

Nordic nuclear safety research
北欧原子力安全研究
NKS-344
ISBN 978-87-7893-426-0
Analysing Steam Explosions with MC3D
Magnus Strandberg
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
July 2015

MC3Dによる蒸気爆発の分析
マグナス・ストランドバーグ
フィンランドのVTT技術研究センター
謝辞

NKSは、この報告書に示された作業を財政的支援または現物寄付によって可能としたすべての組織および人々に感謝の意を表します。

免責事項

この文書に記載されている見解は、著者の責任であり、必ずしもNKSのものを反映するものではありません。

特に、NKSの活動を支援する他の組織や団体は、本報告書に提示された資料について責任を負うことはできない。

Analysing Steam Explosions with MC3D

Authors: Magnus Strandberg

Confidentiality: Public

MC3Dによる蒸気爆発の分析

著者: Magnus Strandberg

機密性: 一般

概要

MC3Dは蒸気爆発を分析するために開発されたシミュレーションソフトウェアです。

このレポートでは、ソフトウェアの概要が示されています。

MC3Dを用いて2回の蒸気爆発実験をシミュレートし、結果を提示する。

最初のシミュレーションは、より複雑なケースの出発点を確立するための簡単なフィッティングテストです。

第2のシミュレーションは、フィッティングテストとしても、感度分析のベースとしても実行されます。

感度分析では、3つの入力パラメータ、熔融温度、トリガリング時間および周囲圧力の影響が変化し、これらの変化が結果にどのように影響するかを確認します。

このうち、トリガ時間の変更は、蒸気爆発の発生と強度に最も大きな影響を与えました。

シミュレーションのために選択された実験は、OECD / NEA SERENA 2プログラムの一部として実施され、TROI研究施設で実施された。

この報告書には、OECD / NEA SERENA 2プログラムの簡単な説明と、プログラムで使用されている2つの試験施設KROTOSとTROIの詳細な説明が含まれています。

シミュレーションプロセスを高速化するための自動シミュレーションスクリプトが開発されました。この新しい方法はまた、人為的エラーの可能性を低減し、シミュレーションを待ち行列に入れることを可能にする。

1はじめに

蒸気爆発は、溶融燃料が冷却材と接触したときに起こり得るエネルギー的な燃料冷却材相互作用 (FCI) である

この報告書は、OECD / NEAの枠組みで実施された実験SERENA2プログラムとMC3Dシミュレーション。

シミュレートされた実験は、SERENA 2プログラムの一部である韓国のTROI実験施設で行われた。

このレポートにはまた、さまざまな段階と蒸気爆発の進行の短いレビューが含まれています。

その後、第3章では、MC3Dの能力

このコードは、フランスのIRSNとCEAによって開発されました。

MC3Dは、原子力安全アプリケーション用の多相および多成分フローをシミュレートするために使用される多次元オイラーコードです。

OECD / NEA SERENA 2のプログラムは、フランスのKROTOSと韓国のTROIの4つのプログラムで利用されている最新の2つの実験施設と共に短時間で提示されます。また、施設の最も重要な特性が比較されます。

もう使用されていない2つの古い実験施設の説明もあります。

第5章の始めに、TROI施設で実施された2つの実験の2つがより詳細に提示される。

その後、TROI TS-3およびTROI TS-5実験のMC3Dシミュレーションの結果を、利用可能な実験データと比較する。シミュレーションでは、蒸気爆発とシミュレーションの結果が異なる初期条件にどのように変化するかについての微妙な洞察を、感度分析によって示しました。その結果は第5章の最後に示されています。

短期間の2つの蒸気爆発

蒸気爆発は、溶融したコリウムが水に砕かれたときに起こりうる燃料冷却剤の相互作用である。

水への溶融金属の破碎は蒸気爆発の前兆であるが、蒸気爆発が起こるだけで蒸気爆発は非常に確率論的事象であることは確かではない。

蒸気爆発現象は、通常、予混合、誘発および伝播の3段階に分けられる。

異なるステージは異なるタイムスケールで発生し、異なる物理現象を伴う。

例えば、プリミキシングは数秒かかることがあり、トリガと伝播の両方がマイクロ秒スケ

ールで行われます。

予混合は、流体力学的な力のために溶融物が破裂する第1段階である。

液滴は、溶融物の温度が非常に高いので、蒸気フィルムによって取り囲まれている。

予混合は、溶融速度と冷却速度の両方の初期条件、および混合が行われる構造の幾何学的形状に対して非常に敏感である。

表1 [Strandberg (2014)]は、様々な初期条件の概要と、それらが爆発確率と強度にどのように影響するかを示しています。

蒸気爆発が起こるかどうかが、そしてどれくらい強くなるかに影響を与える最も重要な条件は、爆発に参加することができる溶融物の量と溶融物の温度

これらの増加は、爆発確率と強度の両方を増加させる。

トリガ段階は、液滴システムが局所的に妨害されて、冷却剤が溶融物と直接接触するようになったときに始まり、それによりさらに細分化される。

トリガーは、外部または内部のいずれかになります。

内部トリガは、溶融構成自体の内部から発生しており、例えば、水が充填されたドライウエルの底部に溶融物が衝突したときにトラップされる水とすることができる。

外部トリガは、外乱が外部の爆発のために容器壁に衝突するものから来る圧力波など、冷却剤混合物の外側から生じるときである。

衝撃波が混合物を点火することができない可能性があるため、トリガイメントが必ずしも蒸気爆発につながるわけではないことに留意されたい。

表1. さまざまな予混合パラメータとその爆発確率と強度への影響の概要。

最後の段階は、伝播段階として知られています。

この段階で、トリガー事象からの衝撃波が冷却剤 - 蒸気 - 溶融混合物を通して伝播し、不安定な液滴 - 蒸気システムを崩壊させることによってそれを発火させる。

混合物を点火する際に誘発事象が成功した場合、衝撃波は超音速で伝搬する。

混合物が発火しない場合、進行速度ははるかに遅くなります。

衝撃波は、熱水力および水と溶融物との間の差速度により、液滴をさらに破砕する。

原子力発電所で分析される必要がある3種類の蒸気爆発があります

安全性の観点：圧力容器内および圧力容器外の蒸気爆発、ならびにデブリベッドが冠水したときに起こり得る蒸気爆発。

圧力容器内および圧力容器外のケースは、初期条件には少し異なりますが、進行は同じです。例えば、ex-vesselの場合は、通常、容器内の場合よりも大幅に過冷却される水分を多く含んでいます。デブリベッド再充填のケースでは、溶融物は「固定」であり、他の場合のように溶融物の代わりに注入される水である。

3 MC3D

MC3D (Multi Component 3D) コードはフランスのIRSNとCEAによって開発されました。

MC3Dは、原子力安全アプリケーション用の多相および多成分フローをシミュレートするために使用される多次元オイラーコードです。研究と安全の両方の用途に使用できます。

名前が示すように、このコードを使用して3Dシナリオと2Dをシミュレートすることができます。このレポートでは、3Dシミュレーションでは大幅に改善された結果が得られないため、2次元シミュレーションのみが実行されます。これは、3Dジオメトリは、通常、回転軸に対してほぼ対称であるためです。

[Meignen and Picchi (2012)]このレポートには、パラメータの変更が少ないいくつかのシミュレーションを分析する感度分析が含まれているため、シミュレーション時間が短くても問題はありません。

3.1 MC3Dの一般的な説明

MC3Dは、一般的な数値ソルバーを持つ2つの異なるFCI（燃料冷却剤相互作用）コードを使用します。

コードの1つは予混合段階用で、もう1つは爆発段階用です。

トリガ段階は、爆発段階で使用されるコードに組み込まれています。これにより、シミュレーションが2つの部分に分割されます。

最初の部分では、メルトジェット断片化、蒸気の蓄積および熱伝達がシミュレートされる。

第2の部分は、ユーザーが選択した時点で開始することができ、熔融液滴の急速な断片化および熔融液滴から冷却液への熱伝達を処理する。

[Meignen and Picchi (2012)]

3.2 ステージ記述のプレミキシング

予混合段階では、燃料は3つの異なる段階で存在することができる：連続燃料、滴下または破片として。

断片段階はオプションであり、継続段階にはいくつかの形式が含まれています。

熔融燃料ジェットまたは熔融プールなどの連続燃料ステージは、ステージ間で燃料を移動させる物質移動式によって接続されています。3つの異なる段階は、異なる組の方程式によって処理される。

連続燃料場の物質移動は、流体 - 区分線形インターフェース構築 (VOF-PLIC) の体積を利用して計算される。

VOF-PLICは、計算流体力学 (CFD) によく使用される方法です。

VOFは、細胞画分を計算し、画分が1または0でない細胞で界面を構築することによって、多相流体を取り扱います。次に、画分に応じて細胞内の線または面としての界面を構築する方法としてPLICを使用します[Karch et al (2013)]。連続燃料の液滴への断片化は、水中でのそのタイプの燃料ジェットのための特定のユーザー特定フラグメンテーションパラメータを使用するグローバル相関モデル、または

Kelvin-Helmholtz拡張モデルを使用して液滴直径を計算するローカルフラグメンテーションモデル。

ケルビン - ヘルムホルツモデルは、メルトジェットとクーラントとの間の速度の差に由来する。

滴の合体は、幾何学的モデルを介して処理される。

移動する液滴を含む領域およびそれらが中断されている媒体を流れと呼ぶ。

図1では、異なるフロータイプ、すなわち、気泡流、移行流および液滴流が示されている。セル内の蒸気体積分率が流量タイプを決定し、異なる領域間の限界をユーザが指定することができる。

シミュレーションの予混合段階では、断片は水と平衡状態にある。 [Meignen et al. (2005)]

3.3爆発ステージの説明

MC3Dでは、トリガ時間はユーザが指定したパラメータです。

それが起こる瞬間に加えて、トリガリングは、外部トリガを達成するために圧力が人為的に増加したセルまたはセルのゾーンを指定することによって定義される。

MC3Dは直接気化アプローチを使用しています。つまり、フラグメント周囲に蒸気生成があり、加圧につながります。

これは、熱伝達関連のためのエプスタイン・ハウザー (Epstein-Hauser) モデルによって達成される。

細分化のために2つの利用可能なモデルがあります。細かいフラグメントのサイズが一定でユーザが指定した標準モデル、およびフラグメンテーションの速度。

また、滴安定性のWeber基準 (1) を使用してフラグメントサイズの変動を計算する新しいモデルが実装されました。新しいモデルはまだ開発中です [Meignen et al. (2005)]

Df =

4 OECD / NEA SERENA 2プログラム

この章では、OECD / NEA SERENA 2プログラムの概要を説明します。まず、一般的なプログラムの概要と、プログラムで使用される2つの実験施設の詳細な説明を示します。

OECD / NEA SERENA 2プログラムの目標は、現在のFCIコードとその能力のステータスを確立するとともに、原子炉事故シナリオにおける蒸気爆発によって引き起こされる負荷を分析することでした。

これは、数多くの試験を設定し、実行し、溶融組成と相互作用に関する多くのパラメータを分析することによって行われました。

原子炉のケースコードで動作するコード能力をテストするための分析作業も実施されました。プログラムの主な所見は、容器内蒸気爆発が原子炉格納容器の完全性に挑戦しないことであった。しかし、容器外の蒸気爆発は、さらなる研究が必要です。

OECD / NEA SERENAおよびSERENA 2プロジェクトは、蒸気爆発の分野における最初の実験的研究プログラムではなかった。60年代以降の研究が行われているためです。

それ以来、蒸気爆発に関連する現象を分析するためにいくつかの設備が使用されてきた。もう使用されていない最も注目すべき実験施設のいくつかは、表2 [Strandberg (2014)] にリストされています。

これと並行して、コンピュータコードの進歩と計算能力の向上の両方について、蒸気爆発

を予測し、近似し、シミュレートする方法も開発されている。

表2. 蒸気爆発の研究に使用されていた、もはや使用されていない実験施設

名前 年 コメント

FARO 1993 Prototypic、.i e。 原子炉規模の蒸気爆発に近い。 高圧下での密閉容器内での沸騰フィードバックと、下部容器ヘッドに対する熱攻撃の可能性を決定するために使用されます

MAGICO 1992予混合をよりよく理解するために、ミリサイズの鋼球を飽和水に投棄した。

MIXA 崩壊後のジェット破砕を観察する可能性のある、偶数ストリームの事前溶融メルト

4.1 クロトス

フランスのCadaracheにあるKROTOSの施設は、Commissariat A' l' Energie Atomique (CEA) によって運営されています。

それは、OECD / NEA SERENAおよびSERENA 2プログラムで使用された試験施設の1つでした [Cassiaut-Louis and P. Piluso (2011)]

相互作用容器の幾何学的形状は、3D試験よりも1Dおよび2Dの軸対称試験に適しています。KROTOS施設の最も重要な特徴は、メルトジェットが水の中に入るときのメルトジェットの細分化を詳細に調査できるX線透視検査装置です。

また、外部トリガーデバイスも装備されています。

放射線検査装置のために、施設は2つのレベルで構成され、下位レベルは地下に位置する。

レベルは、上方散乱X線放射から保護するために、厚いコンクリートスラブによって分離されています。

図2は施設の概略図である。

4.2 TROI

韓国の原子力研究所では、韓国のTROI（水とのコリウムの相互作用のテスト）研究施設が維持されています。カエリ。

この施設は韓国の大田にあります。

OECD / NEA SERENA Phase 1&2プロジェクトで使用されています。

1999年に建設が始まり、2000年7月に初の予備試験が開始された。

2001年4月、UO₂とZrO₂の混合物による最初の試験を実施した。

試験施設は炉槽からなる。圧力容器、中間メルトキャッチャーを備えた急速開放バルブ、および相互作用容器を含む。

図3は、設備の概略図を示し、溶融キャッチャー弁の拡大図を図4に示す。溶融材料は、150kWのRFを介して供給される電磁炉を用いて炉容器内で溶融されるジェネレータ。

ファーネス容器は、溶融温度を測定するための装置（パイロメーター）を含む、周囲圧力だけでなく。

それはまた、エアロゾル除去のためのアルゴン（Ar）ガス注入を組み込んでいる。

また、雰囲気ガスの内容物のサンプルを収集することができる。

溶融物が所望の温度に到達すると、溶融物は中間溶融キャッチャーを介して相互作用容器に

放出される。

相互作用容器には、複数の温度および圧力センサーを含む実験に必要な測定機器が含まれています。

トリガー装置は、相互作用容器の底部に配置され、熔融放出チャンネル内のセンサーによって自動的に制御され、時限付きバックアップが行われます。

相互作用容器の幾何学的形状のため、TROI設備は蒸気爆発の3D効果を研究するのに適している。

これはまた、比較的大きなサンプルを試験するためにも使用することができます。OECD / NEA SERENA 2プログラムでは、18kgに近い熔融材料が使用されました。

KROTOSとTROI実験は蒸気爆発に関連する現象を調べるために作られていますが、構造とテストの焦点は異なります。

TROI実験の熔融物の質量が大きく、3D解析のための設備の設計がより良好であるため、TROI実験はプラント応用シミュレーションの場合の出発点として使用することがより好ましい可能性があるため、この報告書の今後の検討のためにTROI実験を選択した。

表4は、OECD / NEA SERENA 2プロジェクトで実施されたTROI実験のリストである。

5 MC3Dシミュレーション

このレポートの焦点は、OECD / NEA SERENA 2プログラムの一環として実施された、酸化物または金属としてのUおよびZrを含むTROI実験のシミュレーションです。

次の章では、選択した実験とシミュレーションの結果を示します。

まず、金属を含まない実験、すなわち、TROI TS-3実験

この純粋に酸化的な実験は、メッシュをテストするための出発点として使用され、新しいシミュレーションプロセススクリプトの開発にも使用されます（付録Aを参照）。

次のより複雑な実験TROI TS-5（メルトに金属も含まれる）が提示され、シミュレーション結果が分析されます。

この章の最後では、単純な感度分析の結果が一部のパラメータのシミュレーション結果への影響を調べるために示されています。

5.1 非金属実験

5.1.1 TROI TS-3実験の発表

TROI TS-3を感度分析の出発点として選択した。TS-3試験は、71%のUO₂と29%のZrO₂からなる熔融混合物を用いて行った。

実験の他の重要なパラメーターを表5に示す。ここでは、例えば熔融物の質量および温度ならびに反応容器の初期圧力が列挙されている。

図5は、試験室への熔融注入の2つのスナップショットを示す。

ジェットは連続的であることが図からわかる。

メルトジェットの前面の進行を図6に示す。

これは、どのくらいの熔融物が爆発に参加できるかを定義するために重要です。これは爆

発強度に大きな影響を与えます。加えて、実験とシミュレーションの間で簡単に比較できる要素です。

図7は、様々なレベルのTS-3実験で測定された動圧を示す。

青い線は混合物中の外部トリガーの進行を示し、続いて赤い線で示された蒸気爆発の前面を示している。

見ることができるように、蒸気爆発フロントピークの圧力は、爆発において8MPaを超える。

5.1.2シミュレーション結果

TROI TS-3実験をシミュレートする目的は、5.2.2に示すTS-5シミュレーションの開始パラメータを近似することでした。よりシンプルでシミュレーションが速いシミュレーションのもう一つの理由は、付録Aに示す自動シミュレーションスクリプトの開発とテストに使用されたことです。

表5には、シミュレーションで使用したパラメータとともに、テストの実際のパラメータが示されています。

結果が実験と一致するように最終的なパラメータを選択します。

反復プロセスでは、実験パラメータが出発点として使用された。セットアップは対称であり、3Dシミュレーションはシミュレーション時間が大幅に長くなるため、シミュレーションは2Dシミュレーションとして実行されました。

この実験では、水素生成の影響を考慮する必要がないため、シミュレーションは比較的簡単です。

シミュレーションは、事前定義された値の1つの代わりに、カスタムユーザ定義のメルトを使用して行われ、固相線温度と液相線温度の初期値は、ASTECの助けを借りてそれぞれ2973Kと3136Kと定義されました。

実験と同様の結果を得るためには、値の変更が必要でした。

シミュレートされた動圧は図8に見ることができる。

青い線はシミュレーションされた圧力を表し、赤のマーカーは生の実験データである。表5から明らかなように、初期パラメータはかなり変化していた。溶融温度は2861Kから3150Kに上昇した。

5.2金属実験

5.2.1 TROI TS-5実験の発表

このサブセクションでは、よりリアクタライクな特性を備えたより複雑な実験ケースが提示されている。

この場合、水素生成が考慮される。

金属実験のために選ばれた実験は、UO₂:76%、ZrO₂:18.3%、Zr:5%およびU:0.7%からなるTROI TS-5である。

考えられるのは、混合物に金属を添加すると、原子炉事故シナリオのように熔融物がおそらく完全に酸化されず、水素の生成がボイドの蓄積を増加させるので蒸気爆発の進行に影響

響を及ぼすからである。

表6では、異なる実験パラメータがシミュレーションで使用されたパラメータと共に提示されている [HONG et al. (2011)]。

SONG et al. (2007) によれば、水素の生産量が十分であれば水蒸気の爆発は弱くなるが、断片化によって水素の生産が巨額になるかどうかを判断することは難しい。

このような実験の1つでは、大量の水素が生成されるという兆候はなく、その結果生じる蒸気爆発は非常に活発であった。

図9に溶融物の進行が示されている。

図から、この実験は水面に接触する際に速度がわずかに速く、前のサブセクションで提示されたT8-3実験よりもわずかに速く船底に接触したことが分かります [HONG et al.

(2011)]

図10は、溶融クーラントの相互作用中にKISTLERセンサで測定された動圧を示しています。グラフから、圧力が6MPaと高いことが読み取れる。 [HONG et al. (2011)]最大インパルスは約3キロニュートン秒 (kNs) と計算された。算出された相互作用効率は、送達された溶融物中の計算された熱エネルギーと比較して、0.06%であった。

T5-5の実験では、いわゆるスチームスパイクが実際の突っ込みの前に起こった。

蒸気スパイクは、圧力の大幅な上昇なしに、ボイド率および蒸気の有意な増加である。

図11は、相互作用容器の上部および溶融容器内に記録された圧力を示す圧力の別のグラフを示す

グラフから、圧力は半速で上昇しているようであり、トリガーは蒸気爆発を実際に引き起こすのに効率的ではなく、また蒸気スパイクとトリガーを区別することも不可能であることが分かる。 Meignen (2015)]。

TS-5実験の間、周囲ガスの十分量が2回、開封5分前に1回、開封弁および開封後10分に採取された。

両方の場合に2つのサンプルが収集された。爆発後に収集された試料の1つは、水素含有量の測定可能な増加を示した。

他のTROI TS実験と比較して、それはTS-4を除いて他の全ての水素含有量よりも高い水素含有量を有していた。

溶融物中のZr金属は実験中に酸化されたと推測されている [HONG et al. (2011)]

5.2.2シミュレーション結果

金属実験のために、TROI TS-5を、UO₂の76%、ZrO₂の18.3%、Zrの5%およびU [HONGら (2011)]の0.7%からなるシミュレーション運動のために選択した。

表6では、テストからの実際のパラメータが、図12のグラフを生成するために使用されたパラメータとともに提示され、

シミュレーションでは、MC3Dの水素製造方法に起因する不必要な複雑さがカスタムメイドの定義された溶融物として追加されたため、溶融物のデフォルト混合物が使用されました。

図12から、実験で記録された値と比較して、0.68秒でトリガーを用いてシミュレートされ

た蒸気爆発によって生じるシミュレートされた圧力ピークを見ることができる。
シミュレーションでは、フラグメンテーションプロセスも水素を生成した。
予混合段階における水素生成速度は図13に見ることができる。
TS-5実験では“スチームスパイク”が発生したため、シミュレーションデータを実験データに適合させることは実行可能な選択肢ではありません。
実験をトリガする時間と一致する時間に爆発がシミュレートされたときに爆発は起こらなかった。

このため、トリガー時間は0.68秒に変更されました。これはMC3Dが最も強い爆発が起こることを期待する値です。

入力パラメータは、以前の分析と比較して変更され、トリガーの時点でトリガーの位置であるセル内の圧力が人工的に増加するだけでなく、余分な熔融液滴がセルに加えられてトリガーと一緒に。

5.3 感度分析

MC3Dによる蒸気爆発への影響を評価するために、TS-5試験をベースにして、いくつかの重要な入力パラメータについて感度分析を行った。TS-5実験から出発して、感度分析においても水素生成の影響が考慮されることを意味する。

感度分析は、一度に1つのパラメータが変更され、その効果が分析されるように行われました。

5.1.2節の実験値にシミュレーションを適合させる間、熔融温度は爆発強度に最も大きな影響を与えることが明らかになった。したがって、感度分析のために選択されたパラメータの1つは熔融温度であった。

また、このように爆発時間および周囲圧力をシミュレートした。

表1には、蒸気爆発の発生と強度に影響を与える他のいくつかの条件が列挙されていますが、これは感度分析の一部に選ばれていませんでした。

熔融物の質量値を実験値から遠くに変化させると、熔融物の温度、爆発時間および周囲圧力の3つのパラメータが、この段階でより重要であると考えられたため、熔融物および冷却材の塊。

図14では、同じ入力パラメータがシミュレーションと同じように使用され、その結果は図12に示されているが、異なる熔融温度（2800K～3000Kの範囲）で示されている。

2700Kでのシミュレーションも行われましたが、予混合後、爆発ステージのシミュレーションがクラッシュするような状況になりました。

その理由は、2700Kの熔融温度が低過ぎて蒸気爆発に必要な条件にならない可能性が最も高いためです。

蒸気爆発を引き起こすことができた温度のために、圧力の結果の差はそれほど大きくはありませんでした。

この理由は、蒸気爆発が誘発された瞬間に熔融温度が蒸気爆発強度の制限要因にならないことである。

異なるトリガ時間も同様の方法でシミュレートした。

図15では、圧力ピークへの影響を見ることができる。

グラフに表示されたケースに加えて、0.5秒でのトリガもシミュレートされましたが、蒸気爆発は発生しませんでした。

見て分かるように、シミュレートされた爆発は0.68で最も強く、それは0.64秒で弱い。

0.7秒の短い線は、シミュレーションが突然停止したため、おそらくシミュレーションの不具合です。

0.9秒でトリガすると蒸気爆発も起こるという事実は、この仮定を裏付けています。

周囲圧力の影響も分析したが、結果は圧力ピークに顕著な影響を及ぼさないことを示している。

これは、周囲圧力が最大の効果を有するという事実によって説明することができる蒸気爆発の確率ではなく、蒸気爆発の可能性に基づいている。

シミュレーションでは、テストされたすべての周囲圧力レベルで爆発が発生しました。

6結論

このレポートで提示された作業の目的は、MC3D使用の専門知識を広げ、選択された入力パラメータに対するシミュレーション結果の感度を評価することでした。

シミュレーション中に、シミュレーションプロセスを自動化するためのスクリプトが開発されました。

MC3Dコードは、予混合と爆発（伝搬）段階の2つの部分で構成されています。

予混合部は燃料を3つの異なるモード、すなわち連続、液滴および破片に分割する。各モードについて、材料と熱の異なるモードへのおよび異なるモードからの熱伝達を処理するために、異なる方法およびモデルが適用される。

爆発は人工的に引き起こされます。

MC3Dの最新バージョンでは、ユーザーが指定したパラメータを使用せずに、フラグメントサイズをプログラムが計算できるようにすることもできます。

OECD / NEA SERENA 2プロジェクトの枠内で、KROTOS施設とTROI施設の両方で実験を行った。

KROTOS施設の特徴は、X線分光測定装置であり、相互作用容器内の空隙率を詳細に調べることができます。

他方、TROI施設は、より大きな相互作用容器を有し、より大きな溶融質量を可能にし、KROTOSに比べてよりプロトタイプな実験を可能にする。このため、TROI施設で実施された2つの実験を選択してシミュレーションしました。

実験の最初のTROI TS-3は、主にTROI TSテストのシミュレーションパラメータの出発点を達成するために使用されました。しかしながら、シミュレートするのが比較的速かったので、シミュレーションスクリプトの開発に使用するのに適していました。

TROI TS-5実験は、部分的に金属溶融物が水素生成の効果を実証し、分析するために選択された。

TS-5実験では、混合物が適切にトリガーされない理由と考えられる「スチームスパイク」として知られていたものが発生しました。

これは残念なことに、実験とシミュレーションのマッチングを不可能にします。報告書の最後では、3つの異なる入力パラメータに対する単純な感度分析が示されており、パラメータは熔融温度、トリガー時間および周囲圧力である。シミュレーション結果は熔融温度の変化にそれほど敏感ではなかった。これはおそらく熔融温度がこの場合爆発強度の制限要因ではないためである。

トリガ時間の変更は、あまりにも早すぎるまたは遅すぎると蒸気爆発を引き起こさないもので、より目に見える効果があった。このシナリオでは、周囲圧力は蒸気爆発強度に影響を及ぼさなかったが、蒸気爆発が起こる確率にほとんど影響を及ぼすため予想された。

MC3Dで蒸気爆発をシミュレートすることは、前述のようにプログラムを「ブラックボックス」ツールとして使用すべきではないため、かなり時間がかかるプロセスですが、ユーザーが十分に熟練していると満足できる結果を達成することは可能です。自動化されたスクリプトは、開発プロセスにかなりの時間が掛かったにもかかわらず、作業に付加価値をもたらしました。現在、MC3Dの将来の利用はますます高速化され、合理化されます。

図16. 古いシミュレーションプロセス

シミュレーション手順

このレポートで提示されたシミュレーションでは、MC3Dソフトウェアが使用されましたが、すべてのデータの処理と分析をより効率的に行い、エラーの発生を少なくするために、Matlabスクリプトが作成されました。

このスクリプトは、シミュレーションデータディレクトリと設定ファイルの作成を処理します。スクリプトは自動的にデータを収集してグラフにプロットすることもできます。この方法はかなり高速で、データの分析が簡単になります。

手動でシミュレーションを実行する必要がある場合は、データファイルの作成、プレミックスの実行、ファイルのプレミックスから爆発シミュレーションへの転送、爆発シミュレーションの実行、データのグラフへの収集など、さまざまなステップが必要です。

このため、シミュレーションを実行している人は、シミュレーションが実行されている間だけフォーカスを合わせなければならないことは明らかです。

もう1つの要因は、異なる手動ステップ間の時間ステップが大きく異なり、予測が難しいことです。

スクリプトを介してシミュレーションを実行すると、すべての中間ステップが自動化され、手動でデータ入力のみを行う必要があります。

スクリプトは、1つのデータ入力から2つ以上のシミュレーションを連続して実行できます。

これにより、複数のシミュレーションを簡単かつ迅速に自動的に実行することができます。このスクリプトはまた、シミュレーションが成功したかどうかを確認するための第1の概略分析に役立つ圧力グラフを直接印刷します。

図16と図17は、マニュアル入力とスクリプトの使用との違いを示しています。このスクリプトを使用しても、MC3Dをブラックボックスツールとして使用することはできません。なぜなら、ユーザーはテンプレートとしてMatlabファイルに挿入されている下層データファ

イルを作成する必要があるからです。また、結果が現実的であるか否かを徹底的に分析する必要があります。