

J A E R I - M
92-035

ALPHA計画溶融物落水蒸気爆発実験
—現象の把握とエネルギー変換効率の推定—

1992年3月

杉本 純・山野 憲洋・丸山 結
日高 昭秀・早田 邦久

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、お申しこみください。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）で複写による実費領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 Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

ALPHA計画溶融物落水蒸気爆発実験
-現象の把握とエネルギー変換効率の推定-

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

杉本 純・山野 憲洋・丸山 結・日高 昭秀・早田 邦久

(1992年2月7日受理)

軽水炉のシビアアクシデント時に格納容器に加わる負荷と格納容器からのリーク挙動を明らかにし、またアクシデントマネジメントの有効性に関する定量的な検討に資するため、原研では事故時格納容器挙動試験 (ALPHA: Assessment of Loads and Performance of Containment in a Hypothetical Accident) 計画を実施している。ALPHA計画では、(1)貫通部リーク定量化試験、(2)溶融炉心冷却材相互作用試験、(3)溶融炉心コンクリート相互作用試験、(4)エアロゾル挙動試験の4項目の試験を行うこととしている。

本報告書は、溶融炉心冷却材相互作用試験のうち、テルミット反応により生成した溶融物10kg及び20kgを水中に落下させ、水蒸気爆発を起こさせた実験結果についてまとめたものである。この実験では、水蒸気爆発現象を高速度カメラにより撮影・記録することに成功した。また、水槽壁で得られた圧力パルスから、溶融物の有する熱エネルギーから水蒸気爆発で発生した運動エネルギーへの変換効率の推定を行った。

Steam Explosion Experiment in the ALPHA Program
-Phenomena and Estimation of Energy Conversion Ratio-

Jun SUGIMOTO, Norihiro YAMANO, Yu MARUYAMA
Akihide HIDAHA and Kunihisa SODA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 1992)

In order to quantitatively evaluate thermal and mechanical loads to and leakage from the containment during a severe accident, the ALPHA (Assessment of Loads and Performance of Containment in a Hypothetical Accident) program has been initiated at JAERI. The following four test items are to be conducted in the ALPHA program; (1) leakage behavior through containment penetration, (2) molten core/coolant interaction, (3) molten core/concrete interaction, and (4) aerosol behavior in the containment.

The present report describes the result of steam explosion experiment in the molten core/coolant interaction test, in which 10 kg or 20 kg of melt was generated with thermite reaction and dropped into a water pool. The steam explosion behavior was successfully recorded with a high-speed camera. Conversion ratio of the thermal energy of the melt to the kinetic energy of the steam explosion was estimated from the pressure pulse measured at the vessel inner surface of the water pool.

Keywords: Severe Accident, Containment, Steam Explosion,
Spontaneous Explosion, Pressure Pulse,
Energy Conversion Ratio, Accident Management

目 次

1. はじめに	1
2. 実験目的	2
3. 実験条件	2
4. 実験結果	3
5. まとめ	6
謝辞	6
参考文献	7
付録1 日本原子力学会予稿	19
付録2 学会での質疑応答	20

Contents

1. Introduction	1
2. Objectives	2
3. Experiment Conditions	2
4. Experiment Results	2
5. Summary	6
Acknowledgement	6
References	7
Appendix 1 Transactions of the Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Nov. 1991.	19
Appendix 2 Questions and Answers at the Meeting	20

1. はじめに

原研では、安全研究年次計画（平成3～7年度）¹⁾に基づき、1988年より事故時格納容器挙動試験(ALPHA: Assessment of Loads and Performance of Containment in a Hypothetical Accident)計画を開始した²⁾。ALPHA計画の目的は、シビアアクシデント時に格納容器に加わる熱負荷、圧力負荷を明らかにするとともに、格納容器からの漏えい（リーク）量と漏えい機構を明らかにすることである。

そのため、シビアアクシデント時の格納容器内での主要な現象を対象に以下の4項目の試験を実施し、格納容器のシビアアクシデント時の健全性を評価するためのデータを得るとともに、アクシデントマネージメント対策の定量的検討に資するため、試験装置を製作し実験を行っている。ALPHA計画で用いる試験装置の主な仕様を表1に、また装置の系統図を図1に示す。

- (1) 貫通部リーク定量化試験
- (2) 溶融炉心冷却材相互作用試験
- (3) 溶融炉心コンクリート相互作用試験
- (4) エアロゾル挙動試験

貫通部リーク定量化試験のうち、電線貫通部からの漏えい挙動については、米国のサンディア国立研究所(SNL)で実験が行われたが³⁾、ALPHA計画では、シビアアクシデント時に想定されている状態に近い高温(500℃)及び高圧(2MPa)での実験が可能なることに特徴がある。また、漏えい機構を詳細に解明するため、電線貫通部集合体の一部を模擬したテスト部を用いる小型装置を有することも特徴である。

溶融炉心冷却材相互作用については、これまで水蒸気爆発に関連して国内外で多くの実験が行われているが、そのほとんどが小規模である。規模の大きな実験はあまりなく、英国のウィンフリス研究所⁴⁾やSNL⁵⁾で約24kgまでの溶融物を用いた大気圧下の実験が行われた程度である。なお、高速炉を対象としたものでは、動燃における最大201までの高温融体を用いる溶融物質挙動(MELT)試験⁶⁾、及びISPR Aにおける大規模な実験がある⁷⁾。一方、ALPHA装置では溶融物100kg、圧力2MPaまでの実験が可能である。なお、アクシデントマネージメントの観点から溶融炉心の冷却性に関する実験が行えるよう装置が設計されている。

溶融炉心コンクリート相互作用については、ドイツのカールスルーエ原子力研究所(KfK)のBETA実験⁸⁾やSNLのSURC実験⁹⁾などが実施されている。ALPHA計画では、アクシデントマネージメントの観点から、溶融炉心とコンクリート反応中の冷却性に関する実験を行えることに特徴がある。

エアロゾル挙動試験については、これまで世界でもまだ実験されたことのない、格納容器破損時のFPエアロゾルの再浮遊/再蒸発挙動の解明を中心とした実験を行うことがALPHA計画の特徴である。

本報告書は、以上の4つの試験のうち、溶融炉心冷却材相互作用試験の最初の実験シリーズとして実施した、溶融物落下に伴う水蒸気爆発実験について、水蒸気爆発現象を高速撮影した結果、及び水槽壁で測定した圧力パルスからエネルギー変換効率を推定した結果をまとめたものである。

2. 実験目的

ALPHA計画の溶融炉心冷却材相互作用試験では、シビアアクシデント時に格納容器や圧力容器内で起こるとされている、溶融炉心と冷却材（水）との相互作用の発生条件とその影響を明らかにすることを目的としている。この相互作用のうち特に激しいものは「水蒸気爆発」と呼ばれ、格納容器や圧力容器の健全性にとって脅威となり得る。

水蒸気爆発の定義はそれほど厳密にはされていないが、一般には、「大きな温度差の2液体が接触して、沸点の低い液体が急激に蒸発し、衝撃的な圧力を発生する現象」と理解されている¹⁰⁾。水蒸気爆発の例としては、製鉄所における事故や火山地帯におけるマグマと地下水や海水との反応であるマグマ水蒸気爆発が知られている¹⁰⁾。原子力の分野では、1961年米国におけるSL-1事故で水蒸気爆発が生じたとされている¹¹⁾。

ALPHA計画の溶融炉心冷却材相互作用試験では、最初の実験シリーズとして、模擬炉心溶融物を水中に落下させ、水蒸気爆発の発生の有無等を調べる溶融物落水蒸気爆発実験を実施することとしている。この溶融物落水蒸気爆発の実験目的は、水蒸気爆発に関し以下の項目について調べることである。

(1) 種々のパラメータの影響評価

パラメータとしては、投下する溶融物の質量、落下高さ、温度、成分等があり、冷却材については、冷却材の質量、水位、水温、水槽や水底の形状等がある。また、系の雰囲気（窒素/水蒸気）や圧力等も重要なパラメータとなる。

(2) 格納容器に与える負荷の評価

水蒸気爆発が生じた場合に、爆発のエネルギーを評価し、格納容器壁が受ける負荷を評価する。最終的には実際の原子炉において予想される負荷の評価を行う。

(3) アクシデントマネジメントの有効性評価

シビアアクシデント時のアクシデントマネージメントに関連して、水蒸気爆発を生じさせないための可能な方策、あるいは水蒸気爆発が発生してもその影響を軽減させるための手法の有効性について、実験的に明らかにする。

今回報告する実験では、特に、水蒸気爆発現象を高速カメラで撮影記録することにより、現象を定性的及び定量的に把握するとともに、水蒸気爆発によるエネルギー変換効率を推定することを目的とした。

3. 実験条件

図2に本実験の概念図を示す。模擬格納容器内に冷却材プール（水槽容器）を設置し、上方の金属溶融投下装置より、溶融物を冷却材プール中に落下させる。溶融物と冷却材の反応の様子は高速度カメラ（記録速度最高10,000フレーム/秒）及び高速度ビデオ（記録速度最高1,000フレーム/秒）により撮影記録する。水蒸気爆発が発生した場合の圧力パルスは、水槽容器壁及び模擬格納容器壁に取付けられた圧力検出器（応答周波数：150～450kHz）にて測定する。

溶融物落水蒸気爆発実験の主な試験条件を表2に示す。炉心溶融物として、テルミット反応により生成した溶融物(10kg及び20 kg)を使用し、冷却材プールに落下させた。溶融物の温度は放射温度計にて別途測定した。溶融物の落下高さは水面から3.5 mである。なお、高速度ビデオ(500 フレーム/秒)の解析から、溶融物が水面に突入する速度は約 8 m/s であり、自由落下による計算値とほぼ一致した。

実験に使用した円筒形の鋼製水槽及び温度や圧力検出器の位置を図3に示す。容器内径は 1 m であり、実験での水位は 1 m に設定した。図3に示した鋼製水槽以外にも、溶融物と水の反応の様子をより詳しく観測するため、図4に示す四角形状の亚克力製透明水槽も使用している。この容器の内側一辺は 0.88 m であり、円筒容器と同一の水位に対してほぼ同一水量となるようになっている。

計測項目としては、衝撃圧力や水温以外に、水槽容器内冷却材水位、模擬格納容器内雰囲気温度、金属溶融投下装置内の温度、テルミット反応に関する点火、投下などのタイミング等がある。データ集録は、水蒸気爆発の衝撃を測定する圧力検出器については高速性が要求されるため 500 kHzで、またそれ以外の検出器については 100Hzで記録した。

4. 実験結果

(1) 水蒸気爆発の発生

表3に溶融物落水蒸気爆発実験の主な結果をまとめて示す。溶融物として10 kgのテルミットを水中に落下した場合には水蒸気爆発は生じなかったが、20 kgの溶融物を用いた場合には大規模な水蒸気爆発が生じた。このような水蒸気爆発は、小規模実験で爆薬などを使用した強制的な水蒸気爆発の発生に対し、「自発的な水蒸気爆発(Spontaneous Steam Explosion)」と呼ばれている。本試験のように数kgオーダー以上の溶融物を用いる比較的大規模な実験では、従来から自発的な水蒸気爆発が発生するためには、ある臨界質量以上の溶融物が必要とされている^{1,2)}。臨界質量は実験体系にも依存し得るが、本実験結果からは、大気圧、常温水温下で自発的な水蒸気爆発が起きるためには、テルミット反応による溶融物の臨界質量は10~20 kgの間にあるものと推定される。

ただし、20 kgの溶融物を用いた実験は3回実施して全て自発的な水蒸気爆発が発生したので、その再現性はかなり高いと言えるが、10 kgの溶融物を用いた実験は1回しか実施していないので、今後その再現性について確認する必要がある。

(2) 水蒸気爆発の様子

亚克力製の透明水槽を使用した実験において、高速度カメラで得られた水蒸気爆発の様子を写真1に示す。容器表面には、大きさや速度等の見積りのため10cm毎に線が引かれてある。撮影は4,000コマ/秒で行った。照明には2kWのランプ2個を用い、半透明な紙の後方から光を当て散乱させた。写真1では水面直下から水槽の底までが写っている。

写真1において、時刻0ms(時刻は仮の時刻)まで、水中に落下した高温の溶融物は、水蒸気と混合しつつ幾つかの小部分に分かれ、それぞれが水蒸気の膜に覆われたいわゆる「粗混合(Coarse Mixing)」の状態にある。

その後 0.25~1.0 ms にかけて、何らかの外乱により、水蒸気膜が潰れて高温の溶融物が水と直接接触し、そのために多量の水蒸気の発生とともに圧力波が発生（トリガー（Triggering））しそれが全系に伝播（Propagation）している。トリガーは、高速度カメラによる映像の解析から、写真1の左上水面の近くで発生し、右下へ伝播していることが判明した。明色から暗色への急激な変化から高温の溶融物が非常に短時間に大量の熱を水に伝えていることが分る。時刻 0.5~0.75 ms の間において色の变化領域が10~20 cm程度進行していることから、この伝播速度が400~800 m/s のオーダーであることが分る。

この後、時刻 1.25~7.25 ms にかけて、全系における急激な水蒸気発生により、圧力が急上昇し、衝撃的な爆発、すなわち、水蒸気爆発の膨張（Expansion）が生じている。時刻 2.25 ms では、衝撃波のため、アクリル壁にヒビが入り、時刻 3.5 ms では膨張波の衝突により、アクリル壁が破損し始めているのが分る。爆発は容器のほぼ中央で発生し、膨張は球状に広がっている。膨張波面の広がり速度は初期には早く（60-70 m/s）、後期には水からの抵抗を受けるため、やや遅くなっている（約50 m/s）。

なお、時刻 1.25 ms の写真下方において、水の部分に気泡が発生し、その気泡が時刻 2.75 ms まで容器の底の方に存在しているのが観察される。これは、容器底及び水面（自由界面）で反射した衝撃波が干渉し、その位相の違いから底の方に圧力が大気圧より低い領域が生じ、沸騰により気泡が発生したためと考えられる。

(3) 爆発エネルギーの評価

図5に鋼製水槽壁に取付けた圧力検出器から得られた圧力パルスを示す。水蒸気爆発が発生して最初の圧力ピークは約 10 MPa、ピーク幅は約 1 msであることが分る。これらの値は、SNLで行われた大型実験で得られている値とオーダー的に一致している⁵⁾。その後、規則的かつ減衰する圧力パルスが見られているのは、圧力検出器が、水蒸気爆発による最初の衝撃を検出した後、鋼製水槽の円周上を伝わる反射波を検出しているためと推定される。このことは、音波が炭素鋼内の円周（約 3.14 m）を伝わるのに要する時間（約1.5 ms）と減衰する圧力ピークの間隔がほぼ一致することから確かめられる。

シビアアクシデント時の影響評価の観点からは、発生した水蒸気爆発のエネルギーを推定することが特に重要である。爆発のエネルギーとしては、爆発に伴い高速で運動するデブリや水塊の運動エネルギー及び衝撃波の放出により系内の気体を加圧する加圧エネルギーとがある。各々について、溶融物が初期に有する熱的エネルギーとの比を変換効率として定義している。すなわち、

$$\eta_{KE} = \frac{\text{運動エネルギー}}{\text{熱的エネルギー}}$$

$$\eta_D = \frac{\text{加圧エネルギー}}{\text{熱的エネルギー}}$$

ここで、 η_{KE} 、 η_D はそれぞれ、熱的エネルギーの運動エネルギー及び加圧エネルギーへの変換効率を表わしている。

運動エネルギー E_{KE} の評価では以下の仮定を置いた⁵⁾。

- (1) 爆発は容器中央で発生する
- (2) 爆発は容器中央の爆心より等方的に広がる
- (3) 爆心上下に等質量のデブリ、水の混合物が存在する。
- (4) デブリや水は容器と完全弾性衝突する。
- (5) 水槽壁圧力変化から力積を評価できる。

すなわち、

$$E_{KE} = (1/2) M_d v^2 = (1/2) I^2 / M_d$$

ここで、 M_d はテルミットと水の総質量、 v は容器壁に衝突した時の速度、 I は容器に衝突（完全弾性衝突）した時の力積 ($M_d \cdot v$) を表わす。 I の評価においては、図5に示した圧力パルスの第1パルスの積分（三角近似）から見積もった。また、圧力のおよぶ面積として容器底部を半球状と想定した。

加圧エネルギー E_D については、図6に示す模擬格納容器の内圧の上昇より評価した⁵⁾。すなわち、

$$E_D = (\Delta P \cdot V) / (\gamma - 1)$$

ここで、 ΔP は水蒸気爆発直後の圧力上昇、 V は模擬格納容器の体積、 γ は雰囲気気体（空気）の比熱比である。

さらに、初期の熱的エネルギー E_i については、テルミットの質量 (M_t)、熱容量 (C_p)、初期温度 (T_i)、水温 (T_0) 及びテルミットの潜熱 (L) から評価した。すなわち、

$$E_i = C_p \cdot M_t \cdot (T_i - T_0) + M_t \cdot L$$

表4にエネルギーの評価に使用した物性値、測定値等の数値を示す。図7にはこのようにして評価された、運動エネルギー及び加圧エネルギーへの変換効率 η_{KE} 及び η_D をSNLでの実験⁵⁾と比較して示す。横軸は溶融物と水の質量比である。SNLでの実験では、水槽が小さく水位も低いためこの値は最大でも16程度であるが、ALPHA実験では40近い値になっている。

本実験で得られた運動エネルギーへの変換効率 η_{KE} は、約0.7%、また、加圧エネルギーへの変換効率 η_D は、約4.4%と評価された。これらの値は、図7に見るようにSNL実験の値といずれもほぼ一致しているが、やや小さい傾向がある。

なお、運動エネルギーの評価では、高速度カメラによる運動速度からの評価も原理的には可能であるが、デブリと水/蒸気混合物の質量の評価が難しい。今後実施する実験において、水蒸気爆発に及ぼす各種パラメータの影響を明らかにするとともに、異なった手法による運動エネルギーの推定についても検討する必要がある。

さらに、アクシデントマネージメントの観点から、水蒸気爆発を生じさせないための方策、あるいは水蒸気爆発が発生してもその影響を軽減させるための手法の有効性等についても、今後実験的に検討して行く予定である。

5. まとめ

ALPHA計画では、溶融炉心冷却材相互作用試験の最初の実験シリーズとして、溶融物落水蒸気爆発実験を実施した。この実験では、模擬炉心溶融物としてテルミット反応により生成した溶融物10 kg及び20 kgを水中に落下させ、水蒸気爆発発生の有無等について調べた。その結果、高速度カメラにより水蒸気爆発現象を捉えることに成功し、現象を定性的かつ定量的に把握することが可能となった。また、実験結果から、大気圧下において自発的な水蒸気爆発が起こるための溶融物質量のしきい値、爆発による圧力パルス等に関する知見を得るとともに、溶融物の有する熱エネルギーから水蒸気爆発で発生した運動エネルギー及び系の加圧エネルギーへの変換効率の推定を行った。今後は、ALPHA計画試験装置の特徴を活かし、水蒸気爆発に及ぼす系圧力、冷却材条件など種々の影響を調べるとともに、アクシデントマネージメントの観点からの実験を実施して行く予定である。

謝辞

試験装置の設計、製作、運転及び計測に当たっては、原子炉安全工学部安全試験技術室の伊藤、小森、園部及び八木岡各氏の支援を仰いだ。また、実験の遂行に当たっては、原子力エンジニアリングの石井、野上、大内、小島各氏の協力を得た。また、データ処理については、(株)エイ・エス・アイの鳥喰氏の助力を得た。ここに深謝する。

参考文献

- (1) 原子力安全委員会原子力施設等安全研究専門部会：原子力施設等安全研究年次計（平成3～7年度）、平成2年9月。
- (2) 山野他：事故時格納容器挙動試験（ALPHA）-設計報告書-、JAERI-M(予定)。
- (3) Clauss D.B.: Severe Accident Testing of Electrical Penetration Assemblies, NUREG/CR-5334(1989)。
- (4) Bird M.J.: An experimental Study of Scaling in Core Melt/Water Interactions, PWR/SAWG/P(84)71, 22nd National Heat Transfer Conference, Niagara Falls, August 5-8(1984)。
- (5) Mitchell D. E. et al.: Steam Explosion Experiments at Intermediate Scale: FITSB Series, SAND83-1057(1986)。
- (6) 今堀他：高速炉の安全性研究のための高温溶融試験技術の開発、原子力学会1990年秋の大会、F47(1990)。
- (7) D. Magallon et al.: Pouring of 100 kg-Scale Molten UO₂ into Sodium, ANS 1990 Int. Fast Reactor Safety Mtg., Snowbird, August 12-16(1990)。
- (8) Alsmeyer H. et al.: BETA Experimental Results on Melt/Concrete Interaction: Silicate Concrete Behavior, CSNI Specialists' Meeting on Core Debris-Concrete Interactions, EPRI NP-5054-SR(SR(1987)。
- (9) Copus E.R. et al.: Core-Concrete Interactions Using Molten Steel with Zirconium on a Basaltic Basement: The SUEC-4 Experiment, NUREG/CR-4994, SAND 87-2008(1989)。
- (10) 飯田, 高島：蒸気爆発とその機構に関する実験、ながれ、7, 203-211,(1988)。
- (11) Thompson J.M. and Beckerly J.G.: The Technology of Nuclear Reactor Safety 1, MIT Press, 672(1964)。
- (12) Corradini, M. L. et al.: Vapor Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modeling, Prog. Nucl. Energy, 22, 1, pp.1-117,(1988)。

表1 装置の主な仕様

系 統	設計圧力	2 MPa
模擬格納容器	容積	約 50 m ³
	内径	約 4 m
	高さ	約 6 m
	設計温度	250 °C
リーク試験容器	設計温度	500 °C

表2 主な実験条件

系圧力	大気圧
テルミット量	10、20 kg
熔融物温度	2500 °C (推定)
冷却材 (水)	室温、水深1 m
落下高さ	3.5 m
鋼製水槽	内径 1 m

表3 実施した試験の主な結果

RUN No.	テルミット量 (kg)	冷却材	雰囲気	圧力	水蒸気 爆発	備考
STX001	10	水	空気	大気圧	無	高速データ収録系不作動
STX002	20	水	空気	大気圧	有 ¹⁾	
STX003	20	水	空気	大気圧	有 ¹⁾	溶融物分散メッシュ使用 透明水槽使用
STX004	20	水	空気	大気圧	有 ²⁾	
STX005	20	水	空気	大気圧	有 ¹⁾	

1) 大規模水蒸気爆発が発生

2) 小規模爆発。実験手順に不備あり、分散メッシュ効果の特定困難

3) 水温は室温、水深1 m、テルミットの水面への突入速度約8 m/sは共通

表4 エネルギー評価に用いた数値

記号	説明	単位	数値
M_d	テルミットと水の質量	kg	805
I	力積	kg · m/s	1.04×10^4
ΔP	爆発直後の圧力上昇	Pa	8.1×10^3
V	模擬格納容器の体積	m ³	50
γ	空気の比熱比	-	1.4
M_t	テルミット質量	kg	20
C_p	テルミット熱容量	J/(kg K)	463.2
T_1	テルミット初期温度	K	2773
T_0	初期水温	K	288
L	テルミット潜熱	J/kg	2.33×10^5

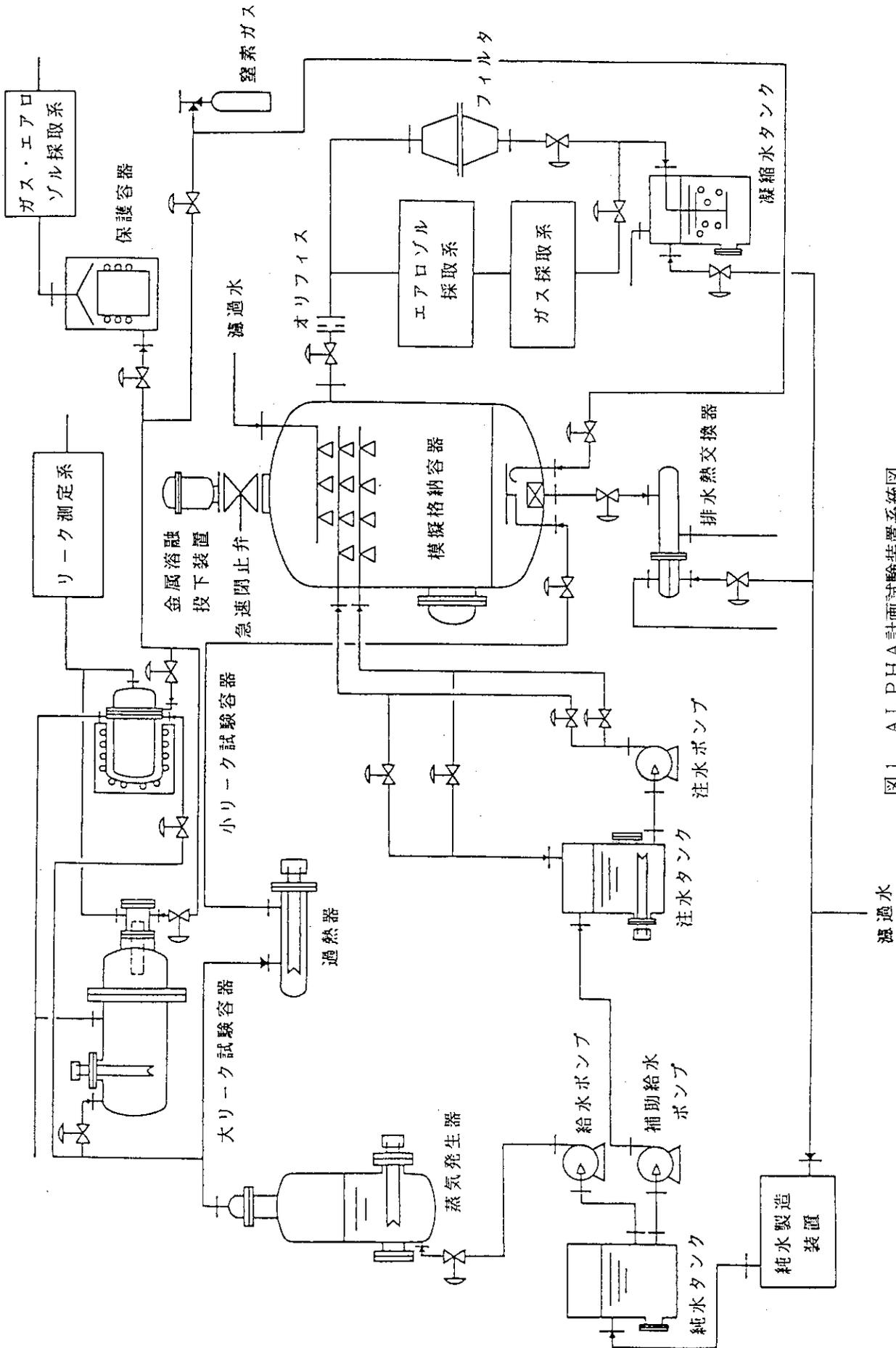


図1 ALPHA計画試験装置系統図

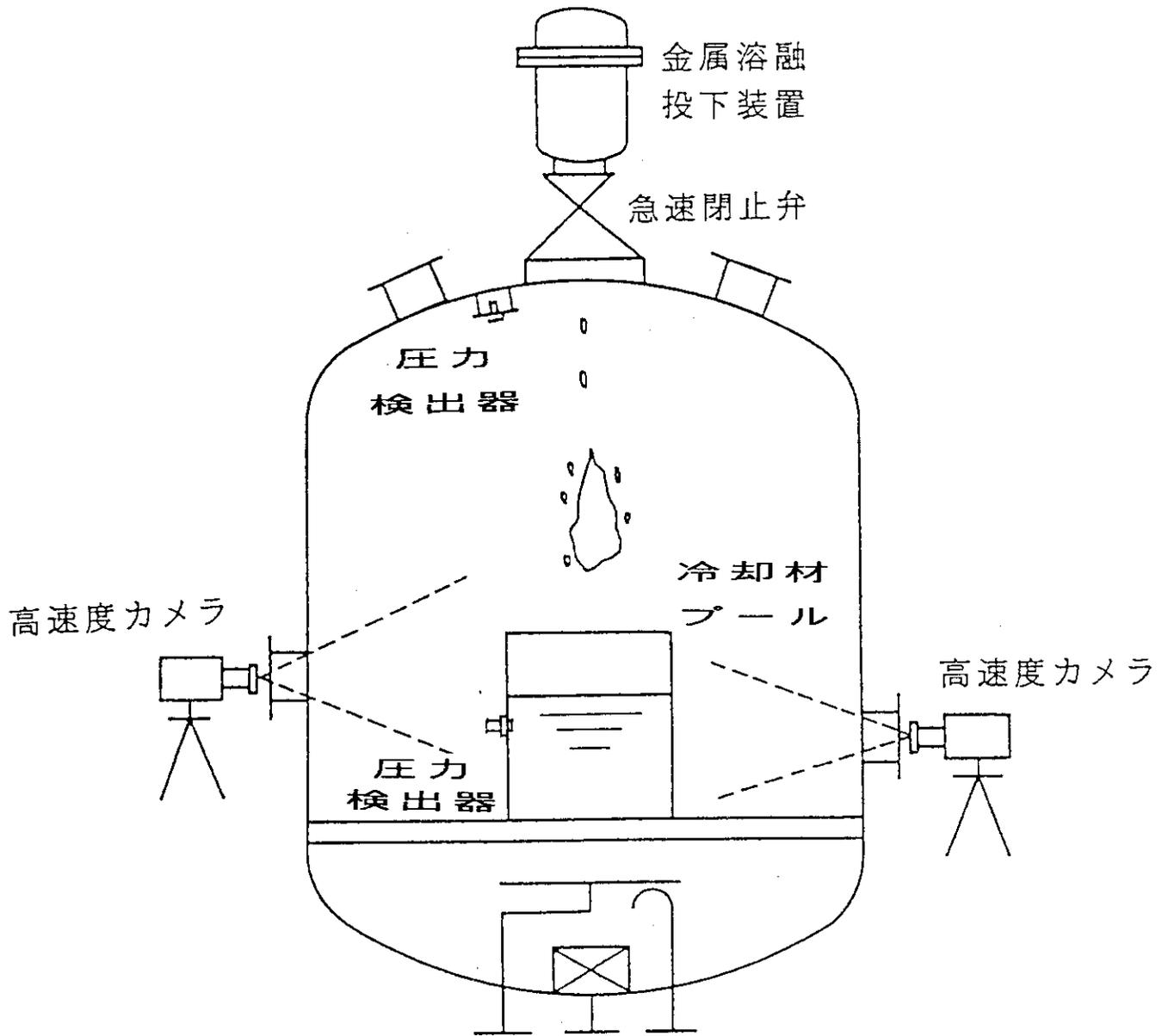
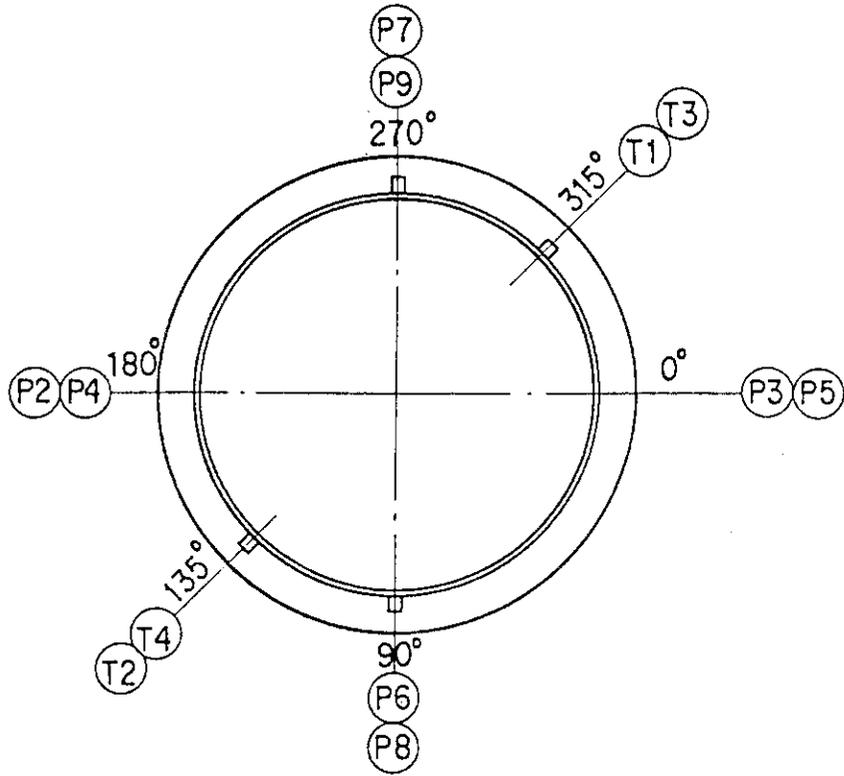


図2 溶融物落水蒸気爆発実験の概念図



T : 熱電対
 P : 圧力検出器

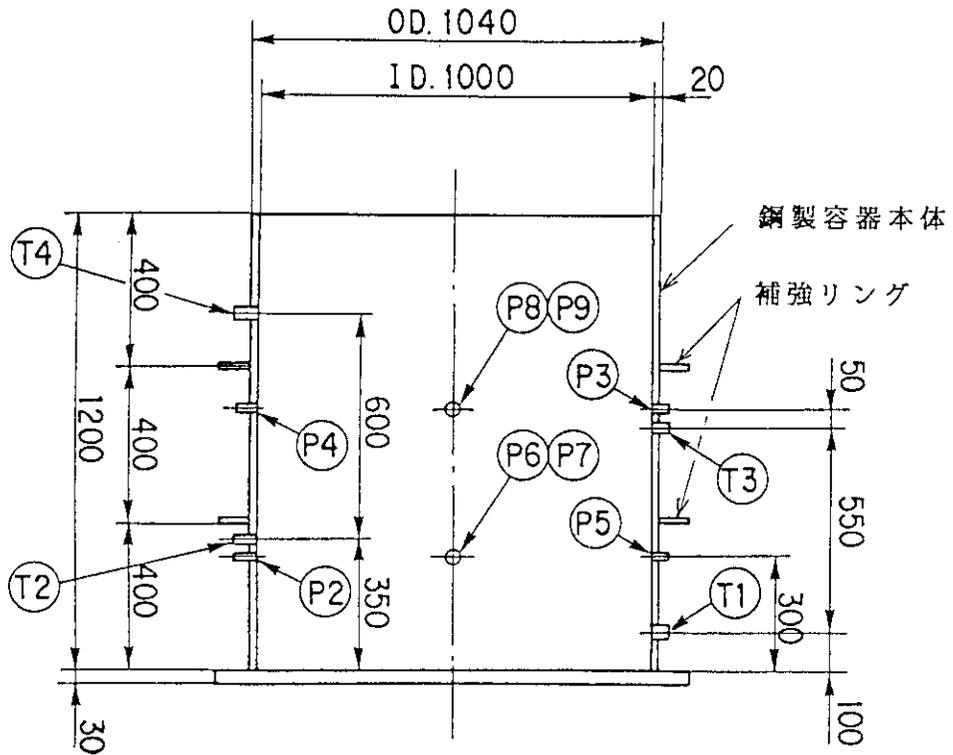


図3 鋼製水槽及び検出器用ノズル

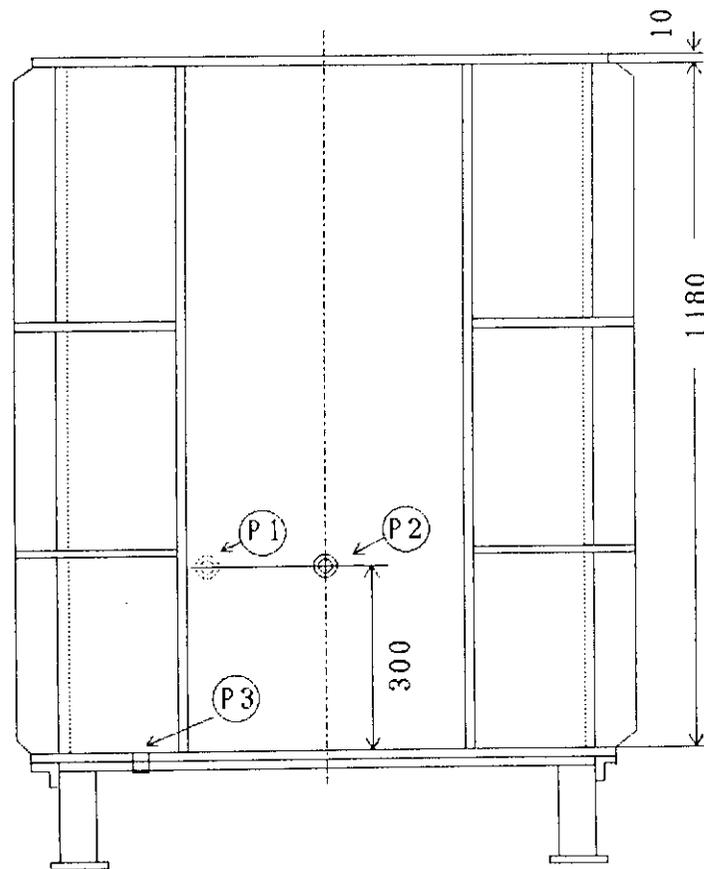
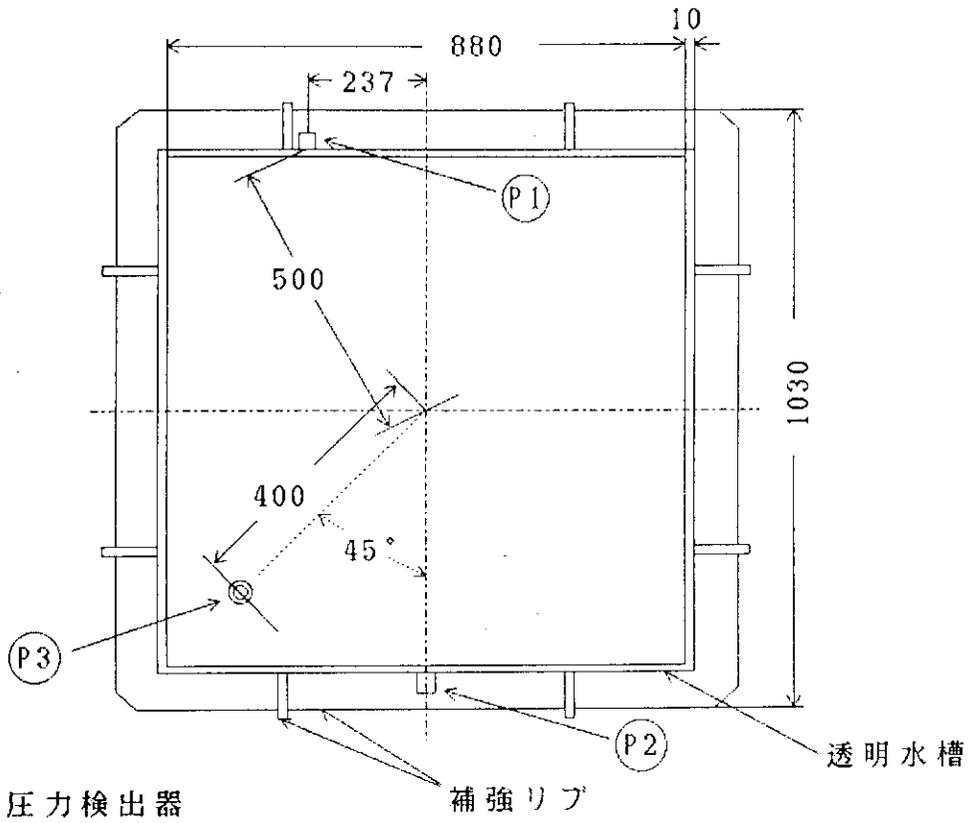


図4 アクリル製水槽及び検出器用ノズル

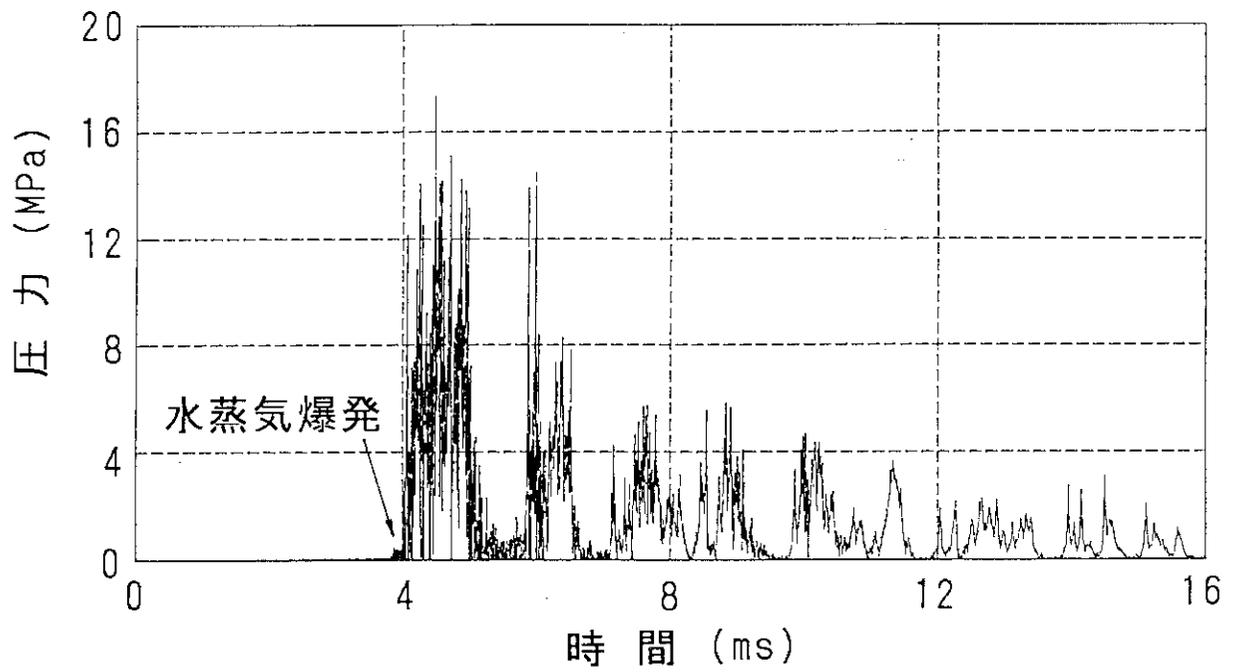


図5 鋼製水槽壁での圧力応答

○-- PE-101-CV (1)

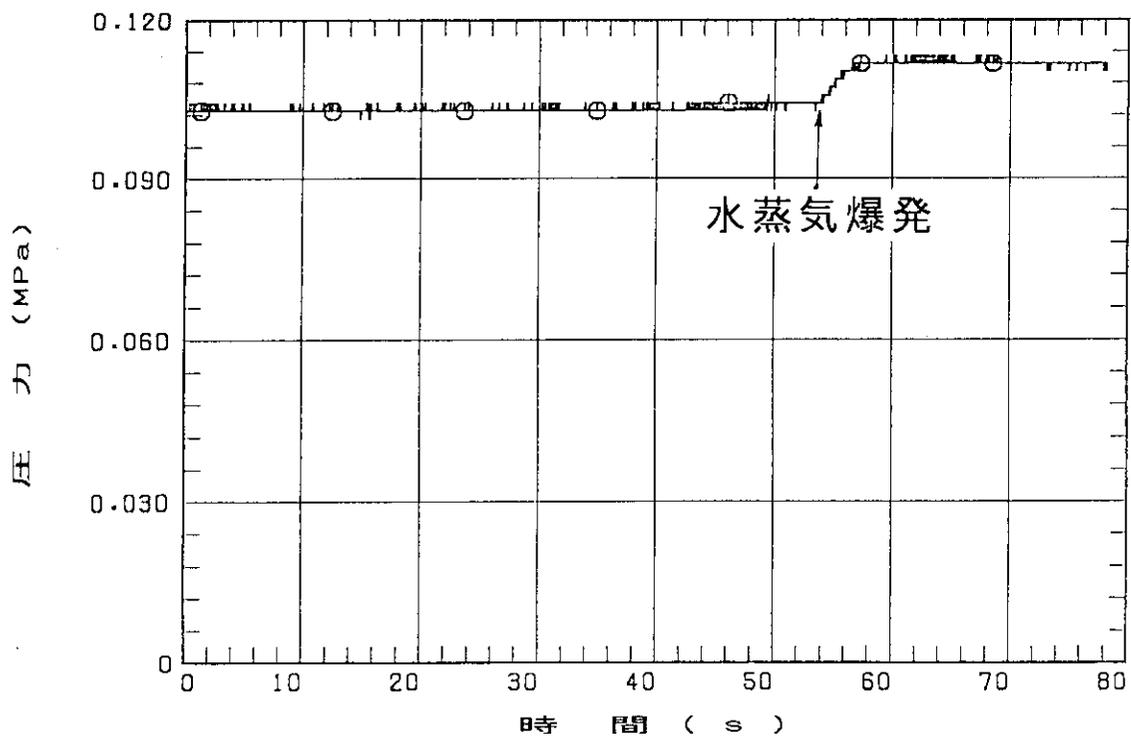


図6 模擬格納容器の内圧応答

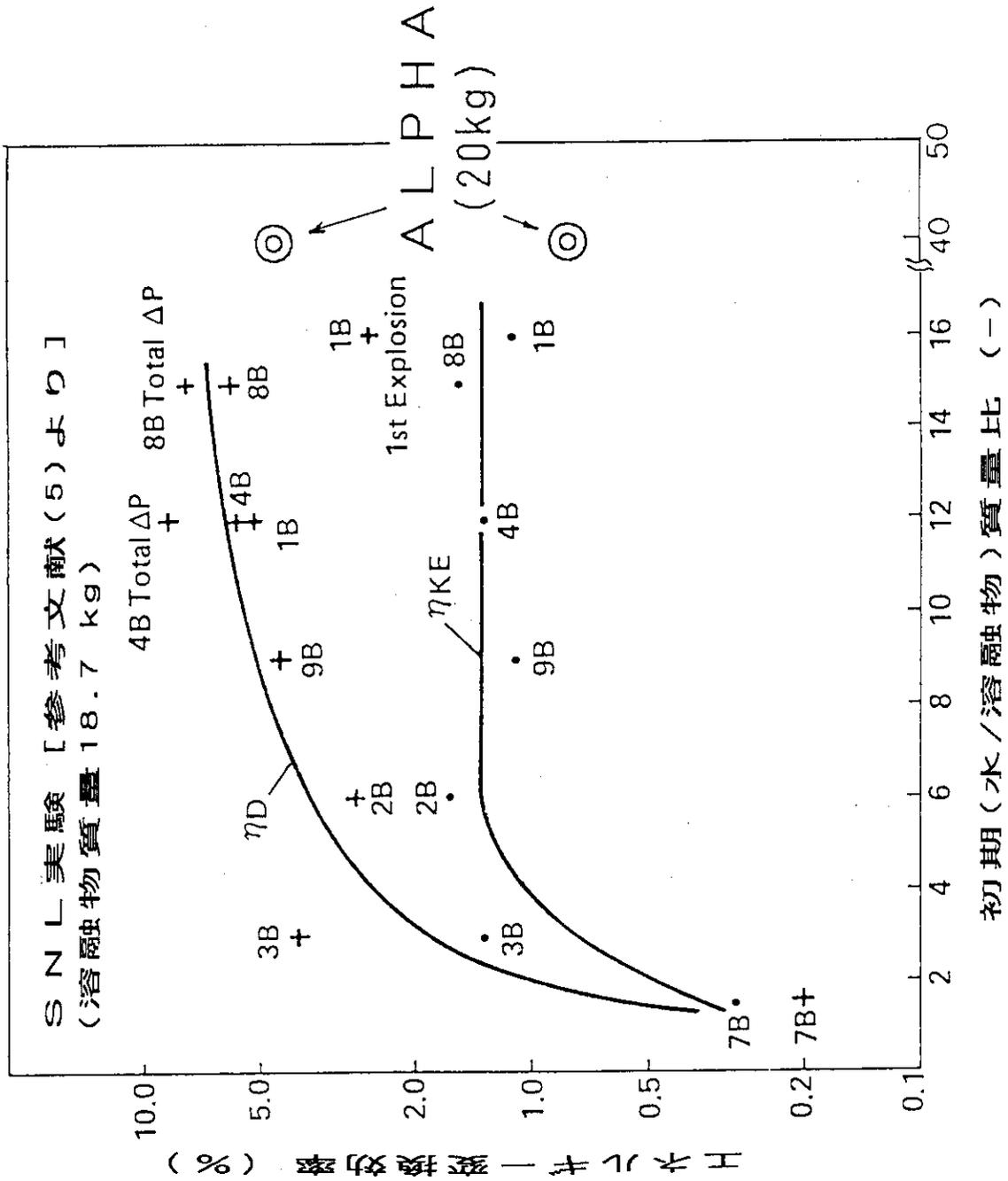
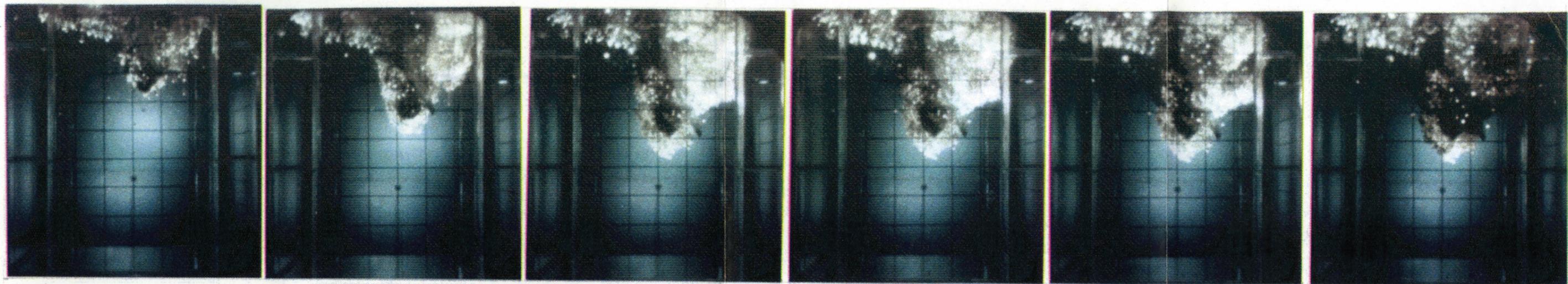


図7 エネルギー変換効率のSNL実験との比較



(t=-57.25)

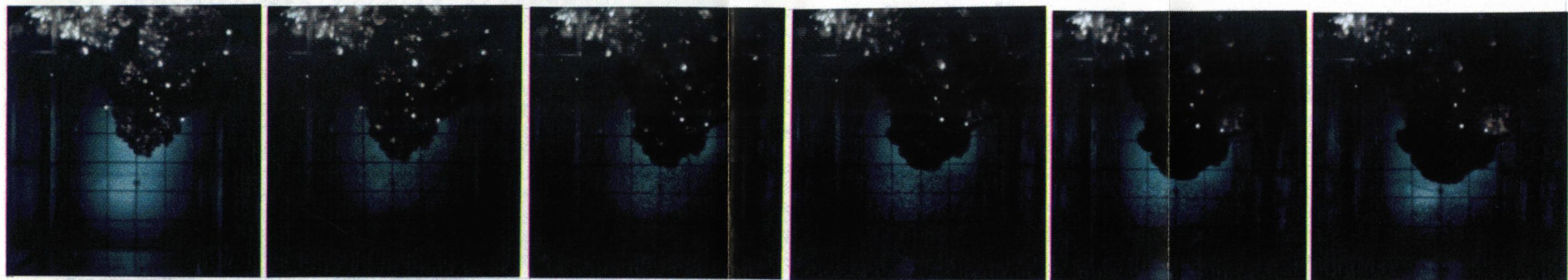
(t=-27.25)

(t=0)

(t=0.25)

(t=0.50)

(t=0.75)



(t=1.00)

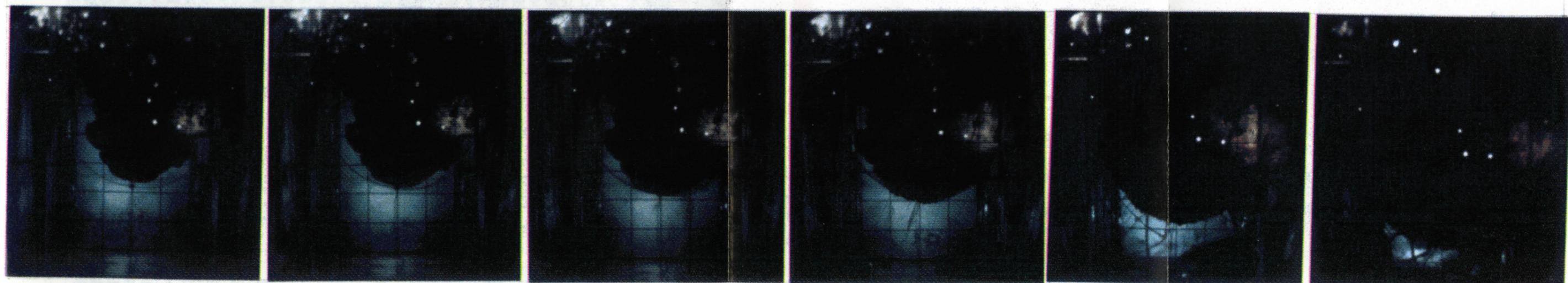
(t=1.25)

(t=1.50)

(t=1.75)

(t=2.00)

(t=2.25)



(t=2.50)

(t=2.75)

(t=3.00)

(t=3.50)

(t=5.25)

(t=7.25)

写真1 ALPHA水蒸気爆発実験 (時刻: ms)

D 20

ALPHA計画 - 溶融物落水蒸気爆発実験 -

ALPHA(Assessment of Loads and Performance of Containment in a Hypothetical Accident) - Melt Drop Steam Explosion Experiment -

○杉本 純、 山野憲洋、 丸山 結、

原子力 原 研 SUGIMOTO Jun YAMANO Norihiro MARUYAMA Yu
安全工学 日高昭秀、 早田邦久
HIDAKA Akihida SODA Kunihisa

1. はじめに 軽水炉のシビアアクシデント時に格納容器に加わる負荷と格納容器からのリーク挙動を明らかにし、またアクシデントマネージメントの有効性の定量的な検討に資するため、原研では事故時格納容器挙動試験(ALPHA)計画を開始した¹⁾²⁾。ALPHA計画では、(1)貫通部リーク定量化試験、(2)溶融炉心冷却材相互作用試験、(3)溶融炉心コンクリート相互作用試験、(4)エアロゾル挙動試験の4項目の試験を実施することとしている。本報では、溶融炉心冷却材相互作用試験の第1段階として実施した、テルミット反応を利用した溶融物落水蒸気爆発実験について報告する。

2. 試験条件 表1に主な試験条件を示す。模擬溶融物として、テルミット反応により生成した溶融金属10kg及び20 kgを使用し、水を満たした容器に落下させた。

3. 試験結果 大気圧条件下では、10 kgの溶融金属を水に落下した場合には水蒸気爆発は生じなかったが、20 kgの溶融金属を用いた場合に自発的な水蒸気爆発が生じた。図1に鋼製水槽に取付けられたピエゾ型圧力計から得られた圧力パルスを示す。水蒸気爆発の最初の圧力ピークは約10 MPa、幅約1 msであり、大型実験で従来得られている値とオーダー的に一致している³⁾。溶融金属の有する熱的エネルギーの水蒸気爆発による機械的エネルギーへの変換効率は、1%未満と評価した。

4. おわりに ALPHA装置を用いた最初の溶融炉心冷却材相互作用試験において、溶融物落水蒸気爆発に関する装置運転、計測等の基本的技術を確認した。大気圧下において自発的な水蒸気爆発が起こるためのしきい値、爆発による衝撃圧力パルス、熱的エネルギーから機械的エネルギーへの変換効率等に関する知見を得た。今後は、ALPHA装置の特質を活かし、水蒸気爆発に及ぼす系圧力、冷却材条件など種々の影響を調べるとともに、アクシデントマネージメントの観点からの実験を実施して行く予定である。

参考文献 1) 杉本他、1990年原子力学会秋の大会、F41.

2) 山野他、1990年原子力学会秋の大会、F42.

3) Mitchell D. E. et al., SAND83-1057,(1986).

表1 主な実験条件

系圧力	大気圧
テルミット量	10、20 kg
溶融物温度	2500 °C(推定)
冷却材(水)	室温、水深1 m
落下高さ	3.5 m
鋼製水槽	内径 1 m

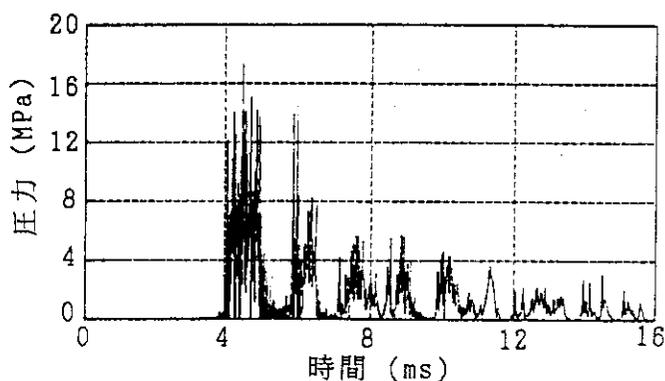


図1 鋼製水槽壁での圧力応答

付録2 学会での質疑応答

(1991年10月15日)

問：自発的な水蒸気爆発が起こるために、熔融物の質量にしきい値が存在するのはどのような理由によるのか。

答：水蒸気爆発のメカニズムが現段階では明らかでになっていないので明確なことは分らない。ただし、熔融物の質量が増大しても蒸気膜の厚さは変わらないので、熔融物の質量が増大すると、蒸気相の熔融物に対する体積割合が減少し、そのために、外乱に対してトリガーとなる機会が多くなるなどのことが言われている。kgオーダーの比較的大規模の実験では、その値はともかく、しきい値が存在することは従来から知られている実験的事実ではある。

コメント：グラムオーダーの高温金属を用いた液滴実験では、場合によっては自発的な水蒸気爆発が起きることもある。

問：実際の原子炉のシビアアクシデントに対してはどのようなことが言えるのか。

答：まだ実験が始まったばかりなので、スケール効果についてはこれからの問題である。ALPHAでは装置上 100 kg までのテルミットを投下することが可能であるが、実際の原子炉のシビアアクシデントでは数トンから十トンオーダーの熔融物が水中に落下する可能性がある。斎藤先生（座長）のモデルでも、2.4~4トンの熔融物が水と相互作用すると評価されている。また、熔融物の成分についても実際の原子炉と異なっている。したがって、実験データだけから原子炉の場合に外挿、評価することは難しく、解析モデルの検証とそれに基づいた外挿を行うことが必要であろう。

コメント：今回の実験結果からは、たとえ 20 kg でも大気圧下で水蒸気爆発が起こり得ることが示されたことだけでも意義がある。

問：落下する高温液体を何等かの手段で分散させ、粗混合(Coarse Mixing)の状態を強制的に変えて、それにより水蒸気爆発が発生するかどうか調べると面白い。

答：実はつい最近の実験で、水槽の上方に太い針金で作ったメッシュを設け、落下途中のテルミットを分散させて水蒸気爆発発生の有無を調べた。その実験では、水蒸気爆発は発生しなかった。メッシュにより、粗混合過程の状態が大きく異なったためと考えている。

以上