

JAERI-Review

94-010



蒸気爆発に関する実験的研究の概要

1994年12月

森山清史・山野憲洋・丸山 結・工藤 保・杉本 純

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

本レポートは、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。

This 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, 1994

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

蒸気爆発に関する実験的研究の概要

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

森山 清史・山野 憲洋・丸山 結

工藤 保・杉本 純

(1994年11月28日受理)

これまでに行われた蒸気爆発の実験的研究について、とくに大規模実験に重点をおいて概要をまとめ、現在得られている知見を整理した。1970年代以降、原子炉のシビアアクシデントの比較的初期における炉心内の現象を模擬したピン体系の実験、大規模な炉心溶融後の溶融物と冷却材の相互作用を模擬した溶融物投下・注入型の実験、層状体系の実験などが行われた。これらの実験により、冷却材温度が飽和温度に近いときや高圧の条件下では自発的な蒸気爆発が起こりにくい、大規模な体系でのエネルギー変換率は0.1～数%のオーダーである、冷却材がナトリウムの場合は水の場合に比較して穏やかな相互作用になりやすい、などの知見が得られている。最近では蒸気爆発の数値解析コードの発達にともない、数値計算に対する検証データを与えることに重点をおいた粗混合実験、一次元体系での実験が行われている。

Overview of Experimental Studies on Vapor Explosions

Kiyofumi MORIYAMA, Norihiro YAMANO, Yu MARUYAMA
Tamotsu KUDO and Jun SUGIMOTO

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

(Received November 28, 1994)

Experimental studies of vapor explosions were overviewed and currently available knowledge was summarized with emphasis on the large scale experiments. Since 1970s, quite a few large scale experiments have been performed, which have included several types such as pin geometry experiments simulating the early stages of severe accidents in nuclear reactors, and melt-coolant interaction experiments with drop/jet geometry or stratified geometry simulating the phenomena expected to take place after a large scale core melt-down. According to previous experimental results, following facts are clarified; spontaneous explosions are not likely with saturated coolant and/or with high pressures; the energy conversion ratio in large scale systems is in the range 0.1~several percents; if the coolant is sodium generally benign interaction is expected compared with the case of water coolant; etc. Recently, accompanied with the development of numerical simulation codes for vapor explosions, considerable efforts are devoted into premixing experiments and one dimensional geometry experiments oriented to provide data for the comparison with numerical simulations.

Keywords: Severe Accident, FCI, Vapor Explosion, Large Scale Experiment

目 次

1. はじめに	1
2. 大規模実験	3
2.1 炉内実験およびピン体系の実験	3
2.2 溶融物液塊あるいはジェット	4
2.3 層状の体系	8
2.4 粗混合実験	9
3. 小規模実験	27
3.1 単一滴実験	27
3.2 複数滴実験	28
3.3 層状体系の実験	28
4. まとめ	33
参考文献	35

Contents

1. Introduction.....	1
2. Large Scale Experiments	3
2.1 In-pile and Pin Geometry Experiments	3
2.2 Melt Drop/jet.....	4
2.3 Stratified Geometry.....	8
2.4 Premixing Experiments.....	9
3. Small Scale Experiments	27
3.1 Single Droplet	27
3.2 Multi-droplet.....	28
3.3 Stratified Geometry.....	28
4. Summary	33
References.....	35

1. はじめに

工学においては、産業界における災害が原因となって新たな研究分野が生まれる例が少なくない。蒸気爆発の研究もそのような一例といえるであろう。蒸気爆発は、熔融金属などの高温の液体と水などの低温・低沸点液体が接触することにより、低沸点液体の急速な蒸発が起こり、非常に大きな圧力発生、および衝撃波の伝播を生じる現象である。金属工業、製紙業などの産業分野で熔融金属と水、熔融塩と水などの接触による蒸気爆発事故が実際に発生し、犠牲者を出している。飯田ら[1]によれば、1935年から1965年までに国内で262件の蒸気爆発事故があり死者80名、800名以上の重軽傷者が出ている。

原子力の分野では、1950年代から60年代にかけて、炉心が熔融するような事故やいくつかの実験において大規模な圧力発生や構造物の破損が起き、蒸気爆発によるものと見られている。1954年に米国の沸騰水型原子炉BORAX-1を用い、大きな反応度を与えて原子炉を破壊する実験が行われた。この実験で、熔融したウラン・アルミニウム合金燃料と水による蒸気爆発と考えられる爆発的な圧力発生が見られた。また1961年には軍用実験炉SL-1で制御棒引抜きによる反応度事故が発生したが、このときにやはり蒸気爆発によると考えられる大規模な破損が生じた[2]。

これまでの蒸気爆発研究の流れについては、既に多くのレビュー論文が発表されているが[2-6]、以下にその概要を紹介する。蒸気爆発の工学的研究の始まりは、おそらく1950年代の蒸気爆発事故の現象解明に焦点をおいた研究である。例えば、Long [7]はアルミニウムの液滴を水中に落とす実験を多数行い、容器底にアルミニウム液滴が接触するとき容器底面とアルミニウム液滴の間に取り込まれた水が急激に沸騰することによって蒸気爆発が起こるというモデルを提案し、容器底の濡れ性を変化させた場合の影響などを調べている。

1960年代になると、上述のような原子炉施設における蒸気爆発の事例がひとつの発端となり、原子炉の安全性に関連して蒸気爆発の研究が精力的に行われるようになった。初期の理論的アプローチとして、熱力学的な観点に基づいて蒸気爆発における熱エネルギーから機械的エネルギーへの変換率の限界値を評価する熱力学的モデル、種々のパラメータを仮定して圧力の時間変化と機械的エネルギー発生の規模を予測するパラメトリックモデルなどが提案された。

1970年代には、数kgから数十kgの規模の溶融物を用いた大規模な実験的研究が始まり、理論面では、さらに詳細な機構を考慮したメカニスティックモデルの提案が行われた。その中で、Fauske[8]の自発的核生成モデルとBoardら[9,10]の熱的デトネーションモデルは代表的なものである。70年代の終わりには蒸気爆発が次のような一連の素過程、すなわち

- 1) 膜沸騰状態における高温液と低温液の初期粗混合状態の形成
- 2) 自発的な、あるいは外部からのトリガーによる膜沸騰の不安定化
- 3) 急速な熱伝達、蒸気発生、細粒化をともなう粗混合領域全体への圧力波の伝播
- 4) 膨張による機械的エネルギーの放出

という4段階(図1)から成ることに対する研究者間の合意が得られた。

1980-90年代には、蒸気爆発の素過程の各段階の解明を目的とした実験的、理論的な研

究や、大規模な蒸気爆発現象のシミュレーションを目的とする数値解析コードの開発、蒸気爆発をアモルファス微粒子の製造などに利用しようとする応用研究などが行われ、現在に至っている。

本報告は、これまでに行われた蒸気爆発の実験的研究について、とくに大規模実験を網羅することに重点をおいて概要をまとめ、現在得られている知見を整理したものである。

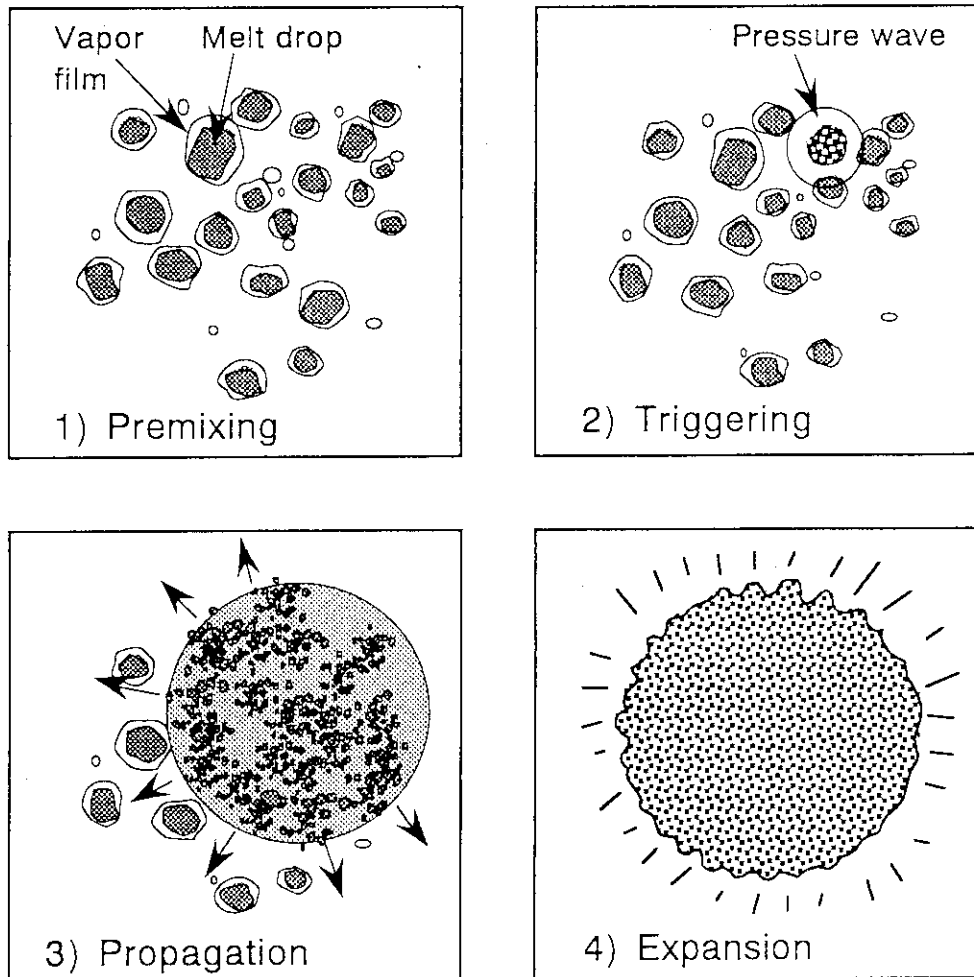


図1 蒸気爆発における4段階の素過程の概念

2. 大規模実験

蒸気爆発の実験的研究はこれまでに多数行われており、それらは厳密な定義によって大規模あるいは小規模と分類されるわけではないが、一般的に規模から分類すると数kg程度以上の溶融物を用いるものを大規模、単一液滴や数十g以下の溶融物を用いるものを小規模というようである。目的からみると、大規模実験では初期粗混合状態から機械的エネルギー放出までの蒸気爆発の一連の過程を実験装置の中で再現し、エネルギー変換率、デブリの粒子径分布、種々のパラメータの影響、スケール効果などを総合的に調べることを目的としている。一方、小規模実験は素過程のある段階に目的をしばってメカニズムの解明に必要な知見を得ようとするものであり、特に典型的なものは単一の溶融物液滴を冷却材中に落とす実験である。本報告の中でも、便宜上このような観点で分類・整理している。

大規模実験もまたいくつかのタイプに分類できる。ここでは実験体系の形状と目的の観点で分類した。ひとつは原子炉のシビアアクシデントの比較的初期における炉心内の現象、つまり燃料棒がもとの形状に近い状態での現象を模擬したピン、あるいはピンバンドル型の実験である[11~27]。これには研究炉の炉心の中に設けられた試験部を核加熱する炉内実験と、電気加熱やテルミット反応を利用した炉外試験がある。ピン体系の実験では、用いられる溶融物の量は数g程度の少量の場合もあるが、総合的な現象の模擬を目的としていることからここでは大規模実験の範疇に含ませた。最近のピン体系実験の多くはLMFBRにおけるシビアアクシデント早期の現象を対象としたものである。

他のタイプは大規模な炉心溶融後の溶融物と冷却材の相互作用を模擬するもので、溶融物と冷却材の接触モードによって大きく2つに分類できる。最も多くの実験が行われているのは溶融物を液塊あるいはジェットのかたちで冷却材中に落下、あるいは注入する体系であり[28~51, 53~59]、大規模なものでは100kgの溶融物を用いた実験も行われている。このタイプの実験では最も典型的な蒸気爆発現象が見られている。もうひとつのモードは、溶融物のプールに冷却材を注ぎ込む層状体系である[38,44,48]。

このほか最近になって、粗混合状態を詳細に調べようとする実験が各機関で行われている[60~63]。これは粗混合の状態が、それに続く蒸気爆発の過程において溶融物のうちのどの程度の量が関与するかを決定し、最終的にエネルギー変換率を左右する重要な条件を与えるという認識から始まったもので、数値計算コードの開発と平行して検証データを提供することを主な目的としているものである。

なお、以下の2.2節から2.4節に紹介した各機関での実験についてまとめたものを表1に示す。

2.1 炉内実験およびピン体系の実験

CronenbergとBenzのレビュー論文[2]には1950~60年代に原子炉で行われた実験、あるいは事故における蒸気爆発の事例が表にまとめられている。1954年に行われたBORAX-1の実験では制御棒を引き抜いて核暴走を起こさせ原子炉を破壊した。その際、溶融したウラン-アルミニウム合金燃料と冷却水の間で水蒸気爆発が起こり、650atmの圧力が発生した

といわれている。また、1961年の軍用研究炉SL-1の事故では、誤って制御棒が引き抜かれたために核暴走が起り、部分的な燃料要素の溶融が生じ、水との間に起こった水蒸気爆発によって原子炉が破壊された。この事故では圧力容器が9ftの高さまで持ち上げられ、全ての配管が破断し、飛び出した制御棒が天井に突き刺さり、3名の犠牲者を出すほどの惨状であった。

これらの事例が発端となって現在にいたるまで蒸気爆発の研究が展開されているが、そのうち炉内実験やピン体系での実験は最も直接的に実炉の安全性に関わる情報をもたらす反面、体系が複雑であること、計装が限定されることから、現象の物理的解明に必要な情報は十分に得にくい面がある。また、これらの実験では蒸気爆発現象も対象とされ、あるいは観測されてはいるが、本来、実炉条件でのより広範な現象を対象としたものであり、蒸気爆発そのものを目的としたものではない。したがってここではこれらの実験については簡単に紹介するにとどめることにする。

軽水炉における炉内実験は反応度事故 (RIA) に関連したものであり、ANLのTREAT [11]、INELのSPERT [11,12]、PBF [11]、原研のNSRR [13,14] (図2) における実験などがある。これらの実験は、実験炉の炉心内に設けられたカプセルの中に各種の燃料棒を短くした試験体、および冷却水を封入し、炉心の中性子束をパルス状に制御して試験体至高負荷の核加熱を与えて燃料棒の破損特性を調べるものである。

高速炉に関連するもの (ナトリウムを冷却材とする実験) では、TOP (transient over power)、TUC (transient under cooling: slow pump coast down, instantaneous flow blockage in a subchannel, etc.) などの条件を模擬した炉内、および炉外実験が行われている。炉内実験にはANLのTREAT[15]、SNLのPBE[16]、フランスのCEA Cadarache 研究所におけるCABRI [17~19]、SCARABEE[20,21]などがある。

ピン体系炉外試験のほとんどは高速炉に関連したナトリウム体系のもので、ピンバンドル内にテルミットを注入するANLのCAMEL[22~24]、テルミットを充填したKfKのSIMBATH [25]、電気加熱による動燃のFSI実験[26]などがある。これに似た軽水炉の体系 (溶融金属-水系) の実験として、規模は小さいが、水中の金属棒の急速加熱、溶融、水蒸気爆発の発生という現象を扱ったInoueら[27]の実験がある。

これらの炉内、およびピン体系実験の結果から実燃料の破損特性、高速炉におけるピンバンドル内の溶融物の進展や閉塞などについて多くの知見が得られているが、蒸気爆発についての知見は一般的に次のようにまとめられるだろう。まず、軽水炉の条件では、炉心溶融に十分な発熱が与えられた場合水蒸気爆発が生じる。このとき、 UO_2 燃料が溶融した時にジルカロイ被覆はまだ健全であり、被覆に生じたき裂から溶融燃料が噴出し、これによって微粒化した溶融燃料と水との間で相互作用が生じると考えられている。高速炉条件では、ナトリウムの除熱特性の高さとピン間隔の狭さのため、溶融燃料と冷却材の大規模な混合が妨げられ、大規模な蒸気爆発が起こる可能性は小さいと考えられている。

2.2 溶融物液塊あるいはジェット

軽水炉のシビアアクシデント時に圧力容器内で溶融した炉心が下部プレナムに堆積した

冷却水中に落下する場合、下部プレナムに堆積した溶融炉心が圧力容器を貫通し、原子炉キャビティ内にたまった水中に落下する場合、また、高速炉の炉心溶融事象後期に溶融燃料が上部あるいは下部プレナムのナトリウム中に噴出、落下する場合などには、溶融炉心が液塊やジェットのかたちで冷却材バルク中に侵入する接触モードが考えられる。この体系では各機関で多くの実験が行われているが、以下にこれらを3つのカテゴリーに分類して紹介する。

i) 現象解明、エネルギー変換率、スケール効果の解明を目的とする総合実験

JRC Ispra (イタリア)における一連の実験

イタリアのJRC Ispra研究所では、Ispra tank facility [28], BETULLA [29], FARO [30~32], KROTOS [55, 56]という一連の実験が行われている。Ispra tank facilityはタンク型の気密容器中の水にステンレス、酸化ウランの粒子あるいは溶融物を投入するもので、350 lの大型容器と6.5 lの小型容器が用いられ、小型容器では2.5MPaまで雰囲気圧力を高めた実験も行われた。50回以上の実験が行われ、2秒程度の急速な圧力上昇は見られたが蒸気爆発は起こらなかった。おそらく溶融物温度が融点に近かったため、溶融物が水中に投入された後、早い時期に表面の凝固が起こったためであろう。

BETULLA装置ではナトリウム液体中にステンレス、銅、酸化ウラン、アルミナの溶融物を投下する実験が行われた。サブクール状態のナトリウム中では膜沸騰が持続せず、蒸気爆発は起こっていない。デブリの形状に滑らかな滴状のものと角張ったものが見られ、それぞれ流体力学的なフラグメンテーションによるものと凝固後に熱応力によって破碎したものと考えられている。

FAROはJRC Ispraで最も大規模な装置で、ナトリウム系、水系の両方について実験が行われている(図3)。ナトリウム系では最大100kgの酸化ウラン溶融物を投入する実験が行われた。液面近くで加熱されて飽和温度に達したナトリウムと溶融物との小規模な蒸気爆発と見られる圧力パルス(~5MPa)が発生し、この小規模な相互作用によって溶融物ジェットの液中への侵入が妨げられる現象が観測された。一回の小規模な相互作用におけるエネルギー変換率は0.03%程度と評価されている。水系の実験は現在進行中であり、これまでに2ケースのスコーピングテストの結果が報告されている。この実験はクエンチテストと称されるもので5MPaの高圧下で水中に約40kgまでのコリウムを投下し、容器底の熱負荷等の測定が行われた。蒸気爆発は見られていない。なおKROTOS実験については後に述べることにする。

AEA Technology (英国)における一連の実験

英国のAEA Winfrith研究所においてもTHERMIR施設による実験[33,34], ウランテルミットを用いた実験[35,36], MFTF実験[37]という一連の研究が行われている。THERMIRではアルミニウムとスズの溶融物を水中に投下し、デトネーターによる外部トリガーを加える実験が行われた。この実験で粗混合、トリガー、伝播という一連の現象が確認され、伝播速度は35~400m/sと測定された。また、溶融物と水の接触界面温度が水の均質核生成温度

より低い場合にも蒸気爆発が発生したことが報告されている。

次の段階として、実機材料の場合の現象を調べるために比較的少量の(0.5kg)ウランテルミット(ウランと酸化モリブデンのテルミット反応によって酸化ウランの溶融物を得る)を用いた実験が行われた。この実験は密閉容器内の水またはナトリウム中に溶融物を放出するものである。この装置はトリガー装置は特に備えていないが、放出装置のキャップが容器底に衝突する際の機械的ショックで蒸気爆発がトリガーされた。エネルギー変換率の評価において、ある粒径以下のデブリを蒸気爆発に関与したものとみて、それが保有していた熱エネルギーに対する機械的エネルギーの比をもって評価する手法が用いられ、この評価で水系の場合の変換効率1~2%、ナトリウム系ではひと桁低い変換率が得られた。

第3段階として、エネルギー変換率に対するスケール効果を調べるため、MFTF装置(図4)によりウランテルミット25kgを水中に放出する実験が行われ、粒径が280 μ m以下のデブリについて評価すれば、溶融物質量0.03~18kgの広範囲にわたって変換率は溶融物質量にあまり依存せず、1~4%程度であることがあきらかにされた。

SNL(米国)における一連の実験

米国のSNLでは、EXO-FITS [38,39] と呼ばれる野外実験とFITS (fully instrumented site) [40~43] と呼ばれる格納容器内での実験が行われている。EXO-FITSでは飽和水に約20kgのテルミットを投下するCM(coarse mixing)シリーズ、過塩素酸カリウムと鉄のテルミット反応で生成した酸化鉄溶融物(~10kg)を水中に投下し、水素発生がない場合の水蒸気爆発を調べるOM(oxide melt)シリーズ、テルミット50kgを、セルロースガムで粘性を大きくした水に投下する実験などが行われ、高速度カメラによる観察、エネルギー変換率の算出などが行われた。FITSでは(図5) 雰囲気圧力の制御、デブリの完全な回収、雰囲気圧力の圧縮仕事からのエネルギー変換率の算出など、密封容器を必要とする計測が行われ、20kg程度までのテルミットやコリウムの溶融物を水中に投下する実験が行われた。これらの実験から次のような知見が得られた。水温が飽和温度に近いとき、あるいは雰囲気圧力が大きいとき(~1MPa)は蒸気爆発は起こりにくい。しかし酸化物の溶融物を飽和水中に投下した実験では蒸気爆発が見られ、金属-水反応による水素が膜沸騰の蒸気膜の安定性に寄与している可能性がある。自発的な蒸気爆発が起こるためにはある程度以上の溶融物の質量が必要である。エネルギー変換率は溶融物-水質量比が1/3~1/15でありあまり変化せず、約1%であった。

ANL(米国)における実験

米国のANLでは原子炉キャビティと格納容器を1/30スケールで模擬したコリウム-水熱的相互作用(CWTI)実験が行われた[44]。この実験では2800 $^{\circ}$ Cのコリウム1.3~4kgを深さ0~30cmの水中にジェット状で投下し、キャビティ内での相互作用で溶融物と水の混合物が格納容器内に吹き出す現象、水素発生などが調べられたが、蒸気爆発は起こらなかった。

KfK(ドイツ)における実験

ドイツのKfKでは、THINA施設[45,46]においてナトリウム中にテルミット反応による鉄またはアルミナ溶融物を下方から注入する実験が行われている。この実験ではX線を用い

てナトリウムの沸騰挙動が観察され、溶融物注入直後の圧力パルスの発生が観測された。エネルギー変換率は0.1~0.3%と評価されている。

原研における実験

原研ではALPHA計画(事故時格納容器挙動試験)の一環として、50m³の模擬格納容器内に置かれた水槽の中にテルミットを投下する実験を行った[47,48](図6)。溶融物の質量、水温、雰囲気圧力を変化させる実験、また、φ2mmの金属線を2cm角の格子状にした分散板を水面上あるいは水面下において溶融物の分散状態を変化させる実験を行ない、次のような知見が得られた。水温が飽和温度に近いとき、あるいは雰囲気圧力が1MPa以上の高圧のときは水蒸気爆発は起こりにくい。分散板によって溶融物を水面上で分散させた場合、自発的な蒸気爆発は起こりにくくなったが、起こった場合には通常よりも激しい水蒸気爆発となった。分散板によるトリガーの抑制は粗混合領域における雰囲気気の巻き込み量が増加し蒸気膜が安定化するため、あるいは粗混合が促進され蒸気発生量が増加することにより粗混合領域での疎水現象が起こるためと考えられる。しかし、ひとたびトリガーが起こればより多くの溶融物が蒸気爆発に関与するため大規模な蒸気爆発が生じると考えられる。

ii) 溶融物のジェットを冷却材に注入する実験

米国SNLでは、溶融物ジェットと水の相互作用による粗混合の過程を調べるIJET/EJET実験[49,50]が行われた。IJET(isothermal jet)実験では室温で水中にフレオンのジェットを注入して流体力学的な混合を観察し、EJET(boiling jet)実験ではテルミットのジェットを水中に注入し、沸騰の効果を観察した。沸騰の有無で全く異なる混合の様相が見られ、水面近くでの顕著な沸騰をともなう混合の過程が詳しく観察された。

イリノイ大学のSchneiderら[51]はビスマス・鉛系の低融点合金(Cerrobend)のジェットをフレオン-11に注入し、ジェットの分裂挙動を調べた。彼らは溶融物の速度が溶融物液滴の自由沈降速度になる深さを溶融物ジェットの分裂が完了する位置と考え、breakup lengthと定義した。そしてbreakup lengthはSaitoら[52]の相関式で良好に整理できることをあきらかにした。

ANLのGaborら[53]はアルミニウム合金の溶融物ジェットを水中に投下する実験を行い、デブリの粒径はジェットの直径によって大きく変化すること、溶融物が分裂し凝固するか溶融状態のまま水槽底部に堆積するかは冷却材のサブクール度に大きく依存することなどをあきらかにした。

動燃ではMELT-II施設を用いた溶融物ジェット-冷却材相互作用実験が行われている[54]。現在までに低融点金属(Wood's metal)のジェットを水中に注入する実験が行われている。4つのFCIモードが観察され、各モードが見られる領域の境界線は、均質核生成温度による境界、臨界温度による境界、最小膜沸騰温度による境界によって説明された。実験条件を外挿することにより、実際のFBRにおける事故条件では穏やかなFCIが起こる可能性が最も高いと結論されている。

iii) 一次元体系における実験

JRC IspraではKROTOS施設[55, 56]において、一次元形状のテスト部に粗混合状態を形成し、トリガーを加えた場合あるいは加えない場合の蒸気爆発について実験を行った。この装置は直径9cmのテスト部に1mの深さまで水を満たし、スズまたはアルミナの溶融物を注入し、底部の金属膜を破断して高圧の気体を吹き込むことにより外部トリガーを与えるものである。スズを用いた実験では、150~270m/sの伝播速度をもつ衝撃波が見られ、アルミナ実験では650~1000m/sの伝播速度、100MPa以上のピークを持つ非常に強い衝撃波が見られた。粒径250 μ m以下のデブリに基づくエネルギー変換率は0.8~1.3%であった。

Wisconsin大学でも同様な一次元形状のテスト部を持つ実験施設WFCI施設[57, 58]が最近製作された(図7)。この装置は円管をT型に接続したもので、溶融物を垂直管内に投下した直後にテスト部上部を密閉し、蒸気爆発による膨張は定められた慣性をもつ水平管内に向かって生じる構造である。これによりエネルギー変換率は水平管内に置かれたおもりの速度から正確に求められる。外部トリガーとして電磁ハンマーによる底部の打撃を用いている。これまでにKROTOS(No. 21)と同じ条件の実験をはじめとして3シリーズの実験が行われた。等しい初期条件に対して外部トリガー、自発的トリガーにかかわらず再現性のある圧力波伝播が見られ、外部トリガーの強さにより2回(テスト部を1往復)または1回(下から上へ)の圧力波の伝播が観測された。エネルギー変換率は1%以下であり、蒸気爆発に関与する溶融物の量は全体の2%以下と評価されている。

体系は小さいが、Inoueら[59]も一次元のテスト部で低融点合金と水を用いた蒸気爆発実験を行った。溶融金属と水の接触界面温度が水の均質核生成温度を越え、かつトリガーが0.9MPa以上の場合に爆発的な相互作用が見られ、さらにトリガーが2MPa以上のとき衝撃波の伝播が観測された。

これらの実験結果は一次元蒸気爆発数値計算コードの検証等に利用されている。

2.3 層状の体系

前節に紹介した実験は事故シナリオにおいて冷却材のプールの中に溶融金属が侵入するモードを模擬したものであるが、逆に溶融金属のプールが形成されているところに冷却材が注入されるような接触モードも考えられる。これを模擬したものが層状体系、あるいは逆接触モード(alternate contact mode)の実験である。SNLのEXO-FITS, ANLのCWTI, 原研のALPHAにおいてこの接触モードの実験が実施されている。

EXO-FITS-ACMシリーズでは層状体系での蒸気爆発の可能性を調べるためにテルミット溶融物に水を注ぐ実験が行われた[38]。実験はテルミット10kg, 18.5kgを用いた2ケースが行われ、そのうち、テルミット反応終了の1秒後に水を注ぎ始めた最初の実験で蒸気爆発が見られた。2回目は反応終了後4.5秒経過した後水を注入し、激しい沸騰が起こったが蒸気爆発は見られなかった。

CWTI実験では層状体系の実験が1ケース行われた[44]。この実験では2800°Cの溶融コリウムに飽和水が注がれ、溶融物の細粒化は見られなかった。また水に溶融物を投下する場

合に比べて溶融物と水の混合物の吹き上げも少なかった。

ALPHA-ACMシリーズ[48]ではテルミット溶融物の深さ8cmのプールに水をパイプノズルあるいはスプレーノズルを介して注入した。パイプノズルを用いた実験で、溶融物の激しい噴出が起り、それに続いて蒸気爆発が発生した。しかし蒸気爆発の規模は小さく、溶融物の約15%が容器から吹き出す程度であった。スプレーノズルは溶融物の表面を急速に冷却するために効果的であることが確認された。

以上のように、層状の接触モードでは大規模な蒸気爆発は見られていない。この体系では効果的な粗混合状態が形成されず、溶融物のごく一部しか相互作用に関与しないためであろう。

2.4 粗混合実験

蒸気爆発におけるエネルギー変換率は、以上に述べたような実験において水系では0.1~数%程度と報告されている。蒸気爆発においてエネルギー変換率が小さいのは、溶融物のうち蒸気爆発に関与しているのは全体のうちごく一部であるためと考えられる。また、ある寸法以下に細粒化されたデブリが蒸気爆発に関与したものと考えると、それが保有していた熱エネルギーを基準にしてエネルギー変換率を評価すると、溶融物の総量に関係なくほぼ一定のエネルギー変換率となるという報告がある[37, 56]。このように、蒸気爆発にどの程度の溶融物に関与するかは重要な問題であり、最近これに関係して、蒸気爆発の初期条件としての粗混合状態を詳細に調べる実験が行われている。このような研究は多相流数値解析コードをベースにした粗混合数値解析コード[60, 61]による予測と比較してコードの検証に資することを重要な目的としている。

California大学 Santa Barbara校のTheofanousらのグループはMAGICO実験[60]において、直径数mmの多数の鋼球を1000°C程度まで加熱して水中に投下し、過渡的な二相流現象の可視化、局所的なボイド率変化の測定(FLUTE装置)を行った。また、二次元多相流数値解析コードPM-ALPHAを開発し、MAGICO実験と比較検討している。実験、解析の両方で粗混合領域内での疎水現象(water depletion phenomena)が確認された。

AEA Winfrithではウランテルミット3kgを飽和水中に投下し、粗混合状態を高速度カメラで可視化し、蒸気発生量を測定する実験を行った(MIXA実験, 図8)[61]。この実験では溶融物の液滴径や広がりやを制御する炭素棒の格子と鋼製のスカートが用いられた。粗混合領域の中心部で蒸気の上方向への流れの中で溶融物の液滴が流動化し、水が不足した'steam chimney'が存在することが確かめられた。

フランスのCEA Grenoble研究所では、BILLEAU計画[62]と称する粗混合実験が計画され、現在実施されているようである。実験条件は、2200°Cに加熱した固体粒子を軸対称あるいは平坦なジェットにして水中に投下するというものである。

ドイツのKfKでも二つの粗混合実験が計画されている[63]。QUEOS実験は室温から2600Kまでの固体粒子を水中に投下するもの、PREMIX実験はテルミット10~50kgを水中に投下するものである。

表 1 大規模実験の概要

i) 大規模総合実験

Ispra Tank Facility (JRC Ispra) [28]	
Purposes	- To investigate FCI phenomena with core and structural materials.
Conditions	Melt: Stainless steel ~3kg, 1500-1800°C UO ₂ particles ~1.5kg, 1120-1800°C UO ₂ melt ~4kg, 2850°C Coolant: Water with/without dissolved gas 20-230°C Vessel: Large 350 l, Small 6.5 l Cover gas: N ₂ , Ar, He 0.1, 2.5MPa Melt/Water volume ratio: 1/1000-1/2
Results	- More than 50 successful runs. - No steam explosion and fragmentation occurred. - Fast (about 2sec) pressure rise.
BETULLA I, II facilities (JRC Ispra) [29]	
Purposes	- Initial mode of boiling upon fuel/sodium contact. - Resultant fragmentation behavior.
Conditions	Melt: SS, Cu High superheat, 0.3-2kg UO ₂ , Al ₂ O ₃ Melting point (2850, 2015°C), 1-2kg Coolant: Na, 200-700°C Vessel: φ56cm, Height 170cm (420l) (BETULLA I) 5.7 l (BETULLA II) Cover gas: Ar
Results	- Transition boiling prevailed in subcooled sodium, no energetic FCI occurred. - Two mechanisms of fragmentation: hydrodynamic / thermalstress (smooth/fractured debris).
FARO-THERMOS experiments (JRC Ispra) [30, 31]	
Purposes	- Large scale molten fuel/sodium interactions. - Melt jet penetration, fragmentation, debris bed formation. - Possibility of vapor explosion.
Conditions	Melt: UO ₂ , 100kg, 3000°C Coolant: Na, 130kg, 400°C Vessel: φ280mm, Height 2.5m Cover gas: Ar, 0.1MPa
Results	- Limited quantities of melt penetrated and fragmented into sodium (<1m long). - The limitation was a result of FCIs in the mixing zone. - The FCIs were interpreted as local vapor explosions involving a limited quantity of melt and saturated sodium. (peak 5-6MPa) - Energy conversion ratio 0.03% for an FCI.

表1 つづき

FARO-LWR scoping tests (JRC Ispra) [32]	
Purposes	<ul style="list-style-type: none"> - Melt/water penetration and mixing. - Hydrogen production. - Thermal loads on structures. - Debris structure.
Conditions	Melt: Corium, 18-44kg, 2700°C, ϕ 100mm jet Coolant: Water, 120-255kg, 265°C, Depth ~1m Vessel: ϕ 0.5-0.7m, Height 2.5m Cover gas: Ar+Steam, 5MPa
Results	<ul style="list-style-type: none"> - No explosions, pressure rise 1.6-1.8MPa. - 2/3 of the melt fragmented into debris; median mass dia. ~4mm. - Max heat flux on the bottom: 0.8MW/m².

THERMIR facility (AEA Winfrith) [33, 34]	
Purposes	- To study characteristics of large scale FCIs including propagations.
Conditions	Melt: Tin, Aluminum ~16kg, 300-800°C Coolant: Water 6-86°C, 0.1MPa Trigger: Detonator
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Coarse mixing, trigger and propagation were observed in ten experiments. (propagation velocity 35-400m/s) - Explosive interaction occurred even with the interface temperature 243°C, which is under the homogeneous nucleation point of water (300°C). - Coherent interactions were observed with large melt/water mixing ratio.

U-Thermite experiments (AEA Winfrith) [35, 36]	
Purposes	- FCIs with prototypical materials.
Conditions	Melt: U-Thermite, 3400-3700K, 0.5kg $(3U+2MoO_3 \rightarrow 3UO_2+2Mo+1.88kJ/g)$ Coolant: Water 5-15°C, Na 250-400°C Vessel: ϕ 40cm, 52 l Cover gas: Ar, 1.2 or 3.6 l, 0.1-1MPa - Under water melt release.
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Explosions were triggered when the end cap contacted the bottom. - Smaller cover gas volume and higher pressure \rightarrow dispersion and fragmentation of the melt into water was restricted. - Energy conversion efficiency related to debris less than 150mm was 1-2%. - For UO₂-Na system, conversion efficiency was an order smaller.

表 1 つづき

MFTF facility (AEA Winfrith) [37]	
Purposes	- Scaling effect on the energy conversion ratio.
Conditions	Melt: U-Thermite, 25kg Coolant: Water Vessel: ϕ 1.2m, Height 1.5m - Under water melt release. - Melt dispersion was confined with a 'catch pot'
Results	- Energy conversion efficiency (the rate of mechanical energy to the thermal energy occupied by the melt involved in the explosion: debris less than 280mm) was 1-4%, and did not significantly depend on the melt mass in the range of 0.03-18kg.

EXO-FITS (Open geometry)(SNL) [38, 39]	
Purposes	- Overall phenomena by high speed photography (transparent vessel).
Conditions	- CM series: Thermite ~19kg / Saturated water - OM series: Iron oxide melt ~10kg (Effect of hydrogen generation) (potassium perchlorate + iron thermite reaction) - Coolant Viscosity Effect: Thermite 50kg / Water+Cellulose gum 2w% ($\eta_r \sim 100$)
Results	- Rapid boiling near the water surface prevented deep penetration of the melt into the water in saturated case. (no explosions 7/10) - Energetic explosions occurred in subcooled water. (5/5) - Energetic explosion even in saturated water in oxide-melt case.(1/1) - Viscous coolant suppressed explosions.(1/1)

表1 つづき

FITS (Fully Instrumented Test Site) (SNL) [40~43]	
Purposes	<ul style="list-style-type: none"> - Vapor explosion experiments in a containment vessel: <ul style="list-style-type: none"> > Controlled ambient pressure > Complete debris recovery > Energy conversion ratio from cover gas compression
Conditions	<ul style="list-style-type: none"> - FITS-B series: <ul style="list-style-type: none"> Thermite ~3000K, ~19kg / Water ~320K (Mf/Mc = 1/1.5-1/15) ($3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{Al} \rightarrow 9\text{Fe} + 4\text{Al}_2\text{O}_3 + 3.3\text{kJ/g}$) - FITS-C, D series: (H_2 generation was measured.) <ul style="list-style-type: none"> Thermite or Corium A+R ($\text{UO}_2, \text{ZrO}_2, \text{SS}$)~20kg /Water 290-370K N_2 ambient 0.08-1.1MPa Mf/Mc = 1/5-1/20
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Threshold for spontaneous explosions existed: Mf=1.8kg. - At high pressures (~1MPa), spontaneous explosions were suppressed. - For water subcooling 75-85°C, interactions were always explosive. - Double explosions with interval of 140-280ms were observed. (The first explosion enhanced coarse mixing for the second explosion.) - The kinetic energy conversion ratio was approximately constant (~1.3%) for Mf/Mc=1/3-1/15. - The chamber stored energy conversion ratio increased when Mf/Mc decreased, and reached 5.1-8.6% when double explosions occurred. - Energy conversion ratio was correlated with debris mean diameter. [Energy conversion ratio was corrected by Farawila et al. (1990); total up to 2.34%.] - H_2 generation during FCIs might depend on the water subcooling or the degree of fragmentation.
CWTI tests (ANL) [44]	
Purposes	- Corium-water interactions in a simulated reactor cavity and containment vessel geometry. (1/30 scale)
Conditions	Melt: Corium (thermite reaction) 2800°C, 1.3-4kg, f1-5cm $(4.67\text{U} + 2.83\text{Zr} + 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CrO}_3 + \text{Ni} \rightarrow 4.67\text{UO}_2 + 2.83\text{ZrO}_2 + 6\text{Fe} + 2\text{Cr} + \text{Ni} + 2.2\text{kJ/g})$ Coolant: Water, saturation or 25°C, Depth 0-35cm Cover gas: N_2, Ar 0.1-5MPa
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Corium injection into the cavity containing water → fluidization and sweep-out of the melt-water mixture. - Direct heating of the containment atmosphere by the mixture dispersion was not significant. - Oxidation of metallic constituents of the melt resulted in significant H_2 generation. (up to 14-80% of the possible maximum amount)

表1 つづき

THINA facility (KfK) [45, 46]	
Purposes	- To study phenomenology of FCIs in sodium.
Conditions	Melt: Thermite, 3000K, ~5kg, Injected from below Coolant: Na, 770K, 155kg, 2.7m deep Vessel: ϕ 0.3m, 5m high Pressure: 0.1MPa
Results	- Voiding and refilling from bottom to top were observed by X-ray facility. - Several intensive FCIs (peak 7-16bar) just after injection. - Energy conversion ratio 0.1-0.3%. - Debris less than 1mm for 90% mass.

ALPHA facility (JAERI) [47, 48]	
Purposes	- Phenomenology of FCIs with relatively large scale geometry. - To assess the effectiveness of possible accident management measures.
Conditions	Melt: Thermite, 10-20kg, 2700K Coolant: Water, 280-370K, depth 1m Cover gas: Air or N ₂ , 0.1, 1.0, 1.6MPa
Results	- Artificial pre-dispersion of the melt generally reduced the possibility of spontaneous explosions, however, possible optimized mixing condition could cause a more energetic spontaneous explosions. - Steam explosions were suppressed when the ambient pressure was over 1MPa or the water was nearly saturated.

ii) ジェット - 冷却材相互作用実験

IJET, EJET experiments (SNL) [49, 50]	
Purposes	- To study the coarse-mixing of molten fuel jets in water chambers.
Conditions	- EJET (Boiling jet) Melt: Thermite 37-47kg, ~2700K, ϕ 3.8-16.3cm Coolant: Water 300-360K, Depth 1.6m - IJET (Isothermal jet) Jet: Freon TF 25°C, ϕ 0.1-7.6cm, Velocity 1-3m/s Bulk: Water 25°C
Results	- Very different breakup mechanisms in boiling and isothermal jet. - Significant boiling and fragmentation near the water surface. - Mixing diameter reached a plateau immediately, and subsequently, the mixing region expanded. - Duration of the plateau depended on the initial jet diameter.

表 1 つづき

Jet breakup experiments at Illinois Univ. (Illinois Univ.) [51]	
Purposes	- Understanding of boiling jet breakup.
Conditions	Melt: Cerrobend, 85-110°C, f3-30mm, single jet / three jets Coolant: Freon-11, saturation at 1atm, Depth ~1.4m # Observation by X-ray radio graphy and motion picture
Results	- No explosion. - Leading edge velocity and breakup length were measured. - Brekup length was defined as the depth at which the penetratin rate falls to the free-fall velocity of drops (i.e. the jet core no longer exists). - Breakup length data was well correlated by Saito's correlation [52]. - Typical debris size was 1-5mm.

Jet breakup experiments at ANL (ANL) [53]	
Purposes	- Understanding of the mechanism of pour stream breakup and quench in liquid coolant.
Conditions	Melt: Aluminum alloy, 929-973K, ϕ 5-20mm circular or ϕ 57mm annular Coolant: Water 300-360K, Depth 1.6m
Results	- No explosion. - Debris size: ~10mm, ~30mm, ~100mm for jet diameter 5mm, 10mm, 20mm, respectively. - The extent of freezing of the melt grobules are sensitive to the water subcooling.

MELT-II experiments (PNC) [54]	
Purposes	- To study phenomenology of molten fuel jet-coolant interactions.
Conditions	Melt: Wood's metal (melt point 78.8°C) 90-610°C, ϕ 6-14mm, Velocity ~2m/s Coolant: Water 8-97°C
Results	- Four types of FCI modes were observed depending on the initial jet and coolant temperatures. - Boundaries of each mode were agreed with 1) homogeneous nucleation temperature criterion, 2) critical temperature criterion, 3) minimum film boiling temperature criterion. - Extrapolation of the results suggests that benign FCIs are most likely in the actual reactor accident condition.

表1 つづき

iii) 一次元体系での中規模蒸気爆発実験

KROTOS facility (JRC Ispra) [55, 56]	
Purposes	- Premixing, energetics of triggered / untriggered vapor explosions in 1-D geometry.
Conditions	Melt: Tin 7.5kg, 1350K Alumina 1.5kg, 2400K, ϕ 30mm jet Coolant: Water 293-360K 0.1MPa, Depth 1.1m, ϕ 95mm (7.5l) Trigger: Gas injection at the bottom
Results	Tin: - Stable propagation of a pressure wave with sharp leading edge, propagation velocity 150-270m/s. (Water temperature 360K) Alumina: - No explosion occurred without trigger when the water was nearly saturated. - High pressure (>100MPa) spontaneous explosions occurred with high subcooling. - Propagation velocity : 650-1000m/s. - Energy conversion ratio related to the debris mass involved in the explosion (<250mm) was 0.8-1.3%. (from the gas compression)
WFCI facility (Wisconsin Univ.) [57, 58]	
Purposes	- Precise data for the escalation/propagation phase - Effect of particular initial conditions on the energetics
Conditions	Melt: Tin 5kg, 1273-1373K, gravitational drop through ϕ 38mm orifice Coolant: Water 360K 0.1MPa, Depth 1.45m, ϕ 87mm (8.7l) Trigger: Bottom impact (electro-magnetic hammer) (~4MPa for 170 μ s) # Explosion in a constrained space # Energy conversion was measured from the movement of the constraint mass
Results	Series A (similar condition to KROTOS-21): - Reproducibility was confirmed for the same initial conditions. - Double propagations: bottom-to-top and then top-to-bottom, peak 2-8MPa, velocity ~250m/s Series B (spontaneous explosions): - Escalating propagations similar to series A were observed. - Duration time until the spontaneous trigger were 600-1200msec. Series C (Effect of trigger strength): - Single propagations were observed with high trigger pulse (electric charge was doubled). * Conversion ratio was less than 1%. * Melt mass involved in the explosion was estimated less than 2%.

表1つづき

1-D Vapor Explosion Experiment in Tokyo Tech. (Tokyo Tech) [59]	
Purposes	<ul style="list-style-type: none"> - Criteria for explosive interactions - Characteristics of the pressure wave propagation in the premixing region - Effect of melt temperature and mass on the peak pressure
Conditions	Melt: Wood's metal (melt point 70°C) 330-550°C, 725-95g, inlet velocity 1.4m/s Coolant: Water ~30°C 0.1MPa, Depth 1.2m, φ60mm Trigger: Under water arc discharge (at the bottom)
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Likelihood of explosive interactions jumped when 1) the contact temperature exceeded the homogeneous nucleation point of water, 2) trigger pulse exceeded 0.9MPa. - Two types of pressure wave characters were observed: detonation type (trigger > 2MPa) and mild type (trigger < 2MPa). - Output pressure pulse became higher when trigger pulse became higher. - Energy conversion ratio (evaluated by the impulse) was higher in the mild-pressure-wave-type than in the detonation-type.

IV) 層状体系の実験

EXO-FITS ACM series (SNL) [38]	
Purposes	- Scoping tests to evaluate the potential of explosions in the alternate contact mode.
Conditions	Melt: Thermite, 10 or 18.5kg Coolant: Water, 298K, 0.3 l/s - Water was poured quiescently over the melt surface.
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Energetic explosion occurred when water was poured 1sec after the completion of thermite reaction. (1st case) - Only a vigorous boiling occurred when water was poured 4.5 sec after the reaction completed. (2nd case)

CWTI-2 test (ANL) [44]	
Purposes	- Corium-water interactions in a simulated reactor cavity and containment vessel geometry. (1/30 scale)
Conditions	Melt: Corium (thermite reaction) 2800°C, 4kg $(4.67\text{U} + 2.83\text{Zr} + 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CrO}_3 + \text{Ni} \rightarrow 4.67\text{UO}_2 + 2.83\text{ZrO}_2 + 6\text{Fe} + 2\text{Cr} + \text{Ni} + 2.2\text{kJ/g})$ Coolant: Saturated water 2.8kg Cover gas: N ₂ 0.1MPa
Results	<ul style="list-style-type: none"> - Minimal sweep out of the melt-water mixture (<1%). - Fragmentation of the melt was not observed.

表1つづき

ALPHA ACM series (JAERI) [48]	
Purposes	- To assess debris coolability.
Conditions	Melt: Thermite, ~2700K, 2.5-30kg Coolant: Water, ~300K, Pipe or Spray nozzle Vessel: ϕ 0.1-0.355m (melt depth 8cm)
Results	- A delayed explosive interaction following a vigorous melt eruption was observed in the case of water supply from a pipe nozzle. - Adding water with a spray nozzle was effective to rapidly cool the melt surface.

v) 粗混合実験

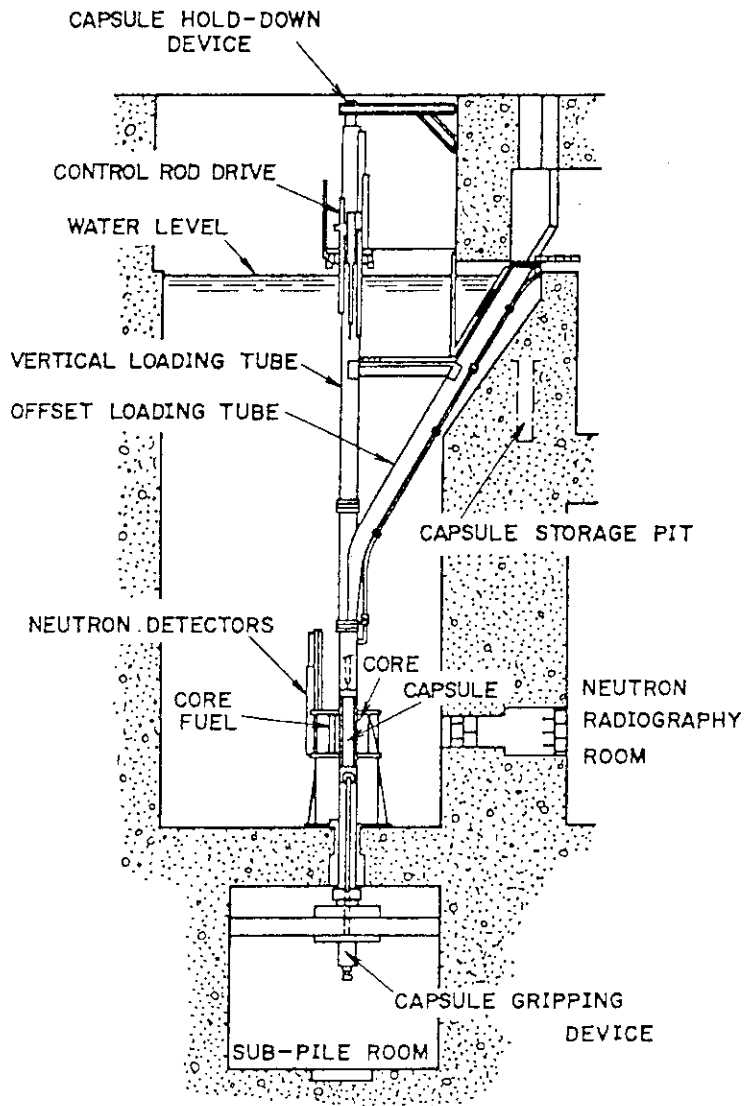
MAGICO (UC Santa Barbara) [60]	
Purposes	- To study short multi-phase transients (<1sec) in the premixing. - Code validation. (PM-ALPHA)
Conditions	Hot material: mm-size steel ball, 600-1000°C, Tens-of-kilograms, Pour dia. ~20cm Coolant: Saturated water, 0.1MPa Instrumentation: Mixing-front advancement, Transient void fraction; (local [FLUTE] & mixing zone averaged)
Results	- The water depletion phenomenon was observed.

MIXA facility (AEA Winfrith) [61]	
Purposes	- To study the mixing of UO ₂ and water. - Code validation (CHYMES).
Conditions	Melt: U-Thermite, 3600K, 3kg Coolant: Saturated water 0.1MPa, 0.37 by 0.37m, Depth 0.6m Instrumentation: High speed photography with back light and filter. (Selected reduction of the light emitted by the melt enables revelation of the detail.) Steam generation rate. - Melt dispersion control by carbon-bar-array and steel skirt.
Results	- No explosions. - Fluidization of fuel drops in high voided 'steam chimney' was observed

表1 つづき

BILLEAU program (CEA Grenoble) (Ongoing; 1992-1994) [62]	
Purposes	- Transient vapor and solid fractions in the mixing region. - Code validation. (TRIO MC)
Conditions	Hot spheres (~2200°C) into a water filled tank. Axisymmetric & plane jets
Results	
Premixing studies in KfK (KfK) (Plan) [63]	
Purposes	- Premixing study with hot spheres and thermite melt.
Conditions	<p>QUEOS</p> <p>Hot sphere: 293-2600K, 0-50kg, 5.5 or 10g/cm³, Velocity 3-6m/s</p> <p>Coolant: Water 283-372K, 0.1MPa, Depth 0.5-1m</p> <p>PREMIX</p> <p>Melt: Thermite, 2600-3000K, 10-50kg, Velocity 4-7m/s</p> <p>Coolant: Water 372-442K, 0.1-0.8MPa, Depth 0.5-1.9m</p>
Results	

(a)



(b)

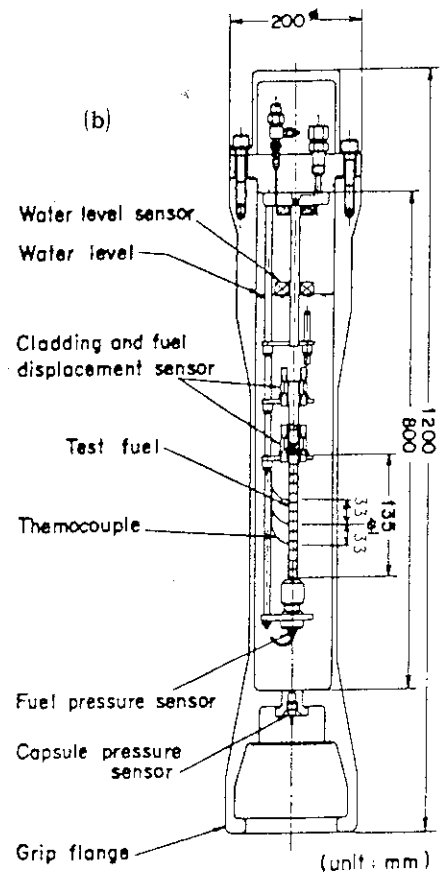


図2 (a) NSRRの概要, (b)試験カプセルとその内部構造 [13]

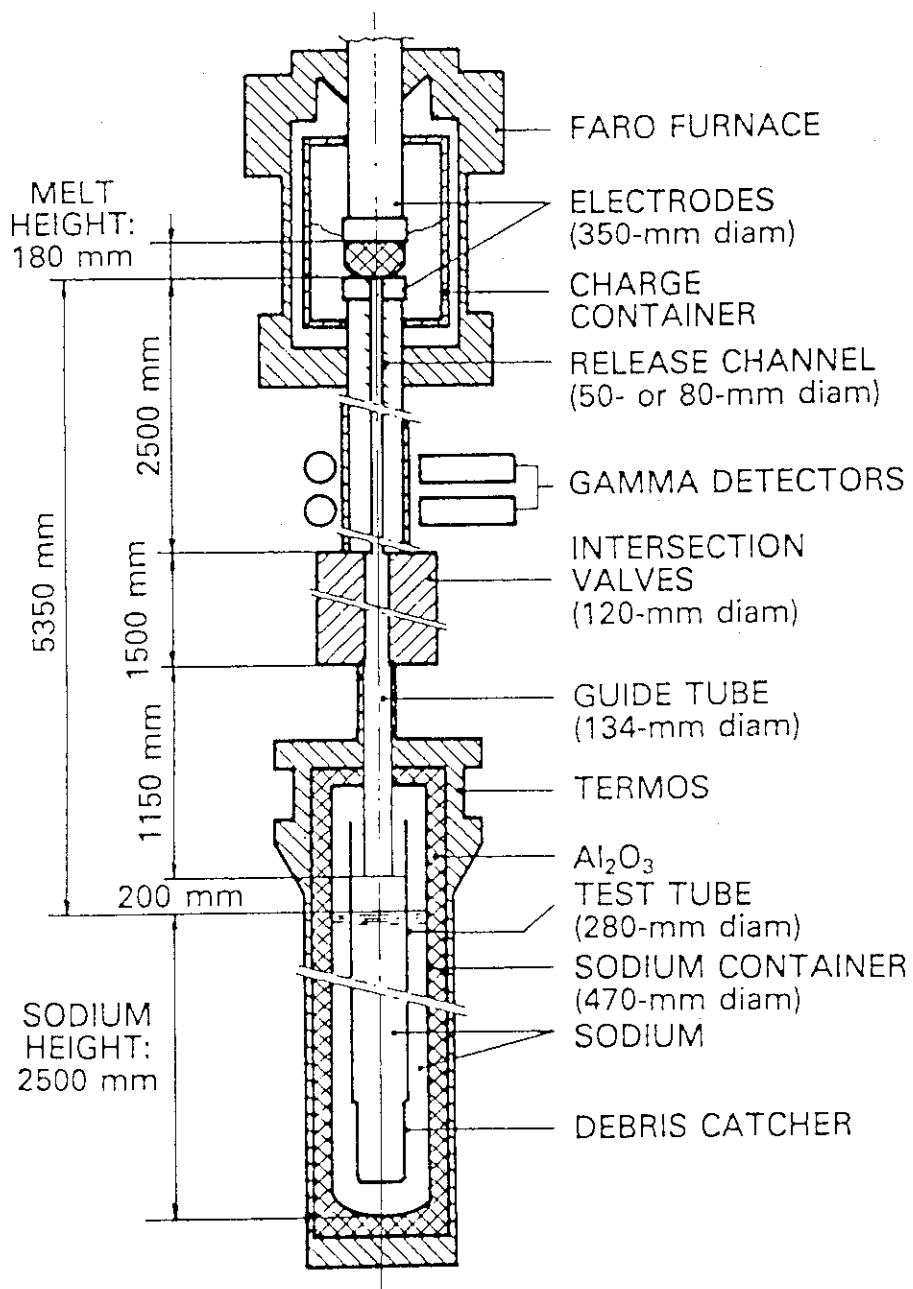


図3 FARO実験装置の概要[31]

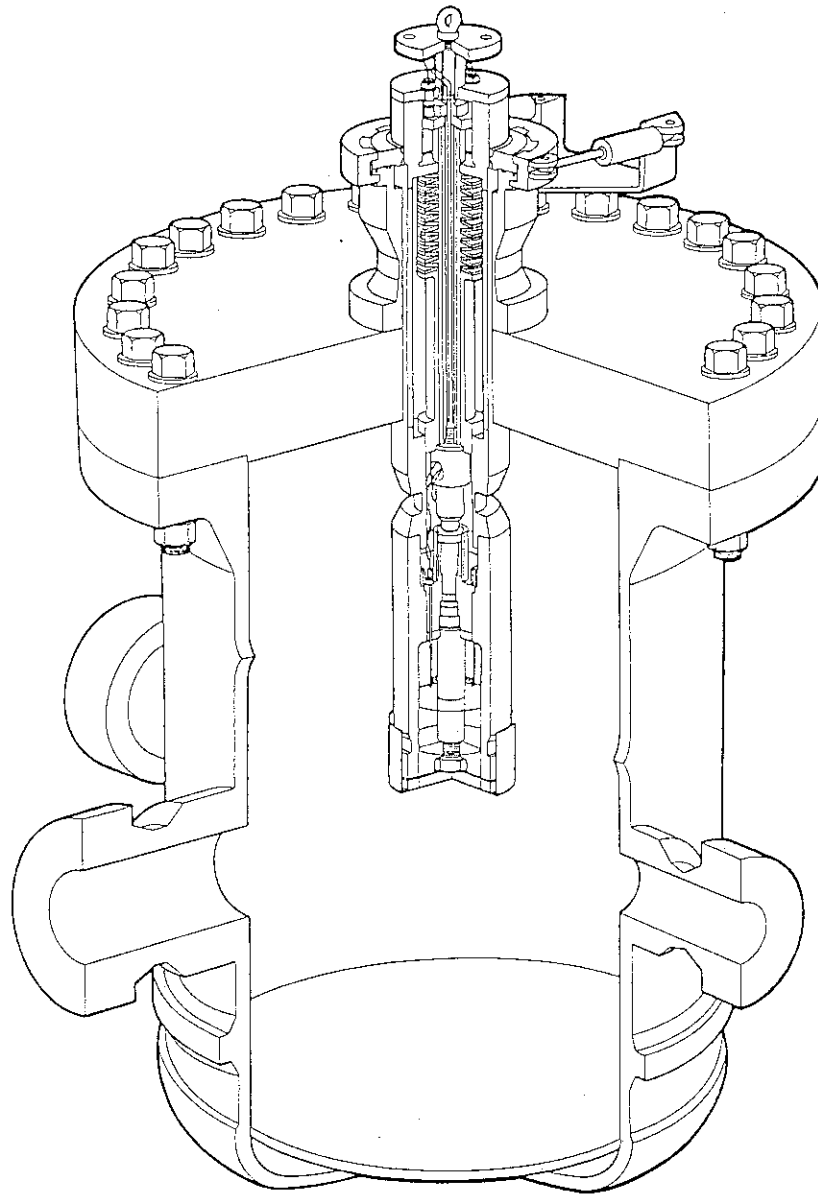


図4 MFTF 実験装置の概要〔37〕

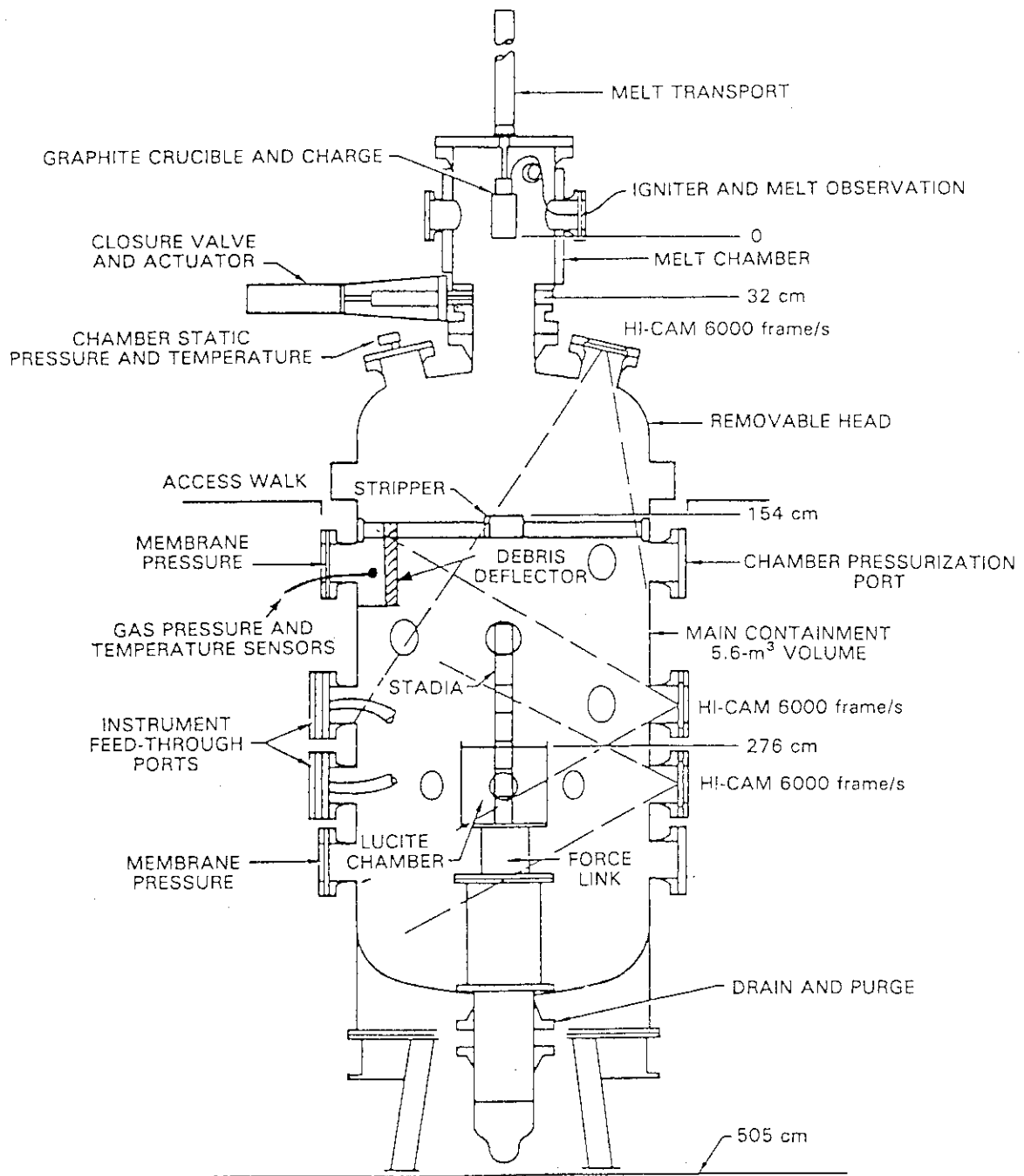


図5 FITS 実験装置の概要 [43]

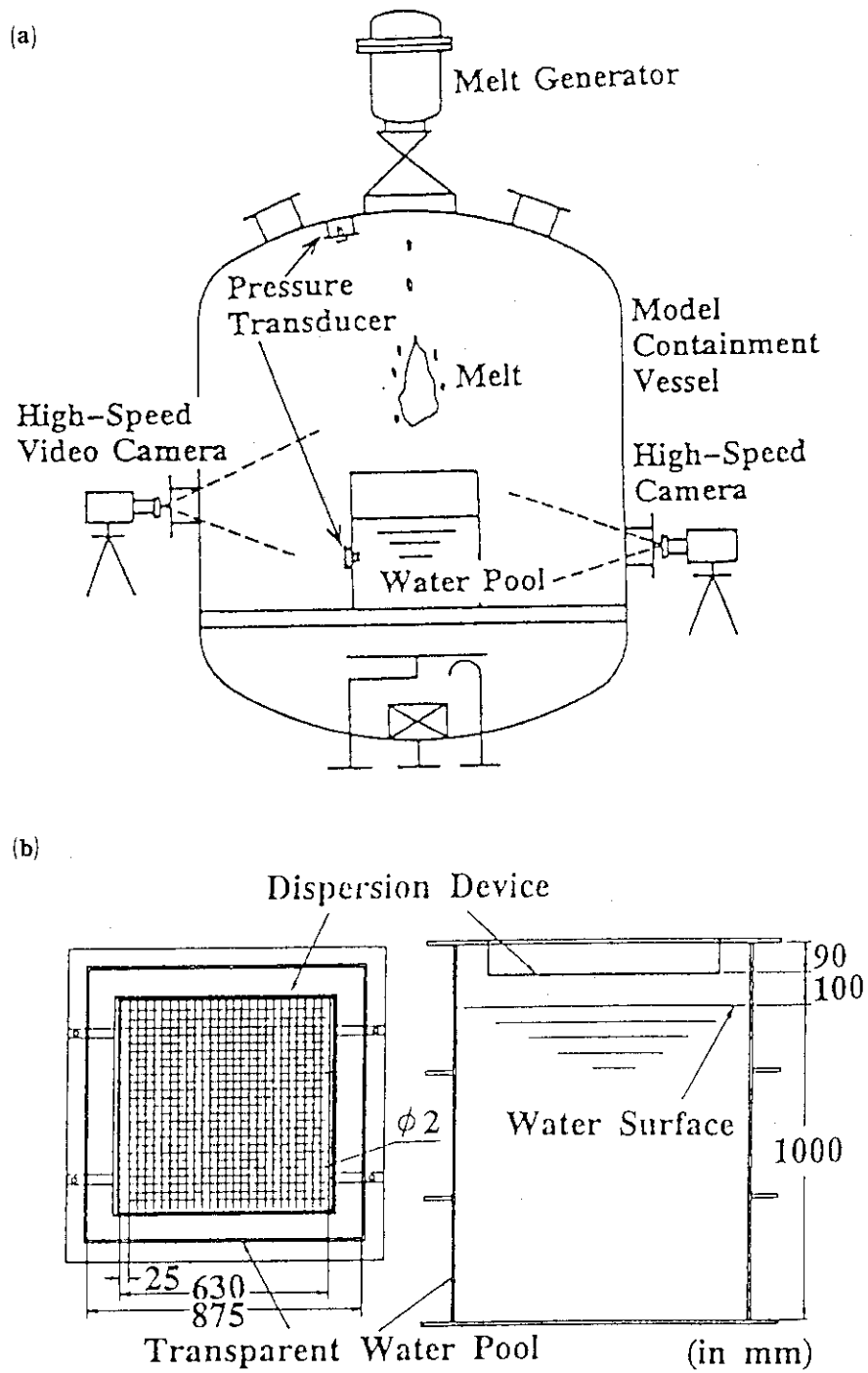


図6 (a) ALPHA水蒸気爆発実験の概要, (b)溶融物分散板 (dispersion device) [48]

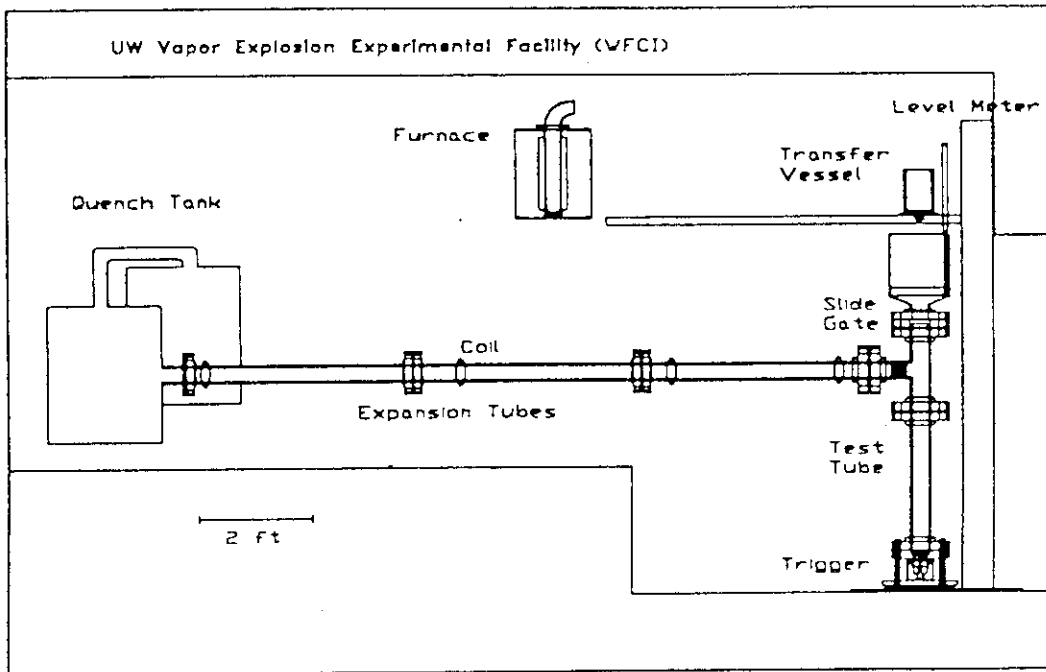


図7 (a)WFCI 施設の概要[58]

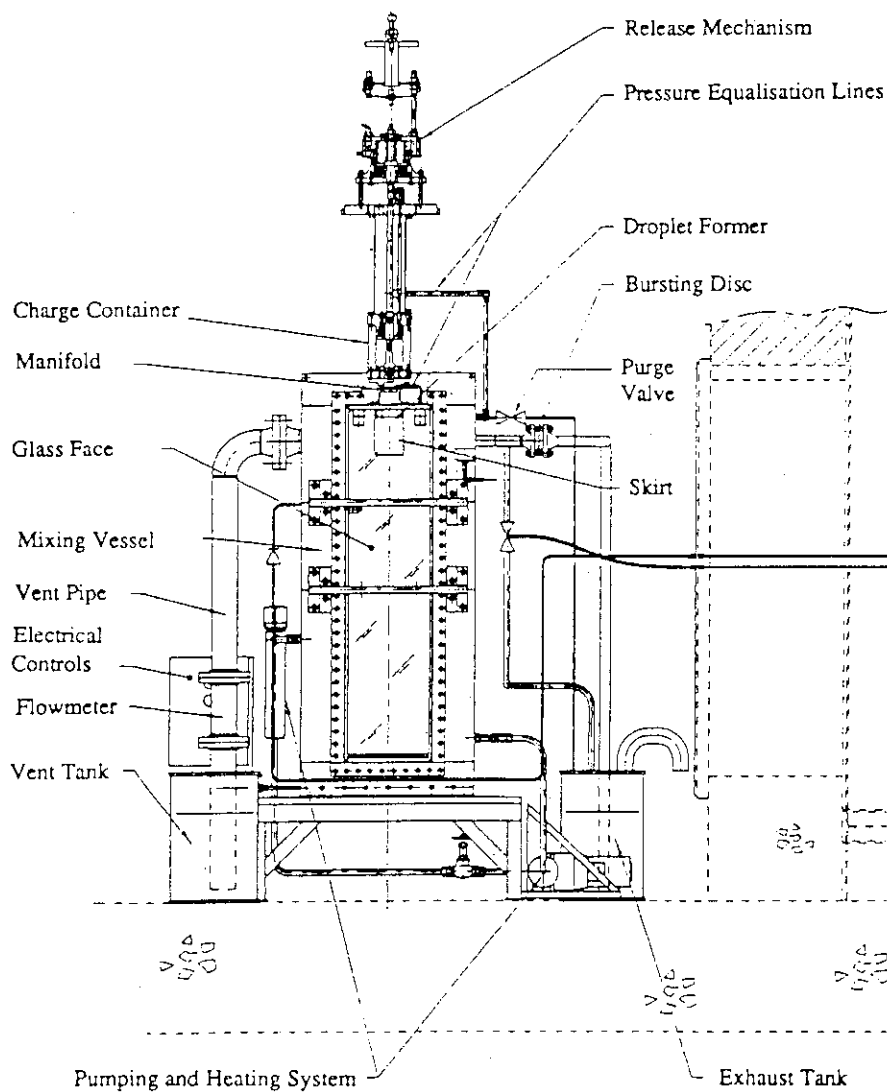


図8 MIXA実験装置の概要〔61〕

3. 小規模実験

大規模な実験により蒸気爆発現象の概要が明らかにされ、パラメトリックモデルなどによるエネルギー変換率の評価やメカニスティックなモデルの提案が行われるにしたがって、蒸気爆発の一連の現象を個々の素過程に分離してさらに詳細に観察し、提案されたモデルに対して実験的な検証を行おうとする努力が行われてきた。蒸気爆発現象の各段階の中でも特に難解なのは急速な細粒化と現象の空間的伝播の段階である。ここには非常に高速かつマイクロスケールな現象が含まれているため、大規模な体系では詳細な観察が難しい。そこで1980年頃から、高温の溶融物の単一液滴を水中に落として蒸気爆発を起こさせる実験が盛んに行われるようになった。蒸気爆発の小規模実験は大規模実験と較べるとはるかに低いコストで、比較的簡単な装置で実施できることもあり、数多く行われている。これらは多くのレビュー論文[2~6]の中でも理論的研究との関連も含めて詳しく紹介されているので、ここではごく簡単に、主なものと最近の小規模実験の動向を概観することにする。

小規模実験も実験体系によっていくつかのタイプに分類できる。最も単純な単一液滴の体系でトリガリングや細粒化の過程を調べる単一滴実験[64~80]、数個の液滴を水中に分布させ、各液滴の間での現象の伝播を調べる複数滴実験[81~83]、高温と低温の液体が蒸気膜を隔てて成層化した状態で、境界面での相互作用のトリガリング、伝播などを調べる層状体系の実験[9, 84~87]などが行われている。

なお、以下に紹介する各実験についてまとめたものを表2に示す。

3.1 単一滴実験

おそらく最初に発表された単一滴実験はSNLのNelsonとDuda [64]のものであろう。彼らは酸化鉄の液滴を水中に落下させ、ブリッジワイヤーによる圧力波で外部トリガーを与えて蒸気爆発を発生させ、溶融物の周りに形成される膜沸騰蒸気膜への空気の混入の影響、蒸気爆発を起こすために必要な外部トリガーの強さなどを調べた。この実験で評価されたエネルギー変換率は2~3%である。彼らのグループの最近の実験では、アルミニウム液滴を用いるとき、液滴の初期温度1773Kで化学反応による非常に強い相互作用が見られることが明らかにされ[65]、また、トリガーの衝撃波を円筒面や楕円面の反射体で集中させる場合の蒸気爆発の規模について調べられている[66]。

国内では、飯田・高島ら[68,69]が冷却材としてエタノール、溶融物として硝酸リチウムやスズを用いた実験を行い、蒸気爆発による気泡の大きさの変化と圧力変化の関係、トリガー時の現象の可視化などを報告している。庄司ら[70,71]、Matsumuraら[72]はスズ-水系の自発的な蒸気爆発の実験を行った。庄司らは遷移沸騰域で自発的トリガーが生じると結論し、Matsumuraらは自発的トリガー発生領域の冷却材温度の上限を蒸気膜の安定性解析によって与えた。

Akiyoshiら[73,74]は蒸気膜に非凝縮性ガスが混入すると細粒化が不均質になることを明らかにし、また、アモルファス金属微粒子の製法としての応用に着目した研究を行った。

Ciccarelliら[75]は溶融物の温度と冷却材との相対速度を変えて細粒化における熱的相互

作用と流体力学的相互作用の程度を調べる実験で、フラッシュX線写真を用いて蒸気爆発時の気泡の内部構造を可視化し、トリガー時に溶融物液滴がフィラメント状の様相を呈することを示した(図9)。Yuenら[76]も同様の可視化手法を用いた実験をおこなった。

一方、冷却材への添加物が蒸気爆発に与える影響について、単一滴実験で調べられている。セルロースやグリセリン、ポリエチレンオキサイドなどを加えて粘性係数を増加させる場合についてKimら[77]、Nelsonら[39]、Ipら[78]の研究があり、粘性係数が大きくなると自発的蒸気爆発が抑制されることが示された。しかし、Ipらの実験では水に比べて粘性係数がわずかに大きい場合にはかえって大きな圧力の発生が観測されている。界面活性剤による表面張力変化の影響についてはBeckerら[79]、Kowalら[80]の研究があり、10wppm以下の添加で蒸気爆発が緩和・抑制されることが示されている。

3.2 複数滴実験

飯田ら[81]は複数滴の硝酸リチウムのエタノール中での蒸気爆発を観察し、単一滴の蒸気爆発における一連の現象が各滴において同時に並行して起こること、つまり、一つの滴における現象の要する時間に比べて短い時間で液滴間の伝播が起こることを見出した。その際、現象の伝播速度は200m/sであった。Froehlich [82]はスズ-水系で2次元的な液滴カーテンの体系で実験を行い、数m/sの伝播速度を観測した。また、伝播速度は液滴径が大きく、間隔が短いほど大きかった。さらに液滴群の間に銅板を置いても伝播が妨げられないことを明らかにした。Frostら[83]は20個の液滴列を用いた実験で圧力波の伝播速度を測定し、狭く拘束されたテスト部では約50m/s、拘束のない場合には7m/sの伝播速度を観測した。

3.3 層状体系の実験

Boardら[9]による初期の実験は深さ7mmの溶融スズの層の上に水を満たした層状体系であった。この系で相互作用の伝播速度は約50m/sであった。Andersonら[84]は水とフレオンR-22を用い、この二液体の間の垂直な仕切を瞬時に取り除く手法で垂直な液液接触面を作り出し、この界面における相互作用の伝播速度を観測し、90~150m/sという結果を得た。また伝播する圧力波のかなり詳細な波形を記録し、相互作用領域の厚さなどについて述べている。

最近の研究にはBangら[85]、Saisonら[86]、Frostら[87]のものがあり、相互作用の伝播の必要条件、伝播速度、系の拘束条件の影響、相互作用における混合深さなどについて調べられている。

表 2 小規模実験の概要

i) 単一滴実験(トリガリング, 細粒化)

Author(s)	Condition(s)	Result(s)
Nelson, L.S. & Duda, P.M.(1982) [64]	Iron oxide (0.05g, 2200K) / Water (298K) Trigger: Bridge wire	Air entrainment in the vapor film suppressed spontaneous/triggered explosions. Threshold of the trigger: 0.2-0.4MPa. Energy conversion ratio 2-3%.
Nelson, L.S., Duda, P.M. & Hyndman, D.A. (1991) [65]	Al (5-10g, 1273-1773K) / Water (298K) Trigger: Bridge wire	Rapid metal-water reaction accompanying a steam explosion was observed (extremely violent explosion at melt temperature 1773K, with brilliant flash of light).
Nelson, L.S., et al. (1991) [66]	Al, Al alloy (6.5g, ~1000K) / Water Trigger: Gold bridge wire; naked, cylindrical or ellipsoidal reflector.	Strong trigger brought with vigor interactions, but trigger with the ellipsoidal reflector made only mild interactions despite the strength.
Zimmer, H.J., Peppler, W. & Jacobs, H. (1989) [67]	Alumina (~3100K) / Na (~1143K) Inert gas atmosphere Trigger: Hammer	Prompt self interaction→No explosion. Dwelled self interaction→Explosion. Triggered delayed/prompt interaction→Explosion.
飯田ら (1986) [68]	LiNO ₃ (600-800K, 0.16g) / Ethanol Tin (550-900K) / Ethanol aq. Trigger: Steel pin	Relation between the pressure oscillation and the bubble dimension was clarified.
高島・飯田 (1994) [69]	LiNO ₃ (760K,0.16g)/Ethanol(300K) Trigger: Hammer	Collapse of the vapor film was initiated by an instability appeared just after the arrival of an external pulse. Time order of a bubble collapse was 1-1.5ms. Coolant jet penetration into hot liquid was not observed.
Shoji, M. & Takagi, N. (1983) [70]	Tin (300-800°C, 2-20g) / Water (0-95°C) Pressure 0.01-0.32MPa	Effects of initial temperatures, pressure and droplet mass were clarified. Spontaneous explosions occurred in the transition boiling region.
庄司ら (1986) [71]	Tin / Water (Thermally stratified)	Explosions were much more likely to occur than the uniform temperature case.
Matsumura, K. & Nariai, H. (1994) [72]	Tin (350-800°C, 3-5.5g) / Water(10-70°C) Drop height 0-90cm	Upper end of the coolant temperature in TIZ agreed with the theory based on a linear stability analysis of the vapor film. Lower end was given by the homogeneous temperature threshold.
Akiyoshi, R., Nishio, S & Tanasawa, I. (1990) [73]	Tin (400-800°C) / Water (20-60°C) Cover gas: Steam, Air	Non-condensable gas in the vapor film suppresses the occurrence of the vapor explosion and reduces the uniformity of the fragments.

表2つづき

Akiyoshi, R., Nishio, S. & Tanasawa, I. (1993) [74]	Tin,Pd-Si alloy (1000°C) / Water (40-80°C) Cover gas: Air , Steam Trigger: Exploding wire # Application for amorphous production.	Steam atmosphere / low water temp. → smaller particles. External pressure pulse during film boiling promoted fragmentation. The cooling rate in vapor explosions was high enough to produce amorphous phase of palladium-silicon alloy.
Ciccarelli, G. & Frost, D.L. (1992) [75]	Tin, Cerrolow / Water (flowing) Trigger: Bridge wire, Blasting cap # Flash X-ray photography	Hot liquid, flow < 5m → fragmentation by bubble effect. High flow (> 45m) → fragmentation by fast vapor flow. Fine filaments from the melt were observed.
Yuen, W.W., Chen, X. & Theofanous, T.G. (1992) [76]	Tin (360-1000°C, 1g) / Water (85°C) Trigger: 66 or 200bar shock # Flash X-ray photography	Thermal effect on hydrodynamic fragmentation and micromixing mechanisms were observed.
Kim, H., Krueger, J. & Corradini, M.L. (1989) [77]	Iron oxide (0.1g, 2200K) / Water (4kg, 288K)+Cellulose (<0.5 w%) Trigger: Bottom impact # Effect of coolant viscosity	Increase of coolant viscosity with constant external trigger resulted in explosion suppression (relative viscosity 40- 240). Energy conversion ratio 0-6%.
Nelson, L. & Guay, K.P. (1986) [39]	Tin / Water+Glycerol, Cellulose Trigger: Non # Effect of coolant viscosity	The depth of spontaneous explosions increased as the viscosity increased, and at $\eta_r = 15$, droplets fell to the bottom without explosions.
Ip, B.M., Dowling, M.F. & Abdel- Khalik, S.I. (1992) [78]	Tin (1000°C, 12g) / Water+Polymer (polyethylene oxide etc., relative viscosity $\eta_r = 1.02-2.0$) # Effect of coolant viscosity	In the most dilute solution ($\eta_r = 1.02-1.13$), larger peak pressures than in pure water were observed. When $\eta_r = 1.25-2.0$, spontaneous explosions were entirely suppressed.
Becker, K.M. & Lindland, K.P. (1991) [79]	Tin (12g, 650K) / Water + Ethoxilated-nonyl-phenol # Effect of surfactants	Spontaneous/triggered explosions were generally mitigated or completely suppressed at 1-10wppm.
Kowal, M.G., Dowling, M.F. & Abdel-Khalik, S.I. (1993) [80]	Tin (12g, 800°C) / Water + surfactants (ionic, non-ionic) # Effect of surfactants	65% reduction in peak pressures, and 19% reduction in metal mass fractions that participated in the interactions. Very little change when the concentration was higher than 5wppm.

表 2 つづき

ii) 複数滴実験(相互作用の伝播)

Author(s)	Condition(s)	Result(s)
飯田ら (1987) [81]	LiNO ₃ multiple drops / Ethanol	Coherent behavior among all the drops. Propagation velocity 200m/s.
Froehlich, G. (1989) [82]	Droplet curtain (multi-jet) of molten tin (650°C) / Water (70°C)	Propagation velocity: 2-4m/s. Propagation velocity / probability increased with drop size increase / interval decrease. Propagation was not prevented by copper plates.
Frost, D.L. & Ciccarelli, G. (1993) [83]	Horizontal array of twenty 5g tin drops (800°C) / Water (60°C) # Effect of confinement	Confined space between glass plates 1.25cm apart →propagation velocity 50-60m/s Unconfined space (width 20cm) →propagation velocity 7m/s

iii) 層状体系の実験(トリガリング, 細粒化, 相互作用の伝播)

Author(s)	Condition(s)	Result(s)
Board, S.J. & Hall, R.W. (1974) [9]	Tin (depth ~7mm) / Water Narrow open topped tank Trigger: Tapping the base	Propagation velocity ~50m/s.
Anderson, R., Armstrong, D., Cho, D. & Kras, A. [84]	Water / Freon-22, initially separated by two diaphragms. Vertical transparent confined pressure vessel.	Peak pressure 0.6MPa. Propagation velocity 90-150m/s. Detailed shape of the pressure measurements indicated a short reaction zone just behind the shock front.
Bang, K.H. & Corradini, M.L. (1991) [85]	Water / Liquid N ₂ , Freon-12 Vessel: 0.2 by 0.5m Trigger: Mechanical impact	Water/Freon pair produced more energetic interactions. Propagation velocities were super sonic (40-250m/s). Mixing depth <1cm.
Saison, J., Gabillard, M. & Williams, T. (1993) [86]	Water / Liquid N ₂ Vessel: 2.5m by 0.3m, 0.6m deep Trigger: Detonator	Stable interface→No propagation(explosion only at the triggered region) Wavy interface→Propagation
Frost, D.L., Bruckert, B. & Ciccarelli, G. (1993) [87]	Tin / Water 1) Top-open narrow horizontal channel (13 by 400mm) 2) Vertical confinement (15 by 457 mm, 139mm height) 3) Cylindrical tank (273mm dia.) Trigger: Exploding wire	Self-sustained propagation 40-50m/s. Mixing zone thickness <2mm. Energy conversion ratio 1%. Inertial constraint caused second more energetic explosion.

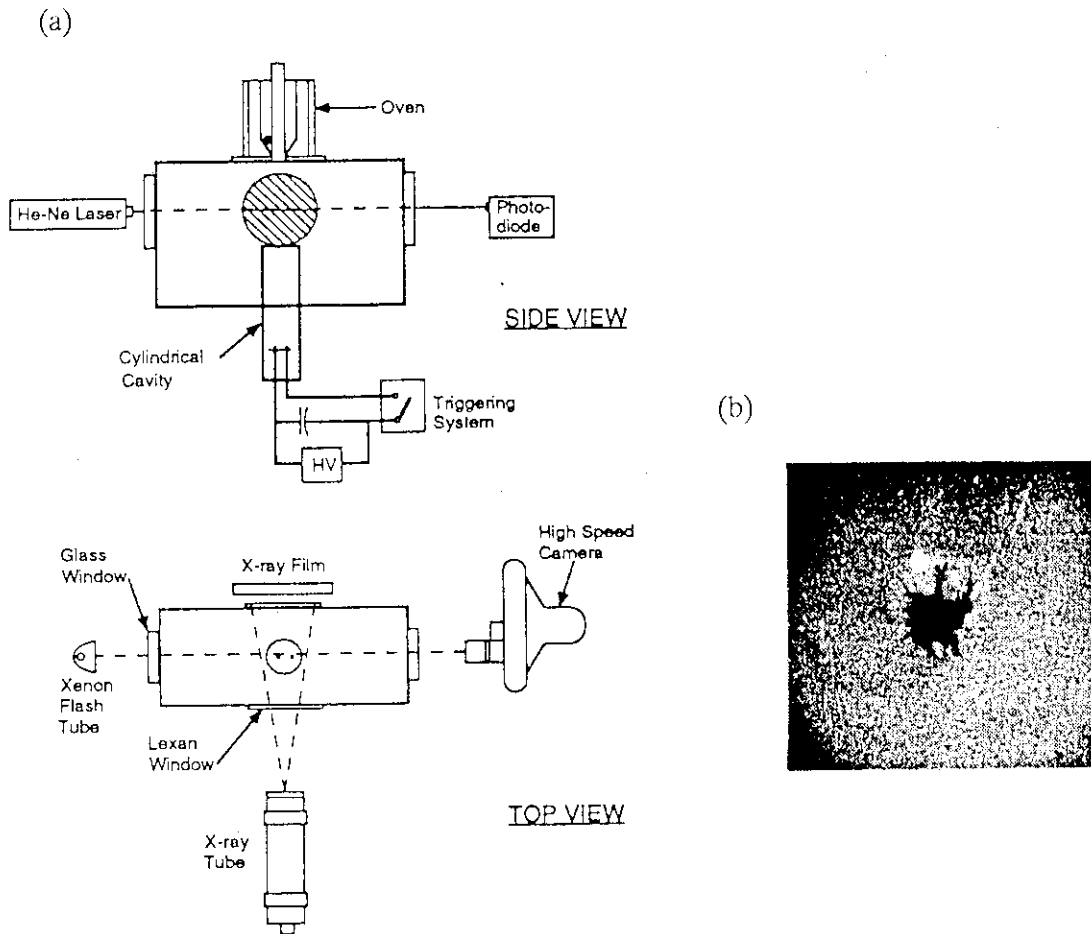


図9 (a) Ciccarelliらの装置, (b) X線フラッシュ法によって撮影された
 フィラメント状の溶融物液滴 (液滴の初期温度 700 °C, 気泡の
 崩壊を基準にした無次元時刻 0.63 における映像) [75]

4. まとめ

以上に概観したこれまでの蒸気爆発の大規模実験、および小規模実験から得られている主な知見を以下にまとめる。

1) 軽水炉の条件（冷却剤が水）の場合

a) 自発的蒸気爆発の抑制について

- ・ 次のような環境では自発的蒸気爆発が抑制あるいは緩和される傾向がある。

- 1) 水温が飽和温度に近いとき
- 2) 1MPa以上の高圧のとき
- 3) 冷却剤の粘性係数を添加物によって数%以上増加させたとき
- 4) 冷却剤に界面活性剤を数wppm以上添加したとき

ただし、3), 4) については実験データが少数であり、さらに多くの検証データが必要であろう。

- ・ 自発的蒸気爆発が起こりにくい条件でも、圧力波などの外部トリガーが加えられると蒸気爆発が起きることがある。

b) 蒸気爆発による機械的エネルギーの発生について

- ・ 溶融物が初期状態で保有する総熱エネルギーを基準にしたエネルギー変換率は0.1から数%のオーダーであり、これはデブリの細粒化の程度と密接な相関をもつ。
- ・ 層状の体系では、溶融物液塊やジェットの体系と比較して蒸気爆発は起きにくく、起きても規模は小さい。

c) スケール効果について

- ・ 自発的蒸気爆発が発生するために必要な溶融物の総量、あるいは最適な溶融物-冷却材の量比が存在することを示唆する実験結果がある。これについて、定性的には自発的トリガーの頻度など確率論的な原因、慣性による拘束の最適条件の存在など機構論的な原因が考えられるが、物理的な解釈、説明は十分といえない。
- ・ ある程度以下の寸法に(例えば250 μm)細粒化された溶融物のみが蒸気爆発に関与したと考えると、その部分が保有していた熱エネルギーを基準にしてエネルギー変換率を評価すると溶融物の総量にかかわらずほぼ一定の値が得られる。

2) 高速炉の条件（ナトリウム冷却剤）の場合

- ・ ナトリウムの高い冷却特性と狭い流路間隙のため、大規模な溶融燃料-冷却剤混合が起こりにくく、概して穏やかな相互作用が起こる。

エネルギー変換率に対するスケール効果は実験による知見と実炉の事故条件の間を外挿するために非常に重要である。実験結果は、エネルギー変換率が蒸気爆発に関与する溶融物の割合に大きく依存し、したがって初期粗混合状態に大きく依存することを示している。現在のところ、初期粗混合過程も含めた蒸気爆発の数値解析モデルの開発によって、受容できるスケールリング手法（あるいは外挿の手段）を間接的に実現しようという方針で研究

が進められている。すなわち、初期粗混合および蒸気爆発過程のできる限り物理的なモデルに基づいたシミュレーションコードの開発、このような数値計算コードの検証に適したデータを提供するために初期・境界条件と計装に注意した総合実験が、各機関で進められている。

トリガリング以後の現象については未だに明らかでない部分が多く、小規模実験による物理的な解明、モデルへの新しい知見の反映が望まれる。

参考文献

- [1] 飯田・高島 (1988), 蒸気爆発とその機構に関する実験, ながれ 7, pp.203-211.
- [2] Cronenberg, A.G. and Benz, R. (1978), Vapor Explosion Phenomena with Respect to Nuclear Reactor Safety Assessment, NUREG/CR-0245, TREE-1242.
- [3] Corradini, M.L. et al. (1988), Vapor Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modelling, Progress in Nuclear Energy, 22, pp.1-117.
- [4] Corradini, M.L. (1991), Vapor Explosions: A Review of Experiments for Accident Analysis, Nuclear Safety, 32, pp.337-362.
- [5] Fletcher, D.F. and Anderson, R.P. (1990), A Review of Pressure-induced Propagation Models of the Vapor Explosion Process, Progress in Nuclear Energy, 23, pp.137-179.
- [6] Corradini, M.L. et al. (1990), Fuel-Coolant Interactions and Vapor Explosions; Recent Results and Related Issues, NUREG/CP-0105, Vol.2, pp.223-249.
- [7] Long, G. (1957), Explosions of Molten Metals in Water - Causes and Prevention, Metals Progress, 71, pp.107-112.
- [8] Fauske, H.K. (1973), On the Mechanism of Uranium Dioxide-Sodium Explosive Interactions, Nuclear Science and Engineering, 51, pp.95-101.
- [9] Board, S.J. and Hall, R.W. (1974), Propagation of Thermal Explosion. 1-Tin/Water Experiments, RD/B/N 2350, Great Britain Central Electricity Generating Board.
- [10] Board, S.J. et al. (1975), Detonation of Fuel-Coolant Explosions, Nature 254, pp.319-321.
- [11] MacDonald, P.E. et al. (1980), Assessment of Light-Water-Reactor Fuel Damage During a Reactivity-Initiated Accident, Nuclear Safety, 21, pp.582-603.
- [12] Taxelius, T.G. et al. (1970), Annual Report SPERT Project, IN-1370.
- [13] Fujishiro, T. et al. (1979), A Study on Pressure Generation Caused by Actual Fuel Failure in the NSRR Experiment, 4th CSNI Specialist Meeting on FCI in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, pp.588-613.
- [14] Fuketa, T. and Fujishiro, T. (1990), An Experimental Study on Vapor Explosion under a Reactivity Initiated Accident Condition, Trans. JSME (Series B), pp.280-289.
- [15] Wright, A.E. et al. (1990), Fast Reactor Safety Testing in Treat in the 1980s, International Fast Reactor Safety Meeting Vol. II, pp.233-243.
- [16] Reil, K.O. and Young, M.F. (1979), Prompt Burst Energetics (PBE) Studies, 4th CSNI Specialist Meeting on FCI in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, pp.570-587.
- [17] Heusener, G. et al. (1990), The CABRI-Programmes - Motivations and Achievements, International Fast Reactor Safety Meeting Vol. II, pp.197-207.
- [18] Struwe, D. and Wolff, J. (1990), Interpretation of Mechanical Energy Releases Deduced from Post-Failure Sodium Expulsions Observed in CABRI-I Experiments, International Fast Reactor Safety Meeting Vol. I, pp.413-420.
- [19] Cranga, M. et al. (1990), Transient Material Behaviour in CABRI 1 Experiment - Failure Under Fully and Semi-Restrained Fuel Pin Conditions, International Fast Reactor Safety Meeting Vol. I,

pp.421-430.

- [20] Livolant, M. et al. (1990), SCARABEE: A Test Reactor and Programme to Study Fuel Melting and Propagation in Connexion with Local Faults. Objectives and Results, International Fast Reactor Safety Meeting Vol. II, pp.177-186.
- [21] Kayser, G. and Berthoud, G. (1992), Fuel Coolant Interactions in SCARABEE, International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo, Vol. IV pp.40.2-1-7.
- [22] Spencer, B.W. et al. (1979), Fuel-Sodium Thermal Interactions in the CAMEL TOP Safety Tests, 4th CSNI Specialist Meeting on FCI in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, pp.551-569.
- [23] Spencer, B.W. et al. (1979), Fuel Motion in the CAMEL TOP-Simulation LMFBR Safety Tests, Proc. of the International Meeting on Fast Reactor Safety Technology, Seattle, pp.1756-1765.
- [24] Wilson, R.J. et al. (1984), CAMEL II 37-Pin/7-Pin Intra-Pin Fuel Injection Test, Transactions of the American Nuclear Society, 46, pp.504-505.
- [25] Pepler, W. and Will, H. (1991), Material Redistribution in Failing Bundle Structures under Simulated Severe FBR Accident Conditions, Nuclear Engineering and Design, 126, pp.403-412.
- [26] Sato, K. et al. (1988), Molten Fuel-Coolant Interactions in Pin Bundle Geometries, ANS Proc. National Heat Transfer Conf., Houston, July 24-27, 1988.
- [27] Inoue, A. et al. (1992), Experimental and Analytical Study on Vapor Explosion of Melting Heated Rod During a Severe Power Transient, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.762.
- [28] Benz, R. et al. (1979), Melt/Water Interactions in Tank Geometry : Experimental and Theoretical Results, 4th CSNI Specialists Meeting on FCI in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, pp.363-386.
- [29] Schins, H. and Gurnnerson, F.S. (1986), Boiling and Fragmentation Behavior during Fuel-Sodium Interactions, Nuclear Engineering and Design, 91, pp.221-235.
- [30] Magallon, D. et al. (1990), Pouring of 100kg-scale Molten UO_2 into Sodium, International Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird, Vol. III pp.553-562.
- [31] Magallon, D. et al. (1992), Pouring of 100kg-scale Molten UO_2 into Sodium, Nuclear Technology, 98, pp.79-90.
- [32] Magallon, D. and Hohmann, H. (1993), High Pressure Corium Melt Quenching Tests in FARO, CSNI Specialists Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), I.1.
- [33] Briggs, A.J. (1976), Experimental Studies of Thermal Interactions at AEA Winfrith, CSNI Meeting on Sodium Fuel Interaction in Fast Reactors, Tokyo, pp.76-95.
- [34] Fry, C.J. and Robinson, C.H. (1979), Experimental Observations of Propagating Thermal Interactions in Metal/Water Systems, 4th CSNI Specialists Meeting on FCI in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, pp.329-362.
- [35] Bird, M.J. and Millington, R.A. (1979), Fuel-Coolant Interaction Studies with Water and Thermite Generated Molten Uranium Dioxide, 4th CSNI Specialists Meeting on FCI in Nuclear

- Reactor Safety, Bournemouth, pp.420-449.
- [36] Bird, M.J. et al. (1982), Experimental Studies of Thermal Interactions between Thermite Generated Molten Fuel and Sodium, Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon.
- [37] Briggs, A.J. (1984), Steam Explosion Studies at Winfrith, 12th Water Reactor Safety Information Meeting, pp.323-337.
- [38] Marshall, B.W. et al. (1985), Recent Intermediate-Scale Experiments on Fuel-Coolant Interactions in an Open Geometry (EXO-FITS), SAND85-1615C.
- [39] Nelson, L.S. and Guay, K.P. (1986), Suppression of Steam Explosions in Tin and Fe-Al₂O₃ Melts by Increasing the Viscosity of the Coolant, High Temp.-High Pressures, 18, 107-111.
- [40] Mitchell, D.E. and Corradini, M.L. (1981), Intermediate Scale Steam Explosion Phenomena: Experiments and Analysis, NUREG/CR-2145.
- [41] Mitchell, D.E. and Evans, N.A. (1986), Steam Explosion Experiments at Intermediate Scale: FITSB Series, NUREG/CR-3983.
- [42] Young, M.F. et al. (1988), Hydrogen Generation During Fuel/Coolant Interactions, Nuclear Science and Engineering, 98, pp.1-15.
- [43] Farawila, Y.M. and Abdel-Khalik, S.I. (1990), On the Calculation of Steam Explosion Conversion Ratios from Experimental Data, Nuclear Science and Engineering, 104, pp.288-295.
- [44] Spencer, B.W. et al. (1987), Hydrodynamics and Heat Transfer Aspects of Corium-Water Interactions, EPRI NP-5127 Project 1931-2.
- [45] Huber, F. et al. (1989), Experiments with Injection of Thermite Melt into Sodium, Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.290.
- [46] Huber, F. et al. (1990), Experiments to the Behavior of Thermite Melt Injection into a Sodium Pool, International Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird, Vol.II p.407-416.
- [47] Sugimoto, J. et al. (1992), Fuel-Coolant Interaction Experiments in ALPHA Program, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.890.
- [48] Yamano, N. et al. (1993), Studies on Fuel-Coolant Interactions during Core Melt Accident of Nuclear Power Plants, CSNI Specialists Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), III.3.
- [49] Marshall, B.W. and Berman, M. (1986), An Experimental Study of Isothermal and Boiling Liquid Jets, 14th Water Reactor Safety Information Meeting, pp.293-317.
- [50] Marshall, B.W. and Beck, D.F. (1987), The Coarse Mixing of Boiling and Isothermal Jets, SAND87-2455C.
- [51] Schneider, J.P. et al. (1992), Breakup of Metal Jets Penetrating a Volatile Liquid, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.437.
- [52] Saito, M. et al. (1988), Experimental Study on Penetration Behaviors of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen, ANS Proc. National Heat Transfer Conf., Houston, July 24-27, 1988.
- [53] Gabor, J.D. et al. (1992), Molten Aluminum Alloy Fuel Fragmentation Experiments, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.898.
- [54] Kondo, Sa. et al. (1993), Fuel-Coolant Interaction Studies at PNC Relevant to Fast Reactor

- Safety, Proceedings of the International Seminar on the Physics of Vapor Explosions, Tomakomai, p.96.
- [55] Buerger, M. et al. (1989), Analysis of Thermal Detonation Experiments by Means of a Transient Multi-Phase Detonation Code, Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.304.
- [56] Hohmann, H. et al. (1993), FCI Experiments in the Aluminumoxide/Water System, CSNI Specialist Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), II.7.
- [57] Park, H.S. et al., Vapor Explosion Escalation/Propagation Experiments and Possible Fragmentation Mechanisms, Proceedings of the International Seminar on the Physics of Vapor Explosions, Tomakomai, p.187.
- [58] Park, H.S. et al., M.L., Experiments on The Trigger Effect for 1-D Large Scale Vapor Explosions, Proc. of the International Conference on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics, Pisa, 1994, Vol.II, pp.271.
- [59] Inoue, A. et al., Experimental Study on Vapor Explosion Induced by Pressure Pulse in Coarse Mixing of Hot Molten Metal and Water, The 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Taipei, 10-D.
- [60] Angelini, S. et al. (1992), Multiphase Transients in the Premixing of Steam Explosions, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.471.
- [61] Denham, M.K. et al. (1992), Experiments on the Mixing of Molten Uranium Dioxide with Water and Initial Comparisons with CHYMES Code Calculations, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.1667.
- [62] Berthoud, G. and Valette, M. (1993), Development of a Multi dimensional Model for the Premixing Phase of a Fuel-Coolant Interaction, Proceedings of 6th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.115-125.
- [63] Jacobs, H. (1994), Private communication.
- [64] Nelson, L.S. and Duda, P.M. (1982), Steam Explosion Experiments with Single Drops of Iron Oxide with a CO₂ Laser, High Temperature-High Pressures, 14, pp.259-281.
- [65] Nelson, L.S. et al. (1991), Thermal- and Ignition- Type Steam Explosions of Single Drops of Molten Aluminum, Trans. ANS, 63, pp.378-379.
- [66] Nelson, L.S. (1993), Steam Explosions of Single Drops of Pure and Alloyed Molten Aluminum, CSNI Specialist Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), III.2.
- [67] Zimmer, H.J. et al. (1989), Thermal Fragmentation of Molten Alumina in Sodium, Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.268.
- [68] 飯田・ほか2名 (1986), 高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究 (第1報), 日本機械学会論文集 B編, 52, pp.1777.
- [69] 高島・飯田 (1994), 外部圧力波によって生ずる単一液滴の蒸気爆発の蒸気膜崩壊過程, 第31回日本伝熱シンポジウム, 札幌, A341.
- [70] Shoji, M. and Takagi, N. (1983), An Experimental Study of Small-Scale Vapor Explosions for Molten Tin Dropped into Water, Bulletin of JSME, 26, pp.791-796.

- [71] 庄司・ほか3名 (1986), 急激な温度勾配をつけた水中で生じる小規模蒸気爆発に関する実験的研究, 日本機化学会論文集 B編, 52, pp.2633-2639.
- [72] Matsumura, K. and Nariai, H. (1994), Thermal Interaction Zone of Vapor Explosion with Tin-Water Drop Experiment, The 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Taipei, 11-A.
- [73] Akiyoshi, R. et al. (1990), Study on the Effect of Non-condensable gas in the Vapor Film on Vapor Explosion, Int. J. Heat Mass Transfer, 33-4, pp.69-73.
- [74] Akiyoshi, R. et al. (1993), An Attempt to Produce Particles of Amorphous Metals Utilizing Vapor Explosion, Proceedings of the International Seminar on the Physics of Vapor Explosions, Tomakomai, p.70.
- [75] Ciccarelli, G. and Frost, D.L. (1992), Fragmentation Mechanisms Based on Single Drop Experiments Using Flash X-ray Photography, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.615.
- [76] Yuen, W.W. et al. (1992), On the Fundamental Microinteractions That Support the Propagation of Steam Explosions, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.627.
- [77] Kim, H. et al. (1989), Single Droplet Vapor Explosion: Effect of Coolant Viscosity, Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.261.
- [78] Ip, B.M. et al. (1992), An Experimental Investigation of the Effects of Polymeric Additives on the Likelihood and Severity of Steam Explosions, Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.907.
- [79] Becker, K.M. and Lindland, K.P. (1991), The Effects of Surfactants on Hydrodynamic Fragmentation and Steam Explosions, KTH-NEL-50, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [80] Kowal, M.G. et al. (1993), An Experimental Investigation of the Effects of Surfactants on the Severity of Vapor Explosions, Nuclear Science and Engineering, 115, pp.185-192.
- [81] 飯田・ほか2名 (1987), 高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究 (第2報), 日本機化学会論文集 B編, 53, pp.222.
- [82] Froehlich, G. (1989), Propagation of Fuel Coolant Interactions in Multi-Jet Experiments, Proc. 4th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp.282.
- [83] Frost, D.L. and Ciccarelli, G. (1993), The Role of Confinement in the Propagation of Vapor Explosions, Proceedings of the International Seminar on the Physics of Vapor Explosions, Tomakomai, p.128
- [84] Anderson, R. et al. (1988), Experimental and Analytical Study of Vapor Explosions in Stratified Geometries, CONF-880724-20.
- [85] Bang, K.H. and Corradini, M.L. (1991), Vapor Explosions in a Stratified Geometry, Nuclear Science and Engineering, 108, pp.88-108.
- [86] Saison, J. et al. (1993), Propagation of Vapor Explosions in Stratified Geometry Experiments with Liquid Nitrogen and Water, CSNI Specialists Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), II.3.

- [87] Frost, D.L. et al. (1993), Effect of Boundary Conditions on the Propagation of a Vapor Explosion in Stratified Molten Tin/Water Systems, CSNI Specialist Meeting on FCI, Santa Barbara (NUREG/CP-0127), II.4.