

SWAT-1試験装置による大リーク，
ナトリウム-水反応試験

第1報 実験Iの結果

1972年2月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

要 旨 動燃大ソーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1) を用いてナトリウム-水反応試験を実施した。本報告は実験 I として行つた最初の 6 回の試験結果をまとめたもので測定データのほかに反応容器準静圧の上昇, 収納容器大気解放系の作動時間, 反応発生熱等についての考察も含まれている。

昭和 47 年 2 月

大洗工学センター
高速炉安全性試験室

| | | |
|---|-----|---|
| 佐 | 藤 | 稔 |
| 大 | 内 義 | 弘 |
| 大 | 島 | 敏 |
| 山 | 田 敏 | 雄 |
| 大 | 高 仁 | 護 |
| 堀 | 雅 | 夫 |

Large-Leak Sodium-Water Reaction Studies
for MONJU Steam generator

I Results of Series I tests

The PNC's large-leak sodium-water reaction test was started in Dec. 1970 using SWAT-1 test rig.

In this paper, the results of Series I test are described. The experimental results of the six tests are presented, and the pressure build-up in reaction vessel and cyclone separator, and the heat balance of reaction energy are discussed.

Feb. 1972

Fast Reactor Safety Laboratory

| | |
|-----------|--------|
| minoru | Sato |
| Yoshihiro | Ouchi |
| Iwao | Oshima |
| Toshio | Yamada |
| Jingo | Otaka |
| Masao | Hori |

目 次

| | |
|--|----------|
| 1. ま え が き | 1 |
| 2. 試験計画と試験装置 | 2 |
| 2.1 試験計画 | 2 |
| 2.2 試験装置 | 3 |
| 2.3 モデル試験と実物の関係 | 4 |
| 3. 試験とその結果 | 6 |
| 4. 実験Iシリーズのまとめ | 9 |
| 5. 考 察 | 13 |
| 5.1 反応容器解放系ラブチャ時間の検討 | 13 |
| 5.2 収納容器放出系ラブチャ時間の検討 | 14 |
| 5.3 反応発生熱収支 | 14 |
| 5.4 考察のまとめ | 16 |
| 7. 今後の試験への課題 | 18 |
| 8. あ と が き | 20 |
| APPENDIX I. 一次元非圧縮性ピストンモデルの内容 | 21 |
| APPENDIX II. P-I Xシリーズの試験条件 | 24 |
| APPENDIX III. 収納容器大気放出系作動に関する均等モデル | 26 |
| APPENDIX IX. 実験Iシリーズ主要結果 | 27 |
| 四 目 次 | 29 |
| 2.1 S W A T - 1 試験装置 | 30 |
| 2.2 水噴出ノズル構造 | 31 |
| 2.3 試験計測系ブロック図 | 32 |
| 3.1 試験の音響的モニタ結果 | 33 |
| 3.2 水注入管圧力 | 34 35 |
| 3.3 水注入系温度 | 36 |
| 3.4 初期スパイク圧 (P - 0 6) | 37 |
| 3.5 " (P - 0 4) | 38 |
| 3.6 反応容器内準静圧上昇 (P - 0 6) | 39 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|-----|
| 3.7 | 反応容器内準静圧上昇 (P - 0 6) | 4 0 |
| 3.9 | 反応容器内温度 | 4 1 |
| 4.1 | 水注入率～オリフィス口径 | 4 2 |
| 4.2 | 水注入率～オリフィス係数 | 4 3 |
| 4.3 | 水注入率～初期スパイク・ピーク値 | 4 4 |
| 4.4 | 測定位置～ | 4 5 |
| 4.5 | 水注入率～反応容器解放系 ラブチャ板作動時間 | 4 6 |
| 4.6 | 反応容器解放系ラブチャ板作動時間 ～収納容器へのナトリウム移動量 | 4 7 |
| 4.7 | 水注入率～収納容器大気放出系 ラブチャ板作動時間 | 4 8 |
| 5.1 | 水素ガス同併熱量 ～反応容器ラブチャ板作動時間 | 4 9 |
| 5.2 | 水素ガス同併熱量 ～発生水素ガス量 | 5 0 |
| 5.3 | 平均注水率/残留ナトリウム量～反応容器内残留発熱量 | 5 1 |

表 目 次

| | | |
|--------|-------------------------------|-----|
| 2.1 | 各社 S G 代表寸法の比較 | 4 |
| 2.2 | 実物 S G と S W A T - 1 の水注入率の関係 | 5 |
| 3.1 | 実験 I シリーズ固定試験条件 | 5 2 |
| 3.2 | " 変化試験条件 | 5 2 |
| 5.1 | 各試験時の反応容器内残留熱量 | 5 3 |
| A・IV・1 | 実験 I シリーズ主要結果 | 5 4 |

写真 目 次

3.1 水注入管先端.....5 8

1 ま え が き

高速原研炉「もんじゅ」用蒸気発生器の開発は動力炉，核燃料開発事業団（動燃）が中心で進められており，現在ひな型である1 MW蒸気発生器の運転試験が実施されている段階である。これらナトリウム加熱蒸気発生器個有の問題点のひとつに，伝熱管が大きく破断した場合，破断口から噴き出した水とナトリウムが爆発的に反応する，いわゆる大リーク・ナトリウム-水反応事故がある。蒸気発生器を対象とした大リーク・ナトリウム-水反応研究は，ほぼ二十年前の潜水艦塔載Na冷却原子炉の開発時代より始められ，ナトリウム冷却高速炉開発中の国々では実験的研究が現在にいたるまでおこなわれている。このような努力にもかかわらず，ナトリウム-水反応現象そのものが高速で複雑であり，加えてナトリウムに附随する¹⁾²⁾³⁾取扱い上の問題などで，ほとんどの領域がいまだに未解決のままであるといつて良い。

このため動燃において，蒸気発生器開発にともない，大リーク・ナトリウム-水反応事故の安全性確認の目的で実験的研究をおこなう必要にせまられ，昭和44年より大リーク・ナトリウム-水反応試験装置SWAT-1による試験研究を開始した。

SWAT-1装置計画当初の目的は以下のよう⁴⁾に設定した。

- (1) ナトリウム-水反応時の放出エネルギー，温度，および圧力の時間的推移を実験的に求める。
- (2) 蒸気発生器および放出系の圧力衝撃に関する設計資料を得る。
- (3) 反応生成物放出系の作動に関する信頼性を確認する。
- (4) ナトリウム-水反応後のナトリウムと反応生成物の実際的処理方法を案出する。

SWAT-1装置を用いての試験は昭和46年12月10日に第1回試験実施後，昭和47年12月23日現在までに計10回の試験がおこなわれ，さらに試験に続行中である。本報告は得られた結果を試験目的(1)，(2)についてとりまとめたものであつて，最終的結論ではなく中間報告的意味合いのものである。

2 試験計画と試験装置

2.1 試験計画

動燃蒸気発生器開発計画は「もんじゅ」炉用として一基150MWのユニット型を想定している。安全設計面から大リーク・ナトリウム-水反応事故を見れば、基本的には事故がおきても破れない缶胴ができれば良いわけで、損耗(wastage)現象などを考へなければ、事故時に発生する圧力の最高値と、その圧力の時間的推移、および問題とする部分の温度が判明すれば良いわけである。また場合によつては多量のナトリウムが高速で蒸気発生器の上部鏡板に衝突することが考えられ、このような液体プラストがおこる条件がわかれば良く、火薬の水中爆発現象による容器の変形、破損と同類の問題と考へてよい。

試験装置を製作するさいには、当然モデル容器からとびだしたナトリウムと反応生成物を収容する容器が必要で、構成面から考へれば、実物蒸気発生器と試験装置とでは安全装置は同じようなものになる。したがつて試験をおこなえば副次的に安全装置の作動に関するデータが得られるわけである。同様に試験後のナトリウムと反応生成物の処理から蒸気発生器処理方法の案出が期待できる。

以上の議論からある程度の規模の装置を作り、ナトリウム-水反応をおこさせて圧力および温度記録をとり、試験装置運用方法を確立すれば初期の目的は達成されたことになる。

試験装置の規模は、計画当初の我が国の技術水準で非常な困難をとまらうことなく、安全に試験できることを考慮して、200litドラム缶1本分のナトリウムを用いる大きさとし、ユニット型蒸気発生器を想定して、反応容器の寸法を定めた。決定された反応容器寸法は200MW級原型炉蒸気発生器の約1/8スケールモデルに相当する。安全装置としては、反応容器カバーガス領域から解放系連絡配管を介して反応生成物収納容器に接続され、さらに水素ガスのみ収納容器より大気に放出する構造とした。収納容器容量は使用ナトリウムが全量収容できて、さらに安全を見てカバーガス容量を反応容器カバーガス容積の3倍にとつた。

水注入方式は計画当初、実際の伝熱管破断現象に近い水循環サーベル型伝熱管破断方式の採用を考へたが、破断口開口方式に信頼性のあるものがなく、結局水循環方式はあきらめて、単純なノズル-ラブチャ板方式とした。

試験後のナトリウムと反応生成物の処理は、反応容器を据付けたまま蒸気洗滌する方式としたが、計画当初においてこの分野の情報が一番不足していた。

2.2 試験装置

SWAT-1 試験装置主要部分は図 2.1 に示すように、反応容器、ナトリウム分離器付き収納容器、および水注入系より構成されている。

反応容器は、内径 400 mm × 高さ 2500 mm × 胴厚さ 12 mm の円筒形容器で使用圧力 30 馬力^{*}で設計され、ナトリウム-水反応時の圧力解放系としてラブチャ板付き内径 200 mm の連絡配管で収納容器に接続されている。

P-O^{*}X シリーズ試験では反応容器内ナトリウム液面は容器底より 1500 mm とし、容器底より 165 mm の位置に水噴出ノズル先端を設定した。このシリーズの試験ではナトリウム-水反応の基本的データを得ることを目的としているため、反応容器内部はナトリウムの移動を妨げるような構造物-模倣伝熱管などは入れていない。

ただ、水噴出ノズルから噴出した水が反応容器底部鏡板にぶつかり、損耗現象による損傷をおこすことを防ぐため、噴出ノズル先端に邪魔板をとりつけている。

水注入系は注入水、温度、圧力を設定する水加熱器、トリガ弁、および水噴出ノズルより構成される。

ナトリウム-水反応はトリガ弁を開くことで、水加熱器からの水が噴出ノズルを通過し先端のラブチャ板を破つて、ナトリウム内に噴出することで始まる。

反応実験以前にトリガ弁々同リークによる圧力上昇により、先端ラブチャ板が破裂しナトリウム-水反応が発生することを防止するため、トリガ弁下流に安全用ラブチャ板を設け、弁とラブチャ板との間を常時真空引きしている。

反応開始に当り、水注入配管内のガスが注入水に圧縮され、ノズルより注入水が噴出する前に噴き出すことを防ぐため、噴出ノズルと安全用ラブチャ板との間の配管内は真空引きをおこなう。

水噴出ノズルは噴出流量制御用に設けたもので図 2.2 に示す構造となつている。

ナトリウム-水反応が生じると、発生水素ガスとナトリウムの一部分は反応容器解放系ラブチャ板を破り、連絡配管を通過して収納容器内に飛び込む。

収納容器はサイクロン式で内部には二段羽根のミストセパレータが入っており、水素ガスとナトリウムは分離され、水素ガスは大気解放系ラブチャ板を破り、チエツキ弁を押し上げて煙突より大気中に放出され、ナトリウムは収納容器底に溜まる。

大気放出煙突頂部には安全のため電気加熱ヒータによる水素ガス点火装置が取付てある。

脚注※ 実験 I シリーズの各試験は P-O1 から P-O6 まで試験番号がつけられている。それ故 P-O^{*}X シリーズと総称される。

計測系は装置運転用の通常のナトリウム装置用計装以外に、ナトリウム-水反応現象の高速計測を主体とした試験計測系が設けてある。

本シリーズ後半頃の試験計測系ブロックダイアグラムを図 2.3 に示す。

この試験装置では反応初期のごく短時間の現象および反応全般にわたる長時間の現象を同一測定器を用いて記録するため、記録はすべてデータレコーダにたよることとした。

2.3 モデル試験と実物との関係

大リーク、ナトリウム-水反応試験は一義的には水注入率と反応発生圧力の関係を求めることである。したがって試験装置の水注入率は実物蒸気発生器との関連を考慮して決定されねばならない。

水中爆発などの液体急加速現象の実物とモデルとの関係を表示するには種々の考え方があるが、ここでは Iso-velocity Model で考えた。Iso-velocity Model によれば

長さ単位で $1/n$ に縮尺 モデルの水注入率は実物の $1/n^2$
 時間単位で $1/n$ に縮尺 したとすると 圧力値は実物とモデルで同一
 となる。

| | B & W Full size SG | | 「もんじゆ」炉 SG A社 一次設計 | 「もんじゆ」炉 SG B社 一次設計 |
|-------------------------------|--------------------|------|--------------------------|--------------------------|
| | Flooded 状態 | 運転状態 | | |
| 伝熱管内径 (代表部) | 19φ | " | 18 | 17φ |
| 伝熱管長さ | 60m (破断部中央) | " | 70 | 50m |
| 破断部水圧力 | 180% _{SG} | 180 | 170 | 170% _{SG} |
| 破断部水温 | 176°C | 300 | 300 | 300°C |
| 水流出率 (1本破断, 破断部 両端から流出) | 1.9kg/sec | 9 | | |

表 2.7 各社 SG 代表寸法の比較

実物蒸気発生器の伝熱管破断時の水流出率はB&W Full-Size 蒸気発生器の計算例では表2.1となる。原型炉「もんじゆ」用200MWユニット型蒸気発生器のボイラ一部伝熱管条件7) 8) はほぼ同じと考えられ、SWAT-1の縮尺は1/8であるから伝熱管1本破断の場合をSWAT-1水注入率に換算すると

$$19.2 \text{ kg/sec} \times \left(\frac{1}{8} \right)^3 = 0.3 \text{ kg/sec}$$

となる。

想定事故にしたがう伝熱管多数本破断の場合は

| 実物蒸気発生器 破損本数 | SWAT-1 水注入率 kg/sec |
|-----------------|-----------------------|
| 1/2 | 0.15 |
| 1 | 0.30 |
| 2 | 0.60 |
| 4 | 1.20 |
| 8 | 2.40 |

表2.2 実物SGとSWAT-1の水注入率の関係

となる。

3 試験とその結果

P-O Xシリーズ試験ではナトリウム側、水側とも試験条件を固定し、水注入配管先端のオリフイス口径を変えて水注入率を変化させ、その影響を見た。表-3.1にP-O Xシリーズ全般にわたる固定条件を、表-3.2に各試験における変化項目を示す。

以下に試験状況とその結果をP-O 6試験を中心に説明する。図-3.1は装置各部にマイクロホンを置き、試験進行状況を音響的にモニタしたものである。試験は水注入管内のトリガ弁を開くことで始まり、水注入管内の二ヶ所のラプチャ板が水圧で次ぎへと破裂し、反応容器底面近くで水注入管先端よりナトリウム中に水が噴出する。ナトリウム中に水が噴出された直後に爆発的にナトリウム-水反応がおき、反応容器内の圧力が上昇して反応容器解放系ラプチャ板が破裂する。反応容器内のナトリウムと発生水素ガスは解放系連絡配管を通過して収納容器へとび込む。この状態でも反応容器内の残留ナトリウム中に水噴出が続き、水素ガス発生が続き圧力が上つて収納容器大気放出系ラプチャ板が破裂して水素ガスのみが大気中に放出される。トリガ弁は所定時間経過後閉じて水注入を止め試験を終了する。

試験の各段階それぞれの位置で得られた記録は次のようになる。

(1) 水注入配管内圧力、温度

水注入配管ラプチャ板R-O a直下にある圧力センサは、音響記録によるラプチャ板破裂R-O a破裂音と思われる時刻の1.0 msec後に圧力上昇を検出する。(図-3.2参照)圧力は1.4%Gでほぼ一定となり、圧力上昇検知後3.3 msecで音響記録によるとナトリウム-水反応が生じている。配管内の圧力は次いで検知後7.8 msecで次の圧力上昇が始まり3.0%Gに達する。以下同様に不明瞭ながらこのような階段状変化で最初の圧力上昇検知後4.7.0 msecで設定圧の7.5%Gにはじめて達している。階段状の圧力上昇特性は、細長い配管中の圧力センサ上を圧力波、反射波が通過するたびにおきる。後記する反応容器解放系ラプチャ板破裂時間2.6.0 msecでは水注入配管は未だ過度状態である。

圧力センサ直下に挿入した熱電対(1.0φシース型)では水注入開始後4.0 msecで設定温度29.0℃に到達しており、さらにオリフイス先端のナトリウム中の熱電対は注入開始後5.0 msec前後で8.8.0℃の反応温度を記録している。(図3.3参照)

この熱電対は噴出水ジェット内の温度を計測する予定であつたが、ジェットに吹き曲げられてナトリウム-水の境界面附近の温度を測定してしまつたものである。

水注入開始後6 secでトリガ弁を閉めると注入配管内圧力は急に下り、トリガ弁下流配管内の残存水の自己蒸発で噴出が2.3 sec后まで続き、残存水が全部噴出してしまふ。

(2) 反応容器内圧力, 温度

ナトリウム-水反応による反応容器内圧力変化は, 水注入直後のパルス的な初期スパイク圧, 発生水素ガス蓄積後解放系ラブチャ板破裂により減圧する準静圧, および収納容器大気解放系作動にいたる二次準静圧の三つの山で代表される。

P-06試験における初期スパイク圧を図-3.4に示す。図中の反応音を対比すると, 反応音が急激に大きくなつた時点(仮りに反応開始点と呼ぶ)から約1 msec後に, 反応容器壁の圧力計センサは初期スパイク圧を測定している。圧力計センサ位置P-1, P-2, P-3, はほぼ同時に立上り, 位置の違いによる波形上の時間的ずれは確認できなかった。センサ位置P-4はナトリウム自由表面より約130 mm下の部分で, センサ特性, センサと容器壁間の継手管特性などから初期パルス波形は減衰してしまつたものと思われる。センサP-5はこの時点ではカバーガス中におかれており, 圧力として検知はされていない。比較の意味で水注入率の大きいP-04試験の初期パルスを図-3.5に示すが傾向としてはP-06のものと同じである。

初期パルス静定後, 反応容器解放系作動までの間, 発生水素ガスによる準静圧上昇が生ずる。P-06試験の測定例を図3.6に示す。測定にさいして相当大きなハムが重複していたため, 再生時にフィルタによりハムを消している。図中の初期パルスの高さが小さくなり, 印が拡がっているのはこの操作のためである。この波形で特徴的なのは, 圧力は単調に上昇するのではなく, 振動的に上昇して行くことである。顕著な振動波は二山見られ波長は140 msec程度である。水注入率の大きいP-04試験では図3.7のように振動的圧力上昇は観察されず, ほぼ単調増加的であつた。

この原因は水注入率の変動, ナトリウム液性の慣性効果などが考えられるがきめ手は得られてない。解放系作動後, 解放系配管を通過してナトリウムと水素ガスが収納容器へ流出することで反応容器内の圧力は下がる。P-06試験ではラブチャ板破裂後圧力が最低値に達するまで約500 msec, P-04試験では約400 msecを要している。

反応容器ナトリウム液面の接点式液面計による記録は, ナトリウム-水反応開始後190 msecで定常液面より高さ230 mmの位置にナトリウム到達を検知しているが, さらに上部二ヶ所(液面から480, 675 mm)の接点式液面計は解放系ラブチャ板が破裂するまでは検知していない。

ラブチャ板破裂後の反応容器内圧力下降時期にいたつて, 残りの二つの液面計がナトリウムを検出する。これは解放系連絡配管が開いてナトリウムと共にカバーガスの一部が容器より流出して, カバーガス圧が下つたためナトリウム液中の水素ガス容積が急に膨張して液注を押し上げたためと考へている。

この試験で用いた液面計はスパークプラグ型なので、アースと電氣的に浮いた状態で来たナトリウムは検知できない。試験後、反応容器解体時の所見では上蓋フランジ面までナトリウム液面が上昇した跡が見られた。

反応時の反応点附近温度は、直径1 mm ϕ シース型無接地形熱電対を写真3.1のような配置で用い測定した。

温度測定値は図-3.9のように得られ、反応生成物温度と思われる880℃の高温の存在が記録されている。水噴出系トリガー弁は反応開始後6 sec で閉じたが、水噴出系配管残溜水がその後も続出を続けていることが温度記録でもわかる。

配管中の残溜水が自己蒸発による圧力で噴出を続けるが、圧力は低下して行きこれにしたがいジェットの流出量が減少し、反応面の位置が変つてくる。

ちょうど反応面が熱電対に当るようになると最高温度が測かれるようになる。

(3) 解放系配管，収納容器の状態

反応容器解放系ラブチャ板破裂後、最初に連絡配管を通過するナトリウムの流速は、連絡配管に設けた三ヶの接点式液面計で測定する。

測定の結果は外側2点間を通過する平均速度は2.3 m/secであつた。反応により収納容器側にナトリウム80 g程度が移行した。(P-06試験では収納容器ドレン配管閉塞のため直接測定できず、反応容器残量からの間接見積り値である。)

収納容器大気解放系は反応開始後1.6 sec でラブチャ板が破裂し、煙突より水素ガスが噴出した。

噴出開始後1 sec 以内で水素ガスは着火し、噴出が終るまで燃焼は続いた。

燃焼時の火炎の色はナトリウムの炎色反応であるオレンジ色を呈していた。

試験終了後の観察では煙突からのナトリウムの飛散はほとんどないようであつた。

4 実験 I シリーズのまとめ

P-01~P-06 試験にて得られた主要特性を以下に述べる。

4.1 水注入配管特性

水注入率はナトリウム-水反応現象を支配する主要因子であるが、大リーク、ナトリウム-水反応においては、ごく短時間で問題とする現象が終了するため、測定には応答速度の速い流量計を必要とする。SWAT-1のように注入水が蒸気相または二相流領域の場合適当な測定器は得られず、装置には流量計は設置されていない。そこで水注入率の第一近似として、試験前後の水加熱器内水量差とトリガ弁々開時間より計算により求めた平均水注入率を用いることにした。(表3.2参照)

$$\text{平均注水率(重量)} = \frac{\left\{ \text{液体状態比容積(at } 290^{\circ}\text{C)} \right\} \times \left[\left(\text{試験前水加熱器注入水重量} \right) - \left(\text{試験後水加熱器内水残重量} \right) \right] - \left[\text{水注入配管容積(トリガ弁下流)} \right]}{\left\{ \text{液体状態比容積(at } 290^{\circ}\text{C)} \right\} \times \left[\text{トリガ弁々開時間} \right]}$$

このようにして得られた水注入率とオリフィス口径の関係を図-4.1に、また噴出水が液相单相と仮定して求めたオリフィス係数と水注入率の関係を図-4.2に示す。

オリフィス係数は、水注入率の小さいところで0.2と小さく、中間で单相流のオリフィス係数0.6に近ずき、水注入率が大きくなると再び低下して0.4となる。これは定性的には次のように推定している。水注入率の小さいところでは水注入管内の流速が遅く、管壁をとおして周囲のナトリウムから熱をもらう時間が充分にあり、飽和温度以上となつてオリフィス上流で発泡がおき、このためオリフィス係数が低下する。水注入率が中頃では配管内流速が上つて、周囲から熱をもらう時間がなくしたがつて発泡もおこらず单相流状態でオリフィスに流れ込み、单相流オリフィス係数に近づく。さらに水注入率が大きくなると、配管内の損失抵抗により配管中のある部分で圧力降下が生じ、これがために発泡することになり、オリフィス入口では二相流となつてオリフィス係数は低下する。

以上に示すように弁開時間平均水注入率としては妥当な値で大きな誤りはないと思われるが、大リーク・ナトリウム-水反応の主要対象は0~3 msec (初期スパイク圧または0~0.5 sec (反応容器準静圧上昇)などの弁開直後のところで、この時期に平均水注入率どおりの水量が出ているかどうかは明らかでなく、今後の検討課題となっている。

4.2 初期スパイク圧

P-0Xシリーズで得られた反応点附近の初期スパイク圧ピーク値と水注入率の関係を図4.3に示す。

水注入率と圧力ピーク値の関係は、水注入率一定の場合には圧力ピーク値 $\sqrt{\text{水注入率}}$ といわれているが、SWAT-1の場合 $\sim(\text{水注入率})$ に近い。

このシリーズをとおして圧力測定位置P-1の圧力はP-2よりも小さかつた。

水注入率の大きいところでは注入水圧力75%G以上の圧力を測定している。測定された圧力については圧力センサと反応容器壁との間に継手管が介在しているため、測定圧がそのまま反応容器壁圧とはいえない面がある。

反応容器軸方向の圧力ピーク値分布を図4.4に示す。同図は水注入率の違い試験を比較するため、圧力測定位置P-U2の値を1としてノルマライズしてある。軸方向の圧力ピーク値相互関係は現在のところ圧力伝達法則⁹⁾からは説明がつけがたいほどばらつく。表A・IX・1にスパイク圧形状について得られた値を示す。同様にスパイク波形立上り時間、ピーク到達時間、パルス巾、半値巾などの相互関係は明確でない。これは圧力計測方法自身の問題なのか、現象的にこのような事になるのか、今のところ不明で検討中である。

現在の圧力スパイク測定法については、継手管特性、使用圧力計、周波数応答特性、継手管内ナトリウムの凍結と圧力センサ使用温度の関係など問題点が多く、今後の検討課題である。

いずれにしても初期スパイク圧については現在のデータから発生機構を解明するほどの情報は得られておらず、水注入率との関係を考察するにはさらに多くの試験が必要である。

4.3 準静圧上昇と反応容器解放系ラブチャ板作動時間について

反応容器圧力センサは、初期スパイク圧を測定するために、フルスケール100%のものを用いている。SWAT-1では圧力センサ数は限られており、このセンサで0~数%範囲の準静圧上昇も測定せねばならず、その絶対値の精度には大きな問題がある。それで反応容器解放系ラブチャ板が設定圧どおりに破綻するものと仮定して、破綻した時点をもつてカバガス圧が設定圧に達したものと見なすことにした。

図4.5に水注入率と解放系ラブチャ板作動時間の関係を示す。水注入率のせまい範囲をとれば測定値にばらつきが目立つが、大きな範囲を見渡せば作動時間と水注入率の間を関係づけることができる。同図に記入してある計算値は一次元非圧縮性ピストンモデ

ルにより求めたもので、詳細は 5.1 項に述べてある。測定値のばらつきの原因は、ラブチャ板破裂のばらつき（ラブチャ板温度が異なるなど）、3項に述べた準静圧上昇中の圧力振動、および水注入量と反応過程など多くの原因が考えられるがきめ手はない。

4.4 反応容器ラブチャ板破裂にともなう収納容器へのナトリウム移動量について

反応容器解放系ラブチャ板の作動にともなうナトリウム移動量を図 4.6 に示す。

同じラブチャ板設定圧に対しては、水注入率直接ではなく、反応容器解放系ラブチャ板作動時間と関係づけた方が試験結果は良くまとまる。

作動時間が 0.4 sec 以内の場合は移動量は作動時間に無関係にほぼ 80 kg 一定である。この量は温度 320°C において反応点から上 600 mm 以上のナトリウム量にあたる。この領域でのナトリウム移動メカニズムは恐らく同一で、ピストンの液柱が持ち上りカバガス圧でラブチャ板が破裂すると、ナトリウムと共にカバガスが流出して圧力が下りそれでナトリウム柱上下の圧力差が大きくなつて液柱はさらに上へ加速され、結局一定量全部が出てしまうことになる。作動時間が 0.5 sec 以上になると作動時間に逆比例的に移動量は減少する。これは、時間が経過するとナトリウム液柱下部で発生水素ガスとナトリウムとの交換がおき二相混合領域が拡大してくることに起因すると思われる。二相流領域存在の有無にかかわらず発生水素がある量たまるとラブチャ板は作動し上部のカバガスは流出して減少し、ナトリウム液柱内の水素気泡体積は大きくなつてナトリウムを押し上げる。二相流領域の水素ガスと交換したナトリウム量だけは底に残るのでナトリウム移動量はその分だけ減ることになる。作動時間が永くなればなるほど二相流領域は拡大して、底に残るナトリウムはふえてくることになり定性的にナトリウム移動はこのようなメカニズムでおこると考えられるが、引きつづく収納容器大気放出系ラブチャ板作動による減圧時の過度気泡成長による流出なども影響があるかも知れない。

4.5 収納容器大気放出系ラブチャ板作動について

収納容器大気放出系ラブチャ板（破裂圧力 1.5 kg）作動時間と水注入率の関係を図 4.7 に示す。図中の 3 本の右下り線は任意の水注入率（時間に対して一定）において全水注入量が一定値に達する時間を表すものである。図からわかるように、水注入率の大きな領域で全水注入量が 1 kg に達すると収納容器ラブチャ板が破裂している。水注入率の小さなところでは、全水注入量が 2 kg に達するとラブチャ板破裂圧に達する。反応容器解放系ラブチャ板破裂後、収納容器ラブチャ板作動までの間は密封容器中のナトリウムに水が注入されるのと同じで、収納容器大気解放系の設定条件が同じなら、全水注

入量が一定値になるとラブチャ板破綻がおきるのは当然である。水注入率の大きなところと小さなところで差がある理由は明白ではないが、水注入率の小さなところでは反応容器内残留ナトリウムの量は大きく、発生水素ガスがその中を通過するさいに、ナトリウムに熱をとられることが原因の一つであろうと考えている。

ラブチャ板作動後大気放出系煙突より水素ガスが放出される。試験安全上、煙突出口に点火装置（シースヒータ900°C程度に加熱）をおいている。これまでの試験では、強風中での試験1回をのぞいて、放出后直ちに着火している。

5.2 収納容器放出系ラブチャ時間の検討

反応容器解放系ラブチャ板作動後、連絡配管を介して反応容器と収納容器はつながる。ナトリウムの流動が静定後、発生水素ガスによる収納容器圧力は上昇し、大気放出系ラブチャ板設定圧に達し、ラブチャ板が破裂して大気放出系が作動する。

これまでの試験では反応容器、収納容器とも初期カバーガス圧はアルゴンガス 0.5 気圧 G で、大気放出系ラブチャ板設定圧は 1.5 気圧 である。

図 4.8 に示す試験結果によれば、大気放出系ラブチャ板が作動するまでに反応容器に注入した水量は 1 kg (水注入率の大きい場合) ~ 2 kg (水注入率の小さい場合) である。収納容器大気放出系作動に関するモデルは経過時間からいつて均質モデルで取扱える。均質モデルを用いて注水量に対する水素ガス発生量と、水素ガスに随伴される反応発生熱量の関係を調べて見ると、図 5.2 のようになる。均質モデルは対象がカバーガス空間部分のみを考えれば良いので、同図には空間部分 (反応容器初期カバーガス容積 + 収納容器容積 + 解放系配管容積) に最初 1.5 気圧 abs の水素ガスが充填されており、そこにナトリウム-水反応発生水素が加わり、所定の圧力に達した場合の発生水素量とその同併熱量の関係が記入してある。

モデルと計算の詳細は APPENDIX-III に示す。

試験で得られている収納容器内のガス温度は初期温度 95 °C、大気放出系作動時の温度 215 °C (P-06) であるが、この温度計測点は収納容器上部のサイクロン羽根の上部の、流動的にはよどみ点にあり、低目に出ている可能性があり、またこのモデルに正確に適合する実測値とは云いがたいが、目やすとしてこの値に巾をもたせて用いることとする。大気解放系作動前後のガス温度 200 °C ~ 300 °C とし、大気解放系作動圧力を 2.5 気圧 abs ~ 3.0 気圧 abs (設定圧は 2.5 気圧 abs) とし、そのときの水注入量を 1 kg と考えると、図 5.2 から次ぎのようなことが云える。

すなわち、水素発生モル比は 1/2 で、発生水素に同併される熱量は 1000 ~ 3000 kcal/kmol-H₂ 程度と考えた方が無理がない。この関係は反応容器内で得られた関係ともオーダ的に一致する。

5.3 反応発生熱について

ナトリウム-水反応の反応発生熱は発生水素ガスと非ガス反応生成物 (Na₂O, NaOH など) に分配される。水素ガス同併熱量は一部ナトリウムに伝わるが残りは水素ガスに併われて外部へ逃げていく。非ガス反応生成物同併熱量は終局的にはナトリウムの温度上昇という形で反応容器内に残る。

SWAT-1 試験に於いて反応容器内の残留ナトリウム最終到達温度と全注水量より反応発生熱の反応容器内残留熱量を求め、熱的な面から反応量について検討を試みた。SWAT-1 試験結果を表 5.1 に示す。

試験状況は注水開始後 0.2 ~ 1 sec (P-U1, U2 は ~ 3 sec) で反応容器解放系ラブチャ板が作動し、反応容器内のナトリウムの相当部分が収納容器へとび出す。その後、反応容器内に残ったナトリウム中にさらに水注入が続く (15 ~ 20 sec 前後) この状況は反応開始後ナトリウムが収納容器へ移動するまでの時間よりはるかに長い時間持続するので、この状況での反応過程と熱の挙動が反応容器内残留反応熱量を支配すると考えて良い。この状況は現象的には発生水素ガスと未反応水蒸気が気泡状またはチャンネル状となつて残留ナトリウム中を吹き抜けて行くと想像される。

反応容器内に残る単位注水量当り反応発生熱は、ナトリウムと水の反応量と水素ガスとナトリウムの熱交換量によつてきまる。無限の広さのナトリウムの中に水を吹き込んだ場合、または有限容積のナトリウム中に微小注水率で水を吹き込んだ場合、ナトリウムと水は全て反応し、発生水素ガスの熱は全てナトリウムにらばわれる。ナトリウム量がゼロの場合、または有限ナトリウム量でも注水率が非常に大きい場合 (くわしくはナトリウム量ゼロの場合とは異なり、反応によりナトリウムは消費されつくすことも考えられる)、反応しないか、未反応水が多量に存在することになり、単位注水率当り残留発生熱量は低下する。これらを加味して

$$\frac{\text{平均注水率}}{\text{残留ナトリウム量}}$$

なる量を作り、反応容器内残留発生熱量の関係を求めると、図 5.3 のようになる。図より本報告の実験範囲では、反応発生熱がすべてナトリウム中に洩るこした場合に比較して単位注水率当り残留発生熱量は試験範囲では $5/7 \sim 3/7$ で (平均注水率 / 残留ナトリウム量) で整理されることがわかる。

以上の検討では反応容器構造材などの温度上昇でくわれる熱量は考慮されていない。この点を補正するためには反応容器構造材の熱容量と反応前後の温度が必要であるが、構造的に複雑な温度分布の存在が予想され、正確な補正は現段階では困難である。それで反応容器底鏡板および円筒壁の長さ 1 m の部分が、反応前後にナトリウムと同じ温度

変化を示すものと仮定して、おおまかな補正を試みた。その結果を表5-1の補正後の値項に記入してある。このような補正をほどこすと反応容器内に残留する熱量は反応発生熱の6/7~4/7程度となる。

5.4 考察のまとめ

大リーク・ナトリウム水反応圧力を計算するには、基本的には5.1項のようなモデルを用いるが、化学反応過程で注入水1molに対し水素が1mol発生するのか1/2mol発生するのか不明で、さらに発生した水素ガスが反応発生熱のなかからどの程度のエネルギーをもらうのかわからず、これまでのところ安全側を見積つて水素は1mol発生し、水素温度は実験により得られた値を用いるのが一般的方法であつた。

5.1~5.2の考察は注水した水が瞬時に全量反応するとの仮定にたつたもので、この仮定を容認する限りでは、初期スパイク圧の取扱いを別にすれば、反応容器および収納容器準静圧上昇過程では

$$\text{水素発生モル比} : \frac{\text{発生水素}}{\text{注入水}} = \frac{1}{2}$$

$$\text{水素同併熱量} : 1000 \sim 5000 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol-H}_2}$$

とするとSWAT-1の試験結果を説明できることが判る。

得られた水素同併熱量は反応発生熱の1/14~1/18(H₂O1モル注水に換算すると)と小さく、瞬時反応の仮定にたつかぎりでは、残りの反応発生熱は全てナトリウム内に吸収されることになる。5.3の考察は、5.1~5.2の考察対象とは時間的には同一領域を対象としたものではないが、反応容器内の水注入点附近のナトリウム温度上昇を検討したものである。この結果によれば、反応容器内に残る熱量は反応発生熱の6/7~と、水注入条件の中領域以下ではほとんどの部分が残るようである。

5.3項の考察精度から考えてこれ以上の結論を出すのは無理であろうが、反応容器内と水素ガスとの間に5.1~5.3の考察を拡大解釈して、反応容器、収納容器ラブチャ板作動時刻前後の時間領域では、水素ガスに同併される熱量以外の反応発生熱はすべて反応容器内に残るものとしても大きな無理はない。

発生モル比1/2が試験結果と一致するということは目新しいものでなく、すでに⁽¹⁰⁾三の報告で指摘されていることで、それが再確認されたにすぎない。

反応発生熱の分配については、本質的には温度を指定した場合と同じであるが、反応容

器解放系作動時刻，収納容器大気放出系作動時刻ということなつた時刻の現象をナトリウムの温度上昇を含めて，不完全ながら統一的に説明できたことになる。

SWAT-1のこれまでの試験では，ナトリウム温度および水側温度は固定されており以上の結論は一般的とは云いがたいが，蒸気発生器および安全系タンク類を含めた系をモデル化するさいには有効な情報と考える。

7 試験結果のまとめと今後の課題

P-OXシリーズ6回と一部P-1Xシリーズ結果について得られた結果を説明してきた。結果をとりまとめると以下のようになる。

- (1) 初期スパイク、ピーク値は水注入率に支配されているが、その支配機構については不明である。
- (2) 準静圧上昇による反応容器ラブチャ板破裂時間は、ラブチャ板破裂設定圧が一定であれば、発生水素モル比および発生水素同併熱量を適当に仮定することで、水注入率に対して計算で推定することができる。
- (3) 反応容器ラブチャ板破裂によるナトリウム移動量は反応容器ラブチャ板作動時間に支配される。
- (4) 収納容器ラブチャ板は、水1Kgが注入されると作動する。
- (5) 水素ガス発生モル比および反応発生熱の水素ガス同併量について考察の結果、発生モル比1/2、反応熱の1/4～1/18が水素ガスに併わることが判つた。

P-OXシリーズ結果の検討によれば、大リーク・ナトリウム水反応現象の多くは直接的間接的に水注入率に支配されることが判明した。現在のSWAT-1装置水注入系には瞬間流量計はついておらず、また二相流領域で信頼できる値の得られるような流量計は入手困難である。何等かの手段で、特に反応開始初期（水注入開始後10msec位まで）の水注入率を求める方法がなければ、大リーク・ナトリウム水反応試験は現状こう着状態を脱することはできない。水注入率計測方法の開発が急務である。

大リーク・ナトリウム-水反応のような過酷な条件で使用に耐える計測センサ、特に圧力センサが入手困難である。現在用いているものは国産抵抗線歪ゲージ式エンジン指圧計であるが、使用温度条件の制約により、継子管を入れて測定せざるを得ず、測定圧力の信頼性に問題が生じている。圧力センサは受圧幕が破損すれば、ナトリウムは破損幕を通つて外に洩れ出してナトリウム漏洩事故となる。使用条件を満し、安全性上絶対的信頼性のある圧力センサの入手がぜひとも必要となつている。

初期スパイク圧の発生機構は、現状ではスパイク圧に影響を与える初期水注入率がわからないこと、および使用圧力センサの制約からくる測定の不確かさなどで、定性的には推定できるが、定量的な一致は得られていない。この分野での信頼し得る計算モデルが得られぬことには、大リーク・ナトリウム-水反応試験装置相互間のデータを比較することができないばかりでなく、試験装置と実物SGの間のデータのやりとりもできないということになる。解決方法としては、SWAT-1装置の試験続行は無論のこと、さらに小型で試験頻度のあ

げられるナトリウム-水反応試験装置による試験および水噴出試験，水-空気シミュレーション試験などの試験研究を組合せおこない総合的に解決をはかるべきと考える。

SWAT-1試験装置の安全系は基本的には実物SGと同じであるが，反応容器寸法に比較して解放系配管の直径が太くかつ短いなど，安全側の設計となつている。このためナトリウム-水反応時の反応容器からのナトリウム移動量，反応容器準静圧力昇の減衰の仕方など，SWAT-1で得られたデータが実物SGの安全系にそのまま適用できないという論もある。いずれにしても，水-空気シミュレーション試験装置などを用いて，各部の寸法などを変え安全系作動へ及ぼす影響を調査すべきと考える。

8 あ と が き

現時点までにP-OXシリーズ6回，P-1Xシリーズ5回合計11回の試験がおこなわれた。最初はナトリウム-水反応でどういうことが生ずるのか判らず，手さぐりの状態で始め，しかも装置のハード的な面を取扱うための資材，技術がなく，計測器も不足していたので，測定よりもなによりも安全に仕事が遂行でき，しかも洗滌作業などの後始末を含めて効率的な道を見つけることに主眼がおかれていたことは否めない事実である。試験開始後一年が経過してどうにか装置の特性が判り，作業手順も確立されてきた現在（作業の困難さは変わらない），ある意味で試験の転換期となつている。他方大リーク・ナトリウム-水反応現象は，蒸気発生器安全性上問題となる現象が広範多岐にわたり，しかも高速現象であるなど測定困難な事項が多い。これらを全てSWAT-1装置の結果から解釈するとなれば多大の労を要するものと思われ，むしろ問題点を整理し，シミュレーション試験で済むものはその道で問題解決をはかるなどの手段を講ずるべきで，初期スパイク圧などの化学反応現象が密接にからんだ事項を中心にSWAT-1試験を実施した方が解決への早道のように思える。

本報告を終るにあたり，試験の実施に直接，間接に協力していただいた方々に深謝の意を表します。

APPENDIX I. 一次元非圧縮性ピストンモデルの内容

反応容器内の準静圧上昇を一次元非圧縮性ピストンモデルにより計算した。

計算内容は以下のとおりである。

(1) ナトリウム柱運動方程式

$$m \frac{d^2 x}{d t^2} + \lambda \left(\frac{d x}{d t} \right)^2 = S (P - P_c) \quad \dots\dots\dots (A \cdot 1)$$

(2) カバーガス圧

$$P_c = P_{c0} \left(\frac{V_{c0}}{V_c} \right)^k \quad \dots\dots\dots (A \cdot 2)$$

$$V_c = S (\ell - X) \quad \dots\dots\dots (A \cdot 3)$$

(3) 発生水素圧力

$P V = n R T$ の微分形

$$P \frac{d v}{d t} + V \frac{d p}{d t} = n R \frac{d T}{d t} + R T \frac{d n}{d t} \quad \dots\dots\dots (A \cdot 4)$$

$$V = S (X_0 + X) \quad \dots\dots\dots (A \cdot 5)$$

(4) 反応発生熱と水素気泡温度

$$\frac{d Q}{d t} = n C_v \frac{d T}{d t} + C_v T \frac{d M}{d t} + A P \frac{d V}{d t} \quad \dots\dots\dots (A \cdot 6)$$

(5) 水注入量, 発生水素ガス, 発生熱の関係

$$\frac{d n}{d t} = \eta \cdot q \quad \dots\dots\dots (A \cdot 7)$$

$$\frac{d Q}{d t} = \xi \cdot \frac{d n}{d t} \quad \dots\dots\dots (A \cdot 8)$$

但し

| | | |
|-----------|---|-----------------|
| m | : | ナトリウム柱質量 |
| λ | : | ナトリウム流体抵抗係数 |
| S | : | ナトリウム柱横断面積 |
| X | : | ナトリウム柱移動距離 |
| P | : | 発生水素圧力 |
| P_c | : | カバガス圧力 |
| P_{c0} | : | " 初期圧力 |
| V_c | : | " 容 積 |
| V_{c0} | : | " 初期容積 |
| K | : | " ポリトロープ指数 |
| φ | : | " 初期行程 |
| V | : | 発生水素ガス容積 |
| n | : | " モル量 |
| R | : | 一般ガス定数 |
| T | : | 発生水素ガス温度 |
| X_0 | : | 発生水素ガス初期気泡厚さ |
| Q | : | " 保有熱量 |
| C_v | : | " 定圧比熱 |
| q | : | 水注入率 |
| η | : | 発生水素モル量/水注入量モル量 |
| ξ | : | 発生水素同併熱量 |

以上の式を連立で解いた。なお計算コード作成上の都合で次のような仮定をおいている。

仮 定

- (1) 反応開始直後は反応発生熱表示式 A.6 式は連立として解かず、発生水素ガス温度は 1000℃ と一定としている。

計算ステップ 100 ステップ后から A.6 式が連立されて解かれる。

- (2) 反応開始前に初期水素気泡 X_0 の存在を仮定している。計算開始 50 ステップで初期圧力が最高となるよう自動的にきまるコードとした。

- (3) 積分はオイラー積分とした。

この計算に用いた数値は以下のとおりである。

$$S = \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \quad (\text{m})$$

$$L = 1.5 \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots \text{ナトリウム柱高さ}$$

$$m = \frac{S \cdot L \cdot \rho}{9.8} \quad (\text{Kg m / see})$$

$$\rho = 0.8 \times 10^3 \quad (\text{Kg / m}^3) \quad \dots\dots\dots \text{ナトリウム密度}$$

$$l = 1 \quad (\text{m})$$

$$K = 1.4$$

$$X_0 = 1 \times 10^{-6} \quad (\text{m})$$

$$R = 847.82 \quad (\text{Kg m / K cal}^{\circ} \text{K})$$

$$C_v = 4.85 \quad (\text{K cal / K mol}^{\circ} \text{C})$$

$$\eta : \text{パラメータ}$$

$$\xi : \text{パラメータ}$$

APPENDIX II. 実験IIシリーズ試験条件

本報告の一部に実験IIシリーズ結果が用いられている。現在実験IIシリーズの全ての結果がとりまとめられているわけではないが、参考までに試験条件について以下の表にとりまとめた。

| | |
|----------------------------------|------------------------------|
| Na量 180 Kg | ラブチャ板設定圧 |
| Na温度 330℃ | R-0 a 5.0 Kg/cm ² |
| 初期カバガス圧 0.5 Kg/cm ² G | R-0 b 2.5 Kg/cm ² |
| 水加熱器圧力 7.5 Kg/cm ² G | R-1 5.0 Kg/cm ² |
| 水加熱器温度 290℃ | R-2 1.5 Kg/cm ² |

表A・II・1 実験IIシリーズ試験固定条件

| 試験 # | オリフイス口径 | 弁開時間 | 平均注水率 |
|------|---------|----------|-------------|
| 1 1 | 3.5 mmφ | 6.25 sec | 0.47 Kg/sec |
| 1 2 | 5.0 | 4.6 | 0.89 |
| 1 3 | 5.0 | 5.0 | 0.76 |
| 1 4 | Z 0 7 | 2.9 | 1.55 |

表A・II・2 実験IIシリーズ試験変化条件

APPENDIX III. 収納容器大気排出系作動に関する均質モデル

5.2項で考察に用いた均質モデルを以下に説明する。

均質モデルは反応容器，収納容器などのカバーガス容積と，それに入り込む水素ガスだけを考えれば良く，以下のようになる。

カバーガス領域のガス状態式

$$P = \frac{R}{V} n T$$

水素ガス随伴熱量とカバーガス温度との関係

$$dQ = n C_v dT + C_v (T - T_0) dn$$

水素ガス発生量と同伴熱量の関係

$$dQ = \eta dn$$

モデルの簡単化のために，最初にカバーガスとして封入したアルゴンガスを水素ガスに置換える。

このモデルではガスの種類に依存する量は比熱 C_v のみで水素ガスの方が1.6倍大きい。

初期状態は
$$P_1 = \frac{R}{V} n_1 T_1$$

これらの関係より収納容器大気解放系ラプチャ 作動直前の圧力，水素ガスモル数，同伴熱量の関係は

$$n = \frac{1}{\eta + C_v T_0} \left\{ \frac{P V C_v}{R} - n_1 C_v (T_1 - T_0) + n \cdot \eta \right\}$$

但し

- n : 水素ガスモル量 (n_1 : 初期モル量)
- P : " 圧力
- V : 均質モデルの容積
- R : 一般ガス定数

- C_v : 水素ガス定圧比熱
 T : 水素ガス温度 (T_1 : 初期温度, T_0 : 常温)
 η : 水素ガス同併熱量
 Q : 水素ガスが保有している熱量

上式とガス状態式より温度が求まる。

計算数値として

$$\begin{aligned}
 \text{体積 } V &= 0.314 \quad +1.30 \quad +0.06 \quad -0.18 \\
 &\quad \text{(反応容器)} \quad \text{(収納容器)} \quad \text{(連絡管)} \quad \text{(ナトリウム量)} \\
 &= 1.49 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{初期圧力 } P_1 = 15000 \text{ Kgf/m}^2$$

$$\text{〃 温度 } T_1 = 473^\circ \text{ K}$$

$$\text{常温 } T_0 = 293^\circ \text{ K}$$

$$\text{水素ガス比熱 } C_v = 485 \text{ Kcal/Kmol}^\circ \text{ K}$$

$$\text{ガス定数 } R = 847.82 \text{ K}g\text{-m/Kcal}^\circ \text{ K}$$

水注入により増加した水素ガスモル量は

$$\Delta n = n - n_1$$

で、同併熱量 η と発生水素ガス量 Δn との関係を図-5.2に示す。

図中に注水量 1 kg に相当する発生水素ガス量の範囲を記入してある。水 1 モル \rightarrow 水素ガス 1 モルの場合 1 kg 水注入に対し発生水素ガスは

$$1/18 = 0.0555 \text{ Kmol}$$

水素ガス 1/2 の場合は

$$1/18 \times 1/2 = 0.0277 \text{ Kmol}$$

で与えられる。

A P P E N D I X IX. 実験 I シリーズ主要結果

実験 I シリーズの主要試験結果を表 A. IX 1 ~ 4 に示す。

参 照 文 献

- 1) J. A. Ford, Literature Review of Sodium-Water Reactions, March 15, 1965 APDA-167
- 2) 機械学会, ナトリウム-水反応の安全性調査および研究報告書(昭和44年度) 昭和45年3月20日
- 3) 機械学会, ナトリウム加熱蒸気発生器の安全性に関する調査研究, 1971年3月 SJ 254, 71-01
- 4) 日立製作所, Na-水反応実験装置御契約仕様書, 昭和44年
- 5) A. J. Friedland et al, Gas-Water Simulation Studies of Sodium-Water Reactions, Sept 1968 APDA-226 P-8
- 6) W. L. Chase, Analysis of the Babcock & Wilcox Full-size Steam Generator for a Sodium-Water Reaction, Nov, 1965 APDA-176 P41~43
- 7) 三菱原子力工業, 高速増殖原型炉予備設計書, 昭和44年1月
- 8) 日立製作所, 高速増殖原型炉一次設計計算書 Vol2, (設計計算書), 昭和45年3月
- 9) 田中, 坂野, 一次元ナトリウム水反応計算コードの開発研究 -実験の予備解析- SJ 213 71-01 川崎重工 1971年3月
- 10) K. Dumm et al., The Reaction of Sodium and Water in Tubes, ATOMKERN ENERGIE Sept 1969

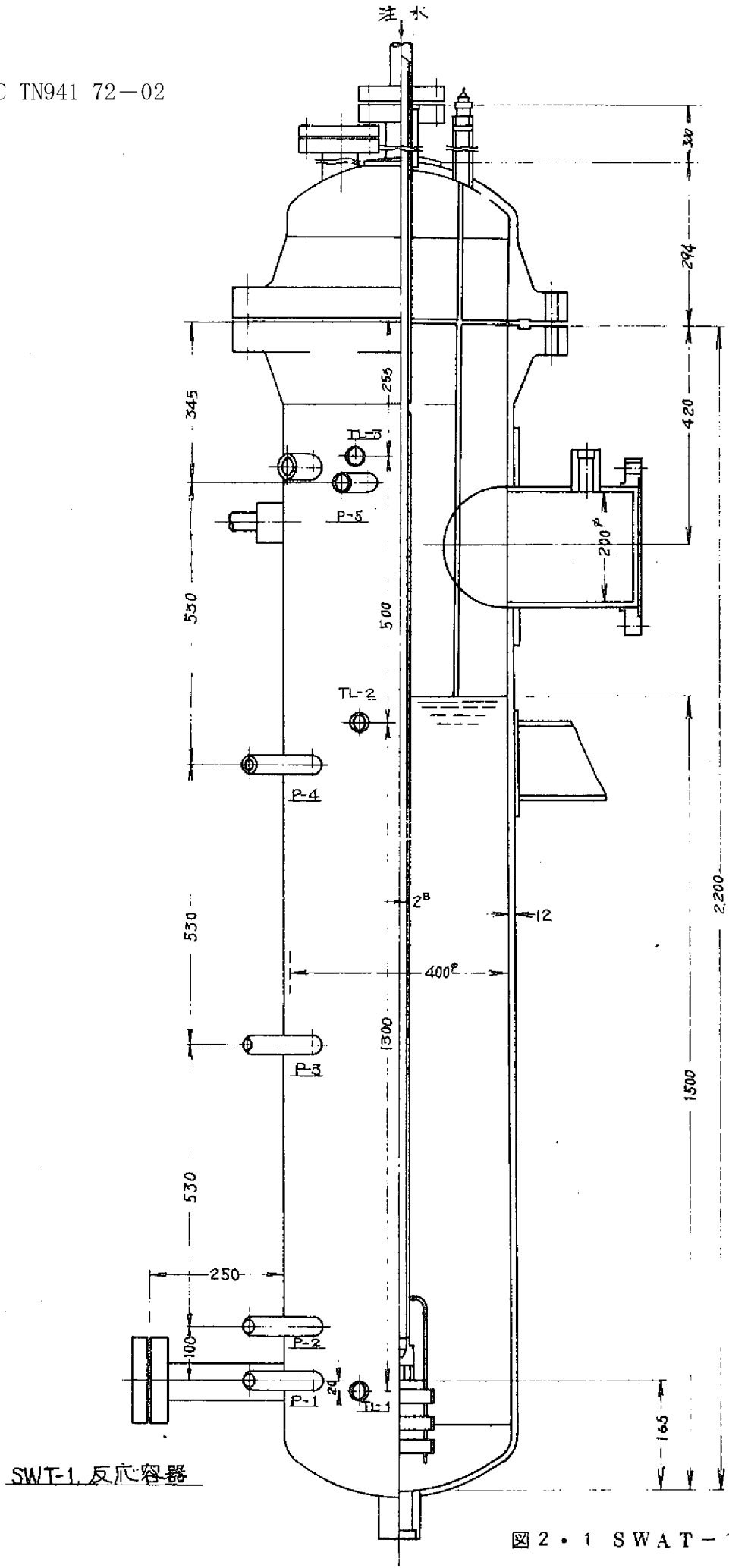


图 2.1 SWAT-1 试验装置

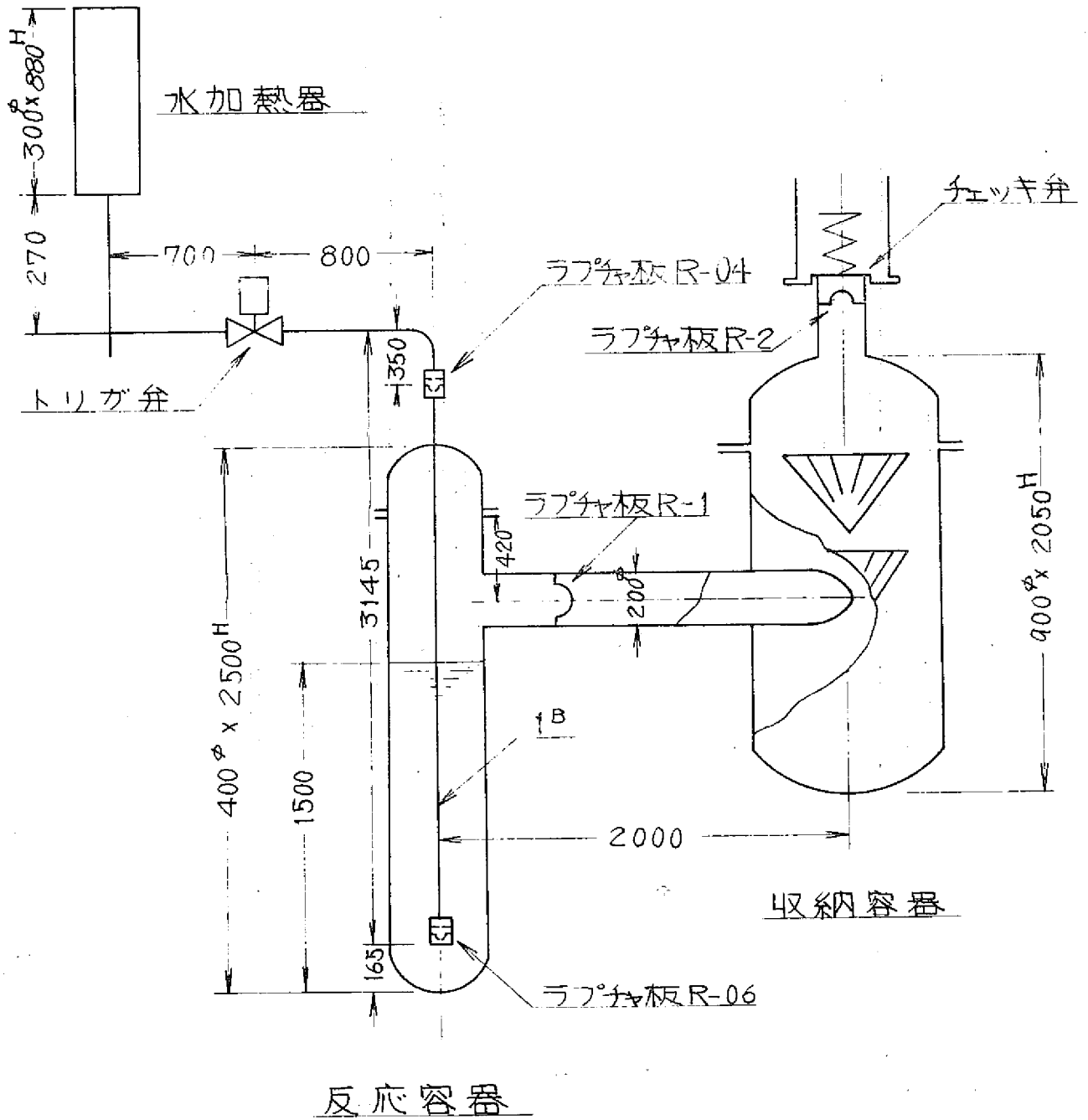


図 2・1 SWAT-1 試験装置

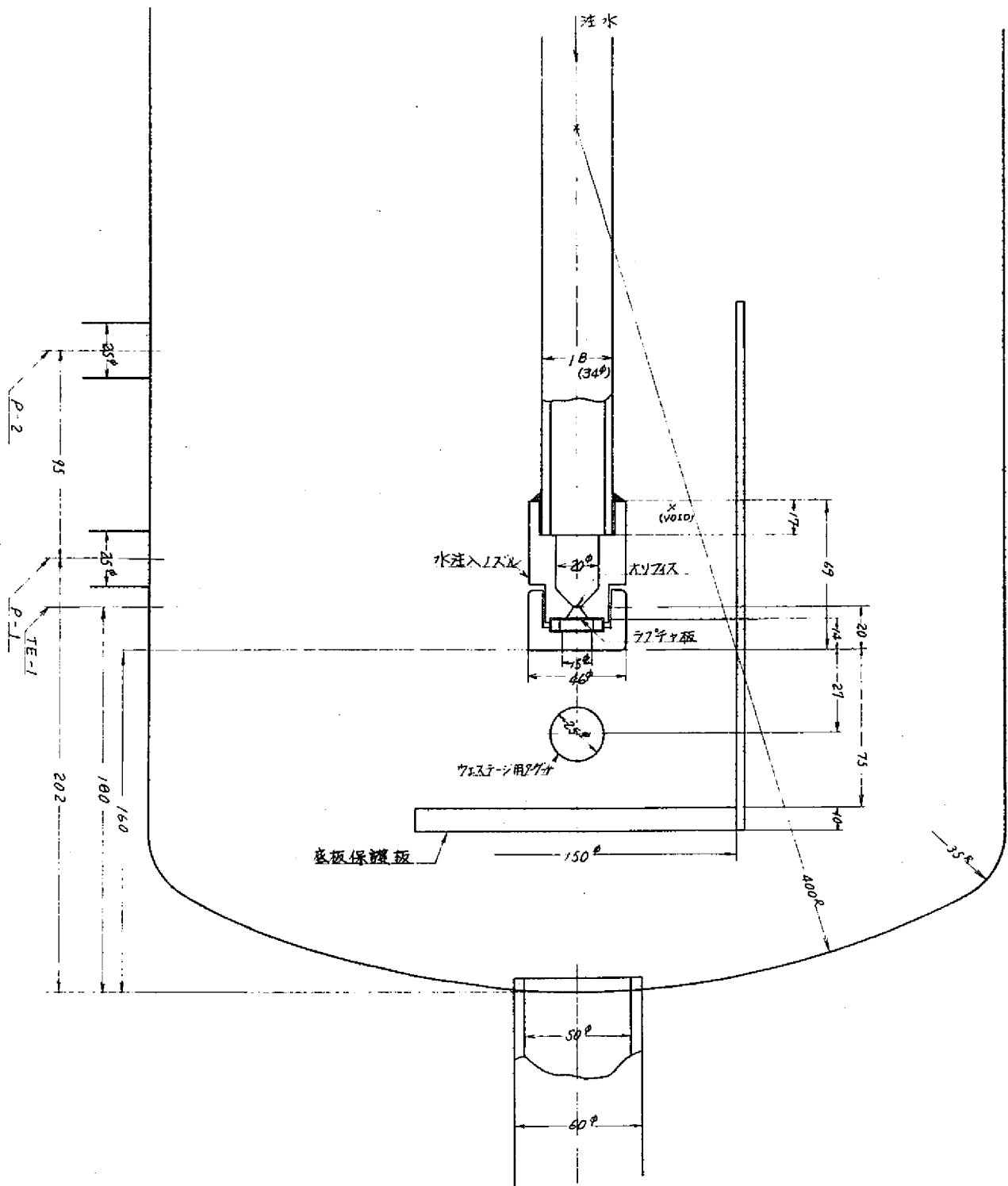
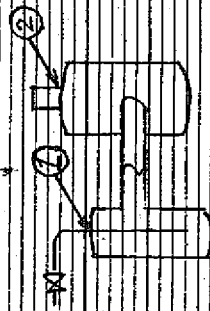


図 2 - 2
SWAT - 1 反応容器反応束付近 (P-06)

モニタ可位置

実験番号 P-06



① 受入音
 水注入配管
 の水通過音

① 受入音

② 受入音
 放射容器爆発
 からのH₂が不噴袋音

② 受入音
 H₂が不噴袋
 作動信号

② 受入音

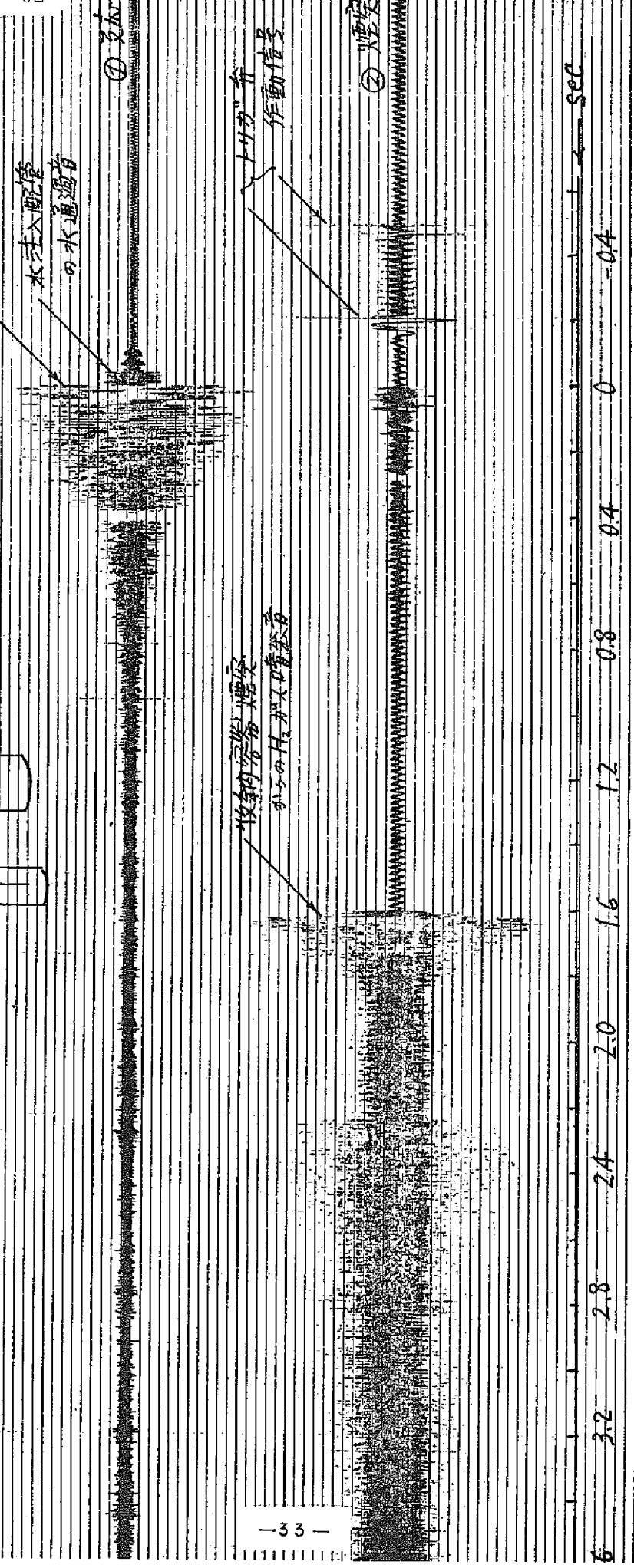
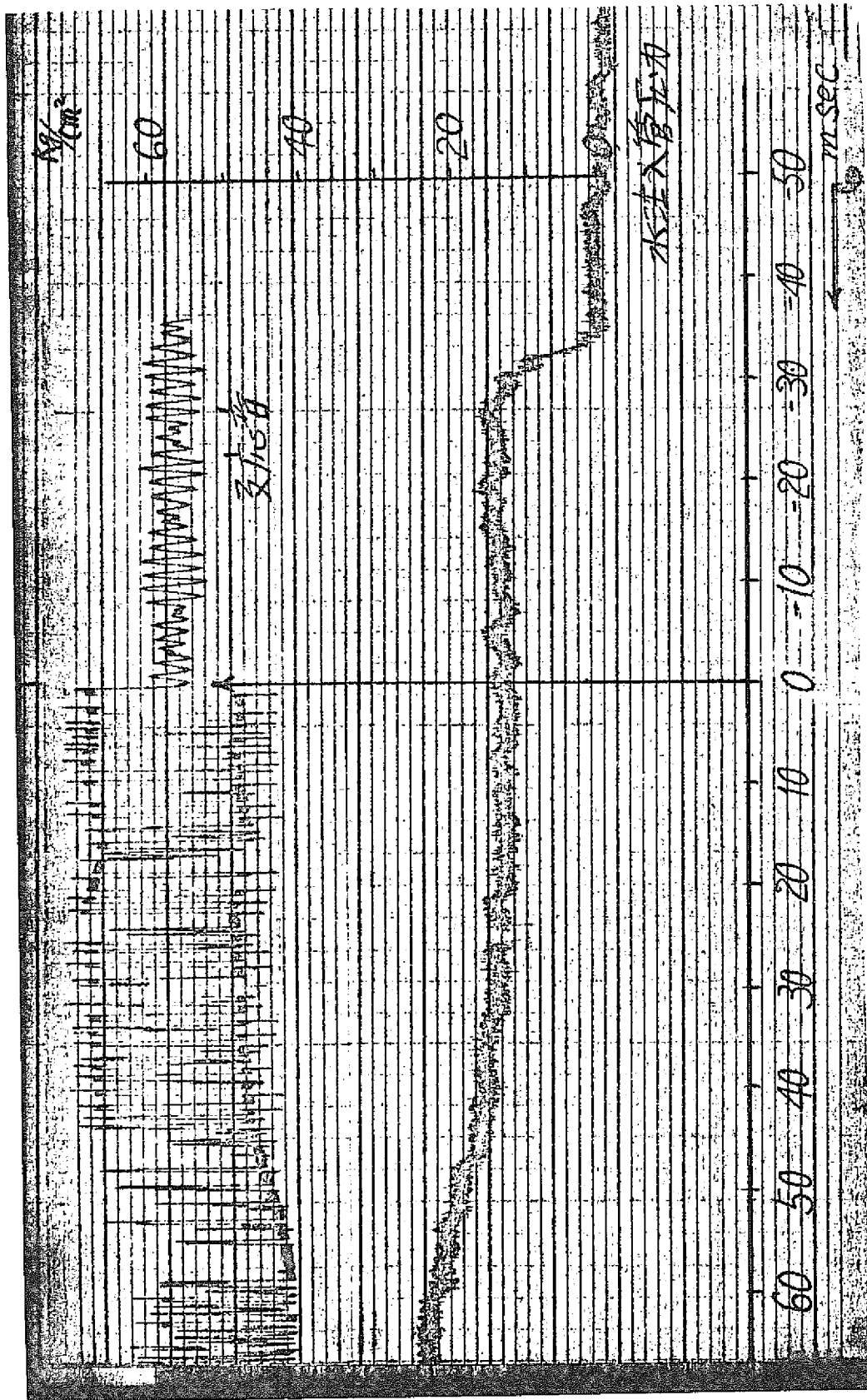


図 3・1 試験の音響的モニタ結果



短時間間圧力経過

図3.2 水注入管圧力

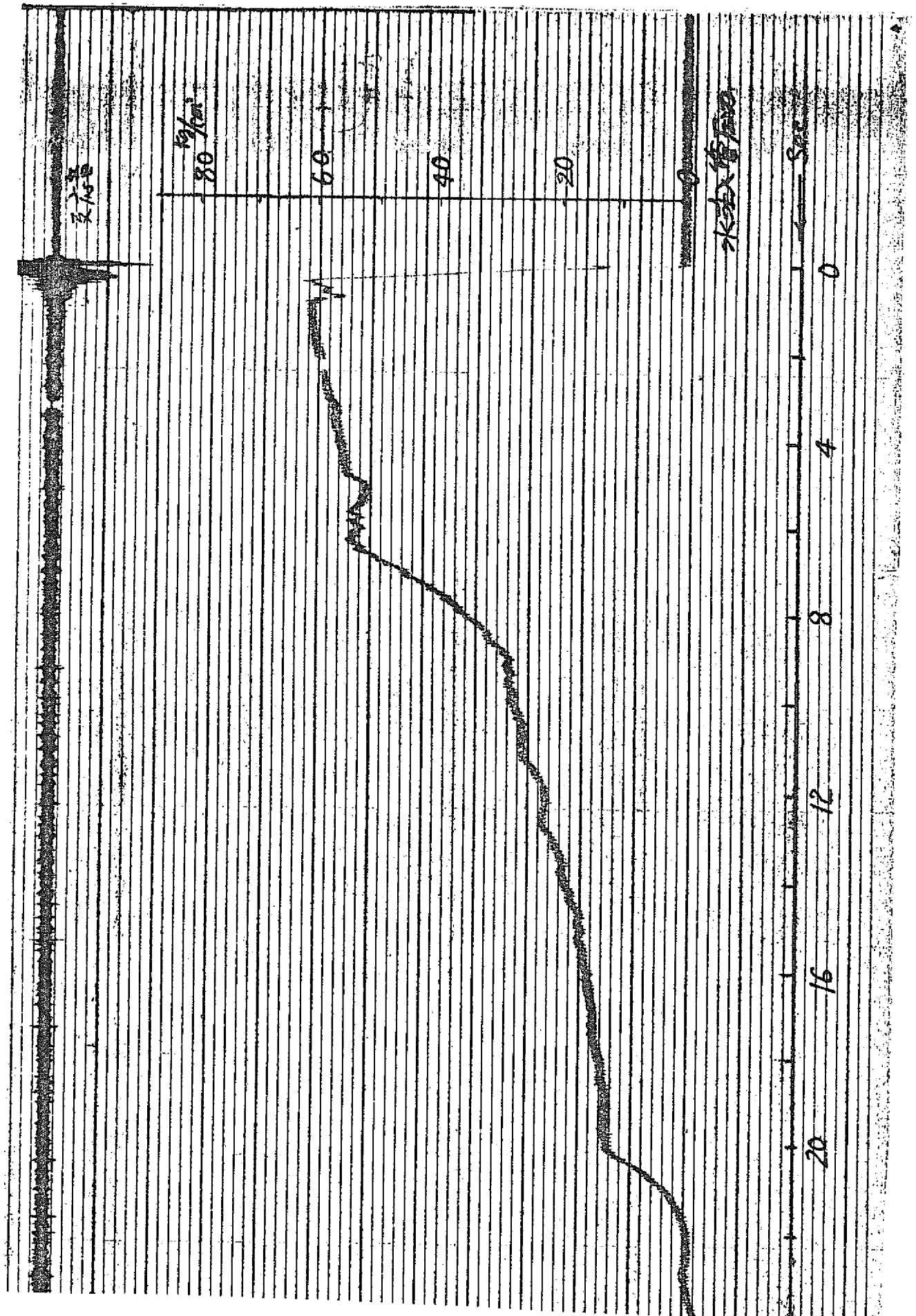


図3・2 水注入管圧力

試験者番号 P-06

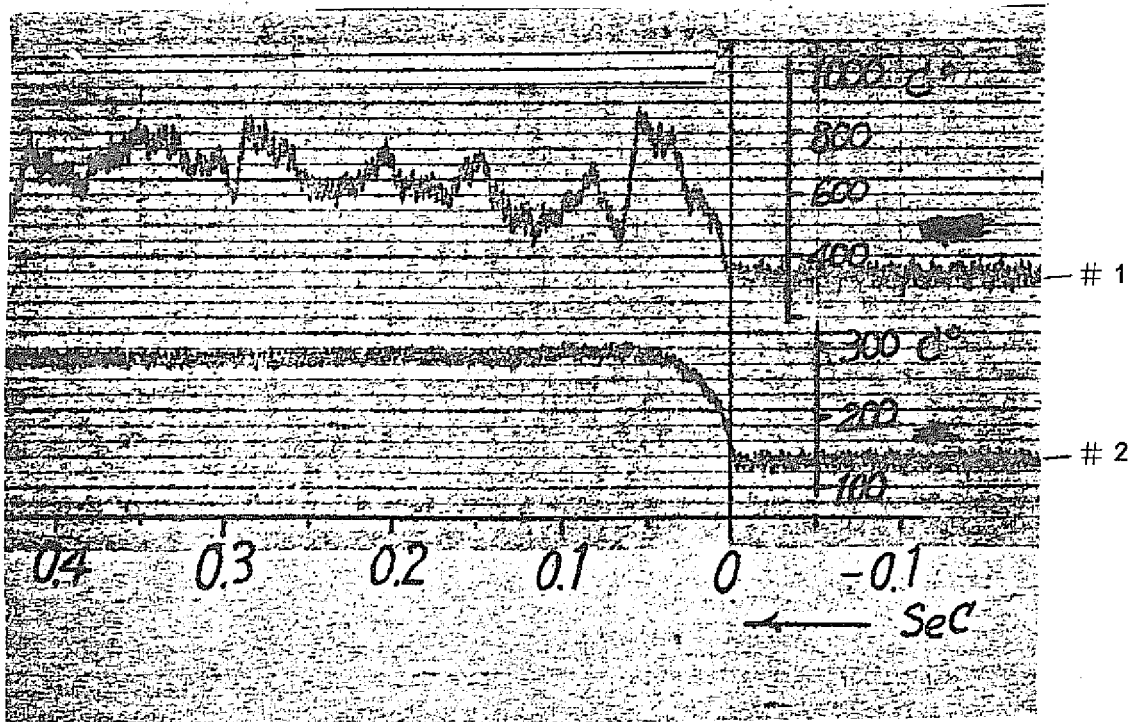
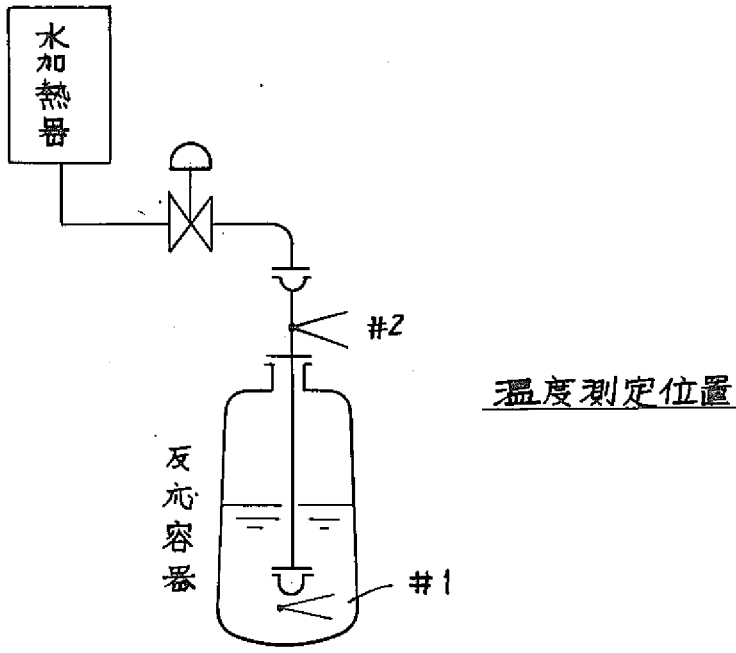


图 3.3 水注入系温度

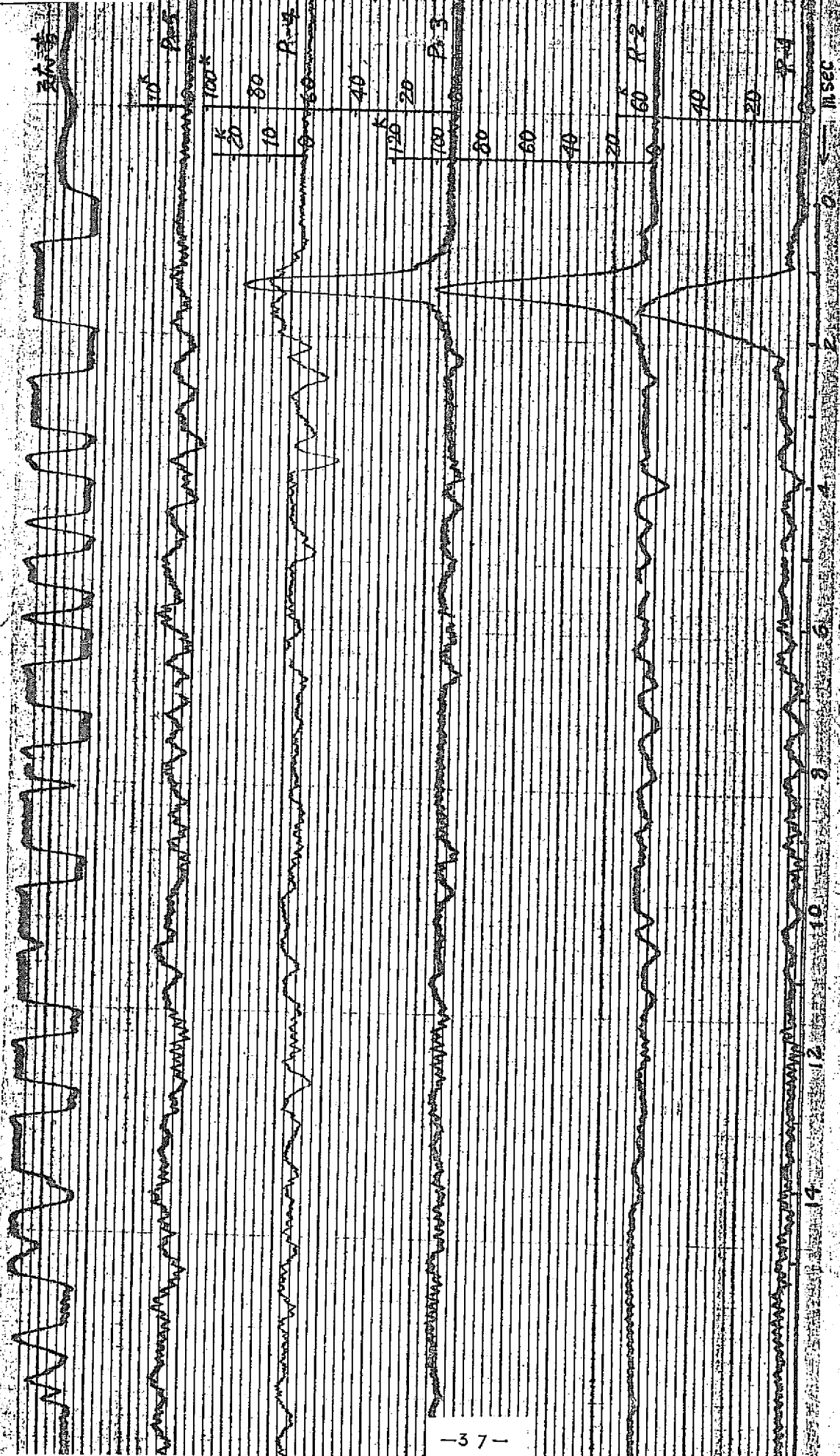


図 3・4 初期スパイク圧 (P-06)

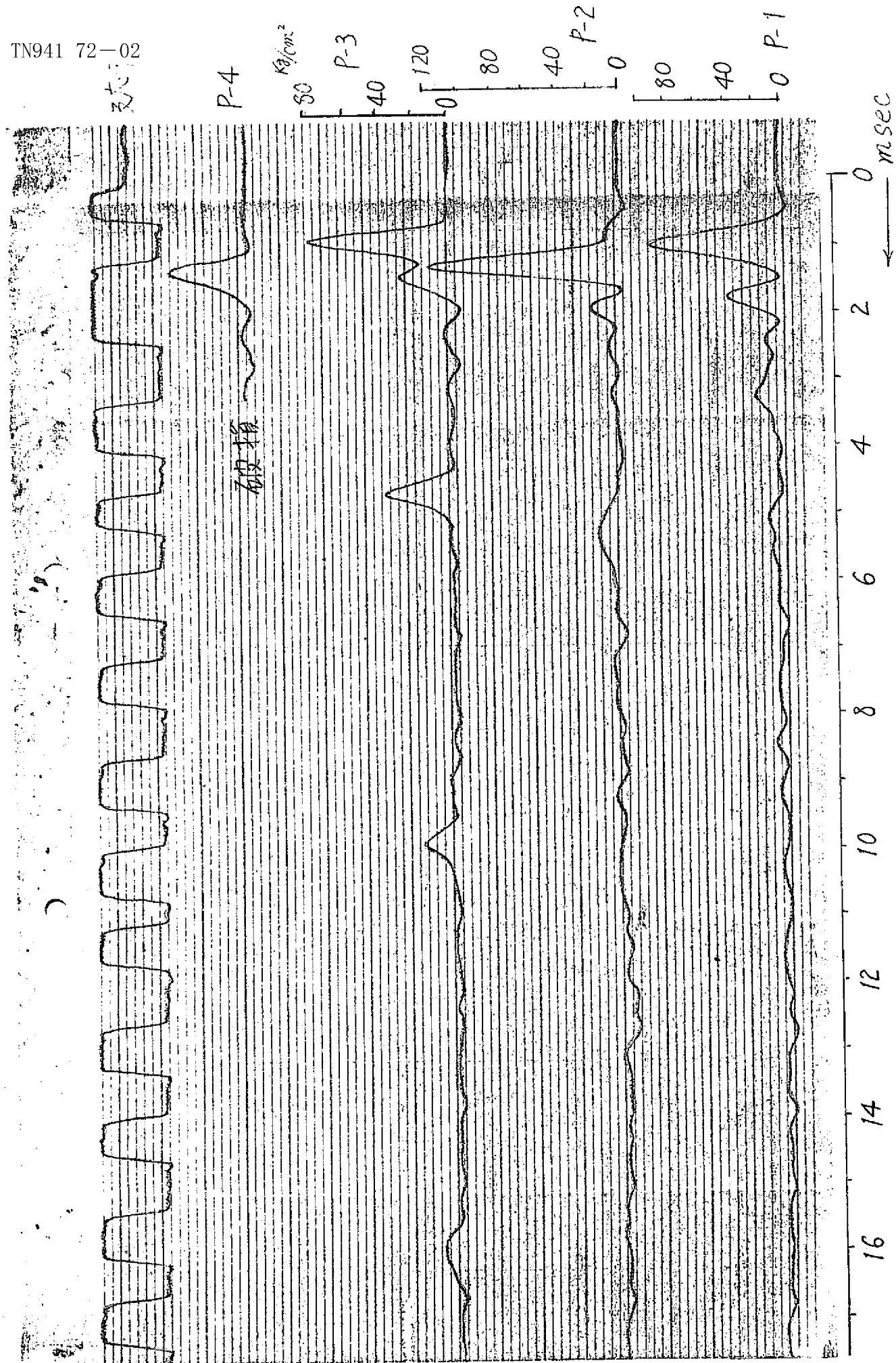


図3・5 初期スパイク圧 (P-04)

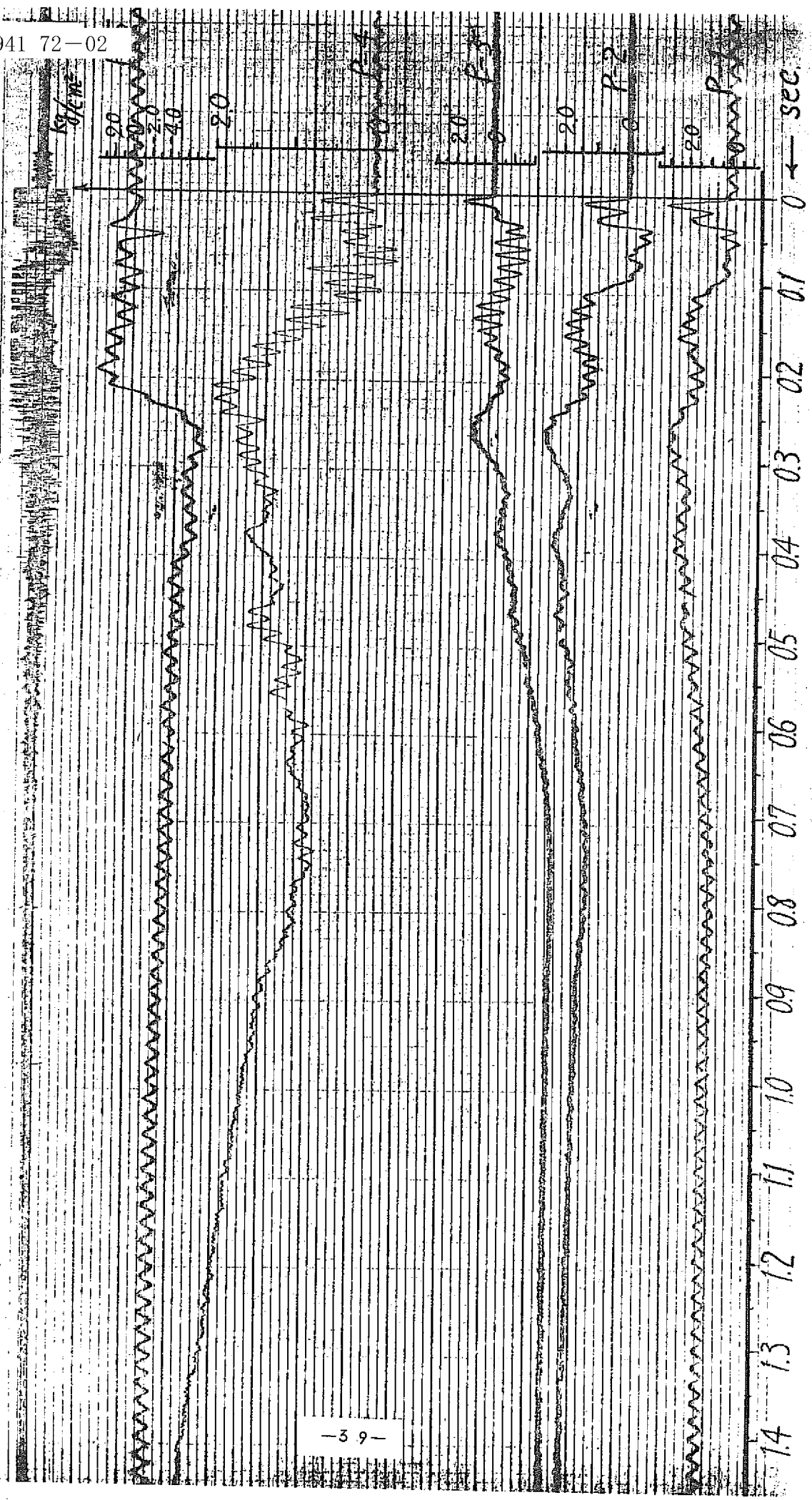


图 3·6 反应容器内準静圧上昇 (P-06)

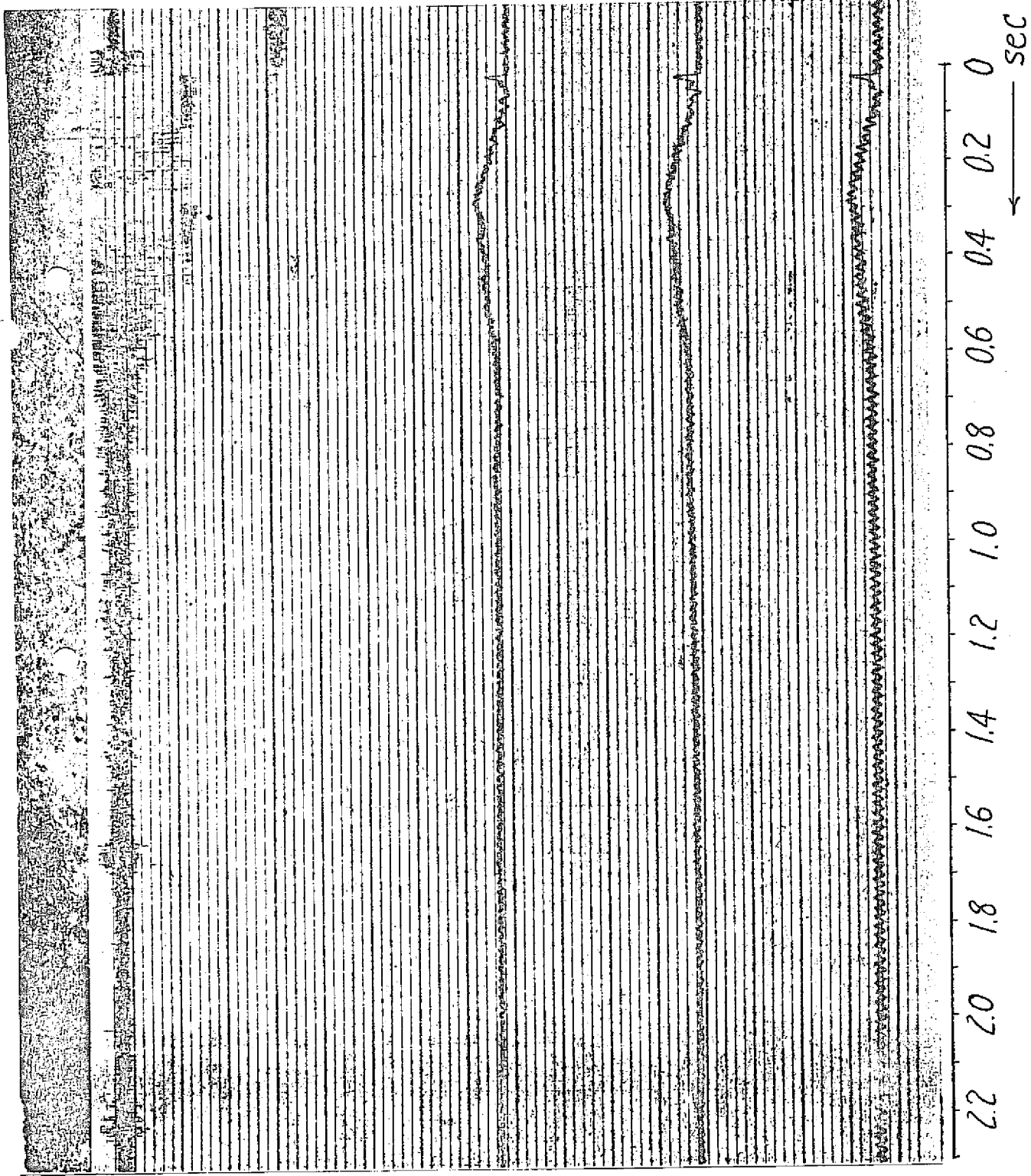


图3·7 反应容器内準静圧上昇 (P-04)

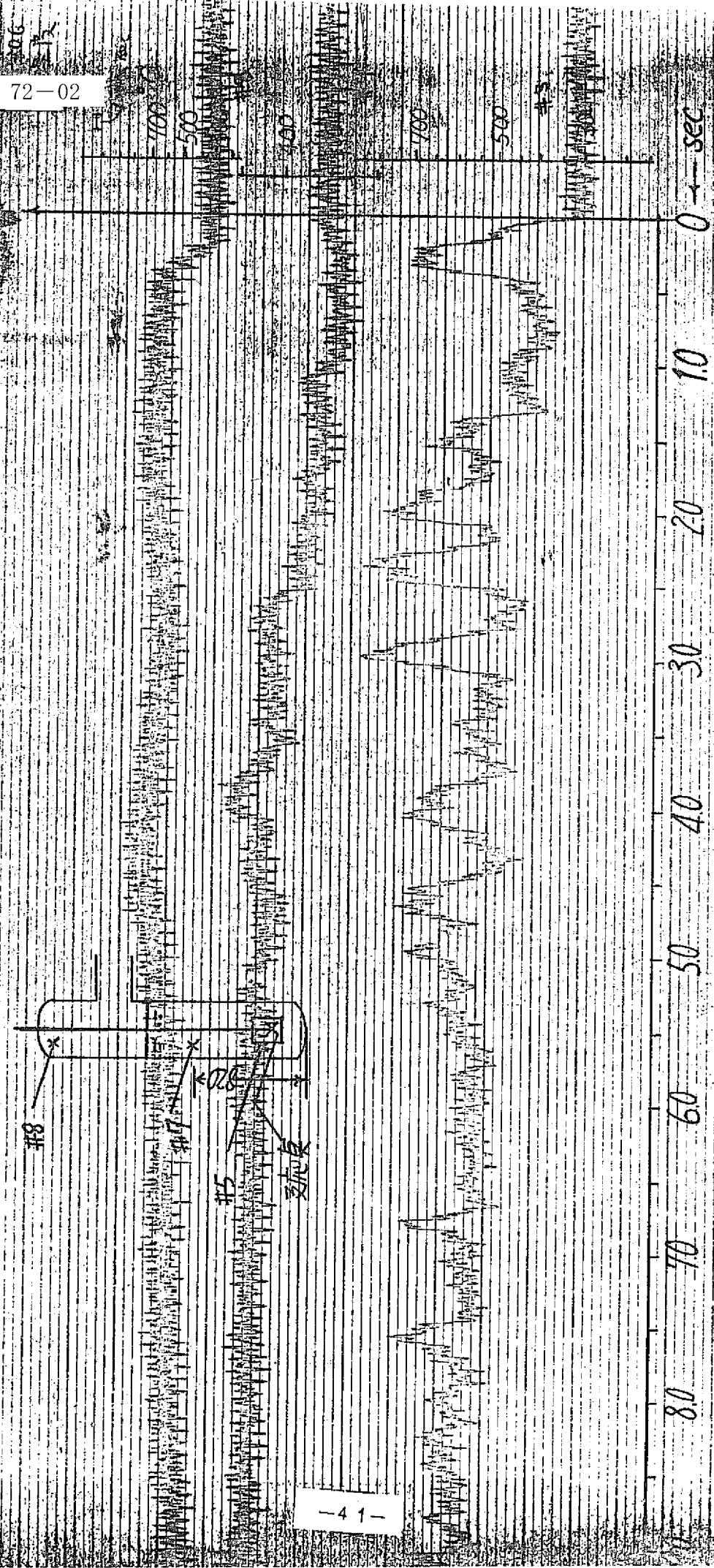


图3.9 反应容器内温度

水加熱器運転条件
7.5 atG (290°C) 飽和水

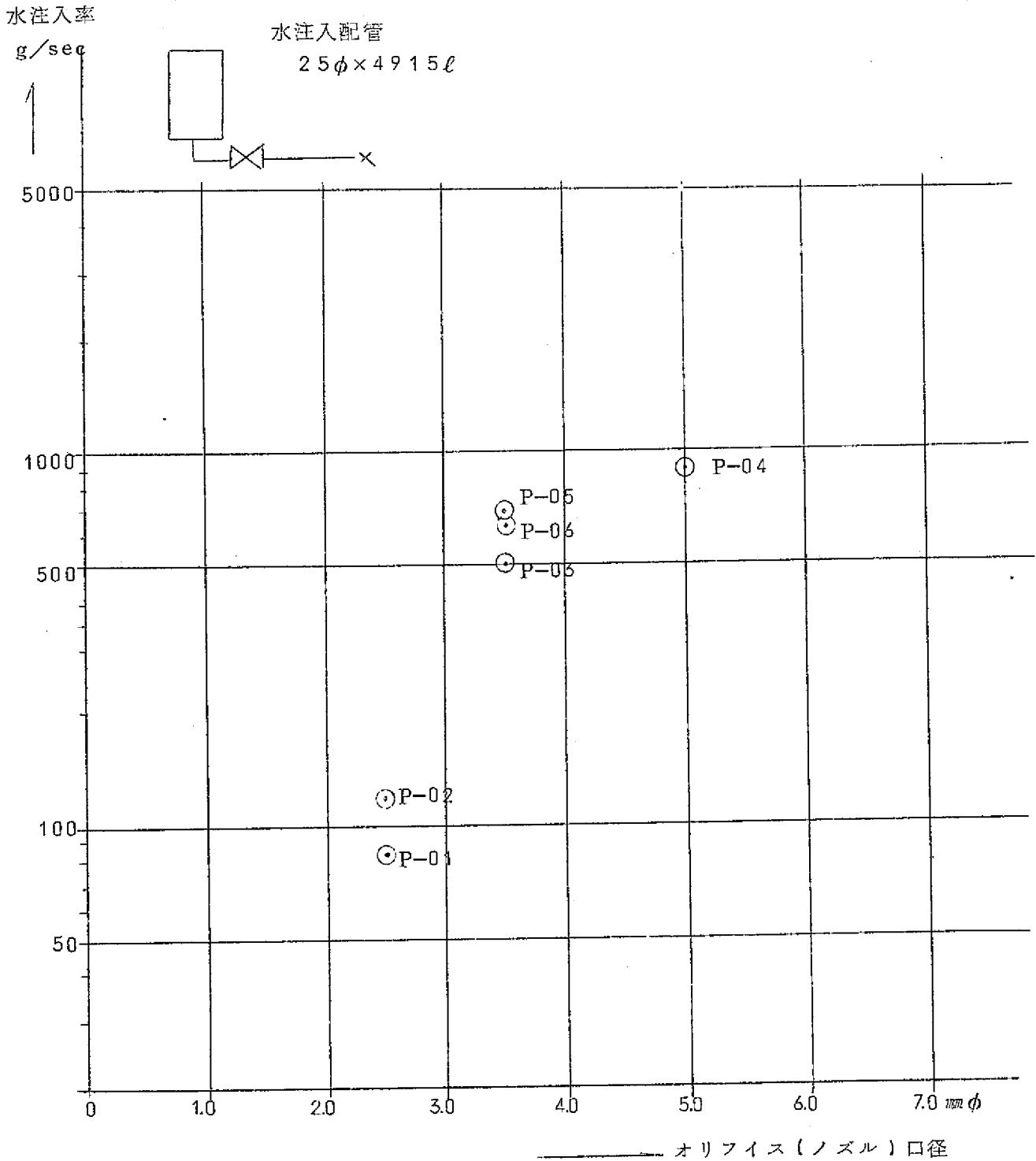


図 4.1 水注入率～オリフィス口径

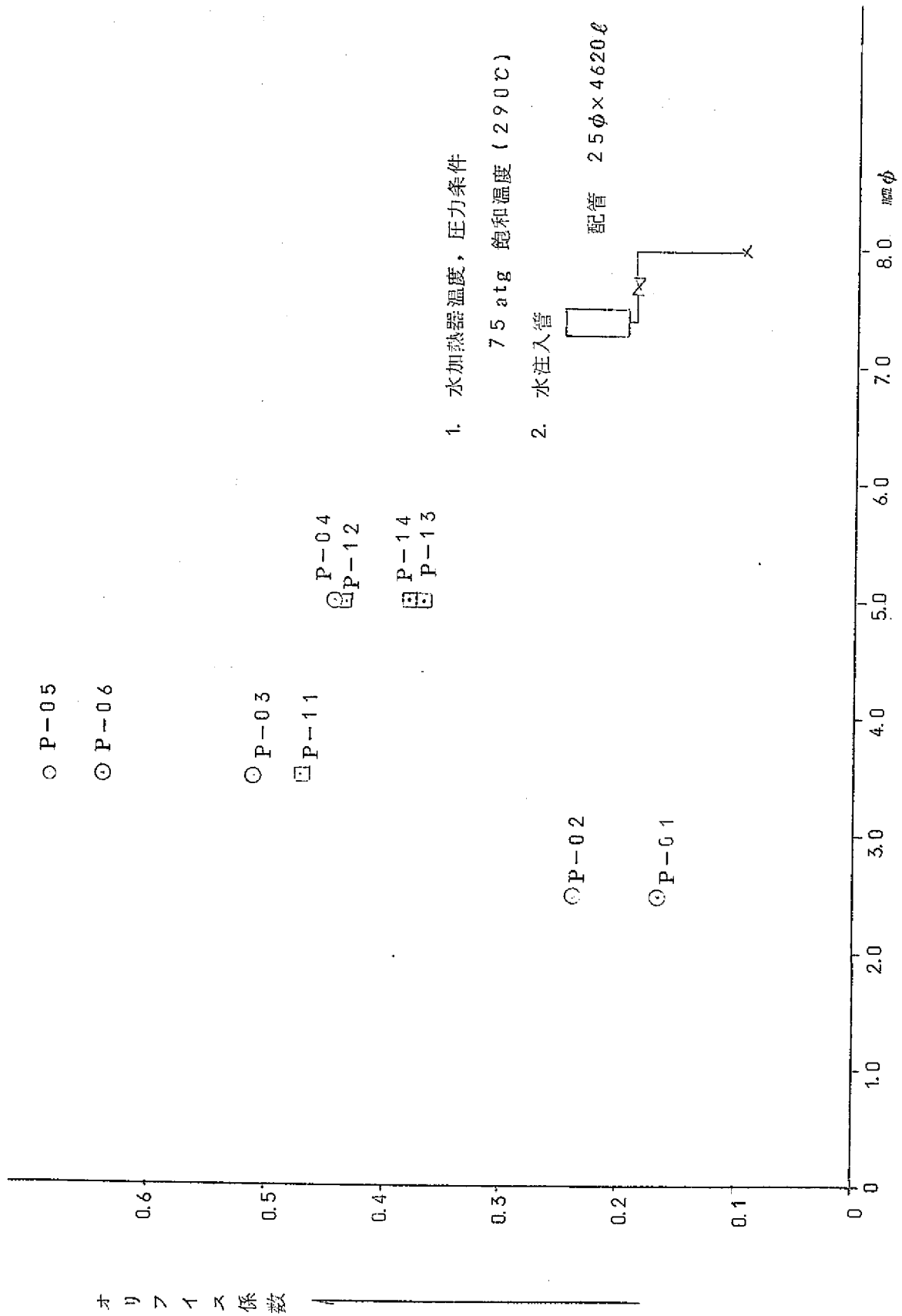


図 4.2 水注入率～オリフィス係数

反応点付近圧力計測点

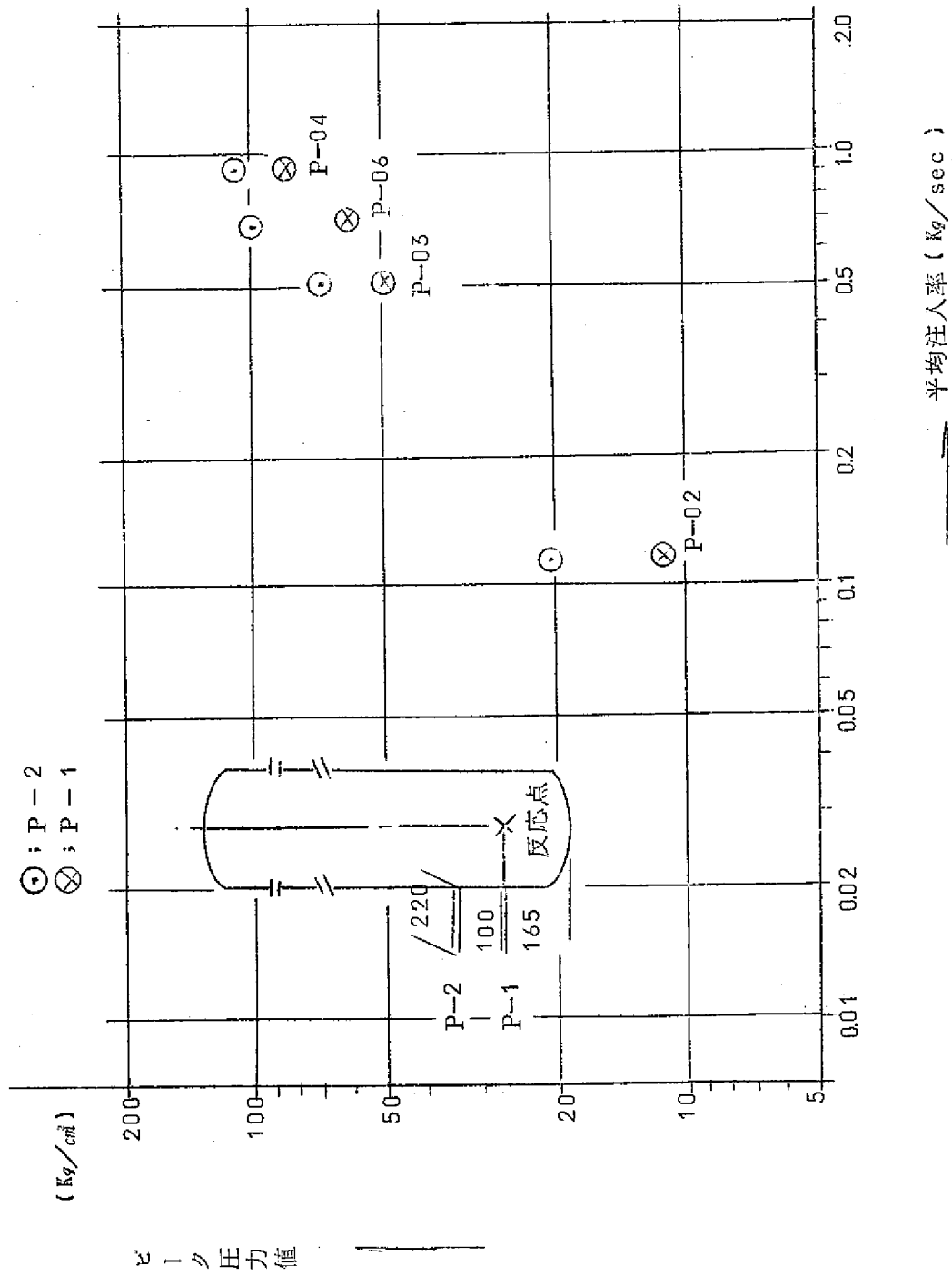


図 4.3 水柱入率～初期スバイクピーク値

- ⊙ P-02
- × P-03
- △ P-04
- P-06

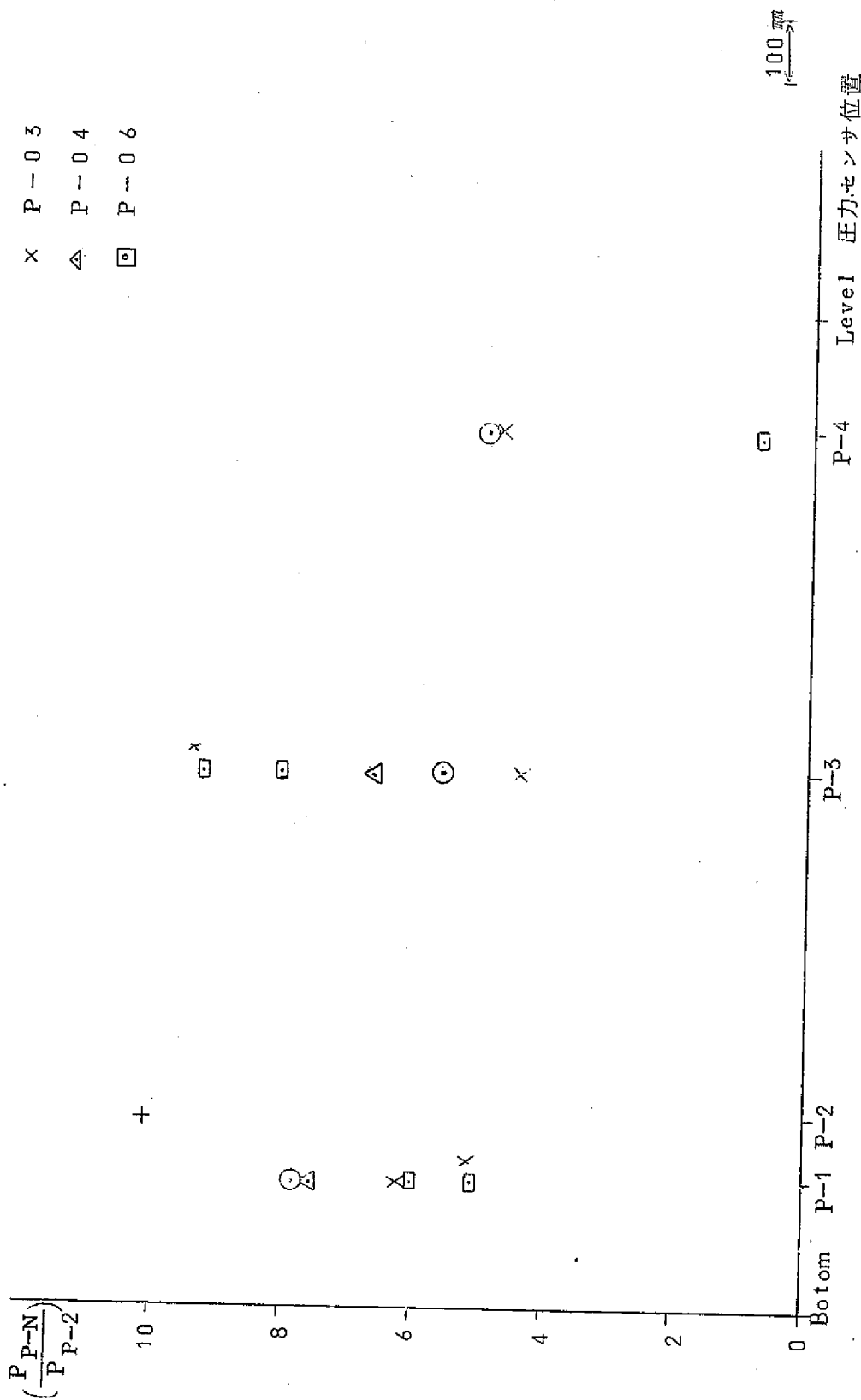
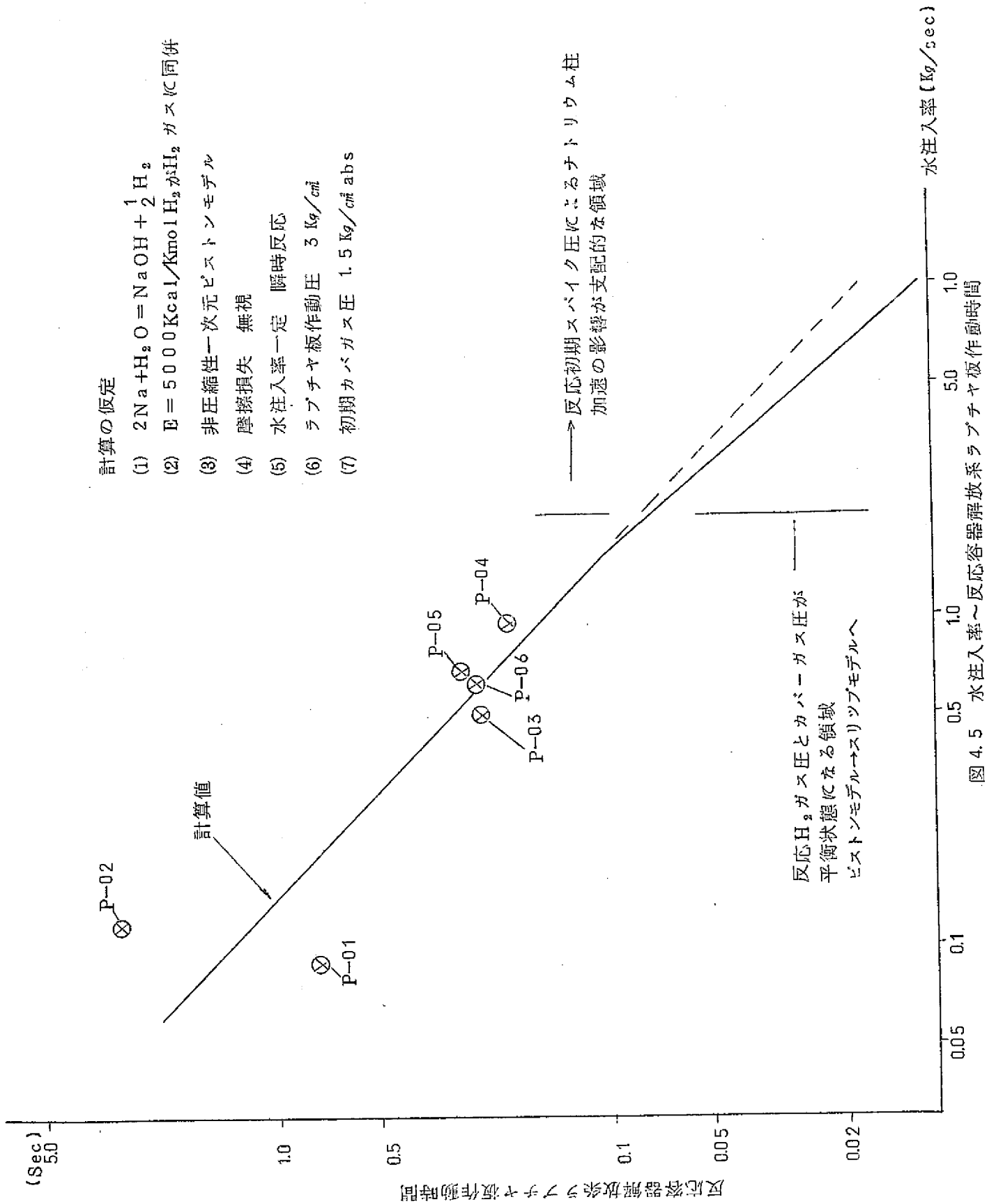


図 4.4 測定位置～初期スパイクピーク値

計算の仮定

- (1) $2Na + H_2O = NaOH + \frac{1}{2}H_2$
- (2) $E = 5000 \text{ Kcal/Kmol}$ H_2 が H_2 ガスに同併
- (3) 非圧縮性一次元ピストンモデル
- (4) 摩擦損失 無視
- (5) 水注入率一定 瞬時反応
- (6) ラブチヤ板作動圧 3 Kg/cm^2
- (7) 初期カババガス圧 $1.5 \text{ Kg/cm}^2 \text{ abs}$



ラプチャ板設定圧 $\sim 3 \text{ Kg/cm}^2$

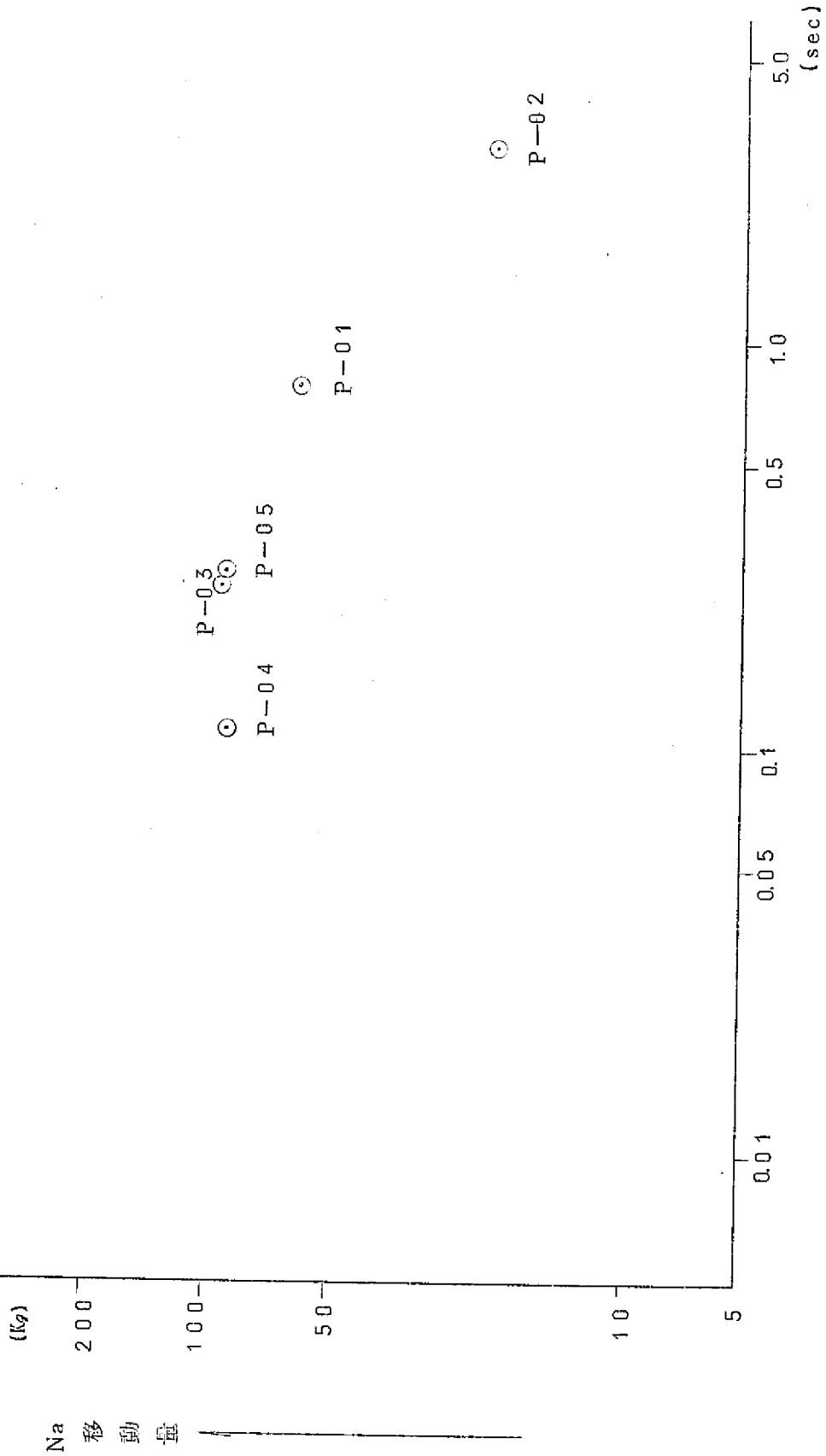
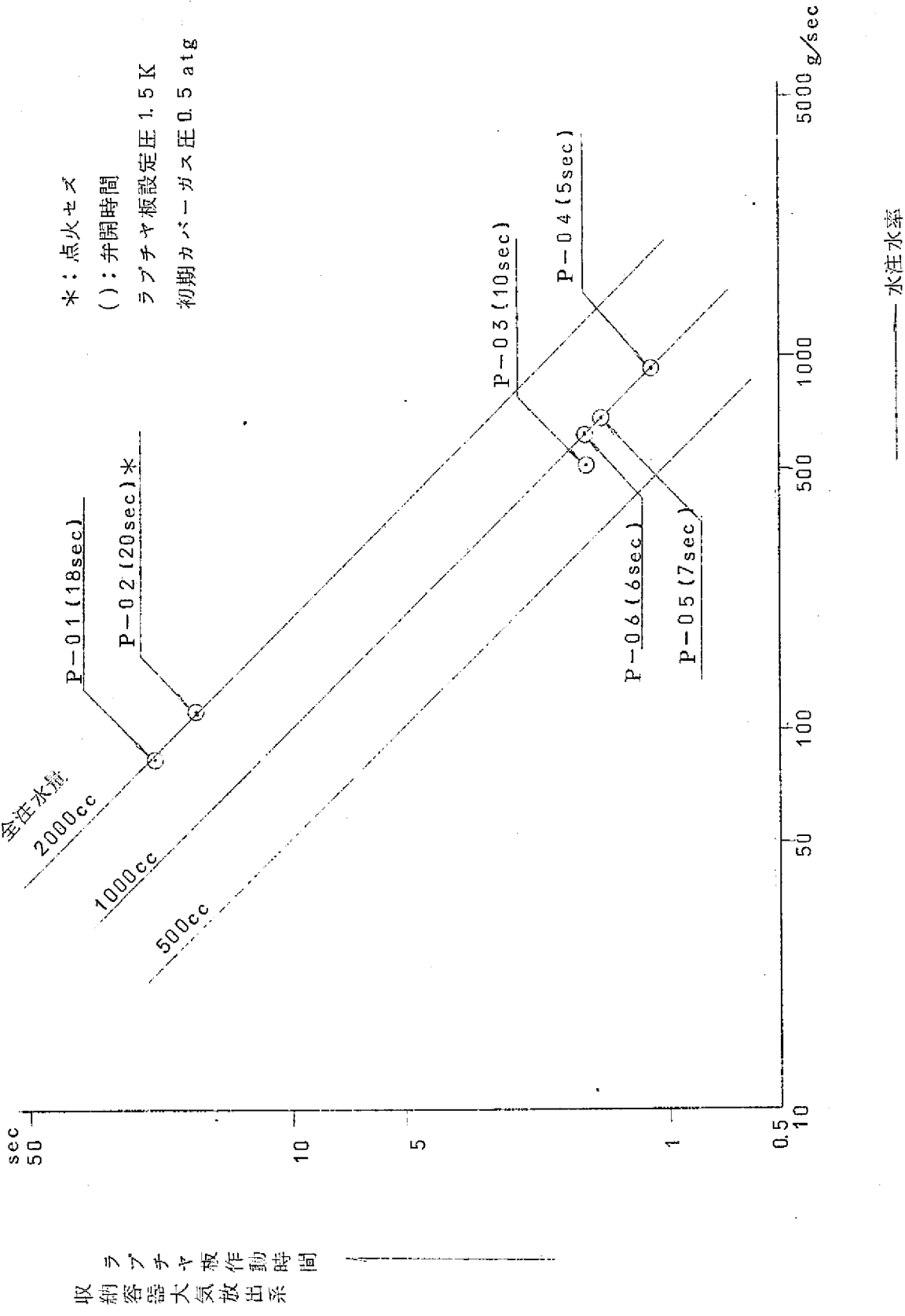


図 4.6 反応容器解放系ラプチャ板作動時間 \sim 収納器へのナトリウム移動量



* : 点火セズ
 () : 弁開時間
 ラブチャ板設定圧 1.5 K
 初期カバークラス圧 0.5 atg

図 4.7 収納容器大気放出系ラブチャ板作動時間～平均水注水率

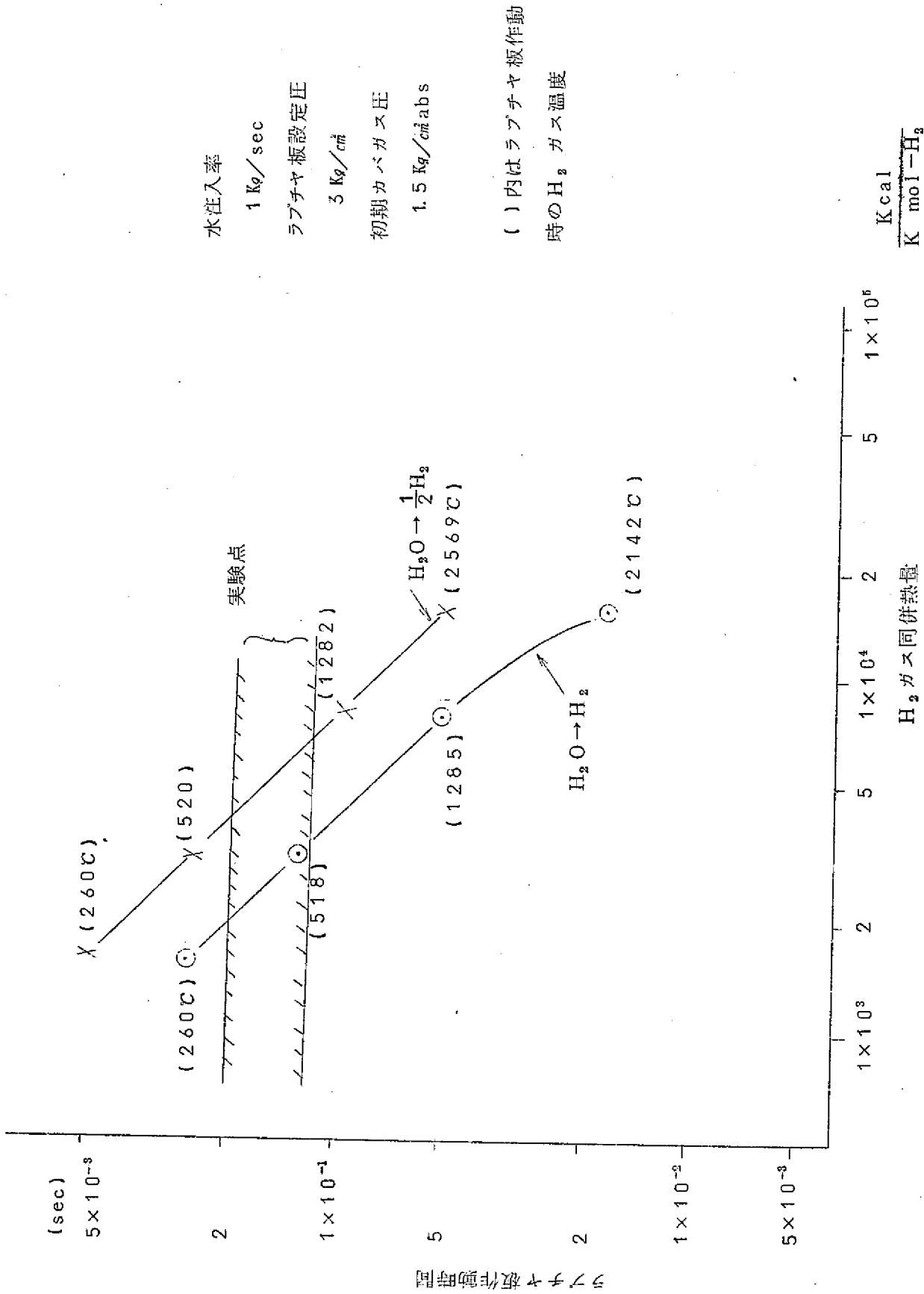


図 5.1 水素ガス同併熱量～反応容器ラブチヤ板作動時間

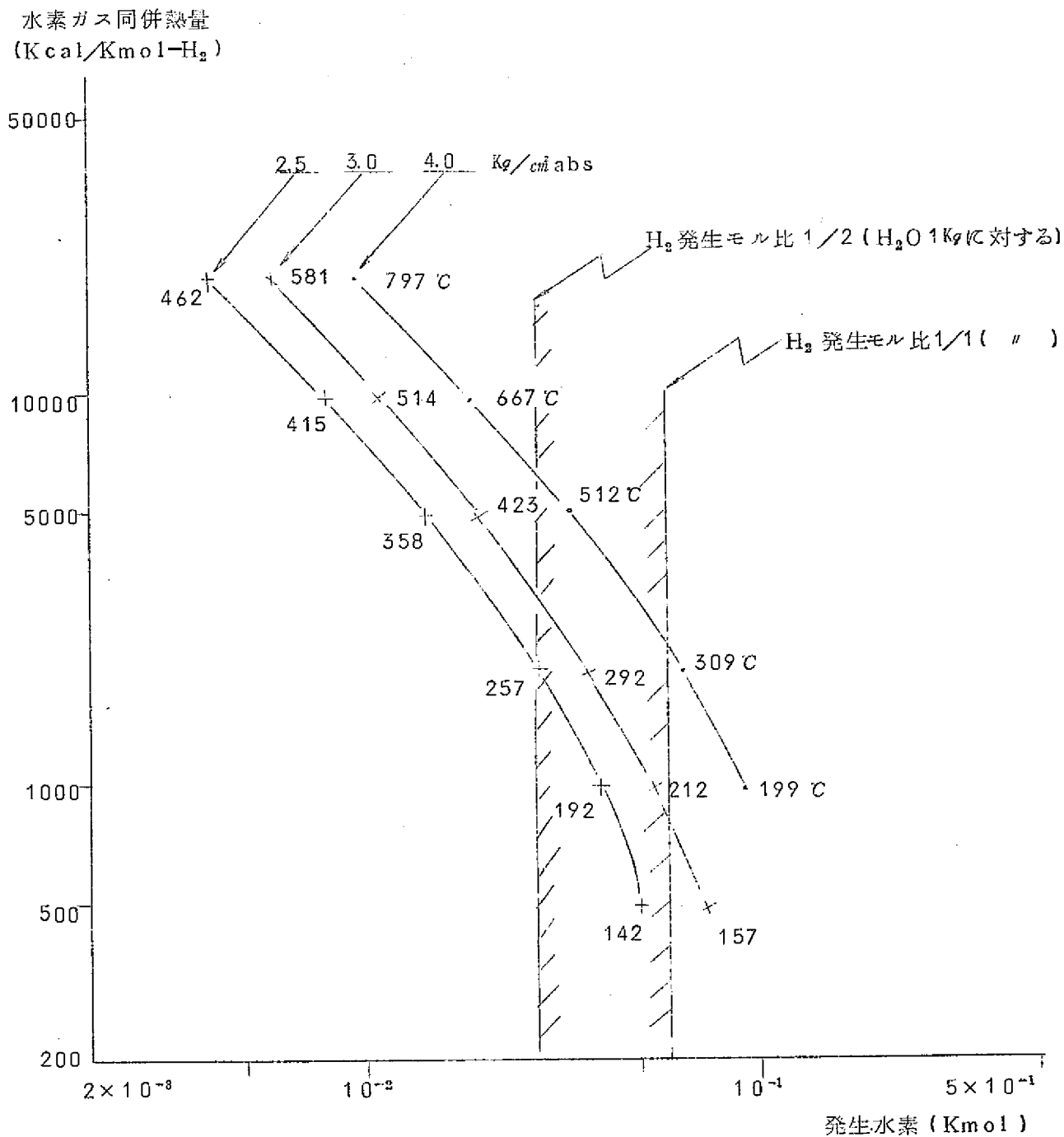


図 5.2 水素ガス同併熱量～発生水素ガス

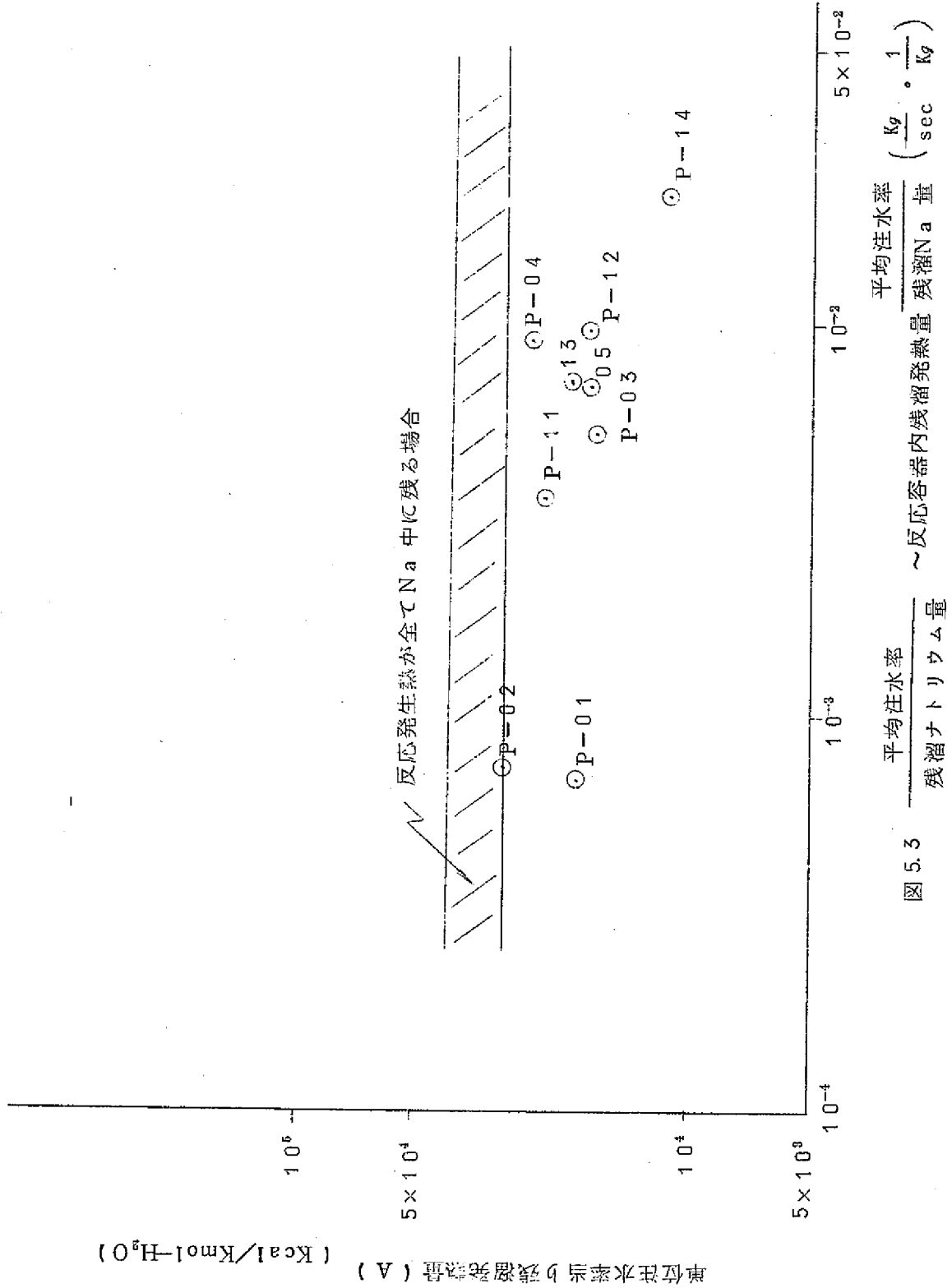


図 5.3

表 3.2 P-OXシリーズ試験変化条件

| 試験番号 | オリフイス口径 | 弁開時間 | 平均注水率 | 備考 |
|------|---------------|--------|--------------|--------|
| 01 | 2.5 mm ϕ | 18 sec | 0.087 Kg/sec | ノズル |
| 02 | 2.5 | 20 | 0.12 | 注水管抵抗大 |
| 03 | 3.5 | 10 | 0.51 | |
| 04 | 5.0 | 5 | 0.91 | |
| 05 | 3.5 | 7 | 0.685 | 注水管部常温 |
| 06 | 3.5 | 6 | 0.639 | |

表 3.1 P-OXシリーズ試験固定条件

| | | | |
|----------|--------------------------|----------|------------------------|
| Na 量 | 180 Kg | ラプチャ板設定圧 | |
| Na 温度 | 330 $^{\circ}$ C | R-0 a | 50 Kg/cm ² |
| 初期カバーガス圧 | 0.5 Kg/cm ² G | R-0 b | 50 Kg/cm ² |
| 水加熱器圧力 | 7.5 Kg/cm ² G | R-1 | 3.0 Kg/cm ² |
| 水加熱器温度 | 290 $^{\circ}$ C | R-2 | 1.5 Kg/cm ² |

| 試験番号 | 注水量 Kg | 反応容器 内残溜ナ トリウム量 Kg | 試験前後 の温度差 ℃ | 単位注水量当り残溜熱量 | | |
|------|-----------|-----------------------------|-------------------|--|---|--|
| | | | | ナトリウム中の 残溜熱量 (A) (Kcal/Kg-molH ₂ O) | 反応容器構造材 中の残溜熱量(B) (Kcal/Kg-molH ₂ O) | 反応容器内に残 る残溜熱量(A+B) (Kcal/Kg-molH ₂ O) |
| P-01 | 2.9 | 124 | 82 | 19.2×10^3 | 5.6×10^3 | 24.8×10^3 |
| 02 | 3.2 | 161 | 102 | 29.2×10^3 | 6.2×10^3 | 35.4×10^3 |
| 03 | 6.6 | 94 | 226 | 17.3×10^3 | 6.8×10^3 | 24.1×10^3 |
| 04 | 5.3 | 96 | 252 | 25.4×10^3 | 9.4×10^3 | 34.8×10^3 |
| 05 | 6.3 | 98 | 214 | 18.1×10^3 | 6.7×10^3 | 24.8×10^3 |
| 11 | 4.4 | 131 | 145 | 23.6×10^3 | 6.5×10^3 | 30.1×10^3 |
| 12 | 5.6 | 92 | 205 | 18.6×10^3 | 7.1×10^3 | 25.7×10^3 |
| 13 | 5.2 | 106 | 185 | 20.5×10^3 | 7.1×10^3 | 29.6×10^3 |
| 14 | 8.1 | 69 | 250 | 11.7×10^3 | 6.0×10^3 | 17.7×10^3 |

但し(1) Na の試験前温度 318~343℃

(2) ナトリウム中の残溜熱量 (A)

$$= \frac{\text{Naの比熱}(=0.305\text{Kcal/Kg}\cdot\text{C}) \times \text{反応容器残溜Na量} \times \text{試験前後の温度差} \times \text{水分子量}(=18)}{\text{水注入量}(=Kg)}$$

(3) 反応容器構造材中の残溜熱量 (B)

$$= \frac{\text{ステンレス鋼比熱}(=0.11\text{Kcal/Kg}\cdot\text{C}) \times \text{反応容器構造材重量}(=110Kg) \times \text{試験前後の温度差} \times \text{水分子量}(=18)}{\text{水注入量}(=Kg)}$$

(4) 反応生成物混入による比熱の変化は反応生成物生成量そのものが不確実なため無視した。この計算では全てNaと見なされる。

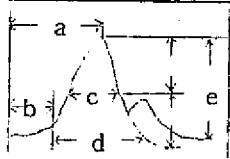
(5) 反応容器構成材の試験前後の温度変化を受ける部分は鏡板(400φ×10t)、円筒(400φ×1000ℓ×10t)底から1000mmの部分とする。

表 5.1 各試験時の反応容器内残溜熱量

| 項 目 | 試験番号 | P-01 | P-02 | P-03 | P-04 | P-05 | P-06 |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 水注入系条件 | | | | | | |
| オリフィス口径 (mmφ) | | 2.5 | 2.5 | 3.5 | 5.0 | 3.5 | 3.5 |
| 水加熱器保有水量 (Kg) | | 6 | 10 | 10 | 18 | 10 | 10 |
| 初期圧力 (Kg/cm ² G) | | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| 初期水温 (℃) | | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 | 290 |
| 水注入配管温度 (℃) | | 290 | 290 | 290 | 290 | 常 温 | 290 |
| 弁開時間 (sec) | | 18 | 20 | 10 | 5 | 7 | 6 |
| 全注水量 (Kg) | | 2.9 | 3.2 | 6.6 | 5.3 | 6.3 | 6.6 |
| 平均注水率 (Kg/sec) | | 0.087 | 0.12 | 0.51 | 0.91 | 0.685 | 0.639 |
| ラブチャ板設定圧 | | | | | | | |
| R-0 a (Kg/cm ²) | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| R-0 b (Kg/cm ²) | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 備 考 | | | | | | | |
| 水注入率制御用絞り | | ノズル | オリフィス | オリフィス | オリフィス | オリフィス | オリフィス |

表 A・id・1 実験 I シリーズ主要結果 (水注入系)

表A・皿・2 実験Iシリーズ主要結果(初期スパイク圧)

| 項 目 | 試 験 番 号 | | | | | |
|---------------------------|---|------|---|-------|------|-------|
| | P-01 | P-02 | P-03 | P-04 | P-05 | P-06 |
| 初期スパイク圧力ピーク値 | | | | | | |
| P-1 (Kg/cm ²) | >32.5 | 12.5 | 43.5 | 89.6 | — | 53.0 |
| P-2 (Kg/cm ²) | >26.5 | 16.0 | 59.0 | 117.6 | 19.7 | 104.0 |
| P-3 (Kg/cm ²) | 破 損 | 9.0 | 31.0 | 78.4 | 45.0 | 97.0 |
| P-4 (Kg/cm ²) | >27.5 | 8.0 | 33.5 | — | 破 損 | 8.0 |
| 初期スパイク圧力立上り時期 | | | | | | |
| P-1 (m sec) | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | — | 0.9 |
| P-2 (m sec) | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 2.0 | 0.8 |
| P-3 (m sec) | — | 0.9 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.8 |
| P-4 (m sec) | 0.8 | 0.8 | 0.7 | — | — | — |
| 初期スパイク圧力ピーク到達時間 | | | | | | |
| P-1 (m sec) | — | 1.4 | 1.0 | 0.9 | — | 1.4 |
| P-2 (m sec) | — | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 2.9 | 1.2 |
| P-3 (m sec) | — | 1.5 | 0.9 | 1.2 | 0.9 | 1.2 |
| P-4 (m sec) | — | 1.1 | 1.0 | — | — | — |
| 初期スパイク圧力半値巾 | | | | | | |
| P-1 (m sec) | — | 0.9 | 0.4 | 0.4 | — | 0.6 |
| P-2 (m sec) | — | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 |
| P-3 (m sec) | — | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.2 |
| P-4 (m sec) | — | 0.4 | 0.3 | — | — | — |
| 初期スパイク圧力パルス巾 | | | | | | |
| P-1 (m sec) | 0.6 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | — | 1.2 |
| P-2 (m sec) | 0.6 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 1.5 | 0.9 |
| P-3 (m sec) | 0.6 | 1.4 | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 0.75 |
| P-4 (m sec) | 0.6 | 0.9 | 0.6 | — | — | — |
| 備 考 |  | | a : 圧力ピーク到達時間 b : 立上り時間 d : パルス巾 c : 半値巾 e : 圧力ピーク値 | | | |

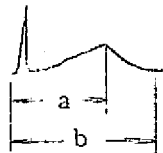
| 項目 | 試験番号 | | | | | |
|---|------|-------------------------------|------|------|------|------|
| | P-01 | P-02 | P-03 | P-04 | P-05 | P-06 |
| 反応容器準静圧上昇 | | | | | | |
| 初期カバーガス圧 (Kg/cm ² G) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| ラブリヤ板設定圧 (Kg/cm) | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| ラブリヤ板破裂時間 (sec) | 0.75 | 3.0 | 0.25 | 0.20 | 0.28 | 0.20 |
| 圧力放出完了時間 (sec) | 1.4 | 3.3 | 0.37 | 0.6 | 0.7 | 0.7 |
| 準静圧ピーク値 (カバーガスを0とした場合) | | | | | | |
| P-1 (Kg/cm ²) | 3.6 | 2.0 | 3.3 | 5.0 | 2.1 | 3.0 |
| P-2 (Kg/cm ²) | 4.8 | 2.3 | 2.6 | 4.6 | 3.75 | 2.5 |
| P-3 (Kg/cm ²) | 3.7 | 2.3 | 3.3 | 4.3 | 5.1 | 1.0 |
| P-4 (Kg/cm ²) | 破 損 | 3.8 | 3.4 | - | - | 1.8 |
| P-5 (Kg/cm ²) | - | - | - | - | - | - |
| 反応容器内温度 | | | | | | |
| 初期ナトリウム温度 (°C) | 318 | 332 | 323 | 330 | 335 | 332 |
| 試験後ナトリウム温度 (°C) | 400 | 434 | 549 | 582 | 549 | 515 |
| カバーガス初期温度 (°C) | √ | √ | √ | √ | √ | 300 |
| カバーガス反応後温度 (°C) | √ | √ | √ | √ | √ | 400 |
| 備 考 | | | | | | |
|  | | a : ラブリヤ板破裂時間 b : 圧力放出完了時間 | | | | |

表 A. III. 3 実験 I シリーズ主要結果 (反応容器内)

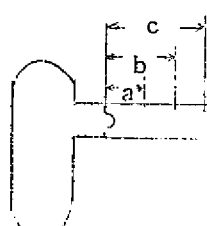
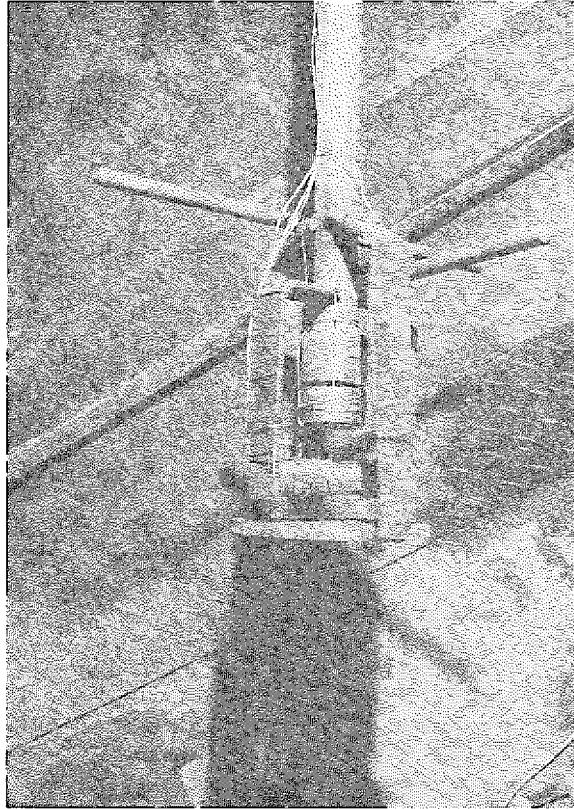
| 項目 | 試験番号 | P-01 | P-02 | P-03 | P-04 | P-05 | P-06 |
|---|------|--|------|-----------------------|-------|------|-------|
| 連絡配管ナトリウム検知(反応開始から) | | | | | | | |
| スパークプラグ-1 (msec) | | ✓ | 破 損 | 300.1 | 282.9 | 破 損 | 240.0 |
| スパークプラグ-2 (msec) | | ✓ | 破 損 | 305.1 | 289.4 | 破 損 | 破 損 |
| スパークプラグ-3 (msec) | | ✓ | 破 損 | 312.2 | 296.0 | 破 損 | 255.5 |
| 収納容器静圧上昇 | | | | | | | |
| ラブチャ板作動時間 (sec) | | 23 | 18 | 10 | 5 | 7 | 6 |
| ラブチャ板設定圧 (Kg/cm ²) | | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 水素放出時着火状況 | | 着 火 | セ ズ | 着 火 | 着 火 | 着 火 | 着 火 |
| 収納容器温度 | | | | | | | |
| カバーガス初期温度 (℃) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 95 |
| カバーガス反応後温度 (℃) | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 215 |
| 反応容器→収納容器 | | | | | | | |
| Na 移動量 (Kg) | | 56 | 29 | 85 | 84 | 84 | - |
| 備 考 | | | | | | | |
| 連絡配管スパークプラグ位置 | | | | | | | |
|  | | $a = 730 \text{ mm}$ $b = 870$ $c = 1.085$ | | ✓ : 測定セズ - : 測定デキズ | | | |

表 A. III. 4 実験 I シリーズ主要結果(解放系, 収納容器内)



3.3 水注入管先端 (P-06)