

S I M M E Rによる最大エネルギー評価の考え方

	内容		評価	関連ページ	
V&V	<p>Verification: 理論解、基礎的なベンチマーク問題、小規模模擬実験の検証解析を行うことにより、個別モデル及びプログラミングを検証した。</p> <p>Validation: 遷移過程に対しては、炉心平均燃料温度を評価指標として重要現象（損傷炉心の核的挙動、構造壁の溶融破損、FCI、燃料スロッシング、燃料流出）を摘出、機械的エネルギー発生に対しては、機械的エネルギーを評価指標として重要現象（燃料からスチールへの熱移行、炉心上部構造による熱損失、蒸気泡の成長）を摘出し、各現象を模擬した試験解析でS I M M E Rを有効性評価に適用することの妥当性を確認した。</p>		<p>Verification（検証研究）によって熱流動解析機能の実装と構成方程式による物理現象のモデル化が適切に行われていることを確認した。また重要現象の模擬試験を解析するValidation（妥当性確認）では、試験結果を適切に解析できていることから、有効性評価に適用することの妥当性を確認している。ただし、これらの模擬試験は実スケールで実機模擬度の高い試験ではないことから、即発臨界超過の原因となる燃料集中に直接影響を与える重要現象である「燃料スロッシング」と「FCI」については、有効性評価において不確かさの影響を包絡する保守的な条件での解析が必要と判断した。</p>	<p>JY-76-1 p.6 p.28-47</p>	
即発臨界超過による放出エネルギー評価	重要現象	検証解析の内容	検証解析の評価	不確かさを包絡する保守的な想定	関連ページ
	<p>【燃料スロッシング】 高速炉の損傷炉心では、溶融した燃料及びスチールと破損した燃料粒子が混在した炉心プールが水平方向に揺動（燃料スロッシング）する過程で燃料が炉心中心に集中することで反応度が上昇し、即発臨界を超過する。燃料集中による即発臨界超過に直接影響を与える重要現象である。 この燃料スロッシングは、(1)固体粒子を含む流体のスロッシング、(2)高密度（約 10⁴kg/m³）の流体の気液二相流、(3)核出力による体積発熱、という物理現象に特徴があり、これらに着目した模擬試験を解析することによりS I M M E Rの妥当性を確認した。</p>	<p>(1) 固体粒子の混在するスロッシング挙動の流動解析機能： 溶融燃料と破損した燃料粒子の混在する炉心内の燃料スロッシングを水と固体粒子（Acryl P210D）を模擬流体として模擬したスロッシング挙動試験解析を実施した。</p> <p>(2) 高密度の炉心物質の流動解析機能： 鉛ビスマスを高密度流体の模擬流体として中性子ラジオグラフィで流動状況を可視化した気液二相プール流動試験解析を実施した。</p> <p>(3) 核発熱を伴う燃料の沸騰挙動： 仏国の試験炉である SCARABEE 炉を用い、核発熱で UO₂を沸騰させた SCARABEE BF2 炉内試験解析を実施した。</p>	<p>評価指標に対して重要である凝集挙動のタイミングと表面高さをほぼ再現できているが、水及び固体粒子（Acryl P210D）を模擬物質とした小規模な炉外試験であることから、有効性評価では燃料凝集の効果を最大とするような不確かさの影響解析を行う必要がある。</p> <p>炉心物質と同様の高密度（密度が約 10⁴kg/m³）の流体の二相プール流動挙動へのS I M M E Rの適用性を確認した。ただし、試験体の規模が数 10cm であることから、炉心規模への外挿性に不確かさがある。</p> <p>核加熱によって UO₂を沸騰させた BF2 試験解析によって実際の炉心物質の沸騰挙動への適用性を確認した。ただし、試験体の規模が数 10cm であることから、炉心規模への外挿性に不確かさがある。</p>	<p>左欄の(1)～(3)に示す妥当性確認を行った模擬試験が模擬物質による試験であり、また実スケールでないことから、実機模擬度に限界がある。その限界による不確かさを包絡する保守的な解析ケースとして、以下の条件及び解析体系による解析を実施した。</p> <p>基本ケースにおいては、以下に示すように炉心燃料の流動性について保守的な条件を用いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 損傷燃料ペレットなどの固体燃料粒子を含む炉心物質の流動性は実際には低い、その効果を無視して溶融燃料と同様に流動すると仮定する保守的な条件を適用した。 ● 損傷燃料ペレットの燃料結晶粒内及び粒子間にある FP ガスによる固体膨張を無視して焼結密度で燃料が凝集する保守的な条件を適用した。 <p>スロッシング挙動の不確かさを包絡する不確かさ影響評価ケースではこれに加えて、以下のように燃料集中の駆動力について保守的な想定を用いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 現実の燃料スロッシングは基本ケースの解析結果に示されるように3次元的な挙動となるが、2次元軸対称円筒体系を用いた解析により炉心中心への燃料集中を強要する解析を実施した。 ● この解析では、反応度を低下させる燃料の炉心外への流出を無視した上で、炉心中心で発生する燃料とスチールの蒸気圧によって一旦外側炉心へ移動した燃料が外側炉心の高 Pu 富化度燃料を伴って再度炉心中心に向かって集中する挙動によって即発臨界超過が発生する。 	<p>JY-76-1 p.7, 13 p.42-45 p.50</p>

	重要現象	検証解析の内容	検証解析の評価	不確かさを包絡する保守的な想定	関連ページ
即発臨界超過による放出エネルギー評価	<p>【FCI】</p> <p>損傷炉心拡大時に構造材の破損又は炉心上下からの冷却材の流入により冷却材が炉心物質と熱交換することによって、冷却材の蒸気圧力が発生する現象である。</p> <p>本物理現象はその発生圧力による燃料集中によって即発臨界超過に直接影響を与える重要現象である。</p>	<p>約 3,000°Cの溶融アルミナ・溶融スティールの混合物とナトリウムの FCI を発生させた THINA 試験解析を実施した。</p>	<p>妥当性確認に用いた THINA 試験は高速炉の炉心損傷事故で発生する温度条件と冷却材条件を模擬したものであり、圧力発生挙動を適切に解析できていることから、実機解析への適用性を有すると判断した。ただし、燃料集中を引き起こす FCI 現象は、溶融燃料とナトリウムが接触・混合する状況の不確かさが大きく、有効性評価ではその不確かさを保守的に包絡する条件を用いた影響評価が必要である。</p>	<p>基本ケースの即発臨界超過の直前で、炉心物質を炉心中心に吹き寄せる 2 カ所の位置にある制御棒下部案内管において FCI が同時に発生すると仮定して、炉心中心への燃料集中による即発臨界超過挙動を解析した。</p> <p>過去に実施されたナトリウムを用いた FCI 実験の最大圧力が約 7MPa であるところ、約 8MPa の圧力が発生する量のナトリウムを強制的に炉心物質に混合させた。</p>	<p>JY-76-1 p.7, 13 p.41 p.50</p>
機械的エネルギー発生量評価	<p>【燃料からスティールへの熱移行】</p> <p>即発臨界超過で高温となった溶融燃料から炉心内の溶融スティールへ熱移行する現象である。本物理現象は、炉心の圧力を支配する燃料蒸気圧とスティール蒸気圧に影響を与える。</p>	<p>仏国の試験炉である CABRI 炉を用い、溶融燃料から溶融スティール液滴への熱伝達によるスティール蒸気圧の発生挙動を測定した CABRI TP-A2 試験解析を実施した。</p>	<p>実際の燃料とスティールを用いた核加熱による試験であるが、小規模なカプセル試験であるために、実スケールへの外挿性に不確かさがある。</p>	<p>基本ケースに対して、試験解析に基づく燃料とスティール間の熱伝達係数の不確かさの影響を評価した。</p>	<p>JY-76-1 p.58~62</p>
	<p>【炉心上部構造への熱損失】</p> <p>上部プレナムへの炉心物質の流出を抑制し、さらに、流出する炉心物質の熱エネルギーを低下させる重要現象である。</p>	<p>高温高圧の二相状態の水を模擬流体として、炉心上部構造を模擬したピン束流路内での熱損失を模擬した VECTORS 試験解析を実施した。</p>	<p>S I M M E R は試験結果を適切に解析できていることから、有効性評価への適用性があると判断した。ただし、水を模擬流体とした試験であり、炉心物質への外挿性に不確かさがある。</p>	<p>炉心上部構造への熱損失を保守的に低減させる不確かさ影響評価を実施した。</p>	
	<p>【FCI】</p> <p>上部プレナム底部に流入した炉心物質と上部プレナム内のナトリウムが接触してナトリウム蒸気圧が発生する現象である。本物理現象は、上部プレナム内のナトリウムを加速する駆動力を発生する現象であることから重要度が高い。</p>	<p>約 3,000°Cの溶融アルミナ・溶融スティールの混合物とナトリウムの FCI を発生させた THINA 試験解析を実施した。</p>	<p>妥当性確認に用いた THINA 試験は高速炉の炉心損傷事故で発生する温度条件と冷却材条件を模擬し、機械的エネルギー発生の状況と同様にナトリウムプールの底部から溶融物質を噴出させる体系で実施したものである。試験で観測された圧力発生挙動とカバーガス圧縮挙動を適切に解析できていることから、実機解析への適用性を有し、またその不確かさは小さいと判断した。</p>	<p>機械的エネルギー発生に係る FCI の不確かさは小さいことから、不確かさ影響評価は不要と判断した。</p>	
	<p>【蒸気泡の成長】</p> <p>FCI で発生した蒸気泡が成長して上部プレナム内のナトリウムを上方向に加速し、機械的エネルギーを発生する直接の現象であることから重要である。</p>	<p>高温高圧の二相状態の水を模擬流体として、水プール底面からの蒸気泡成長とカバーガス圧縮挙動を模擬した Omega 試験解析を実施した。</p>	<p>S I M M E R は試験結果を適切に解析できていることから、有効性評価への適用性があると判断した。ただし、水を模擬流体とした試験であり、炉心物質への外挿性に不確かさがある。</p>	<p>蒸気泡界面への蒸気の凝縮を保守的に低減させる不確かさ影響評価を実施した。</p>	

結論：即発臨界超過によるエネルギー放出及びエネルギー低減メカニズムに係る不確かさの影響評価を実施し、機械的エネルギー発生量は最大約 3.6MJ と評価