

JAERI-M

8 2 7 4

NSRR高温高压水カプセルの試作開発

1979年6月

小林 晋昇・豊川 俊次

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

NSRR 高温高圧水カプセルの試作開発

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

小林 晋昇・豊川 俊次

(1979年5月16日受理)

本報告書は、NSRR で計画されている軽水動力炉の運転条件を模擬した燃料破損実験に使用する高温高圧水カプセルについての試作・開発の結果についてまとめたものである。

試作・開発した装置については、設計・製作後に行った機能試験の結果、試作目的全般にわたって所定の成果が得られた。

Design and Out-of-Pile Test Results
of NSRR High-Pressure Capsule

Shinsho KOBAYASHI and Shunji TOYOKAWA

Division of Reactor Safety
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received May 16, 1979)

Design and operation results are described of a mock-up of an high-pressure test capsule to be used in RIA fuel behavior tests under simulated power reactor operating conditions.

The mock-up capsule was found to meet most of its intended requirements.

The practical high-pressure capsule for in-pile tests will be designed on the basis of mock-up results.

Keywords: High Pressure Capsule, NSRR Reactor, Fuel Failure, Reactivity Initiated Accident, Out-of-Pile Test, In-Pile Test, Mock-up Capsule

目 次

1. はじめに	1
2. 試作・開発の目的	1
3. 基本設計	1
4. 装置の概要	2
4.1 試験部容器	2
4.2 加圧タンク	3
4.3 膨張タンク	3
4.4 保護筒	3
4.5 加熱ヒータ	4
4.6 安全弁	4
4.7 運転計装	4
5. 総合試験	4
5.1 試験目的	4
5.2 試験方法	6
6. 総合試験の結果	6
6.1 ヒータ容量確認試験結果	6
6.2 温度分布把握試験結果	7
6.3 熱膨張量の把握試験結果	8
6.4 安全弁の性能試験結果	8
6.5 高温高圧用圧力計の温度特性試験結果	9
7. 検 討	9
7.1 水位計	9
7.2 圧力計	9
7.3 計装線の容器貫通部	9
7.4 試験部容器内ヒータの取付方法	10
7.5 試験部容器と加圧タンク間の構造	10
7.6 加圧タンクの容量	10
7.7 試験部容器下部の構造	10
7.8 断熱材	10
7.9 装置の運転計装	40
8. ま と め	40
謝 辞	40
参考文献	40

Appendix

A	試験部容器の強度計算	42
B	加圧タンクの強度計算	52
C	膨張タンクの強度計算	53

Contents

1.	Introduction	1
2.	Objective of mock-up capsule	1
3.	Design basis	1
4.	Outline of capsule	2
4.1	Test section	2
4.2	Pressurizer	3
4.3	Suppression tank	3
4.4	Outer casing	3
4.5	Heaters	4
4.6	Safety valves	4
4.7	System instrumentation	4
5.	Functional tests	4
5.1	Objectives	4
5.2	Test method	4
6.	Test results	6
6.1	Heater capability	6
6.2	Temperature distribution	6
6.3	Thermal expansion measurement	7
6.4	Operational test of safety valve	8
6.5	Calibration of pressure sensor	8
6.6	Calibration of level sensor	8
7.	Discussions and Recommendations for the in-pile test capsule	9
7.1	Level sensor	9
7.2	Pressure sensor	9
7.3	Penetration of instrumentation lead wires	9
7.4	Heater assembly in test section	9
7.5	Connecting structure between test section and pressurizer ..	10
7.6	Capacity of pressurizer	10
7.7	Skirt structure of the test section	10
7.8	Thermal insulator	10
7.9	System instrumentation	10
8.	Conclusions	40

Acknowledgement	40
References	40
Appendix	
A. Stress analysis of test section	42
B. Stress analysis of pressurizer	52
C. Stress analysis of suppression tank	53

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は、原子炉で想定される事故のうち反応度事故時の燃料挙動を実験的に究明する目的の研究計画である。

NSRR における実験は、長期研究計画にもとづいて実施されているが、現在のところ常温常圧条件下の実験に成功し、引き続いて高温高圧条件下への実験が行われる予定である。このため軽水炉の運転条件を模擬した高温高圧カプセルやループ等の開発が不可欠である。

本稿で述べる高温高圧カプセルは、主として軽水動力炉の運転温度および圧力を模擬した状態で燃料破損実験に使用する目的で開発した試験装置である。

本試作高温高圧カプセルは、Fig. 1 に示すとおり昇温昇圧用ヒータを内蔵した試験部容器ならびに加圧タンクと、蒸気の凝縮ならびに貯留を行う膨張タンクによって構成されている。これらの容器類は、配管・弁類および支持構造体で結ばれ、装置としては1体構造を成している。

本稿では、装置の概要、製作完了までの技術的問題点および機能・性能に関する総合試験の結果について報告するものであるが、これらの成果は実機開発に大いに役立つものと期待される。

2. 試作・開発の目的

本高温高圧水カプセルは、今日まで約300回のインパイル実験によりその信頼性が立証されている大気圧水カプセルの技術経験にもとづいて試作開発するものであるが、軽水動力炉の運転状態である高温高圧下の実験装置となることから、現在使用中の大気圧水カプセルに比して構造的にもまた、準拠すべき法令ならびに規格・基準等も大きく異なっている。これらに機能上及び安全上の性能を試作機により確認するために本装置を試作・開発したものである。

3. 基本設計

本試験装置は、労働省の圧力容器構造規格の第1種圧力容器の規格・基準に準じた設計・製作であることに加え、実験の母体となるNSRR実験設備²⁾との取合いが十分に配慮された構造であるとともに燃料破損実験を行う高温高圧の状態を容易に可能ならしめるものでなければならない。このため以下に示す基本設計仕様を満足させるものとした。

1. 装置の外径は、NSRRの実験孔内に挿入・取出しを行うことから実験孔の内径（最小部約220 mm）によって制限され、最大でも約200 mmとする必要がある。
2. 装置の全長は、垂直実験孔上部に放射線遮蔽設備を設ける必要上最大6,000 mm以下とする。しかし装置の取扱いを容易ならしめるため、その全長は出来る限り短かくし軽量化を図るものとする。

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は、原子炉で想定される事故のうち反応度事故時の燃料挙動を実験的に究明する目的の研究計画である。

NSRR における実験は、長期研究計画にもとづいて実施されているが、現在のところ常温常圧条件下の実験に成功し、引き続いて高温高圧条件下への実験が行われる予定である。このため軽水炉の運転条件を模擬した高温高圧カプセルやループ等の開発が不可欠である。

本稿で述べる高温高圧カプセルは、主として軽水動力炉の運転温度および圧力を模擬した状態で燃料破損実験に使用する目的で開発した試験装置である。

本試作高温高圧カプセルは、Fig. 1 に示すとおり昇温昇圧用ヒータを内蔵した試験部容器ならびに加圧タンクと、蒸気の凝縮ならびに貯留を行う膨張タンクによって構成されている。これらの容器類は、配管・弁類および支持構造体で結ばれ、装置としては1体構造を成している。

本稿では、装置の概要、製作完了までの技術的問題点および機能・性能に関する総合試験の結果について報告するものであるが、これらの成果は実機開発に大いに役立つものと期待される。

2. 試作・開発の目的

本高温高圧水カプセルは、今日まで約300回のインパイル実験によりその信頼性が立証されている大気圧水カプセルの技術経験にもとづいて試作開発するものであるが、軽水動力炉の運転状態である高温高圧下の実験装置となることから、現在使用中の大気圧水カプセルに比して構造的にもまた、準拠すべき法令ならびに規格・基準等も大きく異なっている。これらに機能上及び安全上の性能を試作機により確認するために本装置を試作・開発したものである。

3. 基本設計

本試験装置は、労働省の圧力容器構造規格の第1種圧力容器の規格・基準に準じた設計・製作であることに加え、実験の母体となるNSRR実験設備²⁾との取合いが十分に配慮された構造であるとともに燃料破損実験を行う高温高圧の状態を容易に可能ならしめるものでなければならない。このため以下に示す基本設計仕様を満足させるものとした。

1. 装置の外径は、NSRRの実験孔内に挿入・取出しを行うことから実験孔の内径(最小部約220 mm)によって制限され、最大でも約200 mmとする必要がある。
2. 装置の全長は、垂直実験孔上部に放射線遮蔽設備を設ける必要上最大6,000 mm以下とする。しかし装置の取扱いを容易ならしめるため、その全長は出来る限り短かくし軽量化を図るものとする。

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は、原子炉で想定される事故のうち反応度事故時の燃料挙動を実験的に究明する目的の研究計画である。

NSRR における実験は、長期研究計画にもとづいて実施されているが、現在のところ常温常圧条件下の実験に成功し、引き続いて高温高压条件下への実験が行われる予定である。このため軽水炉の運転条件を模擬した高温高压カプセルやループ等の開発が不可欠である。

本稿で述べる高温高压カプセルは、主として軽水動力炉の運転温度および圧力を模擬した状態で燃料破損実験に使用する目的で開発した試験装置である。

本試作高温高压カプセルは、Fig. 1 に示すとおり昇温昇圧用ヒータを内蔵した試験部容器ならびに加圧タンクと、蒸気の凝縮ならびに貯留を行う膨張タンクによって構成されている。これらの容器類は、配管・弁類および支持構造体で結ばれ、装置としては1体構造を成している。

本稿では、装置の概要、製作完了までの技術的問題点および機能・性能に関する総合試験の結果について報告するものであるが、これらの成果は実機開発に大いに役立つものと期待される。

2. 試作・開発の目的

本高温高压水カプセルは、今日まで約300回のインパイル実験によりその信頼性が立証されている大気圧水カプセルの技術経験にもとづいて試作開発するものであるが、軽水動力炉の運転状態である高温高压下の実験装置となることから、現在使用中の大気圧水カプセルに比して構造的にもまた、準拠すべき法令ならびに規格・基準等も大きく異なっている。これらに機能上及び安全上の性能を試作機により確認するために本装置を試作・開発したものである。

3. 基本設計

本試験装置は、労働省の圧力容器構造規格の第1種圧力容器の規格・基準に準じた設計・製作であることに加え、実験の母体となるNSRR実験設備²⁾との取合いが十分に配慮された構造であるとともに燃料破損実験を行う高温高压の状態を容易に可能ならしめるものでなければならない。このため以下に示す基本設計仕様を満足させるものとした。

1. 装置の外径は、NSRRの実験孔内に挿入・取出しを行うことから実験孔の内径(最小部約220 mm)によって制限され、最大でも約200 mmとする必要がある。
2. 装置の全長は、垂直実験孔上部に放射線遮蔽設備を設ける必要上最大6,000 mm以下とする。しかし装置の取扱いを容易ならしめるため、その全長は出来る限り短かくし軽量化を図るものとする。

3. 装置の1次系耐圧部の設計圧力は、運転圧力（ 150 kg/cm^2 ）に加え燃料破損によって発生することが予想される衝撃圧力を考慮して $180 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とする。2次系耐圧部の設計圧力は、膨張タンクの安全弁の吹出し圧力を考慮し $10 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とする。
4. 装置の最高温度は、使用最高圧力 150 kg/cm^2 の飽和温度である約 $341 \text{ }^\circ\text{C}$ とする。
5. 装置は、試験部容器、加圧タンクおよび膨張タンクにより構成する。
6. 試験部容器に試験燃料を装填する。
7. 加圧タンクにより昇温による試験部容器内の水の膨張の吸収と蒸気圧による昇圧を行う。
8. 膨張タンクにより試験部容器および加圧タンクから安全弁を介して吹き出される蒸気等の凝縮ならびに貯留を行う。
9. 装置に設ける容器類には各々に安全弁を設ける。
10. 装置の昇温は、試験部容器および加圧タンクそれぞれに内蔵する電気ヒーターによって行う。
11. 装置を室温から定格温度（約 $341 \text{ }^\circ\text{C}$ ）まで昇温するために要する時間は、約 90 分を目標とする。
12. 容器間を結ぶ配管・弁類の部分には、保護外筒を設け配管の保護と実験孔の損傷を防止する。
13. 容器の気密性は、信頼性の高いシールの方法により行い、ヘリウム漏洩率で $1 \times 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cc/sec}$ 以下とする。
14. 試験部容器の内径は、 100 mm ϕ 以上とする。
15. 各容器類および配管類の材料はステンレス鋼とする。

以上の条件を考慮し、Fig. 1 に示すような設計構造とした。

装置は、高さ約 $4,600 \text{ mm}$ 、外径約 200 mm ϕ で、下から試験部容器、加圧タンク、膨張タンクの順に容器類を配置した。試験部容器と加圧タンクを結ぶ主配管は、内径 $3/4$ インチとし、昇温時に試験部容器内の膨張水が加圧タンクに貯留されるための径路であり、途中にバルブを設けない構造とした。したがって装置の1次系耐圧部は、試験部容器と加圧タンクとで構成されることとなる。膨張タンクは、常温水約 800 mm の底部で1次系からの蒸気が細かい気泡となり攪拌するような構造とし、装置の2次系耐圧部を受持つこととなる。また、安全弁の吹出圧力は、試験部容器 $180 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、加圧タンク $175 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ また膨張タンク $10 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ と設定した。

4. 装置の概要

装置を構成する各機器の設計主要目を Table 1 に、強度評価を Appendix に示す。

装置を構成している各機器の概略を以下に示す。

4.1 試験部容器

試験部容器の組立図を Fig. 2 に示す。試験部容器は、試験燃料を装荷し容器内の水を加熱し高温高圧の状態を燃料をパルス照射するための容器である。本容器は主に容器本体（胴部）、試験

3. 装置の1次系耐圧部の設計圧力は、運転圧力（ 150 kg/cm^2 ）に加え燃料破損によって発生することが予想される衝撃圧力を考慮して $180 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とする。2次系耐圧部の設計圧力は、膨張タンクの安全弁の吹出し圧力を考慮し $10 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とする。
4. 装置の最高温度は、使用最高圧力 150 kg/cm^2 の飽和温度である約 $341 \text{ }^\circ\text{C}$ とする。
5. 装置は、試験部容器、加圧タンクおよび膨張タンクにより構成する。
6. 試験部容器に試験燃料を装填する。
7. 加圧タンクにより昇温による試験部容器内の水の膨張の吸収と蒸気圧による昇圧を行う。
8. 膨張タンクにより試験部容器および加圧タンクから安全弁を介して吹き出される蒸気等の凝縮ならびに貯留を行う。
9. 装置に設ける容器類には各々に安全弁を設ける。
10. 装置の昇温は、試験部容器および加圧タンクそれぞれに内蔵する電気ヒーターによって行う。
11. 装置を室温から定格温度（約 $341 \text{ }^\circ\text{C}$ ）まで昇温するために要する時間は、約 90 分を目標とする。
12. 容器間を結ぶ配管・弁類の部分には、保護外筒を設け配管の保護と実験孔の損傷を防止する。
13. 容器の気密性は、信頼性の高いシールの方法により行い、ヘリウム漏洩率で $1 \times 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cc/sec}$ 以下とする。
14. 試験部容器の内径は、 100 mm ϕ 以上とする。
15. 各容器類および配管類の材料はステンレス鋼とする。

以上の条件を考慮し、Fig. 1 に示すような設計構造とした。

装置は、高さ約 $4,600 \text{ mm}$ 、外径約 200 mm ϕ で、下から試験部容器、加圧タンク、膨張タンクの順に容器類を配置した。試験部容器と加圧タンクを結ぶ主配管は、内径 $3/4$ インチとし、昇温時に試験部容器内の膨張水が加圧タンクに貯留されるための径路であり、途中にバルブを設けない構造とした。したがって装置の1次系耐圧部は、試験部容器と加圧タンクとで構成されることとなる。膨張タンクは、常温水約 800 mm の底部で1次系からの蒸気が細かい気泡となり攪拌するような構造とし、装置の2次系耐圧部を受持つこととなる。また、安全弁の吹出圧力は、試験部容器 $180 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、加圧タンク $175 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ また膨張タンク $10 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ と設定した。

4. 装置の概要

装置を構成する各機器の設計主要目を Table 1 に、強度評価を Appendix に示す。

装置を構成している各機器の概略を以下に示す。

4.1 試験部容器

試験部容器の組立図を Fig. 2 に示す。試験部容器は、試験燃料を装荷し容器内の水を加熱し高温高圧の状態を燃料をパルス照射するための容器である。本容器は主に容器本体（胴部）、試験

用フランジポート（容器胴部の中央に設けた貫通孔），上部フランジ，加熱ヒータおよび温度計により構成されている。容器本体の薄肉胴部（肉厚 12 mm）のほぼ中央を貫通している試験用フランジポートは，主として高温高圧下で行うインパイル実験に用いられる各種計測機器の予備試験を行うために設けたものである。また容器の底部に内圧測定に用いる圧力計の取付座を設け，高温高圧用圧力計の特性を把握するために備えた。容器とフランジとのシールには，メタル中空 Oリング（SUS 304，銀メッキ）を用いた。当容器外部には，2分割した鉄板製構造材に断熱材をかねて 75 mm の MG フェルトを固定して使用した。本容器の上部フランジを貫通する加熱ヒータ，温度計および配管類は，隅肉溶接により接続した。

4.2 加圧タンク

加圧タンクの組立図を Fig. 3 に示す。加圧タンクは，昇温にともなう 1 次系内の膨張水の貯留と高温水の飽和蒸気圧による装置 1 次系内の加圧ならびに圧力調節を行うための容器である。タンクは，主として胴部，上下蓋，加熱ヒータ，温度計，圧力計および水位計により構成されている。本タンクは，上下蓋に蓋を貫通する主配管，ヒータおよび各種の計装用配管を隅肉溶接によって接続後，上下蓋と胴部とは突合せ溶接する構造とした。

4.3 膨張タンク

膨張タンクの組立図を Fig. 4 に示す。膨張タンクは，1 次系内の圧力が上昇し，試験部容器および加圧タンク各々に取り付けてある安全弁が作動した場合，安全弁より吹き出された蒸気を本容器内に導き，凝縮し貯留するための容器である。タンクは，タンクの胴部，上下蓋，温度計，圧力計およびサイレンサーにより構成されている。本タンクも加圧タンクの構造と同様，上下蓋に各種計装用管および配管を隅肉溶接により取り付け後，上下蓋をタンクの胴に突合せ溶接する構造である。安全弁より吹き出される高温の蒸気は，タンク内に挿入したサイレンサーを経てタンク内冷却水中に吹き込まれ，冷却水により急冷凝縮され貯留される。サイレンサーは，蒸気が細かい気泡となって冷却水中に吹き込まれるように取り付けたものである。

4.4 保護筒

保護筒は，各容器間を結ぶ配管部に設け，支持構造材の役目と，万一配管破損が生じても実験孔に損傷を与えないために設けたものである。従って，保護筒は，試験部容器と加圧タンクとを結ぶ配管部と加圧タンクと膨張タンクを結ぶ配管部 2 ヶ所に設けている。保護筒と各容器は相互にフランジ構造としボルトで連結している。

4.5 加熱ヒータ

1次系の冷却水を昇温昇圧し、高温高圧の状態を作り出すため、試験部容器および加圧タンクそれぞれにシース型の加熱用ヒータを設けている。試験部容器に用いたヒータは、U字形とした容量3.5 kW (200 V ; 単相)のもの2本を用いた。ヒータについては、発熱部を長くすることにより線出力密度を出来るだけ低くする設計とした。加圧タンクに用いたヒータは、発熱部を出来るだけ加圧タンクの底部に集合させる必要性から、螺旋状形状とした。

4.6 安全弁

試験部容器の安全弁組立図を Fig. 5 に、加圧タンクの安全弁組立図を Fig. 6 に、膨張タンクの安全弁組立図を Fig. 7 に示す。いずれも低揚程型のバネ式安全弁である。安全弁に用いた材料は、主として SUS 304 を用い特にバルブのシート面にはステライトを用いている。

4.7 運転計装

装置の運転計装は、Fig. 8 に示す制御系フローシートのとおり主に温度計、圧力計、水位計およびヒータ出力の制御回路等から構成されている。ヒータ出力の制御回路は、試験部容器と加圧タンクについて独立した2回路からなり、いずれもPIDコントローラーを用いている。試験部容器側は、試験容器内に取り付けた温度計からの入力信号によってヒータ出力を制御する温度制御回路とした。一方加圧タンク側は、タンク上部の飽和蒸気圧を計測している圧力計からの入力信号によってヒータ出力を制御する圧力制御回路とした。

5. 総合試験

5.1 試験目的

装置に用いる材料の健全性を確認するため、装置の主要部分に使用する材料(SUS 304)について材料試験(超音波探傷試験、液体浸透探傷試験、金相試験、化学分析試験、引張試験、曲げ試験、衝撃試験)を行った。また装置の健全性を確認するため、製作完了までに水圧試験、ヘリウム漏洩試験、放射線透過試験、液体浸透探傷試験、外観検査、寸法検査、絶縁抵抗試験、導通試験、絶縁耐力試験および作動試験を行った。

本項の総合試験は、上記試験結果にさらにインパイル実験用カプセルの設計資料を得る目的で実施した各種試験について述べるものである。

5.2 試験方法

試験は、Fig. 1 に示す装置の組立て、水の注入、昇温、冷却および排水等本装置に関する一連

4.5 加熱ヒータ

1次系の冷却水を昇温昇圧し、高温高圧の状態を作り出すため、試験部容器および加圧タンクそれぞれにシース型の加熱用ヒータを設けている。試験部容器に用いたヒータは、U字形とした容量3.5 kW (200 V ; 単相)のもの2本を用いた。ヒータについては、発熱部を長くすることにより線出力密度を出来るだけ低くする設計とした。加圧タンクに用いたヒータは、発熱部を出来るだけ加圧タンクの底部に集合させる必要性から、螺旋状形状とした。

4.6 安全弁

試験部容器の安全弁組立図を Fig. 5 に、加圧タンクの安全弁組立図を Fig. 6 に、膨張タンクの安全弁組立図を Fig. 7 に示す。いずれも低揚程型のバネ式安全弁である。安全弁に用いた材料は、主として SUS 304 を用い特にバルブのシート面にはステライトを用いている。

4.7 運転計装

装置の運転計装は、Fig. 8 に示す制御系フローシートのとおり主に温度計、圧力計、水位計およびヒータ出力の制御回路等から構成されている。ヒータ出力の制御回路は、試験部容器と加圧タンクについて独立した2回路からなり、いずれもPIDコントローラーを用いている。試験部容器側は、試験容器内に取り付けた温度計からの入力信号によってヒータ出力を制御する温度制御回路とした。一方加圧タンク側は、タンク上部の飽和蒸気圧を計測している圧力計からの入力信号によってヒータ出力を制御する圧力制御回路とした。

5. 総合試験

5.1 試験目的

装置に用いる材料の健全性を確認するため、装置の主要部分に使用する材料(SUS 304)について材料試験(超音波探傷試験、液体浸透探傷試験、金相試験、化学分析試験、引張試験、曲げ試験、衝撃試験)を行った。また装置の健全性を確認するため、製作完了までに水圧試験、ヘリウム漏洩試験、放射線透過試験、液体浸透探傷試験、外観検査、寸法検査、絶縁抵抗試験、導通試験、絶縁耐力試験および作動試験を行った。

本項の総合試験は、上記試験結果にさらにインパイル実験用カプセルの設計資料を得る目的で実施した各種試験について述べるものである。

5.2 試験方法

試験は、Fig. 1 に示す装置の組立て、水の注入、昇温、冷却および排水等本装置に関する一連

の取扱い操作をも含めて実施した。また、ヒータ容量、温度分布、熱膨張、安全弁の性能、高温高圧用圧力計の温度特性および水位計の性能についてのデータを収集した。

5.2.1 ヒータ容量確認試験

試験は、容器に内蔵した加熱ヒータの容量（試験部容器内7kW、加圧タンク内3kW）が、装置の定格運転を行うに足りうるもので、さらに十分な余裕があるかどうかを吟味するために実施した。

5.2.2 温度分布把握試験

装置各部の温度を測定する本試験は、装置に不均一な温度分布が生じていないことおよび装置各部の温度が、NSRRの実験孔の使用温度条件に適合することを確認するために実施した。本試験における温度の測定は、Fig.9に示す温度測定位置についてC.A熱電対を用いて計測した。

5.2.3 熱膨張量の把握試験

温度上昇とともに装置各部は熱膨張する。この熱膨張が設計通りであり、異常な変形や熱応力の発生がないことを装置の安全上の観点から調べるために本試験を実施した。

試験は、昇温と並行して行い、熱膨張量を外形寸法測定によって求めた。寸法測定は、Table.4に示すとおり容器の外径および長さ、保管筒の長さ、配管の外径および装置の全長を対象として実施した。

5.2.4 安全弁の性能

本装置に設けた安全弁は、実験の性格上非常に高い吹出設定圧力が要求される。にもかかわらず、実験孔内に装置全体が挿入される制限上小型化しなければならない。安全弁では、小型化と吹出圧力の設定精度とは相反する条件である。本試験では、運転状態において、安全弁の吹出圧力を確認し装置の安全上からも十分であることを確かめた。

5.2.5 高温高圧用圧力計の温度特性

装置に用いる圧力計は、装置の温度上昇にともなう圧力上昇を測定すると共に燃料破損にともなって発生する衝撃圧力の測定を兼ねるものである。特に、装置の運転監視用として使用する圧力計は、装置の昇温-冷却の繰返しが行われてもそれに十分追従し再現性良く、安定しているものでなければならない。従って圧力計の直線性および温度特性の把握が重要となる。今回試験に供した圧力計は、歪ゲージ型および磁歪型である。

5.2.6 水位計

水位計の試験は、加圧タンクの水位が温度上昇によって上昇する量を予め計算により求めておき、水位計のセット位置で警報の作動を確認する方法で実施した。

6. 総合試験の結果

6.1 ヒータ容量確認試験結果

Fig. 10 にヒータ容量確認試験の結果を示す。図に示すとおり、本装置を定格運転状態とするまでに要する時間は、試験部容器内の加熱ヒータ（容量；7 kW）単独で約 85 分であり、設計目標の 90 分に較べて満足のいく結果であり、ヒータ自体、これまでの約 25 回の使用にも十分耐えている。これにより実機に用い得る見通しを得た。

6.2 温度分布把握試験結果

Table 2, 3 に装置各部における温度測定結果を、Fig. 11 に装置の代表的な位置における測定結果を示す。図および表に示す結果は、装置を加熱ヒータのみによって、定格状態を越えさらに安全弁が作動するまで常温からステップ状に加熱し、その後自然冷却を行った過程で測定したものである。この温度測定結果から以下のことが確認された。

(1) 試験部容器と加圧タンクの温度

下部に位置する試験部容器内で水が加熱されるため、加圧タンクの温度は、試験部容器内の温度が約 105 °C になると上昇を開始する。約 150 °C 以降において、加圧タンク内水温は試験部容器内の温度とほぼ同じ値となる。

(2) 安全弁の作動による温度降下

1 次系容器内においては、安全弁の作動と同時に水の自己沸騰が生じる結果温度が約 15 ~ 25 °C 降下している。

(3) 冷却時間の相違

1 次系容器の冷却に要する時間は、Fig. 12 に示すとおり断熱材を取りつけた場合と取り外した場合とで大きく異なる。前者は、後者に比べて約 2 倍の時間を要する。また、温度降下の様子は、試験部容器および加圧タンクいずれも大差なかった。

(4) 表面温度と実験設備

装置の外表面温度が NSRR の実験孔の設計温度との関係上重要となることから測定した保護筒外表面温度は、最高 75 °C 程度であり、実験孔に対して悪影響を及ぼすことはない。しかし試験部容器底部の温度は、130 ~ 145 °C の範囲にあり設計目標の 80 °C 以下とするためには試験部容器底部の構造の変更を要することが明らかになった。

(5) 安全弁作動後の蒸気の凝縮

膨張タンクの外表面の温度測定の結果によれば、安全弁が作動するとともに、膨張タンク内に高温の蒸気が吹き込まれるため、約 10 分間にわたり急激な温度上昇を示す。その後 1 時間程度緩やかな温度上昇があり最高温度は、約 95 °C に達している。しかし、膨張タンクの内圧は全然上昇せず、安全弁の作動前の値であった。以上のことから、膨張タンクに取り付けたサイレンサー

(高温蒸気を常温水中に細かいあわ状にして良く混合させ凝縮させるために用いた)の効果は、十分であると考えられる。この結果からサイレンサーをインパイル用実験装置に活用することによって膨張タンクの容量を小さくすることが可能となり、装置の全長を短かくできるとともに若干の軽量化への見通しが得られた。

(6) 断熱材

Fig. 13 に断熱材部 (MG フェルト) における装置の径方向の温度分布を示す。容器内の温度は、約 12 mm の容器壁によって約 10 °C 降下し、その後は断熱材内で急激に降下している。しかし、MG フェルトをインパイル実験装置の断熱材として使用する場合は、インパイル装置表面の温度を 100 °C 以下とする制限を満たすためには断熱材の厚さが約 50 mm 以上となることから構造上むづかしいものと判断されている。したがって、さらに優れた断熱材の選択ならびに構造の改善が必要である。

(7) 軸方向温度分布

装置の容器、保護筒および配管の軸方向温度分布は、Fig. 14 に示すとおり容器両端および保護筒と容器の接続部等を除けば、平坦な温度分布が得られた。この結果から実際にインパイル実験で試験燃料棒を固定し照射する試験部容器の水温は、ほぼ一様とみなして良いと推定できる。

(8) フランジボルトに発生する熱応力の評価

高温高圧下で用いられるボルトは、一般に容器などに比較して熱膨張係数の小さい材料を選定する。今回同装置 (試験部容器のフランジボルト) に用いたボルト材 (SCM 3) は、Fig. 15 に示すとおり容器材 (SUS 304) よりも約 25 ~ 30 % 熱膨張量が小さい。

今回の試験においては、装置の昇温にともないボルトに作用する熱的な負荷荷重を把握するため、Fig. 16 に示す方法でボルト部の温度を測定し、ボルト強度を評価した。

ボルトのほぼ中心位置で測定された温度は、フランジ上面で測定した温度よりも約 15 °C 低い結果であった。したがって、フランジ部の膨張を迎え込む状態となり、ボルトに作用する応力としては若干大きめとなることが判明した。

$$\sigma / E \alpha T = -1 \quad \dots\dots(1)$$

但し σ ; 熱応力	(kg / mm ²)
E ; 材料の縦弾性係数	(kg / mm ²)
T ; 温度変化	(°C)
α ; 材料の膨張係数	(mm / mm · °C)

また、ボルトに発生する熱応力としては、容器フランジの膨張がボルトの膨張を上廻ることから、初期締付時にさらに張力が作用すると考えられる。この場合についてボルトに作用する熱応力を(1)式により評価すると約 32 kg / mm² となり、一般のボルトの場合と比して若干大きい結果となる。ボルトは、締付応力および熱応力等がボルトの許容応力以下であることから十分な強度を有していることがわかった。

6.3 熱膨張量の把握試験結果

本試験によって得られた装置各部の熱膨張量を Table 4 および Fig. 17 に示す。熱膨張量は、

いずれも材料の熱膨張量に相当しており、装置の局所において過大な熱応力の発生はないものと思われる。しかし、装置全体の伸び量は、約 13 mm (装置内温度約 320 °C の時) となり、今後、インパイル用実験装置の場合さらに装置の伸び量が大きくなることを十分に配慮し、昇温時の装置の全伸び量を吸収可能な構造とする必要があることが確認された。

6.4 安全弁の性能試験結果

本装置に用いた安全弁は、非常に小型化し高い吹出圧力を設定したものである。従って、安全弁としての機能ならびに性能が十分であることを確認し装置の安全を確保するため、装置を運転し安全弁を実動させる試験を行った。Fig. 18 に示すとおり加圧タンク付安全弁の吹出圧力は、設計時の設定圧力 175 kg/cm² に対し 150 kg/cm² であり、吹き止まりでの圧力降下は約 35 kg/cm² であった。設定圧力に対する吹き出し圧力の降下現象は、装置製作後から徐々に現われ 10 回程度の動作回数まで続いたが、その後現在にいたるまでの 15 回程度ではさほどの変化もなく安定した。また吹き止まり圧力も吹出圧力の降下に伴いほぼスライドした形で降下したが、現在は、25 kg/cm² 前後に安定している。

また、安全弁の弁座は作動する毎に損傷しやすく、一般的には、今回のように再三にわたる実動試験を行わないのが常であろうと思われる。それにもかかわらず、本安全弁は繰返し運転にも耐え、また弁座からの漏洩もなく健全であった。以上のことから、本安全弁はインパイル用同装置に対しても十分に活用できる見通しを得た。

6.5 高温高圧用圧力計の温度特性試験結果

装置を運転し、今回同装置の圧力計として用いた歪ゲージ型圧力計と試験用として準備した磁歪型圧力計とについてブルドン管式圧力計の指示と比較しさらに容器内の温度から求めた飽和蒸気圧とも比較した。その結果を Fig. 19, 20 および Fig. 21 に示す。その結果、センサー出力の直線性や昇温過渡時の温度ドリフトに関しては、±3% 程度 (直線性) および ±15% 程度 (温度ドリフト) の精度であった。しかし、磁歪型圧力計の場合ケーブルを延長するとノイズが大きくなることからインパイル用装置ではケーブルの途中に増幅器を増設しなければならないことがわかった。また、歪ゲージ型圧力計は改良をほどこした結果、測定精度を ±3% 以内 (Fig. 21) にすることができ、今後のインパイル用装置に活用の見通しを得た。

6.6 水位計の試験結果

高温高圧用として今回用いた水位計は、浮子式磁気感知型で約 290 °C までの使用に耐えることが判明した。しかし、300 °C 以上になると水の比重の低下にともなって浮子自体が沈むと共に、材料によっては浮子が焼損することが判明し、これらは今後の開発課題として残された。尚、その後水位計の開発を重ねた結果、マイクロヒータ表面に熱電対を取り付け容器内温度とマイクロヒータの表面温度との差から水位を確認する方法を独自*に開発した。本装置に取り付け試験した

*特許出願済

結果は良好であった。

7. 検 討

総合試験の結果、本試作カプセルは、以下に述べる2～3の点を除いて当初の計画通り十分満足すべき結果であり、インパイルカプセルの設計・製作に自信を得た。しかしながら、今回の試験を通じ尚一層の改善や改良点を見出された点もあるので、これらを総合して以下に誌すこととする。

7.1 水 位 計

水位計として当初計画した浮子式のもの、約290℃の飽和温度で沈み使用不能となった。高温高压用の水位計としては、独自に開発（特許出願No.53-117894）したマイクロヒータ方式のものは安定しており、今後活用できるものと期待される。

7.2 圧 力 計

室温より高温高压の状態まで昇温・昇圧される装置において圧力計の圧力検出部も昇温される場合、圧力計の測定精度を高めることはむずかしい。従って、圧力計検出部における昇温曲線と圧力計指示値の変化量との関係进行评估し、その結果をもとに増幅器を改造するかまたは、ケーブルで用いるコネクタにコンデンサーや抵抗を取りつけたりする補修をおこない、検出器としての性能を十分に発揮させることが必要であろう。

7.3 計装線の容器貫通部

装置の容器内から計装信号線を取り出す場合の容器貫通部に当所、セラミック材をシール材とするコナックスシールを用いた。本コナックスシールのシール材は、昇温時ほぼそのシール性能を有した。しかし、装置の運転を停止し冷却すると、装置内が未だ約250℃という高温の状態にもかかわらず、コナックスシール部より蒸気が噴出し、内部水がほとんど放出された。加えて、コナックスシールを容器フランジにテーパネジによるネジ込み取付構造とした部分では、約300℃で蒸気の漏洩が確認された。さらにテーパネジ部に各種のシール材を用いてみたが300℃の壁は厚く脱しきれなかった。その結果をもとにシール部は、金属Oリングを主に用いる構造に変更し成功した。

7.4 試験部容器内ヒータの取付方法

試験部容器内のヒータは、発熱長を長くするために、容器内底部でU字形の2本が十字型にク

結果は良好であった。

7. 検 討

総合試験の結果、本試作カプセルは、以下に述べる2～3の点を除いて当初の計画通り十分満足すべき結果であり、インパイルカプセルの設計・製作に自信を得た。しかしながら、今回の試験を通じ尚一層の改善や改良点を見出された点もあるので、これらを総合して以下に誌すこととする。

7.1 水 位 計

水位計として当初計画した浮子式のもの、約290℃の飽和温度で沈み使用不能となった。高温高压用の水位計としては、独自に開発（特許出願No.53-117894）したマイクロヒータ方式のものは安定しており、今後活用できるものと期待される。

7.2 圧 力 計

室温より高温高压の状態まで昇温・昇圧される装置において圧力計の圧力検出部も昇温される場合、圧力計の測定精度を高めることはむずかしい。従って、圧力計検出部における昇温曲線と圧力計指示値の変化量との関係进行评估し、その結果をもとに増幅器を改造するかまたは、ケーブルで用いるコネクタにコンデンサーや抵抗を取りつけたりする補修をおこない、検出器としての性能を十分に発揮させることが必要であろう。

7.3 計装線の容器貫通部

装置の容器内から計装信号線を取り出す場合の容器貫通部に当所、セラミック材をシール材とするコナックスシールを用いた。本コナックスシールのシール材は、昇温時ほぼそのシール性能を有した。しかし、装置の運転を停止し冷却すると、装置内が未だ約250℃という高温の状態にもかわらず、コナックスシール部より蒸気が噴出し、内部水がほとんど放出された。加えて、コナックスシールを容器フランジにテーパネジによるネジ込み取付構造とした部分では、約300℃で蒸気の漏洩が確認された。さらにテーパネジ部に各種のシール材を用いたが300℃の壁は厚く脱しきれなかった。その結果をもとにシール部は、金属Oリングを主に用いる構造に変更し成功した。

7.4 試験部容器内ヒータの取付方法

試験部容器内のヒータは、発熱長を長くするために、容器内底部でU字形の2本が十字型にク

ロスした構造である。しかし、インパイル用装置では試験燃料を毎々取付、取外しすることからヒータをクロスさせるような設計とすることはできない。従って、ヒータの発熱長も必然的に短くなる結果ヒータの数を増やし、ヒータ1本あたりの出力容量を少なくする必要があるだろう。

7.5 試験部容器と加圧タンク間の構造

試作装置は、試験燃料の取付、取外し作業を行うためには試験部容器のフランジ部を装置の分離位置とすることで設計を進めた。NSSRの実験設備との取合および装置取扱いの容易さを考えると試験部容器と加圧タンクの間で装置を分離可能な構造とする必要があるだろう。そして試験部容器を何基か製作すれば交互に使用できることから実験が便利である。

7.6 加圧タンクの容量

本装置における加圧タンクは、容量が若干不足し、初期水位の確認に困難を生じた。今後の設計時は、加圧タンクの容量は、下方の試験部容器の容量と同等以上とする必要があることがわかった。

7.7 試験部容器下部の構造

試験部容器下部（NSRRグリッピング装置との接続部）は、装置の定格運転時に100℃を越えており、熱反射用断熱材を取り付ける構造とし温度を下げる必要がある。

7.8 断熱材

今回用いたMGフェルト製の断熱材は、断熱効率があまりすぐれておらず他のものを計画する必要がある。多分ミラーインシュレータを用いた設計とすれば、今回よりもさらに良い断熱材としての性能を発揮するであろう。

7.9 装置の運転計装

装置の運転は、温度制御系統と圧力制御系統、いずれも独自に電力を制御する方法を採用した。しかし、加圧タンクの温度が試験部容器の温度を下まわり、下方の試験部容器内で沸騰のおこらないような安全回路を設けることがより望ましい。また、本装置にはヒータに印加されている電圧・電流の指示計を設けていないが、インパイル用装置には設けることが望ましい。

Table 1 試作試験装置の設計主要目

項 目	単 位	試験部容器	加圧タンク	膨張タンク	保 護 筒
型 式		円筒縦型	円筒縦型	円筒縦型	2分割円筒縦型
設 計 圧 力	kg/cm ² G	180	180	10	
設 計 温 度	℃	356	356	183	
使 用 材 質		SUS 304	SUS 304	SUS 304	SS 41
内 容 積	ℓ	6.9	4.5	20	
外 径	mm	200	124	165	200
内 径	mm	100	100	143	182
最小肉厚部厚さ	mm	12	12	11	9
全 長	mm	950	660	1,500	685
安全弁の材質		SUS 304	SUS 304	SUS 304	—
安全弁吹出設定圧力	kg/cm ² G	180	175	10	—
安全弁の吹出口径	mm	3	3	16	—
容器保温材厚さ	mm	75	75	0	—
容器保温材質		MGフェルト	MGフェルト	なし	—
配管保温材質		石綿	石綿	なし	—
加熱ヒータ型式		U字型	螺旋型	—	—
ヒータの容量	kW	7 (3.5 × 2本)	3 (1.5 × 2本)	—	—
ヒータの出力密度	W/cm ²	5.1	5.1	—	—
ヒータの外径	mm	14	12	—	—
ヒータの全長	mm	1,950	1,140	—	—
ヒータの使用電源	V	200 (単相)	200 (単相)	—	—
ヒータの被覆材質		SUS 304	SUS 304	—	—
温 度 計		C/Aシース型	C/Aシース型	C/Aシース型	C/Aシース型
温度計の外径	mm	3.2	1.6	1.6	1.6
温度計の被覆材質		SUS 316	SUS 316	SUS 316	SUS 316
圧力計の型式			PHT - 200	—	—
圧力計の容量	kg/cm ²		200	—	—
圧力計の応答周波数	Hz		10 K以上	—	—
水位計の型式			磁気感知式	磁気感知式	—

Table 2 温度分布測定結果

T/C 測定 場所	時刻	12:30	12:47	13:00	13:10	13:27	13:55	14:15	14:40	15:00	15:20	15:40	15:57	16:13	16:37
	容器内 温度℃	0	50	100	123	153	177	204	227	250	275	300	319	328	314
1	8	10	23	37	79	103	117	137	165	176	194	209	221	230	
2	7	17	61	93	137	162	185	210	242	258	281	300	310	308	
3	8	23	89	116	146	172	196	222	257	273	297	317	326	320	
4	9	43	94	114	144	171	196	221	253	272	296	316	325	318	
5	10	46	96	115	145	173	197	223	252	273	298	317	326	318	
6	10	49	99	117	147	174	198	224	256	275	298	318	327	319	
7	16	49	99	119	148	174	198	223	252	272	296	315	325	318	
8	16	30	80	110	143	175	197	221	252	271	296	314	326	327	
9	17	23	51	82	122	164	183	207	239	256	280	299	312	320	
10	21	21	24	106	141	166	189	213	240	258	280	298	306	297	
1	24	23	23	49	140	165	188	212	239	257	278	295	304	294	
2	24	24	24	26	120	159	185	210	241	255	276	294	303	293	
3	16	22	22	24	56	119	163	199	235	253	276	294	303	294	
4	19	24	50	89	134	167	210	232	253	269	301	321	323	315	
5	21	31	67	98	127	151	172	223	220	234	253	272	280	270	
6	22	32	73	107	129	148	167	190	217	235	258	282	292	282	
7	23	30	64	105	131	153	174	197	224	238	263	279	288	279	
8	24	28	61	109	136	159	180	202	232	247	266	283	292	282	
9	25	27	56	112	139	162	183	206	236	253	272	291	300	289	
20	24	24	25	44	72	94	98	114	141	152	167	182	191	194	
1	24	25	49	112	139	160	181	203	232	248	267	285	294	285	
2	24	25	49	113	142	164	184	208	239	255	275	293	303	293	
3	23	24	41	92	117	135	148	168	194	208	219	233	240	232	
4	24	25	42	98	124	144	161	182	211	222	240	256	266	258	
5	22	24	39	105	132	152	169	191	219	230	247	264	271	262	
6	22	23	34	99	127	147	165	187	218	230	248	265	274	265	
7	23	23	32	95	123	142	160	181	208	220	236	251	259	250	
8	22	23	30	98	133	154	173	197	228	242	260	278	286	279	
9	22	22	28	93	135	157	177	201	234	246	266	285	294	284	
30	19	20	21	36	100	145	162	185	234	243	246	261	273	277	
1	18	19	22	70	146	171	195	221	254	271	295	315	325	317	
2	16	17	18	70	143	164	190	217	250	266	288	308	319	309	
3	16	17	17	62	136	164	191	221	255	271	294	314	324	313	
4	17	18	18	19	112	162	189	218	251	268	291	311	321	310	
5	19	20	20	20	85	161	190	220	253	271	294	314	324	314	
6	20	21	20	20	90	139	166	199	249	259	273	291	301	295	
7	20	21	21	20	36	132	154	185	237	246	255	274	283	272	
8	30	22	22	21	30	129	—	139	183	203	210	225	234	224	
9	23	23	22	22	26	85	108	124	175	201	208	225	231	219	
40	24	23	23	22	24	54	71	109	166	215	243	280	287	276	
1	23	23	22	23	23	27	29	38	58	69	86	127	131	134	
2	22	22	22	21	22	25	25	32	46	48	58	99	101	107	
3	23	23	22	22	24	28	29	35	48	46	54	76	83	88	
4	22	22	21	22	23	26	26	32	46	45	51	81	87	97	
5	22	22	22	21	22	25	26	31	44	44	51	82	88	103	
6	20	21	20	20	20	23	23	27	38	35	37	46	58	89	
7	25	24	23	22	24	28	31	36	47	47	52	56	63	72	
8	26	25	24	24	25	30	33	38	51	49	52	55	59	65	
9	20	20	20	19	21	23	21	24	36	31	33	41	53	87	
50	19	20	20	19	20	22	19	23	35	29	29	33	50	85	
1	23	24	23	22	23	26	23	27	38	31	28	33	39	83	
2	27	27	26	25	27	29	29	31	40	35	34	35	35	37	
3	28	28	27	27	28	31	31	33	40	36	35	36	36	36	
4	32	30	29	28	29	34	34	35	42	38	38	37	37	36	
5	9	10	13	13	21	44	53	64	84	85	96	107	116	128	
6	9	37	84	93	123	155	179	207	242	260	284	306	316	308	
7	8	9	9	12	21	46	57	70	89	94	105	117	128	141	
8	9	16	10	12	21	45	55	67	85	90	101	112	123	135	
9	1	1	1	22	73	111	134	160	192	206	228	246	257	260	
60	15	18	16	19	40	74	90	108	135	143	161	174	185	192	
1	19	19	17	17	28	51	61	72	92	94	105	113	120	126	
2	10	30	66	83	109	137	159	186	219	234	262	282	294	289	
3	12	15	22	49	69	96	114	136	167	195	206	227	241	247	
4				30	43	65	79	98	122	132	155	174	188	201	
5		T/C	断	線											
6						174	199	228	261	277	303	325	335	321	

Table 3 温度分布測定結果

T/C 測定 場所	時刻	16:45	17:6	17:20	17:46	18:20	18:56	19:36	20:30	29:30	22:30	23:25
	容器内 温度℃	297	267	250	225	200	178	158	135	116	101	88
1		221	198	188	171	148	130	114	96	80	69	60
2		289	251	233	207	179	157	136	114	95	82	70
3		303	271	254	230	200	177	155	132	110	95	84
4		303	269	253	229	200	176	154	131	110	95	84
5		301	269	251	226	198	175	153	129	109	94	83
6		303	270	253	230	200	176	154	131	110	95	84
7		302	269	252	227	199	177	157	134	114	100	88
8		312	277	259	233	205	182	161	139	118	103	91
9		310	278	260	233	205	182	161	138	117	102	90
10		283	254	237	216	189	168	148	121	94	71	61
1		280	250	233	211	185	163	142	105	68	44	39
2		280	249	234	211	183	155	123	76	42	33	30
3		278	246	230	200	162	125	87	54	38	32	29
4		300	266	250	224	197	174	154	132	111	96	85
5		256	266	213	192	169	150	133	114	97	85	75
6		268	239	226	203	178	157	140	120	102	89	78
7		266	235	221	199	175	155	137	118	100	88	77
8		268	238	224	202	178	158	139	120	102	89	78
9		274	244	229	208	183	162	143	123	105	91	80
20		179	154	142	125	106	94	83	71	59	51	45
1		271	241	226	206	181	161	142	122	104	91	80
2		278	248	233	211	185	164	145	125	106	92	81
3		220	197	183	166	146	129	113	98	83	73	64
4		254	219	206	186	164	145	128	110	94	82	73
5		248	224	211	192	168	149	132	113	96	84	74
6		251	226	213	193	169	150	133	114	97	85	75
7		237	212	199	181	159	142	125	108	93	81	72
8		262	235	221	200	175	155	137	117	100	87	76
9		268	241	227	206	181	160	142	122	104	90	80
30		266	239	224	202	177	157	139	119	101	87	77
1		300	269	254	229	201	178	157	135	115	99	87
2		292	263	248	224	196	174	153	132	112	98	86
3		296	266	251	226	198	176	155	133	113	98	86
4		294	263	248	224	196	174	154	132	112	97	85
5		297	266	251	226	198	175	155	133	113	98	85
6		280	252	248	214	188	166	147	126	103	89	77
7		258	241	227	206	179	159	140	121	94	79	67
8		212	198	186	170	148	132	116	100	69	53	44
9		207	193	182	163	141	125	110	95	57	43	36
40		262	237	223	201	177	157	138	115	54	41	34
1		132	130	130	124	119	108	93	75	51	40	34
2		107	110	112	111	99	88	78	65	49	39	34
3		88	92	94	92	81	73	65	55	43	36	31
4		97	102	104	103	88	79	70	60	47	39	34
5		104	107	110	110	93	83	74	63	49	41	36
6		93	98	101	97	86	78	70	61	52	45	40
7		76	79	82	79	71	65	58	52	43	38	34
8		67	71	74	72	65	59	54	48	41	36	32
9		89	93	95	90	82	75	69	61	52	46	41
50		87	92	95	91	83	77	70	63	55	49	45
1		86	92	94	90	82	74	67	60	53	47	43
2		38	44	47	49	48	45	42	38	33	30	28
3		36	38	40	42	41	39	36	33	29	27	24
4		36	36	37	36	34	32	30	28	25	23	21
5		130	129	127	119	106	95	85	73	61	53	47
6		294	267	253	229	200	175	154	132	111	96	85
7		144	144	142	133	118	105	94	80	67	58	51
8		138	138	136	127	114	101	90	78	65	56	49
9		247	221	208	184	158	136	119	100	84	72	62
60		187	169	160	140	118	102	89	76	63	54	47
1		124	115	110	96	82	71	62	53	45	39	34
2		275	248	236	212	184	161	141	119	99	86	76
3		239	218	206	186	160	139	120	101	84	73	64
4		198	185	177	159	136	117	101	85	70	61	53
5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6		303	272	258	235	206	183	161	139	118	102	90

Table 4 熱膨張量測定結果

単位 (mm)

測定場所 \ 容器内温度 (°C)	初期値 19.2	61	100	150	200	250	300
試験部容器 薄肉胴部外径	124.35	124.6	124.5	125.0	124.85	124.9	125.1
	124.4	124.5	124.6	124.7	124.75	124.9	125.2
	124.4	124.55	124.7	124.9	124.85	125.0	125.2
試験部容器 厚肉胴部外径	199.3	199.3	199.55	199.6	199.75	200.5	200.25
配管外径	21.8	21.9	21.9	22.1	21.9	21.95	22.15
	21.1	21.3	21.25	21.3	21.25	21.3	21.25
	21.6	21.6	21.6	21.6	21.7	21.65	21.7
試験部容器薄肉胴部の全長	651.7	651.9	652.9	653.9	654.5	655.4	656.2
保護筒の全長	682.6	682.6	682.8	682.9	683.0	683.3	683.6
加圧タンクの全長	658.8	658.8	659.0	660.4	661.0	661.5	662.3
加圧タンク 接続フランジ部外径	197.4	197.4	197.2	197.6	197.9	198.0	198.2
装置の全長	0	0.3	2.4	5.6	7.4	9.7	12.2

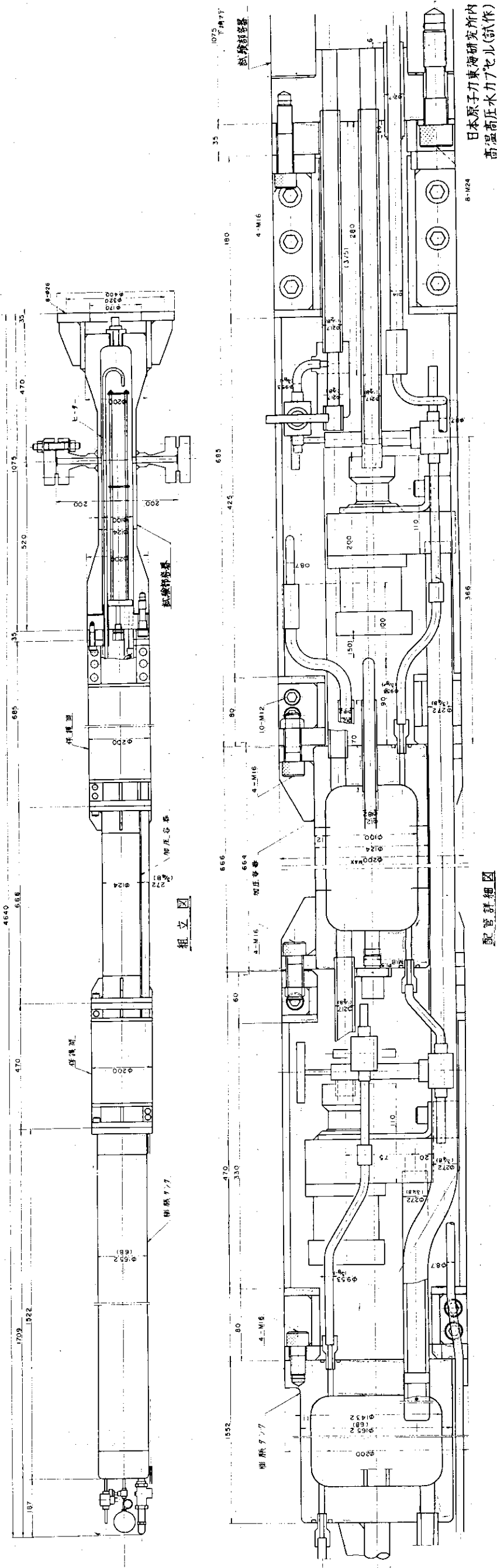
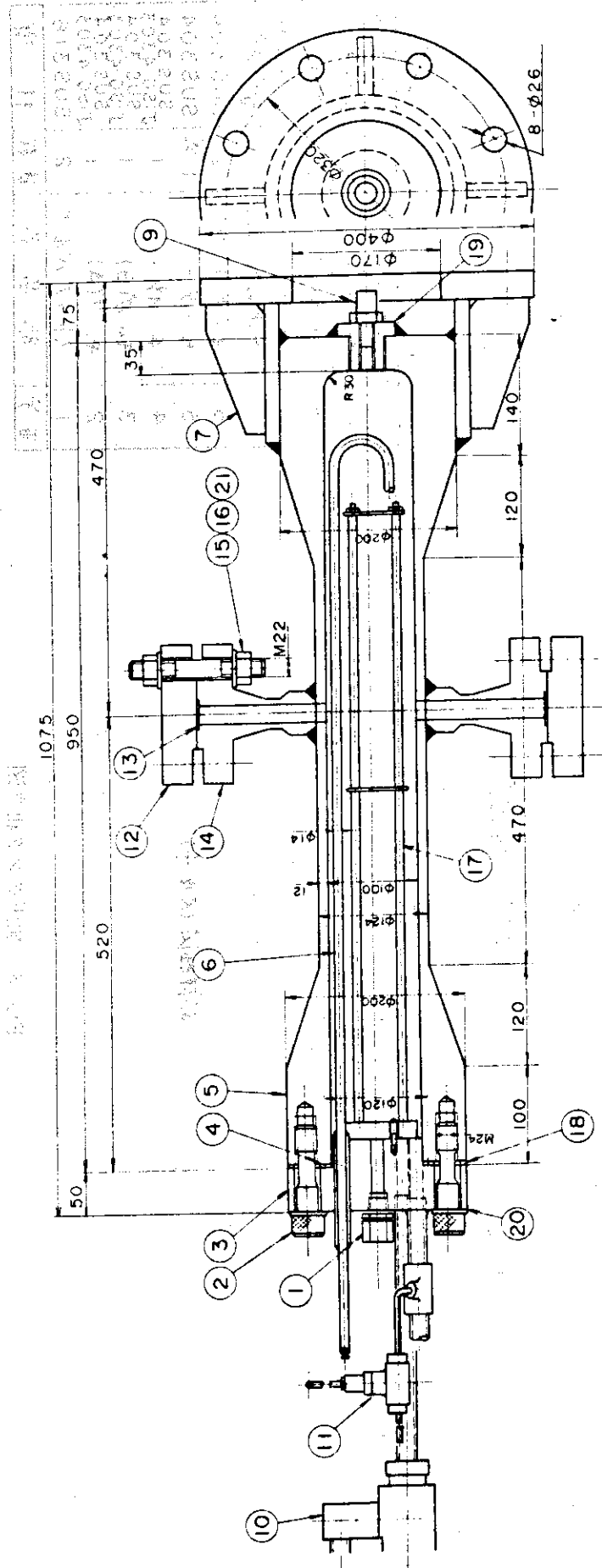


Fig. 1 試作高温高圧水カプセル全体組立図

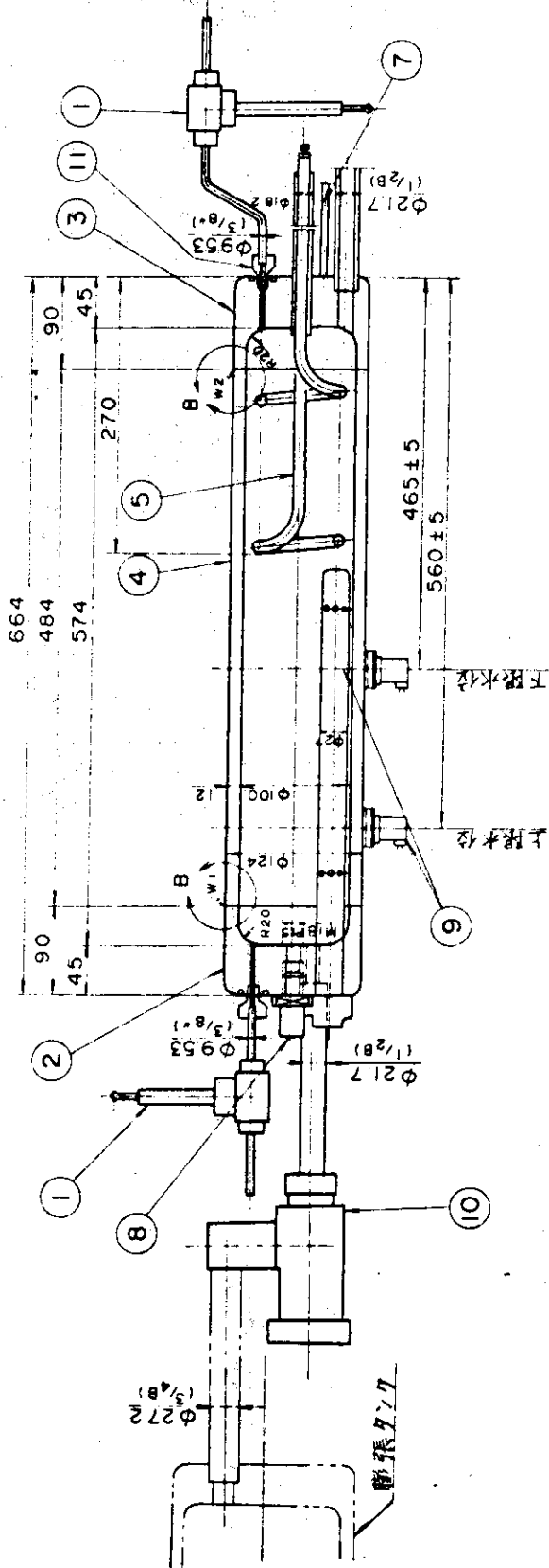


試験部容器詳細図

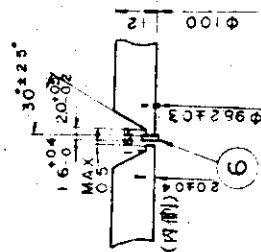
番号	部品名	買数	備考
12	メッキワッシャー	2	SUS304 JISG4303
11	ストップバルブ	1	SUS316
10	安全弁	1	SUS304
9	センサー	1	SUS
8	ベア入	1	SUS304
7	ヒーター	1式	SUS304
6	本体	1	SUS304 JISG4303
5	燃料中空Oリング	1	JISG4303
4	カバー	1	SUS304 JISG4303
3	六角穴付棒材(M24)	8	SCM3
2	コナック入シール	1	SUS

番号	部品名	買数	備考
21	M22ワッシャー	8	SUS304
20	M24ワッシャー	8	SUS304
19	センサー用アラガ	1	SUS304
18	リチウムプレート	1	SUS304
17	燃料支持金具	1式	SUS304
16	ナット(M22)	16	S45C
15	入射棒材(M22)	8	SCM3
14	管台(1B)	2	SUS304 JISG4303
13	燃料中空Oリング	2	JISG4303 φ16 B23

Fig. 2 試験部容器組立図



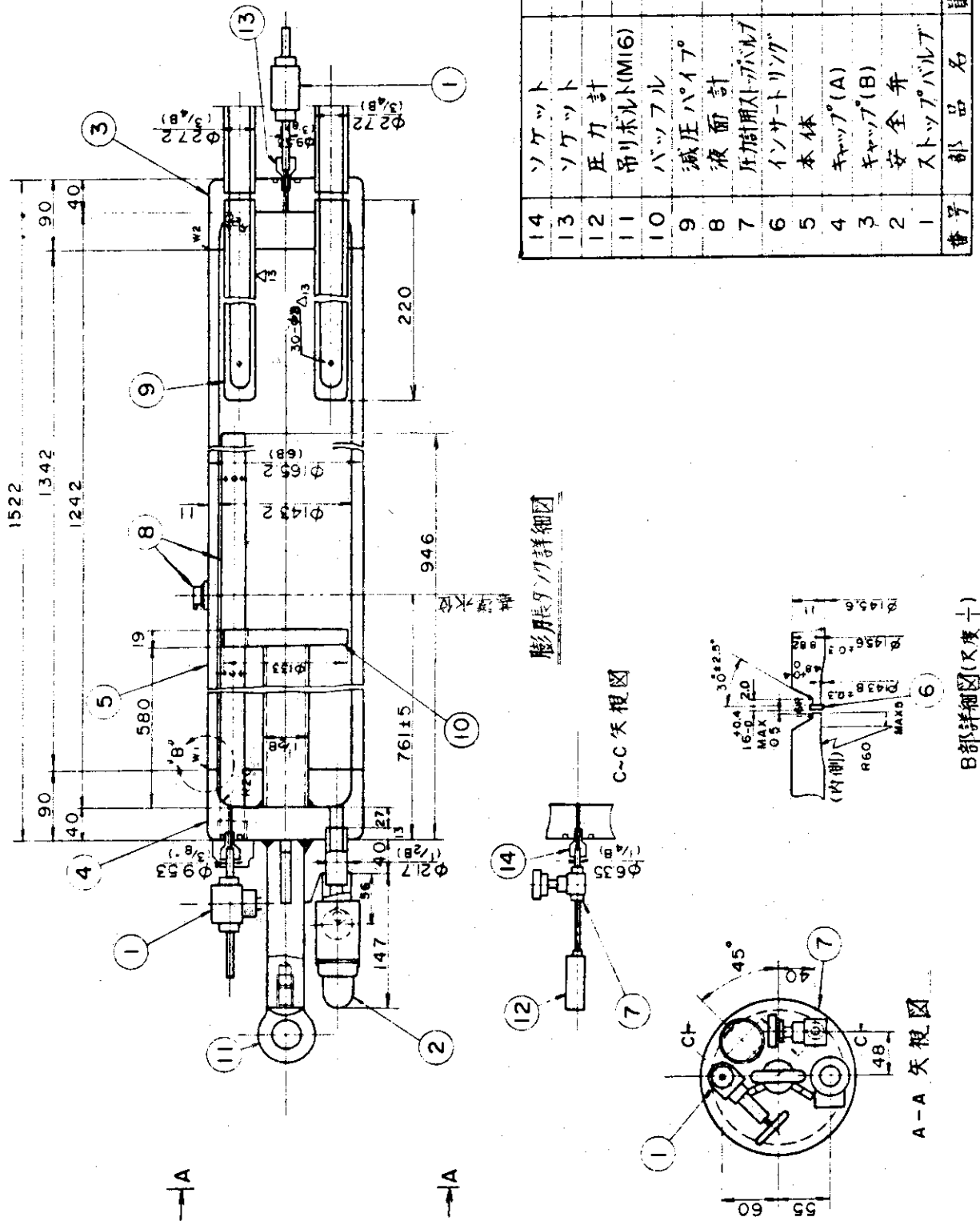
加圧タンク詳細図



B部詳細図 (尺度十)

番号	部品名	目数	材質
11	ソケット	2	SUS304
10	安全弁	1	SUS304
9	液面計	1	電磁式
8	センサー	1	SUS304
7	熱電対(ケルビン)	1	SUS304 φ48C-A
6	インサートリング	2	SUS304
5	ヒーター	1	SUS304
4	本体	1	SUS304 JISG 4303
3	キャップ(B)	1	SUS304 JISG 4303
2	キャップ(A)	1	SUS304 JISG 4303
1	ストッパバルブ	2	SUS316

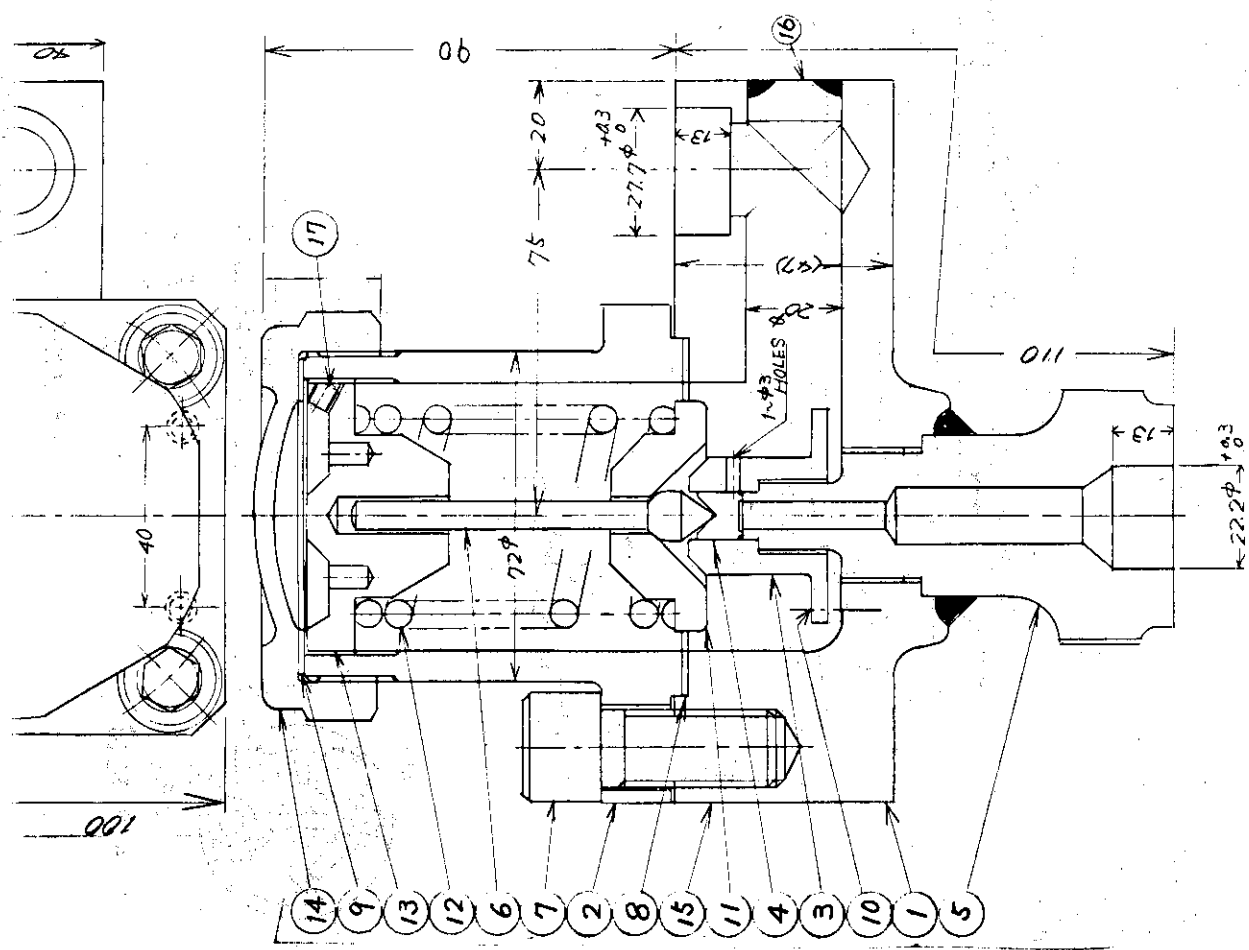
Fig. 3 加圧タンク組立図



番号	部品名	目数	材質
14	ソケット	1	SUS 304
13	ソケット	2	SUS 304
12	圧力計	1	
11	吊りホルト(M16)	1	SR 55E
10	バックル	1	SUS 304
9	減圧パイプ	2	SUS 304
8	液面計	1式	電機式
7	圧加管用パイプ	1	1/4B SUS 304
6	インサートリング	2	SUS 304
5	本体	1	SUS 304TP
4	キャップ(A)	1	JISG 3459 SUS 304
3	キャップ(B)	1	JISG 4303 SUS 304
2	安全弁	1	JISG 4303 SUS 304
1	ストロップバルブ	2	SUS 316

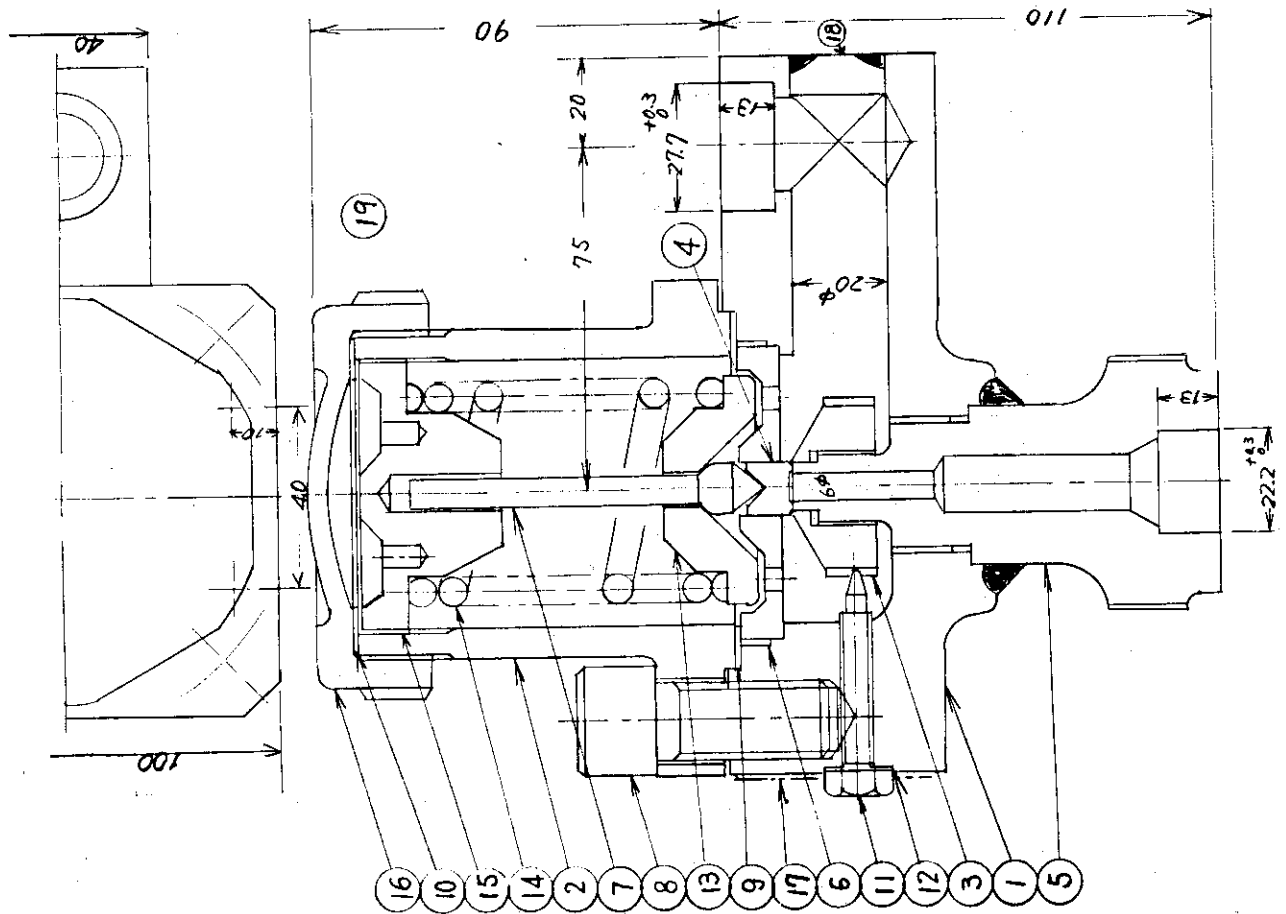
B部詳細図(×度十)

Fig. 4 膨張タンク組立図



NO	PARTS NAME	MATERIAL	QUANTITY
1	BODY	SUS 304	1
2	BONNET	SUS 304	1
3	GUIDE	ABB 2	1
4	VALVE DISC	STELLITE	1
5	SEAT	SUS 304	1
6	STEM	SUS 304	1
7	BOLT	SCM 3	4
8	PACKING	V# 1501	1
9	PACKING	V# 1501	1
10	SET SCREW	SUS 304	1
11	SPRING SUPPORT	SUS 304	1
12	SPRING	SUS 304	1
13	ADJUSTING SCREW	ABB 2	1
14	CAP	SUS 304	1
15	NAME PLATE	SUS 304	1
16	BUSH	SUS 304	1
17	SET SCREW	SUS 304	1

Fig. 5 試験部容器用安全弁組立図



1	BODY	SUS 304	1
2	BONNET	SUS 304	1
3	ADJUSTING RING	ABB 2	1
4	VALVE DISC	STELLITE	1
5	VALVE SEAT	SUS 304	1
6	BUSH	ABB 2	1
7	STEM	SUS 304	1
8	BOLT	SCM 3	4
9	PACKING	V# L%)L	1
10	PACKING	V# 1501	1
11	SET SCREW	SUS 304	1
12	PACKING	V# 1501	1
13	SPRING SUPPORT	SUS 304	1
14	SPRING	SUS 304	1
15	ADJUSTING SCREW	ABB 2	1
16	CAP	SUS 304	1
17	NAME PLATE	SUS 304	1
18	BUSH	SUS 304	1
19	SET SCREW	SUS 304	1

Fig. 6 加圧タンク用安全弁組立図

NO	PARTS NAME	MATERIAL (JIS)	QUANTITY
1	VALVE	SUS304	1
2	VALVE SEAT	SUS304	1
3	ADJUSTING RING	ABB 2	1
4	STEM	SUS304	1
5	SET SCREW	SUS304	1
6	ADJUSTING SCREW	ABB 2	1
7	NUT	ABB 2	1
8	LINER	ABB 2	1
9	COVER	SUS304	1
10	COVER	SUS304	1
11	CAP	SUS304	1
12	SPRING SUPPORT	SUS304	1
13	SPRING SUPPORT	SUS304	1
14	SPRING	SUS304	1
15	PACKING	V#1501	1
16	PACKING	V#1501	1
17	PACKING	V#1501	1
18	NAME PLATE	SUS304	1

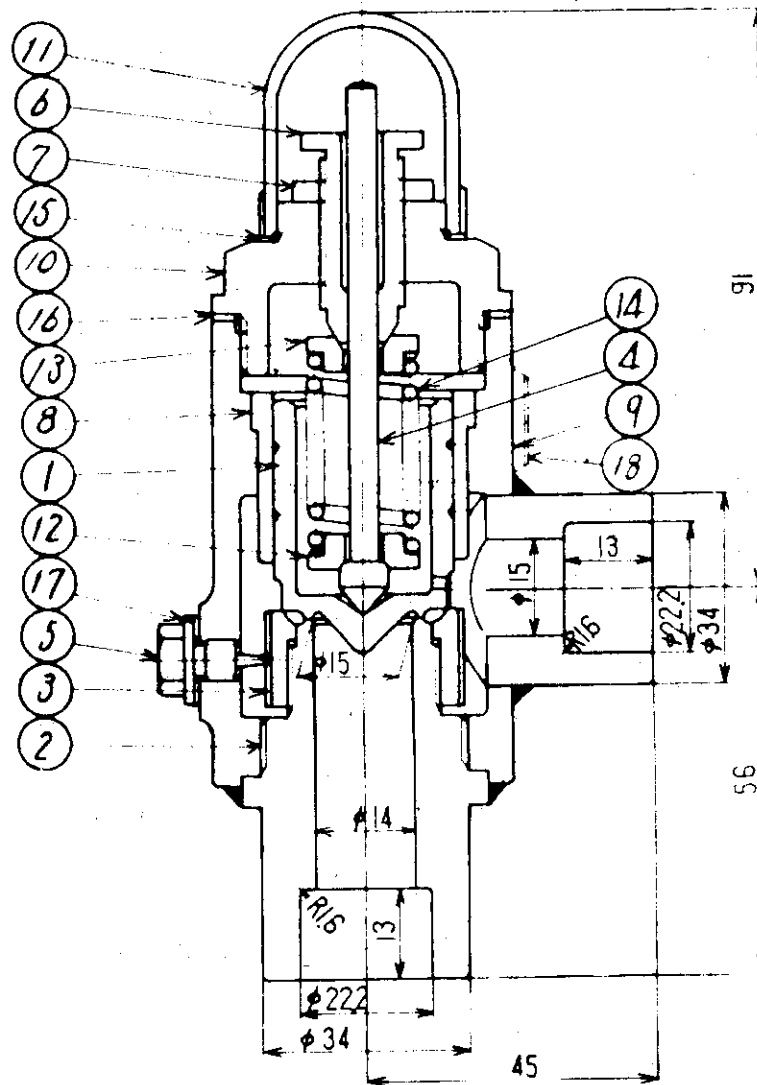


Fig. 7 膨脹タンク用安全弁組立図

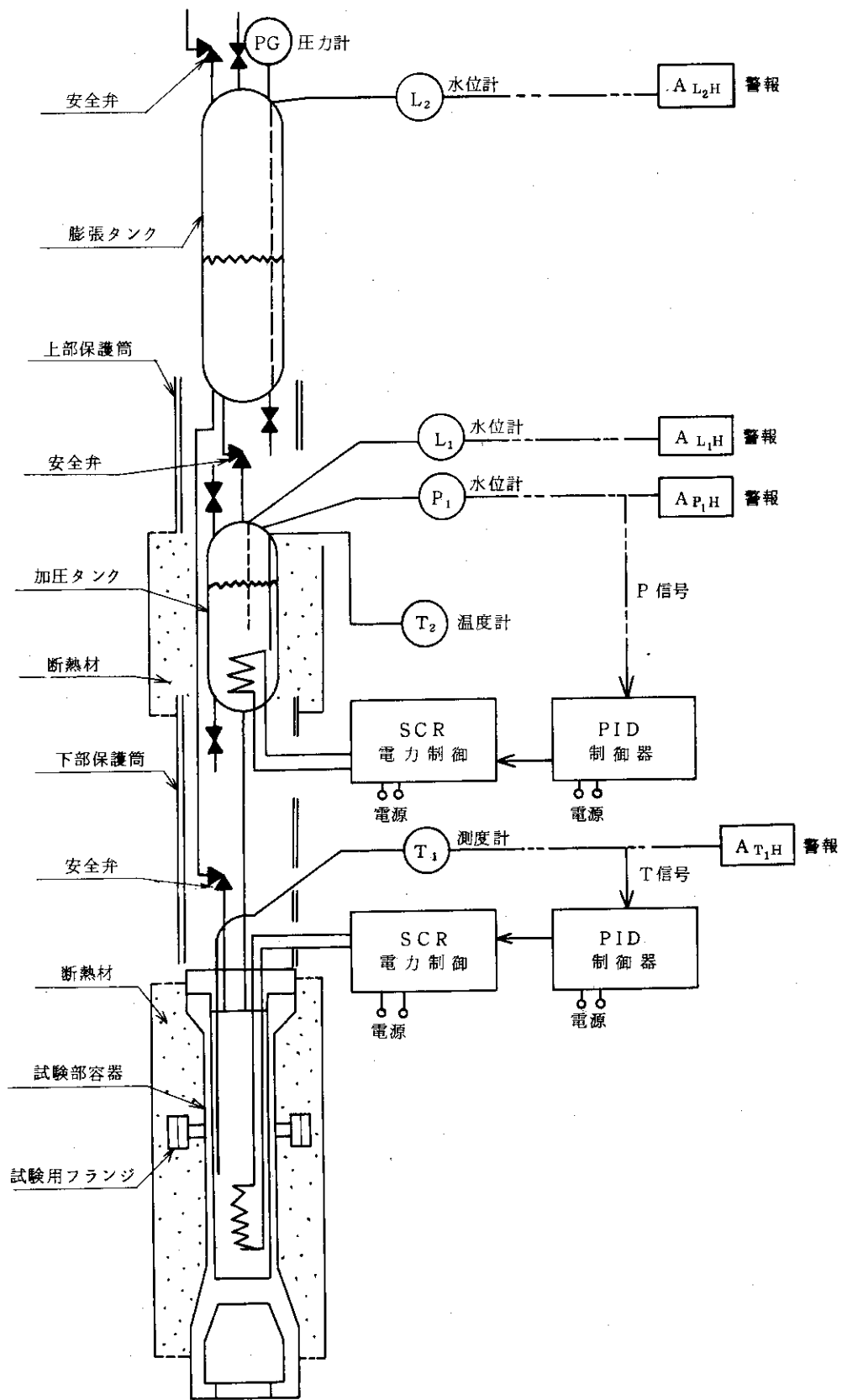
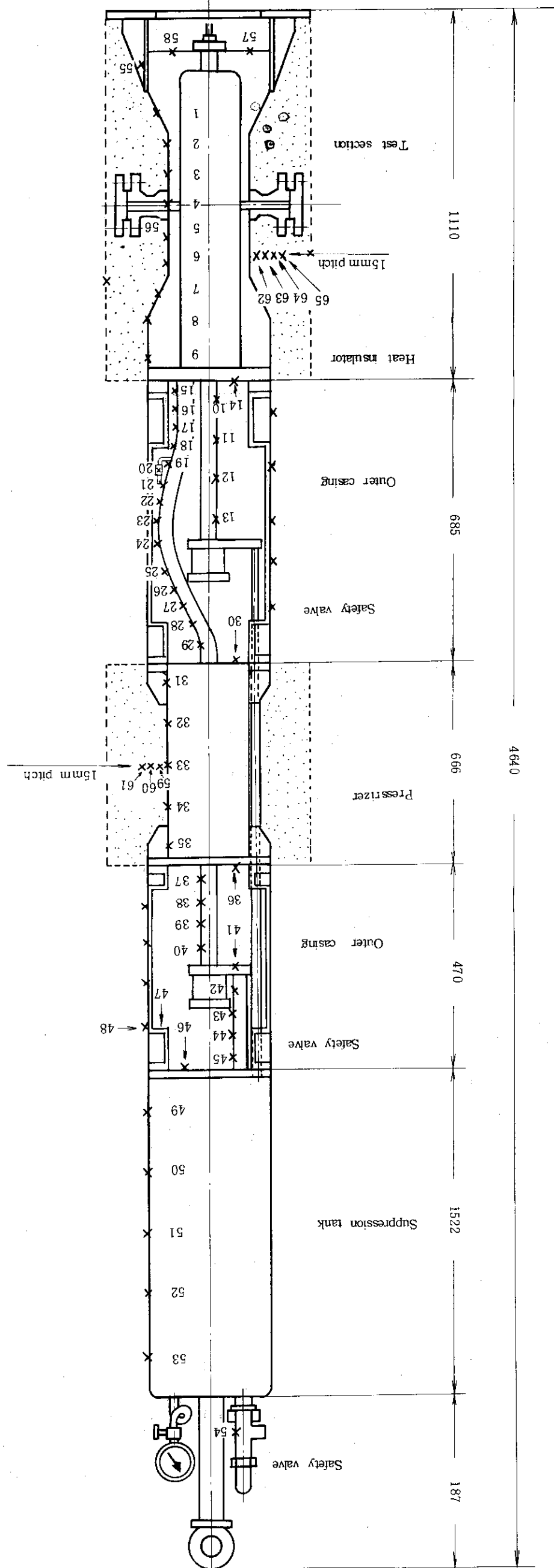


Fig. 8 試作高温高压カプセル制御系フローシート

Fig. 9 装置の温度測定位置



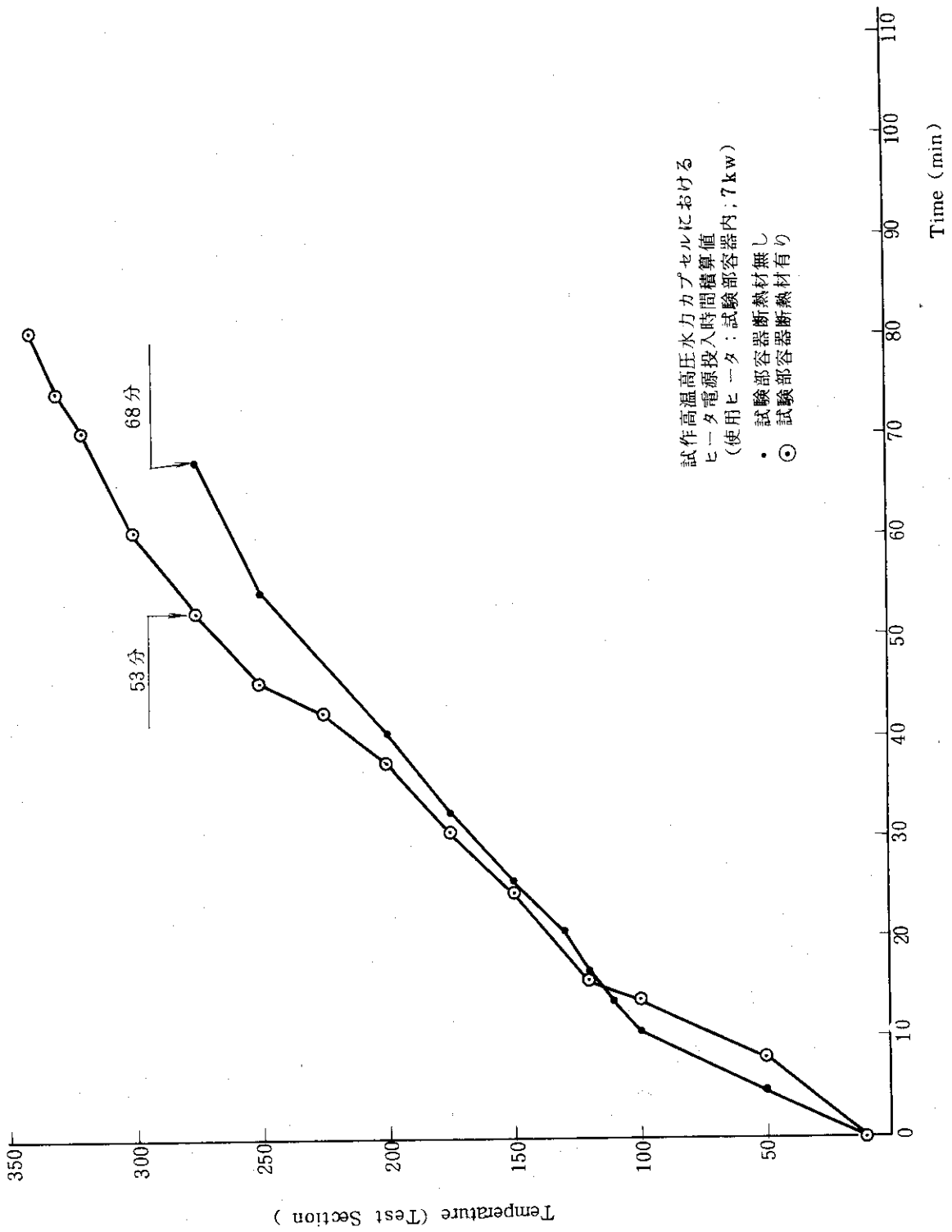


Fig. 10 ヒータ容量確認試験結果

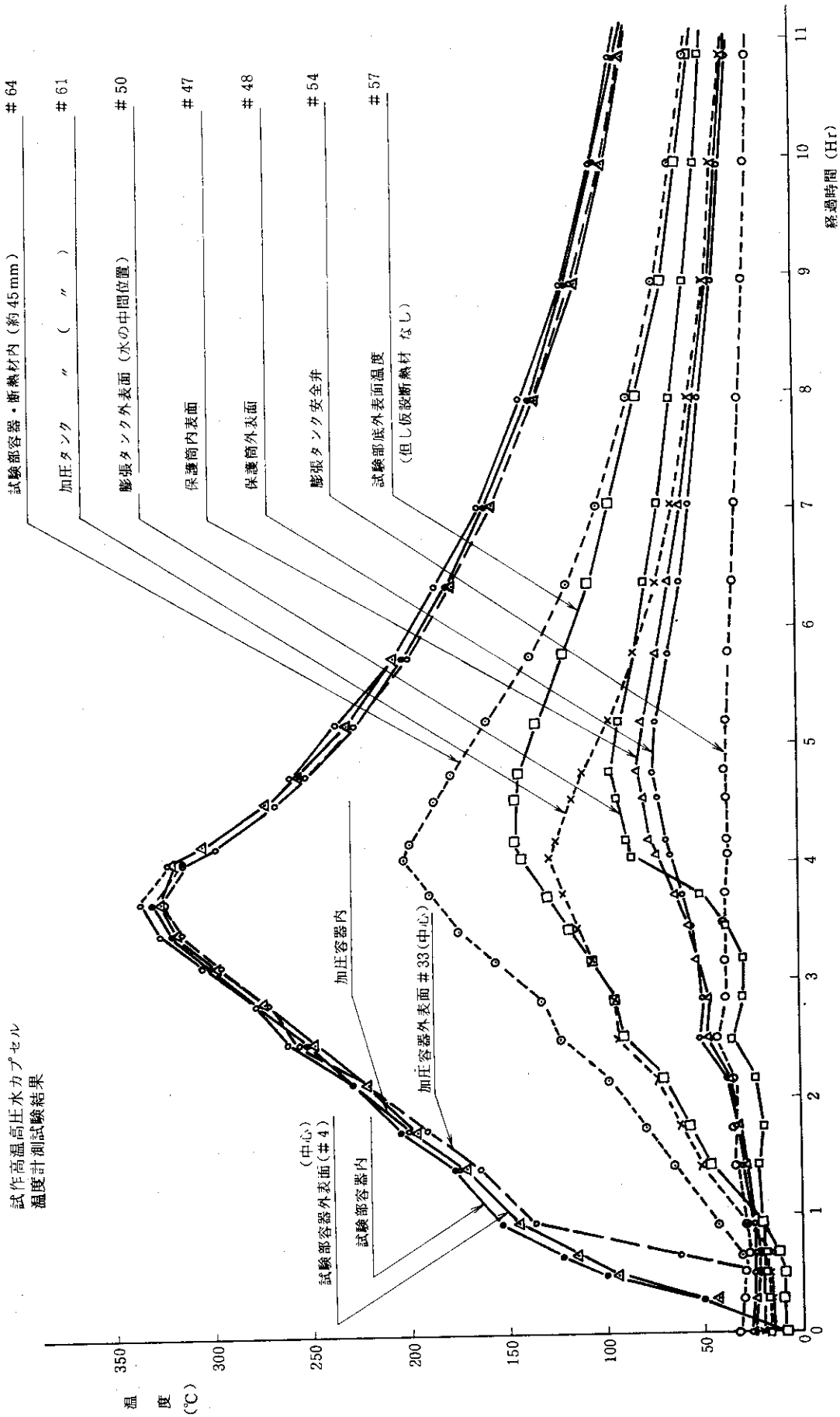


Fig. 11 装置各部温度の時間的变化

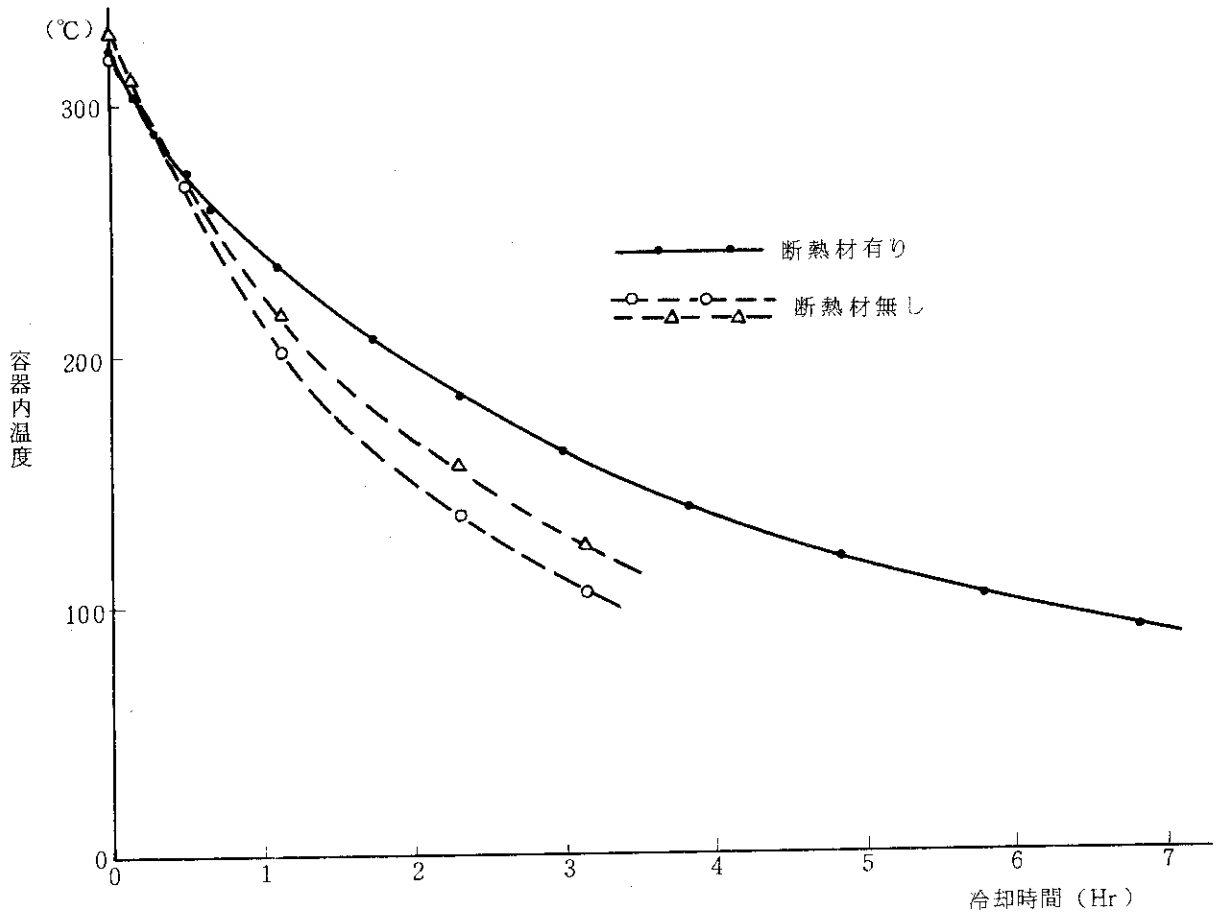


Fig. 12 試験部容器部断熱材の有無による装置冷却時間の相違

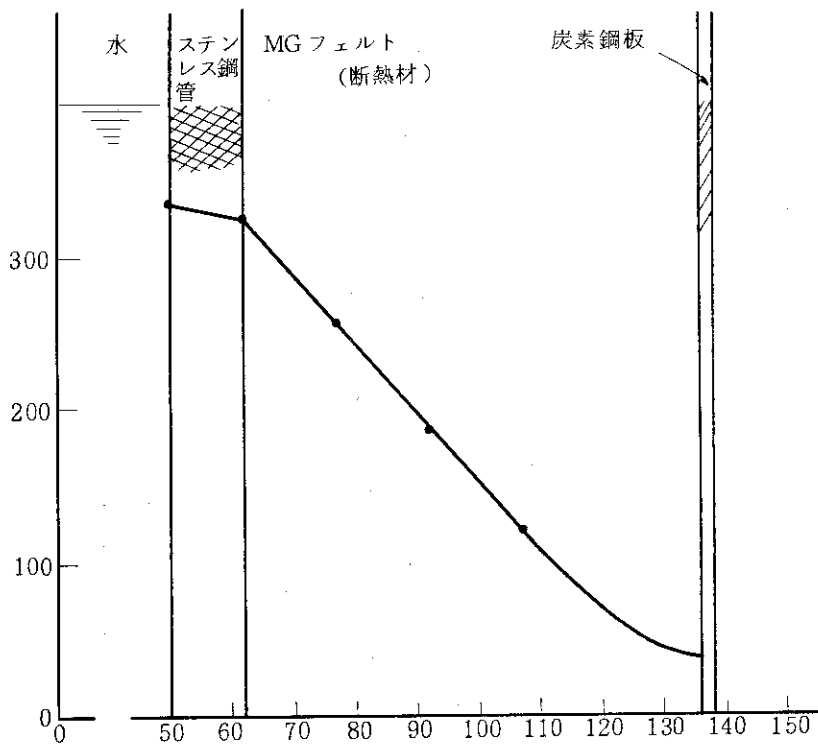


Fig. 13 容器の径方向における温度分布

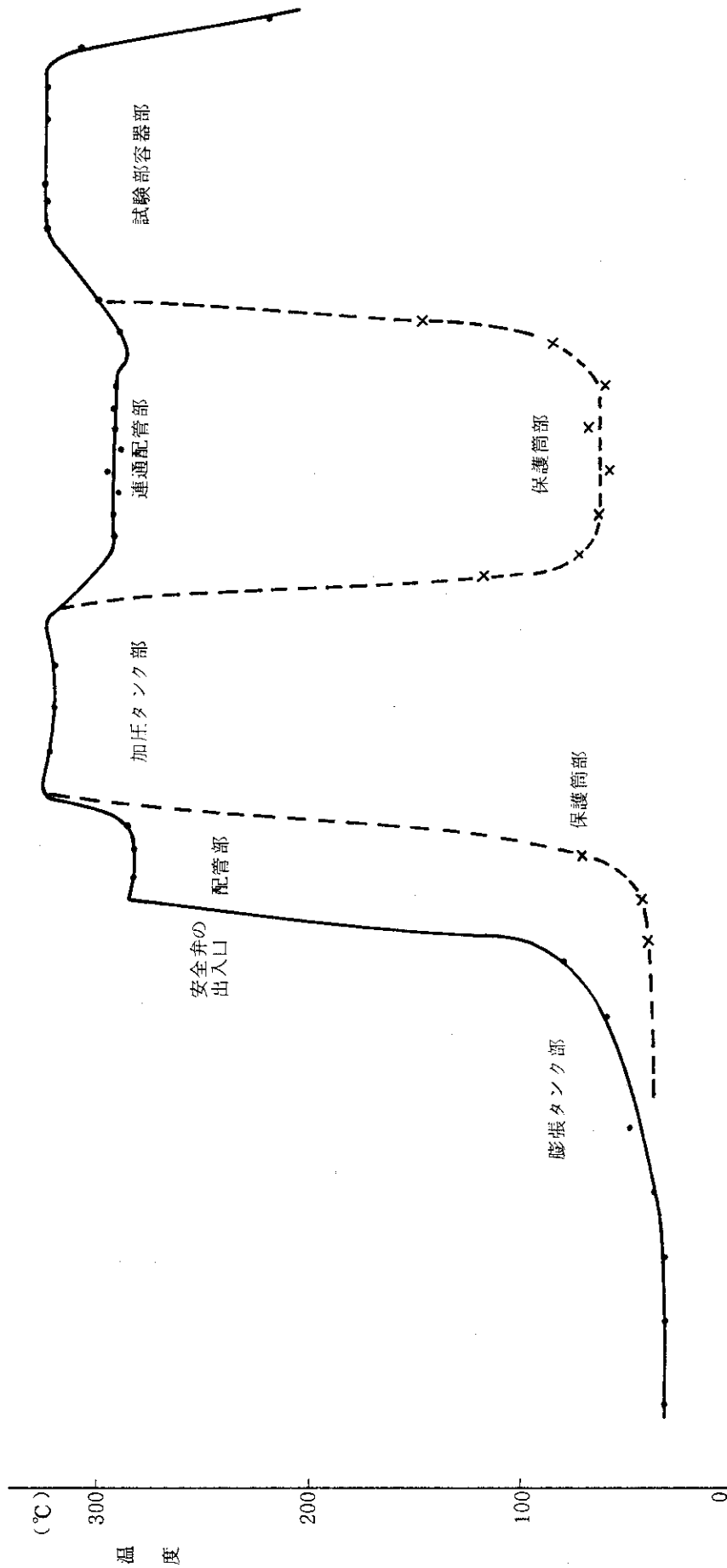


Fig. 14 装置の軸方向における温度分布

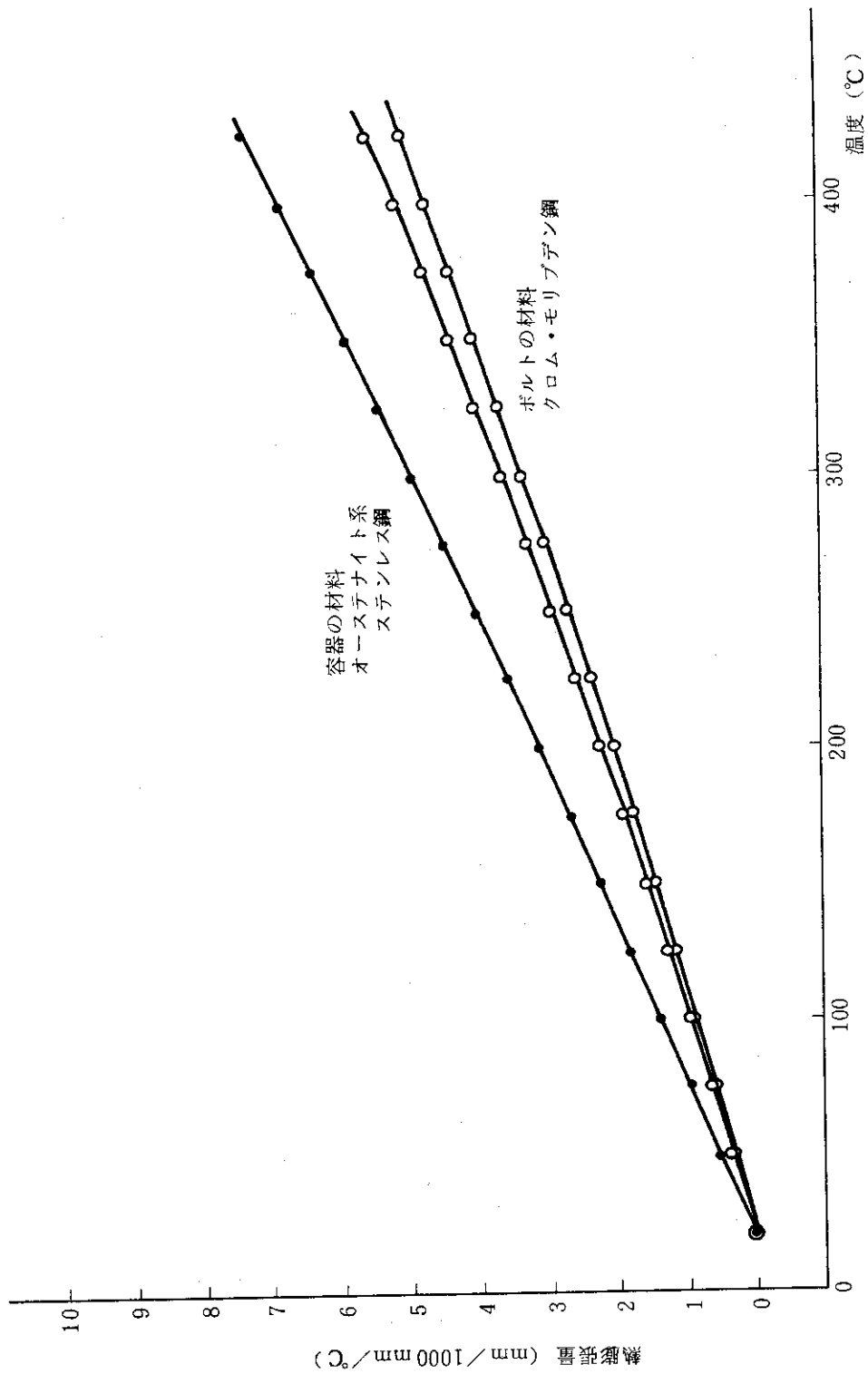


Fig. 15 温度上昇による材料の熱膨張量の比較

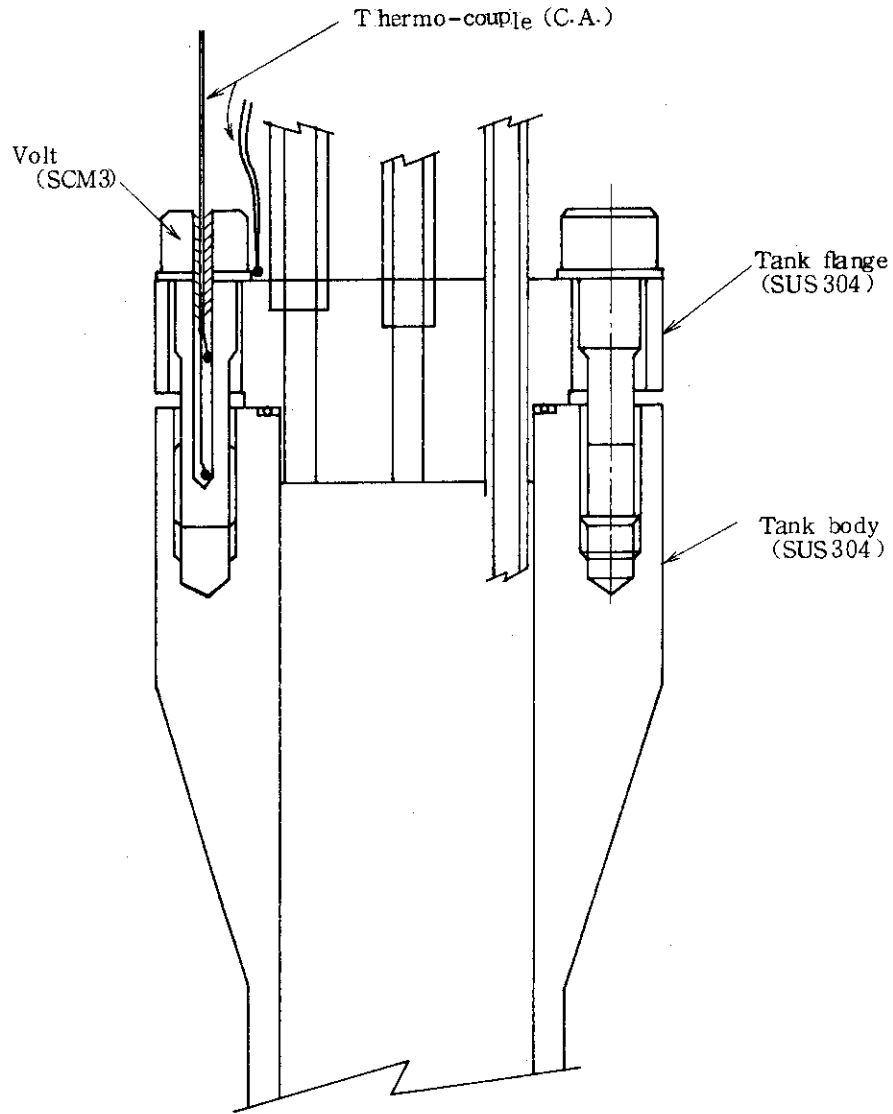


Fig. 16 ボルトおよび容器フランジ部の温度測定位置

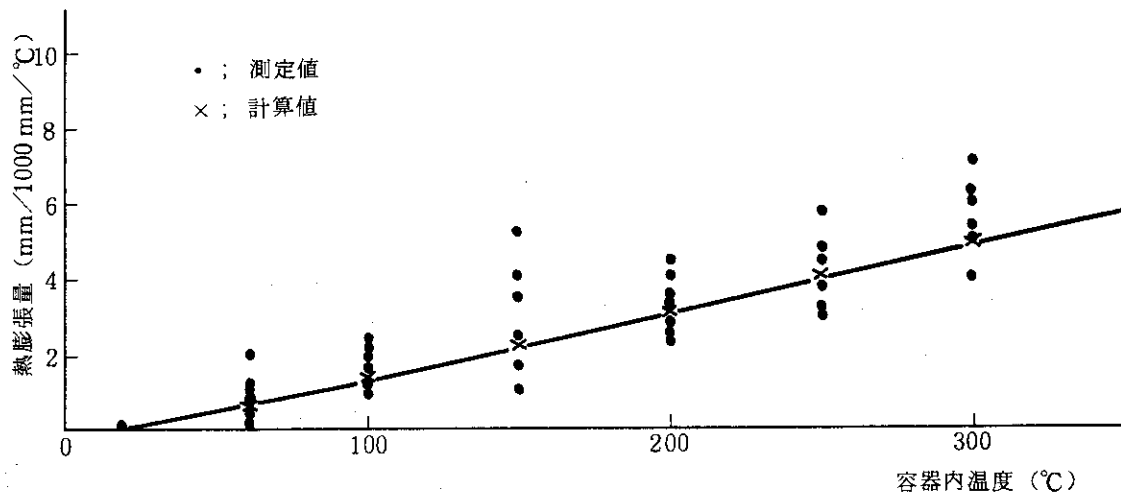


Fig. 17 装置各部における熱膨張量測定結果

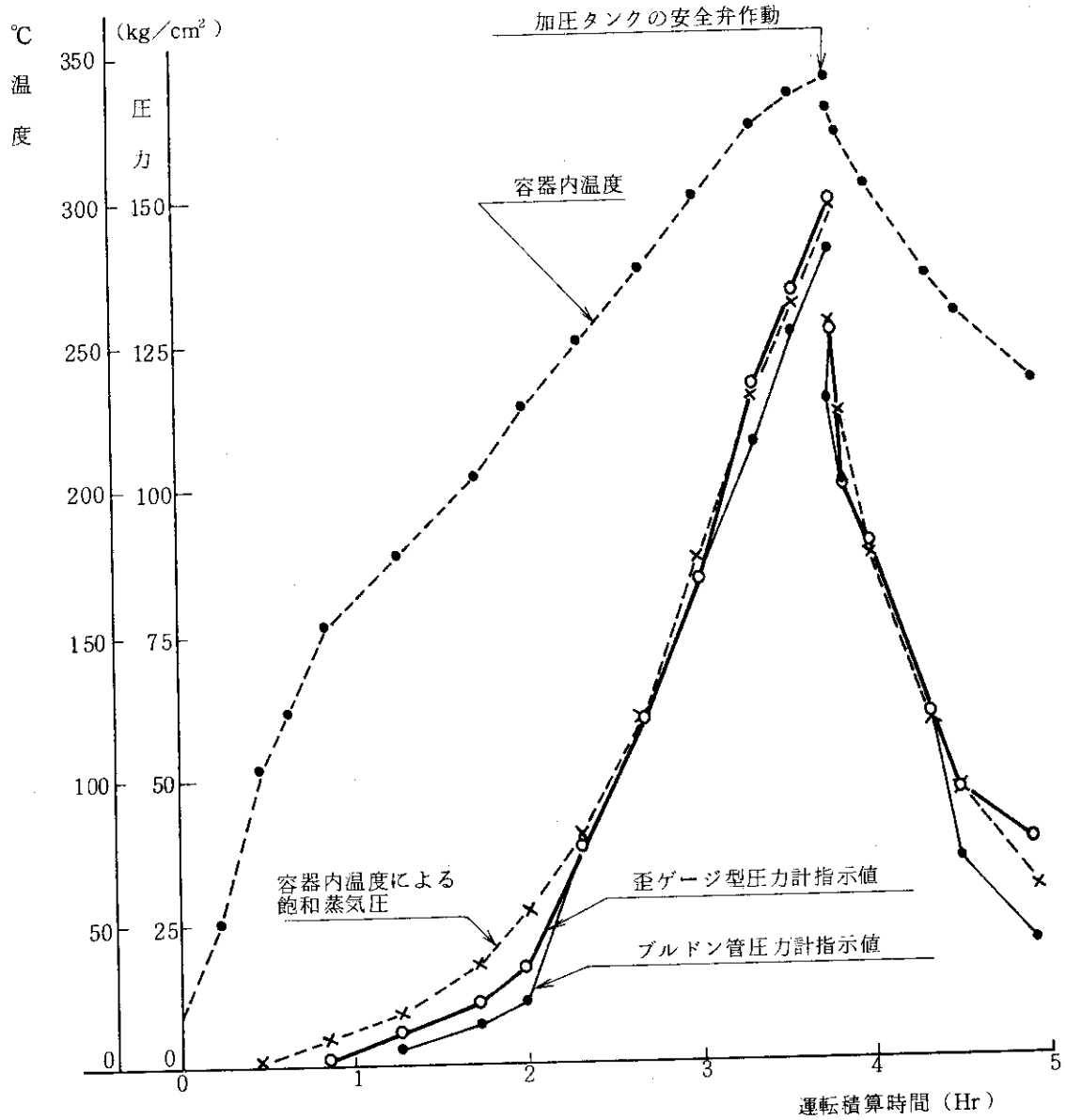


Fig. 18 安全弁の作動試験結果

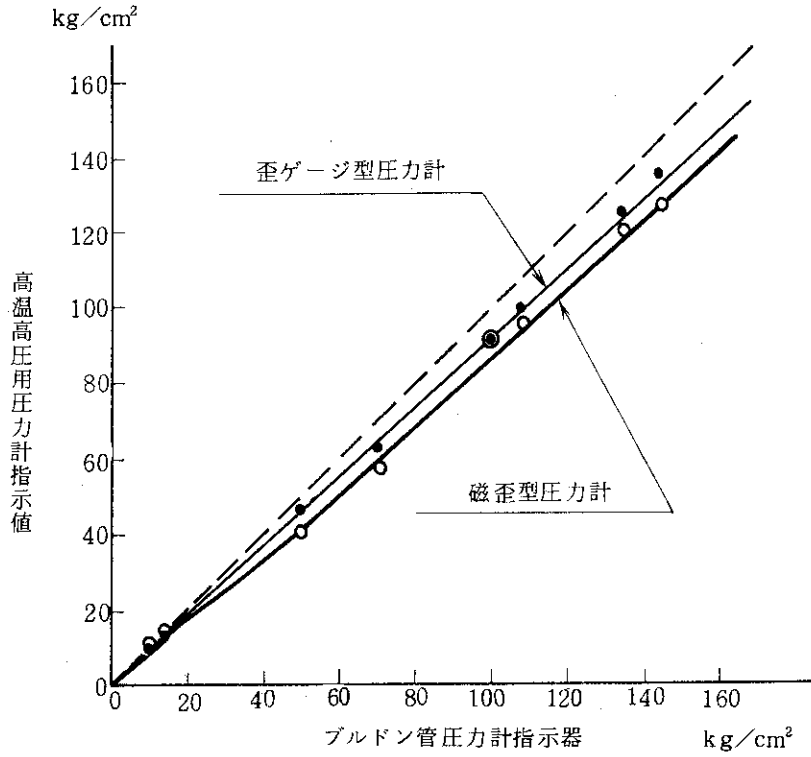


Fig. 19 圧力計較正曲線（初期）

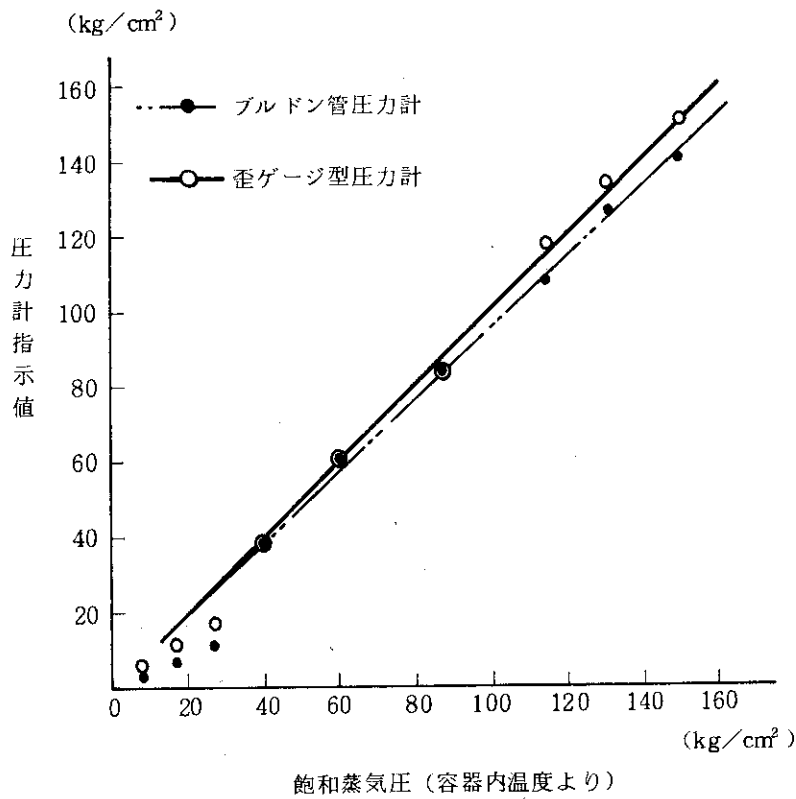


Fig. 20 容器内温度から求めた飽和蒸気圧と
圧力計測に用いた圧力計指示値の比較

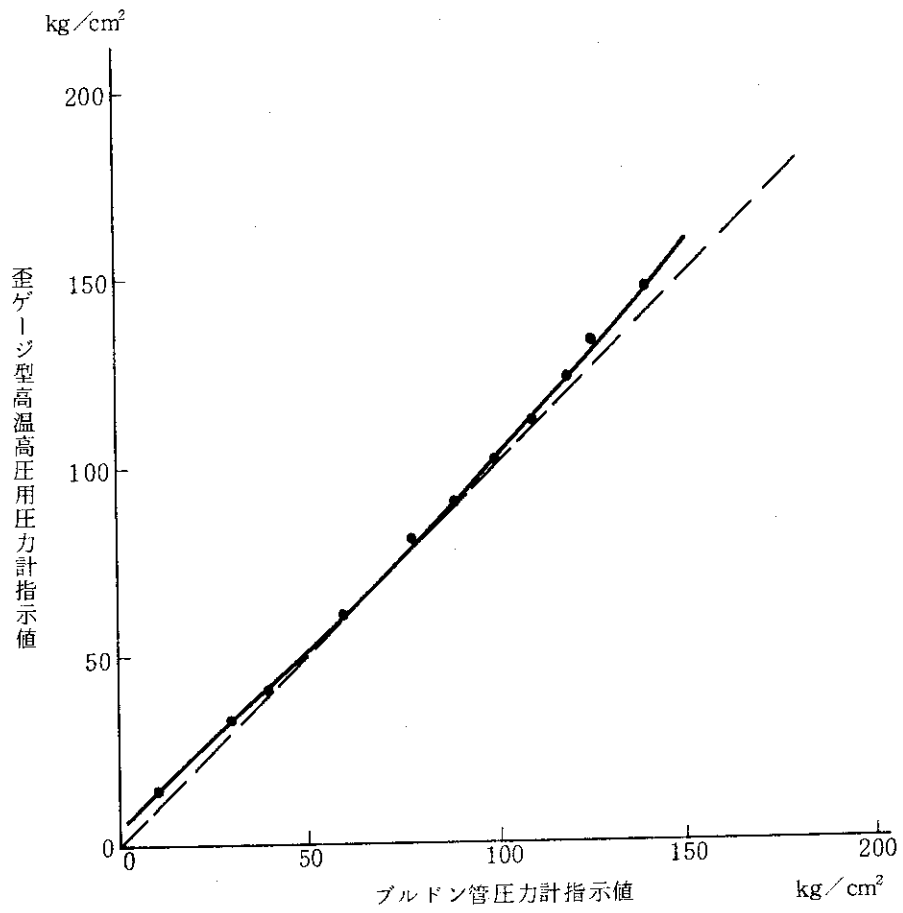


Fig. 21 圧力計較正曲線

8. ま と め

試作試験装置を開発し、総合試験を実施した。その結果、ほぼ所定の目標を達成し、インパイル用実験装置の開発に有効な資料を得た。特に圧力・温度制御方式の確立、計測技術の把握、高温蒸気の凝縮法の確立、小型高圧安全弁の開発、水位計の開発等大きな前進である。今後、これらの資料をもとにインパイル用実験装置の開発を行うとともに、試作の装置にあっては、今後開発される高温高圧下の計測機器の炉外試験装置として開発品の安全性を確認するために用い、また、NSRRの燃料破損実験との関連で必要に応じ炉外試験用の装置として活用する予定である。

謝 辞

本試験装置の開発に当っては、技術部工作課大部昇氏、NSRR管理室山崎利氏、反応度安全研究室岩田耕司氏に御協力いただきました。執筆にあたっては、反応度安全研究室長石川迪夫氏、反応度安全研究室藤城俊夫氏に御指導いただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石川迪夫, 他 : “ NSRR 実験報告, (I) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験”, 日本原子力学会誌, vol. 19, No. 7 (1977)
- (2) 石川迪夫, 他 : “ NSRR 実験報告, (II) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験”, 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 10 (1978)
- (3) 星 蔦雄, 他 : “ 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”, 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 9 (1978)
- (4) NSRR 管理室, 反応度安全研究室 : “ NSRR 臨界および特性試験報告”, JAERI-M 6791 (1976)
- (5) 山崎 利, 他 : “ NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状”, JAERI-M 7105 (1977)
- (6) 藤城俊夫, 他 : “ NSRR カプセルの耐爆実験”, JAERI-M 5861 (1974)
- (7) 通商産業省公益事業局原子力発電課 : “ 発電用原子力技術基準” (昭和 47 年)
- (8) 労働省安全衛生部安全課 : “ ボイラ・圧力容器構造規格の解説” (1971)
- (9) 日本機械学会 : “ 蒸気表” (1968)
- (10) 日本機械学会・熱力学部門委員会, 伝熱工学資料調査分科会 : “ 伝熱工学資料改訂第 2 版” (1966)

8. ま と め

試作試験装置を開発し、総合試験を実施した。その結果、ほぼ所定の目標を達成し、インパイル用実験装置の開発に有効な資料を得た。特に圧力・温度制御方式の確立、計測技術の把握、高温蒸気の凝縮法の確立、小型高圧安全弁の開発、水位計の開発等大きな前進である。今後、これらの資料をもとにインパイル用実験装置の開発を行うとともに、試作の装置にあっては、今後開発される高温高圧下の計測機器の炉外試験装置として開発品の安全性を確認するために用い、また、NSRRの燃料破損実験との関連で必要に応じ炉外試験用の装置として活用する予定である。

謝 辞

本試験装置の開発に当っては、技術部工作課大部昇氏、NSRR管理室山崎利氏、反応度安全研究室岩田耕司氏に御協力いただきました。執筆にあたっては、反応度安全研究室長石川迪夫氏、反応度安全研究室藤城俊夫氏に御指導いただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石川迪夫, 他 : " NSRR 実験報告, (I) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験", 日本原子力学会誌, vol. 19, No. 7 (1977)
- (2) 石川迪夫, 他 : " NSRR 実験報告, (II) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験", 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 10 (1978)
- (3) 星 蔦雄, 他 : " 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動", 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 9 (1978)
- (4) NSRR 管理室, 反応度安全研究室 : " NSRR 臨界および特性試験報告", JAERI-M 6791 (1976)
- (5) 山崎 利, 他 : " NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状", JAERI-M 7105 (1977)
- (6) 藤城俊夫, 他 : " NSRR カプセルの耐爆実験", JAERI-M 5861 (1974)
- (7) 通商産業省公益事業局原子力発電課 : " 発電用原子力技術基準" (昭和 47 年)
- (8) 労働省安全衛生部安全課 : " ボイラ・圧力容器構造規格の解説" (1971)
- (9) 日本機械学会 : " 蒸気表" (1968)
- (10) 日本機械学会・熱力学部門委員会, 伝熱工学資料調査分科会 : " 伝熱工学資料改訂第 2 版" (1966)

8. ま と め

試作試験装置を開発し、総合試験を実施した。その結果、ほぼ所定の目標を達成し、インパイル用実験装置の開発に有効な資料を得た。特に圧力・温度制御方式の確立、計測技術の把握、高温蒸気の凝縮法の確立、小型高圧安全弁の開発、水位計の開発等大きな前進である。今後、これらの資料をもとにインパイル用実験装置の開発を行うとともに、試作の装置にあっては、今後開発される高温高圧下の計測機器の炉外試験装置として開発品の安全性を確認するために用い、また、NSRRの燃料破損実験との関連で必要に応じ炉外試験用の装置として活用する予定である。

謝 辞

本試験装置の開発に当っては、技術部工作課大部昇氏、NSRR管理室山崎利氏、反応度安全研究室岩田耕司氏に御協力いただきました。執筆にあたっては、反応度安全研究室長石川迪夫氏、反応度安全研究室藤城俊夫氏に御指導いただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石川迪夫, 他 : “ NSRR 実験報告, (I) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験”, 日本原子力学会誌, vol. 19, No. 7 (1977)
- (2) 石川迪夫, 他 : “ NSRR 実験報告, (II) 軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験”, 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 10 (1978)
- (3) 星 蔦雄, 他 : “ 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”, 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 9 (1978)
- (4) NSRR 管理室, 反応度安全研究室 : “ NSRR 臨界および特性試験報告”, JAERI-M 6791 (1976)
- (5) 山崎 利, 他 : “ NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状”, JAERI-M 7105 (1977)
- (6) 藤城俊夫, 他 : “ NSRR カプセルの耐爆実験”, JAERI-M 5861 (1974)
- (7) 通商産業省公益事業局原子力発電課 : “ 発電用原子力技術基準” (昭和 47 年)
- (8) 労働省安全衛生部安全課 : “ ボイラ・圧力容器構造規格の解説” (1971)
- (9) 日本機械学会 : “ 蒸気表” (1968)
- (10) 日本機械学会・熱力学部門委員会, 伝熱工学資料調査分科会 : “ 伝熱工学資料改訂第 2 版” (1966)

APPENDIX

Appendix A ; 試験部容器の強度計算

Appendix B ; 加圧タンクの強度計算

Appendix C ; 膨張タンクの強度計算

Appendix A 試験部容器の構造強度計算

1. 試験部容器本体の強度計算

1.1 胴部の最小必要肉厚 t_s

$$t_s = \frac{P \cdot D_i}{200 \cdot \sigma_x \cdot \eta - 2 P (1 - k)} + \alpha = \frac{180 \times 100}{200 \times 10 \times 1 - 2 \times 180 (1 - 0.4)} + 0$$

$$= 10.09 \text{ (mm)}$$

$P = 180 \text{ kg/cm}^2$ (最高使用圧力)

$D_i = 100 \text{ mm}$ (胴の内径)

$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$ (材料の許容応力)

$\eta = 1$ (溶接継手効率)

$k = 0.4$ (容器の材質と使用流体の温度に応じた定数)

$\alpha = 0 \text{ mm}$ (腐れしろ)

1.2 締付ボルトに加わる荷重

1.2.1 使用状態における荷重 W_{m1}

$$W_{m1} = H + H_P = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot G^2 + \frac{P}{100} \cdot 2b \cdot \pi \cdot G \cdot m$$

$$= \frac{180}{100} \times \frac{\pi}{4} \times 117.6^2 + \frac{180}{100} \times 2 \times 0.3 \times \pi \times 117.6 \times 6.5$$

$$= 2.21 \times 10^4 \text{ (kg)}$$

$P = 180 \text{ kg/cm}^2$

$G = 117.6 \text{ mm}$ (パッキンの圧縮力が作用する円の直径)

$b = \frac{2.4}{8} = 0.3$ (パッキンの有効幅)

$m = 6.5$ (パッキン係数)

1.2.2 常温大気状態における荷重 W_{m2}

$$W_{m2} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = \pi \times 0.3 \times 117.6 \times 18.28 = 2.03 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

$y = 18.28 \text{ kg/mm}^2$ (パッキンの最小有効締付圧力)

$b = 0.3$

$G = 117.6 \text{ mm}$

1.3 締付ボルトの最小必要断面積 A_m 1.3.1 使用状態における必要断面積 A_{m1}

$$A_{m1} \frac{W_{m1}}{S_b} = \frac{2.21 \times 10^4}{19.0} = 1.16 \times 10^3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$Wm_1 = 2.21 \times 10^4 \text{ kg} \quad (1.2.1 \text{ より})$$

$$Sb = 19.0 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{使用温度におけるボルトの許容応力})$$

1.3.2 常温大気状態における必要断面積 Am_2

$$Am_2 \frac{Wm_2}{Sa} = \frac{2.03 \times 10^3}{19.0} = 106.8 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$Wm_2 = 2.03 \times 10^3 \text{ kg} \quad (1.2.2 \text{ より})$$

$$Sa = 19.0 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{常温におけるボルトの許容応力})$$

1.4 使用ボルトの谷の断面種 Ab

$$Ab = \frac{\pi}{4} db \cdot n = \frac{\pi}{4} \times 21.8^2 \times 8 = 298 \times 10^3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$db = 21.8 \text{ mm} \quad (\text{ボルトの谷の径, M 24 P 2})$$

$$n = 8 \quad (\text{ボルトの数量})$$

1.5 全体のボルトに作用する力 W 1.5.1 使用状態における力 W_1

$$W_1 = Wm_1 = 2.21 \times 10^4 \text{ (kg)}$$

1.5.2 常温大気状態における力 W_2

$$W_2 = \left(\frac{Am_2 + Ab}{2} \right) \cdot Sa = \left(\frac{106.8 + 2980}{2} \right) \times 19.0 = 2.93 \times 10^4 \text{ (kg)}$$

$$Am_1 = 106.8 \text{ mm}^2 \quad (1.3.1 \text{ より})$$

$$Ab = 2980 \text{ mm}^2 \quad (1.4 \text{ より})$$

$$Sa = 19.0 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{常温におけるボルトの許容応力})$$

1.6 カバーの最小必要肉厚 t

$$t = G \sqrt{\frac{C \cdot P}{100 \cdot \sigma_x} + \frac{1.78 \cdot W \cdot h_G}{\sigma_x \cdot G^3} + \alpha}$$

$$= 117.6 \sqrt{\frac{0.3 \times 180}{100 \times 10} + \frac{1.78 \times 2.93 \times 10^4 \times 21.2}{10 \times 117.3^3} + 0} = 41.1 \text{ (mm)}$$

$$G = 117.6 \text{ mm} \quad (\text{パッキンの圧縮力が作用する円の直径})$$

$$C = 0.3 \quad (\text{定数})$$

$$P = 180 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{最高使用圧力})$$

$$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{使用温度における材料の許容応力})$$

$$W = 2.93 \times 10^4 \text{ kg} \quad (1.5.2 \text{ の } W_2 \text{ より})$$

$$h_G = 21.2 \text{ mm} \quad (\text{ガスケットによるモーメントアームでボルトのピッチ円と } d \text{ との差の } 2 \text{ 分の } 1)$$

$$\alpha = 0$$

1.7 底板の最小必要肉厚 t

$$t = Di \sqrt{\frac{Z \cdot C \cdot P}{100 \cdot \sigma_x}} + \alpha = 100 \sqrt{\frac{1 \times 0.5 \times 180}{100 \times 10}} + 0 = 30.0 \text{ (mm)}$$

$$P = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$$

$$\alpha = 0$$

$$Di = 100 \text{ mm}$$

$$Z = 1$$

(定数で Fig. A-1 による)

$$C = 0.5$$

(定数)

2. 試験部容器フランジの強度計算

2.1 フランジに作用するモーメント

$$H_D = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot B^2 = \frac{180}{100} \times \frac{\pi}{4} \times 100^2 = 1.41 \times 10^4 \text{ (kg)}$$

$$B = 100 \text{ mm (フランジの内径)}$$

(イ) フランジに加わる荷重 H_D (ロ) ボルトに加わる荷重と内圧によりフランジに加わる荷重との差 H_G

$$H_G = W - H = 2.93 \times 10^4 - 1.96 \times 10^4 = 9.7 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

$$W = 2.93 \times 10^4 \text{ kg (1.5.2 より)}$$

$$H = 1.96 \times 10^4 \text{ kg (} H = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot G^2 \text{ より)}$$

(ハ) 内圧によりフランジに加わる荷重とフランジ内径に加わる荷重との差 H_T

$$H_T = H - H_D = 1.96 \times 10^4 - 1.41 \times 10^4 = 5.5 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

2.2 モーメントアーム

(イ) H_D に対するモーメントアームでボルト中心円を H_D が作用する円周間の半径距離 h_D

$$h_D = R + 0.5 g_1 = 18 + 0.5 \times 50 = 43 \text{ (mm)}$$

$$g_1 = 50 \text{ mm (ハブのフランジ背面における肉厚)}$$

$$R = 18 \text{ mm (ボルト中心円とフランジ背面のハブとの交点との半径距離, } R = \frac{C - B}{2} - g_0 \text{)}$$

(ロ) H_G に対するモーメントアームでボルト中心円とパッキン圧縮力が作用する円周間の半径距離 h_G

$$h_G = \frac{C_1 - G}{2} = \frac{160 - 117.6}{2} = 21.2 \text{ (mm)}$$

$$C_1 = 160 \text{ mm (ボルト中心円の直径)}$$

$$G = 117.6 \text{ mm}$$

(イ) H_T に対するモーメントアームでボルト中心円と H_T が作用する円周間の半径距離 h_T

$$h_T = \frac{R + g_1 + h_G}{2} = \frac{18 + 50 + 21.2}{2} = 44.6 \text{ (mm)}$$

2.3 フランジに作用するモーメントの合計 M_0

$$\begin{aligned} M_0 &= H_D \cdot h_D + H_G + H_T \cdot h_T \\ &= 1.41 \times 10^4 \times 43 + 9.7 \times 10^3 \times 21.2 + 5.5 \times 10^3 \times 44.6 = 1.057 \times 10^6 \\ &\quad \text{(kg} \cdot \text{mm)} \end{aligned}$$

2.4 フランジの応力計算

2.4.1 フランジの応力計算に用いる係数

$$A = 200 \text{ mm}$$

$$B = 100 \text{ mm}$$

$$g_0 = 12 \text{ mm}$$

$$g_1 = 50 \text{ mm}$$

$$h = 120 \text{ mm}$$

$$M_0 = 1.057 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

$$h_0 = \sqrt{B \times g_0} = \sqrt{100 \times 12} = 34.6 \text{ mm}$$

$$\frac{g_1}{g_0} = 4.17, \frac{h}{h_0} = 3.46, \frac{A}{B} = 2.0$$

$$T = 1.6 \text{ (Fig. A-1 より)}$$

$$U = 3.4 \text{ (Fig. A-1 より)}$$

$$Y = 3.0 \text{ (Fig. A-1 より)}$$

$$Z = 1.8 \text{ (Fig. A-1 より)}$$

$$F = 0.53 \text{ (Fig. A-2 より)}$$

$$V = 0.03 \text{ (Fig. A-3 より)}$$

$$f = 1 \text{ (Fig. A-4 より)}$$

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 5.65 \times 10^5, \quad e = \frac{F}{h_0} = 1.53 \times 10^{-2}$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = 3.35$$

2.4.2 応力計算

(イ) 長手方向の応力 S_H

$$S_H = \frac{f \cdot M_0}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = \frac{1 \times 1.057 \times 10^6}{3.35 \times 50^2 \times 100} = 1.26 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\therefore S_H = 1.26 \quad 1.5 \cdot S_f = 1.5 \times 10.0 = 15.0$$

(ロ) 半径方向の応力 S_R

$$S_R = \frac{(1.33t \cdot e + 1) M_0}{L \cdot t^2 \cdot B} = \frac{(1.33 \times 100 \times 1.53 \times 10^{-2} + 1) 1.057 \times 10^6}{3.35 \times 100^2 \times 100}$$

$$= 0.958 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\therefore S_R = 0.957 \quad S_f = 10.0$$

(ハ) 接線方向の応力 S_T

$$S_T = \frac{Y \cdot M_0}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = \frac{3.0 \times 1.057 \times 10^6}{100^2 \times 100} - 1.8 \times 0.957 = 1.45 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\therefore S_T = 1.45 \quad S_f = 10.0$$

(ニ) 組合せ応力

$$\frac{S_H + S_R}{2} = 1.109 \quad S_f = 10.0$$

$$\frac{S_H + S_T}{2} = 1.36 \quad S_f = 10.0$$

3. 試験部容器胴部のテストポートフランジの強度計算

3.1 テストポートフランジに作用するモーメント

3.1.1 作用荷重

$$H_0 = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot B^2 = \frac{180}{100} \times \frac{\pi}{4} \times 21.2^2 = 635 \text{ (kg)}$$

$$P = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$B = 21.2 \text{ mm}$$

3.1.2 $H_G = W - H$

(i) ボルトに加わる荷重 W (イ) 使用状態における荷重 W_{m1}

$$\begin{aligned} W_{m1} &= H + H_P = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot G^2 + \frac{P}{100} \cdot 2b \cdot \pi \cdot G \cdot m \\ &= \frac{180}{100} \times \frac{\pi}{4} \times 23.8^2 + \frac{180}{100} \times 2 \times 0.3 \times \pi \times 23.8 \times 6.5 \\ &= 1,325 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$G = 23.8 \text{ mm}$$

$$b = \frac{2.4}{8} = 0.3$$

$$m = 6.5$$

(ロ) 常温大気圧状態における荷重 W_{m2}

$$W_{m2} = \pi \cdot b \cdot G \cdot Y = \pi \times 0.3 \times 23.8 \times 18.23 = 409 \text{ (kg)}$$

$$Y = 18.28 \text{ kg/mm}^2$$

(ii) ボルトに必要な最小断面積 A_m (イ) 使用状態において必要な断面積 A_{m1}

$$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_b} = \frac{1,325}{19.0} = 69.7 \text{ mm}^2$$

$$S_b = 19.0 \text{ kg/mm}^2$$

(ロ) 常温大気圧状態において必要な断面積 A_{m2}

$$A_{m2} = \left(\frac{W_{m2}}{S_a} = \frac{409}{19.0} \right) = 21.6 \text{ (mm}^2)$$

$$S_a = 19.0 \text{ kg/mm}^2$$

(iii) 全体のボルトに作用する荷重 W (イ) 使用状態 $W_1 = W_{m1} = 1,325 \text{ kg}$ (ロ) 常温大気圧状態 W_2

$$W_2 = \frac{A_{m2} + A_b}{2} \cdot S_a = \frac{21.6 + 1,256}{2} \times 19.0 = 639 \text{ (kg)}$$

(イ) その他

$$H = \frac{P}{100} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot G^2 = \frac{180}{100} \times \frac{\pi}{4} \times 23.8^2 = 800.4 \text{ (kg)}$$

$$H_G = 1,325 - 800.4 = 524.6 \text{ (kg)}$$

$$H_T = H - H_D = 800.4 - 635 = 165.4 \text{ (kg)}$$

3.1.3 モーメントアーム

(イ) $h_D = R + 0.5 g_1 = 25.4 + 18 = 43.4 \text{ (mm)}$

$$R = 25.4 \text{ mm}$$

$$g_1 = 18 \text{ mm}$$

(ロ) $h_G = \frac{C - G}{2} = \frac{108 - 23.8}{2} = 84.2 \text{ (mm)}$

$$C = 108 \text{ mm}$$

$$G = 23.8 \text{ mm}$$

(イ) $h_T = \frac{R + g_1 + h_G}{2} = \frac{25.4 + 18 + 84.2}{2} = 63.8 \text{ (mm)}$ (ニ) フランジに作用するモーメントの合計 M_o

$$M_o = H_D \cdot h_D + H_G \cdot h_G + H_T \cdot h_T$$

$$= 635 \times 43.4 + 524.6 \times 84.2 + 165.4 \times 63.8$$

$$= 8.23 \times 10^4 \text{ (kg} \cdot \text{mm)}$$

3.1.4 テストポートフランジの応力計算

(i) 応力計算に用いる係数

$$A = 159 \text{ mm}$$

$$B = 21.2 \text{ mm}$$

$$g_0 = 6.4 \text{ mm}$$

$$g_1 = 18 \text{ mm}$$

$$h = 44 \text{ mm}$$

$$M_0 = 8.23 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

$$h_0 = \sqrt{B \times g_0} = \sqrt{21.2 \times 6.4} = 11.7 \text{ mm}$$

$$\frac{g_1}{g_0} = 2.81, \quad \frac{h}{h_0} = 3.76, \quad \frac{A}{B} = 7.5$$

$$T = 1.1 \quad (\text{Fig. A-1 より})$$

$$U = 15 \quad (\quad \quad \quad)$$

$$Y = 14 \quad (\quad \quad \quad)$$

$$Z = 1.2 \quad (\quad \quad \quad)$$

$$F = 0.6 \quad (\text{Fig. A-2 より})$$

$$V = 0.006 \quad (\text{Fig. A-3 より})$$

$$f = 1 \quad (\text{Fig. A-4 より})$$

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 1.2 \times 10^5$$

$$e = \frac{F}{h_0} = 0.051$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} = 2.9$$

(ii) 応力計算

(イ) 長手方向の応力 S_H

$$S_H = \frac{f \cdot M}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = \frac{1 \times 8.23 \times 10^4}{2.9 \times 18^2 \times 21.2} = 4.1 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\therefore S_H = 4.1 \quad 1.5 S_f = 1.5 \times 10 = 15$$

(ロ) 半径方向の応力 S_R

$$S_R = \frac{(1.33 t \cdot e + 1) M_0}{L \cdot t^2 \cdot B} = \frac{(1.33 \times 35 \times 0.05 + 1) 8.23 \times 10^4}{2.9 \times 35^2 \times 21.2} = 3.7$$

(kg/mm²)

$$\therefore S_R = 3.7 \quad S_f = 10.0$$

(ハ) 接線方向の応力 S_T

$$S_T = \frac{Y \cdot M_0}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = \frac{1.4 \times 8.23 \times 10^4}{35^2 \cdot 21.2} - 1.1 \times 3.7 = 0.4 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

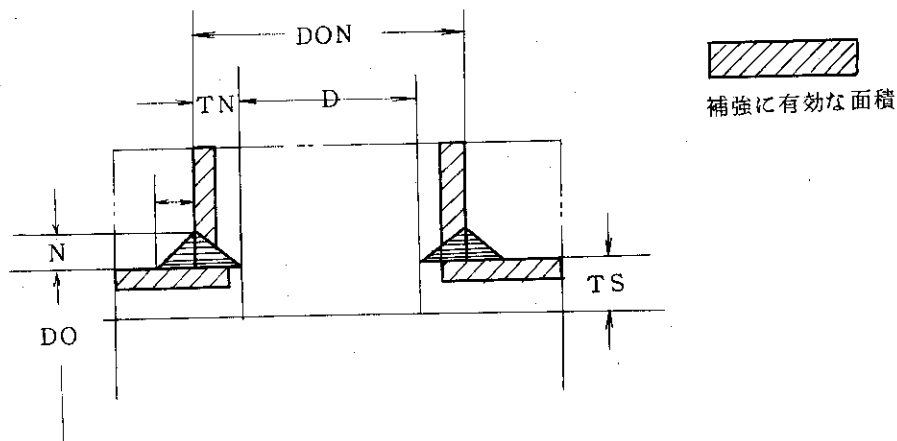
$$\therefore S_T = 0.4 \quad S_f = 10.0$$

(二) 組合せ応力

$$\frac{S_H + S_R}{2} = 3.9 \quad S_f = 10.0$$

$$\frac{S_H + S_T}{2} = 2.25 \quad S_f = 10.0$$

4. 容器胴部に設けた穴の補強計算



4.1 補強に必要な面積 AR

$$AR = D \cdot TSR \cdot F = 21.2 \times 10.1 \times 1 = 214.2 \text{ mm}^2$$

$$D = 21.2 \text{ mm (穴の径)}$$

$$TSR = 10.1 \quad (\text{胴の計算上必要な厚さ})$$

$$F = 1 \quad (\text{断面角度係数})$$

4.2 補強に有効な面積

(イ) 胴部の有効な面積 A_1

$$A_1 = 2(H \cdot TS - F \cdot TSR) \cdot D = 2(1 \times 12 - 1 \times 10.1) \times 21.2 = 80.6 \text{ (mm}^2\text{)}$$

(ロ) 管台部の有効な面積 A_2

$$A_2 = 2(TN - TNR)NH \times (SN / SS)$$

$$= 2(9.9 - 3.4)24.75 \times (10.0 / 10.0) = 321.7 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$TNR = (P \cdot DON) / (200 \cdot SN + 2 \cdot K \cdot P)$$

$$= (180 \times 41) / (200 \times 10 + 2 \times 0.4 \times 120) = 3.4 \text{ (mm)}$$

$$NH = 2.5 \cdot TN = 2.5 \times 9.9 = 24.75$$

TNR ; 管台の計算上必要な肉厚

NH ; 管台の有効高さ

(ハ) 溶接部の有効な面積 A_3

$$A_3 = L \times N = 9 \times 9 = 81 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$L = 9 \text{ mm (溶接の脚長)}$$

$$N = 9 \text{ mm (溶接の脚長)}$$

$$\therefore A_0 = A_1 + A_2 + A_3 = 483.3 \text{ (mm}^2\text{)} \quad AR = 214.2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

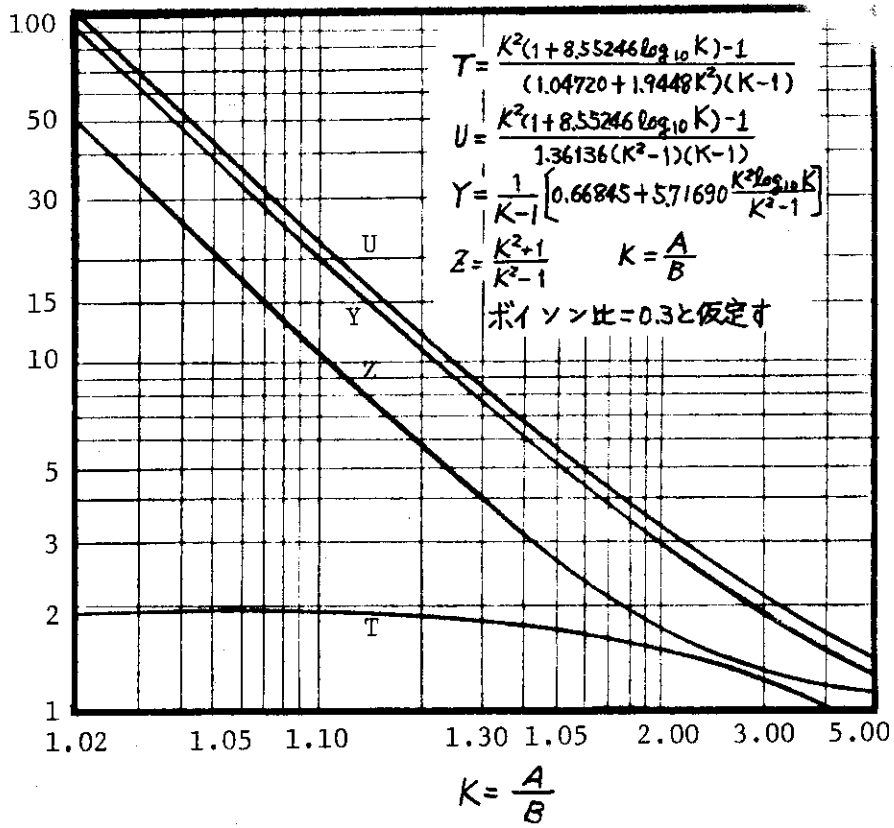


Fig. A-1 T, U, Y, Z の値

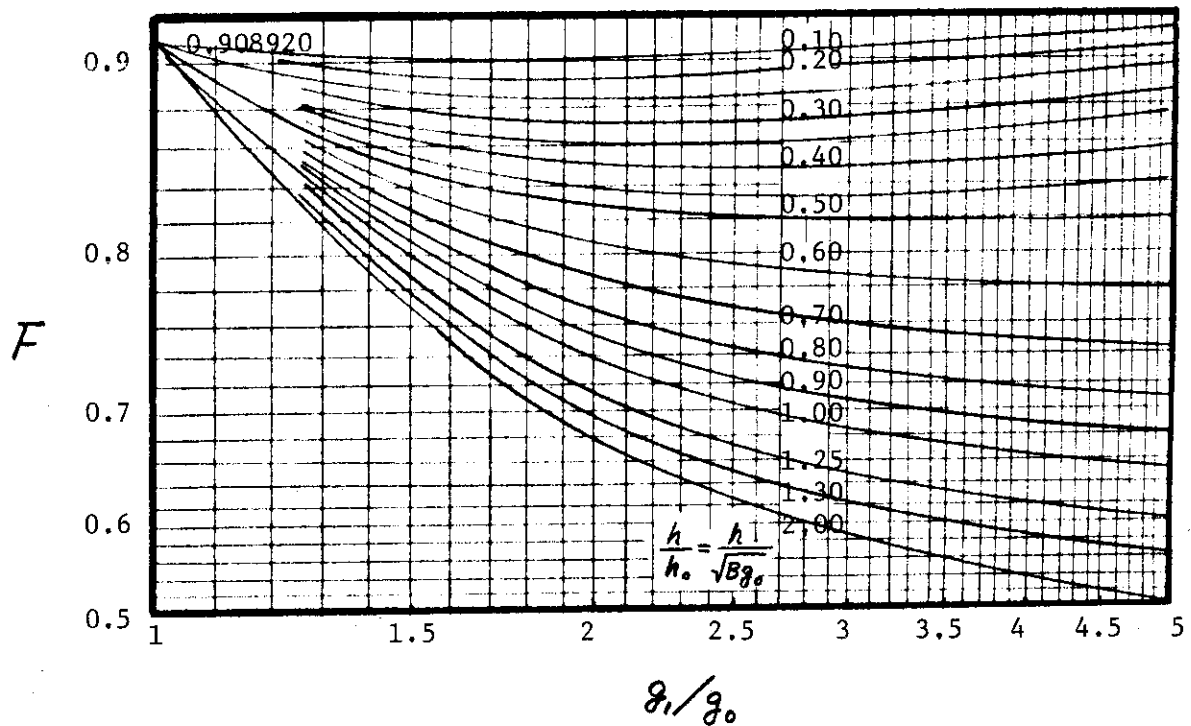


Fig. A-2 F の値 (一体フランジの定数)

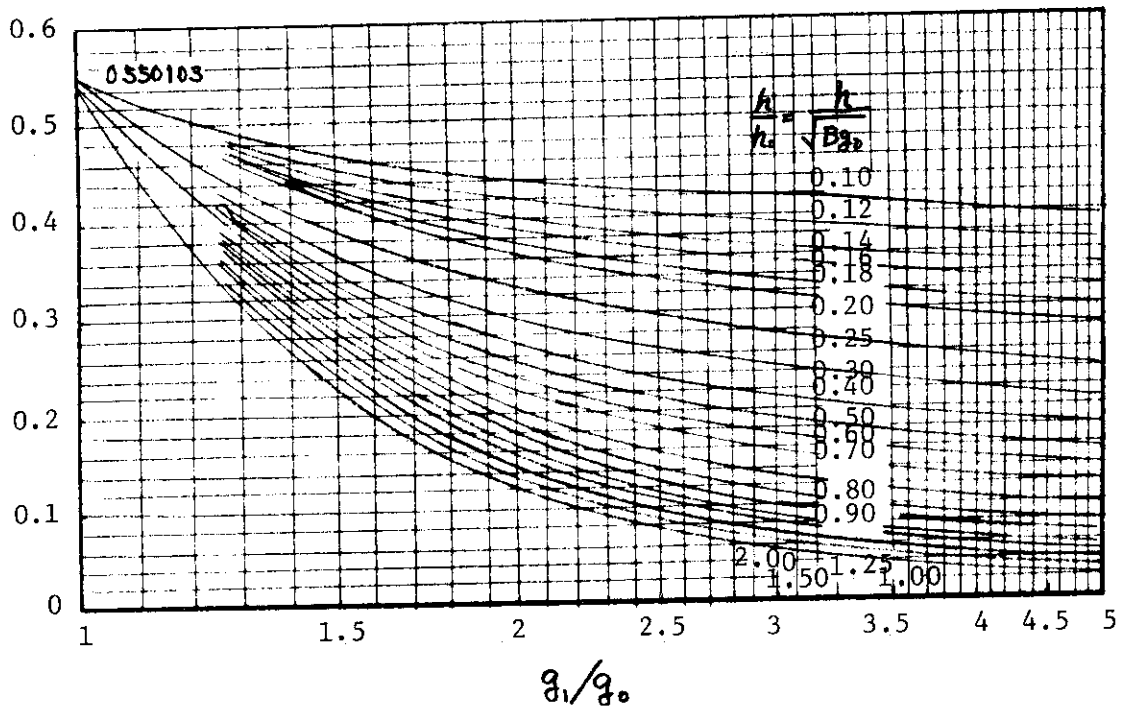


Fig. A-3 V の値 (一体フランジ)

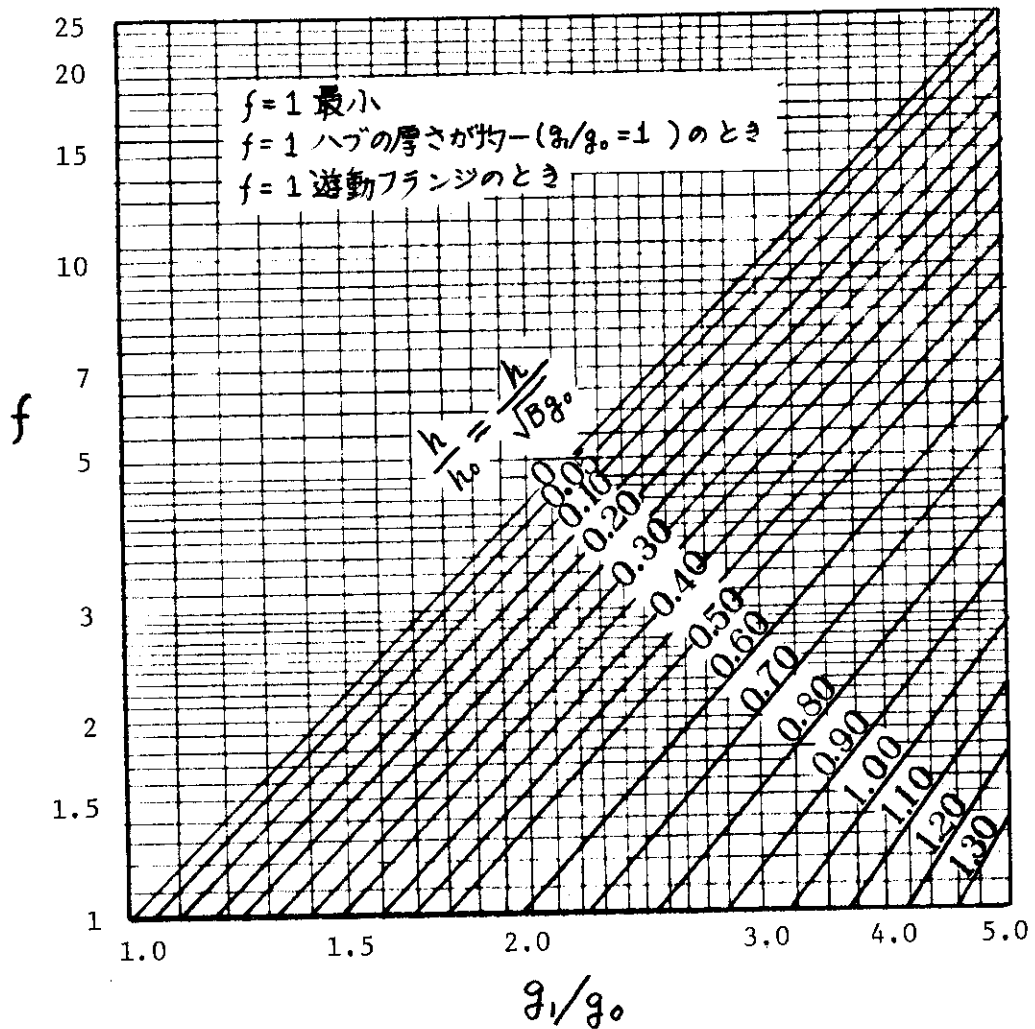


Fig. A-4 f の値

Appendix B 加圧タンクの構造強度計算

1. 加圧タンク胴部の最小必要肉厚 t_s

$$t_s = \frac{P \cdot D_i}{200 \cdot \sigma_x \cdot \eta - 2P(1-K)} + \alpha = \frac{180 \times 100}{200 \times 10 \times 1 - 2 \times 180(1-0.4)} + 0$$

$$= 10.09 \text{ (mm)}$$

$P = 180 \text{ kg/cm}^2$ (最高使用圧力)

$D_i = 100 \text{ mm}$ (胴の内径)

$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$ (材料の許容応力)

$\eta = 1$ (溶接継手効率)

$\alpha = 0$ (腐れしろ)

$K = 0$ (容器の材質と使用流体の温度に応じた定数)

2. 蓋板および底板の最小必要肉厚 t

$$t = d \sqrt{\frac{Z \cdot C \cdot P}{100 \cdot \sigma_x}} + \alpha = 100 \sqrt{\frac{1 \times 0.42 \times 180}{100 \times 10}} + 0 = 27.49 \text{ (mm)}$$

$P = 180 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$

$\alpha = 0 \text{ mm}$

$d = 100 \text{ mm}$ (内径)

$Z = 1$ (定数で Fig. A-1 による)

$C = 0.42$ (定数)

$$\left\{ C = 0.5 \frac{t_r}{t_s} (\text{MIN } 0.3) = 0.5 \times \frac{10.09}{12} = 0.42 \right\}$$

3. 容器底部隅の丸みの計算 r

$$r \geq 1.5 t_f = 1.5 \times 12 = 18 \text{ (mm)}$$

Appendix C 膨張タンクの構造強度計算

1. 圧力抑制タンク胴部の最小必要肉厚 t_s

$$t_s = \frac{P \cdot D_0}{200 \cdot \sigma_x \cdot \eta + 2 \text{ kP}} + \alpha = \frac{10 \times 165.2}{200 \times 10.0 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 10} + 0 = 0.83 \text{ (mm)}$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$D_0 = 165.2 \text{ mm}$$

$$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$$

$$\eta = 1$$

$$k = 0.4$$

$$\alpha = 0$$

2. 蓋板および底板の最小必要肉厚 t

$$t = d \sqrt{\frac{Z \cdot C \cdot P}{100 \cdot \sigma_x}} = 143.2 \sqrt{\frac{1 \times 0.3 \times 10}{100 \times 10.0}} + 0 = 7.84 \text{ (mm)}$$

$$d = 143.2 \text{ mm}$$

$$Z = 1$$

$$C = 0.5 \cdot \frac{t_r}{t_s} = 0.5 \frac{0.64}{8.82} = 0.036 \text{ (}\therefore C = 0.3 \text{ とする)}$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_x = 10.0 \text{ kg/mm}^2$$

$$\alpha = 0$$

3. 容器底部隅の丸みの計算 r

$$r \geq 1.5 t_f = 1.5 \times 8.82 = 13.2 \text{ (mm)}$$