、イオンポンプ交換前後の水素計校正曲線であるが、ニッケル膜の水素透過率が変化していないとすれば低濃度領域で同じ水素濃度に対し1/2以下のイオンポンプ電流になっていることがわかる。

図5-32は、SH-HArのイオンポンプ回復処理前後の校正曲線である。回復処理前のデータは、カバーガス中の水素濃度が100Vppmまでは実測値だがそれ以上の水素濃度は測定できなかつたため予想曲線である。このときの、イオンポンプの水素吸収量は運転実績から推定すると約1400Torr·lである。この図より明らかに回復処理（アルゴンポンバード処理）の効果が顕著に認められる。本水素計の真空系には、オリフィスが取付けられていないため正確な排気速度を測定できず回復処理の効果を定量的に評価することが困難である。しかし、少しあらい評価をすればイオンポンプ回復処理前後のニッケル膜の水素透過率を一定としてイオンポンプ電流1mA時の排気速度は、回復処理（アルゴンポンバード処理）によって約3倍（9.2 l/secから26.8 l/sec）になったものと推定できる。なお、イオンポンプ電流が1mAを越える領域では、上記以上の排気速度の回復が得られている。しかし、回復処理2000時間後（イオンポンプ推定水素吸収量約140Torr·l）のデータでは排気速度が低下する傾向を示している。これは、前述の結果とよく一致しておりアルゴンポンバード処理が一時的な回復処理に過ぎないと見える。

6. 故障経験およびその処置

本章では、50MWSGT Fで、1974年より、水素計を使用してこれまでに得られている故障経験およびその処置について記述する。

表6-1(1/17~17/17)に各水素計で経験した故障およびその処置状況を示し、表6-2に、2次ナトリウム系運転経過、水素計使用経過およびトラブル状況の一覧を示す。

これまでに得られている大きな故障としてはニッケル膜の破損、真空系の真空破壊および真空計の破損が上げられる。

大きな故障については、全体的な把握が可能なよう、図6-1に運転時間とトラブル発生頻度、図6-2に、水素計起動回数とトラブル発生頻度、図6-3に、水素計原因別故障件数の形で整理して示した。

以下、故障別に詳細な内容を記述する。

6.1 ニッケル膜の破損(リークまたは変形)

ニッケル膜のナトリウムリーク(カバーガス中水素計の場合、ナトリウムベーパーを含むアルゴンガスリーク)は、水素計としての機能を完全に失う故障で、その発生防止対策は、設計製作時の最も重要な項目である。

ニッケル膜の変形は、ニッケル膜を設計した時の本来の強度が変化しリークの可能性を大きくさせるばかりでなく、ニッケル膜有効表面積の変化、およびニッケル膜部のコンダクタンスの変化により、水素濃度と真空度の関係式である校正式の変化をもたらす。

50MWSGT Fで経験したニッケル膜のリークは、ナトリウム中水素計で1回、カバーガス中水素計で2回あり、変形については、カバーガス中水素計で2回経験している。

大洗工学センターの他施設でのニッケル膜リークは、SWAT-2でのPNC-MAPIタイプで1回(使用積算時間約1000時間)と1MWナトリウム中水素計で1回(使用積算時間 約1880時間)経験がある。

どちらも、外圧型のニッケル膜を使用していた。本節では、50MWSGT Fにおけるニッケル膜故障について記述する。

6.1.1 ナトリウム中水素計におけるニッケル膜リーク

1982年6月12日 CT-HNa(PNC型1号機改良型)のニッケル膜(内圧型)にリークが発生し、真空系内に多量のナトリウムが流入した。(表6-1の⑥)

(1) 状況

1982年6月8日 2次ナトリウム系はナトリウムチャージされ、CT-HNaにもナトリウムがチャージされた。

6月9日にニッケル膜温度は500°Cに昇温され、2次系内ナトリウムは、純化運転を行

っていた。

6月12日「CT-Na検出部破損」警報が発生した。検出部破損検知は、真空系に設置されている熱電対（設定200°C）より発せられたもので、この検出部破損信号によりCT-HNaのナトリウム出入口弁が自動閉となりナトリウムポンプ及び加熱器が自動停止した。なお、真空計及びイオンポンプは、保護回路作動（フルスケール120%指示でトリップ）によりトリップしていた。

ただちに現場に行き、イオンポンプ入口の隔離弁を閉とし、真空系配管をナトリウムプロックゲージ（電磁誘導によるナトリウム検知器）にて検査したところ、ナトリウムが流入している事を確認した。そこで、イオンポンプ隔離弁を閉とし、系外へのナトリウムリークを防止するため、真空ラインを扇風機にて冷却した。

以上が警報発生後の状況であるが、「検出部破損」警報発生の10～15分前、真空計の圧力及びイオンポンプ電流指示は振動しておりこれらの指示によっても真空系になんらかの異常が起きていた事が分る。図6-4にその時の真空計出力を示す。

ナトリウムリークを起こしたCT-HNaは1979年9月1日に設置され7回の運転停止のサイクルを経験しており、運転積算時間は約8600時間であった。

(2) 処置

ニッケル膜を含む真空系を製作（ただしニッケル膜は予備品を使用）し、1983年8月に交換工事を行った。

交換工事は施設停止中（ナトリウムドレン中）にもかかわらず各種のトラブルが発生し、たしかに有効な経験が得られた。

それらについては、6.3.2～6.3.4項および6.7節で詳細に記述する。

(3) 原因

リークの原因となるような運転操作上の問題はなく現在、大洗工学センター内のナトリウム材料室にて原因究明のための材料試験を実施中である。なお、引抜いたニッケル膜は、目視によっては変形、およびリーク箇所の確認はできなかった。

6.1.2 カバーガス中水素計におけるニッケル膜変形

1979年10月1日、EV-HA r (50MW-CG-MK I) のニッケル膜を膜面積の小さいニッケル膜 (50MW-CG-MK II) と交換 (50MW-CG-MK I の測定範囲は1～600V ppm であり、1～10000V ppm の測定範囲に広げるため) するため、既設ニッケル膜（外圧型）を引き抜いたところ変形している事を発見した（表6-1の⑩）

(1) 状況

変形したニッケル膜を写真6-1及び図6-5に示す。変形状況は、側面から押し潰されており、中心近付の内面は接触していると思われる。

図6-6に寸法測定位置図を表6-3に寸法測定結果を示す。なお、寸法測定は、外側によ

りノギスとマイクロメータにより行った。

本ニッケル膜は、4.2.1(2)項で記述したように、測定上限が600V ppmであったためニッケル膜温度を500°Cから350°Cとし運転状態を変えることにより、測定上限値を高くして使用していた。そのため350°Cでの使用時間は、5000時間、500°Cでは5000時間となり計10000時間の使用実績を有し、その間7サイクルの運転、停止を行っている。

(2) 交換工事

50MW-CG-MK I から 50MW-CG-MK IIへの交換は1979年10月1日から現地交換工事が始まり、その際、50MW-CG-MK I ニッケル膜の潰れを発見したが、交換予定の50MW-CG-MK-IIニッケル膜の強度等についての設計の見直しは行わず、5日間で工事を終了した。

この時、ニッケル膜の他、イオンポンプも10000時間程度使用したため新品と交換し、ニッケル膜部のハウジング、真空ゲージ、真空弁は、既設のものを引き続き使用した。

図6-7に本水素計の交換部分を示す。ニッケル膜部ハウジングからのニッケル膜引抜き及び挿入設置作業は、真空系機器を個々に分解して行うのでなく、真空系一体（ニッケル膜、真空系配管、真空計、イオンポンプ）で行った。

真空系一体で行う事により、真空系部受台を採用でき、ニッケル膜の引抜き及び挿入設置作業が順調に終了できた。また、ニッケル膜の引抜き作業時、グレイロック付近内部には、ナトリウムベーパーが入り、固着している事が予想されるため、グレイロック付近を予熱した。予熱温度はナトリウムの燃焼を考え、100°C程度とした。

これによりニッケル膜、引抜き作業はスムーズに実施できた。

10月3日、設置終了後、昇温ベーカアウトを2日間続けた。交換設置が2日間で終了したのは、本水素計がカバーガス中水素計のため、ニッケル膜部ハウジングにナトリウムがほとんど残留していないかった事や、ニッケル膜を含む真空系が溶接ではなく、グレイロック及びフランジにより接続する構造であったためであると考える。

(3) 変形したニッケル膜の水素計としての特性

1) ニッケル膜部コンダクタンス

図6-8に示すような計算モデルを考え(1)項での寸法測定値を使用して試計算を実施した。なお、肉厚は、0.25mm均一とした。

その結果、真空系全体のコンダクタンスは正常時の 5 l/sec に対し、 $4 \times 10^{-2} \text{ l/sec}$ であった。

なお、変形したニッケル膜部のコンダクタンスは以下の式より求め真空系全体のコンダクタンスとした。

$$C_{\text{全}} = \frac{1}{C_{\ell_1}} + \frac{1}{C_{\ell_2}} + \frac{1}{C_{\ell_3}} \quad \dots \quad (6-1)$$

$C_{\text{全}}$: ニッケル膜部コンダクタンス (ℓ/sec)

C_{ℓ_1} : ℓ_1 部のコンダクタンス (ℓ/sec)

C_{ℓ_2} : ℓ_2 部のコンダクタンス (ℓ/sec)

C_{ℓ_3} : ℓ_3 部のコンダクタンス (ℓ/sec)

$$C_{\ell} = \frac{1}{C_{a^1}} + \frac{1}{C_{a^2}} \quad \dots \quad (6-2)$$

$$C_{a^1} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot \frac{D^3}{\ell} \quad \dots \quad (6-3)$$

$$C_{a^2} = \sqrt{\frac{R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot M}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \dots \quad (6-4)$$

C_{ℓ} : 各部のコンダクタンス (ℓ/sec) ($C_{\ell_1}, C_{\ell_2}, C_{\ell_3}$)

R : ガス定数 8.314×10^7 (erg/mol·K)

T : 気体温度 773 (K)

M : 気体分子 $H_2 = 2$

D : 径 1 (cm)

2) ニッケル膜表面積(有効膜表面積)

両側のニッケル膜が接触している部分は、1項の寸法検査の結果 $3.4 \sim 6.8 \text{ cm}^2$ ($0.1 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm} \times 17 \text{ cm} \times 2$) で健全な場合のニッケル膜表面積 6.28 cm^2 に対して 5.6 cm^2 に減少していた。

3) 水素計指示変化

上記のニッケル膜表面積を使用して、第2章(2-15)式により校正曲線を求めた場合の特性を図6-9に示す。

この場合、ニッケル膜の水素透過率は、 $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{Torr}^{1/2}/\text{sec}$ (500°C) と仮定した。その結果、ニッケル膜変形後は、同一水素濃度に対し 20~50% (1~600V ppm の範囲にて) の真空計指示(イオンポンプ出力電流値)の減少となる。

4) 変形時期の推定

図6-10に、これまで得られている校正試験結果と、前項での校正曲線を示す。

計算で求めた校正曲線と実測で求めた校正曲線との差はあるが 1977年10月と 1978年5月時の校正曲線の差による変形時期の判定は困難である。なお、カバーガス中の水素挙動は不明な点が多く、蒸気発生器の運転条件を一定に保持していてもカバーガス

中の水素濃度はゆるやかに変化しているこもあり、数%の変動はめずらしくない。

このような理由からニッケル膜の変形による指示変化が20~50%減少したとしても、この変化をカバーガス中の水素濃度の変動からくるものと区別することは困難であり、ニッケル膜変形の時期については推定ができなかった。

5) 原因と対策

前項で記述したように、変形した時期は不明確であり、原因についても未だ明らかにされていない。

変形したニッケル膜は、各種材料試験を実施したが、500°Cでの引張強さは11~16kg/mm²であった。

この値は、ニッケル201のデータと比較して30~40%程度小さいが強度としては十分であり潰れの原因とは考えにくい。

この他、考えられる原因として、推測ではあるが、ニッケル膜の真円からのずれによりニッケル膜周方向の応力が大きくなる事が考えられる。

なお、製作時の真円検査は行っており、基準には達していた。以上のように原因は、未だ明らかでないがこのような変形を無くすため、現在ではほとんど内圧型のニッケル膜を使用する構造に設計変更している。

6.1.3 カバーガス中水素計ニッケル膜リーク

1981年10月8日EV-HAr(50MW-CG-MKII)のニッケル膜(外圧型)で真空系にナトリウムベーパーを含むアルゴンガスのリークが発生した。(表6-1の69)

(1) 状況

ニッケル膜温度を500°C一定にて運転中、イオンポンプ出力及び真空計指示が、約40分周期でフルスケールオーバーを繰り返した。図6-11および図6-12に、その時のイオンポンプ出力電流及び真空計出力の記録を示す。

10月13日 EV-HArを動的平衡圧測定モードより静的平衡圧測定モードとしたところイオンポンプ出力電流は安定した。

10月14日 エチルアルコールを真空ラインフランジ部等に吹き付けフランジ部のリークをチェックしたがリークは発見できなかった。そこでEV-HAr(50MW-CG-MKII)を動的平衡圧モードで校正サンプリングラインに切替サンプリングラインを真空引きし、真空計の出力をチェックした。校正ラインが正圧ではイオンポンプ電流は、40分周期のスケールオーバーを繰り返すが、負圧状態ではポンプ電流は安定した。また、ニッケル膜を降温するとスケールオーバーの周期は長くなった。その理由としてイオンポンプでのアルゴンガス排気が考えられイオンポンプの排気作用を以下に記述する。

イオンポンプの排気作用は、次の二つの過程で行われている。一つは、清浄なチタン蒸気膜の持つゲッター作用であり、もう一つは、イオンまたは原子、分子が陰極に飛び込んで、自

己の入射エネルギーによってチタン内部にもぐり込み、捕獲される過程である。

第1のゲッター作用により吸着された分子は、チタン蒸着膜との反応で捕獲された後も比較的安定であるが第二の過程によるものは、イオンの衝撃等を受けると再放出することもある。これら、二つの排気作用は気体の種類によっても異なり、ヘリウム、アルゴン等の希ガスに対し排気速度がきわめて小さく第2の過程で捕獲された分子がイオン衝撃や温度上昇により再放出する可能性も大きい。そのため、アルゴンガスを排気すると、周期的に圧力が上昇する現象が見られる⁶³。

以上のことから今回のトラブルはニッケル膜部でアルゴンガスがリークしたことによると判断し、ニッケル膜部を引き抜き交換することとした。

10月15日 ニッケル膜を引き抜き検査した結果、外形上、変形等の損傷は確認できなかつたが、ニッケル膜の根元（排気系側）溶接線近傍に茶かっ色の物質があり、その中心部に黒色の点状の変色が確認された。

ヘリウムリーク試験を実施した所、上記の変色した近傍であるニッケル膜と真空配管との電子ビーム溶接部付近からリークが見つかった。リーク箇所を図6-13に示す。

ヘリウムリーク試験は、ニッケル膜部をヘリウムリークディレクターに接続し各溶接部にヘリウムを外側から吹き付ける方法によってリーク箇所を捜すことができた。リークの大きさは常温で 2.5×10^{-7} Torr l/sec 程度のものであった。なお、本ニッケル膜の500°Cでの積算使用時間は約6050時間である。

(2) 交換作業

イオンポンプ及び真空計は既設のものを使用し、ニッケル膜部は予備品と交換した。ニッケル膜部交換後520°Cまで昇温し、ベーカアウトを行った。

交換作業を2日間で終了することができたがこの理由については、6.1.2項の交換作業で記述していることと同様である。

(3) 原因

リーク部は純ニッケルとSUS304の異種金属溶接部であるが材料試験の結果、割れ、気孔等の明確なリーク箇所は発見できなかった。

そのため、リーク原因是、溶接熱影響による材料の変質が契機となって発生した可能性が考えられる程度で明確にすることはできなかった。

6.1.4 カバーガス中水素計ニッケル膜のリーク及び変形

1983年4月10日 EV-HAr (50MW-CG-MKII) ニッケル膜（外圧型）に再びリークが発生していることを真空計出力から判断し、1983年8月にニッケル膜部の引き抜きを実施した。その結果、6.1.2項で見られたと同様の変形（潰れ）が発見された。

なお、本水素計は1982年9月に本水素計のニッケル膜の改造計画が立てられており、1983年8月に変形の発生しにくい内圧型のニッケル膜に交換する予定であった。（表6-1の④）

(1) 状況

1983年4月10日 EV-HA イオンポンプ指示が20分から15分の周期でオーバースケールを繰り返した。イオンポンプによる真空圧応答パターンは、6.1.3項の状態に良く似ている。図6-14にその時のイオンポンプ出力記録結果を示す。なお、今回の場合、約2ヶ月前の2月1日にもイオンポンプ出力が40～60分周期でオーバースケールを繰り返す現象が発生したが、その時は真空ラインフランジの増締めを行い、仮設粗引きセット（真空回転ポンプ及びソープショーンポンプが組まれて持運びできる装置）により真空系内を粗引きし、通常の使用モードで正常な水素計応答（真空度安定）に復帰している。そのため、この時、ニッケル膜部でリークが発生し、その後そのリーク箇所が閉塞したこととも考えられる。写真6-2にナトリウム処理後のニッケル膜部を示す。ニッケル膜部についてアルコール洗浄後、ヘリウムリーク試験を行ったところニッケル膜根元接部にリークが確認された。今回のヘリウムリーク試験は、真空側にヘリウムを封じ込め、ニッケル膜部先端部及び根元部にビニールをはり、そのビニール内のヘリウム測定を行う方式を取った。

なお、本ニッケル膜の500°Cにおける1983年4月30日までの使用積算時間は4000時間程度であり、1983年2月1日までの場合、2600時間程度である。

(2) 交換工事

交換工事（耐圧試験含む）は、1983年8月3日より始められ、8月10日に終了し、その後、昇温試験及び組合せ試験（静的平衡圧により3点の水素濃度をかえた校正による直線性のチェック）を行った。

今回の交換工事は、ニッケル膜部ハウジングを含む真空系全体でイオンポンプ及び真空計のコントローラは既設のコントローラを引き継ぎ使用することとした。なお、真空系全体（ニッケル膜ハウジング含む）を工場にて製作しているため現地での作業は、ニッケル膜ハウジングサンプルガスの出入口配管接続、非破壊検査等の範囲であり、一週間程度で交換工事を終了し、その間、大きなトラブルは起っていない。

(3) 原因

現在、ナトリウム材料室にて、材料試験を実施中であり変形により、孔があいたものかは、未だ不明である。

また、変形した時期についても6.1.2項と同様不明である。

6.2 真空破壊

本節では誤操作による真空系の真空破壊の状況、処置及びその後の運転における特性変化について記述する。（表6-2の⑦）

(1) 真空破壊状況

1983年2月2日 EV-HN a (PNC型2号機MK IV) の水素計校正試験中、静的室

を一時動的平衡圧測定モードにする操作時、図6-15に示す粗引き用真空弁（V-5）を、誤まって開とし真空系部（ニッケル膜部を含む）の真空度を悪化させた。（静的平衡圧測定は、静的室真空度を一旦、静的平衡圧以下としその後静的平衡圧測定モードとし、真空計が安定した（静的平衡に達した）後データ採取を行っている。）

このためイオンポンプ及び真空ゲージ（シュルッゲージ）がトリップした。（オーバースケールで保護回路作動）

再度真空計を起動させると真空系内の真空度は、トリップ前の 1.5×10^{-4} Torr から 5.2×10^{-1} Torr まで悪化していた。また、イオンポンプでの系内真空度チェックによつても 0.28 kV であり、真空度の悪化していることが確認された。（真空度が 10^{-4} Torr と高真空であれば、イオンポンプ印加電圧は 4.5 kV である。）

V-5には大気との間にカット弁（V-6 真空弁）が設置されているが、これはV-5を全閉で使用する時のバックアップ弁であり、V-6だけでの高真空保持は期待できない。

(2) 処置

2月4日 粗引き排気セットによりベークアウトを計画し、粗引き排気セット、仮設リボンヒータ及び2個の熱電対の取付作業を行った。その系統図を図6-15に示す。

2月8日 水素計真空系のベークアウトを開始しベークアウト時の予熱は、バリアブルリーグ弁（図6-15のV-4）を 15.0°C 以下におさえる目的で 10.0°C 程度で行った。

2月11日 真空系内真空度が 10^{-2} Torr 程度までしか真空引きができなく、その原因として以下を考えた。

- 1) 粗引きラインに $1/2$ B配管で約1.3mの直管を使用しているため、真空引きの圧損が大きい。
- 2) ソープショーンポンプの活性化を行わず使用した。

そのため、真空系のベークアウトを一時停止し、ソープショーンポンプのベークアウトを行い活性化させた後、真空系のベークアウトを再開したが、それほど効果はなかった。

2月12日 粗引きラインを短かい2Bのキャピラリーチューブに交換しベークアウトを開いた。

2月13日 イオンポンプを起動できる 10^{-4} Torr 程度まで真空引きができたのでイオンポンプでの排気を行い、粗引き系を停止し、予熱をOFFとした。その後の真空系ベークアウトとしては通常運転中動的平衡圧モードで運転していれば、ニッケル膜部が 50.0°C であり、十分ベークアイト出来る事を期待した。今回のベークアウト操作は、粗引き系の不具（排気ラインが細くて長い管を使用）あるいはソープショーンポンプ使用時の操作不足（使用前、活性化を行う）により、イオンポンプ立上げまで何日か要したが、それらがなければ2日間程度で終了できるものである。

なお、ソープショーンポンプでの液体窒素供給量はソープショーンポンプの大きさにもよるが、1

時間間隔で約 1.5 ℓ程度である。

(3) その後の使用状況

今回の真空破壊は、ニッケル膜が 500°C で運転中に起きたものであり、また、本水素計設置後、初めて行う校正試験時であった。真空破壊後の立上げ以降、静的室は動的平衡圧モードとし、ニッケル膜を 500°C にて、長期間運転（約 3.5 ヶ月間）しているが静的平衡圧は図 6-16 及び図 6-17 に示すように 3 時間程度経過しても安定せず、ナトリウム中水素分圧より、高い圧力となっている。これは、真空系部のリークでなく静的室真空系壁面の放出ガスによるものと考えられる。なお、製作時の工場試験での静的真空系壁面の放出ガス測定試験は、300°C で 19 時間のペークアウト実施後、常温で行っている。

その測定結果では、2 時間 45 分を経過しても真空度の変化が生じないことを確認している。

以上のような、運転中に真空破壊を起した経験は、動燃他室の水素計でもあり、その後の真空系内脱ガス処理は、非常に長時間を必要としもし実機プラントで、このような故障が発生した場合、水素計真空システム全体の交換を行う方が良いと報告³³されている。

今回の 50 MWSGT F での経験からも、上述の事が言え、EV-HN a (PNC 2 号機 MK IV) の静的室のニッケル膜を含む真空系交換を、現在計画中である。

(4) 原因と対策

直接原因是、操作員の誤操作であるが、「もんじゅ」等の実機水素計でもありうることが考えられる。

その対策としては、操作員の操作要領の徹底、粗引き用真空弁に封印、操作禁止の札による表示、あるいは粗引き用ラインに盲フランジを取付、高真空としておく等の措置が必要と思われる。

6.3 真空計のフィラメント破損及び電極部リーク

水素計は、水素濃度を真空度により検出しているものであり、真空計の不調は、水素計としての機能が失なわれる。

50 MWSGT F での真空計破損は、運転中 1 回、メーカ納入時のペークアウト及び真空試験時 1 基のナトリウム中水素計で 2 回のフィラメント破損を経験し、電極部リークを 1 回経験している。

本節では、真空計フィラメント破損及び電極部リークの故障経験を記述する。

6.3.1 EV-HN a シュルツゲージフィラメント破損（表 6-2 の②）

(1) 状況

1983年2月20日 施設電源の点検を行うため、水素計の全電源を停止し、点検終了後、EV-HN a (PNC 型 2 号機 MK IV) 静的室シュルツゲージコントローラのフィラメント電源スイッチを入れても、保護回路が作動し電源が投入されなかった。

シュルツゲージのセンサー部フィラメント間の抵抗を測定した結果、正常であれば数Ωの

ところ 20~40Ω の不安定な抵抗値を示し、フィラメントの断線と判断した。

(2) 処置

交換用シュルツゲージを製作メーカーに手配し、施設停止中の1984年3月4日シュルツゲージの交換を行い、200°Cにてベークアウトを約4.5時間程度行った。その後シュルツゲージ(フィラメント)の脱ガス操作を5分間程度行い、交換作業を終了した。交換実作業は仮設粗引きラインがセットされていた事もあり、1日で終了している。取外したシュルツゲージのフィラメントは、図6-18に示すように引き込み端子とフィラメント線の接続部分が外れ(溶断)ていた。

(3) 原因

シュルツゲージは、電離真空計の一種であり熱電子を発生させるため、フィラメントを高温に加熱している。そのため、フィラメント通電中酸素が混入すると、フィラメントは、酸化(燃焼)し断線する。今回不良となったシュルツゲージは、フィラメント線の断線ではなく、フィラメント線を溶接している箇所が溶断により外れていた。これは6.2項の真空破壊時(系内に大気を混入させた)、溶接材の溶融(溶接材は、フィラメント材より低融点金属を使用)等が生じてあり、今回のフィラメント電源入切のショックにより外れたものと考えられる。

6.3.2 CT-HN aのシュルツゲージフィラメント破損(表6-1の⑨)

(1) 状況

1983年8月26日、6.1.1項でのCT-HN aのニッケル膜交換工事において、シュルツゲージが現地(50MWS GTF)へ到着(ニッケル膜、イオンポンプ及び真空計が組み込まれている一体の真空系)後、シュルツゲージを通電すると 1.4×10^{-1} Torr 指示を示し、その後シュルツゲージがトリップし、再投入できない状態であった。

真空系のフランジをチェックしたところ、フランジボルトが指で廻るほどゆるんでいた。

8月29日 シュルツゲージフィラメントの導通チェックを行った結果、導通がなくフィラメントの断線と判断し、シュルツゲージの交換を行った。取外したシュルツゲージのフィラメントは、フィラメント線中央附近で焼損していた。

(2) 原因

シュルツゲージフィラメント焼損は、真空系フィラメントボルトが指で廻るほどゆるんでいた事から、真空度が悪化している状態(空気リークしていた状態)でシュルツゲージフィラメントを通電したため、フィラメントが焼損したものと考えられる。

このフランジボルト締付け不良(ゆるみ)の原因としては、工場でのベークアウト後の増締め不良、あるいは、輸送中での振動等によるボルトのゆるみが考えられる。なお、このような水素計真空系フランジボルトナットの締付け不良は、大洗他施設でも経験があり、メーカーで製作検査後納入され、大洗内倉庫に保管後、試験装置に設置し、真空試験を実施したこと

ろ、真空計のフィラメントが断線した。この場合も、真空系フランジ部ボルトがゆるんでいたと報告³³されている。

(3) 処置及び対策

この場合の真空系は、メーカーで製作後ベークアウトを行い、真空状態で現地に輸送されたもので、メーカー出荷前の各ボルトの締めめ、輸送後の各ボルトのチェックを行い、取付工事に際しては、衝撃的な力や振動を極力避ける必要がある。

6.3.3 CT-HN a のヌードゲージフィラメント破損（表6-1の⑧）

(1) 状況及び処置

1983年9月2日、前項6.3.2のシュルツゲージ交換作業を終了し、真空系内のベークアウトを行った後ヌードゲージに通電すると、エミッション電流（フィラメント線から放出される電流）が0mAで設定できない状態であった。

ヌードゲージフィラメントの導通確認を行った結果、フィラメントの断線と判断し交換を計画した。取外したヌードゲージフィラメントは、図6-19に示すようにフィラメント線がスポットウェルド部で外れていた。

(2) 原因

フィラメント部に衝撃的な力、または振動が加わりスポットウェルド部の脆くなっている部分が折れかかっている状況となっていて、フィラメントに通電した時、そのショックで外れたと考えられる。

(3) 対策

現地への輸送あるいは取付工事の際、ゲージに衝撃力や振動が加わらないよう十分注意する必要がある。

6.3.4 CT-HN a のシュルツゲージ電極部リーカ（表6-1の⑨）

(1) 状況及び処置

1983年9月9日 前項6.3.3でのヌードゲージ交換後、真空系のベークアウトを開始し、ニッケル膜部温度500°C（真空系200~250°C）にて、100hrのベークアウトを終了した。

9月23日 真空系の真空度到達試験（常温で行う）を実施すると 1.8×10^{-8} Torr (2×10^{-9} Torrが判定基準値)までしか真空度が良くならないため、真空系各フランジ及び真空計コネクター部のアルコールリーク試験を実施した。

その結果、シュルツゲージのコレクタのコネクター部でリークを発見した。図6-20に取外したシュルツゲージのリーク部を示す。シュルツゲージを再製作し交換後は、ベークアウトを行い、真空系内放出ガス試験及び真空度別達試験を実施し終了した。なお、本作業（6.3.2項及び6.3.3項のトラブル処置も同様）は、ニッケル膜部を50MWGTFナトリウムループに設置した後起ったトラブルであり、ベークアウト及びその後の各種確認試験は、

現地（50MWSGT F）で行なわれた。

(2) 原因

電極溶接部でのリークであり、製作時の不具合と考えられる。

(3) 対策

本件のような電極溶接部でのリークは初めてである。製造時の検査は、十分注意し、確実に実施されなければならない。（本トラブルにより、電極溶接の改良は、行っていない。）

6.4 カバーガス中水素計用循環ポンプの故障

50MWSGT Fに設置している2基のカバーガス中水素計は強制循環型であり、循環ポンプは水素検出系を構成する機器の中でも重要な機器である。本節では50MWSGT Fでのカバーガス中水素計用循環ポンプの故障について記述する。

6.4.1 EV-HAr での循環ポンプ故障

EV-HAr は 50MW-CG-MK-I, -MK-II, -MK-III, -MK-IV と改造されてきたが全てニッケル膜構造部及び真空系の変更であり、循環ポンプは初めからベローズ型を使用している。

なお、EV-HAr の循環ポンプの故障は、現在までにリーク及び出力低下を各1回経験している。

(1) 循環ポンプリーク（表 6-1 の④）

1) 状況

1981年3月20日 現場パトロール時ポンプベローズ部でリークを発見した。それまでの使用積算時は、13400時間である。

2) 原因

使用時間が長いことからベローズの寿命と考えられる。

3) 対策及び処置

従来の循環ポンプは、米国メタルベローズカンパニーのメタルバルブベローズであったが、メンテナンス部品の納期等の問題もあり、国内のベローズ型ポンプ（イワキ、BA-330SN）に交換した。なお、イワキのベローズ型ポンプの運転保証時間は1年間である。

(2) 循環ポンプ出力低下（表 6-1 の⑤）

1) 状況

1981年6月25日 循環ポンプバイパス弁（図の V-6）を全閉としても規定流量（19.8 N l/min）まで流量が上らなくなり、循環ポンプ自体の振動が大きい状況であった。なお、本ポンプは使用開始後約1ヶ月目で本件が発生した。

2) 原因

配管部に異常は認められず循環ポンプ自体の性能が悪くなり、規定流量を出力できなく

なったと推定される。

3) 対策及び処置

同機種（ベローズ型）であるSH-HArは同じ時期に使用開始したものであるため順調に作動していることから、従来と同仕様のベローズ型循環ポンプに交換した。

6.4.2 SH-HArでの循環ポンプ故障

SH-HAr（PNC-CG-1号機）の循環ポンプは、設置時、ダイヤフラム型であったが、3回のリーク（表6-1の④、④、⑤）を経験したため、前述のEV-HArと同じ、国内のベローズ型循環ポンプに交換している。

(1) 状況

1) 1回目の循環ポンプリーク（表6-1の④）

1979年10月16日 ナトリウム系が予熱運転時、SH-HArの循環ガス流量が減少した。現場で原因を調べたところ、循環ポンプのダイヤフラム部より、ガスがリークしている事を発見した。リークは、ダイヤフラム本体（天然ゴム）及びテフロン膜の亀裂によるもので、それまでの使用積算時間は、4000時間であった。

2) 2回目の循環ポンプリーク（表6-1の④）

1980年12月16日 SHナトリウムレベル制御が異常（カバーガス供給弁が正常時に比べ頻繁に開閉し、SHのナトリウムレベルも不安定な状態となり、現場にてカバーガスのリーク箇所を調べたところ、SH-HAr循環ポンプ部でリークしていることを発見した。リークは、ダイヤフラムの亀裂によるもので、それまでの使用積算時間は、2500時間であった。

3) 3回目の循環ポンプリーク（表6-1の⑤）

1981年3月20日 2回目のリークと同様、SHレベル制御系が異常となった。

このためガスクロとSH-HArをSHより隔離したところ、レベル制御は正常に戻った。

なお、校正ラインよりアルゴンを加圧し循環ポンプ部ダイヤフラムでのリークを確認した。本ダイヤフラムでの使用積算時間は、750時間である。

(2) 原因

本ダイヤフラムの運転保証時間は、2000時間である。1回目及び2回目のリークは、ダイヤフラムの疲労により、亀裂が生じたものと考えられる。3回目のリークについては、運転時間が短かくダイヤフラム交換時ダイヤフラムに傷を付けた事が考えられるが明確な原因は把握されていない。

(3) 対策及び処置

1回目及び2回目のダイヤフラムリークに対しては、予備のダイヤフラムと交換しているが、3回目のリークでは、運転保証期間が1年間とダイヤフラム型に比べ長期使用に耐える

ペローズ型（EV-HArでの循環ポンプと同じもの）に交換した。

6.5 制御系の故障

本節では水素計の性能上特に重要なイオンポンプ、および真空計コントローラと、ニッケル膜温度制御の故障について記述するが個々の故障状況、原因、処置については表6-1に示す。

なお、50MWS GTFでの水素計の定期検査は、特に実施しておらず、故障あるいは不具を発見した時点で修理を行なっている。このためこれらのデータを蓄積することにより、設置後のメンテナンス内容及びインターバルが評価可能と考える。

6.5.1 イオンポンプ及び真空計コントローラの故障

1974年に設置された2基のナトリウム中水素計(50MWMK-I型)のイオンポンプコントローラおよび、真空計コントローラは、設置後、ほぼ同時期にコントローラ内の短絡あるいは、断線等(表6-2での①, ②, ③, ⑤)が発生し、その後は発生していない。本故障は、設置後、約8ヶ月目に生じており、実働期間(ナトリウムが充填されている期間)は、2ヶ月程度である。なお、イオンポンプは、施設が停止中でも、真空保持の立場から作動させているため、この場合、8ヶ月間メンテナンスフリーで使用できたと考える方が妥当である。(イオンポンプを施設停止中でも作動させる理由は、イオンポンプ再起動時の起動条件である 10^{-4} Torr程度まで他の真空ポンプにより真空引きが必要となり、施設停止中におけるイオンポンプの負荷は、ニッケル膜からの水素拡散がないため小さく、積算排気量として大きくならないと考えているためである。)それに比べ1978年に設置した3基の水素計(ナトリウム中水素計PNC型1号機改良型2基、カバーガス中水素計、50MW-CG-MKI1基)のイオンポンプコントローラおよび真空計コントローラは、設置後5年、実働期間17ヶ月故障は発生せず、現在も順調に作動している。

6.5.2 ニッケル膜温度制御系の故障

現在のニッケル膜温度制御の電気ヒータ入力は、全て(水素計6基)サイリスタ制御方式であるが、1974年に設置された2基のナトリウム中水素計(50MWMK-I型)、及びその改造型である50MWMK-II、50MWMK-IIIは、誘導電圧調整器(IVR)方式であった。これまでのニッケル膜温度制御系の故障は、8回の経験があり、その内サイリスタ制御方式での故障は4回(表6-1の④, ⑥, ⑦, ⑨)である。なお、表6-1の⑩は、サイリスタ制御自体で起った故障でなく、温度制御用調節器の故障である。

I VR方式での故障は4回(表6-1の②, ⑤, ⑧, ⑩)でその内3回(表6-1の②, ⑤, ⑩)はI VR自体の故障でなく、引出し端子の外れ、あるいはコンデンサーの不良である。

なお、表6-1の⑩は、復旧時の配線ミスのため故障件数から除外した。今後の水素計では前者のサイリスタ制御方式が主流と考えられるが、本故障の場合、サイリスタゲート制御装置が不調となることが多く、その場で修理するのではなく、予備品を準備しておき、故障時は、交換し運転を続ける方法を取れば良いと考える。

なお、1978年度設置の水素計の内1基（PNC-CG-1号機型）は、現在も（実働18ヶ月間）順調に作動している。

6.6 その他の故障

本節では6.1から6.5節で記述した以外の故障経験についてまとめて記述する。

6.6.1 ニッケル膜ナトリウムリーク検知器の誤作動（表6-1の⑩）

(1) 状況

1979年7月14日 EV-HNa(50MWMK-III)の「拡散膜破損検知」の警報が発生した。この時、イオンポンプを含む真空計指示は、安定しているためリーク検知器の誤作動と判断し運転を継続している。

この場合のニッケル膜ナトリウムリーク検知器は、接点式である。

(2) 原因

リーク検出器は、ナトリウム受容器の貫通部にセラミックを使用し、セラミックは銀口一材で固定していた。そのため、*シルバーマイグレーションにより銀がセラミック部に流れ絶縁不良を起し、誤作動した。

* シルバーマイグレーション

シルバーマイグレーションとは銀移行現象ともいわれ、銀が一定の雰囲気下で絶縁物表面を覆う現象である。シルバーマグレーションは以下の雰囲気で助長することが知られている。

- 1) 絶縁物を介して電界があること。
- 2) 電極が銀（銀メッキ）または銀合金であること。

(3) 対策及び処置

本対策としては、1980年8月セラミック部の銀口一を金口一付けとし交換設置した。

なお、現在の各水素計でのニッケル膜破損検出器は、温度計測によるリーク検出器の有効性が見直され、温度計測による方式を採用している。

6.6.2 EV-HAr電源回路の不具合（表6-1の⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮）

(1) 状況及び原因

EV-HArは、1977年1月に設置され、現場制御盤の受電電源は、1台の漏電ブレーカーを経て真空系の各計器、コントローラ、循環ポンプ、予熱ヒータ、制御用電源に供給されている。そして、予熱ヒータ電源部に地絡継電器がないため、1回路の予熱ヒータに地絡が生ずると現場盤の全電源がトリップする。これにより水素計としての起動回数が多くなり、ニッケル膜部の熱過渡、あるいは真空計及びイオンポンプ再起動時の過負荷等によって悪影響をおよぼしている。

(2) 対 策

予熱ヒータのような地絡の確率の大きな電源には、それぞれに地絡継電器を設けるべきで、現在検討中である。

6.6.3 イオンポンプコントローラの誤操作(表6-1の⑧)

(1) 状 況

イオンポンプコントローラにはイオンポンプからの電流信号が異常に大きくなつた時(数百mA), 保護回路の作動により印加電圧を停止し, イオンポンプ出力をおさえる回路が設置される。本回路はイオンポンプの起動時等, 盤面の切替スイッチ(RUN-S T A R T切替)により保護回路をバイパスさせることができある。1983年10月18日のSH-HArイオンポンプ起動時, 前述の切替スイッチをS T A R T側(保護回路がバイパスされる状態で, イオンポンプ起動時は, S T A R T側で行う。)として運転したが, その後, 切替スイッチをRUN側とせずS T A R T側で運転を続けてしまつたため, イオンポンプからの電流信号が異常に大きくなつても保護回路が作動せずコントローラ内部の抵抗が断線した。この場合, イオンポンプコントローラレンジを電圧レンジにすると正常な5kVを指示するが電流指示レンジにすると0μAあるいは0mAであった。このように, 系内真空度は, あたかも良い指示値となり操作上鎖覚が生じるため, 注意しなければならない。

(2) 原 因

イオンポンプコントローラは, 1974年から同機能のものが設置され問題なく運転されてきたが, 操作員の交替により, 必要操作が徹底されずトラブルに至つたものである。また, イオンポンプ電流信号が異常に大きくなつた原因については不明確であった。なお, イオンポンプ本体は, 次項の6.7.3で記述するが, 1983年10月末, 新しい同仕様のイオンポンプに交換している。

(3) 対策及び処置

操作要領の徹底が必要であり, 切替スイッチの設置に関しても, その必要性の検討が必要である。なお, 本コントローラは, メーカに修理を依頼したが, メーカへの輸送も含め修理に二週間を要した。

6.6.4 イオンポンプ出力不調

本項では50MWSGTにてイオンポンプ自体のトラブルをこれまで2回経験(表6-1の⑯, ⑰)しているので, その経験について記述する。

(1) E V-H N a (50MWMK-III)でのイオンポンプ不調(表6-2の⑯)

1) 状 況

1977年4月28日 イオンポンプが2~3mA(ナトリウム中水素濃度1ppmに相当)を越えるとイオンポンプ出力電流が加速的に増加し, イオンポンプコントローラの保護回路が作動(イオンポンプトリップ)した。

本イオンポンプは、50MWMK-IIIを製作した時、新品のイオンポンプとしており、50MWGTFでの使用時間は約1ヶ月である。

2) 原因

イオンポンプは、電極が過熱されるとトラップしていた水素を放出し、ポンプ自体の排気が低下してイオンポンプ出力電流信号が増加すると考えられ、電極が過熱される原因としては、イオンポンプの寿命、及びイオンポンプ入力電力の増加あるいは悪い真空度状態での運転が考えられるが、本イオンポンプ出力不調は、使用時間も短かくイオンポンプの寿命とは考えられない。

なお、本イオンポンプを取り外した後の特性試験時に分った事であるが、本イオンポンプ（PST-05A特型日本真空製）は、水素計用イオンポンプとして選定を誤ったものであった。

以下にその理由を記す。

PST-05A特型は、不活性ガスに対する排気性能を向上させる目的で、カソードのチタン板の上にタンタルの打抜板を重ねたものを使用（従来のタイプであるPST-1C型の場合は、チタン板のみ）している。

このタンタルはチタンに比べ水素溶解度が室温で1/2以下であり、温度依存性も大きい。そのため少しの温度上昇でも水素溶解度が減少し、水素が放出されることが考えられ、水素の排気を行うイオンポンプとしては不向きであった。

3) 対策及び処置

ナトリウム中水素濃度が1ppm（イオンポンプ出力電流が2～3mA）となるのは、ナトリウム中注水あるいは注水素試験における注入量の大きい時であり、通常運転中においては、大きな影響はなかったが、1977年9月13日、イオンポンプの排気速度が低下していた場合、その排気速度を上げれば、水素濃度測定範囲が広がるため、イオンポンプのベーカアウト処理を行った。（ベーカアウト処理方法については本書5.7章参照）その結果、本書第5章の図5-5で見られる①の校正曲線（1977年4月28日実施）と②の校正曲線（1977年10月26日実施）において少し差が見られるが大きくは変わらない状態であったため、本イオンポンプは、1978年7月の施設運転停止後、新しいイオンポンプに交換した。

(2) SH-HAr (PNC-CG-1号機)でのイオンポンプ出力不調（表6-2の④）

1) 状況

1981年2月 イオンポンプ出力電流が1mA程度(100Vppm)で前項での状況と同じイオンポンプ出力電流が加速度的に増加（イオンポンプの暴走）し、イオンポンプコントローラがトリップする現象が発生した。

本イオンポンプは、1978年10月に設置されたものであり50MWGTFでの使

用積算時間（施設運転時間）は約5600時間である。

運転中におけるイオンポンプ真空度を 3.5×10^{-6} Torr，排気速度を 20 l/sec とすると、本イオンポンプは約 $1400 \text{ Torr} \cdot \text{l}$ の水素吸収となる。

2) 原因

イオンポンプの排気作用はイオンポンプ自体の電極に排気物を吸着させるものであり、長期に使用した場合、イオンポンプ排気速度の劣化が考えられる。

3) 対策及び処置

イオンポンプの排気速度を回復させるため1981年5月16日からイオンポンプベーカーアウト処理及びアルゴンボンバード処理を行った。

イオンポンプのベーカーアウト処理及びアルゴンボンバード処理の方法、およびその結果については、本書5.7章イオンポンプの回復処理で記述しているので本節では省略することにする。

なお、1983年10月に実施したカバーガス中水素計の校正試験時、3000V ppm の水素濃度設定中本イオンポンプは暴走しているため、1983年10月21日に新品のイオンポンプに交換した。

6.7 コールドトラップ出口ナトリウム中水素計の交換工事

CT-HNaは、1982年6月12日にニッケル膜が破損した。このため、1983年8月の施設停止中にニッケル膜を含む真空装置を交換した。ここでは、そのときの交換要領・ナトリウムリークした真空装置のナトリウム付着状況および交換作業で得られた成果について記述する。

6.7.1 交換要領（図6-20参照）

(1) ニッケル膜取外し

あらかじめ主ヒータ内蔵エコノマイザおよびニッケル膜構造部の残存ナトリウムをできる限りドレンするために昇温した。この際、真空装置側を持ち上げナトリウムがドレンしやすいようにした。（通常ニッケル膜構造部は、ガスがたまらないよう逆勾配にしている。）

1) 交換工事に必要な部分の配線・保温を取り外す。

2) ニッケル膜取外し

図6-21のリップ溶接部を削りニッケル膜構造部に仮保温を行い昇温して開口部より溶解したナトリウムドレンする。その後、ニッケル膜構造部を取り外す。

3) 予熱ヒータ・熱電対取外し

4) リップ溶接部周辺のナトリウムをアルコール等により処理する。

5) 主ヒータ内蔵エコノマイザの導通を確認する。

(2) ニッケル膜取付け

1) ニッケル膜取付け

新しいニッケル膜構造部（真空装置も含む）をリップ溶接しフランジにて取付ける。

2) 予熱ヒータ・熱電対・保温材取付け

3) 配 線

(3) 試験検査

以下の試験検査を実施する。

1) 液体浸透探傷検査

2) 耐圧試験

3) ヘリウムリーク検査

4) 導通および絶縁抵抗検査

5) 予熱試験

6.7.2 真空系のナトリウム付着状況

(1) ニッケル膜構造部

図6-21にナトリウムの付着状況を示す。ナトリウム側はエコノマイザ外管壁にドレンされずに残っていたが、ニッケル膜内面（ナトリウム側）は、ナトリウムが比較的きれいにドレンされていた。真空配管の切断部では、切断部より30mm、厚さ3mm程度のナトリウムが全周に付着していた。また、真空配管のニッケル膜側は、粒状のナトリウムがところどころ付着していた。ニッケル膜については、切断部から観察するにとどまつたが薄くナトリウムベーパが付着しているように感じられた。その後、ニッケル膜をアルコール洗浄し目視にて外観の観察を行った。写真6-3～写真6-4は、ニッケル膜全体写真および溶接部の拡大写真である。写真6-4からニッケル膜先端の溶接部が一部変色していることがわかる。そのほかの部位については目視での異常は認められなかった。

(2) 真空系

図6-22に真空系のナトリウム付着状況を示す。ナトリウムは、真空配管全周に薄く付着していたが、特に超高電離真空計付近に多く付着していた。また、イオンポンプ側の真空配管壁にはナトリウムが高速で通過したようなすじ状の跡がみられた。

超高電離真空計においては測定子にナトリウムベーパが付着しており真空配管切断時に空気と反応し燃えた形跡があった。一方、シュルツゲージ測定子およびイオンポンプにはほとんどナトリウムベーパの付着はみられなかった。

6.7.3 交換作業で得られた成果

(1) ナトリウムのドレン性について

当初、構造上から主ヒータ内蔵エコノマイザおよびニッケル膜構造部のナトリウムドレンが十分可能であるか否かが問題であった。ニッケル膜構造部のナトリウムドレンが十分でな

いとニッケル膜構造部の取外しが困難な上無理に外力を加えるためニッケル膜をキズ付けやすい。また、主ヒータ内蔵エコノマイザのナトリウムドレンが十分でない（導通していない）と耐圧、ヘリウムリーク検査を行うことができない。しかし、実際にはニッケル膜構造部にかなりフレキシビリティがありニッケル膜構造部を持ち上げ（ $1/50$ の勾配をつけた）勾配をつけただけでかなりのナトリウムがドレンできた。エコノマイザの外部と内部の間のナトリウムは、上記の方法ではドレンできないため再びニッケル膜構造部を元の状態（下げる）にし再度持ち上げる方法でナトリウムをドレンした。この方法により上記の問題は起らなかつた。

(2) ニッケル膜の交換要領について

ニッケル膜の交換は、治具等は使用せず人手（数人）によってニッケル膜構造部を含む真空装置を持ち上げて取外し・取付けを行った。このとき、新しいニッケル膜を挿入する時に膜内面を案内管にて傷つけてしまった。これは、図4-8に示すようにリップ溶接部からニッケル膜の先端まで約360mmと長く案内管がほとんどニッケル膜の先端まで挿入されている。しかも案内管とニッケル膜の間隙が少ないとおり真空系の重量がかなりあり案内管に対し平行に挿入できなかったためである。

幸い破損したニッケル膜については、傷をつけることなく引抜けた。なお、ニッケル膜構造部を含む真空系の予備品があったため、傷つけたニッケル膜の代わりに取付けた。このときは、ニッケル膜を挿入する上部にパイプを設け予備品をパイプに吊り慎重に挿入した。いずれにしてもCT-HNaのような長いニッケル膜を交換する場合は、ニッケル膜構造部を含む真空系を支えしかもスムーズにスライドできる治具を設けるか図6-24のスタブエンド部にスペーサを設ける必要がある。

7. 実機プラントへの提言

本章は、5章水素計の特性評価、及び6章故障経験及びその処理を基に、実機プラントでの水リーケ検出用水素計の設計、製作、運転、保守補修する上での考慮すべき事項を記述している。また、本提言は実用段階の水素計を考え、コスト低減の立場からも有効な事項を記述している。表7-1に項目あるいは機器別における現状の問題点、提言及び今後検討すべき事項について示す。項目あるいは機器は、1)ニッケル膜、2)イオンポンプ、3)真空ゲージ、4)真空系、5)主加熱器、6)電磁ポンプ、7)ニッケル膜破損検知器、8)ナトリウム中水素計システム、9)カバーガス中水素計システム、10)運転の10項目に分類した。現状の問題点は、まだ明確になっていない事項あるいは今後検討を行なうことにより、より確実な水素計とすべき検討事項を掲げている。提言案及び今後検討すべき事項は従来の各種水素計の使用経験から実機プラントの設計・製作に採用が望ましいと考える内容を記述したものである。また、当該機器あるいは項目ばかりでなく他の機器と整合性を考慮すべき項目についても記述している。提言理由としては、主に50MWSGTで使用された水素計の経験から得られた内容を記述している。今後さらに使用経験を得ることにより、充実した提案とするように考えたい。

8. 結 言

蒸気発生器からの最大のトラブルである伝熱管からの水リークを検出する計測器としての水素計を数多く使用してきて、その使用経験から実プラントで用いる水素計に反映すべき有益な知見が得られた。

水素計の特性評価に関して次のような結果を得た。

- (1) ナトリウム中水素計の校正について、コールドトラップの最低温度から Vissers らの式を用いて求める水素濃度と静的平衡圧から求まる水素濃度とはよく一致し、いずれの方法によっても正しい校正が可能であることがわかった。カバーガス中の校正法は、蒸気発生器のカバーガス部に任意の混合ガス（水素＋アルゴン）を入れ、その濃度をガスクロマトグラフにより測定し、その時の動的平衡圧と比較する方法を用いた。
 - (2) 新しい水素計の使用初期は水素濃度指示のドリフトが大きいため、約 1 ヶ月程度ニッケル膜をナトリウム中に浸漬して、表面状態を安定させてから測定計器として使用すべきであることがわかった。
 - (3) 水素計の出力としては、イオンポンプ出力より真空計出力のほうがノイズが小さく、真空計から水素濃度を求めるほうがよいことがわかった。
 - (4) 500°Cにおけるニッケル膜に対する水素の透過率について、オリフィスタイルのナトリウム中水素計でナトリウムの水素分圧に依存せず $9 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ Torr $^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$ の値が得られ、またカバーガス中水素計でも水素分圧に依存せず $9 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-4}$ Torr $^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}$ の値を得た。
 - (5) オリフィスタイルの水素計は従来のイオンポンプタイプの水素計に比べて校正式の経時変化が少ないことがわかった。（約 1 ヶ月の使用実績現佐）
 - (6) 約 1 万時間運転したナトリウム中水素計のニッケル膜について寿命に影響するような腐食や強度劣化は見られなかった。
 - (7) ニッケル膜のリークはほとんど溶接部で起っているため、長寿命化にはニッケル膜部の溶接施工法、検査法が重要である。
- 水素計の使用経験を通じて水素計の構造等の改良をはかった。
- (1) 水素計の型式について、当初真空室は 1 個であったが水素計の校正時に水リーク検出器の機能が喪失しないよう、静的室、動的室分離型の水素計を用いるようにした。
 - (2) 水素検出時間をできるだけ短かくするため、ナトリウム系及び真空系を当初の水素計より大幅にコンパクトにした。
 - (3) 水素計のニッケル膜とイオンポンプの間にイオンポンプの排気速度に比べて十分小さいコンダクタンスを持つオリフィスを入れることにより、イオンポンプの排気速度が変化しても水素計指示が影響されないようにした。

(4) ニッケル膜の構造に関して、使用中の変形を避けるため外圧型から内圧型に改良した。

水素計の大きなトラブルとして、ニッケル膜の破損、真空系の真空破壊、真空計の破損が生じたが、その原因を把握し、それぞれ改良をはかった。また、水素計を構成する多くの機器等の故障統計を作成し、その点検基準、交換頻度を決めるための参考データを得た。

水素計の特性評価及び故障・処理の経験から実機プラントにおける水リーク検出用水素計の設計・製作・運転・保守補修に反映するため、各構成機器等について、現状の問題点、提言をまとめた。

9. 謝　　辞

本報告書をまとめるに際して、プラント安全工学室、ナトリウム材料開発室等から発行された水素計に関する報告書の一部を引用させていただき、また内外の報告書を参考させていただいたことを感謝いたします。なお、プラント安全工学室の黒羽光男副主任研究員から有益な御助言をいただき感謝の意を表します。また、50MW蒸気発生器試験施設の水素計の運転、保守、補修は試験グループ及び保修グループで実施していただきお礼申上げます。

10. 参考文献

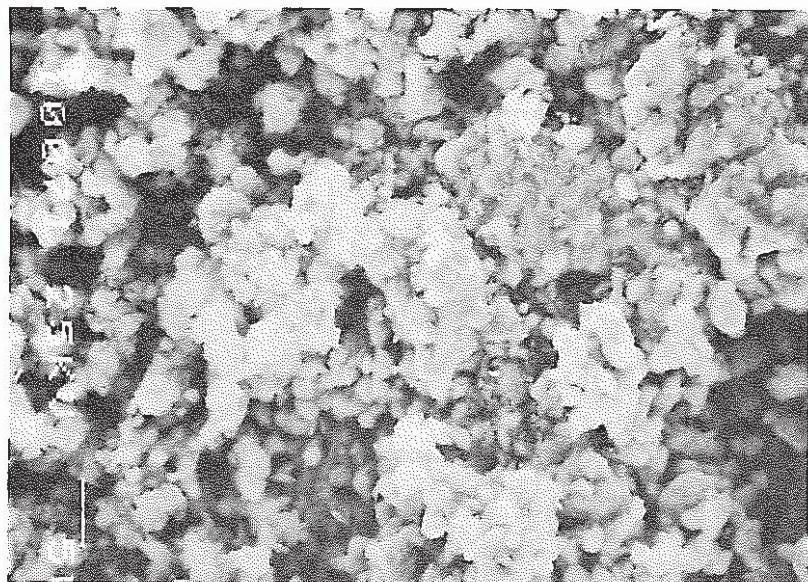
- 1) D.A.Green, "Small Leak Damage and Protection Systems in Steam Generators", Int.Cont.on Liquid Metal Technology in Energy Production, 233 (1976)
- 2) M.Hori, "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactor", Atomic Energy Review, Vol. 18, 707 (1981)
- 3) J.O.Wipple, etal, "Test Results and Evaluation of LLTR Leak Propagation Tests and Supporting Small Leak Tests", Second Joint U.S./Japan LMFBR Steam Generator Seminar, 10-1 (1981)
- 4) R.A.Meyer, etal, "Selection of Steam Generator Design Basis Leaks(DBLs) for LMFBRs", Second Joint U.S./Japan LMFBR Steam Generator Seminar, 11-1 (1981)
- 5) J.M.Mckee, etal, "A Cover-Gas Hydrogen Meter for Sodium Systems", Trans Am. Nucl. Soc., Vol. 22, 557 (1975)
- 6) J.M.Mckee, "Water-to-Sodium Leak Detectors, Development and Testing", Int.Cont.on Liquid Metal Technology in Energy Production, 494 (1976)
- 7) R.A.Davies, etal, "Performance of PFR Hydrogen Leak Detection system Based on Water and Hydrogen Injection into the Steam Generator Units", Int Cont.on Liquid Metal Technology in Energy Production, 502 (1976)
- 8) R.Hans, etal, "Leak Detection of Steam or Water into Sodium in Steam Generators of Liquid-Metal Fast Breeder Reactors", Atomic Energy Review, Vol. 154, 611 (1977)
- 9) A.Kakuta, etal, "Cover Gas Hydrogen Meter for Water Leak Detection", Trans Am Nucl Soc, Vol. 34, 584 (1980)
- 10) W.Haubold, etal, "Monitoring and Control of Impurities in Sodium System", CONF-800507-P2, 15-1 (1980)
- 11) M.M.Osterhout, "Operating Experience with On-Line Meters at Experimental Breeder Reactor-II (EBR-II)", CONF-800507-P2, 15-9 (1980)
- 12) K.Tamayama, etal, "Evaluation Tests on Water Leak Detection System of LMFBR Steam Generator System", CONF-800507-P2, 15-21 (1980)
- 13) J.M.Mckee, etal, "Development and Testing of Chemical Leak Detection System in the U.S.", Second U.S./Japan LMFBER Steam Generator Seminar, 6-1 (1981)
- 14) 法月, 他, "50MW蒸気発生器試験施設における水リーク検出システム評価試験—第5報

- 一注水素試験”, PNC SN941 78-50 (1978)
- 15 小杉, 他, “50MW蒸気発生試験施設における水リード検出システム評価試験—第7報—注水試験”, PNC 941 81-23 (1981)
- 16 錦見, 他, “50MW蒸気発生器試験施設における水リード検出システム評価試験—第8報—注水試験(II)”, PNC SN941 81-259 (1981)
- 17 宮地, 他, “50MW蒸気発生器試験施設における水リード検出システム評価試験—第4報—直接式N₂一隔膜型カバーガス中水素計の開発”, PNC SN941 78-36 (1978)
- 18 玉山, “50MW蒸気発生器試験施設計算機応用(II)—Na—水反応小リード自動判定装置の開発と実証試験—”, PNC N941 82-112 (1982)
- 19 玉山, “50MW蒸気発生器試験施設計算機応用(II)—運転監視システムの開発(その2)—”, PNC N941 82-182 (1982)
- 20 法月, 他, “50MW蒸気発生器試験施設における水リード検出システム評価試験—第1報—”, PNC SN941 77-45 (1977)
- 21 D. R. Vissers, et al, “A Hydrogen-Activity Meter for Liquid Sodium and Its Application to Hydrogen Solubility Measurements”, Nucl Technology, Vol. 21, 235 (1974)
- 22 熊谷, 他, “真空の物理と応用”, 蔵華房発行
- 23 Y. Ebisuzaki, et al, “Diffusion and Solubility of Hydrogen in Single Crystals of Nickel and Nickel-Vanadium Alloy”, J. of Chem. Physics, Vol. 46, 1378 (1967)
- 24 Bennett, et al, Trans Faraday Soc, Vol. 53, 185 (1957)
- 25 C. Liang, “On the Calculation of Thermal Transpiration”, Canadian Journal of Chemistry, Vol. 33, 279 (1955)
- 26 H. H. Podgurski, et al, “Thermal Transpiration at Low Pressure. The Vapor Pressure of Xenon Below 90°K”, J. Physic. chem., Vol. 65, 1343 (1961)
- 27 T. Takaishi, et al, “Thermal Transpiration Effect of Hydrogen, Rare Gases and Methane”, Trans. Fraday Soc. Vol. 60, 2503 (1963)
- 28 K. F. Polter, et al, “Thermal Transpiration Correction in Capacitance Manometers”, Vacuum, Vol. 33(6), 311 (1983)
- 29 山口, 他 “水リード検出システム評価研究”, PNC SJ902 83-03 (1983)
- 30 鐘ヶ江, 他 “ニッケル膜イオンポンプ型ナトリウム中水素計におけるニッケル膜及び真空部最適設計法”(小リード・ナトリウム—水反応試験研究第10報) PNC 941 76-30 (1976)
- 31 鐘ヶ江, 他 “PNC型ナトリウム中水素検出計1号機—小リード・ナトリウム・水反応試験

研究第14報—”PNC SN941 78-85(1978)”—

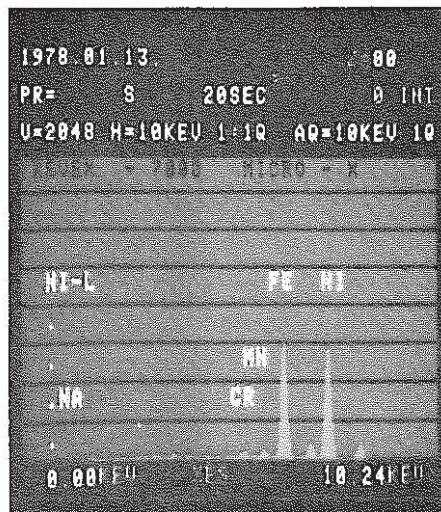
- 32 鐘ヶ江, 他 “PNC型ナトリウム中水素計2号機—動的室・静的室分離型—” (小リーク・ナトリウム・水反応試験研究第15報) PNC SN941 78-91(1978)
- 33 黒羽, 他 “PNC型ナトリウム中水素検出計の長期性能試験” (リーク検出計開発試験第2報) PNC SN941 81-49(1981)
- 34 黒羽, 他 “オリフィス付ナトリウム中水素計の性能特性試験及び最適設計の検討” (リーク検出計開発試験第1報) PNC SN941 79-188(1979)
- 35 根井, 他 “小リークナトリウム水反応試験研究第2報 (リーク検出計の特性試験) PNC SN941 72-14(1972)
- 36 池本, 他 “ナトリウム中水素計の動的及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) PNC SN941 76-28(1976)
- 37 伊藤, 他 “ナトリウム純度管理に関する試験研究 (第12報) 液体ナトリウム水素計の特性及び水素挙動試験” PNC SN941 79-45(1979)
- 38 黒羽, 他 “直接挿入型隔膜式カバーガス中水素計の開発” (リーク検出計開発試験第3報) PNC SN941 81-51(1981)
- 39 武田, 他 “ナトリウム純度管理に関する試験研究 (第20報) 一直浸式ナトリウム中/カバーガス中水素計を使った水素移行試験” PNC SN941 83-30(1983)
- 40 P. M. Magee et al, "Development of Leak Detection Systems for LMFBR Steam Generator in U. S.", U. S./Japan LMFBR Steam Generator Seminar, P11-1(1978)
- 41 藍, 他, “ナトリウム中水素検出器用使用済Ni拡散膜材料試験”, PNC-SJ902 78-02(1978)
- 42 J. M. McKee, et al, "Testing of Hydrogen and Oxygen Meters in Sodium and a Cover-Gas Hydrogen Meter for Steam Generator Leak Detection", CONF-800507-P2, (1980)
- 43 A. Dallos, et al, "Pumping Speeds of Getter-Ion Pumps at Low Pressures," J. Vacuum Science and Technology, Vol. 4(1), 6(1967)
- 44 J. H. Singleton, "Hydrogen Pumping Speed of Sputter-Ion Pumps", J. Vacuum Science and Technology, Vol. 6(2), 316(1969)
- 45 J. H. Singleton, "Hydrogen Pumping by Sputter-Ion Pumps and Getter Pumps", J. Vacuum Science and Technology, Vol. 8(1), 275(1971)
- 46 宮地, 他, “水リーク検出システムの開発(Ⅲ)—Na中水素計の改良—”, 日本原子力学会予稿集(1978年春)
- 47 奥村, 他, “SGナトリウム液面カバーガス部における水素挙動 (リーク検出計開発試験第4

- 報）”，PNC SN941 82-98(1982)
- 48 パリアン社，カタログより抜粋したもの
- 49 日本真空㈱，取扱説明書より抜粋したもの
- 50 八木，他，“イオンポンプ経時変化特性試験報告書”，PNC SJ299 78-12
(1978)
- 51 A. Berman, "Methods of Pumping Speed and Gas Release Measurment in Ionization Gauge Heads—A Review", Vacuum, Vol. 32(8), 497 (1982)
- 52 リーク検出システム評価試験装置—工場試験検査成績書—(1978)
- 53 鐘ヶ江，他，“リーク検出計開発研究プログレスレポート（その1）（小リークナトリウム水反応試験研究第12報）”，PNC SN941 77-190(1977)
- 54 S. W. Stattord, etal, "The Permeability of Hydrogen in Nickel", Scripta Meta, Vol. 9, 1195 (1975)
- 55 M. R. Louthan, etal, "Hydrogen Transport in Austenitic Stainless Steel", Corrosion Science, Vol. 15, 565 (1975)
- 56 W. M. Robertson, "Hydrogen Permeation and Diffusion in Inconel 718 and Incoloy 903", Metallurgical Trans., Vol. 8A, 1709 (1977)
- 57 E. H. Van Deventer, "Hydrogen Permeability of Haynes Alloy-188", J. Nucl. Materials, Vol. 75, 325 (1977)
- 58 坂本，他，“ニッケル中の水素の拡散”，日本金属学会誌，Vol. 42, 331 (1978)
- 59 難波，他，“ニッケル及びハステロイXの水素透過”，日本金属学会誌，Vol. 42(4), 374 (1978)
- 60 Erven H. Van Deventer, etal, "Hydrogen Permeation Characteristics of Some Austenitic and Nickel-Base Alloys", J. Nucl. Materials, Vol. 92, 103 (1980)
- 61 W. M. Robertson, "Hydrogen Permeation, Diffusion and Solution in Nickel", Z. Metallkde, Bd64, 436 (1973)
- 62 佐野，他，“ナトリウム中水素計の開発（ニッケル膜の水素透過特性）”，日本原子力学会予稿集，B76 (1979)
- 63 堀越，真空技術[第2版]，東京大学出版会



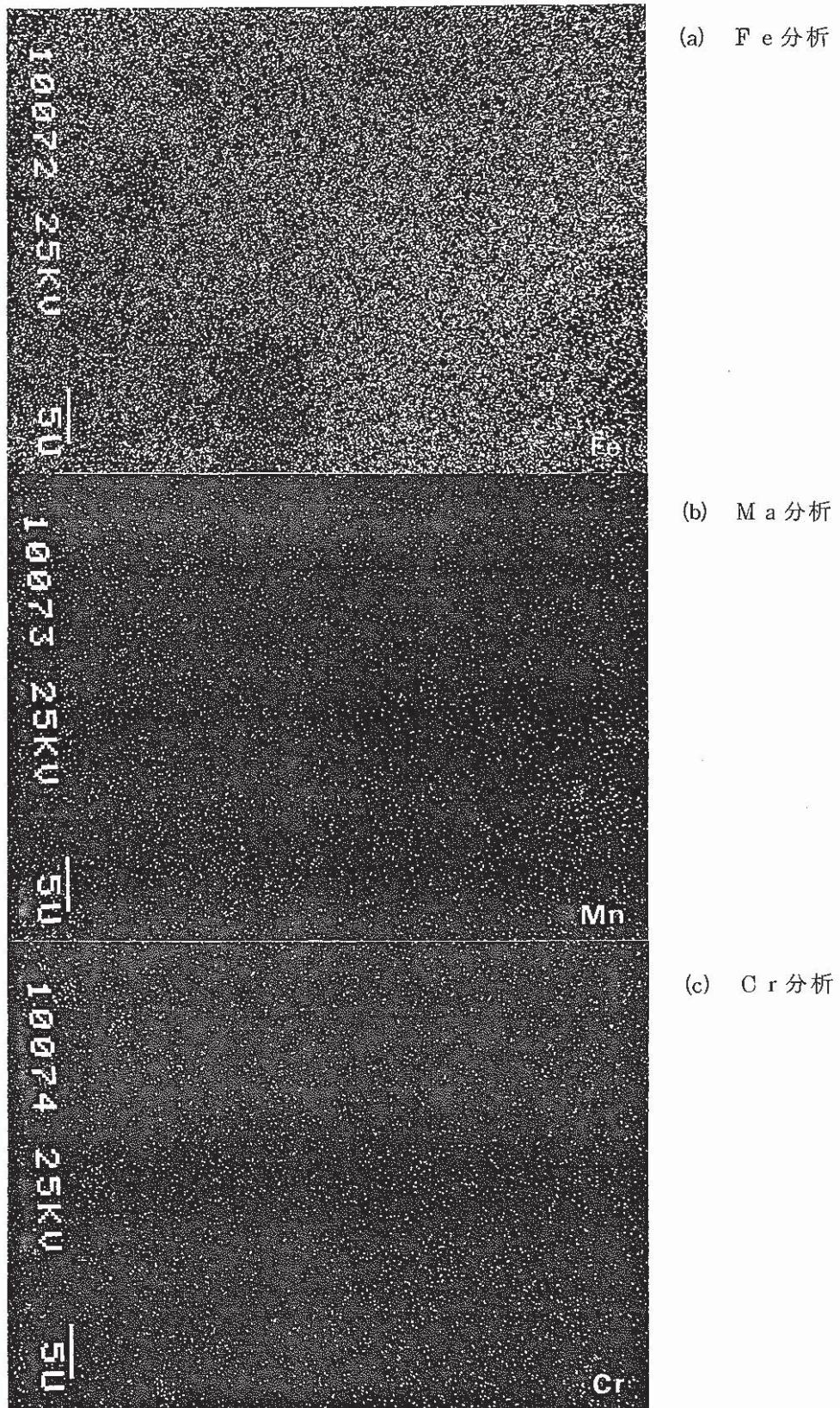
×2000

(a) 直管部表面の付着物
この面を X 線面分析した



(b) (a)図の面成分分析
Fe, Mn, Cr が検出された

Photo 5-1 Surface observation by S.E.M and X-ray
Surface analysis (EV-HNa)
S E Mによる表面観察、X線面分析 (E V - H N a)



(写真5-1の(a)図について各成分で面分析した)

Photo 5-2 Surface observation by S. E. M. and X-ray
Surface analysis (EV-HNa)

SEMによる表面観察、X線面分析 (EV-HNa)

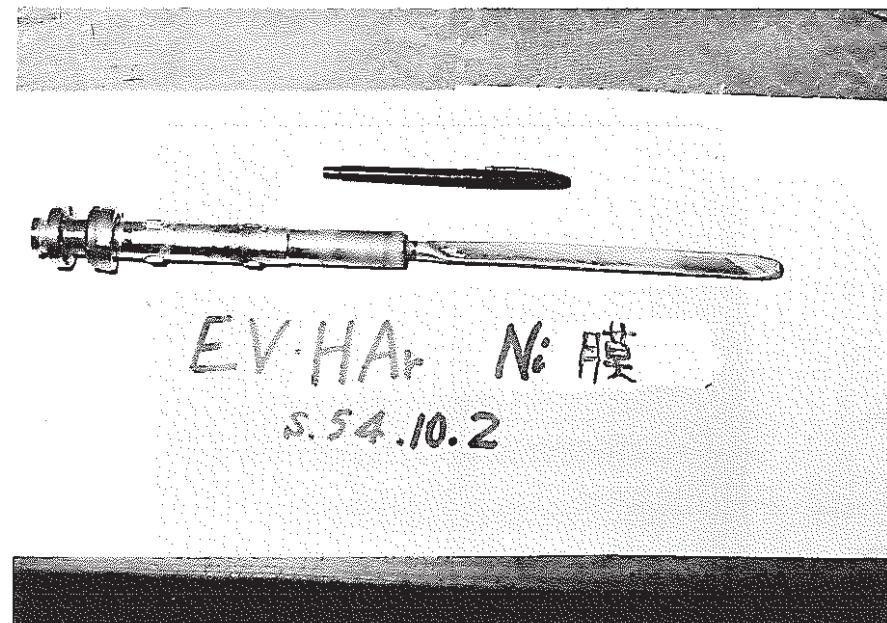


Photo 6-1 Deformation of a nicked membrane in EV-HAr (50MW-CG-MK-I)
EV-HAr (50MW-CG-MK I) ニッケル膜変形状況

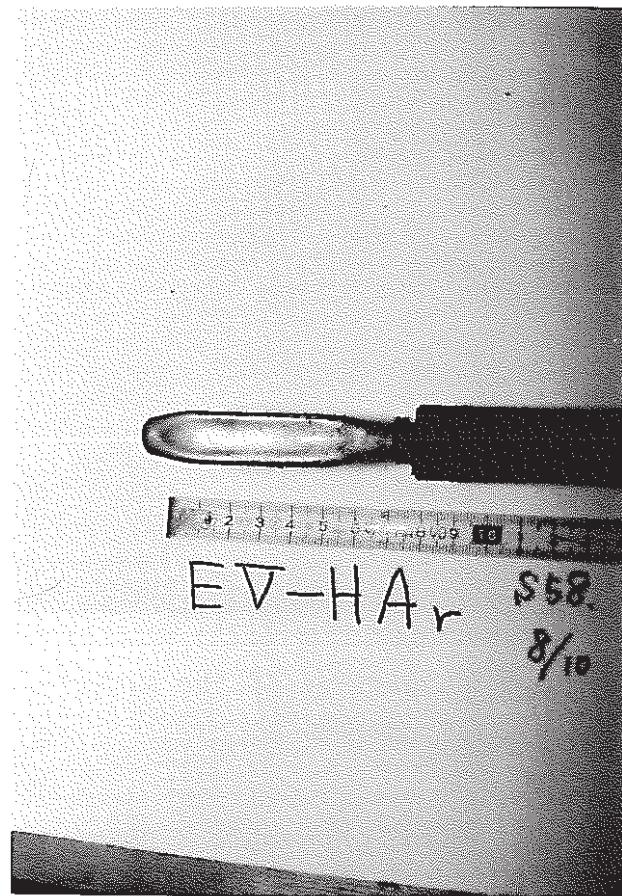


Photo 6-2 Deformation of a nickel membrane in EV-HAr (50MW-CG-MK-III)
EV-HAr (50MW-CG-MK III) ニッケル膜変形状況

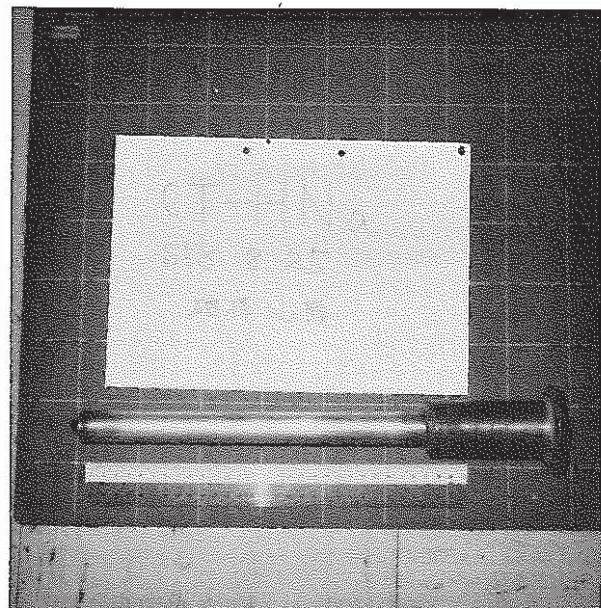


Photo 6-3 The nickel membrane in CH-HNa (PNC type #61 improvement module)
CH-HNa ニッケル膜全体写真



Photo 6-4 Weld portion of the nickel membrane
ニッケル膜溶接部

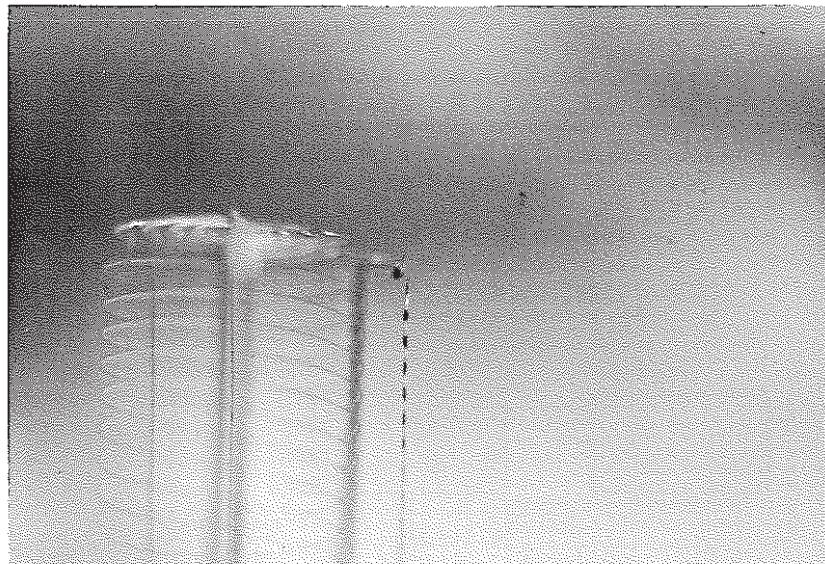
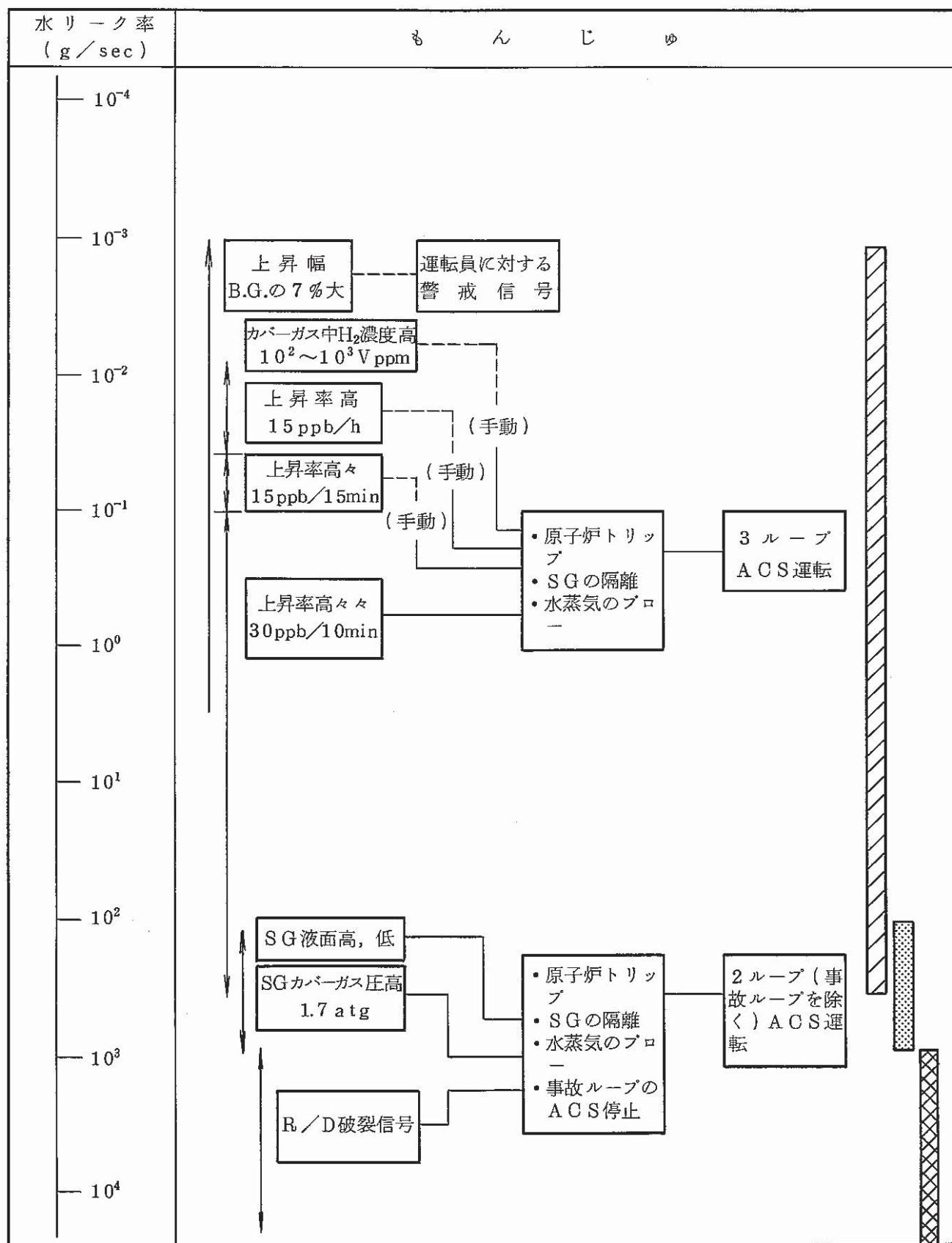


Photo 6-5 Filament break of ultra high ionization vacuum gauge in
CT-HNa

CH-HNa の超高電離真空計 フィラメントの断線

Table 2-1 Detection range of water leak detector in "Monju" plant
 「もんじゅ」プラントにおける水リーク検出器の検出範囲



■ 水素計の水リーク検出範囲。ただし、水リーク率 10^0 g/sec 以上は隣接伝熱管の破損伝播あり。

■ レベル計・圧力計 //

■ 圧力開放板 //

Table 2-2 Main items of the hydrogen meter for "Monju" plant

「もんじゅ」水素計の主要目

項 目	ナトリウム中	カバーガス中
型 式	P N C 型 2 号機 MK IV	* ⁴ 同 左
測 定 範 囲	5 0 ppb ~ 1 0 ppm	1.0 ~ 1 0 0 0 V ppm
検 出 感 度	— * ¹	— * ¹
検 出 時 間	* ² 2 0 sec * ³ 4 0 sec	* ² 2 5 sec * ³ 4 0 sec
サンプリング流量	5 ℥ / min	6.7 ℥ / min (1.8 at g , 1 8 0 ℃)

* 1 所定の検出設定・誤差範囲が達成できること。

* 2 水素計の輸送時間（サンプリング分岐点～ニッケル膜まで）

* 3 ニッケル膜の応答時間

* 4 静的室なし

Table 3-1 Operational experience of in-sodium hydrogen meters
ナトリウム中水素計使用状況

施設名	水素計型式	年											
		71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
50MWSG 試験施設	50MW-MK I (EV-HNa)			○	- - -	□	▽						
	50MW-MK II (EV-HNa)					□	- - -	▽					
	50MW-MK III (EV-HNa)					□	- - -	(No.1)					
	PNC型2号機MK IV (EV-HNa)					□	- - -	(No.2)					
	50MW-MK I (SH-HNa)		○	- - -	□	▽							
	50MW-MK II (SH-HNa)				□	- - -							
	東芝型 (SH-HNa)												
	PNC型1号機改良型 (NaP-HNa)					○	- - -	□					
	PNC型1号機改良型 (CT-HNa)					○	- - -	□					
小リーク・ナ トリウム-水 反応試験施設	PNC-MAP I型 バリアン社製	○	- - -	□	- - -	▽							
	PNC型1号機MK I		○	- - -	□	▽							
	PNC型1号機MK II			○	- - -	□	▽						
	PNC型2号機MK I			○	- - -	□	▽						
	" MK II(1)				○	- - -	□	▽					
	" MK II(2)					○	- - -	□	▽				
	" MK II(3)						○	- - -	□	▽			
	" MK II(4)							○	- - -	□	▽		
	" MK II(5)								○	- - -	□	▽	
	" MK III									○	- - -	□	▽
	" MK IV										□	- - -	▽
1MWSG 試験施設	PNC-MAP I改良型		- - -	□	- - -	▽							
	PNC型2号機MK II(2)									□	- - -	▽	
ナトリウム流 動伝熱および 燃料ピン流動 試験施設	PNC型2号機MK II(3)									□	- - -	▽	
	" (4)									□	- - -	▽	
	" (5)									□	- - -	▽	
ナトリウム純 度管理試験施 設	PNC型2号機MK II(1)									□	- - -	▽	
	W.H社製						○	- - -	□	- - -	▽		

Table 3-2 Comparison of specification of in-sodium hydrogen meter in Oarai Engineering Center PNC
動燃大洗工学センターにおける各ナトリウム中水素計仕様比較表

仕様項目 水素計型式	水素濃度換算	Ni膜形状	Ni膜内圧型 外圧型	強制循環用ポンプの有無	静的平衡圧測定用隔壁弁の有無	真空系粗引用ポンプ	Ni膜破損検出方式	Ni膜静的動的分離型／共用型	Na加熱器エコノマイザ分離型／一体型	Ni膜肉厚(mm)	Na/Arの戻り	真空系オリフィス	製作年月	設置場所	参考文献	製作メーカ
50MW-MK I	質量分析器	Uチューブ4本	内圧型	無	無	ソープションポンプ	プラグ方式	共用型	分離型	0.25	ストレージタンク	無	1974年2月	50MW SG		日立
50MW-MK II	電離真空計イオンポンプ	*	*	*	*	ソープションポンプ	熱電対	*	*	0.25	*	*	1975年8月	50MW SG		日立
50MW-MK III	*	*	*	*	*	SORB-ACポンプ	接点式	*	*	0.25	*	*	1977年6月	50MW SG		日立
PNC型2号機MK IV	電離真空計円筒各1本	*	有	有	-	-	-	分離型	一体型	0.5	主系統	有	1982年8月	50MW SG		東芝
東芝型	*	全半球円すい型1本	*	*	*	-	-	-	*	0.5	*	*	1982年8月	50MW SG		*
PNC型1号機(改良型)	電離真空計イオンポンプ	円筒1本	*	*	*	-	熱電対	共用型	*	0.5	*	無	1978年10月	50MW SG		MAPI
PNC-MAP型	質量分析器	円筒1本	外圧型	*	無	ソープションポンプ	熱電対	*	分離型	0.5	*	*	1972年4月	SWAT2	SN941 72-14	*
バリアン型	電離真空計イオンポンプ	半球形	内圧型	*	有	-	-	*	*	0.25	*	*	1974年12月	SWAT2	SN941 76-28	バリアン
PNC型1号機MK I	*	円筒3本 200cm ³	*	*	*	-	-	*	一体型	0.5	*	*	1976年6月	SWAT2	SN941 78-85	助川電気
PNC型1号機MK II	*	円筒3本 150cm ³	*	*	*	-	-	*	*	0.5	*	*	1976年10月	SWAT2	*	*
PNC型2号機MK I	*	円筒各1本	*	*	*	-	熱電対	分離型	*	0.5	*	*	1977年6月	SWAT2	SN941 78-91	*
PNC型2号機MK II	*	*	*	*	*	-		*	*	0.5	*	*	1977年10月	各施設*1	SN941 81-49	
PNC型2号機MK III	*	*	*	*	*	-		*	*	0.5	*	*	1978年	SWAT2		
PNC-MAP I改良型	質量分析器	円筒1本	外圧型	*	無	ノーブルポンプ	熱電対	共用型	分離型	0.5	*	*	1973年1月	1MW SG		MAPI
WH社型	電離真空計イオンポンプ	段付円筒1本	*	無	有	-	-	*	*	0.25	*	*	1975年10月	純度管理施設	SN941 79-45	WH

*1 ナトリウム純度管理試験施設

ナトリウム流動伝熱試験施設

燃料ピン流動試験施設

Table 3-3 Operational experience of in-cover gas hydrogen meters
カバーガス中水素計使用状況

施設名	水素計型式名	年											
		71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
50MW SG 試験施設	50MW-CG-MK I (EV-HA r)								□	→			
	50MW-CG-MK II (EV-HA r)								□	→			
	50MW-CG-MK III (EV-HA r)								□	→			
	50MW-CG-MK IV (EV-HA r)												↑
	PNC型-CG-1号機 (SH-HA r)								□				→
小リーク、ナトリウム 一水反応試験施設	強制サンプリング型		□	---									
	直接挿入型								---	□	→		
1MW SG 試験施設	1MW-CG								□	---			
ナトリウム純度管理試 験施設	直接挿入型									□			

Table 4-1 Basic specification of the in-sodium hydrogen meters in 50MW SGTF (1/4)

50MW SGTFにおけるナトリウム中水素計基本仕様

項目	50MW-MK I (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MK II (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MK III (蒸発器用)	PNC 2号機MK IV (蒸発器用)	東芝型 (過熱器用)	PNC 1号機改良型 (NaP出口用,CT出口用)
1) 設計温度 (Na系)		520°C	520°C	520°C	520°C	550°C
2) 設計圧力 (Na系および真空系)		-1~10kg/cm²g	-1~10kg/cm²g	-1~10kg/cm²g (真空構造部は -1~0kg/cm²)	-1~10kg/cm²g (真空構造部は -1~0kg/cm²)	-1~10kg/cm²g
3) 測定流体	液体金属Na	液体金属Na	液体金属Na	液体金属Na	液体金属Na	液体金属Na
4) Ni膜						
① 型式	内圧型	内圧型	内圧型	内圧型	内圧型	内圧型
② 厚さ	0.25mm	0.25mm	0.25mm	0.5mm	0.5mm	0.5mm
③ 面積	147cm²	147cm²	147cm²	37.3cm²動的室 148.0cm²静的室	19.4cm²	208cm²
④ 材質	Ni Low C	Ni Low C	Ni Low C	Ni 201相当	Ni 201相当	Ni 201相当
5) イオンポンプ排気速度 (公称水素排気速度)		33ℓ/sec	22ℓ/sec	33ℓ/sec動的室 2.8ℓ/sec静的室	10ℓ/sec	33ℓ/sec 2.8ℓ/sec
6) 超高電離真空計測定範囲		5×10⁻³~ 1×10⁻¹⁰ Torr	5×10⁻³~ 1×10⁻¹⁰ Torr	5×10⁻³~ 1×10⁻¹⁰ Torr	5×10⁻³~ 1×10⁻¹⁰ Torr	5×10⁻³~ 1×10⁻¹⁰ Torr
7) シュルツゲージ測定範囲	1~1×10⁻⁵ Torr	1~1×10⁻⁵ Torr	1~1×10⁻⁵ Torr	1~1×10⁻⁵ Torr	—	1~1×10⁻⁵ Torr
8) 真空系内容積	1室	1室 (隔離弁なし)	1室 (隔離弁あり)	2室分離型 動的室 静的室	1室 (隔離弁あり)	1室 (隔離弁あり)
① 全体		1493cm³	1162cm³	472cm³ 515cm³	352cm³	864cm³
② 静的平衡圧測定部			460cm³	— 346cm³	180cm³	766cm³
9) 真空系内表面積						
① 全体		1200cm²	1003cm²	606cm² 763cm²	527cm²	1482cm²
② 静的平衡圧測定部			498cm²	— 518cm²	297cm²	1302cm²
10) 真空系コンダクタンス		40.0 ℓ/sec	45.4 ℓ/sec		5.5 ℓ/sec	32.8 ℓ/sec
11) オリフィスコンダクタンス	—	—	—	2.49 ℓ/sec	1.0 ℓ/sec	—

Table 4-1 Basic specification of the in-sodium hydrogen meters in 50MW SGTF (2/4)
50MW SGTFにおけるナトリウム中水素計基本仕様

項目	50MW-MKⅠ (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MKⅡ (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MKⅢ (蒸発器用)	PNC2号機MKⅣ (蒸発器用)	東芝型 (過熱器用)	PNC1号機改良型 (NaP出口用,CT出口用)
12 測定範囲		50 ppb~3 ppm	50 ppb~1 ppm	45 ppb~10 ppm	45 ppb~10 ppm	50 ppb~10 ppm
13 検出感度		±10%の濃度変化 の検出	±10%の濃度変化 の検出	±10%の濃度変化 の検出	±10%の濃度変化 の検出	±10%の濃度変化 の検出
14 応答速度		検出系入口から水素 濃度表示まで40秒 以内	検出系入口から水素 濃度表示まで40秒 以内	検出系入口から水素 濃度表示まで30秒 以内	検出系入口から水素 濃度表示まで30秒 以内	検出系入口から水素 濃度表示まで40秒 以内
① 輸送時間*1	9 sec (EV) 7.5 sec (SH)	9 sec (EV) 7.5 sec (SH)	9 sec	17.4 sec	23.9 sec	14.7 sec (12.5 sec*2) NaP 10.0 sec (9.1 sec*2) CT
② 応答遅れ時間 (63%)	10 sec (EV・SH)	10 sec (EV・SH)	10 sec	40 sec	40 sec	40 sec (NaP・CT)
15 イオンポンプ(1)		なし	なし		なし	
① 型式				PST-AP特型 (静的室)		PST-AP特型 (低濃度用)
② 動作電圧				DC 4.5 kV		DC 4.5 kV
③ 排気速度				1 ℓ/sec (N ₂) 2.8 ℓ/sec (H ₂)		1 ℓ/sec (N ₂) 2.8 ℓ/sec (H ₂)
④ ノイズ電流				2 × 10 ⁻⁷ A以下		2 × 10 ⁻⁷ A以下
16 同上コントローラ(1)		なし	なし		なし	
① 型式				GST-AP特型		GST-AP特型
② 入力電圧				AC 200V, 50Hz		AC 200V, 50Hz
③ 出力電圧				DC 4.5 kV		DC 4.5 kV

*1 構造データから求めた計算値

*2 ナトリウム中酸素計との並行運転の場合

Table 4-1 Basic specification of the in-sodium hydrogen meters in 50MW SGTF (3/4)

50 MW SGTFにおけるナトリウム中水素計基本仕様

Table 4-1 Basic specification of the in-sodium hydrogen meters in 50MW SGTF (4/4)

50MW SGTFにおけるナトリウム中水素計基本仕様

項目	50MW-MK I (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MK II (蒸発器用,過熱器用)	50MW-MK III (蒸発器用)	PNC 2号機MK IV (蒸発器用)	東芝型 (過熱器用)	PNC 1号機改良型 (NaP出口用,CT出口用)
④ 測定範囲	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr	$5 \times 10^{-3} 1 \times 10^{-10}$ Torr	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-10}$ Torr
⑩ シュルツ型真空計						
① コントロール型式		HIG-C1型	GI-SH型	GI-SH型	なし	GI-SH型
② 測定子		HIG-N ₁	WI-SH	WI-SH		WI-SH
③ 入力電圧		AC100V, 50Hz	AC100V, 50Hz	AC100V, 50Hz		AC100V, 50Hz
④ 測定範囲		$1 \sim 1 \times 10^{-5}$ Torr	$1 \sim 1 \times 10^{-5}$ Torr	$1 \sim 1 \times 10^{-5}$ Torr		$1 \sim 1 \times 10^{-5}$ Torr
⑪ 超高真空バルブ		VUH-401	951-7150 メタルバルブ	VUH-251 VUH-401 カットバルブ (1/4インチ)	Series 204	VUH-251 VUH-401 パックレスバルブ 1/2B
⑫ バリアブルリーキバルブ		なし	なし	VLV-3型	なし	VLV-3型

Table 4-2 Basic specification of the in-covergas hydrogen meters in 50MW SGTF (1/4)
50MW SGTFにおけるカバーガス中水素計基本仕様

項目	50MW-CG-MK I~MK IV (蒸発器用)	PNC型-CG-1号機(過熱器用)
1) 型式	隔膜式カバーガス中水素検出計	同 左
2) 測定流体	Na蒸気を含むArガス	同 左
3) 設計温度	600°C	550°C
4) 設計圧力	-1~10kg/cm ² g	同 左
5) 測定範囲	1~10 ⁴ V PPM	1×1000V PPM
6) 検出感度	±10%の濃度変化の検出	同 左
7) 応答速度	検出計入口から水素濃度表示まで約40秒	同 左
8) 基準ガス流量	19.8ℓ/min	13.7ℓ/min
9) Ni膜部温度	500°C(定常時)	同 左
10) イオンポンプ排気速度	8ℓ/sec(N ₂)	33ℓ/sec(H ₂)
11) イオンポンプ使用圧力範囲	5×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻⁸ Torr	3×10 ⁻⁵ ~5×10 ⁻⁸ Torr
12) 真空系コンダクタンス オリフィスコンダクタンス	5ℓ/sec	32.8ℓ/sec
13) 真空系内表面積(体積)	MKIII 0.188ℓ/sec, MKIV 0.518ℓ/sec	
① 全体 (イオンポンプは除く)	516cm ²	1482cm ²
② 平衡圧測定部	254.5cm ²	1302cm ²
14) 真空系内容積 ① 全体	168cm ³	864cm ³
② 平衡圧測定部	223cm ³	766cm ³

Table 4-2 Basic specification of the in-covergas hydrogen meters in 50MW SGTF (2/4)
50MW SGTFにおけるカバーガス中水素計基本仕様

項目	50MW-CG-MK I~MK IV (蒸発器用)	PNC型-CG-1号機(過熱器用)
15 Ni膜(検出部)		
①型式	Ni膜外圧型(1個)	内圧型(1個)
②材質	高純度ニッケル材(ニッケル201相当)	ニッケル201
③膜厚	0.25mm(MK I, II, III), 0.5mm(MK IV)	0.50mm
④Ni膜寸法	$\phi 10 \times 68\text{mm}$	$\phi 25 \times 265\text{mm}$
⑤有効Ni膜面積	MK I MK II MK III MK IV 6.28cm^2 2.0cm^2 2.0cm^2 21.2cm^2	2.08cm^2
16 イオンポンプ	イオンポンプ (型式) バリアン社製Model-#911-5005 (排気速度) 8ℓ/sec (N_2)	高濃度測定用イオンポンプ (型式) PST-1C特型 (動作電圧) DC 5 kV (排気速度) 33ℓ/sec (H_2) (耐圧) $1.0\text{kg/cm}^2\text{g}$ (ノイズ電流) $5 \times 10^{-7}\text{A}$ 以下 低濃度測定用イオンポンプ (型式) PST-AP特型 (動作電圧) DC 4.5 kV (排気速度) 2.8ℓ/sec (H_2) (耐圧) $1.0\text{kg/cm}^2\text{g}$

Table 4-2 Basic specification of the in-covergas hydrogen meters in 50MW SGTF (3/4)
50MW SGTFにおけるカバーガス中水素計基本仕様

項目	50MW-CG-MK I~MK IV (蒸発器用)	PNC型-CG-1号機(過熱器用)
17) イオンポンプコントローラ	<p>イオンポンプコントローラ</p> <p>(型式) バリアン社製Model-N921-0015</p> <p>(レンジ切替) $5\mu A$, $50\mu A$, $500\mu A$, $5mA$, $50mA$, $5kV$</p>	<p>高濃度測定用イオンポンプコントローラ</p> <p>(型式) GST-05A(S)型</p> <p>(入力電圧) AC200V, 50Hz</p> <p>(出力電圧) DC5kV(max)</p> <p>(レンジ切替) $100mA$~$1\mu A$ (Full Scale) および kV, Torr</p> <p>(ノイズ電流) $5 \times 10^{-7} A$以下</p> <p>低濃度測定用イオンポンプコントローラ</p> <p>(型式) GST-AP(S)型</p> <p>(入力電圧) AC100V, 50Hz</p> <p>(出力電圧) DC4.5kV</p> <p>(レンジ切替) 10^{-3}~10^{-8} Torr および kV, Torr</p> <p>(ノイズ電流) 2×10^{-7} 以下</p> <p>(レコード出力) 0~10mV</p>
18) 真空計およびコントローラ	<p>ミリトルゲージ</p> <p>(コントローラ) バリアン社製Model-N1008</p> <p>(測定範囲) 0.6~1×10^{-6} Torr</p> <p>(ベーキング温度) $450^\circ C$</p>	<p>シュルツ型真空計</p> <p>(コントローラ) GI-SH(S)型</p> <p>(測定子) WI-SH (ヌード型に改造コンフラッシュフランジUFG-070FH付)</p> <p>耐圧 $10kg/cm^2g$</p> <p>(入力電圧) AC100V, 50Hz</p>

Table 4-2 Basic specification of the in-covergas hydrogen meters in 50MW SGTF (4/4)
50 MW SGTFにおけるカバーガス中水素計基本仕様

項 目	50 MW-CG-MKI~MKN (蒸発器用)	PNC型-CG-1号機(過熱器用)
19 循環ポンプ	(型式) イワキBA-330S型 (1981年2月以前は、USA製のベローズ型) (流量) 30 ℥/min (最大使用圧力) 3kg/cm ²	(測定範囲) 1~1×10 ⁻⁵ Torr (レコーダ出力) 0~10mV 超高真空電離真空計 (コントローラ) GI-N ₃ 型 (測定子) WIN-N ₂ 特型(ヌード型IC改造コンフラットフランジUFC-070FH付) 耐圧 10kg/cm ² (入力電圧) AC100V, 50Hz (測定範囲) 5×10 ⁻³ ~1×10 ⁻¹⁰ Torr (レコーダ出力) 0~10mV
20 ベーパトラップ	1基	同左
21 バッファータンク	1基	(1981年2月以前はダイヤフラム型)
22 フィルター	1基(アブソリートフィルター)	1基(還流充填層式)
23 ドレンポット	1基	1基
24 流量計	サーマルマスフローメータ	オリフィス型流量計

Table 4-3 Basic specification of the gas-chromatograph
ガスクロマトグラフ基本仕様

項 目	E V 用 仕 様	S H 用 仕 様
サンプリング装置		
流 量	2 ℥/min (定格)	同 左
流 体	Arガス	同 左
圧 力 (常 用)	0.4~1.2 kg/cm ² g (入口)	0.75~1.95 kg/cm ² g (入口)
分 析 装 置		
測 定 範 囲		~10000 ppm
測 定 精 度		フルスケールの±2%
分 析 時 間		2 min/流路
サンプリングガス温度	常 温	同 左

Table 5-1 Summary of the measured results of the pumping speed of ionization gauges

電離真空計の排気速度測定結果一覧

Investigator	Type of gauge head	Pressure Pa (torr)	Pumping speeds $\text{dm}^3 \text{s}^{-1}$ (ls^{-1})	Anode-cathode voltage V	Emission current A	Gas	Method	Remarks
Bloomer and Haine 1953	Conventional triode spiral ion collector	5×10^{-3} (5×10^{-5})	4×10^{-3}	210	1.25×10^{-3}	Residual	Static	Measured on the upper side of (log p.t) curve
	BA	1×10^{-5} (1×10^{-7})	8×10^{-2}					Measured on the lower side of (log p.t) curve
Alpert ⁴⁴ 1953	BA	1×10^{-2} (1×10^{-3})	2×10^{-2}		1×10^{-3}	N ₂	Static	
Varnerin and Carmichael ³⁰ 1955	BA	8.5×10^{-3} (8.5×10^{-5})	1×10^{-4}	180	1×10^{-2}	He		Clean glass wall
Bills and Allen ²⁰ 1955	BA	8×10^{-5} (8×10^{-8})	3×10^{-1}			N ₂	Not specified	Metallic film on the glass wall
Young ²⁰ 1956	BA	2×10^{-3} (2×10^{-5})	1×10^{-1}			N ₂	Static	Metallic film on the wall
	to	1×10^{-2} (1×10^{-4})	3×10^{-2}	145	1×10^{-2}		Static	Walls coated with Aquadag at the grid potential
Bills and Carleton 1958	BA	5×10^{-2} (5×10^{-4})	4×10^{-3}					Metallic film on the wall
	to	1×10^{-2} (1×10^{-4})	5×10^{-1}	118	1×10^{-2}	N ₂	Dynamic	Very thin film on the glass walls
Kornelsen ¹⁰² 1960	Inverted magnetron	1.25×10^{-4} (1.25×10^{-6})	3.7×10^{-1} 1.8×10^{-1}			O ₂		Thin film
		1×10^{-4} (1×10^{-6})	3×10^{-2}			He		Visible film
Rhodin and Rowner ¹⁰³ 1960	Modified magnetron	1×10^{-8} (1×10^{-10})	2.5×10^{-1}	6000		Ar	Static	Metal film
Cobic et al ⁹⁷ 1961	BA	1×10^{-3} (1×10^{-5})	2×10^{-1}			He		
	to	1×10^{-5} (1×10^{-7})	1.4×10^{-1}	5000		N ₂	Static	Baked at 400°C
		1×10^{-7}	1.5×10^{-1}			O ₂		
		1×10^{-2} (1×10^{-4})	6.2×10^{-3}			He		
	to	1×10^{-3} (1×10^{-5})	7×10^{-3}			Ne		
Cobic et al ²³ 1961	BA	5×10^{-1} (5×10^{-3})	1.42×10^{-1}					
	to	5×10^{-2} (5×10^{-4})	1.25×10^{-1}	250	1×10^{-2}	N ₂	Static	Measured at the beginning of the second pump-down
Leck and Garter ¹ 1960	BA	1×10^{-4} (1×10^{-6})	1×10^{-2}		1×10^{-3}	Ar	Dynamic	Measured at the beginning of the third pump-down
Lefferty ⁹⁰ 1961	Hot cathode magnetron	1.2×10^{-5} (1.2×10^{-7})	3×10^{-3}	300	1×10^{-7}	CO	Static	H=250 Oe
Hobson ⁴¹ 1961	BA	1×10^{-5} (1×10^{-7})	2.5×10^{-1}	300	8×10^{-3}	N ₂	Dynamic	After saturation of chemical pumping
Barnes et al ⁷⁷ 1962	Redhead's magnetron	6.5×10^{-4} (6.5×10^{-6})	1.7×10^{-1}			He		
	to	1.75×10^{-4} (1.75×10^{-6})	2.5×10^{-1}			N ₂		
			2.0×10^{-1}			H ₂	Static	B=0.1 T (1kg)
			3.4×10^{-1}	5000		O ₂		
			1.7×10^{-1}			Ar		
			2.4×10^{-1}			CO ₂		
Hobson and Edmonds ¹⁰⁴ 1963	BA	1×10^{-7} (1×10^{-9})		1.18 $\times 10^{-2}$	105	8	He	Static
	to	1×10^{-10} (1×10^{-12})						Clean walls at 77K
Ishikawa ³⁹ 1955	BA	1×10^{-5} (1×10^{-7})	1.7×10^{-3}			He		
			7.2×10^{-3}	105	8×10^{-3}	Ar	Static	Coated bulbs at zero voltage with respect to the collector
Byvic and Bradford ¹⁰¹ 1966	BA	1×10^{-3} (1×10^{-5})	1.2×10^{-2}			Kr	collector	
	to	1×10^{-5} (1×10^{-7})	9.6×10^{-2}			H ₂		
			6.9×10^{-2}		4×10^{-3}	O ₂	Static	
			5.4×10^{-2}			N ₂		
			5.7×10^{-2}			He		

Table 5-2 Comparison of the Conductance of an Orifices

各使用オリフィスの仕様

水素計名	イオンポンプ 排 気 速 度 $S_P (\ell/\text{sec})$	オリフィス コンダクタンス $C_{MP} (\ell/\text{sec})$	C_{MP}/S_P	実効コンダクタンス $C_{MP} (\ell/\text{sec})$
P N C 型 2 号機 - M K IV	13 (N_2) 33 (H_2)	2.49	0.075	2.32
東芝型	8 (N_2)	1.0	0.125	0.89
50 MW - CG - MK III	8 (N_2)	0.52	0.065	0.49

Table 5-3 Permeability of hydrogen through nikel membrane
ニッケル膜に対する水素の透過率(ガス中試験)

No.	温 度 (°C)	压 力 (Torr)	透 過 係 数 (Torr ^{1/2} ·cm/sec)	活性化エネルギー (Kcal/mol)	著 者
1	370-693	7.6-760	8.94×10^{-1}	14.20	V.Lombard
2	403-745	760	7.85×10^{-1}	14.85	H.G.Deming
3	180-550	760	1.44	13.80	G.Borelius
4	471-798	114-760	8.33×10^{-1}	10.59	B.C.Hendrid
5	376-600	760	9.26×10^{-1}	13.22	W.R.Ham
6	680-1060	760	8.33×10^{-1}	15.16	W.Baukloh
7	680-1060	760	7.97×10^{-1}	14.64	W.Baukloh
8	600-850	760	3.69×10^{-1}	16.39	W.Baukloh
9	248-750	$7.6-8.5 \times 10^4$	6.81×10^{-1}	12.04	C.J.Smithel
10	372-897	7.6-760	4.46×10^{-1}	13.36	C.B.Post
11	251-372	7.6-760	4.30×10^{-1}	13.56	C.B.Post
12	350-600	7.60×10^4	6.35×10^{-1}	12.75	A.A.Shcherbak
13	451-877	760	8.66×10^{-1}	13.27	H.H.Grimes
14	250-350	760	1.33	13.50	Y.I.Belyakov
15	350-600	760	1.08	12.70	Y.I.Belyakov
16	650-820	760	4.33×10^{-1}	13.77	E.A.Steigerwal
17	400-850	228, 760	7.17×10^{-1}	13.20	J.K.Gorman
18	200-420	760	1.29	13.16	Y.Ebisuzaki
19	360-850	760	1.51	12.00	P.V.Geld
20	80-250	760	4.85×10^{-1}	13.10	J.A.Donovan
21	150-723	760	3.97×10^{-1}	12.53	W.Fischer
22	40-190	760	7.05×10^{-1}	12.40	R.H.Collins
23	24-500	760-2,280	7.74×10^{-1}	13.09	W.M.Robertson
※	24-1060	$7.60-8.51 \times 10^4$	6.64×10^{-1}	13.04	W.M.Robertson

※ No.1～No.23のbest value

Table 5-4 Influence of discharge gas
従来の放出ガス量仕様値での影響比較例

		PNC型2号機-MKV	50MW-CG-MKV
Ni 膜面積 (cm ²)	動的室	37.3	21.2
	静的室	148	
Ni 膜厚さ (cm)	0.05		0.05
オリフィスコンダクタンス (ℓ/sec)	動的室	2.49	0.518
	静的室	2.8*	
真空系内容積 (cm ³)	動的時	472	402
	静的時	346	223
真空系内表面積 (cm ²)	動的時	606	564
	静的時	518	329
動的平衡圧測定範囲(仕様)	45 ppb~10 ppm		1~10,000 V ppm
放出ガスの影響	動的時	Max. 0.7%	Max. 0.3%
	静的時	Max. 0.9%	Max. 0.8%

* イオンポンプ排気速度

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (1 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
①	1974年 8月22日	50MW MKI (EV-HN a)	質量分析器用イオンポンプコントローラトリップ	イオンポンプコントローラユニット内の点検結果から、プレッシャーコネクターに配線されているAC200Vラインとアースラインが接触し、スパークしたと考えられた。	下記部品を交換し、配線処理した。 ○プレッシャーアンタロックコネクター ○トリガーコネクター ○NFB
②	1974年 8月26日	50MW MKI (EV-HN a)	イオンポンプコントローラトリップ (上記質量分析器用のイオンポンプコントローラか不明確)	イオンポンプコントロールユニット内圧力コネクターの断線(断線理由は上記での復旧ミスか不明確)	○コネクター交換 ○回路点検
③	1974年 9月3日	50MW MKI (SH-HN a)	真空計不調 エミッション電流設定できない。	コントローラ内の抵抗断線 (抵抗断線原因不明確、同仕様の抵抗(100KΩ)交換にて作動良好)	抵抗交換
④	1974年 9月8日	50MW MKI (SH-HN a)	質量分析器不調 標準水素濃度を流した状態でEM(二次電子倍増管)の出力がでない。	レンズリベラ電源の抵抗断線 (抵抗断線原因不明確)	
⑤	1974年 11月24日	50MW MKI (EV-HN a)	イオンポンプコントローラトリップ	配線がクロスしていたため発熱によりケーブル被覆が溶けて接触し過電流となりNFB作動	ケーブル修理
⑥	1974年 12月8日	50MW MKI (SH-HN a)	真空計不調 真空度指示が10 ⁻⁷ Torrレンジにおいて0以下に振り切れる。	不明	
⑦	1975年 2月19日	50MW MKI (SH-HN a)	イオンポンプ出力が0.25mAから1mAに瞬間に変化した。	イオンポンプ自体の排気不調と考えられる。 イオンポンプチタン層にたたき込まれたガス分子が、再度脱離を行うことにより、瞬時的变化が生じる。	

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (2 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑧	1976年 4月13日	ガスクロ	指示不良 校正時指示が0指示	リレー不良のため、ガスクロ装置内ポートバルブ不作動	リレー交換調整
⑨	1976年 5月10日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞 E V側サンプリング圧力が $0.2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ である。	ナトリウムベーパによりサンプリングライン詰り	A rガスにて吹かし清掃
⑩	1976年 10月13日	50MW MKII (SH-HN a)	加熱器による昇温動作不能	加熱器電源の I R 驅動モータの調整時、復旧ミスにより誤配線としました。	配線変更
⑪	1976年 10月25日	50MW MKII (E V-HN a)	イオンポンプ出力指示不調 中制指示値と現場コントローラでの指示差が大きい。	現場盤コントローラ出力V/I変換器の0点移動(0点移動量 4.9%) (0点移動の原因については不明確である。)	V/I変換器再調整
⑫	1976年 12月12日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞ぎみ ガスクロのE V側指示値が不安定(上下に振れる)のため現場サンプリング圧を確認した所 $0.2 \sim 0.3 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ であった。ベーパトラップ下流にて導通は確認した。よってベーパトラップ部での閉塞でない。	ナトリウムベーパによりサンプリングライン詰り(ベーパトラップの下流配管は保温なしでありベーパトラップでトラップされないナトリウムベーパーが堆積したと考えられる。 なお、ガスクロサンプルガスは常温でなければならない。)	ガスクロ側フィルター交換
⑬	1977年 1月10日	50MW MKII (E V-HN a)	真空系の温度が上がるとシュルゲージのコレクタ電流が増加し高真空側の測定が不可	電極支持板(ガラス製)の温度上昇による絶縁劣化。(このガラス支持板は従来のゲージがガラス球に納めた構造であったため外すのは可能)	ガラス支持板外す。
⑭	1977年 2月23日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞 E V側ガスクロ指示安定してなくサンプリングラインを開としてもガス放出がない。	ガスクロサンプリングラインベーパトラップにて閉塞(本ベーパトラップは常温で使用しているものであり、定期的な内部ナトリウム洗浄が必要と考える。)	ベーパトラップ内部ナトリウム洗浄

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (3 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑯	1977年 4月28日	50MW MKⅢ A61 (EV-HN a)	動的測定においてイオンポンプ電流が2~3mAを越えると電流が加速的に増加し、イオンポンプコントローラNFBが切れる。 (フランジ部等にリークが無いことは確認済)	イオンポンプ排気速度低下と考えられるが、その排気速度低下の原因は不明確である。 (本イオンポンプは、1997年4月初旬より使用開始している。)	イオンポンプベーキング処理
⑯	1977年 10月28日	ガスクロ	EV側サンプリングライン閉塞ぎみ EVカバーガス圧が0.7kg/cm ² Gであるのみ ガスクロ用昇圧ポンプ入口圧が0.3kg/cm ² Gである。	VA 16-12 (ガスクロサンプリング元弁) 下流配管内にメッシュがつめてあり、そこで閉塞していた。メッシュを配管内に挿入していた理由は不明確である。	メッシュ取外し復旧(配管切断)
⑰	1977年 11月9日	ガスクロ	EV側サンプリングライン閉塞 ガスクロサンプリング流量がとれない。	サンプリングラインのベーパトラップ下部エルボ部(入口側)で閉塞していた。 ベーパトラップ部でトラップされたナトリウムが流下し堆積したと考えられる。	ガスサンプリングラインよりアルゴンガスを加圧し、ベーパトラップ部昇温を行ない閉塞ナトリウムをEV本体内に押し戻す。
⑱	1977年 11月21日	50MW MKⅢ A61 (EV-HN a)	EV加熱器出口ナトリウム温度/低警報発生	熱電対破損 ウェル内でシースが折れていた。	T/C交換
⑲	1978年 1月25日	ガスクロ	EV側SH側サンプリングライン調整 ガスクロ側入口圧がEV 0.1kg/cm ² , SH 0 kg/cm ² である。	サンプリングラインのベーパトラップ下部にて閉塞していた、ベーパトラップ入口部温度が低い状態であったと推測される。	
⑳	1978年 1月27日	ガスクロ	サンプリング圧力は十分有るのにアナライザ部流量が0cc/minである。	ガスクロ装置内シャフトオフバルブダイヤフラムの破損	・シャフトオフバルブダイヤフラム交換 ・シャフトオフバルブ高分子フィルム交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (4 / 17)
故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
㉑	1978年 2月13日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞ぎみ ガスクロ装置入口圧が $0.2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ である。	ベーパトラップの上流側元弁V 16-13部の予熱温度が低く、そこで閉塞。予熱ヒータのヒューズが切れていたため、ヒューズ断の原因は不明確である。	V 16-13部分の予熱ヒータ電源ヒューズ交換。
㉒	1978年 6月21日	50MW MKⅡ (SH-HN a)	拡散膜温度制御不良 IR駆動モータは動いているがニッケル膜温度が降下している。	IVR内電磁接触器のON-OFFによる振動で配線（コンタクター制御用）が断線していた。	再配線 振動はその後なくなる。
㉓	1978年 7月5日	ガスクロ	E Vサンプリングライン閉塞ぎみ ガスクロ装置入口圧が $0.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ であり、 ベーパトラップ出口配管付属のガスサンプリング管よりプローを行なったところ放出は微少であった。	サンプリングラインベーパトラップ部で閉塞 前回のベーパトラップ部閉塞時の処置で完全に内部ナトリウムがドレンされていないため 短期間の使用で閉塞したと考えられる。	ベーパトラップ昇温 内部ナトリウムE V本体へ押し戻し。
㉔	1979年 1月22日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞ぎみ ガスクロ装置入口で $0.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ あり、ベーパトラップ出口配管付属のガスサンプリング管よりプローを行なったところ瞬間プローでその後は放出ガスがない。	サンプリングラインベーパトラップ部で閉塞 前回のベーパトラップ部閉塞時の処置で完全に内部ナトリウムがドレンされなく、短時間の使用で閉塞したと考えられる。	ガスサンプリングラインより アルゴンで加圧しベーパトラップ昇温を行ない閉塞ナトリウムをE V本体内で押し戻す。
㉕	1979年 1月25日	50MW MKⅡ (SH-HN a)	ニッケル膜ナトリウム温度制御系不調 加熱器出口温度制御を自動で制御していたら IRが頻繁に上下（電圧）するため手動としたがIRは同様である。入口ナトリウム流量 温度大きな変化なし。	制御用回路のコンデンサ不良 コンデンサ不良原因は不明確である。	制御用回路のコンデンサ交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (5 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
㉙	1979年 5月20日	50MW MKIII #61 (EV-HNa)	ニッケル膜ナトリウム温度制御系不調 中制加熱器出口温度調節器を操作しても温度変化応答が異常であった。	電磁接触器、制御配線の圧着端子部が不良で配線が外れた。施行ミスと考えられる。	配線取付
㉚	1979年 5月24日	50MW MKII (SH-HNa)	ニッケル膜ナトリウム温度制御系不調 中制加熱器出口温度調節器を手動としてもIRモータの作動表示ランプ(降下方向)の点灯したままであり、温度も降下している。	IVR内電磁接触器不良	電磁接触器交換
㉛	1979年 5月25日	50MW MKII (SH-HNa)	誤操作による真空破壊 その後真空度を立ち上げヌード型電離真空計をONとしても指示なくエミッション電流も0mAとなる。	粗引き用真空弁誤開	予備排気セットによる再立ち上げ(ペークアウトを行なったかは不明確である。)
㉜	1979年 6月7日	ガスクロ	EV側サンプリングライン閉塞 ガスクロ装置入口圧が0kg/cm ² gである。	ベーパトラップ入口配管にナトリウムが閉塞した。 入口配管の予熱温度は200°C設定であり、前回のベーパトラップ部閉塞時の処置で完全に入口配管部のナトリウムがドレンされてなかったと考えられる。	ガスサンプリングラインよりアルゴンで加圧レベーパトラップ部を昇温、閉塞ナトリウムをEV本体内に押し戻す。
㉝	1979年 6月15日	50MW-CG- MK I (EV-HAr)	予熱調節器不良 中制「EV隔膜式カバーガス中H ₂ 検出に高/低」警報発生、現場盤を確認したところ設定値350°Cに対し指示値が降下中である。	予熱調節計制御不良	調節計交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (6 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
③①	1979年 6月30日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞 ガスクロ装置入口で圧力が立たない。	ベーパトラップ部配管にナトリウムが閉塞 前回のベーパトラップ部閉塞時の処置で完全 にナトリウムがドレンされてないため短時間 で閉塞したと考えられる。	ガスサンプリングラインより アルゴンで加圧しベーパトラ ップ部を昇温閉塞ナトリウム をE V本体内に押し戻す。
③②	1979年 10月1日	50MW MKⅢ A61 (E V-HN a)	拡散膜破損検知のリーク警報発生 真空系イオンポンプ出力とも指示変化なし, 誤警報と推定される。	プラグ式ナトリウム検出端の絶縁不良	セラミックとケース及びセラ ミックとピン部分のロー付は 金ローとした。
③③	1979年 10月1日	50MW-CG- MK I (E V-HA r)	ニッケル膜の交換を行なうため既設ニッケル 膜を引き抜いたところ潰れている事を発見し た。 (Ni 膜 3500~500°C 外圧 0.7 kg/ cm ² g で 10000 hr 運転) (1977 年 1 月 設置)	膜の真円度がずれている場合、潰れる可能性 あり	ニッケル膜交換
③④	1979年 10月16日	PNC-CG-1号機 (SH-HA r)	運転時、循環ガス流量が減少した。 (運転時間 約 4000 hr)	循環ポンプのダイヤフラムよりガスが洩れて いた。 (ダイヤフラムの疲労による亀裂)	交換
③⑤	1979年 10月23日	50MW-CG- MK I (E V-HA r)	予熱温度制御不良 予熱温度コントローラは ON で正常と思われ るのに降温されている。	ヒューズ部ハンダ不良のため配線外れ	ハンダ付け
③⑥	1979年 12月6日	50MW MKII (SH-HN a)	予熱ヒータ地路 SG 盤の予熱ヒータ地路の警報が発生したので調 査したところ予熱ヒータのメガが 0Ω であった。	ヒータ本体で絶縁劣化していた。	ヒータ本体交換
③⑦	1980年 10月15日	50MW-CG- MK II (E V-HA r)	予熱制御系不良 予熱ヒータ主電源を ON にしたところ調節計 温度指示が振り切れた。	予熱温度調節計内 I C 不良	予備調節計と交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (7 / 17)

故障およびその処置

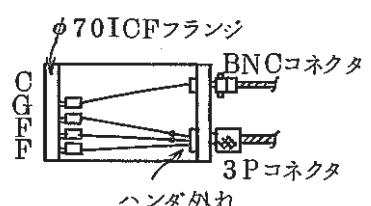
番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
③	1980年 10月21日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	予熱制御系不良 設定温度200°Cに対し335°Cまで温度上昇している。	予熱制御系SCR不良のため、設定温度に関係なくヒータ電源がONとなっていた。	SCR交換
④	1980年 10月22日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	現場盤主電源トリップ	ZCT不良	ZCT交換
⑤	1980年 11月14日	50MW MKIII #2 (EV-HN a)	CT温度110°Cにて静的平衡圧を測定し、動的平衡に移行すべくソーバックポンプを起動したところ真空系内が 10^{-1} Torrまで上昇した。	ソーバックポンプ単体のポンプ作用(モレキュラーシーブルの分子吸着によるポンプ作用)が低下しているためと思われるところに元弁を開としたため真空度が悪化した。	1. ソーバックポンプ単体の活性化を計る。ベーキングを実施しソープショーンポンプで真空引きを行なった。 2. 静的平衡終了時真空系内圧力が 1×10^{-4} Torr程度であればソーバックポンプを使用せず、イオンポンプを起動する事とした。
⑥	1980年 11月15日	50MW MKIII #2 (EV-HN a)	水素計校正試験時、ヌードゲージの指示が急に零になった。	下図の点でハンダが外れていた。  φ70 ICFフランジ BNCコネクタ 3Pコネクタ ハンダ外れ C:コレクター G:グリット F:フィラメント	ハンダ補修

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (8 / 17)
故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
④②	1980年 12月10日	ガスクロ	E V側サンプリングライン閉塞 ガスクロ装置入口圧が 0.1 kg/cm^2 であり、ベーパトラップ出口配管付属のガスサンプリングよりプローされない。 (ベーパトラップ予熱 250°C)	サンプリングラインベーパトラップ部で閉塞 前回のベーパトラップ部閉塞時の処置で完全にナトリウムがドレンされないため短時間の使用で閉塞したと考えられる。	V 16～13～ベーパトラップ間に仮設ヒータ取付昇温し、内部ナトリウム E V本体へ押し戻す。
④③	1980年 12月16日	PNC-CG-1号機 (SH-HAr)	S Hカバーガス圧が徐々に低下し約5分毎にS Hレベル制御(供給弁)が作動している。S Hレベル制御 800T/H 時、通常約20分間隔で行なわれている。(ガスクロサンプリング戻し、ラインない時)(約 2500hr 運転していたものである。)	循環ポンプ部よりリーク 循環ポンプダイヤフラム亀裂	循環ポンプ分解 ダイヤフラム交換
④④	1981年 2月24日	50MW-CG-MKII (EV-HAr)	E V-HAr流量計がバイパス弁(V-6)を全閉にしても 15l/min 位しか流れなかつた。(正常時 20l/min) 入口配管をバイパスしてA r流量を測定したところ規定流量流れた。	配管(サンプリング水平取出部)CNaが潮解したものが詰まっていた。これは、既設配管の受台が外れ、水平部が曲り逆勾配になっていたためである。	・配管交換 ・盤内ヒータを新品と交換 ・新設ハンガー2ヶ所取付 ・水平部 \triangle_{50}^1 の勾配をつけた。
④⑤	1981年 2月～3月	PNC-CG-1号機 (SH-HAr)	イオンポンプが 1mA 程度で暴走 (100V ppm)	イオンポンプ自体の排気不調と考えられる。 イオンポンプチタン層にたたき込まれたガス分子が脱離吸着を行ない真空度が悪くなり暴走となると思われる。	イオンポンプ回復処理 (ベーカアウト処理 A rボンバード処理 1.6mA 程度にて暴走なくなる。

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (9 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑥	1981年 2月～3月	50MW MKIII #62 (EV-HNa)	イオンポンプのレンジは $1 \mu A$ ～ $300mA$ までを計12stepのレンジ切替を有している。このうち $30 \mu A$ レンジでの指示値は $100 \mu A$ 及び $10 \mu A$ レンジの指示値より $1.6 \mu A$ 程度大きい値を示している。	$30 \mu A$ レンジの0点移動と考えられるが、0点移動の原因は不明確である。	$30 \mu A$ レンジを使用しない事とした。
⑦	1981年 2月26日	PNC型1号機 改良型 (NaP-HNa)	Ni膜温度制御系不調 Ni膜温度が徐々に降下した。この時、TIC-101調節計出力は100%であったが温度は下がる一方である。 調査項目 1. 調節計出力を確認した所、正常に動作 2. サイリスタ装置入力側電圧約230V出力側は0V 3. サイリスタゲート装置の電源相を入れ替えたがヒータに電圧がかからなかった。 4. ヒューズはすべてOK	SCRゲート制御装置不良	酸素計用が使用されていなかつたので、酸素計用SCRゲート制御装置と交換した。
⑧	1981年 3月10日	PNC1号機 改良型 #1 (CT-HNa)	Ni膜温度制御系不調 Ni膜温度が徐々に降下した。この時、TIC-201の調節計出力は100%を示していた。	SCRゲート制御装置不良	SCRゲート制御装置を交換した。
⑨	1981年 3月12日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	現場パトロール時蒸発器カバーガス中水素計廻りを点検中異音あり、循環ポンプからガスリークを発見。（13400hr運転）	ポンプベローズ部でリークしていた。 (米国製ベローズポンプ)	国内メーカーのベローズ式循環ポンプに交換した。

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (10 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑤〇	1981年 3月20日	PNC-CG-1号機 (SH-HAr)	S H レベル制御供給弁が頻繁に開閉作動しているためガスクロ及びカバーガス中水素計を隔離したところレベル制御の間隔が正常に戻った。校正ラインより S H - H A r → A r 加圧ポンプでのリークを確認した。(749hr 運転)	ポンプダイヤフラム本体(天然ゴム)及びテフロン膜に亀裂が生じていた。	ペローズ型の循環ポンプに交換した。
⑤①	1981年 5月23日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	漏電ブレーカが作動し、E V - H A r 現場盤の全電源(真空系も含む)が落ちた。	予熱ヒータ本体の絶縁抵抗変化	予熱ヒータ(マイクロヒータ)を交換した。
⑤②	1981年 5月23日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	予熱温度調節計不良 校正ラインの温度調節計が設定 450℃のところ 570℃まで昇温されていた。この為以下の調査を行った。 ○現場盤のヒータ端子で電流を計りながら調節計の「ON」↔「OFF」を行った。 ところ「OFF」でも電流値が低くならなかった。NFBを「OFF」にしたら電流は0になった。	調節計トランジスタリレー不良	トランジスタリレー(G B - 15410)を新品と交換
⑤③	1981年 5月28日	50MW-CG- MK II (EV-HAr)	現場主電源トリップ	予熱ヒータ本体の絶縁抵抗劣化のため地絡	マイクロヒータ交換
⑤④	1981年 6月25日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	アルゴン循環ポンプバイパス弁を全閉として規定流量(19.8Nℓ/min)まで循環量が上らず循環ポンプ自体が振動している。	配管に異常は認められず循環ポンプ自体の性能劣化と推定	循環ポンプ交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (11 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
55	1981年 6月30日	PNC型1号機 改良型 (NaP-HNa)	Ni膜温度が自動制御にもかかわらず降下している。	サイリスタ制御装置不良	予備のサイリスタ制御装置と交換
56	1981年 7月18日	PNC型1号機 改良型 (CT-HNa)	Na流量指示不良 CT-HNaの流量計の指示が突然0ℓ/min付近まで下がった。(流量低にて加熱ヒータトリップ)そのまま放置しておくと流量は自然に復帰するが上記の様な状態が頻繁に起こった。	現場端子ボックス内の端子のゆるみ	端子の締め
57	1981年 7月29日	50MW MKIII No.2 (EV-HNa)	Ni膜温度制御系不良 温度調節計を手動で出力変更できない。	調節計内部故障信号により制御不能 故障原因是電源のノイズによるものであった。	調節計にノイズフィルターを取り付ける。
58	1981年 10月7日	PNC型1号機 改良型 (NaP-HNa)	NaP-HNa検出部予熱(H-109)不良 NaP-HNa検出部予熱の設定が200℃になっているが現場記録計で90℃しか上がりていなかった。	スライダックの抵抗を測定したところ、0Ωであり、スライダック内部で断線し1次2次間で塵等によりショートしているためであった。	スライダック交換
59	1981年 10月8日	50MW-CG-MKII (EV-HAr)	イオンポンプ指示40分周期(Ni膜500℃)でオーバースケール指示振動をくりかえす。	ニッケル膜にピンホールが発生したと推定	ニッケル膜交換
60	1981年 10月15日	50MW-CG-MKII (EV-HAr)	ベーパトラップ用ファン不良 EV-HArベーパトラップ用ファンが起動しなかった。	ファンコイルが0MΩであった。 ファンモータの腐食劣化と推定	ファンモータを新品と交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (12 / 17)
故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑪	1981年 10月15日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	漏電ブレーカ作動 EV-HAr (TCPH-1) のNFBを「ON」 にすると漏電ブレーカが作動し盤内のNFB がトリップした。	予熱ヒータ端子部が移動し盤に接触していた ため、ヒータ端子部の絶縁処理が不十分で あった。	ヒータ端子部に絶縁テープを 巻いた。
⑫	1981年 10月20日	ガスクロ	ガスクロのSH側指示異常 ガスクロのSH側の指示がEV側にくらべて 非常に高くSH側のレベル制御系が呼吸す ると指示は少し低くなる。 そこで一旦ループ側より校正ラインに切り替 えてEV側とSH側の指示を比較してみたが 両方同じであった。 又、サンプリングの圧力流量は正常であった。	不明	ガスクロ再校正
⑬	1981年 10月28日	50MW-CG- MKII (EV-HAr)	EV-HAr ドレンタンクレベル不良 ドレンタンクレベル高の警報が点灯している 為、ドレン実施したがドレン液位高の警報が 消えなかった。その為、校正ラインより圧力 (1kg/cm ²)をかけ導通操作を行なったとこ ろ、圧力降下により導通が認められたがドレ ンタンク液位高の警報が消えなかった。	ナトリウムベーパの付着によるものでセンサ ー先端部にNaが膜状に付着していた。(レ ベル高、低両方共) ナトリウムドレンタンク内ナトリウムベーパ ーが長期に渡り壁面及びレベル計センサー部に 付着堆積したと考えられる。	センサー部取外し、アルコー ル洗浄をした。
⑭	1981年 12月11日	50MW-CG- MKIII (EV-HAr)	予熱ヒータ(TCH-2)不良 TCH-2の設定値が515°Cに対し指示が250°C までしか上昇しなかった。またヒューズの切れは なく調節器による「ON」 - 「OFF」の表示はしていた。	調節計不良 調節計内でPIオフセット回路部が不良であ った。	調節計メーカーにてオーバホー ル

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (13 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑤	1982年 6月8日	50MW MKⅢ M2 (EV-HN a)	温度指示不良 TC14-4E (EV-HN a 拡散膜Na温度調節計) 指示が500°Cに対し約480°C指示であった。この為、TISW14-4を調査したところ指示針が指示計板にひっかかっていた。そこでTISW14-4Eの指示板を調整し、ひっかかりをなくしたが、指示は474°Cであった。TT14-4E (ECR-33T 熱電式伝送器) 入力にて測定したところ497°Cであった。	指示計不良 計器内部側保護カバーに指針が引掛かっていたためであった。	分解調整
⑥	1982年 6月12日	PNC型1号機 改良型 (CT-HN a)	検出部破損警報発生 (約8600時間運転)	ニッケル膜リーク	出入口ナトリウム弁を閉とし運転を停止し、次回停止時にニッケル膜ハウジングを含む真空系の交換をすることとした。
⑦	1983年 1月18日	PNC-CG-1号機 (SH-HAr)	循環ポンプ起動せず	ポンプは正常 ○ポンプの起動時、吐出側の圧力が高く高負荷の為、起動できなかったと考えられる。 また、ポンプバイパス弁V16-104全開になつていなかつたため吐出側圧力が高かつた。	○ポンプ吐出側の配管を開放してガス抜きをし、ポンプを無負荷で起動した後、吐出配管を接続復旧したところ正常な作動状態となつた。

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (14 / 17)
故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑥⑧	1983年 1月23日	50MW-CG- MK III (EV-HAr)	EV-HAr 校正ライン閉塞 EV-HAr を EV側からサンプリングで起動すると正常に流量がでるが校正ラインに切り替えるとポンプバイパスを全閉にしても流量がでない。	校正ライン配管に通常のサンプルガスのナトリウムベーパが流入していて、校正ライン配管部の予熱温度が低いため閉塞したか、校正ラインのサンプルガスは低温（常温）であるため、元弁部が冷えナトリウムベーパで閉塞したと考えられる。	○予熱昇温加圧 ○V-11弁及び配管取替
⑥⑨	1983年 1月30日	50MW-CG- MK III (EV-HAr)	EV-HAr 校正試験中（低濃度 60V ppm 目標）にミリトルゲージ指示が出なくなり、再立上げしたがオートレンジ切替 SWが動作しなかった。	コントローラ内コンデンサー不良	コントローラ交換
⑦⑩	1983年 2月1日	50MW-CG- MK III (EV-HAr)	真空系不調 EV-HAr のイオンポンプ出力が40~60分周期で数十mAまで上昇し、ミリトルゲージ圧力も同じ挙動を示した。	推定原因としては、 真空配管フランジ部のリーク又はNi膜に微少のピンホールの発生が考えられるが、荒引きポンプで真空引き後、立上げたらイオンポンプ出力ミリトルゲージ圧力が正常に復帰できたので原因が不明 (83年4月10日に再度同じ状態となり、復帰しないためニッケル膜リークと判断している。)	○真空配管フランジ増締 ○仮設、粗引きポンプで再立上げ
⑦⑪	1982年 2月2日	PNC型 2号機 MK IV (EV-HNa:静的室)	水素計校正試験時、動的一静的切替弁を操作し動的状態に戻す際、誤まって粗引き用隔離弁を微開をしてしまい、そのため真空度が悪化しイオンポンプがトリップした。	誤操作	静的室のベーカアウト

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (15 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑦	1983年 2月3日	PNC型2号機 MKⅣ (EV-HNa)	EV-HN a EMPコイル温度高のANN発生Na中 H ₂ 計校正試験時 (Na温度350°C) 上記ANNが発生した。 コイル温度はNa250°Cの時は240°C, その後Na温度昇温に伴ない徐々にコイル温度も上昇しANNが発生した。なおEMファンは起動中である。	コイル部製作不良 (コイル部保温は不用であるのに保温が施工されていた)	EMPコイル部保温撤去
⑧	1983年 2月20日	PNC型2号機 MKⅣ (EV-HNa: 静的室)	(1) 停電後, シュルツゲージが起動(ON)後約15秒でトリップする。 (2) イオンポンプで真圧度を確認するためイオンポンプONすると1KV以下であった。 (3) 静的室を排気セットにて真空引きしイオンポンプで4.3KVとしたが, シュルツゲージはトリップしてしまう。 (4) シュルツゲージフィラメント間の抵抗を測定すると20~40Ωで不安定 (フィラメントの断線と判断)	フィラメント線の下図の様に焼損し外れていた。	(1) シュルツゲージ交換 (3月4日) (2) イオンポンプ及び真空系ベーキング (3) シュルツゲージ脱ガス
⑨	1983年 4月10日	50MW-CG- MKⅢ (EV-HAr)	動的状態にてイオンポンプ指示がフルスケールオバを3~4回/時間の周期でくりかえした。	ニッケル膜部のピンホール等によるサンプルガスのリーク	Ni膜及び真空系ライン交換 (外圧タイプ→内圧タイプへ)
⑩	1983年 4月13日	PNC型2号機 MKⅣ (EV-HNa)	EV-HN a 静的室イオンポンプレンジ切換え不調 EV-HN a の静的室イオンポンプレンジ指示が10 ⁻⁶ レンジから落ちていた。	電源回路保護用ヒューズが断ったため直流電源が働かず, リレー不動作によりレンジ切換ができなかった。 なお, ヒューズ断の原因是不明であった。	ヒューズ交換(1A)

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (16 / 17)
故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑥	1983年 4月21日	PNC型1号機 改良型 (NaP-HNa)	(1) 校正データを採取時、指示記録計がオーバー(イオンポンプ指示値)スケールすると指示値が違ってくる。 (2) 記録計の電源入状態で指示針を軽く指で押すだけでフルスケールの約10%程度動いてしまう。	記録指示計の不良 ポテンショメータとブーリの固定ビスがゆるんでいたため、ポテンションが正常な位置でバランスしなかった。	記録指示計修理 固定ビス増締め ポテンショ振り分け調整
⑦	1983年 4月27日	50MW-CG- MKⅢ (EV-HAr)	EV-HAr予熱ヒータ(TCVH-1)漏電 予熱ヒータ(TCVH-1)漏電の為、現場制御盤内メインNFBがトリップした。	予熱ヒータ(TCVH-1)の端子部テーピングが外れ、端子部がEV-HAr現場制御盤内のフレームに接触し地絡となった。	予熱ヒータ端子部、再テーピング
⑧	1983年 5月13日	50MW-CG- MKⅢ (EV-HAr)	EV-HAr校正ライン閉塞 EV-HArをEV側からのサンプリングで起動すると正常に流量ができるが、校正ラインに切替えるとポンプバイパス(V-6)を全閉にしても流量がない。	校正ライン元弁部に通常のサンプルガス中のナトリウムベーパが流入し、予熱温度が低いため閉塞したか、校正ラインのサンプルガスは低温(常温)であるため、元弁部が冷えナトリウムベーパで閉塞したと考えられる。	弁交換
⑨	1983年 8月24日	PNC型1号機 改良型 (CT-HNa)	ニッケル膜交換に際し、ニッケル膜内面にキズをつける。	ニッケル膜を取付時、主モータ内蔵エコノマイザ案内管に接触しキズを付けた。	ニッケル膜交換
⑩	1983年 8月29日	PNC型1号機 改良型 (CT-HNa)	シュルツゲージがトリップし、再投入できなくなる。 フィラメントの導通チェックを行なった結果、フィラメントの断線と判断。	真空系フランジボルトが指で廻るほどゆるんでいた事から、空気リークしている状態でフィラメントを通電したため酸化焼損したと考えられる。真空系フランジボルトの締付け不良の原因としては、工場でのベーカアウト後の増締め不良、あるいは、輸送中での振動によるボルトのゆるみが考えられる。	シュルツゲージ交換

Table 6-1 Failure and troubleshooting of hydrogen meters (17 / 17)

故障およびその処置

番号	日付	水素計名	トラブル状況	原因	処置
⑧①	1983年 9月2日	PNC型1号機 改良型 (CT-HN a)	ヌードゲージのエミッショングループが0mA指示でエミッショングループの設定ができない。	フィラメントの外れ フィラメント部に衝撃的な力または、振動が加わりスポットウェルド部の脆くなっている部分が折れかかっていて、フィラメントを通電した際、そのショックでフィラメントが外れたと考えられる。	ヌードゲージ交換
⑧②	1983年 9月9日	PNC型1号機 改良型 (CT-HN a)	真空度到達試験において、真空度が良くならないため、アルコールリーク試験を実施した結果、シュルツゲージコレクタのコネクタ部でリークを発見した。	電極溶接部でのリークであり、製作時の不具と考えられる。	シュルツゲージ交換
⑧③	1983年 10月18日	PNC-CG- 1号機 (SH-HAr)	イオンポンプがトリップし、その後、KVレンジでは5KV指示をするが、電流レンジは0mAである。	イオンポンプ指示がスケールオーバーしても、START側で運転を続けていたため、保護回路が作動せず、コントローラ内部の抵抗が断線した。	コントローラ内抵抗交換

Table 6-2 Operational history and failure of hydrogen meters (1/4)
水素計使用経過と故障状況

※ ○内の番号は、表6-1故障およびその処置での番号に相当する。

年	1974												1975												1976																	
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
S G A													メーカー PNC																													
2次N ₂ 系運転経過	3 13 14	4 15 16	5 17 18	6 19 20	7 21 22	8 23 24	9 25 26	10 27 28	11 29 30	12 31 1	13 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	1 17 24 25 26 27	2 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	3 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	4 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	5 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	6 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	7 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	8 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	11 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	13 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	14 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	15 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	16 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	17 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	18 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	19 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	20 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	21 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	22 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	23 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	24 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	25 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	26 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	27 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	29 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	30 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
注水素試験																																										
蒸発器出口 ナトリウム中 水素計																																										
過熱器出口 ナトリウム中 水素計																																										
ナトリウムポンプ 出口ナトリウム中 水素計																																										
コールドトラップ 出口ナトリウム中 水素計																																										
蒸発器 カバーガス中 水素計																																										
過熱器 カバーガス中 水素計																																										

Table 6-2 Operational history and failure of hydrogen meters (2/4)
水素計使用経過と故障状況

※ ○内の番号は、表 6-1 故障およびその処置での番号に相当する。

年	1977												1978												1979																								
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12													
S G M													2号機SG																																				
2次Na系運転経過	1 25	3 4	4 44	5 50	6 66	7 6	8 20	9 21	10 22	11 23	12 24	13 25	1 25	3 4	4 55	5 50	6 66	7 77	8 67p	(EV管束引抜き検査)				1 25	3 10	4 15	5 27	6 24	7 10	8 15	9 24	10 10	11 25	12 15															
注水系試験	1 25	2 3	3 55	4 50	5 66	6 6	7 20	8 21	9 22	10 23	11 24	12 25	1 25	2 12	3 19	4 20	5 2	6 24	7 29	8 24	9 13	10 19	11 34	12 26	1 11	2 4	3 25	4 11	5 26	6 11	7 25	8 11	9 26	10 11	11 25	12 15													
蒸発器出口 ナトリウム中 水素計	50MW MKII												50MW MKIII A&I																																				
	△ 指 示 ル不 良 ダレ ジ	Niイ 膜オラ ンス 交換 アブ 交不 良調	△ 加度 熱計 器破 出口投 入温										△ イオン ポンプ 交換												△ Ni不 良膜 温度制 御																								
過熱器出口 ナトリウム中 水素計													50MW MKII																								△ 予熱ヒータ地絡												
ナトリウムポンプ 出口ナトリウム中 水素計																																					△ 予熱ヒータ地絡												
コールドトラップ 出口ナトリウム中 水素計																									PNC型1号機改良型 A&I												△ 予熱ヒータ地絡												
蒸発器 カバーガス中 水素計													50MW-OG-MK I																								△ 子不良 調節器	△ Ni膜 剥離 発見	△ Ni膜 剥離 発見	△ 子不良 調節器	△ Ni膜 剥離 発見								
過熱器 カバーガス中 水素計																									PNC-OG-1号機												△ リーム ボンブ部 ダクト												

Table 6-2 Operational history and failure of hydrogen meters (3/4)

水素計使用経過と故障状況

※ ○内の番号は、表6-1故障およびその処置での番号に相当する。

年	1980												1981												1982												
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
S G 系													2号機 SG																								
2次Na系運転経過																																					
注水系試験																																					
蒸発器出口 ナトリウム中 水素計	50MW MK III #1												50MW MK III #2												PNC型2号機MKIV												
Ni膜交換 Niオノボンプア 交換	△ 真悪 空化 空度 ○ スレ 部不 良④ シコネ ク												△ Ni不 調⑤ 温度制 御系												△ Ni不 調⑥ 温度指 示												
過熱器出口 ナトリウム中 水素計													50MW MK II												東芝型												
ナトリウムポンプ 出口ナトリウム中 水素計													PNC型1号機改良型																								
コールドトラップ 出口ナトリウム中 水素計													△ Ni不 調⑦ 温度制 御系												△ Ni不 調⑧ 温度制 御系												
蒸発器 カバーガス中 水素計	50MW-CG-MKII												△ サブリ ンブリ ングナ イト												△ ニムリ ーク クトリ ウ(停 止)												
過熱器 カバーガス中 水素計													△ フラン クタ イオ ンボ ンプ ダク ト⑨												△ サブリ ンブリ ングナ イト												

Table 6-2 Operational history and failure of hydrogen meters (4/4)

水素計使用経過と故障状況

* ○内の番号は、表6-1故障およびその処置での番号に相当する。

Table 6-3 Measurement of crashed nickel membrane

变形ニッケル膜寸法測定結果

	①	②	③	④	⑤	⑥	平均
h_1	2.20	2.30	2.25	2.25	2.10	2.15	2.20
h_2	2.40	2.55	2.50	2.45	2.60	2.05	2.42
W_1	~2	~1	~2	~1	~1	~2	~1.5
W_2	14.30	14.20	14.25	14.25	14.25	14.35	14.26

单位 : mm

Table 7-1 Proposal for prototype plant (1/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
1. ニッケル膜	<p>(1) 異種金属(ニッケル-SUS)の溶接性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 薄肉、異種金属の溶接が必要なことからその信頼性を十分確立しておく必要がある。 ○ 溶接方法は製作メーカーのノウハウも含まれ、どの程度まで確立されているか不明である。 ○ ナトリウムリークの発生は水リーク検出計としての機能を停止するのみでなく真空系全体の交換が必要となるため、経済性に及ぼす影響が大きい。 ○ 50MWSGTではナトリウム中水素計で1回、カバーガス中水素計で2回のリークを経験している。 <p>(2) 材料製造過程</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ ニッケル膜材料の選定、製造過程が明確にされていない。 ○ 50MWSGTではカバーガス中水素計(外圧型)で2回の変形を経験している。 ○ ニッケル膜はナトリウムバウンダリの仕様にもかかわらず他の材料に比較して十分な検討がなされていない。 <p>(3) 構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 異種金属溶接部が問題となるためできるだけ溶接線長の短かい構造とする必要がある。 ○ 50MWSGTでは円筒型と全半球円錐型の使用経 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 従来の経験からリークの発生箇所は、溶接部であり溶接方法、検査方法、手順の確立を図ることが必要である。 ○ メーカから現状でのニッケル-SUSの溶接方法、検査方法、手順についての詳細な情報を入手する必要がある。 ○ 他の構造材料での扱いと整合性が必要である。 <ul style="list-style-type: none"> ○ ニッケル膜材料に関するデータベースを作成し総合的な設計製作基準を作成する必要がある。 ○ 製造方法についても、その基準の作成が必要である。 ○ 他の構造材料での扱いとの整合性が必要である。 <ul style="list-style-type: none"> ○ 溶接箇所が少なくてすむ全半球円錐型がより健全性が高いと考えられる。しかし、その決定のためには、さらに総合的な検討が必要である。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (2/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
1. ニッケル	験があるが、全半球円錐型についてはトラブルが発生していない。 (4) 交換頻度 <ul style="list-style-type: none"> ○ ニッケル膜は、ナトリウムバウンダリであり、予防保全のため定期的に交換することが望ましい。 ○ 50MWSGTFの内圧型ニッケル膜は溶接部のリークを除いて、ニッケル膜の変形、リーク、問題となる腐食等は生じなかった。 (運転時間は長期なもので20,000時間) 	○ 静的室用ニッケル膜は大きな表面積を必要とするが溶接線長の観点から検討も必要である。 ○ かなり長期の使用に耐え得ると考える。 50MWSGTFの運転からは20,000時間までは十分であることを確認しているが、さらに長期使用も問題ないと考える。 ○ 過去のリークの経験は溶接部であり、ニッケル-SUSの溶接方法、検査手順については今後十分な検討が必要である。 ○ 交換頻度については今後も十分なデータの蓄積が必要である。
	(5) 交換時間 <ul style="list-style-type: none"> ○ 交換後1ヶ月位は、検出計として正常に動らかないため2台一度に交換しないよう、配慮することが必要である。 	○ 1ループ中の3台のナトリウム中水素計ニッケル膜の交換は、互に時期をずらして計画的に行なう必要がある。
	(6) 交換時の構成	○ 真空系を一体として交換するのが良く交換の容易な構造としておくことが必要である。 ○ 工場で真空系を一体として製作、検査、ベーカウト等を実施した方が信頼性の高い水素検出計となる。 ○ 運転中のナトリウムリークによる交換時には真空計、イオンポンプの再使用は不可能である。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (3/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
1. ニッケル膜		<ul style="list-style-type: none"> ○ 定期的交換時においても可能な限り真空計イオンポンプの交換が望ましい。
	(7) その他 ニッケル膜部が高温状態で真空系を大気解放するとニッケル膜が酸化して水素計の機能上、致命的なダメージを受ける。	<ul style="list-style-type: none"> ○ この場合ニッケル膜は交換した方が良いと考える。
2. イオンポンプ	(1) 単品試験 従来、イオンポンプ出力電流を水素濃度換算していたため、水素ガスによる校正試験を実施していた。 (最近の水素計では実施していないのもある。)	<ul style="list-style-type: none"> ○ オリフィスタイルの水素計において、イオンポンプは、真空保持のための機能が要求されるのみであり真空計として使用されることはないため、イオンポンプ単品の出荷時検査のみで十分で水素ガスによる校正是必要ない。
	(2) イオンポンプレンジ切換	<ul style="list-style-type: none"> ○ 運転員の操作量軽減のため、レンジは自動切換が望ましいが市販されていない時には、遠隔切換とする。
	(3) プラント運転停止中のイオンポンプの運転 <ul style="list-style-type: none"> ○ イオンポンプを長期に停止すると放出ガスにより、真空度が低下し、イオンポンプの再起動時仮設排気設備をセットし、イオンポンプの起動条件 (1×10^4 Torr) まで真空引きする必要があり操作が繁雑となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ プラント停止中でも、イオンポンプは起動しておく。(プラント停止時マニュアルに明確化する。) ○ 電気設備との対応をはかり、イオンポンプ電源は非常用電源とする。
	(4) 交換頻度 <ul style="list-style-type: none"> ○ プラント運転中イオンポンプの排気速度が低下しイオンポンプを交換する必要が生じたとき、交換中は、水リーク検出計としての機能が失なわれるためイオンポンプを定期的に交換する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ イオンポンプは 500~2000 Torr·l 排気後急激に排気速度が低下するため安全を考慮し約 500 Torr·l 排気後は交換した方が良い。 ○ イオンポンプの交換は 50MW GTF の経験によると

Table 7-1 Proposal for prototype plant (4/15)
実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
2. イオンポンプ		2~3日間を要する。
	(5) 交換時期 <ul style="list-style-type: none"> ◦ 効率的な交換および水素計として機能しない期間を最少とすることが要求される。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 1ループ中の何台かのイオンポンプの交換は互いに時期をずらして計画的に行う必要がある。 ◦ ニッケル膜、真空ゲージその他真空系の交換との整合性をとり計画的に行う必要がある。
3. 真空計	(1) 単品試験	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 静的室、シュルッゲージは、静的平衡圧によるナトリウム中水素濃度算出時必要であるため、水素ガスによる校正試験が必要である。
	(2) レンジ切換	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 運転員の操作量軽減および操作の確実性を高めるため自動レンジ切換とする。
	(3) コントローラのゼロ点調整 <p>正確な校正式を得ると同時に常時精度良い測定を必要とするため、運転中の調整点検項目を明確にする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 校正試験時、監視運転時に真空計コントローラのゼロ点、エシッショングループ電流値のチェックが必要である。 なお、ゼロ点チェック時には、水リーク警報インターロックが作動しないようにしてから行う必要がある。
	(4) コントローラのアース <ul style="list-style-type: none"> ◦ 真空計コントローラ出力は 0~10mV でありアース処理の不備な場合は、ノイズの乗る可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 十分なアース処理を行い水素計のノイズ原因を除去する必要がある。 ◦ 信号線は計算機側でのアースもあり 2点アースとなるとノイズ発生の原因となるため絶縁アンプの設置等が必要である。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (5/15)

実機プラントへの提言

項目，機器	現 状 の 問 題 点	提言及び今後検討すべき事項
3. 真空計		<ul style="list-style-type: none"> ◦ 他の計器との整合性をとる必要がある。 ◦ 50MWSGT Fで異常ノイズ発生の経験があるがアイソレーションアンプを設置して除去した。
	(5) コントローラ許容使用温度	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 現状の真空ゲージコントローラのカタログ値は0~40°Cでありコントローラに冷却装置を設置するか雰囲気温度が低い所へコントローラを設置する必要がある。 ◦ 50MWSGT Fでは雰囲気温度が45°Cに達することがあり、コントローラ故障の経験がある。その時には、冷却ファンを用いて冷却することにより処置した。 ◦ その他、計測点の計器、コントローラについても総合的に雰囲気温度との対応についてもチェックしておく必要がある。
	(6) コネクター部取付方法	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 従来の計器においてはクリップの様なものでとめてあるにすぎず埃りや湿分により絶縁不良、リーク電流発生の可能性がある。 ◦ 50MWSGT Fの経験でリーク電流発生する現象が発生した。 (PNC型1号機改良型の例)
	(7) 交換頻度取替時期	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 予防保全の観点から定期的に交換する。単体での寿命としては5年位と考えるがニッケル膜交換時に同時に真空計も交換することが良い。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (6/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
3. 真空計		<ul style="list-style-type: none"> ニッケル膜が破損すると真空構造部へナトリウムおよびナトリウムベーバーが侵入し真空計、イオンポンプの特性に影響を与えるため真空計、イオンポンプも交換する必要がある。
4. 真空系	<p>(1) 静的室の容積</p> <ul style="list-style-type: none"> 静的室の容積が大きいと測定時間が長くなり、系内水素濃度が長時間安定せず精度が低下する。 また、測定時間が長いと、真空内壁からの放出ガスにより精度が低下する。 <p>現状の P N C 型 2 号機 - M K N の静的室容積および表面積はまだ小さくする余地があり現在、検討中である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 水素計の総合的な要求仕様（感度、精度、測定に要する時間その他）を満足する様にニッケル膜面積、真空系内容量等の最適化をはかる必要がある。 (もんじゅ各運転サイクルの E_V 通水前に水素計校正データを採取すると考えられるが、その場合の BG 変化を考慮し、静的平衡圧測定時間を決定し、それにより静的室設計を行う。)
	<p>(2) 真空計の耐圧仕様</p> <ul style="list-style-type: none"> ナトリウムに対する耐圧バウンダリは、ニッケル膜部であり十分な強度を持たせているが、真空系の耐圧仕様を $-1 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ とすると真空計、イオンポンプ、真空弁等が特別仕様となりコストが高くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 真空系の耐圧仕様を $-1 \sim 0 + \alpha \text{ kg/cm}^2$ (α : 設計余裕) とする。 コスト評価が必要である。 ナトリウムに対する耐圧バウンダリについての整合性をとる必要がある。
	<p>(3) 真空系の大気とのバウンダリー</p> <ul style="list-style-type: none"> 真空系の大気とのバウンダリーを真空弁によって構成すると、真空弁を誤操作したとき、真空系を真空破壊する恐れがある。（例： P N C 型 2 号機 - M K N ） 	<ul style="list-style-type: none"> 真空系粗引き時の操作についてその手順等を明確にしておく必要がある。 真空系の大気とのバウンダリーは盲フランジとする。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (7/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現 状 の 問 題 点	提言及び今後検討すべき事項
4. 真空系	<p>(4) 粗引き装置の構成</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ ソープションポンプの活性化のために排気量の大きなポンプが必要となる。 <p>50MWSGTではソープションポンプ+ロータリポンプとしている。</p> <p>(5) 真空系粗引き装置数</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ソープションポンプ+ロータリポンプとする。 ◦ 真空系の故障は補修法（運転時に補修するのか）との対応が必要である。
	<p>(6) 交 換</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 1の(6)ニッケル膜交換を参照 ◦ 真空系は一体として工場で製作、検査、ベーキング等の必要な処理を行った方が、信頼性向上のために有利である。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 真空系の交換は一体として行うことが望ましい。 ◦ 真空系としての交換の基準はニッケル膜をベースとして考えそこにイオンポンプと真空計の交換を組合わせて全体としての交換サイクルを考える。 ◦ 同一ループ内の3台の水素計については時期をずらしての交換が必要。 ◦ 1.(4)(5)(6), 2.(4)(5), 3.(6)(7)を総合的に評価・検討することが必要。
	<p>(7) 真空系組立後検査</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 現状ではHeリーク試験、真空度到達試験、放出ガス量試験を実施している。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 真空度到達試験は、放出ガス量試験により代行が可能である。（静的モード） ◦ この場合隔壁弁とイオンポンプ間の健全性の検査はで

Table 7-1 Proposal for prototype plant (8/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
4. 真空系		きないためその部分のみ、Heリーク試験を実施する必要がある。
	(8) ガス中水素計校正試験	<ul style="list-style-type: none"> ○ 実施する必要がない。 (ニッケル膜の透過率が安定するまで初期ドリフトがありガス中校正によっては、正確な校正が得られない。) (直線性の有無の確認が可能なだけでありその必要性はない。) (ガス中試験によっては、いずれにしろ測定下限 50 ppb までの校正是得られない。)
5. 主加熱器	(1) 容量 <ul style="list-style-type: none"> ○ 50MWSGTのPNC型のものでは 15 kWである が運転中の使用状態は 3 kW近傍である。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 5 kWで十分である。
	(2) 尺寸 <ul style="list-style-type: none"> ○ 現状 PNC 型 2 号機 MKIV では約 1,400 cm となっているがさらにコンパクト化すべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 他への波及効果も考慮し、最適長さを決定するべきである。 ○ 電気容量、温度制御性との兼合いを考慮すべきである。 ○ 検出遅れ時間に与える影響についても計算しておく必要がある。
	(3) 交換性 <ul style="list-style-type: none"> ○ 配管への取付は溶接付けとしており容易な交換ができない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 機械的接合(コノシールフランジ、グレーロック等)を用いる。(50MWSGTのナトリウム中、カバーガス中水素計にて実績があり、問題は生じていない。)

Table 7-1 Proposal for prototype plant (9/15)

実機プラントへの提言

項目，機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
5. 主加熱器		<ul style="list-style-type: none"> ○ ナトリウム中での機械的接合方式を採用するにあたつての他機器，システムとの整合性をはかる必要がある。
	(4) 交換頻度	<ul style="list-style-type: none"> ○ 定期的な交換は考える必要ない。 ○ 50MWSGT Fでのトラブル経験はない。 ○ ヒータとの整合性をとる必要がある。
6. 電磁ポンプ	(1) 容量 <ul style="list-style-type: none"> ○ システムを最適化しコスト低減化をはかるべきである。 ○ 50MWSGT F用では10ℓ/minのものを使用しているが運転は3ℓ/minとしている。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 容量とコストの関係を把握する必要がある。（容量を小さくすると，コスト低減につながるのなら低容量(5ℓ/min位)化しコスト上違ひがないのなら流量を大きくとることを考える。） ○ システムとしてどこまで流速上昇が可能か検討する。 ○ ナトリウム流量計との整合性をとる。
	(2) 据付位置	<ul style="list-style-type: none"> ○ 可能な限り水素計検出時間を短縮化するため出口配管に設置する。
7. ニッケル膜破損検出器	<ul style="list-style-type: none"> ○ ニッケル膜の破損を確実に検知することにより水素計の誤作動の原因を早期に知ることができる。 ナトリウムリークが発生するとその時の状態によっては、検出計としては水リーク警報を出すこととなり、誤警報となる。そのため早期の原因究明が必要となる。 ○ 50MWSGT FのCT-HNaClにおいても有効にニッケル膜部ナトリウムを検知することのできた経験がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 検知器を設置することはコスト的には増加する方向となるが比較的安価な温度計で十分有効である。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (10/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
8. ナトリウム中水素計システム	<p>(1) 真空系の構成</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 全ての水素計に静的室と動的室を設置する構成となっている。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 1ループあたり3台設置するナトリウム中水素計のうち1台のみに静的室を設置し、他の2台は動的室のみとする。これにより、大きなコストの低減がはかられる。 (全ての水素計で静的室を削除することも可能ではあるが静的室と動的室の切り換えによる校正法を採用すると操作が複雑であり校正時インターロック停止といったことも必要となりトラブルのもととなると考えられることから一台には静的室を設置することとする。) ◦ ループあたりのニッケル膜を減らすことにより、ニッケル膜の故障、真空系構成機器による故障をなくすことができ水素計としての総合稼動率を上げることができる。 ◦ 各水素計の校正是静的室を有する水素計との比較校正により可能である。 ◦ 校正方法のマニュアル作成が必要である。
	<p>(2) 真空構造部(ニッケル膜を含む)の接続</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 現状(PNC型2号機MKIV)ではリップ溶接となっており容易に交換ができない。 (カバーガス中水素計システムも同様) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 溶接の必要な場合リップ部を工夫し何個もの交換に耐えられる機械式接合(コノーシールフランジ、グレイロック)を採用する。 (50MWSGTFのナトリウム中、カバーガス中水素計で実績がある。) ◦ 他のナトリウムバウンダリの接合条件との整合をとる必要がある。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (11/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
8. ナトリウム中水素計システム	<p>(3) イオンポンプ隔離弁 静的平衡モードから動的モードにするときは圧力指示値を見ながら弁を除々に開とするため弁が手動弁ならば運転員が2人必要となる。 (圧力監視用と弁操作用にそれぞれ1人づつ) (カバーガス中水素計も同様)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 静的平衡測定用のイオンポンプ隔離弁は、制御盤で圧力指示を見ながら操作できるよう遠隔操作弁とする。
	<p>(4) 水素計の製作手順</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 健全な水素計を製作するためには、その工程管理、品質管理が必要であり、そのためにはユーザも製作手順を把握しておくことが必要である。 (カバーガス中水素計も同様) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 水素計の詳細な製作手順を把握し、その問題点を検討する。
	<p>(5) 製作時の真空系ベークアウト</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 工場での製作時のベークアウトについての直接の仕様は与えられていないが現状では長時間のベークアウトを実施しており製作時のコスト低減のため工場でのベークアウト時間を短縮できるよう検討が必要である。 <p>備考：① 水素計は使用初期時にドリフトする。このため、この期間は水リーク検出計として十分な機能を期待できない。したがって、この期間中にニッケル膜部の放出ガスが低減できればよく必ずしも工場での高温ベーキングは必要でないと思われる。</p> <p>したがって水素計の目標性能を踏まえ、それをベ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 他の条件との整合性をとった上で最適なベークアウト時間を見定める必要がある。ベークアウトを全然しないことも問題がある。 <p>ベークアウト時間を決定する条件は、水素計の測定下限値(50 ppb)であり、これを運転初期から満たそうとすると高温長時間(550°C 720時間)のベークアウトを必要とするが現実にはベークアウトを十分したとしても他の理由(ナトリウムとの濡れ)により初期には安定せず検出計としての機能を有しないのが現状でありこの間の整合をとる必要がある。</p>

Table 7-1 Proposal for prototype plant (12/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
8. ナトリウム中水素計システム	<p>ースにして決定する。</p> <p>たとえば、ナトリウム中水素計とカバーガス中水素計では条件が変わってくる。</p> <p>② 50MW使用している水素計はそれぞれニッケル膜の形状が異なり、ピークアウト条件も異なっている。</p> <p>例えば、</p> <p>550°Cで720時間 (PNC1号機改良型)</p> <p>300°Cで30時間 (PNC型2号機, MKIV)</p> <p>③ ピークアウト時間が長いニッケル膜は、ピークアウト時間の短かいそれに比べて使用初期におけるニッケル膜の水素透過率の安定時間は早いよう傾向がある。</p>	
	<p>(6) 水素計システム全体構成と据付方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 主系統配管の熱膨張が大きいため、水素計の設置方式を床固方式とすると水素計の配管が長くなり、水素計が大型化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 主系統につり下げる方式とし熱による移動を吸収することによって、水素計のサンプリング配管長を短縮し、全体のコンパクト化をはかる。 (50MWSGTのPNC型2号機MKIV, 東芝型水素計に採用してコンパクト化に成功しており、トラブルの発生もみられていない。)
	<p>(7) 水素計システム単独での耐圧, Heリーク試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 単独での耐圧, Heリーク試験ができないと、水素計の試験のために二次系全体を加圧する等の不具合が 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 二次系、水素計システム、その他のシステムにおける耐圧、Heリーク試験の手法を検討する必要がある。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (13/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現状の問題点	提言及び今後検討すべき事項
8. ナトリウム中水 素計システム	<p>生ずる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 二次系全体を加圧すると、SGのラブチャーデスクのため、圧力が制限される。 <p>(8) 水素計単独でのドレンチャージ循環の機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 水素計システム側でナトリウムリークの発生した場合の対策をどうするのか、不明確である。 <p>○ プラント運転中における水素計のメンテナンスの必要性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 施設完成時のみでなく、その後の施設補修時の検査についても、その方法、手順を十分に検討しておく必要がある。 ○ 総合的な評価を行い、その必要性あるいは削除の可能性について、検討する必要がある。 <ul style="list-style-type: none"> (1) 他のリーク時との整合性によりプラントを停止すべきとなれば単独でのドレン不要。 (2) ナトリウムリークを水素計システムに限定させてプラント運転をする場合には単独ドレン必要。 (ナトリウムリーク時水素計システム内のリークナトリウムを固化した状態で放置できないと考える。) この場合には、サンプリング出入口配管のバルブを二重にする必要もあると考える。 (他のシステムの例（純化系のナトリウムリーク時対応）との整合性が必要) (1) 運転中に水素計が故障した場合、次の停止時まで補修しないということなら単独でのドレン、チャージ機能不要 (2) 補修を必要とした時は単独ドレン、チャージ機能必要

Table 7-1 Proposal for prototype plant (14/15)

実機プラントへの提言

項目、機器	現 状 の 問 題 点	提言及び今後検討すべき事項
8. ナトリウム中水素計システム	<ul style="list-style-type: none"> ○ 新設又は交換後のニッケル膜の特性の安定しない期間の水素計の扱いをどうするのか。 (新しいニッケル膜はナトリウム浸漬後約一ヶ月間は、水素透過率が安定せず水素計としての精度は悪い) 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 故障水素計と同じ扱いにすれば単独ドレン、チャージ機能不要 (2) 水素計システムに単独でのドレン、チャージ循環機能があれば、プラントのナトリウムチャージ前に、水素計での単独の運転を行うことができる。
9. カバーガス中水素計システム	<ul style="list-style-type: none"> (1) カバーガスサンプリング位置 <ul style="list-style-type: none"> ○ 50MWSGTのカバーガスサンプリングは、ナトリウム液面と鏡部(1m)の中間部(0.5m)で行っている。(現在、サンプリング位置効果試験を検討中) (2) 人口配管勾配 <ul style="list-style-type: none"> ○ カバーガス中水素計サンプリング入口配管に関して配管は1/2B程度であり、サンプリングガスの流れとナトリウムドレンの流れが逆方向であるため配管がナトリウムにより、閉塞する恐れがある。 <p>参考：シェル直接挿入式カバーガス中水素計</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 強制循環型のカバーガス中水素計は構成機器が多いためコストが高く、また故障確率も高くなる。 ○ SGと水素検出計との間にガスサンプリング用配管が必要であり、直接挿入式に比べて検出時間が遅くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ SG上部鏡部での水素検出が一番感度良いと考えられるがカバーガス中水素挙動を検討し、サンプリング位置を決定する。 ○ SG(EV, SH)の構造設計と整合をとる必要がある。 ○ サンプリング入口配管の勾配を大きくとる必要がある。 ○ 全水リーク検出システムの中でのカバーガス中水素計の占める役割又は位置付けがナトリウム中水素計に比べて重要でないにもかかわらずコスト的には大きな役割合を占めておりシステムとしての見直しが必要である。 ○ 水リーク位置(カバーガス中、ダウンカマ領域ナトリウム中)によるカバーガス中水素計の必要性の検討を実施する。

Table 7-1 Proposal for prototype plant (15/15)

実機プラントへの提言

項目，機器	現 状 の 問 題 点	提言及び今後検討すべき事項
9. カバーガス中水素計システム	<ul style="list-style-type: none"> ○ PNCのプラント安全工学室においても使用実績があり特にトラブルの発生も見られなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ナトリウム中水素計と同様その故障時のメンテナンスの必要性についてロジックを作成する。 ○ SG本体への設置が困難な場合には圧力放出系配管への設置も可能である。
10. 運 転	<p>(1) 校正曲線の与える影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 校正曲線としてどの程度の精度が要求されるかについて定量的に把握する。これにより運転中の校正方法を検討する。 <p>(2) 校正方式</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 校正曲線の精度が水リーク検出による警報、施設トリップに及ぼす影響について評価する。 ○ 計算機システムに校正試験結果から直ちにオンラインで校正式が作成され真空計出力値を水素濃度に変換するシステムを作成しておく。 ○ オリフィスタイルでは、水素計が安定した時点（ナトリウム中運転1ヶ月後）では一点校正により勾配を求める方式で十分精度よい校正式が得られる。 ○ 50MWSGTFでの経験からオリフィスタイルの水素計の経時変化は小さく1サイクルに1回の一点校正で十分である。 ○ 校正は1サイクル運転（約4ヶ月か）中に1回で十分である。 ○ 水素計の校正式の時間による変化をチェックする目的で1ループ中の3台のナトリウム中水素計出力の相互比較をし、制限値を超えた時、知らせるような監視システムを設置する。

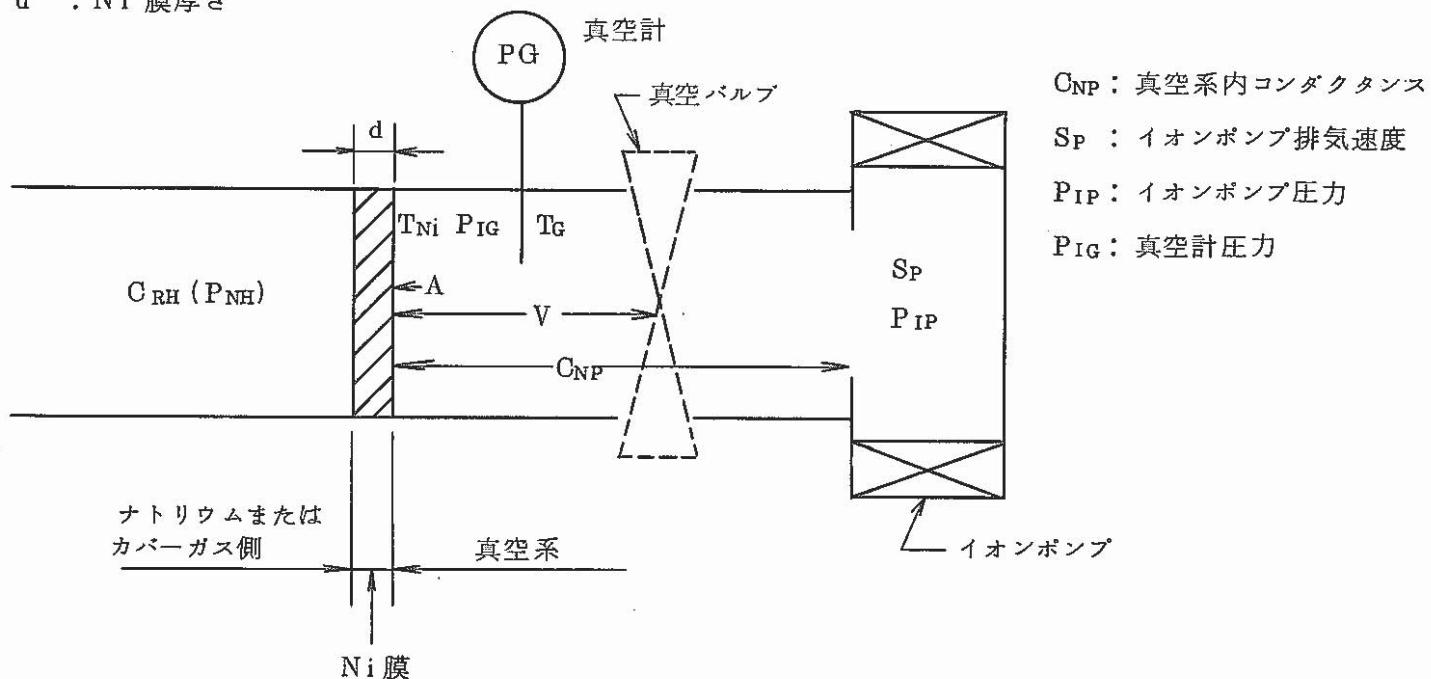
C_{NH} : 水素濃度 P_{NH} : 水素分圧 T_{Ni} : Ni 膜部温度 d : Ni 膜厚さ A : Ni 膜面積 T_G : 真空計部温度 V : Ni 膜～真空バルブ間の容積 C_{NP} : 真空系内コンダクタンス S_P : イオンポンプ排気速度 P_{IP} : イオンポンプ圧力 P_{IG} : 真空計圧力

Fig. 2-1 Schema of nickel diffusion type hydrogen meter

水素計概念図

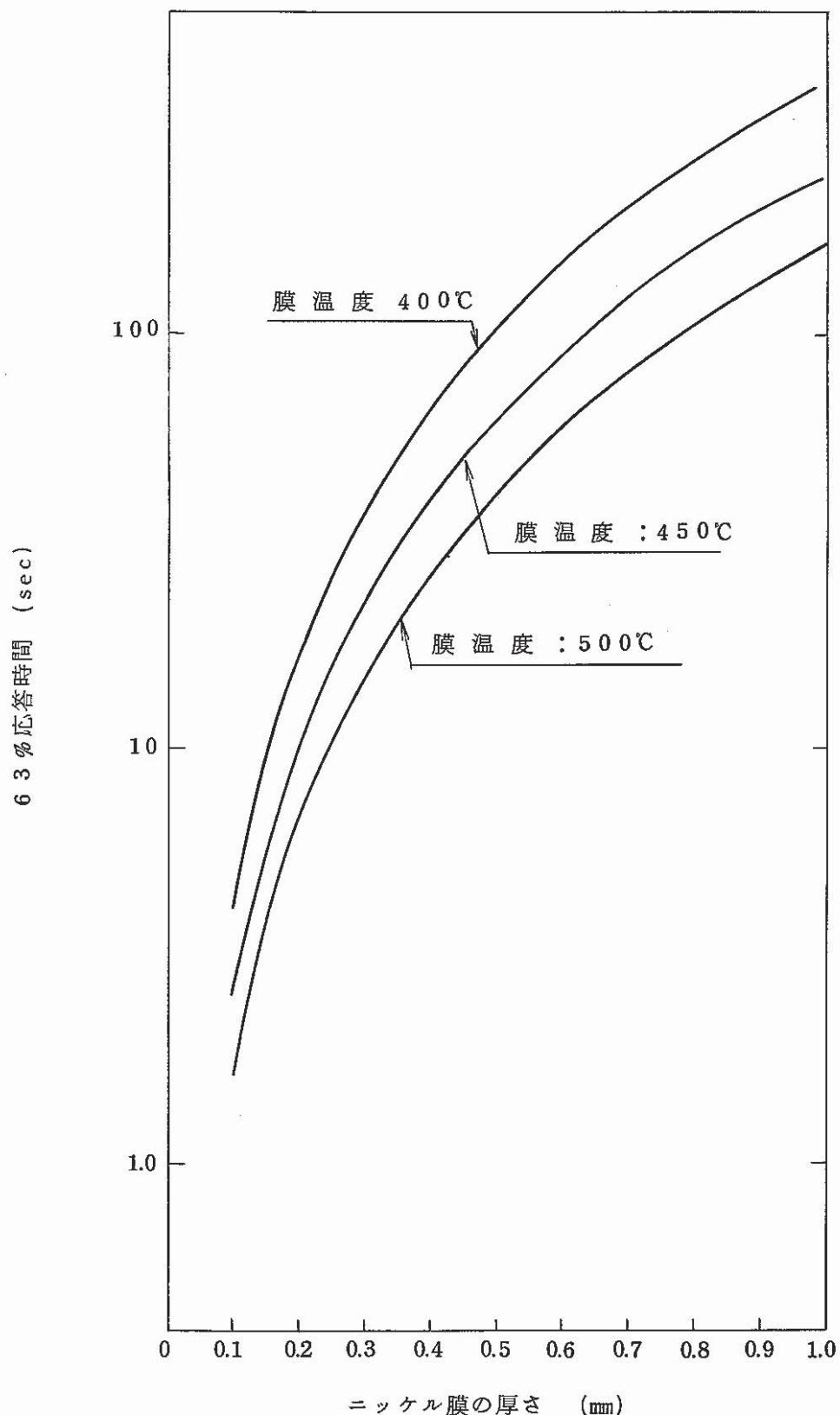


Fig. 2-2 Relation between nickel membrane thickness and
63% response

ニッケル膜の厚さと 63%応答時間との関係

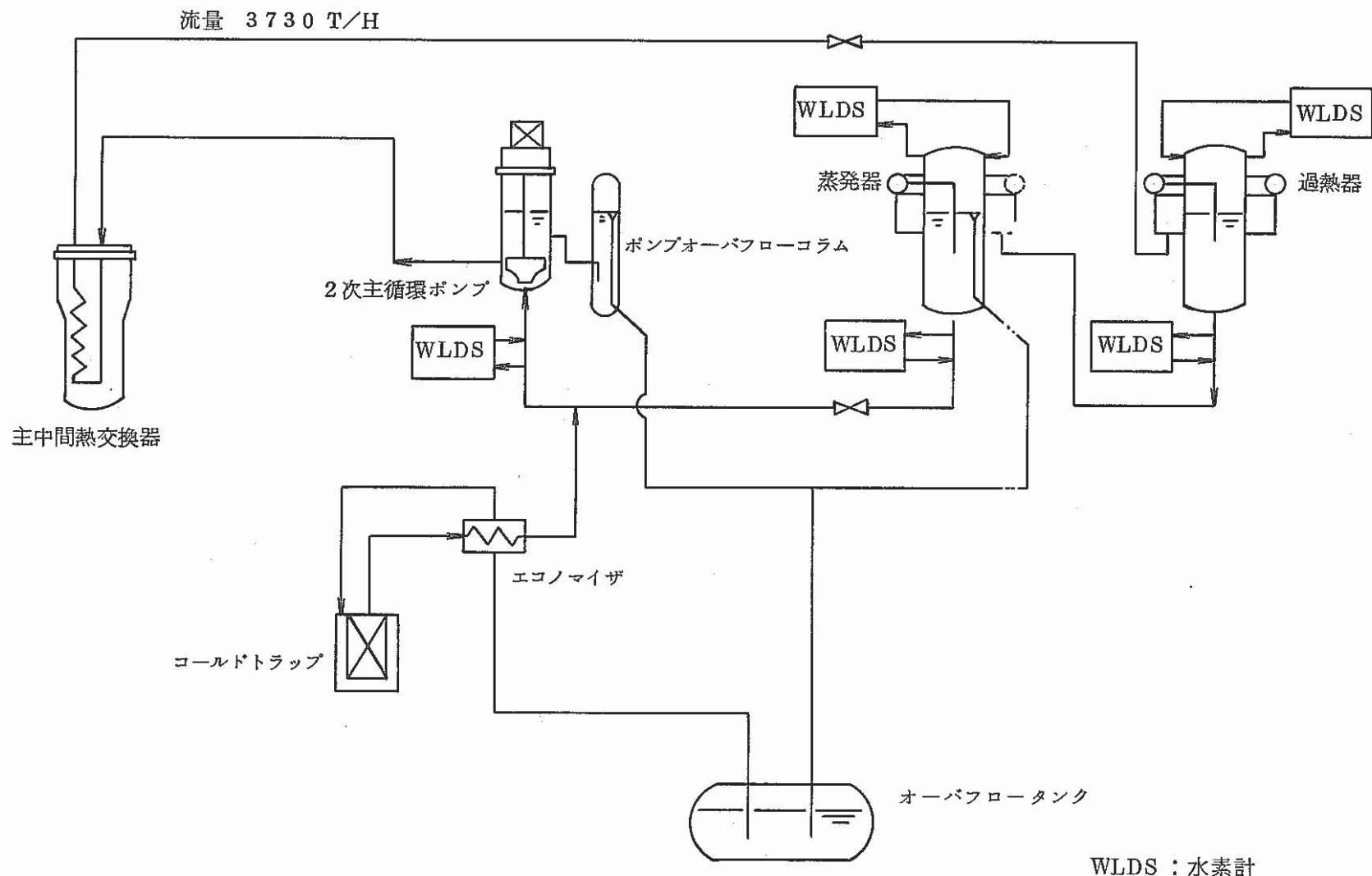


Fig. 2 - 3 Schema of secondary loop in "Monju" plant

「もんじゅ」2次系の概略図

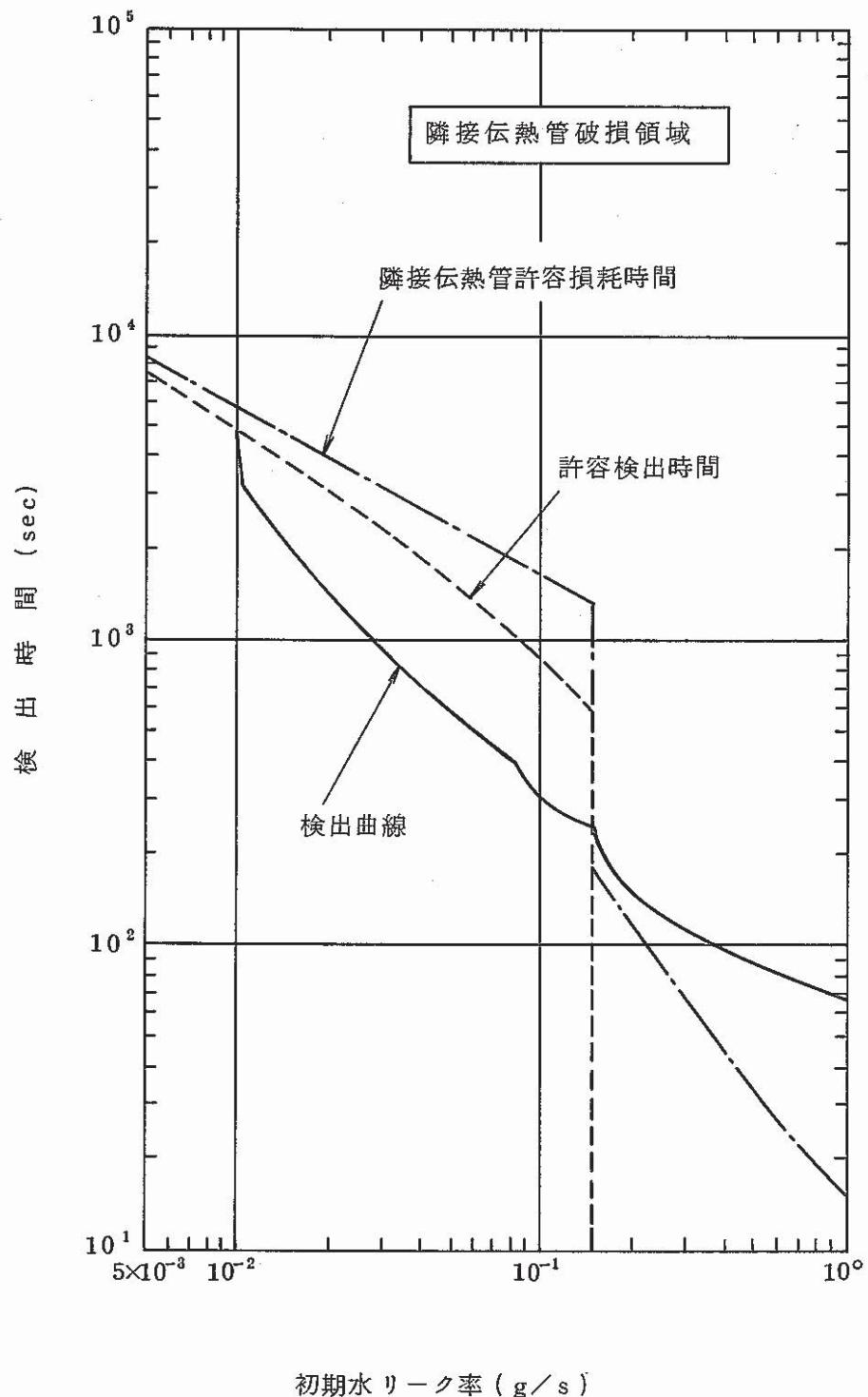


Fig. 2 - 4 Water leak detection characteristic figure

水リーク検出特性図

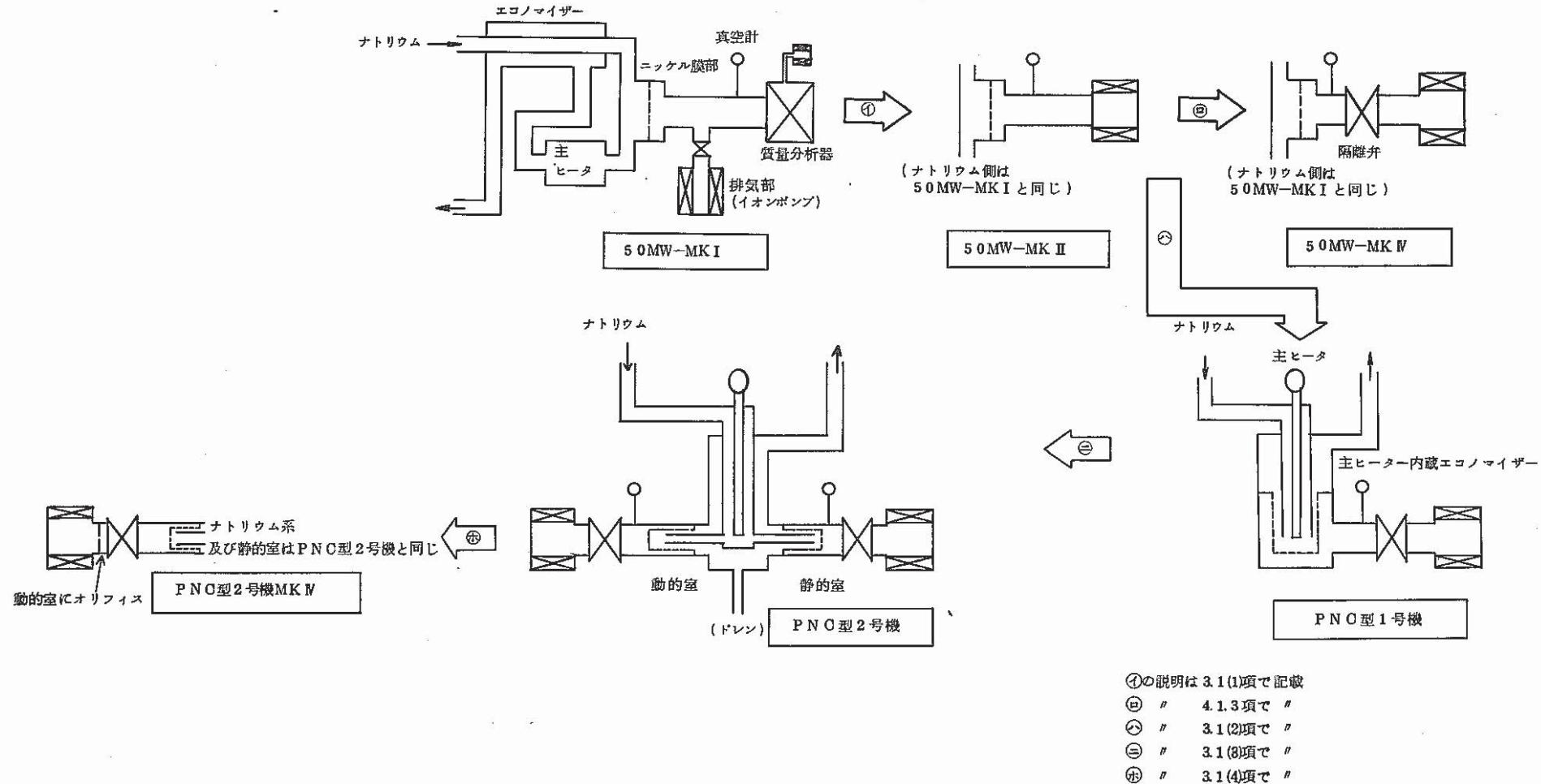


Fig. 3-1 Development of in-sodium hydrogen meter

ナトリウム中水素計の開発経過

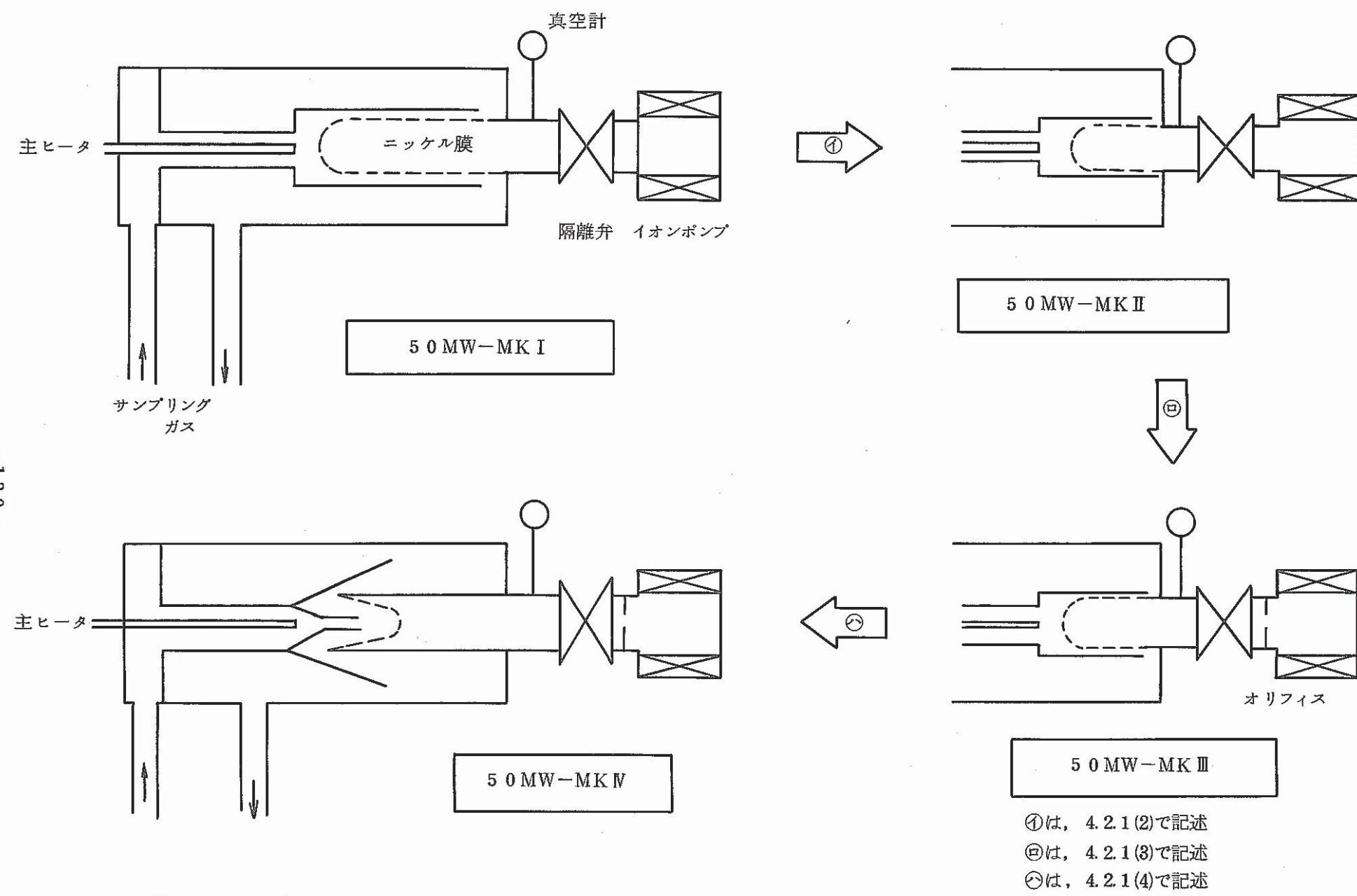


Fig. 3-2 Development of gas circulating in-cover gas hydrogen meter in 50 MW SGT F
50 MW SGT Fにおける循環式カバーガス中水素計開発経過

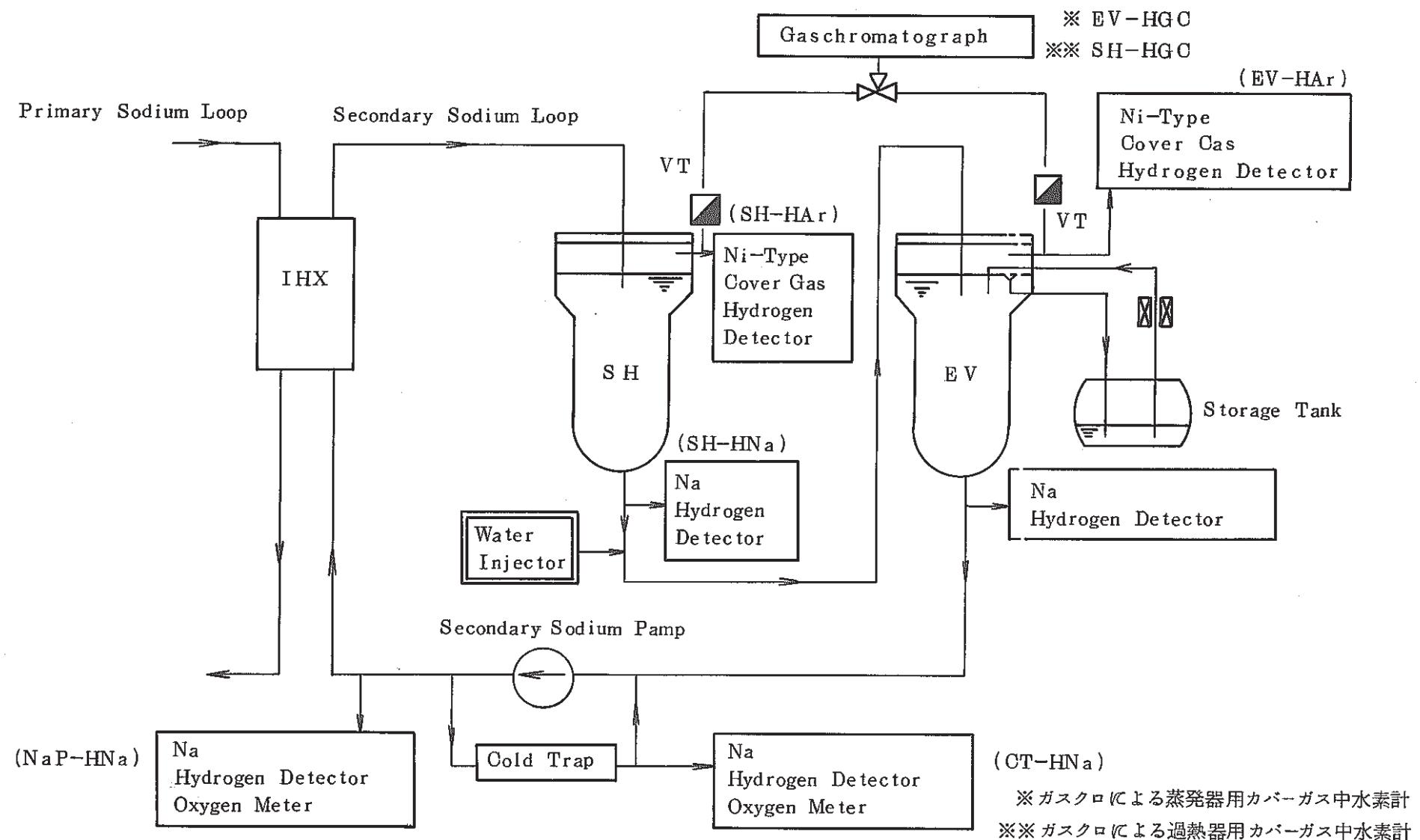


Fig. 4-1 Schema of hydrogen meters location

水素計の設置位置

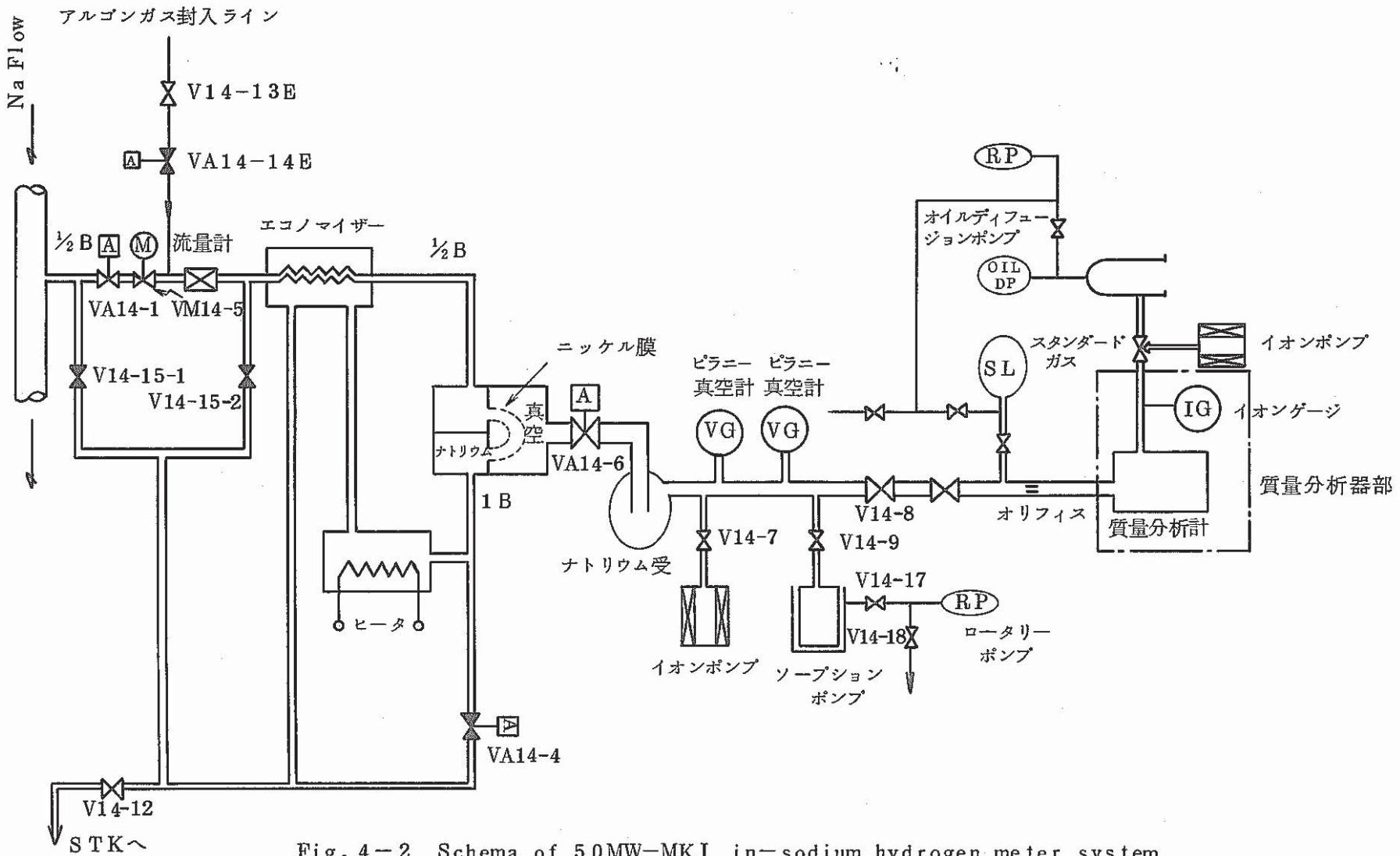


Fig. 4-2 Schema of 50MW-MKI in-sodium hydrogen meter system

50MW-MKI ナトリウム中水素計系統図 (SH-H_{Na}, E_v-H_{Na})

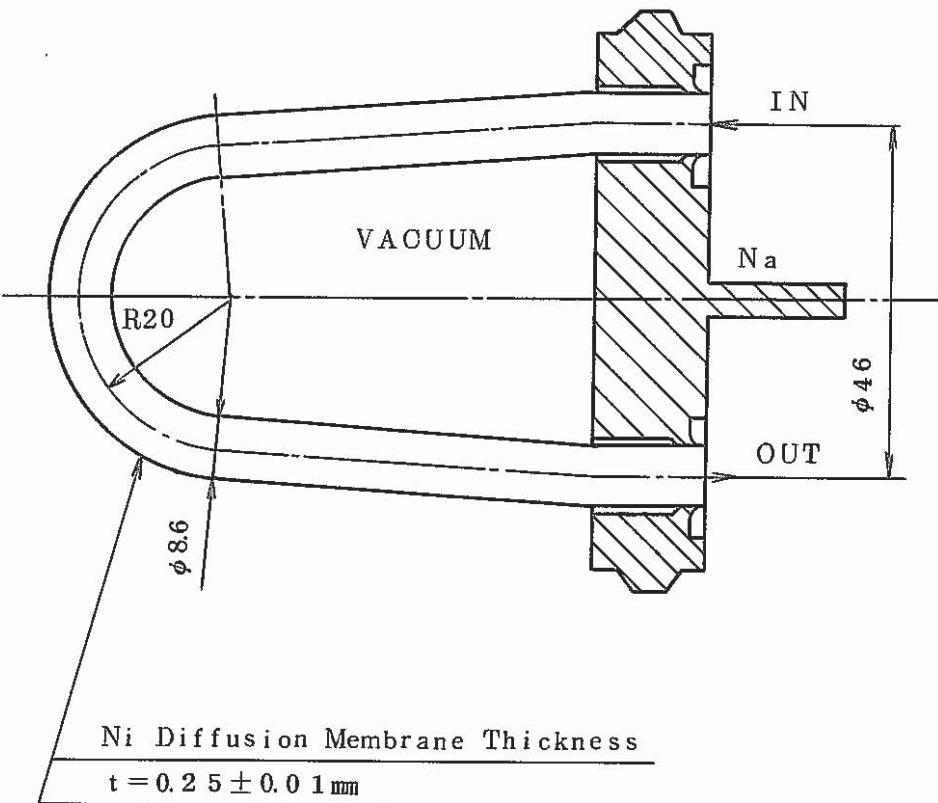
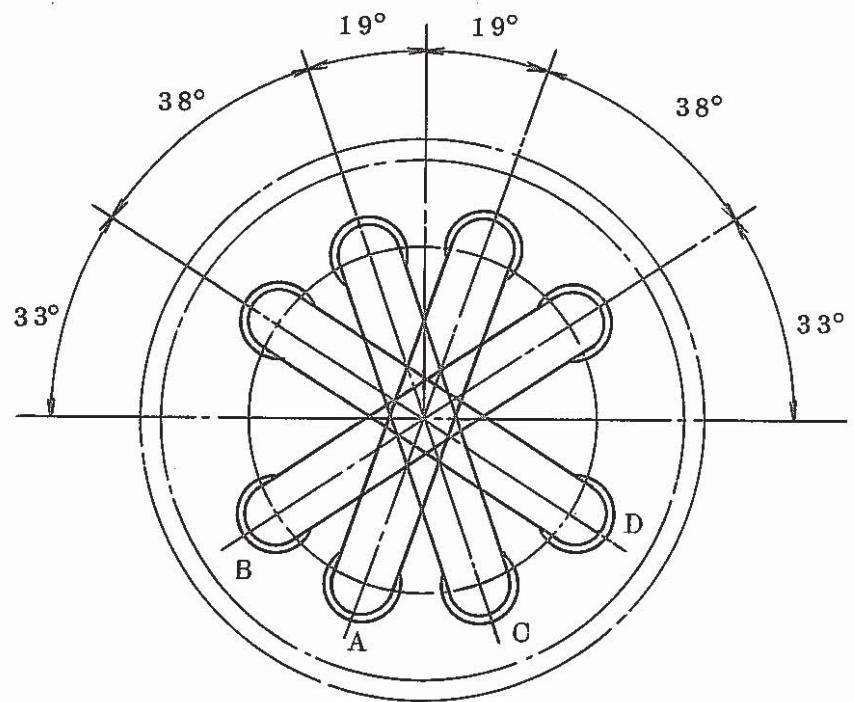


Fig. 4-3 Schema of nickel membrane of hydrogen meter of 50MW-MK I, -MKII and -MKIII

50MW-MK I, -MKII, -MKIII のニッケル膜構造図

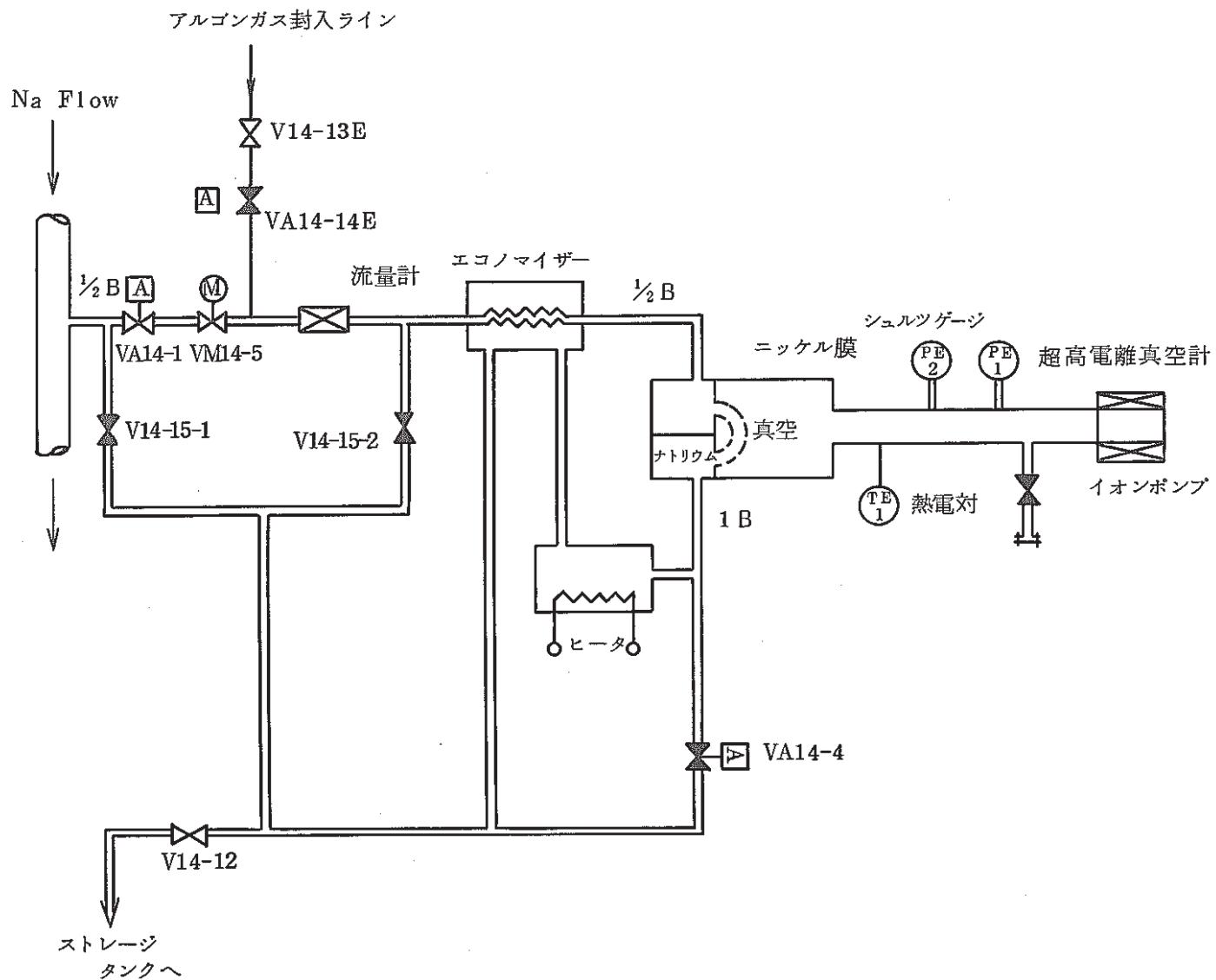


Fig. 4 - 4 Schema of 50MW-MKII in-sodium hydrogen meter system (SH-HNa, EV-HNa)
50MW-MKII ナトリウム中水素計系統図 (SH-HNa, EV-HNa)

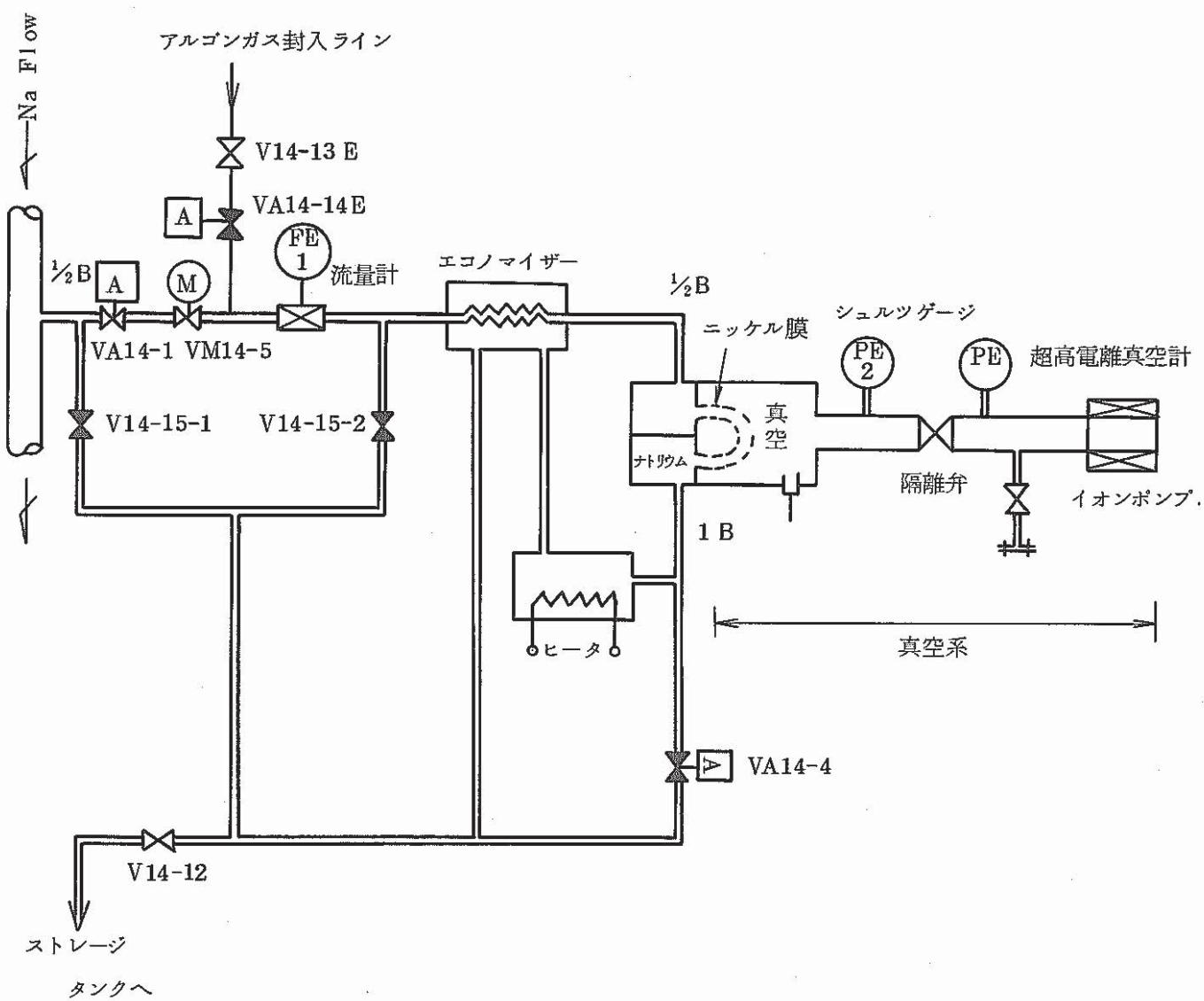


Fig. 4-5 Schema of 50MW-MKIII in-sodium hydrogen meter system (EV-HNa)
50MW-MKIII ナトリウム中水素計系統図 (EV-HNa)

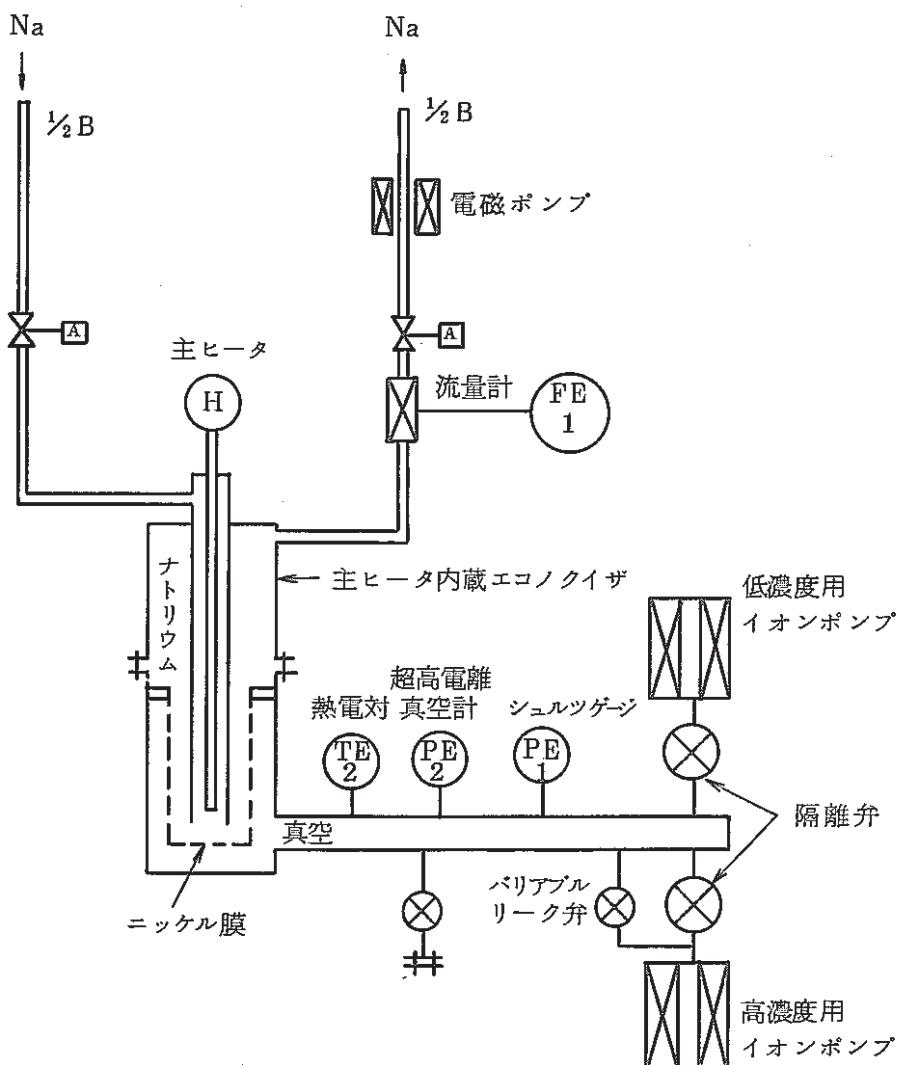


Fig. 4-6 Schema of PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter system (NaP-HNa, CT-HNa)

PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計系統図
(NaP-HNa, CT-HNa)

番号	名 称
1	ヒ 一 タ
2	ス リ ー ブ (1)
3	内 管
4	ス リ ー ブ (2)
5	案 内 管
6	外 管
7	ス タ フ エ エ ド
8	フ ラ ン ジ
9	入 口 ノ ズ ル
10	出 口 ノ ズ ル
11	ス リ ー ブ (3)
12	熱 電 対

設 計 仕 様	
設計圧力	-1~10 kg/cm ² G
設計温度	550 °C
外 径	1 1/4 B Sch 40 ($\phi 42.7$ mm)
長 さ	1695 mm
ヒータ容量	4 kW
Na容 量	3 ℥/min

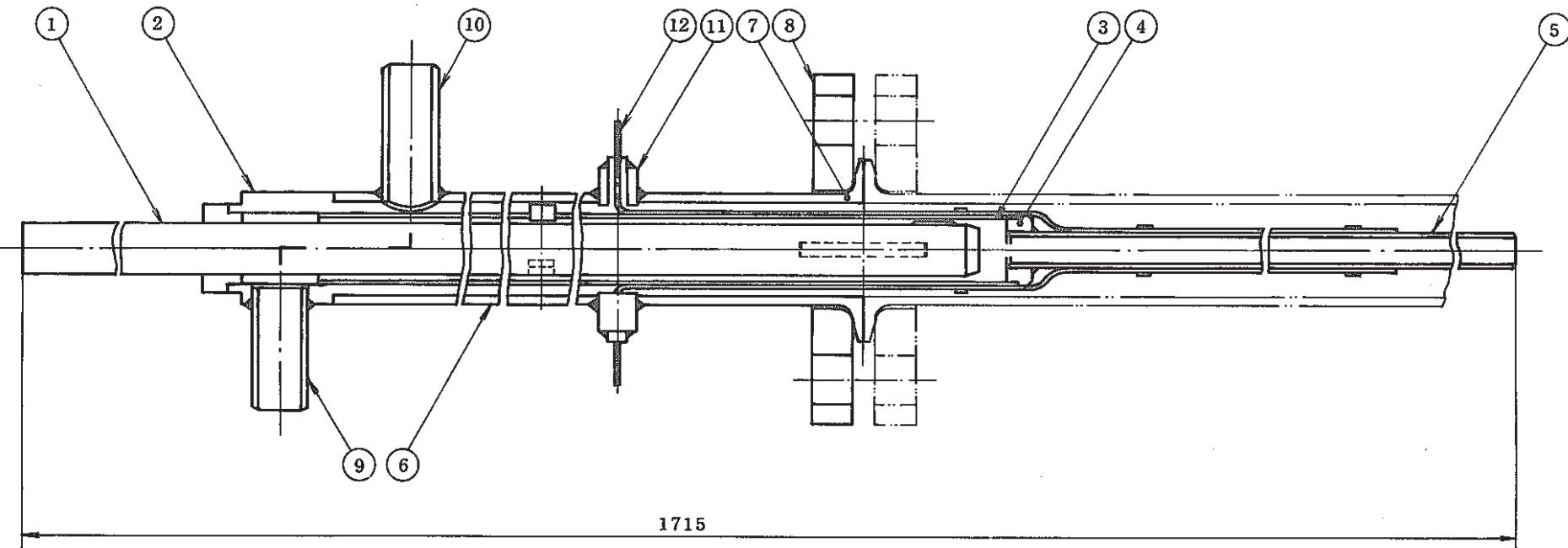


Fig. 4-7 The economizer contained main heater of PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter
PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計の主ヒータ内蔵エコノマイザの構造図

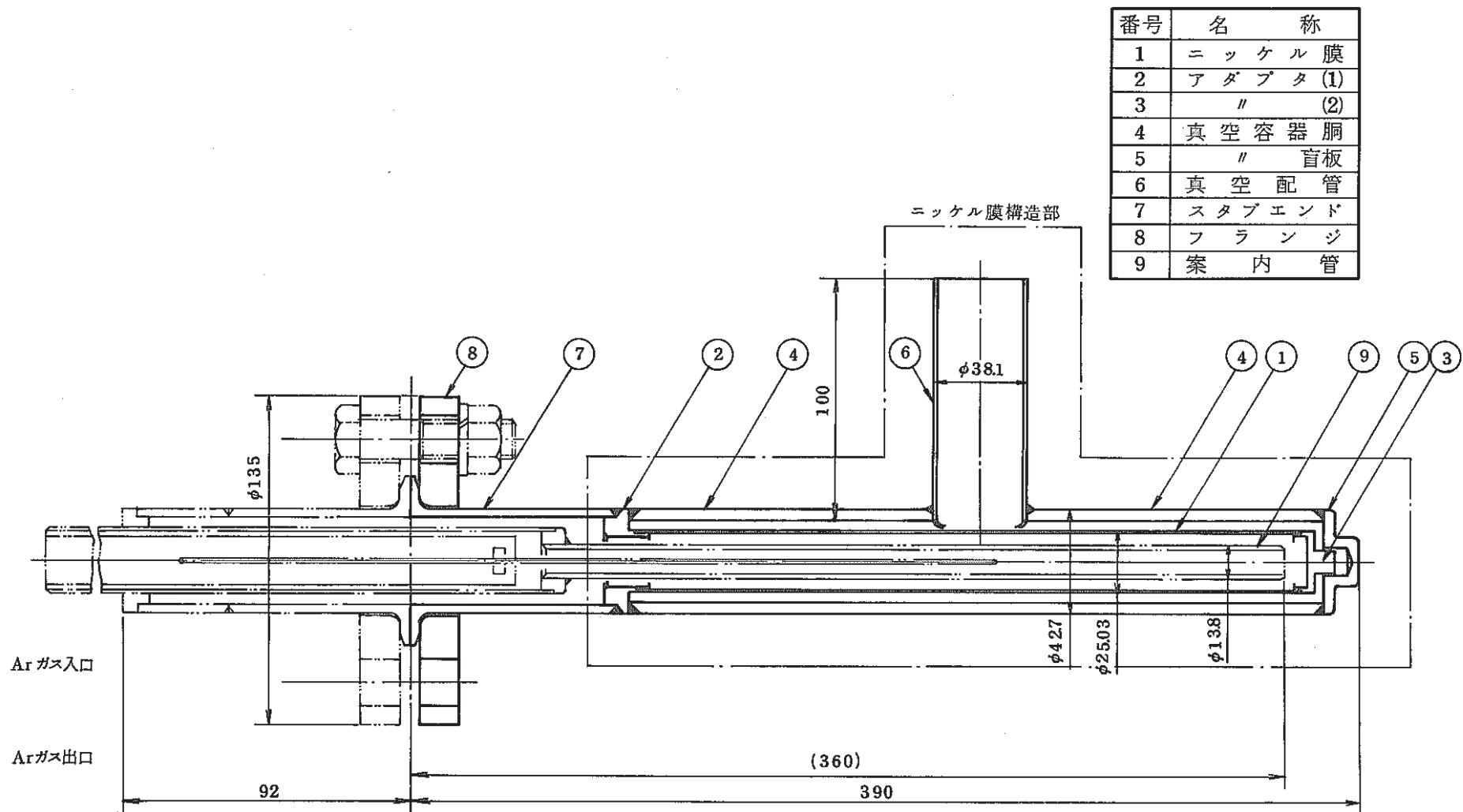


Fig. 4-8 The nickel memarane in PNC type-I improvement model in-sodium hydrogen meter

PNC型1号機改良型ナトリウム中水素計のニッケル膜構造図 (Nap-HNa, CT-HNa)

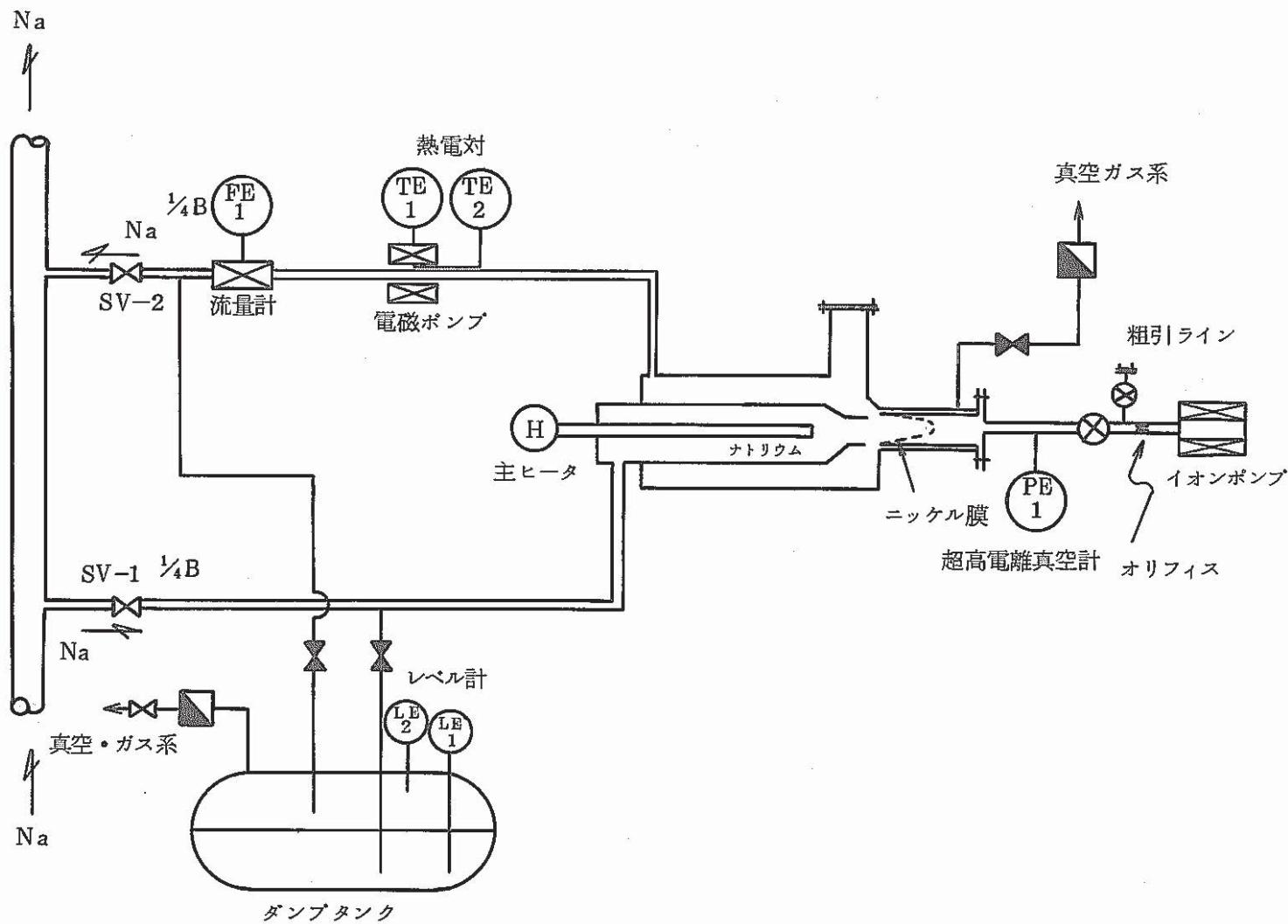


Fig. 4-9 Schema of Toshiba model in-sodium hydrogen meter system (SH-HNa)

東芝型ナトリウム中水素計系統図 (SH-HNa)

P NO	部品名称
1	外管
2	内管
3	ヒータ
4	酸素計用ハウジング
5	TCウェル
6	コノシール継手
7	ニッケル膜

N番号	名 称
N-1	Na入口ノズル
N-2	Na出口ノズル
N-3	酸素計取付ノズル
N-4	ガス系ノズル
N-5	真空系ノズル

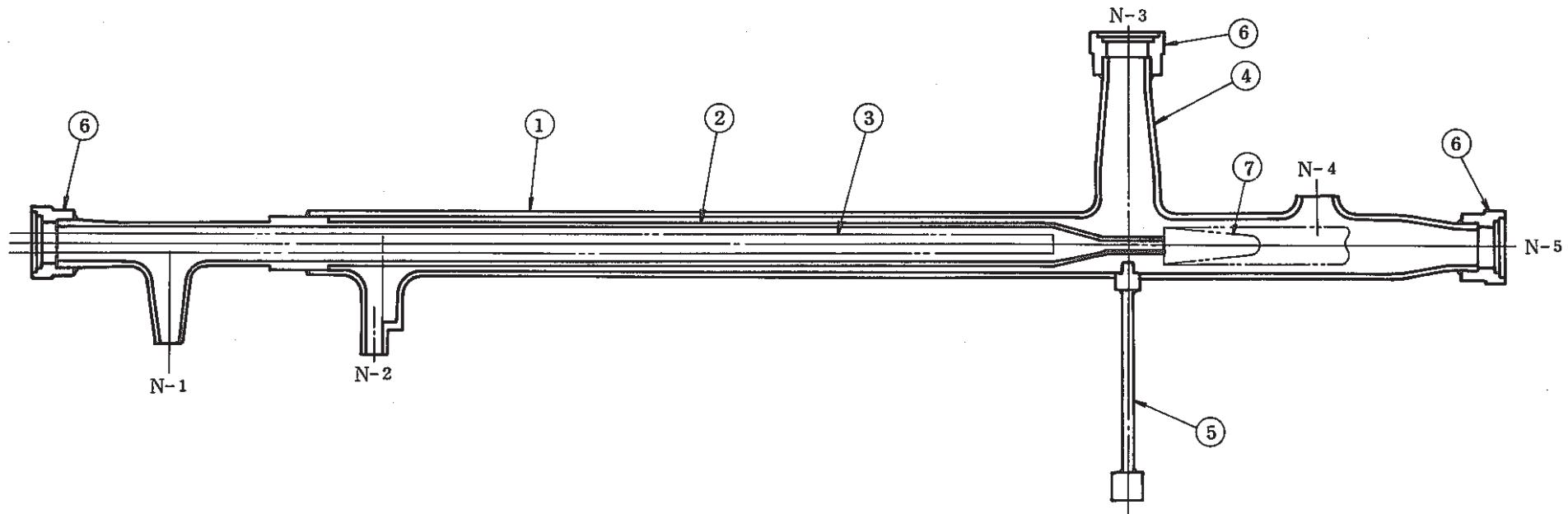


Fig. 4-10 Schema of economizer contained main heater of Toshiba model in-sodium hydrogen meter (SH-HNa)

東芝型ナトリウム中水素計の主ヒータ内蔵エコノマイザ構造図 (SH-HNa)

真空配管

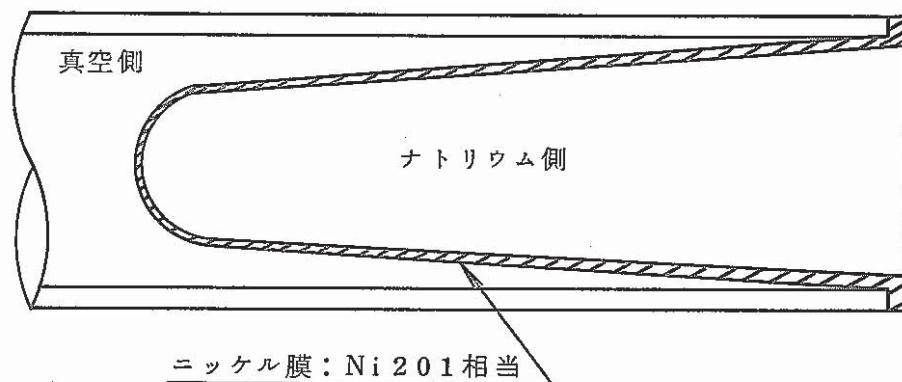


Fig. 4-11 The nickel memarane in Toshiba model in-sodium hydrogen meter

東芝型ナトリウム中水素計のニッケル膜構造図

機器名	測定部分	d (mm)		D (mm)	t (mm)
		X方向	Y方向		
東芝型 (SH-HNa)	基準値	2.00	2.00	48.0	2.0
	公差	±0.8	±0.8	±0.5	±0.8
	実測値	2.01	2.01	48.0	2.0
PNC型2号機 -MKN (EV-HNa)	基準値	3.00	3.00	48.0	2.0
	公差	±0.8	±0.8	±0.5	±0.8
	実測値	3.00	3.00	48.0	2.0
50MW-CG- MKN (EV-HAr)	基準値	1.50	1.50	48.0	2.0
	公差	±0.8	±0.8	±0.5	±0.8
	実測値	1.50	1.50	48.0	2.0

Fig. 4-12 Measure of an orifice for an ion pump
イオンポンプ部オリフィス寸法

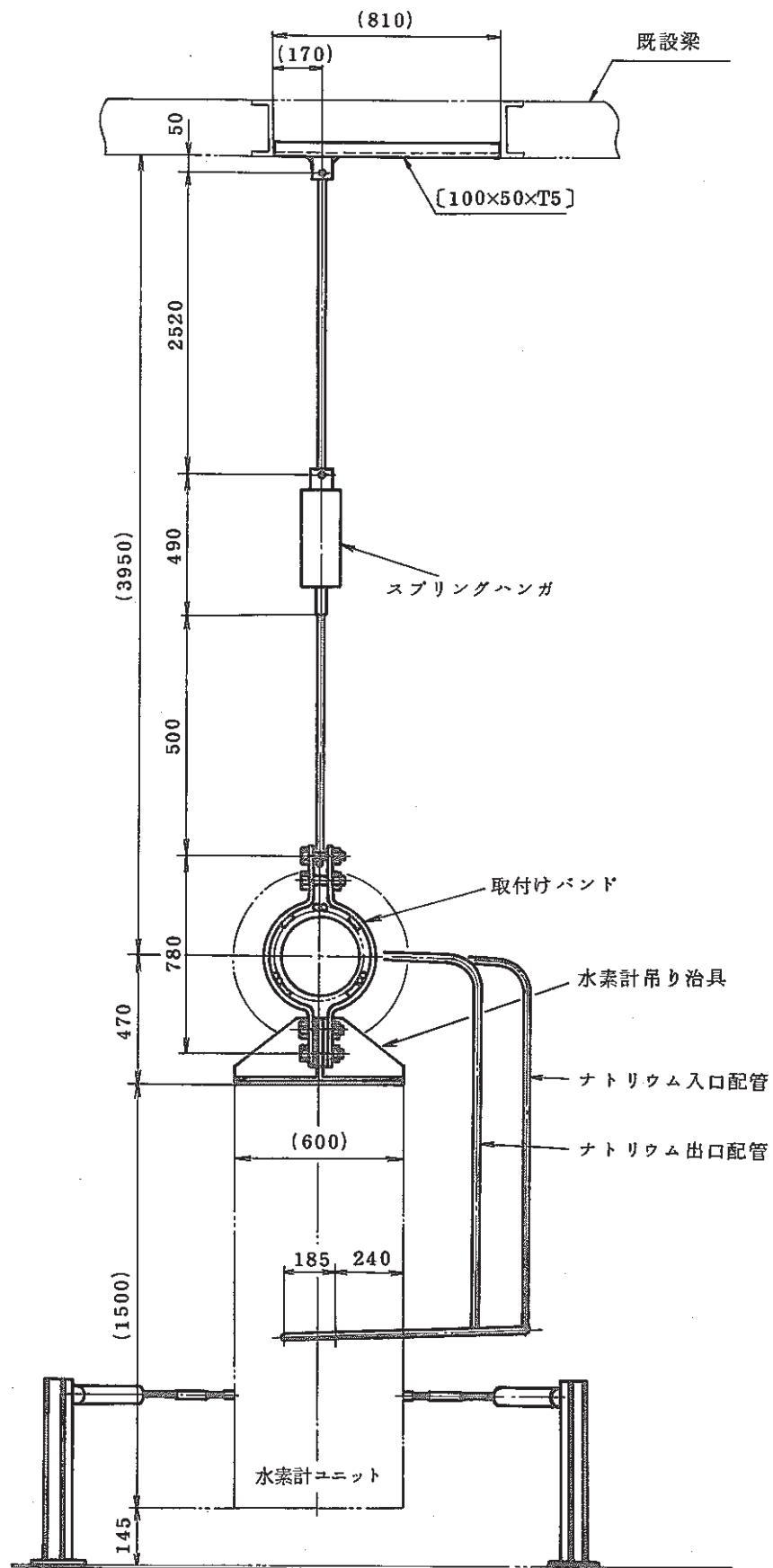


Fig. 4-13 Installation of Toshiba model in-sodium hydrogen meter

東芝型ナトリウム中水素計取付図

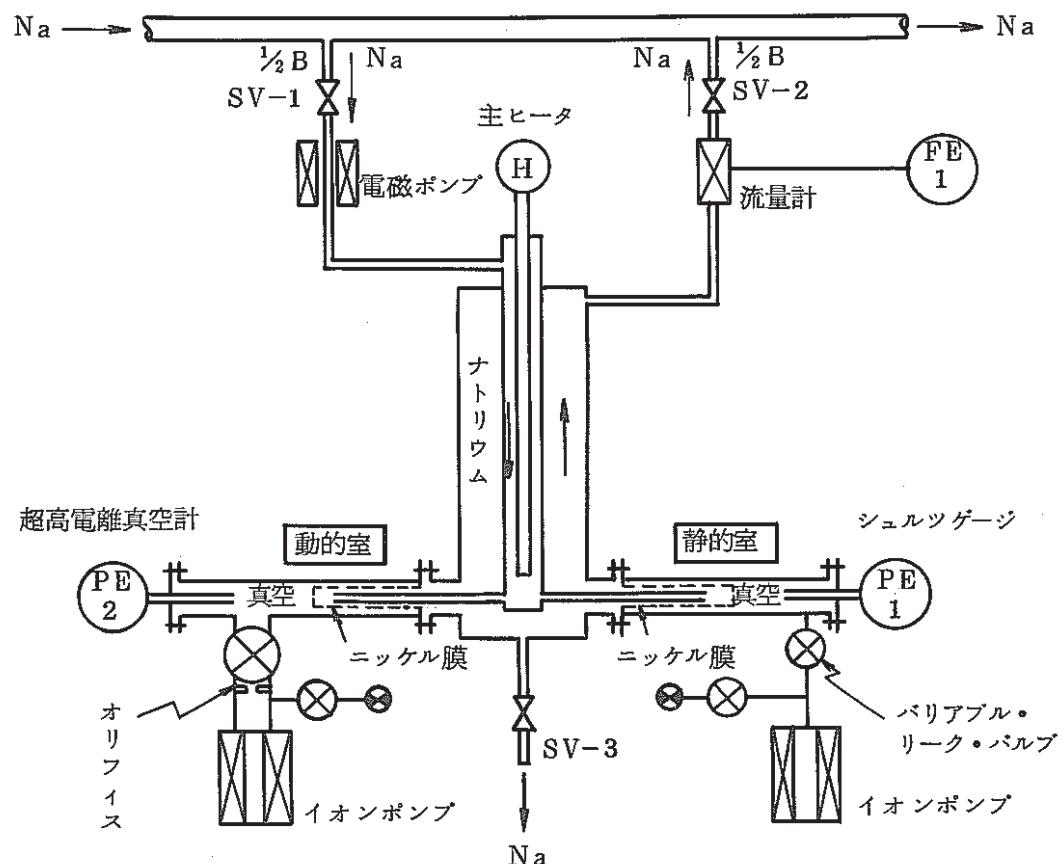
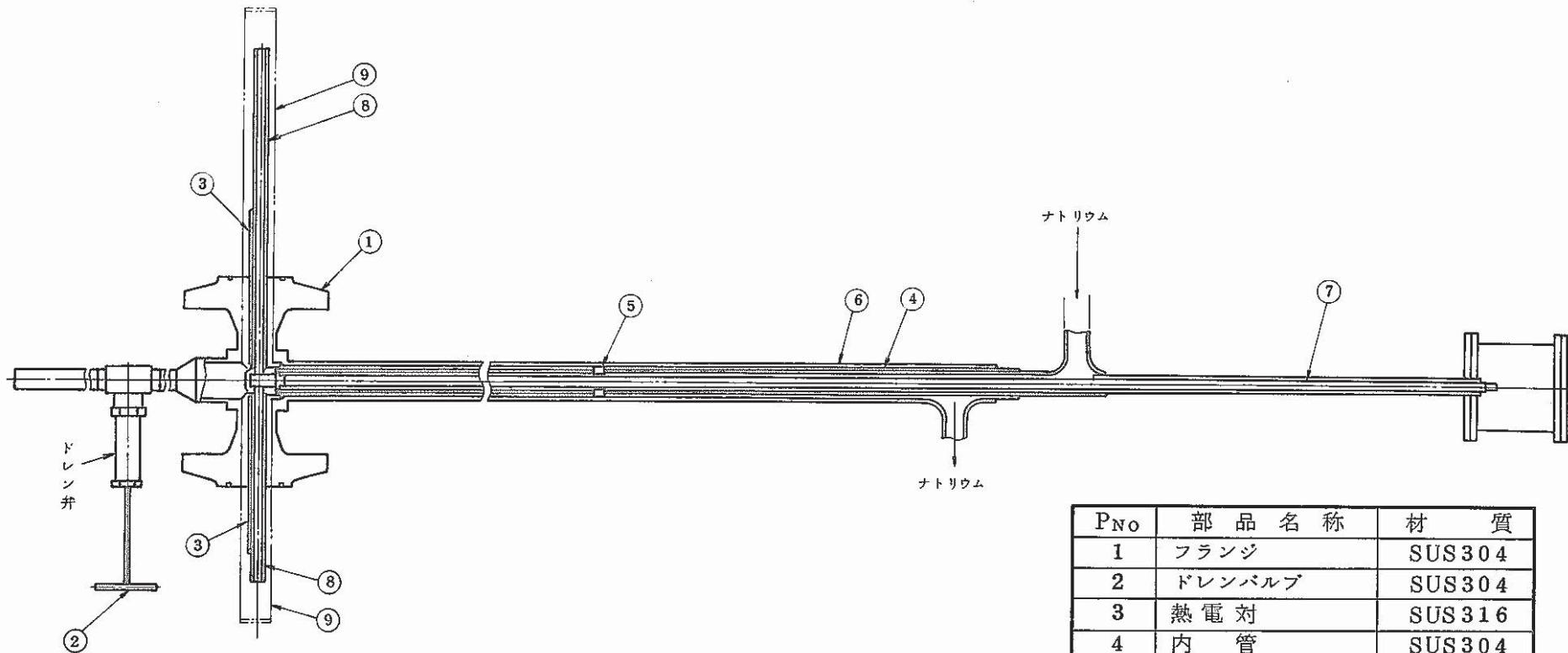


Fig. 4-14 PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter (EV-HNa)

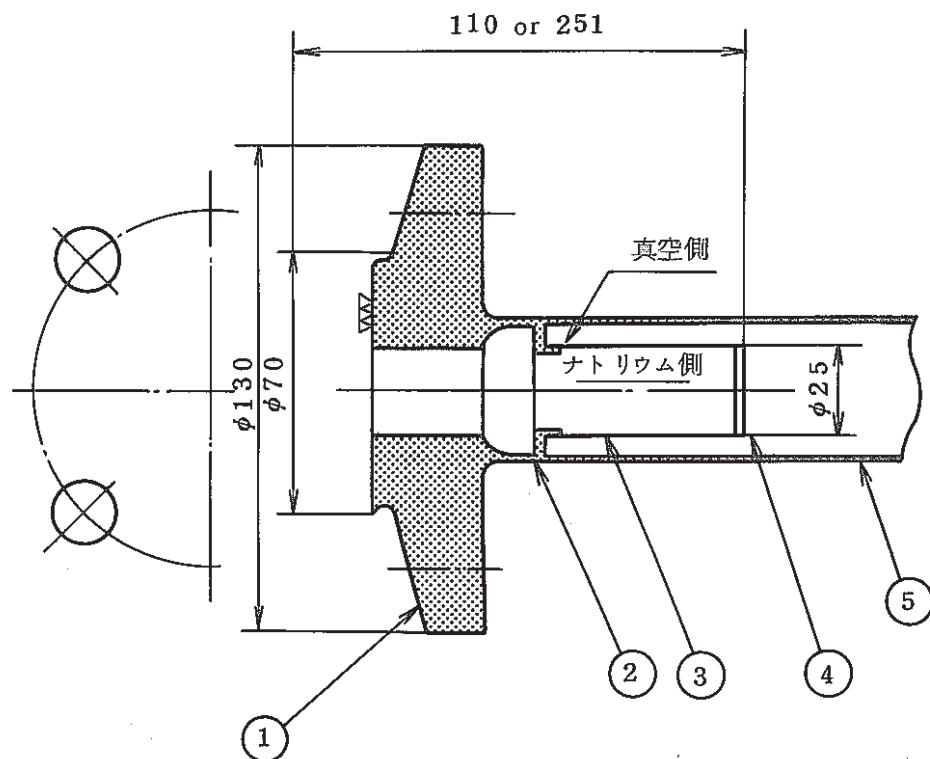
P N C 型 2 号機 MK IV ナトリウム中水素計系統図 (EV-HNa)



P No	部品名称	材質
1	フランジ	SUS304
2	ドレンバルブ	SUS304
3	熱電対	SUS316
4	内管	SUS304
5	スペンサ	SUS304
6	外管	SUS304
7	ヒータ	インコネル610
8	Naディストリビュータ	SUS304
9	ニッケル膜	Ni

Fig. 4-15 The economizer contained main heater of PNC type-II MK IV in-sodium hydrogen meter

PNC型2号機MK IV 主ヒータ内蔵エコノマイザの構造図



PNo	部品名称	材質
1	フランジ	SUS304
2	座	SUS304
3	ニッケル膜	Ni201相当
4	底板	SUS304
5	真空パイプ	SUS304

Fig. 4-16 The nickel membrane in PNC Type-II MKIV in-sodium hydrogen meter
PNC型2号機MKIVニッケル膜構造図

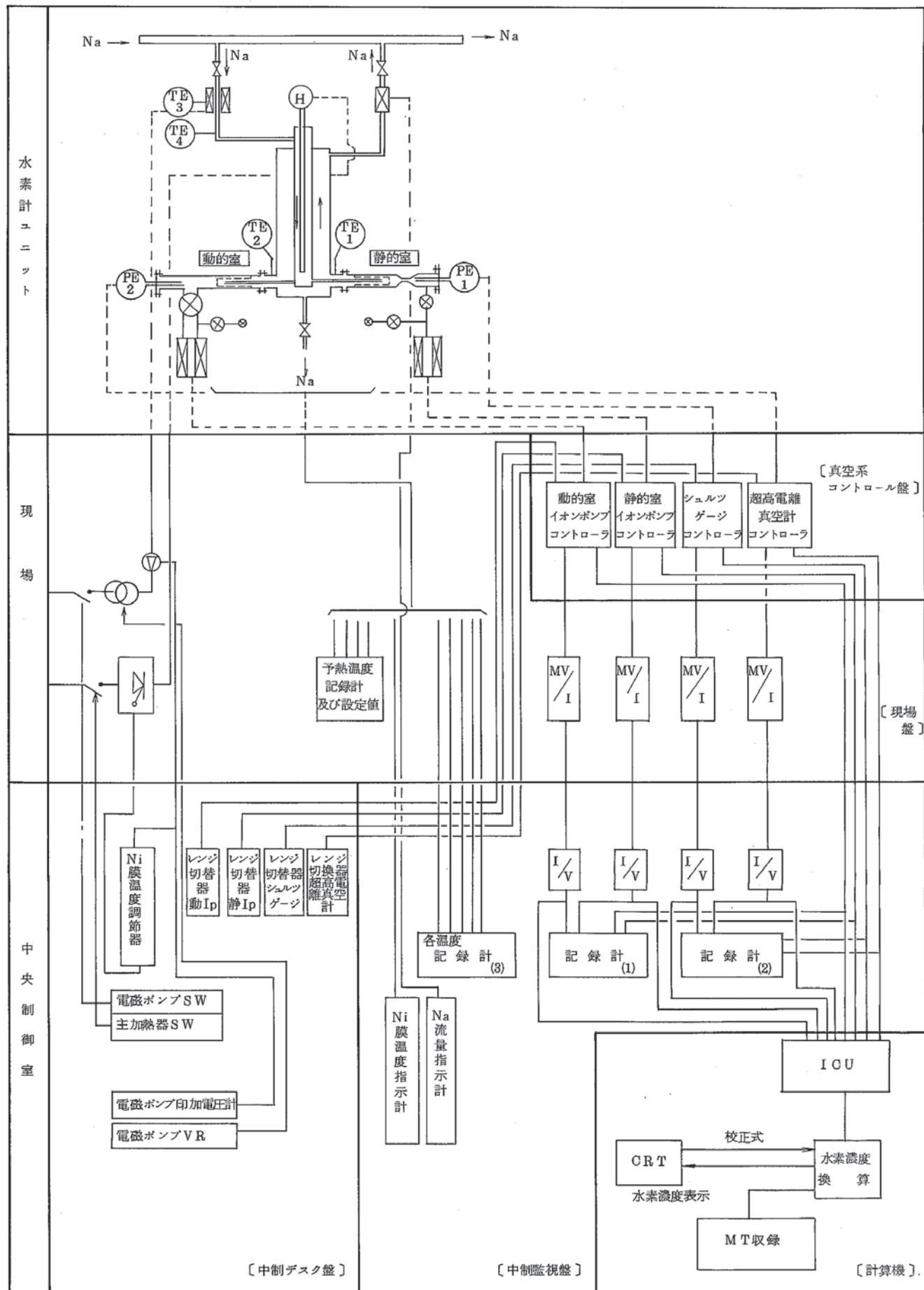


Fig. 4-17 Measurement and signal flow of PNC type-II MKV in-sodium hydrogen meter

PNC型2号機MKVの計装および信号処理フロー：

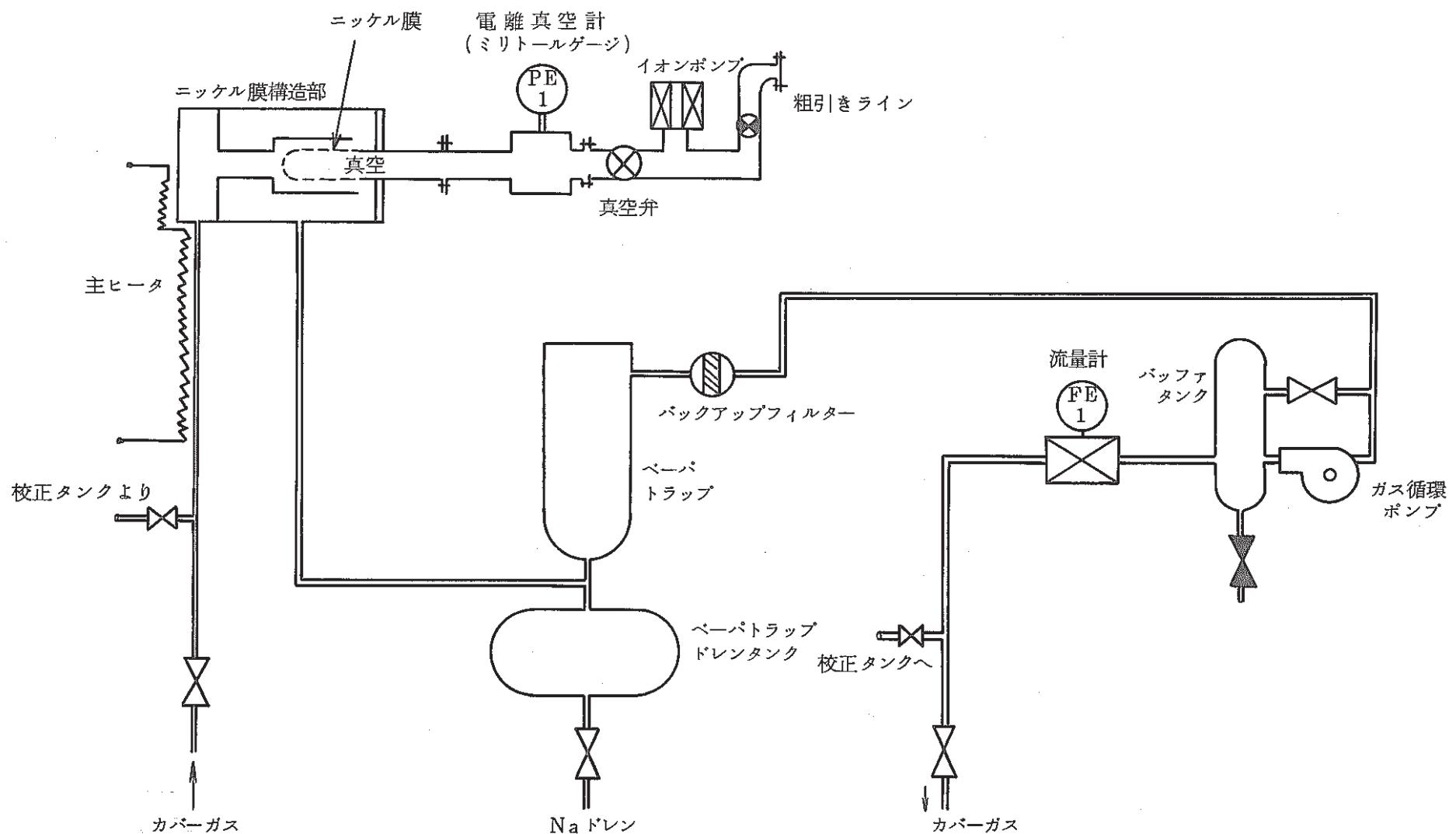


Fig. 4-18 50MW-OG-MK I in-cover gas hyarogen meter (EV-HAr)

50MW-OG-MK I カバーガス中水素計系統図 (EV-HAr)

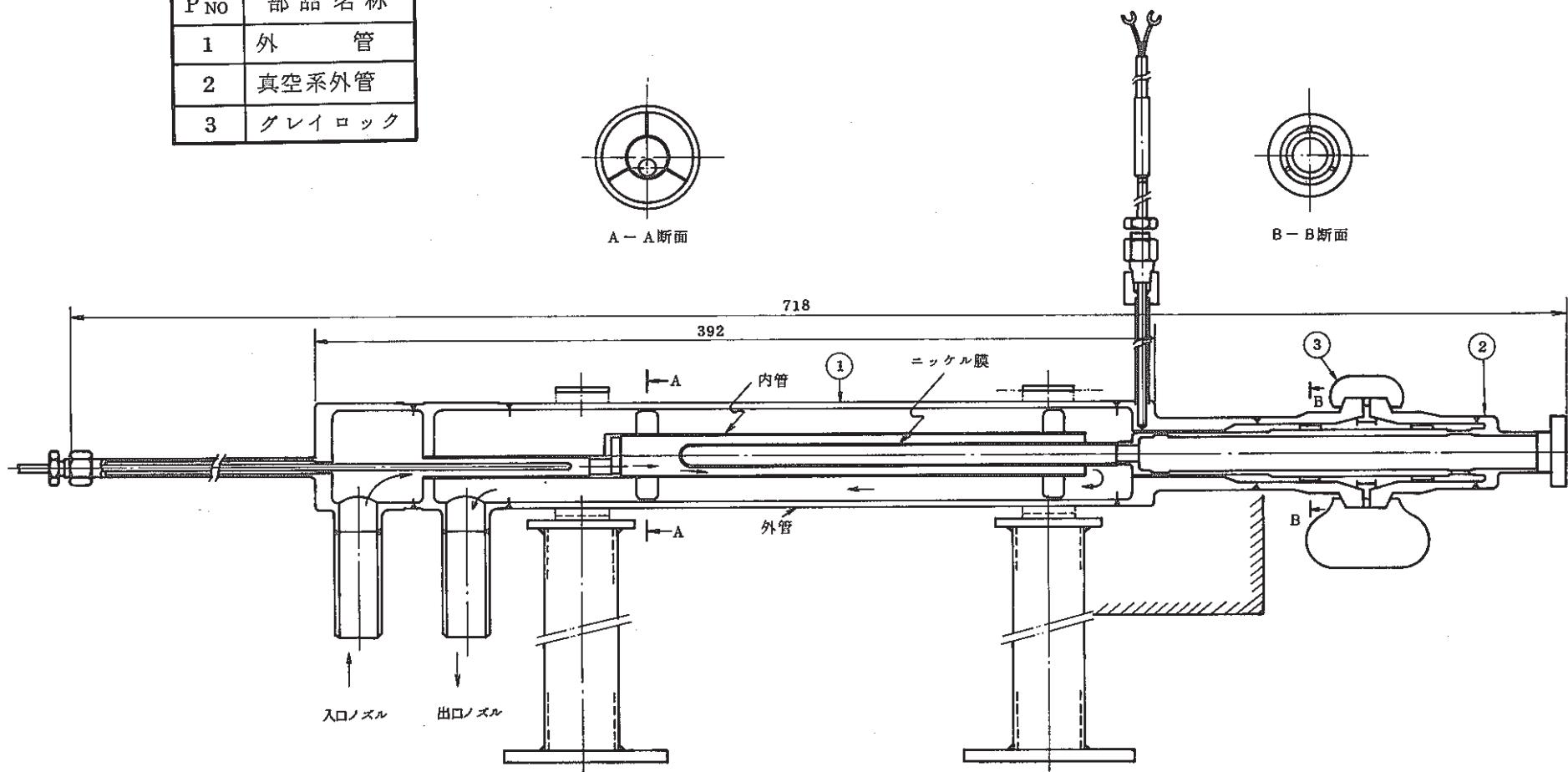


Fig. 4-19 The nickel membrane housing in 50MW-CG-MK I in-corer gas hydrogen meter

50MW-CG-MK I カバーガス中水素計のニッケル膜ハウジング部構造図

P.No	部品名称
1	入口ノズル
2	出口ノズル
3	外管
4	内管
5	ノズル
6	熱電対端子配管
7	熱電対
8	熱電対端子配管
9	ソケット
10	ニッケル
11	真空配管
12	70°コンフラットフランジ
13	コノシール端子
14	スタンド
15	バンド
16	ガスケット

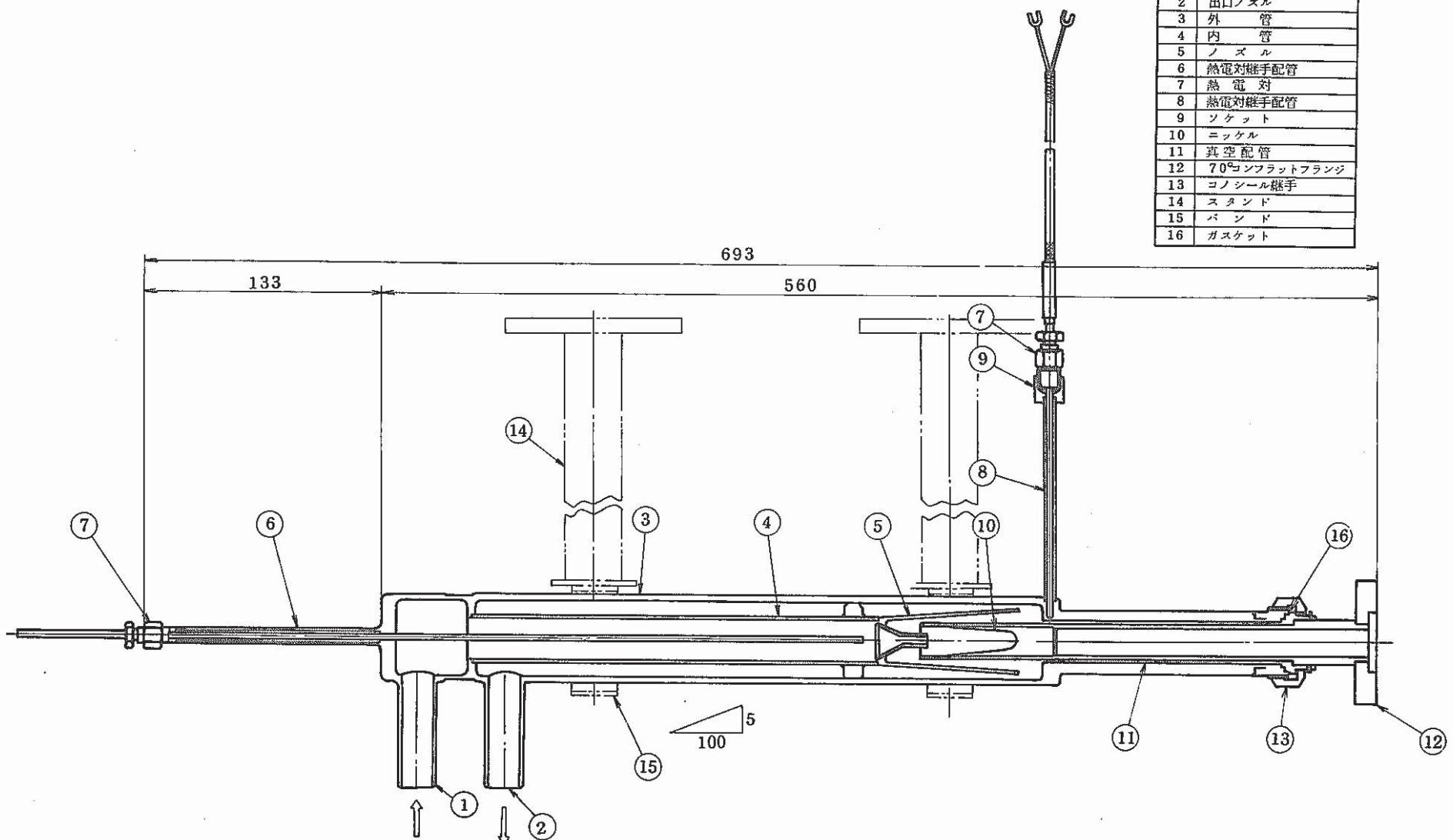


Fig. 4-20 The nickel membrane housing in 50MW-CG-MKW in-cover gas hydrogen meter
50MW-CG-MKW カバー ガス中水素計のニッケル膜ハウ징部構造図

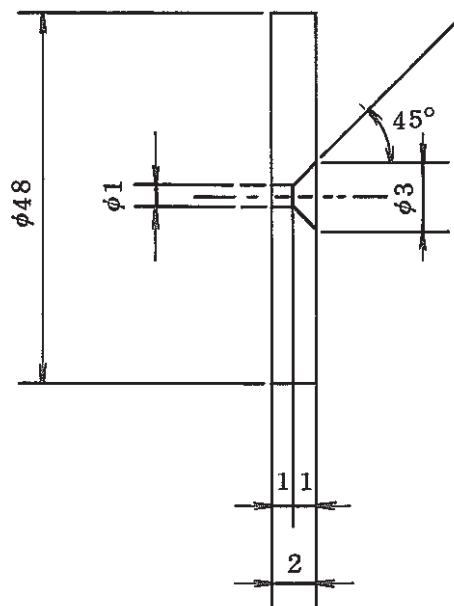


Fig. 4-21 A Orifice in 50MW-CG-MKIII in-corer gas hydrogen meter

50MW-CG-MKIII オリフィスガスケット形図

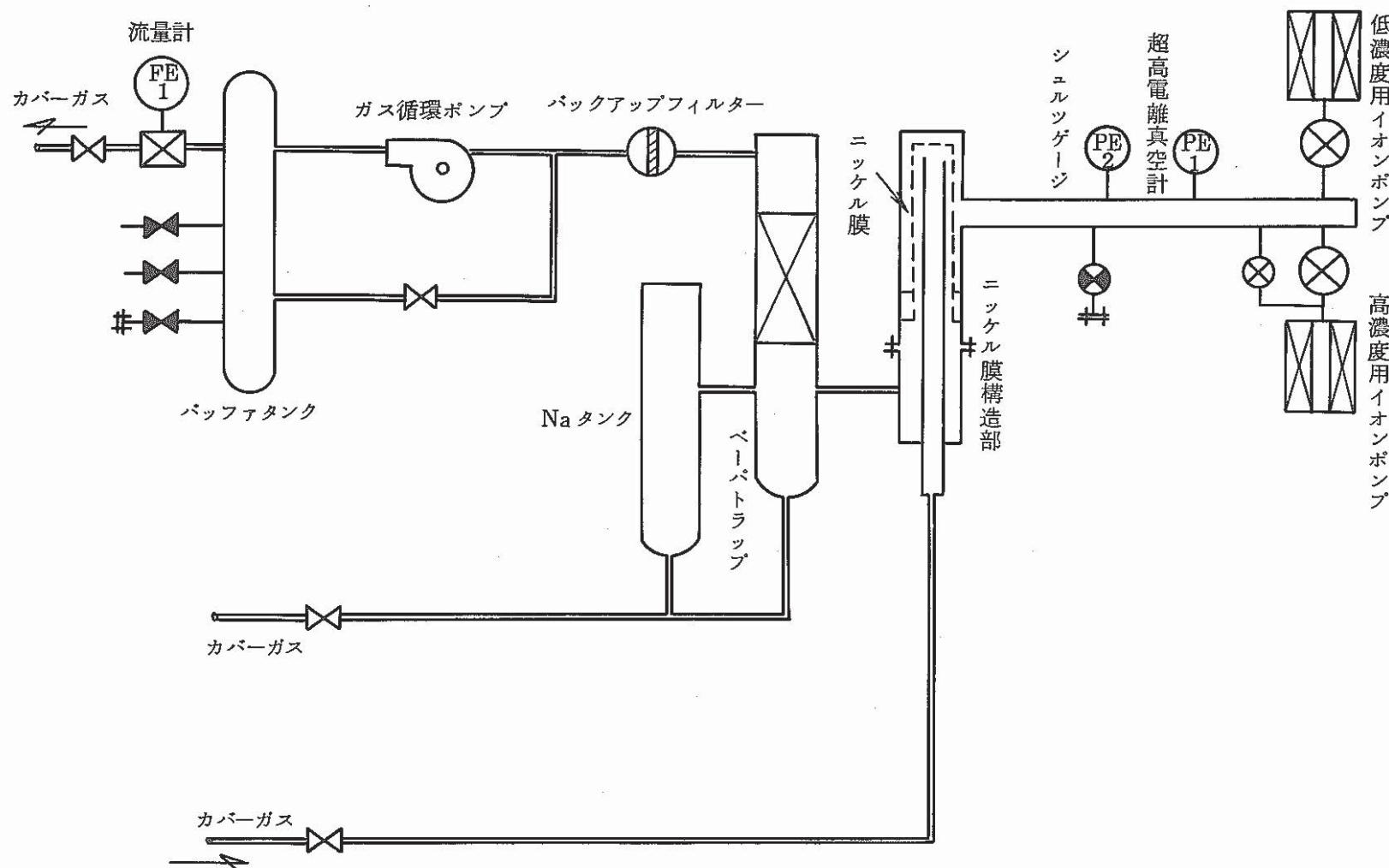


Fig. 4-22 PNC-CG-type I (improvement model) in-cover gas hydrogen meter (SH-HAr)
PNC型-CG-1号機カバーガス中水素計系統図 (SH-HAr)

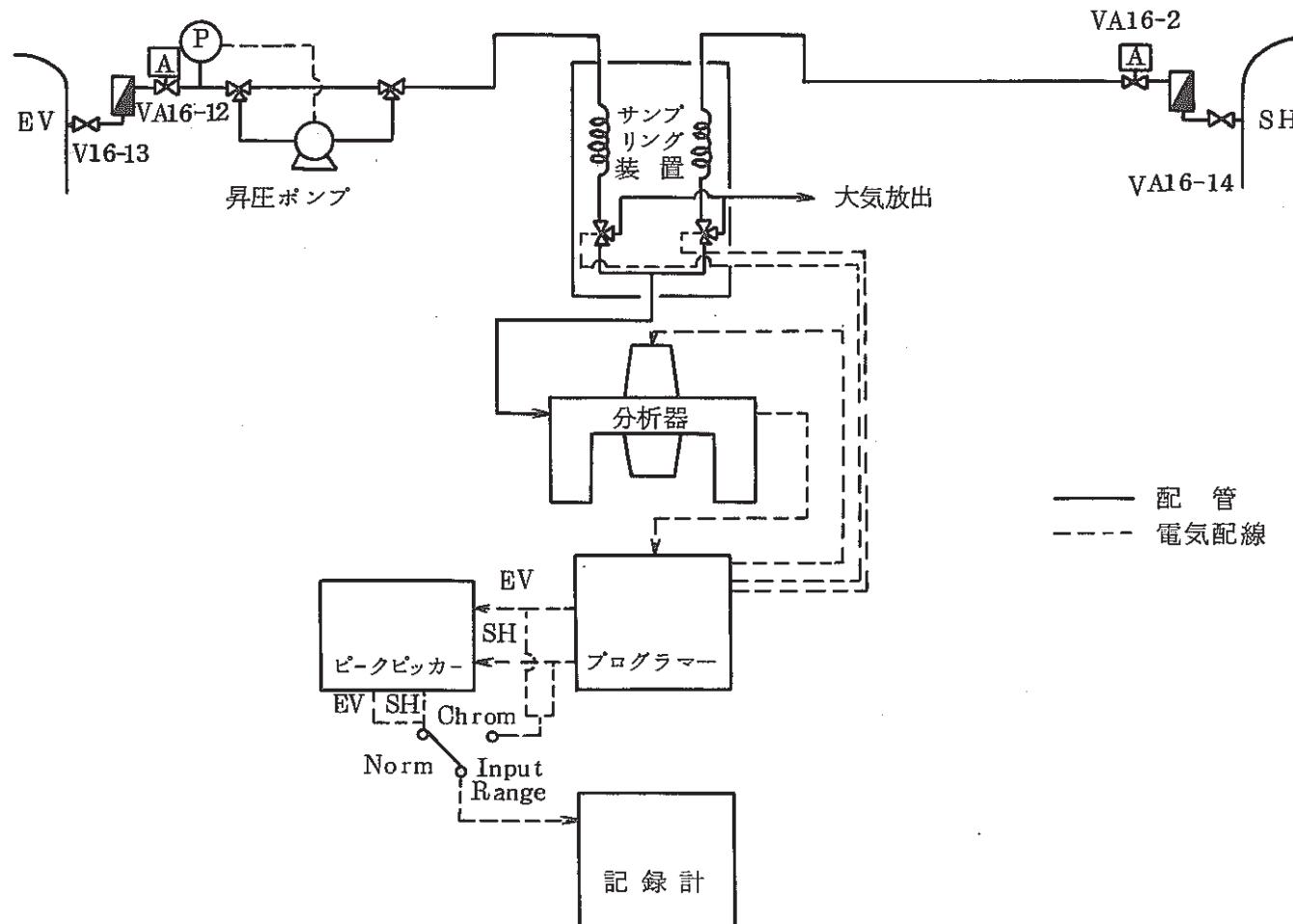


Fig. 4-23 Gas sampling line of gas-chromatograph
ガスクロマトグラフーサンプリングライン系統図

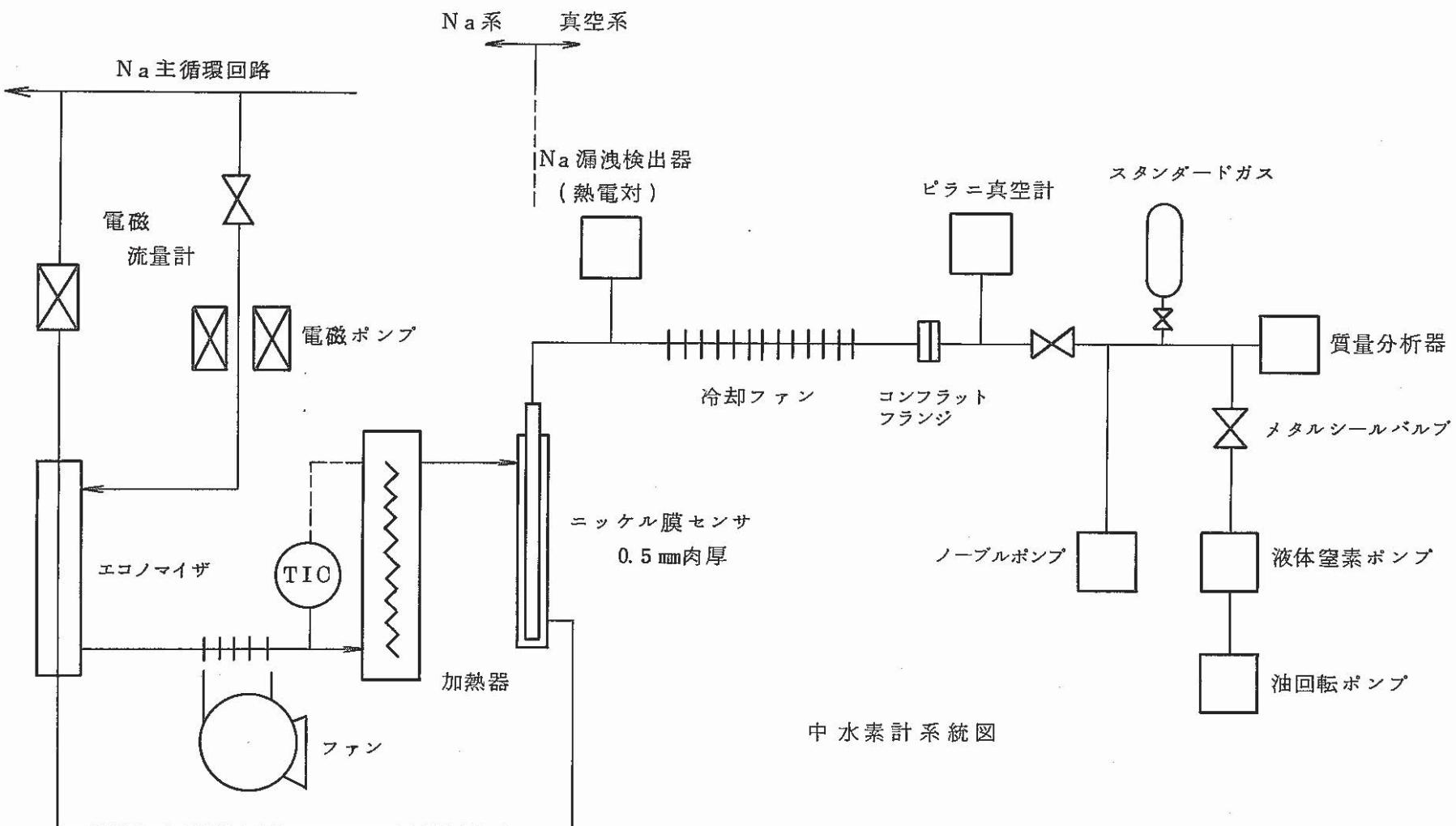


Fig. 4-24 PNC-MAPI type in-sodium hydrogen meter
PNC-MAPI型ナトリウム中水素計系統図

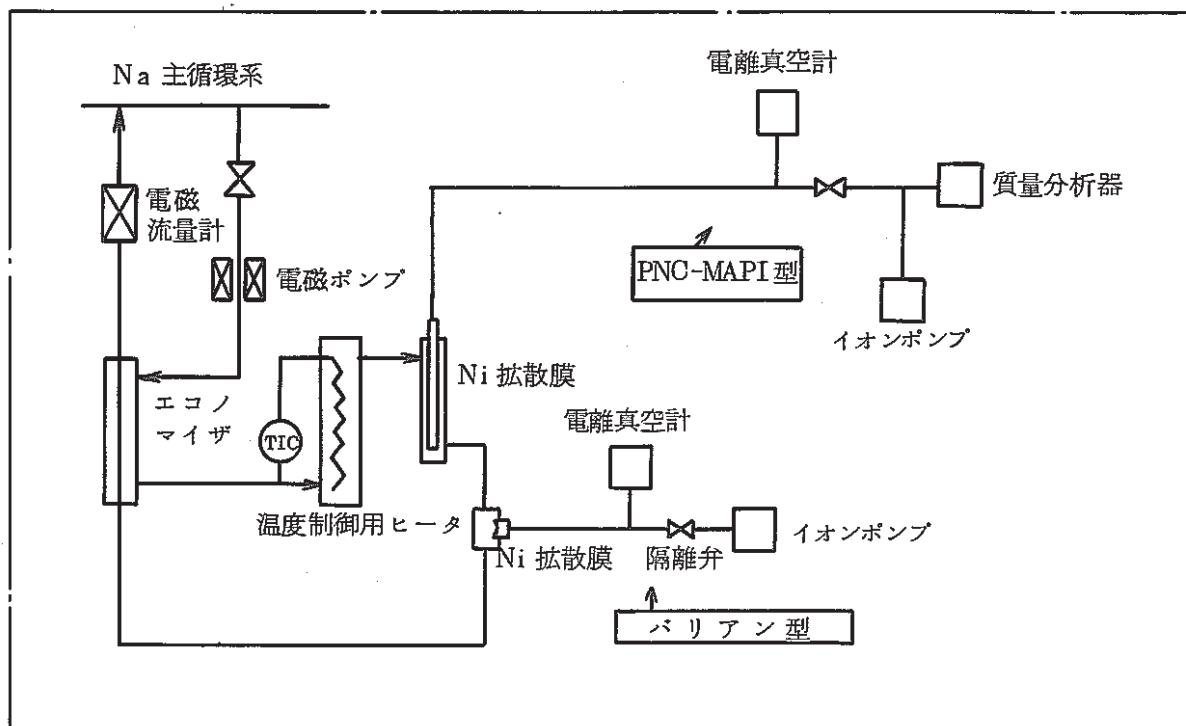


Fig. 4-25 In-Sodium hydrogen meters in SWAT-2 test rig
SWAT-2 装置ナトリウム中水素計ループ

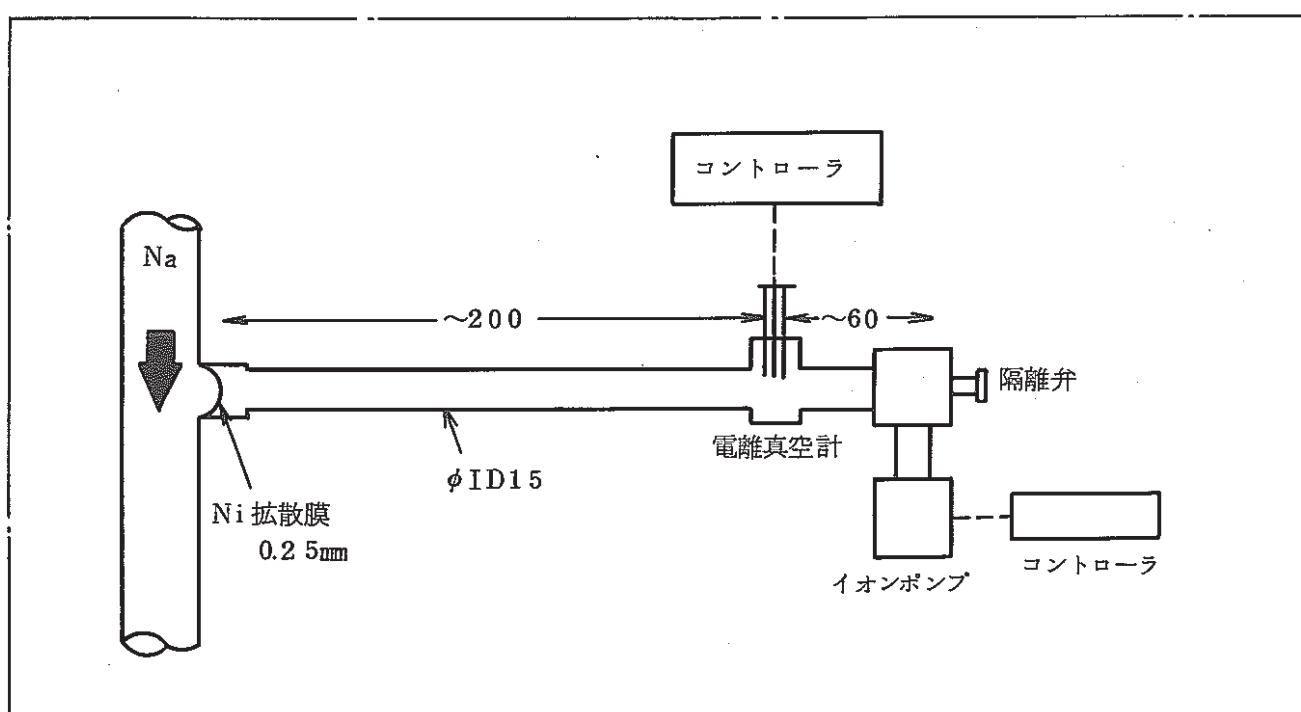


Fig. 4-26 Varian type in-sodium hydrogen meter
バリアン型ナトリウム中水素計概略図

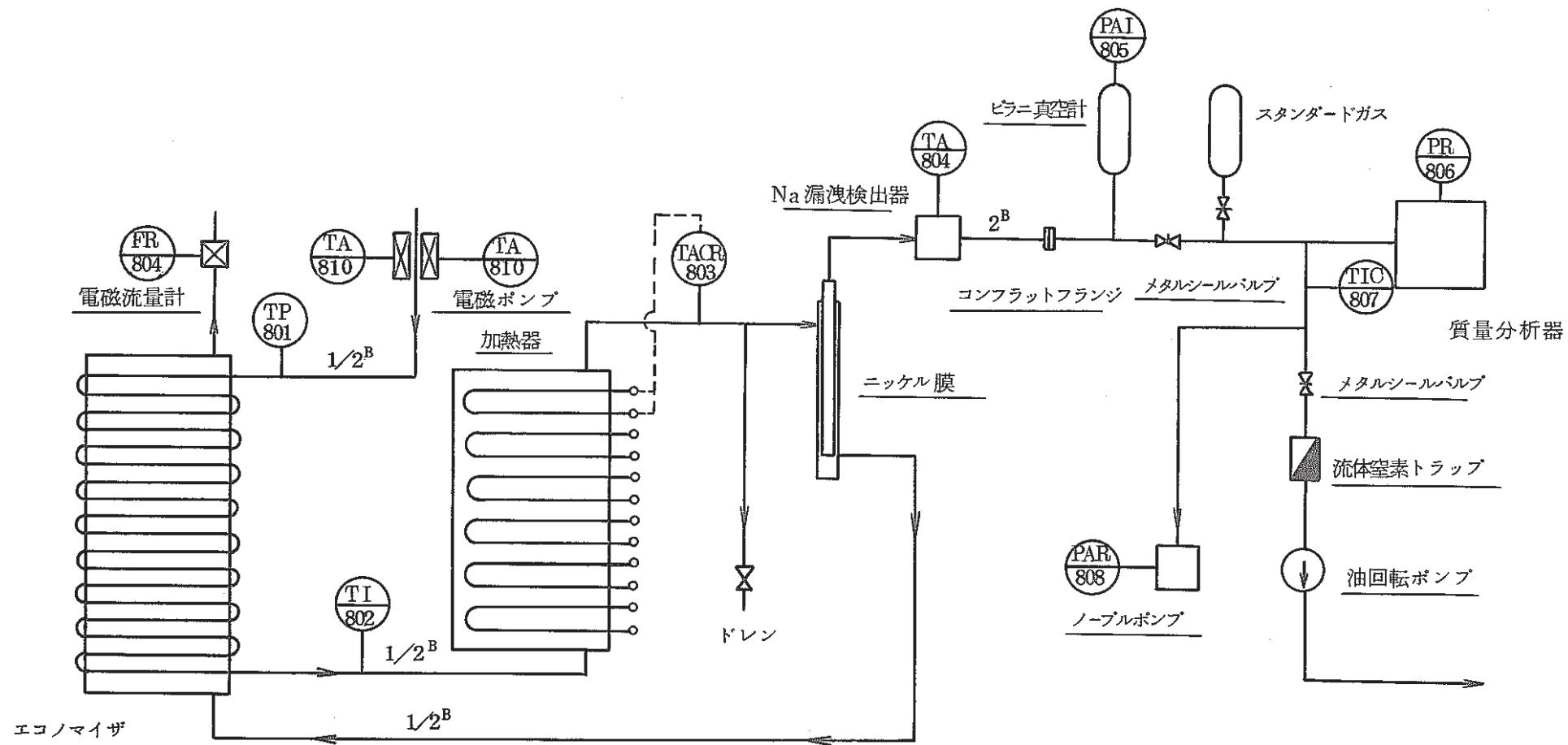


Fig.4-27 PNC-MAPI Type in-sodium hydrogen meter (improvement type)
PNC-MAPI (改良型) ナトリウム中水素計系統図

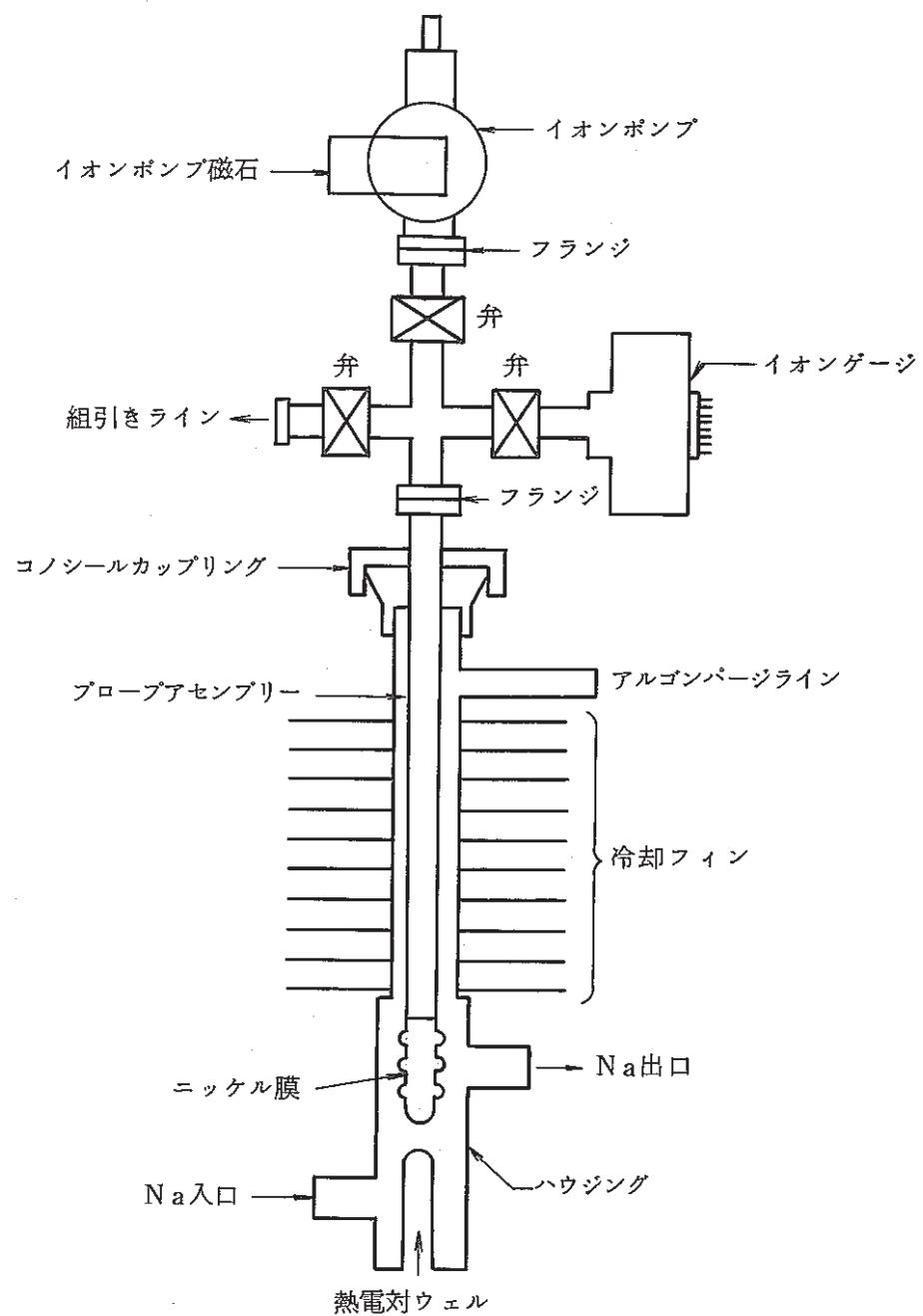


Fig.4-28 Westinghouse type in-sodium hydrogen meter
ウェスチングハウス社製ナトリウム中水素計概略図

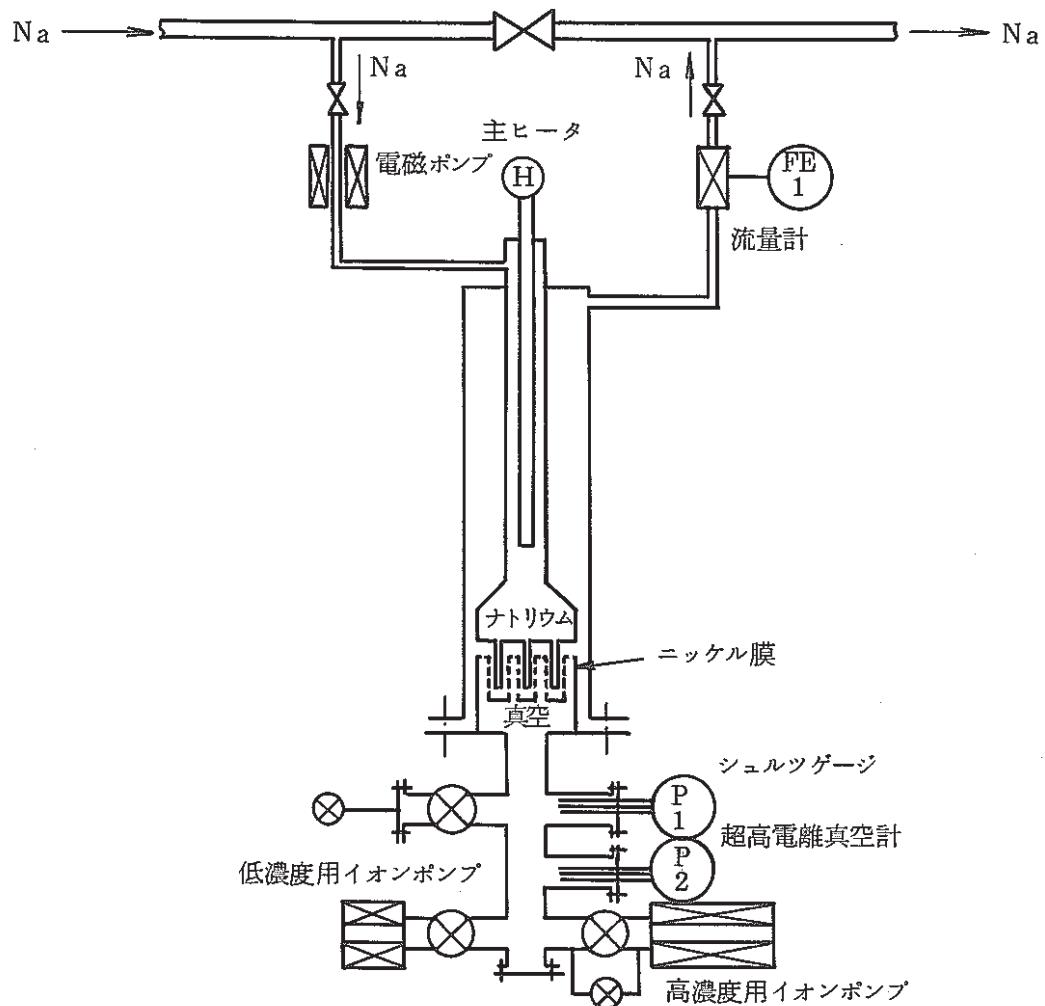


Fig.4-29 PNC type-I MKI and MKII in-sodium hydrogen meters
PNC型1号機(—MK I 及び—MK II)ナトリウム中水素計系統図

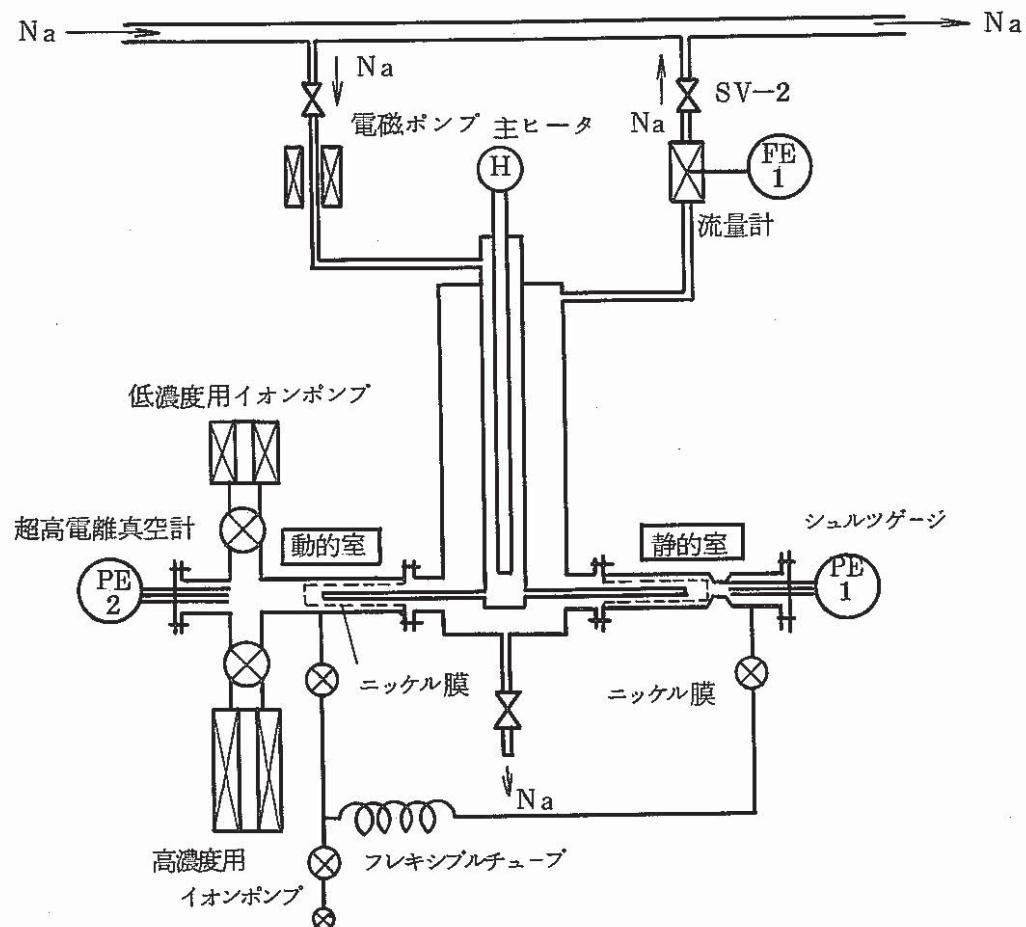


Fig.4-30 PNC type-II MK I in-sodium hydrogen meter
PNC型2号機MK I ナトリウム中水素計系統図

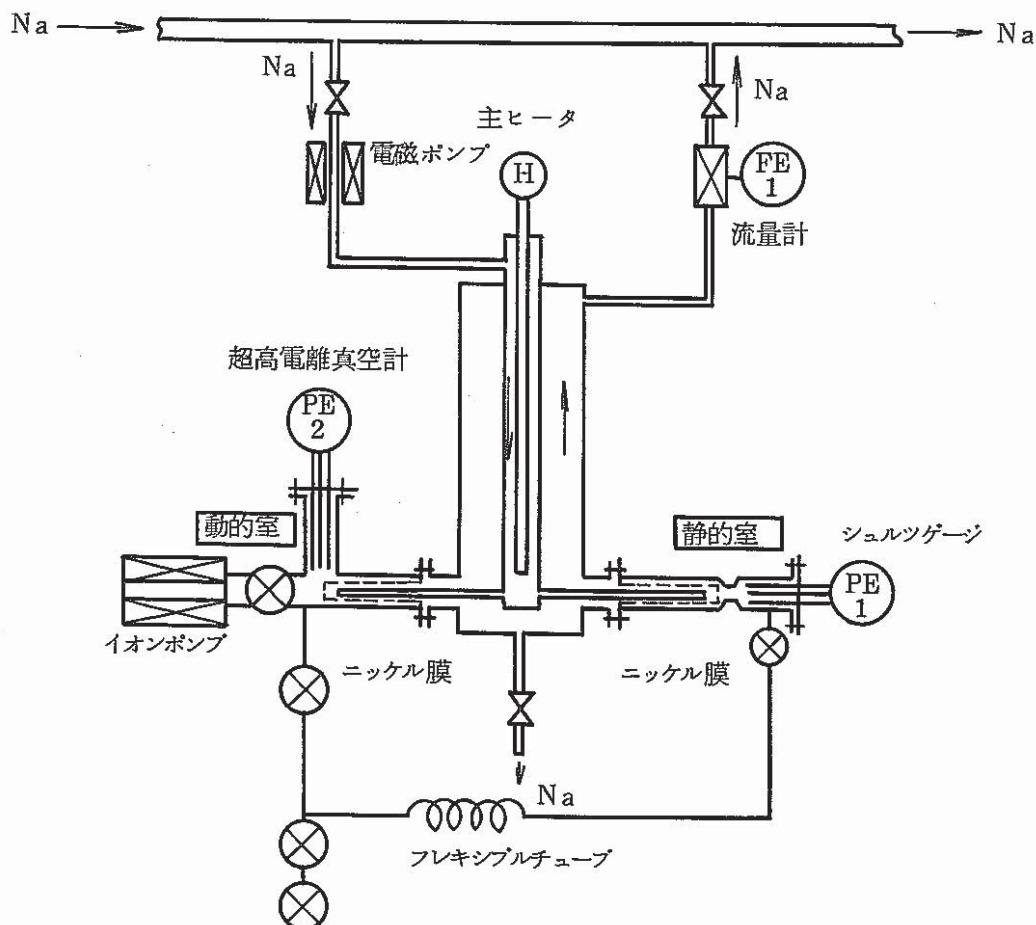


Fig.4-31 PNC type-II MKII in-sodium hydrogen meter
PNC型2号機-MKIIナトリウム中水素計系統図

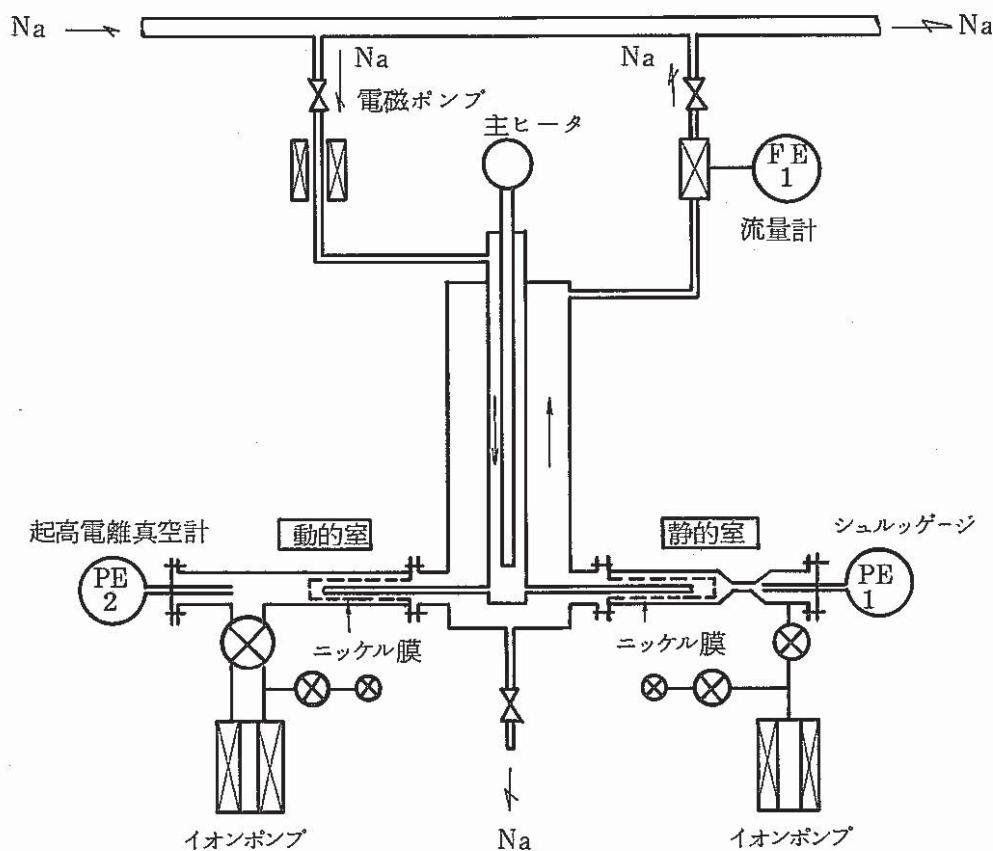


Fig. 4-32 PNC type-II MK III in-sodium hydrogen meter
PNC型2号機MK IIIナトリウム中水素計系統図

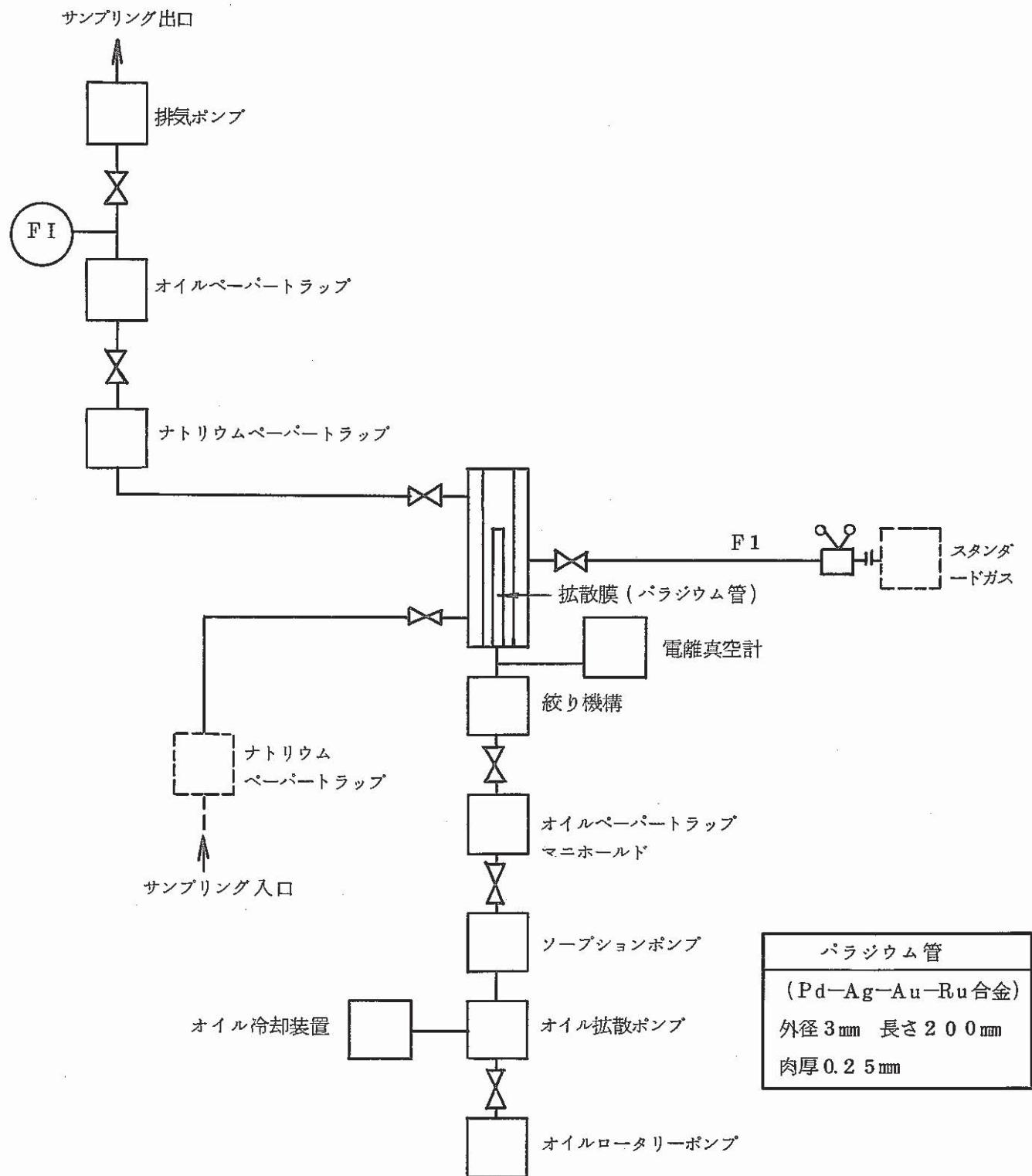


Fig.4-33 Forced sampling type in-cover gas hydrogen meter in SWAT-2 test rig

SWAT-2における強制ケーブリング型カバーガス中水素計系統図

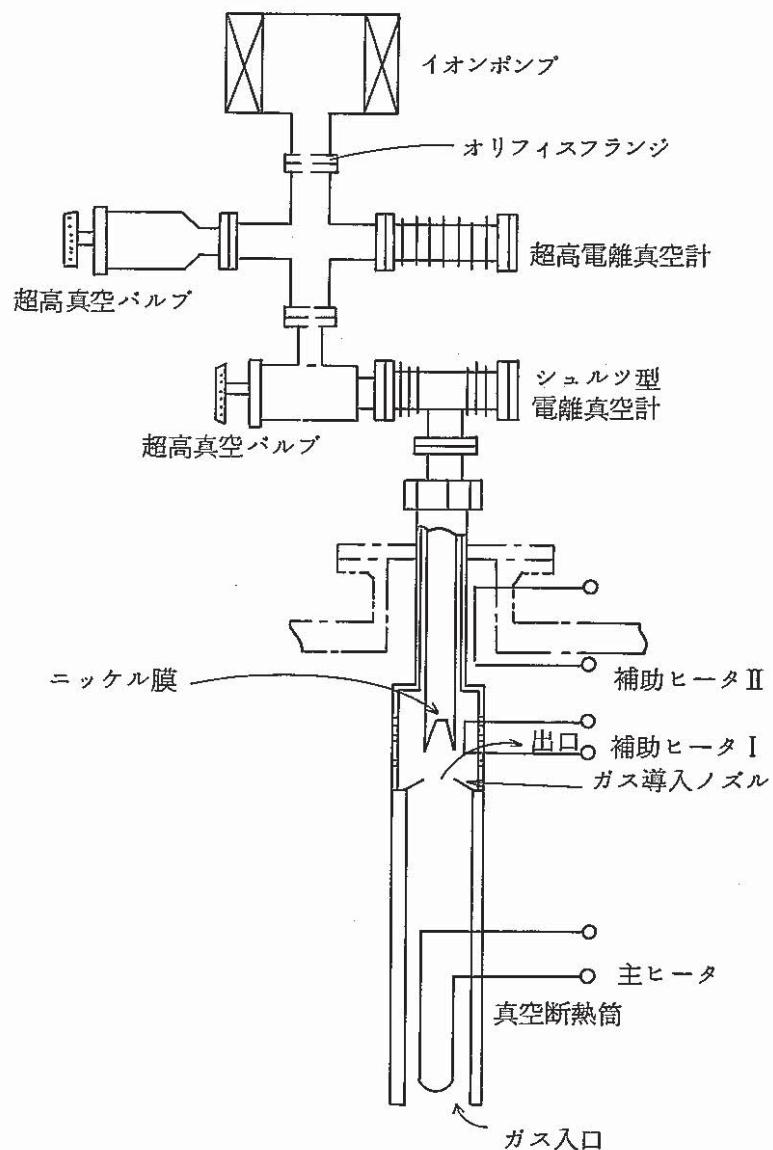


Fig. 4-34 Direct insertion type in-cover gas hydrogen meter in SWAT-2 test rig

SWAT-2における直接挿入型カバーガス中水素計系統図

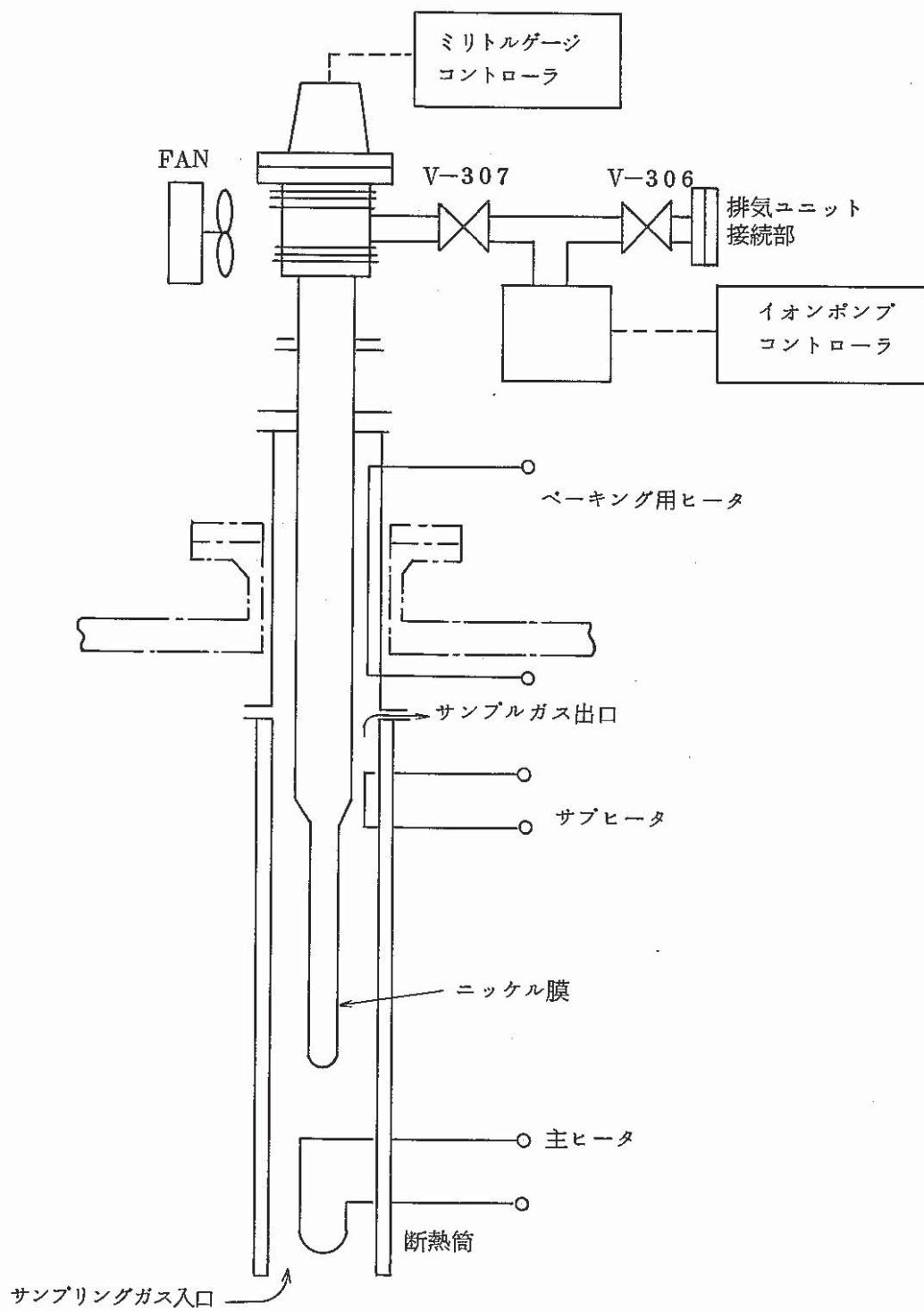


Fig. 4-35 Direct insertion type in-cover gas hydrogen meter in 1MW SG test loop
1MW/Cにおける直接挿入型カバーガス中水素計系統図

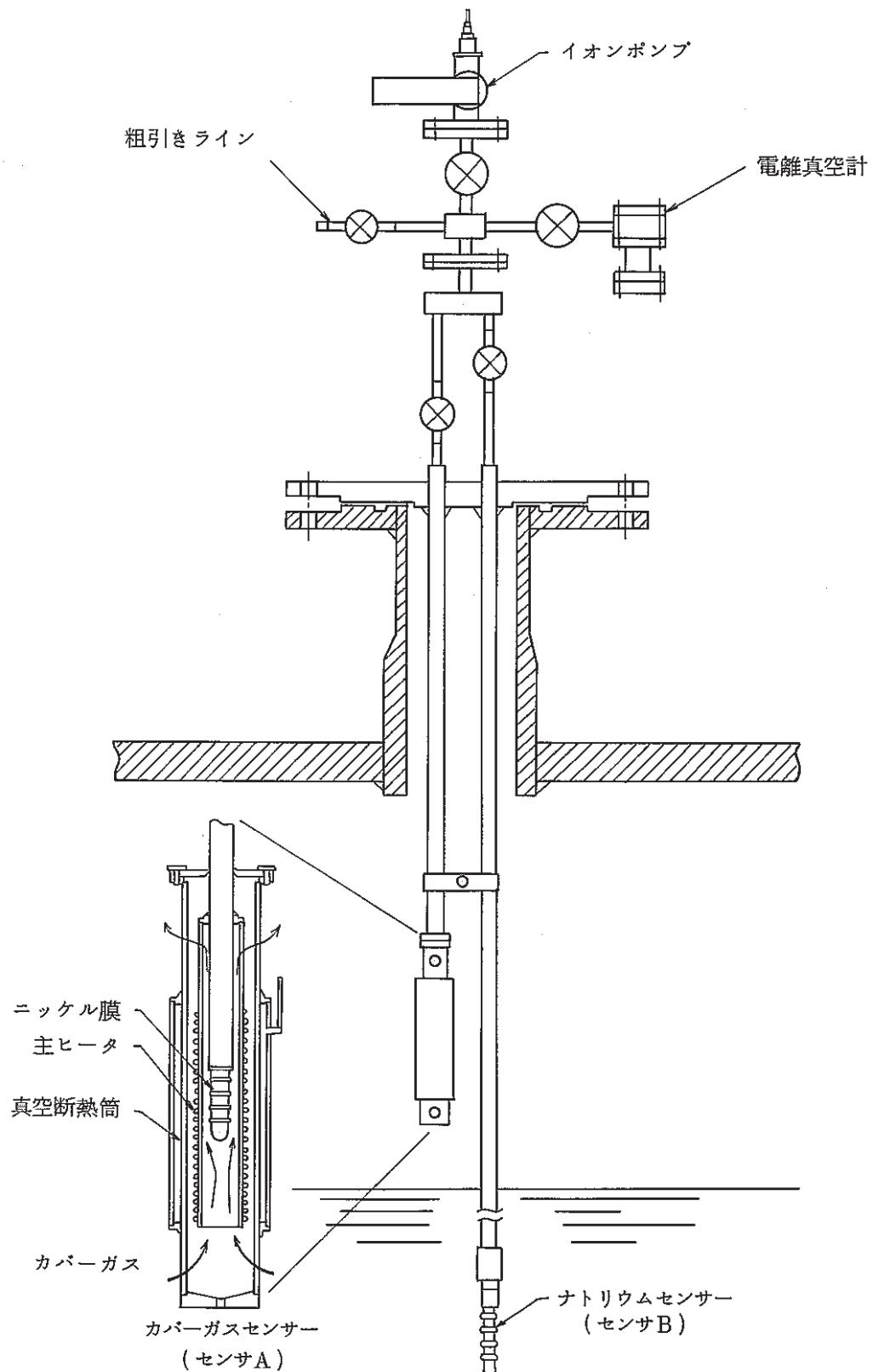


Fig.4-36 Immersion and diffusion type in-sodium/in-cover gas hydrogen meter
直浸式ナトリウム中／カバーガス中水素計

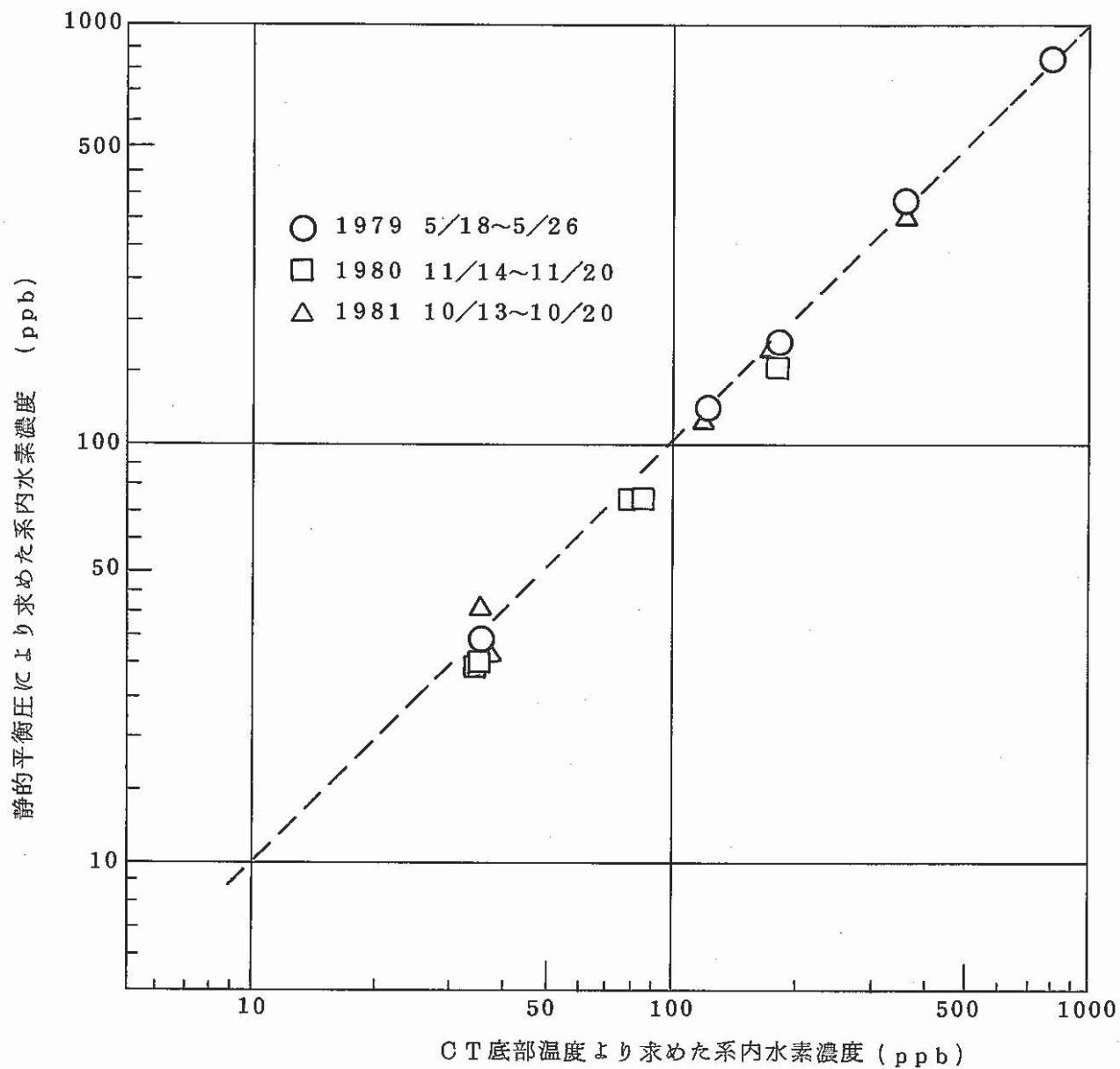


Fig.5-1 Relation of hydrogen conceneration by static equilibrium pressure and experimental equation (CT-HNa (PNC type I improvement model))

静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係(CT-HNa (PNC型1号機改良型))

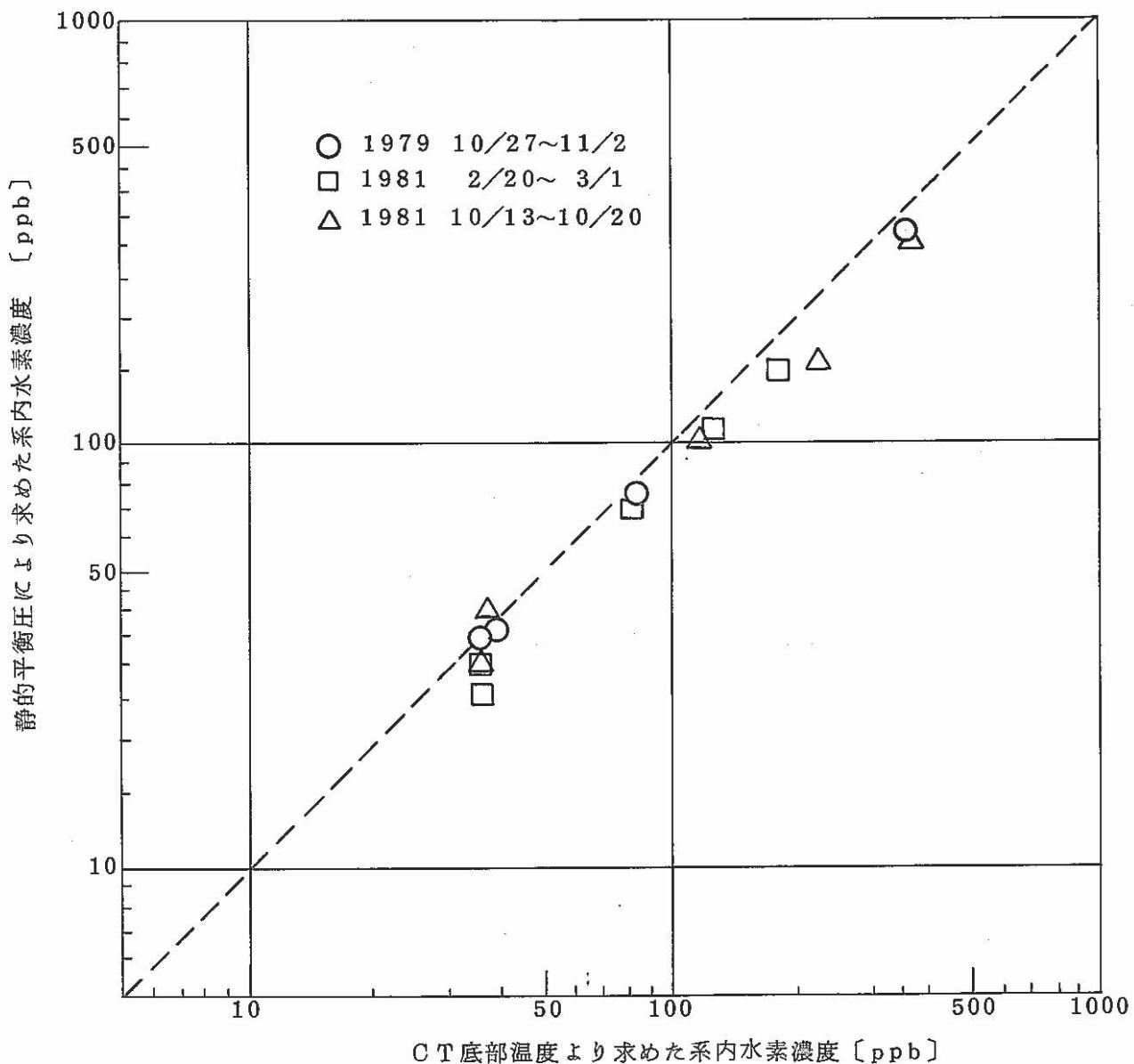


Fig. 5-2 Relation of hydrogen concentration by static equilibrium pressure and experimental equation(NaP-HNa(PNC type I improvement model))

静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係 (NaP-HNa (PNC型1号機改良型))

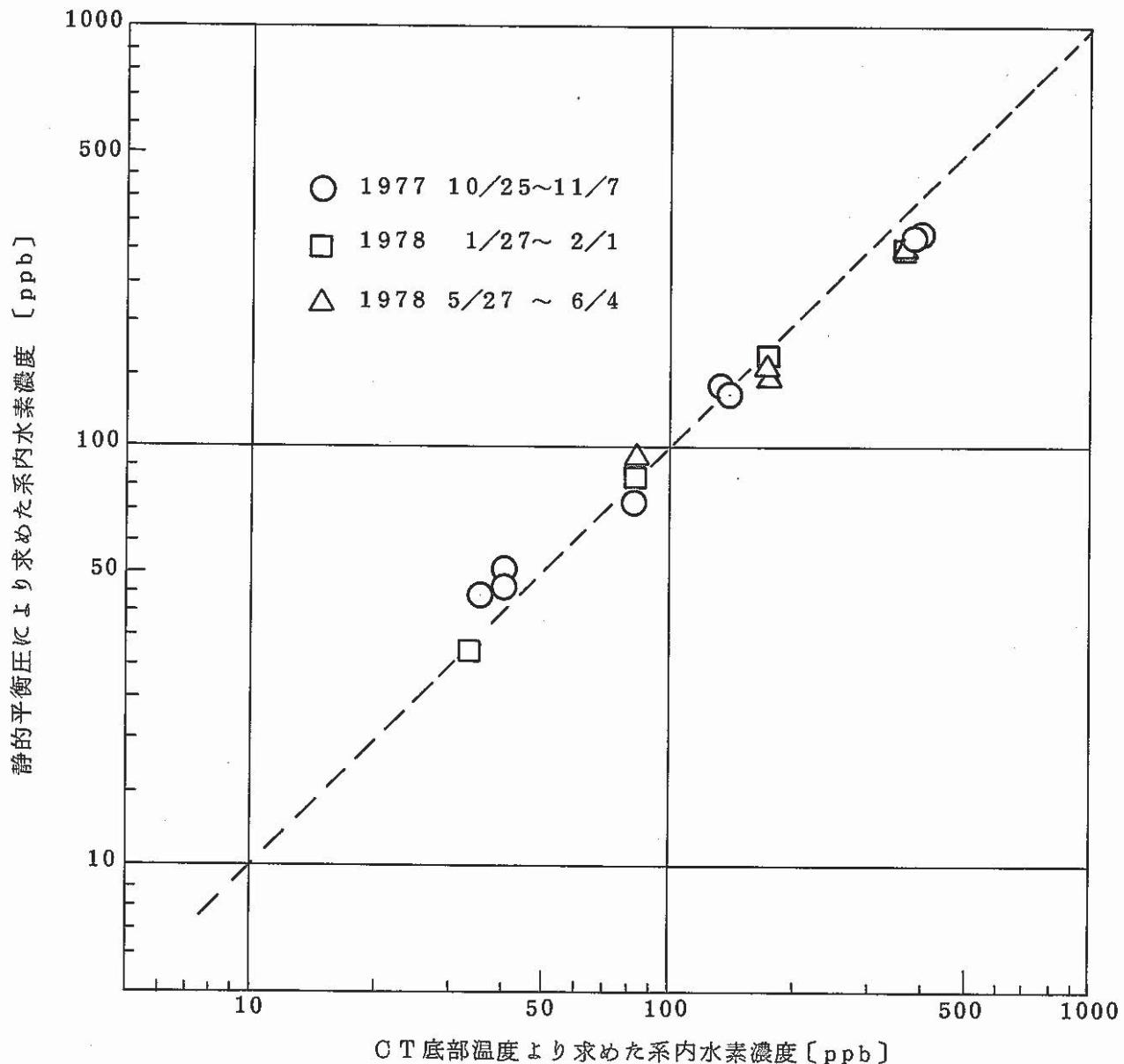


Fig.5-3 Relation of hydrogen concentration by static equilibrium pressure and experimental equation (50MW-MKIII/61)

静的平衡圧測定水素濃度と経験式より求めた水素濃度との関係 (50MW-MKIII/61)

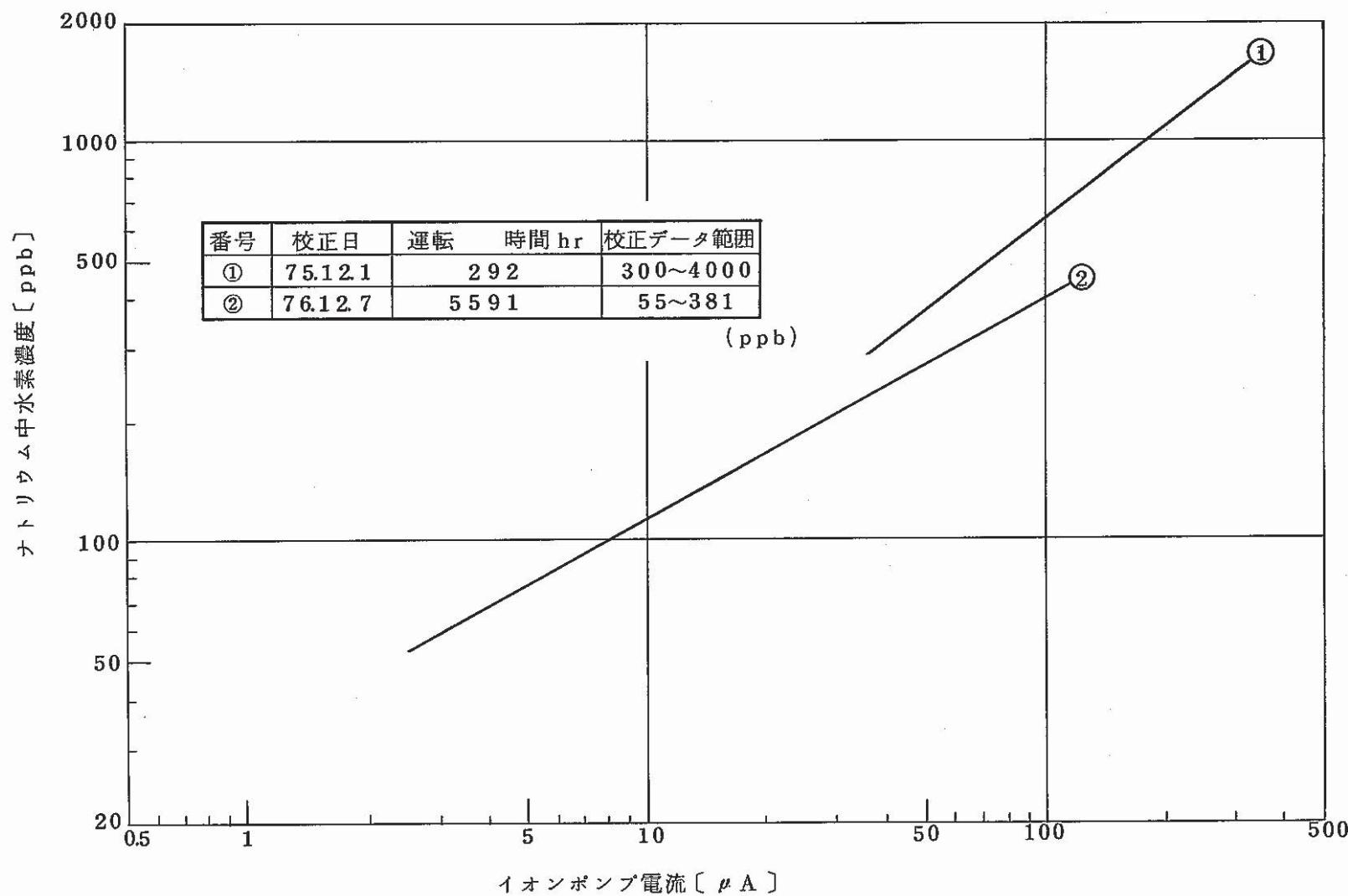


Fig.5-4 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MKII)
EV-HNa (50MW-MKII) 校正試験結果

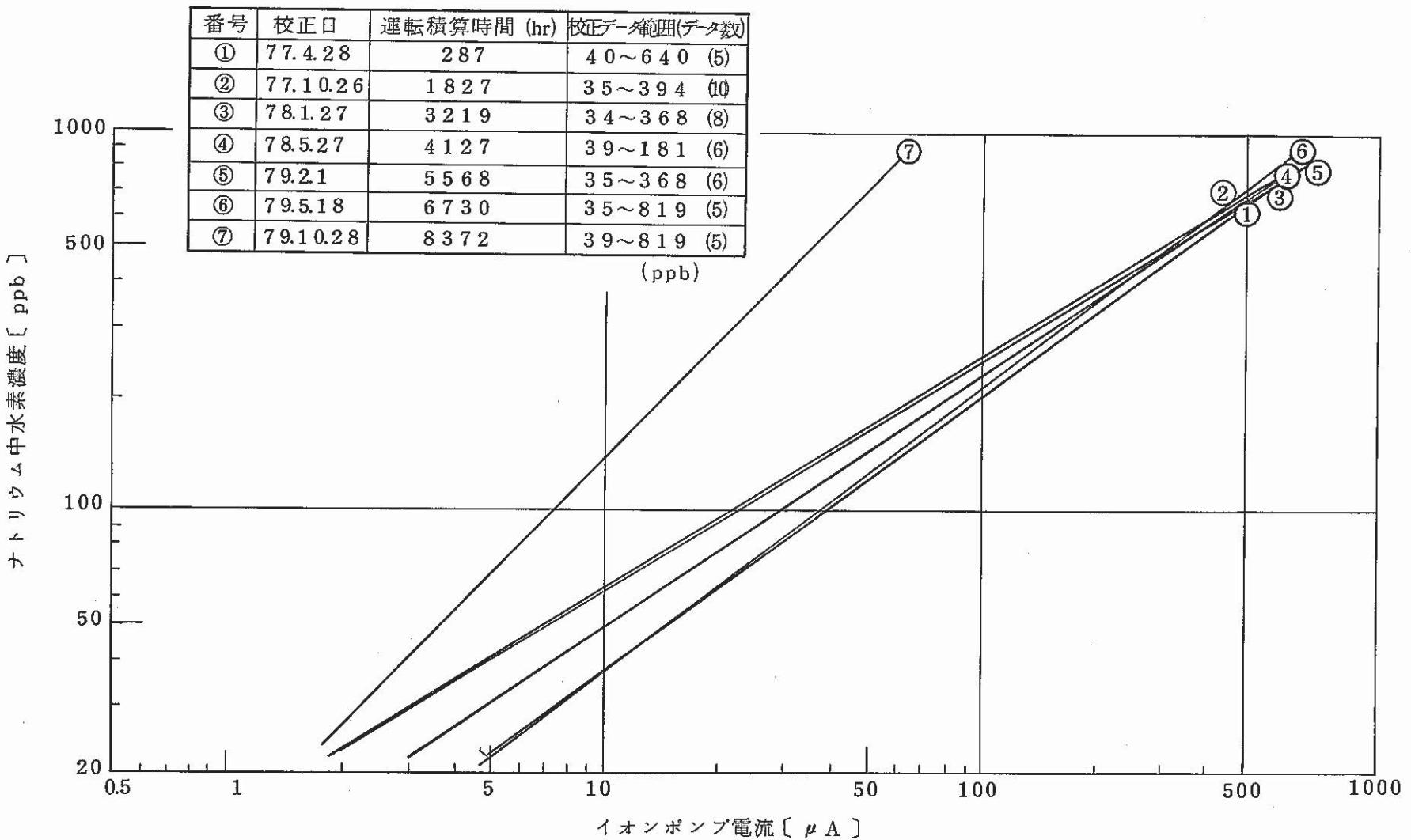


Fig. 5-5 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MKIII, #1)
EV-HNa (50MW-MKIII #1) 校正試験結果

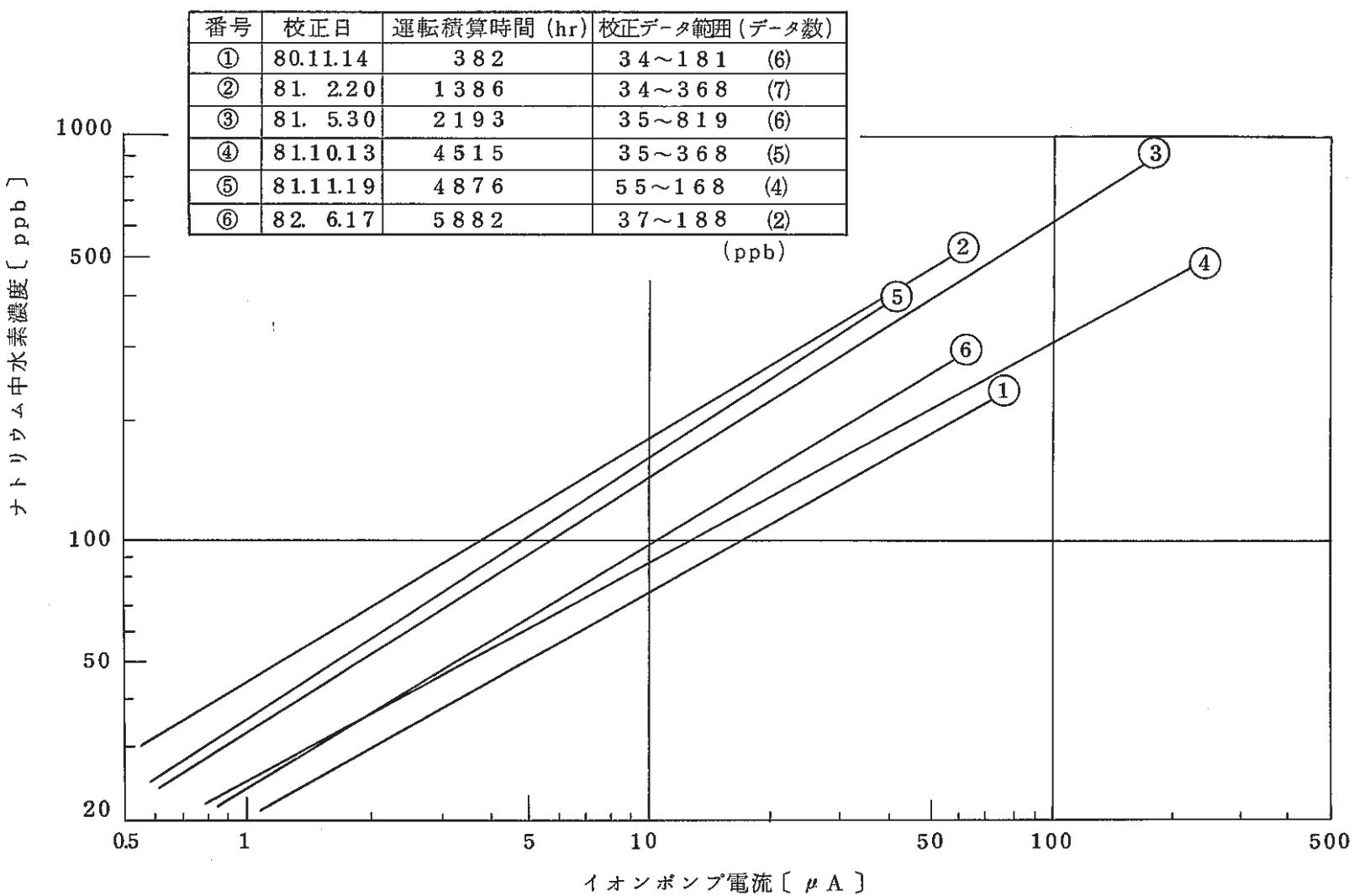


Fig. 5-6 Result of calibration test of EV-HNa (50MW-MKIII, #62)
EV-HNa (50MW-MKIII #62) 校正試験結果

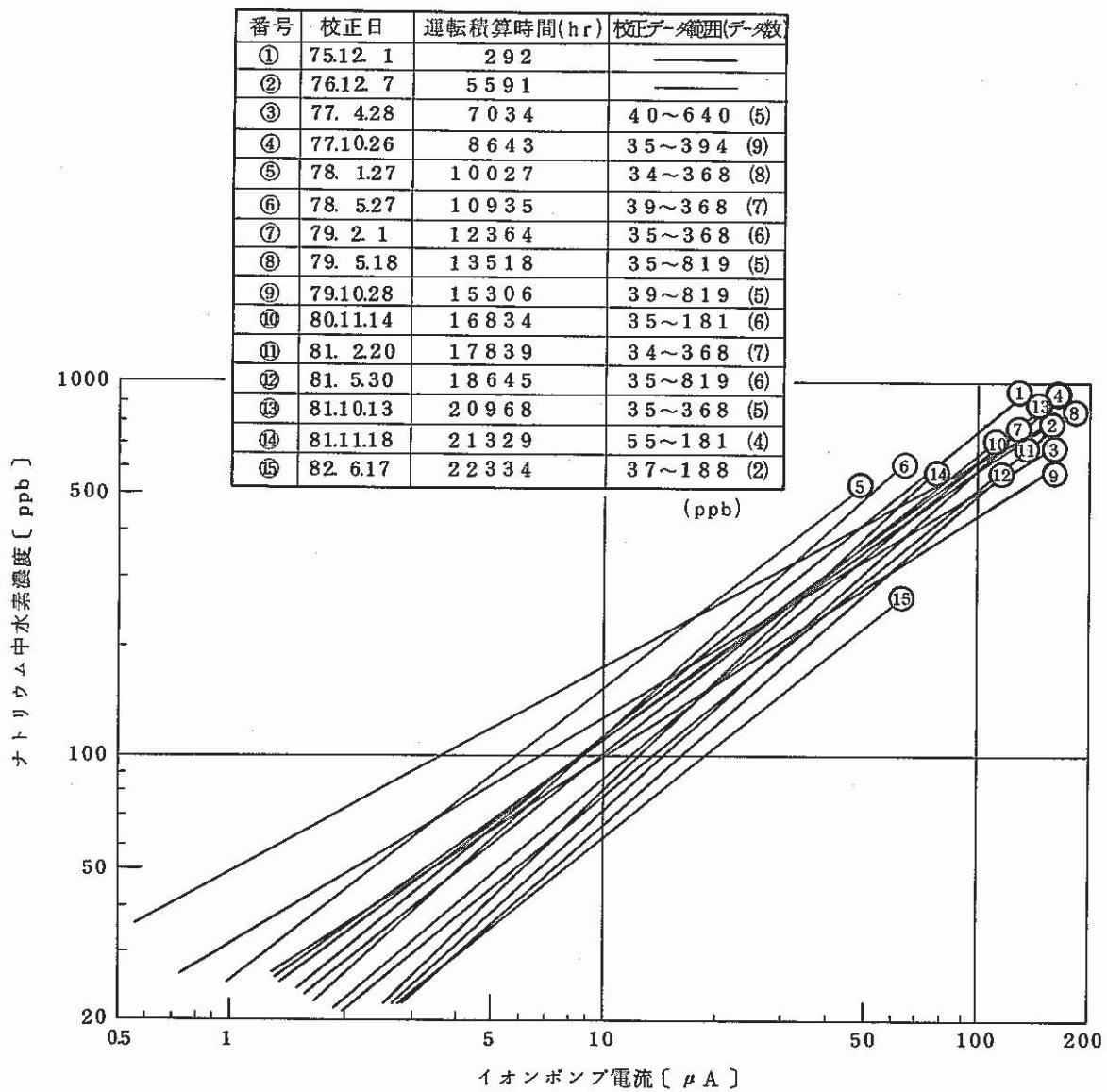


Fig. 5-7 Result of calibration test of SH-HNa (50MW-MKII)
SH-HNa (50MW-MKII) 校正試験結果

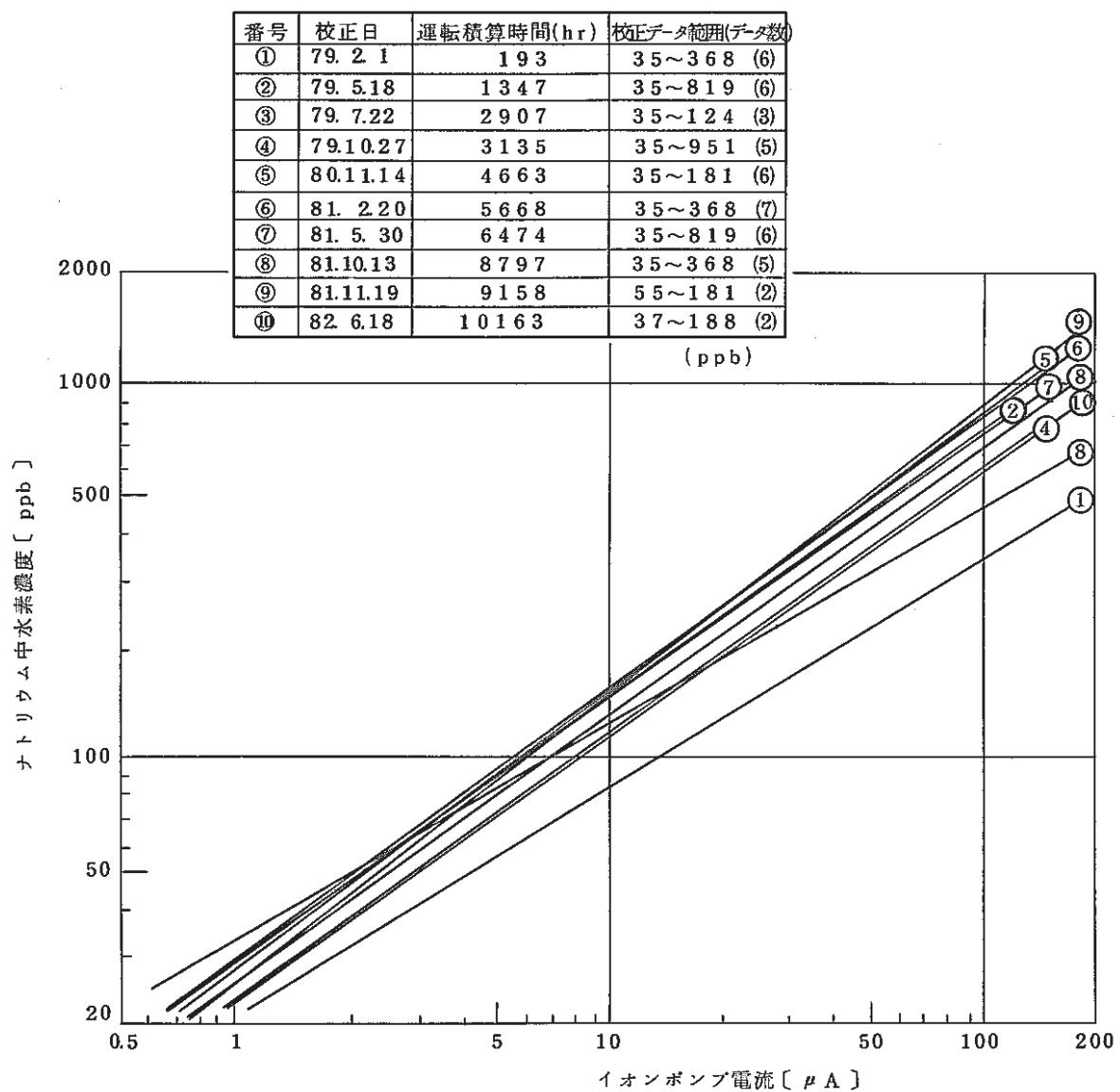


Fig. 5-8 Result of calibration test of NaP-HNa (PNC type-I improvement model)
NaP-HNa (PNC型1号機改良型) 校正試験結果

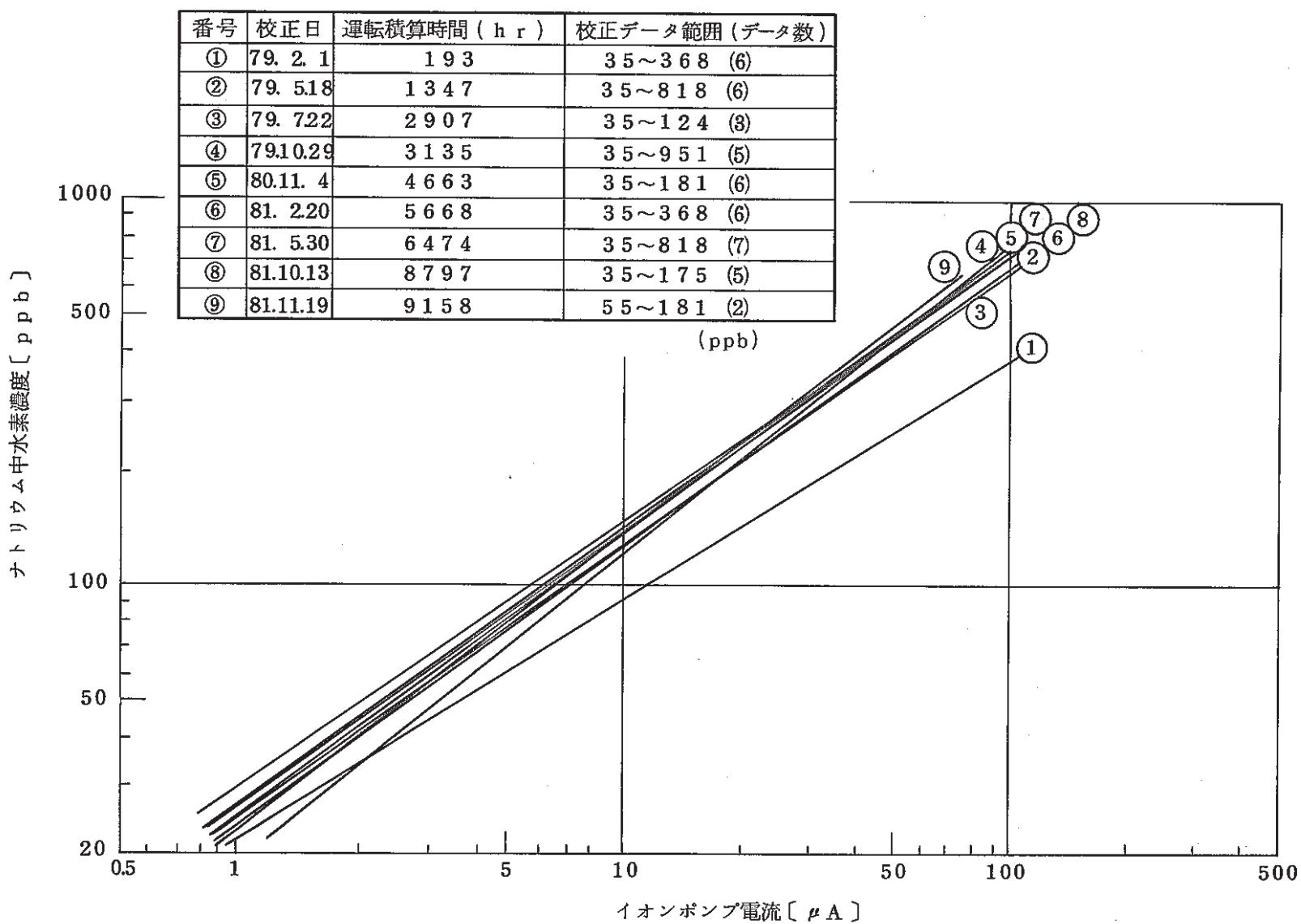


Fig.5-9 Result of calibration test of CT-HNa (PNC type-I (improvement model))
CT-HNa (PNC型1号機(改良型))校正試験結果

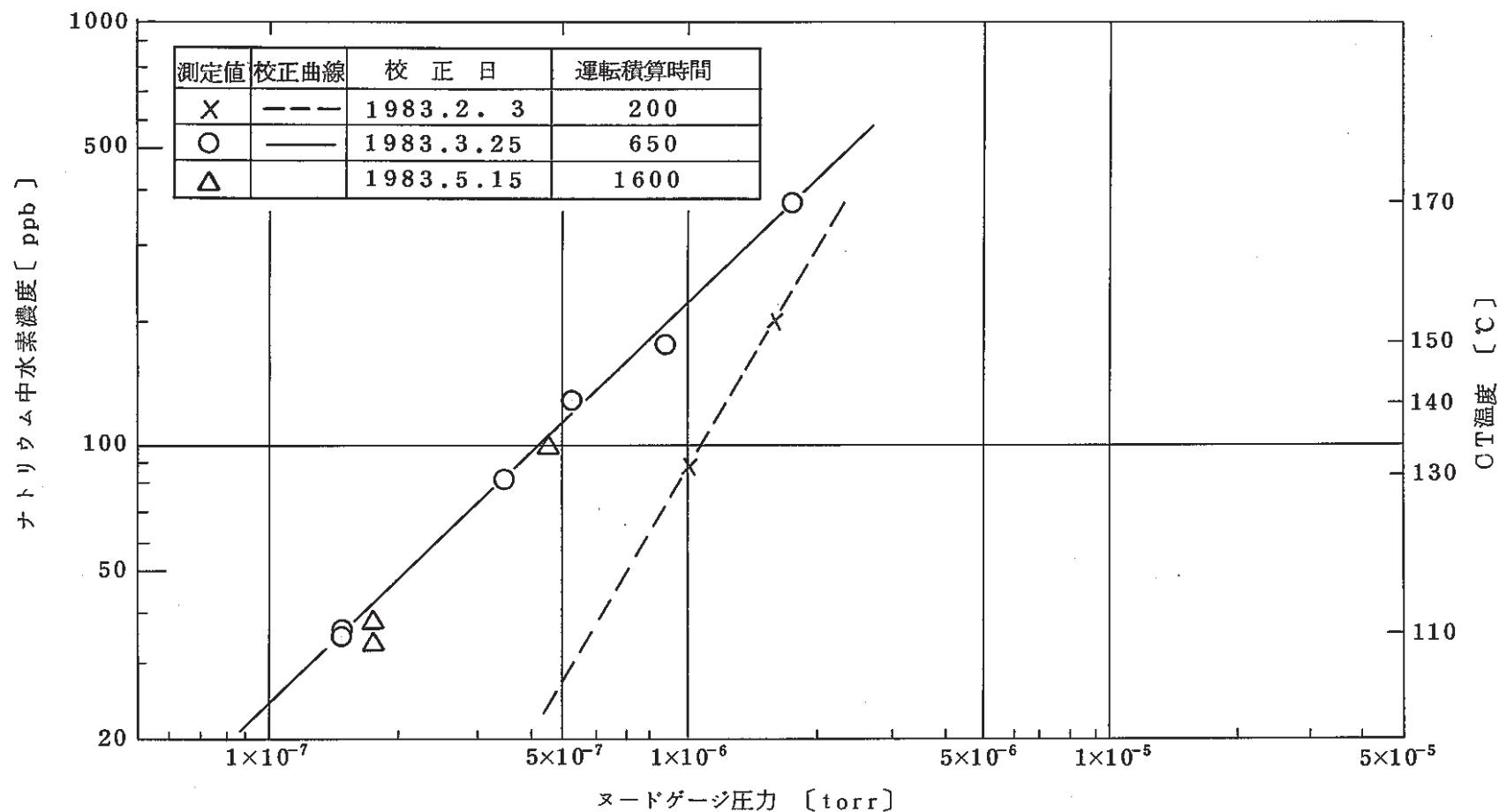


Fig.5-10 Result of calibration test of EV-HNa (PNC type-II MKIV)
EV-HNa (PNC 2号機MKIV) 校正試験結果

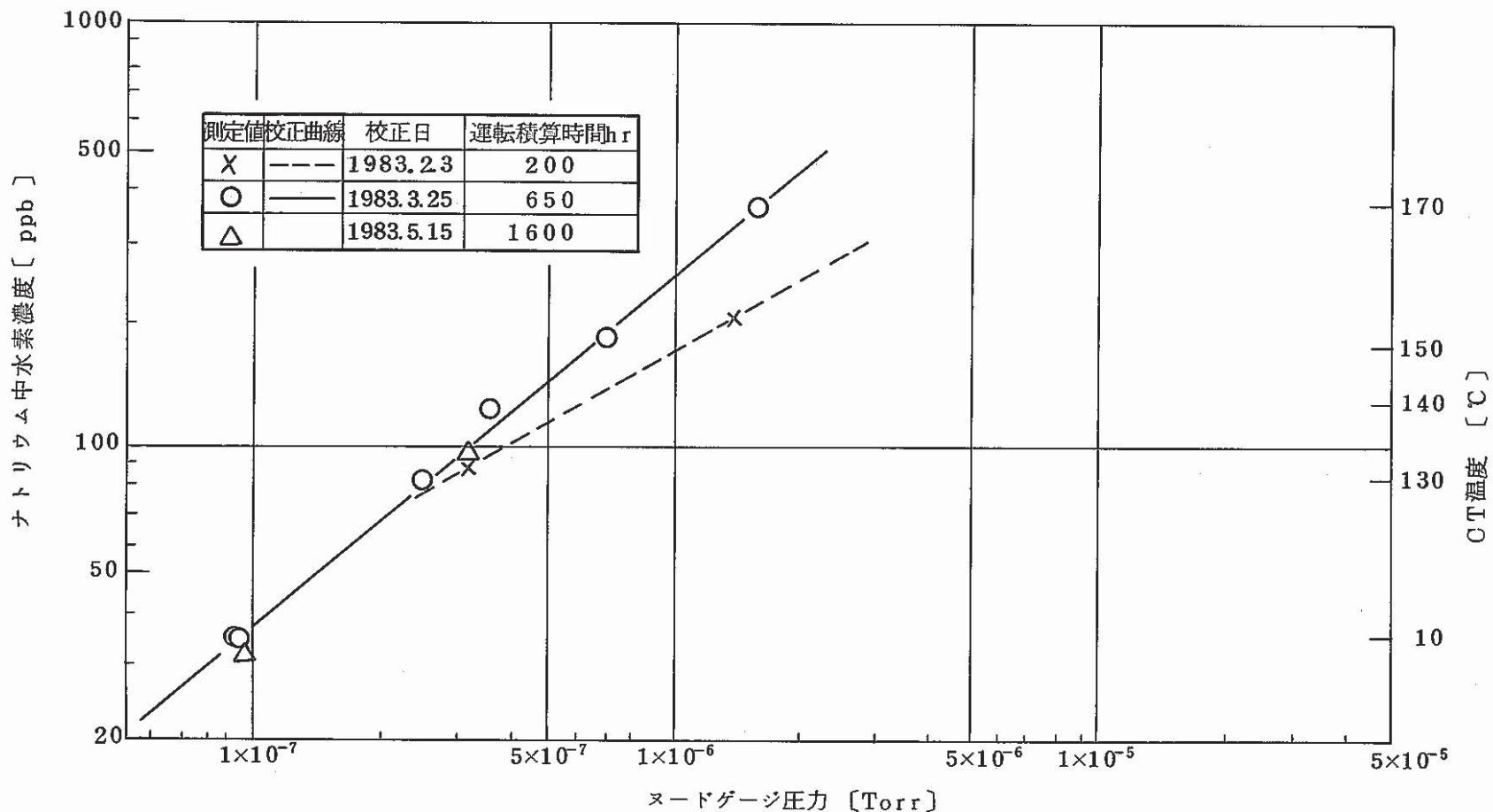


Fig.5-11 Result of calibration test of SH-HNa (TOSIBA Type)

SH-HNa (東芝型) 校正試験結果

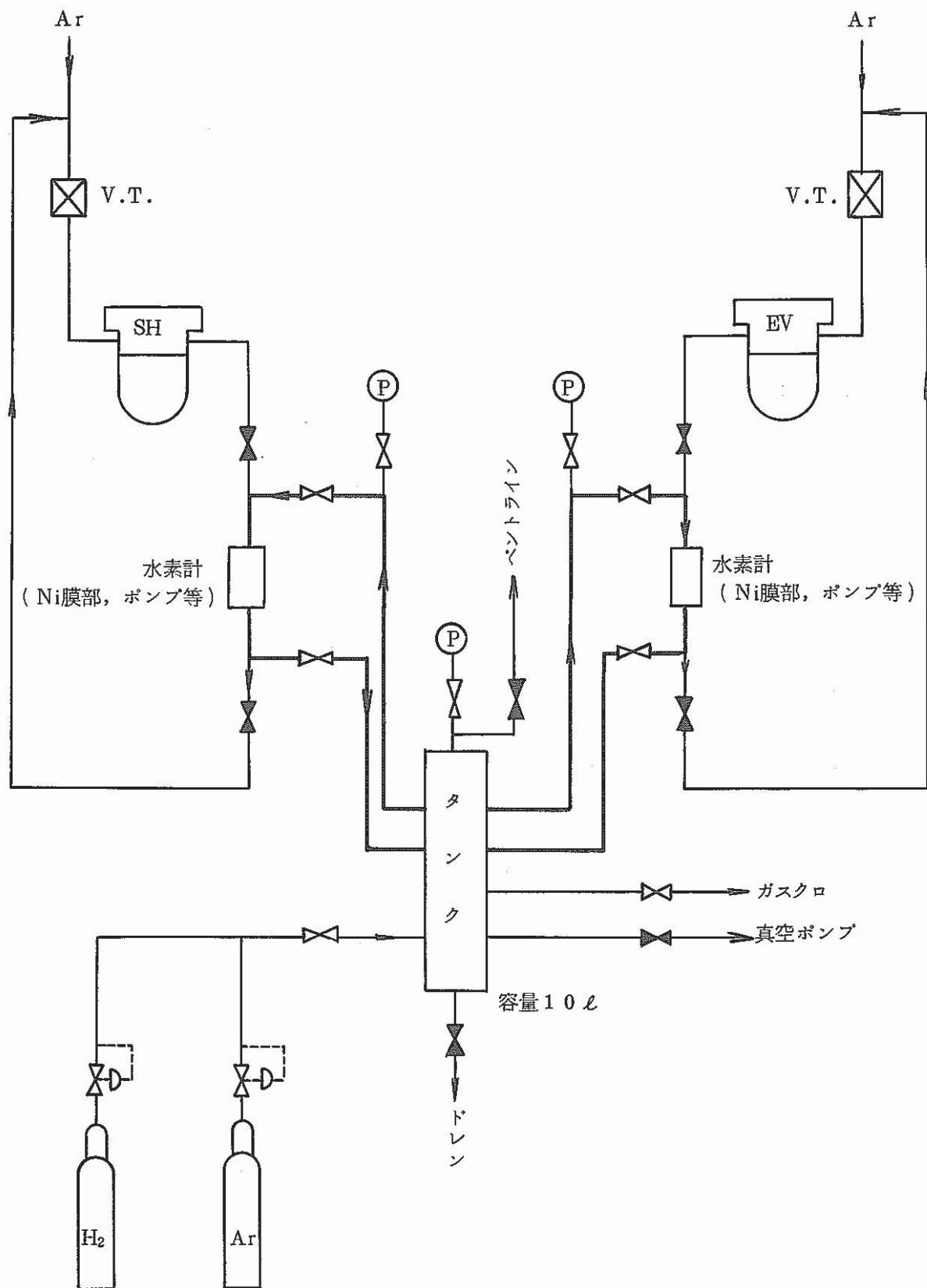


Fig. 5-12 Calibration test equipment for in-cover gas hydrogen meter
カバーガス中水素計校正試験装置

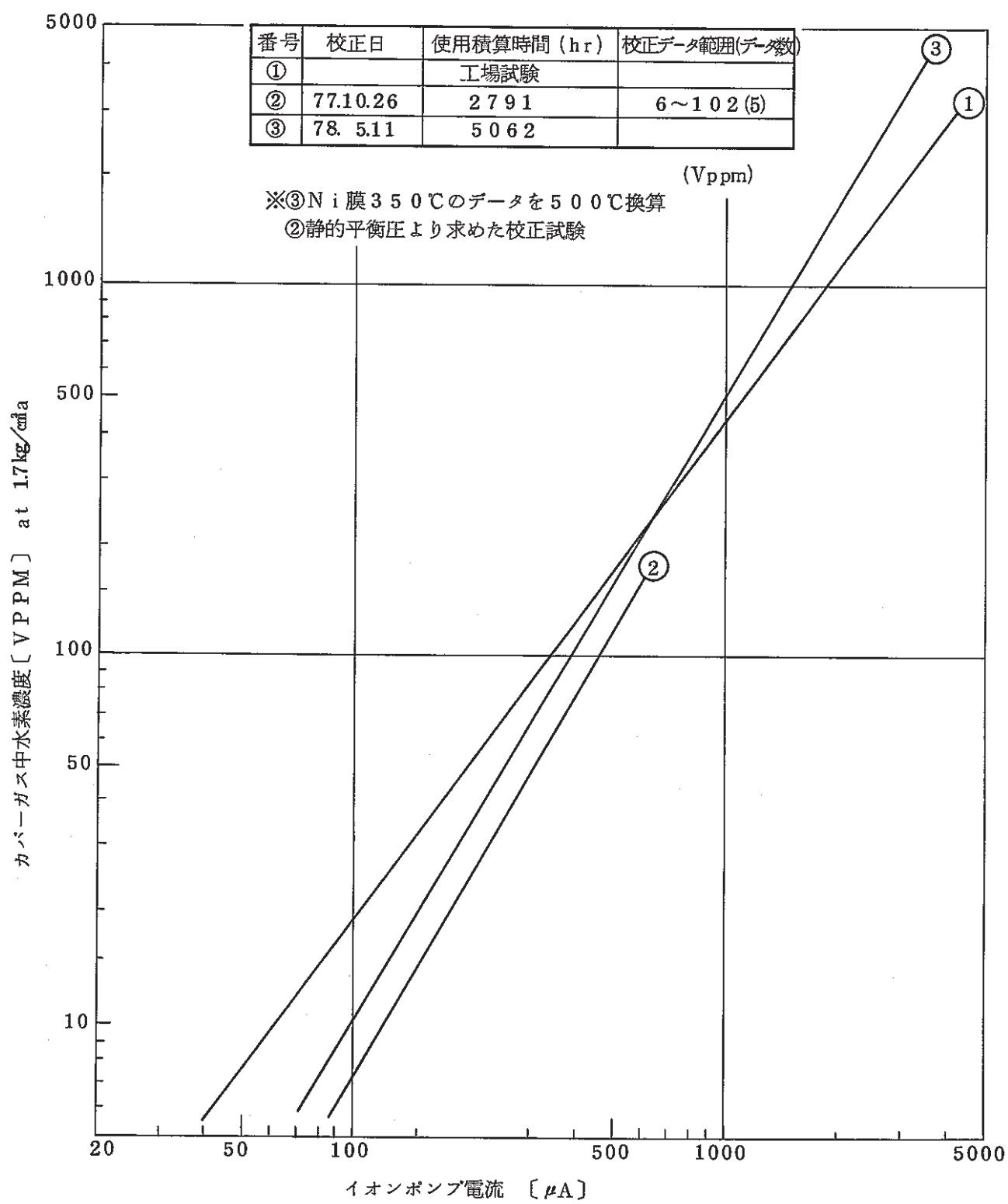


Fig.5-13 Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MK I)
EV-HAr (50MW-CG-MK I) 校正試験結果

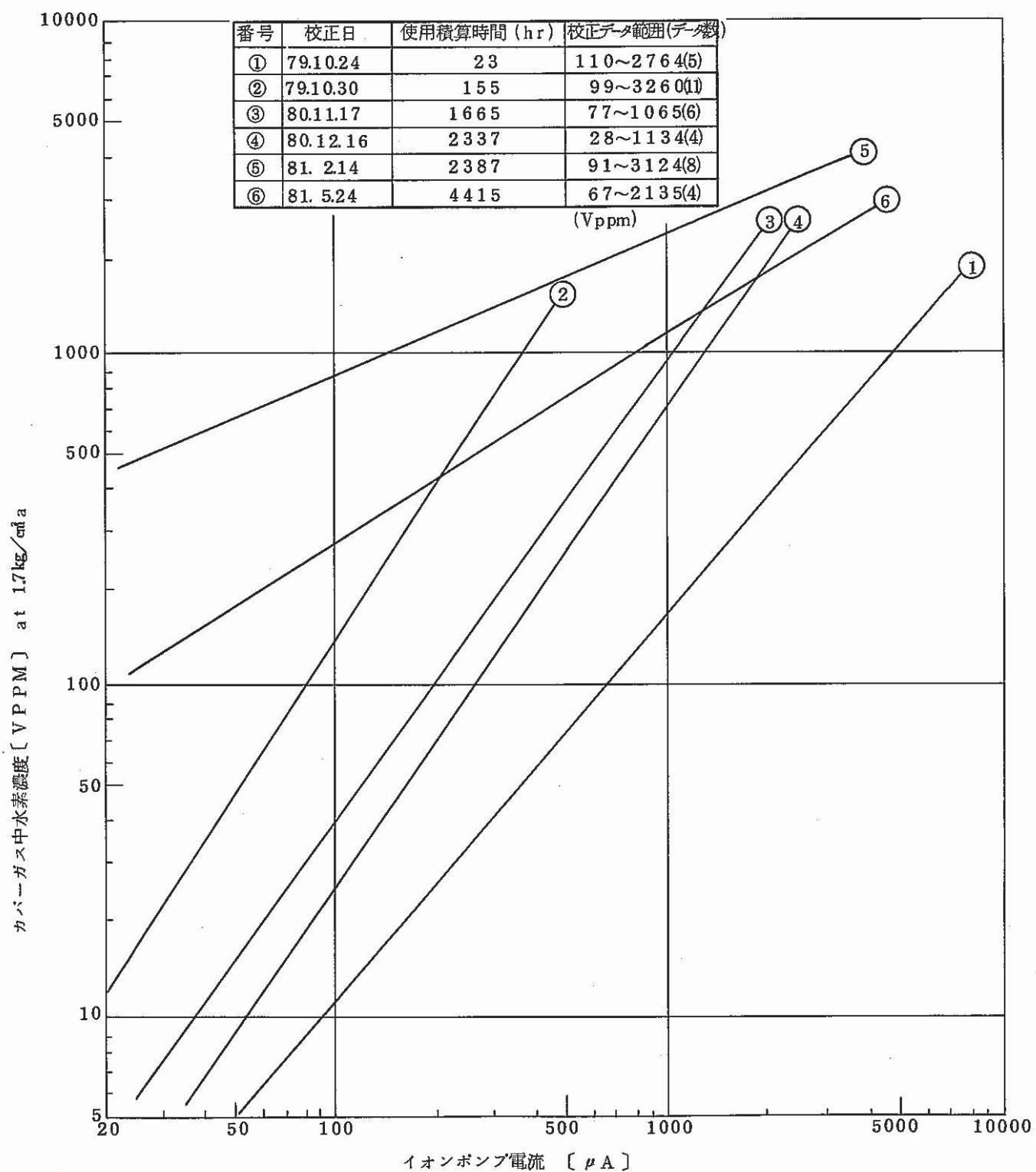


Fig.5-14 Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MKII)
EV-HAr (50MW-CG-MKII) 校正試験結果

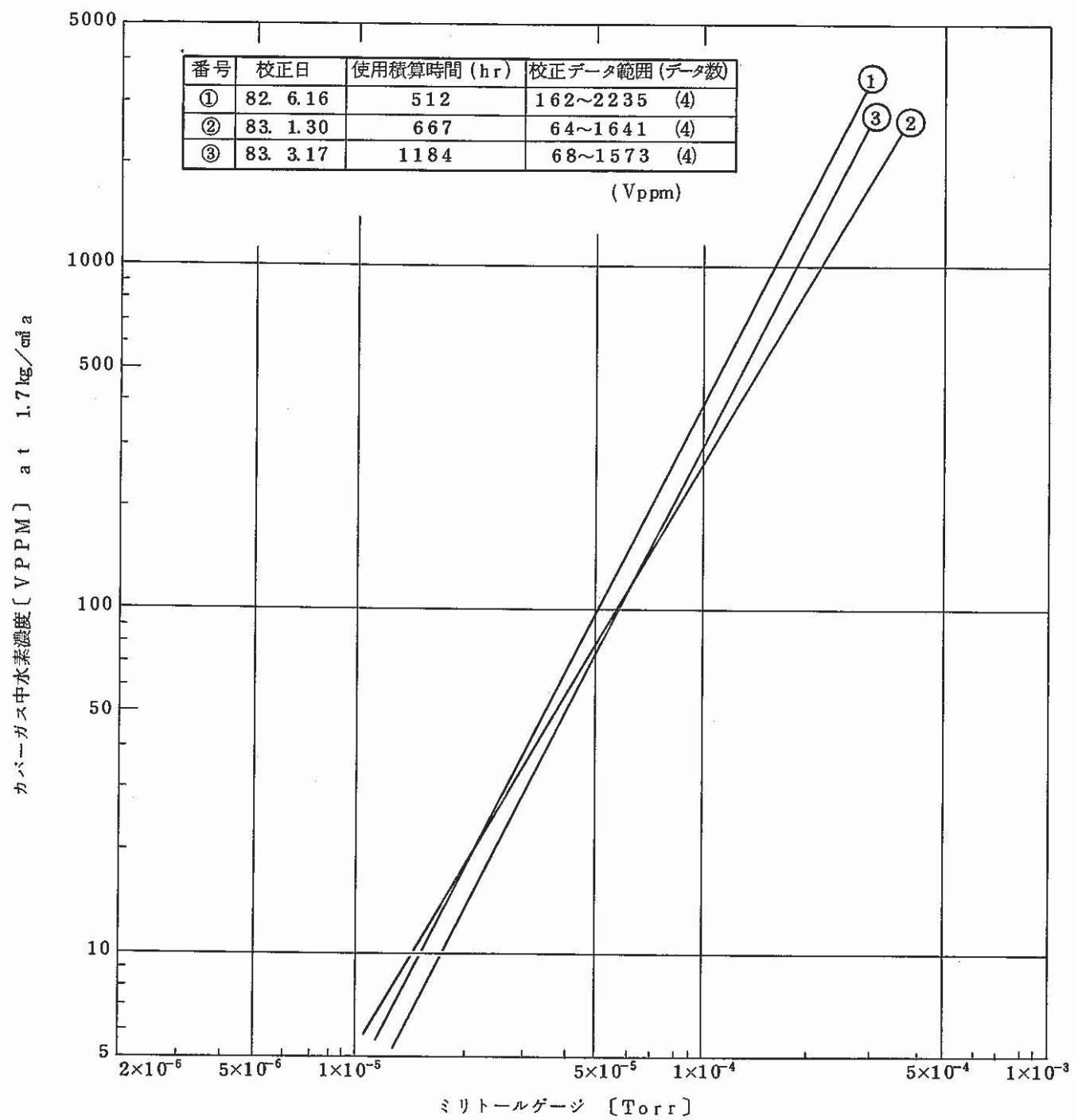


Fig. 5-15 Result of calibration test of EV-HAr (50MW-CG-MKIII)
EV-HAr (50MW-CG-MKIII) 校正試験結果

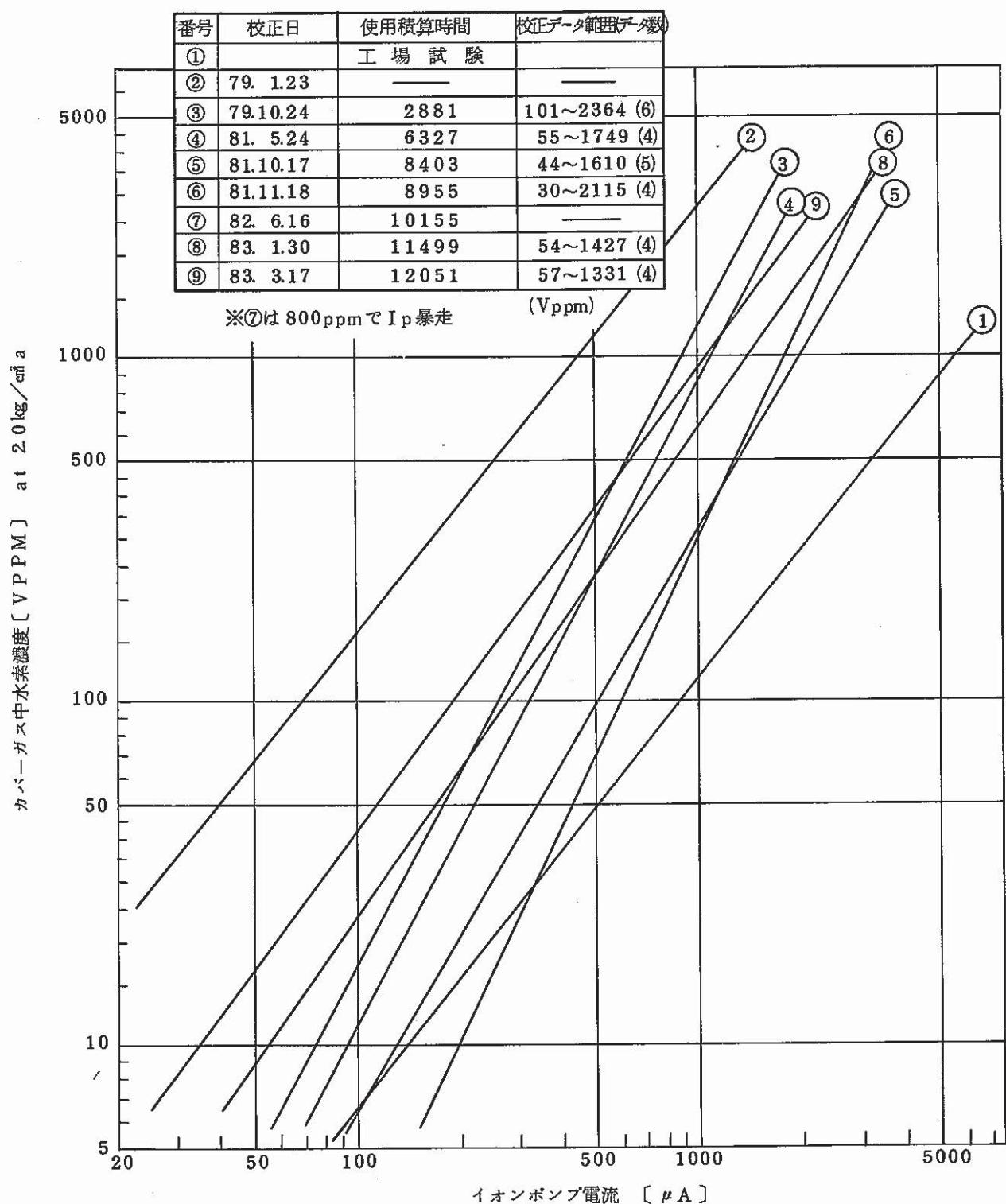


Fig.5-16 Result of calibration test of SH-HA (PNC-CG-type-I
(improvement model))

SH-HA r (PNC-CG-1号機(改良型)校正試験結果

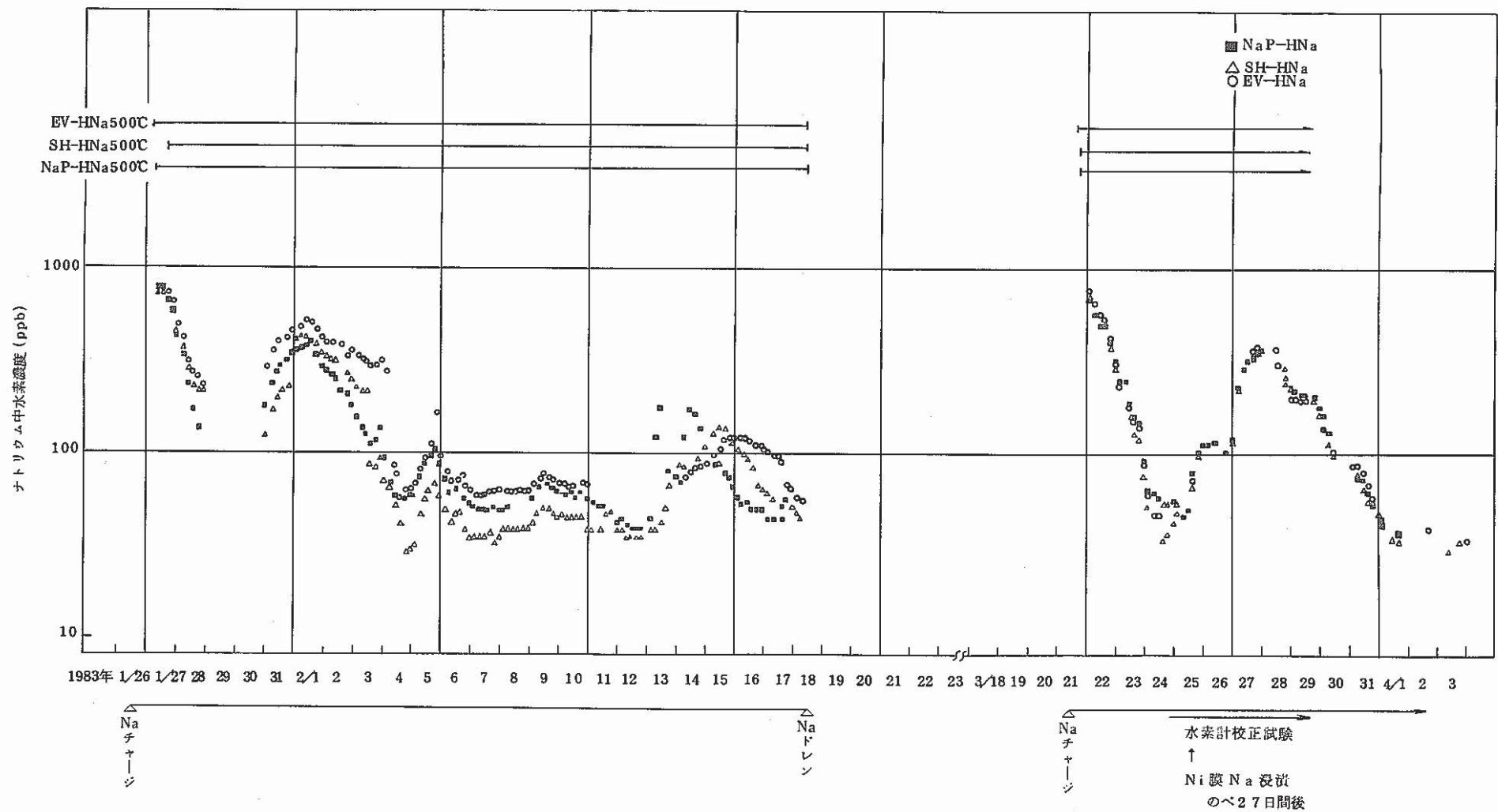


Fig.5-17 Indication of in-sodium hydrogen meter in intial operation

設置後初期運転時のナトリウム中水素計指示

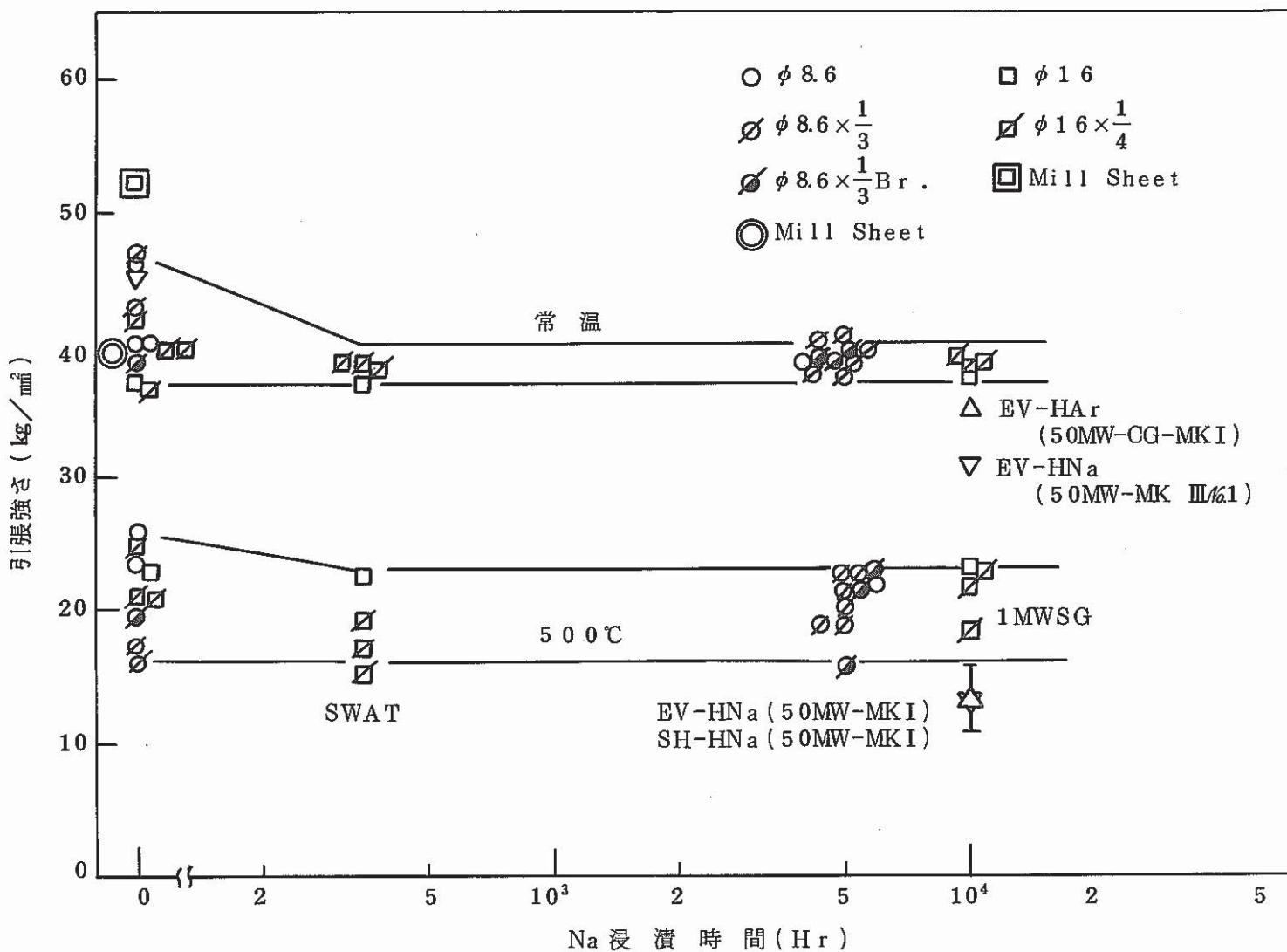


Fig.5-18 Tensile strength and soaked time of nickel membrane
 ニッケル膜の引張強さと浸漬時間

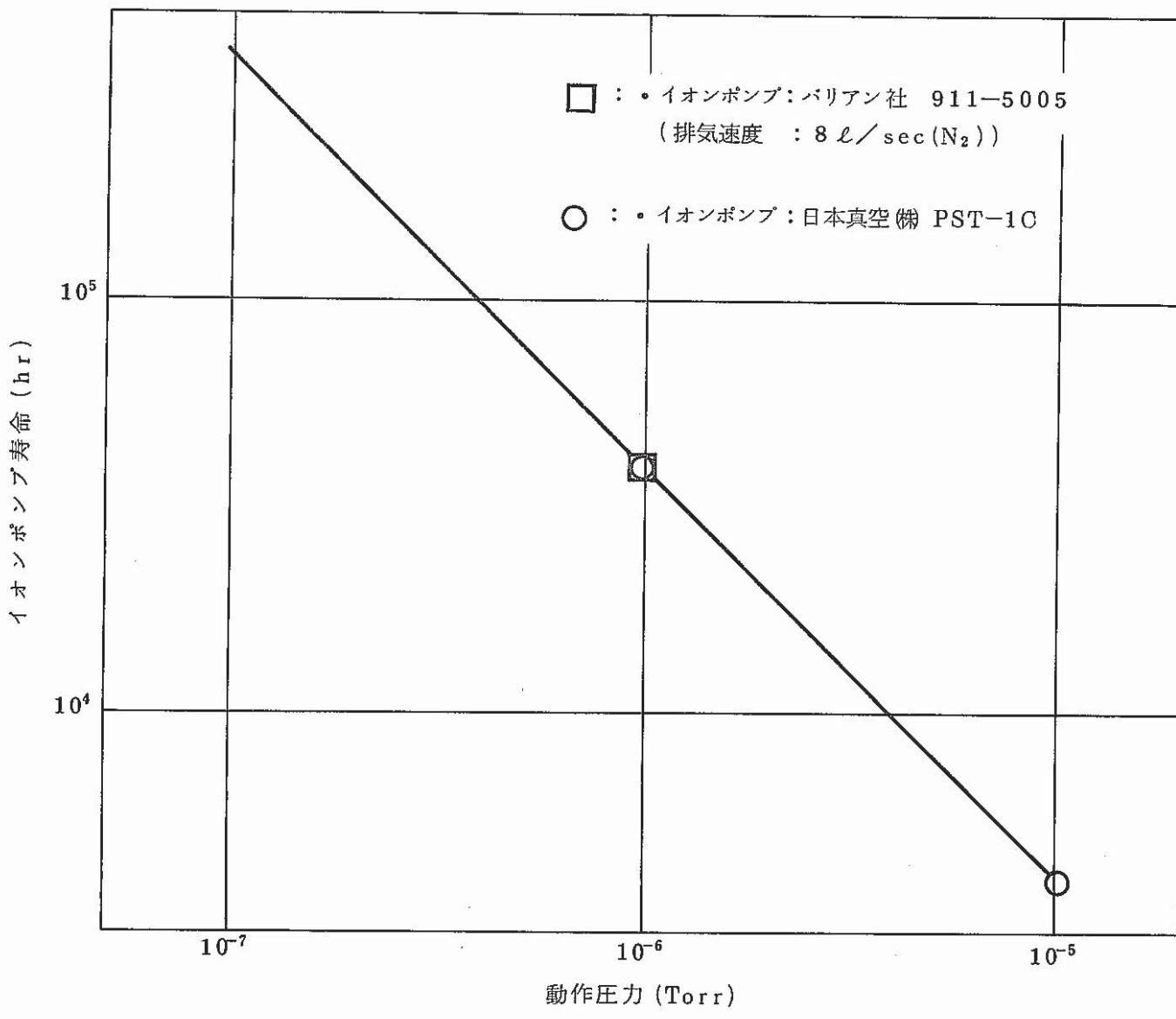


Fig.5-19 The relation between pressure and life of ion pump
イオンポンプの動作圧力と寿命の関係

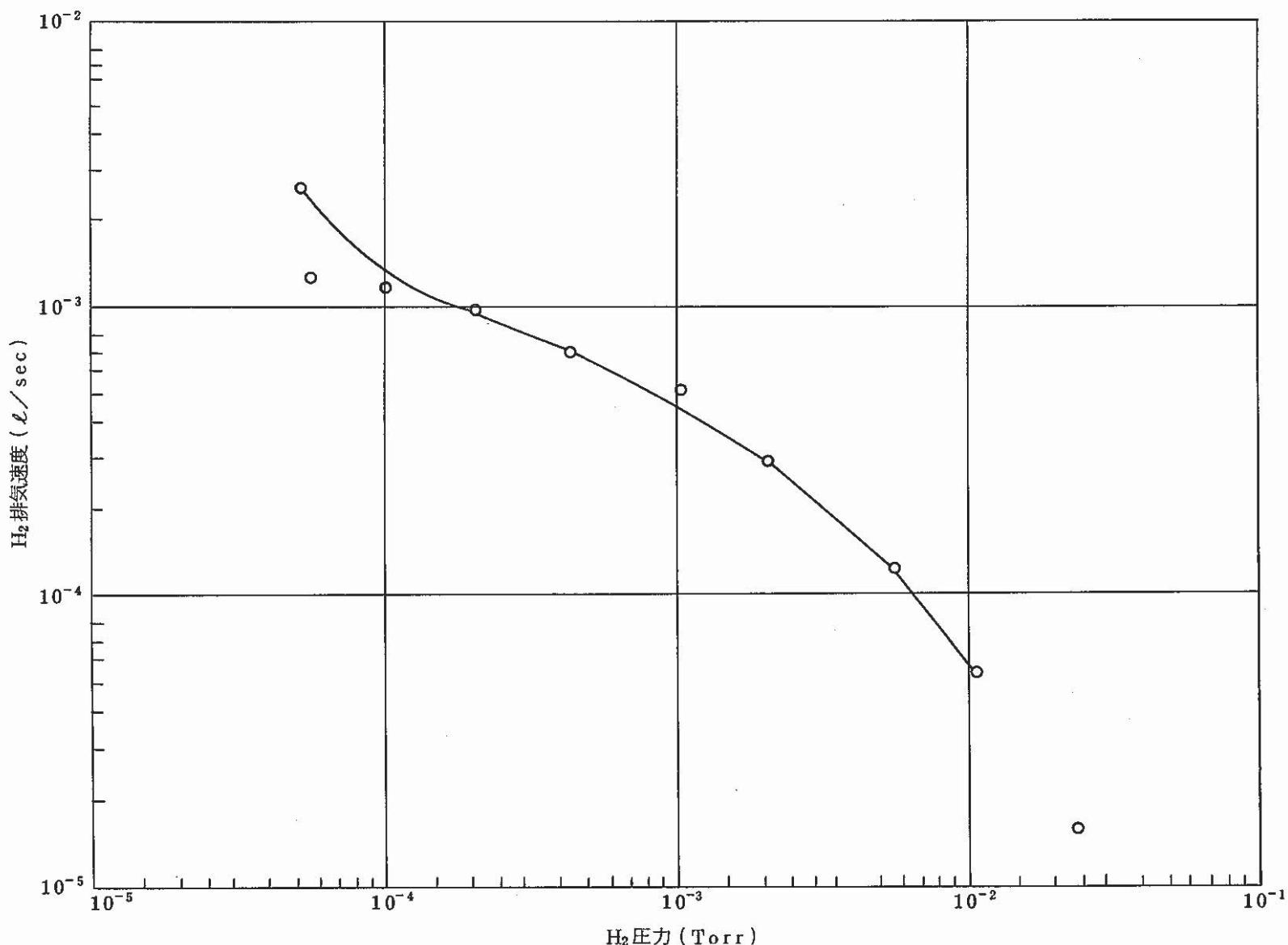


Fig. 5-20 Self pumping speed of schultz gauge

シュルツゲージの自己排気速度

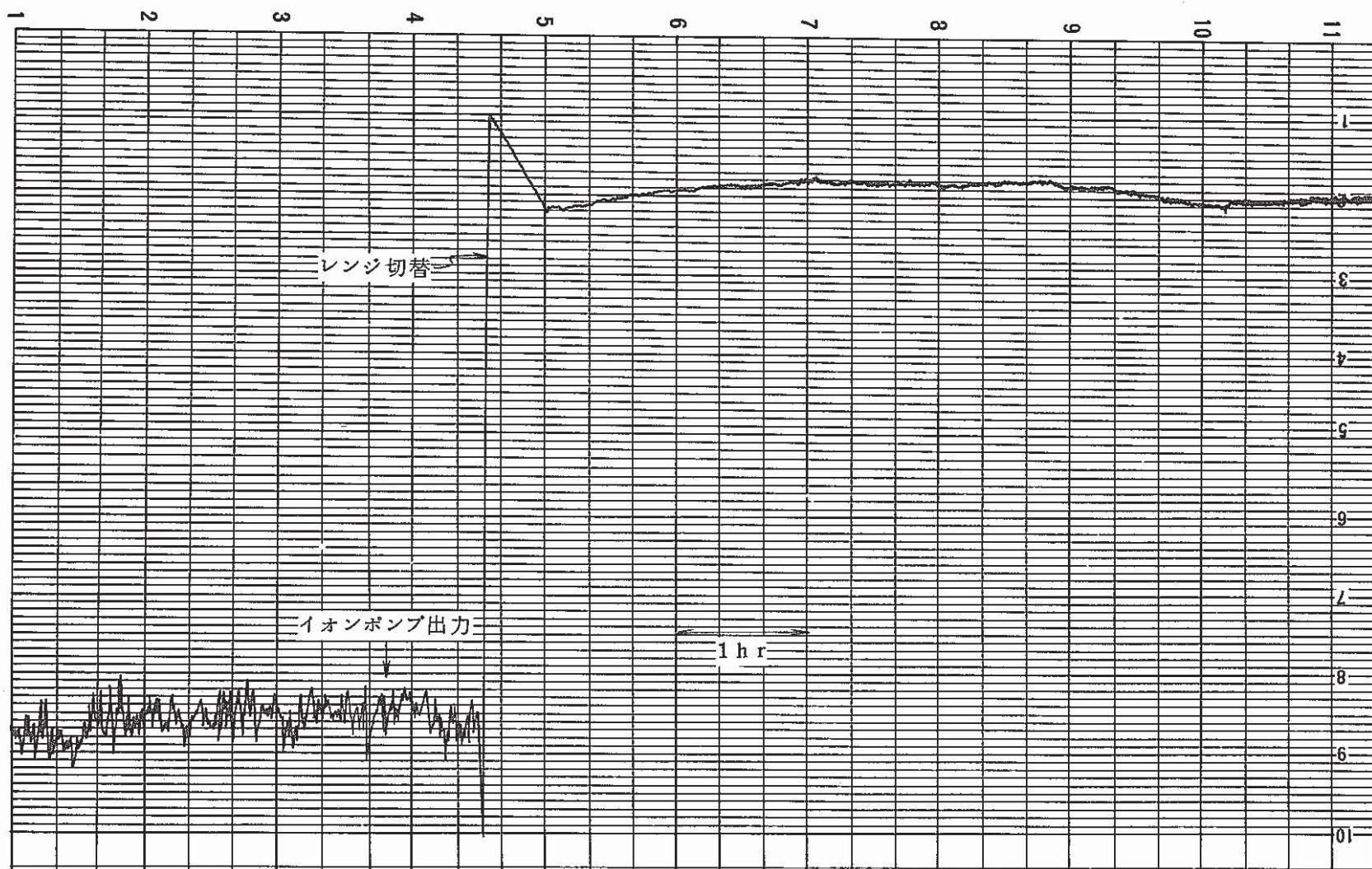


Fig. 5-21 Noise of the ion pump

イオンポンプ出力のノイズ

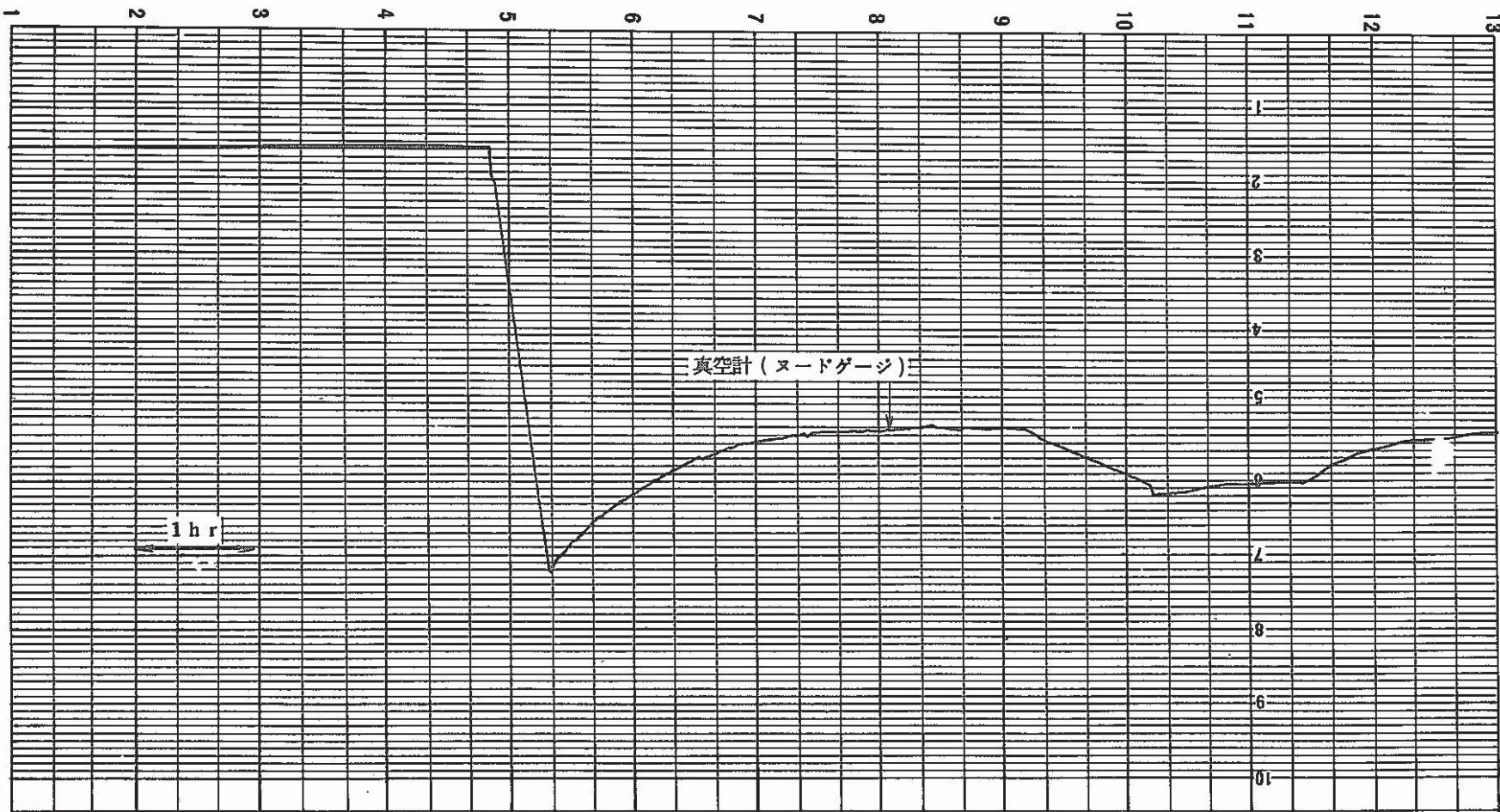


Fig. 5-22 Noise of the vacuum gauge

真空計出力のノイズ

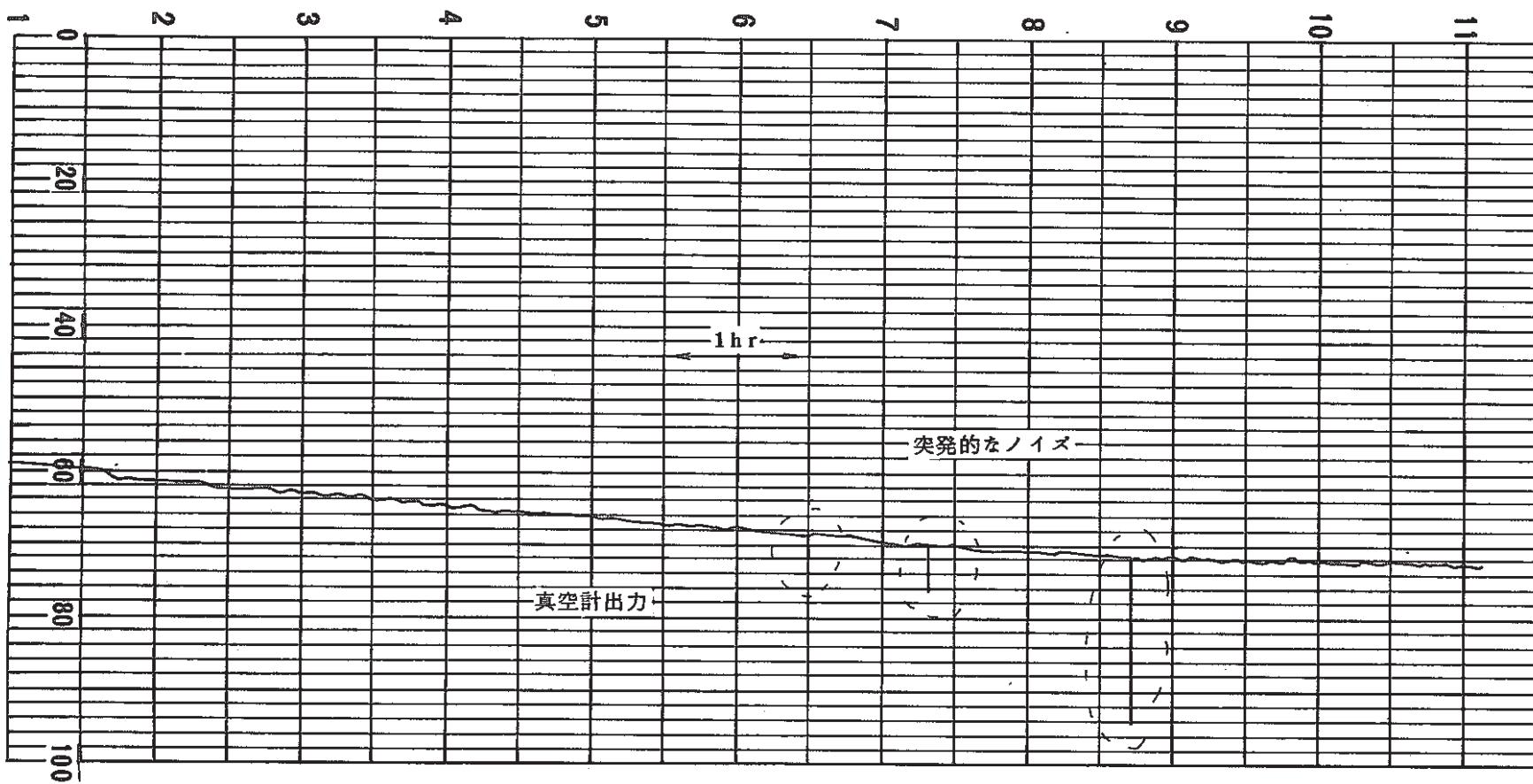
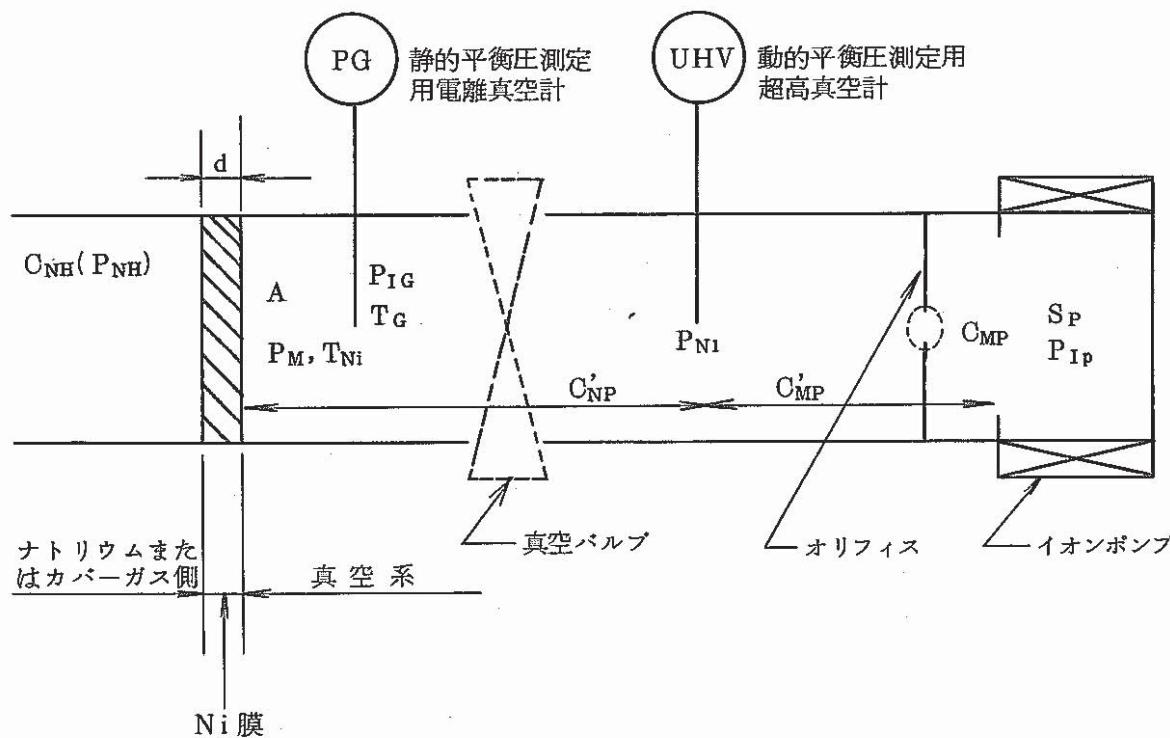


Fig. 5-23 An example of unforeseen noise of the vacuum gauge
真空計出力の突発的なノイズ例



C_{NH} : 水素濃度
 P_{NH} : 水素分圧
 T_{Ni} : Ni膜部温度
 d : Ni膜厚さ
 A : Ni膜面積
 P_M : Ni膜部圧力
 P_N : UHV部圧力
 P_{IG} : PG部圧力
 P_{Ip} : イオンポンプ部圧力
 C'_{NP} : Ni膜~UHVまでのコンダクタンス
 C_{MP} : オリフィスのコンダクタンス
 S_p : イオンポンプ排気速度
 C'_{MP} : 実効コンダクタンス
 T_G : PG部温度

Fig. 5-24 Conceptual figure of orifice type hydrogen meter
オリフィスタイル水素計概念図

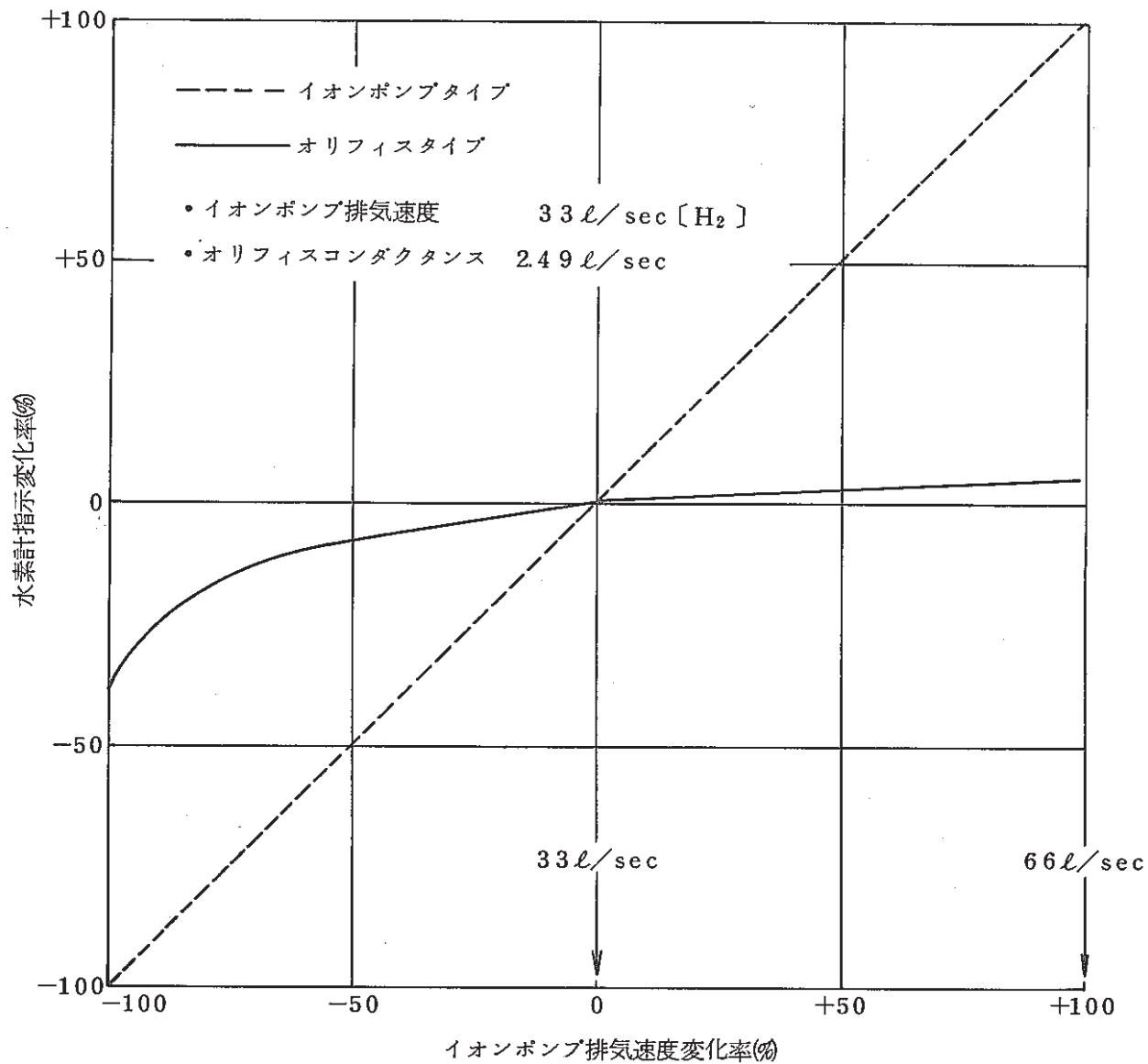


Fig. 5-25 Change of hydrogen indication by change of ion pumping speed
イオンポンプ排気速度変化に伴う水素計の指示変化

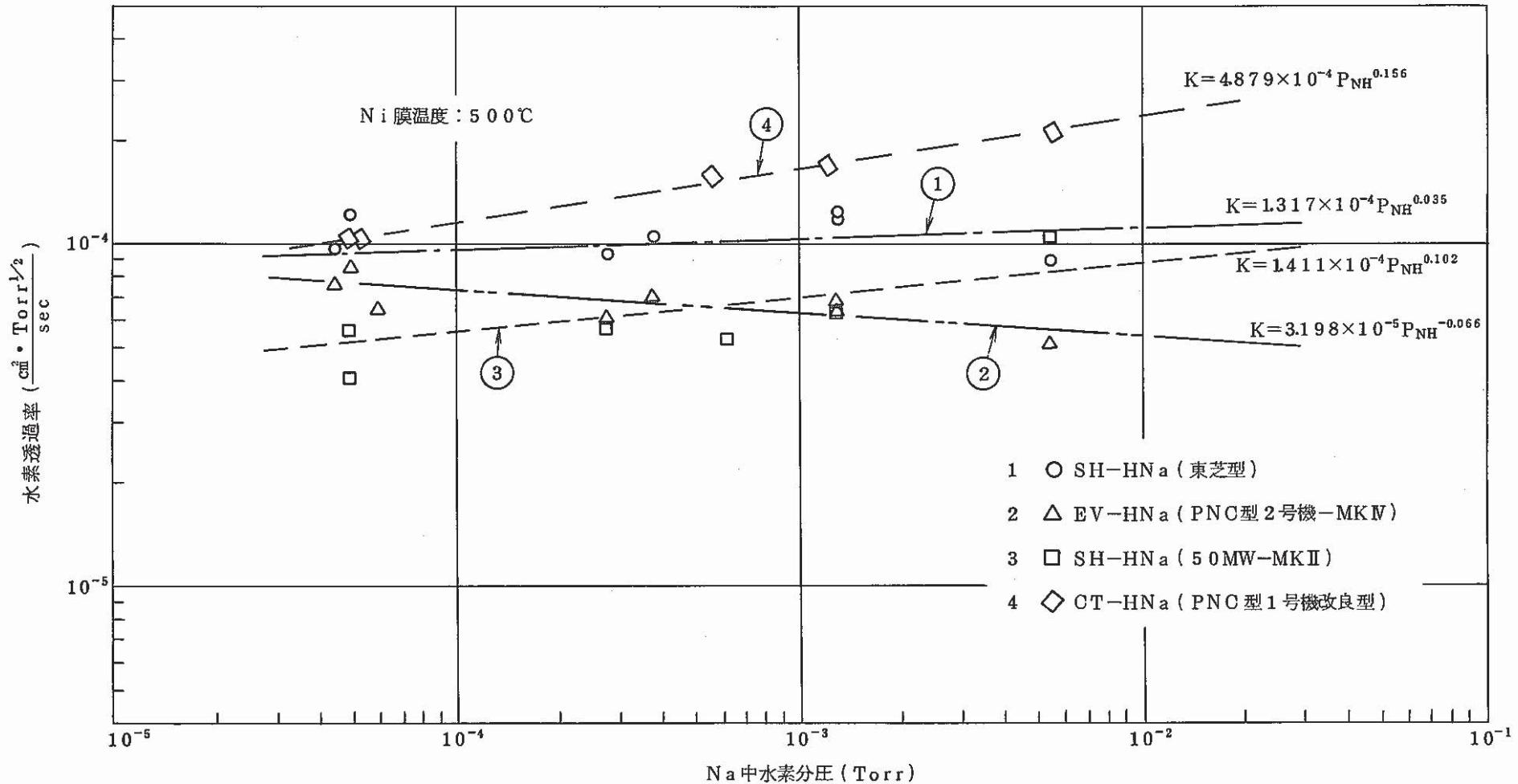


Fig. 5-26 The relation between hydrogen diffusion ratio and partial pressure in sodium
水素透過率とナトリウム中水素分圧の関係

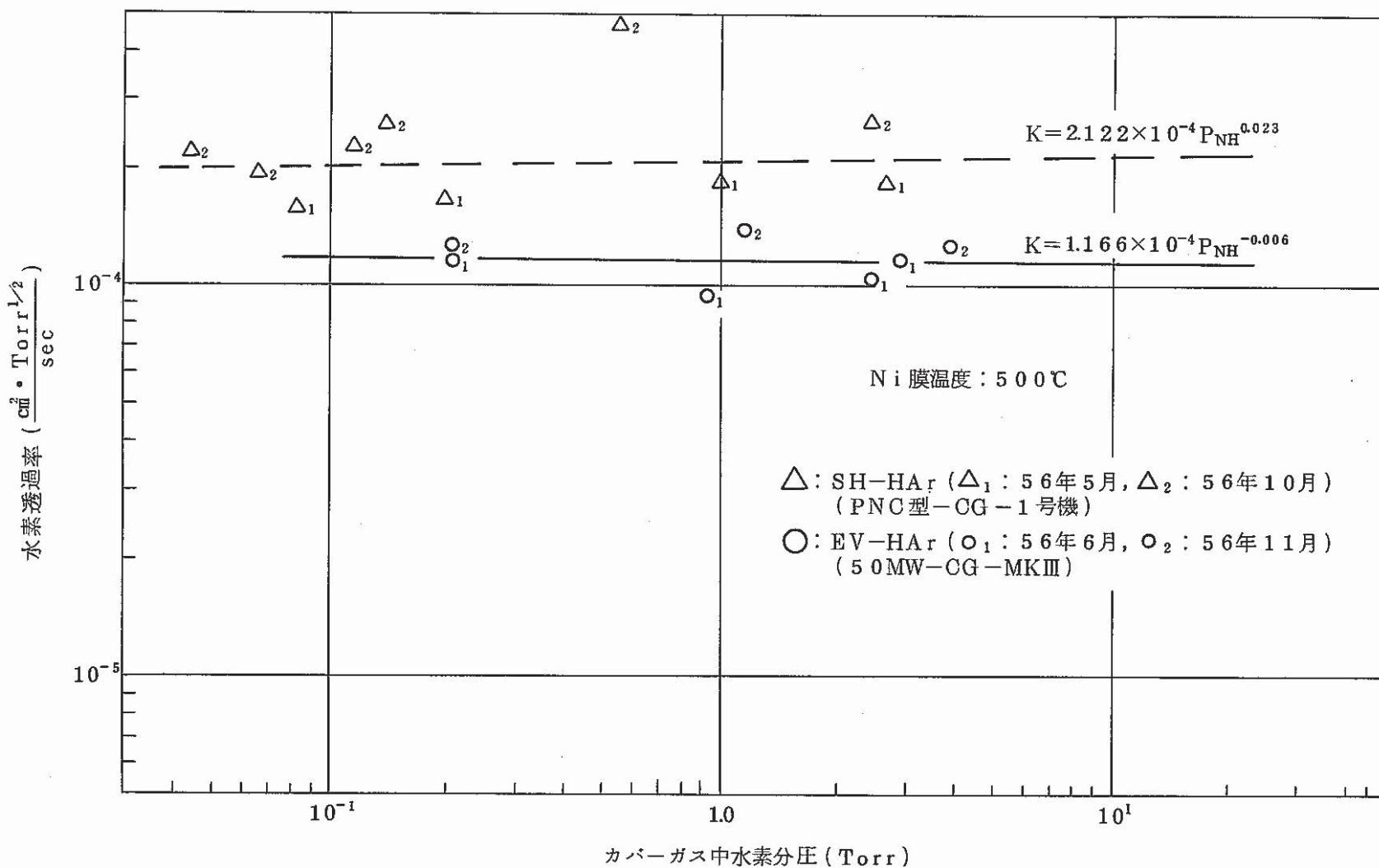


Fig. 5-27 The relation between hydrogen diffusion ratio and partial pressure in cover gas
水素透過率とカバーガス中水素分圧との関係

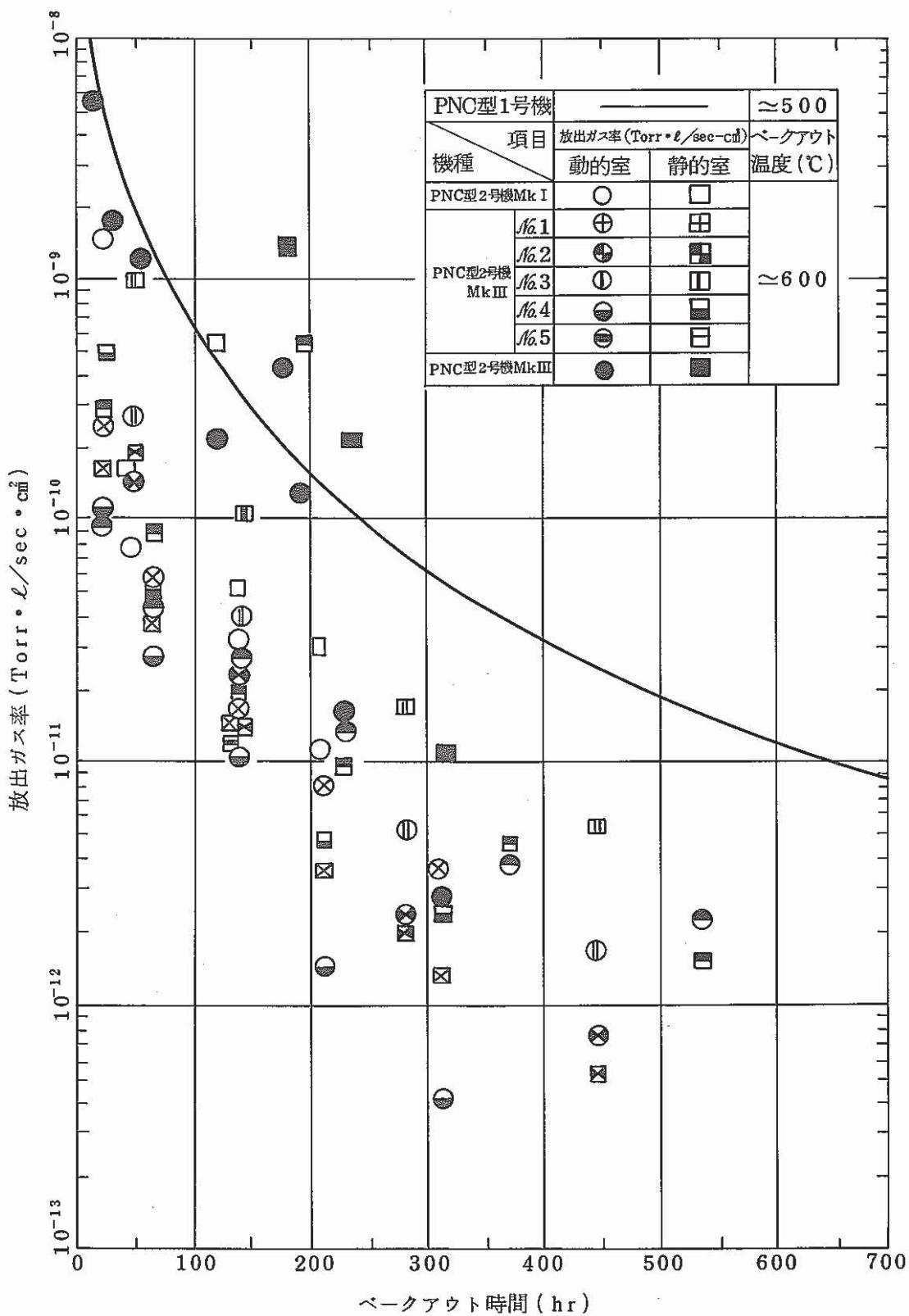


Fig. 5-28 The test result of bake out of PNC type in-sodium hydrogen meter

PNC型ナトリウム中水素検出計ペークアウト試験結果

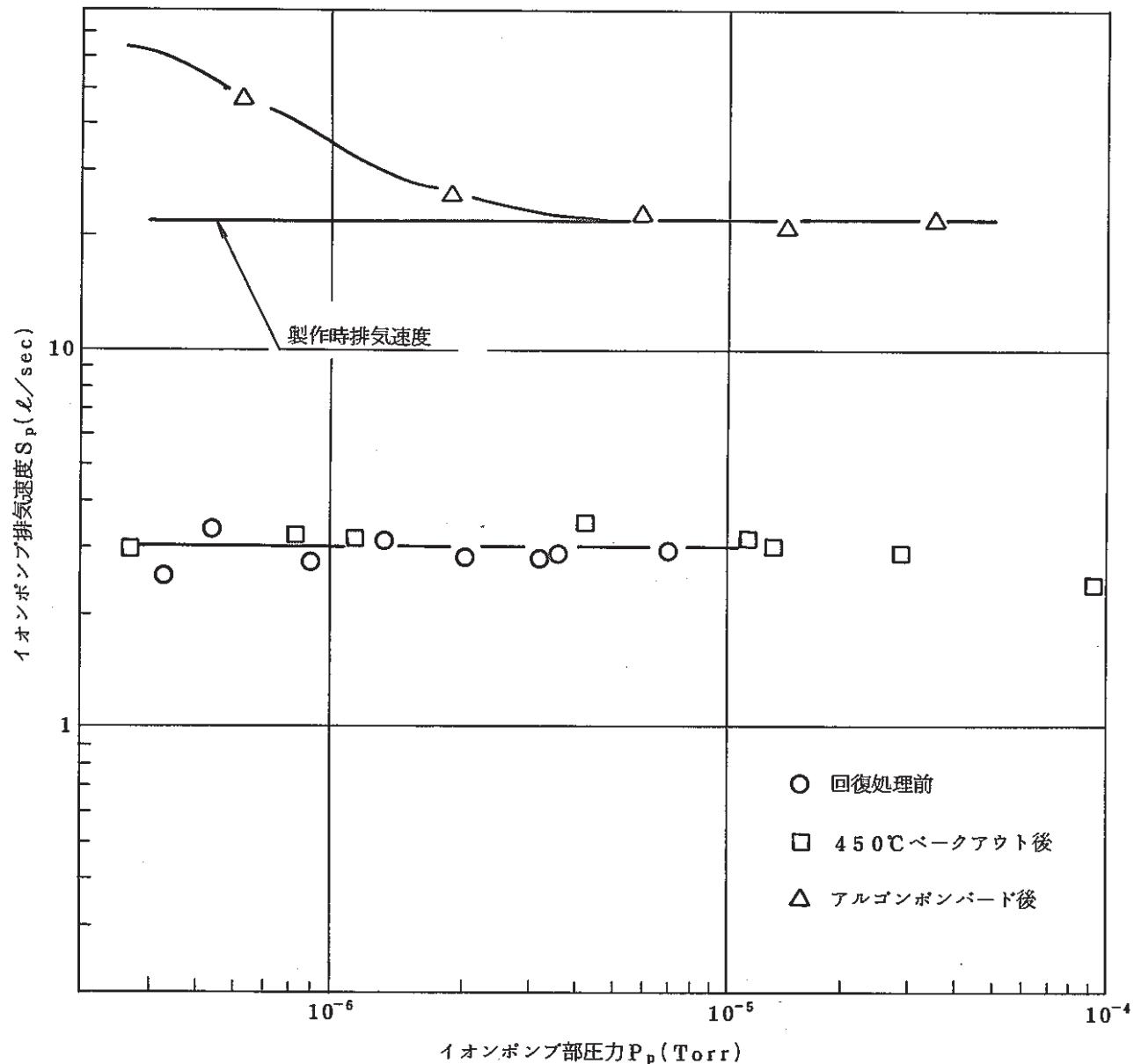
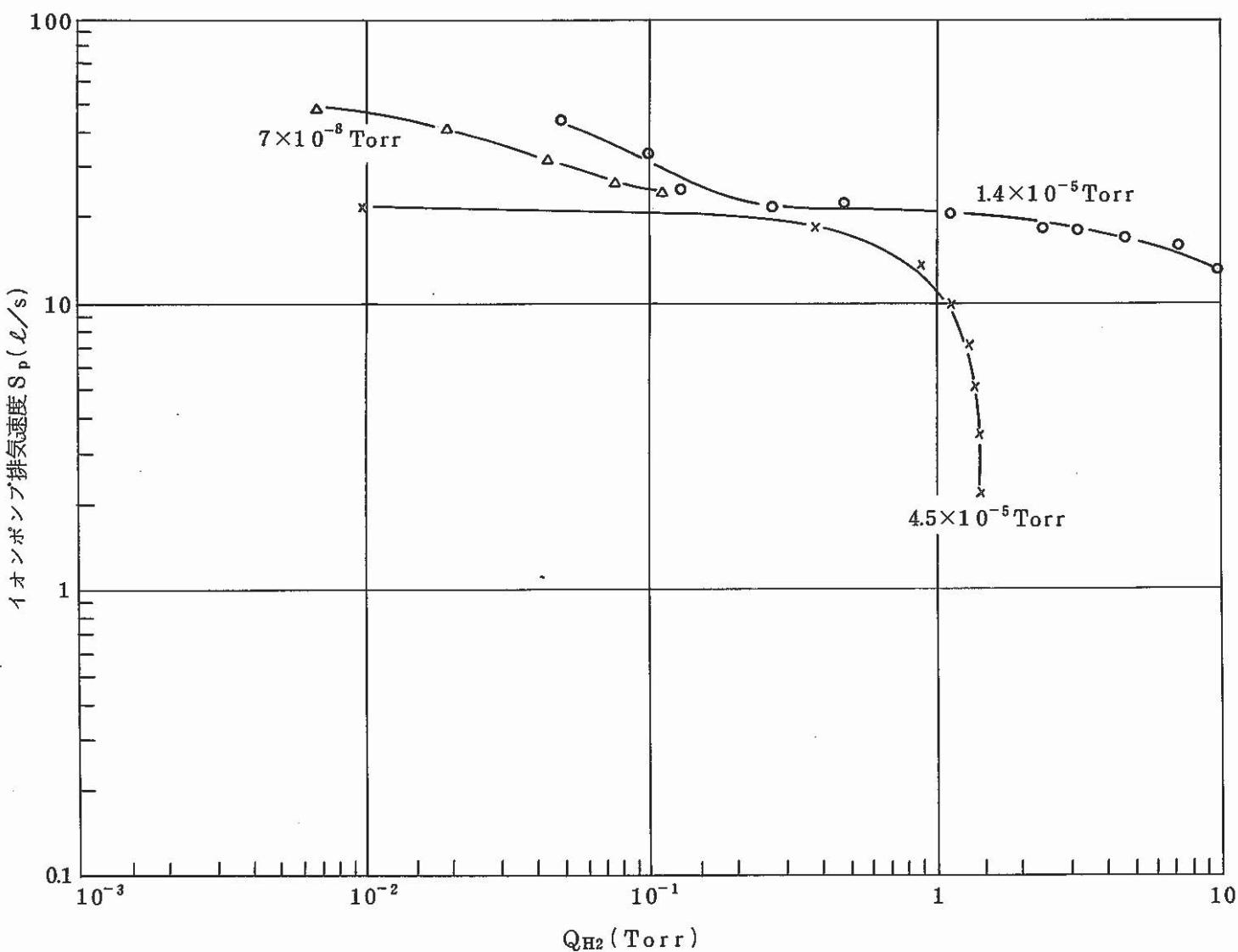


Fig. 5-29 Pumping speed of after and before recovery treatment
イオンポンプ回復処理前後の排気速度

Fig. 5-30 S_p versus Q_{H_2} after the treatment of Ar ion bombardment

イオンポンプ積算排気量

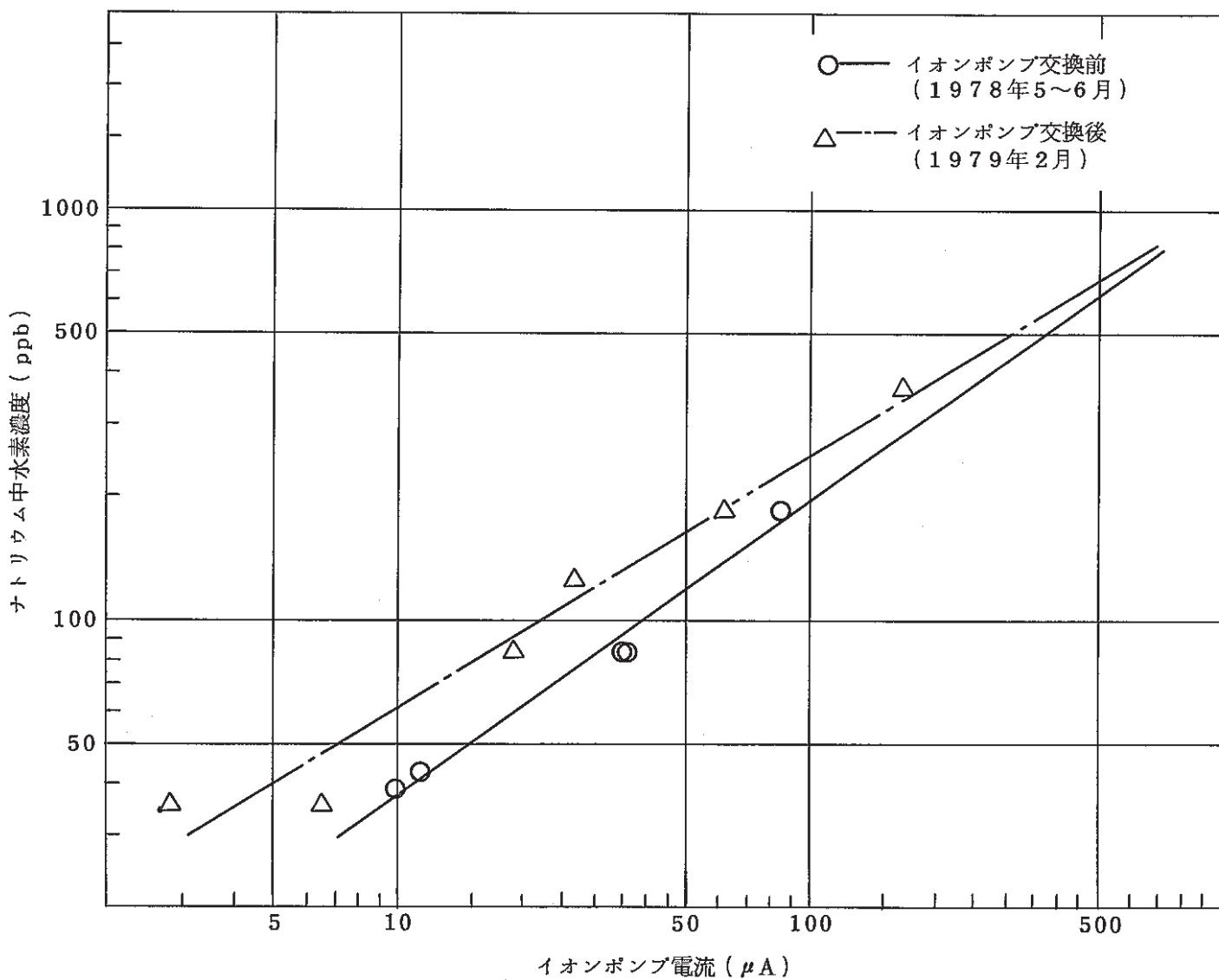


Fig. 5-31 Calibration curve before and after ion pump exchange (EV-HNa-MK III - #1)
イオンポンプ交換前後の EV-HNa-MK III #1 校正曲線

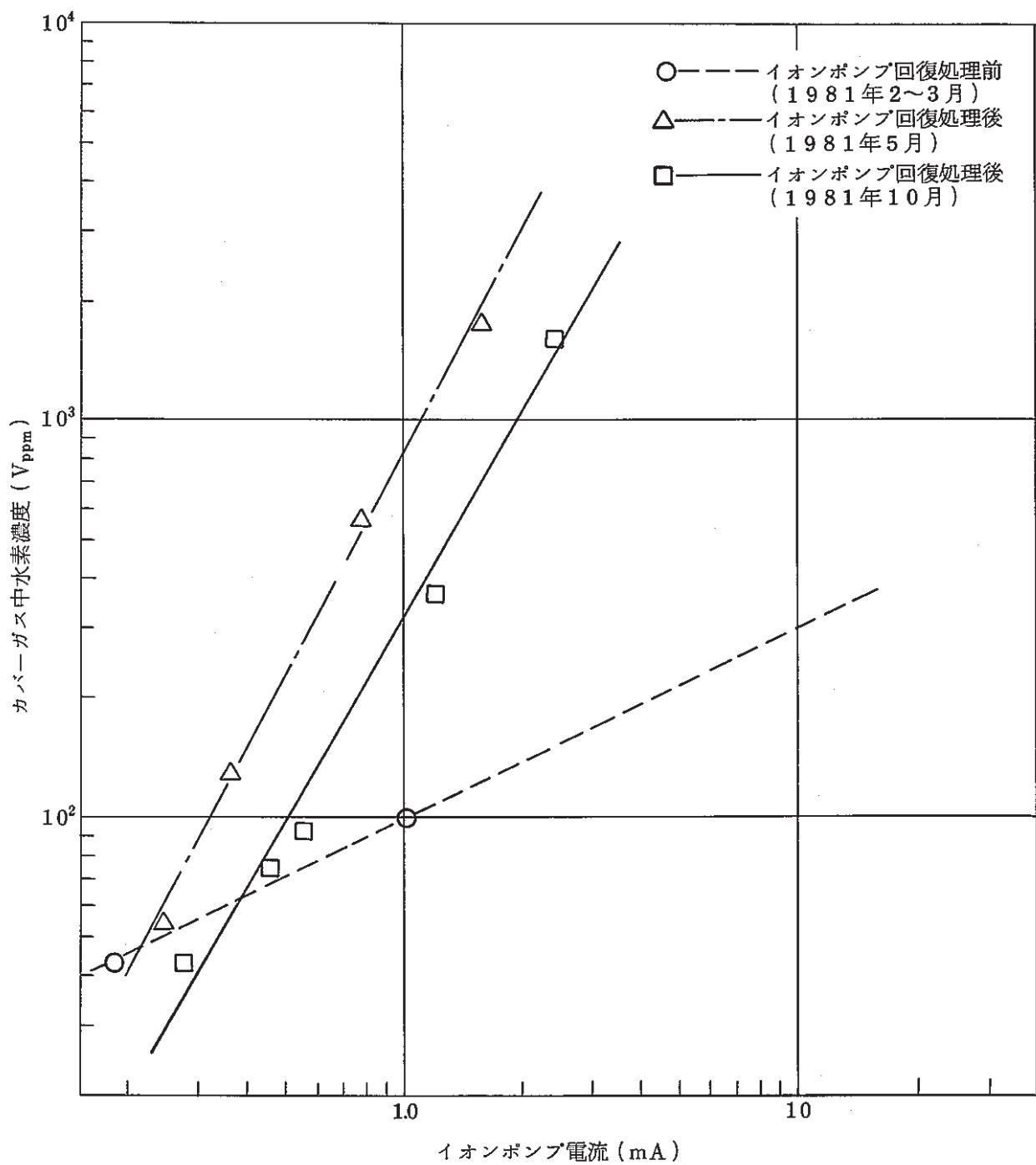


Fig. 5-32 Calibration curve before and after recovery treatment ($\text{SH}-\text{H}_{\text{Ar}}$)

イオンポンプ回復処理前後の $\text{SH}-\text{H}_{\text{Ar}}$ 校正曲線

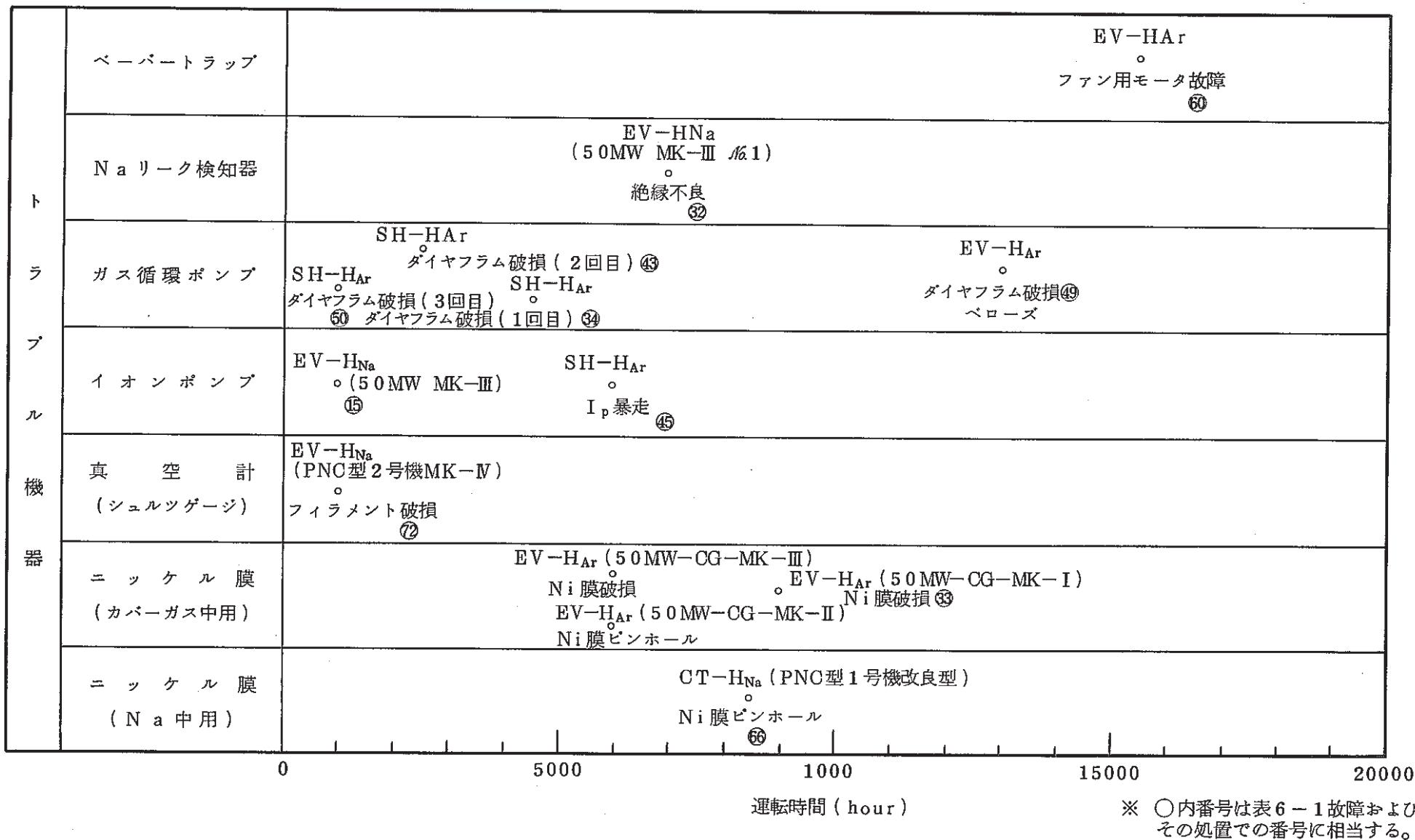
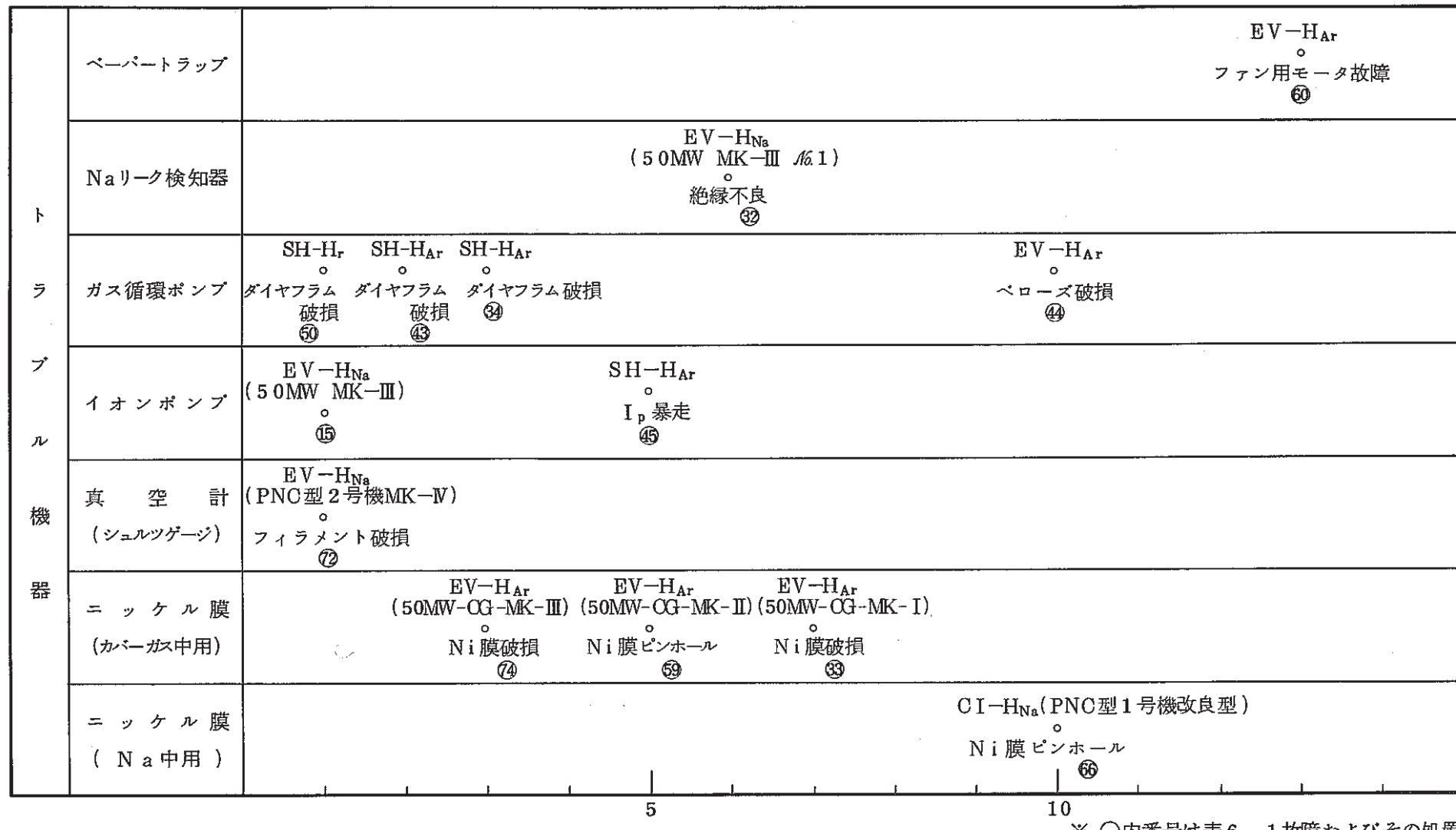


Fig. 6-1 Start up times of frequency of trouble
運転時間とトラブル発生頻度



※ ○内番号は表6-1故障およびその処置での番号に相当する。

Fig. 6-2 Start times of hydrogen meter and frequency of trouble

水素計起動回数とトラブル発生頻度

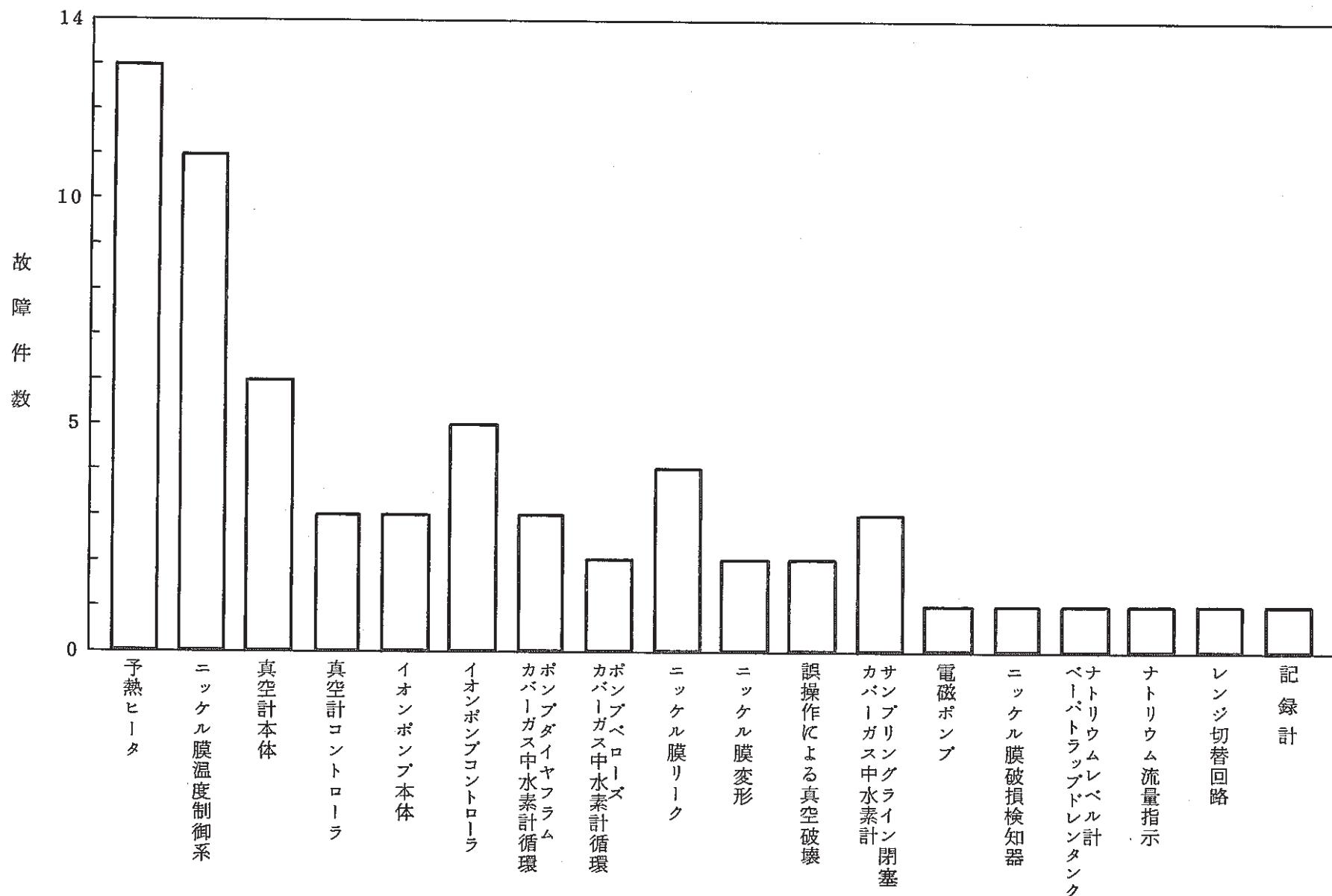


Fig. 6-3 Trouble frequency of each component of hydrogen meter
水素計構成機器別故障件数

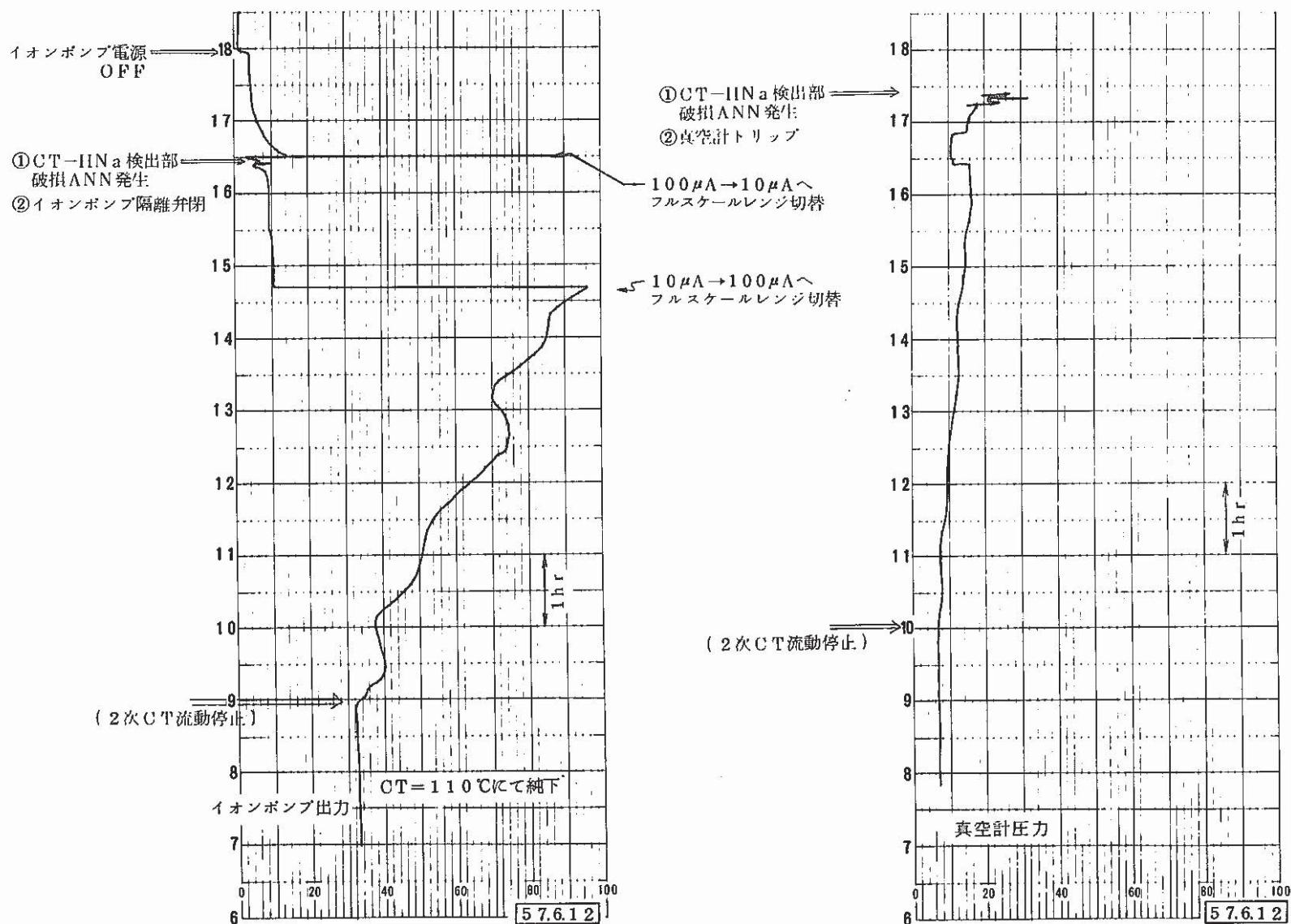


Fig. 6-4 Vacuum gauge indication at nickel membrane leak (CT-HNa)

CT-HNa ニッケル膜リーク時の真空計出力記録

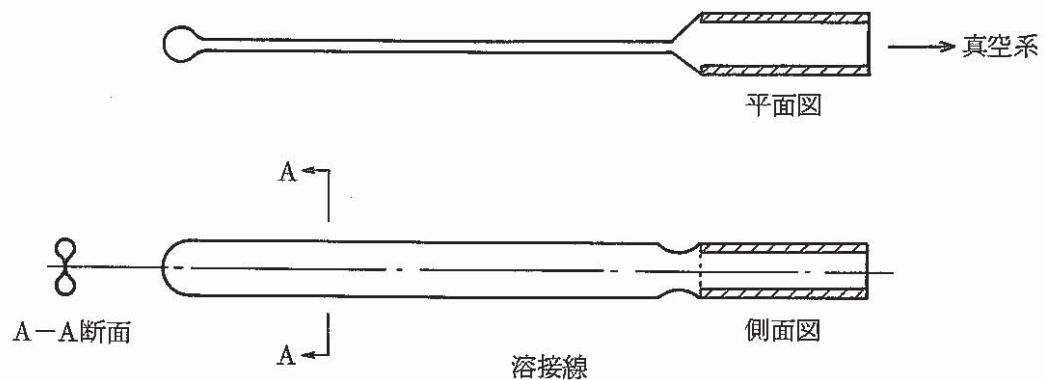


Fig. 6-5 Crash of nickel membrane ($E_V - H_{Ar} (50\text{MW}-CG-MK I)$)
 $E_V - H_{Ar} (50\text{MW}-CG-MK I)$ ニッケル膜潰れ状況

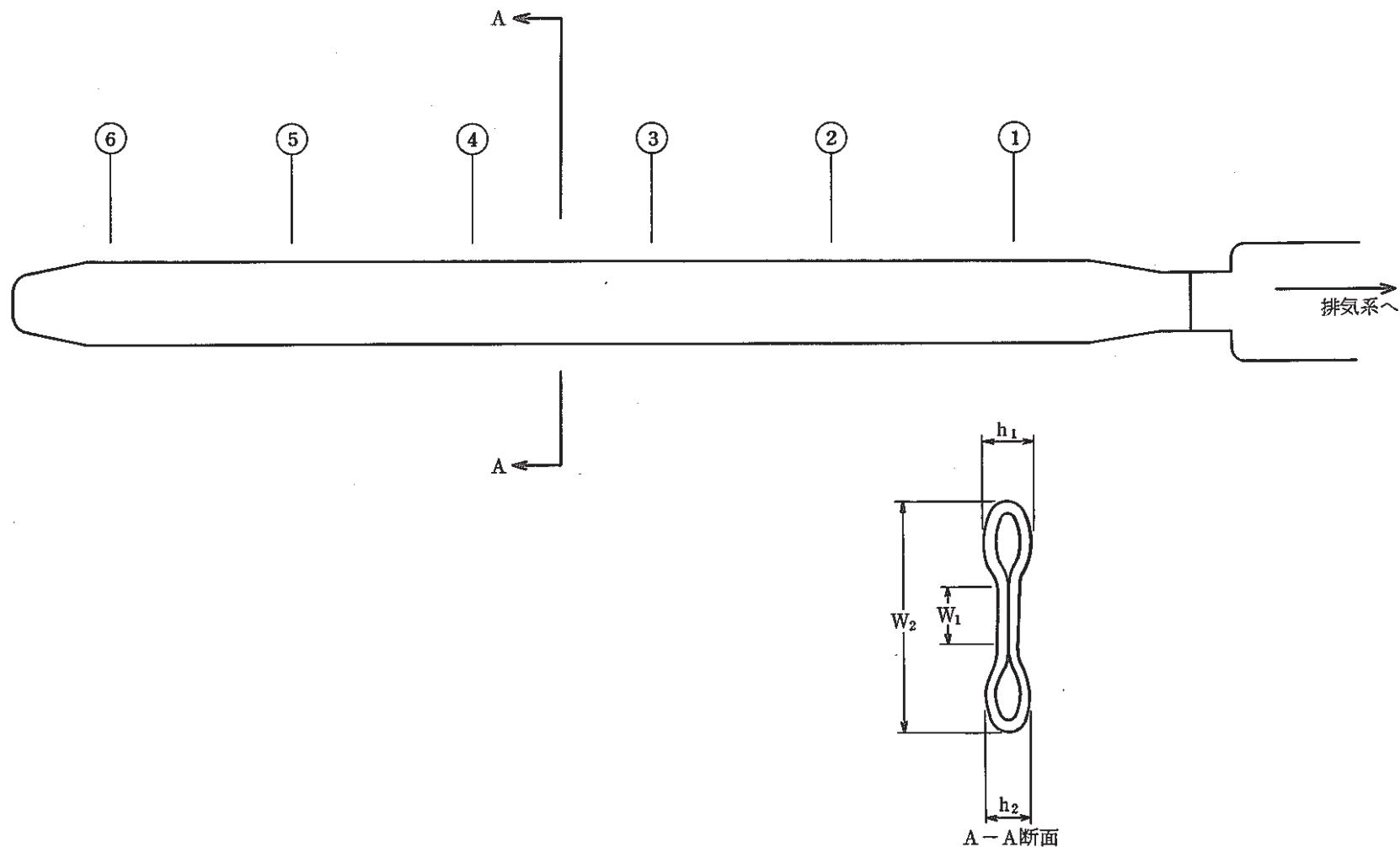


Fig. 6-6 Measurement position of nickel membrane (Ev-H_{Ar}(50MW-CG-MK I))
Ev-H_{Ar}ニッケル膜寸法測定位置

MILLITORR GAUGE

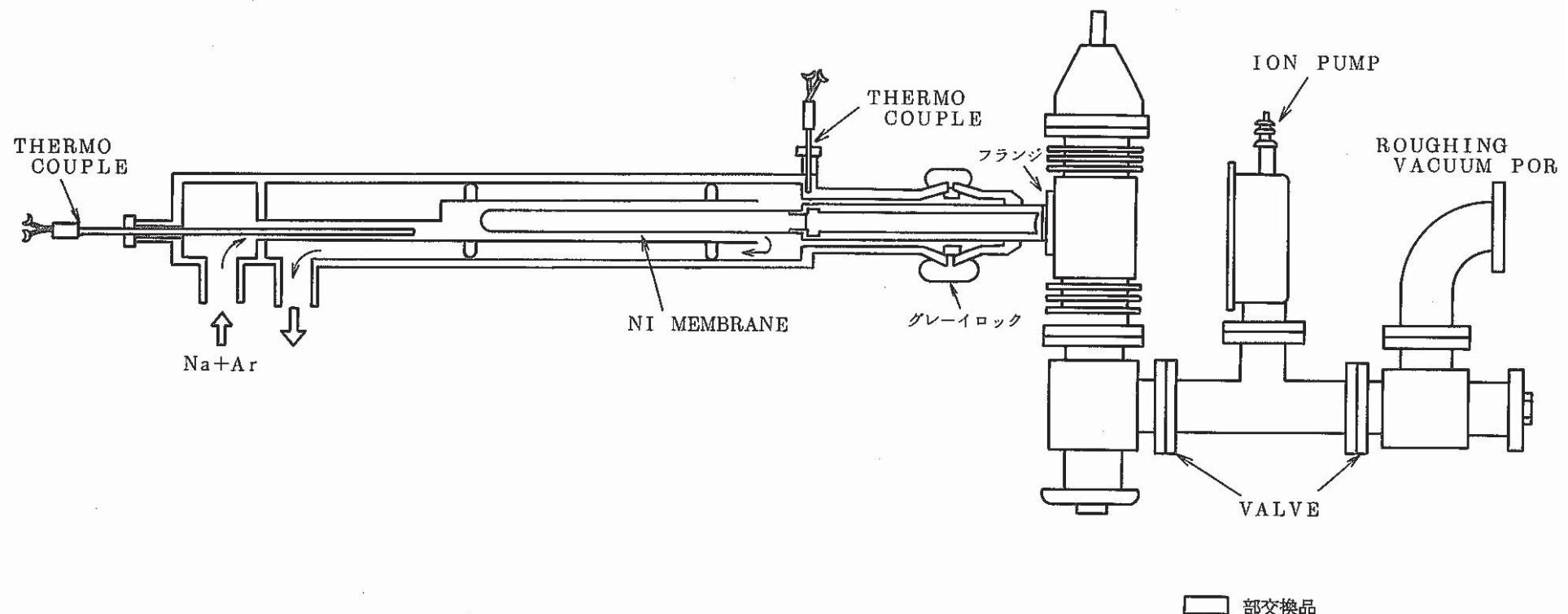
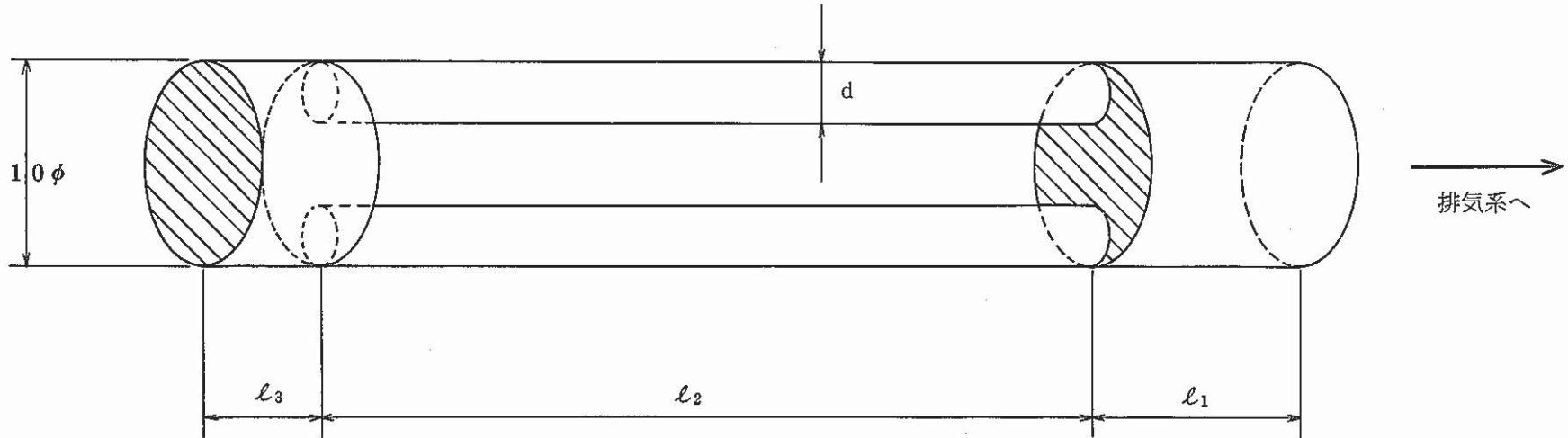


Fig. 6-7 In-cover gas hydrogen meter (EV-HAr(50MW-CG-MK I))
(EV-HAr(50MW-CG-MK I)) ニッケル膜ハウジング及び真空系概略構成図



$$\left. \begin{array}{l} d = 2 \text{ mm} \\ \ell_1 = 10 \text{ mm} \\ \ell_2 = 185 \text{ mm} \\ \ell_3 = 5 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{と仮定}$$

Fig 6-8 Conductance calculation model
コンダクタンス計算モデル

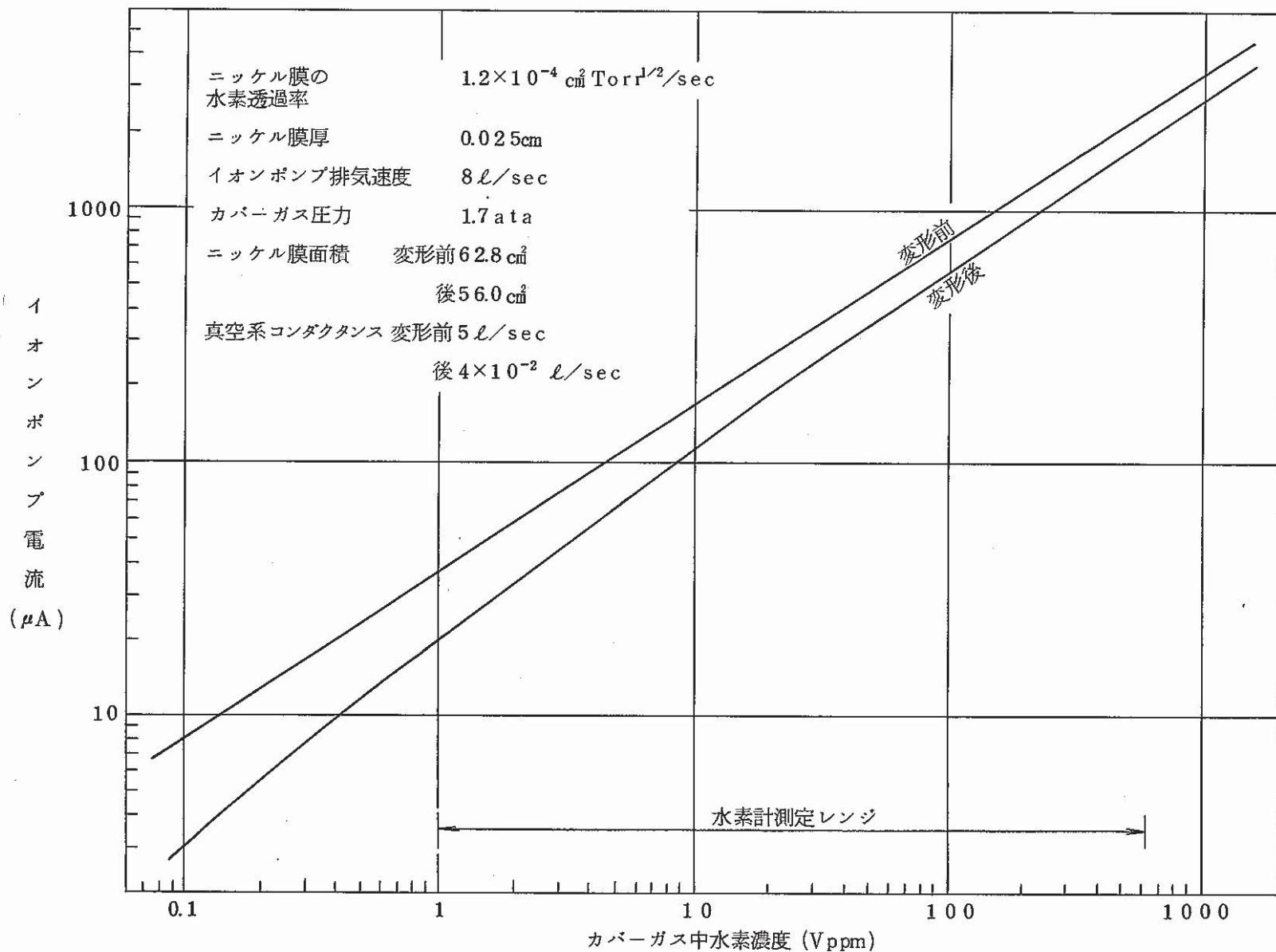


Fig. 6-9 Calibration curve change by nickel membrane transformation (Calculation)
ニッケル膜変形による水素計校正曲線の変化（計算例）

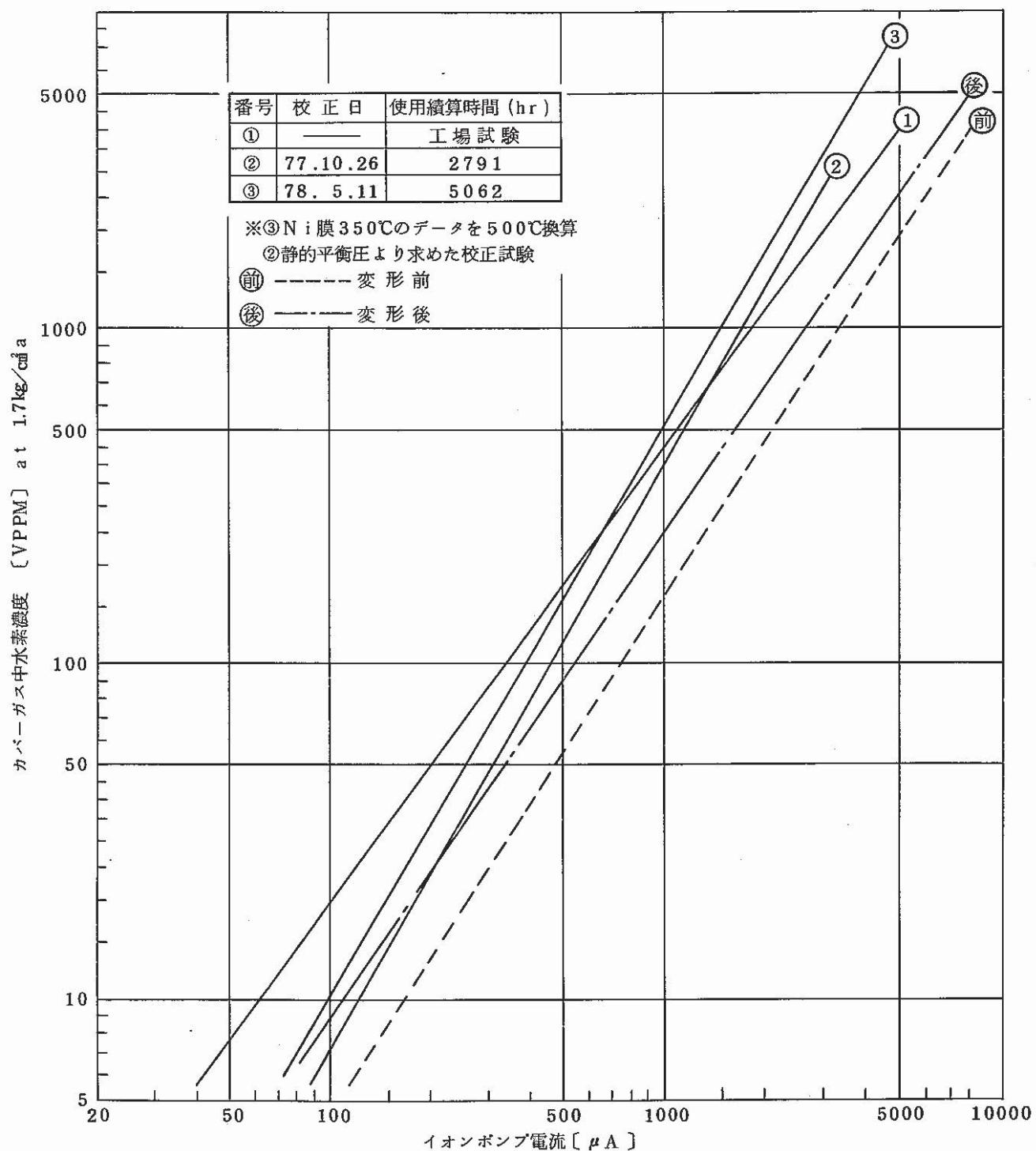


Fig. 6-10 Calibration test result of EV-HAr (50MW-CG-MKI)
 EV-HAr (50MW-CG-MKI) 校正試験結果

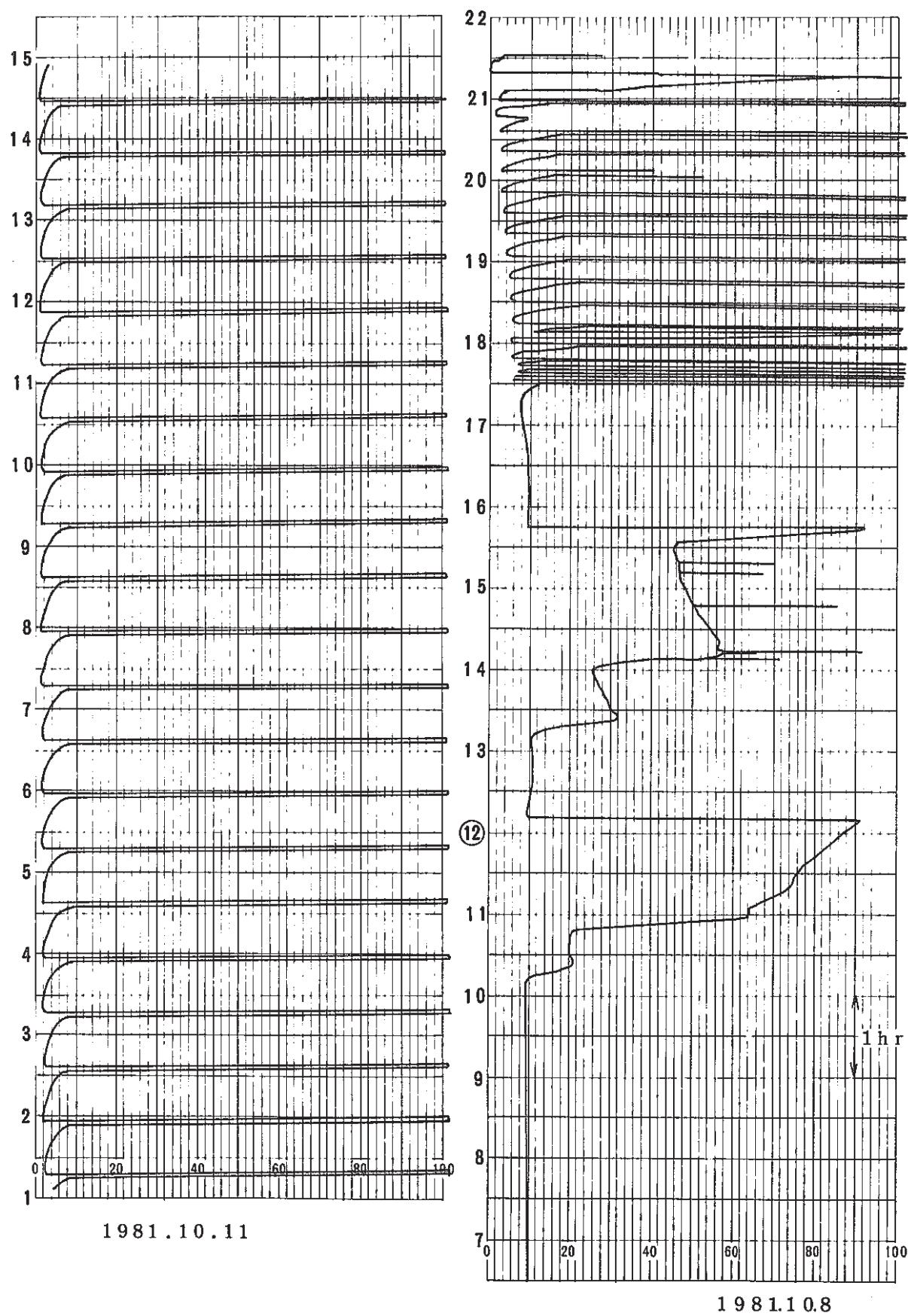


Fig 6-11 Electric current of ionpump for EV-HAr (50MW-CG-MKII)
EV-HAr (50MW-CG-MKII) イオンポンプ電流出力

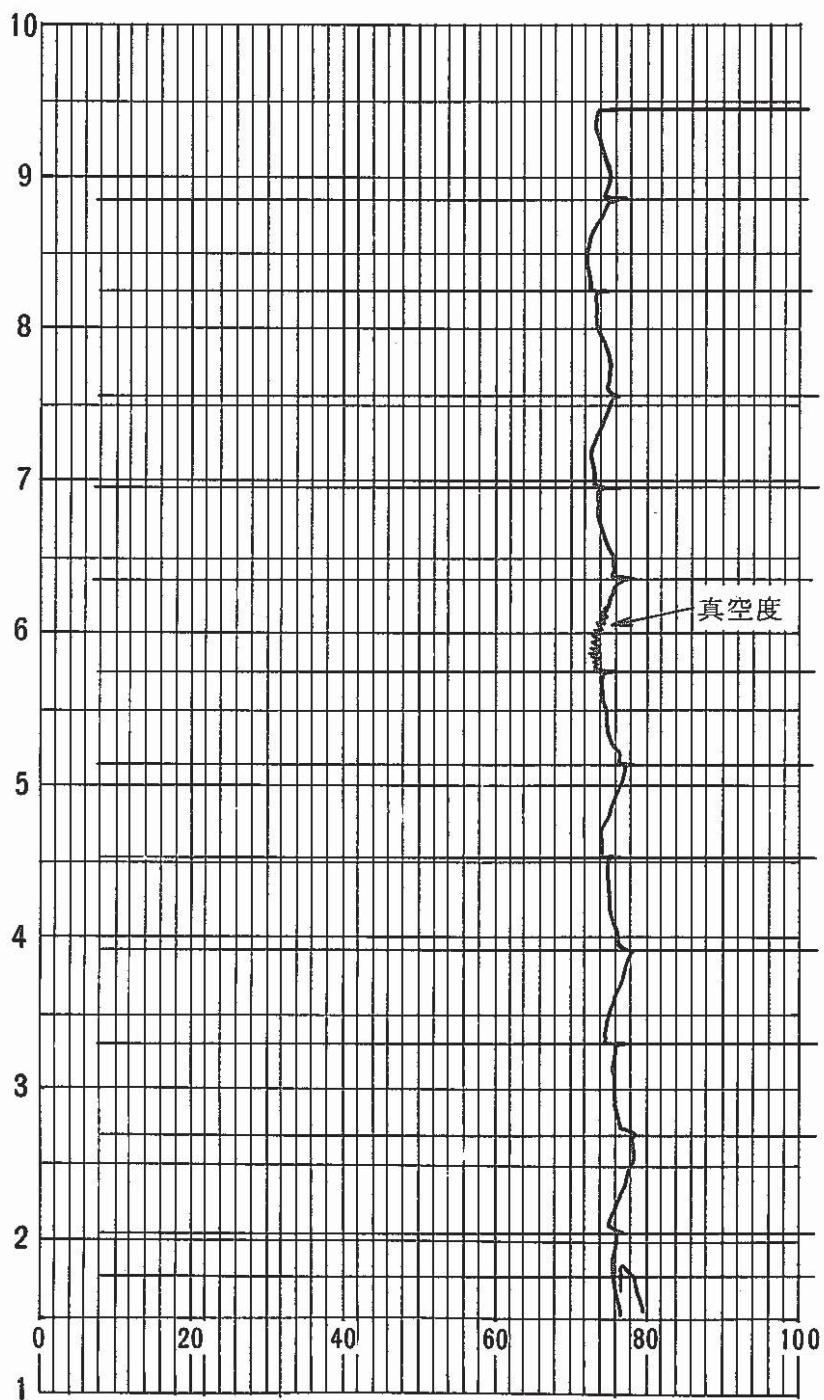


Fig. 6-12 Indication of millitorr gauge for
EV-HAr (50MW-CG-MKII) (1981.10.13)

EV-HAr (50MW-CG-MKII) ミリトールゲージ
出力 (1981年10月13日)

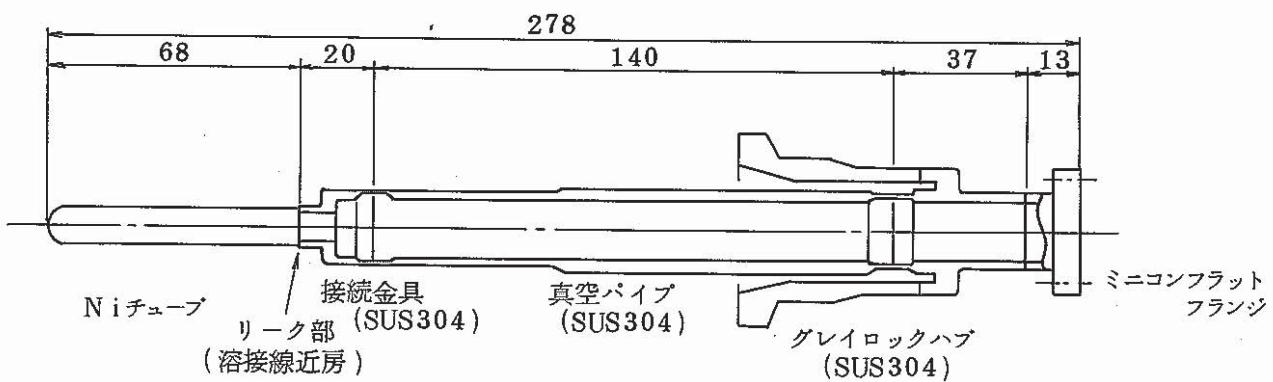


Fig. 6-13 Leak position in nickel membrane of
EV-HAr (50MW-CG-MKII)

EV-HAr (50MW-CG-MKII) ニッケル膜リーク部

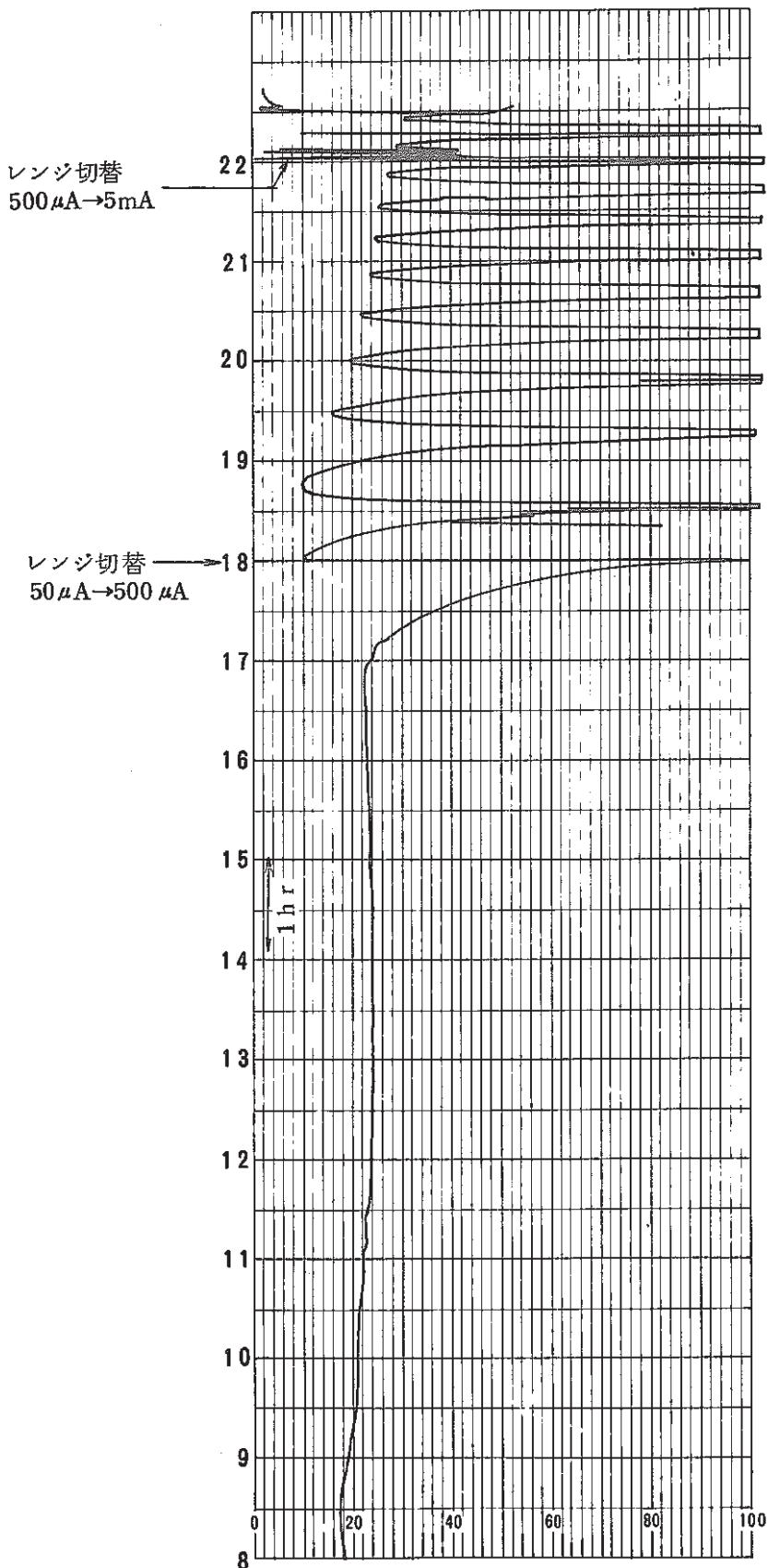


Fig. 6-14 Electric current of ion pump for EV-HAr
(50MW-CG-MKIII) (1983.4.10)

EV-HAr (50MW-CG-MKIII) イオンポンプ電流出力

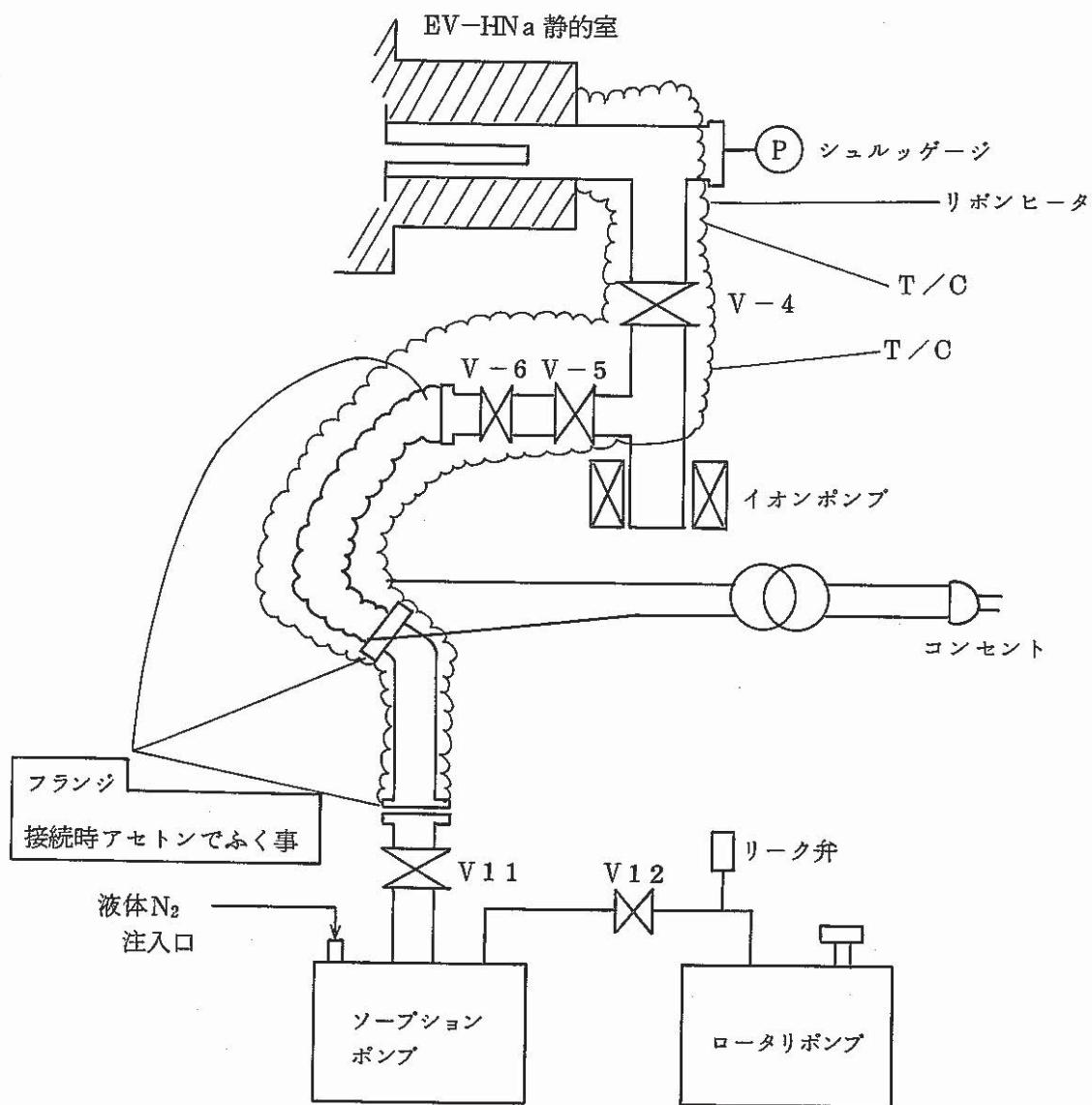


Fig. 6-15 Evacuation of static chamber for
EV-HNa (PNC Type-II MKIV)

EV-HNa (PNC型2号機MK-IV) 静的室
の排気

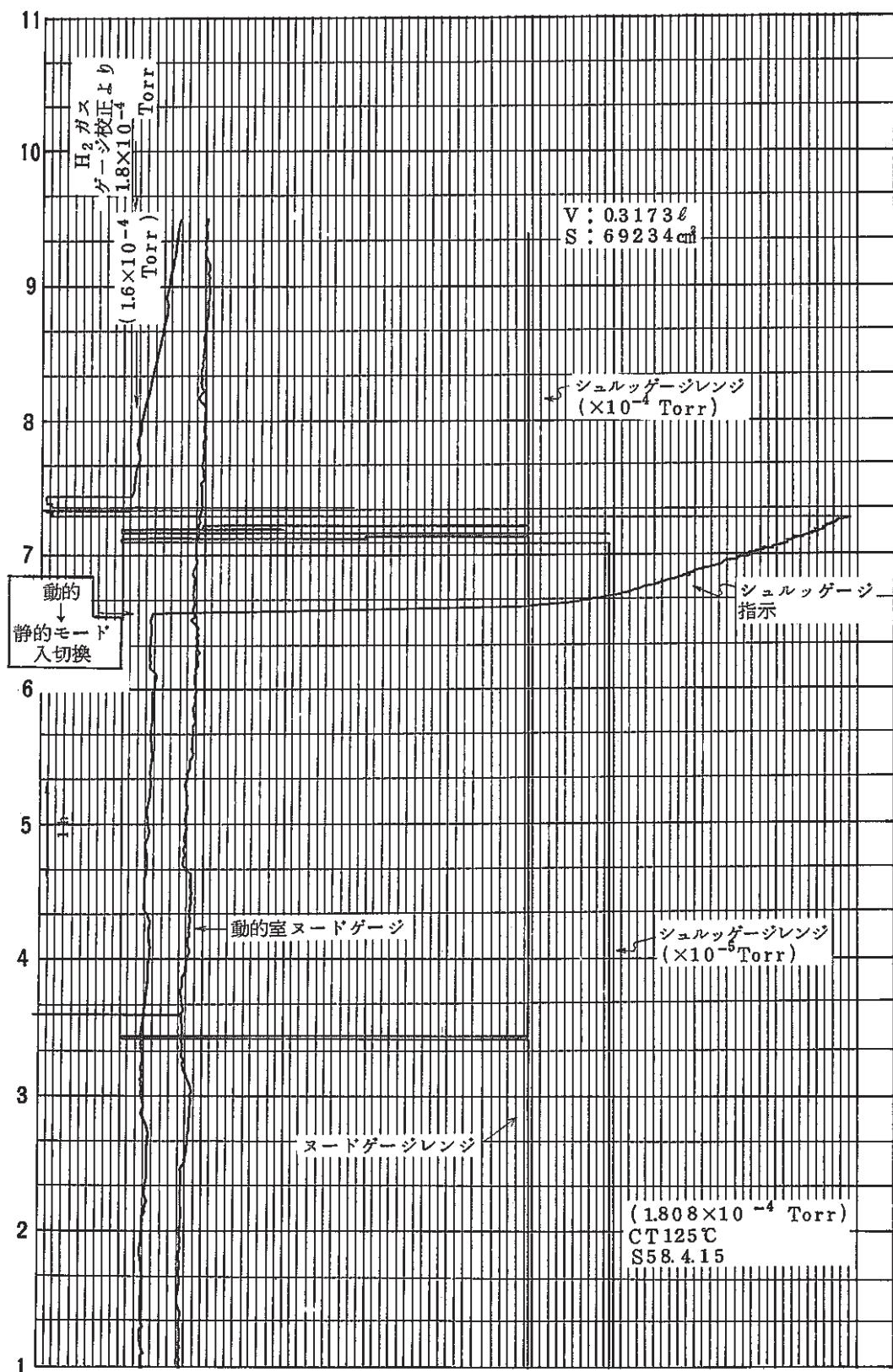


Fig. 6-16 Static equilibrium pressure in static chamber
(EV-HNa (PNC Type-II MKV) (1983.4.15))

EV-HNa (PNC 2号機MK-V) 静的室静的平衡圧

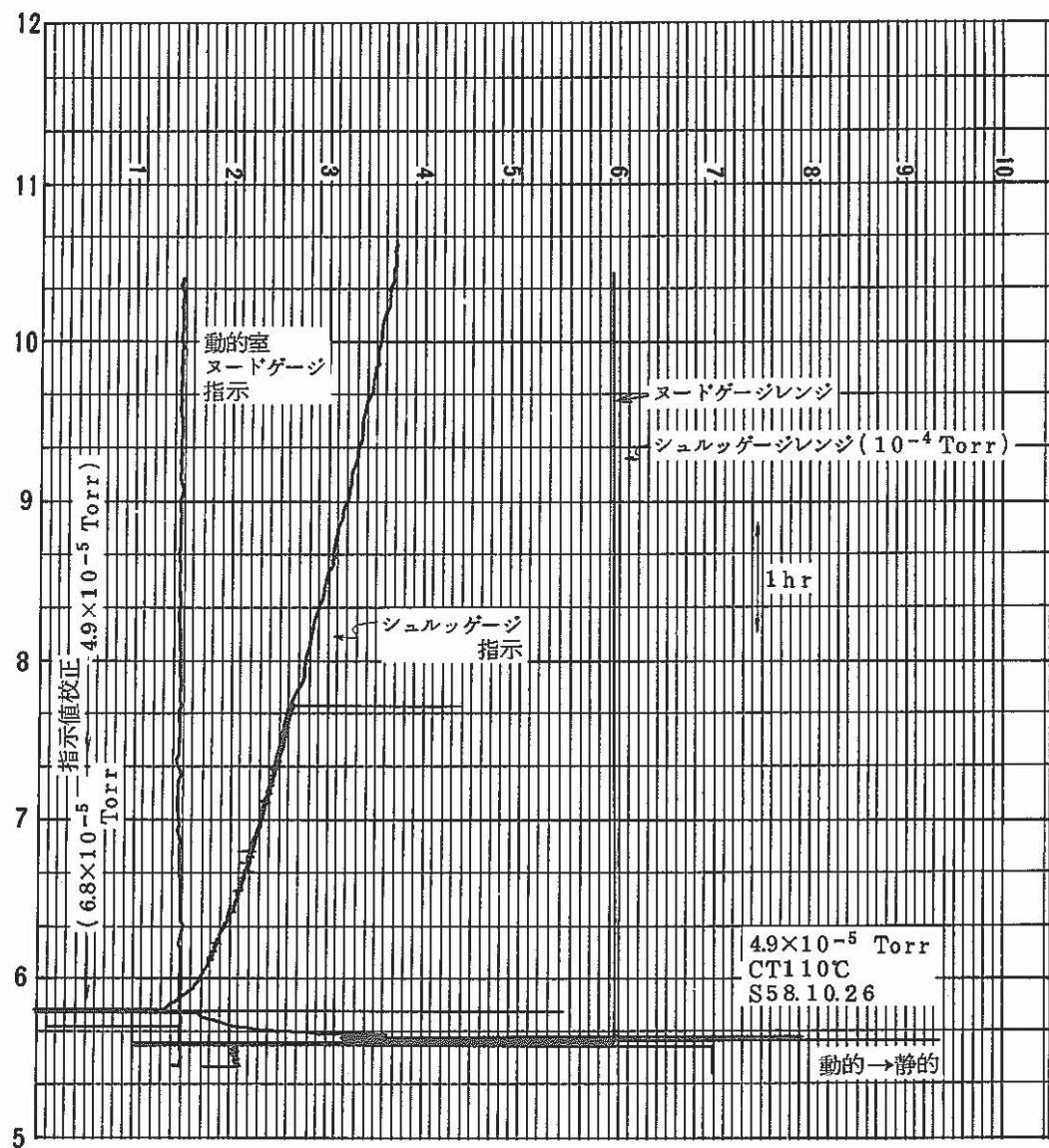


Fig. 6-17 Static equilibrium pressure in static chamber
(EV-HNa (PNC type-II MKIV) (1983.10.26))

EV-HNa (PNC型2号機MK-IV) 静的室静的平衡圧

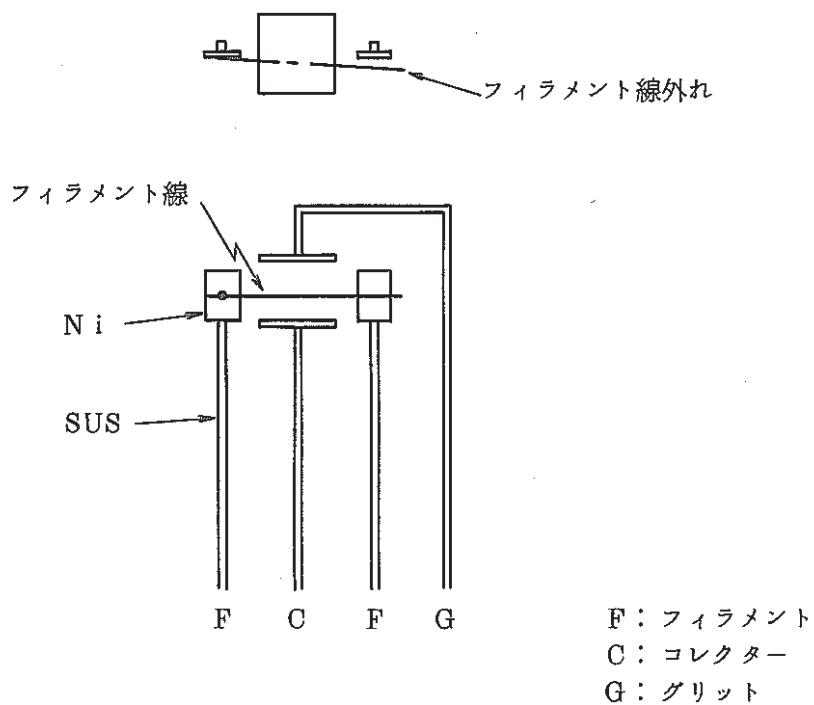


Fig. 6-18 The breaking of filament of Schultz gauge
シュルッゲージフィラメント線外れ状況

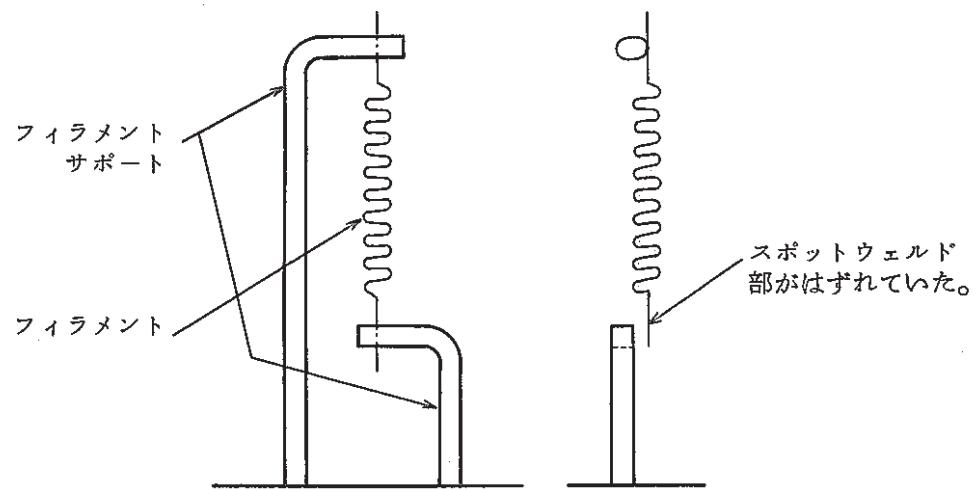


Fig. 6-19 Failure condition of nucdegauge filament for CT-HNa
CT-HNa ヌードゲージフィラメント破損状況

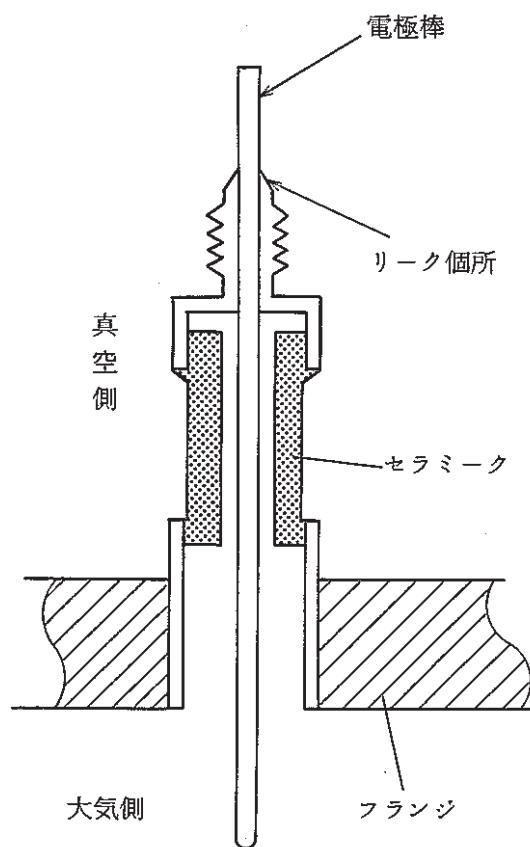


Fig. 6-20 Leak position at collector electrode
of schultz gauge (CT-HNa)

CT-HNa シュルッゲージコレクタ電極部リーク個所

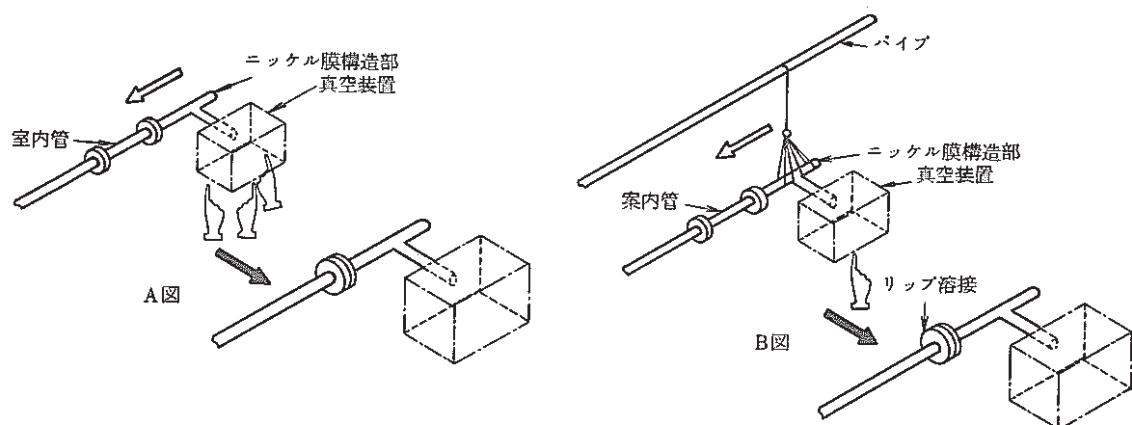
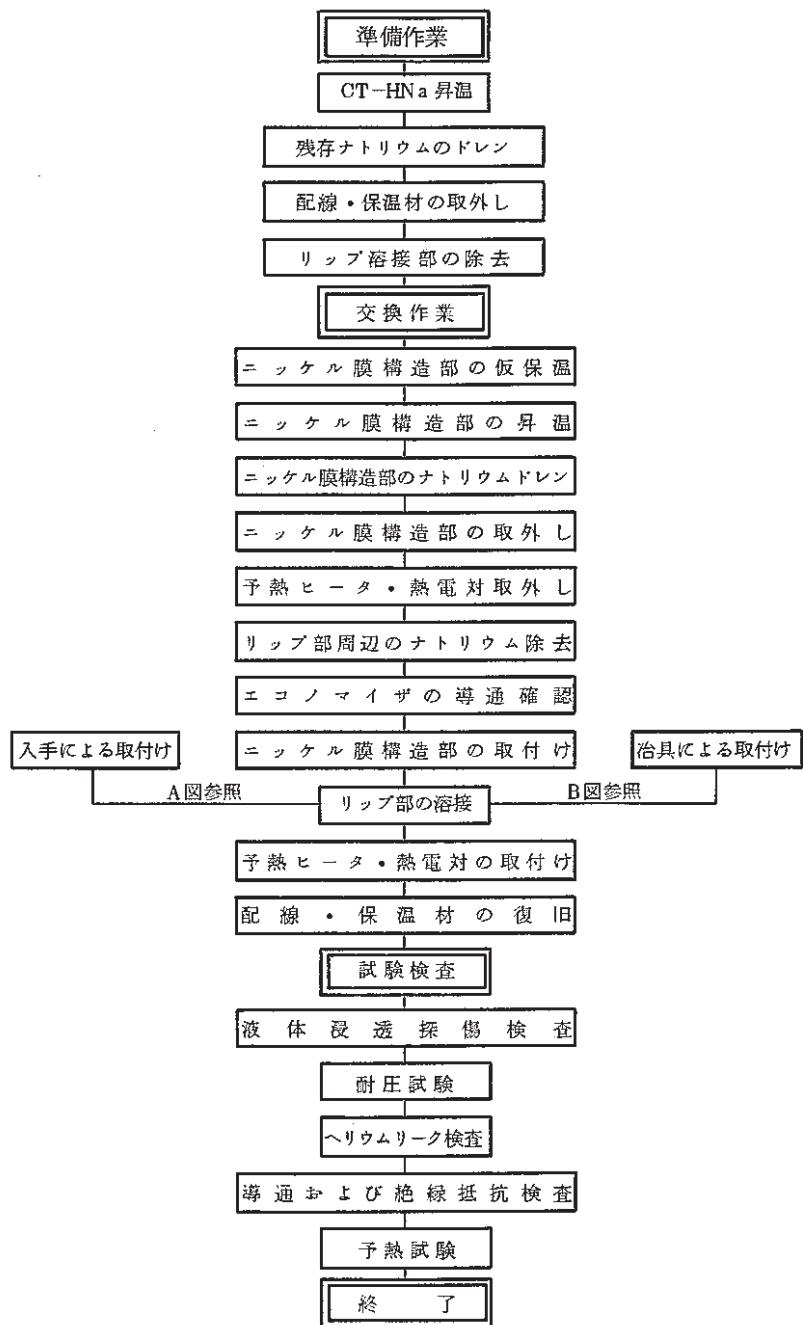


Fig. 6-21 Flow chart of exchange work of nickel membrane

ニッケル膜交換作業フローチャート

符号	名 称
1	ニッケル膜
2	アダプタ(1)
3	// (1)
4	真空容器胴
5	// 盲板
6	真空配管
7	スタブエンド
8	フランジ
9	案内管

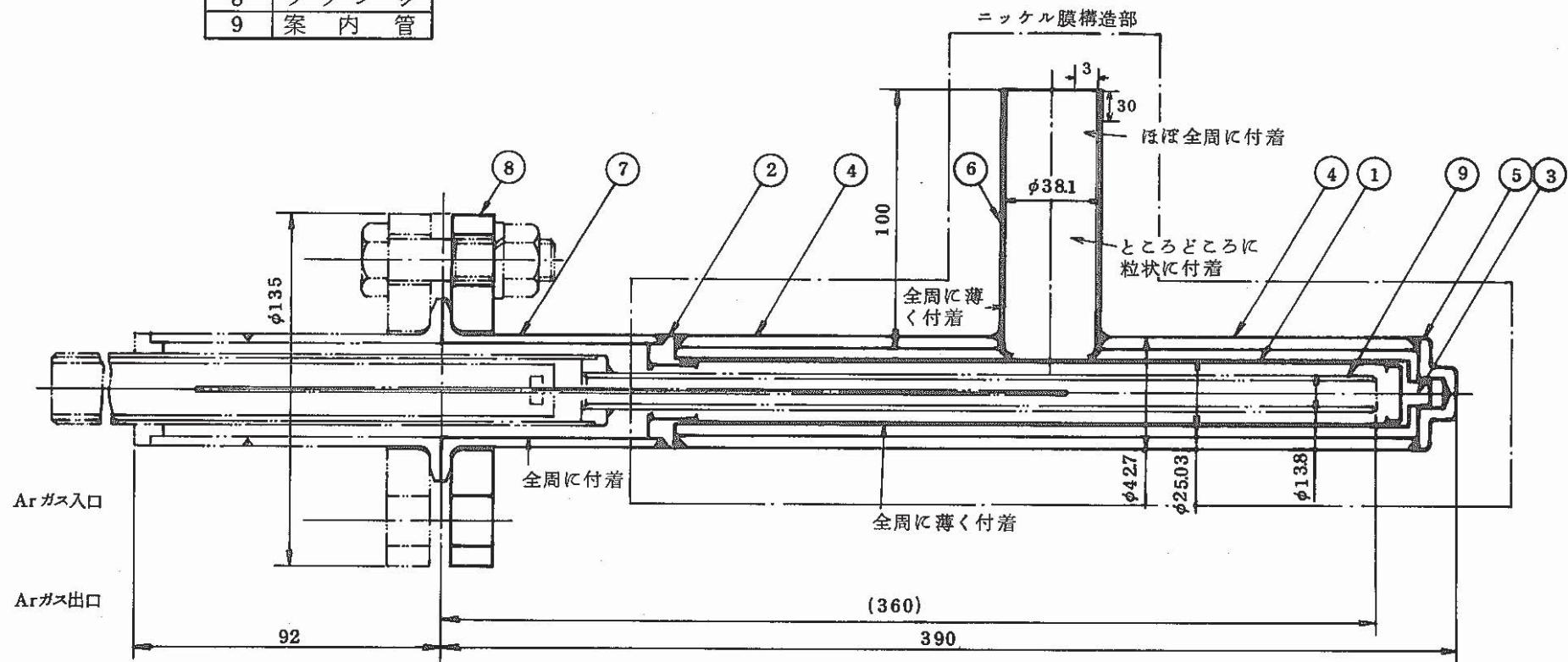


Fig. 6-22 Adhesion state of sodium round nickel membrane
ニッケル膜構造部のナトリウム付着状況

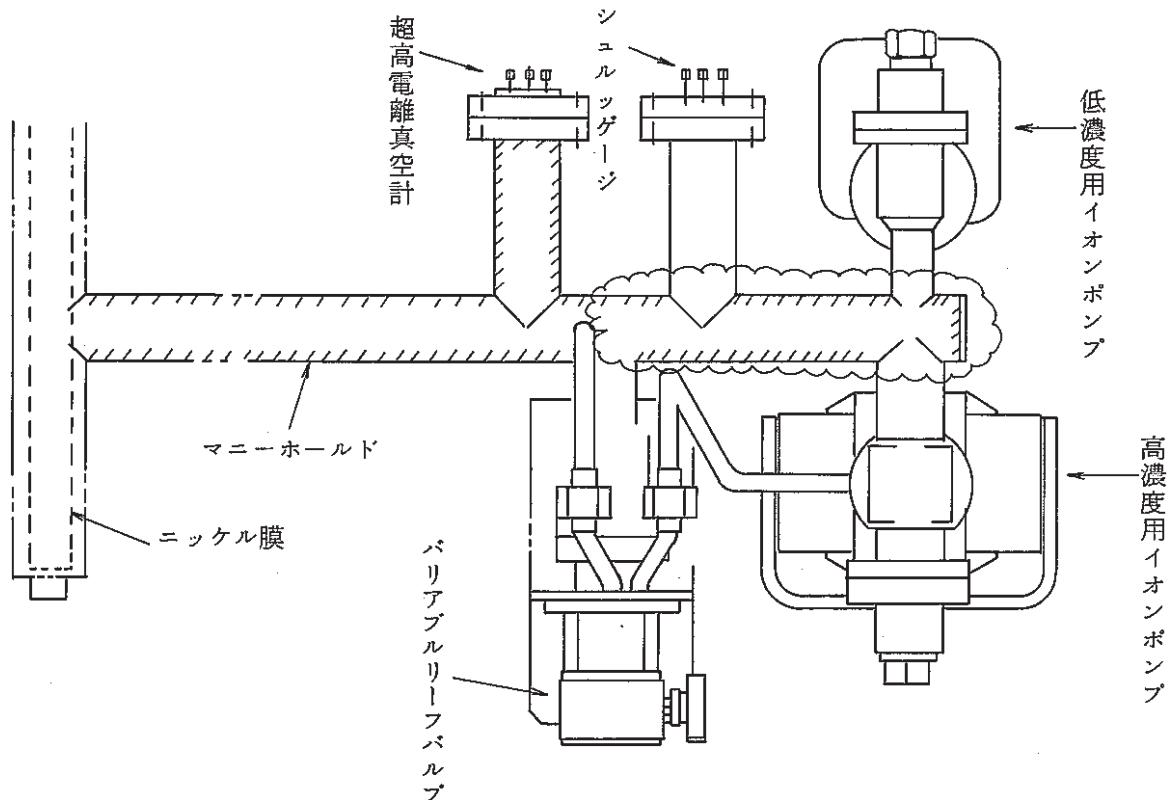


Fig. 6-23 Adhesion state of sodium in vacuum system
真空装置のナトリウム付着状況

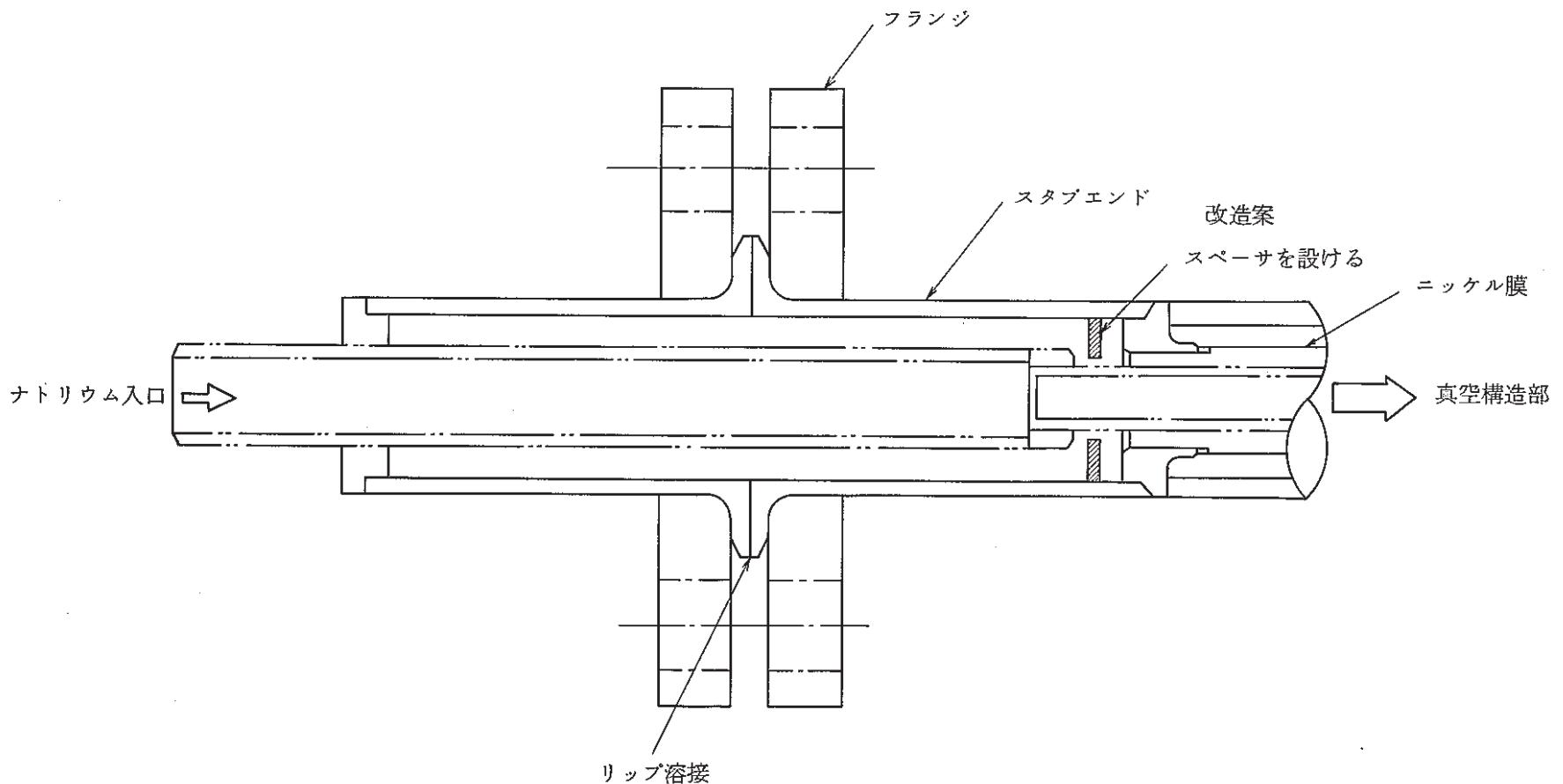


Fig. 6-24 Improvement figure of structures round
nickel membrane

ニッケル膜構造部の改良図

付録—I イオンポンプの回復処理方法および結果

1. 試験方法

(1) 蒸発器ナトリウム中水素計MK III No.1用イオンポンプ

蒸発器ナトリウム中水素計MK III No.1のイオンポンプは、型式PST-05A特型で水素に對しての排気速度は $22\ell/\text{sec}$ を有するものである。このイオンポンプは、1977年5月から使用されたが1978年4月頃よりイオンポンプ電流で数 $100\mu\text{A}$ 以上では排氣能力がほとんどなくなり数 100 ppb 以上のナトリウム中水素濃度の測定が不可能となった。このため、本イオンポンプは、再使用を目的とせず使用後のイオンポンプ回復処理効果を確認するための供試体とした。なお、試験検査は、イオンポンプの製作メーカーである日本真空技術㈱によって行なわれた。その試験内容および方法は、次の通りである。

1) 試験内容

① 現状性能試験

イオンポンプの回復処理を施さない状態で下記の項目の性能試験を行なう。

- (1) イオンポンプ電流 (IP) 対ポンプ部圧力 (P_p)
- (2) 排気速度 (Sp) 対ポンプ圧力 (P_p)
- (3) 連続動作可能最大圧力 (P_c) の測定

② 回復処理後の性能試験

イオンポンプに下記の回復処理を施した後①と同様の性能試験を行なう。

- (1) 450°C ベークアウト処理

イオンポンプを450°Cに加熱し連続24時間のベークアウトを行なう。

- (2) アルゴンポンバード処理

イオンポンプをアルゴンガス圧力 $2 \sim 5 \times 10^{-5}\text{ Torr}$ で20分間動作させる。

③ 解体検査

性能試験終了後イオンポンプを解体しポンプ内部の状況を検査する。

2) 試験方法

① 試験装置

図A1-1に試験装置の真空系統を図A1-2に測定系の概略を示す。

② 試験準備

イオンポンプを試験装置に取付け後、測定系全体を200~250°Cの温度でベーキングし系の到達圧力が $4.5 \times 10^{-9}\text{ Torr}$ に達してから試験を実施している。

③ 性能試験

(1) イオンポンプ排気速度とポンプ部圧力の測定

イオンポンプにて排気状態で図A1-2のVLV1を調整して水素ガス(99.99%)を測定系に導入しP₁, P₂を平衡させる。このとき、次の式が成立する。

$$F (P_1 - P_2) = S_e \cdot P_e = S_p \cdot P \quad \dots \dots \dots \quad (A 1 - 1)$$

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_p} \quad \dots \dots \dots \quad (A 1 - 2)$$

ここで

F : オリフィスコンダクタンス (ℓ/sec)

P_1 : G_1 ゲージ部圧力 (Torr)

$P_2 (= P_e)$: G_2 ゲージ部圧力 (Torr)

S_e : イオンポンプ実効排気速度 (ℓ/sec)

S_p : イオンポンプ排気速度 (ℓ/sec)

P_p : イオンポンプ部圧力 (Torr)

C : 真空系のコンダクタンス (ℓ/sec)

なお、上記の 2 式から次の式が導かれる。

$$S_p = \frac{F (P_1 - P_2)}{P_{IP}} \quad \dots \dots \dots \quad (A 1 - 3)$$

$$P_p = \left(1 - \frac{S_e}{C} \right) \cdot P_2 \quad \dots \dots \dots \quad (A 1 - 4)$$

F , C は既知の値であり、 P_1 , P_2 を測定することにより S_p , P_p を求めることができます。

(ロ) イオンポンプ電流とポンプ部圧力の測定

(イ) の測定中に同時にイオンポンプ電流を測定する。

(ハ) 連続動作可能最大圧力の測定

イオンポンプの動作圧力を 5×10^{-6} Torr 以下の圧力からある設定圧力までステップ状に上昇させて保持し排気速度の変化を観察し排気速度が 0 まで低下してしまわないような圧力の最大値を求める。

(2) 過熱器カバーガス中水素計用イオンポンプ

過熱器カバーガス中水素計のイオンポンプは、型式 P S T - 1 C 特型で水素に対する排気速度が $33 \ell/\text{sec}$ のものである。このイオンポンプは、1979年1月の運転以来わずか2年足らずでイオンポンプ電流 1 mA 程度で排気能力がほとんどなくなり 100 Vppm 以上のカバーガス中水素濃度の測定が不可能となった。このため 1981 年 5 月にイオンポンプの再使用を前提に回復処理 (450°C ベーキング処理 + アルゴンポンバード処理) を行なった。以下に回復処理装置および試験方法を述べる。

1) 回復処理装置

図 A 1 - 3 に過熱器カバーガス中水素計用イオンポンプの回復処理系統を示す。回復処理

装置はアルゴンガス供給ラインと荒引きラインで構成されている。アルゴンガス供給ラインは、バリアブルリーフ弁、アルゴンガスリザーバタンク等から成っておりイオンポンプのアルゴンポンバード処理を行なうもので微量のアルゴンガスを供給することができる。粗引きラインは、水素計を設置した初期の粗引きおよびピークアウト処理による放出ガスの排気を行なうものでソープショーンポンプとロータリーポンプから成っている。

回復処理装置は、一体化（アルゴンガスポンベとロータリーポンプを除く）しておりフレキシブルチューブを介して水素計粗引きラインと接続できる。

(2) 回復処理方法

① 準 備

- (1) 水素計粗引きラインと回復処理装置を接続する。（V₃, V₄閉確認）
- (2) 回復処理装置にアルゴンガスポンベとロータリーポンプを接続する。
- (3) イオンポンプと真空系にピークアウト用ヒータを巻く。ただし、バリアブルリーフ弁（VLV, ）は、150°C以上に昇温することができないため除く。

② アルゴンガス供給ラインの排気

- (1) V₅, V₆, V₈, VLV₂ 閉
- (2) V₇, V₉, V₁₀ 閉
- (3) ロータリーポンプ「ON」
- (4) V₉ を開けし排気を開始する。
- (5) 排気完了後 V₈, V₉ 閉でロータリーポンプ「OFF」

③ アルゴンガス供給ラインへのアルゴンガス充填

- (1) VLV₂ 閉
- (2) V₁₀ 開にて P₁ が 0.1 kg/cm²になるまでアルゴンガスを充填する。
- (3) V₅, V₆ 閉

④ ピークアウト処理

- (1) ロータリーポンプ「ON」
- (2) V₈, V₉ 開にて粗引きラインを排気する。
- (3) ソープショーンポンプに液体窒素を供給しさらに排気する。その後、V₉ 閉ロータリーポンプ「OFF」
- (4) 10分後、V₄, V₃ 閉（電離真空計の指示に注意する）
- (5) ピークアウト用ヒータ電源「ON」にてイオンポンプ 450°C, 真空系 200~250°C に昇温する。（イオンポンプの高圧用コードコネクターは抜いておく）
- (6) ソープショーンポンプにて8時間連続排気後、ピークアウトヒータの電源「OFF」
- (7) 常温になった後、イオンポンプ「ON」, V₈ 閉

⑤ アルゴンポンバード処理

(イ) V_5, V_6 開(ロ) イオンポンプ作動中に $V L V_2$ を微開にしアルゴンガスを導入する。導入量は、圧力 $2 \sim 5 \times 10^{-5}$ Torr の範囲になるように調整し約20分間保持する。(ハ) $V_3, V_4, V L V_2$ 閉

2. 結 果

(1) 蒸発器ナトリウム中水素計MK IIIA.1用イオンポンプ

ここでは、現状性能および回復処理後の性能試験でのイオンポンプ電流 (I_p) とポンプ部圧力 (P_p) の関係連続動作可能最大圧力 (P_c) の測定、ポンプの解体検査結果およびポンプ型式による水素吸収特性について述べる。

図A 1-4にイオンポンプ電流とポンプ部圧力の関係を示す。この図よりイオンポンプの排気速度の変化に關係なく製作時のデータとよく一致している。図A 1-5～図A 1-7は、連続動作可能最大圧力の測定結果を示す。回復処理を施さない状態での連続動作可能最大圧力は、 1.3×10^{-5} Torr, 450°Cベーキング処理後は、 1.5×10^{-5} Torr, アルゴンポンバード処理後は、 1.4×10^{-5} Torr で回復処理による効果はほとんどなかった。450°Cベーキング処理後の結果は、イオンポンプ経時特性試験結果⁵⁰と大きく相異する点である。

イオンポンプの解体検査結果については、素子の変形はなく形状的な異常は認められなかつた。従って今回の排気速度の異常低下や回復処理の効果が得られなかつた原因が素子形状の変化によるものではなく素子の機能的なものと考えられる。日本真空製のイオンポンプには、素子の材質により2種類の形式に分かれている。一つは、過熱器カバーガス中水素計 (PST-IC) のようにC型カソードを使用 (イオンポンプ経時特性試験も同型) しておりもう一つは、本イオンポンプ (PST-05A) のようにA型カソードを使用している。C型カソードは、従来のイオンポンプと同様に材料としてチタンを使用しているが、A型カソードは、図A 1-8に示すようにチタン板の上にタンタル打抜板を重ねたものをカソードにしている。従って両者の水素排気に対する特性の差異は、チタンとタンタルの水素に対する特性の差異と考えられる。図A 1-9にSievertsが測定した1気圧における水素の溶解度曲線である。この図から、チタンに比べてタンタルの場合は、常温において水素の溶解度が約1/2以下であり温度が上昇 (500°C以下の範囲で) するとさらに小さく温度依存性が大きくなっている。すなわち、C型カソードに比べてA型カソードでは、温度の影響を受け易く少しの温度上昇でも溶解度が減少し多量の水素が放出される。従って水素計のように、主に水素のみを排気するようなポンプとしてはC型カソードのものが適当である。この結果を反映して、1978年10月に蒸発器ナトリウム中水素計MK IIIA.1のイオンポンプをC型カソードのPST-1C型に交換した。

(2) 過熱器カバーガス中水素計用イカンポンプ

本イオンポンプの回復処理は、450°Cピークアウト処理を6時間とアルゴンポンバード処理を行なったが、450°Cピークアウト処理からアルゴンポンバード処理に移行する際にV₄のグランド部からリークしていた。その後、V₄を交換しアルゴンポンバード処理を行なった。従って、450°Cピークアウト処理は、ほとんど効果がなかつたものと推定する。なお、V₄からのリーク原因は、V₄が高温仕様でないのに昇温したためである。

本処理の効果については、5.7項に記述している。

付録一Ⅱ 水素計ベーカウト方法

1. P N C 型 1 号機改良型

この水素計は、NaP-HNa, CT-HNa, SH-HAr に該当する。

(1) ベークアウト条件

温 度：ニッケル膜構造部 550°C

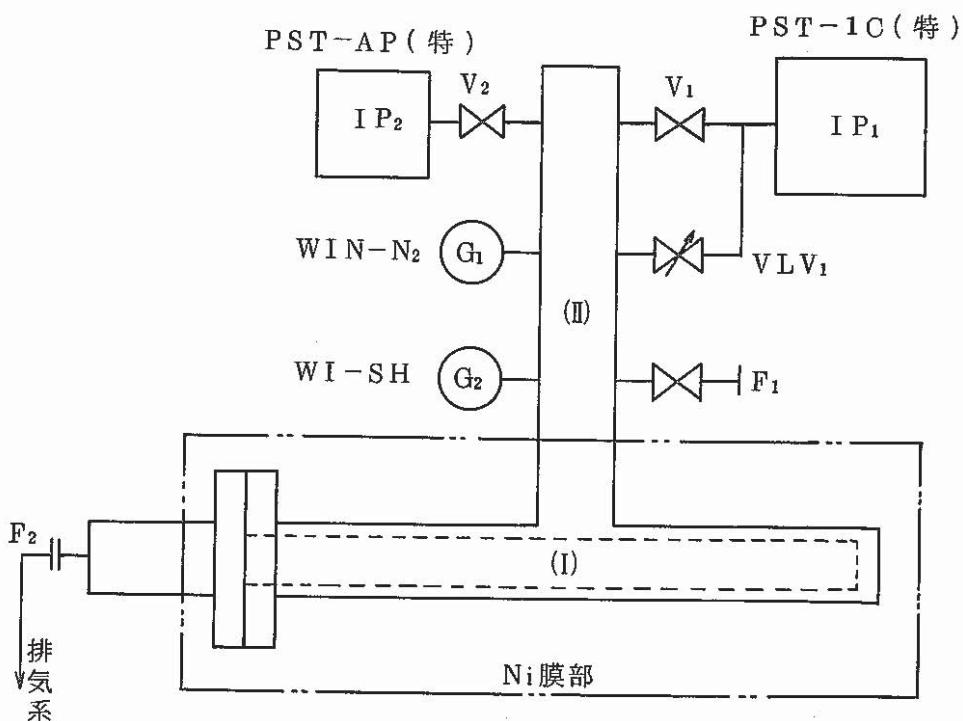
真空構造部 200~250°C

(ただしバリアブルリーク弁、イオンポンプは除く)

ベークアウト時間：720時間

雰囲気：真空中

(ナトリウムおよびカバーガス側)



(2) 放出ガス率

NaP-HNa : 1.4×10^{-12} Torr. l/sec \cdot cm 2 (550°C)

CT-HNa : 1.8×10^{-12} Torr. l/sec \cdot cm 2 (550°C)

SH-HAr : 3×10^{-10} Torr. l/sec \cdot cm 2 (550°C)

2. P N C 型 2 号機 MK IV

現在運転中のEV-HNaに該当する。

(1) ベークアウト条件

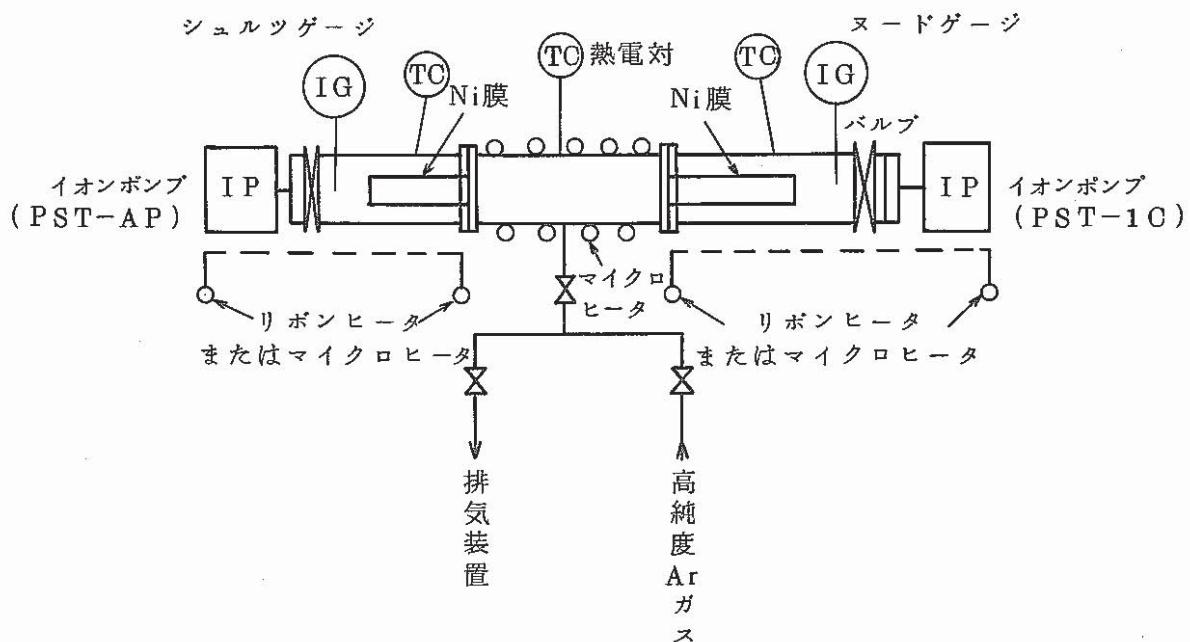
温 度：水素計全体 300°C (ただしバリアブルリーク弁は除く)

ピークアウト時間：25時間（動的室）

19時間（静的室）

雰囲気：アルゴンガス中

（ナトリウム側）



(2) 放出ガス率

動的室： 6.6×10^{-14} Torr. ℓ/sec. cm² (常温)

静的室：測定不可 (常温)

3. 東芝型ナトリウム中水素計

現在運転中の SH-HNa に該当する。

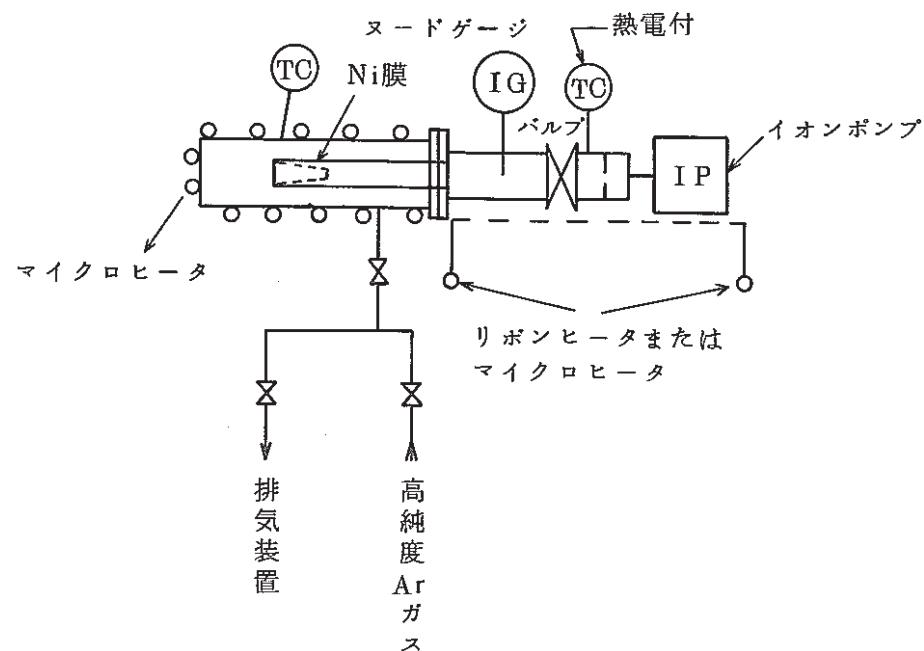
(1) ピークアウト条件

温度：水素計全体 300°C

ピークアウト時間：32.5時間

雰囲気：アルゴンガス中

（ナトリウム側）



(2) 放出ガス率

$$5.92 \times 10^{-14} \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{常温})$$

4. 50MW-CG-MKW

現在運転中のEV-HArに該当する。

(1) ペークアウト条件

温 度：水素計全体 300°C

ペークアウト時間：28時間

雰 囲 気：アルゴンガス中

(カバーガス側)

(2) 放出ガス率

$$1.9 \times 10^{-12} \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{常温})$$

付録-III 50MWSGT Fでの各水素計のイオンポンプおよび
真空計の水素ガス校正曲線

50 M W S G T F でのこれまで各水素計に用いられたイオンポンプおよび真空計の水素ガスによる校正曲線を図 A 3-1 から図 A 3-18 に示す。

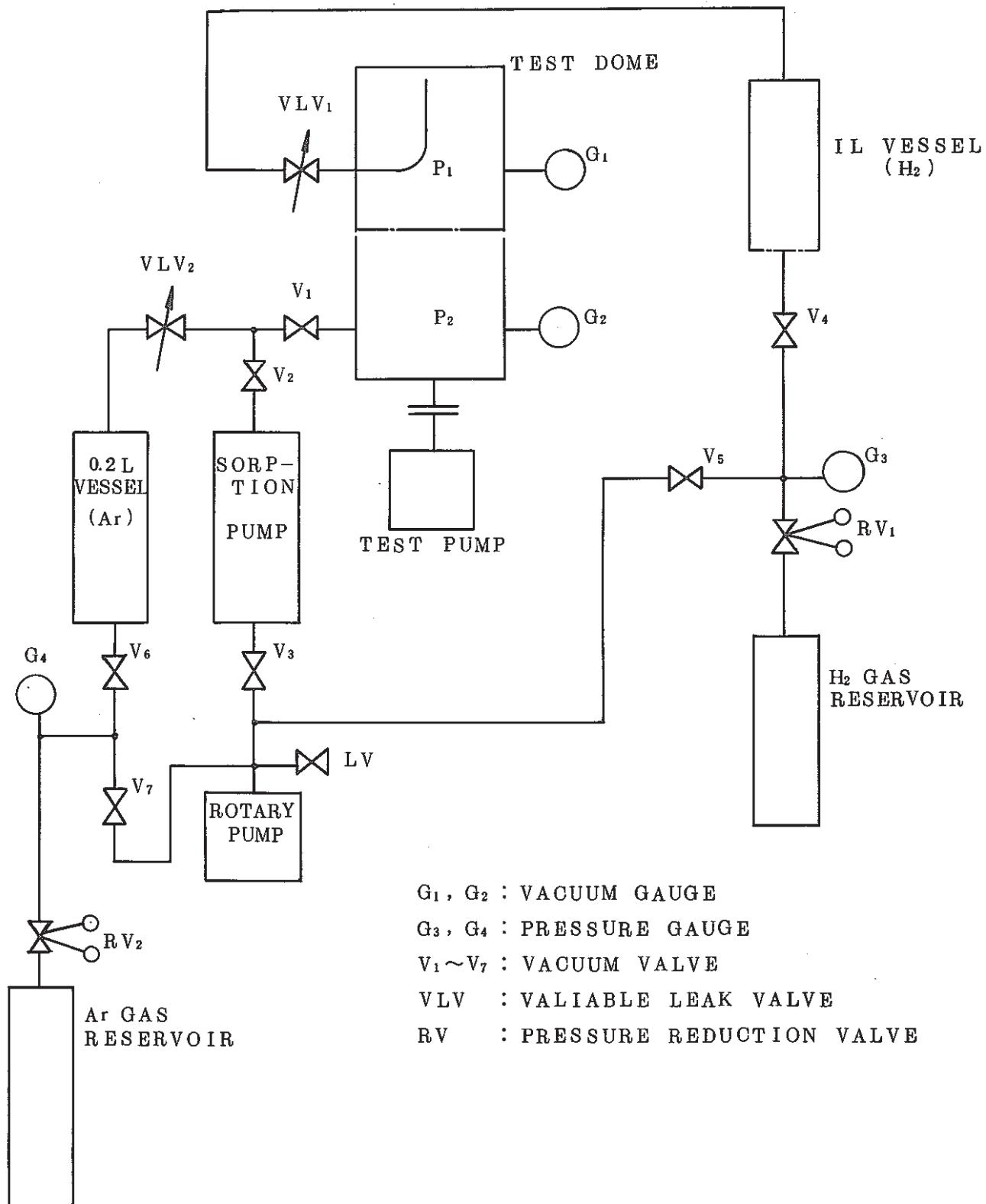
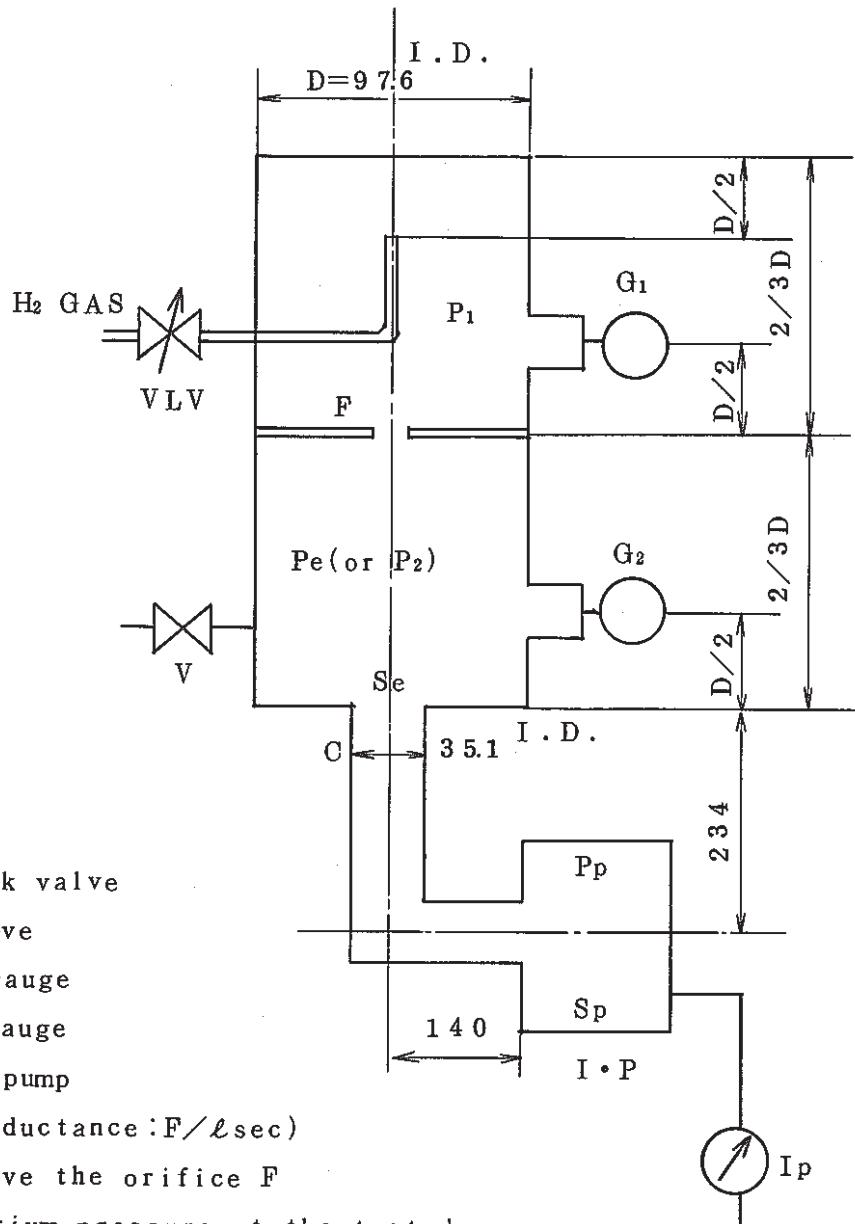


Fig. A 1-1 Schematic diagram of the test apparatus
試験装置系統図



VLV : variable leak valve

V : roughing valve

G_2 : ionization gauge

G_1 : ionization gauge

I.P : sputter ion pump

F : orifice (conductance: $F/\ell \text{sec}$)

P_1 : pressure above the orifice F

$P_e (=P_2)$: equilibrium pressure at the test dome.
[operating pressure of the pump]

P_p : pressure at the pump cell

S_e : effective pumping speed of the pump at the test dome

S_p : pumping speed of the pump at the pump cell

I_p : pumping current (output current)

C : conductance between the test dome and the pump cell

Fig. A1-2 Outline of the test dome

試験部の概要

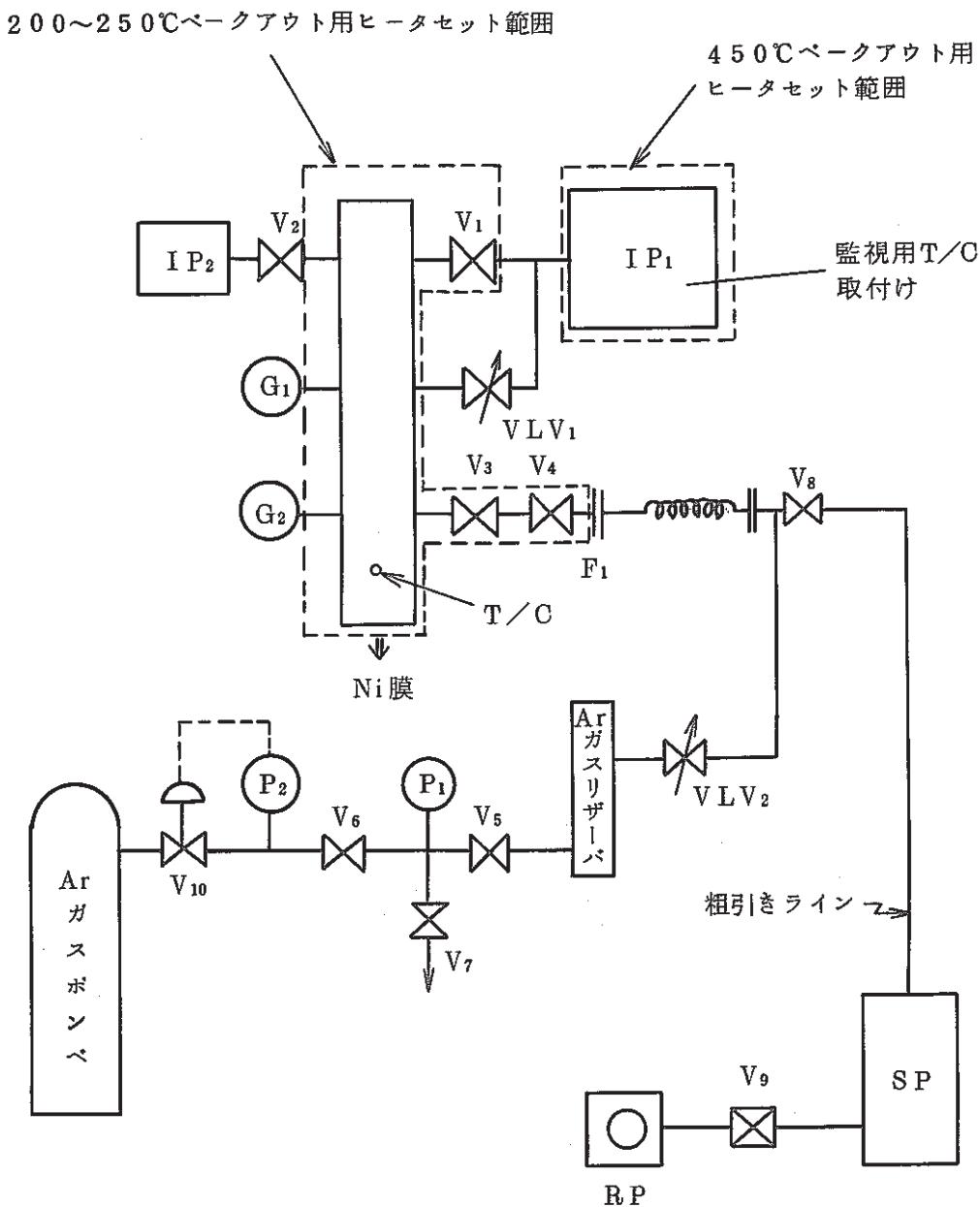


Fig. A1-3 Schema of recovering ionpump (SH-HAr)
SH-HAr イオンポンプ回復処理系統図

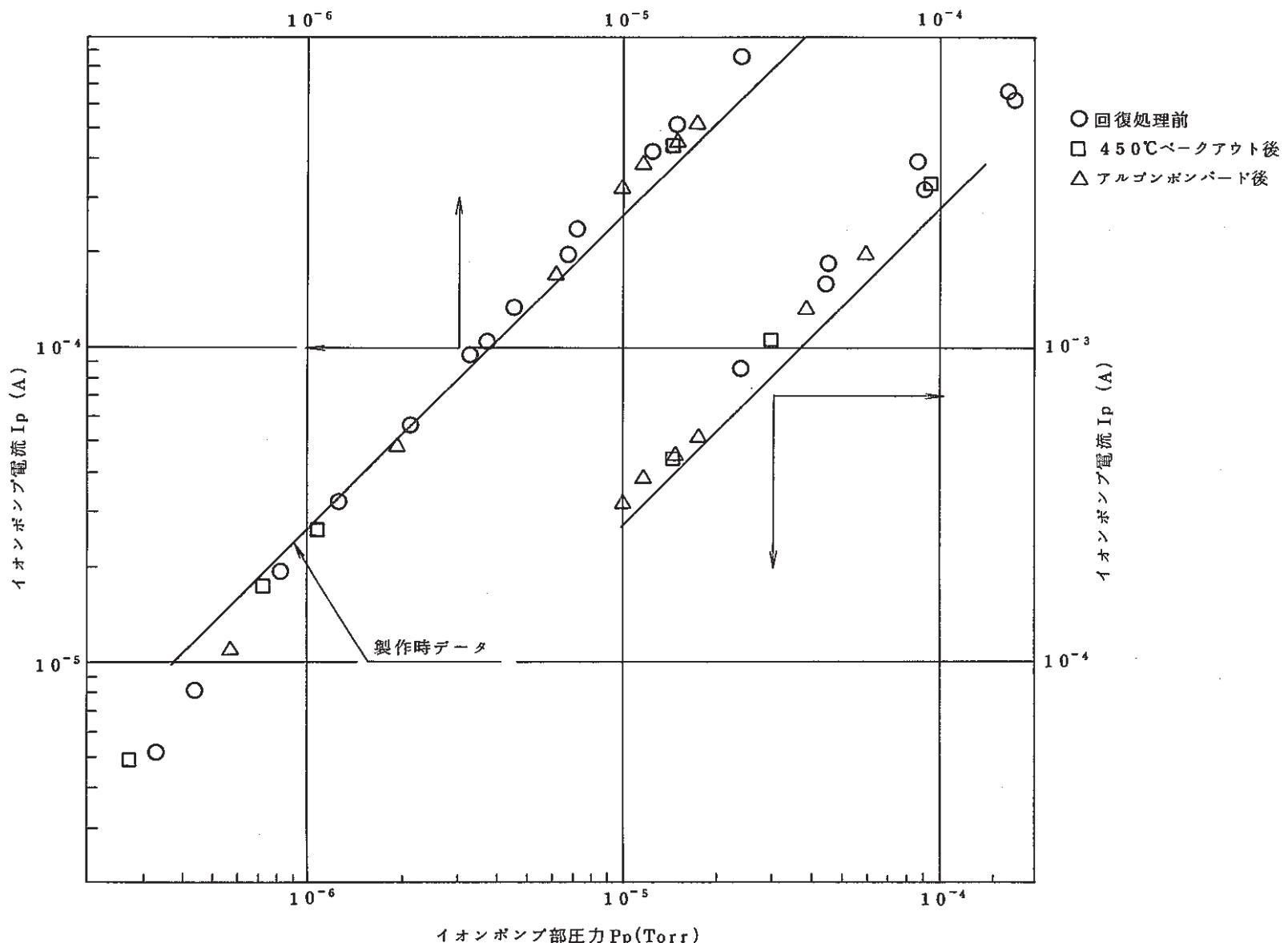


Fig. A1-4 The relation between current and pressure of ion pump

イオンポンプ電流とポンプ部圧力の関係

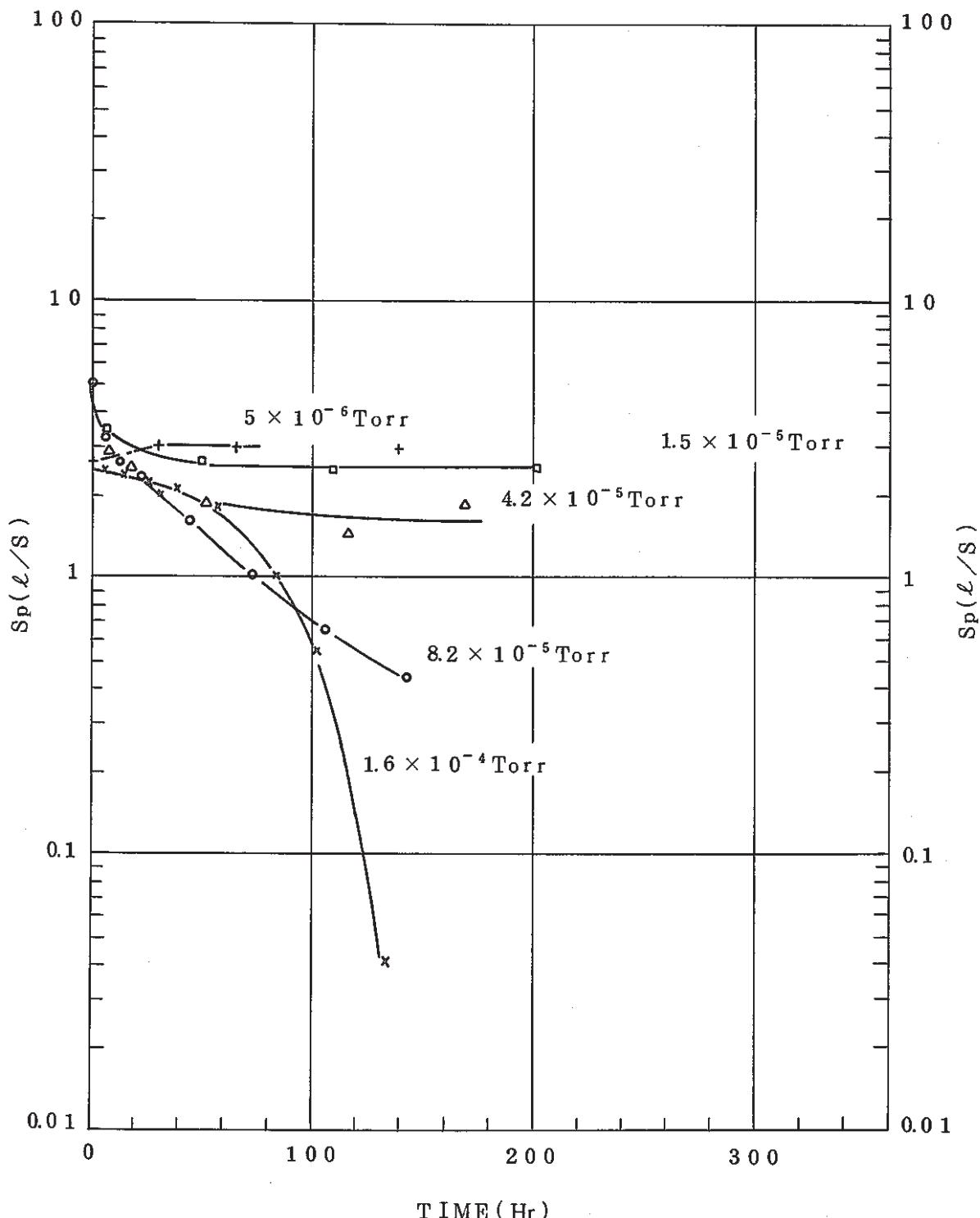


Fig. A 1-5 Sp versus elapsed time without any recovery treatment
回復処理を施さない場合の排気速度と経過時間

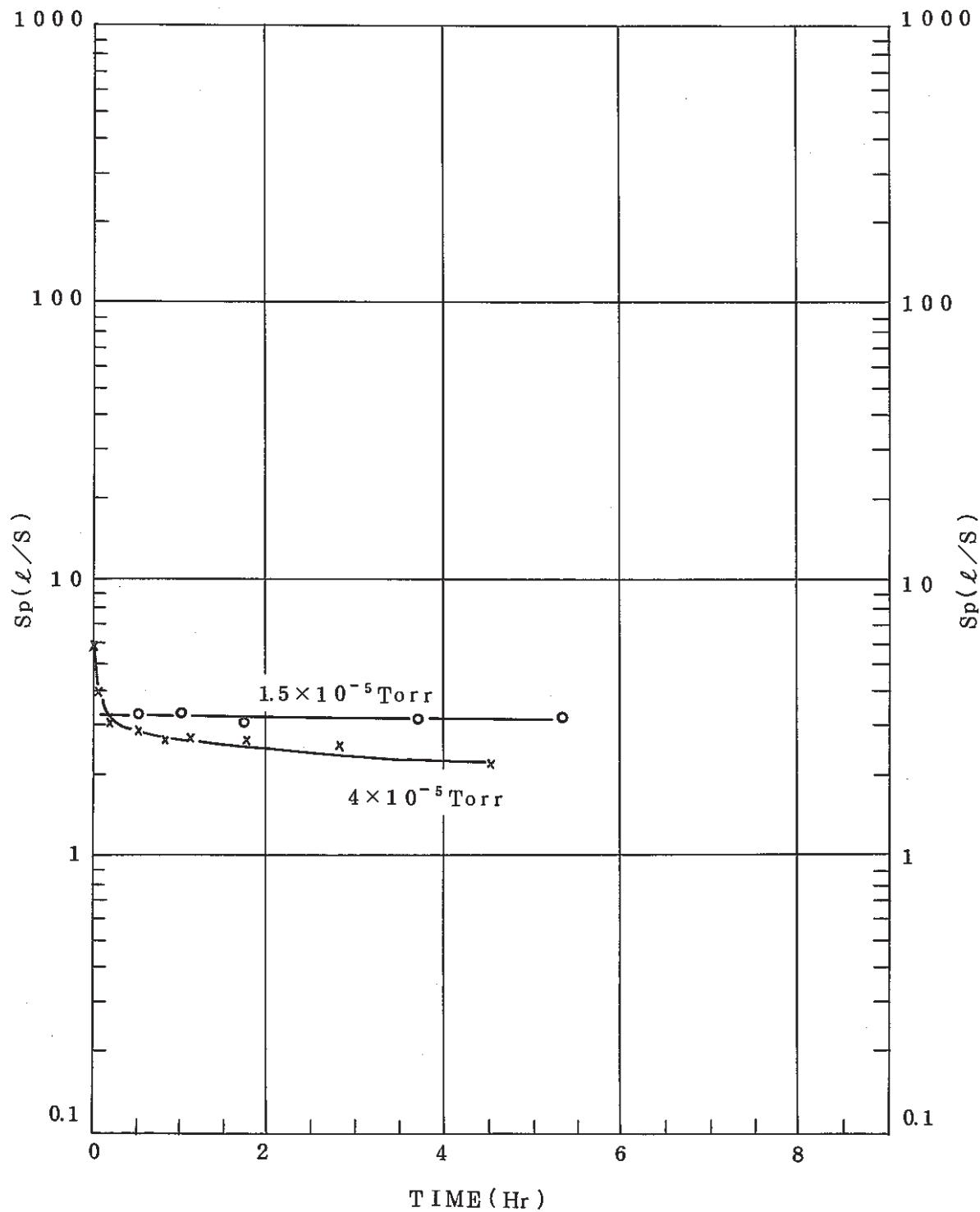


Fig. A1-6 Sp versus elapsed time after the treatment of the backout at 450°C

450°C ベークアウト後の排気速度と経過時間

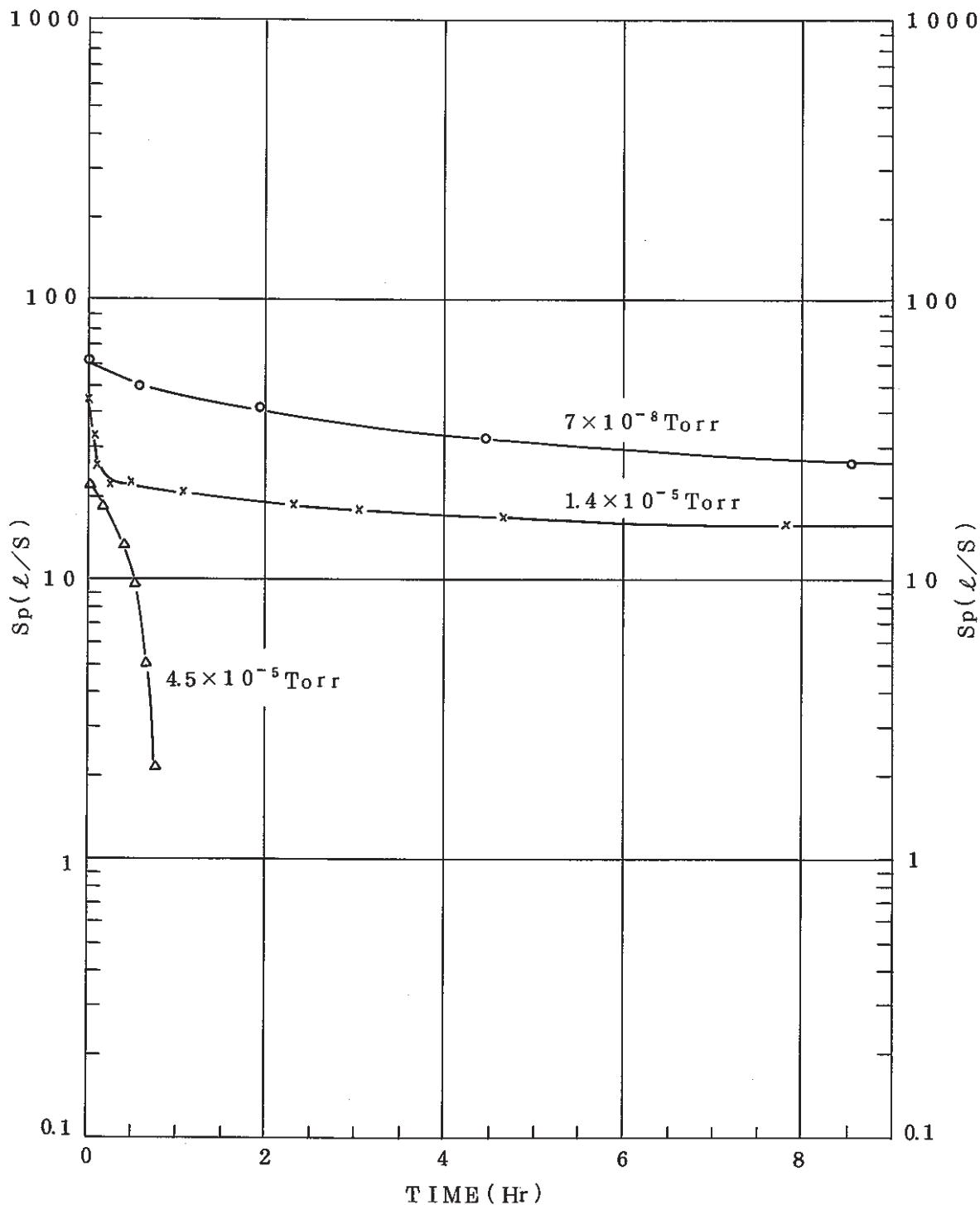


Fig. A1-7 Sp versus elapsed time after the treatment of Ar ion bombardment

アルゴンポンパード処理後の排気速度と経過時間

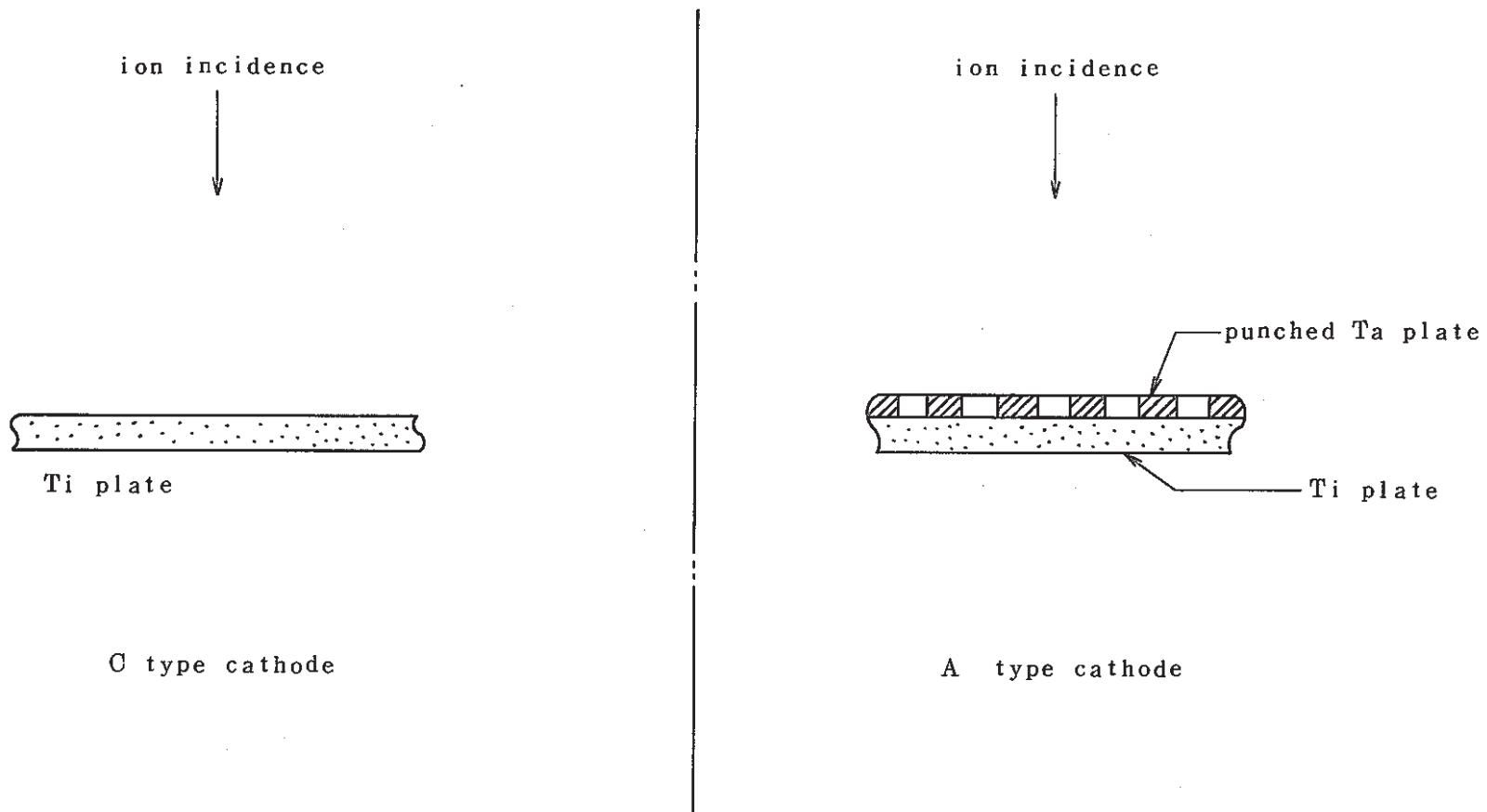


Fig. A1-8 The difference between A type cathode and C type cathode
A型カソードとC型カソードの違い

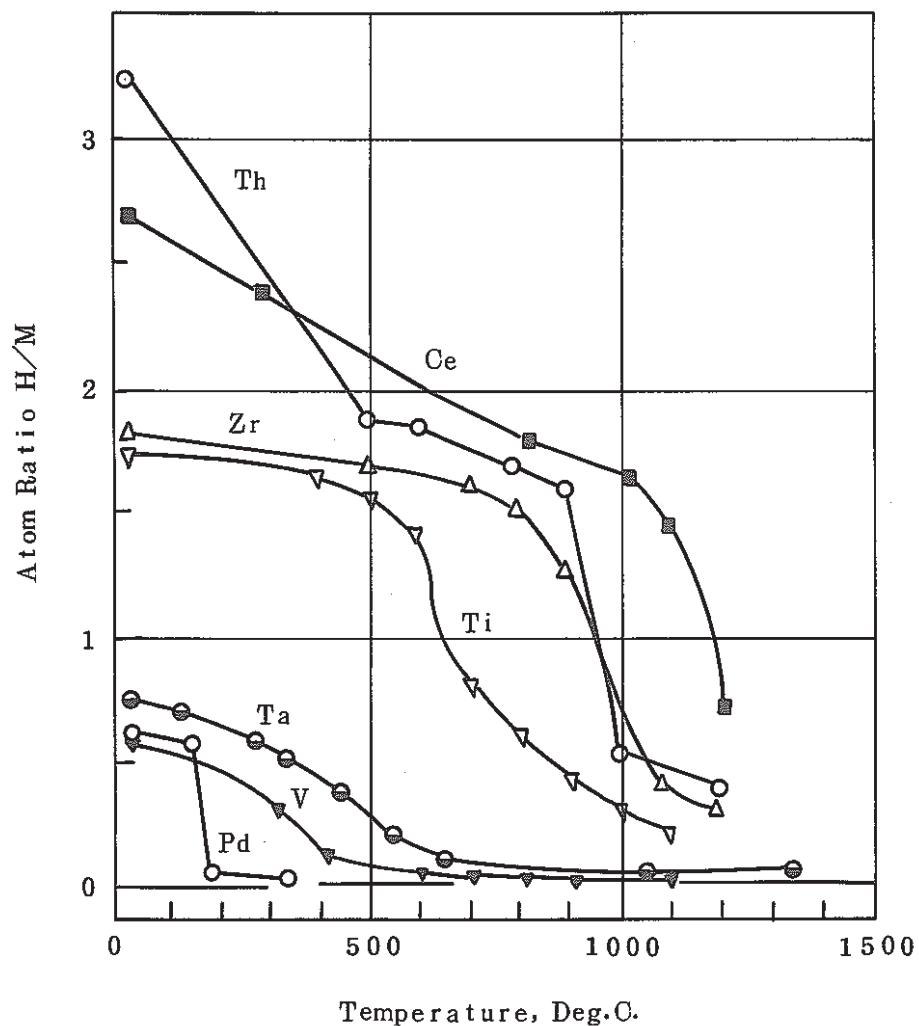


Fig. A 1-9 Hydrogen solubility isobars of exothermic occluders at 1 atm

1気圧における水素溶解度曲線

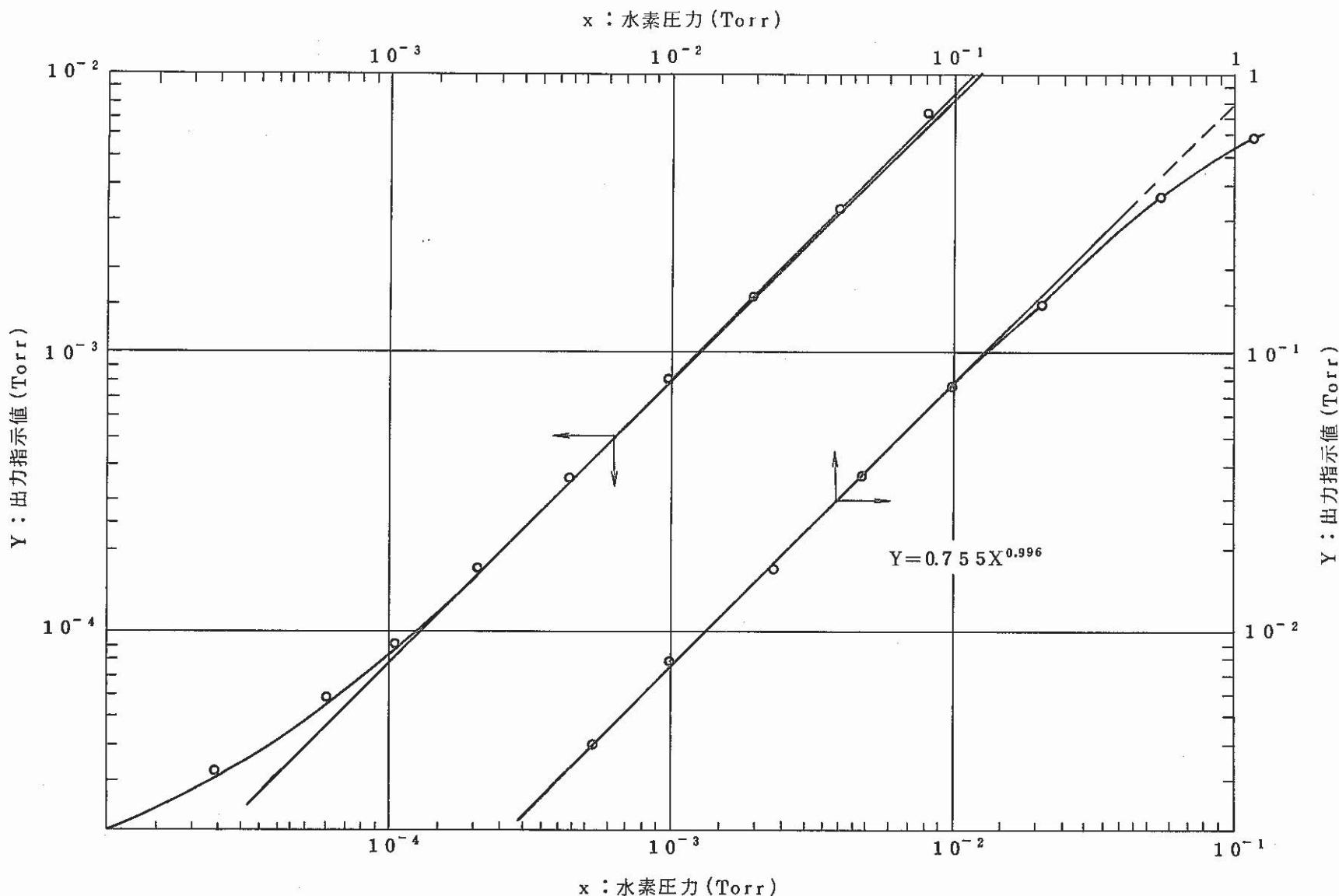


Fig. A3-1 Calibration curve of shultz gauge by hydrogen (EV-HNa(50MW-MKIII/M1))
EV-HNa(50MW-MKIII/M1) シュルツゲージ水素校正曲線

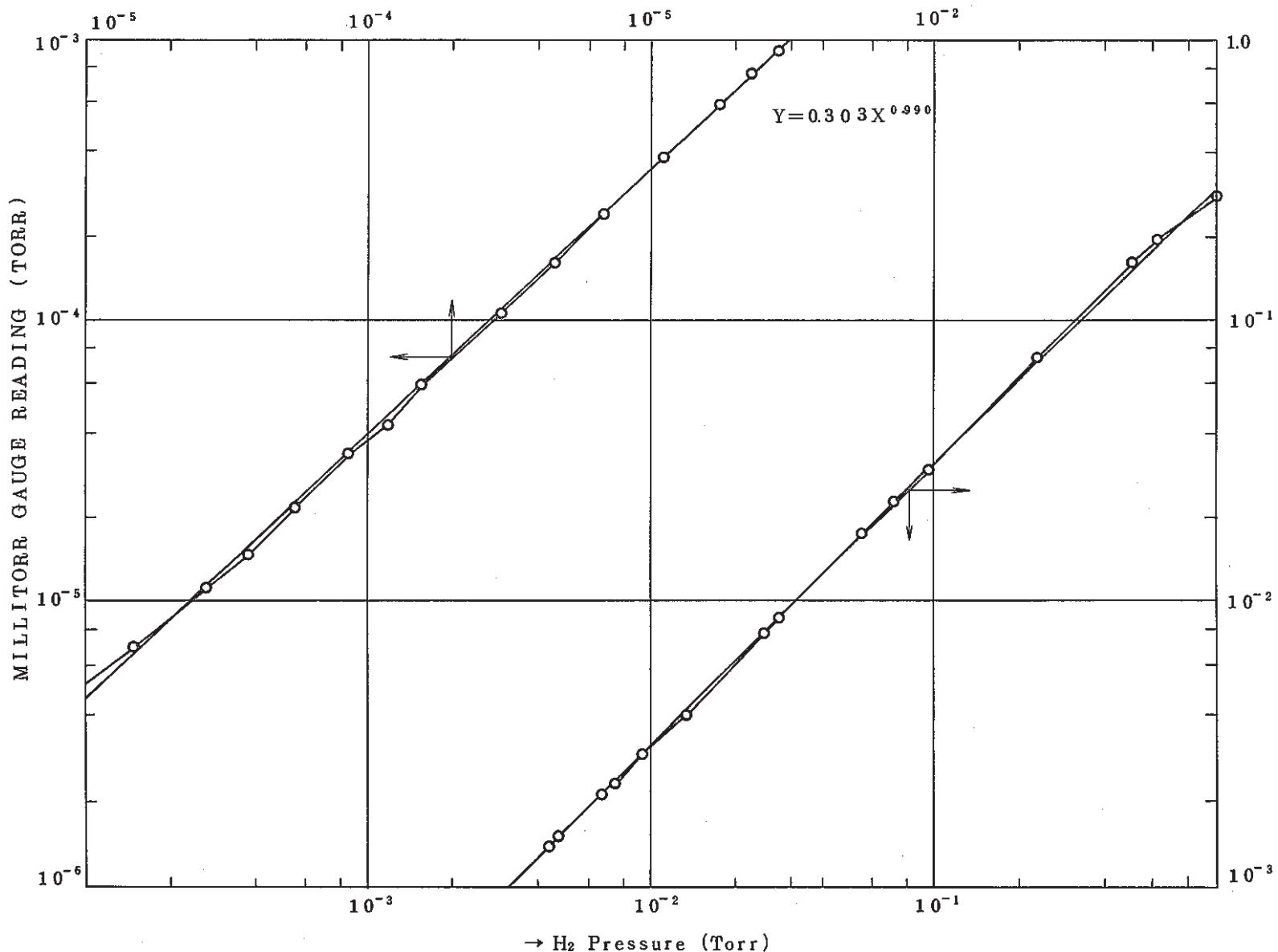


Fig. A 3 - 2 Calibration curve of millitorr gauge by hydrogen EV-HAr(50MW-CG-MK I~MK III)
EV-HAr(50MW-OG-MK I~MK III) ミリトルゲージ水素校正曲線

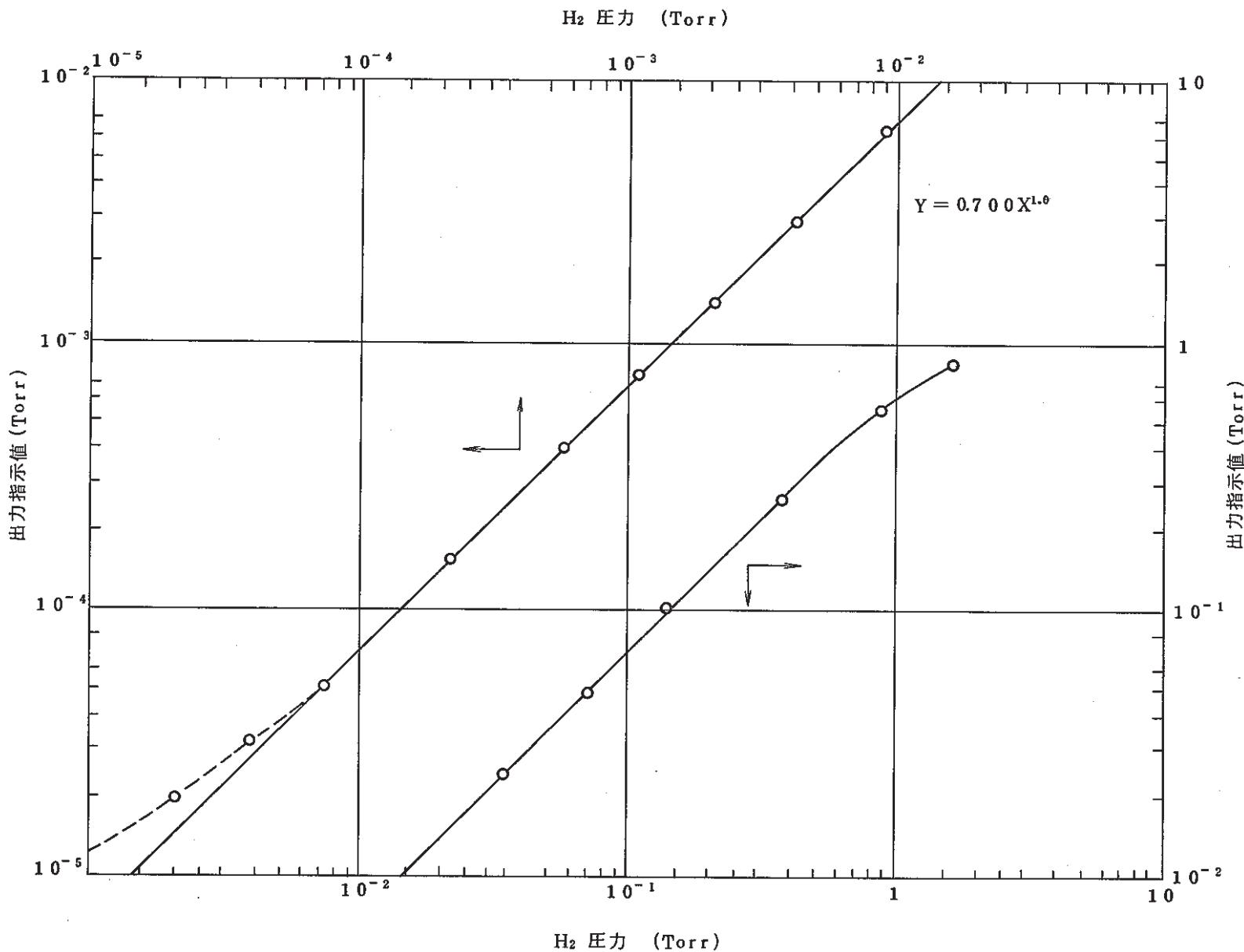


Fig. A 3 - 3 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen(CT-HNa(PNC typeI improvement model #1)
CT-HNa(PNC型1号機改良型#1) シュルツゲージ水素校正曲線

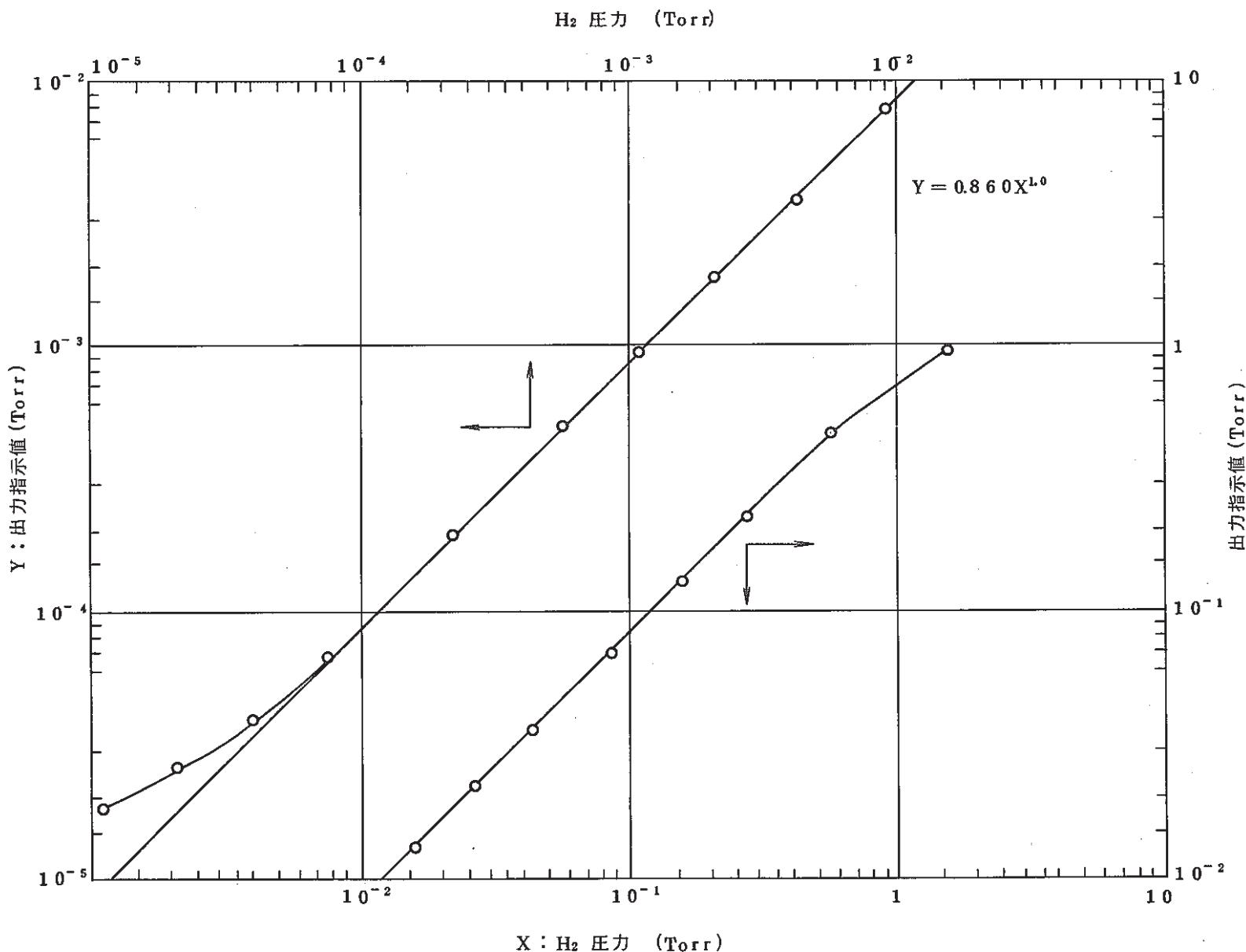


Fig. A 3-4 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (Nap-HNa(PNC type I improvement model))
Nap-HNa(PNC型1号機改良型) シュルツゲージ水素校正曲線

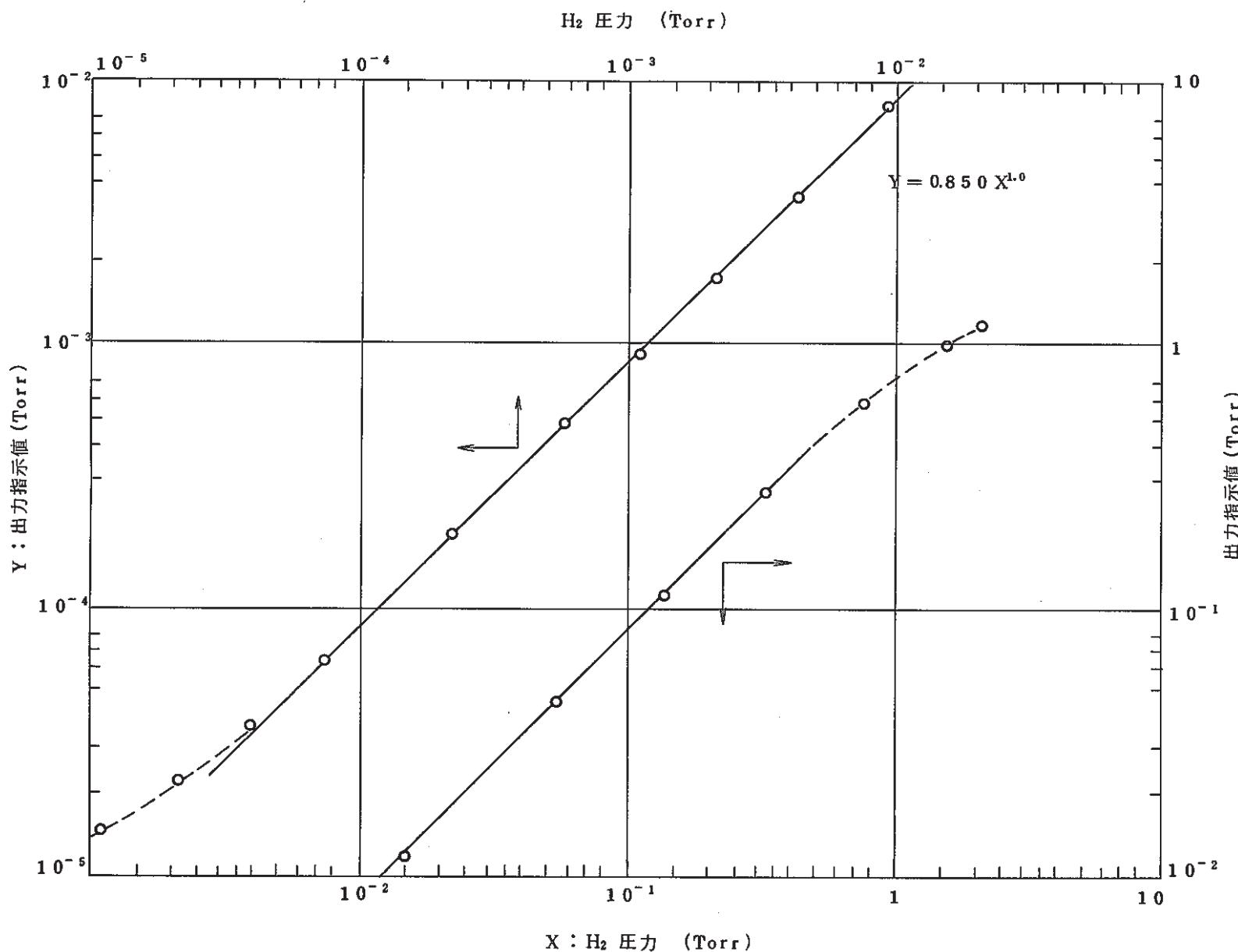


Fig. A3-5 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen(SH-HAr (PNC CG-typeI))
SH-HAr (PNC型-CG-1号機) シュルツゲージ水素校正曲線

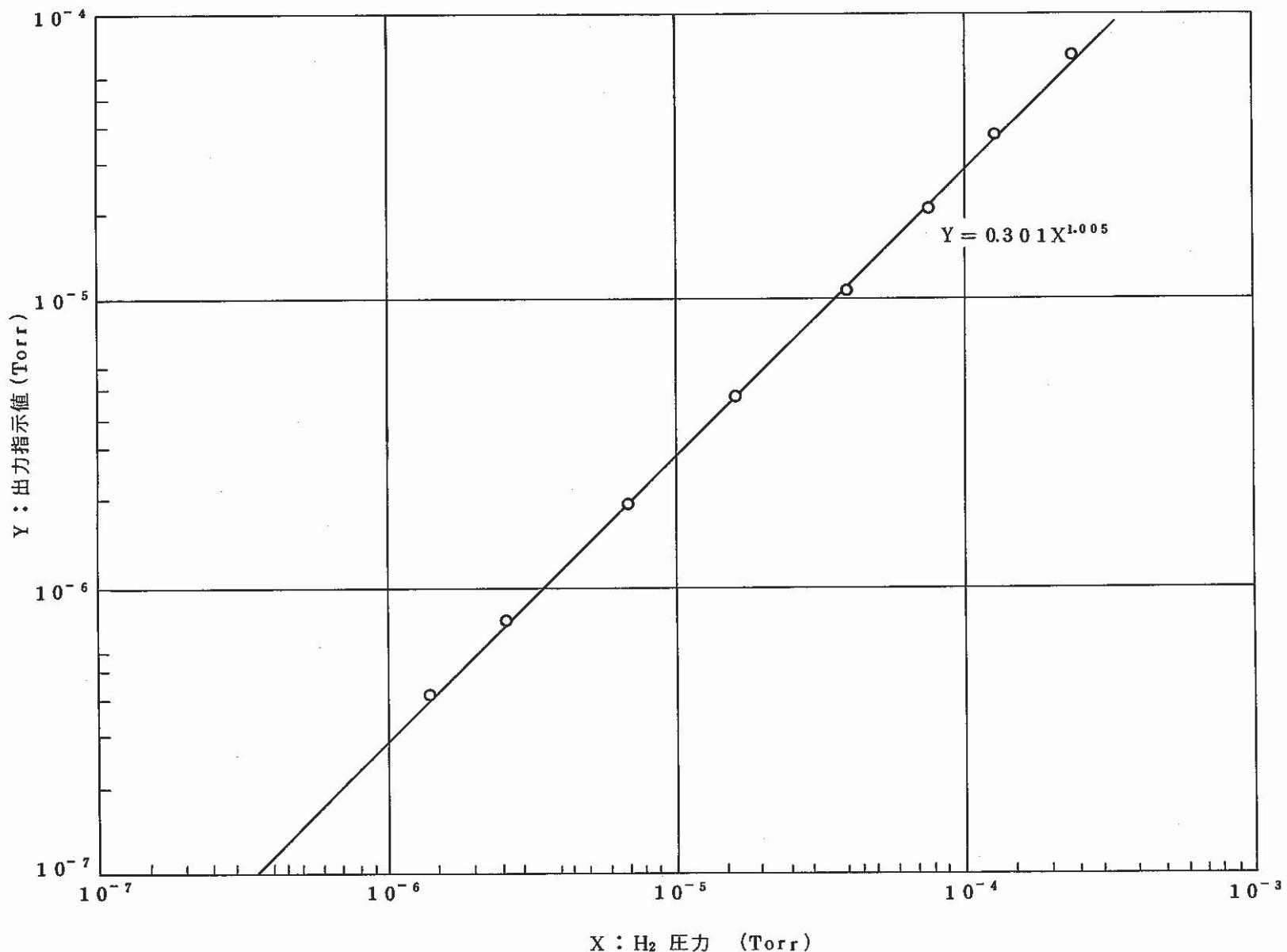


Fig. A3-6 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (CT-HNa (PNC type I improvement model #1))
CT-HNa (PNC型1号機改良型#1) ヌードゲージ水素校正曲線

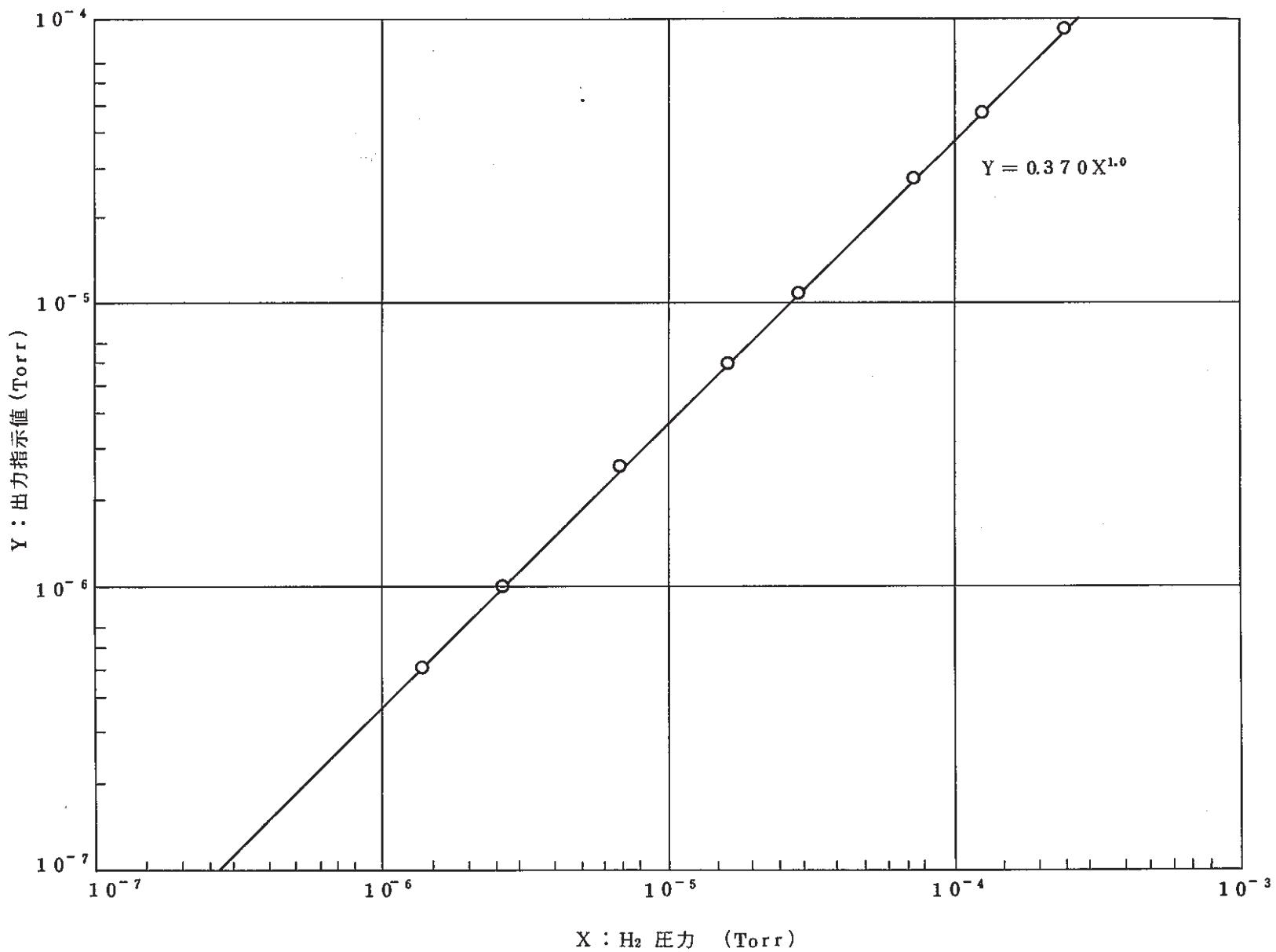


Fig. A3-7 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (NaP-HNaPNC type I improvement model)
NaP-HNa (PNC型1号機改良型) ヌードゲージ水素校正曲線

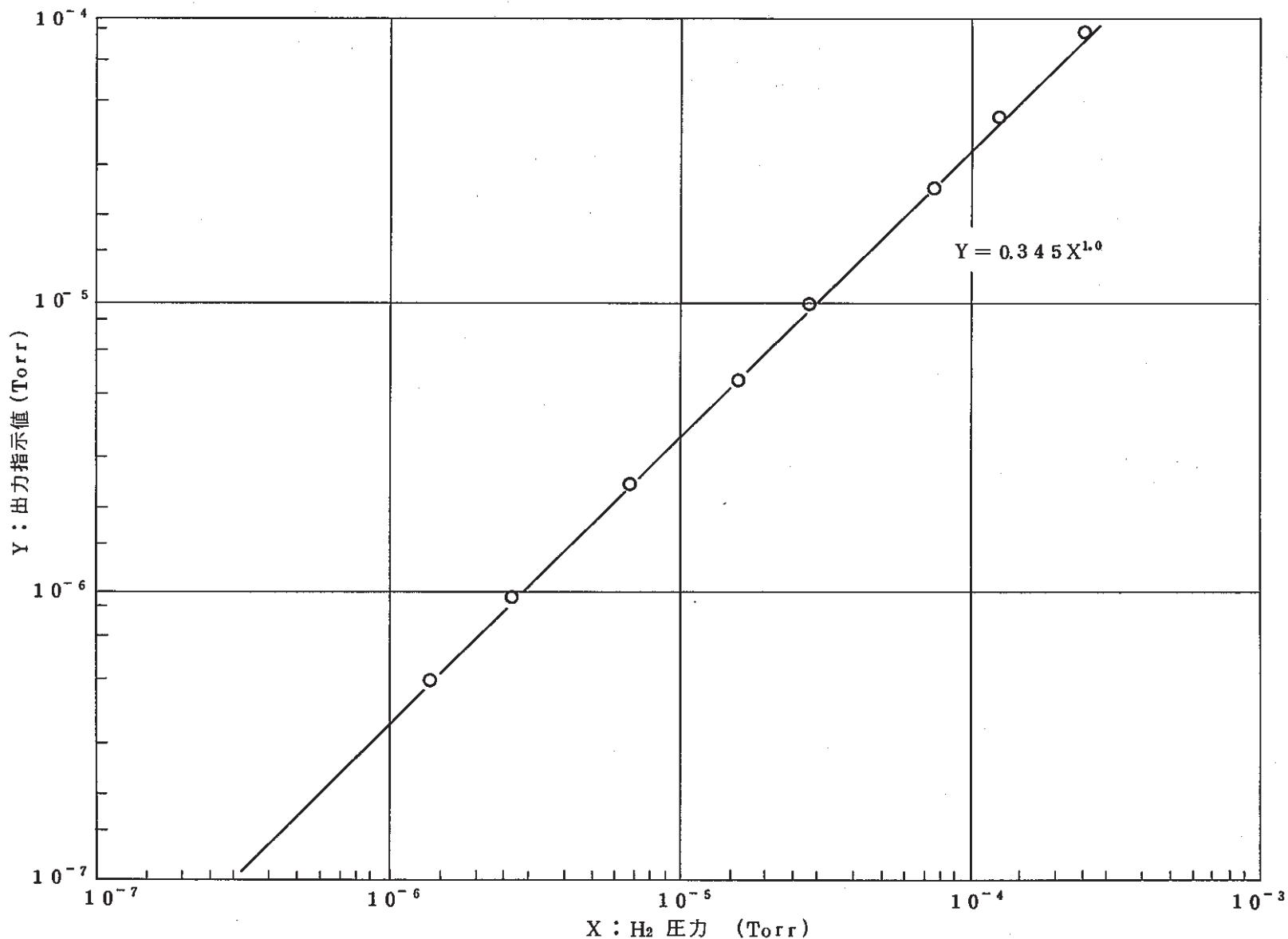


Fig. A 3 - 8 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (SH-HAr (PNC CG-type I))
SH-HAr (PNC-CG-1号機) ヌードゲージ水素校正曲線

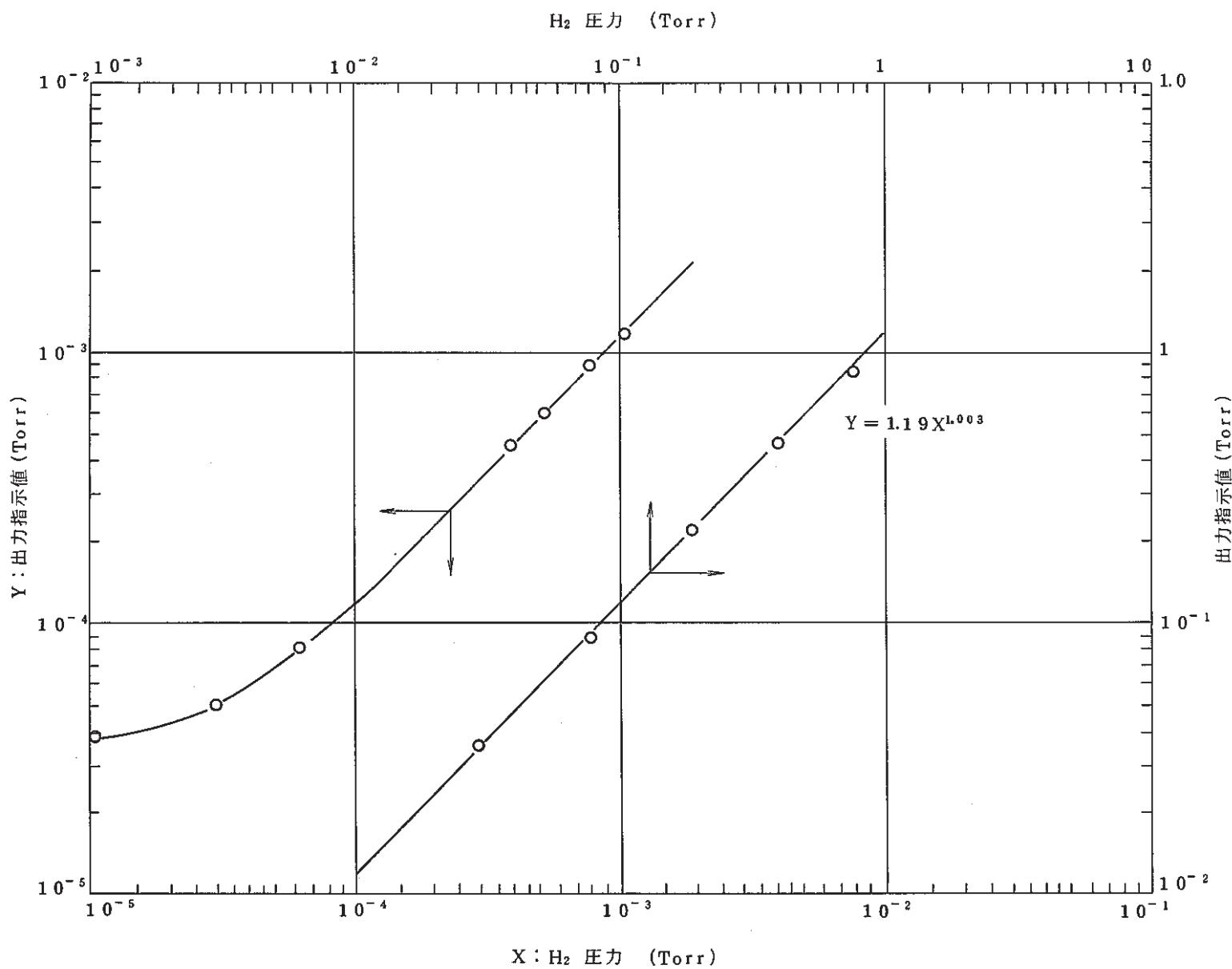


Fig. A 3-9 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (EV-HNa(PNC typeⅡ MKⅣ))
EV-HNa(PNC型 2号機MKⅣ) シュルツゲージ水素校正曲線

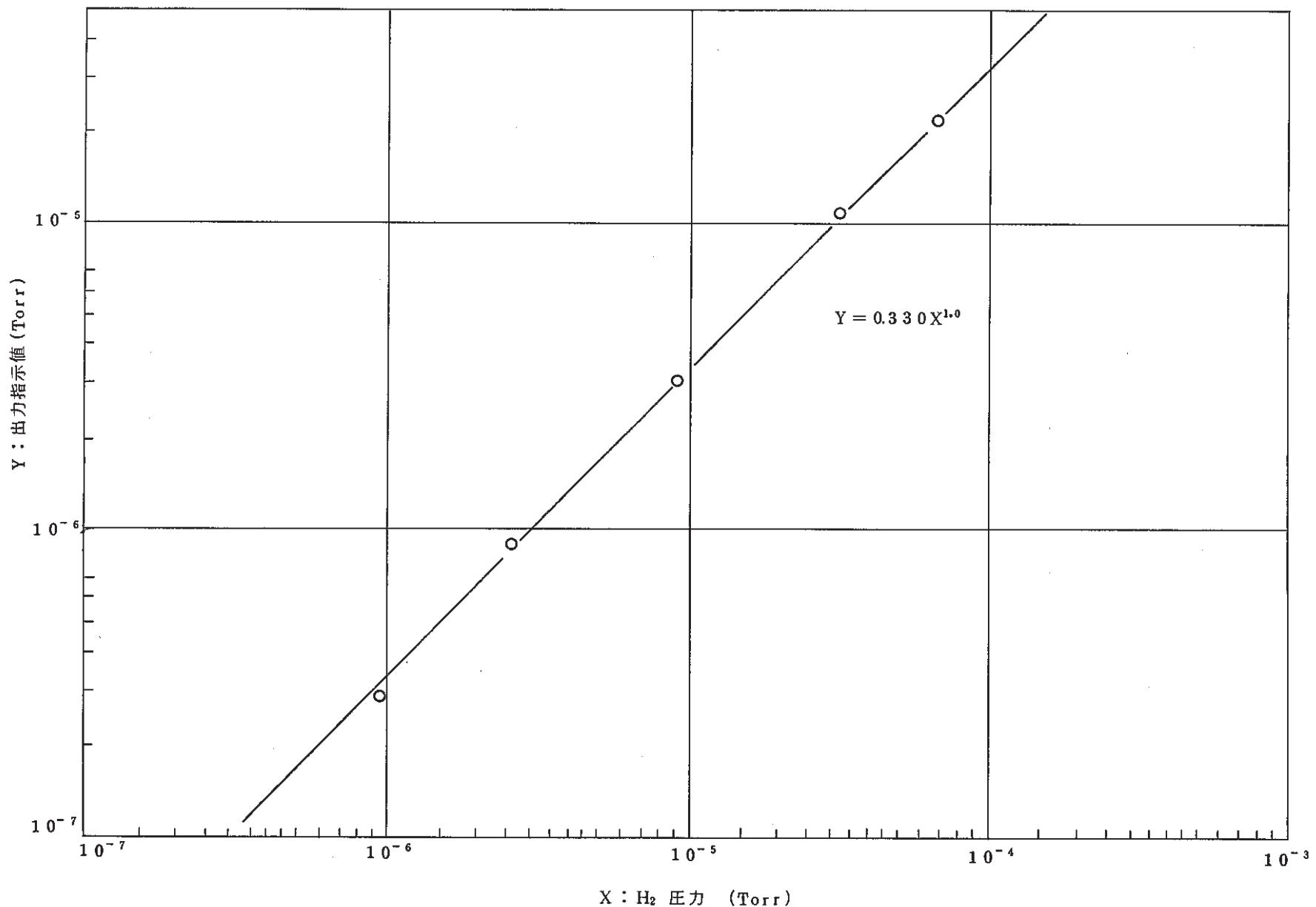


Fig. A 3-10 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (EV-HNa(PNC type-II MKIV))
EV-HNa(PNC型 2号機 MKIV) ヌードゲージ水素校正曲線

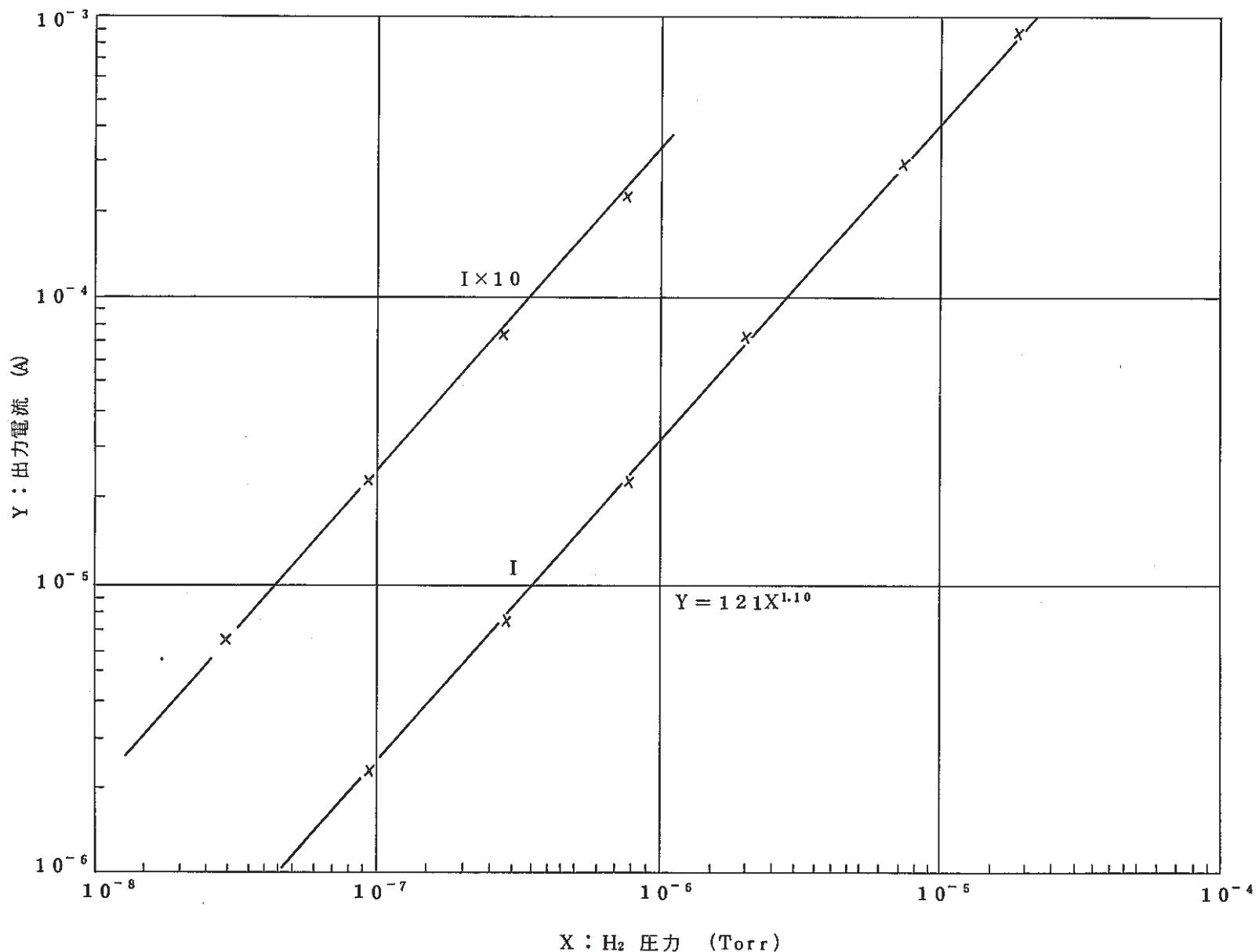


Fig. A3-11 Calibration curve of ion pump by hydrogen (EV-HNa (PNC type II MKW)) (PST-1C type)
EV-HNa (PNC 2号機 MKW) イオンポンプ水素校正曲線 (PST-1C型)

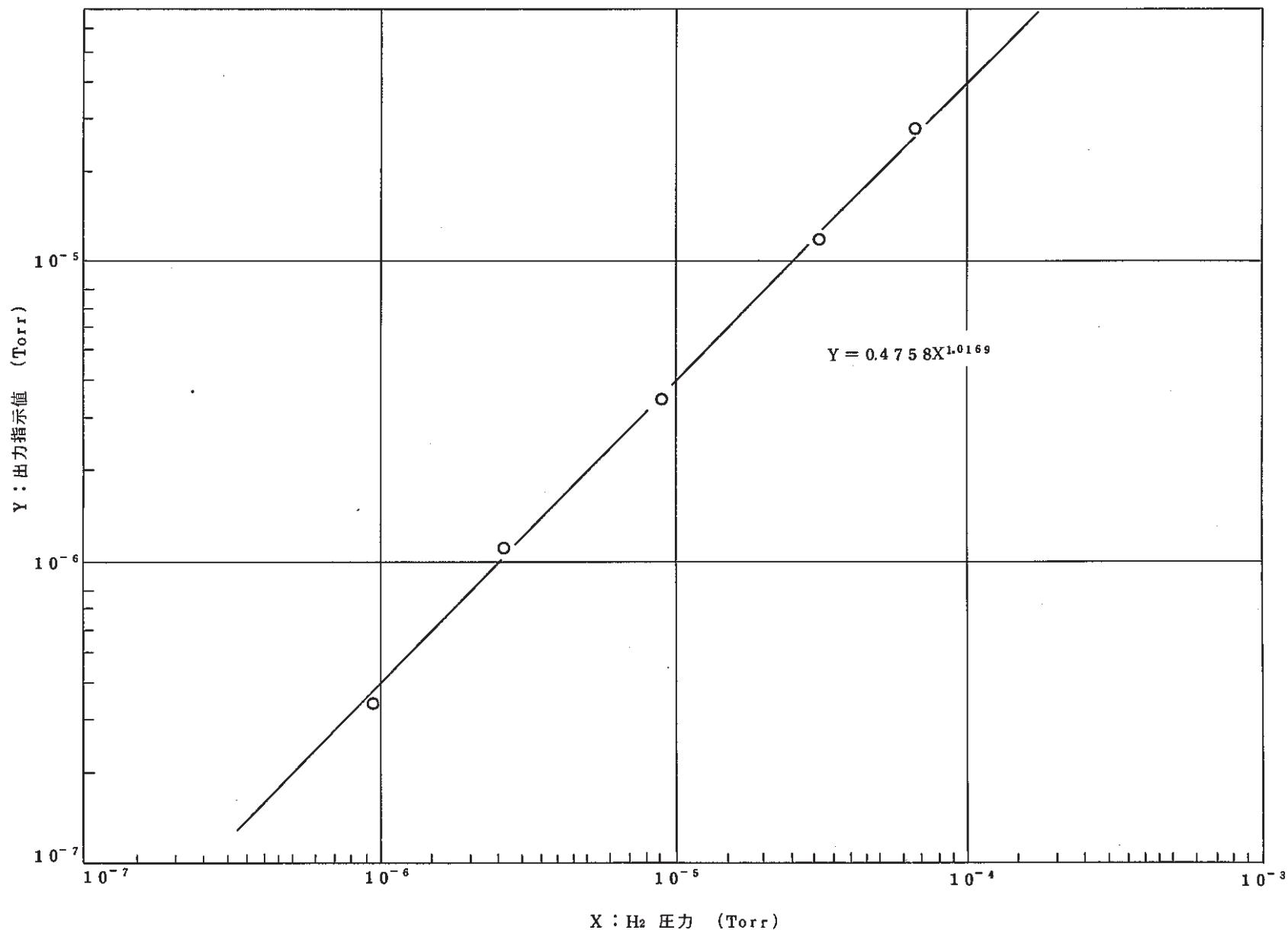


Fig. A 3 - 1 2 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (SH-HNa(Toshiba type))
SH-HNa(東芝型) ヌードゲージ水素校正曲線

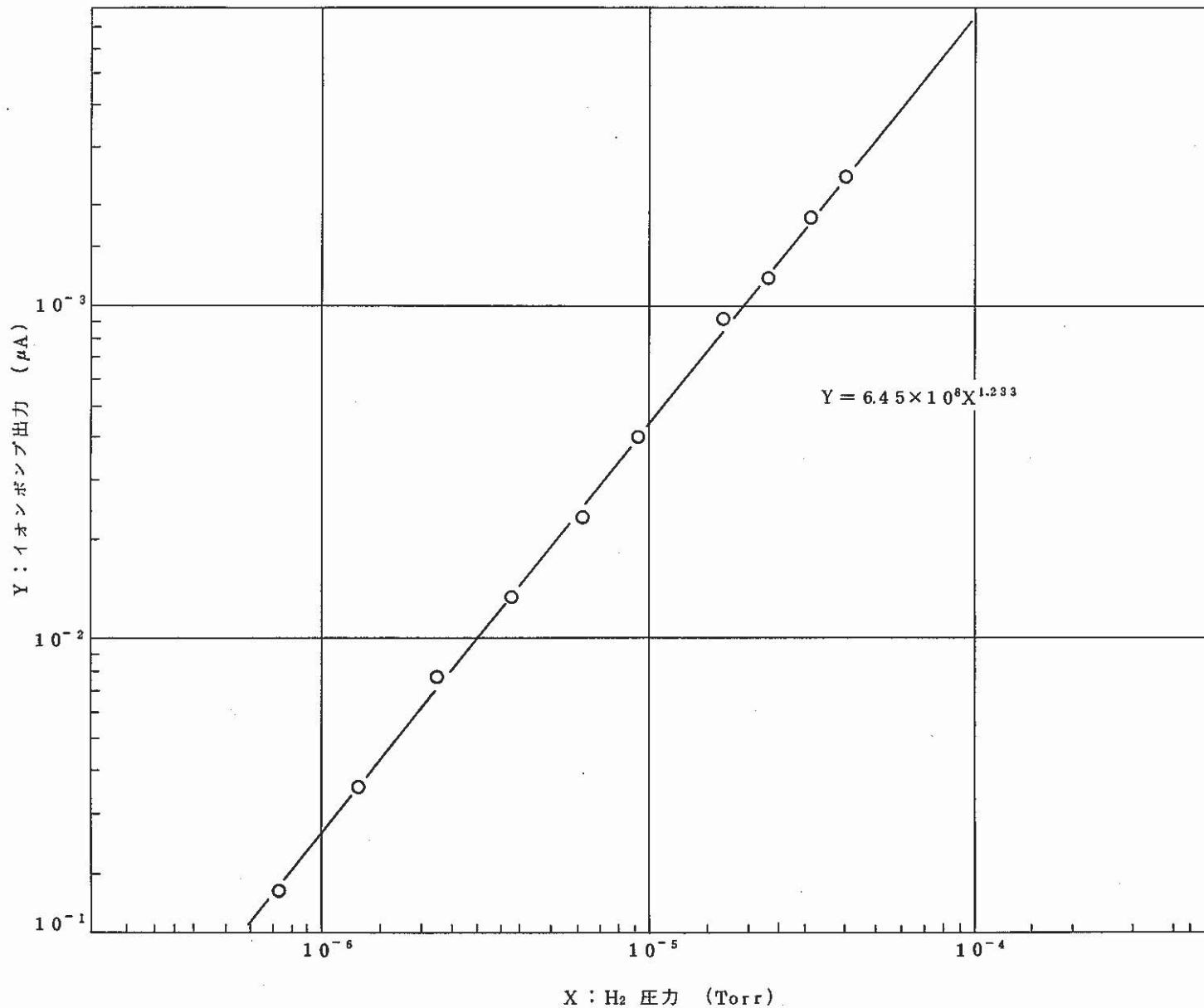


Fig. A 3 - 1 3 Calibration curve of ion pump by hydrogen (SH-HNa(Toshiba type))
SH-HNa(東芝型) イオンポンプ水素校正曲線

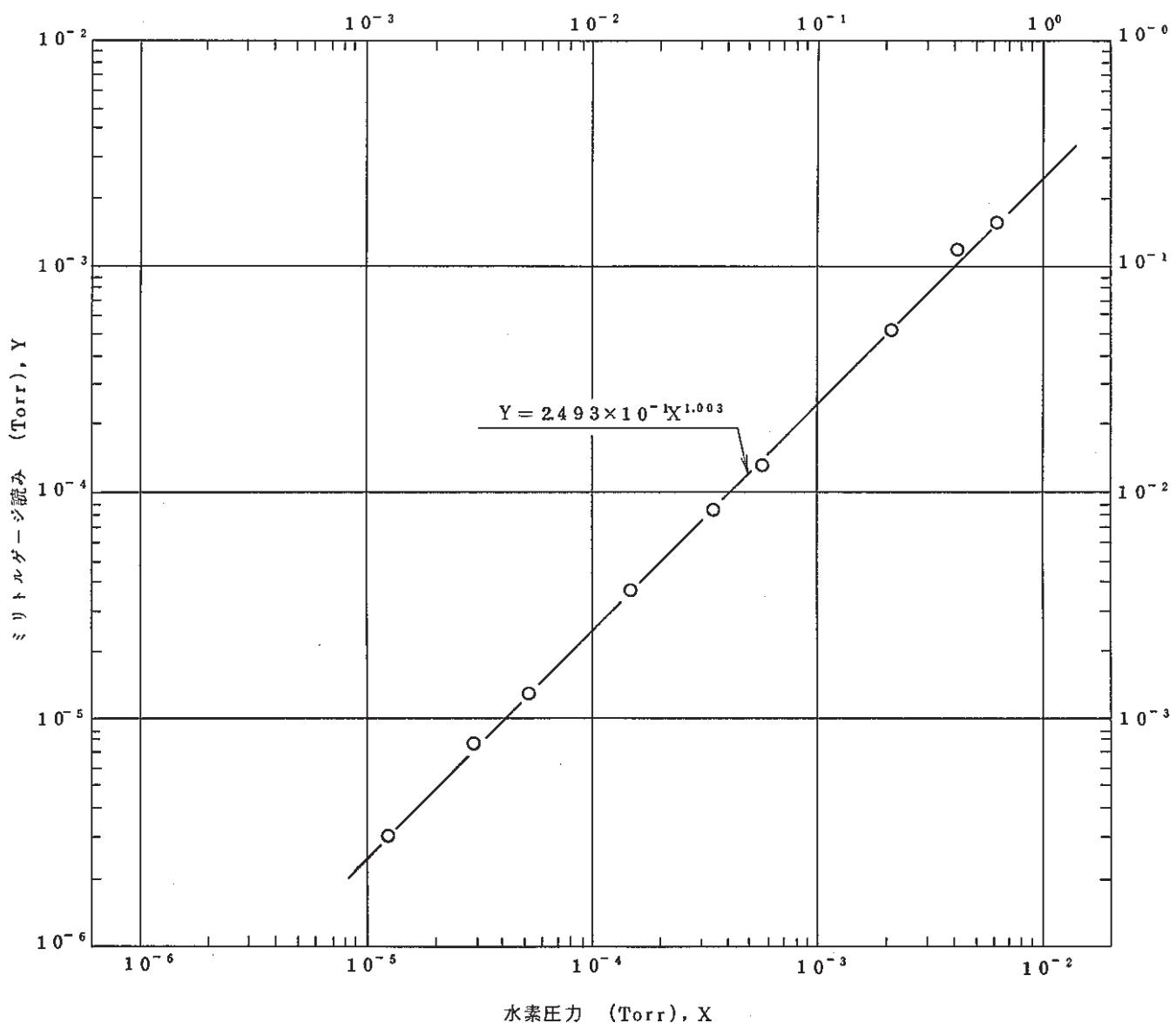


Fig. A 3 - 14 Calibration curve of millitorr gauge by hydrogen (EV-HAr(50MW-CG-MKV)
EV-HAr(50MW-CG-MKV) ミリトルゲージ水素校正曲線

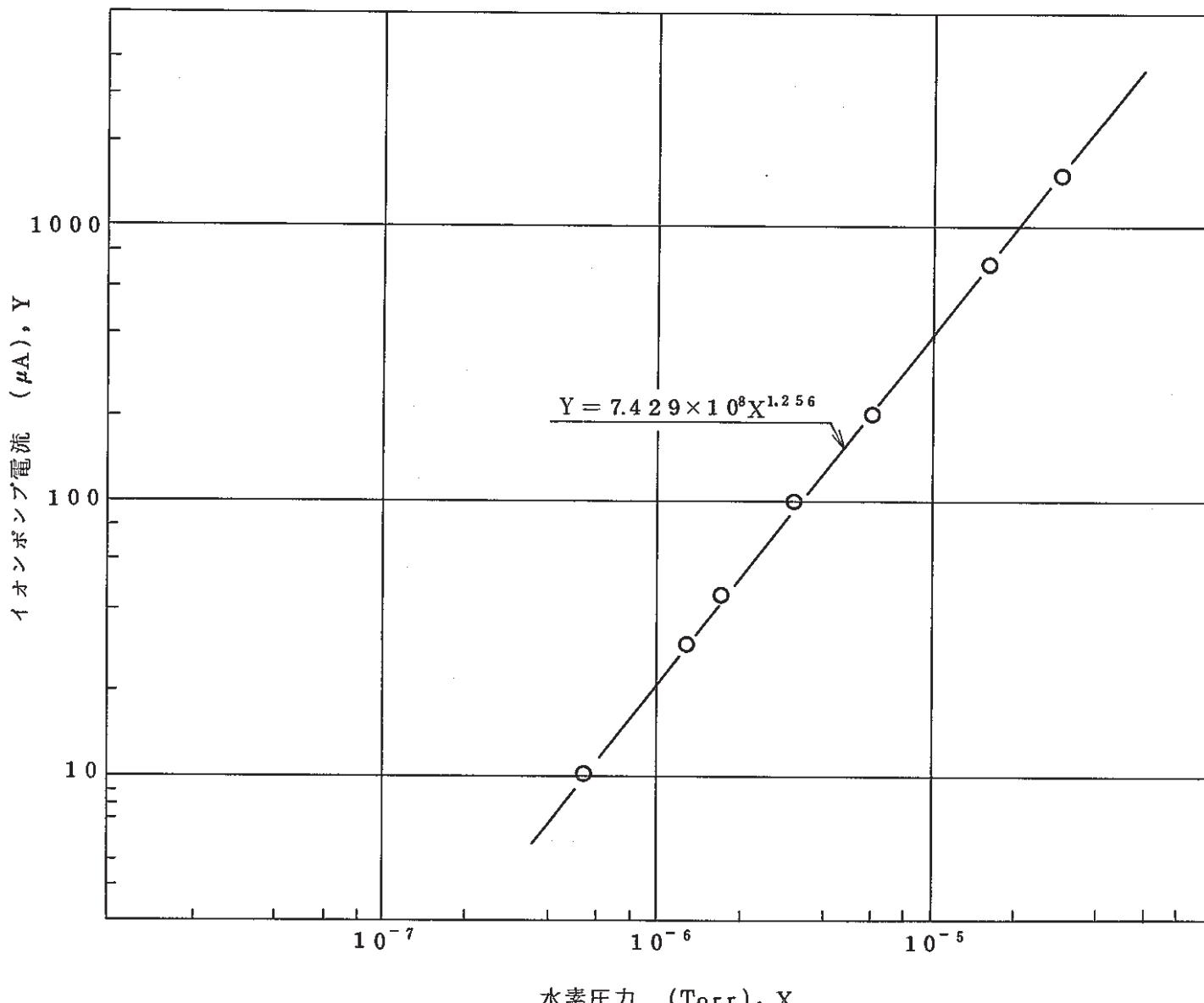


Fig. A 3 - 15 Calibration curve of ion pump by hydrogen (EV-HAr(50MW-CG-MKN))
EV-HAr(50MW-CG-MKN) イオンポンプ水素校正曲線

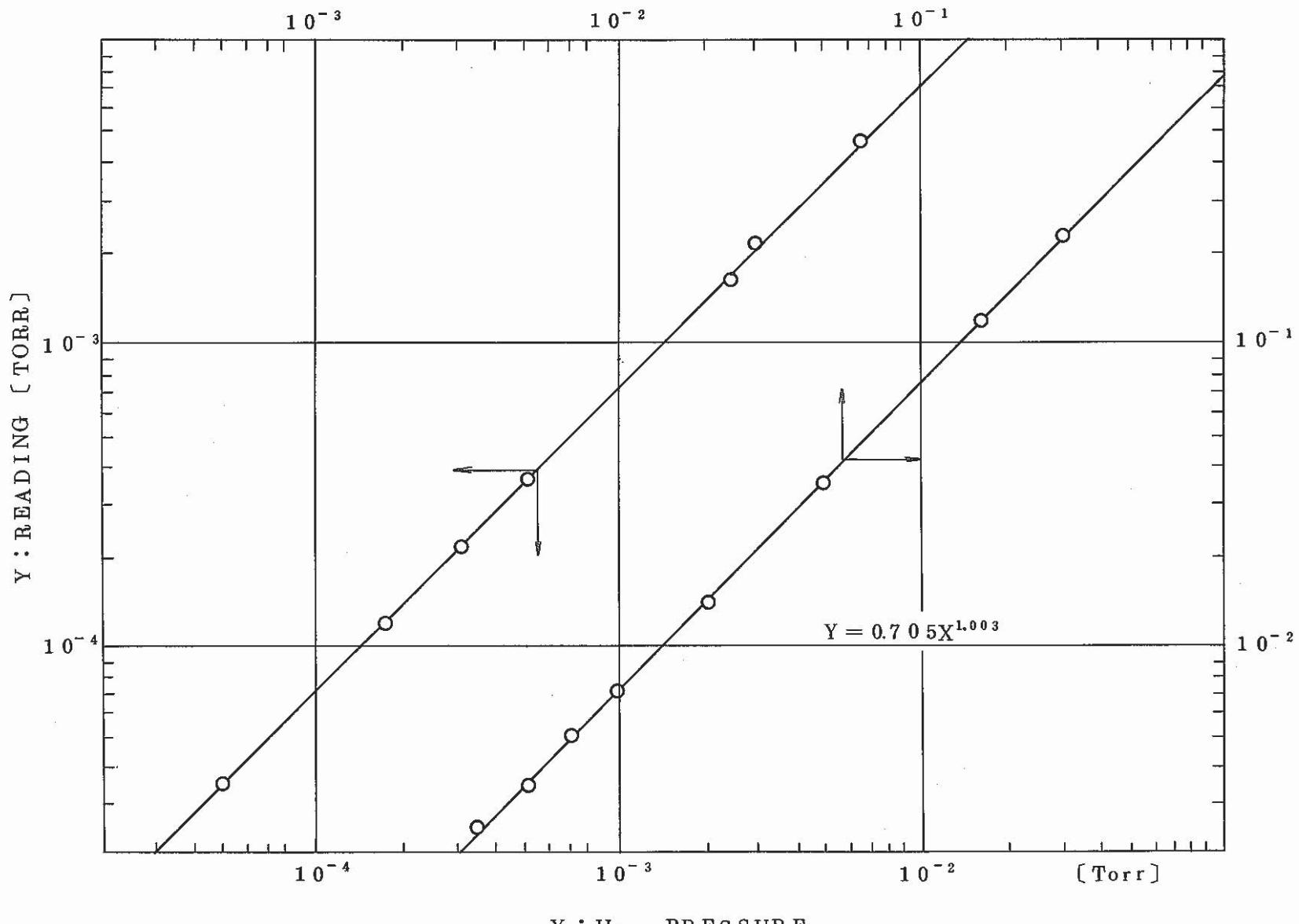


Fig. A3-16 Calibration curve of schultz gauge by hydrogen (PNC type-I improvement model #2)
CT-HNa (PNC型1号機改良型#2) シュルツゲージ水素校正曲線

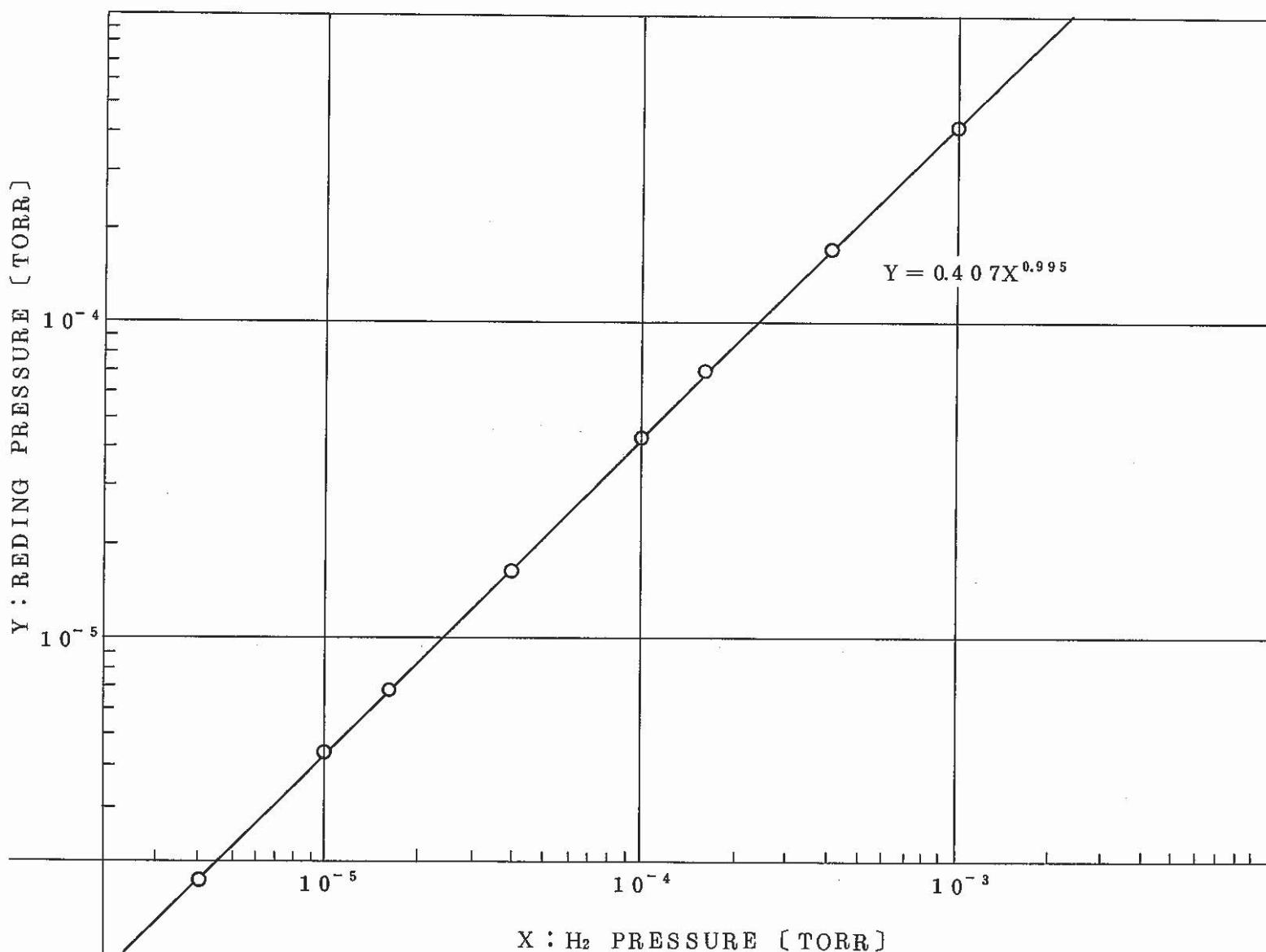


Fig. A3-17 Calibration curve of nude gauge by hydrogen (PNC type-I improvement model No.2)
CT-HNa (PNC型1号機改良型No.2) ヌードゲージ水素校正曲線