

解析コード（J A S M I N E）説明資料
(参考資料)

平成28年9月

東北電力株式会社

東京電力ホールディングス株式会社

中部電力株式会社

中国電力株式会社

日本原子力発電株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 使用実績及び解析モデルについて.....	2
2.1. 使用実績.....	2
2.2. 解析モデル.....	4
2.2.1. 背景.....	4
2.2.2. 解析モデルの構成.....	4
2.2.3. 解析モデルの説明.....	7
2.3. 入出力.....	19
2.3.1. 入力例.....	20
2.3.2. 出力例.....	26
3. 解析結果の例示.....	27
4. 水蒸気爆発実験への適用例.....	29
4.1. 粗混合実験解析.....	29
4.1.1. 解析条件.....	29
4.1.2. 解析結果.....	33
4.2. 爆発実験解析.....	35
4.2.1. 解析条件.....	35
4.2.2. 解析結果.....	40
5. 参考文献.....	47

添付 1. 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて

1. はじめに

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では、運転時の異常な過渡変化、原子炉冷却材喪失事故又は全交流動力電源喪失が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、緩和措置がとられない場合には、溶融炉心と原子炉圧力容器外の原子炉冷却材が接触し、このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器破損に至る可能性がある。

この原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による水蒸気爆発事象発生の可能性は、これまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら、水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し、原子炉格納容器の健全性に対する影響を確認しておくことは、原子炉格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。

本資料では、水蒸気爆発の現象を評価する解析コードである JASMINE コードについて、以下の内容をまとめる。

- ・ 使用実績及び解析モデル
- ・ 試験結果とのベンチマーク

2. 使用実績及び解析モデルについて

2.1. 使用実績

水蒸気爆発解析コード JASMINE (JAEA Simulator for Multiphase INteractions and Explosions) ^[1]は、日本原子力研究開発機構(JAEA)にて開発された水蒸気爆発の現象を評価する解析コードであり、水蒸気爆発の粗混合過程及び伝播膨張過程(爆発過程)における伝熱流動現象のシミュレーションを行うことができる。

表 2.1.1 に JASMINE の主な適用実績を示す。JASMINE コードは、FARO および KROTOS における各種試験結果とのベンチマークにより水蒸気爆発時の挙動を適切に模擬できることが確認されているほか、SERENA 試験解析への適用^[2]、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率評価への適用実績^[3]がある。

(1) 格納容器破損確率評価への適用

BWR および PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を、水蒸気爆発の解析コードである JASMINE コードと確率論的手法を組み合わせ、評価した事例が文献^[3]にて示されている。

BWR モデルプラント (Mark-II 型格納容器) を対象としたペDESTAL 領域水蒸気爆発解析の概要は以下のとおりである。

既存の確率論的安全評価より、ペDESTAL 領域における水蒸気爆発に対する寄与の大きい事故シーケンスとして「中破断 LOCA 時炉心冷却失敗, 自動減圧成功」, 「中破断 LOCA 時低圧注入作動, 崩壊熱除去失敗」の各シーケンスグループが選定され、事故解析コードによる解析等に基づき原子炉圧力容器破損時の格納容器内熱水力条件および溶融炉心条件が設定されている。

解析体系は 2 次元円筒座標系であり、径方向 13×軸方向 33 セルの解析格子でペDESTAL 領域が模擬されている。爆発解析では、体系の中心軸上で底から 2 番目のセルに爆発源を置き、トリガリングを与えている。

JASMINE コードは炉外水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために用いられている。評価の入力条件である水蒸気爆発の初期・境界条件、及び解析モデルに含まれるパラメータは、それぞれの不確かさを表す確率分布関数で与えられ、JASMINE 解析により、その不確かさを伝播させ、水蒸気爆発による負荷の確率分布が評価される。負荷を示す指標としては、プール水に与えられる運動エネルギーのピーク値、壁面の力積の飽和値がそれぞれ評価され、水蒸気爆発による負荷の累積確率分布が評価されている。

(2) SERENA 試験解析への適用

国際協力プロジェクトとして実施されている最新の OECD-NEA/SERENA 試験データを用いて、JASMINE を用い、SERENA 試験 TROI 装置体系を対象にメッシュモデルを作成し、試験体

系内での粗混合過程及び細粒化過程における熱流動解析が実施^[2]されている。

SERENA 試験装置は炉容器と圧力容器の 2 つに大別され、試験時には、炉容器内で融解した溶融デブリが開放弁及びノズルを通じて圧力容器内に設置された試験容器に流入する。試験容器は、直径 600mm、高さ 1.5m の円筒容器であり、水面高さが 1m となるように水が溜められている。解析体系は、圧力容器、圧力容器内の試験容器、メルト流入位置としてノズルが考慮されており、試験容器形状が軸対称形状であることから、2次元軸対称としてモデル化されている。

表 2.1.1 JASMINE の主な適用実績

1	研究名称	軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価
	解析実施者	日本原子力研究開発機構
	実施時期	2007 年 11 月
	研究概要	BWR 及び PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を評価した。水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために、ラテン超方格サンプリング (LHS) による確率論的手法を用い、その中で水蒸気爆発コード JASMINE を物理モデルとして使用した。評価対象は BWR Mk-II 型のペDESTAL 及び圧力抑制プール、PWR のキャビティにおける水蒸気爆発である。
2	研究名称	改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討
	解析実施者	独立行政法人 原子力安全基盤機構
	実施時期	平成 21 年度
	研究概要	FCI 解析コード JASMINE Ver. 3 を用いて、SERENA 試験体系を対象にメッシュモデルを作成し、容器内熱流動解析を実施することによりその適用性について検討を実施。また作成したモデルを適用して感度解析を実施し、模擬溶融デブリ及びプール水の温度、プールの形状、模擬溶融デブリの組成について水蒸気爆発に対する影響を確認した。

2.2. 解析モデル

2.2.1. 背景

図 2.2.1 で示す通り, 水蒸気爆発は, 現象論的に 4 つの段階^{[4][5]}があると考えられている。それぞれの過程に關与する現象を以下に示す。

- ・粗混合 低温冷却材内で高温の融体が粗い粒子として分散し, 混合しながら蒸気膜によって断熱されている状態。(タイムスケール: 0.1 秒~数秒)
- ・トリガリング 蒸気膜の不安定化による急速な冷却材の蒸発および溶融した液滴の細粒化の開始
- ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の細粒化および急速な熱伝達が生じる状態。(タイムスケール: 数ミリ秒単位)
- ・膨張 (爆発) 冷却材の蒸発と, 周囲に負荷を生じさせる可能性のある混合物の膨張 (爆発)

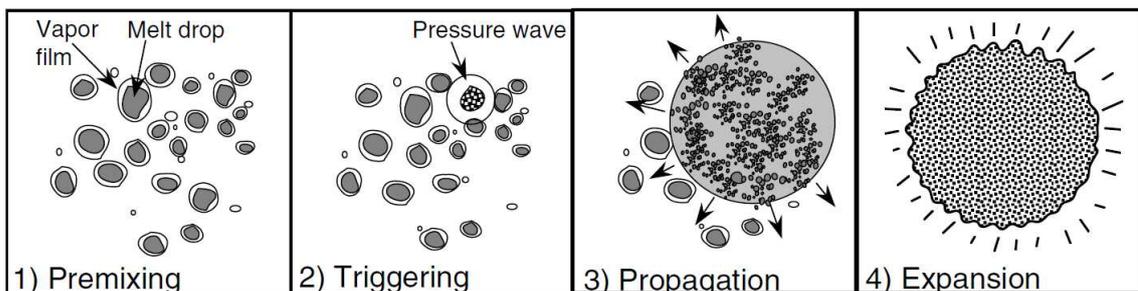


図 2.2.1 水蒸気爆発の現象論的な 4 つの段階^[1]

上で示した現象論的な 4 つの段階の仮定に基づくと, 水蒸気爆発による発生エネルギーの評価は, 通常次の 2 ステップを通して行われる。

- ・冷却材と粗混合状態にあり, 続く爆発過程に關与しうる高温液体がもつ内部エネルギーの評価
- ・伝播と膨張 (爆発) の過程を介する力学的エネルギーの評価

2.2.2. 解析モデルの構成

原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用 (FCI) で想定される現象と JASMINE コードの概念と構成を図 2.2.2 に示す。JASMINE コードは溶融炉心挙動モデルと冷却材の多相流動モデルの 2 つで構成される。溶融炉心モデルは融体ジェット, 融体プール, 融体粒子の 3 つのサブモデルを含む。冷却材の熱水力挙動を扱う多相流動モデルは, 日本原子力研究所 (JAERI) で開発された ACE-3D コード^[6]の修正版である。

JASMINE は、粗混合過程と爆発過程の 2 段階に分けて水蒸気爆発の全過程を解析する。初めに、流動体系や流入する溶解物に関する初期/境界条件を与えることで粗混合過程が解析され、次に、解析時刻における粗混合計算の出力データに、爆発モデルオプションの指定を与えることで、爆発過程、即ち伝播と膨張過程が解析される。

粗混合過程と爆発過程の物理特性を表 2.2.1 にまとめる。

表 2.2.1 粗混合過程及び爆発過程の物理特性

	粗混合	爆発 (伝播, 膨張)
物理特性		
支配的な物理過程	重力 (浮力) による対流	衝撃波の伝播
時間スケール	0.1-10s	0.1-10ms
融体サイズスケール	1-10mm	1-100 μ m

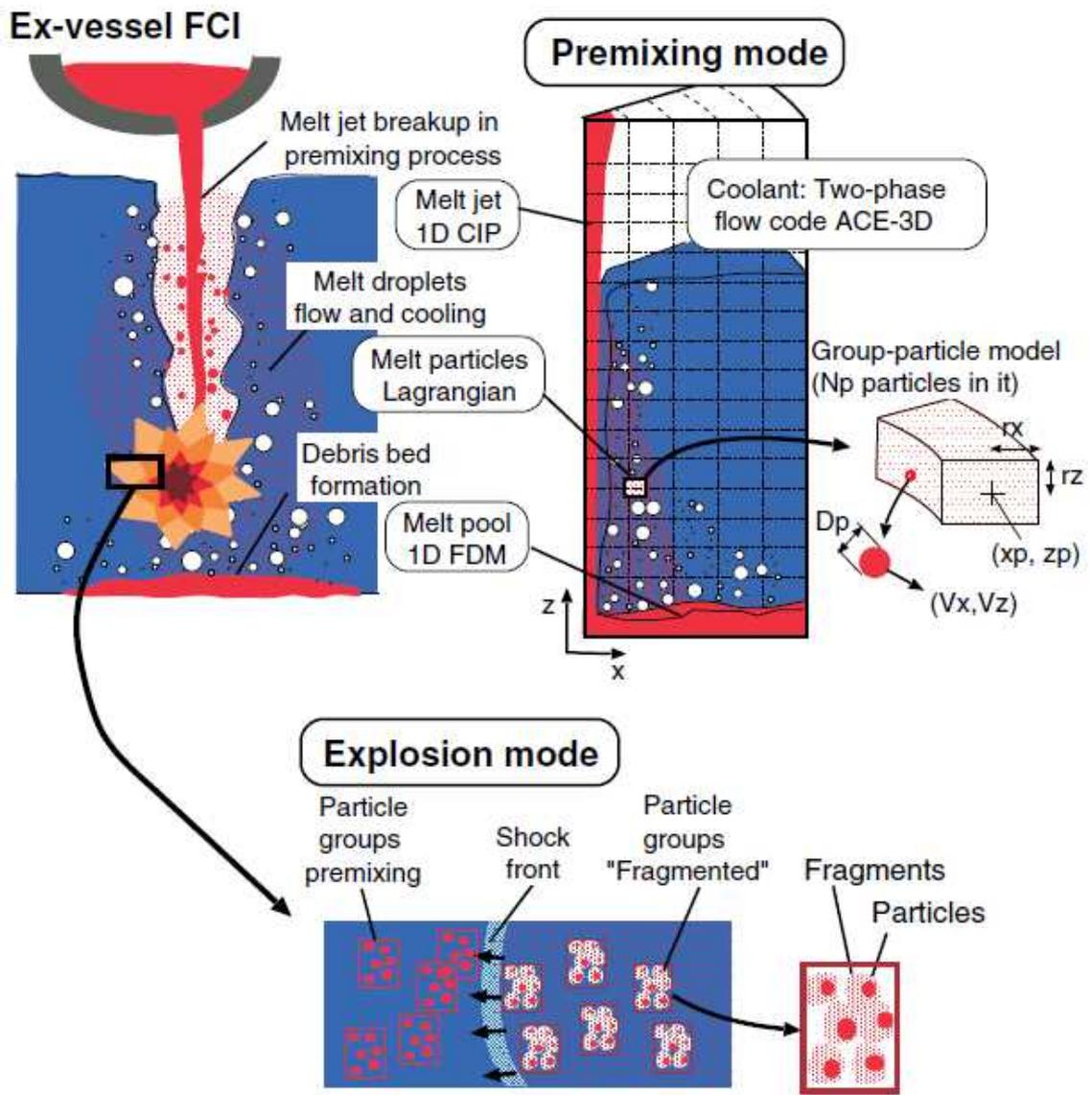


図 2.2.2 JASMINE コードの概念と構成 ^[1]

2.2.3. 解析モデルの説明

(1) 融体ジェットモデル

融体ジェットに対しては、z 方向一次元の質量、内部エネルギーおよび運動量保存則が解かれる。融体ジェット表面からの液滴の発生（融体ジェットからの質量エントレインメント）は、ジェット分裂長に対する実験相関式と融体ジェットの質量保存則に基づき求められる。図 2.2.3 は、融体ジェットがプール水で侵食され、下方に進むに従ってジェット直径が減少する様を表している。ジェットが完全に消失する水深をジェット分裂長 L_{brk} と呼ぶ。

ジェット分裂長は、Bond 数 $Bo_J > 50$ の条件では Taylor 型相関式^[7]が用いられ、それ以外の場合は Saito らの相関式^[8]によって次の通り算出される。

$$\frac{L_{brk}}{D_{Ji}} = \begin{cases} 10 \left(\frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{Ji}^2}{\sigma_J} \geq 50 \\ 2.1 \left(\frac{\rho_J}{\rho_l} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_{Ji}^2}{g \cdot D_{Ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_J \cdot g \cdot D_{Ji}^2}{\sigma_J} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$$

ここで、 ρ_J と ρ_l はそれぞれジェットと水の密度、 σ_J はジェットの表面張力、 D_{Ji} は水面でのジェットの直径、 V_{Ji} は水面でのジェット流速、 g は重力加速度である。

融体液滴発生量、すなわち質量エントレインメントに対応する体積エントレインメント流量 (V_e) は、ジェット直径が水深と共に線形的に減少するという仮定で計算される。

$$V_e = \frac{V_J}{2} \cdot \left(\frac{D_{Ji}}{L_{brk}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$$

ここで、 H_{pl} はプール深さ、 V_J はジェットの流速である。

質量エントレインメント流量 \dot{m}_e は、次のように求められる。

$$\dot{m}_e = C_{ent} \cdot \rho_J \cdot V_e \quad (2.2-3)$$

ここで、 C_{ent} は定数である。定数 C_{ent} を 1 として設定した場合、ジェットは実験に基づく相関式によって決定されたジェット分裂長で崩壊する。 C_{ent} を大きくするにつれ、ジェット分裂長は短くなる。

本融体ジェットモデルでは、ジェットからの伝熱は、表面積と冷却水内の移動時間のどちらにおいても、融体粒子や融体プールの場合と比較して小さいので、現在のところ考慮されていない。従って、ジェットから冷却水への熱流束は 0 と設定される。

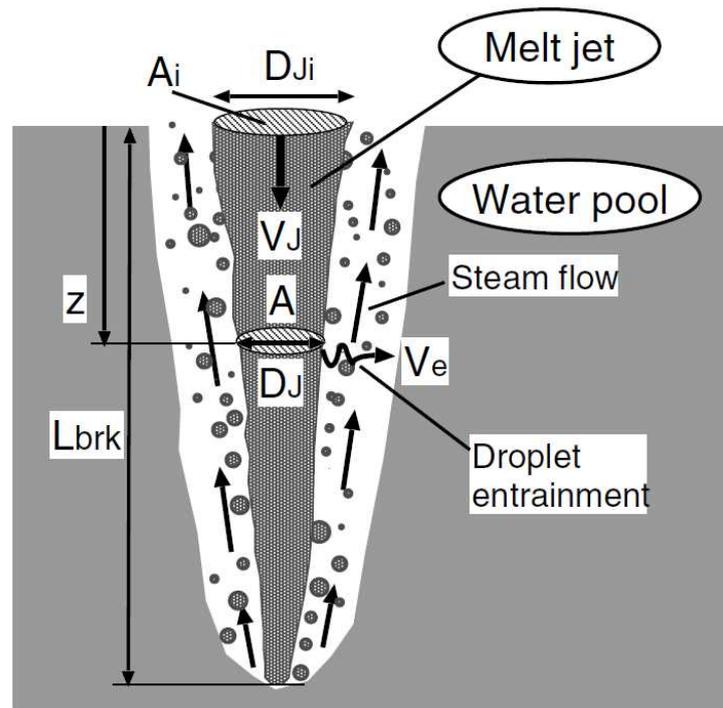


図 2.2.3 ジェット分裂モデルの概要 [1]

(2) 融体プールモデル

ジェット又は粒子群が底面に到達する際には、連続した融体を形成する可能性がある。図 2.2.4 に、融体プールモデルの模式図を示す。融体プールモデルの概要を以下に示す。

- x 方向一次元の質量、エネルギーおよび運動量保存則を解く。
- ジェットや粒子群から加わった融体質量を考慮する。
- 融体プール表面における二相流および床との摩擦影響は無視する。
- 融体プール端の凝固を取り扱う。
- 二相流と融体プール間の伝熱を考慮する。(図 2.2.5)
- 流動様式が気泡流以外、すなわち核沸騰、膜沸騰状態となって気相体積が増加することによる熱流束緩和効果(ボイド効果)は、ベース熱流束にボイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。

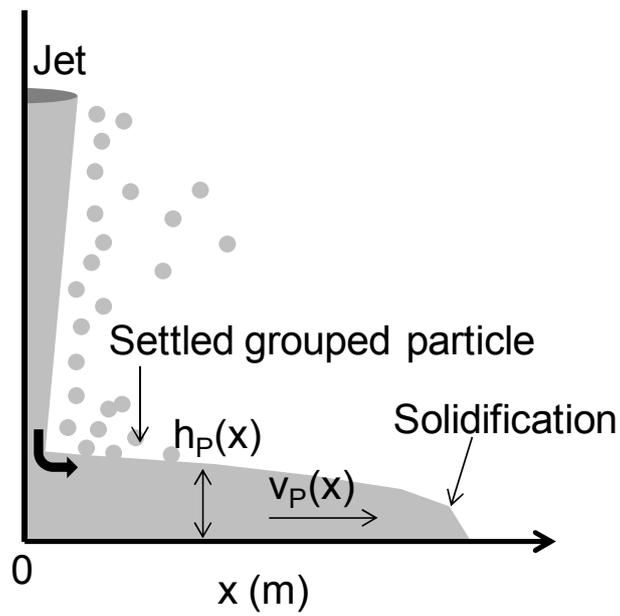


図 2.2.4 融体プールモデル模式図 [1]

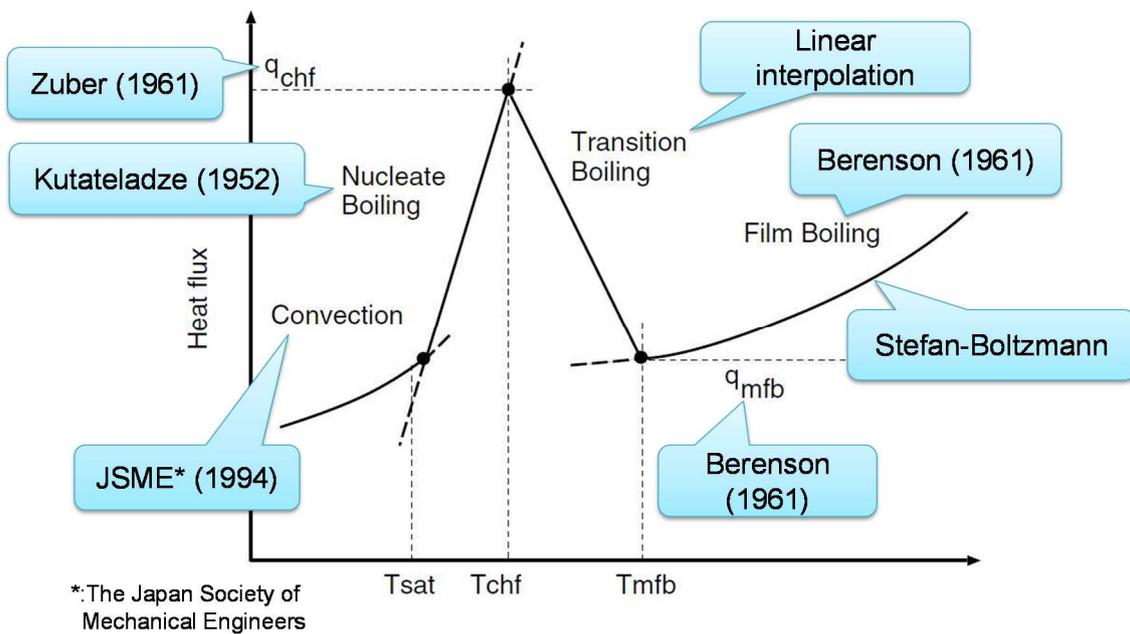


図 2.2.5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)

(3) 融体粒子モデル

実機体系のような大規模シミュレーションを可能とするために、グループ化された粒子（粒子群）の概念が導入された。図 2.2.6 に融体粒子モデルの概要図を示す。融体粒子モデルの概要を以下に示す。

- “粒子群”とは、同じ特性を持ち、 x - z 平面上の有限な空間を占める粒子のグループである。
- 粒子群の実際の形状、回転、拡散特性のような属性は無視される。
- それぞれの粒子群の代表粒子の動きやヒートバランスは、ラグランジュ方程式によって計算される。
- ジェット表面から粒子群が離れる前に、一定量以上の粒子を蓄える“前粒子群”概念が導入されている。前粒子群の融体ジェット表面からの放出基準を以下に示す。
 - 粒子群質量 > 0 , かつ下記に示す少なくとも 1 つの状況に該当すること。
 - 粒子数が N_{per} (ユーザー設定値) の値を超える。
 - 前粒子群の x 方向のサイズが、格子の x 方向サイズの 4 分の 1 より大きい。
 - 前粒子群の x 方向の外側のエッジ位置が最初のセル境界を超える。
 - 存続時間が時間制限値 n_{hist} (ユーザー設定値) を超える。

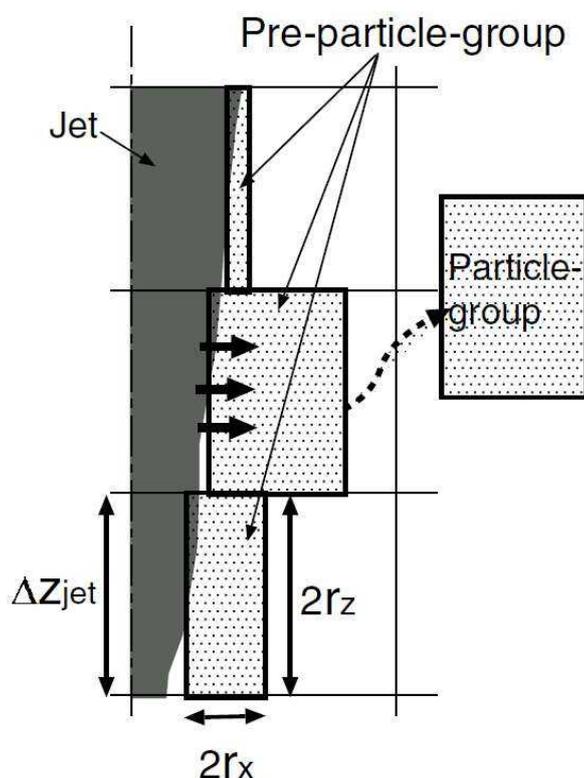


図 2.2.6 融体粒子モデル概要図 [1]

次に、粒子群の取り扱い手法について説明する。

図 2.2.7 に、物理的に非現実的な状況の発生を回避するために設けられた粒子群間のインターフェースにおける三つのモデルを示す。これらのモデルの特徴を以下に示す。

1. 接触する二つの粒子群の粒子の体積割合の総和が融合制限 $\alpha_{\text{pack}} (= 0.6)$ 以上となる場合は、二つの粒子群は減衰係数 0.5 の条件で反発する。
2. 上記の条件を満たさず、かつ二つの接する粒子群が同じような特性を持つ場合、すなわち温度、粒子径、速度が 20%以内の差で一致する場合は、それらは融合して一つの粒子群となる。
3. 上記二つの条件を満たさない場合、二つの粒子群は干渉を起こさずにすり抜ける。

図 2.2.8 に、解析体系の境界において粒子群に適用する取扱い条件を示す。

1. 粒子群が中心境界に到達した場合、境界内側へ弾性衝突する。
2. 粒子群が頂部または側部の境界に達した際は、減衰係数 0.1 の条件で境界内側へと反発する。
3. 粒子群が底へ到達した際、デブリプールと粒子群のどちらかが溶融している場合には粒子群はデブリプールと融合する。そうでない場合には、粒子群は冷え固まったデブリプール上に堆積し、デブリベッドを形成する。

図 2.2.9 に粒子に対する抗力係数の評価条件を示す。抗力係数は球体に対する一般的な評価式を用いる。

融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。

- ・ 粒子表面における熱伝達率は、図 2.2.10 に示す相関式により評価される。粒子が固化するかどうかは、その粒子の表面温度により判断される。
- ・ 粒子群周囲のボイドおよび床への粒子群堆積に伴う伝熱効果の劣化の影響が考慮される。

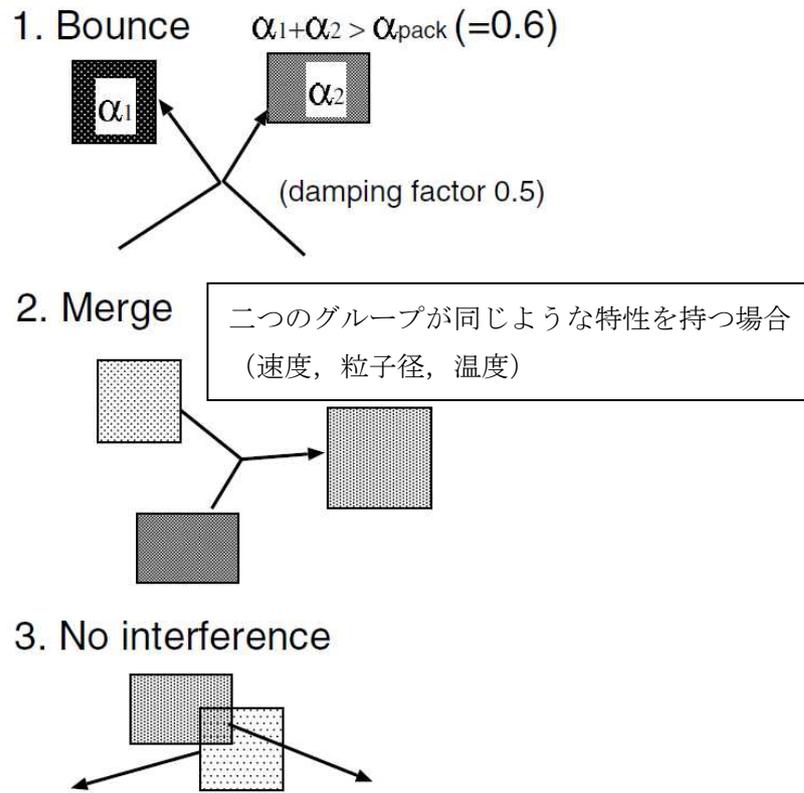


図 2.2.7 粒子群間のインターフェースモデル [1]

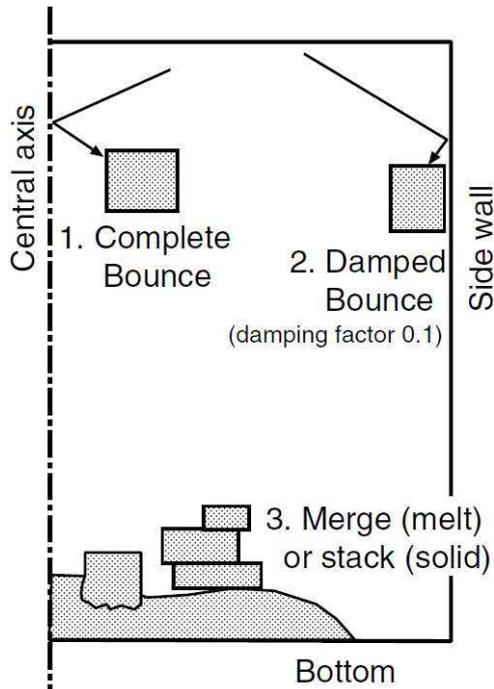


図 2.2.8 粒子群の境界での取扱い [1]

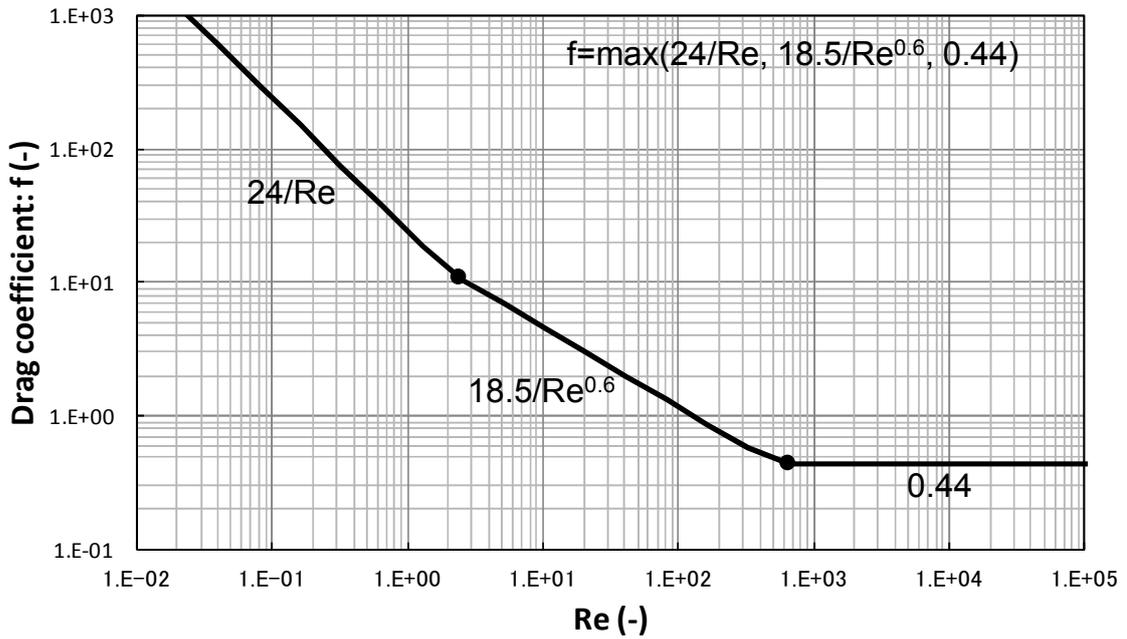


図 2.2.9 融体粒子の流体抗力係数

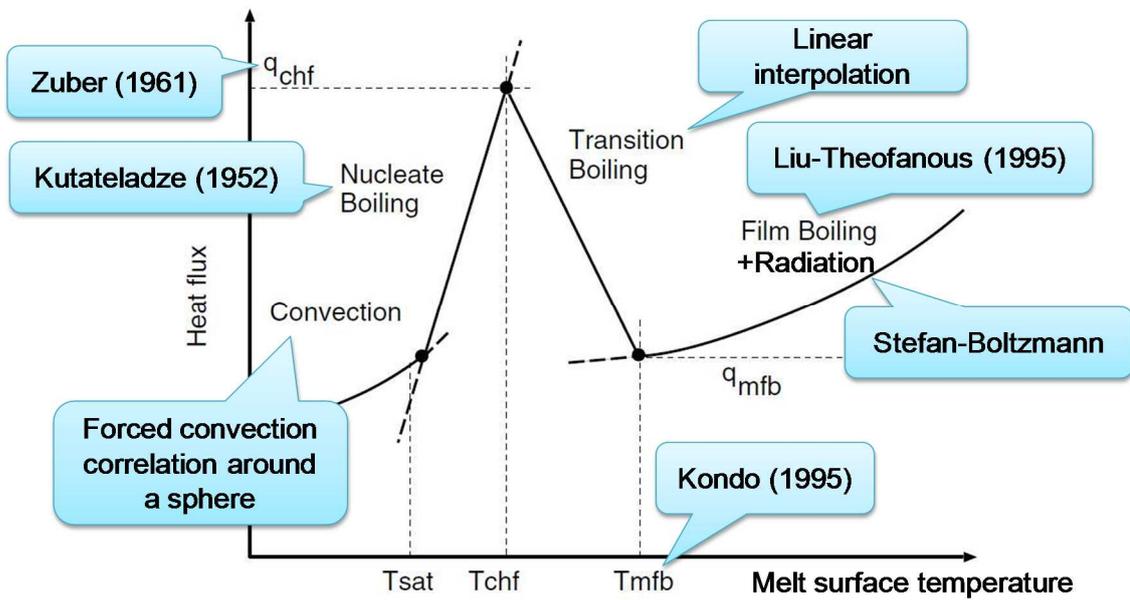


図 2.2.10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)

(4) トリガリングモデル

JASMINE コードを用いた解析では、粗混合計算結果を爆発計算に引き継ぐ際に、トリガリングと呼ばれる爆発のきっかけをユーザーが任意のタイミングで与えることにより、爆発解析を実施する。トリガリングモデルの特徴を以下に示す。

- ・ 局所的な圧力上昇と瞬時のガス膨張によりトリガリングを与える。
- ・ 圧力伝播は細粒化を誘発する。細粒化のしきい圧力はインプットとして与える。

(5) 細粒化モデル

爆発過程は以下の概念を基本としてモデル化されている。

- ・ 粗混合で発生した粒子が衝撃波、即ち周囲冷却材の極端に大きな相対速度に晒されると、流体力により粒子表面の融体が細粒化する。
- ・ 細粒は μm オーダーで熱放出が非常に早く、瞬時に水を蒸発させることで、衝撃波を増幅させる。熱放出は細粒の発生率に依存する。

上記過程を評価するために、図 2.2.11 に示す粒子群モデルにおいて、融体モデル構成要素として”細粒群”が追加された。

細粒群は粒子群から発生した細粒の集合体である。細粒群は以下のように扱われる。

- ・ 細粒の発生：細粒質量は母粒子群から水力的な相互作用により分離される。質量保存則は次のように表せる。

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$$

ここで、 m_p は粒子群中の一粒子の質量、 m_f は一粒子から生成する細粒群の質量、 M_f は粒子群全体から生成する細粒群の質量、 n_p は粒子群の粒子数である。一粒子からの細粒化率 \dot{m}_f は構成式(2.2-7)により与えられる。

- ・ 伝熱とエネルギー保存：

細粒表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、細粒内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。細粒の外部の熱伝達率は非常に大きいと考えられ、定常状態でのいかなる伝熱式もこの特異に過度的な状況には適用できない。細粒の単位質量当たりの熱放出量 \dot{q}_f を用いて、細粒のエネルギー保存は以下のように表せる。

$$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$$

ここで、 e_f と e_p は細粒と粒子の比内部エネルギーである。母粒子の比内部エネルギーは爆発過程では一定であると仮定する。

細粒の大きさはインプットで与えられる。細粒の主要な作用は急速熱放出で、運動論的な観点は重要ではないことから、細粒に対する運動方程式は解かず、細粒は母粒子群に付随すると仮定する。

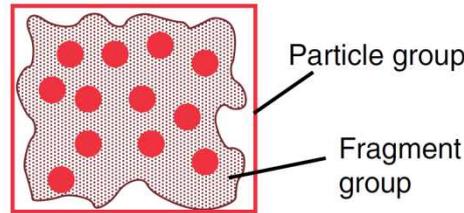


図 2.2.11 粒子群と細粒群 [1]

一融体粒子からの細粒化率 \dot{m}_f は以下のように求める。

$$\dot{m}_f = C_{fsg} \cdot \frac{1}{t_b^*} \cdot \frac{\pi}{6} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$$

$$t_b^* = \begin{cases} 1 & \text{:Caracharios et al. model} \\ 13.7/Bo^{1/4} & \text{:Yuen et al. model} \end{cases} \quad (2.2-8)$$

$$Bo = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$$

$$t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_c} \frac{D_p}{v_r}} \quad (2.2-10)$$

ここで、 t_b は分裂時間、 t_b^* は分裂の無次元時間、 D_p は粒子径、 v_r は粒子と冷却材間の相対速度、 ρ_c と ρ_p は冷却材と融体粒子の密度、 σ_p は融体粒子の表面張力である。抗力係数 C_D はニュートン域の値0.44を使用する。実験定数 C_{fsg} はチューニングパラメータである。

(6) 二相流モデル

JASMINE における二相流モデルは、二相流コード ACE-3D^[6]を基に開発された。二相流モデルの特徴を以下に示す。

- ACE-3D は円筒座標系の 3 次元保存方程式を解くことができるが、JASMINE コードでは二次元座標系での計算機能が適用されている。
- 水、蒸気、非凝縮性ガスの質量および内部エネルギー方程式が解かれる。対して、運動量方程式においては、蒸気と非凝縮性ガスは平衡状態であると仮定して、水、混合性ガスの質量および内部エネルギー方程式を解く。
- 融体プールと融体粒子、細粒からの伝熱を扱うことができる。
- 水-ガス間の熱伝達係数 (図 2.2.12 参照) は、TRAC-PF1 コードの気泡流と液滴流のモデルを採用
- 二相間の相対速度が終端速度に等しいと仮定 (図 2.2.13 参照)
- 水滴/気泡径は臨界 We 数を用いて評価。臨界 We 数は、水滴は 4.0, 気泡は 7.5 (図 2.2.13 参照)
- 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ。(図 2.2.14 参照)
- 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2.2.15(a) に示し、細粒から二相流への伝熱量分配機構を図 2.2.15(b) に示す。

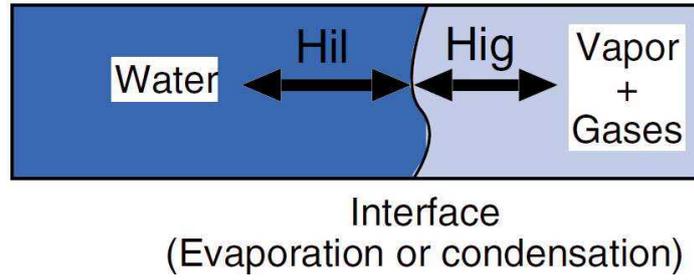


図 2.2.12 水とガスの界面における熱伝達 [1]

$$\text{Buoyancy} = \frac{\pi}{6} d_d^3 \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g$$

$$\text{Drag} = C_d \frac{\pi}{4} d_d^2 \cdot \frac{1}{2} \rho_c \cdot v_r^2$$

|| Balance

d_d : 気泡または液滴の径, ρ_l, ρ_g : 水, ガスの密度,
 g : 重力加速度, C_d : 抗力係数, ρ_c : 連続相の密度,
 v_r : 相対速度, We_{cr} : 臨界ウェバー数 (水滴 4.0, 気泡 7.5), σ : 表面張力

$$d_d = \frac{We_{cr} \cdot \sigma}{\rho_c \cdot v_r^2}$$

図 2.2.13 水滴および気泡における力のつり合い

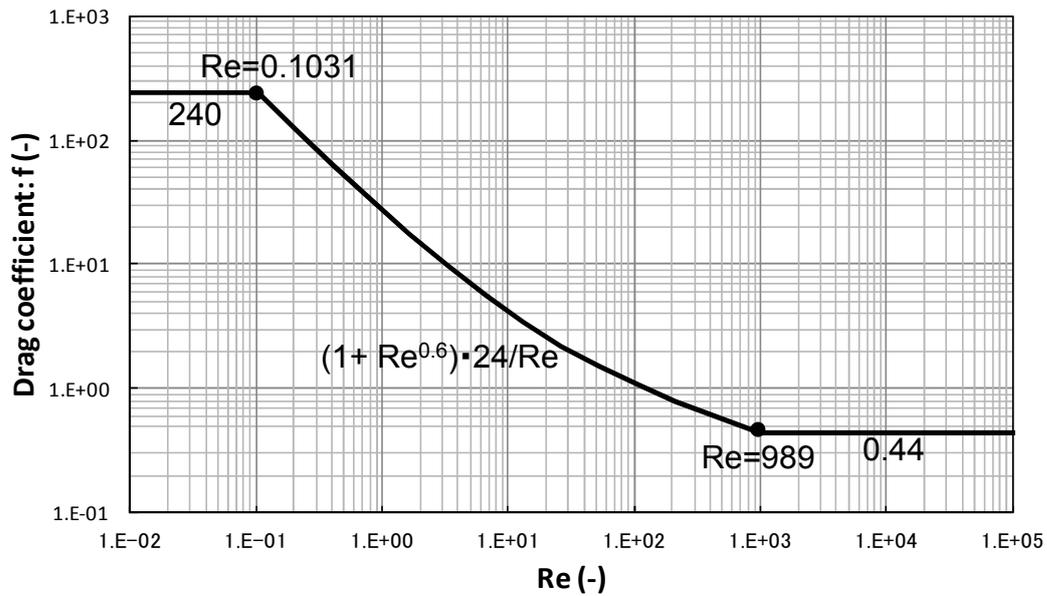
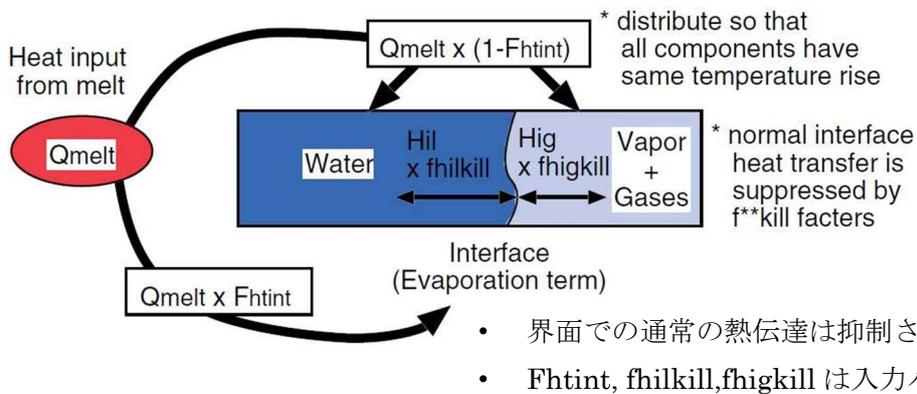
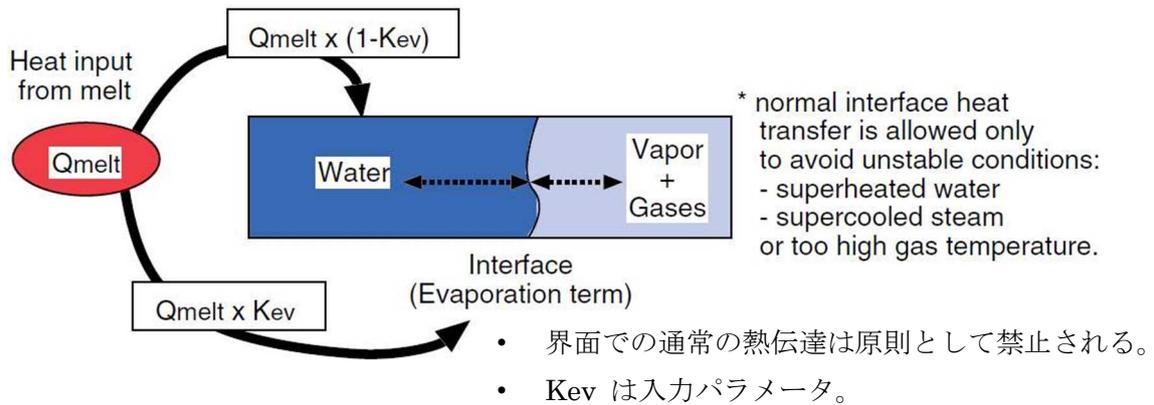


図 2.2.14 水滴および気泡の流体抗力係数



(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構 [1]



(b) 細粒から二相流への伝熱量分配機構

図 2.2.15 二相流への伝熱量分配機構 [1]

2.3. 入出力

本章では、JASMINE による水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。

図 2.3.1 に水蒸気爆発解析のフロー図を示す。幾何形状等のプラント固有条件や事象進展解析 (MAAP) に基づく溶融燃料条件等に基づき JASMINE 入力条件の設定を行う。

JASMINE 解析の評価結果は、水蒸気爆発時の格納容器の健全性評価を実施するための構造応答評価コードの負荷条件として用いられる。水蒸気爆発負荷として、高圧気泡を膨張させるモデルを用いる場合には、水蒸気爆発時の発生エネルギー条件や爆発時の圧力条件が構造応答評価コードに引き渡される。

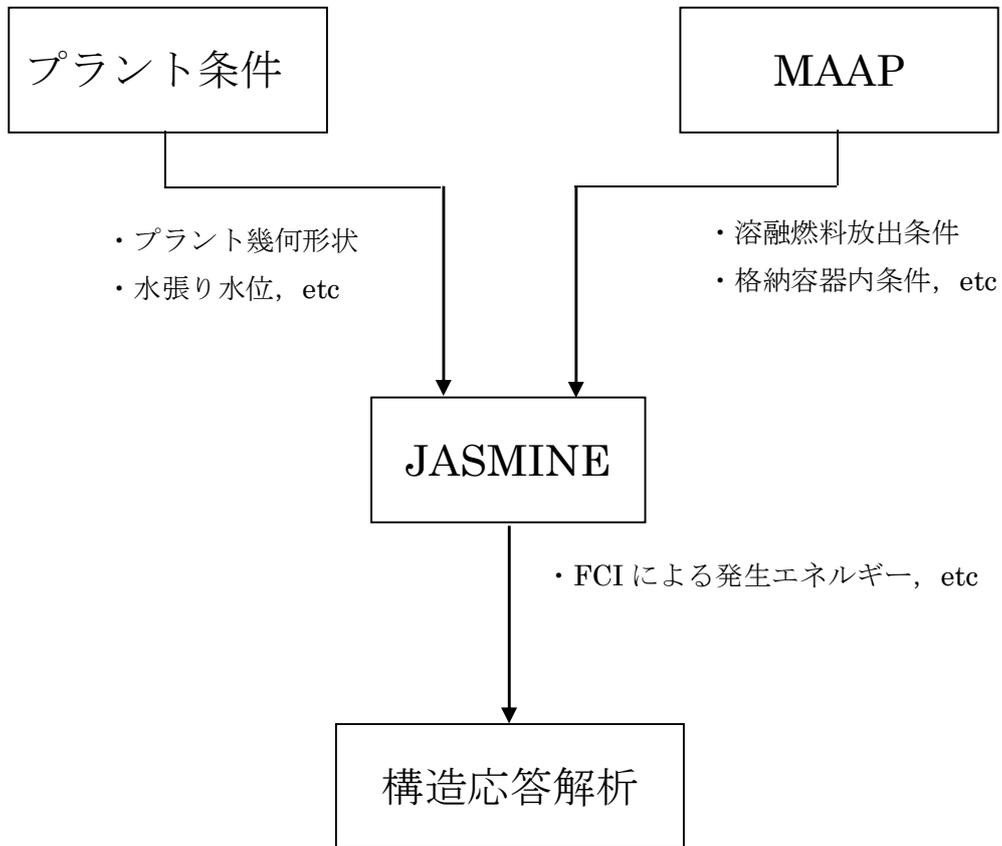


図 2.3.1 水蒸気爆発解析の流れ

2.3.1. 入力例

(1) 計算体系の幾何形状

計算領域は、図 2.3.2 に示す通り、円筒座標系における角度 θ のセクターとして定義され、体積はX-Z平面のグリッドとして離散化される。

原子炉圧力容器破損時におけるペDESTAL領域での水蒸気爆発解析を実施する場合、計算体系を圧力容器、ペDESTAL壁面、床面で形成される原形状の中からモデル化することができる。

X-Z平面でのメッシュ分割は、JASMINE コードの制限値【X方向(=30)、Z方向(=40)】以内で任意に設定することができ、ペDESTAL領域について、ベッセル、ペDESTAL空間(液相、気相)、ペDESTAL壁面等を定義することが可能である。図 2.3.3 にメッシュ分割の例を示す。

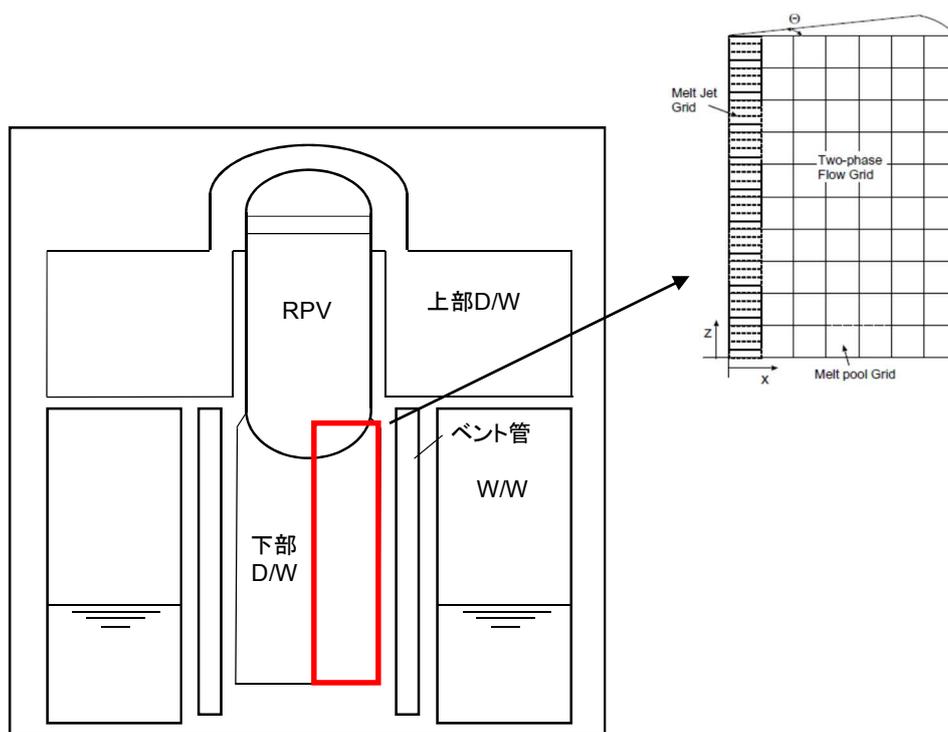
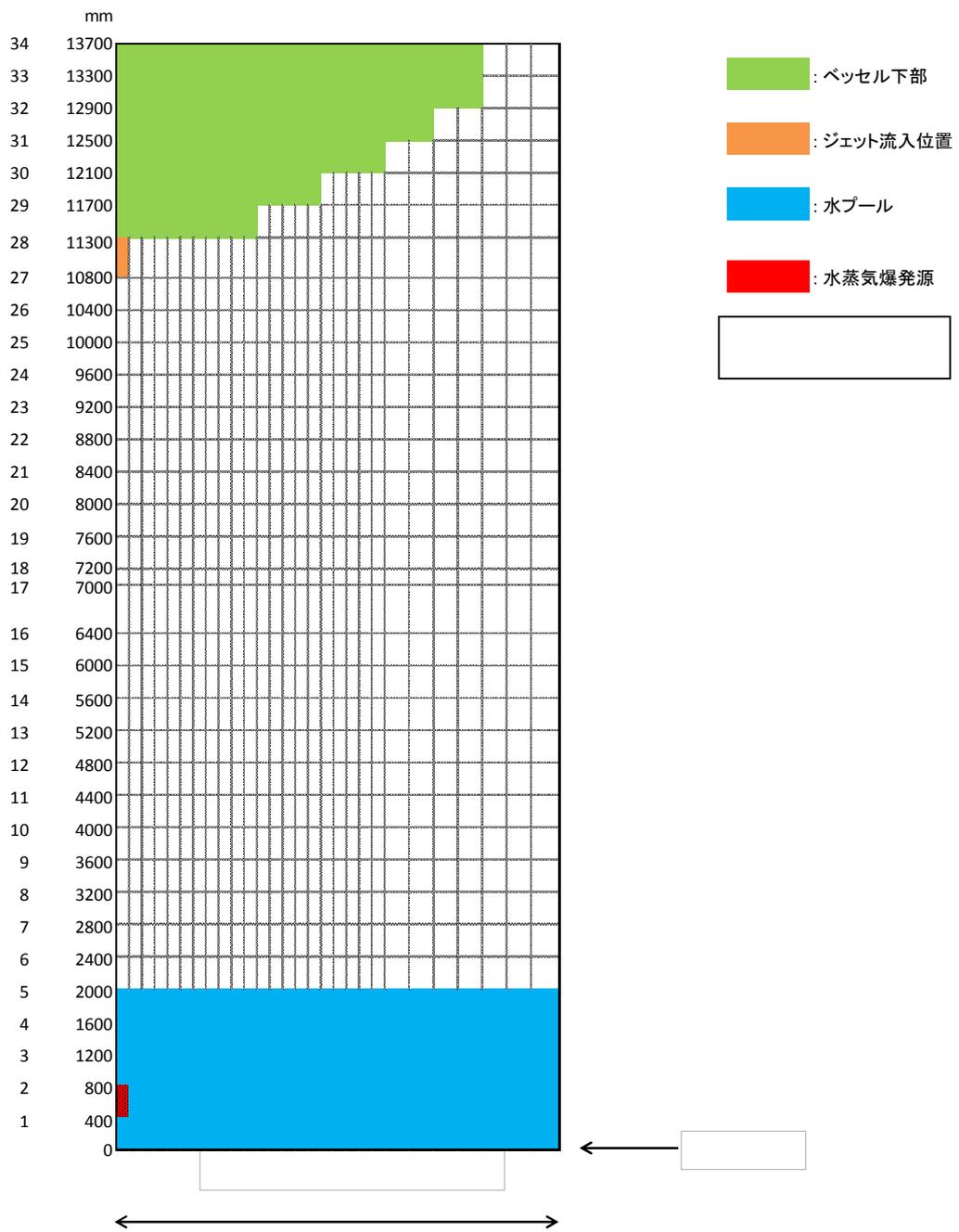


図 2.3.2 計算体系の幾何形状の例



メッシュ分割 X方向 : 28 Z方向 : 34

図 2.3.3 JASMINE のメッシュ分割の例

(2) 溶融炉心物性値

溶融炉心物性値については、溶融コリウムの物性値ライブラリ (`jasmine.corium`, `jasmine.corium2`, `jasmine.corium3`) が、JASMINE コード付属されており、ユーザーは目的に応じてこれらを活用することができる。各物性値ライブラリの主要な特性は以下のとおりである。表 2.3.1 に `jasmine.corium2` の物性値を例示する。

`jasmine.corium` : TROI 試験条件 ($UO_2/ZrO_2=70/30wt\%$)
`jasmine.corium2` : 実機相当条件
`jasmine.corium3` : FARO/KROTOS 試験条件 ($UO_2/ZrO_2=80/20wt\%$)

(3) 主要入力値

表 2.3.2 に(1), (2)以外の主要な入力例を示す。

表 2.3.1 JASMINE 解析における物性値

No.	項目	物性値		備考
		数値	単位	
1	溶融点		[K]	組み込みライブラリ (jasmine.corium2) に基づく値
2	固相線温度		[K]	
3	液相線温度		[K]	
4	固相密度		[kg/m ³]	
5	液相密度		[kg/m ³]	
6	液相比熱		[J/(kg・K)]	
7	固相比熱		[J/(kg・K)]	
8	溶融潜熱		[J/kg]	
9	熱伝導率		[W/(m・K)]	
10	粘性係数		[Pa・s]	
11	表面張力		[N/m]	
12	輻射率		[-]	

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属
しますので公開できません。

表 2.3.2 JASMINE 解析における主な入力条件の例(1/2)

No.	入力	値(定義)	単位	備考
1	初期圧力		[Pa]	MAAP 解析結果に基づき設定。
2	プール水温		[K]	MAAP 解析結果に基づき設定。
3	落下メルト総重量		[kg]	MAAP 解析結果に基づき設定。
4	メルトジェット温度		[K]	
5	メルト放出速度		[m/s]	MAAP 解析に基づく RPV 破損時のデブリ流入速度の最大値を設定。
6	メルト放出口径		[m]	
7	プール水深	2	[m]	手順上定める値を設定。
8	粗混合時液滴径		[m]	大規模 FCI 実験結果 (FARO, COTELS 等) の粒径分布 (質量中央径 3~6mm) から代表粒子径として設定。
9	爆発後粒子径		[m]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
10	ブレイクアップ係数		[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
11	液滴速度ファクタ		[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
12	トリガリング位置	ベデスタルの 中心, 底から 0.6m	[m]	トリガ位置には中心軸上の底部付近として底部から軸方向 2 セル目を選定。これは爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く、爆発の強度が大きくなりやすい条件を選定したものである。
13	トリガリングタイミング		[sec]	水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。
14	トリガ閾値		[Pa]	

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属
しますので公開できません。

表 2.3.2 JASMINE 解析における主な入力条件の例(2/2)

No.	入力	値(定義)	単位	備考
15	フラグメンテーション モデル		[-]	-
16	フラグメンテーション 条件		[-]	-
17	フラグメンテーション 係数		[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検 証解析に用いられる条件を採 用。
18	フラグメンテーション 時間		[sec]	
19	蒸発に用いられるエネ ルギー割合		[-]	
20	フラグメンテーション におけるボイド緩和係 数		[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検 証解析に用いられる条件を採 用。
21	トリガ点圧力		[Pa]	
22	トリガ点ガス割合		[-]	トリガ気相割合は、粗混合解析 結果に基づきトリガ発生時点 でのトリガセルでの気相割合を 設定。
23	トリガ点ガス温度		[K]	文献[1]記載の JAEA が実施した 検証解析に用いられる条件を採 用。

2.3.2. 出力例

JASMINE 解析は、「粗混合過程」と「爆発過程」の2段階に分かれている。それぞれの解析における主要な出力を以下に示す。

(1)粗混合過程

- ・放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量

粗混合解析は、爆発解析の初期条件を評価するために実施する。重要な物理量は、粗混合過程において熔融状態で水中に分散した融体の質量であり、この物理量に基づきトリガタイミングを設定する。

JASMINE ではこの物理量を定量化する指標として、粗混合融体質量（ボイド率 0.75 以下の領域に存在し、温度が融点以上の融体質量）の時間変化を出力することができる。爆発の強度が大きくなるように粗混合融体質量が最初にピークとなったタイミングでトリガタイミングを設定する。

(2)爆発過程

- ・流体の運動エネルギーの時間変化

流体の運動エネルギーを用いて構造健全性評価を実施する場合には、水蒸気爆発発生時にトリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、全領域の流体の運動エネルギーの時間変化からその最大値を設定することが考えられる。

3. 解析結果の例示

本項では、ABWR 代表プラントにおける JASMINE 解析結果例を示す。

評価条件はそれぞれ以下の通りである。

- ・評価体系 : 図 2.3.3
- ・主な評価条件 : 表 2.3.1, 表 2.3.2

(1) 粗混合過程

放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量を図 3.1 に示す。図 3.1 により、粗混合融体質量が最初にピークとなる約 0.9 秒後にトリガタイミングを設定している。

(2) 爆発過程

流体の運動エネルギーの時間変化を図 3.2 に示す。図 3.2 より、流体の運動エネルギーのピーク値約 7MJ が水蒸気爆発時に発生するエネルギーと設定することができる。

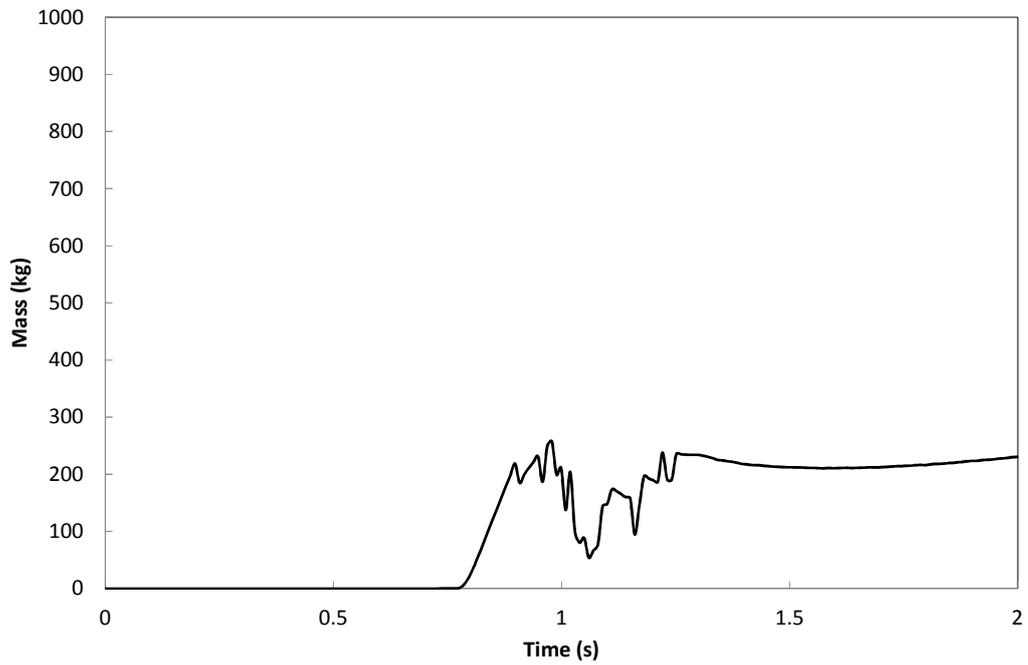


図 3.1 粗混合融体質量（温度が融点以上かつボイド率 0.75 以下の領域に存在する融体質量）の時間的推移

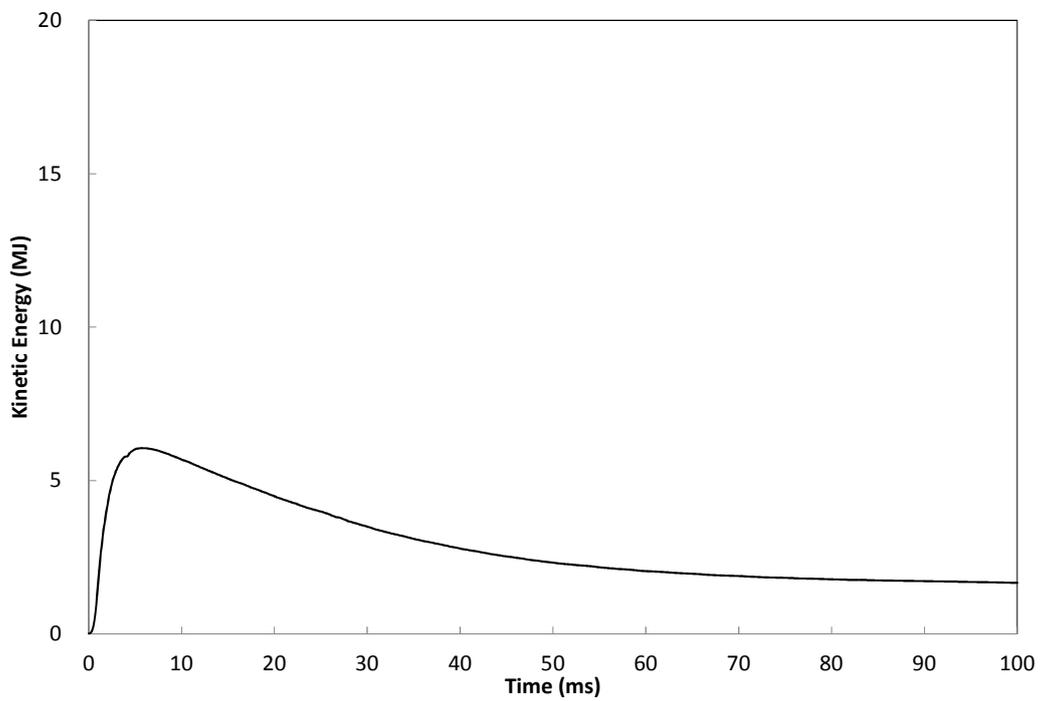


図 3.2 流体運動エネルギーの時間的推移

4. 水蒸気爆発実験への適用例

4.1. 粗混合実験解析

粗混合に関するモデルの検証およびパラメータ調整のために、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 試験に関するシミュレーションを、日本原子力研究開発機構が実施している [1]。FARO 試験では、溶融燃料としてウラン(UO_2)とジルコニウム(ZrO_2)の混合物)を使用し、これらを水プールに落下させたときの、融体ジェット分裂やクエンチ時の加圧および水蒸気発生によるプール水位上昇などのデータが得られている。FARO 試験における試験装置の概要を図 4.1.1 に示す。JASMINE におけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径などのパラメータの異なる 3 種類の試験ケースを選択している。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。

- L14 ケース : サブクール度は 1K と小さく、圧力は高圧 (5MPa) であり、ジェット径は 92mm と大きい。雰囲気ガスは蒸気である。
- L28 ケース : サブクール度は 1K と小さく、圧力は低圧 (0.51MPa) であり、ジェット径は 44mm と小さい。雰囲気ガスは蒸気である。
- L31 ケース : サブクール度は 104K と大きく、圧力は最も低圧 (0.22MPa) であり、ジェット径は 48mm と小さい。雰囲気ガスはアルゴンである。

4.1.1. 解析条件

ベンチマーク対象の実験ケース (L14, L28, L31) の実験条件およびそれぞれのベンチマーク解析条件を表 4.1.1.1 に示す。また、試験装置を模擬した解析モデルを図 4.1.1.1 に示す。

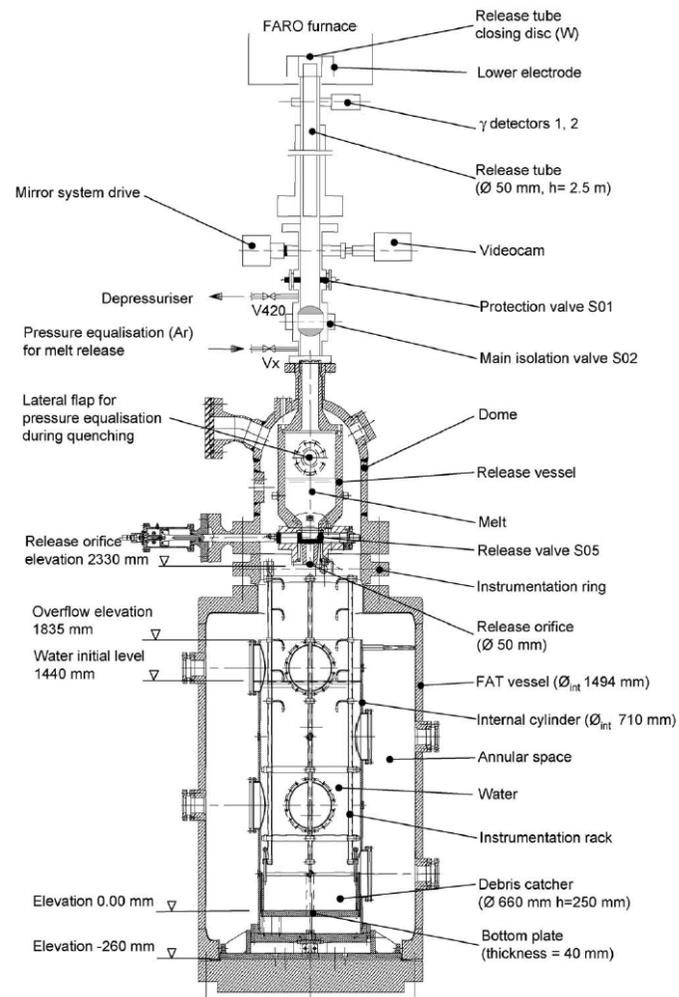
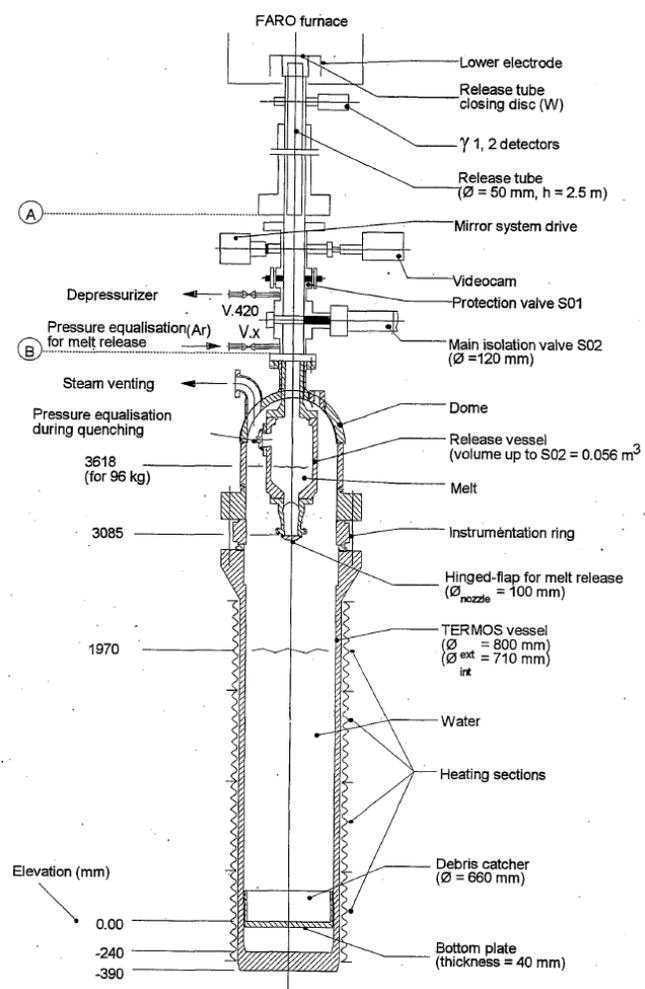
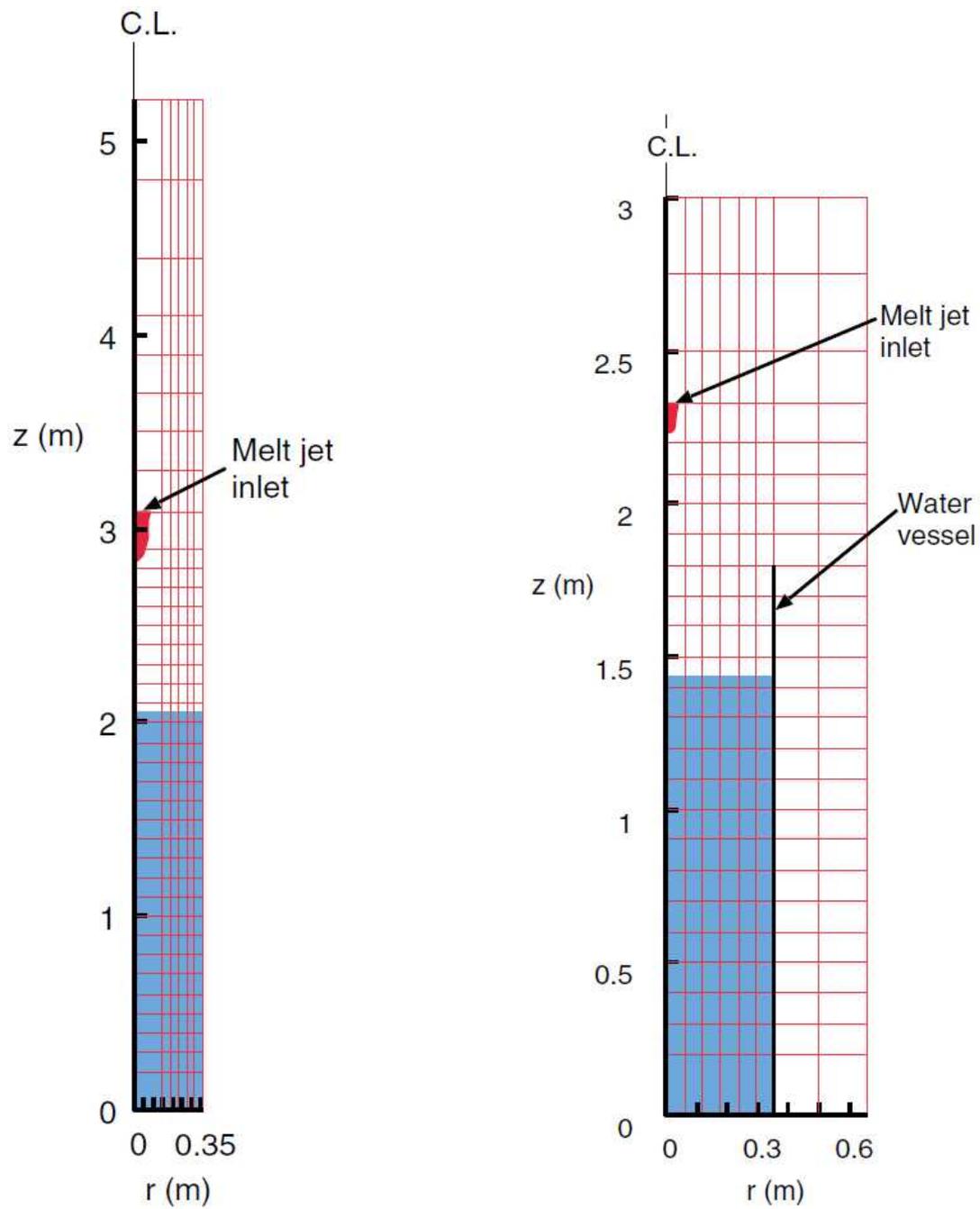


図 4.1.1 FARO 試験装置 [9][10]

表 4.1.1.1 FARO 試験 (L14, L28 および L31) の試験条件及び解析条件

	L14	L28	L31
Melt			
Material	Corium ($T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$, 80wt% UO_2 -20wt% ZrO_2)		
Released mass (kg)	125	175	92
Temperature (K)	3073	3053	2990
Jet diameter at inlet (mm)	92	44	48
Water			
Temperature (Subcool) (K)	537 (1)	424 (1)	291 (104)
Pool depth (m)	2.05	1.44	1.45
Water vessel diameter (m)	0.71	0.71	0.71
Cover gas			
Atmosphere	Steam	Steam	Argon
Initial pressure (MPa)	5.0	0.51	0.22
Cover gas volume(m ³)	1.26	3.53	3.49
Results			
Pressure rise at plateau (MPa)	2.5	1.2	0.04
Level swell (m)	~1.4	~0.6	~0.3
Agglomerated mass (kg)	20 (16%)	77 (44%)	0
Debris mean dia. ^{a)} (mm)	5.0	3.0	3.3
Analytical			
Grid (Water pool zone)	6×37(6×20)	8×25(6×14)	
Central column radius (m)	0.15	0.10	0.10
Time step (ms)		~0.5	
Jet initial velocity(m/s)	3.0	~3.0	~2.7
Jet flow-in duration(s)	0.80	5.2	2.5
Melt particle dia.(const.)(mm)	5.0	3.0	3.0
Jet break-up length model ^{b)}	Taylor type, $C_{ent} = 1$		
Surface temperature drop model	Use		
N_{pcr} ^{c)}	1000		
n_{hist} ^{c)}	1000		
F_{htint} ^{d)}	0.02		

a) mass median diameter b) see 2.2.1 c) see 2.2.3 d) see 2.3.2

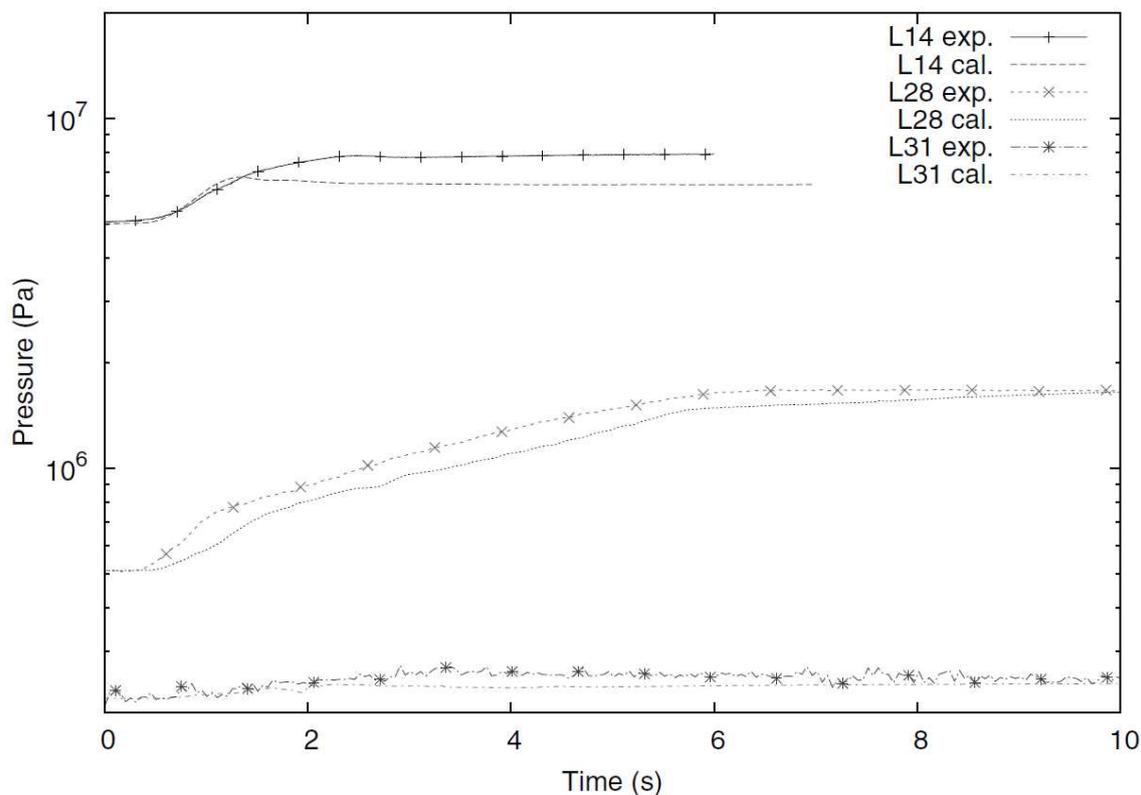


出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.1.1.1 FARO L-14(左)および FARO L28, L31(右)の解析モデル

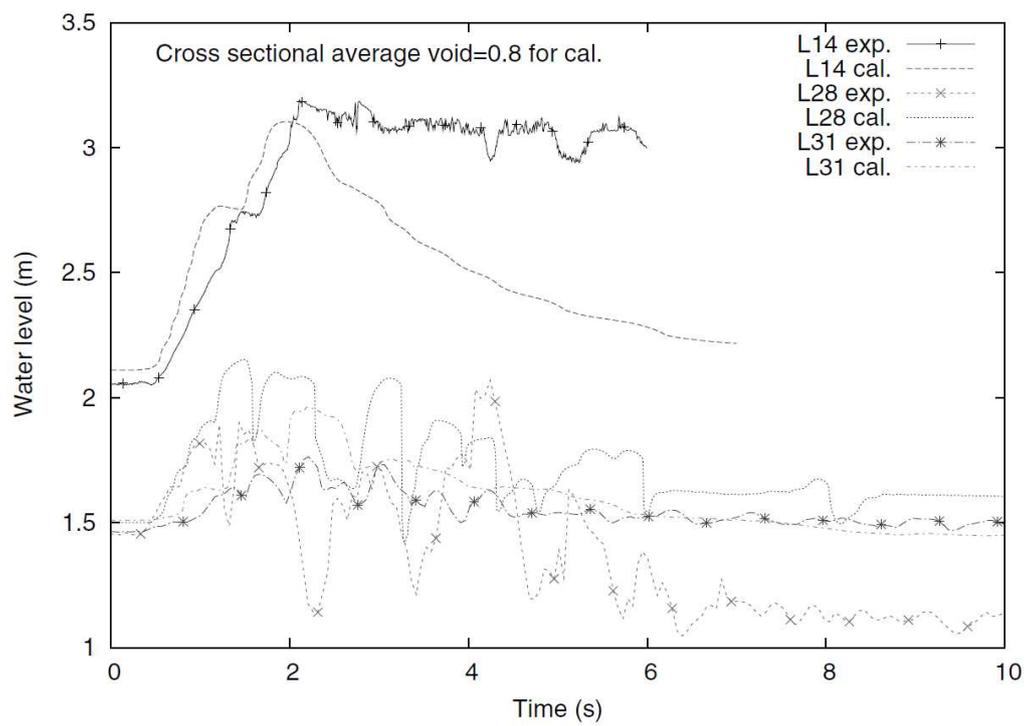
4.1.2. 解析結果

圧力履歴の解析結果を図 4.1.2.1 に、プール水位挙動の解析結果を図 4.1.2.2 に示す。図において、exp. が試験結果で、cal. が解析結果である。全体として試験結果は概ね良く再現されている。詳細にみると、圧力がやや低めに評価されているのに対し、特に低圧試験 (L28 と L31) において水位は高めに評価されている。



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.1.2.1 圧力履歴比較



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.1.2.2 プール水位挙動比較

4.2. 爆発実験解析

爆発に関するモデル関数及びパラメータの調整のため、JRC-Ispra 研究所にて実施された KROTOS-44, 42, 37 実験及び FARO-L33 実験を対象としたシミュレーションを、日本原子力研究開発機構が実施している。^[1]

KROTOS 実験では、1~3kg 程度の溶融アルミナまたはコリウム (UO_2 と ZrO_2 の混合物) を円柱形状の水槽に落下させ、圧縮アルゴンガスによる圧力パルスによってトリガがかけられている。FARO 実験は、大規模スケールの実験であり、100kg の溶融コリウムを水プールに落下させ、起爆装置からの圧力パルスによってトリガがかけられている。これらの実験結果から、各位置での圧力過渡変化及び細粒化粒子の粒子径分布に関するデータに対する検証を実施した。

4.2.1. 解析条件

解析条件を表4.2.1.1に、KROTOS及びFARO実験の解析メッシュモデル図を、図4.2.1.1に示す。水蒸気爆発解析では粗混合過程と爆発過程の2つの過程を解析する。粗混合過程では、計算モデルを調整することで実験結果を適切に模擬することが可能である。具体的には、ジェット分裂長さの相関式と調整係数は、同等の状況で水蒸気爆発が発生しない場合のジェット分裂長さを再現できるよう選択される。

トリガ時刻における全体のボイド率などの実験パラメータの一致性を確認し、粗混合過程の解析結果が妥当であることを確認した。そして、それらの結果を爆発過程の初期条件に設定した。

爆発解析では融体物質やその他の実験条件に関係なくモデルパラメータの値を一定とする。これらは、解析値がKROTOSのアルミナ実験での圧力パルス、水蒸気爆発により発生した微粒子の質量分率と一致するように設定している。爆発過程でのモデルパラメータの調整にアルミナを用いた実験を採用した理由を以下に示す。図4.2.1.2に、KROTOS実験のアルミナとコリウムの総質量、融体質量及びボイド率 0.75 以下の融体質量についての比較結果を示す。アルミナでは粗混合過程において常に溶融状態であり、過度に水蒸気が発生することはない。その為、理想的な粗混合条件（融体物質の大部分が固化せず、水と十分に混合されている）が達成できている。一方、コリウムではトリガ時刻における融体の大部分が固化あるいは高ボイド率領域に含まれている為、水蒸気爆発に寄与する融体量はわずかとなる。この相違は物質の物理的特性や初期温度に関係する。アルミナはコリウムと比較して、融点、初期温度及び密度が低く、潜熱が大きい。その為、液滴径が大きくなり、融体が冷却されるまでに要する時間が長くなる。また、アルミナの融体温度が低く、体積当たりの表面積が小さいため、水への熱伝達は小さくなる。これらの理由により、コリウムではアルミナほど大規模な水蒸気爆発は発生しない。以上より、理想的な粗混合状態が得られるアルミナを用いた実験のほうが、爆発過程の微粒化モデルパラメータの調整には適切と考えられる。

外部トリガは、中心底部のセルに与える。外部トリガ条件は、KROTOSでは、実験で使用したガス室の条件（ 15cm^3 、 14MPa 、 pV =約 220kJ ）から設定する。また、FARO-L33では、起爆エネルギー 1kJ と等価な体積と圧力（ 28.6 cm^3 、 35MPa ）から設定する。

表 4.2.1.1 KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33 の実験条件及び解析条件

		K44	K42	K37	L33
Melt	Material	Alumina ^{a)}		Corium ^{b)}	
	Released mass (kg)	1.50	1.54	3.22	100
	Temperature(K)	2673	2465	3018	3070
	Jet release dia. (mm)	30			48
	Free fall height(m)	0.44			0.77
Water	Temperature(Subcool) (K)	363(10)	293(80)	296(77)	294(124)
	Depth (m)	1.105			1.62
	Vessel diameter (m)	0.20			0.71
Cover gas	Atmosphere	Steam	Argon		
	Pressure (MPa)	0.10			0.41
	Cover gas volume(m ³)	0.290			3.496
Premixing results	Level swell (cm)	12	3	30	9
	Jet break-up length (m)	~0.3		~0.8	~1.1
Explosion results	Pressure peaks (MPa)	~50	~50	NA ^{e)}	~6
	Half height width (ms)	~1.5	~1	NA ^{e)}	~3
	Debris <0.106mm (%)	47	31	1.4	~8 ^{d)}
Analytical conditions	Time step (μ s)	~2			
	Jet initial velocity(m/s)	3.0			~2.9
	Jet flow-in duration(s)	0.270	0.255	0.191	2.6
	Melt Particle dia.(mm)	10		2	3
	Jet break-up length model ^{e)}	S: $C_{ent} = 2.5$		S: $C_{ent} = 1.7$	T: $C_{ent} = 1$
	Surface temperature drop model	Use			
	N_{pcr} ^{f)}	100			1000
	n_{hist} ^{f)}	500			1000
	External trigger	14.8MPa-15cm ³			35MPa-29cm ³
	Trigger time (s)	0.9		0.5	1.12
	C_{frg} ^{g)}	0.35			
	d_{frg} (μ m) ^{g)}	50			
	$t_{triglifc}$ (ms) ^{g)}	1.0			
	p_{trig} (MPa) ^{g)}	0.2			0.5
	Fragmentation criterion	$T_{av} \geq T_{mp}$			
K_{ev} ^{h)}	0.7				

a) $T_{melt} = 2300(K)$ b) $UO_2(80)-ZrO_2(20)$ (wt%), $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$

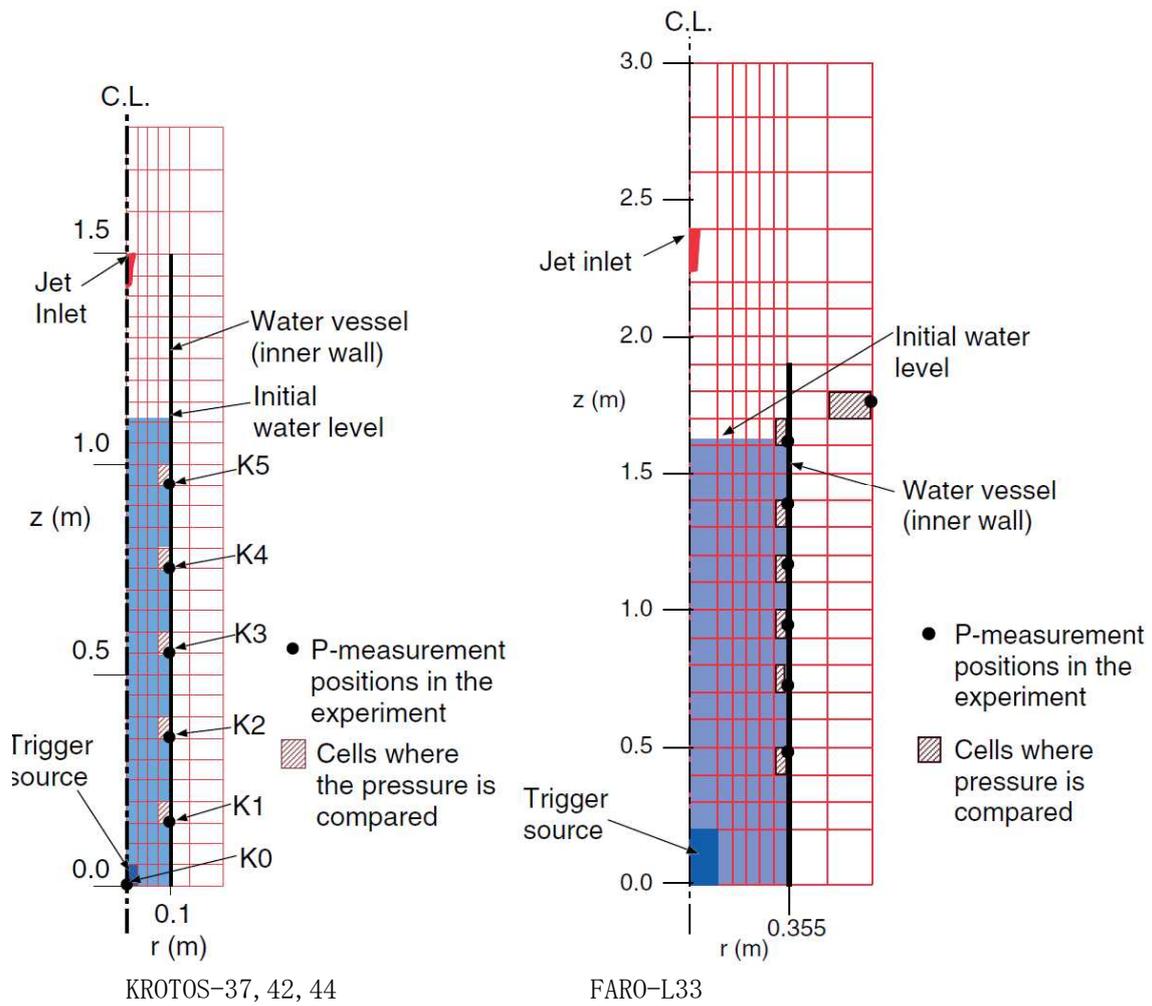
c) Reportedly “no propagating energetic explosions” [37].

d) Extrapolated from the size distribution reported in [41]. The ratio to the melt mass in the system at the triggering time, ~40kg, is ~20%.

e) S: Saito et al. correlation, T: Taylor type correlation (see 2.2.1)

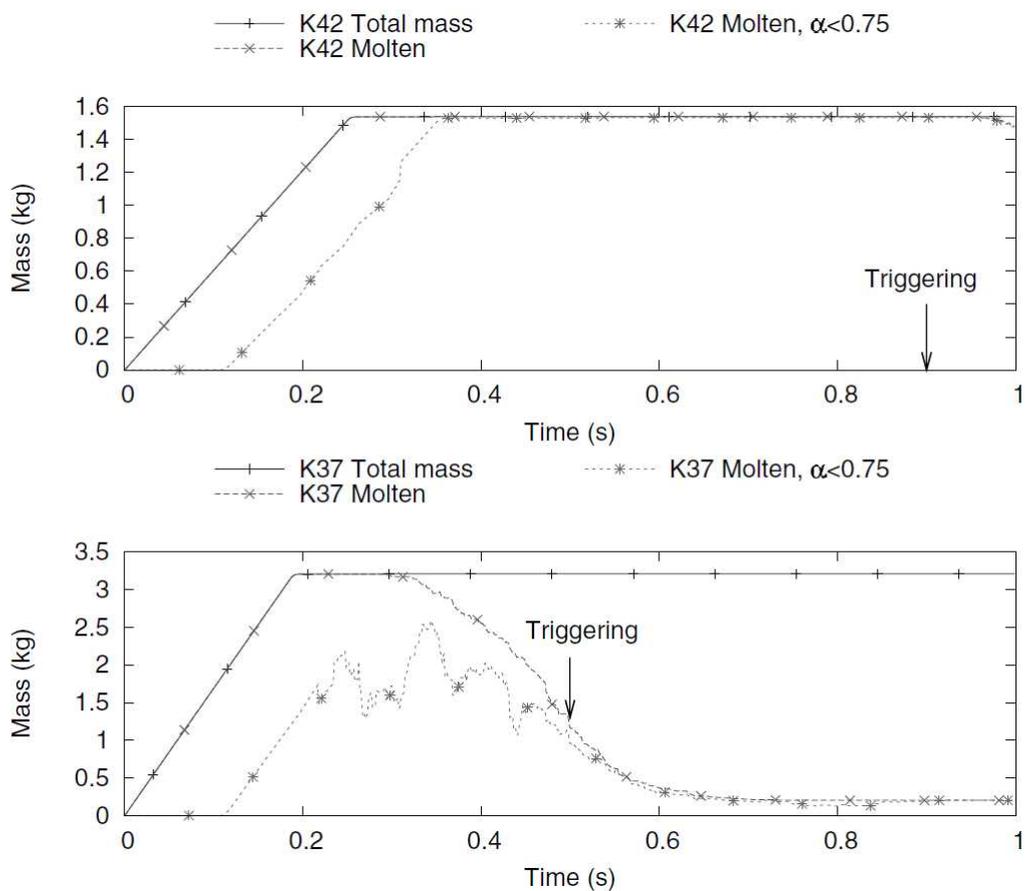
f) see 2.2.3 g) see 2.2.4 h) see 2.3.2

出典 : Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User' s Guide, JAEA^[1]



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.1.1 解析モデル (KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図4.2.1.2 粗混合過程での融体質量
(上：アルミナ(K42)，下：コリウム(K37))

4.2.2 解析結果

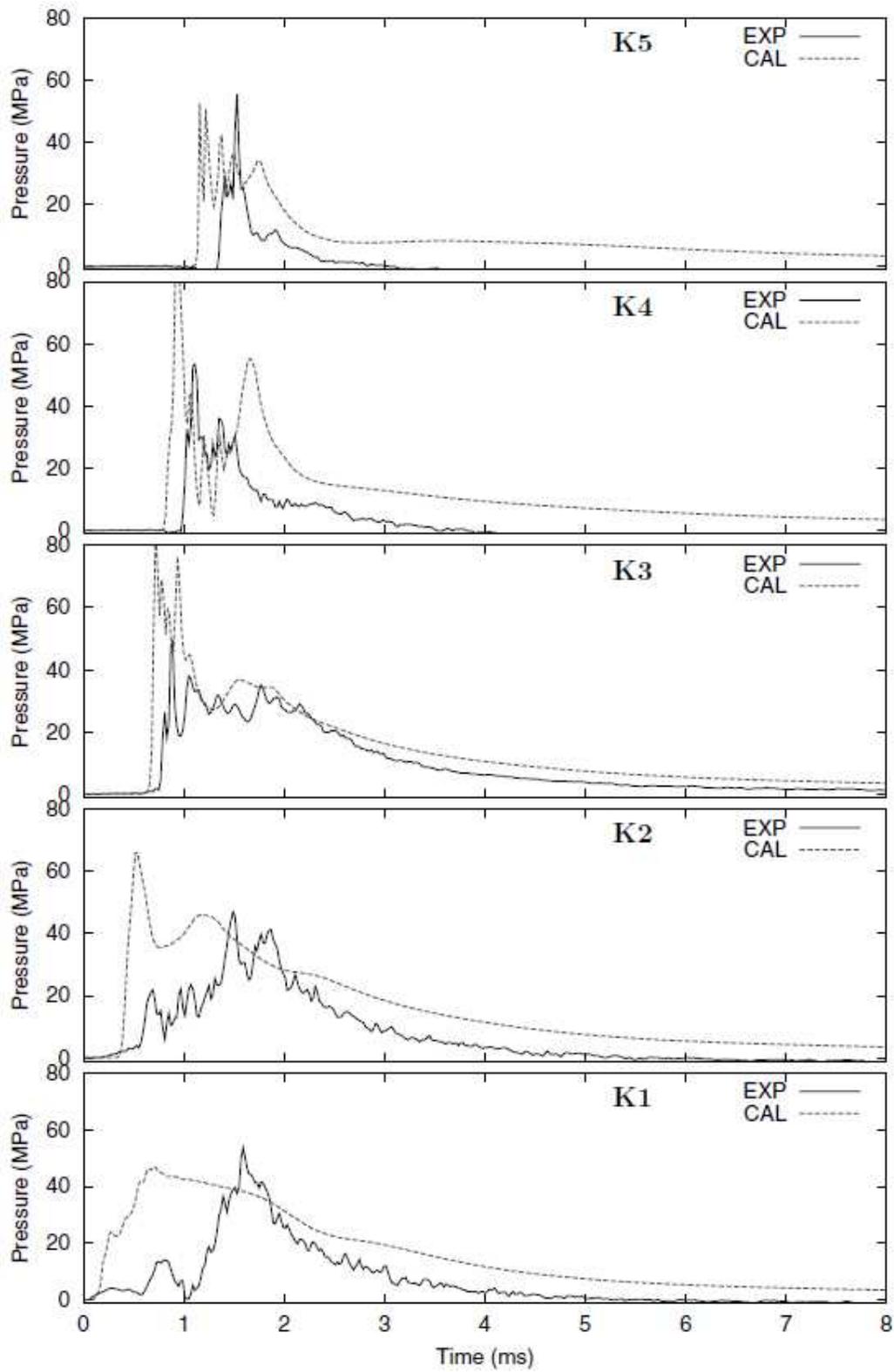
図4.2.2.1及び図4.2.2.2に、KROTOSのアルミナ実験(KROTOS-44, 42)における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は実験結果とよく一致していることが確認できる。また、水のサブクール度が相違するKROTOS-44, 42の解析・実験結果の傾向が一致していることより、サブクールの影響は小さいものと考えられる。

図4.2.2.3に、KROTOSのコリウム実験(KROTOS-37)の解析結果を示す。この実験では水蒸気爆発が生じていないことが報告されている。解析では、トリガリング圧力パルスは爆発源に近い底部のK1及びK2のみで局所的にピークとなるが、それ以外の測定点ではピーク値はない。また、K1及びK2のピーク値を過ぎるとそれ以降は減衰している。

図4.2.2.4に、FARO-L33における垂直に位置した各測定点での圧力履歴の実験結果と解析結果の比較図を示す。図4.2.2.4より、圧力パルスの傾向が良く一致していることがわかる。

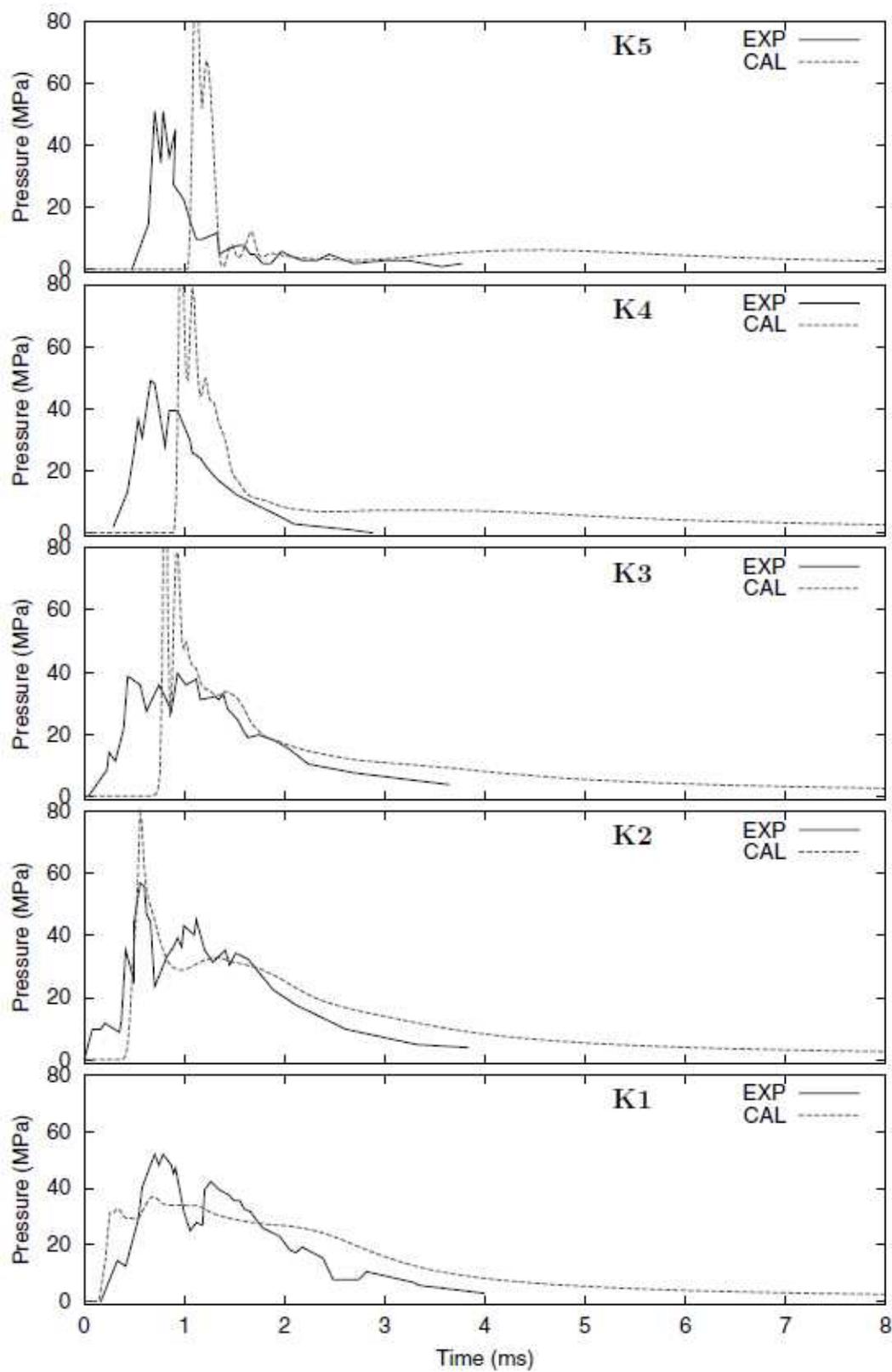
図4.2.2.5及び図4.2.2.6に、KROTOS実験(44, 42, 37)及びFARO実験(L33)の流体運動エネルギーの解析結果と実験結果の比較図を示す。KROTOSのアルミナ実験(44, 42)とFARO-L33において、解析結果と実験結果はよく一致していることがわかる。KROTOS-37では流体運動エネルギーが小さくなっており、これは実験において、水蒸気爆発が生じていない事実と一致している。

一般的に、水蒸気爆発により粒子径0.1mmより小さい微粒子が発生する。解析では、この粒子径を $50\mu\text{m}$ としている図4.2.2.7及び図4.2.2.8に、KROTOS実験(44, 42)及びFARO実験(L33)の微粒子の質量分率の比較結果を示す。実験と解析で粒子径が異なる為、正確な比較はできないが、解析結果の微粒子の質量分率は実験結果と同程度となることが確認できる。



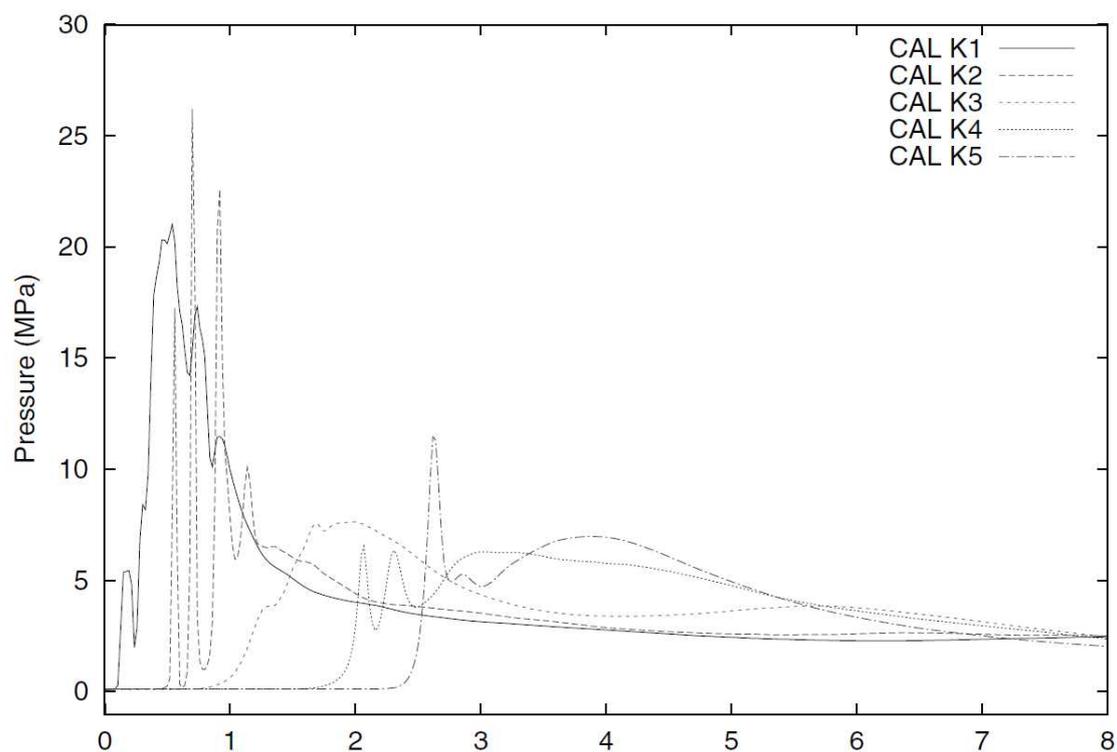
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.1 圧力履歴 (KROTOS-44)



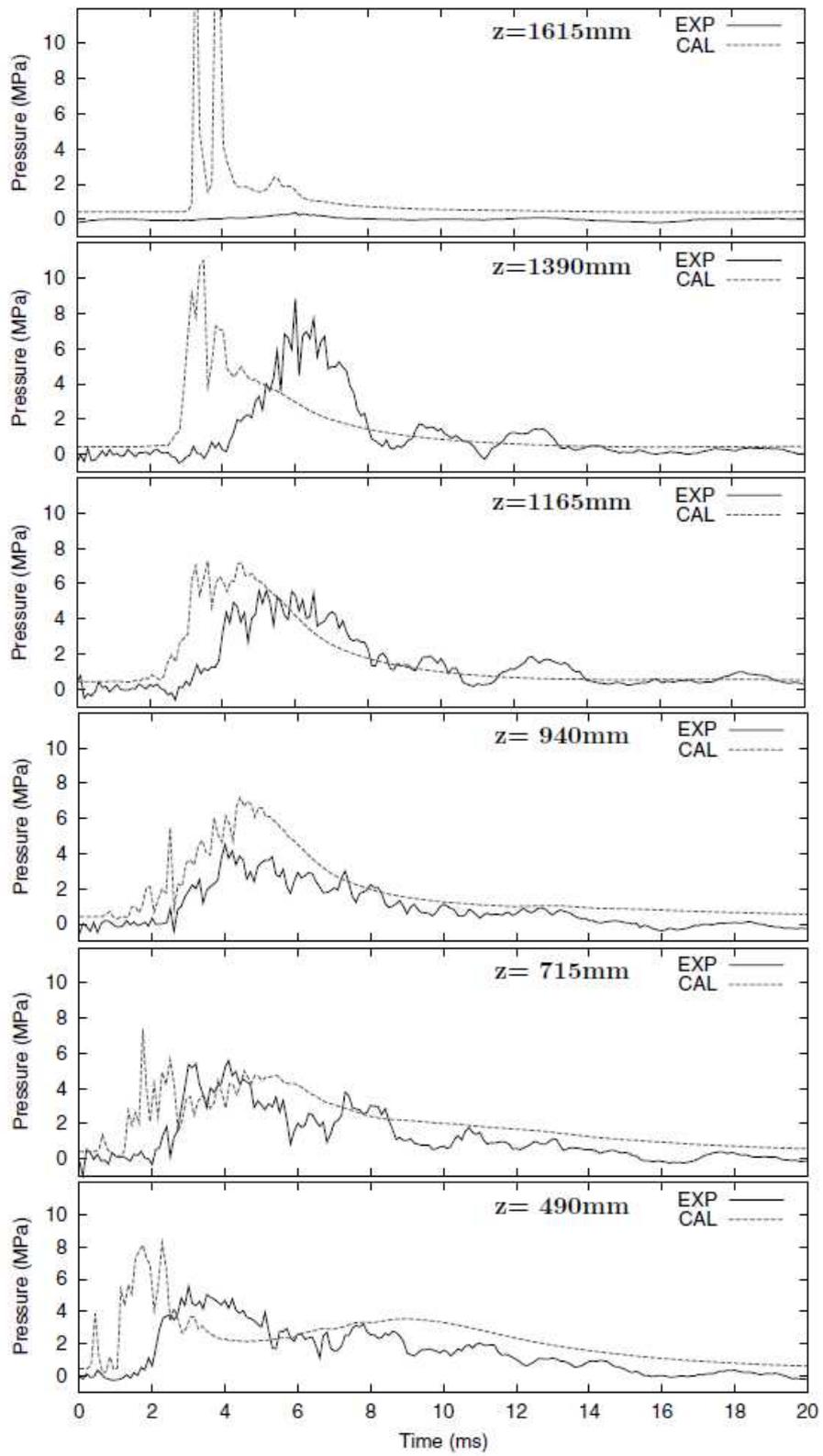
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.2 圧力履歴 (KROTOS-42)



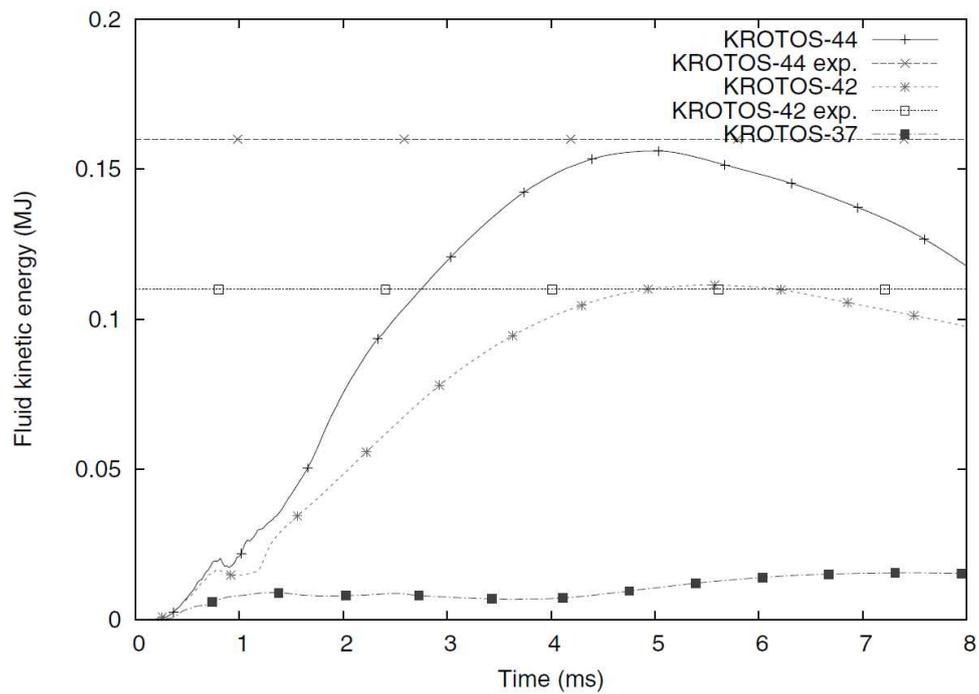
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.3 圧力履歴 (KROTOS-37)



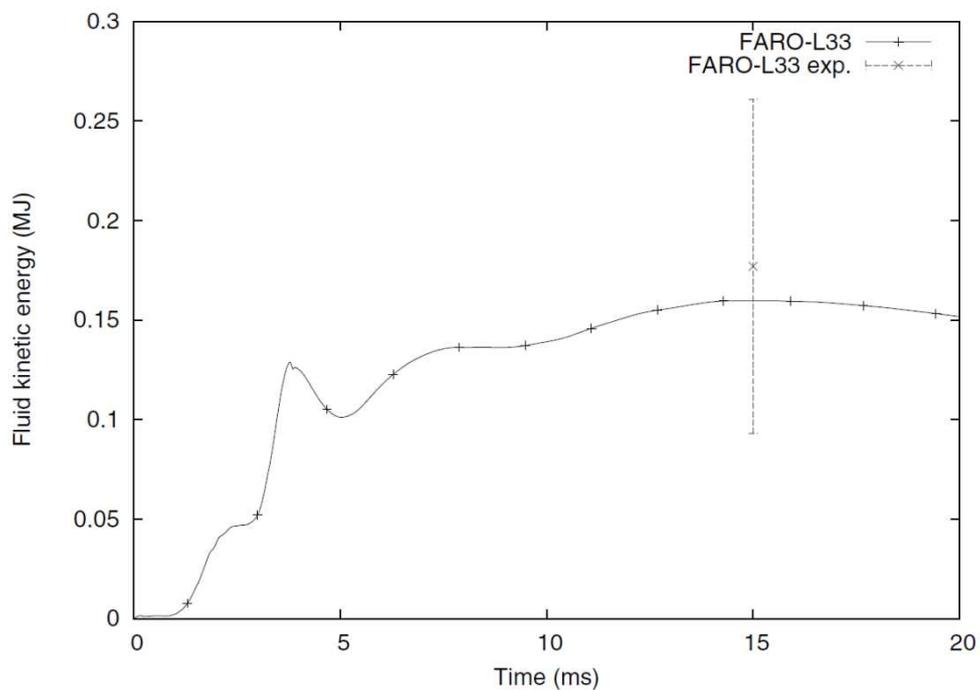
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.4 圧力履歴 (FARO-L33)



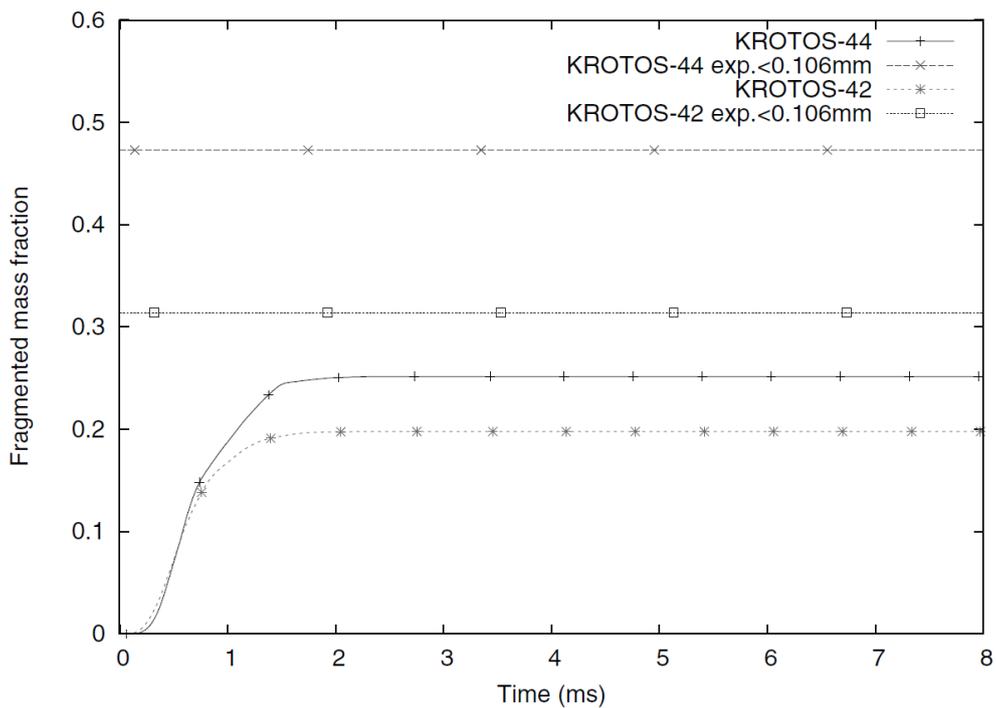
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.5 流体運動エネルギー (KROTOS)



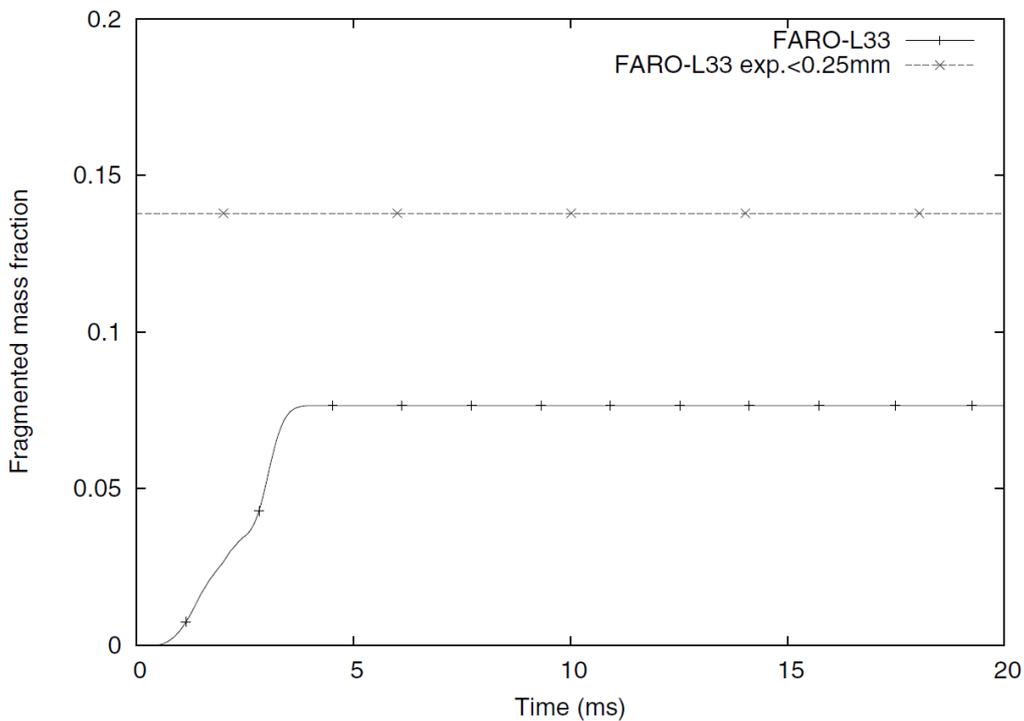
出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.6 流体運動エネルギー (FARO-L33)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.7 微粒子の質量分布 (KROTOS)



出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA^[1]

図 4.2.2.8 微粒子の質量分布 (FARO-L33)

5. 参考文献

- [1] K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, July 2008.
- [2] 改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 21 年度
- [3] 森山 清史 他, 軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Reserch-2007-072,
- [4] A.W. Cronenberg and R. Benz. Vapor explosion phenomena with respect to nuclear reactor safety assessment. NUREG/CR-0245, TREE-1242, Idaho National Engineering Laboratories, 1978.
- [5] M.L. Corradini, B.J. Kim, and M.D. Oh. Vapor explosion in light water reactors: a review of theory and modeling. Progress in Nuclear Energy, 22(1), pp.1-117, 1988.
- [6] 大貫 晃 他, 多次元二流体モデル構成方程式評価用コード ACE-3D の開発, JAERI-Data/Code 96-033, 1996 年 11 月
- [7] G.I. Taylor. The dispersion of jets of metals of low melting point in water. G.K. Batchelor, editor, The scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, vol.3 Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosion, pp.304-305. Cambridge University Press, Cambridge, 1963.
- [8] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, Experimental study on penetration behaviors of water jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS Proc. National Heat Transfer Conference, Houston, U.S., vol.3, pp.173--183, (1988).
- [9] A. Annunziato, et al, FARO TEST L-14 ON FUEL COOLANT INTERACTION AND QUENCHING Comparison Report, Volume I: Analysis of the Results, OECD/CSNI International Standaard Problem 39, 1998.
- [10] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments, Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009. (2006)

水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて

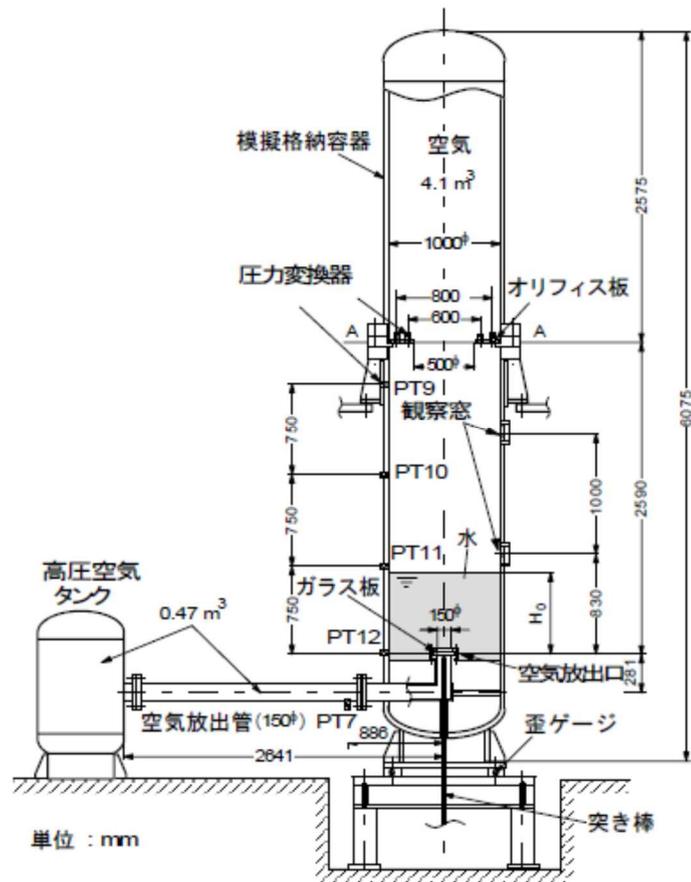
炉外において水蒸気爆発が発生した場合，発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン上に押し上げられ，この水塊衝突による衝撃力が構造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。

この水塊の上昇について，軽水炉の SA 時を想定した気泡急成長に伴う水撃力に関する研究（稲坂ら，2004）では容器下部から注入した気泡によって，水位がピストン状に押し上げられ，気泡が水面に達して吹き抜けるまで水塊として上昇する様子が観察されている。水塊による水位上昇は，主に容器の径， D と初期水位， H_0 のアスペクト比（ H_0/D ）によって整理できるとされており，構造物をこの水塊の到達範囲外に配置することにより水撃力の影響を回避できると結論付けている。添付図 1 に実験装置，添付図 2 に水塊の到達範囲の整理結果，添付図 3 に水塊挙動の実験結果を示す。

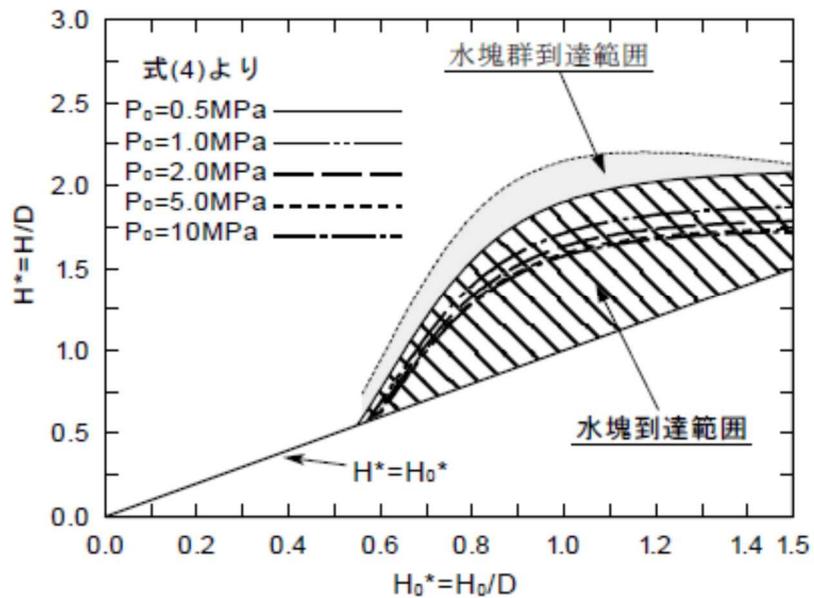
女川 2 号機，浜岡 4 号機，島根 2 号機及び柏崎刈羽 6/7 号機では，ペDESTAL 径と初期水位のアスペクト比はそれぞれ 0.6，0.5，0.65 および 0.2 程度である。この知見を適用した場合，添付図 2 より上記のアスペクト比において水塊群到達範囲が最も大きくなるのは島根 2 号機のアスペクト比 0.65 であり，そのときの水塊の上昇を含む最大水位は約 7.5m（ペDESTAL の径の 1.25 倍程度）となる。これより，島根 2 号機の場合，水塊はペDESTAL 床から約 7.5m まで上昇する可能性があるが，これはペDESTAL 床面からの RPV 底部高さ約 9m よりも低いことから，RPV 支持機能の健全性に与える影響は無いといえる。また，この実験研究は空気を対象としたものであるが，水蒸気を対象とした場合には，蒸気泡に対する凝縮効果のため，水塊の上昇と水撃力が抑制されるとする知見がある（稲坂ら，2007）。

【参考文献】

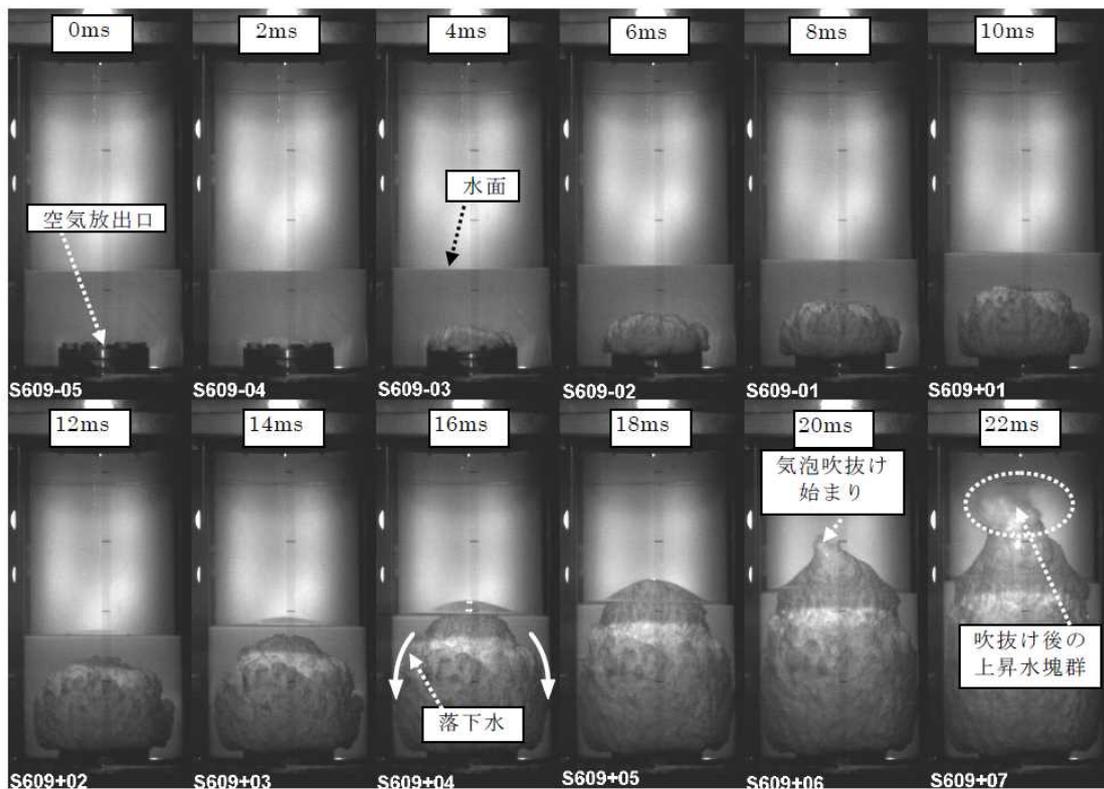
- ・稲坂，安達，汐崎，綾，成合，2004. 「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」，海上技術安全研究報告書 第 4 巻 第 3 号，p. 323-343.
- ・稲坂，安達，村田，綾，2007. 「軽水炉のシビアアクシデント時における蒸気急発生による水撃力」，日本原子力学会和文論文誌 6，p. 289-297.



添付図1 水撃実験装置 (大型容器) (稲坂ら, 2004)



添付図2 水塊がコヒーレント性を保ったまま上昇する範囲 (稲坂ら, 2004)



添付図3 気泡の成長と水塊挙動の実験結果 ($P_0=0.5\text{MPa}$, $H_0^*=0.6$) (稲坂ら, 2004)