

JAERI-M  
82-211

加圧水型軽水炉を模擬したガラス  
ループの試作

1983年1月

木村喜久雄・小原 和弘

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）にて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

加圧水型軽水炉を模擬したガラスループの試作

日本原子力研究所東海研究所原子炉化学部

木村 喜久雄・小原 和弘

(1982年12月16日受理)

加圧水型軽水炉の一次冷却系配管の一部が破断したことを想定する実験は、炉の安全性評価のための研究上重要な課題の一つである。破断時の系内の流体は二相流となり、複雑な挙動を示すことが予想される。

筆者らは、その時に生ずる二相流の挙動を目視により観察するための加圧水型軽水炉を模擬したガラスループ（高さが実炉の1/10）の製作依頼を受けた。

ガラスループの製作仕様は、通常の実験内圧を $1 \text{ kg/cm}^2$ とし、実炉の構造に近似することがその要点であった。

しかしガラスループのうちSG（蒸気発生器）は製作中に熱応力が入り易い構造であるため製作の難度が高く、製作中に生じる歪の除去方法を考慮した製作工程の定め方が製作の可否を決定する重要なポイントとなった。

ここでは、将来ガラスループの内圧を $1.5 \text{ kg/cm}^2$ 以上に設定する実験を想定し、許容内圧の高いSGの2号機の製作のために、1号機製作で経験した設計・製作の方法の紹介と製作の難度を軽減化するための基本設計の考え方について報告する。

JAERI-M 82-211

Construction of a Glass Loop Simulated  
with Pressurized Water Reactor

Kikuo KIMURA and Kazuhiro OBARA

Division of Chemistry, Tokai Research Establishment,  
JAERI

(Received December 16, 1982)

The "Loss of Coolant Experiment" at the Pressurized Water Reactor is very important from the standpoint of safety research on reactor technology. A trial manufacturing of the glass loop simulated with the primary cooling water system of PWR has been made in order to observe the behavior of the two phase flow at the loss of coolant accident.

It was confirmed that the loop made was proof against the experimental pressure of  $1 \text{ kg} / \text{cm}^2$  ( max.  $1.5 \text{ kg} / \text{cm}^2$  ) in the apparatus.

The method of avoiding the stress, which is responsible for the breakage, especially during the glass blowing of steam generator, is also described.

Keywords : Glass, Loop Simulation, PWR, Primary Cooling  
Water System, Two Phase Flow, Observation  
Manufacture

## 目 次

はじめに .....	1
1. 仕 様 .....	1
2. 設計・製作 .....	1
2.1 材 料 .....	1
2.2 使用した製作機器 .....	2
2.3 製作工程 .....	2
3. 反省と対策 .....	4
3.1 反 省 .....	4
3.2 対 策 .....	4
4. おわりに .....	5

## CONTENTS

Introduction .....	1
1. Specification of Steam Generator .....	1
2. Plan and Manufacturing .....	1
2.1 Materials .....	1
2.2 Apparatus for manufacturing .....	2
2.3 A Manufacturing Process .....	2
3. Consideration and Discussion .....	4
3.1 Consideration .....	4
3.2 Discussion .....	4
4. Conclusion .....	5

## は じ め に

安全工学部からの製作依頼によるガラスループは、57年度後期に建設着工予定の加圧水型軽水炉（PWR）破断模擬実験ループをモデルとした実炉の高さの1/10、体積が1/6000の全ガラス製の実験用ループで、一次冷却系配管の破断実験によって生ずる二相流の挙動を目視により観察することが目的である。同様の試験装置は既にスイスにおいて製作されているが、その規模は小さく、ループの組こみが平面的である。またSG（蒸気発生器）はガラスの製作面との妥協からか、その構造は実炉のSGと比較して簡略であり、透視のできない部分があるので、流体挙動の正確な観察をする上で少なからず不満足であった。本報告は、材料の一部にガラス板を使う特殊な構造のために製作上の難度を高くしているSGの製作方法の実施例と考え方を述べると共に、実施例における反省課題を抽出し、その対策について考察を加えた。

将来、2号機の製作計画を詰める上で参考になることを希望する。

## 1. 仕 様

ループ全体およびSGの概略をそれぞれ図1a、1bと写真1、2に示す。

主な仕様は次のとおりである。

- (イ) 実炉構造に近似し、高さが実炉の1/10、体積が1/6000であること。
- (ロ) ガラス以外の材料との組合せは極力避けること。
- (ハ) ループ内の圧力は通常使用内圧1 kg/cm<sup>2</sup>
- (ニ) 内部水温は一次系で約120℃

## 2. 設 計 ・ 製 作

## 2.1 材 料

硼珪酸ガラス（商品名：パイレックス）

{	熱膨張係数	: 32.5 × 10 <sup>-7</sup>
	常用使用温度	: 230℃
	耐熱衝撃性	: 180℃ (1/8"厚)
	弾性率（ヤング）	: 6230 kg/mm <sup>2</sup>

を選定し、SGの外套管には標準管の150 mmφ、熱交換部のUチューブは中肉管（パイレックスガラス規格の呼称）25 mmφ、熱水の出口、入口用配管には中肉管(A)の30 mmφ、縦方向の中仕切り板には厚み3 mmのガラス板をそれぞれ使用し、熱水の温度および圧力に備えた（許容

## は じ め に

安全工学部からの製作依頼によるガラスループは、57年度後期に建設着工予定の加圧水型軽水炉（PWR）破断模擬実験ループをモデルとした実炉の高さの1/10、体積が1/6000の全ガラス製の実験用ループで、一次冷却系配管の破断実験によって生ずる二相流の挙動を目視により観察することが目的である。同様の試験装置は既にスイスにおいて製作されているが、その規模は小さく、ループの組こみが平面的である。またSG（蒸気発生器）はガラスの製作面との妥協からか、その構造は実炉のSGと比較して簡略であり、透視のできない部分があるので、流体挙動の正確な観察をする上で少なからず不満足であった。本報告は、材料の一部にガラス板を使う特殊な構造のために製作上の難度を高くしているSGの製作方法の実施例と考え方を述べると共に、実施例における反省課題を抽出し、その対策について考察を加えた。

将来、2号機の製作計画を詰める上で参考になることを希望する。

## 1. 仕 様

ループ全体およびSGの概略をそれぞれ図1a、1bと写真1、2に示す。

主な仕様は次のとおりである。

- (イ) 実炉構造に近似し、高さが実炉の1/10、体積が1/6000であること。
- (ロ) ガラス以外の材料との組合せは極力避けること。
- (ハ) ループ内の圧力は通常使用内圧1 kg/cm<sup>2</sup>
- (ニ) 内部水温は一次系で約120℃

## 2. 設 計 ・ 製 作

## 2.1 材 料

硼珪酸ガラス（商品名：パイレックス）

{	熱膨張係数	: 32.5 × 10 <sup>-7</sup>
	常用使用温度	: 230℃
	耐熱衝撃性	: 180℃ (1/8"厚)
	弾性率(ヤング)	: 6230 kg/mm <sup>2</sup>

を選定し、SGの外套管には標準管の150 mmφ、熱交換部のUチューブは中肉管（パイレックスガラス規格の呼称）25 mmφ、熱水の出口、入口用配管には中肉管(A)の30 mmφ、縦方向の中仕切り板には厚み3 mmのガラス板をそれぞれ使用し、熱水の温度および圧力に備えた（許容

## は じ め に

安全工学部からの製作依頼によるガラスループは、57年度後期に建設着工予定の加圧水型軽水炉（PWR）破断模擬実験ループをモデルとした実炉の高さの1/10、体積が1/6000の全ガラス製の実験用ループで、一次冷却系配管の破断実験によって生ずる二相流の挙動を目視により観察することが目的である。同様の試験装置は既にスイスにおいて製作されているが、その規模は小さく、ループの組こみが平面的である。またSG（蒸気発生器）はガラスの製作面との妥協からか、その構造は実炉のSGと比較して簡略であり、透視のできない部分があるので、流体挙動の正確な観察をする上で少なからず不満足であった。本報告は、材料の一部にガラス板を使う特殊な構造のために製作上の難度を高くしているSGの製作方法の実施例と考え方を述べると共に、実施例における反省課題を抽出し、その対策について考察を加えた。

将来、2号機の製作計画を詰める上で参考になることを希望する。

## 1. 仕 様

ループ全体およびSGの概略をそれぞれ図1a、1bと写真1.2に示す。

主な仕様は次のとおりである。

- (イ) 実炉構造に近似し、高さが実炉の1/10、体積が1/6000であること。
- (ロ) ガラス以外の材料との組合せは極力避けること。
- (ハ) ループ内の圧力は通常使用内圧1 kg/cm<sup>2</sup>
- (ニ) 内部水温は一次系で約120℃

## 2. 設 計 ・ 製 作

## 2.1 材 料

硼珪酸ガラス（商品名：パイレックス）

{	熱膨張係数	: 32.5 × 10 <sup>-7</sup>
	常用使用温度	: 230℃
	耐熱衝撃性	: 180℃ (1/8"厚)
	弾性率（ヤング）	: 6230 kg/mm <sup>2</sup>

を選定し、SGの外套管には標準管の150 mmφ、熱交換部のUチューブは中肉管（パイレックスガラス規格の呼称）25 mmφ、熱水の出口、入口用配管には中肉管(A)の30 mmφ、縦方向の中仕切り板には厚み3 mmのガラス板をそれぞれ使用し、熱水の温度および圧力に備えた（許容



内圧の計算式になる)。

また、SG上方内部へ注入される二次冷却水の重量は約20 kgとなり、この重量を受止めることになるUチューブを取付けた隔壁板の厚みを5 mmと算定(耐圧表による)されるが、製作工程上これを3~4 mm見当とし、隔壁板を曲面とすることにより、二次冷却水の圧力に耐えるものと判断した。(図2)

## 2.2 使用した製作機器

(イ) ガラス加工旋盤(主軸内径200 mmφ)	1台						
(ロ) 壁掛け型ガラス歪検査機(ポーライザ板900×200 mm)	1台						
(ハ) 徐冷用電気炉(500×500×1000 mm)	1台						
(ニ) 排気用電気炉(除歪に使用、600×1400 mm)	1台						
(ホ) 加工用ガスバーナー(KS-18)	2個						
(ヘ) 予熱用ガスバーナー(火口径30 mmφ)	1個						
(ト) 田中式ガス熔接器(火口30番)	1個						
(チ) 平面研磨機(ダイヤモンドディスク)	1台						
(リ) 縦中仕切り板熔着用固定具(特注:工作課)	1個						
(ヌ) Uチューブ取付け作業用アングルフレーム	1台						
(ル) ハンドバーナー(KSA-中型、30 mmφ配管に使用)	2個						
(オ) ガラス管受台(特注:工作課)							
(ワ) ガスの種類	<table border="0" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>:天然ガス(主成分:メタン)</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>:水素ガス</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>:酸素ガス</td> </tr> </table>	{	:天然ガス(主成分:メタン)	{	:水素ガス	{	:酸素ガス
{	:天然ガス(主成分:メタン)						
{	:水素ガス						
{	:酸素ガス						

## 2.3 製作工程

製作工程について構想を固めるとき、1)縦方向の中仕切り板の熔着方法、2)Uチューブを接続する隔壁板の熔着方法について可能性のある方法を決定しなければ、前後の工程が決まらない。筆者らはこの2点について次のような方法が最も良いと考えた。

### 2.3.1 中仕切り板の熔着

図3の丸底1端封じ管、150 mmφ、長さ600 mmφの同心軸上先端部に30 mmφ位の足場(ガラス管)を付けたものを準備し、これに固定具を装着した中仕切り板を挿入した。

次にガラス加工旋盤の左側チャックに150 mmφ、右側チャックに30 mmφの足場相当部分を取付け、中仕切り板の熔着作業を始めた。ガラス板を熱加工する時の注意としては、被熱加工物全体が転移転以上に加熱するのを待ってからガラス板の部分的熱加工を始めることである。その理由は、材質の転移点以下に起る温度の不均一が、破損の誘因となるからである。今回実

施したSG1号機の試作のように部分的熱加工の繰り返しが必要な作業では、温度の不均一な部分が生じ易く、これに比例して大きな歪も生ずるので特に注意が必要である。

そこで歪検査機を、図4に図示する位置におき、熱加工中に生じる歪の度合を連続的に観察できるようにした。この工夫により熱加工中の歪による破損を防止できた。

ガラス板と150mmφの外套管との熔着は、ガラス加工旋盤で回転させながら、天然ガス+酸素ガスの大きな混合炎でガラス全体を予熱し、適宜な温度になった時点で、(1本の予熱専用バーナで中仕切り板の左半分側の予熱を続ける)加工用バーナ2本にて水素+酸素ガスの混合ガスを燃焼しながら中仕切り板の右側先端から左方向へとヒート&ブローを繰り返す。中仕切り板の長さ1/3位まで熔着したところで、中仕切り板を固定している治具を取り外し、予熱専用バーナと加工用バーナとの位置を入れ替える。加工用バーナを中仕切り板の左端より順次右方向へと移動させ、中仕切り板全長に亘って完全に熔着したところで足場を焼きとる。つぎいてドレン用およびVP(圧力容器)との接続用配管の枝管熔接をおこない、次の工程であるUチューブを接続する隔壁板の製作へと進めた。(天然ガス+酸素ガスの混合炎による予熱作業は止めてはならない)

### 2.3.2 隔壁板の製作

隔壁板用としてガラス円板を準備し、これを図5のように熔着することは、製作の難度を更に高めることになるので、中仕切り板の熔着(2.3.1)終了段階で図6aの斜線個所を加熱熔融し、6bのように封じ切る。

次に矢印の方向から充分に加熱をし、Cのようにカーボン板を押しあて中仕切り板の先端と熔着させる方法とした。(この工程中も一貫して歪の強弱を確認しながら予熱作業を続けなければならない)

### 2.3.3 SG下部の平面フランジの製作

前項の隔壁板の製作終了後、たゞちに当該品全体の温度が下らないように注意しながら、ガラス加工旋盤の右側チャックにセットしていた物を左側チャックへ移動をする。その後、右側チャックには指定寸法大のフランジの製作に十分な長さのガラス管(150mmφ)をセットする。左右両チャックにセットしたガラスの対面側の端部を加熱し、完全に熔着した段階で適当な長さ(図7の破線部分)に焼切り、フランジ製作の常法にしたがって成形をおこなう。

つぎいて予熱作業を中断することなく、Uチューブの基礎管(25φ×100mm)6本の接続をした。この間、終始一貫して、ガラスの温度が転移点以下にならないように留意しなければならない。

### 2.3.4 除歪作業

製作中のガラスを歪検査機で観察しながら、適切な予熱を続けているが、このまゝ放冷したのでは永久歪が残ることになる。従って製作終了時点(2.3.1)でガラスの温度が下らないうちに、製作品を徐冷用電気炉内へ入れた。なお電気炉は、調整してあらかじめ500℃に保っておく。その後電気炉内の温度を580℃まで上げ、電源を切って自然降下を待った。

### 3. 反省と対策

#### 3.1 反省

- (イ) SGは大型工作物に属し、かつ長時間（約5時間）に亘っての高熱作業であるため、ガラス加工旋盤のバーナ据付台の摺動ベースが熱のために狂いをおこし、製作中にバーナの移動ができず困惑した。
- (ロ) SG下部の平面フランジの製作では、フランジの厚みを均等に成形することが、後のループ組込み作業で重要なことである。  
しかしこの場合のフランジ成形では、複合構造の一部を溶かすため、平均した肉留めが出来ないので均等な厚みをもつフランジに成形することは極めて難しい。
- (ハ) SGの内部構造に中仕切り板や隔壁板など、広い面積の平板状のガラス部分を含むために実験操作上、板の両面に生ずる圧力差は避けられない点、また今後、1号機と比較して製作を一層容易にするためにも実炉構造を本質的に崩さない範囲で製作・設計の見直しが必要である。
- (ニ) SGの製作上1次水系（下部）と2次水系（上部）との接続に平面フランジをつけたが、ガラスの弾性（ヤング率： $6230 \text{ kg/mm}^2$ ）は鋼と比べ約 $1/3$ であるため脆弱性や引張り強度を考慮すると、フランジ部の接続作業で片締めの可能性のあるところには平面フランジの採用は不適當と思われる。
- (ホ) SG上部管の平面フランジに施したOリング溝は、簡単にカーボンの治具を手製し整形加工したものであるため、溝の深さが充分にとれず、フランジを押しつけるとOリングの一部が溝から外れる状態になり、これを補足するためにバスボンドを塗布し併用を試みている。
- (ヘ) SGの上部管は、直径が $150 \text{ mm}\phi$ 、長さ $1900 \text{ mm}$ のもので、単純形状の時は、主軸内径 $200 \text{ mm}\phi$ のガラス加工旋盤の使用は可能であるが、脇枝等を付ける工程になると旋盤の使用は出来なくなる。この場合はフリーハンドによるガラス工作となるので、なましが不十分（徐冷用電気炉は小さくて使用不能）なのが気になる。

#### 3.2 対策

- (イ) 今後の製作に当っては、主軸内径 $300 \text{ mm}\phi$ の大型ガラス加工旋盤と、 $500 \times 500 \times 2000 \text{ mm}$ 位の寸寸をもつ徐冷用電気炉の設備が必要であり、外注製作にあたっては、ガラスの配管作業に習熟していることも条件として、工場を選定すること。
- (ロ) 製作上の難度を軽減する方法と、SG上下の安全な接続機構等について検討を深めなければならない。図8はその対案となる。  
すなわち、図中①、②、③、④を金属製部品とし、①はSGの下部と一体になる板フラ

ンジで、④のUチューブ取付けポートを有する。②は板フランジを締るための固定リング、③はSG上部のフランジ押えである。この図が示すように、接続部を締め付ける力は、ガラス管を直径の中心点方向へ圧縮する作用をし、圧縮応力に強いガラスには有効な方法である。またSG製作の内容も少からず軽減することになり、外注製作も可能である。

#### 4. お わ り に

ガラスの耐圧は、材質、表面の状態、熱処理などの条件によって異なる。ガラスの弾性度は一般的に $5000 \sim 10000 \text{ kg/cm}^2$ であり、次の式からガラス管の許容内圧を算出すると、その値の比較により許容内圧の大きさは肉厚に比例することがわかる。

$$P = \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \cdot \sigma$$

P : 許容内圧力 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma$  : 設計応力

d : ガラス管内径

D : ガラス管外径

しかし実際に耐圧製品を製作するに当っては、ガラスの肉厚の程度と、形状(構造)や大きさとの関係を考えないと製作不可の場合があるので、耐圧用の機器の仕様作成には十分な検討を必要とする。

今回のガラスループ製作仕様が通常実験内圧： $1 \text{ kg/cm}^2$ なので、特にSGの形状と算出した材料の肉厚程度では前述の製作方法でも大きく改めることはないと思われる。しかし将来、条件のちがう実験計画やループの安全な組込みのためには、対策(3.2)に述べたような金属部品との組合せもやむえないことと思考する。

末尾ながら、ガラスループの試作に当り、安全工学第1研究室の安濃田良成氏、安全試験技術室の伊藤秀雄氏よりご協力いただき深く感謝の意を表します。

ンジで、④のUチューブ取付けポートを有する。②は板フランジを締るための固定リング、③はSG上部のフランジ押えである。この図が示すように、接続部を締め付ける力は、ガラス管を直径の中心点方向へ圧縮する作用をし、圧縮応力に強いガラスには有効な方法である。またSG製作の内容も少からず軽減することになり、外注製作も可能である。

#### 4. おわりに

ガラスの耐圧は、材質、表面の状態、熱処理などの条件によって異なる。ガラスの弾性度は一般的に $5000 \sim 10000 \text{ kg/mm}^2$ であり、次の式からガラス管の許容内圧を算出すると、その値の比較により許容内圧の大きさは肉厚に比例することがわかる。

$$P = \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \cdot \sigma$$

P : 許容内圧力 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma$  : 設計応力

d : ガラス管内径

D : ガラス管外径

しかし実際に耐圧製品を製作するに当たっては、ガラスの肉厚の程度と、形状(構造)や大きさとの関係を考えないと製作不可の場合があるので、耐圧用の機器の仕様作成には十分な検討を必要とする。

今回のガラスループ製作仕様が通常実験内圧： $1 \text{ kg/cm}^2$ なので、特にSGの形状と算出した材料の肉厚程度では前述の製作方法でも大きく改めることはないと思われる。しかし将来、条件のちがう実験計画やループの安全な組込みのためには、対策(3.2)に述べたような金属部品との組合せもやむえないことと思考する。

末尾ながら、ガラスループの試作に当り、安全工学第1研究室の安濃田良成氏、安全試験技術室の伊藤秀雄氏よりご協力いただき深く感謝の意を表します。

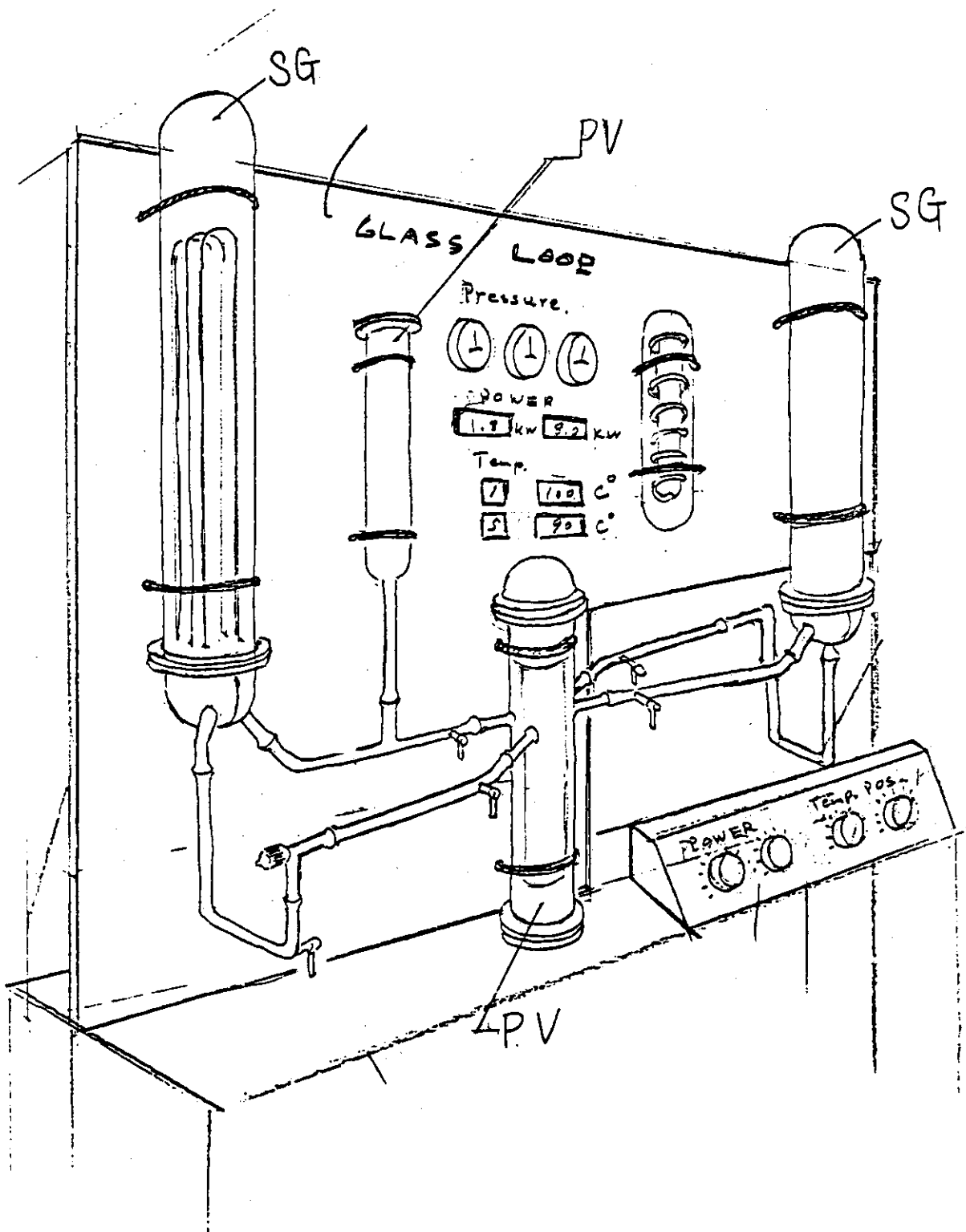


図 1a 模擬 PWR ガラスループ

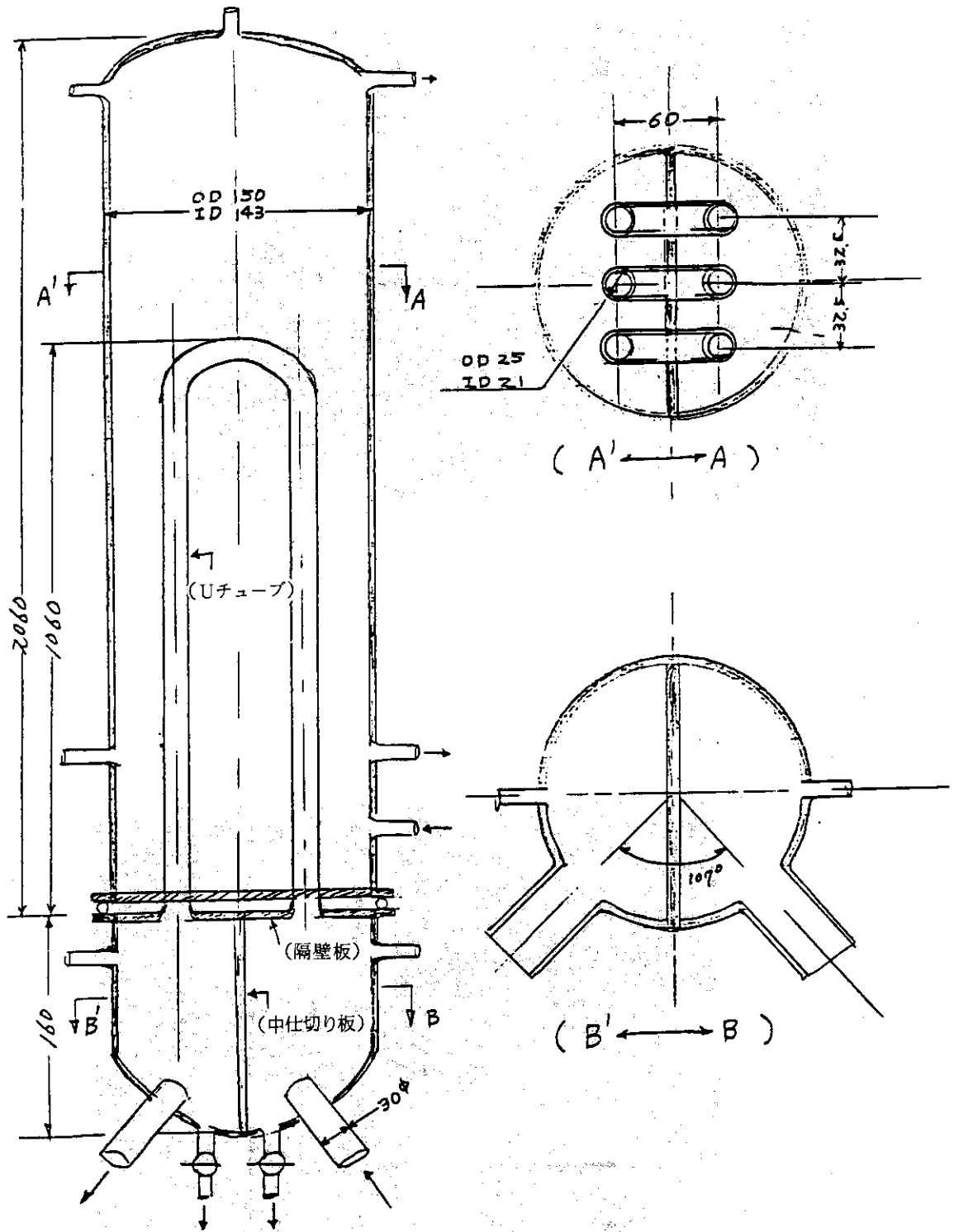


図 1b 蒸気発生器 (SG)

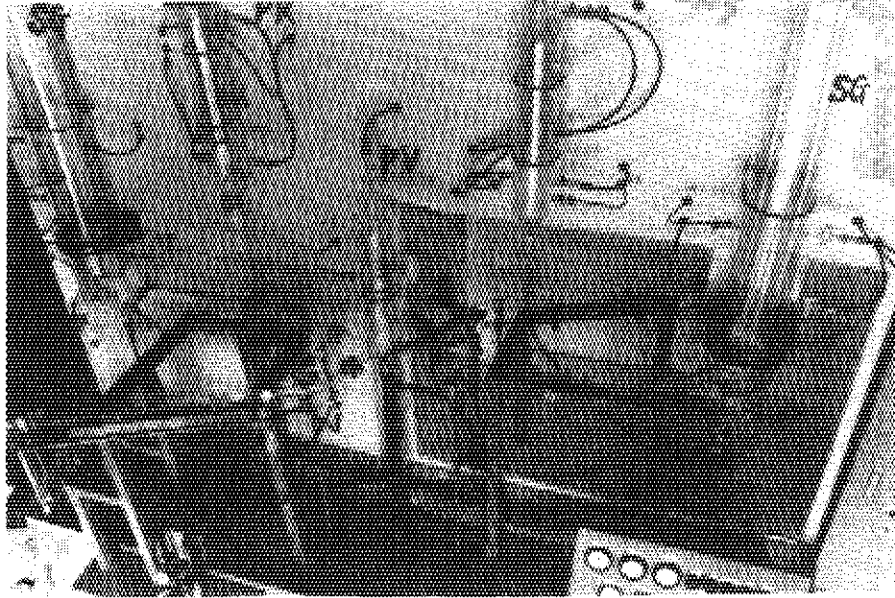


写真1 模擬PWRガラスループ

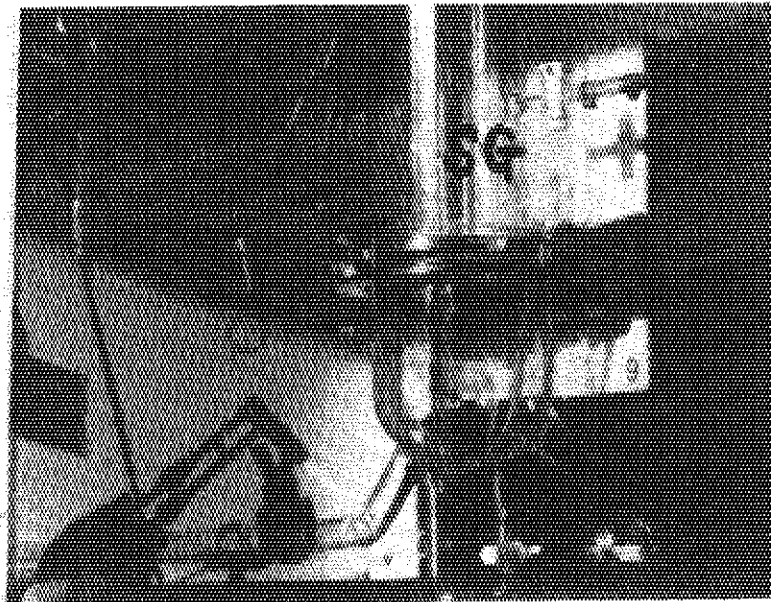


写真2 SG (蒸気発生器) 下部



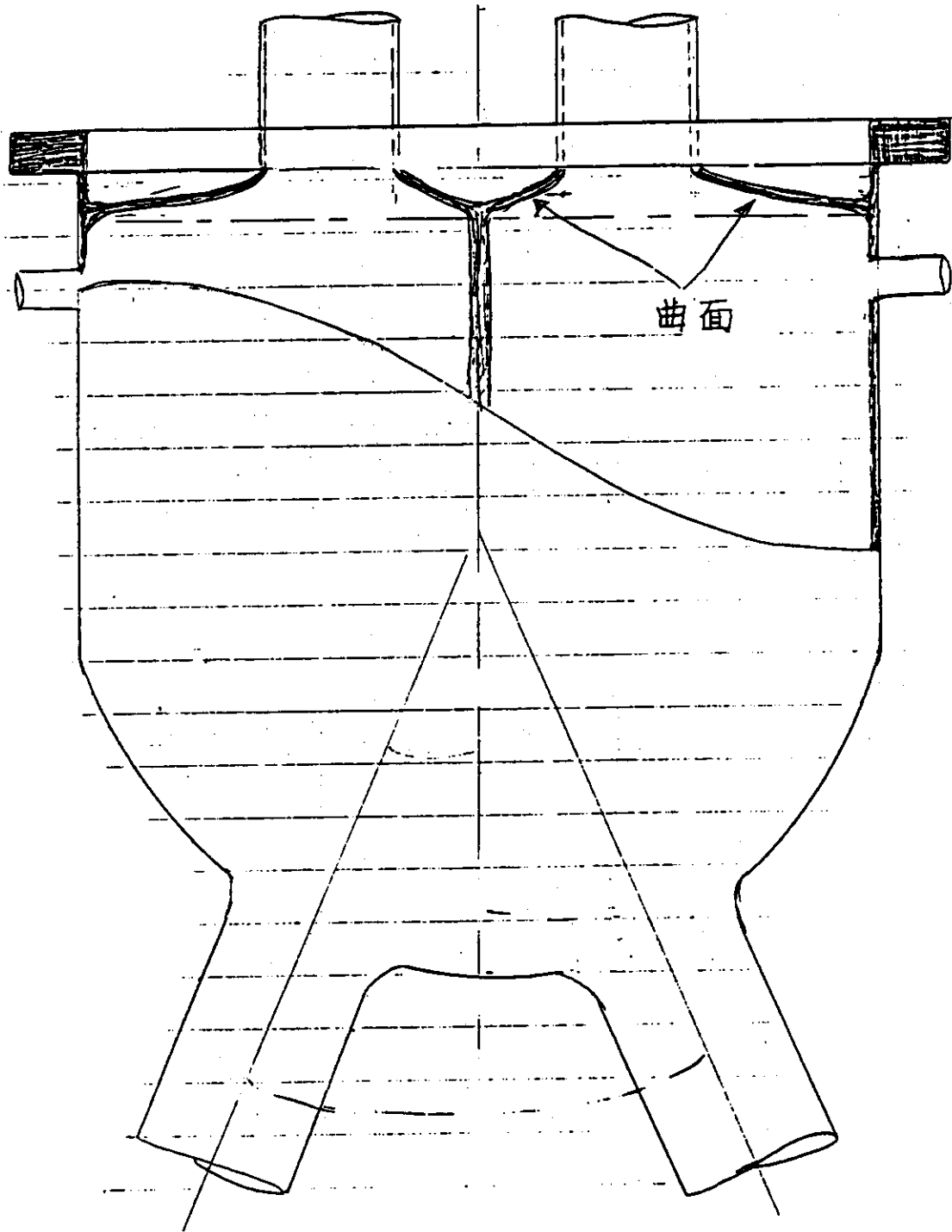


図2 蒸気発生器の隔壁板の形状

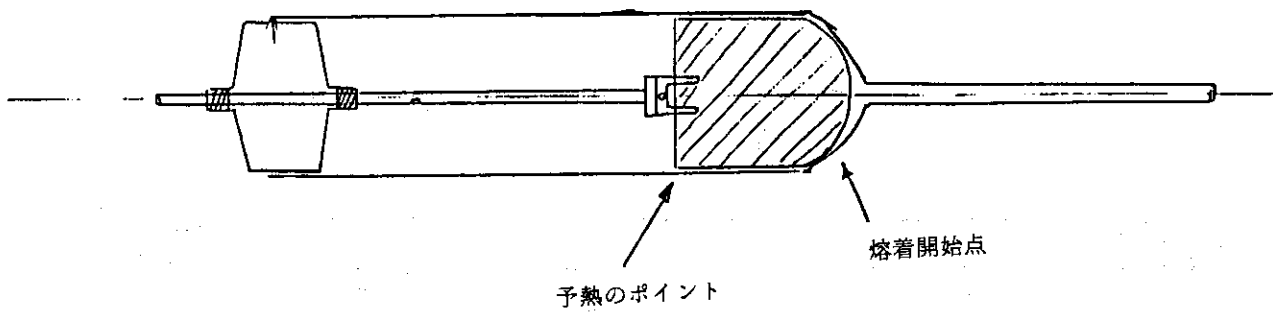


図 3 蒸気発生器製作法(1)

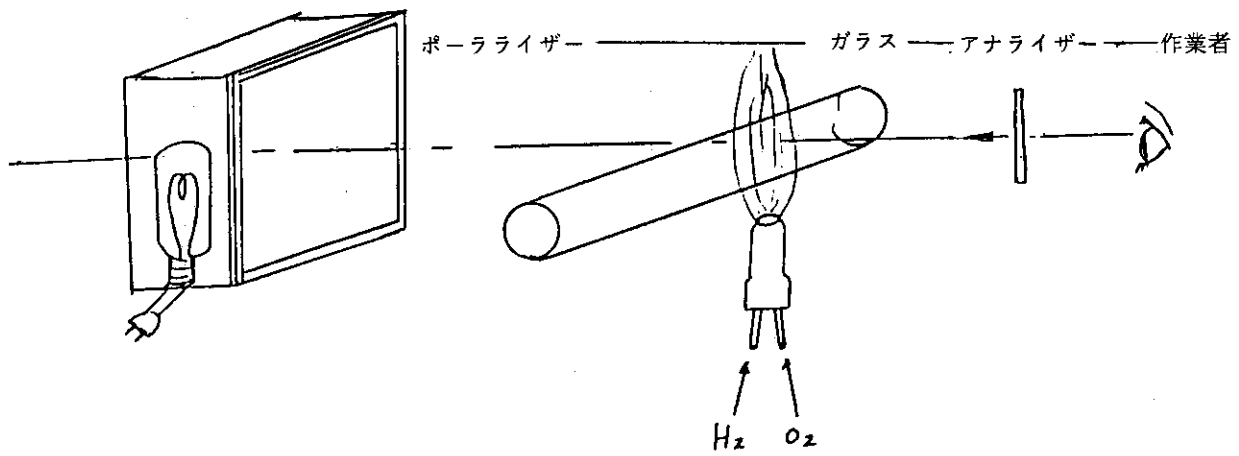


図 4 製作中の歪の観察

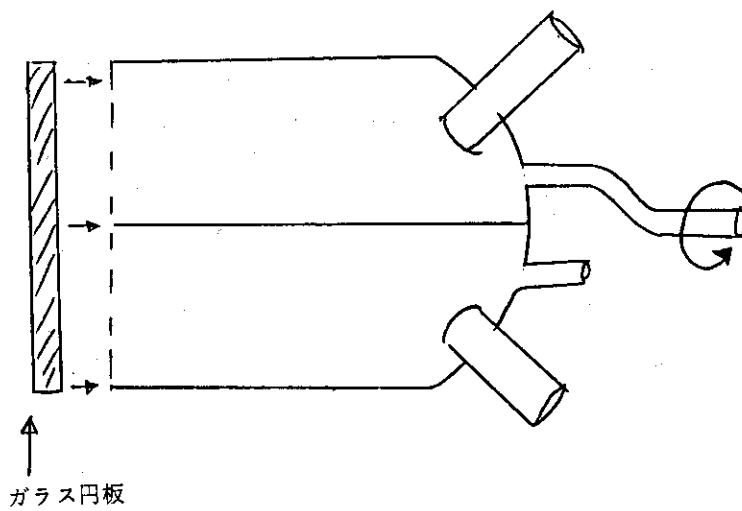


図 5 ガラス円板の熔着例

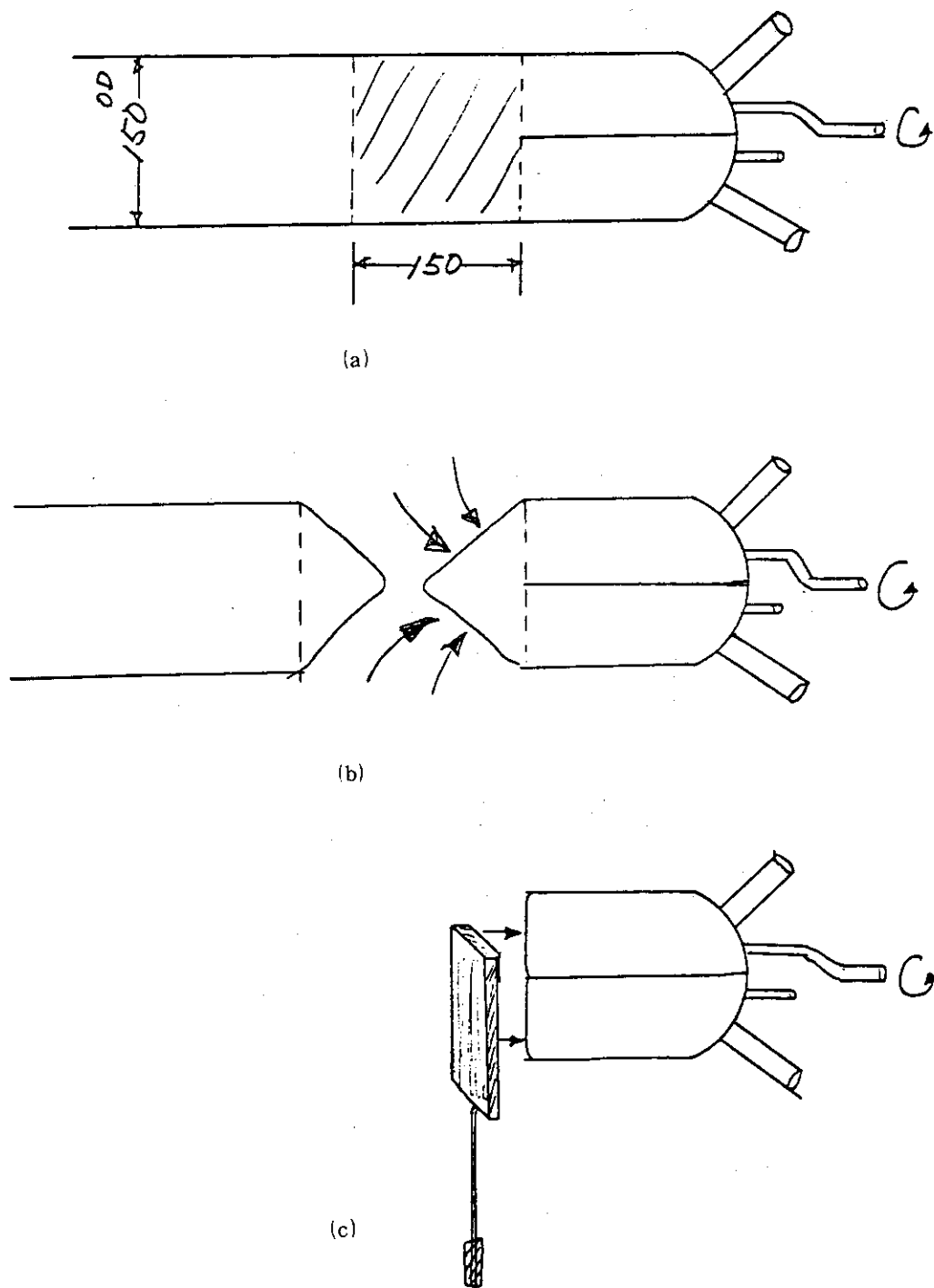


図 6 隔壁板の成型例

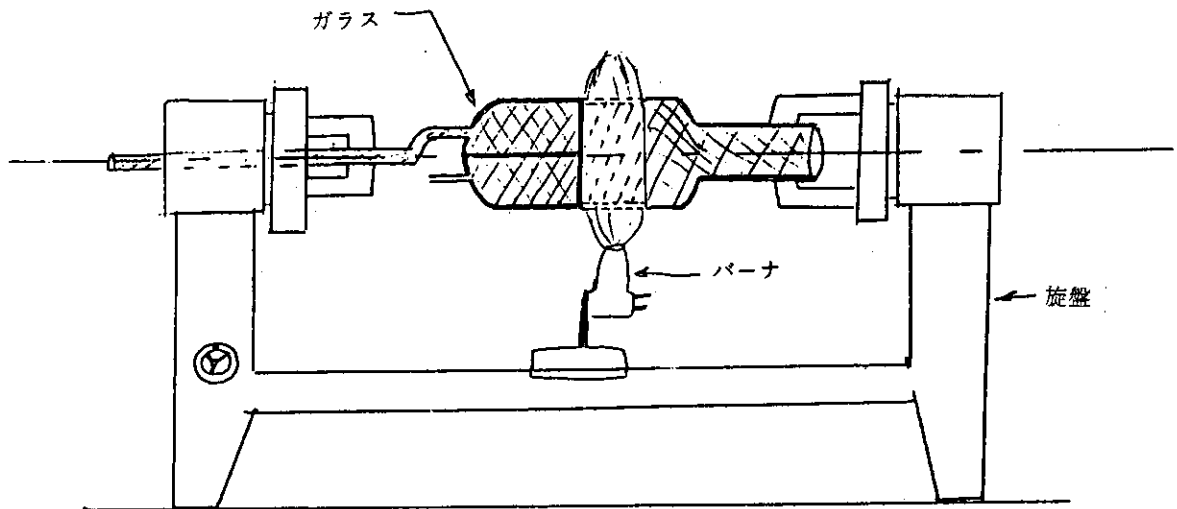


図7 平面フランジの成型例

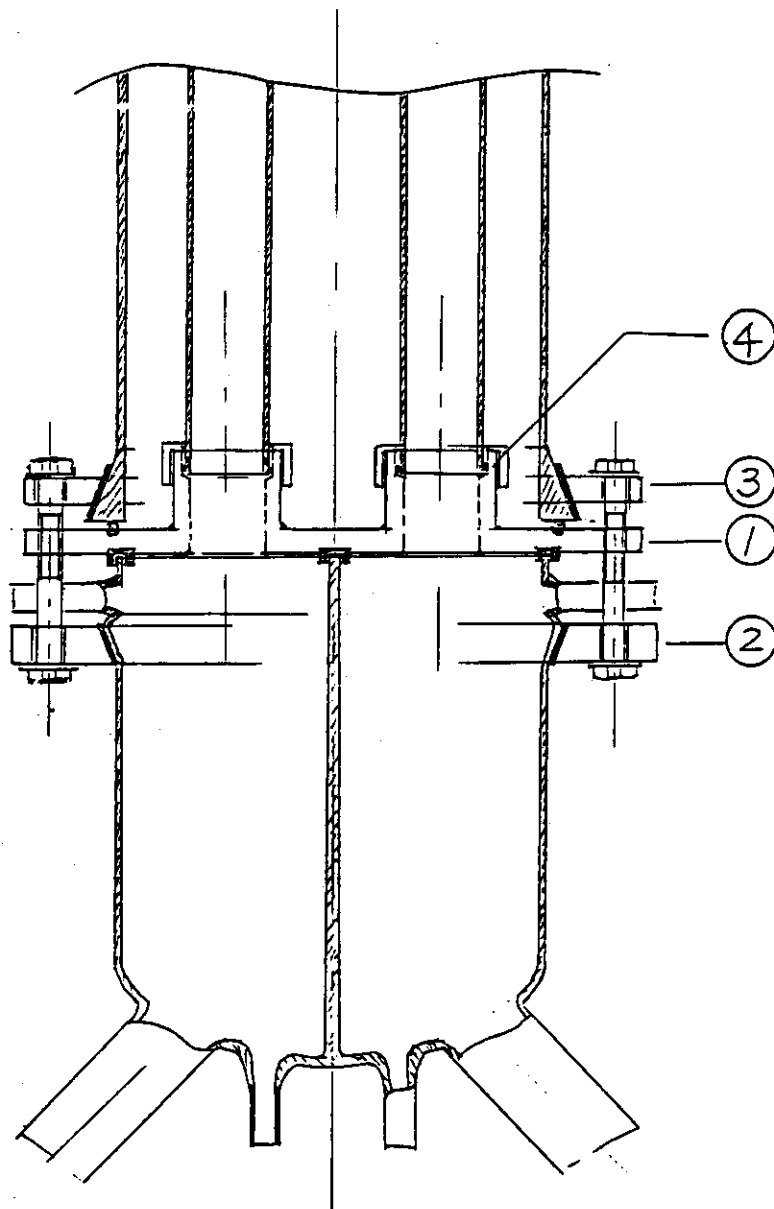


図8 蒸気発生器の改良例(案)