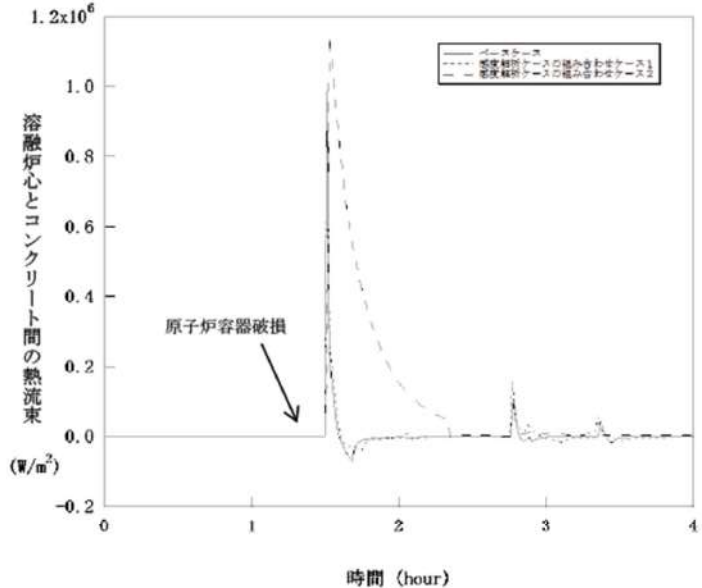


赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

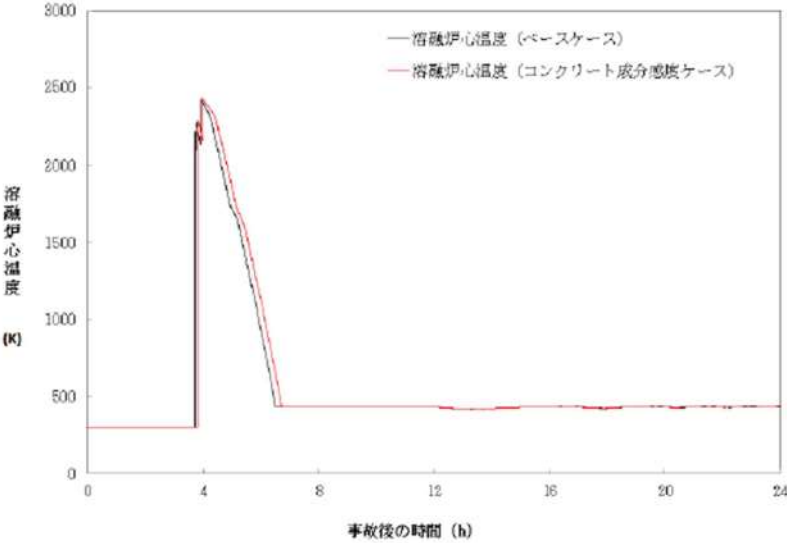
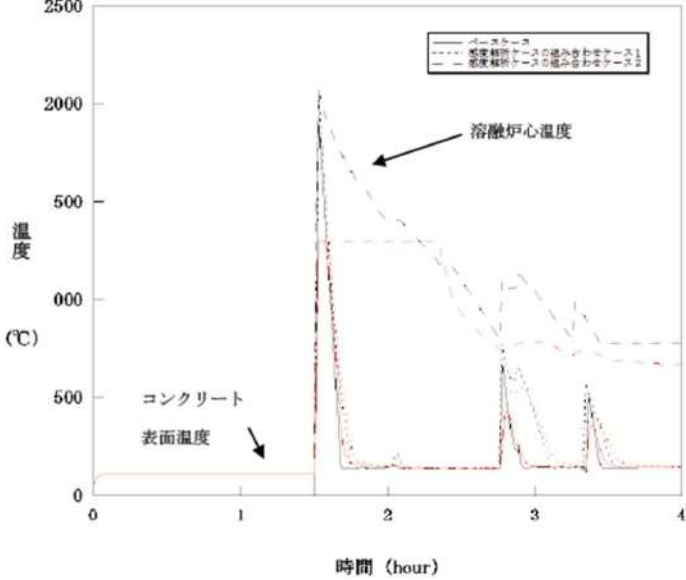
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p style="text-align: center;">図 5-5-6 感度解析ケースの組合せ（6）</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		<p>※コンクリート組成に関する感度解析は基本的考え方の6.5.9に記載</p>
<p>図 5-4b 溶融炉心温度の比較（石灰岩系コンクリート）</p>	<p>図 5-5-7 感度解析ケースの組合せ（7）</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p style="text-align: center;">(t)</p> <p style="text-align: center;">図 5-5-8 感度解析ケースの組合せ (8)</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p style="text-align: center;">図 5-5-9 感度解析ケースの組合せ (9)</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 5-4c ドライウェルガスモル分率（石灰岩系コンクリート）</p>		<p>※コンクリート組成に関する感度解析は基本的考え方の6.5.9に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶解炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図5-4d サプレッションチェンバガスモル分率（石灰岩系コンクリート）</p>		<p>※コンクリート組成に関する感度解析は基本的考え方の6.5.9に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>6. まとめ</p> <p>MCCIに関する種々の実験から得られた知見等に基づきMCCIの各過程における不確かさの分析を行い、不確かさがあり、評価結果に影響するモデルパラメータとして、エントレインメント係数、上面熱流束を抽出した。また、二次元侵食実験結果で確認されている侵食の異方性については、いまだ十分な解明が行われておらず、実機のウェット条件でも起こるのかは不明であるが、念のために異方性の影響をみるために、溶融プールから床方向と壁方向への熱伝達係数の感度解析を行った。これらのパラメータの感度解析以外に、コンクリート種類を玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した場合の解析も参考に実施し、コンクリート侵食量への影響を確認した。</p> <p>BWR5, Mark-I 改プラントの有効性評価に使用しているノミナル条件を設定したベースケースでは、コンクリート侵食量は2.4cmであった。</p> <p>エントレインメント係数の感度解析結果より、水中での粒子化によるクエンチ効果に差が出て、床上に堆積した溶融炉心温度に影響し、コンクリート侵食量に影響するが、その影響は小さかった。</p> <p>上面熱流束の感度解析結果より、上面熱流束は、床上に堆積した溶融炉心温度に大きく影響し、コンクリート侵食量に大きく影響する結果となった。</p> <p>玄武岩系コンクリートに見られる床方向と壁方向のコンクリート侵食の異方性の影響を確認するため、溶融プールから床方向と壁方向への熱分配の異方性として扱い、溶融プールのクラスト間の熱伝達係数を変えて、床方向への熱伝達が大きい場合と壁方向への熱伝達が大きい場合の感度を調べた。その結果、熱伝達の大きい方向の侵食量が大きくなり、侵食の異方性が確認された。ただし、ノミナル条件の場合のように侵食量が小さい場合は、侵食量に大きな感度がないことがわかった。</p> <p>感度解析の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることが確認された。上面熱流束を想定される下限値とした場合でも、コンクリート侵食量は、22.5cm程度に収まることが確認された。</p> <p>また、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性については、MAAPモデルのベンチマーク解析結果から、実験の侵食面における侵食のばらつきが、MAAPコードによる予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることが確認され、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことが確認された。</p> <p>また参考として、他の条件を同一として玄武岩系コンクリートから石灰岩系コンクリートに変更した解析も実施したところ、侵食量に大きな感度はなかった。また、ガス発生の影響も顕著には見られなかった。</p>	<p>6 まとめ</p> <p>MCCIに関する種々の実験から得られた知見等に基づき不確かさの要因の分析を行い、不確かさへの影響する項目を抽出した。これらの項目を対象に感度解析を行いコンクリート侵食への影響を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉下部キャビティ水深 ・Ricou-Spaldingのエントレインメント係数 ・溶融炉心の拡がり ・水-溶融炉心間の熱伝達係数 <p>感度解析の結果、原子炉下部キャビティ水深、Ricou-Spaldingのエントレインメント係数及び水-溶融炉心間の熱伝達係数については、コンクリート侵食深さへの感度は小さく、重大事故対策の有効性評価の結果に影響は与えないことを確認した。</p> <p>溶融炉心の拡がりについては、溶融炉心が過熱度を持ち連続的に原子炉下部キャビティ床へ落下すること等から、原子炉下部キャビティ床面積相当に拡がると考えられるが、溶融炉心が原子炉下部キャビティ水中に落下した際に冷却が進み局所的に堆積するよう仮定して解析を行った場合でも、コンクリート侵食は約18cmにとどまる結果となった。</p> <p>感度解析パラメータを組み合わせた場合の感度解析でもコンクリート侵食は約19cmとなったが、原子炉下部キャビティ底面のコンクリート厚さは数メートルであり、侵食深さは十分小さいことが確認できた。この規模のコンクリート侵食が発生する場合でも、原子炉格納容器内の水素濃度は約6vol%（ドライ条件換算）にとどまり、水素処理装置（PAR及びイグナイタ）による処理が可能なレベルに収まっている結果となっている。また、MCCIにより発生する水素は、すべてジルコニウムに起因するものであることを確認した。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>最後に、MCCIに関係する現象は、複雑な多成分・多相熱伝達現象であり、現状でも知見が十分であるとは言えない。また事前水張り時の落下デブリの冷却性を直接調べた実験例が殆どないことから、今後も継続して検討を進め、新たな知見が出た場合には適宜評価に反映するように努めることが重要であると考えられる。</p>	<p>以上のことから、物理現象を踏まえた不確かさを考慮すると、コンクリート侵食については、溶融炉心の拡がりや影響を与えることが明らかとなった。一方、厳しい条件を組み合わせた場合においても、最終的にコンクリート侵食が停止し得ることから、原子炉下部キャビティ水による溶融炉心の冷却の効果も確認できた。しかしながら、この分野は複雑な多成分及び多相熱伝達現象であり知見が不十分であること、また直接的な実験例が少ないことから、今後も継続して検討を進め、知見の拡充に努めることが重要であると考えられる。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">付録</p> <p>付録1 ドライ条件でのMCC I実験</p> <p>デブリとしてUO₂コリウムを用い、崩壊熱を模擬し、注水を行っていないドライ条件の実験として、米国サンディア国立研究所（SNL）のSURC実験、米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）のACE実験及び独カールスルーエ研究所（KfK）で実施されたBETA実験がある。以下にそれぞれの実験について説明する。これらの実験は、実機におけるMCC I継続の影響の検討に参考となる。</p> <p>(1) SURC実験（米国SNL）^{[4][23][34]}</p> <p>MCC I時の伝熱、化学反応、ガス及びエアロゾルの放出等を調べ、CORCON等の解析コードを検証・改良することを目的にSNLにて4回実験が実施された。そのうち実機と同様の組成のUO₂デブリを使用した実験は2回実施された（SURC-1,2。他の2回の実験は模擬デブリとしてSUS304が使用された）。実験装置の概要を付図1-1に示すが、直径40cmのコンクリート試験体（SURC-1実験では石灰岩系（米国で使用されている）、SURC-2実験では玄武岩系のコンクリートを使用）を入れたMgO製の円筒容器に約250kgの模擬デブリ（組成：UO₂ 69%、ZrO₂ 22%、Zr 9%）を誘導加熱して溶融させてコンクリートとの反応を継続させた。SURC-2のコンクリートの侵食深さの変化を付図1-2に示すが、侵食速度は1時間に20cm程度となっている。</p> <p>また、SURC-4は、コード比較のための国際標準問題（ISP-24）^[5]に選定され、実験データと種々の解析の比較が行われている。200kgのステンレス鋼と模擬FP（Te:0.5kg、La₂O₃:1.17kg、CeO₂:1.23kg、BaO:1.1kg）が、コンクリート侵食が開始するまで加熱され、侵食開始後14分経ってから約0.5秒間に追加的に20kgのジルコニウムが溶融物に添加されている。SURC-4のコンクリートの侵食深さの変化を付図1-3に示すが、侵食速度は約55分の時点で24.5～27.5cmで、MAAP解析結果とよい一致を示している。なお、SURC-4実験では外周部のコンクリート侵食深さが大きくなっており、MAAP解析結果と若干相違が見られるが、これは実験では外周部から誘導加熱して溶融物を加熱しているため、外周部の溶融物への入熱量が大きくなるのが原因と考えられる。したがって、MAAPとの相違は、実験固有の原因と考えられるため、ベンチマーク解析の観点からは問題とはならないと考えられる。</p>	<p style="text-align: center;">【泊では本文3.に記載】</p>	<p style="text-align: center;">※3.1(2)に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

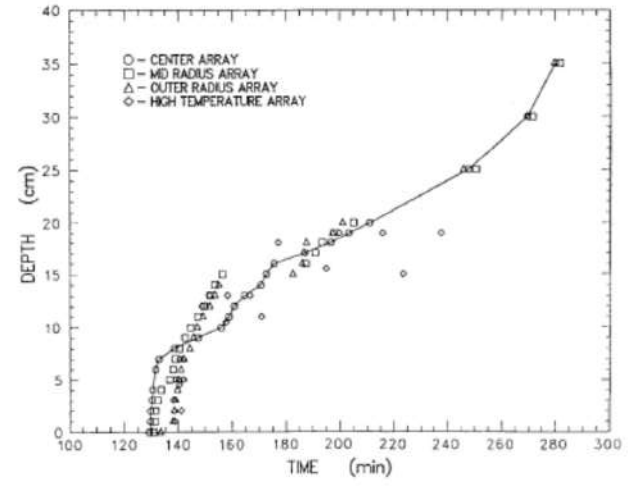
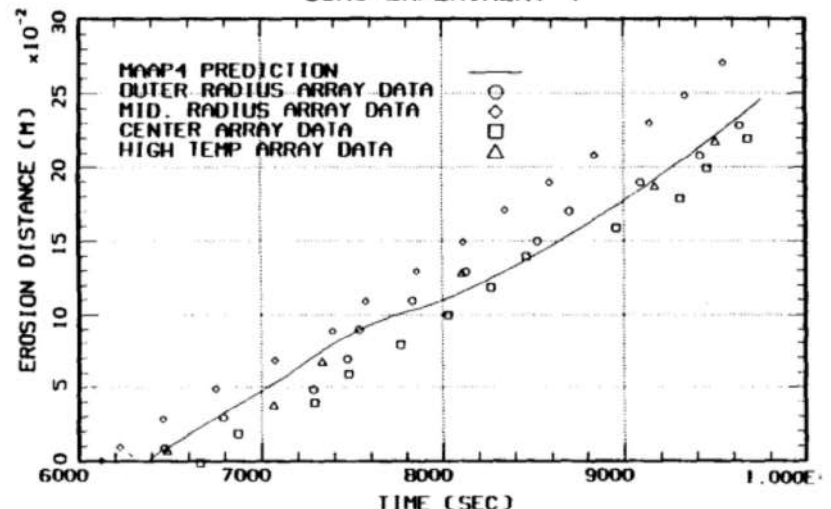
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付図 1-1 SURC 実験装置^[23]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="436 710 750 742">付図 1-2 SURC-2 実験の侵食深さ^[23]</p>  <p data-bbox="324 1364 862 1396">付図 1-3 SURC-4 実験の侵食深さとMAA P解析との比較^[23]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

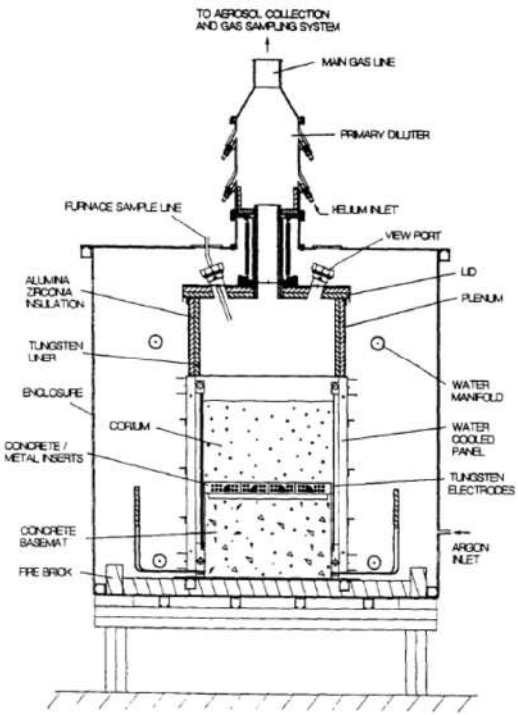
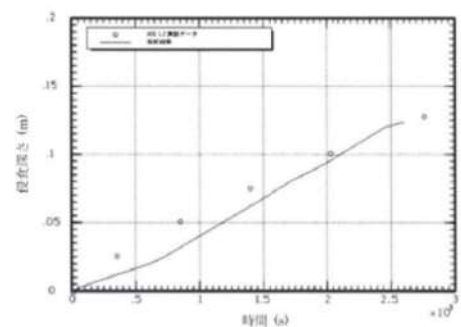
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																
<p>(2)ACE 実験（米国 ANL）^{[3] [23][34]}</p> <p>MCCIにおける熱水力学的及び化学的プロセスを検証し関連コードのデータベースを拡充することを目的に、国際プログラムとしてACE (Advanced Containment Experiments) 計画の一部として実施された。Phase-CでMCCI時のFPエアロゾル放出の定量化の目的で実験が実施された。実験装置の概要を付図1-4に示す。実炉組成の約300kgの模擬デブリを使用し、タングステン電極により直接通電により加熱し溶融させている。コンクリート侵食はベースマット中にある熱電対によりモニターされている。実験マトリックスを付表1-1に示すが、実験はコンクリートの種類やデブリの組成を替えて実施された。</p> <p>L2実験のコンクリートの侵食深さのMAAP解析との比較を付図1-5に示すが、MAAP解析結果とよい一致を示している。</p> <p style="text-align: center;">付表1-1 ACE/MCCI 実験マトリックス^[23]</p> <table border="1" data-bbox="293 579 907 930"> <thead> <tr> <th>Test</th> <th>Concrete Type^a</th> <th>Decay Heat Generation W/kg of UO₂</th> <th>Corium Mixture</th> <th>Initial Zr Oxidation %</th> <th>Absorber Material</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L5</td> <td>L/S</td> <td>325</td> <td>PWR</td> <td>100</td> <td>none</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>S</td> <td>450</td> <td>PWR</td> <td>70</td> <td>none</td> </tr> <tr> <td>L1</td> <td>L/S</td> <td>350</td> <td>PWR</td> <td>70</td> <td>none</td> </tr> <tr> <td>L6</td> <td>S</td> <td>350</td> <td>PWR</td> <td>30</td> <td>Ag, In</td> </tr> <tr> <td>L4</td> <td>Serp/S^b</td> <td>250</td> <td>BWR</td> <td>50</td> <td>B₂C</td> </tr> <tr> <td>L7</td> <td>L/S</td> <td>250</td> <td>BWR</td> <td>70</td> <td>B₂C</td> </tr> <tr> <td>L8</td> <td>L/L</td> <td>350/150^c</td> <td>PWR</td> <td>70</td> <td>Ag, In</td> </tr> </tbody> </table> <p>a. Concrete type: L/S: limestone/common sand S: siliceous L/L: limestone/limestone</p>	Test	Concrete Type ^a	Decay Heat Generation W/kg of UO ₂	Corium Mixture	Initial Zr Oxidation %	Absorber Material	L5	L/S	325	PWR	100	none	L2	S	450	PWR	70	none	L1	L/S	350	PWR	70	none	L6	S	350	PWR	30	Ag, In	L4	Serp/S ^b	250	BWR	50	B ₂ C	L7	L/S	250	BWR	70	B ₂ C	L8	L/L	350/150 ^c	PWR	70	Ag, In		<p>※3.1 (1)に記載</p>
Test	Concrete Type ^a	Decay Heat Generation W/kg of UO ₂	Corium Mixture	Initial Zr Oxidation %	Absorber Material																																													
L5	L/S	325	PWR	100	none																																													
L2	S	450	PWR	70	none																																													
L1	L/S	350	PWR	70	none																																													
L6	S	350	PWR	30	Ag, In																																													
L4	Serp/S ^b	250	BWR	50	B ₂ C																																													
L7	L/S	250	BWR	70	B ₂ C																																													
L8	L/L	350/150 ^c	PWR	70	Ag, In																																													

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="448 917 739 949">付図 1-4 ACE/MCCI 実験装置^[3]</p>  <p data-bbox="560 1324 862 1348">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="336 1396 862 1428">付図 1-5 ACE-L2 実験とMAAP解析の侵食深さの比較^[34]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) BETA 実験（独 KfK）^{[6][34]}</p> <p>MCCI 解析コードの侵食挙動やエアロゾル生成挙動の検証用のデータベースを拡充することを目的として、独 KfK で実施された。実験装置の概要を付図 1-6 に示す。テルミット反応により金属溶融物（Fe, Cr, Ni, Zr）と酸化物溶融物（Al₂O₃, SiO₂, CaO）を生成させて、玄武岩系コンクリート製のるつぼに落下させて、るつぼ内の溶融物は、誘導加熱により加熱している。ベースマット中にある熱電対により二次元のコンクリート侵食挙動が確認できるようになっている。溶融物として Zr を多く含む溶融物を用いた実験シリーズの実験マトリックス（V5.1～V5.3）を付表 1-2 に示す。</p> <p>実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図を、付図 1-7 に示す。壁方向よりは、床方向の侵食量が大きくなっている。溶融物に含まれる Zr によりコンクリート成分の SiO₂ が還元され、Si や SiO の生成が確認されている。V5.1 実験と V5.2 実験のコンクリートの侵食深さのMAAP解析との比較^[34]を付図 1-8 及び付図 1-9 に示すが、MAAP解析結果とよい一致を示している。このMAAPのベンチマーク解析により、二次元侵食に関わるパラメータ設定の妥当性が判断されている。</p>		<p>※3.1 (15) に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(1) Melt (2) Concrete Crucible (3) Induction Coil (4) Hood and Offgas System (5) Thermite Reaction Tank (6) Tank for Measurement Probes</p>		

付図 1-6 BETA 実験装置^[34]

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶解炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉		泊発電所3号炉		相違理由
付表 1-2 BETA 実験マトリックス ^[6]				
BETA Test	Initial Melt, ~ 2200 K	Fission Product Mock-ups and Additives	Planned Heating Power	Main Objectives
V 5.1	300 kg Fe + Cr + Ni 80 kg Zry-4 50 kg Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + CaO	none	400 kW	PWR: Zr chemistry, consequences on erosion and aerosol release
V 5.2	as V 5.1	1 kg Mo, 0.5 kg ZrTe ₂ , 1.5 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	200 kW	BWR with B ₄ C absorber, low power: Zr chemistry and related processes
V 5.3	as V 5.1	1 kg Mo, 1 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	800 kW	BWR with B ₄ C absorber, high power: Zr chemistry and related processes

V 5.1

V 5.2

V 5.3

付図 1-7 BETA 実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図^[6]

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="163 180 539 264" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 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。 </div> <div data-bbox="228 280 976 798" style="border: 2px solid black; height: 324px; margin: 10px 0;"></div> <div data-bbox="309 815 875 844" style="text-align: center;"> 付図 1-8 BETA-V5.1 実験とMAAP解析の侵食深さの比較 ^[34] </div> <div data-bbox="224 877 972 1375" style="border: 2px solid black; height: 312px; margin: 10px 0;"></div> <div data-bbox="309 1393 875 1422" style="text-align: center;"> 付図 1-9 BETA-V5.2 実験とMAAP解析の侵食深さの比較 ^[34] </div>		

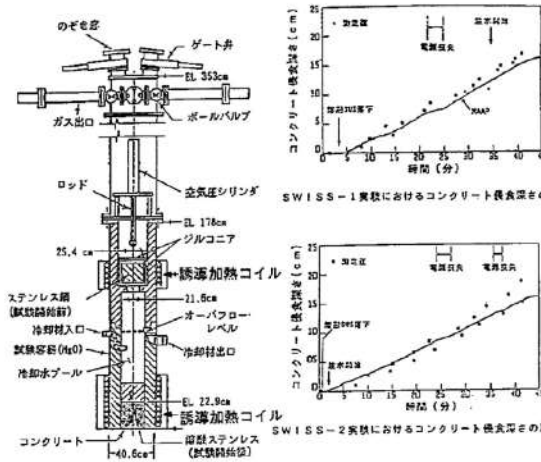
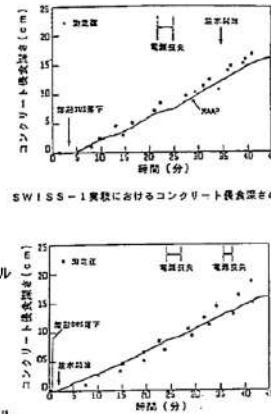
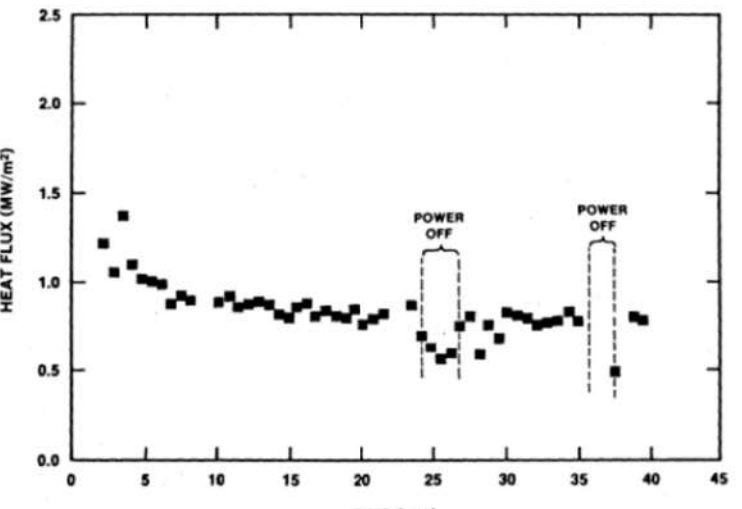
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付録2 注水を伴ったMCCI実験</p> <p>注水を伴う実験（溶融物上に冷却水を注水した実験）としては、SNLで実施されたSWISS実験及びWETCOR実験、ANL（EPRI）の主催で実施されたMACE実験及びOECD/MCCI実験、原子力発電技術機構（NUPEC）により実施されたCOTELS実験がある。</p> <p>以下の実験の知見を示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) SWISS実験（米国サンディア研究所(SNL)） (2) WETCOR実験（米国サンディア研究所(SNL)） (3) MACE実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)） (4) COTELS実験（日本 原子力発電技術機構 (NUPEC)） (5) OECD/MCCI実験（米国アルゴンヌ研究所(ANL)） <p>(1) SWISS 実験（米国 SNL）^[7]</p> <p>高周波加熱によりステンレスを溶融させ、溶融したステンレスとコンクリートとの反応中に注水し、溶融物の冷却性を調べる実験が2回行われた。実験結果2回とも同様の結果となっており、メルト上面に安定なクラストが形成されてメルト内部に冷却水が浸入しにくくなり、メルトによりコンクリートの侵食が継続した（付図2-1 参照）。ただし、本実験はメルトの発熱が実機で想定される値より1桁程度大きいことや100%ステンレスであるため模擬崩壊熱に加え、水-金属反応の発熱が加わったことも一因と分析されている。またコリウムより上方水プールへの熱流束は約800kW/m²程度であった（付図2-2 参照）。</p>	<p>【泊では本文3.に記載】</p>	<p>※3.1 (3)に記載</p>

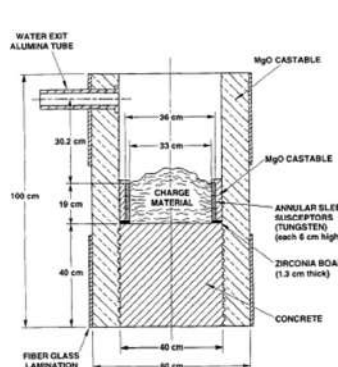
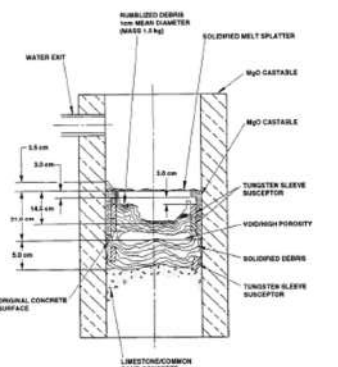

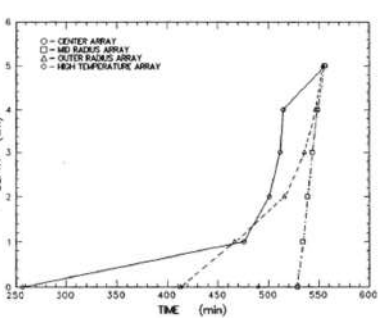
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>実験条件：45kgのSUSを内径21.6cmのコンクリート上に溶融させた状態で落下して注水を実施。比出力1.6kW/kg SUS</p>  <p>実験装置の概要 (SWISS実験)</p>  <p>実験結果および解析結果の比較 (SWISS実験)</p>		
<p>付図2-1 SWISS 実験の実験装置とコンクリート侵食深さの実験と解析 (MAAP) の比較^[7]</p>		
 <p>付図2-2 SWISS-2 実験の水プールへの熱流束^[7]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) WETCOR 実験 (米国 SNL) [8]</p> <p>Al₂O₃ と CaO の酸化物混合溶融物 34kg を用いてコンクリートとの反応中に注水し溶融物の冷却性を調べる実験が行われた (付図 2-3 参照)。SWISS 実験と同様の理由によりコンクリートの侵食が継続した。コンクリート侵食速度は SWISS 実験と比べて約 1/3 に低下している。水プールへの熱流束は溶融時に 520kW/m² 程度、凝固時に 200kW/m² 程度であった。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="246 414 582 829">  <p>(実験装置の概要)</p> </div> <div data-bbox="604 414 940 829">  <p>(実験後の状態の模式図)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="224 861 537 1276">  <p>(上部クラストの様子)</p> </div> <div data-bbox="560 925 940 1276">  <p>(コンクリート侵食の時間変化)</p> </div> </div> <p>付図 2-3 WETCOR 実験結果 [8]</p>	<p>泊発電所3号炉</p>	<p>相違理由</p> <p>※3.1 (4) に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

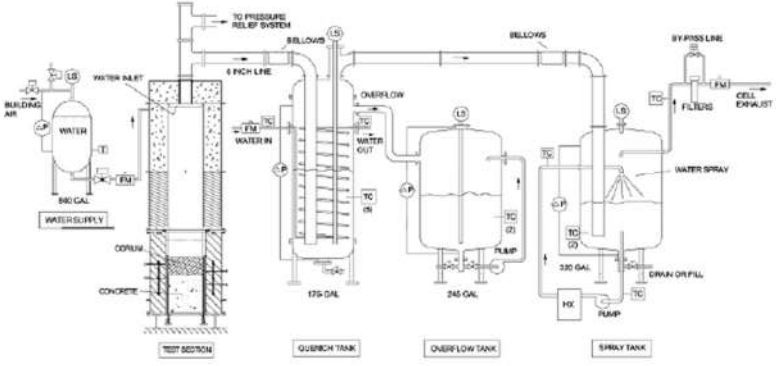
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																		
<p>(3) MACE 実験 (米国 ANL) ^{[3][9][10][20]}</p> <p>MACE 実験 (Melt Attack and Coolability Experiment) は、米国電力研究所 (EPRI) が主催する原子炉格納容器内溶融炉心冷却性に関する国際協力計画である。この実験では、溶融炉心がコンクリート床に落下した後に、溶融炉心の上に注水する状況を模擬しており、大規模実験が含まれていることと、実機相当の UO₂ 及び ZrO₂ を主成分とする溶融炉心模擬物を用いて、さらに、直接通電加熱により崩壊熱の発生を模擬していることが特徴である。</p> <p>実験装置の概要を付図 2-4 に示す。MACE 実験では規模の異なる M0, M1b, M3b, M4 の 4 回の実験が実施されており、その主要条件を付表 2-1 に示す。M0 実験のみコンクリートの側壁で、その他は MgO が用いられている。</p> <p>M3b と M4 の実験結果を付図 2-5 及び付図 2-6 に示す。いずれのケースもコンクリート侵食が継続する結果となっている。実験後の溶融炉心模擬物の固化状況を見ると、メルト上部に安定クラストが形成され側壁に固定化されており、クラスト下部に空洞が見られ、クラストと溶融物とが分離した状態になっている。メルトから冷却水への熱流束を見ると、注水直後の短期間は、大きい熱流束となっているが、安定クラストが形成されクラストと溶融物が分離したと想定される状況では、熱流束は低下している。安定クラストの形成と</p> <p>メルトとの分離によりクラストの下にあるデブリの冷却が阻害される結果となったと分析されている。しかしながら、デブリの長期的な冷却に関与し得るメカニズムとして、クラストに生じる亀裂等への浸水及びコンクリート分解ガスによるクラスト開口部からのデブリの噴出が確認されている。</p> <p style="text-align: center;">付表 2-1 MACE 実験の主要条件^[20]</p> <table border="1" data-bbox="244 868 969 1299"> <thead> <tr> <th></th> <th>M0</th> <th>M1b</th> <th>M3</th> <th>M4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>溶融炉心模擬物重量 (kg)</td> <td>130</td> <td>480</td> <td>1800</td> <td>480</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">コンクリート床 浸食開始時溶融炉心 模擬物組成(%)</td> <td>UO₂</td> <td>56</td> <td>65</td> <td>57</td> <td>57</td> </tr> <tr> <td>ZrO₂</td> <td>11</td> <td>13</td> <td>29</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>その他 (コンクリート 成分等)</td> <td>29</td> <td>19</td> <td>14</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>溶融炉心模擬物深さ (m)</td> <td>0.15</td> <td>0.25</td> <td>0.2</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>溶融炉心模擬物初期温度 (K)</td> <td>2000</td> <td>2350</td> <td>2250</td> <td>2280</td> </tr> <tr> <td>溶融炉心模擬物初期発熱量 (kW)</td> <td>100</td> <td>130</td> <td>300</td> <td>130</td> </tr> <tr> <td>コンクリートの種類</td> <td>石灰岩系</td> <td>石灰岩系</td> <td>石灰岩系</td> <td>ケイ酸系</td> </tr> <tr> <td>コンクリート床面積 (m²)</td> <td>0.3×0.3</td> <td>0.5×0.5</td> <td>1.2×1.2</td> <td>0.5×0.5</td> </tr> <tr> <td>コンクリート床の深さ (m)</td> <td>0.35</td> <td>0.55</td> <td>0.55</td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>水位 (m)</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table>		M0	M1b	M3	M4	溶融炉心模擬物重量 (kg)	130	480	1800	480	コンクリート床 浸食開始時溶融炉心 模擬物組成(%)	UO ₂	56	65	57	57	ZrO ₂	11	13	29	29	Zr	4	3	-	-	その他 (コンクリート 成分等)	29	19	14	14	溶融炉心模擬物深さ (m)	0.15	0.25	0.2	0.3	溶融炉心模擬物初期温度 (K)	2000	2350	2250	2280	溶融炉心模擬物初期発熱量 (kW)	100	130	300	130	コンクリートの種類	石灰岩系	石灰岩系	石灰岩系	ケイ酸系	コンクリート床面積 (m ²)	0.3×0.3	0.5×0.5	1.2×1.2	0.5×0.5	コンクリート床の深さ (m)	0.35	0.55	0.55	0.55	水位 (m)	0.5	0.5	0.5	0.5		<p>※3.1 (5) に記載</p>
	M0	M1b	M3	M4																																																																
溶融炉心模擬物重量 (kg)	130	480	1800	480																																																																
コンクリート床 浸食開始時溶融炉心 模擬物組成(%)	UO ₂	56	65	57	57																																																															
	ZrO ₂	11	13	29	29																																																															
	Zr	4	3	-	-																																																															
	その他 (コンクリート 成分等)	29	19	14	14																																																															
溶融炉心模擬物深さ (m)	0.15	0.25	0.2	0.3																																																																
溶融炉心模擬物初期温度 (K)	2000	2350	2250	2280																																																																
溶融炉心模擬物初期発熱量 (kW)	100	130	300	130																																																																
コンクリートの種類	石灰岩系	石灰岩系	石灰岩系	ケイ酸系																																																																
コンクリート床面積 (m ²)	0.3×0.3	0.5×0.5	1.2×1.2	0.5×0.5																																																																
コンクリート床の深さ (m)	0.35	0.55	0.55	0.55																																																																
水位 (m)	0.5	0.5	0.5	0.5																																																																

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

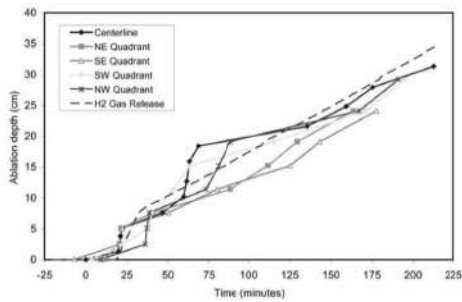
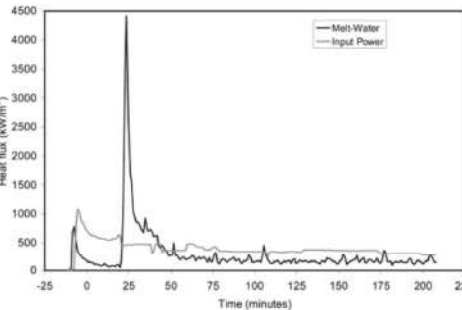
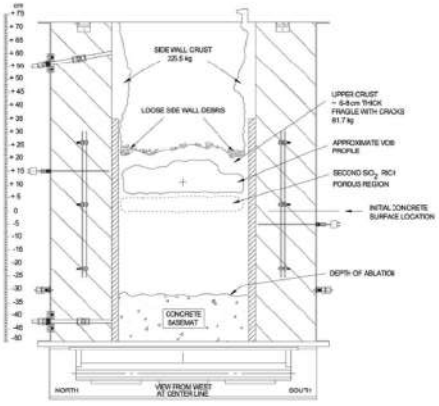
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="414 646 795 678">付図 2-4 MACE 及び OECD/MCCI 実験装置^[9]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>(軸方向侵食データ)</p>  <p>(メルトから水への熱流束)</p>  <p>(実験後状態の模式)</p> <p>付図 2-6 MACE-M4 実験結果^[10]</p>		

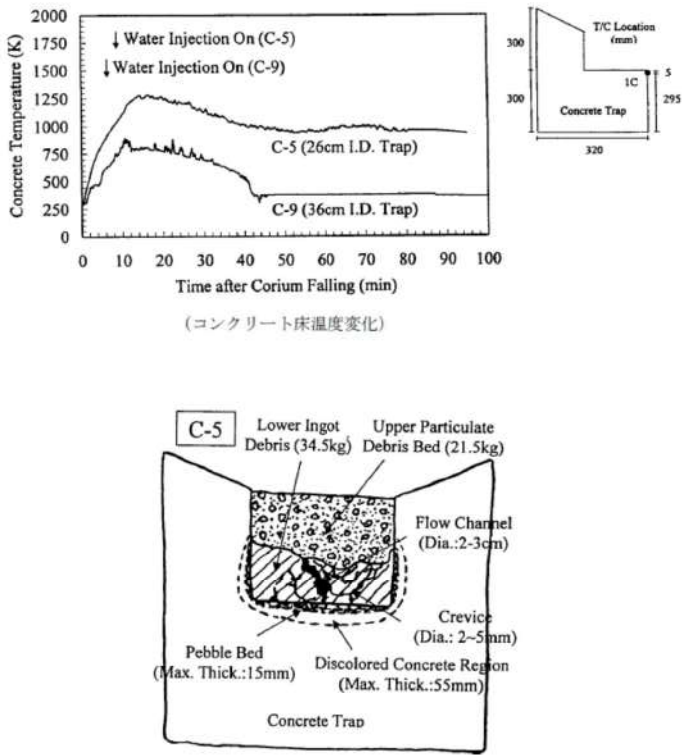
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶解炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) COTELS 実験（日本 NUPEC）^{[1][11]}</p> <p>プール水中に実機組成の UO₂ コリウムを落下させる実験（FCI）とコンクリート上に落下した UO₂ コリウムに注水する実験（MCCI）を実施している。付図2-7にコンクリート上の UO₂ コリウムに注水する実験の実験装置を示す。約 60kg の実機組成の UO₂ コリウムを電気炉で加熱溶解させ、玄武岩系のコンクリート床上に落下させ、その後高周波誘導加熱によりコンクリート上のコリウムを加熱して崩壊熱を模擬している。側壁と床面の両方の侵食を考慮しており、コリウムの高さや直径の比を実験パラメータとしている。注水後にコンクリート温度は低下している。また、侵食深さは 2cm 程度であった。また、付図2-8に実験後に固化したコリウムの断面を観察した結果を示すが、上部は粒子状になっており、下部はインゴット状になっているのが観察されている。また、インゴット状の部分にはひび割れや流路が見られる。</p> <p>COTELS 実験では、いずれもデブリによるコンクリート侵食が生じているが、先行の SWISS, WETCOR, MACE とは異なり、コンクリート侵食は停止している。これは、以下の理由と分析されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・デブリの粒子化と塊状デブリ上への粒子化デブリの堆積 ・デブリとコンクリートとの境界における粗骨材を主体とする多孔質層の形成 ・粗骨材層及び塊状デブリに形成された流路への浸水 <p>溶解物から水プールへの熱流束は水プールへの熱流束は 100～650kW/m² 程度であったが、これらの熱流束は限界熱流束よりも低く、水が更に高い除熱能力を有する可能性があることが示唆されている。</p> <div data-bbox="358 778 963 1300" data-label="Diagram"> </div> <p>付図 2-7 COTELS 実験装置（コンクリート上の UO₂ コリウムに注水する実験）^[11]</p>		<p>※3.1 (8) に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>Concrete Temperature (K) vs Time after Corium Falling (min)</p> <p>Water Injection On (C-5) Water Injection On (C-9)</p> <p>C-5 (26cm I.D. Trap) C-9 (36cm I.D. Trap)</p> <p>T/C Location (mm) IC Concrete Trap 320 295 5</p> <p>C-5 Lower Ingot Debris (34.5kg) Upper Particulate Debris Bed (21.5kg) Flow Channel (Dia.: 2-3cm) Crevice (Dia.: 2-5mm) Pebble Bed (Max. Thick.: 15mm) Discolored Concrete Region (Max. Thick.: 55mm) Concrete Trap</p> <p>(コンクリート床温度変化)</p> <p>(実験後のコリウム断面の模式図)</p> <p>付図2-8 COTELS C-5 実験の結果^[11]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(5) OECD/MCCI 実験 (米国 ANL)^{[10][12][13][36][38][41]}</p> <p>OECD/MCCI 実験は、MACE 実験や COTELS 実験の注水を伴う MCC I 実験で同定された個々のデブリ冷却メカニズムや火山型クラストの冷却性 (付図 2-9 及び付図 2-10 参照) を定量的に解明することを目的として、以下の実験が実施された。</p> <p>① クラスト浸水・強度実験 (SSWICS 実験)</p> <p>SSWICS 実験は、クラスト内への浸水メカニズムと浸水による除熱量、さらにクラスト強度を調べるために実施された。実験装置の構造を付図 2-11 に示し、実験条件一覧を付表 2-2 に示す。テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により UO_2、ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。崩壊熱とコンクリート分解気体の発生は模擬しない過渡クエンチ実験である。最大除熱量はクラスト上面におけるドライアウト熱流束により評価される。実験結果より、安定なクラストは形成されず、クラスト内に冷却材が浸入することにより、熱伝導律速以上の熱流束を期待することができるとしている。さらに、SSWICS 実験で得られたドライアウト熱流束を実機の事故シーケンス解析において直接的に適用できるよう、Lister/Epstein のドライアウト熱流束モデルへの適応が行われた。実験結果とこれに基づいた Lister/Epstein モデルによる予測の比較を付図 2-12 に示す。この実験結果及びこれらに基づいた予測値によれば、コンクリートを全く含有しないデブリに対する上面水プールへのドライアウト熱流束は、約 $400kW/m^2$ であり、コンクリート含有とともに熱流束は低下し、含有率 15% 程度以上では約 $100kW/m^2$ となっている。</p> <p>② 溶融物噴出実験 (MET 実験)</p> <p>コンクリート分解気体がクラストの開口部を通過する際に、気体に随伴されてクラスト上に噴出するデブリ量の定量化を目的としている。クラスト浸水実験と同様に、テスト部内の非侵食性の床面上で、テルミット反応により UO_2、ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を生成しその上に注水する。クラスト浸水実験との違いは、本実験においては直接通電加熱により崩壊熱を模擬すること及び非侵食性床面に設けた多数の細孔からコンクリート分解気体を模擬する非凝縮性気体を供給している。テスト部で発生する水蒸気量の変化と実験後分析から得られるデブリ噴出量に基づいて、供給気体流量と噴出量の関係を評価している。</p> <p>③ 長期二次元コンクリート侵食実験 (CCI 実験)</p> <p>デブリによる長期的な床部及び側壁の侵食挙動を明らかにすることを目的に実施された。実験装置のテスト部の構造を付図 2-13 に示し、実験条件一覧を付表 2-3 に示す。テルミット反応により生成した UO_2、ZrO_2 及びコンクリート成分を主成分とするデブリ模擬溶融物を直接通電により加熱している。電極がある 2 面は非侵食性の側壁を採用し、残りの 2 面をコンクリートにより製作している。使用するコンクリートは実験により種類が変えられている。注水なしの条件で、側壁のコンクリートの最大侵食深さが 30cm に達するまで侵食を継続した後に注水を行い、注水後、最大侵食深さが 35cm に到達した時点で実験を終了している。実験装置に荷重荷装置を設置し、注水後</p>		<p>※3.1 (12) に記載</p> <p>※3.1 (11) に記載</p> <p>※3.1 知見の整理 (12) に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>に形成されるクラストに荷重を与えて、クラストの機械的強度に関するデータを得ている（付図2-14参照）。コンクリート種類を変えて3回実験が行われている。CCI実験のコンクリート組成を付表2-4に示す。CCI実験のデブリ-水間の熱流束を付図2-15に示し、溶融物の平均温度を付図2-16に示す。また、実験後の侵食状態の模式図を付図2-17に示す。石灰岩系コンクリートの場合、床方向と側壁方向の侵食は同程度となっているのに対し、玄武岩系コンクリートの場合、側壁方向の侵食が床方向より大きくなっており、侵食に異方性があることが示されている。付表2-5に示すように、侵食率から側壁方向と床方向の熱流束が推定されている。CCI-2実験（石灰岩系コンクリート）の場合、側壁方向と床方向は同程度と推定されているのに対し、CCI-3実験（玄武岩系コンクリート）の場合、側壁方向の熱流束は、床方向より4倍程度大きいと推定されている。</p> <p>④ クラスト破損実験</p> <p>本実験は上記①③の実験に付随して実施されており、①のSSWICS実験で形成されたクラストの冷却後破損強度を調べる実験と、③の二次元侵食実験の間に高温状態で破損させる実験の2種の実験が行われている。</p> <p>前者の実験では、クラスト浸水実験で形成された直径約30cmのクラストに荷重を加えて、クラストの強度を測定している。低温クラスト破損実験装置の概要を付図2-18に示す。クラスト上面の中央部に集中荷重を与え、クラスト破損時の荷重からクラストの機械的強度（破損時にクラストに発生する最大の応力）を評価している。クラスト上に堆積する冷却水層及び噴出デブリの荷重に起因してクラスト内に発生する応力と、本実験から得られるクラストの機械的強度を比較することにより、実機規模においては、クラストは破損し下部の溶融物と接触する可能性が高いことが示されている。</p> <p>後者の二次元侵食実験では、注水前の高温状態で突き棒（lance）によりクラストが破損する荷重を測定し、注水後も再度突き棒によりクラストが破損する荷重を測定している。これにより、現実に近い状態でのクエンチ前後のクラスト強度が確認され、クエンチ後は、クラスト強度が大きく低下することが確認された。</p> <p>OECD/MCCI 実験結果から以下の知見が得られている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガス噴出は、安定なクラストの形成を阻害し、熱伝達を促進する。 ・クラストが冷却されると、亀裂が生じクラスト強度は大幅に低下する。 ・クラストの亀裂により冷却水が内部に浸入し、デブリの冷却が促進される。 ・溶融物の噴出により、多孔質の粒子状ベッドが形成される。 ・コンクリートタイプにより侵食異方性がみられる。 <p>これらの知見は、CORQUENCHコード等に反映される予定である。</p> <p>また、CCI実験について、MAAPコードによりベンチマーク解析が行われている^[36]。</p>		<p>※3.1 知見の整理（13）に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

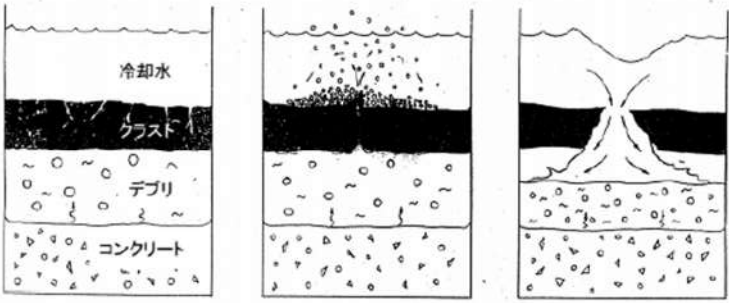
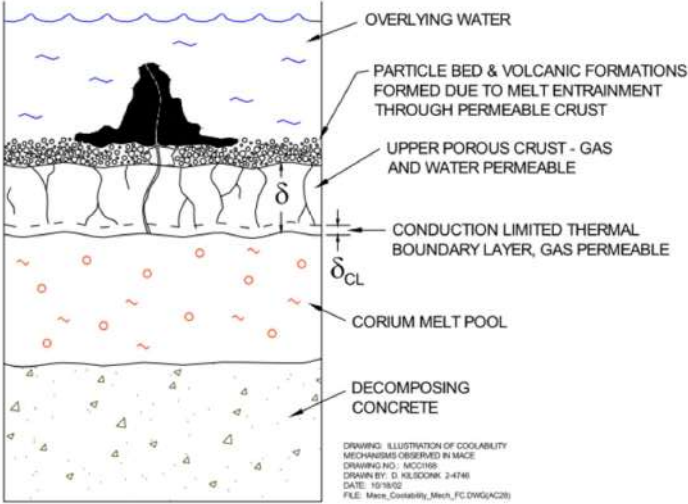
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>CCI-2 実験（石灰岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、固化効果項の影響を除いて対流熱伝達係数のサーベイが可能ないように、対流熱伝達係数として床方向と側壁方向ともに $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$、固化効果項の指数 n に0が設定されている。ここで $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ は、実際のMCCI時の対流熱伝達係数は、固化割合を考慮すると、完全液相状態の値よりも1桁程度小さい値（付図2-19において固化割合が60%程度の値）になることを考慮して設定されている。また、CCI-2 実験では、床方向と側壁方向の熱流束が同程度と推定されていることから、対流熱伝達係数も同じ値が設定されている。この設定を用いた解析により、コリウム温度の変化（付図2-20参照）は、実験データと良く合っている。また、床方向の侵食量は（付図2-21参照）、実験では注水前には25cm程度侵食されているのに対し、MAAP解析では33cm程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（付図2-22参照）、実験では注水前には29cm程度侵食されているのに対し、MAAP解析では33cm程度の侵食量となっている。</p> <p>CCI-3 実験（玄武岩系コンクリート）のベンチマーク解析では、対流熱伝達係数として床方向に $80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$、側壁方向に $300\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$、$n$ に0が設定されている。ここで、$80\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ は、CCI-3 実験では、床方向の熱流束が側壁方向の1/4程度と推定されていることから、床方向の対流熱伝達係数を側壁方向の1/4程度として設定されている。この設定により、コリウム温度の変化（付図2-23参照）は、より実験データに近くなっている。また、床方向の侵食量は（付図2-24参照）、実験では注水前には5cm程度侵食されているのに対し、MAAP解析では5.7cm程度の侵食量となっている。側壁方向の侵食量は（付図2-25参照）、実験では注水前には29cm程度侵食されているのに対し、MAAP解析では27cm程度の侵食量となっている。</p> <p>MCCI実験を対象にしたMAAPベンチマーク解析により、対流熱伝達係数を適切に設定することにより侵食量がおおむね合うことが確認されている。また、侵食の異方性を扱うためには、床方向と側壁方向の対流熱伝達係数の比率の設定が重要であることが示されている。</p>		<p>※3.1 (11) に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>(a) クラストへの浸水 (b) デブリの噴出 (c) クラストの破損</p> <p>付図2-9 想定されているデブリ冷却メカニズム^[38]</p>  <p>付図2-10 想定されている火山型クラストの模式図^[12]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉								泊発電所3号炉	相違理由
付表2-2 SSWICS 実験（デブリ冷却実験）条件一覧 ^[12]									
Parameter	Test Number								
	1	2	3	4	5	6	7		
Melt composition (wt % UO ₂ ZrO ₂ Cr concrete)	61/25/6/8	61/25/6/8	61/25/6/8	48/20/9/23	56/23/7/14	56/23/6/14	64/26/6/4		
Concrete type	LCS	SIL	LCS	LCS	LCS	SIL	LCS		
Melt mass (kg)	75	75	75	60	68	68	80		
Melt diameter / depth (cm)	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15	30 / 15		
Basemat type	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert	Inert		
Initial melt temperature (°C)	~2300	~2100	~2100	~2100	~2100	~1950	~2100		
Initial vessel and coolant temperature (°C)	20	20	100	100	100	100	100		
System pressure (bar)	1	1	4	4	4	1	4		
Water injection period (sec)	665	760	183	195	622	215	194		
Water injection flowrate (lpm)	4	4	12	13	6	14	13		
Water injected (liters)	33	39	34	40	61	47	40		
Condensate collected over course of test (kg)	24.7	16.1	28.9	21.9	22.7	27.6	31.4		
Test duration (hours)	2.2	1.2	1.8	2.4	2.6	3.9	1.4		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

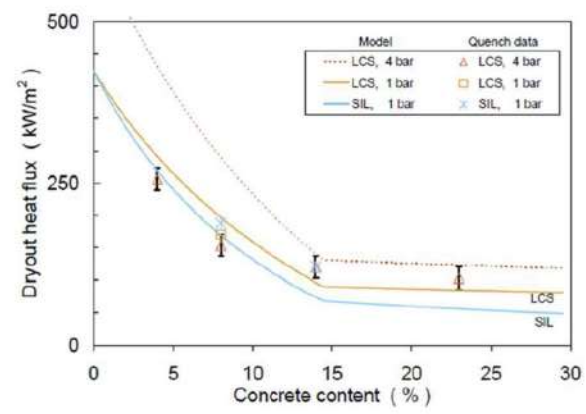
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>注水口</p> <p>蒸気凝縮系へ</p> <p>MgO側壁 (16.4cm)</p> <p>φ30.5cm</p> <p>ZrO₂フェルト</p> <p>タングステン板 (0.25cm)</p> <p>MgO板</p> <p>テルミット 粉末用 イグナイタ</p> <p>テルミット 溶融物</p> <p>ZrO₂板 (1.3cm)</p> <p>付図 2-11 小規模浸水・クラスト強度実験 (SSWICS) 装置^[12]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																											
 <p>Figure 2-12 shows the comparison of dryout heat flux between experimental data and the Lister/Epstein model. The y-axis represents Dryout heat flux in kW/m², ranging from 0 to 500. The x-axis represents Concrete content in percent, ranging from 0 to 30. The graph includes curves for LCS (4 bar, 1 bar) and SIL (1 bar) models, along with corresponding quench data points. The experimental data points are shown as triangles and crosses, while the model results are shown as solid and dashed lines.</p>																																																																													
<p>付図 2-12 SSWICS 実験データと Lister/Epstein モデルのドライアウト熱流束の比較^[12]</p>																																																																													
<p>付表 2-3 CCI 実験（二次元コンクリート侵食実験）条件一覧^[12]</p>																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parameter</th> <th colspan="3">Specification for Test:</th> </tr> <tr> <th>CCI-1</th> <th>CCI-2</th> <th>CCI-3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Corium</td> <td>PWR + 8 wt% SIL</td> <td>PWR + 8 wt% LCS</td> <td>PWR + 15 wt% SIL</td> </tr> <tr> <td>Concrete type^a</td> <td>SIL (US-type)</td> <td>LCS</td> <td>SIL (EU-type)</td> </tr> <tr> <td>Basemat cross-section</td> <td>50 cm x 50 cm</td> <td>50 cm x 50 cm</td> <td>50 cm x 50 cm</td> </tr> <tr> <td>Initial melt mass (depth)</td> <td>400 kg (25 cm)</td> <td>400 kg (25 cm)</td> <td>375 kg (25 cm)</td> </tr> <tr> <td>Test section sidewall construction</td> <td>Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert</td> <td>Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert</td> <td>Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert</td> </tr> <tr> <td>Lateral/Axial ablation limit</td> <td>35/35 cm</td> <td>35/35 cm</td> <td>35/35 cm</td> </tr> <tr> <td>System pressure</td> <td>Atmospheric</td> <td>Atmospheric</td> <td>Atmospheric</td> </tr> <tr> <td>Melt formation tech.</td> <td>Chemical reaction (~30 s)</td> <td>Chemical reaction (~30 s)</td> <td>Chemical reaction (~30 s)</td> </tr> <tr> <td>Initial melt temperature</td> <td>1950 °C</td> <td>1880 °C</td> <td>1950 °C</td> </tr> <tr> <td>Melt heating technique</td> <td>DEH</td> <td>DEH</td> <td>DEH</td> </tr> <tr> <td>Power supply operation prior to water addition</td> <td>Constant @ 150 kW</td> <td>Constant @ 120 kW</td> <td>Constant @ 120 kW</td> </tr> <tr> <td>Criteria for water addition</td> <td>1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm</td> <td>1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm</td> <td>1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm</td> </tr> <tr> <td>Inlet water flowrate/temp.</td> <td>2 lps/20 °C</td> <td>2 lps/20 °C</td> <td>2 lps/20 °C</td> </tr> <tr> <td>Water depth over melt</td> <td>50 ± 5 cm</td> <td>50 ± 5 cm</td> <td>50 ± 5 cm</td> </tr> <tr> <td>Power supply operation after water addition</td> <td>Constant voltage</td> <td>Constant voltage</td> <td>Constant voltage</td> </tr> <tr> <td>Test termination criteria</td> <td>1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.</td> <td>1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.</td> <td>1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.</td> </tr> <tr> <td>Operational Summary</td> <td>Successful: non-symmetrical ablation behavior</td> <td>Successful: symmetrical ablation behavior</td> <td>Successful: symmetrical ablation behavior</td> </tr> </tbody> </table>	Parameter	Specification for Test:			CCI-1	CCI-2	CCI-3	Corium	PWR + 8 wt% SIL	PWR + 8 wt% LCS	PWR + 15 wt% SIL	Concrete type ^a	SIL (US-type)	LCS	SIL (EU-type)	Basemat cross-section	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	Initial melt mass (depth)	400 kg (25 cm)	400 kg (25 cm)	375 kg (25 cm)	Test section sidewall construction	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Lateral/Axial ablation limit	35/35 cm	35/35 cm	35/35 cm	System pressure	Atmospheric	Atmospheric	Atmospheric	Melt formation tech.	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)	Initial melt temperature	1950 °C	1880 °C	1950 °C	Melt heating technique	DEH	DEH	DEH	Power supply operation prior to water addition	Constant @ 150 kW	Constant @ 120 kW	Constant @ 120 kW	Criteria for water addition	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	Inlet water flowrate/temp.	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C	Water depth over melt	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm	Power supply operation after water addition	Constant voltage	Constant voltage	Constant voltage	Test termination criteria	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	Operational Summary	Successful: non-symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior		
Parameter		Specification for Test:																																																																											
	CCI-1	CCI-2	CCI-3																																																																										
Corium	PWR + 8 wt% SIL	PWR + 8 wt% LCS	PWR + 15 wt% SIL																																																																										
Concrete type ^a	SIL (US-type)	LCS	SIL (EU-type)																																																																										
Basemat cross-section	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm	50 cm x 50 cm																																																																										
Initial melt mass (depth)	400 kg (25 cm)	400 kg (25 cm)	375 kg (25 cm)																																																																										
Test section sidewall construction	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert	Nonelectrode walls: concrete Electrode walls: Inert																																																																										
Lateral/Axial ablation limit	35/35 cm	35/35 cm	35/35 cm																																																																										
System pressure	Atmospheric	Atmospheric	Atmospheric																																																																										
Melt formation tech.	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)	Chemical reaction (~30 s)																																																																										
Initial melt temperature	1950 °C	1880 °C	1950 °C																																																																										
Melt heating technique	DEH	DEH	DEH																																																																										
Power supply operation prior to water addition	Constant @ 150 kW	Constant @ 120 kW	Constant @ 120 kW																																																																										
Criteria for water addition	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm	1) 5.5 hours of operation with DEH input, or 2) lateral/axial ablation reaches 30 cm																																																																										
Inlet water flowrate/temp.	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C	2 lps/20 °C																																																																										
Water depth over melt	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm	50 ± 5 cm																																																																										
Power supply operation after water addition	Constant voltage	Constant voltage	Constant voltage																																																																										
Test termination criteria	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.	1) Melt temperature falls below concrete solidus, 2) ablation is arrested, or 3) 35 cm ablation limit is reached.																																																																										
Operational Summary	Successful: non-symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior	Successful: symmetrical ablation behavior																																																																										
<p>^aSIL denotes siliceous concrete, LCS denotes Limestone/Common Sand concrete.</p>																																																																													

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

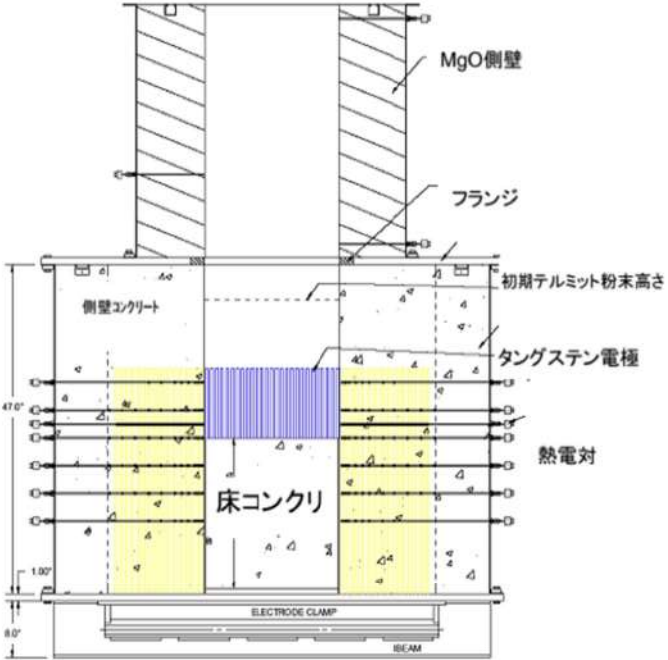
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶解炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉				相違理由
付表2-4 CCI 実験に使用されたコンクリートの組成 ^[12]								
Oxide	CCI-1 Wt%	CCI-2 Wt%	CCI-3 Wt%					
Al ₂ O ₃	0.77	2.49	3.53					
CaO	8.54	25.88	16.79					
Fe ₂ O ₃	0.79	1.39	1.49					
MgO	0.60	11.47	0.85					
MnO	0.00	0.03	0.04					
K ₂ O	0.12	0.55	0.81					
SiO ₂	82.48	21.61	59.91					
Na ₂ O	0.00	0.31	0.66					
SrO	0.00	0.00	0.04					
TiO ₂	0.051	0.135	0.155					
SO ₃	0.514	0.505	0.434					
CO ₂	0.901	29.71	9.80					
H ₂ O, Free	1.808	3.255	2.293					
H ₂ O, Bound	1.92	1.11	1.40					
Total	98.48	98.47	98.19					
付表2-5 CCI実験の側壁方向/床方向の侵食率と熱流束の推定値 ^[12]								
Test	Concr. Type	Lateral Ablation		Axial Ablation		Lateral -Axial Heat Flux Ratio	Data Points Utilized for Ablation Rate Estimates	
		Ablation Rate (cm/hr)	Heat Flux (kW/m ²)	Ablation Rate (cm/hr)	Heat Flux (kW/m ²)			
CCI-1	SIL (US)	N: 39.1	395	26.1	265	- ^a	N Lateral: (19.1 cm, 51 min) (29.2 cm, 66 min) S Lateral: (7.6 cm, 54 min) (5.1 cm, 35 min) Axial: (7.6 cm, 53 min) (1.3 cm, 39 min)	
		S: 8.4	86					
CCI-2	LCS	4.0	58	4.0	59	1.0	Lateral: (19.1 cm, 148 min) (29.2 cm, 302 min) Axial: (15.2 cm, 107 min) (24.1 cm, 240 min)	
CCI-3	SIL (EU)	10.0	97	2.5	25	4.0	Lateral: (19.1 cm, 47 min) (29.2 cm, 107 min) Axial: (2.5 cm, 117 min) (5.1 cm, 178 min)	
^a Heat flux ratio not evaluated for this test due to large asymmetry in lateral cavity erosion.								

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

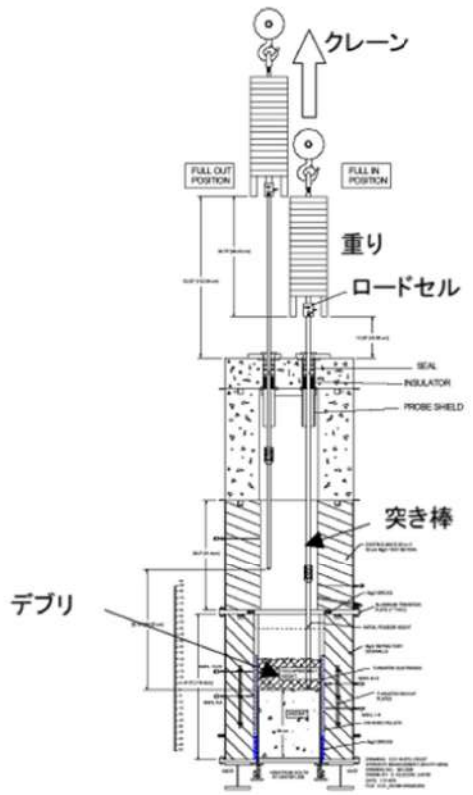
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>付図 2-13 CCI 実験のテスト部^[12]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="280 1053 918 1077">付図 2-14 長期二次元侵食実験におけるクラスト破壊/強度測定装置^[4]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="257 199 929 662"> </p> <p data-bbox="347 710 851 742">付図 2-15 CCI実験におけるデブリー水間の熱流束 [12]</p> <p data-bbox="246 766 952 1252"> </p> <p data-bbox="369 1292 828 1324">付図 2-16 CCI実験における熔融物平均温度 [12]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

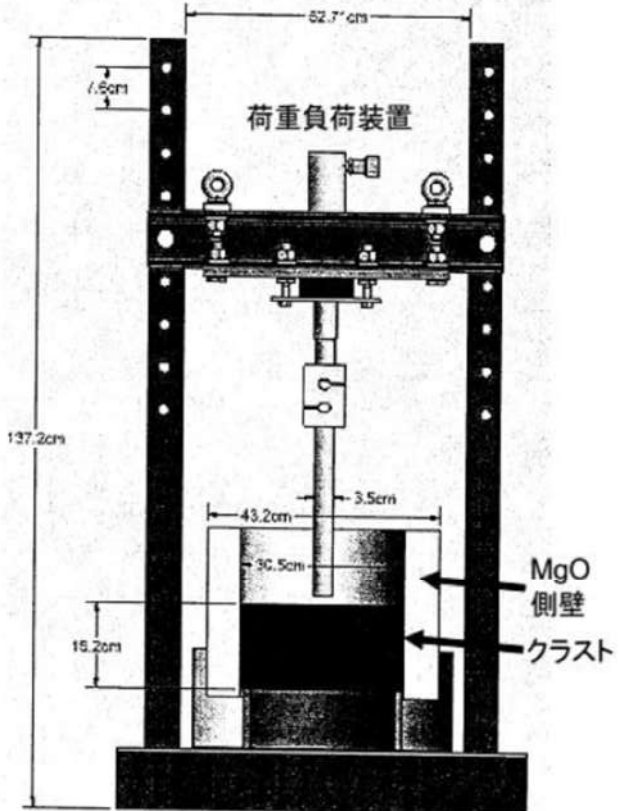
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付図 2-17 C C I 実験における侵食状態の模式図 [12] (a) CCI-1, (b) CCI-2, (c) CCI-3</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="280 1085 896 1117">付図 2-18 クラスト浸水実験の実験後の低温クラスト強度測定装置^[38]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

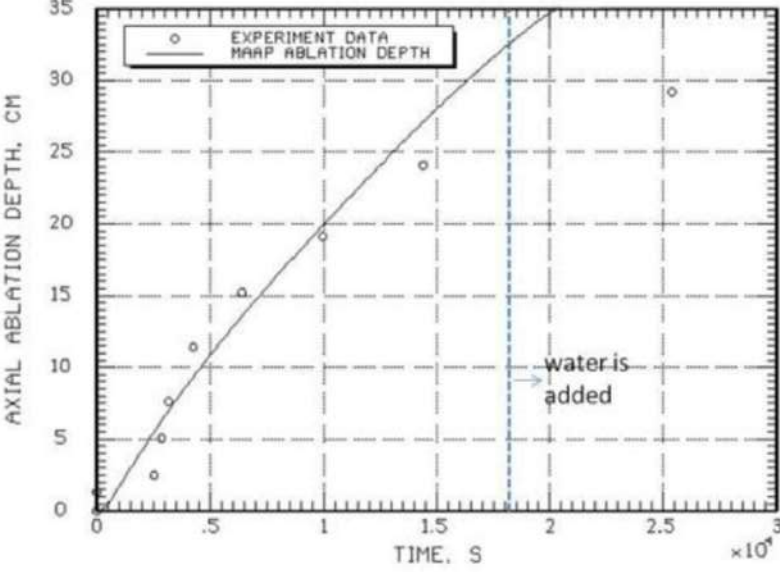
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="159 177 562 260" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>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。</p> </div> <div data-bbox="176 316 1023 933" style="border: 2px solid black; height: 387px; margin-top: 20px;"> </div> <div data-bbox="342 951 846 981" style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>付図 2-19 溶融プールからクラストへの対流熱伝達係数</p> </div>		

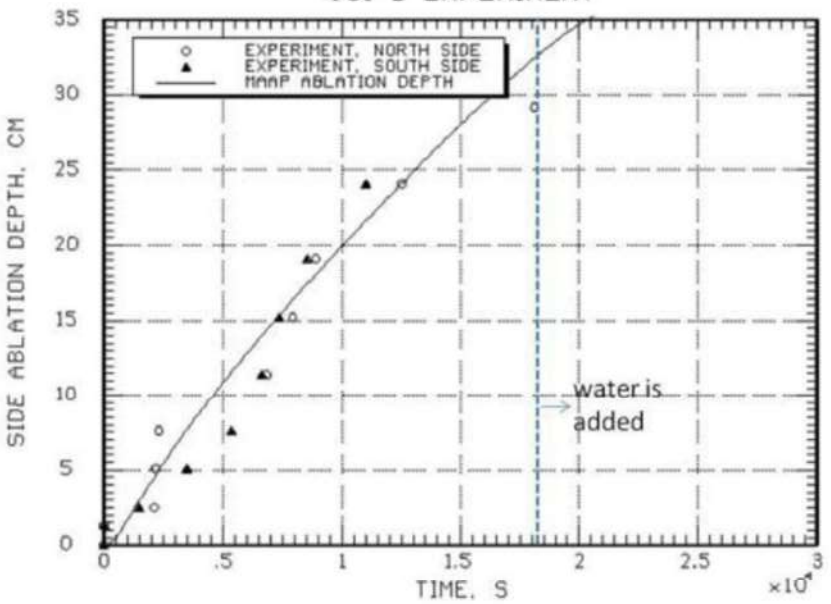
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">CCI-2 EXPERIMENT</p> <p>TEMPERATURE, K</p> <p>TIME, S $\times 10^4$</p> <p>○ EXPERIMENT DATA — MAAP, DEFAULT HI AND N - - - MAAP, NEW HI AND N</p> <p>water is added</p> <p>付図 2-20 CCI-2 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較^[35] (MAAP New 熱伝達係数 (破線)：床方向 300W/m²-K, 側壁方向 300W/m²-K, n=0)</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">CCI-2 EXPERIMENT</p>  <p style="text-align: center;">付図 2-21 CCI-2 実験の床方向侵食の実験データとMAAP解析結果の比較^[36]</p>		

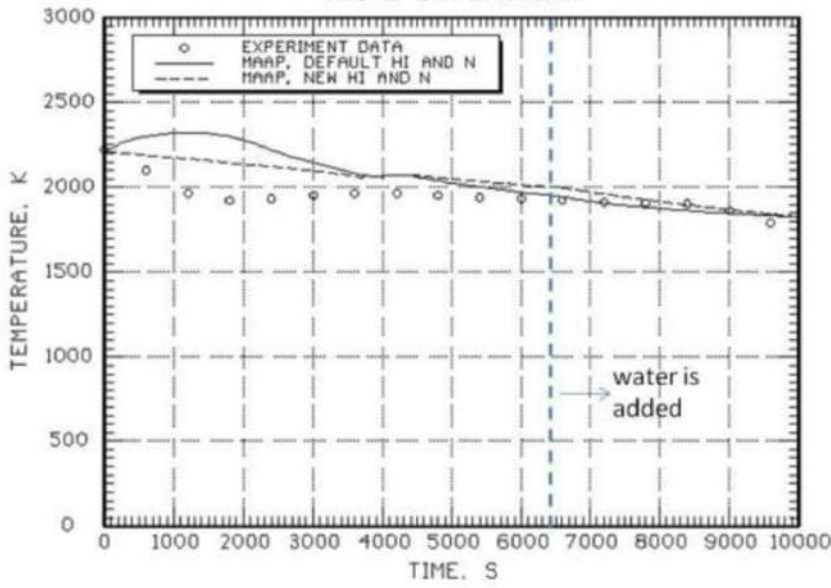
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																												
<p style="text-align: center;">CCI-2 EXPERIMENT</p>  <p>Figure 2-22 CCI-2 Experiment graph showing Side Ablation Depth (CM) vs Time (S x 10³). The graph compares experimental data for North Side (circles) and South Side (triangles) against MAA P analysis results (solid line). A vertical dashed line at 2.0 x 10³ S is labeled 'water is added'.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points from Figure 2-22</caption> <thead> <tr> <th>Time (S x 10³)</th> <th>North Side Experiment (CM)</th> <th>South Side Experiment (CM)</th> <th>MAA P Analysis (CM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>8</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>12</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>0.8</td><td>16</td><td>15</td><td>16</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>20</td><td>19</td><td>20</td></tr> <tr><td>1.2</td><td>24</td><td>23</td><td>24</td></tr> <tr><td>1.4</td><td>28</td><td>27</td><td>28</td></tr> <tr><td>1.6</td><td>32</td><td>31</td><td>32</td></tr> <tr><td>1.8</td><td>35</td><td>34</td><td>35</td></tr> </tbody> </table> <p>付図 2-22 CCI-2 実験の側壁方向侵食の実験データとMAA P解析結果の比較^[36]</p>	Time (S x 10 ³)	North Side Experiment (CM)	South Side Experiment (CM)	MAA P Analysis (CM)	0.0	0	0	0	0.2	5	3	5	0.4	8	7	8	0.6	12	11	12	0.8	16	15	16	1.0	20	19	20	1.2	24	23	24	1.4	28	27	28	1.6	32	31	32	1.8	35	34	35		
Time (S x 10 ³)	North Side Experiment (CM)	South Side Experiment (CM)	MAA P Analysis (CM)																																											
0.0	0	0	0																																											
0.2	5	3	5																																											
0.4	8	7	8																																											
0.6	12	11	12																																											
0.8	16	15	16																																											
1.0	20	19	20																																											
1.2	24	23	24																																											
1.4	28	27	28																																											
1.6	32	31	32																																											
1.8	35	34	35																																											

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

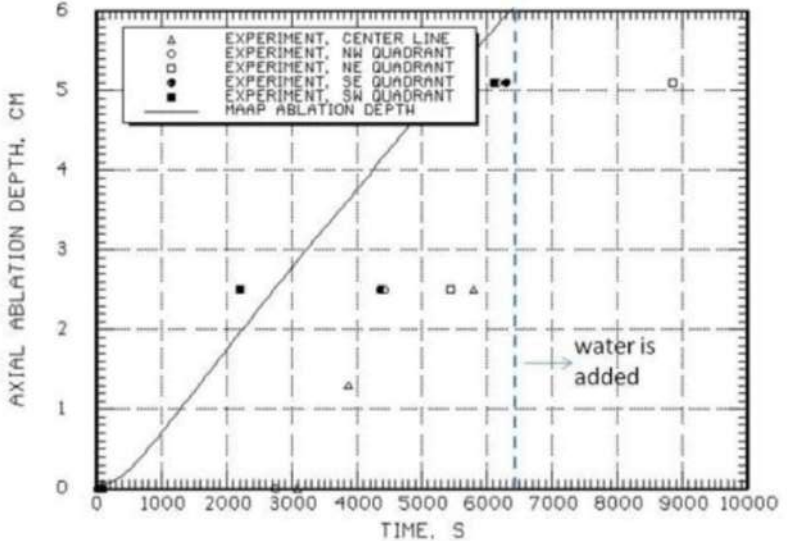
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">CCI-3 EXPERIMENT</p>  <p style="text-align: center;">TEMPERATURE, K</p> <p style="text-align: center;">TIME, S</p> <p style="text-align: center;">water is added</p> <p>付図 2-23 CCI-3 実験のコリウム温度の実験データとMAA P解析結果の比較^[35] (MAA P New 熱伝達係数 (破線)：床方向 80W/m²-K, 側壁方向 300W/m²-K, n=0)</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

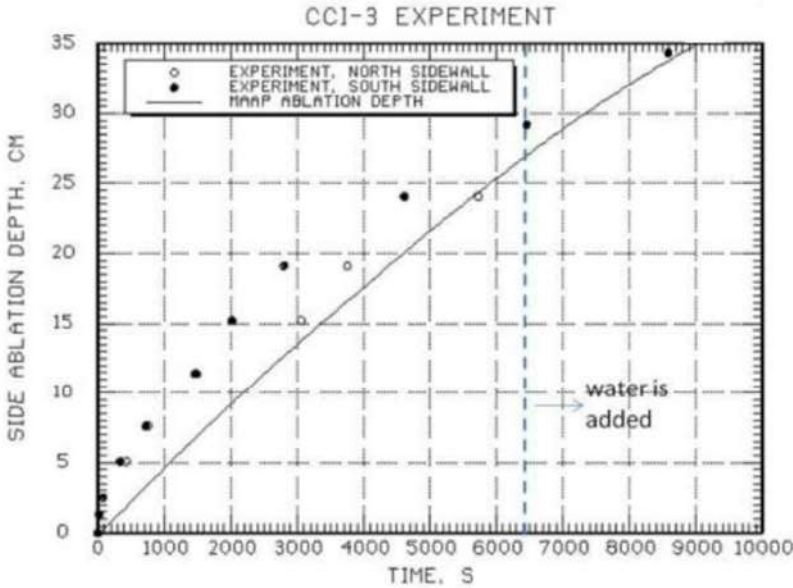
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">CCI-3 EXPERIMENT</p>  <p>AXIAL ABLATION DEPTH, CM</p> <p>TIME, S</p> <p>water is added</p> <p>Legend: △ EXPERIMENT, CENTER LINE ○ EXPERIMENT, NW QUADRANT □ EXPERIMENT, NE QUADRANT ● EXPERIMENT, SE QUADRANT ■ EXPERIMENT, SW QUADRANT — MAAP ABLATION DEPTH</p>		

付図 2-24 CCI-3 実験の床方向侵食の実験データとMAAP解析結果の比較^[36]

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																				
<p style="text-align: center;">CCI-3 EXPERIMENT</p>  <p>The graph plots 'SIDE ABLATION DEPTH, CM' on the y-axis (0 to 35) against 'TIME, S' on the x-axis (0 to 10000). It compares experimental data for the north and south sidewalls against a MAA P model. An arrow points to the 6000s mark with the text 'water is added'.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points from the CCI-3 Experiment graph</caption> <thead> <tr> <th>Time (S)</th> <th>North Sidewall (cm)</th> <th>South Sidewall (cm)</th> <th>MAA P Model (cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1000</td><td>5</td><td>8</td><td>5</td></tr> <tr><td>2000</td><td>10</td><td>15</td><td>10</td></tr> <tr><td>3000</td><td>15</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>4000</td><td>20</td><td>25</td><td>20</td></tr> <tr><td>5000</td><td>25</td><td>30</td><td>25</td></tr> <tr><td>6000</td><td>30</td><td>35</td><td>30</td></tr> <tr><td>7000</td><td>35</td><td>40</td><td>35</td></tr> </tbody> </table>	Time (S)	North Sidewall (cm)	South Sidewall (cm)	MAA P Model (cm)	0	0	0	0	1000	5	8	5	2000	10	15	10	3000	15	20	15	4000	20	25	20	5000	25	30	25	6000	30	35	30	7000	35	40	35		
Time (S)	North Sidewall (cm)	South Sidewall (cm)	MAA P Model (cm)																																			
0	0	0	0																																			
1000	5	8	5																																			
2000	10	15	10																																			
3000	15	20	15																																			
4000	20	25	20																																			
5000	25	30	25																																			
6000	30	35	30																																			
7000	35	40	35																																			

付図 2-25 CCI-3 実験の側壁方向侵食の実験データとMAA P解析結果の比較^[35]

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付録3 熔融物の水中落下時の粒子化実験と解析モデル</p> <p>熔融物が水中に落下した場合の粒子化現象については、主に熔融炉心と冷却材の相互作用（FCI）を調べるために行われてきた。ここでは、以下の実験についての知見を述べる。</p> <p>(1) FARO 実験（イタリア JRC-ISPRA） (2) COTELS-FCI 実験（日本 NUPEC） (3) DEFOR 実験（スウェーデン KTH）</p> <p>また、MAAPコードでは、熔融炉心が原子炉圧力容器下部プレナム水等に落下する場合の粒子化割合を評価しており、Ricou-Spalding 相関式又はSaitoの相関式が用いられている。ここではこれらの相関式の元になった実験についても説明する。</p> <p>(1) FARO 実験（イタリア JRC-ISPRA）^{[1][4]}</p> <p>主に原子炉圧力容器内で熔融物が炉心から下部プレナムの水プールに落下した場合の水蒸気爆発発生の可能性を調べることを目的とした実験で、当初は高圧での実験を対象としてきたが、後に低圧での実験が3ケース実施された。高圧実験装置の構成は、FARO りつぽと実験容器 TERMOS（内径：710mm、体積：1.5m³）である（付図3-1参照）。低圧実験装置ではFATと呼ばれる実験容器の中にTERMOSと同一内径の円筒容器が置かれ、観測窓が設置された。実験手順は原則的に高圧実験も低圧実験も同様で、FARO りつぽで生成された熔融コリウムは一度リリースベッセルに保持し、その底部にあるフラップ又は弁を開放して熔融物を水プールに落下させる。高圧実験ではリリースベッセルは熔融物落下速度を調整するために加圧可能である。ほとんどの実験は酸化コリウム（80wt%UO₂+20wt%ZrO₂）で実施され、テストL11のみが金属Zrを含むコリウム（77wt%UO₂+19wt%ZrO₂+4wt%Zr）が用いられた。また、多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されたが、近年は低圧・サブクール水条件でも3ケース実施されてきている。主な実験パラメータは、初期圧力（0.2～6MPa）、コリウム質量（18～177kg）、水深（87cm～2.05m）、サブクール度（飽和～124K）、コリウム組成（1ケースのみ金属Zrを4.1wt%追加）である（付表3-1参照）</p> <p>実験からの主な知見は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧・飽和水実験、低圧・サブクール実験の何れにおいても水蒸気爆発は発生していなかった。 ・ いずれの実験においても、コリウムの一部が粒子化し、一部はパンケーキ状としてプール底部に堆積した。プール水中に設置した熱電対の測定結果より、一部のコリウムはジェット状でプール底面に衝突したと推定されている（付図3-2参照）。 ・ 粒子化割合は、ほとんどの実験でプール水深に依存し、高圧飽和水実験の水深1m程度で落下コリウムの約50%が粒子化したが、コリウムに少量の金属Zr（4.1wt%）を添加した場合と低圧のサブクール水の実験では100%近くが粒子化した（付図3-3参照）。 	<p>【泊では本文3.に記載】</p>	<p>※3.1(7)に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																																																																																																																																																																													
<p>・ 粒子の質量中央径は比較的大きく、3.2~4.8mmの範囲であり、実験パラメータ（初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度）に依存していない。</p> <p style="text-align: center;">付表3-1 FARO 実験マトリックス^[14]</p> <p>FARO LWR test series—main experimental conditions and debris data</p> <table border="1" data-bbox="181 438 1014 738"> <thead> <tr> <th>Test</th> <th>L-06</th> <th>L-08</th> <th>L-11</th> <th>L-14</th> <th>L-19</th> <th>L-20</th> <th>L-24</th> <th>L-27</th> <th>L-28</th> <th>L-29</th> <th>L-31</th> <th>L-33</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="13">Experimental conditions</td> </tr> <tr> <td>Corium composition^a</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Melt mass^b (kg)</td> <td>18</td> <td>44</td> <td>151</td> <td>125</td> <td>157</td> <td>96</td> <td>177</td> <td>117</td> <td>175</td> <td>39</td> <td>92</td> <td>100^c</td> </tr> <tr> <td>Melt temperature (K)</td> <td>2923</td> <td>3023</td> <td>2823</td> <td>3123</td> <td>3073</td> <td>3173</td> <td>3023</td> <td>3023</td> <td>3052</td> <td>3070</td> <td>2990</td> <td>3070</td> </tr> <tr> <td>Melt release diameter^d (mm)</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Melt fall height in gas (m)</td> <td>1.83</td> <td>1.53</td> <td>1.09</td> <td>1.04</td> <td>1.99</td> <td>1.12</td> <td>1.07</td> <td>0.73</td> <td>0.89</td> <td>0.74</td> <td>0.77</td> <td>0.77</td> </tr> <tr> <td>System pressure (MPa)</td> <td>5</td> <td>5.8</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>Gas phase</td> <td>Steam/Ar</td> <td>Steam/Ar</td> <td>Steam/Ar</td> <td>Steam/Ar</td> <td>Steam^e</td> <td>Steam^e</td> <td>Steam^e</td> <td>Steam^e</td> <td>Steam^e</td> <td>Argon</td> <td>Argon</td> <td>Argon</td> </tr> <tr> <td>Water depth (m)</td> <td>0.87</td> <td>1.00</td> <td>2.00</td> <td>2.05</td> <td>1.10</td> <td>1.97</td> <td>2.02</td> <td>1.47</td> <td>1.44</td> <td>1.48</td> <td>1.45</td> <td>1.60</td> </tr> <tr> <td>Water temperature (K)</td> <td>539</td> <td>536</td> <td>535</td> <td>537</td> <td>536</td> <td>486</td> <td>425</td> <td>424</td> <td>424</td> <td>297</td> <td>291</td> <td>293</td> </tr> <tr> <td>Water subcooling (K)</td> <td>0</td> <td>12</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>97</td> <td>104</td> <td>124</td> </tr> <tr> <td>Water Mass (kg)</td> <td>120</td> <td>255</td> <td>608</td> <td>623</td> <td>330</td> <td>660</td> <td>719</td> <td>536</td> <td>517</td> <td>492</td> <td>481</td> <td>625</td> </tr> <tr> <td colspan="13">Debris bed data^f</td> </tr> <tr> <td>Hard debris, cake (kg. %)</td> <td>6.33</td> <td>14.32</td> <td>0.0</td> <td>20.16</td> <td>77.49</td> <td>21.22</td> <td>27.16</td> <td>26.23</td> <td>77.48</td> <td>39.100</td> <td>0.0</td> <td>8.8</td> </tr> <tr> <td>Loose debris (kg. %)</td> <td>12.67</td> <td>30.68</td> <td>146.100</td> <td>105.84</td> <td>80.51</td> <td>73.78</td> <td>141.84</td> <td>70.77</td> <td>84.52</td> <td>0.0</td> <td>83.100</td> <td>89.92</td> </tr> <tr> <td>Mean loose debris size (mm)</td> <td>4.5</td> <td>3.8</td> <td>3.5</td> <td>4.8</td> <td>3.7</td> <td>4.4</td> <td>2.6</td> <td>Na^g</td> <td>3.0</td> <td>-</td> <td>3.4</td> <td>2.6^h</td> </tr> </tbody> </table> <p>^a A: 80 wt.% UO₂-20 wt.% ZrO₂; B: 77 wt.% UO₂-19 wt.% ZrO₂-4 wt.% Zr.</p>	Test	L-06	L-08	L-11	L-14	L-19	L-20	L-24	L-27	L-28	L-29	L-31	L-33	Experimental conditions													Corium composition ^a	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	Melt mass ^b (kg)	18	44	151	125	157	96	177	117	175	39	92	100 ^c	Melt temperature (K)	2923	3023	2823	3123	3073	3173	3023	3023	3052	3070	2990	3070	Melt release diameter ^d (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	Melt fall height in gas (m)	1.83	1.53	1.09	1.04	1.99	1.12	1.07	0.73	0.89	0.74	0.77	0.77	System pressure (MPa)	5	5.8	5	5	5	2	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4	Gas phase	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Argon	Argon	Argon	Water depth (m)	0.87	1.00	2.00	2.05	1.10	1.97	2.02	1.47	1.44	1.48	1.45	1.60	Water temperature (K)	539	536	535	537	536	486	425	424	424	297	291	293	Water subcooling (K)	0	12	2	0	1	0	0	1	1	97	104	124	Water Mass (kg)	120	255	608	623	330	660	719	536	517	492	481	625	Debris bed data ^f													Hard debris, cake (kg. %)	6.33	14.32	0.0	20.16	77.49	21.22	27.16	26.23	77.48	39.100	0.0	8.8	Loose debris (kg. %)	12.67	30.68	146.100	105.84	80.51	73.78	141.84	70.77	84.52	0.0	83.100	89.92	Mean loose debris size (mm)	4.5	3.8	3.5	4.8	3.7	4.4	2.6	Na ^g	3.0	-	3.4	2.6 ^h		
Test	L-06	L-08	L-11	L-14	L-19	L-20	L-24	L-27	L-28	L-29	L-31	L-33																																																																																																																																																																																																																			
Experimental conditions																																																																																																																																																																																																																															
Corium composition ^a	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A																																																																																																																																																																																																																			
Melt mass ^b (kg)	18	44	151	125	157	96	177	117	175	39	92	100 ^c																																																																																																																																																																																																																			
Melt temperature (K)	2923	3023	2823	3123	3073	3173	3023	3023	3052	3070	2990	3070																																																																																																																																																																																																																			
Melt release diameter ^d (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50																																																																																																																																																																																																																			
Melt fall height in gas (m)	1.83	1.53	1.09	1.04	1.99	1.12	1.07	0.73	0.89	0.74	0.77	0.77																																																																																																																																																																																																																			
System pressure (MPa)	5	5.8	5	5	5	2	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4																																																																																																																																																																																																																			
Gas phase	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam/Ar	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Steam ^e	Argon	Argon	Argon																																																																																																																																																																																																																			
Water depth (m)	0.87	1.00	2.00	2.05	1.10	1.97	2.02	1.47	1.44	1.48	1.45	1.60																																																																																																																																																																																																																			
Water temperature (K)	539	536	535	537	536	486	425	424	424	297	291	293																																																																																																																																																																																																																			
Water subcooling (K)	0	12	2	0	1	0	0	1	1	97	104	124																																																																																																																																																																																																																			
Water Mass (kg)	120	255	608	623	330	660	719	536	517	492	481	625																																																																																																																																																																																																																			
Debris bed data ^f																																																																																																																																																																																																																															
Hard debris, cake (kg. %)	6.33	14.32	0.0	20.16	77.49	21.22	27.16	26.23	77.48	39.100	0.0	8.8																																																																																																																																																																																																																			
Loose debris (kg. %)	12.67	30.68	146.100	105.84	80.51	73.78	141.84	70.77	84.52	0.0	83.100	89.92																																																																																																																																																																																																																			
Mean loose debris size (mm)	4.5	3.8	3.5	4.8	3.7	4.4	2.6	Na ^g	3.0	-	3.4	2.6 ^h																																																																																																																																																																																																																			

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

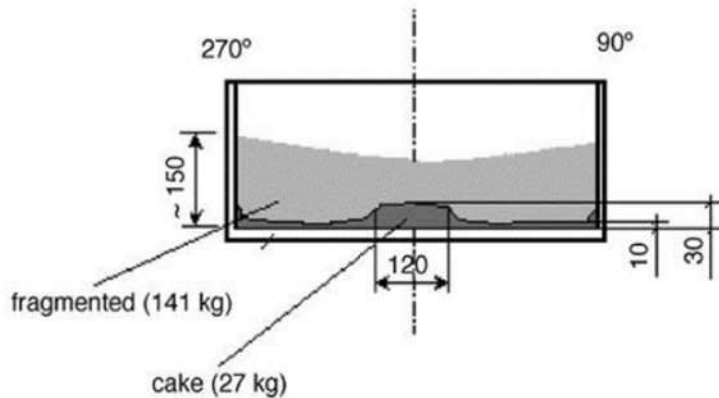
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付図 3-1 FARO 実験装置 (L-27 実験) [14]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>付図3-2 FARO L-24 実験後のデブリの堆積状態（数値単位mm）^[14]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>(a) View of the debris as found</p>   <p>(b) View of the cake after partial removal of loose debris (c) View of blocks after breaking the cake</p> <p>付図 3-3 FARO/L-33 実験後のデブリ取り出し段階ごとのデブリ状態^[4] (低圧, サブクール水)</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

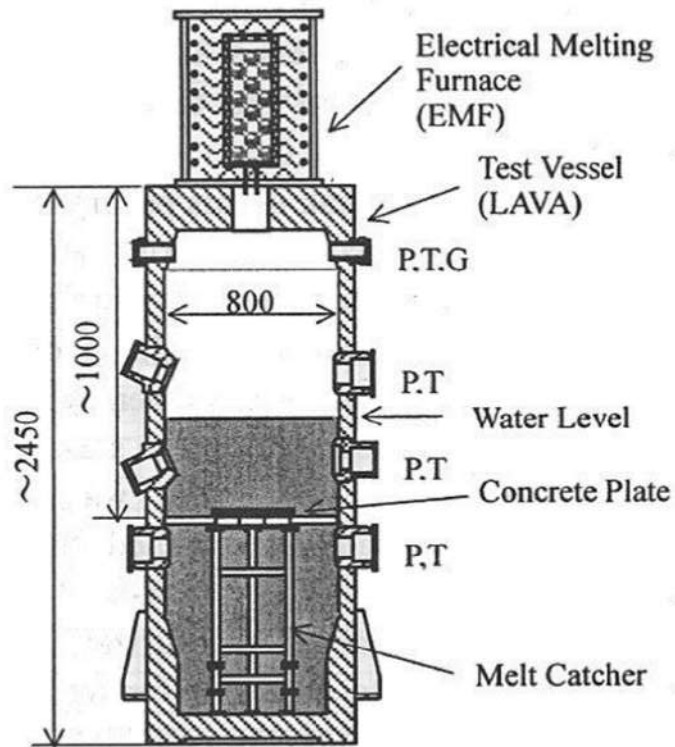
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																																																														
<p>(2) COTELS-FCI 実験（日本 NUPEC）^{[1][6]}</p> <p>本実験は、原子炉圧力容器外でのFCI挙動を調べるために実施された。UO₂混合物を溶融物として用い、その成分は原子炉内構造物のみならず、原子炉圧力容器下部ヘッド内の下部構造物も考慮して設定されている。付図3-4にCOTELS-FCI実験装置の概要を示す。実験装置は、UO₂混合物を溶融させる電気炉とその下に溶融物と水との相互作用を調べるメルトレシーバより構成されている。電気炉は、グラファイト製のつぼと高周波誘導加熱コイルにより構成されている。グラファイト製のつぼは最高温度3200Kで、60kgのUO₂混合物を加熱溶融可能である。つぼ下部には、溶融物を落下させるための穴を設けるプラグ破壊装置が設置され、UO₂混合物が溶融後、瞬時に直径5cmの穴が作ることが可能である。メルトレシーバは、高さ約2.5m、外径約90cmで円筒状をしており、メルトレシーバの中には、高さが可変のメルトキャッチャーが設置されており、メルトキャッチャーの高さを変化させることによりプール水深を変化させる実験を実施しており、雰囲気体積は変化させないように考慮されている。メルトキャッチャーの中心部は、実炉の格納容器床面を模擬するために厚さ3cmのコンクリートが設置され、溶融コリウム/水/コンクリート間の相互作用を調べる事が可能となっている。なお、コンクリートの成分は日本と同じ玄武岩系である。実験マトリックスと主な結果を付表3-2に示す。</p> <p style="text-align: center;">付表3-2 COTELS-FCI 実験マトリックス^[1]</p> <table border="1" data-bbox="152 794 1037 1206"> <thead> <tr> <th>Run No.</th> <th>A1</th> <th>A4</th> <th>A5</th> <th>A6</th> <th>A7</th> <th>A8</th> <th>A9</th> <th>A10</th> <th>A11</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コリウム組成(*1)</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>落下コリウム量, kg</td> <td>56.3</td> <td>27.0</td> <td>55.4</td> <td>53.1</td> <td>24.9</td> <td>47.7</td> <td>57.1</td> <td>55.0</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>プール水深, m</td> <td>0.4</td> <td>0.4</td> <td>0.4</td> <td>0.4</td> <td>1.0</td> <td>0.4</td> <td>0.9</td> <td>0.4</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>水サブクール度, K</td> <td>0</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>21</td> <td>0</td> <td>21</td> <td>0</td> <td>21</td> <td>86</td> </tr> <tr> <td>初気圧, MPa</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.25</td> <td>0.21</td> <td>0.18</td> <td>0.45</td> <td>0.21</td> <td>0.47</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>雰囲気ガス組成</td> <td>Steam</td> <td>Steam</td> <td>Steam N₂20%</td> <td>Steam</td> <td>Steam</td> <td>Steam</td> <td>Steam</td> <td>Steam</td> <td>Ar</td> </tr> <tr> <td>差圧, MPa(*2)</td> <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.01</td> <td>-0</td> <td>-0</td> <td>0.67(*3)</td> <td>0.02</td> <td>0.14</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>ピーク圧力, MPa</td> <td>1.34</td> <td>1.04</td> <td>0.62</td> <td>0.88</td> <td>(*4)</td> <td>1.83</td> <td>0.92</td> <td>3.85</td> <td>1.08</td> </tr> <tr> <td>インレットコリウム, kg</td> <td>5</td> <td>2.5</td> <td>4.2</td> <td>6.5</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>3.8</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>質量中央径, mm</td> <td>6.7</td> <td>6.2</td> <td>7.5</td> <td>7.2</td> <td>8.2</td> <td>5.2</td> <td>7.0</td> <td>0.38</td> <td>4.8</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1)コリウム組成 B: UO₂:55wt%+Zr:25%+ZrO₂:5%+SS:15%</p>	Run No.	A1	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	コリウム組成(*1)	B	B	B	B	B	B	B	B	B	落下コリウム量, kg	56.3	27.0	55.4	53.1	24.9	47.7	57.1	55.0	53	プール水深, m	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0	0.4	0.9	0.4	0.8	水サブクール度, K	0	8	12	21	0	21	0	21	86	初気圧, MPa	0.20	0.30	0.25	0.21	0.18	0.45	0.21	0.47	0.27	雰囲気ガス組成	Steam	Steam	Steam N ₂ 20%	Steam	Steam	Steam	Steam	Steam	Ar	差圧, MPa(*2)	0.03	0.03	0.01	-0	-0	0.67(*3)	0.02	0.14	0.13	ピーク圧力, MPa	1.34	1.04	0.62	0.88	(*4)	1.83	0.92	3.85	1.08	インレットコリウム, kg	5	2.5	4.2	6.5	0	0	3.8	0	4	質量中央径, mm	6.7	6.2	7.5	7.2	8.2	5.2	7.0	0.38	4.8		<p>※3.1 (8) に記載</p>
Run No.	A1	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11																																																																																																							
コリウム組成(*1)	B	B	B	B	B	B	B	B	B																																																																																																							
落下コリウム量, kg	56.3	27.0	55.4	53.1	24.9	47.7	57.1	55.0	53																																																																																																							
プール水深, m	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0	0.4	0.9	0.4	0.8																																																																																																							
水サブクール度, K	0	8	12	21	0	21	0	21	86																																																																																																							
初気圧, MPa	0.20	0.30	0.25	0.21	0.18	0.45	0.21	0.47	0.27																																																																																																							
雰囲気ガス組成	Steam	Steam	Steam N ₂ 20%	Steam	Steam	Steam	Steam	Steam	Ar																																																																																																							
差圧, MPa(*2)	0.03	0.03	0.01	-0	-0	0.67(*3)	0.02	0.14	0.13																																																																																																							
ピーク圧力, MPa	1.34	1.04	0.62	0.88	(*4)	1.83	0.92	3.85	1.08																																																																																																							
インレットコリウム, kg	5	2.5	4.2	6.5	0	0	3.8	0	4																																																																																																							
質量中央径, mm	6.7	6.2	7.5	7.2	8.2	5.2	7.0	0.38	4.8																																																																																																							

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="268 638 313 750">~2450 ~1000 800</p> <p data-bbox="358 1005 761 1117">〔 〕 mm P: Pressure, T: Temperature, G: Gas sampling line</p> <p data-bbox="448 1149 739 1181">付図 3-4 COTELS-FCI 実験装置^[15]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

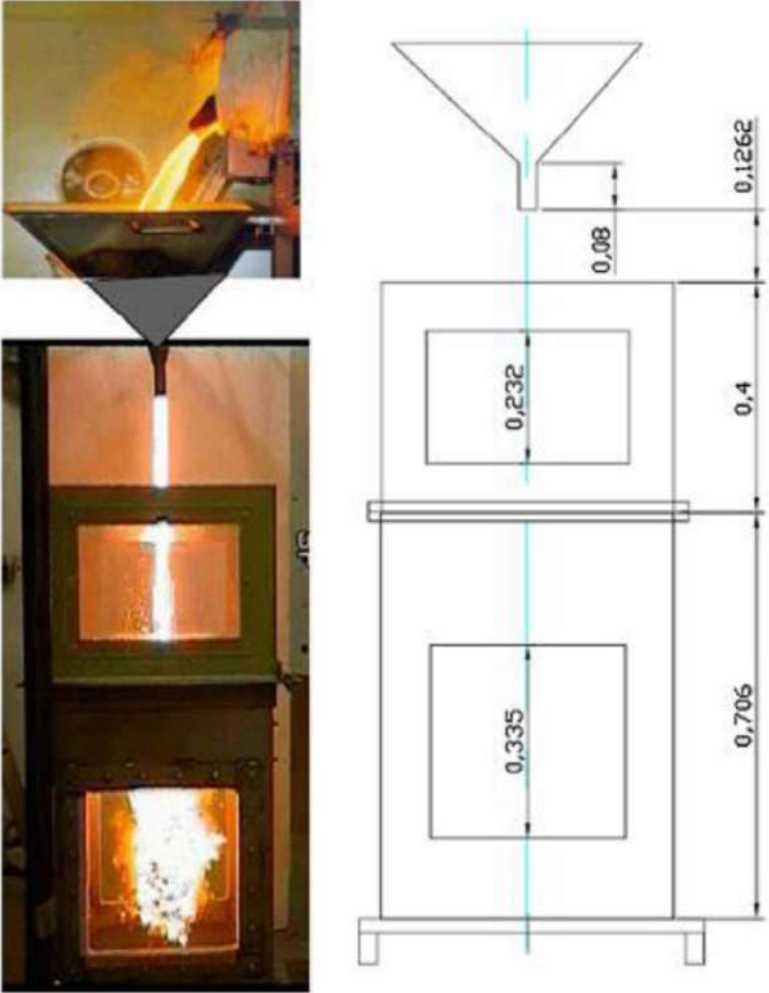
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																															
<p>(3) DEFOR 実験（スウェーデン KTH）^[16]</p> <p>水張り時のデブリ冷却性を調べる目的で実施されている。熔融物の粒子化について、水サブクール、水深、メルト成分、過熱度等の影響を調べるために、熔融物の落下実験が実施されている。実験装置を付図3-5に示すが、上から、誘導加熱炉、メルト容器、冷却タンクより成り、冷却タンクはガラス張りで粒子化の観察が可能となっている。熔融物はメルト容器下部のノズルから重力落下により水中に落下する。DEFOR-E 実験の実験マトリックスを付表3-3に示すが、6ケースの熔融物はCaO-B₂O₃（密度 2500kg/m³）の酸化物が使用されており、1ケースはより重量の大きいWO₃-CaO（密度 5000～8000kg/m³）が使用されている。</p> <p>実験結果より、粒子化挙動は、水サブクールと水深の影響が大きいとしている。実験後のデブリ状態例を付図3-6に示すが、平均ポロシティは0.55～0.7程度と大きい値が得られている。主な結果を付表3-3に併せて示す。</p> <p style="text-align: center;">付表3-3 DEFOR-E 実験マトリックス^[16]</p> <p>Experimental conditions and the measured porosity in the DEFOR-E tests.</p> <table border="1" data-bbox="152 746 1039 890"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parameter/property</th> <th colspan="7">No.</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Melt volume, l</td> <td>3.5</td> <td>7.0</td> <td>3.5</td> <td>3.5</td> <td>3.5</td> <td>3.5</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>Melt initial temp., °C</td> <td>1200</td> <td>1300</td> <td>1350</td> <td>1350</td> <td>1200</td> <td>1250</td> <td>1280</td> </tr> <tr> <td>Coolant volume, l</td> <td>163</td> <td>163</td> <td>163</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>163</td> <td>163</td> </tr> <tr> <td>Coolant initial temp., °C</td> <td>13</td> <td>11</td> <td>85</td> <td>15</td> <td>83</td> <td>88</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Water pool depth, cm</td> <td>65</td> <td>65</td> <td>65</td> <td>40</td> <td>40</td> <td>65</td> <td>65</td> </tr> <tr> <td>Measured porosity, %</td> <td>60</td> <td>77</td> <td>74</td> <td>56</td> <td>50</td> <td>68</td> <td>65</td> </tr> </tbody> </table>	Parameter/property	No.							1	2	3	4	5	6	7	Melt volume, l	3.5	7.0	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	Melt initial temp., °C	1200	1300	1350	1350	1200	1250	1280	Coolant volume, l	163	163	163	100	100	163	163	Coolant initial temp., °C	13	11	85	15	83	88	7	Water pool depth, cm	65	65	65	40	40	65	65	Measured porosity, %	60	77	74	56	50	68	65		<p>※3.1 (10) に記載</p>
Parameter/property		No.																																																															
	1	2	3	4	5	6	7																																																										
Melt volume, l	3.5	7.0	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5																																																										
Melt initial temp., °C	1200	1300	1350	1350	1200	1250	1280																																																										
Coolant volume, l	163	163	163	100	100	163	163																																																										
Coolant initial temp., °C	13	11	85	15	83	88	7																																																										
Water pool depth, cm	65	65	65	40	40	65	65																																																										
Measured porosity, %	60	77	74	56	50	68	65																																																										

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="465 1262 730 1286">付図 3-5 DEFOR-E 実験装置^[16]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 220 573 545" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="268 547 396 576" data-label="Caption"> <p>DEFOR- E1</p> </div> <div data-bbox="589 220 1023 545" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="728 547 855 576" data-label="Caption"> <p>DEFOR- E4</p> </div> <div data-bbox="311 576 815 876" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="463 844 591 873" data-label="Caption"> <p>DEFOR- E7</p> </div> <div data-bbox="403 880 784 914" data-label="Caption"> <p>付図3-6 DEFOR-E 実験後のデブリ状態^[16]</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

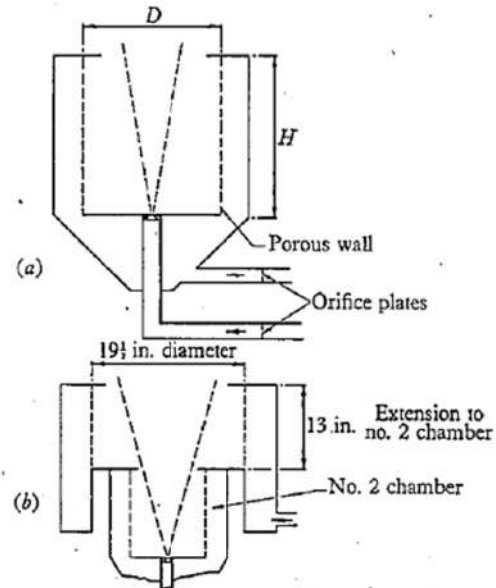
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 熔融物落下時の水中での粒子化割合の解析モデル</p> <p>水中落下時の熔融物の粒子化現象について、これまで種々の実験的研究が行われており、また粒子化割合については相関式も提案されている。ここでは、粒子化現象に関する相関式を用いて、熔融炉心ジェットのパデスタル水プールの条件に対する粒子化割合を評価した。相関式として、MAAPコードで使用されている以下の二つの式を用いて計算を行った。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Ricou-Spalding の相関式 ・ Saito の相関式 <p>a) Ricou-Spalding の粒子化相関式^{[25][34]}</p> <p>Ricou-Spalding の相関式は、空気中へガスジェットを噴出させたエントレインメント実験から得られたもので（実験装置は付図3-7参照）、周囲の流体（空気）がガスジェットによってエントレインされ（巻き込まれ）、ジェット質量流量が距離とともに増加することを相関づけた整理式である。式の検証例を付図3-8に示す。</p> <p>これをメルトジェットのブレイクアップに適用するため、周囲の流体（水）がメルトジェットにエントレインされると考え、そのエントレインされた分だけメルトジェットが侵食され粒子化するとして、円柱ジェットのエントレインメント速度（m/s）を、次式で与えている（付図3-9参照）。</p> $m_{ent} = E_o \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} u_{dj}$ <p>ここで、 E_o：エントレインメント係数 u_{dj}：ジェット速度 [m/s] ρ_{dj}：ジェット密度 [kg/m³] ρ_w：水密度 [kg/m³]</p>		<p>※添付2 3.2 (2)に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

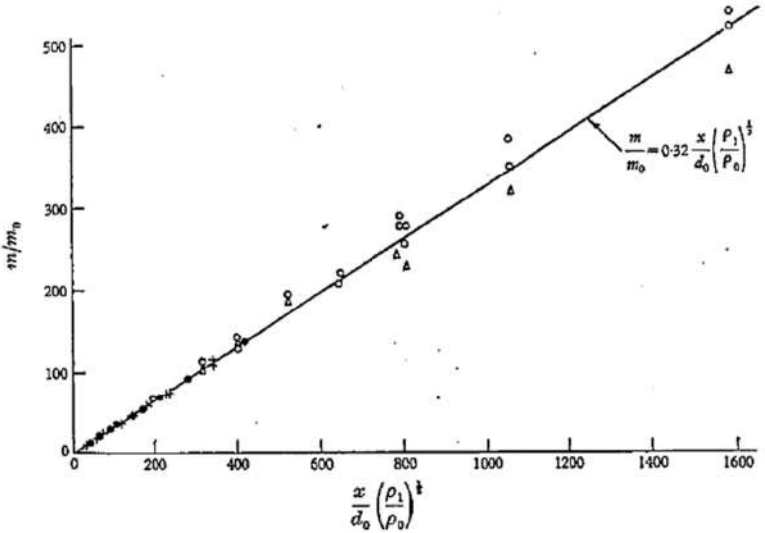
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																
 <p>FIGURE 1. (a) Leading dimensions of three chambers. (b) Dimensions of extension to no. 2 chamber.</p> <table border="1" data-bbox="358 893 851 1021"> <thead> <tr> <th colspan="4">Entrainment chamber</th> </tr> <tr> <th>No.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H in.</td> <td>8.7</td> <td>13</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>D in.</td> <td>5.8</td> <td>8.9</td> <td>8.9</td> </tr> </tbody> </table> <p>付図3-7 Ricou-Spalding のエントレイメント実験装置^[25]</p>	Entrainment chamber				No.	1	2	3	H in.	8.7	13	3	D in.	5.8	8.9	8.9		
Entrainment chamber																		
No.	1	2	3															
H in.	8.7	13	3															
D in.	5.8	8.9	8.9															

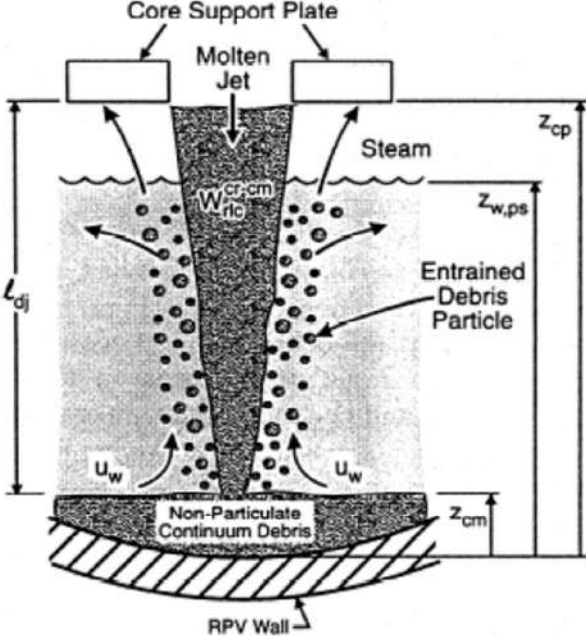
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="190 774 1019 837">FIGURE 5. Entrainment rate for isothermal jets. Experimental results: (a) ●, air into air; (b) +, propane and carbon dioxide into air; (c), ○, hydrogen into air; (Δ, entrainment chamber inverted).</p> <p data-bbox="392 917 806 949">付図 3-8 Ricou-Spalding の相関式の検証例^[25]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="347 949 884 981">Fig. 3. Molten debris jet breakup and quenching.</p> <p data-bbox="291 1021 907 1045">付図3-9 溶融デブリのジェットブレイクアップとクエンチの概念^[34]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

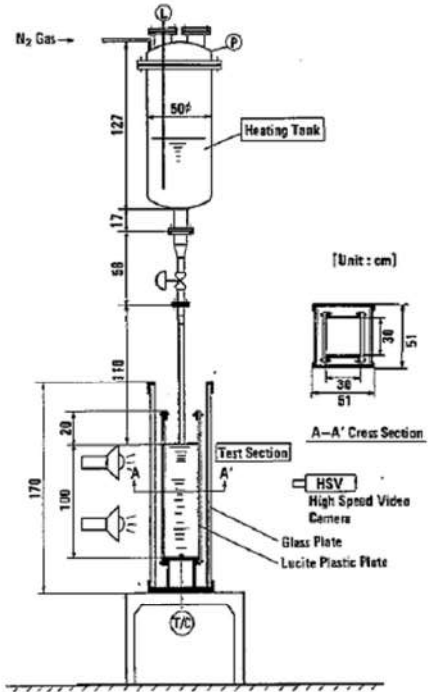
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>b) Saito の相関式^[26]</p> <p>フレオン11あるいは液体窒素の中に高温水ジェットを吹き込む実験により、ジェットのブレイクアップ長さに関する相関式を導出している。実験装置を付図3-10に示す。実験条件は、ノズル直径5～40mm、ジェット速度2.5～15m/sである。実験結果は、付図3-11にまとめられ、それに基づき下記相関式が導かれた。</p> $\frac{L}{D_j} = 2.1 \times \left(\frac{\rho_j}{\rho_c}\right)^{0.5} \times F_r^{0.5}$ <p>ここで、 F_r：フルード数 $= \frac{V_j^2}{(g \times D_j)}$</p> <p>L：ジェットのブレイクアップ長さ [m] D_j：ジェット直径 [m] ρ_j：ジェット密度 [kg/m³] ρ_c：冷却材密度 [kg/m³] V_j：ジェット速度 [m/s] g：重力加速度 [m/s²]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

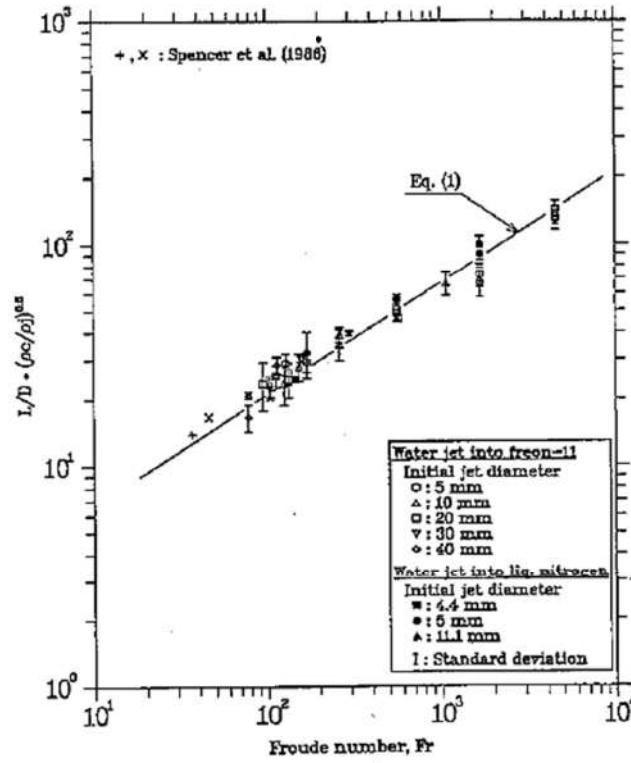
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>Fig. 1 JET-I experimental facility</p> <p>付図3-10 Saito らの実験装置^[33]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="268 223 896 989"> $L/D \cdot (\rho_c/\rho)^{0.25}$ Fr Eq. (1) Spencer et al. (1986) Water jet into freon-11 Initial jet diameter ○: 5 mm △: 10 mm □: 20 mm ▽: 30 mm ◇: 40 mm Water jet into liq. nitrogen Initial jet diameter ■: 4.4 mm ●: 5 mm ▲: 11.1 mm I: Standard deviation </p> <p data-bbox="313 1021 851 1077"> Fig. 8 Experimental correlation for jet mean penetration length </p> <p data-bbox="448 1117 739 1149"> 付図3-11 Saito らの実験結果^[33] </p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表


付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>c) 相関式の適用性に関する検討^[33]</p> <p>Ricou-Spaldingの相関式は、ガスジェットの空気中でのガス巻き込み現象に基づき作成された相関式であるため、溶融炉心物質ジェットの水中での粒子化現象への適用性の確認のため、ALPHA-MJB実験、FARO-TERMOS実験を対象に比較計算された結果を示す。</p> <p>あわせてSaitoの相関式との比較も示す。Saitoの相関式ではジェットのブレイクアップ長さが与えられるので、ジェットの突入から消滅までジェット径が直線的に減少すると仮定して粒子化割合が求められている。</p> <p>(a) ALPHA-MJB実験</p> <p>水中に鉛-ビスマスの溶融物を落下させた実験であり、密度や速度といった計算条件は付表3-4の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を付図3-12及び付図3-13に示す。実験結果は、ジェットブレイクアップ長さとして記載されている水深を、粒子化割合100%として記す。Ricou-Spalding相関式における係数E₀の値は、MAAP推奨値\squareを使用することで、実験結果及びSaitoの相関式とよく一致する結果が得られている。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>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。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉					泊発電所3号炉	相違理由
付表 3-4 ALPHA-MJB 実験の検証解析条件 ^[33]						
ケース	溶融物密度 (kg/m ³)	水密度 (kg/m ³)	ジェット径 (m)	ジェット速度 (m/s)		
MJB01	10453	958	0.03	3.05		
MJB02	↑	↑	0.021	2.86		
(補足) 溶融物密度は鉛-ビスマス 500K での値を使用						
						
付図 3-12 ALPHA-MJB01 実験結果との比較 ^[33]						
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。						

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表



付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="174 193 1032 619" style="border: 2px solid black; height: 267px; width: 383px; margin-bottom: 10px;"></div> <p data-bbox="405 646 801 671">付図 3-13 ALPHA-MJB02 実験結果との比較^[33]</p> <p data-bbox="185 715 376 740">(b) FARO-TERMOS 実験</p> <p data-bbox="199 750 1039 911">水中に実機燃料組成を模擬した溶融物を落下させた実験であり、密度、速度等の条件は付表 3-5 の値が用いられている。実験結果と計算結果の比較を付図 3-14、付図 3-15、付図 3-16、付図 3-17、付図 3-18 及び付図 3-19 に示す。実験結果は水プール水深に対する粒子化割合として示されている。計算結果は、実験結果とよく合っているか粒子化割合を小さく評価している。なお、Ricou-Spalding 相関式における係数 E_0 の値は が使用されている。</p> <div data-bbox="147 983 1048 1254" style="border: 2px solid black; height: 170px; width: 402px; margin-top: 10px;"></div> <p data-bbox="387 952 801 978">付表 3-5 FARO-TERMOS 実験の検証解析条件^[33]</p> <div data-bbox="147 1334 557 1422" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>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。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表



付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>付図3-14 FARO-L06 実験結果との比較^[33]</p>		
		
<p>付図3-15 FARO-L08 実験結果との比較^[33]</p>		
<p>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。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表


付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>付図3-16 FARO-L11 実験結果との比較^[33]</p>		
		
<p>付図3-17 FARO-L14 実験結果との比較^[33]</p>		
<p>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。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>付図 3-18 FARO-L19 実験結果との比較^[33]</p>		
		
<p>付図 3-19 FARO-L20 実験結果との比較^[33]</p>		
<p>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。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>d) 格納容器ペDESTAL水張り水深に対する粒子化割合の評価^[33]</p> <p>Ricou-Spalding の相関式及びSaito の相関式に基づき、大気圧飽和状態の水ブールを想定し、水深とジェット直径及びジェット速度をパラメータとして粒子化割合を整理されたものを付図3-20、付図3-21及び付図3-22に示す。</p> <div data-bbox="145 347 1046 869" style="border: 2px solid black; height: 327px; width: 402px;"></div> <p>付図3-20 Ricou-Spalding 相関式による粒子化割合のマップ^[33]</p> <div data-bbox="145 1023 557 1114" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>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。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="145 212 1048 742" style="border: 2px solid black; height: 332px; width: 403px;"></div> <p data-bbox="286 751 909 774">付図3-21 Saito の相関式による粒子化割合のマップ (Vj=5.0m/s) ^[33]</p> <div data-bbox="152 1059 557 1147" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 100px;"> <p>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。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="145 193 1032 746" style="border: 2px solid black; height: 347px; width: 396px;"></div> <p data-bbox="277 751 913 775">付図 3-22 Saito の相関式による粒子化割合のマップ (Vj=10.0m/s) ^[39]</p> <div data-bbox="152 1129 557 1217" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>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。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																		
<p>付録4 熔融物の拡がり実験</p> <p>熔融物の拡がり挙動に関して、付表4-1に示す実験的研究が実施されている。この中で水が存在する場合の熔融物の拡がりに関する主要な知見について以下に整理する。</p> <p>付表4-1 熔融物拡がりに関する主な実験^[27]</p> <table border="1" data-bbox="152 451 1034 746"> <thead> <tr> <th>実験名</th> <th>実施国</th> <th>拡がり形状</th> <th>熔融物</th> <th>その他</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BNL^[18]</td> <td>米国</td> <td>2D</td> <td>Pb</td> <td>ドライ、ウエット</td> </tr> <tr> <td>SPREAD^[19]</td> <td>日本</td> <td>1D, 2D</td> <td>ステンレススチール</td> <td>ドライ、ウエット</td> </tr> <tr> <td>CORINE^[36]</td> <td>フランス</td> <td>2D</td> <td>グリセロール他</td> <td>ドライ、ウエット</td> </tr> <tr> <td>VULCANO</td> <td>フランス</td> <td>2D</td> <td>コリウム</td> <td>ドライ</td> </tr> <tr> <td>KATS^[23]</td> <td>ドイツ</td> <td>1D, 2D</td> <td>テルミット</td> <td>ドライ、ウエット</td> </tr> <tr> <td>COMAS</td> <td>ドイツ</td> <td>1D, 2D</td> <td>コリウム</td> <td>ドライ</td> </tr> <tr> <td>ISPRA</td> <td>EU JRAC</td> <td>2D</td> <td>コリウム</td> <td>ドライ</td> </tr> <tr> <td>S3E^[27]</td> <td>スウェーデン</td> <td>1D, 2D</td> <td>模擬物(ウッズメタル等)</td> <td>ドライ、ウエット</td> </tr> <tr> <td>PULiMS^[21]</td> <td></td> <td>2D</td> <td>模擬物(B₂O₃-WO₃等)</td> <td>ウエット</td> </tr> </tbody> </table> <p>(1) Mark-I型格納容器のシェルアタックに関する研究^{[17][18][19][20]}</p> <p>Mark-I型格納容器のシェルアタックに関してROAM手法による確率論的評価^[17]が行われており、その中で水張り時のデブリの拡がりの評価が行われている。熔融物拡がり挙動解析には、MELTS SPREADコードが使用されている。熔融物の拡がり挙動には、熔融物落下流量、熔融物成分、熔融物過熱度が主に影響するとされている。</p> <p>米国BNLでは、熔融物として鉛を使用した小規模な拡がり実験を、ドライ条件とウエット条件で行っている^[18]。熔融物の過熱度と水深が、デブリ拡がり挙動において重要であること、熔融物の拡がりは、水への熱伝達による熔融物の温度挙動と、熔融物の流体力学的挙動により制限されることが示されている。</p>	実験名	実施国	拡がり形状	熔融物	その他	BNL ^[18]	米国	2D	Pb	ドライ、ウエット	SPREAD ^[19]	日本	1D, 2D	ステンレススチール	ドライ、ウエット	CORINE ^[36]	フランス	2D	グリセロール他	ドライ、ウエット	VULCANO	フランス	2D	コリウム	ドライ	KATS ^[23]	ドイツ	1D, 2D	テルミット	ドライ、ウエット	COMAS	ドイツ	1D, 2D	コリウム	ドライ	ISPRA	EU JRAC	2D	コリウム	ドライ	S3E ^[27]	スウェーデン	1D, 2D	模擬物(ウッズメタル等)	ドライ、ウエット	PULiMS ^[21]		2D	模擬物(B ₂ O ₃ -WO ₃ 等)	ウエット	<p>添付3-1</p> <p>熔融炉心の水中での拡がり評価について</p> <p>1.はじめに</p> <p>熔融炉心が原子炉下部キャビティ水中に落下した場合、実機条件では水深に対するジェット径が相対的に大きいため、落下過程において熔融炉心の一部は細粒化するものの、その大部分が連続層として水中に堆積すると考えられる。本資料では、水中での熔融炉心の拡がり挙動について説明し、実機に適用した場合の評価について説明する。</p>	<p>※BWR 特有の評価</p>
実験名	実施国	拡がり形状	熔融物	その他																																																
BNL ^[18]	米国	2D	Pb	ドライ、ウエット																																																
SPREAD ^[19]	日本	1D, 2D	ステンレススチール	ドライ、ウエット																																																
CORINE ^[36]	フランス	2D	グリセロール他	ドライ、ウエット																																																
VULCANO	フランス	2D	コリウム	ドライ																																																
KATS ^[23]	ドイツ	1D, 2D	テルミット	ドライ、ウエット																																																
COMAS	ドイツ	1D, 2D	コリウム	ドライ																																																
ISPRA	EU JRAC	2D	コリウム	ドライ																																																
S3E ^[27]	スウェーデン	1D, 2D	模擬物(ウッズメタル等)	ドライ、ウエット																																																
PULiMS ^[21]		2D	模擬物(B ₂ O ₃ -WO ₃ 等)	ウエット																																																

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
【比較のため掲載順を入替え】		
<p>(3) KTHの熔融物拡がり研究^{[21][27]}</p> <p>また、水中での熔融物拡がり挙動を調べるPULiMS 実験^[21]が実施されている。この実験では、浅い水プール（水深20cm）へ熔融したBi₂O₃-WO₃合金を流入させ、その拡がり挙動が観察された。実験装置を付図4-7に示し、実験条件を付表4-4に示す。水中へ流入した熔融物の拡がりの様子を付図4-8に示す。また、固化したデブリ層の性状を付図4-9に示す。固化したデブリ層は3層を形成し、デブリ層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており、水又は蒸気が存在していた可能性がある。3層の最下層は薄い1.5~2mmのケーキ（クラスト）層で空隙はなく、中間層は割れ目や細長い孔が含まれている。最上部は不規則な構造で高多孔性である。</p>	<p>2. 水中での拡がり挙動に関する実験的知見と考察</p> <p>スウェーデン王立工科大学（KTH）では、水中での熔融物拡がり挙動を調べるPULiMS 試験^[1]を実施している。この実験では、浅い水プールへ熔融したBi₂O₃-WO₃合金を流入させ、その拡がり挙動を観察した。水中へ流入した熔融物は、水との熱伝達により徐々に固化し、ある程度床上を拡がる結果となった。固化した熔融炉心層は3層を形成し、熔融炉心層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており（図2.1）、水又は蒸気が存在していた可能性がある。3層の最下層は薄い1.5~2mmのケーキ（クラスト）層で空隙無し、中間層は割れ目や細長い孔を含む。最上部は不規則な構造で高多孔性である。</p>	
<p>スウェーデンKTHでは、熔融物拡がりの小規模実験として、S3E 実験^[27]が行われている。種々の熔融物と冷却材の組合せ（例 ウッズメタル-水、塩（NaNO₃-KNO₃）-パラフィン）で熔融物温度、熔融物流量等をパラメータに、熔融物の拡がり挙動に関するデータが取られている。熔融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られており、熔融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、流量（慣性力）によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。</p>	<p>スウェーデン王立工科大学（KTH）において実施されたS3E 実験^[2]では、熔融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られている。熔融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、質量流量（慣性力）によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。</p>	
<p>国内BWR産業界では、SPREAD 実験^{[19][20]}が実施されている。熔融物として約2000Kに加熱したステンレススチールを用い、熔融物落下流量、水深、熔融物過熱度等を変化させて、格納容器模擬試験体（一次元形状と二次元形状の2種類、二次元形状は付図4-1を参照）に放出し、熔融物の拡がり挙動に関する基礎的なデータを収集した。実験条件を付表4-2に示す。また、熔融物の拡がりを解析するSPREAD コードが開発されている。熔融物が重力で拡がると仮定し、熱源として崩壊熱及び化学反応を考慮し、床コンクリートや上面の水プールへの伝熱を考慮し、質量、運動量及びエネルギーのバランスを解くことにより、熔融物の移動速度と熔融物厚さを求めている。（付図4-2参照）このモデルでは、流動限界固相率を超えた時点で流動が停止すると仮定されており、実験データを再現する流動限界固相率として55%が使用されている。二次元体系に対する実験結果と解析結果の比較を付図4-3に示すが、よい一致が示されている。</p>	<p>米国Brookhaven National Laboratoryにおいて実施されたBNL 実験^[3]においては、熔融物の過熱度と水深が、熔融炉心拡がり挙動において重要であると結論付けられている。熔融物の拡がりは、水への熱伝達による熔融物の温度の挙動と、熔融物の流体力学的挙動により制限されると結論付けられている。</p> <p>日立製作所において実施されたSPREAD 実験^[4]では、固化割合が約55%になった場合に熔融物の拡がりは停止しており、熔融物の拡がりは落下質量流量と熔融物の過熱度に影響されるとされている。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

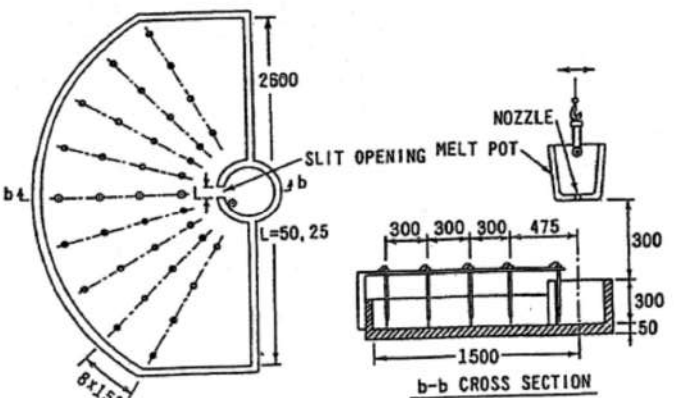
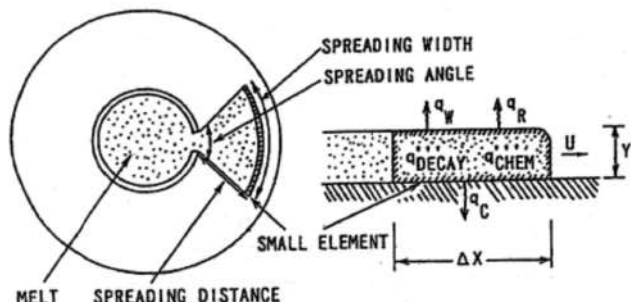
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>【比較のため掲載順を入替え】</p>		
<p>独カールスルーエ研究センター（FZK）で実施されたKATS 実験^{[23][29][30]}では、熔融物としてテルミット（Al₂O₃ 約150kg、Fe 約150kg）が使用され、熔融物の放出速度や温度、拡がり形状（1D, 2D）、床の材質（コンクリート、セラミック、コーティング）、水の有無をパラメータに熔融物の拡がり実験が行われている。実験装置を付図4-4及び付図4-5に示す。Al₂O₃とFeでは密度が異なり成層化するため、熔融物の出口を2箇所設け、最初にAl₂O₃が放出し、最後にFeを放出することにより酸化熔融物の拡がりや金属熔融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を付表4-3に示す。</p> <p>KATS-10とKATS-11の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-10の方は1mmの水張りをしてあり、KATS-11の方はドライ条件となっている。両者の拡がり結果を付図4-6に示すが、両ケースのように熔融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。</p>	<p>ドイツのカールスルーエ研究センター（FZK）において実施されたKATS 実験^[5]では、熔融物の放出速度が比較的大きい場合は、拡がり挙動は大きな影響を受けない（冷却水が無い場合と同様な拡がりになる）とされている。</p>	
<p>CEA/DRN/DTPで行われたCORINE 実験^[36]では、低融点物質（グリセロール他）を模擬物質として使用して、水中での拡がり挙動を調べる実験が実施され、拡がり先端の移動速度や底部に形成されるクラストの影響が調べられた。</p>	<p>CEA/DRN/DTPで行われたCORINE 実験^[6]では、低融点合金を模擬物質として使用して、底部でのクラスト形成を防止するために底部を熱くした試験が実施された。その結果、先端が著しく速く進展したことが示され、底部クラストによる減速効果が示された。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>付図4-1 溶融物拡がり実験の試験体（二次元形状）^[20]</p>  <p>付図4-2 SPREAD コードの概念図^[20]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由			
【比較のため掲載順を入替え】					
付図4-7 PULiMS 実験装置の概要図 ^[21]					
付表4-4 PULiMS 実験条件 ^[21]					
Parameter	PULiMS tests				
Melt material	E1	E2	E3	E4	E5
Melt mass composition, %	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ eutectic	B ₂ O ₃ -CaO non-eutectic	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ eutectic	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ eutectic	ZrO ₂ -WO ₃ eutectic
Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20
Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400
Initial melt volume, L	3	3	10	6	6
Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2
T _{sub} , °C	870	1027	870	870	1231
T _{hgt} , °C	870	1027	870	870	1231
Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531
Water pool depth, mm	200	200	200	200	200
Water temperature, °C	79	78	75	77	72

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">【比較のため掲載順を入替え】</p>  <p style="text-align: center;">付図4-8 PULiMS 実験E4 ケースの溶融物拡がり挙動のスナップ写真 [21]</p>  <p style="text-align: center;">付図4-9 PULiMS-E4 実験の固化デブリの性状写真 [21]</p>	 <p style="text-align: center;">Figure 40: The melt spread in PULiMS-E1 experiment (side view). The volatile particle debris have been removed while solidified core of the melt remained intact.</p> <p style="text-align: center;">図 2.1 PULiMS 試験において水中に落下させた溶融物</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>上記の水中での拡がり実験に対する実験条件を表2.1に整理する。</p> <p>上記知見等により、実機における水中における熔融炉心拡がり挙動及び形状は以下のとおりと考えられる。</p> <p>① 原子炉下部キャビティでの熔融炉心の拡がり挙動について</p> <p>原子炉下部キャビティ水中での熔融炉心の拡がり挙動は、熔融炉心の過熱状態及び熔融炉心の落下質量流量に影響される。原子炉下部キャビティ水中への熔融炉心落下後、熔融炉心の温度が高い状態では、固化割合が小さいため粘度が低く、拡がる速度は速くなる。その後、原子炉下部キャビティ水との熱交換により、熔融炉心の固化割合が増加するに従って、粘度が高くなることにより流動性が低くなり、熔融炉心の拡がりは減速され、その後停止する。</p> <p>② 原子炉下部キャビティでの熔融炉心の形状について</p> <p>原子炉下部キャビティ床に堆積した熔融炉心については、原子炉下部キャビティ水に落下する過程において、細粒化した熔融炉心が固化せずに接着すること、あるいはクラストが破碎することなどにより、多孔質層のクラストを形成する。熔融炉心は多孔質層を持ち上げそれと共に移動する場合や、上部クラストの下を移動する場合がある。熔融炉心層とコンクリートの間は、全面が密着しているわけではなく、部分的に密着せずにギャップが形成されている。これにより、側方から熔融物の下面へ水が浸入することによる冷却の可能性がある。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																																																																																																																																																																
<p>付図4-3 溶融物拡がり距離の実験値と解析値の比較^[20]</p>	<p>表 2.1 実験条件の整理</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>FULMIS 実験 (Sweden)</th> <th>S3E 実験 (Sweden)</th> <th>BNL 実験 (USA)</th> <th>SPREAD 実験 (Japan)</th> <th>CORINE 実験 (France)</th> <th>KATS 実験 (Germany)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>実験装置の特徴</td> <td>2D</td> <td>1D, 2D</td> <td>1D, 2D</td> <td>1D, 2D</td> <td>2D (19° 円分)</td> <td>1D, 2D</td> </tr> <tr> <td>溶融物材</td> <td>Bi2O3-WO3, 水 B2O3-CaO, 水</td> <td>ウッドメタル, 水 NaNO3-KNO3, オイル</td> <td>鉛, 水</td> <td>Steel, 水</td> <td>低融点合金, 水</td> <td>Iron, 水 Oxide, 水</td> </tr> <tr> <td>溶融物体積、質量</td> <td>2.7~3 m³</td> <td>3~19 liters</td> <td>~1 liters</td> <td>1~15 liters</td> <td>~50 liters</td> <td>140~160kg</td> </tr> <tr> <td>溶融物融点</td> <td>870~1027℃</td> <td>80~120℃ 280~364℃</td> <td>不明 (鉛の融点: 327.46℃)</td> <td>1,584~1,625K</td> <td>不明</td> <td>2,450K</td> </tr> <tr> <td>溶融物の流入方法</td> <td>ジェット 直径 20mm</td> <td>底部流入口*</td> <td>底部流入口*</td> <td>底部流入口* 入口幅 0.05m</td> <td>底部流入口*</td> <td>底部流入口*</td> </tr> <tr> <td>水深</td> <td>0.2m</td> <td>4.5~7.5cm</td> <td>不明</td> <td>不明</td> <td>不明</td> <td>1cm</td> </tr> </tbody> </table> <p>*) 非ジェット形状の底部からの流入</p>		FULMIS 実験 (Sweden)	S3E 実験 (Sweden)	BNL 実験 (USA)	SPREAD 実験 (Japan)	CORINE 実験 (France)	KATS 実験 (Germany)	実験装置の特徴	2D	1D, 2D	1D, 2D	1D, 2D	2D (19° 円分)	1D, 2D	溶融物材	Bi2O3-WO3, 水 B2O3-CaO, 水	ウッドメタル, 水 NaNO3-KNO3, オイル	鉛, 水	Steel, 水	低融点合金, 水	Iron, 水 Oxide, 水	溶融物体積、質量	2.7~3 m³	3~19 liters	~1 liters	1~15 liters	~50 liters	140~160kg	溶融物融点	870~1027℃	80~120℃ 280~364℃	不明 (鉛の融点: 327.46℃)	1,584~1,625K	不明	2,450K	溶融物の流入方法	ジェット 直径 20mm	底部流入口*	底部流入口*	底部流入口* 入口幅 0.05m	底部流入口*	底部流入口*	水深	0.2m	4.5~7.5cm	不明	不明	不明	1cm																																																																																																																																																																
	FULMIS 実験 (Sweden)	S3E 実験 (Sweden)	BNL 実験 (USA)	SPREAD 実験 (Japan)	CORINE 実験 (France)	KATS 実験 (Germany)																																																																																																																																																																																																												
実験装置の特徴	2D	1D, 2D	1D, 2D	1D, 2D	2D (19° 円分)	1D, 2D																																																																																																																																																																																																												
溶融物材	Bi2O3-WO3, 水 B2O3-CaO, 水	ウッドメタル, 水 NaNO3-KNO3, オイル	鉛, 水	Steel, 水	低融点合金, 水	Iron, 水 Oxide, 水																																																																																																																																																																																																												
溶融物体積、質量	2.7~3 m³	3~19 liters	~1 liters	1~15 liters	~50 liters	140~160kg																																																																																																																																																																																																												
溶融物融点	870~1027℃	80~120℃ 280~364℃	不明 (鉛の融点: 327.46℃)	1,584~1,625K	不明	2,450K																																																																																																																																																																																																												
溶融物の流入方法	ジェット 直径 20mm	底部流入口*	底部流入口*	底部流入口* 入口幅 0.05m	底部流入口*	底部流入口*																																																																																																																																																																																																												
水深	0.2m	4.5~7.5cm	不明	不明	不明	1cm																																																																																																																																																																																																												
<p>付表 4-2 SPREAD 実験条件^[19]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test No.</th> <th>Melt Mass (kg)</th> <th>Super Heat (K)</th> <th>Slit Width (m)</th> <th>Floor Material</th> <th>Nozzle Diam. (mm)</th> <th>Water Depth (mm)</th> <th>Water Added Position *</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>95.0</td><td>133</td><td>0.15</td><td>Concrete</td><td>70</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>2</td><td>7.5</td><td>77</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>3</td><td>24.0</td><td>149</td><td>↑</td><td>↑</td><td>30</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>4</td><td>43.0</td><td>115</td><td>0.05</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>5</td><td>19.0</td><td>110</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>6</td><td>66.0</td><td>107</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>7</td><td>115.0</td><td>135</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>8</td><td>66.0</td><td>112</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>9</td><td>94.2</td><td>110</td><td>0.025</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>10</td><td>60.2</td><td>86</td><td>0.05</td><td>MgO</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>11</td><td>93.4</td><td>122</td><td>↑</td><td>Concrete</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>12</td><td>67.0</td><td>115</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>13</td><td>93.1</td><td>116</td><td>0.025</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>14</td><td>68.1</td><td>130</td><td>0.05</td><td>↑</td><td>70</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>15</td><td>63.6</td><td>133</td><td>↑</td><td>↑</td><td>30</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>16</td><td>116.0</td><td>131</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>17</td><td>106.2</td><td>171</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>18</td><td>108.8</td><td>158</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>19</td><td>61.9</td><td>108</td><td>0.025</td><td>↑</td><td>↑</td><td>0</td><td>-</td></tr> <tr><td>20</td><td>64.0</td><td>91</td><td>0.05</td><td>↑</td><td>↑</td><td>10</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>21</td><td>69.1</td><td>107</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>22</td><td>65.0</td><td>90</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>70</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>23</td><td>60.0</td><td>94</td><td>0.025</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C</td></tr> <tr><td>24</td><td>65.0</td><td>125</td><td>0.05</td><td>↑</td><td>↑</td><td>40</td><td>O/C, I/C</td></tr> <tr><td>25</td><td>63.8</td><td>94</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>Spray</td><td>O/C</td></tr> </tbody> </table> <p>* O/C: Outside of Cylindrical Region I/C: Inside of Cylindrical Region</p>	Test No.	Melt Mass (kg)	Super Heat (K)	Slit Width (m)	Floor Material	Nozzle Diam. (mm)	Water Depth (mm)	Water Added Position *	1	95.0	133	0.15	Concrete	70	0	-	2	7.5	77	↑	↑	↑	0	-	3	24.0	149	↑	↑	30	0	-	4	43.0	115	0.05	↑	↑	0	-	5	19.0	110	↑	↑	↑	0	-	6	66.0	107	↑	↑	↑	40	O/C	7	115.0	135	↑	↑	↑	0	-	8	66.0	112	↑	↑	↑	0	-	9	94.2	110	0.025	↑	↑	0	-	10	60.2	86	0.05	MgO	↑	0	-	11	93.4	122	↑	Concrete	↑	40	O/C	12	67.0	115	↑	↑	↑	40	O/C	13	93.1	116	0.025	↑	↑	40	O/C	14	68.1	130	0.05	↑	70	0	-	15	63.6	133	↑	↑	30	0	-	16	116.0	131	↑	↑	↑	0	-	17	106.2	171	↑	↑	↑	0	-	18	108.8	158	↑	↑	↑	0	-	19	61.9	108	0.025	↑	↑	0	-	20	64.0	91	0.05	↑	↑	10	O/C	21	69.1	107	↑	↑	↑	40	O/C	22	65.0	90	↑	↑	↑	70	O/C	23	60.0	94	0.025	↑	↑	40	O/C	24	65.0	125	0.05	↑	↑	40	O/C, I/C	25	63.8	94	↑	↑	↑	Spray	O/C		
Test No.	Melt Mass (kg)	Super Heat (K)	Slit Width (m)	Floor Material	Nozzle Diam. (mm)	Water Depth (mm)	Water Added Position *																																																																																																																																																																																																											
1	95.0	133	0.15	Concrete	70	0	-																																																																																																																																																																																																											
2	7.5	77	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
3	24.0	149	↑	↑	30	0	-																																																																																																																																																																																																											
4	43.0	115	0.05	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
5	19.0	110	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
6	66.0	107	↑	↑	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
7	115.0	135	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
8	66.0	112	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
9	94.2	110	0.025	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
10	60.2	86	0.05	MgO	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
11	93.4	122	↑	Concrete	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
12	67.0	115	↑	↑	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
13	93.1	116	0.025	↑	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
14	68.1	130	0.05	↑	70	0	-																																																																																																																																																																																																											
15	63.6	133	↑	↑	30	0	-																																																																																																																																																																																																											
16	116.0	131	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
17	106.2	171	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
18	108.8	158	↑	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
19	61.9	108	0.025	↑	↑	0	-																																																																																																																																																																																																											
20	64.0	91	0.05	↑	↑	10	O/C																																																																																																																																																																																																											
21	69.1	107	↑	↑	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
22	65.0	90	↑	↑	↑	70	O/C																																																																																																																																																																																																											
23	60.0	94	0.025	↑	↑	40	O/C																																																																																																																																																																																																											
24	65.0	125	0.05	↑	↑	40	O/C, I/C																																																																																																																																																																																																											
25	63.8	94	↑	↑	↑	Spray	O/C																																																																																																																																																																																																											

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表



付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) EPR コアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験^{[23][29][30][36]}</p> <p>CEA/DRN/DTPで行われたCORINE 実験^[36]では、低融点物質（グリセロール他）を模擬物質として使用して、水中での拡がり挙動を調べる実験が実施され、拡がり先端の移動速度や底部に形成されるクラストの影響が調べられた。</p> <p>独カールスルーエ研究センター（FZK）で実施されたKATS 実験^{[23][29][30]}では、溶融物としてテルミット（Al_2O_3 約150kg、Fe 約150kg）が使用され、溶融物の放出速度や温度、拡がり形状（1D, 2D）、床の材質（コンクリート、セラミック、コーティング）、水の有無をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われている。実験装置を付図4-4及び付図4-5に示す。Al_2O_3とFeでは密度が異なり成層化するため、溶融物の出口を2箇所設け、最初にAl_2O_3が放出し、最後にFeを放出することにより酸化物溶融物の拡がりや金属溶融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を付表4-3に示す。</p> <p>KATS-10とKATS-11の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-10の方は1mmの水張りをしてあり、KATS-11の方はドライ条件となっている。両者の拡がり結果を付図4-6に示すが、両ケースのように溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。</p> <div data-bbox="235 646 896 1117" data-label="Diagram"> </div> <p>付図4-4 KATS 実験装置の概要図^[29]</p>		<p>※付録3-1 2.に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																				
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">(1D) (2D)</p> <p style="text-align: center;">付図4-5 KATS 実験の1D と2D の拡がり形状の写真^[30]</p> <p style="text-align: center;">付表4-3 KATS 実験条件と拡がり距離（酸化物溶融物、1D 拡がり）^[29]</p> <table border="1" data-bbox="174 963 1003 1275"> <thead> <tr> <th>Test #</th> <th>Substratum</th> <th>Mass in channel (kg)</th> <th>Temperature Melt (°C)</th> <th>Pouring rate (l/s) / Length in Time(s)</th> <th>Spreading length (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KATS-12</td> <td>Ceramics*)</td> <td>186</td> <td>2027</td> <td>12.7 → 0 l/s in 10 s</td> <td>11.7</td> </tr> <tr> <td>KATS-14</td> <td>Ceramics*)</td> <td>176</td> <td>1967</td> <td>2 → 1.2 l/s in 37 s</td> <td>7.2</td> </tr> <tr> <td>KATS-10</td> <td>Concrete 1mm Water (Epoxy)</td> <td>179</td> <td>2037</td> <td>12.4 → 0 l/s in 10s</td> <td>>12 first front 6.5 m main front</td> </tr> <tr> <td>KATS-11</td> <td>Concrete Dry (Epoxy)</td> <td>183</td> <td>2062</td> <td>12.7 → 0 l/s in 10s</td> <td>9.5 m first Front 6.8 m main front</td> </tr> <tr> <td>KATS-13</td> <td>Concrete Dry</td> <td>185</td> <td>2052</td> <td>12.7 → 0 l/s in 10s</td> <td>7.5</td> </tr> </tbody> </table> <p>*) Cordierite (Al₂O₃ 37 wt%, SiO₂ 52 wt%, MgO 6,5 wt%)</p>	Test #	Substratum	Mass in channel (kg)	Temperature Melt (°C)	Pouring rate (l/s) / Length in Time(s)	Spreading length (m)	KATS-12	Ceramics*)	186	2027	12.7 → 0 l/s in 10 s	11.7	KATS-14	Ceramics*)	176	1967	2 → 1.2 l/s in 37 s	7.2	KATS-10	Concrete 1mm Water (Epoxy)	179	2037	12.4 → 0 l/s in 10s	>12 first front 6.5 m main front	KATS-11	Concrete Dry (Epoxy)	183	2062	12.7 → 0 l/s in 10s	9.5 m first Front 6.8 m main front	KATS-13	Concrete Dry	185	2052	12.7 → 0 l/s in 10s	7.5		
Test #	Substratum	Mass in channel (kg)	Temperature Melt (°C)	Pouring rate (l/s) / Length in Time(s)	Spreading length (m)																																	
KATS-12	Ceramics*)	186	2027	12.7 → 0 l/s in 10 s	11.7																																	
KATS-14	Ceramics*)	176	1967	2 → 1.2 l/s in 37 s	7.2																																	
KATS-10	Concrete 1mm Water (Epoxy)	179	2037	12.4 → 0 l/s in 10s	>12 first front 6.5 m main front																																	
KATS-11	Concrete Dry (Epoxy)	183	2062	12.7 → 0 l/s in 10s	9.5 m first Front 6.8 m main front																																	
KATS-13	Concrete Dry	185	2052	12.7 → 0 l/s in 10s	7.5																																	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="188 204 981 539" data-label="Figure"> <p>The figure consists of two vertically stacked line graphs. The top graph is for KATS-10, labeled 'concrete, epoxy-coated' and '1mm of water'. The y-axis is 'Melt height [mm]' with values 25, 50, 75, 100. The x-axis is 'Channel length [m]' with values 0, 25, 50, 75, 100. The data points show a melt height that starts around 75mm, remains relatively stable until about 50m, then drops sharply to about 25mm at 75m, and then rises back to about 75mm at 100m. The bottom graph is for KATS-11, labeled 'concrete, epoxy-coated' and 'dry'. It has the same axes. The data points show a melt height that starts around 75mm, remains stable until about 50m, then drops to about 25mm at 75m, and then rises to about 50mm at 100m.</p> </div> <div data-bbox="286 544 907 571" data-label="Caption"> <p>付図4-6 KATS 実験の水の有無の影響（酸化物溶融物、1D 拡がり）^[29]</p> </div> <div data-bbox="145 646 448 673" data-label="Section-Header"> <p>(3) KTHの溶融物拡がり研究^{[21][27]}</p> </div> <div data-bbox="145 679 1048 842" data-label="Text"> <p>スウェーデンKTHでは、溶融物拡がりの小規模実験として、S3E 実験^[27]が行われている。種々の溶融物と冷却材の組合せ（例 ウッズメタル-水、塩（$\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$）-パラフィン）で溶融物温度、溶融物流量等をパラメータに、溶融物の拡がり挙動に関するデータが取られている。溶融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られており、溶融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、流量（慣性力）によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。</p> </div> <div data-bbox="145 849 1048 1082" data-label="Text"> <p>また、水中での溶融物拡がり挙動を調べるPULiMS 実験^[21]が実施されている。この実験では、浅い水プール（水深20cm）へ溶融した$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$合金を流入させ、その拡がり挙動が観察された。実験装置を付図4-7に示し、実験条件を付表4-4に示す。水中へ流入した溶融物の拡がりの様子を付図4-8に示す。また、固化したデブリ層の性状を付図4-9に示す。固化したデブリ層は3層を形成し、デブリ層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており、水又は蒸気が存在していた可能性がある。3層の最下層は薄い1.5-2mmのケーキ（クラスト）層で空隙はなく、中間層は割れ目や細長い孔が含まれている。最上部は不規則な構造で高多孔性である。</p> </div>		<p>※付録3-1 2.に記載</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																														
<p>付図4-7 PULiMS 実験装置の概要図^[21]</p>																																																																																
<p>付表4-4 PULiMS 実験条件^[21]</p>																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th colspan="5">PULiMS tests</th> </tr> <tr> <th></th> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>E3</th> <th>E4</th> <th>E5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Melt material</td> <td>Bi₂O₃-WO₃</td> <td>B₂O₃-CaO</td> <td>Bi₂O₃-WO₃</td> <td>Bi₂O₃-WO₃</td> <td>ZrO₂-WO₃</td> </tr> <tr> <td>Melt mass composition, %</td> <td>42.64-57.36 eutectic</td> <td>30-70 non-eutectic</td> <td>42.64-57.36 eutectic</td> <td>42.64-57.36 eutectic</td> <td>15.74-84.26 eutectic</td> </tr> <tr> <td>Melt jet diameter, mm</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Jet free fall height, mm</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>Initial melt volume, L</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>10</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Initial melt mass, kg</td> <td>23.4</td> <td>7.5</td> <td>78.1</td> <td>46.9</td> <td>41.2</td> </tr> <tr> <td>T_{sub}, °C</td> <td>870</td> <td>1027</td> <td>870</td> <td>870</td> <td>1231</td> </tr> <tr> <td>T_{top}, °C</td> <td>870</td> <td>1027</td> <td>870</td> <td>870</td> <td>1231</td> </tr> <tr> <td>Melt temperature in the funnel upon pouring, °C</td> <td>1006</td> <td>1350</td> <td>1076</td> <td>940</td> <td>1531</td> </tr> <tr> <td>Water pool depth, mm</td> <td>200</td> <td>200</td> <td>200</td> <td>200</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>Water temperature, °C</td> <td>79</td> <td>78</td> <td>75</td> <td>77</td> <td>72</td> </tr> </tbody> </table>	Parameter	PULiMS tests						E1	E2	E3	E4	E5	Melt material	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	B ₂ O ₃ -CaO	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃	Melt mass composition, %	42.64-57.36 eutectic	30-70 non-eutectic	42.64-57.36 eutectic	42.64-57.36 eutectic	15.74-84.26 eutectic	Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20	Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400	Initial melt volume, L	3	3	10	6	6	Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2	T _{sub} , °C	870	1027	870	870	1231	T _{top} , °C	870	1027	870	870	1231	Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531	Water pool depth, mm	200	200	200	200	200	Water temperature, °C	79	78	75	77	72		
Parameter	PULiMS tests																																																																															
	E1	E2	E3	E4	E5																																																																											
Melt material	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	B ₂ O ₃ -CaO	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃																																																																											
Melt mass composition, %	42.64-57.36 eutectic	30-70 non-eutectic	42.64-57.36 eutectic	42.64-57.36 eutectic	15.74-84.26 eutectic																																																																											
Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20																																																																											
Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400																																																																											
Initial melt volume, L	3	3	10	6	6																																																																											
Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2																																																																											
T _{sub} , °C	870	1027	870	870	1231																																																																											
T _{top} , °C	870	1027	870	870	1231																																																																											
Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531																																																																											
Water pool depth, mm	200	200	200	200	200																																																																											
Water temperature, °C	79	78	75	77	72																																																																											

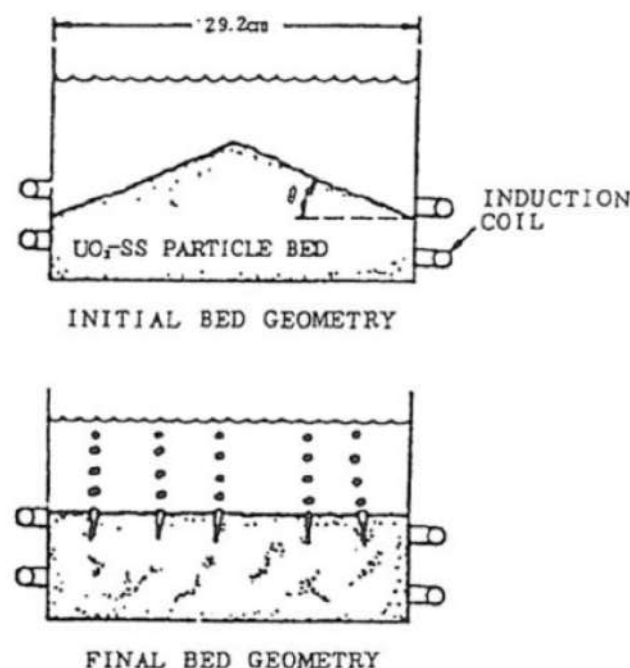
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="280 542 907 566">付図4-8 PULiMS 実験E4 ケースの溶融物拡がり挙動のスナップ写真 [21]</p>  <p data-bbox="358 1252 840 1284">付図4-9 PULiMS-E4 実験の固化デブリの性状写真 [21]</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 粒子状ベッドの拡がり^[22]</p> <p>ANLでは、水プール中に不均質に堆積させたデブリベッドが、内部の沸騰により均一化する様子を確認するため、水プール中にUO₂、SUS、Cuの0.2～1mm程度の粒子ベッドを非均一の厚さに堆積させ、誘導加熱により崩壊熱発生を模擬させた実験^[22]を行っている。付図4-10に粒子ベッド厚さの均一化の概念図を示す。非均一の厚さに堆積した粒子ベッドは、誘導加熱により粒子ベッド内に沸騰が生じ、粒子が吹き上げられて再堆積する過程で厚さが均一化し、均一化に要した時間は2～3分程度であると報告されている。</p>  <p>付図4-10 セルフレベリング実験におけるデブリベッドの均一化の概念図^[22]</p>		<p>※3.1 (9) に記載</p>

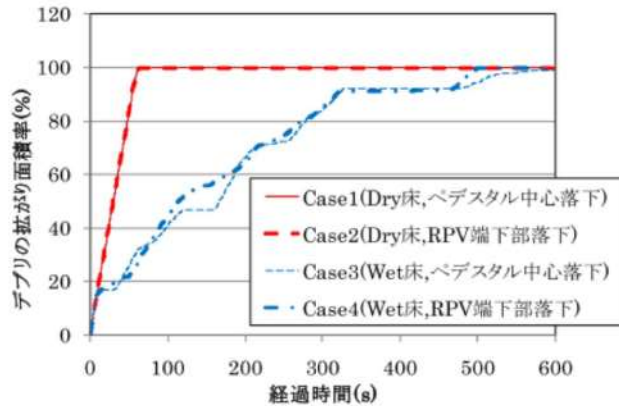
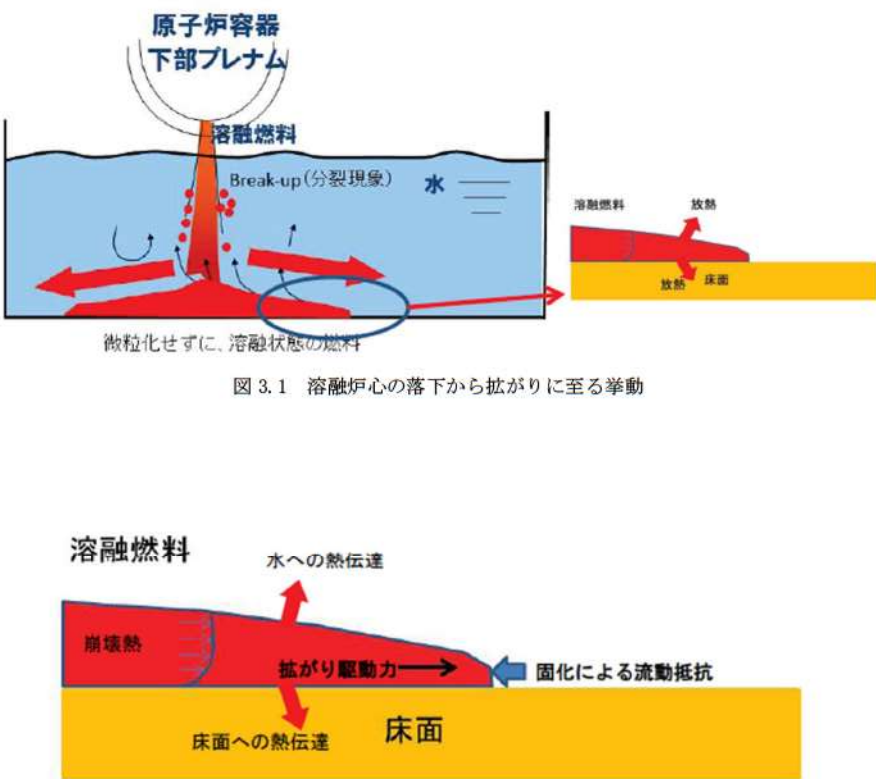
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																														
<p>(5) 溶融物の拡がり解析^{[20][27][28][39][40]}</p> <p>溶融物の拡がり挙動の解析のために、種々の解析コードが提案されている。主要なものを付表4-5に示す。これらの解析コードは、実験データを元に検証が行われている。また、実験と実機条件とを関連づけるスケーリング則の提案も行われている。^{[20][27][28]}</p> <p>付表4-5 溶融物拡がり挙動の主な解析コード^[27]</p> <table border="1" data-bbox="154 416 1039 730"> <thead> <tr> <th>Code</th> <th>Country</th> <th>Model characteristics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CORFLOW *</td> <td>Germany</td> <td>2D - mechanistic</td> </tr> <tr> <td>CROCO</td> <td>France</td> <td>Simplified (ISPN)</td> </tr> <tr> <td>LAVA *</td> <td>Japan</td> <td>2D - Bingham fluid</td> </tr> <tr> <td>MELTSREAD *</td> <td>USA</td> <td>1D - complex physics and chemistry</td> </tr> <tr> <td>MECO</td> <td>Germany</td> <td>Mechanistic (Ruhr Univ.)</td> </tr> <tr> <td>RASPLAV / SPREAD</td> <td>Russia</td> <td>2D - hydrodynamic</td> </tr> <tr> <td>SPREAD</td> <td>Japan</td> <td>simplified</td> </tr> <tr> <td>THEMA *</td> <td>France</td> <td>phenomenological (CEA/DRN)</td> </tr> <tr> <td>Footnote</td> <td colspan="2">* Code receiving International recognition</td> </tr> </tbody> </table> <p>a) 三次元溶融物拡がり解析例</p> <p>溶融物の拡がり挙動を三次元で評価した例もある。付図4-11に示すとおり過酷事故解析コードSAMPSONのデブリ拡がりモジュール(DSA)^[39]を使用して、ABWRの格納容器ペDESTAL上におけるデブリ拡がり評価を実施している^[40]。床面に200mmの水位がある条件(Wet床条件)で、制御棒駆動機構ハウジング1本の破損を想定して、全炉心相当の溶融炉心がペDESTAL(半径約5.3m)へ落下する場合の溶融炉心の床上の拡がり面積を評価している。床面に水が存在する場合でも、溶融炉心は落下位置に依らずペDESTALのほぼ全面に拡がり、最終的な堆積高さは400~500mm程度となる結果を得ている。</p>	Code	Country	Model characteristics	CORFLOW *	Germany	2D - mechanistic	CROCO	France	Simplified (ISPN)	LAVA *	Japan	2D - Bingham fluid	MELTSREAD *	USA	1D - complex physics and chemistry	MECO	Germany	Mechanistic (Ruhr Univ.)	RASPLAV / SPREAD	Russia	2D - hydrodynamic	SPREAD	Japan	simplified	THEMA *	France	phenomenological (CEA/DRN)	Footnote	* Code receiving International recognition		<p>3. 水中での拡がり挙動の概要及び相関式</p> <p>(1) 水中での溶融炉心拡がり挙動の概要</p> <p>下部プレナムから流出した溶融炉心は、水中に落下する過程において一部が細粒化し、大部分は液体の状態で原子炉下部キャビティ床に堆積する。原子炉下部キャビティ床に堆積した溶融炉心は、重力の影響で拡がるが、原子炉下部キャビティ水及び床面で除熱されることで固化が進み、やがて拡がり停止する。</p> <p>PULiMS 実験により得られた知見より、原子炉下部キャビティ内での最終的な溶融炉心の拡がりの大きさは、以下のパラメータにより決定されると考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・拡がり駆動力 <p>溶融炉心と水との密度差により、溶融炉心には水中を拡がる駆動力が生じる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・拡がり抑制力 <p>床面上に形成されたクラストによる減速効果が働くこと、及び溶融炉心の固化が進むことにより、溶融炉心の粘度が増加し、溶融炉心の拡がりを抑制する力が生じる。</p> <p>上記のとおり、溶融炉心の拡がりの大きさは、溶融炉心と水の密度差による拡がりの駆動力の時間スケールと、溶融炉心の固化の時間スケールとの競合によって決まり、固化が早ければ拡がりが抑制され、あまり拡がらずに固化してしまい、固化が遅くなれば、拡がりは大きくなる傾向となる。図3.1及び図3.2に以上の挙動の模式図を示す。</p>	<p>※BWR固有の解析</p>
Code	Country	Model characteristics																														
CORFLOW *	Germany	2D - mechanistic																														
CROCO	France	Simplified (ISPN)																														
LAVA *	Japan	2D - Bingham fluid																														
MELTSREAD *	USA	1D - complex physics and chemistry																														
MECO	Germany	Mechanistic (Ruhr Univ.)																														
RASPLAV / SPREAD	Russia	2D - hydrodynamic																														
SPREAD	Japan	simplified																														
THEMA *	France	phenomenological (CEA/DRN)																														
Footnote	* Code receiving International recognition																															

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>付図 4-11 ABWRを対象にした三次元溶融炉心拡がり評価結果例（SAMPSONコード）^[40]</p>	 <p>図 3.1 溶融炉心の落下から拡がりに至る挙動</p> <p>図 3.2 溶融炉心の拡がりに係る熱伝達及び流体力学的挙動</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>b) スケーリング則を用いた溶融物拡がり相関式</p> <p>(3) に示した PULiMS 実験の結果を元に、水中での溶融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案されている^[28]。これは、障害物のない水平な床面に落下した溶融物の拡がり停止後の平均厚さや拡がり距離を求める相関式である。一般的に、溶融物の拡がり挙動は、溶融物の堆積高さに対応した重力による拡がり、溶融物冷却に伴う粘性増加による流動性低下の競合する二つのプロセスにより支配される。（付図4-12参照）</p> <p>スケーリング則では、競合する二つのプロセスの時間スケールとして、流体力学的拡がり時間 τ_{conv} を、拡がり停止後の平均厚さ δ_v に達するまでの時間と定義し、固化時間 τ_{solid} を、溶融物が冷却され固化するまでの時間と定義し、これらの時間の比を、拡がりの無次元時間スケール $T (= \tau_{conv} / \tau_{solid})$ と定義している。また、拡がり停止後の平均厚さ δ_v と表面張力とのバランスで決まる厚さ δ_{cap} の比を、無次元長さスケール $L (= \delta_v / \delta_{cap})$ と定義している。</p> <p>障害物のない水平な床を想定し、落下した溶融物が軸対称に拡がると仮定すると、無次元長さスケール L は、無次元時間スケール T を用いて(1)式で表されるとしている。</p> <p>添え字の i は 慣性力支配流れの値を示し、v は粘性力支配流れの値を示している。</p> $Lv = Cv \cdot T^{1/2} \cdot N^{1/2} \quad (1)$ <p>また、拡がり距離 $r(t)$ と拡がり時間 t の関係は、以下のように表されるとしている。</p> <p>慣性力支配流れの場合 $r_i(t) = \beta_i \cdot t^{3/4} \quad (2)$</p> <p>粘性力支配流れの場合 $r_v(t) = \beta_v \cdot t^{1/2} \quad (3)$</p>	<p>(2) 水中での溶融炉心拡がり長さ^{[7][8][9]}と時間の相関式</p> <p>文献^[7]では、溶融炉心の水中での拡がり挙動を以下のとおり定式化している。</p> <p>液相として床に堆積した溶融炉心が拡がる際の最終的な厚さ δ_{sp} は溶融炉心拡がり無次元時間 T から(1)の相関式で表される。</p> $\frac{\delta_{sp}}{\delta_{cap}} = CT^{0.5} N^{0.5} \quad (1)$ <p>δ_{sp}：溶融炉心の最終厚さ δ_{cap}：表面張力による最小厚さ $(= 2\sqrt{\sigma/\rho_m g})$</p> <p>$C$：比例定数 T：溶融炉心拡がり無次元時間 $(= \tau_{conv} / \tau_{solid})$</p> <p>$N$：重力-慣性力支配流れの時1、重力-粘性力支配流れの場合 $= \left(\frac{V_{tot}}{\pi \delta_{cap}}\right)^{1/3} \frac{\beta_i^{4/3}}{\beta_v^2}$</p> <p>$\tau_{conv}$：溶融炉心拡がり特性時間 $(s) = \left(\frac{r_{sp}}{\beta_v}\right)$</p> <p>$\tau_{solid}$：溶融炉心固化特性時間 $(s) = \delta_{cap} \rho_m \frac{C_{p,m} \Delta T_{sup} + \eta H_f}{q_{up} + q_{dn} - q_v \delta_{cap}}$</p> <p>(1) 式より、溶融炉心の拡がる際の最終的な厚さが算出され、この値と溶融炉心の落下量から、溶融炉心の拡がり長さ（拡がりの直径）が算出できる。</p> <p>また、拡がり長さ $r_v(t)$ と拡がり時間 t の関係は(2)式より表されるため、拡がり時間は(2)式で算出することができる。</p> $r_v(t) = \beta_v t^{0.5} \quad (2)$ <p>$\beta_{i,v}$：デブリ広がり係数 $\beta_v = \left(\frac{gG^3}{v}\right)^{0.125} \beta_i = 0.84(gG)^{0.25}$</p> <p>$r_{sp}$：幾何的に可能な最大拡がり径(m) ΔT_{sup}：溶融炉心過熱度(K) $C_{p,m}$：溶融炉心比熱(J/kg/K) q_{up}：溶融炉心上面の熱流束（放射及び対流熱伝達）(W/m²) q_{dn}：溶融炉心下面の熱流束（対流熱伝達）(W/m²) q_v：単位体積当たりの崩壊熱(W/m³) H_f：溶融炉心の溶融潜熱(J/kg)</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ここで、</p> <p>δ_{cap}：表面張力とバランスする厚さ（$= 2\sqrt{\sigma/\rho_m g'}$）</p> <p>$C_f$：比例定数。PULiMS 実験より、$C_f=1.30$ が得られている。</p> <p>N：粘性因子（$= \frac{\tau_{conv,v}}{\tau_{conv,l}} \cdot \frac{\delta_{cap}}{\delta_{cap}}$）</p> <p>$\beta$：拡がり係数 $\beta_i = 0.84(g' G)^{1/4}$, $\beta_v = 0.67\left(\frac{g' G^2}{v}\right)^{1/8}$</p> <p>$\tau_{solid}$：デブリ固化特性時間(s) $(= \delta_{cap} \cdot \rho_m \cdot \frac{C_{p,m} \Delta T_{sup} + \eta H_f}{q_{up}^* + q_{dn}^* - q_w - \delta_{cap}})$</p> <p>$\Delta T_{sup}$：デブリ過熱度(K) , $C_{p,m}$：デブリ比熱(J/kg/K)</p> <p>q_{up}^*：デブリ上面の熱流束（放射及び対流熱伝達）(W/m²)</p> <p>q_{dn}^*：デブリ下面の熱流束（対流熱伝達）(W/m²)</p> <p>q_w：単位体積当たりの崩壊熱(W/m³)</p> <p>H_f：デブリの熔融潜熱(J/kg) , η：流動停止までの有効潜熱割合(-)</p> <p>σ：デブリ表面張力(N/m) , ρ_m：デブリ密度(kg/m³) , ρ_w：水の密度(kg/m³)</p> <p>g：重力加速度(m/s²) , v：デブリの動粘性係数(m²/s)</p> <p>g'：水中における重力加速度の補正（$= g(\rho_m - \rho_w)/\rho_m$）(m/s²)</p> <p>$V_{tot}$：デブリ体積(m³)（$= \frac{m(1-f_m)}{\rho_m}$）, m：デブリ質量(kg)</p> <p>G：エントレインされなかった連続体デブリの体積流量(m³/s)（$= \frac{V_{tot}}{t_{rel}}$）</p> <p>$t_{rel}$：原子炉圧力容器からの熔融炉心放出時間(s)</p> <p>f_m：デブリ落下時のエントレイン割合(-)</p> <p>ρ'_m：有効デブリ密度(kg/m³)（$= \rho_m(1 - \epsilon_m)$）, ϵ_m：デブリポイド分率(-)</p> <p>(1)式は、拡がり停止時のデブリ平均厚さが、無次元時間スケール（= 熔融物の拡がり時間/固化時間）の平方根に比例することを意味しており、熔融物の拡がりが遅いほど、固化するまでの時間が短いほど、無次元時間は大きくなり、結果として、拡がり停止時の平均厚さが大きく、拡がり面積は小さくなる傾向を示している。逆に、熔融物の拡がり早いほど、固化までの時間が長いほど、無次元時間は小さくなり、平均厚さが薄くなり、拡がり距離は大きくなる。このスケールリング則について、PULiMS 実験との比較が行われており、付図 4-13 に、実験結果とスケールリング則による評価との比較を示すが、概ね一致している結果が得られている。</p> <p>上記のスケールリング則の式より、$\tau_{conv,v}$及びNは次式のように得られる。</p>	<p>η：有効潜熱割合(-)</p> <p>σ：熔融炉心表面張力(N/m)</p> <p>ρ_m：熔融炉心密度(kg/m³)</p> <p>ρ_w：水の密度(kg/m³)</p> <p>g'：水中における重力加速度の補正（$= g(\rho_m - \rho_w)/\rho_m$）(m/s²)</p> <p>$g$：重力加速度(m/s²)</p> <p>$v$：熔融炉心の動粘性係数(m²/s)</p> <p>V_{tot}：熔融炉心体積(m³)（$= \frac{m(1-f_m)}{\rho_m}$）</p> <p>$m$：熔融炉心質量(kg)</p> <p>$G$：エントレインされなかった連続体熔融炉心の体積流量(m³/s)（$= \frac{V_{tot}}{t_{rel}}$）</p> <p>$t_{rel}$：原子炉容器からのデブリ放出時間(s)</p> <p>f_m：熔融炉心落下時のエントレイン割合(-)</p> <p>ρ'_m：有効熔融炉心密度(kg/m³)（$= \rho_m(1 - \epsilon_m)$）</p> <p>ϵ_m：熔融炉心ポイド率(-)</p> <p>この相関式は、最終的な熔融燃料の拡がり時の厚さδ_{sp}が、無次元時間（熔融炉心の拡がり時間÷熔融炉心が固化するまでの時間）の平方根に比例することを意味している。熔融炉心の拡がり遅い、又は固化するまでの時間が短い場合には、無次元時間Tは大きくなり、結果として、拡がり時の最終的な厚さδ_{sp}が大きくなり、結果として拡がり面積は小さくなる。逆に、熔融炉心の拡がり早い、又は固化までの時間が長い場合には、無次元時間Tは小さくなり、熔融炉心の厚さが薄くなるため、拡散が進む方向となる。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

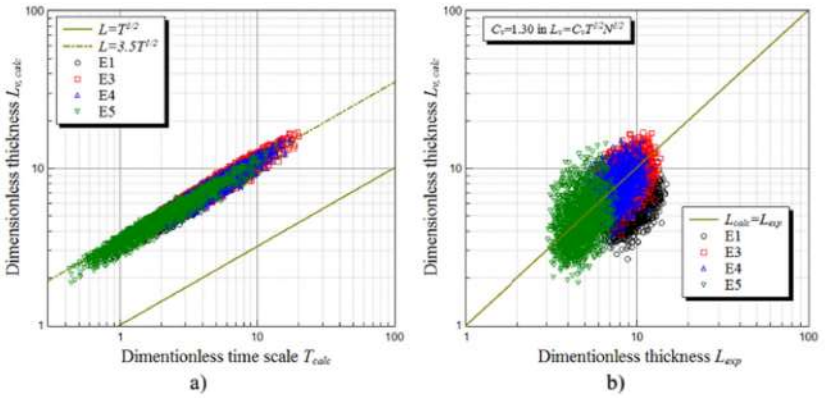
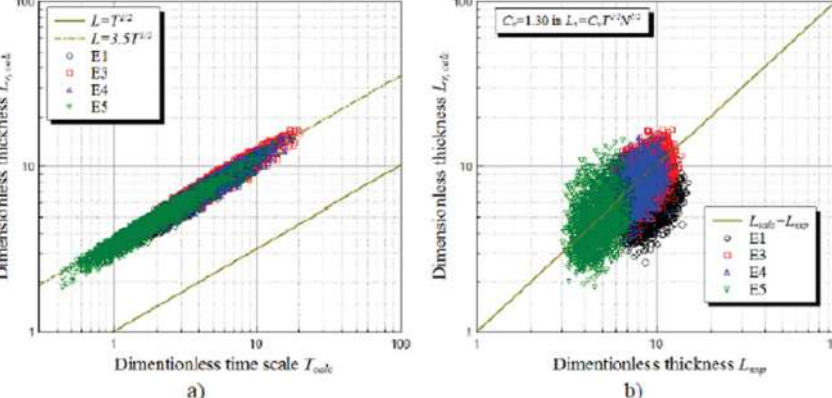
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="241 204 880 279" data-label="Equation-Block"> $\tau_{conv,v} = \left(\frac{V_{tot} \tau_{solid}^{1/2}}{\pi \beta_v^2 \delta_{cap} C_p N^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (4)$ </div> <div data-bbox="241 311 880 370" data-label="Equation-Block"> $N = \left(\frac{V_{tot}}{\pi \delta_{cap}} \right)^{1/3} \frac{\beta_l^{4/3}}{\beta_v^2} \quad (5)$ </div> <div data-bbox="156 379 866 411" data-label="Text"> <p>(4)式及び(5)式により$\tau_{conv,v}$が求まり、次式で拡がり距離が得られる。</p> </div> <div data-bbox="253 419 880 453" data-label="Equation-Block"> $r_v(\tau_{conv,v}) = \beta_v \cdot \tau_{conv,v}^{1/2} \quad (6)$ </div> <div data-bbox="156 544 1048 775" data-label="Text"> <p>BWRの溶融物条件（付表4-6参照）を用いて、上記のPULiMS スケーリング則を適用し、(6)式により溶融物の拡がり半径を評価した。付図4-14に評価結果を示す。制御棒駆動機構ハウジング破損時の溶融物落下質量速度である約8500kg/sの場合、約18mの拡がり半径を得る。溶融物質量を減らして落下質量速度を減らすと、拡がり距離は減少するが、BWR条件の落下質量速度の1/10にしても、まだ、ペDESTAL半径（Mark-I改の場合約3.2m）を超えた拡がり半径を得る。したがって、PULiMS スケーリング則を適用しても、BWRの溶融物条件では、溶融物はペDESTAL床全面に拡がる結果となる。</p> </div> <div data-bbox="224 823 967 1206" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="246 1225 940 1252" data-label="Caption"> <p>付図4-12 溶融炉心の拡がりに関わる熱伝達及び流体力学的な力を示す模式図</p> </div>	<div data-bbox="1075 167 1960 263" data-label="Text"> <p>さらに、上記の拡がりモデルについては、PULiMS 試験との比較により、その妥当性が示されており、図3.3に示すとおり、実験で得られたデータと評価モデルとの比較が実施され、概ね一致している。</p> </div> <div data-bbox="1075 271 1960 335" data-label="Text"> <p>実機評価においては、各入力パラメータに対する実機での条件を適切に与えることにより、拡がり挙動について解析を実施する。</p> </div>	<div data-bbox="1971 542 2116 574" data-label="Text"> <p>※BWR固有の解析</p> </div>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="219 646 974 678">付図4-13 PULiMS 実験を対象にしたスケーリング則による評価と実験結果の比較^[28]</p>	 <p data-bbox="1265 646 1713 678">図3.3 拡がりモデルとPULiMS試験結果との比較</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																		
<div data-bbox="183 178 586 264" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 20px;"> 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。 </div> <div data-bbox="362 341 815 367" style="text-align: center;"> 付表4-6 BWR溶融物条件（BWR5 Mark-I改） </div> <div data-bbox="244 379 954 745" style="border: 2px solid black; height: 229px; margin-bottom: 20px;"> <!-- Intentionally blank content for the missing table --> </div> <div data-bbox="224 793 981 1292"> <table border="1" style="display: none;"> <caption>Data for Figure 4-14</caption> <thead> <tr> <th>溶融物落下質量速度 (kg/s)</th> <th>拡がり距離 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>~5</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>~8</td> </tr> <tr> <td>4000</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>6000</td> <td>~15</td> </tr> <tr> <td>8000</td> <td>~17</td> </tr> <tr> <td>8500 (BWR条件)</td> <td>~17.5</td> </tr> <tr> <td>10000</td> <td>~18</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div data-bbox="219 1327 956 1355" style="margin-top: 10px;"> 付図4-14 溶融物落下質量速度と拡がり距離の関係（PULiMS スケーリング則適用） </div>	溶融物落下質量速度 (kg/s)	拡がり距離 (m)	0	0	1000	~5	2000	~8	4000	~12	6000	~15	8000	~17	8500 (BWR条件)	~17.5	10000	~18		<p>※BWR固有の解析</p>
溶融物落下質量速度 (kg/s)	拡がり距離 (m)																			
0	0																			
1000	~5																			
2000	~8																			
4000	~12																			
6000	~15																			
8000	~17																			
8500 (BWR条件)	~17.5																			
10000	~18																			

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>4. 実機評価</p> <p>これまでの実験の知見から、デブリジェットが原子炉下部キャビティ床に到達するまでの落下過程において冷却されず高温のまま床に到達する場合には、熔融炉心の拡がりは大きくなり、反対に、熔融炉心が落下時に細粒化などにより冷却が進む場合には、熔融炉心の拡がりは小さくなると考えられる。図4.1及び図4.2にそれぞれの場合の模式図を示す。感度解析では、これらのケースに対する熔融炉心の拡がり面積を算出し、MAAPコードの解析の入力条件とする。</p> <div data-bbox="1205 427 1814 662" data-label="Image"> </div> <p>図4.1 落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース （熔融炉心からの除熱が進まず、固化割合が小さいため拡がりが大きくなる。）</p> <div data-bbox="1124 833 1870 1077" data-label="Image"> </div> <p>図4.2 落下時に細粒化などにより冷却が進むケース （熔融炉心からの除熱が進み、固化割合が大きくなるため拡がり抑制される。）</p> <p>表4.1に1回目の原子炉容器破損時の熔融炉心落下条件について示す。また、表4.2に落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースと落下時に細粒化などにより冷却が進むケースの細粒化割合と過熱度の熱損失をまとめたものである。</p> <p>前者のケースでは、デブリジェットが原子炉下部キャビティ床に到達するまでの落下過程において、熔融炉心の冷却が進まないような条件として、細粒化無しとし、また、落下過程における熔融炉心-原子炉下部キャビティ水間の熱伝達による熔融炉心の熱損失も無しとしている。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 熔融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																		
	<p>一方、後者のケースでは、デブリジェットが原子炉下部キャビティ床に到達するまでの落下過程において、熔融炉心の冷却が進むような条件として、細粒化割合はSaitoの相関式¹⁰⁾を用い、また、熔融炉心の熱損失については、熔融炉心の過熱度分がすべて水と熱交換するとしている。</p> <p>評価結果を表4.3に示す。拡がり直径については、前者のケースで約7.7m、後者のケースで約1.5mとなった。</p> <p style="text-align: center;">表4.1 熔融炉心放出時のパラメータ</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>メルト質量 [kg]</td><td>48,600</td></tr> <tr><td>放出時間 [s]</td><td>100</td></tr> <tr><td>メルト温度 [K]</td><td>2,554.05</td></tr> <tr><td>冷却水温度 [K]</td><td>408.05</td></tr> <tr><td>メルト密度 [kg/m³]</td><td>8,463.1</td></tr> <tr><td>冷却水密度 [kg/m³]</td><td>931</td></tr> <tr><td>ジェット径 [m]</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>ジェット粘性係数 [Pa*s]</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>ジェット表面張力 [N/m]</td><td>1</td></tr> <tr><td>メルト比熱 [J/kg/K]</td><td>484.6</td></tr> <tr><td>冷却水比熱 [J/kg/K]</td><td>4,280</td></tr> <tr><td>単位質量当たりの崩壊熱 [W/kg]</td><td>264.2</td></tr> <tr><td>固化温度 (T_{sol}) [K]</td><td>2,308.25</td></tr> <tr><td>液化温度 (T_{liq}) [K]</td><td>2,308.25</td></tr> <tr><td>メルト融解熱 [J/kg]</td><td>326.415</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表4.2 各ケースに対する主な入力パラメータ</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース</th> <th>落下時に細粒化などにより冷却が進むケース</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>メルト細粒化割合 [-]</td> <td>0.0</td> <td>0.66</td> </tr> <tr> <td>ジェット冷却による過熱度の熱損失 [K]</td> <td>0</td> <td>245.8</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表4.3 熔融炉心の拡がり評価結果</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース</th> <th>落下時に細粒化などにより冷却が進むケース</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>拡がり直径 [m]</td> <td>約7.7</td> <td>約1.5</td> </tr> <tr> <td>拡がり面積 [m²]</td> <td>約47</td> <td>約1.8</td> </tr> </tbody> </table>	項目	値	メルト質量 [kg]	48,600	放出時間 [s]	100	メルト温度 [K]	2,554.05	冷却水温度 [K]	408.05	メルト密度 [kg/m ³]	8,463.1	冷却水密度 [kg/m ³]	931	ジェット径 [m]	0.4	ジェット粘性係数 [Pa*s]	10.5	ジェット表面張力 [N/m]	1	メルト比熱 [J/kg/K]	484.6	冷却水比熱 [J/kg/K]	4,280	単位質量当たりの崩壊熱 [W/kg]	264.2	固化温度 (T _{sol}) [K]	2,308.25	液化温度 (T _{liq}) [K]	2,308.25	メルト融解熱 [J/kg]	326.415		落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース	メルト細粒化割合 [-]	0.0	0.66	ジェット冷却による過熱度の熱損失 [K]	0	245.8		落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース	拡がり直径 [m]	約7.7	約1.5	拡がり面積 [m ²]	約47	約1.8	
項目	値																																																			
メルト質量 [kg]	48,600																																																			
放出時間 [s]	100																																																			
メルト温度 [K]	2,554.05																																																			
冷却水温度 [K]	408.05																																																			
メルト密度 [kg/m ³]	8,463.1																																																			
冷却水密度 [kg/m ³]	931																																																			
ジェット径 [m]	0.4																																																			
ジェット粘性係数 [Pa*s]	10.5																																																			
ジェット表面張力 [N/m]	1																																																			
メルト比熱 [J/kg/K]	484.6																																																			
冷却水比熱 [J/kg/K]	4,280																																																			
単位質量当たりの崩壊熱 [W/kg]	264.2																																																			
固化温度 (T _{sol}) [K]	2,308.25																																																			
液化温度 (T _{liq}) [K]	2,308.25																																																			
メルト融解熱 [J/kg]	326.415																																																			
	落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース																																																		
メルト細粒化割合 [-]	0.0	0.66																																																		
ジェット冷却による過熱度の熱損失 [K]	0	245.8																																																		
	落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース																																																		
拡がり直径 [m]	約7.7	約1.5																																																		
拡がり面積 [m ²]	約47	約1.8																																																		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>5.参考文献</p> <p>[1] Pavel Kudinov, et al., " Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction," The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.</p> <p>[2] Sehgal, B.R., Dinh, T.N., Green, J.A., Konovalikhin, M.J., Paladino, D., Leung, W.H., Gubaidulin, A.A., " Experimental Investigation of Melt Spreading in One-Dimensional Channel" , RIT/NPS Research Report for European Union EU-CSC-1D1-97, 86p., 1997.</p> <p>[3] Greene, G.A., Finrock, C., Klages, J., and Schwarz, C.E., " Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling Heat Transfer and Coolant Layer Boiling," Proceedings of 16th Water Reactor Safety Meeting, NUREG/CP-0096, pp. 341-358, (1988).</p> <p>[4] Suzuki, H., et al., " Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floor," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, pp. 403-407, (1993).</p> <p>[5] Fieg, G., et al., " Simulation Experiments on the Spreading Behavior of Molten Core Debris" , Proceedings of the 1996 National Heat Transfer Conference, in the session " Fundamental Phenomena in Severe Accidents" , Houston, Texas, August 3-6, 1996, HTC-Vol.9, pp.121-129.</p> <p>[6] Alsmeyer H., et al., " Overview on the Results of the RCA Project on Molten Core - Concrete Interactions" , FISA-95 Proceedings, Luxemburg, EUR 16896 EN, pp.231-255 (1996).</p> <p>[7] Konovalenko A. and Kudinov P., "Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water," Proceedings of The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, N9P0302, 2012.</p> <p>[8] Dinh, T.N. Konovalikhin, M. J., Sehgal, B. R., " Core melt spreading on a reactor containment floor" , Progress in Nuclear Energy, 36(4), pp.405-468, (2000).</p> <p>[9] Maxim J.K., Investigations on Melt Spreading and Coolability in a LWR Severe Accident, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, 2001.</p> <p>[10] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, " Experimental Study on Penetration Behavior of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen," ANS Proc. of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, USA, (1988).</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">付録5</p> <p style="text-align: center;">粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル</p> <p>粒子状ベッドの冷却性については、高速増殖炉の炉心損傷事故の評価において重要な評価となることから、従来から多くの実験的及び解析的研究が行われてきている^[32]。また、TMI-2事故以降は、軽水炉を対象とした研究も進められている。</p> <p>デブリベッド冷却に関する研究の主要な焦点の一つは、デブリベッドの冷却限界が、崩壊熱を上回るかどうかであり、判断基準のパラメータはデブリベッドのドライアウト熱流束と考えられている。発熱する粒子状ベッドの内を流下する冷却水と上昇する蒸気の対向二相流がデブリベッド内で形成される。粒子状デブリベッドの流動状態の模式図を付図5-1に示す。崩壊熱が高いと、局所的にデブリベッド内でドライアウトが生じ、デブリベッドの温度が急激に高くなる。この時の熱流束がドライアウト熱流束となる。粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束は、種々の実験が行われ、種々の相関式が提案されている。その中でもLipinski 0-Dモデル^[34]（次頁参照）は、小さい粒径から大きい粒径まで適用可能とされており、広く使われている。MAAPコード内でも压力容器下部プレナムの粒子状ベッドの冷却の評価に使用されている。Lipinski 0-Dモデルでは、ドライアウト熱流束は、主に粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力に依存する。</p>	<p style="text-align: center;">添付3-2</p> <p style="text-align: center;"><u>粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル</u></p> <p>粒子状ベッドの冷却性については、高速増殖炉の炉心損傷事故の評価において重要な評価となることから、従来から多くの実験的及び解析的研究が行われてきている。また、TMI-2事故以降は、軽水炉を対象とした研究も進められている。</p> <p>デブリベッド冷却に関する研究の主要な焦点の一つは、デブリベッドの冷却限界が、崩壊熱を上回るかどうかであり、判断基準のパラメータはデブリベッドのドライアウト熱流束と考えられている。発熱する粒子状ベッドの内を流下する冷却水と上昇する蒸気の対向二相流がデブリベッド内で形成される。粒子状デブリベッドの流動状態の模式図を付図2-1に示す。崩壊熱が高いと、局所的にデブリベッド内でドライアウトが生じ、デブリベッドの温度が急激に高くなる。この時の熱流束がドライアウト熱流束となる。粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束は、種々の実験が行われ、種々の相関式が提案されている。その中でもLipinski 0-Dモデル（付表2-1参照）は、小さい粒径から大きい粒径まで適用可能とされており、広く使われている。MAAPコード内でも乱流域に対するLipinski 0-Dモデルが粒子状ベッドの冷却の評価に使用されている。Lipinski 0-Dモデルでは、ドライアウト熱流束は、主に粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力に依存する。</p>	<p>※付録3-2は従来のPWRの公開文献から追加</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>付図 5-1 粒子状デブリベッドの流動状態の模式図 [32]</p>	<p>付図 2-1 粒子状ベッド冷却の流動モデル 出展：日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」日本工業出版（平成元年）</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違 (設計方針の相違)
 青字：記載箇所又は記載内容の相違 (記載方針の相違)
 緑字：記載表現、設備名称の相違 (実質的な相違なし)
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由				
<p>Lipinski 0-Dモデルについて (日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」より抜粋)</p> <p>c. Lipinskiの0-Dモデル⁽¹¹⁾</p> <p>Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。</p> <p>連続の式</p> $\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$ <p>運動量の式 (気相)</p> $\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$ <p>運動量の式 (液相)</p> $-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$ <p>エネルギー式</p> $\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$ <p>圧力の釣合⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾</p> $\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma(\epsilon/5\kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$ <p>ここで、 U：見掛け流速 κ：層流での浸透率 η：乱流での浸透率 $\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$：各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)</p> <p>でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている⁽⁹⁾。</p> $\kappa = (d^2/180)\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ $\eta = (d/1.75)\epsilon^3/(1-\epsilon)$ $\kappa_v = 1 - 1.11s, \kappa_l = s^3$ $\eta_v = (1-s)^3, \eta_l = s^3$ <p>上述の関係を用いると、式(8.14)～式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 $q (= \dot{Q} H_b)$ は下式で与えられる。</p> $q = \rho_v \Delta h_v u_1 \left[1 + (u_2/u_1)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$ $u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$ $u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$ <p>ドライアウト熱流束は、式(8.19)が $s (0 \leq s \leq 1)$ に関して極大値をとる条件として求まる。</p>	<p>付表2-1 Lipinski 0-Dモデルについて 出展：日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」日本工業出版 (平成元年)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="1061 304 1480 339">モデル</th> <th data-bbox="1480 304 1953 339">実験との比較</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="1061 339 1480 1377"> <p>c. Lipinskiの0-Dモデル⁽¹¹⁾</p> <p>Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。</p> <p>連続の式</p> $\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$ <p>運動量の式 (気相)</p> $\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$ <p>運動量の式 (液相)</p> $-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$ <p>エネルギー式</p> $\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$ <p>圧力の釣合⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾</p> $\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma(\epsilon/5\kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$ <p>ここで、 U：見掛け流速 κ：層流での浸透率 η：乱流での浸透率 $\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$：各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)</p> <p>でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている⁽⁹⁾。</p> $\kappa = (d^2/180)\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ $\eta = (d/1.75)\epsilon^3/(1-\epsilon)$ $\kappa_v = 1 - 1.11s, \kappa_l = s^3$ $\eta_v = (1-s)^3, \eta_l = s^3$ <p>上述の関係を用いると、式(8.14)～式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 $q (= \dot{Q} H_b)$ は下式で与えられる。</p> $q = \rho_v \Delta h_v u_1 \left[1 + (u_2/u_1)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$ $u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$ $u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$ <p>ドライアウト熱流束は、式(8.19)が $s (0 \leq s \leq 1)$ に関して極大値をとる条件として求まる。</p> </td> <td data-bbox="1480 339 1953 1377"> </td> </tr> </tbody> </table>	モデル	実験との比較	<p>c. Lipinskiの0-Dモデル⁽¹¹⁾</p> <p>Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。</p> <p>連続の式</p> $\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$ <p>運動量の式 (気相)</p> $\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$ <p>運動量の式 (液相)</p> $-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$ <p>エネルギー式</p> $\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$ <p>圧力の釣合⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾</p> $\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma(\epsilon/5\kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$ <p>ここで、 U：見掛け流速 κ：層流での浸透率 η：乱流での浸透率 $\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$：各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)</p> <p>でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている⁽⁹⁾。</p> $\kappa = (d^2/180)\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ $\eta = (d/1.75)\epsilon^3/(1-\epsilon)$ $\kappa_v = 1 - 1.11s, \kappa_l = s^3$ $\eta_v = (1-s)^3, \eta_l = s^3$ <p>上述の関係を用いると、式(8.14)～式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 $q (= \dot{Q} H_b)$ は下式で与えられる。</p> $q = \rho_v \Delta h_v u_1 \left[1 + (u_2/u_1)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$ $u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$ $u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$ <p>ドライアウト熱流束は、式(8.19)が $s (0 \leq s \leq 1)$ に関して極大値をとる条件として求まる。</p>		
モデル	実験との比較					
<p>c. Lipinskiの0-Dモデル⁽¹¹⁾</p> <p>Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。</p> <p>連続の式</p> $\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$ <p>運動量の式 (気相)</p> $\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$ <p>運動量の式 (液相)</p> $-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$ <p>エネルギー式</p> $\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$ <p>圧力の釣合⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾</p> $\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma(\epsilon/5\kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$ <p>ここで、 U：見掛け流速 κ：層流での浸透率 η：乱流での浸透率 $\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$：各々層流及び乱流での気液の比浸透率 (無次元)</p> <p>でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている⁽⁹⁾。</p> $\kappa = (d^2/180)\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ $\eta = (d/1.75)\epsilon^3/(1-\epsilon)$ $\kappa_v = 1 - 1.11s, \kappa_l = s^3$ $\eta_v = (1-s)^3, \eta_l = s^3$ <p>上述の関係を用いると、式(8.14)～式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 $q (= \dot{Q} H_b)$ は下式で与えられる。</p> $q = \rho_v \Delta h_v u_1 \left[1 + (u_2/u_1)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$ $u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$ $u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\} \right]^{1/2}$ <p>ドライアウト熱流束は、式(8.19)が $s (0 \leq s \leq 1)$ に関して極大値をとる条件として求まる。</p>						

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>参考文献：</p> <p>[1] (財)原子力発電技術機構 (NUPEC), 「重要構造物安全評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する 総括報告書」 (2003)</p> <p>[2] EPRI, Technical Foundation of Reactor Safety, Revision 1, Knowledge Base for Resolving Severe Accident Issues, 1022186 (2010).</p> <p>[3] B.R. Sehgal, et al., "ACE Project Phases C & D : ACE/MCCI and MACE Tests," Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, 19th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0119, Vol.2 (1991).</p> <p>[4] E.R. Copus, et al., "Sustained Uranium-Concrete Interactions (SURC)", Reactor Safety Research Semiannual Report, NUREG/CR-4805 (1986).</p> <p>[5] G.A. Greene, R.A. Bari, "ISP-24 International Standard Problem No 24, SURC-4 Experiment On Core-Concrete Interactions, Final Workshop Summary Report," CSNI Report No 155, Volume 2 (1989).</p> <p>[6] H. Alsmeyer, et al., "BETA experiments on Zirconium Oxidation and Aerosol Release during Melt-Concrete interaction," Proceedings of the Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).</p> <p>[7] R.E. Blose, et al., "SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions With Overlying Water Pools," NUREG/CR-4727 (1987).</p> <p>[8] R.E. Blose, et al., "Core-Concrete Interactions with Overlying Water Pools -The WETCOR-1 Test," NUREG/CR-5907 (1993).</p> <p>[9] M.T. Farmer, et al., "Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments," OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).</p> <p>[10] M.T. Farmer, et al., "Corium Coolability under Ex-Vessel Accident Conditions for LWRs," Nuc. Eng. and Technol., 41, 5 (2009).</p> <p>[11] H. Nagasaka, et al., "COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests," OECD</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (添付3 溶解炉心とコンクリートの相互作用について)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).</p> <p>[12] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI Project Final Report," OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).</p> <p>[13] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI-2 Project Final Report," OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).</p> <p>[14] D. Magallon, "Characteristics of corium debris bed generated in largescalefuel-coolant interaction experiments," Nucl. Eng. Design, 236 1998-2009(2006).</p> <p>[15] M. Kato, H. Nagasaka, et al., "COTELS Fuel Coolant Interaction Tests underEx-Vessel Conditions," JAERI-Conf 2000-015 (2000).</p> <p>[16] A. Karbojian, et al., "A scoping study of debris bed formation in theDEFOR test facility," Nucl. Eng. Design 239 1653-1659, (2009).</p> <p>[17] T. G. Theofanous, et al., "The Probability of Liner Failure in a Mark-IContainment," NUREG/CR-5423, (1991).</p> <p>[18] G. A. Greene, et al., "Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling HeatTransfer and Coolant Layer Boiling," Proceedings of 16th Water Reactor SafetyInformation Meeting, NUREG/CP-0096, pp. 341-358 (1988).</p> <p>[19] H. Suzuki, et al., "Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreadingon Concrete Floor," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear EngineeringConference, Vol. 1, pp. 403-407 (1993).</p> <p>[20] (社) 日本原子力学会, シビアアクシデント熱流動現象評価 (2001)</p> <p>[21] A. Konovalenko, et al., "Experimental Results on Pouring and UnderwaterLiquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction," Proceedingsof NUTHOS-9, N9P0303, Taiwan (2012).</p> <p>[22] J. D. Gabor, L. Baker, Jr., and J. C. Cassulo, (ANL), "Studies on HeatRemoval and Bed Leveling of Induction-heated Materials Simulating FuelDebris," SAND76-9008 (1976).</p> <p>[23] Proceedings of the Second OECD(NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten CoreDebris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>[24] R. J. Lipinski, "A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds," NUREG/CR-2646, SAND82-0765 (1982).</p> <p>[25] F. P. Ricou, D. B. Spalding, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 21-32 (1961).</p> <p>[26] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, "Experimental Study on Penetration Behavior of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen," ANS Proc. of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, USA, (1988).</p> <p>[27] T. N. Dinh, et al., "Core Melt Spreading on a Reactor Containment Floor," Progress in Nuclear Energy, Vol. 36, No. 4, pp. 405-468 (2000).</p> <p>[28] A. Konovalenko, P. Kudinov, "Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water," Proceedings of NUTHOS-9, N9P0302, Taiwan (2012).</p> <p>[29] B. Eppinger, et al., "KATS Experiments to Simulate Corium Spreading in the EPR Core Catcher Concept," FzK, Karlsruhe, Germany.</p> <p>[30] B. Eppinger, et al., "Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17," FZKA 6589 (2001).</p> <p>[31] I. Lindholm, "A Review of Dryout Heat Fluxes and Coolability of Particle Beds," SKI Report 02:17 (2002).</p> <p>[32] 日本機械学会編, 「沸騰熱伝達と冷却: 第8章 デブリベッドの冷却」, 日本工業出版, 平成元年</p> <p>[33] (財)原子力安全研究協会, 「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」, 平成13年7月 付録7-4 溶融炉心の粒子化割合, 付録7-5 粒子状物質ベッドの冷却性 付録7-6 粒子状物質の粒子径</p> <p>[34] EPRI/FAI, MAAP4 Computer Code Manual (2007).</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）
 下線：従来のPWRの公開文献から追加した内容

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>[35] Q. Zhou, et al., "Benchmark of MCCI Model in MAAP5.02 against OECD CCI Experiment Series," Proceedings of ICAPP 2014, ICAPP-14352, Charlotte, USA, (2014).</p> <p>[36] J. M. Veteau and R. Wittmaack., "CORINE Experiments and Theoretical Modeling," Proceedings of FISA-95, Luxemburg EUR 16896 EN, pp. 271-285 (1996).</p> <p>[37] R. K. Cole, et al., "CORCON-Mod2: A Computer Program for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions," NUREG/CR-3920, SAND84-1246, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (1984).</p> <p>[38] 独立行政法人原子力安全基盤機構, 「平成17年度 原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書 =環境への影響緩和(デブリ冷却) =」, 06 基シ報-0003, 平成18年7月</p> <p>[39] M. Hidaka, et al., "Verification for Flow Analysis Capability in the Model of Three-Dimensional Natural Convection with Simultaneous Spreading, Melting and Solidification for the Debris Coolability Analysis Module in the Severe Accident Analysis Code 'SAMPSON', (II)," Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 5, p. 520-530 (2002).</p> <p>[40] 中島 他, SAMPSON コードによる ABWR 格納容器ベドスタル上の炉心デブリの3次元拡がり評価, 日本原子力学会「2013 年秋の大会」, H12, 2013 年9月</p> <p>[41] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report," OECD/MCCI-2005-TR05 (2006).</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="488 172 707 194">【第5部 MAAPより抜粋】</p> <p data-bbox="147 244 445 266">別添1 新知見への対応について</p> <p data-bbox="147 316 271 338">1. はじめに</p> <p data-bbox="165 347 927 370">MAAPコードは、福島第一原子力発電所1～3号機の事象進展解析に適用されている^[1]。</p> <p data-bbox="147 379 1043 510">これらの解析では、システムの応答や外部注水流量等の不確かさの大きな境界条件については、当時の記録に基づいた分析や一部推定を行った上で設定されており、解析結果と実測データとの比較が行われている。この比較結果から、相違点があるプラント挙動や物理現象については検討課題として抽出し、個別に評価・検討が行われている。</p> <p data-bbox="147 520 1043 651">以下では、この検討を通じて得られた課題や知見のうち、MAAPコードで対象とする現象評価に関連する内容と有効性評価への影響について検討する。また、MAAPコードの改良は米国EPRIを中心としたMAAP User's Groupのもとで継続的に進められており、改良の動向と有効性評価への影響について検討する。</p> <p data-bbox="147 700 882 722">2. 福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項と有効性評価への影響</p> <p data-bbox="147 732 483 754">2.1 未確認・未解明事項について</p> <p data-bbox="147 764 1043 831">福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項^[2]のうち、有効性評価に対して影響し得る項目を抽出し、MAAPコードによる有効性評価で留意すべき事項を以下の4項目に大別した。</p> <p data-bbox="147 944 622 967">(1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について</p> <p data-bbox="147 976 1043 1139">原子炉圧力容器の水位が低下し炉心が露出すると、過熱した炉心から発生する高温ガスや過熱蒸気により、原子炉圧力容器バウナダリが通常よりも高い温度となる。1号機のMAAP解析においては、この原子炉内温度の上昇によって原子炉内核計装のドライチューブや主蒸気管フランジ等の原子炉圧力容器上部からドライウェルへの気相漏えいが発生したと仮定している。この現象によって、原子炉圧力容器破損タイミングや格納容器圧力及び温度の上昇等の事象進展に影響を及ぼす可能性がある。</p> <p data-bbox="147 1220 483 1243">(2) 熔融炉心の下部プレナム落下挙動</p> <p data-bbox="147 1252 1043 1415">1号機のMAAP解析において、原子炉圧力は3月11日22時頃に急峻なピークを示している。MAAPコードでは、炉心損傷の進展に伴って、固化クラストによって閉塞領域が形成されると熔融炉心は一旦保持されるものの、クラストの破損に伴って、熔融炉心が下部プレナムへの落下を開始するというモデルを採用していることに起因すると考えられる。一方、複雑な下部構造を持つBWRでは、燃料支持金具の冷却水の通過口から熔融した炉心が降下し、下部プレナムに流れ落ちる経路や、熔融プールが</p>	<p data-bbox="1368 172 1653 194">【第3部 MAAPコードより抜粋】</p> <p data-bbox="1064 244 1361 266">別添1 新知見への対応について</p> <p data-bbox="1064 316 1187 338">1. はじめに</p> <p data-bbox="1081 347 1843 370">MAAPコードは、福島第一原子力発電所1～3号機の事象進展解析に適用されている^[1]。</p> <p data-bbox="1064 379 1960 510">これらの解析では、システムの応答や外部注水流量等の不確かさの大きな境界条件については、当時の記録に基づいた分析や一部推定を行った上で設定されており、解析結果と実測データとの比較が行われている。この比較結果から、相違点があるプラント挙動や物理現象については検討課題として抽出し、個別に評価・検討が行われている。</p> <p data-bbox="1064 520 1960 651">以下では、この検討を通じて得られた課題や知見のうち、MAAPコードで対象とする現象評価に関連する内容と有効性評価への影響について検討する。また、MAAPコードの改良は米国EPRIを中心としたMAAP User's Groupのもとで継続的に進められており、改良の動向と有効性評価への影響について検討する。</p> <p data-bbox="1064 700 1798 722">2. 福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項と有効性評価への影響</p> <p data-bbox="1064 732 1373 754">2.1 未確認・未解明事項について</p> <p data-bbox="1064 764 1960 863">福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項^[2]のうち、有効性評価に対して影響し得る項目を抽出し、MAAPコードによる有効性評価で留意すべき事項を以下の4項目に大別した。その選定方法については、別紙に示す。</p> <p data-bbox="1064 944 1538 967">(1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について</p> <p data-bbox="1064 976 1960 1177">原子炉圧力容器の水位が低下し炉心が露出すると、過熱した炉心から発生する高温ガスや過熱蒸気により、原子炉圧力容器バウナダリが通常よりも高い温度となる。1号機のMAAP解析においては、この原子炉内温度の上昇によって原子炉内核計装のドライチューブや主蒸気管フランジ等の原子炉圧力容器上部からドライウェルへの気相漏えいが発生したと仮定している。泊3号機においても、原子炉容器や1次冷却材配管からの気相部漏えいの発生した場合には、原子炉容器破損タイミングや原子炉格納容器圧力及び温度の上昇等の事象進展に影響を及ぼす可能性がある。</p>	<p data-bbox="1975 802 2121 933">記載内容の相違 ・泊では4項目に大別した選定方法を別紙に記載</p> <p data-bbox="1975 1083 2121 1106">記載表現の相違</p> <p data-bbox="1975 1220 2121 1422">記載内容の相違 ・熔融炉心の下部プレナムへの落下経路は、炉心領域の熔融プールが径方向に拡大</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード（MAAP 新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>炉心の径方向に拡大し、外周部のバイパス領域へ流出し、下部プレナムへ流れ落ちる経路、更に炉心シェラウドと接触・破損させることによってダウンカマへ流出する経路等、流出経路には様々な形態が考えられる。熔融炉心の下部プレナムへの落下挙動は、それ以降の原子炉圧力容器破損等の事象進展に影響を与える可能性がある。</p> <p>(3) 圧力抑制プールの温度成層化について</p> <p>3号機では、RCICによる注水期間において、原子炉格納容器圧力のMAAP解析結果と実測値に差があり、圧力抑制プールにおいて温度成層化が起きた可能性が指摘されている^[3]。MAAPコードによる有効性評価では、圧力抑制プールのプール水を単一ノードで模擬し、プール水温は均一に上昇する仮定と</p>		<p>して外周部のバイパス領域から落下する経路と、軸方向に拡大して炉心支持板開口部から落下する経路が考えられる。PWRの炉心支持板開口部は支持板に穴を空けた単純構造であり、BWRのように複雑な流路構造を形成していない。また、MAAPコードでは、炉心支持板以下の支持構造はヒートシンクとしてのみ考慮され、落下する熔融炉心を妨げることがないモデルである。よって、泊3号機の“熔融炉心の下部プレナム落下挙動”は事象進展に対して保守的な取り扱いと考えられる。</p> <p>記載内容の相違</p> <p>・PWRとBWRの相違によりMAAPコードによる有効性評価で留意す</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード（MAAP 新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>しているのに対し、温度成層化を考慮した場合、原子炉格納容器の圧力及び温度上昇が速くなる可能性がある。</p> <p>(4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて 1号機及び2号機の MAAP 解析では、格納容器圧力等の実測値を再現するために原子炉格納容器の気相部からの漏えいを仮定しているものの、計測されたパラメータや観測事実からは、漏えい箇所やその規模については直接的な推定が得られていない。一つの要因として格納容器内部で生じた局所的な過温状態による損傷が挙げられている。一方、MAAP コードによる有効性評価では、原子炉格納容器内を代表的な区画にノード分割し、ノード内温度は均一と仮定し、温度分布を評価することはできない。</p> <p>2.2 有効性評価に対する影響について 2.1 で挙げられた留意すべき事項に対して、有効性評価に対する影響について以下に考察する。これらの考察より、有効性評価で対象とする事象進展に対しては、MAAP コードによる解析への影響は小さく適用性に問題はないと判断される。</p> <p>(1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について 炉心損傷に伴って発生する高温ガスにより、原子炉圧力容器からの漏えいが生じた場合、原子炉圧力の減圧を促進する。しかしながら、有効性評価において、大破断 LOCA を起因事象とするシーケンス</p>	<p>(2) コア・コンクリート反応 熔融燃料が十分に冷却されない場合、熔融燃料と接触した格納容器床面のコンクリートが融点以上まで熱せられることによりコンクリートが分解するコア・コンクリート反応が生じる。コア・コンクリート反応では、水素、一酸化炭素等の非凝縮性ガスが発生する。1号機の MAAP 解析においては、コア・コンクリート反応による原子炉格納容器の侵食深さを評価しているが、実際にコア・コンクリート反応がどの程度進展していたかは不確かさが大きいため、それ以降の原子炉格納容器破損等の事故進展に影響を与える可能性があり、泊3号機の評価においても留意する必要がある。</p> <p>(3) 水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動 2号機では、主蒸気逃がし安全弁（SRV）の開操作により、原子炉の強制減圧に成功した。その後原子炉圧力が上昇したことから SRV を1弁追加で開けるも圧力は低下せず、さらに別の SRV を開放したところ原子炉圧力が低下した。この原子炉圧力上昇は、炉心損傷が進んでいると考えられることから、その減圧時の蒸気放出には非凝縮性ガスである水素が大量に含まれているものと考えられる。泊3号機において、非凝縮性ガスの存在により原子炉格納容器の事故進展に影響を与える可能性がある。</p> <p>(4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて 1号機及び2号機の MAAP 解析では、格納容器圧力等の実測値を再現するために原子炉格納容器の気相部からの漏えいを仮定しているものの、計測されたパラメータや観測事実からは、漏えい箇所やその規模については直接的な推定が得られていない。一つの要因として格納容器内部で生じた局所的な過温状態による損傷が挙げられている。一方、MAAP コードによる有効性評価では、原子炉格納容器内を代表的な区画にノード分割し、ノード内温度は均一と仮定し、温度分布を評価することはできない。</p> <p>2.2 有効性評価に対する影響について 2.1 で挙げられた留意すべき事項に対して、有効性評価に対する影響について以下に考察する。これらの考察より、有効性評価で対象とする事象進展に対しては、MAAP コードによる解析への影響は小さく適用性に問題はないと判断される。</p> <p>(1) 原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について 炉心損傷に伴って発生する高温ガスにより、原子炉容器からの漏えいが生じた場合、原子炉圧力の減圧を促進する。しかしながら、有効性評価において、大破断 LOCA を起因事象とするシーケンス（青 囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）、原子炉圧力容器外の熔融燃料—冷却材相互作用、</p>	<p>べき事項が一部異なるが、解析への影響は小さく適用性に問題はない</p> <p>記載表現の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>については、起因事象発生時点で大規模な一次冷却材圧力バウンダリの喪失を仮定していることから、これらの事象による格納容器内事象進展への影響はない。</p> <p>別図 1-2.2-1 及び別図 1-2.2-2 に、炉心損傷に伴う計装用案内管破損を模擬した場合の原子炉圧力及び格納容器温度の比較を示す。これらの図から明かなように、事象進展への影響は小さい。</p> <p>また、過渡事象（TQUV）起因のシーケンスでは、原子炉圧力容器からの気相漏えいは、原子炉減圧挙動と水位低下挙動に影響する。</p> <p>高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止に係る評価においては、高温ガス発生による気相部漏えいが生じる場合には、原子炉の減圧が促進されるため、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の回避に対して有効に寄与する。さらに、原子炉圧力容器破損前に運転員による原子炉減圧操作が必須となるが、破損までには十分な時間余裕があり、気相漏えいを想定しても破損時間への影響は小さい。別図 1-2.2-3 に、炉心損傷に伴う計装用案内管破損を模擬した場合の原子炉圧力の比較を示す。計装用案内管温度が融点に到達した時点で損傷するとした本感度解析では、その損傷は原子炉減圧後に発生しており、原子炉減圧操作への影響はない。</p> <p>溶融炉心と冷却材の相互作用及び溶融炉心とコンクリートの相互作用においては、原子炉減圧後の現象を評価するため、原子炉圧力容器破損前のベデスタル注水が必須となる。しかしながら、上述のように十分な時間余裕があり、かつ、評価においては、原子炉水位が有効燃料棒底部まで低下する以前に原子炉減圧操作を実施しており、炉心損傷初期の段階であることから、原子炉圧力容器の気相漏えいを仮定しても破損時間に対する影響は小さく、運転操作に対する影響はない。</p>	<p>溶融炉心・コンクリート相互作用、水素燃焼）については、起因事象発生時点で大規模な一次冷却材圧力バウンダリの喪失を仮定していることから、これらの事象による原子炉格納容器内事象進展への影響はない。</p> <p>また過渡事象起因のシーケンス（雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過温破損）、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）では、原子炉容器からの気相漏えいや漏えい量の増加は、原子炉減圧挙動と水位挙動に影響する。</p> <p>雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過温破損）、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止に係る評価においては、高温ガス発生による気相部漏えいが生じる場合には、原子炉の減圧が促進されるため、雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過温破損）、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の回避に対して有効に寄与する。さらに、原子炉容器破損前に運転員による原子炉減圧操作が必須となるが、破損までには十分な時間余裕があり、気相漏えいを想定しても破損時間への影響は小さい。よって、有効性評価への影響は小さいと考えられる。</p> <p>また、有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過温破損）」の評価において、添付資料7.2.1.2.2「全交流動力電源喪失+補助給水失敗」における原子炉冷却材圧力バウンダリから現実的な漏えいを想定した場合の事象進展について」で、原子炉冷却材圧力バウンダリから漏えいが発生した場合の運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響が小さいことを確認している。</p>	<p>・泊では具体的な破損モードを記載</p> <p>記載内容の相違</p> <p>・泊では計装用案内管破損を模擬した解析を実施している</p> <p>記載内容の相違</p> <p>・シーケンスの相違</p> <p>記載内容の相違</p>
<p>(2) 溶融炉心の下部プレナム落下挙動</p> <p>有効性評価のうち、「格納容器過圧・過温破損」の評価において、原子炉圧力容器が破損しないシーケンスを想定するシナリオでは、溶融炉心の下部プレナム落下前に冷却される状態を対象としているため、本現象の影響はない。</p> <p>下部プレナムへの溶融炉心落下が発生するシーケンスについては、本文「3.3.6 溶融炉心の挙動モデル」で述べたように、MAAP コードでは、溶融炉心の下部プレナムへの落下は、炉心支持板が破損するか、クラストが破損して溶融炉心を保持できなくなった場合に開始され、落下する溶融炉心の量は、仮想的なデブリジェット径等により計算されている。一方、燃料支持金具等の炉心下部構造物を介した溶融炉心の移行は、別図 1-2.2-4 に示す経路が想定され、溶融炉心が下部プレナムへ移行する場合、</p>		<p>記載内容の相違</p> <p>・溶融炉心の下部プレナムへの落下経路は、炉心領域の溶融プールが径方向に拡大して外周部のバイパス領域から落下する経路と、</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>これらの構造物との熱的な相互作用によって、その経路で一部が固化し、落下流量が低減される等の影響が想定される。したがって、これらを考慮していない現行評価は、原子炉圧力容器下部ヘッドへの熱負荷を計算する上で、保守的な扱いといえる。</p> <p>また、同じく「3.3.6 溶融炉心の挙動モデル」で述べたように、MAAPコードでは、溶融炉心の径方向のリロケーションは下部ノードが閉塞した以降に発生し、溶融領域は炉心シュラウドまで到達しない想定としている。溶融炉心が炉心シュラウドと接触した場合、炉心シュラウドを溶融貫通する可能性はあるものの、その径方向への進展は下部ノードの閉塞挙動等に依存した極めて不確かさの大きな現象と考えられる。さらに、溶融炉心が炉心シュラウドを溶融貫通した場合の下部プレナムへの移行は、ジェットポンプ等の貫通後に発生するが、ジェットポンプ内部に冷却材が存在している場合には、溶融炉心が一時的に冷却される等の効果も期待される。このようなことから、炉心下部構造物を介した移行に比べて、主要なリロケーション経路となり得るとは考えにくく、有効性評価への影響は小さいと考えられる。</p> <p>(3) 圧力抑制プールの温度成層化について（別添1（補足）参照）</p> <p>原子炉隔離時冷却系の運転方法として、福島第一原子力発電所3号機と同様にテストラインを使用し注水流量を制御するような運転方法とした場合、圧力抑制プールの温度成層化による原子炉格納容器の圧力上昇が生じる可能性がある。しかしながら、原子炉隔離時冷却系が間欠運転（L-2とL-8の自動制御）の場合、原子炉隔離時冷却系が停止している間に原子炉圧力が上昇し、逃がし安全弁が作動することにより温度成層化の発生の可能性は小さくなる。また、原子炉隔離時冷却系の注水流量調整のみによる制御とした場合においても、消費される駆動蒸気量の減少により逃がし安全弁の作動回数が増え、温度成層化の発生可能性は小さくなる可能性がある。</p>		<p>軸方向に拡大して炉心支持板開口部から落下する経路が考えられる。PWRの炉心支持板開口部は支持板に穴を空けた単純構造であり、BWRのように複雑な流路構造を形成していない。また、MAAPコードでは、炉心支持板以下の支持構造はヒートシンクとしてのみ考慮され、落下する溶融炉心を妨げることがないモデルである。よって、泊3号機の“溶融炉心の下部プレナム落下挙動”は事象進展に対して保守的な取り扱いと考えられる。</p> <p>記載内容の相違 ・PWRとBWRの相違によりMAAPコードによる有効性評価で留意すべき事項が一部異なるが、解析への影響は小さく</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード (MAAP 新知見への対応)）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>一方、低圧代替注水系を用いた原子炉注水時において成層化の発生可能性はあるものの、原子炉格納容器圧力に対する影響は小さいものと考えられる。</p> <p>(4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて 福島第一原子力発電所事故においては、原子炉格納容器内で局所的な過温状態となって、気相部に漏えいが生じた可能性が指摘されている。重大事故時の原子炉格納容器内温度分布は、損傷炉心及び核分裂生成物の分布やその冷却状態、また、原子炉格納容器への注水等によるガス攪拌に資する駆動力の有無にも依存することから、MAAP の評価体系で原子炉格納容器内の温度分布を精度よく評価することは困難である。</p>	<p>(2) コア・コンクリート反応 有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）」の評価において、添付資料 7.2.1.1.18 「熔融炉心・コンクリート相互作用が発生した場合の原子炉格納容器圧力及び温度への影響について」で、コア・コンクリート反応の不確かさを考慮し、原子炉下部キャビティ床面での熔融炉心の拡がり小さく、局所的に熔融炉心が堆積するような条件での感度解析を実施した。 感度解析ケースでは、基本ケースに比べて熔融炉心の拡がり面積及び熔融炉心からの原子炉下部キャビティ水への熱流束を制限していることから熔融炉心が十分冷却されるまでの時間が長くなる。このため、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇は緩やかになる。その後コンクリート侵食による非凝縮性ガスの発生により原子炉格納容器圧力及び温度は上昇するものの、原子炉下部キャビティ水により熔融炉心が冷却されることでコンクリート侵食は停止するため、これらの要因による原子炉格納容器圧力及び温度の上昇は一時的なものである。</p> <p>また、有効性評価のうち、「熔融炉心・コンクリート相互作用」の評価において、添付資料 7.2.5.2 「解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（熔融炉心・コンクリート相互作用）」で、解析コード及び解析条件の不確かさの評価を実施しており、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響が小さいことを確認している。</p> <p>(3) 水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動 炉心損傷が進んでいる場合、その減圧時には水素等の非凝縮性ガスを多く含んだ蒸気が放出されることにより原子炉格納容器の事故進展に影響を与える可能性がある。 有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）」の評価において、添付資料 7.2.1.1.20 「格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却の水素濃度に対する影響について」で、原子炉格納容器内の水素濃度の不確かさを考慮した場合の、原子炉格納容器圧力及び温度に対する影響を確認した。水素濃度が高く、格納容器再循環ユニットの除熱量が低下した場合でも、原子炉格納容器圧力及び温度への影響は軽微であることを確認している。</p> <p>(4) 原子炉格納容器の気相漏えいについて 福島第一原子力発電所事故においては、原子炉格納容器内で局所的な過温状態となって、気相部に漏えいが生じた可能性が指摘されている。重大事故時の原子炉格納容器内温度分布は、損傷炉心及び核分裂生成物の分布やその冷却状態、また、原子炉格納容器への注水等によるガス攪拌に資する駆動力の有無にも依存することから、MAAP の評価体系で原子炉格納容器内の温度分布を精度よく評価することは困難である。</p>	<p>適用性に問題はない</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

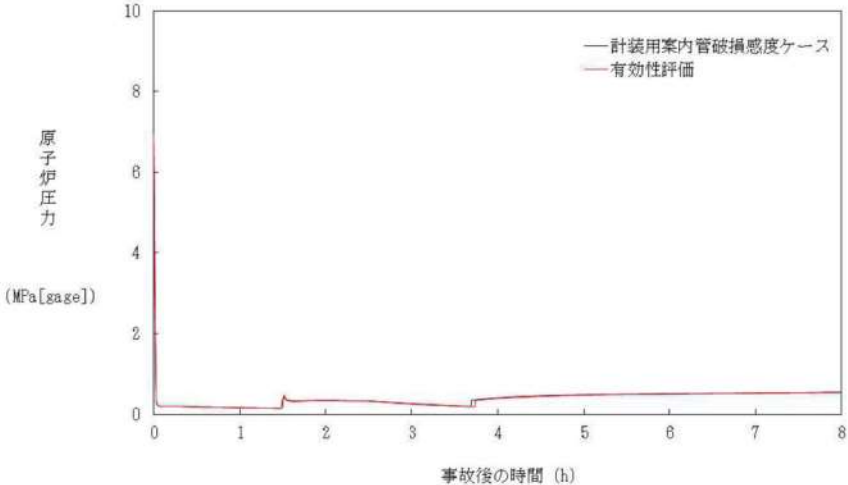
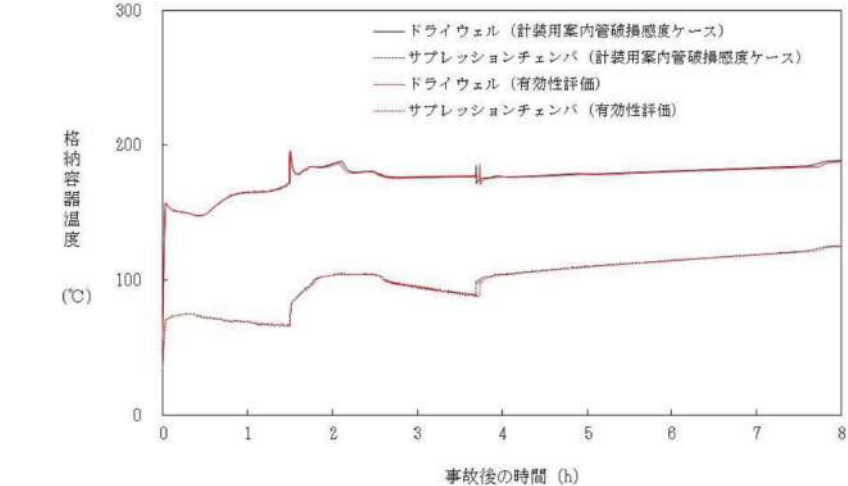
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>一方、福島第一原子力発電所事故で推定されている局所的な過温状態の発生を回避するため、重大事故等対策として、原子炉及び格納容器への代替注水等を整備し、その有効性を確認することが有効性評価の目的となっている。すなわち、これらの対策によって、原子炉圧力容器内損傷炉心の非冷却状態長期化を防止でき、また、原子炉格納容器への注水によって、雰囲気を十分攪拌させて高温気体の局所的な滞留を防止できるため、局所的な過温は回避可能と考えられる。</p> <p>このような観点から、本文「3.3.4 格納容器モデル」の図3.3-6に例示した原子炉格納容器のノード分割方法は、原子炉格納容器の過圧・過温に対する有効性評価に適用可能である。</p>	<p>一方、福島第一原子力発電所事故で推定されている局所的な過温状態の発生を回避するため、重大事故等対策として、代替格納容器スプレイポンプによる代替格納容器スプレイ、格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却等を整備し、その有効性を確認することが有効性評価の目的となっている。すなわち、これらの対策によって、溶融炉心の非冷却状態長期化を防止でき、また、原子炉格納容器への注水によって、雰囲気を十分攪拌させて高温気体の局所的な滞留を防止できるため、局所的な過温は回避可能と考えられる。</p> <p>このような観点から、有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）」の評価において、添付資料7.2.1.1.4「MAAPでの原子炉格納容器モデルについて」に例示した原子炉格納容器のノード分割方法は、原子炉格納容器の過圧・過温に対する有効性評価に適用可能である。</p>	<p>対策の相違</p> <p>記載内容の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

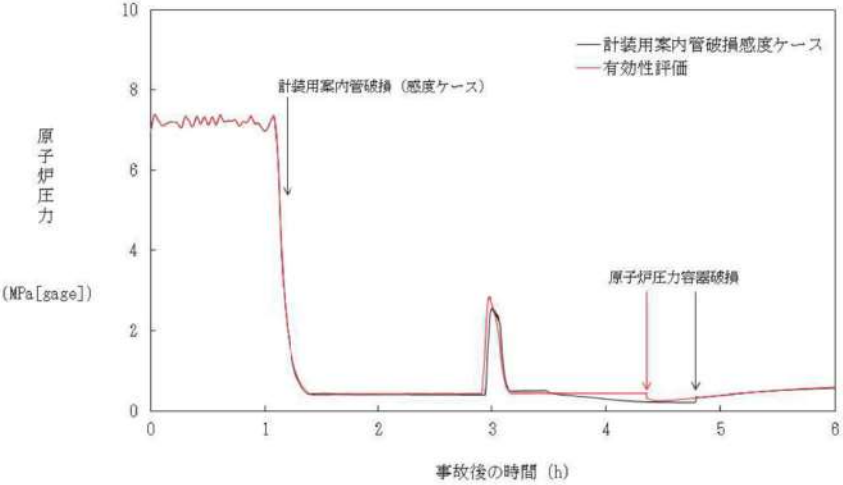
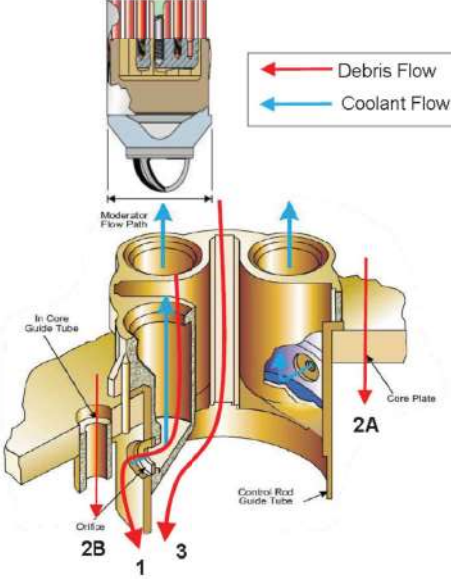
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>別図 1-2.2-1 大破断LOCA時注水機能喪失（原子炉圧力容器破損） における原子炉圧力変化の比較</p>  <p>別図 1-2.2-2 大破断LOCA時注水機能喪失（原子炉圧力容器破損） における格納容器温度変化の比較</p>		<p>記載内容の相違 ・泊では有効性評価で計装用案内管破損を模擬した解析を実施している</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>別図 1-2.2-3 高圧・低圧注水機能喪失における原子炉圧力変化の比較</p>  <p>別図 1-2.2-4 炉心下部構造物を介した溶融炉心の移行経路^[4]</p>		<p>設計の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード (MAAP 新知見への対応)）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3. MAAP コード改良の動向について</p> <p>3.1 MAAP コードの改良^[6]</p> <p>MAAP コード最新バージョンで追加された物理現象モデル^[6]のうち、有効性評価に関連すると考えられる主要なモデルについて、推定される影響を整理する。</p> <p>(1) 炉心モデル</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、制御材である B₄C の酸化モデルが追加されている。B₄C 酸化については、QUENCH 実験において、B₄C 酸化による H₂ 発生量全体に寄与する割合は QUENCH-07 で 2.4%、QUENCH-09 で 2.2%と小さいことが確認されている。すなわち、炉心損傷進展に伴う不確かさに比べればその影響は小さく、有効性評価への影響は小さいと考えられる。</p> <p>(2) 一次系モデル</p> <p>(a) 主蒸気管ノードの追加</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、主蒸気管ノードが一次系ノードに追加され、高温ガスによるクリープ損傷がモデル化されている。本現象は、炉心損傷後に原子炉圧力容器内に長時間高温・高圧状態に維持される場合に生じ得るが、有効性評価では、運転員操作による炉心損傷の初期段階での原子炉減圧を想定しているため、主蒸気管のクリープ損傷が発生する可能性は小さいと考えられる。</p> <p>また、仮にクリープ損傷が生じた場合にも、2.2における原子炉圧力容器からの気相漏えいと同等に事象進展への影響は小さいと推定される。</p> <p>(b) 計装管損傷モデルの追加</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、原子炉内核計装等の計装管の損傷がモデル化されており、損傷した計装管への溶融炉心の侵入と固化挙動が評価可能となっている。計装管損傷の影響は、2.1及び2.2で述べたように原子炉圧力容器からの気相漏えいとして現れるが、上述のように有効性評価で対象とする事故シーケンスへの影響は小さいと考えられる。</p> <p>(3) 下部プレナム内デブリモデル</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト RASPLAV^[6] 及び MASCA^[7] 計画の知見を反映し、下部プレナム内で重金属層（金属ウラン）が酸化物層（二酸化ウラン、酸化ジルコニウム）の下方に成層化するモデルが追加されている。しかしながら、本現象は、原子炉圧力容器を外部から冠水させて溶融炉心を下部プレナム内に長期間保持する対策をとる際に重要となるものであり、有効性評価では下部プレナム内に溶融炉心を保持して事故収束させるシーケンスを対象としていないため、影響はない。</p> <p>(4) 格納容器モデル</p> <p>(a) 圧力抑制プールの多ノード化</p>	<p>3. MAAP コードの改良の動向について</p> <p>3.1 MAAP コードの改良^[6]</p> <p>MAAP コード最新バージョンで追加された物理現象モデル^[6]のうち、有効性評価に関連すると考えられる主要なモデルについて、推定される影響を整理する。</p> <p>(1) 炉心モデル</p> <p>MAAP コードの最新バージョンでは、高温領域でのジルコニウム-水反応モデルに Urbanic-Heidrick の式(U-Hの式)が追加されている。U-H 式は、有効性評価に適用している現行 MAAP で使用する Baker-Just の式に比べ、ジルコニウム-水反応を抑制する傾向にある。しかしながら、U-H 式の適用は高温領域に限定されることから、有効性評価への影響は小さいと考えられる。</p> <p>(2) 1次系モデル</p> <p>(a) ループモデルの改良</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、1次系の各ループをそれぞれ独立に模擬できるモデルが追加されている。</p> <p>有効性評価に適用している現行 MAAP では、3つあるループを2グループに分けて模擬するが、有効性評価で対象とする事故シーケンスは、3つのループをそれぞれ独立に模擬する必要がある現象を含んでいない。したがって、このモデル改良が有効性評価へ与える影響は小さいと考えられる。</p> <p>(b) 計装管損傷モデルの追加</p> <p>MAAP コードの最新バージョンでは、原子炉容器下部プレナム内の計装管の損傷モデルが追加されており、損傷した計装管への溶融炉心の侵入と固化挙動が評価可能となっている。計装管損傷の影響は、原子炉容器からの気相漏えいとして現れるが、2.2で述べたように有効性評価への影響は小さいと考えられる。</p> <p>(3) 下部プレナム内デブリモデル</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト RASPLAV^[4] 及び MASCA^[6] 計画の知見を反映し、下部プレナム内で重金属層（金属ウラン）が酸化物層（二酸化ウラン、酸化ジルコニウム）の下方に成層化するモデルが追加されている。しかしながら、本現象は、原子炉容器を外部から冠水させて溶融炉心を下部プレナム内に長期間保持する対策をとる際に重要となるものであり、有効性評価では下部プレナム内に溶融炉心を保持して事故収束させるシーケンスを対象としていないため、影響はない。</p> <p>(4) 格納容器モデル</p> <p>(a) 放射線水分解モデルの追加</p>	<p>記載内容の相違</p> <p>・PWR と BWR の相違により MAAP コードのモデルが異なるが、有効性評価への影響は小さい点では同様</p> <p>記載表現の相違</p> <p>記載内容の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード (MAAP 新知見への対応)）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>MAAP コード最新バージョンでは、圧力抑制プールの多ノードモデルが追加されており、逃がし安全弁排気管からの入熱等による温度分布を評価することが可能となっている。これにより、圧力抑制プール水の温度成層化の模擬が可能である。</p> <p>この多ノード化については、2.2 で述べたように、圧力抑制プールの温度成層化は、逃がし安全弁の作動状況に依存するものの、原子炉格納容器圧力に対する影響は小さいと考えられる。</p> <p>(b) 熔融炉心とコンクリート相互作用モデルの改良</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト MCCI 計画^{[9][10]}の知見を反映して、熔融炉心の上部クラストに形成された亀裂への水浸入による冷却効果、コンクリート分解気体がクラスト開口部を通過する際に気体に随伴されて熔融物が噴出することによって形成される粒子状デブリの堆積とその冷却効果及び連続層の減少、熔融炉心のコンクリート含有に伴う上面水プールへのドライアウト熱流束低下等がモデル化されており、MCCI 試験結果との比較による妥当性確認が行われている^[11]。</p> <p>これらの物理現象モデルの根拠となった試験では、熔融物落下後にドライ条件である程度コンクリート侵食が進んだ後に上部から注水（TopFlooding）する条件で行われており、有効性評価で対象としている、熔融炉心が水中へ落下し、粒子化した後、床面に粒子状ベッドとして堆積する場合の伝熱挙動とは異なるため、このモデル改良が、有効性評価にそのまま適用されるわけではない。しかしながら、熔融炉心の挙動に係る知見の拡充については継続的に進め、有効性評価に影響するような新たな知見が出た場合には適宜評価に反映することが重要と考える。</p> <p>3.2 福島第一原子力発電所事故を踏まえた MAAP コードの改良</p> <p>福島第一原子力発電所の事象進展説明や燃料デブリ位置推定・炉内状況把握を目的とした MAAP コード高度化が推進されている^[4]。主要な項目としては、下記のとおり、熔融炉心の挙動に重点を置いたものとなっている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下部プレナムへの熔融炉心リロケーション経路の追加 ・下部プレナム内構造物と熔融炉心との相互作用 ・原子炉格納容器内デブリ拡がりモデルの追加 <p>(1) 下部プレナムへの熔融炉心リロケーション経路の追加</p> <p>BWR の炉心下部構造を模擬した熔融炉心の下部プレナムへの落下経路が追加された。2.1 及び 2.2 にて示したように、本モデルによって、下部プレナムへの落下流量が低減されるため、下部ヘッドへの熱負荷も軽減され、原子炉圧力容器破損時間も遅延されると推定される。したがって、有効性評価に適用している現行 MAAP は保守的な扱いとなっていると考えられる。</p>	<p>MAAP コード最新バージョンでは、放射線水分解モデルが追加されており、水の放射線分解による水素発生を評価することが可能となっている。</p> <p>有効性評価に適用している現行 MAAP では、水の放射線分解による水素発生を考慮していないが、水素発生を主要因となるジルコニウム-水反応を考慮しており、水の放射線分解による水素発生影響は小さい。したがって、本モデル改良が有効性評価で対象とする事故シーケンスへの影響は小さいと考えられる。</p> <p>(b) 熔融炉心とコンクリート相互作用モデルの改良</p> <p>MAAP コード最新バージョンでは、OECD/NEA 国際プロジェクト MCCI 計画等^{[6][7][8]}の知見を反映して、熔融炉心の上部クラストに形成された亀裂への水浸入による冷却効果、コンクリート分解気体がクラスト開口部を通過する際に気体に随伴されて熔融物が噴出することによって形成される粒子状デブリの堆積とその冷却効果及び連続層の減少、熔融炉心のコンクリート含有に伴う上面水プールへのドライアウト熱流束低下等がモデル化されており、MCCI 実験の結果との比較による妥当性確認が行われている^[9]。</p> <p>有効性評価に適用している現行 MAAP では、添付資料 7.2.1.1.18 「熔融炉心・コンクリート相互作用が発生した場合の原子炉格納容器圧力及び温度への影響について」で、コア・コンクリート反応の不確実さを考慮し、MCCI 実験の結果（SWISS 実験、CCI 実験、SSWICS 実験）に基づき、熔融炉心の状態に合わせて熱流束を制限する感度解析を実施した。したがって、このモデル改良が有効性評価へ与える影響は小さいと考えられる。しかしながら、熔融炉心の挙動に係る知見の拡充については継続的に進め、有効性評価に影響するような新たな知見が出た場合には適宜評価に反映することが重要と考える。</p> <p>3.2 福島第一原子力発電所事故を踏まえた MAAP コードの改良</p> <p>福島第一原子力発電所の事象進展説明や燃料デブリ位置推定・炉内状況把握を目的とした MAAP コード高度化が推進されている^[10]。主要な項目としては、下記のとおり、熔融炉心の挙動に重点を置いたものとなっている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下部プレナムへの熔融炉心リロケーション経路の追加 ・下部プレナム内構造物と熔融炉心との相互作用 ・原子炉格納容器内デブリ拡がりモデルの追加 <p>これらモデル改良は BWR に特化したものであるため、有効性評価に適用している現行 MAAP に影響はない。しかしながら、熔融炉心の挙動に係る知見の拡充については継続的に進め、有効性評価に影響するような新たな知見が出た場合には適宜評価に反映することが重要と考える。</p> <p style="text-align: right;">以上</p>	<p>・PWR と BWR の相違により MAAP コードのモデルが異なるが、有効性評価への影響は小さい点では同様</p> <p>記載表現の相違 ・泊は参照する文献が OECD/NEA だけでなく EPRI も含むことから等を記載</p> <p>記載内容の相違</p> <p>記載内容の相違 ・MAAP コードの改良は BWR に特化したものであるため記載内容が異なる</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 下部プレナム内構造物と溶融炉心との相互作用</p> <p>BWR 下部プレナムは制御棒（CR）案内管・制御棒駆動機構（CRD）ハウジング等の構造物を有している。有効性評価に適用している現行MAAPでは、これらを1個のヒートシンクとしてモデル化しているが、径方向に複数のグループに分類して、下部プレナム内溶融炉心との接触面積の相違を考慮し、CR案内管・CRDハウジング内冷却水保有量とそれらの溶融をグループごとに評価するモデルが追加された。これによって、炉心部から下部プレナムへの溶融炉心の落下が段階的に発生する。すなわち、(1)と同様に、下部プレナムへの落下流量が低減されるため、下部ヘッドへの熱負荷も軽減され、原子炉圧力容器破損時間も遅延されると推定される。</p> <p>(3) 原子炉格納容器内デブリ拡がりモデルの追加</p> <p>有効性評価に適用している現行MAAPでは、原子炉圧力容器破損後に格納容器床に落下する溶融炉心は、ユーザーが指定する床面積まで直ちに拡がるモデルとなっている。この拡がり挙動を現実的に評価することを目的として、拡がり速度を指定可能とするデブリ拡がりモデルが追加されている。本モデルは、原子炉圧力容器から段階的に溶融炉心が落下する場合に拡がり制限される可能性があるが、BWRで支配的なCRDハウジング逸出による破損モードの場合、瞬時に大量の溶融物が落下するため、拡がり挙動の影響は小さいと考えられる。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表


付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由										
<p>【該当する資料無し】</p>	<p style="text-align: right;">別添1 別紙</p> <p>福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項のうち、MAAPコードによる有効性評価に対して留意すべき項目の抽出過程について</p> <p>福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項より、MAAPコードによる泊3号炉の有効性評価において留意すべき項目として4項目（表1）を抽出しており、その抽出過程について本資料にまとめた。</p> <p style="text-align: center;">表1 MAAPコードによる泊3号炉の有効性評価において留意すべき項目</p> <table border="1" data-bbox="1153 523 1888 734"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">泊3号炉</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">(1)</td> <td>原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(2)</td> <td>コア・コンクリート反応について</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(3)</td> <td>水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(4)</td> <td>原子炉格納容器の気相漏えいについて</td> </tr> </tbody> </table> <p>福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項にかかる報告書「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告 2022年11月10日 東京電力ホールディングス株式会社」（以下、「東電報告書」と記載）では、課題リストとして、「共通」及び「各号機」別に、合計52項目が抽出されている。</p> <p style="text-align: center;">課題リスト～共通～： 共通-1 ～ 共通-16 ⇒ 16項目 課題リスト～1号機～： 1号機-1 ～1号機-11 ⇒ 11項目 課題リスト～2号機～： 2号機-1 ～2号機-13 ⇒ 13項目 課題リスト～3号機～： 3号機-1 ～3号機-12 ⇒ 12項目</p> <p>これら52項目は、図1に示すように、A～Dの4つの分類とさらなる細分類にて整理されているが、A「機器の動作・応答・特性」、C「地震・津波」及びD「その他」（ヒューマンファクター）については、MAAPコードによる事象進展解析とは直接的には関係がないと考えられるため、これらを除外し、B「炉心損傷・放射性物質放出への進展とメカニズム」について留意すべきかについて検討した。</p> <p>さらに、B「炉心損傷・放射性物質放出への進展とメカニズム」は、①～⑦に細分化されているが、①「圧力・水位・温度の挙動」、②「炉心損傷過程・デブリ挙動」、③「RPV漏えい」及び④「PCV漏えい」は、MAAPコードによる事象進展解析に直接的に関係する可能性があると考えられる。一方で、⑤「核種放出・線量上昇・汚染」、及び⑥「水素爆発」は、MAAPコードによる事象進展解析を参考にしつつも、MAAPコード以外の計算コード・手法による評価を「有効性評価」として最終的に実施すること</p>	泊3号炉		(1)	原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について	(2)	コア・コンクリート反応について	(3)	水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動	(4)	原子炉格納容器の気相漏えいについて	<p>記載内容の相違</p> <p>・泊は福島第一原子力発電所事故における未確認・未解明事項において留意すべき項目の選定方法について記載</p>
泊3号炉												
(1)	原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について											
(2)	コア・コンクリート反応について											
(3)	水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動											
(4)	原子炉格納容器の気相漏えいについて											

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード (MAAP 新知見への対応)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>から、ここでは着目しないこととした。また、⑦「その他」についても、MAAP コードでの事象進展解析には関係しないものと判断した。その結果、B①～B④の中から7項目が残った。B①のうち、2号機-7「強制減圧後の原子炉圧力の上昇について」は有効性評価において主要因と影響を考慮済であること、2号機-11「原子炉格納容器の気相漏えいについて」はB④1号機-6「原子炉格納容器の気相漏えいについて」と概ね重複すること、B③のうち、3号機-9「原子炉圧力容器の気相漏えいについて」は1号機-5「原子炉圧力容器の気相漏えいについて」と概ね重複することから片方で代表させた。選定フローについては図2、選定した7項目と採否については表2に示す。</p> <p>以上より、B①～B④の4項目で細分化される福島第一原子力発電所事故の未確認・未解明事項に対して、それぞれから1項目を抽出した。</p> <div style="text-align: right;">以上</div>  <p style="text-align: center;">図1 東電報告書における福島第一原子力発電所事故未確認・未解明事項の分類 (報告書 P.90 より抜粋)</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード (MAAP 新知見への対応)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<pre> graph TD A[抽出された52項目] --> B{MAAPの事象進展に直接関係するか} B -- NO --> C["(分類A、C、D、Bの⑦)"] B -- YES --> D{最終的にMAAPで評価するか} D -- NO --> E["(分類Bの⑤、⑥)"] D -- YES --> F{PWRに置換え可能か} F -- NO --> G["(分類Bの①～④のうち13項目)"] F -- YES --> H["(項目Bの①～④のうち7項目)"] H --> I{重複、類似、考慮していないか} I -- NO --> J["(分類B①～④の7項目のうち3項目)"] I -- YES --> K["【採用項目】 B 炉心損傷・放射性物質放出への進展とメカニズムからそれぞれ代表的な1項目を以下の通り抽出 ①水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動 ②コア・コンクリート反応について ③原子炉圧力容器からの気相漏えいの発生について ④原子炉格納容器の気相漏えいについて"] C --> L["【不採用項目】 A 機器の動作・応答・特性(①～⑥) C 地震・津波(①、②) D その他(ヒューマンファクター) B 炉心損傷・放射性物質放出への進展とメカニズム(①～④の16項目、⑤、⑥、⑦)"] </pre>	

図2 福島第一原子力発電所事故未確認・未解明事項から有効性評価において留意すべき項目の選定フロー

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部MAAPコード（MAAP新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																								
	<p style="text-align: center;">表2 選定した7項目について</p> <table border="1" data-bbox="1117 263 1944 952"> <thead> <tr> <th data-bbox="1117 263 1196 300">細分類</th> <th data-bbox="1196 263 1650 300">項目</th> <th data-bbox="1650 263 1944 300">採否</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="1117 300 1196 400">B①</td> <td data-bbox="1196 300 1650 400">2号機-7 強制減圧後の原子炉圧力の上昇について</td> <td data-bbox="1650 300 1944 400">不採用 主な要因は有効性評価にて考慮済</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 400 1196 472"></td> <td data-bbox="1196 400 1650 472">2号機-10 水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動</td> <td data-bbox="1650 400 1944 472">採用</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 472 1196 609"></td> <td data-bbox="1196 472 1650 609">2号機-11 原子炉格納容器の気相漏えいについて</td> <td data-bbox="1650 472 1944 609">採用 ただし、概ね内容重複するためB④1号機-6にて代表させた</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 609 1196 681">B②</td> <td data-bbox="1196 609 1650 681">共通-5 コア・コンクリート反応について</td> <td data-bbox="1650 609 1944 681">採用</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 681 1196 753">B③</td> <td data-bbox="1196 681 1650 753">1号機-5 原子炉圧力容器の気相漏えいについて</td> <td data-bbox="1650 681 1944 753">採用</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 753 1196 890"></td> <td data-bbox="1196 753 1650 890">3号機-9 原子炉圧力容器の気相漏えいについて</td> <td data-bbox="1650 753 1944 890">採用 ただし、概ね内容重複するためB③1号機-5にて代表させた</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1117 890 1196 952">B④</td> <td data-bbox="1196 890 1650 952">1号機-6 原子炉格納容器の気相漏えいについて</td> <td data-bbox="1650 890 1944 952">採用</td> </tr> </tbody> </table>	細分類	項目	採否	B①	2号機-7 強制減圧後の原子炉圧力の上昇について	不採用 主な要因は有効性評価にて考慮済		2号機-10 水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動	採用		2号機-11 原子炉格納容器の気相漏えいについて	採用 ただし、概ね内容重複するためB④1号機-6にて代表させた	B②	共通-5 コア・コンクリート反応について	採用	B③	1号機-5 原子炉圧力容器の気相漏えいについて	採用		3号機-9 原子炉圧力容器の気相漏えいについて	採用 ただし、概ね内容重複するためB③1号機-5にて代表させた	B④	1号機-6 原子炉格納容器の気相漏えいについて	採用	
細分類	項目	採否																								
B①	2号機-7 強制減圧後の原子炉圧力の上昇について	不採用 主な要因は有効性評価にて考慮済																								
	2号機-10 水素リッチな蒸気を放出した際の凝縮挙動	採用																								
	2号機-11 原子炉格納容器の気相漏えいについて	採用 ただし、概ね内容重複するためB④1号機-6にて代表させた																								
B②	共通-5 コア・コンクリート反応について	採用																								
B③	1号機-5 原子炉圧力容器の気相漏えいについて	採用																								
	3号機-9 原子炉圧力容器の気相漏えいについて	採用 ただし、概ね内容重複するためB③1号機-5にて代表させた																								
B④	1号機-6 原子炉格納容器の気相漏えいについて	採用																								

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAP コード（MAAP 新知見への対応））

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>[参考文献]</p> <p>[1] 東京電力株式会社, “MAAP コードによる炉心・格納容器の状態の推定,” 平成 24 年 3 月 12 日</p> <p>[2] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第3回進捗報告,” 平成 27 年 5 月 20 日</p> <p>[3] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “圧力抑制室保有水の温度成層化による原子炉格納容器圧力等への影響等の検討,” 平成 24 年 2 月 1 日</p> <p>[4] Y. Kojima, et al., “MAAP Enhancements for Ascertaining and Analyzing Reactor Core Status in Fukushima Daiichi NPP”, Proceedings of ICAPP 2014, Charlotte, USA, April 6-9, 2014, Paper 14209.</p> <p>[5] Electric Power Research Institute, “Modular Accident Analysis Program 5 (MAAP5) Applications Guidance”, May 2015.</p> <p>[6] “IN-VESSEL CORE DEBRIS RETENTION AND COOLABILITY Workshop Proceedings”, 3-6 March 1998, Garching, Germany (NEA/CSNI/R(98)18).</p> <p>[7] D. F. Tsurikov, et al., “Main Results of the MASCA 1 and 2 Projects”, Russian Research Centre “KURCHATOV INSTITUTE”, OECD MASCA Project (2007).</p> <p>[8] M. T. Farmer, et al., “Corium Coolability under Ex-Vessel Debris Cooling Tests”, Proc. Of OECD/CSNI Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).</p> <p>[9] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI Project Final Report”, OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).</p> <p>[10] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI-2 Project Final Report”, OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).</p> <p>[11] Q. Zhou, et al., “Benchmark of MCCI Model in MAAP5.02 against OECD CCI Experiment Series”, Proceedings of ICAPP 2014, ICAPP-14352, Charlotte, USA, 2014.</p>	<p>[参考文献]</p> <p>[1] 東京電力株式会社, “MAAP コードによる炉心・格納容器の状態の推定,” 平成 24 年 3 月 12 日</p> <p>[2] 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告,” 2022 年 11 月 20 日</p> <p>[3] Electric Power Research Institute, “Modular Accident Analysis Program 5 (MAAP5) Applications Guidance, Desktop Reference for Using MAAP5 Software -Phase 3 Report,” November 2017</p> <p>[4] “IN-VESSEL CORE DEBRIS RETENTION AND COOLABILITY Workshop Proceedings”, 3-6 March 1998, Garching, Germany (NEA/CSNI/R(98)18).</p> <p>[5] D. F. Tsurikov, et al., “Main Results of the MASCA 1 and 2 Projects”, Russian Research Centre “KURCHATOV INSTITUTE”, OECD MASCA Project (2007).</p> <p>[6] M. T. Farmer, et al., “Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments”, Proc. of OECD/CSNI Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany (1999).</p> <p>[7] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI Project Final Report”, OECD/MCCI-2005-TR06 (2006).</p> <p>[8] M. T. Farmer, et al., “OECD MCCI-2 Project Final Report”, OECD/MCCI-2010-TR07 (2010).</p> <p>[9] Q. Zhou, C.Y. Paik, and P.B. McMinn, “Enhancements in MAAP5.03+ MCCI and Corium Coolability Models and Benchmarks against OECD CCI Tests,” NURETH-16, Chicago, IL, August 30-September 4, 2015.</p> <p>[10] Y. Kojima, et al., “MAAP Enhancements for Ascertaining and Analyzing Reactor Core Status in Fukushima Daiichi NPPs”, Proceedings of ICAPP2014, Charlotte, USA, April 6-9, 2014, Paper 14209.</p>	<p>参考文献の相違</p> <p>記載箇所の相違 ・泊の[10]は女川の[4]に相当</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">参考資料2</p> <p style="text-align: center;">JASMIN E</p> <p>目次</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 使用実績及び解析モデルについて <ol style="list-style-type: none"> 2.1 使用実績 2.2 解析モデル <ol style="list-style-type: none"> 2.2.1 背景 2.2.2 解析モデルの構成 2.2.3 解析モデルの説明 2.3 入出力 <ol style="list-style-type: none"> 2.3.1 入力例 2.3.2 出力例 3. 解析結果の例示 4. 水蒸気爆発実験への適用例 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 粗混合実験解析 <ol style="list-style-type: none"> 4.1.1 解析条件 4.1.2 解析結果 4.2 爆発実験解析 <ol style="list-style-type: none"> 4.2.1 解析条件 4.2.2 解析結果 5. 参考文献 <p>添付1 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて</p> <p>添付2 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p>	<p style="text-align: center;">参考資料1</p> <p style="text-align: center;">JASMIN Eコード</p> <p>目次</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 使用実績及び解析モデルについて <ol style="list-style-type: none"> 2.1 使用実績 2.2 解析モデル <ol style="list-style-type: none"> 2.2.1 背景 2.2.2 解析モデルの構成 2.2.3 解析モデルの説明 2.3 入出力 <ol style="list-style-type: none"> 2.3.1 入力例 2.3.2 出力例 3. 解析結果の例示 4. 水蒸気爆発実験への適用例 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 粗混合実験解析 <ol style="list-style-type: none"> 4.1.1 解析条件 4.1.2 解析結果 4.2 爆発実験解析 <ol style="list-style-type: none"> 4.2.1 解析条件 4.2.2 解析結果 5. 参考文献 <p>添付1 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p>	<p>※資料の記載が先行と同等であることを確認するため、先行の記載を参考とした。</p> <p>※泊は女川の文献適用範囲外であり、個別解析から評価しているため、同考察については補足説明12に掲載</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>1. はじめに</p> <p>格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の熔融燃料-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、熔融炉心と原子炉圧力容器外の水が接触し、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。</p> <p>この原子炉圧力容器外の熔融燃料-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、ペDESTAL等の原子炉格納容器の構造部材の支持機能に対する影響を確認しておくことは、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。</p> <p>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JASMINECODEコードについて、以下の内容をまとめる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用実績及び解析モデル ・実験結果とのベンチマーク <p>2. 使用実績及び解析モデルについて</p> <p>2.1 使用実績</p> <p>水蒸気爆発解析コードJASMINECODE(JAEA Simulator for Multiphase Interactions and Explosions)^[1]は、日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)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脹過程(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。</p> <p>表2-1にJASMINECODEの主な適用実績を示す。JASMINECODEは、FARO及びKROTOSにおける各種実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他、SERENA実験解析への適用^[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。</p> <p>(1)格納容器破損確率評価への適用</p> <p>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、水蒸気爆発の解析コードであるJASMINECODE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。</p> <p>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。</p> <p>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原子炉格納容器内熱水力条件及び熔融炉心条件が設定されている。</p>	<p>1. はじめに</p> <p>格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の熔融燃料-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、熔融炉心と原子炉圧力容器外の水が接触し、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。</p> <p>この原子炉圧力容器外の熔融燃料-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、ペDESTAL等の原子炉格納容器の構造部材の支持機能に対する影響を確認しておくことは、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。</p> <p>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JASMINECODEコードについて、以下の内容をまとめる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用実績及び解析モデル ・実験結果とのベンチマーク <p>2. 使用実績及び解析モデルについて</p> <p>2.1 使用実績</p> <p>水蒸気爆発解析コードJASMINECODE(JAEA Simulator for Multiphase Interactions and Explosions)^[1]は、日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)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脹過程(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。</p> <p>表2-1にJASMINECODEの主な適用実績を示す。JASMINECODEは、FARO及びKROTOSにおける各種実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他、SERENA実験解析への適用^[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。</p> <p>(1)格納容器破損確率評価への適用</p> <p>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、水蒸気爆発の解析コードであるJASMINECODE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。</p> <p>PWRモデルプラントを対象とした原子炉下部キャビティ内水蒸気爆発解析の概要は以下のとおりである。</p> <p>既存の確率論的安全評価より、頻度の高いプラント損傷状態で原子炉下部キャビティ冠水の可能性があるものとして、「小破断LOCA、早期炉心損傷、格納容器スプレイ作動」、「小破断LOCA、後期炉心損傷、格納容器スプレイ作動」、「小破断LOCA、早期炉心損傷、格納容器スプレイ不作動」、「小破断LOCA、後期炉心損傷、格納容器スプレイ不作動」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原子炉格納容器内熱水力条件及び熔融炉心条件が設定されている。</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>解析体系は二次元円筒座標系であり、径方向13×軸方向33セルの解析格子でベデスタル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。</p> <p>JASMIN E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、JASMIN E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。</p> <p>(2)SERENA 実験解析への適用</p> <p>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 実験データを用いて、JASMIN Eコードを用い、SERENA 実験 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微細化過程における熱流動解析が実施⁽²⁾されている。</p> <p>SERENA 実験 FARO 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熔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、二次元軸対称としてモデル化されている。</p>	<p>解析体系は二次元円筒座標系であり、径方向18×軸方向36セルの解析格子で原子炉下部キャビティ周辺が模擬されている。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。</p> <p>JASMIN E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、JASMIN E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。</p> <p>(2)SERENA 実験解析への適用</p> <p>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 実験データを用いて、JASMIN Eコードを用い、SERENA 実験 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微細化過程における熱流動解析が実施⁽²⁾されている。</p> <p>SERENA 実験 FARO 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熔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、二次元軸対称としてモデル化されている。</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉			泊発電所3号炉			相違理由
表 2-1 JASMIN Eコードの主な適用実績			表 2-1 JASMIN Eコードの主な適用実績			
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	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	JAEA		解析実施者	JAEA	
	実施時期	2007年11月		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JASMIN Eコードを物理モデルとして使用した。評価対象はBWR Mark-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。		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JASMIN Eコードを物理モデルとして使用した。評価対象はBWR Mark-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	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		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		実施時期	平成21年度	
	研究概要	FCI解析コードJASMIN E Ver.3を用いて、SERENA実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。		研究概要	FCI解析コードJASMIN E Ver.3を用いて、SERENA実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。	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2.2 解析モデル</p> <p>2.2.1 背景</p> <p>図2-1 で示すとおり、水蒸気爆発は、熱的デトネーションモデル⁽⁴⁾において、4つの段階があると考えられている。それぞれの過程に関する現象を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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(細粒化)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及び溶融した液滴の微細化の開始 ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の微細化及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) <div data-bbox="147 560 1039 786"> </div> <p>図2-1 水蒸気爆発の現象論的な4つの段階⁽⁴⁾</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冷却材と粗混合状態にあり、続く爆発過程に関与し得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 <p>2.2.2 解析モデルの構成</p> <p>原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用(以下「FCI」という。)で想定される現象とJASMIN Eコードの概念と構成を図2-2に示す。JASMIN E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⁽⁵⁾の修正版である。</p> <p>JASMIN Eコードは、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。</p> <p>粗混合過程と爆発過程の物理特性を表2-2にまとめる。</p>	<p>2.2 解析モデル</p> <p>2.2.1 背景</p> <p>図2-1 で示すとおり、水蒸気爆発は、熱的デトネーションモデル⁽⁴⁾において、4つの段階があると考えられている。それぞれの過程に関する現象を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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(細粒化)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及び溶融した液滴の微細化の開始 ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の微細化及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) <div data-bbox="1066 560 1957 786"> </div> <p>図2-1 水蒸気爆発の現象論的な4つの段階⁽⁴⁾</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冷却材と粗混合状態にあり、続く爆発過程に関与し得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 <p>2.2.2 解析モデルの構成</p> <p>原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用(以下「FCI」という。)で想定される現象とJASMIN Eコードの概念と構成を図2-2に示す。JASMIN E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⁽⁵⁾の修正版である。</p> <p>JASMIN Eコードは、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。</p> <p>粗混合過程と爆発過程の物理特性を表2-2にまとめる。</p>	

女川原子力発電所2号炉			泊発電所3号炉			相違理由
表 2-2 粗混合過程及び爆発過程の物理特性			表 2-2 粗混合過程及び爆発過程の物理特性			
物理特性	粗混合	爆発 (伝搬, 膨張)	物理特性	粗混合	爆発 (伝搬, 膨張)	
支配的な物理過程	重力 (浮力) による対流	衝撃波の伝搬	支配的な物理過程	重力 (浮力) による対流	衝撃波の伝搬	
時間スケール	0.1-10 s	0.1-10ms	時間スケール	0.1-10 s	0.1-10ms	
融体サイズスケール	1-10mm	1-100 μ m	融体サイズスケール	1-10mm	1-100 μ m	

Ex-vessel FCI

Premixing mode

Explosion mode

Ex-vessel FCI

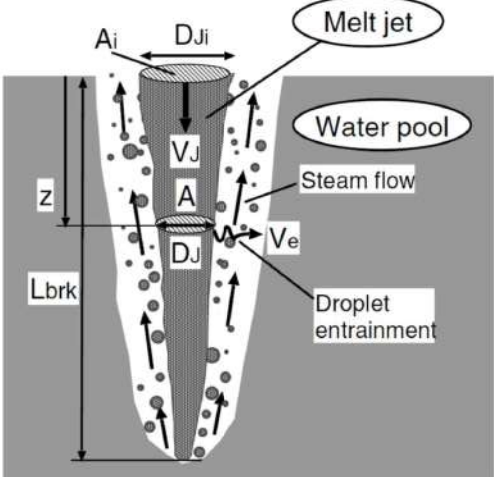
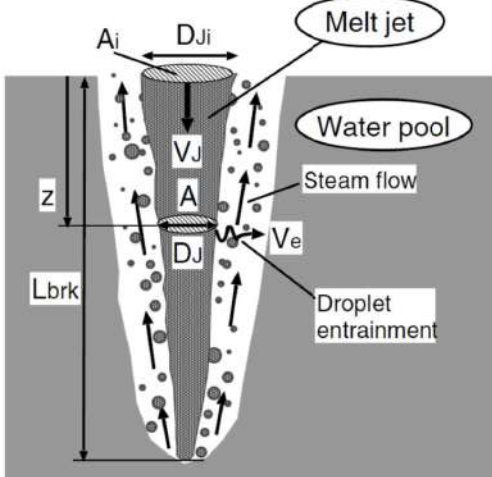
Premixing mode

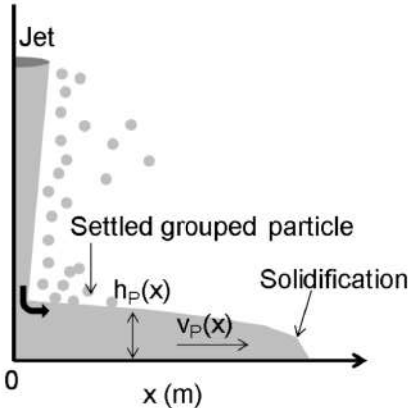
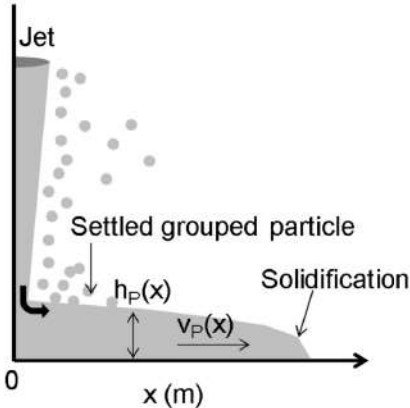
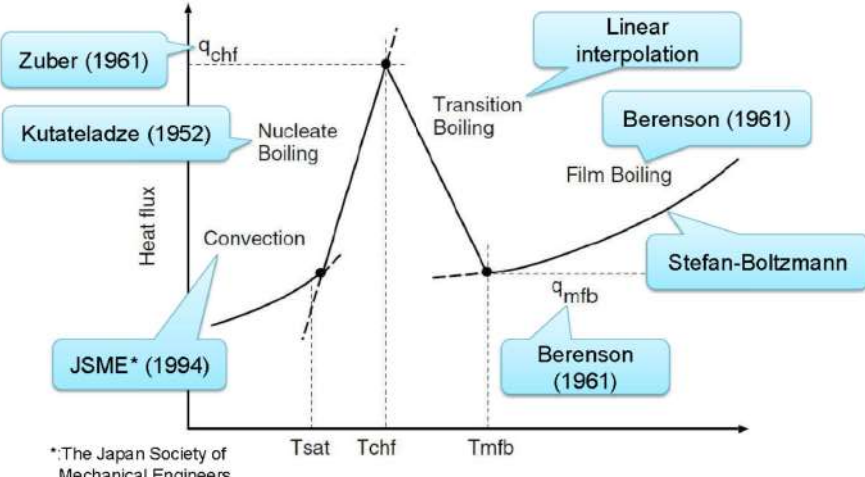
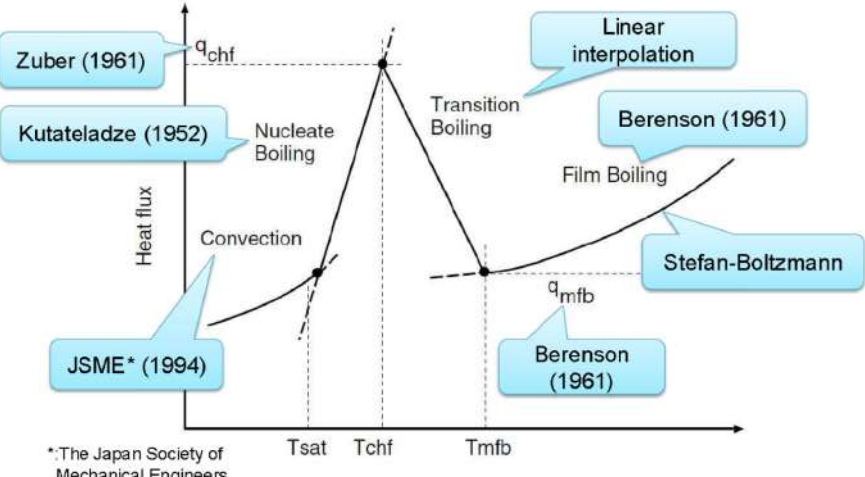
Explosion mode

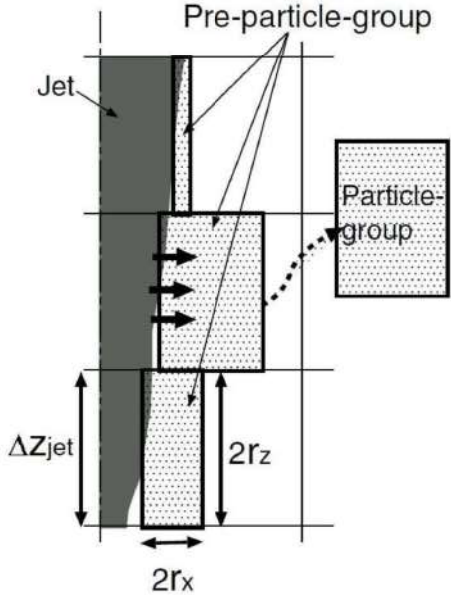
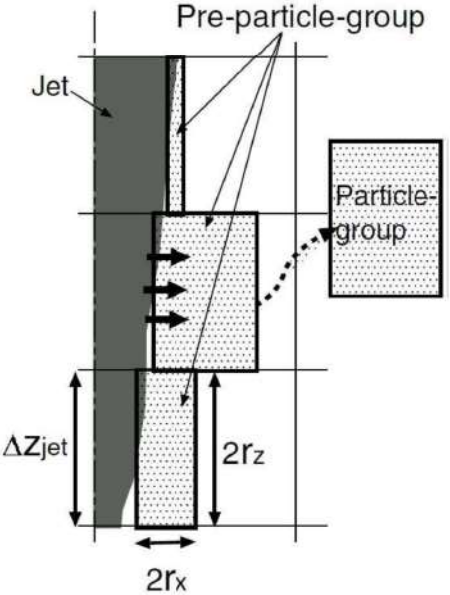
図 2-2 JASMIN Eコードの概念と構成 ⁽¹⁾

図 2-2 JASMIN Eコードの概念と構成 ⁽¹⁾

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2.2.3 解析モデルの説明</p> <p>(1) 融体ジェットモデル</p> <p>融体ジェットに対しては、Z方向一次元の質量、内部エネルギー及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2-3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。</p> <p>ジェット分裂長は、Bond数$Bo_J > 50$の条件ではTaylor型相関式⁽⁶⁾が用いられ、それ以外の場合はSaitoらの相関式⁽⁷⁾によって次のとおり算出される。</p> $\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = \begin{cases} 10 \left(\frac{\rho_j}{\rho_l} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_j} \geq 50 \\ 2.1 \left(\frac{\rho_j}{\rho_l} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_{ji}^2}{g \cdot D_{ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_j} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$ <p>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。</p> <p>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ともに線形的に減少するという仮定で計算される。</p> $V_e = \frac{V_j}{2} \cdot \left(\frac{D_{ji}}{L_{brk}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$ <p>ここで、H_{pl}はプール深さ、V_jはジェットの流速である。</p> <p>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。</p> $\dot{m}_e = C_{ent} \cdot \rho_j \cdot V_e \quad (2.2-3)$ <p>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。</p> <p>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。したがって、ジェットから冷却水への熱流束は0と設定される。</p>	<p>2.2.3 解析モデルの説明</p> <p>(1) 融体ジェットモデル</p> <p>融体ジェットに対しては、Z方向一次元の質量、内部エネルギー及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2-3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。</p> <p>ジェット分裂長は、Bond数$Bo_J > 50$の条件ではTaylor型相関式⁽⁶⁾が用いられ、それ以外の場合はSaitoらの相関式⁽⁷⁾によって次のとおり算出される。</p> $\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = \begin{cases} 10 \left(\frac{\rho_l}{\rho_j} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_j} \geq 50 \\ 2.1 \left(\frac{\rho_l}{\rho_j} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_{ji}^2}{g \cdot D_{ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j \cdot g \cdot D_{ji}^2}{\sigma_j} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$ <p>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。</p> <p>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ともに線形的に減少するという仮定で計算される。</p> $V_e = \frac{V_j}{2} \cdot \left(\frac{D_{ji}}{L_{brk}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$ <p>ここで、H_{pl}はプール深さ、V_jはジェットの流速である。</p> <p>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。</p> $\dot{m}_e = C_{ent} \cdot \rho_j \cdot V_e \quad (2.2-3)$ <p>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。</p> <p>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。したがって、ジェットから冷却水への熱流束は0と設定される。</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>図2-3 ジェット分裂モデルの概要⁽¹⁾</p>	<p>図2-3 ジェット分裂モデルの概要⁽¹⁾</p>	
<p>(2) 融体プールモデル</p> <p>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2-4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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ X方向一次元の質量、エネルギー及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及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2-5) ・ 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(ポイド効果)は、ベース熱流束にポイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。 	<p>(2) 融体プールモデル</p> <p>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2-4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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ X方向一次元の質量、エネルギー及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及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2-5) ・ 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(ポイド効果)は、ベース熱流束にポイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。 	

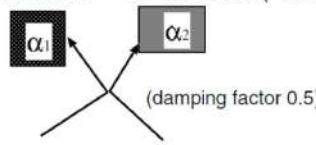
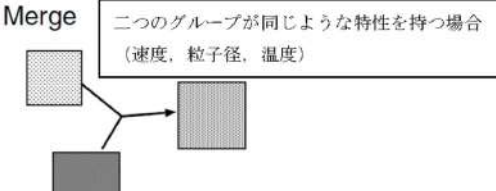
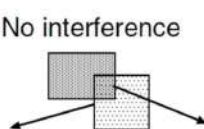
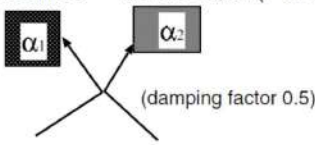
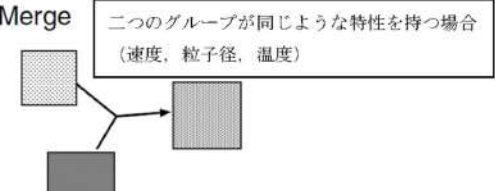
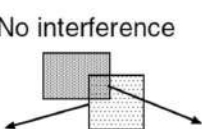
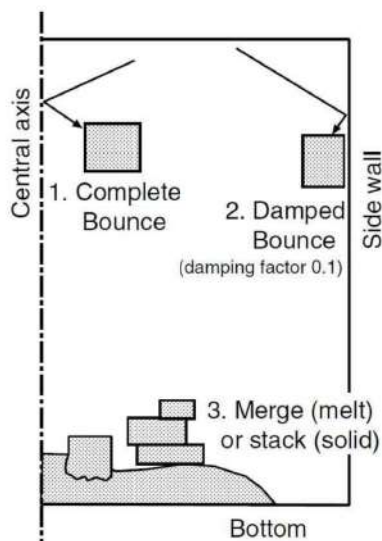
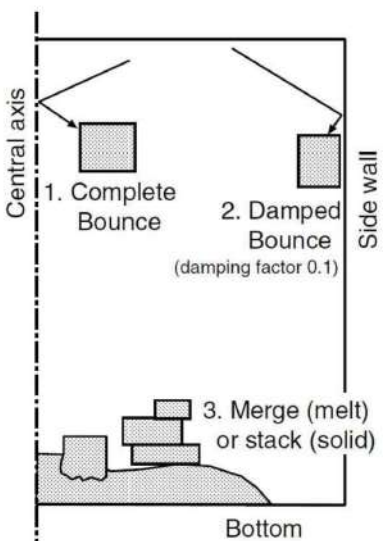
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>図 2-4 融体プールモデル模式図⁽¹⁾</p>	 <p>図 2-4 融体プールモデル模式図⁽¹⁾</p>	
 <p>図 2-5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)</p>	 <p>図 2-5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)</p>	

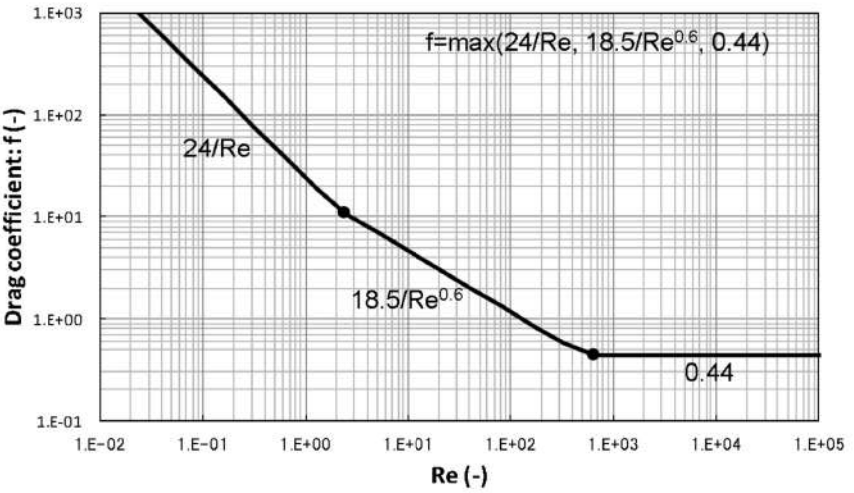
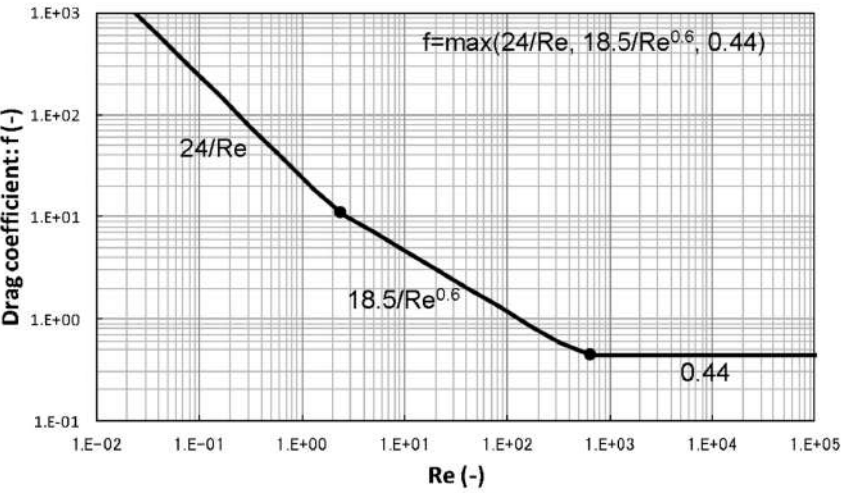
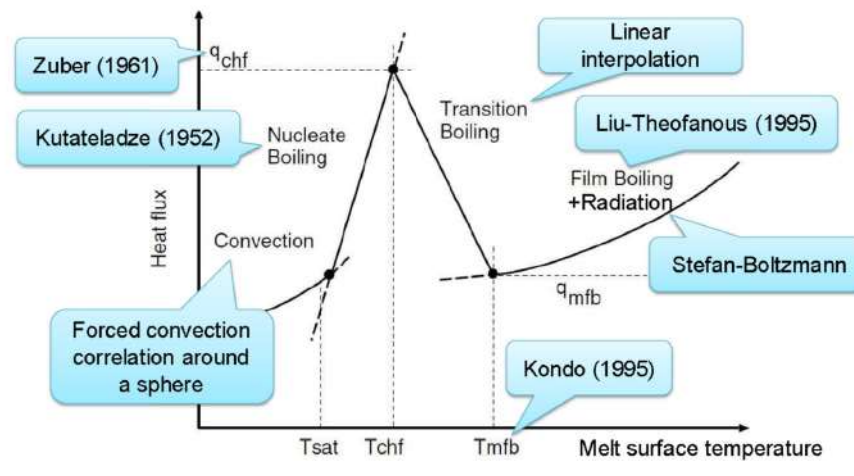
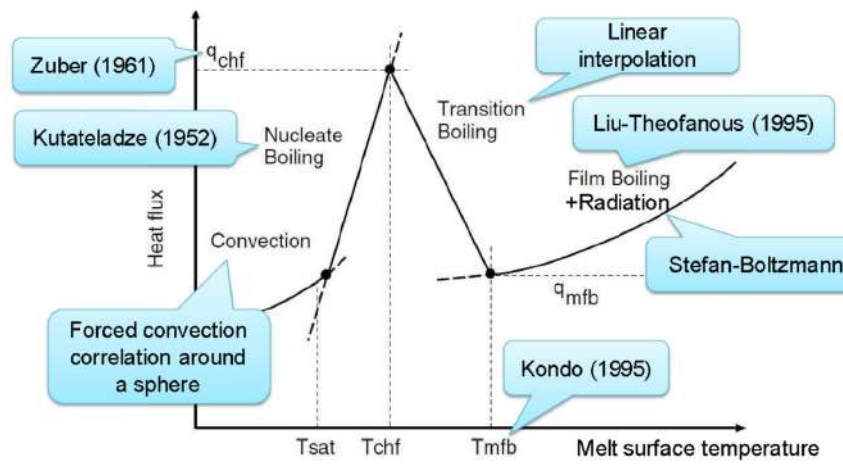
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) 融体粒子モデル</p> <p>実機体系のような大規模シミュレーションを可能とするために、グループ化された粒子(粒子群)の概念が導入された。図2-6に融体粒子モデルの概要図を示す。融体粒子モデルの概要を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ “粒子群”とは、同じ特性を持ち、X-Z平面上の有限な空間を占める粒子のグループである。 ・ 粒子群の実際の形状、回転、拡散特性のような属性は無視される。 ・ それぞれの粒子群の代表粒子の動きやヒートバランスは、ラグランジュ方程式によって計算される。 ・ 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。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 粒子数がN_{per}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_{lim}を超える。  <p>図2-6 融体粒子モデル概要図⁽¹⁾</p>	<p>(3) 融体粒子モデル</p> <p>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2-6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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ “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。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 粒子数がN_{per}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_{lim}を超える。  <p>図2-6 融体粒子モデル概要図⁽¹⁾</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

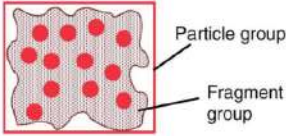
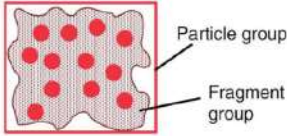
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>次に、粒子群の取り扱い手法について説明する。</p> <p>図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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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$\alpha_{pack}(=0.6)$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。 <p>図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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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. 粒子群が頂部又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。 <p>図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。</p> <p>融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 粒子表面における熱伝達率は、図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及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。 	<p>次に、粒子群の取り扱い手法について説明する。</p> <p>図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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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$\alpha_{pack}(=0.6)$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。 <p>図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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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. 粒子群が頂部又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。 <p>図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。</p> <p>融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 粒子表面における熱伝達率は、図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及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。 	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>1. Bounce $\alpha_1 + \alpha_2 > \alpha_{pack} (=0.6)$ </p> <p>2. Merge </p> <p>3. No interference </p> <p>図 2-7 粒子群間のインターフェースモデル ^[1]</p>	<p>1. Bounce $\alpha_1 + \alpha_2 > \alpha_{pack} (=0.6)$ </p> <p>2. Merge </p> <p>3. No interference </p> <p>図 2-7 粒子群間のインターフェースモデル ^[1]</p>	
<p>Central axis </p> <p>1. Complete Bounce</p> <p>2. Damped Bounce (damping factor 0.1)</p> <p>3. Merge (melt) or stack (solid)</p> <p>Bottom</p> <p>図 2-8 粒子群の境界での取扱い ^[1]</p>	<p>Central axis </p> <p>1. Complete Bounce</p> <p>2. Damped Bounce (damping factor 0.1)</p> <p>3. Merge (melt) or stack (solid)</p> <p>Bottom</p> <p>図 2-8 粒子群の境界での取扱い ^[1]</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>Drag coefficient: $f(-)$</p> <p>$f = \max(24/Re, 18.5/Re^{0.6}, 0.44)$</p> <p>Re (-)</p>	 <p>Drag coefficient: $f(-)$</p> <p>$f = \max(24/Re, 18.5/Re^{0.6}, 0.44)$</p> <p>Re (-)</p>	
<p>図 2-9 融体粒子の流体抗力係数</p>  <p>Heat flux</p> <p>Melt surface temperature</p> <p>Convection</p> <p>Nucleate Boiling</p> <p>Transition Boiling</p> <p>Film Boiling + Radiation</p> <p>q_{chf}</p> <p>q_{mfb}</p> <p>T_{sat} T_{chf} T_{mfb}</p> <p>Zuber (1961)</p> <p>Kutateladze (1952)</p> <p>Linear interpolation</p> <p>Liu-Theofanous (1995)</p> <p>Stefan-Boltzmann</p> <p>Kondo (1995)</p> <p>Forced convection correlation around a sphere</p>	<p>図 2-9 融体粒子の流体抗力係数</p>  <p>Heat flux</p> <p>Melt surface temperature</p> <p>Convection</p> <p>Nucleate Boiling</p> <p>Transition Boiling</p> <p>Film Boiling + Radiation</p> <p>q_{chf}</p> <p>q_{mfb}</p> <p>T_{sat} T_{chf} T_{mfb}</p> <p>Zuber (1961)</p> <p>Kutateladze (1952)</p> <p>Linear interpolation</p> <p>Liu-Theofanous (1995)</p> <p>Stefan-Boltzmann</p> <p>Kondo (1995)</p> <p>Forced convection correlation around a sphere</p>	
<p>図 2-10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)</p>	<p>図 2-10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)</p>	

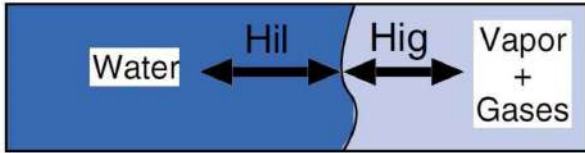
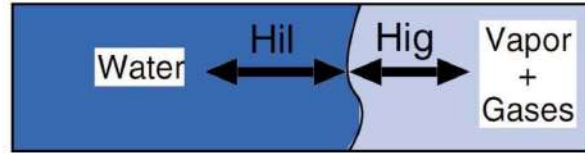
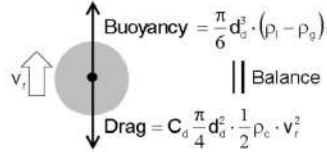
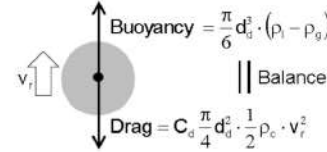
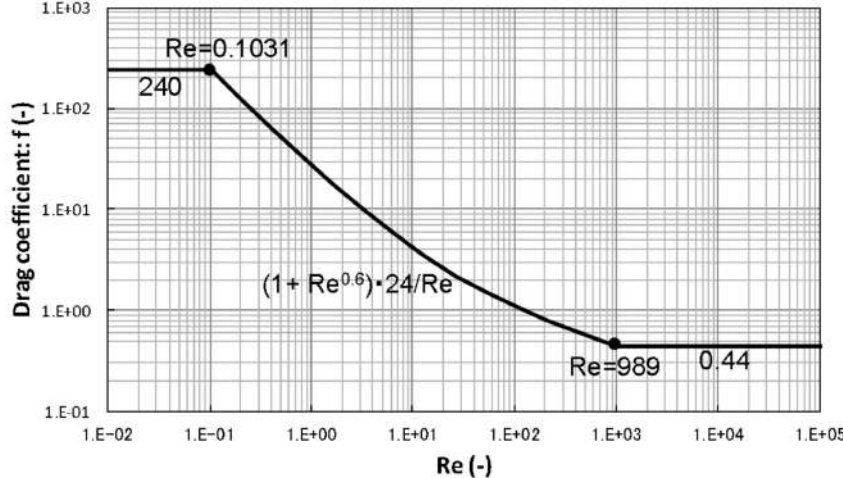
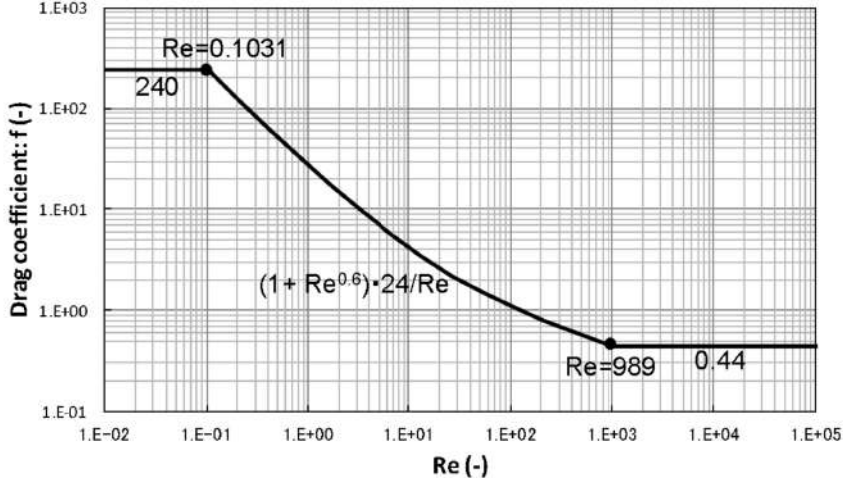
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) トリガリングモデル</p> <p>JASMIN Eコードを用いた解析では、粗混合計算結果を爆発計算に引き継ぐ際に、トリガリングと呼ばれる爆発のきっかけをユーザーが任意のタイミングで与えることにより、爆発解析を実施する。トリガリングモデルの特徴を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 局所的な圧力上昇と瞬時のガス膨張によりトリガリングを与える。 ・ 圧力伝播は微細化を誘発する。 <p>(5) 微細化モデル</p> <p>爆発過程は以下の概念を基本としてモデル化されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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微細化する。 ・ 微細化粒子は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。熱放出は微細化粒子の発生率に依存する。 <p>上記過程を評価するために、図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”微細粒群”が追加された。</p> <p>微細粒群は粒子群から発生した微細化粒子の集合体である。微細粒群は以下のように扱われる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 微細化粒子の発生： 微細化粒子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。 $\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$ $\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$ <p>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微細粒群の質量、M_f は粒子群全体から生成する微細粒群の質量、n_p は粒子群の粒子数である。一粒子からの微細化率\dot{m}_fは構成式(2.2-7)により与えられる。</p> ・ 伝熱とエネルギー保存： 微細化粒子表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、微細化粒子内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。微細化粒子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。微細化粒子の単位質量当たりの熱放出量\dot{q}_fを用いて、微細化粒子のエネルギー保存は以下のように表せる。 	<p>(4) トリガリングモデル</p> <p>JASMIN E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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 圧力伝播は微細化を誘発する。 <p>(5) 微細化モデル</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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微細化する。 ・ 微細化粒子は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。熱放出は微細化粒子の発生率に依存する。 <p>上記過程を評価するために、図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”微細粒群”が追加された。</p> <p>微細粒群は粒子群から発生した微細化粒子の集合体である。微細粒群は以下のように扱われる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 微細化粒子の発生： 微細化粒子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。 $\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$ $\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$ <p>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微細粒群の質量、M_f は粒子群全体から生成する微細粒群の質量、n_p は粒子群の粒子数である。一粒子からの微細化率\dot{m}_fは構成式(2.2-7)により与えられる。</p> ・ 伝熱とエネルギー保存： 微細化粒子表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、微細化粒子内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。微細化粒子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。微細化粒子の単位質量当たりの熱放出量\dot{q}_fを用いて、微細化粒子のエネルギー保存は以下のように表せる。 	

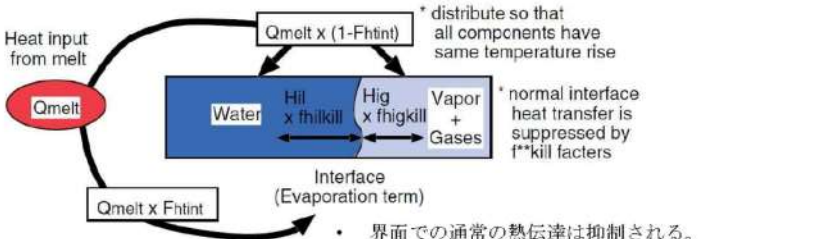
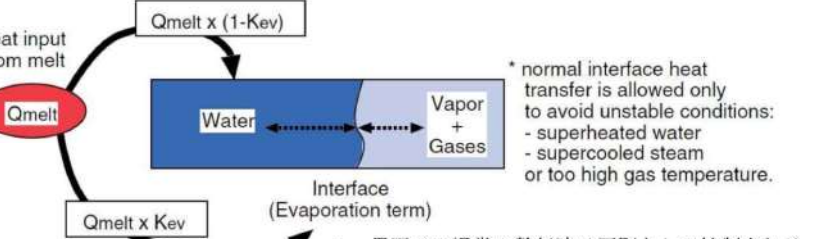
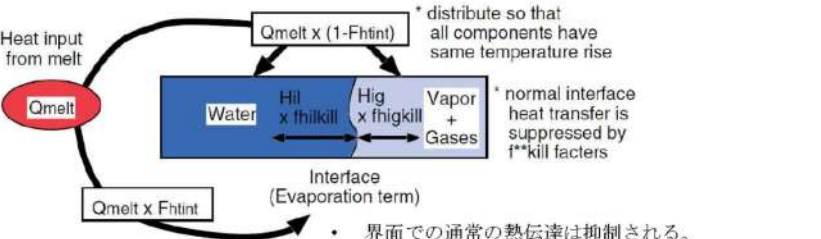
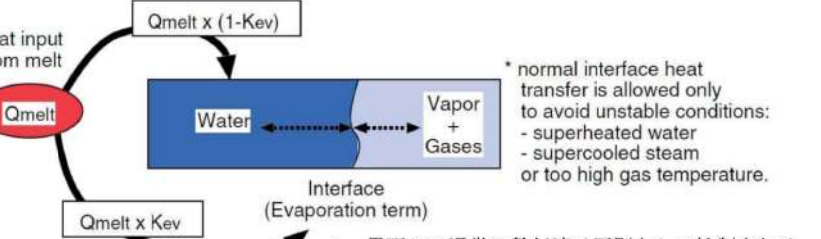
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$ <p>ここで、e_f と e_p は微細化粒子と粒子群の粒子の比内部エネルギーである。母粒子 (粒子群の粒子) の比内部エネルギーは爆発過程では一定であると仮定する。</p> <p>微細化粒子の主要な作用は急速熱放出で、運動論的な観点は重要ではないことから、微細化粒子に対する運動方程式は解かず、微細化粒子は母粒子群に付随すると仮定する。</p>  <p>図 2-11 粒子群と微細粒群⁽¹⁾</p> <p>一融体粒子からの微細化\dot{m}_f は以下のように求める。</p> $\dot{m}_f = C_{frg} \cdot \frac{1}{t_b^*} \cdot \frac{\pi}{6} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$ $t_b^* = \begin{cases} 1 & \text{:Carachario setal.model} \\ 13.7/Bo^{3/4} & \text{:Yuen etal.model} \end{cases} \quad (2.2-8)$ $Bo = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$ $t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p D_p}{\rho_c v_r}} \quad (2.2-10)$ <p>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_b はニュートン域の値 0.44 を使用する。C_{frg} は実験定数である。</p> <p>(6) 二相流モデル</p> <p>JASMIN Eコード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。</p>	$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$ <p>ここで、e_f と e_p は微細化粒子と粒子群の粒子の比内部エネルギーである。母粒子 (粒子群の粒子) 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。</p> <p>微細化粒子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、微細化粒子に対する運動方程式は解かず、微細化粒子は母粒子群に付随すると仮定する。</p>  <p>図 2-11 粒子群と微細粒群⁽¹⁾</p> <p>一融体粒子からの微細化\dot{m}_f は以下のように求める。</p> $\dot{m}_f = C_{frg} \frac{1}{t_b^*} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$ $t_b^* = \begin{cases} 1 & \text{: Carachario setal.model} \\ 18.7/Bo^{1/4} & \text{: Yuen etal.model} \end{cases} \quad (2.2-8)$ $Bo = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$ $t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p D_p}{\rho_c v_r}} \quad (2.2-10)$ <p>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_b はニュートン域の値 0.44 を使用する。C_{frg} は実験定数である。</p> <p>(6) 二相流モデル</p> <p>JASMIN Eコード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。</p>	

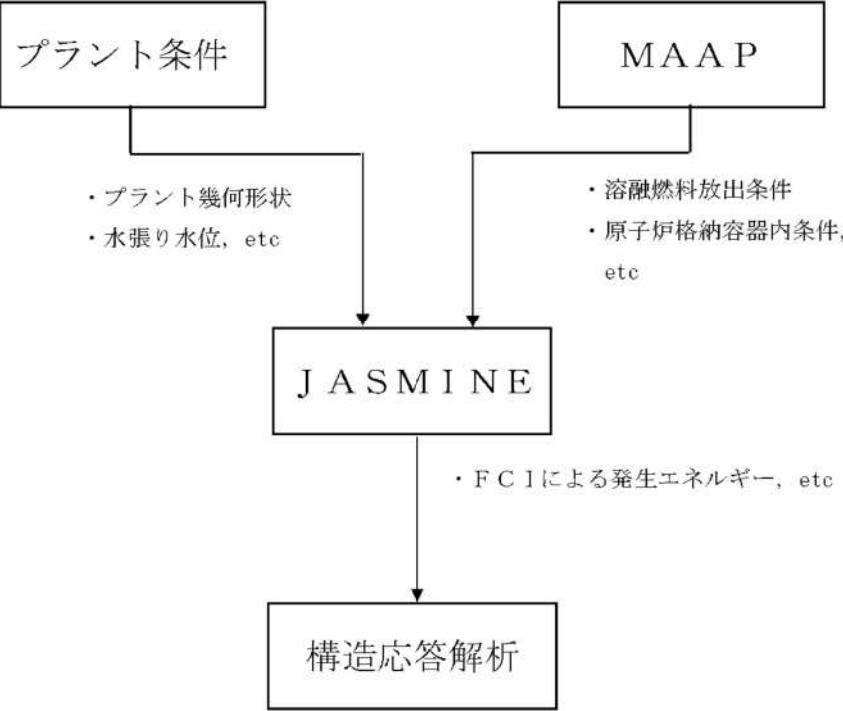
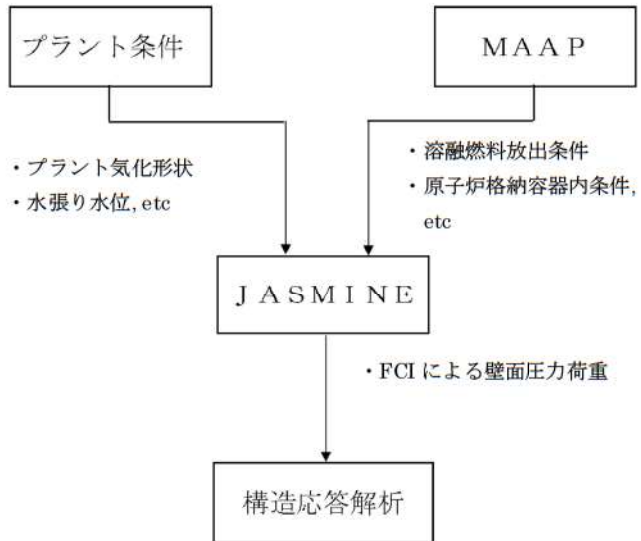
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

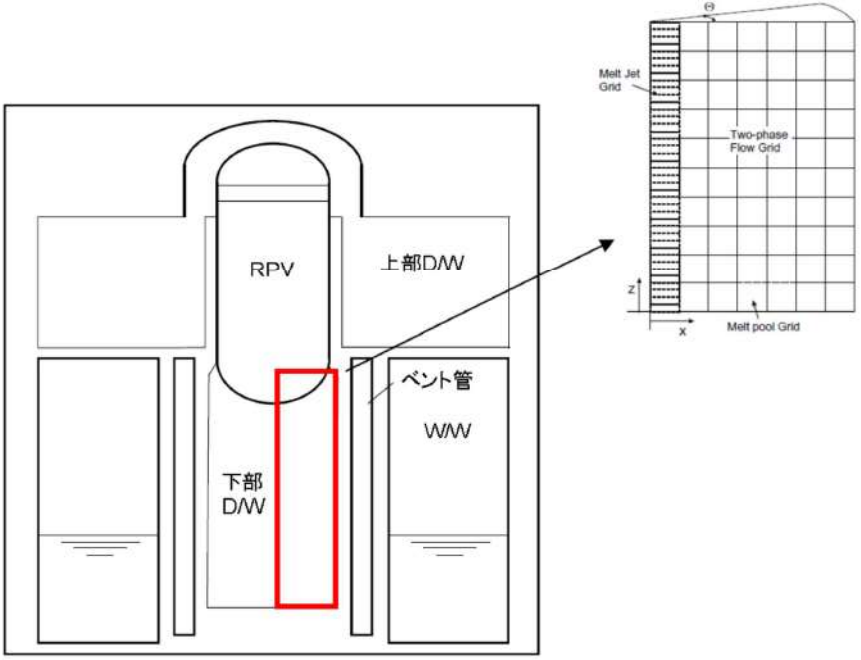
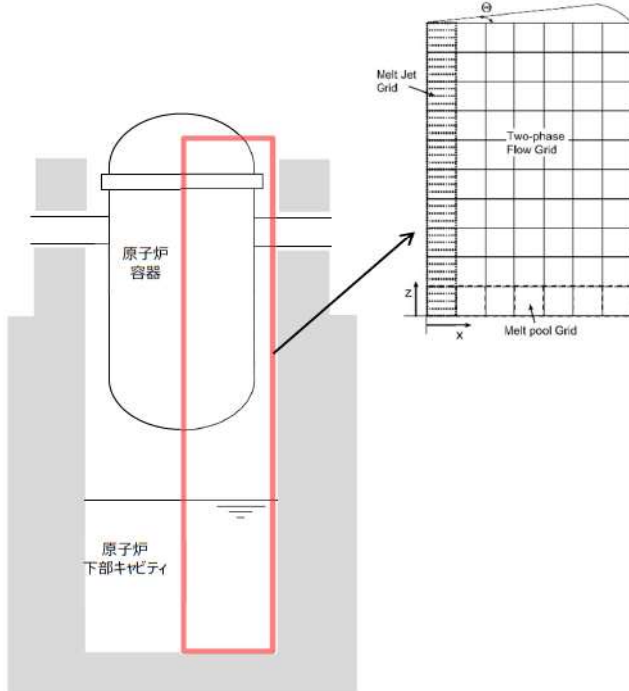
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<ul style="list-style-type: none"> ・ ACE-3Dは円筒座標系の三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及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、混合性ガスの質量及び内部エネルギー方程式を解く。 ・ 融体ブルと融体粒子、微細化粒子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2-12参照)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2-13参照)。 ・ 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2-13参照)。 ・ 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ(図2-14参照)。 ・ 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図2-15(a)に示す。図2-15(a)においてfhtint, fhilkill, fhigkillは粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータである。fhtintは、融体からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を示す。fhilkill, fhigkillは、それぞれサブクール水と気液界面の熱伝達係数、過熱蒸気と気液界面の熱伝達係数の乗数である。 ・ 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構を図2-15(b)に示す。Kevは爆発解析にて微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を表す。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ACE-3Dは円筒座標系の三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及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、混合性ガスの質量及び内部エネルギー方程式を解く。 ・ 融体ブルと融体粒子、微細化粒子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2-12参照)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2-13参照)。 ・ 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2-13参照)。 ・ 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ(図2-14参照)。 ・ 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図2-15(a)に示す。図2-15(a)においてfhtint, fhilkill, fhigkillは粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータである。fhtintは、融体からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を示す。fhilkill, fhigkillは、それぞれサブクール水と気液界面の熱伝達係数、過熱蒸気と気液界面の熱伝達係数の乗数である。 ・ 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構を図2-15(b)に示す。Kevは爆発解析にて微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を表す。 	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p style="text-align: center;">Interface (Evaporation or condensation)</p>	 <p style="text-align: center;">Interface (Evaporation or condensation)</p>	
<p style="text-align: center;">図 2-12 水とガスの界面における熱伝達 ^(a)</p>	<p style="text-align: center;">図 2-12 水とガスの界面における熱伝達 ⁽¹⁾</p>	
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>d_d: 気泡又は液滴の径, 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}: 臨界ウエバー数 (水滴 4.0, 気泡 7.5), σ: 表面張力</p> </div> $d_d = \frac{We_{cr} \cdot \sigma}{\rho_c \cdot v_r^2}$	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>d_d: 気泡又は液滴の径, 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}: 臨界ウエバー数 (水滴 4.0, 気泡 7.5), σ: 表面張力</p> </div> $d_d = \frac{We_{cr} \cdot \sigma}{\rho_c \cdot v_r^2}$	
<p style="text-align: center;">図 2-13 水滴及び気泡における力のつり合い</p>	<p style="text-align: center;">図 2-13 水滴及び気泡における力のつり合い</p>	
		
<p style="text-align: center;">図 2-14 水滴及び気泡の流体抗力係数</p>	<p style="text-align: center;">図 2-14 水滴及び気泡の流体抗力係数</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>* distribute so that all components have same temperature rise</p> <p>* normal interface heat transfer is suppressed by f**kill factors</p> <p>Interface (Evaporation term)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 界面での通常の熱伝達は抑制される。 • fhtint, fhikill, fhigkill は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータ。 <p>(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構⁽¹⁾</p>  <p>* normal interface heat transfer is allowed only to avoid unstable conditions: - superheated water - supercooled steam or too high gas temperature.</p> <p>Interface (Evaporation term)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 界面での通常の熱伝達は原則として抑制される。 • Kev は爆発解析にて、微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合。 <p>(b) 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構</p>	 <p>* distribute so that all components have same temperature rise</p> <p>* normal interface heat transfer is suppressed by f**kill factors</p> <p>Interface (Evaporation term)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 界面での通常の熱伝達は抑制される。 • fhtint, fhikill, fhigkill は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータ。 <p>(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構^[1]</p>  <p>* normal interface heat transfer is allowed only to avoid unstable conditions: - superheated water - supercooled steam or too high gas temperature.</p> <p>Interface (Evaporation term)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 界面での通常の熱伝達は原則として抑制される。 • Kev は爆発解析にて、微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合。 <p>(b) 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構</p>	
<p>図 2-15 二相流への伝熱量分配機構⁽¹⁾</p>	<p>図 2-15 二相流への伝熱量分配機構^[1]</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2.3 入出力</p> <p>本章では、JASMIN Eコードによる水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。</p> <p>図2-16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JASMIN Eコードの入力条件の設定を行う。</p> <p>JASMIN E解析の評価結果は、水蒸気爆発時の原子炉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。</p>  <p>図2-16 水蒸気爆発解析の流れ</p>	<p>2.3 入出力</p> <p>本章では、JASMIN Eコードによる水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。</p> <p>図2-16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JASMIN Eコードの入力条件の設定を行う。</p> <p>JASMIN E解析の評価結果は、水蒸気爆発時の原子炉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。</p>  <p>図2-16 水蒸気爆発解析の流れ</p>	<p>構造応答解析手法の相違によりJASMIN Eコードから引き継ぐ入力条件が異なる(大飯と同様)。</p> <p>なお、泊はJASMIN E解析で得られた水蒸気爆発負荷(壁面での圧力履歴)を構造応答解析の境界条件として直接使用するのに対し、女川はJASMIN E解析で得られた水蒸気爆発負荷を構造計算にて模擬(その手法の適切さを別途確認(LS-DYNA, 添付1))している。</p>

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2.3.1 入力例</p> <p>(1) 計算体系の幾何形状</p> <p>計算領域は、図 2-17 に示すとおり、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。</p> <p>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。</p> <p>X-Z 平面でのメッシュ分割は、JASMIN E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 2-18 にメッシュ分割の例を示す。</p>  <p>図 2-17 計算体系の幾何形状の例</p>	<p>2.3.1 入力例</p> <p>(1) 計算体系の幾何形状</p> <p>計算領域は、図 2-17 に示すとおり、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。</p> <p>原子炉圧力容器破損時における原子炉下部キャビティ領域での水蒸気爆発解析を実施する場合、計算体系を原子炉容器、原子炉下部キャビティ壁面、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。</p> <p>X-Z 平面でのメッシュ分割は、JASMIN E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、原子炉下部キャビティ領域について、ベッセル、原子炉下部キャビティ空間(液相、気相)、原子炉下部キャビティ壁面等を定義することが可能である。図 2-18 にメッシュ分割の例を示す。</p>  <p>図 2-17 計算体系の幾何形状の例</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>メッシュ分割 X方向: 28 Z方向: 34</p> <p>図 2-18 J A S M I N E 解析のメッシュ分割の例</p>	<p>図 2-18 J A S M I N E 解析のメッシュ分割の例</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 溶融炉心物性値</p> <p>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、J A S M I N Eコードに付属されており、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 に jasmine.corium2 の物性値を例示する。</p> <p>jasmine.corium : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%)</p> <p>jasmine.corium2 : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%), 融点, リキダス, ソリダスを実機相当条件に設定</p> <p>jasmine.corium3 : TROI 実験条件 (UO₂/ZrO₂=70/30wt%)</p> <p>(3) 主要入力値</p> <p>表2-4 に(1),(2)以外の主要な入力例を示す。</p> <p>(4) 入力条件の設定の考え方</p> <p>入力条件は、表2-4 に示された入力条件の例で示すように、代表的な水蒸気爆発実験を最適に再現するために設定した入力値をベースとし、水蒸気爆発事象に伴う不確かさを踏まえて、以下の保守性を考慮して設定している。なお、評価結果に対して各々が相互に影響し得る条件については、総合的に保守性が担保できることを考慮した設定としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メルト放出速度：メルト放出速度は、破損口にかかるデブリ堆積圧等の圧力から計算される。メルト放出速度としては、原子炉压力容器（以下「RPV」という。）の低圧破損時に最も大きくなる条件である溶融デブリ全量が下部プレナムに堆積した場合を想定した値を設定。 ・メルト放出口径：粗混合融体質量を保守的に評価するために、RPV底部の貫通配管で最も大きい口径0.15mの値を保守的に丸めて□として設定。 ・粗混合時液滴径：既存のFCI実験（KROTOS, FARO, TROI, CCM）のザウター平均粒径は0～3mm程度⁽⁸⁾とされている。一般に粗混合時液滴径が大きい程、粒子から冷却材への伝熱が低下して粒子が固化しにくくなり、冷却材ボイド率も低下することで、粗混合融体質量が大きい傾向があると考えられ、このような傾向は、トリガリング位置を底部、トリガリングタイミングを粗混合融体質量がピークとなる条件において、感度解析により確認されている。上述のトリガ条件を前提として、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、上述のザウター平均粒径を包絡する□を設定。 ・トリガリング位置：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として、中心軸上の底部から軸方向2セル目を選定。 ・トリガリングタイミング：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。 <p style="text-align: right;">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> <p style="text-align: right;">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。</p>	<p>(2) 溶融炉心物性値</p> <p>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、J A S M I N Eコードに付属されており、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 に jasmine.corium2 の物性値を例示する。</p> <p>jasmine.corium : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%)</p> <p>jasmine.corium2 : FARO/KROTOS 実験条件 (UO₂/ZrO₂=80/20wt%), 融点, リキダス, ソリダスを実機相当条件に設定</p> <p>jasmine.corium3 : TROI 実験条件 (UO₂/ZrO₂=70/30wt%)</p> <p>(3) 主要入力値</p> <p>表2-4 に(1),(2)以外の主要な入力例を示す。</p> <p>(4) 入力条件の設定の考え方</p> <p>入力条件は、表2-4 に示された入力条件の例で示すように、代表的な水蒸気爆発実験を最適に再現するために設定した入力値をベースとし、水蒸気爆発事象に伴う不確かさを踏まえて、以下の保守性を考慮して設定している。なお、評価結果に対して各々が相互に影響し得る条件については、総合的に保守性が担保できることを考慮した設定としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メルト放出速度：メルト放出速度は、破損口にかかるデブリ堆積圧等の圧力から計算される。メルト放出速度としては、原子炉压力容器（以下「RV」という。）の低圧破損時に溶融デブリが下部プレナムに堆積した場合を想定した値を設定。 ・メルト放出口径：粗混合融体質量を保守的に評価するために、RV底部の計装案内管口径0.038mの値を保守的に丸めて□として設定。 ・粗混合時液滴径：既存のFCI実験（KROTOS, FARO, TROI, CCM）のザウター平均粒径は0～3mm程度⁽⁸⁾とされている。一般に粗混合時液滴径が大きい程、粒子から冷却材への伝熱が低下して粒子が固化しにくくなり、冷却材ボイド率も低下することで、粗混合融体質量が大きい傾向があると考えられ、このような傾向は、トリガリング位置を底部、トリガリングタイミングを粗混合融体質量がピークとなる条件において、感度解析により確認されている。上述のトリガ条件を前提として、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、上述のザウター平均粒径を包絡する□を設定。 ・トリガリング位置：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として、中心軸上の底部から軸方向7セル目を選定。 ・トリガリングタイミング：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。 <p style="text-align: right;">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉																																																																																											
<p>表2-3 JASMIN E解析における物性値</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No.</th> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">物性値</th> <th rowspan="2">備考</th> </tr> <tr> <th>数値</th> <th>単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>融点</td><td rowspan="12" style="background-color: #cccccc;"></td><td>[K]</td><td rowspan="12">組み込みライブラリ (jasmine.corium2) に基づく値</td></tr> <tr><td>2</td><td>固相線温度</td><td>[K]</td></tr> <tr><td>3</td><td>液相線温度</td><td>[K]</td></tr> <tr><td>4</td><td>固相密度</td><td>[kg/m³]</td></tr> <tr><td>5</td><td>液相密度</td><td>[kg/m³]</td></tr> <tr><td>6</td><td>液相比熱</td><td>[J/(kg・K)]</td></tr> <tr><td>7</td><td>固相比熱</td><td>[J/(kg・K)]</td></tr> <tr><td>8</td><td>融解潜熱</td><td>[J/kg]</td></tr> <tr><td>9</td><td>熱伝導率</td><td>[W/(m・K)]</td></tr> <tr><td>10</td><td>粘性係数</td><td>[Pa・s]</td></tr> <tr><td>11</td><td>表面張力</td><td>[N/m]</td></tr> <tr><td>12</td><td>輻射率</td><td>[-]</td></tr> </tbody> </table>	No.	項目	物性値		備考	数値	単位	1	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	融解潜熱	[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	[-]	<p>表2-3 JASMIN E解析における物性値</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No.</th> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">物性値</th> <th rowspan="2">備考</th> </tr> <tr> <th>数値</th> <th>単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>融点</td><td rowspan="12" style="background-color: #cccccc;"></td><td>[K]</td><td rowspan="12">組み込みライブラリ (jasmine.corium2) に基づく値</td></tr> <tr><td>2</td><td>固相線温度</td><td>[K]</td></tr> <tr><td>3</td><td>液相線温度</td><td>[K]</td></tr> <tr><td>4</td><td>固相密度</td><td>[kg/m³]</td></tr> <tr><td>5</td><td>液相密度</td><td>[kg/m³]</td></tr> <tr><td>6</td><td>液相比熱</td><td>[J/(kg・K)]</td></tr> <tr><td>7</td><td>固相比熱</td><td>[J/(kg・K)]</td></tr> <tr><td>8</td><td>融解潜熱</td><td>[J/kg]</td></tr> <tr><td>9</td><td>熱伝導率</td><td>[W/(m・K)]</td></tr> <tr><td>10</td><td>粘性係数</td><td>[Pa・s]</td></tr> <tr><td>11</td><td>表面張力</td><td>[N/m]</td></tr> <tr><td>12</td><td>輻射率</td><td>[-]</td></tr> </tbody> </table>	No.	項目	物性値		備考	数値	単位	1	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	融解潜熱	[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	[-]	<p>相違理由</p>
No.			項目	物性値		備考																																																																																						
	数値	単位																																																																																										
1	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	融解潜熱		[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		[-]																																																																																									
No.	項目	物性値		備考																																																																																								
		数値	単位																																																																																									
1	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	融解潜熱		[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		[-]																																																																																									
<p>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。</p>	<p> : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>																																																																																											

女川原子力発電所2号炉

表2-4 JASMIINE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]	MAAP解析によると下部プレナム内の溶融デブリの酸化層の過熱度は約 [] であることから、溶融デブリの融点は jasmine 付属のメルトの物性値パッケージ jasmine.corium2 のリキダス [] に過熱度 [] を考慮した値を設定。
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]	RPV底部の貫通配管で最も口径の大きいCRDチューブ径 0.15mを保守的に丸めて [] を設定。
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)の粒径分布から代表粒子径として設定。
9	爆発後粒子径	0.00005	[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	1.0	[-]	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	5	[-]	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	ベダスタルの中心、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	粗混合融体質量の最初のピークとなる時刻	[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	5×10^4	[Pa]	マニュアルによるトリガ圧力の設定範囲 500kPa-10MPaより、500kPaを設定。

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。

泊発電所3号炉

表2-4 JASMIINE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]	
4	メルトジェット温度		[K]	MAAP解析によると下部プレナム内の溶融デブリの酸化層の過熱度は約 [] であることから、溶融デブリの融点は jasmine 付属のメルトの物性値パッケージ jasmine.corium2 のリキダス [] に、過熱度 [] に対して保守的に10Kを考慮した値を設定。
5	メルト放出速度		[m/s]	MAAP解析に基づくRV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]	RV底部の貫通部(計装案内管)口径0.038mを保守的に丸めて [] を設定。
7	プール水深		[m]	MAAP解析結果に基づき設定。原子炉容器底部から原子炉下部キャビティ床面までの水深は約5m。
8	粗混合時液滴径		[m]	大規模FCI実験結果(FARO, COTELS等)の粒径分布から代表粒子径として設定。
9	爆発後粒子径	0.00005	[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	1.0	[-]	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	5	[-]	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	原子炉下部キャビティ円筒部の中心、底からから2.7m	[m]	トリガ位置には中心軸上の底部から軸方向7セル目を選定。これは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を選定したものである。
13	トリガリングタイミング	粗混合融体質量の最初のピークとなる時刻	[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	5×10^5	[Pa]	マニュアルによるトリガ圧力の設定範囲 500kPa-10MPaより、500kPaを設定。

[] : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

相違理由

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

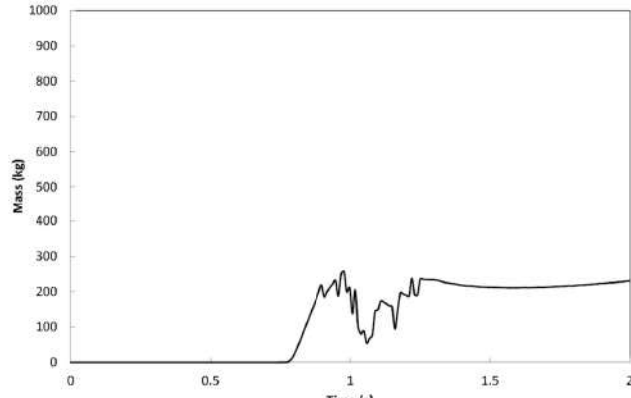
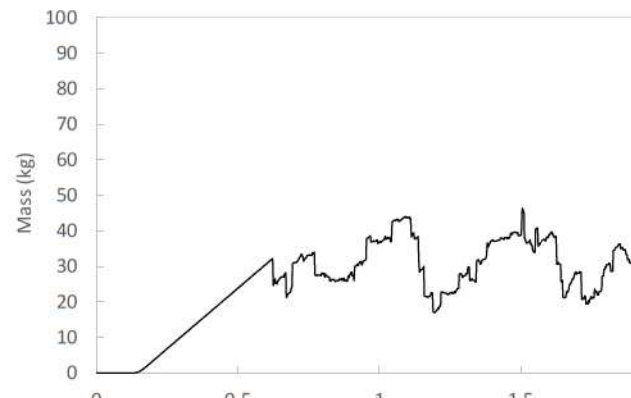
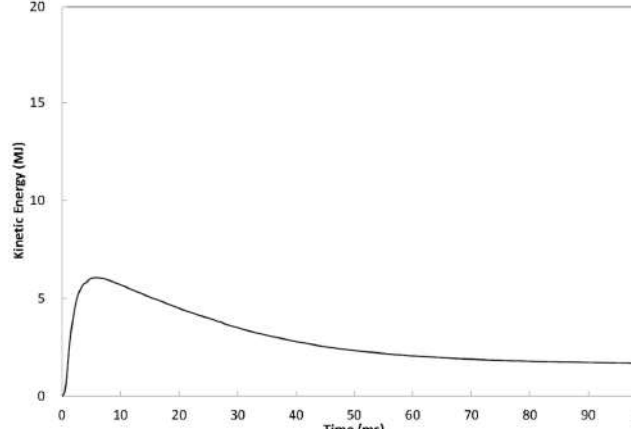
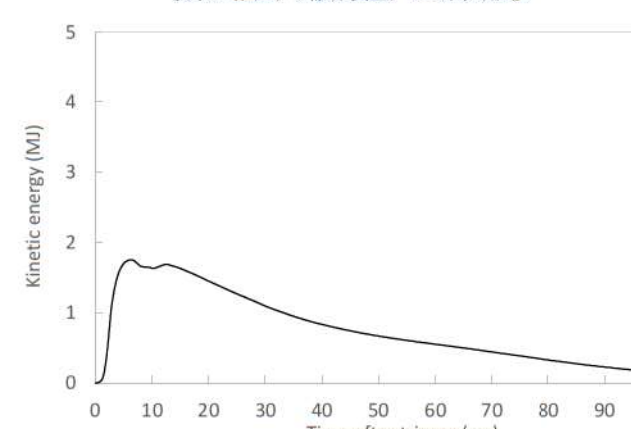
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉					泊発電所3号炉					相違理由
表2-4 JASMIN E解析における主な入力条件の例(2/2)					表2-4 JASMIN E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	No.	入力	値(定義)	単位	備考	
15	フラグメンテーションモデル	Caracharios(1983)モデル	[-]	-	15	フラグメンテーションモデル	Caracharios(1983)モデル	[-]	-	
16	フラグメンテーション条件	粒子温度の平均温度が融点以上	[-]	-	16	フラグメンテーション条件	粒子温度の平均温度が融点以上	[-]	-	
17	フラグメンテーション係数	0.35	[-]	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。	17	フラグメンテーション係数	0.35	[-]	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	10 ⁻³	[sec]		18	フラグメンテーション時間	10 ⁻³	[sec]		
19	蒸発に用いられるエネルギー割合	融体の寄与:0.02 フラグメント放熱の寄与:0.7	[-]		19	蒸発に用いられるエネルギー割合	融体の寄与:0.02 フラグメント放熱の寄与:0.7	[-]		
20	フラグメンテーションにおけるボイド緩和係数	ボイド率0.3~0.75でカットオフ	[-]		20	フラグメンテーションにおけるボイド緩和係数	ボイド率0.3~0.75でカットオフ	[-]	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	1×10 ⁷	[Pa]	ピーク圧力よりも低くかつトリガ閾値圧力500kPaよりも十分大きい圧力として設定。	21	トリガ点圧力	2×10 ⁶	[Pa]	ピーク圧力よりも低くかつトリガ閾値圧力500kPaよりも十分大きい圧力として設定。	
22	トリガ点ガス割合	粗混合解析結果の引継ぎ	[-]	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。	22	トリガ点ガス割合	粗混合解析結果の引継ぎ	[-]	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	1000	[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。	23	トリガ点ガス温度	1000	[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。	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2.3.2 出力例</p> <p>JASMININE 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。</p> <p>(1)粗混合過程</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>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溶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リングタイミングを設定する。</p> <p>JASMININEコード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リングタイミングを設定する。</p> <p>(2)爆発過程</p> <ul style="list-style-type: none"> 流体の運動エネルギーの時間変化 <p>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。</p> <p>3. 解析結果の例示</p> <p>本項では、ABWR代表プラントにおけるJASMININE解析結果例を示す。</p> <p>評価条件はそれぞれ以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 評価体系 : 図2-18 主な評価条件 : 表2-3, 表2-4 <p>(1)粗混合過程</p> <p>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秒後にトリガリングタイミングを設定している。</p> <p>(2)爆発過程</p> <p>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。</p>	<p>2.3.2 出力例</p> <p>JASMININE 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。</p> <p>(1)粗混合過程</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>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溶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リングタイミングを設定する。</p> <p>JASMININEコード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リングタイミングを設定する。</p> <p>(2)爆発過程</p> <ul style="list-style-type: none"> 流体の運動エネルギーの時間変化 <p>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。</p> <p>3. 解析結果の例示</p> <p>本項では、泊発電所3号炉におけるJASMININE解析結果例を示す。</p> <p>評価条件はそれぞれ以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 評価体系 : 図2-18 主な評価条件 : 表2-3, 表2-4 <p>(1)粗混合過程</p> <p>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0.6秒後にトリガリングタイミングを設定している。</p> <p>(2)爆発過程</p> <p>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2MJ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。</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>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</p>	 <p>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</p>	
 <p>図 3-2 流体運動エネルギーの時間的推移</p>	 <p>図 3-2 流体運動エネルギーの時間的推移</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

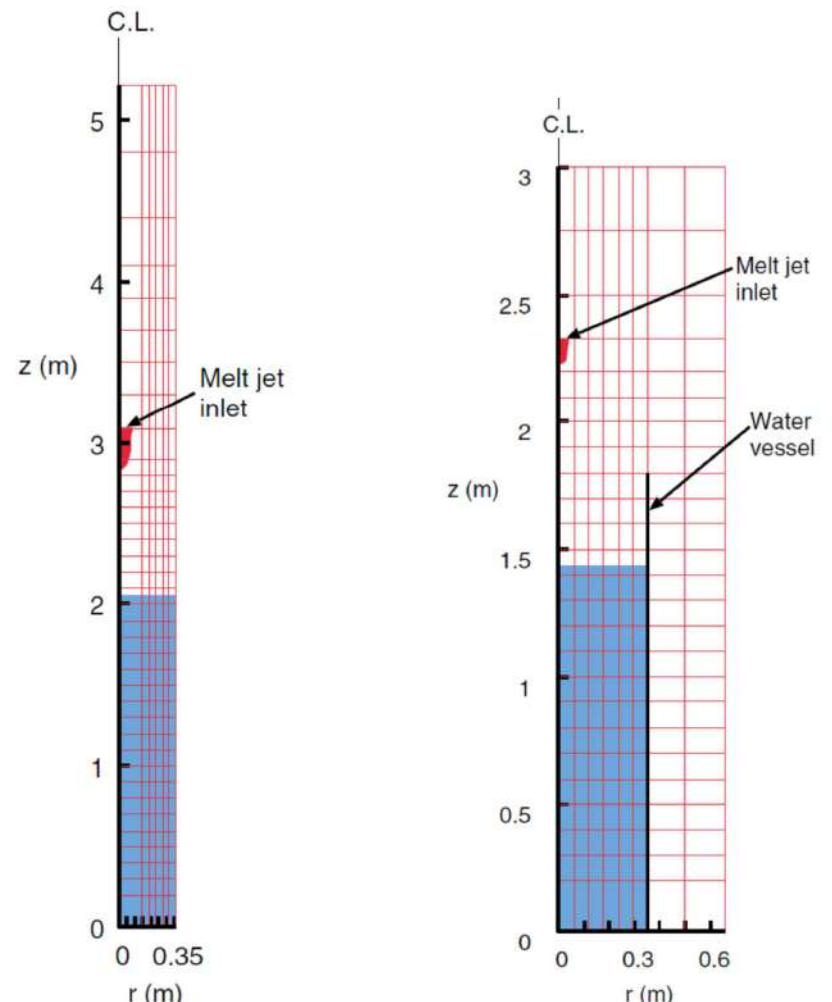
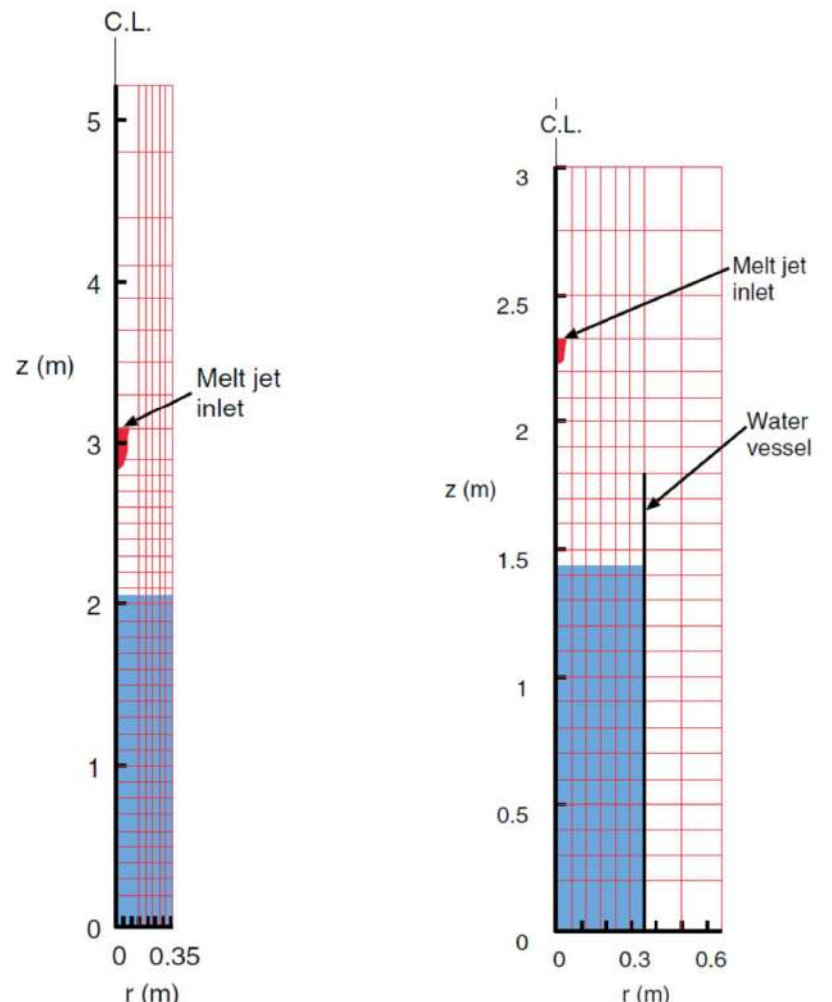
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

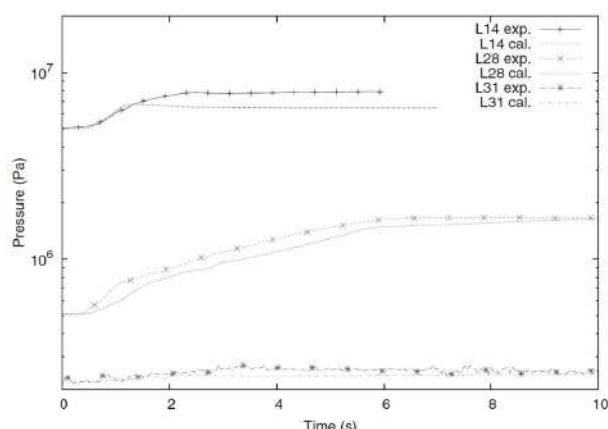
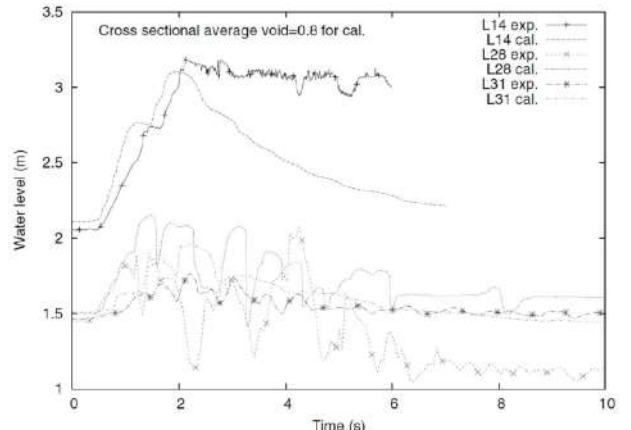
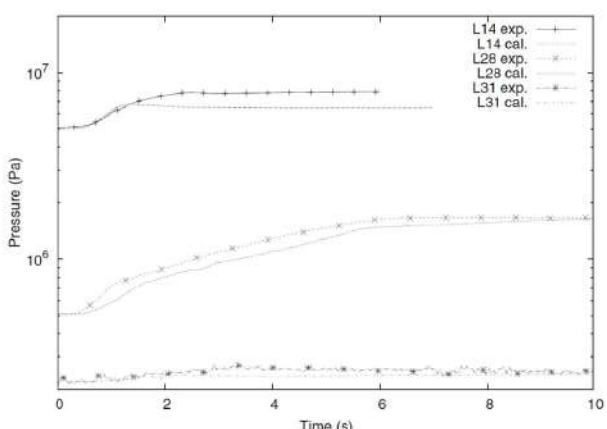
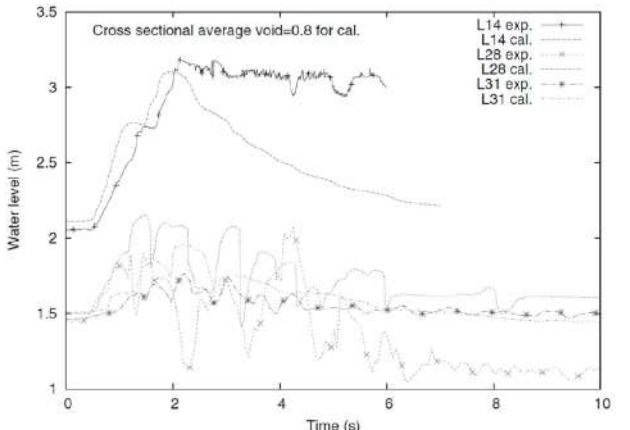
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4. 水蒸気爆発実験への適用例</p> <p>4.1 粗混合実験解析</p> <p>粗混合に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 実験に関するシミュレーションを、JAEA が実施している⁽¹⁾。FARO 実験では、熔融燃料としてコリウム(UO₂とZrO₂の混合物)を使用し、これら水をプールに落下させたときの、融体ジェット分裂やクエンチ時の加圧および水蒸気発生によるプール水位上昇等のデータが得られている。FARO 実験における実験装置の概要を図4-1に示す。JASMINEコードにおけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径等のパラメータの異なる3種類の実験ケースを選択している。これらの実験では水蒸気爆発が発生せず、かつ粗混合状態が確認できたため、粗混合に関するベンチマーク実験として選定された。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。</p> <p>L14 ケース：デブリの温度は3073K、水位は2.05m、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。</p> <p>L28 ケース：デブリの温度は3053K、水位は1.44m、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。</p> <p>L31 ケース：デブリの温度は2990K、水位は1.45m、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。</p> <p>4.1.1 解析条件</p> <p>ベンチマーク対象の実験ケース(L14, L28, L31)の実験条件及びそれぞれのベンチマーク解析条件を表4-1に示す。また、実験装置を模擬した解析モデルを図4-2に示す。</p>	<p>4. 水蒸気爆発実験への適用例</p> <p>4.1 粗混合実験解析</p> <p>粗混合に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 実験に関するシミュレーションを、JAEA が実施している⁽¹⁾。FARO 実験では、熔融燃料としてコリウム(UO₂とZrO₂の混合物)を使用し、これら水を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等のデータが得られている。FARO 実験における実験装置の概要を図4-1に示す。JASMINEコードにおけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径等のパラメータの異なる3種類の実験ケースを選択している。これらの実験では水蒸気爆発が発生せず、かつ粗混合状態が確認できたため、粗混合に関するベンチマーク実験として選定された。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。</p> <p>L14 ケース：デブリの温度は3073K、水位は2.05m、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。</p> <p>L28 ケース：デブリの温度は3053K、水位は1.44m、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。</p> <p>L31 ケース：デブリの温度は2990K、水位は1.45m、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。</p> <p>4.1.1 解析条件</p> <p>ベンチマーク対象の実験ケース(L14, L28, L31)の実験条件及びそれぞれのベンチマーク解析条件を表4-1に示す。また、実験装置を模擬した解析モデルを図4-2に示す。</p>	

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		<p>相違理由</p>
<p>図 4-1 FARO 実験装置 (9), (10)</p>	<p>図 4-1 FARO 実験装置 (9), (10)</p>	

女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉				相違理由
表 4-1 FARO 実験 (L14, L28 及び L31) の実験条件及び解析条件				表 4-1 FARO 実験 (L14, L28 及び L31) の実験条件及び解析条件				
	L14	L28	L31		L14	L28	L31	
Melt								
Material	Corium ($T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$, 80wt%UO ₂ -20wt%ZrO ₂)			Material	Corium ($T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(K)$, 80wt%UO ₂ -20wt%ZrO ₂)			
Released mass (kg)	125	175	92	Released mass (kg)	125	175	92	
Temperature (K)	3073	3053	2990	Temperature (K)	3073	3053	2990	
Jet diameter at inlet (mm)	92	44	48	Jet diameter at inlet (mm)	92	44	48	
Water								
Temperature (Subcool) (K)	537 (1)	424 (1)	291 (104)	Temperature (Subcool) (K)	537 (1)	424 (1)	291 (104)	
Pool depth (m)	2.05	1.44	1.45	Pool depth (m)	2.05	1.44	1.45	
Water vessel diameter (m)	0.71	0.71	0.71	Water vessel diameter (m)	0.71	0.71	0.71	
Cover gas								
Atmosphere	Steam	Steam	Argon	Atmosphere	Steam	Steam	Argon	
Initial pressure (MPa)	5.0	0.51	0.22	Initial pressure (MPa)	5.0	0.51	0.22	
Cover gas volume(m ³)	1.26	3.53	3.49	Cover gas volume(m ³)	1.26	3.53	3.49	
Results								
Pressure rise at plateau (MPa)	2.5	1.2	0.04	Pressure rise at plateau (MPa)	2.5	1.2	0.04	
Level swell (m)	~1.4	~0.6	~0.3	Level swell (m)	~1.4	~0.6	~0.3	
Agglomerated mass (kg)	20 (16%)	77 (44%)	0	Agglomerated mass (kg)	20 (16%)	77 (44%)	0	
Debris mean dia. ^{a)} (mm)	5.0	3.0	3.3	Debris mean dia. ^{a)} (mm)	5.0	3.0	3.3	
Analytical								
Grid (Water pool zone)	6×37(6×20)	8×25(6×14)		Grid (Water pool zone)	6×37(6×20)	8×25(6×14)		
Central column radius (m)	0.15	0.10	0.10	Central column radius (m)	0.15	0.10	0.10	
Time step (ms)		~0.5		Time step (ms)		~0.5		
Jet initial velocity(m/s)	3.0	~3.0	~2.7	Jet initial velocity(m/s)	3.0	~3.0	~2.7	
Jet flow-in duration(s)	0.80	5.2	2.5	Jet flow-in duration(s)	0.80	5.2	2.5	
Melt particle dia.(const.)(mm)	5.0	3.0	3.0	Melt particle dia.(const.)(mm)	5.0	3.0	3.0	
Jet break-up length model ^{b)}	Taylor type, $C_{ent} = 1$			Jet break-up length model ^{b)}	Taylor type, $C_{ent} = 1$			
Surface temperature drop model	Use			Surface temperature drop model	Use			
N_{pcr} ^{c)}	1000			N_{pcr} ^{c)}	1000			
n_{hist} ^{c)}	1000			n_{hist} ^{c)}	1000			
F_{htint} ^{d)}	0.02			F_{htint} ^{d)}	0.02			
a) mass median diameter b) see 2.2.1 c) see 2.2.3 d) see 2.3.2				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⁾				出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide,JAEA ⁽¹⁾				

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-2 FARO L-14 (左) 及び FARO L28, L31 (右) の解析モデル</p>	 <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-2 FARO L-14 (左) 及び FARO L28, L31 (右) の解析モデル</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.1.2 解析結果</p> <p>圧力履歴の解析結果を図4-3に、プール水位挙動の解析結果を図4-4に示す。図において、exp.が実験結果で、cal.が解析結果である。全体として実験結果はおおむ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、特に低圧実験(L28とL31)において水位は高めに評価されている。</p>  <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-3 圧力履歴比較</p>  <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-4 プール水位挙動比較</p>	<p>4.1.2 解析結果</p> <p>圧力履歴の解析結果を図4-3に、プール水位挙動の解析結果を図4-4に示す。図において、exp.が実験結果で、cal.が解析結果である。全体として実験結果はおおむ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、特に低圧実験(L28とL31)において水位は高めに評価されている。</p>  <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-3 圧力履歴比較</p>  <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p>図4-4 プール水位挙動比較</p>	

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

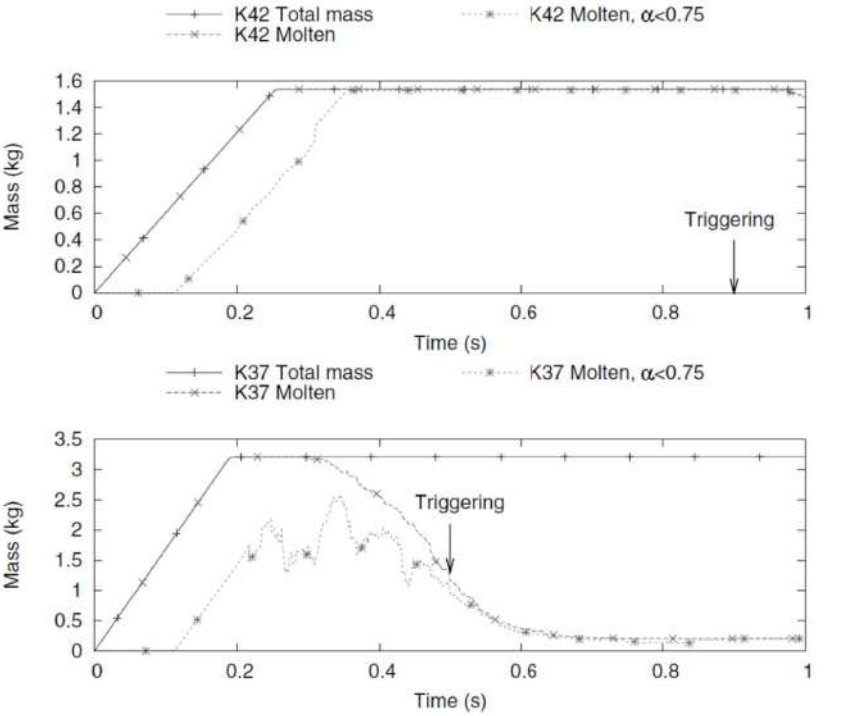
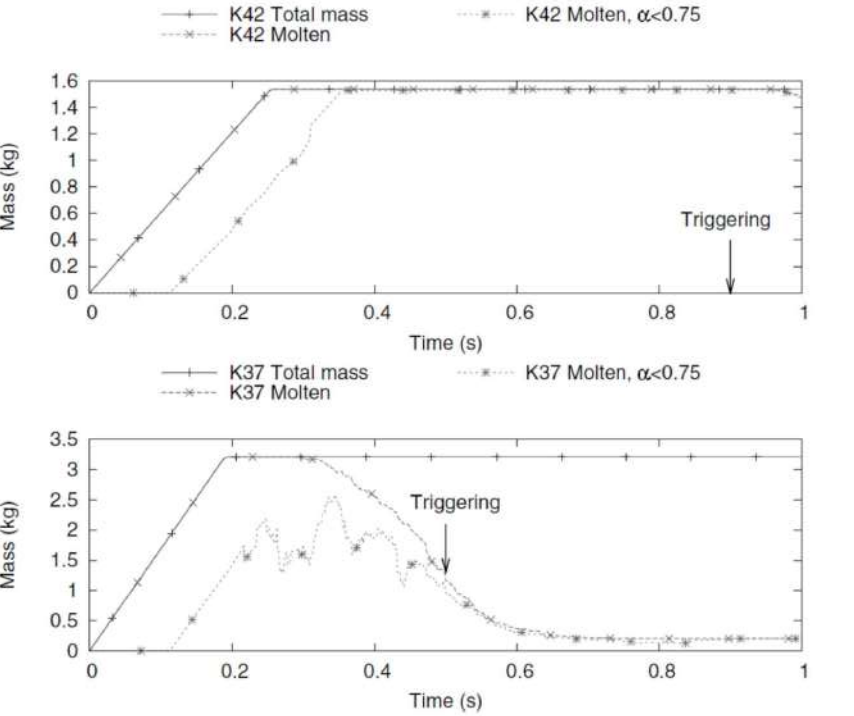
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2 爆発実験解析</p> <p>爆発に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所にて実施された実験のうち、FCI に伴うエネルギーの発生が確認された KROTOS-44, 42 実験及び FARO-L33 実験に加え、エネルギーの発生が確認できなかった KROTOS-37 実験についても解析対象として選定した。これらの検証解析は、JAEAにて実施されている。⁽¹⁾</p> <p>KROTOS 実験では、1～3kg 程度の熔融アルミナ又はコリウム (UO₂ と ZrO₂ 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 の熔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微細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。</p> <p>4.2.1 解析条件</p> <p>解析条件を表 4-2 に、KROTOS 及び FARO 実験の解析メッシュモデル図を、図 4-5 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を再現できるよう選択される。</p> <p>トリガ時刻における全体のボイド率等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。</p> <p>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細化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 4-6 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熔融状態であり、過度に水蒸気が発生することはない。そのため、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ため、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。そのため、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、爆発過程の微細化モデルパラメータの調整には適切と考えられる。</p> <p>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 (15cm³, 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 (28.6cm³, 35MPa) から設定する。</p>	<p>4.2 爆発実験解析</p> <p>爆発に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所にて実施された実験のうち、FCI に伴うエネルギーの発生が確認された KROTOS-44, 42 実験及び FARO-L33 実験に加え、エネルギーの発生が確認できなかった KROTOS-37 実験についても解析対象として選定した。これらの検証解析は、JAEAにて実施されている。⁽¹⁾</p> <p>KROTOS 実験では、1～3kg 程度の熔融アルミナ又はコリウム (UO₂ と ZrO₂ 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 の熔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微細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。</p> <p>4.2.1 解析条件</p> <p>解析条件を表 4-2 に、KROTOS 及び FARO 実験の解析メッシュモデル図を、図 4-5 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を再現できるよう選択される。</p> <p>トリガ時刻における全体のボイド率等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。</p> <p>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細化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 4-6 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熔融状態であり、過度に水蒸気が発生することはない。そのため、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ため、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。そのため、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、爆発過程の微細化モデルパラメータの調整には適切と考えられる。</p> <p>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 (15cm³, 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 (28.6cm³, 35MPa) から設定する。</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (参考資料1)

女川原子力発電所2号炉					泊発電所3号炉					相違理由	
表 4-2 KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33 の実験条件及び解析条件					表 4-2 KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33 の実験条件及び解析条件						
		K44	K42	K37	L33			K44	K42	K37	L33
Melt	Material	Alumina ^{a)}		Corium ^{b)}		Melt	Material	Alumina ^{a)}		Corium ^{b)}	
	Released mass (kg)	1.50	1.54	3.22	100		Released mass (kg)	1.50	1.54	3.22	100
	Temperature(K)	2673	2465	3018	3070		Temperature(K)	2673	2465	3018	3070
	Jet release dia. (mm)	30			48		Jet release dia. (mm)	30			48
	Free fall height(m)	0.44			0.77		Free fall height(m)	0.44			0.77
Water	Temperature(Subcool) (K)	363(10)	293(80)	296(77)	294(124)	Water	Temperature(Subcool) (K)	363(10)	293(80)	296(77)	294(124)
	Depth (m)	1.105			1.62		Depth (m)	1.105			1.62
	Vessel diameter (m)	0.20			0.71		Vessel diameter (m)	0.20			0.71
Cover gas	Atmosphere	Steam	Argon			Cover gas	Atmosphere	Steam	Argon		
	Pressure (MPa)	0.10			0.41		Pressure (MPa)	0.10			0.41
	Cover gas volume(m ³)	0.290			3.496		Cover gas volume(m ³)	0.290			3.496
Premixing results	Level swell (cm)	12	3	30	9	Premixing results	Level swell (cm)	12	3	30	9
	Jet break-up length (m)	~0.3		~0.8	~1.1		Jet break-up length (m)	~0.3		~0.8	~1.1
Explosion results	Pressure peaks (MPa)	~50	~50	NA ^{c)}	~6	Explosion results	Pressure peaks (MPa)	~50	~50	NA ^{c)}	~6
	Half height width (ms)	~1.5	~1	NA ^{c)}	~3		Half height width (ms)	~1.5	~1	NA ^{c)}	~3
	Debris <0.106mm (%)	47	31	1.4	~8 ^{d)}		Debris <0.106mm (%)	47	31	1.4	~8 ^{d)}
Analytical conditions	Time step (μ s)	~2				Analytical conditions	Time step (μ s)	~2			
	Jet initial velocity(m/s)	3.0			~2.9		Jet initial velocity(m/s)	3.0			~2.9
	Jet flow-in duration(s)	0.270	0.255	0.191	2.6		Jet flow-in duration(s)	0.270	0.255	0.191	2.6
	Melt Particle dia.(mm)	10		2	3		Melt Particle dia.(mm)	10		2	3
	Jet break-up length model ^{e)}	S: $C_{ent} = 2.5$		S: $C_{ent} = 1.7$	T: $C_{ent} = 1$		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					Surface temperature drop model	Use			
	$N_{per}^f)$	100			1000		$N_{per}^f)$	100			1000
	$n_{hist}^f)$	500			1000		$n_{hist}^f)$	500			1000
	External trigger	14.8MPa-15cm ³			35MPa-29cm ³		External trigger	14.8MPa-15cm ³			35MPa-29cm ³
	Trigger time (s)	0.9	0.5		1.12		Trigger time (s)	0.9	0.5		1.12
	$C_{frg}^g)$	0.35					$C_{frg}^g)$	0.35			
	$d_{frg}(\mu\text{m})^g)$	50					$d_{frg}(\mu\text{m})^g)$	50			
	$t_{triglfe}(\text{ms})^g)$	1.0					$t_{triglfe}(\text{ms})^g)$	1.0			
	$p_{trig}(\text{MPa})^g)$	0.2			0.5		$p_{trig}(\text{MPa})^g)$	0.2			0.5
	Fragmentation criterion	$T_{av} \geq T_{mp}$					Fragmentation criterion	$T_{av} \geq T_{mp}$			
$K_{ev}^h)$	0.7				$K_{ev}^h)$	0.7					
a) $T_{melt} = 2300(\text{K})$ b) $\text{UO}_2(80)\text{-ZrO}_2(20)$ (wt%), $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(\text{K})$					a) $T_{melt} = 2300(\text{K})$ b) $\text{UO}_2(80)\text{-ZrO}_2(20)$ (wt%), $T_{sol}/T_{liq} = 2830/2850(\text{K})$						
c) Reportedly “no propagating energetic explosions” [37].					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%.					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)					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					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⁾						

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>KROTOS-37, 42, 44</p> <p>FARO-L33</p> <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	<p>KROTOS-37, 42, 44</p> <p>FARO-L33</p> <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-5 解析モデル (KROTOS-37, 42, 44 及び FARO-L33)</p>		

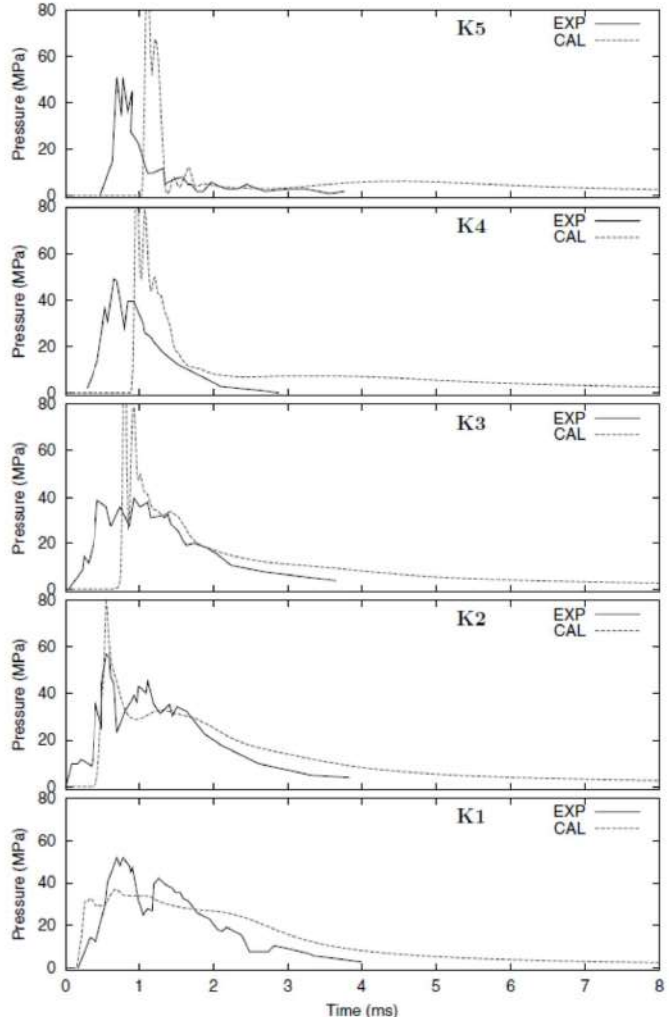
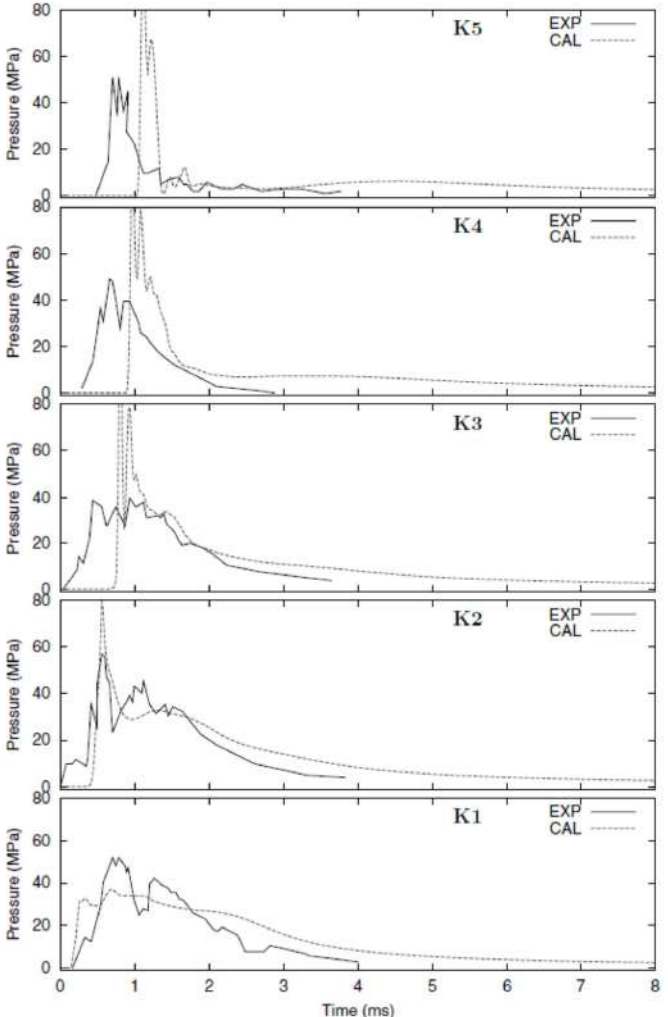
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="436 933 1030 965">出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="392 973 795 1037">図 4-6 粗混合過程での融体質量 (上：アルミナ (K42)，下：コリウム (K37))</p>	 <p data-bbox="1355 933 1948 965">出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="1310 973 1713 1037">図 4-6 粗混合過程での融体質量 (上：アルミナ (K42)，下：コリウム (K37))</p>	

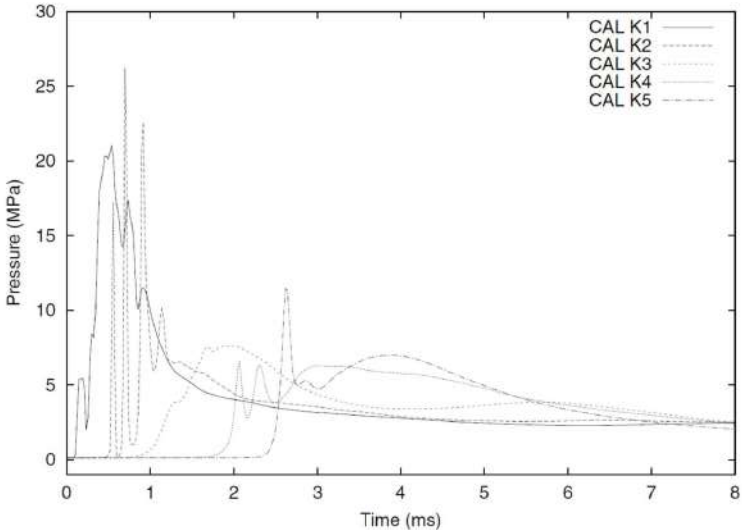
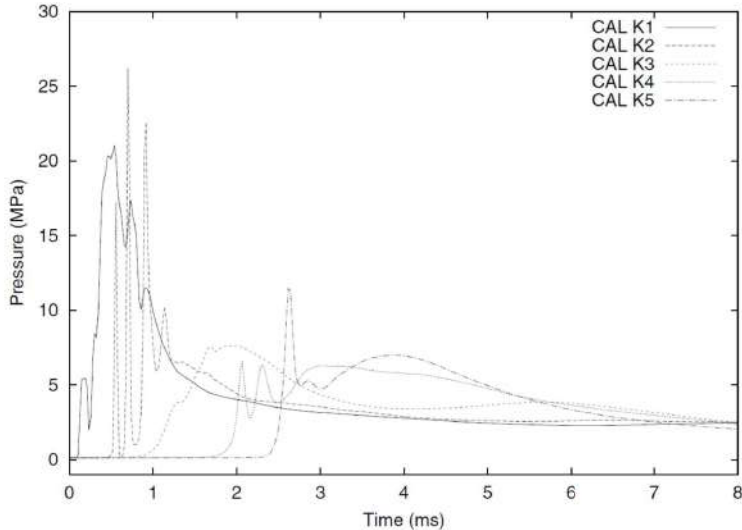
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.2 解析結果</p> <p>図4-7及び図4-8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。</p> <p>図4-9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。</p> <p>図4-10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4-10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。なお、水面近傍である$Z=1615\text{mm}$での圧力挙動について、実験結果では大きな圧力上昇は確認されておらず、解析結果との差異が生じているが、これは解析による爆発時の水位挙動と実験結果との相違が圧力伝播挙動に影響している可能性が考えられる。図4-11及び図4-12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。</p> <p>一般的に、水蒸気爆発により粒子径0.1mmより小さい微細化粒子が発生する。解析では、この粒子径を$50\mu\text{m}$としている図4-13及び図4-14に、KROTOS実験(44,42)及びFARO実験(L33)の微細化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、解析結果の微細化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。</p>	<p>4.2.2 解析結果</p> <p>図4-7及び図4-8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。</p> <p>図4-9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。</p> <p>図4-10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4-10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。なお、水面近傍である$Z=1615\text{mm}$での圧力挙動について、実験結果では大きな圧力上昇は確認されておらず、解析結果との差異が生じているが、これは解析による爆発時の水位挙動と実験結果との相違が圧力伝播挙動に影響している可能性が考えられる。図4-11及び図4-12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。</p> <p>一般的に、水蒸気爆発により粒子径0.1mmより小さい微細化粒子が発生する。解析では、この粒子径を$50\mu\text{m}$としている図4-13及び図4-14に、KROTOS実験(44,42)及びFARO実験(L33)の微細化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、解析結果の微細化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。</p>	

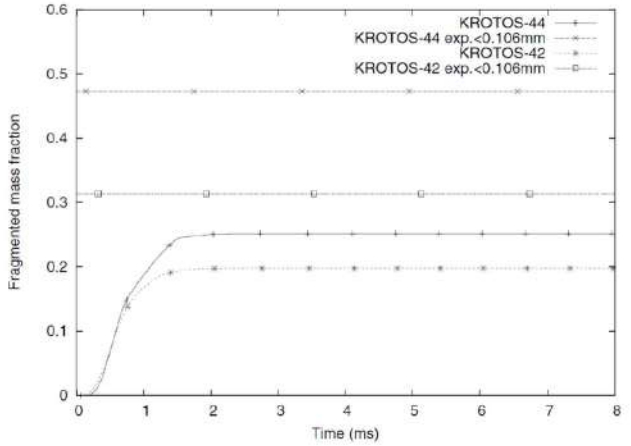
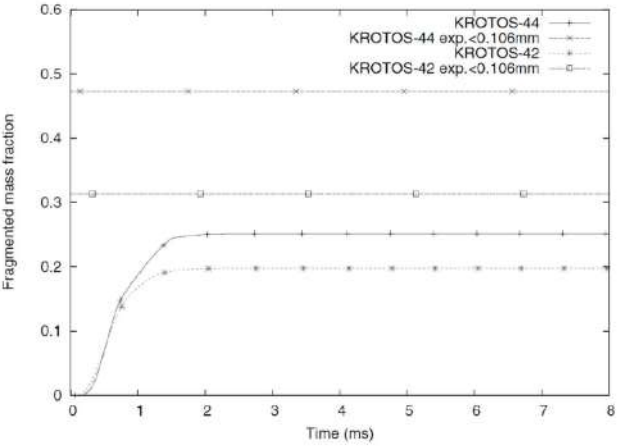
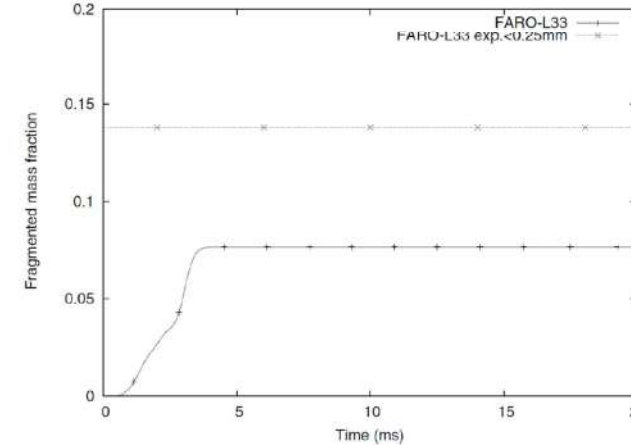
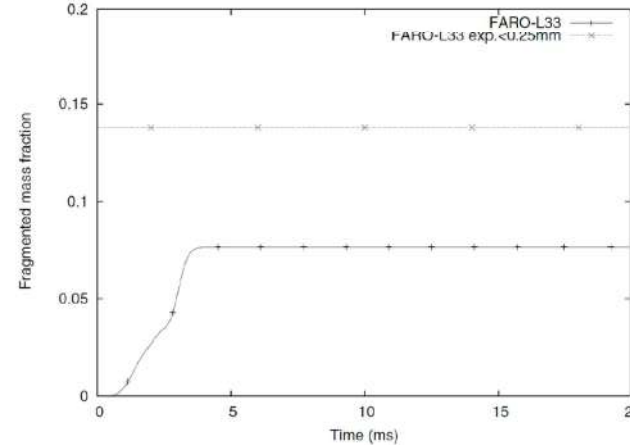
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="465 1246 943 1267">出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="465 1289 719 1310">図 4-7 圧力履歴 (KROTOS-44)</p>	<p data-bbox="1377 1246 1854 1267">出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="1377 1289 1630 1310">図 4-7 圧力履歴 (KROTOS-44)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="465 1252 952 1276">出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="465 1289 728 1316">図 4-8 圧力履歴 (KROTOS-42)</p>	 <p data-bbox="1384 1252 1870 1276">出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="1384 1289 1646 1316">図 4-8 圧力履歴 (KROTOS-42)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="481 758 974 778">出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="459 798 728 821">図 4-9 圧力履歴 (KROTOS-37)</p>	 <p data-bbox="1393 758 1886 778">出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p> <p data-bbox="1370 798 1639 821">図 4-9 圧力履歴 (KROTOS-37)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>Pressure (MPa)</p> <p>Time (ms)</p> <p>z=1615mm EXP CAL</p> <p>z=1390mm EXP CAL</p> <p>z=1165mm EXP CAL</p> <p>z=940mm EXP CAL</p> <p>z=715mm EXP CAL</p> <p>z=490mm EXP CAL</p> <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	<p>Pressure (MPa)</p> <p>Time (ms)</p> <p>z=1615mm EXP CAL</p> <p>z=1390mm EXP CAL</p> <p>z=1165mm EXP CAL</p> <p>z=940mm EXP CAL</p> <p>z=715mm EXP CAL</p> <p>z=490mm EXP CAL</p> <p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-10 圧力履歴 (FARO-L33)</p>	<p>図 4-10 圧力履歴 (FARO-L33)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	<p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-11 流体運動エネルギー (KROTOS)</p>	<p>図 4-11 流体運動エネルギー (KROTOS)</p>	
<p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	<p>出典：Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-12 流体運動エネルギー (FARO-L33)</p>	<p>図 4-12 流体運動エネルギー (FARO-L33)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	 <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-13 微細化粒子の質量分布 (KROTOS)</p>  <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	<p>図 4-13 微細化粒子の質量分布 (KROTOS)</p>  <p>出典: Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA⁽¹⁾</p>	
<p>図 4-14 微細化粒子の質量分布 (FARO-L33)</p>	<p>図 4-14 微細化粒子の質量分布 (FARO-L33)</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>5. 参考文献</p> <p>(1) K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, July 2008.</p> <p>(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</p> <p>(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.</p> <p>(4) S.J. BOARD, R.W. HALL, R.S. HALL, Detonation of fuel coolant explosions, Nature254, 319-321, 1975.</p> <p>(5) 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</p> <p>(6) 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.3Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosion, pp.304-305.Cambridge University Press, Cambridge, 1963.</p> <p>(7) M. Saito, K. Sato, S. Imahori, Experimental study on penetration behaviors ofwater jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS Proc. National Heat TransferConference, Houston, U.S., vol.3, pp.173--183, 1988.</p> <p>(8) R.Meignen, et al, The challenge of modeling fuel-coolant interaction: Part I - Premixing, Nucl.Eng.Des. 280 511-527, 2014.</p> <p>(9) A. Annunziato, et al, FARO TEST L-14 ON FUEL COOLANT INTERACTION AND QUENCHINGComparison Report, Volume I: Analysis of the Results, OECD/CSNI InternationalStandaard Problem 39, 1998.</p> <p>(10) D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scalefuel-coolant interaction experiments, Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009, 2006.</p>	<p>5. 参考文献</p> <p>[1] K.Moriyama, et al, Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide, JAEA-Data/Code 2008-014, July 2008.</p> <p>[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</p> <p>[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.</p> <p>[4] S.J. BOARD, R.W. HALL, R.S. HALL, Detonation of fuel coolant explosions, Nature254, 319-321, 1975.</p> <p>[5] 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</p> <p>[6] 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.3Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosion, pp.304-305.Cambridge University Press, Cambridge, 1963.</p> <p>[7] M. Saito, K. Sato, S. Imahori, Experimental study on penetration behaviors ofwater jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS Proc. National Heat TransferConference, Houston, U.S., vol.3, pp.173--183, 1988.</p> <p>[8] R.Meignen, et al, The challenge of modeling fuel-coolant interaction: Part I - Premixing, Nucl.Eng.Des. 280 511-527, 2014.</p> <p>[9] A. Annunziato, et al, FARO TEST L-14 ON FUEL COOLANT INTERACTION AND QUENCHINGComparison Report, Volume I: Analysis of the Results, OECD/CSNI InternationalStandaard Problem 39, 1998.</p> <p>[10] D. Magallon, Characteristics of corium debris bed generated in large-scalefuel-coolant interaction experiments, Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009, 2006.</p>	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

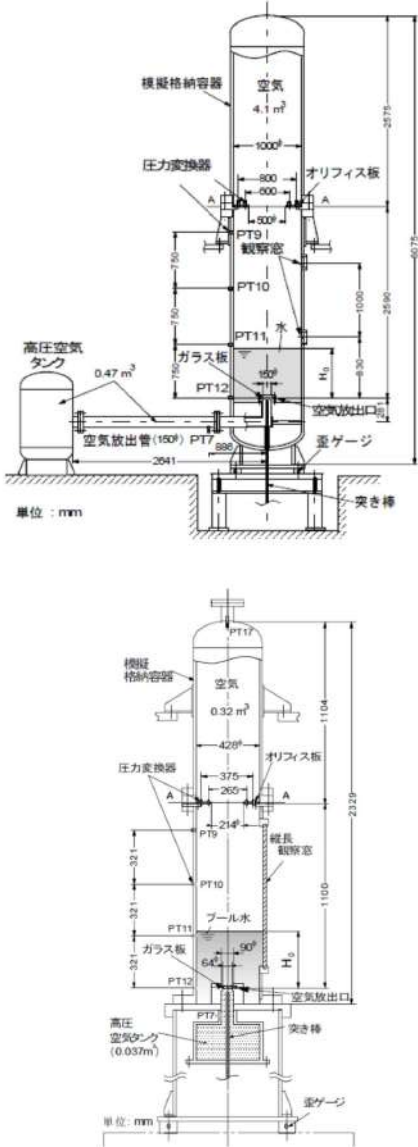
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付1 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて</p> <p>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状に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が建造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝撃と圧力波の2つの効果に分けられるが、ペDESTALにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。</p> <p>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。</p> <p>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、建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1-1に実験装置、添付図1-2に水塊の到達範囲の整理結果、添付図1-3に水塊挙動の実験結果を示す。</p> <p>女川2号炉、浜岡4号炉、島根2号炉及び柏崎刈羽6号及び7号炉では、ペDESTAL径と初期水位のアスペクト比による無次元水位はそれぞれ0.6、0.5、0.65及び0.2程度である。この知見を適用した場合、添付図1-2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号炉のアスペクト比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径の1.25倍程度)となる。これより、島根2号炉の場合、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9.0m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ないといえる。</p> <p>本実験では、水蒸気爆発時の水塊運動の主要パラメータとして、容器径、初期水位、気泡圧力を変更したケースについて実験を実施している。これらの実験パラメータ範囲の実機条件への適用性は以下のとおりである。</p> <p>容器径については、大型容器(内径1.0m)と小型容器(内径0.428m)の実験を行い、容器径のスケール効果を考慮している。実験結果より、容器径で規格化した無次元水面上昇距離は、小型容器と大型容器で同一のアスペクト比条件における実験結果の観察結果から、ほぼ一致すると評価されている。添付図1-2の水塊到達範囲の実験相関式は、これらの実験装置のデータより整理されたものである。したがって、実機の格納容器下部領域の径は本実験装置の容器径よりも大きくなるが、実験相関式は容器のスケール効果を考慮しており、実機条件にも適用できると考えられる。</p> <p>また、この実験では、圧縮空気を水張り容器の底部から供給して水蒸気爆発による気泡運動の水位上昇への影響を調査しているが、実機では必ずしも底部から気泡が成長を始めるわけではない。しかしながら、底部から供給される気泡は一次元軸方向への運動が支配的となる一方で、実機では蒸気泡がより三次元的に運動できるため、軸方向への水位上昇を評価する観点では、この実験方法は実機と比較して保守的であると考えられる。</p> <p>初期水位は、無次元初期水位を変更したケース(0.6、0.8、1.0、1.2、1.4)の実験を行っているが、実験の実水位は最大1.4m(容器径1.0mの場合)となる。実機条件では、実験条件の実水位よ</p>	<p>【参考のため泊の補足12を再掲】</p> <p>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状に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が建造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝撃と圧力波の2つの効果に分けられるが、原子炉下部キャビティにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。</p> <p>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。</p> <p>この実験の2.0MPaの圧力条件は実機炉心相当で約11tの落下溶融炉心による蒸気発生量に対応するとしている¹。一方で、泊3号炉を想定した解析条件(添付資料7.2.3.1、別紙)では、溶融炉心の原子炉容器外への放出後、溶融炉心重量は百数十秒で約11tに達するが、水蒸気爆発が約0.6秒で生じることを考慮すれば、この実験条件の設定は泊3号炉で生じる事象よりも桁違いで大きな気体の発生を想定している。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)。</p> <p>よって、泊3号炉において大規模な水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さいと考えられるが、仮に水蒸気爆発が発生した場合においても、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状に押し上げられるとは考え難い。</p> <p>なお、図1は泊3号炉を想定した解析に基づき、原子炉容器底部にかかる合計荷重を評価した結果である。ピーク荷重は約2.6×10^6 N (=約260t)であり、原子炉容器の自重(約720t)よりも十分小さく原子炉容器を上昇させるような影響はないことが確認できる。</p>	<p>※BWRでは参考文献からウォーターハンマーの影響について考察しているが、泊では爆発規模の観点から同参考文献は適用範囲外である。したがって、同等の説明とするために泊では個別解析を基に定量的な資料とした。個別解析を根拠とした説明としているため、本説明は補足12に掲載している。参考のため泊欄には泊補足12を再掲</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>り高くなると想定される。しかし、初期水位と水位上昇の関係は、容器径で規格化された無次元初期水位（容器径と初期水位の比）及び無次元水塊到達範囲（容器径と水位上昇の比）で整理される（添付図1-2）。この無次元水位でみると実機条件は、実験範囲にあり、実機条件に適用できると考えられる。</p> <p>気泡の圧力条件は、気泡圧力を変更したケース（0.5MPa, 1.0MPa, 2.0MPa）を行っている。実験結果より、圧力が大きくなると気泡が吹き抜けやすくなり、水塊が押し上げられる範囲は圧力に依存しなくなる傾向がある。このため、高圧条件（10MPa以上）での水塊到達範囲はほぼ同じになるとされている。これより、実機での水蒸気爆発では、実験条件よりも圧力が高くなることが想定されるが、添付図1-2の水塊到達範囲は実機条件にも適用できると考えられる。</p> <p>なお、この実験の圧力条件は実機における落下熔融炉心の重量を想定して設定されており、2.0MPaの圧力条件は実機炉心相当で約11tの落下熔融炉心による蒸気発生量に対応している¹。表2-4に示す実機を想定した解析条件では、熔融炉心のRPV外への放出後、熔融炉心重量は数秒で約11tに達するが、水蒸気爆発が1秒前後で生じることを考慮すれば、この実験条件の設定は実機で生じる事象と同程度のオーダーであると考えられる。</p> <p>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）。</p> <p>以上より、本実験結果による水塊運動の範囲の結果は、実機条件でも適用できると考えられる。</p> <p>〔参考文献〕</p> <p>(1) 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.</p> <p>(2) 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.</p> <p>1 熔融炉心の潜熱及び比熱をそれぞれ 323kJ/kg, 0.526kJ/(Kg-K)として、実験体系における空気容量と同等の蒸気発生量となる熔融炉心重量を概算し、実験体系と実機の空間スケール(～1/10スケール)の違いを踏まえて算出(稲坂ら, 2004)</p>	<p>〔参考文献〕</p> <p>(1) 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.323-344.</p> <p>(2) 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 Vol.6 No.3, p.289-297.</p> <p>1 熔融炉心の潜熱及び比熱をそれぞれ 323kJ/kg, 0.526kJ/(Kg-K)として、実験体系における空気容量と同等の蒸気発生量となる熔融炉心重量を概算し、実験体系と実機の空間スケール(～1/10スケール)の違いを踏まえて算出(稲坂ら, 2004)</p> <p>【再掲終了】</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>添付図 1-1 水撃実験装置 (上: 大型容器、下: 小型容器) (稲坂ら, 2004)</p>		

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="291 231 884 678" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="241 694 936 726" data-label="Caption"> <p>添付図 1-2 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)</p> </div> <div data-bbox="161 746 1025 1364" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="212 1396 967 1428" data-label="Caption"> <p>添付図 1-3 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)</p> </div>		

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																										
<p>添付2 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p> <p>1. はじめに 水蒸気爆発時の発生エネルギーを議論するうえで、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータであり、各研究機関で実施された水蒸気爆発実験においても、実験時に確認されたパラメータに基づきエネルギー変換効率が評価されている。また、水蒸気爆発解析において、粗混合過程、爆発過程の解析モデルの妥当性を確認するためのベンチマークの一つとして、実験時に確認されているエネルギー変換効率との比較が実施されている。 本資料では、水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較結果をまとめる。</p> <p>2. 水蒸気爆発実験でのエネルギー変換効率 (1) エネルギー変換効率について 一般的には以下の式①によりエネルギー変換効率は評価されている。 ① エネルギー変換効率(%)=機械的エネルギー/デブリの持つ熱エネルギー×100 機械的エネルギー：試験容器内の温度、圧力挙動からの評価、構造物への荷重評価等より機械的エネルギーを評価 デブリの持つ熱エネルギー：落下させる全デブリ質量、温度、比熱からデブリの持つ保有エネルギーを評価 上式①に基づくエネルギー変換効率は、粗混合過程と爆発過程の二つのプロセスが影響するパラメータとして扱う必要がある。粗混合過程は、落下デブリ質量に対して、デブリ注入速度、プール水位等といった実験条件が、粗混合融体質量に大きく影響する。一方、爆発過程は、粗混合粒子の微細化から爆発的な伝熱挙動といった物理現象であるため、体系等の実験条件の影響は低いと考えられる。 したがって、以下の式②により定義されたエネルギー変換効率を用いることで、実験条件の影響を小さくできると考える。 ② エネルギー変換効率(%)=機械的エネルギー/粗混合融体の持つ熱エネルギー×100 粗混合融体の持つ熱エネルギー：温度がデブリ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エネルギー (2) TROI 実験におけるエネルギー変換効率 UO₂ デブリを用いた水蒸気爆発実験において、比較的高いエネルギー変換効率が確認されている TROI 実験を対象に式②でエネルギー変換効率を評価した結果を添付表 2-1 に示す。 添付表 2-1 TROI 実験におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="152 1289 1037 1406"> <thead> <tr> <th></th> <th>TS1</th> <th>TS2</th> <th>TS3</th> <th>TS4</th> <th>TS6</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.12%</td> <td>0.28%</td> <td>0.22%</td> <td>0.35%</td> <td>0.66%</td> <td>参考文献(1)より</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>0.36%</td> <td>0.81%</td> <td>0.54%</td> <td>1.25%</td> <td>2.49%</td> <td>参考文献(2)より</td> </tr> </tbody> </table>		TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考	式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献(1)より	式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献(2)より	<p>添付1 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p> <p>1. はじめに 水蒸気爆発時の発生エネルギーを議論するうえで、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータであり、各研究機関で実施された水蒸気爆発実験においても、実験時に確認されたパラメータに基づきエネルギー変換効率が評価されている。また、水蒸気爆発解析において、粗混合過程、爆発過程の解析モデルの妥当性を確認するためのベンチマークの一つとして、実験時に確認されているエネルギー変換効率との比較が実施されている。 本資料では、水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較結果をまとめる。</p> <p>2. 水蒸気爆発実験でのエネルギー変換効率 (1) エネルギー変換効率について 一般的には以下の式①によりエネルギー変換効率は評価されている。 ① エネルギー変換効率(%) = 機械的エネルギー / デブリの持つ熱エネルギー × 100 機械的エネルギー：試験容器内の温度、圧力挙動からの評価、構造物への荷重評価等より機械的エネルギーを評価 デブリの持つ熱エネルギー：落下させる全デブリ質量、温度、比熱からデブリの持つ保有エネルギーを評価 上式①に基づくエネルギー変換効率は、粗混合過程と爆発過程の二つのプロセスが影響するパラメータとして扱う必要がある。粗混合過程は、落下デブリ質量に対して、デブリ注入速度、プール水位等といった実験条件が、粗混合融体質量に大きく影響する。一方、爆発過程は、粗混合粒子の微細化から爆発的な伝熱挙動といった物理現象であるため、体系等の実験条件の影響は低いと考えられる。 したがって、以下の式②により定義されたエネルギー変換効率を用いることで、実験条件の影響を小さくできると考える。 ② エネルギー変換効率(%) = 機械的エネルギー / 粗混合融体の持つ熱エネルギー × 100 粗混合融体の持つ熱エネルギー：温度がデブリ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エネルギー (2) TROI 実験におけるエネルギー変換効率 UO₂ デブリを用いた水蒸気爆発実験において、比較的高いエネルギー変換効率が確認されている TROI 実験を対象に式②でエネルギー変換効率を評価した結果を表 1 に示す。</p> <p>表 1 TROI 実験におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="1122 1326 1895 1430"> <thead> <tr> <th></th> <th>TS1</th> <th>TS2</th> <th>TS3</th> <th>TS4</th> <th>TS6</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.12%</td> <td>0.28%</td> <td>0.22%</td> <td>0.35%</td> <td>0.66%</td> <td>参考文献[1]より</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>0.36%</td> <td>0.81%</td> <td>0.54%</td> <td>1.25%</td> <td>2.49%</td> <td>参考文献[2]より</td> </tr> </tbody> </table>		TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考	式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献[1]より	式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献[2]より	<p>※泊は補足 6 を改めて参考資料 JASMINE の添付 1 として記載</p>
	TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考																																						
式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献(1)より																																						
式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献(2)より																																						
	TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考																																						
式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献[1]より																																						
式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献[2]より																																						

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて(参考資料1)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
<p>3. 実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率との比較</p> <p>実プラントの水蒸気爆発評価結果に基づき式①と式②より算出したエネルギー変換効率を添付表 2-2 にまとめる。</p> <p>ここで、TROI 実験並びに実プラントの条件におけるジェット分裂長を評価した結果、TROI 実験 (TS1~TS4, TS6) の実験条件におけるジェット分裂長は約 1m であり、プール水位は 1m であるため、TS1~TS4, TS6 はプール底部到達までにジェットがほぼ完全に分裂すると推測される。また、A BWR プラント実機体系におけるジェット分裂長は、約 4~5m であり、7m 水位ではジェットが完全に分裂すると推測される。</p> <p>したがって、ジェットがほぼ完全に分裂する条件となっている TS1~TS4, TS6 と A BWR プラント実機体系 7m 水位条件について、式②によるエネルギー変換効率で比較を行うと、TS1~TS4, TS6 にて確認されたエネルギー変換効率を A BWR プラント実機体系が上回る結果となることが確認できた。</p> <p>上記より A BWR プラント実機体系における J A S M I N E 解析においては、同等の条件の実験と比較するとエネルギー変換効率は保守的な結果を与えていることが確認できた。</p> <p>添付表 2-2 A BWR プラント実機体系におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="389 703 801 810"> <thead> <tr> <th></th> <th>水位 7m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.8%</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>3.0%</td> </tr> </tbody> </table> <p>4. 参考文献</p> <p>(1) NEA/CSNI/R(2014)15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions</p> <p>(2) 堀田, 森田, 梶本, 丸山, 2017. 「JASMIN Version 3 による溶融燃料-冷却材相互作用 SERENA2 実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌 (2017)</p>		水位 7m	式①	0.8%	式②	3.0%	<p>3. 実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率との比較</p> <p>実プラントの水蒸気爆発評価結果に基づき式①と式②より算出したエネルギー変換効率を表 2 にまとめる。</p> <p>ここで、TROI 実験並びに実プラントの条件におけるジェット分裂長を評価した結果、TROI 実験 (TS1~TS4, TS6) の実験条件におけるジェット分裂長は約 1m であり、プール水位は 1m であるため、TS1~TS4, TS6 はプール底部到達までにジェットがほぼ完全に分裂すると推測される。また、泊 3 号の水蒸気爆発評価におけるジェット分裂長は、約 1.4m であり、原子炉下部キャビティに 4.1m の水張りがされている場合、原子炉下部キャビティ床面到達までにジェットが完全に分裂されることが推定される。</p> <p>したがって、実験条件の影響の小さい式②によるエネルギー変換効率で比較を行うと、TS1~TS4, TS6 にて確認されたエネルギー変換効率を泊 3 号の水蒸気爆発評価が上回る結果となることが確認できた。</p> <p>上記より泊 3 号の水蒸気爆発評価においては、同等の条件の実験と比較するとエネルギー変換効率は保守的な結果を与えていることが確認できた。</p> <p>表 2 泊 3 号の水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="1332 711 1675 802"> <thead> <tr> <th></th> <th>水位 4.1m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>約 2.5%</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>約 3.3%</td> </tr> </tbody> </table> <p>4. 参考文献</p> <p>[1] NEA/CSNI/R (2014) 15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions</p> <p>[2] 堀田, 森田, 梶本, 丸山. 「JASMIN Version 3 による溶融燃料-冷却材相互作用 SERENA2 実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌 (2017)</p>		水位 4.1m	式①	約 2.5%	式②	約 3.3%	
	水位 7m													
式①	0.8%													
式②	3.0%													
	水位 4.1m													
式①	約 2.5%													
式②	約 3.3%													

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">LS-DYNA</p> <p style="text-align: right;">参考資料3</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 適用対象事象及び適用実績 3. 解析モデルと解析結果の例示 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 計算要素 3.2 境界条件 3.3 材料モデル 3.4 爆発源の設定方法 3.5 解析フロー 3.6 入出力 3.7 解析結果の例示 4. 解析結果の検証 5. 参考文献 <p>添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について</p> <p>添付2 反射波の考慮について</p> <p>添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について</p>	<p style="text-align: center;">LS-DYNA コード</p> <p style="text-align: right;">参考資料2</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 適用対象事象及び適用実績 3. 解析モデルと解析結果の例示 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 計算要素 3.2 境界条件 3.3 材料モデル 3.4 衝撃圧力の設定方法 3.5 解析フロー 3.6 入出力 3.7 解析結果の例示 4. 解析結果の検証 5. 参考文献 <p>添付1 反射波の考慮について</p> <p>添付2 原子炉下部キャビティ構造応答評価における判定基準について</p>	<p>PWR では JASMINE で圧力まで解析 するため、該当す る資料は不要</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>1. はじめに</p> <p>本資料は、格納容器破損防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）において、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」（以下、「FCI」と称す。）に対して参考として示した水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価に適用するコードのうち、LS-DYNAコードについて、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・適用対象事象及び適用実績 ・解析モデルと解析結果の例示 ・解析結果の検証 <p>に関してまとめたものである。</p> <p>なお、JASMINEコードの計算結果をインプットする必要があるが、このJASMINEコードに対する説明は別資料（解析コード（JASMINE）説明資料（参考資料））にて行う。</p>	<p>1. はじめに</p> <p>本資料は、格納容器破損防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）において、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」（以下、「FCI」と称す。）に対して参考として示した水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価に適用するコードのうち、LS-DYNAコードについて、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・適用対象事象及び適用実績 ・解析モデルと解析結果の例示 ・解析結果の検証 <p>に関してまとめたものである。</p> <p>なお、JASMINEコードの計算結果をインプットする必要があるが、このJASMINEコードに対する説明は別資料（解析コード（JASMINE）説明資料（参考資料））にて行う。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>2. 適用対象事象及び適用実績</p> <p>LS-DYNAコードは、原子炉圧力容器外において FCI による水蒸気爆発の発生を想定した場合、圧力容器の支持構造物であるベDESTALへの荷重を評価し、その健全性を確認することを目的として使用する。</p> <p>(1) 適用対象事象</p> <p>シビアアクシデント発生時に原子炉圧力容器の破損を想定する場合、熔融炉心・コンクリート相互作用の緩和策として、格納容器下部への水張りが実施される。原子炉圧力容器から熔融炉心が落下した場合において、この格納容器下部の冷却水と熔融炉心の接触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。</p> <p>この炉外における FCI による水蒸気爆発発生時の評価は、水蒸気爆発解析コード JASMIN Eにより実施し、水蒸気爆発現象に伴う流体の圧力及び運動エネルギー並びに融体デブリの振る舞いを評価する。</p> <p>LS-DYNAコードでは、この JASMIN Eコードによって得られた評価結果に基づき、水蒸気爆発発生時の爆発源の状態を入力条件として与え、流体中を伝播する圧力波がベDESTAL構造材に荷重として作用する構造応答を評価する。</p> <p>(2) 適用実績</p> <p>LS-DYNAコードは、ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）で開発されたDYNA3Dコードに基づき、リバモアソフトウェアテクノロジー社（LSTC）が開発した汎用有限要素解析コードである^[1]。</p> <p>DYNA3Dコードは、重量物の構造材衝撃問題を対象として開発されており、衝撃波による非線形動的応答評価を目的とするため、陽解法による解析を採用している。LS-DYNAコードは、自動車の衝突安全解析への適用を目的として開発されており、DYNA3Dと同様に、衝撃問題に対して陽解法を適用する。</p> <p>LS-DYNAコードは、自動車製造分野への適用を主目的として開発されているが、時間と共に接触条件や構造物形状が変化するような非線形解析が可能であり、衝撃や爆発的燃焼による圧力伝播、構造物の塑性歪み、健全性の解析に対応している。このため、自動車産業に限らず、航空宇宙、防衛、電気機器、建設・土木分野等にも応用されており、原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生した際のベDESTAL構造材への荷重応答評価にも適していると言える。</p> <p>原子力分野における爆発及び爆轟に伴う衝撃荷重の構造材応答評価にLS-DYNAコードを適用した例について概要を以下に示す。</p> <p>a. BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管健全性評価^[2]</p> <p>BWR 配管の主蒸気の放射線分解により生じる可燃性混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管内での爆轟を模擬した強度試験に対し、LS-DYNAコードにより試験模擬解析を実施している。LS</p>	<p>2. 適用対象事象及び適用実績</p> <p>LS-DYNAコードは、原子炉圧力容器外において FCI による水蒸気爆発の発生を想定した場合、圧力容器の支持構造物である原子炉下部キャビティ壁への荷重を評価し、その健全性を確認することを目的として使用する。</p> <p>(1) 適用対象事象</p> <p>シビアアクシデント発生時に原子炉圧力容器の破損を想定する場合、熔融炉心・コンクリート相互作用の緩和策として、格納容器下部への水張りが実施される。原子炉圧力容器から熔融炉心が落下した場合において、この格納容器下部の冷却水と熔融炉心の接触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。</p> <p>この炉外における FCI による水蒸気爆発発生時の評価は、水蒸気爆発解析コード JASMIN Eにより実施し、水蒸気爆発現象に伴う流体の圧力及び運動エネルギー並びに融体デブリの振る舞いを評価する。</p> <p>LS-DYNAコードでは、この JASMIN Eコードによって得られた評価結果に基づき、水蒸気爆発発生時の原子炉容器下部キャビティ壁に作用する圧力履歴を入力条件として与え、原子炉下部キャビティ壁の構造応答を評価する。</p> <p>(2) 適用実績</p> <p>LS-DYNAコードは、ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）で開発されたDYNA3Dコードに基づき、リバモアソフトウェアテクノロジー社（LSTC）が開発した汎用有限要素解析コードである^[1]。</p> <p>DYNA3Dコードは、重量物の構造材衝撃問題を対象として開発されており、衝撃波による非線形動的応答評価を目的とするため、陽解法による解析を採用している。LS-DYNAコードは、自動車の衝突安全解析への適用を目的として開発されており、DYNA3Dと同様に、衝撃問題に対して陽解法を適用する。</p> <p>LS-DYNAコードは、自動車製造分野への適用を主目的として開発されているが、時間と共に接触条件や構造物形状が変化するような非線形解析が可能であり、衝撃や爆発的燃焼による圧力伝播、構造物の塑性歪み、健全性の解析に対応している。このため、自動車産業に限らず、航空宇宙、防衛、電気機器、建設・土木分野等にも応用されており、原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生した際の原子炉下部キャビティ壁への荷重応答評価にも適していると言える。</p> <p>原子力分野における爆発及び爆轟に伴う衝撃荷重の構造材応答評価にLS-DYNAコードを適用した例について概要を以下に示す。</p> <p>a. 竜巻飛来物の衝突による原子力施設防護対策評価^[2]</p> <p>この研究は原子力発電所施設等における竜巻防護施設の鋼板試験体に竜巻飛来物の一つである鋼製パイプを衝突させる鋼板貫通試験に対して、LS-DYNAコードによる試験模擬解析を実施している。耐</p>	<p>炉型の相違により適用事例が異なる</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>—DYNAコードによる強度解析は、試験体の周方向ひずみを良好に再現することが確認されている。</p> <p>b. 原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃挙動解析^[3] この研究は原子力発電所施設等での爆発衝撃荷重に対する構造物の堅牢性を評価するための解析モデルを構築する目的で実施されており、水中爆轟バブル挙動解析手法の確立と地中に設置された構造物の衝撃荷重に対する挙動評価手法の確立を主課題として検討されている。LS-DYNAコードによるこれらの課題に対する評価の結果、水中爆轟バブル挙動については、必要な時間スケールでの解析が適切に実施できることが確認され、地中構造物に対する堅牢性評価については、試験結果とトレース解析の比較から、爆発衝撃問題に対する解析モデルが構築可能であるとの知見が得られている。</p> <p>3. 解析モデルと解析結果の例示 LS-DYNAコードは、構造物などの大変形応答を解析するための非線形動的構造解析ソフトウェアであり、静的問題から準静的な塑性加工問題、波動の伝播を考慮するような衝撃問題などの解析が可能である。時刻歴応答解析では、時間積分に中央差分による収束計算が不要な陽解法を用いて解析するため、落下・衝突のような非線形性の強い問題でも解が発散せず、安定して解が得られる。 またLS-DYNAコードの使用実績としては、自動車・航空宇宙・造船などの産業で製品の安全性対応や高品質化などに幅広く活用されている。 陽解法の特徴は、着目している要素の隣接する過去の要素情報しか現在の状態に影響を与えないということである。したがって衝撃解析では、波動の伝搬速度である音速cが重要な意味を持っており、いま着目する要素（要素サイズ△e）で、音速cの影響による現象を陽解法で安定に実行するためには、時間積分の刻み幅（△t）にCourant条件と言われる制約がある。</p> $\Delta t = \frac{\Delta e}{c}$ <p>ここで連続体が構造物の場合、ヤング率E、密度ρとすると、構造物内での音速cは、</p> $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ <p>連続体が流体の場合、体積弾性率K、密度ρとすると、流体内での音速cは、</p>	<p>貫通防護設計評価手法として、解析で得られた、飛来物の衝突荷重により鋼板に生じる相当塑性ひずみとSAガイドラインで提案されている局所的な破損のひずみ制限値を比較する手法が有用であることが確認されており、LS-DYNAコードによる耐貫通性能問題への適用が可能であるとの知見が得られている。</p> <p>b. 原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃挙動解析^[3] この研究は原子力発電所施設等での爆発衝撃荷重に対する構造物の堅牢性を評価するための解析モデルを構築する目的で実施されており、水中爆轟バブル挙動解析手法の確立と地中に設置された構造物の衝撃荷重に対する挙動評価手法の確立を主課題として検討されている。LS-DYNAコードによるこれらの課題に対する評価の結果、水中爆轟バブル挙動については、必要な時間スケールでの解析が適切に実施できることが確認され、地中構造物に対する堅牢性評価については、試験結果とトレース解析の比較から、爆発衝撃問題に対する解析モデルが構築可能であるとの知見が得られている。</p> <p>3. 解析モデルと解析結果の例示 LS-DYNAコードは、構造物などの大変形応答を解析するための非線形動的構造解析ソフトウェアであり、静的問題から準静的な塑性加工問題、波動の伝播を考慮するような衝撃問題などの解析が可能である。時刻歴応答解析では、時間積分に中央差分による収束計算が不要な陽解法を用いて解析するため、落下・衝突のような非線形性の強い問題でも解が発散せず、安定して解が得られる。 またLS-DYNAコードの使用実績としては、自動車・航空宇宙・造船などの産業で製品の安全性対応や高品質化などに幅広く活用されている。 陽解法の特徴は、着目している要素の隣接する過去の要素情報しか現在の状態に影響を与えないということである。したがって衝撃解析では、波動の伝搬速度である音速cが重要な意味を持っており、いま着目する要素（要素サイズ△e）で、音速cの影響による現象を陽解法で安定に実行するためには、時間積分の刻み幅（△t）にCourant条件と言われる制約がある。</p> $\Delta t = \frac{\Delta e}{c}$ <p>ここで連続体が構造物の場合、ヤング率E、密度ρとすると、構造物内での音速cは、</p> $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	<p>解析手法の相違により、流体内での音速は使用しない</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p style="text-align: center;">$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$</p> <p>である。FCI 時の構造応答解析で取扱う連続体のおよその音速 c は、鋼材で 5000 m/s、コンクリートで 3400 m/s、水中で 1500m/s、空気中で 330 m/s である。</p> <p>LS-DYNAコードでは、時間積分の刻み幅 Δt を、すべての要素で決定される時間増分の中で最小のものを自動的に用いている。</p> <p>3.1 計算要素</p> <p>一般的に連続体（流体・固体）を記述するための手法的な観点から分類すると、LS-DYNAコードでは以下の3種類がある。このうちALE要素を用いた手法は、流体構造連成解析手法としては、LS-DYNAコードでは最も実績があるものの一つである。各要素の概念を図3-1に示す。</p> <p>(a) Euler 要素</p> <p>空間に固定した座標を用い、各瞬間における速度、圧力などの物理量の変化の様子を空間座標と時間の関数として記述する。（メッシュの中を物質が移動）流体の場合、特定箇所を追跡し、その位置を確認することが難しいことから、Euler要素を用いることが一般的である。</p> <p>(b) Lagrange 要素</p> <p>物質の位置、速度、圧力などの物理量の時間変化と共に座標が変形する。境界面が移動または変形しても、メッシュが追従するので主として固体に対して適用性がある。</p> <p>(c) ALE 要素</p> <p>Euler要素とLagrange要素の中間的な座標を用いる。物体の変形や流動とは無関係に任意に動かすことのできる参照座標系を用いて連続体の運動を記述する方法。Euler要素では移動境界を表現するには特別な工夫を必要とするが、ALE要素では、移動境界を比較的容易に表せる。また、幾何形状から分類すると、以下の代表的な2種類がある。</p> <p>(d) Solid 要素</p> <p>標準的な三次元体積要素。8節点6面体Solid要素や6節点5面体Solid要素などがある。</p> <p>(e) Shell 要素</p> <p>三次元モデルでは、3節点あるいは4節点の薄板シェル要素として、板厚方向の寸法がそれ以外の寸法よりもきわめて小さい構造物をモデル化するのに使用される。二次元モデルでは、平面ひずみ要素や軸対称要素などに使用される。</p> <p>LS-DYNAコードでは、三次元のベDESTALの構造応答の観点から、構造材に力を伝える流体にはALE Solid要素、構造材にはLagrange Solid要素を用いる。構造材の各メッシュ分割は、ベDESTALの壁厚方向、周方向及び高さ方向に十分に解析精度を確保できるサイズとする。流体側のメッシュサイズは、力のやり取りの関係から構造側と同サイズにすることが推奨されていることから、流体と構造の連成境界面では同サイズとなるように設定する。</p>	<p>である。FCI 時の構造応答解析で取扱う連続体のおよその音速 c は、鋼材で 5000 m/s、コンクリートで 3400 m/s である。</p> <p>LS-DYNAコードでは、時間積分の刻み幅 Δt を、すべての要素で決定される時間増分の中で最小のものを自動的に用いている。</p> <p>3.1 計算要素</p> <p>LS-DYNAコードでは、構造物を記述する一般的な手法としてLagrange要素を用いる。また、原子炉下部キャビティの3次元な幾何形状をモデル化するためにSolid要素、Shell要素を用いる。各要素の概要を以下に示す。</p> <p>(a) Lagrange 要素</p> <p>物質の位置、速度、圧力などの物理量の時間変化と共に座標が変形する。境界面が移動または変形しても、メッシュが追従するので主として固体に対して適用性がある。</p> <p>(b) Solid 要素</p> <p>標準的な三次元体積要素。8節点6面体Solid要素や6節点5面体Solid要素などがある。</p> <p>(c) Shell 要素</p> <p>三次元モデルでは、3節点あるいは4節点の薄板シェル要素として、板厚方向の寸法がそれ以外の寸法よりもきわめて小さい構造物をモデル化するのに使用される。二次元モデルでは、平面ひずみ要素や軸対称要素などに使用される。</p> <p>構造材の各メッシュ分割は、原子炉下部キャビティ壁の壁厚方向、周方向及び高さ方向に十分に解析精度を確保できるサイズとする。</p>	<p>解析手法の相違により、流体内の音速は使用しない</p> <p>解析手法の相違により、流体を記述する要素は使用しない</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

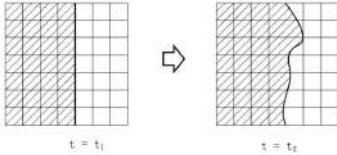
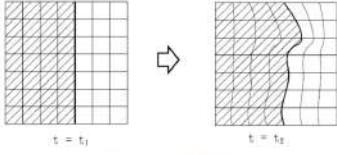

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>流体や固体の連続体の挙動を記述する基礎式としては、連続の式（質量保存則）・運動方程式（運動量保存則）・エネルギー保存式の3式が必要となる。この3式と物質の性質を表現するための状態方程式や材料構成式とが連立して解かれることにより、連続体の運動、すなわち、流体と固体の移動、変形及び動的な相互作用を求めることができる。数値解法上は、有限要素法による空間の離散化・中心差分に基づく、陽解法と呼ばれる極めて微小な時間幅で数値的に積分する方法が用いられている。</p>	<p>固体の連続体の挙動を記述する基礎式としては、連続の式（質量保存則）・運動方程式（運動量保存則）・エネルギー保存式の3式が必要となる。この3式と物質の性質を表現するための材料構成式とが連立して解かれることにより、連続体の運動、すなわち、固体の移動、変形を求めることができる。数値解法上は、有限要素法による空間の離散化・中心差分に基づく、陽解法と呼ばれる極めて微小な時間幅で数値的に積分する方法が用いられている。</p>	<p>圧力容器支持構造の相違 解析手法の相違 により、流体はモデル化しない</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

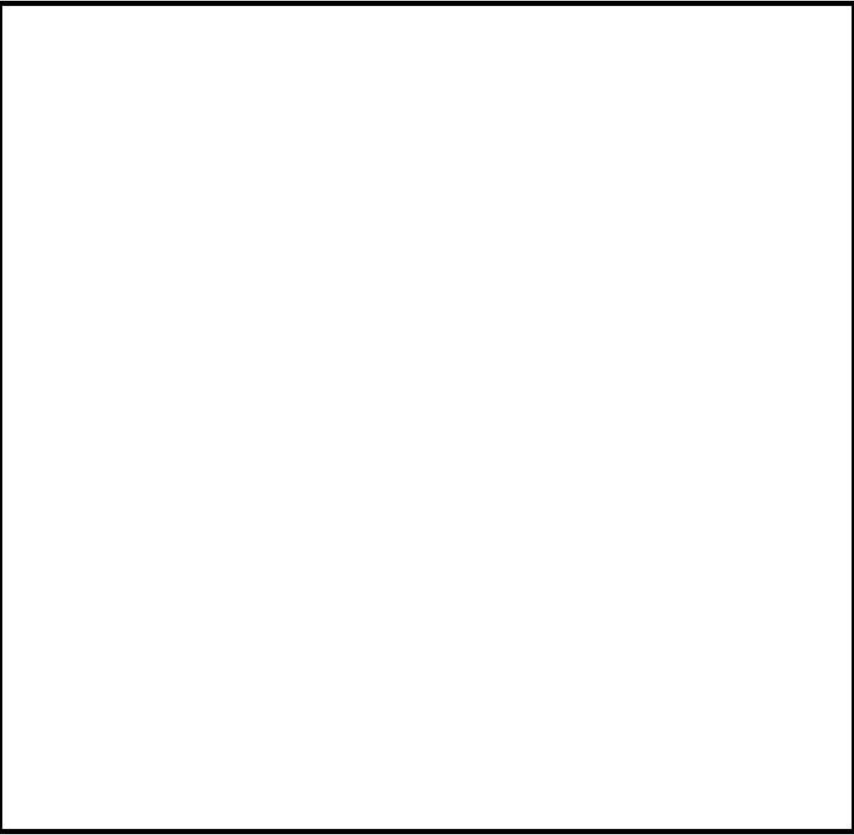
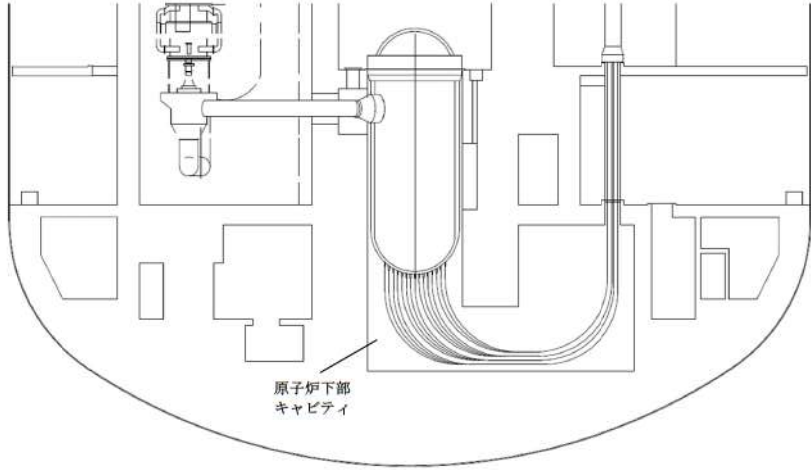
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div style="text-align: center;">  <p>(a) Euler 要素の概念</p>  <p>(b) Lagrange 要素の概念</p>  <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>Lagrangian ステップ 通常の構造解析と同様に計算する</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>Advection(移流) ステップ 時間を進めず、メッシュを初期位置に戻し、物理量をマッピングする</p> </div> </div> <p>(c) ALE 要素の概念</p> <p>図3-1 各要素タイプの場合</p> </div>		<p>相違理由</p> <p>解析手法の相違により、流体はモデル化しない</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.2 境界条件</p> <p>原子炉圧力容器を支持するペDESTAL内のリブ配置構造を考慮して、解析モデルは三次元体系とする。図3-2に示すようにペDESTAL基部はPCV底部コンクリート内に埋没されており、構造的には剛体と見なせることから、図3-3に示すFCI解析時の拘束条件として、PCV底部コンクリート内に埋没しているペDESTAL鋼板は完全拘束とする。</p>  <p>図3-2 ペDESTALの設置構造</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	<p>3.2 境界条件</p> <p>原子炉圧力容器を支持する原子炉下部キャビティ壁の構造を考慮して、解析モデルは三次元体系とする。図3-1に示すように原子炉下部キャビティ底部は十分厚い基礎コンクリートであること、及び側面は十分な広がりを持つ平面であることから、図3-2に示す構造応答解析時の拘束条件として、原子炉下部キャビティの底面は鉛直方向拘束とし、側面は完全拘束とする。</p>  <p>図3-1 原子炉下部キャビティの構造</p>	<p>压力容器支持構造の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="161 220 1034 1329" style="border: 2px solid black; height: 695px; width: 390px;"></div> <div data-bbox="465 1358 728 1385" style="text-align: center;"> <p>図3-3 FCI 解析時の拘束条件</p> </div> <div data-bbox="454 1401 1025 1441" style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1070 794 1944 1289" style="border: 2px solid black; height: 310px; width: 390px;"></div> <div data-bbox="1361 1326 1659 1353" style="text-align: center;"> <p>図3-2 構造応答解析時の拘束条件</p> </div> <div data-bbox="1384 1358 1951 1385" style="text-align: center;"> <p>：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	<p>圧力容器支持構造、及び解析手法の相違</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																				
<p>3.3 材料モデル</p> <p>3.3.1 計算体系</p> <p>今回の評価では三次元モデルを用い、 で評価を実施している。本評価では、気相部、液相部、爆発源、鋼板及びびコンクリートをモデル化しており、縦リブ鋼板も想定している。また、開口部の影響を考慮するため、CRD 搬入口高さ位置に開口部を設定している。</p> <p>3.3.2 流体モデル</p> <p>流体の影響を考慮する際、特定の粒子の運動を知るより、空間に固定されたメッシュ内での流動状態や時間変化を知る方が重要である。また、構造材との連成を考慮した場合、流体は移動境界を比較的容易に表せるALE 要素を用いるのが適当である。以下に流体要素のプロパティ一覧を示す。なお、想定したセル形状を考慮し、Solid モデルを採用する。</p> <p style="text-align: center;">表 3-1 要素プロパティ一覧</p> <table border="1" data-bbox="412 628 777 815"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>爆発源</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>液相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>気相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> </tbody> </table> <p>3.3.3 構造材モデル</p> <p>構造材の変形を考慮する際、構造材メッシュの変形を考慮する必要がある。メッシュ自体の変形を考慮する場合、粒子の集まりが時間とともに、どのように動いていくか（メッシュ点がどのように動いていくか）に着目する Lagrange 手法を用いるのが適当である。以下に構造材要素のプロパティ一覧を示す。なお、厚さ方向の影響も確認するため、鋼板についても Solid モデルを採用する。</p> <p style="text-align: center;">表 3-2 要素プロパティ一覧</p> <table border="1" data-bbox="371 1094 810 1265"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> </tbody> </table> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px; text-align: center;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	部位	要素	爆発源	ALE 要素 (Solid)	液相	ALE 要素 (Solid)	気相	ALE 要素 (Solid)	部位	要素	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	鋼板	Lagrange 要素 (Solid)	<p>3.3 材料モデル</p> <p>3.3.1 計算体系</p> <p>今回の評価では三次元モデルを用い、1 / 1 体系で評価を実施している。本評価では、鉄筋及びびコンクリートをモデル化している。</p> <p>3.3.2 構造材モデル</p> <p>構造材の変形を考慮する際、構造材メッシュの変形を考慮する必要がある。メッシュ自体の変形を考慮する場合、粒子の集まりが時間とともに、どのように動いていくか（メッシュ点がどのように動いていくか）に着目する Lagrange 手法を用いるのが適当である。以下に構造材要素のプロパティ一覧を示す。なお、鉄筋には、縦方向と横方向それぞれの断面積をピッチで除した等価板厚の Shell モデルを採用し、コンクリートの Solid モデルとカップリングする構成とする。</p> <p style="text-align: center;">表 3-1 要素プロパティ一覧</p> <table border="1" data-bbox="1285 1110 1711 1281"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>鉄筋</td> <td>Lagrange 要素 (Shell)</td> </tr> </tbody> </table>	部位	要素	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)	<p>圧力容器支持構造、及び解析手法の相違</p> <p>解析手法の相違により、流体はモデル化しない</p>
部位	要素																					
爆発源	ALE 要素 (Solid)																					
液相	ALE 要素 (Solid)																					
気相	ALE 要素 (Solid)																					
部位	要素																					
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																					
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)																					
部位	要素																					
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																					
鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)																					

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表


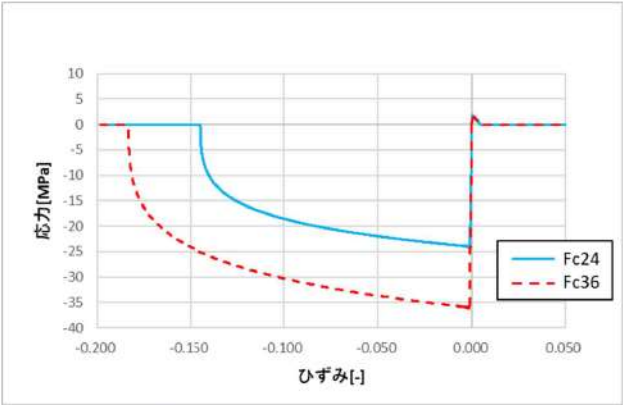
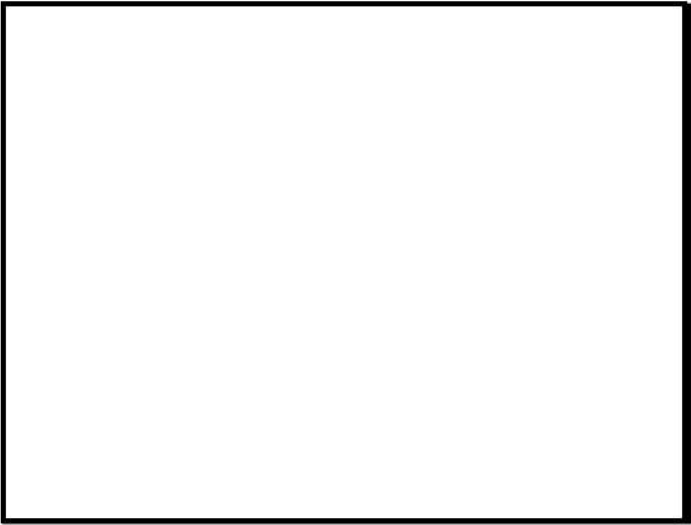
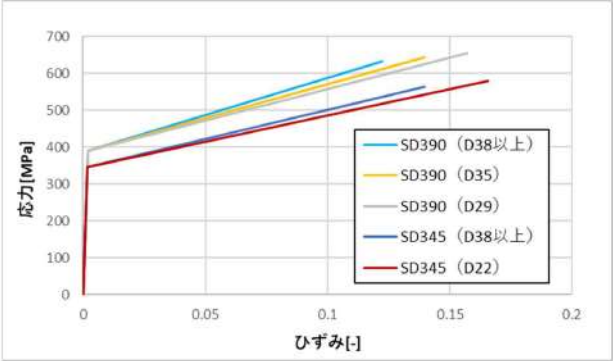
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																												
<p>3.3.4 材料モデル</p> <p>表3-3 と表3-4 に鋼材とコンクリートの材料特性を示す。表3-1 及び表3-2 の設定の基づき、解析にあたっては個別プラントの密度、ヤング率、降伏応力等を入力する。</p> <p>流体から構造材に力が掛かることで応力が発生する。この応力により構造材に歪みが発生する。このときの応力歪み曲線をコンクリート及び鋼板について図3-4 及び図3-5 に示す。なお、コンクリートに関しては、最大の力を受ける圧縮方向の応力歪み曲線で代表する。</p> <p style="text-align: center;">表 3-3 鋼材の材料特性</p> <table border="1" data-bbox="360 464 831 767"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>設定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>構成則</td> <td>等方硬化則</td> </tr> <tr> <td>破壊則</td> <td>— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)</td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td rowspan="4">SPV490 の値</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> </tr> <tr> <td>降伏応力</td> </tr> <tr> <td>塑性ひずみ特性</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 3-4 コンクリートの材料特性</p> <table border="1" data-bbox="367 836 824 1131"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>設定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>構成則</td> <td>等方硬化則で近似</td> </tr> <tr> <td>破壊則</td> <td>— (強度部材では無く考慮しない)</td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td rowspan="4">個別プラントの設計強度による値</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> </tr> <tr> <td>降伏応力</td> </tr> <tr> <td>塑性ひずみ特性</td> </tr> </tbody> </table>	項目	設定	構成則	等方硬化則	破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)	密度	SPV490 の値	ヤング率	降伏応力	塑性ひずみ特性	項目	設定	構成則	等方硬化則で近似	破壊則	— (強度部材では無く考慮しない)	密度	個別プラントの設計強度による値	ヤング率	降伏応力	塑性ひずみ特性	<p>3.3.3 材料モデル</p> <p>表3-2 と表3-3 に鉄筋とコンクリートの材料特性を示す。表3-1 の設定に基づき、解析にあたっては個別プラントの密度、ヤング率、降伏応力等を入力する。</p> <p>構造材に力が掛かることで応力が発生する。この応力により構造材に歪みが発生する。このときの応力歪み曲線をコンクリート及び鉄筋について図3-3 及び図3-4 に示す。なお、コンクリートに関しては、引張・圧縮の軟化挙動を考慮した非線形材料モデルを適用する。</p> <p style="text-align: center;">表 3-2 鉄筋の材料特性</p> <table border="1" data-bbox="1245 448 1794 767"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>設定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>構成則</td> <td>等方硬化則</td> </tr> <tr> <td>破壊則</td> <td>— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)</td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td rowspan="4">個別プラントの設計強度による値</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> </tr> <tr> <td>降伏応力</td> </tr> <tr> <td>塑性ひずみ特性</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 3-3 コンクリートの材料特性</p> <table border="1" data-bbox="1245 836 1794 1195"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>設定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>構成則</td> <td>引張・圧縮の軟化特性を考慮した非線形材料モデル</td> </tr> <tr> <td>破壊則</td> <td>— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)</td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td rowspan="4">個別プラントの設計強度による値</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> </tr> <tr> <td>降伏応力</td> </tr> <tr> <td>塑性ひずみ特性</td> </tr> </tbody> </table>	項目	設定	構成則	等方硬化則	破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)	密度	個別プラントの設計強度による値	ヤング率	降伏応力	塑性ひずみ特性	項目	設定	構成則	引張・圧縮の軟化特性を考慮した非線形材料モデル	破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)	密度	個別プラントの設計強度による値	ヤング率	降伏応力	塑性ひずみ特性	<p>圧力容器支持構造及び解析手法の相違</p>
項目	設定																																													
構成則	等方硬化則																																													
破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)																																													
密度	SPV490 の値																																													
ヤング率																																														
降伏応力																																														
塑性ひずみ特性																																														
項目	設定																																													
構成則	等方硬化則で近似																																													
破壊則	— (強度部材では無く考慮しない)																																													
密度	個別プラントの設計強度による値																																													
ヤング率																																														
降伏応力																																														
塑性ひずみ特性																																														
項目	設定																																													
構成則	等方硬化則																																													
破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)																																													
密度	個別プラントの設計強度による値																																													
ヤング率																																														
降伏応力																																														
塑性ひずみ特性																																														
項目	設定																																													
構成則	引張・圧縮の軟化特性を考慮した非線形材料モデル																																													
破壊則	— (入力では考慮せず、解析結果を見て判断)																																													
密度	個別プラントの設計強度による値																																													
ヤング率																																														
降伏応力																																														
塑性ひずみ特性																																														

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>図 3-3 コンクリートの応力歪み曲線</p>	
<p>図 3-4 コンクリートの応力歪み曲線（設計強度：30MPa）</p>  <p>図 3-5 鋼板の応力歪み曲線</p>	 <p>図 3-4 鉄筋の応力歪み曲線</p>	
<p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

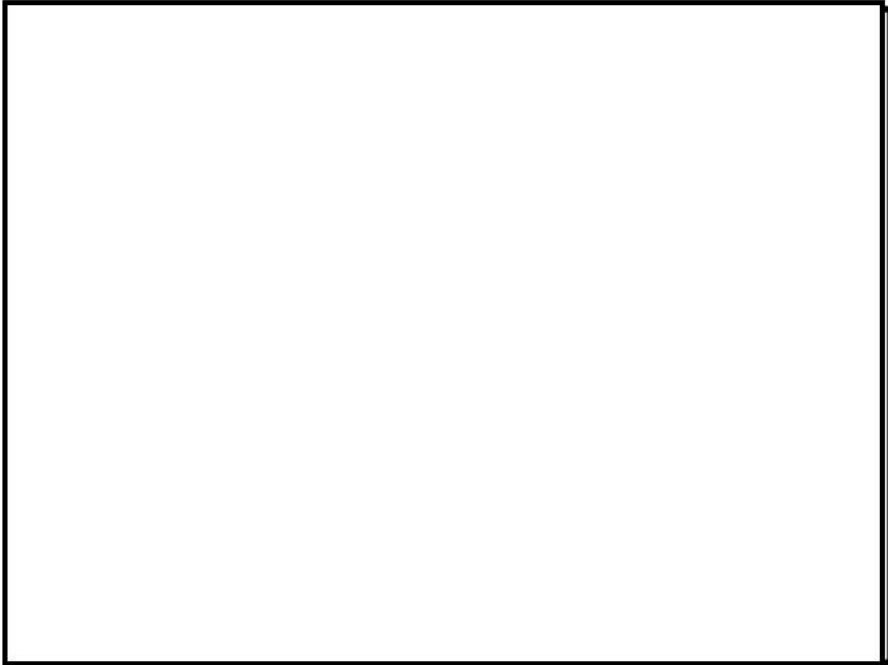
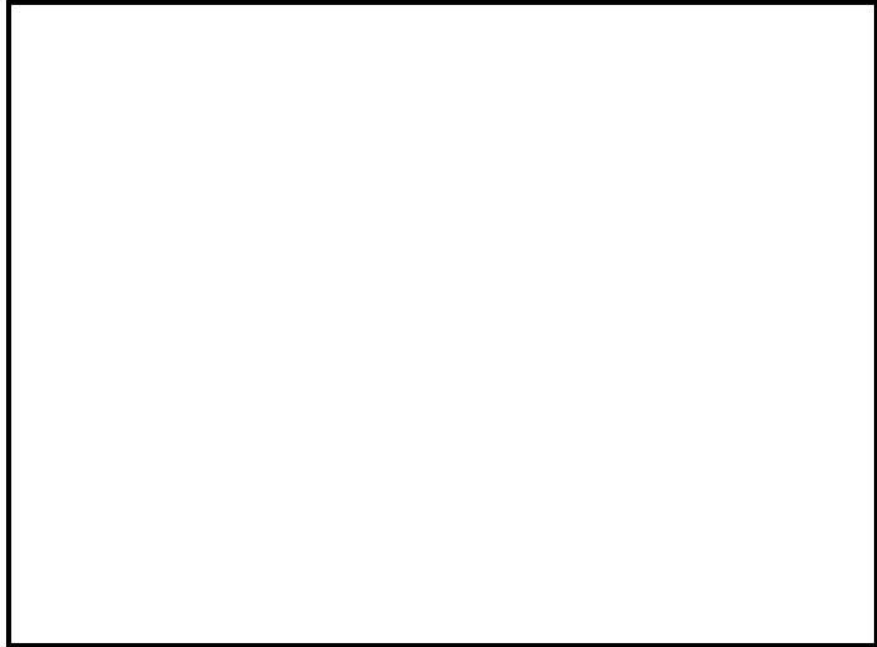

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.3.5 メッシュ分割</p> <p>図3-6～図3-10に各部のメッシュ分割について示す。ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 <input type="text"/> mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。また、構造材に力を伝える流体（ALE要素）のメッシュサイズは、ALE法を用いることを考慮し、境界面における伝達ロスが生じないように構造材（Lagrange要素）のメッシュサイズと同等とする。以下に各要素のメッシュ分割例を示す。</p> <div data-bbox="159 539 1032 1187" style="border: 1px solid black; height: 400px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: center;">図3-6 コンクリート部のメッシュ例</p> <div data-bbox="383 1326 954 1362" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	<p>3.3.4 メッシュ分割</p> <p>図3-5～図3-6に各部のメッシュ分割について示す。原子炉下部キャビティの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 <input type="text"/> mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。以下に各要素のメッシュ分割例を示す。</p> <div data-bbox="1084 544 1951 1254" style="border: 1px solid black; height: 445px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: center;">図3-5 コンクリート部のメッシュ例</p> <div data-bbox="1384 1326 1951 1362" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> <input type="text"/>：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。 </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		<p>解析手法の相違により爆発源はモデル化しない</p>
<p>図3-7 鋼板部のメッシュ例</p>	<p>図3-6 鉄筋部のメッシュ例</p>	
	<p>□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	
<p>図3-8 爆発源のメッシュ例</p> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		解析手法の相違 により爆発源は モデル化しない
<p>図3-9 水相部のメッシュ例</p>		
		
<p>図3-10 気相部のメッシュ例</p>		
<p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="138 220 1039 798" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="315 831 873 860" data-label="Caption"> <p>図 3-12 JASMINe解析による粗混合領域の圧力履歴の例</p> </div> <div data-bbox="138 901 427 930" data-label="Section-Header"> <p>3.4.3 爆発源の開放エネルギー</p> </div> <div data-bbox="138 935 1043 1104" data-label="Text"> <p>JASMINeコードの解析による流体の運動エネルギーは、LS-DYNAコードで直接入力することはできない。そのため、今回の評価では、この流体運動エネルギーを再現するため、爆発源の開放エネルギーを適切に設定し、LS-DYNAコードの解析結果としての流体運動エネルギーの最大値がJASMINeコードの解析の最大運動エネルギー相当となるよう調節している。これらの設定方法を図3-13に示す。</p> </div> <div data-bbox="138 1109 1048 1174" data-label="Text"> <p>なお、この流体の最大運動エネルギーを保存する解析手法は、添付1に示す通り保守的な評価となる。</p> </div>		<p data-bbox="1966 901 2121 930">解析手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

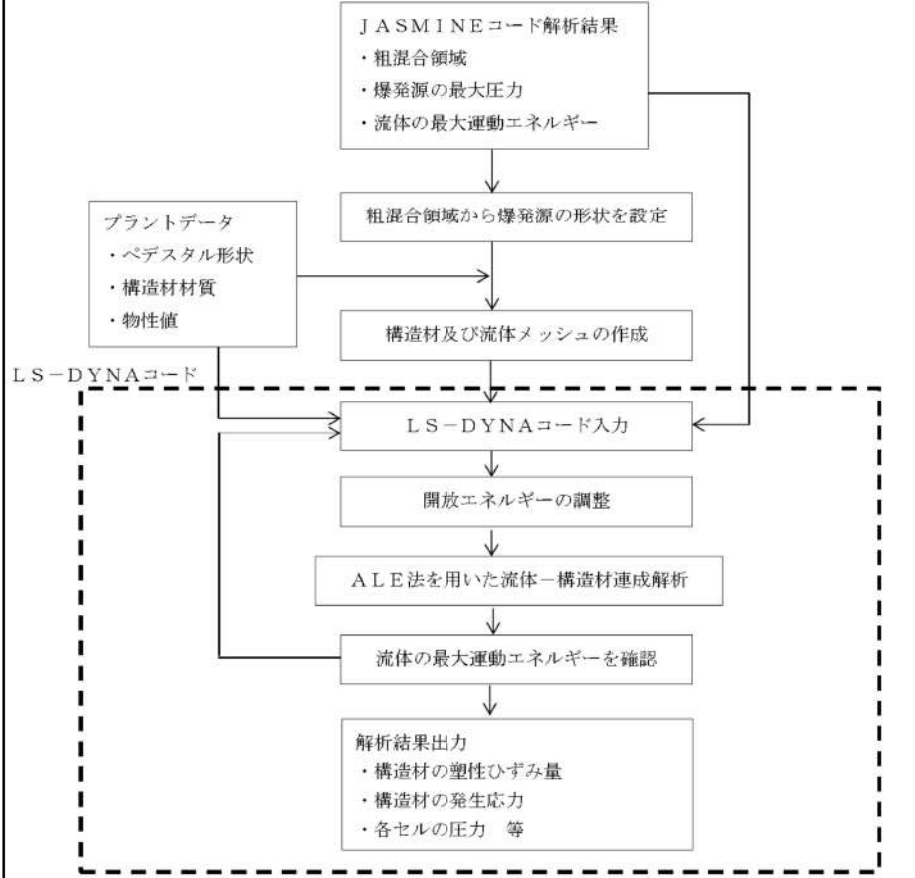
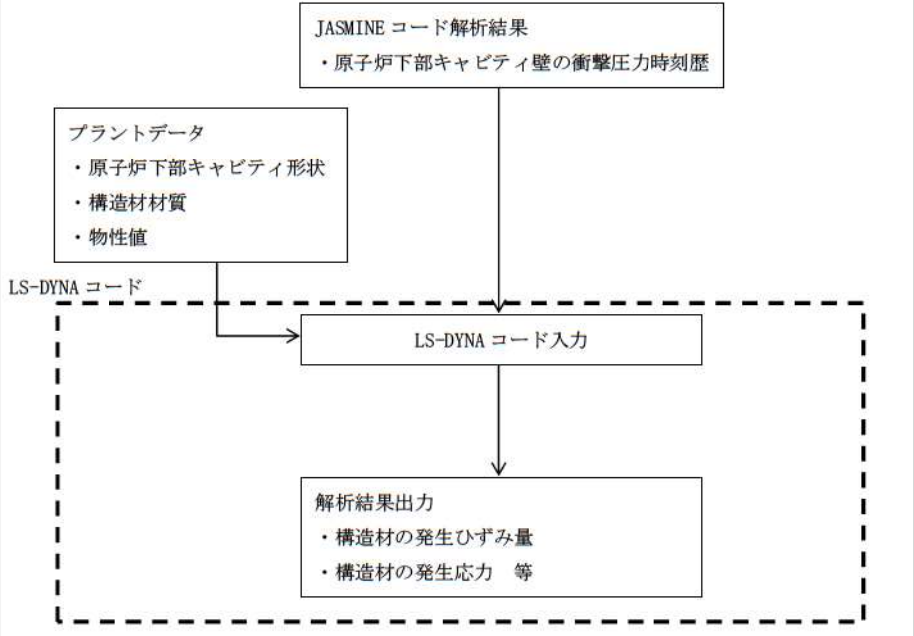
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図3-13 LS-DYNAコードにおける流体運動エネルギー設定方法</p> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>		<p>解析手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.5 解析フロー</p> <p>LS-DYNAコードの入力は、JASMINEコードの解析結果である粗混合領域の形状、爆発源の最大圧力、流体の運動エネルギーを入力条件として引き継ぎ、解析を実施する。なお、流体の運動エネルギーをLS-DYNAコードに直接入力することはできないため、爆発源の開放エネルギーを調節することで、JASMINEコードから出力される流体の運動エネルギーを再現している。解析フローを図3-14に示す。</p>  <p>図3-14 LS-DYNAコード解析フロー図</p>	<p>3.5 解析フロー</p> <p>LS-DYNAコードの入力は、JASMINEコードの解析結果である原子炉下部キャビティ壁の衝撃圧力時刻歴を入力条件として引き継ぎ、解析を実施する。解析フローを図3-8に示す。</p>  <p>図3-8 LS-DYNAコード解析フロー図</p>	<p>解析手法の相違によりJASMINEコードから引き継ぐ入力条件が異なる。JASMINEコードから、爆発により原子炉下部キャビティ壁に作用する圧力時刻歴を引き継ぐため、LS-DYNAコードでの運動エネルギーの再現は不要</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.6 入出力</p> <p>LS-DYNAコードの主要な入出力は図3-14に示した解析フロー図にも示されるとおりである。LS-DYNAコードの入出力データは以下のとおり構成される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① ベDESTAL構造物の幾何形状 ② 各構造物に対する拘束条件 ③ 構造物及び流体の物性値 ④ 流体及び構造材のメッシュデータ ⑤ 流体及び構造材の要素タイプ ⑥ 爆発源の形状（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく） ⑦ 爆発源の初期圧力及びエネルギー（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく） <p>上記をインプットデータとして、水蒸気爆発発生時の構造材衝撃荷重応答を評価し、以下の主要なアウトプットデータを得る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 構造材の塑性ひずみ量 ② 構造材の発生応力 ③ 各セルの圧力 	<p>3.6 入出力</p> <p>LS-DYNAコードの主要な入出力は図3-8に示した解析フロー図にも示されるとおりである。LS-DYNAコードの入出力データは以下のとおり構成される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 原子炉下部キャビティ構造物の幾何形状 ② 各構造物に対する拘束条件 ③ 構造物の物性値 ④ 構造材のメッシュデータ ⑤ 構造材の要素タイプ ⑥ 原子炉下部キャビティ壁の衝撃圧力時刻歴（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく） <p>上記をインプットデータとして、水蒸気爆発発生時の構造材衝撃荷重応答を評価し、以下の主要なアウトプットデータを得る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 構造材の発生ひずみ量 ② 構造材の発生応力 	

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																
<p>3.7 解析結果の例示</p> <p>代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。</p> <p>(1) 解析モデル及び境界条件</p> <p>LS-DYNAコードによる解析モデルについて図3-15に示す。この図に示す通り、気相部、液相部、爆発源、鋼板、コンクリート及び縦リブ鋼板を模擬している。拘束条件については、図3-15に示すΔで示したコンクリートで埋設されている部分は全方位で拘束されているとし、\squareで示したベダスタル頂部、液相底面（ベダスタル床面）、気相頂部は、Z方向のみ拘束されているとした。</p> <p>模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表3-5に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 3-5 要素分割の詳細</p> <table border="1" data-bbox="331 528 857 852"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> <th>要素数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>爆発源</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> <td rowspan="6" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>液相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>気相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 材料物性</p> <p>代表プラントのベダスタルの構成材料（充填コンクリート及び鋼板）の密度、ヤング率、ポアソン比を表3-6に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図3-4及び図3-5に示すとおりである。</p> <p style="text-align: center;">表 3-6 ベダスタルの構成材料の物性値</p> <table border="1" data-bbox="152 1118 1032 1297"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>密度 (g/cm³)</th> <th>ヤング率 (Pa)</th> <th>ポアソン比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>充填コンクリート</td> <td colspan="3" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td colspan="3" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> </tbody> </table> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>	部位	要素	要素数	爆発源	ALE 要素 (Solid)		液相	ALE 要素 (Solid)	気相	ALE 要素 (Solid)	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	鋼板	Lagrange 要素 (Solid)			材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	充填コンクリート				鋼板				<p>3.7 解析結果の例示</p> <p>代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。</p> <p>(1) 解析モデル及び境界条件</p> <p>LS-DYNAコードによる解析モデルについて図3-9に示す。この図に示す通り、コンクリート及び鉄筋を模擬している。拘束条件については、図3-9に示すようにコンクリート底面はZ方向のみ拘束とし、側面部は完全拘束されているとした。</p> <p>模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表3-4に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 3-4 要素分割の詳細</p> <table border="1" data-bbox="1223 517 1845 687"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> <th>要素数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> <td rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>鉄筋</td> <td>Lagrange 要素 (Shell)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 材料物性</p> <p>代表プラントの原子炉下部キャビティの構成材料（コンクリート及び鉄筋）の密度、ヤング率、ポアソン比を表3-5に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図3-3及び図3-4に示すとおりである。</p> <p style="text-align: center;">表 3-5 原子炉下部キャビティの構成材料の物性値</p> <table border="1" data-bbox="1066 1107 1957 1305"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>密度 (g/cm³)</th> <th>ヤング率 (Pa)</th> <th>ポアソン比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>2.35</td> <td>2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>鉄筋</td> <td>7.85</td> <td>2.05E+11</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">\square：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	部位	要素	要素数	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)		鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)	材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	コンクリート	2.35	2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)	0.2	鉄筋	7.85	2.05E+11	0.3	<p>圧力容器支持構造及び解析手法の相違</p>
部位	要素	要素数																																																
爆発源	ALE 要素 (Solid)																																																	
液相	ALE 要素 (Solid)																																																	
気相	ALE 要素 (Solid)																																																	
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比																																															
充填コンクリート																																																		
鋼板																																																		
部位	要素	要素数																																																
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)																																																	
材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比																																															
コンクリート	2.35	2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)	0.2																																															
鉄筋	7.85	2.05E+11	0.3																																															

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

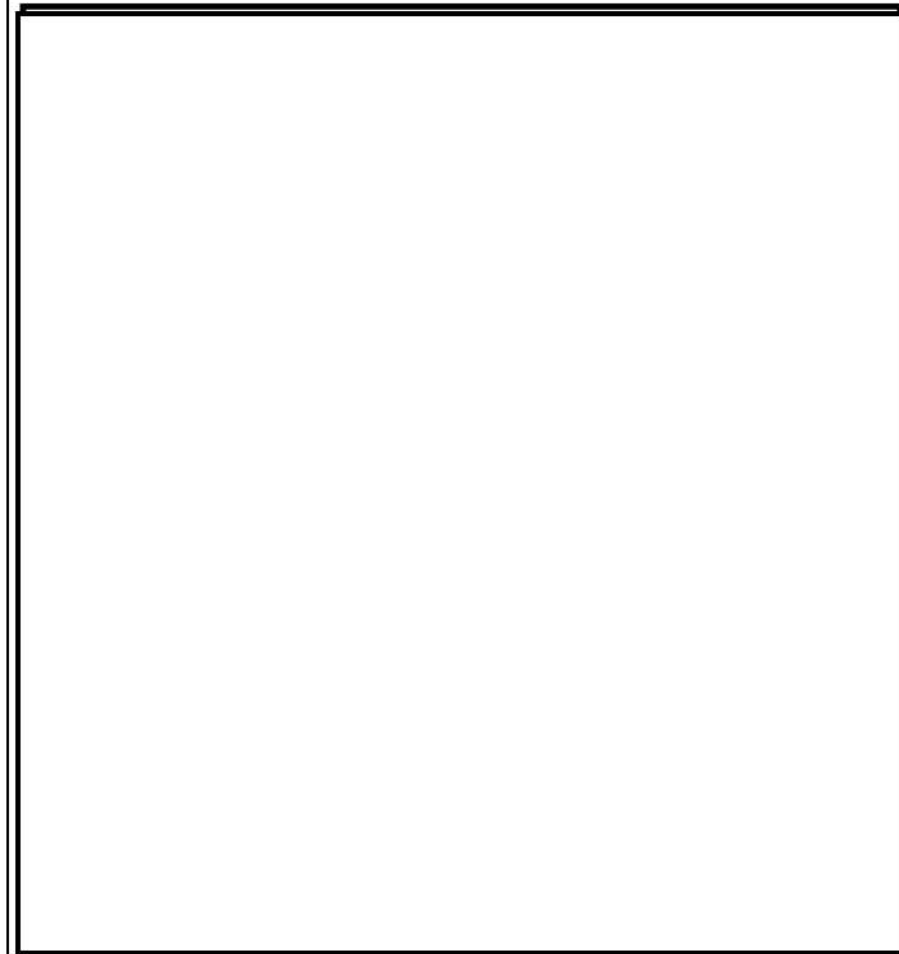
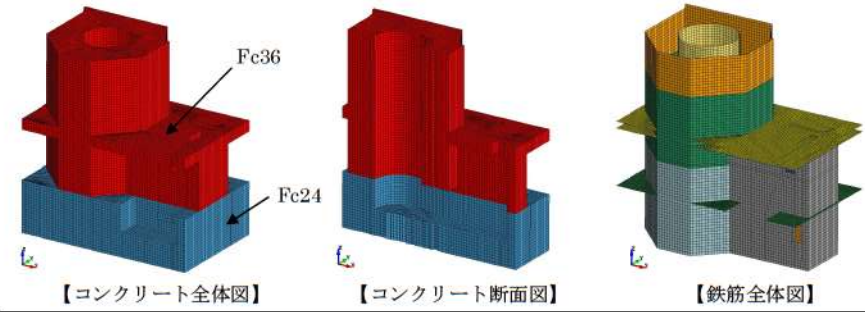
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由											
<p>(3) 爆発源の条件 爆発源の仕様を表 3-7 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 3-7 爆発源の仕様</p> <table border="1" data-bbox="163 323 1030 778"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>値</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>初期半径</td> <td rowspan="4" style="border: 2px solid black;"></td> <td>J A S M I N E コード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定</td> </tr> <tr> <td>初期体積</td> </tr> <tr> <td>最大圧力（初期圧力）</td> <td>J A S M I N E コード解析結果の爆発源の最大圧力より設定</td> </tr> <tr> <td>流体の運動エネルギー*</td> <td>J A S M I N E コード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 J A S M I N E コード解析結果に基づく値</td> </tr> </tbody> </table> <p>*) L S - D Y N A コードへの入力値ではなく、開放エネルギーの調整の結果として確認される</p> <p>(4) 解析結果 (1) ~ (3) の入力条件に基づき、解析を実施した結果について、爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布及び内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴を図 3-16 及び図 3-17 にそれぞれ示す。また、発生応力が最大となる時間での応力分布を内側鋼板及び外側鋼板について、図 3-18 及び図 3-19 にそれぞれ示す。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	項目	値	設定根拠	初期半径		J A S M I N E コード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定	初期体積	最大圧力（初期圧力）	J A S M I N E コード解析結果の爆発源の最大圧力より設定	流体の運動エネルギー*	J A S M I N E コード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 J A S M I N E コード解析結果に基づく値	<p>(3) 衝撃圧力の条件 J A S M I N E コード解析結果より引き継ぐ原子炉下部キャビティ壁の衝撃圧力時刻歴を図 3-10 に示す。</p> <p>(4) 解析結果 (1) ~ (3) の入力条件に基づき、解析を実施した結果について、爆発発生から 0.2 秒後までの鉄筋の相当塑性ひずみの最大値分布を図 3-11 に、コンクリートのせん断ひずみの最大値分布及び最大値発生位置でのせん断ひずみの時刻歴を図 3-12 及び図 3-13 にそれぞれ示す。また、コンクリートの最小主ひずみの最小値分布及び最小値発生位置での最小主ひずみの時刻歴を図 3-14 及び図 3-15 にそれぞれ示す。</p>	<p>相違理由 解析手法の相違により、J A S M I N E コードから引き継ぐ条件が異なる</p>
項目	値	設定根拠											
初期半径		J A S M I N E コード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定											
初期体積													
最大圧力（初期圧力）		J A S M I N E コード解析結果の爆発源の最大圧力より設定											
流体の運動エネルギー*		J A S M I N E コード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 J A S M I N E コード解析結果に基づく値											

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

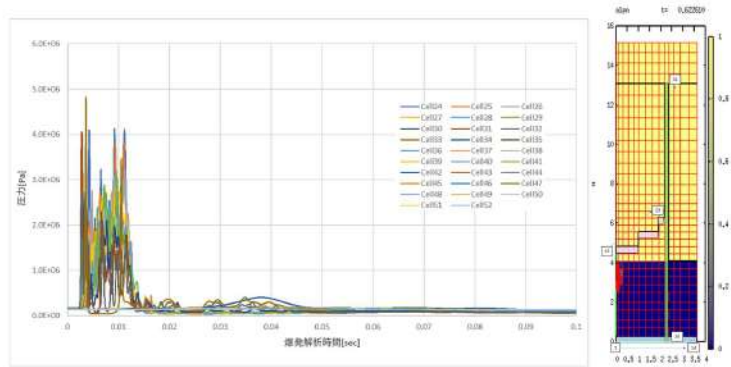
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>図3-15 代表プラントのLS-DYNAコードの解析モデル</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	<p>図3-9 代表プラントのLS-DYNAコードの解析モデル</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> □：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。 </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由											
<p>【比較のために再掲】</p> <p>表3-7 爆発源の仕様</p> <table border="1" data-bbox="161 287 1025 742"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>値</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>初期半径</td> <td rowspan="4" style="border: 2px solid black;"></td> <td>JASMIN Eコード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定</td> </tr> <tr> <td>初期体積</td> </tr> <tr> <td>最大圧力（初期圧力）</td> <td>JASMIN Eコード解析結果の爆発源の最大圧力より設定</td> </tr> <tr> <td>流体の運動エネルギー*</td> <td>JASMIN Eコード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 JASMIN Eコード解析結果に基づく値</td> </tr> </tbody> </table> <p>*) LS-DYNAコードへの入力値ではなく、開放エネルギーの調整の結果として確認される</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	項目	値	設定根拠	初期半径		JASMIN Eコード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定	初期体積	最大圧力（初期圧力）	JASMIN Eコード解析結果の爆発源の最大圧力より設定	流体の運動エネルギー*	JASMIN Eコード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 JASMIN Eコード解析結果に基づく値	 <p>図3-10 原子炉下部キャビティ壁の衝撃圧力時刻歴</p>	<p>圧力容器支持構造、及び解析手法の相違</p>
項目	値	設定根拠											
初期半径		JASMIN Eコード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定											
初期体積													
最大圧力（初期圧力）		JASMIN Eコード解析結果の爆発源の最大圧力より設定											
流体の運動エネルギー*		JASMIN Eコード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 JASMIN Eコード解析結果に基づく値											

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="176 228 999 730" style="border: 1px solid black; height: 315px; width: 367px;"></div> <div data-bbox="176 767 999 1270" style="border: 1px solid black; height: 315px; width: 367px;"></div> <div data-bbox="304 1284 882 1351" style="text-align: center;"> <p>図 3-16 爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布 （上：内側鋼板，下：外側鋼板）</p> </div> <div data-bbox="465 1391 981 1420" style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1120 244 1883 783" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="1171 798 1839 826" style="text-align: center;"> <p>図 3-11 爆発発生から 0.2 秒後までの鉄筋の相当塑性ひずみの最大値分布</p> </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

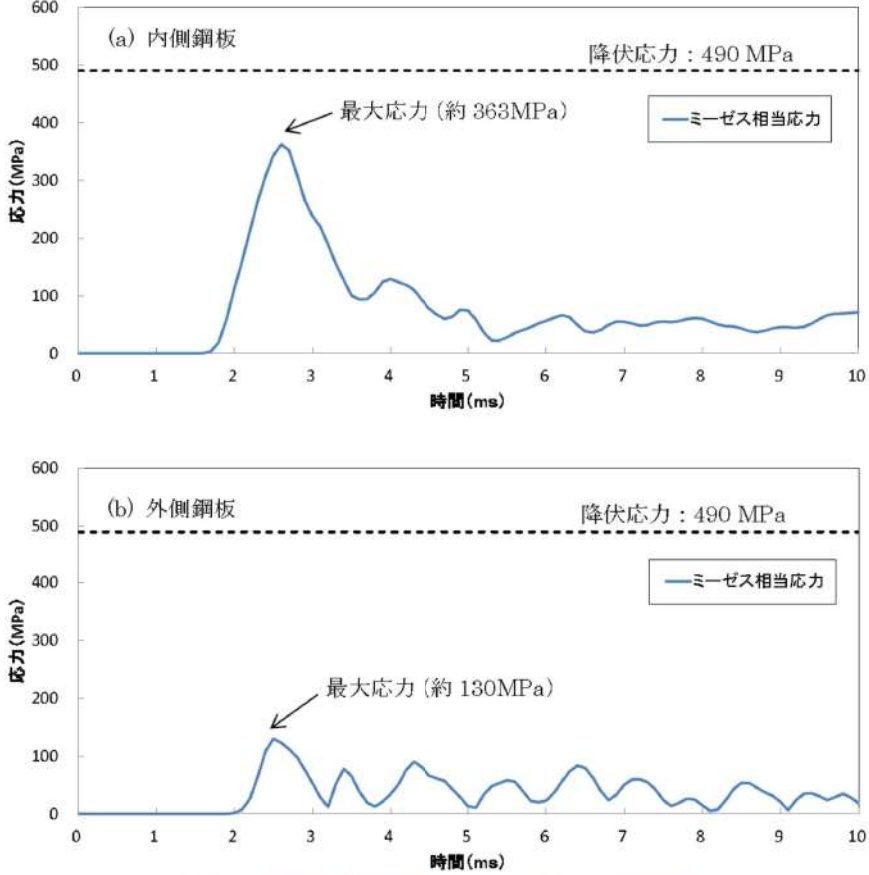
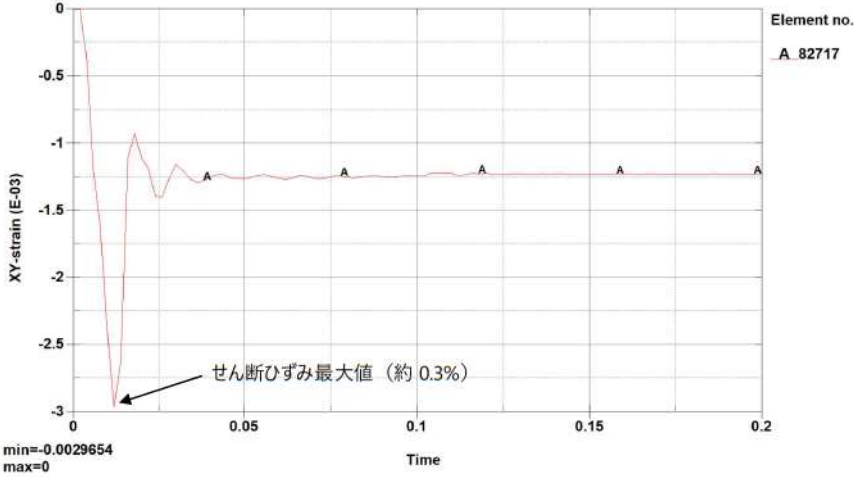
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<div data-bbox="1160 183 1861 671"> <p>Time = 0 Contours of Mean Ipt XY-strain (minima@state#7) min=-0.0029654, at elem# 82717 max=0, at elem# 72775</p> <p>せん断ひずみ 0.3%</p> <p>Mean IptXY-strain (minima@state#7) -3.253e-10 -2.965e-04 -9.931e-04 -8.896e-04 -1.186e-03 -1.483e-03 -1.779e-03 -2.076e-03 -2.372e-03 -2.669e-03 -2.965e-03</p> </div> <p>(a)最大発生箇所（絶対最大値評価）</p> <div data-bbox="1160 762 1861 1251"> <p>Time = 0 Contours of Mean Ipt XY-strain (minima@state#7) min=-0.0029654, at elem# 82717 max=0, at elem# 72775</p> <p>Mean IptXY-strain (minima@state#7) -3.253e-10 -2.965e-04 -9.931e-04 -8.896e-04 -1.186e-03 -1.483e-03 -1.779e-03 -2.076e-03 -2.372e-03 -2.669e-03 -2.965e-03</p> </div> <p>(b)A-A 断面</p>	

図 3-12 爆発発生から 0.2 秒後までのコンクリートのせん断ひずみの最大値分布

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

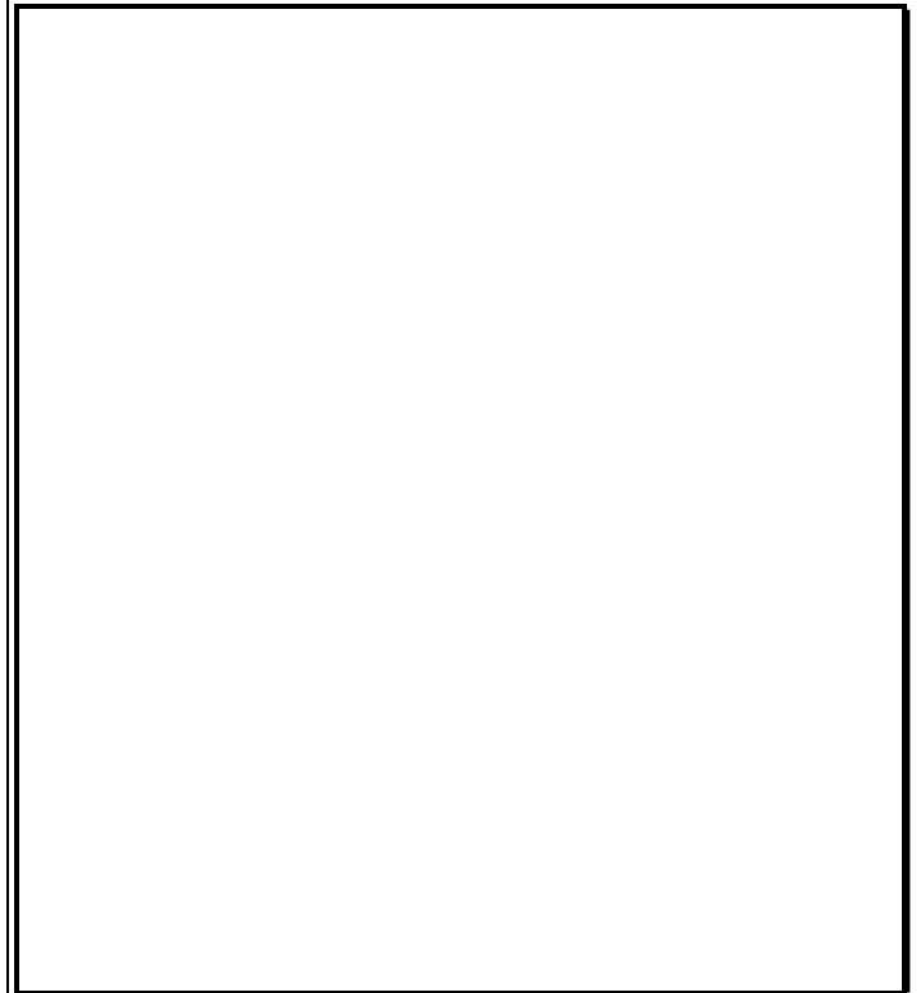
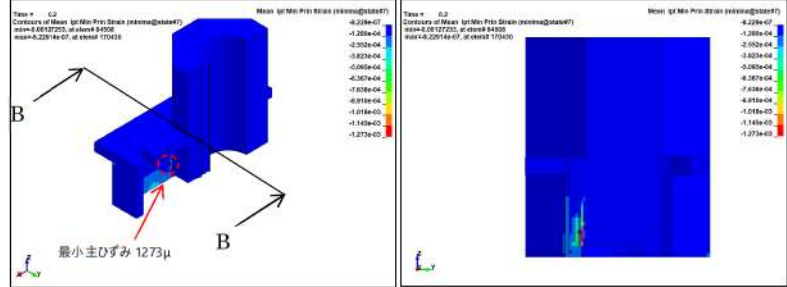
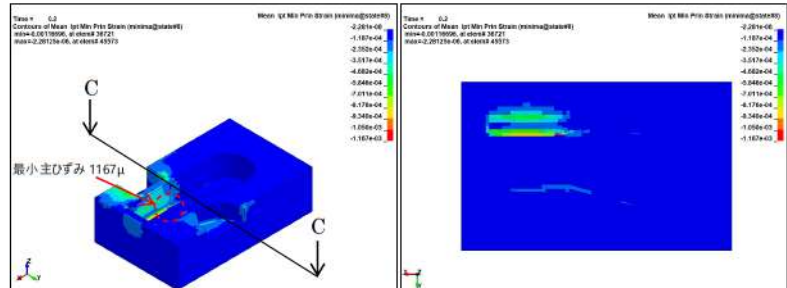
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>(a) 内側鋼板 降伏応力：490 MPa 最大応力（約 363MPa） ミーゼス相当応力</p> <p>(b) 外側鋼板 降伏応力：490 MPa 最大応力（約 130MPa） ミーゼス相当応力</p>	 <p>Element no. A 82717</p> <p>せん断ひずみ最大値（約 0.3%）</p> <p>min=-0.0029654 max=0</p>	
<p>図 3-17 内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴 （上：内側鋼板，下：外側鋼板）</p>	<p>図 3-13 コンクリートのせん断ひずみ最大値発生位置でのせん断ひずみの時刻歴</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

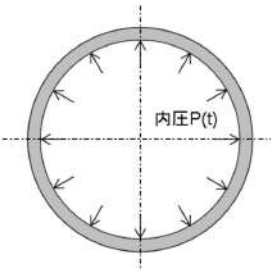
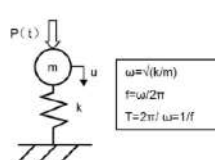
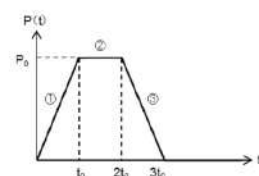
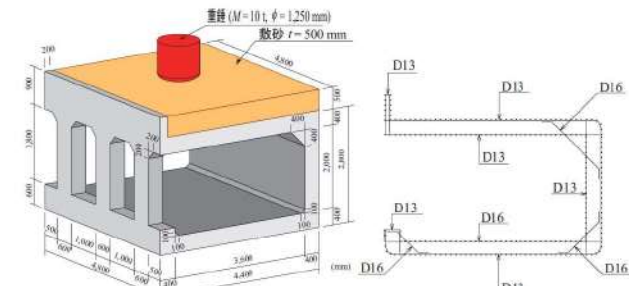
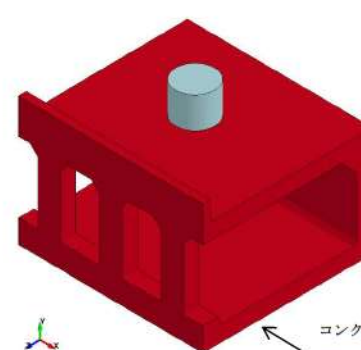
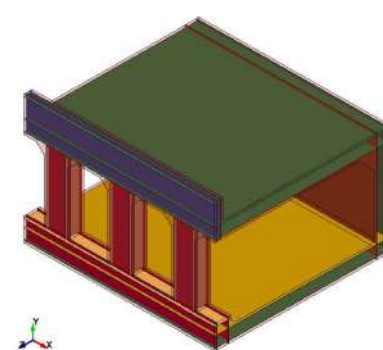
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<div data-bbox="1115 391 1899 678">  <p>(a)最小値発生箇所 (b)B-B断面</p> <p>【上部コンクリート】</p> </div> <div data-bbox="1115 805 1899 1093">  <p>(a)最小値発生箇所 (b)C-C断面</p> <p>【下部コンクリート】</p> </div>	
<p>図3-18 発生応力が最大となる時間での応力分布（内側鋼板）</p> <div data-bbox="430 1316 1003 1356" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p>図3-14 爆発発生から0.2秒後までのコンクリートの最小主ひずみの最小値の分布 (上：上部コンクリート，下：下部コンクリート)</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

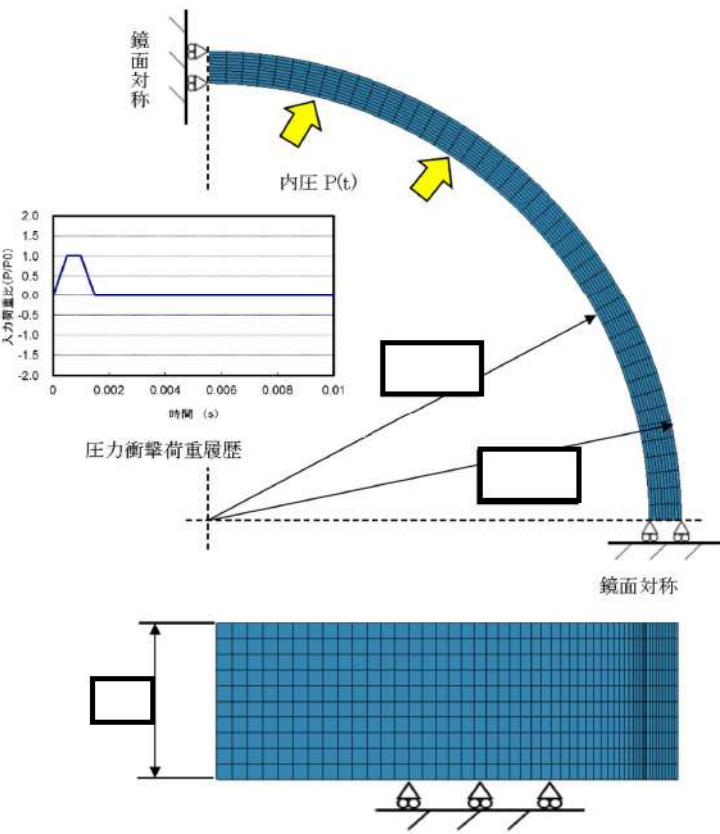
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 209 1010 890" style="border: 2px solid black; height: 427px; width: 383px;"></div> <p data-bbox="315 903 862 932">図3-19 発生応力が最大となる時間での応力分布（外側鋼板）</p> <div data-bbox="421 1070 992 1110" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 100px;"> <p data-bbox="445 1077 967 1101">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1144 201 1861 647"> <p data-bbox="1413 659 1599 687">【上部コンクリート】</p> </div> <div data-bbox="1144 730 1861 1177"> <p data-bbox="1413 1150 1599 1179">【下部コンクリート】</p> </div> <p data-bbox="1144 1219 1861 1281">図3-15 コンクリートの最小主ひずみ最小値発生位置での最小主ひずみの時刻歴 (上：上部コンクリート，下：下部コンクリート)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由															
<p>4. 解析結果の検証</p> <p>本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いたベDESTALの構造応答解析は、鋼板、放射状リブ及びコンクリート部を三次元ソリッド要素でモデル化して実施していることから、検証はベDESTAL構造とほぼ同形状をモデル化したソリッド要素とする。</p> <p>(1) 理論解との比較</p> <p>連続体要素を扱う動的解析の基本的な例題として、リング（円環）の面内振動を取り上げた。衝撃荷重が作用する構造物の応答では、図4-1に示すように構造物の固有周波数 f が大きく関係し^[4]、弾性範囲では図4-1に示されるような動的倍率（静的変位に対する倍率）の理論解が与えられる^[5]。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>内圧 $P(t)$</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho r^2}}$ <p>E: ヤング率 ρ: 密度 r: リングの中心線の半径</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>1質点系モデル</p> <p>$\omega = \sqrt{k/m}$ $f = \omega/2\pi$ $T = 2\pi/\omega = 1/f$</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>台形荷重</p> </div> </div> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 20px;"> <thead> <tr> <th>時間区分</th> <th>荷重の式</th> <th>動的倍率（=動的変位 u/静的変位 δ_0）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① $0 \leq t \leq t_0$</td> <td>$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$</td> </tr> <tr> <td>② $t_0 \leq t \leq 2t_0$</td> <td>$P(t) = P_0$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> <tr> <td>③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$</td> <td>$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> <tr> <td>④ $3t_0 \leq t$</td> <td>$P(t) = 0$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> </tbody> </table>	時間区分	荷重の式	動的倍率（=動的変位 u /静的変位 δ_0 ）	① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$	② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$	③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$	④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$	<p>4. 解析結果の検証</p> <p>本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と試験結果の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いた原子炉下部キャビティ壁の構造応答解析では、鉄筋の弾塑性挙動やコンクリートが一部破損するような挙動を評価するため、検証には同様の事象が発生する山口らの鉄筋コンクリート製ロックシェッド模型への重錘落下試験の結果^[4]を用いる。</p> <p>(1) 試験との比較</p> <p>山口らの試験におけるロックシェッド模型及び重錘の概略図を図4-1に示す。原子炉下部キャビティ壁と同条件となるように、ロックシェッド模型はコンクリートをソリッド要素、鉄筋を等価板厚のシェル要素でモデル化し、ソリッド要素でモデル化した重錘の落下高さに相当する入力エネルギーに対するコンクリートの挙動を試験結果と比較する。解析モデル図を図4-2に示す。</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>図4-1 ロックシェッド模型及び重錘の概略図</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>コンクリート 底面を完全拘束</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>鉄筋（シェル要素）</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">コンクリート（ソリッド要素）</p> <p style="text-align: center;">図4-2 解析モデル図</p>	<p>検証手法の相違</p>
時間区分	荷重の式	動的倍率（=動的変位 u /静的変位 δ_0 ）															
① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$															
② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$															
③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$															
④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$															

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

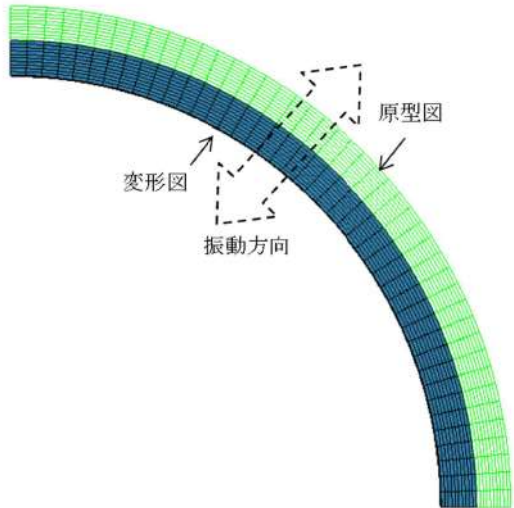
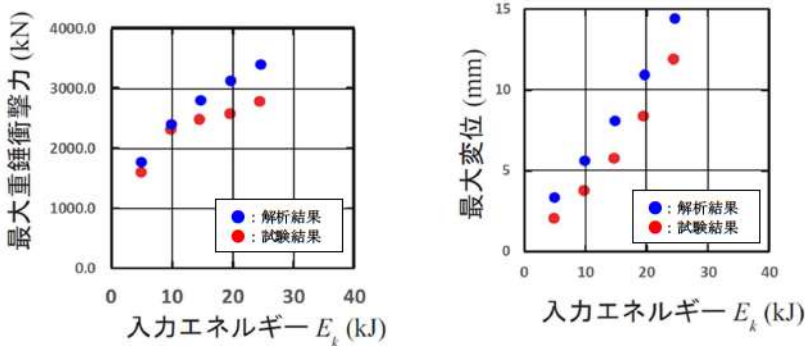
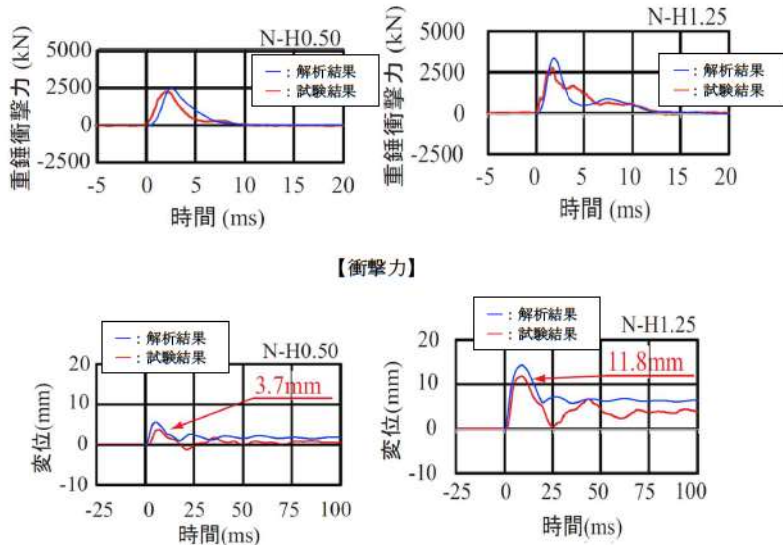
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図4-2に解析モデルを示す。リング形状は内半径 <input type="text"/> m, 外半径 <input type="text"/> m で解析モデルは対称性から1/4モデルとした。拘束条件としてリング周方向端部は鏡面对称、径方向には自由で、高さ方向は片側が固定されている。計算に用いた材料物性、内圧の最大値は以下の数値を用いた。図4-2に示す圧力衝撃荷重履歴は、最大圧力荷重を1としたときの荷重比の履歴として表している。</p> <p>縦弾性係数 E : <input type="text"/> (MPa) 質量密度 ρ : <input type="text"/> (kg/m³) ポアソン比 ν : <input type="text"/> (-) 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 内圧 P0 : 1.0 (MPa)</p>  <p>図4-2 解析対象モデル</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

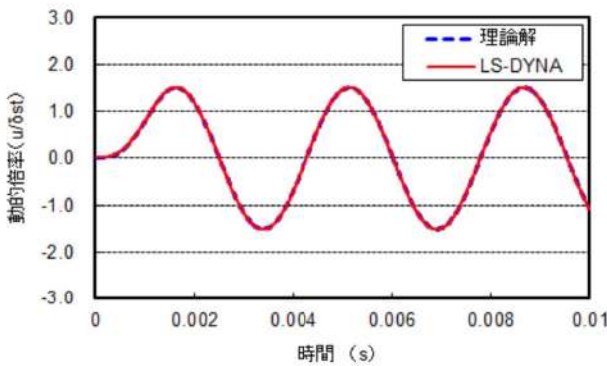
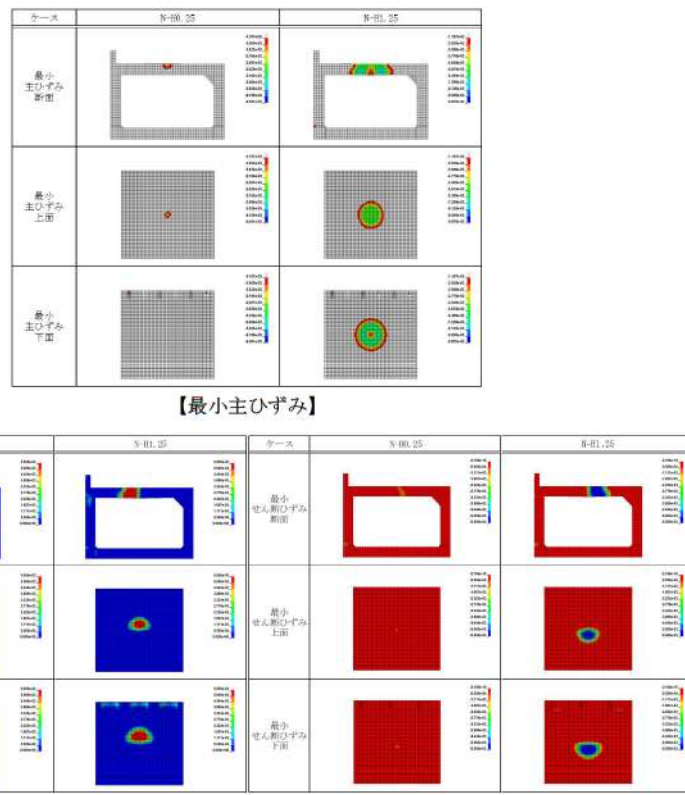
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
<p>(a) 円形リングの面内振動の固有振動数</p> <p>参考文献[4]より円形リングの固有振動数の理論解は、表 4-1 に示すように 283.80Hz である。</p> <p>表 4-1 円形リングの固有振動数（理論解）</p> <table border="1" data-bbox="333 316 853 564"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>縦弾性係数 E (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td></td> </tr> <tr> <td>密度 (kg/m³)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>固有周波数 (Hz)</td> <td>283.80</td> </tr> <tr> <td>周期 T (s)</td> <td>3.52×10^{-3}</td> </tr> </tbody> </table> <p>LS-DYNAコードの固有値計算値は、図 4-3 に示すように 283.37Hz であり、誤差-0.15%で理論解と良く一致している。</p>  <p>図 4-3 LS-DYNAコードの固有値解析結果 (径方向に振動する固有値モード)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-top: 10px;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	項目		縦弾性係数 E (MPa)		ポアソン比		密度 (kg/m ³)		固有周波数 (Hz)	283.80	周期 T (s)	3.52×10^{-3}	<p>(a) コンクリートに作用する最大衝撃力と最大変位</p> <p>鉄筋コンクリートの落下高さに相当する入力エネルギーに対する最大衝撃力とコンクリートの最大変位の比較を図 4-3 に、衝撃力と変位の時刻歴の比較を図 4-4 にそれぞれ示す。試験と解析結果は概ね一致しており、解析結果は試験結果より保守的な値となっている。</p>  <p>図 4-3 衝撃力と変位の最大値の試験結果と解析結果の比較</p>  <p>図 4-4 衝撃力と変位の時刻歴の試験結果と解析結果の比較</p>	<p>検証手法の相違</p>
項目														
縦弾性係数 E (MPa)														
ポアソン比														
密度 (kg/m ³)														
固有周波数 (Hz)	283.80													
周期 T (s)	3.52×10^{-3}													

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(b) 台形荷重に対する応答</p> <p>次に参考文献[5]による動的倍率の理論解と解析解を比較する。入力する衝撃荷重の条件を図4-2に示すような台形荷重で時間 t_0 は0.5ms、最大荷重 P_0 は1MPaとした。理論解による最大動的倍率は1.505倍である。</p> <p>LS-DYNAコードによる動的解析結果のリング内面位置での時刻歴変位を理論解とあわせて図4-4に示す。LS-DYNAコードの動的解析結果による最大動的倍率は1.514倍で、理論解との誤差0.6%と良く一致しており、衝撃荷重に対する問題にLS-DYNAコードを用いることは妥当である。</p>  <p>図4-4 動的倍率の理論解とLS-DYNAコードによる解析結果の比較</p>	<p>(b) コンクリートに作用する最大衝撃力と最大変位</p> <p>ロックシェッド模型頂版コンクリートの上面と下面におけるひずみの分布を図4-5に示す。最小主ひずみの分布では、着色した圧縮強度を超えるひずみ発生箇所に、最大及び最小せん断ひずみ分布では、赤色または青色で着色した絶対値が許容せん断ひずみ0.5%を超える範囲に、コンクリートの損傷が発生すると考えられる。これらは図4-6に示す試験結果の押し抜きせん断破壊の範囲と概ね一致しており、衝撃荷重に対する問題にLS-DYNAコードを用いることは妥当である。</p>  <p>【最小主ひずみ】</p> <p>【最大せん断ひずみ】</p> <p>【最小せん断ひずみ】</p> <p>図4-5 ロックシェッド模型頂版コンクリートのひずみ分布</p>	<p>検証手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p style="text-align: center;">(a) N-H0.50 (赤線) (b) N-H0.75 (青線) (c) N-H1.00 (緑線) (d) N-H1.25 (黒線)</p> <p style="text-align: center;">図 4-6 試験のひび割れ状況</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

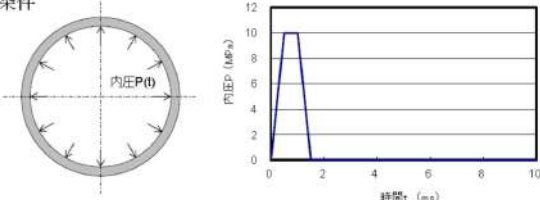
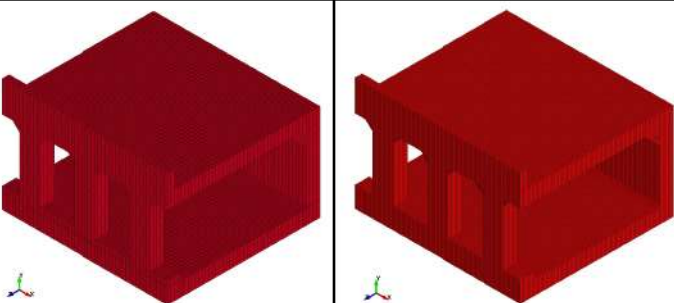
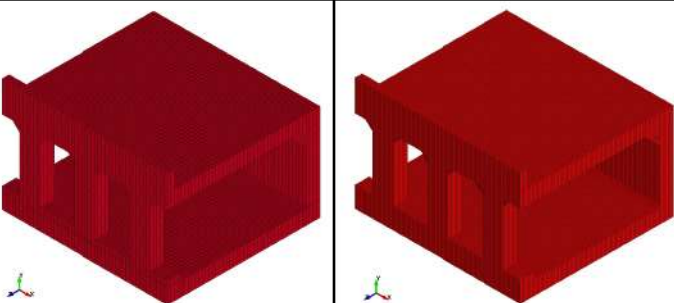
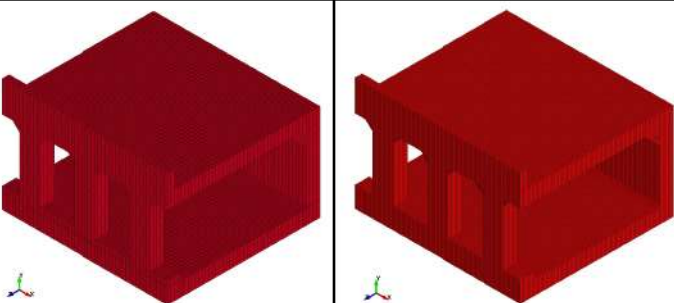
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) メッシュ分割の感度解析</p> <p>今回のFCI時のRPVペDESTALの構造評価では、構造体を模擬するLagrange Solid要素（要素幅約 <input type="text"/> ）、流体を模擬するALE Solid要素（要素幅約 <input type="text"/> ）を設定している。</p> <p>ここで、設定したメッシュ分割が適切なのかを確かめるために、ペDESTAL壁の一部を模擬した円環モデルにてメッシュ分割数の異なる二つのモデルに対して動的解析を行い、解析結果を比較した。図4-5に検討した円環モデルの概要、図4-6に解析結果の比較を示す。図4-6に示すように、FCI時の設定した要素サイズ（モデル1）と各要素辺長さを1/2とした詳細モデル（モデル2）の内外壁面における径方向変位の数値誤差*）は内外面で+4%、周方向応力の解析結果の数値誤差は内面で+3%、外面で+5%であり、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、メッシュ分割は妥当である。</p> <p>*）数値誤差の定義は、（モデル1-モデル2）/モデル2+（プラス）は、モデル1の方が解析結果の数値が大きいことを示す。</p> <p><input type="text"/> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>	<p>(2) メッシュ分割の感度解析</p> <p>ロックシェッド落錘試験との比較解析では、構造体を模擬するLagrange Solid要及びLagrange Shell要素の要素幅を、<input type="text"/> に設定している。</p> <p>ここで、設定したメッシュ分割が適切なのかを確かめるために、試験との比較解析モデルにてメッシュ分割数の異なる二つのモデルに対して落錘試験の解析を行い、解析結果を比較した。図4-7に検討した解析モデルの概要、図4-8に解析結果の比較を示す。図4-8に示すように、落錘試験との比較解析時に設定した要素サイズ（モデル1）と各要素辺長さを1/2としたモデル（モデル2）の衝撃力と変位の時刻歴、及び最小主ひずみ分布は概ね一致しており、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、<input type="text"/> でメッシュ分割は妥当である。</p> <p><input type="text"/> 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	<p>検証手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																	
<div data-bbox="226 225 477 328" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 検討した円環の概略寸法 内径：ϕ <input type="text"/> m 壁厚：t <input type="text"/> m 高さ：<input type="text"/> m </div> <div data-bbox="499 225 768 328" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 検討した円環の物性 ヤング率：<input type="text"/> Pa 密度：<input type="text"/> kg/m³ ポアソン比：<input type="text"/> </div> <table border="1" data-bbox="192 384 911 943" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>モデル1 (FCI 評価時と同等の 要素サイズ)</th> <th>モデル2 (FCI 評価時の約 1/2 の 要素サイズ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>要素分割数</td> <td colspan="2" rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div> </td> </tr> <tr> <td>横断面</td> </tr> <tr> <td>縦断面</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="208 967 1028 1185" style="margin-top: 20px;"> <p>荷重条件</p>  <p style="text-align: right;">FCI と同程度の荷重作用時間</p> </div> <div data-bbox="338 1217 851 1246" style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>図 4-5 要素サイズの比較検討に用いた円環モデルの概要</p> </div> <div data-bbox="253 1318 826 1358" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>		モデル1 (FCI 評価時と同等の 要素サイズ)	モデル2 (FCI 評価時の約 1/2 の 要素サイズ)	要素分割数	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>		横断面	縦断面	<table border="1" data-bbox="1106 762 1912 1182" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>モデル1</th> <th>モデル2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>要素幅</td> <td colspan="2" style="text-align: center;"> <div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 30px;"></div> </td> </tr> <tr> <td>解析モデル</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1245 1222 1762 1251" style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>図 4-7 要素サイズの比較検討に用いた解析モデルの概要</p> </div> <div data-bbox="1368 1289 1955 1318" style="text-align: right; margin-top: 20px;"> <p>：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>		モデル1	モデル2	要素幅	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 30px;"></div>		解析モデル			<p>検証手法の相違</p>
	モデル1 (FCI 評価時と同等の 要素サイズ)	モデル2 (FCI 評価時の約 1/2 の 要素サイズ)																	
要素分割数	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>																		
横断面																			
縦断面																			
	モデル1	モデル2																	
要素幅	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 30px;"></div>																		
解析モデル																			

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
<div data-bbox="241 247 913 555" data-label="Image"> </div> <table border="1" data-bbox="203 598 1025 1098"> <thead> <tr> <th></th> <th>評価点：A（内壁）</th> <th>評価点：B（外壁）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>径方向変位</td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>周方向応力</td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>		評価点：A（内壁）	評価点：B（外壁）	径方向変位			周方向応力			<div data-bbox="1164 231 1848 454" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1198 478 1803 742" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1064 837 1915 1045" data-label="Figure"> </div>	<p>検証手法の相違</p>
	評価点：A（内壁）	評価点：B（外壁）									
径方向変位											
周方向応力											

図 4-6 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較

図 4-8 要素サイズの異なるモデルの解析結果の比較

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>5. 参考文献</p> <p>[1] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUMEI, 2007</p> <p>[2] 「BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン（第3版）」, 平成22年3月, 日本原子力技術協会</p> <p>[3] 「原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析」, 平成20年11月, 原子力安全基盤機構</p> <p>[4] 「新版 工業振動学」, チモシェンコ, pp.428 ~ pp.429, 1977年1月, コロナ社</p> <p>[5] 「基礎からの衝撃工学」, 石川, pp.86 ~ pp.87, 2008年3月, 森北出版</p>	<p>5. 参考文献</p> <p>[1] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUMEI, 2007</p> <p>[2] 「竜巻飛来物の衝突による原子力施設防護対策評価手法」, 2019年, 電力中央研究所</p> <p>[3] 「原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析」, 平成20年11月, 原子力安全基盤機構</p> <p>[4] 「敷砂緩衝材の有無によるRC製ロックシェッド模型(2/5)の重錘落下衝撃実験」, 2011年5月, 山口 悟, 西弘明, 今野 久志, 岸 徳光</p>	<p>炉型の相違により適用事例が異なる</p> <p>検証手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

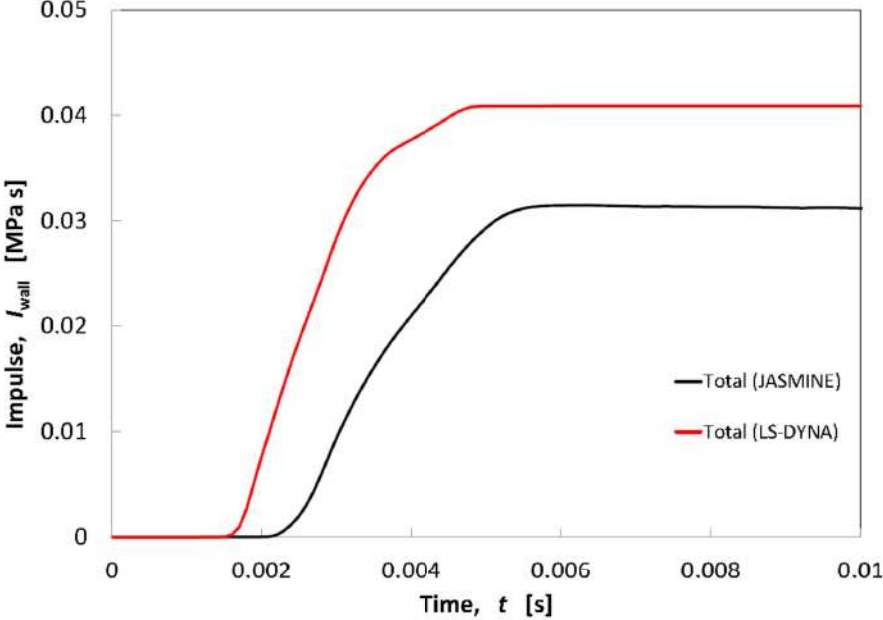
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について</p> <p>3.4 節に示したように、LS-DYNAコードの評価は、JASMINEコードの解析結果に基づき設定した水蒸気爆発時の流体の最大運動エネルギーに基づいて実施している。すなわち、LS-DYNAコードの評価での水蒸気爆発時の流体最大運動エネルギーがJASMINEコードの評価における全領域の流体運動エネルギーの最大値と同等となるように設定している。これは、水蒸気爆発発生時には溶融デブリからの熱エネルギーが、爆発による圧力波を介して流体側に運動エネルギーとして伝わりこれが構造材のペDESTAL壁に作用するためであり、この運動エネルギーの最大値を解析条件としてLS-DYNAコードの評価に引き渡すことにより、ペDESTALの構造健全性を適切に評価できると考えられるためである。</p> <p>上記の考え方の妥当性を確認するために、JASMINEコードの解析による水蒸気爆発時の壁面力積履歴とLS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴を比較した。添付図1-1に示すとおり、LS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴はJASMINEコードの解析よりも大きく、解析条件として保守的であることが確認できる。</p> <p>また、爆発源の形状については、3.4 節に示したように、JASMINEコードの解析による粗混合領域の分布形状に合わせて円柱状に設定している。LS-DYNAコードの解析では、円柱状に設定した爆発源の領域の中で、JASMINEコードの解析の結果、最も大きくなる圧力を爆発源全体の初期圧力として設定しており、構造応答評価が保守的となるように配慮している。</p> <p>一方で、爆発源の位置及び形状に関して、水相部の底部付近の小さな領域を爆発源として設定するよりは、3.4 節に示した円柱状の爆発源は、その上部が水面に近いため、爆発源のエネルギーが水面より上方の気相部に伝搬しやすいと考えられる。添付図1-2には、ペDESTALの側壁に隣接する各軸方向位置における力積履歴について、JASMINEコードの結果とLS-DYNAコードの結果を比較した。この図に示されるように、水面以下の力積について、軸方向高さが高い位置の力積はLS-DYNAコードの方がやや大きいものの、下層部と比較してJASMINEコードとの差異が小さくなっていることが分かる。このように、爆発源の形状を円柱状として設定することにより、爆発源のエネルギーの一部が気相部に伝搬されやすくなり、軸方向高さが高い位置では、LS-DYNAコードの力積が小さくなりやすい可能性があるものの、全体としては、JASMINEコードの力積履歴と比較して保守的であり、爆発源を円柱状とした場合であっても、LS-DYNAコードの解析条件の保守性を確認できる。</p>	<p>【該当項目なし】</p>	<p>相違理由</p> <p>解析手法の相違によりLS-DYNAコードで運動エネルギーから圧力への変換は行っていない</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="376 871 819 895">添付図 1-1 水蒸気爆発による壁面力積履歴の比較</p>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 204 1016 810" style="border: 2px solid black; height: 380px; width: 386px;"></div> <div data-bbox="174 826 922 1348"> <p>添付図 1-2 ペDESTAL側壁の局所位置における力積のコード間比較</p> </div> <div data-bbox="439 1401 1010 1441" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>		

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

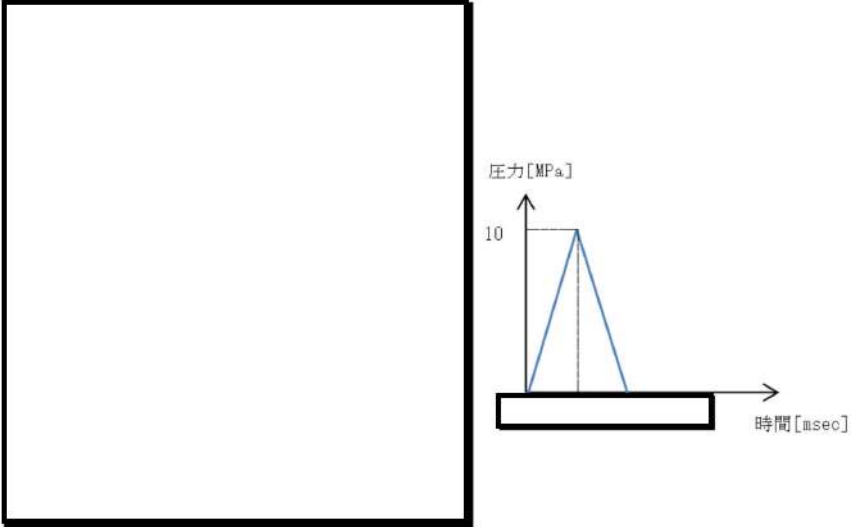
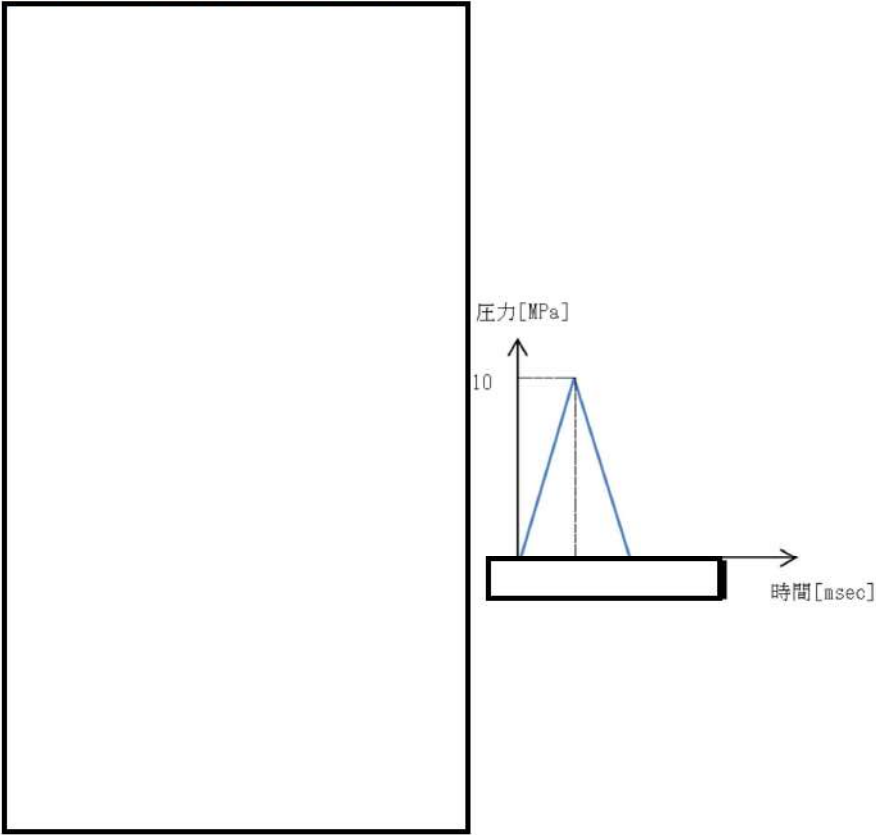
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付2 反射波の考慮について</p> <p>LS-DYNAコードは非線形動的構造解析ソフトウェアであり、時刻歴応答計算では陰解法を採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法を採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。</p> <p>今回のFCI時のRPVペダスタルの構造応答は、構造体を模擬するLagrange要素（要素幅約 <input type="text"/> mm）と流体を模擬するALE要素（要素幅約 <input type="text"/> mm）を設定し、両者の相互作用による流体-構造連成解析によって計算している。</p> <p>Lagrange要素の幅は、ペダスタルの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として設定したものである。一方、ALE要素は、Lagrange要素との力のやり取りの関係からLagrange要素と同等の設定をすることが推奨されており、要素幅を <input type="text"/> mmと設定している。</p> <p>なお、一般的に陽解法では、荷重等の伝播速度と要素サイズから自動的に時間刻みを計算することで、解析の精度を確保している。</p> <p>したがって、今回の解析体系においても、要素サイズ、時間刻みは適切に設定されており、流体-構造間、及び構造体内部での圧力伝播や反射の影響については適切に模擬できているものと考えている。</p> <p>ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なLagrange要素のモデルにパルス状の荷重を負荷した場合の構造物内部の応力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図2-1に示す。</p> <p>添付図2-1に示す条件で圧力波の伝播挙動を解析した結果として、代表点のLagrange要素の応力時刻歴を抽出した結果を添付図2-2に、時刻毎の応力分布を添付図2-3に示す。添付図2-2に示す通り、圧力波の進行と反射の影響により、要素が受ける応力の時刻歴は圧縮応力と引張応力が周期的に変動しており、境界面で圧力波の反射が考慮されていることを確認した。</p> <p>また、同様のモデルを用いて反射波の重畳の効果についても確認した。解析モデルと荷重条件を添付図2-4に示す。添付図2-4に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点のLagrange要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図2-5に示す。</p> <p>添付図2-5に示す通り、ケース1とケース2の入力を重ね合わせたケース3の解析結果は、ケース1とケース2の解析で得られた個々の圧力波形の重ね合わせとして表現されていることが確認された。これにより、LS-DYNAコードでは圧力伝播と反射、及び反射波の重畳が適切に模擬されていることを確認した。</p> <p>また、添付図2-6に3章に示すペダスタル構造解析において没水部のペダスタル外側壁面に負荷される圧力荷重の時刻歴を示す。</p> <p>今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間（ミリ秒単位）で作用する事象であり、爆発エネルギーの開放直後の圧力波による発生応力が支配的となると考えられる。実際の解析評価においても、添付図2-6に示したように、水蒸気爆発によって生じる圧力波の第一ピーク</p> <p style="text-align: center;">本資料のうち、枠囲み部分は商業秘密に属しますので公開できません。</p>	<p>添付1 反射波の考慮について</p> <p>LS-DYNAコードは非線形動的構造解析ソフトウェアであり、時刻歴応答計算では陰解法を採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法を採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。</p> <p>今回のFCI時の原子炉下部キャビティ壁の構造応答は、構造体を模擬するLagrange要素（要素幅約 <input type="text"/> mm）を設定し解析している。</p> <p>Lagrange要素の幅は、原子炉下部キャビティ壁の構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として設定したものである。</p> <p>なお、一般的に陽解法では、荷重等の伝播速度と要素サイズから自動的に時間刻みを計算することで、解析の精度を確保している。</p> <p>したがって、今回の解析体系においても、要素サイズ、時間刻みは適切に設定されており、構造体内部での圧力伝播や反射の影響については適切に模擬できているものと考えている。</p> <p>ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なLagrange要素のモデルにパルス状の荷重を負荷した場合の構造物内部の応力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図1-1に示す。</p> <p>添付図1-1に示す条件で圧力波の伝播挙動を解析した結果として、代表点のLagrange要素の応力時刻歴を抽出した結果を添付図1-2に、時刻毎の応力分布を添付図1-3に示す。添付図1-2に示す通り、圧力波の進行と反射の影響により、要素が受ける応力の時刻歴は圧縮応力と引張応力が周期的に変動しており、境界面で圧力波の反射が考慮されていることを確認した。</p> <p>また、同様のモデルを用いて反射波の重畳の効果についても確認した。解析モデルと荷重条件を添付図1-4に示す。添付図1-4に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点のLagrange要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図1-5に示す。</p> <p>添付図1-5に示す通り、ケース1とケース2の入力を重ね合わせたケース3の解析結果は、ケース1とケース2の解析で得られた個々の圧力波形の重ね合わせとして表現されていることが確認された。これにより、LS-DYNAコードでは圧力伝播と反射、及び反射波の重畳が適切に模擬されていることを確認した。</p> <p>また、添付図1-6に3章に示す原子炉下部キャビティ構造解析において原子炉下部キャビティ外側壁面に負荷される圧力荷重の時刻歴を示す。</p> <p>今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間（ミリ秒単位）で作用する事象であり、爆発エネルギーの開放直後の圧力波による発生応力が支配的となると考えられる。実際の解析評価においても、添付図1-6に示したように、水蒸気爆発によって生じる圧力波の爆発初期</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="138 169 1041 231">クによる圧力が、以降の反射波による圧力ピークに比べて大きく、爆発初期の圧力波が構造応答評価に対して支配的となることを確認できる。</p> <div data-bbox="190 284 1041 813">  </div> <p data-bbox="448 829 761 861">添付図 2-1 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="392 1053 963 1093" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="414 1061 940 1085">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p data-bbox="1055 169 1957 231">のピークによる圧力が、以降の反射波による圧力ピークに比べて大きく、爆発初期の圧力波が構造応答評価に対して支配的となることを確認できる。</p> <div data-bbox="1064 239 1937 1077">  </div> <p data-bbox="1344 1109 1668 1141">添付図 1-1 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="1377 1173 1948 1212" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="1388 1181 1937 1204">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 228 1025 639"> </div> <div data-bbox="336 659 855 687"> <p>添付図 2-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴</p> </div> <div data-bbox="168 708 1025 1082"> </div> <div data-bbox="456 1112 732 1141"> <p>添付図 2-3 応力場分布の推移</p> </div> <div data-bbox="421 1252 994 1289"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1064 284 1960 630"> </div> <div data-bbox="1243 659 1762 687"> <p>添付図 1-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴</p> </div> <div data-bbox="1075 726 1960 1088"> </div> <div data-bbox="1361 1112 1644 1141"> <p>添付図 1-3 応力場分布の推移</p> </div> <div data-bbox="1370 1181 1953 1209"> <p>□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

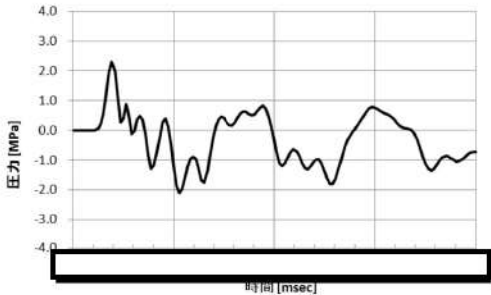

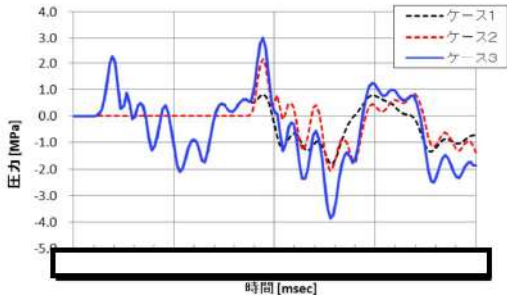
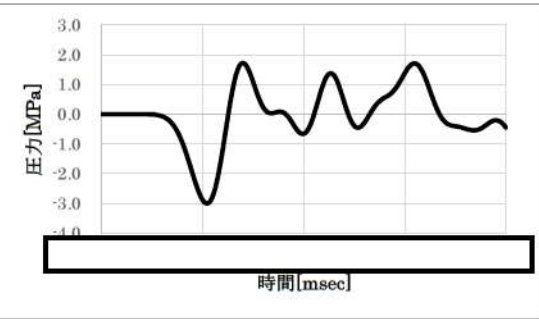
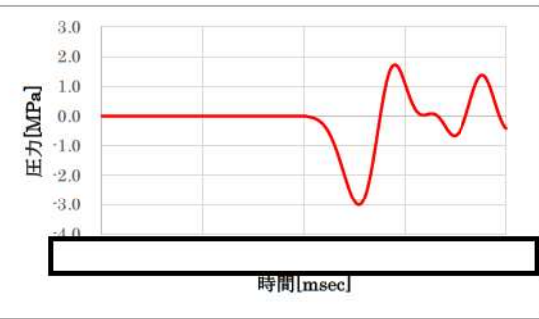
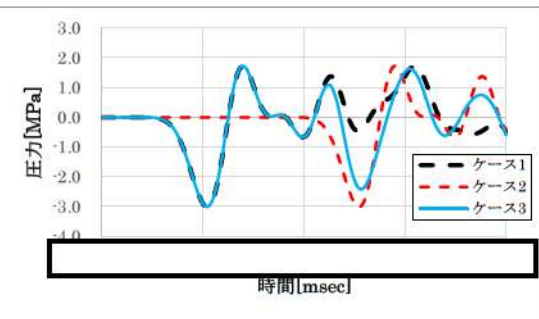
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="159 220 1025 1054" style="border: 2px solid black; height: 500px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="443 1082 748 1104">添付図 2-4 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="421 1254 994 1289" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 20px;"> <p data-bbox="443 1257 958 1279">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1066 188 1962 1054" style="border: 2px solid black; height: 500px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="1357 1082 1662 1104">添付図 1-4 解析モデルと荷重条件</p> <p data-bbox="1384 1219 1944 1244">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="241 220 362 244"><ケース1></p>  <p data-bbox="241 566 362 590"><ケース2></p>  <p data-bbox="241 909 362 933"><ケース3></p>  <p data-bbox="454 1289 739 1313">添付図 2-5 各ケースの圧力履歴</p> <div data-bbox="454 1380 1025 1417" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="481 1385 999 1409">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p data-bbox="1059 172 1158 196"><ケース1></p>  <p data-bbox="1059 555 1158 579"><ケース2></p>  <p data-bbox="1059 938 1158 962"><ケース3></p>  <p data-bbox="1366 1324 1650 1348">添付図 1-5 各ケースの圧力履歴</p> <div data-bbox="1377 1356 1948 1388" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="1388 1361 1937 1385">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="168 236 1032 842" style="border: 2px solid black; height: 380px; width: 386px;"></div> <p data-bbox="322 869 869 895">添付図 2-6 圧力によってペダスタル外側壁面に作用する荷重</p> <div data-bbox="226 927 965 975" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p data-bbox="259 938 920 963">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1064 312 1960 823" style="border: 2px solid black; height: 320px; width: 399px;"></div> <p data-bbox="1184 869 1832 895">添付図 1-6 圧力によって原子炉下部キャビティ外側壁面に作用する荷重</p> <p data-bbox="1379 903 1948 928">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について</p> <p>1. ペDESTALの支持機能について</p> <p>炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、ペDESTALが圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。</p> <p>保守的な想定として、内側鋼板、コンクリート及び縦リブ構造材を無視し、ペDESTALの外側鋼板のみを考慮した場合の降伏強度について以下に評価する。</p> <p>ペDESTALの外側鋼板の断面積は、</p> $A_0 = \pi/4 \times (D_0^2 - D_i^2) = \boxed{} \text{ mm}^2$ <p>外側鋼板の降伏応力は、</p> $S_y = 490 \text{ MPa}$ <p>よって、外側鋼板の降伏耐力は、</p> $P_y = \boxed{} \text{ mm}^2 \times 490 \text{ MPa} = \boxed{} \text{ kN}$ <p>となる。一方、ペDESTAL評価箇所に加わる主な荷重としては、</p> <p>① 圧力容器からの作用荷重（約 $\boxed{}$ ton） ② 原子炉遮へい壁からの作用荷重（約 $\boxed{}$ ton） ③ ペDESTALの基礎に直接作用する荷重（約 $\boxed{}$ ton）</p> <p>があり、鉛直方向の荷重は合計で約 $\boxed{}$ kN（$\boxed{}$ ton）である。したがって、外側鋼板のみでもペDESTALに加わる荷重に対して降伏することはない。</p> <p>以上に示すように、ペDESTALの支持機能は外側鋼板のみで成立するため、炉外 FCI 時の水蒸気爆発評価においては、衝撃荷重によるペDESTAL外側鋼板の健全性への影響を確認する。</p> <p>2. 許容ひずみについて</p> <p>鋼板の健全性は、爆発荷重によって生じるひずみが許容ひずみ範囲内であることをもって確認する。</p> <p>炉外 FCI 評価に用いるペDESTAL鋼板の許容ひずみは、材料データの既往知見（NUPEC 試験^[1]）の最大荷重点でのひずみより 10%としている。以下ではその設定の考え方について示す。</p> <p>ペDESTAL鋼板の材質は SPV490 である。SPV490 の JIS 規格では破断ひずみを 19%以上である。これに対して、既往知見の一つである NUPEC 試験データに SPV490 の最大荷重点でのひずみ 10%がある。</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">本資料のうち、枠囲み部分は商業秘密に属しますので公開できません。</p>	<p>添付2 原子炉下部キャビティ構造応答評価における判定基準について</p> <p>1. 原子炉下部キャビティ壁の支持機能について</p> <p>炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、原子炉下部キャビティ壁が圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。</p> <p>2. 許容ひずみについて</p> <p>鉄筋コンクリート構造の破壊モードとしては、引張側の鉄筋が破断する曲げ引張破壊、コンクリートにせん断力が作用し脆性的に破壊されるせん断破壊、及び圧縮側のコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊が考えられ、鉄筋コンクリートの健全性は、爆発荷重によって生じるひずみを各破壊モードにおける許容値と比較評価し、構造が全体的に崩壊する挙動とならないことをもって確認する。</p> <p>曲げ引張破壊モードにおいては、JSME S NX3-2015^[1]で示される破断ひずみを真値に換算した値 11.9%を鉄筋の相当塑性ひずみの許容ひずみとして採用する。</p>	<p>圧力容器支持構造、及び評価手法の相違</p>

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ペDESTALの機能維持の観点からは、耐力が低下せず、外力の増加に対応できる範囲であれば荷重負担能力が維持できることから、FCI 時の荷重に対して発生するひずみが最大荷重時ひずみ未満であることが機能維持の判定基準であると考えられる。このため、SPV490 の最大荷重点でのひずみ 10%を許容ひずみとして採用する。</p> <p>3. 代表的な解析結果と判断基準に対する傾向の確認</p> <p>今回の評価結果では添付図 3-1 に示すように、外側鋼板の応力は最も厳しい局所位置においても約 130MPa であり、鋼板の大半の領域では応力の最大値は 30MPa 程度である。また、局所的に降伏応力を上回る応力が発生して塑性ひずみが生じたとしても問題となることはなく、外側鋼板の局所以外の大部分に生じる塑性ひずみ量が判断基準を十分に下回っていれば、ペDESTALの支持機能は維持される。</p> <p>以上のように、外側鋼板は炉外 FCI 時の水蒸気爆発荷重に対し、最も厳しい局所位置においても弾性変形の範囲内であり、その他の大部分の領域の発生応力は降伏応力に対しても十分に余裕があることから、ペDESTALの支持機能としての健全性には影響がないと判断できる。</p> <p>4. 参考文献</p> <p>[1] 「平成7年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験（原子炉格納容器）に関する報告書」, 原子力安全基盤機構, 平成8年3月</p>	<p>せん断破壊モードにおいては、NEI07-13^[2]で示される許容せん断ひずみ 0.5%をコンクリートのせん断ひずみの許容ひずみとして採用する。</p> <p>曲げ圧縮破壊モードにおいては、コンクリートが圧縮強度に達するひずみ (Fc24:1114μ, Fc36:1349μ) をコンクリートの最小主ひずみの許容ひずみとして採用する。</p> <p>3. 代表的な解析結果と判断基準に対する傾向の確認</p> <p>今回の評価結果を添付表 3-1 に示す。曲げ引張破壊モードにおいては、原子炉下部キャビティ壁の鉄筋に塑性ひずみは発生しておらず、許容ひずみ 11.9%を超過していない。また、せん断破壊モードにおいては、コンクリートのせん断ひずみが最大 0.3%に達しているものの、許容せん断ひずみ 0.5%を超過していない。曲げ圧縮破壊モードについては、最小主ひずみが下部コンクリートで最大 1167μ に達しており、許容ひずみ 1114μ を超過しているものの、添付図 3-1 に示す通りトンネル内壁及び階段室の表層に限定されており、全断面では許容値を超過していない。</p> <p>以上より、コンクリートは表層部の限定された範囲以外の部分が許容値である圧縮強度相当のひずみ以内であり、鉄筋には塑性ひずみが発生しておらず弾性範囲内であることから、水蒸気爆発による衝撃荷重により原子炉下部キャビティ壁の鉄筋コンクリート構造が全体的に崩壊する挙動とはならず、構造健全性が維持され原子炉格納容器の健全性が保たれると判断できる。</p> <p>4. 参考文献</p> <p>[1] 「シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン（PWR プレストレスコンクリート製格納容器編）」, 日本機械学会, JSME S NX3-2015, 2015年9月</p> <p>[2] “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design”, Nuclear Energy Institute (NEI), NEI07-13 (Rev. 8P), 2011.4</p>	

赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																		
<div data-bbox="367 210 875 667" style="border: 1px solid black; height: 286px; width: 227px; margin-bottom: 20px;"></div> <div data-bbox="264 724 936 1155"> </div> <p data-bbox="230 1185 947 1246">添付図 3-1 炉外 FCI 評価における外側鋼板の応力コンター図（最大応力発生時）及び代表位置における応力履歴</p> <div data-bbox="450 1321 1021 1358" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 20px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p data-bbox="1375 207 1641 231">添付表 3-1 LS-DYNA 解析結果</p> <table border="1" data-bbox="1106 236 1910 521"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>評価パラメータ</th> <th>発生値</th> <th>許容値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鉄筋</td> <td>塑性ひずみ</td> <td>0%</td> <td>11.9%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">コンクリート</td> <td>せん断ひずみ</td> <td>0.3%</td> <td>0.5%</td> </tr> <tr> <td>最小主ひずみ (下部(Fc24))</td> <td>1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)</td> <td>1次遮蔽壁全断面で1114 μ以上とならないこと</td> </tr> <tr> <td>最小主ひずみ (上部(Fc36))</td> <td>1273 μ</td> <td>1次遮蔽壁全断面で1349 μ以上とならないこと</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1117 639 1895 928"> </div> <p data-bbox="1256 946 1429 970">(a) 最小値発生箇所</p> <p data-bbox="1664 946 1771 970">(b) C-C 断面</p> <p data-bbox="1126 1016 1890 1040">添付図 3-1 爆発発生から 0.2 秒後までのコンクリートの最小主ひずみの最小値の分布</p>	部位	評価パラメータ	発生値	許容値	鉄筋	塑性ひずみ	0%	11.9%	コンクリート	せん断ひずみ	0.3%	0.5%	最小主ひずみ (下部(Fc24))	1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)	1次遮蔽壁全断面で1114 μ 以上とならないこと	最小主ひずみ (上部(Fc36))	1273 μ	1次遮蔽壁全断面で1349 μ 以上とならないこと	
部位	評価パラメータ	発生値	許容値																	
鉄筋	塑性ひずみ	0%	11.9%																	
コンクリート	せん断ひずみ	0.3%	0.5%																	
	最小主ひずみ (下部(Fc24))	1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)	1次遮蔽壁全断面で1114 μ 以上とならないこと																	
	最小主ひずみ (上部(Fc36))	1273 μ	1次遮蔽壁全断面で1349 μ 以上とならないこと																	