

JAERI-M

9840

反応度事故に伴う破壊エネルギー  
発生機構の研究

——炉外可視実験報告——

1981年12月

床井 博見\*・岩田 耕司・星 蔦雄

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

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1981

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

反応度事故に伴う破壊エネルギー発生機構の研究

——炉外可視実験報告——

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

床井 博見・岩田 耕司・星 蔦雄

(1981年11月19日受理)

反応度事故条件を模擬したNSRR炉での高発熱量実験や浸水燃料実験並びに加圧燃料実験において観測される衝撃的な圧力や水撃力等、いわゆる機械エネルギーの挙動やエネルギー評価法を検討するため、炉外での可視実験を実施した。実験では燃料破損を模擬するため、ラプチャディスクを用いてカプセル内に圧縮ガスを瞬時注入して、カプセル内の圧力挙動並びに水塊挙動を観測した。

炉外実験の結果、ラプチャディスクの破碎と同時にカプセル内には衝撃的な圧力が発生し、引き続き数ms周期の圧力パルスがみられた。カプセル内の水は圧縮ガスの注入と共に剛体のように水塊となって飛び上り、その後注入されたガスと上部カバーガスとの間でピストン状に20~50msの周期で上下振動を繰り返した。この水塊の振動に同期してカプセル内の圧力にも振動がみられた。前者の衝撃的な圧力と短周期の圧力パルスは炉内実験で観測された前期圧力群に対応し、燃料破損に伴う衝撃圧の発生によること、また後者の長周期の圧力振動は炉内実験で観測された後期圧力群に対応し、これは燃料内から放出されたガスや燃料と冷却水との相互作用で発生した蒸気のため、水塊がピストン運動することによって生じることが明らかとなった。

機械エネルギーは水塊の飛び上りに追従する水位計の信号と後期圧力群の振動周期から得られる飛び上り水塊質量をもとに、ピストンモデルに従い水塊の運動エネルギーと、カバーガスのエンタルピー増加の和として評価できる。本研究ではスプリングの歪エネルギーから機械エネルギーを評価する方法も検討し、双方良い一致をみた。

A Study on Mechanical Energy Generation Mechanism  
under Reactivity Initiated Accident Conditions

—Out-of-pile Visualization Experiments—

Hiromi TOKOI<sup>\*</sup>, Koji IWATA and Tsutao HOSHI

Division of Reactor Safety,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 19, 1981)

The transient behavior and evaluation methods of mechanical energy generated in RIA (Reactivity Initiated Accident) simulation tests in the NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) experiment have been investigated in the out-of-pile visualization tests using a transparent acrylic capsule. In the tests, to simulate gas and steam bubble formation at fuel failure compressed gas was injected rapidly into water in the capsule by breaking a rupture disc. The transient behavior of water column was filmed by a high speed camera.

A sharp pressure pulse followed by pressure pulses with a period of a few ms was measured in the capsule water when the rupture disc was burst. After the burst, the water column in the capsule moved upward as a piston and then oscillated with a period of 20 ~ 50ms. It has become clear that the pressure pulses with an oscillation period of 20 ~ 50ms are caused by the movement of water column.

It was verified that the mechanical energy is evaluated by calculating the kinetic energy of the water column and the enthalpy increase of the cover gas from the measurements of the water column level and velocity. The validity of this evaluation method was proved by an elastic strain energy measurement utilizing spring compression.

Keywords: RIA, Fuel Failure,  
Destructive Energy, Mechanical Energy,  
Pressure Generation, Fuel Coolant Interaction, Steam Explosion,  
Visualization

---

\*) On leave from Hitachi Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. NSRR炉内実験でのカプセル内挙動 .....	2
3. 炉外可視実験 .....	6
3.1 実験方法と装置 .....	7
3.2 実験条件 .....	7
3.3 実験結果および考察 .....	7
3.3.1 高速度カメラによる観測結果 .....	7
3.3.2 計測信号との対応 .....	7
3.3.3 注入流量と初期圧力の影響 .....	7
3.3.4 ラプチャディスク肉厚の影響 .....	10
3.3.5 水位の影響 .....	11
3.3.6 カバーガス圧の影響 .....	11
3.3.7 スプリングによる拘束の影響 .....	11
3.3.8 カプセル形状の影響 .....	12
3.3.9 炉外可視実験のまとめ .....	12
4. 機械エネルギー評価 .....	37
4.1 機械エネルギー評価方法 .....	37
4.2 水塊速度の測定による機械エネルギー評価 .....	37
4.3 スプリングによる機械エネルギー評価 .....	39
4.4 機械エネルギー評価法のまとめ .....	39
5. 結 言 .....	44
謝 辞 .....	44
参考文献 .....	45
付録A NSRR炉の概要 .....	46



## 1. 緒 言

反応度事故において、事故の程度が極めて厳しい場合に発生する機械エネルギー、いわゆる破壊エネルギーは、SL-1炉の事故<sup>1)</sup>にみられるように場合によっては原子炉の破壊につながる大きなエネルギーとなる。従って機械エネルギーの評価は原子炉安全性研究において重要な課題の一つである。これまで機械エネルギーの発生挙動を解明するため、SPERT<sup>2)</sup>-1やSNAPTAN-2<sup>3)</sup>, 3<sup>4)</sup>において原子炉破壊実験が実施され、大きな反応度(3.5~3.75)が印加されると炉心が破壊し機械エネルギーへの転換率は3.5~4%にも達することが明らかになった。また、これらの実験で機械エネルギーが発生する場合には必ず燃料の破損を伴う事が明らかになり、原子炉の破壊は暴走出力によって急激に加熱された燃料の破壊と密接な関係があることが実証された。これら一連の実験から、原子炉の破壊現象の解明には原子炉を実際に破壊して実証する必然性は必ずしもなく、反応度事故時の出力挙動をパルス炉を用いて模擬し、試験燃料の破壊実験を実施すればよいことが示唆された。この試みを最初に実施したのは米国のSPERT-CDC実験<sup>5)</sup>であり、ここでは燃料の破損挙動の解明のための実験や機械エネルギーの発生挙動の研究が行なわれた。

しかし、これらの研究にもかかわらず、燃料破損に伴う機械エネルギー発生機構や挙動並びに機械エネルギー転換率についてはまだ十分が解明がなされておらず、現在反応度事故に関する重要な研究課題の一つとなっている。

このような背景からNSRRでは燃料破損挙動の解明を行なうとともに、機械エネルギーの発生機構と挙動並びに機械エネルギー転換率を解明するため、パルス炉による燃料照射実験を進めてきた。<sup>6),7)</sup> これまで高発熱量実験や浸水燃料実験並びに加圧燃料実験において、実験カプセル内に衝撃的な圧力や水撃力等の機械エネルギーの発生が認められ、特に高発熱量実験<sup>7)</sup>と浸水燃料実験<sup>8)</sup>の場合には燃料が微粒子状になって破損し、冷却水中に放出されているのが観測されている。機械エネルギーの発生は冷却水中に放出された燃料と水との相互作用や燃料破損に伴う内圧の解放により発生すると考えられ、これまでカプセル内圧や水塊の飛び上り速度等の計測により機械エネルギーの評価を進めてきた。しかし実験において計測された信号は複雑であり、これらの信号から単純にカプセル内の水塊の挙動や圧力挙動さらに発生した機械エネルギーの定量化を計ることは困難であった。例えば機械エネルギーを評価するにあたって必要となるカプセル内の水の運動についてみれば、燃料破損時に燃料上部の水が剛体のように水塊となって吹き上げられるのかどうか、また仮に吹き上げられたとして、その水塊の質量をどう評価すればよいのかといった疑問はこれまでのSPERT実験においても大きな課題であり、その取扱いは仮定の域を出なかった。またカプセル内の圧力挙動についても燃料破損直後に発生する衝撃的な圧力に引き続く1ms以下の短周期の圧力群並びにその後の20~30ms周期で生じる圧力振動の発生原因が解明されていない。

そこでこれらカプセル内の挙動を明らかにし、機械エネルギーの評価法を検討するため、炉外での可視実験を実施した。<sup>9)10)</sup> 可視実験ではラプチャディスクを用いて、圧縮ガスを透明カ

プセル内に瞬時注入し、カプセル内の水塊挙動を高速度カメラで観測した。

## 2. NSRR炉内実験でのカプセル内挙動

これまでNSRR炉で観測された機械エネルギーの発生を伴う燃料破損実験の一例として、加圧燃料実験および浸水燃料実験の結果を示す。実験に使用した照射カプセルと実験計装をFig. 1に、供試燃料をFig. 2に、またNSRR炉の形状および特性についてはその概略を付録Aに示した。なお詳細な実験装置や実験方法については参考文献6を参照されたい。Fig. 3は加圧燃料実験における過渡記録の代表的な結果である。本実験は内圧を3 MPaに加圧した燃料を常温常圧雰囲気標準水カプセル内に装填し、反応度3.23ドルでパルス照射したものである。この時の試験燃料の発熱量は $280 \text{ cal/gUO}_2$ であった。過渡記録に示されるように被覆管表面温度はパルス照射に引き続き急速に上昇し、カプセル底部に設けられた圧力計ではパルス照射から80ms後に衝撃的な水圧が観測された。この衝撃的な圧力とほぼ時を同じくして浮子の上昇、すなわち水面の上昇が観測された。これらの結果は衝撃的な圧力が発生した時点で燃料の破損が生じ、機械エネルギーの発生が起ったことを示している。その後の水面の動きおよびカプセル内の水圧の挙動をみると、浮子が最高位置に達する頃水圧は一旦低下し、さらに浮子の下降に伴ないカプセル内の水圧の上昇が観測されている。それ以後の浮子の信号は小さく水面の挙動は定かではないが、カプセルの水圧はほぼ30msの周期で5~6回振動している。

Fig. 3でカプセル底部に衝撃的な圧力の発生した時点を拡大してみると、第1の衝撃的な圧力の発生に引き続いて、ほぼ1msの短周期で繰返し圧力ピークが発生し、漸次減衰しているのが認められる。

一方、Fig. 4は浸水燃料実験における過渡記録の例である。試験燃料の浸水量は30%であり、発熱量は $150 \text{ cal/gUO}_2$ である。この実験でも加圧燃料実験と同様に燃料破損と同時に生じる第1の衝撃的な圧力の発生とそれに引き続くほぼ1msの短周期の圧力パルスと、20~30msの長周期の圧力振動とが観測されている。この実験ではカプセル胴部に取り付けた歪計の信号が明確に測定されている。歪信号とカプセル底部の水圧との相関をみると、破損と同時に生じる第1の衝撃的な圧力および周期20~30msの圧力信号とカプセル胴の相関は強いが、第一の衝撃的な圧力に引き続いて生じる短周期のパルスの圧力との対応は認め難い。このことから燃料破損の直後に生じている短周期の圧力振動と、20~30ms周期で生じる圧力振動とはその発生原因が異なっているものと考えられる。そこで、燃料破損直後に生じる短周期の圧力群を後期圧力群と呼び、後続の長周期の圧力群を後期圧力群と呼ぶことにする。

また浸水燃料実験で観測される第1の衝撃的な圧力は加圧燃料実験に比べかなり大きな値となっている。この衝撃圧力は燃料の破損に伴って燃料内圧が急激に開放されるため発生するものと考えられている。従って両者の発生圧力値の相異は破損時の燃料内圧の相異によるものと考えられる。すなわち浸水燃料実験では封入された水の急激な熱膨張と蒸気発生とで内圧が上昇し、被覆管が低温状態で破損するため燃料内圧は100MPa近くにも達するのに対し、



プセル内に瞬時注入し、カプセル内の水塊挙動を高速度カメラで観測した。

## 2. NSRR炉内実験でのカプセル内挙動

これまでNSRR炉で観測された機械エネルギーの発生を伴う燃料破損実験の一例として、加圧燃料実験および浸水燃料実験の結果を示す。実験に使用した照射カプセルと実験計装をFig. 1に、供試燃料をFig. 2に、またNSRR炉の形状および特性についてはその概略を付録Aに示した。なお詳細な実験装置や実験方法については参考文献6を参照されたい。Fig. 3は加圧燃料実験における過渡記録の代表的な結果である。本実験は内圧を3 MPaに加圧した燃料を常温常圧雰囲気標準水カプセル内に装填し、反応度3.23ドルでパルス照射したものである。この時の試験燃料の発熱量は $280 \text{ cal/gUO}_2$ であった。過渡記録に示されるように被覆管表面温度はパルス照射に引き続き急速に上昇し、カプセル底部に設けられた圧力計ではパルス照射から80ms後に衝撃的な水圧が観測された。この衝撃的な圧力とほぼ時を同じくして浮子の上昇、すなわち水面の上昇が観測された。これらの結果は衝撃的な圧力が発生した時点で燃料の破損が生じ、機械エネルギーの発生が起ったことを示している。その後の水面の動きおよびカプセル内の水圧の挙動をみると、浮子が最高位置に達する頃水圧は一旦低下し、さらに浮子の下降に伴ないカプセル内の水圧の上昇が観測されている。それ以後の浮子の信号は小さく水面の挙動は定かではないが、カプセルの水圧はほぼ30msの周期で5~6回振動している。

Fig. 3でカプセル底部に衝撃的な圧力の発生した時点を拡大してみると、第1の衝撃的な圧力の発生に引き続いて、ほぼ1msの短周期で繰返し圧力ピークが発生し、漸次減衰しているのが認められる。

一方、Fig. 4は浸水燃料実験における過渡記録の例である。試験燃料の浸水量は30%であり、発熱量は $150 \text{ cal/gUO}_2$ である。この実験でも加圧燃料実験と同様に燃料破損と同時に生じる第1の衝撃的な圧力の発生とそれに引き続くほぼ1msの短周期の圧力パルスと、20~30msの長周期の圧力振動とが観測されている。この実験ではカプセル胴部に取り付けた歪計の信号が明確に測定されている。歪信号とカプセル底部の水圧との相関をみると、破損と同時に生じる第1の衝撃的な圧力および周期20~30msの圧力信号とカプセル胴の相関は強いが、第一の衝撃的な圧力に引き続いて生じる短周期のパルス的な圧力との対応は認め難い。このことから燃料破損の直後に生じている短周期の圧力振動と、20~30ms周期で生じる圧力振動とはその発生原因が異なっているものと考えられる。そこで、燃料破損直後に生じる短周期の圧力群を後期圧力群と呼び、後続の長周期の圧力群を後期圧力群と呼ぶことにする。

また浸水燃料実験で観測される第1の衝撃的な圧力は加圧燃料実験に比べかなり大きな値となっている。この衝撃圧力は燃料の破損に伴って燃料内圧が急激に開放されるため発生するものと考えられている。従って両者の発生圧力値の相異は破損時の燃料内圧の相異によるものと考えられる。すなわち浸水燃料実験では封入された水の急激な熱膨張と蒸気発生とで内圧が上昇し、被覆管が低温状態で破損するため燃料内圧は100MPa近くにも達するのに対し、

加圧燃料実験では封入したガス圧の上昇もさることながら、被覆管温度の上昇に伴う材料強度の低下が主因となって破損するため燃料内圧はそれほど大きな値とはならない。

このように第1の衝撃圧力については、ほぼ発生原因が想定されるが、衝撃圧力に引き続く短周期の前期圧力群や後続の長周期の後期圧力群については、その発生原因が究明されていない。

また、これまでの炉内実験ではカプセル内の水塊の挙動と計測された水位計の信号との対応や水塊の挙動と圧力計の信号との対応が十分つけられず、燃料破損に伴って生じる機械エネルギーの発生機構や挙動並びにそのエネルギーの大きさを明らかにすることができなかった。従って、ここでは水塊の挙動や前期圧力群並びに後期圧力群の発生原因を明らかにすると共に機械エネルギーの評価法を検討するため、可視カプセルを用いた炉外実験を実施した。

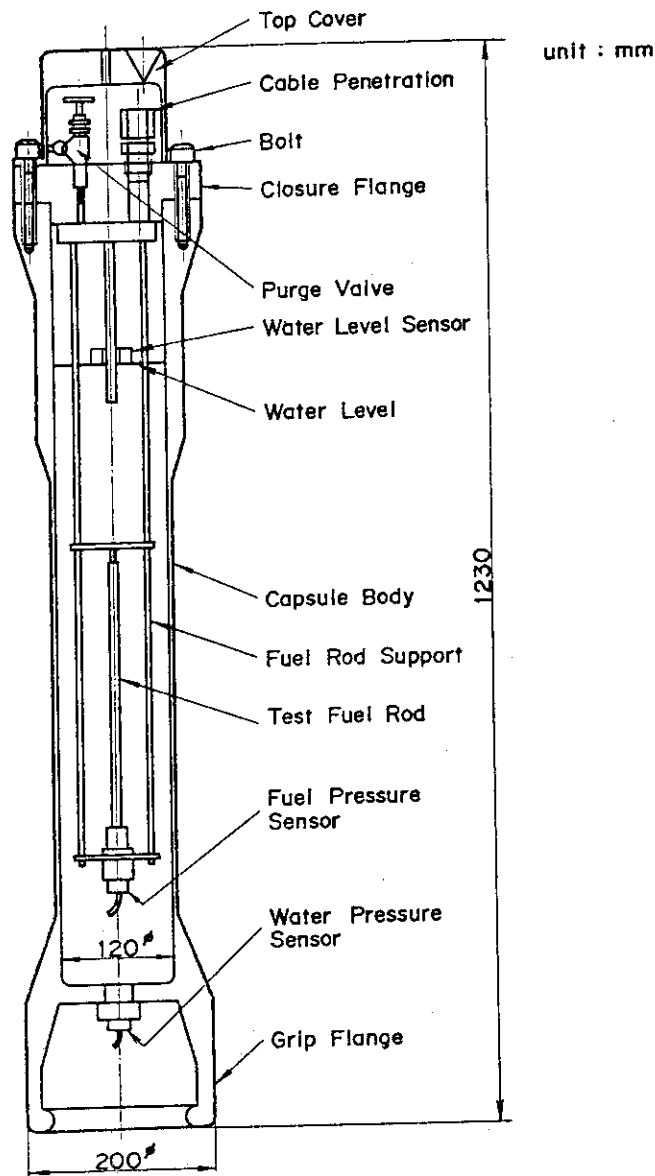


Fig. 1 Standard Water Capsule

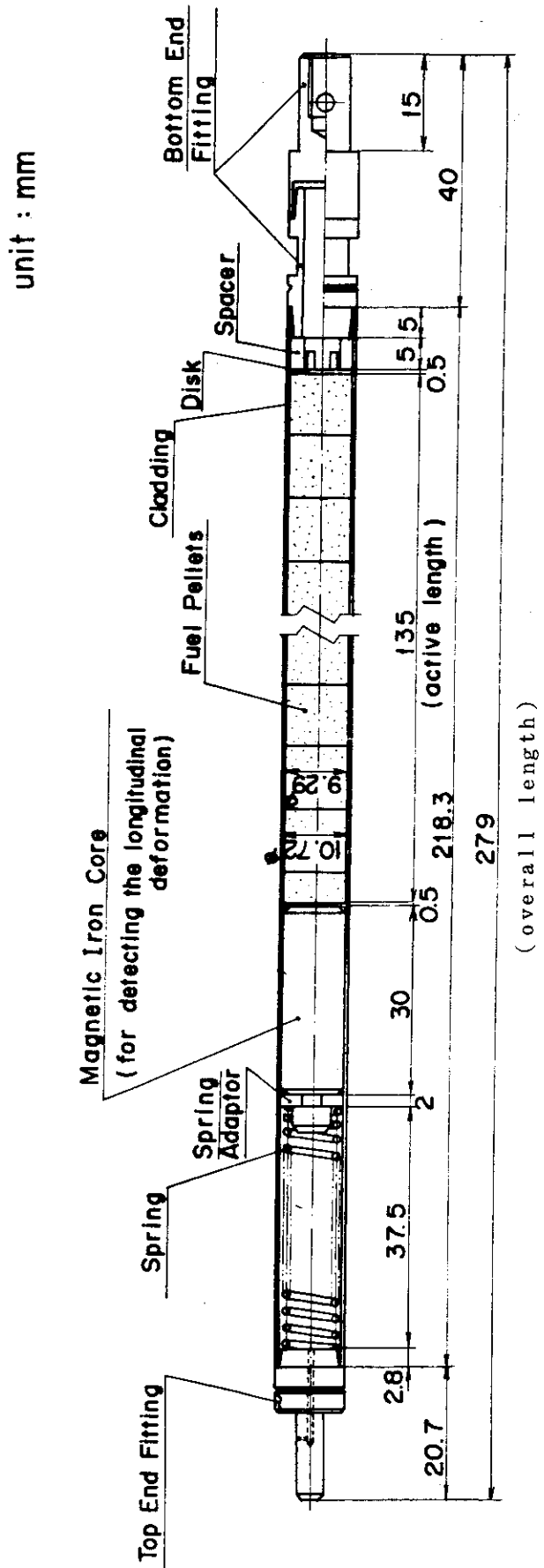


Fig. 2 Standard Type Test Fuel

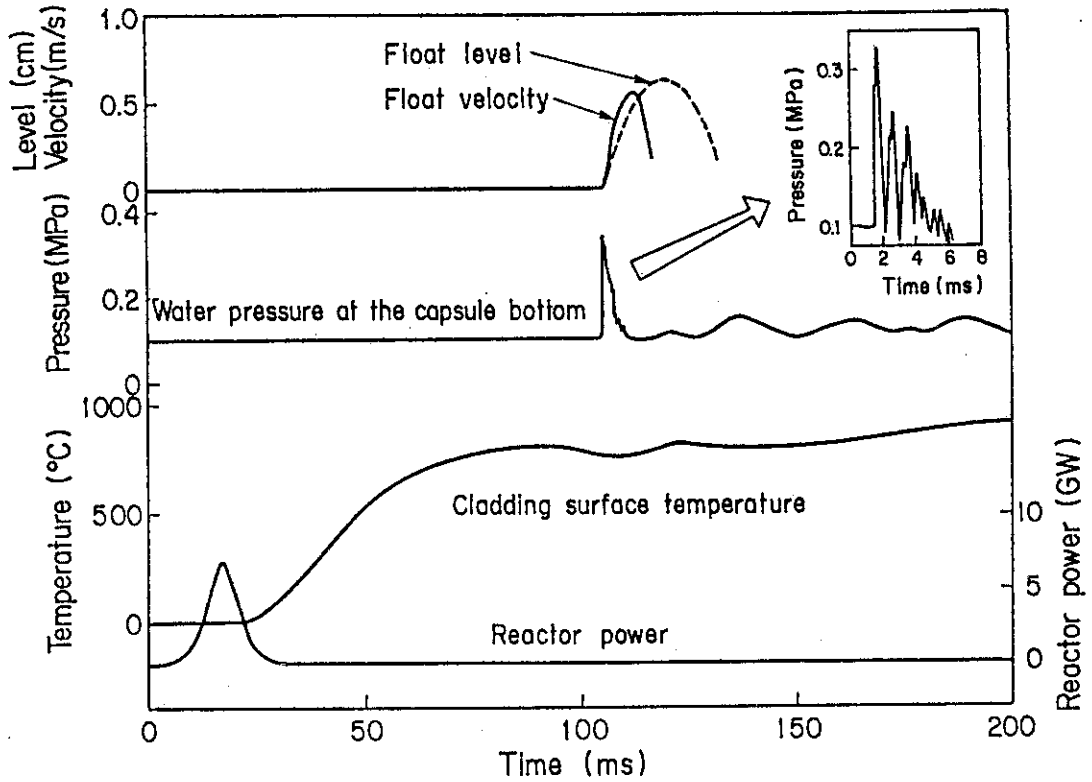


Fig. 3 Typical transient behavior of pre-pressurized fuel rod in-pile experiment (initial pressure: 3MPa)

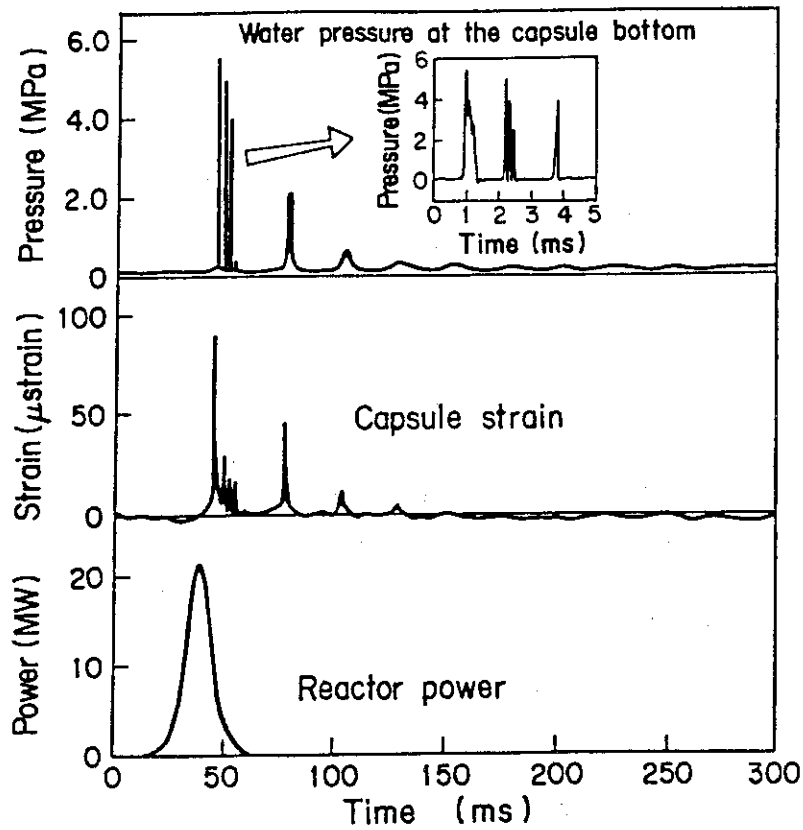


Fig. 4 Typical transient behavior of waterlogged fuel rod irradiated at 150cal/gUO<sub>2</sub> (volumetric fraction of water: 30%)

### 3. 炉外可視実験

#### 3.1 実験方法と装置

炉外での可視実験では、炉内の現象を模擬するため、すなわち燃料破損に伴って放出される燃料内のガスや高温の燃料と冷却材との相互作用で発生する蒸気を模擬するため、ラプチャディスクを用いて圧縮ガスをカプセル内に瞬時注入する方法（以下ガス注入法と呼ぶ）を採用した。

従って炉外可視実験ではまずガス注入法で炉内実験のカプセル内挙動を模擬できることを確認し、さらにカプセル内挙動に影響を及ぼす各因子についてパラメータサーベイをして炉内実験の解釈の一助となるデータを収集することに動めた。

可視実験装置の全体構成を Fig. 5 に、可視カプセルの構造を Fig. 6 にその写真を Fig. 7 に示す。カプセルは内部の様子を観測できるように透明なアクリル製とし、カプセルの形状及び寸法は炉内実験との比較を容易にするため炉内実験用の標準カプセル (Fig. 1) と同一とした。また燃料破損時に発生すると考えられるガス放出を模擬するためにカプセル側面に圧縮ガス注入装置を設けた。圧縮ガス注入装置は Fig. 8 に示すようにガスチェンバとラプチャディスクから構成され、ガスの注入はニードルをインパルスハンマで打撃しラプチャディスクを破碎して行なり構造とした。ガスチェンバの容積は  $90 \text{ cm}^3$  で、ラプチャディスクには直径  $20 \text{ mm}$ 、厚さ  $0.06 \sim 0.1 \text{ mm}$  のアルミニウム箱を用いた。圧縮ガスには A ガスを用い初期圧は  $0.3 \sim 2.1 \text{ MPa}$  とした。

実験では圧縮ガス注入後のカプセルの模様を  $16 \text{ mm}$  高速度カメラで観測する（コマ送り  $500 \text{ pps}$ ）と共にカプセル内の水位と圧力、カプセル歪を同時に計測した。カプセル内の水位とその変化速度は浮子形水位計<sup>11)</sup>によって計測した。浮子形水位計は Fig. 9 に示すように浮子と検出コイルとから構成される。浮子内には永久磁石が埋め込まれ、検出コイルは浮子支柱内に  $6 \text{ mm}$  間隔で巻き方向を逆転して巻かれている。従って、浮子の変位につれてコイル内には電磁誘導により Fig. 9 に示すような交流電圧が発生するので、浮子の移動速度と位置は各波の周期とその波数から求められる。

なおスプリングを用いた機械エネルギー測定では、Fig. 10 に示したように浮子と上部フラジとの間にスプリングを装着し、スプリングに機械エネルギーを吸収させる構造とした。使用したスプリングのバネ定数は  $7.1 \times 10^3 \sim 1.36 \times 10^4 \text{ kg/s}^2$  である。

圧力測測には歪ゲージ式圧力計を用いた。圧力計の仕様は定格容量  $5 \text{ MPa}$ 、固有振動数  $50 \text{ KHz}$  である。実験ではカプセル底部と側面の水中圧ならびにカプセル上部のカバーガス圧を測定した。

またカプセルの動歪測定にはゲージ抵抗  $120 \Omega$  の歪ゲージを用いた。測定位置はカプセルの圧縮ガス注入装置取付け位置を中心に軸方向  $15 \text{ cm}$  間隔に上下 3 箇所とした。

これらの測定データはデータレコーダに収録し、高速度写真と照合しながら解析を進めた。

### 3.2 実験条件

実験ではガス注入法で炉内実験のカプセル内挙動をほぼ模擬できることを確認するため、Table 1 に示した標準実験にて、高速度写真と計測信号とを対応させ検討した。

さらにこれまでの炉内実験結果からわかるように、燃料内圧や浸水量などの初期条件やパルス照射時の燃料の発熱量などによりカプセル内の挙動が異なることから、これらに対応して炉外実験においてもガスの注入条件やカプセル体系などについて、Table 1 に示すようなパラメータ実験を実施した。

ガス注入条件では注入ガスの初期圧ならびにガス注入量を変えるためラプチャディスクの肉厚や破断面積を変えた。周囲の体系や拘束条件ではカプセル寸法を変える他、水位とカバーガス圧ならびにスプリングによる水面の拘束を取り入れた。またカバーガス圧の影響を無くすため上部フランジ開放条件での実験も行なった。スプリングは拘束条件の検討の他に機械エネルギーの評価法の一つとしても検討した。カプセルの形状については2種類のカプセル径について実験した。

### 3.3 実験結果および考察

標準実験条件での結果を3.3.1と3.3.2に示し、炉内でのカプセル内挙動がガス注入法で模擬できることを明らかにし、さらに個々のパラメータ実験の結果については3.3.3節以下に詳述する。

#### 3.3.1 高速度カメラによる観測結果

標準実験 (Test No. 100-1) の高速度写真を Fig. 11 に示す。本実験でのガス注入部の条件はガス初期圧 0.9 MPa, ラプチャディスク肉厚 0.1 mm であり、カプセル部の条件は、ラプチャディスクから水面までの水柱高さ 350 mm, カバーガス圧 0.1 MPa, カバーガス容積 1.9 ℓ (カバーガス高さ 170 mm) である。浮子には直径 55 mm の木製浮子を用いた。

写真①でわかるように圧縮ガスが瞬時的に解放された時点では水面の変化はない。その後水中に放出されたガスは気泡となり膨張する。膨張に伴ない気泡より上部の水塊がピストン状に押し上げられ、約 26 ms 後水塊が最上位に到達する (写真②)。この時点までの浮子の挙動をみると水位の上昇に良く追随しているのが判る。水塊が最上位まで到達すると逆に下降を始め、気泡は収縮に転じ 48 ms 後には写真③に示すごとく最小となる。この時点では浮子はすでに水位に追随していない。以後も同様気泡の膨張と収縮は繰返され、5~6回の水塊振動が観測された。時間の経過に伴ない気泡は浮力を受け、小気泡を合体しながら上昇し大気泡 (写真④) となり、ほぼ 900 ms 後に水面へと達し (写真⑤)、過渡現象を終結した。

#### 3.3.2 計測信号との対応

Fig. 12 に標準実験 (Test No. 100-1) のカプセル内の水中圧、カバーガス圧、カプセル歪などの計測結果を示す。カプセル内挙動の可視実験結果をもとに、これらの計測信号との

対応をみると圧縮ガスが瞬時的に解放された時点で水中に衝撃的な圧力が発生している。この時点ではカプセル内の水塊に変動は生じない。衝撃的な第1次圧に引き続く1~2 msの間隔の短い圧力ピークの発生が認められるが、これは次節に記述するように振動周期から第1次圧力のカプセル底面並びに浮子下面での反射による圧力波と考えられる。

水中に放出されたガスが膨張するに従い水位が上昇するが、これにつれてカプセル上部のカバーガスが圧縮されているのがわかる。カバーガスのピーク圧の発生は、水面の最大上昇位置に対応する。その後水面は下降するがこれにつれてカバーガス圧は低下し、逆に水中圧は上昇を始める。すなわち、カバーガスは膨張し水中の気泡が収縮する。水中の気泡が最も収縮した時点で水中圧は再びピークを示し、カバーガス圧は最も下がる。その後は再び水面が上昇し、気泡の膨張と収縮が繰返され、それに対応して水中圧およびカバーガス圧も繰返し上昇下降をする。この繰返しは5~6回観測された。繰返しにつれてピーク値は漸次減少し、その繰返し周期は48 msであった。ピーク値の減衰は摩擦による水塊の運動エネルギーの消失によるものである。また、カプセルの歪は水中圧のピーク時とほぼ同期してピーク値を示していることが判る。

標準実験の計測信号 (Fig. 12) は、炉内実験の計測信号 (Fig. 3, 4) に比べ、前期圧力群の振動周期と後期圧力群の振動周期を除き、圧力の全体挙動ならびに浮子の挙動などは良く一致している。なお上記の相異点については、後述するように、前者がカプセルの材質による音速の相異、後者が飛び上り水塊の質量の相違によるものであり、炉内実験と炉外とでカプセル内挙動に本質的な相異はなく、ガス注入法によって炉内実験のカプセル内挙動を模擬できることがわかった。

なお、標準実験と同一条件で浮子径のみ大きくした大径浮子実験 (100 L-1) の結果を Fig. 13, 14 に示すが、この場合においてもカプセル内の水塊挙動ならびに圧力挙動は標準実験と大差ない。本実験で特徴的なことは、水塊が最上位に到達後も数回浮子が水位に良く追随して運動している点である。

次にカプセル内の位置による衝撃圧の挙動の相異について検討する。上述の圧力挙動はカプセル底部の水圧の測定結果に基づくもので、ラプチャディスク取付高さ位置のカプセル側部にも圧力計を設けたので両者の関係をここで比較してみる。Fig. 15はいろいろなパラメータ実験で計測された両者の圧力関係を示したものである。本図にみられるようにカプセル底部の圧力は、カプセル側部の水圧に比べほぼ1.3倍高い値となっており、この傾向はすべての実験に共通したものである。発生した圧力波はラプチャ破砕面からカプセル内壁まで、球面波として伝播し、内壁で反射した後はほぼ平面波となってカプセル底部へ伝播すると考えられる。そこでカプセル底部の水圧は、ラプチャ破砕位置に近いカプセル側部の圧力より水中での減衰のため低くなると考えられがちであるが、実際には反射波の影響でカプセル底部の圧力の方が高くなる。底部では側壁からの反射があるほか、圧力計の受圧面が圧力波の進行方向に垂直に置かれているため、受圧面での反射波が入射波に重畳されるのに対し、側部では入射波の進行方向に垂直とはならず反射波の影響が小さいためと考えられる。

### 3.3.3 注入流量と初期圧力の影響

本節では注入ガスの流量と初期圧力がカプセル内挙動に与える影響について、実験結果を比較検討した。

#### (1) 注入流量の影響

ラプチャディスクの破砕と同時に発生する衝撃的な圧力とチェンバ内の圧力減衰時定数との関係を Fig. 16 に示す。ここでチェンバ内の圧力減衰はチェンバからカプセル内へのガス注入流量に関係すると考えられ、ガスの注入流量はラプチャの破断面積に比例する値である。そこで実験後のラプチャの破断面積の逆数と圧力減衰時定数との関係を Fig. 17 に示す。図から圧力減衰時定数は破断面積にほぼ比例する。従って Fig. 16 からラプチャ初期圧を一定とした場合、圧力減衰時定数が短いほど、すなわちラプチャの破断面積が大きい程衝撃圧力は大きくなるといえる。

一方、Fig. 18, 19 は水塊の上昇速度ならびに水塊の最高到達高さを整理した図である。本図から判るように水塊の上昇速度、最高到達高さも、圧力減衰時定数の影響を受ける。これらの値は圧力減衰時定数の減少に伴い増大している。

次に後期圧力群の大きさを水塊の最高到達高さで整理したものを Fig. 20 に示す。図中の圧力は第 1 回目の水面下降時にカプセル底部で観測された圧力を示す。図から最高到達高さが増加すると後期圧力群の大きさも増大することがわかる。

#### (2) 初期圧力の影響

ここでは初期圧力を 0.3~2.1 MPa まで変化させた実験 (Test No. 101~107) の結果をもとに、カプセル内挙動への影響を検討する。Fig. 21, 22 は初期圧力 2.1 MPa の場合の過渡挙動を示す図である。これらの図からわかるようにカプセル内の水塊の運動ならびにカプセル内圧力の全体挙動は初期圧力によらずすべてが良く対応している。まず衝撃圧力と注入ガスの初期圧力との関係を調べてみる。Fig. 23 は初期圧力と衝撃圧力の関係を示すもので、衝撃圧力は初期圧力の増加に伴って増大している。これは初期圧力が増加するとガスの流出速度が増すためと考えられる。従って衝撃圧力の大きさは初期圧力が高い程、また圧力減衰時定数が短い程増大することが明らかとなった。

また衝撃圧力に引き続く前期圧力群の大きさについても Fig. 12 と Fig. 22 とを比較するとわかるように、初期圧力が増加すると大きくなる。

前期圧力群の周期は初期圧力が変わっても 1.5 ms 程度で大きな変化はみられない。周期に関しては前述したように炉内実験では 1 ms 以下であり、炉外と炉内実験との相異は以下に示すごとく前期圧力群が衝撃圧のカプセル内での反射波により発生するものと考えれば説明がつく。

まず Fig. 3 と Fig. 12 のカプセル底部で観測された初期圧力群を拡大し、その周期を調べてみると Fig. 24 のごとくなる。図中  $P_1$  は、炉外ではラプチャディスク位置を圧力発生源としてカプセル底部の圧力計へ向った圧力波であり、炉内では燃料破損箇所を圧力発生源として底部圧力計へ向った圧力波と考える。 $P_2$  は圧力発生源から一度浮子下面で反射した後底部圧力計へ到達したもの、 $P_3$  は  $P_1$  が底部で一旦反射された後、浮子下面で反射され底部圧力計へ到達したもの、以後同様に  $P_4, P_5$  もカプセル底部と浮子下面で反射を繰り返す、圧力計で検出さ



れたものと考えた。従って  $T_A, T_B, T_C$  については、それぞれ圧力波がカプセル底部から浮子下面までを一往復する時間となる。このような経路で圧力波が次々に圧力計へ伝播したのとして、それぞれの圧力到達時間間隔を推定してみる。まず水の満されたカプセル内の圧力波伝播速度  $a$  は水とカプセルの弾性に依りて次式にて定まる。

$$a = \sqrt{\frac{g K}{r \left( 1 + \frac{K D}{\delta E} \right)}} \quad (1)$$

ここで  $K$  : 水の体積弾性率

$g$  : 重力加速度

$r$  : 水の単位体積重量

$E$  : カプセル材の弾性係数

$\delta$  : カプセル壁厚さ

$D$  : カプセル内径

上式において  $K = 2.07 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$ ,  $r = 10^3 \text{ kg/m}^3$  であり 炉外のアクリルカプセルでは  $E = 2.5 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$ , 炉内のステンレス鋼 (SUS304) 製カプセルでは  $E = 2.15 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$  であり,  $\delta, D$  は両カプセルとも 7 mm と 120 mm であるので, 圧力波の伝播速度はそれぞれ炉外のアクリルカプセル中では 431 m/s, 炉内のステンレス鋼製カプセル中では 1320 m/s となる。従って  $P_1, P_2, \dots, P_5$  の各圧力波が前述のような経路で圧力計に到達したとすると, それぞれの経過時間  $T_1, T_2, T_3, T_4$  は Fig. 24 に示した時間間隔となる。実測値はほぼ推定時間と一致していることがわかる。なお  $T_1$  については幾分ズレがみられるが, 圧力波発生源から圧力計への伝播経路の推定誤差によるものと考えられる。この結果に対比するようにカプセル底部から水面まで一往復する時間  $T_A, T_B, T_C$  には実測値と推定値との間に大きな相異はない。以上の結果から衝撃圧に続く多数の圧力ピークはカプセル底部ならびに浮子下面での衝撃圧の反射波であり, 炉外実験と炉内実験での周期の相異はアクリルカプセルならびにステンレス鋼製カプセル内における水中での圧力波の伝播速度に依存するものであることがわかった。

また初期圧力を変えても浮子は水塊が最初に最上位置に達するまでは水塊の変位に良く追従することがわかった。Fig. 25 と 26 は初期圧力と水塊の最大速度および最大到達高さを示す図である。この図にみられるように水塊速度および水塊の最大到達高さは, 初期圧力の増加と共に増大する。

### 3.3.4 ラプチャディスク肉厚の影響

炉内での燃料破損を考えると燃料ペレットの保護管の役割をしている被覆管の肉厚は, 燃料の破損挙動並びにその後の機械エネルギー発生に影響すると考えられる。そこで本実験 (Test No. 500, 501, 103) ではラプチャディスクの肉厚を 0.06, 0.08, 0.1 mm と変えてカプセル内の挙動を調べた。注入ガスの初期圧を一定とすると, ラプチャディスクの肉厚が厚くなるに従い破断面積は小さくなり, 圧力減衰時定数の増加が認められ, これに伴って衝撃圧力は減少し, 水塊の最高速度並びに最高到達位置も減少した。これらの関係を Fig. 27 に示した。

### 3.3.5 水位の影響

機械エネルギーを評価する際には、飛び上る水塊の質量の評価が重要となる。炉内炉験においては水塊の質量の計測は不可能であるので、水面を変えて飛び上る水塊の質量の影響を検討した。これまでの実験ではラプチャディスク部より上面の水塊が飛び上がっているのので、実験では水位を変えて影響を調べた。水位を変えただけでは必然的に上部カバーガスの容積も変動するので、Test №200~202 では水位を変化させてもカバーガス容積は常に一定に保って実験した。過渡挙動の一例をFig. 28, Fig. 29に示す。カプセル内の全体挙動は標準実験と良く対応しているが、後期圧力群の振動周期は水位の低下と共に短縮している。Fig. 30は飛び上り水塊の質量と周期の関係を整理した図である。図中には、水塊がピストン状に運動するとしたピストンモデルにより、水塊質量をパラメータとして周期を計算した結果を示しているが、実験値と計算値はほぼ一致していることがわかる。また炉内実験の結果を炉外実験の結果と比較すると炉内実験の方が幾分周期が短かめなものがあるが、これはむしろ炉内実験の水塊質量の決定に原因があると考えられる。すなわち炉内実験では燃料破損位置より上部の水がすべて吹き上がるとしたため、水塊質量を幾分過剰評価したきらいがある。

なお、水位のみを変えた実験 (Test №203~206) においても、後期圧力群の振動周期は水位の低下と共に短くなる傾向にあるが、カバーガス容積を一定に保った実験に比べると、周期の短縮の程度は、小さなものであった。

以上、本結果より炉内実験において後期圧力群の周期から、飛び上り水塊質量の評価が可能であることが明らかとなった。

### 3.3.6 カバーガス圧の影響

水塊の運動がピストンモデルで取扱えると考えると、カバーガスの圧力および容積により後期圧力群の挙動、特に周期が著しく変わってくると考えられる。従ってここではカバーガス圧力を変えた実験 (Test №301) と容積を変えた実験 (Test №302, 303) の結果について比較検討する。Fig. 31はカバーガス圧力と水塊の振動周期を整理した図である。本図からカバーガス圧力が高くなると水塊の振動周期が短くなる。一方Fig. 32, 33はカプセル上部のフランジを取り除き、カバーガスを大気開放にした実験結果である。

またFig. 34, 35はカバーガス容積を極端に小さくした極限の状態として、カプセル内を満水にした実験 (Test №303) の結果である。実験ではアクリルカプセルの強度を考慮して注入ガスの初期圧力を0.5 MPaとした。Fig. 35にみられるようにラプチャ破砕と同時に衝撃的な圧力が底部と側部に観測され、以後圧縮ガスの注入に伴なってゆっくりとした圧力上昇がみられた。この実験においては、水塊の振動は生じないので標準体系でみられるような後期圧力群の発生はなかった。

### 3.3.7 スプリングによる拘束の影響

これまでNSRRの実験における機械エネルギーの測定は水塊の飛び上り速度から求めることに考えていた。しかし、この場合には飛び上る水塊の質量の評価が重要となる。そこでスプリングを用いてその圧縮距離からエネルギーを評価することを検討した。この場合、スプリング

の拘束により衝撃圧力の大きさ、挙動が変わってくるのが考えられるので、ここでは浮子上部にスプリングを設けて検討した。スプリングはバネ定数  $1.36 \times 10^4 \text{ kg/s}$  のものを用い、取付はカプセル内面をほぼカバーする大径浮子（直径 119 mm）を用いて、浮子とカプセル上部フランジ間に設置した。実験結果（Test №400-1）を Fig. 36, 37 に示す。スプリングによる拘束力のため、標準実験に比べ水塊の上昇速度や最高到達高さが減少し、またスプリングの反撥のため後期圧力の発生時期も早められた。しかし衝撃圧力には影響は認められなかった。スプリングによる機械エネルギーの測定結果については 4.3 節に述べる。

### 3.3.8 カプセル形状の影響

炉内実験では機械エネルギー転換率に及ぼす燃料-水比の影響を検討するために、カプセルの寸法を変えた実験を予定している。そこでカプセル形状による影響を調べるためカプセル内径を標準実験用カプセルの  $1/2$  とした小径カプセル（直径 60 mm）による実験（Test №600）を Fig. 38, 39 に示す。ラブチャディスク破砕に伴って発生する衝撃圧力は、本実験では標準カプセルの実験ほど顕著でなかったが、他の小径カプセル実験においては明瞭な圧カプセルを観測したものもあり、その原因がカプセル形状の影響なのか確かでない。一方、水塊の最大速度は小径カプセルでは  $4 \text{ m/s}$  と標準実験の  $1.5 \text{ m/s}$  に対しほぼ 3 倍となり、最高到達高さも  $8.4 \text{ cm}$  と標準実験の  $3 \text{ cm}$  に比べほぼ 3 倍に達した。このように小径カプセルの場合に水塊の上昇速度および最高到達高さが増加する理由は、小径カプセルではラブチャディスク上部の水塊質量が小さくなったためと考えられる。機械エネルギーの測定結果については 4.2 節で検討する。

### 3.3.9 炉外可視実験のまとめ

炉外可視実験の結果、炉内実験のカプセル内挙動を模擬するのにガス注入法が妥当であることを実証した。さらに炉内実験結果を解析するにあたり有効と思われる炉外実験から得られた知見を以下に列記する。

#### (1) 圧力挙動

##### ① 圧力の挙動

ラブチャディスクの破損と同時に衝撃圧力が発生し、引き続き数 ms 周期の圧力振動が生じ、その後  $20 \sim 50 \text{ ms}$  周期の圧力振動が生じる。前者はラブチャディスク破砕に伴う衝撃圧力とその反射波であり、炉内実験で観測された前期圧力群に対応する。後者は水塊のピストン運動によって生じるもので炉内実験で観測された後期圧力群に対応する。

##### ② 衝撃圧力

衝撃圧力の大きさは、注入ガスの初期圧力と注入口の断面積に依存する。その圧力値は初期圧力が高い程大きく、さらにガス注入断面積が大きいほど大きくなる。

カプセル内の水位やカバーガス圧、スプリング等による水面の拘束条件などの影響はほとんどない。

## ③ 前期圧力群の大きさと周期

前期圧力群は衝撃圧力がカプセル内で反射したもので、衝撃圧力が高い程高い圧力となる。前期圧力群の周期は、カプセル内の圧力波の進行速度によって決定される。

## ④ 後期圧力群の大きさと周期

後期圧力の大きさは、水塊の最高到達位置の増加と共に増大し、その周期は飛び上り水塊の質量の増加と共に増加する。従って炉内実験で観測される後期圧力群の振動周期から飛び上り水塊の質量を推定できる。

## (2) 水塊挙動

## ① 水塊の挙動

ガス注入によってガス注入部より上部の水塊は飛び上がる。飛び上がった水塊はカプセル上部のカバーガスとの間をピストン運動的に上下する。ピストン運動は系の摩擦抵抗によって漸次減衰する。

## ② 浮子の挙動

水塊が最高到達点に達するまでは、浮子は水塊の挙動に良く追随する。また、カプセル内径とほぼ同じ大径浮子の場合には水塊の数回の上下振動にも追随する。

## ③ 水塊上昇速度と水塊最高到達位置

水塊上昇速度と水塊最高到達位置は注入ガスの初期圧が高くなる程増大し、さらにラプチャディスクの破断面積の大きい程増大する。また水塊上部のカバーガス圧力の影響を受け、カバーガス圧力が高くなると水塊上昇速度は鈍り、到達位置も低くなる。

## ④ 水塊振動周期

水塊の振動周期は飛び上る水塊の質量に依存する。質量が増大すると周期が長くなる。またカバーガス部はこの振動においてバネの役割をしており、ガス圧力を高くすればバネ定数が大きくなるので周期は短くなり、カバーガス部に実際のバネを装着すればさらに周期は短くなる。

水塊の振動周期は注入ガスの初期圧やラプチャディスクの破断面積の影響を受けない。

また飛び上り水塊の質量は振動周期から推測できることが判明した。

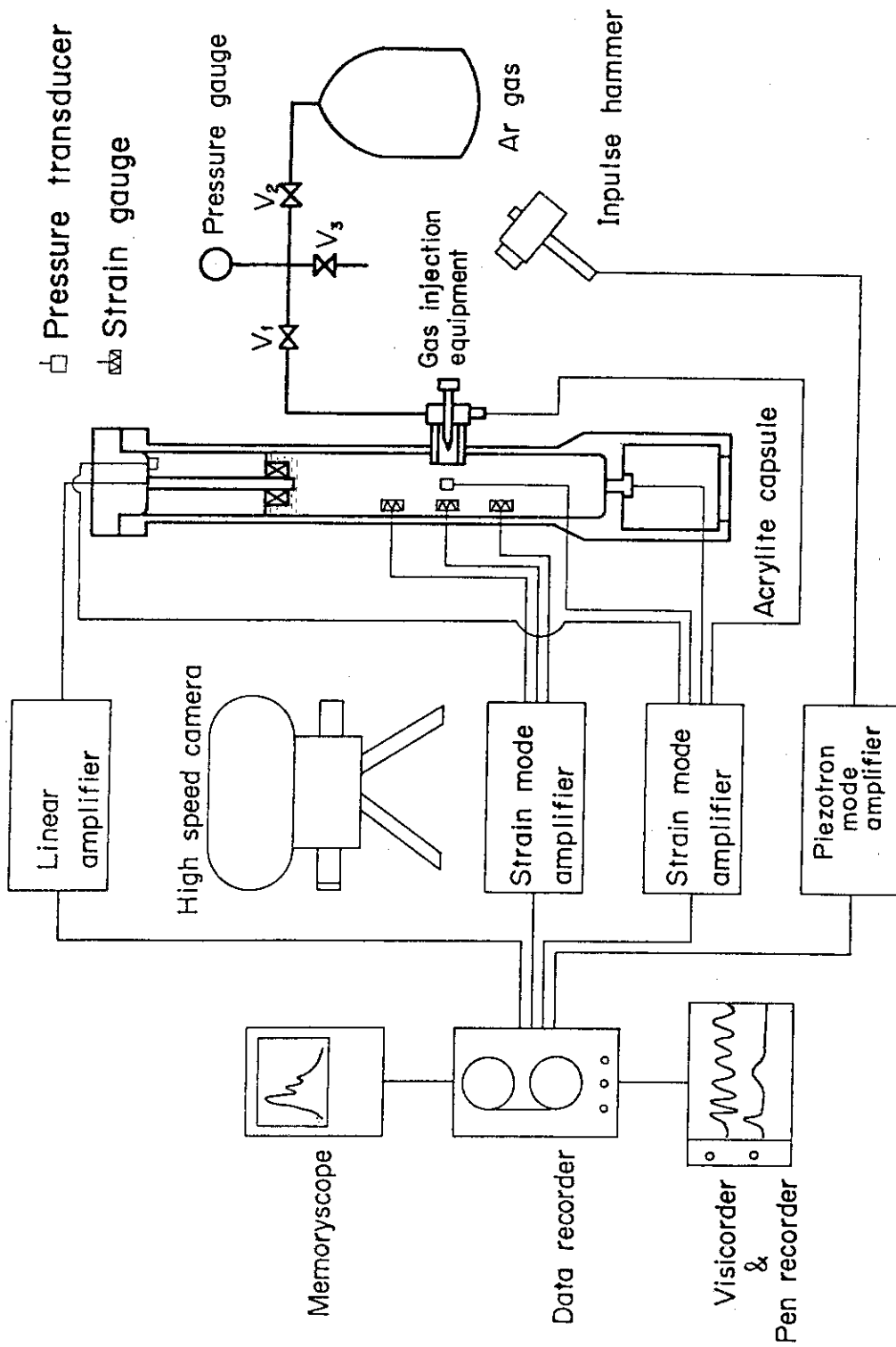


Fig. 5 Schematic diagram of out-of-pile visualization experiment

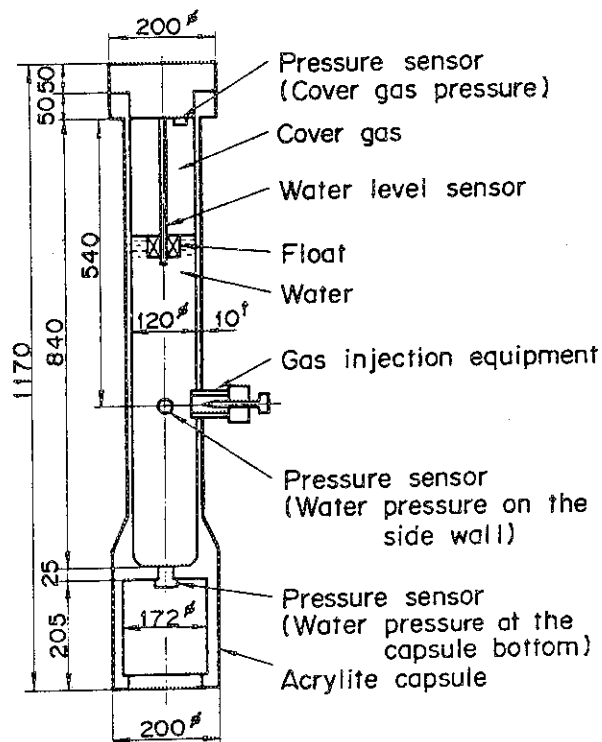


Fig. 6 Experimental acrylite capsule and measuring instruments

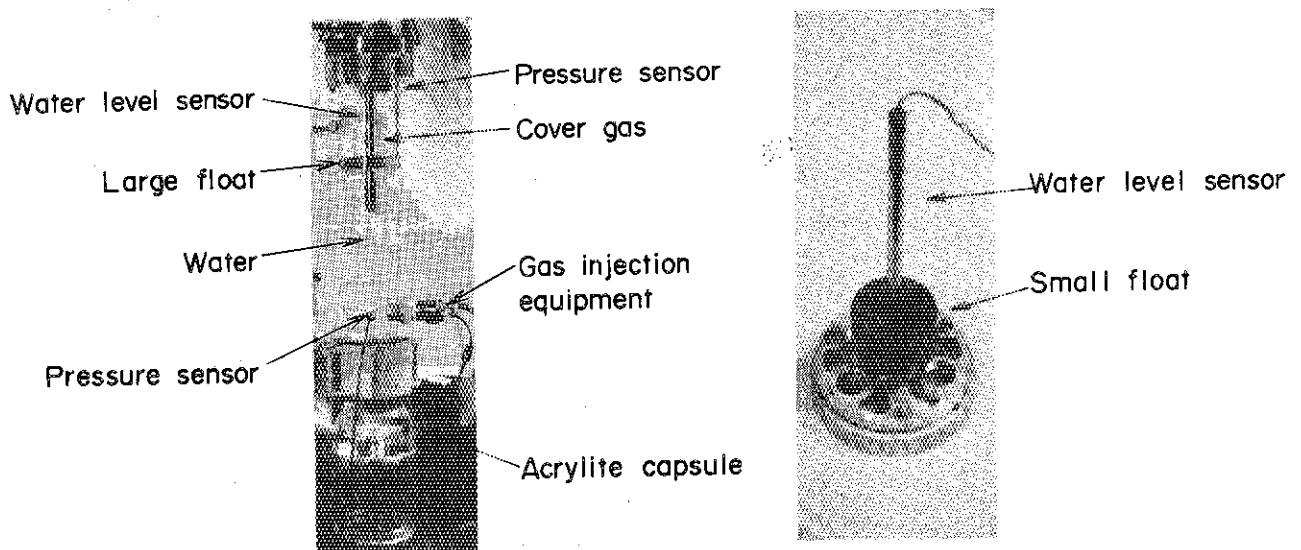


Fig. 7 Acrylite capsule and measuring instruments

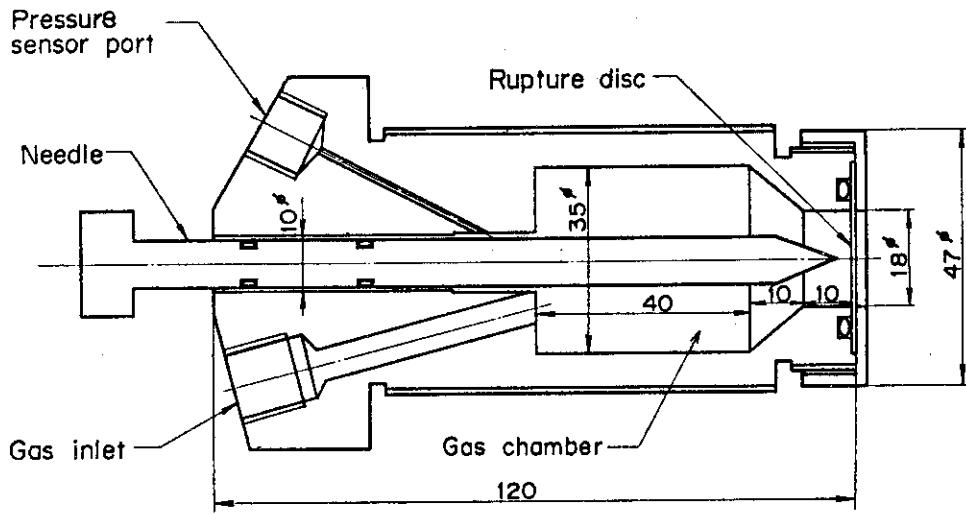


Fig. 8 Cross-section view of gas injection equipment

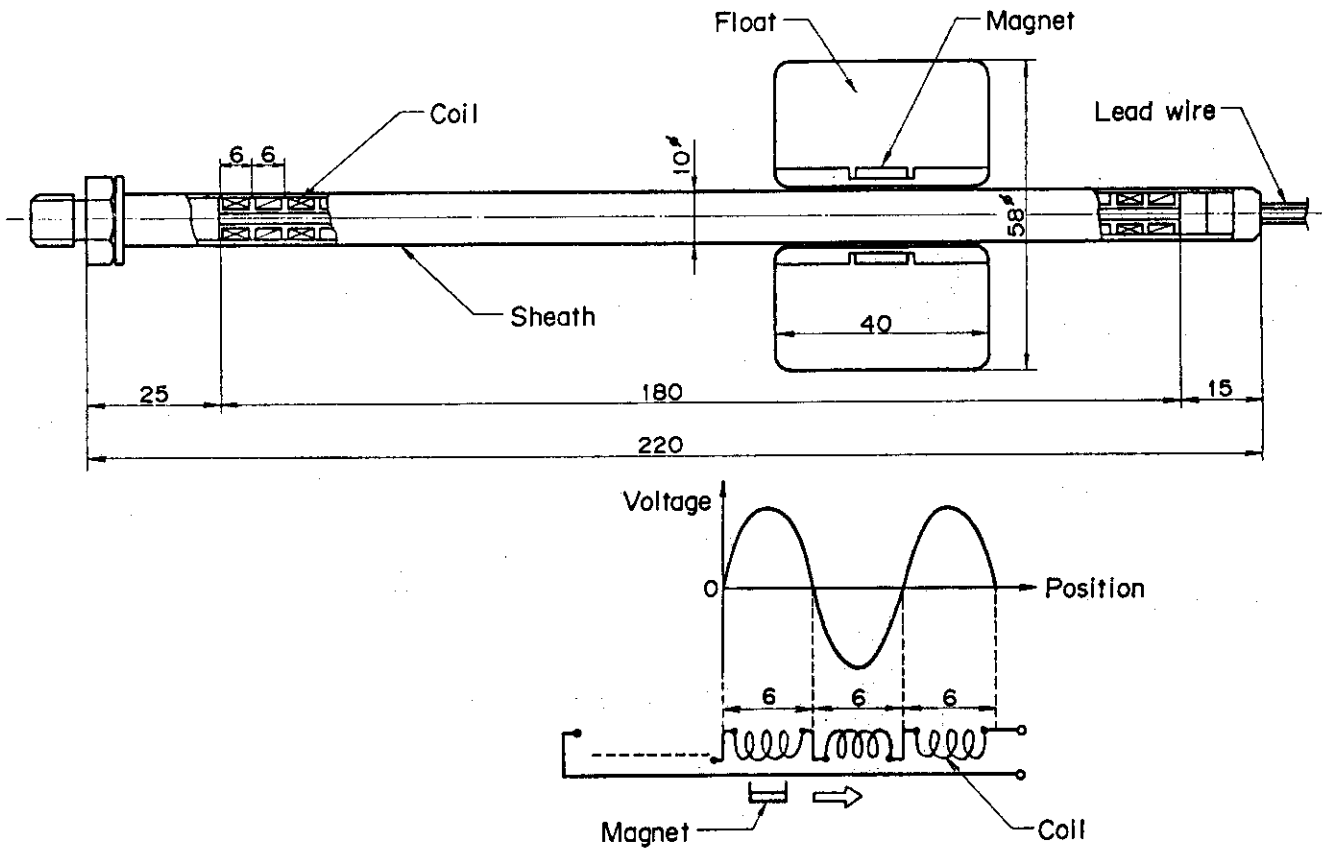


Fig. 9 Water level sensor

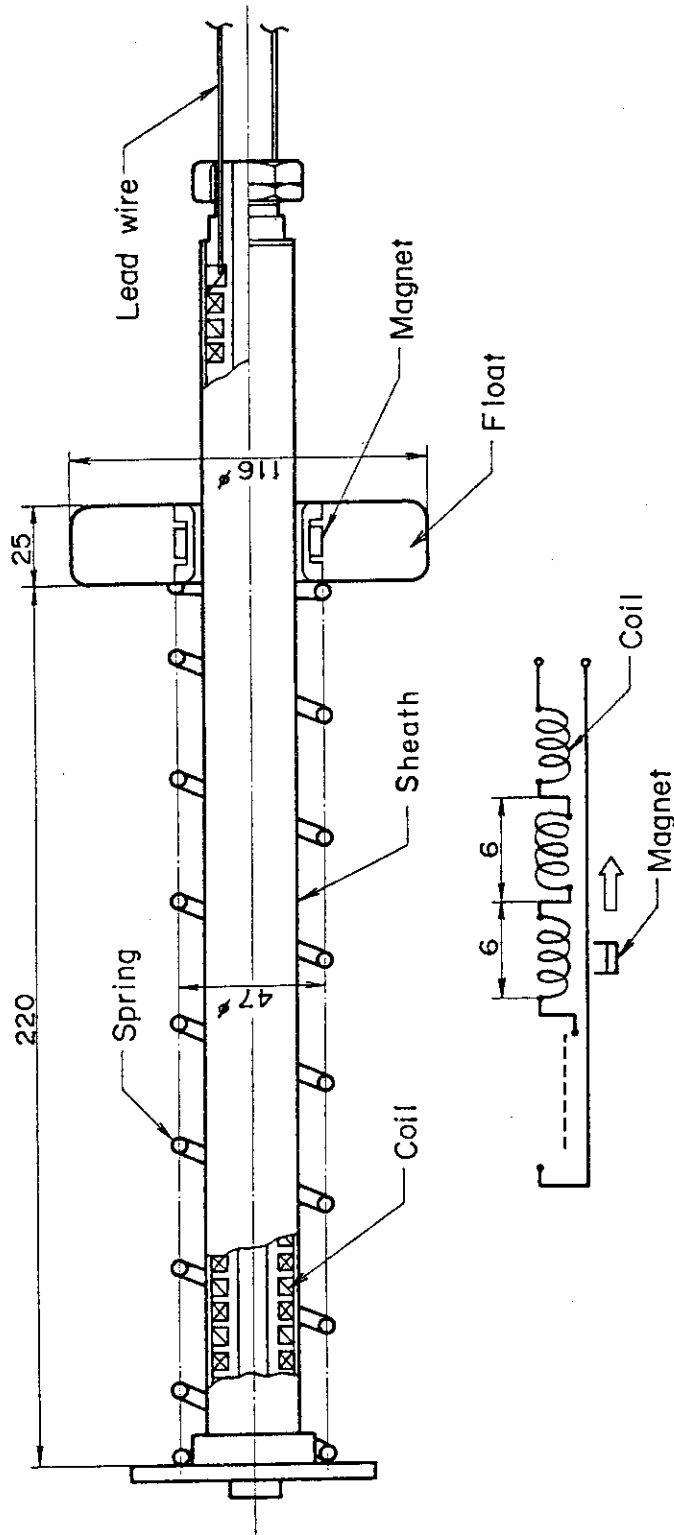


Fig. 10 Water level sensor for mechanical energy measurement



Table 1 Out-of-pile visualization test conditions

Item	Test No.	Initial rupture pressure (MPa)	Rupture disc thickness (mm)	Water level (mm)	Cover gas height (mm)	Cover gas pressure (MPa)	Spring constant (kg/s <sup>2</sup> )	Float diameter (mm $\phi$ )	Capsule diameter (mm $\phi$ )	Remarks
Standard	100-1~6	0.9	0.1	350	170	0.1	—	55	120	
Large float	100L-1,2	"	"	"	"	"	—	116	"	
Initial pressure	101	0.3	0.06	"	"	"	—	55	"	
	102	0.5	0.06	"	"	"	—	"	"	
	103	0.7	0.1	"	"	"	—	"	"	
	104	1.1	"	"	"	"	—	"	"	
	105	1.3	0.08x2	"	"	"	—	"	"	
	106	1.6	0.08x3	"	"	"	—	"	"	
	107-1~3	2.1	0.1+0.08x4	"	"	"	—	"	"	
Water column mass	200	0.9	0.1	240	"	"	—	—	"	
	201	"	"	150	"	"	—	—	"	
	202	"	"	90	"	"	—	—	"	
	203	"	"	420	100	"	—	55	"	
	204	"	"	260	260	"	—	—	"	
	205	"	"	170	350	"	—	—	"	
	206	"	"	70	450	"	—	—	"	
Cover gas pressure	301-1,2	"	"	350	170	0.2	—	55	"	
	302-1,2	"	"	"	without flange	0.1	—	—	"	
	303	0.5	"	full	0	—	—	55	"	
Spring	400-1,2	0.9	"	290	230	0.1	$1.36 \times 10^4$	119	"	
Rupture disc thickness	500-1~3	0.7	0.08	350	170	"	—	55	"	
	501	"	0.06	"	"	"	—	"	"	
Small capsule	600	0.9	0.1	410	160	"	—	"	60	
	601-1,2	"	"	"	without flange	"	—	"	"	
	602-1,2	"	"	"	160	"	$7.1 \times 10^3$	"	"	
	603-1~4	"	"	"	"	"	"	"	"	injected gas at the bottom

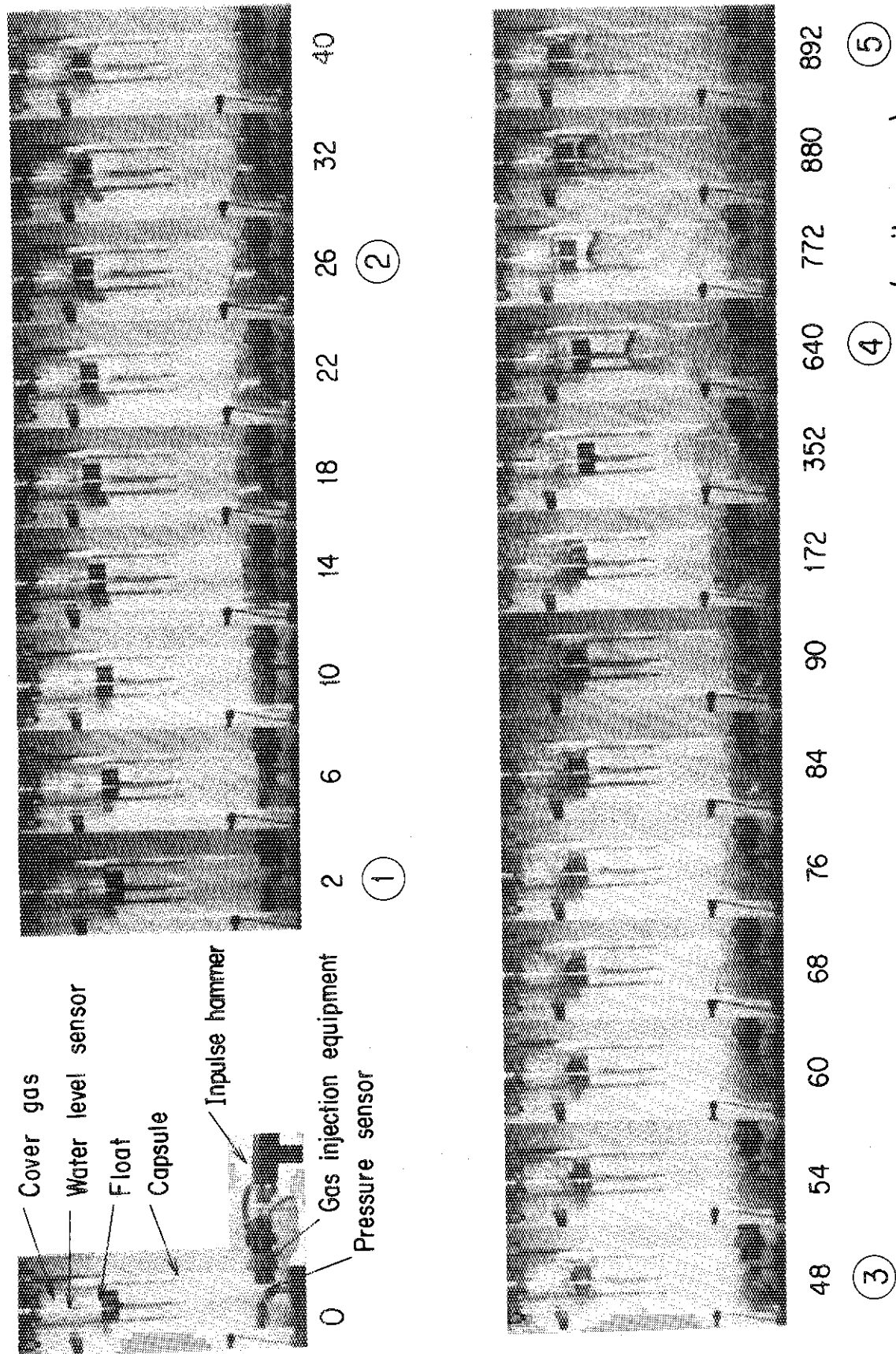


Fig. 11 Water column behavior in the capsule in Test No.100-1  
 ( initial rupture pressure : 0.9MPa )

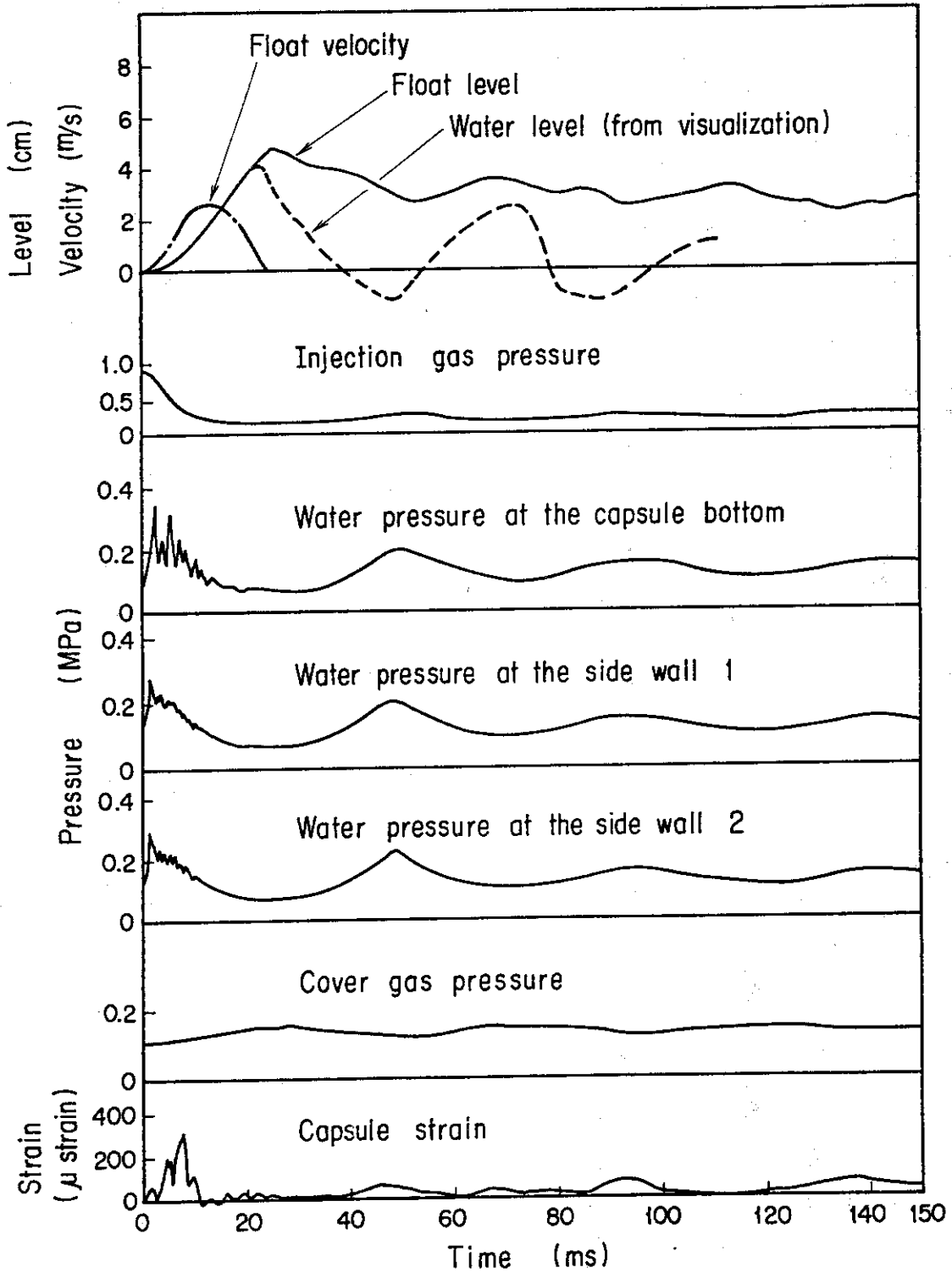


Fig. 12 Transient record of out-of-pile experiment in Test No.100 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

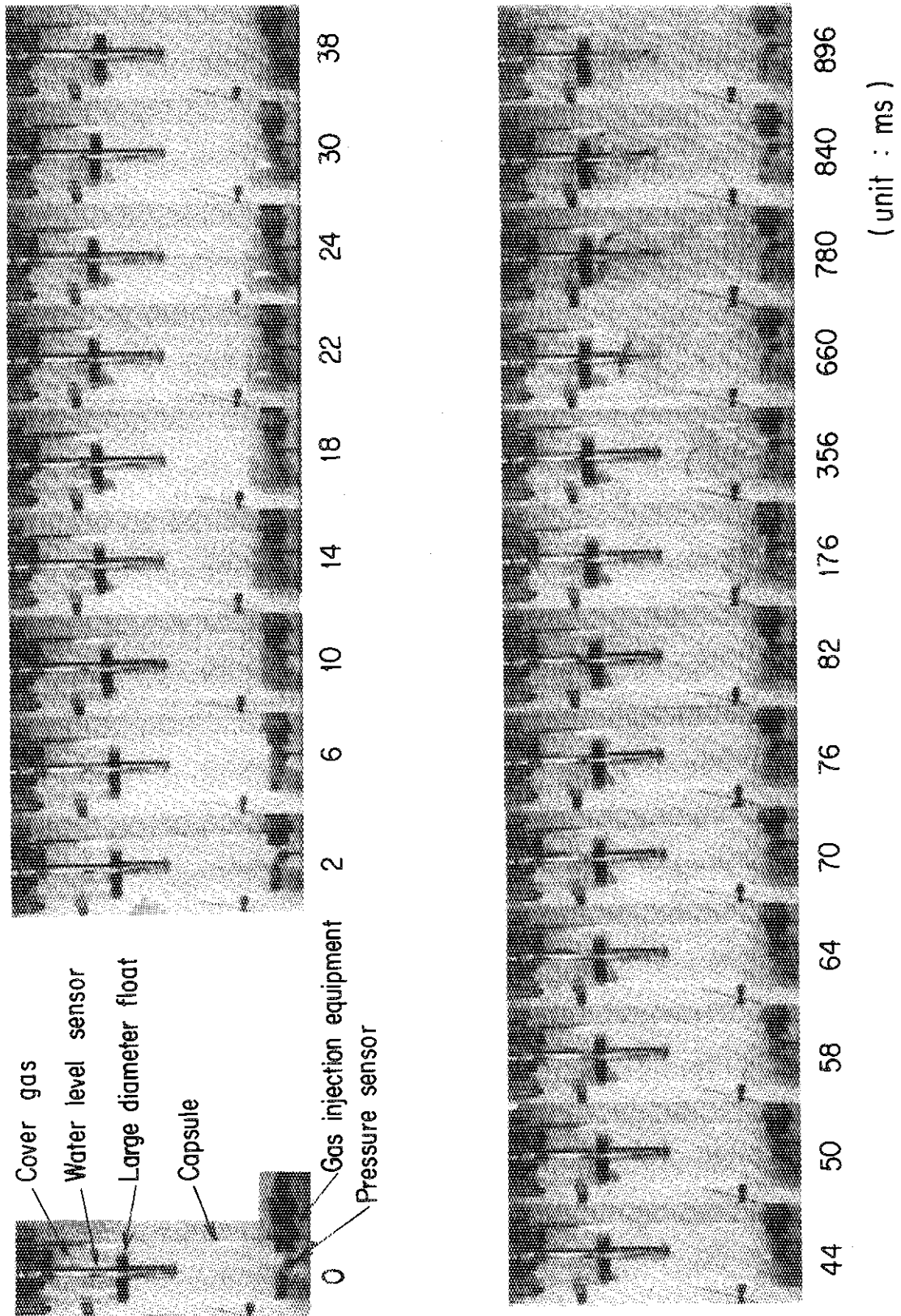


Fig. 13 Water column behavior in the capsule (Test No.100L-1)

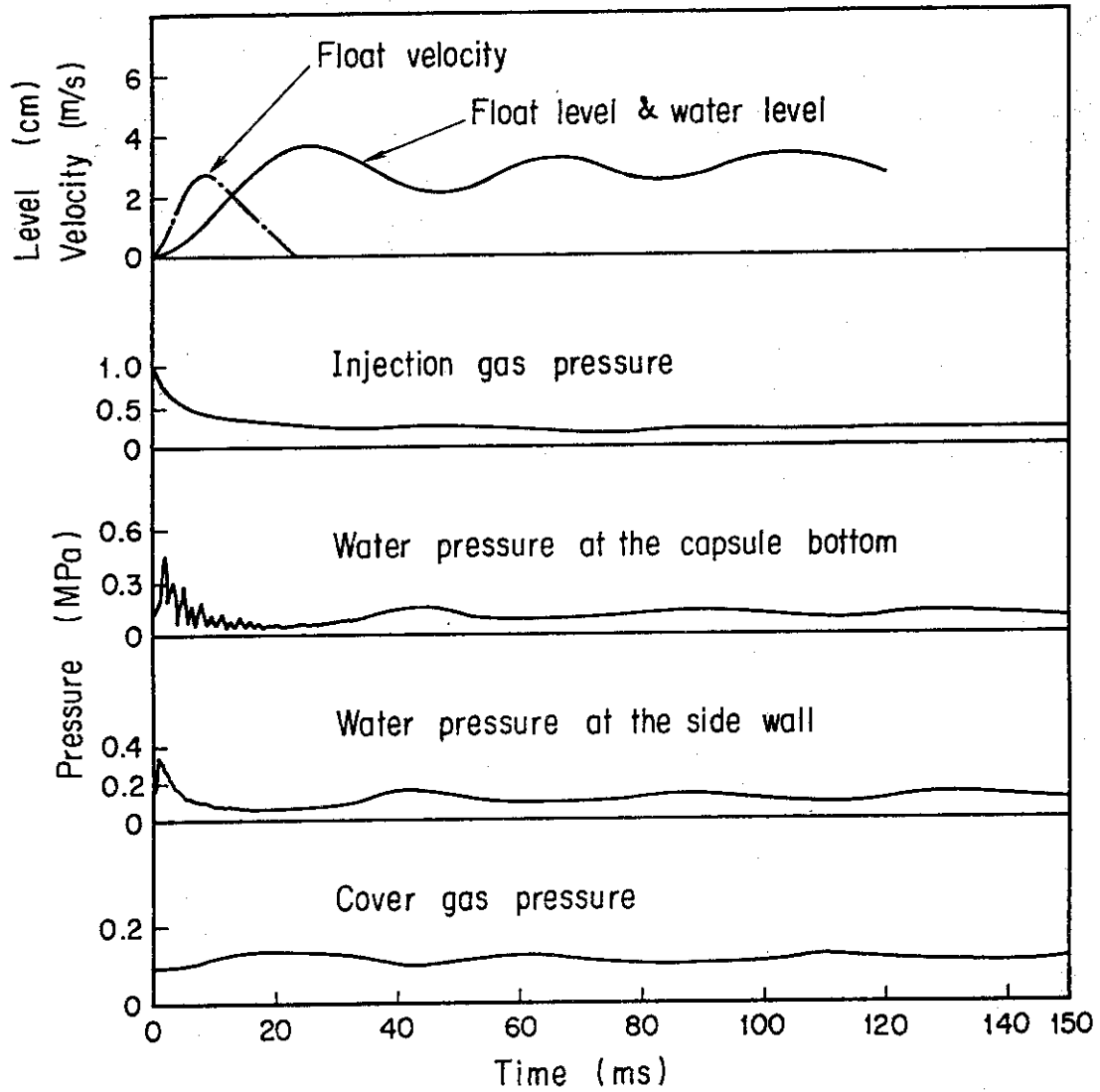


Fig. 14 Transient record of out-of-pile experiment using a large diameter float in Test No.100L-1 (initial rupture pressure: 0.9MPa)

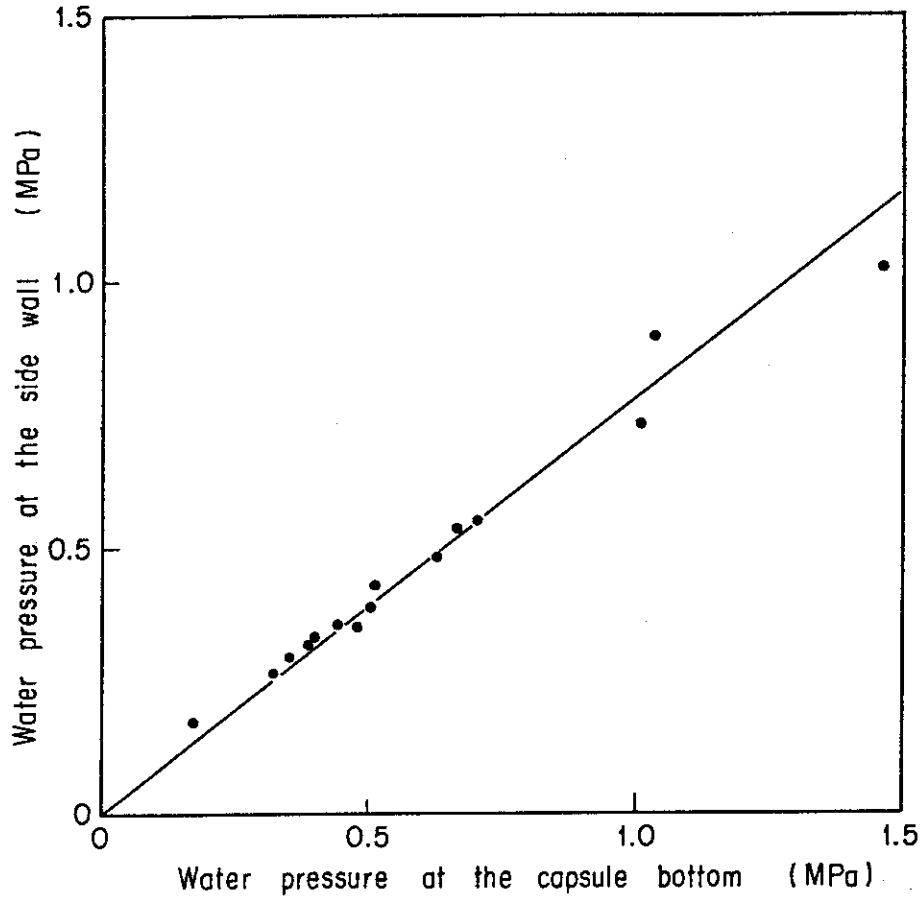


Fig. 15 Relation between water pressure at the side wall and that at the capsule bottom

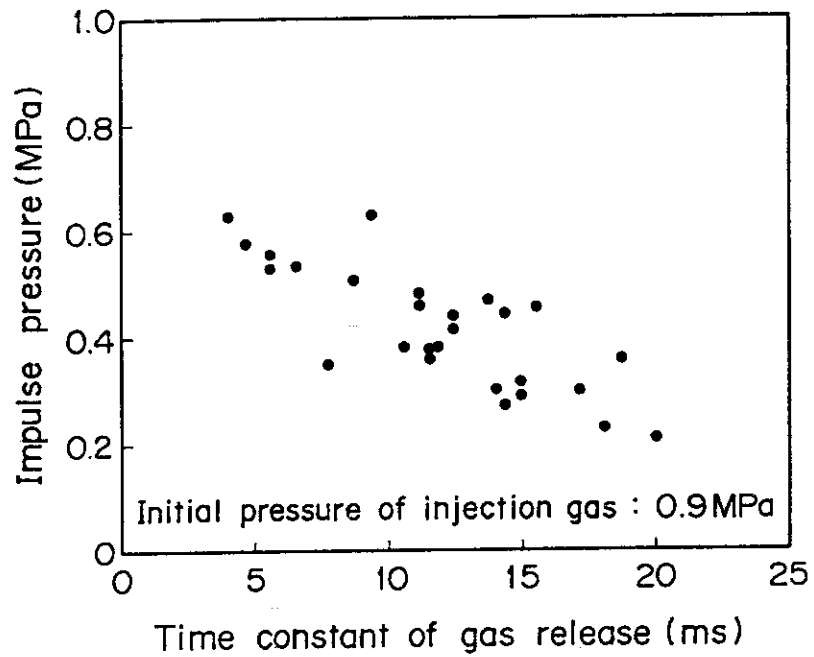


Fig. 16 Impulse pressure in water at the capsule bottom vs time constant of gas release in the gas injection equipment

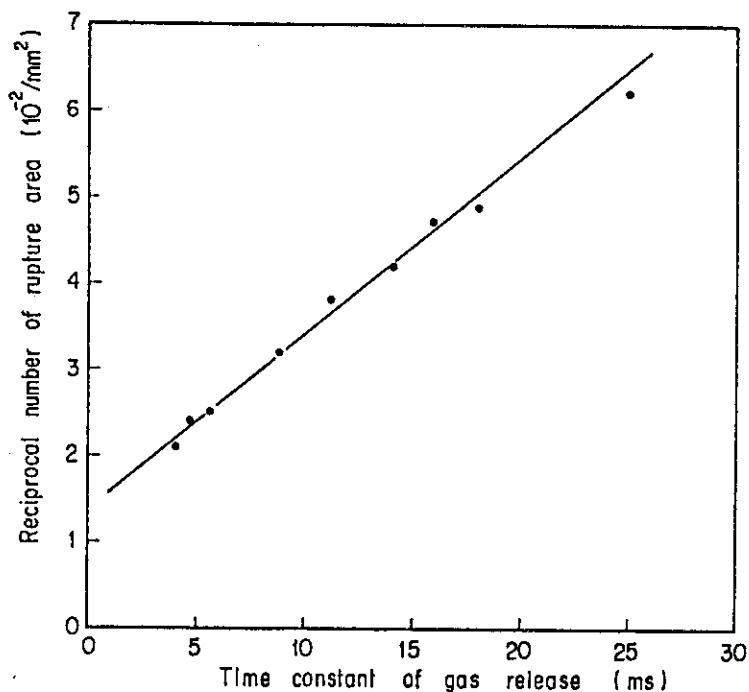


Fig. 17 Relation between reciprocal number of rupture area and time constant of gas release

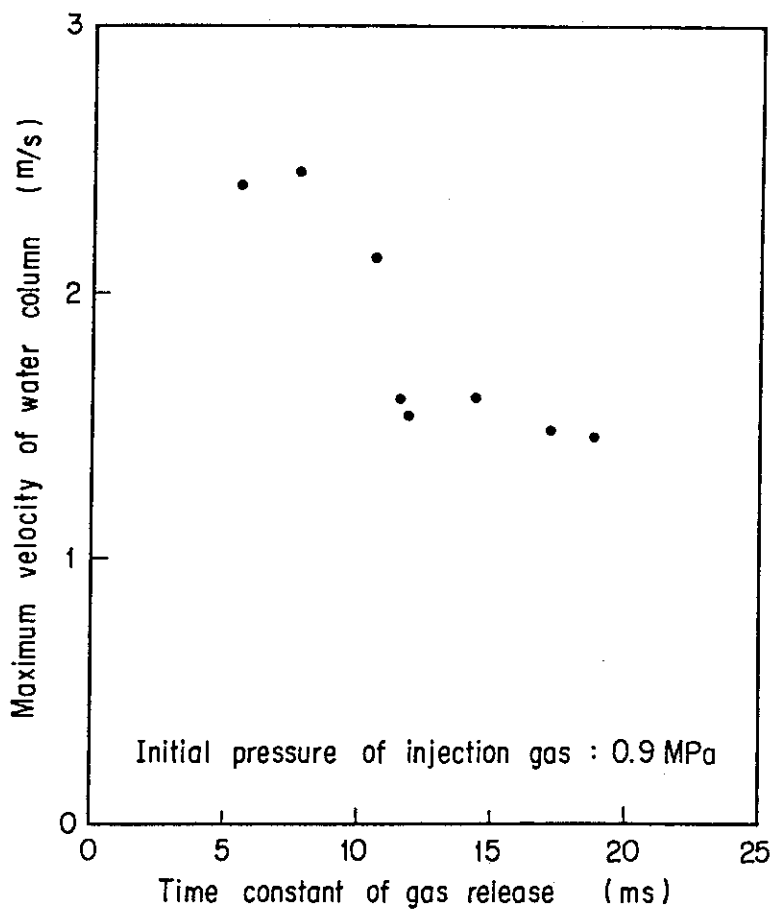


Fig. 18 Effect of time constant of gas release on maximum velocity of water column

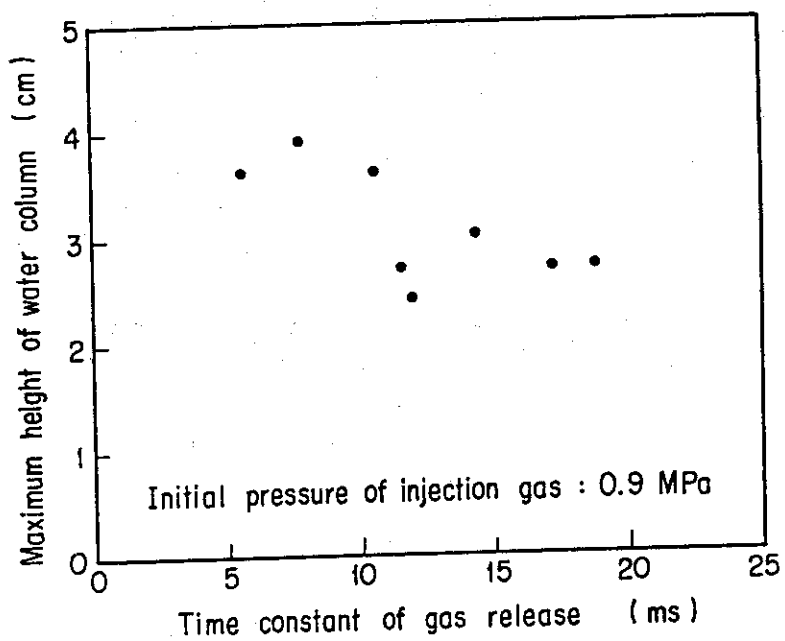


Fig. 19 Effect of time constant of gas release on maximum height of water column

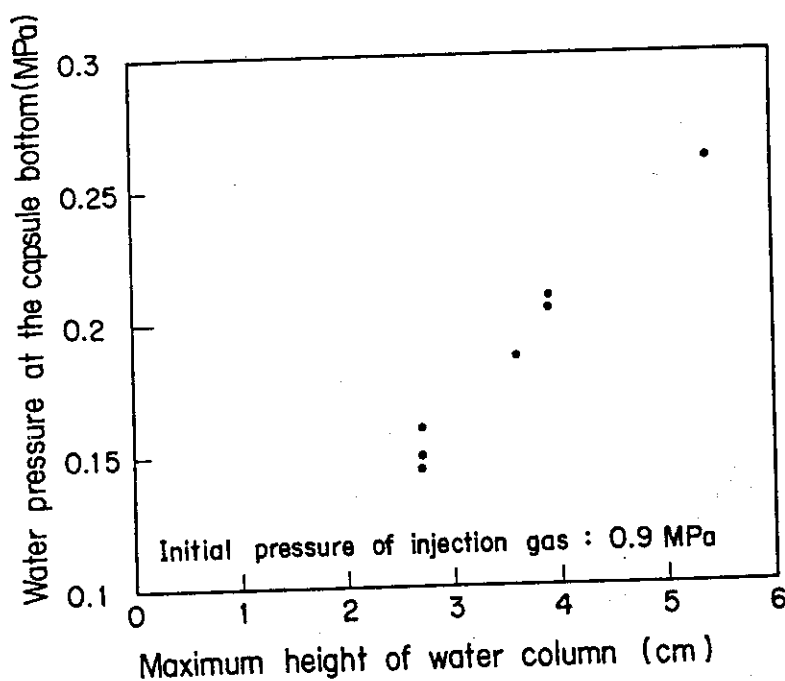


Fig. 20 Relation between secondary water pressure generated by water column vibration and maximum height of water column.



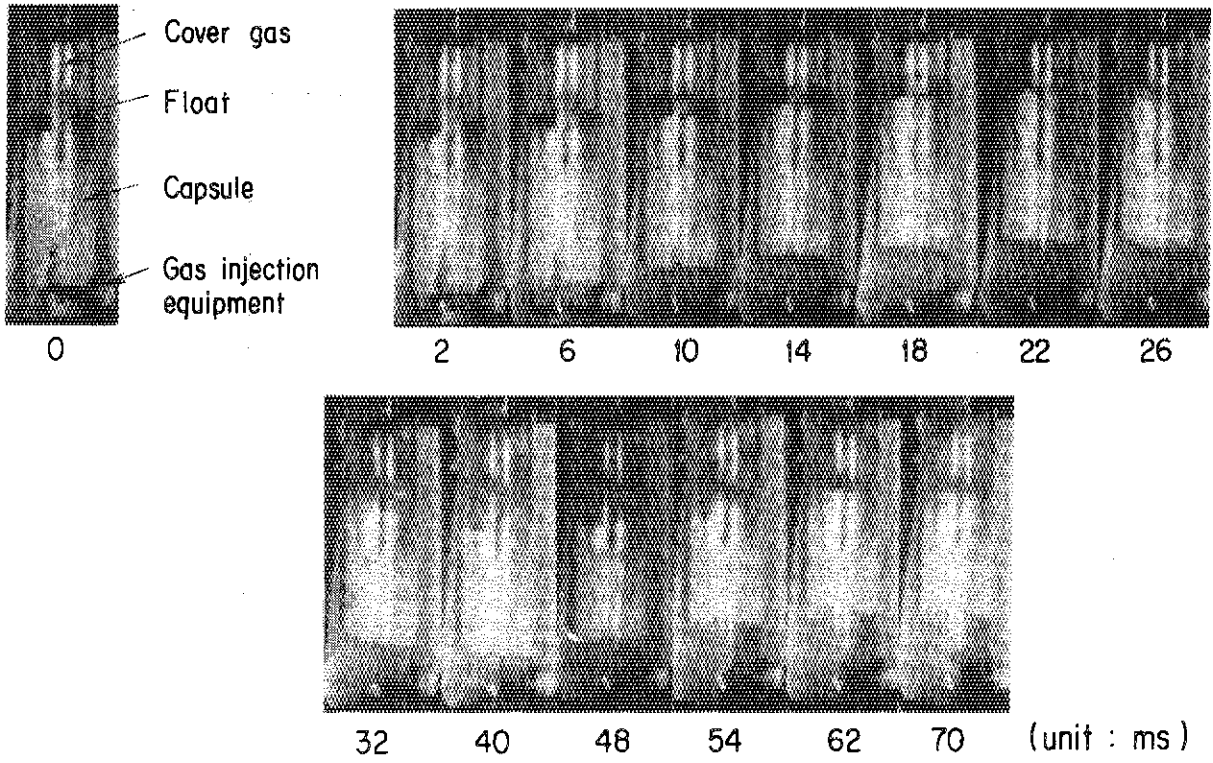


Fig. 21 Water column behavior in the capsule in Test No.107-1 (initial rupture pressure: 2.1MPa)

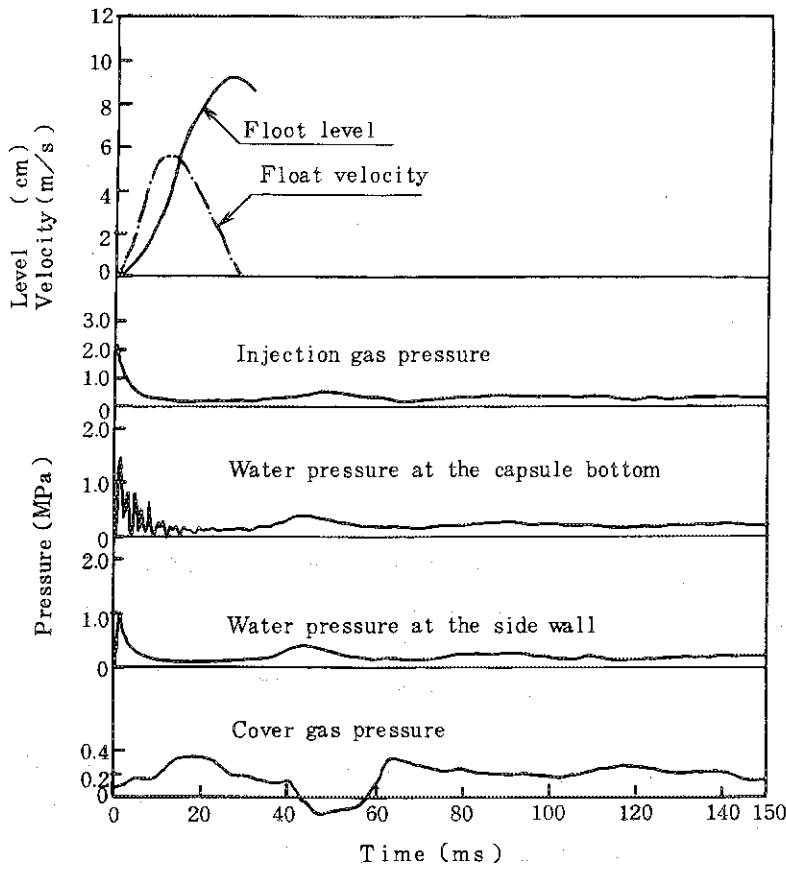


Fig. 22 Transient record of out-of-pile experiment in Test No.107-1 (initial rupture pressure: 2.1MPa)

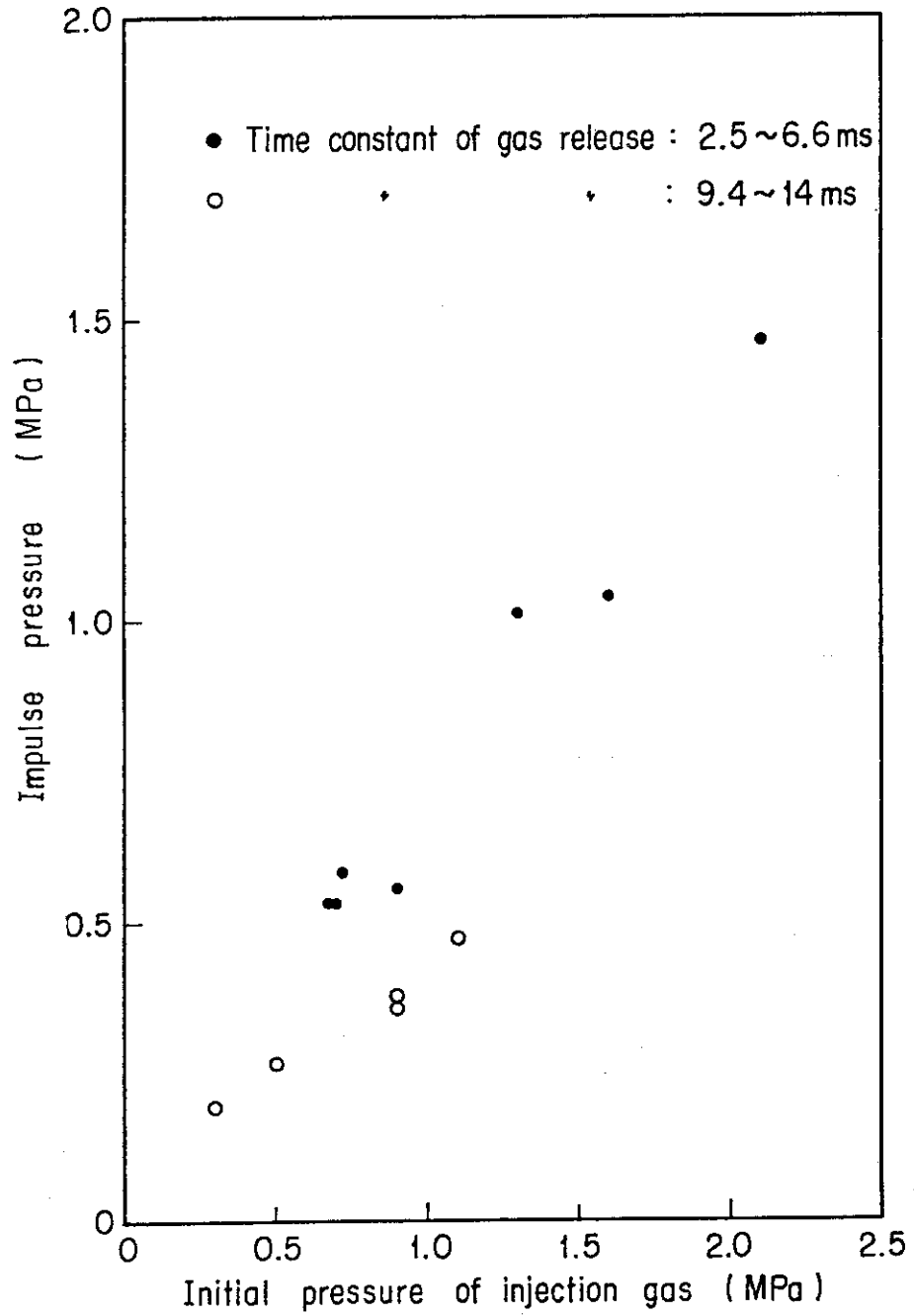
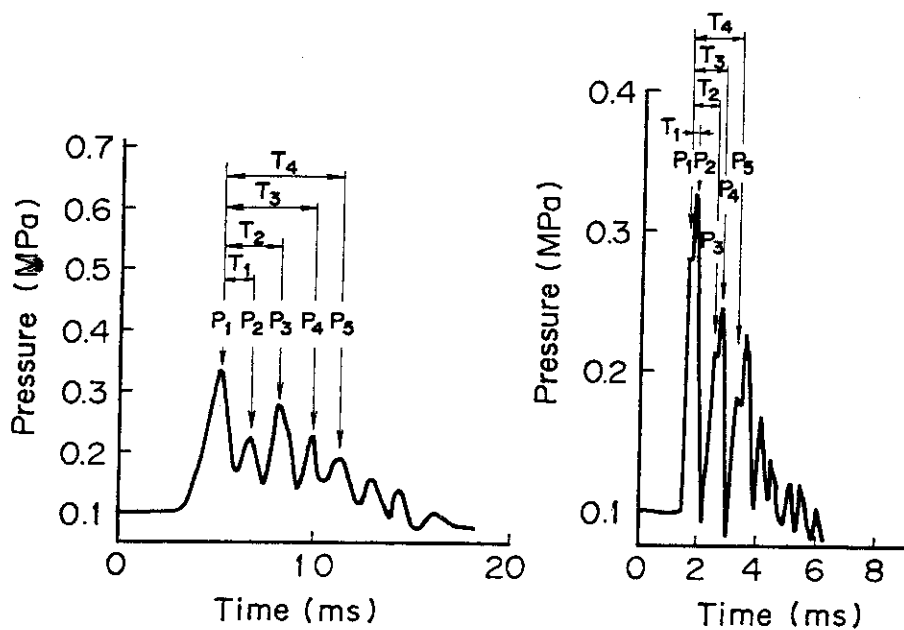


Fig. 23 Effect of initial pressure of injection gas on impulse pressure



(a) Out-pile experiment      (b) In-pile experiment

Time interval	Out-pile experiment		In-pile experiment	
	Measurement	Calculation	Measurement	Calculation
$T_1$	1.44	1.55	0.12	0.29
$T_2$	3.13	3.11	0.87	0.87
$T_3$	4.69	4.66	1.08	1.17
$T_4$	6.13	6.22	1.66	1.74
$T_A = T_2$	3.13	3.11	0.87	0.87
$T_B = T_3 - T_1$	3.25	3.11	0.96	0.87
$T_C = T_4 - T_2$	3.00	3.11	0.79	0.87

Fig. 24 Time interval of reflection wave measured by water pressure sensor at the capsule bottom

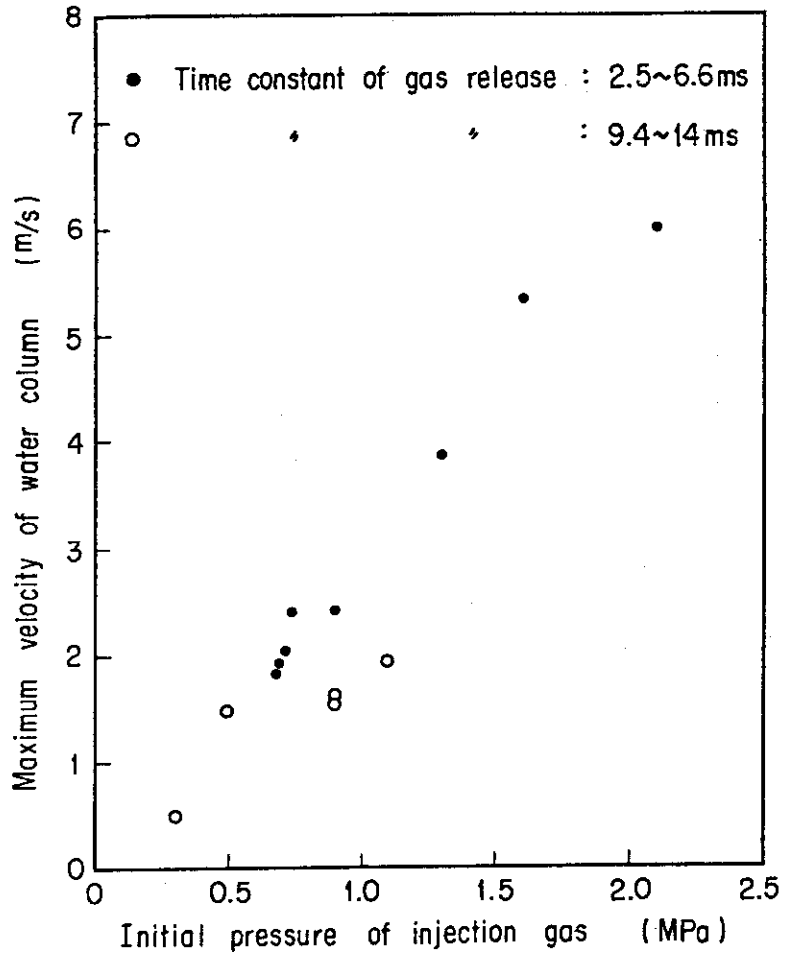


Fig. 25 Effect of initial pressure of injection gas on maximum velocity of water column

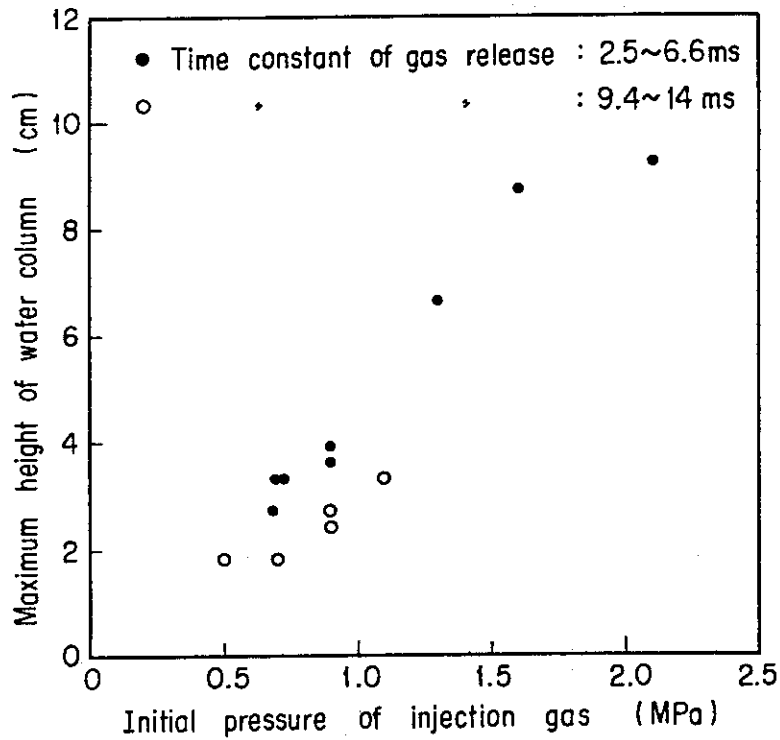


Fig. 26 Effect of initial pressure of injection gas on maximum height of water column

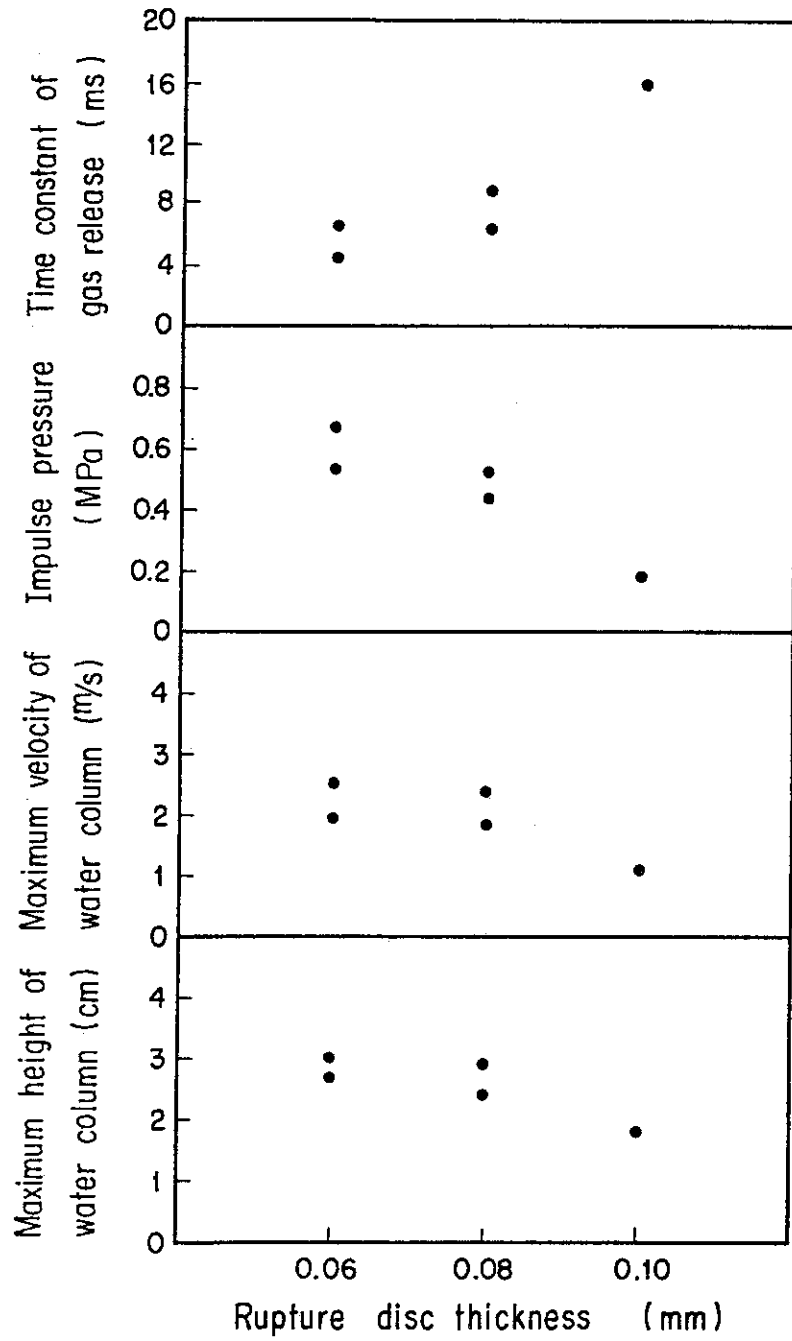


Fig. 27 Effect of rupture disc thickness on behavior of water column in a capsule

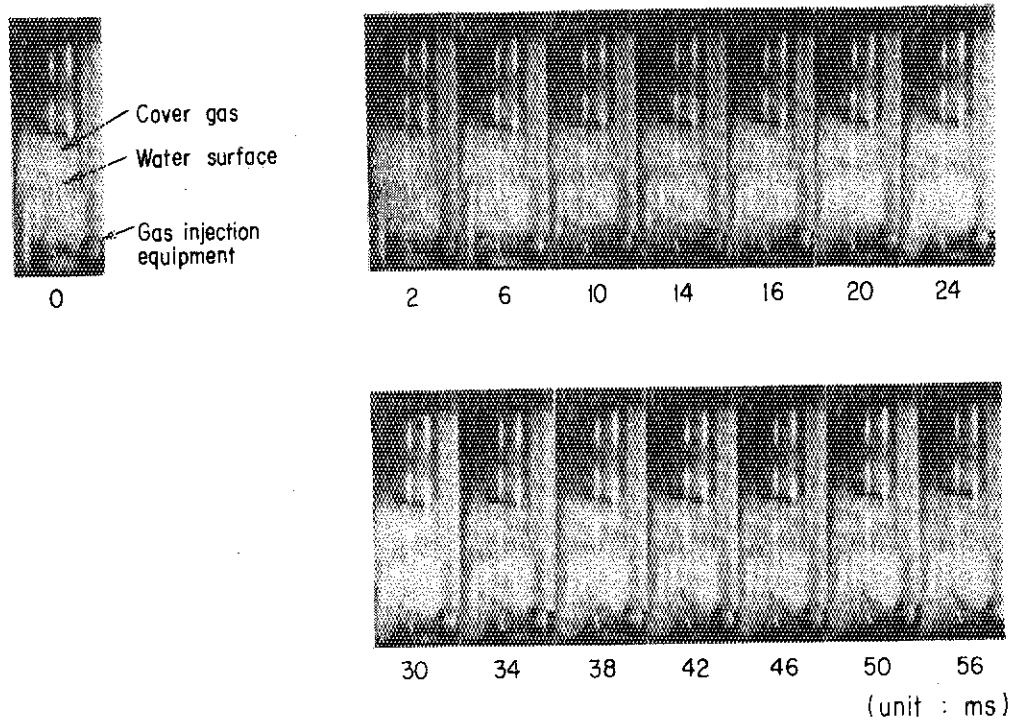


Fig. 28 Water column behavior in the capsule with low water level in Test No.202 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

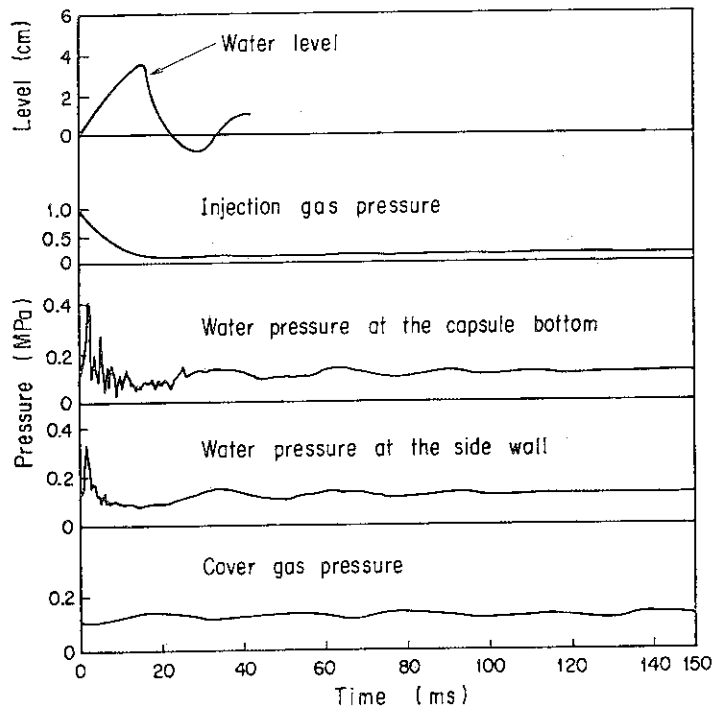


Fig. 29 Transient record of out-of-pile experiment in Test No.202 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

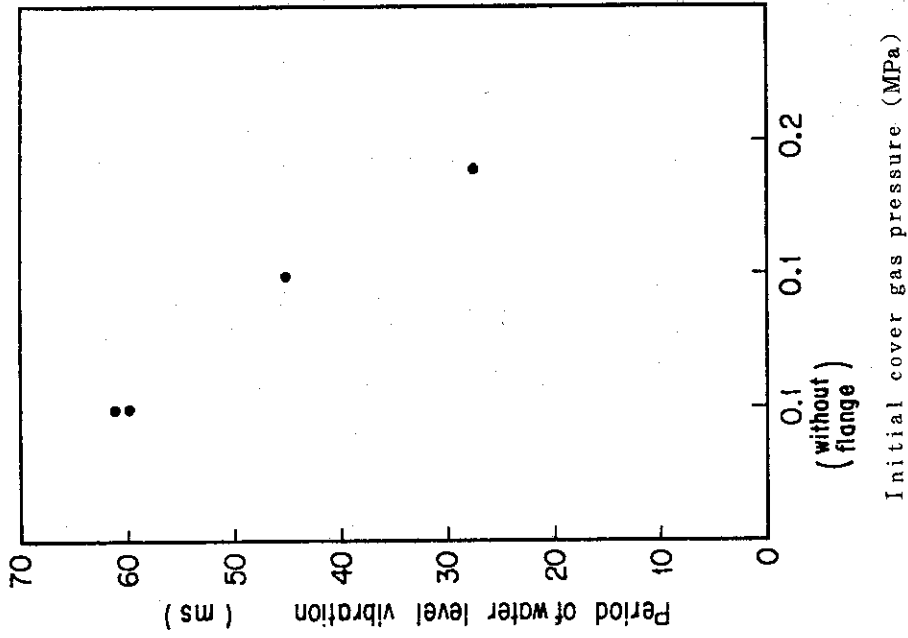


Fig. 31 Effect of cover gas pressure on period of water level vibration

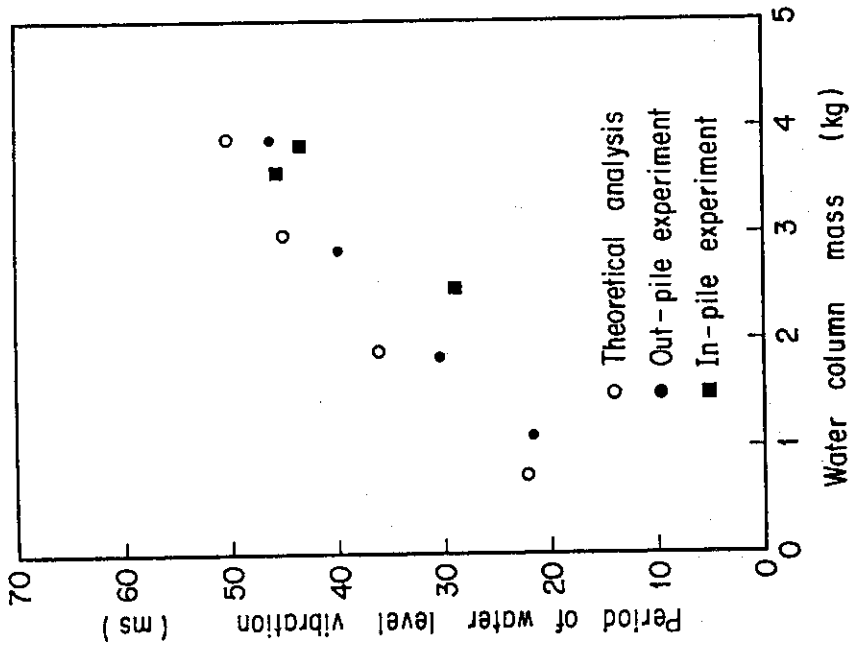


Fig. 30 Relation between period of water level vibration and water column mass

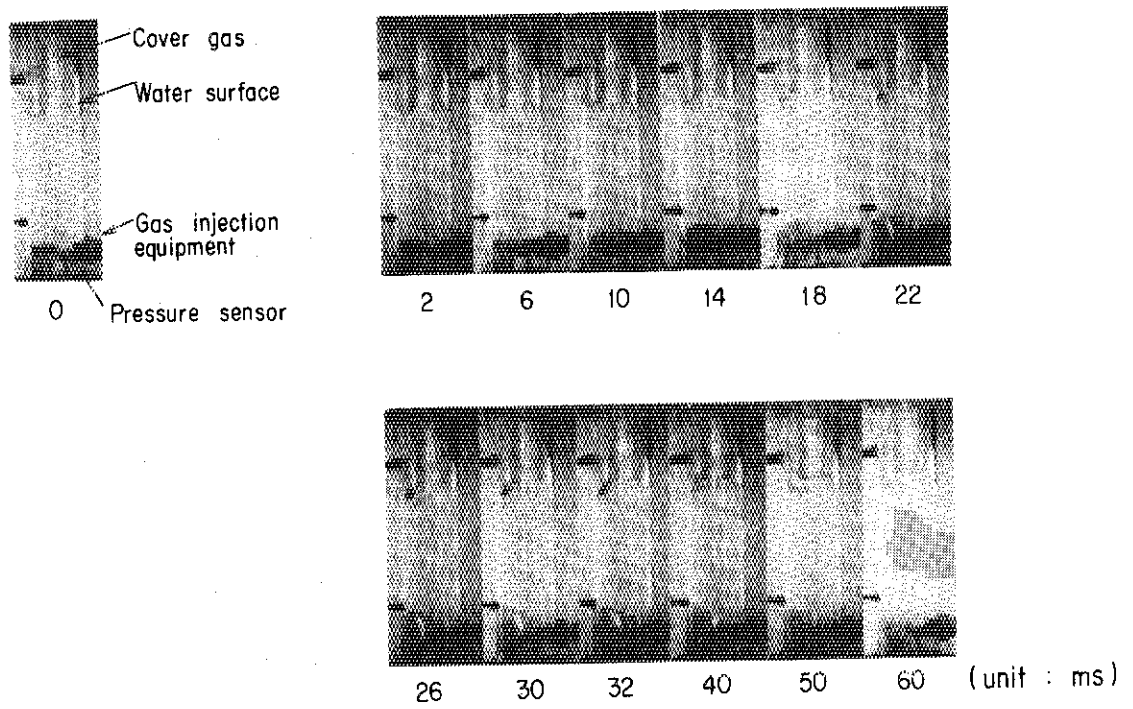


Fig. 32 Water column behavior in the capsule without capsule top flange in Test No.302-1 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

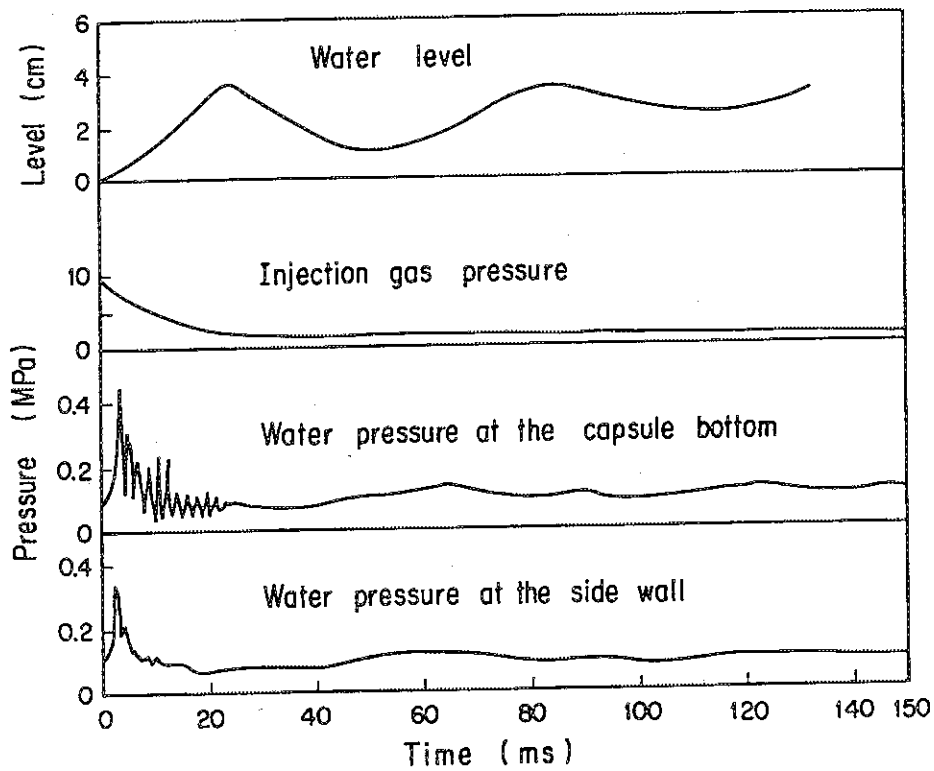


Fig. 33 Transient record of out-of-pile experiment without capsule top flange in Test No.302-1 (initial rupture pressure : 0.9 MPa)



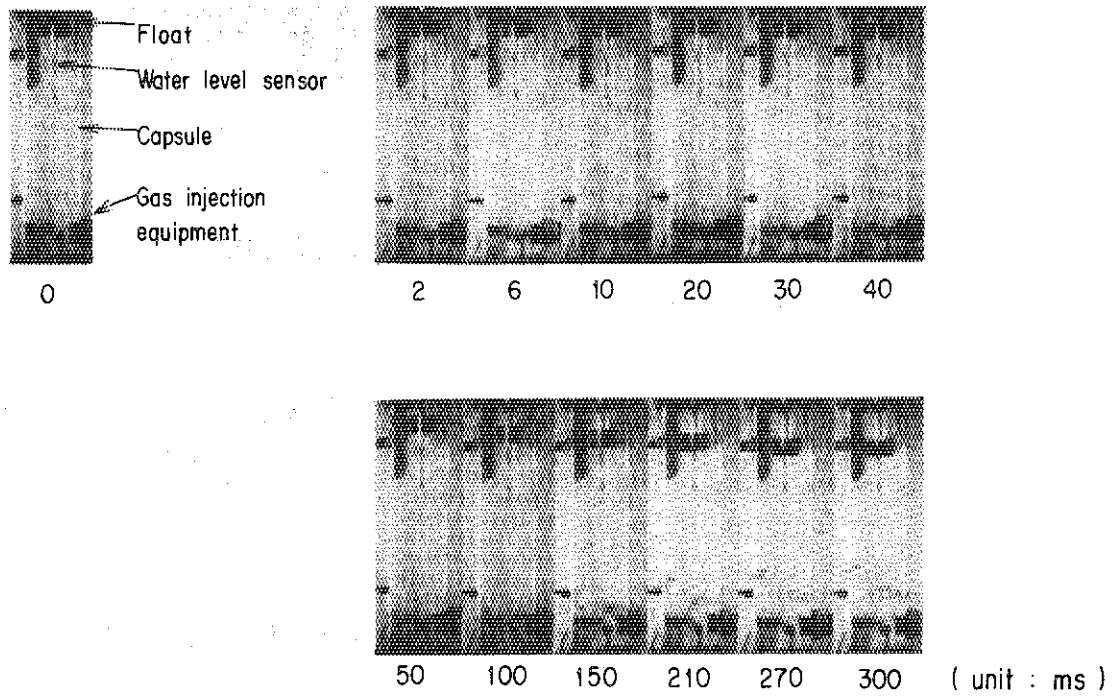


Fig. 34 Water column behavior in the water filled capsule in Test No.303 (initial rupture pressure : 0.9 MPa)

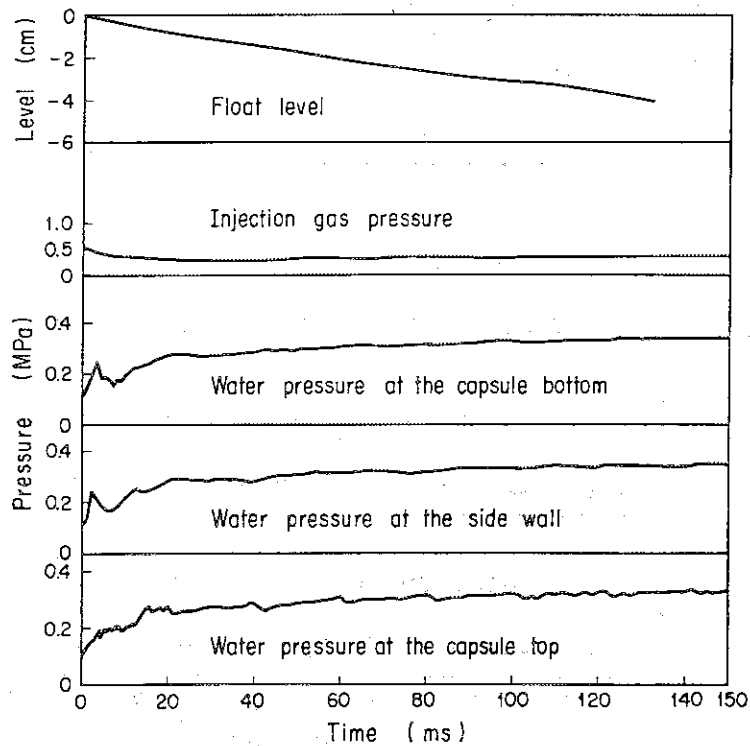


Fig. 35 Transient record of out-of-pile experiment in Test No.303 (water filled capsule initial rupture pressure: 0.5 MPa)

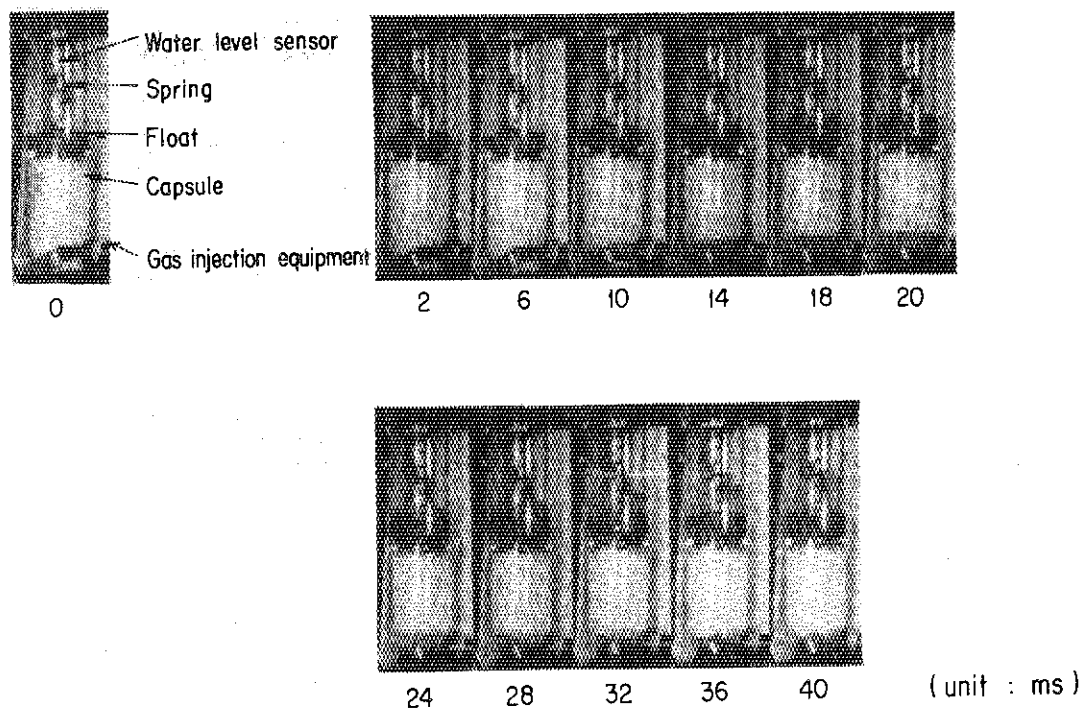


Fig. 36 Water column behavior in the capsule using large diameter float with spring in Test No.400-1 (initial rupture pressure:0.9MPa)

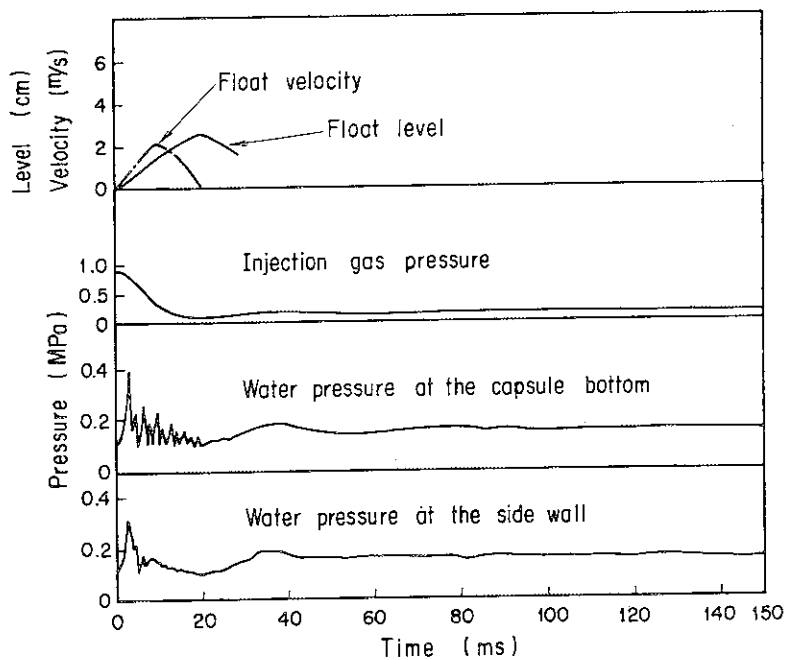


Fig. 37 Transient record of out-of-pile experiment using spring in Test No.400-1 (initial rupture pressure : 0.9 MPa)

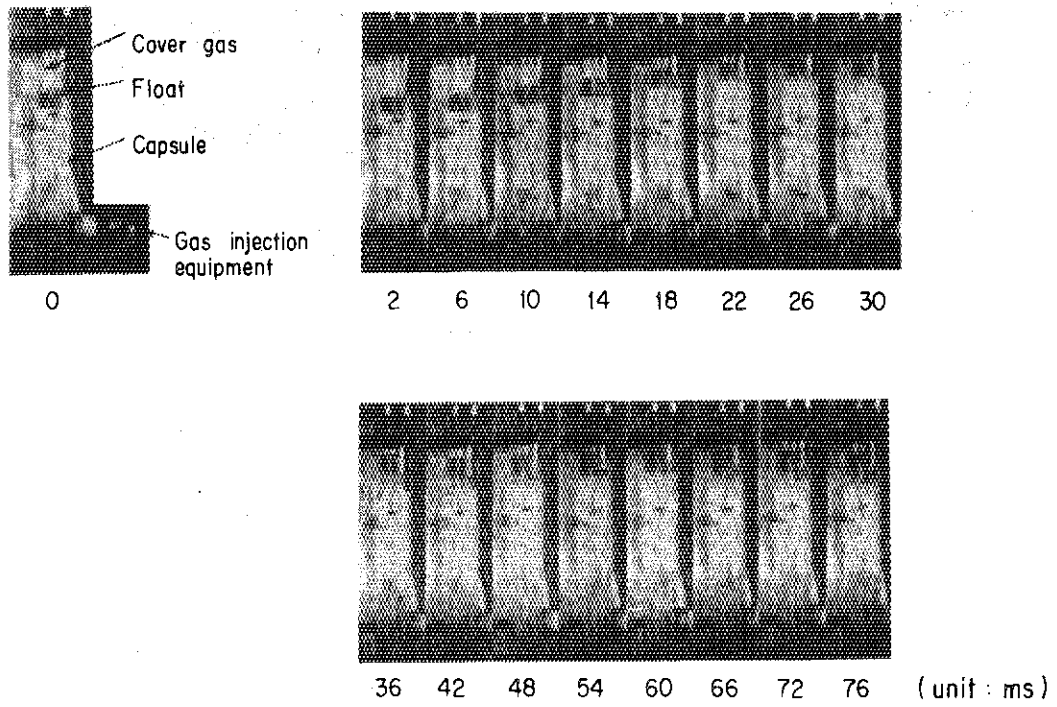


Fig. 38 Water column behavior in the small diameter capsule in Test No.600 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

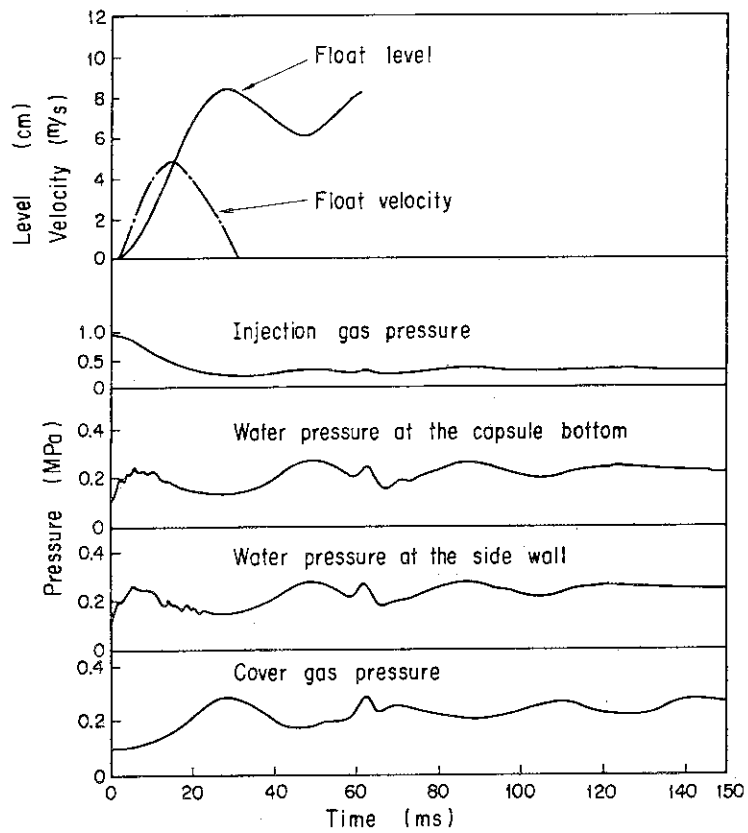


Fig. 39 Transient record of out-of-pile experiment using small diameter capsule in Test No.600 (initial rupture pressure : 0.9MPa)

## 4. 機械エネルギー評価

### 4.1 機械エネルギー評価方法

炉外可視カプセル実験の結果、水塊の挙動はピストン運動をすることが明らかになった。Fig. 40 はピストン運動モデルであり、運動方程式は以下に与えられる。

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -g + \frac{gA}{M} P_1(x) - \frac{gA}{M} P_2(x) - \frac{r}{M} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $A$  はカプセルの断面積、 $P_1, P_2$  はそれぞれ圧縮ガスとカバーガスの圧力、 $M$  は飛上る水塊の質量、 $r$  は抵抗係数、 $x$  は水塊の変位、 $t$  は時間を示す。

解析例を Fig. 41 に示す。この図に示されたように、カプセル内の水位やカバーガス圧と水圧との交互振動の周期など解析結果は Fig. 12 に示した炉外実験の結果と良く一致している。

従って NSRR 実験で使用しているカプセル体系においては、燃料破損に伴い発生する機械エネルギーの形態は、(1)水塊の運動エネルギー、(2)水塊の位置エネルギー、(3)カバーガスの圧縮エネルギー（エンタルピー増加）、(4)カプセルの歪エネルギーの4つが考えられる。

即ち、機械エネルギー  $E_m$  は次式で与えられる。

$$E_m = E_k + E_p + E_c + E_s \quad (3)$$

$E_k$  : 運動エネルギー  
 $E_p$  : 位置エネルギー  
 $E_c$  : 圧縮エネルギー  
 $E_s$  : 歪エネルギー

また炉内実験において評価される機械エネルギー転換率  $\eta$  は

$$\eta = \frac{E_m}{E_t} \quad (4)$$

で与えられる。ここで  $E_t$  は核分裂により発生する熱エネルギーである。

実験においては水位計により水塊の速度および位置、歪計によりカプセル歪が得られ、機械エネルギーを求めることができる。しかし水塊速度測定による方法では前節に述べたように水塊質量の評価が重要になるので、著者等はすでに述べたようにスプリングを取付け水塊の運動エネルギーをスプリングの圧縮エネルギーに変換させて求める方法も検討した。

以下にそれぞれの測定による評価法について述べる。

### 4.2 水塊速度の測定による機械エネルギー評価

水塊の運動エネルギー  $E_k$  は次式で表わせる。

$$E_K = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (5)$$

ここで  $M$  : 飛び上り水塊の質量

$v$  : 水塊速度

一方 水塊の位置エネルギー  $E_P$  は次式で表わせる。

$$E_P = Mgh \quad (6)$$

ここで  $g$  : 重力加速度

$h$  : 水塊の飛上り高さ

また, カバーガスの圧縮エネルギー  $E_C$  は等エントロピーを仮定すれば,

$$E_C = \int_{V_0}^V PdV \quad (7)$$

$$= \frac{1}{r-1} (P_0 V_0 - PV) \quad (8)$$

ここで,  $P = P_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^r$

$P_0, P$  : 圧縮前後のカバーガス圧力

$V_0, V$  : 圧縮前後のカバーガス体積

$r$  : カバーガスの比熱比

と表せる。

さらにカプセルの歪エネルギー  $E_S$  は次式で表わせる。

$$E_S = \frac{1}{2} P_f \cdot \delta$$

ここで  $P_f$  : 引張力

$\delta$  : 全伸び

標準実験条件での水塊位置と圧縮エネルギー, および水塊速度と運動エネルギー関係を Fig. 42 に示す。図から標験実験の機械エネルギー発生 of 過渡挙動を求め Fig. 43 に示す。なお Fig. 43 では水塊の位置エネルギーとカプセルの歪エネルギーの機械エネルギーに占める割合が, Table 2 に示したごとく小さいので, これらを見捨てた。機械エネルギーは, Fig. 43 に示したごとく水塊の上昇と共に増加し, 水塊の最高到達位置で最大値を示した。

機械エネルギーと注入ガスの圧力減衰時定数との関係を Fig. 44 に示す。図中, スプリングなしの標準カプセル実験 (黒丸) をみると機械エネルギーは圧力減衰時定数が短いほど大きくなることわかる。これは水塊の最高到達位置が圧力減衰時定数の減少と共に高くなるためであり, 機械エネルギーの大きさはガス流入流量に依存することわかる。次に注入ガスの初期圧力と機械エネルギーの関係を Fig. 45 に示す。実験ではガス注入装置のチャンバ容積を一定にとったので注入ガスの圧力増加と共に機械エネルギーが増加することになる。

小径カプセル実験 (Test No 600) についても同様機械エネルギーを評価すると Fig. 44 に示したごとく標準カプセルの実験結果と良く対応している。

### 4.3 スプリングによる機械エネルギー評価

スプリングの圧縮により吸収される弾性歪エネルギー  $E_e$  は次式で表わせる。

$$E_e = \frac{1}{2} k x^2 \quad (9)$$

ここで  $k$  : バネ定数

$x$  : 最大変位

標準カプセル(内径120mm)にバネ定数  $1.36 \times 10^4 \text{ kg/s}^2$  のスプリングを設けた実験 (Test №400), 並びに小径カプセル(内径60mm)にバネ定数  $7.1 \times 10^3 \text{ kg/s}^2$  のスプリングを設けた実験 (Test №602, 603) の結果から機械エネルギーを評価し, Fig. 44 に示した。まず標準カプセルの場合は, スプリングの圧縮から求めた機械エネルギーと水塊速度計から求めた値とが良く一致した。一方, 小径カプセルの場合は, スプリングを用いて測定した機械エネルギーの方が, 低い値となった。これはカプセル内壁と浮子とのギャップが標準カプセルに比べ大きい為, 水塊が飛上った際, スプリングの抗力のためギャップ部から流出する水量が無視できなくなったためと考えられる。ギャップ部からの水の流出は高速度写真の結果からも観測された。従って小径カプセルにおいてもカプセル内壁と浮子とのギャップを小さくすれば, スプリングによる機械エネルギーの吸収は可能と考えられる。

### 4.4 機械エネルギー評価法のまとめ

炉外実験の結果, 機械エネルギー評価法としては次の二つの方法が妥当と考えられる。

- (1) 水位に追随する水位計の信号と後期圧力群の振動周期から得られる飛び上り水塊の質量をもとに, ピストンモデルに従い水塊の運動エネルギーとカバーガスのエンタルピー増加とから評価する方法。
- (2) 水塊のもつ運動エネルギーをスプリングの圧縮による弾性歪エネルギーに変換して求める方法。

なお(1), (2)の方法で求めた機械エネルギーはほぼ一致をみた。さらに炉内実験を解析するにあたり有効と思われる炉外実験での知見を示す。

- (1) 炉外実験で発生した機械エネルギーは注入ガスの初期圧力が高い程増大し, さらにラプチャディスクの破断面積が大きい程増大した。
- (2) 機械エネルギーに及ぼすカプセル内径の影響は認められなかった。

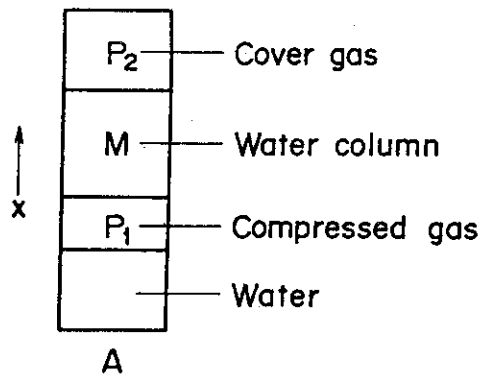


Fig. 40 Water piston model

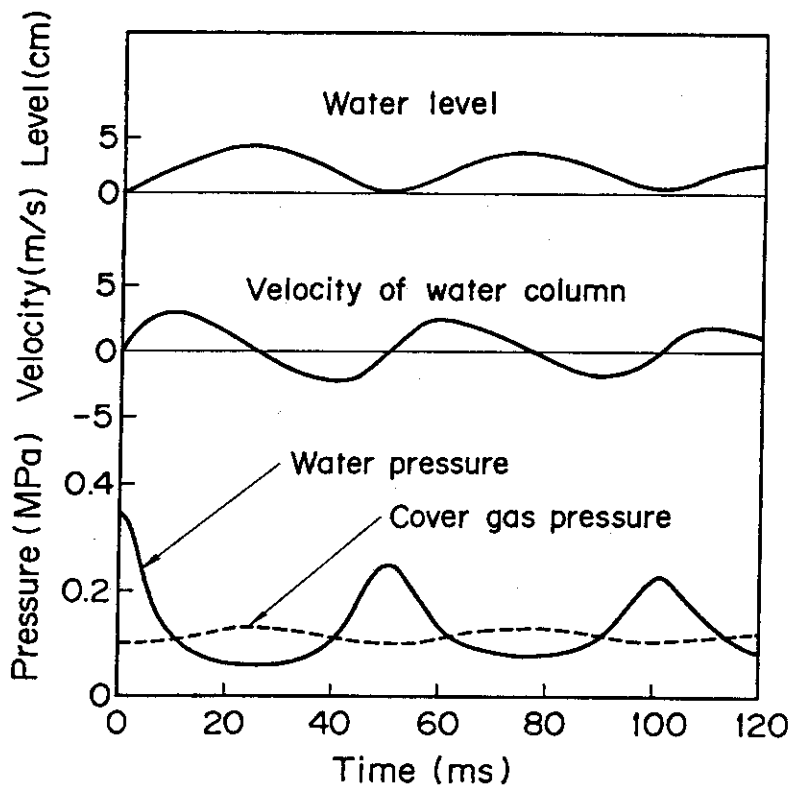


Fig. 41 Theoretical analysis on behavior of water column using water piston model

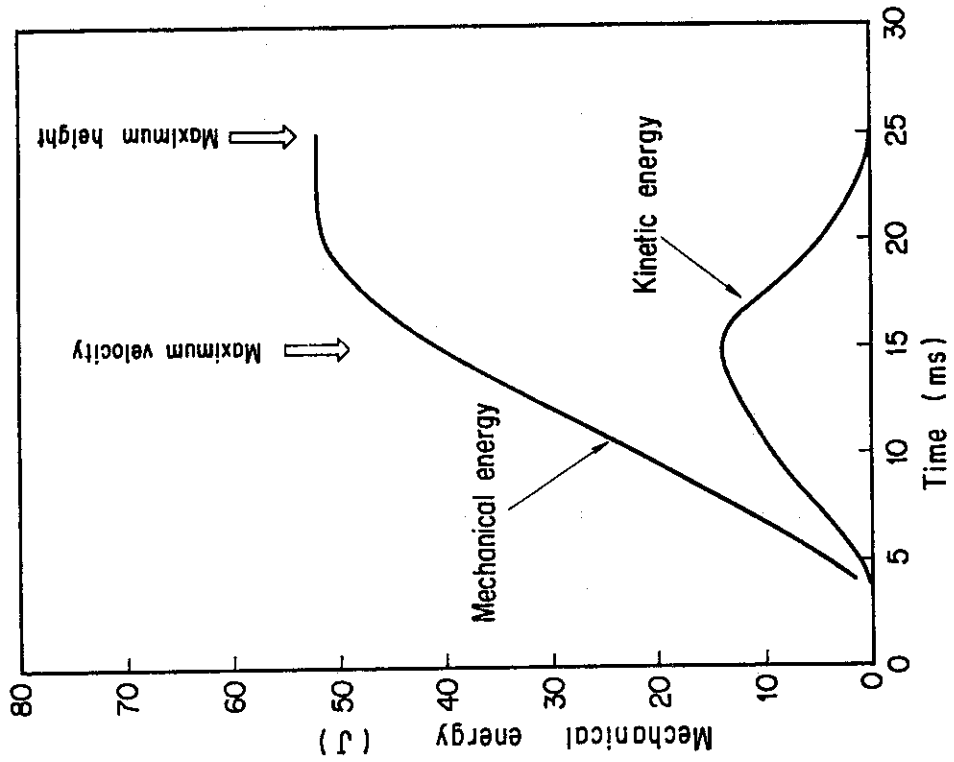


Fig. 43 Typical transient behavior of energy

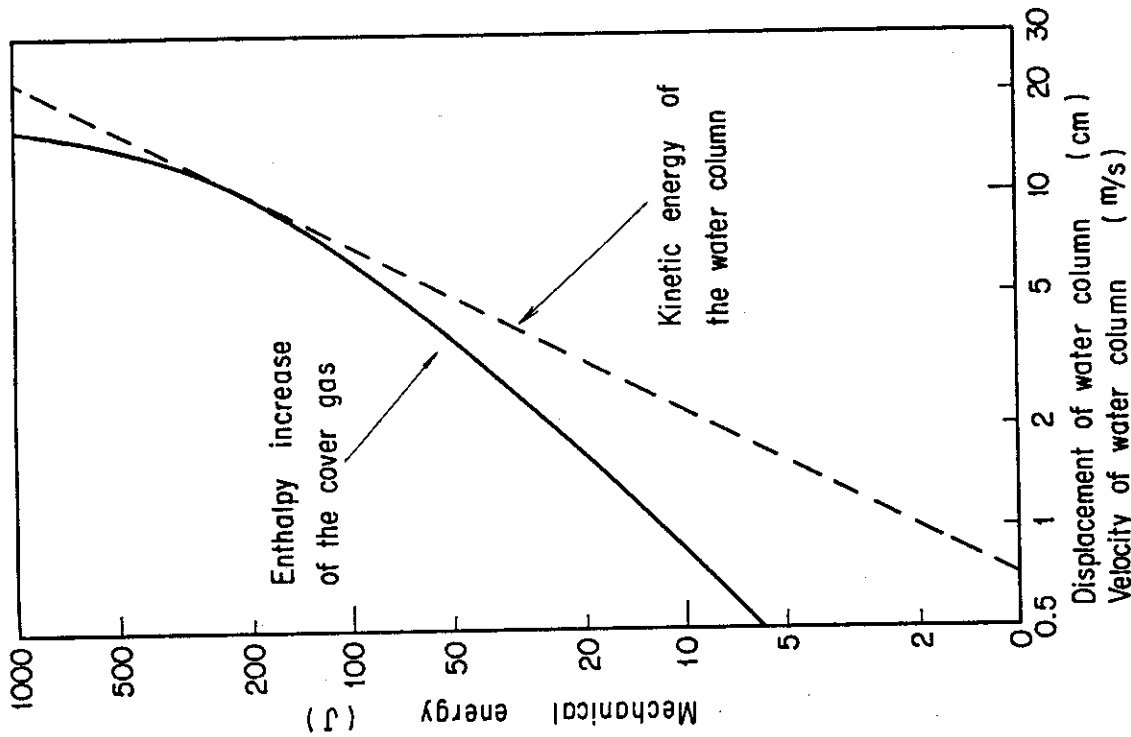


Fig. 42 Relation between mechanical energy and displacement and velocity of the water column in the standard capsule



Table 2 Mechanical energy release in out-of-pile experiment No.100-1

Kinetic energy of the water column	12.1 J
Enthalpy increase of the cover gas	29.5 J
Potential energy of the water column	2.2 J
Strain energy of the acrylite capsule	0.2 J
Total mechanical energy	44.0 J

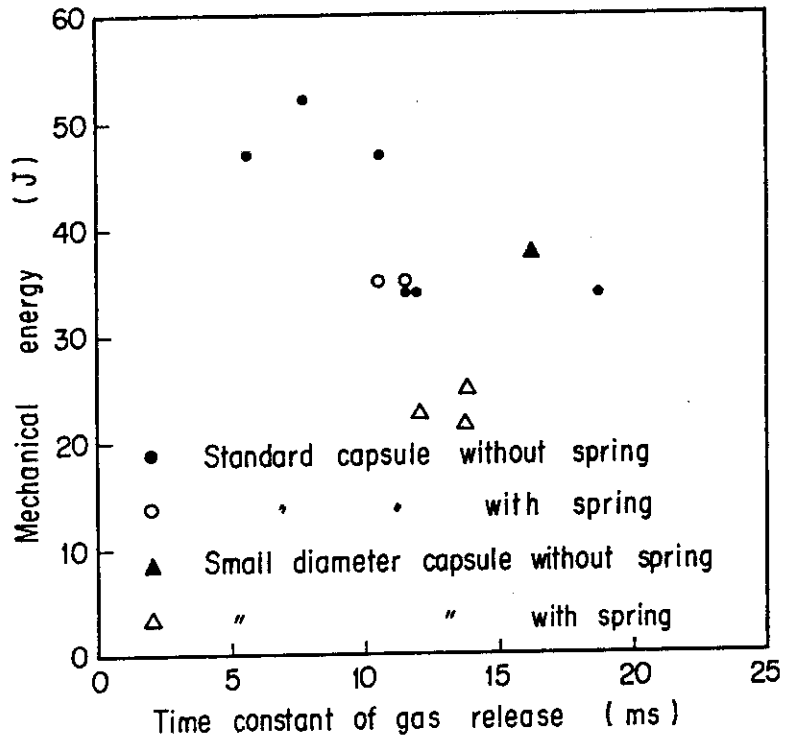


Fig. 44 Effect of time constant of gas release on mechanical energy (initial rupture pressure : 0.9MPa)

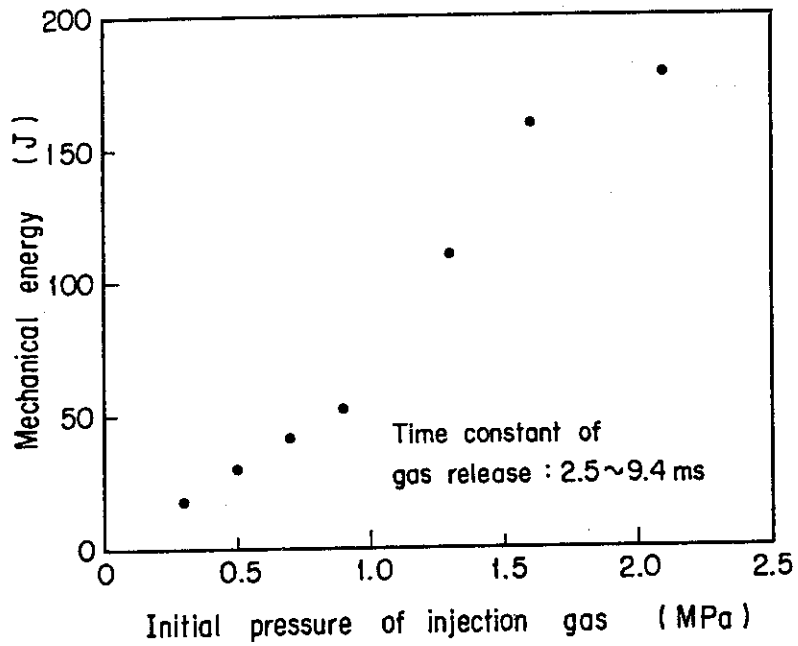


Fig. 45 Relation between mechanical energy and initial pressure of injection gas

## 5. 結 言

反応度事故条件下でのNSRR炉内実験で観測される機械エネルギーの発生機構並びに機械エネルギー評価法を検討するため、ラプチャディスクを用いた炉外での可視実験を実施し、炉内でのカプセル内挙動を模擬するにガス注入法が妥当であることを実証した。さらに炉内実験を解析するにあたり有効と思われる知見をまとめて以下に示す。

### (1) 注入時の衝撃圧力

注入ガスの初期圧力が高い程高く、さらにラプチャディスクの破砕断面積が大きい程高くなる。

### (2) 水塊の挙動

ガス注入部より上部の水は剛体のごとく水塊となって飛び上がり、カプセル上部のカバーガスとの間をピストン状に上下運動する。この際、水面に浮べた浮子は水塊が最高点に達するまで水塊の挙動に良く追随する。

### (3) 水塊質量の評価法

飛び上った水塊の質量は、水塊のピストン運動により発生した後期圧力群の振動周期より求まる。

### (4) 機械エネルギー評価法

(a) ピストンモデルに従う水塊の運動エネルギーとカバーガスのエンタルピー増加とから評価できる。

(b) スプリングの圧縮による弾性歪エネルギーとカバーガスのエンタルピー増加とから評価できる。

### (5) 炉内実験との類似性

炉外実験ではラプチャディスクの破砕と同時に衝撃圧力が発生し、引き続き数ms周期の圧力振動が生じ、その後20~50ms周期の圧力振動が生じた。前者はラプチャディスク破砕に伴なり衝撃圧力とその反射波であり、炉内実験で観測された前期圧力群に対応する。後者は水塊のピストン運動によって生じるもので炉内実験で観測された後期圧力群に対応する。

## 謝 辞

本研究を進めるに当って、総合的に御指導戴いた安全工学部次長 石川迪夫氏に感謝の意を表します。また、実験遂行に御助言・御協力を戴いた反応度安全研究室ならびにNSRR管理室の皆様へ感謝いたします。

## 5. 結 言

反応度事故条件下でのNSRR炉内実験で観測される機械エネルギーの発生機構並びに機械エネルギー評価法を検討するため、ラプチャディスクを用いた炉外での可視実験を実施し、炉内でのカプセル内挙動を模擬するにガス注入法が妥当であることを実証した。さらに炉内実験を解析するにあたり有効と思われる知見をまとめて以下に示す。

### (1) 注入時の衝撃圧力

注入ガスの初期圧力が高い程高く、さらにラプチャディスクの破砕断面積が大きい程高くなる。

### (2) 水塊の挙動

ガス注入部より上部の水は剛体のごとく水塊となって飛び上がり、カプセル上部のカバーガスとの間をピストン状に上下運動する。この際、水面に浮べた浮子は水塊が最高点に達するまで水塊の挙動に良く追随する。

### (3) 水塊質量の評価法

飛び上がった水塊の質量は、水塊のピストン運動により発生した後期圧力群の振動周期より求まる。

### (4) 機械エネルギー評価法

(a) ピストンモデルに従う水塊の運動エネルギーとカバーガスのエンタルピー増加とから評価できる。

(b) スプリングの圧縮による弾性歪エネルギーとカバーガスのエンタルピー増加とから評価できる。

### (5) 炉内実験との類似性

炉外実験ではラプチャディスクの破砕と同時に衝撃圧力が発生し、引き続き数ms周期の圧力振動が生じ、その後20~50ms周期の圧力振動が生じた。前者はラプチャディスク破砕に伴う衝撃圧力とその反射波であり、炉内実験で観測された前期圧力群に対応する。後者は水塊のピストン運動によって生じるもので炉内実験で観測された後期圧力群に対応する。

## 謝 辞

本研究を進めるに当って、総合的に御指導戴いた安全工学部次長 石川迪夫氏に感謝の意を表します。また、実験遂行に御助言・御協力を戴いた反応度安全研究室ならびにNSRR管理室の皆様へ感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) U. S. AEC:IDO-19302,(1962).
- (2) Ergen,W. K. :Nucl. Safety 5,(1964).
- (3) Kessler, W. E., et al. :IDO-17019,(1963)
- (4) Kessler, W. E. and Weydert Jr. L. N. :IDO-17194
- (5) Taxelius,T. G. , et al. :IN-1370(1970)
- (6) 星 蔦 雄, 他 :日本原子力誌, 20〔9〕, 651(1978)
- (7) NSRR実験プログレスレポート・6, JAERI-M 7977,(1978)
- (8) 大西信秋, 他 :日本原子力誌, 投稿中
- (9) 星 蔦 雄, 他 :日本原子力学会, 昭和55年年会 A20
- (10) NSRR実験プログレスレポート・10, JAERI-M 9319,(1981)
- (11) 山崎利, 他 :JAERI-M 7105,(1977)

## 付録 A NSRR炉の概要

### (1) NSRRの構成

NSRRによる燃料破損実験では、試験燃料にパルス状の高い中性子束を与えることによって、実際の原子炉における反応度事故時の厳しい過渡的挙動を模擬した発熱状態を起し、試験燃料を破損に至らしめるものである。この実験の母体となるNSRRは、高いパルス性能を有するTRIGA型原子炉に実験上の便宜を考慮して改良を加えた熱中性子パルス炉である。原子炉はFig.A-1に示すように、水深9mを有するスイミング型の炉である。炉心はプール底部に位置しており、炉心燃料の冷却はプール水の自然循環によって行う。

試験燃料は、実験用カプセルあるいはループ中に収納固定して中央の実験孔に挿入する。

実験孔は、炉心中央に貫通し、プールの中程でY字状に分岐してプール上面の床面まで伸びた構造である。このうちの1本は垂直装填管、他方はオフセット装填管と呼ぶ。オフセット装填管は、管が傾斜しているため放射線のストリーミングが減少するので、シールドプラグが不要であり、実験物の挿入、取出しが容易に行える特徴がある。このため、オフセット装填管は標準サイズの実験物を用いた数多いパラメータ実験に便利である。一方、垂直装填管は、ループ実験や燃料集合体実験のような大形の実験物を用いる場合に使用する。

実験孔の下部にはカプセル・グリップ装置があり、カプセルの下部をしっかりと固定する。これは、カプセル内部で燃料が破壊した際に、冷却水を急速に加熱し大きな水撃力を発生して、カプセルを飛び上らせる作用を及ぼすことが予想されるために、これを防止することを目的としたものである。カプセル・グリップ装置の下端は、原子炉プール下部のサブパイプ室の壁に埋め込まれた1字鋼によって固定され、70tまでの衝撃圧に耐えることができる。また、垂直装填管内部にはカプセル・ホールダウン機構がある。これは、実験孔に装荷したカプセルの上部を抑えるためのもので、カプセル・グリップ装置とともに、カプセル飛び上り防止のための装置である。

### (2) 炉心構成

NSRRの燃料は、濃縮ウラン-水素化ジルコニウム(U-ZrH)を発熱体とし、上下に黒鉛反射体を配して、これをステンレス鋼製被覆材で覆ったものである。

U-ZrH燃料は、炉心に大きな正の反応度を印加しても、速かに炉出力の上昇を抑える強い即発性の負の温度係数(約 $-9.3 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ )を有する。これは、燃料中に減速材(ZrH)が均一に混合しており、減速材の温度上昇が燃料温度の上昇と同時に起こって、中性子のスペクトル硬化が即発的に生じ、熱中性子の利用率を著しく減少するためである。

燃料は、Fig.A-2に示すように、内径22cmの六角形の中空実験孔の周囲に稠密に配列され炉心を構成する。炉心内の燃料本数は149本であり、炉心は約\$8.5の余剰反応度を有する。また、炉心内には安全棒2本、調整6本(いずれも燃料フォロア型制御棒)の制御棒のほか、パルス出力発生のために用いるトランジェント棒3本がある。トランジェント棒は $B_4C$ の中性子吸収体に空気フォロアのついた制御棒で、3本のトランジェント棒のうち2本は、圧縮空気によって駆動し、他の1本は圧縮空気駆動系に加えて電動モータ駆動系を備えており、

任意に挿入位置を加減することができて、パルス運転の際の投入反応度を調節しうる。

パルス運転時には、各トランジェント棒は全て圧縮空気系で急速引き抜きする。トランジェント棒の反応度変化上有効なストロークの引き抜き時間は約50msecである。NSRRのパルス運転上許された最大投入反応度は\$4.70であり、この場合の反応度変化率は約\$100/secとなる。

### (3) パルス特性

現在までに実施したパルス運転における最大投入反応度は\$4.67であるが、この最大パルス時における炉出力のピーク値は21.100MWであり、1パルス当りに放出される炉出力の時間積分値(放出エネルギー)117MW-sec、パルス半値幅4.4msec、最短炉周期1.13msecであった。Fig. A-3には、この最大パルス時に測定したパルス出力波形および積分出力の実測値を示す。

また、Fig. A-4には、投入反応度を変えた場合のピーク出力および積分出力の測定データを示す。

### (4) 実験能力

実験孔はフラックス・トラップとなっており、ここに置かれた水カプセルの内部では、水の中性子減速作用によって熱中性子束が炉心における平均値よりも数段高くなっている(Fig. A-5)。このため、実験時には、炉心燃料の健全性を損うことなく試験燃料を効率的に溶融せしめることができる。

Fig. A-6は、各投入反応度のパルス運転によって試験燃料に与える断熱的な最大発熱量を示す。同図から分るように、例えば最大投入反応度によるパルスが5%濃縮のPWR型試験燃料に与え発熱量は約340cal/g·UO<sub>2</sub>でこれはUO<sub>2</sub>の溶融エンタルピを十分に上まわるものである。

Table A-1 Characteristics of NSRR

- (1) Reactor Type; Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
- (2) Reactor Vessel; 3.6<sup>m</sup>(wide) x 4.5<sup>m</sup>(long) x 9<sup>m</sup>(deep) open pool
- (3) Fuel;
- |                          |  |
|--------------------------|--|
| Fuel type                | 12 wt% U-ZrH fuel                              |
| Fuel enrichment          | 20 wt% U-235                                   |
| Clad material            | Stainless steel                                |
| Fuel diameter            | 3.56cm   |
| Clad diameter            | 3.76cm O.D.                                    |
| Length of fuel section   | 38cm   |
| Number of fuel rods      | 157 (including 8 fuel-followered control rods) |
| Equivalent core diameter | 62cm   |
- (4) Control Rods;
- |                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| Number          | 8 (including 2 safety rods) |
| Type            | Fuel followed type          |
| Poison material | Natural B <sub>4</sub> C    |
| Rod drive       | Rack and pinion drive       |
- (5) Transient Rods;
- |                 |  |
|-----------------|--|
| Number          | 2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod         |
| Type            | Air followed type  |
| Poison material | 92% enriched B <sub>4</sub> C                                |
| Rod drive       | Fast : Pneumatic<br>Adjustable : Rack and pinion & Pneumatic |
- (6) Core Performance;
- a) Steady state operation
- |                    |       |
|--------------------|-------|
| Steady state power | 300KW |
|--------------------|-------|
- b) Pulse operation
- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Max. peak power           | 21,100MW                  |
| Max. burst energy         | 117MW-sec                 |
| Max. reactivity insertion | 3.4% $\Delta k$ (\$4.67)  |
| Min. period               | 1.17 msec                 |
| Pulse width               | 4.4 msec (1/2 peak power) |
| Neutron life time         | 30 $\mu$ sec              |
- (7) Experiment Tube;
- |                 |      |
|-----------------|------|
| Inside diameter | 22cm |
|-----------------|------|



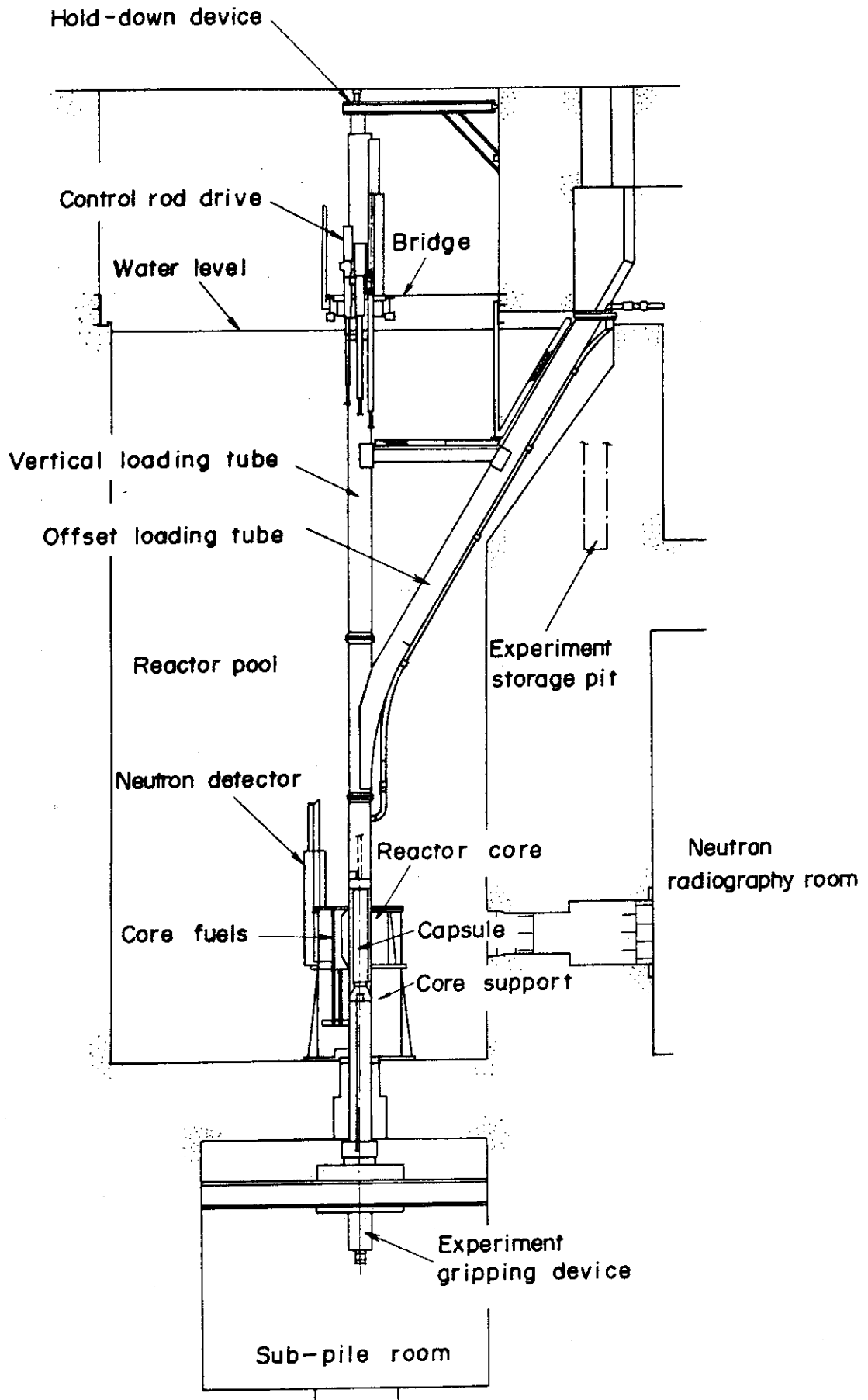


Fig. A-1 General Arrangement of NSRR

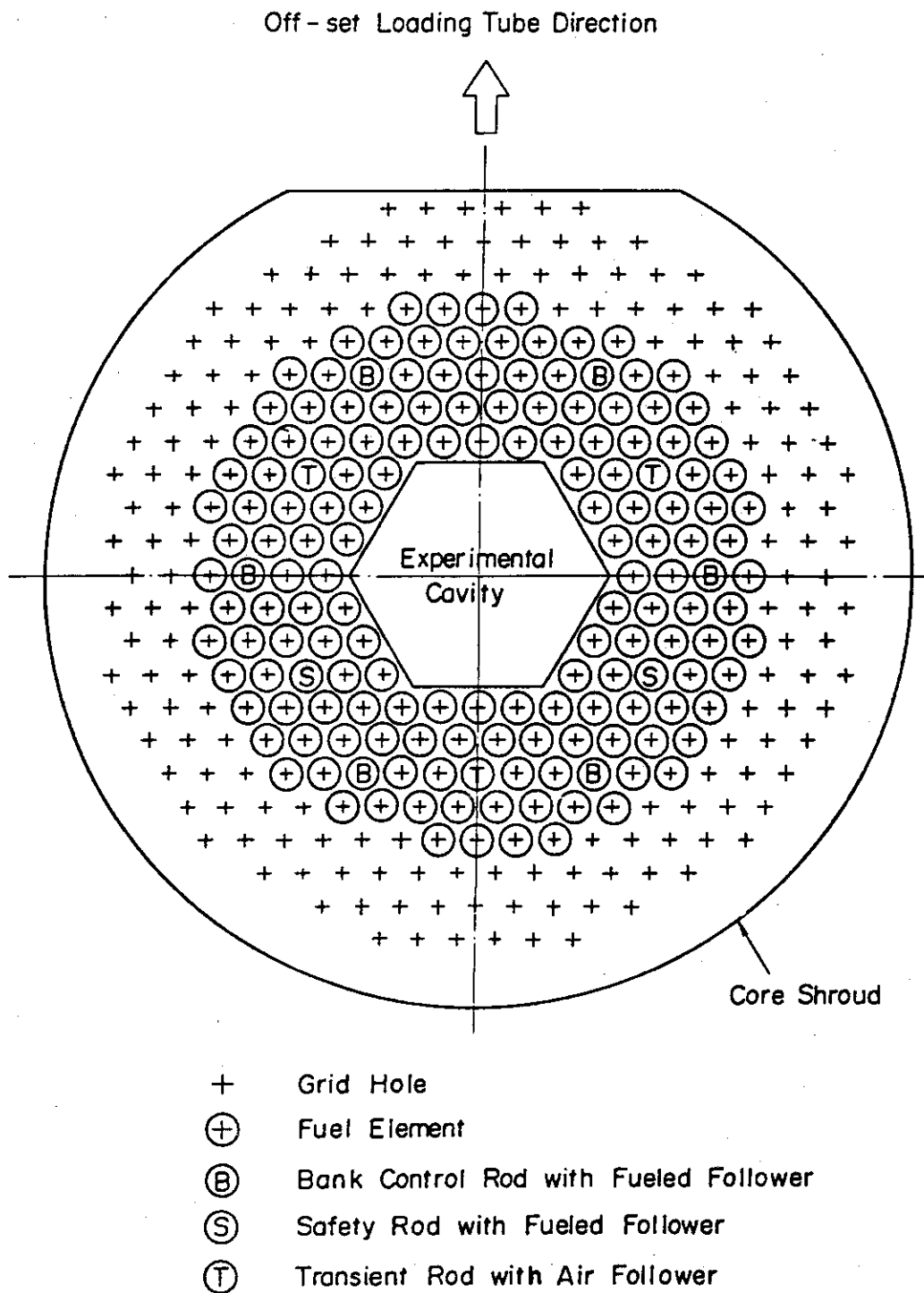


Fig. A-2 Operational Core Configuration

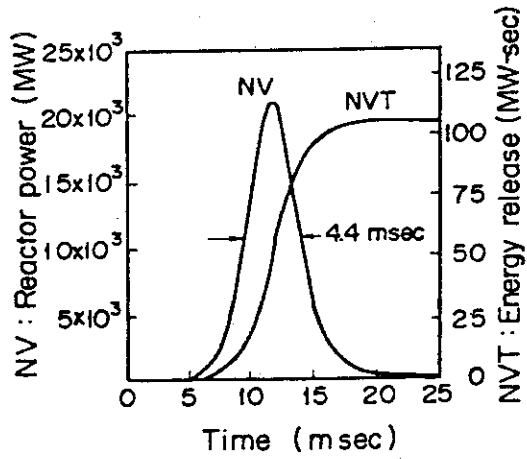


Fig. A-3 Reactor Power and Core Energy Release given by \$ 4.67 Pulse

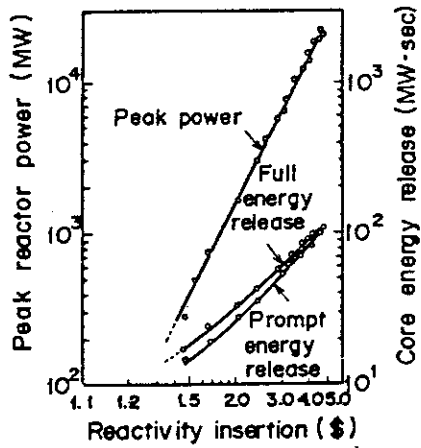


Fig. A-4 Peak Reactor Power and Core Energy Release Versus Reactivity Insertion

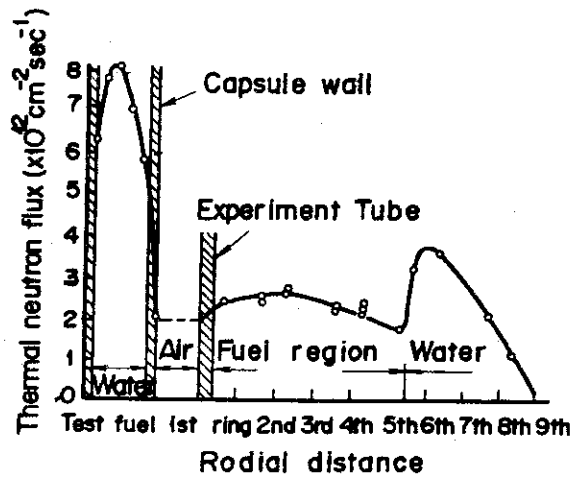


Fig. A-5 Radial Thermal Neutron Flux Distribution in the Core and Capsule

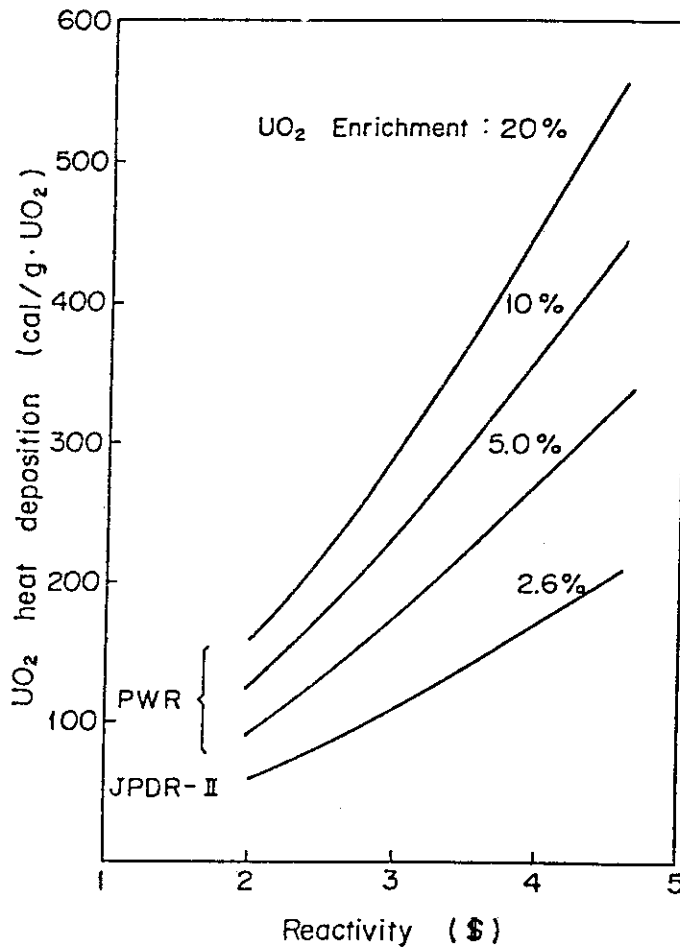


Fig. A-6 Heat Deposition in a LWR Size Test Fuel Rod Contained in a Capsule with Water as a Function of Inserted Reactivity in Pulsing Operation