

# Ex-vessel Steam Explosion Analysis for Pressurized Water Reactor and Boiling Water Reactor abstract

原子力工学と技術

原著

加圧水型原子炉および沸騰水型原子炉のための压力容器外水蒸気爆発分析

概略

溶融炉心が水と接触する重大事故の際に蒸気爆発が起こることがある。

加圧水型原子炉と沸騰水型原子炉の蒸気爆発実験は、経済協力開発機構（OECD）原子力応用プロジェクトの蒸気爆発対策プロジェクトの条件下で、多成分三次元三重項オイラー法による大気汚染物質相互作用コードで実施された原子炉の運動が提示され、議論される。原子炉の計算では、蒸気爆発強度の予測における最大の不確実性は、ジェット破壊に関する大きな不確実性に起因すると予想される。

これらの不確実性についてのいくつかの洞察を得るために、利用可能なジェットブレイクアップモデル、すなわちグローバルモデルとローカルモデルの両方でプレミキシングシミュレーションを実施した。シミュレーションは、予測されたより小さい溶融液滴サイズが、溶融凝固の増加およびボイドの蓄積の増加をもたらし、両方とも爆発強度を低下させることを明らかにした。加圧水型原子炉の場合に予測されるより低い活性溶融物量にもかかわらず、キャビティ壁における圧力負荷は、通常、沸騰水型原子炉の場合よりも高い。これは、著しく大きな沸騰水型原子炉キャビティのためであり、キャビティの中心の予混合物に由来する爆発圧力波は、遠隔のキャビティ壁に到達すると既に著しく弱まっている。

韓国原子力社会に代わってElsevier Korea LLCによって発行されたCopyright©2015。

## 1. はじめに

蒸気爆発は原子炉の安全性の枠組みの中で、炉心溶融物（corium）と水の相互作用に起因するプロセスである[1, 2]。コリウムから冷却剤へのエネルギー移動は非常に速く、非常に短い時間内に大量の蒸気が生成される。蒸気の高圧および高速の膨張は、潜在的に周囲の構造物に高負荷を誘発する可能性がある。蒸気爆発は、活発なフェーエルクーラント相互作用（FCI）とも呼ばれます。压力容器外の蒸気爆発の場合、キャビティ壁はこのような動的荷重を負うことができない。

それで、キャビティや封じ込めは損傷や故障の危険性があります[3-5]。

封じ込めの完全性の直接的または迂回的な損失は、放射性物質の環境への放出をもたらす、一般の人々の安全を脅かす可能性がある。

蒸気爆発の前および最中に行われたプロセスの詳細は、実験結果を原子炉の条件に合わせるためにこれらのプロセスをモデリングするための付加的な努力とともに、何年にもわたって実験的に研究されている[1, 6, 7]。蒸気爆発の研究に大きな努力をしているにもかかわらず、原子炉の状況を予測する信頼は、蒸気爆発による封じ込めの早期失敗であろうとな

かろうと、明確な決定を下すことはできません。FCIのプロセスに関する残りの未解決問題とその前の蒸気爆発エネルギーへの影響を解決するために、OECDプロジェクトである原子力応用のための蒸気爆発の解決（SERENA）が2007年に開始された。[8, 9]。原子炉アプリケーションのための主要なFCIプロセスの理解とモデル化における進展を確認するために、プロジェクトの最後に原子炉訓練が実施された。この訓練は、加圧水型原子炉（PWR）中央溶融物放出、PWR側放出、および沸騰水型原子炉（BWR）中心放出の3つの場合を含む。我々の容器外蒸気爆発研究では、PWRおよびBWRの中央溶融物放出のためのSERENAプロジェクト原子炉運動の条件が考慮された。シミュレーションは、2つの異なるジェットブレイクアップモデリング手法を適用することによって実行された。

以下のセクションでは、モデリング手法と考慮される压力容器外FCI症例を最初に説明する。

次に、実行されたPWRおよびBWRシミュレーションが提示される。様々な予混合及び爆発相シミュレーション結果が提供され、議論される。最後に、PWRとBWRのシミュレーション結果を比較して説明します。

## 2. モデリングと計算条件

シミュレーションは、コンピュータコードMC3D（多成分三次元オイラー理論的相互作用コード）バージョン3.6.8 [10, 11]を用いて行った。MC3Dは、原子力安全分野における多相および多成分流の研究に注力した多次元オイラー符号です。

蒸気爆発シミュレーションは通常2つのステップで実行されます。

最初に、予混合段階をシミュレートし、続いて予混合シミュレーション結果を初期条件として使用し、爆発トリガを適用して、次の爆発段階のシミュレーションを行う。

原子炉の計算では、蒸気爆発強度の予測における最大の不確実性は、ジェット破壊に関する大きな不確実性に起因すると予想される。これらの不確かさは、異なる予混合プロセスを通じて伝播し、溶融液滴の生成速度およびサイズ、予混合物中の溶融液滴の分布、液滴凝固および空隙率の不確実性をもたらす、これらはすべて蒸気爆発強度に影響を及ぼす [9]。MC3Dでは、2つのジェットブレイクアップモデルが用意されています。グローバルモデルとローカルモデルです。

グローバルなジェット分割モデルは、局所的速度を考慮することなく、溶融物、液体、および蒸気の局所的物理的性質のみを考慮した相関によってジェット破壊を達成できるという仮説に基づいている。局所ジェット分割モデルは、KelvineHelmholtz不安定モデルに基づいており、これはまた、局所速度を考慮する。ジェットブレイクアップに関連するこれらの不確実性についてのいくつかの洞察を得るために、プレミックスシミュレーションを、利用可能なジェットブレイクアップモデルの両方で実行しました。

世界的なジェットブレイクアップモデルは、厳密に言えば、水プール内の単一の大きな、非常に熱いジェットにのみ適用可能であり、その特徴は主に浮力によって支配される蒸気膜の摩擦により生じる。

このモデルはFARO施設蒸気爆発試験 [12] で検証されたため、FAROのものから遠い状況への外挿は疑わしい。このモデルでは、液滴への容積ジェット分裂の速度は、標準的な場合と

の比較から推論される。

典型的なFARO条件は標準的なケースに対して選択されます：基準断片化率 $G_0 = 0.1 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{秒}$ 、ジェット温度 $T_0 = 3,000 \text{ K}$ 、蒸気粘度 $\mu_g = 0.10_3 \text{ kg} / \text{m} / \text{s}$ 、ジェット密度 $\rho_0 = 8,000 \text{ kg} / \text{m}^3$ 、ジェット表面張力 $\sigma_0$ である。 $0.5 \text{ Nm}$ 。

作成された液滴の直径は、ユーザ入力パラメータであり、デフォルト値は $3 \text{ mm}$ であり、FARO実験における典型的な平均ソータ直径である。

ローカルジェット分割モデルは、KelvineHelmholtz不安定モデルに基づいています。これは、多相のアスペクトを考慮して修正されました。このモデルでは、体積ジェットのフラグメンテーション率は次の式で計算されます。

添え字 $j$ はジェットを表し、添え字 $\text{amb}$ は周囲の流体を表し、その性質は相の体積分率を考慮して平均化することによって計算される。

$N_f$ は、1と6との間の期待値を有するジェットフラグメンテーションパラメータである。FARO実験との直接的な比較は、 $N_f$ の使用につながる。 $2$  [13]。このモデルでは、生成された液滴 $d_d$ の直径は、

不安定性は、波数 $k_{\text{max}}$  [Eq. (2) ] :

$N_d$ は液滴径パラメータであり、期待値は $0.1 \sim 0.5$ である。FARO実験との比較に基づく推奨値は $N_d$ です。 $0.2$  [13]。

本研究では、PWRおよびBWRの中央溶出試験のためのSERENAプロジェクト原子炉運動の条件を検討した。原子炉運動の目的は、様々なFCIコードによって計算された圧力負荷が互いに一致しているかどうかを確認することでした。この目標は、原子炉規模のFCIプロセスのすべての特性を保持するのに十分な一般的な限られた幾何学的条件および条件にコードを適用することによって達成でき、現実的であり、もっともらしい事故シナリオに対応する必要があります。SERENAプロジェクトでは、電力会社の代表者は、PWRのためのフランス電力とフィンランドの技術研究センター（BWR）のような主な原子炉設計に従って、最も関連性が高いと考えられる条件を提供した。PWR中央放出、PWR側放出、およびBWR中心放出 [14]が定義された。

OECD MASCAプロジェクトの実験で明らかになったように、下部ヘッダの溶融池は、異なるメルト組成の3つの層に段階的に階層化される可能性があります - 上部に軽い金属層、下部に重金属層がある溶融酸化物プール

上部の軽金属層は狭い反応容器領域に熱を集中させることがあるので、側方の溶融破壊をもたらす側の容器の破損は、底部の容器の破損よりも起こりやすく、中央の放出をもたらす。側方溶融放出のシミュレーションは、必要な三次元モデル化アプローチおよび実験的検証可能性の欠如のために大きな不確実性を有する。したがって、本研究では、中心的な放出事例のみが考慮された。SERENA原子炉の訓練も実施した研究も安全解析ではないことを強調すべきである。安全性解析のためには、反応炉特有の幾何学的形状および関連する

重大な事故シナリオの広いスペクトルが考慮されなければならない。しかしながら、実施された研究は、圧力容器外の蒸気爆発挙動および結果として生じる圧力負荷に関する興味深い洞察を提供する。

考えられるPWRおよびBWR症例の初期状態の幾何学的形状は、溶融したコリウムを、直径30cmの開口部を通して故障した原子炉容器から、部分冷却された水で部分的に満たされたキャビティに注入する。封じ込めと容器の圧力は等しく、溶融物は重力のみによって放出される。ケースの主な違いは、BWR症例のキャビティ、自由落下高さ、水深がPWRの場合よりもかなり大きいことです。主な初期条件は表1に要約されている。考慮されているPWRおよびBWRの場合の幾何学的形状は軸対称であるため、円筒座標系（図1および図2）における2次元モデリングアプローチが可能である。メッシュは、最も重要な領域、すなわちジェット周りの領域およびFCIが生じる水の中で十分に精製された。

いくつかの試験の後、PWRの場合、42（放射状）\_ 59（垂直）セルのメッシュが、BWRの場合は55~65セルのメッシュが選択された。シミュレーション領域の上部境界では、一定の圧力境界条件が適用された。フランス原子力エネルギー・代替エネルギー委員会（PWR）の場合はSERENAプロジェクト、BWRの場合はフィンランドの技術研究センター（14）によって提供された使用されたコリウムの組成と特性は表2に示されている。コリウムの熱力学的性質は、NUCLEA-09熱力学データベース[17]を用いてGEMINI2コード[16]を用いて計算した。

### 3. PWRケースのシミュレーション

#### 3.1. 予混合段階

予備混合段階は、溶融放出の開始後2.5秒でシミュレートした。グローバルなジェットブレイクアップモデル（グローバルモデルと呼ばれる）とローカルジェットブレイクアップモデル（KelvineHelmholtzモデルまたはKHモデルと呼ばれる）を適用した2つのシミュレーションが実行されました。デフォルトまたは推奨のモデリングパラメータが使用されました。

図3に示すように、グローバルおよびKHモデルで計算された予混合条件は、溶融物放出後の様々な時間にわたって提示される。ガス中を0.4m自由落下させた後、コリアジェットは水を浸透し始め、徐々に溶融液滴に崩壊する。赤色のドットは、効果的に液体と見なされるほど十分に暑い溶融液滴を有する領域を示し、黒色のドットは、実質的に固体であると考えられ、したがって、断片化を受けることができない液滴を有する領域を示す。溶融液滴は、その平均温度が溶融固相線温度よりも高い場合、効果的に液体であると考えられる。これはMC3Dコードが溶融液滴の平均Sauter直径に基づいているという事実を考慮したデフォルトの基準です。シミュレーションの後の段階では、メルテボトム接触後、激しい相互作用のために、流体の流れが非常に乱れ、予混合物が反応容器内に押し込まれる。グローバルモデルでは、これは、液滴の大きさ、熱伝達率、液滴の断片化が強く結合している二次的な崩壊に関連しており、結果的に急激なボイドの蓄積によって促進されるが、集中的な相互作用につながる可能性がある。KHモデルでは、ジェット分裂速度と生成された液滴の大きさが周囲の予混合状態に直接依存するジェット分裂自体の強いフィードバックメカ

ニズムに関連している。

図4に示すように、全体の溶融液滴平均直径の変化が示されている。グローバルモデルでは、作成された液滴のサイズはユーザパラメータであり、デフォルト値の3mmが使用されました。したがって、液滴の平均サイズは最初は3mmであり（液滴が存在しない場合、数値的理由により平均直径は任意に大きな値に設定される）、次いで二次的な崩壊により減少し、不安定な液滴のより小さな小滴。

約1.5秒で、先の段落で説明したように、集中的な断片化が起こり、液滴サイズを約1mmに急速に減少させる。KHモデルでは、生成される溶融液滴のサイズは局所条件に依存し、1-2mmの範囲内にある。シミュレーションの終わりに、液滴サイズは両方のジェット破壊モデルで増加する。

その理由は、乱流が原因で、連続溶融相が乱れすぎて粗いメッシュではうまく説明できず、数値的に大きな液滴に分裂するからです（図3）。

図5は、水中のコリウムの総質量、コリウム小滴の総質量、液滴の質量、空隙の60%未満の領域における液滴の総質量、および液体の質量を示す、様々な真皮質量の進化を示す60%未満の空隙を有する領域内の液滴。

水中のコリウムの総質量は、最初の水位より低いコリウムの質量として定義される。このように、激しい相互作用が起こり、予混合物が反応容器内に押し込まれると（図3）、様々な液滴質量がこのように定義された塊状の水中で大きくなることもある。

蒸気爆発の強さは、水蒸気爆発に効率的に関与する溶融液滴の質量、すなわち含水率の高い領域の液体溶融液滴の質量、いわゆる活性溶融塊に依存する。

ボイドの60%未満の領域における液滴の質量は、この活性な溶融物の質量に対して良好な尺度である（図5、曲線「DrLiq<60%」）。ボイドの60%未満の領域における液滴の総質量は、ボイドのみによる爆発強度の制限効果（曲線「DrVap <60%」）を示し、液滴の質量は凝固（曲線「DrLiquid」）。

約1秒までの初期溶融浸透段階において、水中のコリウムの質量は、両方の場合において同様である（図5、曲線「InWater」）。これは、一定の圧力境界条件が適用されているために、容器の下の圧力上昇が無視できるため、溶融物の無制限の重力が生じるからである。水位が原子炉容器に達すると（図3）、キャビティの中央部に圧力が発生し、溶融物の流出が減少します。激しい相互作用が起こると、圧力上昇が非常に大きくなり、溶融物がもはや容器から流れ出ることはありません。実際には、予混合物は容器の中に押し込まれる。これは、KHモデルではやや早く起こるため、水中でのコリウムの最終質量は、グローバルモデルのそれよりも低い。

システムは激しい相互作用の後に複雑な挙動を示すので、溶融ボトム接触までの最初の溶融浸透段階（図5、点線の黒線）についてのみ議論する。

液滴の総質量は、全体モデル（曲線「液滴」）により大きくなることが観察され得る。

予想通り、溶融凝固はKHモデルでは

より速く冷却する液滴（曲線「液滴」と「DrLiquid」を比較）。しかしながら、高空隙領域における液滴の質量対液滴の総質量の比は、両方のモデルで同等である（曲線「液滴」お

よび「DrVap <60%」を比較する)。

KHモデルのより小さな液滴はより多くの空隙を生成するので、有意差が予想された。しかし、この結果の理由はジェットブレイクアップのモデリング自体です。グローバルモデルでは、断片化率は局所予混合条件に依存しない。

液滴はジェットが厚い蒸気煙突に囲まれていても生成されるため、これらの液滴はガス領域に直接挿入されます(図3)。最も重要な結果は、活性塊(曲線「DrLiq<60%」)、すなわち低ボイド領域における液体熔融液滴の質量であり、それは蒸気爆発の予想される強度に関連し得るからである。活性質量は、より小さい液滴のためにKHモデルでは典型的に低い。したがって、グローバルモデルではより強力な爆発が予想されます。トリガー時間は黒い点線で示されています。

### 3.2. 爆発フェーズ

各予混合シミュレーションについて、爆発シミュレーションを行った。

爆発段階は、誘発後100ミリ秒でシミュレートされた。

爆発は、中央のキャビティの底部に5MPaの加圧ガスをトリガセルに適用することによって、熔融底部接触時間にトリガされた。このトリガリング時間は、実験では、熔融物が底に到達したときに自発的な蒸気爆発がしばしば引き起こされるために選択された[2]。

図6に示すように、爆発トリガー時の予混合条件は、グローバルモデルとKHモデルによるシミュレーションで提示されます。グローバルモデルでは、水中の液滴の領域(青色領域)が水中でより大きくなるのが観察され、これは図5の活性質量曲線に従う。

図7に示すように、計算された圧力対応する圧力インパルス(圧力積分時間が経つにつれて)は、図1。

これらの位置は、中央のキャビティ底部(曲線CavBotCen)、中心からの空洞底部1m(CavBot1m)、0.5e3.5m(WalEle0.5mWalEle3.5m)の高さのキャビティ壁、および反応容器0.25センター(VesCen0.25m)からm。

すべての場合において、最も大きな圧力および圧力インパルスは、中央の空洞底部で計算される。爆発圧力波が予混合領域から軸対称ジオメトリの壁に伝播する間に圧力が減少し、圧力逃がしによる隆起の増加とともに圧力が減少するので、壁の負荷はより低くなる。

トリガー時に計算されたアクティブ質量(図5、曲線「DrLiq<60%」)に従って、圧力負荷は、グローバルモデルの場合と比較してKHモデルの方が小さい。

1つの例外は、中央のキャビティ底部の狭い圧力ピークであり、KHモデル(～53MPa対～39MPa)で大きく、局所事象である。

キャビティ壁は、圧力反射のために周期的に負荷されることが観察され得る。

両方のモデルとも壁面の最大圧力は約15MPaですが、壁面の最大圧力インパルスはKHモデル(約80kPa 秒～約110kPa 秒)により大幅に低くなります。

中央のキャビティ底部の圧力インパルスは、両方のモデルとも約140kPa 秒です。

KHモデルでは、圧力インパルスは中心からの増加に伴って急激に減少する。中心から1m離れたところで、圧力インパルスはKHモデルで～80kPa 秒に低下しますが、グローバルモデ

ルでは約110kPa 秒です。

#### 4. BWR症例のシミュレーション

##### 4.1 予混合段階

予備混合段階は、溶融放出の開始後2.5秒でシミュレートした。PWRの場合と同様に、2つのシミュレーションが実行され、一方はグローバルモデルを適用し、他方はローカルKHモデルを適用した。グローバルモデルによる計算は2.28秒後に不安定になり、停止しました。したがって、計算が停止するまでに得られた結果のみが提示される。

図8に示すように、実施された両方の計算のために、溶融放出後の様々な時間における予混合条件が提示される。

図3と同じ表記がある。はここで使用されます。ガス中を9 m自由落下させた後、コリウムジェットは水を浸透し始め、徐々に溶滴に分裂する。

グローバルモデルでは、溶融物が水に浸透するまで、ジェット破壊は重要ではないが、KHモデルでは、ガスの自由落下中にジェット破壊が顕著になる。

図9には、溶融液滴平均直径の変化が示されている。グローバルモデルでは、作成された液滴に3mmのデフォルトサイズが使用されました。従って、液滴の平均サイズは最初は3mmである。

約2秒で、PWRの場合にも観察されたように、集中的な断片化が起こり、液滴サイズを約1mmまで急速に減少させる。この激しい相互作用は、液滴サイズの強い結合、熱伝達率、および液滴の断片化を促進する急速なボイド形成によって引き起こされる。KHモデルでは、生成された溶融液滴のサイズが計算され、1e2mmの範囲内にある。液滴サイズが小さく、熱伝達面積が大きいため、KHモデルによるボイドの蓄積は、グローバルモデルによるものよりも大きい (図8)。

図10に示すように、水中の様々なコリウム塊の進化が提示される。ここでは、図2と同じコリウム質量が得られる。PWRの場合の図5が示され、図の説明も示されている。ジェットブレイクアップモデリングは溶融物放出に大きな影響を与えない。従って、水中のコリウムの質量は、両方の場合において同様である (図10、曲線「InWater」)。

約2秒までの初期溶融浸透段階では、溶融液滴の総質量は、典型的には、全体モデルでより大きい。後で、それはKHモデル (曲線「液滴」) でより大きい。

ジェット長あたりの断片化速度は、典型的にはKHモデルでより大きく、初期段階の差異は、グローバルモデルでのより速いジェット浸透のために生じ、したがって、最初は水中でのジェット長がより長いように思われる。

予想通り、溶融凝固はKHモデルではより小さい液滴のためにはるかに多く表現されており、より速く冷却する (「DrLiquid」曲線)。

驚くべきことに、高ボイド領域の液滴の質量は、グローバルモデル (曲線「液滴」および「DrVap <60%」を比較する) により高い。KHモデルのより小さな液滴はより多くの空隙を生成するので、反対が予想された。PWRの場合と同様に、この動作の理由はジェットブレイクアップのモデリング自体です。

グローバルモデルでは、水位下のフラグメンテーション率は地方条件に依存しない。

ジェットが厚い蒸気煙突に囲まれているため、溶滴も生成され、したがってこれらの液滴はガス領域に直接挿入されます (図8)。

最も重要な結果は、活性塊 (曲線「DrLiq <60%」)、すなわち蒸気爆発の予想される強度を規定するため、低空隙領域における液体溶融液滴の質量である。

アクティブな質量は、より小さい液滴のためにKHモデルでは典型的には低い (2秒後にグローバルモデルで説明された集中的な断片化の前に) ので、グローバルモデルではより強い爆発が予想される。

#### 4.2. 爆発フェーズ

爆発段階は、誘発後100ミリ秒でシミュレートされた。

爆発は、5 MPaの加圧ガスをトリガーセルに適用することによって引き起こされました。各予混合シミュレーションについて、2つの爆発シミュレーションを行った。

事例「前部3.6m」: PWRの場合のように、溶融物が水中に3.6mまで浸透したときに爆発が引き起こされ、直接的な比較が行われた。トリガーセルは、対称軸上の溶融フロントのすぐ下にあった。

トリガー時間は、グローバルモデルとのプレミックス計算では1.62秒、KHモデルでは1.75秒でした。

ケース「最大活性質量」: 深いBWR水プールの底に達したときに溶融物がすでに凝固している可能性があるため、その場所でのセルフトリガーを可能にしなかったと仮定したので、爆発はメルテボトム接触時間に誘発されず、PWRの場合と同様であるが、最も強い爆発が予想されるときの計算された最大質量 (図10、曲線「DrLiq <60%」) の時点である。トリガーセルは、対称軸上のキャビティ底部にあった。グローバルモデルによる爆発計算がこれらの条件で収束しなかったため、結果に重要な影響を及ぼさない1つのセルによってトリガーセルが持ち上げられました。

トリガー時間は、グローバルモデルとのプレミックス計算では1.88秒、KHモデルでは1.67秒でした。

検討した場合の爆発トリガー時の予混合条件を図11に示す。

液体水中の液滴 (赤色点) の領域 (青色領域) は、グローバルモデルではより大きく、これは図10のアクティブ質量曲線に従うことが観察され得る。

また、図12および図13に示すように、計算された圧力および対応する圧力インパルスの時間発展は、(CavBot1m) からのキャビティ底部1m、1-7m (WalEle1m-WalEle7m) の高さの壁、および0.25mの反応容器センター (VesCen0.25m) から。すべての場合において、最大圧力および圧力インパルスは、中央のキャビティ底部で計算される。

爆発圧力波が圧力領域から軸対称ジオメトリの壁に伝搬する間に圧力が低下し、圧力逃がしによる隆起が増加するにつれて圧力が低下するので、壁の負荷はより低くなる。キャビティ底部の最大圧力は、すべての考慮された場合 (~25MPa) に匹敵する。KHモデルの圧力ピークは非常に狭く、1ミリ秒未満です。壁面における最大圧力は、KHモデル (約5-10MPa) よりもグローバルモデル (約15-20MPa) で有意に高いが、高圧の持続時間は同様 (約7ミリ秒) である。



アクティブ質量曲線（図10、曲線“DrLiq <60%”）に基づいて予測されるように、圧力インパルスは、KHよりもグローバルモデルで有意に高いモデル。グローバルモデルでは、壁面の最大圧力インパルスは、「最大有効質量」のケースでは、「前面3.6m」および90kPa秒のトリガケースの場合、約60kPa秒です。KHモデルでは、壁面での最大圧力インパルスは、両方のトリガケースで約35kPa秒であり、ほぼ同時にトリガされます（わずかに0.08秒の差）。

## 5. ディスカッション

このセクションの議論は、主に第3および第4のセクションで広範に議論された、考慮されているPWRおよびBWR溶融放出の比較分析に焦点を当てている。表3では、実行されたシミュレーションの主な積分結果が比較のために提示されている。

典型的な溶融物流出速度は、BWRの場合よりも、PWRの場合よりも大きく、その理由は、反応容器内の溶融プールがより高く、その結果、BWRの場合の容器開口部の静水圧がより高くなり、融解放出の開始から溶融 - 水接触までの時間は、自由落下高さがより大きいためBWRの場合にはかなり大きい。BWRの場合、溶湯の衝突速度が速いため、爆発が誘発されたときに溶融液が水中に侵入し、BWRの場合PWRの場合よりもはるかに速くなります。したがって、このトリガリング時間における水中のコリウムの質量は、溶融物の流出速度がより大きいにもかかわらずBWRの場合よりも低い。BWRの場合には爆発のトリガーまでの溶融浸透が速く、溶融浸透時間が短いため、溶融凝固が少なくなり、水の過冷却によりさらに減少するボイド形成が少なくなるため、爆発のトリガー時の活性溶融物質量BWRの場合にはかなり大きい。

KHモデルでは、作成された溶融液滴のサイズが計算され、より大きな溶融透水速度で、生成された液滴のサイズはより小さくなる。その結果、融解水の衝突速度が大きな自由落下高さのためPWRの場合よりも著しく大きいBWRの場合、平均溶融液滴サイズがより小さくなることが期待される。しかしながら、メルトジェットはガスの長い自由落下の間にガスの密度が高くなるために大きな溶融物の液滴が生成されるために崩壊し始めることが分かった。

したがって、KHモデルでは、BWRの場合、起動時の平均直径はPWRの場合と比較してさらに大きくなります。

PWRの場合の活性溶融物の質量がより低いにもかかわらず、溶融物が水中に3.6mまで浸透したときに爆発が引き起こされたBWRの場合よりも、キャビティ壁の圧力負荷が高い。最大活性溶融質量の時に爆発が誘発される時、圧力負荷は、典型的にBWRの場合の圧力負荷よりもさらに高い。

対応するPWRの場合よりも、グローバルモデルを適用したBWRの場合、キャビティ壁の最大圧力のみが高くなります。BWRケースの圧力負荷は、BWRキャビティのサイズがはるかに大きいため、通常PWRケースの圧力負荷よりも低くなります。具体的には、爆発が起こるキャビティの中心における予混合物は、より小さいPWRキャビティよりもキャビティ壁からはるかに離れており、したがって、円筒キャビティ形状の圧力波がBWRキャビティ壁に到達すると、大幅に弱まった。

蒸気爆発の間、コリウムの熱エネルギーは機械的仕事に変換される。蒸気爆発の強度の重要な尺度は、蒸気爆発の高圧によって加速される、コリウム、水および蒸気の運動エネルギーの形態で最初に反映される蒸気爆発によって行われる機械的作業である。

表3には、蒸気爆発中のこれらの相の計算された最大全運動エネルギーが示されている。予想されるように、最大運動エネルギーは、最大活性溶融物質量の時間にトリガされた全体的ジェット分割モデルを適用して、トリガリングで最大の活性溶融物質量、すなわちBWRの場合で最大である。

同様の活性メルトマスでは、PWRの場合の最大運動エネルギーは、BWRの場合（193kgの活性メルトでは34.8MJ、168kgのアクティブメルトでは19.9MJ）よりもかなり大きいことが観察される。PWRの場合、このより効率的なエネルギー移動の理由は、PWRの場合、水位が原子炉容器まで上昇することである（図6）。

BWRの場合、水面は自由であるのに対し、爆発領域の排気はより困難になる（図11）。

爆発領域の閉じ込め時間が長くなるため、PWRの場合には、活性メルトから水への熱伝達がさらに完了します。

爆発後の相の運動エネルギーと溶融物の初期熱エネルギーとの比として定義されるエネルギー変換比は、蒸気爆発の特徴付けのための便利な無次元一体蒸気爆発量であり、基本的な量比較さまざまな蒸気爆発の実験と分析。蒸気爆発実験では、エネルギー変換比は、通常、トリガー時の水中の溶融物の総質量に基づいて計算される。

しばしば、実験は、トリガ時に溶融物が主に液滴の形態であるように設計されている。したがって、エネルギー転換率は、水中のコリウム層の総質量と水中のコリウム層の質量に基づいて計算された（表3）。

溶融物が初期溶融温度から水温まで冷却されるときに放出されるエネルギーとして定義される溶融物の特定の初期熱エネルギーは、PWRの場合1.58MJ / kgであり、BWRの場合は1.49MJ / kgである表1および2のデータから）。

結果は、一般的にBWRの場合、エネルギー変換比が世界的なジェットブレイクアップモデル（最大3%、水中の真珠の質量を基準にして）を適用した場合に最大であることを示している。

その理由は、BWRの場合、PWRの場合よりも溶融浸透が速いため、KHジェット破壊モデルよりも大きな溶融液滴が存在するため、他の場合に比べて空隙が少なく、溶融凝固形態が少ない予備混合物最も効率的な爆発に至る。これは、BWR症例のための水中のコリウムの総質量に関して、真の最大活性物質量にも反映され、両方の誘発時間に対して、グローバルジェット分裂モデルが用いられる。計算されたエネルギー変換比は、コリウム層を用いた蒸気爆発実験の場合よりも一般に1桁大きいですが、エネルギー変換比は直接測定されないため概算されるに過ぎない[2, 6, 7]。これは、リアクタースケールでのエネルギー変換比が実験スケールでのエネルギー変換比よりも大きい可能性があることを示している可能性があります。理由は、大規模のために原子炉状態でのより良い爆発領域の閉じ込めである可能性がある。

## 6. 結論

MC3Dコードを用いて、PWRおよびBWR前容器蒸気爆発分析を実施した。この研究では、OECD SERENAプロジェクト原子炉運動の条件が、PWRおよびBWR中央溶融物放出の場合について考慮された。

両方のケースの主な違いは、BWRの場合の原子炉キャビティ、溶融自由落下高さ、水深がPWRの場合よりも大幅に多いことです。

原子炉の計算では、蒸気爆発強度の予測における最大の不確実性は、ジェット破壊に関する大きな不確実性に起因すると予想される。

これらの不確かさは、異なる予混合プロセスを通じて伝播し、溶融液滴の生成速度およびサイズ、予混合物中の溶融液滴の分布、液滴凝固および空隙率の全てが蒸気爆発強度に影響する不確実性をもたらす。

ジェットブレイクアップに関連するこれらの不確実性についてのいくつかの洞察を得るために、グローバルモデルとローカルKHモデルの利用可能なジェットブレイクアップモデルの両方でプレキシングシミュレーションを実行しました。

実施されたシミュレーションは、予期されるより小さい溶融液滴サイズのために、全体モデルと比較して弱い爆発がKHモデルによって予測され、爆発強度を低下させる溶融凝固および増加したボイド形成を増加させることを明らかにした。

PWRの場合、爆発は溶融ボトム接触で引き起こされたのに対して、BWRの場合は、PWRの場合のように溶融物が水中に3.6メートル浸透したときと、最も強い蒸気爆発が予想されるときに計算された最大活性融解質量。

爆発トリガリングまでの溶融浸透が速く、溶融浸透時間が短いため、溶融凝固が少なくボイド形成が少ないことから、BWRの場合、爆発トリガ時の活性溶融物質量はかなり大きいことが分かった。しかし、PWRの場合の活性溶融物質量がより低いにもかかわらず、BWRの場合の最大活性溶融物質量の時間に爆発が誘発された場合でも、キャビティ壁の圧力負荷は通常、BWRの場合の圧力負荷よりも高い。

その理由は、かなり大きなBWRキャビティであり、キャビティの中心の予混合物に由来する爆発圧力波は、遠くのキャビティ壁に到達すると既に著しく弱められている。PWRの場合、キャビティ壁の予測最大圧力は、両方のジェット分割モデルで約15 MPaです。

壁面における最大圧力インパルスは、グローバルモデルでは~110kPa秒、KHモデルでは~80kPa秒です。

BWRの場合、壁面で予測される最大圧力は、グローバルモデルでは約15-20MPa、KHモデルでは約5-10MPaです。

考えられる最も困難なBWRの場合、壁面での最大圧力インパルスは、グローバルモデルでは約90kPa、KHモデルでは約35kPaです。

蒸気爆発の強度の重要な尺度は、蒸気爆発によって行われる機械的作業である。

シミュレーションは、同様の活性溶融物質量において、PWRの場合の最大運動エネルギーがBWRの場合よりも有意に大きいことを示した。その理由は、PWRの場合、水位が原子炉容器まで上がり、爆発領域の換気がより困難になり、したがって閉じ込め時間が長くなることにより、活性メルトから水への熱伝達は、水面が空いているBWRの場合よりも完了する。

水中のコリウムの質量に基づくエネルギー変換比は、1～3%であり、BWRの場合には最大のものであり、大きなメルト液滴と組み合わせて速い溶融浸透のために最も効率的な爆発形態の開発を可能にする予備混合が行われる世界的なジェット分割モデルを適用する。

計算されたエネルギー変換比は、典型的には、コリウムを用いた蒸気爆発実験の場合よりも1桁大きい。これは、エネルギー変換比が実験規模より反応器規模でおそらく大きいことを示す可能性がある。

適用されたジェットブレイクアップモデルのどれが反応炉条件においてより信頼できる結果をもたらすかを判断することは困難である。

両方のモデルは、実験結果によって首尾よく検証された。

KHモデルはより機械的であり、したがって実験条件から反応器条件への外挿に潜在的により適している。しかし、その限界は、様々な非線形現象の強い結合のために、実験条件からはるかに信頼できるものではないかもしれないということです。逆に、ロバストなグローバルモデルはよりパラメトリックであり、より制御された挙動を可能にするが、その欠点は、モデルパラメータを原子炉圧力容器スケールに必然的に外挿することは、信頼性が高くないかもしれない工学的判断いずれか。

安全性研究のためには、合理的な範囲のモデルパラメータ内でパラメトリック解析を実行し、利用可能であれば検証された異なるモデリング手法を適用することで対処しなければならないFCIモデルの不確実性を認識することが重要です。FCIモデリングの不確実性を低減し、原子炉計算の信頼性を向上させるためには、さらに実験的かつ分析的なFCI研究が必要である

利害の衝突すべての著者は、宣言する利益相反はありません。

謝辞

著者らは、研究プログラムP2-0026内のスロベニア研究機関の財政支援を認めている。