

JAERI-M

8767

NSRR 高温高压カプセル

1980年3月

小林 晋昇・豊川 俊次

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 高温高圧カプセル

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

(1980年2月5日受理)

本報告書は、NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) 実験用に完成した高温高圧カプセル (以下、高圧カプセルと言う) についてまとめたものである。

高圧カプセルは、実際の動力炉の運転温度および圧力条件を模擬する高温高圧条件下の燃料破損実験に使用するものである。

本カプセルについては、炉外および炉内において試運転試験を行った結果、高温高圧下のインパイル実験装置に必要な性能が確認でき、製作目的全般にわたって所定の成果が得られた。

JAERI-M 8767

NSRR High-Temperature High-Pressure Capsule

Shinsho KOBAYASHI and Shunji TOYOKAWA

Division of Reactor Safety
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 5, 1980)

This report describes a high temperature, high pressure capsule (HT-HP capsule) developed for NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) in JAERI.

To perform reactivity accident tests under power reactor operating conditions, the capsule is designed to simulate a high temperature, high pressure atmosphere of BWR or PWR.

Out-pile and in-pile performance tests of the capsule made by December 1978 showed its design specifications had been met.

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

目 次

1. はじめに	1
2. 設 計	2
2.1 基本設計	2
2.1.1 設計に対する要求	2
2.1.2 設計方針	2
2.2 構造設計	3
2.2.1 高圧カプセルの概略構造	3
2.2.2 試験部容器の構造	3
2.2.3 加圧タンクの構造	4
2.2.4 圧力抑制タンクの構造	4
2.2.5 高圧カプセル上部の押え機構の構造	4
2.2.6 計測制御系の概要	4
2.3 強度設計	5
2.3.1 高圧カプセルの負荷荷重の考え方	5
2.3.2 高圧カプセルの最大実験条件	6
2.3.3 高圧カプセルの負荷荷重の算定根拠	6
2.3.4 高圧カプセルの負荷荷重の算定結果	7
2.3.5 高圧カプセルの強度設計条件	8
3. 高圧カプセルの性能	9
3.1 燃料破損実験条件に関する高圧カプセルの性能	9
3.1.1 温度および圧力条件	9
3.1.2 試験燃料の発熱量	10
3.1.3 実験体系	11
3.1.4 実験計装機器	11
3.2 NSRR 実験物取扱い設備との適合性	12
3.3 高圧カプセルの試運転実績	12
3.3.1 試運転の概要	12
3.3.2 高圧カプセルの運転制御系	12
3.3.3 高圧カプセル運転用電気ヒータの容量	13
3.3.4 高圧カプセルの温度分布	13
3.3.5 圧力計、水位計およびサイレンサーの性能	13
4. 試験検査	14
5. ま と め	15
謝 辞	15
参考文献	16
付 録 NSRR の装置および特性の概要	60

Contents

1. Introduction	1
2. Design	2
2.1 Basic Design	2
2.1.1 Requirements	2
2.1.2 Design Policy	2
2.2 Structural Design	3
2.2.1 Outline of Capsule	3
2.2.2 Test Section	3
2.2.3 Pressurizer Tank	4
2.2.4 Surpression Tank	4
2.2.5 Holding Down Device	4
2.2.6 Instrumentation	4
2.3 Stress Analyses	5
2.3.1 Evaluation of Loads	5
2.3.2 Maximum Test Condition	6
2.3.3 Bases of Stress Calculations	6
2.3.4 Results of Stress Calculations	7
2.3.5 Design Requirements from Stress Analyses	8
3. Performances	9
3.1 Performance for Reactivity Accident Tests	9
3.1.1 Temperature and Pressure Conditions	9
3.1.2 Energy Deposition	10
3.1.3 Space of Test Section	11
3.1.4 Measuring Instruments	11
3.2 Handling performance of NSRR Facilities	12
3.3 Records of Performance Test	12
3.3.1 Test Schedule	12
3.3.2 Operation Control System	12
3.3.3 Capacity of Electric Heaters	13
3.3.4 Temperature Distribution	13
3.3.5 Performances of Pressure Sensors, Level Sensors and Silencers	13 14
4. Tests and Inspections	15
5. Conclusions	15
References	16
Appendix. Characteristics of NSRR	60

図 ・ 表 ・ 写 真 目 次

表

1. 高圧カプセルの設計主要目	18
2. 高圧カプセルの基本設計条件	19

図

1. NSRR 原子炉棟断面図	21
2. NSRR 実験物取扱い架台組立図	22
3. NSRR 実験物解体セル組立図	23
4. NSRR 実験物保管架台組立図	24
5. NSRR における実験物の設計・製作・使用手順のフロー	25
6. NSRR における実験物の設計に用いる衝撃圧力基本線図	26
7. NSRR における実験物の設計で水撃力の評価に用いる機械エネルギー転換率 基本線図	26
8. 高温高圧カプセル全体組立図	27
9. 高圧カプセル試験部容器単体組立図	28
10. 高圧カプセル加圧タンク単体組立図	29
11. 高圧カプセル圧力抑制タンク単体組立図	30
12. 高圧カプセル試験部容器安全弁組立図	31
13. 高圧カプセル加圧タンク安全弁組立図	32
14. 高圧カプセル圧力抑制タンク安全弁組立図	33
15. 高圧カプセル空気作動弁組立図	34
16. 高圧カプセルグレイロック単体組立図	35
17. 高圧カプセル現場運転操作盤外形図	36
18. 高圧カプセル制御室実験監視盤外形図	37
19. NSRR の最大実験条件における試験燃料発熱量と UO_2 との関係	38
20. 試験燃料の発熱量とカプセル内注入水の径方向の厚さとの関係	38
21. 温度・圧力条件の違いによる試験燃料の発熱量の解析結果	38
22. 高圧カプセル実験用温度計組立図	39
23. 試験部用器内圧測定用圧力計外観図	40
24. 加圧タンク内圧測定用圧力計外観図	41
25. 圧力抑制タンク内圧測定用圧力計外観図	42
26. 高圧カプセルの運転に要する電気ヒータの出力測定結果	43
27. 高圧カプセル運転の標準モデル	43
28. 高圧カプセルの運転制御系統図	45

29. 高圧カプセル各部の温度測定位置	47
30. 炉外での試運転時における高圧カプセルの温度・圧力・水位の時間的变化	48
31. 炉外での試運転時における高圧カプセル各部温度の時間的变化	49
32. 実験孔内での試運転時における高圧カプセルの温度・圧力・水位の時間的变化	50
33. 実験孔内での試運転時における高圧カプセル各部温度の時間的变化	51
34. 高圧カプセルの定格運転時における軸方向温度分布	52
35. 高圧カプセルの軸方向伸びの測定結果	53
36. 炉内（実験孔内）および炉外での試運転における加圧タンク内圧力の比較	53
37. 炉外での試運転時における高温高圧用圧力計と仮設ブルドン管圧力計の指示値の比較	54
38. 試運転時における加圧タンク水位計の指示と解析による水位変化の比較	54
39. 高圧カプセルの工事のフロー及び試験・検査の概略	55

写 真

1. 高圧カプセル全体組立時の外観	57
2. 高圧カプセル現場運転操作盤の外観	57
3. 高圧カプセル制御室実験監視盤の外観	57
4. NSRR 実験物取扱い架台の外観	58
5. NSRR 実験物解体セルの外観	58
6. NSRR 実験物保管架台の外観写真	58
7. NSRR 実験物詳細寸法測定装置（カプセル寸法測定用プロフィールメータ）	59
8. NSRR 実験物内部欠陥計測装置（超音波探傷試験装置）	59

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) 計画は、原子炉を用いて行う実燃料の破壊実験計画で、事故時の燃料挙動を工学的立場から解明することを目的とするものである。¹⁾

NSRRでは、1975年10月に燃料破壊実験を開始し、これまでに約300余回に達する数多くのパラメータ試験を行った。これらの実験は、いずれもNSRRの長期研究計画のもとに、常温常圧試験条件で実施したものである。^{2), 3), 4)}この長期研究計画では、先ず、常温常圧下における実験で主要なパラメータの影響を把握する。次に、BWRおよびPWRの運転条件を模擬した高温高圧の条件へと進み、さらに強制対流条件を実現し、ループでの実験へと移行する。そして実験結果の実炉への適用可能性を確認してゆくという方法で実験を進める予定である。

本報で述べる高温高圧カプセル（以下、高圧カプセルと言う）は、この長期研究計画のうち、高温高圧の条件下でNSRR実験に使用する最初の実験装置である。

本稿は、この高圧カプセルの設計、製作、性能および試運転結果についてまとめたものである。

NSRRでは、先ず初めに、高温高圧の条件を得る目的で、昭和49年度に、高温高圧の炉外試験装置を試作した。インパイル実験用の高圧カプセルの設計・製作にあたっては、試作機の設計、製作およびその後の各種試験検査によって得られた技術的資料をもとに進めた。^{5), 6), 7)}

特に、高圧カプセルの設計で試作機の経験にもとずき、配慮あるいは改良を加えたところは、以下の諸点である。Table 1に高圧カプセルの設計主要目を示す。

- (1) 炉心で発生した中性子の利用率を高め、目標とする試験燃料の発熱量を得るために、試験部容器について変形を許す設計を採り入れ、容器胴部の肉厚を薄くした。
- (2) 試作機では、試験部容器とその上部の加圧タンクとの接続配管を溶接により固定し、1体構造としている。これに対し、実機では、同じ位置に用いる配管やケーブル類などをグレイロックやコネクタによる接続とした。その結果、試験部容器と加圧タンクとの間で容易に分離可能な構造となり、装置の取扱いも円滑とすることができた。
- (3) 試作機では、運転圧力を $150 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とし、燃料の破損時に発生する衝撃圧力を $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ として、設計圧力を $180 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とした。

これに対し、実機では、運転圧力を $160 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、衝撃圧力を 210 kg/cm^2 とし、NSRRおよびSPERTの実験結果（最大約 $130 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ ）よりも高めに見積もり、設計圧力を $370 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ として安全側となる設計を行った。

- (4) 装置の各容器類に設けた安全弁では、試作機では、安全弁取付後、容器の耐圧試験は、安全弁が作動してしまうために実施できない構造であったが、実機では、安全弁にギャグを用いることにより容器の耐圧試験のできる構造に改良した。
- (5) 装置の運転制御回路では、温度制御、圧力制御それぞれを個別に独立させていた試作機に対し、実機では、さらに、温度・圧力を同時に制御できる回路を追加した。

2. 設 計

2.1 基本設計

2.1.1 設計に対する要求

高圧カプセルは、PWR の定格運転時における温度および圧力条件を模擬した状態で行う燃料破損実験に用いる実験装置とすることが望まれる。このことから、高圧カプセルは、圧力160 kg/cm²G、温度約347°Cにおける運転がスムーズでなければならない。さらに、高圧カプセルは、これまでのNSRR実験を実施してきた大気圧カプセルのように幅の広い実験ができることと、試験燃料の高い発熱量が得られることなどが、実験実施上要求されている。^{8), 9)}

試験燃料の発熱量は、カプセル内に注入する燃料周囲の水層の厚さによっても異なる。大気圧水カプセルにおける理想的な水層の厚さは、約5.5 cmであった。高圧カプセルの場合についても、理想的な水層の厚さを確保するような試験部容器の内径とすることが要求される。

また、NSRR実験では、試験燃料の破損により高温のペレットや核分裂生成物等が冷却材中に分散する。この試験燃料の破壊に伴ない、カプセル内で衝撃圧力や水撃力が発生しカプセルに圧力波として作用する。したがって、カプセルが、分散した燃料片や核分裂生成物を容器内に閉じ込めるためのものであることから、カプセル自身試験燃料のいかなる形態での破損に対してもこわれることのない剛な設計とすることが要求される。

また、装置の取扱いに関する観点では、先ず第1に、NSRRの実験設備（Fig.1にNSRR原子炉棟断面積を、Fig.2 NSRR実験物取扱い架台組立図を、Fig.3にNSRR実験物解体セル組立図を、Fig.4にNSRR実験物保管架台組立図を示す）で本カプセルの組立、分解などの作業が行われるため、この設備との取合について十分に配慮した構造とすることが、当然のことながら要求される。

次に、実験計装機器を取り付け、照射過渡時のデータを得る必要がある。それ故、試験燃料や実験計装機器は、実験ごとのカプセルに装填および取出しがおこなわれることになる。特に、この装填・取出し作業時における放射線被曝の低減化のためにも、カプセルは、作業性の良い構造とすることが望まれる。更に、後述するように、高圧カプセルは、長尺で重量のある装置であることから、クレーン設備を多用する必要がある、この点についても設計上の配慮が望まれるものである。

本高圧カプセルの設計にあたっては、上記の基本的な諸点に考慮を払い設計を行った。

2.1.2 設計方針

NSRRでは、実験物（カプセルやループ等）の設計方針についてその基本をNSRRの原子炉設置許可の中で定めている。その中で実験物については、構造設計、強度設計、強度確認試験および使用条件等、項目別に設計時の基本的な考え方が明記されている。

本高圧水カプセルについても、NSRRの大気圧水カプセルと同様に上記、設計時の基本的な考え方の条項を尊重し設計を進めた。

Fig. 5にNSRRにおける実験物の設計・製作および使用手順のフローを示す。

高圧カプセルの設計は、まず、装置に作用する圧力の評価から着手する。装置に作用する圧力は、装置の運転圧力と試験燃料に与える発熱量から求める衝撃的な圧力との和により求められる。Fig. 6およびFig. 7にNSRRの実験物の設計に用いる衝撃圧力および水撃力の評価の基本線図を示す。

また、本カプセルの設計では、瞬時のパルス照射実験と地震との重なる確立が非常に少ないことから、地震は $160 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の本カプセルの定格圧力での運転時に発生したと仮定し、その結果カプセルに外的荷重として作用するものとして設計した。

高圧カプセルは、最大実験条件において、試験燃料を装填する試験部容器とそれ以外の部分で設計圧力が $370 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ および $200 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ と異なる。

まず、試験部容器は、 $160 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の運転圧力に、衝撃圧力に対して安全余裕を見込んだ $210 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の圧力を加算し、 $370 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ を設計圧力とした。これに対し、試験部容器以外で高圧となる部分（主に加圧タンクおよび試験部容器と加圧タンクの連続配管など）では、 $200 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}^*$ を設計圧力とした。

2.2 構造設計

2.2.1. 高圧カプセルの概略構造

Fig. 8に高圧カプセルの全体図を示す。図に示す如く、高圧カプセルは、全長約7 mの高圧カプセル本体と約5 mのカプセル上部の押え機構および運転操作パネル類により構成される。装置の全体組立の外観をPhoto. 1に示す。

高圧カプセルは実験孔の内径によって、外径を最高約200 mm ϕ と制限される。本カプセルの本体部分は、下から試験部容器、加圧タンクおよび圧力抑制タンクの順に容器類を配置し、容器類を結ぶ配管部には、容器類の支持と配管の保護を兼ねるための保護外筒を2分割円筒型として設けた。上記、容器間を直接結ぶ配管は、その途中にスパイラル部分を設け、熱膨脹を吸収する構造とした。

2.2.2 試験部容器の構造

Fig. 9に試験部容器の単体組立図を示す。

試験部容器は、容器本体、フランジ、下部スカート部および断熱材からなる容器部と、試験燃料を固定する支持具、容器の内圧測定用圧力計、冷却材温度測定用熱電対および昇温用の電気ヒータ（棒状型で3本1組）からなる内蔵品により構成されている。容器のフランジ部や計装線のフランジ貫通部などのシール部分は、中空の金属Oリングを用いてシールする構造とした。

* 試験部容器内で発生すると考えられる衝撃圧力が加圧タンクに伝播する伝播圧力を解析により求め、その得られた圧力に対して安全余裕を十分に考慮した相当静圧 $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ を運転圧力（最高 $160 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ ）に加算した圧力である。

2.2.3 加圧タンクの構造

Fig. 10 に加圧タンクの単体組立図を示す。

加圧タンクは、容器胴体、フランジおよび断熱材からなる容器部と、容器の内圧測定用圧力計、冷却材の温度および水温測定用熱電対、水位計および昇圧用の2本のスパイラル型電気ヒータなどによる容器内蔵品により構成されている。容器のシール部分は、試験部容器と同様、中空の金属Oリングを用いている。加圧タンクは、主に、圧力に関する実験条件をセットする容器として用いるものであり、容器内は、蒸気圧によって加圧されるとともに、圧力の調節が行われる。また、本容器は、試験部容器内水の昇温に伴う膨脹水の吸収も行う容器として用いるものである。

2.2.4 圧力抑制タンクの構造

Fig. 11 に圧力抑制タンクの単体組立図を示す。

圧力抑制タンクは、容器胴体、フランジ、内部温度計、圧力計、水位計およびサイレンサーにより構成されている。圧力抑制タンクは、常温水を約800 mmまで保持しておき、実験中に安全弁から吹き出された場合に、蒸気を凝縮し、貯留するために用いる容器である。高温の蒸気は、サイレンサーを通して冷却水中に吐出することにより凝縮する。

上記、3つの容器は、いずれも労働省の第1種圧力容器に該当するため、同法令の規格・基準にしたがった設計であり、それぞれ安全弁を設けている。^{5), 11)} Fig. 12 ~ Fig. 14 に容器類に設けた安全弁の組立図を、また、空気作動弁およびグレイロックの組立図をFig. 15, Fig. 16 それぞれに示す。

2.2.5 高圧カプセル上部の押え機構の構造

NSRRでは、実験物の飛び上りを防止するため、実験物の下部をグリッピング装置で固定し、上部をホールドダウン機構により抑えた状態で、実験を実施している。本高圧カプセルについても、試験部容器下部をグリッピング機構により固定し、上部に押え機構を設け、抑え得る構造とした。

押え機構は、パラフィンと粒状鉛等を充填した遮蔽容器、支持棒、保持プレート、伸び吸収スプリングおよびターンバックル等により構成されている。

押え機構と高圧カプセル本体との接続部は、実験準備などの取扱い作業時、頻繁に、接続および分離することから差込み型とし、ボールロックピンを挿入して接続する構造とした。同様に、ヒータ電源ケーブル、運転計装ケーブルおよび実験計装ケーブルについても同じ位置でコネクタ-接続とした。

2.2.6 計測制御系の概要

高圧カプセルの運転操作盤の外観図をFig. 17, 18 に、外観写真をPhoto 2, 3 に示す。

高圧カプセルの運転は、主に、NSRRの原子炉棟内に設けた現場操作パネルにおいて行うようにした。本カプセルの運転時における温度ならびに圧力の制御は、試験部容器と加圧タンクとに内蔵した電気ヒータの電源をON-OFFさせる方法を用いている。また、運転中における装置の監視は、それぞれの容器や保護筒に設けた温度計、圧力計および水位計などの指示計により行う。

2.3 強度設計

2.3.1 高圧カプセルの負荷荷重の考え方

高圧カプセルは、実験孔内に装荷された後、実験の初期条件としての圧力および温度（160 kg/cm²G 及びその飽和温度）の状態でパルス照射を受ける。したがって、最大実験条件に近づくような高い発熱量を与える実験において、試験燃料は、細かな粒子状となるような激しい破損を呈する。この試験燃料の破損に伴って、容器内上部に自由空間のある大気圧水カプセルでは、衝撃圧力及び水撃力等の破壊力が発生し容器壁に作用する。一方、本高圧カプセルの試験部容器は、実験時容器内上部に自由空間がなく満水の状態で使用される。それ故試験燃料の破損により、冷却材が飛び上がり容器のフランジ等に衝突する現象で生ずる水撃力の発生はない。以上の評価に基づき、高圧カプセルの試験部容器に作用する負荷荷重は、運転による圧力と衝撃圧力である。

加圧タンク内では、試験部容器内での試験燃料の激しい破損に伴って、試験部容器から加圧タンクへの水の急激な吹き出しが考えられる。この噴流は、加圧タンク上部に自由空間があることから噴出口の形状にもよるが、加圧タンク内水を飛び上がらしめ、水撃力を発生させる恐れがある。このため、この噴出流による加圧タンク内水の飛び上がりを防止するため、試験部容器から加圧タンク内への流入部分に水撃力防止装置（サイレンサー）を設けた。

このことにより、加圧タンクに作用する負荷荷重としては、水撃力は無視し得るものであることから、運転時の最高圧力と、試験部容器内で試験燃料の破損時に発生する衝撃圧力が加圧タンク内に伝播すると予想される伝播圧力（衝撃圧力）とを主要なものとした。

また、圧力抑制タンクについても、安全弁を介して吹き出される高温水及び蒸気によってタンク内水の飛び上がりが考えられる訳であるが、加圧タンクと同様にサイレンサーを設けることにより、水撃力の発生も抑止している。

圧力抑制タンクに作用する負荷荷重としては、タンクに備える安全弁の吹出圧力が最高使用圧力となることから、安全弁の吹出圧力を主要なものとした。

保護筒に作用する負荷荷重は、保護筒内の配管が破断した場合を想定し、配管の破断口径から噴出する蒸気-水の二相流体が保護筒に衝突する荷重を主要なものとする。

高圧カプセル上部の押え機構に作用する負荷荷重は、NSRRの大気圧水カプセル用ホールダウン機構と同等の初期抑え荷重と、高圧カプセルの熱膨脹により生ずる押え機構への圧縮荷重とを主要な荷重とした。

なお、高圧カプセルの疲れに対する検討については、本カプセルの繰返し使用回数が、NSRR設置許可条件に述べられている通り200回以下であるので、次項に示す、設計時の最大実験条件に対して200回を繰返し回数と定めた。

2.3.2 高圧カプセルの最大実験条件

設計条件としての高圧カプセルの最大実験条件は、Fig. 19 に示したNSRRの実験条件の許容の上限である有効破壊エネルギー 920 cal^* および総発熱量 $3.1 \times 10^5 \text{ cal}$ までとした。従って、高圧カプセルの設計負荷荷重の算定は、この最大の実験条件に基づいて行った。

2.3.3 高圧カプセルの負荷荷重の算定根拠

(1) 設計上の適用データ

NSRR実験と同種の燃料破損実験は、米国のNRTS (National Reactor Testing Station) において、1965年から1970年にかけて行われたSPERT-CDC実験がある。

SPERT-CDC実験によれば、水中におかれた燃料がパルス照射によって破損する際に破壊力が発生する。この破壊力は、衝撃圧力と水撃圧力が主要なものであり、このうち衝撃圧力の発生は、破損した高温の燃料片が燃料周囲の冷却材中に飛散し、冷却材が急激に加熱されることから蒸気爆発的な現象としておこるものである。一方、水撃力の発生は、衝撃圧力の発生に伴う蒸気爆発的な現象と同時に発生した蒸気の膨脹によって、燃料周囲の冷却材が吹き上げられ、水魂となって、カプセルの上蓋などに衝突して生ずるものである。

(2) 試験部容器および加圧タンクに作用する負荷荷重

試験部容器および加圧タンクの設計のための負荷荷重は、静的な最大使用圧力と上記のSPERT-CDC実験のデータにもとずいた蒸気爆発的な衝撃圧力である。設計に用いる衝撃圧力値 ($130 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) は、SPERT-CDC実験で得られた衝撃圧力のピーク値^{*}を結んで作成した最大圧力線図 (Fig. 6参照) から求めたものである。

加圧タンクに作用する負荷荷重としては、運転時の最高使用圧力 (熱荷重及び地震荷重を含む) と衝撃圧力の伝播解析により得られた圧力であり、これらを加算した圧力が最大の加圧タンクへの負荷荷重である。

(3) 圧力抑制タンク

圧力抑制タンクの設計のための負荷荷重の算定は、圧力抑制タンクに備える安全弁の吹出圧力を考慮した荷重と、熱荷重および地震荷重である。

(4) 保護筒

保護筒の設計のための負荷荷重は、配管の破断口から噴出する蒸気-水の二相流体が保護筒に衝突する際の荷重を主要なものとし解析により求めた。

(5) 押え機構

押え機構の設計のための負荷荷重の算定は、運転前に負荷する初期押え荷重と、熱膨脹によって生ずる押え機構への圧縮荷重および地震荷重である。

*		健全燃料実験	浸水燃料実験
	試験燃料重量 (g. UO_2)	90	90
	発熱量 (cal/g. UO_2)	600	450

*		設計用衝撃圧力ピーク値	圧力タンク内	
	試験部容器内	健全燃料 600 cal/g. UO_2	130 kg/cm^2	衝撃圧力の伝播解析により求める。
		浸水燃料 450 cal/g. UO_2	130 kg/cm^2	

2.3.4 高圧カプセルの負荷荷重の算定結果

(1) 試験部容器に対する負荷荷重の算定結果

(i) 静的荷重の算定結果

試験部容器の静的な負荷荷重は、運転圧力の最大値である 160 kg/cm^2 の圧力に、安全余裕度を考慮した圧力 $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ を加算し、 $200 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とした。

(ii) 動的荷重の算定結果

試験部容器の動的な負荷荷重は、前節で述べた衝撃圧力をこれに相当する静的荷重に換算して負荷荷重とする。

この動的荷重の相当静的荷重への換算は、動的荷重に対する試験部容器の動的応答解析を行い、換算係数を求めることによって可能である。算出に用いた諸定数は

圧力ピーク値 (kg/cm^2)	130 (動圧)
作用時間 (msec)	1.1
縦弾性係数 (kg/mm^2)	2.0×10^4
降伏強さ (kg/mm^2)	17.7
引張強さ (kg/mm^2)	49.5
伸び (%)	35

である。

試験部容器の設計に用いる換算係数としては、計算で得られた値の 1.2 に安全余裕度としてさらに 0.4 を加算し 1.6 を採用した。それ故、相当静的荷重は、衝撃圧力 $130 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の 1.6 倍となり $210 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ である。

以上のことから、試験部容器の設計荷重は、運転圧力 160 kg/cm^2 に相当静的荷重 $210 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ を加算して $370 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とした。

(2) 加圧タンクに対する負荷荷重の算定結果

加圧タンクの負荷荷重は、試験部容器内で発生する衝撃圧力 (最大 $130 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$) がその後、加圧タンク内に減衰して伝播する圧力 (伝播圧力) を解析および NSRR の耐爆実験により求め、次に、試験部容器の場合と同じ方法で、伝播圧力を相当静的荷重に換算し、運転圧力に加算する方法で求めた。

加圧タンクの設計に用いた換算係数は、計算値 1.2 に安全余裕度 0.8 を加算し 2.0 とした。この結果、相当静的荷重は、圧力ピーク値 $20 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の 2 倍で $40 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ となり、設計荷重は、 $160 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の運転圧力に加算して $200 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とした。

(3) 押え機構に作用する負荷荷重の算定結果

高圧カプセルの押え機構に作用する荷重は、NSRR のホールドダウンと同様に、押え機構に設けたスプリングを規定の変位 (約 2 cm) まで圧縮する初期押え荷重と、カプセルの熱膨脹によりスプリングが圧縮される時の反力とである。

押え機構の負荷荷重の算出は式(1)によって行った。

$$F = K \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし K : 押え機構のバネ定数 (kg/mm)

δ : バネの圧縮長 (mm)

ここで $\delta = \delta_1 + \delta_2$

δ_1 ; バネの初期圧縮長 (20 mm)

δ_2 ; 装置の熱膨脹によるスプリングの圧縮長 (mm)

(計算結果 ; $\delta_2 < 25$ mm)

式(1)により得られた負荷荷重は、約 1445 kg であり、設計には、1500kg として強度評価を行うこととした。

2.3.5 高圧カプセルの強度設計条件

高圧カプセルの強度設計の基本条件を Table2 に示す。

Table に示す高圧カプセルの静的荷重 (200 kg/cm²G) に対する強度設計は、以下の基準にしたがって設計応力の評価を行った。¹⁰⁾

- (i) 一次一般膜応力強さ $\leq S_m$
- (ii) 一次局部膜応力強さ $\leq 1.5 S_m$
- (iii) 一次膜応力+一次曲げ応力強さ $\leq 1.5 S_m$
- (iv) 一次応力+2次応力 $\leq 3 S_m$
- (v) ボルトの平均引張応力 $\leq 2 S_m$
- (vi) ボルトネジ山の剪断応力 $\leq F/\sqrt{3}$

ここで F は、材料の降伏点と 0.7 倍の引張強さの小さい方の値 (降伏点を用いた) である。

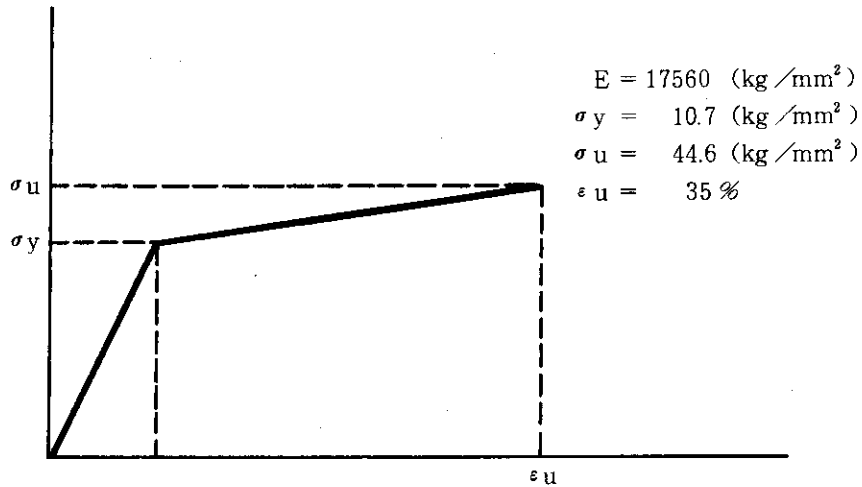
この設計応力の評価基準は、後で述べる変形を許す設計を行った試験部容器の胴部 (試験燃料を原子炉のパルス出力により照射する場所で、炉心からの中性子が試験燃料に入射する部分) 以外の部分に適用した。

この静的荷重条件における設計応力の評価は、そのほとんどについて計算コードを用い、軸対象の条件で解析が行なわれたものである。

一方、動的荷重を相当静的荷重に換算し、160 kg/cm²G の運転圧力に加算した設計荷重 (370 kg/cm²G) に対する試験部容器胴部の強度設計は、設計荷重に対する試験部容器胴部の変形量の評価を計算コードを用い、弾塑性解析をおこない、変形量が以下に示す値を越えないことを確認した。

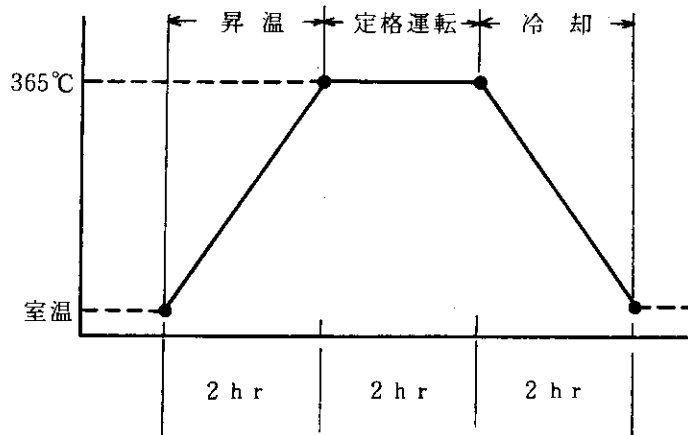
- (i) 板厚平均歪 $\leq 2\%$
- (ii) 表面歪 $\leq 2\%$
- (iii) 局部歪 $\leq 5\%$

上記、弾塑性解析における材料の応力-歪の関係は、下図に示すようにバイリニアール表示とし軸対称の条件で行なった。



地震荷重に対しては、水平方向 $3C_0$ 、* 垂直方向 $1.5C_0$ が同時に作用する場合の静的解析と NSRR の原子炉棟の床応答スペクトルを用いた動解析により評価した。

また、高压カプセルに発生する熱応力の評価は、カプセルへの熱サイクル条件を下図に示すように昇温に要する時間を 2 時間、定格運転状態を 2 時間、および冷却に要する時間を 2 時間の計 6 時間と仮定し、計算コードを用い軸対称条件での計算により行なわれたものである。



3. 高压カプセルの性能

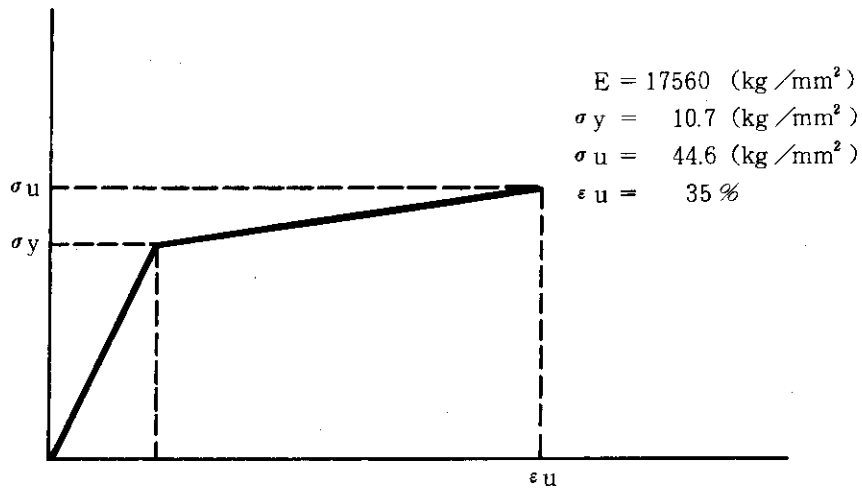
3.1 燃料破損実験条件に関する高压カプセルの性能

3.1.1 温度および圧力条件

高压カプセルは、実炉の運転条件下（温度および圧力条件を模擬する）における NSRR の燃料破壊実験に使用するための実験装置である。

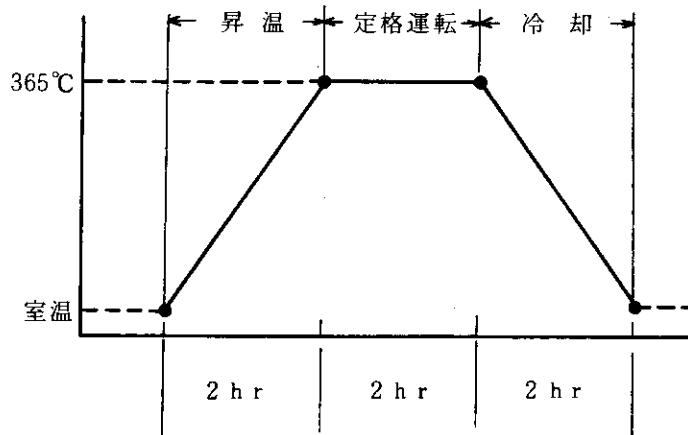
* C_0 は建築基準法に基づく耐震評価の基準値である。

上記、弾塑性解析における材料の応力-歪の関係は、下図に示すようにバイリニアール表示とし軸対称の条件で行なった。



地震荷重に対しては、水平方向 $3C_0$ 、* 垂直方向 $1.5C_0$ が同時に作用する場合の静的解析と NSRR の原子炉棟の床応答スペクトルを用いた動解析により評価した。

また、高压カプセルに発生する熱応力の評価は、カプセルへの熱サイクル条件を下図に示すように昇温に要する時間を 2 時間、定格運転状態を 2 時間、および冷却に要する時間を 2 時間の計 6 時間と仮定し、計算コードを用い軸対称条件での計算により行なわれたものである。



3. 高压カプセルの性能

3.1 燃料破損実験条件に関する高压カプセルの性能

3.1.1 温度および圧力条件

高压カプセルは、実炉の運転条件下（温度および圧力条件を模擬する）における NSRR の燃料破壊実験に使用するための実験装置である。

* C_0 は建築基準法に基づく耐震評価の基準値である。

実炉の運転条件と言っても、BWRとPWRでは、運転時における温度および圧力の条件（温度について約 30°C 、圧力について約 $85\text{ kg/cm}^2\text{G}$ の差がある）が大幅に異なることから、本高圧カプセルでは、その最高値として、PWRの運転条件（温度約 313°C （炉心出口温度）および圧力 $157\text{ kg/cm}^2\text{G}$ ）におけるインパイル実験を円滑に実施するため、温度 365°C 、圧力 $200\text{ kg/cm}^2\text{G}$ の条件で運転時における設計を行った。

したがって、本高圧カプセルの燃料破損実験時における運転時の圧力設定に関しては、加圧タンク内の飽和蒸気圧により、 $160\text{ kg/cm}^2\text{G}$ 以下の圧力であれば任意に設定することができるように装置を製作した。

また、温度の設定では、圧力の設定値にもとづく最小サブクール温度が約 8°C となるが、それ以下の温度であれば任意に設定することができる。

高圧カプセルにおける上記温度および圧力の設定精度としては、 $160\text{ kg/cm}^2\text{G}$ の定格運転状態で温度約 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、圧力約 $\pm 3\text{ kg/cm}^2\text{G}$ とすることが可能である。

以上のことから、本高圧カプセルは、実験目的であるBWRやPWRの実炉の運転条件を設定することが容易に可能であることに加えて、幅の広い温度および圧力の実験条件の設定が可能である。したがって、本カプセルの性能を十分に発揮させることにより、温度および圧力条件に関する、幅の広いNSRR実験が可能である。

3.1.2 試験燃料の発熱量

NSRR実験では、カプセル内に挿入しパルス照射した試験燃料の挙動を整理する場合に発熱量（ cal/g. UO_2 ）を用いている。²⁴⁾

試験燃料が、発熱量の増加にともなって激しく破損することは、これまでの大気圧水カプセル実験（常温・常圧）により明らかである。^{16), 17), 18), 19)}

本高圧カプセルの実験時に試験燃料の発熱量がどの程度となるか推定しておくことは、実験計画を立案する上でも重要である。

高圧カプセル実験における発熱量の推定は、これまでの大気圧水カプセル実験の結果を基準に行った。

まず、高圧カプセルと大気圧水カプセルとの形状寸法の違いによって考えられる影響としては、容器の内径および肉厚が異なることならびに高圧カプセルでは、容器の外側にさらに断熱材を用いていることである。

容器の内径による影響としては、Fig. 20に示すとおり、高圧カプセルでは約5%程度発熱量が低くなるのがわかる。また、容器の肉厚等による影響としては、肉厚4mmの増加で約3%の減少するとの評価^{12), 13)}を参照すると、高圧カプセルでは、大気圧水カプセルに対して約6%低くなる。よって、形状寸法の違いから、高圧カプセルでは大気圧水カプセルよりも約11%発熱量が低くなる。

次に実験時の温度および圧力条件の違いによる影響としては、Fig. 21に示す解析結果^{*}から、常温に比して、BWR条件では約12%、PWR条件では約17%の発熱量の低下があることがわかる。

* 反応度安全研究室の齊藤氏、石島氏、吉村氏、Bruker氏が実施した解析結果で、現在報告書を作成中である。

以上のことから、高圧カプセル実験における試験燃料の発熱量は、大気圧水カプセルに比べて、BWR 条件では約23%、PWR 条件では約29%低下するものと思われる。従って、試験燃料の発熱量としては、100MW-S（積分出力）あたり以下に示す程度得られる見通しから、10%濃縮の標準燃料を用い、破損しきい値を究明する実験が可能となり、これまでの豊富な大気圧水カプセルの実験結果と比較検討することができるであろう。

100MW-S当りの試験燃料の発熱量 (cal/g. UO₂)

試験燃料 の濃縮度	大気圧水カプセル	高圧カプセル	
	常温 常圧	BWR条件	PWR条件
5%	315	243	227
10%	436	336	314
20%	540	416	389

3.1.3 実験体系

NSRR実験は、単一燃料の場合および数本の燃料をバンドルに組み込んだ場合について実施している。本高圧カプセルについても、これまでの大気圧水カプセルの実験体系を尊重し、単一燃料実験はもちろん、最大9本の試験燃料を用いるバンドル実験まで可能である。

3.1.4 実験計装機器

これまでの大気圧水カプセル実験で用いている実験計装機器は、いずれも100°C以下の環境温度条件で使用するものとして製作されており、本高圧カプセルのような高温高圧の条件では、シール性および絶縁性に問題があり、使用不能である。⁷⁾

高圧カプセルの実験計装としては、これまでにインパイル実験に使用可能の見通しの得られた、被覆管表面温度計、冷却材温度計、カプセル内圧力計および試験燃料棒内圧力計について報告する。

(1) 温度計

Fig. 22 に温度計の単体組立図を示す。

温度計は、高温高圧条件で使用するため、シース型とした。温度計の計測部分は、シース外径を0.5 mmφと細くし、NSRR実験における瞬時の過度挙動に対する応答性に着目した構造としている。また、温度計は、被覆管表面温度および冷却水温度など多点計測の必要性から多チャンネル構造とした。尚、計測信号線のカプセルの貫通部は、数本の温度計を銀ロー付けしたアダプターを金属Oリングを用いてシールする方法を採用している。

(2) 圧力計

Fig. 23 ~ Fig. 24 にカプセルに用いた圧力計の外観図を示す。

本圧力計は、歪ゲージ型の高温高圧用圧力計を用いている。歪ゲージ型圧力計については、試作高温高圧カプセルで採用したものと同一タイプのものであるが、インパイル用の本カプセルの圧力計では、昇温による温度ドリフトを少なくするよう改良を加えたものである。

実験計装機器については、温度計および圧力計に限らず、各種の計測機器について改良又は

開発を行ない、より良い実験結果が得られるよう努力するつもりである。⁵⁾

3.2 NSRR 実験物取扱い設備との機能性

高圧カプセルは、長尺の重量物（組立全長；約12 m，重量；約1100 kg）であって、照射実験によりカプセルの一部（NSRR炉心挿入部となる試験部容器の部分）が放射化する。このことから、取扱いには細心の注意が必要となる装置である。

本カプセルを用いての燃料破壊実験は、大気圧水カプセル実験と同様に、組立→試験検査→実験孔挿入→照射→冷却→解体→試験燃料の照射後検査（カプセルにあっては再使用のための検査を行う）の手順によって行われる。

大気圧水カプセル（全長；約1.2 m，重量；約80 kg）に比して全長及び重量とも約10倍となる本カプセルを上記実験手順に従って安全且つ円滑に取扱ってゆくために、NSRRでは、長尺実験物に対する種々の実験物取扱い設備を設けている。

これらの実験物取扱い設備のうち、Photo. 4に示す取扱い架台では、実験孔挿入前の実験物の安全確認のための各種試験を行う。また、Photo. 5に示す実験物解体セルでは、実験物からの試験燃料の取出しを行う。一方、次回の実験までの実験物を、Photo. 6に示す保管架台に保管する。尚、実験物で変形を許す設計を実施した試験部容器胴部については、Photo. 6, 7に示す詳細寸法測定装置（プロフィールメータ）やPhoto. 8に示す超音波探傷試験装置を用いて再使用のための検査を行う。

高圧カプセルは、これらNSRRの実験設備での作業が円滑であること、また、各設備も十分にその機能を果たしていることが、これまでの高圧カプセルの試運転試験で確認された。

3.3 高圧カプセルの試運転実績

3.3.1 試運転の概要

高圧カプセルの機能性ならびに安全性を確認するとともに、本カプセルの取扱い訓練も兼ねる目的で、これまでに約16回の試運転を行った。

試運転は、本高圧カプセル実験に係わる一連の実験手順（組立、注水、耐圧試験、昇温、冷却、排水、分解）をできるだけ取り入れ繰返し訓練するつもりで実施した。

また、高圧カプセルは、インパイル実験時、実験孔内の換気系により冷却される。このため、炉外の組立架台で行った運転に際しては、高圧カプセルの外側に模擬実験孔を取りつけ、換気ファンによる冷却を行い、カプセルの冷却条件をできるだけインパイル実験の場合と同じ条件で試験した。

以下に、主要な試運転結果について述べる。

3.3.2 高圧カプセルの運転制御系

高圧カプセルの運転制御系統の概略図をFig. 26に示す。図に示すとおり、本カプセルの運転制御は、温度制御系統と圧力制御系統の2系統から構成されている。この2系統の制御回路は、

原則としてそれぞれ独自に制御する回路とし、電気ヒータの電源をON-OFFさせる制御方法を採用した。

尚、温度制御回路については、試作機の経験にもとずき、試験部容器内の温度計と加圧タンク内の温度計の信号を演算器の入力とすることにより、常に加圧タンク内の温度が試験部容器内の温度よりも高い状態で制御する回路を増設した。本回路の増設によって、常に試験部容器内は、温度の高い加圧タンク内の蒸気圧により加圧され、減圧沸騰現象が防止され、安定した運転が可能である。

圧力制御回路は、試作機と同様、加圧タンクに設けた圧力計の入力信号によって電気ヒータの電源をON-OFFさせる回路である。

これまでの試運転により、運転制御系は、高压カプセルの運転に十分満足しうるものであった。また、Fig. 27 に示す高压カプセル運転の標準モデルも確認できた。

3.3.3 高压カプセル運転用電気ヒータの容量

高压カプセルの運転に要する電気ヒータ容量の測定結果をFig. 28 に示す。図に示すとおり、試験部容器内に設けたヒータでは、8 kw (3 本)の定格容量に対して約2~3kwの容量で運転に足りうる事が確認され、容量が大きく十分な余裕を残している。

一方、加圧タンク内に設けたヒータは、約4 kw の容量を運転に要するものであり、定格容量5 kw (2本) と定めたことが妥当であった。

3.3.4 高压カプセルの温度分布

Fig. 29 にカプセル各部の温度測定位置を示す。またFig. 30~Fig. 33 にカプセルの代表的な位置における温度の測定結果を示す。

カプセルの外表面温度は、NSRRの実験孔の使用温度との関係で重要となるが、図に示すとおり、最高でも約80°Cであり、使用上問題となることはない。

Fig. 34 に、高压カプセルの定格運転時における軸方向の温度分布を示す。図に示すとおり、容器内部ではほぼ平坦な温度分布が得られたことから、燃料破壊実験時における試験燃料の軸方向の温度分布もほぼ一様と考えられる。

試運転で得られた高压カプセルの軸方向伸びの測定結果をFig. 35 に示す。本カプセルの軸方向伸びは、最大約18 mmで、設計で評価した25 mm以下であった。このことから、運転時のカプセルの伸び量を吸収させるために設けたカプセル上部のスプリング入り押え機構は、その機能を十分に発揮しうるものである。

3.3.5 圧力計、水位計およびサイレンサーの性能

Fig. 36 に示すとおり、圧力計の指示は、炉外および炉内での運転試験いずれでも良く一致していることがわかる。また、炉外で行った試験で仮設して計測したブルドン管型圧力計の指示と本カプセルの圧力計の指示を比較しFig. 37 に示す。図から本カプセルに用いた圧力計の指示精度は約3%以下であり運転上支障ないことがわかる。

運転時における加圧タンクの水位計の指示を、解析と比較してFig. 38 に示す。

本水位計は、歪ゲージを用いた差圧式のもので、当初昇温時に温度ドリフトなどによる指示のバラツキが生じたりしたが、ケーブルの交換およびコネクター部における温度補償回路の付加など、若干の改良が成されたため、ほぼ満足する結果が得られた。

圧力抑制タンク内に設けたサイレンサーは、安全弁作動後、安全弁から吹きだされた蒸気を圧力抑制タンク内において凝縮させるために設けた。

Fig. 31に示すとおり、安全弁作動後、圧力抑制タンク内の温度は、約80°C上昇したが、圧力抑制タンク内の圧力上昇は確認されなかった。以上のことから、圧力抑制タンク内に設けた本サイレンサーがその能力を十分に発揮したことがわかる。

4. 試験・検査

高圧カプセルの完成までに行った試験・検査の概略を高圧カプセルの組立手順と合せてFig. 39に示す。

試験・検査は、高圧カプセルに使用する材料の健全性を調べるための材料試験に始まり、労働省の第1種圧力容器に係わる試験・検査を含め、最終的には、科学技術庁の使用前検査に合格してその全容が終了した。

これらの製作に係わる試験・検査以外に、設計の妥当性を確認するため、火薬を用いた耐爆実験をNSRRにおいて行った。

耐爆実験としては、先ず、加圧タンクの設計で用いた圧力伝播解析結果の妥当性を確認するため、圧力伝播実験を行った。

次に変形を許す設計を行った試験部容器についてその解析の妥当性を確認するため、試験部容器の強度確認試験を行った。

その結果、本カプセルの設計が妥当なものであり、カプセルは、十分にNSRR実験に耐えるものであることが立証された。

本水位計は、歪ゲージを用いた差圧式のもので、当初昇温時に温度ドリフトなどによる指示のバラツキが生じたりしたが、ケーブルの交換およびコネクター部における温度補償回路の付加など、若干の改良が成されたため、ほぼ満足する結果が得られた。

圧力抑制タンク内に設けたサイレンサーは、安全弁作動後、安全弁から吹きだされた蒸気を圧力抑制タンク内において凝縮させるために設けた。

Fig. 31 に示すとおり、安全弁作動後、圧力抑制タンク内の温度は、約80°C上昇したが、圧力抑制タンク内の圧力上昇は確認されなかった。以上のことから、圧力抑制タンク内に設けた本サイレンサーがその能力を十分に発揮したことがわかる。

4. 試験・検査

高圧カプセルの完成までに行った試験・検査の概略を高圧カプセルの組立手順と合せてFig. 39 に示す。

試験・検査は、高圧カプセルに使用する材料の健全性を調べるための材料試験に始まり、労働省の第1種圧力容器に係わる試験・検査を含め、最終的には、科学技術庁の使用前検査に合格してその全容が終了した。

これらの製作に係わる試験・検査以外に、設計の妥当性を確認するため、火薬を用いた耐爆実験をNSRRにおいて行った。

耐爆実験としては、先ず、加圧タンクの設計で用いた圧力伝播解析結果の妥当性を確認するため、圧力伝播実験を行った。

次に変形を許す設計を行った試験部容器についてその解析の妥当性を確認するため、試験部容器の強度確認試験を行った。

その結果、本カプセルの設計が妥当なものであり、カプセルは、十分にNSRR実験に耐えるものであることが立証された。

5. ま と め

高圧カプセルは、高温高圧下で行うNSRR実験に使用するものであり、製作完了後、炉外および炉内において多くの運転試験をおこない、カプセルの機能および性能を調べた。

その結果、NSRRの長期研究計画で必要としている実験装置として本カプセルを完成させるという目標は、ほぼ完了した。今後、実際のパルス実験に用いることにより、試験燃料に付与することのできる発熱量も明確となり、最終的な、高圧カプセルの評価がなされるであろう。

NSRRでは、これまでに大気圧カプセルを用いた実験を数多く実施しており、本カプセルにあっても、実験回数の多いことが望まれている。この意味でも、本カプセルは、インテグラル型の装置であり、試験燃料を挿入して照射する試験部容器を容易に接続および分離できる構造としており、ことなどから取扱い上も簡便である。よって試験部容器をさらに準備し交互に使用することにより本カプセルの実験回数も高められ、得るべきデータも豊富となる。

以上のことから、本高圧カプセルがNSRR実験に効果的に使用され、軽水炉の安全性評価に大いに役立つことを期待するものである。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって総合的に御指導下さった反応度安全研究室長石川迪夫、同室員藤城俊夫の各氏に感謝の意を表します。また、本カプセルに係わる耐爆実験を担当していただいたNSRR管理室山崎 利、菊池 隆、谷内茂康、菊池孝行の各氏に、装置の開発にあたって御協力をいただいた石川島播磨重工業株式会社林 三雄氏、鈴木洋二氏ならびにST研究所株式会社塩田 健氏、笹崎 守氏に感謝致します。さらに、製作時の検査および試運転に際して御助力・御協力をいただいた反応度安全研究室の皆様方、NSRR管理室の皆様方に深甚の意を表します。

5. ま と め

高圧カプセルは、高温高圧下で行うNSRR実験に使用するものであり、製作完了後、炉外および炉内において多くの運転試験をおこない、カプセルの機能および性能を調べた。

その結果、NSRRの長期研究計画で必要としている実験装置として本カプセルを完成させるという目標は、ほぼ完了した。今後、実際のパルス実験に用いることにより、試験燃料に付与することのできる発熱量も明確となり、最終的な、高圧カプセルの評価がなされるであろう。

NSRRでは、これまでに大気圧カプセルを用いた実験を数多く実施しており、本カプセルにあっても、実験回数の多いことが望まれている。この意味でも、本カプセルは、インテグラル型の装置であり、試験燃料を挿入して照射する試験部容器を容易に接続および分離できる構造として、いることなどから取扱い上も簡便である。よって試験部容器をさらに準備し交互に使用することにより本カプセルの実験回数も高められ、得るべきデータも豊富となる。

以上のことから、本高圧カプセルがNSRR実験に効果的に使用され、軽水炉の安全性評価に大いに役立つことを期待するものである。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって総合的に御指導下さった反応度安全研究室長石川迪夫、同室員藤城俊夫の各氏に感謝の意を表します。また、本カプセルに係わる耐爆実験を担当していただいたNSRR管理室山崎 利、菊池 隆、谷内茂康、菊池孝行の各氏に、装置の開発にあたって御協力をいただいた石川島播磨重工業株式会社林 三雄氏、鈴木洋二氏ならびにST研究所株式会社塩田 健氏、笹崎 守氏に感謝致します。さらに、製作時の検査および試運転に際して御助力・御協力をいただいた反応度安全研究室の皆様方、NSRR管理室の皆様方に深甚の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石川迪夫 : “ 模擬爆走出力を利用した安全性研究 ”, 原子力工業 vol. 17, No. 2
(1971)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 星 篤雄, 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)
- (5) 小林晋昇, 他 : “ NSRR高温高压水カプセルの試作開発 ”, JAERI - M 8274 (1978)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 石川迪夫 : “ 反応度事故に対する安全性研究 ”, 日本原子力学会誌 vol. 12, No. 5
(1970)
- (9) 石川迪夫, 他 : “ 反応度事故に関する安全性研究計画 ”, 火力原子力発電, vol. 26,
No. 4, (1974)
- (10) 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)
- (11) 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)
- (12) TRIGA ANNULAR CORE PULSE REACTOR Safety Analysis and Preliminary
Design for the NSRR, Gulf Energy & Environmental Systems, E 117-174
(1972)
- (13) 伊勢武治, 他 : “ NSRRの試験燃料1本ピンの発熱計算 (NSRRの炉物理と核設計・4)
JAERI - M 5613 (1974)
- (14) 石川迪夫, 他 : “ NSRR実験プログレス・レポート・1 (1975年10月~1976年3月) ”,
JAERI - M 6635 (1976)
- (15) 石川迪夫, 他 : “ NSRR実験プログレス・レポート・2 (1976年4月~1976年6月) ”,
JAERI - M 6790 (1976)
- (16) 安全工学部 反応度安全研究室, 他 : “ NSRR実験プログレス・レポート・3 (1976年7
月~1976年12月) ”, JAERI - M 7051 (1977)
- (17) 安全工学部 反応度安全研究室, 他 : “ NSRR実験プログレス・レポート・4 (1977年
1月~1977年6月) ”, JAERI - M 7304 (1977)
- (18) 安全工学部 反応度安全研究室, 他 : “ NSRR実験プログレス・レポート・5 (1977年
7月~1977年12月) ”, JAERI - M 7554 (1978)

- 19) 安全工学部 反応度安全研究室, 他 : " NSRR 実験プロGRESS・レポート・6 (1978年1月~1978年6月)", JAERI - M 7977 (1978)
- 20) 安全工学部 反応度安全研究室, 他 : " NSRR 実験プロGRESS・レポート・7 (1978年7月~1978年12月)", JAERI - M 8259 (1979)
- 21) 塩沢周策 : " NSRR 実験における標準燃料の振舞いに関する一考察 ", JAERI - M 7267 (1977)
- 22) 星 葛雄, 他 : " NSRR 実験における燃料中心温度測定 ", JAERI - M 7796 (1978)
- 23) S. Kobayashi, et al. : " Experiment Results of Some Cluster Tests in NSRR ", Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 15, No. 6 (1978)
- 24) 大西信秋, 他 : " NSRR 実験における試験燃料の発熱量の評価 ", JAERI - M 7539 (1978)
- 25) 藤城俊夫, 他 : " NSRR カプセルの耐爆実験 ", JAERI - M 5861 (1974)
- 26) 塩田 健 : " 新しいトランスデューサ (原子炉の安全性に関する計測) ", 原子力工業誌, 3月号 (1977)
- 27) 塩田 健 : " 原子炉の安全性に関する計測 (新しいトランスデューサ) ", 計測技術誌, Vol. 1.7 (1979)
- 28) 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)
- 29) 八名純三 : " 自緊式クランプ型管継手の耐圧試験について ", 圧力技術誌, Vol. 14 (1976)
- 30) 日本機械学会編修 : " 機械工学便覧 (改訂第5版) "

Table 1 高圧カプセルの設計主要目

項目	単位	試験部容器	加圧タンク	圧力抑制タンク	保護筒
型式		円筒縦型	円筒縦型	円筒縦型	2分割円筒縦型
設計応力	kg/cm ² G	200(370)*	200	20	160(吹出流体)
設計温度	℃	365	365	250	室温
使用材質		SUSF 304	SUSF 304	SUSF 304	SUS 304
内容積	ℓ	6	8	30	—
外径	mm	200	200	210	200
内径	mm	100	100	150	180
最小肉厚部厚さ	mm	13	14	13	8
全長	mm	1095	1155	1720	1155(上部) 1385(下部)
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	200	180	20	—
安全弁の吹出口径	mm	6	7	13	—
容器保温材厚さ	mm	35	35	なし	—
容器保温材質		SUS+Aℓ	SUS+Aℓ	なし	—
配管保温材質		石綿	石綿	なし	—
加熱ヒータ型式		棒状	螺旋型	—	—
ヒータの容量	kW	8(267×3本)	5(25×2本)	—	—
ヒータの出力密度	W/cm ²	11.0	8.3	—	—
ヒータの外径	mm	12	8	—	—
ヒータの全長	mm	1950(3本)	2360(2本)	—	—
ヒータの使用電源	V	200(3φ)	200(1φ)	—	—
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	32	32	32	32
温度計の被覆材質		SUS 316	SUS 316	SUS 316	SUS 316
圧力計の型式		PHT-300M	PHT-300DE	PHT-30DE	—
圧力計の容量	kg/cm ²	300	300	30	—
圧力計の応答周波数	Hz	10 KHz 以上	10 KHz 以上	10 KHz 以上	—
水位計の型式		なし	差圧式歪ゲージ型	差圧式歪ゲージ型	—

Table 2 高圧カプセルの基本設計条件

装置各部の名称	単位	静的荷重条件				最大実験条件				備考
		労働省(第一種压力容器)		科学技術庁(MITIの第一種容器に準拠)		科学技術庁の認可に基づく		評価	備	
		設計条件	耐圧試験	設計条件	耐圧試験	設計条件	評価			
1 試験部容器	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	Sm, 1.5Sm, 3.0Sm, 疲労, 耐震, 熱応力	365 370	塑性変形を許容(薄肉胴部) 1) 数厚平均値, 表面歪→2.0%以下 2) 局部歪→5.0%以下	1) 地震荷重(静的荷重条件時) 水平; 3 Co, 垂直; 1.5 Co 2) 疲労解析 使用回数200回以下(MITI) 3) 使用材料 。容器およびタンク SUSF 304 (JISG 3214) 。ボルト SNB-7 (JISG 4104) 。配管類 (20A, 15A, 8A, 6A等; sch 80) SUS 304TP (JISG 3459) 。ソケットおよびプラグ類 SUS 304およびSUS 316 。保護筒, 保温材, 抑え機構 SUS 304他(JISG 4303) 4) 昇温用ヒーター容量 試験部容器用ヒーター 約8kw/3本 (カートリッジヒーター) 加圧タンク用ヒーター 約5kw/2本 (コイル状シーズヒーター) 5) 保護筒の強度は, 160kg/cm ² Gの圧力の飽和蒸気が, 配管破断によって, 吹出す場合の吹出流が保護筒に衝突する際の臨界流として評価。	
2 試験部容器付の配管, グレイロック, 弁類	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	板の最小厚さ	365 200	MITIの第一種管に準拠		
3 加圧タンク	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	Sm, 1.5Sm, 3.0Sm, 疲労, 耐震, 熱応力	365 200	MITIの第一種容器に準拠		
4 加圧タンク付の配管, 弁類	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	板の最小厚さ	365 200	MITIの第一種管に準拠		
5 圧力抑制タンク	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	250 20	室温 30	250 20	室温 30	Sm, 1.5Sm, 3.0Sm, 疲労, 耐震, 熱応力	250 20	MITIの第一種容器に準拠		
6 圧力抑制タンク付の配管, 弁類	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	214 20	室温 30	250 20	室温 30	板の最小厚さ	250 20	MITIの第一種管に準拠		
7 保護筒	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)			347 160		板の厚さの評価 (耐震)	347 160	板の厚さの評価 (備考5)		
8 保護材 (マラインジュレーション)	温度(°C)			内表面 365		断熱効果の評価	内表面 365°C	容器の薄肉部保温材外表面温度が60°C程度を目標		
9 抑え機構	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)			室温 大気圧		支持構造物の 強度評価(耐震)		NSRRの抑え機構と同等の機能を有すること。		
10 運転計装系の 発信器のセンサ	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)			365 200	室温 326		365 370	正常に作動すること。 耐圧; 370kg/cm ² G, レンジ; 300kg/cm ² G		
11 実験計装系の 発信器のセンサ	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)			365 200	室温 326		365 370	正常に作動すること。 耐圧; 370kg/cm ² G, レンジ; 300kg/cm ² G	試験部容器圧力センサ	
12 試験部容器付逃し弁	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	内部全ヒータによる吐出量の評価	365 200	内部全ヒータによる吐出量の評価	吹出設定圧力; 200±6kg/cm ² G, 背圧; 20kg/cm ² G 吹出流体; 高温水	
13 加圧タンク付安全弁	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	"	365 200	"	吹出設定圧力; 180±5kg/cm ² G, 背圧; 20kg/cm ² G 吹出流体; 蒸気	
14 圧力抑制タンク付安全弁	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	250 20	室温 300	250 20	室温 30	"	250 20	"	吹出設定圧力; 20±0.6kg/cm ² G, 背圧; 大気圧 吹出流体; 蒸気	
15 エア作動弁	温度(°C) 圧力(kg/cm ² G)	365 200	室温 300	365 200	室温 326	板の最小厚さ	365 200	MITIの第一種管に準拠	エア作動弁の使用エア圧力; 7kg/cm ² G	

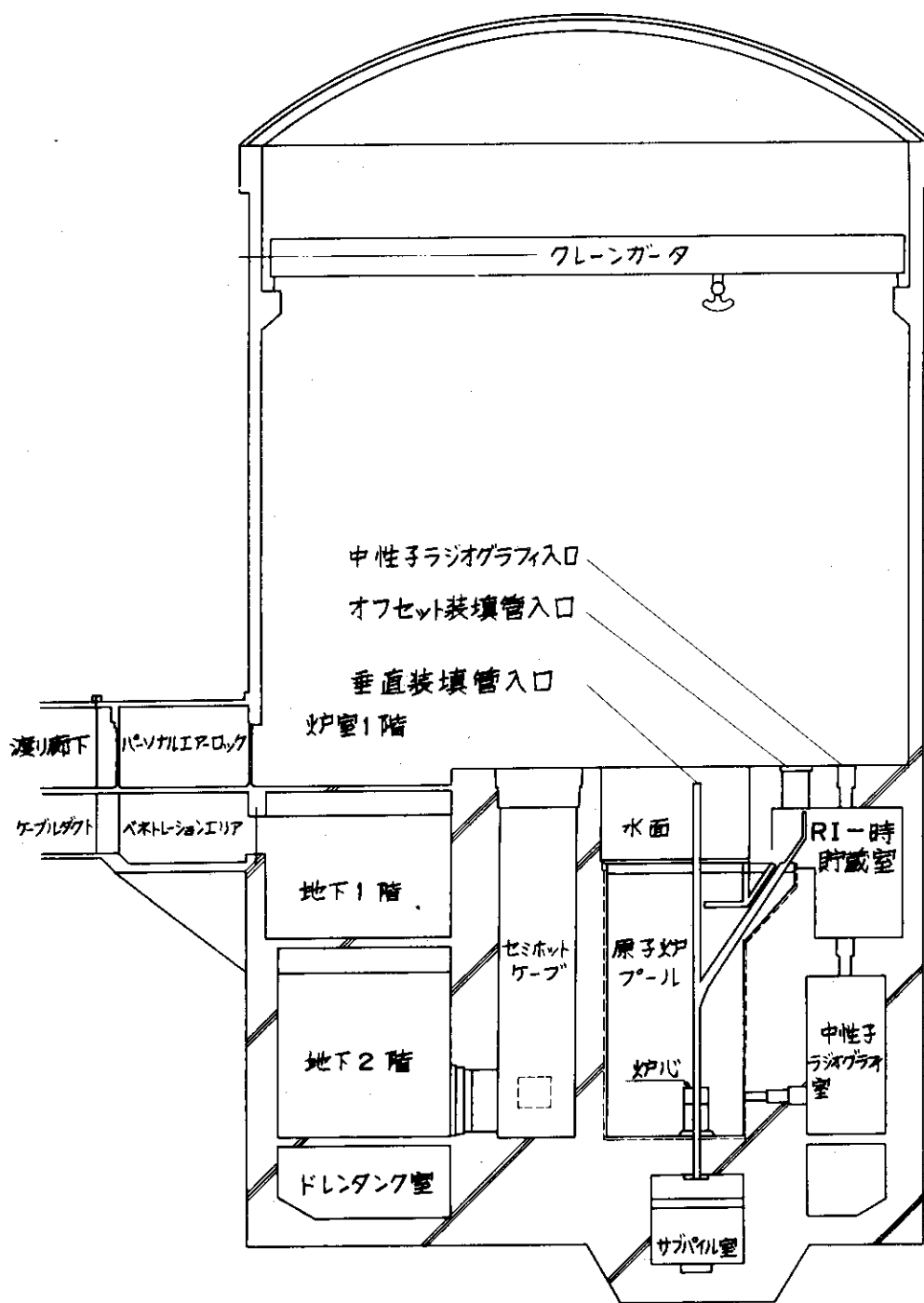


Fig. 1 NSRR原子炉棟断面図

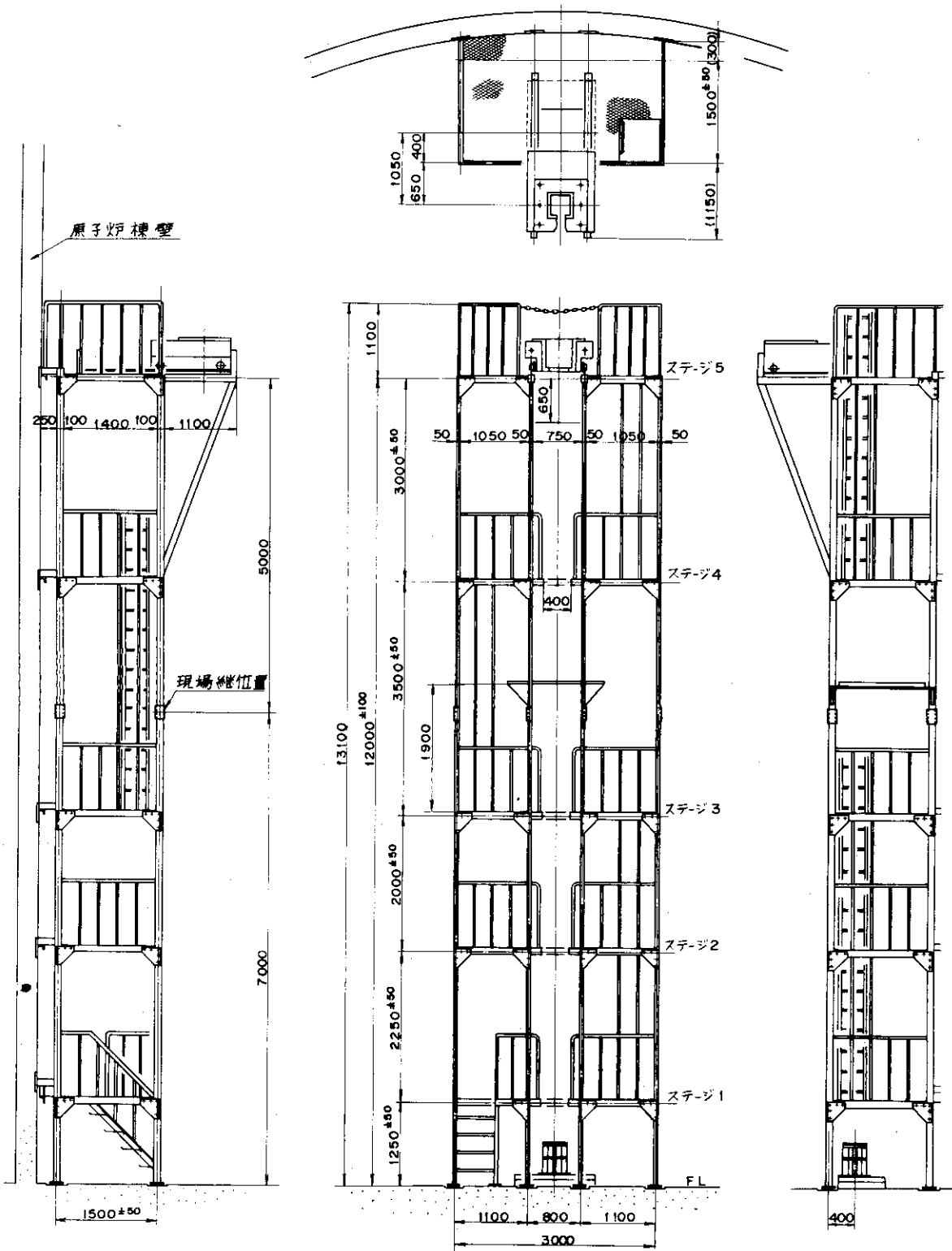


Fig. 2 NSRR実験物取扱い架台組立図

設計・製作・使用手順

評価方法又は基準

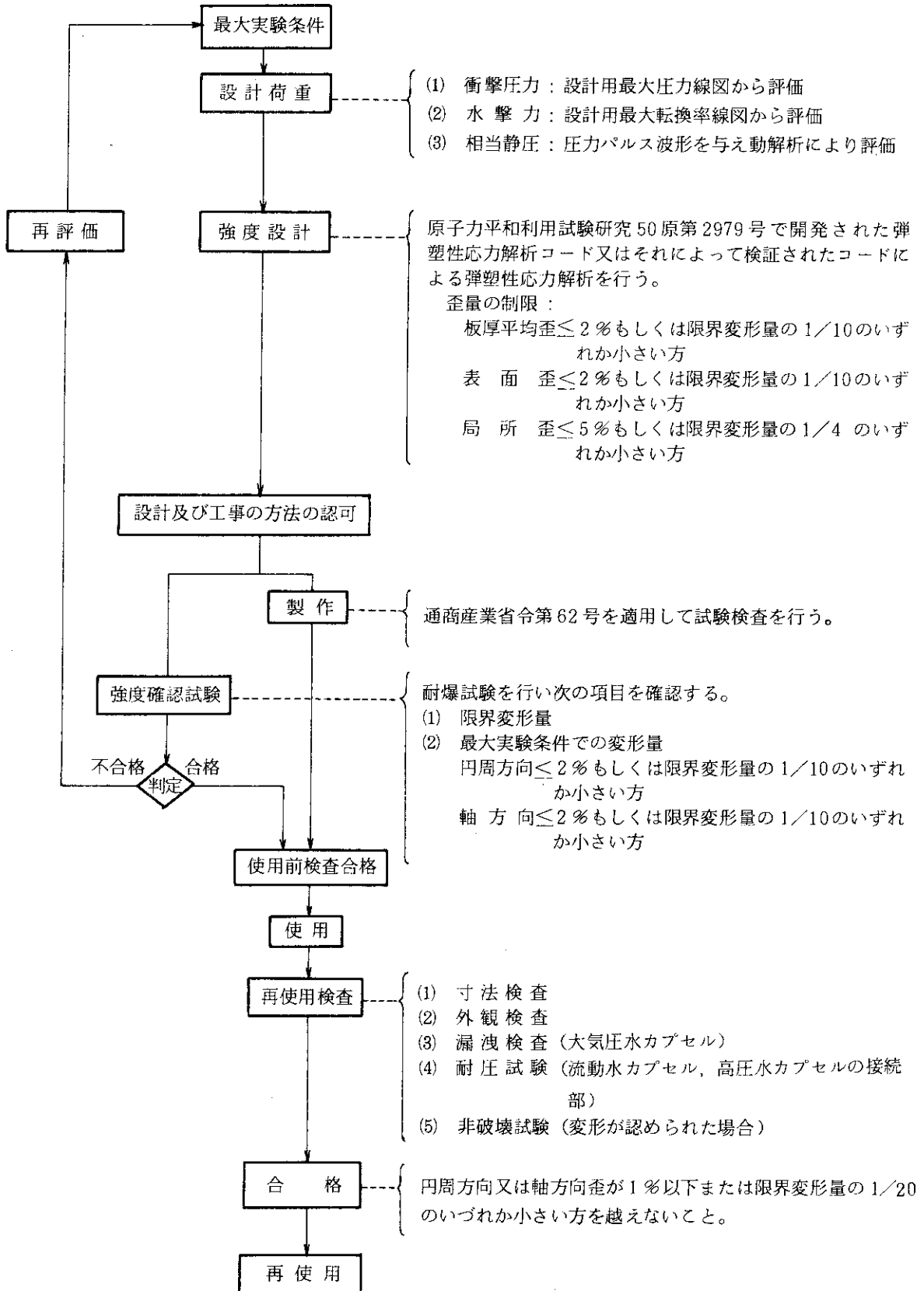


Fig. 5 NSRR における実験物の設計・製作・使用手順

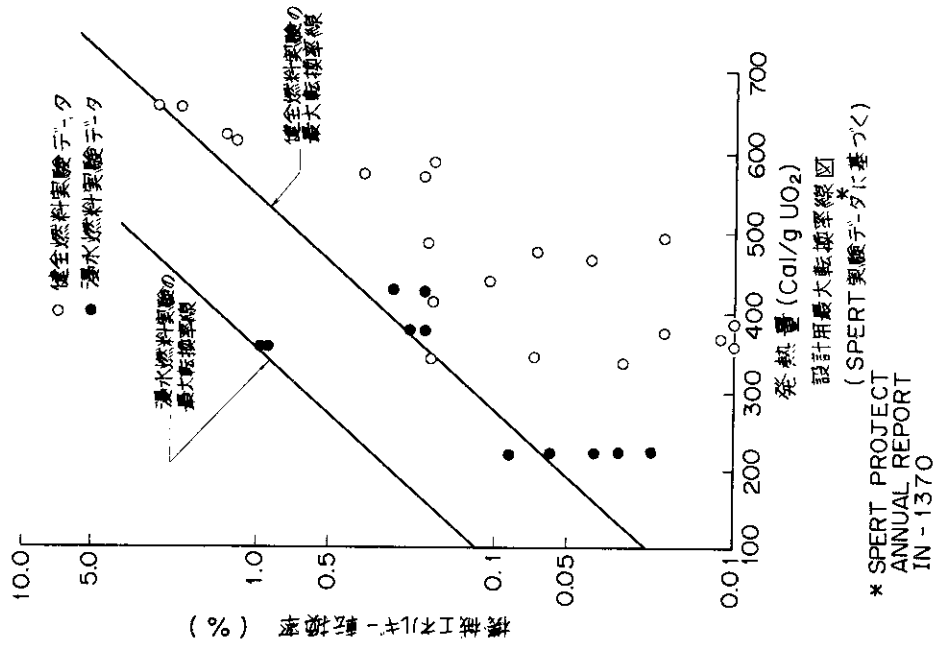


Fig. 7 NSRRにおける実験物の設計で水撃力の評価に用いる機械エネルギー転換率基本線図

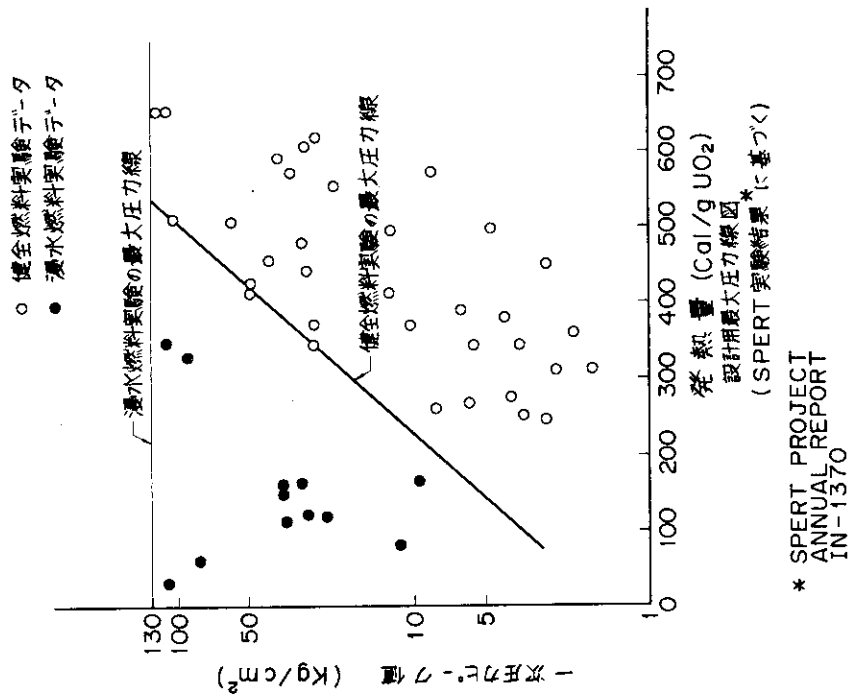


Fig. 6 NSRRにおける実験物の設計に用いる衝撃圧力基本線図

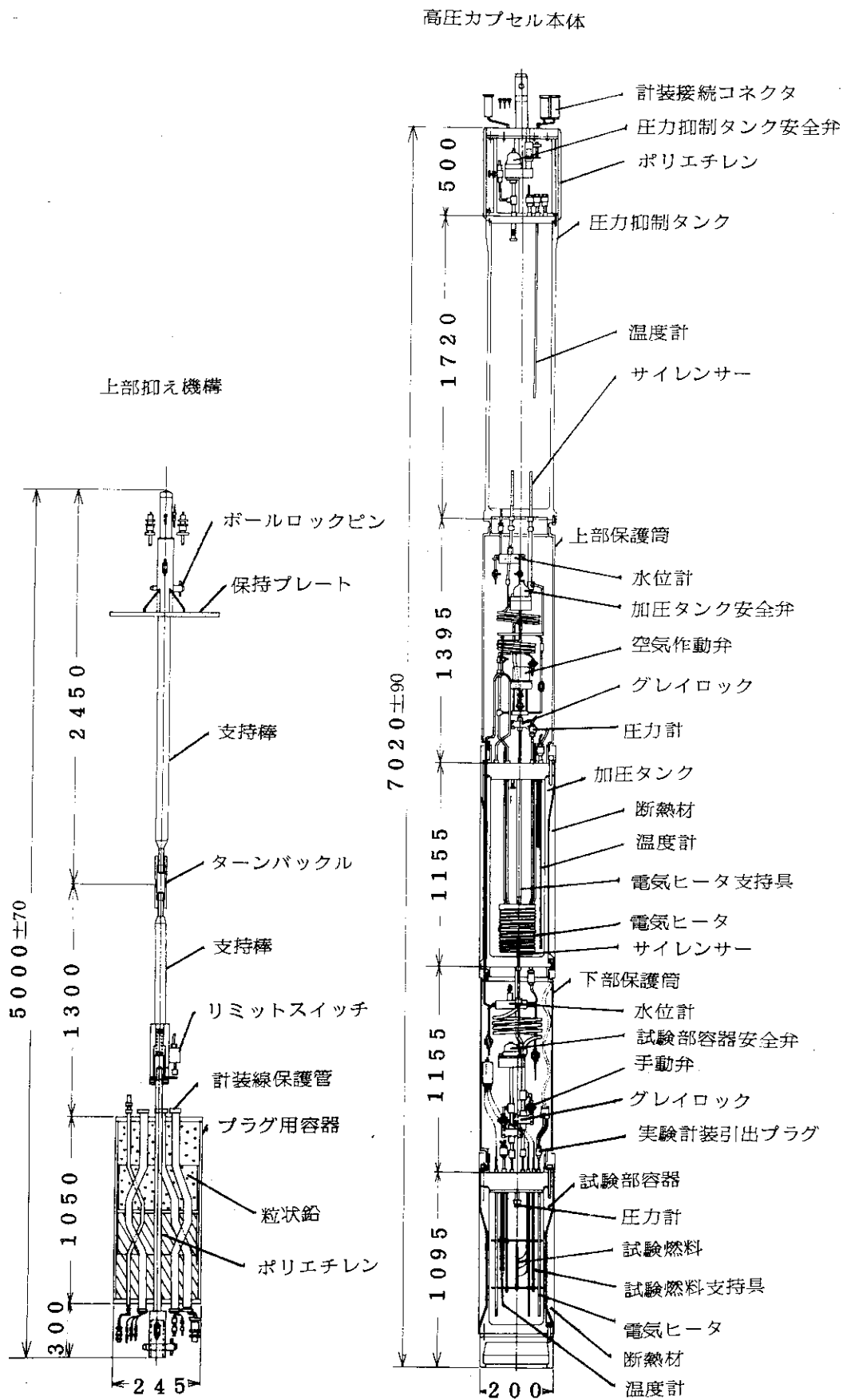


Fig. 8 高温高圧カプセル全体組立図

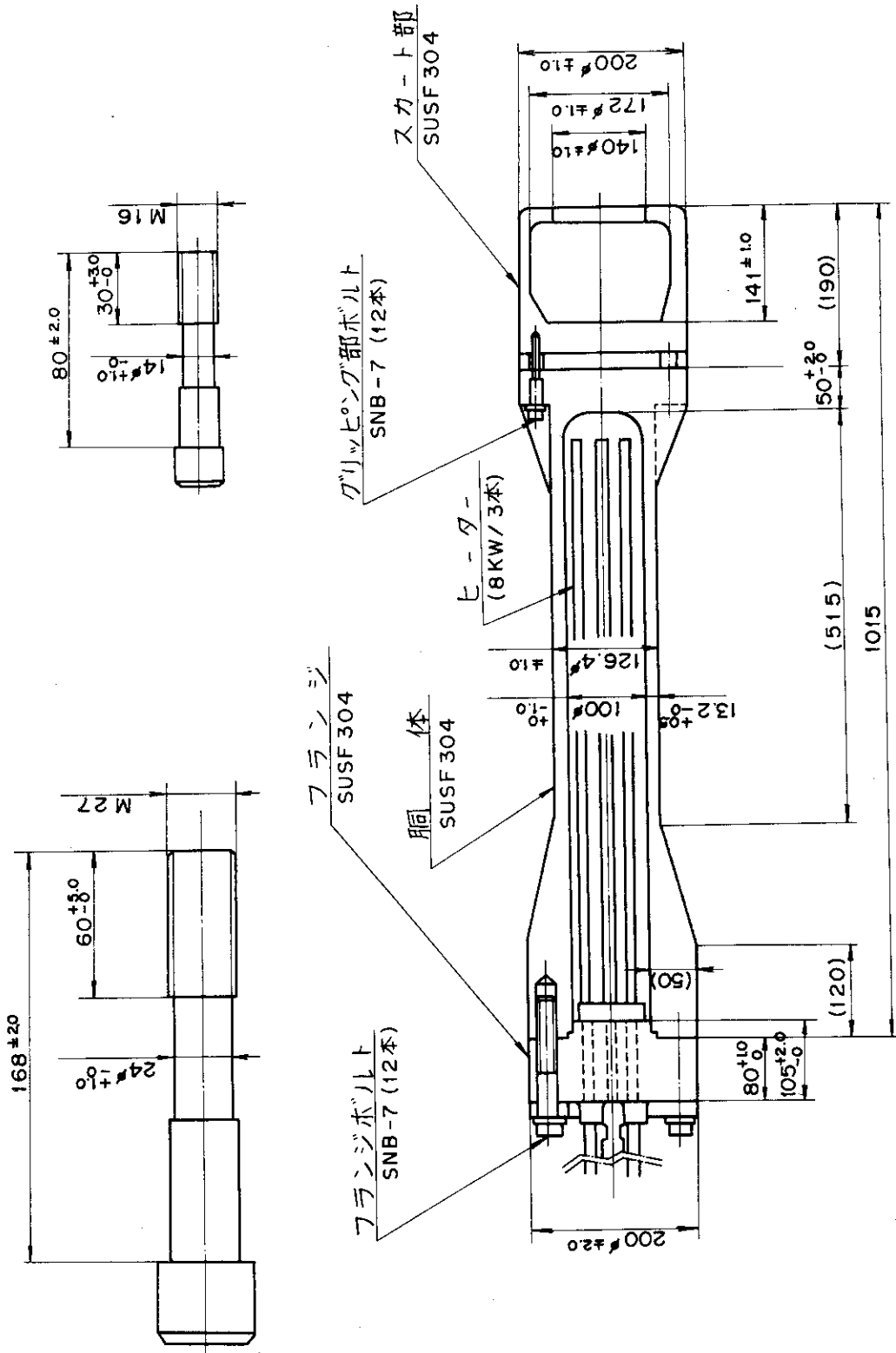


Fig. 9 高圧カプセル試験部容器単体組立図

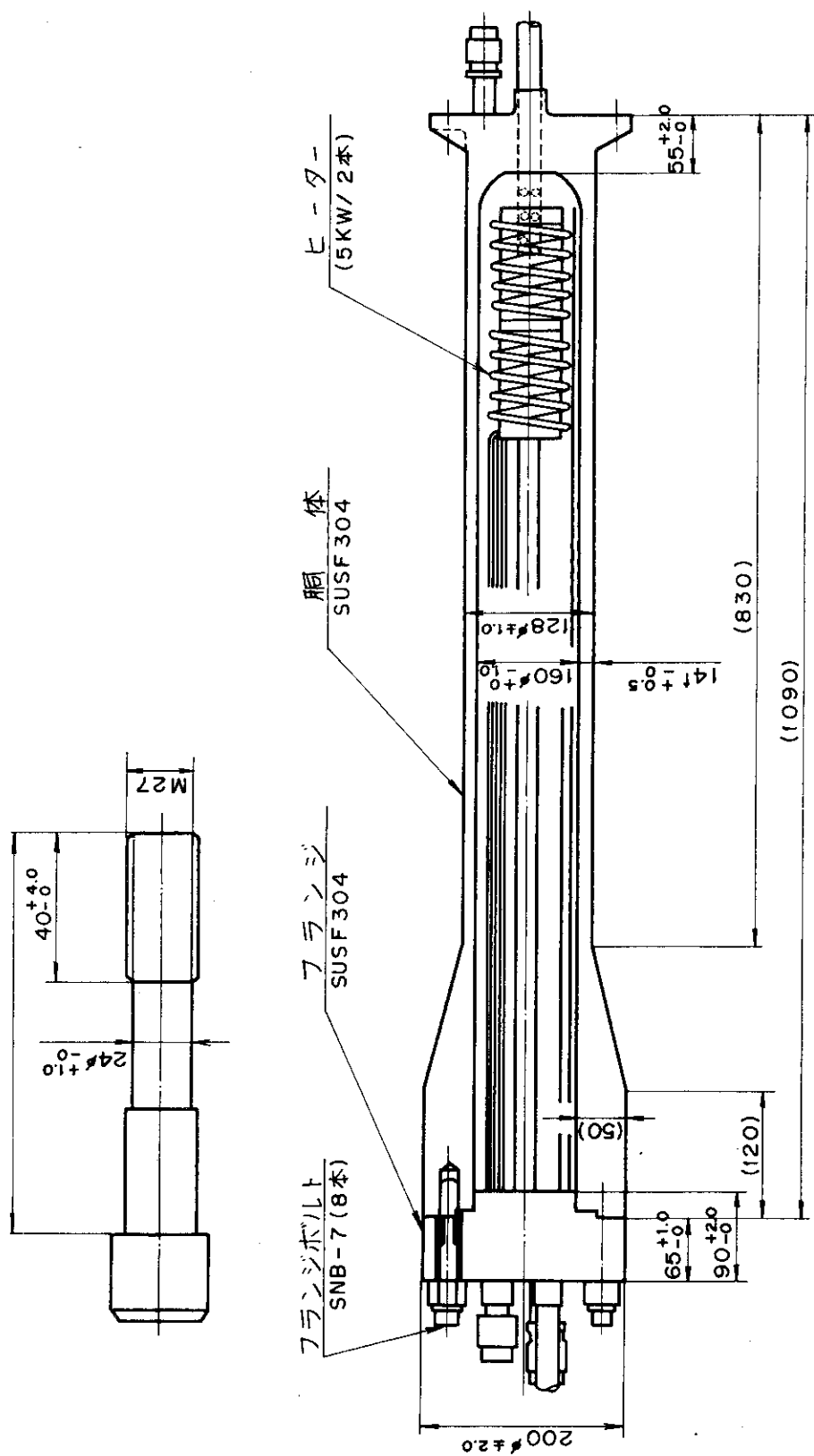


Fig. 10 高圧カプセル加圧タンク単体組立図

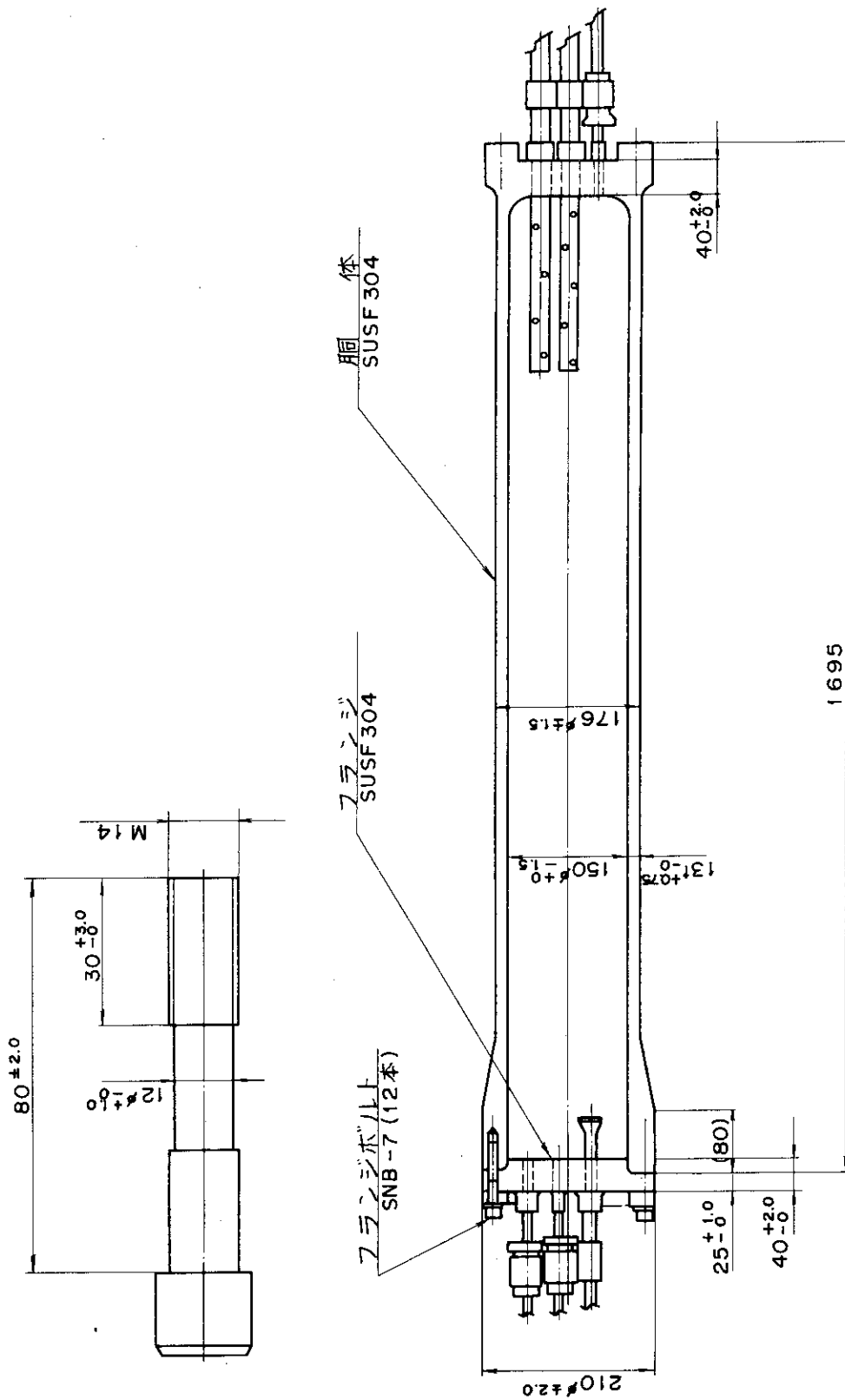


Fig. 11 高圧カプセル圧力抑制タンク単体組立図

NO	PARTS NAME	MATERIAL (J.I.S)	QUANTITY	REMARKS
1	BODY	SUSF304	1	STELLITING
2	BONNET	SUSF304	1	
3	GUIDE	ABB 2	1	
4	VALVE DISC	SUSF304	1	STELLITING
5				
6				
7	STEM	SUS 304	1	
8	BOLT	SCM 3	4	
9	GASKET	Cu P	1	
10	KEY	SUS 304	1	
11	SET BOLT	SUS 304	1	
12	WASHER	SUS 304	1	
13	SPRING SUPPORT	SUS 304	1	
14	SPRING	SUS 304	1	
15	STOPPER	ABB 2	1	
16	SCREW BUSM	ABB 2	1	
17	SPRIT PIN	SUS 304	1	
18	NAME PLATE	SUS 304	1	SUSF304
19	PLUG	ABB 2	1	
20	PLUG	ABB 2	1	
21	GASKET	Cu P	1	
22	TEST GAS	HBS BF	1	
23	TEST GAG CAP	HBS BF	1	WITH DRING

仕様

- (1) バネ式単式低揚程式水用
- (2) ノズル径 0.3cm, リフト 0.15 cm
- (3) 吹出圧力 200 kg/cm²G
- (4) 吹出容量飽和水 745 kg/H

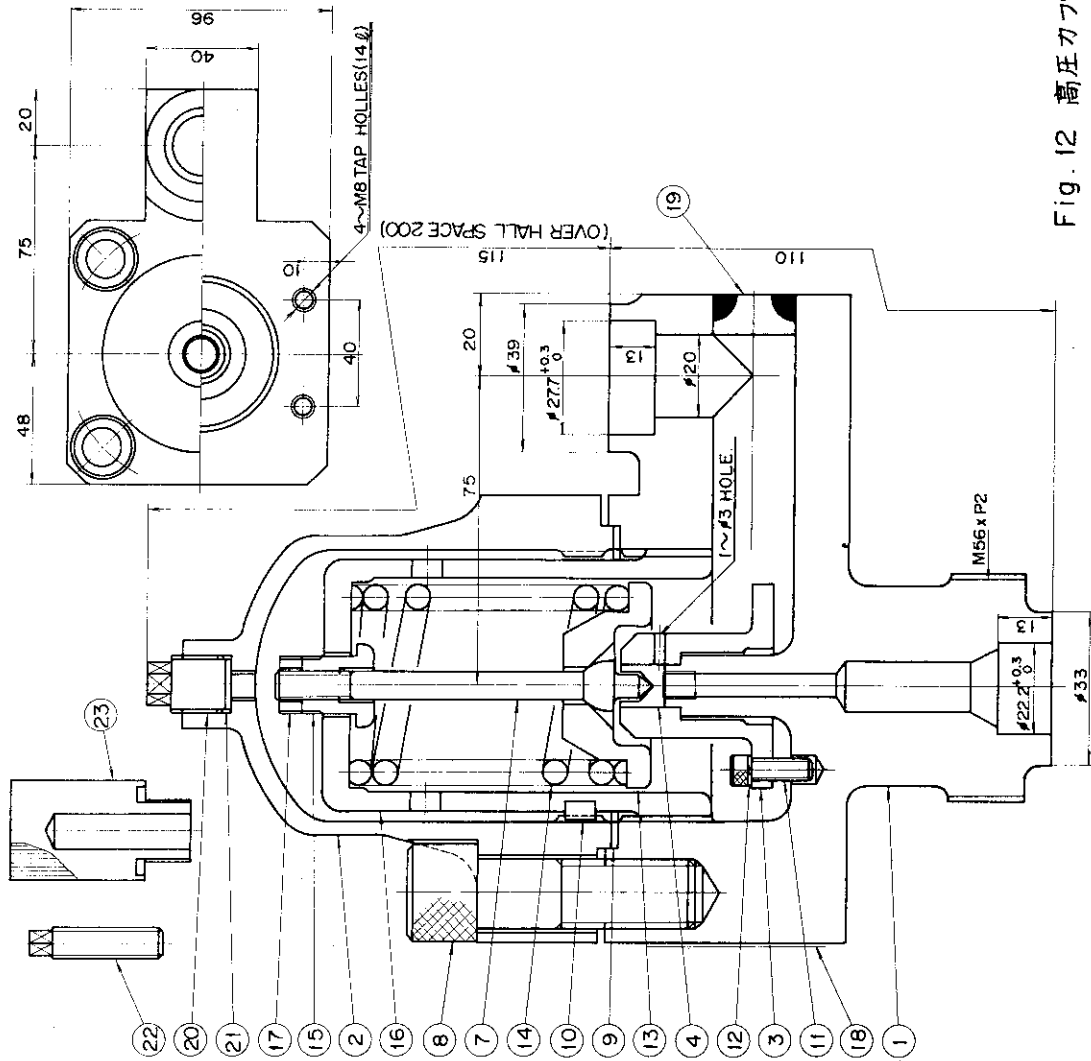


Fig. 12 高圧カプセル試験 chamber 安全弁組立図

NO.	PARTS NAME	MATERIAL (J.I.S)	QUANTITY	REMARKS
1	BODY	SUSF304	1	STELLITING
2	BONNET	SUSF304	1	
3	BUIDE	ABB 2	1	
4	VALVE DISC	SUS 304	1	STELLITING
5				
6				
7	STEM	SUS 304	1	
8	SOLT	SCM 3	4	
9	GASKET	Cu P	1	
10	KEY	SUS 304	1	
11	SET SCREW	SUS 304	1	
12	GASKET	Cu P	1	
13	SPRING SUPPORT	SUS 304	1	
14	SPRING	SUS 304	1	
15	STOPPER	ABB 2	1	
16	SCREW BUSE	ABB 2	1	
17	SPRIT PIN	SUS 304	1	
18	NAME PLATE	SUS 304	1	
19	PLUG		1	SUS F304
20	PLUG	ABB 2	1	
21	GASKET	Cu P	1	
22	TEST GAG	HB& BF	1	
23	TEST GAG CAP	HB& BF	1	MTH"D"RING

仕様

- (1) バネ式 単式低揚程式 蒸気用
- (2) 弁座口径 0.7cm, リフト 0.02cm
- (3) 吹出圧力 180 kg/cm²G
- (4) 吹出容量 飽和蒸気 19.4 kg/H

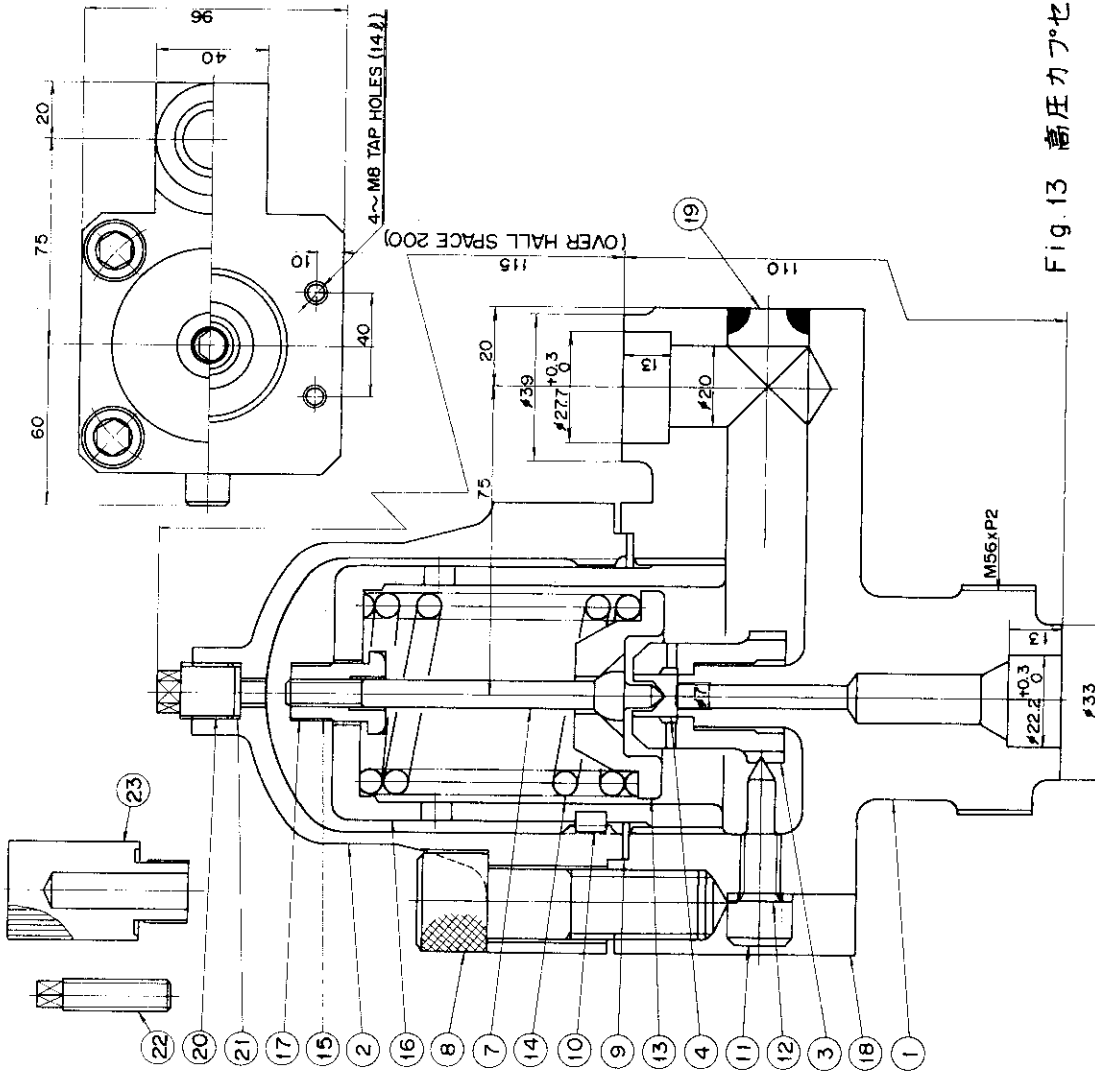


Fig. 13 高圧カプセル加圧タンク安全弁組立図

NO.	PARTS NAME	MATERIAL (J.I.S)	QUANTITY	REMARKS
1	BODY	SUSF304	1	STELLITING
2	BONNET	SUSF304	1	
3	GUIDE	ABB 2	1	
4	VALVE DISC	SUS 304	1	STELLITING
5				
6				
7	STEM	SUS 304	1	
8	BOLT	SCM 3	4	
9	GASKET	Cu P	1	
10	KEY	SUS 304	1	
11	SET SCREW	SUS 304	1	
12	GASKET	Cu P	1	
13	SPRING SUPPORT	SUS 304	1	
14	SPRING	SUS 304	1	
15	STOPPER	ABB 2	1	
16	SCREW BUSM	ABB 2	1	
17	SPLIT PIN	SUS 304	1	
18	NAME PLATE	SUS 304	1	
19	PLUG	SUS 304	1	
20	PLUG	ABB 2	1	
21	GASKET	Cu P	1	
22	TEST GAG	HBsBF	1	
23	TEST GAG CAP	HBsBF	1	WITH O'RING

仕様

- (1) バネ式、単式低揚程式、蒸気用
- (2) 弁座口径 1.3 cm, リフト 0.05 cm
- (3) 吹出圧力 20 kg/cm²G
- (4) 吹出容量 飽和蒸気 133 kg/H

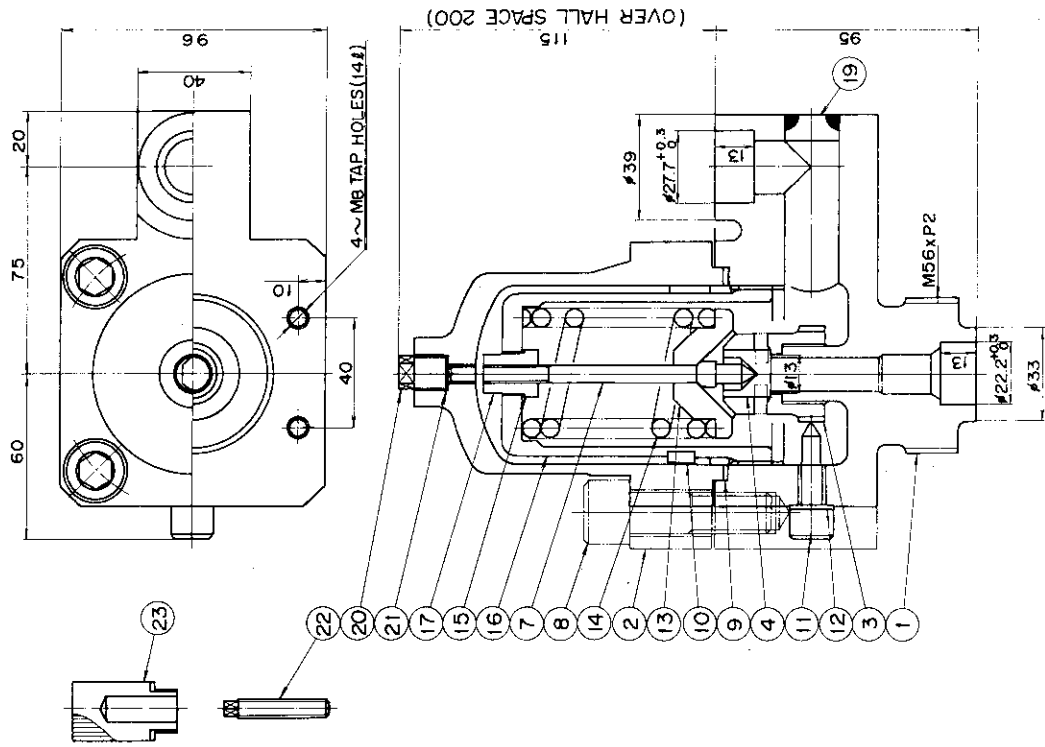


Fig.14 高圧カプセル圧力抑制タンク安全弁組立図

ITEM	PART NUMBER	PART NAME	MATERIAL	QTY
1	SS-8B-TSW-PQ	BODY	316 S.S.	1
2	STE6B-8B-P3	INSERT	STELLITE 6B	1
3	SS-8B-P2	ADAPTER	316 S.S. ALUMINUM	1
4	SS-4U-P4	RING	316 S.S.	1
5	SS-4U-P15	O-RING	316 S.S.	1
6	188-4BDAC-P3	TIE ROD NUT	18-8 S.S.	3
7	LEDAX-4BDAC-P1	FLANGE	LEDLOY AX	1
8	316L-8U-P1	STEM	316L S.S.	1
9	347-4U-P3	BELLOWS	347 S.S.	1
10	SS-4B-P7	BONNET NUT	316 S.S.	1
11	SS-4BDAC-P7	JAM NUT	316 S.S.	1
12	440C-4U-P18	STEM EXTENSION	440C S.S.	1
13	416-4U-P8	PIN	416 S.S.	1
14	440C-4U-P16	BALL	440C S.S.	1
15	SS-4U-P6	BONNET	316 S.S.	1
16	416-4UDAC-P9	ACTUATOR	416 S.S.	1
17	SS-4U-P14	SPACER	316 S.S.	1
18	ASBINC-4U-P5	PACKING	ASBESTOS INCONEL	3
19	SS-4U-P10	JAM NUT	316 S.S.	1
20	SS-4U-P12	GLAND NUT	316 S.S.	1
21	SS-4UDAC-P2	TIE ROD	316 S.S.	3
22	188-4UDAC-P4	JAM NUT	18-8 S.S.	1
23	SS-4U-P13	GLAND	316 S.S.	1
26	DAC-MS-P3	SPACER	316 S.S.	2
27	A-94NC-P100	SPACER	ALUMINUM	1
28	MS-94NC	AIR OPERATOR	ALUMINUM	1
29		AIR OPPOSITION ROD	416 S.S.	1
30		PISTON ROD O-RING	VITON	1
31		HOUSING	ALUMINUM	1
32		PISTON O-RING	VITON	1
33	302-4UNC-P6	PISTON	ALUMINUM	1
34		SPRING	302 S.S.	1
		BUSHING	BRONZE	1

- NOTES
1. VALVE IS SHOWN IN THE CLOSED POSITION
 2. VALVE BODY THICKNESS $1\frac{1}{4}$
 3. AIR OPERATOR MUST BE PROPERLY SUPPORTED WHEN VALVE IS INSTALLED IN A SYSTEM

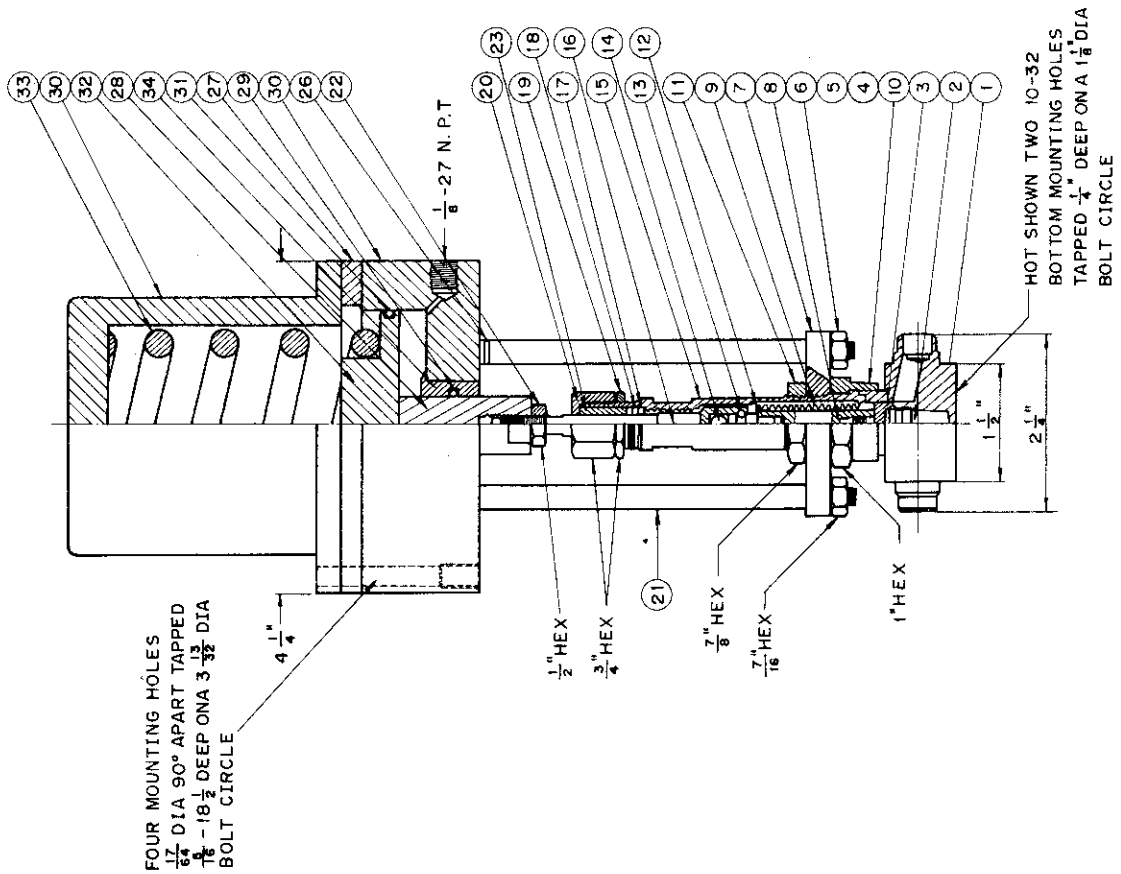


Fig. 15 高圧カプセルエア作動弁組立図

品番	品名	材質	数量	総数	重量 (kg)
1	フランジ	SUSF304	2	4	0.500
2	ボルト	A193-B8	4	8	0.065
3	ナット	A194-GR8	8	16	0.020
4	SW.ハブ	SUSF304	2	5	0.450
5	シムリング	17-4PH DEFRIC	1	2	0.015
6	シムリング	SUSF304	1	2	0.450
7	シムリング	17-4PH DEFRIC	9	18	0.015

1set 当りの重量 : 2.335 kg
 総重量 : 6.29 kg

設計条件
 温度 : 365°C
 圧力 : 340kg/cm²G
 締付トルク
 2.075 ~ 2.762
 kg-m

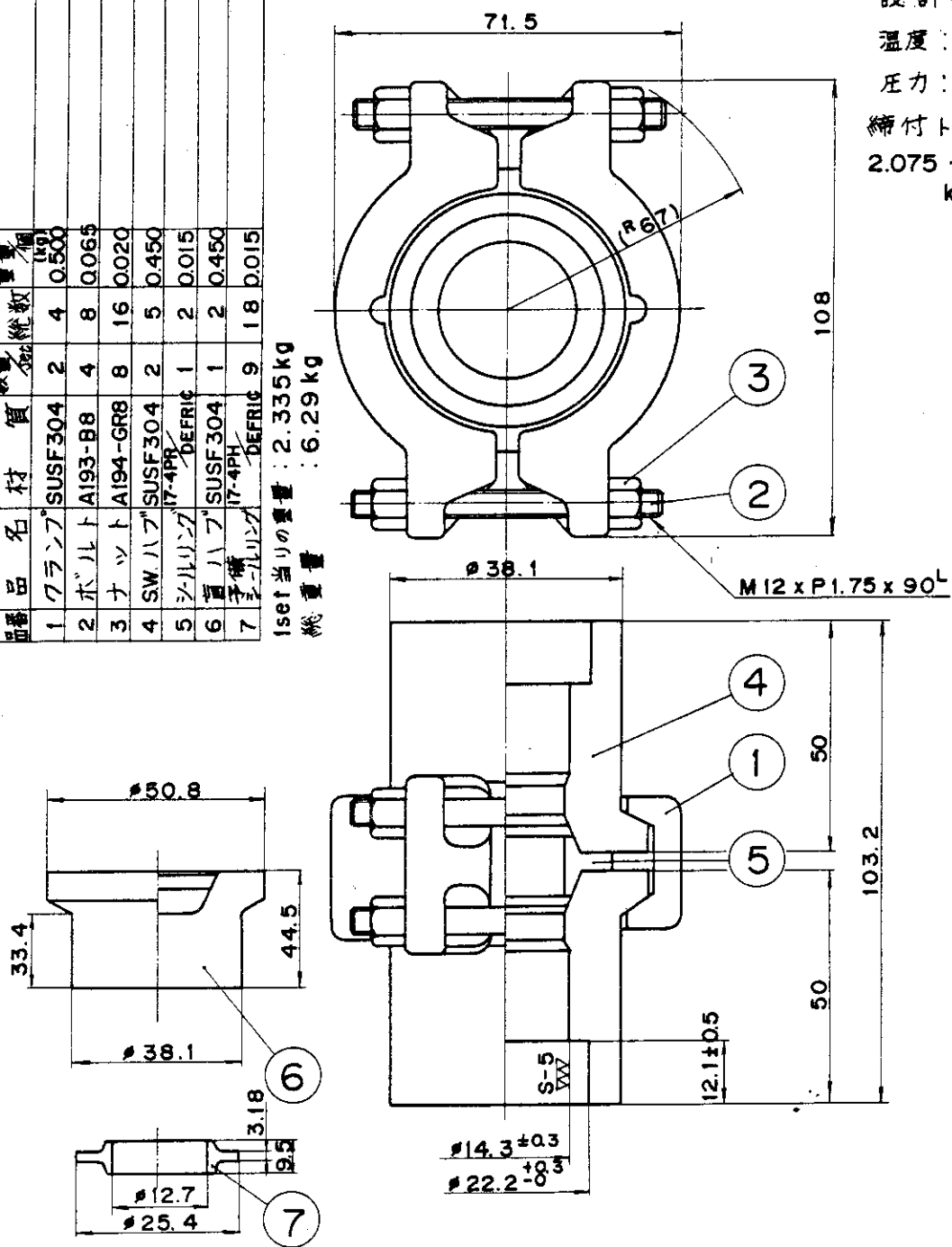


Fig. 16 高圧カプセルグレイロック単体組立図

FI 記入文字

温度 変化率高 予備	試験部容器 温度高	加圧タンク 圧力高	加圧タンク 水位低	加圧タンク 抑制タンク 安全弁作動
	保護筒 表面温度高	加圧タンク 抑制タンク 圧力高	加圧タンク 抑制タンク 水位低	ヒータ電源 通電回路 接地

CP仕様アクリル63x16
CP 仕様 記入文字

NO	試験部容器温度	加圧タンク温度偏差
CP 1	試験部容器温度	加圧タンク温度偏差
2	加圧タンク温度	加圧タンク圧力
3	加圧タンク圧力	加圧タンク水位
4	加圧タンク水位	加圧タンク抑制タンク水位
5	加圧タンク抑制タンク水位	加圧タンク抑制タンク圧力
6	加圧タンク抑制タンク圧力	加圧タンク抑制タンク温度
7	加圧タンク抑制タンク温度	加圧タンク抑制タンク水位
8	加圧タンク抑制タンク水位	加圧タンク抑制タンク圧力
9	加圧タンク抑制タンク圧力	加圧タンク抑制タンク温度
10	加圧タンク抑制タンク温度	加圧タンク抑制タンク水位
11	加圧タンク抑制タンク水位	加圧タンク抑制タンク圧力
12	加圧タンク抑制タンク圧力	加圧タンク抑制タンク温度
13	加圧タンク抑制タンク温度	加圧タンク抑制タンク水位
14	加圧タンク抑制タンク水位	加圧タンク抑制タンク圧力
15	加圧タンク抑制タンク圧力	加圧タンク抑制タンク温度
16	加圧タンク抑制タンク温度	加圧タンク抑制タンク水位
17	加圧タンク抑制タンク水位	加圧タンク抑制タンク圧力
18	加圧タンク抑制タンク圧力	加圧タンク抑制タンク温度

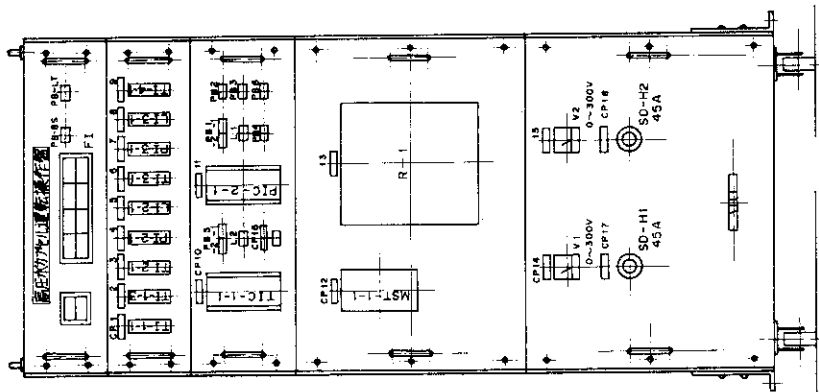
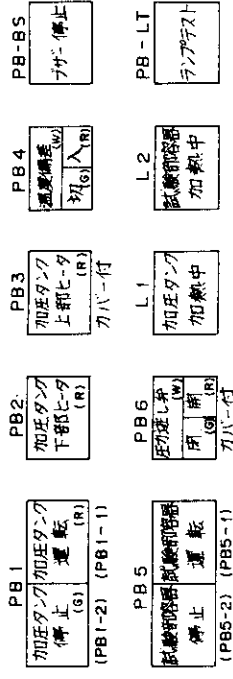
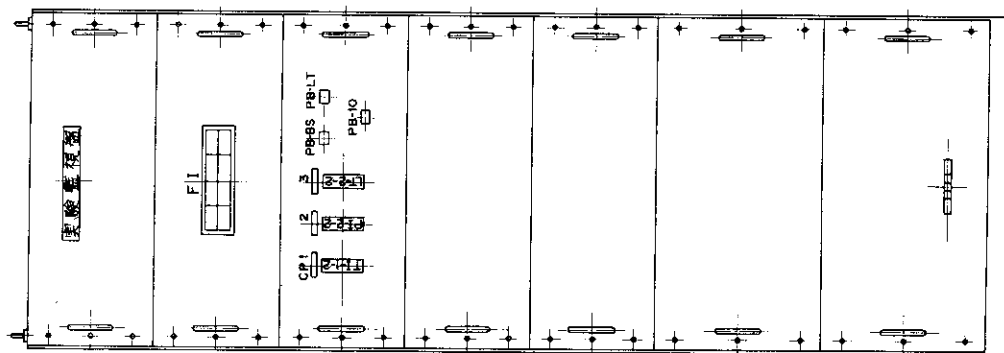


Fig. 17 高圧カプセル現場運転操作盤外形図



FI 記入文字

試験設備 温度高	加圧タンク 圧力高	加圧タンク 水位低	圧力 抑制タンク 安全弁作動
保護筒 表面温度高	圧力 抑制タンク 圧力高	圧力 抑制タンク 水位低	ヒータ電流 過電流 地絡

CP仕様アケリル 63 x 16

NO	記入文字
CP 1	試験装置温度
2	加圧タンク圧力
3	加圧タンク水位

PB-BS
プカ停止

PB-LT
ファンテスト

PB-IO
停止運転
(S) (R)

Fig. 18 高圧カプセル制御室実験監視盤外形図

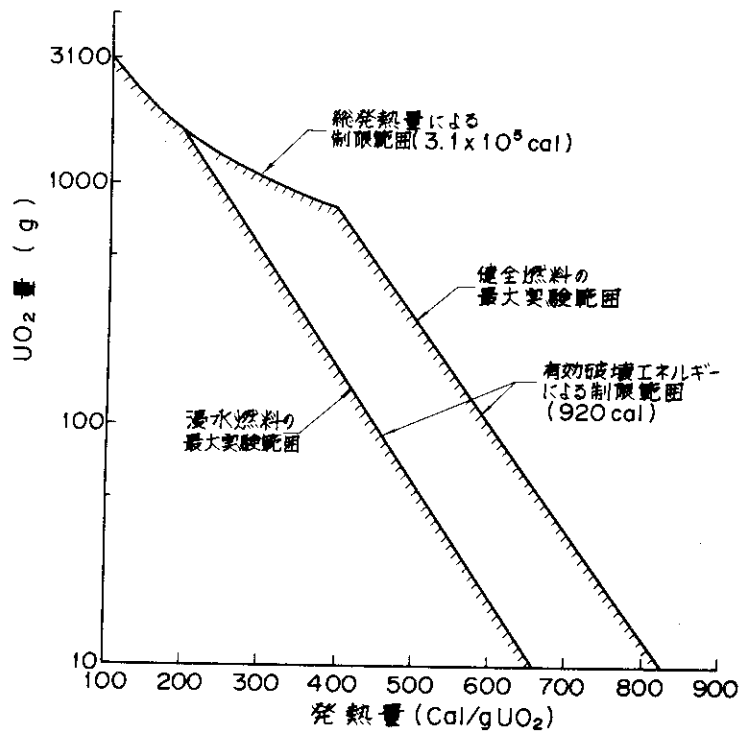


Fig. 19 NSRRの最大実験条件における試験燃料発熱量とUO₂量との関係

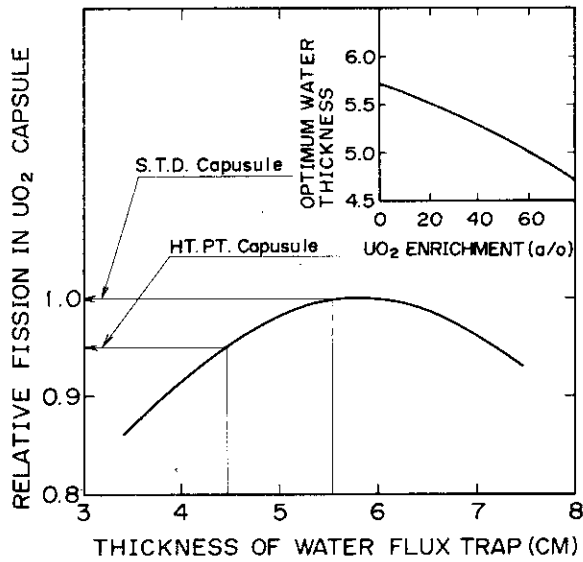


Fig. 20 Relative fissions in a single UO₂ fuel pin as a function of thickness of water in flux trap (1D transport calculation)

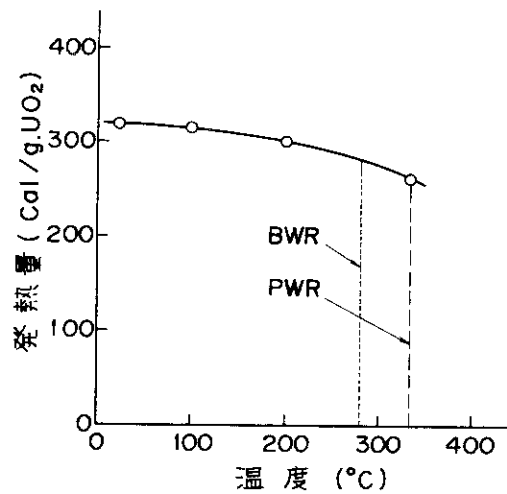
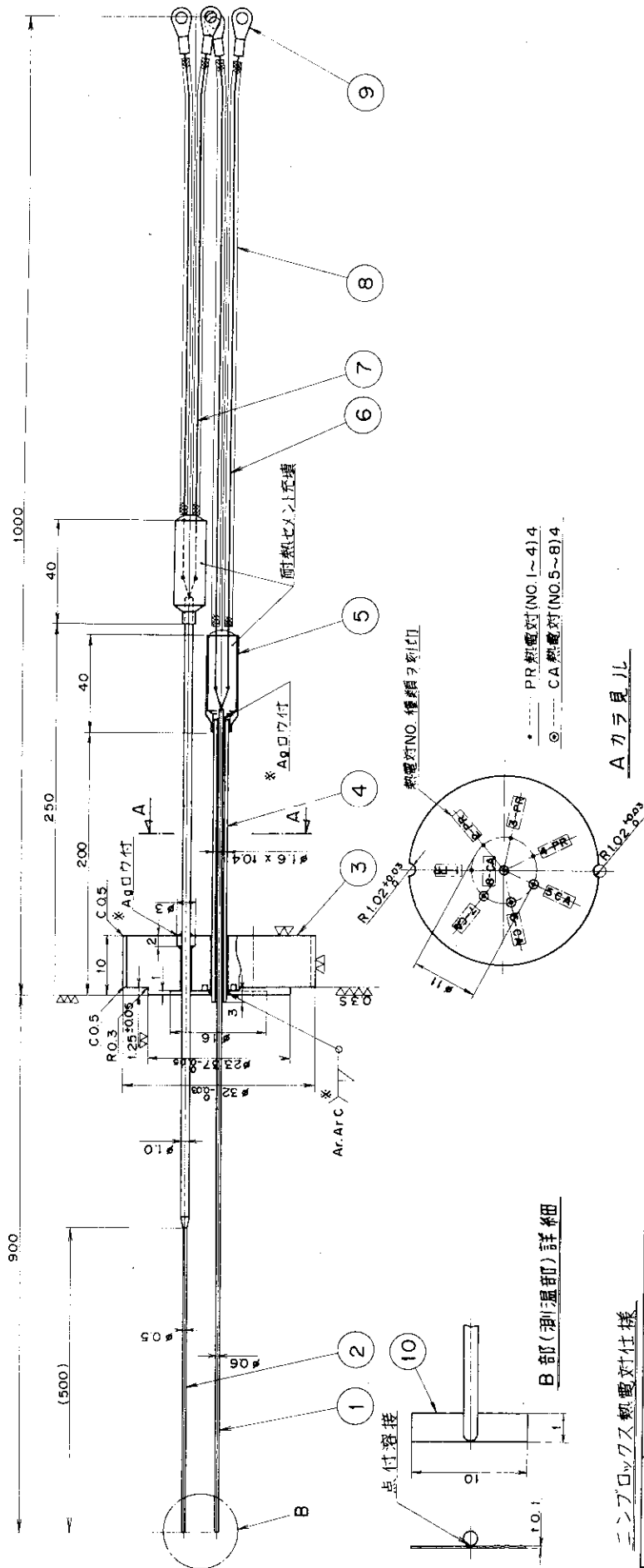


Fig. 21 温度・圧力条件の違いによる試験燃料の発熱量の解析結果



検査項目

1. 外観検査
2. 寸法検査 特ニ指定ハナリ加工公差 JISB0405 相殺
シース厚サ ± 3mm
3. 温度ニ対スル熱起電力許容差 比較法ニヨリ
100, 300, 500 °Cニ於テ実施
4. 電気抵抗
5. Heリーク検査 1×10^{-6} Acc/sec以下
6. 耐圧力検査 静水圧 370kg/cm² (構造)
(項5, 6 検査対象部ハ *印ヲ接シ Agロウ付部)

ニプロックス熱電対仕様

項目	品#1 熱電対仕様	品#2 熱電対仕様
種類	PR	CA
階級	0.25級	0.75級
対数	シングル	シングル
シース外径	φ 0.6	φ 1.0, φ 0.5 テーパー形
シース材質	Pt	SUS 347
別温度点	接地形	接地形
規格	規準熱起電力比温度ニ対スル許容差 JISC 1602-74ニヨリ	規準熱起電力比温度ニ対スル許容差 JISC 1602-74ニヨリ

品番	品名	材質	図番	備考
8, 10	板	Nb(ニオブ)		
16	圧着端子	Cu		M4
8	絶縁チューブ	ガラスウール		
4, 7	CA 裸熱電対			φ 0.65 JIS 0.75級
4, 7	PR 裸熱電対			φ 0.5 JIS 0.25級
5	アダプタ	SUS 304		
4	スリーブ			
1	貫通板	SUS 304		
4	ニプロックスCA熱電対			
4	ニプロックスPR熱電対			

高圧カプセル実験用温度計組立図

Fig. 22 高圧カプセル実験用温度計組立図

品名 試験部容器圧力発信器
 型名 PHT-300M

項目	仕様
定格容量	300 kg/cm ²
出力電圧	1 mv/v FS
過負荷	120% FS
非直線性(&ヒステリシス)	1 % FS
再現性	0.5 % FS
温度特性	0.1%FS/°C
入出力抵抗	120Ω
ブリッジ電圧(MAX)	6VDC
使用温度範囲	RT~365°C
ケーブル	MIケーブルQ.4m

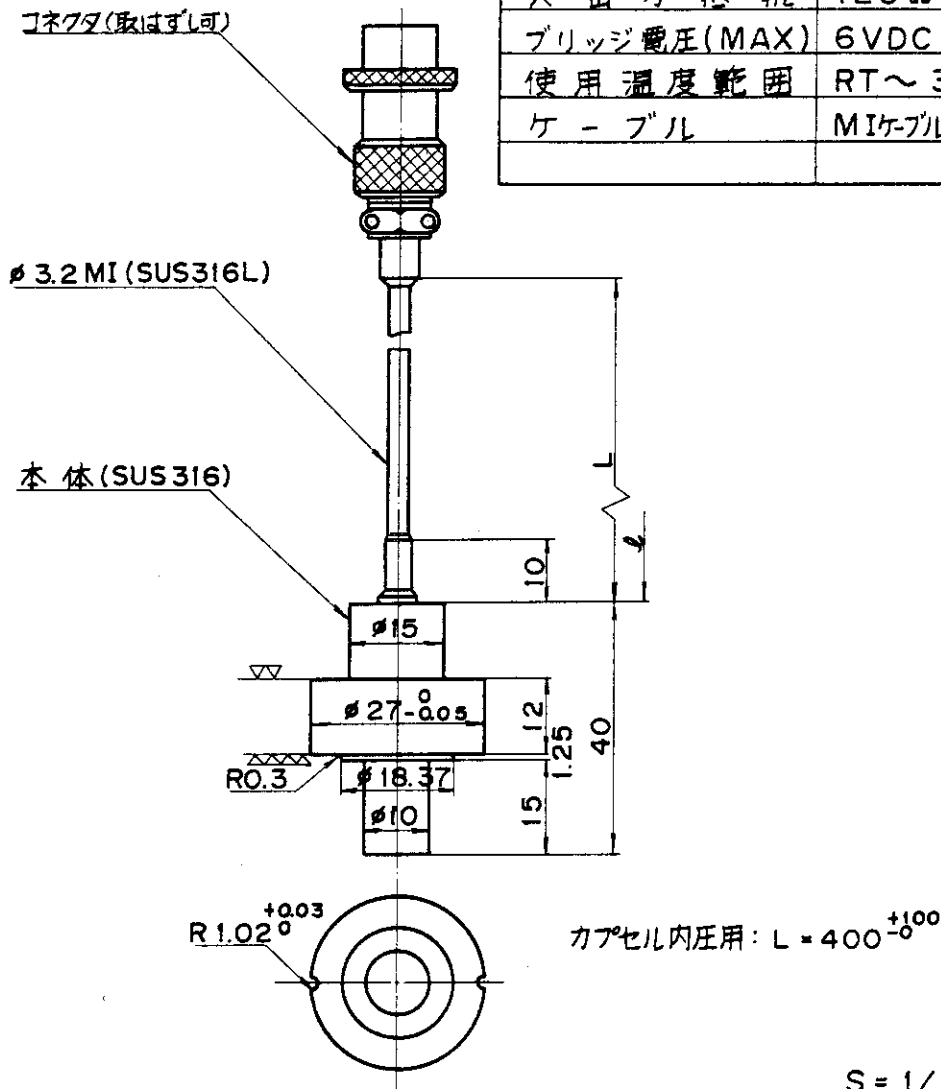
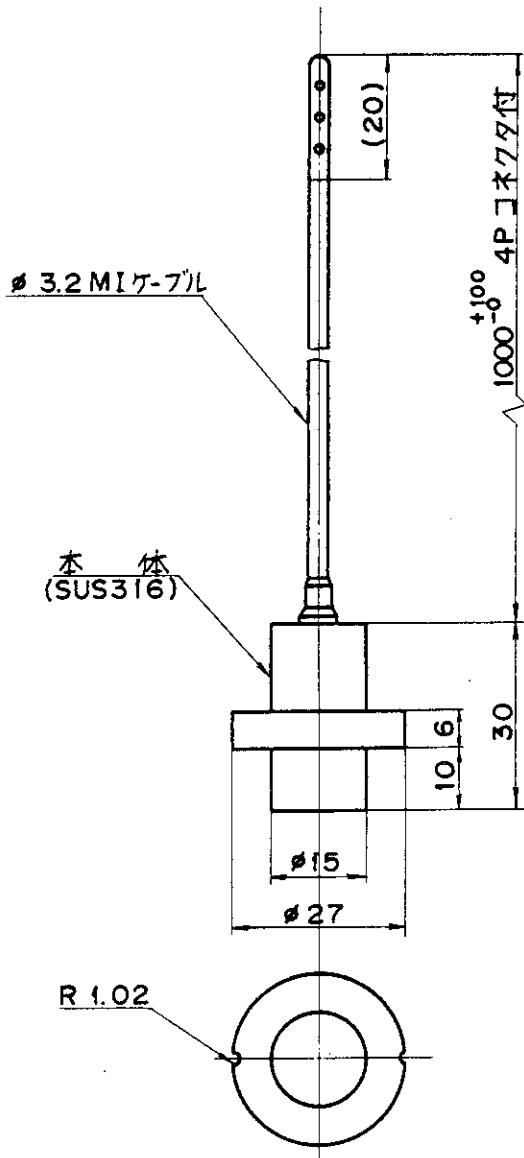


Fig. 23 試験部容器内圧測定用圧力計外觀図

品名 加圧タンク圧力発信器
 型名 PHT-300DE

項目	仕様
定格容量	300 kg/cm ²
出力電圧	1 mv/v FS
過負荷	120% FS
非直線性(&ヒステリシス)	1% FS
再現性	0.5% FS
温度特性	0.1% FS/°C
入出力抵抗	120Ω
ブリッジ電圧(MAX)	6VDC
使用温度範囲	RT~365°C
ケーブル	MIケーブル1m

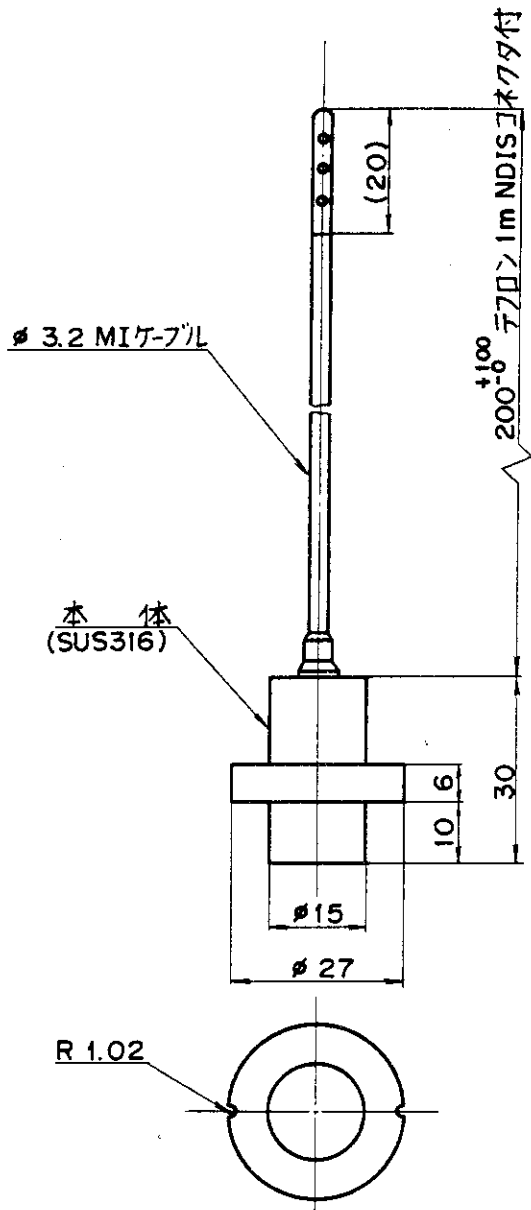


S = 1/1

Fig. 24 加圧タンク内圧測定用圧力計外觀図

品名 圧力抑制タンク圧力発信器
 型名 PHT-30DE

項目	仕様
定格容量	30 kg/cm ²
出力電圧	1 mv/v FS
過負荷	120% F kg/cm ²
非直線性(&ヒステリシス)	1 % FS
再現性	0.5 % FS
温度特性	0.1 % FS/°C
入出力抵抗	120Ω
ブリッジ電圧(MAX)	6V DC
使用温度範囲	RT~365°C
ケーブル	MIケーブル0.2m



S = 1/1

Fig. 25 圧力抑制タンク内圧測定用圧力計外觀図

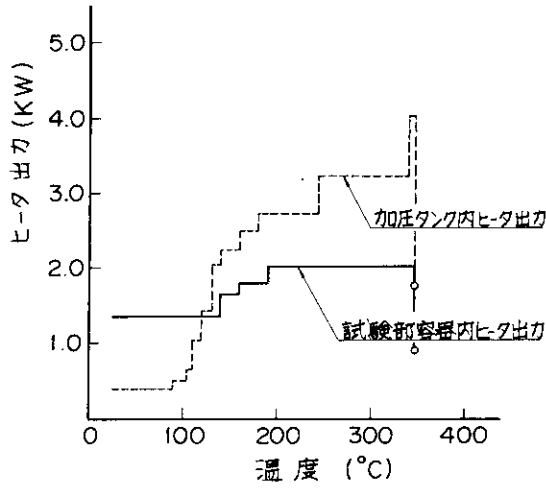


Fig. 26 高压カプセルの運転に要する電気ヒータの出力測定結果

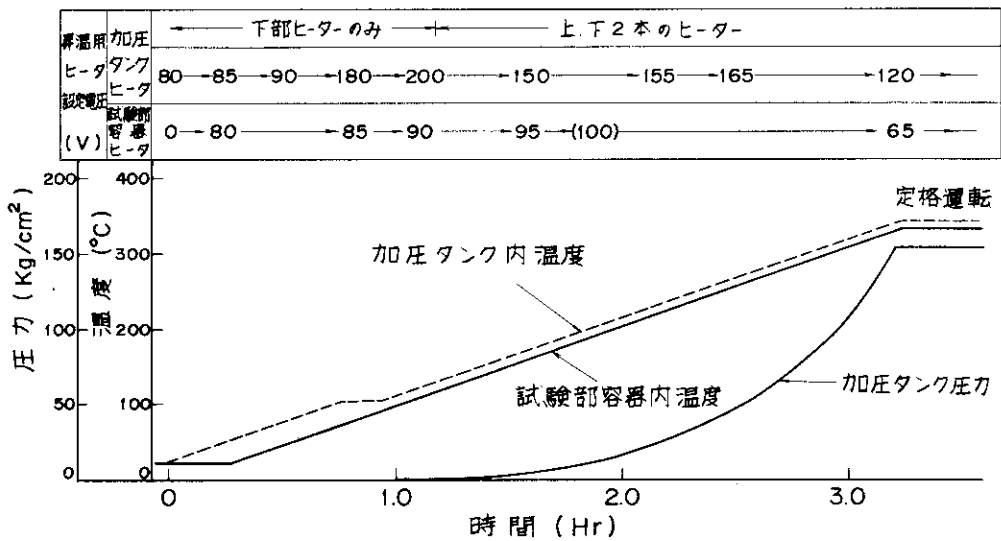


Fig. 27 高压カプセル運転の標準モデル

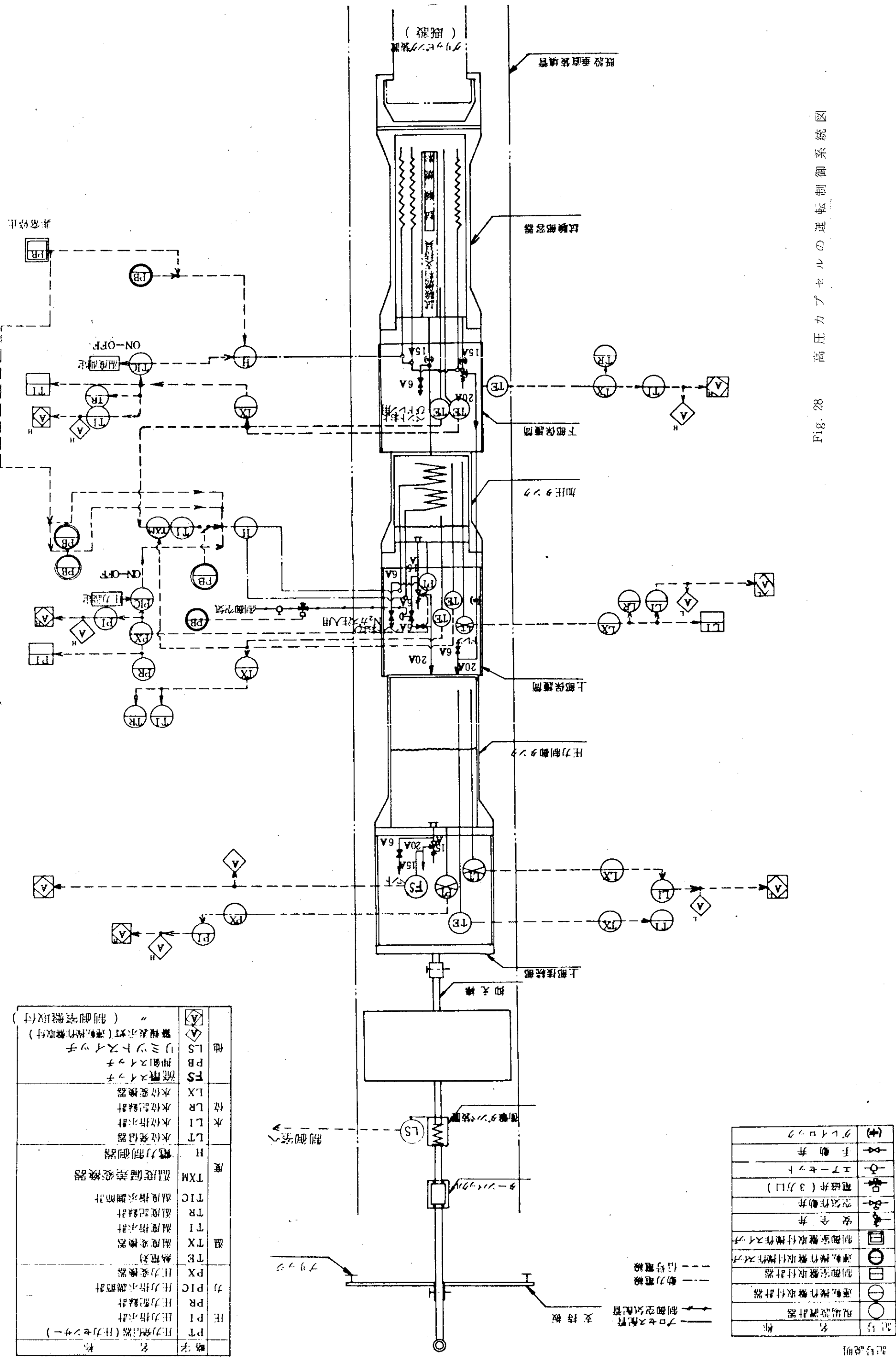


Fig. 28 高圧カプセルの運転制御系統図

略字説明

略字	名称
PT	圧力発信器 (圧力センサー)
P1	圧力指示計
PR	圧力記録計
PIC	圧力指示調節計
PX	圧力変換器
TE	熱電対
TX	温度変換器
TI	温度指示計
TR	温度記録計
TIC	温度指示調節計
TXM	温度偏差変換器
H	電力制御器
LT	水位発信器
L1	水位指示計
LR	水位記録計
LX	水位変換器
FS	流量スイッチ
PB	押しスイッチ
LS	リミットスイッチ
他	各種表示灯 (運転操作盤取付)
	各種表示灯 (制御室盤取付)

記号説明

記号	名称
○	現場設置計器
○	運転操作盤取付計器
○	制御室盤取付計器
○	運転操作盤取付操作スイッチ
○	制御室盤取付操作スイッチ
○	安全弁
○	空気作動弁
○	電磁弁 (3方口)
○	イターセット
○	手動弁
○	グライロック

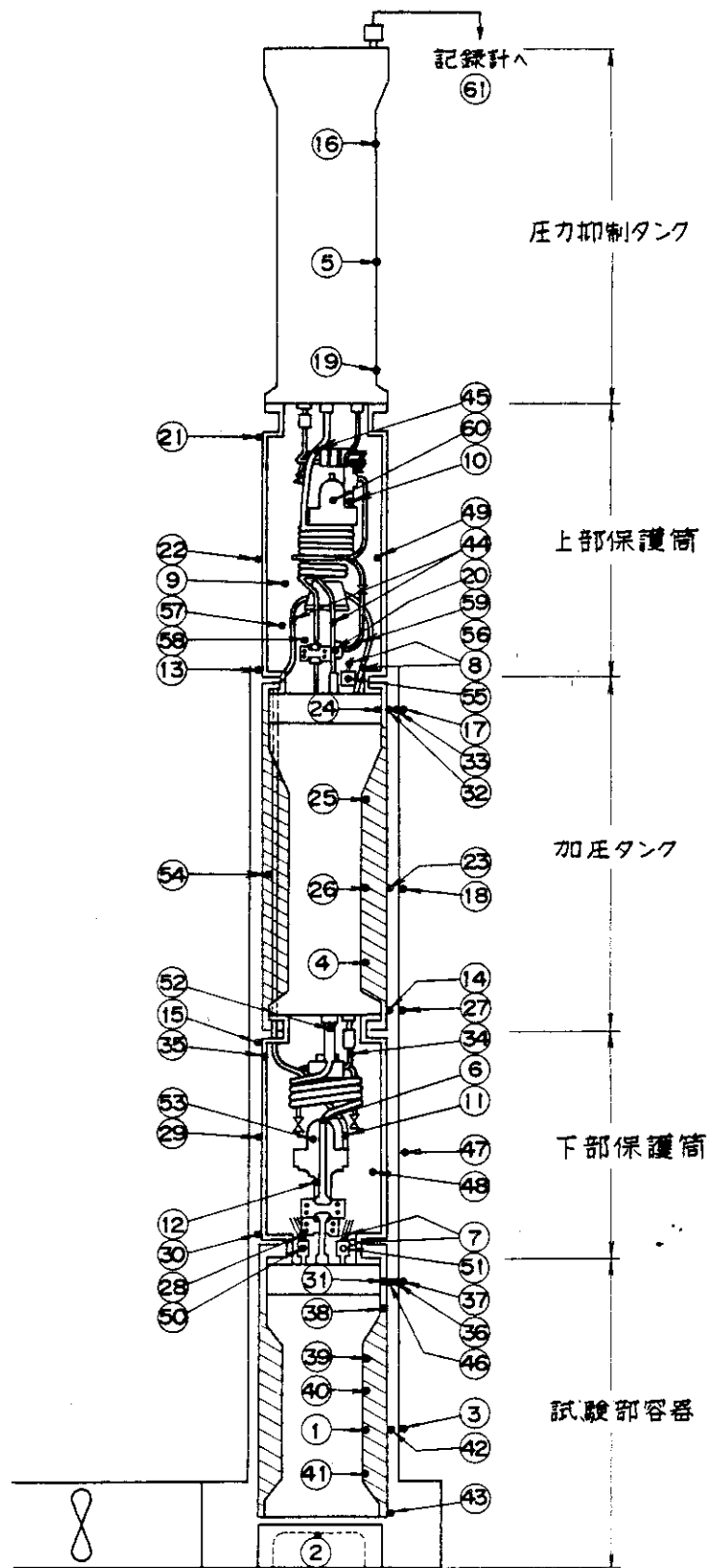


Fig. 29 高圧カプセル各部の温度測定位置

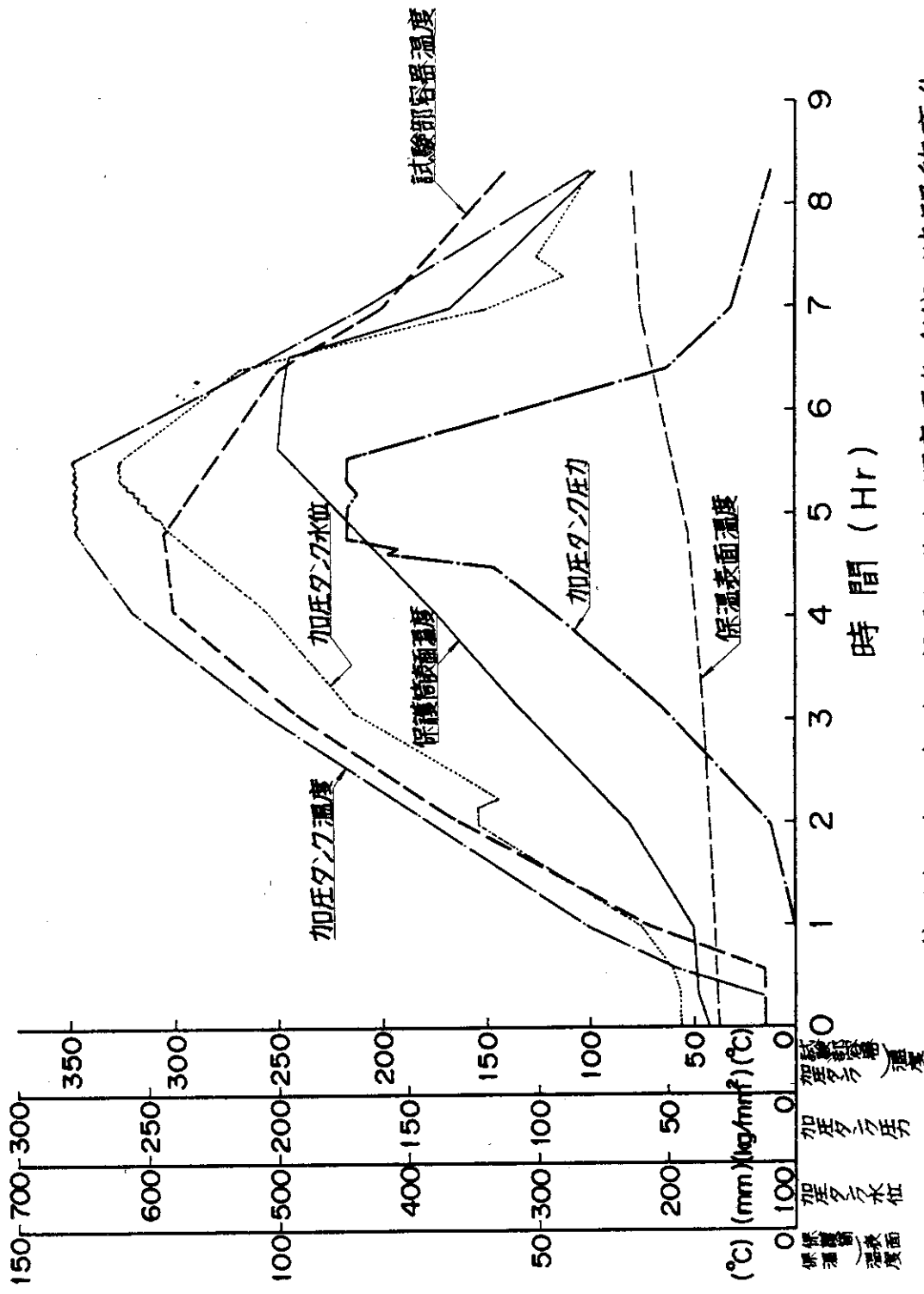


Fig. 30 炉外での試運転時における高圧カプセルの温度・圧力・水位の時間的变化

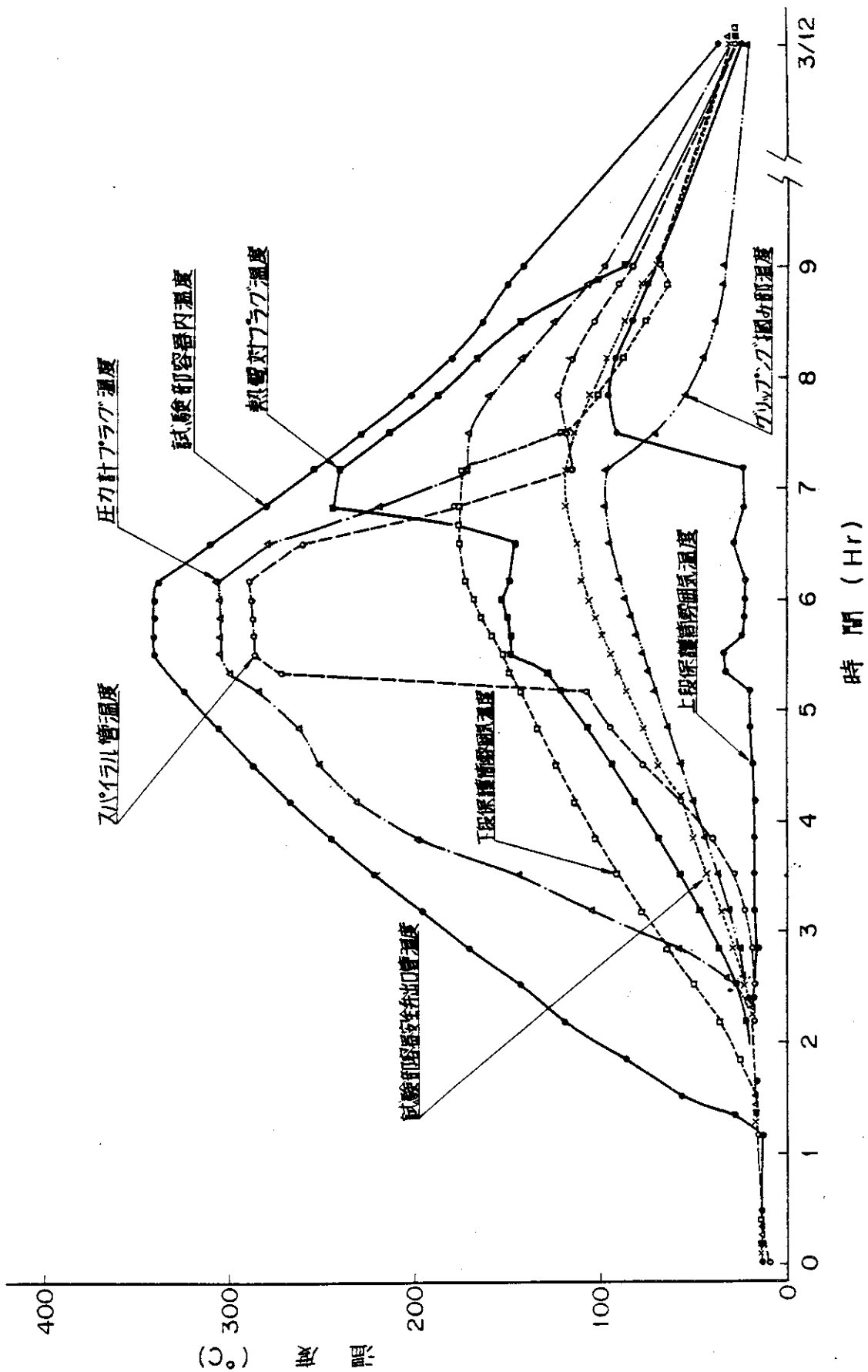


Fig. 31 炉外での試運転時における高圧カプセル各部温度の時間的变化

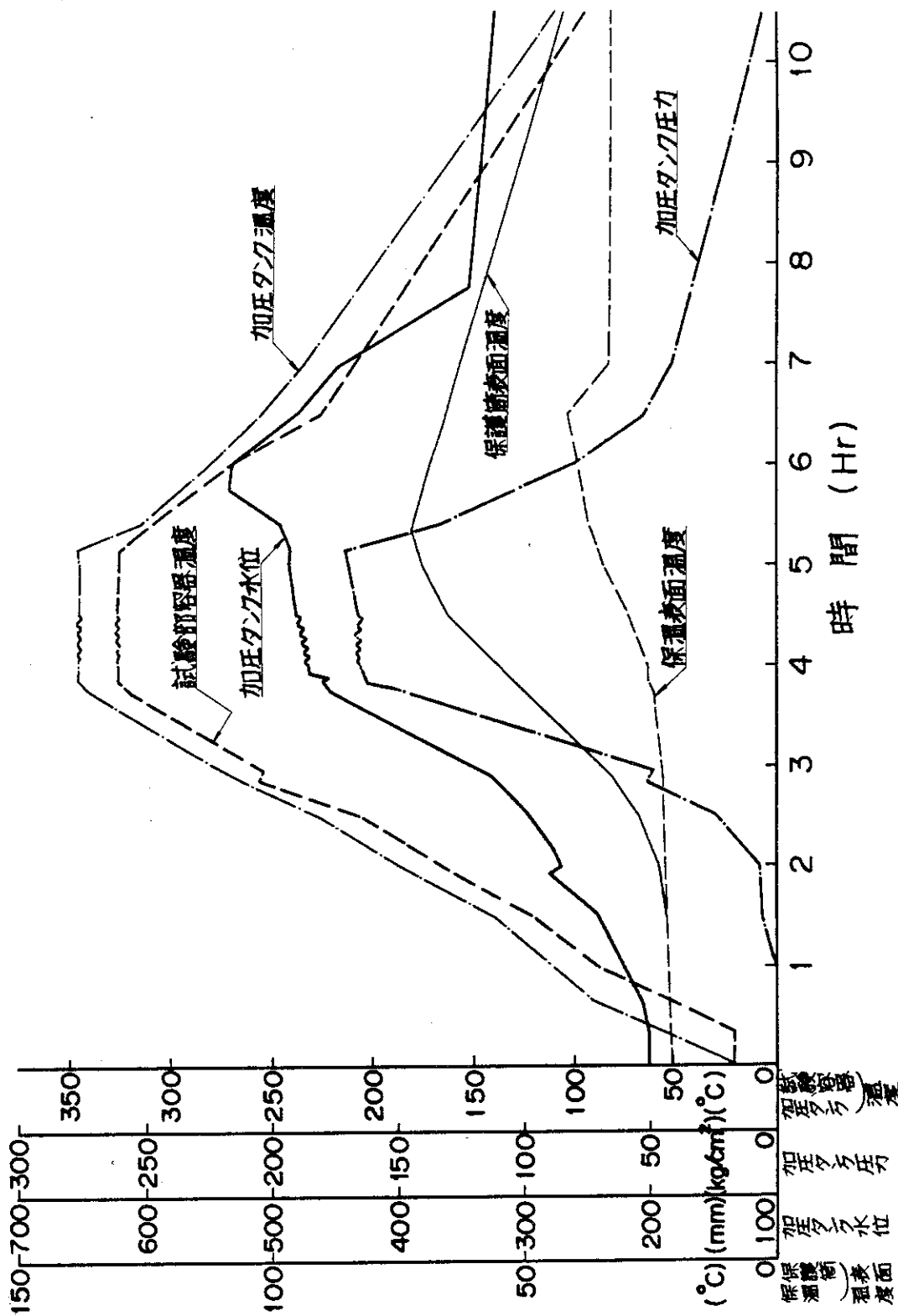


Fig. 32 実験孔内での試運転時における高圧カプセルの温度、圧力、水位の時間的变化

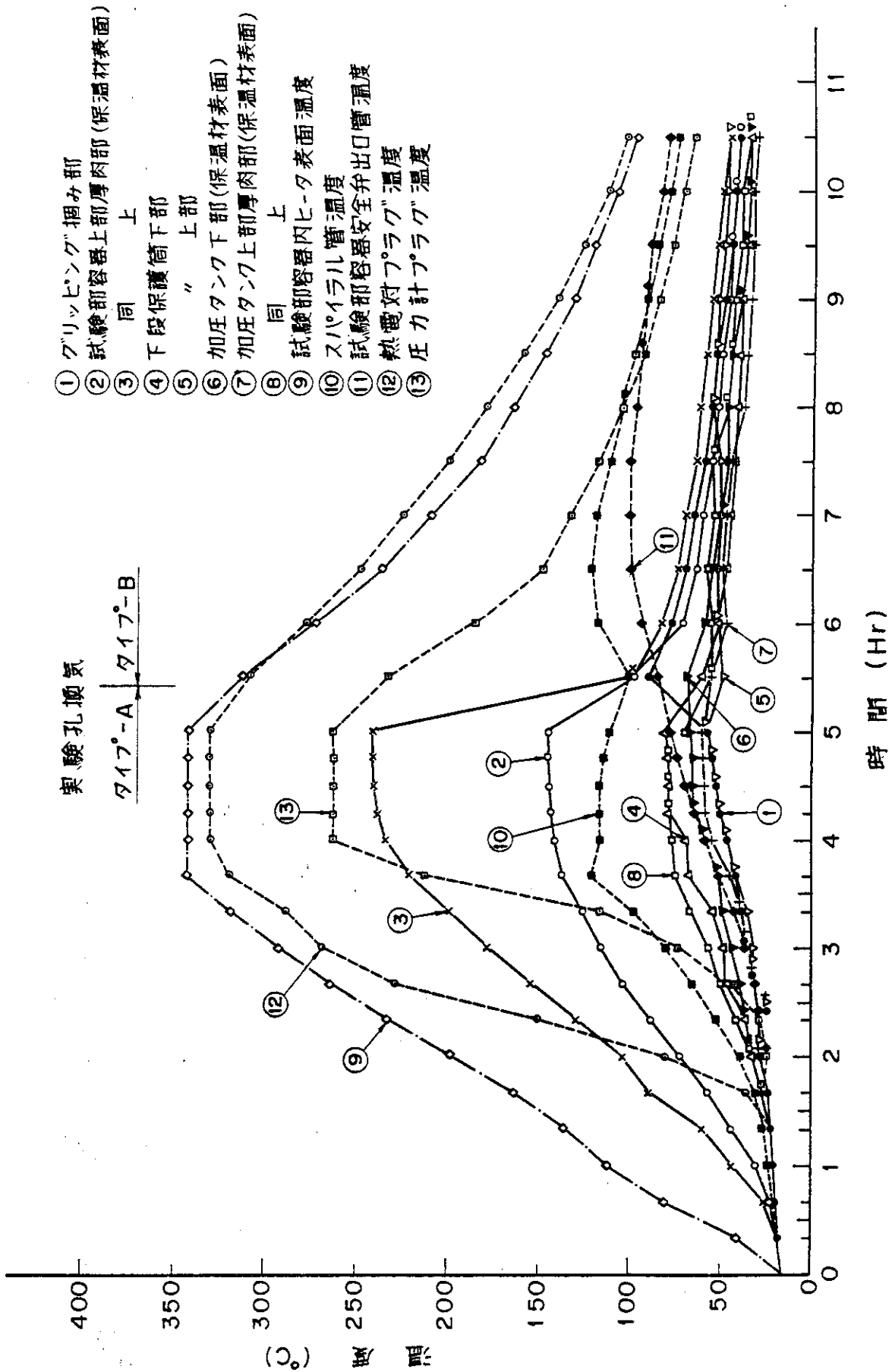


Fig. 33 実験孔内での試運転時における高压カプセル各部温度の時間的变化

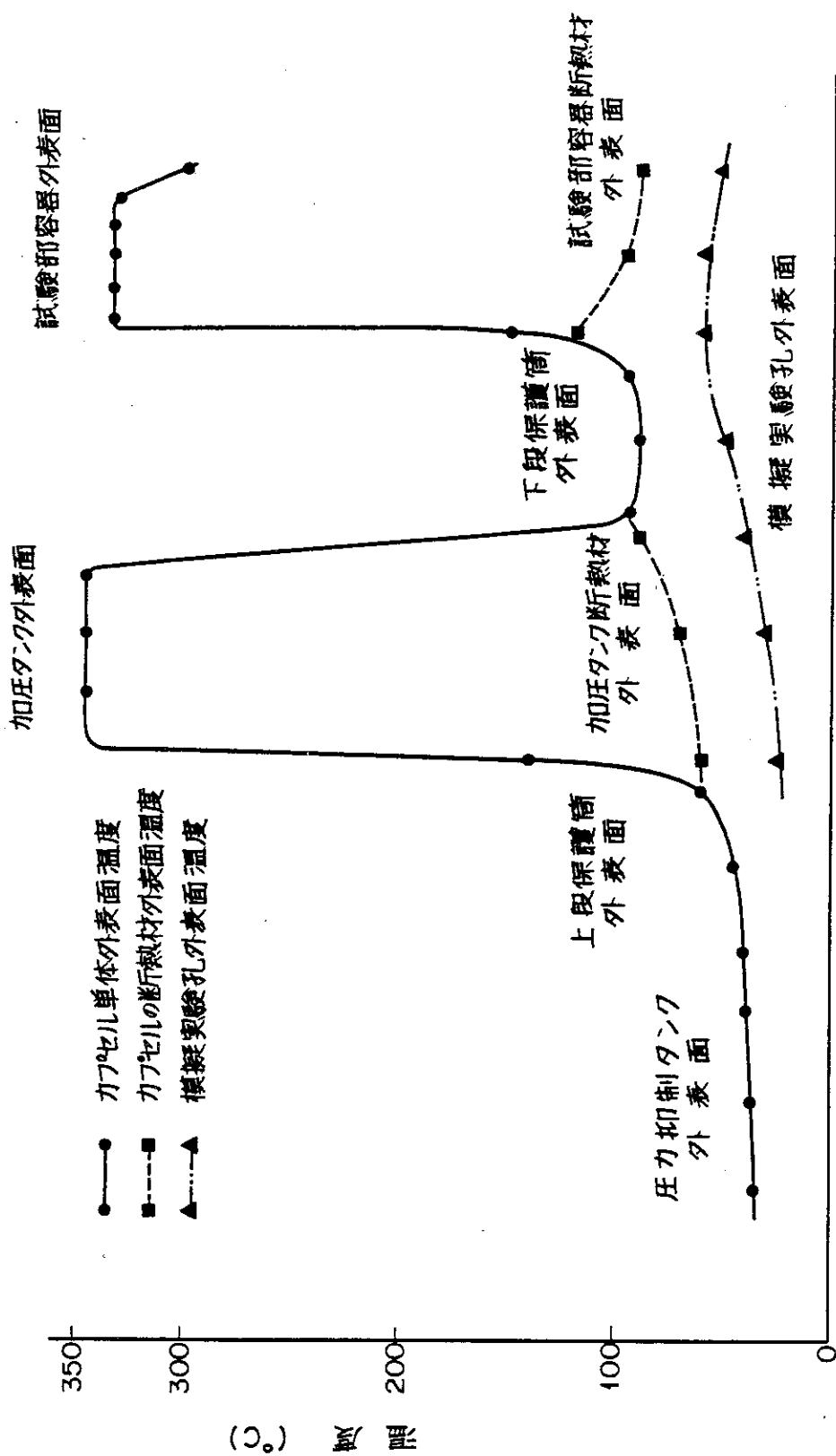


Fig. 34 高压カプセルの定格運転時における軸方向温度分布

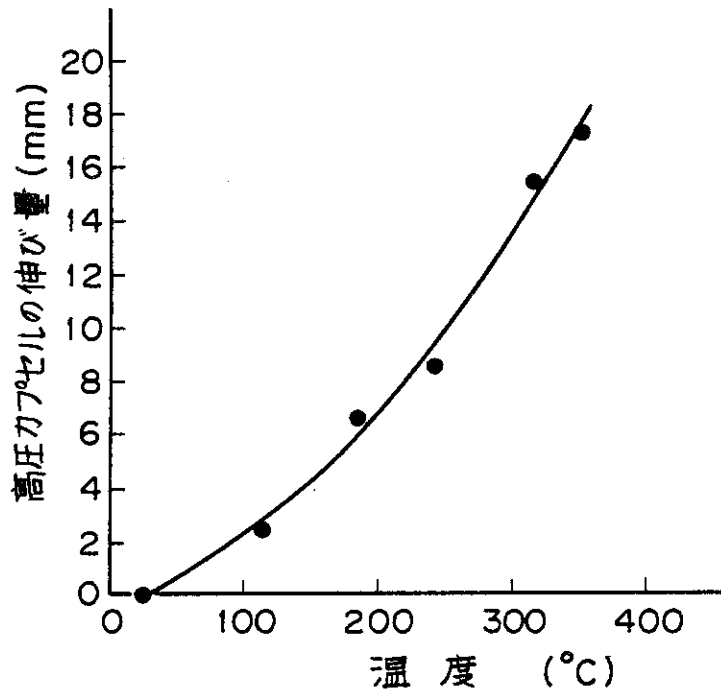


Fig. 35 高圧カプセルの軸方向伸びの測定結果

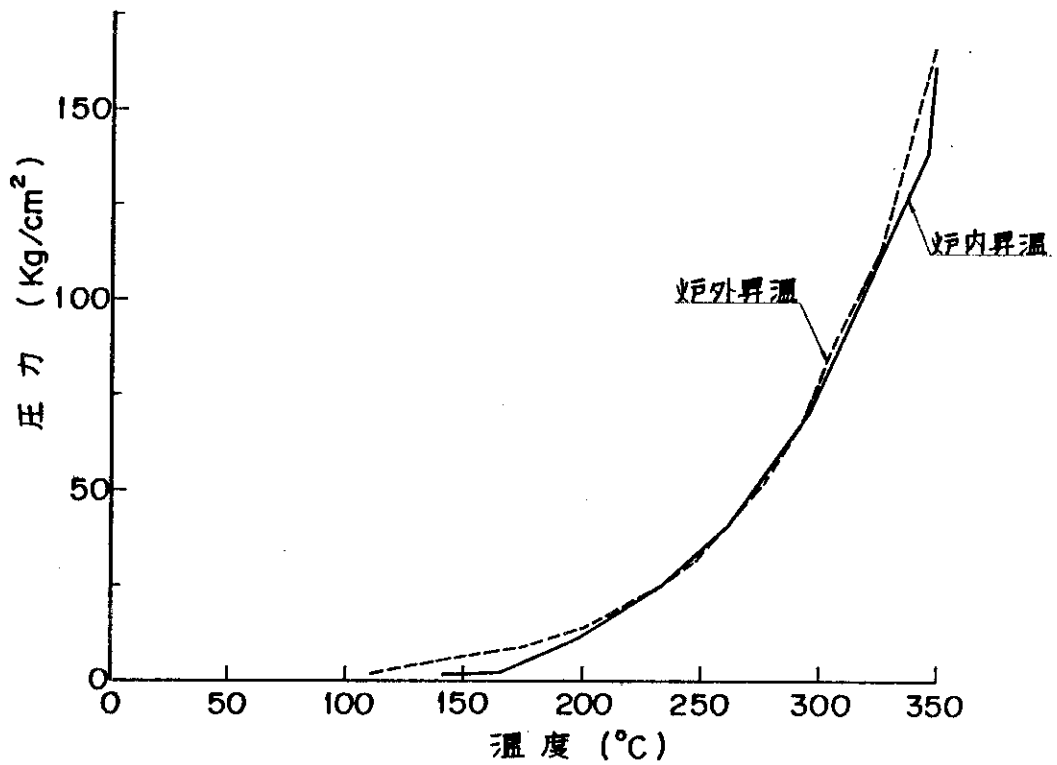


Fig. 36 炉内(実験孔内)および炉外での試運転時における加圧タンク内圧力の比較

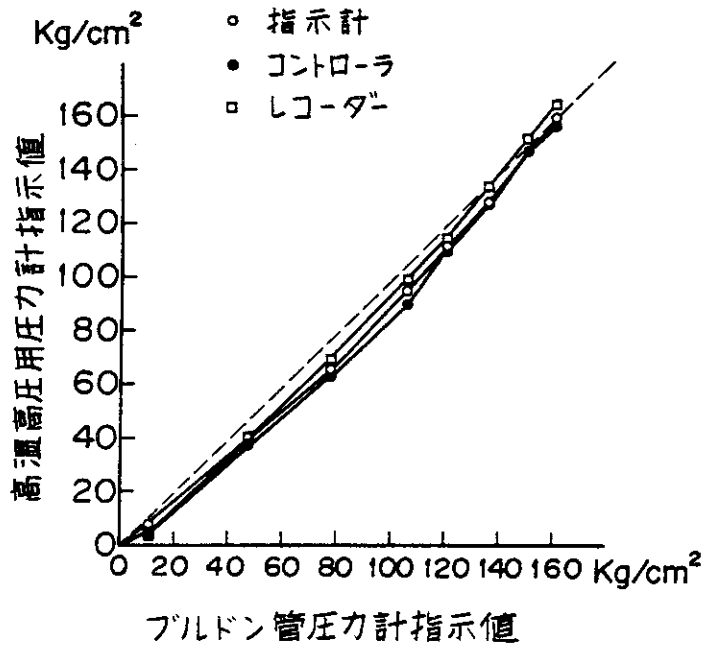


Fig. 37 炉外での試運転時における高温高压用圧力計と仮設ブルドン管圧力計の指示値の比較

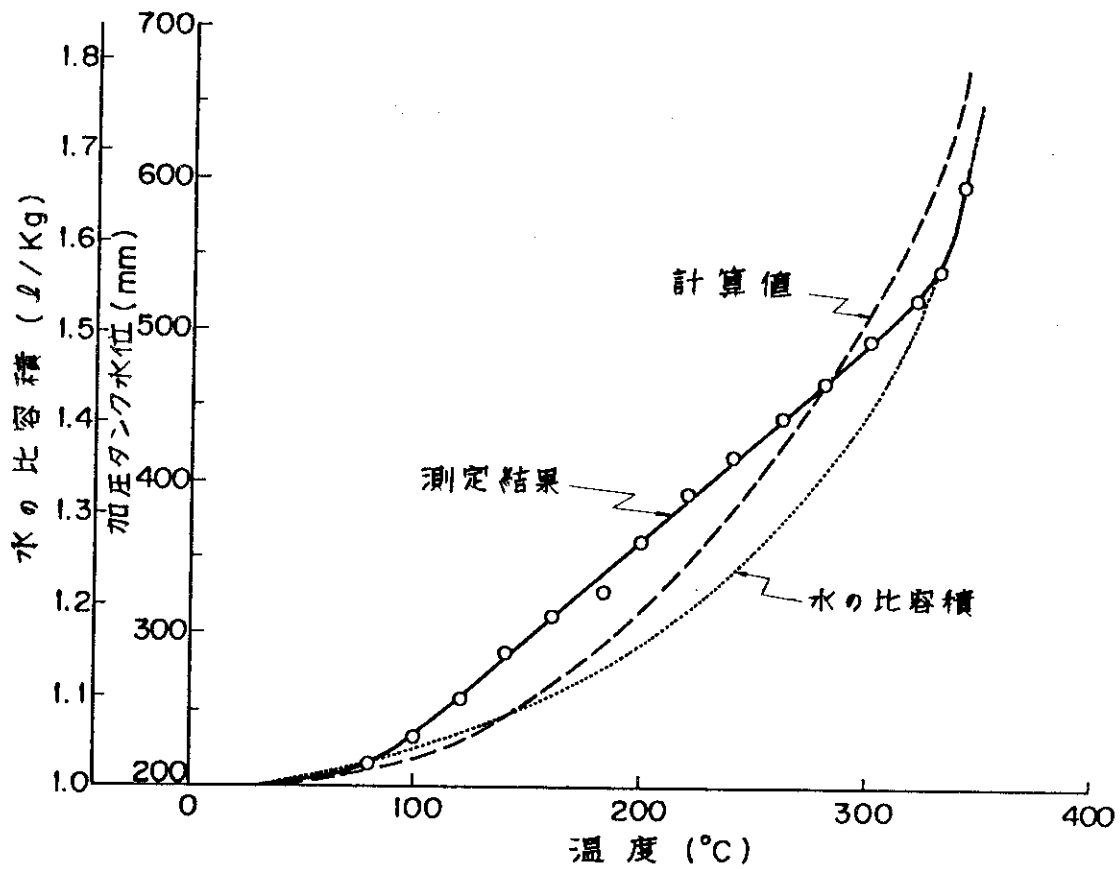


Fig. 38 試運転時における加圧タンク水位計の指示と解析による水位変化の比較

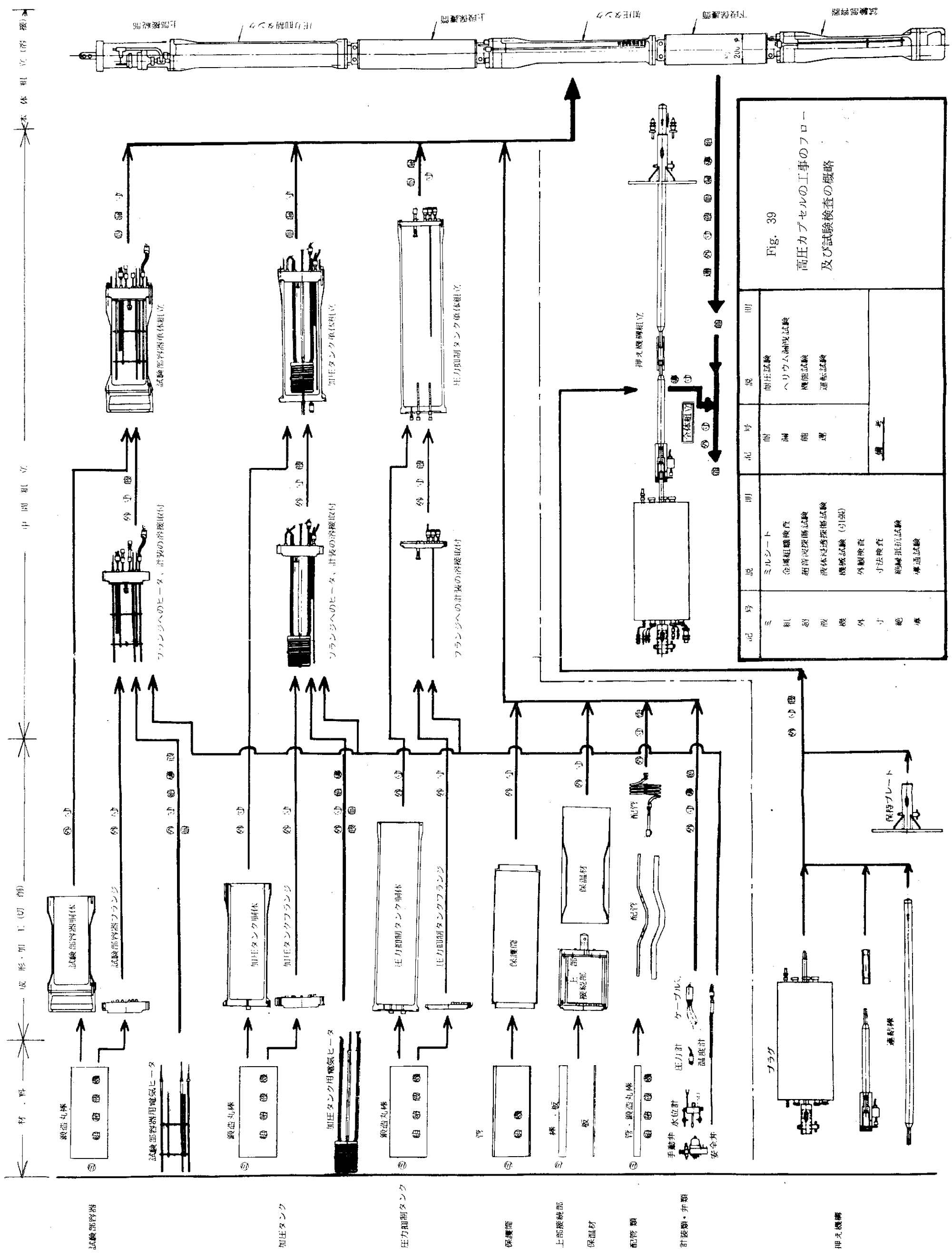


Fig. 39
高圧カプセルの工事のフロー
及び試験検査の概略

記号	説明	記号	説明
ミ	ミルシート	シ	耐圧試験
組	金属組織検査	ヘ	ヘリウム漏洩試験
液	超音波探傷試験	機	機能試験
機	液体透過探傷試験	運	運転試験
外	機械試験 (引張)		
寸	外形検査		
絶	寸法検査		
導	絶縁抵抗試験		
通	導通試験		

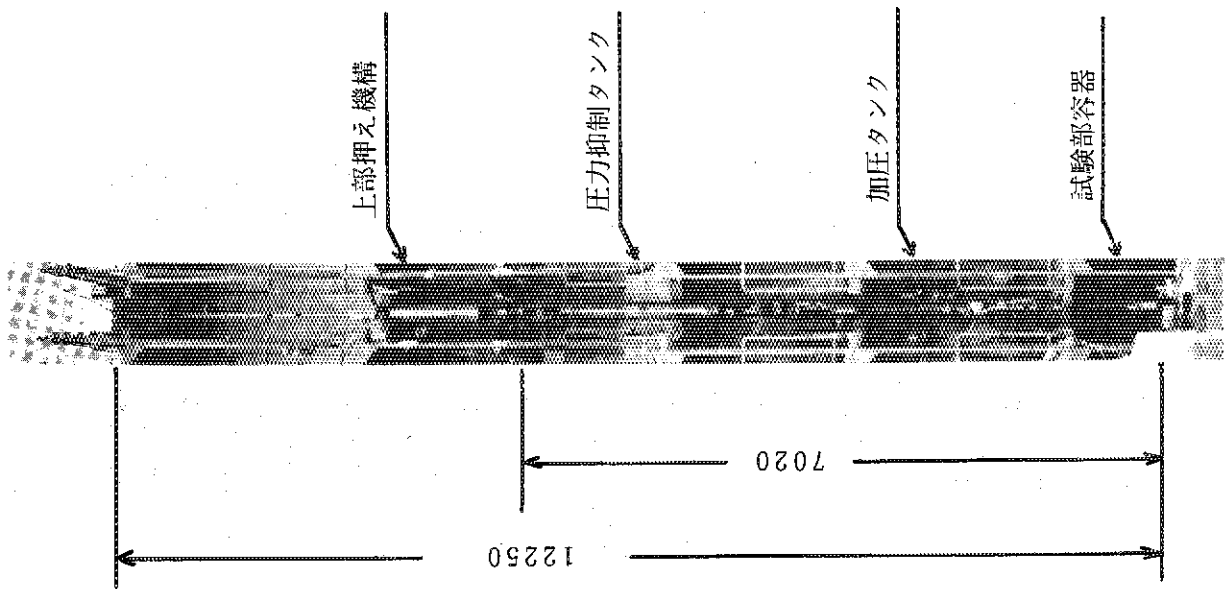


Photo. 1 高圧カプセル全体組立の外観

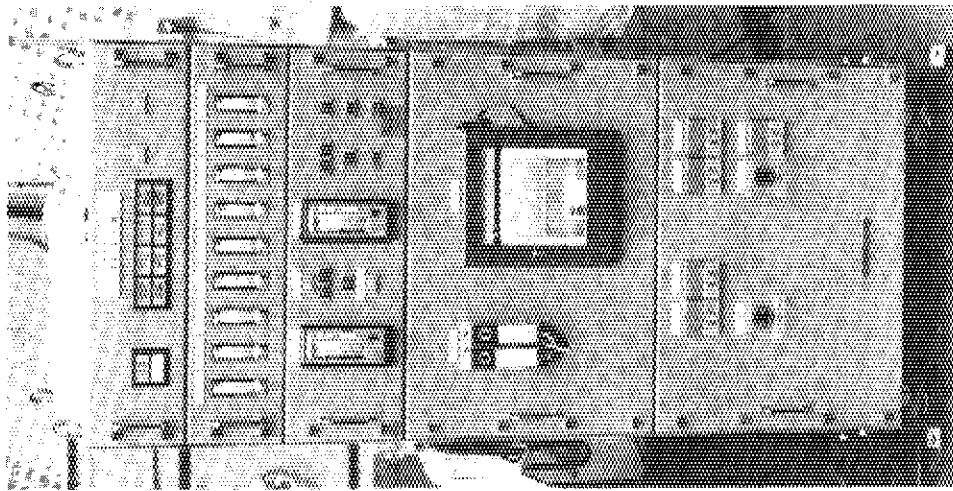


Photo. 2 高圧カプセル現場運転操作盤の外観

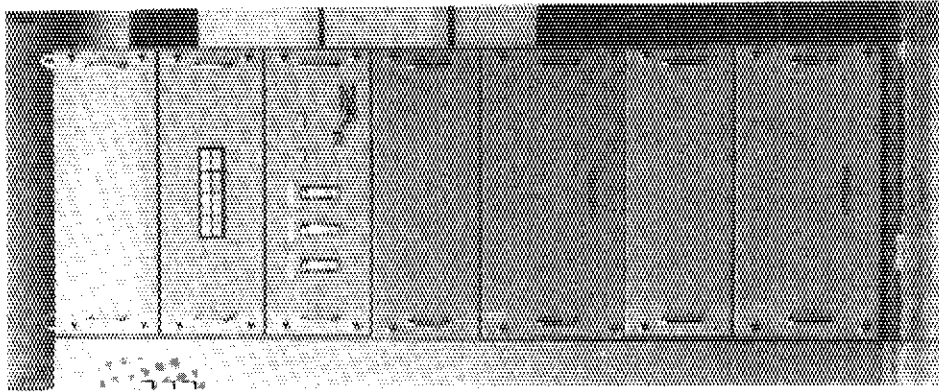


Photo. 3 高圧カプセル制御室実験監視盤の外観

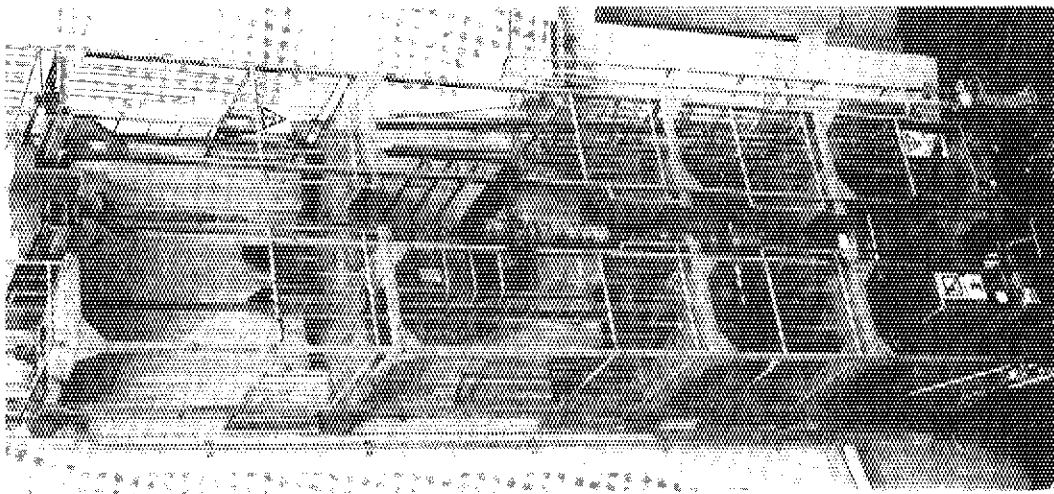


Photo. 4 NSRR 実験物取扱い架台の外観

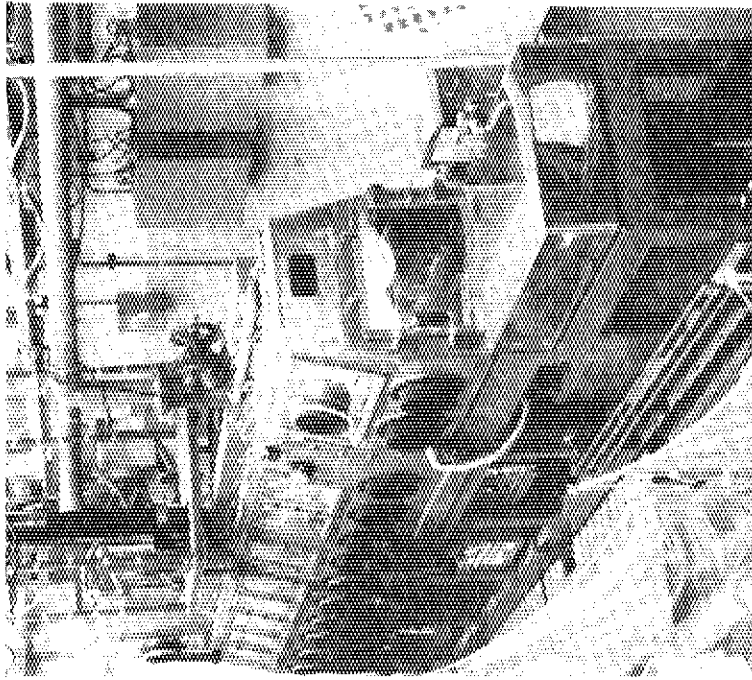


Photo. 5 NSRR 実験物解体セルの外観

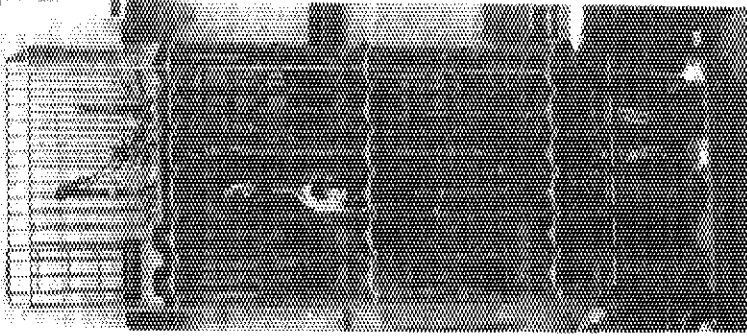


Photo. 6 NSRR 実験物保管架台の外観

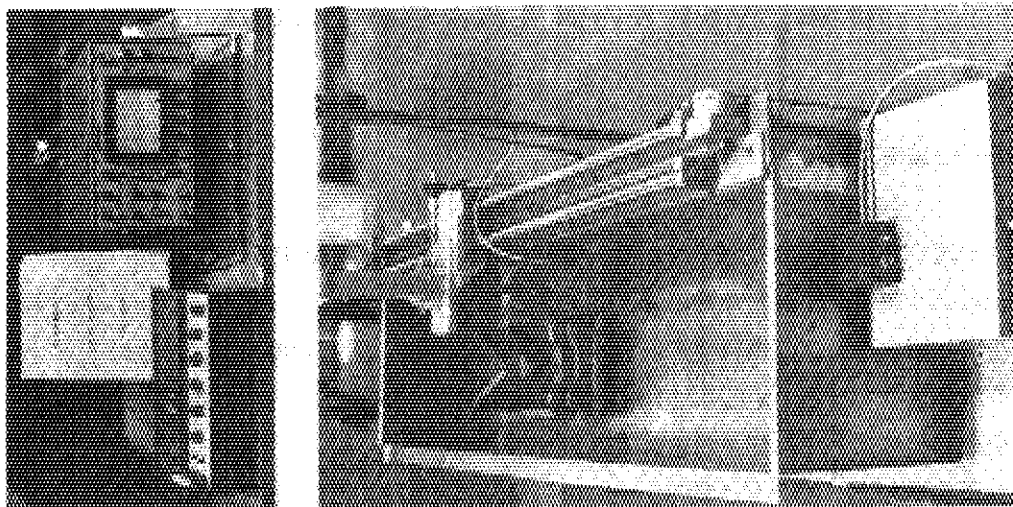


Photo. 8 NSRR 実験物内部欠陥計測装置
(超音波探傷試験装置) の外観

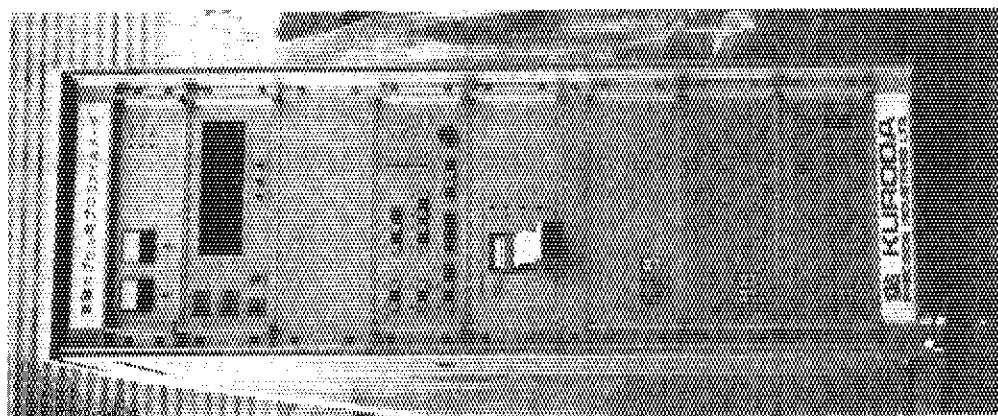
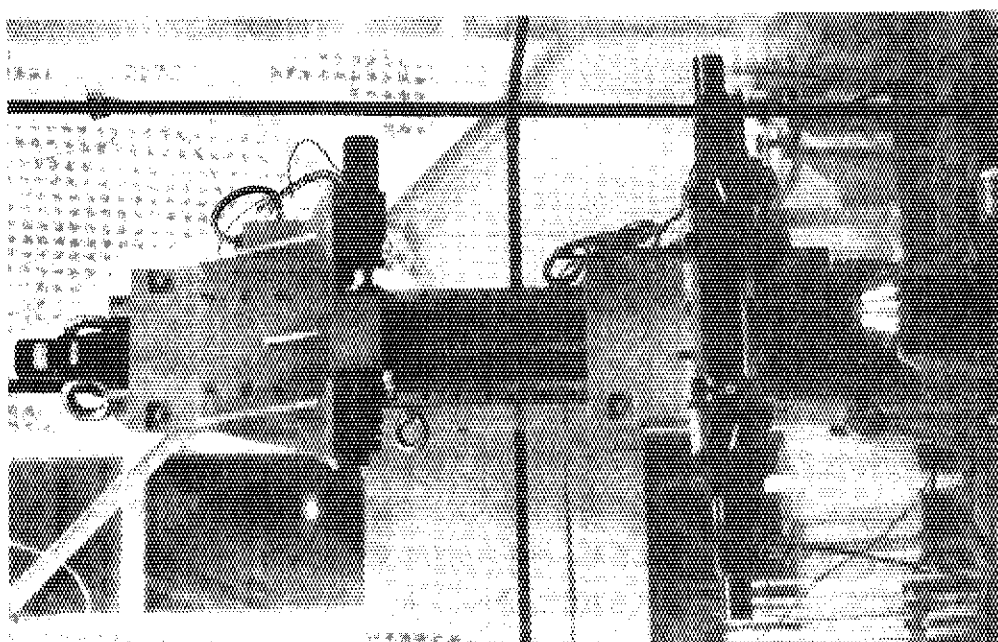


Photo. 7 NSRR 実験物詳細寸法測定装置 (ケーブル寸法
測定用プロファイルメータ) の外観



付録 NSRRの装置および特性の概要

1. NSRRの装置の概要

NSRRは米国GA社によって開発された大型パルス炉TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) を若干改良したものである。炉心は第1図に示すように、炉心中心部の実験孔と、それを取り囲む149本の燃料要素と8本の燃料フォロワー型制御棒および3本のトランジェント棒より構成されている。炉心本体は水深約9mのスイミングプール内に設置されており、プール水の自然対流によって冷却されるように設計されている。

炉心は直径約63cm、有効長さ約38cmの円筒形状である。炉心燃料は直径約3.6cm、有効長さ約38cmの20%濃縮ウラン-水素化ジルコニウム ($U-ZrH_{1.6}$)合金をステンレス鋼で被覆したものである。

実験孔は第2図に示すように炉心中心部を貫通し、プールの中ほどでY字状に分岐してプール上面まで伸びた内径22cmの管である。垂直に伸びた管を垂直装填管、傾斜した管をオフセット装填管という。前者は主としてループなど長尺物を使用する実験に用い、後者は管が傾斜しているために放射線の遮蔽が不要なことから、取り入れ取り出しが比較的簡単なカプセル実験に用いる。

2. 実験用カプセル

試験燃料を収納するカプセルは、実験の安全性を確保すると共に、実験条件を設定するよう設計されている。NSRRで開発した標準水カプセルの概略を第3図に示す。これは常温常圧の実験条件において使用されるものでステンレス鋼で製作されている。試験燃料は、試験燃料の軸方向中心部が丁度炉心燃料部の軸方向中心に位置するように、カプセルの中心部より若干下の位置に支持棒により固定される。

3. パルス性能

パルス出力の発生は3本のトランジェント棒の急速引抜きによって行われる。3本のトランジェント棒の組合せによって最大約4.7ドルまでの任意の反応度を投入することができる。パルス出力はNSRRのもつ自己制御性、すなわち、燃料体に含まれる減速材 (ZrH) の大きな負の温度係数によるフィードバック効果により抑制される。第4図に反応度投入量4.7ドルに対するパルス出力と積分出力の時間変化を示す。この場合の最大ピーク出力と積分出力は、それぞれ約21000MWと約120MW-secである。また、パルス出力の最短炉周期とパルス半値巾はそれぞれ1.13と4.4 msecで、これらはいずれも熱中性子パルス炉としては最も速く、かつ狭いものである。第5図にパルス出力と積分出力を逆炉周期で整理した図を示す。なお、NSRRの即発中性

子寿命 ℓ および遅発中性子割合 β_{eff} の計算値はそれぞれ $30 \mu\text{sec}$ および 0.0073 である。

4. 炉心および実験孔の熱中性子束分布

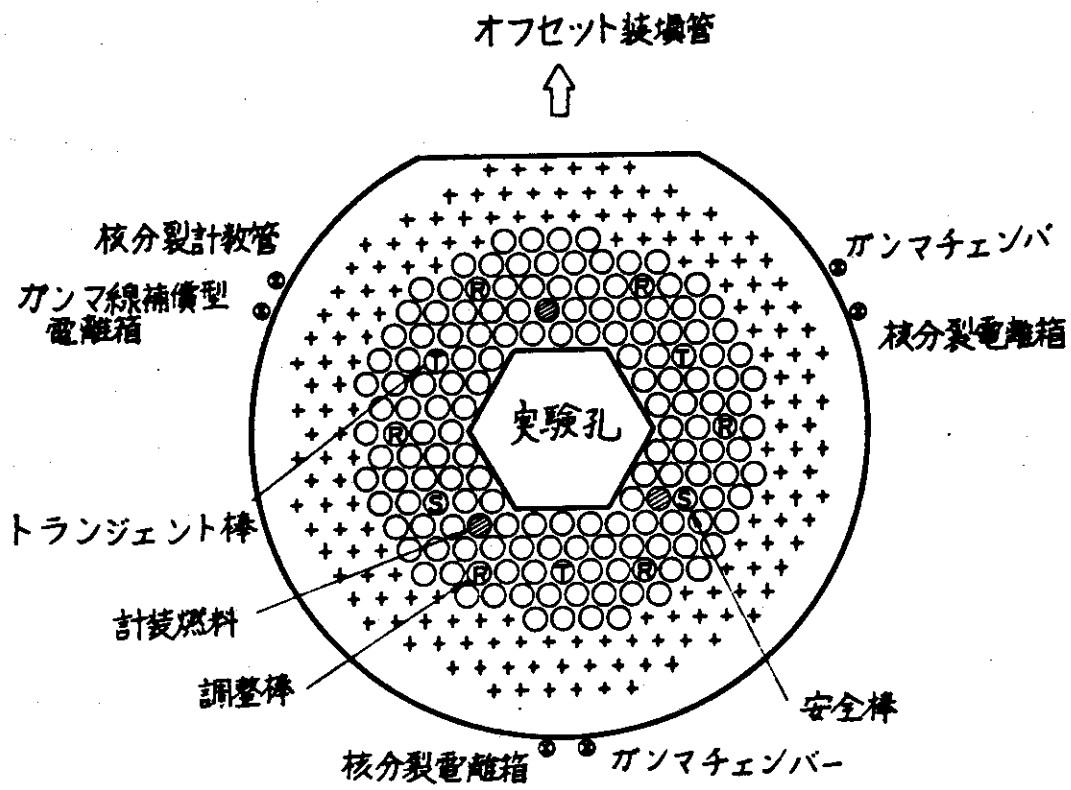
炉心および実験孔の半径方向および軸方向の熱中性子束分布を第6図および第7図に示す。図に示すように、実験孔の熱中性子束は炉心領域に比べて数段高くなっている。このため炉心燃料の健全性を損うことなく試験燃料に破損等を起させるに有効な熱中性子を与えることができる。炉心領域の熱中性子束の平均値（または最高値）に対する実験孔内の熱中性子束の平均値の比（F. O. M., Figure of Merit という）は、実験孔内の実験物の構成物や構造が大幅に異なる限り大きく変化しないと考えられる。したがって、炉心の出力に対する試験燃料の発熱量が較正されておれば、実験ごとに発熱量の較正測定をする必要がなくパルス出力の測定値から簡単に求めることができる。

この炉の熱中性子束は放射化法により実験孔内にカプセルが挿入されている場合とない場合について測定され、定格出力運転の最大出力 300kW においてそれぞれ $2.29 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ （炉心平均）および $2.56 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ （炉心平均）となっている。炉心の出力ピーキング係数を第1表に示す。実験孔内にカプセルを挿入した場合とそうでない場合とではピーキング係数が多少異っている。

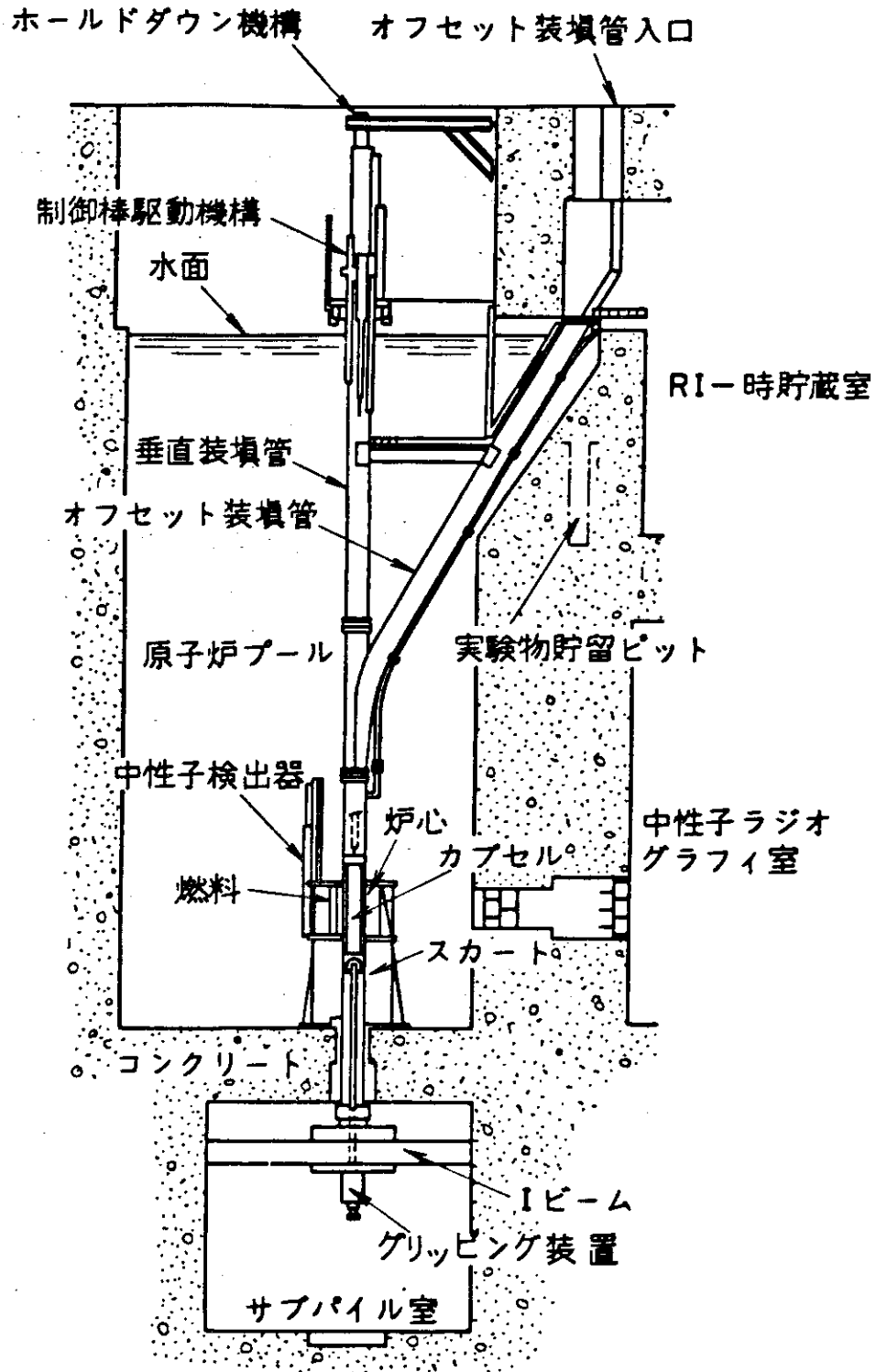
5. 試験燃料

NSRR実験においては、実験結果をできる限り整理しやすいようにするために実験に用いる試験燃料の形状、材質および製造条件等の仕様を同一にしたものを標準燃料として用いている。標準燃料およびそれを基準にしてギャップ幅を変えたギャップ燃料等の主要な仕様を第2表に、また概略を第8図に示す。表に示されているように、標準燃料は長さ、濃縮度および内圧を除いてほぼPWR燃料と同一の仕様である。NSRR実験では標準燃料を基準とした燃料破損に関するデータ・ベースをつくり、被覆管の材質、ペレット形状、濃縮度等の燃料に関するパラメータの違いによる破損挙動に及ぼす影響を標準燃料の結果と比較することによって評価する方法をとっている。

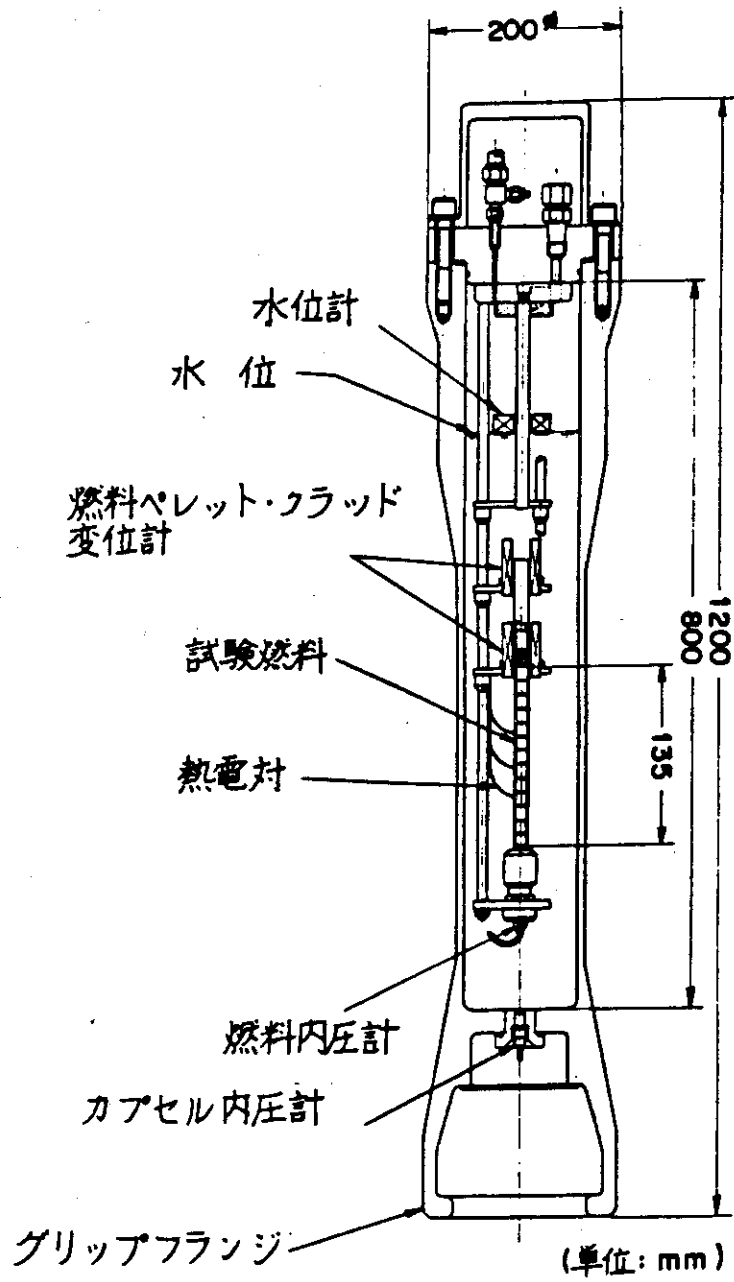
以上の点から、発熱量の評価も10%濃縮度の標準燃料が主体的に行われており、測定に用いられた燃料本数も最も多くなっている。



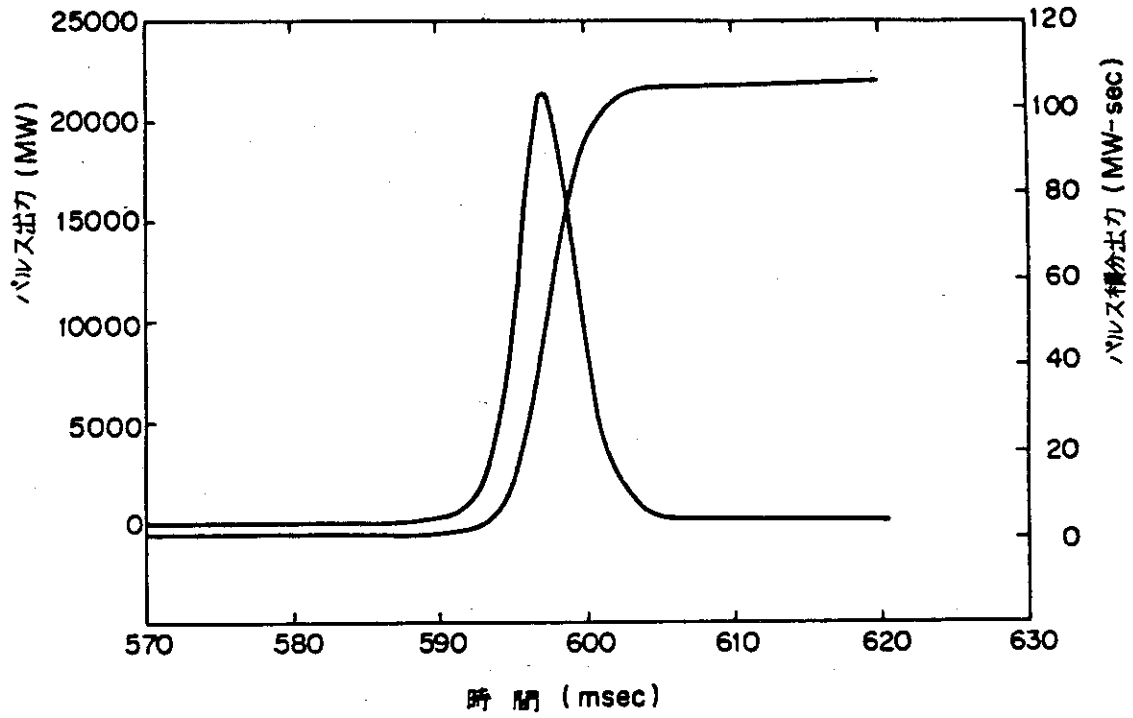
第1図 炉心の概略図



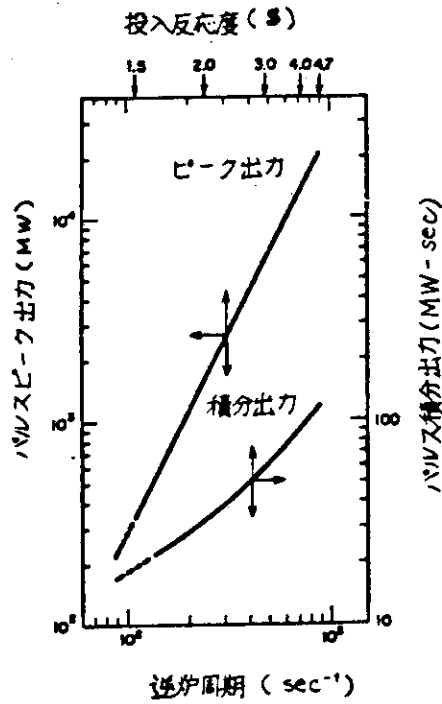
第2図 原子炉本体縦断面



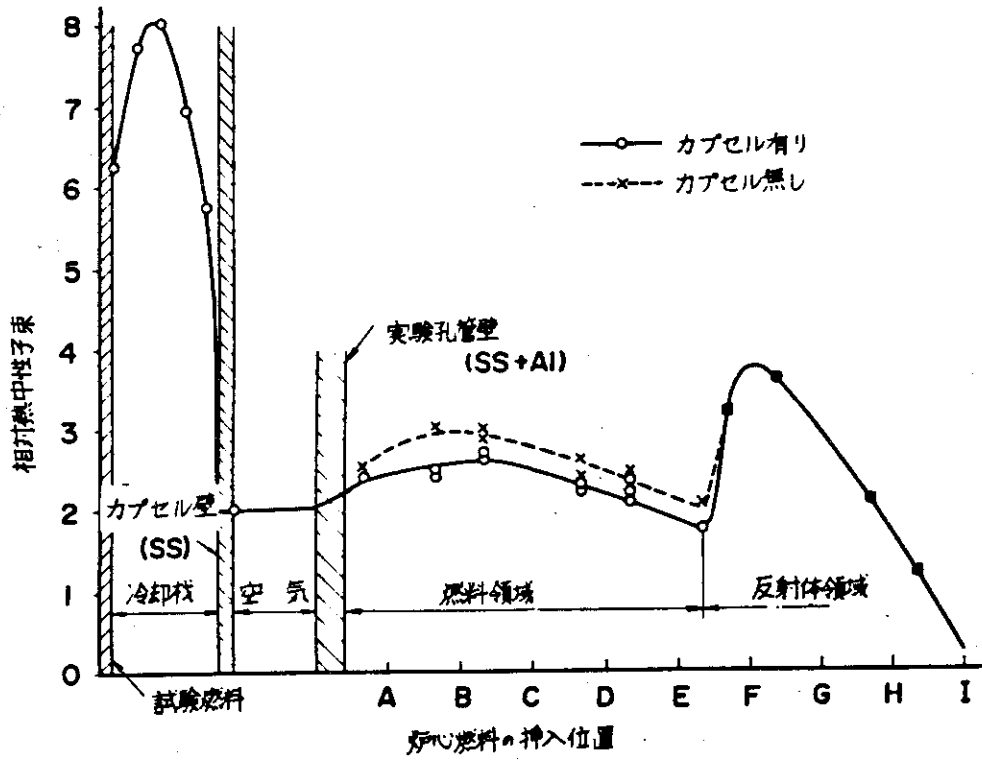
第3図 標準水カプセル



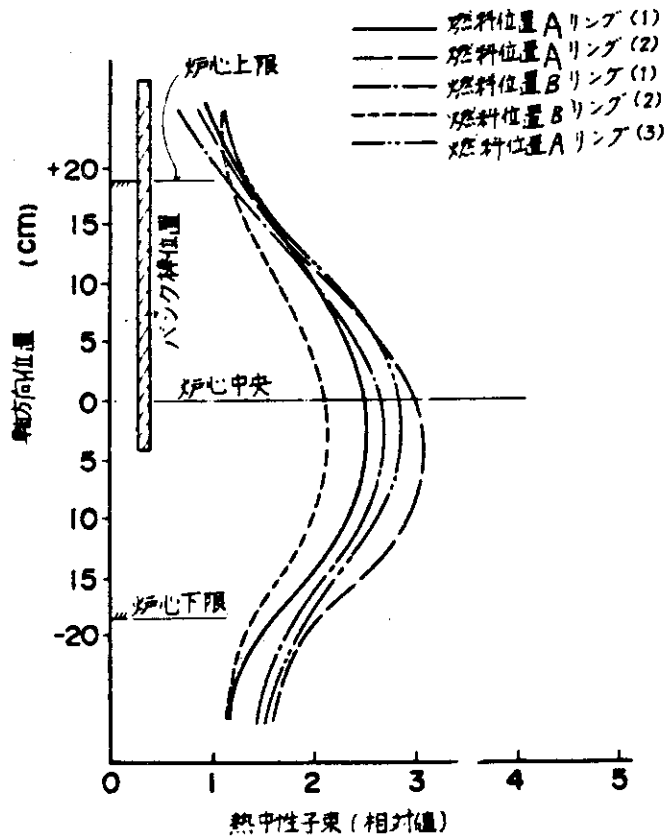
第4図 投入反応度4.7%に対するパルス出力およびパルス積分出力の時間変化



第5図 投入反応度に対するパルスピーク出力およびパルス積分出力特性



第6図 炉心および実験孔の半径方向熱中性子束分布



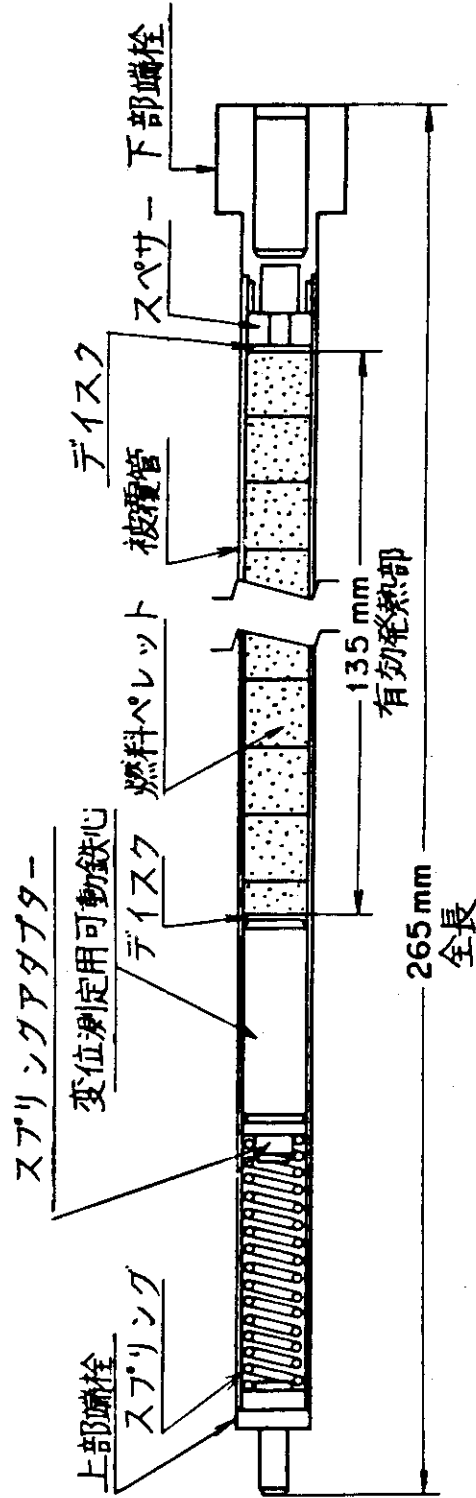
第7図 炉心の軸方向熱中性子束分布

第1表 炉心の出力ピーキング係数の測定値

測定条件 測定項目	測 定 値	
	カプセルありの場合	カプセルなしの場合
軸 方 向	1.37	1.35
半径方向	1.16	1.12
合 計	1.59	1.51

第2表 試験部燃料主要諸元

燃 料 タ イ プ	標 準 燃 料	広巾ギャップ燃料
UO ₂ ペレット		
直 径	9.29 mm	9.09 mm
長 さ	10 mm	10 mm
密 度	95% T. D.	95% T. D.
濃 縮 度	10% (5,20%)	10%
形	Chamfered	Chamfered
クラッド		
材 質	Zircaloy-4	Zircaloy-4
厚 さ	0.62 mm	0.62 mm
ピ ン		
直 径	10.72 mm	10.72 mm
ギャップ	0.095 mm	0.195 mm
要 素		
全 長	265 mm	265 mm
燃 料 長	135 mm	135 mm
ペレット重量	96 g	91 g
ペレット個数	14	14
プレナムガス	He 1 atm	He 1 atm



第8図 試験燃料の概略図