PNC-TJ9124 96-008

ナトリウム－水反応時の管外熱伝達率測定試験装置の設計

（動力炉・核燃料開発事業団　契約業務報告書）

1996年3月

技術管理室
No.
8.11.19
動燃事業団大洗工学センター

株式会社 日立製作所

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）

PNC-TJ9124 96-008
March 1996

Design Study of A Sodium-Water Reaction Test Model for Measurement of heat transfer coefficient

Jun Kashiwakura* Atsuhiko Kubo*
Ideta Hirokazu* Suzuki Toshiyuki**
Koichi Ouchi*** Toshiji Yoshida***

Abstract

It is needed for a reasonable design of a FBR plant to evaluate a sodium water reaction accident more reasonably and establish the realistic Design Basis Leak (DBL) in a steam generator. High temperature bursting phenomenon, which has much effect on the DBL, depends on heat transfer coefficients of leak jets on tube surfaces at a sodium-water reaction accident. So thermal behavior of leak jets are to be confirmed in the sodium-water reaction test.

This report mentions design of a sodium-water reaction test model for measurement of heat transfer coefficient. The test model will be installed in the first test of the FBR safety div.

This report has been prepared as the results of the services executed by Hitachi,Ltd. under the contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No. 07-C-4111
Division and section in charge of the Corporation :
FBR Plant Safety Engineering Section Safety Engineering Division, Akikazu Kurihara

* FBR Design Center,Hitachi Works, Hitachi,Limited
** Nuclear Information Control System Center,Hitachi Works, Htachi,Limited
*** Nuclear Power Design Division, Energy System Center, Hitachi Nuclear Engineering Co.,Ltd.

PNC-TJ9124 96-008
1996年3月

ナトリウム－水反応時の管外熱伝達率測定試験装置の設計

柏倉　潤*　　久保篤彦*
出田博和*　　鈴木寿之**
大内公一***　　吉田利司***

要　　旨

大型炉蒸気発生器（SG）で生じうる水リークをより現実的に評価し、適切な設計基準水リーク（DBL）を設定することが高速炉の合理的な設計推進の観点から急務となっている。DBLに影響を及ぼす要因の１つとして伝熱管の高温ラプチャ型破損が考えられるが、この破損挙動はナトリウム－水反応時のリークジェットによる管外の熱伝達率に大きく依存する。従って、高温ラプチャの支配因子の１つであるリークジェットによる熱的挙動を明らかにするため、ナトリウム－水反応試験を行い管外熱伝達率を試験的に測定する必要がある。

本報告書は、このナトリウム－水反応時の管外熱伝達率測定試験を行うために、試験装置の設計を行ったものである。なお、設計する装置は、動燃事業団所有の高速炉安全性第１試験室に設置するものとする。

本報告書は、(株)日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：07-C-4111
事業団担当部課室：大洗工学センター　安全工学部　プラント安全工学室
栗原　成計

*　(株)日立製作所 日立工場　高速増殖炉設計センタ
**　(株)日立製作所 日立工場　原子力情報制御システムセンタ
***　日立ニュークリアエンジニアリング(株)　エネルギーシステム本部　原子力設計部

目　　次

1.　目　的 …… 1-1
2.　検討計画 …… 1-1
2.1　検討項目 …… 1-1
3.　検討内容及び成果 …… 3-1
3.1　検討条件 …… 3-1
3.1.1　基本方針 …… 3-1
3.1.2　試験装置への要求条件 …… 3.1-1
3.2　試験装置の設計 …… 3.2.1-1
3.2.1　系統構成・仕様 …… 3.2.1-1
3.2.2　主要機器の設計 …… 3.2.2-1
(1)　反応容器 …… 3.2.2-1
(2)　収納容器 …… 3.2.2-2
(3)　ダンプタンク …… 3.2.2-3
(4)　水加熱器 …… 3.2.2-3
3.2.3　計装設備 …… 3.2.3-1
(1)　データ収録設備 …… 3.2.3-2
(2)　音響検出設備 …… 3.2.3-5
3.2.4　配管・配置・架台設計 …… 3.2.4-1
(1)　配管・配置 …… 3.2.4-1
(2)　架台 …… 3.2.4-13
3.3　運転方法の検討 …… 3.3-1
3.4　製作・据付工程 …… 3.4-1
4.　まとめ …… 4-1
5.　謝辞 …… 4-1
6.　参考文献 …… 4-1

補足資料-1「主要機器の強度計算書」 …… 補 1-1
補足資料-2「予熱保温設計計算書」 …… 補 2-1
参考文献　「気泡ポンプの揚水特性」 …… A-1

1. 目的

動燃事業団所有の高速炉安全性第１試験室の大リーク・ナトリウム－水反応試験装置（SWAT-1）跡を利用した管外熱伝達率測定試験装置の設計を実施する。本検討においては特に反応容器内部構造物、試験装置の設計を行う。

2. 検討計画

2.1 検討項目

本研究においては以下の項目について検討する。

(1) 試験装置の設計

a. 系統構成・仕様

b. 主要機器の設計

c. 計装設備

d. 配管・配置・架台設計

(2) 運転方法の検討

a. 運転方法

(3) 製作・据付工程

3. 検討内容及び成果

大型炉蒸気発生器（SG）で生じうる水リークをより現実的に評価し、適切な設計基準水リーク（DBL）を設定することが高速炉の合理的な設計推進の観点から急務となっている。DBLに影響を及ぼす要因の１つとして伝熱管の高温ラプチャ型破損が考えられるが、この破損挙動はナトリウム－水反応時のリークジェットによる管外の熱伝達率に大きく依存する。従って、高温ラプチャの支配因子の１つであるリークジェットによる熱的挙動を明らかにするため、ナトリウム－水反応試験を行い管外熱伝達率を試験的に測定する必要がある。

本件は、このナトリウム－水反応時の管外熱伝達率測定試験装置の設計に関するものである。なお、設計する装置は、動燃事業団所有の高速炉安全性第１試験室に設置するものとする。

3.1 検討条件

3.1.1 基本方針

本試験は、実機条件下において反応ジェットによる隣接伝熱管への熱的影響を確認できるように、リークジェットをターゲット管群に衝突させ管壁温度分布及び熱伝達率を測定するものである。本試験装置の検討は、下記方針によるものとする。

(1) 熱伝達率測定用ターゲット管には内部にナトリウムを流動させ、伝熱管外の温度上昇に対しての冷却機能を持たせる。冷却材にナトリウムを選定した理由は、3.2.1 項にて述べる。

(2) 水リーク点近傍の伝熱管及び支持構造等の構造は、実証炉実機条件に基づくものとする。

(3) 管壁温度分布及び熱伝達率を求めるための測定項目は下記とする。（プロセス計装以外を示す。詳細は 3.2.1 項参照）

① ターゲット管　管近傍ナトリウム温度及び管表面温度（管周方向、軸方向）
管壁内温度径方向２カ所×４点
冷却ナトリウム出入口温度、流量

② ダミー管　管近傍ナトリウム温度（管周方向、軸方向）

③ 注水管　注水温度、圧力、流量

(4) 適用法規・規格は下記によるものとする。

① 消防法及び危険物規制に関する政令及び規則

② 労働省第１種圧力容器構造規則

③ 日本工業規格（JIS）

④ 高圧ガス取締法

⑤ 関係茨城県条例

⑥ その他関連規則

3.1.2 試験装置への要求事項

(1) ナトリウム系・水系の試験条件

実証炉以降のＳＧ運転条件を念頭において、実機ＳＧでの水リーク時のリーク孔近傍での温度挙動等を模擬もしくは推定できるようにナトリウム系、水系の試験条件を下記とする。（暫定）

- ナトリウム側温度 ： ～550 ℃
- ナトリウム側圧力 ： 0～7 kg/cm^{2}g
- 水リーク率 ： 10～1000 g/sec
- 水側圧力 ： ～190 kg/cm^{2}g
- ﾀｰｹﾞｯﾄ管内除熱量 ： 10^6 kcal/h･m^2 程度

(2) 各設備の最高使用条件

設計仕様として、主要設備の最高使用条件を表 3.1.2-1 に示す。

表 3.1.2-1　熱伝達率測定試験装置 主要機器設計仕様

1) 反応容器	
設計圧力	30 kg/cm²G
設計温度	550 ℃
内径	700 mm
高さ	3000 mm
放出系配管径	6 B
2) 反応生成物収納容器	
設計圧力	10 kg/cm²G
設計温度	550 ℃
内径	900 mm
高さ	2750 mm
放出配管径	6 B
3) ダンプタンク－1（新設）	
設計圧力（最高使用圧力）	10 kg/cm²G
設計温度	550 ℃
内径	1050 mm
高さ	1224 mm
内容積	0.9 m³
3) ダンプタンク－2（既設流用）	
設計圧力（最高使用圧力）	10 kg/cm²G
設計温度	535 ℃
内容積	0.584 m³
4) 水加熱器（別設備流用予定）	
設計圧力	220 kg/cm²G
設計温度	450 ℃
容量	0.075 m³
5) 吸気ヘッダ	
設計圧力／設計温度	10 kg/cm²G／150 ℃
6) 排気ヘッダ	
設計圧力／設計温度	10 kg/cm²G／150 ℃

3.2 試験装置の設計

3.2.1 系統構成・仕様

本試験装置は、高温の液体ナトリウムを充填した反応容器内に水・蒸気を注入し、ナトリウム－水反応発生時のリークジェットが衝突する伝熱管（ターゲット管）廻りの温度分布、熱伝達率を測定するものであり、反応容器、反応生成物収納容器、ダンプタンク（既設及び新設）の各機器と、反応生成物を放出する放出系配管、ナトリウム充填・ドレンのためのナトリウム配管及びガス系配管、及び水・蒸気注入系（別施設）より構成される。試験装置全体系統図を図 3.2.1-1 に示す。

本試験装置は、既実施試験の試験装置と比較して、試験条件としての注入水量を増加（目安として 20kg；1kg/sec×20sec）させたこと及び、ナトリウム－水反応時の放出ルートを２つ設けてそれぞれの放出ルートでの水リーク試験を行うことができることにある。１つのルートは、反応容器と反応生成物収納容器とを放出系配管で接続して、水リーク試験時における反応生成物を収納容器に導き、収納容器で水素を分離して放出し、水素以外の反応生成物を収納するものであり、従来設計と同様である。他のルートは、実証炉設計で検討されてきた概念であり、ダンプタンクで未反応のナトリウムや水酸化ナトリウム等の反応生成物を分離した後、収納容器（サイクロンセパレータによる分離機能）でさらに分離して水素を系外へ放出するものである。これら２つの試験を可能とするために、新設のダンプタンクを設け、充填ドレンだけでなく、反応生成物収納容器と兼用できるようにした。

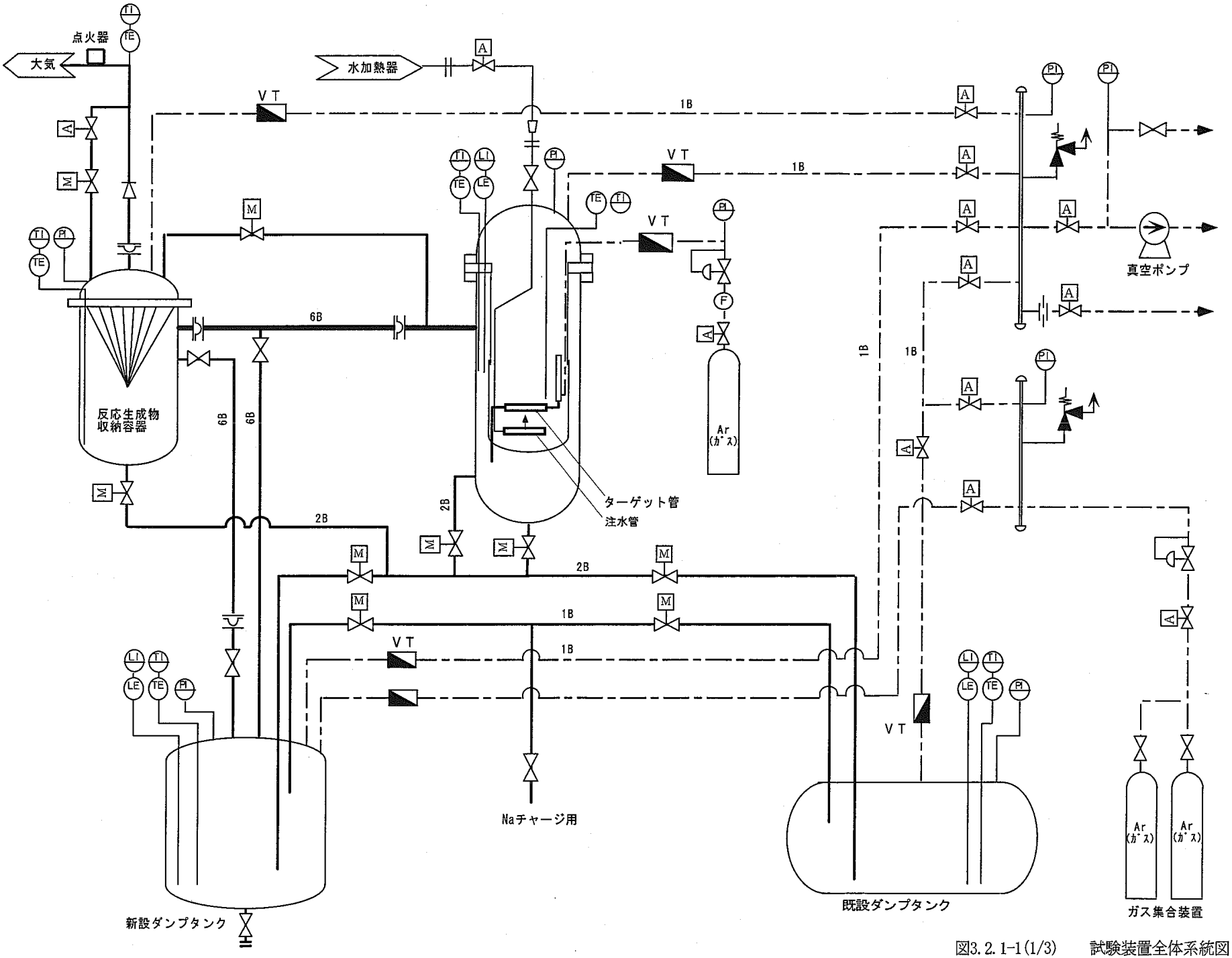


図3.2.1-1(1/3)　試験装置全体系統図

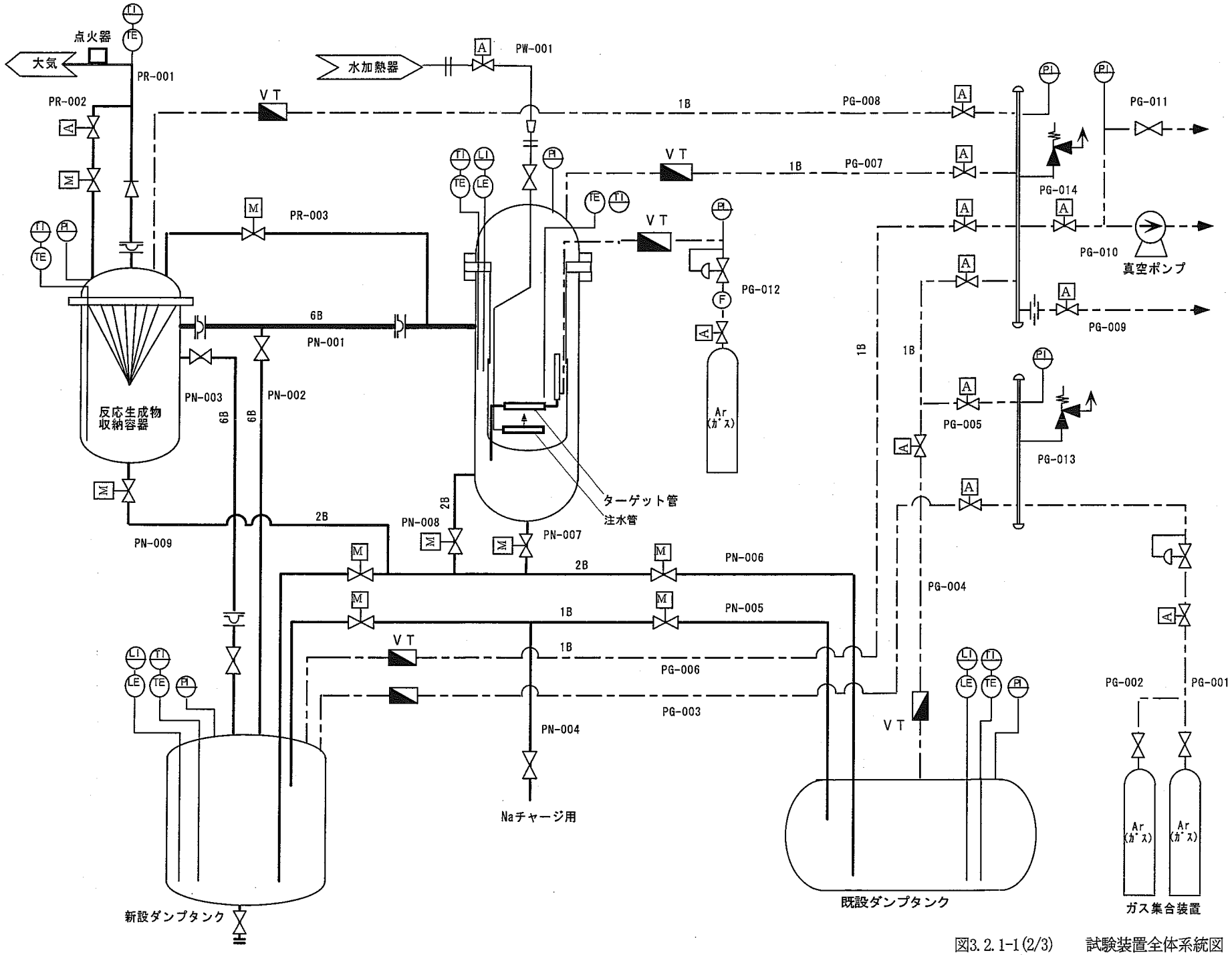


図3.2.1-1(2/3)　試験装置全体系統図（配管番号）

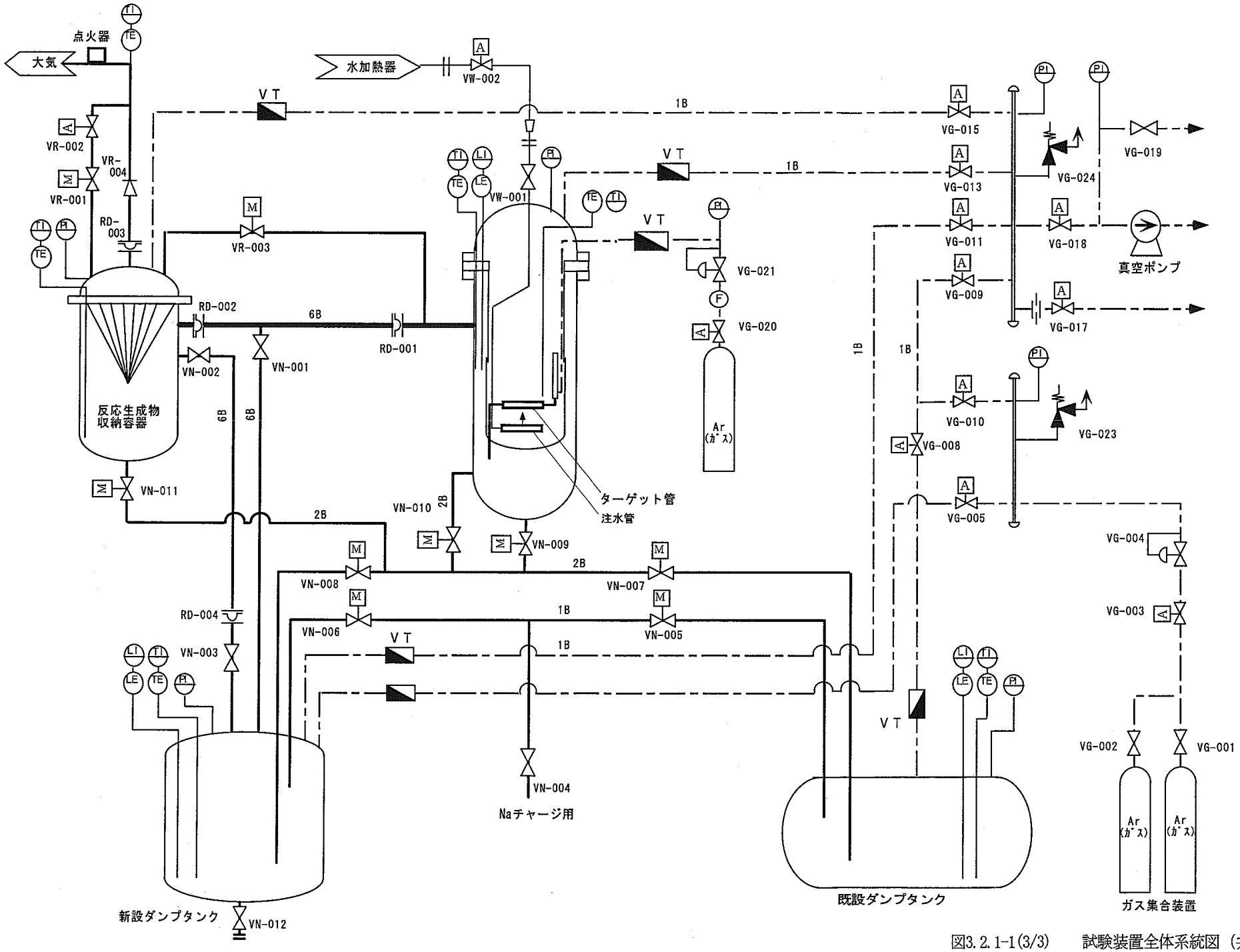


図3.2.1-1(3/3)　試験装置全体系統図（弁番号）

表3.2.1-1　配管リスト記号

内部流体		配管材質		保温材		予熱ヒータ	
Ｎａ	ナトリウム	ＣＳ	炭素鋼	○	有	○	有
	（反応生成物含）	ＳＳ	ステンレス鋼	×	無	×	無
Ａｒ	アルゴンガス	ＣＭ	クロムモリブデン鋼	△	一部予熱有	△	一部予熱有
ＲＰ	反応生成ガス（アルゴンガス含）	ＣＩ	鋳鉄				
Ｗａ	水・蒸気	ＡＬ	アルミニウム				
		ＣＵ	銅				
		ＢＳ	黄銅				
		ＴＩ	チタン				

表3.2.1-2　配管リスト

No.	配管番号	配管名称	内部流体	耐震性 (G)	呼び径 (B)	肉厚 (mm)	材質	最高使用条件 温度 (℃)	最高使用条件 内圧時圧力 (kg/cm²)	最高使用条件 外圧時圧力 (kg/cm²)	保温	予熱ヒータ	配管部ヒータ容量 (kw)	概略配管長 (m)
1	PG-001	ガス集合装置～吸気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
2	PG-002	ガス集合装置バイパス配管	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
3	PG-003	吸気ヘッダ～新設ダンプタンク	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.11	2
4	PG-004	既設ダンプタンク～排気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.11	2
5	PG-005	既設ダンプタンクガス配管分岐点～吸気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	×	×		
6	PG-006	新設ダンプタンク～排気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.11	2
7	PG-007	反応容器～排気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.11	2
8	PG-008	反応生成物収納容器～排気ヘッダ	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.11	2
9	PG-009	排気ヘッダ～大気	Ar	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	×	×		
10	PG-010	真空ポンプ配管	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
11	PG-011	真空破壊弁配管	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
12	PG-012	気泡ポンプ用ガス供給配管	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	△	×		
13	PG-013	吸気ヘッダ～安全弁	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
14	PG-014	排気ヘッダ～安全弁	Ar	0.3	1	3.2	SS	150	10	1	×	×		
15	PW-001	水加熱器～反応容器	Wa	0.3	3/2	7.1	CM	450	220	1	○	○	(0.12)*1	4.0
16	PN-001	反応容器～反応生成物収納容器	Na	0.3	6	5	SS	550	30	1	○	○	9.68	14.3
17	PN-002	反応生成物放出配管分岐点～新設ダンプタンク	Na	0.3	6	5	SS	550	30	1	○	○	3.91	5.2
18	PN-003	反応生成物収納容器～新設ダンプタンク	Na	0.3	6	5	SS	550	10	1	○	○	12.45	17.1
19	PN-004	Ｎａチャージ用配管	Na	0.3	2	3.8	SS	550	10	1	○	○	0.50	1.6
20	PN-005	既設ダンプタンク～新設ダンプタンク（Ｎａチャージ用）	Na	0.3	2	3.8	SS	550	10	1	○	○	1.05	3.6
21	PN-006	既設ダンプタンク～新設ダンプタンク（反応容器内Ｎａ汲上排出用）	Na	0.3	2	3.8	SS	550	10	1	○	○	1.00	3.2
22	PN-007	反応容器～ダンプタンク連通管分岐点	Na	0.3	2	3.8	SS	550	30	1	○	○	0.86	4.9
23	PN-008	反応容器～ダンプタンク連通管分岐点バイパス配管	Na	0.3	2	3.8	SS	550	30	1	○	○	0.89	5.2
24	PN-009	反応生成物収納容器～ダンプタンク連通管分岐点	Na	0.3	2	3.8	SS	550	10	1	○	○	1.70	12.6
25	PR-001	反応生成物収納容器～放出系配管	RP	0.3	6	5	SS	550	10	1	△	△	3.82	2
26	PR-002	反応生成物収納容器～放出系配管バイパス配管	RP	0.3	1	3.2	SS	550	10	1	△	△	0.44	2
27	PR-003	反応容器～反応生成物収納容器バイパス配管	RP	0.3	1	3.2	SS	550	30	1	○	○	0.94	14.3
											ヒータ合計		37.9 KW	

＊1（ ）内は400℃の温度保持に必要な容量を示す

表3.2.1-3　弁リスト記号

型式		操作方法		遠隔操作		シール方法		流れ方向		内部流体		弁箱材質	
A	アングル弁	DA	空気作動（ダイヤフラム式）	○	有	BS	ベローズシール	→	正	Na	ナトリウム（反応生成物含）	CS	炭素鋼
BA	ボール弁	HA	手動	×	無	FS	フリーズシール	←	逆			SS	ステンレス鋼
BU	バタフライ弁	HY	油圧作動			GS	グランドシール					CM	クロムモリブデン鋼
C	逆止弁	M	モータ作動							Ar	アルゴンガス	CI	鋳鉄
D	ダイヤフラム弁	PI	空気作動（ピストン式）							RP	反応生成ガス（アルゴンガス含）	AL	アルミニウム
F	フロート弁	PO	空気作動（ポジショナ付）									CU	銅
GA	仕切弁	SD	自力式									BS	黄銅
GL	玉型弁	SO	電磁作動			電源種別				N2	窒素	TI	チタン
N	ニードル弁					0	不要			He	ヘリウム		
R	減圧弁					1	要			Fr	フレオン		
SA	安全弁									Oi	油		
3W	三方弁									Re	樹脂		
4W	四方弁									Ch	薬液		
FD	防火ダンパ									Ai	空気		
GD	逆止弁									Wa	水・蒸気		
VD	風量設定又ハ調整ダンパ												

表3.2.1-4　弁リスト

No.	弁番号	弁名称	形式	操作方法	遠隔操作	シール方法	電源種別	流れ方向	内部流体	耐震性 (G)	呼び径 (B)	弁箱材質	最高使用条件 温度 (℃)	最高使用条件 内圧時圧力 (kg/cm²)	最高使用条件 外圧時圧力 (kg/cm²)	備考
1	VG-001	ガス供給元弁	GL	HA	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
2	VG-002	ガス供給元バイパス弁	GL	HA	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
3	VG-003	ガス供給弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
4	VG-004	ガス調節弁	R	SD	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
5	VG-005	新設ダンプタンクガス吸気配管入口弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
6	VG-008	既設ダンプタンクガス系隔離弁	GL	DA	○	GS	1	—	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
7	VG-009	既設ダンプタンクガス排気弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
8	VG-010	既設ダンプタンクガス吸気弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
9	VG-011	新設ダンプタンクガス排気弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
10	VG-013	反応容器ガス吸排気弁	GL	DA	○	GS	1	—	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
11	VG-015	反応生成物収納容器ガス吸排気弁	GL	DA	○	GS	1	—	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
12	VG-017	大気開放弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	550	10	1	
13	VG-018	真空ポンプ入口弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
14	VG-019	真空破壊弁	GL	HA	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
15	VG-020	気泡ポンプ用ガス供給弁	GL	DA	○	GS	1	→	Ar	0.3	1	SS	150	30	1	
16	VG-021	気泡ポンプ用ガス調節弁	R	SD	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
17	VG-023	吸気ヘッダ用安全弁	SA	SD	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
18	VG-024	排気ヘッダ用安全弁	SA	SD	×	GS	0	→	Ar	0.3	1	SS	150	10	1	
19	VW-001	反応容器－給水系隔離弁	GL	HA	×	GS	0	→	Wa	0.3	1	CM	450	220	1	
20	VW-002	反応容器給水入口弁	GL	DA	○	GS	0	→	Wa	0.3	3/2	CM	450	220	1	
21	VN-001	反応容器反応生成物収納容器連通管Ｎａドレン弁	GL	HA	×	BS	0	→	Na	0.3	6	SS	550	30	1	
22	VN-002	反応生成物収納容器新設ダンプタンク連通管入口元弁	GL	HA	×	BS	0	→	Na	0.3	6	SS	550	10	1	
23	VN-003	反応生成物収納容器新設ダンプタンク連通管入口弁	GL	HA	×	BS	0	→	Na	0.3	6	SS	550	10	1	
24	VN-004	Ｎａ供給弁	GL	HA	×	BS	0	→	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
25	VN-005	既設ダンプタンクＮａ供給弁	GL	M	○	BS	1	—	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
26	VN-006	新設ダンプタンクＮａ供給弁	GL	M	○	BS	1	—	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
27	VN-007	反応容器既設ダンプタンク連通管隔離弁	GL	M	○	BS	1	—	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
28	VN-008	反応容器新設ダンプタンク連通管隔離弁	GL	M	○	BS	1	—	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
29	VN-009	反応容器Ｎａ充填ドレン弁	GL	M	○	BS	1	—	Na	0.3	2	SS	550	30	1	
30	VN-010	反応容器Ｎａ充填バイパスドレン弁	GL	M	○	BS	1	→	Na	0.3	2	SS	550	30	1	
31	VN-011	反応生成物収納容器Ｎａドレン弁	GL	M	○	BS	1	→	Na	0.3	2	SS	550	30	1	
32	VN-012	新設ダンプタンクＮａドレン弁	GL	HA	×	BS	1	→	Na	0.3	2	SS	550	10	1	
33	VR-001	反応生成物放出配管バイパス出口元弁	GL	M	○	BS	1	→	RP	0.3	2	SS	550	10	1	
34	VR-002	反応生成物放出配管バイパス出口弁	GL	DA	○	GS	1	→	RP	0.3	2	SS	550	10	1	
35	VR-003	反応容器反応生成物収納容器バイパス止め弁	GL	M	○	BS	1	—	RP	0.3	2	SS	550	30	1	
36	VR-004	反応生成物放出配管逆止弁	GD	SD	×	GS	0	→	RP	0.3	2	SS	550	10	1	

3.2.2　主要機器の設計

(1)　反応容器

a.　注水部

実機条件下において反応ジェットによる隣接伝熱管ラプチャの熱的影響を確認できるように、リークジェットをターゲット管群に衝突させ管壁温度分布及び熱伝達率を測定できるような注水部（注水管）とする。

試験体構造概念を図 3.2.2-1 に示す。熱伝達率測定用ターゲット管には内部にナトリウムを流動させ、冷却機能を持たせるものとし、注水管注水部ノズル口径をパラメータとして、ターゲット管及び周囲の管（ダミー管）周りの温度を測定するものとする。

試験体の管配列は、ターゲット管を中心に置き前後１列／上下２段として、３列×５段のヘリカルコイル部分モデルとなる構造とした。また、管ピッチは実機管束部の軸方向 50mm／径方向 50mm に合わせた。

試験体管軸方向長さは、反応容器内に収納可能な範囲で出来るだけ長くするものとし、250mm に設定した。

図 3.2.2-2 に注水管構造(案)を示す。

試験時には、水加熱器より送られた水が注水管中央に設置されたラプチャ板を割って反応容器内に注水される構造になっている。

b.　ターゲット管及びダミー管

ターゲット管は、内部流体による冷却機能を持たせる。

ここで、冷却材として考えられるナトリウム，蒸気，ガスについて、それぞれの除熱性能を比較した例を表 3.2.2-1 に示す。また、各冷却材の出入口温度差と流量及び流速の関係をグラフ化したものを図 3.2.2-3(1/3)～(3/3)に示す。これらの結果から、試験条件（流量/流速、圧力）として現実的なナトリウムが、最も冷却材として妥当であることが分かる。

次に、ターゲット管内冷却材のナトリウムを駆動する方式について考えられる概念の比較を行ったものを表 3.2.2-2 に示す。安定した駆動及び流量を把握する点では、電磁ポンプによる駆動方式が有効であると考えられるが、設備の簡素化・メンテナンス性の点から、気泡ポンプによる駆動方式を採用する。気泡ポンプを採用するにあたっては、供給ガス量，駆動能力，流量測定精度等について、要素試験による確認が必要と考えられる。

図 3.2.2-4 にターゲット管の温度計測用熱電対取付け位置(案)を示す。管表面の熱電対(図

中の○印で示したもの)は、管表面温度測定用と管表面近傍流体温度測定用を重ならないように取り付けるものとし、肉厚方向の計測点を含め合計で３２点の温度計測を行う。

注水管からのリークジェットの影響が及ぶと考えられる隣接管周りの温度計測点について、図 3.2.2-5 に示す。実機条件下において反応ジェットによる隣接伝熱管への熱的影響を確認できるよう、注水管及びターゲット管の外径及びピッチを実機伝熱管と同等とした。また、ダミー管への熱電対取付けイメージを図 3.2.2-6 に示す。注水管及びターゲット管の配置は、試験条件によって異なり、図は一案を示したものである。試験体全体での温度計測点が多いため、熱電対は管内を通して支持板の外へまとめる構造とした。なお、熱電対の管内への引き込み孔は、試験時のジェットによる流れに影響が生じないよう、注水管方向の反対側に設けるものとする。

c. 反応容器内構造

反応容器内構造概念を図 3.2.2-7 に示す。

反応容器内部構造物としては、まず、試験時の衝撃・熱を直接容器に与えることを防ぐシュラウドが容器胴上部にフランジで固定される。シュラウド下部には、ナトリウムドレン用ノズルを設けている。

容器上部フランジに取り付けられる鏡部には、中央の注水管用ノズルから試験体ユニットの位置までセンターパイプが設けられ、下端に注水部試験体ユニットが取り付けらる構造となっており、気泡ポンプユニットとともに一体で引き抜き可能な構造とした。

気泡ポンプユニットには、流量計測（参考計測）のための液位測定管が取り付けられる。（液位計は接点式のものを想定）

d. 反応容器構造

反応容器構造図を図 3.2.2-8 に示す。

(2) 反応生成物収納容器

収納容器の容量は、反応容器内の注水管より上のナトリウムが全量放出した場合にも収納可能な容量とし、これにカバーガス容量及び余裕を見込んで、800 リットル程度とする。

図 3.2.2-9 に反応生成物収納容器構造図を示す。

(3) ダンプタンク

ダンプタンクは、既設流用及び新設の合計２基とする。

新設ダンプタンクの容量は、上述の収納容器ナトリウム容量以上を確保することとし、下記ナトリウム容量及びカバーガス容量を考慮して 0.9m³ とした。

・反応容器ナトリウム容量　　：0.5m³

・配管内ナトリウム容量　　：0.05m³

・ダンプタンク内ナトリウム残量：0.15m³

・カバーガス容量（余裕含む）　：0.2m³

図 3.2.2-10 にダンプタンク（新設）概念図を示す。

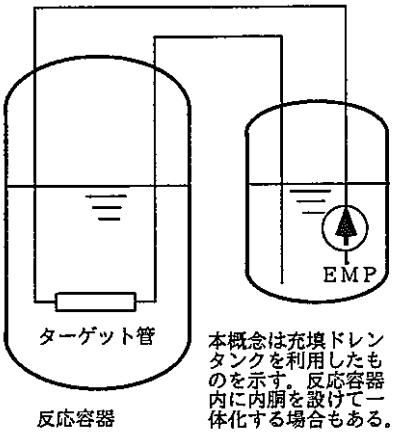
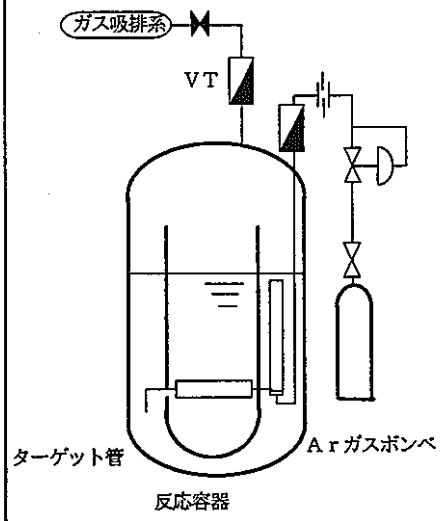
(4) 水加熱器

注水管への水供給用の水加熱器は、別設備のものを流用するものとする。

表3.2.2-1　ターゲット管の冷却材の除熱性能の比較例

項　　目	単位	Ｎａ冷却	蒸気冷却	ガス冷却
伝熱管　材質	—	Mod.9Cr-1Mo	Mod.9Cr-1Mo	Mod.9Cr-1Mo
口径	m	0.0318	0.0318	0.0318
肉厚	m	0.01	0.01	0.01
内径	m	0.0118	0.0118	0.0118
長さ	m	0.25	0.25	0.25
伝熱面積	m^2	0.0250	0.0250	0.0250
熱伝導率	kcal/mh℃	25	25	25
伝熱管内外面温度差	℃	60	60	60
1／管熱抵抗	kcal/mh℃	1586	1586	1586
除熱量	kcal/h	2376.7	2376.7	2376.7
熱流束	$kcal/m^2h$	95161.2	95161.2	95161.2
管内冷却用流体	—	ナトリウム	飽和蒸気	窒素ガス
温度	℃	350	350	350
圧力	kg/cm^2	—	167.6	10
比重量	kg/m^3	868.2	113.6	5.8
比熱	kcal/kg℃	0.308	1.7	0.26
出入口温度差	℃	10	10	50
必要流量	kg/h	771.7	139.8	182.8
	l/min	14.8	20.5	522.0
管内流速	m/s	2.26	3.13	79.55

表 3.2.2−2　ナトリウム駆動方式の比較

項目	電磁ポンプ	気泡ポンプ
概　念		
構成機器	①電磁ポンプ ②Ｎａ充填ドレンタンク ③カバーガス系 ④ＥＭＰ冷却系	①ベーパトラップ ②ガス吸排系
得失比較		
制御性／駆動力	①反応容器内Ｎａと冷却Ｎａが分離され、ＥＭＰ駆動なので安定に所定流量流すことができる。	①Ｎａ－水反応時圧力により噴出ガス体積が変わり駆動力が変化する可能性があるが、その影響は小さいと推定される。流量測定が難しい。
健全性	①容器内の冷却管に外圧がかかるが、適切に肉厚を設定することで問題なし。ＥＭＰには試験時発生圧力はかからない。	①吸気側圧力をＮａ－水反応時発生圧力より高くして逆流を防止するためにバブラー部での差圧を大きくとる必要有り。
ﾒﾝﾃﾅﾝｽ性	①ＥＭＰ健全性の点から反応生成物が混入しない系統とする必要あり。 ②ＥＭＰ冷却用ブロワの保守要	①動的機器がないことからﾒﾝﾃﾅﾝｽは、循環ガス(Ar)の補充、ベーパトラップメッシュ交換等の消耗品補充のみ。
物量	Ｎａ系設備の増加による漏洩検出設備の増大、ＥＭＰの冷却系等物量が大きいと考えられる。	簡素な系統であり、物量は小さいと考えられる。
評価	流量制御性は良いが、物量大。動的機器のﾒﾝﾃﾅﾝｽ要。	流量制御は難しいが、簡素なｼｽﾃﾑでﾒﾝﾃﾅﾝｽ性良。

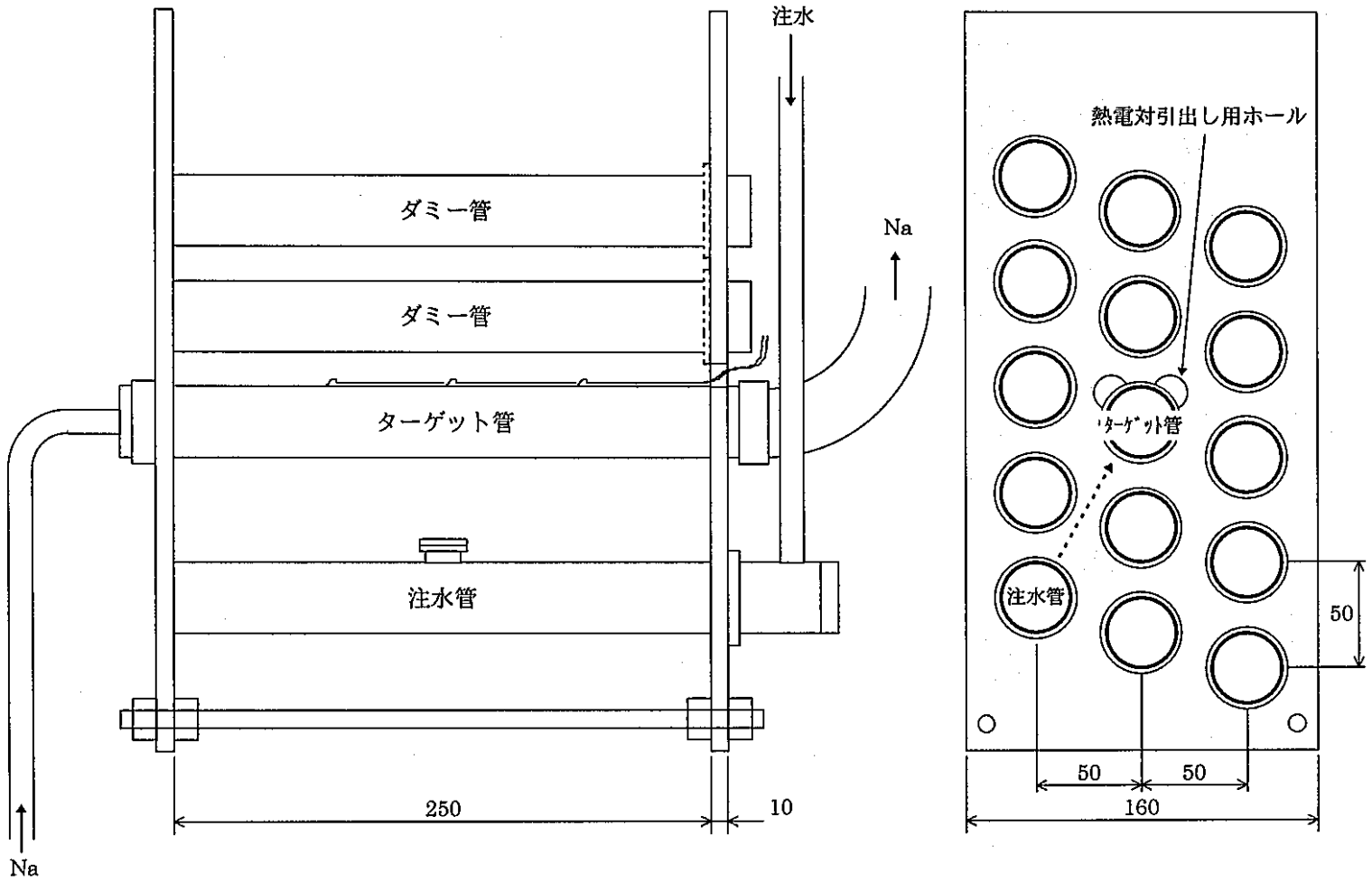
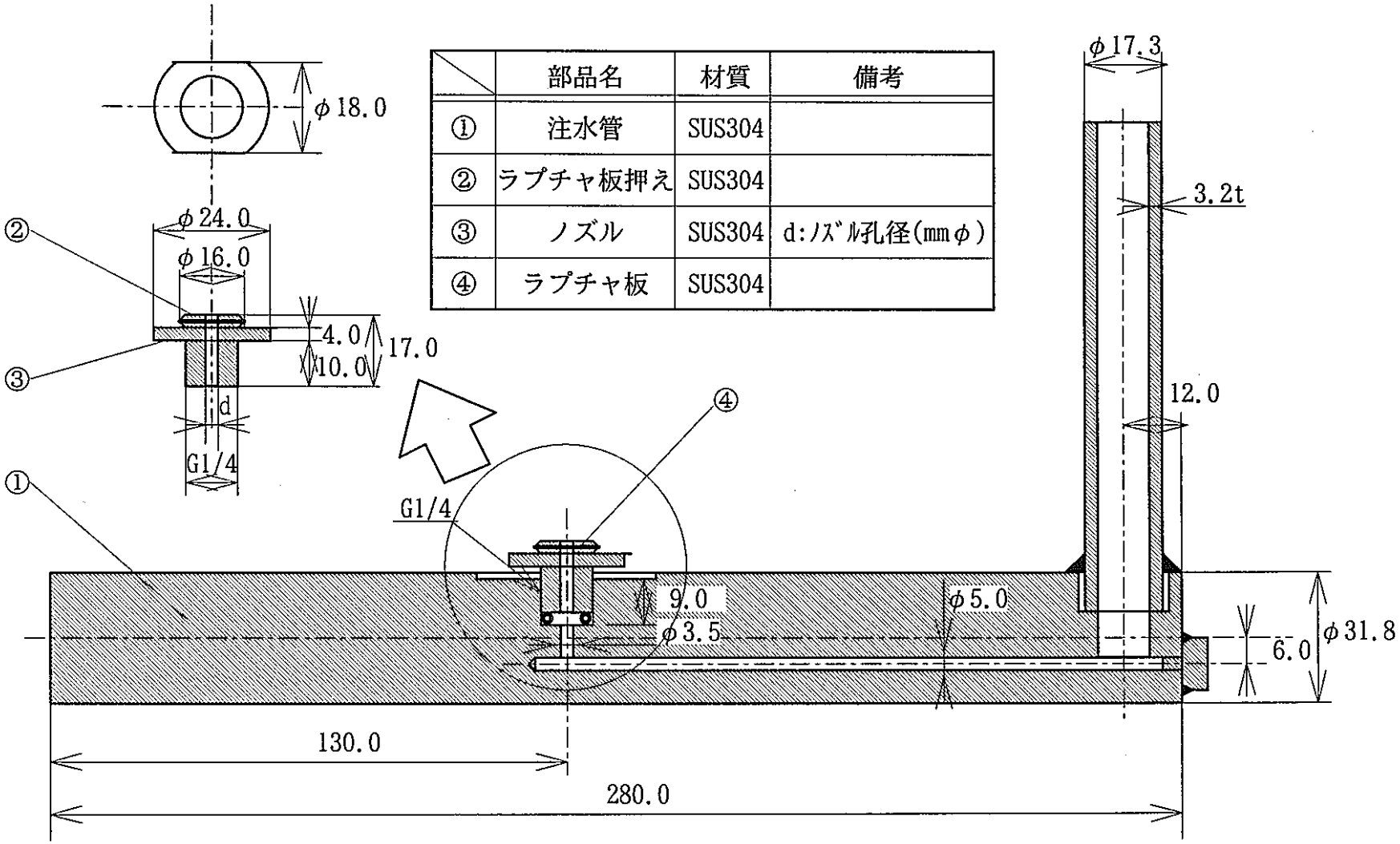


図 3.2.2-1　試験体構造概念（案）



	部品名	材質	備考
①	注水管	SUS304	
②	ラプチャ板押え	SUS304	
③	ノズル	SUS304	d:ﾉｽﾞﾙ孔径(mmφ)
④	ラプチャ板	SUS304	

図3.2.2-2　注水管構造概念(参考図)

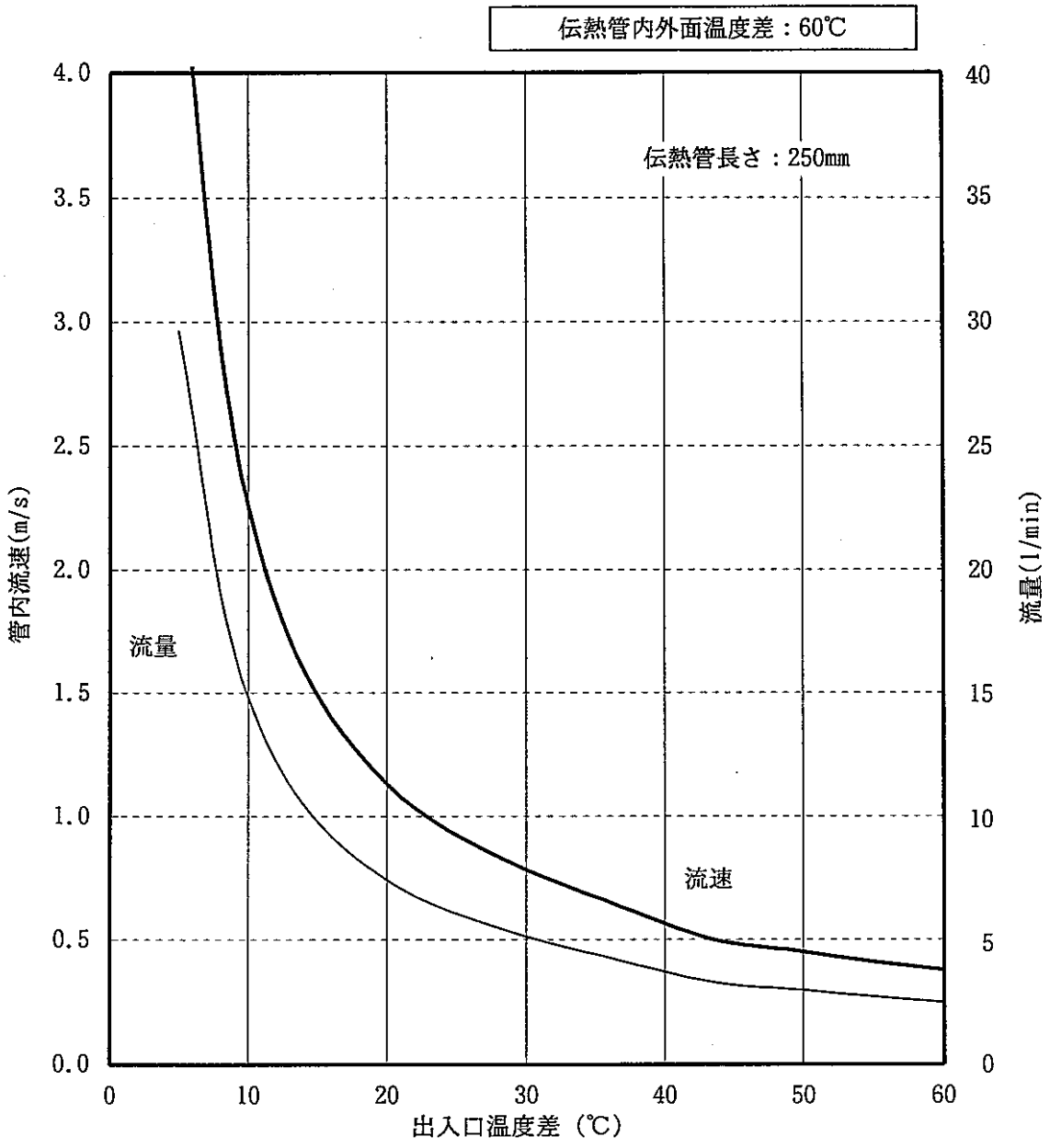


図3.2.2-3(1/3)　ターゲット管内冷却材の出入口温度差と流量
（ナトリウムの場合）

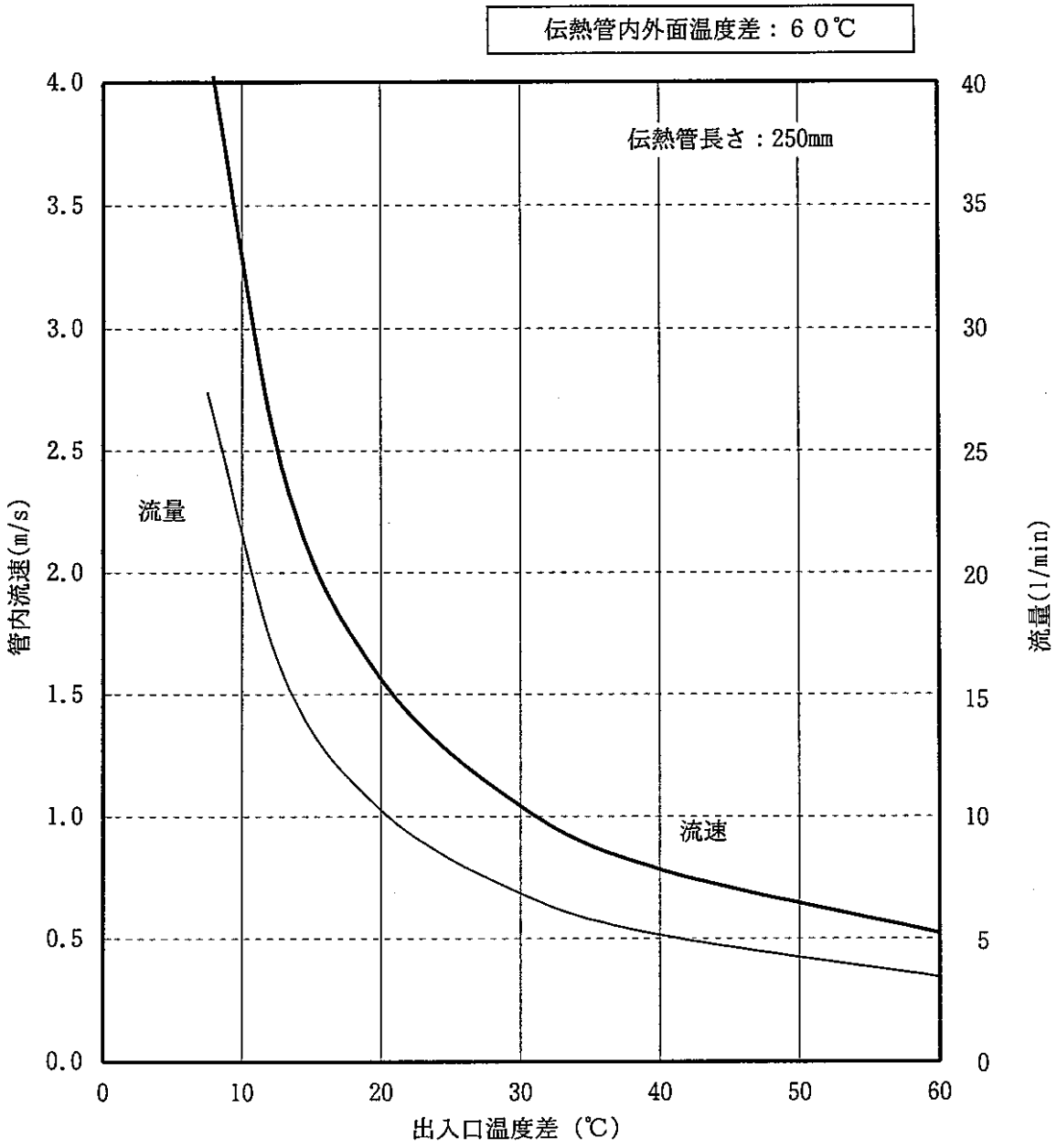


図3.2.2-3(2/3)　ターゲット管内冷却材の出入口温度差と流量
（350℃飽和蒸気の場合）

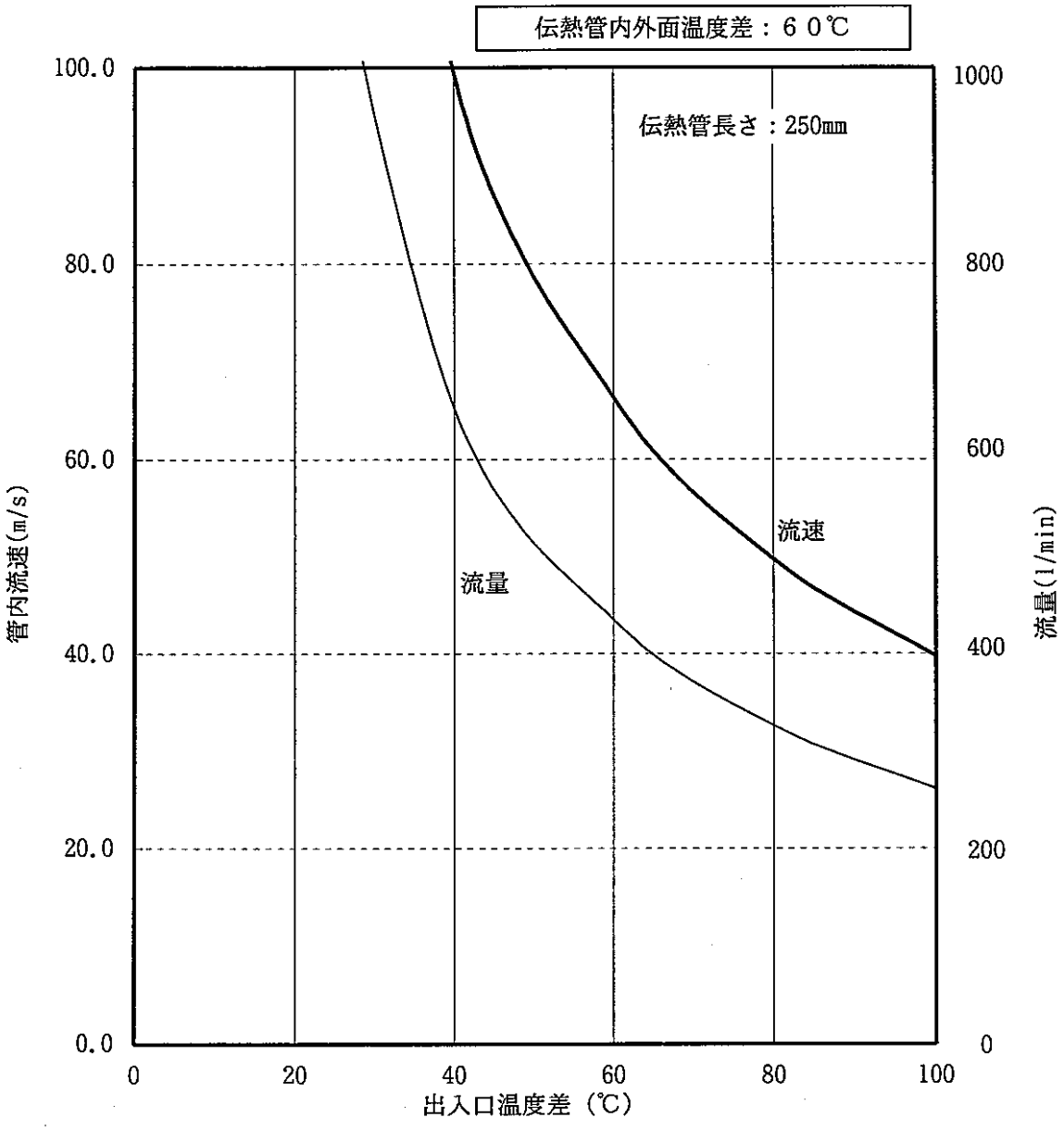


図3.2.2-3(3/3)　ターゲット管内冷却材の出入口温度差と流量
（10kg/cm^{2}窒素ガスの場合）

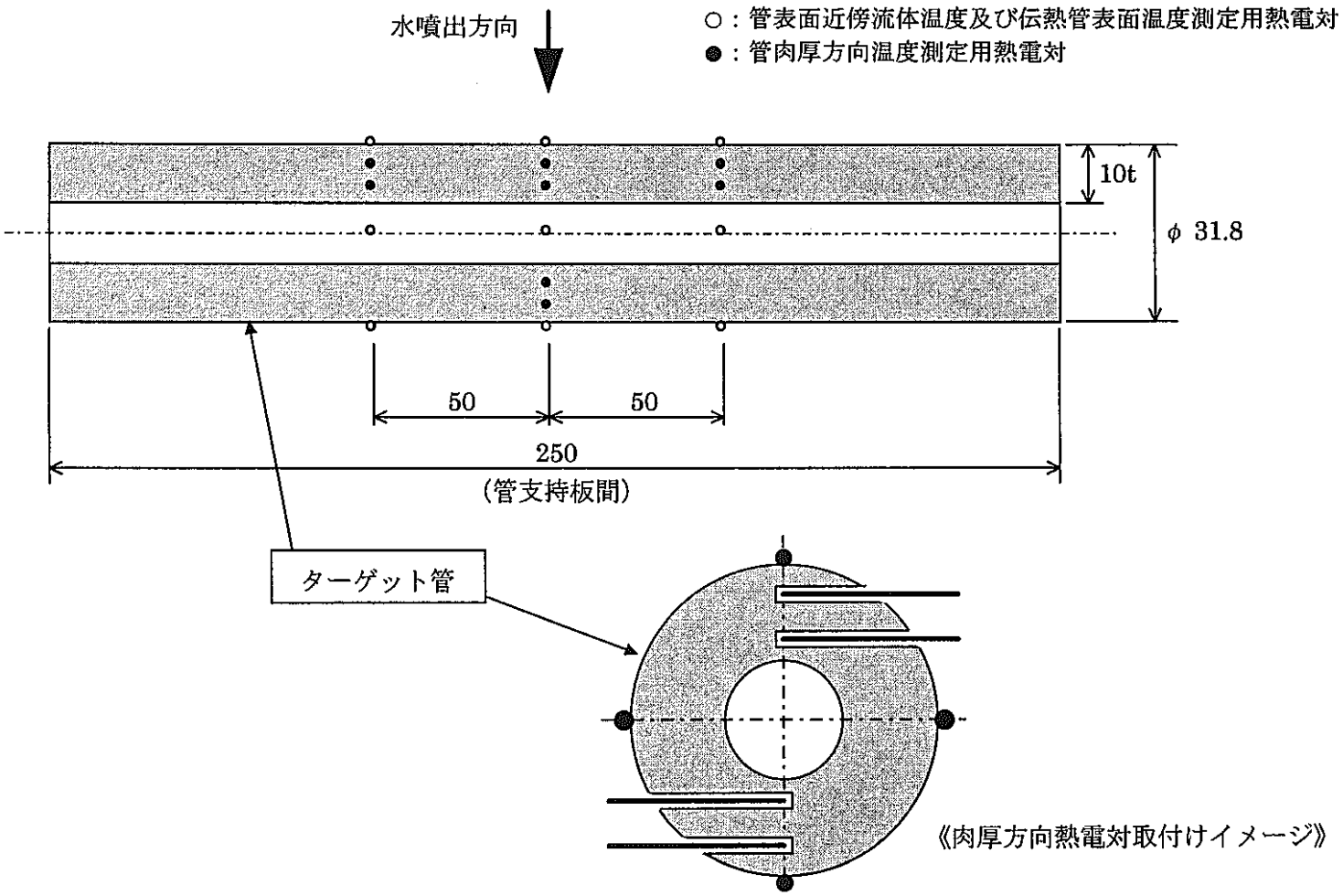
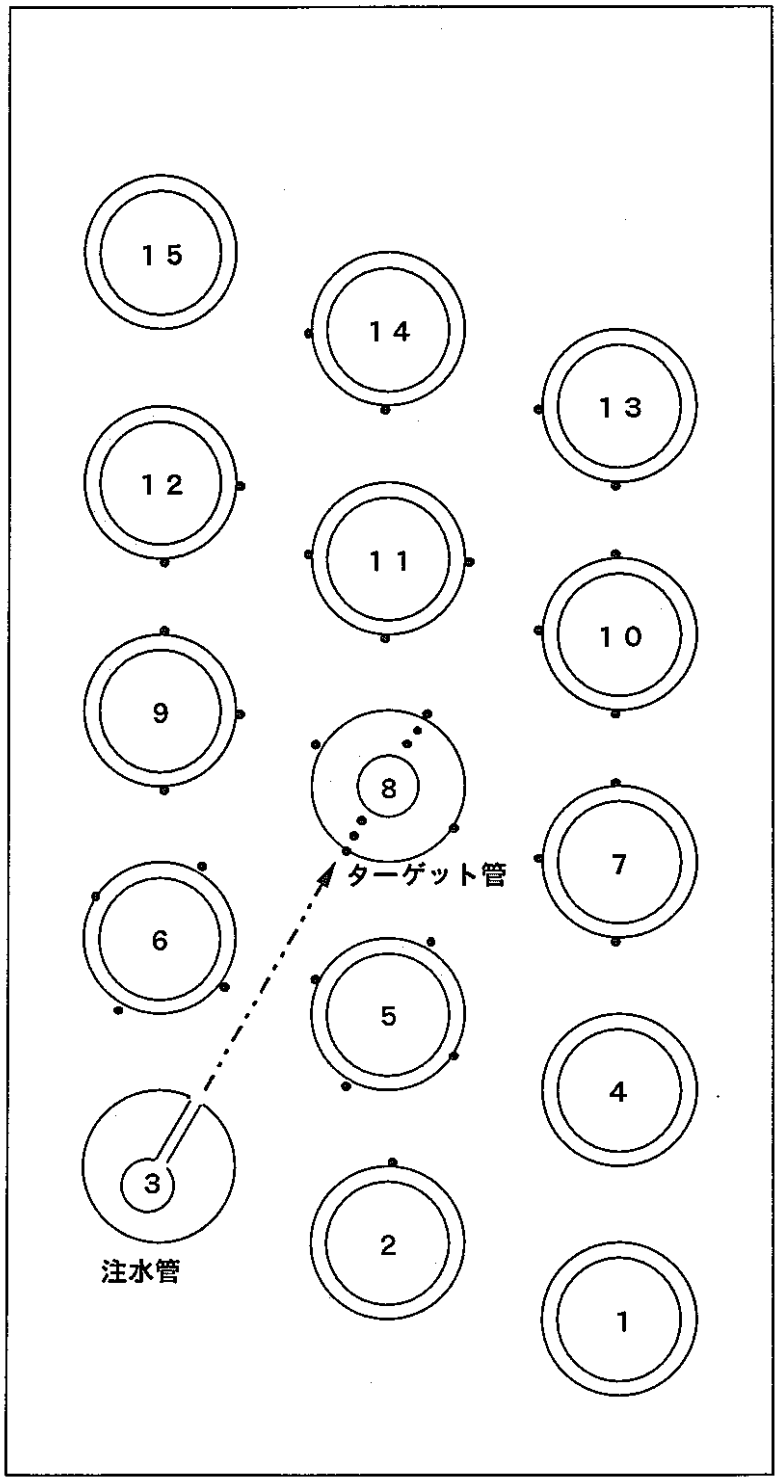


図 3.2.2-4　ターゲット管の熱電対取付け位置（案）



※ターゲット管以外の管(ダミー管)の熱電対取付け位置は、管長手方向の中央部(注水孔位置に対応した位置)に設置。ターゲット管の熱電対取付け位置の詳細は、図 3.2.2-4 参照。

図 3.2.2-5　熱電対取付け位置（案）

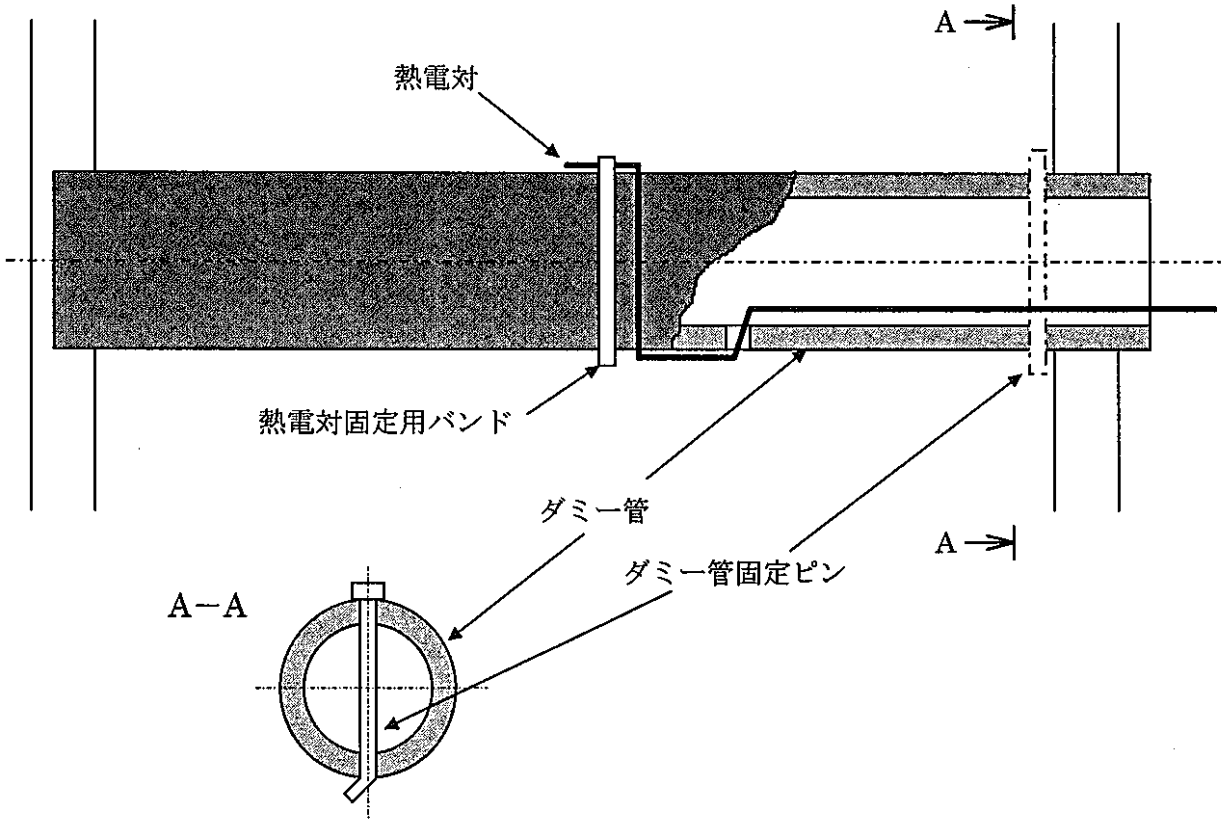


図 3.2.2-6　ダミー管の熱電対取付けイメージ

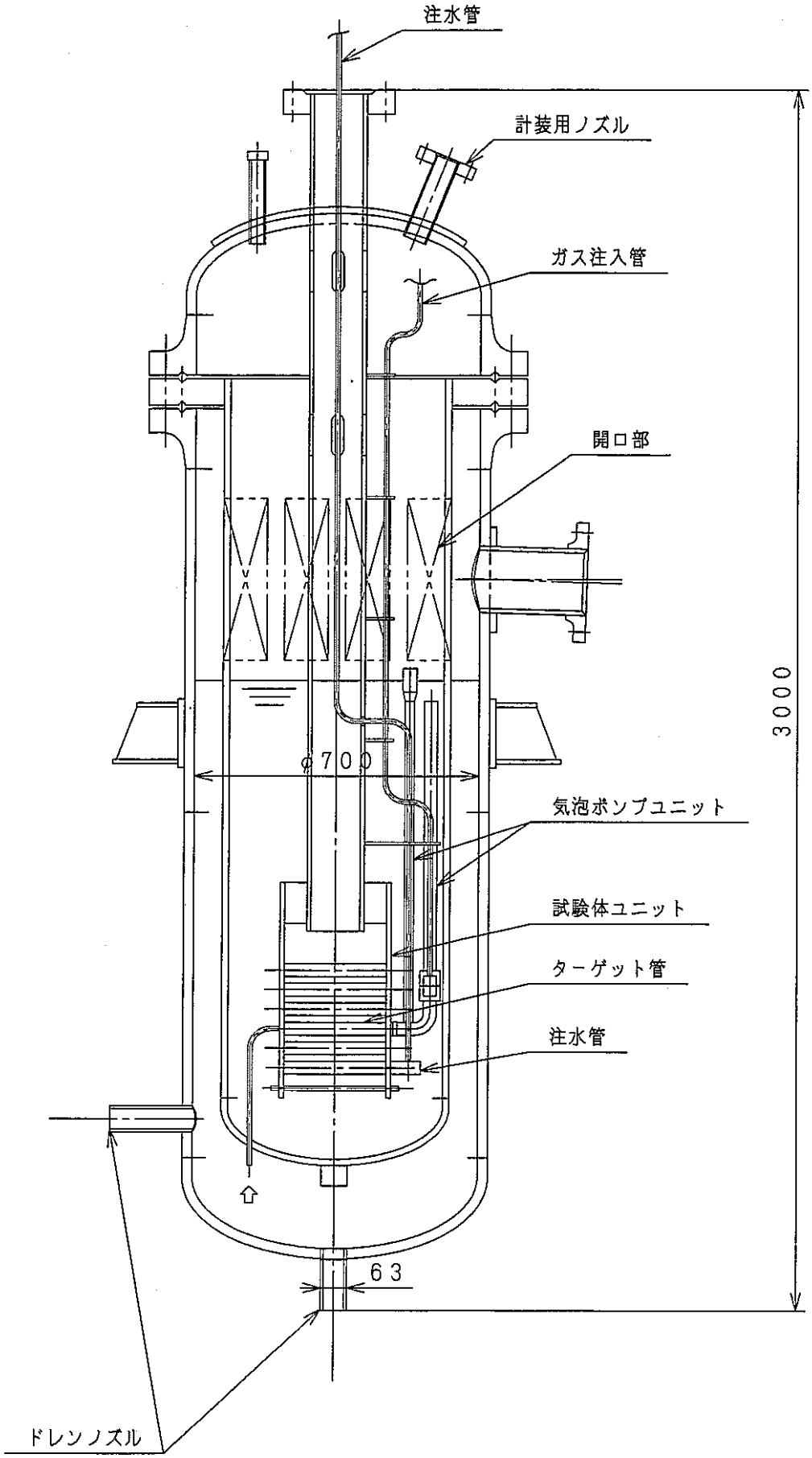
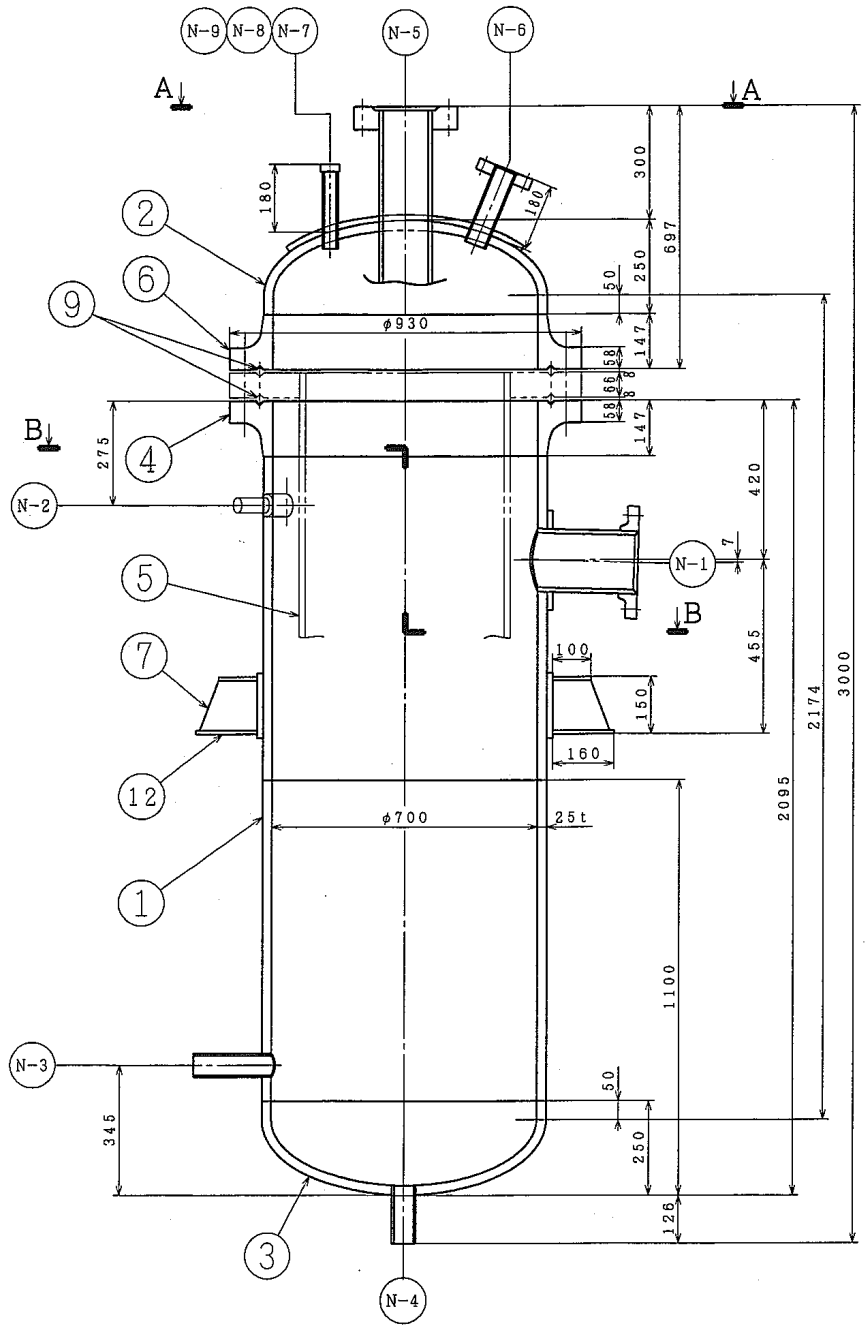
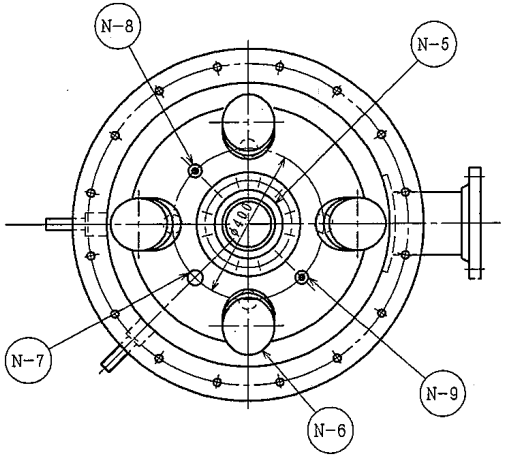


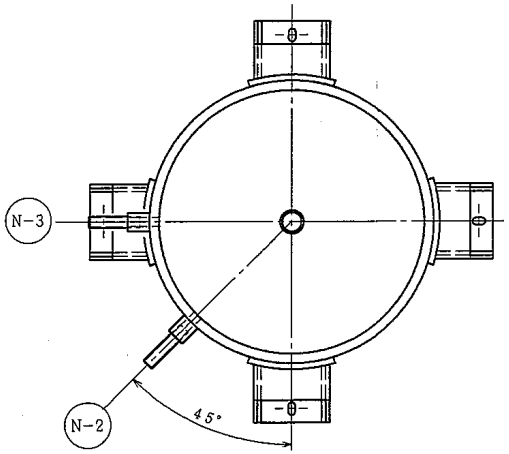
図 3.2.2-7　　反応容器内構造概念



A−A



B−B



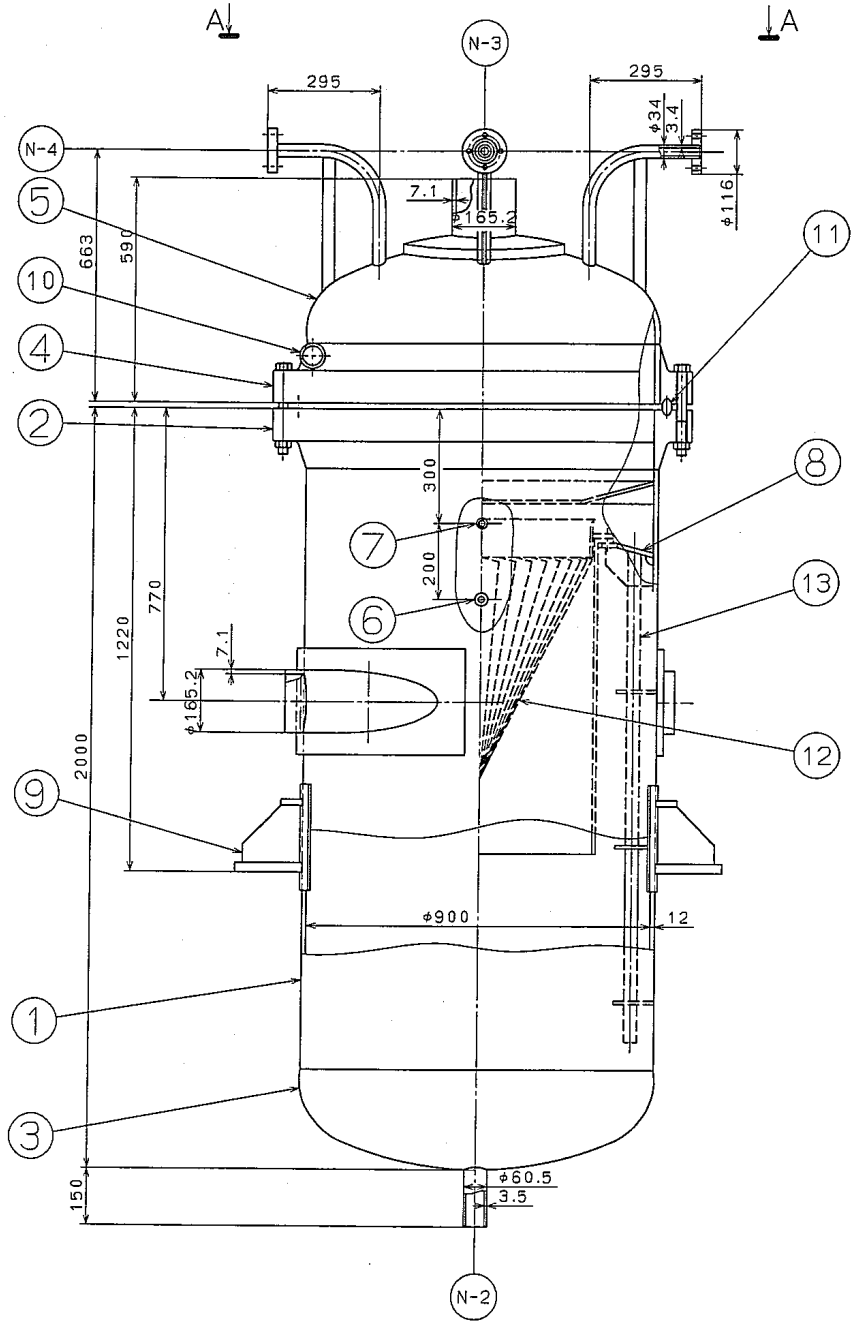
番号	名　称	呼び径	員数	備　考
N-9	ガス注入ノズル	25A	1	
N-8	カバーガス用ノズル	25A	1	
N-7	液面計用ノズル	25A	1	
N-6	計装用ノズル	50A	4	
N-5	注水管用ノズル	125A	1	
N-4	ドレンノズル	50A	1	
N-3	ドレンノズル	50A	1	
N-2	ガス入口ノズル	50A	1	
N-1	放出系ノズル	150A	1	

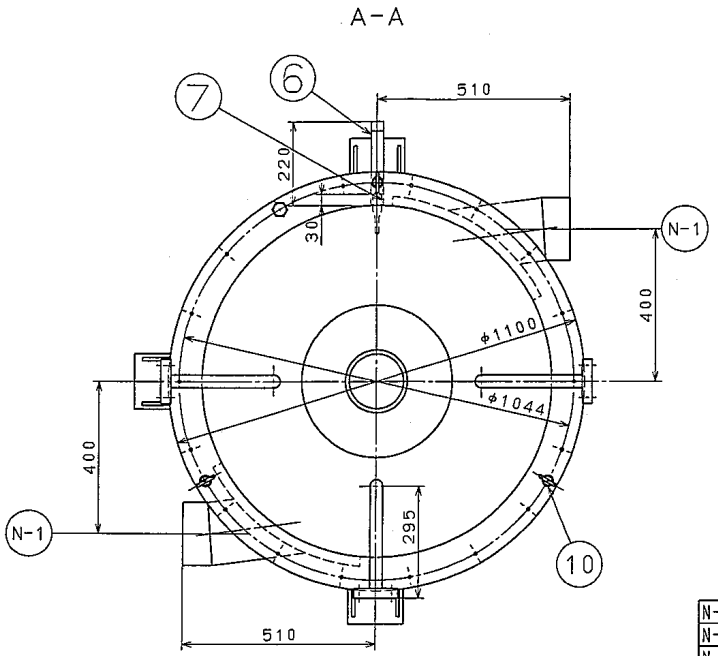
ノズル一覧表

番号	品　名	員数	材　質	備　考
9	ジョイントリング	1式	ステンレス鋼	
8	閉止板	1	SUS304	
7	脚	4	SUS304	
6	鏡板フランジ	1	SUSF304	
5	保護スリーブ	1	SUS304	
4	調体フランジ	1	SUSF304	
3	下部鏡板	1	SUS304	
2	上部鏡板	1	SUS304	
1	調　体	1	SUS304	

図 3.2.2-8　熱伝達率測定試験装置
反応容器構造図

SWAT1





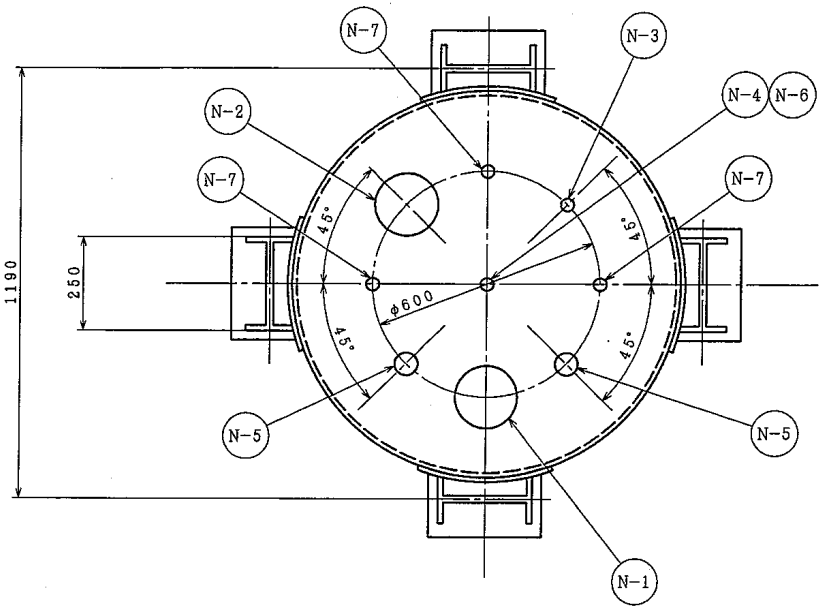
番号	名称	呼び径	員数	備考
N-4	ガス系ノズル	25A	3	
N-3	開放系出口ノズル	150A	1	
N-2	ドレンノズル	50A	1	
N-1	開放系入口ノズル	150A	2	

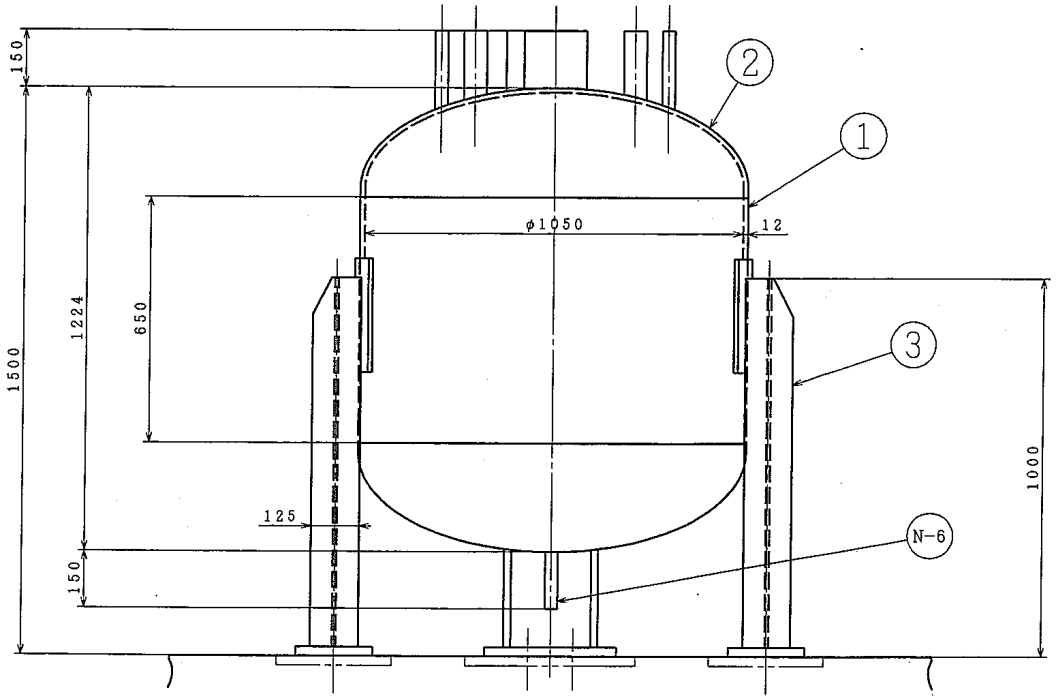
ノズル一覧表

番号	品名	員数	材質	備考
13	オーバフロー管	1	STPT410	
12	サイクロンセパレーター	1	SUS304	
11	リングジョイント	1	ステンレス鋼	
10	吊り金具	3	SR55E	
9	脚	4	SB410	
8	セパレーター用サポート	1	SS400	
7	温度計用座	1	SFA24	
6	圧力計用座	1	STPT410	
5	鏡板	1	SB410	
4	フランジ	1	SF440	
3	鏡板	1	SB410	
2	フランジ	1	SF440	
1	胴体	1	SB410	

図 3.2.2-9　熱伝達率測定試験装置
反応生成物収納容器構造図

TN1





番号	名　称	呼び径	員数	備　考
N-7	計装用ノズル	25A	3	
N-6	Naドレン用ノズル	25A	1	
N-5	ガス系ノズル	50A	2	
N-4	Na移送用ノズル	25A	1	
N-3	Naチャージ用ノズル	25A	1	
N-2	開放系出口ノズル	150A	1	
N-1	開放系入口ノズル	150A	1	

ノズル一覧表

番号	品　名	員数	材　質	備　考
3	脚	4	SB410	
2	鏡　板	2	SUSF304	
1	胴　体	1	SUS304	

図 3.2.2-10　熱伝達率測定試験装置
ダンプタンク概念図

DPTNK

気泡ポンプの検討

1．概要

ターゲット管内をナトリウムで冷却するためには 20ﾘｯﾄﾙ／分程度までの流量を流す必要性がある。このナトリウムの駆動方式として構造・システム簡素化が図れることが期待される気泡ポンプについてその特性を検討する。

2．検討条件

気泡ポンプの検討条件を表1に示す。ここで、検討条件設定のための基本的考え方は下記よる。

(1) 気泡ポンプ特性の評価は下記知見によるものとする。なお、本知見に対して熱伝達率測定試験装置の気泡ポンプでは、扱う流体がナトリウムであることや揚水管長が短いこと等の差があるが、正味の特性については、製作段階にて水試験等を実施して確認されるものとし、ここでは下記文献に報告の手法をそのまま適用するものとする。

「気ほうポンプの揚水特性」；轟 一郎他、日本機会学会論文集、38-312(昭 47)、2085

(2) 気泡ポンプは、ターゲット管の後流側垂直に設置し、気泡ポンプ上端開口はナトリウム中に浸漬させるものとする。

(3) ターゲット管に十分なナトリウムを流入させるため及び気泡注入部取り付け性向上の観点から、気泡ポンプの揚水管径は、ターゲット管より大きくする。本検討では、ターゲット管との接続性、揚水管の配置等を考慮して、1B(管径 34mm）を代表として検討する。

3．検討結果

(1) 図1に、気泡ポンプへの供給ガス量とナトリウム汲み上げ量の関係を示す。ナトリウム汲み上げ量は、供給ガス量が約 10ﾘｯﾄﾙ/分までは急激に立ち上がり、供給ガス量をさらに増やすとわずかに減少していく。ターゲット管内流速は、2.5m/s 程度まで確保されており、また、供給ガス量が約 10ﾘｯﾄﾙ/分以上では、顕著な変化はないことが分かる。

(2) 図2(1/2)及び図2(2/2)は、供給ガス量を一定条件とし、反応容器内圧力が上昇した場合のナトリウム汲み上げ量とターゲット管内流速を示したものである。ナトリウム流速の変化に着目すると、供給ガス量が 60ﾘｯﾄﾙ/分に比して 120ﾘｯﾄﾙ/分の方が変化は少ないが、容器内圧力 30kg/c ㎡までの範囲で、20％程度の差であり、試験へ及ぼす影響も小さいものと期待される。

反応容器内のカバーガス体積を $0.4m^3$ 程度と見込むと、120ﾘｯﾄﾙ/分で 20 秒流すと 40ﾘｯﾄﾙ分増加するので、カバーガス圧力は概ね1割程度上昇することになる。初期カバーガス圧力を微正圧と仮定すれば、圧力は 0.1kg/c ㎡の上昇であり、40 秒ながしても 0.2kg/c ㎡程度の上昇となる。従って、試験開始（注水開始）までに数 10 秒流して、ナトリウム側平衡流量状態まで到達できれば、十分試験条件を達成できるものと考えられる。

表１　　気泡ポンプ検討条件

項　　目	記号	単位	数　　値	備　　考
浸水率	σ	－	1.00	揚水ヘッドはないものとした。
揚水管長さ	L	m	0.70	
外径	Do	m	0.034	
肉厚	t	m	0.0034	
管断面積	F	m^2	5.81E-4	
管摩擦係数	λ10	－	0.018	
指数	z	－	1.75	
導水管の長さ	L'	m	0.50	ターゲット管を含む。
内径	Di'	m	0.0118	ターゲット管と同一とする。
導水管の入口損失係数	ζe	－	0.50	
圧力損失係数１	c1	－	0.47	揚水管の圧力損失係数
圧力損失係数２	c2	－	11.90	導水管の圧力損失係数（揚水管内径基準）
圧力損失係数３	c3	－	≡2(1/f - 1)	ガス注入による管内運動量変化に対応する圧力損失係数（ｆは液体体積率）
ターゲット管内径	Dti	m	0.0118	

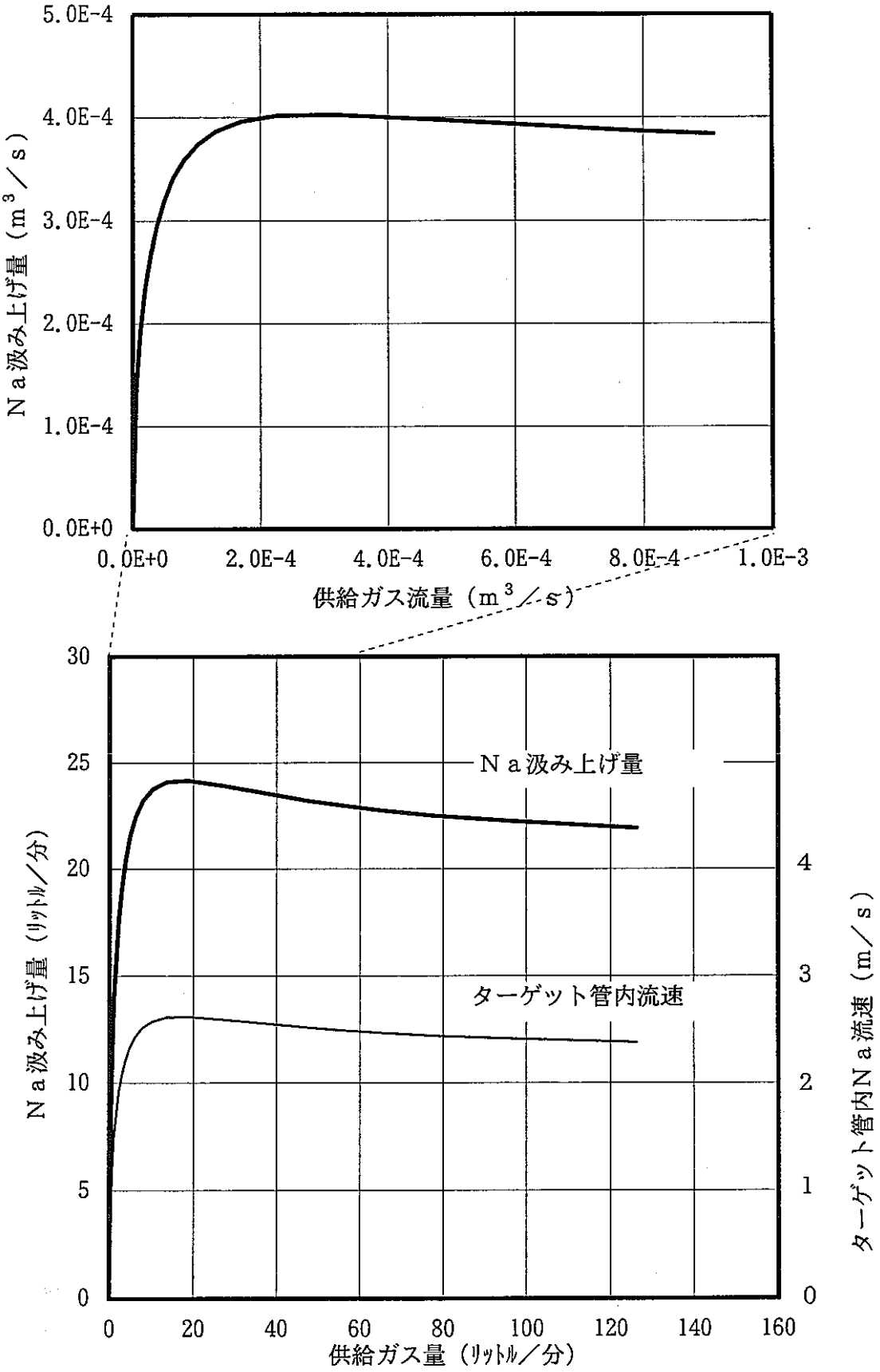


図１　　気泡ポンプの特性予測

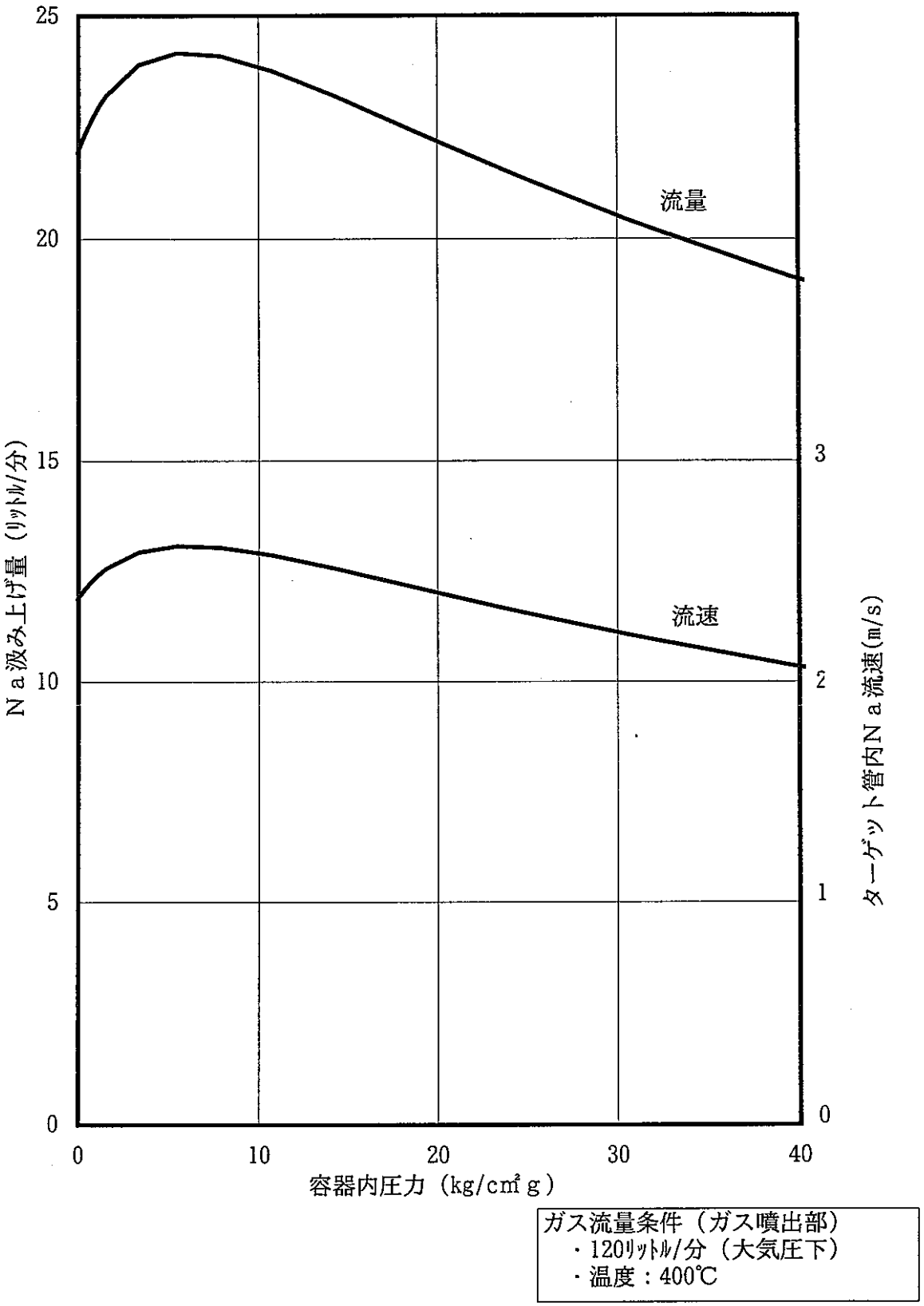
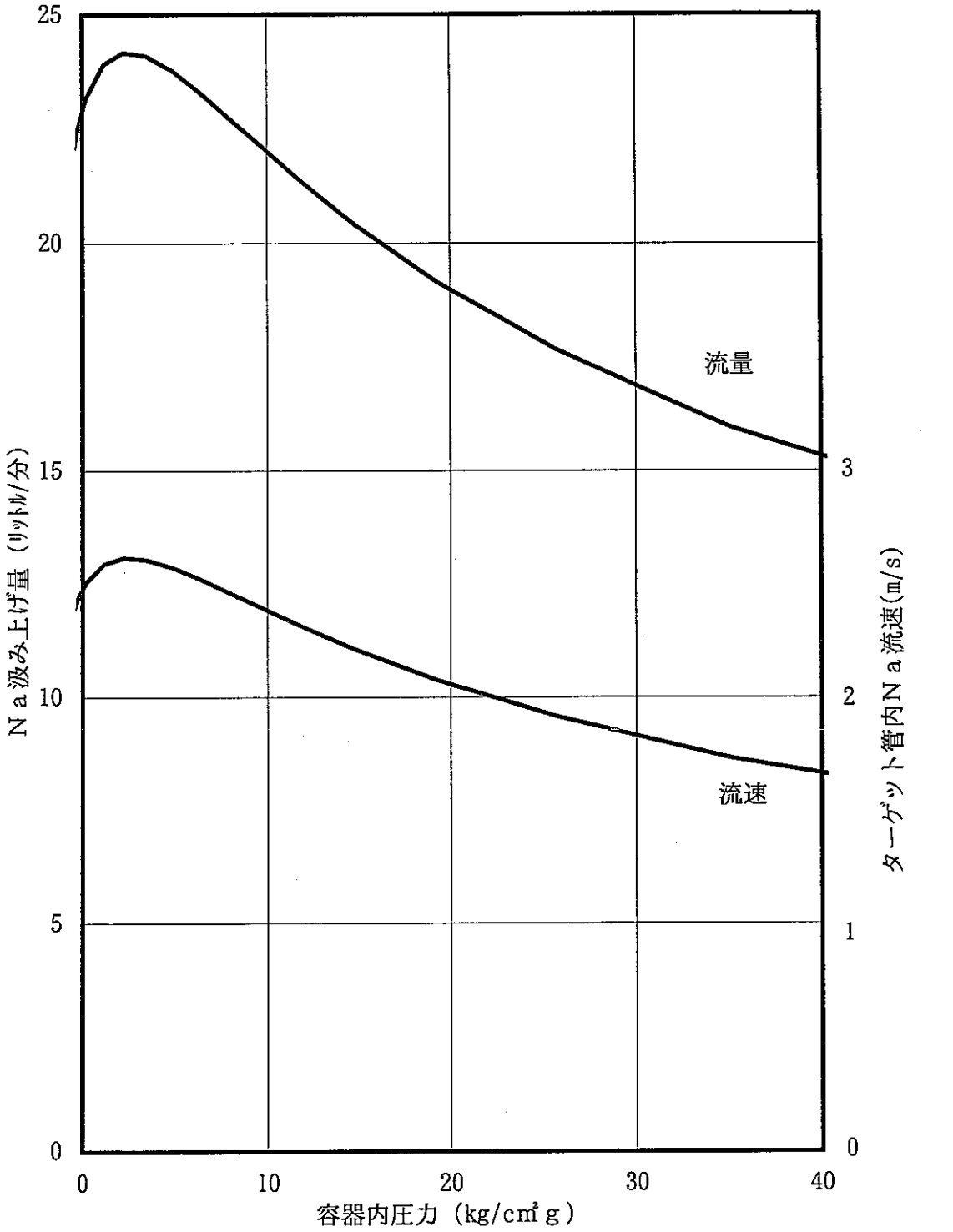
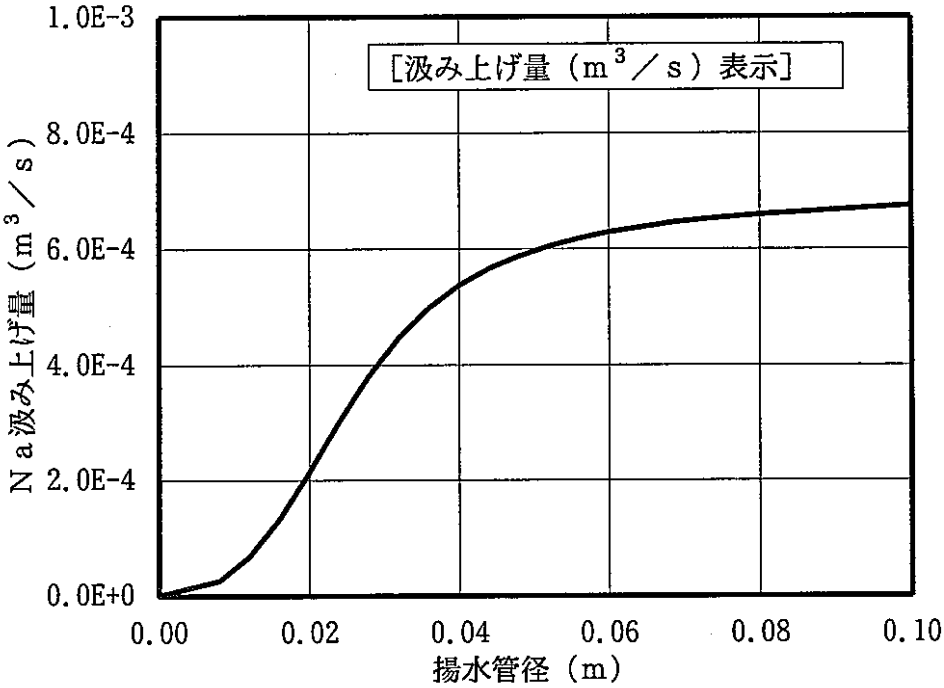


図２　　反応容器内圧力と気泡ポンプ性能(1/2)



ガス流量条件（ガス噴出部）
・60ﾘｯﾄﾙ/分（大気圧下）
・温度：400℃

図２　　反応容器内圧力と気泡ポンプ性能(2/2)



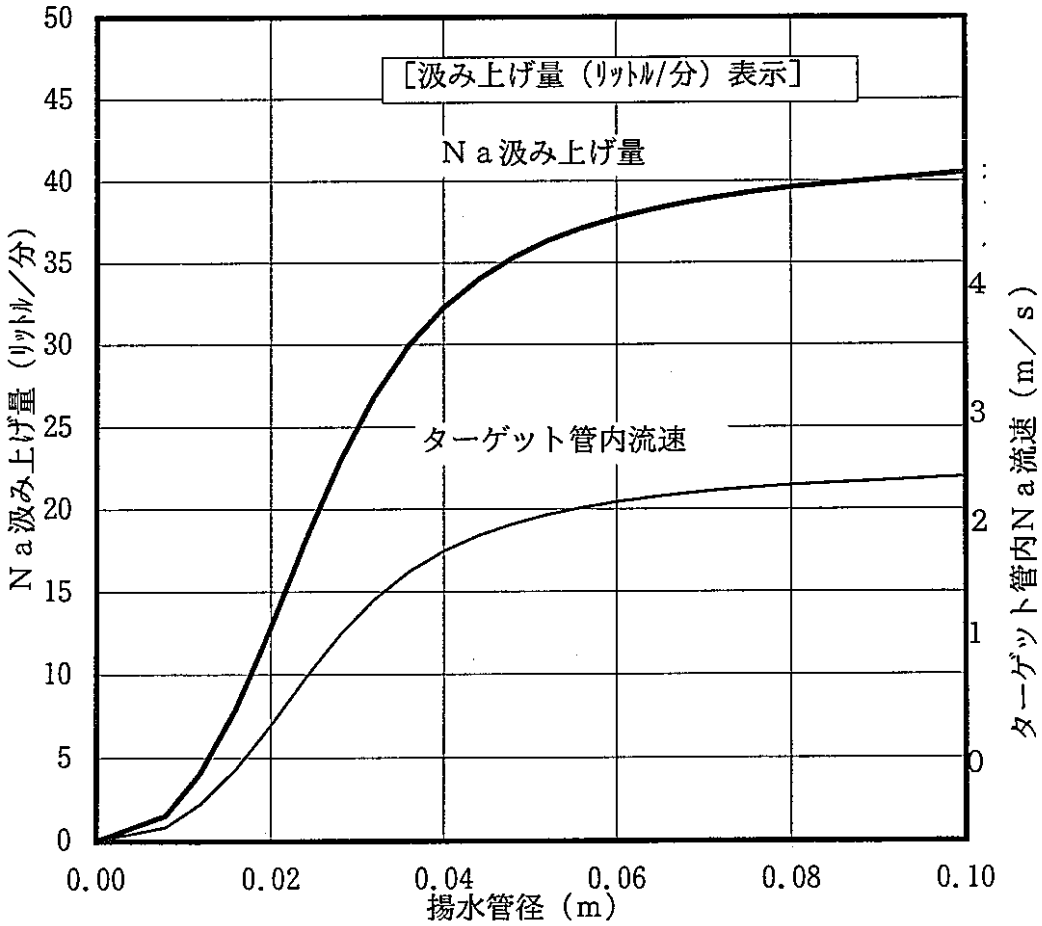


図３　　気泡ポンプの特性予測
（揚水管径とＮａ汲み上げ量の関係）

表２　ターゲット管除熱量測定方式の比較

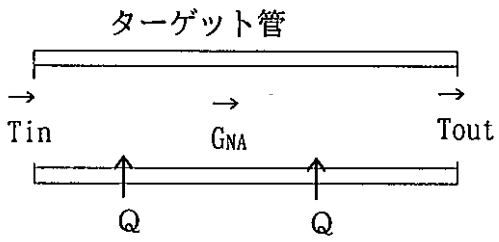
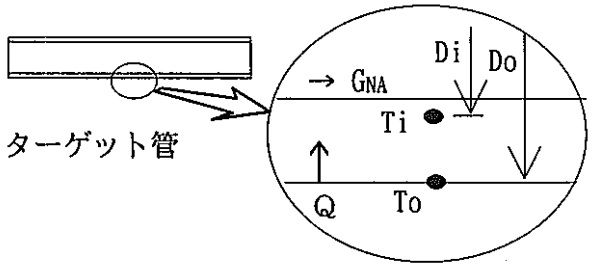
項　目	ケース１	ケース２	備　考
概　念	ターゲット管内流量と出入口温度から測定する場合  Q＝GNA･(Tin-Tout)･Cp	ターゲット管の複数の内外面温度から局所熱流束を求め除熱量を測定する場合  Q＝Do/2/λ･ln(Do/Di)･A･(To-Ti)	ケース１では、管内Ｎａ用流量計が必要。 ケース２では、管周方向に４点、軸方向に３点、管肉厚方向に２点の温度計装点が必要。
メリット	(1)計測点数が少ない。	(1)ターゲット管外部の状況に応じた熱流束が得られるので、詳細な評価が可能。 (2)管内のＮａ流量を測定しなくても良い。 （出入口温度から流量を推定すること可能）	
デメリット	(1)流量を計測するのが困難。 （流量測定については表３参照） (2)試験時(過渡時)のＮａ流量を精度良く測定できるか不明であり、除熱量を正しく求めることは困難と想定される。 (3)端部効果を考慮して出入口温度差を精度良く計測する必要がある。	(1)管周方向、軸方向の熱流束分布を求めるために、多くの計測点数を要する。 (2)熱電対の員数多いので導線の引き回しに配慮が必要。 (3)急激な温度変化がある場合の除熱量を求めるためには、管壁での過渡解析が必要。	
評　価	ターゲット管除熱量を求めることが目的であることから、計測点数は多くなるが本主旨を満足するケース２を採用するものとする。		

表3　　ターゲット管ナトリウム流量測定方式について

項　目	ケースA	ケースB	ケースC	備　考
概　念				左記の各ケースは表3で管内流速を測定する方策を示す。
特　徴	■管内流動による静圧低下を液面計により計測し、管内流速を測定	■気泡ポンプ出口開口の下方に流出孔を設け、本孔からの水頭を測定して、本孔からの流出量を測定	■気泡ポンプ廻りにＮａ受けを設けて、溢れ出たＮａを液面計により計測し、管内流速を測定	
メリット	■物量が少ない。	■物量が少ない。	■精度は左記２ケースより高いと期待される。	
デメリット	■数cmのヘッドを測定するので精度が悪い。 ■過渡時追従性確認要	■数cmのヘッドを測定するので精度が悪い。気泡の影響を把握するのが難しい。 ■過渡時追従性確認要	■試験終了後のＮａ受け内のＮａ／ドレン処理が大変。 （～200ﾘｯﾄﾙ程度） ■液面の揺らぎの影響確認要	
評　価	測定精度の点で課題が大きいが、補助的な計装として設置する。	測定精度の点でケースＡより課題が大きく、適用しない。	Ｎａの取り扱い、測定精度の点で課題が大きく、適用しない。	

3.2.3 計装設備

計装設備は大きく、系統監視・制御に係わる計装設備、伝熱管温度等の試験データを収録するデータ収録設備及び、ナトリウム・水反応時に発生する音響を参考データとして検出する音響検出設備から構成される。

設備区分	機　能　概　要	備　考
系統監視・制御設備	試験装置全体の監視・制御・操作に係わる設備 ・プロセスデータの指示・記録 ・機器の自動・手動操作及び状態表示 ・プロセスデータ及び機器異常時の警報	
データ収録設備	主に伝熱管温度データを収録する設備 ・伝熱管温度データの収録 ・試験条件となるプロセスデータ（給水流量等）の収録 ・音響データ（実効値）の収録 ・収録データの表示	試験条件となるプロセスデータは、系統監視・制御設備から取り込む。
音響検出設備	ナトリウム・水反応時の音響を検出する設備 ・ナトリウム・水反応時の音響自体の収録（パッシブ法音響計評価用データ）	音響の収録のみ行い、反応容器内音源強度分布の計算等はオフライン処理とする。

以下、各設備の検討結果を記載する。

（1）　データ収録設備

i. 計測点

本試験装置における系統監視・制御に係わる計装設備は、監視・操作点数を以下のように設定し（現状の系統設計点数に余裕を含んだ点数）、電気・計装盤の概略を設計した。

監視項目*		点　数
温度	指示	15
	記録	10
	指示・調節	10
圧力	指示	5
	記録	10
	指示・調節	1
流量	記録	1
液位	指示	3
	記録	1

操作項目	点　数
ヒータ	10
電動弁	9
空気作動弁	10
真空ポンプ	1
点火器	1

＊　計測ループの代表とし容器回りの計測点に関する仕様を表3.2.3-1及び表3.2.3-2に示す通り設定した。

① 監視操作盤（図3.2.3-1参照）

・ 型式　　：　垂直自立型

・ 面数　　：　1面

・ 主要収納品：　操作器、指示計、記録計（反応容器回りをペン式、その他を打点式とした）、調節計、リレーユニット、警報窓

② 変換器盤（図3.2.3-2参照）

・ 型式　　：　垂直自立型

・ 面数　　：　2面

・ 主要収納品：　信号変換器、警報設定器

③ 電力調整器盤（図3.2.3-3参照）

・ 型式　　：　垂直自立型

・ 面数　　：　２面

・ 主要収納品：　電力調整器、コンタクタ

④ ＭＣＣ盤（図 3.2.3-4 参照）

・ 型式　　：　垂直自立型

・ 面数　　：　２面

ii. データ収録

次にオンライン表示及び収録データのオフライン表示を行う装置を、ワークステーション及び高速演算モジュール等を用いて構成することを前提に機能仕様・ハードウエア構成を以下のように設定した。

a. データ収録設備機能仕様

① 入力点数　　：　１００点以下のアナログ信号
（伝熱管温度約５０点、その他関連するプロセスデータ約５０点を想定）

② サンプリング周期　：　０．１秒

③ オンライン表示　：

・１０秒毎の表示更新

・選択したデータの数値表示及びトレンド表示

・トレンド表示については、時刻軸及びプロセスデータ軸のスパンを任意に設定可能とする

④ データ収録・保存　：　１０時間程度の連続収録を可能とし、収録データは、光磁気ディスクに保存

⑤ オフライン表示　：

・選択したデータの数値表示及びトレンド表示

・トレンド表示については、時刻軸及びプロセスデータ軸のスパンを任意に設定可能とする

⑥ 印　刷　　：　表示画面のハードコピー

⑦ 停電時対応　　：　停電時に収録データの喪失がない様、自動シャットダウン機能を設ける

b．データ収録設備ハードウェア構成（図 3.2.3-5 参照）

① 高速演算モジュール　：　1式

・ A／D変換

・ データ収録・ホストコンピュータへの転送

・ 必要により、しきい値との比較・判定等の処理

② ホストコンピュータ　：　1台

・ データ収録（ハードディスク）

・ マン・マシンインタフェース

起動・停止、表示データ切替え（オンライン・オフライン、チャンネル）、表示スパン設定、工学値変換定数・しきい値設定、光磁気ディスクへの保存、印刷、他

③ モニタ　：　1台

④ プリンタ　：　1台

⑤ 光磁気ディスク装置　：　1台

⑥ 無停電電源装置　：　1台

(2) 音響検出設備

ＦＢＲ実証炉１号において音響式伝熱管水漏洩検出計(以下、音響計)は、数 g/sec（中リーク）以下の水漏洩を検出対象とした監視系として設置される。現在、音響計の研究開発では、伝熱管漏洩時に発生する音響または水素気泡を、水中へのガス（アルゴン，窒素など）注入により模擬した試験が行われているが、その妥当性は必ずしも十分に検証されていない。

本項では、音響計の開発に不可欠なナトリウム中への水漏洩時音響データを採取するための音響検出設備について、参考的に検討した。

実証炉１号への適用が検討されている音響計の概念として、水漏洩時の音響を計測するパッシブ法と水素気泡による音響の減衰を計測するアクティブ法があるが、ここでは、パッシブ法音響計開発にとって重要なナトリウム－水反応音データの採取を目的とした設備検討を行った。

a. ハードウェア構成

図 3.2.3-6 に音響検出設備構成（案）を示す。

① 検出器（音響センサ）

・ 型式 ： 圧電式加速度ピックアップ（リオン PV-44A 等）

・ 測定周波数範囲 ： 1～25kHz（信号処理上有効と考えられる低周波域に着目）

・ 計測点数／位置 ： 注水位置と同レベル周方向４点、軸方向４点

② 振動計（リオン VM-80 等）

③ 音響レベル監視・データ収録装置：パソコンにより生波形を取り込む

b. 検出器設置構造／位置

図 3.2.3-7 に検出器設置構造／位置（案）を示す。

熱的影響を緩和するため導波棒設けるものとし、試験容器に溶接された導波棒先端に検出器をネジ止めする構造とする。導波棒寸法は、従来知見より φ 16mm ×長さ 200mm を暫定する。

検出器設置位置は、容器の大きさ，設置架台との干渉を避けること等を考慮し、ターゲット管位置と同レベルの周方向４個所及び軸方向３個所に設置し、試験時の音響レベル及び周波数特性把握のためのデータ採取を行う。

表 3.2.3-1(1/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 1／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			インタロック	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
反応容器温度															
検出器	30	550	0～600℃	mV	－	－	－	－	熱電対	K	助川	0．75	30	－	
変換器	－	－	0～600℃	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	ETR－34T	日立	0．5	0．22	AC100V	アイソレータ1、記録計への出力
アイソレータ1	－	－	0～600℃	DC1～5V	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、警報設定器への出力
アイソレータ2	－	－	0～600℃	DC4～20 mA	－	－	－	○	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	－	－	0～600℃	－	○H2	○H1	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
反応容器カバーガス圧力															
検出器	30	550	－1～30 kg／cm2	－	－	－	－	－	Na－K 封入式	EPR－3SW	日立	1．5	－	－	
変換器	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	X－EPR－3SW	日立		－	AC100V	
アイソレータ1	－	－	－1～30 kg／cm2	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、アイソレータ3への出力
アイソレータ2	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	警報設定器，記録計への出力
アイソレータ3	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	○	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	－	－	－1～30 kg／cm2	－	○H1	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
Na漏洩検出器	－	550	－	－	－	－	－	－	接点式	－	－	－	－	－	
警報設定器	－	－	ON／OFF	－	○	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	

表 3.2.3-1(2/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 2／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			インタロック	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
反応容器液位															
検出器	30	550	NL−1000 ～+500mm	ACmV	−	−	−	−	校正出力付誘導型	ETR−3	日立	3	−	−	
変換器	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC1～5V 4～20mA	−	−	−	−	電子式	ETR−3A	日立		0．32	AC100V	アイソレータ1、記録計への出力
アイソレータ1	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC1～5V	−	−	−	−	電子式	VC−34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、警報設定器への出力
アイソレータ2	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC4～20 mA	−	−	−	○	電子式	VC−34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	−	−	NL−1000 ～+500mm	−	○H2	○H1	−	−	電子式	VA−34	日立	0．2	0．1	AC100V	
反応容器温度、圧力、液位															
記録計	−	−	0～600℃，−1～30 kg／cm2，NL−1000 ～+500mm	−	−	−	−	−	自動平衡式	VKP65	日立	0．5	2．5	AC100V	
反応容器圧力開放板開放検出															
検出器	30	550	−	−	−	−	−	−	サーキットブレーカ方式	−	日立	−	−	−	
スイッチ	−	−	−	−	○	○	−	−	リレー	MY4Z−4	オムロン	−	−	−	
反応容器気泡ポンプ用液面計	30	550	NL−200～+50mm	−	−	−	−	−	接点式	−	−	−	−	−	

表 3.2.3-1(3/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 3／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			ｲﾝﾀﾛｯｸ	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
反応生成物収納容器出口温度															
検出器	10	550	0～600℃	mV	－	－	－	－	熱電対	K	助川	0．75	30	－	
変換器	－	－	0～600℃	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	ETR－34T	日立	0．5	0．22	AC100V	
指示計	－	－	0～600℃	－	－	－	－	－	電子式	DEf－150NT	東洋計器	1．5	－	－	
反応生成物収納容器圧力															
指示計	10	65	－1～1 kg／cm2	－	－	－	－	－	ﾌﾞﾙﾄﾞﾝ管式	BVU1／2×100	長野計器	1．5	－	－	
スイッチ	10	65	0．2～2 kg／cm2	－	－		－	－	ベローズ式	CB13	長野計器	0．5	－	－	
反応生成物収納容器圧力開放板開放検出															
検出器	10	550	－	－	－	－	－	－	ｻｰｷｯﾄﾌﾞﾚｰｶ方式	－	日立	－	－	－	
スイッチ	－	－	－	－	－	○	－	－	リレー	MY4Z－4	オムロン	－	－	－	
Na漏洩検出器	－	550	－	－	－	－	－	－	接点式	－	－	－	－	－	
警報設定器	－	－	ON／OFF	－	○	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	

表 3.2.3-1(4/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 4／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			ｲﾝﾀﾛｯｸ	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
新設ダンプタンク温度															
検出器	10	550	0～600℃	mV	－	－	－	－	熱電対	K	助川	0．75	30	－	
変換器	－	－	0～600℃	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	ETR－34T	日立	0．5	0．22	AC100V	アイソレータ1、記録計への出力
アイソレータ1	－	－	0～600℃	DC1～5V	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、警報設定器への出力
アイソレータ2	－	－	0～600℃	DC4～20 mA	－	－	－	○	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	－	－	0～600℃	－	○H2	○H1	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
新設ダンプタンクカバーガス圧力															
検出器	10	550	－1～30 kg／cm2	－	－	－	－	－	Na－K 封入式	EPR－3SW	日立	1．5	－	－	
変換器	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	X－EPR－3SW	日立		－	AC100V	
アイソレータ1	－	－	－1～30 kg／cm2	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、アイソレータ3への出力
アイソレータ2	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	警報設定器，記録計への出力
アイソレータ3	－	－	－1～30 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	○	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	－	－	－1～30 kg／cm2	－	○H1	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
Na漏洩検出器	－	550	－	－	－	－	－	－	接点式	－	－	－	－	－	
警報設定器	－	－	ON／OFF	－	○	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	

表 3.2.3-1(5/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 5／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			ｲﾝﾀﾛｯｸ	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
新設ダンプタンク液位															
検出器	10	550	NL−1000 ～+500mm	ACmV	−	−	−	−	校正出力付誘導型	ETR−3	日立	3	−	−	
変換器	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC1～5V 4～20mA	−	−	−	−	電子式	ETR−3A	日立		0．32	AC100V	アイソレータ1、記録計への出力
アイソレータ1	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC1～5V	−	−	−	−	電子式	VC−34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	アイソレータ2、警報設定器への出力
アイソレータ2	−	−	NL−1000 ～+500mm	DC4～20 mA	−	−	−	○	電子式	VC−34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	伝熱管温度収録装置への出力
警報設定器	−	−	NL−1000 ～+500mm	−	OH2	OH1	−	−	電子式	VA−34	日立	0．2	0．1	AC100V	
新設ダンプタンク温度、圧力、液位															
記録計	−	−	0～600℃，−1～30 kg／cm2，NL−1000 ～+500mm	−	−	−	−	−	自動平衡式	VKP65	日立	0．5	2．5	AC100V	
新設ダンプタンク圧力開放板開放検出															
検出器	10	550	−	−	−	−	−	−	ｻｰｷｯﾄﾌﾞﾚｰｶ方式	−	日立	−	−	−	
スイッチ	−	−	−	−	○	○	−	−	リレー	MY4Z−4	オムロン	−	−	−	

表 3.2.3-1(6/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 6／7 ）

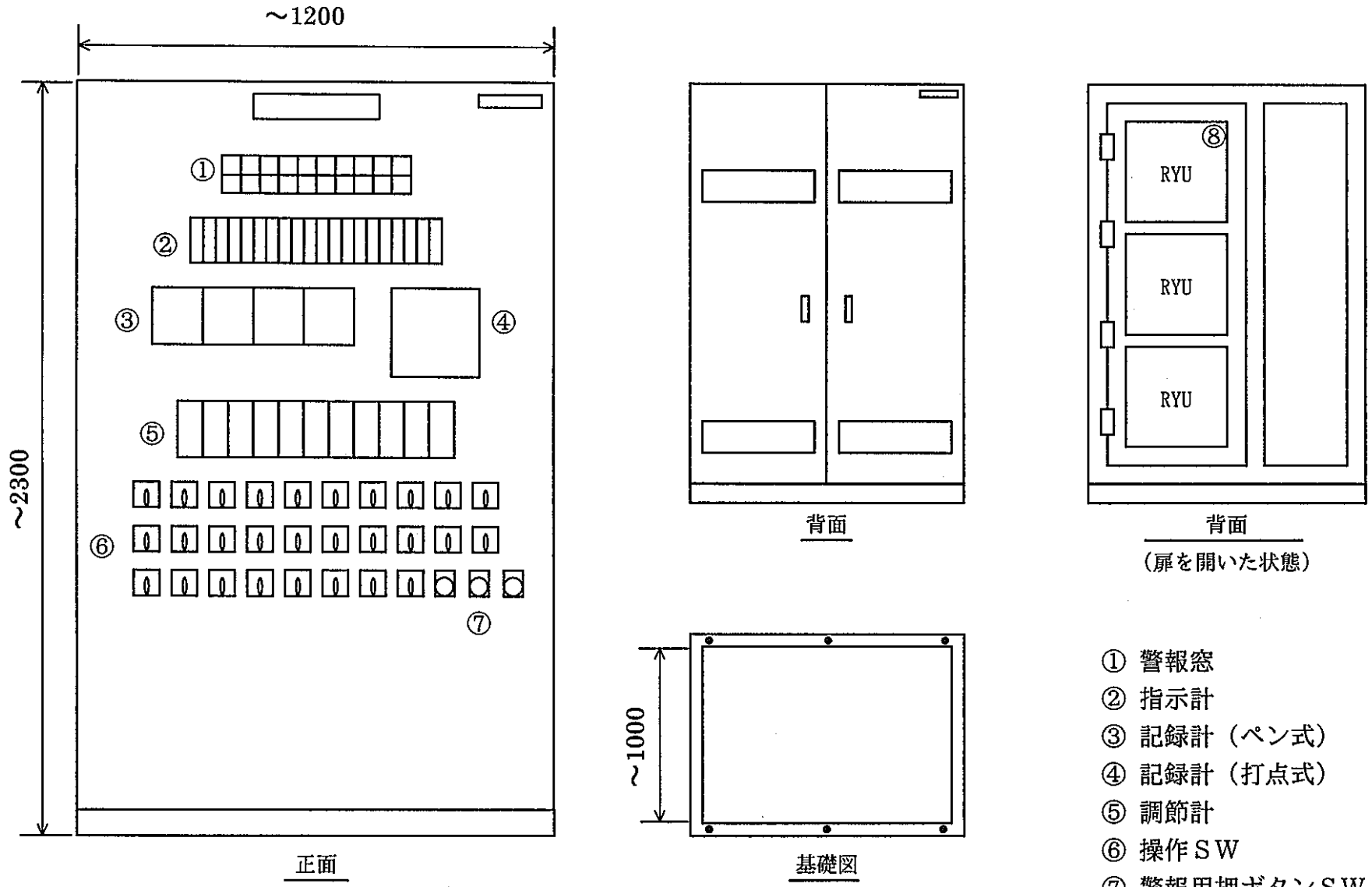
使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			インタロック	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
既設ダンプタンク温度															
検出器	10	535	0～600℃	mV	－	－	－	－	熱電対	K	助川	0．75	30	－	
変換器	－	－	0～600℃	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	ETR－34T	日立	0．5	0．22	AC100V	警報設定器、指示計への出力
警報設定器	－	－	0～600℃	－	－	OH	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
指示計	－	－	0～600℃	－	－	－	－	－	電子式	DEf－150NT	東洋計器	1．5	－	－	
既設ダンプタンクカバーガス圧力															
検出器	10	535	－1～10 kg／cm2	－	－	－	－	－	Na－K封入式	EPR－3SW	日立	1．5	－	－	
変換器	－	－	－1～10 kg／cm2	DC4～20 mA	－	－	－	－	電子式	X－EPR－3SW	日立		－	AC100V	
アイソレータ	－	－	－1～10 kg／cm2	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	VC－34IC	日立	0．3	0．22	AC100V	警報設定器、指示計への出力
警報設定器	－	－	－1～10 kg／cm2	－	－	OH	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
指示計	－	－	－1～10 kg／cm2	－	－	－	－	－	電子式	DEf－150NT	東洋計器	1．5	－	－	
Na漏洩検出器	－	550	－	－	－	－	－	－	接点式	－	－	－	－	－	
警報設定器	－	－	ON／OFF	－	O	－	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
既設ダンプタンク液位															
検出器	10	535		ACmV	－	－	－	－	校正出力付誘導型	ETR－3	日立	3	－	－	
変換器	－	－		DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	ETR－3A	日立		0．32	AC100V	警報設定器、指示計への出力
警報設定器	－	－		－	OH2	OH1	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
指示計	－	－		－	－	－	－	－	電子式	DEf－150NT	東洋計器	1．5	－	－	

表 3.2.3-1(7/7) 熱伝達率測定試験装置 計測リスト（プロセス計装 7／ 7 ）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			インタロック	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
反応生成物収納容器温度															
検出器	10	550	0～600℃	mV	－	－	－	－	熱電対	K	助川	0．75	30	－	
変換器	－	－	0～600℃	DC1～5V 4～20mA	－	－	－	－	電子式	ETR－34T	日立	0．5	0．22	AC100V	警報設定器、指示計への出力
警報設定器	－	－	0～600℃	－	－	OH	－	－	電子式	VA－34	日立	0．2	0．1	AC100V	
指示計	－	－	0～600℃	－	－	－	－	－	電子式	DEf－150NT	東洋計器	1．5	－	－	
Na漏洩検出器	－	550	－	－	－	－	－	－	接点式	－	－	－	－	－	

表 3.2.3-2　熱伝達率測定試験装置　計測リスト（伝熱管温度計装　1／1）

使用先	最高使用		測定範囲	信号種別	用途				計器種別			性能		供給電源	備考
	圧力 kg/cm2	温度 ℃			ｲﾝﾀﾛｯｸ	警報	調節	収録	形式	形番	製造者	精度 %	応答時間 秒（約）		
伝熱管温度															
検出器	30	550	0～1500℃	mV	－	－	－	－	熱電対	R				－	
変換器	－	－	0～1500℃	DC－10～＋10V	－	－	－	○	電子式	MS 2301	ｴﾑﾃｨﾃｨ	0．25		AC100V	



① 警報窓
② 指示計
③ 記録計（ペン式）
④ 記録計（打点式）
⑤ 調節計
⑥ 操作ＳＷ
⑦ 警報用押ボタンＳＷ
⑧ リレーユニット

図 3．2．3－1 監視操作盤外形図

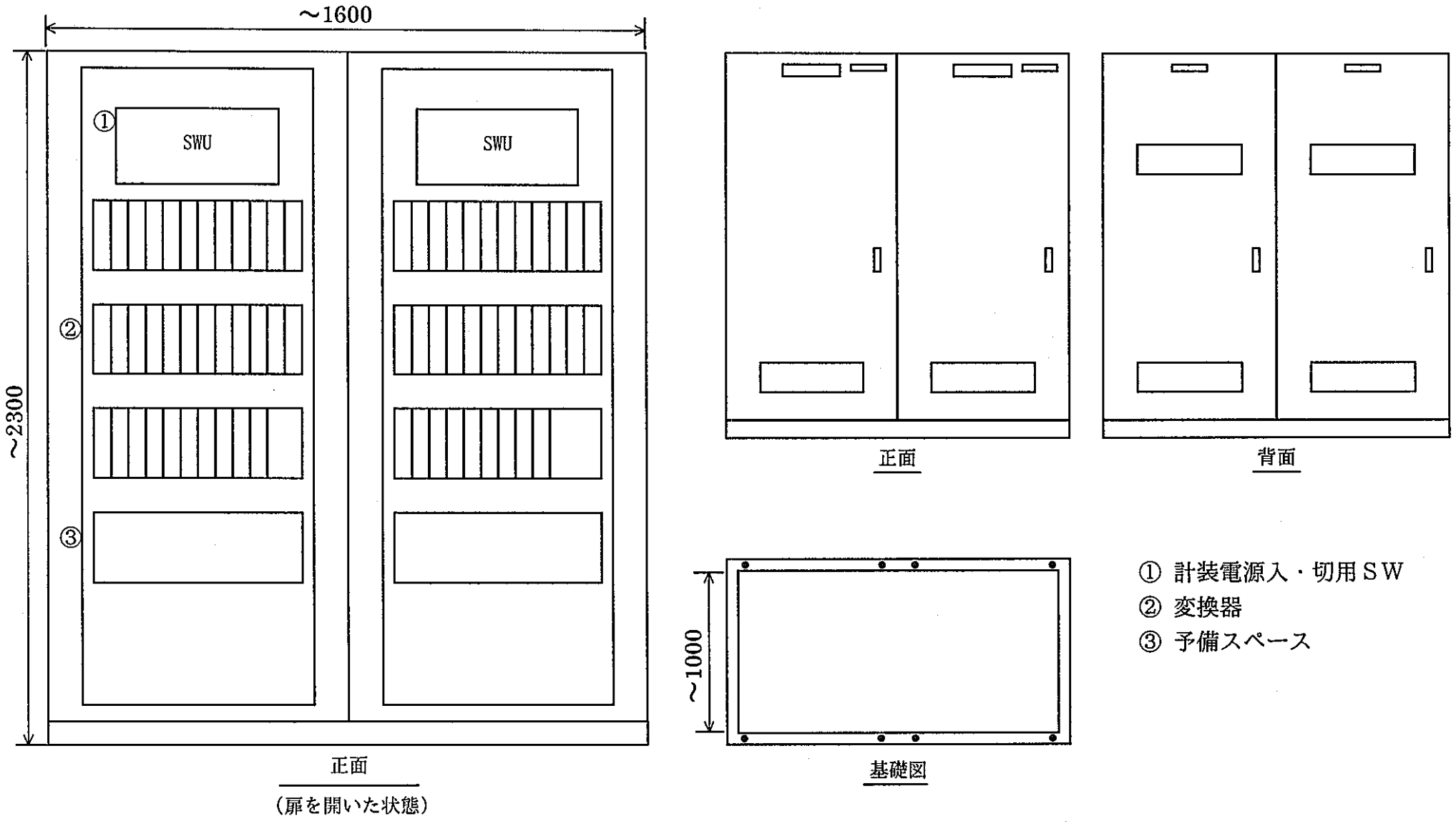
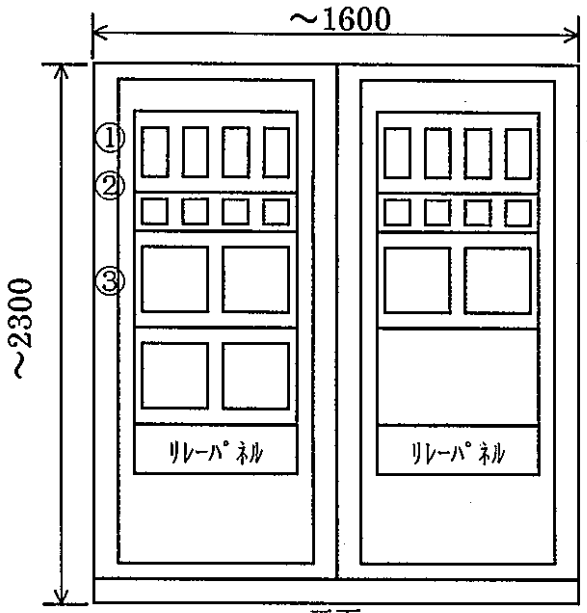
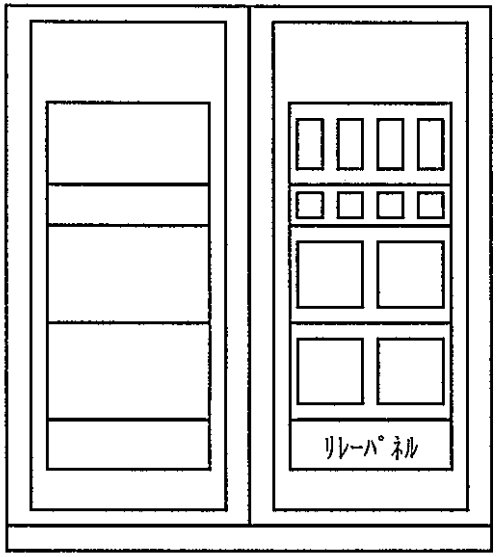


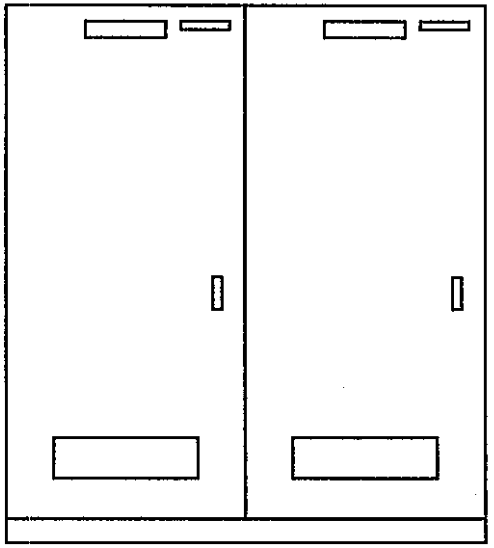
図 3．2．3－2　変換器盤外形図



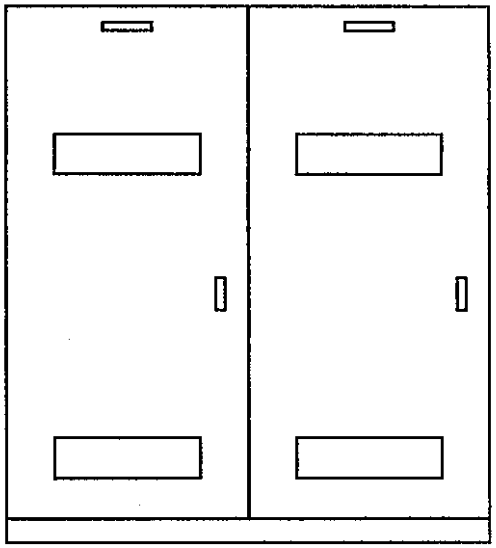
正面
（扉を開いた状態）



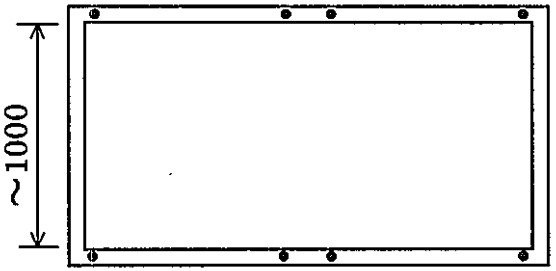
背面
（扉を開いた状態）



正面



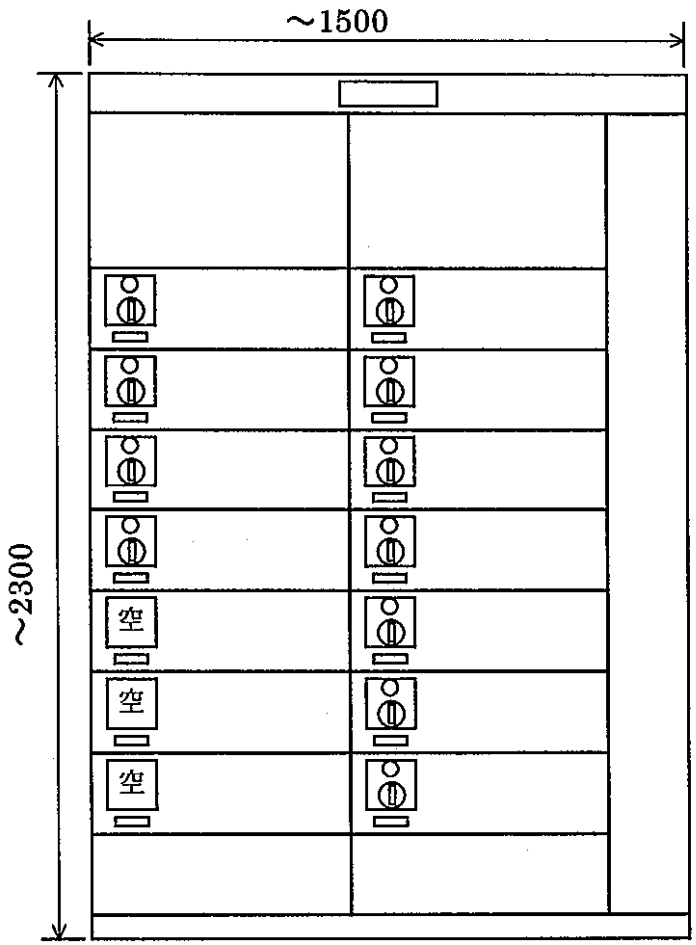
背面



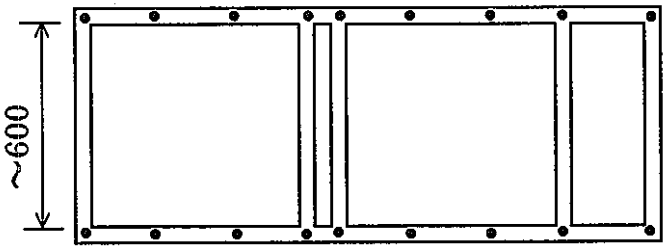
基礎図

① 漏電遮断器
② コンタクタ
③ 電力調整器

図 3．2．3－3　電力調整器盤



正面



基礎図

図 3．2．3－4　MCC盤

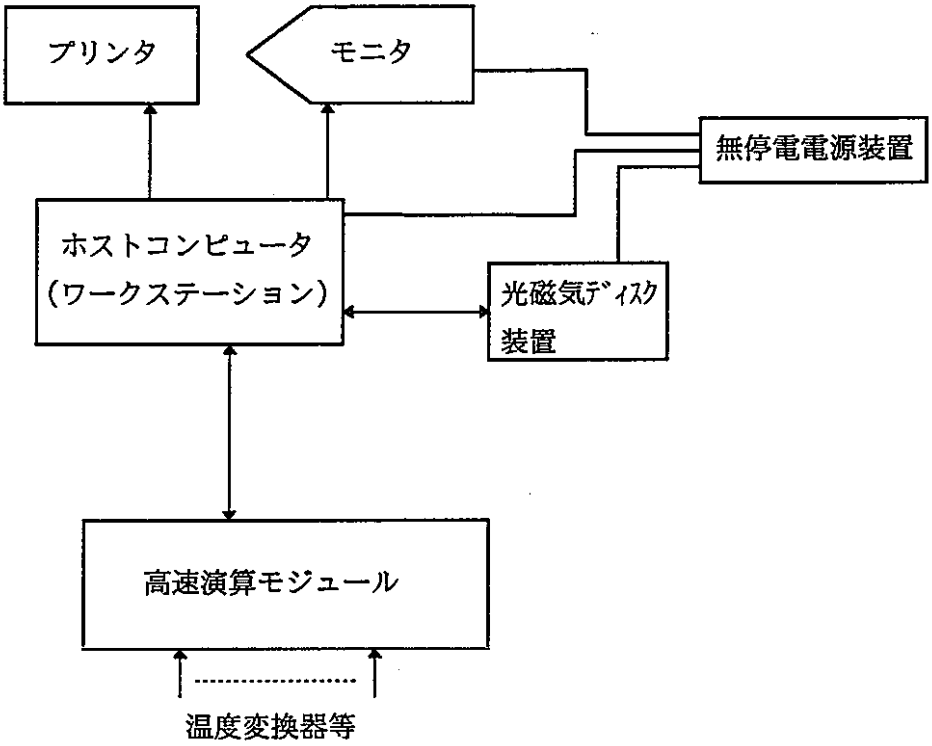


図 3.2.3-5 データ収録設備ハードウェア構成

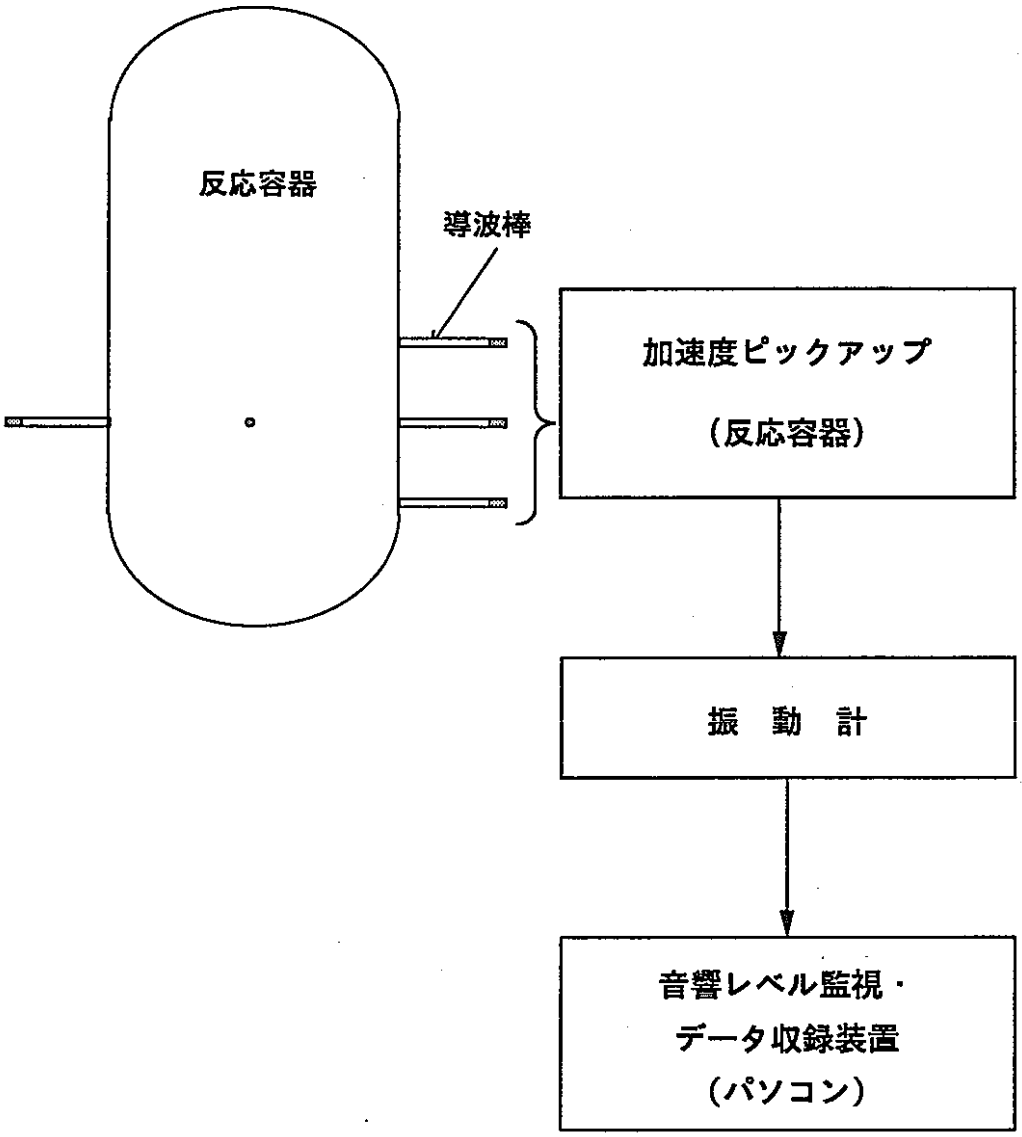
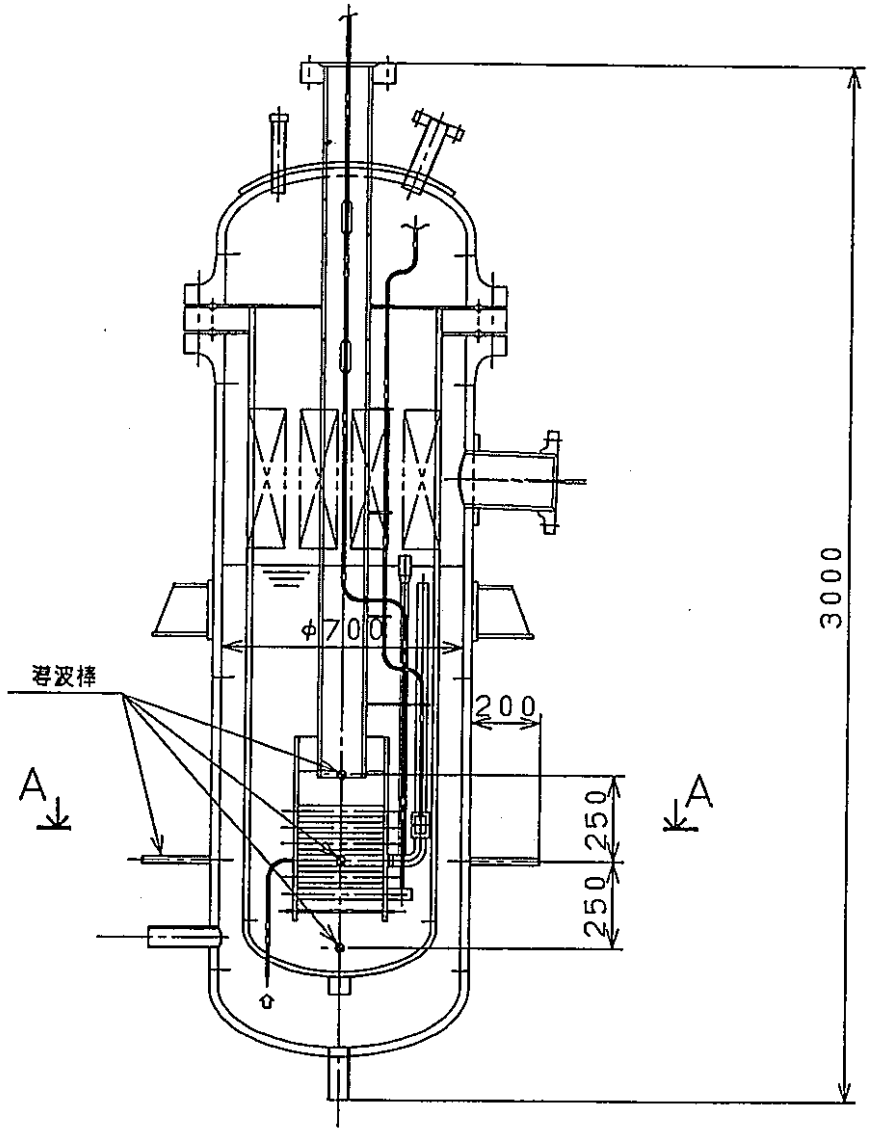
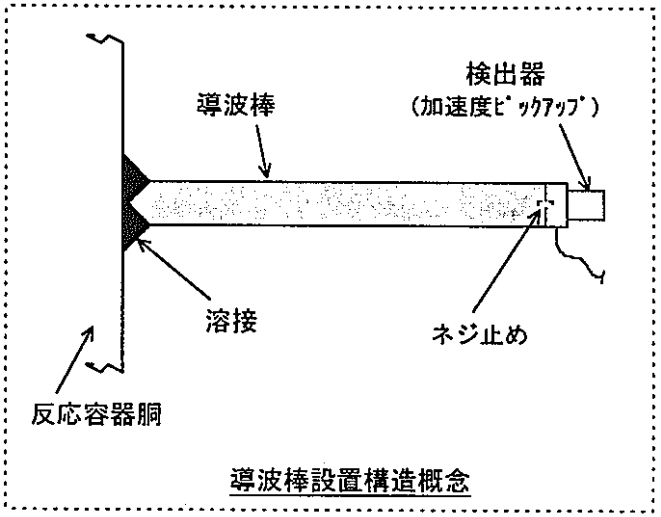


図 3.2.3-6　　音響検出設備構成（案）





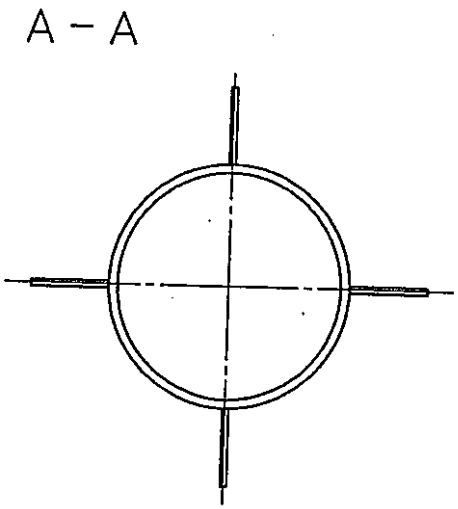


図 3.2.3-7　　検出器設置構造／位置（案）

3.2.4　配管・配置・架台設計

(1)　配管・配置

図 3.2.4-1 に試験装置を据え付ける高速炉安全性第 1 試験室の平面図を示す。また、本試験室内に熱伝達率測定試験装置として設置する主要機器及び配管の配置について、図 3.2.4-2 に平面図を、図 3.2.4-3 に立面図を示す。これらのナトリウム系配管について、自重，熱膨張解析及び耐震解析を実施した。解析ケースは以下の通りである。

①自重解析：ナトリウム、保温材を含めた自重解析

②熱膨張解析：設計温度による熱膨張解析

③耐震解析：0.3G を負荷した静解析

表 3.2.4-1 に解析条件を示す。また、図 3.2.4-4～図 3.2.4-8 に解析モデル（アイソメ図）を示す。

各モデルに対してベローズを設けない場合の解析結果を表 3.2.4-2(a)～表 3.2.4-2(c)に示す。熱膨張解析の結果、解析モデル No.SWAT-001 及び SWAT-004 が許容値を満足しないことが分かった。これらは、設計温度による熱膨脹応力を評価していること等保守的な条件での結果ではあるが、熱膨脹応力が許容値の 2 倍程度生じていることからベローズを設け熱膨張応力を緩和させるものとする。

SWAT-001 で高応力が発生する原因は,反応容器から分岐して新規ダンプタンクへ接続する配管のエルボ部（K8）に面内曲げ応力が発生するためである。配管の熱膨張変形モードは、新規ダンプタンクから鉛直配管が上方向に変位するが、これを水平配管で拘束するため,高応力が発生する。したがって、この鉛直配管にベローズを設けることでエルボ部の応力を緩和することができる。

SWAT-004 では,新規ダンプタンクと既設ダンプタンクを接続するエルボ部(K2)に面内曲げ応力が発生する。これは,新規ダンプタンクと既設ダンプタンクの鉛直配管が短いため,水平配管の熱膨張変位を吸収できないためである。したがって,この水平配管にベローズを設けることでエルボ部の応力を緩和することができる。

表 3.2.4-3(a)～表 3.2.4-3(c)にベローズを設置した場合の解析結果を示す。　図 3.2.4-4(SWAT-001)の図中に示す位置にベローズを 1 カ所設け、また、図 3.2.4-7(SWAT-004)の図中に示す位置にベローズを 1 カ所設けることにより、表 3.2.4-3(a)～表 3.2.4-3(c)に示すように、すべての配管が各種荷重に対して許容値を満足することができる。

表3.2.4-1　配管解析条件一覧表

項目		単位	放出系配管	ドレン配管
配管口径		—	6B	2B
材質		—	SUS304	SUS304
外径/肉厚		mm/mm	165.2/7.1	60.5/3.5
設計圧力		kg/cm^2g	30	10
設計温度		℃	550	550
重量	配管	kg/m	28	5
	ナトリウム	kg/m	14.7	1.8
	保温材等	kg/m	29	17
	計	kg/m	71.7	23.8
エルボ半径		mm	152.4＊1	76.2＊2

注記：

＊1：熱膨張応力が厳しいエルボは，エルボの曲げ半径を228.6mmとする。

＊2：熱膨張応力が厳しいエルボは，エルボの曲げ半径を181.5mmとする。

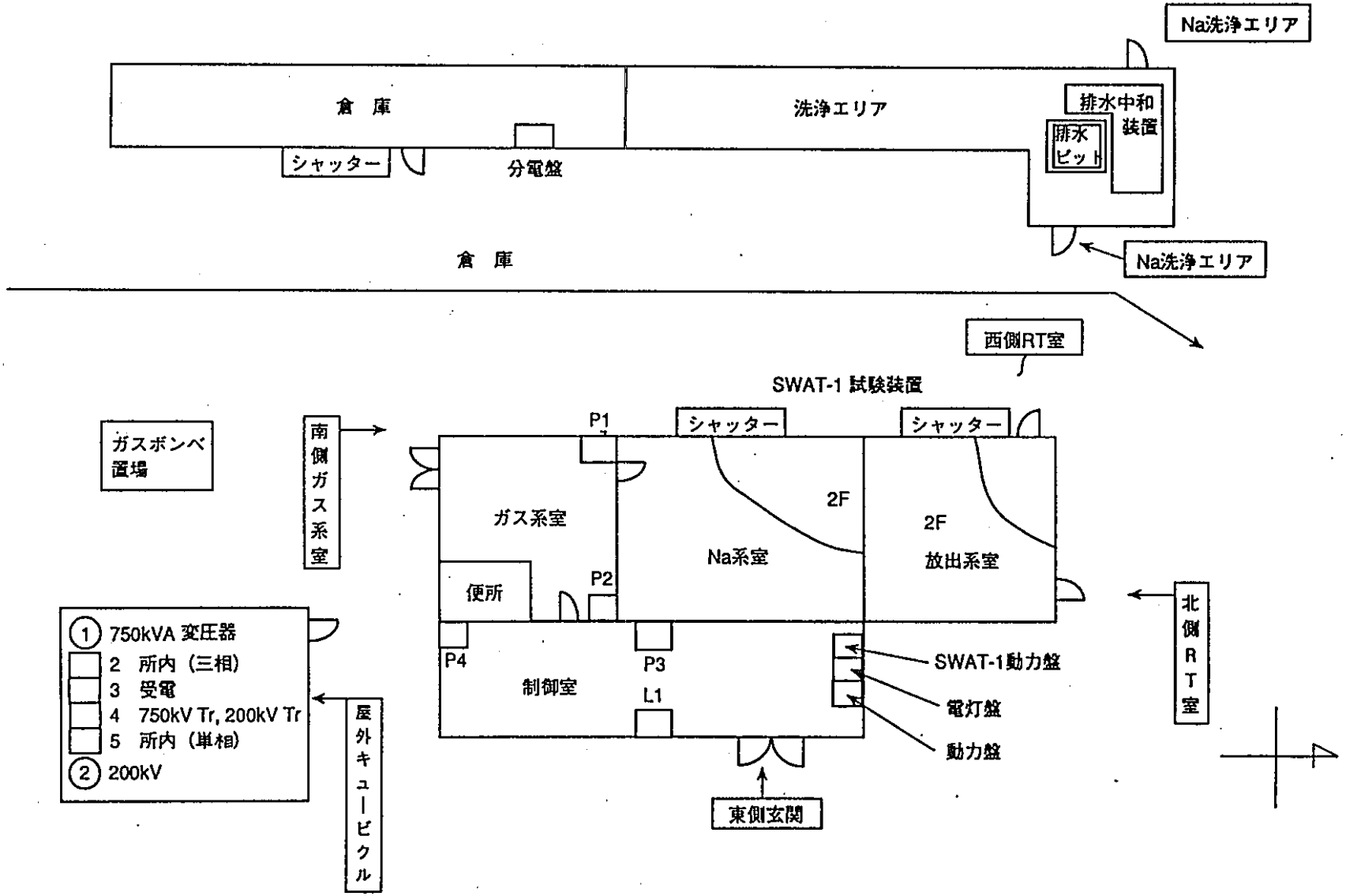


図 3.2.4-1　高速炉安全性第一試験室平面図

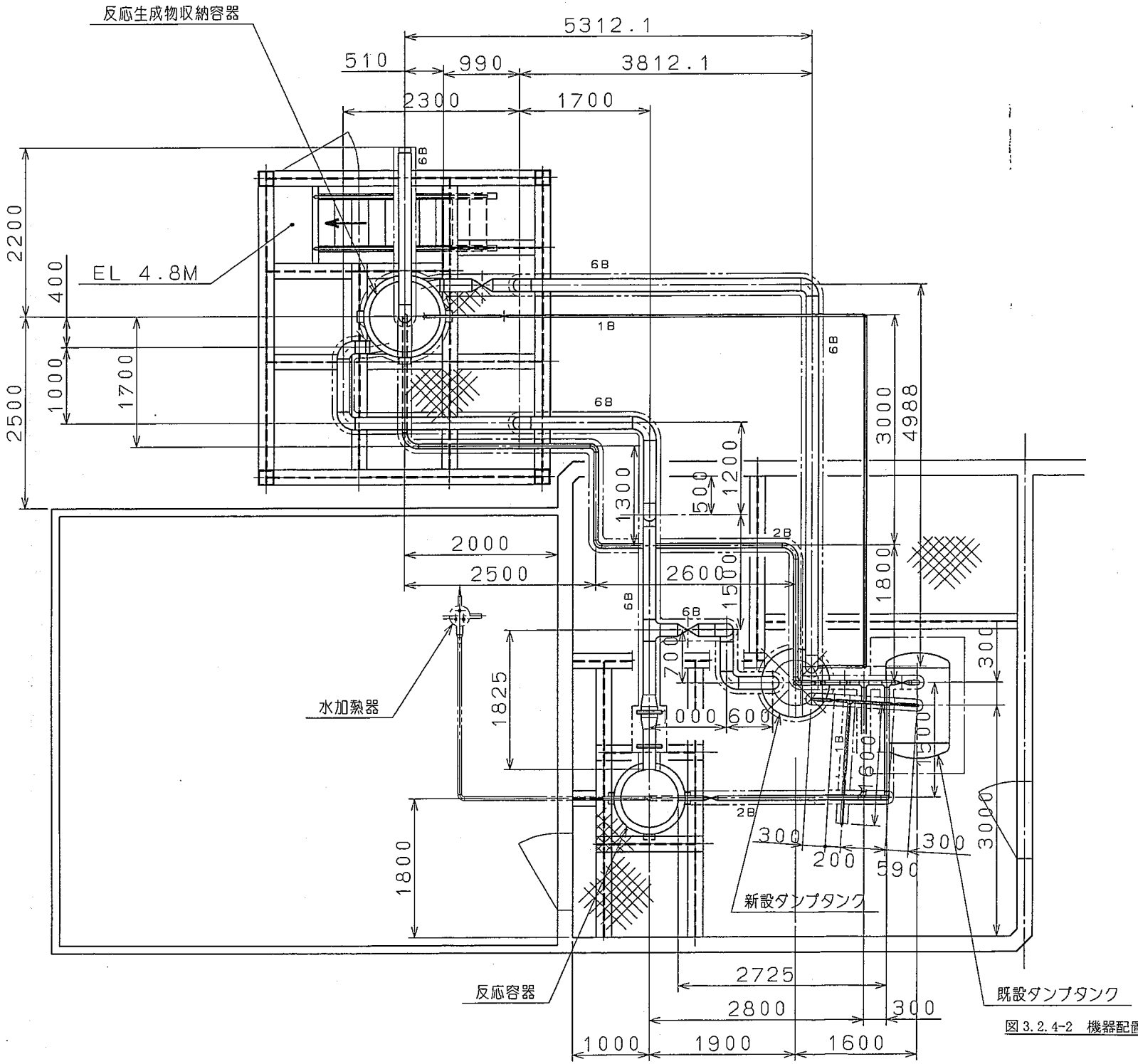


図 3.2.4-2　機器配置・配管引き廻し図（平面図）

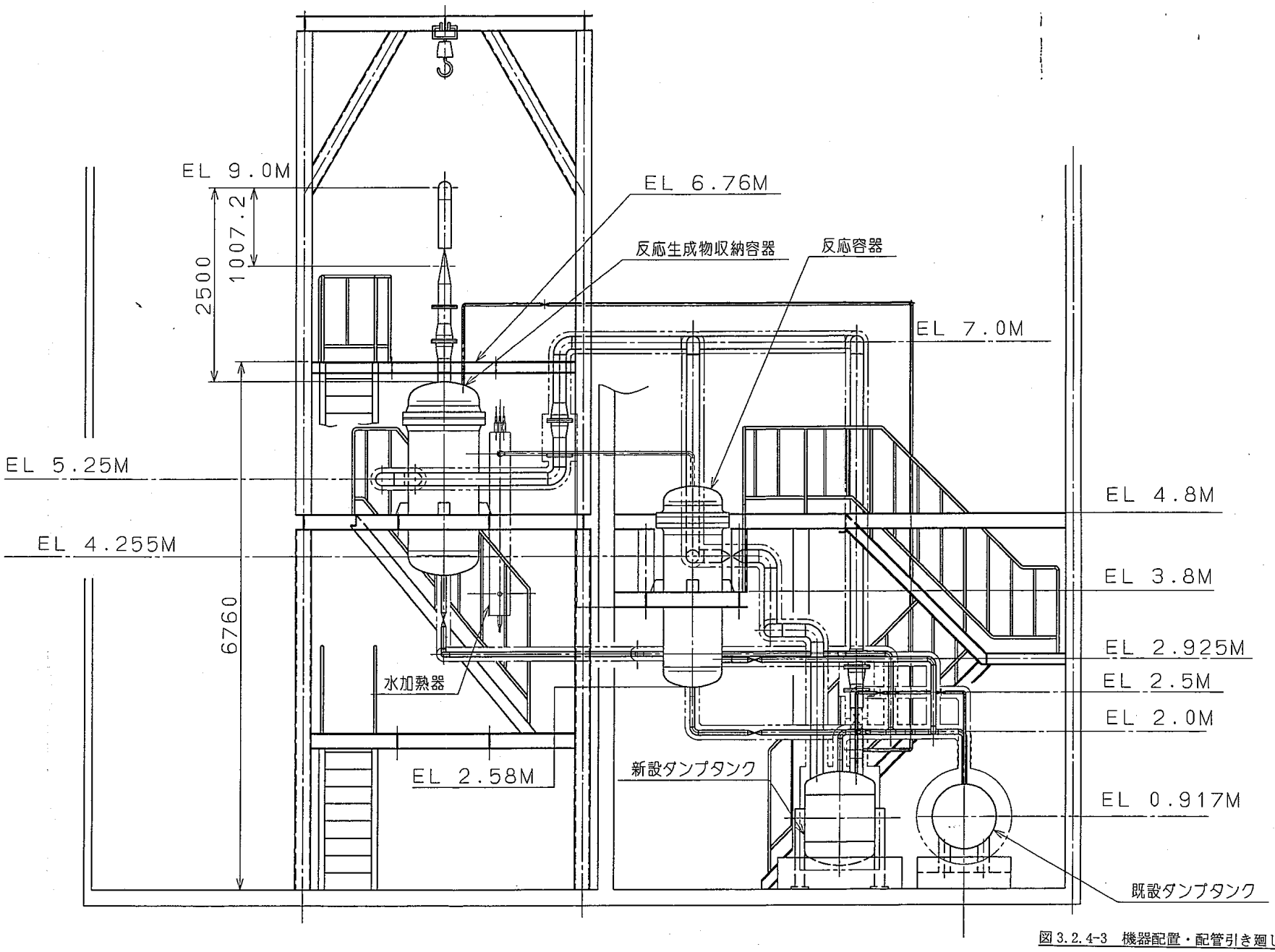


図 3.2.4-3　機器配置・配管引き廻し図（立面図）

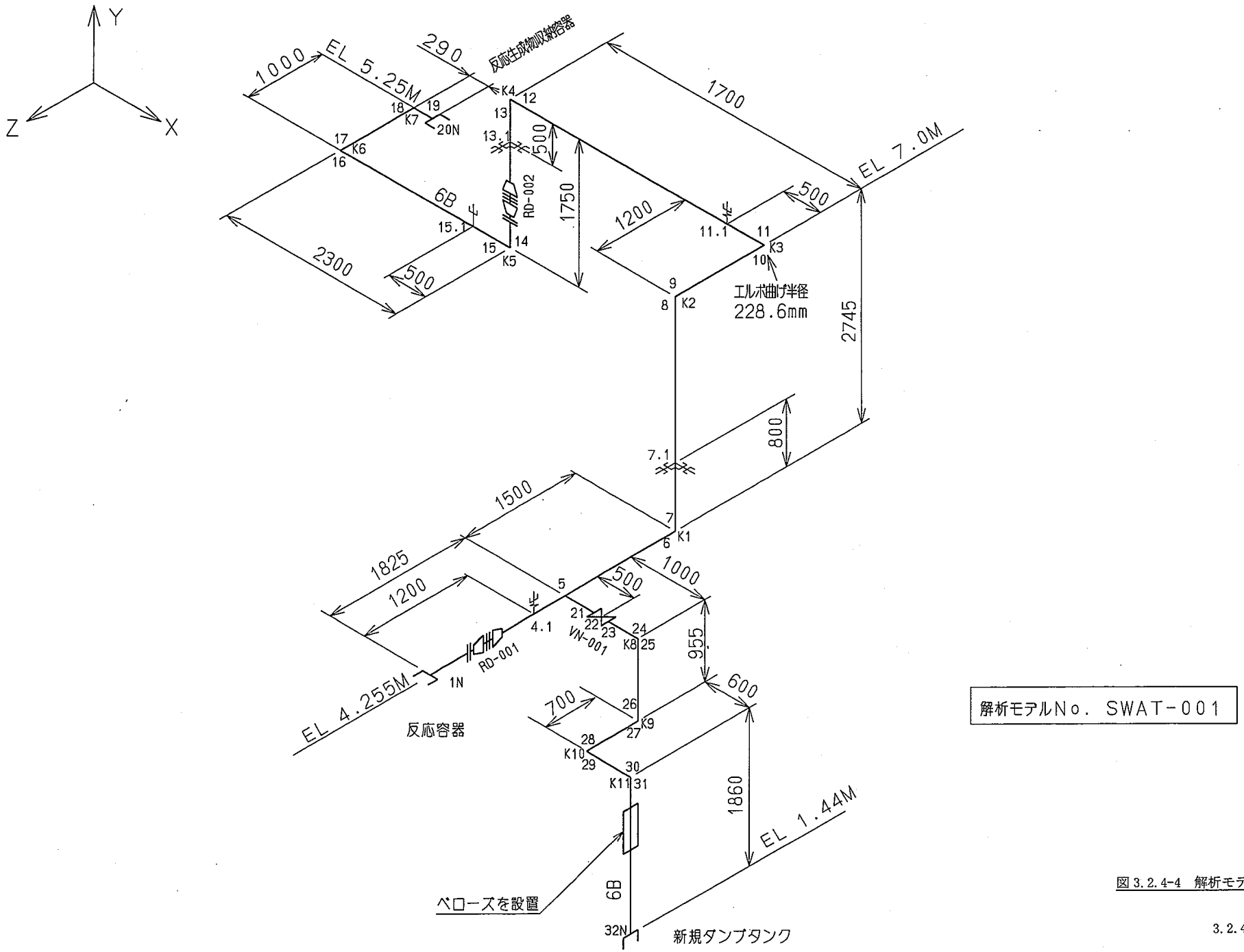


図 3.2.4-4 解析モデル図 (SWAT-001)

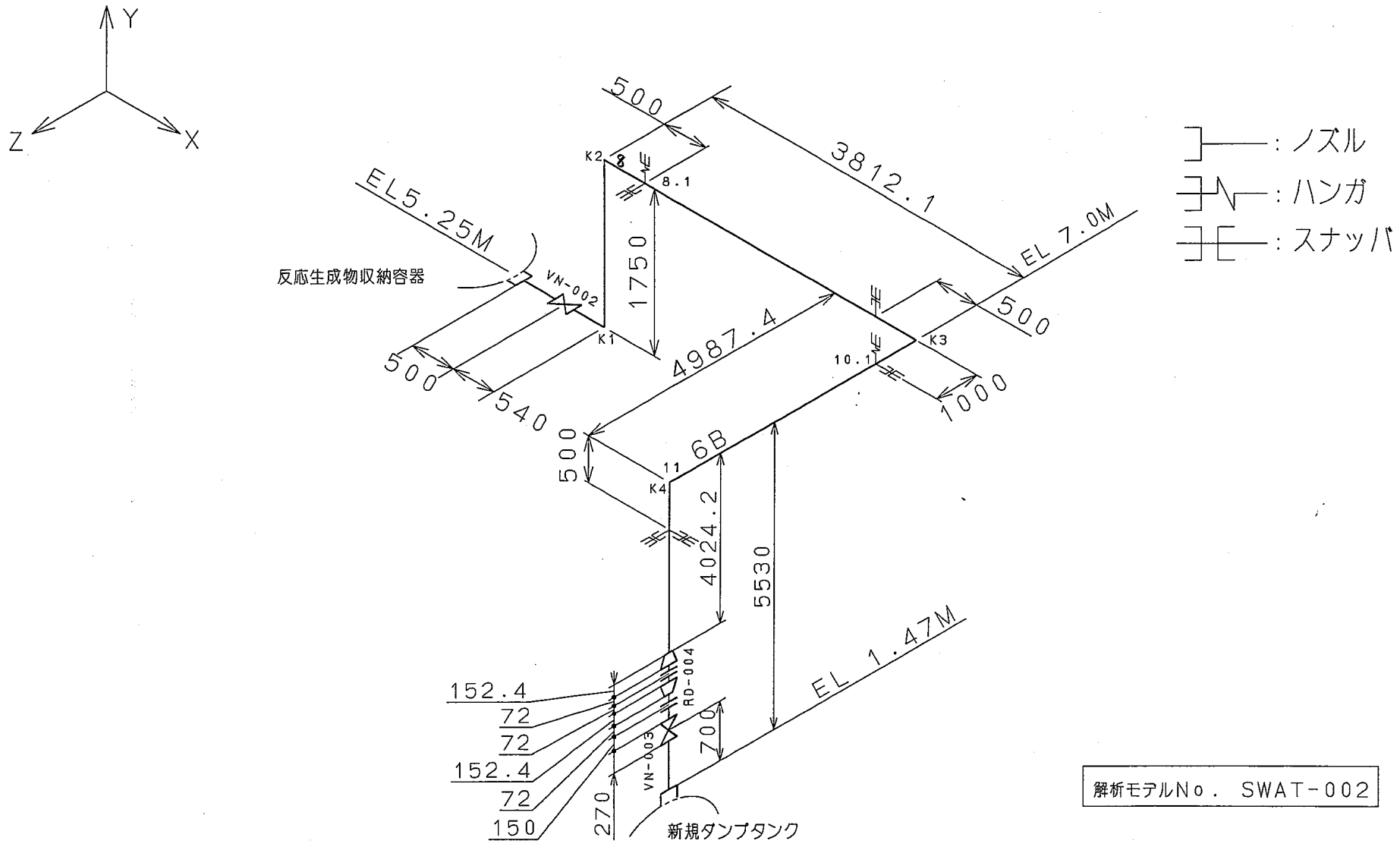
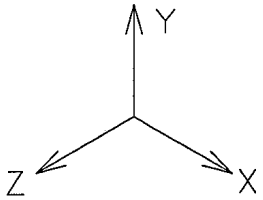
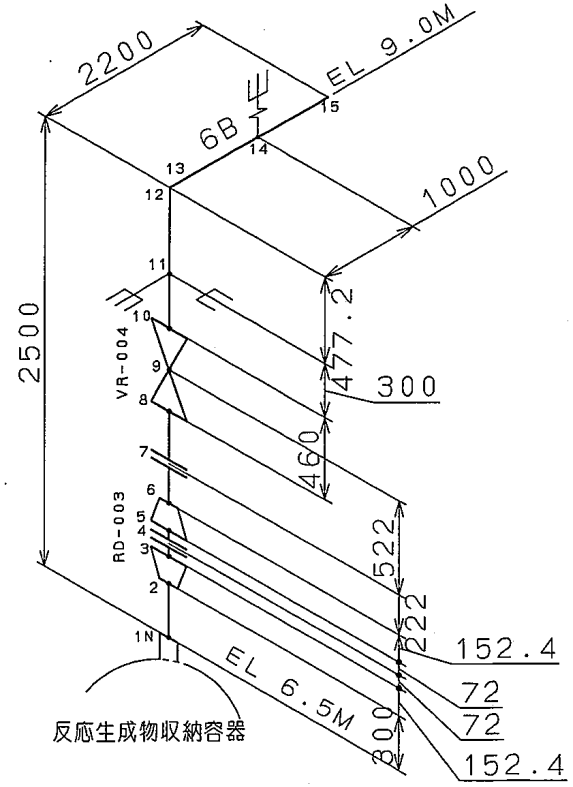


図 3.2.4-5 解析モデル図（SWAT-002）





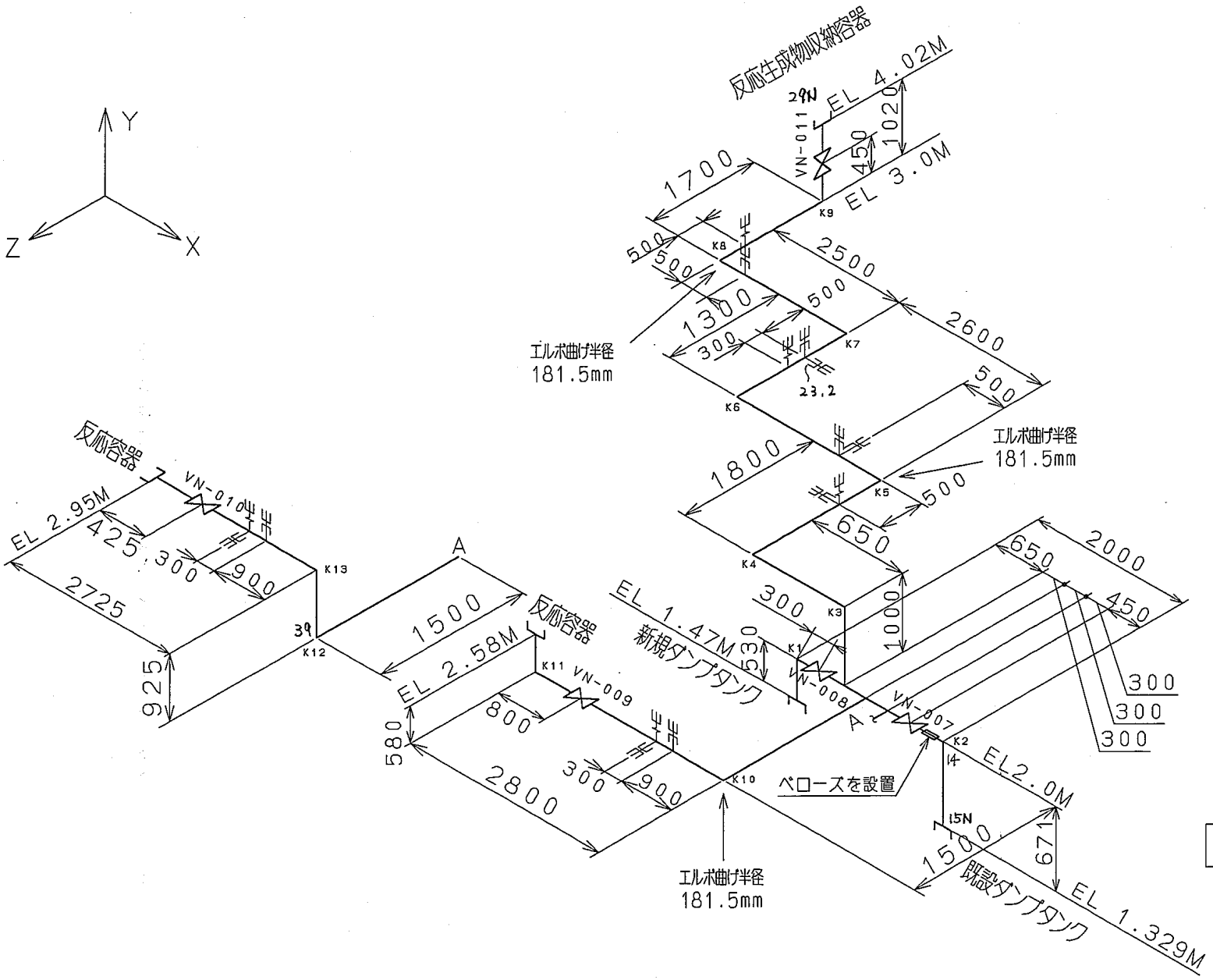
：ノズル

：ハンガ

：レストレイント

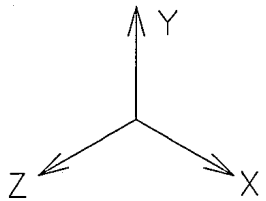
解析モデルNo. SWAT-003

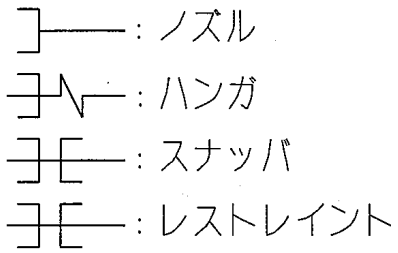
図3.2.4-6 解析モデル図（SWAT-003）

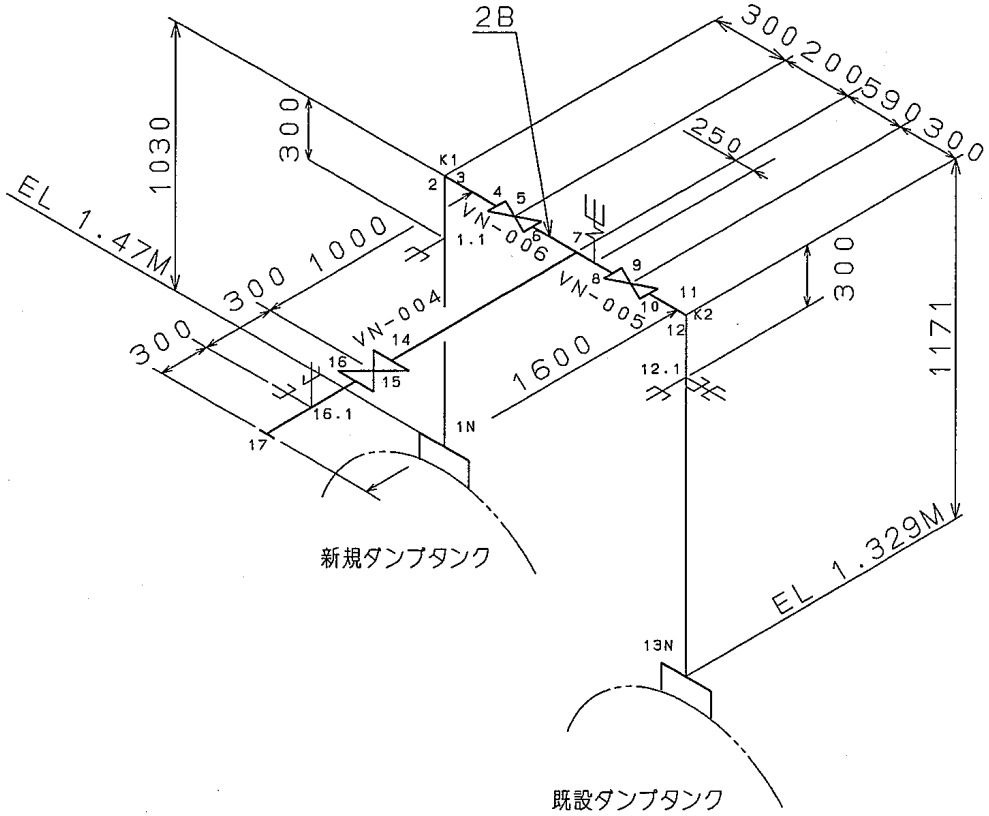


解析モデルNo. SWAT-004

図 3.2.4-7 解析モデル図 (SWAT-004)







解析モデルNo． SWAT-005

図 3.2.4-8 解析モデル図（SWAT-005）

表3.2.4-2(a)　自重解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	7.8(19)	7.7(K7)	4.5(K1)	3.5(12,Z方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-002	0.9(8)	0.9(10.1)	0.7(8.1)	0.8(11,Z方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-003	0.4(14)	0.2(13-14)	0.1(1N)	0.2(15,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-004	10.2(K2)	9.9(K1)	9.8(14)	6.7(39,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-005	1.6(14)	1.5(15)	1.1(2)	0.5(14,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○

表3.2.4-2(b)　熱膨張解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	54.0(K8)	46.6(K9)	45.7(K11)	57.9(K3,Y方向)	29.1(3Sm)	×
SWAT-002	25.2(K3)	21.7(K1)	21.0(K4)	53.9(11,Y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-003	0.0	0.0	0.0	24.3(13,Y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-004	63.2(15N)	60.6(K2)	28.9(K13)	29.4(K5,y方向)	29.1(3Sm)	×
SWAT-005	21.1(K2)	15.8(K1)	12.6(13N)	16.8(17,Z方向)	29.1(3Sm)	○

表3.2.4-2(c)　耐震解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	2.6(13)	2.4(K1)	2.3(6)	1.9(8,Y方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-002	2.7(K1)	1.5(K3)	1.0(K4)	1.8(8,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-003	3.7(12)	3.5(K1)	3.2(13)	2.9(15,X方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-004	6.0(K6)	4.3(29N)	5.0(K2)	9.1(23.3,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-005	2.4(2)	2.2(7)	1.8(6)	0.7(7.1,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○

注) Sm：9.7kg/mm^2(550℃)

表3.2.4-3(a) 自重解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	7.8(19)	7.8(K7)	4.4(K1)	3.4(12,Z方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-002	0.9(8)	0.9(10.1)	0.7(8.1)	0.8(11,Z方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-003	0.4(14)	0.2(13-14)	0.1(1N)	0.2(15,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-004	10.2(K2)	9.9(K1)	9.8(14)	6.7(39,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○
SWAT-005	1.6(14)	1.5(15)	1.1(2)	0.5(14,Y方向)	14.5(1.5Sm)	○

表3.2.4-3(b) 熱膨張解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	24.2(K2)	24.2(K6)	22.7(K3)	33.5(K3,Y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-002	25.2(K3)	21.7(K1)	21.0(K4)	53.9(11,Y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-003	0.0	0.0	0.0	24.3(13,Y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-004	23.0(K4)	21.7(K6)	20.8(K9)	27.2(K5,y方向)	29.1(3Sm)	○
SWAT-005	21.1(K2)	15.8(K1)	12.6(13N)	16.8(17,Z方向)	29.1(3Sm)	○

表3.2.4-3(c) 耐震解析結果

解析モデルNo.	発生応力(kg/mm^2)			最大変位量(mm)	許容応力(kg/mm^2)	評　価
SWAT-001	2.6(K4)	2.4(K1)	2.3(6)	2.4(7-8,Y方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-002	2.7(K1)	1.5(K3)	1.0(K4)	1.8(8,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-003	3.7(12)	3.5(K1)	3.2(13)	2.9(15,X方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-004	6.0(K6)	4.3(29N)	5.0(K2)	9.1(23.3,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○
SWAT-005	2.4(2)	2.2(7)	1.8(6)	0.7(7.1,Z方向)	21.8(2.25Sm)	○

注1) Sm：9.7kg/mm^2(550℃)
注2) 解析モデルNo.SWAT-001及びSWAT-004にベローズを１ケ設置した解析結果を示す。

(2) 架台

試験装置の架台について、図 3.2.4-9 に平面図を、図 3.2.4-10 に立面図を示す。

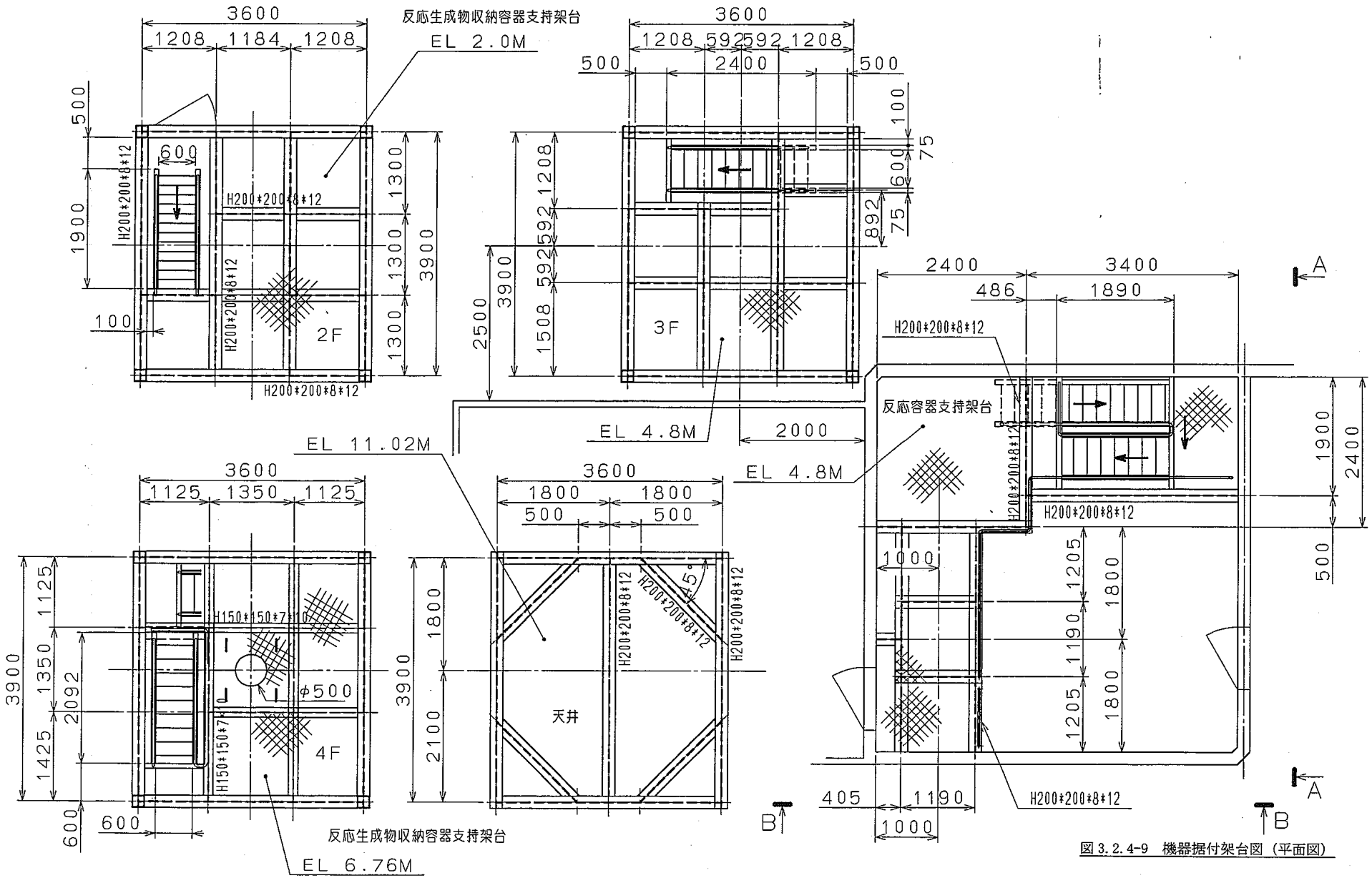


図 3.2.4-9　機器据付架台図（平面図）

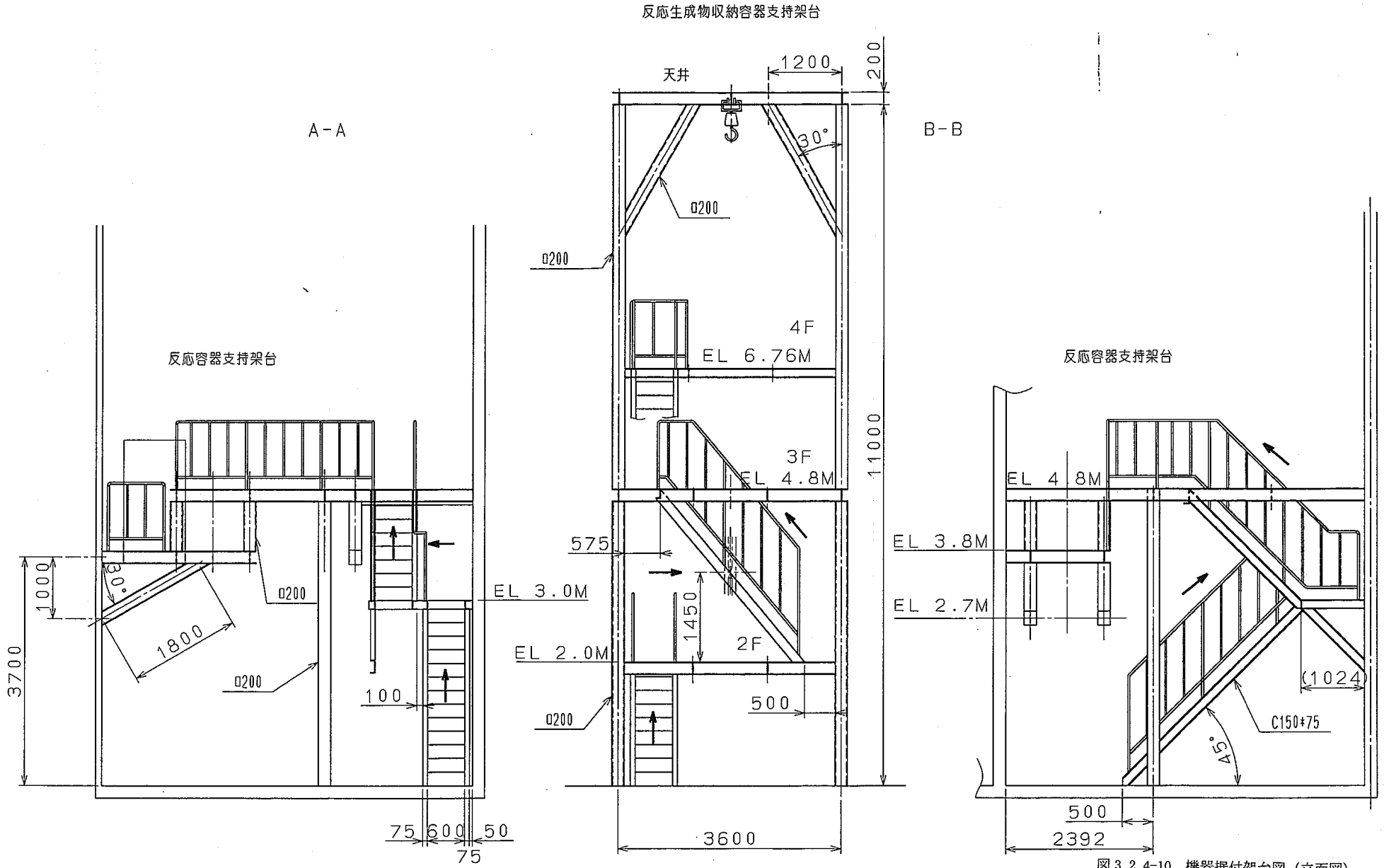


図 3.2.4-10　機器据付架台図（立面図）

3.3 運転方法の検討

本試験装置では２通りの放出ルートを設けており、それぞれの放出ルートでの水リーク試験を行うことができる。１つのルートは、反応容器と反応生成物収納容器とを放出系配管で接続して、水リーク試験時における反応生成物を収納容器に導き、収納容器で水素を分離して放出し、水素以外の反応生成物を収納するものであり、従来設計と同様である。他のルートは、実証炉設計で検討されてきた概念であり、ダンプタンクで未反応のナトリウムや水酸化ナトリウム等の化合物を分離した後、収納容器（サイクロンセパレータによる分離機能）でさらに分離して水素を系外へ放出するものである。これら２つの試験を可能とするために、新設のダンプタンクを設け、充填ドレンだけでなく、反応生成物収納容器と兼用できるようにした。

表 3.3.1-1 に系統内アルゴンガス充填／予熱から試験終了後のナトリウムドレンまでの手順をまとめたものを示す。表中、各作業時における弁の開閉手順と確認事項及び各作業終了時の試験装置の弁開閉状況を示した。

系統内アルゴンガス充填／予熱時は、予熱時の各部温度差により容器間に圧力差が生じないように、各容器を連通させた。

ナトリウム移送（充填）は、新設ダンプタンクより、0.5 m^3のナトリウムを反応容器へ加圧充填することとした。反応容器／収納容器／既設ダンプタンクの容積合計が３m^3以上あることから、これらの容器を連通させることにより、収納容器側ガスを排気しなくても圧力は２０％［← ３÷（３－０．５）=1.2 ］程度の上昇に抑えることができる。また、新設ダンプタンクと反応容器のヘッド差は約３ｍで小さい。これらから、作業性及び安全性を考慮して反応容器へのナトリウム充填時は、カバーガスの排気は行わず、充填後に排気してガス圧力を設定するものとした。

ナトリウム充填速度に関しては、下記に示す条件で実施した場合

管内ナトリウム流速：２．０ｍ／ｓ (0.27m^3/min)

となり、新設ダンプタンクから反応容器への移送が完了するのに２分程度と見積もることができる。

［条件］　ナトリウム温度：２００℃ (903.7kg/m^3)

配管寸法　：口径２Ｂ（φ 53.5 ID）　長さ５．８３ｍ

（表 3.2.4-1、図 3.2.4-7 参照）

配管摩擦係数　：０．０２（ムーディー線図より得た保守的な値）

弁のＬ／Ｄ　：３４０／個（ＣＲＡＮＥより）

エルボのＬ／Ｄ：　３０／個（ＣＲＡＮＥより）

差圧　　：０．３ kg/c m²

加圧側を 0.8kg/c m²、反応容器側を 0.2kg/c m²（微正圧から 20%上昇）、ヘッド分を 0.3kg/c m²と見込んで設定した値

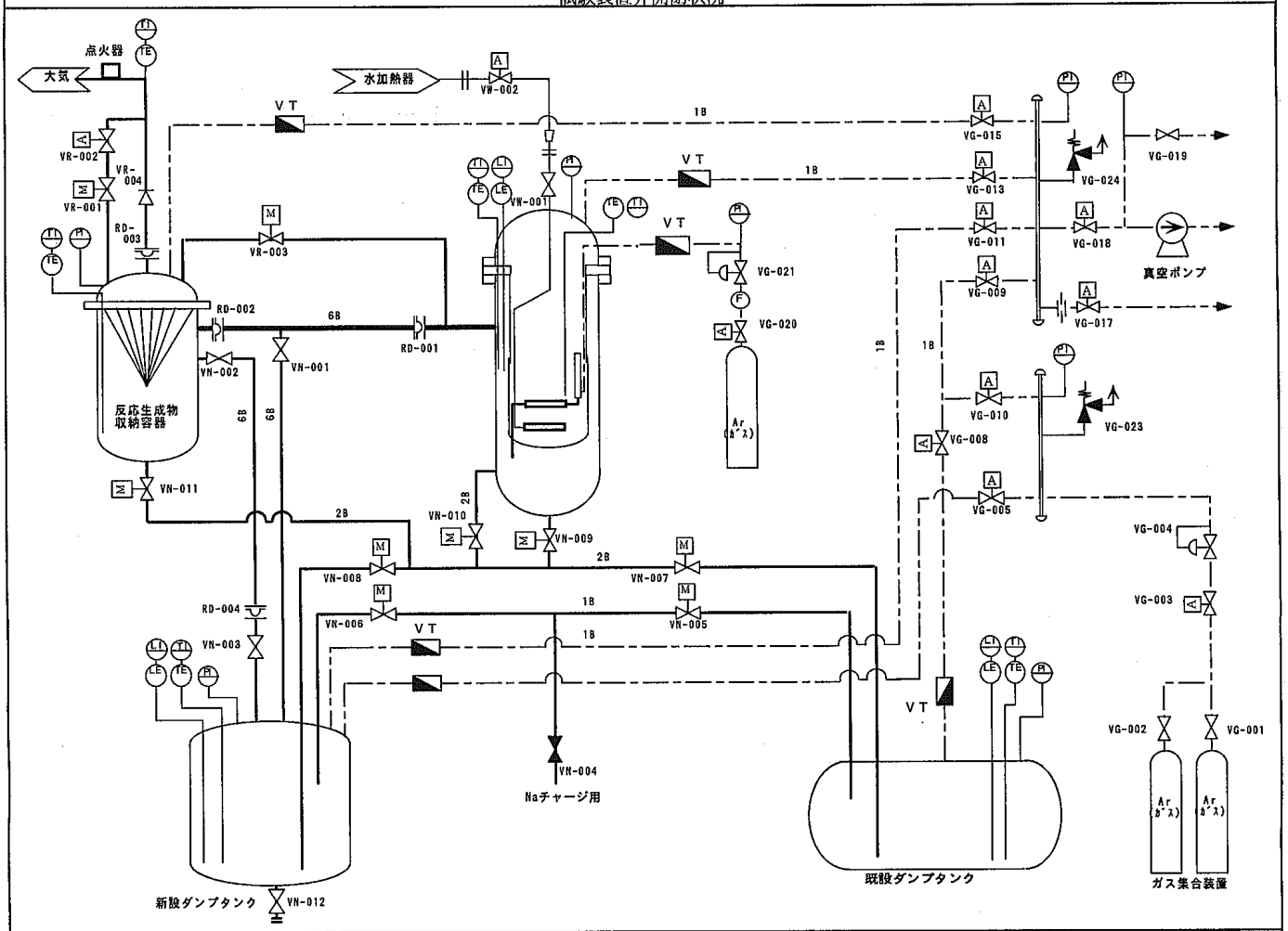
本条件でも短時間で充填されることから、これより加圧側圧力を低めに設定（例えば 0.6～0.7kg/c m²）し、新設ダンプタンク／反応容器内ナトリウム液位を監視しながら充填を行うことが望ましい。なお、急激に移送された場合でも、新設ダンプタンク内下端の配管開口部に液面が到達後はガスが巻き込まれ反応容器へ導かれ、全系のガス圧力が若干上昇するのみであり有意な問題はない。

試験後の反応容器内には、反応生成物は重量が重いことから、反応容器内の下層に沈殿し、上層にはきれいなナトリウムがあるものと考えられる。ここで、１ kg/s で 20 秒間注水した場合、水１モルに対して１モルのナトリウム反応物が生じるので、概ね 50～70kg(水酸化ナトリウム／酸化ナトリウム)のナトリウム生成物が生じる。これらの生成物が全量反応容器内に残存したと仮定しても、容器下端から側部ドレン孔レベルまでのインベントリは 90 リットル以上あるので側部ドレンレベル下方に反応生成物を収納することは可能である。

以上から、試験後のナトリウムドレンに際しては、反応容器の上方のきれいなナトリウムを反応容器側部ドレン孔より新設ダンプタンクへドレンし、容器内残存ナトリウムは既設ダンプタンクにドレンするものとした。なお、これらのドレン操作時には、配管内のつまり防止の観点から容器、ドレンラインを 400℃以上に予熱するものとする。

表3.3.1-1　　運転操作手順（1／5）

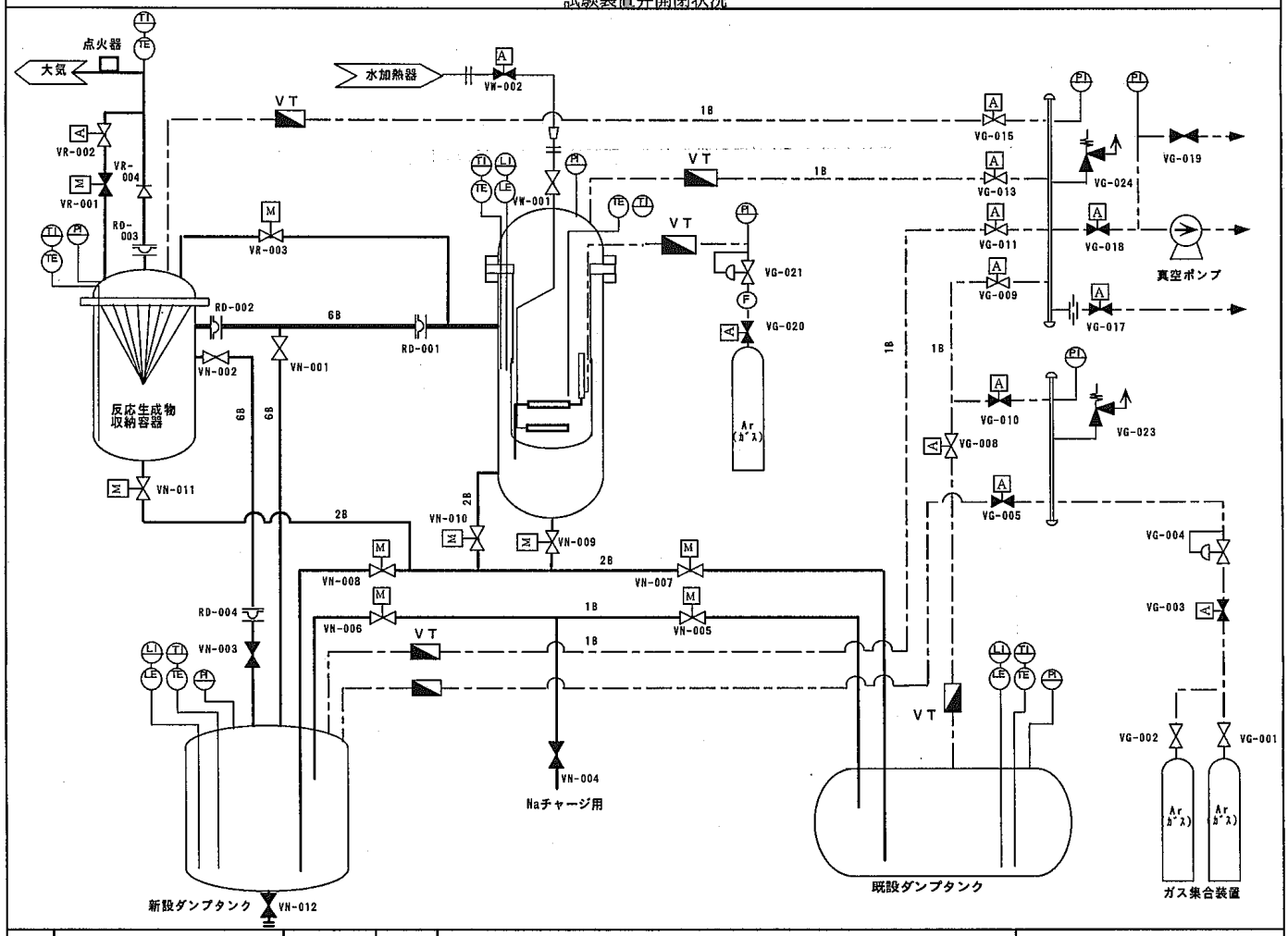
試験装置弁開閉状況



No	作業項目	弁の開閉		内容／確認事項	備考
1	系統内Ａｒガス充填	VN-003	閉	①外部境界の弁を閉	
		VN-004	閉	容器間Ｎａ弁は開として、容器内圧力の均一化を図る。	上図はNo.１開始時を示す。
		VN-012	閉		
		VW-002	閉		
		VG-003	閉		
		VG-005	閉		
		VG-010	閉		
		VG-017	閉		
		VG-018	閉		
		VG-019	閉		
		VG-020	閉		
		VR-001	閉		
		VG-018	開	②真空ラインより系内ガスを排気	
				VG-18「開」後、真空ポンプ起動。	
				系内圧力を0.1kg/cm^{2}ａ以下まで減圧する。	
		VG-018	閉	VG-10「閉」後、真空ポンプ停止。	
		VG-003	開	③ガス供給系より系内にＡｒガス加圧	
		VG-005	開	ラプチャディスクの健全性を考慮し、２kg/cm^{2}まで昇圧する。	
		VG-010	開		
		VG-010	閉	昇圧後、逆の順序で各弁閉。	
		VG-005	閉		
		VG-003	閉		
		VG-017	開/閉	④排気ラインより各容器を微正圧まで減圧。	
				⑤上記②～④を再度実施。	
		VG-017	閉	⑥系統内Ａｒガスパージ後VG-017閉として保持。	
				(2) 外部ヒータにより容器／配管を予熱	
				・予熱温度：２００℃	
		VG-017	開/閉	・系内ガス圧力微正圧保持	

表3.3.1-1　　運転操作手順（2／5）

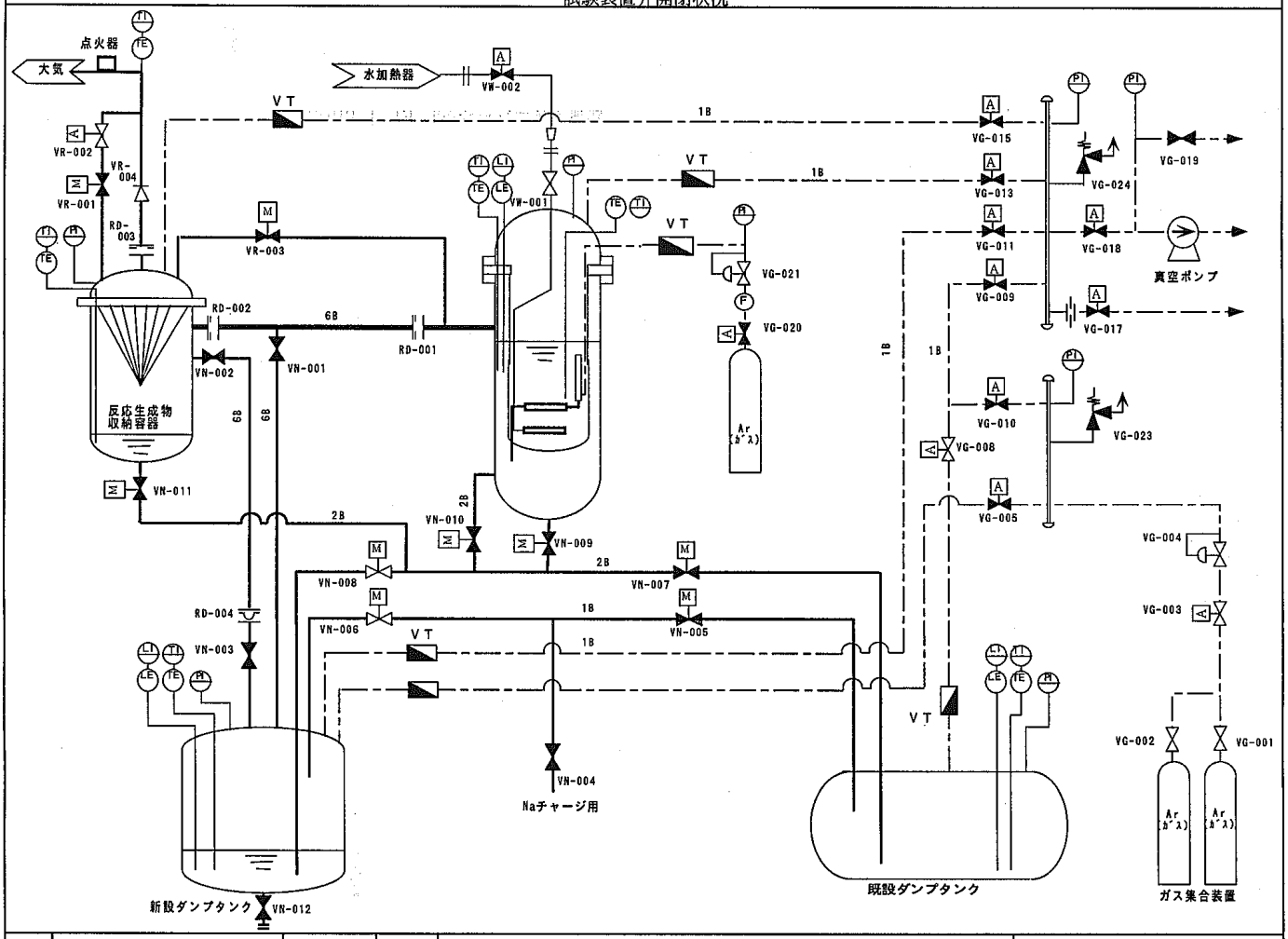
試験装置弁開閉状況



No	作業項目	弁の開閉		内容／確認事項	備考
2	Ｎａ移送／試験準備	VN-001	閉	①新設ダンプタンク廻りＮａ弁の設定	
		VN-002	閉	・既設ダンプタンクとＮａ系配管切り離し	上図はNo.2開始時を示す。
		VN-005	閉	・補助ライン隔離	
		VN-007	閉	・反応容器／収納容器ドレン弁閉	
		VN-010	閉		
		VN-011	閉		
		VR-003	閉		
		VN-004	開	②新設ダンプタンクへＮａチャージ	
				・Ｎａチャージ配管と供給設備配管(図示せず)を接続	
				・Ｎａチャージライン、新設ダンプタンク温度確認(200±30℃)	
				・VN-004「開」、Ｎａチャージ開始	
		VN-004	閉	・新設ダンプタンク内Ｎａ液面を監視し、所定液位でチャージ終了。VN-004閉	
		VG-017	開/閉	・系統内ガス圧力が微正圧(0.1kg/cm²程度)となるように調整	
		VG-011	閉	③反応容器へＮａチャージ	
		VG-003	開	・ガス供給系より新設ダンプタンク内にＡｒガス供給	
		VG-005	開/閉	・新設ダンプタンク／反応容器内液位を監視	
				・供給ガスを調整し反応容器内所定液位に設定	
		VN-009	閉	・反応容器内にＮａチャージ完了	
		VG-009	閉	・Ｎａ配管内Ｎａをドレン	
		VG-010	開		
		VG-011	開		
		VN-005	開		
		VN-007	開		
		VG-010	開	・ガス圧均一化	
		VG-011	開		
		VG-017	開/閉	④反応容器昇温	
				・反応容器内Ｎａを外部ヒータで試験温度まで昇温	
				・系統内ガス圧力が微正圧(0.1kg/cm²程度)となるように調整	
		VG-009	閉	⑤試験準備完了	
		VG-011	閉	・反応容器／収納容器カバーガス隔離	
		VG-013	閉		
		VG-015	閉		

表3.3.1-1　　運転操作手順（3／5）

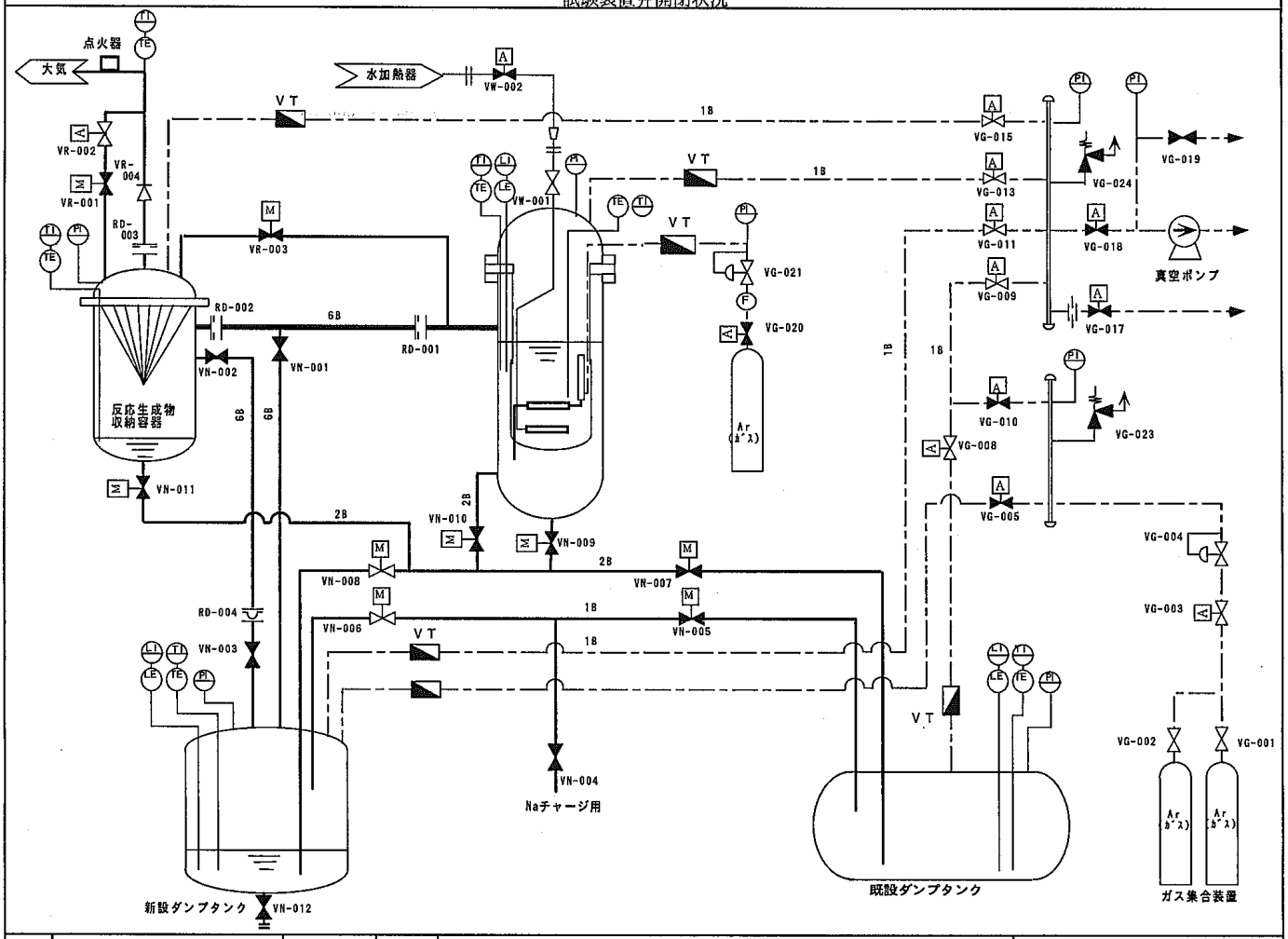
試験装置弁開閉状況



No	作業項目	弁の開閉		内容／確認事項	備考
3	試験終了後 容器内ガスパージ	VG-010 VG-009 VG-013	開 開 開	①反応容器、収納容器内ガスパージ （容器内反応ガスを点火器に導き燃焼処理）	上図はNo.3開始時を示す。
		VG-013 VG-015	閉 開	②収納容器内ガスパージ （容器内反応ガスを点火器に導き燃焼処理）	
		VG-010 VG-013 VG-011	閉 開 開	③全カバーガス連通 （真空引き後パージもあるが、ここでは加圧パージによる場合を示す。）	
		VG-017	開/閉	③微正圧まで減圧	

表3.3.1-1　　運転操作手順（4／5）

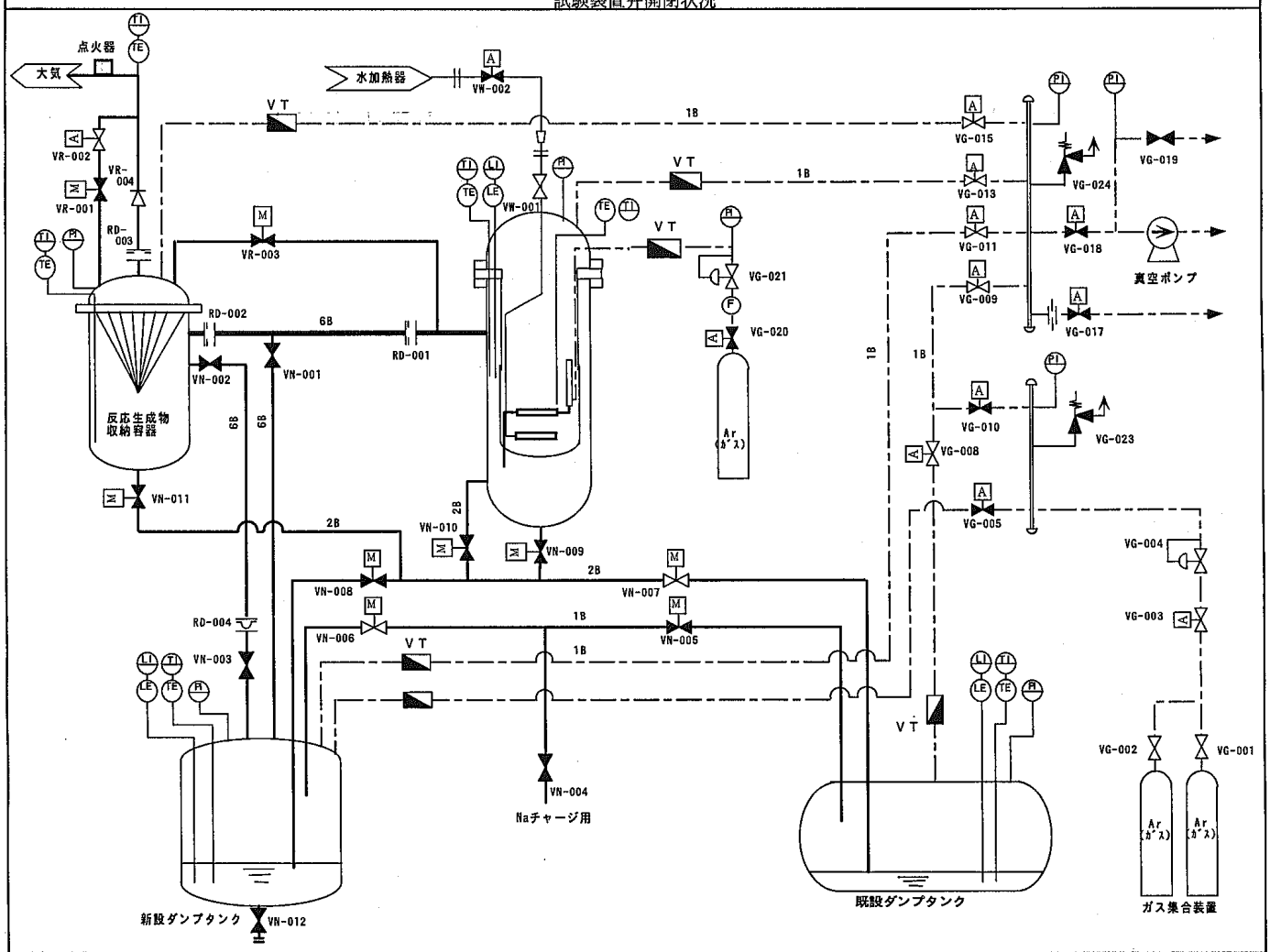
試験装置弁開閉状況



No	作業項目	弁の開閉		内容／確認事項	備考
4	Ｎａドレン	VN-010	閉 開	①反応容器から新設ダンプタンクにドレン ・ドレン配管温度確認（400℃以上暫定） ・反応容器内Ｎａ温度確認（400℃以上暫定）	上図はNo.４開始時を示す。
		VN-010 VN-008 VN-007 VN-009	閉 閉 開 開	②反応容器から既設ダンプタンクにドレン ・ドレン配管温度確認（400℃以上暫定） ・反応容器内Ｎａ温度確認（400℃以上暫定）	
		VG-008 VG-011 VG-010	閉 閉 開	③ガス連通による反応容器ドレン完了の確認 ・反応容器内圧力昇圧(0.2～0.3kg/cm^2) ・反応容器／既設ダンプタンク内圧力を監視。 各容器内圧力の上昇を確認する。	必要に応じ実施
		VG-010 VG-008 VN-009 VN-011	閉 開 閉 開	④収納容器から既設ダンプタンクにドレン	
		VG-008 VG-010	閉 開	⑤ガス連通による収納容器ドレン完了の確認 ・収納容器内圧力昇圧(0.2～0.3kg/cm^2) ・収納容器／既設ダンプタンク内圧力を監視。 各容器内圧力の上昇を確認する。	必要に応じ実施
		VG-010 VG-008 VG-011 VG-017	閉 開 開 開/閉	・確認後、Ａｒガス供給停止し、全容器カバーガス連通後ガス圧低下し、微正圧保持する。	

表3.3.1-1　　運転操作手順（5／5）

試験装置弁開閉状況



No	作業項目	弁の開閉		内容／確認事項	備考
5	汚れたＮａの分離	VG-010 VG-015 VG-011 VN-005 VG-005 VG-003 VG-011 VG-017	閉 開 閉 開 開 開/閉 開 開/閉	①新設ダンプタンクから既設ダンプタンクへのＮａ移送 ・新設ダンプタンク内ガス圧力を0.5kg/cm²まで昇圧 ・新設ダンプタンク／既設ダンプタンクＮａ液位監視 ・所定液位到達後ガス供給を停止し、サイホンブレークさせる。 ・系統内ガス圧力調整	上図はNo.5開始時を示す。
		VG-009 VG-010 VG-005 VG-011 VG-003 VG-009 VG-017	閉 開 閉 開 開/閉 開 開/閉	②既設から新設ダンプタンクに上澄みＮａ移送 ・既設ダンプタンク内ガス圧力を0.5kg/cm²まで昇圧 ・新設ダンプタンク／既設ダンプタンクＮａ液位監視 ・所定液位到達後ガス供給を停止し、サイホンブレークさせる。 ・系統内ガス圧力調整 上記①②を必要に応じ繰り返し、新設ダンプタンク内Ｎａのの浄化を行う。 反応容器内洗浄を行う場合は新設ダンプタンクから反応容器へのＮａチャージ（表3.3.1-1(2/5)）及びドレン（表3.3.1-1(4/5)）の手順により行う。	

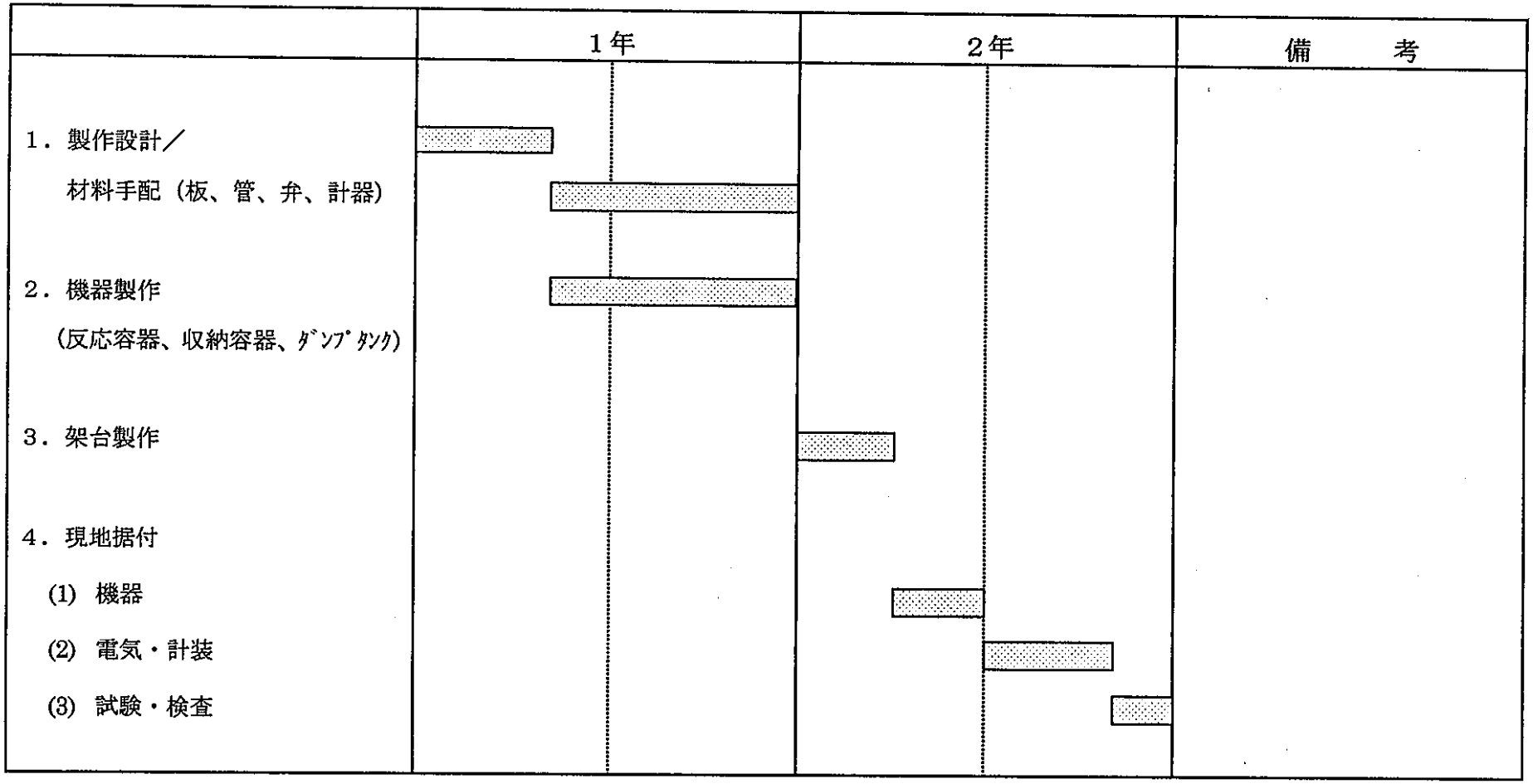
3.4 製作・据付工程

前項までに示した各機器・設備の製作・据付工程を検討した。

表 3.4-1 に熱伝達率測定試験装置の製作・据付工程（案）を示す。

本検討成果をもとに製作設計を行い、材料手配，機器・架台製作，現地据付を行い、試験・検査完了まで２ヶ年としている。

表 3.4-1　製作・据付工程（案）



4．まとめ

動燃事業団所有の高速炉安全性第１試験室の大リーク・ナトリウム－水反応試験装置（SWAT-1）跡を利用した管外熱伝達率測定試験装置に関して、系統／主要機器／計装設備／配管・配置・架台の設計を行った。また、運転方法，製作・据付工程の検討を行った。

5．謝　辞

本検討作業の遂行にあたり御指導頂きました動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室の濱田広次氏、下山一仁氏、栗原成計氏、柴崎洋一氏及び関係各位に対し、深甚の謝意を表します。

6．参考文献

(1) 田中信夫、広井博、大高仁護、佐々木和一、佐藤稔、堀雅夫, SWAT-1 試験装置による大リーク・ナトリウム－水反応試験 －第Ⅳ報 放出系特性試験の結果－：SN941 76-38(1976 年 4 月)

主要機器の強度計算書

1．仕　様

1.1 反応容器の仕様

仕　　様			
最高使用圧力	内圧作用時	30.0	kg/cm^2
	外圧作用時	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550	℃
耐圧試験時圧力		45.0	kg/cm^2

1.2 収納容器の仕様

仕　　様			
最高使用圧力	内圧作用時	10.0	kg/cm^2
	外圧作用時	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550	℃
耐圧試験時圧力		15.0	kg/cm^2

1.3 ダンプタンクの仕様

仕　　様			
最高使用圧力	内圧作用時	10.0	kg/cm^2
	外圧作用時	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550	℃
耐圧試験時圧力		15.0	kg/cm^2

2．設計条件

部　位		反応容器胴板	収納容器・ﾄﾞﾚﾝﾀﾝｸ胴板	反応容器鏡板	収納容器・ﾄﾞﾚﾝﾀﾝｸ鏡板	反応容器ﾉｽﾞﾙ	収納容器・ﾄﾞﾚﾝﾀﾝｸﾉｽﾞﾙ
材　料		SUS304HP		SUSF304		SUS304, SUS304TP	
最高使用圧力	内圧作用時	30.0 kg/cm^2	10.0 kg/cm^2	30.0 kg/cm^2	10.0 kg/cm^2	30.0 kg/cm^2	10.0 kg/cm^2
	外圧作用時	1.0 kg/cm^2	1.0 kg/cm^2	1.0 kg/cm^2	1.0 kg/cm^2	1.0 kg/cm^2	1.0 kg/cm^2
最高使用温度		550 ℃	550 ℃	550 ℃	550 ℃	550 ℃	550.0 ℃
耐圧試験圧力		45.0 kg/cm^2	15.0 kg/cm^2	45.0 kg/cm^2	15.0 kg/cm^2	45.0 kg/cm^2	15.0 kg/cm^2
適用法規	労働安全衛生法第１種圧力容器	第３２条１項		第４２条１項		第３２条２項	第５０条
腐れ代		0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
溶接継手の種類		突き合わせ		—		—	—
残留応力の除去		実施		実施		実施	実施
放射線検査の有無		有		—		—	—
継手効率		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3．容器の胴の厚さの計算

圧力容器構造規格　第３１条第１項、第３２条第１項及び第３３条第１項を準用する。

3.1 胴板（反応容器）

（イ）第１号による胴の厚さ　　t1

（ロ）内面に圧力を受ける円筒形の胴

$$t = \frac{PDi}{200\sigma x\eta - 2P(1-k)} + \alpha$$

（ハ）外面に圧力を受ける円筒形の胴

$$Pa = \frac{4B}{3(Do/ts)}$$

材料			SUS304HP	
最高使用圧力	内圧	[P]	30.0	kg/cm^2
	外圧	[Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度			550.0	℃
胴の内径		[Di]	700.0	mm
胴の外径		[Do]	750.0	mm
強め輪間の有効長さ		[l]	2000.0	mm
許容引張り応力		[σx]	9.2	kg/mm^2
降伏点		[Sy]	11.1	kg/mm^2
継手効率		[η]	1.0	
継手の種類			突き合わせ	
放射線検査の有無			有	
呼び厚さ	25.00 mm		最小厚さ [ts]	21.76 mm
必要厚さ		[t]	11.7	mm
l / Do			2.7	
Do / ts			34.5	
[B]（別図第(ハ)の４より求めた値）			400.0	
許容外圧		[Pa]	15.5	kg/cm^2
ts ≧ t,　Pa ≧ Pe　よって十分である。				

3.2 胴板（収納容器）

（イ）第１号による胴の厚さ　　t1

（ロ）内面に圧力を受ける円筒形の胴

$$t = \frac{PDi}{200\sigma x\eta - 2P(1-k)} + \alpha$$

（ハ）外面に圧力を受ける円筒形の胴

$$Pa = \frac{4B}{3(Do/ts)}$$

材料		SUS304HP	
最高使用圧力	内圧　[P]	10.0	kg/cm^2
	外圧　[Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550.0	℃
胴の内径	[Di]	900.0	mm
胴の外径	[Do]	924.0	mm
強め輪間の有効長さ	[l]	1500.0	mm
許容引張り応力	[σx]	9.2	kg/mm^2
降伏点	[Sy]	11.1	kg/mm^2
継手効率	[η]	1.0	
継手の種類		突き合わせ	
放射線検査の有無		有	
呼び厚さ	12.00　mm	最小厚さ　[ts]	9.44　mm
必要厚さ	[t]	5.0	mm
l / Do		1.6	
Do / ts		97.9	
[B]（ 別図第(ハ)の４より求めた値 ）		300.0	
許容外圧	[Pa]	4.1	kg/cm^2
ts ≧ t,　Pa ≧ Pe　よって十分である。			

3.3 胴板（ダンプタンク容器）

（イ）第１号による胴の厚さ　　t1

（ロ）内面に圧力を受ける円筒形の胴

$$t = \frac{PDi}{200\sigma x\eta - 2P(1-k)} + \alpha$$

（ハ）外面に圧力を受ける円筒形の胴

$$Pa = \frac{4B}{3(Do/ts)}$$

材料			SUS304HP	
最高使用圧力	内圧	[P]	10.0	kg/cm^2
	外圧	[Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度			550.0	℃
胴の内径		[Di]	1000.0	mm
胴の外径		[Do]	1024.0	mm
強め輪間の有効長さ		[l]	700.0	mm
許容引張り応力		[σx]	9.2	kg/mm^2
降伏点		[Sy]	11.1	kg/mm^2
継手効率		[η]	1.0	
継手の種類			突き合わせ	
放射線検査の有無			有	
呼び厚さ	12.00 mm		最小厚さ [ts]	9.44 mm
必要厚さ		[t]	5.5	mm
l / Do			0.7	
Do / ts			108.5	
[B]（別図第(ハ)の４より求めた値）			300.0	
許容外圧		[Pa]	3.7	kg/cm^2
ts ≧ t,　Pa ≧ Pe　よって十分である。				

4．容器の鏡板の厚さの計算

圧力容器構造規格　第４２条第２項及び第４３条第４項を準用する。

4.1 反応容器の鏡板

$$t = \frac{PDV}{200\sigma x\eta - 0.2P} + \alpha$$

$$V = \frac{1}{6}\left(2 + \left(\frac{D}{2h}\right)^2\right)$$

hは、鏡板の内面における短径の２分の１の値を表すものとする。

材料			SUSF304	
最高使用圧力	内圧	[P]	30.0	kg/cm^2
	外圧	[Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度			550.0	℃
胴の内径		[D]	900.0	mm
胴の外径		[Do]	950.0	mm
半だ円体形鏡板の形状による係数		[V]	0.4	mm
許容引張り応力		[σx]	9.2	kg/mm^2
継手効率		[η]	1.0	
継手の種類			—	
放射線検査の有無			—	
呼び厚さ	25.00 mm		最小厚さ [ts]	19.85 mm
必要厚さ		[t]	5.9	mm
ts ≧ t, よって十分である。				

4.2 収納容器の鏡板

$$t = \frac{PDV}{200\sigma x\eta - 0.2P} + \alpha$$

$$V = \frac{1}{6}\left(2 + \left(\frac{D}{2h}\right)^2\right)$$

hは、鏡板の内面における短径の２分の１の値を表すものとする。

材料		SUSF304	
最高使用圧力	内圧 [P]	30.0	kg/cm^2
	外圧 [Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550.0	℃
胴の内径	[D]	700.0	mm
胴の外径	[Do]	724.0	mm
半だ円体形鏡板の形状による係数	[V]	0.4	mm
許容引張り応力	[σx]	9.2	kg/mm^2
継手効率	[η]	1.0	
継手の種類		—	
放射線検査の有無		—	
呼び厚さ	12.00 mm	最小厚さ [ts]	8.28 mm
必要厚さ	[t]	4.6	mm
ts ≧ t, よって十分である。			

4.3 ダンプタンクの鏡板

$$t = \frac{PDV}{200\sigma x\eta - 0.2P} + \alpha$$

$$V = \frac{1}{6}\left(2 + \left(\frac{D}{2h}\right)^2\right)$$

hは、鏡板の内面における短径の２分の１の値を表すものとする。

材料		SUSF304	
最高使用圧力	内圧 [P]	30.0	kg/cm^2
	外圧 [Pe]	1.0	kg/cm^2
最高使用温度		550.0	℃
胴の内径	[D]	1000.0	mm
胴の外径	[Do]	1024.0	mm
半だ円体形鏡板の形状による係数	[V]	0.4	mm
許容引張り応力	[σx]	9.2	kg/mm^2
継手効率	[η]	1.0	
継手の種類		—	
放射線検査の有無		—	
呼び厚さ	12.00 mm	最小厚さ [ts]	8.28 mm
必要厚さ	[t]	6.6	mm
ts ≧ t, よって十分である。			

5．容器の管台の厚さの計算

圧力容器構造規格　第３２条第３項を準用する。

（二）外径を基準とする場合

$$t = \frac{PDo}{200\sigma x\eta + 2kP} + \alpha$$

No.		内圧時 最高使用圧力 (kg/cm²)	内圧時 最高使用温度 (℃)	外径 Do (mm)	公称厚さ (mm)	材質	σx (kg/mm²)	η	Q	ts (mm)	tr (mm)	備考
反応容器	N-1	30	550	165.2	7.1	SUS304TP	6.7	1	10.0	6.39	3.64	
	N-2	30	550	60.5	13.4	SUS304	9.2	1	0.3	13.10	0.98	ソケット
	N-3	30	550	60.5	13.4	SUS304	9.2	1	0.3	13.10	0.98	ソケット
	N-4	30	550	60.5	3.9	SUS304TP	6.7	1	12.5	3.42	1.34	
	N-5	30	550	139.8	6.6	SUS304TP	6.7	1	10.0	5.94	3.08	
	N-6	30	550	60.5	3.9	SUS304TP	6.7	1	10.0	3.51	1.34	
	N-7	30	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.75	
	N-8	30	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.75	
収納容器	N-1	10	550	165.2	7.1	SUS304TP	6.7	1	10.0	6.39	1.23	
	N-2	10	550	60.5	3.5	SUS304TP	6.7	1	12.5	3.07	0.45	
	N-3	10	550	165.2	7.1	SUS304TP	6.7	1	10.0	6.39	1.23	
	N-4	10	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.26	
	N-5	10	550	60.5	3.5	SUS304TP	6.7	1	12.5	3.07	0.45	
タンク	N-1	10	550	165.2	7.1	SUS304TP	6.7	1	10.0	6.39	1.23	
	N-2	10	550	165.2	7.1	SUS304TP	6.7	1	10.0	6.39	1.23	
	N-3	10	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.26	
	N-4	10	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.26	
	N-5	10	550	60.5	3.5	SUS304TP	6.7	1	12.5	3.07	0.45	
	N-6	10	550	34.0	3.4	SUS304TP	6.7	1	12.5	2.98	0.26	

ts≧tr,　よって十分である。

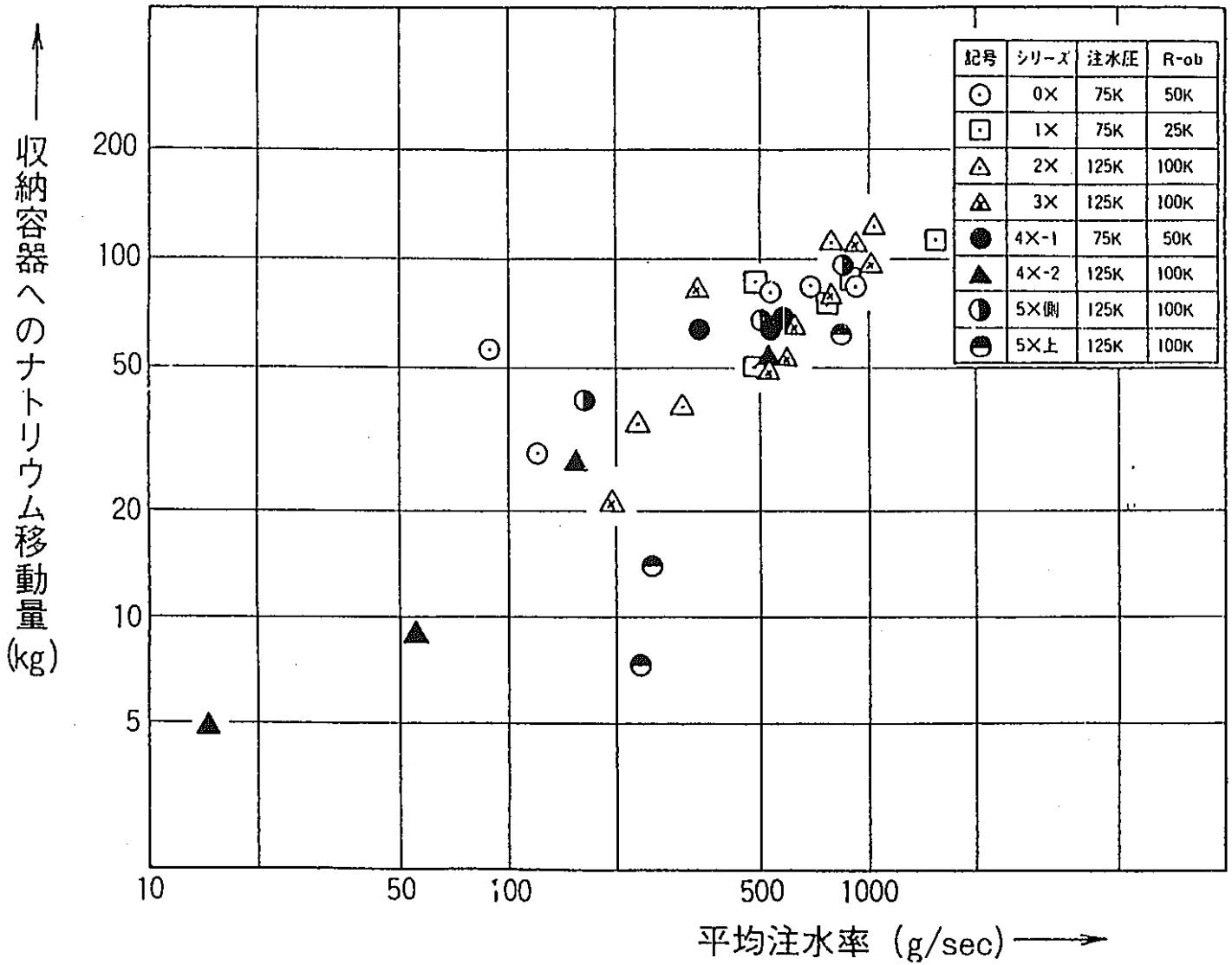


図 6.10　平均注水率と収納容器へのNa移動量の関係

（SN941 76-33 より）

補足資料－２

予熱保温設計計算書

1.　設計条件

昇温温度　θ_1＝５５０［℃］
昇温時間　Ｔ　＝　　８［ｈ］
初期温度　θ_0＝　２０［℃］

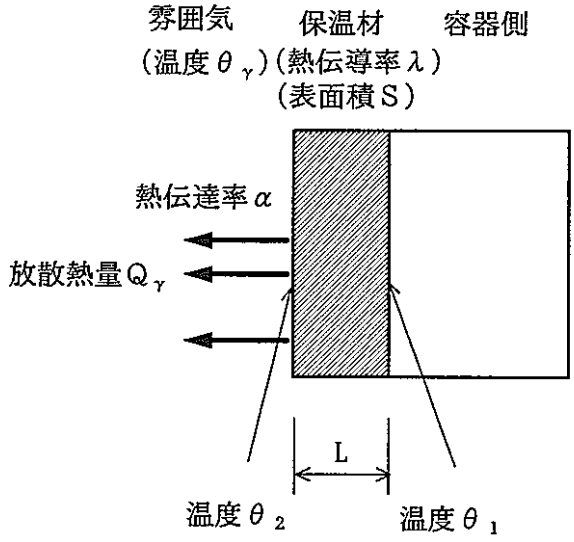
2.　計算式

(1)放散熱量／放散熱補償に必要なヒータ容量
（円筒部についても平板として想定し計算）

$$Q_r = \alpha \times (\theta_2 - \theta_\gamma) \times S$$

但し、$S = \pi \times d_1 \times h(+\frac{\pi}{4} \times d_1^{\ 2} \times 2)$

（）内は容器の場合のみ使用



(2)保温材厚さ

$$\lambda = \lambda \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{Q}$$

(3) 放散熱補償に必要なヒータ容量

$$Q_0 = \frac{Q_v}{T}$$

但し　$Q_v = C \times G \times (\theta_1 - \theta_0)$

$G = \rho \times V$

$V = \frac{\pi}{4} \times [d_1^{\ 2} - (d_1 - 2t)^2] \times h(+\frac{\pi}{4} \times d_1^{\ 2} \times t)$

後の（）内は容器の場合のみ使用

記号説明

C ; 容器／配管比熱
d_1 ; 容器／配管外径
d_2 ; 保温材外径
h ; 容器高さ／配管長さ
G ; 容器／配管重量
H_v ; 容器／配管熱容量
l ; 保温材厚さ
q ; 熱流束
Q_0 ; 容器／配管単位時間当たりの昇温熱量（＝容器／配管８時間昇温に必要なヒータ容量）
Q_r ; 放散熱量（＝放散熱補償に必要なヒータ容量）
Q_v ; 容器／配管８時間時昇温容量
Q_{0d} ; 容器／配管８時間昇温に必要なヒータ設計容量
Q_{rd} ; 放散熱補償に必要なヒータ設計容量
S ; 容器／配管表面積
t ; 容器／配管板厚
T ; 昇温時間
α ; 保温外表面熱伝達率
θ_0 ; 初期温度
θ_1 ; 内部流体温度（＝容器／配管外表面温度）
θ_2 ; 保温材外表面温度
θ_r ; 雰囲気温度
ρ ; 容器／配管密度
λ ; 保温材熱伝導率

3. 計算条件

(1)　各物性値は下記の値を用いる。

1) 容器／配管比熱　C

C＝０．１１８ [kcal/kg℃]　(at ２０℃、ＳＵＳ３０４)

2)保温材熱伝導率

λ＝０．０４４ [kcal/mh℃]　(ロックウール３号品相当)

λ＝０．０２２ [kcal/mh℃]　(マイクロサーム相当)

3)保温外表面熱伝達率

α＝　　１０ [kcal/m^2h℃]　(もんじゅの予熱・保温設備の設計値を参考に設定)

(2)　必要昇温ヒータ容量は、予熱に必要なヒータ容量と放散熱補償に必要なヒータ容量を合計し決定する。

表１　保温材厚さと放散熱補償に必要なヒータ容量

容器・配管	容器外径 d_1 [m]	容器高さ h [m]	容器表面積 S [m^2]	内部流体温度 θ_1 [℃]	保温材熱伝導率 λ [kcal/mh℃]	保温材厚さ l [m]	保温表面温度 θ_2 [℃]	雰囲気温度 θ_0 [℃]	熱流束 q [kcal/hm^2]	放散熱量 Q_r [kcal/h]	ヒータ容量 Q_r [kW]	ヒータ設計容量 Q_{rd} [kW]
反応容器	0.750	3.00	8.0	550.0	0.044	0.145	55.0	40.0	150.0	1192.8	1.4	1.9
反応生成物収納容器	0.924	2.59	8.9	550.0	0.044	0.145	55.0	40.0	150.0	1328.9	1.5	2.2
新設ダンプタンク	1.074	1.22	5.9	535.0	0.044	0.141	55.0	40.0	150.0	891.3	1.0	1.5
放出系配管(1m当たり)	0.165	1.00	0.5	550.0	0.044	0.145	55.0	40.0	150.0	77.8	0.091	0.127
ドレン配管(1m当たり)	0.061	1.00	0.2	550.0	0.044	0.145	55.0	40.0	150.0	28.5	0.033	0.046

注１）容器を円筒形状と仮定して表面積を算定

注２）放散熱量の算定は注１）の表面積を平板で仮定

注３）保温材材質はロックウールを想定

表２　容器の昇温に必要なヒータ容量（８時間での容器昇温を想定）

容器・配管	容器外径 d_1 [m]	板厚 t [m]	容器高さ h [m]	容器容積 V [m^3]	密度 ρ [kg/m^3]	比熱C [kcal/kg℃]	熱容量 H_v [kcal/℃]	内部流体温度 θ_1 [℃]	初期温度 θ_0 [℃]	８時間時昇温容量 Q_v [kcal/h]	ヒータ容量 Q_0 [kW]	ヒータ設計容量 Q_{0d} [kW]
反応容器	0.750	0.03	3.00	1.93E-01	7810	1.18E-01	1.78E+02	550.0	20.0	11778.3	13.7	19.2
反応生成物収納容器	0.924	0.01	2.59	1.05E-01	7810	1.18E-01	9.69E+01	550.0	20.0	6419.4	7.5	10.5
新設ダンプタンク	1.074	0.01	1.22	7.07E-02	7810	1.18E-01	6.52E+01	535.0	20.0	4197.2	4.9	6.8
放出系配管(1m当たり)	0.165	0.01	1.00	3.53E-03	7811	1.18E-01	3.25E+00	550.0	20.0	215.3	0.250	0.351
ドレン配管(1m当たり)	0.061	0.00	1.00	6.27E-04	7812	1.18E-01	5.78E-01	550.0	20.0	38.3	0.045	0.062

注１）容器を円筒形状と仮定して容器重量を算定

表３　放散熱を補償し所定時間に予熱するのに必要なヒータ容量

容器・配管	ヒータ設計容量Q_{rd} [kW]	ヒータ設計容量Q_{0d} [kW]	ヒータ容量合計 [kW]
反応容器	1.9	19.2	21.1
反応生成物収納容器	2.2	10.5	12.6
新設ダンプタンク	1.5	6.8	8.3
放出系配管(1m当たり)	0.127	0.351	0.477
ドレン配管(1m当たり)	0.046	0.062	0.109

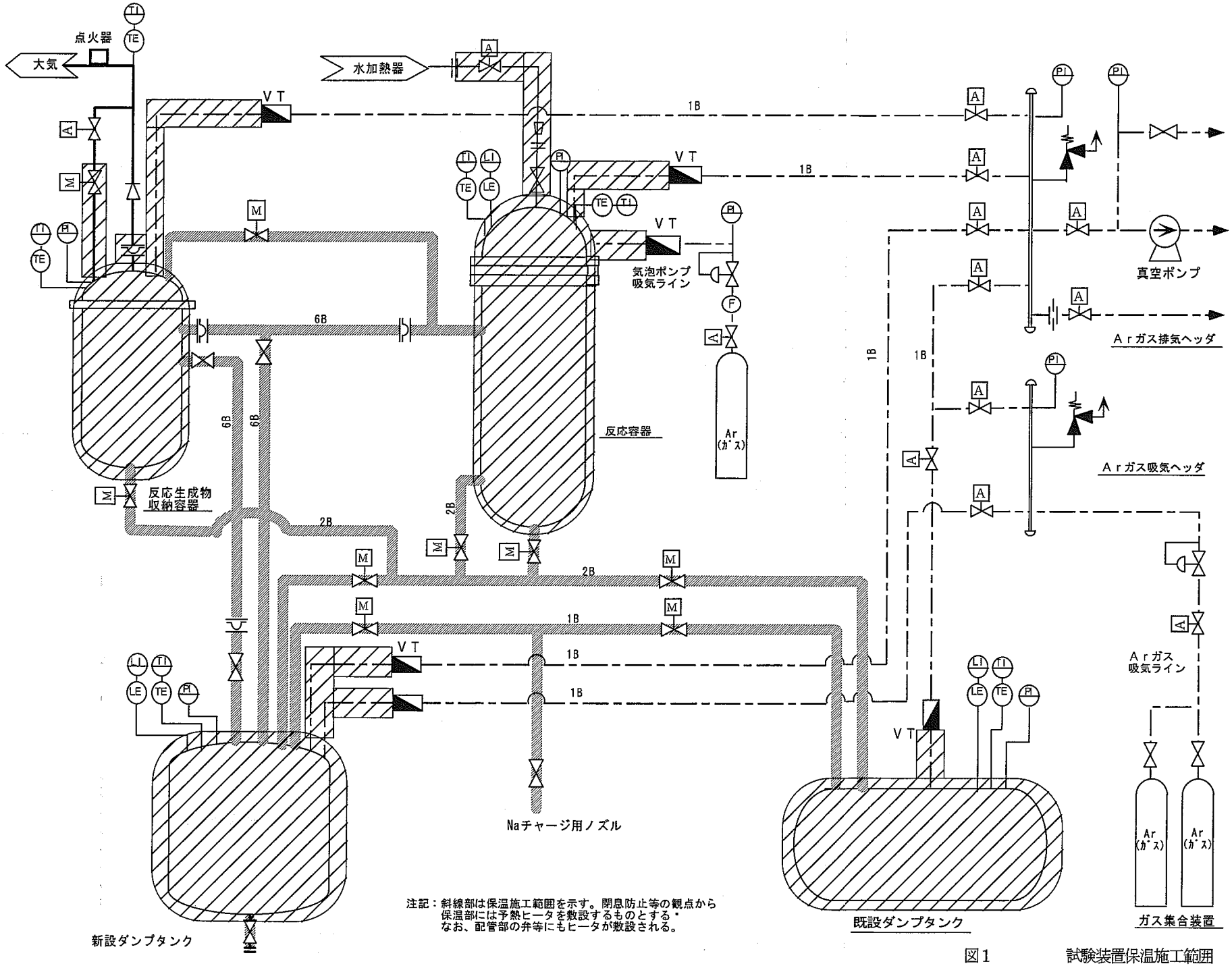


図1　試験装置保温施工範囲

621.695

気ほうポンプの揚水特性*

轟　一郎**，佐藤泰生***，本田　達***

1. 緒　　言

気ほうポンプのよく知られた用途には，金属への腐食性の強い液体，あるいは爆発性や毒性のある液体，温泉水などの高温液体，およびうず巻ポンプによる揚水が不可能であるような地下水，などの揚水がある．これらの目的には将来においても気ほうポンプが重要な地位を占めるであろうと予想される．また，特殊な用途としては物質の相変化を利用した沸騰気ほうポンプも考案されつつある[1]．

しかしながら，これまでのところ気ほうポンプの設計法は確立されているとはいいがたく，利用されている資料のうちには検討を要するものも見受けられる[2]．気ほうポンプに関する報告は古くから数多く出されているが[3]~[8]，気液二相流体の流動問題が解決されていなかったため一般性のある資料とはいいがたい．最近 Stenning ら[9]は気液のすべり比を用いて解析を行なっており，よい解析法を示唆している．しかしながら，この論文については次の点が指摘される．すなわち，気ほうポンプの性能解析においてはすべり比よりも気体ないしは液体体積率を用いるほうがその特性をはあくしやすいこと，およびどのような手続きをとれば合理的な設計ができるかという点が論述されていないこと，の2点である．

本研究は，気液二相流に関するこれまでの研究で明らかにされている摩擦圧力損失と気体体積率の資料と，モデルポンプによる実験結果とをもとに，気ほうポンプの揚水特性を明らかにし，その設計ないしは性能予測のための資料を与えようとするものである．

2. おもな記号

c_1, c_2, c_3：係数　$c_1 \equiv \lambda_{l0}\dfrac{L}{D}$，$c_2 \equiv \lambda_{l0}\dfrac{L'}{D}+\zeta_e$，

$c_3 \equiv 2\left(\dfrac{1}{f_{l2}}-1\right)$

D：管内径　m

F：管断面積　m^2

F_f：導水管内の壁面摩擦力　kg

f_l：液体体積率

$\bar{f}_l$：揚水管内の平均液体体積率（平均圧力点における値をとる）

g：重力の加速度　m/s^2

G_l：液体の重量流量　kg/s

H_d：吐出し揚程　m

H_s：浸水深さ　m

L：揚水管の長さ　m

L'：導水管の長さ　m

Q_g：供給空気量の大気圧換算値　m^3/s

$\bar{Q}_g$：供給空気量（揚水管内の平均圧力点における値）　l/s もしくは m^3/s

$\bar{Q}_{go}$：揚水開始点の空気量　m^3/s

Q_l：揚水量　l/s もしくは m^3/s

R_{el0}：みかけの液レイノルズ数$=w_{l0}D/\nu_l$

$\bar{w}_{g0}$：揚水管内のみかけの空気流速$=\bar{Q}_g/F$　m/s

$\bar{w}_{g0b}$：最高効率点のみかけの空気流速　m/s

$\bar{w}_{g0e}$：最大揚水量点のみかけの空気流速　m/s

w_l：揚水管における液相の平均流速$=Q_l/f_lF$　m/s

w_{l0}：揚水管内のみかけの液流速　m/s

z：指数

ζ_e：導水管の入口損失係数

γ_l：液体の比重量　kg/m^3

γ_{TP}：気液二相流体の比重量　kg/m^3

η_1：揚水管効率

η_2：理想揚水効率

η_p：揚水効率

$\eta_{c,is}$：圧縮機の全等温効率

σ：浸水率$=H_s/L$

λ_{l0}：管摩擦係数（液単相流）

τ_{TP}：二相流の壁面せん断応力　kg/m^2

3. 気ほうポンプの関係式

3・1　揚水の基礎式　断面積の一様な垂直管からな

* 昭和45年5月22日　九州支部長崎地方講演会および昭和45年10月30日九州・中国四国支部松江地方講演会において講演，原稿受付　昭和46年1月7日．

** 正員，有明工業高等専門学校．
*** 正員，熊本大学工学部（熊本市黒髪町）．

る図1のような気ほうポンプ系を考える．液面より H_s だけ低いところで管に気体を導入すると，流量 Q_l の液が H_d の位置まで揚水される．$H_s+H_d=L$ の部分が気液混合物の流動する揚水管であり，長さ L' の部分は液のみが流れる導水管である．定常的な揚水状態に関して断面1と断面2との間に運動量方程式を適用すると

$$\frac{G_l}{g}(w_{l1}-w_{l2})-F\int_0^L \gamma_{TP}dz-\int_0^L(\pi D\tau_{TP})dz$$
$$-F_f-F\zeta_e\frac{w_{l1}^2}{2g}\gamma_l+F\gamma_l H_s=0 \cdots\cdots(1)$$

となる．ただし，気体の運動量変化は他の項に比べて著しく小さいので無視されている．式(1)の第1項は液の運動量変化を表わしている．ここで

$$w_{l1}=w_{l0} \cdots\cdots(2)$$

$$w_{l2}=\frac{w_{l0}}{f_{l2}} \cdots\cdots(3)$$

$$G_l=Fw_{l0}\gamma_l \cdots\cdots(4)$$

を考慮すると，この運動量項は

$$\frac{G_l}{g}(w_{l1}-w_{l2})=\frac{\gamma_l}{g}Fw_{l0}^2\left(1-\frac{1}{f_{l2}}\right) \cdots\cdots(5)$$

となる．

第2項は揚水管内の流体重量を表わす項である．気ほうポンプにおいては一般に，$\gamma_l \gg \gamma_g$ であるから $\gamma_{TP}\cong\gamma_l f_l$ となる．よって第2項は次のように表わされる．

$$F\int_0^L \gamma_{TP}dz=FL\gamma_l\bar{f}_l \cdots\cdots(6)$$

ただし

$$\bar{f}_l=\frac{1}{L}\int_0^L f_l dz$$

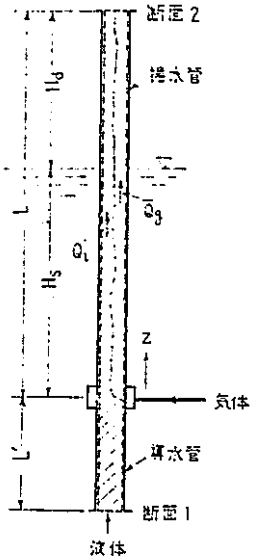


図1　気ほうポンプの解析モデル

である．

第3項は揚水管における摩擦力を示す項である．垂直管内二相流の摩擦圧力損失算定式としては多くの提案があるが，式の形が簡単で，かつ比較的よく実験値と一致するものとして，赤川[10]，勝原[11]の

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_l}=f_l^{-z} \cdots\cdots(7)$$

をあげることができる．ここで，ΔP_{TP} は二相流の摩擦圧力損失であり，ΔP_l は液成分のみが単独に流動する場合の摩擦圧力損失である．z は管の傾斜角度と管内面の相対あらさによって決まる定数である．式(7)を揚水管に適用する場合，液体体積率として $\bar{f}_l$ を用いることができるものと仮定すると，第3項は次のように書き表わせる．

$$\int_0^L(\pi D\tau_{TP})dz=F\Delta P_{TP}$$
$$=F\bar{f}_l^{-z}\lambda_{l0}\frac{L}{D}\frac{w_{l0}^2}{2g}\gamma_l \cdots\cdots(8)$$

第4および5項は，それぞれ導水管内の壁面摩擦力と入口損失に対応する圧力であり，ζ_e を入口損失係数とすると次のように書き表わすことができる．

$$F_f+F\zeta_e\frac{w_{l1}^2}{2g}\gamma_l=F\left(\lambda_{l0}\frac{L'}{D}+\zeta_e\right)\frac{w_{l0}^2}{2g}\gamma_l \cdots\cdots(9)$$

式(5)，(6)，(8)，(9)を式(1)に代入して整理すると

$$(H_s-L\bar{f}_l)\gamma_l=c_1\bar{f}_l^{-z}\frac{w_{l0}^2}{2g}\gamma_l+c_2\frac{w_{l0}^2}{2g}\gamma_l$$
$$+c_3\frac{w_{l0}^2}{2g}\gamma_l \cdots\cdots(10)$$

がえられる．ここで

$$c_1\equiv\lambda_{l0}\frac{L}{D},\quad c_2\equiv\lambda_{l0}\frac{L'}{D}+\zeta_e,\quad c_3\equiv2\left(\frac{1}{f_{l2}}-1\right)$$

式(10)の左辺は揚水の起動力であり，これに対して右辺がポンプで起こる諸損失である．この式をさらに書き改めると次のようになる．

$$\frac{w_{l0}^2}{2gL}=\frac{\sigma-\bar{f}_l}{c_1\bar{f}_l^{-z}+c_2+c_3} \cdots\cdots(11)$$

次に平均液体体積率 $\bar{f}_l$ の算式を考える．気ほうポンプの一般的な運転状態では揚水管内の流動様式がスラグ流となる場合が多いこと，および性能解析を行なう際には液体体積率と気液流量との間にめいりょうな関係が必要となること，の2点を考慮すると次の式(12)が適当であると考えられる．

$$\bar{f}_l=1-\frac{\bar{w}_{g0}}{1.2(\bar{w}_{g0}+w_{l0})+0.35\sqrt{gD}} \cdots\cdots(12)$$

この式は気体スラグの上昇速度が $w_g=1.2(w_{g0}+w_{l0})+0.35\sqrt{gD}$ で与えられるという Nicklin らの式[12]

を用い，かつ w_{g0} としては揚水管内の平均圧力点(平均圧力は揚水管入口と出口の圧力の算術平均)における値を用いた．

3・2 効率　気体圧縮機をも含んだ気ほうポンプ系全体の効率を η_t とすれば，η_t は揚水効率 η_p と圧縮機の効率 η_c とに分けることができる．

$$\eta_t=\eta_p\eta_c \cdots\cdots(13)$$

さらに，η_p と η_c は次の内容をもつものと考えることができる．

$$\eta_p=\eta_1\eta_2 \cdots\cdots(14)$$

$$\eta_c=\eta_{c,is} \cdots\cdots(15)$$

ここで η_1 は揚水管内において，気液の相対速度および水力学的諸損失によって失われる動力を考慮した効率で，これを揚水管効率と称し，次式のように定義する．

$$\eta_1=\frac{\left[\begin{array}{l}\text{揚水の正味動力（実}\\ \text{際に液の得た動力）}\end{array}\right]}{\left[\begin{array}{l}\text{相対速度，管内諸損失を無}\\ \text{視した場合の理想揚水動力}\end{array}\right]} \cdots\cdots(16)$$

η_2 は理想揚水効率とも称すべきもので，次式のように定義する．

$$\eta_2=\frac{\left[\begin{array}{l}\text{相対速度，管内諸損失を無}\\ \text{視した場合の理想揚水動力}\end{array}\right]}{\text{気体の等温圧縮動力}} \cdots\cdots(17)$$

η_c は

$$\eta_c=\frac{\text{気体の等温圧縮動力}}{\text{圧縮機の軸動力}}$$

$$=\text{圧縮機の全等温効率 } \eta_{c,is} \cdots\cdots(18)$$

η_p は圧縮機を除いた気ほうポンプのみの作動状態で決まり，気ほうポンプ相互の比較に用いることができる．これに対して η_t は圧縮機も含めた気ほうポンプ系の効率であり，他種のポンプとの比較の際にはこの値をもってすべき性質のものである．

η_1 と η_2 はさらに次のように導かれる．揚水管において相対速度および管内の水力学的諸損失を無視した場合の液体体積率を f_l' とすると，式(10)から

$$H_s-Lf_l'=0 \qquad \therefore\ f_l'=\frac{H_s}{L}=\sigma \cdots\cdots(19)$$

しかるに，相対速度のない場合の揚水量を Q_l' とすれば

$$f_l'=\frac{Q_l'}{\bar{Q}_g+Q_l'} \cdots\cdots(20)$$

したがって

$$Q_l'=\frac{\sigma}{1-\sigma}\bar{Q}_g \cdots\cdots(21)$$

実際の揚水量 Q_l は式(11)より

$$Q_l=F\sqrt{\frac{2gL(\sigma-\bar{f}_l)}{c_1\bar{f}_l^{-2}+c_2+c_3}} \cdots\cdots(22)$$

であるから，式(16)の η_1 は次のように定式化できる．

$$\eta_1=\frac{\gamma_l Q_l H_d}{\gamma_l Q_l' H_d}=\frac{1-\sigma}{\sigma}\frac{Q_l}{\bar{Q}_g}$$

$$=\frac{1-\sigma}{\sigma}\frac{1}{\bar{w}_{g0}}\sqrt{\frac{2gL(\sigma-\bar{f}_l)}{c_1\bar{f}_l^{-2}+c_2+c_3}} \cdots\cdots(23)$$

気体が大気圧 P_a から $\gamma_l H_s$ まで圧縮される場合を考えると，理想揚水効率 η_2 は

$$\eta_2=\frac{\gamma_l Q_l' H_d}{P_a Q_g \ln\left(\dfrac{\gamma_l H_s+P_a}{P_a}\right)} \cdots\cdots(24)$$

これに式(21)を代入し，$P_a/\gamma_l=H_a$ とおいて書き改めると

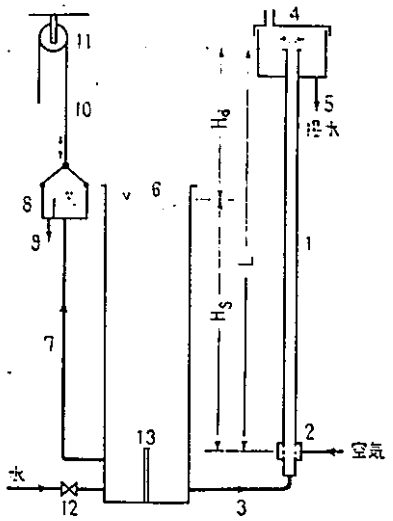
$$\eta_2=\frac{L\sigma}{\left(\dfrac{1}{2}\sigma L+H_a\right)\ln\left(\dfrac{\sigma L+H_a}{H_a}\right)} \cdots\cdots(25)$$

となり，η_2 は浸水深さ $\sigma L=H_s$ のみの関数として表わされる．

揚水効率 η_p は気体の圧縮動力に対する正味揚水動力の比で従来の定義と変わらないが，その内容が式(23)と式(25)で表わされることが明らかとなった．

4. 実験装置および実験結果

4・1 実験装置　実験装置の概要を図2に示す．あらかじめ流量の測定された空気が気水混合部2から揚水管1に連続的に導入されると，この空気量に対応する水が導水管3を経て揚水管に流入する．ここで気水混合物となり揚水管内を上昇して管末端開口部から分離器4に放出される．ここで，空気と分離した水が揚水量 Q_l として測定される．



1：揚水管　2：気水混合部　3：導水管　4：気水分離器　5：揚水　6：貯水そう　7：たわみホース　8：オーバフロータンク　9：ドレン　10：ロープ　11：滑車　12：給水調整弁　13：じゃま板

図 2　実験装置の概要

水源は，水位が一定に保たれた貯水そう6であり，これには下部から水が供給されている．貯水そうの水位を任意の位置で一定に保つため，すなわち気ほうポンプの浸水深さ H_s を一定に保つために次のような考慮をした．すなわち，オーバフロータンク8をたわみホース7により貯水そうと連通させ，弁12を調整することにより8において常に微小量のオーバフローを起こさせた．オーバフロータンクは滑車11を通ったロープ10でつり下げられているから，H_s は任意に選ぶことができる．

揚水管には内径 28.3 mm，長さ 7.50 m と内径 50.6 mm，長さ 6.8 m の2種類のアクリル樹脂管を用いた．内面のあらさは，水単相流の流動実験から前者はなめらかで，後者は $\varepsilon/D \cong 0.002$ 程度と見積もられた．なお，導水管3で生じる圧力損失は，あらかじめ水を流して測定した．

4・2　実験結果　供給空気量に対する揚水量の関係を図3に示す．この図は $D=28.3$ mm 揚水管で得られた結果であり，供給空気量 $\bar{Q}_g$ は管内の平均圧力点における値である．任意の浸水率のもとでは，空気量が所定の量に達すると揚水を開始し，その後は空気量の増加とともに揚水量が増大する．さらに空気量が増加すると揚水量が減少するという経過をたどる．一定空気量のもとで浸水率が大きくなると，予想されるとおり揚水量は増加する．これらの一般的な傾向は揚水管の寸法には関係しない．

5．検　　討

5・1　揚水基礎式と実験値との比較　3・1 節で述べた揚水の基礎式(11)，(12)と本実験結果とを比較すると図4(a)，(b)のごとくである．式(11)の計算に際しては，指数 z は勝原の実験値[11] のうちもっともなめらかな管内面あらさに対する，$z=1.75$ を選んだ．定数 c_1 と c_2 はレイノルズ数 $R_{el0}=w_{l0}D/\nu_l$ による変化が実験範囲では小さいので，揚水管内のみかけの水流速 $w_{l0}=0.6$ m/s に対応する値を選んだ（この値は次の5・3節で述べる最高効率点における水流速である）．c_3 は，管出口の液体体積率 f_{l2} を試行錯誤法により求めて算出した．図5は，$D=1$ in，$L=168$ in の

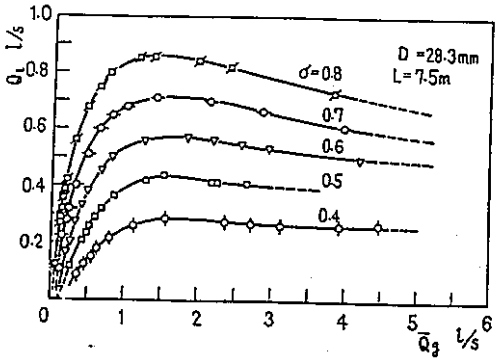


図 3　供給空気量と揚水量の関係

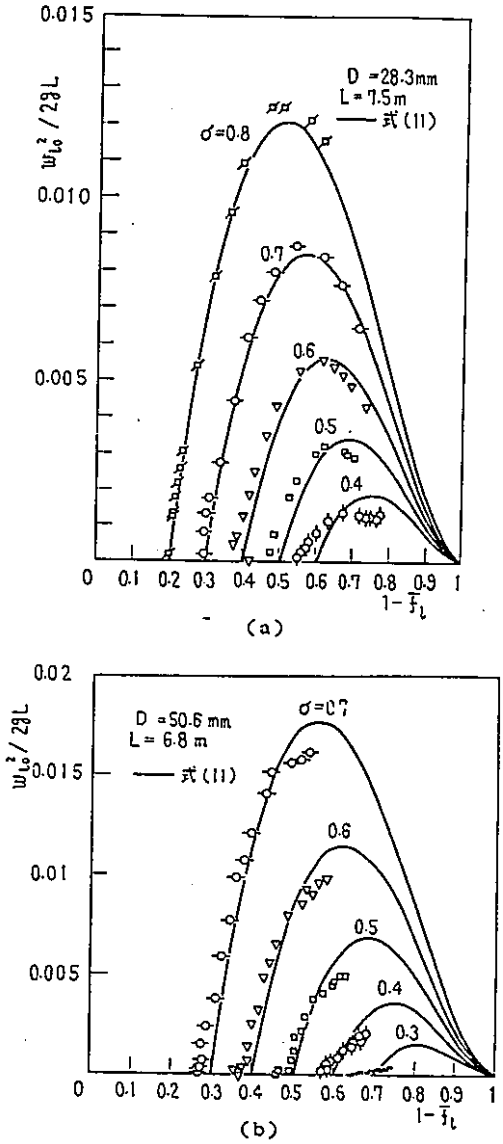


図 4　基礎式 (11) と本実験結果との比較

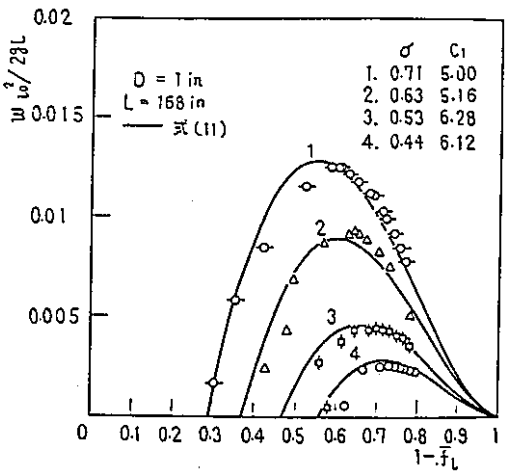


図 5　基礎式 (11) と Stenning らの実験値との比較

気ほうポンプによりえられた Stenning ら[9] の実験値と式(11), (12)との比較である.

Pickert の実験値[4] は $D=100$ mm, $L=42$ m の比較的深い井戸でえられたものであるが, この実験値と式(11), (12)との比較を図6に示す. 原論文にはここに示したもののほかに $\sigma=0.646$, 0.574, 0.268 の実験値が記載されているが, 図が繁雑になるので割愛した. 式の計算にあたって, 管内面のあらさには新しい鋳鉄管程度の値を推定した.

図 4～6 に示すように, 式(11), (12)による計算値と実験値とはかなりよく一致している. これらの図において浸水率 σ と横軸 $(1-\bar{f}_l)$ の全般にわたってのさらによい一致がみられない理由としては, 次の2点があげられる. すなわち, 揚水管内ではスラグ流以外の流動様式も生じているが, これを考慮することなくスラグ流として処理したこと. および液体体積率は空気の膨張により変化するが, これを揚水管の平均圧力点における値で代表させたこと, である.

しかしながら, 通常の気ほうポンプでは浸水率の変化範囲はあまり広くなく, $\sigma=0.5$～0.8 程度であり, その運転状態の平均的な流動様式はスラグ流と考えてよいこと. および気体の膨張による液体体積率と管摩擦損失の管軸方向の変化を考慮して式(1)を解析することには著しい困難が予想され, したがって供給空気量と揚水量との関係を簡単に求めることが期待できなくなることを考え合わせると, 式(11), (12)を気ほうポンプの基礎式とすることは適当であろうと判断される.

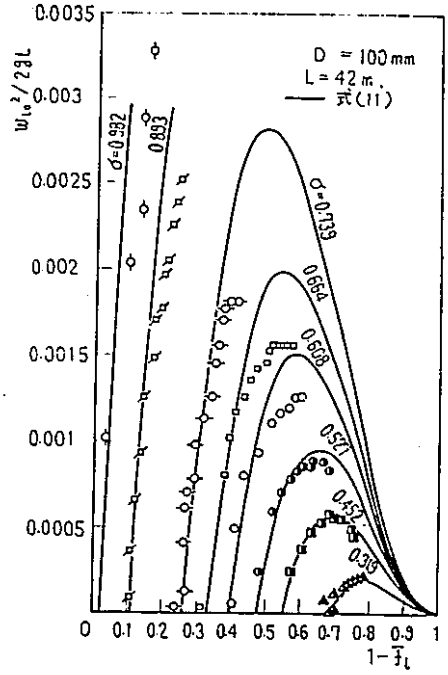


図 6　基礎式 (11) と Pickert の実験値との比較
(比較的深い井戸)

る.

5・2　揚水特性　任意の浸水率における供給空気量に対する揚水量の特性は, 図7に示す模型曲線のようである. 空気量が図中のa点の値 $\bar{Q}_{ga}$ に達するまでは揚水管内の水位が吐出し高さ H_d にいたらず, 揚水量 Q_l は零である. 空気量を $\bar{Q}_{ga}$ より大きくすると, 揚水量は空気量の増加にしたがって増大し, 点cで最大値に達する. 空気量が増加すると液体体積率が減少し, 揚水の起動力は増加する. a～c 間は, この増加割合が摩擦損失の増加割合より大きく, その結果揚水量の増大する範囲である. 空気流量がc点の値 $\bar{Q}_{gc}$ よりさらに大きくなると, 揚水量は c→d のように減少する. これは a→c の範囲における理由とは逆に, 揚水起動力の増加割合より摩擦損失の増加割合のほうが大きくなるからである. 一定浸水率のもとで揚水効率 η_p が最大となるのは, 揚水管効率 η_1 が最大の場合である. したがって式 (23) から明らかなように, 図7において原点から揚水量曲線に接線を引くとき, その接点bが最高効率点を与える.

揚水の起こらない $0<\bar{Q}_g<\bar{Q}_{ga}$ の範囲は次のような仮想状態として理解することができる. すなわち, もし, この範囲でも揚水管の全長にわたって気液混合物が充満しているものとすれば, 式 (10) より $\gamma_l H_s<\gamma_l \bar{f}_l L$ となり, 起動力の方向が逆転して負の揚水作用を想定することができる. これが点線 ae である. 垂直下向き二相流においても摩擦損失が $\bar{f}_l^{-z}$ に比例するものと仮定すれば, $(\sigma-\bar{f}_l)$ の符号を考慮して式 (11) を

$$Q_l=F\sqrt{\frac{2gL|\sigma-\bar{f}_l|}{c_1\bar{f}_l^{-z}+c_2+c_3}}\,\mathrm{sgn}(\sigma-\bar{f}_l) \quad \cdots\cdots\cdots(26)$$

と書き表わすことにより, 図の ae 部分も含めて揚水曲線を定式化できる.

つぎに, 揚水を起こすための下限空気量は次のように求められる. 任意の一定浸水率のもとで, 揚水管内の水位が管出口に達したときは, 式(11)から明らかなように

$$\bar{f}_l=\sigma \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

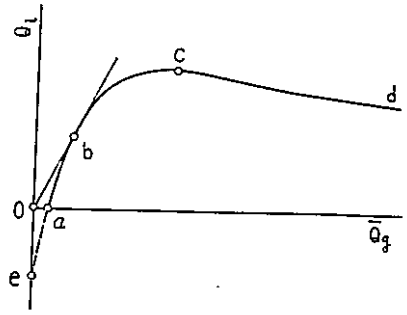


図 7　揚水量曲線の説明図

となる．Nicklin らの実験結果[12] によれば，静止した液柱を上昇するスラグの速度は

$$w_g=1.2w_{g0}+0.35\sqrt{gD} \quad \cdots\cdots(28)$$

であるから，このときの液体体積率 $\bar{f}_l$ は次のようになる．

$$\bar{f}_l=\frac{0.2\bar{w}_{g0}+0.35\sqrt{gD}}{1.2\bar{w}_{g0}+0.35\sqrt{gD}} \quad \cdots\cdots(29)$$

これを式(27)に代入すると

$$\bar{Q}_{ga}=\frac{0.35(1-\sigma)F\sqrt{gD}}{1.2\sigma-0.2} \quad \cdots\cdots(30)$$

をうる．したがって，揚水を行なうためには少なくともこの値以上の空気量を供給しなくてはならない．

5・3　最高効率点　気ほうポンプの設計に際しては，前節に述べた最高効率点の性質をあらかじめ知っておく必要がある．図8は，この点の揚水効率 $\eta_{p\max}$ が浸水率によってどのように変わるかを $D=28.3$ mm，$L=7.5$ m のなめらかな揚水管を有するポンプを例にとって示したものである．図において，曲線は計算値，各点は実験値である．両者には差がみられるが，これは 5・1 節に述べた理由によるものと思われる．いずれにしても，$\sigma=0.7\sim0.8$ 付近に揚水効率の最大値が存在し，$\sigma<0.5$ では効率が著しく低下することがうかがわれる．

図9はすでに述べた実験結果から，最高効率点におけるみかけの水流速 w_{l0b} を求め，浸水率についてプロットしたものである．図には最大揚水量に対応するみかけの水流速 w_{l0c} も示している．式(11)の c_2 と c_3 は $c_1\bar{f}_l^{-z}$ に比べて無視することができる程度の大きさであるから，

$$\frac{w_{l0}^2}{2gL}=\frac{\sigma-\bar{f}_l}{c_1\bar{f}_l^{-z}}$$

この式から，$d(w_{l0}^2/2gL)/d\bar{f}_l=0$ を満足する液体体積率を求めると $\bar{f}_l=\sigma z/(z+1)$ をうる．これを上の式に代入し，$c_1=\lambda_{l0}L/D$ なることを考慮すれば，このときのみかけの水流速 w_{l0c} は

$$w_{l0c}\propto(D\sigma^{z+1})^{1/2} \quad \cdots\cdots(31)$$

となり，図9に示す実験結果の傾向と一致している．w_{l0b} は，浸水率の小さいところで w_{l0c} の約 70%，大きいところで約 40% となっている．図の示すところによれば，ポンプの仕様にはかなりの幅があるにもかかわらず，通常の作動範囲 $\sigma=0.5\sim0.8$ では $w_{l0b}=0.4\sim0.7$ m/s であることがわかる．

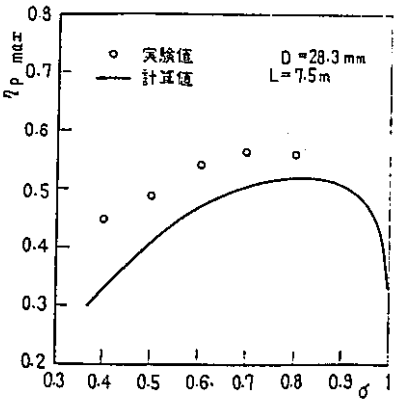


図 8　最高効率 $\eta_{p\max}$ の浸水率による変化 ($D=28.3$ mm，$L=7.5$ m の場合)

6.　気ほうポンプの設計法

揚水量 Q_l と吐出し揚程 H_d を設計条件として気ほうポンプの設計を進めることが多い．この場合の設計手続きを以下に述べる．

(1)　揚水管長 L の決定　　浸水率 σ の好適な使用範囲は，図8より $\sigma>0.5$ である．σ が小さ過ぎると効率が著しく低下し，所要空気量が増大して運転費が高くなる．また，地下水の揚水などの場合には，σ が大きくなると掘さく深さが大きくなり，工事費が増大する．したがって適当な浸水率が生じる．

(2)　揚水管径 D の決定　　$\sigma=0.5\sim0.8$ における最適作動点（最高効率点）のみかけの水流速は，図9により $w_{l0b}=0.4\sim0.7$ m/s の範囲にある．これを目安にして管径を決定する．

(3)　液体体積率と揚水量・供給空気量との関係　式(11)と(12)により，一定浸水率における供給空気量と揚水量との関係を試行錯誤法的に求める．計算過程は図 10 の流れ図による．すなわち，まず浸水率 σ と液体体積率 $\bar{f}_l$ を与えて，式(11)により w_{l0} を計算す

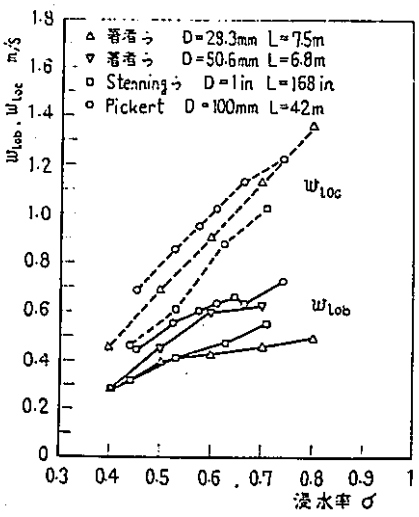


図 9　最高効率点および最大揚水量点のみかけの水流速（注：$D=50.6$ mm，$L=6.8$ m の w_{l0c} は空気量不足のため実験値がえられていない）

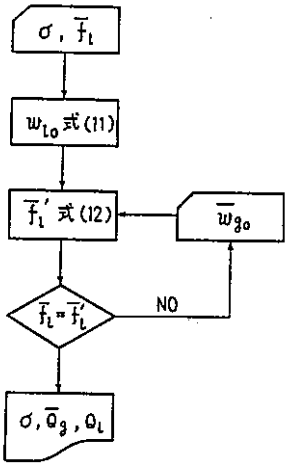


図 10　所要空気量計算の流れ図

る．次に $\bar{w}_{g0}$ を仮定して，式 (12) により液体体積率を計算し，これを $\bar{f}_l'$ とする．$\bar{f}_l=\bar{f}_l'$ を満足する $\bar{w}_{g0}$ を見出して，揚水量 Q_l，所要空気量 $\bar{Q}_g$ を決定する．

（4） ポンプ特性曲線の作成　供給すべき空気量 $\bar{Q}_g$ がわかれば，揚水効率 η_p と等温圧縮動力 L_{is} も判明し，遠心ポンプなどにおける表示法と同様のポンプ特性曲線（揚水量に対する所要空気量・揚水効率・所要動力の曲線）を描くことができる．

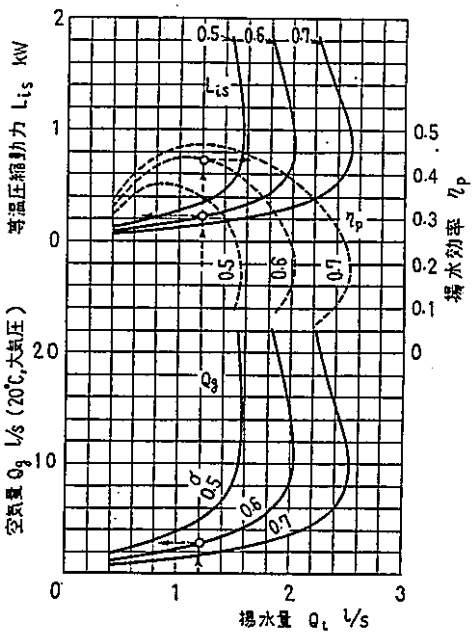
試みに以上の手続きにしたがって，設計条件 $Q_l=1.2\,l/s$，$H_d=6\sim10$ m のポンプを設計してみると $L=20$ m，$D=50$ mm となり，その予想特性曲線は図 11 のようになる．ただし，空気量は 20°C の大気圧換算値，所要等温圧縮動力は kW で示してある．揚水管内面の相対あらさは $\varepsilon/D\cong0.005$ とした．

7. 結　　言

気ほうポンプの揚水特性を調べた．本報を要約するとおよそ次のとおりである．

（1） 揚水基礎式を運動量方程式より導いた．式の誘導にあたっては，供給空気量と揚水量との関係を明らかにするために，気液混合物の液体体積率としてスラグ流に対する算式，摩擦損失の算式として $\Delta P_{TP}/\Delta P_l=f_l^{-x}$ を用いた．

（2） 基礎式は著者らの実験値のほか，Pickert, Stenning らの実験値と比較され，25 mm $\leqq D\leqq$ 100 mm，4 m $\leqq L\leqq$ 42 m，$0.4<\sigma<0.8$ の範囲で実験値



設計条件：$Q_l=1.2\,l/s$，$H_d=6\sim10$ m
ポンプ仕様：$D=50$ mm，$L=20$ m
$\varepsilon/D\cong0.005$，導水管なし

図 11　気ほうポンプの予想特性曲線

とよい一致を示した．

（3） 揚水効率を揚水管効率と理想揚水効率の二つに分け，それぞれの内容を明らかにした．

（4） 本報に提示した資料をもとに気ほうポンプの設計法を示した．

終わりに，実験装置の製作にご協力いただいた吉村久人氏，ならびに実験に参加された大橋規佳，松井寛，境　寛，松本浣嗣，佐保典英，前田芳樹の諸氏に心からお礼申しあげる．

文　　献

(1) 森・ほか5名，機講論，No. 700-21 (昭 45-11)，25.
(2) 機械工学便覧（第5版），(昭 43)，9-74，日本機械学会．
(3) Swindin, N., *The Theory and Practice of Pumping*, (1924)，199，Ernest Benn.
(4) Pickert, F., *Engineering*, 34 (1932-7)，19.
(5) 井伊谷，化学機械，16-4 (昭 26-4)，111.
(6) 井伊谷・木村，化学工学，18-12 (昭 28-12)，586.
(7) 有江・ほか3名，機械前刷（北海道9回），第2室 (昭 38-10)，101.
(8) 有江・三谷，機講論（北海道 12 回），(昭 43-10)，153.
(9) Stenning, A.H. and Martin, C.B., *Trans. ASME*, Ser. A, 90-2 (1968-4)，106.
(10) 赤川，機論，23-128 (昭 32-4)，292.
(11) 勝原，機論，24-148 (昭 33-12)，1050.
(12) Nicklin, D.J., ほか，*Trans. Inst. Chem. Engr.*, 40 (1962)，61.