

JAERI-M

5861

NSRRカプセルの耐爆実験
(実験方法および実験結果)

1974年10月

藤城 俊夫・岩田 耕司・菊地 隆
吉原 文夫・星 蔦雄

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カプセルの耐爆実験

(実験方法および実験結果)

日本原子力研究所東海研究所反応度安全開発室

藤城 俊夫・岩田 耕司・菊地 隆

吉原 文夫・星 篤雄

(1974年10月受理)

NSRRによる燃料破壊実験において実験燃料を収納するカプセルは、燃料の破損にもなって生じる衝撃圧力や水撃力に十分に耐え、カプセル内に放出される燃料破損片や核分裂生成物等を外部に洩出させない機能が要求される。このため、NSRRの安全審査においては火薬を用いた耐爆実験によりカプセルの安全性を確認することが義務づけられた。本耐爆実験はこのような安全審査上の要求に基づき、標準カプセルの耐衝撃強度の確認および今後に予定される各種カプセルの耐衝撃設計データの収集を目的として行なったものである。試験カプセルとしてはNSRRの最初の実験に使用するステンレス鋼製インパイル水カプセルと全く同じものを使用し、使用条件と同じく冷却水および内部構造材を入れ、実験燃料を入れる位置に低爆速型爆薬を置いて爆発させ、カプセル各部の変形挙動、密封性能およびグリップング装置(カプセル固定装置)の性能等を調べた。この結果、設計条件としたインパイル最大実験条件に対し十分余裕のある耐衝撃強度および密封特性を確保できる事が明らかになった。

Explosive Proof Test of NSRR Experimental Capsule

Toshio FUJISHIRO, Koji IWATA, Takashi KIKUCHI,
Fumio YOSHIHARA and Tatsuo HOSHI

Div. of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received September 12, 1974)

NSRR experimental capsules are designed as pressure vessels to withstand and confine mechanical energy such as pressure pulses and water hammer forces generated at experimental fuel rupture. To prove the safety margin of the capsule, it is required to perform mock-up tests using chemical explosives.

This report presents the results of explosive tests carried out with full size models of Type I in-pile capsule. Chemical explosive of 10g or 50g was charged at the fuel position in the test capsule, and fired by an electric detonator. Shock pressures, capsule wall transient and residual deformations and water column jumping speed were measured. For testing "Gripping Device" which is to be used for fixing the capsule in place, a similar mock-up was built and used throughout the tests.

Assessing the results of all these test experiments, it was confirmed that the capsule and the gripping device have a enough margin against the destructive pressures to be generated at the designed NSRR fuel rupture experiments.

目 次

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | 耐爆実験の目的および考え方 | 2 |
| 3 | 実験装置および実験方法 | 4 |
| 3.1 | 耐爆実験 | 4 |
| 3.1.1 | 概 要 | 4 |
| 3.1.2 | 耐爆実験カプセル | 4 |
| 3.1.3 | グリップング装置 | 4 |
| 3.1.4 | 測定機器 | 4 |
| 3.1.5 | 火 薬 | 6 |
| 3.2 | ヘリウム・リーク試験 | 6 |
| 3.3 | 材料引張試験 | 7 |
| 4 | 実験結果および考察 | 17 |
| 4.1 | 実施経過 | 17 |
| 4.2 | 材料強度特性 | 17 |
| 4.3 | 火薬の破壊力 | 17 |
| 4.3.1 | 衝撃圧力 | 17 |
| 4.3.2 | 水 撃 力 | 18 |
| 4.3.3 | カプセル設計条件と火薬の破壊力との比較 | 18 |
| 4.4 | カプセル各部のひずみ挙動 | 20 |
| 4.4.1 | 動ひずみ挙動 | 20 |
| 4.4.2 | 残留ひずみ挙動 | 21 |
| 4.4.3 | カプセル破損限界の予想 | 21 |
| 4.5 | ヘリウム・リーク試験結果 | 22 |
| 4.6 | グリップング装置の性能 | 22 |
| 5 | 結 論 | 36 |
| 6 | 謝 辞 | 36 |
| | 添付図 標準水カプセル(耐爆実験用) | 37 |

図・表目次

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 第 1 図 | カプセル負荷荷重のモデル | 3 |
| 2 | 燃料破損時に発生する衝撃圧力 | 3 |
| 3 | 燃料破損時の機械的エネルギー転換率 | 3 |
| 4 | 耐爆実験フローチャート | 8 |
| 5 | 実験実施手順 | 11 |
| 6 | 耐爆実験カプセル | 12 |
| 7 | グリッピング装置とその動作 | 13 |
| 8 | 起爆の方法 | 14 |
| 9 | ヘリウム・リーク試験フローチャート | 14 |
| 10 | 引張試験片 | 14 |
| 11 | カプセル材料の応力・ひずみ線図 | 28 |
| 12 | 衝撃圧力データ記録例 | 29 |
| 13 | 水撃力データ記録例 | 30 |
| 14 | 水塊速度および水撃圧力と薬量の関係 | 31 |
| 15 | 水撃エネルギーと薬量の関係 | 31 |
| 16 | 機械的エネルギー転換率と薬量の関係 | 32 |
| 17 | ひずみエネルギーとひずみの関係 | 32 |
| 18 | 動ひずみデータ記録例 | 33 |
| 19 | 胴体周方向ひずみ挙動 | 34 |
| 20 | ひずみの軸方向分布 | 34 |
| 21 | 累積円周ひずみと累積薬量の関係 | 35 |
| 22 | 実験 1 回当たりの円周ひずみ | 35 |
| 第 1 表 | SUS304 鋼管ミルシート | 9 |
| 2 | SUS304 鋼棒ミルシート | 10 |
| 3 | 火薬の性能表 | 11 |
| 4 | 実験シリーズ分類 | 23 |
| 5 | カプセル耐爆実験実施日程 | 24 |
| 6 | 衝撃圧力のピーク値および半値幅 | 23 |
| 7 | カプセルの設計条件 | 25 |
| 8 | 水撃力の比較 | 25 |
| 9 | 衝撃圧力の効果の比較 | 25 |
| 10 | 蓋および厚肉部における歪 | 26 |
| 11 | ヘリウム・リーク試験結果 | 27 |
| 12 | グリッピング装置の負荷荷重 | 27 |

1. はじめに

NSRR実験は実験燃料をNSRR炉の実験孔内でパルス照射し、実験燃料中に原子炉の異常出力上昇に対応した発熱を生じさせる事によって原子炉燃料の破損限界、破損機構、燃料破損にもなり衝撃圧力その他の機械的エネルギー発生挙動等の究明を行なうものである。このため実験燃料を収納するカプセルは実験に際し必要な実験条件を設定できる機能を持っていないが、同時に、実験燃料の破損にもなって発生する破壊力に耐え、実験燃料片や核分裂生成物等を内部に閉じ込めておく機能が要求されるので、十分な衝撃強度とシール特性を持たなければならない。

本耐爆実験は実験燃料破損時の破壊力、すなわち衝撃圧力と水撃力とを火薬の爆発によって模擬する事によって、(1) カプセルの耐衝撃強度を確認すること、(2) 今後さらに機能性の高いカプセルやループの設計を行なう際の耐衝撃設計データを収集することを目的として行なったものである。

カプセルの耐爆実験としては既に高温配管用炭素鋼管STPT-42の材料から作製した試験カプセルを用いて予備実験を実施しているが(JAERI-memo 5222参照)本実験はこの予備実験の経験にもとづき、耐爆実験カプセルとしてインパイル用ステンレス製標準水カプセル*と全く同一材質、寸法、形状のものを用いて行なった実機耐爆実験である。実験条件はインパイル実験条件を模擬するためにインパイル実験とほぼ同じ形状の内部構造物およびカプセル計装を取付け、同じ水位まで水を入れ、実験燃料の中心となる位置に火薬を装荷して水中爆発させた。火薬には低爆速用爆薬10g包および50g包を用い、さらに最小薬量実験として起爆用の電気雷管だけを爆発させる実験も行なった。

また、カプセルのシール特性を知るためにヘリウム・リーク試験を実施し、カプセル素材から製作した試験片の静的引張試験を実施して材料の強度特性データを得た。

また、本耐爆実験を通して、耐爆カプセル固定装置としてNSRR実験孔内に設置するグリッピング装置と同じ構造のつかみ装置を製作し使用した。したがって、本耐爆実験では、カプセルの耐衝撃強度だけでなくカプセル固定装置の機能および耐衝撃荷重特性についても試験した事になった。

なお、本報告は上述の(1)、(2)の目的のうち、前者すなわち衝撃性能の確認を主眼としてまとめたものである。

* 実験燃料を大気圧、室温条件の水の中においてパルス照射し、破損挙動を調べる実験に使用するカプセルであり、NSRR実験の最初に使用する予定のものである。

2. 耐爆実験の目的および考え方

本耐爆実験はインパイル実験において燃料破損時に発生する衝撃的な破壊力を火薬の爆発力で模擬する事により、カプセルの耐衝撃強度を確認するために行なう実験である。燃料破損時に発生する破壊力については、いわゆる燃料・冷却材相互作用の問題 (Fuel Coolant Interaction) として現在盛んに研究されつつあり、NSRR実験の実験項目の1つにもなっているが、今までの研究結果から主要な破壊力は燃料破損直後の衝撃圧力および水塊吹上げによる水撃力である事がわかっている。すなわち、第1図にモデル的に示したように、カプセル内の冷却水中に固定された燃料が急激な加熱を受けて破損すると、小片となって飛散する高温の燃料片による冷却材の瞬時加熱、急激な蒸気発生あるいは被覆材破損時のバースト圧力等が原因となり、図中 P_1 で示した衝撃圧力が発生する。ついで蒸気泡の生長によって燃料上部にある液塊が吹上げられ、これがカプセル上端のフランジ面に衝突する結果水撃力 P_2 が発生する。NSRRインパイルカプセルの設計に当ってはこれら2種類の衝撃圧力 P_1 および P_2 を主要な負荷荷重とし、荷重値としてはNSRR実験条件に最も近いインパイル実験であるSPERT-CDC実験のデータにもとづいて決定した。第2図に衝撃圧力 P_1 のピーク値のSPERT-CDC実験結果を、又、第3図に水撃力のエネルギーに転換する効率(転換率)の実験結果を示す。設計にはこれらの図の最大圧力線および最大転換率線を用いた。

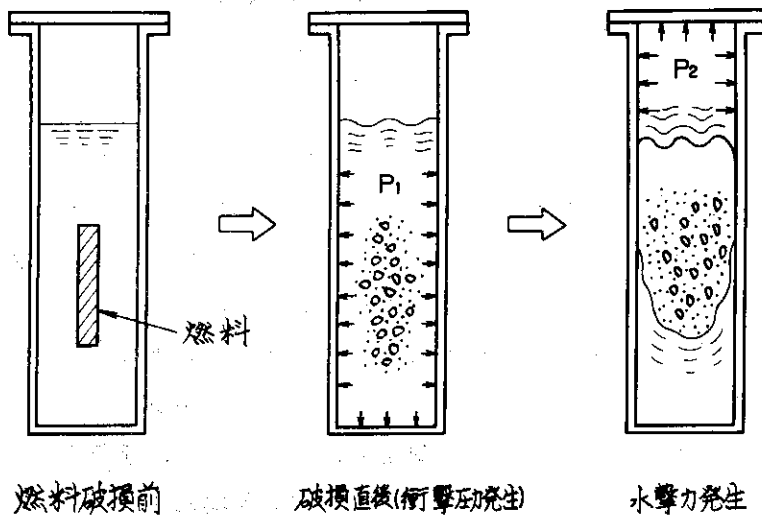
ところで、火薬を第1図に示したように容器内の水中で爆発させた場合には、まず爆燃によって衝撃波が発生し爆発位置を中心に周囲の水中に伝播する。この衝撃波は燃料破損直後に発生する衝撃圧力 P_1 に相当する。次に、火薬爆発の結果生じた燃料ガスの膨張によって容器上部の水塊が押上げられ、前述の P_2 に相当する水撃力が発生する。前者は火薬爆発では一般に燃料・冷却材相互作用によって生じる場合に比べ非常に鋭い衝撃圧力となるが、後者は高温・高圧の気体の膨張によって生じる現象であり、原理的には燃料・冷却材相互作用によって生じる水撃力と同じものと考えられる。したがって、衝撃圧力の性格の違いさえ十分留意すれば、火薬爆発によって良好な耐衝撃模擬実験が可能であると言える。そこで、本耐爆実験においては衝撃圧力をできるだけ低く抑えるために低爆速用爆薬(LEP)を使用し、相当薬量の決定は水撃力のエネルギー比較で行ない、安全側の評価となるようにした。

耐衝撃強度の判定の基準としては

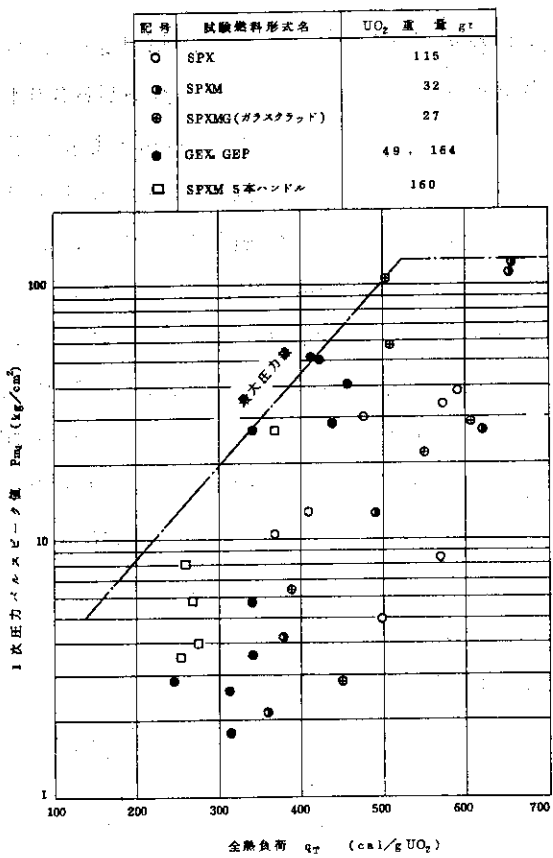
- (1) 変形した結果カプセルが実験孔から取出し不能にならない事
- (2) カプセルが破損し内部の放射性物質が漏出する状態にならない事

の2つがある。しかし、前者については胴部外径が初期値の134 mm ϕ から200 mm ϕ にまで膨張したとしても、すなわち約49%の永久歪が生じても取出し可能であるのでその前に破損が生じてしまう事になり、(2)に比べ決定的な条件にはならない。

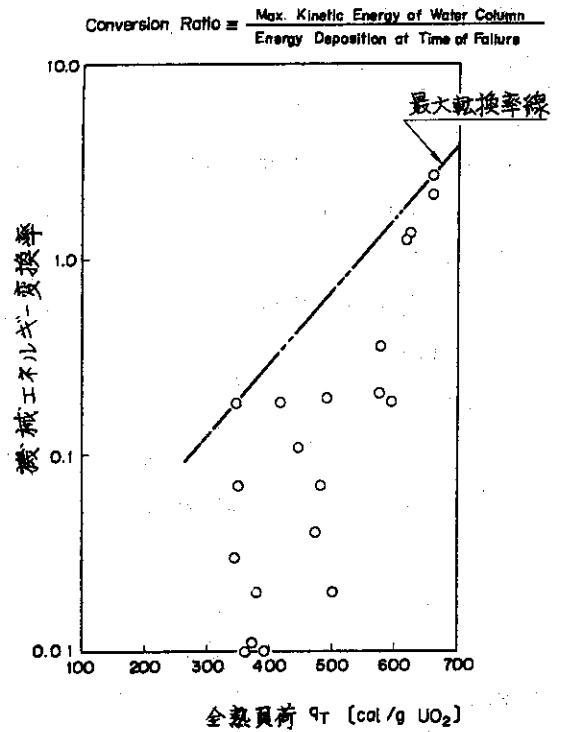
さらに、フランジシール部、計測線貫通部その他のシール部分の性能を確認するために、耐爆実験実施前および実施後にヘリウム・リーク試験を行なって比較した。又、材料の機械強度特性を知るために、同一素材から切り出した引張試験片を用いて静的引張試験を行ない、応力・ひずみ線図を得た。



第1図 カプセル負荷荷重のモデル



第2図 燃料破損時の発生圧力
(SPERT実験データ)



第3図 燃料破損時の機械的エネルギー転換率

3 実験装置および実験方法

3.1 耐爆実験

3.1.1 概要

第4図は耐爆実験の概念を示すフローチャートである。耐爆実験カプセルは実際に使用する条件と同じくグリッピング装置によって垂直に固定し、規定水位まで水を注入し、実験燃料を装荷する位置に火薬を固定して外部の発破器による電気信号によって爆発させた。火薬爆発によって生じる水の飛上りやカプセルの変形挙動等は図に示されるように次のようにして計測した。すなわち、動ひずみはカプセル各部分に貼付けたひずみゲージにより、水の飛上り速度は水面に浮かした浮子式センサーから発する電気信号により、また、衝撃圧力はカプセルの底および胴部(圧力測定カプセル)に取付けたピエゾ式圧力変換器により測定した。これらのセンサーからの電気信号は各々適合するプリアンプによって増幅した後、データレコーダに記録し、実験後に再生してシンクロスコープで観察した。また、残留ひずみについては、各実験回ごとに直径、胴部の周長および長さをノギスおよび巻尺を用いて計測した。

また、実験実施手順を第5図に示す。

3.1.2 耐爆実験カプセル

耐爆実験用カプセルにはインバイル用カプセルと同じ材質(SUS304)、形状および寸法のものを使用した。添付図面にカプセルの主要寸法を示す。本カプセルの胴部はSUS304継目無ステンレス鋼管(JIS G 3459規格、外径×内径=147×115mm)より製作し、又、その他の部分すなわちフランジ、スカート、蓋およびキャップ部はSUS304ステンレス鋼丸棒(JIS 4303規格、外径210mm)より削り出して作製した。また、胴部とフランジ部およびスカート部との間の周方向溶接継手は、肉厚16mmにおいてTIG溶接した後、内・外面を機械加工して設計肉厚7mmの胴部に仕上げた。第1表および第2表にこれらの材料のミル・シートを示す。また、第6図には、火薬および計測器類の取付け状態および測定箇所を示す。ただし、図中に鎖線で示した爆心側壁圧力 P_1 および P_2 は、カプセル側壁の変形を防ぐために胴部の肉厚を10mmに増した圧力測定用カプセルを耐爆実験カプセルとは別に製作し、第6図に示した位置に圧力測定タップを取付けて測定した。耐爆実験カプセルおよび圧力測定用カプセルを写真1、2に示す。

3.1.3 グリッピング装置

耐爆実験カプセルの固定のために、NSRR実験孔で使用する予定のグリッピング装置と同じ構造のカプセル固定装置を製作し、本耐爆実験を通して使用した。本装置の構造および動作は第7図に示す通りであり、大・小2個の空気シリンダの作動により、カプセル・スカート部のフランジを4本の爪(クランプ・ヨーク)で握み、約5tの力で台座に押し付け固定する。さらに装置全体はフランジ間隔200mmの2本のI型鋼で支持される構造となっている。グリッピング装置を写真3に示す。

3.1.4 測定機器

本耐爆実験のトランジェントデータの測定・記録および残留ひずみの測定には以下の測定機

器を使用した。

測定機器を写真4に示す。

(1) 圧力測定機器

a センサ

形式：ピエゾ式圧力変換器（Kistler社製217C型および207C型ピエゾトロン圧力変換器）

測定範囲：圧力；0～80,000 psi

応答周波数；0.001～20,000 Hz

精度：分解能；1 psi

直線性；±1% FS

b ピエゾアンプ

形式：チャージアンプ（Kistler社製504D型および504E型）

測定範囲：増幅周波数範囲；DC～100 kHz，±5%

精度：ゲイン精度±1%

温度ドリフト；+0.01%/°C

直線性；0.1%以下

(2) 動ひずみ測定機器

a センサ

形式：塑性ひずみゲージ（東洋測器社製YL-5型）

測定範囲：最大ひずみ約5%まで

b ひずみ増幅器

形式：高周波数応答動ひずみ増幅器（新興通信社製4007型）

ひずみ測定範囲：±50,000 μ

最大感度：200 μ/V（ゲージ電圧8Vのとき）

応答周波数：0～50 kHz（±1 dB）

直線性：±0.5%以下

(3) 水塊速度測定機器

a センサ

形式：浮子式水面移動センサ（本耐爆実験用に開発）

測定範囲：浮子移動スパン 200 mm

出力信号：浮子5 mm移動ごとに極性変換

b 直流増幅器

形式：変調形直流増幅器（YEW製3125型）

最大電圧利得：3 V/15 mV（46 dB）

使用周波数範囲：DC～2,500 Hz

直線性：±0.3%以下

(4) データ収録機器

a データレコーダ

形 式：可搬型磁気テープ記録装置
(TEAC製R-510型)

記録チャンネル：7+1(音声)

記録方式：FM

テープ幅：12.7 mm ($\frac{1}{2}$ インチ)

周波数特性(テープ速度)：DC~20 kHz (152 cm/s)

S/N比：47 dB

b シンクロ스코ープ

形 式：2現象ストレージ・オシロスコープ
(ソニー・テクトロニクス製7313型)

周波数帯域：DC~25 MHz

感 度：5mV/div~5V/div, 10ステップ, 精度2%以内

写真撮影装置：専用ボライドカメラ使用

(5) 寸法測定機器

a ノギス

形 式：長口ノギス

測定範囲：300 mm ($\frac{1}{20}$ mmバーニア付)

b 巻 尺

形 式：鋼製巻尺

測定範囲：2 m (1 mm 目盛)

3.1.5 火 薬

燃料破損時の破壊力を火薬爆発によって模擬するためには、できるだけ爆速が遅いものを使用する必要がある。このため、最初は無煙火薬(燃焼速度100~300m/s)を使用する予定でいたが、水中で爆発させる試験を行なったところ燃焼の途中で浸水のために火が消えてしまう場合が多い事が判明した。そこで無煙火薬の代りに旭化成工業製の低爆速用爆薬(LEP)を使用した。

ただし、10g以下の少量の火薬の起爆は不安定になるので最小薬包は10gとし、さらに小薬量の爆発実験として、LEPの起爆に使用した6号電気雷管だけを爆発させる実験(臨界薬量実験)を行なった。なお、6号電気雷管には添装薬としてペンスリット0.4gが鋼管内に装填されている。

爆発によって生じる衝撃波を球面波に近くするために、LEPの薬量は直径および高さが等しい円柱形とし、この中心に第8図に示すように雷管を中心に装荷した内装起爆方式を採用した。火薬の装荷例を写真5に示す。

LEPおよびペンスリットの性能表を第7表に示す。

3.2 ヘリウム・リーク試験

カプセル・シール部の性能を試験するために、以下に述べる方法によりヘリウム・リーク試験を行なった。

リーク試験は真空法によって行なった。すなわち、実際に使用する条件と同じく計測線引出

シール(コナックスシール)およびガス抜きバルブを取付け、上蓋を取付けてカプセルを密閉し、これを第9図に示すようにヘリウム・リーク・ディテクターに連結する。次にガス抜きバルブを介して真空ポンプによりカプセル内部の空気を抜く。十分な真空度が得られたならば荒引き用真空ポンプを切離してカプセル内部をヘリウム・リーク・ディテクターに直結し、カプセルの外側からシール部分にヘリウムガスを吹き付け、カプセル内部へのリークの有無をリーク・ディテクターにより検知する。

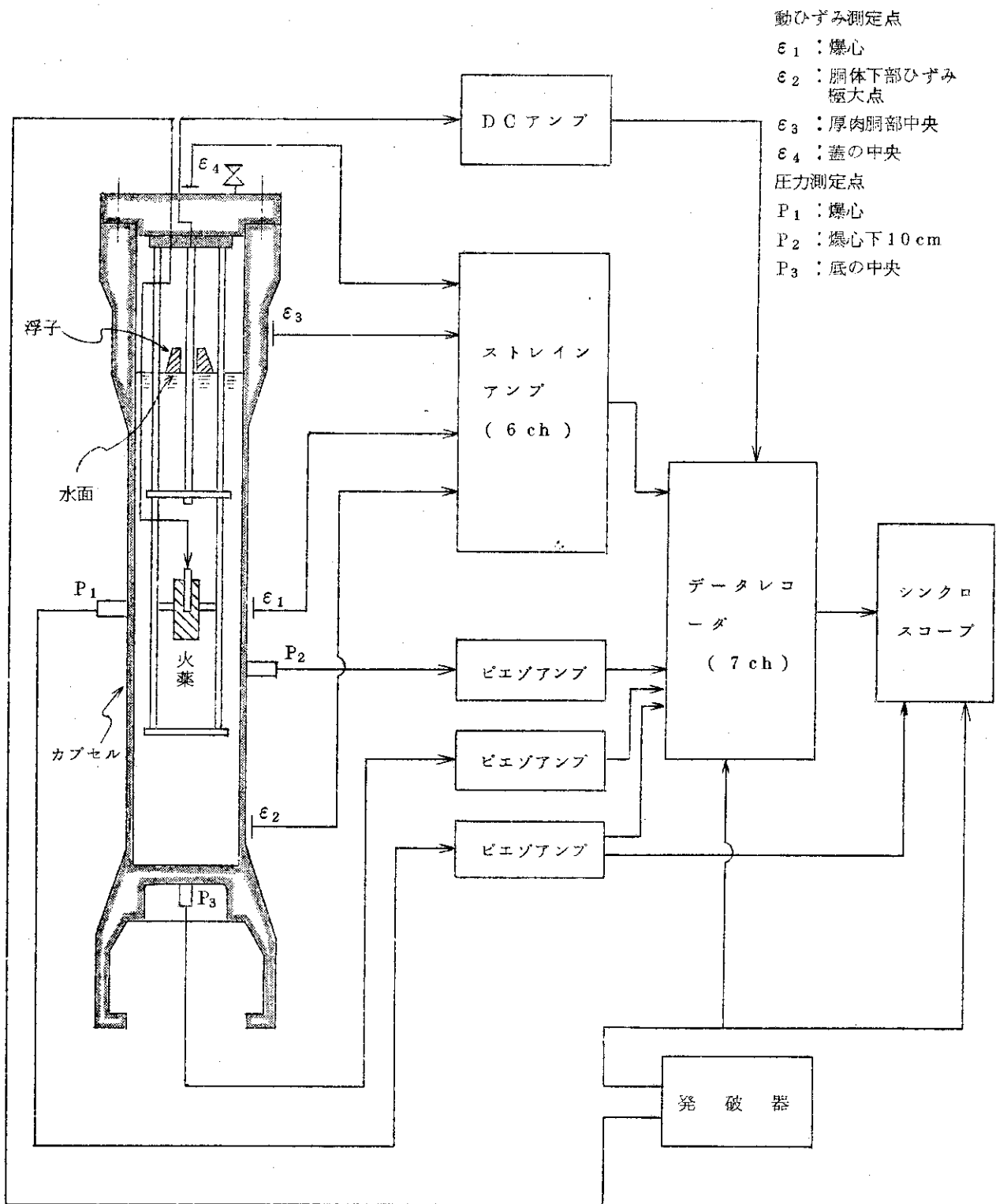
以上の試験は同じシール材に対して発破実験前および薬量10g発破実験終了後に実施し、実験初期条件におけるシール性能および耐爆実験によるシール性能の劣化の有無を調べた。シール性能試験のために用いたカプセルは2体で、その各々に対して以上の試験を各2個くり返して行なった。

なお、使用したリーク・ディテクターはDu Pont社製24-120B型であり、感度は 5×10^{-11} atm cc/secである。

3.3 材料引張試験

カプセルの素材はJIS規格にしたがって製造したSUS304ステンレス鋼であるが、材料の強度を確認し、かつ正確な応力-ひずみ曲線を求めるために、カプセル胴部に使用した材料の1部から試験片を作製し引張試験を実施した。試験片の形状、寸法を第10図に示す。

引張試験機は最大荷重2 tonのオルゼン型引張試験機を使用し、平行部の伸びは試験片のカラー間(30 ± 0.05 mm)の伸びをリンクおよび差動トランスを組合せた検出器により電気信号に変換しX・Yレコーダに記録した。なお、弾性変形域の伸びは試験片の平行部に直接取付けたひずみゲージによっても測定した。



第4図 耐爆実験のフローチャート

第1表 SUS304 鋼管ミルシート

KOBE STEEL, LTD.
MILL SHEET

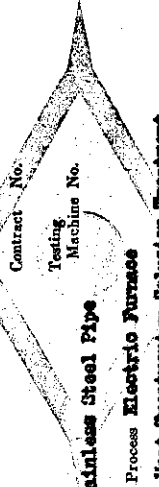
Purchaser: 住友商事株式会社

Supplier:

Buyer:

Kind of Material: JIS G459 SUS304 B-C Seamless Austenitic Stainless Steel Pipe

Destination:



Contract No.
Testing Machine No.

Process: Electric Furnace

Heat Treatment: Solution Treatment

Surveyor:

Ship No.

Order No.

Date of Issue: April 30, 1973

Sheet No.: Y 1523

Date of Inspection: April 18, 1973

| Mfg. No. Designated | Heat No. | Size OD x ID x L mm | Bundle No. or Case No. | Quantity | | Inspection No. | Tension Test | | | | Chemical Composition (% x 100, except P & S) | | | | | | | Remarks | | | |
|------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------|--------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------|---------|------------------------|--|----|----|-----|----|----|-----|---------|----|---|--|
| | | | | No. of Pieces | Weight kg | | Y.P. or T.S. kg/mm ² | Elongation % | EL % | Reduction of Area % | C | Si | Mn | P | S | Ca | Ni | | Cr | Mo | |
| Y 1523A | TH 5107 | 147.0 x 115.0 x 1,000 | | 6 | 310 | | Min. 21 | Max. 52 | Min. 35 | Max. 76 | | 5 | 52 | 175 | 29 | 11 | 897 | 1894 | | Ultrasonic Test ... Satisfactory as Per Attached Report Liquid Penetrant Test ... Satisfactory as Per Attached Report Type of Test Piece: F=Full Section, S=Strip | |
| | ST 0069 | " x " x 1,000 | Total | 4 | 207 | | Min. 35 | Max. 62 | Min. 72 | Max. 68 | | 6 | 47 | 185 | 34 | 24 | 969 | 1674 | | | |
| | TH 5107 (x100) | Micro Structure | | 10 | 517 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Measurement & Surface | Satisfactory Attached Report | Hydrostatic Test | Flattening Test | Firing Test | Bending Test | Flange Test | | | | | | | | | | | | | | | |

It is hereby certified that the above materials are satisfactory in compliance with the requirements specified in the contract.

KOBE WORKS
KOBE STEEL, LTD.

Inspection Section, Technical Dept.

Form

第2表 SUS304鋼棒ミルシート

材料試験成績表

検査員 野中...

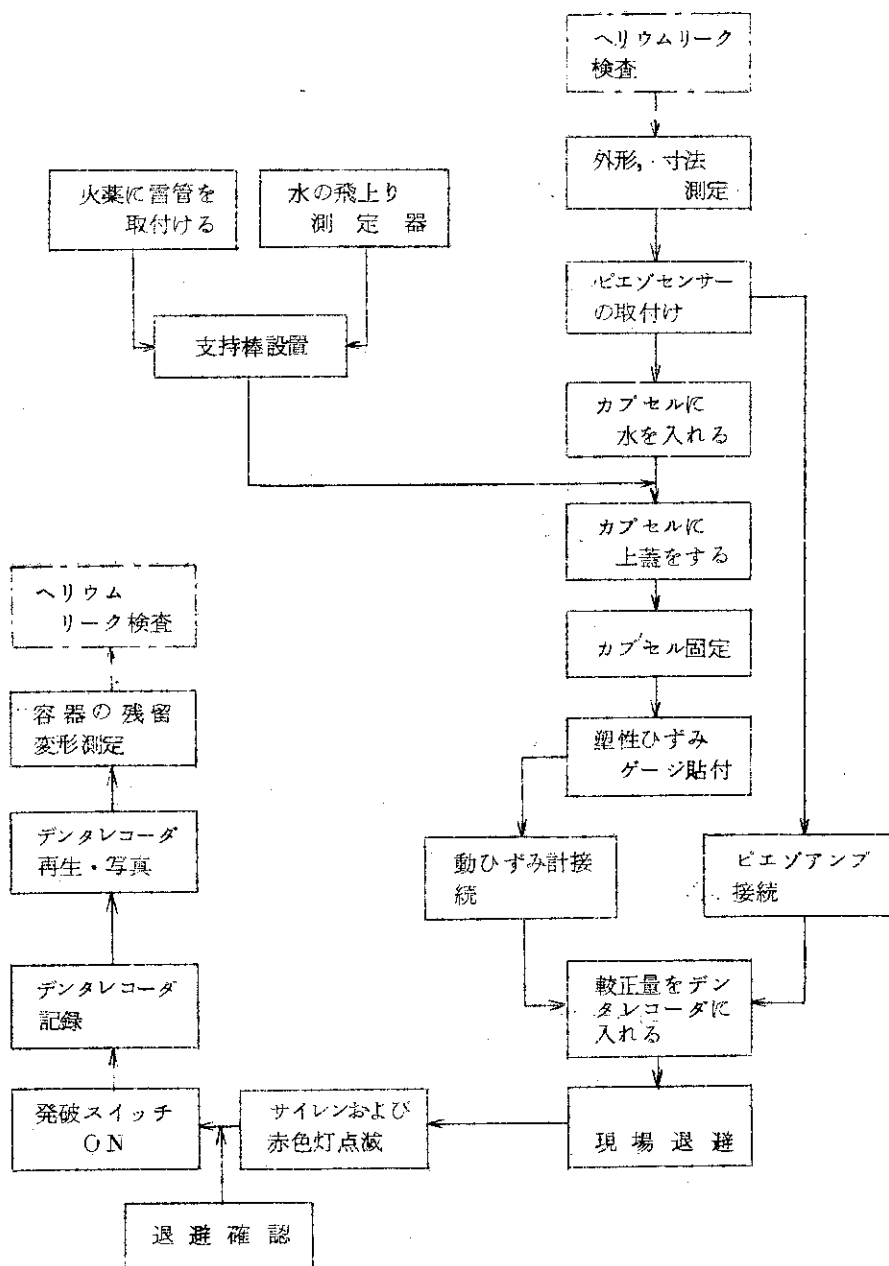


株式会社 神高 戸田製鋼所

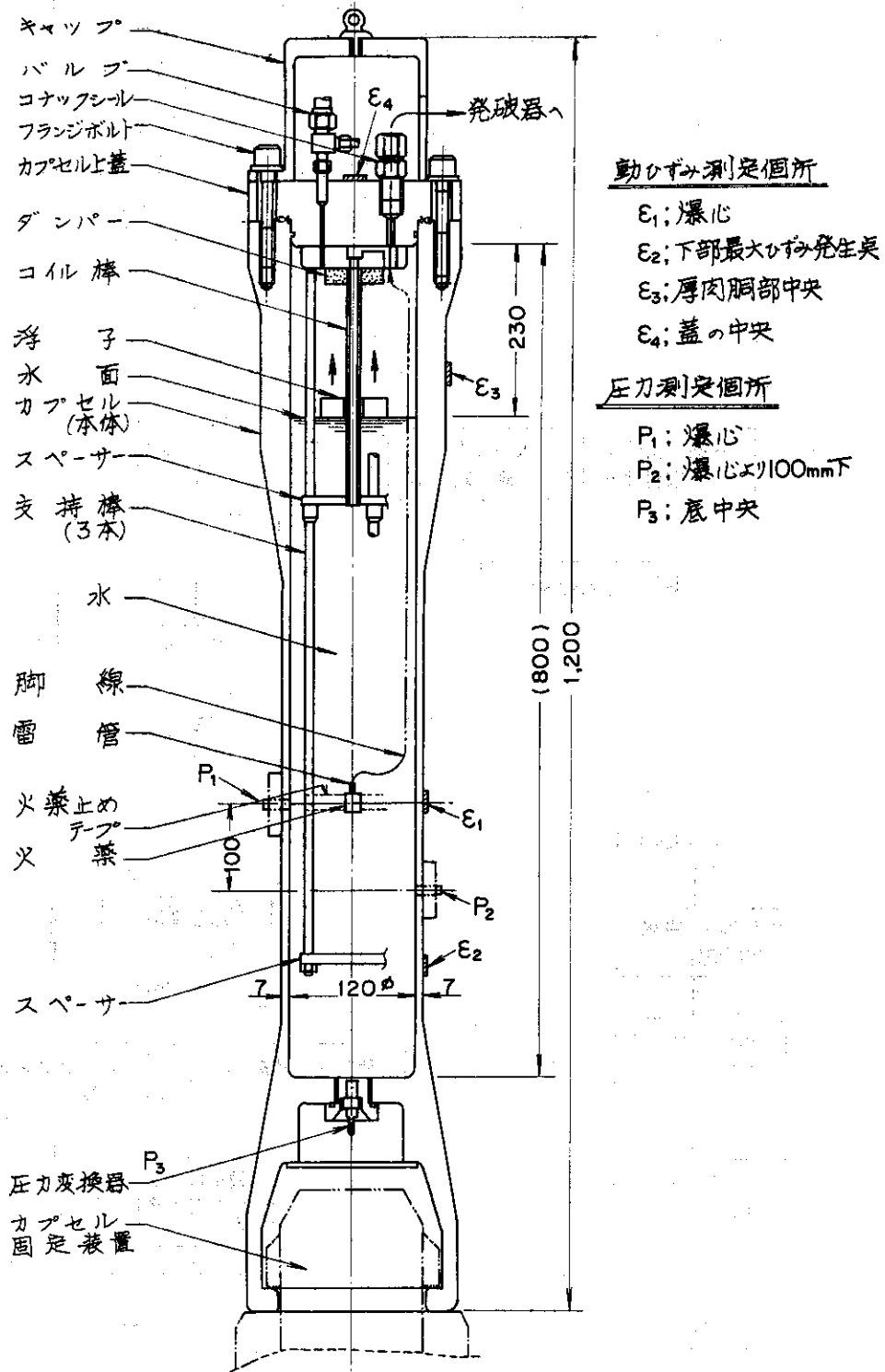
| 用途 | 品名 | 御注文 | | | | 主 | | | 製造番号 | 材質 | 試験年月日 |
|------|--|-------------|------|--------------------|------|------|-------|------|------------|---------------------|------------|
| | 2106 | 日本原子力研究所 | | | | 殿 | | | 72-37183-0 | SUS 27 | 昭和 48-5-11 |
| 図面番号 | | 試験項目 | 引張試験 | | 曲げ試験 | | カタサ試験 | 衝撃試験 | | 判 | |
| | | 試験片符号 | 原形寸法 | 引張強さ | 伸び | 切断位置 | 絞り | 内径 | 曲率半径 | シャルピー | アイソット |
| | | | mm | Kg/cm ² | % | mm | % | mm | mm | Kgm/cm ² | Kg-m |
| | | | 50 | 21 | 50 | 60 | | | | | |
| | 17 | TH6270-1-1J | 14.0 | 31 | 55A | 74 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| 成分% | C | Si | Mn | P | S | NI | Cr | | | | |
| 規格 | .05 | | Max. | 以下 | 以下 | 8.00 | 18.00 | | | | |
| 符号 | .08 | 1.00 | 2.00 | .040 | .030 | 11.0 | 20.00 | | | | |
| 化学成分 | TH 6270 | .053 | 1.73 | .032 | .011 | 9.41 | 18.83 | | | | |
| 備考 | 試験機番号 T-67268①. T-1613. H-3447. I-3218. 8F | | | | | | | | | | |
| | 熱処理温度 | | | | | | | | | | |
| | 知印年月日 | | | | | | | | | | |
| | 重量 | | | | | | | | | | |
| | 銀線比 | | | | | | | | | | |
| | 御注意 | | | | | | | | | | |

第3表 火薬の性能表

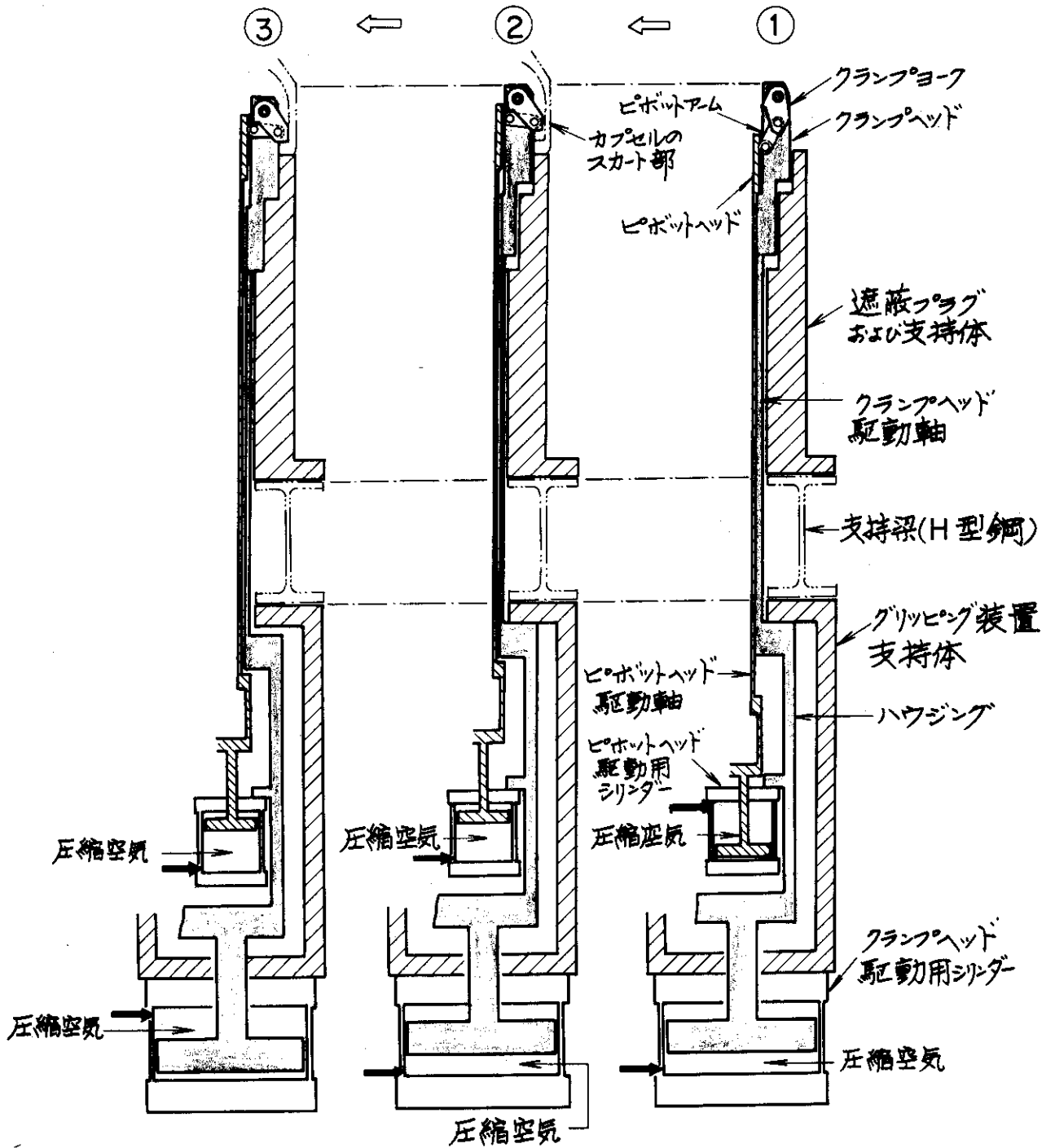
| | 低爆速用爆薬 | ペンスリット |
|-----------|----------------|-----------------|
| 酸素バランス | 1.9 g/100g | -10.1 g/100g |
| 発生ガス量 | 919 cc/kg | 780 l/kg |
| 発生熱量 | 1100 Kcal/kg | 1400 Kcal/kg |
| 爆発温度 | 2460℃ | 4200℃ |
| 爆発速度 | 2000 m/s | 5300 m/s |
| 装填密度 | 0.5 g/ml | 0.8 g/ml |
| 発火点 | 200℃ | 215℃ |
| 火薬量 | 94,761 kg-m/kg | 131,634 kg-m/kg |
| 弾動白砲エネルギー | 75% | 89% |



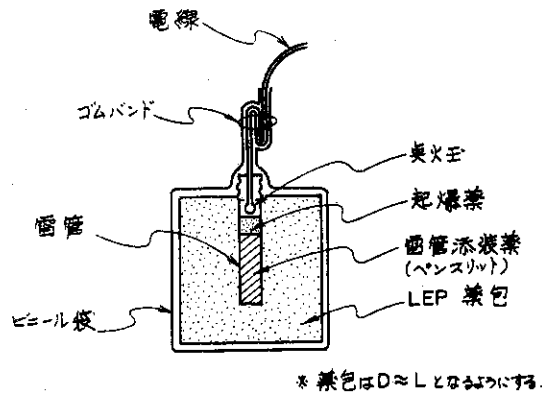
第5図 カプセル耐爆実験実施手順



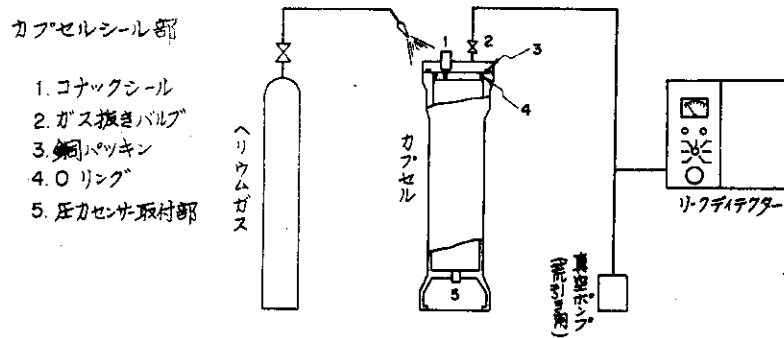
第6図 耐爆実験用カプセル(材質: SUS304)



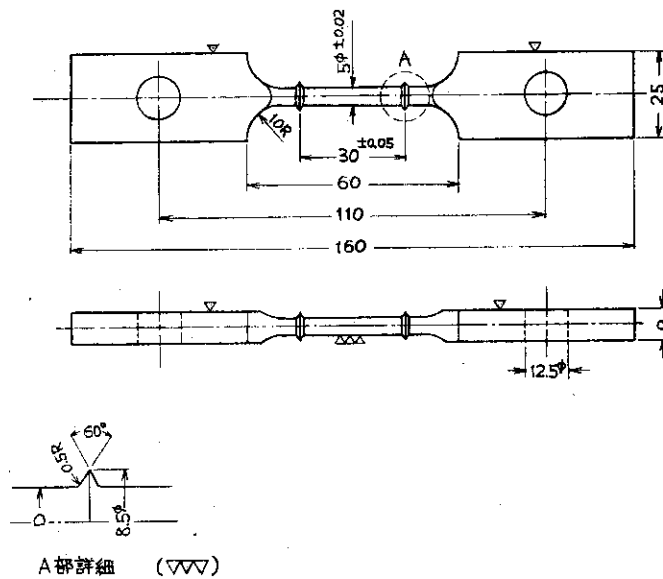
第7図 グリッピング装置とその動作



第8図 起爆の方法 (内装起爆)



第9図. ヘリウム・リーク試験フローチャート



第10図 引張試験片

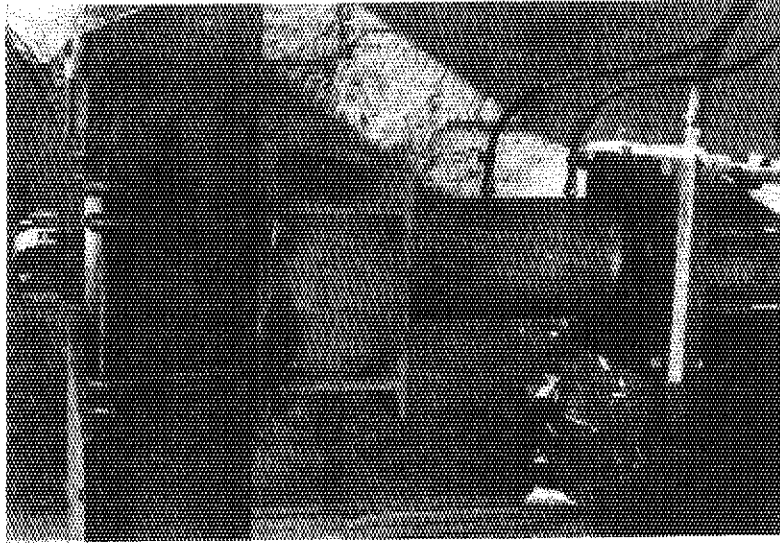


写真3 グリッピング装置

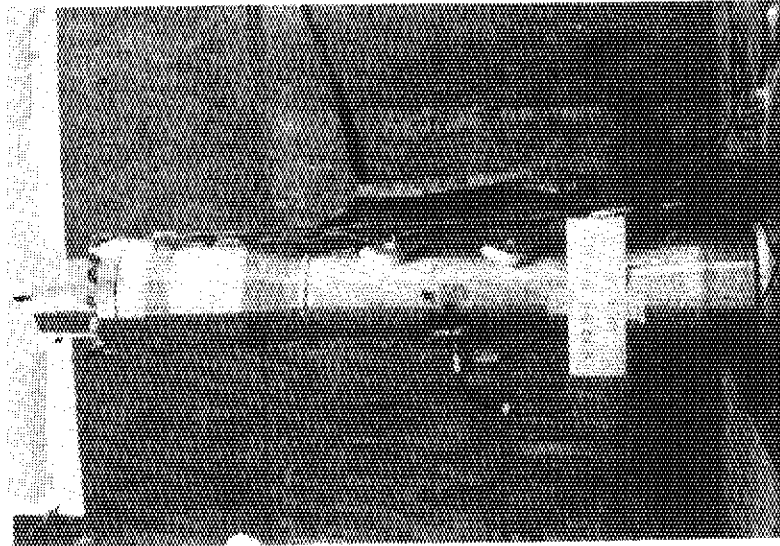


写真2 圧力測定用カブセル

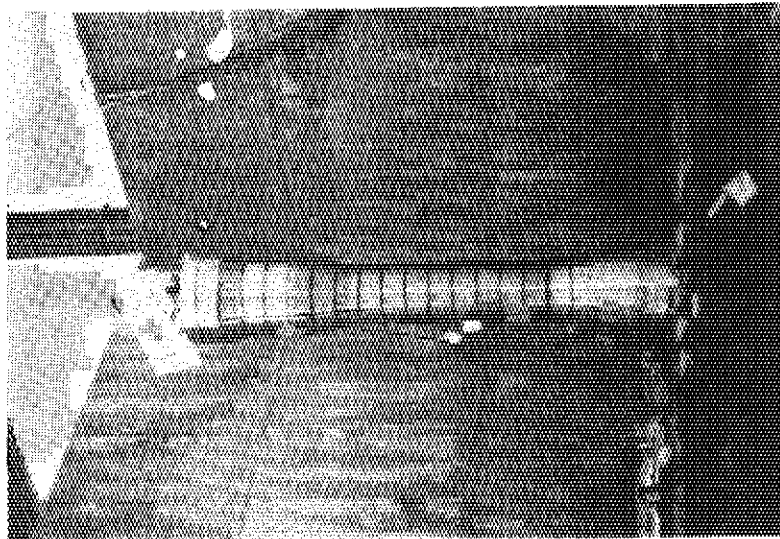


写真1 耐爆実験カブセル

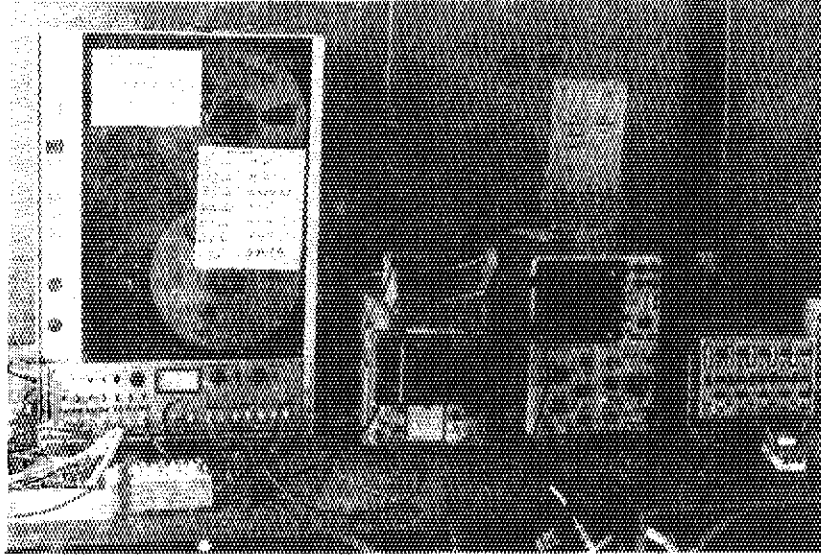


写真 4 測定機器

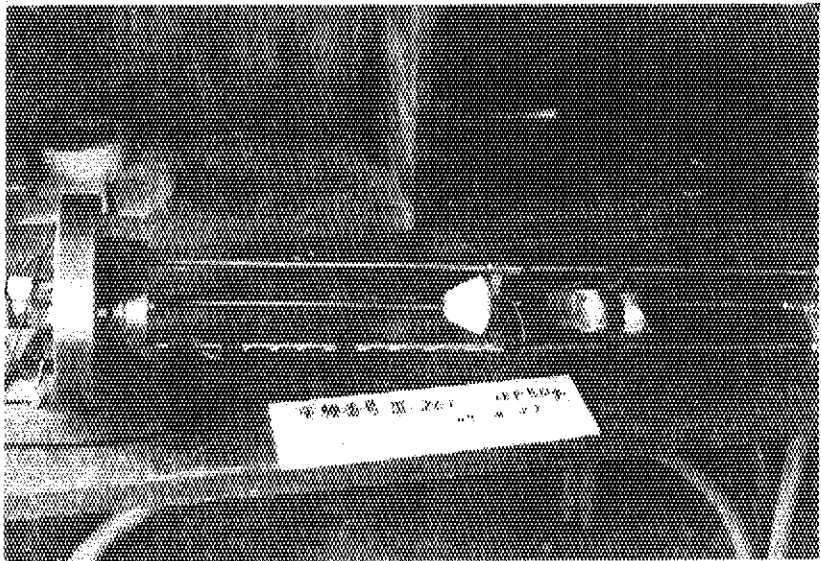


写真 5 火薬の装填例

4 実験結果および考察

4.1 実施経過

実験は昭和49年3月1日に開始し、約3ヶ月間にわたって延べ47回の爆発実験を行った。

実験カプセルとしては、インパイルカプセルと同一条件で同一形状・寸法に作製した標準カプセル2体、標準カプセルに加工後、熱処理（溶体化処理）を施した熱処理カプセル1体、おかひ胴体部に圧力タップを取付けた圧力測定カプセル2体を用いて行ない、第4表に示す実験シリーズに分けて実験を行った。

実験の実施経過を第5表NSRRカプセル耐爆実験実施日程表に示す。

4.2 材料強度特性

試験片の引張試験の結果得られた応力-ひずみ線図を第11図に示す。この試験により次の静的材料強度特性データが得られた。

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| 降状応力 | $U_y = 24.5 \text{ kg/mm}^2$ |
| 引張強さ | $U_t = 63.3 \text{ kg/mm}^2$ |
| 伸 び | $\epsilon = 42.5 \%$ |
| 絞 り | $= 8.05 \%$ |
| ヤング率 | $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ |
| 最大応力点での伸び | $\epsilon_{\max} = 35 \%$ |

4.3 火薬の破壊力

4.3.1 衝撃圧力

圧力測定実験において測定した衝撃圧力データの記録例を第12図に示す。 P_1 は爆心側壁の圧力、 P_2 は P_1 から10cm下の圧力、又、 ϵ_1 は爆心側壁の円周方向の動ひずみである。(a)は雷管（ペンスリット0.4g）を爆発させたときの P_1 および P_2 の直接記録例、すなわちセンサーからの信号を直接シンクロスコープに入れて写真記録したもので、爆発直後の鋭い圧力ピーク波形が忠実に記録されている。ただしセンサーの極性によって下方向が正の値となっている。この記録例から圧力伝播の様子が良くわかり、直接波 $P_1 \rightarrow P_2$ 、反射波 $P_2 \rightarrow P_1$ の順に衝撃波面の通過を示すピークが現れている。 P_2 の波形に途中で段差が生じているのは、この圧力を測定するセンサーの破損（内部信号線の断線）によるものである。次に(b)は、同じ実験における P_1 と ϵ_1 、すなわち爆心側壁における圧力と歪の関係を示したものである。これから圧力の作用時間に比べ最大変形が生じる時間はかなり遅れる事が示され、衝撃圧力がインパルス的に作用している事がわかる。ただし、このデータはデータレコーダの再生記録によるものなので、データレコーダ記録の上限周波数の制限によって P_1 のピーク値 $P_{1\max}$ は(a)図のものと異なっている。(c)図はLEP10gを爆発させたときの ϵ_1 および P_2 の記録例である。(a)、(b)の場合と同じく圧力波形に底からの反射波が現れている事、衝撃圧力に比べて歪の波形の立上りがゆるやかな事がわかる。

また、衝撃圧力のピーク値および半値幅を第6表に示す。以上の結果から、本実験における火薬爆発によって生じた衝撃圧力は次のようなものである事がわかった。

- (1) 爆心での圧力はピーク値 840 Kg/cm^2 (雷管) $\sim 1,400 \text{ kg/cm}^2$ (LEP10g), 半幅値 $10 \mu\text{s}$ (雷管) $\sim 40 \mu\text{s}$ (LEP10g) の非常に鋭い圧力スパイクである。
- (2) 爆心側壁から離れるにしたがって反射波が重畳されて波形が複雑になり、全体としてはより幅の広い衝撃波となっている。
- (3) カプセル底に達した衝撃波はここであまり大きな減衰が無く反射される。しかし、水面からの反射波は殆んど検知されない。
- (4) カプセル壁のひずみ速度は、衝撃波の立上りに比べて比較的ゆっくりしている。

4.3.2 水撃力

水撃力を求めるために浮子式水塊速度計により水塊の飛上る速度を測定し、また、蓋の中央に取付けた歪ゲージによって水撃発生時点を測定した。第13図はこれらのデータ記録例を示したものである。(a)および(b)は水塊速度計の信号Wと爆心部の筒のひずみ ϵ_1 の記録を掃引時間を変えて示したものである。水塊速度計は浮子の案内棒の中に5mm間隙ごとに巻き方向が反対になるように巻いた検出コイルを仕組んであるので、データ記録信号Wの1波長は浮子が10mm移動した時間を示すことになる。したがって、水塊は信号 ϵ_1 が示す火薬爆発時点から約 $100 \mu\text{s}$ 後れて衝撃波が水面に達してから移動開始し、約 $300 \mu\text{s}$ 程度の短時間に加速を受け、そこからほぼ一定速度で蓋に達する事がわかる。

次に(c)図はLEP10gを爆発させた時の圧力 P_2 , 蓋のひずみ ϵ_4 , および水塊速度計出力Wを示したものである。 ϵ_4 とWは同一実験の結果ではないので少しずれがあるが、水塊速度計が水塊との衝突を示す時点で蓋に鋭い衝撃荷重が現れている。したがって、蓋のひずみ信号により爆発から水撃発生までの時間を知り、水塊の平均速度を求めることができる。

第14図は以上の測定方法によって求めた水塊速度、およびこれから計算した水撃圧力を、横軸に薬量をとって示したものである。カプセルの設計条件とした水塊速度は 16.6 m/s であるから、薬量 0.4 g (雷管) の場合がほぼこの条件に相当し、 10 g あるいは 50 g を爆発させた場合には設計条件に比べ非常に大きな水撃力が発生する。

第15図は水塊速度から求めた水塊の運動エネルギーと薬量の関係を示したものである。水撃エネルギーと薬量とが大体比例することが分る。

第16図は水撃エネルギーと火薬の発生熱量との比として求めた機械エネルギー転換率と薬量との関係を示したものである。雷管のみの場合には $12 \sim 24\%$ という比較的大きな値を示すが、LEPの場合には薬量によってあまり大きな差はなく、 $6 \sim 8\%$ となる。このことは第15図に示した水撃エネルギーと薬量が比例関係にある事と符合する。

4.3.3 カプセル設計条件と火薬の破壊力との比較

溶融燃料と冷却材との相互作用によって生じる破壊力には衝撃圧力と水撃力の2種類あるが、衝撃圧力としては最も厳しい実験条件においてもピーク圧力が 150 kg/cm^2 程度にしかならず、水撃力が主要な破壊力である事がSPERT実験その他でわかっている。これに対して、大薬の爆発によって生じる破壊力は大部分が衝撃圧力によるものであって、水撃力はむしろ付随的なものである。したがって、破壊力のエネルギー比較から火薬の当量を求める場合に、同じ水撃エ

エネルギーを発生する条件で換算を行なう事にすれば、相当薬量の火薬爆発によって生じる衝撃圧力はインパイル条件に比べてより厳しいものとなり安全側の評価を与える事になる。このような考え方にもとづき耐爆実験計画においては水撃エネルギー等量で相当薬量を求める事にした。すなわち、火薬当量 W_p (g) は次式で計算する。

$$W_p = \frac{\eta_F}{\eta_p} \cdot \frac{q_F}{q_p} \cdot W_F \quad (1)$$

ただし W_F : 試験燃料の重量 (g)

q_p, q_F : 火薬および試験燃料の単位重量当り発熱量 (cal/g)

η_p, η_F : 火薬および試験燃料の機械エネルギー(水撃エネルギー)転換率

(1) 水撃力の比較

火薬の爆発によって生ずる水撃エネルギーあるいは機械エネルギー転換率は第15図および第16図に示したように耐爆実験結果としてわかっている。一方、インパイル実験において生じる水撃力のエネルギーは SPERT 実験データにもとづき計算し第7表に示す結果を得ており、これをカプセルの設計値としている。

以上の数値により設計条件と火薬の爆発による水撃力とを比べると第8表のようになる。これから、雷管1体の爆発による水撃力はステンレスカプセルに対する設計条件にほぼ相当し、LEP10g はこのほぼ10倍、さらにLEP50g は約40倍に相当することがわかる。

(2) 衝撃圧力の比較

衝撃圧力についてはステンレスカプセルの最大実験条件において予想される衝撃圧力のピーク値 45Kg/cm^2 に対し、雷管1本の爆発ですらピーク圧力 840Kg/cm^2 の衝撃圧力を発生するので、火薬実験が実際の使用条件よりも非常に厳しい条件である事は明らかである。しかし、圧力の作用時間が大きく異なる事および設計圧力条件ではカプセル壁は弾性変形範囲にとどまるのに対し、火薬実験では塑性変形が生じる事などから、単純にピーク圧力だけでは比較できない。そこで、カプセルの爆心側壁の最大変形時のひずみエネルギーによって衝撃圧力の破壊効果を比較した。

最大変形を ϵ_{\max} とするとここまで変形するまでに材料中に貯えられたひずみエネルギー E は次式で与えられる。

$$E = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

後に述べるようにカプセル壁の変形は周方向への伸びに比べ軸方向の伸びが無視できる程に小さいので、殆んど単純引張に近い状態で変形するものと考えられる。したがって、上式の積分をカプセル材料の静的引張試験から求めた応力-ひずみ線図(第11図)を図式積分して求めた。この積分の結果得られた E と ϵ_{\max} の関係を第17図に示す。ただし、耐爆試験においてはカプセル壁面の変形速度が非常に大きいので、実際の変形過程における応力-ひずみ曲線は第11図に示す静的なものよりも、さらに σ の大きい方にずれたものとなり、第17図の E の値は実際よりもやや小さ目の値を与えるものと考えられる。

設計条件、雷管およびLEP10g 爆発の場合に対する衝撃圧力の効果の計算結果を第9表に示す。ただし、設計条件に対しては 45Kg/cm^2 の圧力が衝撃的に作用するとみなして、相当

静圧 90 Kg/cm^2 が静的に作用する場合のひずみによって計算した。

以上の結果から、水撃力の比較ではほぼ等しい破壊力を生ずる雷管爆発の場合でも、衝撃圧力では40倍近い破壊効果を示し、又、LEP10gの爆発によっては実に3,000倍近い破壊効果を与える事になり、実際の条件に比べて極端に厳しい強度試験条件を与える事になる。

4.4 カプセル各部のひずみ挙動

4.4.1 動ひずみ挙動

動ひずみはカプセル壁外面の各部に取付けた歪ゲージによって測定した。第18図は低爆速用爆薬(LEP)10gの実験におけるカプセル各部の動ひずみデータ記録の例を示す。

(a)は爆心側壁の胴の円周方向および軸方向動ひずみおよび胴下部の円周方向ひずみを示したものである。爆心では衝撃圧力によって円周方向に大きくひずみを生じた後、残留ひずみ量まで回復し、その位置を中心にして容器の固有振動数に対応した周期で弾性振動している。一方、軸方向ひずみは円周ひずみに比べてずっと小さくやゝ負の値を示している。軸方向ひずみが周方向ひずみに比べ非常に小さく、かつ負になるような変形挙動は、静的な圧力あるいはゆっくりした変動圧力による変形とは大きく異なっており、本耐爆実験のような火薬の衝撃圧力による変形に特有の現象と思われる。また、胴の下部では底および周囲からの反射波の影響により弾性ひずみを生じている時間が長くなっている。

(b)は胴下部の円周方向および軸方向のひずみを比較したもので、胴体中を伝わる弾性波と水中衝撃波の伝播速度の差を明瞭に示している記録例である。すなわち、約 5100 m/s で胴体中を伝播する弾性波(縦波)によって、まず軸方向に正のひずみを生じ、次に約 1500 m/s で伝播する水中衝撃波によって円周方向のひずみが生じ、これによって軸方向のひずみは爆心部と同じく負の値になる。

(c)はカプセル上蓋の中央部のひずみ、および厚肉胴部のひずみであり、水撃力によって生じた動ひずみを示している。爆発時点においては胴体中を伝わって来る弾性波による弾性振動を示すが、これから約 2.2 ms 後に再び最初とはやゝ波形が異なった弾性振動が生じており水撃力によって生じた動ひずみを示している。

以上に示した動ひずみ記録から弾性ひずみのピーク値および残留ひずみを求めたものを第19図に示す。この図は爆心および胴体下部の周方向のひずみを実験回数に対してプロットしたものである。ただし、ひずみが大きくなるとひずみゲージの変形が弾性回復に十分追従しきれなくなる。動ひずみ記録から求めた残留ひずみとノギスによる直径測定から得た残留ひずみとの比較から、ピーク値が約 $1.5 \times 10^4 \mu$ を越えると動ひずみ測定による残留ひずみが実際よりも大きくなる傾向を持つ。したがって、第19図の爆心周の残留値のプロットのうち、実験回数が9回位までは実際の値より大き目になっている。なお、周方向ひずみとの比較のために、爆心での軸方向ひずみも同図に示した。

これから

(1) 動ひずみのピーク値は残留ひずみの1.5~6倍になっており、全ひずみエネルギーのうち30%以上が弾性ひずみエネルギーとして貯えられる事。

(2) 実験回数が進むにつれてひずみ量が減少しており、加工硬化性が大きい事がわかる。

第10表は蓋および厚肉胴部各部の爆発直後および水撃力によるひずみのピーク値を示したものである。残留ひずみはどの部分にも生じておらず、水撃力に対しては十分な耐力を持っていることを示している。また、蓋および蓋に近い胴部では、水撃力によるひずみの方が大きいのに対し、厚肉胴部の蓋より離れた所では水撃力よりもむしろ胴体中を伝わる弾性波によるひずみ振幅の方が大きくなっており、蓋より速くなるにつれて水撃力の影響が逡減している事がわかる。

4.4.2 残留ひずみ挙動

カプセルの残留変形の様子を写真6に示す。

残留ひずみはノギスを使用して各爆発回ごとに外径を測定して求めた。第20図は外径測定から求めた周方向の残留変形量の軸方向分布を示したものである。残留ひずみが生じているのは薄肉胴部および厚肉部への肉厚変化部の一部のみであり、軸方向ひずみは殆んど生じていない。最大ひずみ点は爆心の側壁であり、ひずみ分布はこの最大ひずみ点を中心に上下ほぼ対称形の山形分布を示す。さらに、底からの反射圧力波および底部での拘束の影響により、胴下部の測定点No.14とNo.15の間にもう1つの局大ひずみ点が生じる。これら2点の局大ひずみ点における累積円周ひずみを累積薬量に対してプロットすると第21図のようになる。熱処理の影響および1回の爆発薬量の違いによる影響を知るために、通常カプセル1体(No.1カプセル)は薬量10gの実験を10回くり返して行ない、もう1体の通常カプセル(No.2カプセル)および熱処理カプセルに対しては、途中で薬量50gの実験を含め、最終累積薬量200gまでの実験を行なった。第20図のプロットのうちNo.2およびNo.3カプセルの実験点が累積薬量30gから80gへ飛んでいるのは、ここで薬量50gの実験を行なった事に対応する。また、薬量50g爆発実験以後の曲線がNo.1カプセルだけ異なっており、爆発薬量の違いによる影響を明瞭に示している。又、第22図は実験1回当りの残留ひずみを実験回数に対して示したものである。実験回数が進むにしたがって実験1回当りの残留ひずみが減少し、加工硬化の影響が明瞭に示される。

以上のデータから、残留ひずみに関して次のような事が明らかになった。

- (1)累積円周ひずみは累積薬量に応じて徐々に増加するが、加工硬化が生じるために変形が大きくなるにしたがって爆発1回当りのひずみ量は減少し、累積ひずみ-累積薬量曲線の勾配が小さくなる。
- (2)累積薬量200gにおいても累積残留ひずみは28%以下であり、まだ破損には到っていない。
- (3)通常カプセルと熱処理カプセルとでは、ひずみ挙動については殆んど差が認められない。
- (4)爆心位置での残留ひずみについて薬量50gの1回の爆発によるものと、薬量10gの5回の爆発によって生じるものを比べると、前者の方が大きくなっている。この理由として、薬包の体積の違いや爆発効率の違い等も考えられるが、最も大きな理由は全ひずみエネルギーのうち弾性ひずみエネルギーとして1時的に貯えられる分が塑性ひずみの増大によってもあまり変わらないために、たとえ全ひずみエネルギーが同じであるとしても、1回の爆発よりも5回の爆発の方が弾性ひずみエネルギーとして吸収される分が約5倍近く大きくなるために、その分だけ塑性ひずみが少なくなるためであろうと考えられる。

4.4.3 カプセル破損限界の予想

累積残留ひずみのデータを外挿する事によって、薬量10gのみを連続して爆発させた場合の

破損限界を予想する。火薬による耐衝撃実験においては、インパイル実験条件とは異なり爆心側壁に最も厳しい衝撃荷重を与えるために、破損は爆心位置での胴部から生じると思われる。又、溶接部は爆心位置から上・下各約 20 cm 離れており、第 19 図に示したひずみ分布から考えても溶接部が最初の破損発生点になるとも考えられない。したがってカプセルの破損限界は爆心側壁の最大ひずみ点の残留ひずみが限界値に達した場合として推定を行なう。ところで火薬の衝撃圧力によって胴部に生じる応力は周方向のみが卓越しており、単軸引張に近い変形条件とみなす事ができるので、胴部が破損するときのひずみは第 11 図に示した素材の応力-ひずみ線図の最大応力点におけるひずみ量、すなわち約 35% と考える事ができる。そこで第 20 図に示した累積残留ひずみ-累積薬量の曲線を用い、薬量 10g 当りの残留ひずみ量として累積薬量 160g から 200g までの 4 回の実験の平均値を用いて累積薬量 200g から先を直線外挿し、累積残留ひずみが 35% となるときの累積薬量を求めると約 850g となる。したがって薬量 10g の爆発試験をくり返した場合には、カプセルは約 85 回まで耐えると予想される。

4.5 ヘリウム・リーク試験結果

カプセル・シール部の性能を試験するために、No.2 カプセルおよび No.3 カプセルを用いて、薬量 10g の爆発実験の前・後にヘリウム・リーク試験を行なった。リーク試験は各カプセルについて連続 2 回の爆発に対して行なった。試験結果を第 11 表に示す。この結果から、少なくとも 1 回の耐爆実験に対してはシール性能の劣化は起らないと言える。実際にインパイル実験に使用する場合には、シール材は毎回交換する事になっており、又、作用する水撃力も本耐爆実験で与えた条件の 1/10 程度にすぎない。したがって、本カプセルのシール部は実際の使用条件に対して十分な性能をもっている。

4.6 グリッピング装置の性能

NSRR 実験孔内に設置するカプセル・グリッピング装置と同じ構造および寸法のモックアップ装置を作り、本耐爆実験の全爆発実験においてカプセル固定装置として使用する事により、作動特性、耐爆実験時の負荷荷重測定および強度の確認を行なった。この結果、カプセルの掴み、固定および解放の動作は遠隔の圧縮空気切換弁の作動によって非常に円滑に作動し、実験孔内でも十分に使用可能な事が確認された。又、耐爆実験時には水撃力によってグリッピング装置の掴み部には上向荷重が作用する。薬量 10g の実験の場合についてこの荷重を掴み部の駆動軸にひずみゲージを取付けて測定した。第 12 表にこの測定結果を示す。カプセルの蓋に働く水撃力のピーク値、すなわちピーク圧力×作用面積の値は水塊速度の測定結果から平均 $1.6 \times 10^4 \text{Kg}$ となる。これに比べグリッピング装置に作用する衝撃力のピーク値は $9.3 \sim 11.3 \times 10^3 \text{Kg}$ であって、水撃力がカプセルの蓋から胴体を径てグリッピング装置にまで伝わる過程で約 1/6 に減衰している事になる。又、本装置は薬量 50g の爆発実験 2 回を含み通算 4.7 回の爆発実験に使用したが部材の変形や動作の異常は生じなかった。したがって強度上も十分な性能をもっている事が確認された。

第4表 実験シリーズ分類

| シリーズ名 | 主 目 的 | 火薬の種類・量 | 使用カプセル |
|---------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 臨 界 薬 量 実 験 | インパイル実験条件と ほぼ同じ薬量で実験する | 雷管1本 (ヘンズリット0.4g) | No.1 カプセル (標準カプセル) |
| 小 薬 量 実 験 | 比較的小薬量での くり返し実験 | 低爆速爆薬 10g | No.1 カプセル (標準カプセル) |
| 大 薬 量 実 験 | 大薬量爆発も含み 破損限界まで実施 | 低爆速爆薬 10g, 50g | No.2 カプセル (標準カプセル) |
| シ ー ル 性 能 試 験 | Heリーク試験により シール性能を試験 | 低爆速爆薬 10g | No.2, No.3 カプセル |
| 熱処理カプセル実験 | 熱処理による 強度変化を調べる | 低爆速爆薬 10g, 50g | No.3 カプセル (熱処理カプセル) |
| 圧 力 測 定 実 験 | 爆発圧力を 測定する | 雷管および 低爆速爆薬10g | No.4, No.5 カプセル (圧力測定カプセル) |

第6表 衝撃圧力ピーク値および半値幅

| 実験番号 | 火薬量 | 測定位置 | ピーク圧力 (Kg/cm ²) | | 半値幅 (μ s) |
|--------|------------|---------------|-----------------------------|---------|-------------------|
| | | | 直接 | データレコーダ | |
| IV-001 | 雷管 | 爆心 | 840 | 413 | 10~15 |
| IV-001 | 雷管 | 爆心より 10cm下 | 596 | 364 | — ^{*2} |
| IV-002 | LEP 10g | 爆心より 10cm下 | — ^{*1} | 630 | — ^{*2} |
| IV-003 | LEP 10g | 爆心より 10cm下 | 1,400 | 693 | — ^{*2} |
| IV-004 | LEP 10g | 爆心 | 1,400 | 1,180 | 40 |

* 1 測定不能

* 2 圧力が零にもどる前に検出器が破損したために測定不能

第5表 NSRR カプセル耐爆実験実施日程

| 作業内容 | 2月 | | 3月 | | | | 4月 | | | | 5月 | | | | 6月 |
|------------------------------------|----|--------------------|-------|-------|-------|----|---------------------------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------------------|--------------------------|
| | 24 | 3 | 10 | 17 | 24 | 31 | 7 | 14 | 21 | 28 | 5 | 12 | 19 | 26 | 2 |
| 爆発実験実施(6回) | | o | o o o | o o o | o o o | o | o | o o o | o o o o | o o o | o o o | o o o | o o o | o o o | o |
| 実験準備作業 | | | | | | | | Heリフ試験準備 | | | | | | 圧力測定用カプセル製作、セット準備 | |
| 臨界薬量実験 (ハンズリフ0.4g 電管) | | No.1カプセル 臨界薬量実験 | | | | | | | | | | | | | |
| 小薬量実験 (LEP 10g) | | | 小薬量実験 | | | | | | | | | | | | |
| シール性能及び 大薬量実験 (LEP 10g, 50g) | | | | | | | No.2カプセル シール性能試験 大薬量実験 | | | | | | | | |
| 熱処理カプセル実験 (LEP 10g, 50g) | | | | | | | No.3カプセル シール性能試験 | | | | | | | | |
| 圧力測定実験 (ハンズリフ0.4g LEP 10g) | | | | | | | | | | | | | | | No.4, No.5カプセル 圧力測定実験 |
| 実験データ整理 | | | | | | | | | | | | | | | |

第7表 カプセルの設計条件

| カプセルの種類 | 最大実験条件 | | 機械エネルギー | 機械エネルギー(cal) |
|-----------|---------|------------|---------|--------------|
| | 燃料重量(g) | 熱負荷(cal/g) | 転換率(%) | |
| ステンレスカプセル | 90 | 400 | 0.257 | 94 |
| インコネルカプセル | 90 | 600 | 1.05 | 594 |

第8表 水撃力の比較

| | 設計条件 | 雷管 | LEP10g | LEP50g |
|---------------|-------|------|--------|--------|
| 水塊速度(m/s) | 16.6 | 17.6 | 53.2 | 108.4 |
| 機械エネルギー転換率(%) | 0.257 | 16.5 | 7.5 | 6.0 |
| 機械エネルギー(cal) | 94 | 107 | 1,018 | 3,997 |
| 設計条件に対する比 | 1 | 1.14 | 10.8 | 42.5 |

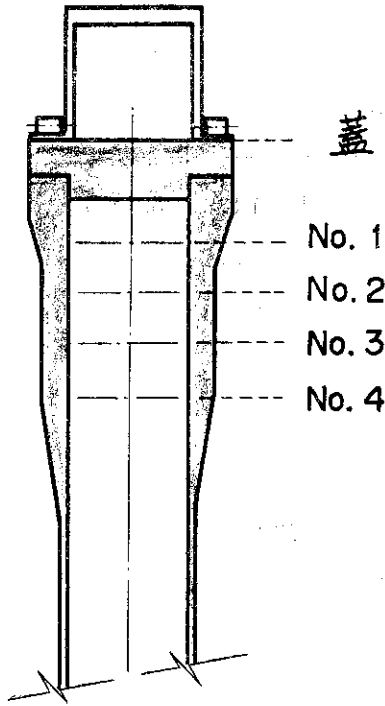
第9表 衝撃力の効果の比較

| | 設計条件 | 雷管 | LEP10g |
|---|-------------------|-------------------|--------|
| ピーク圧力(Kg/cm ²) | 45 | 840 | 1,400 |
| 半直幅(μs) | ~500 | 10~15 | ~40 |
| 最大ひずみ(%) | 0.037 | 0.29 | 9.6 |
| ひずみエネルギー($\frac{\text{Kg} \cdot \text{mm}}{\text{mm}^3}$) | 1.3×10^3 | 5.0×10^2 | 3.9 |
| 設計条件に対する比 | 1 | 1 | 2,950 |

第10表 蓋及び厚肉部における歪

1 爆発直後の歪 (ピーク値)

| 位置 | 10g | 50g |
|---------|--------------|--------------|
| 蓋 | 735.8 μ | 1354.2 μ |
| No.2 周軸 | 470 μ | — |
| No.3 周軸 | 2508 μ | 3260 μ |
| No.4 周軸 | 1075.3 μ | — |



2. ウォーターハンマーによる歪 (ピーク値)

| 位置 | 10g | 50g |
|---------|--------------|--------------|
| 蓋 | 428.6 μ | 2291.7 μ |
| No.2 周軸 | 534 μ | — |
| No.3 周軸 | 1304.3 μ | 2173.9 μ |
| No.4 周軸 | 1195.6 μ | 1720.4 μ |
| No.4 周軸 | 860.2 μ | — |

第11表 ヘリウム・リーク試験結果

| | No. 2 カプセル | No. 3 カプセル |
|----------------------|---|------------------------------|
| 実 験 前 | 1×10^{-10} Acc/s 以下 | 1×10^{-10} Acc/s 以下 |
| 第1回爆発後 | 1×10^{-10} Acc/s 以下 | 1×10^{-10} Acc/s 以下 |
| 第2回爆発後 ^{*1} | $\sim 1 \times 10^{-6}$ Acc/s ^{*2} | 1×10^{-10} Acc/s 以下 |

* 1 シール材は第1回爆発実験に使用したものを再使用した。
* 2 リーク箇所はOリング部およびコナックスシールランド部

第12表 グリッピング装置の負荷荷重

| 実験番号 | 作用おくれ時間 (ms) | 作用時間 (ms) | ピーク荷重 (Kg) |
|-------|-----------------|--------------|--------------------|
| Ⅲ-205 | 0.20 | 0.19 | 9.31×10^3 |
| 206 | 0.20 | 0.19 | 1.33×10^4 |
| 207 | 0.21 | 0.15 | 1.13×10^4 |
| 208 | 0.24 | 0.14 | 9.38×10^3 |
| 平均値 | 0.21 | 0.17 | 1.08×10^4 |

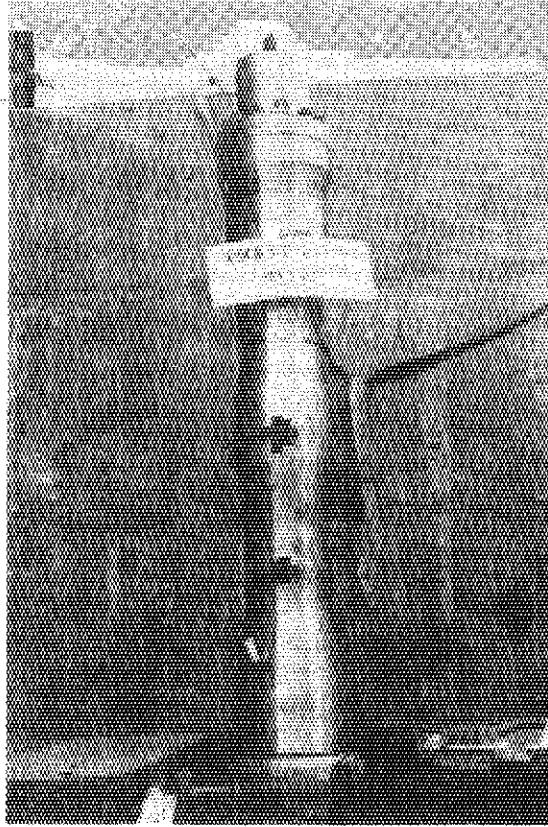
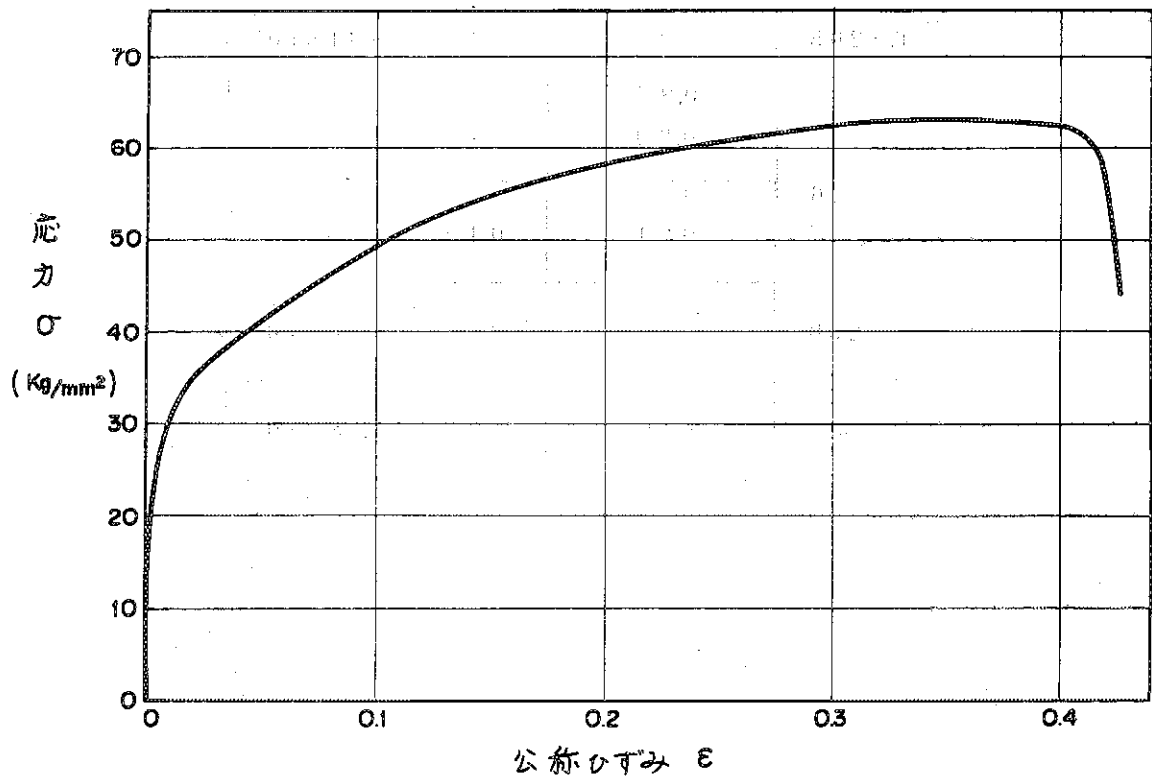
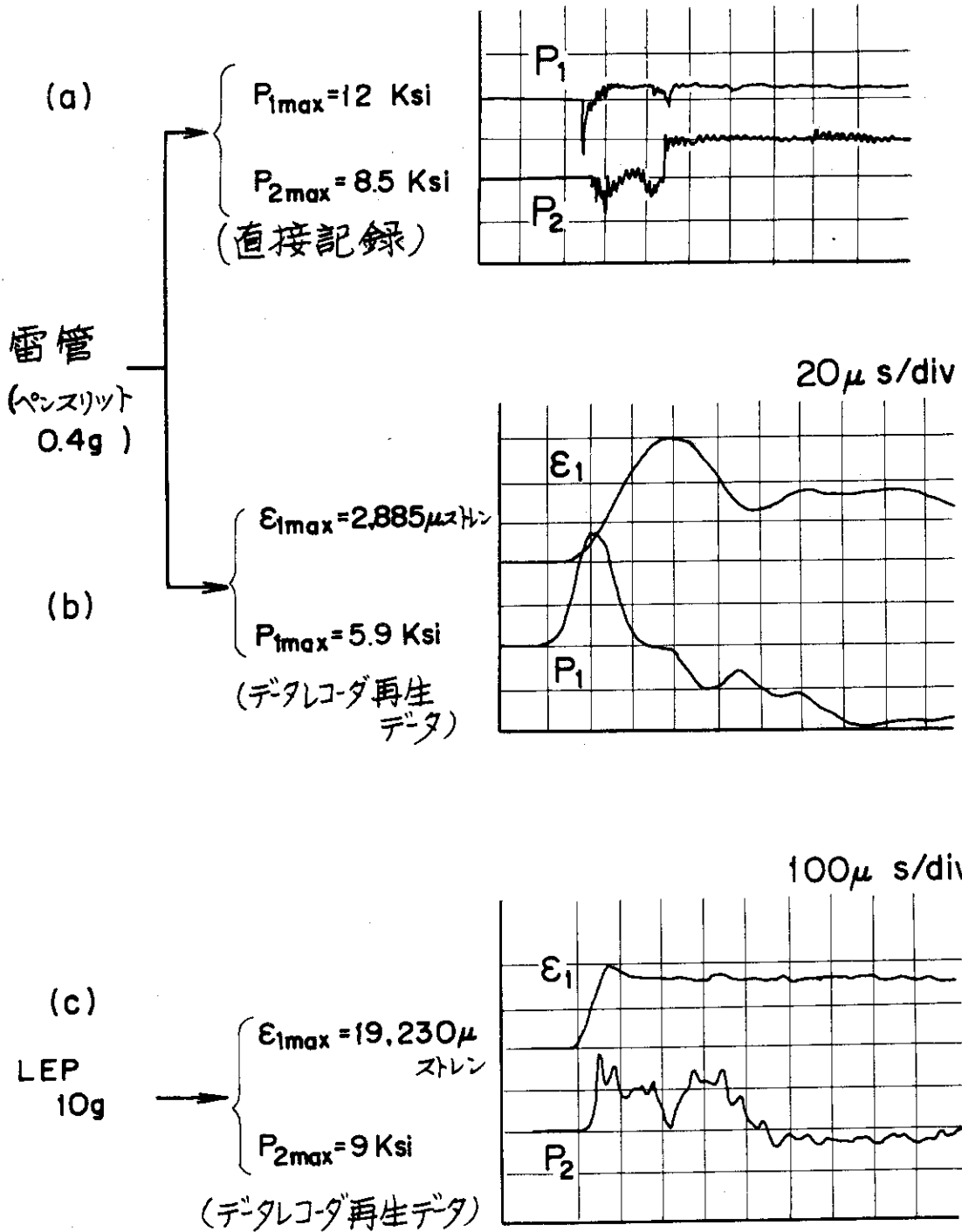


写真 6 残留ひずみ例



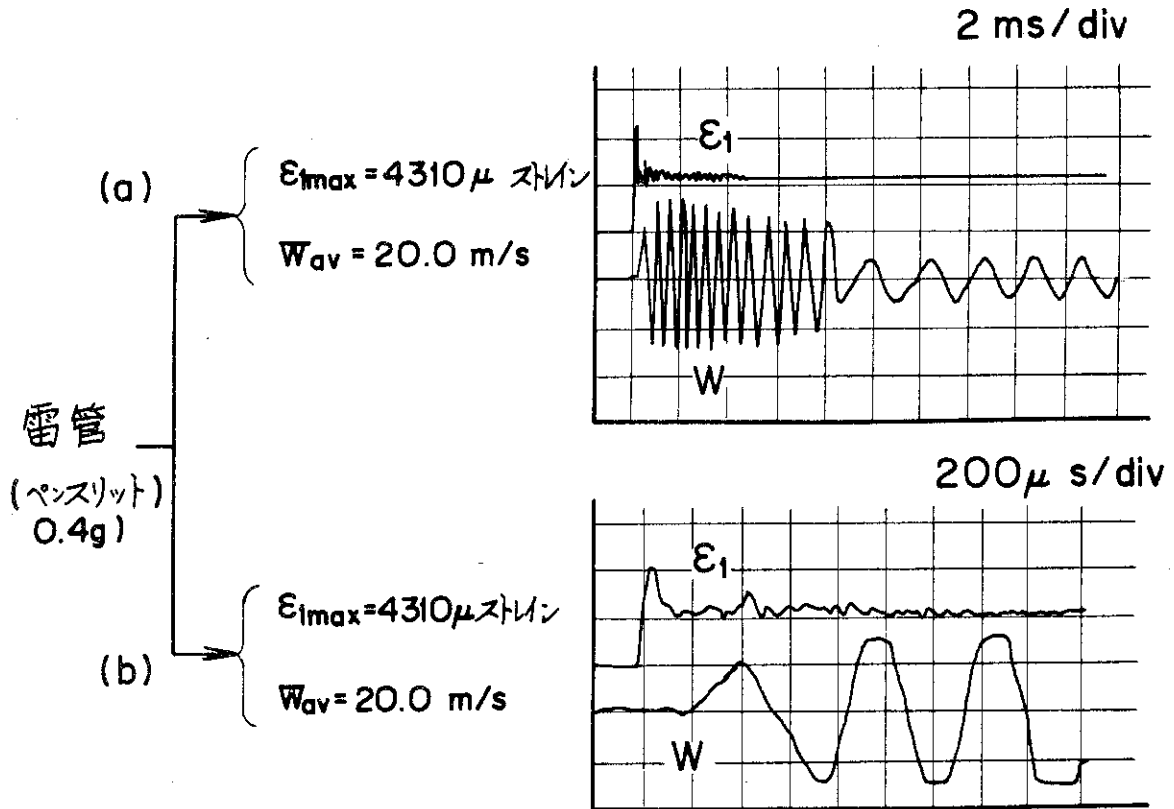
第 11 図 カプセル材料の応力ひずみ曲線 (SUS304)

200 μ s/div

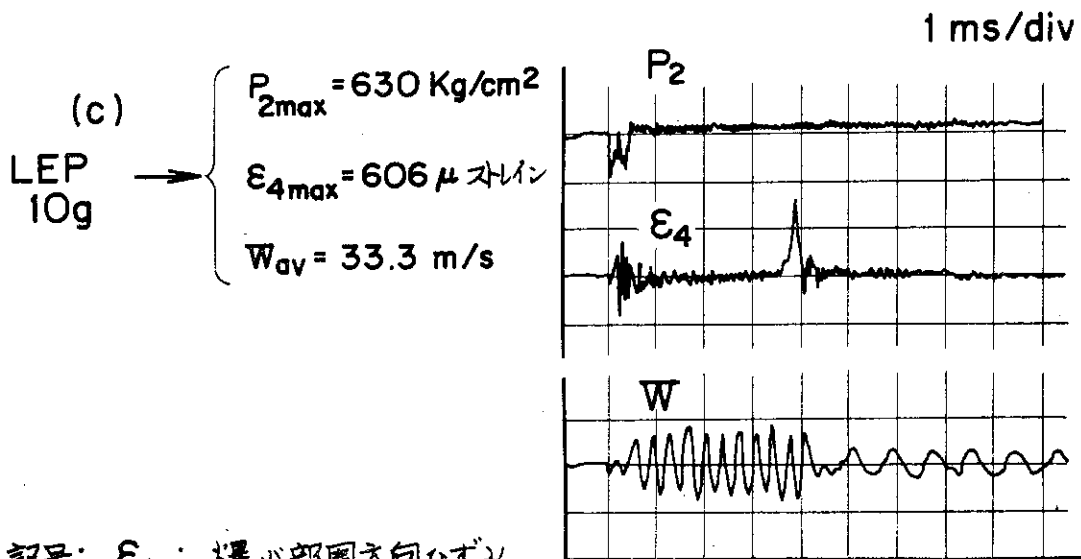


記号 P_1 : 爆心圧力
 P_2 : 爆心より10cm下の圧力
 ϵ_1 : 爆心の周方向ひずみ

第12図 衝撃圧力データ記録例

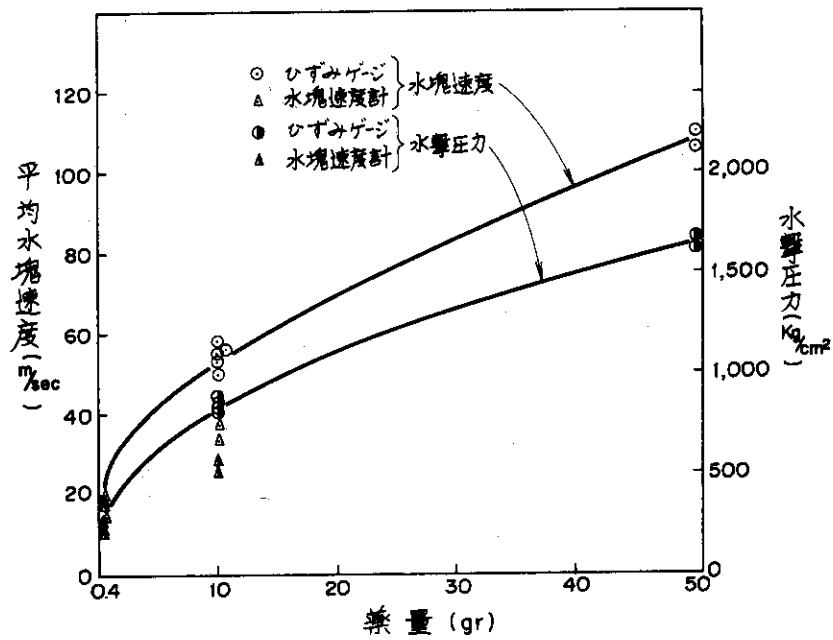


・W は1波長が水面が
1cm移動した事を示す

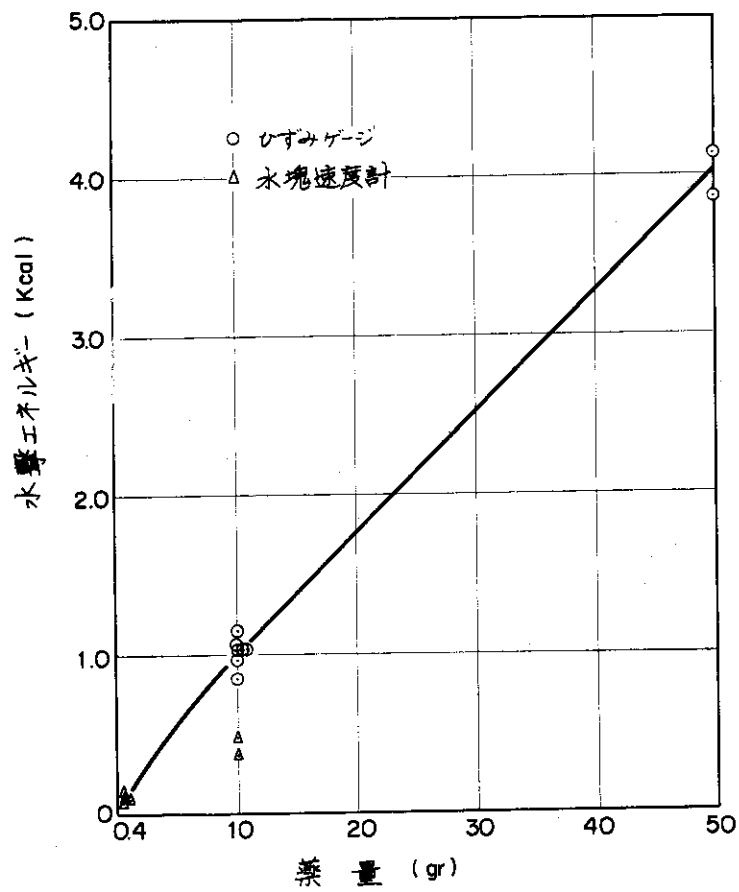


記号: ϵ_1 : 爆心部周方向ひずみ
 ϵ_4 : ふたの中央ひずみ
 W : 水の飛上り速度
 P_2 : 爆心より10cm下の圧力

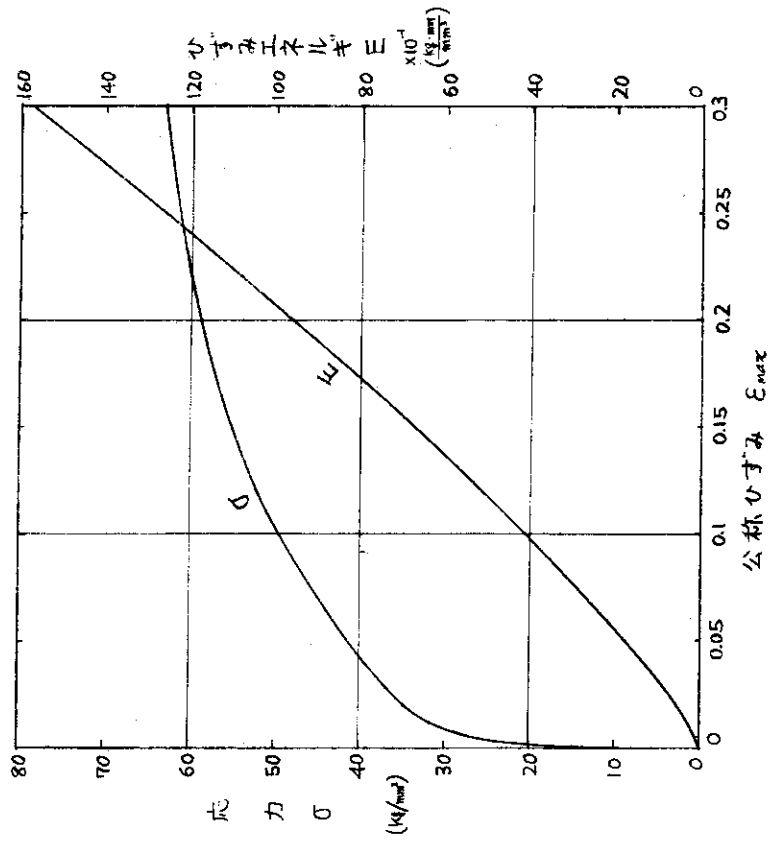
第13図 水撃力データ記録例



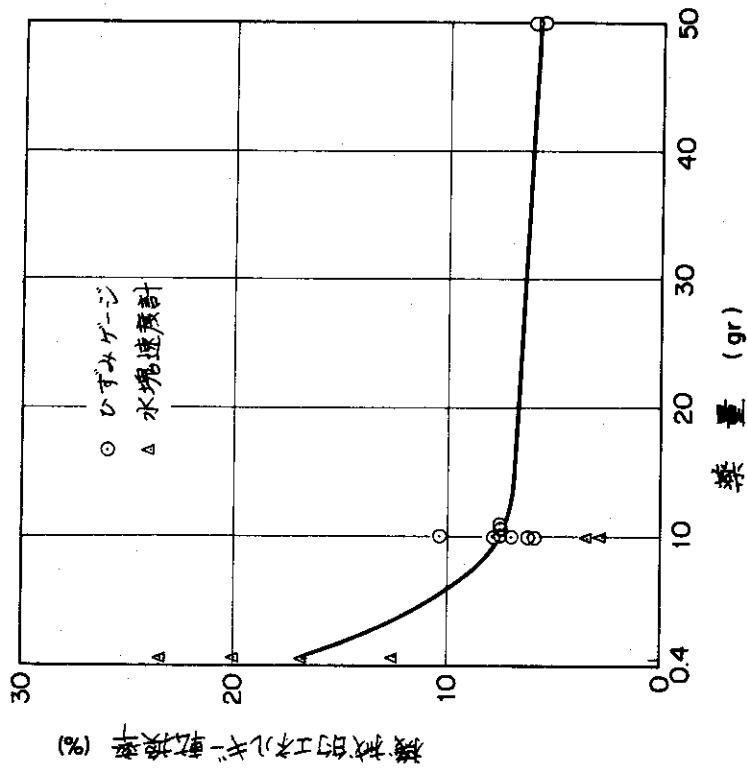
第 14 図 水塊速度および水撃圧力と薬量の関係



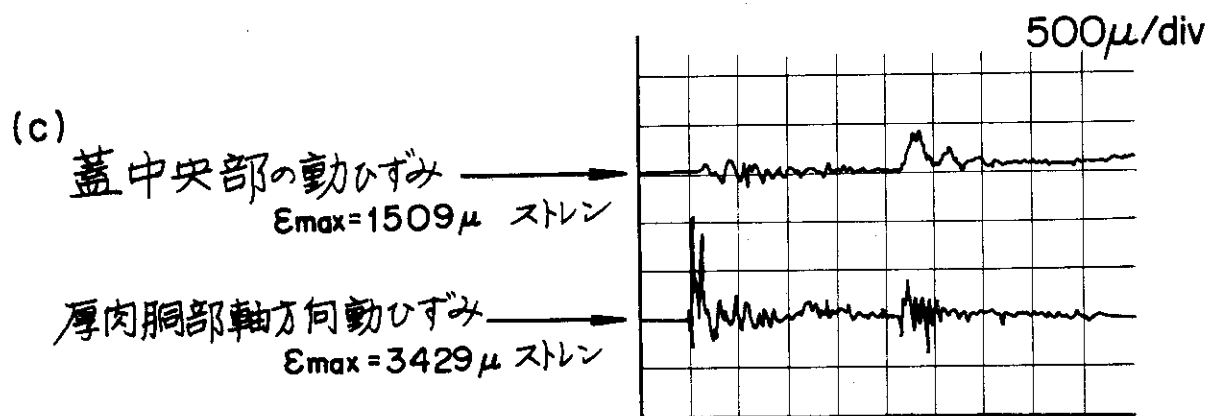
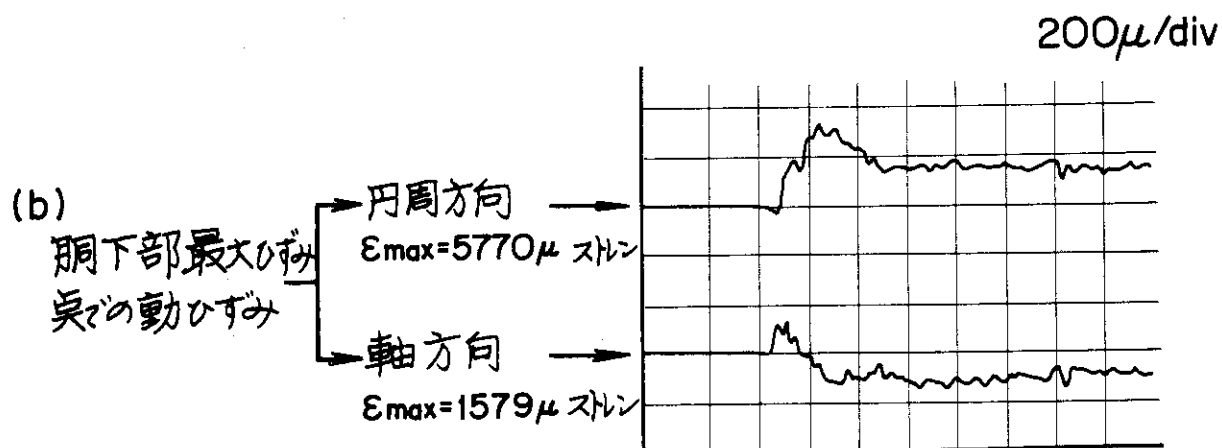
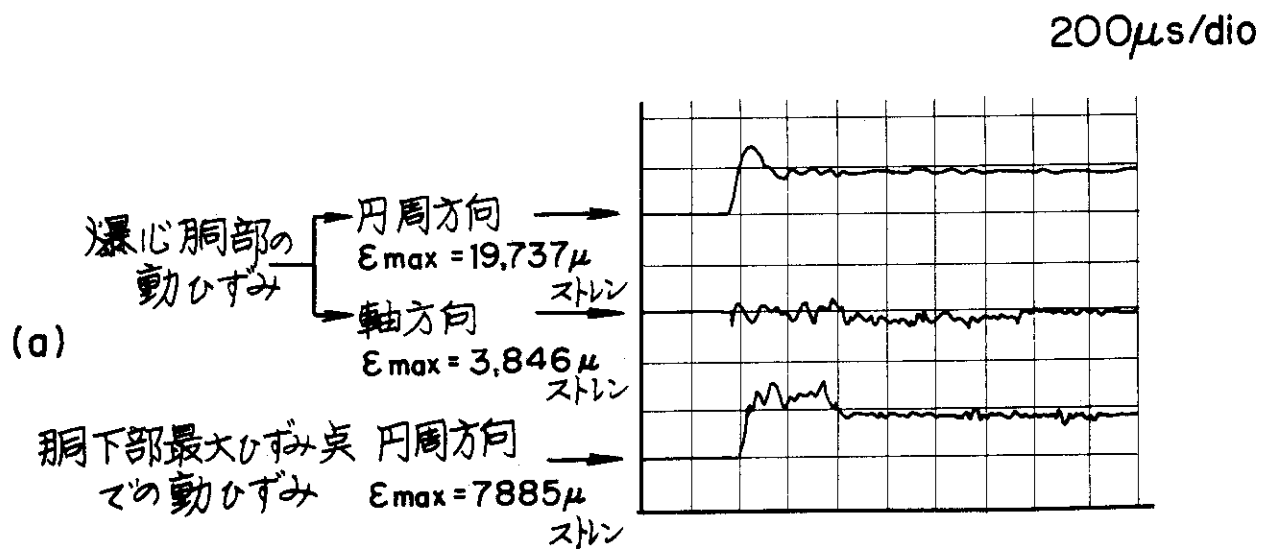
第 15 図 水撃エネルギーと薬量の関係



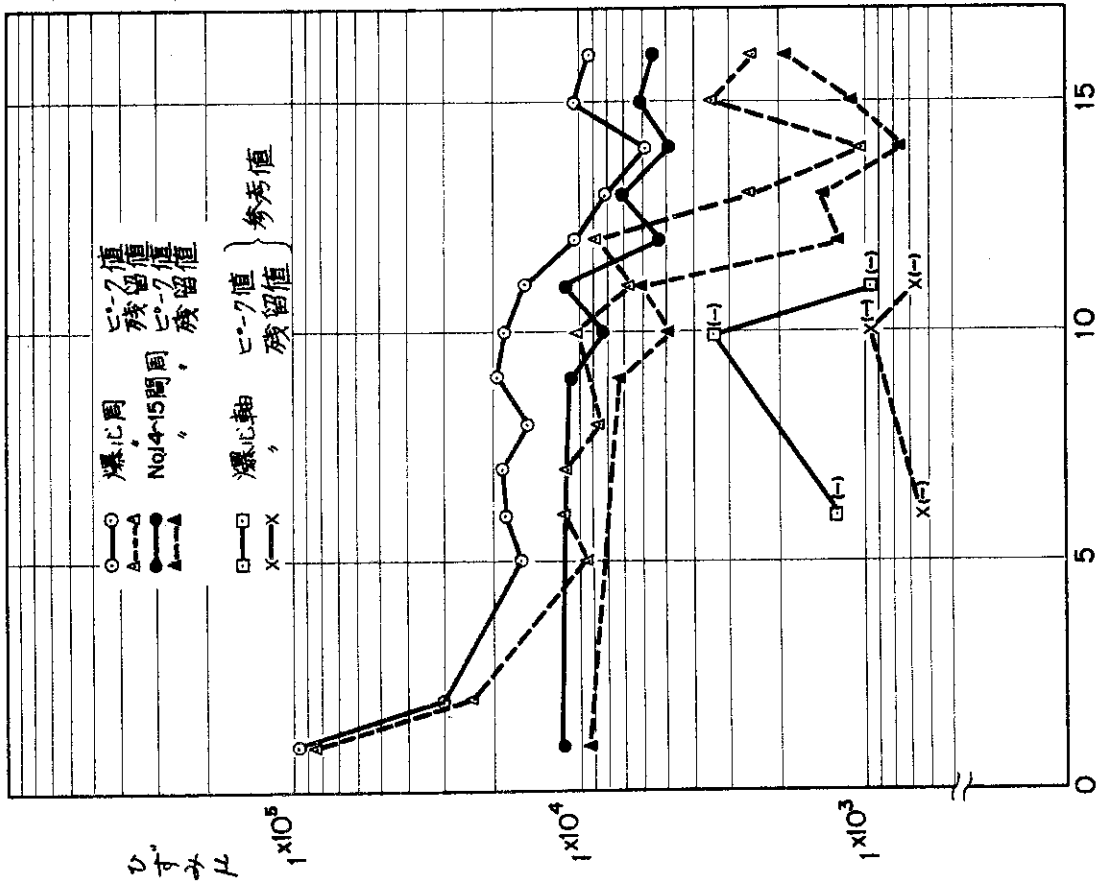
第17図 ひずみエネルギーとひずみの関係



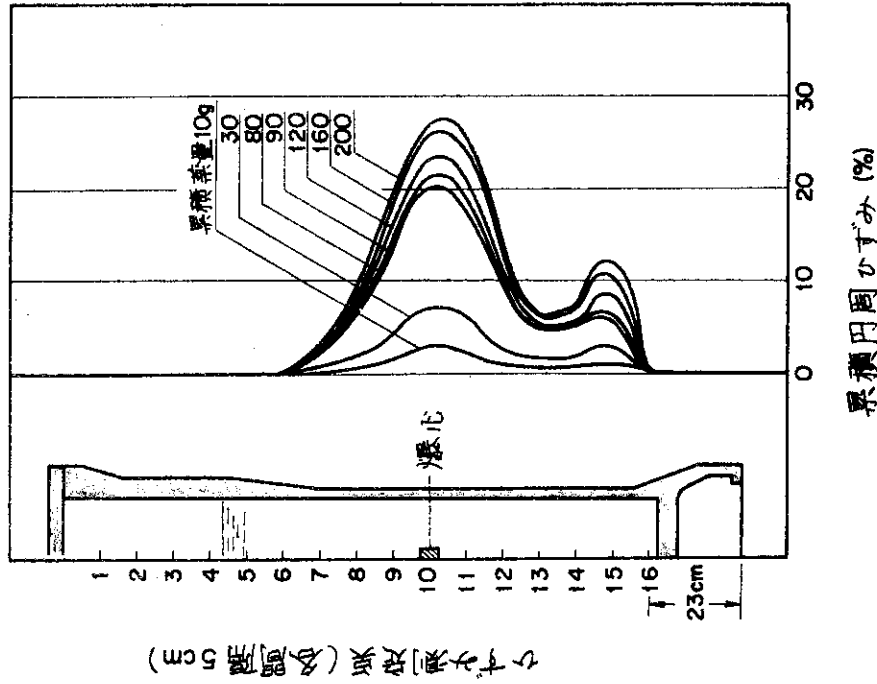
第16図 機械的エネルギー転換率と薬量の関係



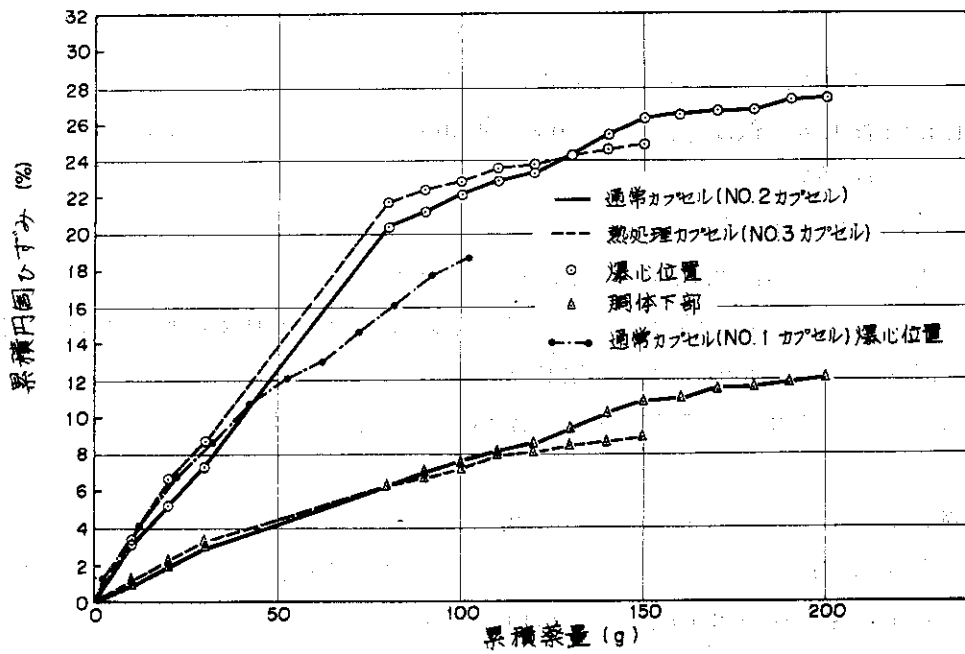
第18図 動ひずみデータ記録例 (LEP10g)



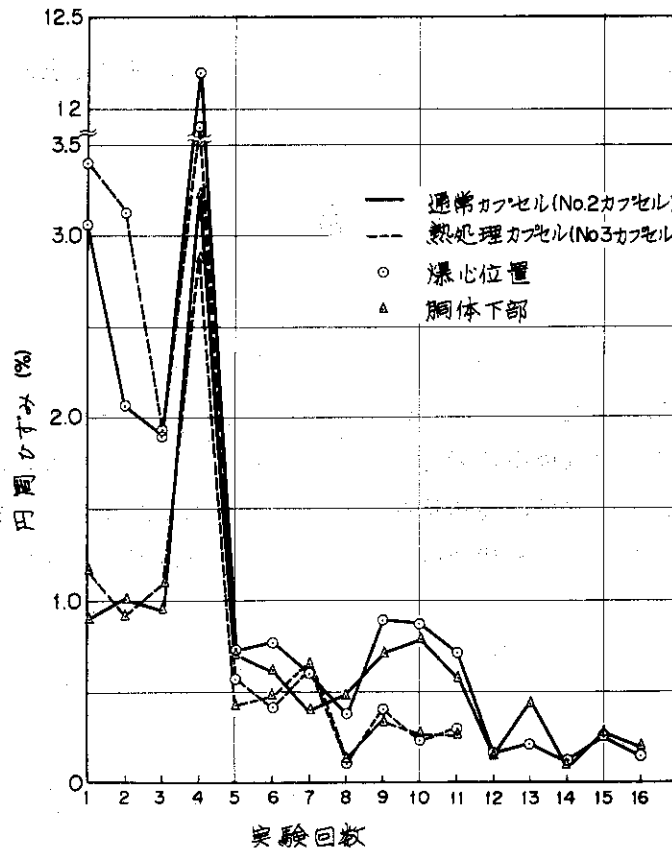
第19図 胴体周方向ひずみ挙動



第20図 ひずみの軸方向分布



第21図 累積円周ひずみと累積薬量の関係



第22図 実験1回当りの円周ひずみ

5 結 論

本耐爆実験によって確認された事実を列記すると以下のようになる。

(1)実験に使用した雷管1本，低爆速用火薬10g，同50gはそれぞれ実際の使用条件に比べて次の倍率の実験条件を与える。

水撃力に対し；等量，10倍，40倍

衝撃圧力に対し；40倍，3,000倍，15,000倍以上

(2)水撃力がほぼ等量となる雷管実験では，水撃による影響は全然現れず，衝撃圧力によって爆心側壁に0.3%以下の軽微な残留ひずみが生じただけであった。

(3)水撃力に対しては，約40倍量に相当するLEP50gの試験に対しても残留ひずみが生じなかった。

(4)衝撃圧力に対しては，ひずみエネルギー比で約3,000倍という非常に苛酷な実験条件を与えるLEP10gのくり返し実験によって，累積薬量200gでも破損しない事が確認できた。又，データの外挿によって，累積薬量850g位までは耐える事がわかった。

(5)フランジ部，計測線貫通部等のシール特性は薬量10gの試験によっても劣化せず，ヘリウム・リーク試験により十分なシール性能を持つ事を確認した。

(6)グリップング装置を全実験期間にわたって連続使用したが，良好に作動し，変形その他の異常は生じなかった。

以上の結果から，カプセルおよびグリップング装置が機能上および強度上ともに十分な性能を持つ事が確認された。

6 謝 辞

本実験を遂行するためあたり，構造強度研究室の磯崎敏邦氏には計測器機の手配をはじめ実験実施上で色々と御助力をいただいた。又，構造強度研究室の大場敏弘および反応度安全開発室の山崎利の両氏には，危険物取扱主任者として火薬の取扱いを担当していただいた。その他，実験場の整備や器材の移動，取付，周辺監視等の実験実施上必要な多くの雑作業を反応度安全開発室員のほとんど全員の方々に交代で御助力願った。以上の方々に対し，ここに改めて深甚の謝意を表します。

なお，本実験カプセルは原研の仕様によってGeneral Atomic社がインコネル製カプセルとして設計したものにもとづき，材質をステンレスとして原研で設計・製作し直したものである。このカプセル製作においては，中央胴体部とスカートまたは上部との溶接部分の施行やスカートの製作が極めて困難なものであったが，技術部工作課における設計，製作，検査の卓越した技術によって完成し，耐爆実験の結果も本レポートに記したように極めて良好であったことを付記し感謝の意を表します。

5 結 論

本耐爆実験によって確認された事実を列記すると以下のようになる。

(1)実験に使用した雷管1本、低爆速用火薬10g、同50gはそれぞれ実際の使用条件に比べて次の倍率の実験条件を与える。

水撃力に対し；等量，10倍，40倍

衝撃圧力に対し；40倍，3,000倍，15,000倍以上

(2)水撃力がほぼ等量となる雷管実験では、水撃による影響は全然現れず、衝撃圧力によって爆心側壁に0.3%以下の軽微な残留ひずみが生じただけであった。

(3)水撃力に対しては、約40倍量に相当するLEP50gの試験に対しても残留ひずみが生じなかった。

(4)衝撃圧力に対しては、ひずみエネルギー比で約3,000倍という非常に苛酷な実験条件を与えるLEP10gのくり返し実験によって、累積薬量200gでも破損しない事が確認できた。又、データの外挿によって、累積薬量850g位までは耐える事がわかった。

(5)フランジ部、計測線貫通部等のシール特性は薬量10gの試験によっても劣化せず、ヘリウム・リーク試験により十分なシール性能を持つ事を確認した。

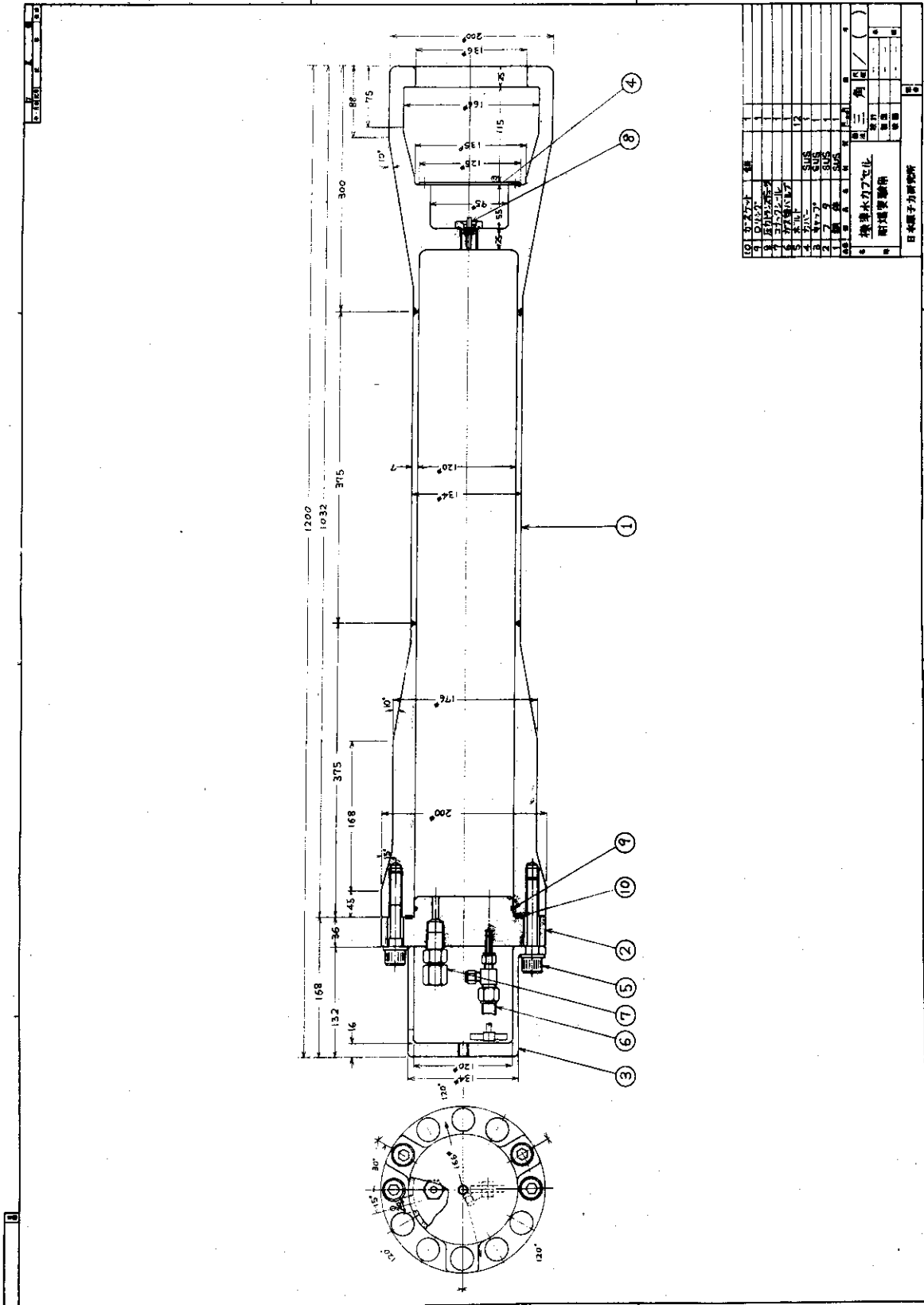
(6)グリップング装置を全実験期間にわたって連続使用したが、良好に作動し、変形その他の異常は生じなかった。

以上の結果から、カプセルおよびグリップング装置が機能上および強度上ともに十分な性能を持つ事が確認された。

6 謝 辞

本実験を遂行するためあたり、構造強度研究室の磯崎敏邦氏には計測器機の手配をはじめ実験実施上で色々と御助力をいただいた。又、構造強度研究室の大場敏弘および反応度安全開発室の山崎利の両氏には、危険物取扱主任者として火薬の取扱いを担当していただいた。その他、実験場の整備や器材の移動、取付、周辺監視等の実験実施上必要な多くの雑作業を反応度安全開発室員のほとんど全員の方々に交代で御助力願った。以上の方々に對し、ここに改めて深甚の謝意を表します。

なお、本実験カプセルは原研の仕様によってGeneral Atomic社がインコネル製カプセルとして設計したものにもとづき、材質をステンレスとして原研で設計・製作し直したものである。このカプセル製作においては、中央胴体部とスカートまたは上部との溶接部分の施行やスカートの製作が極めて困難なものであったが、技術部工作課における設計、製作、検査の卓越した技術によって完成し、耐爆実験の結果も本レポートに記したように極めて良好であったことを付記し感謝の意を表します。



| | | |
|----|----------|---|
| 10 | 3.7.7.4 | 鋼 |
| 9 | Q157 | 鋼 |
| 8 | 272.2.11 | 鋼 |
| 7 | 272.2.11 | 鋼 |
| 6 | 272.2.11 | 鋼 |
| 5 | 鋼 | 鋼 |
| 4 | 鋼 | 鋼 |
| 3 | 鋼 | 鋼 |
| 2 | 鋼 | 鋼 |
| 1 | 鋼 | 鋼 |

機組水力工作止
 耐摩損材料
 日本原子力研究所