

本資料は 2001. 6. 20 日付けで登録区分、  
変更する。

[技術情報室]

# ガラス固化体パッケージ評価試験

## 成果報告書

1985年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

# ガラス固化体パッケージ評価試験 成果報告書



実施責任者 梶原 英千世 安藤 久隆  
報告者 大森 栄一 河津 和人  
佐々木 憲明

期 間 1982年4月～1985年3月

目 的 高レベル廃液ガラス固化プラントにて製造するガラス固化体パッケージの諸特性を評価する。

要 旨 ガラス固化体パッケージの仕様の概説、基本特性の解析及び諸特性の実験結果をとりまとめた。

内容は、(1)固化体の基本特性計算、(2)固化体の諸特性評価試験である。

(1)では固化体の発熱量、 $\gamma$ 線強度、中性子線強度を計算している。(2)ではガラスの注入実験による実測値を参考にし、実ガラスの温度変化を計算し、さらに、クラックによるガラス固化体実効熱伝導率の変化を実測により評価している。ガラス注入時のキャニスター変形量及び残留応力についても実測を行った。更に落下試験により落下時の挙動を把握した結果もまとめた。ガラス中のクラックについては、冷却条件や落下条件による相違を実験を通して把握した。また、キャップ溶接についても実験を通じて健全性を確認した。



The Report of the evaluation of the High Active Waste Glass  
Package

Hidechiyo Kashihara  
Hisataka Ando  
Noriaki Sasaki  
Kazuto Kawatsu  
Eiichi Ohmori

Abstract

To evaluate the High Active Waste Glass Package, some calculations and tests were executed.

The calculations are divided into three kinds of categories; the thermal power, the gamma radiation dose and neutron radiation dose of the package. The tests are executed by using full scale, non-radioactive waste glass packages, and divided into seven kinds of categories; the temperature distribution, the thermal conductivity and the deformation of the glass filled canister, the residual stress of the canister, the deformation by dropping, the crack of the glass and lid welding.

Through these calculations and tests, the characteristics of the waste glass package which will be produced from the High Active Liquid Waste Vitrification Plant become clear.

## 目 次

まえがき .....	1
1. ガラス固化体パッケージ仕様 .....	2
2. ガラス固化体パッケージ特性 .....	14
2.1 ガラス固化体パッケージの温度分布 .....	14
2.2 ガラス固化体の実効熱伝導率 .....	41
2.3 キャニスター変形量測定 .....	47
2.4 キャニスター残留応力測定 .....	53
2.5 落下試験 .....	57
2.6 クラック測定 .....	69
2.7 溶接試験 .....	82
Appendix A 腐食量の算定 .....	84
あとがき .....	88

## まえがき

使用済燃料の再処理により発生する高レベル廃液は、ガラス固化処理され、ガラス固化体パッケージとして、安全に貯蔵されることが考えられている。

動燃では、このガラス固化体パッケージの特性を評価検討することを目的に各種試験を行ってきた。

本報告書は昭和57年より昭和60年3月までの成果を委託試験も含めてまとめたものである。

## 1. ガラス固化体パッケージ仕様

再処理工場より発生する廃液はガラス固化処理され、キャニスター内にガラス固化体として包蔵される。ガラス固化体を包蔵したキャニスターを、ガラス固化体パッケージと称する。

再処理工場より発生する高レベル廃液の特性（核種存在量，アクティビティ，崩壊熱）をORIGEN-79コードにて計算した。計算条件はTable 1-1に示す標準的な燃料仕様を使用した。結果をTable 1-2-1～Table 1-2-6に示した。発熱量については経時変化をFig. 1-1に， $\gamma$ 線及び中性子の発生量についてはFig. 1-2に示した。

高レベル廃液は，ガラス固化処理され，Table 1-3に示す組成のガラス固化体となる。このガラス固化体の物性をTable 1-4に示す。

ガラス固化体は，Fig. 1-3に示すキャニスターに包蔵され，ガラス固化体パッケージとして保管・貯蔵される。キャニスター諸物性をTable 1-5に，また製作図をFig. 1-4に示す。

Table 1-1 燃料仕様

炉 型	LWR
燃料濃縮度	$^{235}\text{U}$ 4wt%
燃 焼 度	28000 MWD/MT
比 出 力	35 MW/MT
再 処 理 時 期	炉取出後 0.5年
ガラス固化時期	炉取出後 5.5年
回 収 率	
$^3\text{H}$	96%
I	99.5%
He	100%
Kr	100%
Xe	100%
Np	0%
Am	0%
Cm	0%
U	99.396%*
Pu	99.704%*

\* U, Puの回収率については，再処理工場の設計値を標準値とし，廃液中にU 5.81kg/MT, Pu 22.9g/MT 入るよう回収率を選定した。

Table 1-2-1 ORIGEN-79 計算結果 (核種存在量-アクチニド)

REFERENCE LWR EQUILIBLIUM FUEL CYCLE (1)

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT CONCENTRATION, GRAMS  
BASES = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

Table with 12 columns (HE, TL, PB, BI, PO, AT, RN, FR, RA, AC, TH, PA, U, NP, PU, AM, BK, CM, CF, TOTALS) and 11 rows (5.00 Y, 7.00 Y, 10.00 Y, 20. Y, 30. Y, 50. Y, 60. Y, 70. Y, 80. Y, 90. Y) showing element concentrations in grams.

Table 1-2-2 ORIGEN-79 計算結果 (アクティビティー-アクチニド)

REFERENCE LWR EQUILIBLIUM FUEL CYCLE (1)

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT RADIOACTIVITY, CURIES  
BASES = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

Table with 12 columns (TL, PB, BI, PO, AT, RN, FR, RA, AC, TH, PA, U, NP, PU, AM, BK, CM, BK, CF, TOTALS) and 11 rows (5.00 Y, 7.00 Y, 10.00 Y, 20. Y, 30. Y, 50. Y, 60. Y, 70. Y, 80. Y, 90. Y) showing element radioactivity in curies.

Table 1-2-3 ORIGEN-79 計算結果 (崩壊熱-アクチニド)

REFERENCE LWR EQUILIBLIUM FUEL CYCLE (1)

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASES = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

Table with 12 columns (TL, PB, BI, PO, AT, RN, FR, RA, AC, TH, PA, U, NP, PU, AM, BK, CM, BK, CF, TOTALS) and 11 rows (5.00 Y, 7.00 Y, 10.00 Y, 20. Y, 30. Y, 50. Y, 60. Y, 70. Y, 80. Y, 90. Y) showing element thermal power in watts.





Table 1-2-6 ORIGEN-79 計算結果(崩壊熱-F.P.)

REFERENCE LWR EQUILIBLIUM FUEL CYCLE (1)

POWER= 35.00MW, BURNUP= 28000.MWD, FLUX= 2.87E+13N/CM\*\*2-SEC

ELEMENT THERMAL POWER, WATTS  
BASES = MT OF HEAVY METAL CHARGED TO REACTOR

	CHARGE	DISCHARGE	5.00 Y	7.00 Y	10.00 Y	20. Y	30. Y	50. Y	60. Y	70. Y	80. Y	90. Y
H	0.0	1.52E-02	1.15E-02	1.02E-02	8.64E-03	4.92E-03	2.80E-03	9.07E-04	5.16E-04	2.94E-04	1.67E-04	9.52E-05
SE	0.0	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05	8.33E-05
RB	0.0	3.10E-03	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08	1.66E-08
SR	0.0	3.96E+02	7.59E+01	7.22E+01	6.71E+01	5.24E+01	4.09E+01	2.50E+01	1.95E+01	1.53E+01	1.19E+01	9.32E+00
Y	0.0	9.53E+02	3.57E+02	3.40E+02	3.15E+02	2.46E+02	1.93E+02	1.18E+02	9.19E+01	7.18E+01	5.61E+01	4.38E+01
ZR	0.0	1.27E+03	3.18E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04	3.12E-04
NS	0.0	2.34E+03	1.54E-04	1.76E-04	2.19E-04	3.19E-04	3.75E-04	4.24E-04	4.34E-04	4.39E-04	4.42E-04	4.44E-04
TC	0.0	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03	8.41E-03
RU	0.0	2.28E+02	5.49E-01	1.39E-01	1.78E-02	1.91E-05	2.04E-08	2.24E-14	2.25E-17	2.37E-20	2.61E-23	1.27E-24
RH	0.0	2.81E+03	9.04E+01	2.29E+01	2.92E+00	3.14E-03	3.36E-06	3.68E-12	3.86E-15	3.91E-18	4.30E-21	2.09E-22
PD	0.0	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06	4.20E-06
AG	0.0	2.32E+02	1.53E+00	2.04E-01	1.00E-02	5.29E-07	9.00E-08	8.08E-08	7.66E-08	7.27E-08	6.89E-08	6.53E-08
CD	0.0	3.40E-01	2.75E-02	2.50E-02	2.17E-02	1.35E-02	8.38E-03	3.24E-03	2.01E-03	1.25E-03	7.78E-04	4.84E-04
IN	0.0	2.49E-03	2.93E-14	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15	9.66E-15
SN	0.0	7.62E+00	1.08E-03	5.44E-04	5.10E-04	4.82E-04	4.59E-04	4.20E-04	4.05E-04	3.92E-04	3.80E-04	3.70E-04
SB	0.0	2.15E+01	5.96E+00	3.59E+00	1.68E+00	1.38E-01	1.65E-02	6.15E-03	6.09E-03	6.08E-03	6.08E-03	6.08E-03
TE	0.0	1.66E+01	3.88E-01	2.34E-01	1.09E-01	8.61E-03	6.80E-04	4.23E-06	3.34E-07	2.64E-08	2.08E-09	1.64E-10
I	0.0	3.12E-06	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08
CS	0.0	1.65E+03	3.73E+02	2.28E+02	1.29E+02	6.14E+01	4.74E+01	2.99E+01	2.37E+01	1.88E+01	1.50E+01	1.19E+01
BA	0.0	3.40E+02	3.03E+02	2.89E+02	2.70E+02	2.14E+02	1.70E+02	1.07E+02	8.54E+01	6.78E+01	5.39E+01	4.28E+01
LA	0.0	1.86E+00	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12	1.04E-12
CE	0.0	5.76E+02	6.15E+00	1.04E+00	7.16E-02	9.74E-06	1.32E-09	2.45E-17	3.32E-21	4.52E-25	6.14E-29	8.34E-33
PR	0.0	6.09E+03	7.10E+01	1.20E+01	8.28E-01	1.13E-04	1.39E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
PM	0.0	6.98E+01	1.08E+01	6.39E+00	2.89E+00	2.06E-01	1.47E-02	7.43E-05	5.29E-06	3.77E-07	2.68E-08	1.91E-09
SM	0.0	1.26E+01	1.22E-01	1.20E-01	1.17E-01	1.09E-01	1.01E-01	8.70E-02	8.08E-02	7.49E-02	6.96E-02	6.46E-02
EU	0.0	6.54E+01	4.32E+01	3.67E+01	2.87E+01	1.28E+01	5.69E+00	1.13E+00	5.06E-01	2.26E-01	1.01E-01	4.52E-02
GD	0.0	7.29E-03	3.80E-05	4.64E-06	1.98E-07	5.35E-12	1.45E-16	1.06E-25	2.87E-30	7.78E-35	2.10E-39	5.70E-44
TB	0.0	8.58E-01	2.14E-08	1.94E-11	5.32E-16	3.29E-31	2.04E-46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HO	0.0	1.83E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.81E-06	1.80E-06	1.78E-06	1.77E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.74E-06
TOTALS	0.0	1.71E+04	1.34E+03	1.01E+03	8.19E+02	5.88E+02	4.57E+02	2.81E+02	2.21E+02	1.74E+02	1.37E+02	1.08E+02

Fig. 1-1 ガラス固化体の発熱量〔1MTU当り〕(Log-Log)

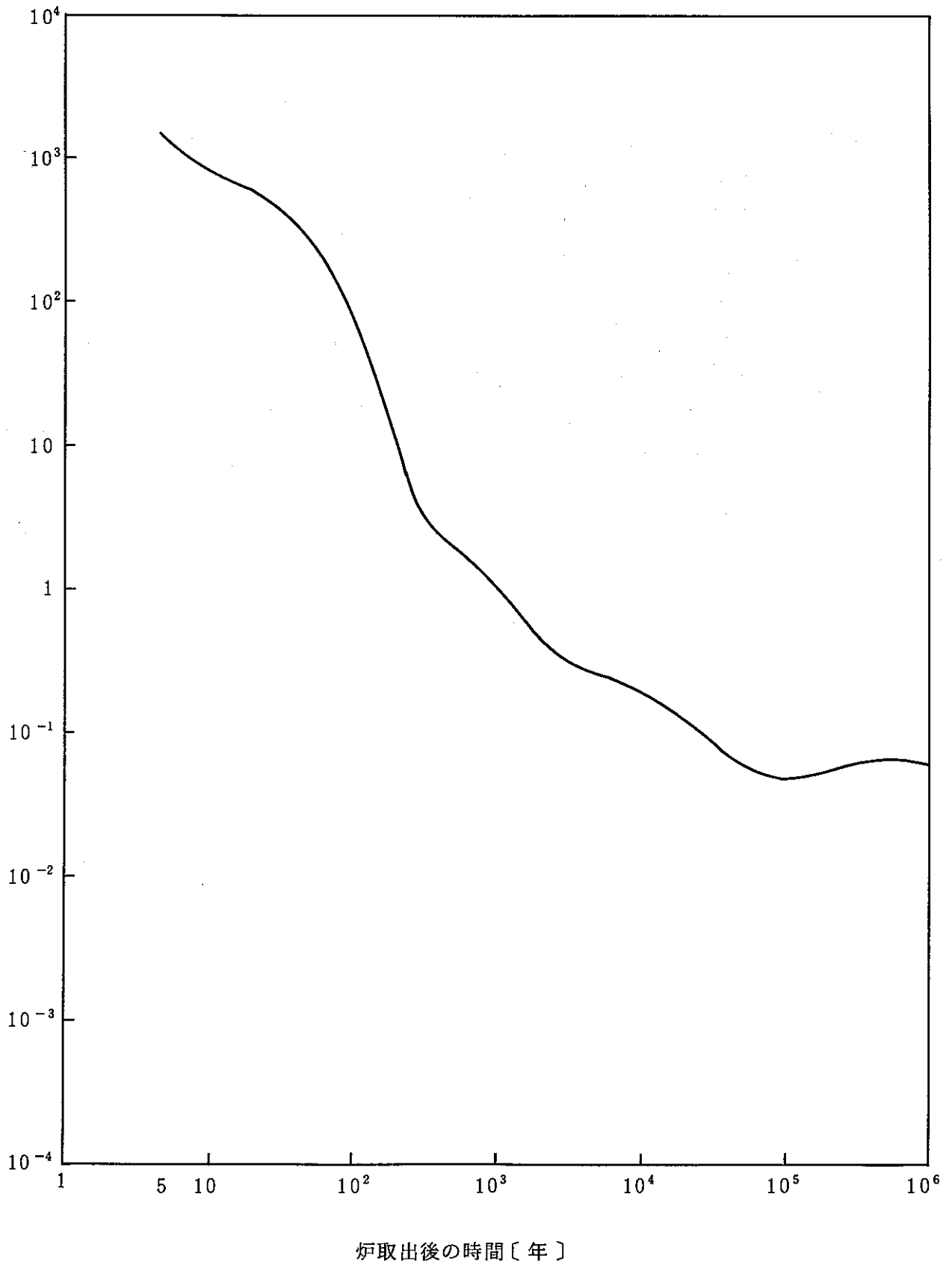


Fig. 1-2 ガラス固化体からの中性子・γ線発生量〔1MTU当り〕(Log-Log)

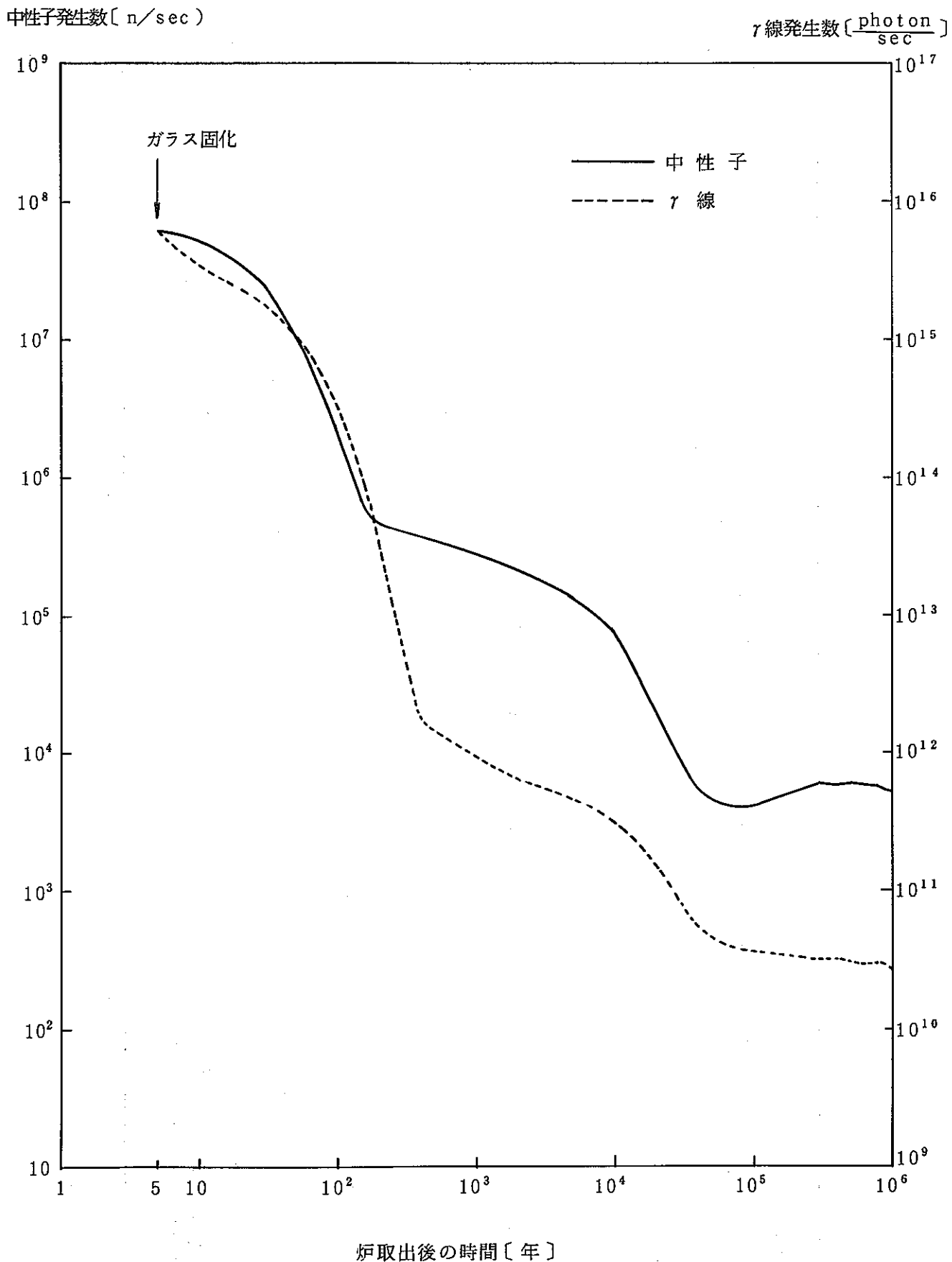


Table 1-3 ガラス固化体組成

ガラス名 酸化物成分	G-2 P0500	GN-3 P0686	GN-4 P0798
Glass Frit			
SiO <sub>2</sub>	43.22	45.00	46.60
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.07	14.20	14.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52	3.60	5.00
Li <sub>2</sub> O	3.02	3.00	3.00
Na <sub>2</sub> O	1.01	—	—
K <sub>2</sub> O	2.01	—	—
CaO	2.01	3.00	3.00
ZnO	2.01	3.00	3.00
BaO	—	3.00	—
MgO	—	—	—
CuO	—	—	—
TiO <sub>2</sub>	—	—	—
SUB TOTAL	70.87	74.80	74.80
Waste			
Na <sub>2</sub> O	7.41	10.00	10.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—
MgO	—	—	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	0.30	0.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.41	2.04	2.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.10	0.10
NiO	0.49	0.23	0.23
Rb <sub>2</sub> O	0.15	0.11	0.11
Cs <sub>2</sub> O	1.02	0.75	0.75
SrO	0.41	0.30	0.30
BaO	0.68	0.49	0.49
ZrO <sub>2</sub>	2.00	1.46	1.46
MoO <sub>3</sub>	1.99	1.45	1.45
Tc <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Mn 0.29	Mn 0.37	Mn 0.37
RuO <sub>2</sub>	1.02	0.74	0.74
Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.14	0.14
PdO	0.48	0.35	0.35
Ag <sub>2</sub> O	—	0.02	0.02
CdO	—	0.02	0.02
SnO <sub>2</sub>	—	0.02	0.02
SeO <sub>2</sub>	—	0.02	0.02
TeO <sub>2</sub>	0.26	0.19	0.19
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.18	0.18
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	0.42	0.42
CeO <sub>2</sub>	1.14	0.87	0.87
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0.28	0.42	0.42
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.50	1.37	1.37
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.29	0.29
Pm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	Nd 0.01	Nd 0.01
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.05	0.05
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.02	0.02
Actinide	G.F. 包含	Ce 2.47	Ce 2.47
SUB TOTAL	29.13	25.20	25.20
TOTAL	100.00	100.00	100.00

Table 1-4 ガラス物性

物性項目		ガラス名	G-2	GN-3	GN-4
			P0500	P0686	P0798
浸出率 ( $\times 10^{-5}$ g/ cm <sup>2</sup> ·day)	Static法				
	PH2.3		2.3	2.4.9	2.2.2
	5.7		2.3	7.8	2.8
	7.0 (蒸留水)		2.4	2.3	2.3
	9.5		1.8	2.2	2.3
	Soxhlet法 (蒸留水)		17.2	10.3	8.0
	試料の比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)		156	151	137
密度 (g/cm <sup>3</sup> )			2.78	2.81	2.74
熱膨張係数 ( $\times 10^{-7}$ /°C)			89	91	83
転移点 (°C)			490	501	517
屈伏点 (°C)			536	552	579
軟化点 (°C)			600	602	604
液相温度 (°C)			1235	854	885
粘性 (poise)	at 1150°C		PNC 36 P0545	NEG 32 P0692 PNC 31	PNC 40 P0797L
	at 900°C		PNC 1,011 P0545	NEG 779 P0692 PNC 589	PNC 807 P0797L
電気伝導率 ( $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) at 1150°C			GIRI 0.186	NEG 0.24	TGC 0.19
熱伝導率 (kcal/mh°C)			PNC 0.99 (180°C)	PNC 0.97 (180°C)	
			GIRI 0.98 (200°C)	-	
比熱 (cal/g°C)			PNC 0.22 (100°C)		

注) GIRI: 大阪工学技術試験所  
 NEG: 日本電気硝子㈱  
 TGC: 東芝硝子㈱

Table 1-5 キャニスター物性

項目			備考									
材質	SUS 304L (板材) SUS F 304L (鍛鋼品)		JISG 4304, 4305 JISG 3214									
形状	内径 410mm 高さ 1345mm 板厚 10mm	添付図参照										
重量	(空)	175kg										
容量	(空)	138ℓ										
ガラス充填重量	300kg											
ガラス充填容量	115ℓ (注入時) 107ℓ (冷却後)		密度 2.6 g/cm <sup>3</sup> 密度 2.8 g/cm <sup>3</sup>									
ガラス充填高さ	870mm											
化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr					
SUS 304L	0.30	1.00	2.00	0.045	0.030	9.00	18.00					
	以下	以下	以下	以下	以下	13.00	20.00					
SUS F304L	"	"	"	"*	"	"	"					
* 原子炉圧力容器用部品については0.040%以下にすることができる。												
物理的性質	オーステナイト系ステンレス鋼の物理的性質 (AISI)											
出典: ステンレス鋼便覧												
AISI Type No	当該 JIS	融点範囲 (℃)	比重	平均熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /℃)		熱伝導率 (cal/cm <sup>2</sup> /sec/℃/cm)		比重 (cal/g/℃) (0~100℃)	電気比抵抗 (μΩ·cm) 室温	ヤング率 (kg/cm <sup>2</sup> )	透磁率 (焼なまし) 磁性	
				(0~100℃)	(0~650℃)	(1000℃)	(500℃)					
304	SUS 304	1,399~1,454	8.03	17.3	18.7	0.0388	0.0512	0.12	72	19,700	●	1.02

● 焼なまし状態で非磁性で冷間加工で磁性をもつ

Table 1-5 (続き)

項 目							備 考
機械的性質	SUS 304Lの固溶化熱処理状態の機械的性質						
	引 張 試 験			硬 さ 試 験			
	耐 力 kgf/mm <sup>2</sup> {N/mm <sup>2</sup> }	引 張 強 さ kgf/mm <sup>2</sup> {N/mm <sup>2</sup> }	伸 び %	HB	HRB	HV	
	18 { 177 } 以上	49 { 481 } 以上	40 以上	187 以下	90 以下	200 以下	
ガラス充填後の キャニスター 輻 射 率	SUS F 304Lの固溶化熱処理状態の機械的性質						
	引 張 試 験				硬 さ 試 験		
	耐 力 kgf/mm <sup>2</sup> {N/mm <sup>2</sup> }	引 張 強 さ kgf/mm <sup>2</sup> {N/mm <sup>2</sup> }	伸 び 率 14A号 試験片 %	絞 り %	HB	HRB	
18 { 177 } 以上	46 { 451 } 以上	29 以上	50 以上	187 以下	90 以下		
	白色面 0.3 焼付面 0.45				ガラス注入実験及び解析 結果より		



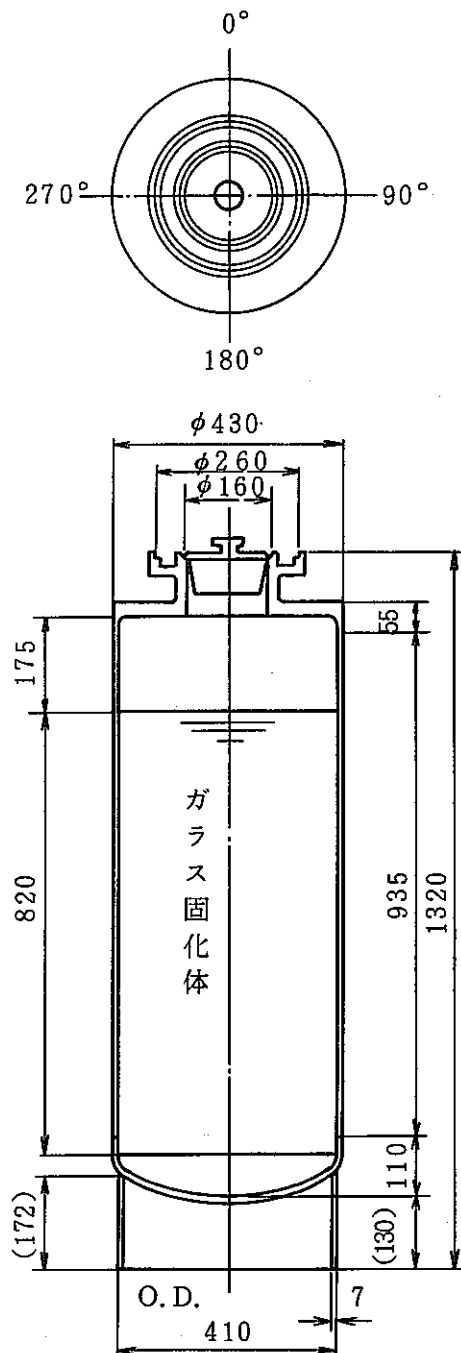


Fig.1-3 キャニスター構造図

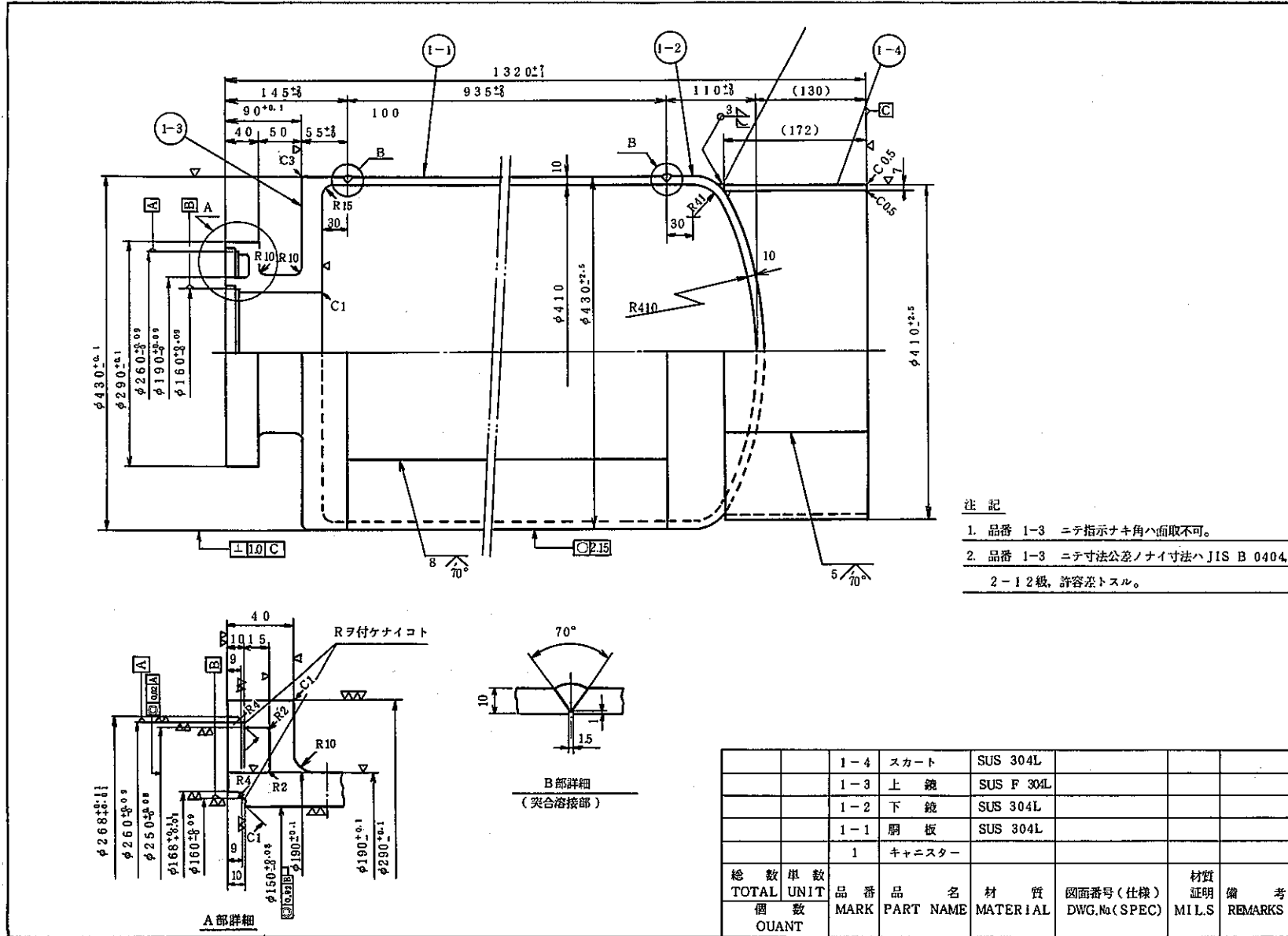


Fig.1-4 キャニスター製作図

## 2. ガラス固化体パッケージ特性

### 2.1 ガラス固化体パッケージの温度分布

ガラス固化体パッケージの温度分布は、溶融ガラスの蓄熱と放射性核種崩壊による発熱が寄与する。したがって評価方法として以下のようにした。

- ① 非放射性ガラス固格体パッケージの温度分布測定により、解析コードの検証を行う。
- ② 検証された解析コードを用いて、放射性ガラス固化体パッケージの温度分布を計算する。計算結果をFig. 2-1-1からFig. 2-1-4に、等温線図をFig. 2-2-1からFig. 2-2-6に示す。

計算条件は以下の通り。

計算コード	「HEATHG」 <sup>1)</sup>
計算体系	Fig. 2-3に示す。
ガラス量	300kg
ガラス注入時間	124分
注入ガラス平均温度	1030℃
室温	30℃
崩壊熱量	1章を参照

計算方法

#### (i) ガラス注入計算

注入計算では、核種崩壊による内部発熱が、ガラス固化体の温度へ与える影響が少ないため崩壊熱量を考慮せずに計算を行った。

#### (ii) 注入後の短期温度分布計算（注入完了から3日後まで）

上記(i)の計算結果を引き継ぎ、内部発熱を入力して非定常計算を行った。

#### (iii) 長期温度分布計算

各時刻の内部発熱量より、定常計算を行った。

物性値及び境界条件 Appendix I 参照。

---

1) 本コードは(株)芙蓉情報センターにて委託開発したコードである。

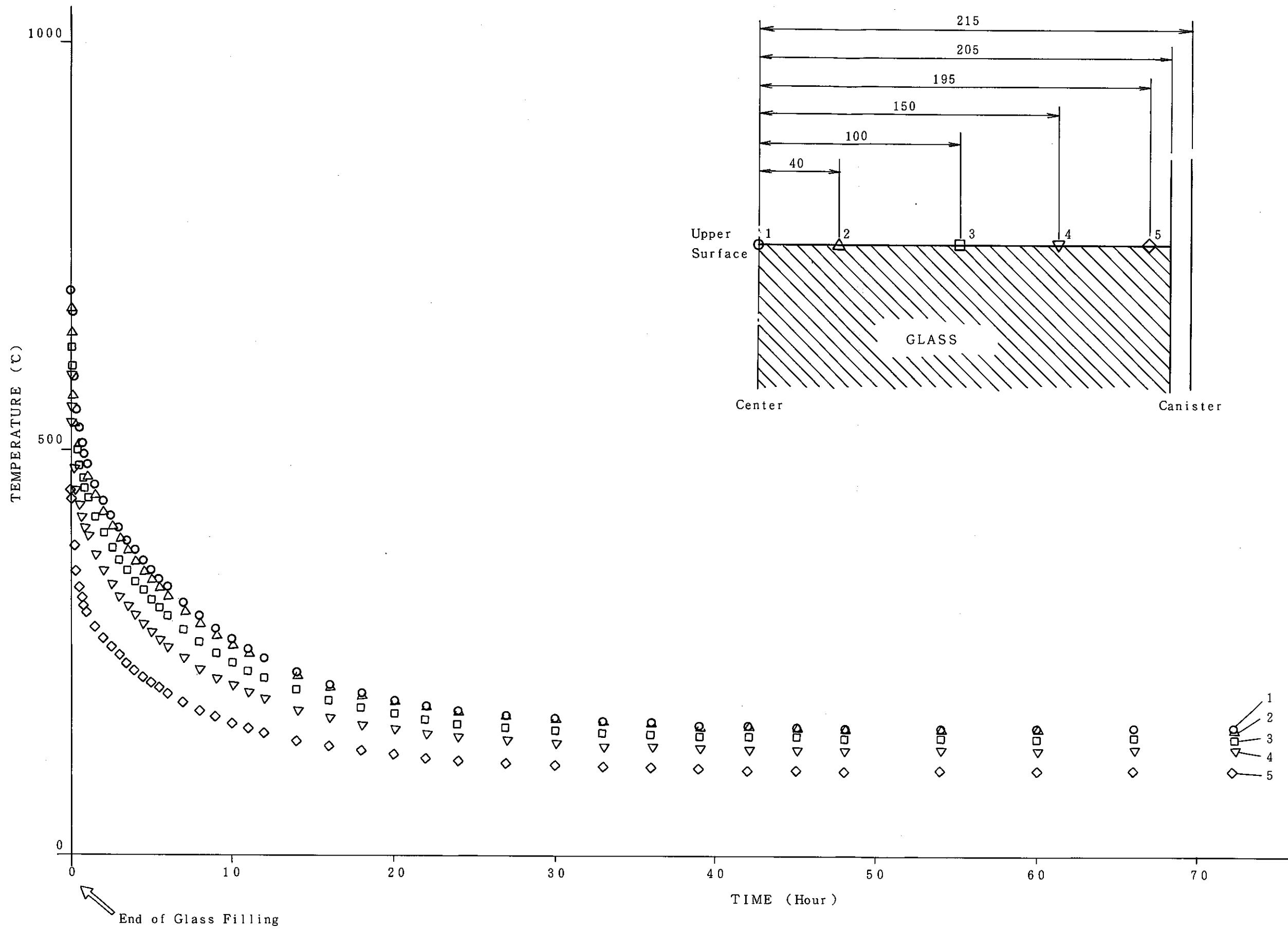


Fig. 2-1-1 Temperature of Upper Surface in Glass Filled Canister

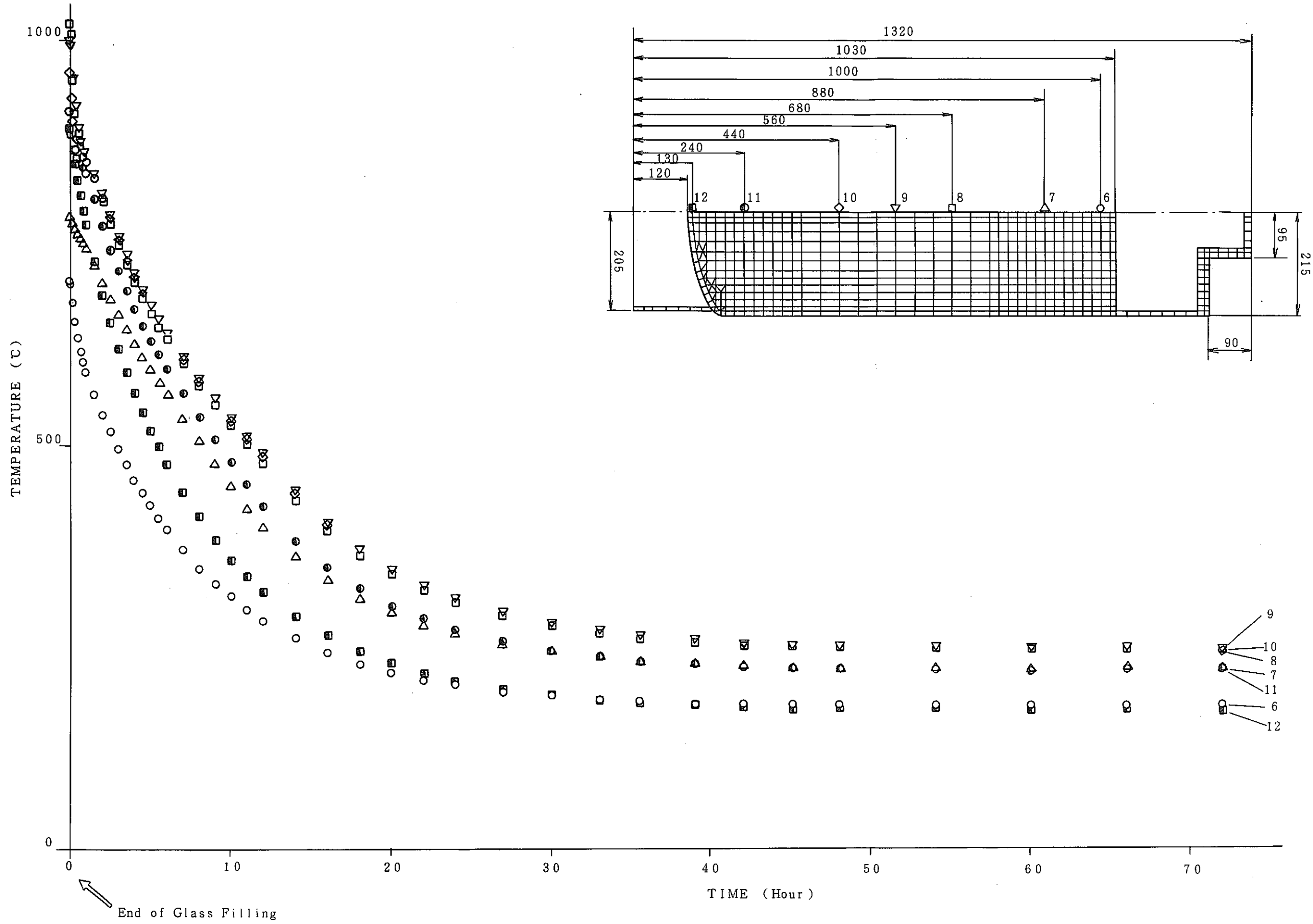


Fig. 2-1-2 Temperature of Axial Center in Glass Filled Canister

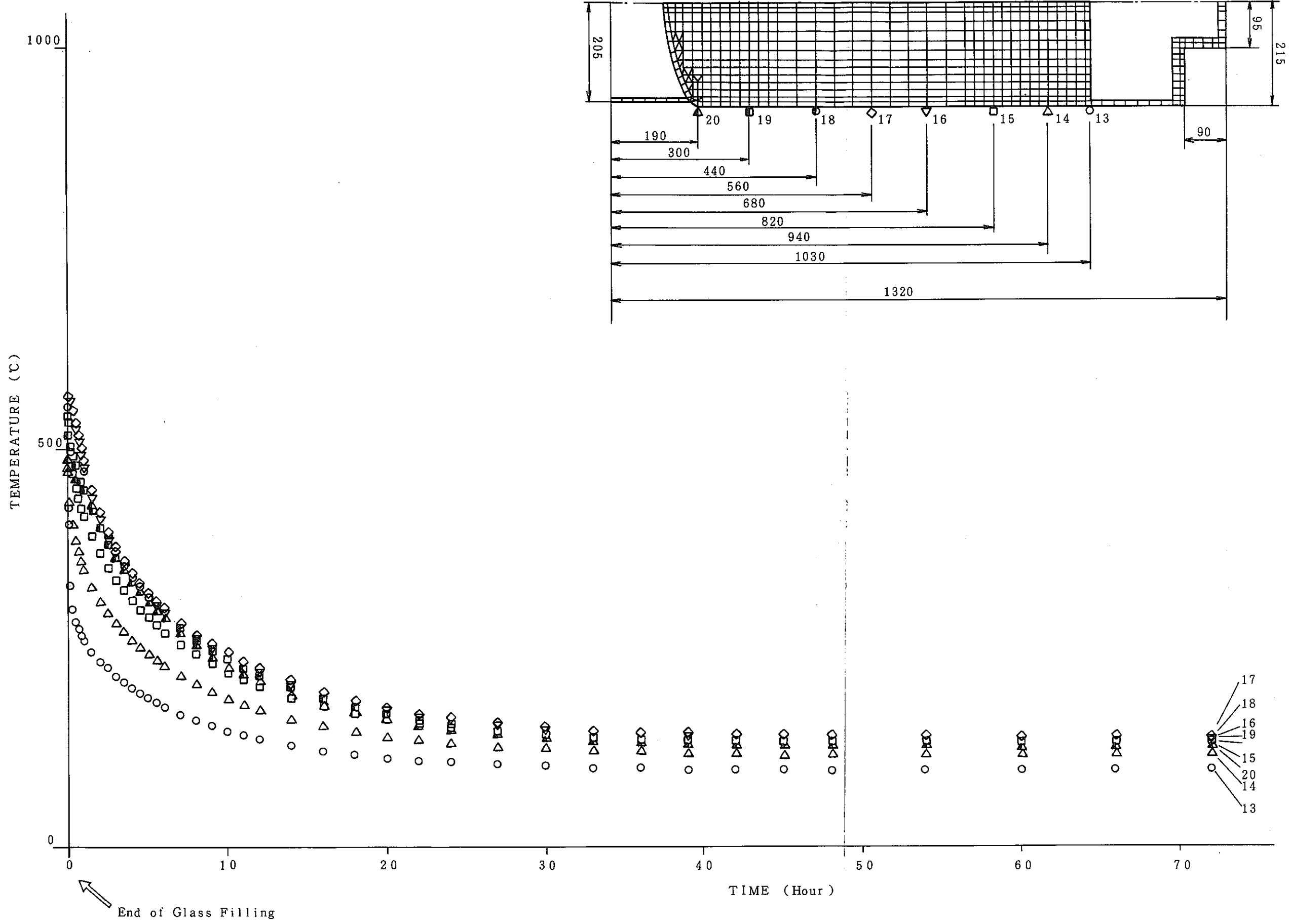


Fig. 2-1-3 Temperature of Canister Wall in Glass Filled Canister

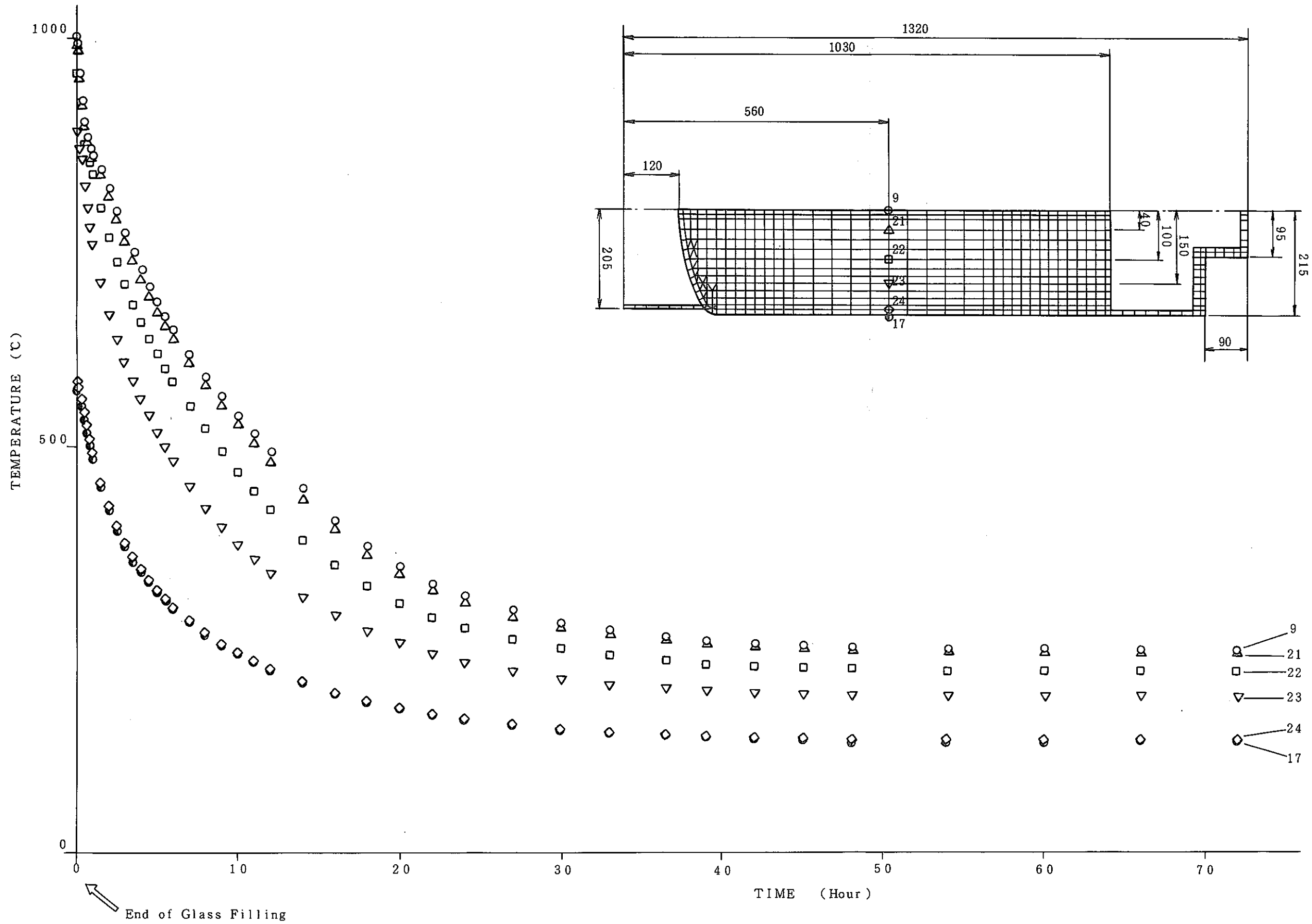


Fig. 2-1-4 Temperature of Radial Center in Glass Filled Canister

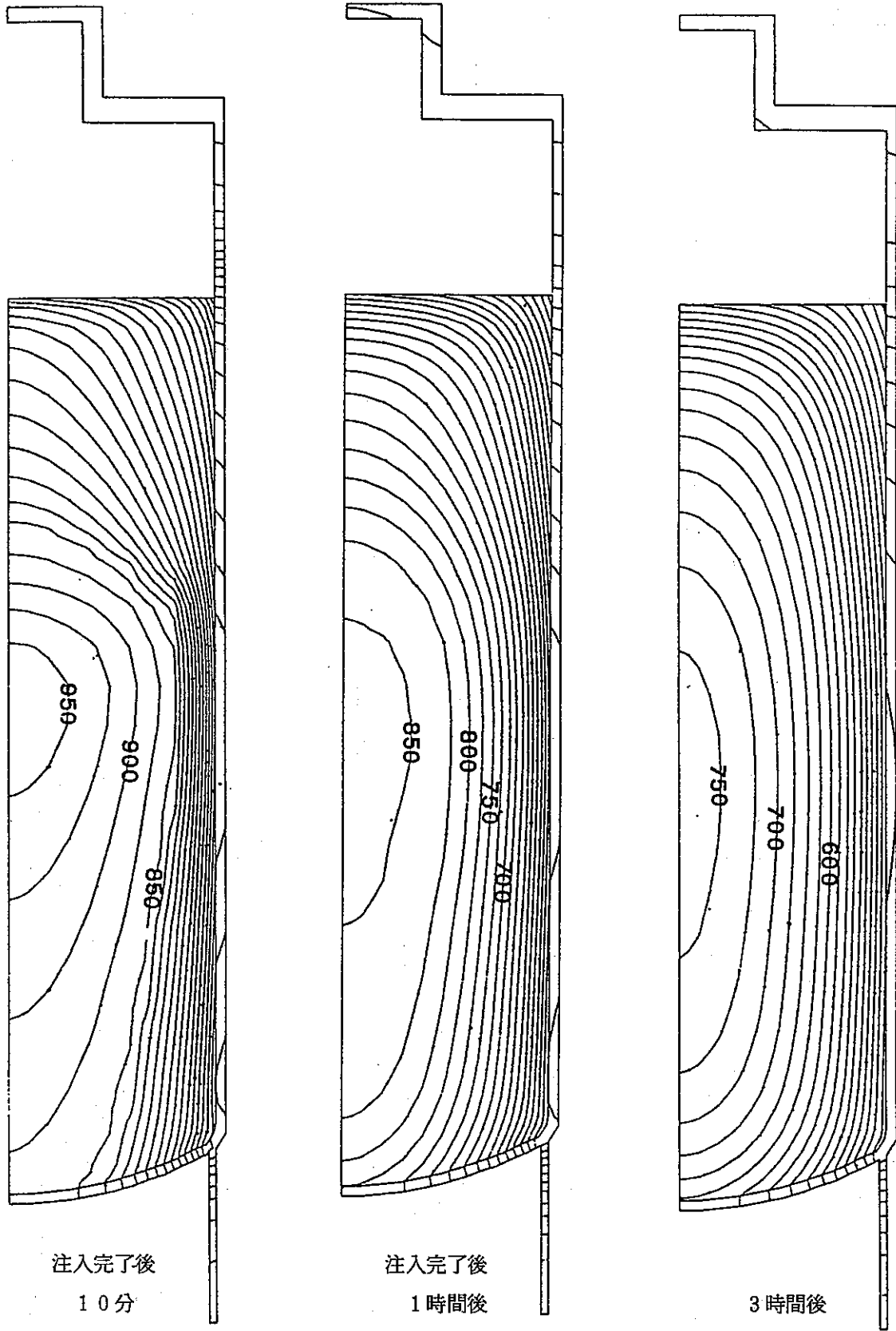


Fig.2-2-1 等温線図



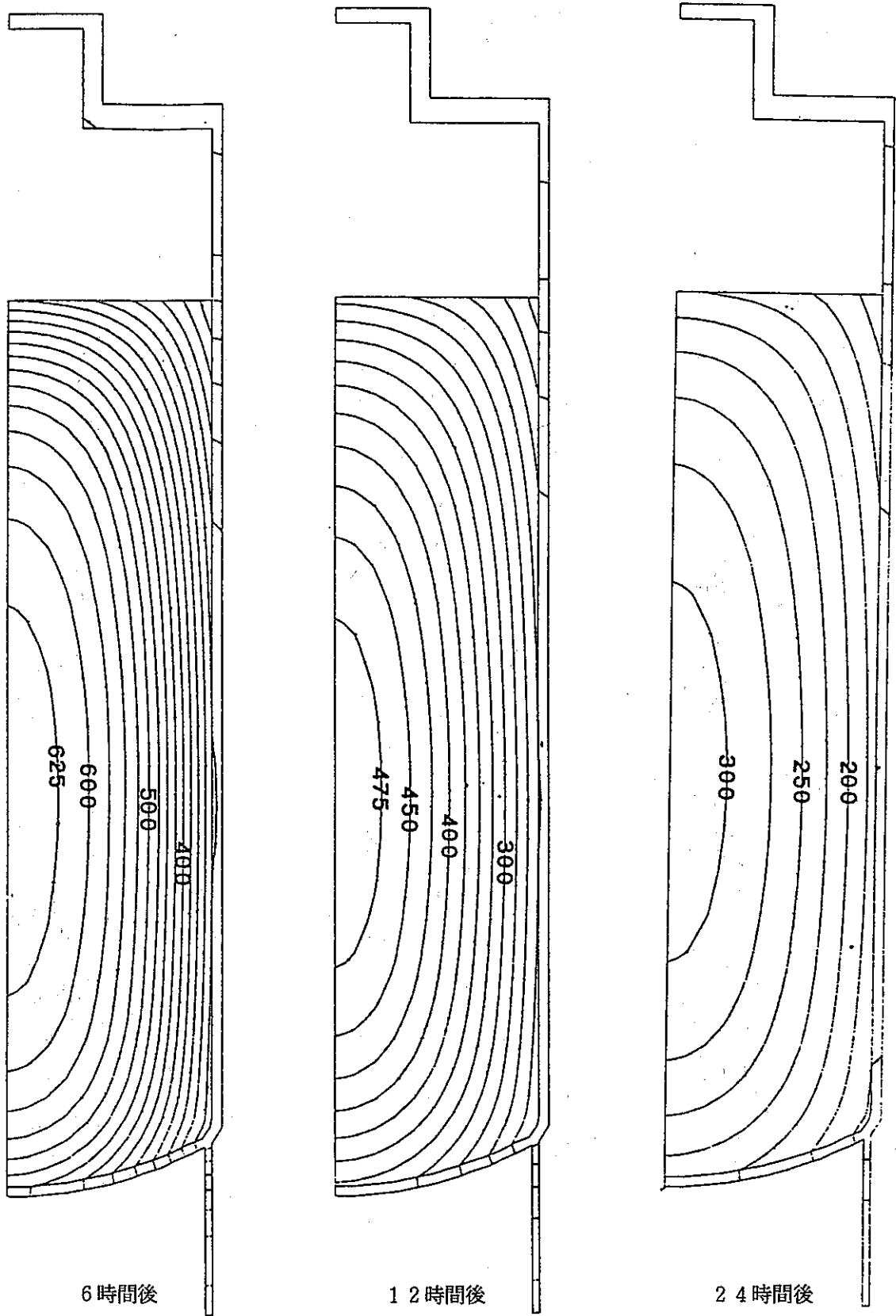


Fig.2-2-2 等温線図 (続き)

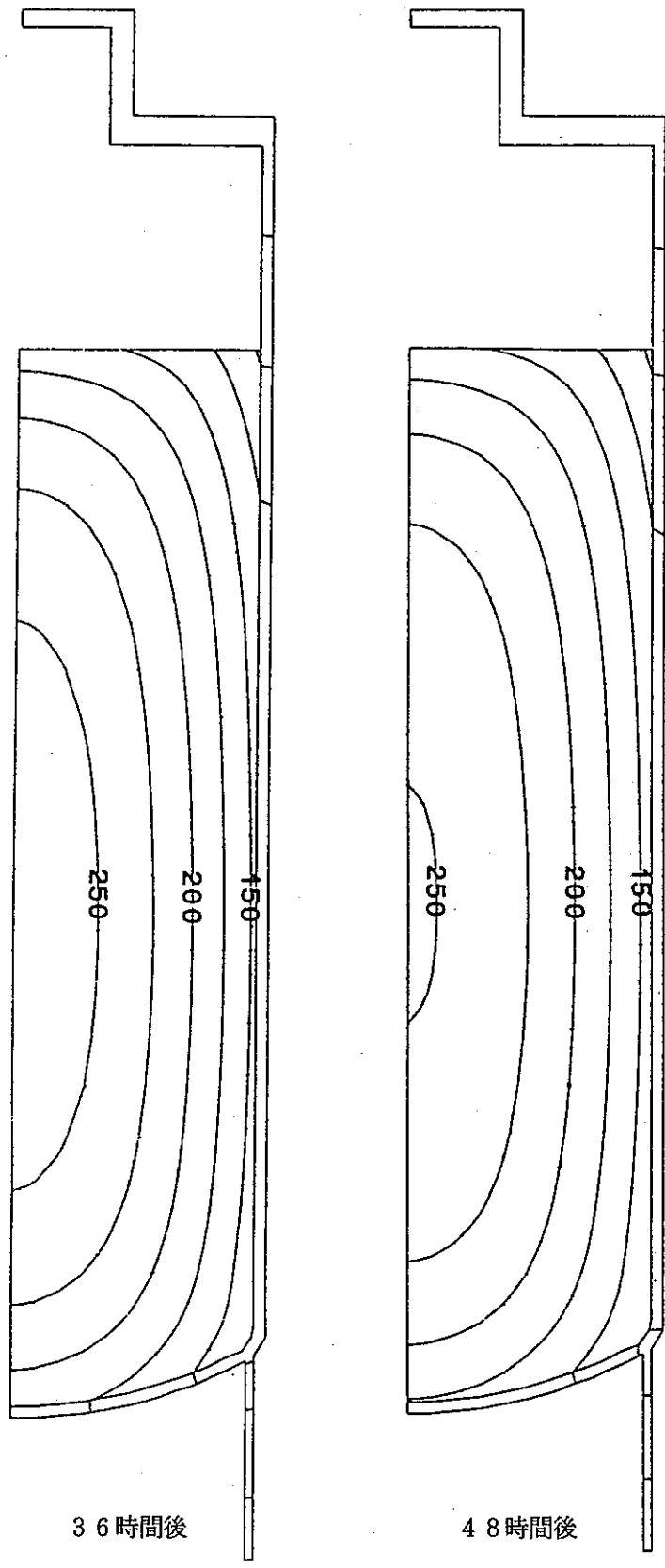


Fig.2-2-3 等温线图 (続き)

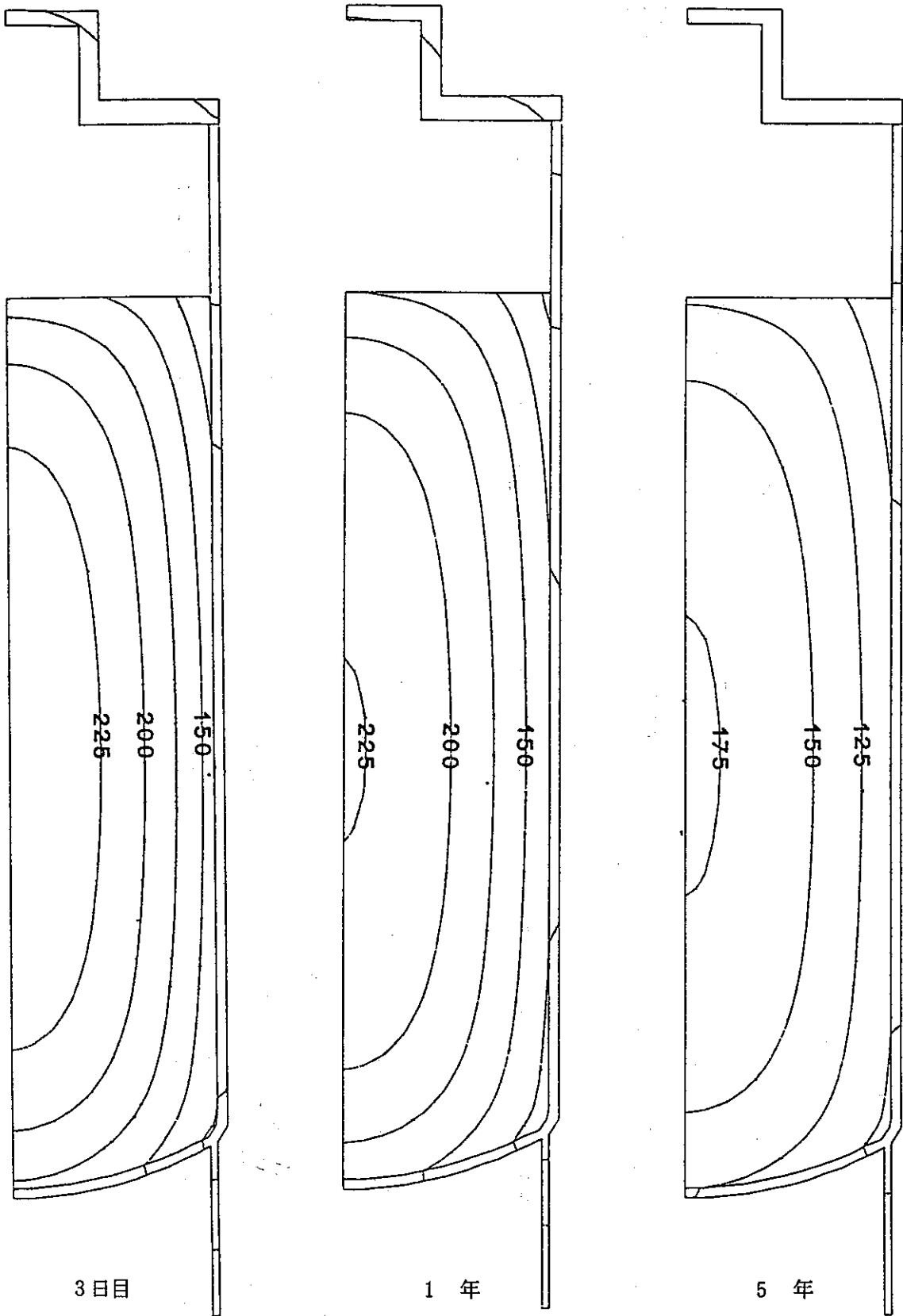


Fig.2-2-4 等温线图 (続き)

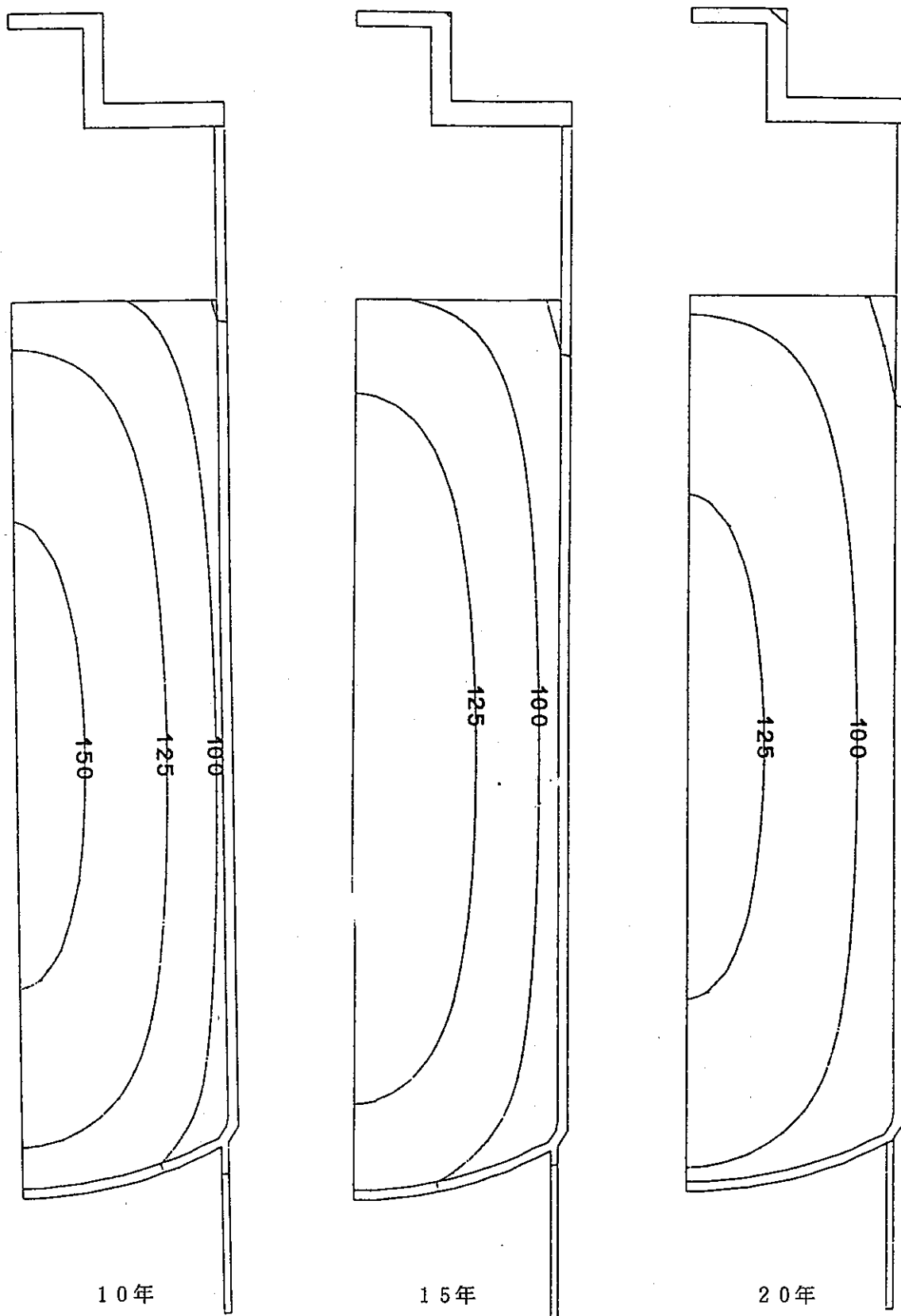


Fig.2-2-5 等温线图 (続き)

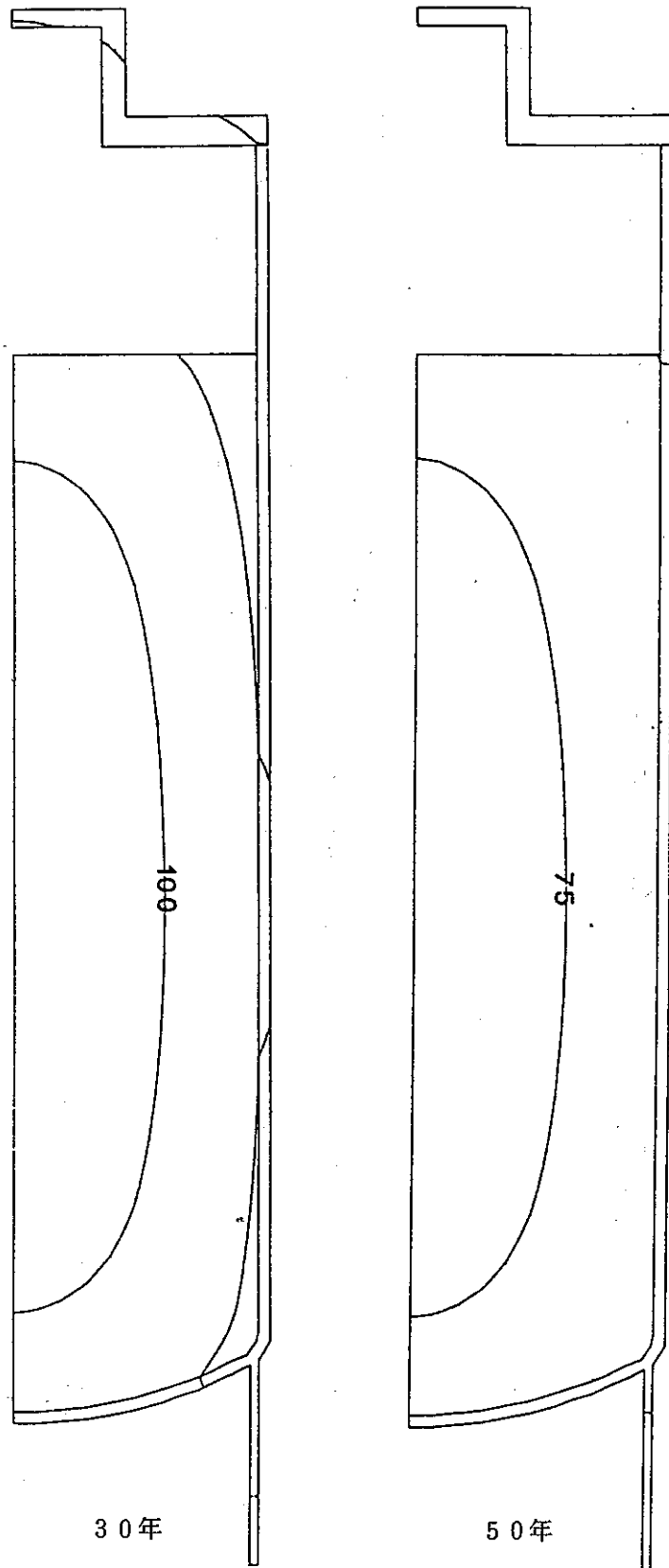


Fig.2-2-6 等温线图(続き)

## Appendix I 物性値及び境界条件

## 1. 物性値

ガラス物性値をTable A-1.1に、キャスター物性値をTable A-1.2に示す。キャニスター輻射率は焼面  $\epsilon = 0.45$ 、白色面  $\epsilon = 0.3$  とした。また、空気の物性値をTable A-1.3に示す。

Table A-1.1 ガラス物性値

密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )		熱伝導率 ( $\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ )	
温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値
20	$2.8 \times 10^3$	0	0.173	20	$2.353 \times 10^{-4}$
484	$2.786 \times 10^3$	435	0.302	500	$3.650 \times 10^{-4}$
1100	$2.56 \times 10^3$	490	0.400	1000	$9.972 \times 10^{-4}$
1200	—	560	0.42	1200	$1.2503 \times 10^{-4}$
—	—	800	0.35	—	—

Table A-1.2 キャニスター物性値 (SUS 304L)

密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )		熱伝導率 ( $\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ )	
温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	値
0	$8.04 \times 10^3$	0	0.118	0	$3.389 \times 10^{-3}$
1200	$7.50 \times 10^3$	1200	0.190	1200	$6.056 \times 10^{-3}$

Table A-1.3 空気の物性値

温度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/sec m°C)	動粘性係数 (m <sup>2</sup> /sec)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	プラントル数	熱膨張係数 (1/°C)
0	$5.750 \times 10^{-6}$	$1.381 \times 10^{-5}$	1.251	0.72	$3.661 \times 10^{-3}$
40	$6.500 \times "$	$1.750 \times "$	1.091	0.71	$3.193 \times "$
60	$6.861 \times "$	$1.961 \times "$	1.026	0.71	$3.002 \times "$
80	$7.222 \times "$	$2.169 \times "$	0.968	0.70	$2.832 \times "$
100	$7.556 \times "$	$2.389 \times "$	0.916	0.70	$2.680 \times "$
120	$7.917 \times "$	$2.619 \times "$	0.869	0.70	$2.544 \times "$
140	$8.250 \times "$	$2.861 \times "$	0.827	0.70	$2.420 \times "$
160	$8.583 \times "$	$3.083 \times "$	0.789	0.69	$2.309 \times "$
180	$8.889 \times "$	$3.333 \times "$	0.754	0.69	$2.207 \times "$
200	$9.222 \times "$	$3.583 \times "$	0.722	0.69	$2.113 \times "$
250	$9.972 \times "$	$4.250 \times "$	0.652	0.69	$1.911 \times "$
300	$1.072 \times 10^{-5}$	$4.944 \times "$	0.596	0.69	$1.745 \times "$
350	$1.144 \times "$	$5.694 \times "$	0.548	0.69	$1.605 \times "$
400	$1.214 \times "$	$6.444 \times "$	0.508	0.69	$1.486 \times "$
500	$1.341 \times "$	$8.139 \times "$	0.442	0.70	$1.293 \times "$
600	$1.464 \times "$	$9.889 \times "$	0.391	0.70	$1.145 \times "$
700	$1.579 \times "$	$1.179 \times 10^{-4}$	—	0.705	$1.028 \times "$
800	$1.694 \times "$	$1.369 \times "$	0.319	0.71	$9.318 \times 10^{-4}$
900	$1.806 \times "$	$1.600 \times "$	—	0.715	$8.524 \times "$
1000	$1.917 \times "$	$1.831 \times "$	0.265	0.72	$7.855 \times "$

(注) いずれの値も伝熱工学による。

熱膨張係数は空気を理想気体として  $\beta = 1 / (273.15 + T)$  とした。

2. 境界条件

境界条件は、対流熱伝達と輻射熱伝達とがあり、それらは、Fig. A-1.1 に示す過所に適用される。そのときの熱伝達量は、次式で決められる。

$$q = r \times \left\{ E_r \frac{T_a^4 - T_b^4}{T_a - T_b} + E_c + E_n (T_a - T_b)^h \right\} (T_a - T_b)$$

r : 半径 (境界の位置)

q : 伝熱量

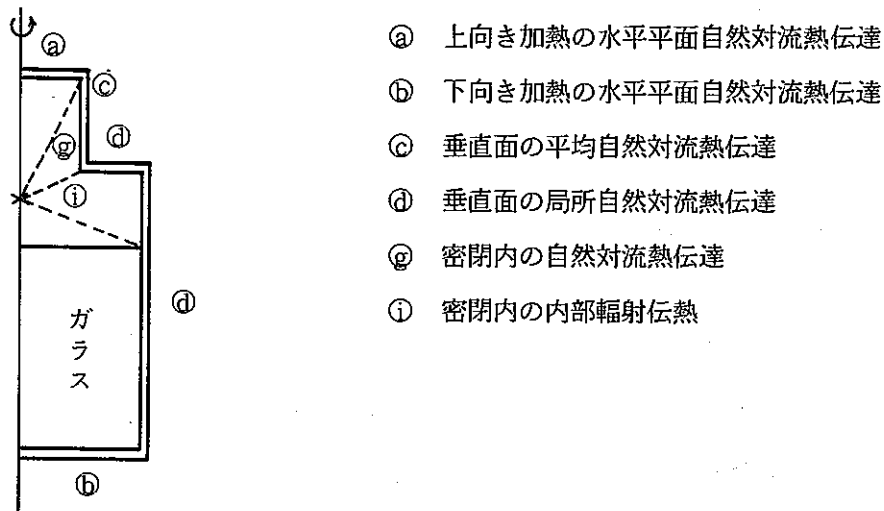
$E_r$  : 輻射熱伝達係数

$E_c$  : 強制対流熱伝達係数

$E_n$  : 自然対流熱伝達係数

h : 自然対流熱伝達の指数

熱伝達式を整理して示すとつぎのとおりである。ここでは、対流熱伝達係数、輻射熱伝達係数の順に示す。



- Ⓐ 上向き加熱の水平平面自然対流熱伝達
- Ⓑ 下向き加熱の水平平面自然対流熱伝達
- Ⓒ 垂直面の平均自然対流熱伝達
- Ⓓ 垂直面の局所自然対流熱伝達
- Ⓔ 密閉内の自然対流熱伝達
- Ⓕ 密閉内の内部輻射伝熱

Fig. A-1.1

(1) 上面と下面の自然対流による熱伝達について

上面の自然対流による熱伝達の取り扱いは、水平平板の自然対流熱伝達についての式を適用する。下面は、断熱とするが、下面の自然対流による熱伝達も上面と同様に取り扱えるため、参考のために、併記した。

これらの熱伝達式は次式で表わせる。



$$Nu_{\ell} = A (Gr_{\ell} \cdot Pr)^B \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$Nu_{\ell}$  : 平均ヌセルト数

$Gr_{\ell}$  : 平均グラスホフ数

$Pr$  : プラントル数

A, B : 定数

(1)式により平均熱伝達量 q は次のとおりである。

$$q = E_n (T - T_{\infty})^{h+1} \dots\dots\dots (2)$$

$$E_n = A \frac{\lambda}{\ell} \left( \frac{\ell^3 g \beta Pr}{\nu^2} \right)^B \dots\dots\dots (3)$$

$$h = B$$

ここで、

$E_n$  : 熱伝達係数

h : 冷却材による係数

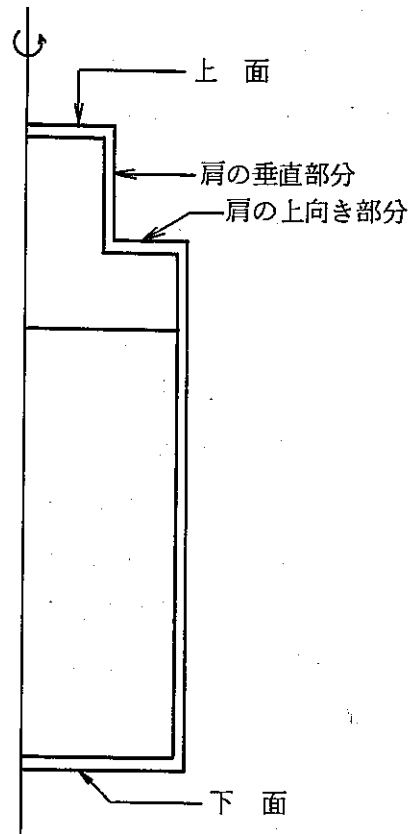
$\lambda$  : 熱伝導係数

$\ell$  : 代表的長さ (円板の場合は直径)

g : 重力加速度

$\beta$  : 熱膨張係数

$\nu$  : 動粘性係数



ガラス固化体

平板から上方に熱が出て行く場合 (上向き平板) と、下に熱が出て行く場合 (下向き平板) で、定数 A, B の値は異なる。また同じ上向きでも文献により A, B の値は異なる。そこで A, B の値及び  $E_n$  の値をまとめて、Table A-1.4 に示す。 $E_{n \text{ air}}$  は、空気冷却の場合の熱伝達係数で、 $E_{n \text{ water}}$  は、水冷却の場合の熱伝達係数である。これらの熱伝達係数のうち、「Heat Transmission」による値を使用する。また、層流と乱流の熱伝達式による伝熱量の違いは、わずかであるのですべての温度で乱流域の式を用いる。

以上により、ガラス固化体の上面の熱伝達は次式を用いる。

$$Nu_{\ell} = 0.14 (Gr_{\ell} \cdot Pr)^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

TableA-1.4 定数A, Bの値

項目	㉑ 上方に熱が伝達される場合					㉒ 下方に熱が伝達される場合					
	文献名	A	B	Enair	Enwater	h	A	B	Enair	Enwater	
Heat Transmission	* (注1) 0.14	1/3	(注2) $3.95 \times 10^{-4}$	$4.86 \times 10^{-2}$	1/3	0.27	0.25	$2.43 \times 10^{-4}$	$1.97 \times 10^{-2}$	0.25	正方形の場合の式
	0.54	0.25	$5.71 \times 10^{-4}$	$4.63 \times 10^{-2}$	0.25	/					
伝熱工学資料	* 0.13 ~ 0.16	1/3	$3.66 \times 10^{-4}$ ~ $4.51 \times 10^{-4}$	$4.52 \times 10^{-2}$ ~ $5.56 \times 10^{-2}$	1/3	0.6	0.2	$2.72 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-2}$	0.2	
	0.51	0.25	$5.40 \times 10^{-4}$	$4.38 \times 10^{-2}$	0.25	/					
伝熱工学及び 化学工学便覧	Heat Transmissionと同じ					Heat Transmissionと同じ					
文献 3) 1	/					0.51 or 0.55	0.2	$2.31 \times 10^{-4}$ ~ $2.50 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-2}$ ~ $1.58 \times 10^{-2}$	0.2	円形平板の場合の 計算値
<p>(注1) *印は乱流の場合 <math>2 \times 10^7 &lt; G_{re} \cdot P_r &lt; 3 \times 10^{10}</math> のとき乱流, <math>10^5 &lt; G_{re} \cdot P_r &lt; 10^7</math> のとき層流</p> <p>(注2) <math>E_n</math> の値は, 物性値 <math>T_\infty = 21^\circ\text{C}</math> のときの値, <math>\ell = 0.21</math> (下方), <math>\ell = 0.11</math> (上方) として計算した。</p> <p>(注3) T.Fujii, Int J.Heat Transfer vol 16, pp 611 (1973)</p>											

(2) 垂直面の自然対流熱伝達

垂直面の自然対流熱伝達は、平均熱伝達係数と局所熱伝達係数を用いる。ガラス固化体は高さが高いため、高さ方向の伝熱量のちがいが大きいので高さ方向の伝熱量のちがいを(局所熱伝達係数)を考慮する。

(i) 垂直面の平均自然対流熱伝達係数

垂直面の平均自然対流熱伝達係数は、冷却材により異なるが空気については、cheese write の平均自然対流熱伝達係数と文献値BNWL-2252とがある。

(cheese write の平均自然対流熱伝達係数)

$$Nu_{\ell} = 0.0204 (Gr_{\ell} \cdot Pr)^{2/5} + (15.8 \sim -12.8) \dots\dots\dots (5)$$

$$Nu_{\ell} \left( = \frac{q}{(T_w - T_{\infty})} \times \frac{\ell}{\lambda} \right) \text{ヌセルト数}$$

$$Gr_{\ell} (= \ell^3 \times g \times \beta \times (T_w - T_{\infty}) / \nu^2) \text{グラスホフ数}$$

- q : 熱流束
- ℓ : 伝熱面高さ (m)
- T<sub>w</sub> : 伝熱面温度
- T<sub>∞</sub> : 周囲流体温度
- λ : 熱伝導率
- g : 重力加速度
- β : 平均体膨張係数
- ν : 動粘性係数

(5)式から E<sub>n</sub> , h は、(2), (3)式を用いて計算する。

(文献BNWL-2252による平均自然対流熱伝達係数)

$$E_{n \text{ air}} = 3.136 \times 10^{-4} (\text{kcal} / \text{sec} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{4/3})$$

$$h = 1/3$$

(ii) 局所自然対流熱伝達係数

局所自然対流熱伝達係数は、壁温一様の場合及び壁面熱流束一様の場合について詳しく調べられている。ここでは熱流束一様の場合の熱伝達係数を用いる。またガラス固化体は、その半径が大きいため、曲率による補正を行わず、鉛直平板として取り扱った。

壁面熱流束一様の場合の局所自然対流熱伝達は、いずれの流域でも次式で示される。

$$Nu_{ix} = a (\nu_{\infty} / \nu_w)^m (Gr_{ix}^* \cdot Pr)^b \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$N_{ux} = \frac{Zq}{\lambda_{\infty}(T_w - T_{\infty})} : \text{局所ヌセルト数}$$

$$G_{rx}^* = \frac{Z^4 g \beta q}{\lambda_{\infty} \nu_{\infty}^2} : \text{修正グラスホフ数}$$

$P_r$  : プラントル数

$a, b, \mu$  : 流域ごとに異なる定数 (2)参照)

$\nu_{\infty}$  : 周囲流体温度での動粘性係数 (  $m^2/sec$  )

$\nu_w$  : 壁温度 " ( " )

$Z$  : 下端からの伝熱面の高さ (  $m$  )

$q$  : 壁面熱流束 (  $kcal/m^2 \cdot sec$  )

$\lambda_{\infty}$  : 周囲流体温度での熱伝導係数 (  $kcal/m \cdot sec \cdot ^\circ C$  )

$T_w$  : 壁温度 (  $^{\circ} C$  )

$T_{\infty}$  : 周囲流体温度 ( " )

$g$  : 重力加速度 (  $9.8 m/sec^2$  )

$\beta$  : 体膨張係数 (  $1/^{\circ} C$  )

なお、壁面温度一様の場合の局所自然対流熱伝達は、次式で示される。

$$N_{ux} = A (\nu_{\infty} / \nu_w)^M (G_{rx} \cdot P_r)^B \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$G_{rx} = \frac{Z^3 g \beta (T_w - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} : \text{グラスホフ数}$$

$A, B, M$  : 流域ごとに異なる定数

式(6)と式(7)は次のグラスホフ数と修正グラスホフ数との関係式を用いて形式的に変換できる。

$$G_{rx}^* = G_{rx} \cdot N_{ux}$$

変換すると定数は次の関係を満たす。

$$a = A \frac{1}{1+B} \dots\dots\dots (8)$$

$$b = \frac{B}{1+B} \dots\dots\dots (9)$$

$$\mu = \frac{M}{1+B} \dots\dots\dots (10)$$

本研究では、式(6)を用いる。

[ 流域の判定と定数 a, b, μ について ]

壁面熱流束一様の場合の  $N_{ux}$  と  $G_{rx}^* \cdot P_r$  の関係は、Fig. A-1.2 のようになる。壁面温度一様の場合の  $N_{ux}$  と  $G_{rx} \cdot P_r$  の関係も同様である。また、各流域の境界は、修正グラスホフ数と、プラントル数の積  $G_{rx}^* \cdot P_r$  の値によって決められる。

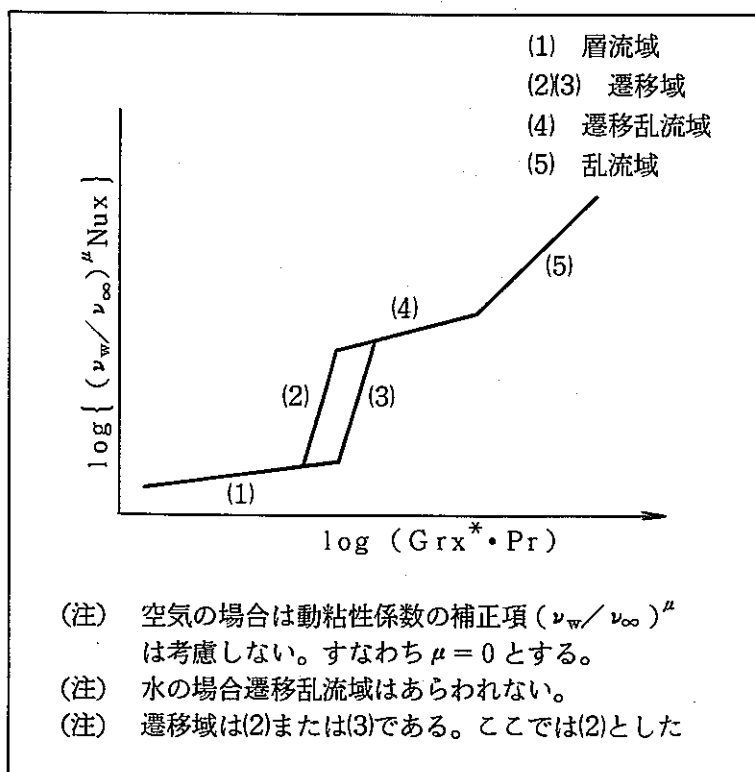


Fig.A-1.2  $N_{ux}$  と  $G_{rx}^* \cdot P_r$  の関係

定数 a, b, μ 及び各流域の境界値については、水の場合は熱流束一様の場合の藤井による値を用いた。空気の場合は熱流束一様の場合についての値を見出せなかったので、壁温一様の場合の cheese wright による値を用いた。なお藤井によると、解析的な解では熱流束一様の場合壁温一様の場合より定数 A が、約 13% 高くなる。定数 a, b, μ 及び各流域の境界値を熱流束一様の場合に換算して Table A-1.5 に示す。

TableA-1.5 定数 a, b, μ 及び流域の境界値

流域 冷却材		層流域	遷移域	遷移乱流域	乱流域	流域の境界値 ( $G_r^* \cdot Pr$ )			動粘性係 数の補正
						層流域   遷移域	遷移域   遷移乱流域	遷移乱流域   乱流域	
空気	a	0.466 <sup>(1)</sup>	8.89×10 <sup>-7</sup> <sup>(2)</sup>	0.895 <sup>(2)</sup>	0.0707 <sup>(2)</sup>				補正なし μ = 0.0
	b	0.2	0.694	0.2	0.286	3.86×10 <sup>11</sup>	1.45×10 <sup>12</sup>	7.27×10 <sup>12</sup>	
水	a	0.59 <sup>(2)</sup>	1.12×10 <sup>-4</sup> <sup>(2)</sup>	/	0.215 <sup>(1)</sup>	層流域   遷移域	遷移域   乱流域		μ = 0.21
	b	0.2	0.503	/	0.25	2.0×10 <sup>12</sup>	1.0×10 <sup>13</sup>		

(1): T.Fujii etc Int. Heat Transter vol 13 P753 1968

(2): 藤井哲 伝熱工学の進展

(3) 密閉内の自然対流熱伝達

密閉流体内の自然対流熱伝達の式として、平行二面間の密閉流体層の伝熱式があり、レイリー数  $R_a$  の値によりつぎの2式がある。

(Emery-chuの式)

$$Nu_u = 1 \quad (R_a < 10^3)$$

$$Nu_u = 0.28 (R_a)^{1/4} (L/D)^{-1/4} \quad (10^3 < R_a < 10^7)$$

(鈴置, 赤津の式)

$$Nu_u = 0.0516 \times R_a^{1/3} \quad (10^6 < R_a) \dots\dots\dots (1)$$

$$Nu_u \left( = \frac{g \times D}{\lambda + \Delta T} \right) \text{ヌセルト数}$$

$$R_a \left( = \frac{g \beta D^3 \times Pr}{\nu^2} \times \Delta T \right) \text{レイリー数}$$

キャニスター上部の密閉内の伝熱にこの二面間の熱伝達式は組み込みにくいので、つぎのように考え、仮想点を設定して(1)式を使用する。

水平平板の場合、流体より平板が高温で熱が上方に伝達される場合と、流体より平板が低温で熱が下方から伝達される場合の乱流熱伝達は、次式で示される。

$$N_u = 0.14 R_a^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

式(12)は板と気体の間の熱伝達の式である。Fig.A-1.3のような密閉流体層を考えると、式(11)によると伝熱量qは次のようになる。

$$q = 0.0516 \times C \times (T_A - T_B)^{4/3} \dots\dots\dots (13)$$

C：定数

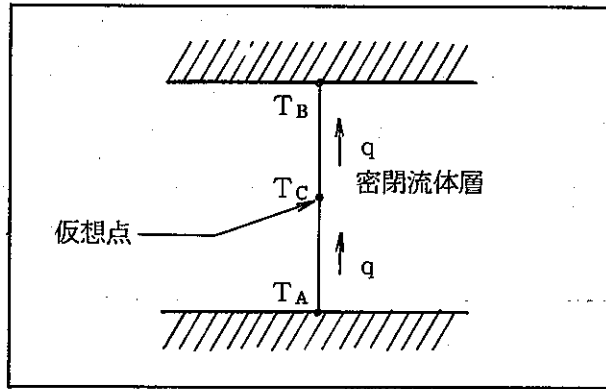


Fig. A-1.3 密閉流体層の熱伝達の模式図

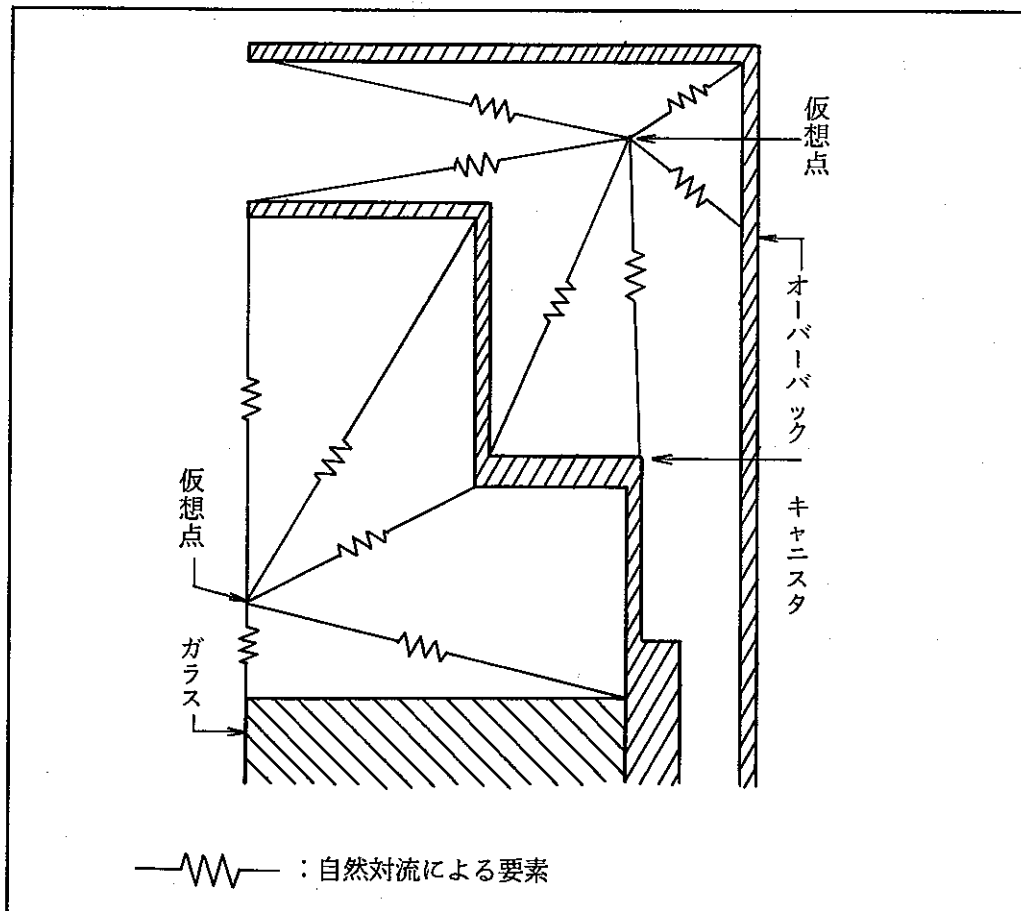


Fig. A-1.4 仮想点を設けた場合の模式図

一方、式(12)によると、次のようになる。

$$q = 0.14 \times C \times (T_A - T_C)^{4/3} \dots\dots\dots (14)$$

$$q = 0.14 \times C \times (T_C - T_B)^{4/3} \dots\dots\dots (15)$$

式(14)と式(15)より  $T_C$  を消去すると

$$q = \left(\frac{1}{2}\right)^{4/3} 0.14 \times C \times (T_A - T_B)^{4/3} \dots\dots\dots (16)$$

$$= 0.0556 \times C \times (T_A - T_B)^{4/3} \dots\dots\dots (16)$$

となる。式(13)と式(16)を比べると、両式はほぼ一致していると考えられる。現象的にも両者は、同様であると考えられる。そこで密閉内の熱伝達の式(11)を用いる代わりに、空洞部分に仮想点を設け水平平板の式(12)を用いる。壁と仮想点との熱伝達は一次元要素を用いる。

(4) 接触面の熱抵抗について

ガラス固化体とキャニスタの接合部で熱抵抗がある。この熱抵抗のコード上の取り扱い、対応する熱伝達係数を設定すれば良い。固体と固体が接触している場合の熱抵抗については、接触面の固さ、粗さ、圧力、固体の熱伝導係数及び接触面の平面度にも大きく依存する。このため、その熱伝達係数の評価はむずかしい。接触面の熱伝達係数の計算方法について、いくつかの例を示す。

(Ross & Stouteの式)

$$\lambda = 95.14 \frac{P}{H^4 \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \times \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{10^6 \lambda_3}{0.25 C (\delta_1 + \delta_2) + \delta_j} \dots\dots\dots (17)$$

(橋の式)

$$\alpha = \frac{10^4}{\frac{\delta_1 + 2.3}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + 2.3}{\lambda_2}} \times \frac{P}{H} + \frac{10^6 \times \lambda_3}{\delta_1 + \delta_2} \dots\dots\dots (18)$$

(以上2式は伝熱工学資料)

$$\alpha = \frac{1.45 |\tan\theta|}{\frac{\sigma}{2} \times \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right)} \times \left(\frac{P}{H}\right)^{0.985} \dots\dots\dots (19)$$

(M.G. Cooper etc 「Thermal contact conductance」 Int.J.Heat Transfer vol 12. pp 279)



ここで、

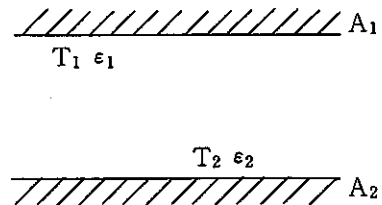
- $\alpha$  : 接触面の熱伝達係数
- $a$  : 実際に接触している面積
- $A$  : 接触面の見かけの面積
- $\lambda_1, \lambda_2$  : 固体の熱伝導係数
- $\lambda_3$  : 接触面の流体の熱伝導係数
- $\delta_1, \delta_2$  : 接触面の粗さ
- $\delta_j$  : 温度跳躍距離
- $C$  : 無次元定数
- $P$  : 接触圧力
- $H$  : 接触固体のやわらかい方のかたさ
- $\sigma$  : 表面の高さの分布の偏差
- $\overline{\tan \theta}$  : 斜面のかたむきの平均

(5) 輻射伝熱

輻射伝熱は大きく2つに分けられる。一つは平行二平面間の輻射伝熱で、もう一つはガラス固化体上部の空洞内の輻射伝熱である。

(平行二平面間の輻射伝熱)

$$q_r = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \times \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$



$q_r$  : 輻射伝熱量

$\sigma$  : スティファンボルツマン定数 (  $4.88 \times 10^{-8}$  kcal/h · deg )

$\epsilon_1, \epsilon_2$  : 輻射率

$T_1, T_2$  : 温度 (絶対温度)

プログラム内の輻射伝熱係数  $E_r$  はつぎのようになる。

$$E_r = \sigma \times \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_1} - 1}$$

(空洞内の輻射伝熱)

空洞内が灰色体の系で、ある面から出て行く輻射を考えると、輻射量は、その面自身から射出している熱輻射のみでなく、外部からの入射線が、その面で反射されたものが加わっている。その面から単位面積、単位時間当りの定常輻射量を射度  $G$  kcal/m<sup>2</sup> · sec

と呼び、この射度を用いて輻射伝熱量を求める。

$$\text{射度 } G = \frac{\text{表面から出ているエネルギー (自己輻射 + 外来照射の反射)}}{\text{表面積} \times \text{時間}}$$

(射度の関係式)

$$G_i S_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 S_i + (1 - \epsilon_i) \sum_{k=1}^n G_k S_k F_{ki} \dots\dots (20)$$

$$i = 1, 2, \dots\dots n$$

$G_i$  : 射度

$S_i$  : 面積

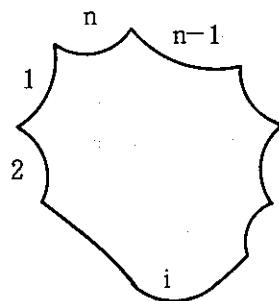
$\epsilon_i$  : 輻射率

$T_i$  : 面  $i$  の温度

$F_{ki}$  : 面  $k$  から面  $i$  への形態係数

$n$  : 空洞内の面の数

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数



(20)式を形態係数の相互関係  $S_k F_{ki} = S_i F_{ik}$  を用いて次式へ変換する。

$$G_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \sum_{k=1}^n F_{ik} G_k \dots\dots (21)$$

$$i = 1, 2, \dots\dots n$$

この連立一次方程式を解けば、 $G_i$  が定まる。

この射度  $G_i$  を用いて各節点からの熱エネルギー  $Q_i$  を表わすと次のとおりである。

$$Q_i = G_i S_i - \sum_{k=1}^n G_k S_k F_{ki} \dots\dots (22)$$

$Q_i$  : 面  $i$  から出る熱量

$Q_i > 0$  のとき熱量を放出

$Q_i < 0$  のとき熱量を吸収

(22)式を  $S_k F_{ki}$  を用いて整理する。

$$Q_i = (G_i - \sum_{k=1}^n F_{ik} G_k) \times S_i \dots\dots (23)$$

空洞内の輻射を取り扱うとき、入力項目は、輻射率、面積、及び面間の形態係数とがある。これらの入力項目のうち、輻射率、面積は直ちに設定出来るが、形態係数は空洞内の幾可学的形状より求める必要がある。

面1から面2への形態係数  $F_{12}$  は、二つの面の大きさ、形状、相対位置及び角関係で定まる量であり、つぎのように決められる。

$$S_i F_{12} = \frac{1}{\pi} \int_{s_1} \int_{s_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{L^2} d s_1 d s_2 \dots (24)$$

S : 面 i の面積

F<sub>12</sub> : 面 1 から面 2 への形態係数

L : 二面間の距離

この形態係数間の関係は相互関係と閉じた系に関する形態係数総和関係がある。

(相互関係)

任意の二面 i, k の形態係数 F<sub>ik</sub>, F<sub>ki</sub> にはつぎの関係式が成立する。

$$S_i k_{ik} = S_k F_{ki}$$

(総和関係)

Fig.A-1.5のようにn個の面によって囲まれた閉空間における各面間の形態係数には、つぎの関係式が成立する。

$$\sum_{k=1}^n F_{ik} = 1 \dots \dots \dots (25)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

空洞内(キャニスタ空洞部)の形態係数は式(25)に従って計算すれば良いが、計算の手間を省くため、次のような計算式を用いて計算した。

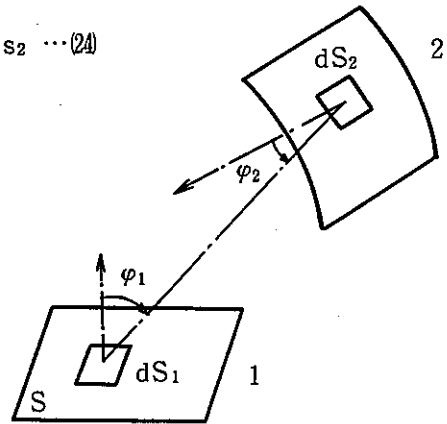


Fig. A-1.5 相対する2面

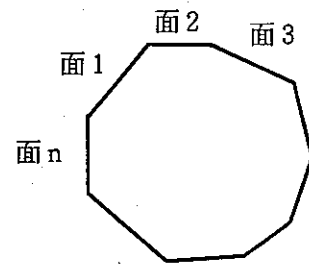
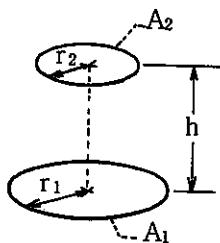


Fig. A-1.6 多くの面が空間を囲む場合

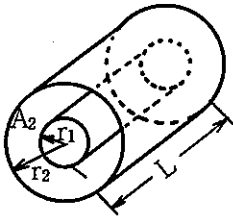


Parallel circular disks with centers along the same normal.

$$R_1 = \frac{r_1}{h} \quad R_2 = \frac{r_2}{h}$$

$$X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left[ X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right]$$



Two concentric cylinders of same finite length.

$$R = \frac{r_2}{r_1} \quad L = \frac{1}{r_1}$$

$$A = L^2 + R^2 - 1$$

$$B = L^2 - R^2 + 1$$

$$F_{2-1} = \frac{1}{R} - \frac{1}{\pi R} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) - \frac{1}{2L} \left[ \sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \cos^{-1} \left( \frac{B}{RA} \right) + B \sin^{-1} \left( \frac{1}{R} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

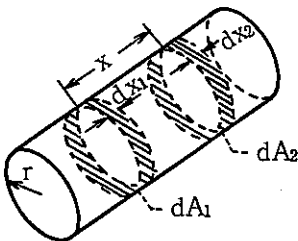
$$F_{2-2} = 1 - \frac{1}{R} + \frac{2}{\pi R} \tan^{-1} \left( \frac{2\sqrt{R^2-1}}{L} \right) - \frac{L}{2\pi R} \left\{ \frac{\sqrt{4R^2+L^2}}{L} \sin^{-1} \left[ \frac{4(R^2-1) + (L^2/R^2)(R^2-2)}{L^2+4(R^2-1)} \right] - \sin^{-1} \left( \frac{R^2-2}{R^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left( \frac{\sqrt{4R^2+L^2}}{L} - 1 \right) \right\}$$

where for any argument  $\xi$  :

$$-\frac{\pi}{2} \leq \sin^{-1} \xi \leq \frac{\pi}{2}$$

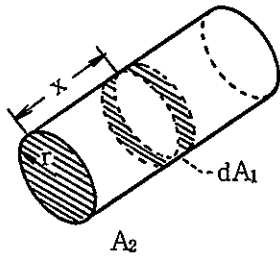
$$0 \leq \cos^{-1} \xi \leq \pi$$

Two ring elements on the interior of a right circular cylinder.



$$X = \frac{x}{2r}$$

$$dF_{\sigma_1-\sigma_2} = \left[ 1 - \frac{2X^3+3X}{2(X^2+1)} \right] dX_2$$



Ring element  $dA_1$  on interior of right circular cylinder to circular disk  $A_2$  at end of cylinder.

$$X = \frac{x}{2r}$$

$$F_{\sigma 1-2} = \frac{X^2 + \frac{1}{2}}{\sqrt{X^2 + 1}} - X$$

出所 THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER  
SIEGEL-HOWELL  
McGRAW-HILL

## 2.2 ガラス固化体の実効熱伝導率

キャニスタ内に注入されたガラス固化体の熱伝導率はガラス固化体中に生ずるクラックによって、ガラス自身の熱伝導率とは異なることが予想されるため、実規模ガラス固化体を用いて実効熱伝導率測定試験を行った。

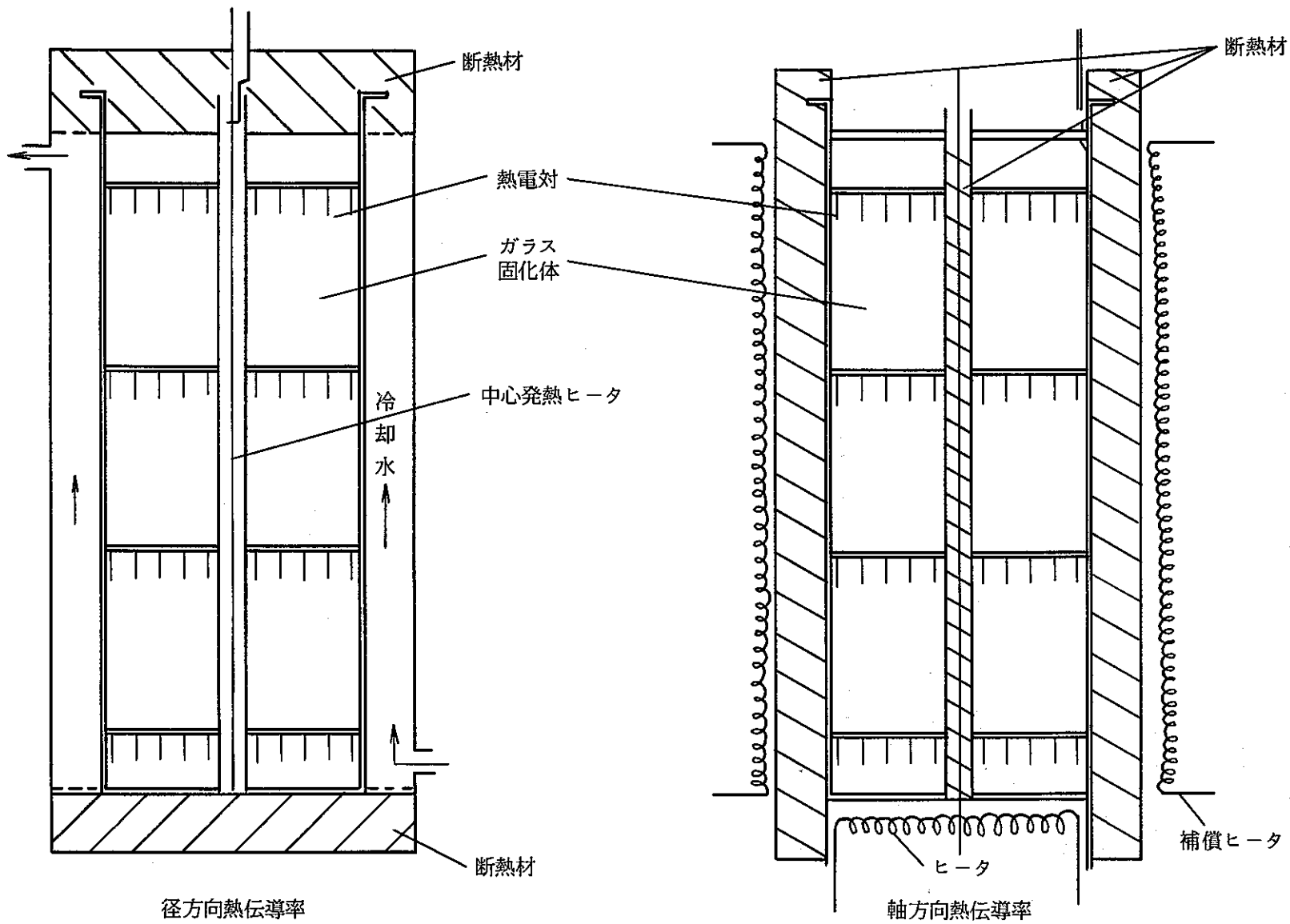
### 実験方法

300kgの模擬ガラスを2時間でキャニスタへ注入し徐冷、大気放冷、水冷の3通りの熱処理を行った後、Fig. 2-2-1に示すような方法で径方向及び軸方向のガラス固化体実効熱伝導率を測定した。

### 結 果

大気放冷の場合の径方向熱伝導率をFig. 2-2-2に、軸方向熱伝導率をFig. 2-2-3に、また3通りの熱処理による違いをFig. 2-2-4に示す。更にガラス固化体最高温度と実効熱伝導率の関係をFig. 2-2-5に示す。

ガラス固化体実効熱伝導率は、徐冷と大気放冷とで大差はなく、ガラスそのものの熱伝導率20~30%減と評価できる。



径方向熱伝導率

軸方向熱伝導率

Fig. 2-2-1 熱伝導率測定試験方法概念図

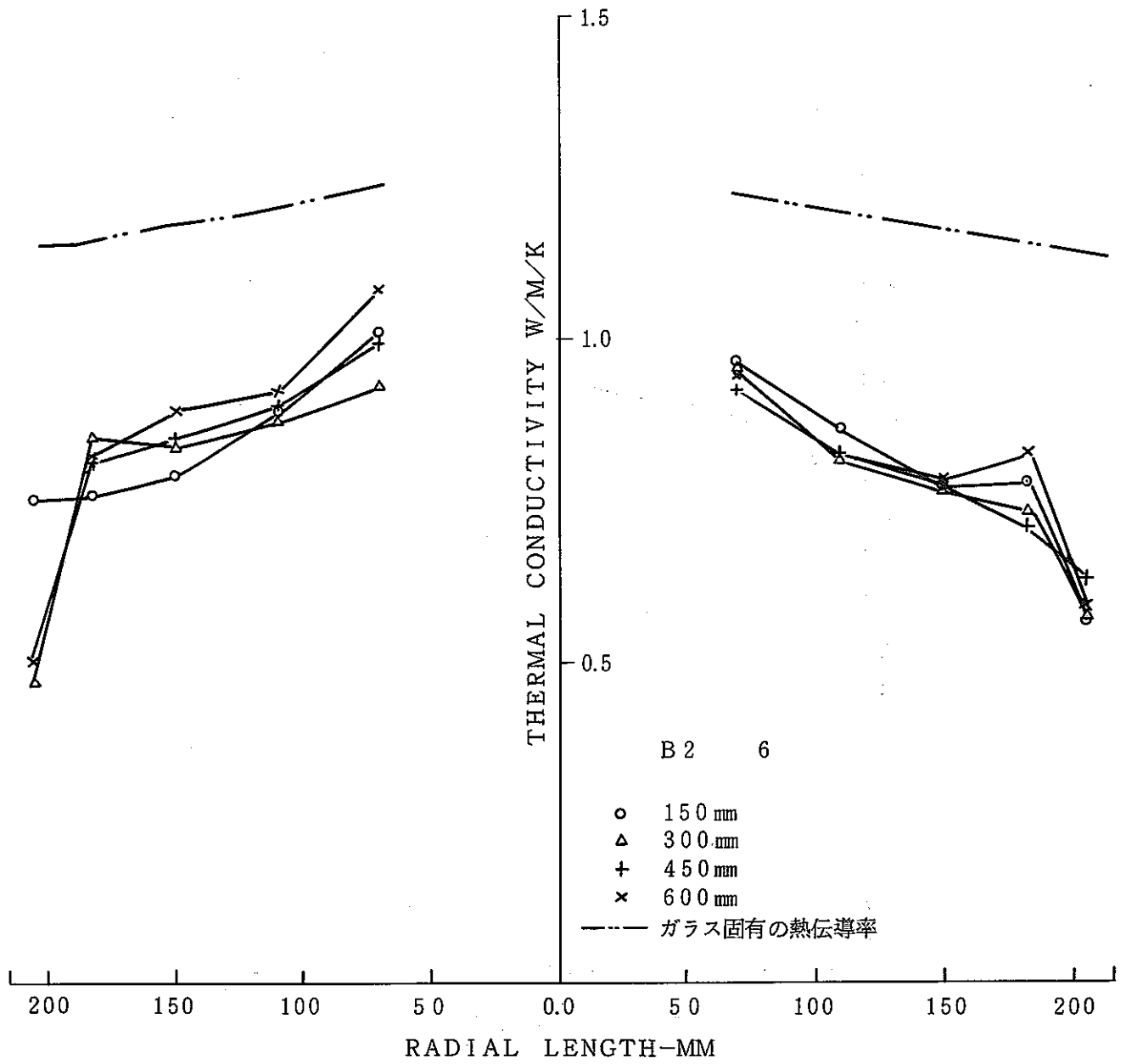


Fig. 2-2-2 ガラス固化体熱伝導率



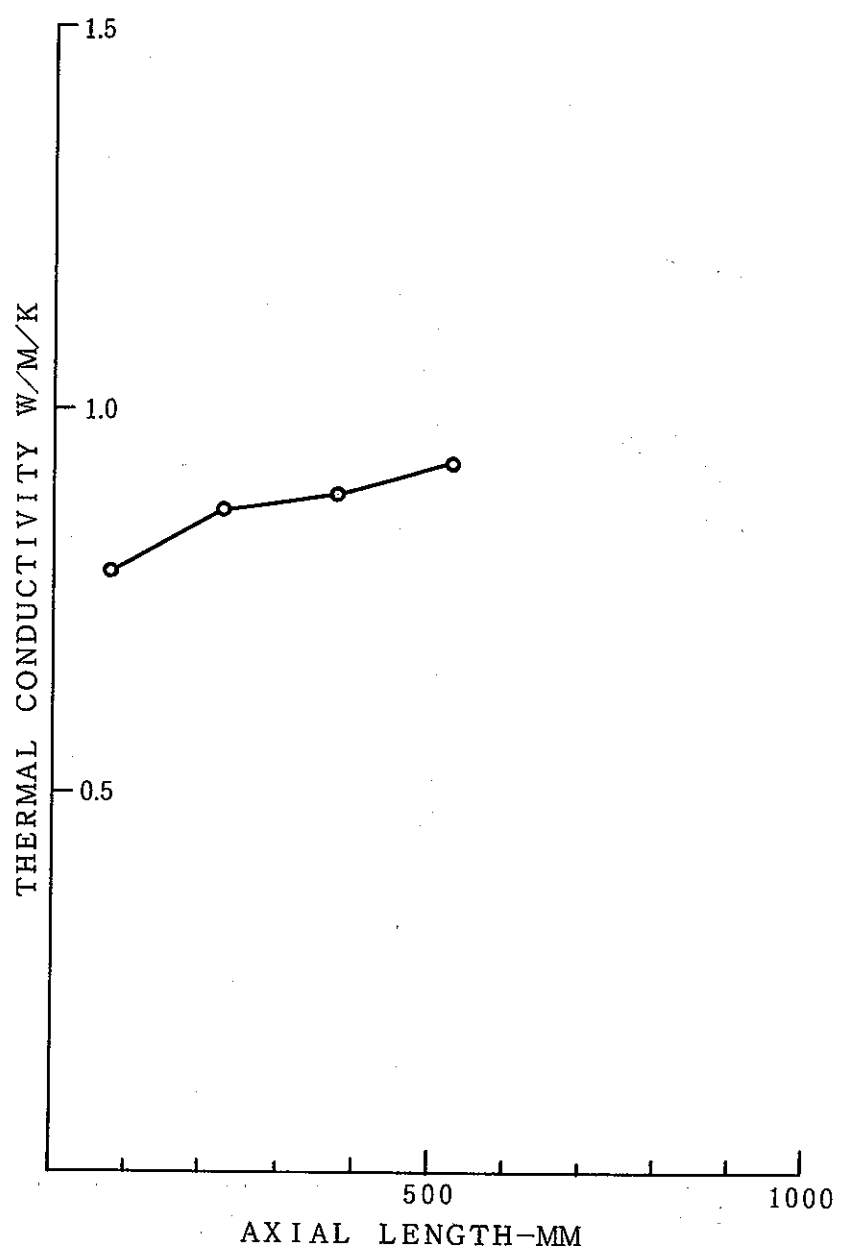


Fig. 2-2-3 ガラス固化体熱伝導率

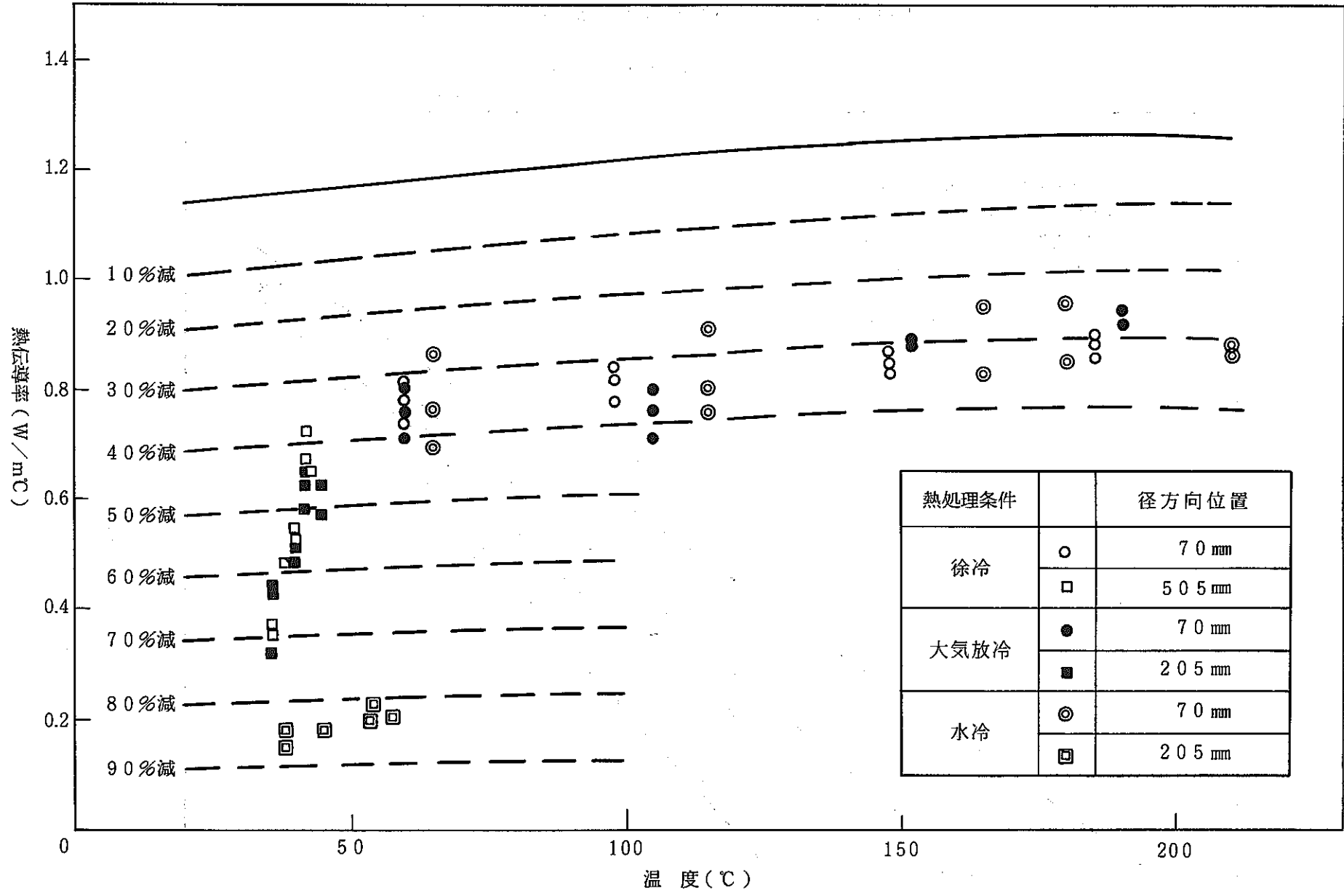


Fig. 2-2-4 ガラス固化体の実効熱伝導率

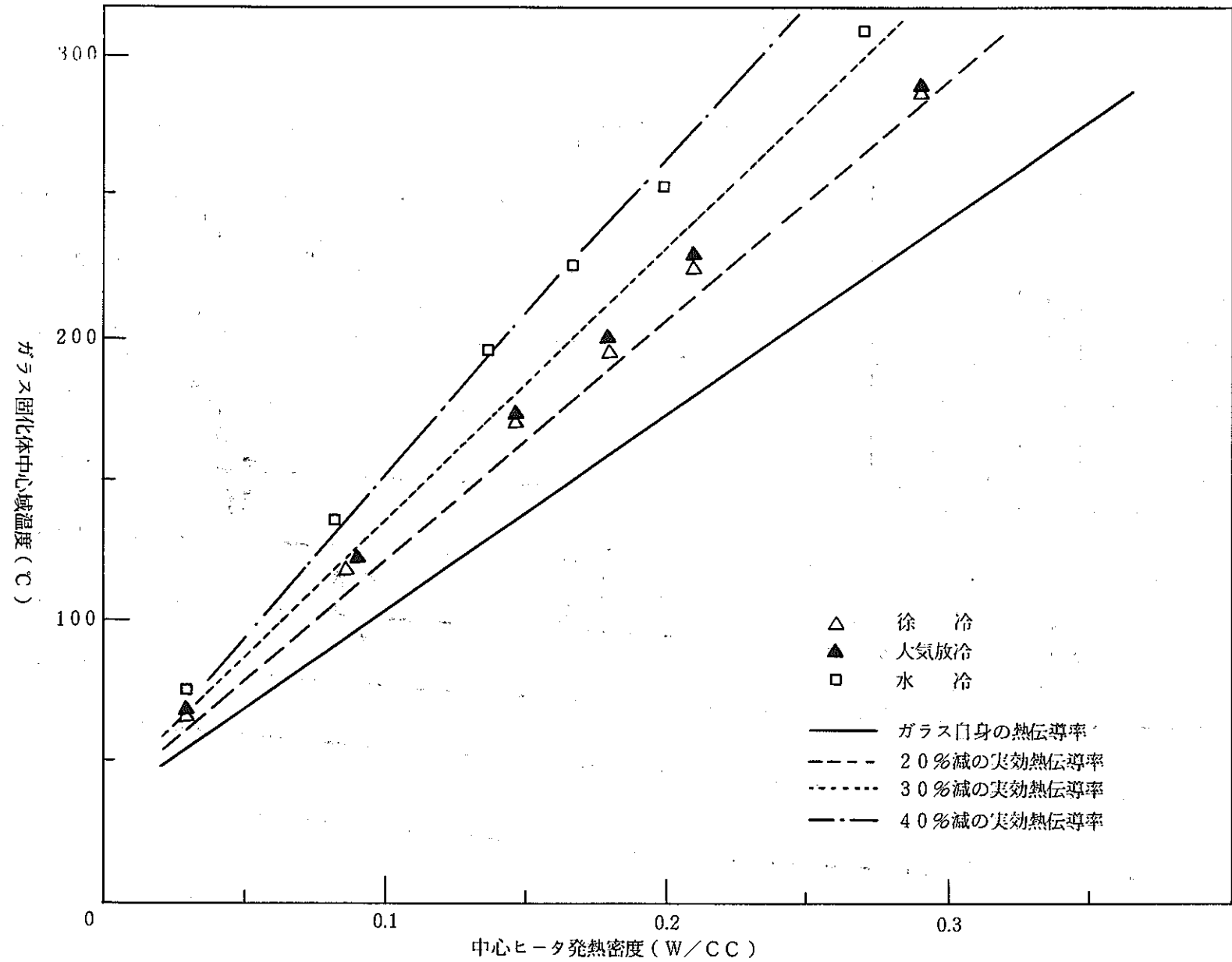


Fig. 2-2-5 ガラス固化体最高温度と実効熱伝導率の関係

### 2.3 キャニスター変形量測定

キャニスターは溶融ガラス注入時に高温となるため、熱変形が生じる。

変形量の測定には、実規模キャニスターに模擬廃液溶融ガラスを300kg注入し、キャニスター全長の伸び、胴径の膨張、偏芯量を、ダイヤルゲージ、金尺により測定した。(測定図をFig. 2-3-1に、測定概略方法をFig. 2-3-2に示す。)

キャニスターのガラス注入時及び注入後の軸方向変化(伸び)をFig. 2-3-3に、直径の変化をFig. 2-3-4に、偏芯量の変化をFig. 2-3-5に示す。

キャニスター伸びは全長1320mmに対してガラス注入完了時に最大となり9mm、冷却後は0mmであった。径の膨張は直径430mmに対してガラス注入完了時に最大4.5mm、冷却後は0.5mmであった。偏芯は最大1.1mm、冷却後は0.5mmであった。

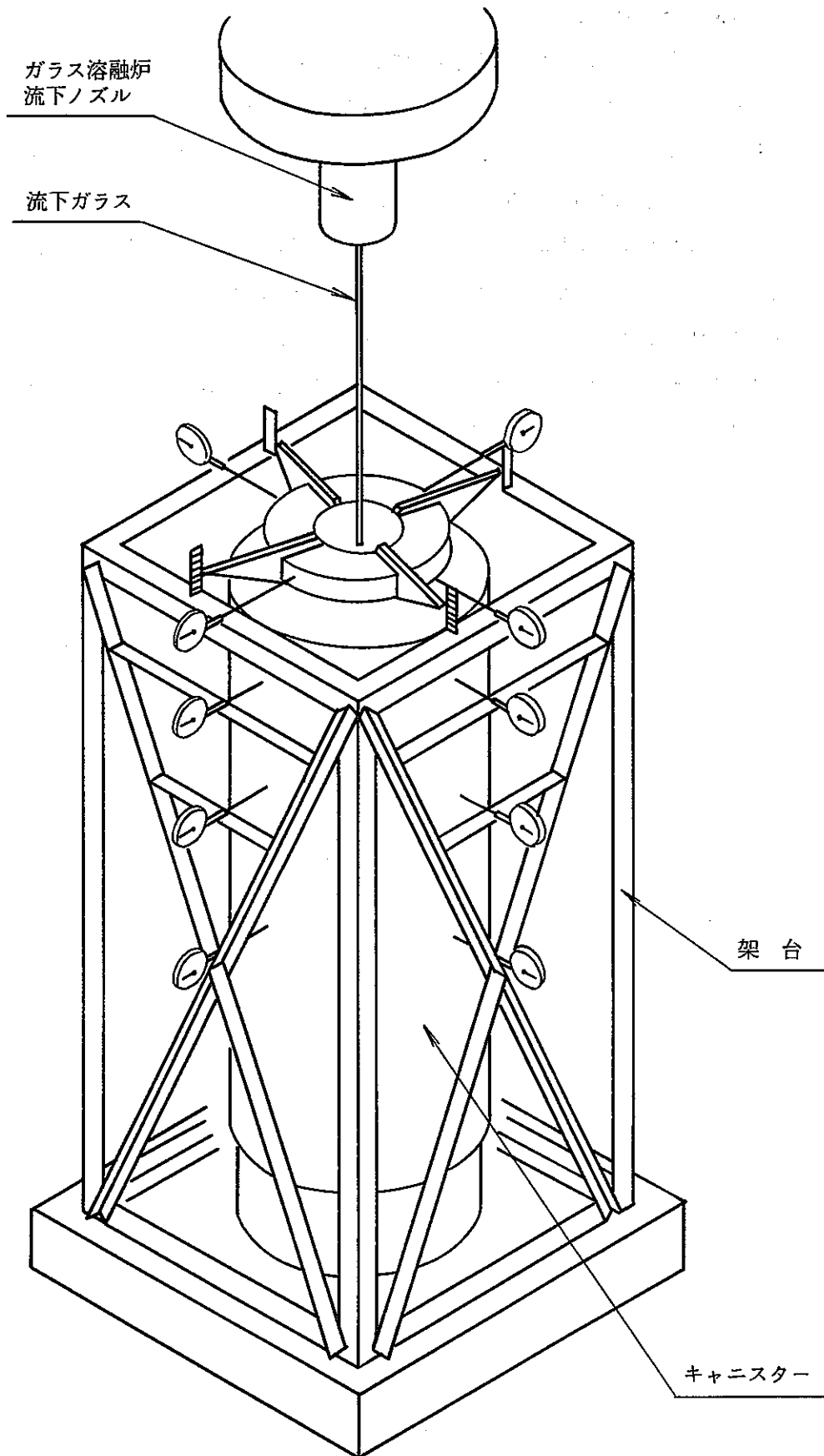


Fig. 2-3-1 変形量測定図

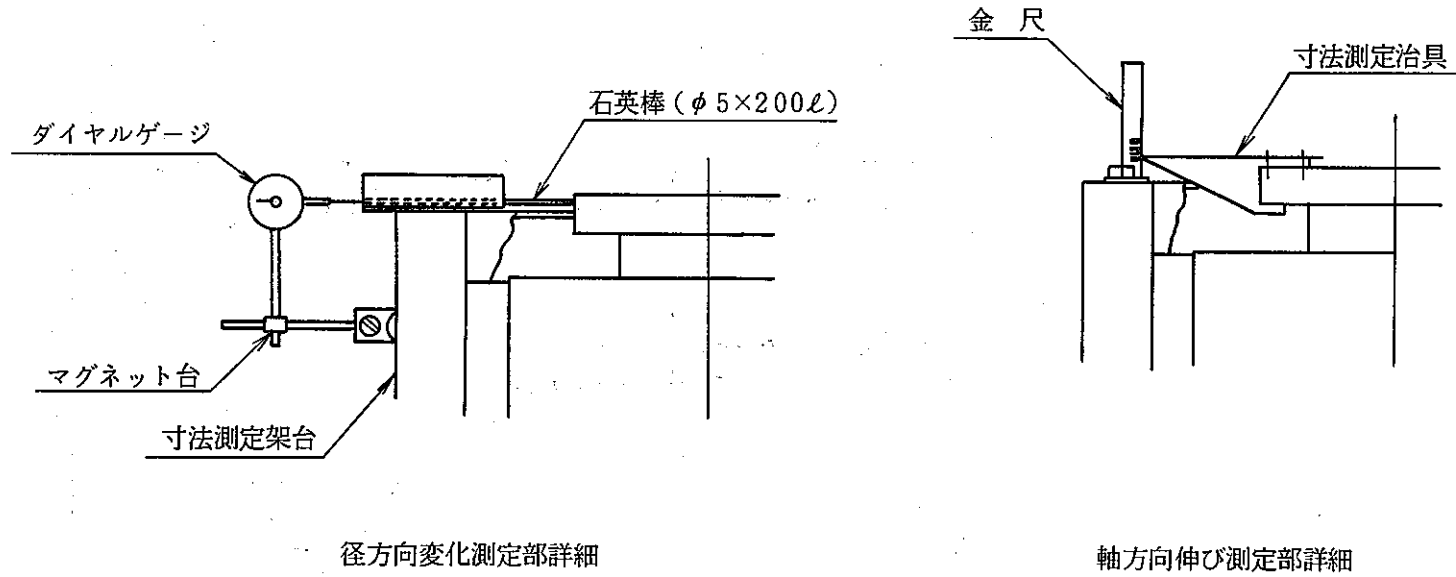


Fig. 2-3-2 変形量測定概略方法

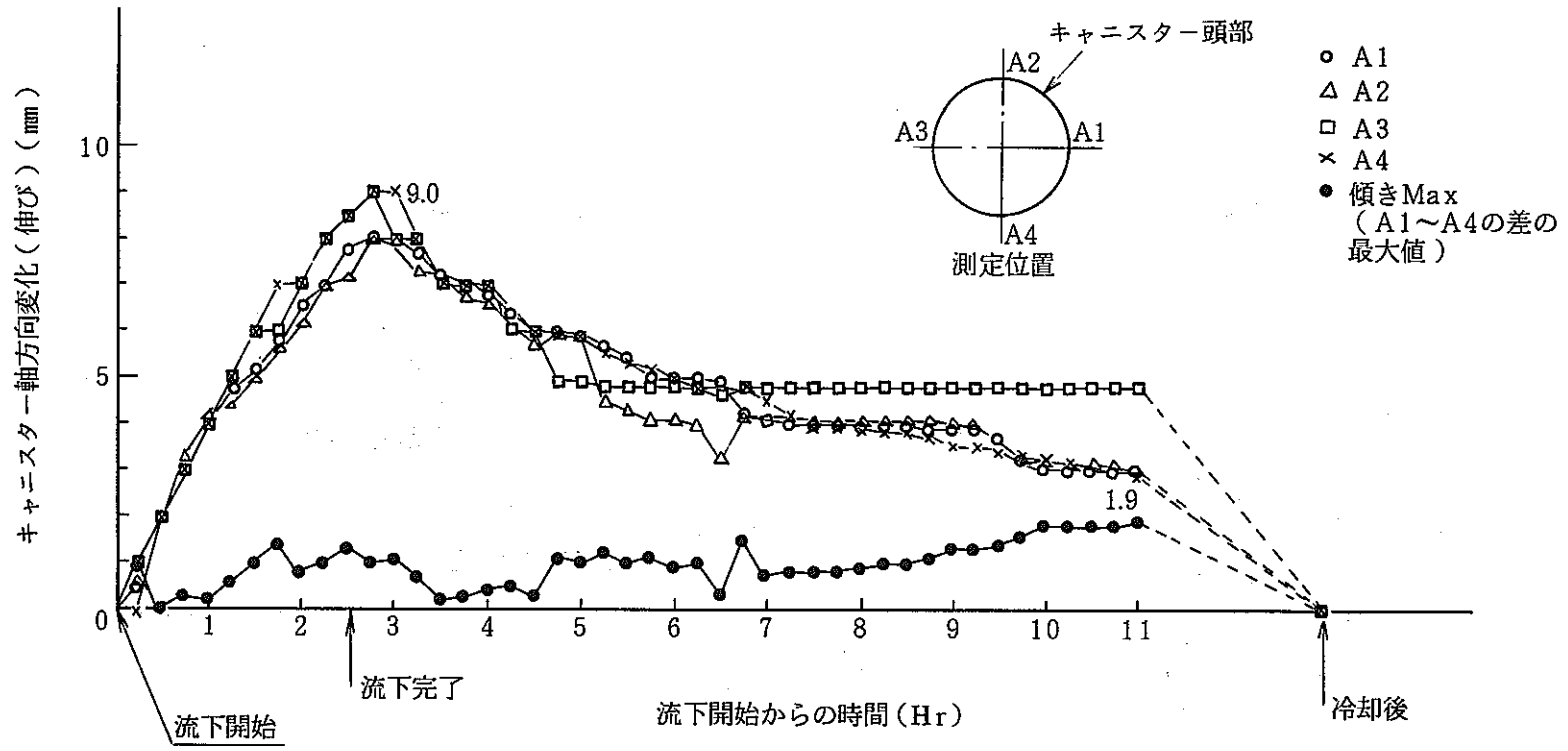


Fig. 2-3-3 キャニスターガラス注入時及び注入後の軸方向変化(伸び)

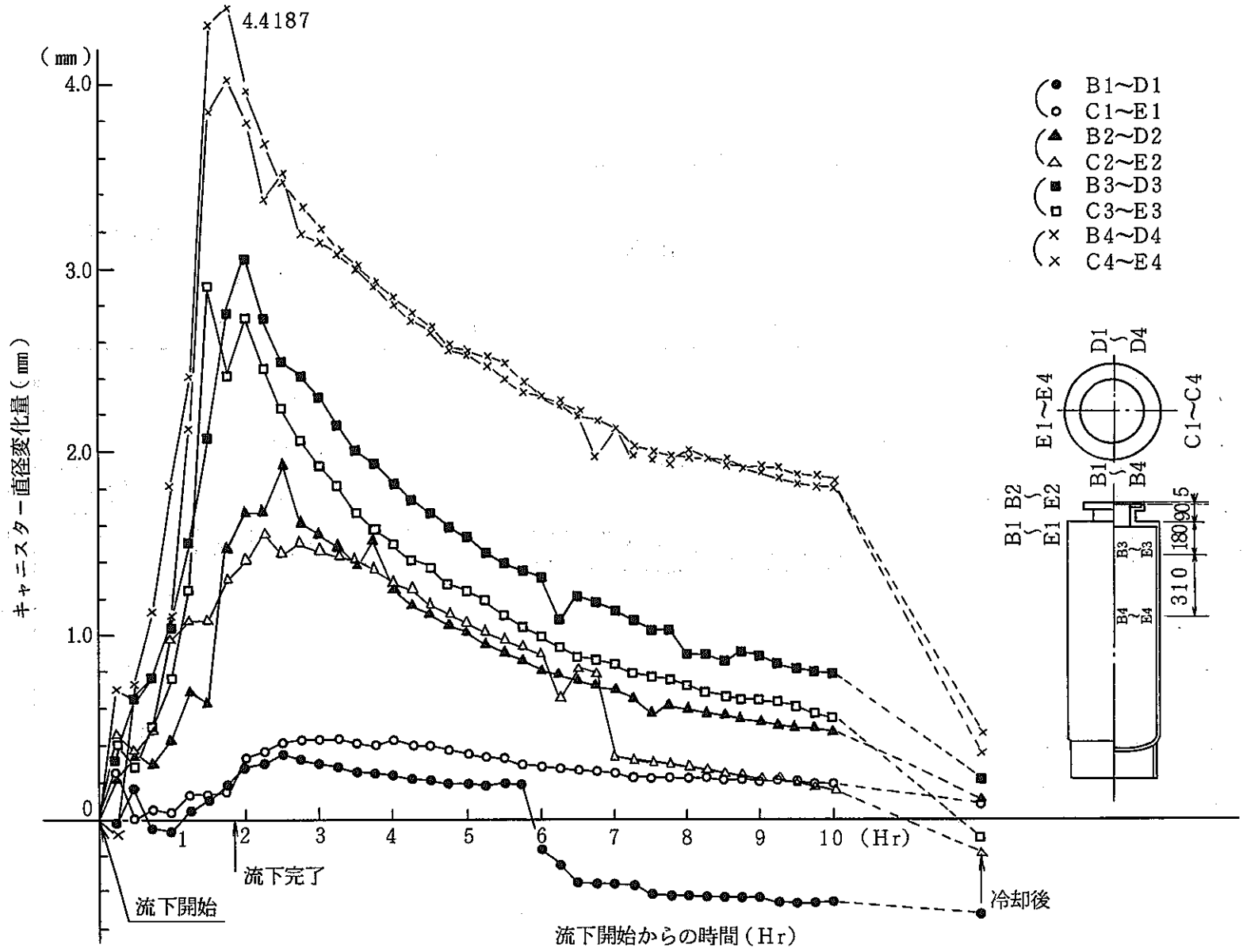


Fig. 2-3-4 キャニスターガラス注入時及び注入後の直径変化



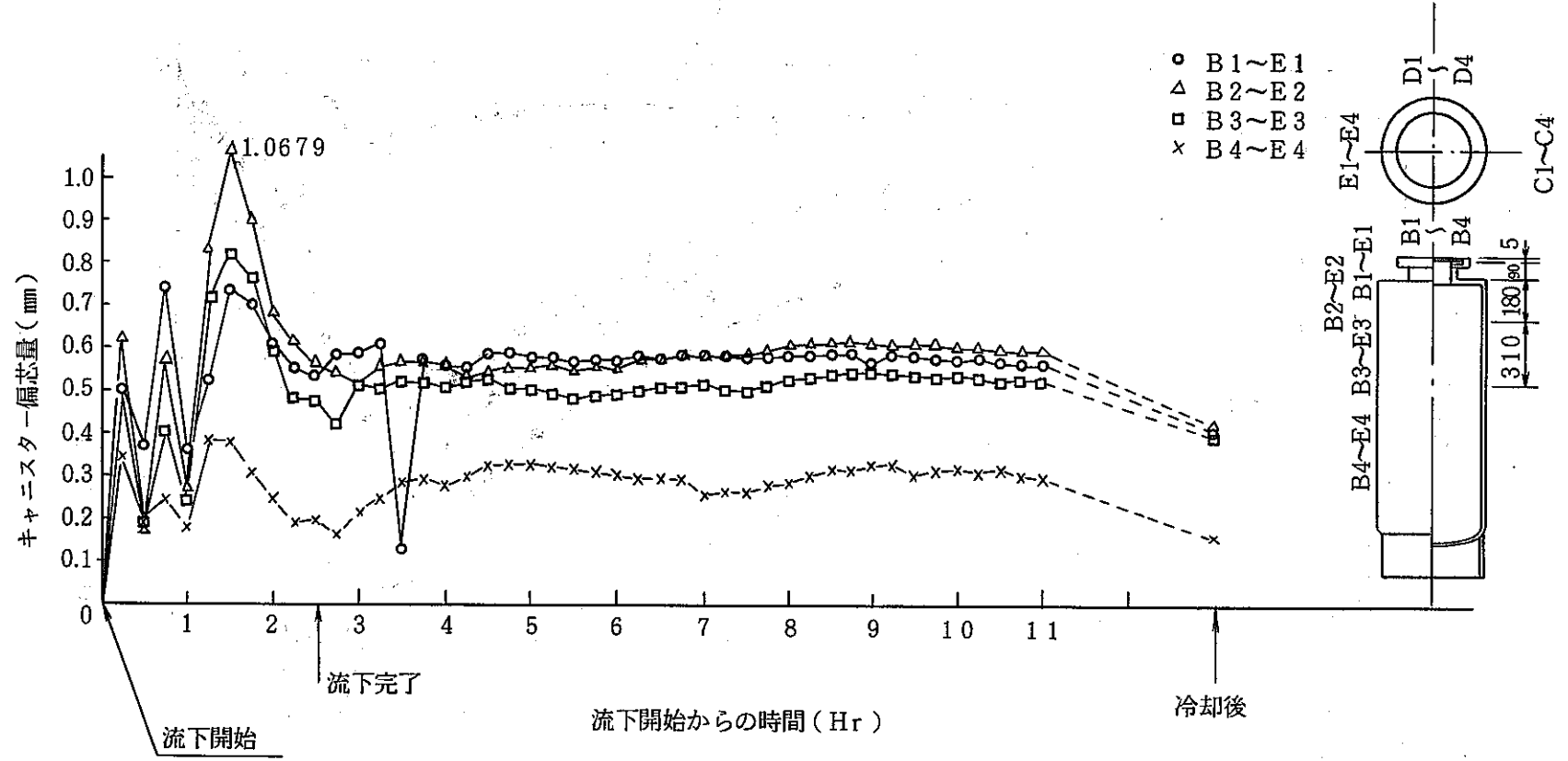


Fig. 2-3-5 キャニスターガラス注入時及び注入後の偏芯量

#### 2.4 キャニスター残留応力測定

溶融ガラスを充填したキャニスターは、冷却中にガラスとの熱膨張率の違いにより、残留応力が発生する。

残留応力値の測定は、実規模キャニスターを用い、模擬廃液溶融ガラスを300kg注入・冷却後、キャニスターを切断し、解放された歪を測定することにより行った。

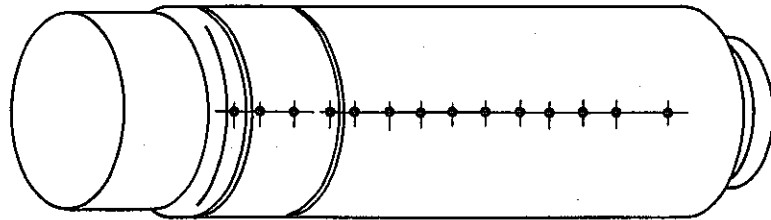
測定方法の概要をFig. 2-4-1に示す。

周方向残留応力分布をFig. 2-4-2に、軸方向残留応力分布をFig. 2-4-3に示す。

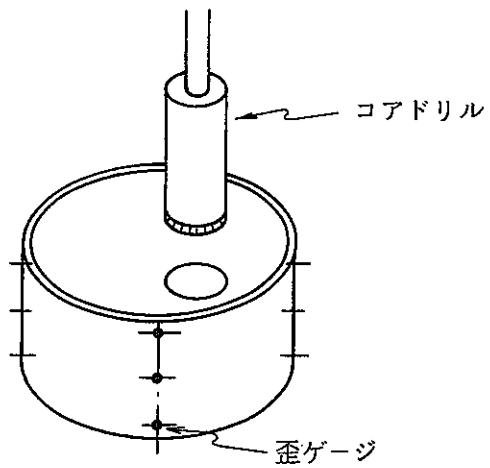
周方向残留応力  $15 \pm 3 \text{ kg/mm}^2$

軸方向残留応力  $12 \pm 3 \text{ kg/mm}^2$

1. キャニスタ輪切



2. ガラス除却



3. キャニスタ縦切断

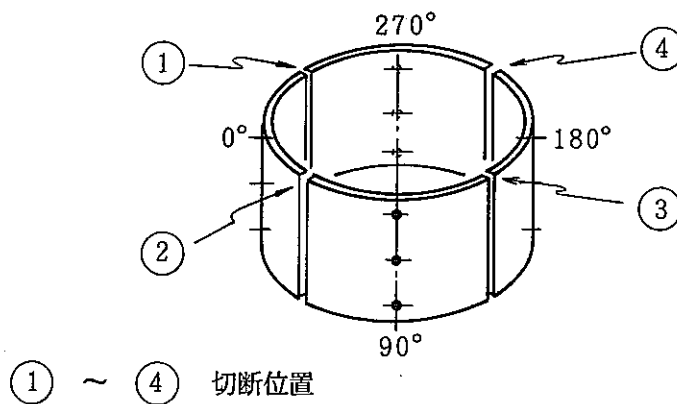


Fig. 2-4-1 キャニスタ切断及びガラス除却手順

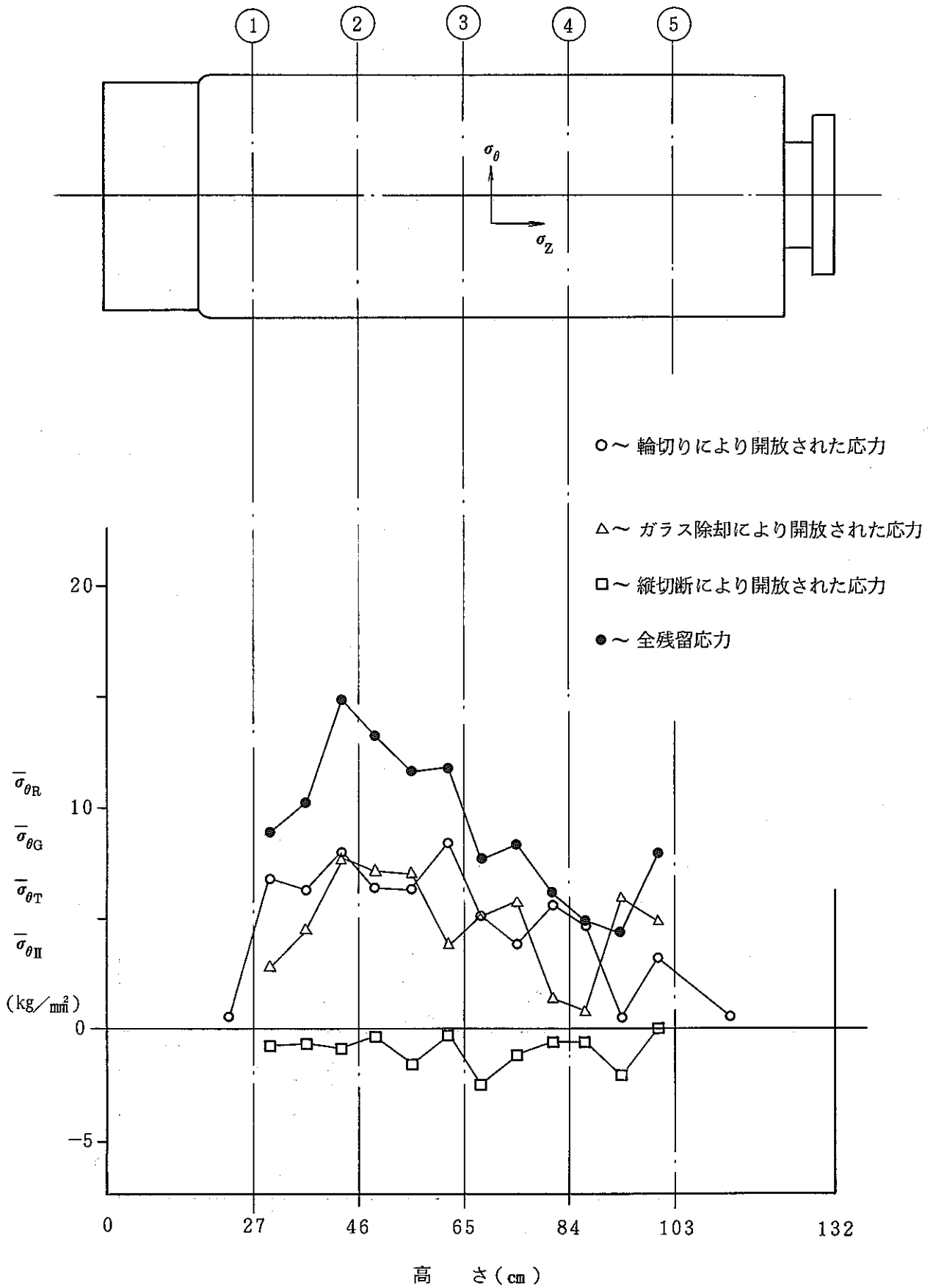


Fig. 2-4-2 周方向残留応力

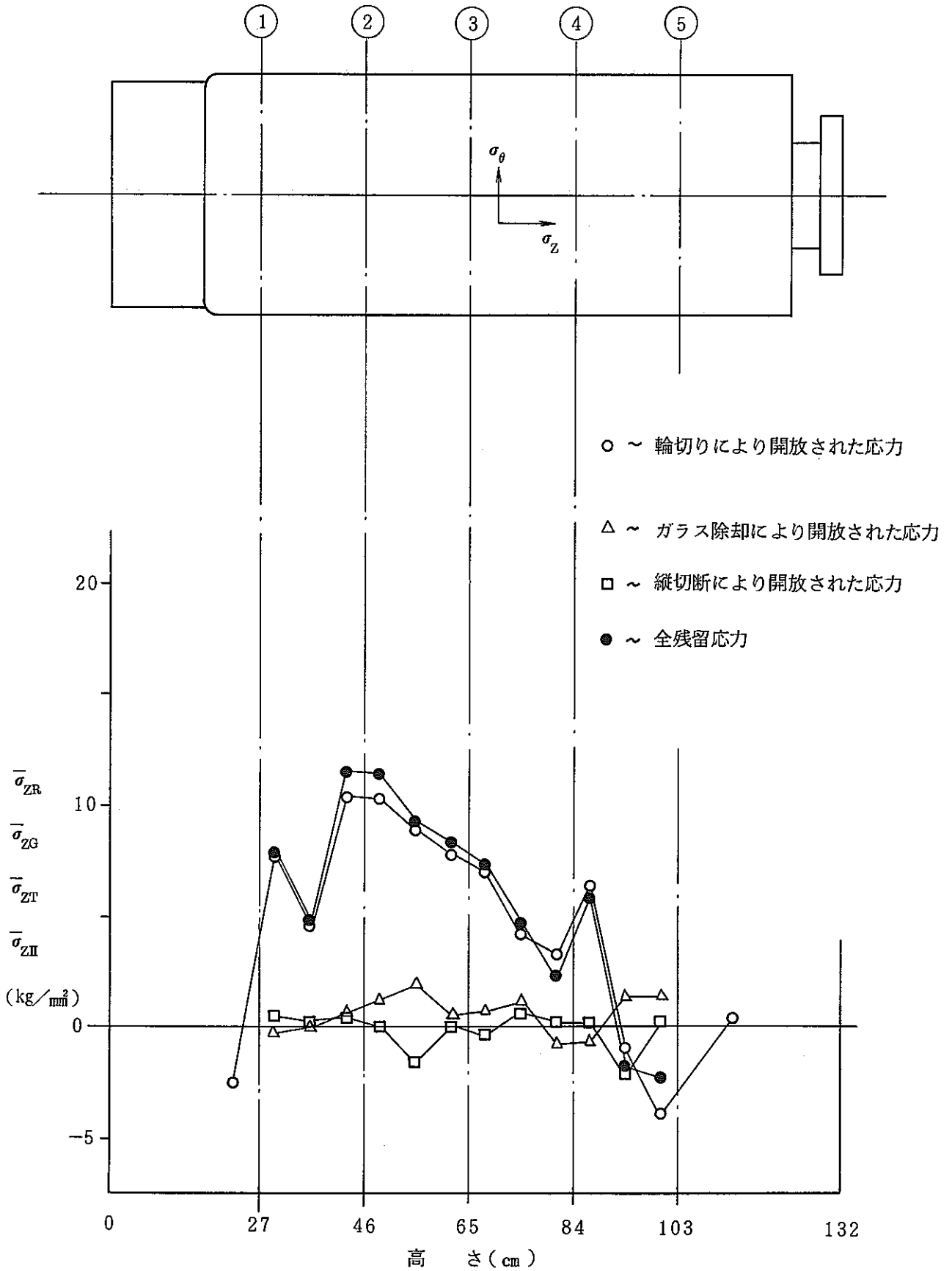


Fig. 2-4-3 軸方向残留応力

## 2.5 落下試験

熔融ガラス注入、蓋溶接後のキャニスター（ガラス固化体パッケージ）が、施設内のハンドリング中に落下・転倒した場合を仮定し、落下時の挙動を把握するために落下試験を行った。

試験は、実規模キャニスターに模擬廃液熔融ガラスを注入後、蓋を溶接し、落下高さ、落下姿勢及び被衝撃体を変えて落下させ、加速度・歪・変形の程度を測定した。

落下試験の条件をTable 2-5-1に示す。キャニスターは、肉厚10mm及び腐食代を除いた8mmの2種類を使用した。被衝撃体は、Fig. 2-5-1に示す鋼板上、Fig. 2-5-2に示すピット下部模擬体上、Fig. 2-5-3に示す模擬突起物上及びキャニスター上の4種類である。

落下時の歪、加速度をTable 2-5-2に、変形状態をFig. 2-5-4～Fig. 2-5-10に示す。

正立と斜正立落下では、被衝撃体の種類・落下高さに関係なく、キャニスターの変形は下部スカート部にとどまり、内容物の放出は認められない。また以降の取扱いにも支障をきたさない。

倒立と斜倒立落下では、変形がキャニスター首部で生じ、吊具の当る部分が胴部内に陥没した。このため、以降の取扱いに支障をきたすものもある。

模擬突起物上への落下は水平落下の場合特に損傷が大きく、肉厚8mmの場合ガラスの放出が認められた。

熔融ガラス注入、蓋溶接後のキャニスター（ガラス固化体パッケージ）は、施設内での落下が発生しないよう施設側で十分な落下対策を構じるが、ハンドリング中の不慮の事故による、落下時の挙動を把握するために、落下試験を行った。

Table 2-5-1 落下実験モード

(キャニスター板厚  $t = 10\text{mm}$ , 本数 10本)

○印について試験を実施する。

落下高さ 又は条件 落下姿勢	13m ピット内落下 ピット下受台上	13m ピット内落下 ピット内パッケージ	13m 自由落下 落下衝撃台上	9m 自由落下 落下衝撃台上	9m 自由落下 模擬突起物上
正立	○	○(2体試験)	○		○
倒立				○	
斜正立				○	
斜倒立				○	
水平				○	○

(キャニスター板厚  $t = 8\text{mm}$ , 本数 3本)

板厚 10mmのキャニスター試験の結果, 損傷の大きい3条件  
を選び実施する。

落下高さ 又は条件 落下姿勢	13m ピット内落下 ピット下受台上	13m ピット内落下 ピット内キャニスター上	13m 自由落下 落下衝撃台上	9m 自由落下 落下衝撃台上	9m 自由落下 模擬突起物上
正立			○		
倒立				○*	
斜正立					
斜倒立				○**	
水平					○

\* オーバーキャップパッケージにて行う。

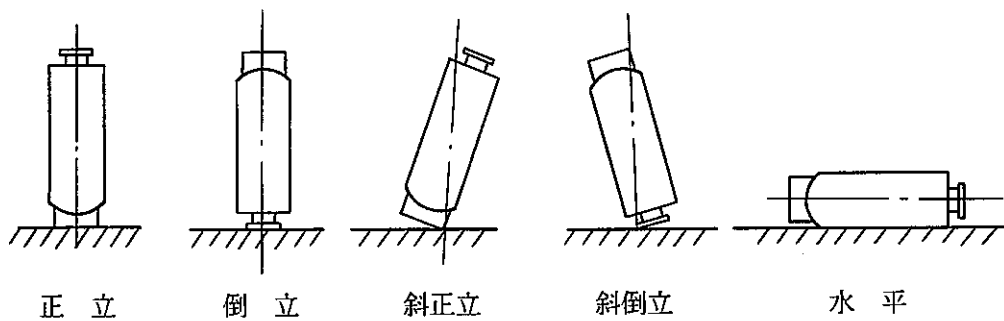
\*\* 倒位落下後に実施。

○ 印について実施した。

Table 2-5-2 落下試験結果(歪, 加速度)

落下 高さ	姿勢	被衝体	キャニスター No.	第1次衝突 箇所・変形	変形量 (mm)	接触時間 msec	リバウンド 高さ (m)	ひずみ量 ( $\times 10^{-6}$ )		加速度 (peak 値) (g)				加速度 (低周派成分) (g)			
								衝突部	胸	P-1	P-2	P-3	P-4	P-1	P-2	P-3	P-4
13m	正立	ヒット 受台	1	スカート	-3.5 -1.05(max)	12.68	0.82	S-1-x;-24,400 S-1-y;+18,100	S-7-x; -500 S-8-x; -420	2359 (1573)	1442 (721)	-	-	562 (225)	361 (154)	-	-
(13m)	正立	キャニ スター	2	スカート 一部座屈	-7.8 -19(max)	12.48 (6.49)	0.15	S-1-x;-26,000以上 S-3-x;-26,000以上	S-7-x; -380 S-8-x; -460	2138 (518)	3155	513	627	453	502	205 (-205)	157 (-250)
13m	正立	鋼板	4	スカート 座屈	-23.4 -31(max)	8.49	0.18	S-1 : -26,000以上 S-6	S-9-x; -560 S-10-x; -490	1520 (1013)	1843 (860)	2088 (1106)	-	563 (338)	369	860 (491)	-
13m	正立	鋼板	12	スカート 座屈	-14.5 -17(max)	4.11	0.30	S-1 : 26,000以上 S-6	S-9-x; -890 S-10-x; -560	-	-	-	-	295	319	332	-
9m	正立	突起物	5	スカート 破断		13.63 (11.11)	0.05	S-1, S-3; -26,000以上	S-9-x; -150 S-10-x; -130	314 (329)	340 (309)	1625	-	204 (126)	216 (154)	-	-
9m	斜正立	鋼板	7	スカート	-5.45(max)	9.98	0.14	S-1 : -26,000以上 S-4	S-9-x; -130 S-10-x; -70	232 (102)	179	221	-	116	115	111	-
9m	倒立	鋼板	6	頂部	-5.58 -5.75(max)	9.33 (2.00)	0.25	S-3-x;+15,000 S-3-y;-22,000	S-9-x; -850 S-10-x; -860	3398 (2162)	2120	1825 (1314)	-	309	283	876 (438)	-
9m	倒立	鋼板	13 -1	頂部	-5.6 -5.7(max)	9.53	0.27	S-3-x;+12,230 S-3-y;-22,560	S-9-x; -440 S-10-x; -390	318	338	319	312 (282)	52	135	116	142
9m	斜倒立	鋼板	8	頂部	-87(max)	6.76 (3.72)	0.10	S-4-x;-11,000 S-4-y;+15,610	S-9-x; -830 S-10-x; -510	3137	1425 713	1036 324	1296 648	285	259	259	259
9m	斜倒立	鋼板	13 -2	頂部	倒立落ドを含む -77.5(max)	7.38	0.01	S-3-x;+14,590 S-3-y;-16,000以上	S-9-x; -330 S-10-x; -460	288	189	232	227	118	122	131	128
9m	水平	鋼板	9	胸		1.54	1.17	S-3-x;-760 S-3-y;+1,430	S-9-x; -490 S-9-y; +680	(3430)	(7142)	-	-	2450 スケールオーバー	5844	3769	-
9m	水平	突起物	10	胸	-12	3.75	0.56	S-3-x;+2,990 S-3-y;+3,860	S-9-x; +2,490 S-9-y; +1,130	1145	1727	1656	-	833	813	1004	-
9m	水平	突起物	14	胸 クラック	-15	4.79	0.25	S-3; +13,000以上 S-4; +6,300以上	S-9-x; +2,600 S-9-y; +770	1704 (795)	1219 (813)	1205 (931)	-	565	508	602	-





落下姿勢

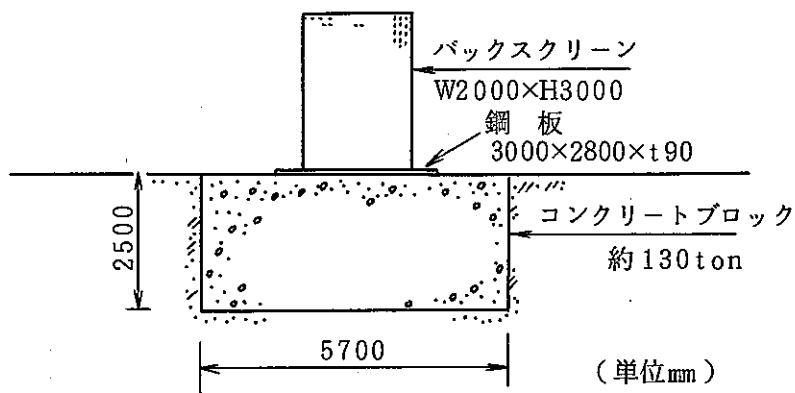
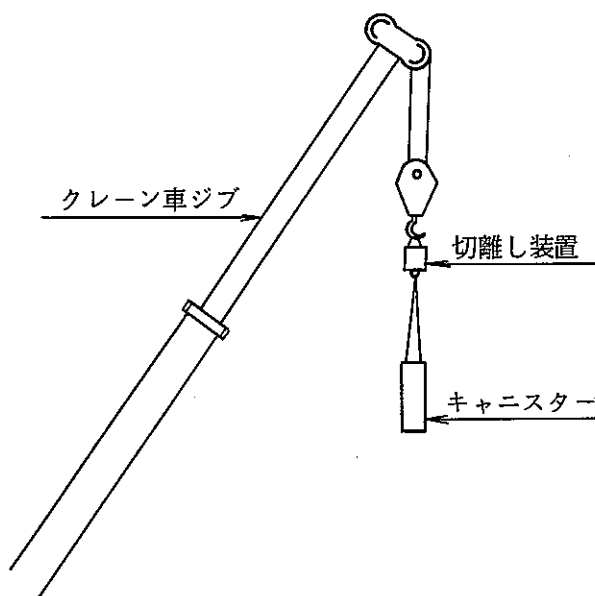


Fig. 2-5-1 落下衝撃試験台

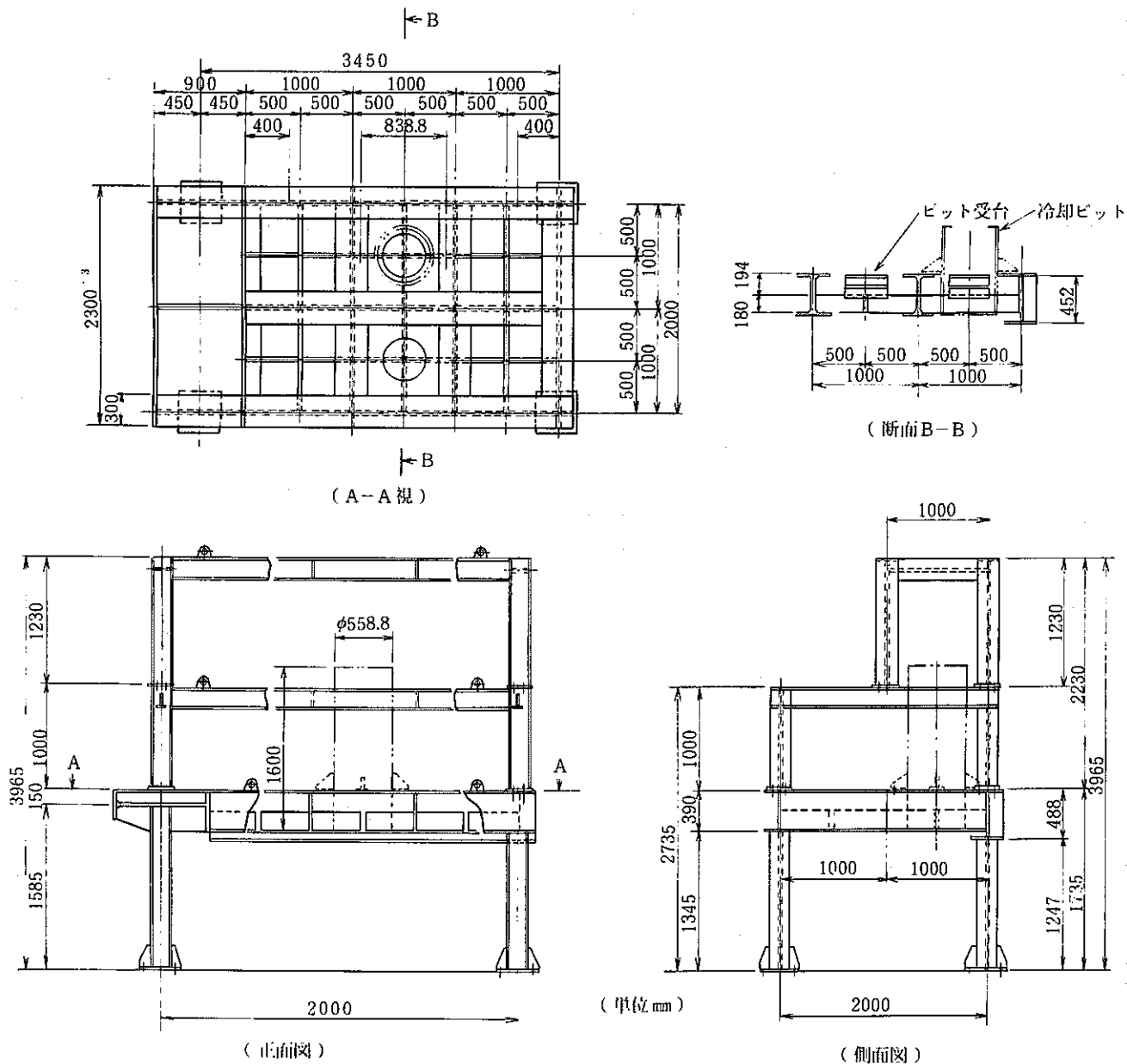


Fig. 2-5-2 ピット下部模擬構造体

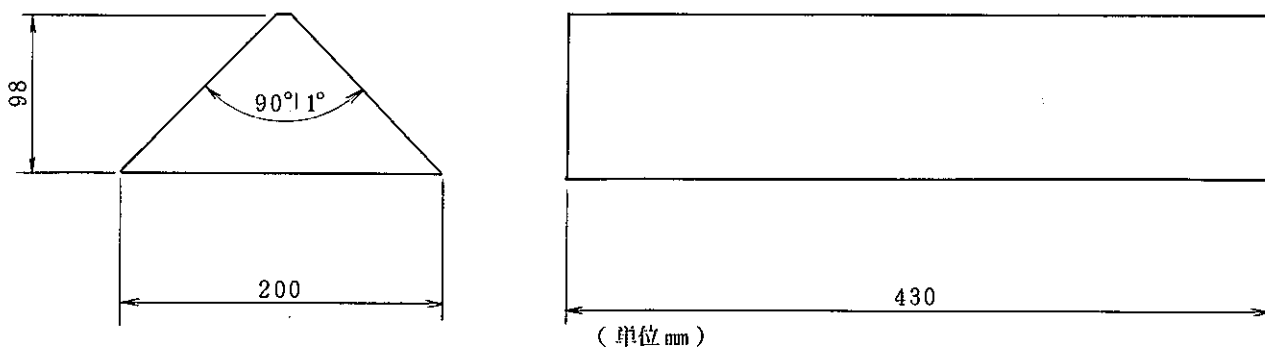


Fig. 2-5-3 模擬突起物

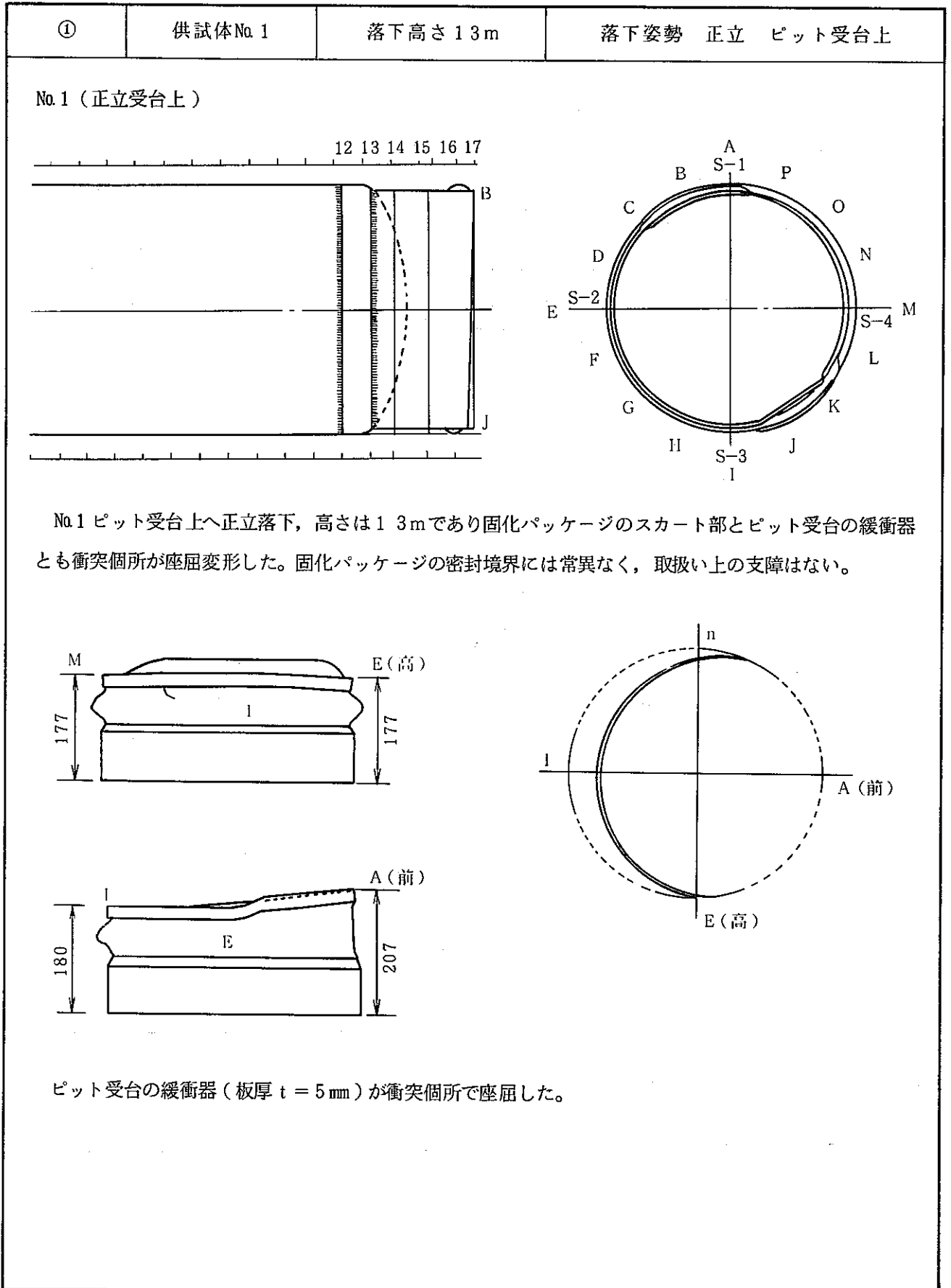


Fig. 2-5-4 変形状態

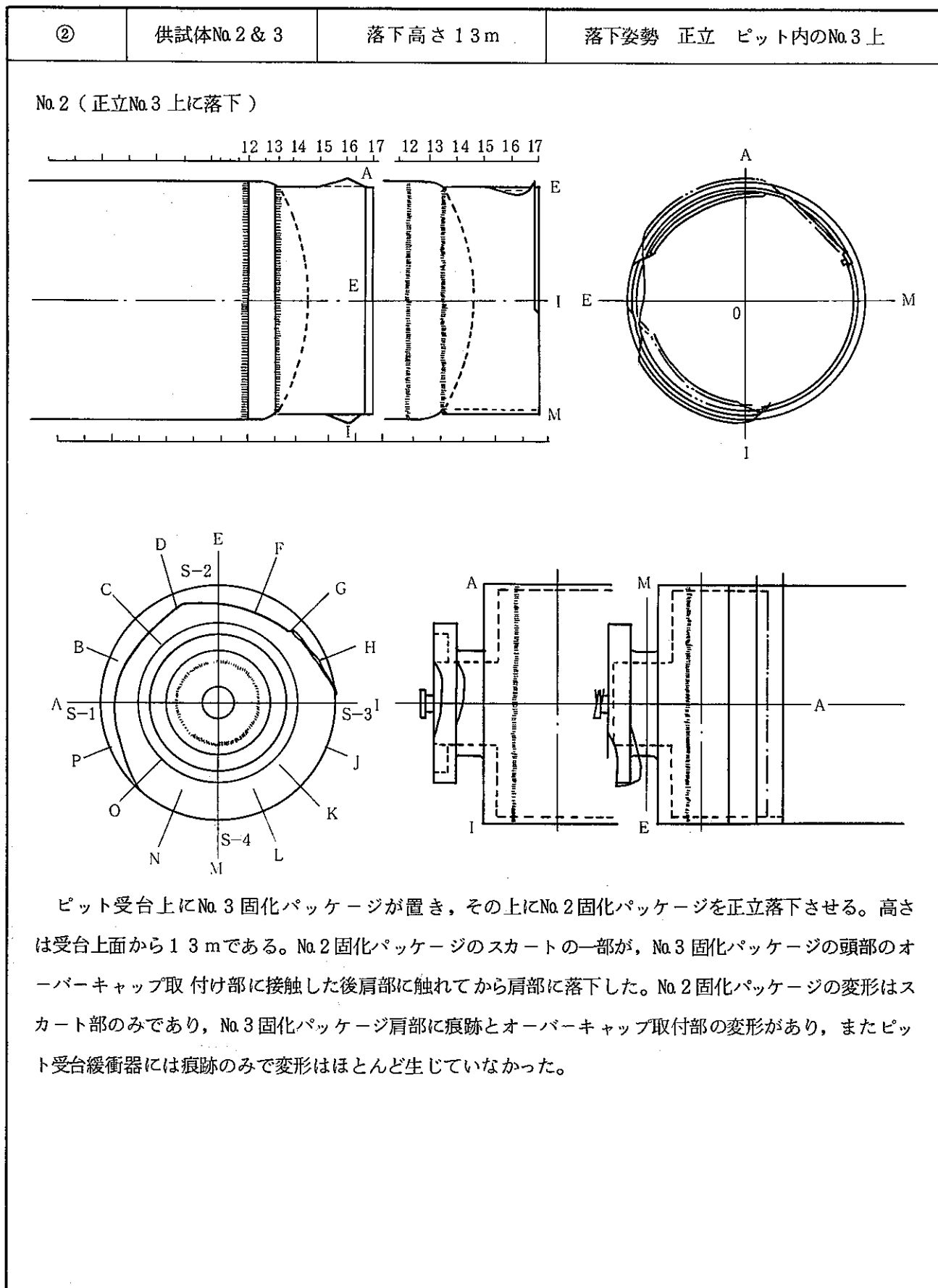


Fig. 2-5-5 変形状態

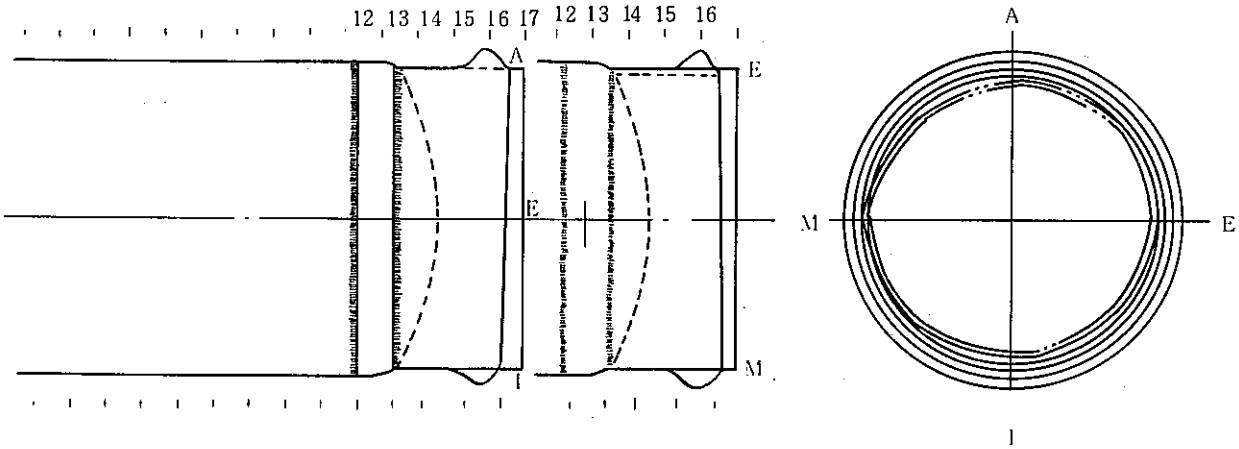
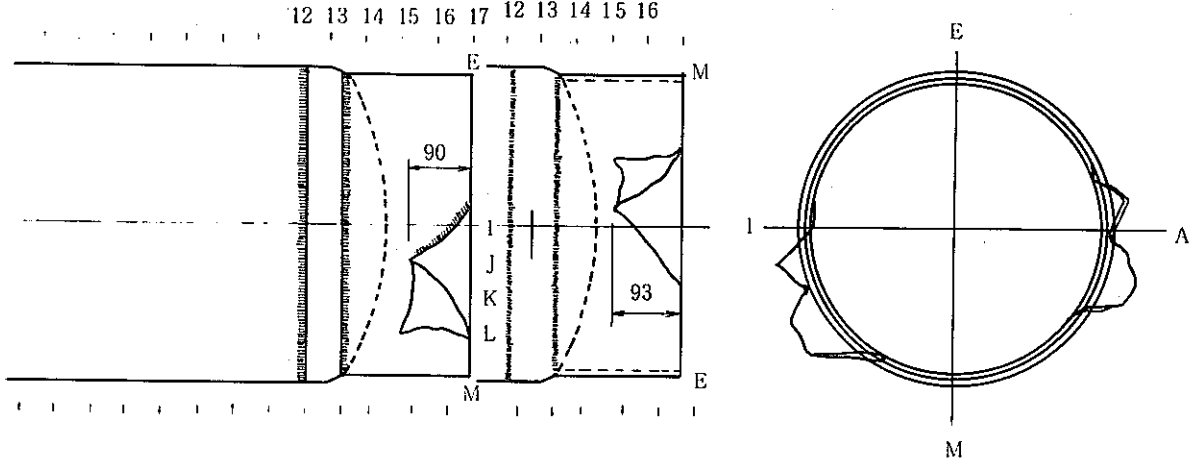
③	供試体No.4	落下高さ 13m	落下姿勢 正立 鋼板上
<p>No.4 (正立)</p>  <p>No.4 固化パッケージは鋼板上への正立落下で、高さ13mである。スカート下端部が可動なモードで座屈した。変形量はキャニスター高さが2.3mm減少し、スカートの直径が3.7mm増加した。</p>			
④	供試体No.5	落下高さ 9m	落下姿勢 正立 模擬突起物上
<p>No.5 (正立突起物上)</p>  <p>No.5 固化パッケージは模擬突起物上への正立落下で、高さ9mである。スカート下端部は2箇所で裂けて5.0~6.0mm外側に変形した。</p>			

Fig.2-5-6 変形状態

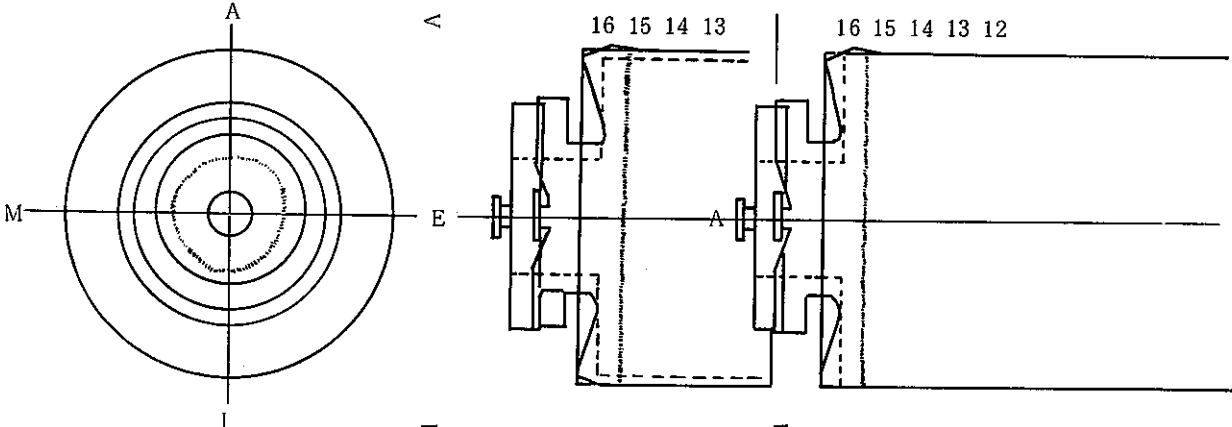
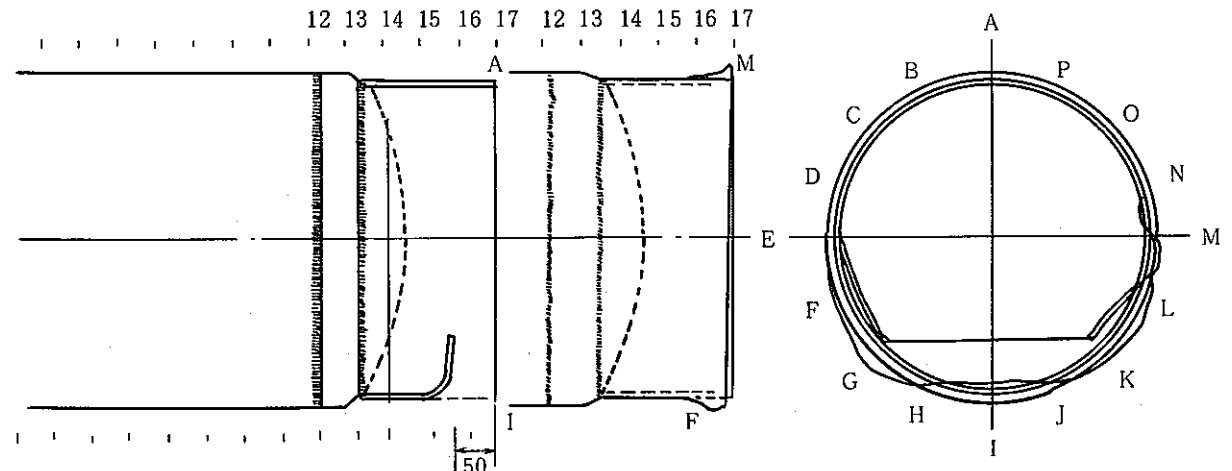
⑤	供試体 No. 6	落下高さ 9m	落下姿勢 正立 鋼板上
<p data-bbox="200 344 250 371">No. 6</p>  <p data-bbox="200 936 1411 1075">No. 6 固化パッケージは鋼板上への倒立落下で、高さ 9 m である。変形は頂部のみであり、主に蓋板と肩部円板の曲げ変形による。頭部が肩部円板にめり込むため、吊具の使用ができない。キャニスター高さが 5.6 mm 減少した。</p>			
⑥	供試体 No. 7	落下高さ 9 m	落下姿勢 斜正立 鋼板上
<p data-bbox="200 1249 326 1276">No. 7 斜正立</p>  <p data-bbox="200 1809 1411 1899">No. 7 固化パッケージは鋼板上への斜正立落下で、高さ 9 m である。スカート円筒のほぼ半周が座屈し、最大 5.5 mm 高さが減少した。</p>			

Fig. 2-5-7 変形状態

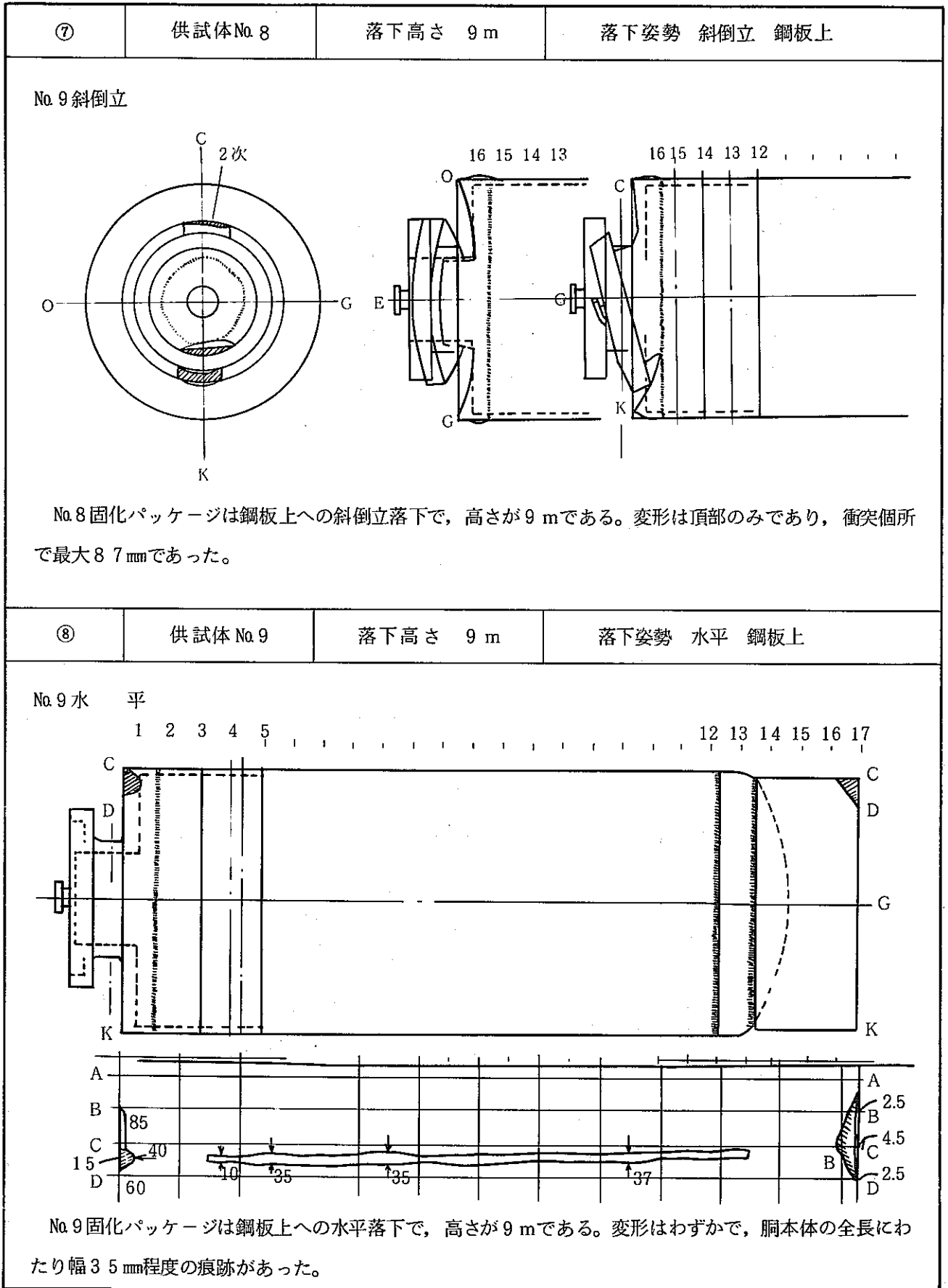


Fig. 2-5-8 変形状態

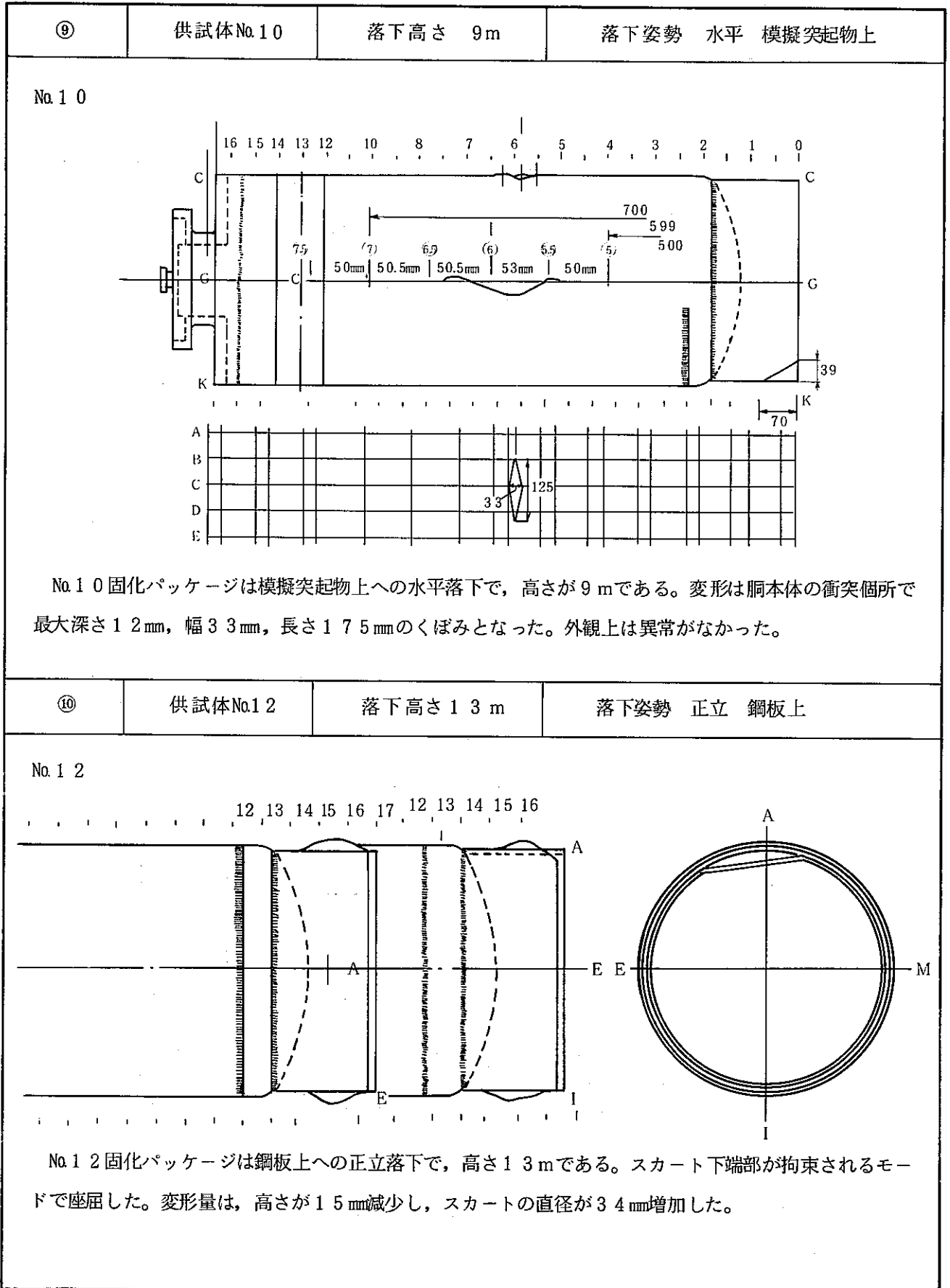


Fig.2-5-9 変形状態



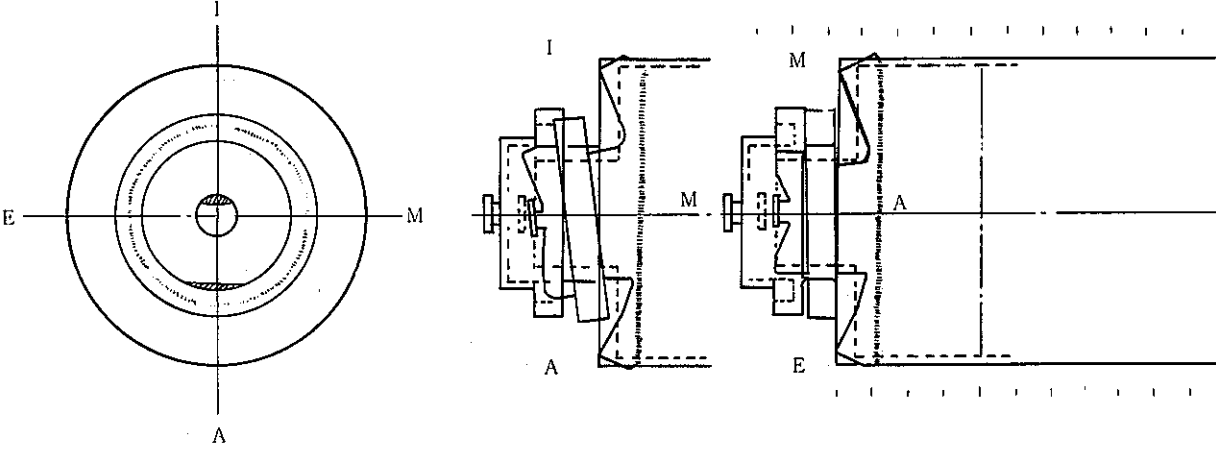
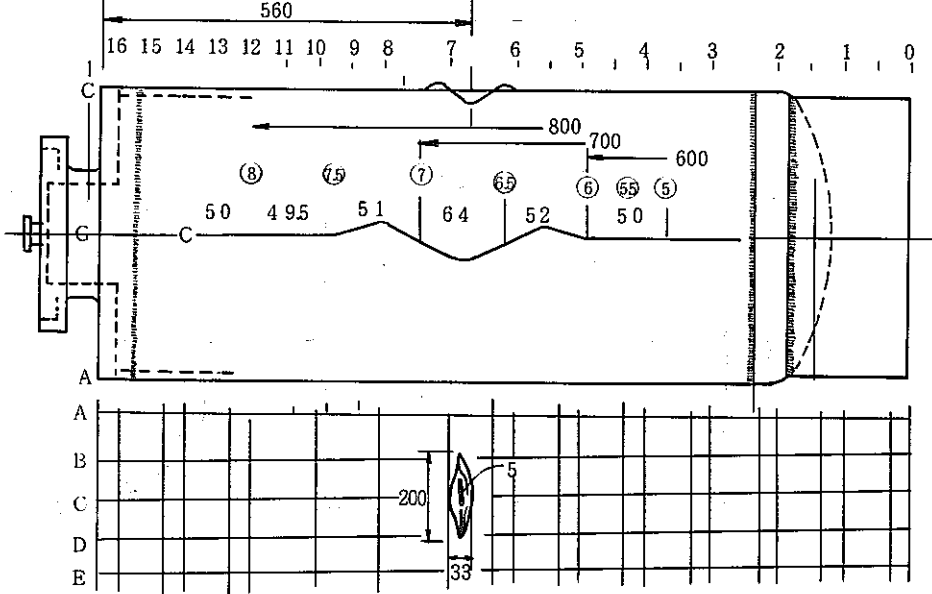
⑪	供試体No.13	落下高さ 9 m	落下姿勢 倒立, 斜倒立 鋼板上
<p>No.13</p>  <p>No.13 固化パッケージはオーバーキャップ付きであり、鋼板上への倒立落下と斜倒立落下の2回試験した。高さは9 mである。倒立落下による変形はオーバーキャップと肩部円板の曲げ変形であり、キャニスターの高さが5.6 mm減少した。また斜倒立落下によりさらに変形が加わりキャニスター高さが衝突個所で最大7.8 mm減少となった。</p>			
⑫	供試体No.14	落下高さ 9 m	落下姿勢 水平 模擬突起物上
<p>No.14</p>  <p>No.14 固化パッケージは模擬突起物上への水平落下で、高さが9 mである。変形は胴本体の衝突個所で最大深さ1.5 mm、幅3.3 mm、長さ200 mmのくぼみとなり、幅5 mm程度の裂目が胴に生じて、ガラス粉末が付着していた。</p>			

Fig. 2-5-10 変形状態

## 2.6 クラック測定

### 2.6.1 徐冷試験

熔融ガラスをキャニスターへ注入・冷却する間に、ガラス固化体には熱応力によるクラックが発生する。このクラックの量が、ガラス固化体の冷却条件によってどのように変化するかを把握するため、徐冷試験を行った。

実験には、実規模キャニスターを用い、模擬廃液溶融ガラスを注入・冷却条件を変えて冷却し、切断後クラック量の測定を行った。

放射性核種を含有したガラスは、核種崩壊により内部発熱が生じている。この内部発熱のあるガラスが冷却していく温度分布を模擬するよう、非放射性ガラス固化体の冷却条件を選定した。(Table 2-6-1)

切断後のガラス固化体断面図をFig 2-6-1~Fig 2-6-4に示す。クラック量の算定は、切断面のクラック長さの測定値を、固化体軸方向に積分し、固化体外表面積で除した「比表面積」で表わした。(Table 2-6-2)

測定の結果、固化体に内部発熱がある場合、クラックの量は、冷却条件の影響をほとんど受けないことが判った。

### 2.6.2 落下試験後ガラス固化体のクラック測定

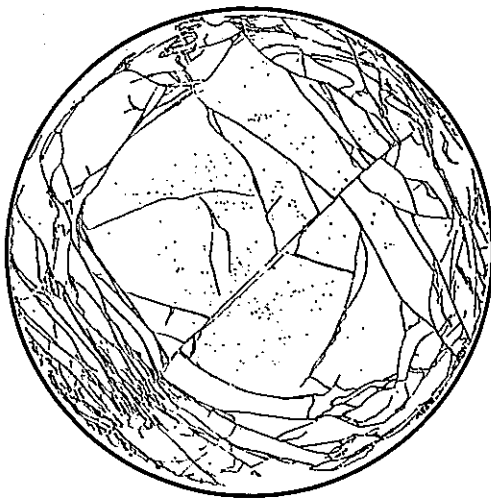
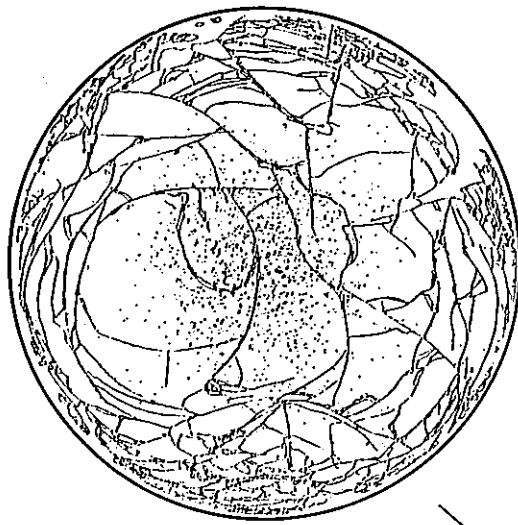
2.5項で述べた落下試験の後、ガラス固化体を切断、クラック測定を行い、落下させないものと比較した。

ガラス固化体の切断面をFig 2-6-5~Fig 2-6-9に、比表面積の違いをTable 2-6-3に示す。

キャニスター底部のスカートや、頂部構造が緩衝体となるため、斜正立・倒立・斜倒立では比表面積の増加率は20~30%程度だが、水平落下では90%となっている。

Table2-6-1 Hot 及び Cold ガラスの冷却条件

キャニスター	Hot ガラス冷却想定条件	Hot ガラス冷却時の温度履歴を模擬した Cold ガラスの冷却条件	ガラス中心表面最大温度差
No.1	徐冷炉により徐冷速度を制御する徐冷（キャニスター表面温度を550℃とした後5℃/hrで徐冷する）	徐冷炉にて固化体温度を650℃とし、その後キャニスター表面温度を18℃/hrで冷却する。	約150℃
No.2	大気放冷	大気放冷 （冷却速度が大きいため、内部発熱量はガラスが持つ熱容量に比べ小さく、温度履歴はほぼ同じになる）	約400℃
No.3	理想的な徐冷 （非常にゆっくり徐冷する場合で、各温度で定常温度分布を形成する）	徐冷炉にて固化体温度650℃とし、その後キャニスター表面温度を下記条件で冷却する。 表面温度 650℃ → 400℃ → 330℃ 冷却速度 125℃/hr 14℃/hr → 252℃ → 室温 155℃/hr 17℃/hr	約115℃
No.4	断熱材による簡易徐冷 （断熱材マクロックS相当を厚さ5cm巻き付けたキャニスターにガラスを注入、そのまま放置）	断熱材マクロックSを厚さ5cm巻き付けたキャニスターにガラスを注入そのまま放置する。（Hot ガラスと同様）	約200℃



No.1 キャニスター

Hot 発熱模擬

徐冷炉にて5℃/hの徐冷

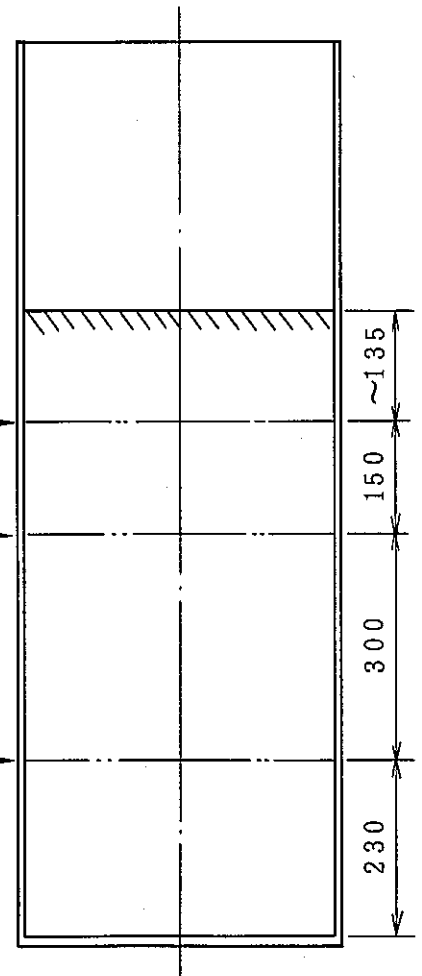


Fig2-6-1 切断面トレース図(1)

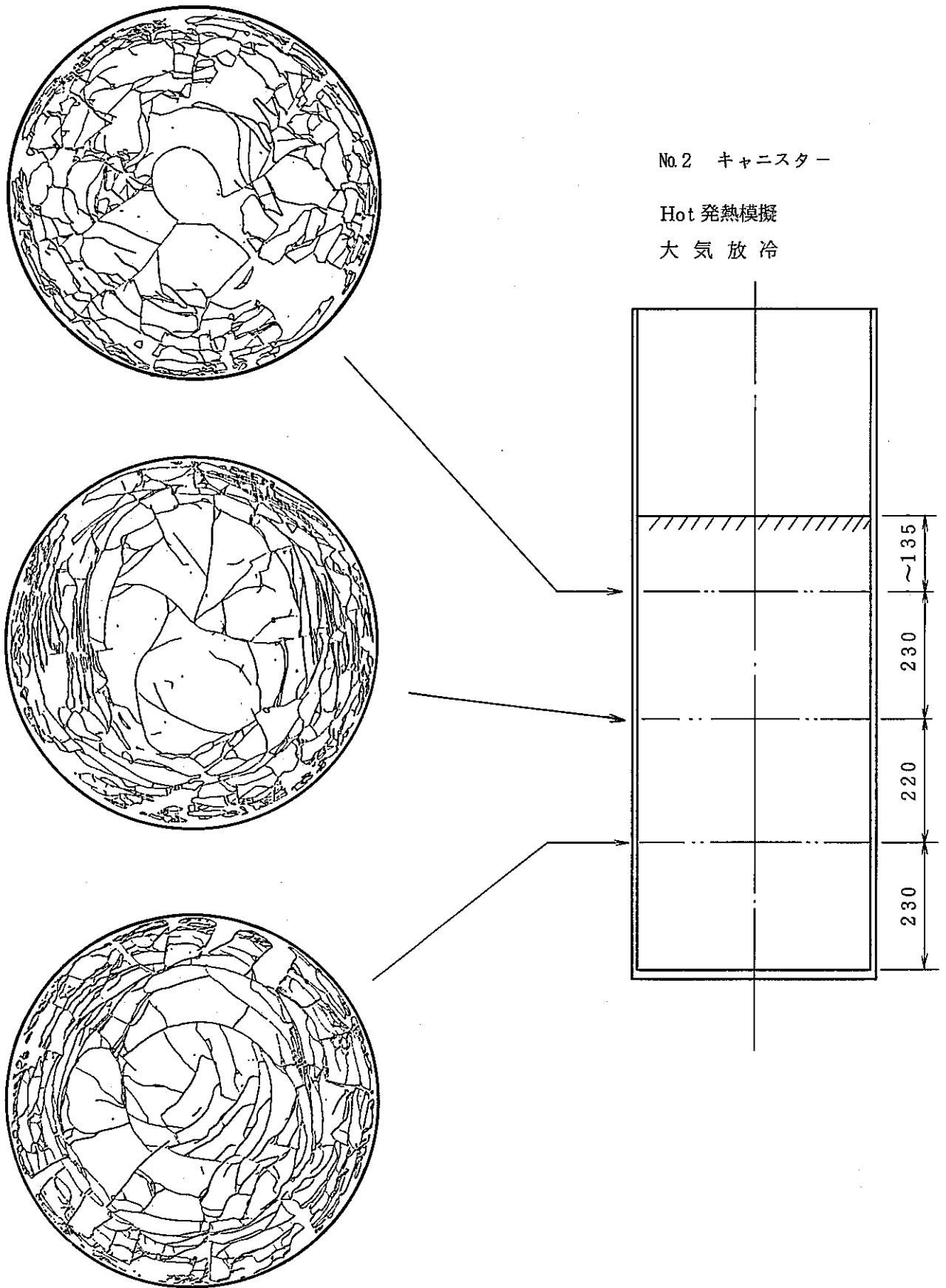


Fig2-6-2 切断面トレース図(2)

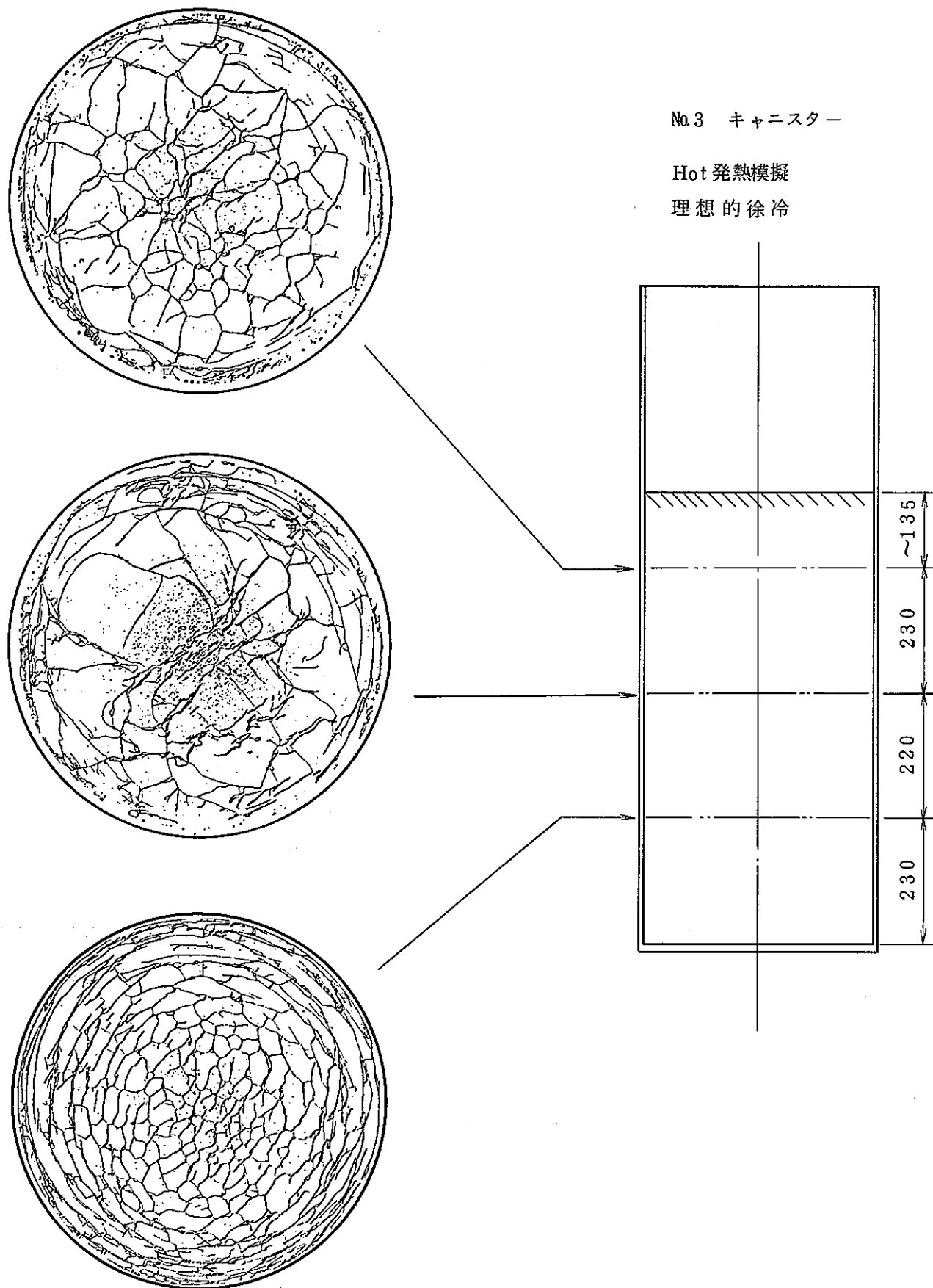
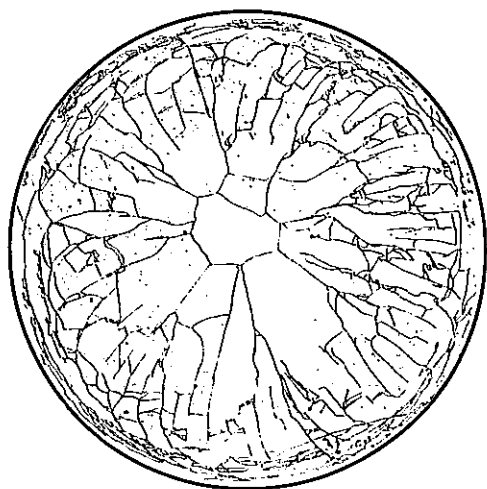
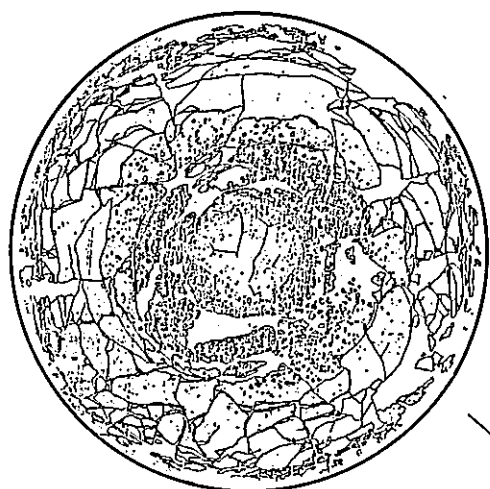


Fig2-6-3 切断面トレース図(3)



No.4 キャニスター

Hot 発熱模擬

断熱材による簡易徐冷

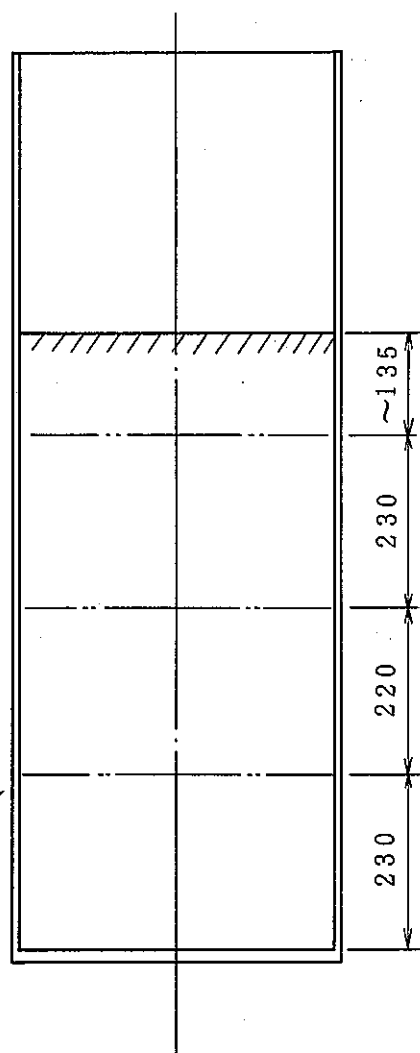


Fig2-6-4 切断面トレース図(4)

Table 2-6-2 冷却条件によるガラス固化体比表面積\*

キャニスター 冷却条件 切断面 高さ位置 (下部よりmm)	No. 1 ホット発熱模擬 徐冷炉にて5℃/hr の徐冷	No. 2 ホット発熱模擬 大気放冷	No. 3 ホット発熱模擬 理想的徐冷	No. 4 ホット発熱模擬 断熱材による 簡易徐冷
680	31.3	31.8	22.2	37.1
450	34.6**	32.7	24.6	28.2
230	25.1	32.4	35.2	26.2
固化体1体の 比表面積***	23.0	25.3	24.0	24.2

$$* \text{ 比表面積} = \frac{(\text{クラック総長}) \times 2 + (\text{周長})}{(\text{周長})} (\text{一断面})$$

\*\* 切断面高さ位置下部より530 mmでの値

$$*** \text{ 固化体1体の比表面積} = \frac{(\text{クラック全面積}) + (\text{固化体外表面積})}{(\text{固化体外表面積})}$$

$$\text{クラック全面積} = 2 \times (\text{クラック総長の積分値})$$



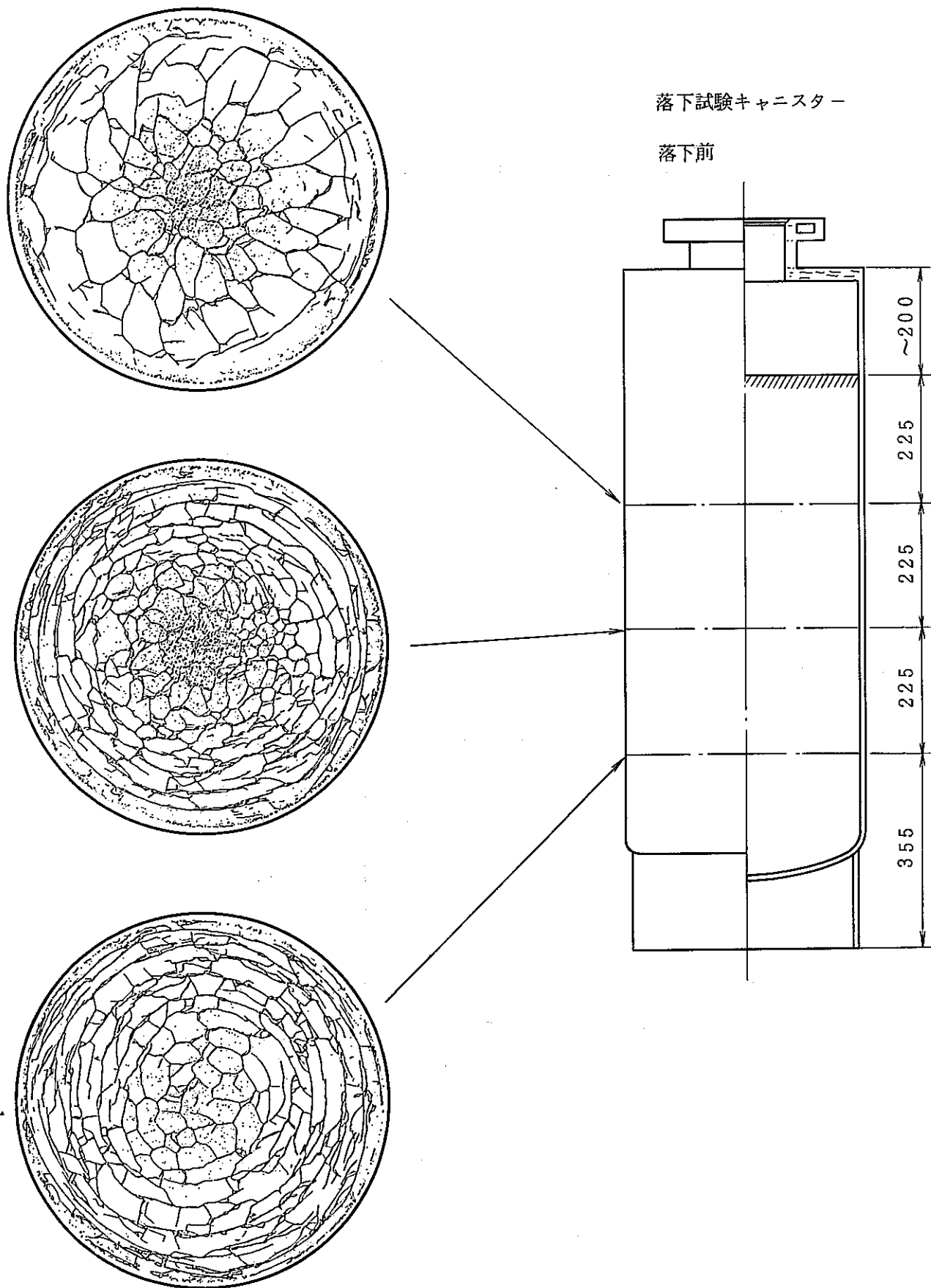


Fig2-6-5 切断面トレース図(5)

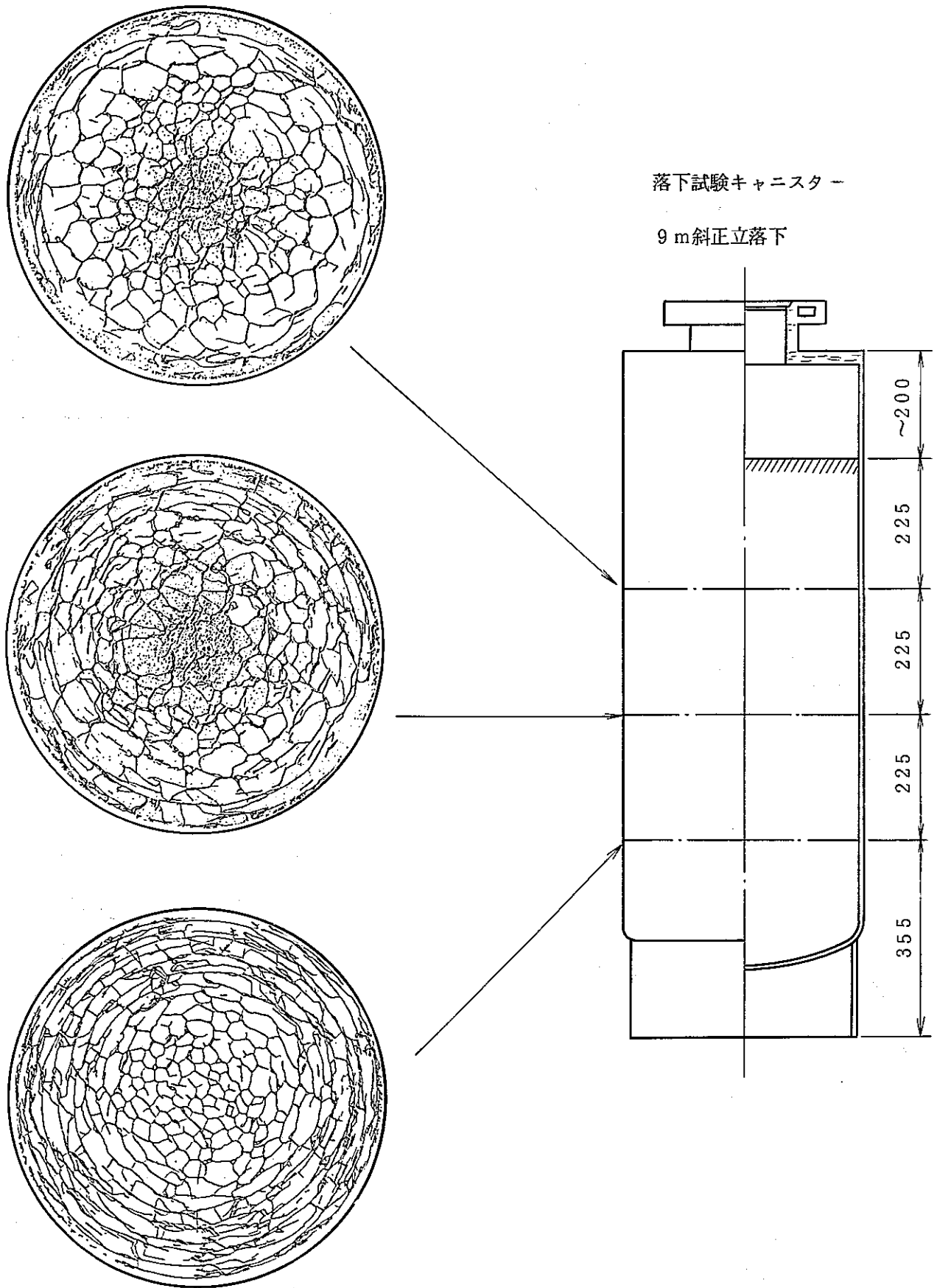


Fig2-6-6 切断面トレース図(6)

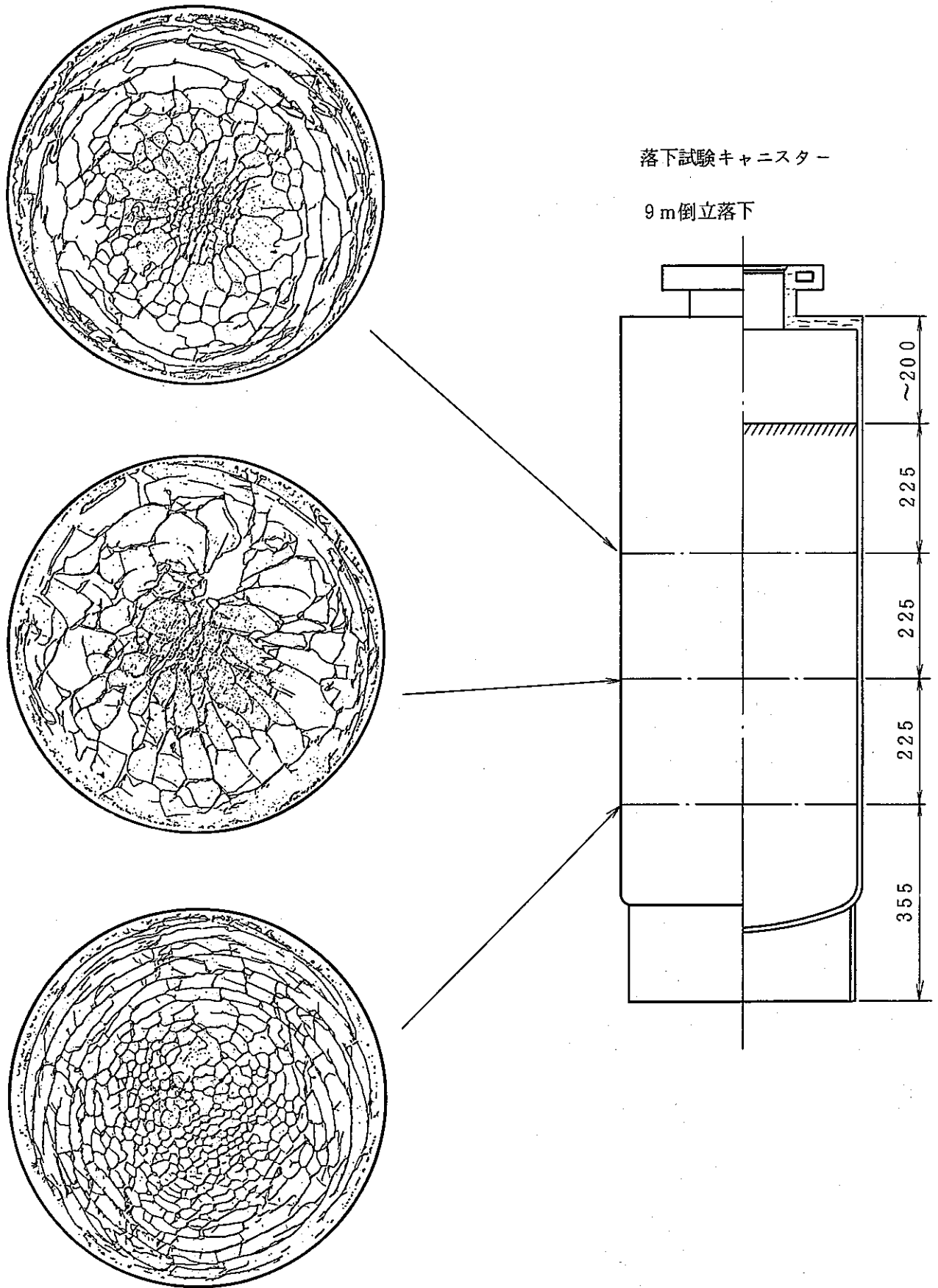


Fig2-6-7 切断面トレース図(7)

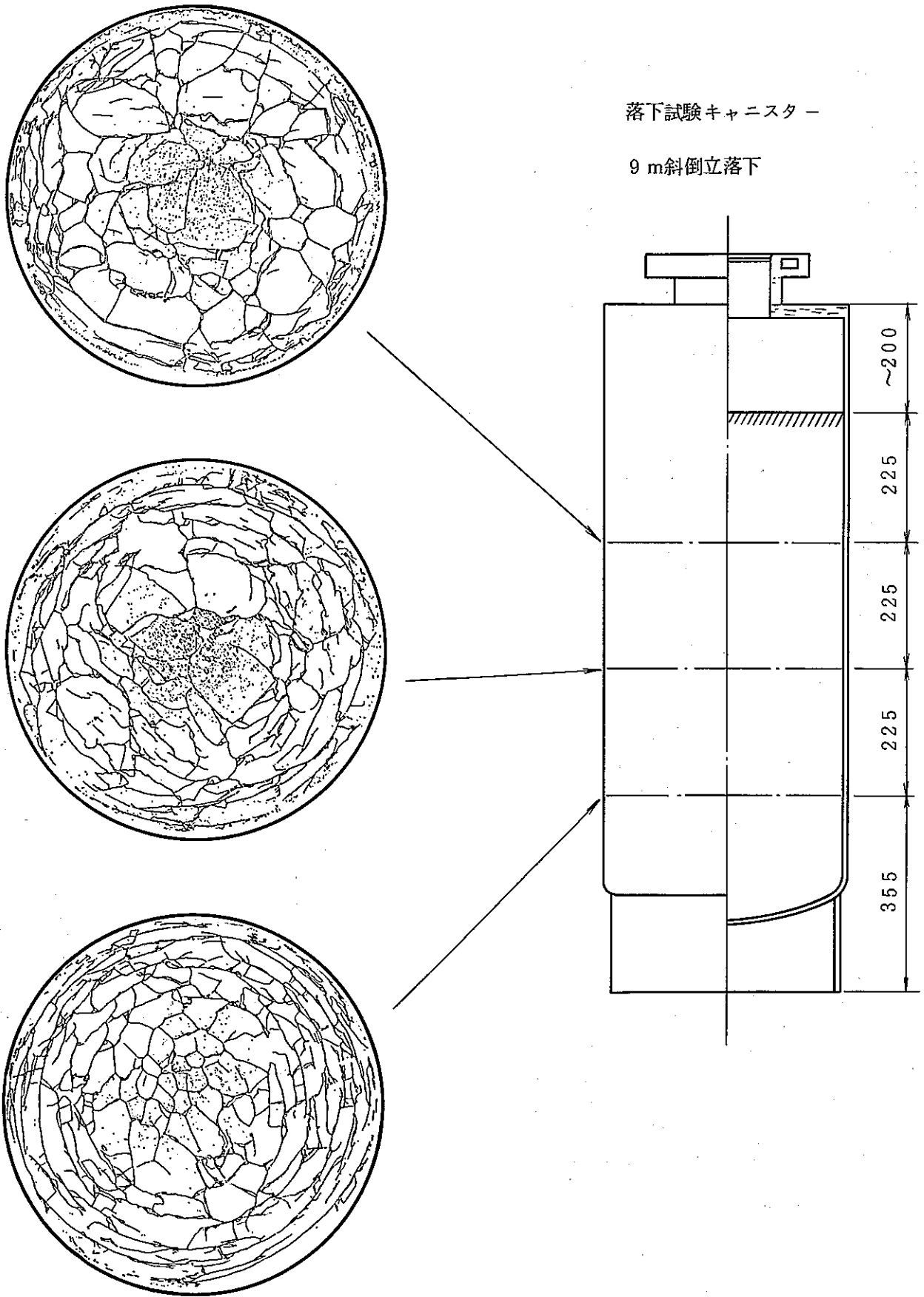


Fig2-6-8 切断面トレース図(8)

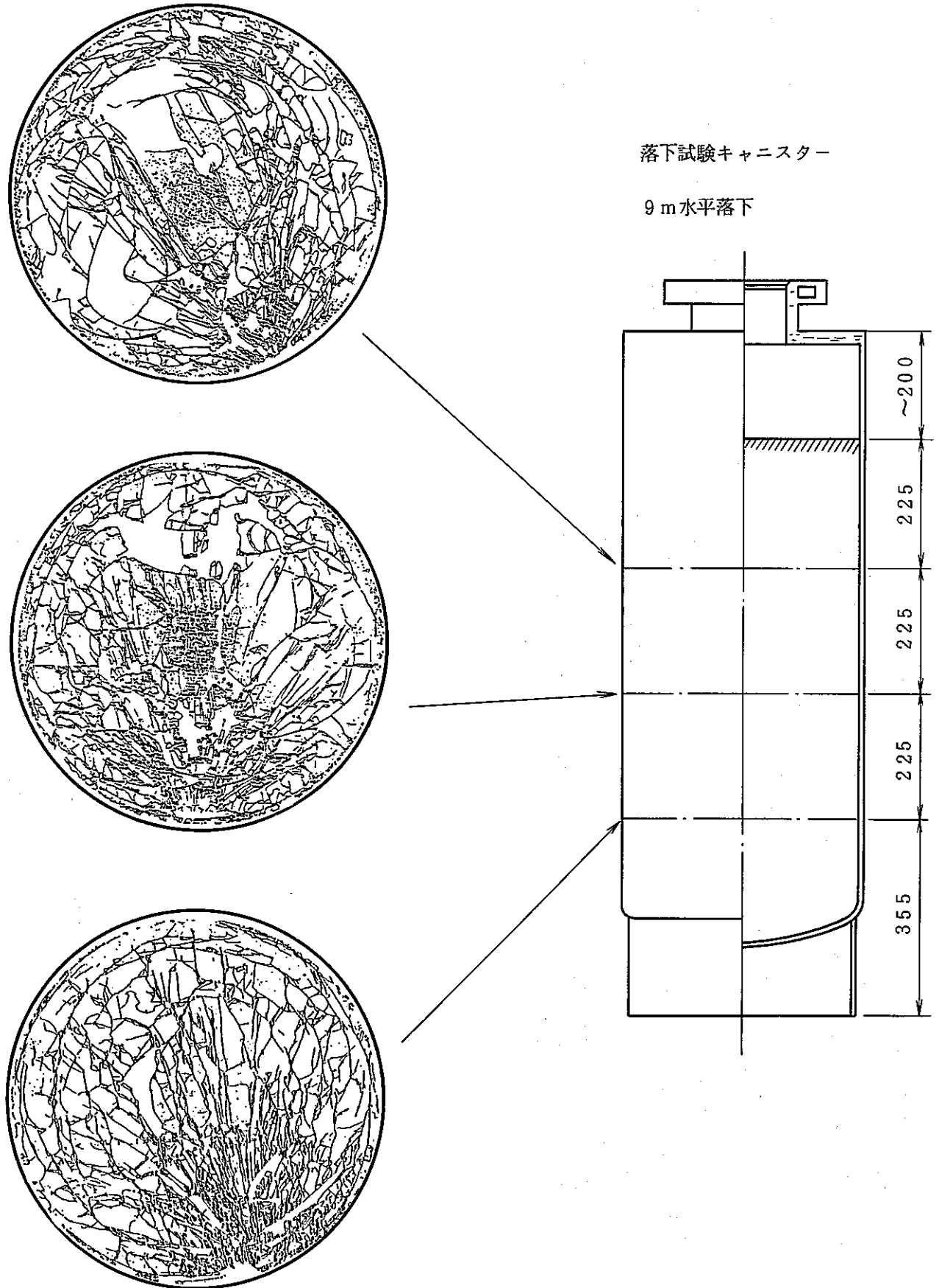


Fig2-6-9 切断面トレース図(9)

Table 2-6-3 落下条件によるガラス固化体比表面積\*

切断面 高さ位置 (肩部よりmm)	キャニスター 落下条件	No. 1 落下前	No. 2 9 m 斜正立落下	No. 3 9 m 倒立落下	No. 4 9 m <sup>3</sup> 斜倒立落下	No. 5 9 m <sup>3</sup> 水平落下
425		19.1	29.2	31.8	24.2	49.4
650		34.1	34.2	28.1	25.2	51.5
875		31.8	38.3	35.5	28.8	55.1
固化体1体の 比表面積**		22.1	27.8	27.0	21.6	42.3

$$* \text{ 比表面積} = \frac{(\text{クラック総長}) \times 2 + (\text{周長})}{(\text{周長})} \quad (\text{一断面})$$

$$** \text{ 固化体1体の比表面積} = \frac{(\text{クラック全面積}) + (\text{固化体外表面積})}{(\text{固化体外表面積})}, \quad \text{クラック全面積} = 2 \times (\text{クラック総長積分値})$$

## 2.7 溶接試験

キャニスター蓋部の溶接として、厚さ1.0mm、再処理1級相当の品質を得ることを目標に溶接試験を実施した。

溶接法としては、実績のあるTIG溶接(タングステンイナートガスアーク溶接)において、各種開先形状、溶接積層数、電流、電圧、溶接速度、電極位置、溶加ワイヤ供給角度、及び供給速度の最適条件を捜し、Table 2-7-1に示す溶接条件が得られた。

更に、得られた溶接条件に対し、許容される変動巾を見出すために、溶接条件を変えて試験を行い、以下に示す許容変動巾を得た。

電 流	-13~+13A
電 圧	-0.4~+0.7V
溶接速度	-0.8~+1.1cm/min
溶加ワイヤ供給速度	-13.5~+13.5cm/min
電極位置	-1.0~+1.0mm

以上の試験により、キャニスターキャップの溶接について、再処理1級相当の溶接部が得られることが判った。

Table 2-7-1 溶接条件

パス	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)	ワイヤ量 (cm/min)	備 考
仮付	150	9.5	4.5	0	120°ピッチ3点 仮付長10mm
ナメ付	180	9.8	8	0	
1	250	10	10	110	
2	250	10	10	110	
3	220	10	10	110	
4	220	10	10	110	
5	235	10.5	10	110	
ワ イ ヤ : TGS308L, $\phi 1.2$ , 進入角度33.5 (水平より) シールドガス : 純アルゴン, 25 l/min 電 極 : 2%Thタングステン・ $\phi 3.2$ mm					



## Appendix -A 腐食量の算定

ガラス固化体を内蔵するキャニスターは、熔融ガラスの注入や長期間にわたる貯蔵などにより腐食を生じることが考えられる。キャニスターが受ける腐食環境は、以下のように分類される。

- ① ガラス注入時、高温ガラスによる短時間の内面腐食
- ② ガラス固化後、低温ガラスによる長期間の内面腐食
- ③ ガラス注入時、高温での大気酸化による外面腐食
- ④ ガラス固化後、低温での大気酸化による外面腐食

## (1) ガラスによる腐食量

キャニスターと同じSUS304L試験片を模擬廃棄物ガラス中に浸漬し、温度をパラメータとして腐食量を測定した。試験結果をTable A-1に示す。この結果、高温ガラスによる腐食量は約 $1.6\mu\text{m}$ 、低温ガラスによる腐食量は約 $10\mu\text{m}/\text{年}$ という結果が得られた。

## (2) 大気酸化

大気酸化量は文献値より算定した。Fig A-1にSUS304の $1000^\circ\text{C}$ での大気酸化量を、Table A-2にSUS304の $566^\circ\text{C}$ での大気酸化量を示す。

## (3) キャニスター腐食量の算定(設計値)

上記データよりキャニスター腐食量の設計値としての算定を行う。

- |                |                           |
|----------------|---------------------------|
| ① ガラス注入時の内面腐食量 | $10\mu\text{m}$           |
| ② ガラス固化後の内面腐食量 | $10\mu\text{m}/\text{年}$  |
| ③ ガラス注入時の外面腐食量 | $6\mu\text{m}$            |
| ④ ガラス固化後の外面腐食量 | $4.2\mu\text{m}/\text{年}$ |

以上よりキャニスター腐食量は100年後で $1436\mu\text{m}$ で約 $1.5\text{mm}$ となる。

Table A-1 長期両立性試験後のSUS304及びSUS304Lの全浸食量

Material	SUS 304							SUS 304L						
	700	300		400		500		700	300		400		500	
Temp. (°C)														
Time. (yr)	(10hr)	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	(10hr)	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
浸食量:A	0.6	0.63	0.50	0.49	0.19	1.05	0.32	0.48	0.63	0.45	0.42	0.31	1.01	0.36
浸食量:B	2.2	3.3	11.1	3.3	9.3	2.9	12.9	1.1	3.6	9.8	2.9	8.0	8.0	6.7
全浸食量:C (=A+B)	2.8	3.93	11.6	3.79	9.49	3.95	13.22	1.58	4.23	10.25	3.32	8.31	8.31	7.06

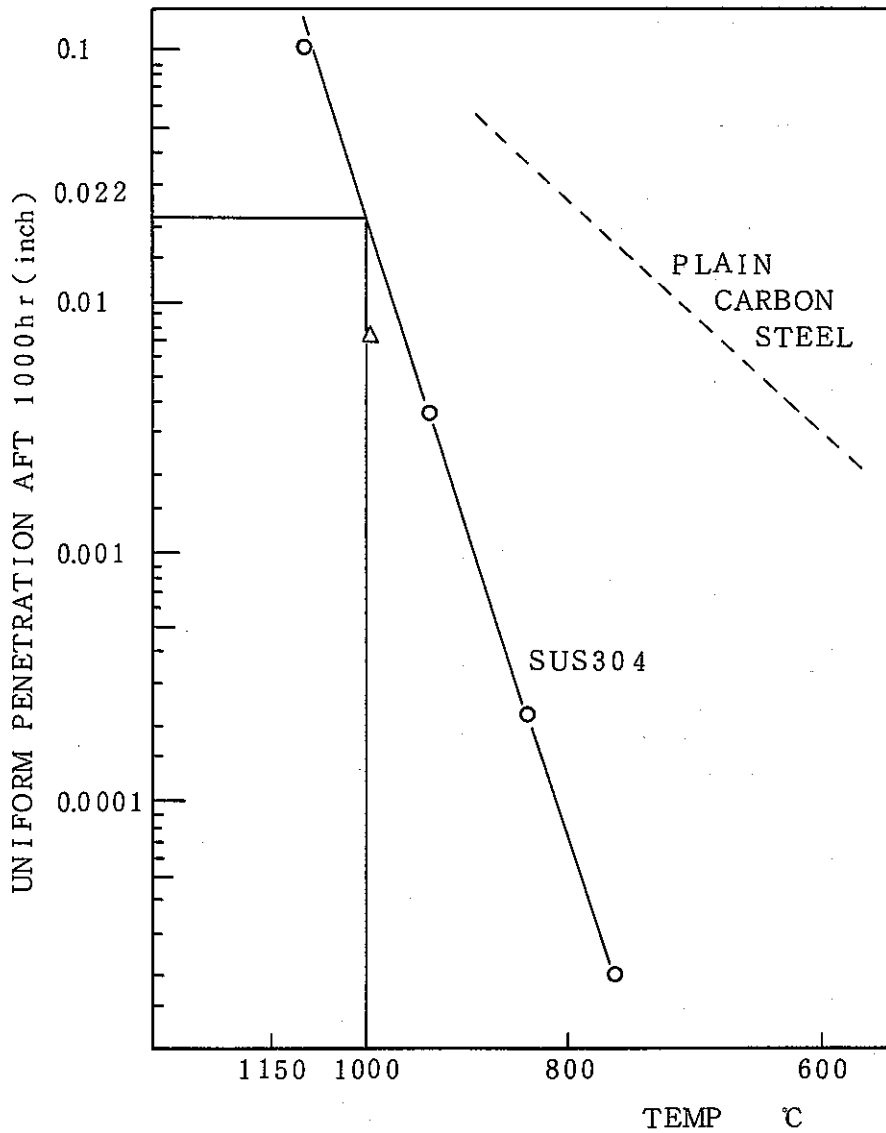
unit:  $\mu\text{m}$ 

Remark: 長期両立性試験の前に, 700°C, 10 hrの前処理を行う

A: 重量減少による値

B: EPMA解析による値

FigA-1



CORROSION RATE 0.56mm/1000hr at 1000°C

(C.L. Angeran "Durability of Cauisters for Storing Solidied Radioactive Waste" NACE Annual Meeting, San Francisco (1977 Paper No.83 より抜粋)

TableA-2 CORROSION METAL LOSS

	566°C		621°C	
	3yr	20yr	3yr	20yr
Type 304SS	0.015mm	0.084mm	0.043mm	0.26mm

CORROSION RATE 0.0042mm/yr

Calculated Minimum Long-Term Corrosion--Isothermal Exposure (G. P. Wozaldo et al, "General Corrosion of Stainless Steels and Nickel Base Alloys Exposed Isothermally in Superheated Steam" Corrosion, vol 21 (No.11) 1965)

## あ と が き

本報告書は昭和60年3月までの、動燃における、ガラス固化体パッケージ特性についてまとめたものである。この段階で、高レベル廃液固化ガラス固化プラントの設計は詳細設計(Ⅱ)が完了したところであり、今後更に合理化を目指す調整設計が進められていくことになっている。この調整設計の中で、キャニスターの仕様に対しても更に合理化を目指す方向で進められるであろうが、本報告書が、キャニスター合理化の一助となることを願うものである。