

# 1. 緒言

## 1.1. 蒸気爆発に関する研究の背景

蒸気爆発現象とは、高温液体と低温液体が接触したときに急速な熱移動のために低温液体が蒸発して、蒸発による圧力の増加速度が系の圧力緩和速度（音速）を上回り衝撃圧縮を生じる相互作用である。産業分野において過去に起きた蒸気爆発による事故の事例として、鑄造工場（熔融金属／水<sup>[1-3]</sup>）、製紙工場（混合熔融塩（スメルト）／水<sup>[4]</sup>）、化学工場（熔融塩／水）低温燃料輸送系（水／LNG<sup>[5,6]</sup>）などが報告されている。また、原子力プラントのシビアアクシデント時（熔融酸化ウラン／水<sup>[7-9]</sup>）においても蒸気爆発が生じる可能性が指摘されている。自然分野においては火山の噴火時（マグマ／水）などの事例が報告されている。以下に具体的な例を幾つか述べる。

蒸気爆発に起因する事故例を以下に列挙する。

### 産業プラント

No.	年	場所		高温液体	低温液体
1	1958年	茨城県	鹿島コンビナートでの事故	熔融 Mg	水
2	1988年	兵庫県	製鉄所での事故	銑鉄	水
3	1984年	富山県	アルミニウム鑄造工場	熔融 Al	水
4	1989年	大阪府	製鉄所での事故	銑鉄	水
5	1990年	山形県	廃品回収工場での事故	熔融 Al	水

### 原子力プラント

No.	年	場所		高温液体	低温液体
6	1961年	米国	軍用原子炉 SL-1 <sup>[7]</sup>	熔融 UO <sub>2</sub>	水

### 自然環境分野

No.	年	場所		高温液体	低温液体
7	1965年	比国	タール火山の噴火時	マグマ	水
8	1986年	伊豆大島	三原山の噴火時	マグマ	水
9	1989年	伊東沖	海底火山の噴火時	マグマ	水

産業プラントでの事故例として2番に示した事故では、高炉から溶けた銑鉄（鑄鉄）を流す桶の末端部から約1500℃の銑鉄数百kgが漏れ、桶を冷却するための冷却水と接触して蒸気爆発が生じた。この事故では、発生した爆発によって付近にあった機械類や通路の手すりなどが吹飛び、死傷者6名を出す大事故となった。

原子力プラントでの事故例として6番に示した事故では、原子炉を停止し保守作業を行っている時に起きた。作業員が誤って制御棒を引き抜いてしまったために急激な出力上昇が生じ、燃料が熔融して原子炉の冷却水と熱的相互作用を起こした結果、蒸気爆発が発生した。その結果、水撃力により圧力容器

に上向きの力が働いたため圧力容器上部が周囲の一次系配管を全て分断して飛び上がり、約 3m 上方のクレーンに衝突したことが事故調査の結果明らかとなった。この事故では、爆発ならびに放射線被曝により作業員 3 人が死亡した。

自然環境での災害例として 7 番に示した事故では、湖水とマグマが反応してマグマ水蒸気爆発を発生させた。そのマグマ水蒸気爆発によって発生した高温の噴煙と爆風により 150 人の死者を出し、日本の火山分野におけるマグマ水蒸気爆発に関する研究が盛んに行われる契機ともなったといわれている。

このような蒸気爆発に起因する事故、災害を防ぐためにも、蒸気爆発の発生条件ならびに蒸気爆発が発生した場合の規模などを予め知ることが極めて重要となってきた。しかしながら、蒸気爆発は極短時間で生じる現象であり、その観察ならびに測定が困難で未知の部分が多大に残されている。今後、蒸気爆発の発生メカニズムなどに関する研究を行っていくことが求められている。

## 1.2. 蒸気爆発現象の概要

現在、蒸気爆発の進展過程については未だ十分に解明されてはいないが、1970年代に提唱された蒸気爆発を記述する素過程を概略化したものを図 1.2.1 に示す。このモデルでは、蒸気爆発を大まかに4つの段階に分類している。

1	接触		高温高沸点液体（例えば熔融金属）と低温低沸点液体（例えば水）の接触
2	粗混合	粗混合	高温高沸点液体の塊が低温低沸点液体中で細くなり粗い粒子として分散
3		膜沸騰	細かく分散した高温液滴の周りを蒸気膜が覆う
4	トリガリング	蒸気膜崩壊	蒸気膜の一部が崩壊
5		液-液接触	高温液滴と低温液体の直接接触
6		液滴微粒化	高温液滴の微粒化
7		急速伝熱	伝熱面の拡大による高温液滴から低温液体への急速な伝熱
8	伝播・膨張	圧力波の発生	蒸気発生に起因する圧力波の発生
9		圧力波の伝播	周囲の高温液滴への伝播
10		大規模な爆発	圧力波によって連鎖的に蒸気膜崩壊・液滴微粒化が起こり、圧力波が増幅されて大規模な蒸気爆発に至る

このモデルでは、特に熱的エネルギーから機械的エネルギーへの変換が発生する条件として、適度な大きさに分散した高温高沸点液体と低温低沸点液体とが蒸気膜を介して分散している「粗混合」と呼ばれる状態となり、これに蒸気膜を崩壊して高温液滴と低温低沸点液体との直接接触を引き起こす「トリガリング」が働き、これがきっかけで直接接触、急速伝熱・沸騰、高温高沸点液体の微粒化が急速に進展する「伝播」、そして体系全体への「膨張」の4過程が必要であると考えられている。すなわち、高温高沸点液体の熱エネルギーが有効に機械的エネルギーへと変換されるためには、高温高沸点液体は微粒化しやすい適度な大きさの粒子となって低温低沸点液体中に粗混合していなければならない。蒸気膜を崩壊させるトリガとして、外部からの圧力波などの強制的な力が作用するもの（強制的蒸気膜崩壊）と凝縮効果などによって蒸気膜崩壊が自発的に生じるもの（自発的蒸気膜崩壊）がある。この4過程全ての発生条件がそろったときに初めて大規模爆発となる、とするものである。

第3段階のトリガリングについて詳しく見ることにする。図 1.2.2 に高温熔融液滴の粗混合から微粒化に至るまでのフローチャートを示す。以下に、各段階について説明する。

- 段階Ⅰ : 粗混合した高温熔融液滴上に膜沸騰が形成されない場合、高温熔融液滴は激しい沸騰を生じながら固化される。逆に、高温熔融液滴周りに非常に膜沸騰が形成された場合、高温熔融液滴は蒸気爆発を生じることなく固化される。蒸気爆発が生じるためには、本段階において高温熔融液滴周りに膜沸騰が形成され、その後、斉時的に崩壊する必要がある。
- 段階Ⅱ : 高温熔融液滴周りの蒸気膜が崩壊した時、高温熔融液滴と低温低沸点液体の接触界面が固化しているならば、微粒化が起こらずに冷却・固化される。蒸気爆発が生じるためには、本段階において高温熔融液滴と低温低沸点液体が液体の状態ですべて直接接触する必要がある。
- 段階Ⅲ : 液体の状態ですべて直接接触した高温熔融液滴表面が安定な場合には、莫大な伝熱を生じることがなく、膜沸騰を再形成あるいは激しい沸騰を生じ高温熔融液滴は冷却・固化される。蒸気爆発が生じるためには、本段階において液体の状態ですべて直接接触した高温熔融液滴表面が不安定を生じ、それによる高温熔融液滴の微粒化の発生が必要となる。

蒸気爆発の発生条件を明らかにするためには、これら蒸気爆発におけるトリガリングの各段階を構成する条件がすべて明らかにされる必要がある。言い換えれば、これらの条件のうち一つでも進展過程が阻害されるならば蒸気爆発は発生しないものと考えることが出来る。

現在、蒸気爆発の発生機構を記述するモデルとして、以下の2つのモデルが有力なモデルとされている。

- (1) 1973年 H. K. Fauske 自発核生成モデル<sup>[10]</sup>
- (2) 1975年 S. J. Board et al. 熱的デトネーションモデル<sup>[11,12,13]</sup>

図 1.2.3 に系の温度と蒸気泡核生成率の関係を示す。蒸気泡核生成率とは単位時間・単位体積あたりに発生する自発核の個数である。系の温度が上昇するにつれ蒸気泡核生成率は上昇するが、点線で示した均質核生成温度付近では指数的に急上昇する。この現象を蒸気爆発に適用したのが(1)の自発核生成モデルである。このモデルは、図 1.2.4 に示すように高温高沸点液体と低温低沸点液体が直接接触したときの接触界面温度  $T_i$  が均質核生成温度  $T_H$  より高い場合には、爆発的に蒸気泡が発生し、急激な膨張によってきわめて高い圧力ピークが発生し、蒸気爆発に至るとされているモデルである。

なお、高温高沸点液体が熔融金属の場合、接触界面温度が高温融体の融点  $T_M$  以上であることも考慮しなければならない。図 1.2.5 は縦軸を低温低沸点液体温度、横軸を高温高沸点液体の投入時の温度としたときのグラフを示している。この形態のグラフは、蒸気爆発の発生の有無を整理する際によく用いられるものである。蒸気爆発を実験的に調べた結果、発生しやすい温度領域が存在することがわかり、その領域は熱的相互作用領域 (Thermal interaction zone : TIZ) と呼ばれている。この TIZ 上に自発核生成モデルの条件を示したものがグラフ中の赤色の太線ならびに細線である。太線は接触界面温度が均質核生成温度と等しくなる場合の低温低沸点液体温度と高温高沸点液体の温度の関係を示したものであり、細線は接触界面温度が高温熔融金属の固化温度 (融点) と等しくなる場合の関係を示したものである。蒸気膜が崩壊して高温熔融金属と低温低沸点液体が接触する際、接触界面温度が均質核生成温度以

上となり低温低沸点液体が瞬時に沸騰すること、また接触界面温度が固化温度（融点）以上となる条件が、高温熔融金属の微粒化を引き起こしやすい条件であると考えられている。

一方、(2)に示した熱的デトネーションモデルの概要図を図 1.2.6 に示す。膜沸騰状態にある高温液滴が低温低沸点液体中に分散・粗混合した状態において、蒸気膜を崩壊させるのに十分な大きさの圧力波が到来した場合を考える。この圧力波によって高温液滴周りの蒸気膜が崩壊されると、高温液滴と低温低沸点液体の密度の相違に基づいて加速度の差が顕著となり、高温液滴が微粒化を起こす。この微粒化による伝熱面積の増加ならびに高温液滴と低温低沸点液体の直接接触によって急速な熱の移動が生じ、蒸気泡が発生する。蒸気泡の発生によって急激な膨張が生じ、それによりきわめて高い圧力ピークが発生して蒸気爆発に至るとされているモデルである。

以上のモデルが蒸気爆発を記述する主なモデルとして提唱されているが、前者のモデルにおいては、高温液滴の微粒化、圧力波が短時間で広範囲に伝播してゆく圧力変動、現象が短時間で広範囲において起こるコヒーレントな性質、熱エネルギーから機械的エネルギーへのエネルギー変換、など蒸気爆発の動的な事項が説明できないという批判もある。また後者のモデルにおいても、蒸気爆発を記述するものであるかどうかについての解明は十分にはなされていない。ただし、近年行われている研究では、熱的デトネーションモデルに基づいた解析や実験が多数を占めているのが現状である。

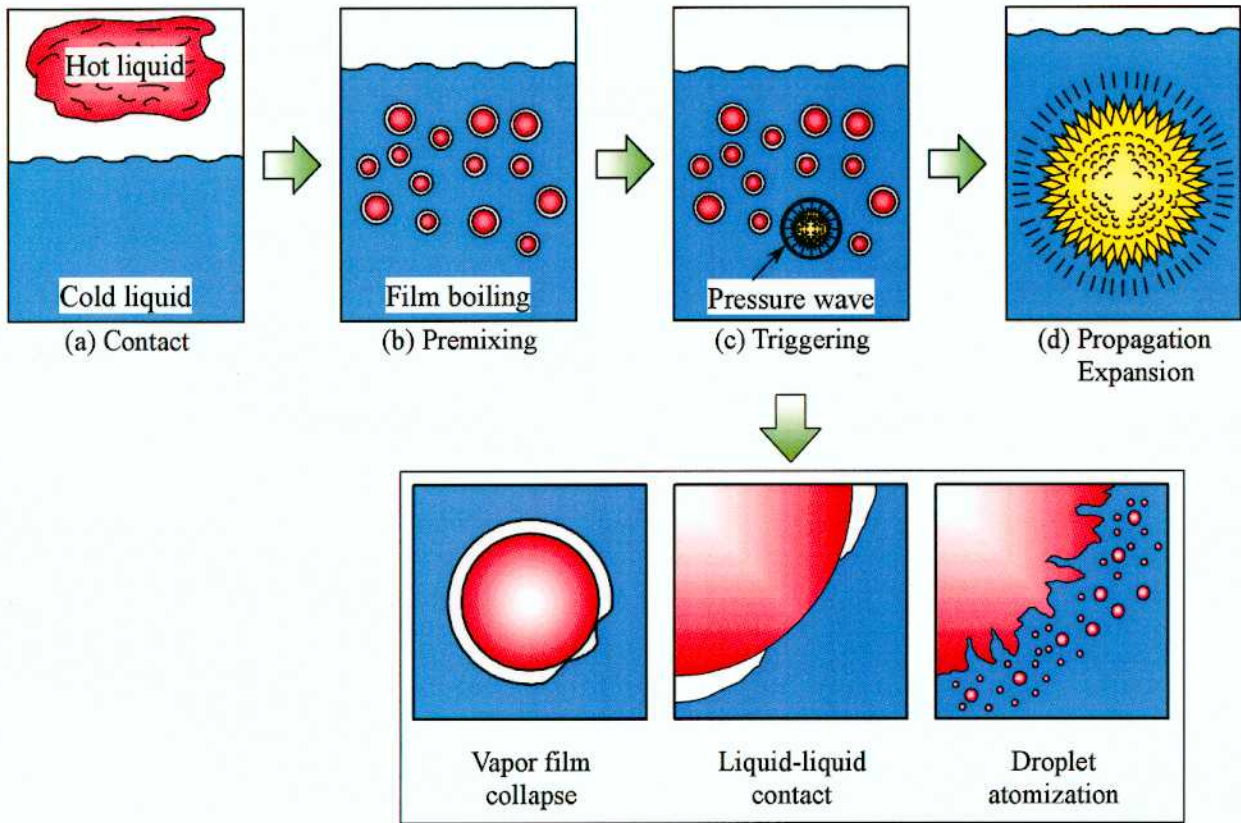


Fig.1.2.1 Outline of vapor explosion

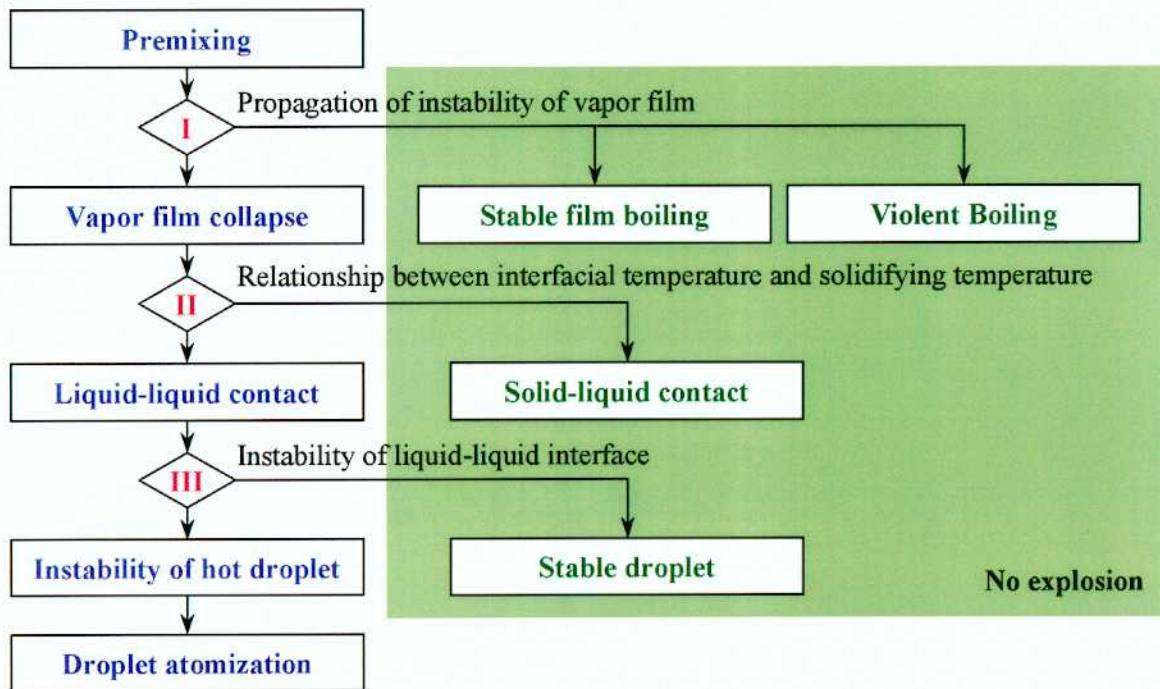


Fig.1.2.2 Flowchart of triggering in vapor explosion



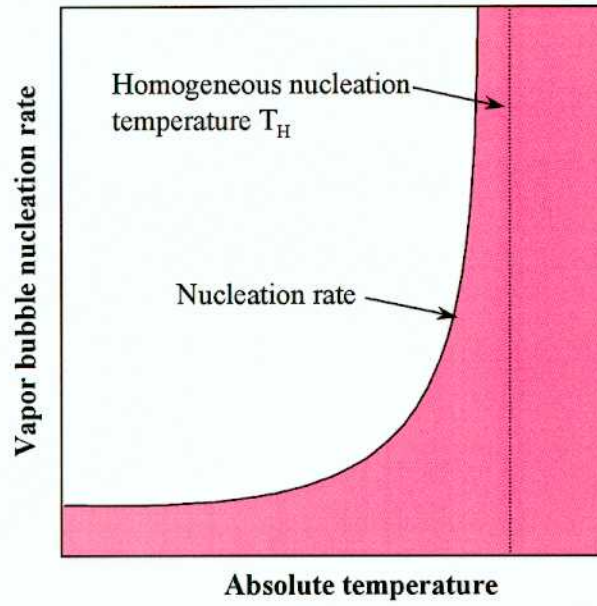


Fig. 1.2.3 Relationship between vapor bubble nucleation rate and temperature

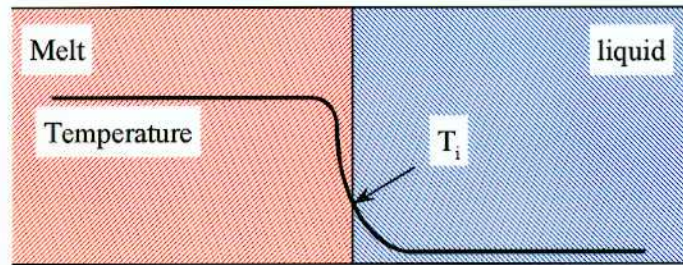


Fig. 1.2.4 Schematic diagram of interfacial temperature during direct-contact

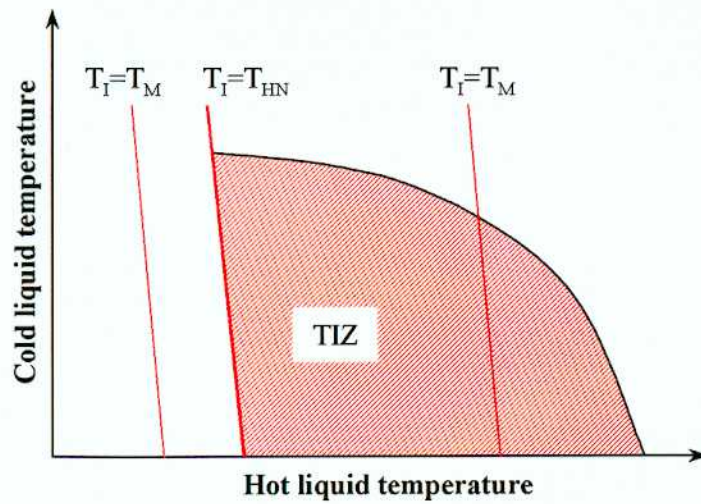


Fig. 1.2.5 Schematic diagram of thermal interaction zone (TIZ)

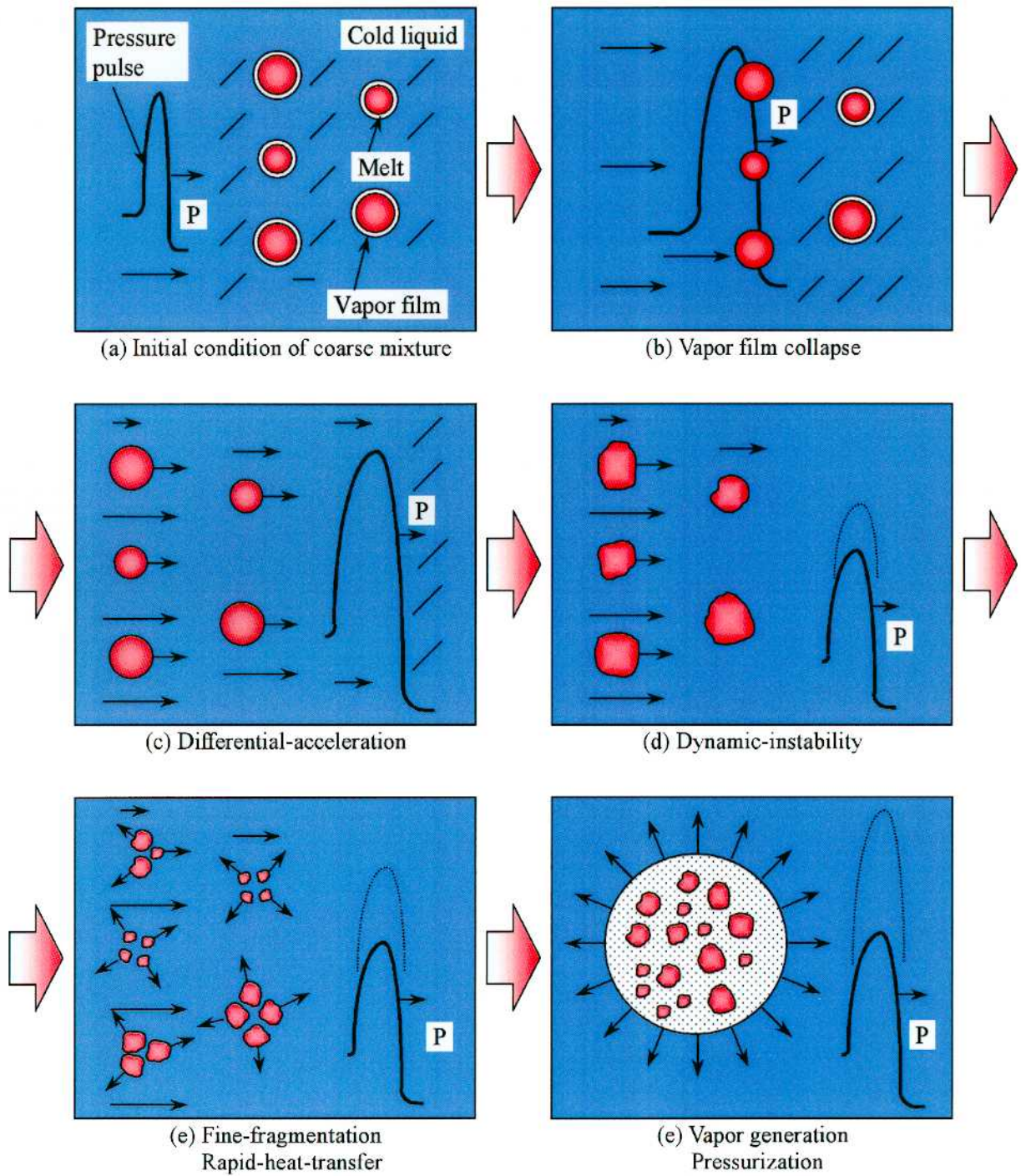


Fig.1.2.6 Schematic diagram of thermal detonation model



### 1.3. 従来の研究

これまでに熱的デトネーションモデルにおける蒸気膜の崩壊過程、高温液の細粒化の様子、急速伝熱過程に関する実験的ならびに解析的研究が多数行われてきている。以下にそのいくつかを列挙する。

#### 1.3.1. 実験的研究

実験的研究に関しては、一般的に数 g 程度の高温熔融液滴を扱い、主としてトリガのメカニズムの解明を目的とした小規模実験、また、実炉を模擬して一連の過程を総合的に調べることを目的とした大規模実験がある。以下にその一部を示す。

##### 小規模実験

研究者	内容
Anderson ら <sup>[14]</sup>	R-22-水との反応実験に基づいて熱的デトネーションモデルに類似したモデルを提唱している。
Bankoff ら <sup>[15]</sup>	MFCI 体系では気体中の液滴破碎と比較して両成分の密度差が小さいことを指摘し、このため、微粒化に要する時間が長くなり、衝撃波を維持する条件を満足しないと批判した。
Board ら	気体中での単一液滴の破碎に関する Simpkins & Bales <sup>[16]</sup> の半実験式より評価し、微粒化に要する時間が衝撃波の通過時間より十分に短いことを報告している。
Cho ら <sup>[17]</sup>	微細規模の微粒化に必要な混合エネルギーを評価し、圧縮性の蒸気が存在すれば容易に微粒化しうることを示した。
Ciccarelli ら <sup>[18,19]</sup>	圧力波を用いて熔融錫に蒸気爆発を起こさせ、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、衝撃は通過時には熔融液滴表面はフィラメント状の様相を呈することを示した。
Dullforce ら <sup>[20]</sup>	熔融錫を水中に落下させて、両液体がある温度範囲にあるときは自発的蒸気爆発が発生する熱的相互作用領域があることを示し、両液体の温度の増加に伴い蒸気爆発が発生するまでの時間遅れが存在することを明らかにした。
Epstein <sup>[21]</sup>	高温液中の溶存気体が析出して高温液を微粒化するモデルを提唱した。
Ivins <sup>[22]</sup>	熔融金属-水の微粒化機構として Weber 型の不安定を提唱している。
Nelson ら <sup>[23,24]</sup>	自発的に蒸気爆発が発生しない酸化鉄-水系に対して、エキスプローディングワイヤにより発生させた圧力波で蒸気爆発を発生させ、蒸気爆発を発生させるために必要な圧力波の強さを調べた。また、非常に短いサイクルで蒸気泡域の成長と収縮を繰り返し、高温液滴の微粒化が蒸気爆発の発生に伴うことを体系的に明らかにした。
Swift ら <sup>[25]</sup>	白金と水銀を用いた実験を行い、高温液滴の融点が低温液体の膜沸騰下限温度より高い場合、もしくは高温液体温度が低温液体の臨界温度より高い場合には微粒化が発生することを示した。
Theofanous ら	衝撃管型の条件下では、液-液系であっても十分に速やかに微粒化が生じうることを実験的に確認して、この場合の微粒化は Taylor 型の不安定性が支配的要因であることを示した。
Witte ら <sup>[26]</sup>	種々の熔融金属を水中に落下させ、錫、鉛、ビスマスでは相互作用が発生し、アルミニウム、亜鉛では相互作用が発生しないことを示した。

Wright ら <sup>[27]</sup> 、 Darby ら <sup>[28]</sup>	両液体を強制的に直接接触させた場合の実験を行い、Taylor 型の不安定により微粒化が発生していることを確認した。
井上ら <sup>[29]</sup>	円柱上の白金箔線上に形成させた膜沸騰に衝撃波を通過させて、膜沸騰熱伝達率の変化について実験的に調べている。
飯田ら <sup>[30]</sup>	<p>熔融錫-水系による自発的蒸気爆発実験を行い、膜沸騰状態の熔融錫の一端から蒸気膜の崩壊と微粒化が始まり、周囲全体に伝播して崩壊してゆく過程を明らかにした。また、この蒸気泡域の拡大は西尾らによる固-液系の水平円柱周りの蒸気膜が斉時的崩壊するときの崩壊伝播速度と同じオーダーであったことを報告している。</p> <p>硝酸リチウム-エタノール系での実験において針山によって蒸気膜を崩壊させたときの蒸気爆発の挙動について調べており、熔融塩-水の場合にも Nelson らと同様に蒸気泡域の運動と圧力変動を観測している。</p>
庄司ら <sup>[31]</sup>	熔融錫-水での実験を行い、Dullforce らと同様の結果を得ている。また、流水実験を行い、熔融錫がクエンチされていく過程の温度を測定し、蒸気爆発発生時の錫の上限温度は Dhir らの固-液系の実験によって得られたクエンチ温度とほぼ一致し、膜沸騰領域から遷移沸騰領域に移るときに蒸気爆発が発生するものとした。
鶴田ら <sup>[32]</sup>	反応度事故を模擬した原子炉用燃料の破壊実験に対して、燃料が部分的に熔融し、内圧が上昇し、その結果被覆管が破裂して燃料が冷却水中に飛び出すというモデルを提唱し、実験における微粒化現象もこのモデルによって定性的には説明できると報告している。
飛田ら <sup>[33]</sup>	酸化鉄-水系での衝撃波誘発による微粒化現象に関する実験を行い、過渡伝熱と微粒化過程に対する解析モデルを作成した。
成合ら <sup>[34]</sup>	自発的蒸気爆発が生じる熱的相互作用領域の低温液の発生上限をサブクールによる蒸気膜の不安定性から生じるものとし、線形振動安定性解析ならびに熔融錫-水系による実験を行い、その妥当性を示した。

#### 中規模・大規模実験

実験装置	国	内容
ALPHA <sup>[35-37]</sup>	日	日本原子力研究所で実施されており、格納容器内の諸現象を明らかにするために行われている。10~20kg のアルミナ熔融物であるテルミットを内径 4m、高さ 5m の耐圧容器である模擬格納容器内に設置した冷却水プールに落下させ、水蒸気爆発に関連する発生圧力、微粒化粒子径、衝撃波伝播速度、エネルギー変換効率などを報告している。
COTELS <sup>[38,39]</sup>	日	原子力発電技術機構で実施されており、圧力容器底部が破損して格納容器内の冷却水に落下した場合を想定している。最大 60kg の酸化ウラン熔融物である熔融コリウムを内径 0.8m、高さ 2.5m の耐圧試験容器に落下させ、水蒸気爆発で見られるような大きな圧力スパイクは観測されず、粒子径は数 mm から 10mm 以上であったことを報告している。
FARO・ KROTOS <sup>[40-44]</sup>	伊	JRC-Ispra 研究所で実施されており、圧力容器内での相互作用を調べることを目的としている。FARO 試験は熔融コリウムによる落下実験を行い、KROTOS 試験は比較的小規模の実験装置を用いて熔融コリウムやアルミナを用いた落下実験の可視化、水蒸気爆発の発生の有無、エネルギー変換効率などを報告している。
FITS <sup>[45,46]</sup>	米	SNL で実施されており、圧力容器内での相互作用を調べることを目的としている。10~20kg のアルミナ熔融物であるテルミットによる落下実験を行っている。雰囲気圧力の制御、デブリ回収、エネルギー変換効率などを報告している。

ここで、いくつかの代表的な研究を挙げることにする。

図 1.3.1 は Corradini ら<sup>[47]</sup>によって提唱された「Entrapment model」と呼ばれる液滴の微粒化モデルである。このモデルでは圧力波が到来したときの蒸気膜の気液界面ならびに熔融液滴の界面の線形安定解析を行い構築されたモデルである。このモデルは以下のようになっている。圧力波が到来したときに気液界面に不安定性が生じ (図(b))、ある臨界波長ならびに運動量を有したときに低温液体液滴が高温液滴内に貫入する (図(c))。この貫入した液滴の外側に熔融物の殻が形成され (図(d))、内部に貫入した液滴が蒸発することで高温液滴の微粒化ならびに蒸気膜の膨張が発生するというものである。しかしながら、この研究では理論的な検討のみ行っており、実験的な事実の確認がなされていないものであった。

図 1.3.2 は Nelson ら<sup>[23,24]</sup>によって提唱された液滴の微粒化モデルである。この実験では高温の錫ならびに 1.2 酸化鉄の熔融液滴を水中に投入し、圧力波を当ててそのときの挙動を高速度カメラならびに高速度写真を用いて観測を行った。その結果より構築したモデルである。まず、圧力波によって周りを覆っている蒸気膜が崩壊するとき (段階 2,3)、低温液体のジェットが熔融物の中に貫入し、液滴の微粒化・蒸気膜の膨張を引き起こす (段階 4)。その後、凝縮によって蒸気膜が崩壊して圧力波が発生し (段階 5)、2 度目のより細かな微粒化ならびに圧力波の発生が生じる (段階 6,7) モデルである。この研究では先の Corradini が提唱した「Entrapment model」を支持するような実験結果が得られているが、スケール効果の違いによって現象が異なり、先のモデルと現象をうまく結び付けるまでには至っていない。

図 1.3.3 は Ciccarelli ら<sup>[18]</sup>によって行われた実験結果を示している。この実験では、高温の Bi-Pb-In 合金数  $g$  の熔融液滴を水中に投入して圧力波を当て、そのときの挙動を X 線写真で観察したものである。この結果より、下方より圧力波が到来したときに、外側に向かって針状の熔融物のスパイク飛び出している様子が見られた。この実験結果は、X 線写真で蒸気膜内部の熔融物の挙動を観察するという当時としては斬新な実験結果であり、現在においても重要な実験的結果としてしばしば参照されることが多い。

この実験を元に構築されたモデルを図 1.3.4 に示す。水中の高温熔融液滴に圧力波が到来したとき、気液界面に Rayleigh-Taylor 不安定性による波が発生する (図 b)。その不安定性が成長し (図 c)、気液界面と熔融液滴表面が接触する (図 d)。その際、低温液への急速な熱の移動が生じて高圧の蒸気が発生する。その高圧の蒸気によって熔融液滴表面に表面波が発生し (図 e)、熔融液滴が搾り出されてスパイク状の突起物を形成する (図 f)。この先端が分裂してフラグメントとなり、そのフラグメントが気液界面に貫入後 (図 g)、蒸気膜の崩壊・液滴の微粒化を引き起こすと言うものである。

現在、多くの研究において、液滴微粒化モデルとして Corradini のモデルと Ciccarelli のモデルを採用している。しかしながら、これらのモデルでは高温物質として熔融金属を用いており、その表面形状によって蒸気膜の挙動が変化することが考えられ、蒸気爆発のトリガリング挙動に蒸気膜の崩壊挙動がどの程度寄与するかという評価は行われていない。また他の研究においても円筒形状または平板形状の固体物質を用いた蒸気膜の崩壊挙動に関する実験が行われている。しかしながら、高温粒子は球形に近い形状をしており、蒸気爆発現象への適用性を考えると、球体系での蒸気膜崩壊挙動について調べる必要があるものと考えられる。

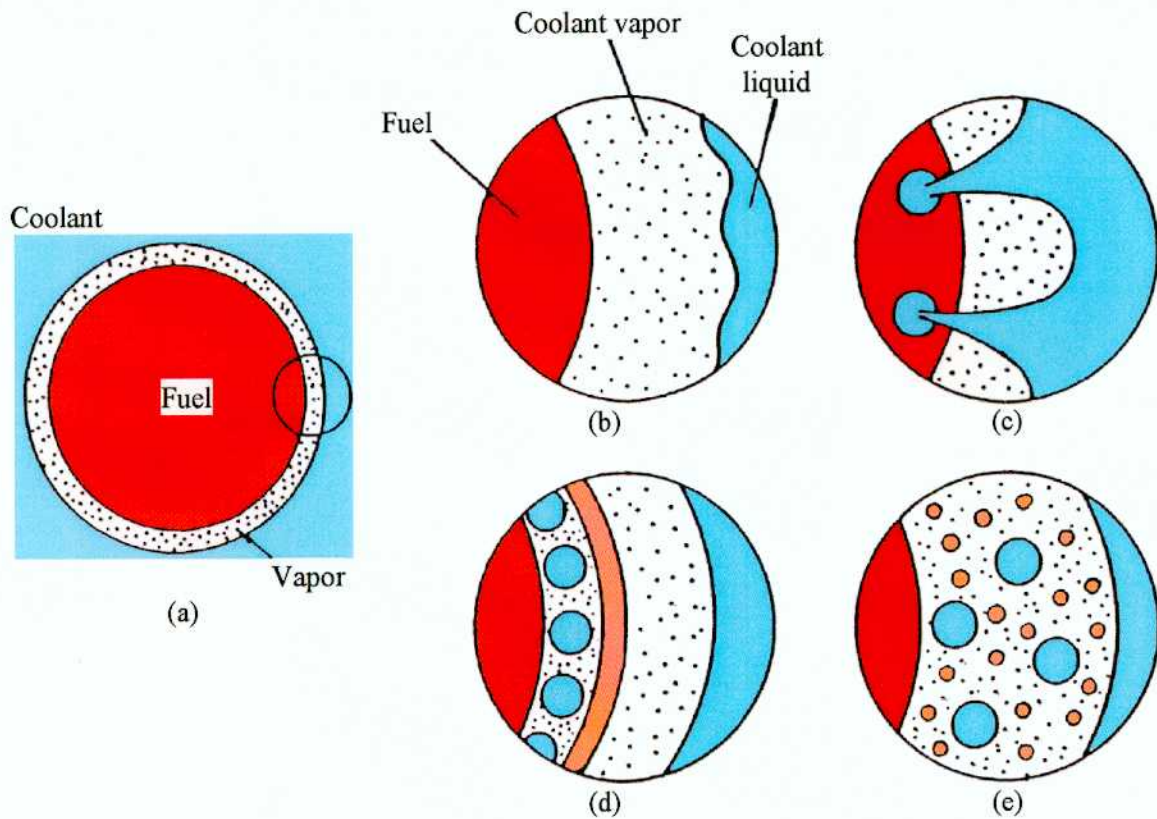


Fig. 1.3.1 Droplet atomization model by Corradini et al.<sup>[47]</sup>

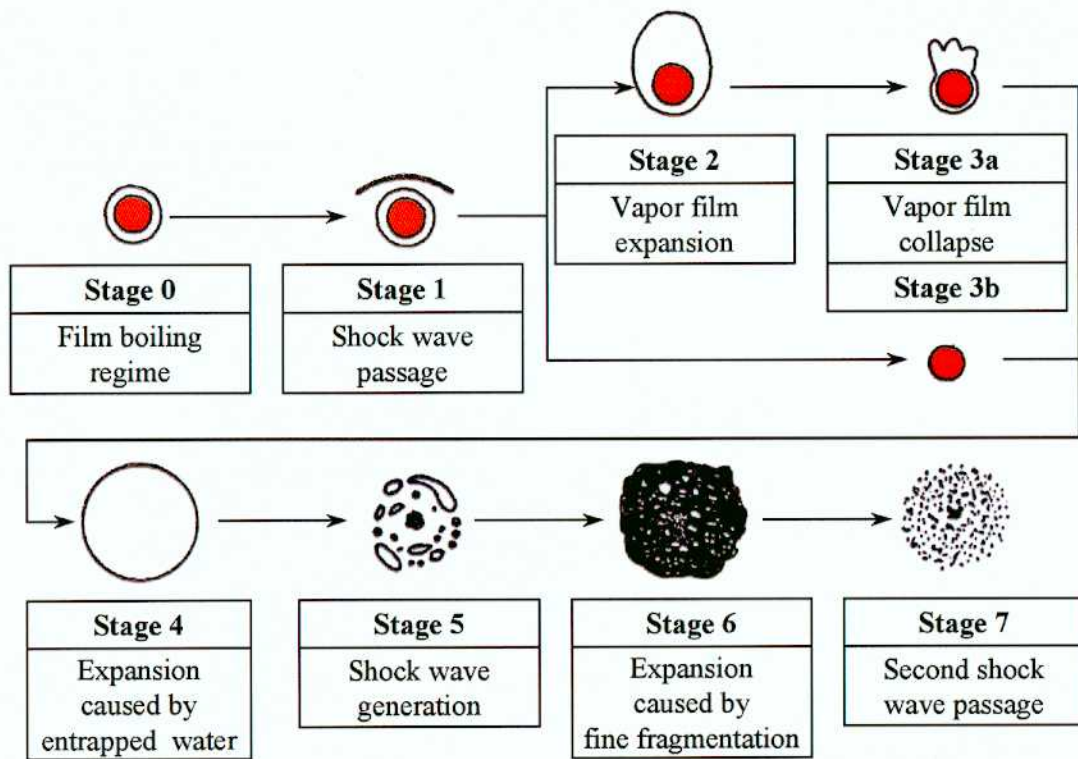


Fig. 1.3.2 Droplet atomization scenario by Nelson et al.<sup>[24]</sup>

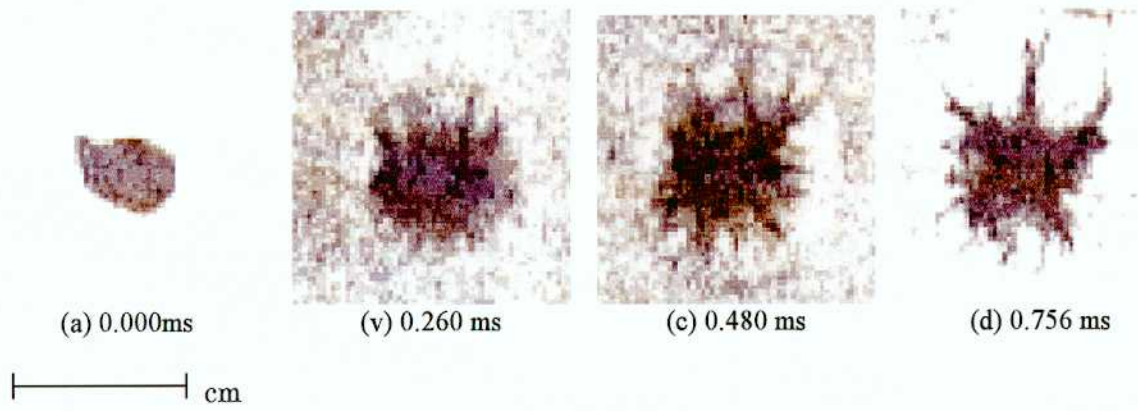


Fig. 1.3.3 Observation result of droplet fragmentation by Ciccarelli et al.<sup>[18]</sup>

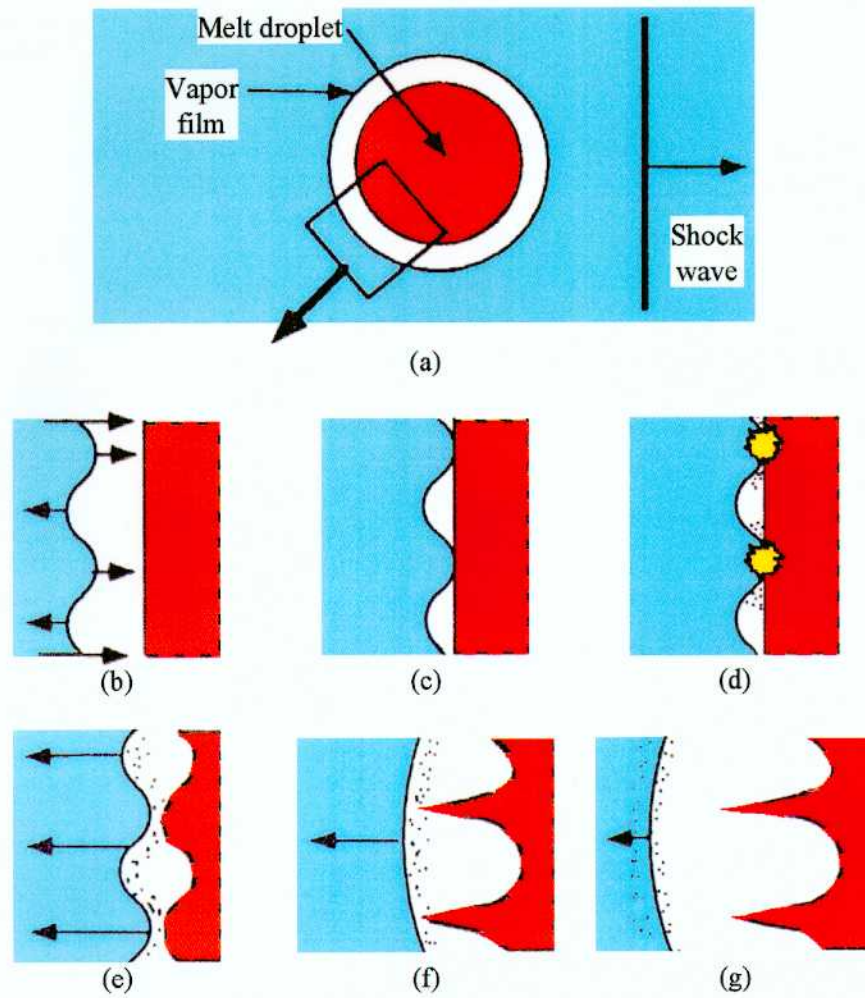


Fig. 1.3.4 Droplet atomization model by Ciccarelli et al.<sup>[18]</sup>



### 1.3.2. 解析的研究

また蒸気爆発の解析では、解析コードとして採用されているものとして以下に示されているようなコードが挙げられる。

名称	研究機関	特徴
COMETA <sup>[42,48]</sup>	JRC-Ispra (伊)	2相流解析に RELAP コードを用い、溶融物モデルを Lagrange 法で構築して2相流解析と結合している。1次元または2次元円筒座標系の解析を行う。溶融物モデルはジェット、粒子および体系の底に溜まった連続相の3相。溶融物の酸化による水素発生モデル化も試みられている。
CHYMES / CULDESAC <sup>[49,50]</sup>	AEA Culham Laboratory (英)	CHYMES は粗混合を2次元円筒座標系で水、蒸気、溶融物の3流体モデルで解析する。CULDESAC は1次元で伝播過程を解析する。但し、直線、円筒および球座標 (r 方向) の計算が可能で、それぞれの体系で拘束の違いの影響は分かる。
IFCI <sup>[51]</sup>	SNL (米)	粗混合および伝播過程の解析を行う。水、蒸気、溶融物、液滴、溶融物細粒の4流体モデルを SETS (Stability-Enhanced Two-Step) 法で解く。解析体系は2次元円筒座標系である。解析セルサイズを超える溶融物の大規模分布については VOF (Volume of Fluid) 法に基づいて界面追跡を行い、高解像度を得られる。
IKEJET <sup>[52,53]</sup>	Univ. of Stuttgart (独)	溶融物ジェットの1次元モデル。Kelvin-Helmholtz 不安定、Miles 不安定などの理論に基づくブレークアップモデルを用いた解析が行われてきている。COMETA コードと組み合わせて用いられた例もある。 <sup>[54]</sup>
IVA <sup>[55,56,57]</sup>	Siemens, FZK (独)	エネルギー保存則をエントロピーで表現した方程式系を使っている。旧 KfK (現 FZK) で開発された IVA3 が、FZK では水蒸気爆発解析に特化した IVA-KA として、また Siemens で汎用の IVA4 として継続している。ジェットモデルは含まない。
JASMINE- pre / pro <sup>[58,59,60]</sup>	日本 原子力 研究所 (日)	粗混合解析モジュール JASMINE-pre、伝播解析モジュール JASMINE-pro の二部から成る。JASMINE-pre は水、蒸気、溶融物の3流体モデルから成る初版の開発の後、溶融物モデルを Lagrange 法に変更するなどの改良が試みられている。JASMINE-pro では水、蒸気、Interaction Coolant、溶融物液滴、溶融物近傍の水および蒸気であり、ごく少量の冷却材が溶融物の細粒化の際に熱交換に関与するという概念に基づいている。
MC3D <sup>[61,62]</sup>	CEA (仏)	3次元の混相ソルバーを中心として、種々のアプリケーションに適用できる構造になっている。粗混合解析では、溶融物ジェットおよび液滴、水、蒸気+非凝縮性ガスの4速度場、伝播過程では溶融物を液滴と細粒として同様に4速度場の方程式系を解く。層状体系のモデルも試みられた。
PM-ALPHA / ESPROSE.m <sup>[63,64]</sup>	Univ. of California (米)	PM-ALPHA で粗混合、ESPROSE.m で伝播過程を解析する。溶融物ジェットについての特別な取り扱いは含まれず、溶融物はすでに液滴状になっているという仮定に基づいて計算する。PM-ALPHA は水、蒸気、溶融物の3流体モデル、ESPROSE.m は水、溶融物液滴、および m-流体の3流体モデルである。m-流体とは、水の一部、蒸気ならびに溶融物の細粒を含むもので、水のうち溶融物の細粒と熱および運動量交換を行うのはごく一部であり、それらは短時間で熱および力学的平衡に達するという Macrointeraction の概念に基づく。
SAMPSON <sup>[65,66]</sup>	原子力 発電技術 機構 (日)	軽水炉発電プラントの事故解析システム IMPACT 中のシビアアクシデント解析コードである。この一部として、水蒸気爆発解析モジュールが含まれている。水、蒸気、溶融炉心液滴、細粒またはジェットの4相4速度場モデルを用いている。水蒸気爆発の粗混合過程、伝播過程の解析を行う。トリガリングは簡略モデルによって判断している。

SIMMER-III <sup>[67]</sup>	核燃料 サイクル 機構 (日)	高速炉の炉心崩壊時の核熱流体解析のために開発された。2次元の平面または円筒座標系、1次元の解析ができる。多くの成分、速度場を設定して解析でき、軽水炉のシビアアクシデント条件に関連した解析も行われている。
TEXAS <sup>[68]</sup>	Univ of Winsconsin (米)	1次元水蒸気爆発解析コード。初期から溶融物を Lagrange 法で扱っている。水、蒸気には2流体モデルが用いられている。溶融物を粒子法で扱うため溶融物分布に対して数値拡散などの問題が無い、数値的な安定性などの長所があるが、1次元のために冷却材の複雑な流れを考慮できない点が短所である。最近、3次元への拡張が行われている。 <sup>[69]</sup>
THIRMAL-I <sup>[70]</sup>	ANL (米)	溶融物ジェットに重点を絞った粗混合解析コードである。冷却材の流れは1次元で、溶融物ジェットおよび液滴は Lagrange 粒子として扱う。連続した溶融物のジェットの表面から液滴となって冷却材中に分散する溶融物の量と粒径を、ジェットの側面では Kelvin-Helmholtz 不安定、ジェット先端では境界層剥離モデルにより与える。冷却材の昇温と蒸発量、溶融物の酸化による水素発生モデルが含まれる。
TRACER <sup>[71]</sup>	韓国海洋 大 (韓)	水、蒸気、溶融物の液滴と細粒の4成分3速度場モデル。細粒は瞬時に水と力学的平衡、水蒸気の平均温度と熱平衡になると仮定。ジェットモデルは含まない。

これらのような解析コードの多数は計算空間内で平均化された物理変数を用いている。単相流や固気混相流解析において行われているような Navier-Stokes 方程式を LES や DNS を用いて解く局所的な物理変数を用いた解析は蒸気爆発の解析ではほとんど行われていない。これは、解析で扱う流体（固体）の成分が多成分であるために基礎方程式の数が多数となることや、現象の複雑さの度合いに依存して乱流などの取り扱いが困難となることによるものと考えられる。最近では MPS や CIP のように粒子法の考え方に基づく解析が精力的に行われてきている。

## 1.4. 本研究の目的

本研究では、蒸気爆発現象において蒸気爆発を引き起こすか引き起こさないかを決定付けるトリガリング挙動の一つである、粗混合状態における高温粒子表面上の蒸気膜崩壊挙動の微視的機構について注目する。

これまでに、高温物体表面上の蒸気膜の崩壊挙動に関してはさまざまな実験的研究がなされている。これらの研究の多くは熔融金属を用いているために蒸気爆発に続いて微粒化が発生していたり、また、固体物質を用いた実験でも円筒形状または平板形状の固体物質を用いた実験が行われている。しかしながら、高温粒子は球形に近い形状をしており、球上の蒸気膜崩壊挙動について調べる必要がある。そこで、まず初めに、高温粒子を模擬した金属球を用いて蒸気膜の崩壊挙動を実験的に調べることにする。従来の研究とは異なり、高温粒子を模擬した物体として金属球を用いることによって、熔融液滴を用いた実験では見られた微粒化の影響を排除した状態での蒸気膜の崩壊挙動の観察が可能である。この高温の金属球表面上に蒸気膜を形成させ、自発的に崩壊した場合ならびにトリガとなる圧力パルスが作用した場合、この蒸気膜がどのような挙動で崩壊するかを微視的に観察を行うこととする。また、蒸気膜の崩壊挙動は低温液のサブクーリングに影響を受けるとされているが、この蒸気膜の崩壊挙動が低温液のサブクーリングに対してどのように影響を受けるとかを微視的に観察を行うこととする。

また解析においては、既存の解析手法では解析結果が構成方程式に大きく依存してしまうので、現象が十分に把握されていない蒸気爆発に適應すると困難を伴う。このように蒸気爆発現象が十分解明されていないという現状をふまえると、現象ごとにモデルを構築して解く巨視的解析手法を用いるよりむしろ分子動力学などの微視的手法に基づいた解析手法の方が適用性が高いと考えられる。また、蒸気爆発現象が局所的に起こっていることを考えると、微視的手法の方が優位性が高いと考えられる。しかし、分子動力学に基づく解析では計算負荷が非常に大きく系の大きさが制限されるため、蒸気爆発現象のように広範囲にわたる現象にはその適用性が計算機の性能に大きく依存する。

そこで、Navier-Stokes 方程式などを用いた巨視的スケールで扱う手法と分子動力学のような微視的スケールで扱う手法に対して、その中間のスケールで現象を扱う格子ガスオートマトン法と呼ばれる新しい計算手法が提案されている。この手法では、時間および空間を離散化して、分子の運動を代表したものに相当する粒子に衝突および移動の法則を与えて、この粒子の運動を統計的に処理することで流体の流れなどの物理現象を再現する手法である。この手法では、現象を数式で明示する必要がなく、容易なオートマトン上の法則を与えるだけで複雑なパターンを形成できる特徴を有しており、分子動力学を用いた計算より少ない計算負荷での計算が可能であるという長所を有している。このため、格子ガスオートマトン法は巨視的スケールおよび微視的スケールの長所を有する手法と考えられ、複雑形状流れ、局所的な現象、混相流などの高速な熱流動現象への適應が期待されている。本研究では、この格子ガスオートマトン法を用いることとした。従来、格子ガスオートマトン法では2次元モデルが提唱されているが、工学的に実用性が高い3次元モデルの開発は現時点では遅れている。そこで、従来の2次元モデルに拡張を施して3次元モデルを新たに構築することとする。その3次元モデルを用いて、蒸気膜崩壊挙動に関する数値シミュレーションを行い、蒸気膜の崩壊挙動への適用可能性の検討を行うこととする。

最終的に、実験より得られた結果ならびに解析より得られた結果を比較・検討することにより蒸気膜の崩壊挙動の微視的なメカニズムの解明を行うことを目的とする。

## 1.5. 本論文の構成

本論文では、大きく実験的研究と解析的研究に分かれる。2、3章では主に実験的研究、4、5章では、粒子法の1つとして新たに提唱されている格子ガスオートマトン法を用いた解析について述べている。

2章では蒸気膜の崩壊挙動に関する実験の内容について述べている。2.1節では本章の目的について述べている。次の2.2節では本実験を行うに当って構築した実験装置について説明しており、2.3節で派実験を行う手順について説明している。2.4節では蒸気膜が形成される条件を調べ、その結果を受けて実験条件を設定している。2.5節では実験より得られた結果を用いた解析について説明しており、最後の2.6節でこれらをまとめている。

3章では蒸気膜の崩壊挙動に関する実験結果について述べている。3.1節では本実験の目的ならびに概要について述べている。3.2節では蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験結果について述べている。本実験では、高温粒子の表面温度ならびに水のサブクーリングを変化させて行い、その実験結果を示している。3.3節では圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の実験結果について述べている。本実験では、まず圧力パルスが到来したときの蒸気膜の崩壊挙動を調べ、次に水のサブクーリングを変化させた条件で行った実験結果を示している。3.4節では、3.3節で行った圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動について詳しく調べるために、熱伝導解析ならびにPIV解析の方法ならびに結果について述べる。これらの実験により得られた知見を3.5節でまとめている。

4章では、蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行うために、格子ガスオートマトン法の3次元モデルならびに伝熱・相変化モデルを構築し、それらの検証を行っている。初めに4.1節では本研究で格子ガスオートマトン法を用いて蒸気膜の崩壊挙動を行うまでに至った経緯について述べている。4.2節では、格子ガスオートマトン法の概要について説明している。4.3節では、従来提唱されている2次元モデルを元に、新たに開発した3次元15速度モデルについて説明している。4.4節では従来提唱されている二成分流体を扱う解析モデルである2次元ILGモデルを元に、新たに開発した3次元15速度ILGモデルの概要について説明する。4.5節では、3次元15速度ILGモデルを元に伝熱・相変化現象を扱えるように新たに構築した伝熱・相変化モデルについて説明する。4.6節では、3次元15速度ILGモデルの検証を行うために二成分流体の凝集・分離挙動の解析を行った結果について示している。本解析では、界面積等の評価を行うとともに、領域内に配置する粒子の数密度ならびに二成分流体の割合を変化させて計算を行った結果を示し、検証を行っている。4.7節では、3次元15速度LGAモデルの検証を行うために多孔質体内部の流動解析を行った結果について示している。本解析では、領域内に配置する多孔質体の空隙率を変化させて計算を行った結果を示し、また理論と比較して検証を行っている。4.8節では3次元15速度伝熱・相変化モデルの検証を行うために、沸騰現象に関する解析を行った結果について述べている。この解析では、沸騰現象の観測ならびに沸騰曲線の比較を行い、伝熱・相変化モデルの検証を行っている。これら新しく開発したモデルならびにそれを用いた検証計算で得られた知見を4.9節でまとめている。

5章では、4章で開発した3次元15速度伝熱・相変化モデルを用いて、圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析結果について述べている。本章では、蒸気膜の崩壊挙動に支配的な要因となる要素を調べるために蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行った。まず初めに、5.1節で本解析を行う理由などを述べるとともに本解析で重点的に調べる点について述べている。5.2節では圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析の概

要について述べている。5.3 節では流動のみを考慮した場合の解析結果、5.4 節では流動ならびに壁伝熱を考慮した場合の解析結果、5.5 節では流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した場合の解析結果、5.6 節では流動、壁伝熱、相変化ならびに膨張波を考慮した場合の解析結果について述べている。これらの節では、得られた解析結果と実験結果の定性的な比較を行っている。5.7 節では、これらの解析ならびに実験より得られた結果を考察し、得られた結果がどのように従来のモデルに反映されるかについて述べている。最後に、蒸気膜の崩壊挙動に関する解析で得られた知見を 5.8 節でまとめている。

最後の 6 章では、以上の 2~5 章で得られた知見を総合するとともに、蒸気膜の崩壊挙動に関する崩壊のメカニズムに関して結論を述べている。