

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

配付限定

分置

# 圧力波の発生と伝播の研究

## 報告書

昭和51年3月31日

船舶技術研究所

原子力船部

この資料は鈾燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だ

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

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

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

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

# 目 次

1. 研究目的 .....	1
2. 研究概要 .....	1
3. 実験装置 .....	2
4. 実験方法及び実験上の問題点 .....	6
5. 実験結果 .....	7
6. 考 察 .....	45
7. 結 び .....	45

## 1. 研究目的

高速増殖炉の炉心の燃料溶融事故時には、溶融燃料と冷却材としてのナトリウムの相互作用、いわゆるFSI (Fuel Sodium Interaction) が生ずると考えられており、事故解析上の重要な問題点となっている。

FSI時には高温の溶融燃料から低温の冷却材へ急速に熱が伝えられるため、ナトリウムの冷却材の突沸的な激しい沸騰が生じ、大きな圧力波が発生する。この現象を解明するため、原子炉内での模擬実験いわゆる in-pile test や、高温のUO<sub>2</sub>燃料と液体ナトリウムによる相互作用実験、いわゆる out-of-pile test が現在各国で行われつつある。

ところで、FSI時にはいろいろな過渡的圧力変化が生ずると考えられている。すなわち、高温の溶融燃料とナトリウムが接触したとき、液体ナトリウムの急激な熱膨張により発生すると考えられる数m sec以内の圧力(これを phase A と呼ぶ)及びその後ナトリウムの沸騰により発生する数十 m secの圧力の山(これを phase B と呼ぶ)であって、解析モデルもこれに従ってつくられることが多い。

ところで、圧力波はまわりの構造体の形状寸法やどのようにして生じたかにより発生状況が異なり、in-pile test や out-of-pile test あるいは各種模擬実験の解釈や評価には注意する必要がある。

本研究は、水やR-11, R-113のフロン液のような可視液にヒーターを沈めて、このヒーターを急速に加熱することにより発生する圧力波を記録及び観察することによって、FSI時の圧力発生を模擬し、インパイル及びアウトオブパイルの種々の実験結果の解釈に有用なデータを得ると共に、各種計算コードのモデル評価に役立つものである。

## 2. 研究概要

圧力波の発生と伝播の研究のための、可視実験装置により、圧力波の発生と伝播に関する研究を行った。本実験装置はSUS製であり、中に取付たSUSヒーターの急速加熱時の沸騰状況等を観察できるようになっている。

この装置により当初、水を用いて実験を行おうとしたが、SUSヒーターを数十 m sec間大電流交流直接加熱する関係で、ノイズを十分処理できず、フロン系冷媒に切換えて実験を続行した。なお、液のサブクーリングの影響をみるため、沸点の異なる2つの冷媒を用いた。

本研究は、実験装置として新設のものを使用したため、予期しないトラブル処理で時間を

とられ、未だ十分満足できる結果が得られず、予備実験的段階であるが、以下の結果を得ることができた。

(イ) 沸騰による数十 m sec の圧力波と、それに続く数百 m sec 以後の水撃的作用による圧力波を R-11 及び R-113 液について記録することができた。

(ロ) R-11 について高速度写真撮影を行い、圧力変化時の現象の観察を行った。

今後の研究課題は、これまでの経験を生かしてさらに急速加熱を行うよう装置の改造を行い、また記録計に応答の早いものを使用して、phase A と呼ばれる早い圧力変化がこのような系で発生することができるかどうか確かめること、さらにその場合、構造寸法の影響を明らかにすることなどである。

### 3. 実験装置

実験装置の概念図を図 3-1 に示す。すなわち実験装置はテスト部、電源部及び記録部よりなっている。

テスト部の概念図を図 3-2 に示す。すなわち、幅 15 mm、奥行 25 mm、高さ 150 mm の SUS 製可視部（前後面をパンライト板として内部を観察できる）の上部にガラス管（内径約 10 mm）を取付けた装置を本体とし、これに幅 10 mm、厚さ 0.3 mm、長さ 100 mm の SUS 製加熱板を取付けてヒーターとし、さらに圧力変換器を側部及び底部に取付けて圧力変化を計測する。電源部は三相交流電源、入力スイッチ、一次側電流しゃ断器、三相変圧器、二次側電流しゃ断器及び SUS 加熱板ターミナルよりなるものである。一次側電流しゃ断器は、ろう電しゃ断器であり、30 mA 以上のろう電を感知して、100 m sec 以内（最大 30 m sec）で回路をしゃ断するもので、本実験はスイッチを入れると同時に 30 mA 以上のろう電を生じる構造にしておいて、直ちにこれが働くようにした。本実験の印加電流はこれによってしゃ断した。変圧器は二次側に低電圧、大電流を得るため使用するもので、3相誘導式 30 KVA 用である。本実験装置はそのうち二次側で 2 本のみ取出して使用した。二次側電流しゃ断器は 30 A 用ノーヒューズブレーカーであり数百 m sec でしゃ断する。これは一次側がしゃ断しなかった場合のバックアップとして使用した。

記録部は圧力変換器、動歪計及びビジグラフよりなる。圧力変換器はエンジン指圧計（新興通信製及び共和電業製）を使用し、動歪計としては新興通信製広帯域（DC~50 KHz）動歪計を用いた。また記録計としては三栄測器製 5L16 型ビジグラフを用いた。

実験の使用流体としては、当初純水を考えたが実験中にノイズを除去することが難しく、電気抵抗がほぼ無限大のフロン系冷媒を用いることとした。

なお、この場合装置の都合でサブクーリング温度をいろいろにとることが困難であったため、沸点の異なる2つの冷媒、すなわち R-113 (沸点約 48℃) 及び R-11 (沸点約 22℃) を用いた。

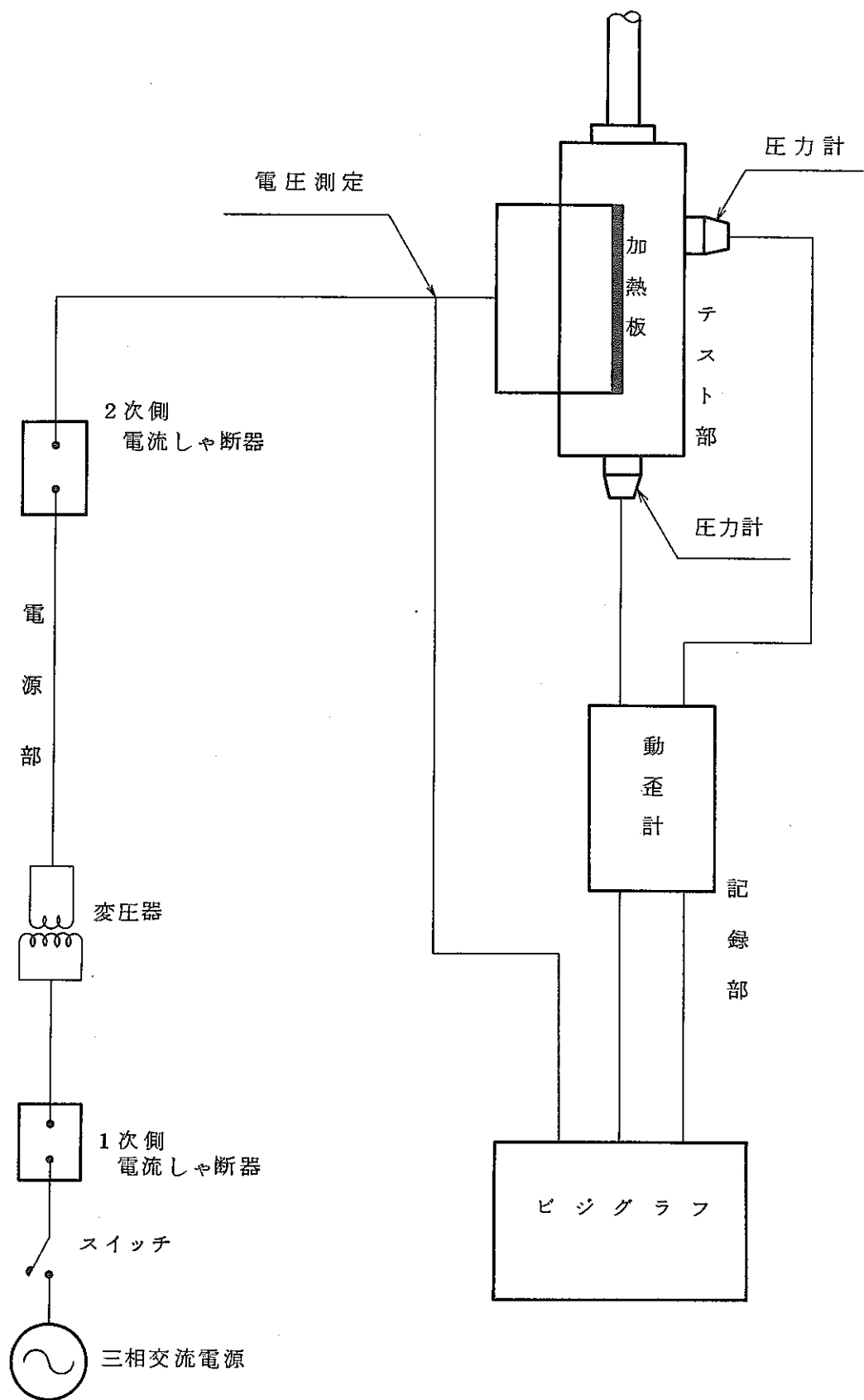


図 3 - 1 実験装置概念図

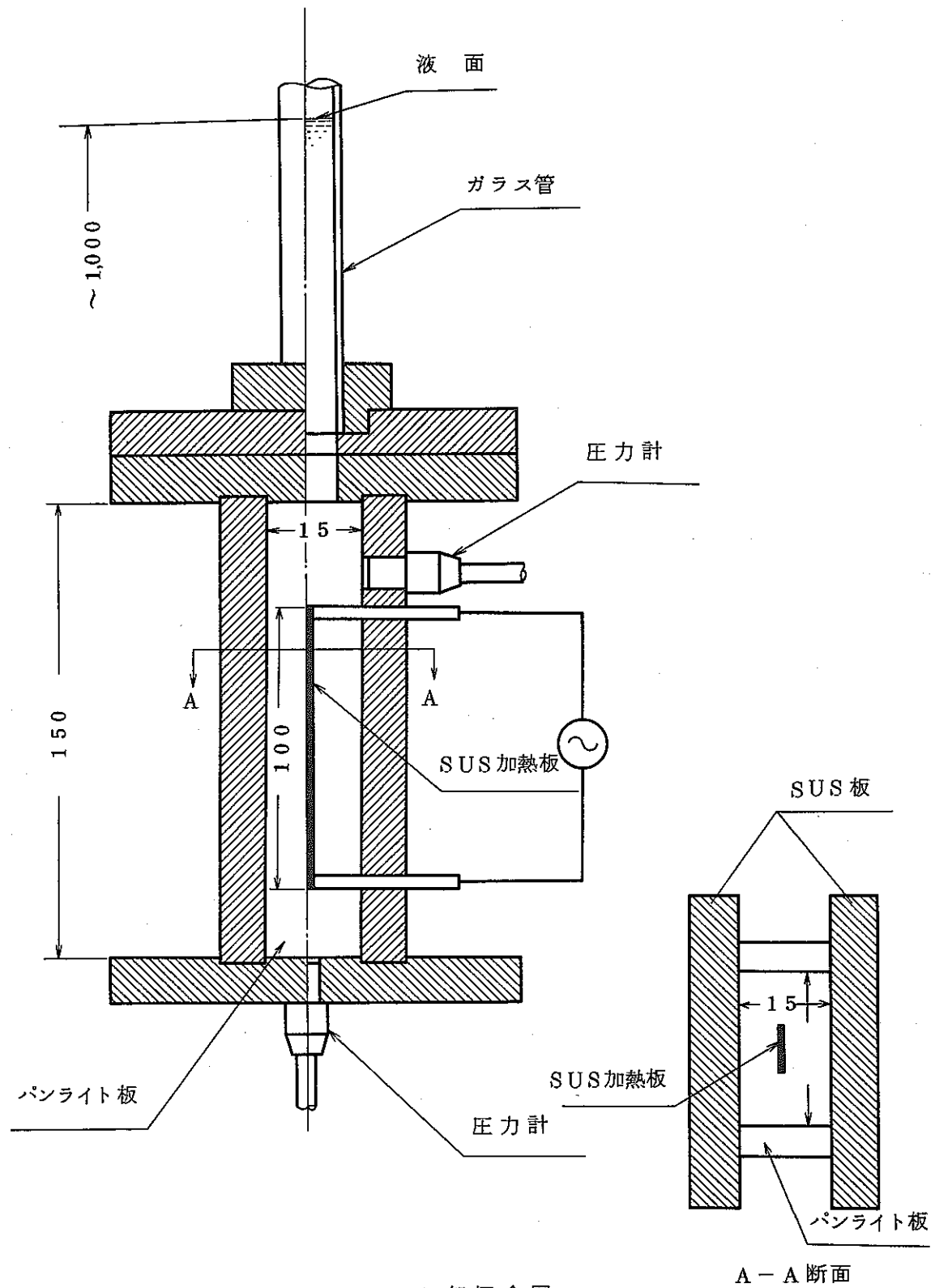


図 3-2 テスト部概念図



#### 4. 実験方法及び実験上の問題点

実験は以下の順序で行う。テスト部内にガラス管の適当な高さまで流体を注入する。次に三相誘導変圧器を調節してヒーターに所定の電圧がかかるようにする。一次側電流しゃ断器を動作状態にする。以上で準備がなり、記録計等を動作させた後、入力スイッチを入れる。入力スイッチが入ると同時に一次側電流しゃ断器が働いて、電流が30～100 m secで切れる。この間にヒーターに交流50 Hzの大電流が流れて、ヒーターを加熱し、さらにその熱で流体を加熱して沸騰状態とし、種々の圧力波を発生させる。

本実験装置は本年度に新設したものであり、当初予期しなかった種々のトラブルがあった。以下にその主なもの及び解決策を記す。

- (1) 流体として水を使用する予定でいたが、装置がSUS製であり、短時間に大電流が流れる本実験では、ノイズが大きく、今後水を使用する場合、改良すべき点が多い。さしあたり本年度は電気抵抗の大きなR-11及びR-113を用いた。
- (2) 既存施設の30 KW三相誘導変圧器を使用したがる、本実験装置のSUSヒーターとうまくマッチングせず、変圧器内の内部抵抗による電力損失が大きくて、当初予定した電圧(すなわち電力)を得ることができなかった。
- (3) 電流印加時間を一次側電流しゃ断器で制御する予定であったが、ろう電しゃ断器のしゃ断時間が、その度ごとにまちまちであって、ある場合には時間が短かすぎて、十分加熱が行われず、また次には十分長いという具合であった。所要の印加時間を10 m sec以内の範囲で制御する方法が考えられればよいが今後の問題である。
- (4) phase B及び水撃圧力の測定は、エンジン指圧計で十分測定できたが、今後 phase Aすなわち1 m sec以内の早い圧力の測定には、さらに早い圧力変換器が必要である。
- (5) 記録計としてはビジグラフを使用した。これは取扱いが容易なこと、及び phase Bと水撃圧力の記録には間にあうことなどの理由によった。  
今後、早い圧力測定にはデジタルメモリーやデータレコーダーなどを使用した方がよい。
- (6) 高速度写真は5000コマ/秒で約1秒以内しか撮影できないため、早い現象の撮影には、タイミングをうまく考えないと難しい。

## 5 実験結果

### 5.1 R-113 による実験

R-113 を用いた圧力変化例を図 5.1-1 ~ 図 5.1-6 に示す。すなわち図には圧力変化図、印加電圧及び時間が同時に記されている。電圧は全ての場合、約 60 m sec 間印加されていることがわかる。この電力によりヒーター板が加熱されて、フロン液を加熱沸騰させる。約 50 m sec から 80 m sec に生じている圧力の山がこれであって、F S I 時に生ずるいわゆる phase B に相当する。

圧力は約 80 m sec 後に大気圧以下に下り真空状態になる。これが約 90 m sec 間続き、約 170 m sec ~ 200 m sec で急激な大きな圧力パルスが発生する。これが、いわゆる水撃による圧力であり、再び真空になった後 60 m sec 後に再び圧力パルスが発生する。これがくり返されて次第に減衰してゆく。印加電力がほぼ等しいこともあり、5 回の圧力波は大きさや周期がほとんど同じものが得られているのが興味あるところである。

### 5.2 R-11 による実験

R-11 を用いて行った実験の圧力変化例を図 5.2-1 ~ 図 5.2-8 に示す。本図も同様に圧力変化、電圧印加及び、時間を同時に示してある。

図 5.2-1 及び図 5.2-2 はテスト部内の導圧管内等に空気又は蒸気が残っていた場合の例と考えてよい。すなわち、4 ~ 50 m sec で生ずる圧力の山 ( phase B ) 及びそれから続く水撃的圧力の変化は生じているが、これが早く減衰する傾向にあることである。特に図 5.2-1 は第 2 の山が 170 m sec, 第 3 の山が 340 m sec で生じているが絶対値は小さい。図 5.2-2 は電圧印加が 100 m sec になった例で、phase B の圧力の山の後 150 m sec 以上真空が続き、220 m sec で大きな圧力 ( 水撃 ) が生ずるが、それ以後の圧力の変化は比較的小さい。図 5.2-3 ~ 図 5.2-8 は圧力の絶対値及び生ずる時間がほとんど同じ例である。すなわち、電圧印加はほぼ 5 ~ 60 m sec 間であり、40 ~ 70 m sec に第 1 の圧力の山 ( phase B ) が生じ、その後真空となるが、約 180 m sec に再び数  $\text{Kg}/\text{m}^2 \text{g}$  の圧力の立上りがあり、再び真空になる。そして 420 ~ 480 m sec に急な圧力の立上りがあり再び真空に戻る。そして、550 ~ 630 m sec に次の圧力の山があり、さらに 100 m sec 後に再び圧力が立上る。

これらの図で特徴的なことは、水撃圧力は圧力が大きなほど立上りと戻りが急であり、圧力が小さいとただらかになることである。R-11 は沸点に近くサブクーリングが小さ

いため残存気泡の影響がこのような形であらわれたものと考えられる。

圧力波として特徴的なことは、第1の圧力 ( phase B ) と次の圧力の山の間が 100 m sec 位なのに対し、次の圧力の山が生ずるのは 250 m sec 以上経過してからであり、以後はこの間隔が次第にちぢまることである。

### 5.3 R-11 の高速度写真フィルム

R-11 の圧力変化時を高速度写真に撮った例を示す。図 5.3-1 はその際の圧力変化の記録であり、前項で記した R-11 の典型的な圧力変化例を示している。

高速度写真は約 2000 コマ/秒 で撮ったものであって写真 1~14 に 3~4 コマずつ示してある。写真と圧力波記録との対応をイ、ロ、ハ………で示してある。写真は中央にほそいヒーター板がみえ、蒸気が黒く、液は透明になって撮影されている。

写真と圧力記録からわかるように、初期の phase B の圧力は沸騰によるものであり、真空期間は蒸気でおおわれ、圧力の上昇と共に液があらわれる。特に 450 msec 近くでは約 10 m sec だけ液がみえるのが、急な圧力上昇をよくあらわしている。

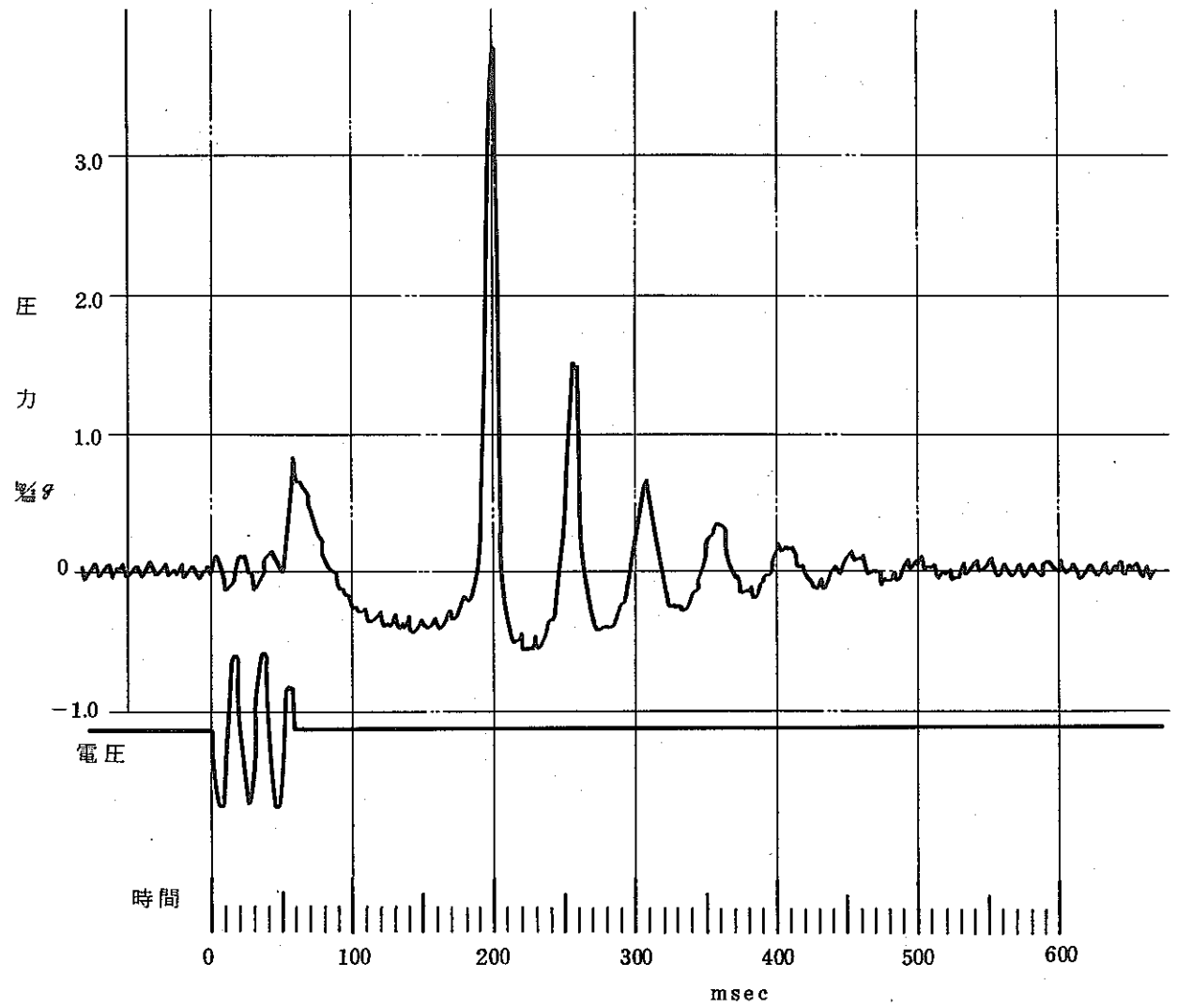


図 5.1 - 1 R - 113 の圧力波 ( その 1 )

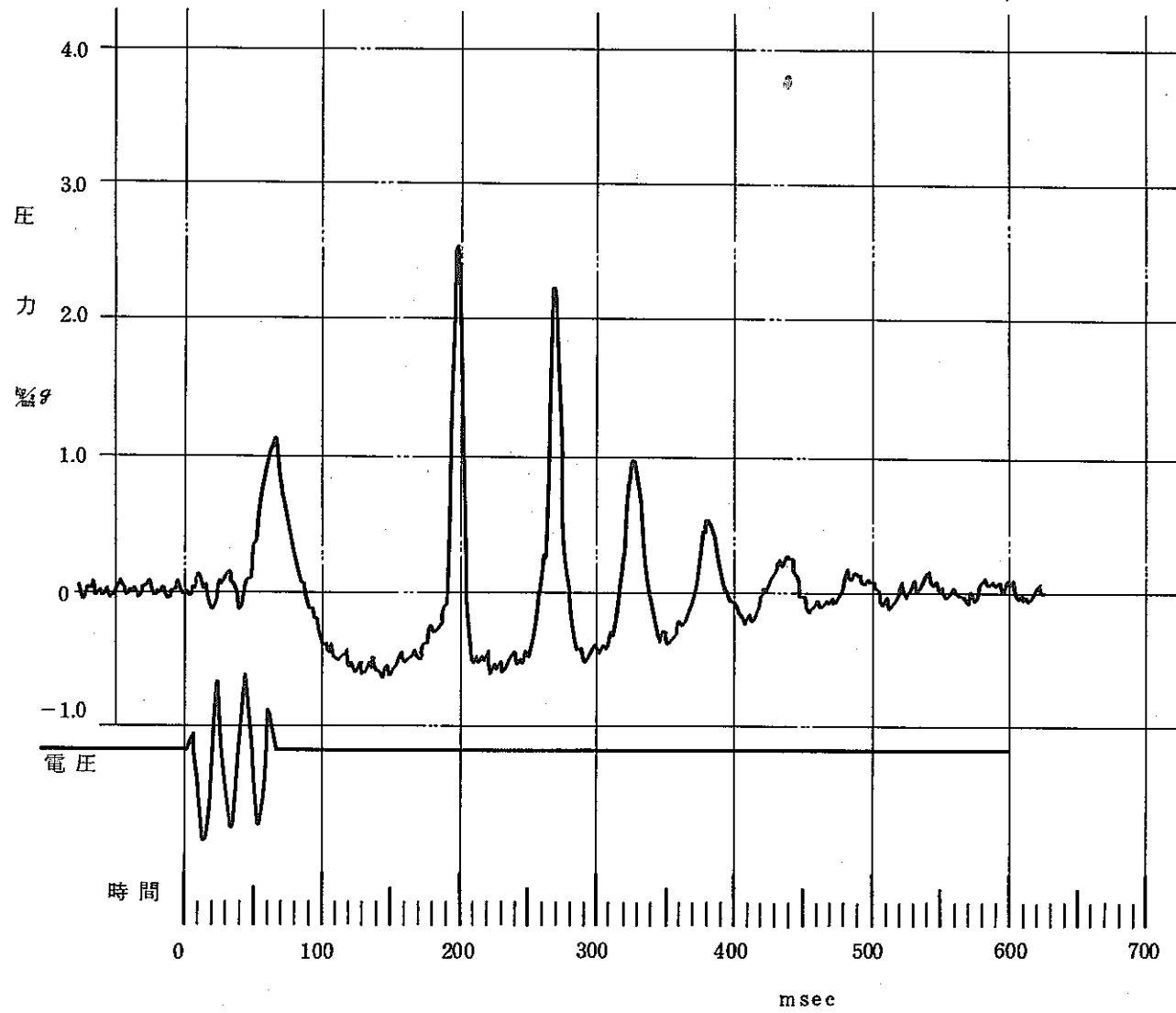


図 5.1 - 2 R-113 の圧力波 (その 2)

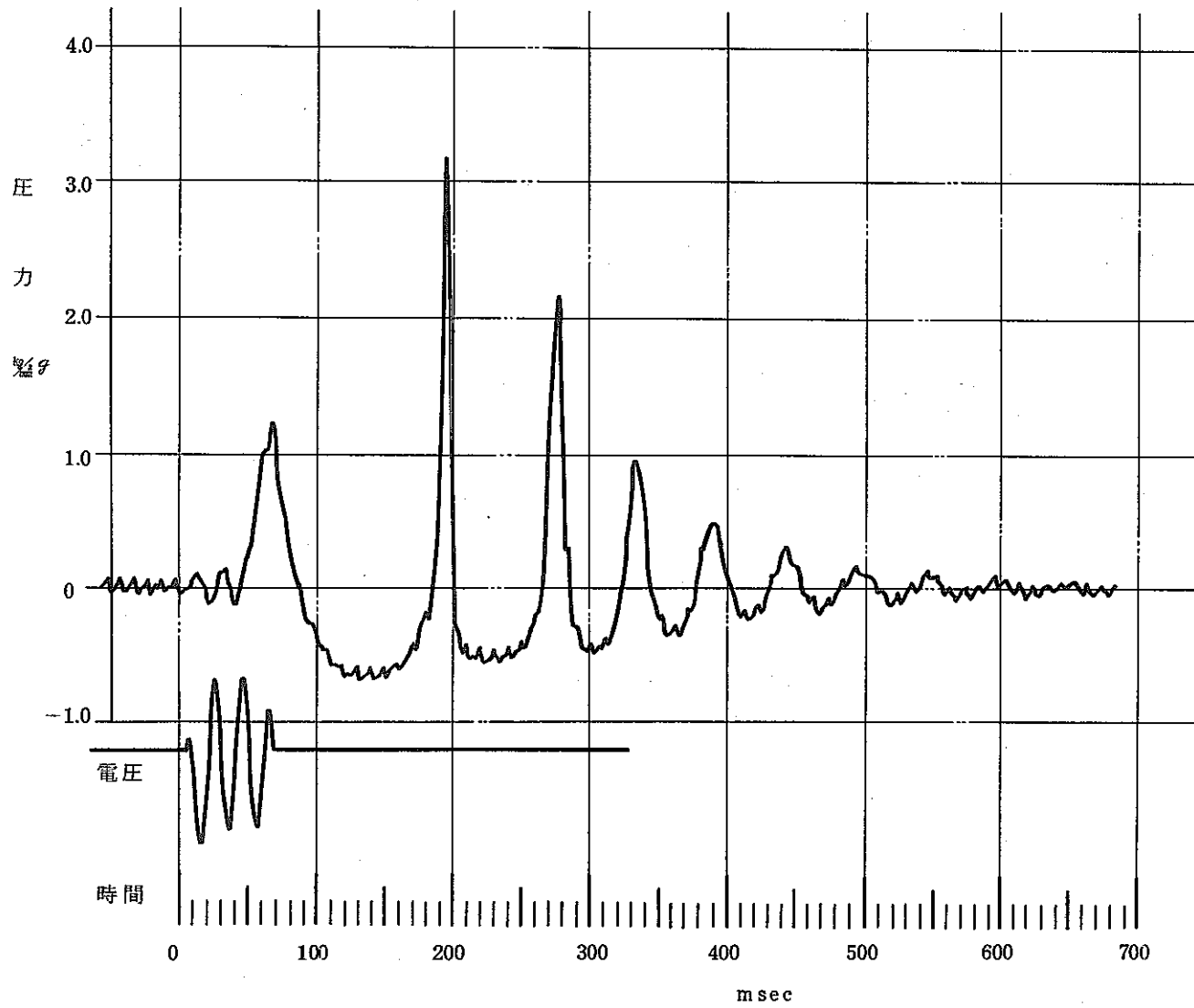


図 5.1-3 R-113 の圧力波 ( その 3 )

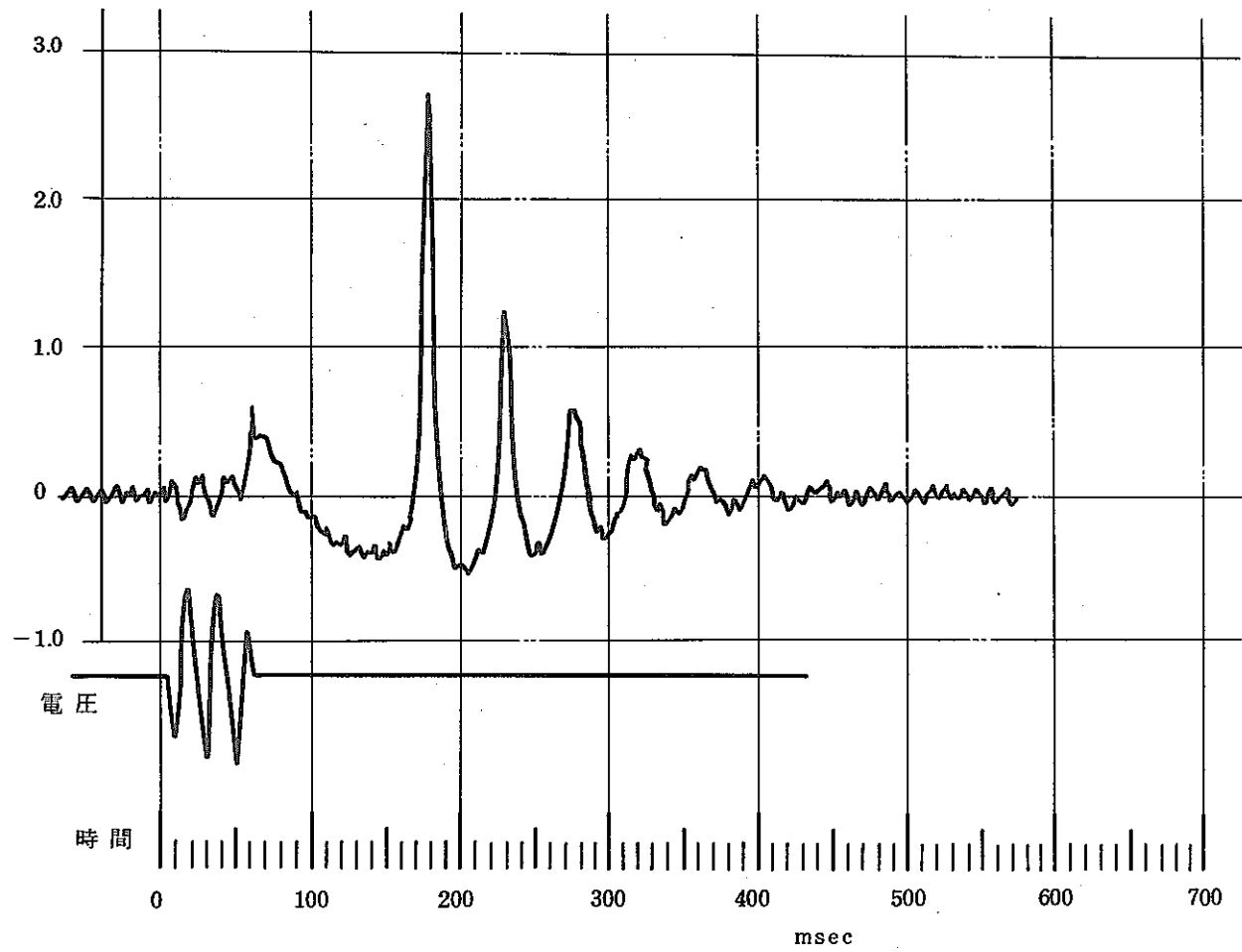


図 5.1 - 4 R-113 の圧力波 ( その 4 )

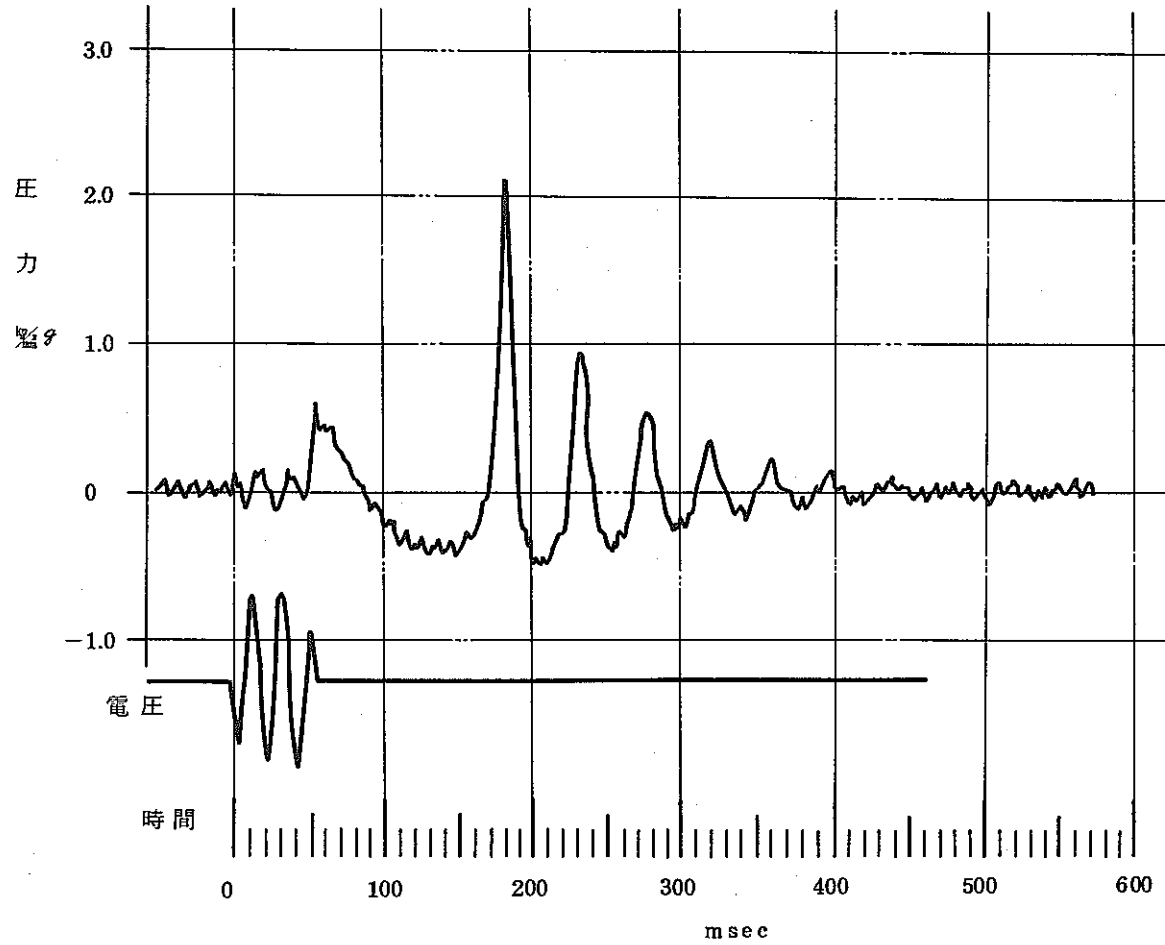


図 5.1 - 5 R-113 の圧力波 (その 5)



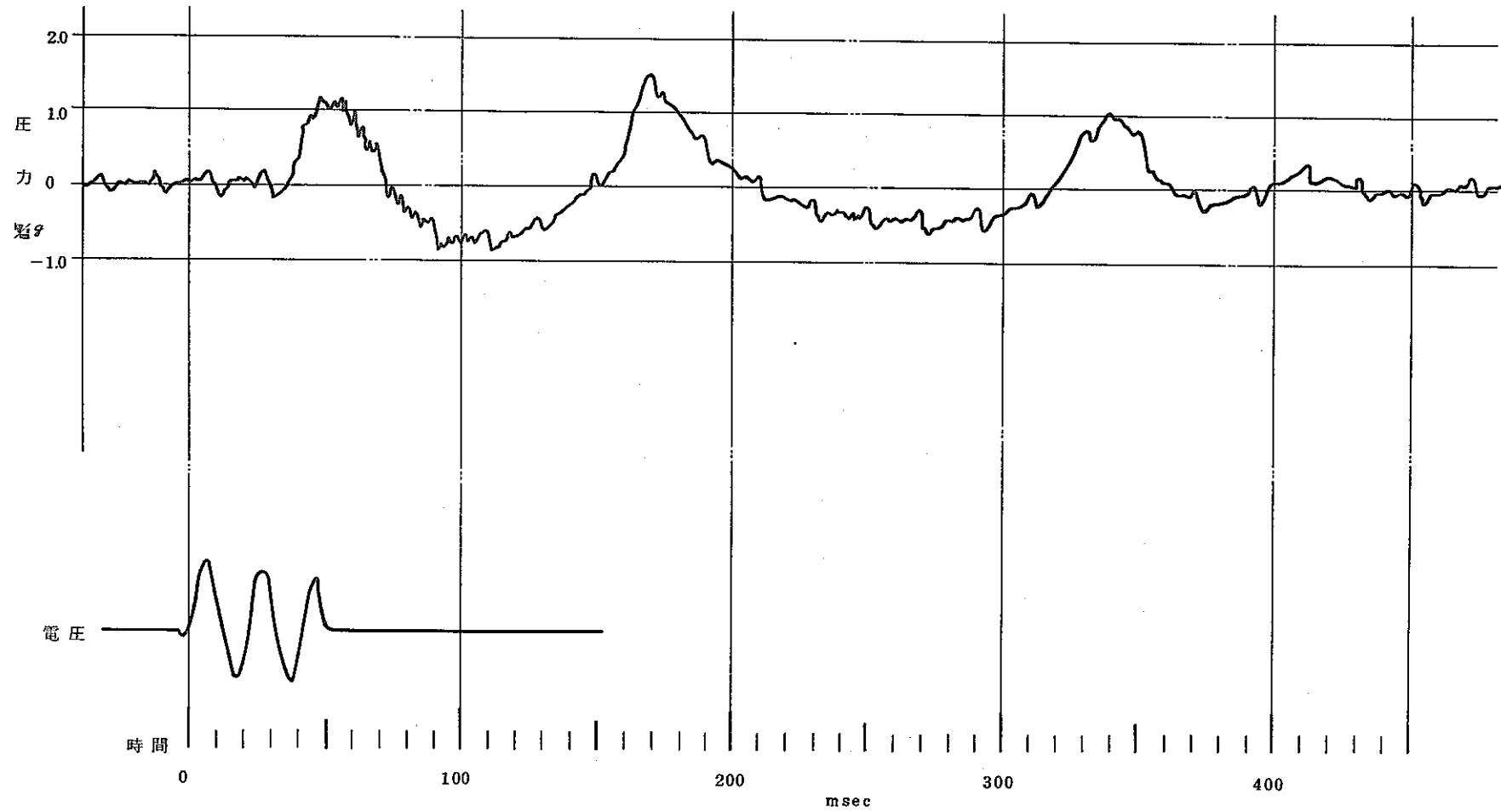


図 5.2-1 R-11 の圧力波 (その 1, ハンマー圧発生せず)

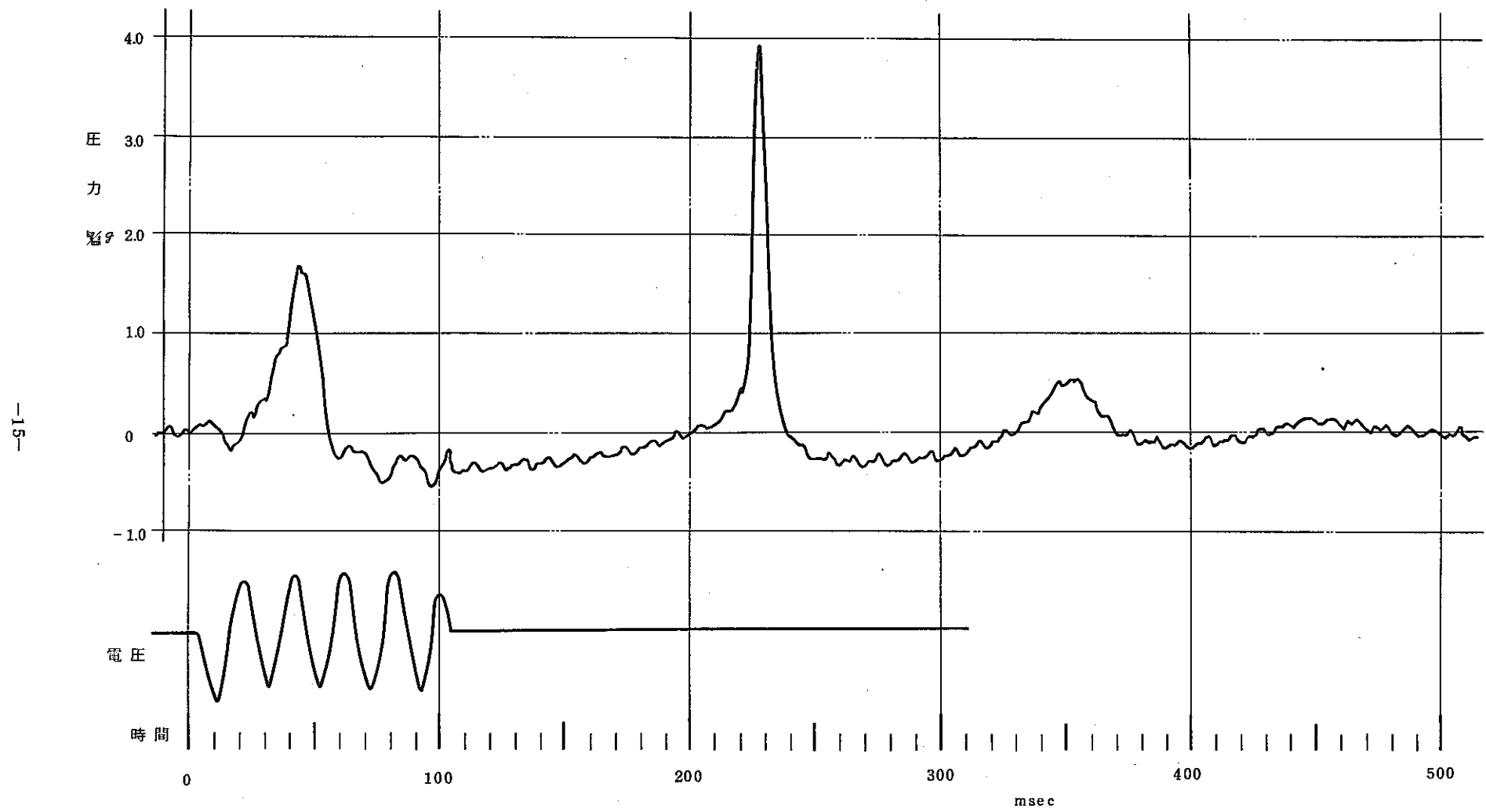


図 5.2-2 R-11 の圧力波 (その 2)

**この頁はPDF化されていません。**  
**内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理**  
**担当箇所を参照して下さい。**

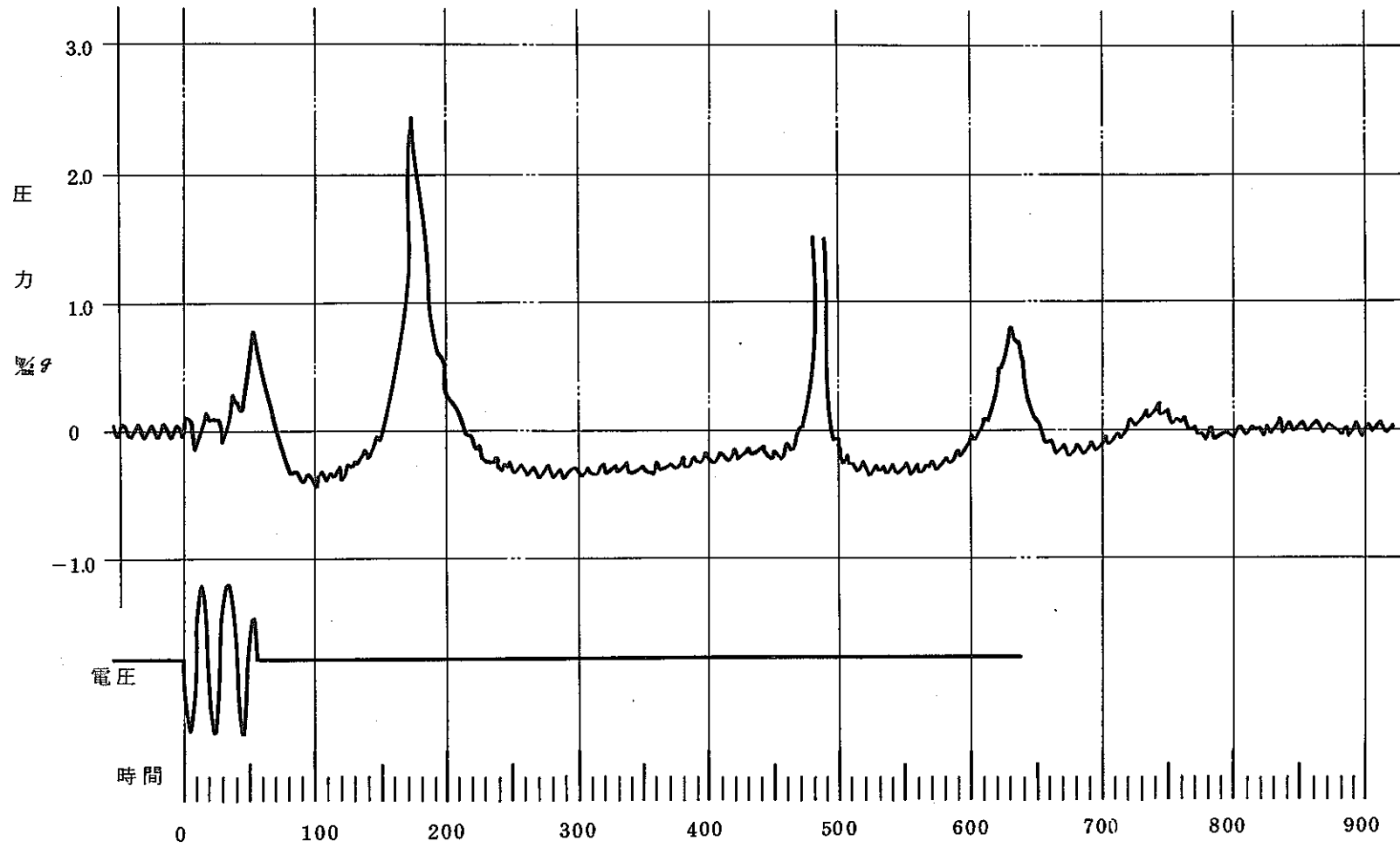
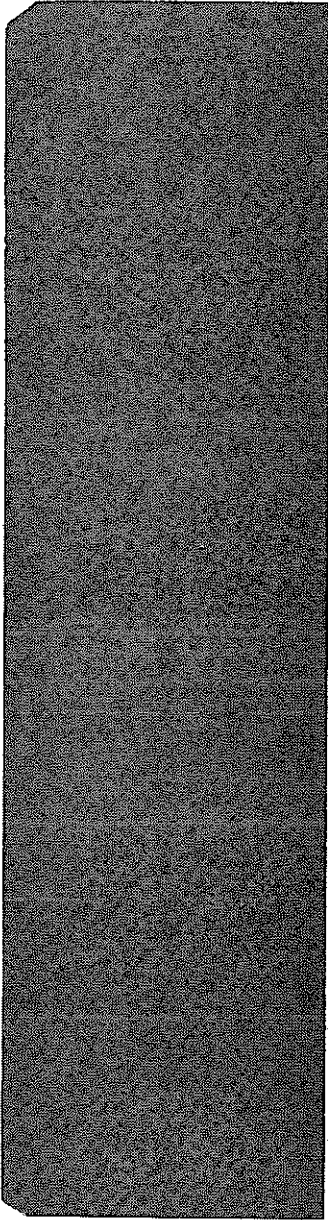
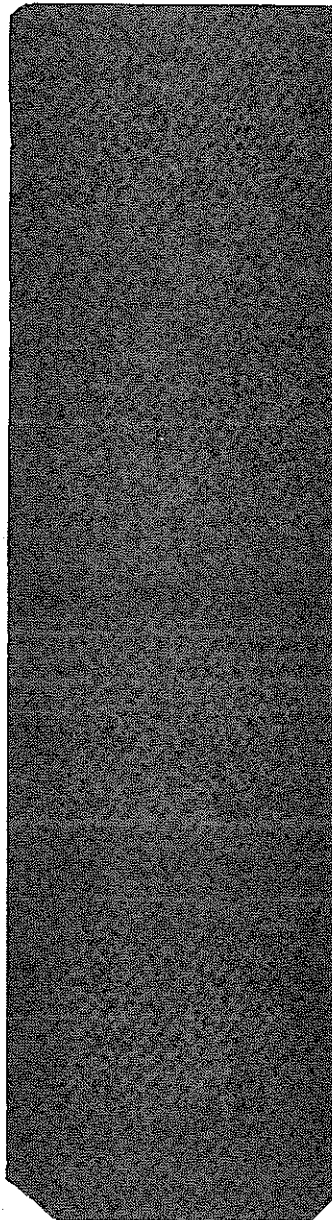


図 5.2 - 8 R - 11 の圧力波 ( その 8 )

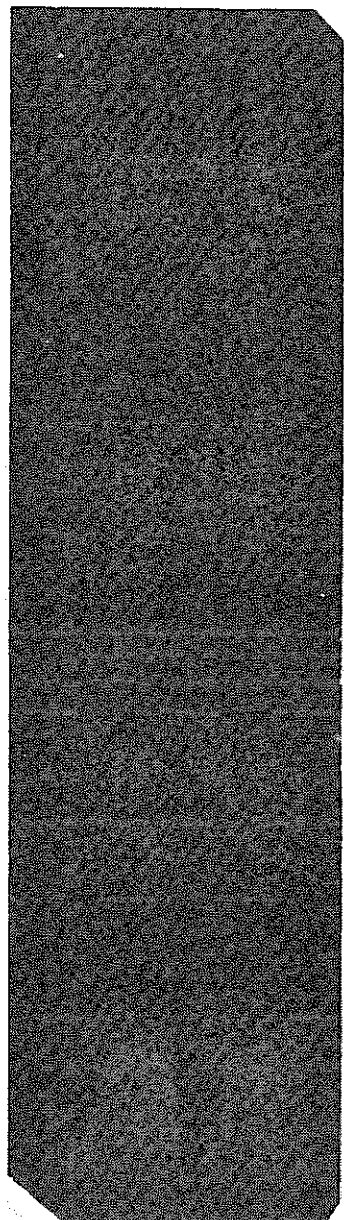
**この頁はPDF化されていません。**  
**内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理**  
**担当箇所を参照して下さい。**



イ

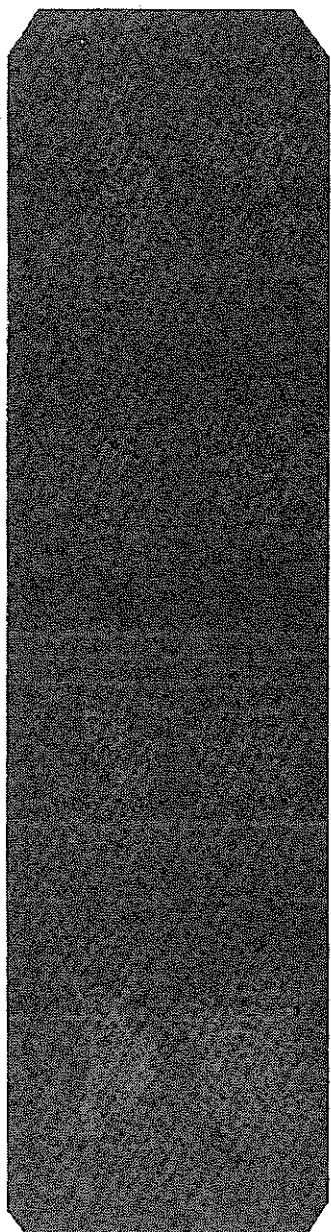


ロ

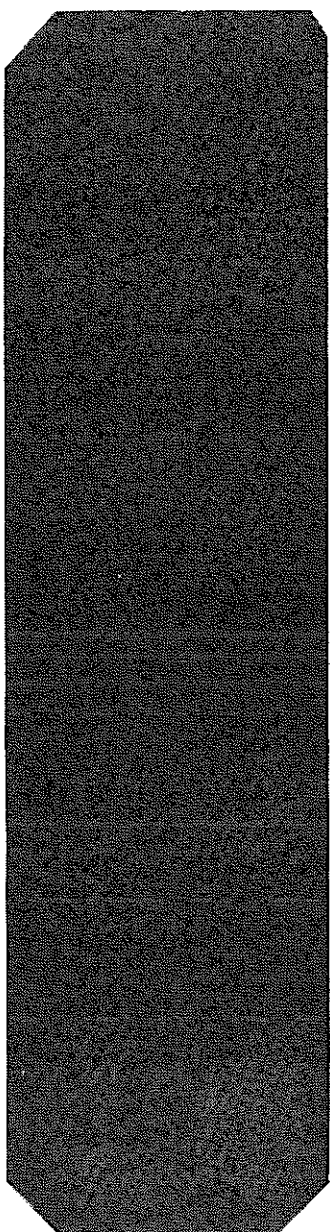


ハ

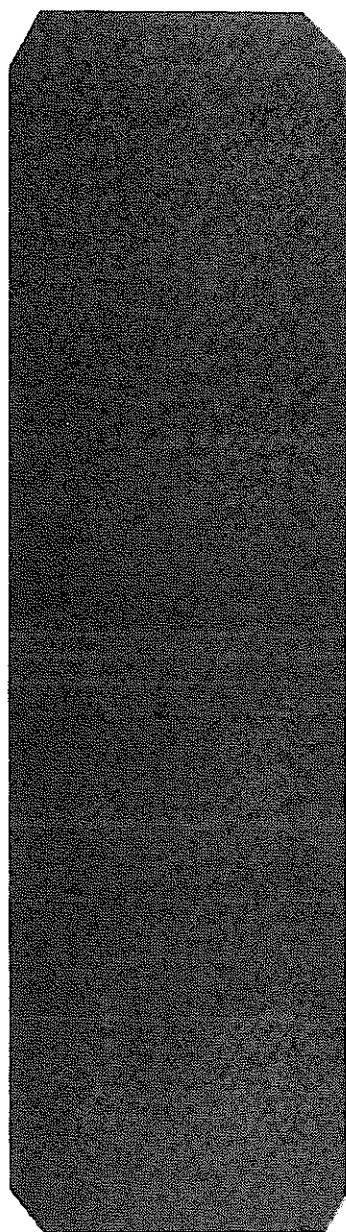
写真 1



二

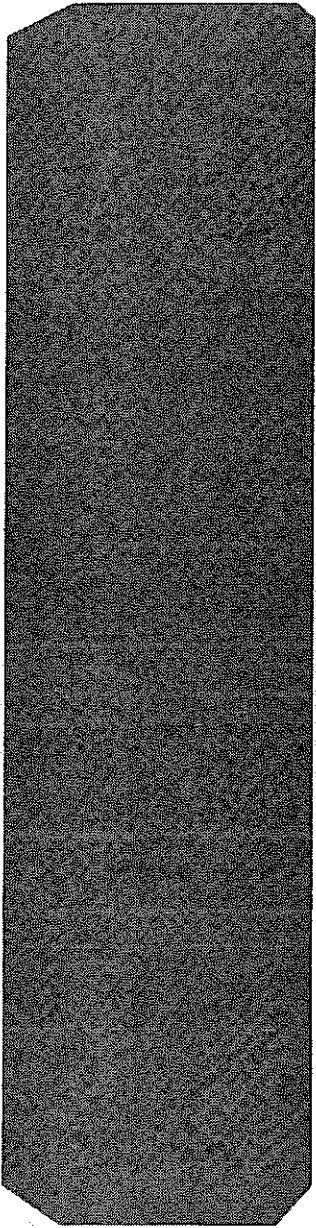


ホ

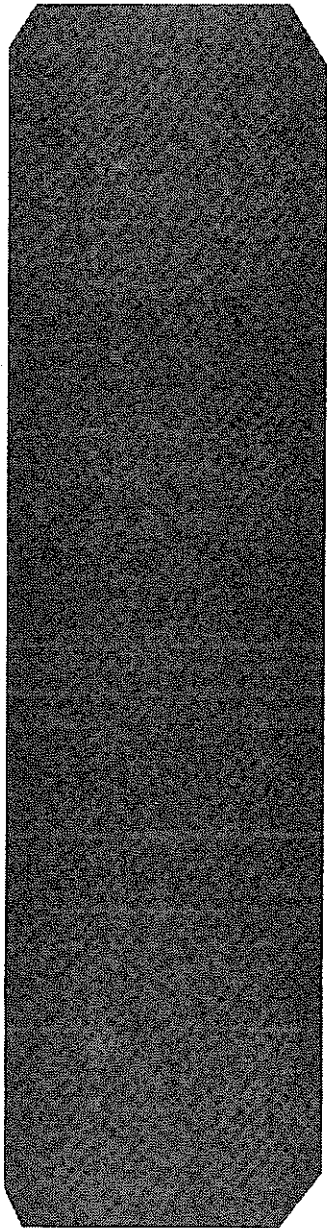


ハ

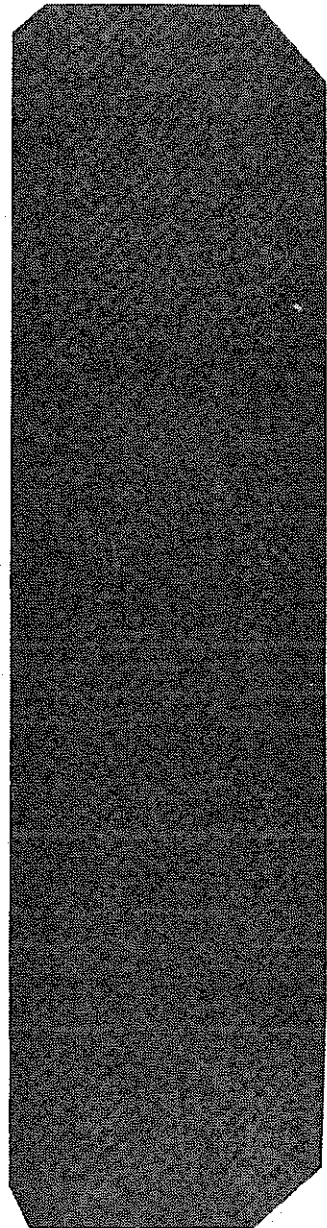
写真 2



ト



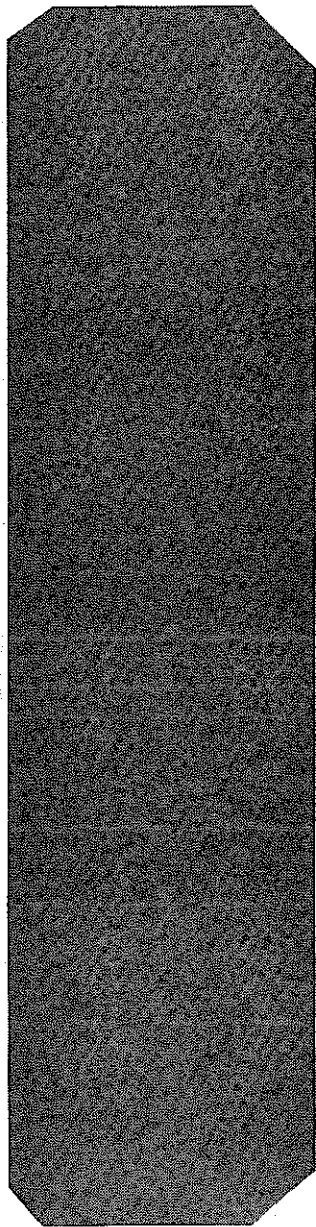
チ



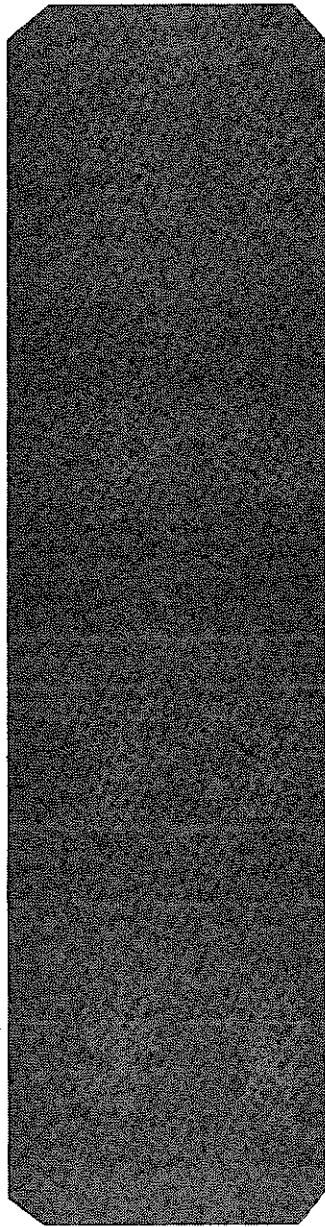
リ

写真 3

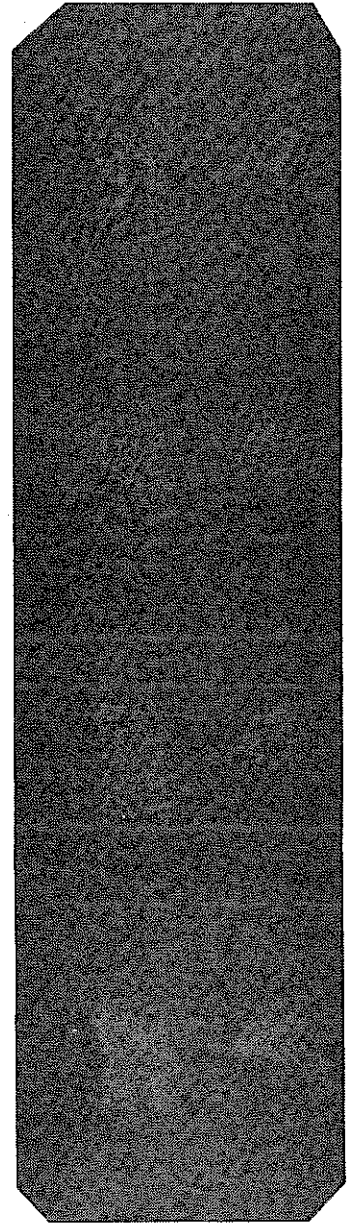




又

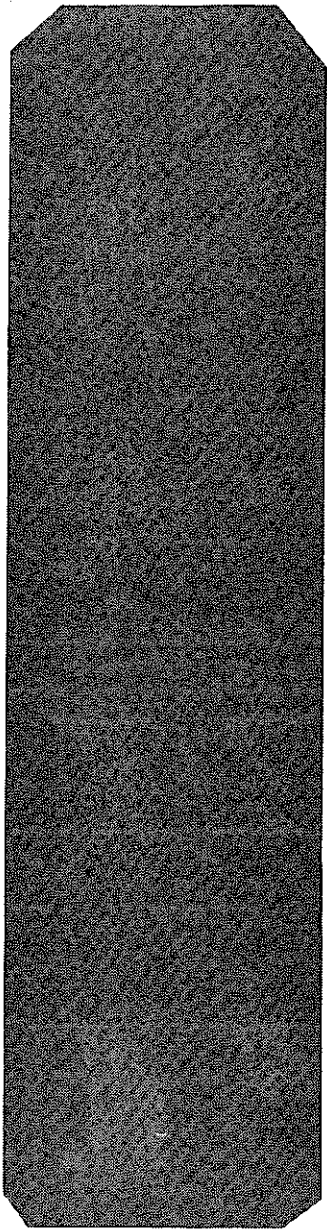


ル

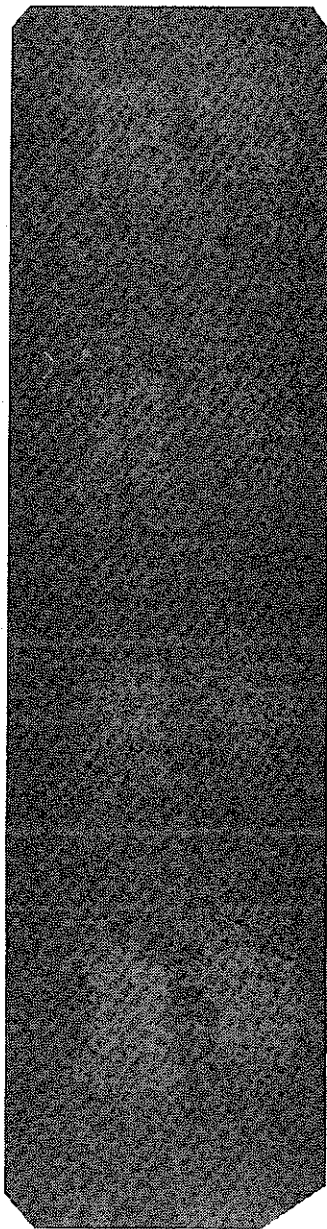


ヲ

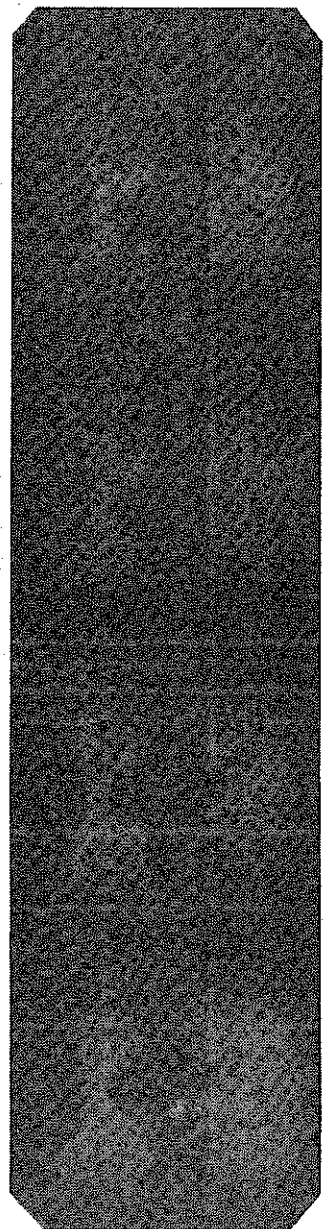
写真 4



ワ

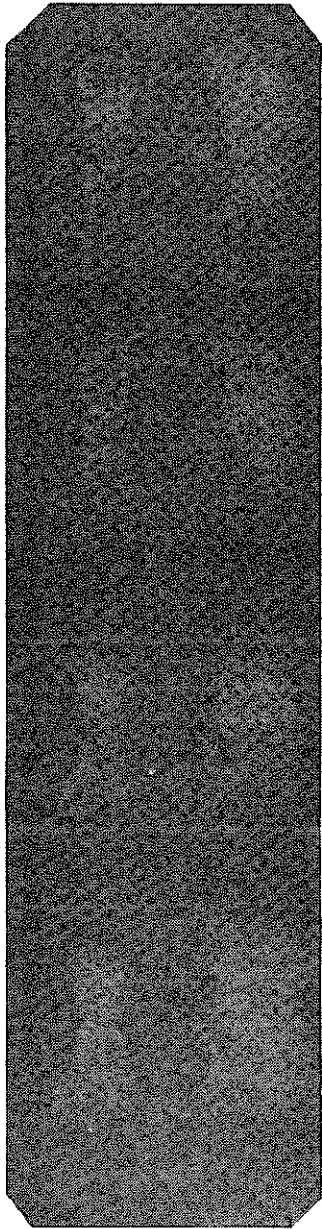


カ

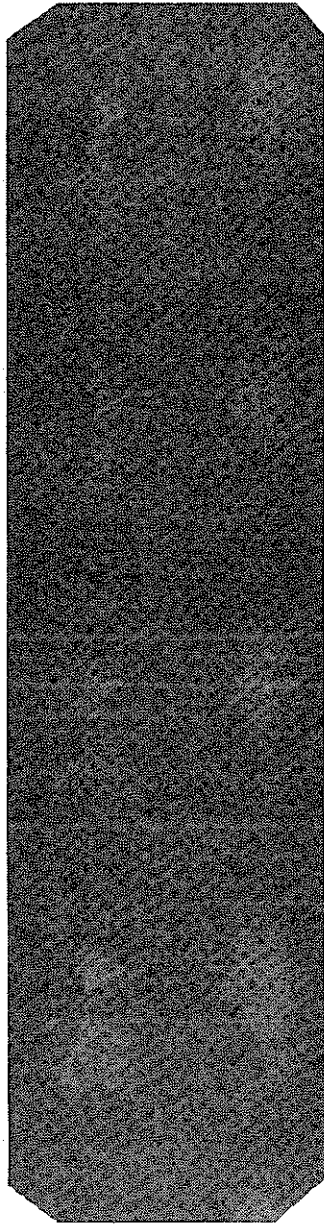


コ

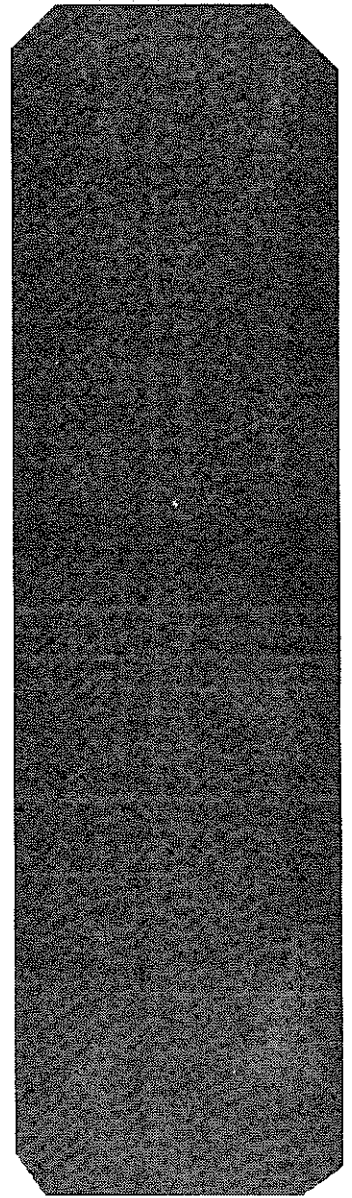
写真 5



タ

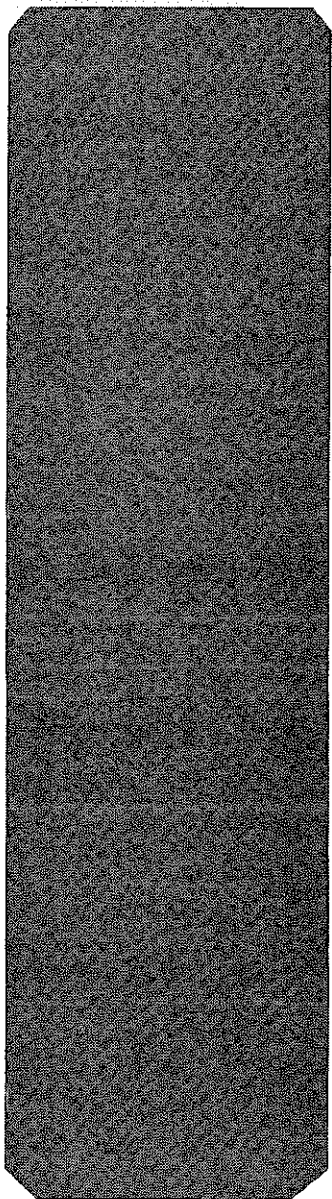


レ

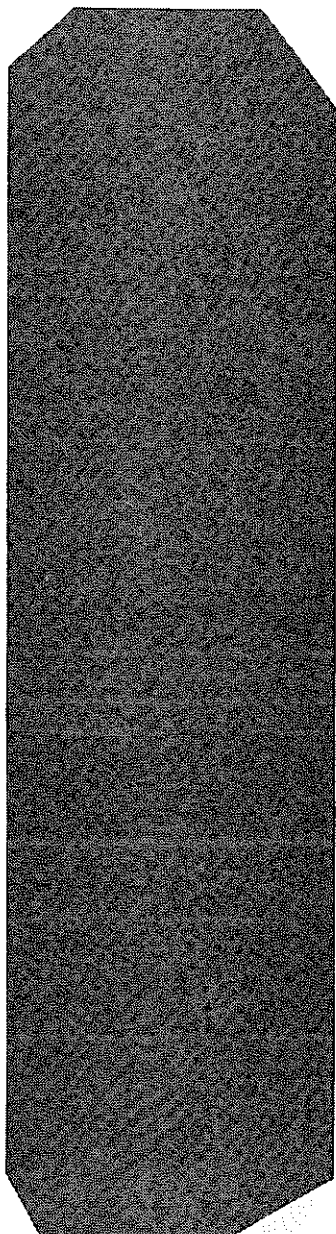


ソ

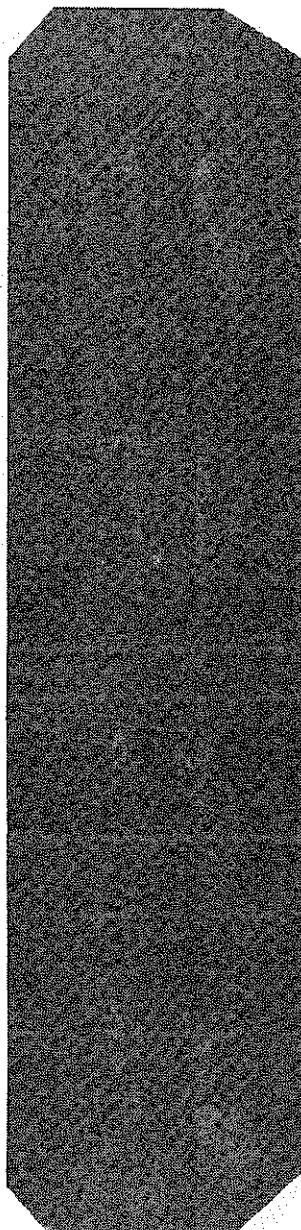
写真 6



ツ



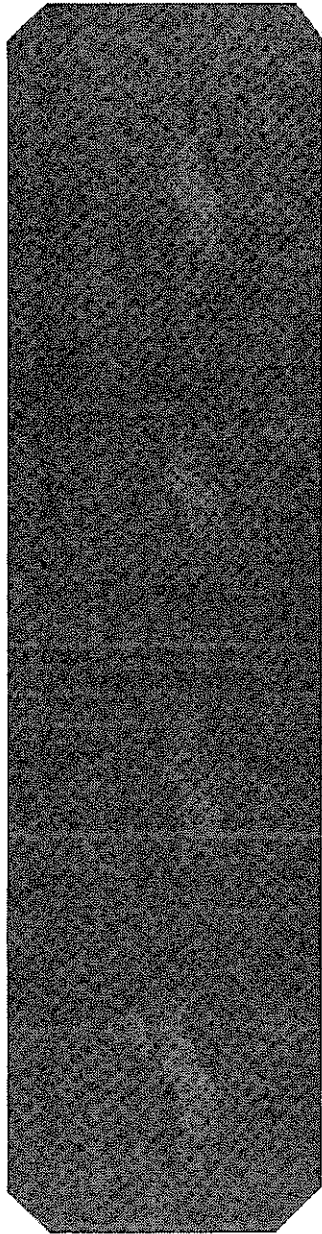
ネ



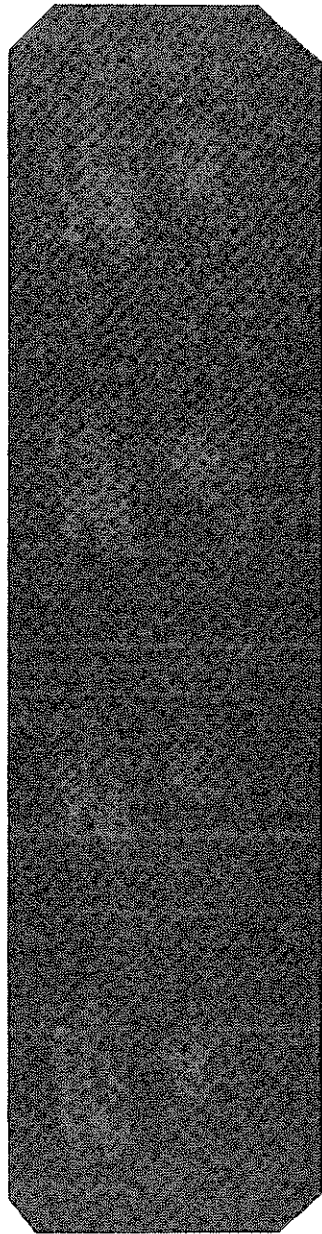
ナ

写真 7

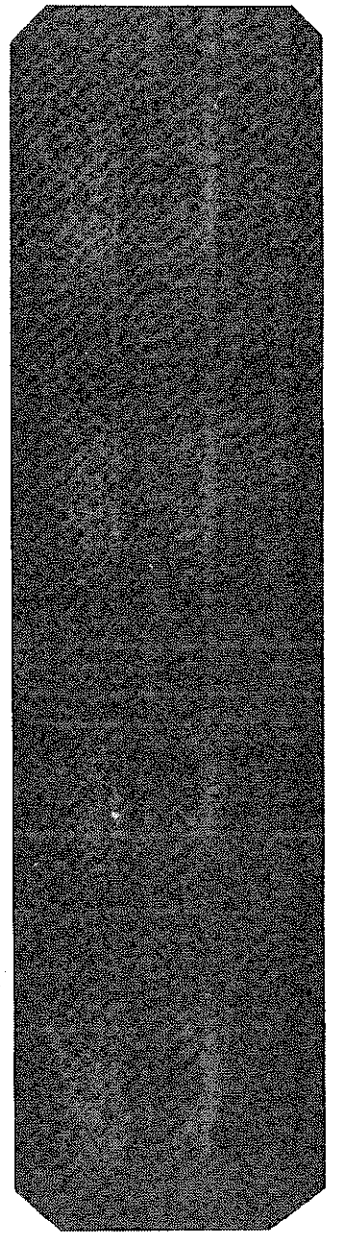




ラ

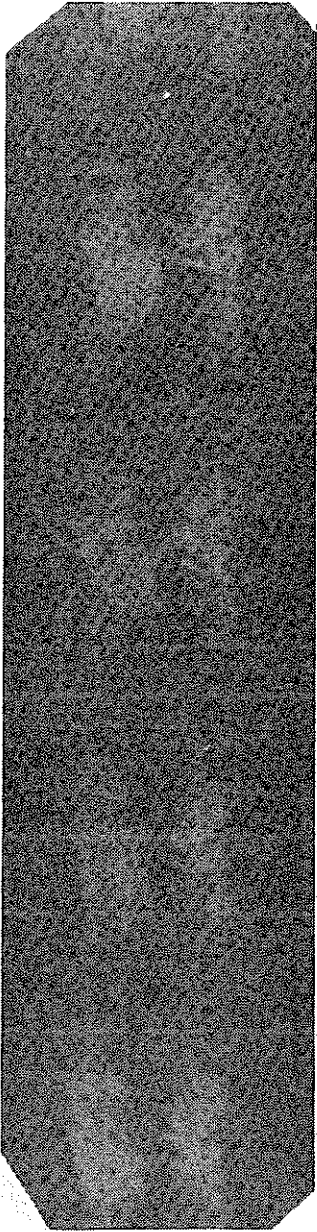


ム

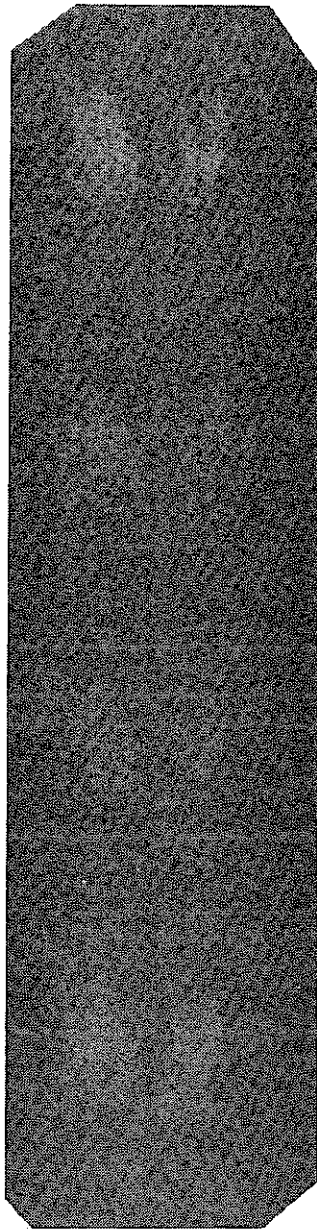


ウ

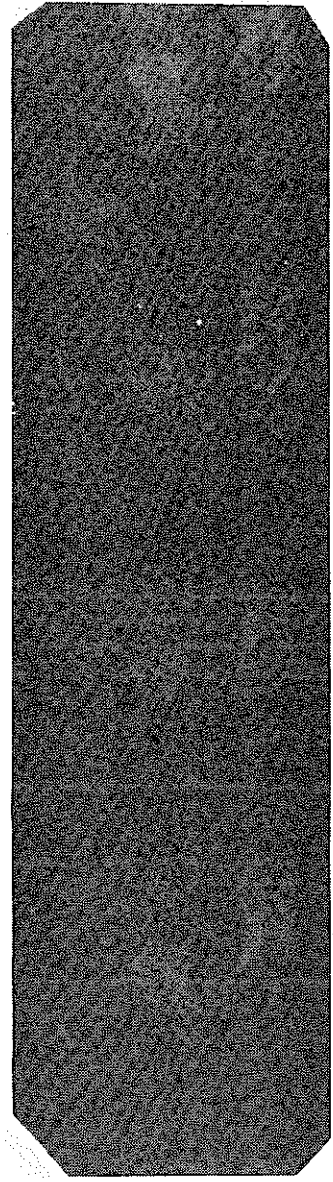
写真 8



辛

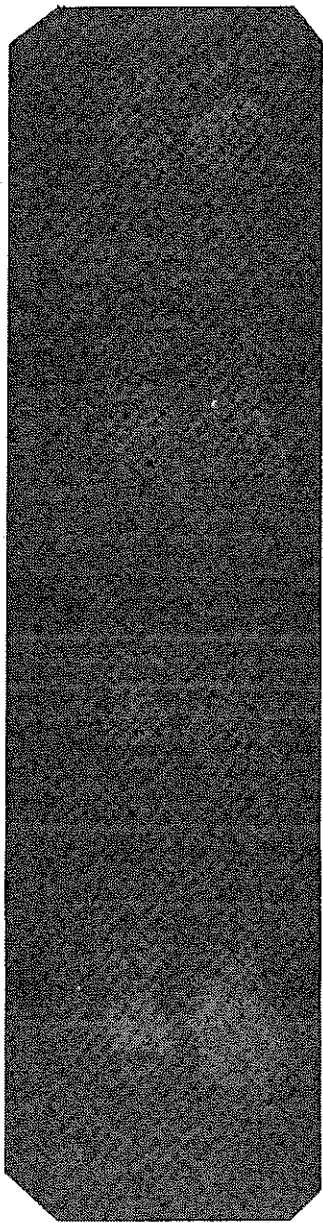


ノ

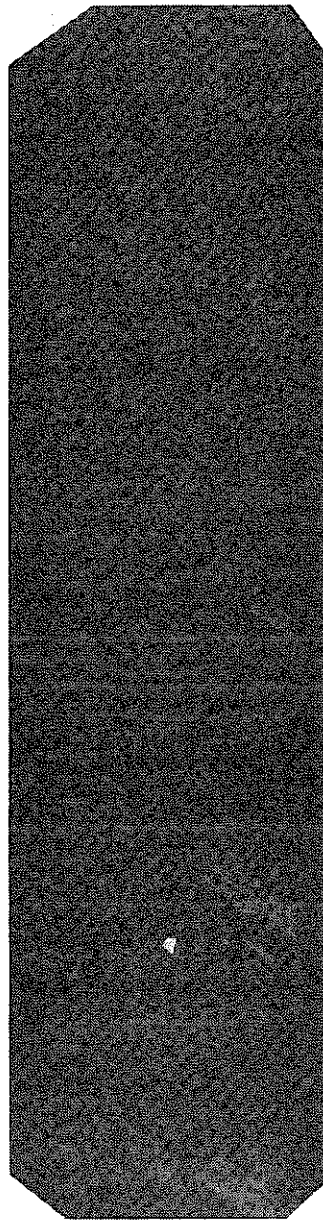


才

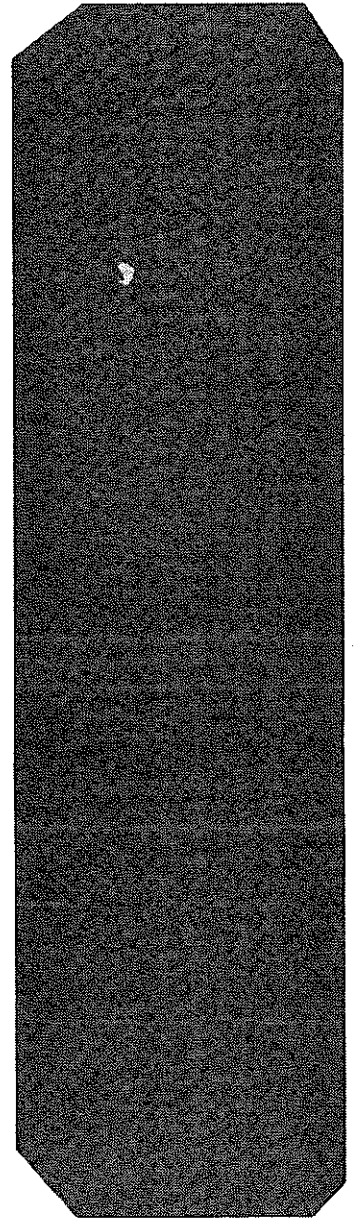
写真 9



ク

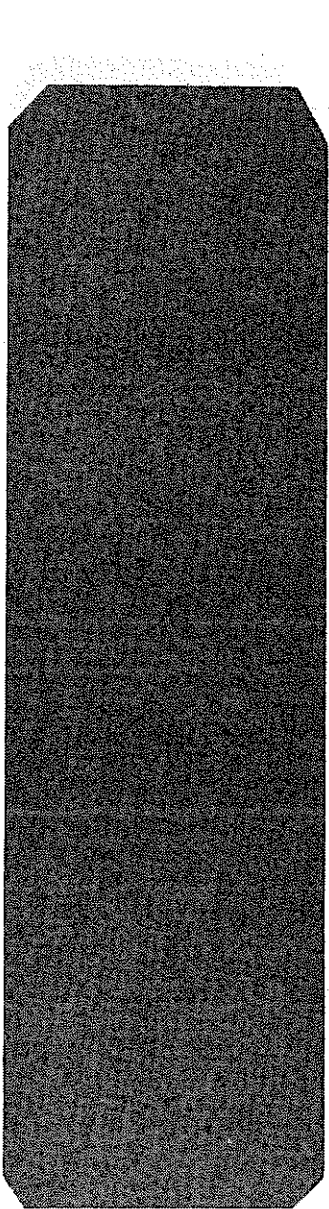


ヤ

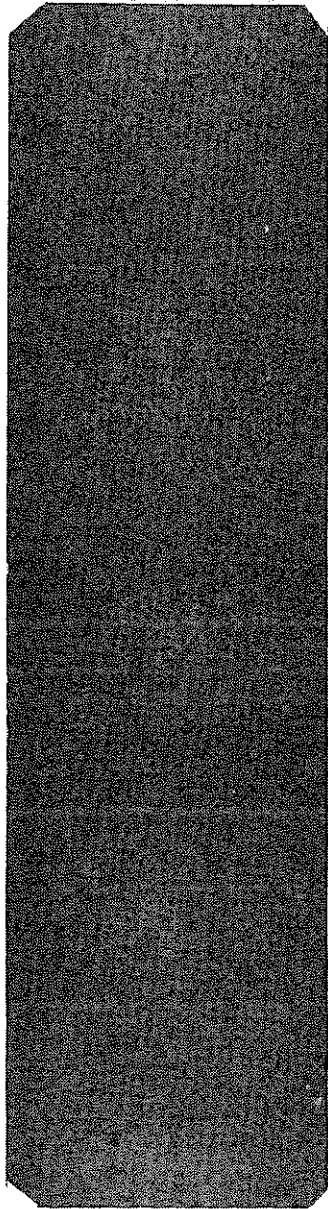


マ

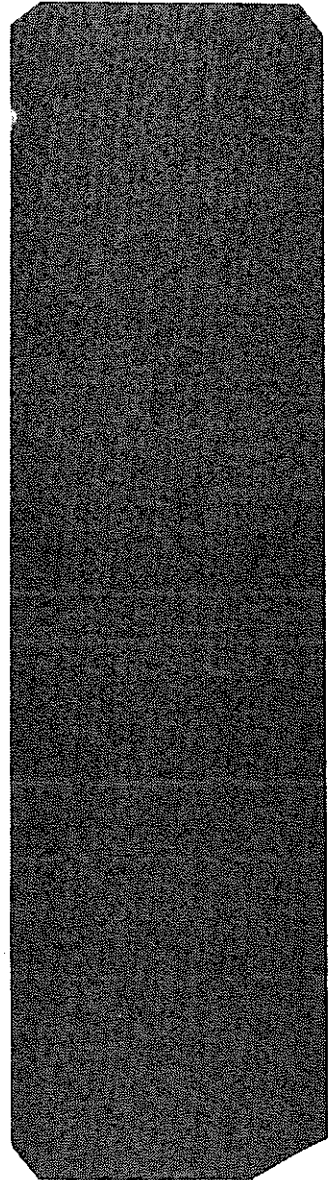
写真 10



ケ



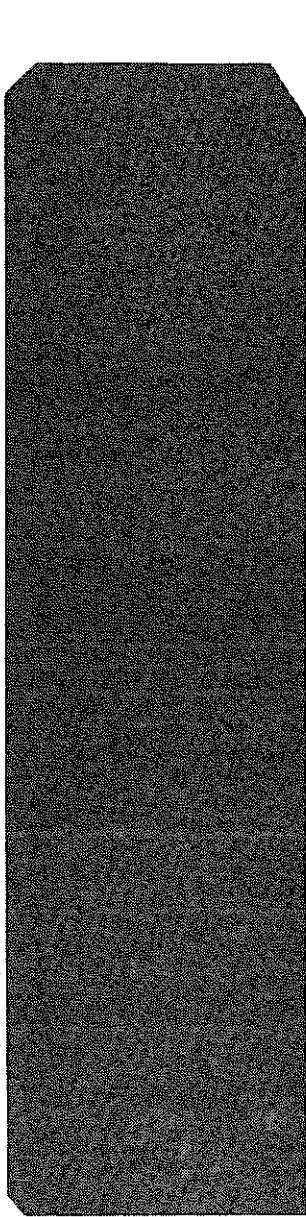
フ



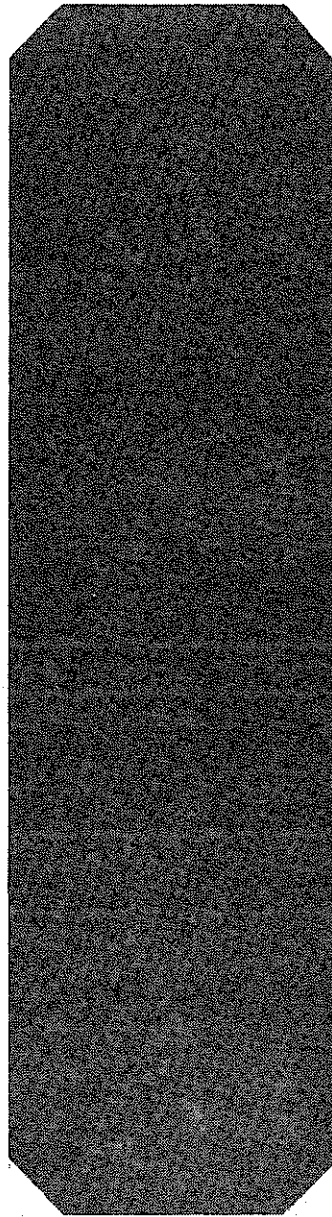
コ

写真 11

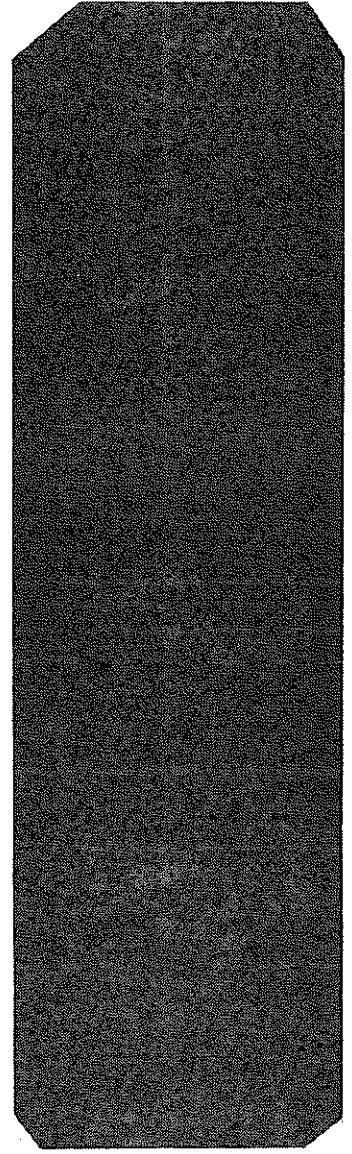




エ

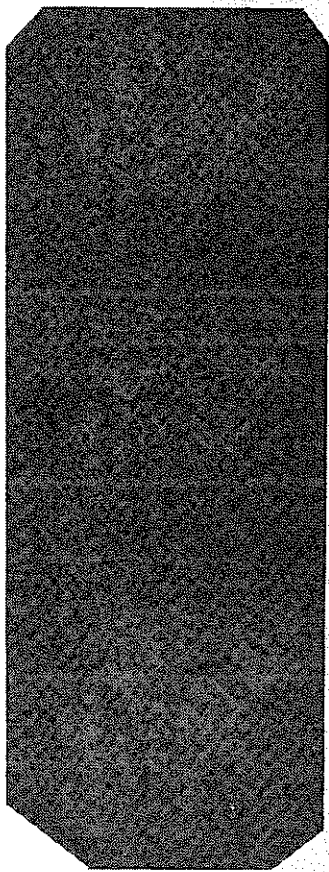


テ

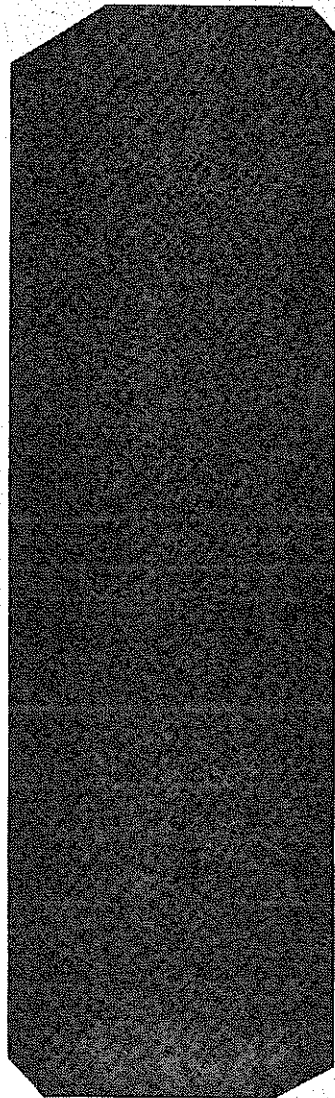


ア

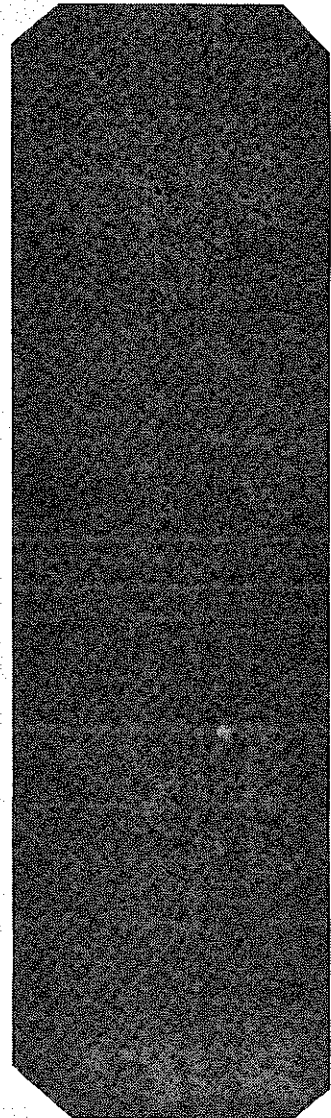
写真 12



サ

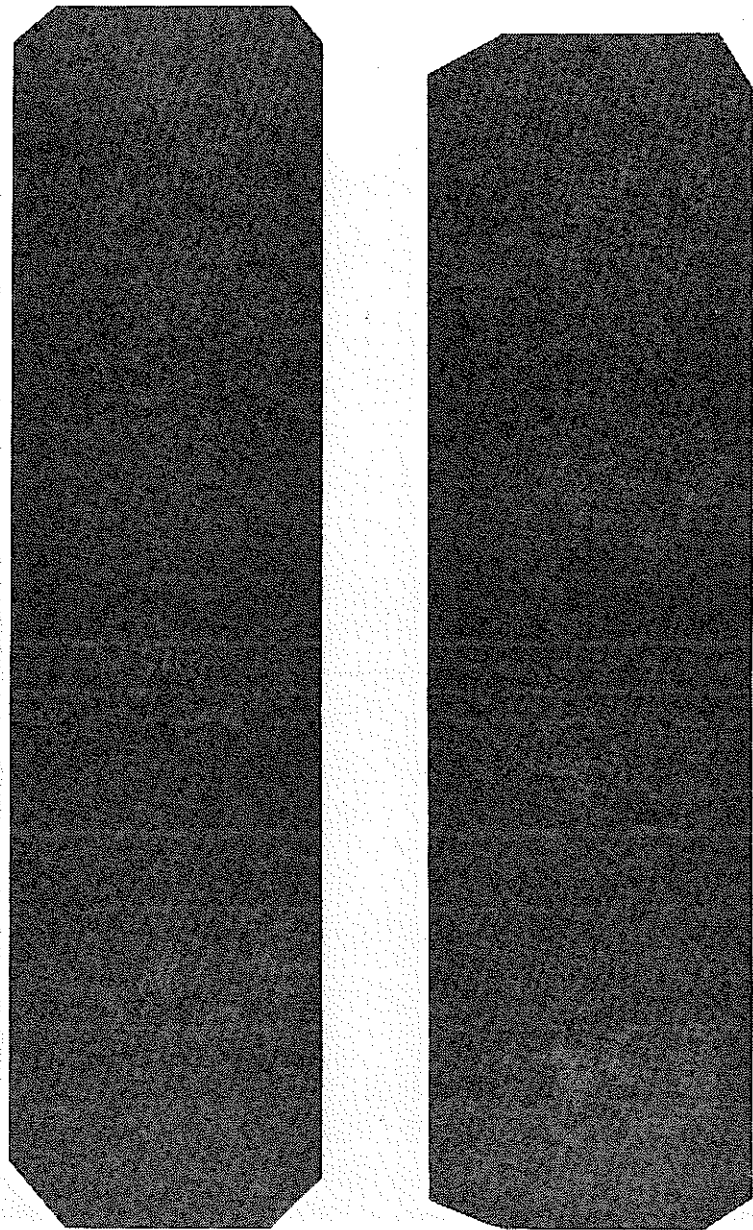


キ



ユ

写真 13



メ

ミ

写真 14

## 6. 考 察

R-11, R-113を用いた実験により, 下端が閉じ, 上端が開いたシステムで, 下部を急激に加熱した場合にあらわれる圧力波について調べることができた。すなわち加熱直後にあらわれる沸騰による圧力の山 ( phase B と呼ばれる ) 及び, しばらく続く真空の後にあらわれる水撃的圧力の連続である。

R-11とR-113の圧力特性の違いよりサブクーリングの影響がある程度わかる。R-113の場合, 第1の圧力の山 ( phase 13 ) の後真空が続き, 180 m sec以後, 規則的な水撃連続圧力パルスが発生する。一方, 沸点に近いR-11の場合, 第1の圧力の山の後, R-113と同様180 m sec近くで第2の圧力の山が生ずるが, この生成圧力による作用が大きいため200 m sec以上も真空が続き, 450 m sec近くで急な圧力パルスが発生するという経過をとる。

これら圧力の発生原因は, 第1の圧力の山 ( phase B ) がヒーター板表面の沸騰によるもので, この生成圧力により液柱が上部に押し上げられる。液柱は慣性を持っているので, しばらくすると逆にヒーター部は真空になり, ヒーター表面あるいは空間部は蒸気でおおわれるようになる。液柱は真空に引張られて, 下へ戻ってきてヒーター部の蒸気 (あるいは析出空気) を押しつぶすと共に圧力を上昇させる。この際, 蒸気や空気が多量に存在したり, ヒーター附近が柔かな構造になっていると衝撃力は弱められるので, 圧力の上昇は小さい。

このように圧力の特性は, 液体の状態 (サブクーリング, 溶存空気量) 及び構造材の特性 (構造の柔軟性), 加熱速度と方法などに依存することがわかる。

今後, 系統的な実験を行って, このようなシステムの圧力特性について定量的評価を行い, 各種テストにあらわれる圧力特性の評価に役立てる。なお, 本実験では数 m sec 内のいわゆる phase A の圧力については加熱速度, 圧力計, 記録装置の全ての理由から測定できなかった。問題点もある程度絞れたため, それらを改良して, 今後の研究課題としたい。

## 7. 結 び

圧力波の発生と伝播の研究のため, 下端が閉じ, 上端を大気開放した実験装置の下部を急激加熱することにより発生する圧力波について, R-11及びR-113を用いて実験的に調べた。

これにより, 数十 m sec 間発生する沸騰による圧力の山 ( phase B に相当 ), 及びその

後100 msecのオーダーで発生する水撃的圧力パルスについて、圧力記録及び高速度写真により明らかにすることができた。特にサブクーリングにより特性が異なること、またヒーター周辺部の構造の柔軟性が影響することなどが明らかとなった。

今後、定量的評価のため系統の実験を行うとともに、装置、記録計の改良により、phase Aの急激な圧力変化についても調べる予定である。