

OECD-SERENAプロジェクトにおける原子炉圧力容器外水蒸気爆発リスクの解決の現状

ソン・ワンホン¹、パスカル・ピルソ²、マツァーズ・レコバール³

¹KAERI、P. O. Box 105、Yusong、Taejon、305-600、Korea

²CEA、Bâtiment708、F-13108 Saint-Paul-lez Durance Cedex、フランス

³JSI、Jamova cesta 39、1000リュブリャナ、スロベニア

概略

2007年10月から進められているOECD / NEA SERENAプロジェクトの目的は、冷却水のボイドと燃料冷却材の相互作用（FCI）に対する不確実性を解決することです。炉心溶融組成および条件の広いスペクトルを反映する計装、および原子炉のケース分析に使用するのに十分なレベルにコード能力をもたらすために必要な分析作業が含まれます。

その目的を達成するための実験と分析プログラムが実行されています。

実験的試験（TROIおよびKROTOS施設）の主な目的は、事故シナリオを代表する大規模な溶質を使用してプロトタイプのコリウム組成物のキーFCI現象に関する欠落した実験データを提供し、革新的な実験データを生成することである。プレミックスおよびトリガリング後のコリウム溶融物および空隙率のサイズ分布、伝播および蒸気爆発。

SERENA Phase-1と比較してSERENA Phase-2での進展を実証するために、SERENA Analytical Working Group (AWG) の主な課題は分析モデルを改善し、スケーリング効果と原子炉ケースへの適用に取り組んでいます（特に、予測のばらつき）を排除することができます。本稿では、SERENAプロジェクトの現状を紹介する。

I はじめに蒸気爆発は重大な事故の研究にとって残っている重要な問題の1つです。コリウムの形成の場合、いくつかのシナリオでは、ジェットが形成され、容器または反応器のピットに存在する水と相互作用することができる。この場合、液滴の周囲には水滴と蒸気膜が形成される。条件によると、トリガーが発生し、局所蒸気膜が崩壊し、圧力パルスが形成され、衝撃波が伝播し、燃料から冷却剤への集中的な熱伝達が生じる。冷却材の熱エネルギーは機械的エネルギーに変換される。

原子炉格納容器の蒸気爆発の結果を十分に評価しなければならない。それはSERENAプログラムのフレームです。

APR-1400 や AP1000 のような新しいPWRの炉心溶融物のIVR (In-Vessel Retention) を保証するSAM (重大事故管理) 対策として原子炉キャビティの冠水が考えられます。原子炉キャビティの冠水は、既存のPWRではSAM戦略として考慮されていない。しかし、スプレーの使用および/または一次回路破裂によって引き起こされる原子炉キャビティ内の水の存在を排除することはできない。結果として、実際の原子炉の場合にはそのような考慮を排除することができないため、容器外爆発に対する封じ込め安全余裕を確立することができる必要がある。

蒸気爆発の問題を解決するために広範囲の活動[1, 2, 3]が行われてきたが、プロトタイプ of 材料を用いた実験データの欠如と、正確な提供が容易ではないため、重大な事故の未解決の問題の1つとなっているコード検証のための実験データ FCI の問題を解決する努力の一環

として、OECD / NEA は SERENA プロジェクトを実施した。

2005年に完成したSERENA Phase 1 [4]から、不確実性が原子炉構造物の動的負荷の予測可能性に影響を与える重大なFuel-Coolant Interaction (FCI) 現象についてコンセンサスを得ました。

Phase1の主な結論は、既存の負荷がない場合、圧力容器内の蒸気爆発は圧力容器内の完全性に挑戦しないが、圧力容器外の爆発のためにキャビティへの損傷が予想されることであった。結果の散乱が大きすぎて正確に荷重を予測することができず、場合によってはキャビティの損傷を示します (図1)。

一貫した予測のための収束を考慮していない主な不確実性の1つは、爆発時の予混合物中の成分分布、特にボイドのレベルに関する実験データがないことである。レベル膨潤測定からは、グローバルボイド率のみが利用可能であった。もう一つの大きな不確実性は、コリウム溶融物の爆発挙動であった。言い換えれば、コリウムが溶けて低エネルギー活動を示す理由は何なのか。

FCI / Ex-vesselの条件では、原子炉状況の予測値の許容値を低下させるための行動が必要でした。したがって、2007年10月1日にOECD / NEA SERENAプロジェクト[5]が開始され、ボイド率と溶融組成の不確かさを解決するために、穏やかな蒸気爆発特性を有するプロトタイプ材料の性質、およびコンピュータコード検証のための革新的な実験データを提供することである。SERENAプロジェクトは、これらの現象の不確実性をリスク評価の許容レベルまで低減するために必要な確認研究を実施している。

図1：標準的な容器外冷却状態への負荷

本稿では、OECD / NEA SERENAプロジェクトの範囲、不確実性を除去するための革新的な機能、および予備的な結果を紹介する。

2 SERENAプロジェクトの範囲

2.1 フェーズ2の目的

OECD / NEA SERENAプロジェクトの目的は、その不確実性を解決することである。

炉心溶融組成および条件の広いスペクトルを反映する進歩した計器を用いて、限られた数のよく設計された試験を実施することにより、冷却剤の蒸気の泡および材料効果を評価することである。

実験的試験 (TROIおよびKROTOS施設) の目的は、1) 事故シナリオを代表する大規模な溶質を用いた原型的なコリウム組成物の重要なFCI現象 (「物質的影響」) に関する欠落した実験データの提供、2) 予混合中および爆発時およびその後のトリガリング、伝播および蒸気爆発時のボイド率およびコリウム溶融物のサイズ分布を提供する。3) 新しい容器の蒸気爆発によるキャビティ負荷の一貫した予測を得るために、新しい実験データに基づいて改良されたモデル化を可能にする。

分析作業の目的は、1) FCIの能力を高めることPhase-2実験プログラムの結果を統合してPhase-1で実施した作業を補完することにより原子炉分析に使用するモデル/コード、および2) 安全解析と大規模化のためのフィッティングコードで作業を行う爆発強度を低下させる効果。

2.2フェーズ2の実験作業プログラム

KROTOS (CEA) とTROI (KAERI) 施設の補完的で革新的な機能が使用されています。KROTOS 施設は、1次元ジオメトリのプロトタイプのコリウム溶融物のFCI特性を調査し、プレミックスの精密な特性評価のために、コリウム、水および泡を区別できるX線透視検査のおかげでより適しています。TROI設備は、より大きな質量および多次元融解水相互作用幾何学的形状のために、反応器様の条件におけるFCI挙動を調べるためにより適している。

2.2.1試験施設

KROTOSとTROIテスト施設は図2に示されています。KROTOSとTROIの両方を使用する利点は、複雑さが増している実験でキー効果をチェックすることができ、KROTOSとTROIの一貫した解釈が同一のモデリング手法が可能である。KROTOSデータのモデルの検証と、TROIでシミュレートされたより多くの原子炉指向の状況を計算するためのコード能力の検証は、原子炉条件に対するコード適用の信頼性を強化する。

2.2.2試験条件の選択

構成および溶融組成物は、圧力容器外FCIの最も関連性の高い事故シナリオを反映するように選択された。4種の異なる溶融組成物が考慮された。一連の12の補完的なテストが提案された (KROTOSでは6、TROIでは6)。試験は、最初の試験を除いて標準的な予備容器条件、すなわち0.2MPaの圧力および50Kの過冷却で行った。最初のテストは、FCIを悪化させると予想される現実的な条件で実行されました。他のテストでは、ジオメトリと材料効果を調べました。表1は、SERENA試験マトリックスを示す。

新しいリリースシステムは、TROI (FAROタイプリリースデバイス) とKROTOSの両方でリリース条件を改善しました。KROTOS設備では、図3に示すように、底部に膜を有するつぼは、溶融物が必要な温度に加熱された後に放出管を通して重力によって落下する。膜はパンチャーによって穿孔される。溶融物は、30mmの一定の直径を有する連続噴流の形態で放出される。

KROTOS施設の場合と同様に、図4に示すように、TROI施設にも中間溶融キャッチャーがあり、明確な溶融物をジェット形で水に注ぐことができます。必要な溶融温度で、プラグを取り外し、パンチャーを空気圧で作動させる。溶融物は重力によって中間キャッチャーに放出され、約2秒間蓄積する。良好に設計された溶融流れは、溶融キャッチャーの下方に位置する弁を開くことによって相互作用容器内の水中に供給される。

TROI施設では、差圧 (DP) 送信機を使用して、予混合段階の間にスパンバナ化ボイド率を測定する。図6に示すように、TROIの試験区域の平均空隙率は、3つの差圧発信器を用いて測定した。相互作用容器の底部からの20cmと40cmの間の差圧 (VFDP101)、40cmと60cm

(VFDP102) と60cmと80cm (VFDP103) を試験管壁に圧力タップを設置することによって測定した。図10は、DPによるスパン平均ボイド率を示す。各TROI-TS試験のボイド率は提供されています。しかし、コード検証のための局所空隙率は、この測定技術では得られません。実際、空隙率はFCIの不確実性を誘発する主要パラメータの1つであり、溶融温度や溶融注入形態などの他の初期実験条件と関連しています。

図7に示すように、プレ混合中の成分分布を決定するための高度な測定技術は、KROTOS施設

で高エネルギーX線を使用しています。このシステムは、50～300Hzの周波数で5 μ sの9 MeV X線フラッシュ（LINATRON）を用いて、周辺蒸気膜、断片化領域およびコヒーレントジェットコアを同定した。100 f / sでの蒸気膜検出の精度は、直径50 mmの予混合ゾーンでは1 mm未満であり、したがってプレミックス中の詳細な成分分布を提供します。

図8は、実験目的の1つであるコリウム溶融物および空隙率の空間およびサイズ分布を提供するための、コリウム、空隙および水の再構成画像を示す。特定の較正とX線透視法のための特定の後処理の開発のおかげで、現在の段階で局所的なスケールで非常に重要な情報を得ることが可能になりました。ポイド、水およびコリウム（ジェット、液滴）

図9は、グローバルおよびローカルポイド率、再構成画像からのソータ直径などの得られた情報を示す。

2.3 フェーズ2の分析作業プログラム

分析ワーキンググループ（AWG）の主な任務は、1) テスト仕様と分析を支援するために試験前と試験後の計算を実行すること、2) 分析モデルを改善すること、および主に影響を及ぼすと思われる重要な現象を理解すること3) スケーリングの効果と原子炉ケースへの適用に取り組む、4) フェーズ1と比較してSERENA Phase-2で進展したことを証明すること（特に、予測のばらつきを減らすこと）船舶の原子炉の運動”と呼ばれる。表4に、適用されたFCIコンピュータコードとそれを使用する組織を示します。

表4：SERENAプロジェクトに適用されたFCIコンピュータコードおよび組織の適用

AWGは、TROI-TSおよびKROTOS-KS試験の試験前および試験後の計算を行っています。事前テスト計算のサポートにより、正確なテスト条件が指定されました。コード検証、モデリング改善、実験結果解釈のサポートとして、試験後の計算と感度試験を行いました。説明のために、図10に、TEXAS-Vを用いたKS-2の予混合条件とJASMINEを用いたTS-2の計算圧力を示す。TS-2計算は、液滴質量平均直径および液滴Sauter平均直径の値を溶融液滴直径として用いて行った。圧力は、圧力変換器の位置で与えられる。

包括的な成果報告書が準備されており、SERENAフェーズ2で行われた共同作業プロセスと進捗状況を反映し、原子炉アプリケーションを考慮したFCIに影響を及ぼす重要な現象に焦点を当てています。それは、ジェットブレイクアップ、混合物中の融解物の質量および空隙、溶融凝固、爆発相、およびFCIモデリングをトピックとして取り上げている。

原子炉アプリケーションのFCIキー現象の理解とモデリングにおける進展を検証するために、原子炉運動のベンチマークが実施されました。この演習の目的は、SERENAフェーズ1で観測された炉心FCIのコード予測のばらつきが、原子炉構造の負荷を予測できるように低減することを実証することです。このエクササイズは3つのケースから成っている：BWR軸方向溶融物放出、PWR軸方向放出およびPWR側放出。これらは、両方の原子炉設計の最も関連性の高い条件に基づいており、これは運動目的のために大幅に単純化されている。PWRおよびBWRの軸方向放出の場合の条件を図11に示します。

運動の参加者は、計算方法については何も課されていませんでした。ただし、コードを自分の組織の安全解析に使用方法に公正かつ一貫して使用する必要があります。各参加組織が提供する数量を詳細に定義して、計算結果を簡単に比較できるようにしました。と

りわけ、以下の最も重要な量が提供されなければならなかった：トリガー時の放射状に平均化された成分率の軸方向分布、混合物中およびボイドが60%未満の領域における全融解液滴質量の履歴、図12では、JEMIで計算されたBWR事例の予混合条件と、JEMIで計算されたBWR事例の予混合条件が示されています。MC3Dで計算されたPWRサイドリリースケースが表示されます。

圧力容器外の原子炉ケースの状態を代表する原型の構成物、並びに高度な計器が含まれる。分析ワーキンググループのメンバーは、試験前と試験後の計算、そして最後に比較的な容器反応炉の訓練を行った。いくつかのコードは、テスト結果とAWGの議論に基づいて改善されました。

SERENA-2プロジェクトの第1の実験目的は、予混合物の内部構造の詳細なデータを提供することにより、空隙分布の不確実性を低減することです。大域的な空隙率の情報は大きく進歩しましたが、現在はX線と特殊な後処理のおかげで、KROTOS実験における局所空隙率に関する定量的なデータを得ることができます。SERENA-2の第2の実験目的は、原子炉の場合を代表するKROTOSおよびTROI施設における大量のコリウム溶融物および条件による蒸気爆発によるエネルギー論を評価することであった。両方の試験施設の実験結果は同等です。1D施設KROTOSで得られた結果は、TROI施設での2D結果と同等です。試験結果は、模擬アルミナと比較して、原型のコリウムの低エネルギー蒸気爆発を確認した。

SERENA-2プロジェクトの分析目的は、新しい実験データに基づいてモデリングとコードの性能を向上させることにより、容器外蒸気爆発の予測の散乱を容認可能な水準に抑えることです。実施された原子炉運動は、SERENAフェーズ1と比較してコード計算の差異の減少を実証すると思われるが、原子炉状態における予測の信頼性を高めるためにコードを改善する計画がさらに存在する。

謝辞著者は、OECD / NEA SERENAプロジェクトの参加者に感謝します。この論文は、プロジェクトメンバーのために書かれています。ベルギー (TEC)、カナダ (AECL)、フィンランド (VTT)、フランス (CEA、IRSN、EDF)、ドイツ (GRS、IKE)、日本 (JNES)、韓国 (KAERI、KINS、KMU)、スロベニア (JSI)、スウェーデン (SSM、KTH)、スイス (PSI)、米国 (US NRC、UWM)