

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（第3部 MAAPコード）

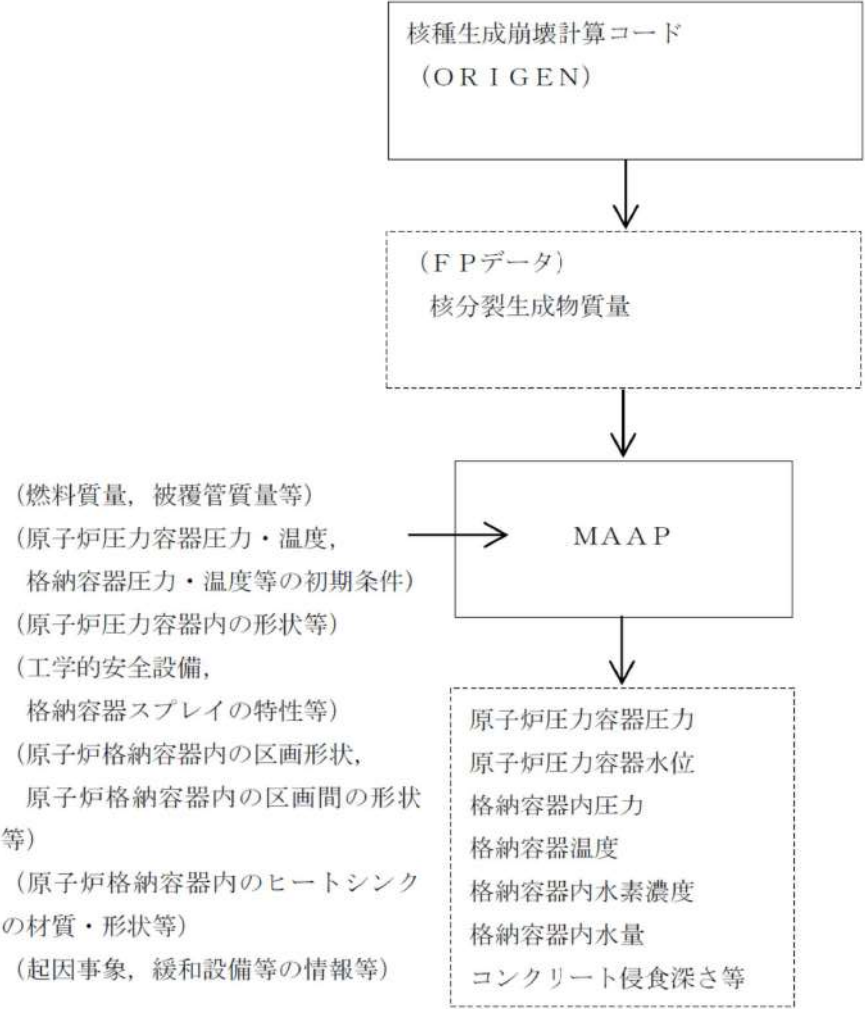
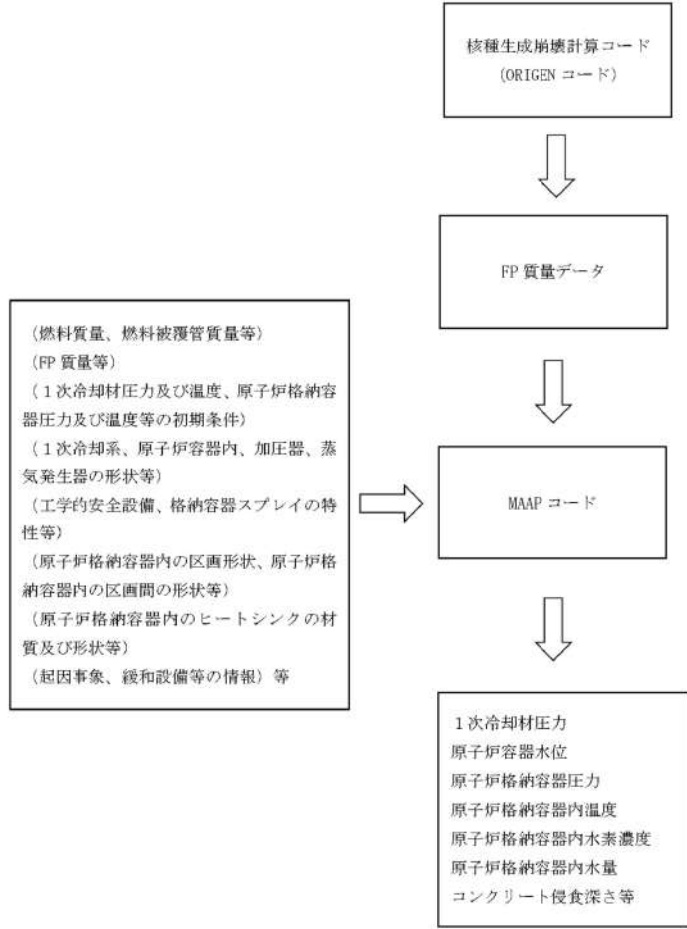
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>核種生成崩壊計算コード (ORIGEN)</p> <p>(FPデータ) 核分裂生成物質量</p> <p>(燃料質量, 被覆管質量等) (原子炉压力容器圧力・温度, 格納容器圧力・温度等の初期条件) (原子炉压力容器内の形状等) (工学的安全設備, 格納容器スプレイの特性等) (原子炉格納容器内の区画形状, 原子炉格納容器内の区画間の形状 等) (原子炉格納容器内のヒートシンク の材質・形状等) (起因事象, 緩和設備等の情報等)</p> <p>MAAP</p> <p>原子炉压力容器圧力 原子炉压力容器水位 格納容器内圧力 格納容器温度 格納容器内水素濃度 格納容器内水量 コンクリート侵食深さ等</p>	 <p>核種生成崩壊計算コード (ORIGENコード)</p> <p>FP質量データ</p> <p>(燃料質量, 燃料被覆管質量等) (FP質量等) (1次冷却材圧力及び温度, 原子炉格納容 器圧力及び温度等の初期条件) (1次冷却系, 原子炉容器内, 加圧器, 蒸 気発生器の形状等) (工学的安全設備, 格納容器スプレイの特 性等) (原子炉格納容器内の区画形状, 原子炉格 納容器内の区画間の形状等) (原子炉格納容器内のヒートシンクの材 質及び形状等) (起因事象, 緩和設備等の情報)等</p> <p>MAAPコード</p> <p>1次冷却材圧力 原子炉容器水位 原子炉格納容器圧力 原子炉格納容器内温度 原子炉格納容器内水素濃度 原子炉格納容器内水量 コンクリート侵食深さ等</p>	

図 3.5-2 前処理コードによるMAAP入力作成の流れ

図 3.5-1 MAAPコードの入出力

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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4. 妥当性確認</p> <p>4.1 妥当性確認方法</p> <p>2.3において分類した重要現象の妥当性確認方法を以下に記載する。各重要現象の妥当性確認においては、事故解析あるいは実験解析によって確認することを基本とするが、機器や設備の性能に基づいて物理現象の特性を与えているため、妥当性確認が不要となるものがある。</p> <p>2章では「原子炉圧力容器破損後の高圧溶融炉心放出」及び「格納容器雰囲気直接加熱」を重要現象として抽出していないものの、その発生を防止するという観点からは、事象進展に影響する各モデルの不確かさに基づいた総合的な判断が必要なことから、添付1において不確かさの分析及び感度解析による影響評価をまとめる。</p> <p>また、「原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用（FCI）」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）」については、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、不確かさが大きい現象であると言えることから、添付2及び添付3において、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価をまとめる。</p> <p>4.1.1 崩壊熱 [炉心 (核)]</p> <p>重要現象に分類された物理現象のうち崩壊熱は、信頼性の高いモデルと現実的な条件を用いて評価された最確値をもとに、事象発生後の原子炉出力変化として計算される。このため、MAAPコードにおける崩壊熱の妥当性確認は不要であると考えられる。</p> <p>4.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]</p> <p>炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離（水位変化）・対向流」については、原子炉圧力容器内水位に関係する現象である。MAAPコードの炉心水位（二相水位）は、3.3.2(4)で述べたモデルによって計算される。上部プレナム領域についても同様にドリフトフラックスモデルによるボイド率から二相水位が計算され、炉心水位と併せて原子炉圧力容器内水位として計算される。</p>	<p>4. 妥当性確認</p> <p>4.1 妥当性確認方法</p> <p>2.3において分類した重要現象の妥当性確認方法を以下に記載する。なお、各重要現象の妥当性確認においては、事故解析あるいは実験解析によって確認することを基本とするが、物理現象の特性が設備性能に基づき妥当性確認が不要なものや、MAAPコード以外のコードに依存して妥当性確認が不要なものがある。</p> <p>なお、2章では「原子炉容器破損後の高圧溶融炉心放出」及び「格納容器雰囲気直接加熱」を重要現象として抽出していないものの、その発生を防止するという観点からは、事象進展に影響する各モデルの不確かさに基づいた総合的な判断が必要なことから、添付1において不確かさの分析及び感度解析による影響評価を続ける。</p> <p>また、「原子炉容器外の溶融炉心と冷却材の相互作用（FCI）」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）」については、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言えることから、添付2及び添付3において、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を続ける。</p> <p>4.1.1 崩壊熱</p> <p>崩壊熱は、下記の崩壊熱曲線を入力値で与えていることから、MAAPコードの解析モデルとしての不確かさはなく、妥当性評価は不要と考えられる。</p> <p>有効性評価解析では、崩壊熱が高い方が注目する評価指標を厳しく評価することになるため、崩壊熱の不確かさ及び実機運用による変動を考慮した崩壊熱曲線を使用する。具体的には、参考文献[10]に示すように、アクチニド崩壊熱はORIGEN-2コード、FP崩壊熱はAESJ推奨値により評価された崩壊熱曲線を使用している。この崩壊熱曲線は、不確かさとしてアクチニド崩壊熱は20%、FP崩壊熱は<math>3\sigma_A</math>を考慮し、実機運用による変動として燃料運用を考慮した燃料濃縮度（MOX燃料はPu含有率等）や燃焼度が考慮されている。これにより、有効性評価においては崩壊熱に関する不確かさや実機運用による変動が考慮された崩壊熱曲線が適用されることから、5章においては、入力条件の不確かさとして、評価指標や運転員等操作への影響を整理する。</p> <p>4.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離（炉心水位）・対向流（炉心（熱流動））、気液分離・対向流（1次冷却系）</p> <p>炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離（炉心水位）・対向流」は、炉心水位に関連する物理現象である。また、1次冷却系の「気液分離・対向流」について、蒸気発生器でのスチームバインディングは、高温側配管のボイド率が高く、蒸気発生器伝熱管への冷却材流入量が増加すると冷却材が伝熱管内で蒸発して圧力損失を増大させるため、炉心水位を下げる方向に働く。これらの現象は、いずれも炉心水位に関連する現象であり、「ECCS再循環機能喪失」シーケンス</p>	<p>※重要現象、解析モデルに相違があるため、妥当性確認に差が生じる。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>炉心損傷防止対策の事故シーケンスにおいては、対象とする原子炉水位といった原子炉圧力容器内挙動はSAFERコードによって評価されており、MAAPコードは原子炉格納容器内挙動の評価のみに用いられているが、格納容器破損防止対策の事故シーケンスにおいては、MAAPコードによって、原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を評価している。原子炉水位は炉心冷却状態及び炉心溶融進展への影響が考えられるため、原子炉水位についてSAFERコードと比較を行い、不確かさを確認する（4.3.1参照）。</p> <p>4.1.5 ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）[原子炉圧力容器]、スプレィ冷却、サブプレッション・プール冷却 [原子炉格納容器]</p> <p>ECCS及びスプレィ注入特性は、設計値に基づいて、作動圧力及びポンプの圧力-流量特性を入力値として与えている。スプレィによる格納容器気相部の冷却に関しては、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルが採用されている。液滴は質量に対して伝熱面積が大きいことより、スプレィされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する。スプレィの水滴温度が比較的短時間に周囲の雰囲気温度と平衡状態となることは良く知られているところであり、伝熱モデルの不確かさによる結果への影響はないと考えられる。よって、「ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）」、「スプレィ冷却」の妥当性確認は不要であると考えられる。「サブプレッション・プール冷却」においても、設計値に基づいて、ポンプ流量及び除熱量を入力値として与えており、妥当性確認は不要であると考えられる。</p>	<p>におけるECCS再循環失敗以降の炉心水位挙動に対して影響が大きいと考えられることから、コード間比較により評価を行う（4.3.1参照）。</p> <p>4.1.3 構造材との熱伝達（1次冷却系）</p> <p>1次冷却系の「構造材との熱伝達」は、炉心露出後に炉心で発生した過熱蒸気から1次冷却系配管等への熱伝達による1次冷却系配管のクリーブ破損の観点で、重要な現象として抽出されたものである。</p> <p>過熱蒸気と構造材の熱伝達は、炉心部と同じくDittus-Boelterの相関式を用い、1次冷却系配管のクリーブ破損については、Larson-Millerパラメータ手法を適用している。いずれも、工学分野でクリーブ破損評価に広く使用されるモデルであり、妥当性評価は不要と考えられる。</p> <p>4.1.4 ECCS強制注入（1次冷却系）</p> <p>強制注入系特性は、設計での不確かさを考慮し、目的に応じて最大流量又は最小流量を使い分ける。解析では作動圧力及びポンプの圧力-流量特性を入力値として与えるため、妥当性評価は不要である。</p> <p>一方、ECCS注入水の1次冷却系内の混合については、LOCA等により1次冷却系の保有水量が減少すると、気相と液相を別に取り扱うモデルとなっており、気液の混合挙動は気液界面の対流熱伝達及び凝縮熱伝達によりモデル化されている。</p> <p>炉心損傷防止に係る重要事故シーケンスのうち「原子炉格納容器の除熱機能喪失」では、ECCSの作動を仮定するが、原子炉格納容器圧力上昇の観点で厳しい結果となるよう、ECCSによる蒸気凝縮効果がほとんど無いような重要事故シーケンスが選択されており、上記のモデルに係る不確かさは小さい。また、「ECCS再循環機能喪失」では、炉心再冠水以降では、対流熱伝達及び凝縮熱伝達はほとんど発生せず、上記のモデルに係る不確かさは小さい。</p> <p>4.1.5 ECCS蓄圧タンク注入（1次冷却系）</p> <p>蓄圧タンク注入流量は、1次冷却系との圧力差及び注入配管の圧力損失に基づき計算され、注入開始後の蓄圧タンク圧力は状態方程式により計算されるため、一般的な状態方程式及び差圧流モデルという意味で不確かさは小さく妥当性確認は不要である。</p> <p>ただし、「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」（及び「格納容器過温破損」）においては、1次冷却系強制減圧時の1次冷却材圧力の挙動に影響を与える可能性があるため、感度解析によりその影響を確認する（4.3.2及び添付1参照）。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
【参考のため掲載順を入れ替えた】		
<p>4.1.3 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉圧力容器〕</p> <p>原子炉圧力容器と原子炉格納容器との間の流れとなる、LOCA破断口からの臨界流による流量については、3.3.3(3)で述べたとおり、保守的なモデルを用いている。逃がし安全弁からの流量については、3.3.5(3)で述べたとおり、設計値に基づいて流量が計算される。差圧流については一般的なモデルが用いられていることから解析モデルとしての不確かさは小さく、MAAPコードにおける「冷却材放出（臨界流・差圧流）」の妥当性確認は不要であると考えられる。</p>	<p>4.1.6 冷却材放出（加圧器）</p> <p>加圧器逃がし弁からの放出量については、加圧器逃がし弁設定圧における放出係数に基づき圧力に応じて流量計算されるため、TMI事故に対するベンチマーク解析において、事故発生から加圧器逃がし弁元弁閉止までの挙動に着目して妥当性の確認を行う。具体的には、1次冷却材圧力及び加圧器水位の挙動に着目して考察を行う（4.2.1参照）。</p> <p>なお、「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」（及び「格納容器過温破損」）では、加圧器逃がし弁開放による1次冷却系強制減圧が、「原子炉容器破損後の高圧溶融炉心放出」の防止の観点で重要であることから、低圧時の加圧器逃がし弁からの放出量に関して考察している（添付1参照）。</p>	
【参考のため掲載順を入れ替えた】		
<p>4.1.4 格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、気液界面の熱伝達、格納容器ベント〔原子炉格納容器〕</p> <p>「格納容器各領域間の流動」、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」、「気液界面の熱伝達」は、HDR実験に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。あわせて、「格納容器各領域間の流動」、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」は、CSTF実験に対するベンチマーク解析によって妥当性の確認を行う。「格納容器ベント」に関しては、3.3.4(2)で述べたとおり、「格納容器各領域間の流動」と同様の計算方法が用いられており、「格納容器各領域間の流動」の妥当性の確認に含まれる。なお、「構造材との熱伝達及び内部熱伝導」に関しては、直接的なデータが得られていないため、格納容器圧力や温度の過渡挙動を模擬した実験との比較から、所定の入熱があった場合の構造材への熱伝達及び内部熱伝導による放熱計算に関する考察を行うものとする（4.2.3及び4.2.4参照）。</p>	<p>4.1.7 1次側・2次側の熱伝達、冷却材放出（臨界流・差圧流）、2次側水位変化・ドライアウト（蒸気発生器）</p> <p>蒸気発生器の「1次側・2次側の熱伝達」、「冷却材放出（臨界流・差圧流）」及び「2次側水位変化・ドライアウト」は、PWRプラントの蒸気発生器を模擬したMB-2実験（米国）に対するベンチマーク解析により妥当性確認を行う（4.2.6参照）。</p> <p>なお、TMI事故解析における蒸気発生器2次側の挙動については、事故データに不確かさがあることが国際的にも指摘されていることから参考情報として検討する（4.2.1参照）。</p> <p>4.1.8 区画間・区画内の流動（蒸気、非凝縮性ガス）、構造材との熱伝達及び内部熱伝導（原子炉格納容器）</p> <p>「区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）」、「構造材との熱伝達」は、廃炉となった独国のHDR炉を用いたHDR実験（国際標準問題ISP-29）及び米国のハンフォード工学研究所で実施されたCSTF実験に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。なお、「構造材との熱伝達」に関しては、直接的データが得られていないことから、原子炉格納容器圧力や温度の挙動から考察を行うものとする（4.2.2及び4.2.3参照）。</p> <p>4.1.9 区画間・区画間の流動（液体）（原子炉格納容器）</p> <p>「区画間・区画間の流動（液体）」は、原子炉格納容器の形状（流路高低差や堰高さ）に基づく静水頭による流動計算には不確かさは小さいため、妥当性確認は不要である。</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（第3部 MAAPコード）

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;"><b>【参考のため再掲】</b></p> <p>4.1.5 ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）[原子炉圧力容器]、スプレイ冷却、サブプレッショ ン・プール冷却 [原子炉格納容器]</p> <p>ECCS及びスプレイ注入特性は、設計値に基づいて、作動圧力及びポンプの圧力-流量特性 を入力値として与えている。スプレイによる格納容器気相部の冷却に関しては、液滴径を入力 し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルが採用されている。液滴は質量 に対して伝熱面積が大きいことより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落 下する。スプレイの水滴温度が比較的短時間に周囲の雰囲気温度と平衡状態となることは良く 知られているところであり、伝熱モデルの不確かさによる結果への影響はないと考えられる。よ って、「ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）」、「スプレイ冷却」の妥当性確認は不要であ ると考えられる。「サブプレッション・プール冷却」においても、設計値に基づいて、ポンプ流量 及び除熱量を入力値として与えており、妥当性確認は不要であると考えられる。</p>	<p>4.1.10 スプレイ冷却（原子炉格納容器）</p> <p>スプレイ注入特性は、設計での不確かさを考慮し、目的に応じて最大流量又は最小流量を使 い分けており、解析では評価目的に応じた作動圧力及びポンプの圧力-流量特性を入力値とし て与えるため、妥当性確認は不要であると考えられる。</p> <p>スプレイによる原子炉格納容器気相部の冷却に関しては、液滴径を入力し、液滴と気相部の 界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルが採用されている。液滴は質量に対して伝熱面積 が大きいことより、評価結果ではスプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下す る。スプレイの水滴温度が比較的短時間に周囲の雰囲気温度と平衡状態となることは良く知ら れているところであり、伝熱モデルの不確かさによる結果への影響は無いと考えられる。</p>	
<p style="text-align: center;"><b>【参考のため掲載順を入れ替えた】</b></p> <p>4.1.6 燃料被覆管酸化 [炉心（燃料）]、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生 [原子炉格納 容器] [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、TMI事故に対するベンチマーク 解析により妥当性の確認を行う。水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生量は、コ ード内にモデルを備えていないため、崩壊熱を用いた評価としており、妥当性確認は不要である。</p>	<p>4.1.11 水素濃度変化（原子炉格納容器）</p> <p>原子炉容器内での水素の発生量、規制要求に応じて全炉心内ジルコニウムの75%反応に相当 する水素量を使用する。水素の発生速度はMAAPコード解析結果に応じた補正を行うため、 水素発生速度の妥当性を確認する必要がある。水素発生速度は炉心損傷進展挙動に大きく依存 するため、MAAPコードの炉心溶融モデルについて、TMI-2の炉心溶融過程の時間経過なら びに発生した水素量に対する評価の模擬能力から、水素発生期間及び水素発生速度の時間変化 について一定の妥当性が確認できる（4.2.1参照）。</p>	
<p>4.1.7 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形 [炉心（燃料）]、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの溶融炉心の熱伝 達 [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>MAAPコードの炉心ヒートアップモデルについては、TMI事故に対するベンチマーク解 析及び CORA 実験に対するベンチマーク解析により、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの</p>	<p>4.1.12 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（原子炉格納容器）</p> <p>雰囲気ガス温度に対する格納容器再循環ユニットの除熱特性をMAAPコードの入力デー タとして模擬している。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除熱データ は、国内の凝縮熱伝達実験において確認された評価式を用いて、格納容器再循環ユニットの形 状等に基づき算出した除熱特性を使用しているため、妥当性評価は不要である。</p> <p>一方、格納容器再循環ユニットの冷却特性は、原子炉格納容器内のガス流動モデルにも影響 される。そこで、原子炉格納容器内のガス流動挙動に妥当性の検討結果も踏まえ感度解析によ り確認する（4.3.3参照）。</p>	
<p>4.1.13 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変 形）及びリロケーション、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達</p> <p>MAAPコードの炉心溶融モデル及び下部プレナムでの溶融炉心伝熱モデルについては、 TMI事故に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。</p>	<p>4.1.13 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変 形）及びリロケーション、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達</p> <p>MAAPコードの炉心溶融モデル及び下部プレナムでの溶融炉心伝熱モデルについては、 TMI事故に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>溶融炉心伝熱モデルについては、TMI事故に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う。</p> <p>TMI事故では炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達を直接示す測定値はないものの、それらの挙動が間接的に影響する1次系及び2次系の挙動や、事故後の調査研究で各時刻の溶融進展状況が推定されており、それら調査結果との比較により本モデルの妥当性が確認できると考えられる（4.2.1参照）。</p> <p>TMI事故は原子炉圧力容器破損前に事象終息していること、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であり、不確かさが大きいと考えられることから、感度解析による影響の把握を行う（4.3.2、4.3.3、4.3.5参照）。</p> <p>4.1.8 原子炉圧力容器破損 [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>原子炉圧力容器破損挙動を溶融炉心挙動と併せて実験した例はないため、実験解析により直接的に妥当性評価を行うことはできない。以下のように、MAAPコードの原子炉圧力容器破損モデルはTMI事故の知見に基づき開発されており、妥当性確認は不要と考えられる。</p> <p>TMI事故では、溶融炉心が下部プレナムへ落下したものの、原子炉圧力容器と溶融炉心のギャップに水が浸入することで原子炉圧力容器壁を冷却できたと推定されている。MAAPではTMI事故の調査研究や溶融炉心から原子炉圧力容器壁への伝熱挙動を模擬した実験に基づいて、原子炉圧力容器壁への伝熱挙動をモデル化している。また、原子炉圧力容器の破損形態として、原子炉圧力容器のクリープ破損、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損等が考慮されている。原子炉圧力容器破損モデルは、工学分野でクリープ破損評価に広く使用されるLarson-Millerパラメータ手法に基づくものであり、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損は単純な熱伝導問題であり、これらモデルにはある程度の妥当性があるものと推測される。しかしながら、現象自体が持つ不確かさもあることを踏まえ、不確かさの整理を行うとともに、感度解析による影響の確認を行う。（4.3.6参照）</p> <p>4.1.9 原子炉圧力容器内FP挙動 [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]、原子炉格納容器内FP挙動 [原子炉格納容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心からのFP放出モデルについては、これまでに実験や検討がなされてきており、MAAPではその知見に基づくFP放出モデルが採用されている。燃料から原子炉圧力容器及び原子</p>	<p>TMI事故では炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）及びリロケーションを直接示す測定値はないものの、それらの挙動が間接的に影響する1次冷却系及び2次冷却系挙動や、事故後の調査研究で各時刻の溶融進展状況が推定されており、それら調査結果との比較により本モデルの妥当性が確認できると考えられる（4.2.1参照）。</p> <p>TMI事故は原子炉容器破損前に事象収束していること、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であり、不確かさが大きいと考えられることから、感度解析による影響の把握を行う（4.3.4、4.3.5、4.3.7及び4.3.8参照）。</p> <p>一方、炉心損傷防止に係る重要事故シーケンスに関しては、「ECCS再循環機能喪失」の重要事故シーケンスに対して、炉心が露出する場合の重要現象として「燃料棒表面熱伝達」が挙げられているが、有効性評価では炉心露出を判断基準とし、炉心が冠水した状態を取り扱い、その場合には、「燃料棒表面熱伝達」が炉心水位や燃料被覆管温度に与える影響は小さい。なお、再循環機能喪失後の崩壊熱による冷却材の蒸散に伴う炉心水位低下の挙動の妥当性については、4.3.1において確認する。</p> <p>4.1.14 原子炉容器破損、溶融</p> <p>原子炉容器破損挙動を溶融炉心挙動と合わせて実験した例はないため、実験解析により直接的に妥当性評価を行うことは出来ない。以下のように、MAAPコードの原子炉容器破損モデルはTMI事故の知見に基づき開発されており、妥当性評価は不要と考えられる。</p> <p>TMI事故では、溶融炉心が下部プレナムへ落下したものの、原子炉容器と溶融炉心のギャップに水が浸入することで原子炉容器壁を冷却できたと推定されている。MAAPコードではTMI事故の調査研究や溶融炉心から原子炉容器壁への伝熱挙動を模擬した実験に基づいて、原子炉容器壁への伝熱挙動をモデル化している。また、原子炉容器破損形態として、原子炉容器のクリープ破損及び計装案内管溶接部の破損が考慮されている。原子炉容器破損モデルは、工学分野でクリープ破損評価に広く使用されるLarson-Millerパラメータ手法に基づくものであり、計装案内管溶接部の破損は単純な熱伝導問題であり、これらモデルにはある程度の妥当性があるものと推測される。しかしながら、現象自体が持つ不確かさもあることを鑑み、不確かさの整理を行うとともに、感度解析による影響の確認を行う（4.3.8参照）。</p> <p>4.1.15 1次系内FP挙動、原子炉格納容器内FP挙動</p> <p>炉心からのFP放出モデルについては、これまでに実験や検討がなされてきており、MAAPコードではその知見に基づくFP放出モデルが採用されている。燃料から1次冷却系へ放出</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>炉圧力容器から原子炉格納容器へ放出されるFP挙動についてPHEBUS-FP実験のベンチマーク解析によって妥当性を確認する（4.2.7参照）。また、格納容器内に放出されたエアロゾル挙動についてABCOVE実験のベンチマークによって妥当性を確認する（4.2.8参照）。</p> <p>4.1.10 原子炉圧力容器内FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）〔原子炉圧力容器（炉心損傷後）〕          溶融炉心の細粒化及び粒子状デブリから水への熱伝達については、溶融物の粘性や冷却材条件に違いはあるものの、幅広く個別効果試験が実施されてきた。それらの知見をもとにMAAPのモデルは構成されているので、妥当性確認は不要と考えられる。また、原子炉圧力容器内FCIにより生じる圧力スパイクについては、専門家間では原子炉冷却材圧力バウンダリや格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられている。          ただし、高圧溶融物放出を防止する観点から、原子炉圧力容器内FCIによる原子炉圧力上昇は原子炉圧力容器破損とあいまって、有効性の確認に影響するものと考えられることから、原子炉圧力容器内FCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を添付2にまとめており、概要を4.3.4に示す。</p> <p>4.1.11 原子炉圧力容器外FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）〔原子炉格納容器（炉心損傷後）〕          原子炉圧力容器外FCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行ったものを添付2にまとめており、概要を4.3.7に示す。</p> <p>4.1.12 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり、溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱、溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生〔原子炉格納容器（炉心損傷後）〕          「格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり」、「溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱」、「溶融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」を含めたMCCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行ったものを添付3にまとめており、概要を4.3.8に示す。また、「溶融炉心とコンクリートの伝熱」、「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」については、ACE実験及びSURC-4実験に対するベンチマーク解析によっても妥当性の確認を行う（4.2.5及び4.2.6参照）。</p>	<p>されるFP挙動についてPHEBUS-FP試験のベンチマークによって妥当性を確認する（4.2.7参照）。また、原子炉格納容器内に放出されたエアロゾル挙動についてABCOVE実験のベンチマークによって妥当性を確認する（4.2.8参照）。</p> <p>また、有効性評価で採用しているFP放出モデルの不確かさを考慮し、炉心からの放出速度を変更した場合に対する感度解析によって、炉心損傷検知判断の観点から特に原子炉格納容器空間に放出される希ガスの挙動を比較し、感度解析による影響の確認を行う（4.3.11参照）。</p> <p>4.1.16 原子炉容器内FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）          溶融炉心の細粒化及びデブリ粒子から水への熱伝達については、溶融物の粘性、や冷却材条件には違いはあるものの、幅広く個別効果試験が実施されてきた。それらの知見を基にMAAPコードのモデルは構成されているので、妥当性評価は不要と考えられる。また、原子炉容器内FCIにより生じる圧力スパイクについては、専門家間では原子炉冷却材圧力バウンダリや原子炉格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられている。          ただし、高圧溶融物噴出を防止する観点から、原子炉容器内FCIによる1次冷却材圧力上昇は原子炉容器破損とあいまって、判断基準への適合性に影響するものと考えられることから、添付1において関連する物理現象も含めた総合的な評価を続けている。このうち、原子炉容器内FCIに関し、概要を4.3.6に示す。</p> <p>4.1.17 原子炉容器外FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）          原子炉容器外FCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による総合的な評価を行っており添付2に纏めており、4.3.9に概要を示す。</p> <p>4.1.18 原子炉下部キャビティ床面での溶融炉心の拡がり、溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱、溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生          溶融炉心伝熱モデルは、溶融プールとその周囲の固化したクラストの間の対流熱伝達、上部クラストと上部の原子炉下部キャビティ水あるいは気相への熱伝達、下部クラスト及び側部クラストとコンクリートとの伝熱モデルから構成される。また、コンクリート分解及び非凝縮性ガスの発生は、分解コンクリートと炉心材の混合物の化学平衡計算によりモデル化されている。          「溶融炉心とコンクリートの伝熱」、「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」については、ACE実験及びSURC実験に対するベンチマーク解析により妥当性の確認を行う（4.2.4及び4.2.5参照）。また、これらの物理現象も含めたMCCIに関する現象について、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による総合的な評価を行っており添付3に纏めており、4.3.10に概要を示す。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉

泊発電所3号炉

相違理由

表 4.1-1 重要現象に対する妥当性確認方法 (1/2)

物理現象	重要現象	妥当性確認方法										その他*	
		TMI 事故	CORA 実験	HDR 実験	CSTF 実験	ACE 実験	SURC-4 実験	PHEBUS -FP 実験	ABCOVE 実験	感度解析			
炉心(炉)	崩壊熱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.1
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	燃料棒表面熱伝達	図 4.2-1	図 4.2-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	燃料棒覆管変形	図 4.2-2	~	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3.2
	燃料棒覆管酸化	図 4.2-4	図 4.2-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
炉心 (熱流動)	沸騰・ボイド率変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	気流分離（水位変化）・対向流	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3.1
原子炉 压力容器	冷却材放出（臨界流・差圧流）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.3
	ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.5
原子炉 格納 容器	格納容器各領域間の流動	-	-	-	図 4.2-31	-	-	-	-	-	-	-	-
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	-	-	図 4.2-19 図 4.2-26	図 4.2-32 図 4.2-33	-	-	-	-	-	-	-	-
	気液界面の熱伝達	-	-	図 4.2-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	スプレイ冷却	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.5
格納 容器	放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.6
	格納容器ベント	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.4
	サブプレッション・プールの冷却	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.5

\* 4.1 で示した理由により妥当性確認が不要と考えられる現象

表 4.1-1 重要現象に対する妥当性確認方法 (1/2)

物理領域	重要現象	妥当性確認方法										その他*	
		TMI 事故	HDR 実験	CSTF 実験	ACE 実験	SURC 実験	MB-2 実験	PHEBUS -FP 実験	ABCOVE 実験	感度解析			
炉心	崩壊熱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.1
	燃料棒内温度変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	燃料棒表面熱伝達	図 4.2-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	燃料棒覆管酸化	図 4.2-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3.4
	燃料棒覆管変形	図 4.2-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1次 冷却系	沸騰・ボイド率変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	気液分離（炉心水位）・対向流	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.3.1
	気液分離・対向流	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	構造材との熱伝達	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
加圧器	ECCS強制注入	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.3
	ECCS蓄圧タンク注入	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1.4
蒸気 発生器	冷却材放出	図 4.2-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	流動抵抗 4.3.2
	1次側・2次側の熱伝達	図 4.2-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	冷却材放出（臨界流・差圧流）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2次側水位変化・ドライアウト	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	図 4.2-30 図 4.2-31

\* 4.1 で示した理由により妥当性確認が不要と考えられる現象





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）

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 妥当性確認（事故解析及び実験解析）</p> <p>4.2.1 TMI 事故解析</p> <p>(1) 事故の概要</p> <p>TMI 事故は、大きく4つのフェーズに分けることができる<sup>[10]</sup>。フェーズ1は、事故発生から全ての1次冷却材ポンプが停止するまでの過程であり、事故発生0～100分後に相当する。フェーズ2は、全ての1次冷却材ポンプが停止し、その後最初の1次冷却材ポンプ2Bが起動するまでの過程であり、事故発生100～174分後に相当する。このフェーズでは、1次冷却材のボイルオフによって、炉心露出、ヒートアップ、さらには炉心損傷が生じた。フェーズ3は、1次冷却材ポンプ2Bの起動から、高圧注入系が作動するまでの過程であり、事故発生174～200分後に相当する。1次冷却材ポンプ2Bの起動によって炉心は一時的に冷却されるが、その後ヒートアップ及び炉心損傷は継続したと考えられる。フェーズ4は、高圧注入系が作動した事故発生200分後以降であり、炉心が再冠水するとともに熔融炉心が下部プレナムに落下することで冷却可能形状に至ったと考えられる。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>解析では、TMI-2のプラント形状、システム挙動及び初期状態を入力として与える。ノード分割については、炉心をR-Z系の2次元でモデル化し、径方向には4分割、軸方向には16分割する。1次系及び蒸気発生器は、貫流型蒸気発生器の冷却ループを模擬したコード内蔵のノード分割が採用されている。</p> <p>境界条件としては、2次系のデータとして蒸気発生器水位、高圧注入系からの注入流量に加え、運転員の操作に関する入力として加圧器逃がし弁及び主蒸気隔離弁の開閉操作並びに1次冷却材ポンプの運転の時刻を与える。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>水素ガス発生量の解析結果を図4.2-1に示す。MAAPによる解析では、水素ガス発生が事故発生約145分後に開始し、事故発生約185分後まで急激に増加する。その後、水素ガス発生は事故発生約230分後まで継続し、この間に発生する水素ガス量は合計で約510kg（約1,125lb）である。</p>	<p>4.2 妥当性確認（事故解析及び実験解析）</p> <p>4.2.1 TMI 事故解析</p> <p>(1) 事故の概要</p> <p>TMI 事故については、事故発生から300分後までの事故シナリオを、以下の4つのフェーズに分けて考えることができる。なお、この事故シナリオの分類は、参考文献[11]に基づくものである。</p> <p>フェーズ1…事故発生（0分）から1次冷却材ポンプ（RCP）全台停止（約100分）まで。 蒸気発生器の除熱機能が短時間喪失し、加圧器逃がし弁から1次冷却材が流出する小破断LOCAの状態である。</p> <p>フェーズ2…1次冷却材ポンプ全台停止（約100分）から1次冷却材ポンプ2B起動（約174分）まで。1次冷却材ポンプが停止することから1次冷却材流量が喪失し気水分離が生じる。その結果、炉心は露出し燃料棒がヒートアップすることにより炉心損傷が生じる。</p> <p>フェーズ3…1次冷却材ポンプ2B起動（約174分）から高圧注入系作動（約200分）まで。2Bポンプの短時間の起動により炉心に1次冷却材が流入し、急冷により炉心形状が大きく変化すると同時に大量の水素ガスが発生したと考えられている。</p> <p>フェーズ4…高圧注入系作動（約200分）以降。高圧注入系により炉心の冷却が促進されるものの、約224分～226分に熔融炉心が下部プレナムに落下したと考えられている。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>本解析では、TMIの体系を模擬し、事故前のプラント状態を初期値として設定している。炉心のノード分割は、炉心は径方向4、軸方向16のR-Z2次元ノードである。1次冷却系及び蒸気発生器は、貫流型蒸気発生器の冷却ループを模擬したコード内蔵のノード分割が採用されている。原子炉格納容器は、上部区画、下部区画、アニュラ区画及び原子炉下部キャビティ区画の4ノードとしている。</p> <p>境界条件としては、蒸気発生器水位と高圧注入系からの注入流量を時間関数として与え、加圧器逃がし弁及び主蒸気隔離弁の開閉操作並びに1次冷却材ポンプの運転の時刻をそれぞれ入力値として与えている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>代表的なパラメータに関してベンチマーク解析結果について述べる。</p> <p>1次冷却材圧力について事故データと解析結果の比較を図4.2-1に示す。炉心露出（～112分後）から1次冷却材ポンプ2Bを起動する174分後までは、1次冷却材ポンプの全台停止（100分後）による圧力の緩やかな低下、加圧器逃がし弁元弁の閉止（139分後）による圧力</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>事故発生約 220 分後における炉心状態の解析結果を図 4.2-2 に示す。炉心の外周部は下から 8 番目のノードにおいて固体クラストが形成され、この 6 分後（事故初期から 226 分後）に固体クラストが破損し、熔融炉心が下部プレナムへ流出する。解析では下部プレナムに流出した熔融炉心は約 25,000kg である。</p> <p>原子炉容器壁温の解析結果を図 4.2-3 に示す。熔融炉心が下部プレナムに流入すると、最初は堆積した熔融炉心により原子炉容器壁が加熱される。一時的に約 1,200℃（約 2,200° F）まで急上昇し、その熱により原子炉容器壁がクリープ変形することで熔融炉心と原子炉容器壁との間にギャップが生じ成長する。その結果、ギャップに水が浸入し壁面が冷却される。</p>	<p>の上昇、1 次冷却材ポンプ 2B の一時的な運転（174 分～193 分）による圧力の急上昇等の主要挙動が事故データとよく一致している。1 次冷却材ポンプ 2B の手動起動から高圧注入系の再起動（200 分～217 分）までは解析結果の方が高い値で推移するが、これは炉心損傷を保守的に評価するために水素発生量が多いことから、非凝縮性ガスによる凝縮抑制を過大に評価しているためである。その後の加圧器逃がし弁元弁の開閉操作による圧力挙動及び熔融炉心の下部プレナムへの移行（226 分後）による圧力の一時的な上昇等は、全体的に事故データの応答の特徴をよく模擬している。</p> <p>加圧器水位の挙動に関しては、図 4.2-2 に示すように、事故データ及び解析結果における 1 次冷却材ポンプ 2B が起動する 174 分以降の水位上昇は、ポンプの一時的な運転（174 分～193 分）による 1 次冷却材圧力の急上昇が原因である。高圧注入系が作動する 200 分後の水位低下が解析結果の方が事故データよりも穏やかであるのは、解析結果の 1 次冷却材圧力が高い値で推移したためである。</p> <p>蒸気発生器圧力（A ループ及び B ループ）の挙動については、図 4.2-3 及び図 4.2-4 に示すように、事故データとよく一致している。ここで、解析では A ループの蒸気発生器圧力が約 174 分後以降に上昇しているのは、境界条件で指定した蒸気発生器の水位及び主蒸気逃がし弁の開放割合に不確実性があるためと考えられる。同様に、解析では B ループの蒸気発生器圧力が 100 分後までの減圧が小さく、174 分後に 1 次冷却材ポンプ 2B を起動した際の瞬間的な圧力上昇が模擬できていないが、全体的な挙動は模擬できている。</p> <p>水素発生量に関しては、図 4.2-5 に示すように、解析では 1 次冷却材ポンプ 2B 起動の直前に 700Lb.（約 318kg）、最終的には 1,125Lb.（約 510kg）生成される結果となった。TMI 事故では水素が 1,100～1,200Lb.（約 499～544kg）生成されたと考えられているが、事故データは水素が生成されている間の 150 分時点一点のみであり、その時は多量の水素が蒸気発生器 A に蓄積されていたと考えられている。事故後 10 時間経って原子炉格納容器内で水素燃焼が生じたことから、解析結果は妥当である。</p> <p>原子炉容器内の炉心状態の解析結果（約 220 分後）を図 4.2-6 に示す。約 220 分後には、炉心の外周部は 8 番目の高さ位置に固体クラストが形成され、この 6 分後（事故初期から 226 分後）に固体クラストが破損し、熔融炉心が下部プレナムへ流出する。</p> <p>解析では下部プレナムへ流出した熔融炉心は 56,000Lb.（約 25,401kg）である。これは、TMI 事故で観察された量 42,000Lb.（約 19,051kg）と比較すると、やや多めの評価となっているが同等であり、MAAPコードでの下部プレナムへの熔融炉心の落下挙動は妥当である。</p> <p>熔融炉心が下部プレナムに流入すると、最初は堆積した熔融炉心により原子炉容器壁が加熱される。一時的に 1,200℃（2,200° F）まで急上昇し、その熱により原子炉容器壁がクリープ変形することで熔融炉心と原子炉容器壁との間にギャップが生じ成長する。その結果、ギャップに水が浸入し壁面が冷却される。原子炉容器（下部ヘッド）の壁温の解析結果を図 4.2-7 に示す。1,200℃まで上昇した後、急冷するこの温度挙動は、TMI-2 Vessel Investigation Project<sup>[12]</sup>の観察結果と一致している。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>(a) 燃料被覆管酸化、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生</p> <p>TMI事故の分析では、約139分で水素ガスの発生が開始し、ジルコニウム-水反応による水素ガス発生率が約175分の時点で最大となった。約203分で炉心が冠水した以降は再露出することはないが、クラスト内部の溶融炉心領域の温度は上昇しており、約224分で溶融炉心が下部プレナムに移行するまで水素ガスが発生したと分析されている。全水素ガス発生量は499～544kg（1,100～1,200lb）であったと分析されている。TMI事故の分析とMAAPコード解析の水素ガス挙動の比較を表4.2-1に示す。</p> <p>このように、MAAPによる解析で得られた水素ガス発生期間及び水素ガス発生量は、ともにTMI事故の分析結果と良く一致している。したがって、MAAPは放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生及び燃料被覆管酸化に関して適切なモデルを有していると判断でき</p>	<p>原子炉格納容器については、原子炉下部キャビティ、下部区画、外周部及び上部区画の4区画に分割した解析モデルとしており、図4.2-8に示すように、原子炉格納容器（下部区画）の雰囲気温度の解析結果は、加圧器逃がし弁元弁の開閉に伴う温度変化を良く模擬できている。</p> <p>原子炉格納容器圧力に関しては、図4.2-9に示すように、解析では原子炉格納容器内のヒートシンクを簡略化していることから圧力変化はデータの方が緩慢であるが、全体的な挙動は良く一致しており、ファンクロー等の原子炉格納容器の除熱機能が適切に模擬できている。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における物理現象として抽出された項目に対し、本ベンチマーク解析の結果からMAAPコードの不確かさについて考察した。</p> <p>a) 加圧器からの冷却材放出</p> <p>1次冷却材圧力及び加圧器水位より、加圧器からの冷却材放出について考察する。</p> <p>1次冷却材圧力について事故発生から、加圧器逃がし弁元弁の閉止（139分後）までの挙動に着目する。初期は炉出力の低下に伴う1次冷却材の収縮及び加圧器逃がし弁開固着により圧力が低下し、その後、強制循環による炉心の冷却に伴う入熱と加圧器逃がし弁からの冷却材放出がバランスして圧力はほぼ一定に維持され、A-1次冷却材ポンプの停止（100分）以降は、1次冷却系内の気液分離により炉心水位が下がるにつれて、冷却材の蒸散が少なくなり、1次冷却材圧力は徐々に低下傾向となり、加圧器逃がし弁元弁の閉止により1次冷却材圧力が上昇に転じるまでの一連の挙動を模擬できている。</p> <p>加圧器水位については、1次冷却系の加熱による水位の上昇、加圧器逃がし弁開による一時的な水位低下、1次冷却系の減圧沸騰に伴う水位上昇、1次冷却材ポンプ停止による気液分離に伴う水位低下の一連の挙動について模擬できている。</p> <p>以上のとおり、1次冷却材圧力及び加圧器水位の挙動は、事故データを模擬しており、加圧器からの「冷却材放出」を伴った場合の1次冷却系保有水量が適切に評価されていることを示している。</p> <p>b) 水素濃度変化、燃料被覆管酸化</p> <p>TMI事故の分析では、約139分に水素の発生が開始され、ジルコニウム-水反応による水素発生率が約175分の時点で最大となった。約203分で炉心が冠水した以降は再露出することはないが、クラスト内部の溶融炉心領域の温度は上昇しており、約224分で溶融炉心が下部プレナムに移行するまで水素が発生したと分析されている。全水素発生量は約499～544kgの範囲であったと分析されている。</p> <p>一方、MAAPコードの解析では、水素発生期間が約145～230分で、全水素発生量が510kgであった。水素の発生率が高いのは図4.2-5より155～185分の期間であり、また、水素の発生が停止したのは約230分の時点であり、水素発生期間及び水素発生量共にTMI事故結果と概ね一致している。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																								
<p>る。なお、酸素ガス生成については、MAAPによる解析において直接的に考慮されないが、格納容器の水素ガス及び酸素濃度を評価するに当たっては、MAAPによる事象進展解析に加えて、原子炉格納容器の初期酸素濃度、水の放射線分解によって発生する酸素ガスを適切に考慮している。</p> <p>【参考のため掲載順を入れ替えた】</p>	<p>よって、炉心ヒートアップ速度、ヒートアップした炉心に関連するモデルは妥当と考えられる。</p>																									
<p>表 4.2-1 水素ガス挙動の比較</p> <table border="1" data-bbox="152 387 1041 603"> <thead> <tr> <th>水素ガス挙動の比較項目</th> <th>TMI事故の分析</th> <th>MAAPコード解析</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素ガス発生開始時刻</td> <td>139分</td> <td>145分</td> </tr> <tr> <td>水素ガス発生期間</td> <td>139～224*分</td> <td>145～230分</td> </tr> <tr> <td>全水素ガス発生量</td> <td>1,100～1,200lb. 499～544kg</td> <td>1,125lb. 510kg</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 推定時間。224分まで熔融固化領域は温度上昇しているため。</p>	水素ガス挙動の比較項目	TMI事故の分析	MAAPコード解析	水素ガス発生開始時刻	139分	145分	水素ガス発生期間	139～224*分	145～230分	全水素ガス発生量	1,100～1,200lb. 499～544kg	1,125lb. 510kg	<table border="1" data-bbox="1068 379 1953 603"> <thead> <tr> <th>水素挙動の比較項目</th> <th>TMI事故の分析</th> <th>MAAPコード解析</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素発生開始時刻</td> <td>139分</td> <td>145分</td> </tr> <tr> <td>水素発生期間</td> <td>139～224*分</td> <td>145～230分</td> </tr> <tr> <td>全水素発生量</td> <td>1,100～1,200 lb. 約 499～544kg</td> <td>1,125 lb. 510 kg</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 推定時間。224分まで熔融固化領域は温度上昇をしているため。</p>	水素挙動の比較項目	TMI事故の分析	MAAPコード解析	水素発生開始時刻	139分	145分	水素発生期間	139～224*分	145～230分	全水素発生量	1,100～1,200 lb. 約 499～544kg	1,125 lb. 510 kg	
水素ガス挙動の比較項目	TMI事故の分析	MAAPコード解析																								
水素ガス発生開始時刻	139分	145分																								
水素ガス発生期間	139～224*分	145～230分																								
全水素ガス発生量	1,100～1,200lb. 499～544kg	1,125lb. 510kg																								
水素挙動の比較項目	TMI事故の分析	MAAPコード解析																								
水素発生開始時刻	139分	145分																								
水素発生期間	139～224*分	145～230分																								
全水素発生量	1,100～1,200 lb. 約 499～544kg	1,125 lb. 510 kg																								
<p>(b) 燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達</p> <p>TMI事故の分析より得られた事故発生約220分後の炉心状態を図4.2-4に示す。図4.2-2に示したMAAPによる解析結果と比較すると、軸方向位置に若干の相違はあるものの、炉心上部の空隙、デブリベッド、クラスト、熔融プール及び非破損領域の状態は良く一致している。</p> <p>TMI事故で観察された下部プレナムへ流出した熔融炉心は、約19,000kgであり、MAAPによる解析結果と比較すると、MAAPの解析結果（約25,000kg）はやや多めの評価となっているが同等である。</p> <p>また、原子炉容器壁温について考察すると、TMI-2 vessel inspection project<sup>[11]</sup>の分析では、炉心出口温度の急上昇による警報発信及び中性子源領域中性子検出器の指示値の急上昇から、事故発生約224分後に熔融炉心の下部プレナムへの流入が開始し、ECCSによる注入水等で約20分以内に冷却されたとされている。図4.2-3に示したMAAPによる原子炉容器壁温の解析結果は、事故発生約224分後で急上昇し、事故発生約240分後に低下することから、TMI事故の分析結果と一致している。また、原子炉容器壁温の最大値は、ステンレス鋼の融点（約1,350℃）より低い約1,200℃であり、原子炉容器に損傷がなかったという事実と整合している。</p>	<p>c) 燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、下部プレナムの熔融炉心の熱伝達</p> <p>TMI事故では、炉心熔融後早期に注水が回復したため、原子炉容器の破損には至らなかった。そこで、炉心ヒートアップ時の水素発生、炉心領域での熔融進展、下部プレナムへの落下、及び、原子炉容器の加熱状況を確認した。</p> <p>MAAPコード解析結果として、図4.2-6に220分時点の炉心状態を示す。TMI事故の分析により推定された約220分時点の炉心状態図（図4.2-10）と比較すると、中央の熔融プール位置は解析の方がやや高い位置となっているものの、上部の空隙領域、その下の上部崩壊領域、中央の熔融プール（二相及び単相の熔融プール）、ならびに、下部の非熔融領域の各状態は、TMI事故の推定結果をよく模擬している。よって、炉心熔融及びリロケーションに関するMAAPコードの解析モデルは、一定の妥当性を有すると考えられる。</p> <p>熔融炉心から原子炉容器壁への熱伝達に関しては、原子炉容器（下部ヘッド）の壁温の解析結果（図4.2-7）から妥当性を考察する。TMI事故の分析によると、炉心出口温度の急上昇による警報発信、及び、中性子源領域中性子検出器の指示値の急上昇から、約224分時点で熔融炉心が下部プレナムに落下を開始し、その後、ECCSによる注入水等により約20分以内に冷却されたと分析されている。</p> <p>MAAPコードの解析結果では、原子炉容器（下部ヘッド）の壁温は、約224分時点で急上昇し、約240分時点で低下傾向となっており、TMI事故の分析結果と一致する結果を得ている。また、原子炉容器（下部ヘッド）の壁温の最高温度は、ステンレス鋼の融点（約1,350℃）よりわずかに低い約1,200℃（2,200°F）であり、圧力容器に損傷がなかったという結果と一致する。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																												
<p>このように、MAAPによる解析で得られた炉心状態及び原子炉容器壁温は、TMI事故の分析結果との比較から、妥当であると考えられる。したがって、MAAPは炉心ヒートアップに関連する燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p>このように、「炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）」、「リロケーション」及び「下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達」に関しては、TMI事故の分析結果と比較して妥当であり、MAAPコードの解析モデルは炉心損傷過程を適切に評価できる。</p> <p style="text-align: center;">表 4.2-1 TMI 2号機と国内 PWR の比較</p> <table border="1" data-bbox="1108 459 1944 1056"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>単位</th> <th>TMI-2</th> <th>国内 PWR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>一般</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>熱出力</td> <td>MWt</td> <td>2,772</td> <td>2,652</td> </tr> <tr> <td>ループ数</td> <td>-</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>ループ全流量</td> <td>kg/h</td> <td>62.5×10<sup>6</sup></td> <td>45.7×10<sup>6</sup></td> </tr> <tr> <td>炉心</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料集合体数</td> <td>-</td> <td>177</td> <td>157</td> </tr> <tr> <td>集合体当たりの燃料棒数</td> <td>-</td> <td>208</td> <td>264</td> </tr> <tr> <td>燃料棒配列</td> <td>-</td> <td>15×15</td> <td>17×17</td> </tr> <tr> <td>燃料有効発熱長</td> <td>m</td> <td>3.66</td> <td>3.66</td> </tr> <tr> <td>蒸気発生器</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>タイプ</td> <td>-</td> <td>貫流型</td> <td>U字型</td> </tr> <tr> <td>基数</td> <td>-</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1次冷却材ポンプ</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>台数</td> <td>-</td> <td>4</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">※ 代表3ループプラントの場合</p>	項目	単位	TMI-2	国内 PWR	一般				熱出力	MWt	2,772	2,652	ループ数	-	2	3	ループ全流量	kg/h	62.5×10 <sup>6</sup>	45.7×10 <sup>6</sup>	炉心				燃料集合体数	-	177	157	集合体当たりの燃料棒数	-	208	264	燃料棒配列	-	15×15	17×17	燃料有効発熱長	m	3.66	3.66	蒸気発生器				タイプ	-	貫流型	U字型	基数	-	2	3	1次冷却材ポンプ				台数	-	4	3	
項目	単位	TMI-2	国内 PWR																																																											
一般																																																														
熱出力	MWt	2,772	2,652																																																											
ループ数	-	2	3																																																											
ループ全流量	kg/h	62.5×10 <sup>6</sup>	45.7×10 <sup>6</sup>																																																											
炉心																																																														
燃料集合体数	-	177	157																																																											
集合体当たりの燃料棒数	-	208	264																																																											
燃料棒配列	-	15×15	17×17																																																											
燃料有効発熱長	m	3.66	3.66																																																											
蒸気発生器																																																														
タイプ	-	貫流型	U字型																																																											
基数	-	2	3																																																											
1次冷却材ポンプ																																																														
台数	-	4	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)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>図 4.2-1 TMI 事故のベンチマーク解析結果：1次冷却材圧力</p>	
	<p>図 4.2-2 TMI 事故のベンチマーク解析結果：加压器水位</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）

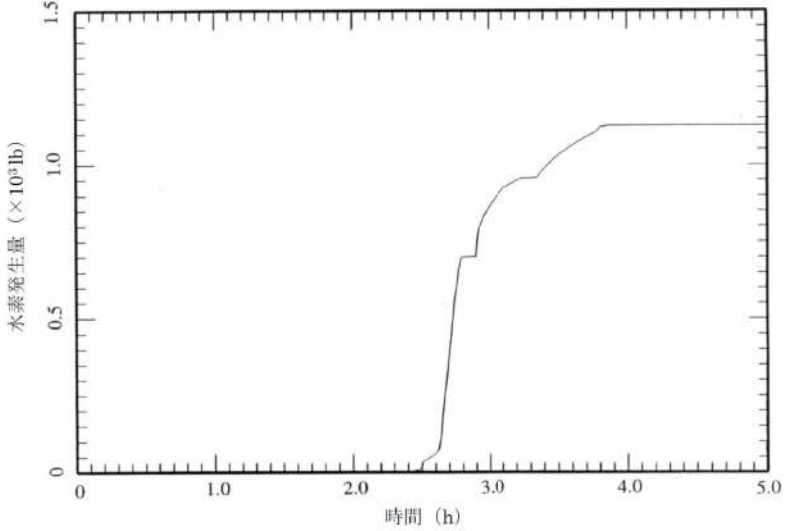
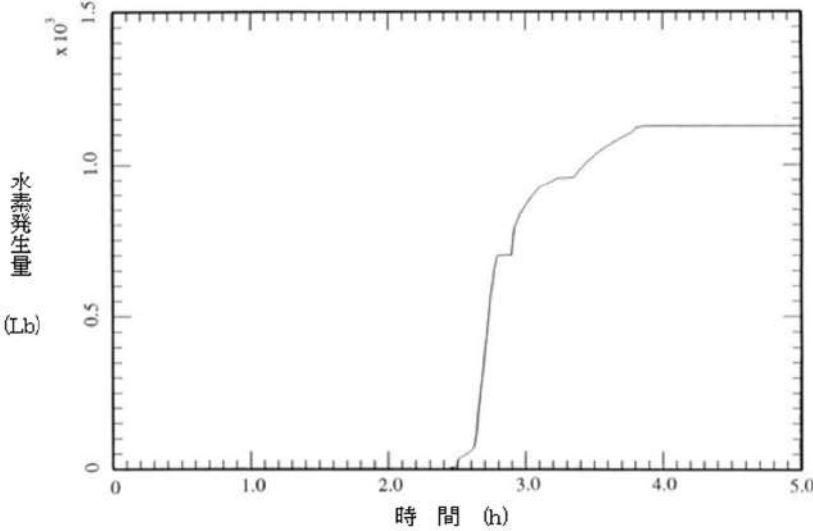
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>2次系圧力(Aループ) (psia)</p> <p>時間 (h)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI<sup>©</sup></p> <p>図 4.2-3 TMI 事故のベンチマーク解析結果：蒸気発生器圧力（Aループ）</p> <p>2次系圧力(Bループ) (psia)</p> <p>時間 (h)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI<sup>©</sup></p> <p>図 4.2-4 TMI 事故のベンチマーク解析結果：蒸気発生器圧力（Bループ）</p>	



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）

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="712 726 1003 746">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="365 751 815 772">図 4.2-1 TMI 事故の解析結果（水素ガス発生量）</p>	 <p data-bbox="1648 726 1939 746">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="1256 751 1765 772">図 4.2-5 TMI 事故のベンチマーク解析結果：水素発生量</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>Normal  Two-phase Pool  Molten Pool  Color Only  Empty  Rubble  Solid Crust  White </p> <p>TEMPERATURE SCALE (°F)</p> <p>16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p> <p>1 2 3 4</p> <p>°C</p>	<p>Normal  Two-phase Pool  Molten Pool  Color Only  Empty  Rubble  Solid Crust  White </p> <p>TEMPERATURE SCALE (°F)</p> <p>16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1</p> <p>1 2 3 4</p> <p>°C</p>	
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI	出典：MAAP4 User's Manual, EPRI	
図 4.2-2 TMI 事故の解析結果（事故発生約 220 分後の炉心状態）	図 4.2-6 TMI 事故のベンチマーク解析結果：炉心状態（約 220 分後）	



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

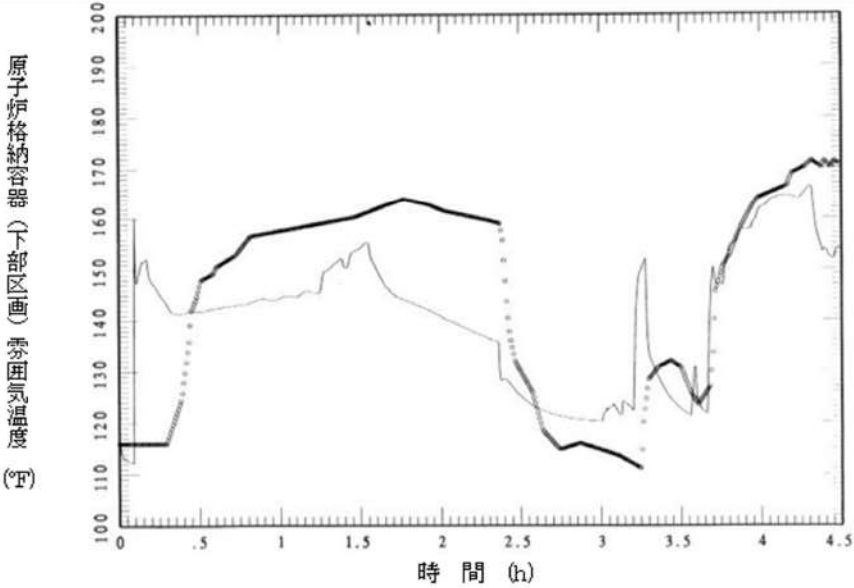
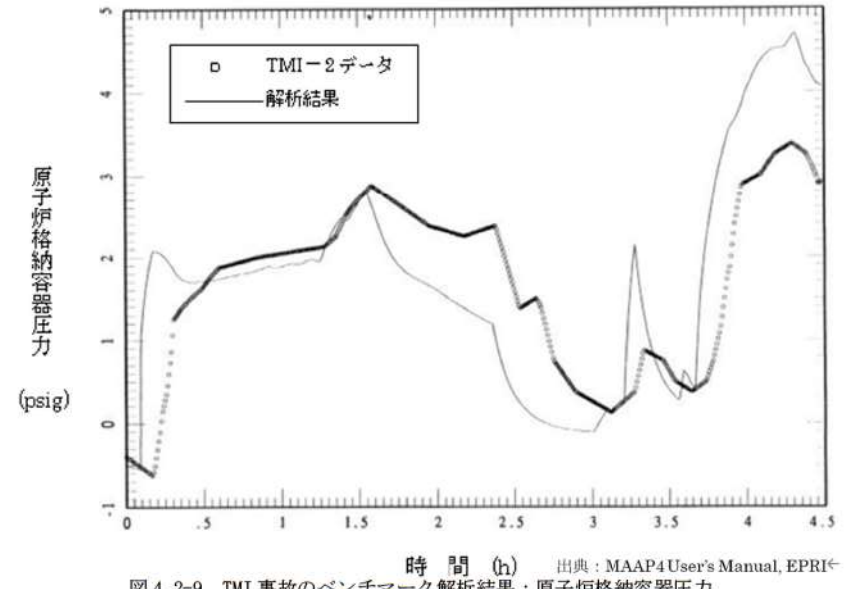
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	
<p>図 4.2-3 TMI 事故の解析結果（原子炉容器壁温）</p>	<p>図 4.2-7 TMI 事故のベンチマーク解析結果：原子炉容器下部ヘッド壁温</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）

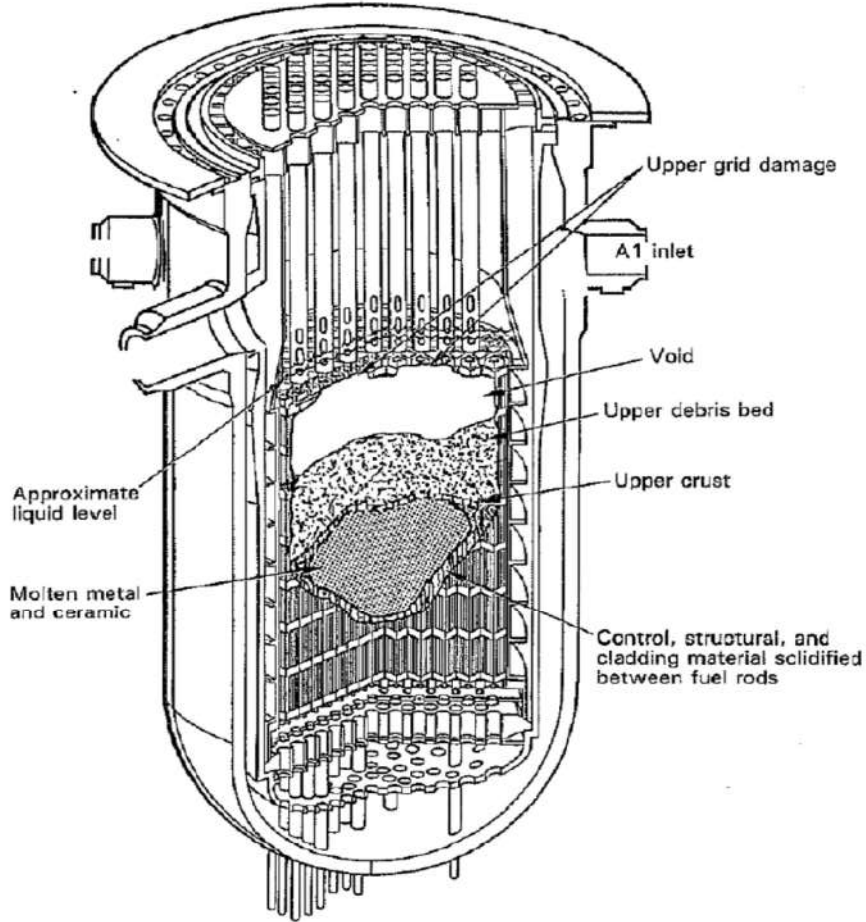
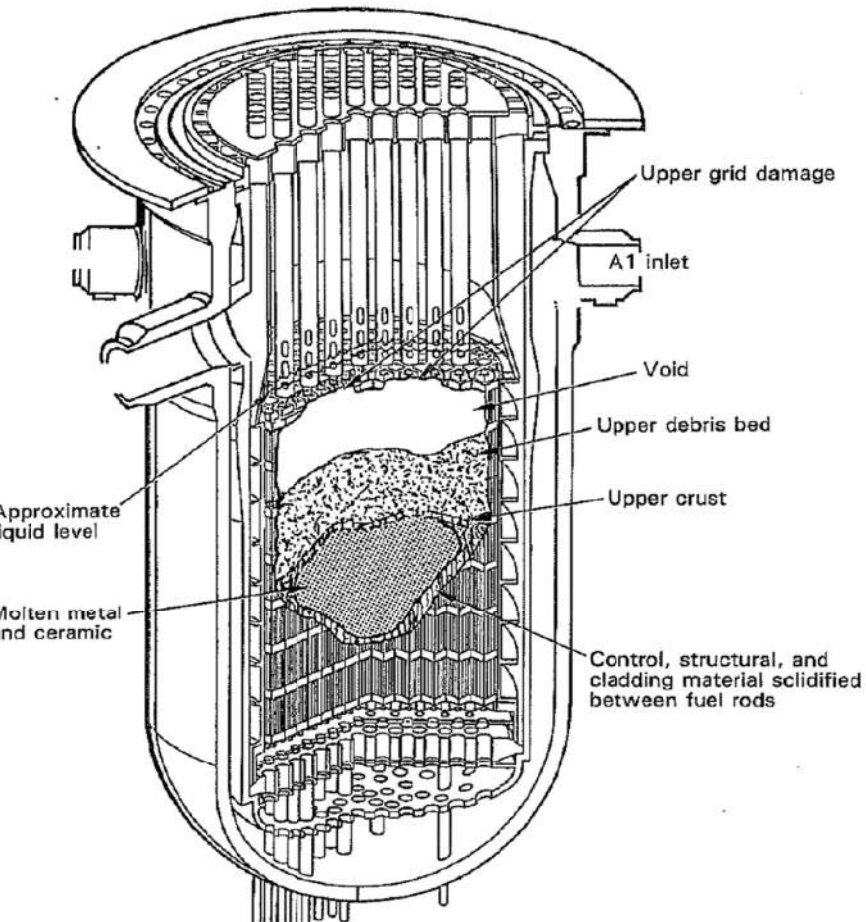
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>原子炉格納容器(下部区画)雰囲気温度 (°F)</p> <p>時間 (h)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-8 TMI 事故のベンチマーク解析結果：原子炉格納容器下部区画雰囲気温度</p>  <p>原子炉格納容器圧力 (psig)</p> <p>時間 (h)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-9 TMI 事故のベンチマーク解析結果：原子炉格納容器圧力</p>	



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		
<p>図 4.2-4 TMI 事故の炉心溶融状況の分析結果（事故発生約 220 分後）<sup>[12]</sup></p>	<p>図 4.2-10 炉心溶融状況の比較（炉心溶融 220 分後、TMI 事故）<sup>[13]</sup></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）

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 CORA 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>CORA 実験<sup>(13)</sup>は、シビアアクシデント条件下での燃料集合体の損傷・溶融進展を把握するために、国際的な協力の枠組みの中で、独カールスルーエ研究センター(KIT, 旧 FZK)にて実施された。</p> <p>図 4.2-5 に CORA 実験装置の概要を示す。CORA 実験では、軽水炉の燃料バンドルを模擬し、燃料をヒーターによって電気加熱し、水蒸気とアルゴンガスの混合物を注入することによって、燃料の溶融進展挙動を模擬することができる。CORA-16、CORA-17 及び CORA-18 では、BWR の燃料集合体を模擬した試験が行われており、バンドルの材質と主要な形状は表 4.2-2 に示すとおりである。CORA-16 実験は、燃料、燃料被覆管、制御棒 (B<sub>4</sub>C) 及びチャンネルボックスを配置し、BWR の炉心を模擬している。CORA-17 実験は、CORA-16 実験をベースケースとしてクエンチさせたケース、CORA-18 実験は、バンドルサイズを大きくしたケースである。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>CORA 実験装置に対応するベンチマーク解析のノード分割を図 4.2-6 に示す。炉心は、燃料、燃料被覆管、チャンネルボックス、制御棒及び流体(アルゴン、水蒸気及び水素)によって構成される。炉心は2つの径方向リングに分割され、各々のリングは軸方向に分割され、下から下部非燃料域、10 ノードの燃料有効部及び2ノードの上部非燃料域となっている。ノード間においては、軸方向の熱伝導、対流、リロケーション及び放射が考慮され、最外周のリングでは、シュラウドへの放射が考慮される。燃料バンドルの底部からアルゴンと水蒸気の混合ガスを注入し、燃料バンドルがヒートアップによって、燃料棒が急速に酸化し、2,100K から 2,300K になるまで、燃料棒ヒーターへの出力を直線的に増加させる。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>CORA 実験のケース CORA-16、CORA-17 及び CORA-18 に対するベンチマーク解析の結果を以下に述べる。</p> <p><u>CORA-16 実験</u></p> <p>CORA-16 実験のバンドルの配置を図 4.2-7 に示す。この実験は制御棒中の B<sub>4</sub>C とステンレス及び制御棒のステンレスとチャンネルボックスの Zr の反応を確認する目的で実施された。バンドル中には 12 本の加熱燃料棒及び 6 本の非加熱燃料棒、ステンレス中の B<sub>4</sub>C 及び燃料棒を取り囲むチャンネルボックスで構成される。</p> <p>図 4.2-9、図 4.2-10、図 4.2-11 及び図 4.2-12 に燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化をそれぞれ示す。</p> <p>燃料被覆管の温度は、約 1,800K における Zr の酸化によって、1,100 秒付近において急上昇する。加熱が停止されるまでの間、測定値に比べて、800K 程度高い解析結果となっているが、</p>		<p>※BWR 燃料を模した BWR 特有の実験のため記載なし</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>測定温度が低くなっている理由として、短い予熱時間や測定誤差による可能性が考えられる。加熱燃料棒、非加熱燃料棒ともに同様の傾向を示している。</p> <p>近接する制御棒と反応しているチャンネルボックスの温度の比較は、おおむね一致している。制御棒の温度は、1,100秒付近において溶融し、リロケーションするまで、解析結果は高い値を示しているが、これは、比較的低温な上部プレナム構造物への輻射熱伝達と、のぞき窓を介した対流熱伝達が模擬されていないためであると考えられる。</p> <p><b>CORA-17 実験</b></p> <p>CORA-17 実験は、CORA-16の実験条件と同様であるが、損傷炉心のクエンチの効果を確認する目的で実施された。実験開始後、2,000秒から2,125秒まで、燃料棒をクエンチタンク内で水没させている。</p> <p>図4.2-13に燃料被覆管の温度変化を示す。解析結果では、Zrの酸化反応によって温度は急上昇している。解析結果のピークは高温のU-Zr-O共晶物が上方のノードからリロケーションしてきたことによる。1,500秒から1,800秒において、解析結果は測定結果よりも高い温度を示しているが、この期間においては、上のノードからのリロケーションしてきた溶融物が熱電対に接触し、測定値に影響が出ているものと考えられる。なお、解析結果では、Zrは溶融し、バンドル底部にリロケーションしており、クエンチに付随した酸化による発熱は予測されていない。</p> <p><b>CORA-18 実験</b></p> <p>CORA-18実験のバンドルの配置を図4.2-8に示す。バンドル中には48本の燃料棒が配置されており、この実験は炉心溶融の進展過程におけるバンドルサイズの影響を確認する目的で実施された。</p> <p>図4.2-14、図4.2-15及び図4.2-16に燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化をそれぞれ示すが、全体的な温度挙動は、実験期間全体において測定値とよく一致している。なお、実験ではバンドルの加熱割合や冷却材の流量といった境界条件に違いがあったものの、バンドルサイズの影響は直接的には確認できなかった。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>燃料被覆管、制御棒及びチャンネルボックスの温度変化については、図4.2-9、図4.2-10、図4.2-11、図4.2-12、図4.2-13、図4.2-14、図4.2-15及び図4.2-16に示すとおり、CORA-16及びCORA-17実験において、Zrの急激な酸化の開始から加熱を停止するまでの間、温度を高く評価しているものの、実機の体系により近いCORA-18実験においては、測定データと良く一致する解析結果が得られている。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																				
<p>このように、MAAPによる解析で得られた燃料被覆管の温度変化、チャンネルボックスの温度変化及び制御棒の温度変化は、CORA 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAPは燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p> <p>表 4.2-2 試験バンドルの材質と主要な形状</p> <table border="1" data-bbox="163 379 981 938"> <thead> <tr> <th>バンドルデータ</th> <th>単位</th> <th>CORA-16 &amp; 17</th> <th>CORA-18</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料 UO<sub>2</sub> 質量</td> <td>kg</td> <td>9.14</td> <td>25.63</td> </tr> <tr> <td>ヒーター質量</td> <td>kg</td> <td>6.57</td> <td>15.32</td> </tr> <tr> <td>炉心 Zr 質量</td> <td>kg</td> <td>8.98</td> <td>17.42</td> </tr> <tr> <td>保温材 ZrO<sub>2</sub> 質量</td> <td>kg</td> <td>3.50</td> <td>5.38</td> </tr> <tr> <td>制御棒 B<sub>4</sub>C 質量</td> <td>kg</td> <td>0.54</td> <td>0.54</td> </tr> <tr> <td>制御棒ステンレス質量</td> <td>kg</td> <td>1.67</td> <td>1.67</td> </tr> <tr> <td>非燃料域 Zr 質量</td> <td>kg</td> <td>0.27</td> <td>0.71</td> </tr> <tr> <td>非燃料域ステンレス質量</td> <td>kg</td> <td>0.94</td> <td>2.15</td> </tr> <tr> <td>シュラウド Zr 質量</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>0.423</td> <td>0.599</td> </tr> <tr> <td>バンドル流路面積</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>4.818E-3</td> <td>9.957E-3</td> </tr> <tr> <td>チャンネル1 燃料棒数</td> <td>-</td> <td>8</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>チャンネル2 燃料棒数</td> <td>-</td> <td>10</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	バンドルデータ	単位	CORA-16 & 17	CORA-18	燃料 UO <sub>2</sub> 質量	kg	9.14	25.63	ヒーター質量	kg	6.57	15.32	炉心 Zr 質量	kg	8.98	17.42	保温材 ZrO <sub>2</sub> 質量	kg	3.50	5.38	制御棒 B <sub>4</sub> C 質量	kg	0.54	0.54	制御棒ステンレス質量	kg	1.67	1.67	非燃料域 Zr 質量	kg	0.27	0.71	非燃料域ステンレス質量	kg	0.94	2.15	シュラウド Zr 質量	m <sup>2</sup>	0.423	0.599	バンドル流路面積	m <sup>2</sup>	4.818E-3	9.957E-3	チャンネル1 燃料棒数	-	8	18	チャンネル2 燃料棒数	-	10	30		
バンドルデータ	単位	CORA-16 & 17	CORA-18																																																			
燃料 UO <sub>2</sub> 質量	kg	9.14	25.63																																																			
ヒーター質量	kg	6.57	15.32																																																			
炉心 Zr 質量	kg	8.98	17.42																																																			
保温材 ZrO <sub>2</sub> 質量	kg	3.50	5.38																																																			
制御棒 B <sub>4</sub> C 質量	kg	0.54	0.54																																																			
制御棒ステンレス質量	kg	1.67	1.67																																																			
非燃料域 Zr 質量	kg	0.27	0.71																																																			
非燃料域ステンレス質量	kg	0.94	2.15																																																			
シュラウド Zr 質量	m <sup>2</sup>	0.423	0.599																																																			
バンドル流路面積	m <sup>2</sup>	4.818E-3	9.957E-3																																																			
チャンネル1 燃料棒数	-	8	18																																																			
チャンネル2 燃料棒数	-	10	30																																																			



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-5 CORA 実験装置概要</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</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）

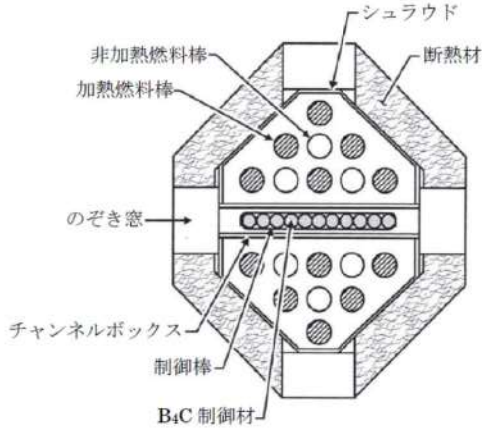
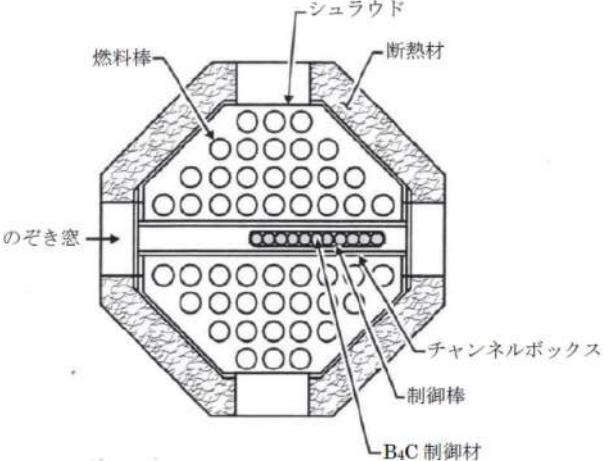
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-6 CORA 実験ベンチマーク解析MAAPノード分割</p>		



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

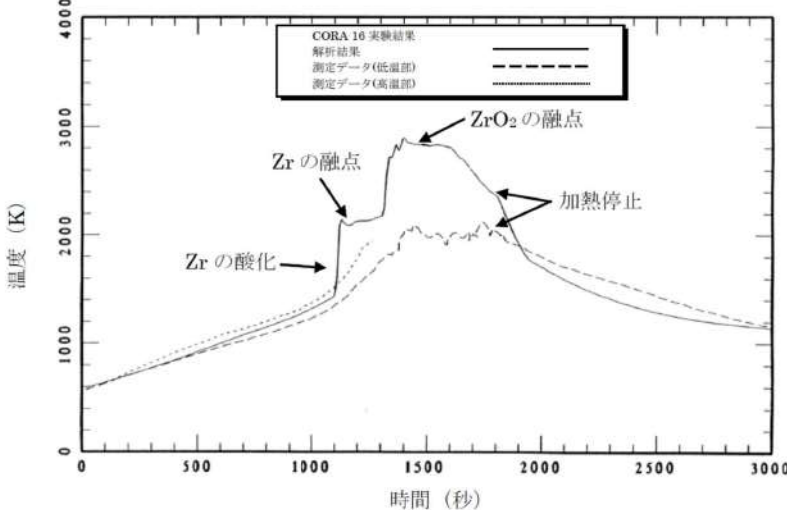
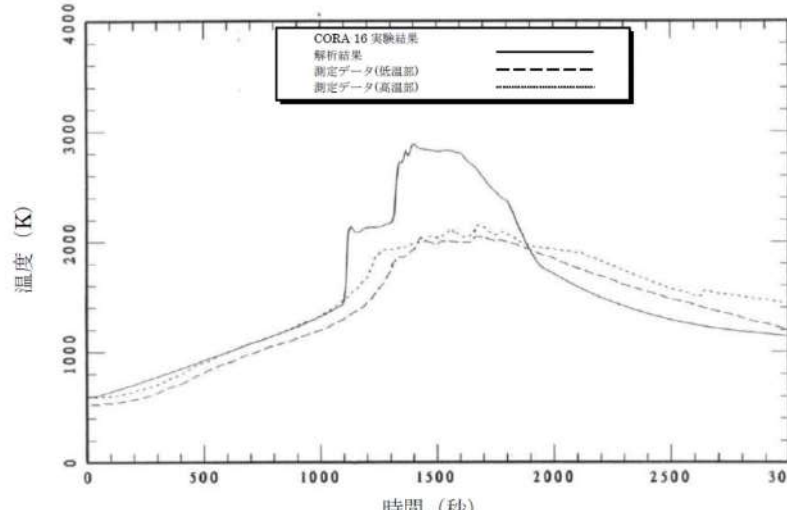
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-7 CORA-16 実験 試験バンドル形状</p>	 <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-8 CORA-18 実験 試験バンドル形状</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)

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>		
<p>図 4.2-9 CORA-16 実験 燃料被覆管温度変化(加熱燃料棒：エレベーション 550mm)</p>  <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-10 CORA-16 実験 燃料被覆管温度変化(非加熱燃料棒：エレベーション 550mm)</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）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>		
<p>図 4.2-11 CORA-16 実験 チャンネルボックス温度変化(エレベーション 550mm)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>		
<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</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）

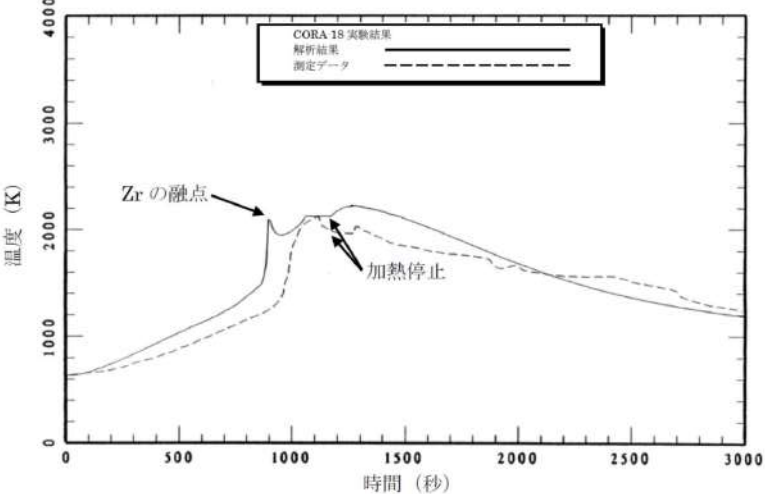
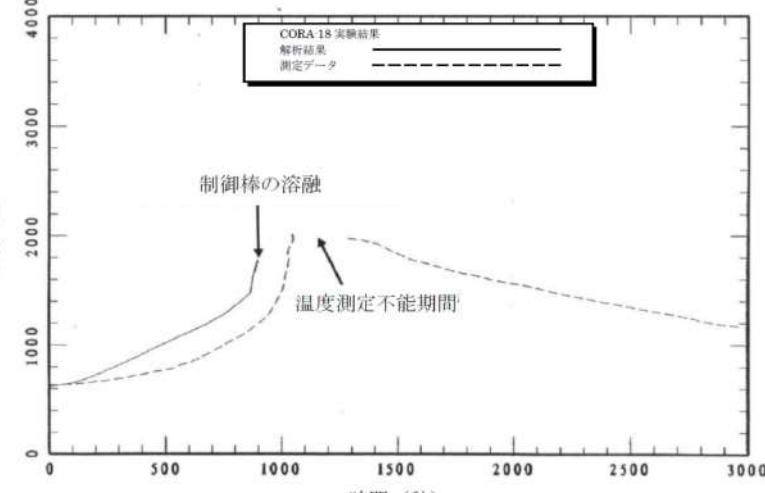
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>		
 <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>		

図 4.2-15 CORA-18 実験 チャンネルボックス温度変化(エレベーション 550mm)

図 4.2-16 CORA-18 実験 制御棒温度変化(エレベーション 550mm)

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.3 HDR 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>HDR 実験<sup>(14),(15)</sup>は、廃炉となったドイツのHDR で行われた実験であり、モデルの妥当性確認に利用できる大規模実験データが取得されている。代表的な実験ケースの一つであるE11.2 実験では、小破断LOCAによる格納容器中への蒸気放出、それに続く水素及びヘリウムの放出並びに外部スプレイによる格納容器の冷却が模擬されている。</p> <p>図4.2-17にはHDRの格納容器の概略を示すが、格納容器は高さ60m、直径20mの円筒型である。また、比較的大きい自由空間を有するドーム部と、細かく区画化された空間を特徴としている。ドーム部の自由空間は、全自由体積11,400m<sup>3</sup>のうち5,000m<sup>3</sup>を占める。また、格納容器内には、多数の流路で繋がった約70の区画が存在するが、支配的な流路は格納容器下層からドームへ向かう1対の階段と設備シャフトと同定できる。また、格納容器圧力バウンダリは厚さ17mmのスチール・シェルであり、シェルとコンクリート外壁には約0.6mの間隙がある。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>解析では、図4.2-18に示すとおり、29ノード及び44ジャンクションを設定しており、破断想定位置から近い区画は個別に、離れた区画はまとめてモデル化している。ドーム部は2ノードで、またシェルとコンクリート外壁の間隙は3ノードに分割している。</p> <p>実験では、開始から約750分の間、23.5m位置にある1805室に約2.1kg/s（最後の約1時間間は1.1kg/s）の流量で水蒸気が注入される。水蒸気の注入終了の約10分前から、水素及びヘリウムの混合ガスが同じ位置に約30分間注入される。さらに、混合ガス注入後には、下方に位置する1405室に水蒸気が約3時間注入される。格納容器は約15分間自然冷却された後、外部スプレイにより冷却される。解析では、これら一連の操作を境界条件として与える。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>格納容器圧力の解析結果を測定データと比較して図4.2-19に示す。最初の水蒸気注入期間（試験開始0～41,400秒後）において、解析結果は測定データよりも速く上昇し、また最大値は228kPaと測定データの203kPaに比べて高い。その後、水蒸気流量を減少させガスを注入する期間（試験開始41,400～46,200秒後）においては、解析結果は測定データよりも速く減少する。2度目の水蒸気注入期間（試験開始46,200～57,600秒後）では、期間を通じてMAAPは緩やかな圧力低下を正確に予測している。外部スプレイ冷却期間（試験開始58,500～71,400秒後）においては、解析結果は測定データよりも速く減少する傾向を示している。</p>	<p>4.2.2 HDR 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>HDR 実験<sup>(14)(15)</sup>は、廃炉となったドイツのHDR (Heiss Dampf Reaktor) で行われた実験であり、様々なタイプのLOCAに関する実機規模の実験が行われている。HDRの原子炉格納容器の概要を図4.2-11に示す。原子炉格納容器は、高さ60m、直径20mであり、半球状のドームを持ち、全自由体積11,400m<sup>3</sup>のうち5,000m<sup>3</sup>を占める。原子炉格納容器内は、約70区画が流路で連結されている。支配的な流路は、対称位置にある下部からドーム部へ立ち上がっている対の階段室と設備シャフト室である。また、原子炉格納容器圧力バウンダリは厚さ17mmのスチールシェルであり、シェルとコンクリート外壁のギャップは0.6mである。</p> <p>HDR 実験のうちE11.2 実験は、水蒸気の注入により小破断LOCAを模擬し、水素とヘリウムを注入することで燃料被覆管酸化により炉心が十分に過熱された状況（即ち、水素の大量発生）を想定したものである。E11.2 実験は、シビアアクシデントのシナリオを特徴付けるシーケンスに則っており、OECD/NEAの国際標準問題（ISP-29）に選定されている。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>本実験を模擬したMAAPコードの解析モデルでは、図4.2-12に示すように、HDRの原子炉格納容器の区画、流路、ヒートシンク等をモデル化している。また、E11.2 実験の後半で外部冷却されるスチールドームや原子炉格納容器下部のスチールシェル内側のコンクリートライナーも模擬している。</p> <p>E11.2 実験の操作イベントは、表4.2-2に示すとおりであり、これらを境界条件として与えている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>原子炉格納容器圧力の解析とデータとの比較を図4.2-13に示す。最初の予熱期間（0秒から41,400秒）の圧力上昇は解析結果の方が高く、ピーク圧力も解析結果の方が高くなっている。その後のガス注入期間（41,400秒から46,200秒）では、圧力低下幅は解析結果の方が大きくなっている。2回目の蒸気注入期間（46,200秒から57,600秒）では、MAAPコードは圧力低減度合いをよく模擬している。外部スプレイ冷却期間（58,500秒から71,400秒）では、圧力低下幅は解析結果の方がやや大きくなっている。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>格納容器の圧力上昇速度は、図4.2-20に示すようなエネルギー配分に依存する。表4.2-3には最初の水蒸気注入が終了した時点（試験開始41,400秒後）におけるエネルギー配分の主な内訳を示すが、圧力上昇に寄与する雰囲気への配分は、注入された水蒸気が保有するエネルギーのわずか約7%であり、残りの大部分はヒートシンクに吸収される。したがって、圧力上昇を計算する上で、ヒートシンクへの熱伝達の観点から温度成層の予測性が重要となる。</p> <p>図4.2-21、図4.2-22及び図4.2-23に、それぞれ10m位置、階段横及び0m位置における雰囲気温度の解析結果を測定データと比較して示す。図4.2-21、図4.2-22及び図4.2-23より、測定データでは、10mより低い位置においては最初の水蒸気注入の影響はほぼ認められないが、MAAPでは10m位置における水蒸気注入の影響を大きく評価している。図4.2-23より、0m位置においては、二度目の水蒸気注入までは雰囲気温度の上昇は見られない。図4.2-22における16.5m位置においては、解析結果が測定データを下回っており、測定データに比べて水蒸気注入の影響が及ぶ範囲をやや小さく評価しているものの、全体としては温度成層の様子を良く再現できている。図4.2-24及び図4.2-25に、それぞれドーム部及び蒸気発生器室の雰囲気温度の解析結果を測定データと比較して示す。ドーム部の雰囲気温度はやや高めに評価されており、測定データは水蒸気の飽和を示唆しているのに対し、解析結果は水蒸気の過熱を予測している。これは、MAAPにおいて雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に評価されている可能性を示唆している。蒸気発生器室については、解析結果は総じて測定データを良く再現できている。</p> <p>これらの解析結果より、温度上昇を大きめに予測する原因として、系内のヒートシンクを正確に模擬できていないことが考えられる。ヒートシンクの不確かさとしてコンクリートの物性が考えられるが、図4.2-19に示すとおり、コンクリートの熱伝導率を2倍にした解析結果は、測定データと良い一致を示している。</p> <p>図4.2-26及び図4.2-27には、それぞれドーム部上部及びドーム部下部の水素・ヘリウム混合ガス濃度の解析結果を示す。二度目の水蒸気注入の期間では、空気を多く含むガスが格納容器下方から上方に向かい流れるが、ドーム部上部の混合ガス濃度は高い状態を維持する。その後、外部スプレイが開始されると、ドーム部上部において水蒸気の凝縮が顕著になり、ドーム部下部から空気を多く含むガスが流入する。同時に、スプレイ冷却によってドーム部上部のガス密度が増加し、下方の区画との間で循環が生じる。このため、約65,000秒で変化の傾向が反転し、上部ドームの混合ガス濃度は低下を、ドーム部下部の混合ガス濃度は上昇を開始する。MAAPによる解析結果は、これら一連の変化挙動を良く再現できている。</p>	<p>上部ドーム部と下部区画の雰囲気温度の変化を図4.2-14に示す。(a)上部区画（ドーム部下部）については、最初の予熱期間（0秒から41,400秒）の温度上昇は解析結果の方が高く、ピーク温度も解析結果の方が高くなっている。その後の低下挙動については、解析結果の低下幅は実験結果と同等である。(b)下部区画については、同様に最初の予熱期間の温度上昇幅が実験よりも大きくなっているが、総じて実験結果をよく再現している。</p> <p>このHDR原子炉格納容器は図4.2-11に示されるように縦長の形状である。また水蒸気及び水素ヘリウム混合ガスの注入点は同図上の高いエレベーションにある1805室（ノード23）である。これらの条件においては、PWRの原子炉格納容器に比べ、原子炉格納容器内全体のガス混合はあるものの、相対的に水蒸気及び混合ガスは密度が低いためにドーム部に成層化されやすい傾向にある。解析結果のドーム部の温度が相対的に下部区画の温度より高めに評価しているのは、温度の高いガスをドーム部近傍で高位置に注入することにより、MAAPコードで温度の成層化を大きめに評価しているためであると考えられる。この温度成層化にともない原子炉格納容器内のガス流動（主にエネルギーの移動）が抑制され、水蒸気凝縮も抑制される方向に働き、圧力の解析結果も実験値より高くなったものと考えられる。図4.2-16にMAAPコードで計算された注入水蒸気エネルギーの分配割合の時間変化を示す。水蒸気注入中は、分配割合はほぼ一定の関係で推移し、蒸気の注入を停止させた状態や外部冷却を行っている場合は、蒸気の凝縮が進み、気相のエネルギー割合が低下する傾向となっている。最初の予熱終了時点（41,400秒）での割合を表4.2-4に示す。注入水蒸気の7%がガスの加圧に寄与し、残りは凝縮熱としてヒートシンクや原子炉格納容器壁等に吸収され、その内50%がコンクリート壁に吸収され割合が高い。また、感度解析でコンクリートの熱伝導率を2倍にした結果が実験結果と良く一致している（図4.2-13）。これらのことは成層化に伴うガス流動の抑制によりコンクリートへの伝熱が低下したこと及び圧力が高めに解析されたことを裏付けている。なお、このHDRの縦長格納容器と高い放出点はPWRと類似性は低く、これらの傾向がPWRでも同じように現れるとは考えにくい。</p> <p>ドーム部上部とドーム部下部の水素ヘリウム混合ガス濃度の変化を図4.2-15に示す。0秒から約45,000秒の間、下部区画に水蒸気が注入されており、原子炉格納容器内は水蒸気雰囲気である。約44,000秒から約46,300秒の間、下部区画に水素ヘリウム混合ガスが注入され、ドーム部下部の混合ガス濃度は上昇するが、軽いガスはドーム部上部に移動するため、混合ガスの注入が終了すると、ドーム部下部の混合ガス濃度は低下に転じる。一方、ドーム部上部の混合ガス濃度は、混合ガスの注入終了後も上昇を続け、57,600秒に外部スプレイが作動すると、ドーム部上部の水蒸気が急速に凝縮するためドーム部上部へのガス流入が増加し、混合ガス濃度は上昇する。外部スプレイによる冷却の継続によりガス温度が低下するとドーム部上部のガス密度が相対的に高くなり、原子炉格納容器内の自然対流とそれに伴うガス混合が促進される。そうして約65,000秒以降は、ドーム部上部の混合ガス濃度は低下し、ドーム部下部の混合ガス濃度は上昇する。MAAPコードによる解析結果（破線）は、初期のガス成層とガスの入れ替わりの一連の挙動をよく模擬できており、実験結果と同等の応答が得られている。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>HDR実験（E11.2実験）では、格納容器内に水蒸気及び非凝縮ガスを注入し、外部スプレイを実施している。このため格納容器内のガスの移流挙動、外部スプレイによる効果を含めたヒートシンク面の凝縮熱伝達挙動等の効果が現れる実験である。</p> <p>格納容器圧力及び温度については、図4.2-19、図4.2-21、図4.2-22、図4.2-23、図4.2-24及び図4.2-25に示すとおり、雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に評価されている可能性が示唆されており、それに起因して格納容器温度を十数℃程度高めに、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられ、主要な傾向は再現できている。</p> <p>また、図4.2-26及び図4.2-27に示したドーム部上部及びドーム部下部の水素・ヘリウム混合ガス濃度については、水蒸気及び混合ガス注入過程における混合ガス濃度の変化挙動、外部スプレイ冷却後における循環流による混合挙動等、測定データと良く一致する解析結果が得られている。</p>	<p>以上のとおり、MAAPコードの原子炉格納容器内の伝熱、流動（水素ガス挙動を含む）に関する現象モデルは、HDR特有の縦長の形状と放出点が高い条件によると考えられるが、ガス成層化を大きめに評価し圧力を若干高めに評価しているものの、各部の温度及び混合ガス濃度の挙動を比較的適切に模擬できており、MAAPコードは、原子炉格納容器内の気相混合挙動を妥当に評価できる能力を持つと判断できる。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価に関わる重要現象として抽出された項目に対し、本ベンチマーク解析から考えられるMAAPコードの不確かさについて考察した。</p> <p>HDR実験（E11.2実験）では、原子炉格納容器内に水蒸気及び非凝縮ガスを注入し、外部スプレイを実施している。このため原子炉格納容器内の圧力挙動、ガスの移流挙動、外部スプレイによるヒートシンク面の凝縮熱伝達挙動、及び非凝縮性ガスの移流及び水蒸気凝縮に伴う濃度変化など多様な挙動の総合的な効果が現れる実験である。</p> <p>この実験ではドーム部直下の区画から水蒸気及び水素ヘリウム混合ガスを注入し、温度がガス組成の不均一から生じる自然対流や注入による強制流により、原子炉格納容器全体にガスのエネルギー及び質量が分散される挙動となっている。解析結果のエネルギーバランスは水蒸気による流入エネルギーの93%がガス以外の構造物等や構造物を通じて原子炉格納容器外へ放出されることを示している。この結果はガスの密度及び熱容量の小ささからも理解できる。たとえばHDR原子炉格納容器内の初期ガスの質量を考えると、11,400m<sup>3</sup>は気体の密度を1kg/m<sup>3</sup>とすれば、11tであり金属ヒートシンクでは1m<sup>3</sup>強に相当する非常に小さい質量である。このためガス質量の持つ熱容量はヒートシンクの熱容量と比べ遙かに小さい。したがって、水蒸気、水素ヘリウム混合ガスの熱容量はヒートシンクと比べ非常に小さく、エネルギーを蓄積するより、原子炉格納容器全体にエネルギーを運ぶ働きが主であり、圧力はガスが受け取る熱とヒートシンク等へ熱移動のバランスの結果維持されると考えられる。このHDRの実験は注入ガスの質量及びエネルギーの自然対流及び強制流による原子炉格納容器全体への広がりヒートシンクの吸熱が重要現象として挙げられこれらに着目して検討を行う。</p> <p>「区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）」としては、図4.2-15に示したドーム部上部とドーム部下部の水素ヘリウム混合ガス濃度の変化において、注入過程や外部スプレイによる水蒸気凝縮に起因したドーム部の混合ガス濃度の上昇挙動及び、ドーム部の温度低下及び凝縮によるガス体積の減少に伴った自然対流による混合挙動など、実験データとよく一致している結果が得られている。これらのことから原子炉格納容器内の非凝縮性ガスの移流挙動や水蒸気凝縮に伴う濃度上昇挙動ならびに自然対流による混合挙動が比較的良く模擬できると推測される。</p> <p>ドーム部の温度の解析結果は相対的に下部区画の温度より高めに評価し、圧力の解析結果も実験値より若干高く評価されている。これは解析において、高温で低密度の注入水蒸気が上部ドームに成層化したため、原子炉格納容器中部及び下方での水蒸気凝縮による除熱の効果が下がり、圧力が高めに評価されたと推測される。解析では、上記の傾向について、除熱低下</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>このように、MAAPによる解析で得られた格納容器圧力及び温度並びに格納容器内のガス濃度変化は、HDR実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAPは格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、及び気液界面の熱伝達に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p>の原因としてコンクリートの熱伝導率を高くした感度解析で圧力が下がることを確認している。温度が成層化する解析結果はHDRの縦長格納容器及び高い注入点に起因して、この傾向が強く現れたと考えられ、PWRの原子炉格納容器形状及び低い1次冷却系位置の場合では、水蒸気が低い位置から放出されることによって、広範囲のヒートシンクによる除熱量が大きくなるので、不確かさはHDR実験解析よりも小さくなると考えられる。</p> <p>以上の結果より、MAAPコードでは、「区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）」については適正に評価する。「構造材の熱伝達」については、やや過小評価し、それに起因して原子炉格納容器内温度については十数℃程度高めに、原子炉格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認された。これらは、HDRの縦長格納容器形状及び高い注入点の条件により温度成層化を高めに評価した結果生じた可能性があり、PWRの原子炉格納容器及び低位置の1次冷却系では、上記の傾向は緩和され、より適切に模擬する方向になると考えられる。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉		相違理由				
	表 4.2-2 HDR 実験（ケース E11.2）の操作イベント						
	0.0 分	小破断 LOCA の発生とほぼ同時（1～2 分の遅れ）に、第 1805 室への水蒸気の注入開始（2.06 [kg/s] の一定流量，仕様では 3.3 [kg/s]）					
	693.82分	LOCA の終了と水蒸気の注入流量を 1.20 [kg/s] まで削減					
	739.4 分	混合ガスの注入開始（第 1805 室）					
	749.98分	水蒸気の注入終了					
	772.3 分	混合ガスの注入終了					
	772.93分	第 1405 室への水蒸気の注入開始（2.06 [kg/s]）					
	958.77分	水蒸気の注入終了					
	975.0 分	外部スプレイ期間の開始（流量 21[t/h]=5.83[kg/s]）					
	1,095.0 分	スプレイ流量を 26.5[t/h]=7.36[kg/s] まで増加					
	1,155.0 分	スプレイ流量を 33[t/h]=9.17[kg/s] まで増加					
	1,185.0 分	スプレイ流量を 38.5[t/h]=10.69[kg/s] まで増加					
	1,203.0 分	スプレイ期間の終了と自然冷却期間の開始					
	1,300.0 分	試験の終了					
	1,445.0 分	自然冷却期間の終了					
	表 4.2-3 実験施設と国内 PWR の比較						
	項目	国内 PWR プラント			実験施設		
		2 ループ		3 ループ	4 ループ	HDR	CSTF
	プラント熱出力 (MWt)	1,650		2,652	3,411	-	-
	原子炉格納容器内自由体積 (m <sup>3</sup> )	42,400		67,900	73,700	11,400	850

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）

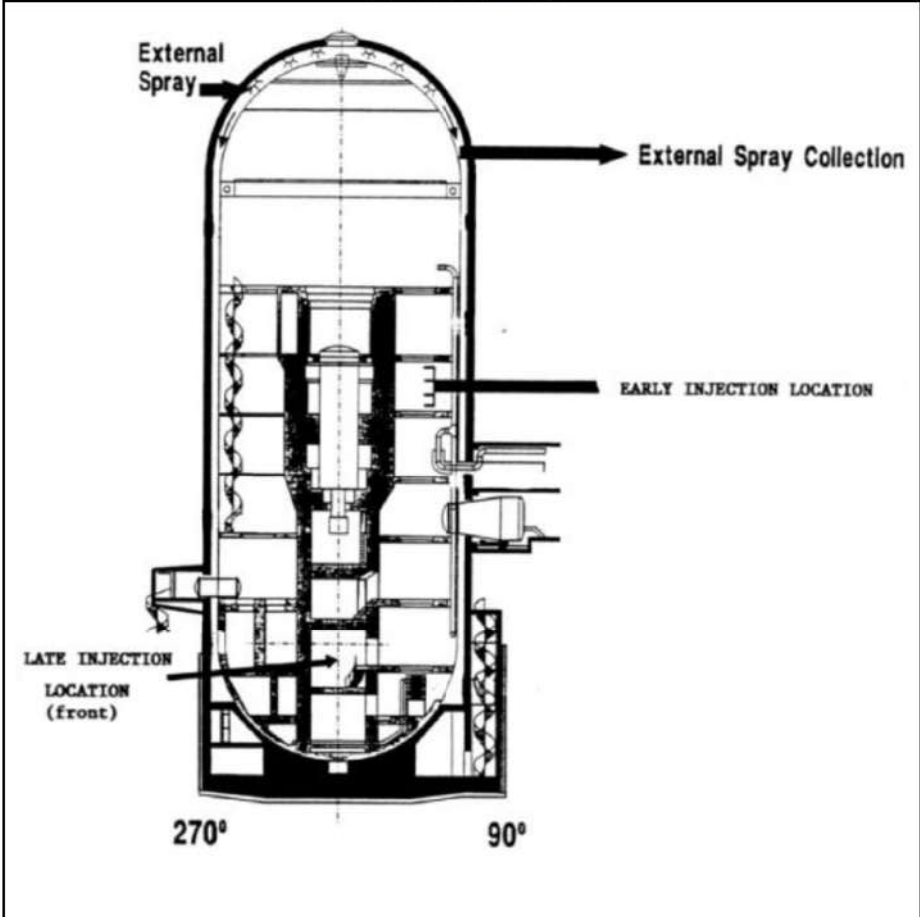
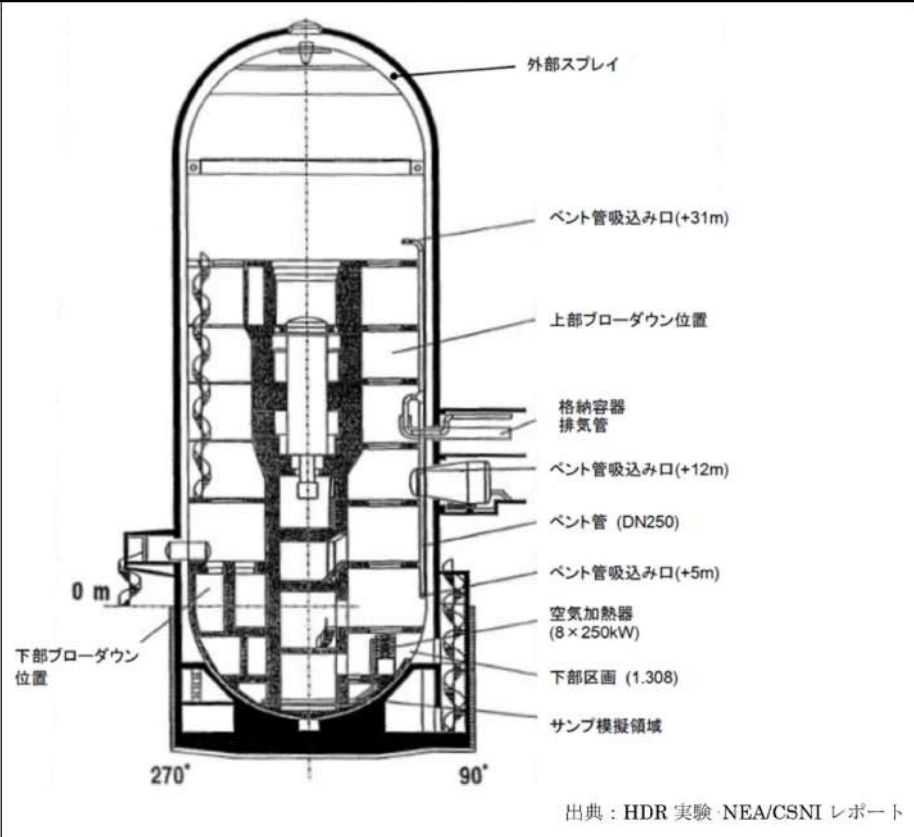
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																										
<p>表 4.2-3 HDR 実験解析における主なエネルギー配分の内訳</p> <table border="1" data-bbox="188 220 992 660"> <tr> <td>コンクリート壁</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>金属製設備</td> <td>6.0%</td> </tr> <tr> <td>冷却コイル</td> <td>15.0%</td> </tr> <tr> <td>シェルからの漏えい</td> <td>12.9%</td> </tr> <tr> <td>凝縮液</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>雰囲気</td> <td>7.3%</td> </tr> </table> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	コンクリート壁	50.0%	金属製設備	6.0%	冷却コイル	15.0%	シェルからの漏えい	12.9%	凝縮液	8.3%	雰囲気	7.3%	<p>表 4.2-4 MAAPコードで計算されたエネルギーバランス            （注入された水蒸気エネルギーの分配）</p> <table border="1" data-bbox="1077 276 1935 679"> <tr> <td>Concrete walls</td> <td>50%</td> </tr> <tr> <td>Metal equipment</td> <td>6.0%</td> </tr> <tr> <td>Instrumental cooling coil</td> <td>15.0%</td> </tr> <tr> <td>Leak through the shell</td> <td>12.9%</td> </tr> <tr> <td>Condensate</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>Gas</td> <td>7.3%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>100.%</td> </tr> </table>	Concrete walls	50%	Metal equipment	6.0%	Instrumental cooling coil	15.0%	Leak through the shell	12.9%	Condensate	8.3%	Gas	7.3%	Total	100.%	
コンクリート壁	50.0%																											
金属製設備	6.0%																											
冷却コイル	15.0%																											
シェルからの漏えい	12.9%																											
凝縮液	8.3%																											
雰囲気	7.3%																											
Concrete walls	50%																											
Metal equipment	6.0%																											
Instrumental cooling coil	15.0%																											
Leak through the shell	12.9%																											
Condensate	8.3%																											
Gas	7.3%																											
Total	100.%																											



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）

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="694 1085 1008 1109">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="481 1125 705 1149">図 4.2-17 HDR の概略図</p>	 <p data-bbox="1601 965 1960 989">出典：HDR 実験・NEA/CSNI レポート</p> <p data-bbox="1388 1021 1624 1045">図 4.2-11 HDR 実験設備</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>Total Containment Volume 11.400 m<sup>3</sup></p>	<p>Total Containment Volume 11.400 m<sup>3</sup></p>	
<p>図 4.2-18 HDR 実験解析におけるノード分割</p>	<p>図 4.2-12 ノード分割図<sup>[16]</sup></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

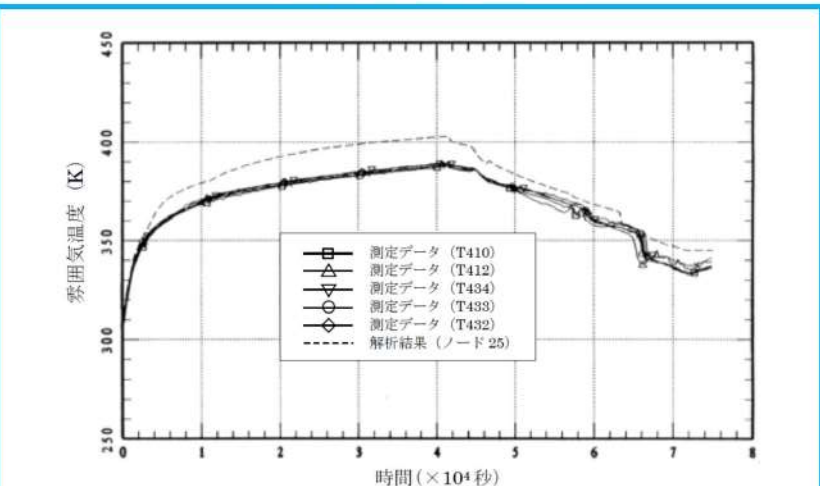
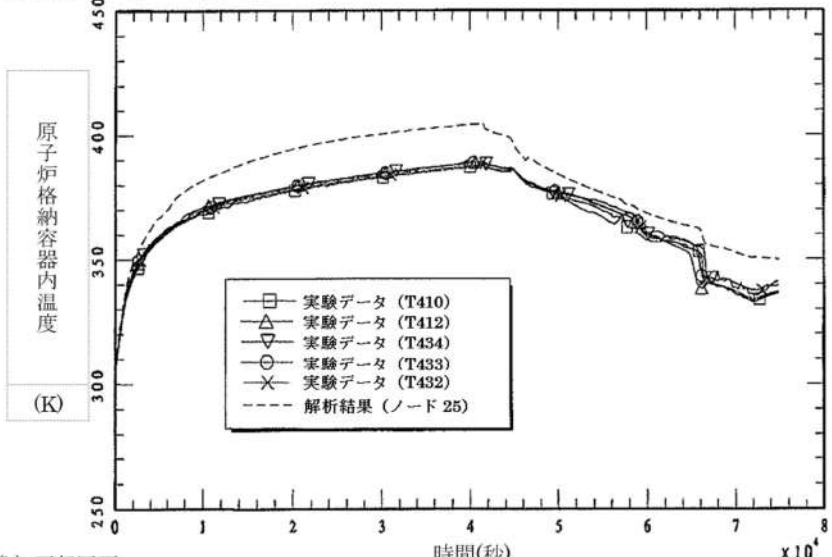
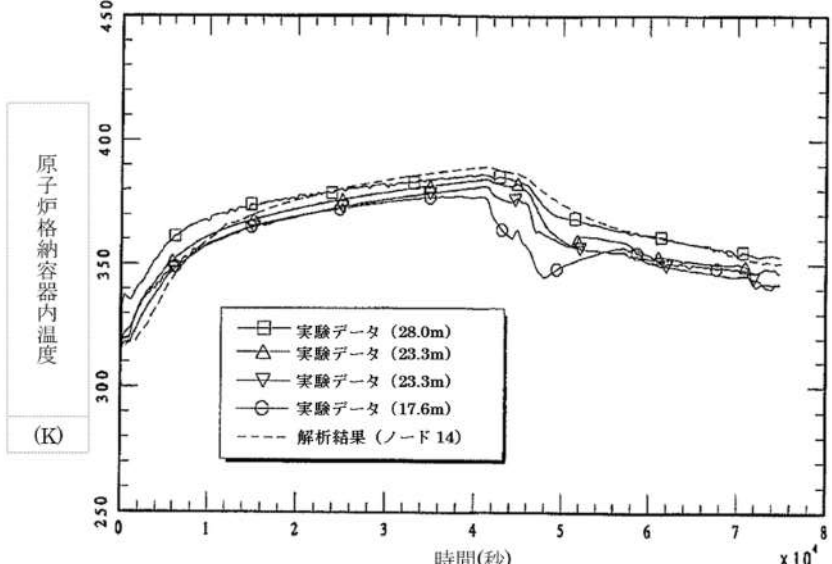
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-19 HDR 実験の解析結果（格納容器圧力）<sup>[15]</sup></p>	<p>図 4.2-13 HDR 実験のベンチマーク解析結果：原子炉格納容器圧力<sup>[15]</sup></p>	

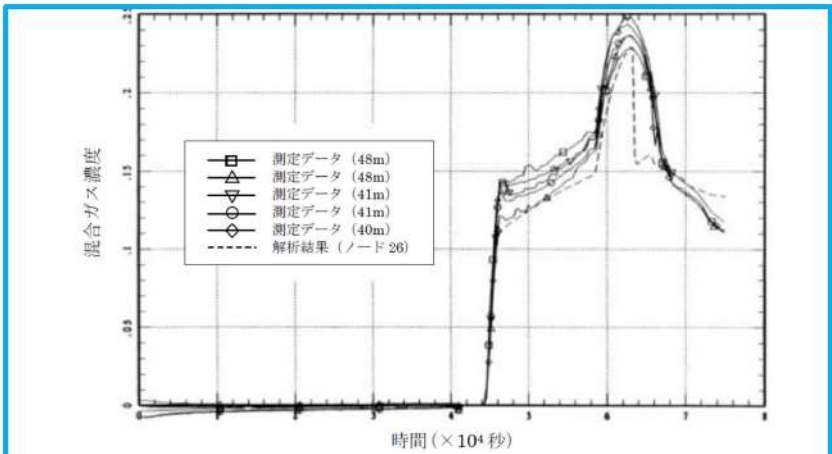
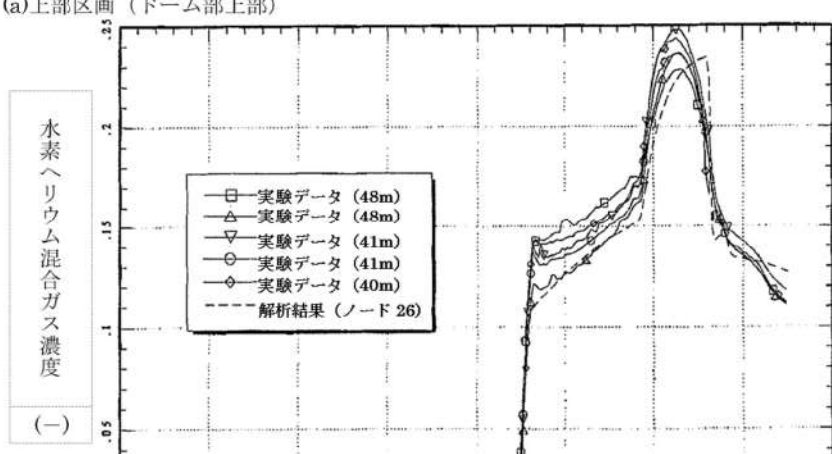
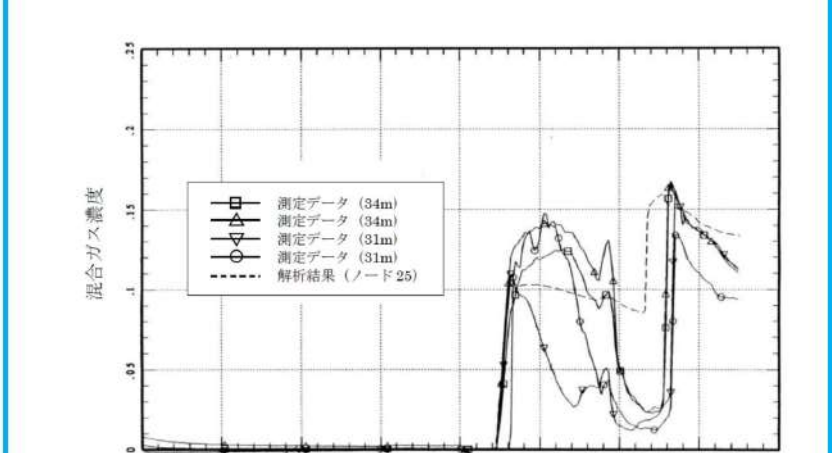
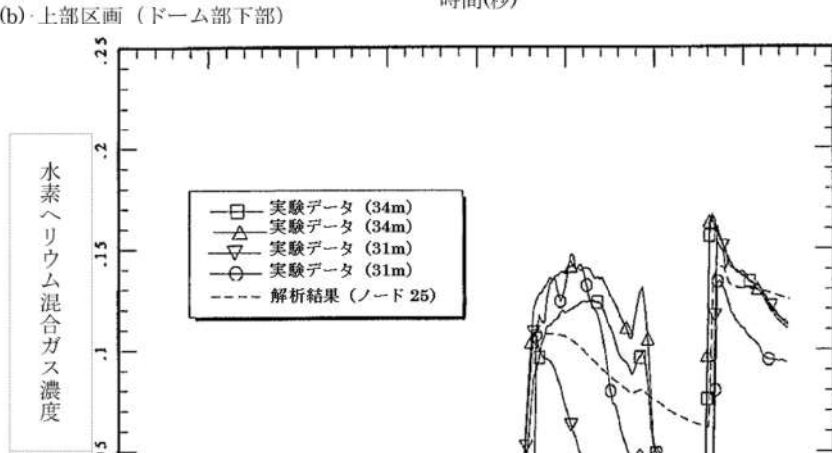
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）  
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）  
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

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)

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="448 167 739 199">【参考のため掲載順を入れ替えた】</p>  <p data-bbox="627 718 896 742">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="336 750 828 774">図 4.2-24 HDR 実験の解析結果（ドーム部の雰囲気温度）</p>	<p data-bbox="1086 183 1344 215">(a) 上部区画（ドーム部下部）</p>  <p data-bbox="1086 766 1209 798">(b) 下部区画</p>  <p data-bbox="1187 1396 1825 1420">図 4.2-14 HDR 実験のベンチマーク解析結果：原子炉格納容器内温度<sup>[16]</sup></p>	



女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>【参考のため掲載順を入れ替えた】</p>  <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>(a) 上部区画（ドーム部上部）</p>  <p>(-)</p>	
<p>図 4.2-26 HDR 実験の解析結果（ドーム部上部混合ガス濃度）</p>		
 <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>(b) 上部区画（ドーム部下部）</p>  <p>(-)</p>	
<p>図 4.2-27 HDR 実験の解析結果（ドーム部下部混合ガス濃度）</p>	<p>図 4.2-15 HDR 実験のベンチマーク解析結果：水素ヘリウム混合ガス濃度<sup>[15]</sup></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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>エネルギー (×10<sup>11</sup>J)</p> <p>時間 (×10<sup>4</sup>秒)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>---□--- コンクリート壁①</li> <li>---△--- +金属製設備②</li> <li>---▽--- +凝縮液③</li> <li>---○--- +シェルからの漏えい④</li> <li>---◇--- +雰囲気⑤</li> <li>---▲--- +冷却コイル⑥</li> <li>---▽--- 全流入エネルギー⑦</li> </ul> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>エネルギー (×10<sup>11</sup>J)</p> <p>時間(秒) ×10<sup>4</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>---□--- WALLS ①</li> <li>---△--- + EQUIPMENT ②</li> <li>---▽--- + WATER ③</li> <li>---○--- + LEAK THRU. SHELL ④</li> <li>---◇--- + GAS ⑤</li> <li>---▲--- + INST. COOLING ⑥</li> <li>---▽--- SOURCE ⑦</li> </ul> <p>混合ガスの注入</p> <p>蒸気注入の再開</p> <p>蒸気による余熱の終了</p> <p>外部スプレー開始</p>	
<p>図 4.2-20 HDR 実験の解析結果 (エネルギー配分)</p>	<p>図 4.2-16 HDR 実験のベンチマーク解析結果：エネルギーバランス (MAAPコード) [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）

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)

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="190 183 974 710" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="667 746 965 767">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="347 786 833 807">図 4.2-21 HDR 実験の解析結果 (10m 位置の雰囲気温度)</p> <div data-bbox="206 821 974 1332" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="674 1353 965 1374">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="353 1398 828 1418">図 4.2-22 HDR 実験の解析結果 (階段横の雰囲気温度)</p>	<p data-bbox="1435 137 1576 193">4.3-9</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）

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）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-23 HDR 実験の解析結果 (0m 位置の蒸気温度)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-25 HDR 実験の解析結果 (蒸気発生器室の蒸気温度)</p>		

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.4 CSTF 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>CSTF 実験<sup>[6]</sup>は、米国 Hanford Engineering Developing Laboratory においてアイスコンデンサ型格納容器を模擬した Containment Systems Test Facility (CSTF) 実験装置を用いて、原子力発電所におけるシビアアクシデント時の水素制御に関する研究を行ったものである。この実験では、水素混合挙動や水素ポケット又は水素リッチな混合ガスの成層化の可能性を調査している。CSTF 実験では、小破断 LOCA 時の破断口及び破損した加圧器逃がシタンのラプチャ・ディスク経由の冷却材放出を想定して、水素と水蒸気又はヘリウムと水蒸気の混合ガス放出を模擬している。窒素雰囲気において水素ガスが用いられた1つの実験を除いて水素ガスの代わりにヘリウムガスが用いられた。</p> <p>CSTF 実験装置の概要を図 4.2-28 及び図 4.2-29 に示す。高さ約 20.4m、外径約 7.6m、体積は約 850m<sup>3</sup>、160℃において 0.52MPa の設計圧力の圧力容器であり、CSTF 容器は下部と上部に分かれ、アイスコンデンサ下部扉と再循環ファンを模擬している。また、異なった事故シナリオにおける水素ガスの蓄積の可能性を調査するために、強制対流がある場合とない場合の実験が実施された。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>ベンチマーク解析に用いた MAAP のノード分割を図 4.2-30 に示す。V3 は上部区画全体を模擬しており、遮蔽壁と燃料取替キャビティより外側の下部区画を V1 と V2 に分けている。V4 は燃料交換キャビティである。</p> <p>ジャンクション J2 は、物理的な壁はないが、ノード V1 とノード V2 を均等に分割する流路である。ドアを持った2つの異なるジャンクション J3 と J1 をノード V1 と V3 の間、ノード V2 と V3 の間にそれぞれ配置することによってアイスコンデンサ下部扉を模擬する。ジャンクション J4 及び J7 は、それぞれノード V4 とノード V2、V1 間の漏えいパスを模擬している。ジャンクション J5 及び J6 は、それぞれノード V3 とノード V1、V2 間の強制対流のための再循環ファンの流路を模擬している。また、各区画におけるヒートシンクは、構造材の厚さ、伝熱面積、構造物ごとの物性値を考慮している。</p> <p>表 4.2-4 に実験ケースの一覧を示す。HM-P1～P4 は自然対流及び強制対流における混合挙動を確認するための予備実験である。HM-1～5 は小破断 LOCA による水蒸気と水素ガスの放出を模擬し、HM-6～7 は、加圧器逃がシタンのラプチャ・ディスク破損による水蒸気と水素ガスの放出を模擬している。HM-1～2 は再循環ファンの作動なしを想定しており、HM-3～7 は再循環ファンの作動ありを想定している。ベンチマーク解析として、再循環ファンの作動のない HM-1、HM-2 及び窒素雰囲気に入水素ガスを注入した HM-5 の解析を示す。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>CSTF 実験のケース HM-1、HM-2 及び HM-5 に対するベンチマーク解析の結果を以下に述べる。</p>	<p>4.2.3 CSTF 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>CSTF 実験<sup>[6]</sup>は、米国 Hanford Engineering Developing Laboratory においてアイスコンデンサ型格納容器構造を模擬した Containment Systems Test Facility (CSTF) を用いて、シビアアクシデント時の原子炉格納容器内水素制御に関する研究を行ったものである。この実験では、強制対流の有無を含め複数の事故シナリオを想定して、水素ポケット又は水素リッチ混合ガス成層の可能性を調査している。CSTF 容器は下部と上部に分かれ、部分開口したアイスコンデンサ扉と再循環ファンを模擬している（アイスコンデンサ区画とアイス自体は模擬していない）。CSTF 実験では、小破断 LOCA 時の破断口からの冷却材放出及び加圧器逃がシタンの破損ラプチャディスク経由の冷却材放出を想定して、各々水平方向及び垂直方向のジェットノズルからヘリウム（又は水素）及び水蒸気の混合ガスを放出して模擬している。</p> <p>CSTF 設備の概要を図 4.2-17 及び図 4.2-18 に示す。高さ 20.4m、外径 7.6m、容積は 850m<sup>3</sup>、設計圧力 0.52MPa の圧力容器であり、参照プラントに対する線形スケールファクタは 0.3、外壁はプラントのクレーン壁を模擬し、高さとの割合は同等である。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>ベンチマーク解析に用いた MAAP コードのノード分割を図 4.2-19 に示す。ノード分割は、V1:下部区画、V2:下部区画（ジェットノズル含）、V3:上部プレナム区画（仮想アイスコンデンサ区画含）、V4:原子炉（燃料取替）キャビティ模擬区画（デッドエンド区画）の4ノードに分割している。</p> <p>重要なジャンクションとして、部分開口したアイスコンデンサ扉を模擬した24の垂直方向のスロットを簡便化したジャンクション（J1:V2とV3、J3:V1とV3）と、強制対流のための再循環ファンのジャンクション（J5、J6）がある。その他に、物理的な壁はないが2分した下部区画を繋ぐジャンクション（J2:V1とV2）と、上部区画とデッドエンド区画を繋ぐリークパス（J4:V2とV4、J7:V1とV4）がある。ヒートシンクは、構造材の厚さ、表面積及び物性を考慮している。</p> <p>実験ケースの一覧を表 4.2-5 に示す。HM-P1～P4 は自然対流及び強制対流の影響を確認するための予備実験である。HM-1～5 は小破断 LOCA を想定し、HM-6～7 は、加圧器逃がシタンのラプチャディスク破損を想定したものである。HM-1～2 は再循環ファン無しのケース、HM-3～7 は再循環ファン有りのケースである。ベンチマーク解析としては、典型的なケースとして HM-1、HM-4、HM-6 の解析を実施している。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>CSTF 実験のケース HM-1、HM-4 及び HM-6 に対するベンチマーク解析の結果を以下に述べる。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p><b>HM-1 実験</b></p> <p>この実験は、水平方向ジェットノズルによって小破断LOCAを模擬しているが、再循環ファンは考慮していないため、気相の混合に寄与するのは、ジェットノズルからの注入による強制対流と自然対流のみである。下部区画のガス温度及びヘリウム濃度について、解析結果と実験データの比較を図4.2-31に示す。</p> <p>実験開始後の緩やかな温度の低下は、ヒートシンクの影響による。約14分後に急激な温度低下があるが、これは、アイスコンデンサ下部扉の開放によって、比較的温度的の高い下部区画と比較的温度的の低い上部区画での自然対流によるものと考えられる。混合ガスの注入の開始から注入完了までの温度上昇傾向はよく一致している。</p> <p>注入完了からの約10分間においては、解析結果のほうが急峻な低下を示しているが、これは解析では下部区画から上部区画への自然循環流量を大きく評価しているためと考えられる。全体としては、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画のヘリウムガス濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。</p> <p><b>HM-2 実験</b></p> <p>この実験は、HM-1 実験と同様に、水平方向ジェットノズルによって小破断LOCAを模擬し、再循環ファンは考慮しておらず、気相の混合に寄与するのは、ジェットノズルからの注入による強制対流と自然対流のみである。HM-1 実験との違いは、ジェットノズルからの注入流量であり、ガス流量及び水蒸気流量ともに約2倍の質量流量となっている。下部区画のガス温度及びヘリウム濃度について、解析結果と実験データの比較を図4.2-32に示す。</p> <p>HM-1 実験と同様に、混合ガス注入完了後の温度低下は、解析の方が実験より若干急峻であるものの、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画のヘリウムガス濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。</p>	<p><b>HM-1 実験</b></p> <p>この実験は、水平方向ジェットノズルにより小破断LOCAを想定しているが、再循環ファンは模擬しておらず、気相混合に寄与するのは、ジェットノズルからの注入による強制対流と自然対流のみである。</p> <p>図4.2-20に示すように、下部区画のガス温度については、初期は計算結果もデータもともにヒートシンクの影響でなだらかに低下する。14分後に急に温度低下するのは、アイスコンデンサ下部扉が開き、下部区画の高温ガスと上部区画の低温ガス間で自然対流が開始されたからである。その後混合ガスの注入が開始（約18分）されてから終了（約30分）までの温度変化は、解析結果の方が若干高く評価するものの概ね良く一致していると考えられる。混合ガス注入終了から約10分間の温度低下は、解析の方が実験より若干急峻であるが、これは解析では下部区画から上部区画への自然循環流量が高めに評価されたためと考えられる。全般的にはアイスコンデンサ下部扉が開いたあとの実験における温度低下挙動を再現できており、温度差のあるガスの混合挙動を模擬できる。</p> <p>実験開始後及び注入終了後の温度低下は、ヒートシンクへの伝熱挙動に起因する。注入終了後、実験では熟成層化の影響で若干の差が生じているものの、全体的な温度低下挙動は実験結果と解析結果で比較的良く一致しており、ヒートシンク挙動モデルも妥当なものである。</p> <p>下部区画のヘリウムガス濃度に関しては、図4.2-20に示すように、解析結果は実験結果と良く一致する挙動を示すが、若干濃度は高い傾向を示す。これは、MAAPコードはランプトモデルであるため区画内均一混合となるが、実験では密度の低いヘリウムガスが下部区画でも上方に移行して上部区画へ流入しやすい状況にあったことが推測できる。全体的に混合挙動は良く模擬できており、非凝縮性ガスの混合挙動モデルは妥当と考えられる。</p> <p><b>HM-4 実験</b></p> <p>この実験は、HM-1と同様に水平方向ジェットノズルにより小破断LOCA 想定であるが、再循環ファンが模擬されており、HM-1と比較して再循環ファンによる強制対流も気相混合に寄与する。下部区画のガス温度及び下部区画のヘリウムガス濃度について、解析結果と実験データの比較を図4.2-21に示す。</p> <p>下部区画のガス温度については解析結果の方が若干高く評価するものの、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉が開いたあとの温度低下、注入終了時のピーク温度及びその後の温度低下など、全体的に解析結果は実験データと良く一致している。</p> <p>アイスコンデンサ下部扉が開いたあとの温度低下挙動、実験開始及び注入終了後の温度低下挙動が比較的良く一致していることから、温度差のあるガスの混合挙動及びヒートシンクへの伝熱挙動を良く模擬できていることが確認できる。</p> <p>下部区画のヘリウムガス濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致性を示しており、強制循環による非凝縮性ガスの混合挙動モデルは妥当である。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p><b>HM-5 実験</b></p> <p>この実験では、水平方向ジェットノズルにより小破断LOCAを想定して、実験開始前にCSTF容器に空気の代わりに窒素ガスを封入し、水素ガスが注入されている。再循環ファンが模擬されており、HM-1やHM-2と比較して再循環ファンによる強制対流も気相混合に寄与する。下部区画のガス温度及び下部区画の水素濃度について、解析結果と実験データの比較を図4.2-33に示す。</p> <p>HM-1実験及びHM-2実験と同様に、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉の開放による急激な温度低下、注入開始による温度上昇、注入完了時のピーク温度及び完了後の温度低下等、解析結果と実験データにおいて一連の挙動は良く一致している。また、下部区画の水素濃度に関しても解析結果は実験データと良い一致を示している。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>CSTF実験は、上部区画と下部区画で仕切られた区画を持つ格納容器の下部区画に水平あるいは垂直ジェットにより水蒸気及び水素又はヘリウムを注入し、再循環ファンあるいはアイスコンデンサ扉による強制対流と自然対流による混合を確認した実験である。HM-1実験及びHM-2実験は空気雰囲気に対し、ヘリウム及び水蒸気の水平方向ジェットによる強制対流とアイスコンデンサ扉開放による自然対流を考慮し、HM-5実験は窒素雰囲気に対し、水素ガス及び水蒸気の水平方向ジェットによる強制対流、アイスコンデンサ扉開放による自然対流及び再循環ファンによる強制対流を考慮している。</p> <p>格納容器内のガス温度や非凝縮性ガスの濃度については、図4.2-31、図4.2-32及び図4.2-33に示すとおり、すべての実験条件において、自然循環及び強制対流下で、測定データと良く一致する解析結果が得られている。</p> <p>このように、MAAPによる解析で得られた格納容器温度及び非凝縮性ガスの濃度変化は、CSTF実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAPは格納容器各領域間の流動及び構造材との熱伝達及び内部熱伝導に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p><b>HM-6 実験</b></p> <p>この実験は、垂直方向ジェットノズルにより加圧器逃がしタンクのラプチャディスク破損を模擬し、再循環ファンも模擬している。垂直方向ジェットノズルが上部区画と下部区画の気相混合に寄与する。下部区画のガス温度と下部区画のヘリウムガス濃度について、実験結果において区画内高さの違いが表れているが、実験開始後の温度低下、アイスコンデンサ下部扉が開いたあとの温度低下、注入終了時のピーク温度及びその後の温度低下など全体的に解析結果は実験データと良く一致している。上部区画ガス温度については、ガス注入期間は解析結果が実験結果より若干高いが、その後は同様になっている。これは、実験では下部区画内で高さ方向に温度分布がついていることが影響したと考えられる。</p> <p>下部区画のヘリウムガス濃度に関してもHM-1及び4と同様に解析結果は実験データと良い一致性を示している。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価に関わる重要現象として抽出された項目に対し、本ベンチマーク解析から考えられるMAAPコードの不確かさについて考察した。</p> <p>CSTF実験は、上部区画と下部区画で仕切られた区画を持つ原子炉格納容器の下部区画に水平あるいは垂直ジェットにより水蒸気及び非凝縮性ガスを注入し、再循環ファンあるいはアイスコンデンサ扉による強制対流と自然対流による混合を確認した実験である。HM-1は水平方向ジェットによる強制対流とアイスコンデンサ扉開放による自然対流を考慮し、HM-4及びHM-6実験は水平方向あるいは垂直ジェットによる強制対流、アイスコンデンサ扉開放による自然対流及び再循環ファンによる強制対流を考慮している。</p> <p>それぞれの実験解析結果において、実験では区画内高さ方向に温度差がある場合でも、MAAPコードはランプモデルとして一様に扱うモデリングに依存した差異は見られるものの、全般的には自然循環及び強制対流での混合挙動は良好に模擬できている。</p> <p>実験開始後及び注入終了後の温度低下はヒートシンクへの伝熱挙動に起因しており、流れの無い条件下での「構造材（ヒートシンク）との熱伝達」はやや過小に評価される傾向があると考えられるが、全体的な温度低下挙動は実験結果と解析結果で比較的良く一致しており、ヒートシンク挙動モデルの不確かさは大きくないものと判断できる。</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）

女川原子力発電所2号炉											泊発電所3号炉											相違理由
表 4.2-4 CSTF 水素混合実験 実験ケース一覧											表 4.2-5 CSTF 水素ガス濃度混合実験 実験ケースの一覧											
実験ケース	雰囲気ガス	再循環流量		注入ガス組成	ガス流量 (ヘリウム又は水素)		水蒸気流量		下部区画 ガス初期温度		実験ケース	雰囲気ガス	再循環流量		注入ガス組成	ガス流量 (ヘリウム又は水素)		水蒸気流量		下部区画 ガス初期温度		
		m <sup>3</sup> /min.	ft. <sup>3</sup> /min.		kg/min.	lb./min.	kg/min.	lb./min.	°C	°F			m <sup>3</sup> /min.	ft. <sup>3</sup> /min.		kg/min.	lb./min.	kg/min.	lb./min.	°C	°F	
予備試験											予備試験											
HM-P1	Air	0	0	-	-	-	-	-	29	85	HM-P1	Air	0	0	-	-	-	-	-	29	85	
HM-P2	Air	104	3700	-	-	-	-	-	29	85	HM-P2	Air	104	3700	-	-	-	-	-	29	85	
HM-P3	Air	0	0	-	-	-	-	-	66	150	HM-P3	Air	0	0	-	-	-	-	-	66	150	
HM-P4	Air	104	3700	-	-	-	-	-	66	150	HM-P4	Air	104	3700	-	-	-	-	-	66	150	
高速ジェット試験（水平方向）											高速ジェット試験（水平方向）											
<u>HM-1</u>	Air	0	0	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	<u>HM-1</u>	Air	0	0	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	
<u>HM-2</u>	Air	0	0	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	HM-2	Air	0	0	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	
HM-3	Air	104	3700	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	HM-3	Air	104	3700	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	
HM-4	Air	104	3700	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	<u>HM-4</u>	Air	104	3700	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	
<u>HM-5</u>	N <sub>2</sub>	104	3700	H <sub>2</sub> -Steam	0.41	0.9	24.5	54	66	150	HM-5	N <sub>2</sub>	104	3700	H <sub>2</sub> -Steam	0.41	0.9	24.5	54	66	150	
高速ジェット試験（垂直方向）											高速ジェット試験（垂直方向）											
HM-6	Air	104	3700	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	<u>HM-6</u>	Air	104	3700	He-Steam	0.41	0.9	12.3	27	66	150	
HM-7	Air	104	3700	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	HM-7	Air	104	3700	He-Steam	0.82	1.8	24.5	54	66	150	

※下線部は、ベンチマーク解析ケース

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

※ 下線部は、ベンチマーク解析ケース

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

表 4.2-6 実験施設と実機条件の比較

項目	国内 PWR プラント			実験施設	
	2 ループ	3 ループ	4 ループ	HDR	CSTF
プラント熱出力 (MWt)	1,650	2,652	3,411	—	—
原子炉格納容器 内自由体積 (m <sup>3</sup> )	42,400	67,900	73,700	11,400	850

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-28 CSTF 実験装置</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>図 4.2-17 CSTF 実験装置の区画構成（全体）</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-29 CSTF 実験装置における空気再循環の詳細</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>図 4.2-18 CSTF 実験装置の区画構成（詳細）</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">V<sub>i</sub></span> ノード V<sub>i</sub>  <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">J<sub>j</sub></span> ジャンクション J<sub>j</sub>  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">V<sub>4</sub></span> デッドエンド区画                 </p> <p>                     垂直ジェットノズル                      再循環ファン                      再循環ファン                      垂直方向ジャンクション                      垂直方向ジャンクション                      水平ジェットノズル                      水平ジェットノズル                      垂直ジェットノズル                      垂直ジェットノズル                      漏えいバース                      漏えいバース                 </p> <p>試験ケース：HM-1~HM-5                      試験ケース：HM-6~HM-7</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">V<sub>i</sub></span> ノード V<sub>i</sub>  <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">J<sub>j</sub></span> ジャンクション J<sub>j</sub>  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">V<sub>4</sub></span> デッドエンド区画                 </p> <p>                     垂直ジェットノズル                      再循環ファン                      再循環ファン                      垂直方向ジャンクション                      垂直方向ジャンクション                      水平ジェットノズル                      水平ジェットノズル                      垂直ジェットノズル                      垂直ジェットノズル                      漏えいバース                      漏えいバース                 </p> <p>                     試験ケース HM-1~HM-6                      試験ケース HM-6~HM-7                 </p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	

図 4.2-30 CSTF 実験ベンチマーク解析 MAAP ノード分割

図 4.2-19 CSTF 実験ベンチマーク解析 MAAPコード ノード分割

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）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	
<p>図 4.2-31 CSTF 実験ベンチマーク解析結果（ケース HM-1）</p>	<p>図 4.2-20 CSTF 実験ベンチマーク解析結果（ケース HM-1）</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)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>HM-2 試験：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>● 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上方位置</li> <li>△ 実験データ：中央位置</li> <li>◇ 実験データ：下方位置</li> </ul> <p>HM-2 試験：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>● 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上限値</li> <li>△ 実験データ：下限値</li> </ul> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>ケース HM-4：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>● 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上方位置の温度</li> <li>△ 実験データ：中央高さの温度</li> <li>◇ 実験データ：下方位置の温度</li> </ul> <p>ケース HM-4：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>● 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上限値</li> <li>△ 実験データ：下限値</li> </ul> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	
<p>図 4.2-32 CSTF 実験ベンチマーク解析結果 (ケース HM-2)</p>	<p>図 4.2-21 CSTF 実験ベンチマーク解析結果 (ケース HM-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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>HM-5 試験：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>△ 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上方位置</li> <li>△ 実験データ：中央位置</li> <li>◇ 実験データ：下方位置</li> </ul>	<p>下部区画ガス温度 (°C)</p> <p>ケース HM-6：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>△ 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上方位置の温度</li> <li>△ 実験データ：中央高さの温度</li> <li>◇ 実験データ：下方位置の温度</li> </ul>	
<p>HM-5 試験：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析結果：ノード1</li> <li>△ 解析結果：ノード2</li> <li>▽ 実験データ：上限値</li> <li>◇ 実験データ：下限値</li> </ul>	<p>上部区画ガス温度 (°C)</p> <p>ケース HM-6：下部区画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 解析結果：ノード3</li> <li>□ 実験データ：再循環ファン入口ガス温度</li> </ul>	
<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-33 CSTF 実験ベンチマーク解析結果（ケース HM-5）</p>	<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-22 CSTF 実験ベンチマーク解析結果（ケース HM-6）（1/2）</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）

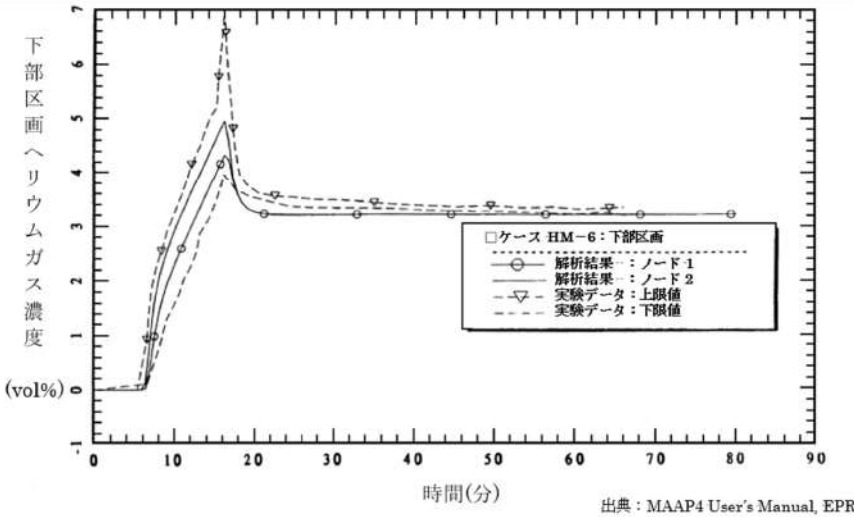
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>下部区画ヘリウムガス濃度 (vol%)</p> <p>時間(分)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>□ ケース HM-6：下部区画      ○ 解析結果：ノード1      ● 解析結果：ノード2      ▽ 実験データ：上限値      ▾ 実験データ：下限値</p>	

図4.2-22 CSTF 実験ベンチマーク解析結果（ケースHM-6）(2/2)



女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.5 ACE 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>米国アルゴンヌ国立研究所で実施された ACE 実験<sup>[17]</sup>では、MCC I の大規模な実験が行われている。この試験の目的は、MCC I の熱水力学的及び化学的プロセスの調査と、計算コードの開発及び妥当性確認に向けたデータベース拡充である。試験装置の概要を図 4.2-34 に示す。試験装置は、8枚の水冷却パネルを対にして四方の壁を構成しており、その中にコンクリート床、コンクリート/金属製の内挿物、コリウムを内蔵している。二つの壁の内面には、25本のタングステン電極棒集合体が設置されており、それらはタングステンコイルによりコリウム頂部付近に接続され、コリウムが熔融して誘導加熱を開始できるまで加熱する。試験装置の大きさは53.0cm×50.2cmである。また、試験装置は二枚式の蓋で覆われており、蓋を通じて主ガス管と接続されている。蓋には四つの窓が設置されており、一つはエアロゾルの収集、ガスのサンプリング及び排出に、残りの三つは光学温度計及びビデオカメラによるコリウムの観察に用いられる。</p> <p>UO<sub>2</sub>を含む全てのコリウム成分は粉末状であり、均一に混合されている。また、コリウム及びコンクリート成分は、複数の条件について実験が行われている。表 4.2-5 及び表 4.2-6 に、L2 実験、L6 実験及び L7 実験におけるコリウム及びコンクリートの成分を示す。実験中、コリウムはタングステン電極で加熱され熔融プールを形成する。コンクリートの侵食は内部に設置された熱電対により観測される。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>解析では、図 4.2-35 に示すとおり、試験部を一つのノードとしてモデル化している。水冷却パネルで構成される側壁、コンクリート床及び蓋はヒートシンクとしてモデル化し、試験部と外部環境の間にジャンクションを設定している。</p> <p>実験ではコリウムを室温から加熱するが、解析ではコンクリートの侵食が開始した時間を零と定義し、その時点における各部の温度等を境界条件として与える。コリウムの初期温度は、L2 実験で 2,400K、L6 実験及び L7 実験で 2,500K である。また、コンクリート床の初期温度は、コリウムとの界面ではコンクリート融点、底面では室温としている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p><u>L2 実験</u></p> <p>L2 実験では、部分的に酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用が調査されている。電気加熱の出力は平均で約 220kW、水冷却パネルでの熱損失は平均で約 120kW であり、解析ではこれらを境界条件として与えている。熔融プール温度は侵食</p>	<p>4.2.4 ACE 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>ACE 実験<sup>[17]</sup>は、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として、国際的に支援された ACE (Advanced Containment Experiments) プログラムの一部として米国アルゴンヌ国立研究所で実施されたものである。</p> <p>図 4.2-23 に実験装置を示す。4方向の壁（水冷却パネル）で囲まれた中には、コンクリートベースマット、コンクリート金属挿入物、コリウム溶融物が入っている。内側表面には 25 個のタングステン電極を備えた額縁型アセンブリがあり、それらは 4 つのタングステンコイルでコリウム溶融物頂部付近に接続されて、コリウム模擬物が熔融して誘導加熱を開始できるまで加熱する。設備の大きさは 53.0cm×50.2cm である。長方形の 2 枚式の蓋（水冷却）があり主ガス管に繋がっている。蓋には、エアロゾル収集ならびにガスサンプリング及び排気口用のポートが 1 つと、コリウム溶融物監視用ポート（光学温度計とビデオカメラ付き）が 3 つ付いている。</p> <p>コリウム溶融物の組成は UO<sub>2</sub> を含み、粉末状で均一にブレンドされた状態である。ACE 実験のうち、PWR 向けに実施されたケース L2 及び L6 のコリウム溶融物組成及びコンクリート成分を表 4.2-7 に示す。実験中、コリウム溶融物はタングステンの電極で加熱され熔融プールを形成する。コンクリート侵食はベースマットの中にある熱電対によりモニターされる。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>ベンチマーク解析の解析モデルは、図 4.2-24 に示すように、ノード、ジャンクション及びヒートシンクを配置したものである。実験設備のガスプレナムを 1 つのノードとし、ガスプレナムと外部環境とのジャンクションを 1 つ設けている。ベースマット、るつぼの蓋及び壁はヒートシンクである。</p> <p>ベンチマーク解析の初期状態としては、コンクリート侵食開始のタイミングを 0 秒として取り扱い、実験におけるその時点の状態（初期ガス温度等）を境界条件として与えている。0 秒でのコリウム溶融物温度は、ケース L2 が 2,400K、ケース L6 が 2,500K である。コンクリート侵食開始時のベースマットの温度は、コリウム溶融物との界面をコンクリート融点、底面を室温とし、コンクリート内部は放物線状の温度分布としている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>ACE 実験（ケース L2 及び L6）のベンチマーク解析結果について、以下に述べる。</p> <p><u>ケース L2</u></p> <p>ケース L2 は、一部酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用に関する実験である。実験における伝熱量は平均 220kW、側壁への熱損失は平均 120 kW で、これらを境界条件として与えている。侵食開始時の熔融プール温度は 2,400K でその後もその温度を維持している。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>開始時において約 2,400K であり、その後もその温度を維持している。垂直方向へのコンクリート侵食量は 2,000 秒において約 10cm である。</p> <p>侵食深さとコリウム温度の解析結果を測定データと比較して図 4.2-36 に示すが、いずれも良い一致を示している。</p> <p><b>L6 実験</b></p> <p>L6 実験では、部分的に酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートの相互作用を調査している。この実験ではコンクリート製ベースマットの上に 7cm のコンクリート/金属製の挿物が設置されているが、解析では侵食開始時にコリウム成分と併せて考慮することで実験を模擬している。電気加熱出力は約 200kW、水冷式パネルでの熱損失は約 125kW である。侵食率は試験開始時には低く、試験終了時には高い値となり、最終的な侵食深さは約 13cm であった。コリウム温度と侵食深さの解析結果を測定データと比較して図 4.2-37 に示すが、コリウム温度については良い一致を示している。侵食率については、侵食開始時において解析結果が実測データをやや上回っているが、これはコンクリート床への熱損失をわずかに大きく評価しているためである。</p> <p><b>L7 実験</b></p> <p>L7 実験では、部分的に酸化した BWR 燃料のコリウム溶融物（70%の Zr が酸化）と石灰岩/砂系コンクリートが用いられており、電気加熱出力は約 130kW である。L6 実験と同様に、コンクリート床上に 5.7cm のコンクリート/金属製挿物を設置しており、解析では侵食開始時にコリウム成分と併せて考慮することで実験を模擬している。実験では、1,500 秒で約 2.5cm の侵食が観測されている。BWR 燃料のコリウム溶融物における低い出力密度と、石灰岩/砂系コンクリートが有する高い分解エンタルピに起因して、侵食深さが小さくなっている。コリウム温度と侵食深さの解析結果を測定データと比較して図 4.2-38 に示すが、いずれも良い一致を示している。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいて MAAP の不確かさを評価する。</p> <p>ACE 実験では、冷却水の注水がなく、かつコリウム及びコンクリートの配置が既知である。したがって、冷却水の熱水力的挙動や幾何形状の不確かさを最小化した条件においてコンクリート侵食挙動を確認することができ、溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさを評価する上で有効である。</p> <p>MAAP 解析では、実験で観測されたコンクリート侵食速度を良く再現した結果となっており、MAAP による解析で得られたコリウム温度及び侵食速度は、ACE 実験における測定データとの比較から妥当である。また、非凝縮性ガスの発生量については直接的な測定データとの比較をしていないものの、コンクリート侵食速度を問題なく予測できていることから一定</p>	<p>実験データとベンチマーク解析結果の比較を図 4.2-25 に示す。コリウム溶融物温度は、実験データをよく再現できている。また、侵食深さについても、実験データをよく再現できしており、垂直方向へのコンクリート侵食率の平均は 7.8mm/分である。</p> <p><b>ケース L6</b></p> <p>ケース L6 は、制御棒の材質を含む一部酸化したコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用に関する実験である。本ケースでは、実験開始時の侵食率は低めであったが、徐々に上昇し、最終的な侵食深さは 40 分の時点で 13cm に至っている。また、光学温度計により計測されたコリウム溶融物の温度も高めであった。実験における伝熱量は約 200kW、側壁への熱損失は約 125 kW で、ベンチマーク解析では、これらを境界条件として与えている。</p> <p>実験データとベンチマーク解析結果の比較を図 4.2-26 に示す。コリウム溶融物の温度は、実験データとよく一致している。一方、侵食深さは、初期段階において深めの傾向となっているが、これは、初期段階のコンクリートベースマットへの熱損失がわずかに大きいためである。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価に関わる重要現象として抽出された項目に対し、本ベンチマーク解析から考えられる MAAP コードの不確かさについて考察した。</p> <p>ACE 実験では、注水がなく、かつ、溶融炉心の堆積状態が既知であることから、注水による冷却や粒子ベッド形状といった他の要因の影響が小さい状態でのコンクリート侵食挙動が確認でき、「溶融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」の現象モデルの確認として有効である。</p> <p>ベンチマーク解析では、実験で観測されたコンクリート侵食速度を良く再現した結果となっている。ACE 実験では二酸化ウランと酸化ジルコイなどの混合物が使用されており、熱的物性も実機に近い条件となっている。溶融炉心からコンクリートへの熱移動は、基本的にクラ</p>	<p>※BWR 特有の実験のため泊では記載していない</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																																																																																																																																																																													
<p>の妥当性を有していると考えられる。したがって、MAAPは熔融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p> <p>表 4.2-5 ACE 実験におけるコリウム成分</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>成分(kg)</th> <th>L2</th> <th>L6</th> <th>L7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>UO<sub>2</sub></td><td>216</td><td>219</td><td>188.5</td></tr> <tr><td>ZrO<sub>2</sub></td><td>42.5</td><td>18.5</td><td>59.4</td></tr> <tr><td>Zr</td><td>13.4</td><td>21.1</td><td>17.7</td></tr> <tr><td>Zirc-4</td><td>-</td><td>1.8</td><td>1.1</td></tr> <tr><td>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>NiO</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>SS-304</td><td>-</td><td>9.1</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>CaO</td><td>3.0</td><td>7.3</td><td>11.5</td></tr> <tr><td>SiO<sub>2</sub></td><td>20.9</td><td>16.9</td><td>12.5</td></tr> <tr><td>BaO</td><td>0.8</td><td>0.79</td><td>1.4</td></tr> <tr><td>La<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>0.6</td><td>0.6</td><td>1.14</td></tr> <tr><td>SrO</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>CeO<sub>2</sub></td><td>1.3</td><td>1.3</td><td>2.32</td></tr> <tr><td>MoO<sub>2</sub></td><td>0.9</td><td>0.94</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>SnTe</td><td>0.2</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>ZrTe<sub>2</sub></td><td>-</td><td>0.2</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Ru</td><td>-</td><td>0.38</td><td>-</td></tr> <tr><td>B<sub>4</sub>C</td><td>-</td><td>-</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>Ag</td><td>-</td><td>1.19</td><td>-</td></tr> <tr><td>In</td><td>-</td><td>0.22</td><td>-</td></tr> </tbody> </table> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	成分(kg)	L2	L6	L7	UO <sub>2</sub>	216	219	188.5	ZrO <sub>2</sub>	42.5	18.5	59.4	Zr	13.4	21.1	17.7	Zirc-4	-	1.8	1.1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	NiO	-	-	-	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	SS-304	-	9.1	0.6	CaO	3.0	7.3	11.5	SiO <sub>2</sub>	20.9	16.9	12.5	BaO	0.8	0.79	1.4	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.6	1.14	SrO	0.5	0.5	0.96	CeO <sub>2</sub>	1.3	1.3	2.32	MoO <sub>2</sub>	0.9	0.94	1.7	SnTe	0.2	-	-	ZrTe <sub>2</sub>	-	0.2	0.18	Ru	-	0.38	-	B <sub>4</sub> C	-	-	1.0	Ag	-	1.19	-	In	-	0.22	-	<p>スト内の熱伝導や熔融炉心に接するコンクリート内の熱伝導が主要な熱移動挙動になるため、下方向の侵食挙動に関しての不確かさは比較的小さいと考えられる。</p> <p>以上より、ACE 実験のような熔融炉心の形状が既知の場合に、MAAPコードのモデルにおいて実験で観測されたコンクリート侵食挙動を再現できることが確認された。</p> <p>表 4.2-7 ACE 実験：コリウム溶解物組成及びコンクリート組成</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Constituent (kg)</th> <th>L2</th> <th>L6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>UO<sub>2</sub></td><td>216</td><td>219</td></tr> <tr><td>ZrO<sub>2</sub></td><td>42.5</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>Zr</td><td>13.4</td><td>21.1</td></tr> <tr><td>Zirc-4</td><td>-</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>NiO</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>SS-304</td><td>-</td><td>9.1</td></tr> <tr><td>CaO</td><td>3.0</td><td>7.3</td></tr> <tr><td>MgO</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>SiO<sub>2</sub></td><td>20.9</td><td>16.9</td></tr> <tr><td>BaO</td><td>0.8</td><td>0.79</td></tr> <tr><td>La<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>0.6</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>SrO</td><td>0.5</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>CeO<sub>2</sub></td><td>1.3</td><td>1.3</td></tr> <tr><td>MoO<sub>2</sub></td><td>0.9</td><td>0.94</td></tr> <tr><td>SnTe</td><td>0.2</td><td>-</td></tr> <tr><td>ZrTe<sub>2</sub></td><td>-</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Ru</td><td>-</td><td>0.38</td></tr> <tr><td>B<sub>4</sub>C</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>Ag</td><td>-</td><td>1.19</td></tr> <tr><td>In</td><td>-</td><td>0.22</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Constituent (kg)</th> <th>L2</th> <th>L6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SiO<sub>2</sub></td><td>69</td><td>69</td></tr> <tr><td>CaO</td><td>13.5</td><td>13.5</td></tr> <tr><td>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>K<sub>2</sub>O</td><td>1.4</td><td>1.4</td></tr> <tr><td>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>1.0</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>TiO<sub>2</sub></td><td>0.8</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>MgO</td><td>0.7</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>Na<sub>2</sub>O</td><td>0.7</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>MnO</td><td>0.03</td><td>0.03</td></tr> <tr><td>BaO</td><td>0.02</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>SrO</td><td>0.02</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub></td><td>7.9</td><td>7.9</td></tr> <tr><td>Concrete Type</td><td>S<sup>1</sup></td><td>S<sup>1</sup></td></tr> <tr><td>TOTALS</td><td>99.1</td><td>99.08</td></tr> </tbody> </table> <p>※ コンクリートタイプ            S<sup>1</sup>：ケイ土系</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	Constituent (kg)	L2	L6	UO <sub>2</sub>	216	219	ZrO <sub>2</sub>	42.5	18.5	Zr	13.4	21.1	Zirc-4	-	1.8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	NiO	-	-	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	SS-304	-	9.1	CaO	3.0	7.3	MgO	-	-	SiO <sub>2</sub>	20.9	16.9	BaO	0.8	0.79	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.6	SrO	0.5	0.5	CeO <sub>2</sub>	1.3	1.3	MoO <sub>2</sub>	0.9	0.94	SnTe	0.2	-	ZrTe <sub>2</sub>	-	0.2	Ru	-	0.38	B <sub>4</sub> C	-	-	Ag	-	1.19	In	-	0.22	Constituent (kg)	L2	L6	SiO <sub>2</sub>	69	69	CaO	13.5	13.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	4	K <sub>2</sub> O	1.4	1.4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	1.0	TiO <sub>2</sub>	0.8	0.8	MgO	0.7	0.7	Na <sub>2</sub> O	0.7	0.7	MnO	0.03	0.03	BaO	0.02	0.02	SrO	0.02	0.02	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	7.9	7.9	Concrete Type	S <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	TOTALS	99.1	99.08	
成分(kg)	L2	L6	L7																																																																																																																																																																																																												
UO <sub>2</sub>	216	219	188.5																																																																																																																																																																																																												
ZrO <sub>2</sub>	42.5	18.5	59.4																																																																																																																																																																																																												
Zr	13.4	21.1	17.7																																																																																																																																																																																																												
Zirc-4	-	1.8	1.1																																																																																																																																																																																																												
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-																																																																																																																																																																																																												
NiO	-	-	-																																																																																																																																																																																																												
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-																																																																																																																																																																																																												
SS-304	-	9.1	0.6																																																																																																																																																																																																												
CaO	3.0	7.3	11.5																																																																																																																																																																																																												
SiO <sub>2</sub>	20.9	16.9	12.5																																																																																																																																																																																																												
BaO	0.8	0.79	1.4																																																																																																																																																																																																												
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.6	1.14																																																																																																																																																																																																												
SrO	0.5	0.5	0.96																																																																																																																																																																																																												
CeO <sub>2</sub>	1.3	1.3	2.32																																																																																																																																																																																																												
MoO <sub>2</sub>	0.9	0.94	1.7																																																																																																																																																																																																												
SnTe	0.2	-	-																																																																																																																																																																																																												
ZrTe <sub>2</sub>	-	0.2	0.18																																																																																																																																																																																																												
Ru	-	0.38	-																																																																																																																																																																																																												
B <sub>4</sub> C	-	-	1.0																																																																																																																																																																																																												
Ag	-	1.19	-																																																																																																																																																																																																												
In	-	0.22	-																																																																																																																																																																																																												
Constituent (kg)	L2	L6																																																																																																																																																																																																													
UO <sub>2</sub>	216	219																																																																																																																																																																																																													
ZrO <sub>2</sub>	42.5	18.5																																																																																																																																																																																																													
Zr	13.4	21.1																																																																																																																																																																																																													
Zirc-4	-	1.8																																																																																																																																																																																																													
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-																																																																																																																																																																																																													
NiO	-	-																																																																																																																																																																																																													
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-																																																																																																																																																																																																													
SS-304	-	9.1																																																																																																																																																																																																													
CaO	3.0	7.3																																																																																																																																																																																																													
MgO	-	-																																																																																																																																																																																																													
SiO <sub>2</sub>	20.9	16.9																																																																																																																																																																																																													
BaO	0.8	0.79																																																																																																																																																																																																													
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.6																																																																																																																																																																																																													
SrO	0.5	0.5																																																																																																																																																																																																													
CeO <sub>2</sub>	1.3	1.3																																																																																																																																																																																																													
MoO <sub>2</sub>	0.9	0.94																																																																																																																																																																																																													
SnTe	0.2	-																																																																																																																																																																																																													
ZrTe <sub>2</sub>	-	0.2																																																																																																																																																																																																													
Ru	-	0.38																																																																																																																																																																																																													
B <sub>4</sub> C	-	-																																																																																																																																																																																																													
Ag	-	1.19																																																																																																																																																																																																													
In	-	0.22																																																																																																																																																																																																													
Constituent (kg)	L2	L6																																																																																																																																																																																																													
SiO <sub>2</sub>	69	69																																																																																																																																																																																																													
CaO	13.5	13.5																																																																																																																																																																																																													
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	4																																																																																																																																																																																																													
K <sub>2</sub> O	1.4	1.4																																																																																																																																																																																																													
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	1.0																																																																																																																																																																																																													
TiO <sub>2</sub>	0.8	0.8																																																																																																																																																																																																													
MgO	0.7	0.7																																																																																																																																																																																																													
Na <sub>2</sub> O	0.7	0.7																																																																																																																																																																																																													
MnO	0.03	0.03																																																																																																																																																																																																													
BaO	0.02	0.02																																																																																																																																																																																																													
SrO	0.02	0.02																																																																																																																																																																																																													
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01																																																																																																																																																																																																													
H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	7.9	7.9																																																																																																																																																																																																													
Concrete Type	S <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>																																																																																																																																																																																																													
TOTALS	99.1	99.08																																																																																																																																																																																																													



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

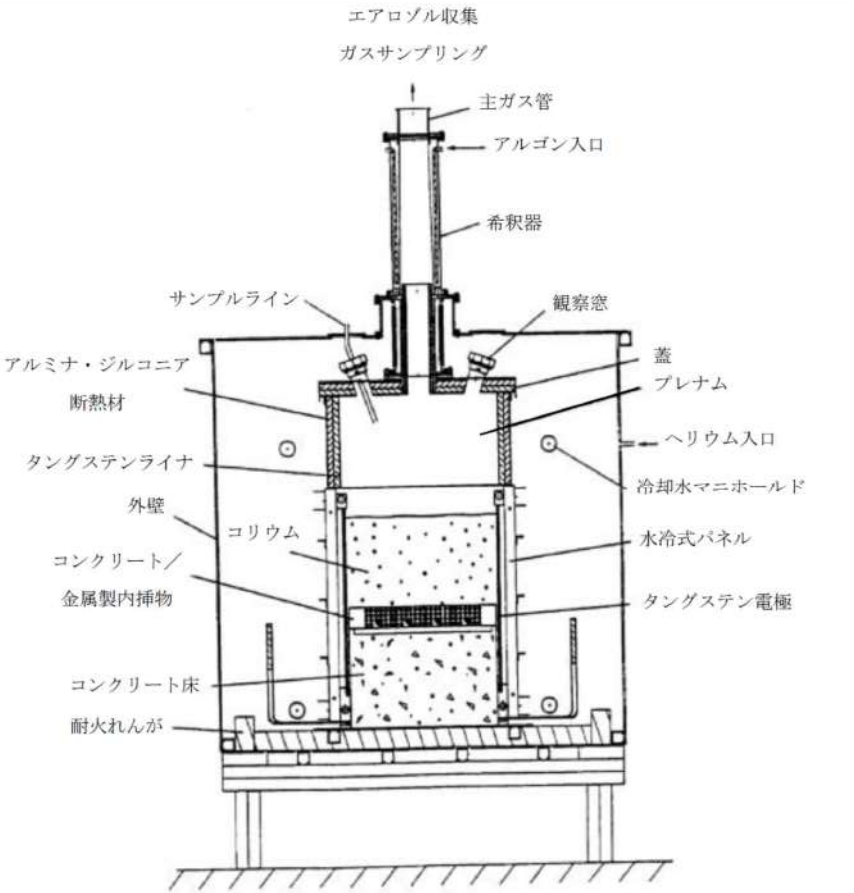
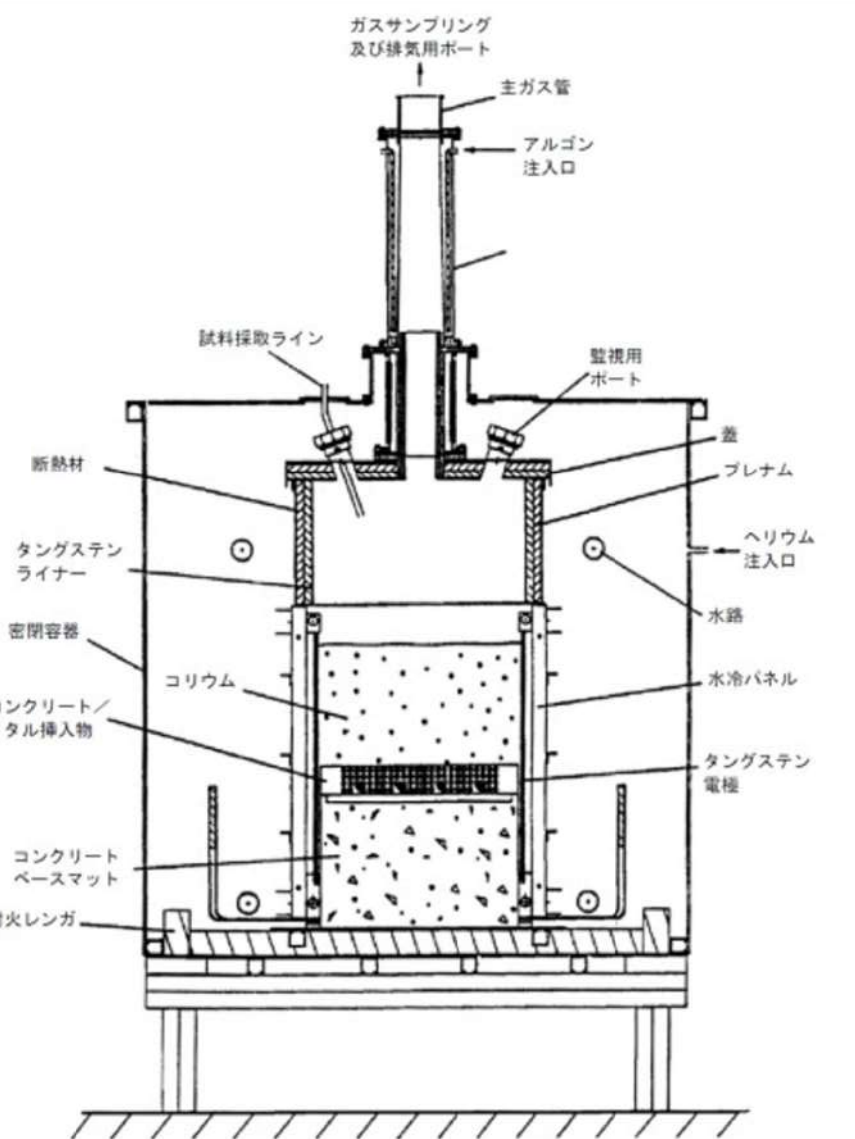
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉	相違理由
表 4.2-6 ACE 実験におけるコンクリート成分					
成分 (kg)	L2	L6	L7		
SiO <sub>2</sub>	69	69	28.3		
CaO	13.5	13.5	26.0		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	4	3.5		
K <sub>2</sub> O	1.4	1.4	0.6		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	1	1.6		
TiO <sub>2</sub>	0.8	0.8	0.14		
MgO	0.7	0.7	9.6		
Na <sub>2</sub> O	0.7	0.7	1.1		
MnO	0.03	0.03	0.05		
BaO	0.02	0.02	0.03		
SrO	0.02	0.02	0.03		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.009		
H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	7.9	7.9	27.5		
コンクリートの種類※	S	S	L/S		
合計	99.1	99.08	98.459		
※ コンクリートの種類 S : ケイ土系 L/S : 石灰岩・砂系  出典：MAAP4 User's Manual, EPRI					

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>エアロゾル収集 ガスサンプリング</p> <p>主ガス管 アルゴン入口 希釈器</p> <p>サンプルライン 観察窓</p> <p>アルミナ・ジルコニア 断熱材 タングステンライナー 外壁 コクリウム コンクリート/ 金属製内挿物 コクリウム床 耐火レンガ</p> <p>蓋 プレナム ヘリウム入口 冷却水マニホールド 水冷式パネル タングステン電極</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-34 ACE 実験装置の概要</p>	 <p>ガスサンプリング 及び排気用ポート</p> <p>主ガス管 アルゴン 注入口</p> <p>試料採取ライン 監視用 ポート</p> <p>断熱材 タングステン ライナー 密閉容器 コクリウム コンクリート/ メタル挿入物 コクリウム ベースマット 耐火レンガ</p> <p>蓋 プレナム ヘリウム 注入口 水路 水冷パネル タングステン 電極</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-23 ACE 実験装置の概要</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（第3部 MAAPコード）

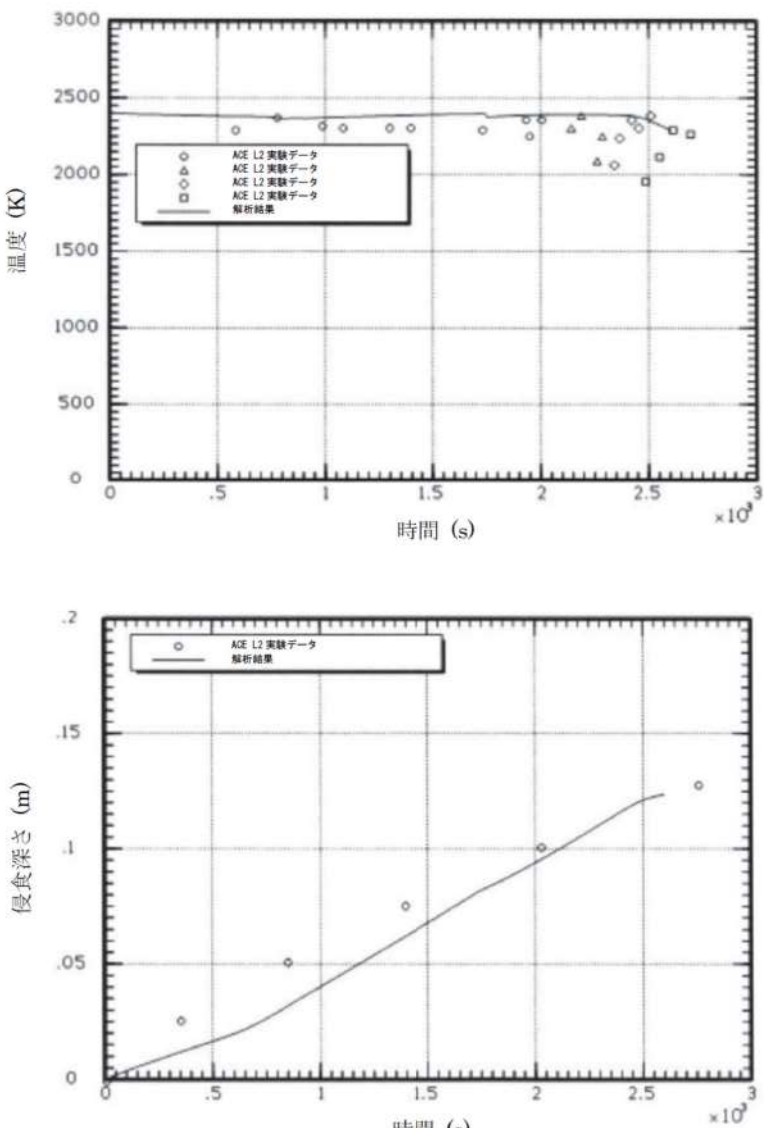
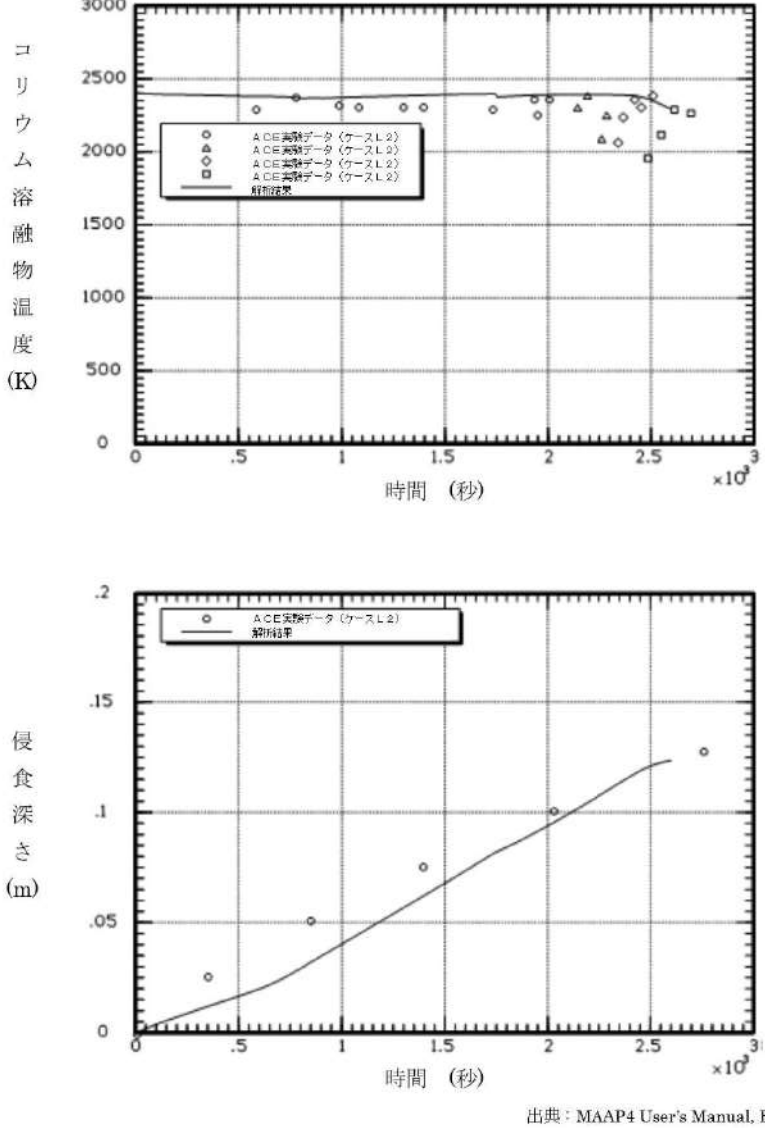
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-35 ACE 実験解析におけるノード分割</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	<p>図 4.2-24 ベンチマーク解析モデル (MAAPコード)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	



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

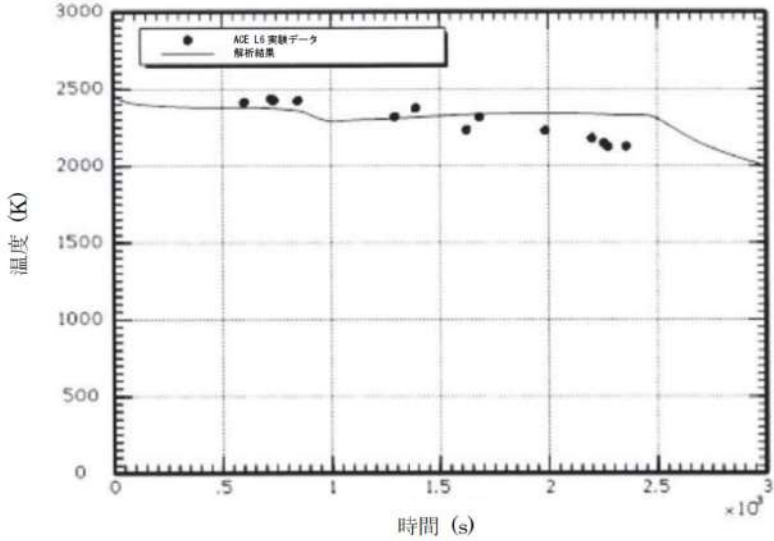
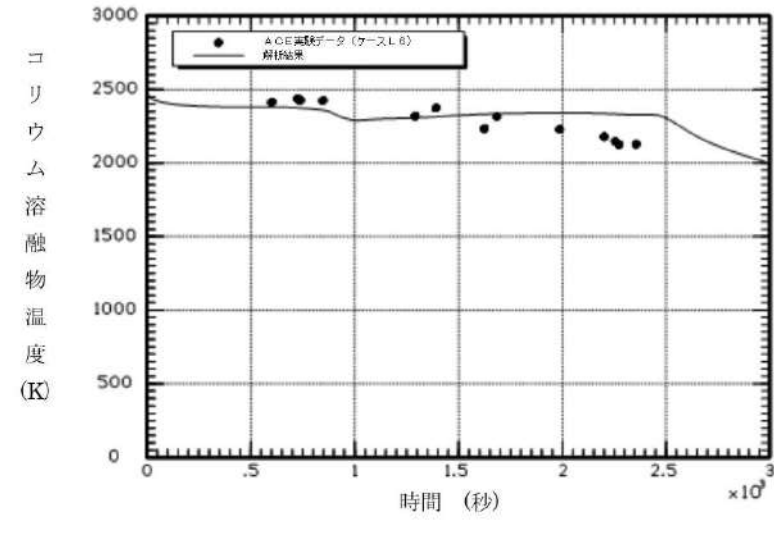
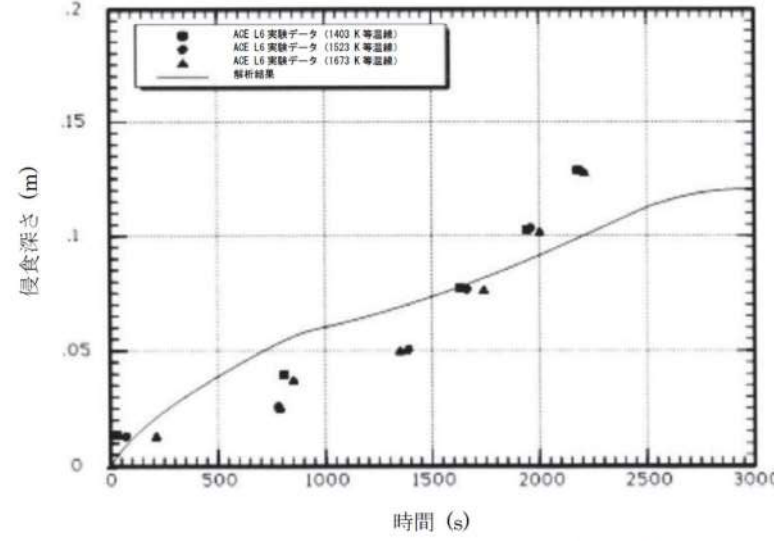
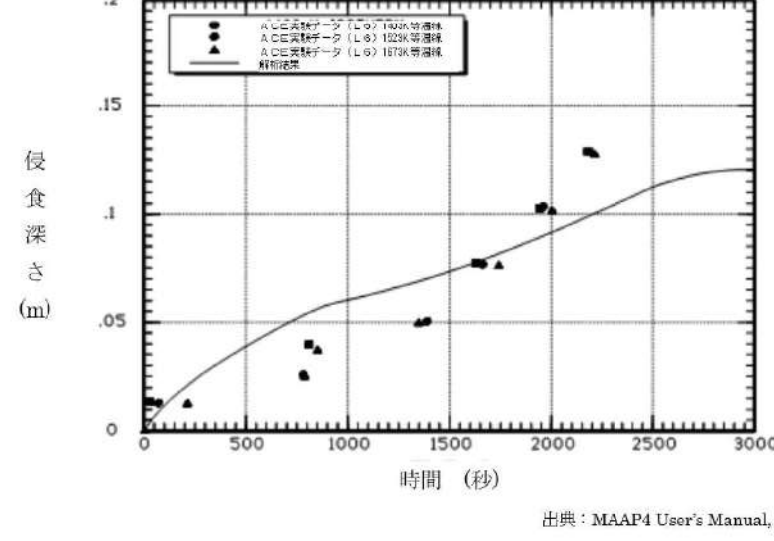
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて (第3部 MAAPコード)

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>温度 (K)</p> <p>時間 (s) <math>\times 10^3</math></p> <p>温度 (K)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>侵食深さ (m)</p> <p>時間 (s) <math>\times 10^3</math></p> <p>侵食深さ (m)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	 <p>コリウム溶融物温度 (K)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>コリウム溶融物温度 (K)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>侵食深さ (m)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	
<p>図 4.2-36 ACE 実験の解析結果 (L2 実験)</p>	<p>図 4.2-25 ACE 実験ベンチマーク解析結果 (ケース L2)</p> <p>コリウム溶融物：PWR コリウム溶融物 (部分酸化)</p> <p>コンクリート：ケイ土系コンクリート</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

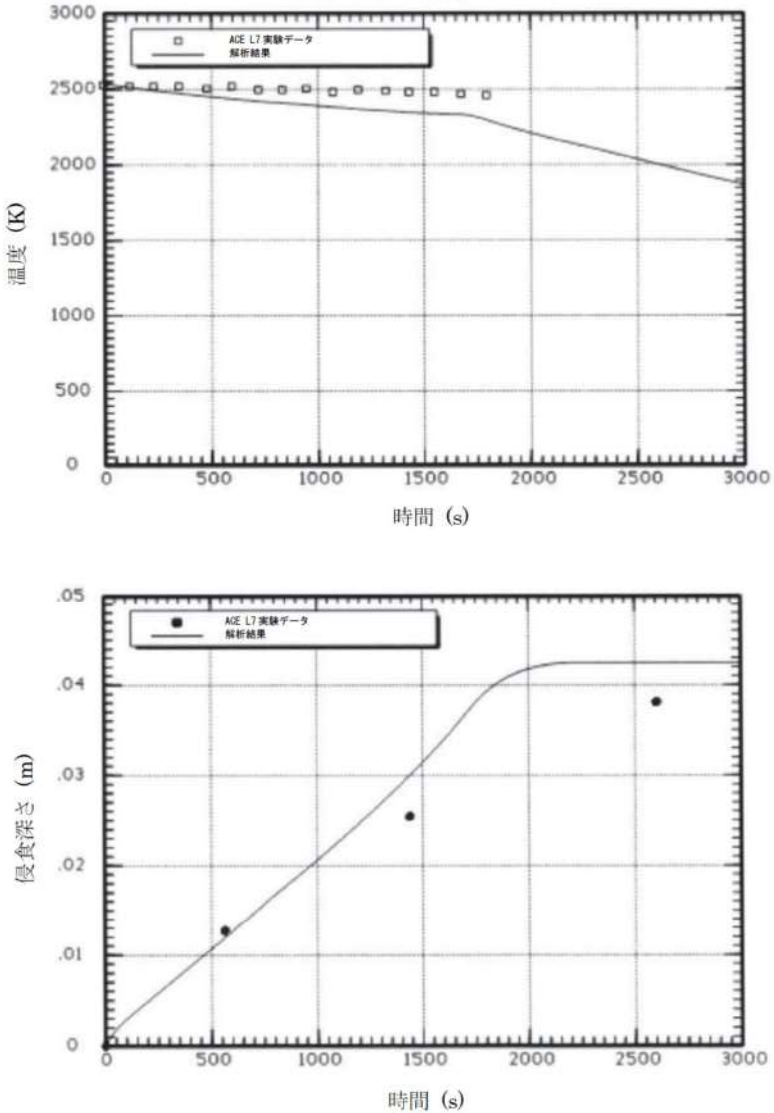
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>温度 (K)</p> <p>時間 (s) <math>\times 10^3</math></p> <p>ACE L6 実験データ 解析結果</p>	 <p>コリウム 溶融物 温度 (K)</p> <p>時間 (秒) <math>\times 10^3</math></p> <p>ACE実験データ (ケースL6) 解析結果</p>	
 <p>侵食深さ (m)</p> <p>時間 (s)</p> <p>ACE L6 実験データ (1400 K等温線)    ACE L6 実験データ (1523 K等温線)    ACE L6 実験データ (1673 K等温線)    解析結果</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	 <p>侵食深さ (m)</p> <p>時間 (秒)</p> <p>ACE実験データ (L6) 1400K等温線    ACE実験データ (L6) 1523K等温線    ACE実験データ (L6) 1673K等温線    解析結果</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	
<p>図 4.2-37 ACE 実験の解析結果 (L6 実験)</p>	<p>図 4.2-26 ACE 実験ベンチマーク解析結果 (ケース L6)</p> <p>コリウム溶融物：PWR コリウム溶融物（部分酸化、制御棒材質を含む）</p> <p>コンクリート：ケイ土系コンクリート</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（第3部 MAAPコード）

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="712 1326 1010 1345">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="412 1366 770 1385">図 4.2-38 ACE 実験の解析結果 (L7 実験)</p>		<p data-bbox="1977 172 2114 260">※BWR 特有の実験のため泊では記載していない</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.6 SURC-4 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>SURC-4 実験<sup>[14]</sup>は米国サンディア国立研究所で行われたMCCI実験であり、OECD/NEAの国際標準問題（ISP-24）にも選定されている。</p> <p>実験装置の概要を図4.2-39に示す。試験装置は、アルミニウム製格納容器とその内部に設置された円筒状のるつぼから構成される。るつぼの側壁及び蓋は厚さ約10cmのMgO製鋳造物であり、るつぼ全体の大きさは直径約60cm、高さ約100cmである。るつぼの下部には、厚さ約40cmの玄武岩系コンクリート床が設置され、コンクリートの侵食は内部に設置された熱電対により観測される。</p> <p>実験では、コンクリート侵食が開始するまで、約200kgのステンレス鋼と模擬FPから成るコリウムを約60kWの電気出力で誘導加熱し、それによるコンクリート侵食及びコリウム温度が測定されている。また、化学反応とガス放出への影響を調査するため、コンクリート侵食開始から約14分後に約20kgのジルコニウムをコリウムに投入している。最終的な侵食深さは約24.5～27.5cmであった。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>SURC-4 実験は、ACE実験と同様のモデルで模擬できることから、図4.2-35に示したモデルを用いている。</p> <p>解析ではコンクリートの侵食が開始した時間を零と定義し、その時点における各部の温度等を境界条件として与える。コリウムの初期温度は1,750Kであり、コンクリート床の初期温度は、コリウムとの界面ではコンクリート融点、底面では室温としている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>図4.2-40に侵食深さの解析結果を測定データと比較して示す。解析による侵食率は、測定データとの良好な一致を得ている。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、解析結果と相違が見られるが、これは、実験では外周部からの誘導加熱によって溶融物を加熱しているため、外周部への入熱量が大きくなる試験体系によるものと考えられる。</p>	<p>4.2.5 SURC 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>SURC (Sustained Urania-Concrete Interaction) 実験<sup>[18]</sup>はサンディア国立研究所で行われたMCCI実験の一つである。本実験は、コード比較のための国際標準問題（ISP-24）に選定されている。実験装置の概要を図4.2-27に示す。円筒状の反応るつぼがアルミ容器内に設置されている。アニュラス部とるつぼの蓋はMgOできている。反応るつぼの床は厚さ40cmの玄武岩系コンクリートであり、温度記録用の熱電対が設置されている。</p> <p>200kgのステンレス鋼と模擬FPがコンクリート侵食の開始まで加熱される。本実験では、観測されたコンクリート侵食深さは24.5～27.5cmである。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>解析モデルは、ACE実験と同様の体系で模擬できることから、図4.2-24に示したものをを用いている。</p> <p>ベンチマーク解析の初期状態としては、コンクリート侵食開始のタイミングを0秒として取り扱い、実験におけるその時点の状態（初期ガス温度等）を境界条件として与えている。0秒でのコリウム溶融物温度は、1,750Kである。コンクリート侵食開始時のベースマットの温度は、コリウム溶融物との界面はコンクリート融点とし、底面は室温とし、コンクリート内部は放物線状の温度分布としている。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>ベンチマーク解析の初期状態としては、コンクリート侵食開始のタイミングを0秒として取り扱い、実験におけるその時点の状態（初期ガス温度等）を境界条件として与えている。0秒でのコリウム溶融物温度は1,750Kである。コンクリート侵食開始時のベースマットの温度は実験から得られた準静的な温度プロファイルを基に、熱境界層において放物線を描くと想定し、その頂部（コリウム溶融物との接触面）はコンクリート融点、底部は環境温度と想定している。</p> <p>実験データとベンチマーク解析結果の比較を図4.2-28に示す。解析によるコンクリート侵食深さは実験データをよく再現できている。</p> <p>SURC-4 実験に対するベンチマーク解析の結果から、コンクリート侵食挙動に関するMAAPコードのMCCIモデルの妥当性を確認した。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>SURC-4 実験では、冷却水の注水がなく、かつコリウム及びコンクリートの配置が既知である。したがって、冷却水の熱水力的挙動や幾何形状の不確かさを最小化した条件においてコンクリート侵食挙動を確認することができ、溶融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさを評価する上で有効である。</p> <p>MAAP解析では、実験で観測されたコンクリート侵食速度を良く再現した結果となっており、MAAPによる解析で得られた侵食速度は、SURC-4 実験における測定データとの比較から妥当である。また、非凝縮性ガスの発生量については直接的な測定データとの比較をしていないものの、コンクリート侵食速度を問題なく予測できていることから一定の妥当性を有していると考えられる。したがって、MAAPは溶融炉心とコンクリートの伝熱及びコンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価に関わる重要現象として抽出された項目に対し、本ベンチマーク解析から考えられるMAAPコードの不確かさについて考察した。</p> <p>SURC 実験では、注水がなく、かつ、溶融炉心の堆積状態が既知であることから、注水による冷却や粒子ベッド形状といった他の要因の影響が小さい状態でのコンクリート侵食挙動が確認でき、「溶融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」の現象モデルの確認として有効である。</p> <p>ベンチマーク解析では、実験で観測されたコンクリート侵食速度をよく再現した結果となっている。SURC 実験ではステンレス鋼の模擬FPが使用されており、実機の材質と異なるが、熱的にも実機に近い条件となっている。溶融炉心からコンクリートへの熱移動は、基本的にクラスト内の熱伝導や溶融炉心に接するコンクリート内の熱伝導が主要な熱移動挙動になるため、下方向の侵食挙動に関しての不確かさは比較的小さいと考えられる。</p> <p>以上より、SURC 実験のような溶融炉心の形状が既知の場合に、MAAPコードのモデルにおいて実験で観測されたコンクリート侵食挙動を再現できることが確認された。</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）

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）

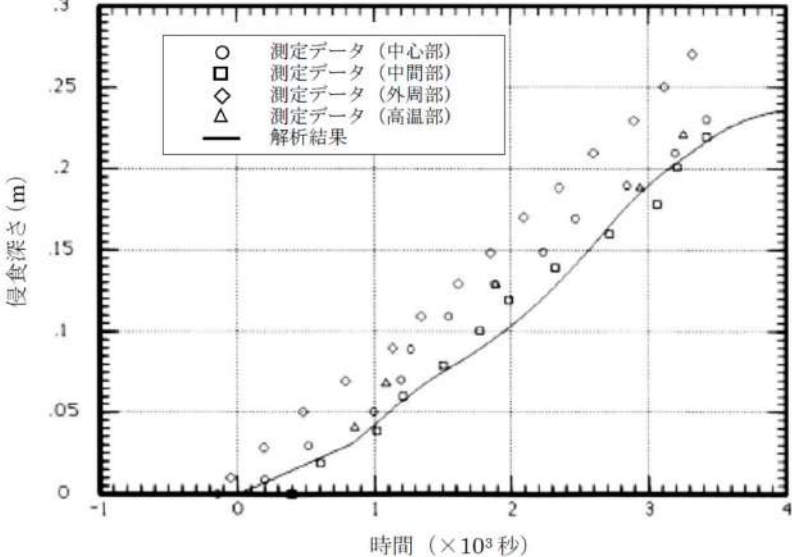
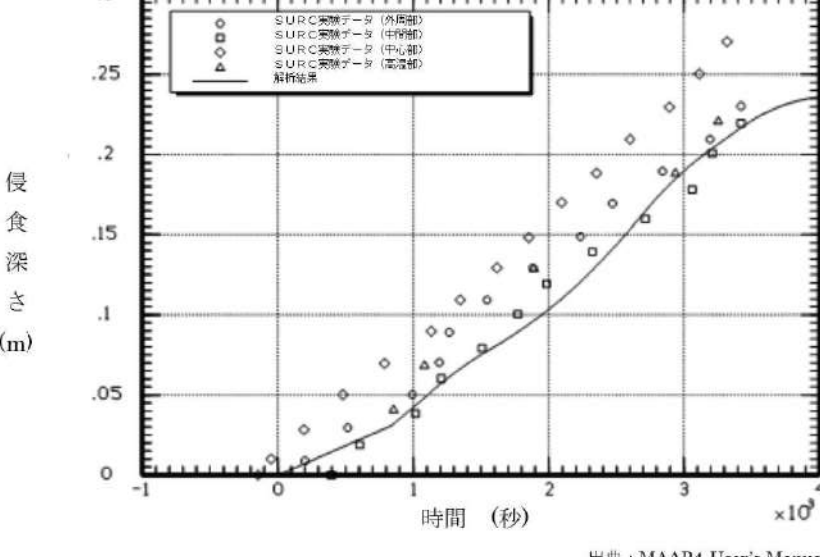
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-39 SURC-4 実験装置図</p>	<p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-27 SURC-4 実験装置図</p>	



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）

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：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-40 SURC-4 実験の解析結果</p>	 <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-28 SURC-4 実験の模擬解析結果</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>4.2.6 MB-2実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>MB-2 実験<sup>[19][20]</sup>は、PWRプラントの過渡時及び事故時の蒸気発生器2次側の応答を模擬した実験である。設備の概略を図4.2-29に示す。本実験設備は、ウェスチングハウスのモデルF型蒸気発生器の1/7スケールモデルで、幾何的かつ熱水力的には同等に設計されている。高さは14.625mで、内部構造物も模擬されている。52本のチューブが長方形にアレンジされ、F型モデルと同様、インコネル600製、外径17.5mm、厚さ1mmである。ダウンカマ下部は、F型蒸気発生器のダウンカマ下部アニュラスの断面積を模擬した独立した配管2本でモデル化されている。1次冷却系の熱供給システムは、ポンプ、制御弁、10MWガスヒータを備えた加圧水ループにより行っている。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>MAAPコードでは、蒸気発生器モデル（2領域分割モデル）により実験体系を模擬している（図3.3-5）。1次冷却系の流量や温度は境界条件として与えている。</p> <p>解析ケース及び解析条件は、次のとおりである。</p> <p><u>100%主蒸気管破断</u></p> <p>本ケースは、高温停止状態からの100%主蒸気管破断である。初期の蒸気発生器圧力は7.64MPa、1次冷却材圧力は14.48MPaである。1次冷却材高温側温度は293.2℃、初期ダウンカマ水位はチューブシートから11.24mである。初期の補助給水流量は0.118kg/sで、10秒後に停止させている。</p> <p><u>給水流量喪失解析</u></p> <p>このケースは、定格運転状態から給水流量が喪失し、原子炉トリップの10分後に補助給水を開始するケースである。</p> <p>初期状態は、蒸気発生器圧力が6.87MPa、1次冷却材圧力が13.79MPa、1次冷却材高温側温度が325℃、ダウンカマ水位は11.18mである。また、1次冷却材高温側温度は325℃で維持される。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>MB-2実験のベンチマーク解析結果について以下に述べる。</p> <p>a) 100%主蒸気管破断解析</p> <p>蒸気発生器圧力、破断流量、伝熱部コラプスト水位、1次冷却系から2次冷却系への伝熱量について、実験データと解析結果の比較を図4.2-30に示す。</p>	<p>※PWR固有の実験</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>蒸気発生器圧力は、全体的に実験データと一致しているが、実験では約50秒に伝熱管が露出して減圧するのに対して、MAAPコードではやや遅れる結果となっている。また、同様に、破断流量も50秒まではよく一致し、その後はMAAPコードが高めに推移している。</p> <p>初期の応答（～約50秒）に着目すると、実験データでは、蒸気ドームの二相水位が2.5秒後に蒸気発生器頂部に達することで液相放出が開始し、約30秒まで継続した後に蒸気放出へと移行するが、MAAPコードにおいても実験データと同等の応答が得られており、これは、MAAPコードの解析モデルが、伝熱部入口での逆流（伝熱部からダウンカマへの流れ）と、上部ドームでの二相水位膨張を考慮できているためである。33秒時点での放出質量は実験データが363kg（初期質量の約66%）であるのに対し、MAAPコードでは330kg（初期質量の約60%）となっており、よく一致した結果が得られている。</p> <p>その後の応答（約50秒～）については、蒸気発生器圧力及び破断流量は、MAAPコードの方が高めの推移となるが、この原因は、湿分離器がモデル化されていないために蒸気発生器出口のクオリティが、蒸気ドーム部の二相水位と蒸気発生器頂部のボイド率に依存するためである。即ち、前述の放出質量の差のために伝熱管の露出が遅れ、その結果として減圧も遅れることで、圧力が高くなり、約50秒以降の破断流量が多めに推移している。</p> <p>伝熱部のコラプスト水位及び1次冷却系から2次冷却系への伝熱量は、全体的にMAAPコードの方が高めに推移しているが、実験結果の特徴をよく捉えている。</p> <p>b) 給水流量喪失解析</p> <p>蒸気発生器圧力、1次冷却材低温側配管温度、ダウンカマ水位、伝熱部コラプスト水位についての実験データと解析結果の比較を、図4.2-31に示す。</p> <p>蒸気発生器圧力は、実験データの特徴を捉えた応答であるが、やや低めに推移する傾向がある。1次冷却材低温側温度は、実験結果とよく一致している。ダウンカマ水位は、実験データとよく一致している。また、伝熱部コラプスト水位は、実験データの特徴を捉えているものの、高めに推移している。これは、伝熱部でのボイド率を線形分布と仮定しているためである。ダウンカマ水位と伝熱部コラプスト水位の応答は、両者の質量や流動圧力損失が釣り合った結果であり、実験結果の応答の特徴をよく捉えた推移となっていることから、事故条件下の蒸気発生器の応答を適切に模擬できている。</p> <p>(4) 不確かさの整理</p> <p>以上の結果より、MB-2 実験結果に対するMAAPコードによる解析結果は、実験結果の応答の特徴を捉え、よく模擬できていると判断できる。これは、シンプルな蒸気発生器の領域分割と内部再循環やボイド率計算モデルが、これらの事故条件下の蒸気発生器の応答を適切に模擬できることを示している。</p> <p>有効性評価において、MAAPコードをLOCA及び全交流動力電源喪失に適用するが、LOCA時には1次冷却系保有水量が早期に減少し、1次冷却系と2次冷却系の伝熱量の事象進展に与える影響は小さいことから、全交流動力電源喪失に関して考察する。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>全交流動力電源喪失が発生し、補助給水に失敗する場合は、1次側からの伝熱により2次側が昇温及び昇圧される状態であり、MB-2実験の給水流量喪失のケースから考察する。図4.2-31(1/2)に蒸気発生器圧力と1次冷却材低温側温度の比較を示している。1次冷却材低温側温度は、1次冷却系と2次冷却系の伝熱による1次側への影響が現れたものであり、実験データとほぼ一致した挙動である。また、蒸気発生器圧力は、1次冷却系と2次冷却系の伝熱による2次側への影響が現れたものであり、実験データと0.2MPaの範囲で一致する挙動となっている。また、1次冷却系と2次冷却系の伝熱において、蒸気発生器2次側水位も影響する要因であり、図4.2-31(2/2)のダウンカマ水位、伝熱部コラプスト水位とともに、実験データよりわずかに高めに推移するものの、概ね一致した挙動である。</p> <p>以上より、「1次冷却系・2次冷却系の熱伝達」については、MAAPコードの蒸気発生器2次側モデルによる計算結果の有する不確かさは小さいと言える。</p> <p>一方、全交流動力電源喪失において2次側が昇温及び昇圧した場合、2次冷却系からの冷却材放出が発生するが、これについては、MB-2実験の100%主蒸気管破断のケースから考察する。図4.2-30(1/2)に示すように、主蒸気管破断とともに蒸気発生器圧力は低下しており、蒸気ドームの二相水位が早期に蒸気発生器頂部に達するために、液相も放出されている。破断流量は、概ね実験データと一致する結果が得られているが、液相放出質量としては、実験データよりやや高めに推移する傾向があり、この結果、図4.2-30(2/2)に示すように、初期のコラプスト水位がやや低めに、伝熱量が高めに推移する結果となっている。これは、前述のとおり、湿分離器がモデル化されていないために蒸気発生器出口のクオリティが、蒸気ドーム部の二相水位と蒸気発生器頂部のボイド率に依存するためである。</p> <p>以上より、「冷却材放出」については、放出質量自体はほぼ適正に評価できるが、液相放出については過大に評価するため、その結果、「1次冷却系・2次冷却系の熱伝達」についても過大に評価する可能性がある。</p> <p>また、上記より、「2次側水位変化・ドライアウト」については、ダウンカマ水位、伝熱部コラプスト水位、ともにほぼ適正に評価できるが、液相放出時には低めに評価する可能性がある。</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）

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）

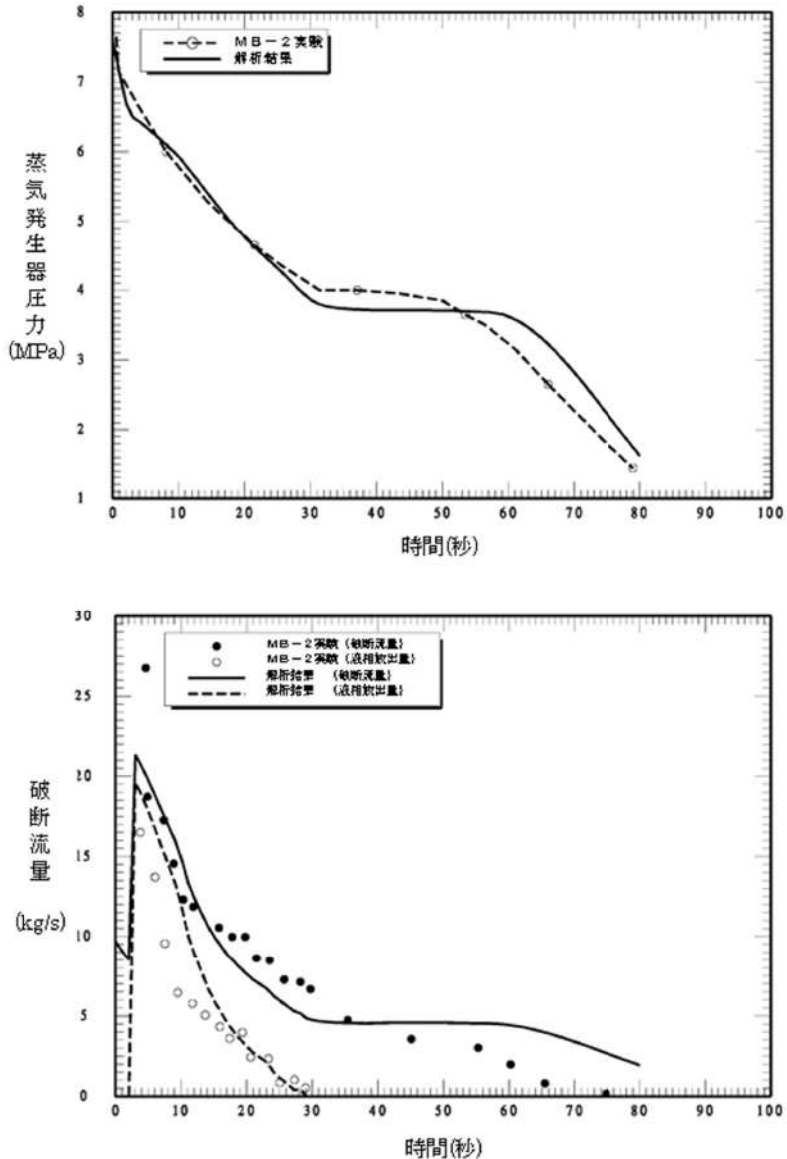
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>The figure contains two vertically stacked line graphs. The top graph plots '蒸気発生器圧力 (MPa)' (Steam generator pressure in MPa) on the y-axis (ranging from 1 to 8) against '時間(秒)' (Time in seconds) on the x-axis (ranging from 0 to 100). It compares 'MB-2実験' (MB-2 experiment, dashed line with open circles) and '解析結果' (Analysis result, solid line). Both curves start at approximately 7.5 MPa at 0 seconds and decrease to about 1.5 MPa at 80 seconds. The bottom graph plots '破断流量 (kg/s)' (Rupture flow rate in kg/s) on the y-axis (ranging from 0 to 30) against '時間(秒)' (Time in seconds) on the x-axis (ranging from 0 to 100). It compares 'MB-2実験 (破断流量)' (MB-2 experiment rupture flow rate, solid line with solid circles) and '解析結果 (破断流量)' (Analysis result rupture flow rate, dashed line with open circles). Both curves start at approximately 27 kg/s at 0 seconds and decrease to about 2 kg/s at 80 seconds. A legend in the bottom graph also includes 'MB-2実験 (液相放出量)' (MB-2 experiment liquid phase release amount, solid line with solid circles) and '解析結果 (液相放出量)' (Analysis result liquid phase release amount, dashed line with open circles).</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p>	

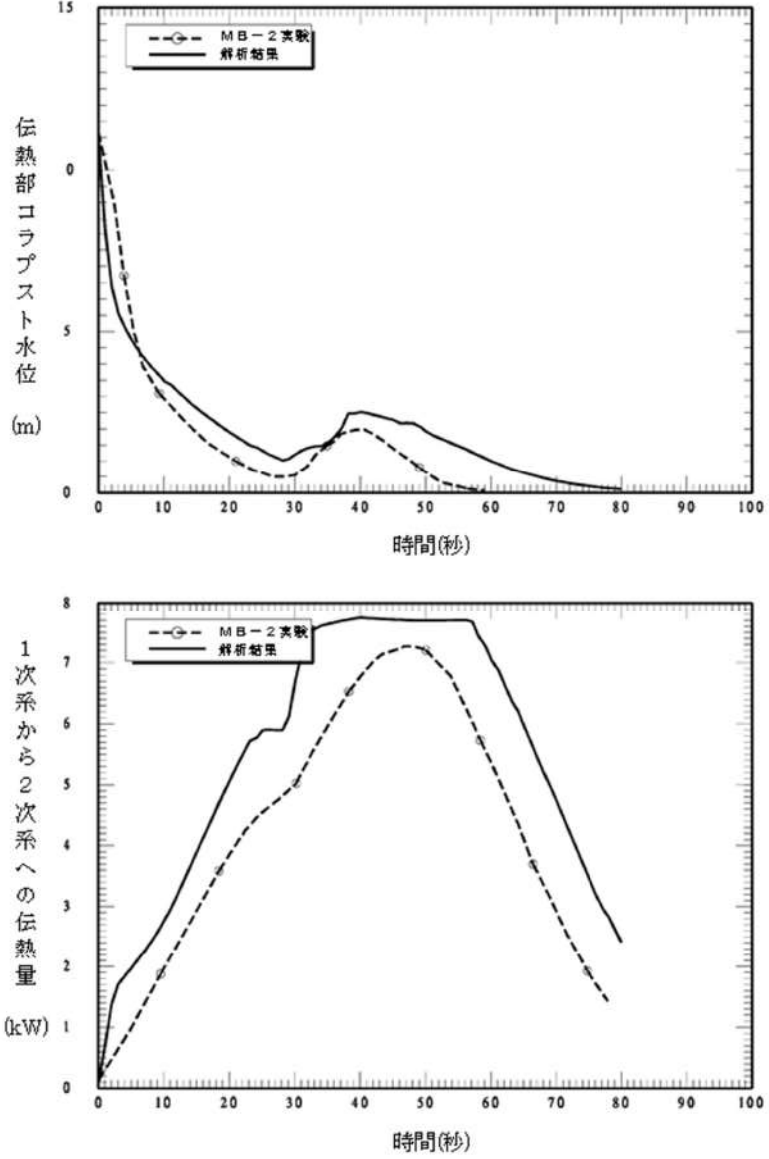
図 4.2-30 MB-2 実験ベンチマーク解析結果（100%主蒸気管破断）（1/2）



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

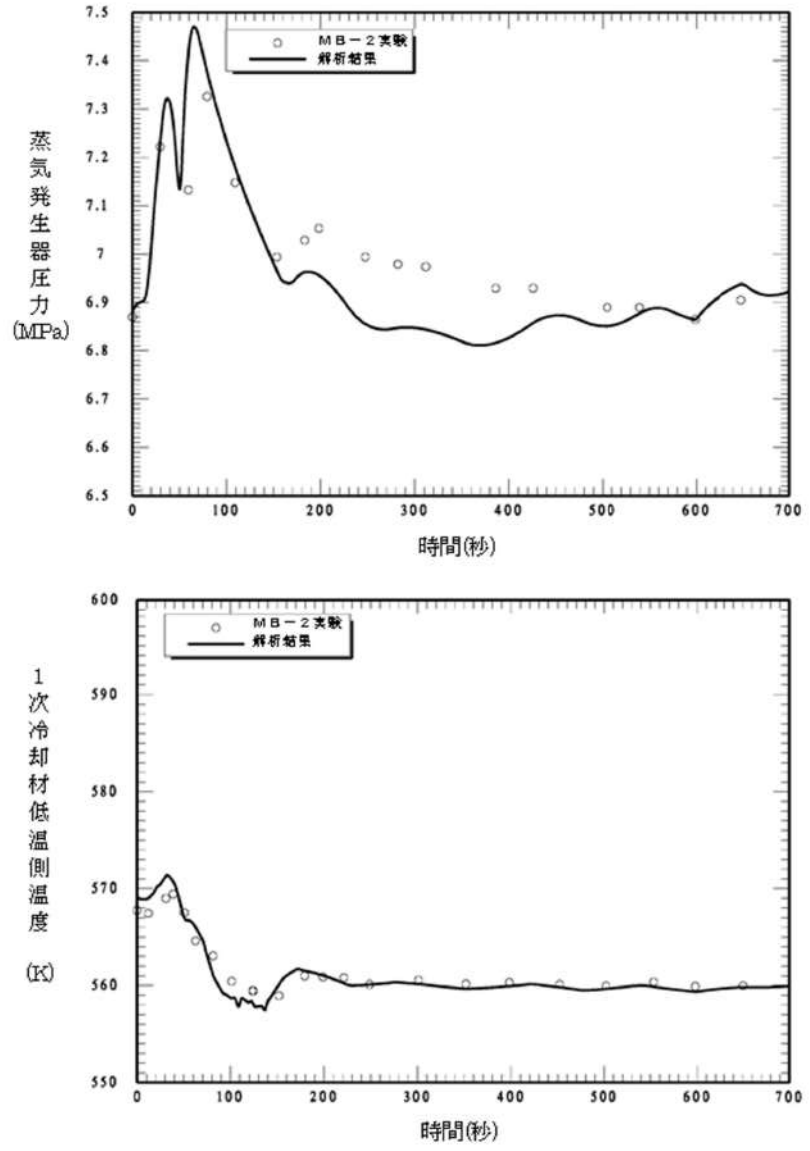
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>伝熱部コラプスト水位 (m)</p> <p>時間(秒)</p> <p>1次系から2次系への伝熱量 (kW)</p> <p>時間(秒)</p> <p>MB-2実験 解析結果</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-30 MB-2 実験ベンチマーク解析結果（100%主蒸気管破断）（2/2）</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

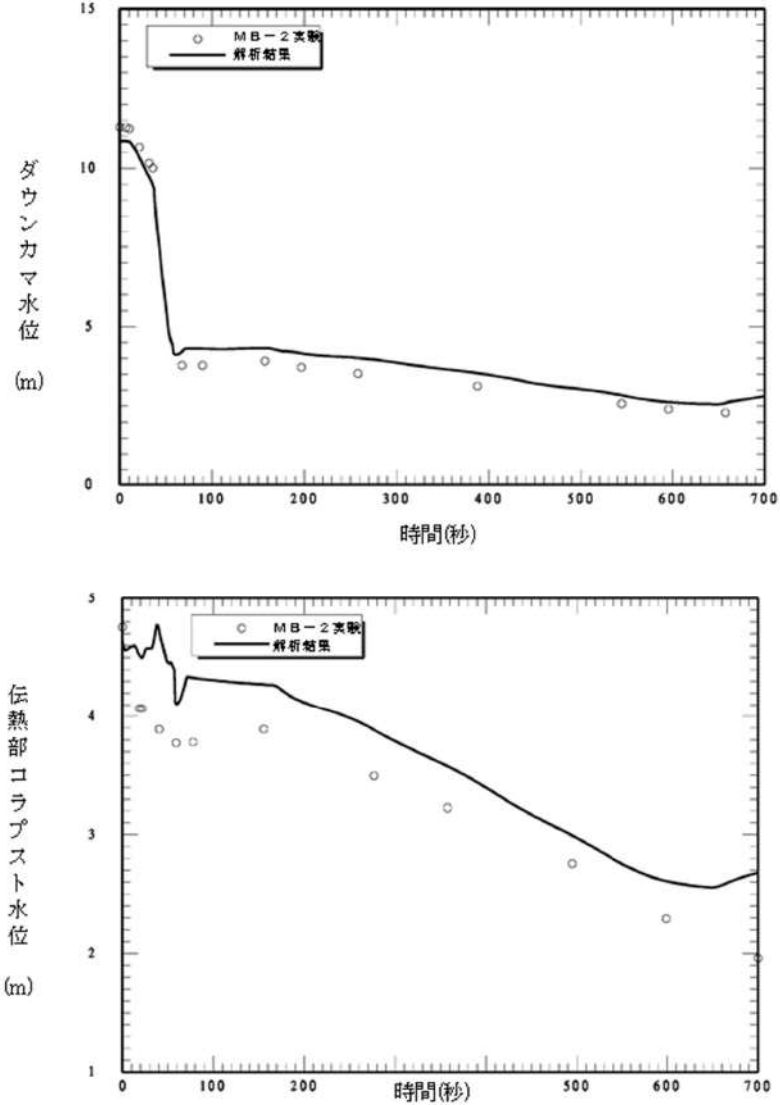
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>蒸気発生器圧力 (MPa)</p> <p>時間(秒)</p> <p>1次冷却材低温側温度 (°C)</p> <p>時間(秒)</p> <p>出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p>図 4.2-31 MB-2 実験ベンチマーク解析結果（給水流量喪失）（1/2）</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>ダウンカマ水位 (m)</p> <p>伝熱部コラプスト水位 (m)</p> <p>時間(秒)</p> <p>時間(秒)</p> <p>MB-2実験</p> <p>解析結果</p>	

出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図4.2-31 MB-2実験ベンチマーク解析結果（給水流量喪失）(2/2)



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.7 PHEBUS-FP 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>PHEBUS-FP 計画<sup>[19][20]</sup>は、フランス放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）、フランス電力及びEUを中核とする国際協力プログラムであり、燃料から放出されるFPの種類、量、1次系及び原子炉格納容器内への移行と除去挙動に関する知見を取得し、シビアアクシデント解析コードの改良及び検証に資することを目的として実施されている。</p> <p>PHEBUS-FP 計画は、FPT0、1、2、3及び4の計5つの実験から構成されており、各実験では実燃料（酸化ウラン燃料）を炉心内で溶解させ、放出されるFP等の挙動を調査している。FPT0 実験は未照射燃料を対象とし、FPT4 実験は燃料デブリを対象としていること、FPT2 実験及びFPT3 実験はいずれも水蒸気枯渇状態で実施されていることを考慮し、ここでは水蒸気雰囲気下で照射済燃料を対象に実施されたFPT1 実験を取り上げる。なお、同実験は、OECD/NEAの国際標準問題（ISP-46）にも選定されている。</p> <p>図4.2-41には実験設備の概要を示すが、装置は大きく3領域に分かれており、それぞれ炉心、1次系及び原子炉格納容器を模擬している。炉心には長さ約1mの実燃料20本と制御棒で構成される試験体が設置され、中性子束によって加熱される。炉心部には図4.2-42に示す軸方向位置に熱電対が配置されており、温度が測定される。また、放出されたFPは燃料を取り囲むシュラウド内に試験体下部より供給される水蒸気によって上部垂直ラインに導かれる。FPT1 実験における水蒸気流量及び炉心の加熱出力を図4.2-43に示す。</p> <p>1次系はホットレグ及びコールドレグを模擬する内径3cm、長さ約13.3mの水平配管と、SG伝熱管を模擬する内径約2cm、長さ約10mのU字管で構成される。</p> <p>模擬格納容器は約10m<sup>3</sup>の容積を有しており、内部に備えられたコンデンサは、実機の格納容器壁面における水蒸気の凝縮及びエアロゾルの沈着を模擬するように、雰囲気温度より低い温度に設定されている。また、下部にはエアロゾルを含んだ洗浄水を溜めるサンプルが設けられている。</p>	<p>4.2.7 PHEBUS-FP (FPT1) 実験解析</p> <p>MAAPコードのFP挙動モデルに関し、燃料から1次冷却系へ放出されるFP挙動について、PHEBUS-FP 実験に対するベンチマーク<sup>[21]</sup>によって妥当性を確認する。</p> <p>PHEBUS-FP 計画<sup>[22][23]</sup>は、放射線防護・原子力安全研究所（IRSN、フランス）、フランス電力及びEUを中核とする国際協力プログラムで、シビアアクシデント条件下での炉心燃料から1次冷却系を経て原子炉格納容器に至るまでのFP挙動を調査した総合試験である。PHEBUS-FP 計画では、FPT0、1、2、3及び4の計5実験から構成されており、それぞれの実験ごとに実燃料（酸化ウラン燃料）を用いている。FPT0 試験は未照射燃料が対象、FPT4 試験は溶解炉心が対象である試験であること、FPT2 及び3 試験は水蒸気枯渇状態が対象であることから、ここでは、使用済燃料を対象にし、水蒸気雰囲気下で実施されたFPT1 実験を対象とする。なお、FPT1 実験は、OECD/NEAの国際標準問題（ISP-46）にも取り上げられている。</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>PHEBUS-FP (FPT1) の実験体系は、炉心、1次冷却系及び原子炉格納容器を模擬したものである。実験設備の概要を図4.2-32に示す。実験設備は、炉心部、1次冷却系及び模擬格納容器を模擬した3領域からなる。本試験では原子炉容器の破損は模擬されていないので、LOCA破断口（低温側配管）が原子炉格納容器へのFP放出パスとなる。</p> <p>試料は約1mの長さの実燃料（20本、10kg）と制御棒材から構成される。炉心の高さ方向に対する温度測定のため図4.2-33に示されるように熱電対が配置されている。炉心下部からは水蒸気が供給されることができる。</p> <p>1次冷却系は高温側配管、低温側配管及び蒸気発生器伝熱管を模擬した配管より構成される。高温側配管及び低温側配管は内径3cm、長さ約13.3mであり、蒸気発生器伝熱管は内径2cm、長さ約10mである。模擬格納容器は体積10m<sup>3</sup>を有する。</p> <p>実験ケース FPT1 における水蒸気流量及び炉心の加熱出力を図4.2-37に示す。このケースを用いてMAAPコードのFP挙動モデルの妥当性確認を実施している。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ける燃料被覆管温度の急上昇は、ジルコニウム酸化反応による発熱が原因と考えられる。燃料被覆管温度及び水素ガス発生量はピークを過ぎるとすぐに減少する。これは、熔融燃料のキャンドリングが開始することで燃料被覆管と水蒸気の接触面積が減少し、酸化反応も減少したためと推測される。高さ300mmの場合に、約1,500℃に到達した時点で急激な温度上昇が発生していないことも、上部からのキャンドリングにより酸化反応が顕著にならなかったものと推測される。ジルコニウム酸化反応の進展により燃料被覆管外面には酸化ジルコニウム層が形成されるが、燃料被覆管内面の金属部は1,800℃程度で熔融するため、それ以上の温度になると酸化ジルコニウム層のみで燃料棒としての形状を維持することになる。約2,200℃を超えると熔融した燃料被覆管による二酸化ウランの溶解現象が進み、燃料被覆管内部は溶解物割合が高まる。そのような状況では酸化ジルコニウム層では燃料被覆管形状を維持できずに破損し、溶解物が流下することになると考えられている。同時に上部に残っていた燃料も落下すると考えられている。図4.2-52には水素ガス発生量の積算値を示しているが、最終的に発生した水素ガス量は96±13gと推定されており、これは初期ジルカロイの64%が酸化したことに相当する。</p> <p>図4.2-53及び図4.2-54には、一次系及び原子炉格納容器内に放出された希ガス及びよう素の割合を示す。オンライン計測によると、実験開始後約6,000秒には燃料被覆管破損にともなう少量のFP放出が確認されているが、希ガス及びよう素の放出が顕著になるのは、ジルコニウム酸化反応にともなう発熱により燃料温度が急上昇する実験開始後約11,000秒である。その後、燃料温度は高温を維持するため、希ガス及びよう素の放出は継続されるが、実験開始後約17,000秒で加熱がなくなると、積算放出割合はほぼ一定となる。図4.2-55に実験結果の分析から得られたよう素の回路内マスバランスを示す。よう素のバンドル内残存割合は約13%であり、したがって最終的にはバンドル外へ約87%が放出された。一方、1次系（コールドレグ）内質量流量の測定値からは、1次系を通過して原子炉格納容器内に放出された希ガスの割合は約77%となるが、PHEBUS-FPT1実験最終報告書<sup>[20]</sup>においては、燃料の損傷度合いやよう素等の揮発性核種の放出量との比較結果から、この値はやや過小評価であり、実際はよう素と同等の80～85%程度であったと推定されている。</p>	<p>燃料被覆管温度及び水素発生量がピークを過ぎるとすぐに減少して、急上昇する以前と同程度に戻る。これは、熔融燃料のキャンドリングが開始することで燃料被覆管と水蒸気の接触面積が低下し、酸化反応も減少したためと推測される。高さ300mmの場合に、1,500℃に到達した時点で急激な温度上昇が発生していないことも、上部からのキャンドリングにより酸化反応が顕著にならなかったものと推測される。つまり、ジルコニウム-水反応の進展により燃料被覆管外面には酸化ジルカロイ層が形成されるが、燃料被覆管内面の金属ジルカロイは1,800℃程度で熔融するため、それ以上の温度になると酸化ジルカロイ層のみで燃料棒としての形状を維持することになる。約2,200℃を超えると熔融ジルカロイによる二酸化ウランの溶解現象が進み、燃料被覆管内部は溶解物割合が高まる。そのような状況では酸化ジルカロイ層では燃料被覆管形状を維持できずに破損し、溶解物が流下することになると考えられている。同時に上部に残っていた燃料も落下すると考えられている。主要な酸化反応の時間幅は約1,000秒であり、水素発生量の総量から初期ジルカロイの約64%が酸化したと推定されている。</p> <p>一方、FPガスの発生に関し、図4.2-42及び図4.2-43に希ガス及びよう素の挙動を示す。燃料被覆管は約6,000秒、約850℃で破損しており、ギャップ中のFPの放出が始まり、その後、約11,000秒でジルコニウム酸化反応熱により燃料温度も急上昇すると、希ガス及びよう素の放出量が大きく上昇を始める。これは、約11,000秒でジルコニウム酸化反応熱により燃料温度も急上昇し、燃料ペレットからの希ガスや高揮発性FPの放出が急増したことを示す。その後も、希ガス及びよう素共に概ねバンドル過熱履歴との相関をもった形で放出を継続するが、約17,000秒で加熱が無くなると、燃料被覆管温度は急激に低下し、FP放出はほとんど停止する。希ガス及びよう素の放出割合は放出開始時に共に0.08程度、総放出量は0.8前後となっている。希ガスとよう素の最終的な放出割合には若干の差が生じている点については、次に述べる理由による。図4.2-47に実験結果の分析から整理されたよう素の回路内質量バランスを示す。1次冷却系への放出割合は試験前のよう素量から、試験後の燃料中よう素の残存量を差し引くことで求めている。γスペクトロメトリを用い、燃料に残存したよう素からの放射線を測定することでその量を評価する手法が採られており、燃料中よう素の残存量は13±4%と評価されている。したがって、燃料から放出されたよう素は87±4%と評価されている。γスペクトロメトリの結果からは、残存部分は燃料の損傷がない燃料バンドル下部に多く存在する。一方、希ガスは、模擬格納容器に設置されたサンプリング装置により収集した量から約77.4%と評価されているが、PHEBUS-FPT1実験最終報告書<sup>[20]</sup>においては、燃料の損傷度合いやよう素等の揮発性核種の放出量との比較結果から、やや過小評価であり、実際はよう素と同等の80～85%程度であったと推定されている。</p> <p>このように、燃料からのFP放出過程としては、ギャップ放出（約6,000秒～）、燃料破損後（約11,000秒～）の2段階に分けることができるが、FP放出の大部分は後者で起こり、かつ、燃料破損の進展とともに上昇する。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>B) 解析結果の考察</p> <p>燃料被覆管温度の解析結果を図4.2-47、図4.2-48、図4.2-49及び図4.2-50に示すが、炉心の加熱出力が増加する実験開始後約8,000秒まで、解析結果と測定データは良く一致している。その後、解析結果は測定データをやや上回る傾向を示しており、急上昇が生じる時刻は測定データに比べて500秒程度早くなっている。図4.2-51には水素ガス流量の解析結果を示しているが、実験開始後約8,000秒から水素ガス流量はやや大きく予測されており、このためジルコニウム-水反応による発熱量が実験に比べて大きくなったと考えられる。この結果は、燃料被覆管温度の解析結果が測定データを上回り、また燃料被覆管温度の急上昇を早く予測した結果と整合する。図4.2-52には、積算水素ガス量を示すが、最終的な水素ガス発生量の解析結果は測定データに比べて3割程度多くなっている。</p> <p>MAAPの解析では燃料被覆管温度が約1,600℃以上でBaker-Justモデル、それより低温ではCathcartモデルを使用しているが、燃料被覆管温度が1,500℃程度から急上昇した後の挙動は実験と解析ともに同程度であることから、Cathcartモデルによる酸化速度が大きめの傾向を持つことが考えられる。解析結果と測定データの差異については、実験体系のモデル化が要因の一つと考えられる。すなわち、図4.2-44に示すとおり実験のバンドル形状は5×5配列であり、燃料棒間及び外周構造体との放射熱伝達や、水蒸気による対流熱伝達による影響を考慮すると、半径方向には比較的大きな温度分布が生じると考えられる。実際に図4.2-56に示す実験後の燃料バンドルのX線トモグラフィでは、半径方向にかなり強い非均質性が見られている。一方、解析においては、バンドルを内側12本、外側8本の2領域で模擬しているため、半径方向の温度分布が実験に比べて均質化されることにより、燃料被覆管温度の予測性に影響を与えている可能性がある。</p> <p>約11,000秒付近の燃料被覆管温度のピーク値については、解析結果が実験結果より数十℃高めになっている。また、高さ300mmの場合は実験に見られない急上昇が見られる。これはキャンディング開始タイミングに関係している。キャンディング開始タイミングは、燃料棒内で溶解した被覆管による二酸化ウランの溶解速度と、酸化ジルコニウム層による形状維持の限界タイミングに依存しており、後者の酸化ジルコニウム層の破損は振動や流れによる外力の影響が大きい。解析では2,500K（約2,227℃）にて溶解ジルコイによる二酸化ウランの溶解が開始するとともに酸化ジルコニウム層の破損によるキャンディング開始をモデル化している。この温度が実験での観察結果より若干高い設定となっており、キャンディング開始タイミングが遅れたため、キャンディングによって酸化反応が阻害されていないことになるが、二酸化ウランの融点（約2,800℃）より低い温度で液化するという観点からは妥当であるといえる。</p> <p>図4.2-53及び図4.2-54にFP積算放出割合の解析結果を示す。FP放出が開始される時間は、解析結果と測定データで良く一致している。これは、燃料被覆管破損が生じる実験開始後約6,000秒まで、燃料被覆管温度を良く再現できていることから妥当な結果と考</p>	<p>B) 解析結果の考察</p> <p>次に実験と解析結果の比較について考察する。</p> <p>燃料被覆管温度挙動（図4.2-38～図4.2-41）については、燃料被覆管破損時（約6,000秒）の温度は実験結果と同等であり、ギャップ放出の時期については、よく模擬できている。11,000秒近傍でジルコニウム-水反応により温度は急上昇し1,500℃を超える時刻は解析が実験より500秒程度早くなっている。これは水素流量が急増するタイミングの違いと強い相関があるので、解析ではジルコニウム-水反応の増加挙動を大きめに評価し、その結果生じる反応熱でバンドル外周部の燃料被覆管の温度上昇も速くなったと考えられる。図4.2-45に水素積算量を示すように、解析の方が3割程度、水素発生量が大きくなっていることから、ジルコニウム-水反応による酸化反応熱を大きめに評価している結果となっている。</p> <p>MAAPコードの解析では燃料被覆管温度が1,580℃以上でBaker-Justモデル、それ以下でCathcartモデルを使用しているが、燃料被覆管温度が1,500℃程度から急上昇した後の挙動は実験と解析ともに同程度であることから、1,500℃以下で使用しているCathcartモデルによる酸化速度が大きめの傾向を持つことが考えられる。しかし、燃料被覆管温度は燃料棒間あるいは外周構造材との放射熱伝達や、蒸気流との熱伝達によっても影響を受けていると考えられる。即ち、実験のバンドル形状は5×5配列で四隅は温度計若しくは流路となっているのに対して、解析では内側12本、外側8本を2チャンネルで模擬したドーナツ状の体系となっているため、解析ではバンドル内の半径方向温度分布をかなり平均化した扱いとなるために、伝熱流動の観点から要因となりうる。実験後のX線トモグラフィによると、バンドル内部では半径方向にも軸方向にも複雑に損傷しており、2チャンネルでモデル化しきれない様子は示していない。</p> <p>約11,000秒付近の燃料被覆管温度のピーク値については、解析結果が実験結果より数十℃高めになっている。また、高さ300mmの場合は実験に見られない急上昇が見られる。これはキャンディング開始タイミングに関係している。キャンディング開始タイミングは、燃料棒内で溶解ジルコイによる二酸化ウランの溶解速度と、二酸化ジルコイによる形状維持の限界タイミングに依存しており、後者の二酸化ジルコイ層の破損は振動や流れによる外力の影響が大きい。解析では2,500K（2,227℃）にて溶解ジルコイによる二酸化ウランの溶解が開始するとともに二酸化ジルコイ層の破損によるキャンディング開始をモデル化している。この温度が実験での観察結果より若干高い設定になっていることになるが、二酸化ウランの融点（2,800℃程度）より低い温度で液化するという観点で模擬性は高いといえる。</p> <p>FP挙動については、実験結果ではほぼ一定の割合で放出割合が増大しているが、解析結果では放出開始時に希ガス及びヨウ素とともに急速に約0.5まで放出されており、実験に比べて上昇の幅が大きい。それ以降は逆に実験よりも低い速度で模擬格納容器に放出される。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>えられる。一方、FP放出が顕著になる実験開始後約11,000秒以降は、測定データが時間とともに一定の割合で増加するのに対し、解析結果は約0.5まで急激に増加した後、緩やかな増加を示す。この原因は、解析において燃料温度が測定データに比べて高く予測され、FPの放出が促進されたためと考えられる。</p> <p>実験終了時の積算放出割合については、解析結果は実験と同程度の0.8前後となっているが、図4.2-53に示した希ガスの積算放出割合については、解析結果が実験結果を若干上回っている。図4.2-54に示したよう素の積算放出割合については解析結果が実験結果を若干下回っている。MAAPの解析においては、径方向を2チャンネル、軸方向を11ノードに分割した各セルでは温度や熔融状況は均一であり、温度分布及び質量移行による空洞化部分は左右対称となる。一方で、実験後の燃料のX線トモグラフ（図4.2-56）では、温度分布及び空洞化部分は左右非対称である。MAAPの炉心モデルは、1つのチャンネルに多数の燃料棒を含んだ実機の体系を対象としており、本実験のように個々の燃料棒の形態が影響する場合には輻射熱伝達の計算等に誤差が生じやすく、放出割合に若干の差が生じたと推定される。</p> <p>PHEBUS-FP実験では、実機の炉心と比較すると小規模な体系を扱っているため、解析における炉心のチャンネル分割方法が結果に影響を及ぼしたと考えられる。</p> <p>(4) 重要現象に関する不確かさの評価</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>PHEBUS-FP実験においては、燃料バンドルの加熱にともなう燃料被覆管温度の上昇、ジルコニウム酸化反応による燃料被覆管温度の急上昇及び炉心熔融といった事象進展の中で、FP放出の挙動が確認されている。</p>	<p>この理由として、解析では、放出開始時の水素流量が実験に比べて大幅に高くなっていることから、直接的な原因としてはジルコニウム-水反応による燃料温度上昇が急激に起き、それにより燃料からの揮発性FPの放出が促進されたと考えられる。実験では現象に非均質性や不等方性が起きていることが考えられ、それらばらつきが全体でみれば連続的な変化として表れているのに対して、解析ではバンドルを径方向2ノードで模擬しているため、チャンネル単位で現象が変化する。そのため、実験での非均質性や不等方性を有する変化に比べて、解析では初期の放出量を多めに評価する結果となっていると考えられる。</p> <p>実験終了時の放出割合については、解析結果は実験と同程度の0.8前後となっているが、図4.2-42に示した希ガス放出割合の実験結果及び解析結果の比較については、実験に対し若干上回り、図4.2-43に示したよう素放出割合の実験結果及び解析結果の比較については実験に対し若干下回っている。MAAPコードの解析においては、径方向を2チャンネル、軸方向を11ノードに分割しモデル化している（図4.2-34参照）。各セルでは温度や熔融状況は均一であり、温度分布及び質量移行による空洞化部分は左右対称となる。一方で、実験後の燃料のX線トモグラフを図4.2-46に示す。図中で黒い部分は熔融により質量が移行し空洞化した部分であり、下部に密度が高い部分があり、熔融した燃料が移行していることを示している。このように、実験では温度分布及び空洞化部分は左右非対称であり、解析でこれを厳密に再現することは困難である。即ち、MAAPコードの炉心モデルは、1つのチャンネルに多数の燃料棒を含んだ実機の体系を対象としており、本実験のように個々の燃料棒の形態が影響する場合には輻射熱伝達の計算などに誤差が生じやすく、放出割合に若干の差が生じたと推定している。</p> <p>PHEBUS-FP実験では、実機の炉心と比較すると小規模な体系を扱っているため、解析における炉心のチャンネル分割方法が結果に及ぼす影響も大きく表れると考えられる。</p> <p>(4) 不確かさの整理</p> <p>PHEBUS-FP実験に対するMAAPコードによる実験解析をベースにMAAPコードのFP挙動関連モデルの妥当性を検討した。</p> <p>PHEBUS-FP実験においては、燃料バンドルの過熱に伴う燃料被覆管温度の上昇、燃料被覆管破損に伴うギャップ放出、ジルコニウム-水反応に伴う水素生成及び酸化反応熱による過熱、並びに、炉心熔融が進展する過程で大規模なFP放出の各フェーズでの挙動が確認されている。これに対し、PHEBUS-FP実験に対するMAAPコードによるベンチマーク解析では、各パラメータの変化に実験との差が生じているものの、各フェーズで観測された現象について、ある程度の模擬ができています。</p> <p>実験と解析の結果を比較すると、ギャップ放出のタイミングについては適切に評価されるが、その後の燃料被覆管酸化反応熱を大きめに評価し、燃料被覆管温度が高めに推移し、燃料破損後のFP放出開始のタイミングも早く評価する結果となっている。燃料からのFP放出割合では、最終的な放出割合について実験と同程度となっているものの、燃料被覆管温度を高め</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>F P放出割合の解析結果と測定データの比較から、F P放出の開始時間を良く再現できることを確認している。</p> <p>解析結果と測定データの差異については、実験体系のモデル化が要因の一つと考えられる。PHEBUS-FP 実験では、実機の炉心に比較して小規模な体系を扱っており、個々の燃料棒の形態が大きく影響するが、実機体系では、局所的な挙動による影響は相対的に小さくなるため、この種の不確かさは小さくなると考えられる。</p> <p>以上のことから、MAAPによる解析で得られたF P放出割合は、PHEBUS-FP 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAPは原子炉压力容器内F P挙動及び原子炉格納容器内F P挙動に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p>に評価し、放出の時間変化に相違がある。これらは、小規模な炉心体系の模擬性に起因していると考えられる。</p> <p>上述の小規模な炉心体系の模擬性については、1つのチャンネルに多数の燃料棒を含んだ実機体系とは異なり、PHEBUS-FP 実験のような小規模な体系の場合、本実験のように個々の燃料棒の形態が影響する。即ち、連続的な物理現象を不連続な解析モデルに分割する場合において、体系の大きさによってはモデル化方法が結果に及ぼす影響が大きくなると推測できる。なお、実機スケールでは、ノード分割数が多く、連続的な挙動に近づくため、この種の不確かさは小さくなると考えられる。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉

泊発電所3号炉

相違理由

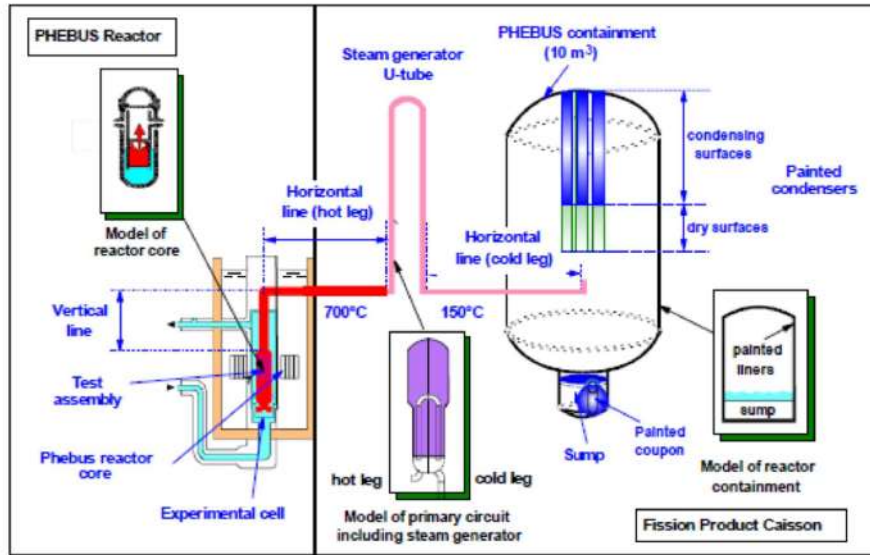


図 4.2-41 PHEBUS-PP 実験 (FPT1) における設備概要<sup>[21]</sup>

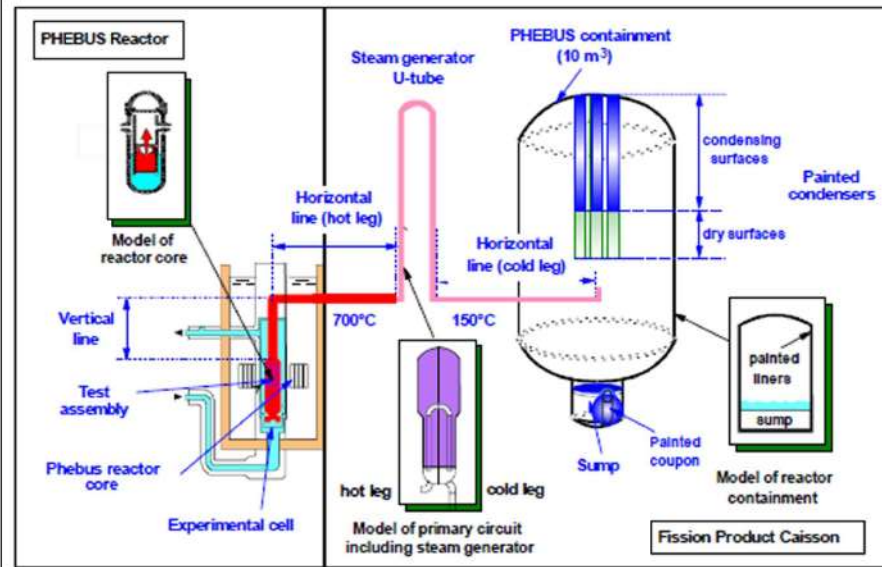


図 4.2-32 PHEBUS-PP 実験設備概要

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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-42 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) における炉心部の熱電対位置<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-33 FPT1 試験炉心部の熱電対設置位置</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）

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 ノード番号</p> <p>高さ(mm)</p> <p>1112</p> <p>11</p> <p>10</p> <p>9</p> <p>8</p> <p>7</p> <p>6</p> <p>5</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>上部スベーク位置</p> <p>下部スベーク位置</p> <p>ThO2 (第1層)</p> <p>ThO2 (第2層)</p> <p>蒸気 (第3層)</p> <p>ZrO2 (第4層)</p> <p>蒸気 (第5層)</p> <p>ZrO2 (第6層)</p> <p>インコネル (第7層)</p> <p>36.5mm</p> <p>56mm</p> <p>0mm</p> <p>燃料バンドルは2つのチャンネルでモデル化</p> <p>● 制御棒</p> <p>● チャンネル1 (燃料棒12本)</p> <p>● チャンネル2 (燃料棒8本)</p> <p>燃料バンドル (チャンネル1)</p> <p>シュラウド (7層) (断熱材+圧力容器)</p> <p>燃料バンドル (チャンネル2)</p> <p>図 4.2-44 PHEBUS-FP 実験解析における炉心（燃料バンドル）モデル<sup>[21]</sup></p>	<p>軸方向 ノード番号</p> <p>高さ(mm)</p> <p>1112</p> <p>11</p> <p>10</p> <p>9</p> <p>8</p> <p>7</p> <p>6</p> <p>5</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>上部スベーク位置</p> <p>下部スベーク位置</p> <p>ThO2 (第1層)</p> <p>ThO2 (第2層)</p> <p>蒸気 (第3層)</p> <p>ZrO2 (第4層)</p> <p>蒸気 (第5層)</p> <p>ZrO2 (第6層)</p> <p>インコネル (第7層)</p> <p>36.5mm</p> <p>56mm</p> <p>0mm</p> <p>燃料バンドルは2つのチャンネルでモデル化</p> <p>● 制御棒</p> <p>● チャンネル1 (燃料棒12本)</p> <p>● チャンネル2 (燃料棒8本)</p> <p>燃料バンドル (チャンネル1)</p> <p>シュラウド (7層) (断熱材+圧力容器)</p> <p>燃料バンドル (チャンネル2)</p> <p>図 4.2-34 炉心（燃料バンドル）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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-45 PHEBUS-FP 実験解析における1次系モデル<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-35 1次冷却系モデル</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

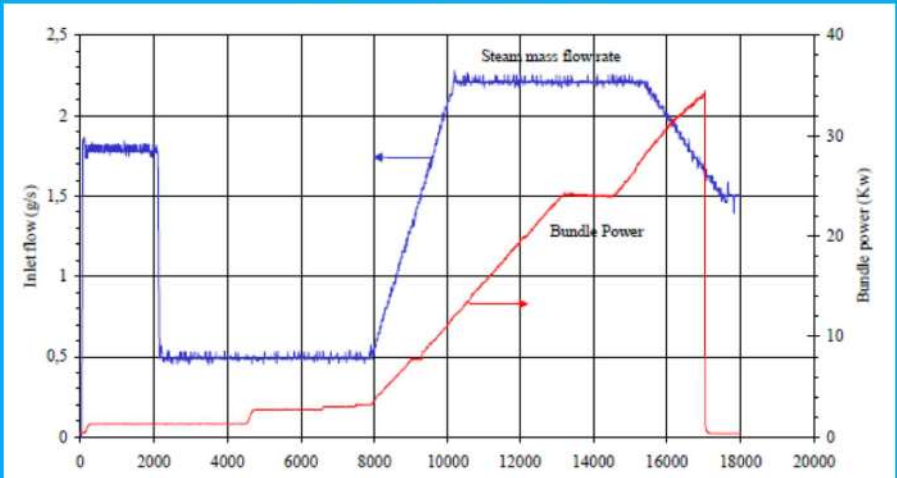
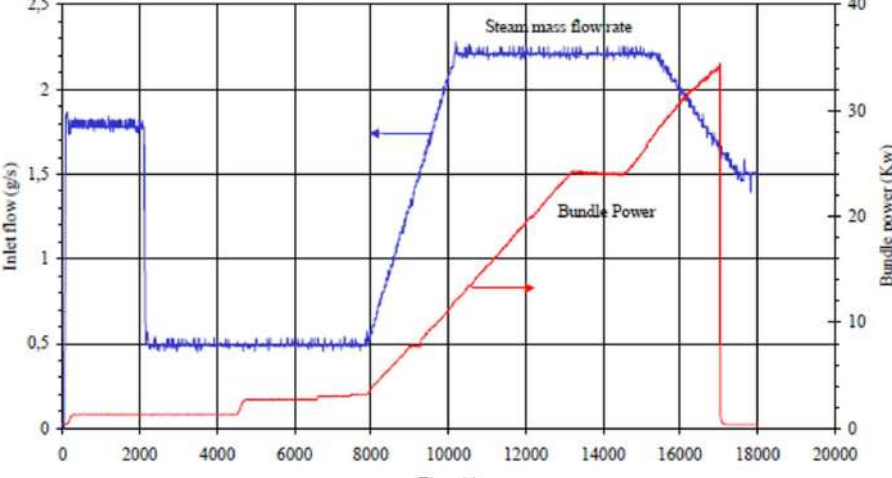
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-46 PHEBUS-FP 実験解析における格納容器モデル<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-36 格納容器モデル</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 (第3部 MAAPコード)

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;">【参考のため掲載順を入れ替えた】</p>  <p style="text-align: center;">図 4.2-43 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) におけるバンドル出力と蒸気流量<sup>[21]</sup></p>	 <p style="text-align: center;">図 4.2-37 境界条件 (バンドル出力と蒸気流量)</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-47 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果（燃料被覆管温度，下端から 700mm）<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-38 燃料被覆管温度（700mm）の比較</p>	
<p>図 4.2-48 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果（燃料被覆管温度，下端から 600mm）<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-39 燃料被覆管温度（600mm）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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-49 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果（燃料被覆管温度，下端から 400mm）<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-40 燃料被覆管温度（400mm）の比較</p>	
<p>図 4.2-50 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果（燃料被覆管温度，下端から 300mm）<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-41 燃料被覆管温度（300mm）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

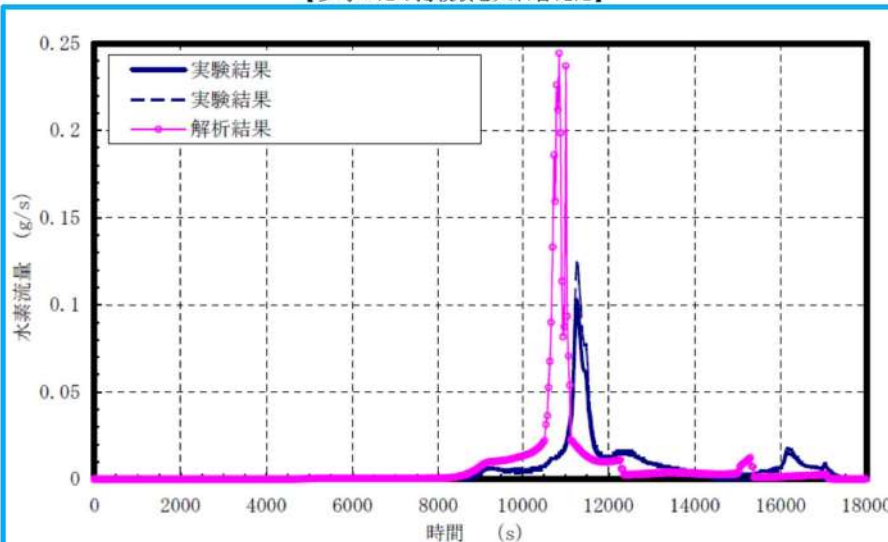
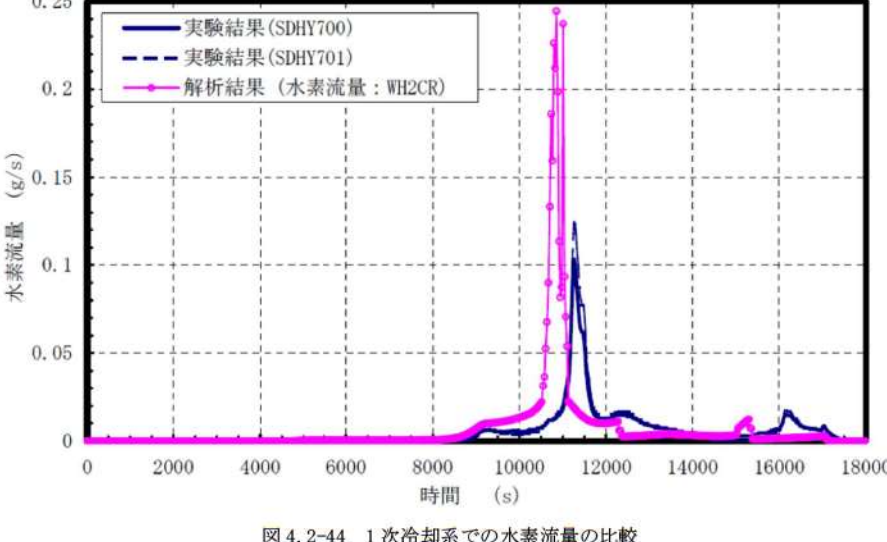
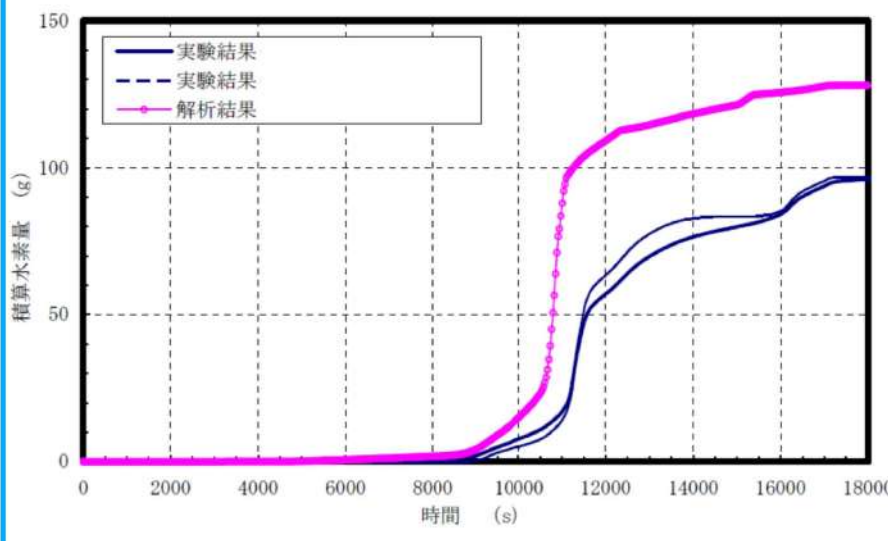
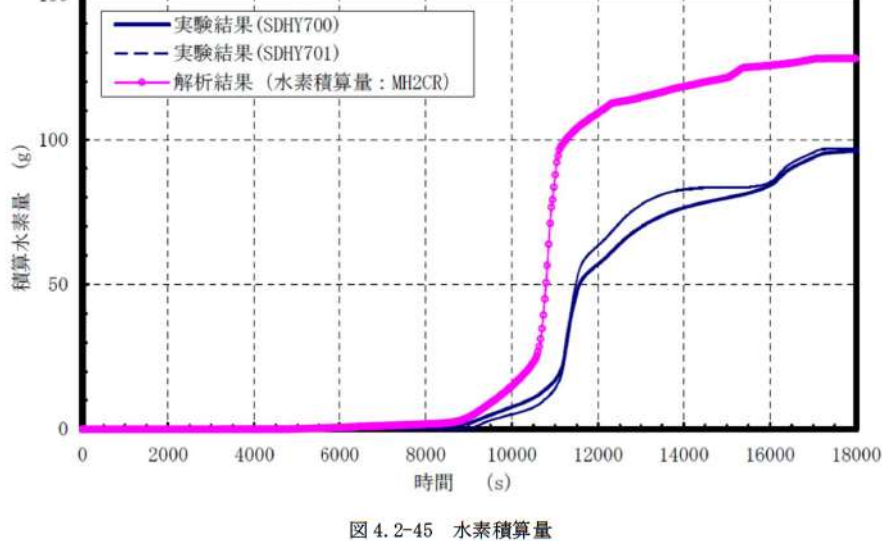
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-53 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果 (希ガス積算放出割合) <sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-42 希ガス放出割合の比較</p>	
<p>図 4.2-54 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果 (よう素積算放出割合) <sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-43 よう素放出割合の比較</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）

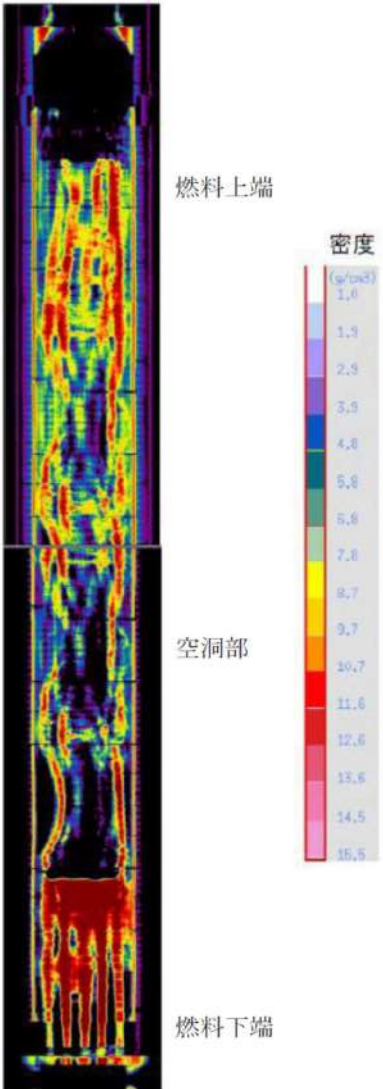
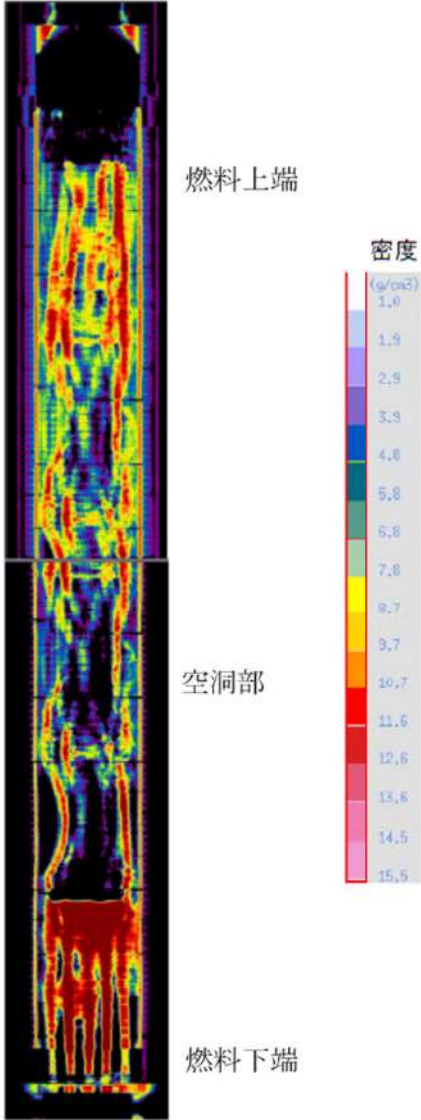
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>【参考のため掲載順を入れ替えた】</p>  <p>図 4.2-51 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果 (水素ガス流量) <sup>[21]</sup></p>	 <p>図 4.2-44 1次冷却系での水素流量の比較</p>	
 <p>図 4.2-52 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) の解析結果 (積算水素ガス量) <sup>[21]</sup></p>	 <p>図 4.2-45 水素積算量</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>燃料上端</p> <p>密度 (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>空洞部</p> <p>燃料下端</p> <p>図 4.2-56 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) における燃料バンドルのX線トモグラフ<sup>[21]</sup></p>	 <p>燃料上端</p> <p>密度 (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>空洞部</p> <p>燃料下端</p> <p>図 4.2-46 燃料バンドルのX線トモグラフ</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>【参考のため掲載順を入れ替えた】</p> <p>図 4.2-55 PHEBUS-FP 実験 (FPT1) におけるよう素の回路内マスバランス<sup>[21]</sup></p>	<p>図 4.2-47 回路内質量バランス (よう素)</p>	<p>燃料に残存したよう素の量は、13%±4%と評価されている。即ち、1次系に放出されたよう素の量は試験前のように素量から残存量を減じれば算定できるため、87%±4%と評価される。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.2.8 ABCOVE 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>米国 Hanford Engineering Developing Laboratory で実施された ABCOVE (AB5) 実験<sup>[22]</sup>では、計算コードの妥当性確認を目的に、エアロゾル挙動に関するデータが取得されている。実験では、図 4.2-57 に示すようにコンクリートピットに設置された容積約 852m<sup>3</sup>の格納容器内にエアロゾルを発生させ、凝集及び沈着にともなう気相中のエアロゾル濃度の減少挙動が調査された。</p> <p>主な試験条件を表 4.2-7 に示す。エアロゾルは、スプレインズルから原子炉格納容器内に噴出させたナトリウムを燃焼させることにより生成される。実験では、約 223kg のナトリウムが約 872 秒間スプレイされ、全てのナトリウムが酸化ナトリウム約 60%、水酸化ナトリウム約 40%から成るエアロゾルに変化している。エアロゾルの濃度はエアロゾルの生成にともなって上昇し、スプレイ開始後約 383 秒で最大となり、約 1.7×10<sup>-4</sup>g/cc (約 170g/m<sup>3</sup>) に到達した。エアロゾル生成が継続する約 900 秒後まで高い濃度が維持され、その後は凝集及び重力沈降によって約 105 秒後には約 5×10<sup>-9</sup>g/cc 程度にまで減少している。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>AB-5 実験におけるエアロゾル特性及び実験体系を考慮し、エアロゾル濃度の推移を解析している。なお、MAAP の解析手法とは異なる数値解についても併せて評価している。</p> <p>(3) 解析結果</p> <p>MAAP によるエアロゾル濃度の解析結果を測定データと比較して図 4.2-58 に示す。MAAP による解析結果は測定データの挙動を良く再現できている。</p>	<p>4.2.8 ABCOVE 実験解析</p> <p>(1) 実験の概要</p> <p>過熱炉心からガス状態で放出された希ガス以外の FP は気相中で冷却され、固体の微粒子(粒子径が 0.1µm 程度)であるエアロゾルに変化する。これらのエアロゾル粒子が凝集して粒子径が大きくなると重力沈降などにより気相中から 1 次冷却系内あるいは原子炉格納容器内の構造材表面へ沈降することにより気相から離脱する。また重力沈着が支配的であるが熱泳動や拡散泳動でも構造材表面へ沈着される。</p> <p>ABCOVE (aerosol behavior code validation and evaluation) 試験<sup>[24]</sup>は、格納容器体系試験装置 (CSTF : Containment System Test Facility) で実施された大規模エアロゾル挙動試験である。この試験装置は容積 852m<sup>3</sup>、直径 7.62m の大規模試験容器で、これを用いて乾燥状態のエアロゾルの試験 (AB5) が実施された。この試験では試験容器内にエアロゾルを発生させ、その凝集及び沈着挙動による気相中のエアロゾル質量の減少挙動が測定されている。なお、エアロゾルの発生は Na スプレイを燃焼させ酸化 Na エアロゾルを生成させている。</p> <p>(2) 解析条件</p> <p>ABCOVE-AB5 の試験装置及び試験条件をそれぞれ図 4.2-48 及び表 4.2-8 に示す。試験装置は、体積 852m<sup>3</sup>で、高さ 20.3m の円筒型の試験容器である。その試験容器の下部 (EL. 4.36m) から上向きに Na スプレイを注入させ Na を酸化させることにより、メジアン粒子半径が 0.25 µm の酸化ナトリウムエアロゾルが 445 g/s の速度で生成される。ナトリウムの注入によるエアロゾル生成は 13~885 秒まで継続される。</p> <p>(3) 解析結果の検討</p> <p>実験結果と MAAP コード及び厳密解の比較を図 4.2-49 に示す。実験では 885 秒まではエアロゾルの生成があるため、気相中のエアロゾルは最高で 10<sup>-4</sup>g/cc まで増加する。その後はエアロゾルの生成が無くなるため、凝集及び重力沈降により 10<sup>5</sup>秒で 5×10<sup>-9</sup>g/cc まで減少している。厳密解及び MAAP コードの解析結果はエアロゾル質量がピークになる 900 秒からその後に減衰して 10<sup>5</sup>秒に至るまでの間、実験結果を良く模擬できている。また、実験結果が無い場合についても、MAAP コードの解析結果は 10<sup>6</sup>秒まで厳密解と良く一致している。無次元相関式を使用した MAAP コードのモデルでも厳密解と同等に、エアロゾルの凝集とそれによる重力沈降による気相からの離脱を良く模擬できていることを示している。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 重要現象に関する不確かさの検討</p> <p>有効性評価における重要現象として抽出された項目について、解析結果に基づいてMAAPの不確かさを評価する。</p> <p>高温の炉心から原子炉格納容器にガス状で放出された揮発性FPは、気相中で冷却されエアロゾルを形成する。エアロゾル粒子が凝集して粒子径が大きくなると、重力沈降等によって気相中から原子炉格納容器内の構造材表面へ移動することにより、気相中のFP濃度が低下する。MAAPではこれの原子炉格納容器内エアロゾル挙動を良く模擬できている。</p> <p>MAAPによる解析で得られたエアロゾル濃度は、ABCove (AB5) 実験における測定データとの比較から妥当であると考えられる。したがって、MAAPは原子炉格納容器内FP挙動に関して、適切なモデルを有していると判断できる。</p>	<p>(4) 不確かさの検討</p> <p>MAAPコードの結果は、10<sup>6</sup>秒（約28時間）まで実験を良く模擬し、エアロゾルの凝集とそれによる重力沈降による気相からの離脱を良く模擬できていることを示している。また、厳密解との比較においても10<sup>6</sup>秒（約280時間）まで良く一致している。この結果から乾燥エアロゾルにおいては、エアロゾルの凝集及び沈着挙動を良く模擬できると判断することができる。</p> <p>以上より、「原子炉格納容器内FP挙動」のうち原子炉格納容器内エアロゾル挙動として、原子炉格納容器内への放出及び沈降の過程を良く模擬できている。</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）

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 4.2-7 ABCOVE 実験 (AB5) の主要な条件<sup>[28]</sup></p> <table border="1" data-bbox="235 248 981 730"> <tr><td>格納容器直径</td><td>7.62 m</td></tr> <tr><td>格納容器高さ</td><td>20.3 m</td></tr> <tr><td>格納容器体積</td><td>852 m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>初期酸素濃度</td><td>23.3 %</td></tr> <tr><td>初期温度</td><td>302.25 K</td></tr> <tr><td>初期圧力</td><td>0.122 MPa</td></tr> <tr><td>Na スプレー流量</td><td>256 g/s</td></tr> <tr><td>スプレー期間</td><td>試験開始後 13~885 秒</td></tr> <tr><td>エアロゾル生成速度</td><td>445 g/s</td></tr> <tr><td>生成粒子の平均半径</td><td>0.25 μm</td></tr> </table>	格納容器直径	7.62 m	格納容器高さ	20.3 m	格納容器体積	852 m <sup>3</sup>	初期酸素濃度	23.3 %	初期温度	302.25 K	初期圧力	0.122 MPa	Na スプレー流量	256 g/s	スプレー期間	試験開始後 13~885 秒	エアロゾル生成速度	445 g/s	生成粒子の平均半径	0.25 μm	<p style="text-align: center;">表 4.2-8 試験装置及び初期条件</p> <table border="1" data-bbox="1137 248 1877 628"> <tr><td>試験容器及び初期条件</td><td>データ</td></tr> <tr><td>体積</td><td>852 m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>高さ</td><td>20.3 m</td></tr> <tr><td>床面積</td><td>45.60 m<sup>2</sup></td></tr> <tr><td>初期圧力</td><td>122.0 kPa</td></tr> <tr><td>初期温度</td><td>29.1 °C</td></tr> <tr><td>初期ガスモル分率(O<sub>2</sub>)</td><td>0.233</td></tr> <tr><td>初期ガスモル分率(N<sub>2</sub>)</td><td>0.767</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">表 4.2-9 エアロゾル生成条件</p> <table border="1" data-bbox="1146 791 1870 1066"> <tr><td>エアロゾル発生時刻</td><td>13~885 秒</td></tr> <tr><td>エアロゾル</td><td>酸化ナトリウム</td></tr> <tr><td>エアロゾル生成速度</td><td>445g/s</td></tr> <tr><td>エアロゾル材の密度</td><td>2.5g/cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>生成粒子の平均半径</td><td>0.25 μm</td></tr> <tr><td>生成粒子の標準偏差</td><td>1.5</td></tr> </table>	試験容器及び初期条件	データ	体積	852 m <sup>3</sup>	高さ	20.3 m	床面積	45.60 m <sup>2</sup>	初期圧力	122.0 kPa	初期温度	29.1 °C	初期ガスモル分率(O <sub>2</sub> )	0.233	初期ガスモル分率(N <sub>2</sub> )	0.767	エアロゾル発生時刻	13~885 秒	エアロゾル	酸化ナトリウム	エアロゾル生成速度	445g/s	エアロゾル材の密度	2.5g/cm <sup>3</sup>	生成粒子の平均半径	0.25 μm	生成粒子の標準偏差	1.5	
格納容器直径	7.62 m																																																	
格納容器高さ	20.3 m																																																	
格納容器体積	852 m <sup>3</sup>																																																	
初期酸素濃度	23.3 %																																																	
初期温度	302.25 K																																																	
初期圧力	0.122 MPa																																																	
Na スプレー流量	256 g/s																																																	
スプレー期間	試験開始後 13~885 秒																																																	
エアロゾル生成速度	445 g/s																																																	
生成粒子の平均半径	0.25 μm																																																	
試験容器及び初期条件	データ																																																	
体積	852 m <sup>3</sup>																																																	
高さ	20.3 m																																																	
床面積	45.60 m <sup>2</sup>																																																	
初期圧力	122.0 kPa																																																	
初期温度	29.1 °C																																																	
初期ガスモル分率(O <sub>2</sub> )	0.233																																																	
初期ガスモル分率(N <sub>2</sub> )	0.767																																																	
エアロゾル発生時刻	13~885 秒																																																	
エアロゾル	酸化ナトリウム																																																	
エアロゾル生成速度	445g/s																																																	
エアロゾル材の密度	2.5g/cm <sup>3</sup>																																																	
生成粒子の平均半径	0.25 μm																																																	
生成粒子の標準偏差	1.5																																																	



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）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

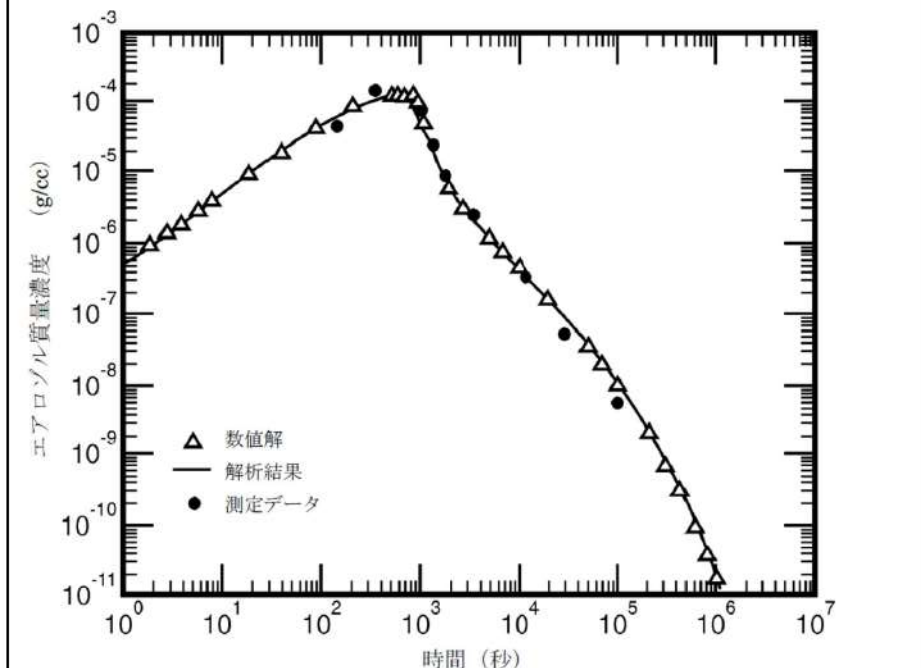
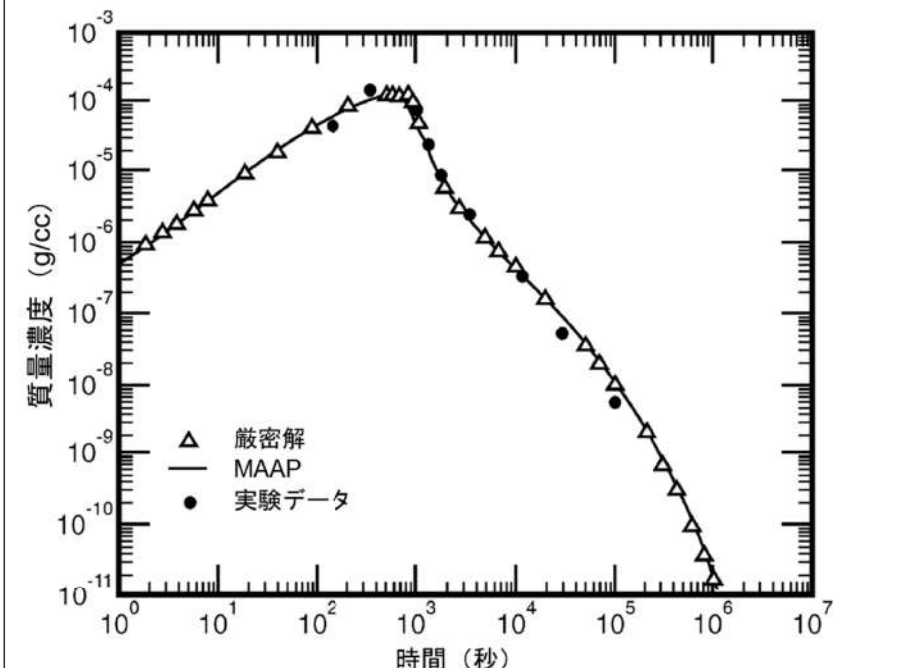
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.2-57 ABCOVE 実験 (AB5) における装置概要<sup>[23]</sup></p>	<p>図 4.2-48 ABCOVE-AB5 試験装置</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)

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="716 893 1030 925">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="336 941 828 973">図 4.2-58 ABCOVE 実験解析結果 (エアロゾル質量濃度)</p>	 <p data-bbox="1612 893 1926 925">出典：MAAP4 User's Manual, EPRI</p> <p data-bbox="1299 941 1702 973">図 4.2-49 エアロゾル質量濃度の時間変化</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3 妥当性確認（感度解析）</p> <p>4.3.1 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流〔炉心（熱流動）〕</p> <p>炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離（水位変化）・対向流」については、原子炉圧力容器内水位に関係する現象である。</p> <p>炉心損傷防止対策の事故シーケンスにおいては、対象とする原子炉水位といった原子炉圧力容器内挙動はSAFERコードによって評価されており、MAAPコードは原子炉格納容器内挙動の評価のみに用いられているが、格納容器破損防止対策の事故シーケンスにおいては、MAAPコードによって、原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を評価している。原子炉水位は炉心冷却状態及び炉心熔融進展への影響が考えられるため、原子炉水位についてSAFERコードと比較を行い、不確かさを確認する。</p>	<p>4.3 妥当性確認（感度解析）</p> <p>4.3.1 沸騰・ボイド率変化、気液分離（炉心水位）・対向流（炉心（熱流動））、気液分離・対向流（1次冷却系）</p> <p>炉心の「沸騰・ボイド率変化」及び「気液分離（炉心水位）・対向流」並びに1次冷却系の「気液分離・対向流」については、炉心水位に関係する現象である。</p> <p>MAAPコードを適用する重要事故シーケンスにおいて、炉心水位が評価指標に直接影響するのは、「ECCS再循環機能喪失」シーケンスである。「ECCS再循環機能喪失」シーケンスでは、本資料の本文の「5. 有効性評価に適用するコードの選定」で述べたように、再循環切替時点では、大破断LOCA直後のブローダウン事象よりも緩やかな挙動となることから、基本的に適用可能と考えられ、さらに、再循環切替時には水源である格納容器再循環サンプの状態が原子炉格納容器内の状態に依存すること、大破断LOCA時には1次冷却材圧力が原子炉格納容器圧力より若干高い圧力で推移し原子炉格納容器圧力の影響を受けることから、1次冷却系と原子炉格納容器の連成解析が可能な点で、MAAPコードを選定した。</p> <p>「ECCS再循環機能喪失」シーケンスでは、再循環失敗から代替再循環による注水開始の間の炉心水位の低下に伴う燃料被覆管温度の上昇が、判断基準（1200℃）を下回ることから炉心損傷が防止できることを確認することが目的であり、評価に当たっては、再循環切替失敗以降の炉心の冠水状態が維持されることにより燃料被覆管温度の上昇が抑えられることから、炉心露出に至らないことを確認している。</p> <p>したがって、「ECCS再循環機能喪失」の評価では炉心水位が重要であり、妥当性確認においては、「崩壊熱による冷却材の蒸散」、「炉心領域の気泡水位（炉心及び上部プレナムのボイド率）」及び「1次冷却系内保有水分分布」に着目する。</p> <p>MAAPコードの解析モデルにおいて、崩壊熱による冷却材の蒸散については、3.3.2(3)で述べたとおり、沸騰挙動に応じた燃料棒から液相への伝熱と蒸気発生量を計算する。炉心水位（気泡水位）は、3.3.2(4)で述べたとおり、炉心とダウンカマの静水頭のパランスにより計算される。上部プレナム領域についても同様にドリフトフラックスモデルによるボイド率から気泡水位が計算され、炉心水位と合わせて原子炉容器内水位として計算される。1次冷却系内保有水については、3.3.3(2)で述べたように、流路の流動抵抗の合計とノードの静水頭のパランスにより流動計算から求められるが、運動量の収支は準定常を想定し代数的に取り扱い、運動方程式は解いていないモデルであることから、1次冷却系内で炉心や高温側配管よりも高い位置（蒸気発生器伝熱管の鉛直部等）に液相が持ち上がり難いところに不確かさがあると考えられる。</p> <p>以上を踏まえ、MAAPコードの解析モデルの不確かさについて、原子炉1次冷却系のシステム応答を模擬した総合効果実験データにより検証されてきたM-RELAP5コード<sup>[25]</sup>との比較により評価する。なお、M-RELAP5コードは、大破断LOCAに特有のECCS注入水の</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(1) 解析条件</p> <p>SAFERコードは、原子炉内熱水力過渡変化及び炉心ヒートアップを解析するコードであり、原子炉圧力容器に接続する各種一次系配管の破断事故、原子炉冷却材流量の喪失事故、原子炉冷却材保有量の異常な変化等を取り扱うことができる。また、SAFERコードは、MAAPコードと比較し原子炉圧力容器内のモデルが精緻であり、上部タイプレート及び炉心入口オリフィス等での気液対向流制限現象（CCFL現象）及び上部プレナムにおけるサブクール域の局在化により冷却材が下部プレナムに落水する現象（CCFLブレイクダウン現象）等を考慮することができる。</p> <p>SAFERコードは炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループのうち以下の6グループで使用され、原子炉圧力、原子炉水位、燃料被覆管温度等の評価に使用されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高圧・低圧注水機能喪失</li> <li>・高圧注水・減圧機能喪失</li> <li>・全交流動力電源喪失</li> <li>・崩壊熱除去機能喪失</li> <li>・LOCA時注水機能喪失（中小破断LOCA）</li> <li>・格納容器バイパス（インターフェイスシステムLOCA）</li> </ul> <p>そこで、これらのシーケンスグループのうち、原子炉水位の低下が比較的緩慢な「高圧注水・減圧機能喪失」（以下「TQUXシーケンス」という。）及び比較的速い「LOCA時注水機能喪失（中小破断LOCA）」（以下「中小破断LOCAシーケンス」という。）の2グループを対象として比較評価を行った。</p> <p>(2) 解析結果</p> <p>原子炉水位について、原子炉圧力容器内挙動をより精緻に評価可能なSAFERコードとの比較を通じて確認した。BWR5Mark-I改良型格納容器プラントを例とし、炉心損傷防止対策の有効性評価で評価しているTQUX及び中小破断LOCAシーケンスを対象とした。</p> <p>A) TQUXシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-1に示す。SAFERコード、MAAPコードとも給水流量の全喪失に伴い原子炉水位は急速に低下する。初期値が異なるのは、上部プレナムノードの定義の違いによる。すなわち、SAFERコードは気水分離器第一段上端までとしているのに対し、MAAPコードでは気水分離器の上端までとしているためである。</p> <p>原子炉水位低（レベル1）に到達して10分後に作動する原子炉代替減圧系による急速減圧開始時刻は、約4分の差異が生じている。また、SAFERコードでは急速減圧後の水位上昇が大きく評価され、その後の蒸気流出の継続による水位低下が顕著に確認される。また、急速減圧後、SAFERコードでは炉心入口でのCCFLの発生により炉心から下部プレナムへの落下水量が抑えられるため、炉心水位はMAAPコードよりも高めとなる。MAAP</p>	<p>バイパスや再冠水挙動等の複雑かつ急激な現象に対して検証が十分ではないが、炉心冠水後のプラント応答には適用できる。</p> <p>(1) M-RELAP5コードとの比較</p> <p>1次冷却系の挙動をより精緻に評価可能なM-RELAP5コードとの比較を通じて、MAAPコードによる評価の特性について、代表3ループプラントを例として確認した。なお、M-RELAP5コード単体では、原子炉格納容器内の挙動が取り扱えないことから、MAAPコードにより計算された原子炉格納容器圧力、格納容器再循環サンプル水の水温等を境界条件として与えている。</p> <p>MAAPコード及びM-RELAP5コードによるECCS再循環機能喪失の比較（原子炉容器内水位）を図4.3-1に示す。MAAPコードによる計算結果（実線）では、再循環切替失敗（約19分）から30分後に代替再循環運転を開始することに伴い、約49分後から炉心水位が回復し炉心は露出しない。一方、M-RELAP5コードによる計算結果（破線）では、代替再循環運転を開始する以前（約35分）に炉心露出となる。MAAPコードによる計算では水位の低下を外挿すると約50分に炉心は露出すると考えられることから、MAAPコードはM-RELAP5コードよりも炉心露出を約15分遅く評価すると考えられる。</p> <p>図4.3-2～図4.3-6に1次冷却系内の各領域の保有水量の比較を示す。以下、コード間差異について考察する。</p> <p>A) ECCS再循環切替失敗までの状態</p> <p>ECCS再循環切替失敗（約19分）時点の炉心領域の保有水量（図4.3-2）とダウンカメラ領域の保有水量（図4.3-3）は両コードで同等である。</p> <p>一方、高温側配管の保有水量（破断側：図4.3-5、健全側：図4.3-6）に関しては、MAAPコードの方が多い。MAAPコードでは差圧バランスを基本とした簡略なモデルにより1次冷却系内の液相分布が定まることから、高温側配管（水平部）の保有水量が多く、蒸気発生器伝熱管への液相の流入が少ない結果となる。一方、M-RELAP5コードでは、詳細に分割された各ノードにおいて流動様式を考慮した流動、質量分布を計算しており、蒸気発生器伝熱管に流入した液相は鉛直部への蓄水による差圧の増加と2次側からの伝熱により発生した蒸気による1次側の圧力損失の増加（いわゆる「スチームパインディング効果」）を生</p>	<p>※PWRとBWRで解析に使用するコードが異なるため、資料構成が異なる</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>コードでは、有効燃料棒底部まで低下しており、その後の低圧注入系による注水による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は約4分MAAPコードの方が遅くなる。</p> <p>B) 中小破断LOCAシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-2に示す。5cm<sup>2</sup>の破損を想定するとともに、給水流量の全喪失に伴い原子炉水位は急速に低下する。TQUXシーケンスと同様、上部プレナム内の水位の初期値は異なる。25分後の急速減圧と注水開始以降は、TQUXシーケンスとほぼ同様な傾向を示す。MAAPコードでは、炉心入口のCCFLを考慮していないために水位低下幅はSAFERコードよりも大きく、その後の補給水系の注水による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は約2分早い。</p>	<p>じていることから高温側配管領域（水平部から蒸気発生器伝熱管まで）の保有水量は少ない結果となる。このように、高温側配管領域に関しては、M-RELAP5コードよりも保有水量を多く評価し、代表3ループプラントの場合、約15×10<sup>3</sup>kg多い。</p> <p>B) ECCS再循環切替失敗以降の状態</p> <p>再循環切替失敗まではダウンカマは入口ノズル下端まで満水（図4.3-4）であり、ダウンカマ領域の保有水量（図4.3-3）は同等である。一方、再循環切替失敗直後、MAAPコードに比べ、M-RELAP5コードではダウンカマ水位が大きく低下している。これは、再循環切替失敗に伴い蒸気発生器伝熱管への液相の流入が減少することからスチームバインディング効果が低下し、ダウンカマから炉心への流量が増加するためである。さらに、破断口からの流出を質量バランスから与えるMAAPコードに対し、運動量バランスから解かれるM-RELAP5コードでは、再循環切替直後に崩壊熱に伴う冷却材の蒸散に見合った流量に低下するまでに遅れがあることも要因となっていると考えられる。</p> <p>その後の崩壊熱による冷却材の蒸散に伴う、炉心領域の保有水量やダウンカマ水位の低下速度（保有水量の減少速度）は両コードで同等である。</p> <p>C) ボイド率予測</p> <p>原子炉容器内の気泡水位は、炉心及び上部プレナムの水量に加え、これら領域のボイド率より定まる。MAAPコードでは、実績があるドリフトフラックスモデルに基づいて炉心平均及び上部プレナムのボイド率が計算され、当該事象の炉心再冠水以降の期間では、炉心平均で約50%、上部プレナム（炉心上端から出口ノズル上端まで）で約60%である。M-RELAP5コードの水位予測及びボイド率計算はORNL/THTF実験データを用いた検証解析によりその妥当性が示されている。M-RELAP5コードでの再冠水以降の期間は炉心平均で約50%、上部プレナム領域で約65～70%である。</p> <p>(2) 不確かさの検討</p> <p>MAAPコードのECCS再循環機能喪失への適用に当たって考慮すべき不確かさを検討する。</p> <p>ECCS再循環機能喪失シーケンスのMAAPコードとM-RELAP5コードの解析結果の比較から、MAAPコードの解析モデルに関して、以下を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊熱による冷却材の蒸散について、その影響として現れる炉心水位の低下速度は両コードでほぼ同じであり、MAAPコードで計算される沸騰挙動に応じた燃料棒から液相への伝熱と蒸気発生量は、M-RELAP5コードと同等である。</li> <li>炉心領域の気泡水位については、MAAPコードではドリフトフラックスモデルにより計算されるボイド率を用い、そのボイド率について、炉心領域は同等の予測となるが、上部プレナム領域ではやや過小評価となっている。</li> </ul>	

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>・1次冷却系内保有水分分布のうち炉心領域及びダウンカマ領域の保有水量については、両コードは同等と言えるが、高温側配管領域の保有水量については、MAAPコードの方が多く評価され、不確かさが大きいと考えられる。</p> <p>・高温側配管領域の保有水量をMAAPコードの方が多く評価する要因としては、MAAPコードで蒸気発生器伝熱管への液相の流入が少ないのに対して、M-RELAP5コードでは蒸気発生器伝熱管への液相の流入があり、それによる差圧の増加と伝熱管でのスチームバインディング効果が生じているためであると考えられる。</p> <p>これらから、MAAPコードのECCS再循環機能喪失への適用に当たって考慮すべき不確かさとしては、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①炉心及び上部プレナム領域のボイド率</li> <li>②高温側配管～蒸気発生器伝熱管領域の保有水分分布</li> <li>③蒸気発生器伝熱管の圧力損失</li> </ul> <p>の3項目に整理される。①項のボイド率については、上部プレナム領域ではやや過小評価するものの大きな差ではなく、②項の高温側配管領域の保有水量を多めに評価することが炉心露出までの時間を長く評価する主要因であると考えられる。また、③項の蒸気発生器伝熱管の圧力損失については、ダウンカマの水頭圧との釣り合いに考慮され、高温側配管領域の液相分布に影響することから②項に含まれている。これらの影響として、MAAPコードは、M-RELAP5コードに比べ、炉心露出までの時間を長く評価しており、代表3ループプラントの場合は約15分と定量化される。</p> <p>このような1次冷却系保有水量の差は、1次冷却系から原子炉格納容器へ放出されるエネルギーにも影響すると考えられる。即ち、炉心の崩壊熱により加熱されたECCS注入水が1次冷却系に留まるか原子炉格納容器内に放出されるかの違いが、原子炉格納容器への放出エネルギーの差となることから、1次冷却系保有水量を多く評価する傾向があるMAAPコードの方が、原子炉格納容器への放出エネルギーが少なくなり、原子炉格納容器圧力が低めに推移することが考えられる。したがって、比較対象に用いたM-RELAP5コードでは、MAAPコードにより計算した原子炉格納容器圧力等を境界条件に使用しており、M-RELAP5コードにより計算した放出エネルギーに対する原子炉格納容器圧力は、MAAPコードで計算された原子炉格納容器圧力より高くなる傾向がある。両コードの計算結果から得られる放出エネルギー量の差は約3%であり、放出エネルギーには原子炉格納容器の液相部に入る流出水のエネルギーも含まれすべてが原子炉格納容器圧力の上昇に寄与することはないこと、原子炉格納容器内温度の上昇分に応じてヒートシンクによる抑制効果が働くことから、原子炉格納容器圧力の上昇幅はわずかであり、影響は小さいと考えられるが、1次冷却系内の挙動への影響を以下のとおり整理する。</p> <p>・崩壊熱による冷却材の蒸散に関しては、燃料棒から冷却材への伝熱量により決まることから、原子炉格納容器圧力は影響しない。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>・炉心領域の気泡水位に関しては、原子炉格納容器圧力が高くなると1次冷却材圧力も高くなることから、炉心領域、上部プレナム領域等のボイドが圧縮され、ボイド率は低くなるため、気泡水位としては低下する傾向であるが、高温側配管からの流入があり、影響は小さい。</p> <p>・1次冷却系保有水分布に関しては、炉心部のボイド率が低下するため、ダウンカムとの静水頭のバランスから、蒸気発生器伝熱管への液相の流入が減り、スチームバインディング効果が小さくなるため、1次冷却系の保有水量としては増加する方向となる。</p> <p>・同じく1次冷却系保有水分布に関して、破断口からの冷却材放出については、炉心の冠水以降は、1次冷却材圧力は原子炉格納容器圧力とバランスして変化しており、放出流量は1次冷却系内の質量バランスから ECCS による注水と崩壊熱による蒸散に相当する流量となるため、原子炉格納容器圧力はほとんど影響しない。</p> <p>このように、1次冷却系保有水分布の違いにより、原子炉格納容器に放出される質量に差が生じることで、1次冷却系内の挙動への影響が考えられるが、原子炉格納容器圧力の差としてはわずかである。よって、M-RELAP5コードでMAAPコードの不確かさを含む原子炉格納容器圧力等を境界条件に用いることが、解析結果に与える影響は軽微であると考えられる。</p> <p>また、M-RELAP5コードのECCS再循環機能喪失の評価の不確かさについて、「第1部M-RELAP5コード」では以下を確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・旧日本原子力研究所（旧JAERI）で実施されたCCTF（Cylindrical Core Test Facility、円筒炉心試験装置）実験の実験データと実機解析結果との比較により、M-RELAP5コードは蒸気発生器での圧力損失を大きく計算するため、炉心及び高温側配管での保有水量を実際より少なく計算し、保守的な結果を与える。</li> <li>・旧JAERIで実施されたTPTF（Two-Phase Flow Test Facility、二相流試験装置）実験よりM-RELAP5コードは水平配管でボイド率を高く計算する傾向があることを確認し、その結果を基に実機の感度解析を実施し、高温側配管でのボイド率計算の不確かさは非保守的な結果を与えない。</li> <li>・M-RELAP5コードは低圧時の炉心のボイド率予測に不確かさを有する。その不確かさに関する感度解析を実施し、不確かさの影響により原子炉容器内の水位に影響するが、ECCS再循環機能喪失での15分での代替再循環開始により炉心は冠水状態を維持でき、不確かさの感度は小さい。</li> </ul> <p>したがって、M-RELAP5コードによる解析により評価したECCS再循環機能喪失での代替再循環開始の時間は、コードのボイド率計算の不確かさを考慮しても非保守的とはならないことを確認している。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) まとめ</p> <p>原子炉水位変化について、原子炉圧力容器内挙動をより精緻に評価可能なSAFERコードと比較を行った。CCFLの取り扱い等により水位変化に差異が生じたが、水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻に関しては、TQXシーケンス、中小破断LOCAシーケンスともSAFERコードとの差異は小さく、短期的な挙動をよく模擬できており、崩壊熱の影響が支配的となる長期的な挙動を評価対象とした、有効性評価における格納容器挙動評価への適用性に問題はないと判断した。</p>	<p>以上より、MAAPコードが高温側配管の保有水量を多めに評価することに伴って炉心露出を遅めに予測する傾向をMAAPコードの不確かさとして取り扱う。</p> <p>(3) 判断基準における裕度</p> <p>「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」では判断基準として炉心損傷に係る基準が適用されるが、有効性評価では炉心露出の防止を基準とした評価を実施している。</p> <p>この評価基準の差による裕度を確認する目的から、代表3ループプラントを対象にM-RELPA5コードにより代替再循環開始までの時間を15分、20分とした解析結果を示す。この解析では、PCT評価のため、出力分布を考慮した高温燃料棒を模擬している。代替再循環開始を15分とした場合（図4.3-7）では炉心は露出せず、再循環機能喪失以降の燃料被覆管温度に変化は見られない。代替再循環開始を20分とした場合（図4.3-8）、事象発生約35分後に炉心が再露出し燃料被覆管温度が上昇する。その後、代替再循環による炉心への注水が開始されることで燃料被覆管温度の上昇は抑えられ、低下に転じる。炉心の再露出後の燃料被覆管最高温度は約550℃であり、炉心損傷の判断基準の1,200℃に対して余裕がある。したがって、炉心露出の防止を基準としていることで、炉心損傷に至るまでにはさらに5分以上の時間余裕がある。</p> <p>(4) まとめ</p> <p>ECCS再循環機能喪失シーケンスの評価において、MAAPコードは高温側配管の保有水量を多めに評価する傾向があり、ECCS再循環切替失敗後の炉心露出までの時間を長く評価する。この影響は、代表3ループプラントの場合約15分である。また、原子炉格納容器圧力を低めに評価することにも影響するが、MAAPコードとM-RELPA5コードの計算結果から得られる放出エネルギーの差から見積もられる原子炉格納容器圧力の差はわずかである。</p> <p>比較に用いたM-RELPA5コードについては、MAAPコードの計算結果を境界条件に用いることが解析結果に与える影響は軽微であること、炉心露出予測について非保守的な傾向を与えないことを確認している。</p> <p>以上より、炉心露出までの時間を長く評価することを、MAAPコードの不確かさとして取り扱い、MAAPコードの評価結果に対して、この不確かさを考慮することで、ECCS再循環機能喪失に係る炉心損傷防止対策の有効性を確認することが可能である。</p> <p>なお、同シーケンスに対する炉心損傷防止対策の評価では、炉心露出の防止を基準としていることで、代表3ループプラントの場合、炉心損傷に至るまでにはさらに5分以上の時間余裕が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）

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）

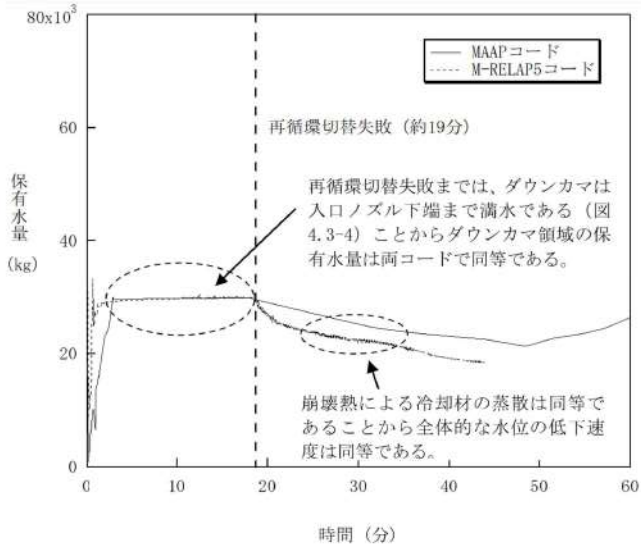
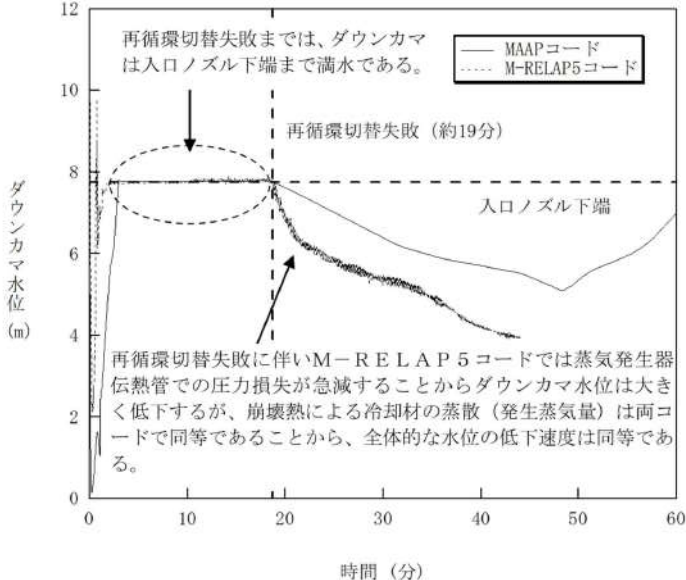
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.3-1 原子炉水位に関するコード間比較（TQUXシーケンス）</p>	<p>図 4.3-3-1 ECCS 再循環機能喪失 コード間比較（原子炉容器内水位）</p> <p>*：MAAPコードによる原子炉水位は入口ノズル下端を上限とした表記となる</p>	
<p>図 4.3-2 原子炉水位に関するコード間比較（中小破断LOCAシーケンス）</p>	<p>図 4.3-2 炉心領域（炉心入口～出口ノズル）保有水量のコード間比較</p>	



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

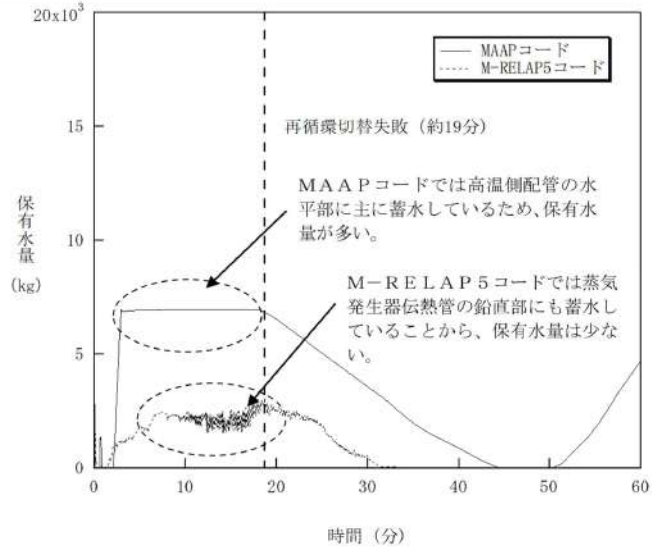
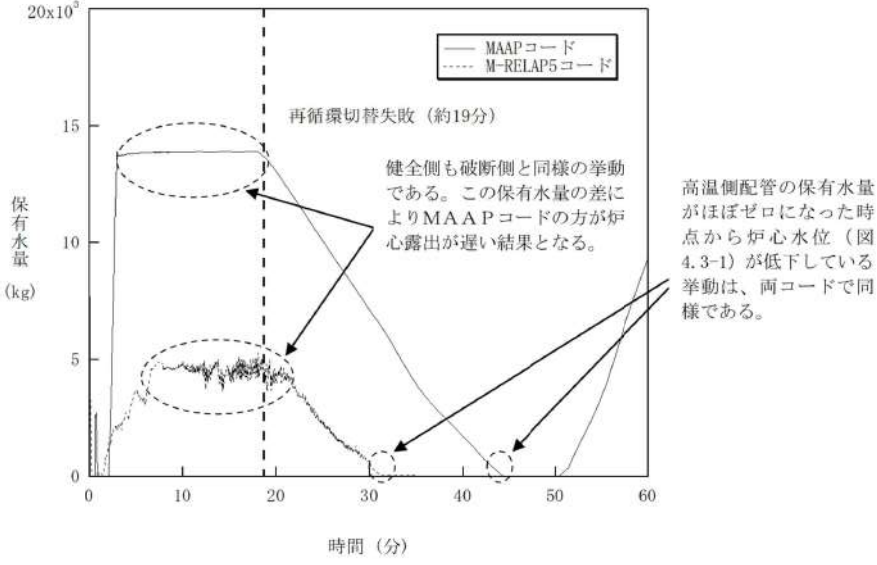
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>図 4.3-3 ダウンカマ領域（低温側配管～下部プレナム）保有水量のコード間比較</p>	
	 <p>図 4.3-4 ダウンカマ水位のコード間比較</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

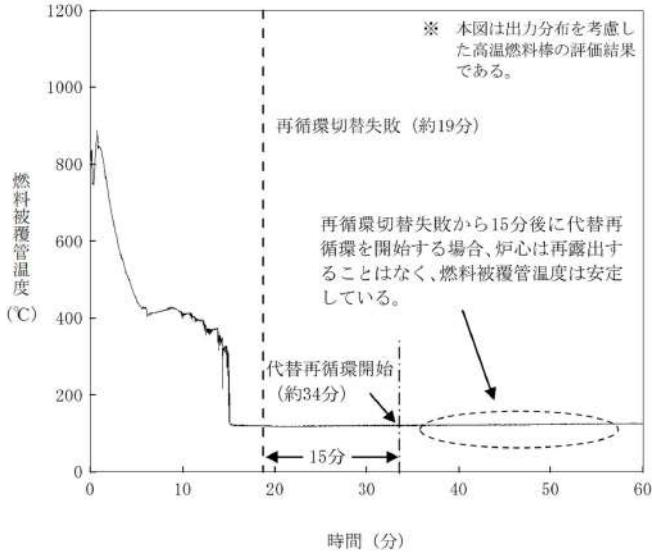
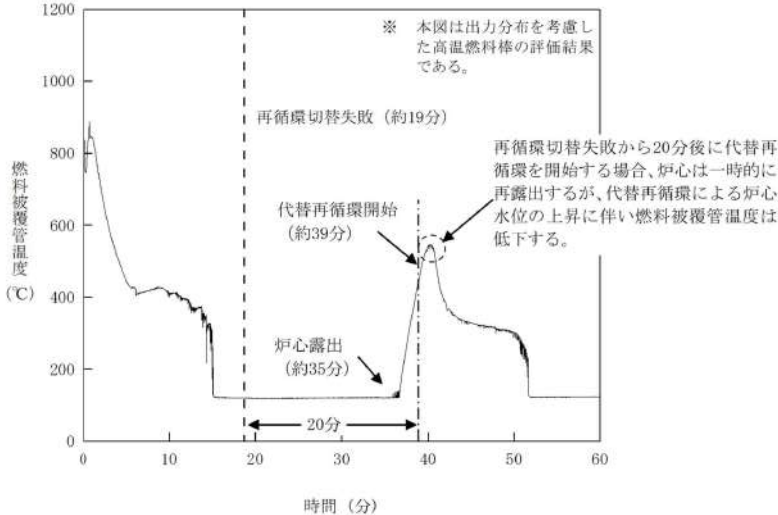
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>図 4.3-5 高温側配管～蒸気発生器伝熱管領域（破断側）保有水量のコード間比較</p>	
	 <p>図 4.3-6 高温側配管～蒸気発生器伝熱管領域（健全側）保有水量のコード間比較</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	 <p>図 4.3-7 3ループ PWR・ECCS 再循環機能喪失・代替再循環 15分（燃料被覆管温度）</p>	
	 <p>図 4.3-8 3ループ PWR・ECCS 再循環機能喪失・代替再循環 20分（燃料被覆管温度）</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<p>4.3.2 ECCS 蓄圧タンク注入</p> <p>蓄圧タンクからの注入流量は蓄圧タンク内圧と1次冷却材圧力の差圧及び配管圧力損失に基づき計算される。一般的な状態方程式及び差圧流モデルが使用されていることから、解析モデルとしても不確かさは小さいと考えられるが、「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」（及び「格納容器過温破損」）では、1次冷却系強制減圧時の1次冷却材圧力に影響を与える可能性があるため、添付1において感度解析により影響評価を行っている。以下、概要をまとめる。</p> <p>(1) 解析条件</p> <p>ベースケースでは圧力損失としてプラント設計に基づく□を与えているが、感度解析では感度を確保する目的から、その50%増の□を設定する。</p> <table border="1" data-bbox="1189 563 1794 655"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>流動抵抗係数</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>□</td> <td>プラント設計に基づく値</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>□</td> <td>プラント設計に基づく値の50%増</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 解析結果</p> <p>図4.3-9に、流動抵抗係数の感度解析結果を示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は蓄圧注入開始以降に現れる。約3.3時間時点で、加圧器逃がし弁開による1次冷却系強制減圧により1次冷却材圧力は急減し、約3.6時間の時点で蓄圧注入系が作動する。その時刻までは、ベースケースと感度解析ケースとで挙動は同等である。3.6時間以降の挙動については、1次冷却材圧力と蓄圧タンク圧力がバランスした緩やかな応答であるため、流動抵抗係数を大きくすることで蓄圧タンクからの注入量が少なくなることの影響はわずかであり、溶融炉心の下部プレナムへの移行から原子炉容器破損までの一連の挙動にほとんど影響を与えず、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力に対しても有意な感度はない。</p> <p>なお、3.6時間以降に、圧力がやや振動的な挙動となっているが、これは、注入水が炉心部で蒸発することによる圧力上昇、それに伴って注入量が減少し炉心部で蒸発量も低下し圧力減少といったフィードバックによるものである。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>蓄圧注入の流動抵抗に関する感度解析を行い、1次冷却系強制減圧時の1次冷却材圧力挙動への影響を確認した結果、溶融炉心の下部プレナムへの移行から原子炉容器破損までの一連の挙動にほとんど影響を与えず、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力に対しても有意な感度はないことを確認した。</p> <div data-bbox="1653 1358 1957 1425" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>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>	項目	流動抵抗係数	設定根拠	ベースケース	□	プラント設計に基づく値	感度解析ケース	□	プラント設計に基づく値の50%増	<p>※PWR 固有の設備に対する妥当性確認</p>
項目	流動抵抗係数	設定根拠									
ベースケース	□	プラント設計に基づく値									
感度解析ケース	□	プラント設計に基づく値の50%増									

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）

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="1556 204 1960 276" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p> </div> <div data-bbox="1160 316 1904 861"> </div> <p data-bbox="1332 885 1691 909">図 4.3-9 蓄圧注入の流動抵抗感度解析</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>4.3.3 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</p> <p>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モデルでは、国内の凝縮熱伝達実験において確認された評価式を用いて格納容器再循環ユニットの形状に基づき設定された除熱特性を入力値としており、最適値であると言えるが、モデル化の観点から不確かさの整理を行う。また、入力値に用いている除熱特性は、原子炉格納容器に水素が存在しない場合に対する最適値であり、有効性評価においては、水素が発生する事象もあることから、水素が存在する場合の影響評価を行う。さらに、2つの観点で整理した不確かさを踏まえ、感度解析により影響の程度を把握する。</p> <p>(1) 不確かさの整理（モデル化の観点）</p> <p>実機の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は、冷却コイルに冷却水を通水することで気相部の水蒸気を凝縮させ、出入口の密度差を自然対流力（ドラフト力）として、自然対流を確立させるものである。</p> <p>一方、MAAPコードにおける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モデルは、3.3.5(3)で述べたとおり、除熱特性（雰囲気温度に対する流速及び除熱量の関係）を与え、そこから計算される格納容器再循環ユニットの流速及び除熱量を用いて、質量及びエネルギーのバランスにより、原子炉格納容器内の状態量を計算する方式である。</p> <p>この方式では、入力値により除熱特性を与えているので、不確かさは小さいと判断できる。即ち、3.3.1で述べたとおり、質量の式では、相変化による質量変化を、エネルギーの式では、相変化によるエネルギー変化（潜熱）をそれぞれ考慮していることから、入力された除熱特性から演算された流速及び除熱量に見合った質量、エネルギー及び相変化を適切に取り扱うことが可能であり、モデル化の観点での不確かさは存在しない。</p> <p>(2) 不確かさの整理（水素影響の観点）</p> <p>MAAPコードの入力値である除熱特性データに関して、原子炉格納容器内に水素が発生している場合の影響を評価する。</p> <p>有効性評価においては、原子炉格納容器での水素燃焼による爆轟の判定基準であるドライ換算で13vol%の水素濃度を超えないことを確認していることから、ドライ換算13vol%の水素が存在する場合、即ち、水素濃度が最大限増加した場合を想定して検討する。なお、水素については、水素処理装置によって処理できることから、水素濃度がドライ換算で13vol%に至ることはないと考えられ、以下の検討の前提は水素濃度の観点からは厳しい条件となっている。</p> <p>A) 解析モデルへの影響</p> <p>MAAPコードの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モデルでは、格納容器再循環ユニット入口のガス温度（即ち、原子炉格納容器内温度）を入力値として除熱量と</p>	<p>※PWR固有の設備に対する妥当性確認</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<p>吸い込みガス速度を計算するモデルであるため、水素ガスが存在する場合でも、影響はなく、除熱量及び速度は、除熱特性に従って計算される。</p> <p>原子炉格納容器上部区画に水蒸気が混合したウェットな条件において、格納容器再循環ユニットでの除熱量の大部分が水蒸気の凝縮に消費されることから、水素ガスが増加した場合には、非凝縮性ガスの冷却に消費される割合が増加する方向となるが、その影響は、わずかであり無視しうる。</p> <p>B) 除熱量への影響</p> <p>水素が存在しない場合からドライ換算で13vol%に相当する水素ガスが増加した状態とは、非凝縮性ガスの割合が1割程度増加した状態である。これを、冷却コイル表面での蒸気凝縮現象への影響として捉えると、冷却面への蒸気拡散に対する非凝縮性ガスが1割増加した状態であると捉えることができる。</p> <p>そこで、非凝縮性ガスの割合が1割程度増加した状態（下図の(a)）を、水蒸気量が1割程度減少した状態（下図の(b)）とみなし、評価を行う（(a)と(b)とで、非凝縮性ガスと水蒸気の割合は等価である）。</p> <div data-bbox="1198 726 1787 986" style="text-align: center;"> </div> <p>(b)は、非凝縮性ガス量は同じで、蒸気量が増加した状態、即ち、蒸気分圧が増加した状態である。そこで、蒸気量の差を見るという観点で、ガス温度の差に対する凝縮伝熱量を概算する。プラントによって格納容器再循環ユニットの形状やガス温度が変化するが、代表3ループプラントを例とすると、</p> <table border="1" data-bbox="1108 1161 1854 1281"> <thead> <tr> <th>ガス温度</th> <th>蒸気分圧</th> <th>凝縮伝熱量</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>135℃</td> <td>3.1気圧</td> <td>5.25×10<sup>6</sup> kcal/h</td> </tr> <tr> <td>130℃</td> <td>2.7気圧（-13%）</td> <td>4.78×10<sup>6</sup> kcal/h（-9%）</td> </tr> </tbody> </table> <p>の関係を得る。この関係を内挿し、蒸気分圧が10%低下する場合の凝縮伝熱量は約7%低下すると評価できる（最大限水素濃度が増加する場合（ドライ換算で13vol%）の評価値）。</p>	ガス温度	蒸気分圧	凝縮伝熱量	135℃	3.1気圧	5.25×10 <sup>6</sup> kcal/h	130℃	2.7気圧（-13%）	4.78×10 <sup>6</sup> kcal/h（-9%）	
ガス温度	蒸気分圧	凝縮伝熱量									
135℃	3.1気圧	5.25×10 <sup>6</sup> kcal/h									
130℃	2.7気圧（-13%）	4.78×10 <sup>6</sup> kcal/h（-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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>C) 流速への影響</p> <p>原子炉格納容器内雰囲気は水蒸気と空気（非凝縮性ガス）の混合気体で形成されるが、空気中の水素濃度が増加した場合には、非凝縮性ガスの分圧及び密度が変化し、これに伴う自然対流への影響が考えられる。そこで、水素を含まない場合と水素を含む場合において、自然対流の駆動力となる気体密度の相違及びダクトにおける圧力損失を評価し、両者を比較することで、水素の自然対流流量への影響を半定量的に評価する。</p> <p>自然対流の駆動力及び格納容器再循環ユニットのダクトにおける圧力損失を以下に示す。この2つの式がバランスする点で自然対流が成立する。</p> <p>自然対流力の式：<math>P_d = h \cdot (\rho_2 - \rho_1)</math></p> <p>圧力損失の式：<math>\Delta P = \frac{\zeta \times V^2 \times \rho_m}{2g}</math></p> <p>ここで、<math>P_d</math> ドラフト力  <math>h</math> 冷却コイルとダクト開口高さ  <math>\rho</math> 密度  <math>\Delta P</math> 圧力損失  <math>\zeta</math> 抵抗係数  <math>V</math> ユニット正面流速  <math>g</math> 重力加速度</p> <p>原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>及び格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho_2</math>は、それぞれの空気密度と水蒸気密度の和であり、</p> <p>原子炉格納容器内密度：<math>\rho_1 = \rho_{a1} + \rho_{v1}</math>      格納容器再循環ユニット出口密度：<math>\rho_2 = \rho_{a2} + \rho_{v2}</math></p> <p>で示される。<math>\rho_m</math>は、原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>と格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho_2</math>の平均値であり、</p> $\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ <p>である。また、<math>\rho_{a1}</math>、<math>\rho_{v1}</math>、<math>\rho_{a2}</math>、<math>\rho_{v2}</math>は、</p> <p><math>\rho_{a1}</math> 原子炉格納容器内空気密度（原子炉格納容器内空気分圧に対する密度）  <math>\rho_{v1}</math> 原子炉格納容器内水蒸気密度（原子炉格納容器内飽和温度に対する密度）  <math>\rho_{a2}</math> 格納容器再循環ユニット出口空気密度（格納容器再循環ユニット出口空気分圧に対する密度）  <math>\rho_{v2}</math> 格納容器再循環ユニット出口水蒸気密度（格納容器再循環ユニット出口飽和温度に対する密度）</p> <p>により定義され、格納容器再循環ユニット出口の空気分圧は、全圧と水蒸気分圧との差である。また、格納容器再循環ユニット出口水蒸気分圧は飽和温度から求める。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>以下、水素を含まない場合と水素を含む場合とに分けて評価を行い、両者を比較することで自然対流流速を評価する。</p> <p>a) 水素を含まない場合</p> <p>流速を評価するため、原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>及び格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho_2</math>を算定する。</p> <p>気体の密度<math>\rho_a</math>は、状態方程式を用い、</p> $\rho_a = \frac{P_a \times 1.01325 \times 10^5}{R_a \times (T + 273.15)}$ <p>により計算する。ここで、<math>P_a</math>は気体分圧[atm]、<math>R_a</math>はガス定数[J/K/kg]、<math>T</math>は雰囲気温度[°C]である。</p> <p>まず、原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>を求める。原子炉格納容器圧力が3.97atmの場合の原子炉格納容器内の条件は、</p> <p>《原子炉格納容器内条件》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉格納容器内温度： 130°C（原子炉格納容器圧力の飽和温度）</li> <li>・原子炉格納容器内水蒸気分圧： 2.67atm</li> <li>・原子炉格納容器内空気分圧： 1.31atm</li> <li>・原子炉格納容器内水蒸気密度<math>\rho_{v1}</math>：1.50kg/m<sup>3</sup>（飽和蒸気密度）</li> <li>・原子炉格納容器内空気密度<math>\rho_{a1}</math>： 1.14kg/m<sup>3</sup></li> </ul> <p>である。ここで、原子炉格納容器内空気密度<math>\rho_{a1}</math>は、</p> $\rho_a = \frac{P_a \times 1.01325 \times 10^5 - 1.31 \times 1.01325 \times 10^5}{R_a \times (T + 273.15)} = \frac{289 \times (130 + 273.15)}{289 \times (130 + 273.15)} = 1.14$ <p>により求めている。原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>は、<math>\rho_{a1}</math>と<math>\rho_{v1}</math>の和であり、</p> $\rho_1 = \rho_{a1} + \rho_{v1} = 1.50 + 1.14 = 2.64 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{①}$ <p>を得る。</p> <p>次に、格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho_2</math>を求める。原子炉格納容器圧力が3.97atmの場合の格納容器再循環ユニット出口の条件は、</p> <p>《格納容器再循環ユニット出口条件》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器再循環ユニット出口温度： 74.2°C (冷却コイルバランス計算値)</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口水蒸気分圧： 0.37atm (格納容器再循環ユニット出口温度の飽和蒸気圧力)</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口空気分圧： 3.61atm</li> </ul>	



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>(全圧-飽和蒸気分圧)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>格納容器再循環ユニット出口水蒸気密度<math>\rho_{v2}</math> : 0.23kg/m<sup>3</sup></li> </ul> <p>(飽和蒸気密度)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>格納容器再循環ユニット出口空気密度<math>\rho_{a2}</math> : 3.64kg/m<sup>3</sup></li> </ul> <p>である。ここで、格納容器再循環ユニット出口空気密度<math>\rho_{a2}</math>は、</p> $\rho_a = \frac{p_a \times 1.01325 \times 10^5}{R_a \times (T + 273.15)} = \frac{3.61 \times 1.01325 \times 10^5}{289 \times (74.2 + 273.15)} = 3.64$ <p>により求めている。格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho_2</math>は、<math>\rho_{a2}</math>と<math>\rho_{v2}</math>の和であり、</p> $\rho_2 = \rho_{a2} + \rho_{v2} = 0.23 + 3.64 = 3.87 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \textcircled{2}$ <p>を得る。</p> <p><u>b) 水素を含む場合（水素混合空気の場合）</u></p> <p>a) の状態から、ドライ換算濃度 13vol%の水素が混入した場合の評価を行う。      水素が混入した場合の密度変化は、</p> <p>原子炉格納容器内密度（水素混入後）：<math>\rho'_1 = \rho'_{a1} + \rho_{v1}</math>      格納容器再循環ユニット出口密度（水素混入後）：<math>\rho'_2 = \rho'_{a2} + \rho_{v2}</math></p> <p>であり、このときの、気体の密度<math>\rho'_a</math>は、</p> $\rho'_a = \frac{p'_a \times 1.01325 \times 10^5}{R'_a \times (T + 273.15)}$ <p>により計算する。</p> <p>まず、水素混入後の原子炉格納容器内密度<math>\rho'_1</math>を求める。原子炉格納容器圧力は、3.97atmから水素混入により加圧された状態であり 4.17atm とする。このときの原子炉格納容器内の条件は、</p> <p>《原子炉格納容器内条件》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉格納容器内温度： 130℃（原子炉格納容器圧力の飽和温度）</li> <li>原子炉格納容器内水蒸気分圧： 2.67atm</li> <li>原子炉格納容器内空気分圧： 1.50atm（水素濃度を 13vol%）</li> <li>原子炉格納容器内水蒸気密度<math>\rho'_{v1}</math> : 1.50kg/m<sup>3</sup>（飽和蒸気密度）</li> <li>原子炉格納容器内空気密度<math>\rho'_{a1}</math> : 1.15kg/m<sup>3</sup></li> </ul> <p>である。ここで、原子炉格納容器内空気密度<math>\rho'_{a1}</math>は、</p> $\rho'_a = \frac{p'_a \times 1.01325 \times 10^5}{R'_a \times (T + 273.15)} = \frac{1.50 \times 1.01325 \times 10^5}{328 \times (130 + 273.15)} = 1.15$ <p>により求めている。原子炉格納容器内密度<math>\rho_1</math>は、<math>\rho_{a1}</math>と<math>\rho_{v1}</math>の和であり、</p> $\rho_1 = \rho_{a1} + \rho_{v1} = 1.50 + 1.15 = 2.65 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \textcircled{3}$	

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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>を得る。</p> <p>次に、水素混入後の格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho'_2</math>を求める。原子炉格納容器圧力が4.17atmの場合の格納容器再循環ユニット出口の条件は、</p> <p>《格納容器再循環ユニット出口条件》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器再循環ユニット出口温度： 74.2℃ （水素を含まない場合の冷却出口温度を第一近似として設定）</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口水蒸気分圧： 0.37atm （雰囲気温度の飽和蒸気圧力）</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口空気分圧： 3.80atm （全圧－飽和蒸気分圧）</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口水蒸気密度<math>\rho'_{v2}</math>：0.23kg/m<sup>3</sup> （飽和蒸気密度）</li> <li>・格納容器再循環ユニット出口空気密度<math>\rho'_{a2}</math>： 3.38kg/m<sup>3</sup></li> </ul> <p>である。ここで、水素混入後の格納容器再循環ユニット出口空気密度<math>\rho'_{a2}</math>は、</p> $\rho'_{a2} = \frac{P_a \times 1.01325 \times 10^5}{R_a \times (T + 273.15)} = \frac{3.80 \times 1.01325 \times 10^5}{328 \times (74.2 + 273.15)} = 3.38$ <p>により求めている。水素混入後の格納容器再循環ユニット出口密度<math>\rho'_2</math>は、<math>\rho'_{a2}</math>と<math>\rho'_{v2}</math>の和であり、</p> $\rho'_2 = \rho'_{a2} + \rho'_{v2} = 0.23 + 3.38 = 3.61 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{④}$ <p>を得る。</p> <p><u>c) 流速への影響評価</u></p> <p>a) 及び b) の結果から、水素を含まない場合と水素を含む場合を比較することで自然対流流速を評価する。</p> <p>自然対流流量（流速）は、自然対流力の式及び圧力損失の式、即ち、</p> <p>自然対流力の式： <math>P_d = h \cdot (\rho_2 - \rho_1)</math></p> <p>圧力損失の式： <math>\Delta P = \frac{\zeta \times V^2 \times \rho_m}{2g}</math></p> <p>において、<math>P_d</math>と<math>\Delta P</math>がバランスする場合の流速<math>V</math>であり、上式の右辺同士が等しい状態であり、流速<math>V</math>について解くと、</p> $V = \sqrt{\frac{2gh}{\zeta} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_m}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_m}}$ <p>を得る。ここで、<math>\alpha</math>は定数をひとまとめにしたものである。</p> <p>上式に、A) 及びB) の結果を代入することで、</p> <p>水素を含まない場合 <math>V = \alpha \times 0.615</math></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

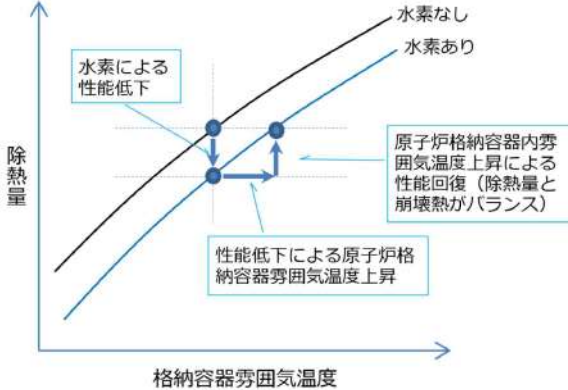
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
	<p>水素を含む場合 <math>V' = \alpha \times 0.554</math></p> <p>となり、水素を含む場合は、水素を含まない場合に対して、流速が約90%（約10%の低下）になる。</p> <table border="1" data-bbox="1160 284 1823 429"> <thead> <tr> <th></th> <th>水素を含まない場合</th> <th>水素を含む場合</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>雰囲気密度</td> <td>2.64 kg/m<sup>3</sup></td> <td>2.65 kg/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>ユニット出口密度</td> <td>3.87 kg/m<sup>3</sup></td> <td>3.61 kg/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>流速</td> <td><math>\alpha \times 0.615</math> m/s</td> <td><math>\alpha \times 0.554</math> m/s (左記に対し-10%)</td> </tr> </tbody> </table> <p>水素が存在しない場合からドライ換算で13vol%に相当する水素ガスが増加した状態とは、非凝縮性ガスの割合が1割程度増加した状態である。これを、冷却コイル表面での蒸気凝縮現象への影響として捉えると、冷却面への蒸気拡散に対する非凝縮性ガスが1割増加した状態であると捉えることができる。</p> <p>D) 水素影響評価のまとめ</p> <p>以上の検討の結果、最大限水素濃度が増加する場合（ドライ換算で13vol%）の影響として、水素が存在しない場合に対し、</p> <p>除熱量の低下 : 約7%          流速の低下 : 約10%</p> <p>が見込まれる。</p> <p>なお、除熱量と流速が低下する場合には、原子炉格納容器の除熱が悪化する分、原子炉格納容器内温度は高くなることから、除熱量と流速はある程度、改善される。</p> <p>(3) 感度解析</p> <p>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モデルに関する不確かさとしては、水素が存在する場合に性能低下が見込まれることから、代表3ループプラントを例として、感度解析により原子炉格納容器内の圧力及び温度への影響を評価する。</p> <p>A) 解析条件</p> <p>感度解析のベースケースは、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧破損）」である。ベースケースでは、3.3.5(3)で述べたとおり、設計値に基づく除熱特性（雰囲気温度に対する流速及び除熱量の関係）を与えている。また、(2)の検討より、最大限水素濃度が増加するとした場合の除熱特性の低下は、除熱量で約7%、流速で約10%である。感度解析ケースとしてこれらの性能低下を考慮した解析を実施した。</p>		水素を含まない場合	水素を含む場合	雰囲気密度	2.64 kg/m <sup>3</sup>	2.65 kg/m <sup>3</sup>	ユニット出口密度	3.87 kg/m <sup>3</sup>	3.61 kg/m <sup>3</sup>	流速	$\alpha \times 0.615$ m/s	$\alpha \times 0.554$ m/s (左記に対し-10%)	
	水素を含まない場合	水素を含む場合												
雰囲気密度	2.64 kg/m <sup>3</sup>	2.65 kg/m <sup>3</sup>												
ユニット出口密度	3.87 kg/m <sup>3</sup>	3.61 kg/m <sup>3</sup>												
流速	$\alpha \times 0.615$ m/s	$\alpha \times 0.554$ m/s (左記に対し-10%)												



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<table border="1" data-bbox="1160 197 1843 400"> <thead> <tr> <th></th> <th>除熱特性</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>設計に基づく除熱特性</td> <td>設計値</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>設計に基づく除熱特性に対し、以下を見込む 除熱量： -7% 流速： -10%</td> <td>水素による除熱特性への影響の検討結果（4.3.3）を包絡するよう設定</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="1059 467 1171 491">B) 解析結果</p> <p data-bbox="1108 499 1962 863">                     解析結果を図 4.3-10 に示す。事象発生の24時間後に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を開始することにより、原子炉格納容器圧力を長期的に低下させる。感度解析ケースにおいては、除熱量を7%、流速を10%低下させているため、原子炉格納容器圧力及び温度が高めに推移する傾向があり、原子炉格納容器最高圧力は約0.351MPa[gage]で、ベースケース（約0.335MPa[gage]）よりも約0.016 MPa 高めに評価する結果となる。原子炉格納容器内温度は約135℃であり、ベースケース（約133℃）よりも約2℃高めに評価する結果となる。このように、性能低下幅（除熱量：7%、流速：10%）に対して、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇はわずかであった。その理由は、格納容器再循環ユニットでの除熱量が低下したことで原子炉格納容器内温度が高めとなるためにヒートシンクへの伝熱量が増加すること、及び、格納容器再循環ユニットの除熱効果が改善されることが考えられる。後者は、下図に示すとおりであり、性能低下により原子炉格納容器内温度が上昇するが、それにより除熱性能が改善されることによる。                 </p>  <p data-bbox="1290 1353 1727 1377">原子炉格納容器再循環ユニット除熱特性 概念図</p>		除熱特性	設定根拠	ベースケース	設計に基づく除熱特性	設計値	感度解析ケース	設計に基づく除熱特性に対し、以下を見込む 除熱量： -7% 流速： -10%	水素による除熱特性への影響の検討結果（4.3.3）を包絡するよう設定	
	除熱特性	設定根拠									
ベースケース	設計に基づく除熱特性	設計値									
感度解析ケース	設計に基づく除熱特性に対し、以下を見込む 除熱量： -7% 流速： -10%	水素による除熱特性への影響の検討結果（4.3.3）を包絡するよう設定									

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

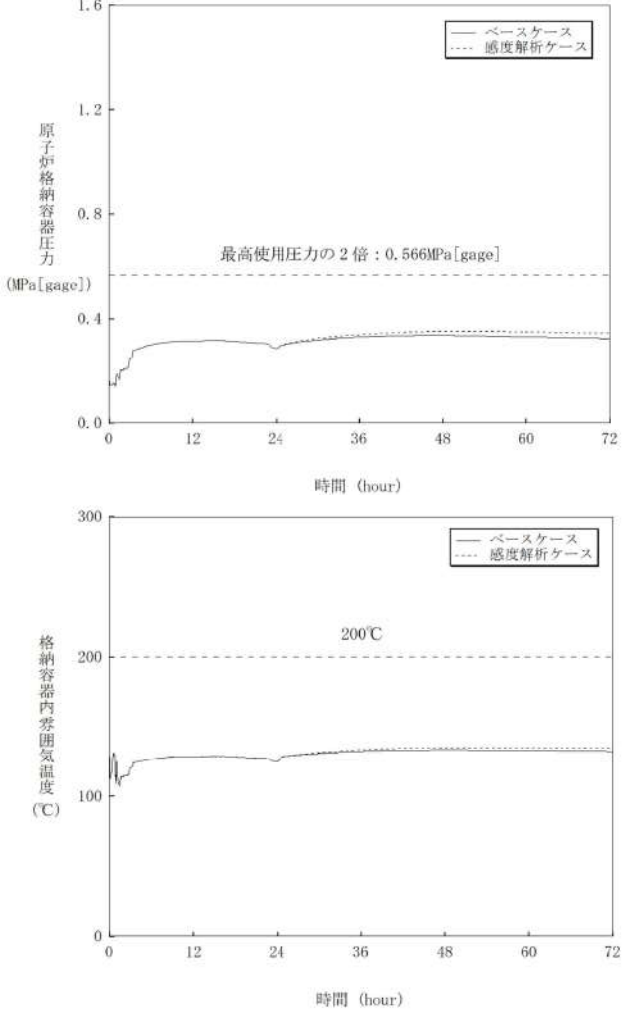
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<p>これらの結果、水素による性能低下に対して、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇が抑えられていると考えられる。</p> <p>なお、本評価は、最大限水素濃度が増加するとした場合（ドライ換算 13vol%）に対する評価であり、実際の性能低下は、実際の水素生成量、水素処理装置による処理から求められる水素濃度に依存する。</p> <p>(4) まとめ</p> <p>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モデルに関する不確かさの検討を行い、原子炉格納容器内に水素が存在する場合に除熱性能の低下が見込まれることから、代表3ループプラントを例として、最大水素濃度（ドライ条件換算で 13vol%）を想定した場合、水素が存在しない場合に対して、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 除熱量の低下 : 約 7%</li> <li>・ 流速の低下 : 約 10%</li> </ul> <p>の不確かさがあることを確認した。なお、本評価は、最大限水素濃度が増加するとした場合（ドライ条件換算 13vol%）に対する評価であり、実際の性能低下は水素濃度に依存する。</p> <p>上記の不確かさについて、感度解析により、有効性評価への影響を確認した。その結果、原子炉格納容器最高圧力で約 0.016MPa、原子炉格納容器内最高温度で約 2℃の感度があり、原子炉格納容器の最高使用圧力の 2 倍及び原子炉格納容器内温度 200℃までの余裕は少なくなる傾向となるが、原子炉格納容器内温度が高めとなることで、ヒートシンクへの伝熱量の増加、及び、格納容器再循環ユニットの除熱効果の改善の効果があり、不確かさの影響は、最高使用圧力の2倍及び200℃に対する余裕に比べて1桁程度小さい。</p> <table border="1" data-bbox="1189 895 1771 1074"> <thead> <tr> <th></th> <th>ベースケース</th> <th>感度解析ケース</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原子炉格納容器最高圧力 (MPa[gage])</td> <td>約 0.335 (0.231)</td> <td>約 0.351 (0.215)</td> </tr> <tr> <td>原子炉格納容器内最高温度 (℃)</td> <td>約 133 (67)</td> <td>約 135 (65)</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 括弧内は最高使用圧力の2倍 (0.566MPa[gage]) あるいは200℃までの余裕を示す。</p> <p>上記の評価は、代表3ループプラントを対象とした結果であり、ループ数によらず各プラントで同様の格納容器内自然対流冷却の方式（メカニズム）を採用していることから、原子炉格納容器内に水素が存在する場合に圧力及び雰囲気温度を高め評価する傾向については各プラントでも同様であり、MAAPコードの自然対流冷却に関するモデルは、水素が存在する場合の影響評価手法も含め、実機解析に適用できる。ただし、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冷却性能等の条件はプラントによって異なることから、不確かさの幅（水素による性能低下の幅）及びその影響程度は、プラント毎に評価を要する。</p>		ベースケース	感度解析ケース	原子炉格納容器最高圧力 (MPa[gage])	約 0.335 (0.231)	約 0.351 (0.215)	原子炉格納容器内最高温度 (℃)	約 133 (67)	約 135 (65)	
	ベースケース	感度解析ケース									
原子炉格納容器最高圧力 (MPa[gage])	約 0.335 (0.231)	約 0.351 (0.215)									
原子炉格納容器内最高温度 (℃)	約 133 (67)	約 135 (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）

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）

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="1563 209 1960 272">「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p>  <p data-bbox="1182 1332 1848 1388">図 4.3-10 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モデルに関する感度解析結果</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.2 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、被覆管変形〔炉心（燃料）〕）</p> <p>炉心ヒートアップに関する解析モデル（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）については、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響の程度を把握する。</p> <p>(1) 解析条件</p> <p>原子炉水位が低下すると、燃料表面からの除熱が低下し崩壊熱によって炉心がヒートアップする。その際、燃料被覆管温度が上昇すると崩壊熱にジルコニウム-水反応の酸化発熱反応が加わりヒートアップが加速される。また、炉心ヒートアップの過程で燃料棒内が加圧され被覆管破裂が発生する可能性がある。これらの挙動が炉心ヒートアップ速度に与える影響については十分な知見が得られていないことから、BWR 5Mark-I 改良型格納容器プラントを例として、炉心ヒートアップ速度に関する感度解析を実施して、その影響の程度を確認する。</p> <p>この感度解析では、ジルコニウム-水反応が一旦開始すると、この反応熱は崩壊熱よりも大きく、ヒートアップに最も寄与することから、ジルコニウム-水反応の速度に着目する。ジルコニウム-水反応速度の感度をみるため、ジルコニウム-水反応の起きる面積を変化させた感度解析を実施する。反応の起きる面積に乘じる係数（ジルコニウム-水反応速度の係数）はジルコニウム-水反応の計算のみに使用され、熱水力挙動の計算に使用される燃料被覆管の直径、長さ等の幾何形状を変えるものではない。この係数を増加させることにより、酸化反応熱の発生速度、水素ガス発生速度、酸化ジルコニウム生成速度が速くなる方向に影響する。これらは炉心熔融進展が速くなる方向へ作用する。この係数は、ベースケースでは燃料被覆管表面積に基づき1倍を与えている。これは、ヒートアップ時には燃料被覆管破裂が発生する場合に破裂部の燃料被覆管内面の酸化もあるが、燃料被覆管内面の酸化は、限定された破裂部のみで生じること、炉心形状が健全な状態は熔融過程の比較的短期間であることから、炉心全体が熔融する状況では内面の反応は無視できると考えられることに基づいている。</p> <p>これに対し、感度解析のパラメータの振り幅としては、炉心ヒートアップ速度が速くなる場合の応答の確認として仮想的な厳しい想定ではあるが、表4.3-1に示すように2倍とする。</p>	<p>4.3.4 炉心ヒートアップ</p> <p>炉心ヒートアップに関する解析モデル（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）については、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見を基に開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響程度を把握する。</p> <p>(1) 解析条件</p> <p>炉心水位が低下すると、燃料表面からの除熱が低下し崩壊熱によって炉心がヒートアップする。その際、燃料被覆管温度が上昇すると崩壊熱にジルコニウム-水反応の酸化発熱反応が加わりヒートアップが加速される。また、炉心ヒートアップの過程で燃料棒内が加圧され燃料被覆管パーストが発生する可能性がある。これらの挙動が炉心ヒートアップ速度に与える影響については十分な知見が得られていないことから、4ループプラントを例として、炉心ヒートアップ速度に関する感度解析を実施して、その影響程度を確認する。</p> <p>この感度解析では、ジルコニウム-水反応が一旦開始すると、この反応熱は崩壊熱よりも大きく、ヒートアップに最も寄与することから、ジルコニウム-水反応の速度に着目する。ジルコニウム-水反応速度の感度をみるため、ジルコニウム-水反応の起きる面積を変化させた感度解析を実施する。反応の起きる面積に乘じる係数（ジルコニウム-水反応速度の係数）はジルコニウム-水反応の計算のみに使用され、熱水力挙動の計算に使用される燃料被覆管の直径、長さ等の幾何形状を変えるものではない。この係数を増加させることにより、酸化反応熱の発生速度、水素発生速度、酸化ジルコニウム生成速度が高くなる方向に影響する。これらは炉心熔融進展が早まる方向へ作用する。この係数は、ベースケースでは燃料被覆管表面積に基づき1倍を与えている。これは、ヒートアップ時には燃料被覆管パーストが発生する場合にパースト部の燃料被覆管内面の酸化もあるが、燃料被覆管内面の酸化は、限定されたパースト部のみで生じること、炉心形状が健全な状態は熔融過程の比較的短期間であることから、炉心全体が熔融する状況では内面の反応は無視できると考えられることに基づいている。これに対し、感度解析のパラメータの振り幅としては、炉心ヒートアップ速度が速くなる場合の応答の確認として、仮想的な厳しい想定ではあるが、2倍とする。</p>	



女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																		
<p style="text-align: center;">表 4.3-1 炉心ヒートアップの感度解析ケース</p> <table border="1" data-bbox="241 233 949 363"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ジルコニウム-水 反応速度の係数</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>1倍</td> <td>燃料被覆管表面積に基づく値</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>2倍</td> <td>燃料被覆管表面積に基づく値の2倍</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 解析結果</p> <p>炉心ヒートアップの進展は、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、格納容器破損防止対策の有効性評価のうち、「高圧・低圧注水機能喪失（原子炉压力容器破損）」（以下「TQUVシーケンス」という。）及び「大破断LOCA時注水機能喪失（原子炉压力容器破損）」（以下「大破断LOCAシーケンス」という。）について、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。</p> <p>A) TQUVシーケンス（添付1に詳細を記載）</p> <p>解析結果を図4.3-3に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。ヒートアップ時のジルコニウム-水反応速度の係数を2倍にしたことで、金属-水反応による酸化反応熱が増加することから、炉心溶融は感度解析ケースにおいて約5分早くなっている。原子炉压力容器破損時の原子炉圧力はわずかに高くなるが2.0MPa[gage]以下である。また、格納容器圧力・格納容器温度に対しては、酸化反応熱が増加することから、原子炉格納容器に放出された熱量の増加によりベースケースより高めになるが、その差はわずかである。</p> <p>B) 大破断LOCAシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-4に示す。大破断LOCAシーケンスでは、原子炉压力容器内の冷却材インベントリが急激に減少し除熱が悪化することから、TQUVシーケンスと比較してより早い時間からヒートアップが進展する。感度解析ケースにおいてはヒートアップ時の被覆管表面積を2倍にしたが、大破断LOCA事象と同時に原子炉冷却材が喪失するため、原子炉内の限られたインベントリに対する酸化反応は限定的であり、反応表面積を増加した場合の方が炉心溶融までの時間を遅くする。炉心溶融は、感度解析ケースにおいて約4分遅くなっている。TQUVシーケンスでは、原子炉压力容器内の冷却材インベントリの減少がより緩やかであることから、炉心部への蒸気供給が継続される。このため、ヒートアップ時の被覆管表面積の感度はTQUVシーケンスの方が大きくなったものである。</p>	項目	ジルコニウム-水 反応速度の係数	設定根拠	ベースケース	1倍	燃料被覆管表面積に基づく値	感度解析ケース	2倍	燃料被覆管表面積に基づく値の2倍	<table border="1" data-bbox="1160 233 1818 363"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ジルコニウム-水 反応速度の係数</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>1倍</td> <td>燃料被覆管表面積に基づく値</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>2倍</td> <td>燃料被覆管表面積に基づく値の2倍</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 解析結果</p> <p>炉心ヒートアップの進展は、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、SBOシーケンスとLOCAシーケンスについて、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。</p> <p>A) SBOシーケンス（添付1に詳細を記載）</p> <p>解析結果を図4.3-11に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍にしたことで、ジルコニウム-水反応による酸化反応熱が増加することから、炉心溶融は感度解析ケースにおいて約4分早くなっている。さらに、酸化反応熱が増加することでその後の炉心溶融の進展も早くなることから、下部プレナムへのリロケーション開始は約14分早くなっている。この影響として、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力はわずかに高くなるが2.0MPa[gage]以下である。また、原子炉格納容器圧力・温度に対しては、酸化反応熱が増加したため、原子炉格納容器に放出された熱量の増加によりベースケースより高めになるが、その差はわずかである。</p> <p>B) LOCAシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-12に示す。ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍にしたことで、ジルコニウム-水反応による酸化反応熱が増加する。炉心溶融は、ベースケースと感度解析ケースでほぼ同時に発生する。リロケーション開始は感度解析ケースの方が約30秒早くなるにとどまり、SBOシーケンスと比較して感度が小さい結果となっている。LOCAシーケンスでは、1次冷却系保有水量が減少し除熱が悪化することから、SBOシーケンスと比較してより早い時間よりヒートアップが進展する。SBOシーケンスでは、1次冷却系保有水量の減少がより緩やかであることから、ヒートアップ挙動はより緩慢となる。このため、ジルコニウム-水反応速度の係数の感度はSBOシーケンスの方が大きくなったものである。</p>	項目	ジルコニウム-水 反応速度の係数	設定根拠	ベースケース	1倍	燃料被覆管表面積に基づく値	感度解析ケース	2倍	燃料被覆管表面積に基づく値の2倍	
項目	ジルコニウム-水 反応速度の係数	設定根拠																		
ベースケース	1倍	燃料被覆管表面積に基づく値																		
感度解析ケース	2倍	燃料被覆管表面積に基づく値の2倍																		
項目	ジルコニウム-水 反応速度の係数	設定根拠																		
ベースケース	1倍	燃料被覆管表面積に基づく値																		
感度解析ケース	2倍	燃料被覆管表面積に基づく値の2倍																		

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) まとめ</p> <p>ヒートアップに関してジルコニウム-水反応が促進される場合の影響を確認するため、仮想的な厳しい振幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析を行った。炉心溶融のタイミングについては、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。また、下部プレナムへのリロケーションの開始時刻は、両シーケンスともベースケースとほとんど同時であり、炉心溶融開始から原子炉圧力容器破損までは3～4時間程度の時間があることから、原子炉圧力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされており、実機解析への影響はない。さらに、TQUVシーケンスでは、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力も2.0MPa[gage]以下であり、格納容器圧力への影響もわずかとなることから、実機解析への影響はない。水素ガス発生観点では、感度解析においては被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的に被覆管表面積（ジルコニウム-水反応速度の係数）を大きくしているものであり、実機の被覆管表面積は形状により決まることから影響しない。また、原子炉圧力容器破損時刻への感度は大きくなく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</p> <p>以上より、有効性評価への適用性に問題はないと判断した。</p>	<p>(3) まとめ</p> <p>ヒートアップに関してジルコニウム-水反応が促進される場合の影響を確認するため、仮想的な厳しい振幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析を行った。運転員等操作の起点となる炉心溶融については、SBO、LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。また、下部プレナムへのリロケーションの開始時刻は、SBOシーケンスで約14分の感度があるが、SBOシーケンスは事象進展が遅く、炉心溶融開始から原子炉容器破損までは3～4時間程度の時間がかかることから、原子炉容器破損時点で原子炉下部キャビティに十分な注水がなされており、実機解析への影響はない。さらに、SBOシーケンスでは、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力も2.0MPa[gage]以下であり、原子炉格納容器圧力の上昇もわずかとなることから、実機解析への影響はない。水素発生観点では、感度解析においては燃料被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的にジルコニウム-水反応速度の係数を大きくしているものであり、実機の燃料被覆管反応表面積は形状により決まること、また、水素生成量は全炉心内のZrの75%が酸化反応するという条件に包絡されることから影響しない。</p> <p>また、LOCAシーケンスにおいて原子炉容器破損時刻への感度は大きくなく、原子炉下部キャビティへの注水量に大きな差は生じないことから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</p> <p>以上より、有効性評価への適用性に問題はないと判断した。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p>	
<p>図 4.3-3 炉心ヒートアップに関する感度解析結果（TQUVシーケンス）（1/2）</p>	<p>図 4.3-11 炉心ヒートアップに関する感度解析結果（SBOシーケンス）（1/2）</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ドライウエル圧力 (kPa [gage])</p> <p>ドライウエル雰囲気温度 (°C)</p> <p>格納容器限界圧力 (854kPa [gage] (最高使用圧力の2倍))</p> <p>格納容器限界温度 (200°C)</p> <p>逃がし安全弁開による減圧開始</p> <p>原子炉圧力容器破損</p> <p>ベースケース</p> <p>ヒートアップ時の被覆管表面積感度ケース</p> <p>事故後の時間 (h)</p>	<p>原子炉格納容器圧力 (MPa [gage])</p> <p>格納容器内雰囲気温度 (°C)</p> <p>最高使用圧力の2倍 : 0.784MPa [gage]</p> <p>200°C</p> <p>ベースケース</p> <p>ヒートアップ時の被覆管表面積感度ケース</p> <p>時間 (hour)</p> <p>時間 (hour)</p>	
<p>図 4.3-3 炉心ヒートアップに関する感度解析結果 (TQUVシーケンス) (2/2)</p>	<p>図 4.3-11 炉心ヒートアップに関する感度解析結果 (SB0シーケンス) (2/2)</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>Figure 4.3-4 consists of two line graphs. The top graph plots '炉心燃料質量 (ton)' (Core fuel mass) on the y-axis (0 to 300) against '事故後の時間 (h)' (Time after accident) on the x-axis (0 to 10). It shows two curves: a solid line for 'ベースケース' (Base case) and a red line for 'ヒートアップ時の被覆管表面積感度ケース' (Sensitivity case for heatup). Both curves show a sharp drop in fuel mass starting around 1.5 hours, labeled '炉心溶融開始' (Core melting start), and '下部プレナムへの溶融炉心落下開始' (Start of molten core falling into the lower plenum). The bottom graph plots 'ドライウエル圧力 (kPa[gage])' (Drywell pressure) on the y-axis (0 to 1600) against '事故後の時間 (h)' on the x-axis. It shows a horizontal line at 850 kPa labeled '格納容器限界圧力 (85kPa[gage]) (最高使用圧力の2倍)' (Containment vessel limit pressure (2x max operating pressure)). The curves show a pressure spike around 2 hours labeled '下部プレナムへの溶融炉心落下による圧力上昇' (Pressure rise due to molten core falling into the lower plenum) and another spike around 4 hours labeled '原子炉圧力容器破損' (Nuclear reactor pressure vessel rupture).</p>	<p>Figure 4.3-12 consists of two line graphs. The top graph plots '炉心燃料質量 (ton)' (Core fuel mass) on the y-axis (0 to 200) against '時間 (hour)' on the x-axis (0 to 4). It shows two curves: a solid line for 'ベースケース' (Base case) and a dashed line for 'ヒートアップ時の被覆管表面積感度ケース' (Sensitivity case for heatup). Both curves show a sharp drop in fuel mass starting around 1 hour, labeled '炉心溶融' (Core melting), and 'リロケーション' (Relocation). The bottom graph plots '原子炉格納容器圧力 (MPa[gage])' (Atomic reactor containment vessel pressure) on the y-axis (0.0 to 1.6) against '時間 (hour)' on the x-axis. It shows a horizontal line at 0.784 MPa labeled '最高使用圧力の2倍 : 0.784MPa[gage]' (2x max operating pressure). The curves show a pressure spike around 2 hours labeled '原子炉容器破損' (Atomic reactor vessel rupture).</p>	
<p>図 4.3-4 炉心ヒートアップに関する感度解析結果（大破断LOCAシーケンス）</p>	<p>図 4.3-12 炉心ヒートアップに関する感度解析結果（LOCA シーケンス）</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
<p>4.3.3 リロケーション [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響の程度を把握する。</p> <p>(1) 解析条件</p> <p>炉心がヒートアップすると、燃料が自立した状態から、燃料が崩壊した状態となる。燃料が崩壊すると、燃料が自立した状態に比べて水蒸気による冷却が困難となり、熔融状態へ至る事象進展が早くなる。MAAPコードでは、炉心温度と破損時間の関係を整理した Larson-Miller パラメータを利用して、炉心ノード崩壊の判定を行っており、この条件がリロケーションに与える影響については十分な知見が得られていないことから、BWR 5Mark-I 改良型格納容器プラントを例として、燃料崩壊によるリロケーションに関する感度解析を実施して、その影響の程度を確認する。</p> <p>ベースケースでは、炉心ノードの崩壊について、炉心ノード温度 <input type="text" value=""/> K と <input type="text" value=""/> 時間の関係から Larson-Miller パラメータを設定しているが、感度解析では、さらに炉心ノードの崩壊が早く進むことを想定し、表 4.3-2 に示すように、炉心ノード温度 <input type="text" value=""/> K と <input type="text" value=""/> 時間（あるいは <input type="text" value=""/> K で <input type="text" value=""/> 秒）から Larson-Miller パラメータを設定した場合の影響を確認する。これは、炉心ノード崩壊のパラメータを <input type="text" value=""/> K 低くするものであり、炉心ヒートアップ時の燃料及び燃料被覆管の融点は精度よく予測できるため、<input type="text" value=""/> K 低く評価することは実現象に対しては仮想的かつ厳しいものであるが、リロケーションが早く進む場合の影響の把握を目的としたものである。なお、実際には炉心ノードの温度履歴に応じて、炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算している。</p> <p>表 4.3-2 リロケーションに関する感度解析のパラメータ</p> <table border="1" data-bbox="248 1058 936 1225"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>炉心ノード崩壊のパラメータ (炉心温度)</th> <th>設定根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td><input type="text" value=""/> K</td> <td>当該変数設定範囲のノミナル値</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td><input type="text" value=""/> K</td> <td>炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定</td> </tr> </tbody> </table>	項目	炉心ノード崩壊のパラメータ (炉心温度)	設定根拠	ベースケース	<input type="text" value=""/> K	当該変数設定範囲のノミナル値	感度解析ケース	<input type="text" value=""/> K	炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定	<p>4.3.5 リロケーション</p> <p>炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見を基に開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心熔融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析を実施して、その影響程度を把握する。</p> <p>(1) 解析条件</p> <p>炉心がヒートアップすると、燃料棒の体系から、燃料ペレットが崩壊した状態となる。燃料ペレットが崩壊すると、燃料棒体系の場合に比べて水蒸気による冷却が困難となり、熔融状態へ至る事象進展が早くなる。MAAPコードでは、炉心がある温度に達してから、燃料ペレットが崩壊するまでの時間（あるいは、一定時間のうちに燃料ペレットが崩壊する温度）を条件として、炉心崩壊の判定を行っており、この条件がリロケーションに与える影響については十分な知見が得られていないことから、リロケーションに関する感度解析を実施して、その影響程度を確認する。</p> <p>ベースケースでは、炉心ノードが <input type="text" value=""/> K 一定と仮定した場合に <input type="text" value=""/> 時間で炉心が崩壊することを想定しているが、感度解析では、炉心崩壊が早く進むことを想定し、炉心ノードが <input type="text" value=""/> K 一定と仮定した場合に <input type="text" value=""/> 時間（あるいは <input type="text" value=""/> K 一定で <input type="text" value=""/> 秒）経過すると炉心が崩壊する場合の影響を確認する。これは、炉心崩壊の判定条件を <input type="text" value=""/> K 早くするものであり、炉心ヒートアップ時の燃料及び燃料被覆管の融点は精度よく予測できるため、<input type="text" value=""/> K 低く評価することは実現象に対しては仮想的かつ厳しいものであるが、リロケーションが早く進む場合の影響の把握を目的としたものである。なお、実際には温度履歴に応じて、燃料ペレットが崩壊するまでの時間を計算している。</p>	
項目	炉心ノード崩壊のパラメータ (炉心温度)	設定根拠									
ベースケース	<input type="text" value=""/> K	当該変数設定範囲のノミナル値									
感度解析ケース	<input type="text" value=""/> K	炉心ノードが崩壊する時間を早めるように設定									

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。

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 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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 解析結果</p> <p>炉心のリロケーションは、炉心領域の冷却材が失われ、崩壊熱及び被覆管酸化反応により燃料温度が上昇して発生するが、TQUVシーケンスと大破断LOCAシーケンスについて、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。</p> <p>A) TQUVシーケンス（添付1に詳細を記載）</p> <p>解析結果を図4.3-5に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。感度解析ケースにおいては、炉心ノードが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に炉心ノードの崩壊及び炉心溶融が進展することになるものの、その影響は限定的であり、事象全体の進展に大きな影響はない。原子炉圧力容器破損時刻に関してもほぼ同時刻である。この時の原子炉圧力は、ベースケースとほぼ同じであり、2.0MPa[gage]以下である。また、格納容器圧力に対しても、到達する圧力や温度の差はわずかである。</p> <p>B) 大破断LOCAシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-6に示す。大破断LOCAシーケンスでは、原子炉圧力容器内のインベントリが減少し除熱が悪化することから炉心のヒートアップが促進され、TQUVシーケンスと比較して早い時間でリロケーションが進展する。感度解析ケースにおいては、炉心ノードが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に炉心ノードの崩壊及び炉心溶融が進展することになるものの、TQUVシーケンスと同様、事象全体の進展に大きな影響はない。また、格納容器圧力に対しても、到達する圧力や温度の差はわずかである。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>リロケーションが早く進む場合の確認として、非常に厳しい条件ながら、炉心ノード崩壊の判定温度を低下させた感度解析を行った。炉心溶融のタイミングについては、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。なお、原子炉圧力容器破損の時点についても両シーケンスで感度はなく、実機解析への影響はない。さらに、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力も2.0MPa[gage]以下であり、実機解析への影響はない。コンクリート侵食量については、原子炉圧力容器破損時刻への感度は大きくなく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。</p>	<p>(2) 解析結果</p> <p>炉心のリロケーションは、炉心領域の冷却材が失われ、崩壊熱及び燃料被覆管酸化反応により燃料温度が上昇して発生するが、SBOシーケンスとLOCAシーケンスについて、感度解析を実施した。以下に結果を述べる。</p> <p>A) SBOシーケンス（添付1に詳細を記載）</p> <p>解析結果を図4.3-13に示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心露出以降に現れる。感度解析ケースにおいては、燃料ペレットが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に燃料ペレットの崩壊及び炉心溶融が進展するが、炉心溶融時刻はほぼ同時刻である。リロケーション時刻は、約17分感度解析ケースの方が早いものの、図から分かる通り感度解析ケースでリロケーション直後の溶融炉心の移動量はわずかであり、事象全体の進展に大きな影響は無い。原子炉容器破損時刻は、感度解析ケースの方が約26分早くになっている。このときの1次冷却材圧力は、ベースケースよりも高くなるものの、2.0MPa[gage]以下である。また、原子炉格納容器圧力に対しては、溶融炉心の原子炉下部キャビティへの落下時刻が早まるために、原子炉格納容器圧力や温度の上昇時期も早くなるものの、到達する圧力値の差はわずかである。</p> <p>B) LOCAシーケンス</p> <p>解析結果を図4.3-14に示す。感度解析ケースにおいては、燃料ペレットが崩壊する判定を厳しくしたことで、より早期に燃料ペレットの崩壊及び炉心溶融が進展する。ベースケースと感度解析ケースにおいて、炉心溶融時刻は同時刻である。リロケーションは約24秒、原子炉容器破損は約3分と、わずかながら感度解析ケースの方が早いものの、ほぼ同時刻である。LOCAシーケンスでは、1次冷却系保有水量が減少し除熱が悪化することから炉心のヒートアップが促進され、SBOシーケンスと比較して早い時間でリロケーションが進展する。また、溶融炉心の原子炉下部キャビティへの落下のタイミングが変化することで、原子炉格納容器圧力の挙動にも影響するがわずかである。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>リロケーションが早く進む場合の確認として、非常に厳しい条件ながら、炉心崩壊の判定温度を低下させた感度解析を行った。運転員等操作の起点となる炉心溶融については、SBO、LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。また、原子炉容器破損の時点ではSBOシーケンスで約26分の感度があるが、SBOシーケンスは事象進展が遅く、炉心溶融開始から原子炉容器破損までは3～4時間程度の時間がかかることから、原子炉容器破損時点で原子炉下部キャビティに十分な注水がなされており、実機解析への影響はない。さらに、SBOシーケンスでは、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力も2.0MPa[gage]以下であり、原子炉格納容器圧力の上昇幅もわずかであり、実機解析への影響はない。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>以上より、有効性評価への適用性に問題はないと判断した。</p>	<p>水素生成量に関しては、燃料崩壊前の発生量には影響はなく、その後はリロケーションに応じて変化し得るが、全炉心内のZrの75%が酸化反応するという条件に包絡される。</p> <p>コンクリート侵食量については、LOCAシーケンスにおいて原子炉容器破損時刻への感度は小さくなく、原子炉下部キャビティへの注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。</p> <p>以上より、有効性評価への適用性に問題はないと判断した。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.3-5 リロケーションに関する感度解析結果（TQ UVシーケンス）（1/2）</p>	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p> <p>図 4.3-13 リロケーションに関する感度解析結果（SBO シーケンス）（1 / 2）</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ドライウエル圧力 (kPa [gauge])</p> <p>ドライウエル雰囲気温度 (°C)</p> <p>事故後の時間 (h)</p> <p>ベースケース 炉心ノードが崩壊する時間及び温度感度ケース</p> <p>格納容器限界圧力 (854kPa [gauge]) (最高使用圧力の2倍)</p> <p>格納容器限界温度 (200°C)</p> <p>逃がし安全弁開による減圧開始</p> <p>原子炉圧力容器破損</p>	<p>原子炉格納容器圧力 (MPa [gauge])</p> <p>格納容器内雰囲気温度 (°C)</p> <p>時間 (hour)</p> <p>ベースケース 燃料ペレット経路利感度ケース</p> <p>最高使用圧力の2倍 : 0.784MPa [gauge]<sup>4)</sup></p> <p>200°C<sup>4)</sup></p>	
<p>図 4.3-5 リロケーションに関する感度解析結果 (TQUVシーケンス) (2/2)</p>	<p>図 4.3-13 リロケーションに関する感度解析結果 (SBOシーケンス) (2/2)</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.3-6 リロケーションに関する感度解析結果（大破断LOCAシーケンス）</p>	<p>図 4.3-14 リロケーションに関する感度解析結果（LOCA シーケンス）</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.4 原子炉圧力容器内FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）〔原子炉圧力容器（炉心損傷後）〕</p> <p>原子炉圧力容器内FCIにより生じる圧カスパイクは、冷却材圧力バウンダリや原子炉格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損のタイミングにおける原子炉圧力に影響を与えるものと考えられることから、添付1「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。</p> <p>以下に概要をまとめる。</p> <p>(1) 不確かさの整理</p> <p>原子炉圧力容器内FCIは、溶融炉心が炉心から下部プレナムに落下する際に、溶融炉心と冷却材の伝熱により、短期間に水蒸気が発生し、原子炉圧力が急上昇する現象である。したがって、現象に影響する要因として、①下部プレナムの冷却水の状態（温度）、②溶融ジェット径、③エントレイン量、④冷却水とデブリ粒子の伝熱が挙げられる。このうち、①については、崩壊熱と減圧沸騰により決まり、一般的な質量・エネルギー保存則に基づき計算されることから、現象としての不確かさは小さいものと考えられる。よって、②～④について感度解析を行う。</p> <p>(2) 感度解析及び結果</p> <p>A) 溶融ジェット径</p> <p>溶融炉心の下部プレナムへの落下は、物理現象としては、炉心支持板上に堆積した溶融炉心によって炉心支持板が破損するか、又は炉心領域最外周境界のクラストが破損することにより、溶融炉心が下部プレナムへ落下する過程である。これに対し、解析モデルでは、溶融ジェット径は、炉心支持板の開口部の面積の等価直径相当を入力条件として与えたものから計算される。したがって、実現象では解析よりも溶融ジェット径が小さい場合が考えられるため、感度解析としては、その1/10倍を設定した。</p> <p>解析結果を図4.3-7に示す。感度解析ケースでは、溶融ジェット径を小さくしたことにより、細粒化割合が大きくなり、粒子ベットの質量が増加しているため、圧カスパイクによる圧力上昇幅がわずかながら大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は2.0MPa[gage]以下であり大きな感度はないことが確認された。</p> <p>なお、感度解析ケースでは溶融ジェットのほぼ全量が細粒化することから、これ以上ジェット径が小さくなくても、細粒化量はほとんど変化しない。</p>	<p>4.3.6 原子炉容器内 FCI（溶融炉心細粒化、熱伝達）</p> <p>原子炉容器内 FCI により生じる圧カスパイクは、原子炉冷却材圧力バウンダリや原子炉格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物噴出を防止する観点で、原子炉容器破損の時期とあいまって、影響するものと考えられることから、添付1において不確かさの整理と感度解析による影響評価を行っている。</p> <p>以下、概要をまとめる。</p> <p>(1) 不確かさの整理</p> <p>原子炉容器内 FCI は、溶融炉心が炉心から下部プレナムに落下する際に、溶融炉心と冷却水の伝熱により、短期間に水蒸気が発生し、1次冷却材圧力が急上昇する現象である。したがって、現象に影響する要因として、①下部プレナムの冷却水の状態（温度）、②デブリジェット径、③エントレイン量、④冷却水とデブリ粒子の伝熱が挙げられる。このうち、①については、1次冷却材と蓄圧注入の混合により決まり、一般的な質量及びエネルギー保存則に基づき計算されることから、現象としての不確かさは小さいものと考えられる。よって、②～④について感度解析を行う。</p> <p>(2) 感度解析及び結果</p> <p>A) デブリジェット径</p> <p>溶融炉心の下部プレナムへの落下は、物理現象としては、溶融炉心のリロケーションにより下部炉心支持板の上部に堆積した溶融炉心のクラストが融解し、そこから溶融炉心が下部炉心支持板の開口部を通して下部プレナムへ落下する過程である。これに対し、解析モデルでは、ノード単位でクラストの融解を取り扱い、溶融ジェットの落下径は、下部炉心支持板の開口部の面積を等価直径として入力条件として与えたものから計算される。したがって、実現象では解析よりもデブリジェットの落下径が小さい場合が考えられる。</p> <p>有効性評価においては、デブリジェット径として、下部炉心支持板の水力等価直径を与えており、感度解析としては、クラスト破損面積が小さくなる場合を想定して、その1/2倍を設定した。</p> <p>解析結果を図4.3-15に示す。感度解析ケースでは、溶融ジェット径を小さくしたことにより、細粒化割合が高くなり、粒子ベットの質量が増加しているため、圧カスパイクによる圧力上昇幅が約3.7MPaとなっているが、過渡的な変化であり、原子炉容器破損時点での1次冷却材圧力は1.8MPa[gage]程度であり大きな感度は無いことが確認された。</p> <p>なお、感度解析ケースではデブリジェットのほぼ全量が細粒化することから、これ以上ジェット径が小さくなくても、細粒化量はほとんど変化しない。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>B) エントレイン量</p> <p>原子炉圧力容器内 FCI により生じる圧力スパイクは、エントレインされたデブリ粒子と冷却水との伝熱により生じることから、エントレイン量による感度を確認する。</p> <p>エントレイン量は Ricou-Spalding モデルにより計算しており、その比例係数（エントレインメント係数）を変化させる。エントレインメント係数は、大規模実験（FARO 実験）に対するベンチマーク解析により検討された設定範囲があり、有効性評価の解析ではその最確値を設定している。よって、感度解析としては、エントレイン量が最大となるよう、設定範囲の最大値とする。また、参考として最小値の結果も示す。</p> <p>解析結果を図 4.3-8 に示す。感度解析ケースでは、エントレインメント係数を大きくしたことにより、細粒化割合が大きくなり、粒子ベッドの質量が増加しているため、圧力スパイクによる圧力上昇幅がわずかに大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度はないことが確認された。</p> <p>C) 冷却水とデブリ粒子の伝熱</p> <p>冷却水とデブリ粒子の伝熱は、膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達により計算するが、その伝熱量は、デブリ粒子の表面積、すなわち、粒子径に依存する。有効性評価の解析では、デブリ粒子の径を、(UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>) を用いた大規模実験（FARO 試験）に基づき、その平均的な値を使用しているが、実験ケースによってばらつきが存在していることから、この粒子径を小さくする場合の感度を確認する。よって、感度解析ケースでは、大規模実験に基づき検討された設定範囲の最小値とする。また、参考として最大値の結果も示す。</p> <p>解析結果を図 4.3-9 に示す。感度解析ケースでは、粒子径を小さくしたことにより、冷却水とデブリ粒子の伝熱が促進されることにより、圧力スパイクによる圧力上昇幅がわずかに大きくなっている。しかし、原子炉圧力容器の減圧維持を継続していることから、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は 2.0MPa[gage]以下であり大きな感度はないことが確認された。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>以上、溶融ジェット径、エントレイン量及び冷却水とデブリ粒子の伝熱に関して感度解析を行った結果、圧力スパイクのピーク値及び原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力への影響はわずかであることが確認された。</p>	<p>B) エントレイン量</p> <p>原子炉容器内 FCI により生じる圧力スパイクは、エントレインされたデブリ粒子と冷却材との伝熱に生じることから、エントレイン量による感度を確認する。</p> <p>エントレイン量は Ricou-Spalding により計算しており、その比例係数（エントレインメント係数）を変化させる。エントレインメント係数は、大規模実験に対するベンチマーク解析により検討された設定範囲があり、有効性評価の解析ではその最確値を設定している。よって、感度解析としては、エントレイン量が最大となるよう、設定範囲の最大値とする。</p> <p>解析結果を図 4.3-16 に示す。感度解析ケースでは、エントレインメント係数を大きくしたことにより、細粒化割合が高くなり、粒子ベッドの質量が増加しているため、圧力スパイクによる圧力上昇幅が約 1.8MPa となっているが、過渡的な変化であり、原子炉容器破損時点での 1 次冷却材圧力は 1.8MPa[gage]程度であり大きな感度は無いことが確認された。</p> <p>C) 冷却水とデブリ粒子の伝熱</p> <p>冷却水とデブリ粒子の伝熱は、膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達により計算するが、その伝熱量は、デブリ粒子の表面積、即ち、粒子径に依存する。有効性評価の解析では、デブリ粒子の径を、UO<sub>2</sub>及び ZrO<sub>2</sub>を用いた大規模実験に基づき、その平均的な値を使用しているが、実験ケースによってばらつきが存在していることから、この粒子径を小さくする場合の感度を確認する。よって、感度ケースでは、大規模実験に基づき検討された設定範囲の最小値とする。</p> <p>解析結果を図 4.3-17 に示す。感度解析ケースでは、粒子径を小さくしたことにより、冷却水とデブリ粒子の伝熱が促進されることにより、圧力スパイクによる圧力上昇はわずかに高くなるが、ベースケースとの差はわずかであり大きな感度はないことが確認された。したがって、原子炉容器破損時点での 1 次冷却材圧力にもほとんど影響がない。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>以上、デブリジェット径、エントレイン量及び冷却水とデブリ粒子の伝熱に関して感度解析を行った結果、デブリジェット径、エントレイン量について、圧力スパイクのピーク値に対して影響を与えるものの、原子炉容器破損時点での 1 次冷却材圧力への影響はわずかであることが確認された。</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）

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

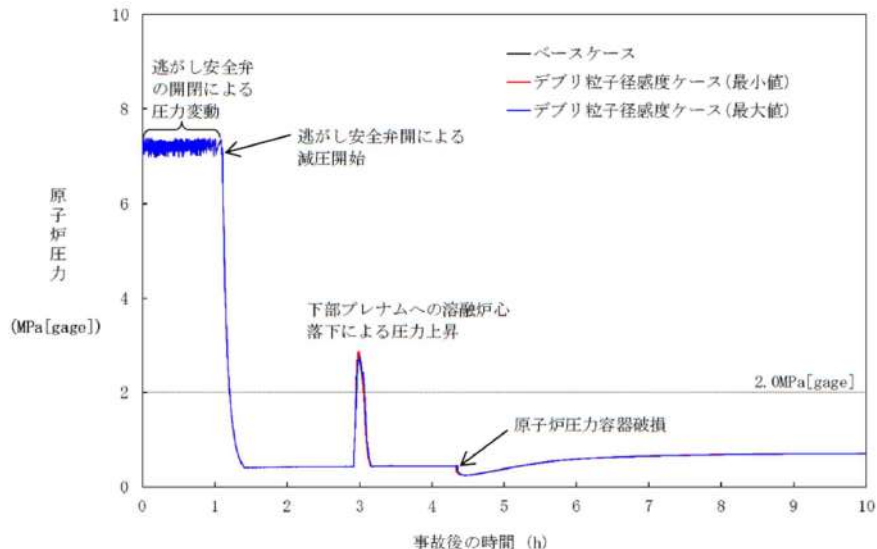
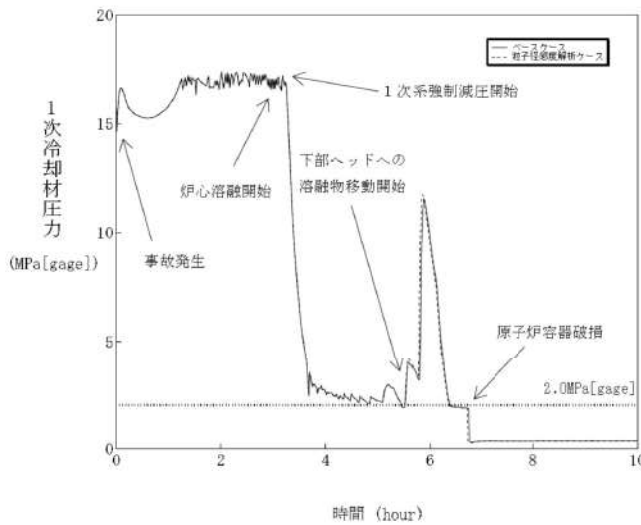
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.3-7 原子炉圧力容器内 FCI に関する感度解析結果（溶融ジェット径）</p>	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p> <p>図 4.3-15 原子炉容器内 FCI に関する感度解析結果（デブリジェット径）</p>	
<p>図 4.3-8 原子炉圧力容器内 FCI に関する感度解析結果（エントレイン量）</p>	<p>図 4.3-16 原子炉容器内 FCI に関する感度解析結果（エントレイン量）</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p>図 4.3-9 原子炉圧力容器内 FCI に関する感度解析結果（冷却水とデブリ粒子の伝熱）</p>	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p>  <p>図 4.3-17 原子炉容器内 FCI に関する感度解析結果（冷却水とデブリ粒子の伝熱）</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.5 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達 [原子炉压力容器(炉心損傷後)]</p> <p>下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、添付1「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要をまとめる。</p> <p>(1) 解析条件及び解析結果</p> <p>A) 溶融炉心と上面水プールとの伝熱</p> <p>溶融炉心が下部プレナムに堆積し、上面が水プールで覆われる状況では、溶融炉心は冷却され、そのときの熱流束は限界熱流束で制限される。上部クラスト形態には不確かさがあり、クラストのひび割れがない場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉压力容器破損へ至る事象進展も早くなる。したがって、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束に関する感度解析を実施する。</p> <p>ベースケースでは、限界熱流束に係る係数として最確値を与え、感度解析ケースでは水への熱伝達が制限される値を設定する。</p> <p>図4.3-10に、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束の感度解析結果を示す。</p> <p>ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムにリロケーションした後は、感度解析ケースにおいて溶融炉心と上面水プールの伝熱量が減少する事になる。その結果、感度解析ケースにおいて原子炉压力容器破損時間はわずかに早くなっている。ただし、原子炉压力容器破損割合及び破損時刻のいずれについても、感度の大きさとしてはわずかである。</p> <p>B) 溶融炉心と原子炉压力容器間の熱伝達</p> <p>原子炉压力容器がクリープすることで、溶融炉心の下部クラストと原子炉压力容器の間にギャップが生じ、そのギャップに水が浸入して冷却される。MAAPの解析モデルでは、ギャップに浸入した水と溶融炉心の熱流束は限界熱流束で制限される。この現象は実験的に確認されているものの、溶融炉心重量が大きい場合にはギャップ幅が小さくなり、気液対向流制限現象によりギャップに十分な水が流れ込まないことも報告されている<sup>[24]</sup>。また、制御棒駆動機構ハウジング等の貫通部及びその溶接部を持つ体系での実験はこれまでなされていない。このように、ギャップによる冷却には不確かさがあり、これが小さい場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉压力容器破損へ至る事象進展も早くなる。</p>	<p>4.3.7 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達</p> <p>下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見を基に開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかし、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、添付1において、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルに関連したパラメータの不確かさを検討し、感度解析によりその影響程度を把握している。以下に概要を纏める。</p> <p>(1) 解析条件及び解析結果</p> <p>A) 溶融炉心と上面水プールとの伝熱</p> <p>溶融炉心が下部プレナムに堆積し、上面が水プールで覆われる状況では、溶融炉心は冷却され、そのときの熱流束は限界熱流束で制限される。上部クラスト形態には不確かさがあり、クラストのひび割れが無い場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉容器破損へ至る事象進展も早くなる。したがって、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束に関する感度解析を実施する。</p> <p>ベースケースでは、限界熱流束にかかる係数として最確値を与え、感度解析ケースでは水への熱伝達が制限される値を設定する。</p> <p>図4.3-18に、下部プレナム内の溶融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束の感度解析結果を示す。</p> <p>ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムにリロケーションした後は、感度解析ケースにおいて溶融炉心と上面水プールの伝熱量が減少することになる。その結果、感度解析ケースにおいて溶接部破損割合及びクリープ破損割合の上昇がわずかながら急峻になっている。また、原子炉容器破損時間はわずかに早くなっている。ただし、原子炉容器破損割合及び破損時刻のいずれについても、感度の大きさとしてはわずかであることが分かる。</p> <p>B) 溶融炉心と原子炉容器間の熱伝達</p> <p>原子炉容器がクリープしているため、溶融炉心の下部クラストと原子炉容器の間にギャップが生じ、そのギャップに水が浸入して冷却される。MAAPコードの解析モデルでは、ギャップに浸入した水と溶融炉心の熱流束は限界熱流束で制限される。この現象は実験的に確認されているものの、溶融炉心重量が多い場合にはギャップ幅が小さくなり、気液対向流現象によりギャップに十分な水が流れ込まないことも報告されている<sup>[26]</sup>。また、計装用案内管等の貫通部及びその溶接部を持つ体系での実験はこれまでなされていない。このように、ギャップによる冷却には不確かさがあり、これが小さい場合には、溶融炉心が冷却されにくくなり、原子炉容器破損へいたる事象進展も早くなる。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>したがって、下部プレナム内の溶融炉心とギャップに浸入した水との間の限界熱流束に関する感度解析を行い、その影響を把握する。溶融炉心と下部プレナムのギャップに存在する水による除熱量には不確かさがあり、ベースケースではギャップへの熱流束に係る係数として最確値を与えている。この係数は、下部プレナムギャップの水による除熱量に係る係数として定義され、ベースケースではギャップによる除熱量の評価式により計算された除熱量がそのまま適用される。一方、係数を小さくすることは、ギャップに十分な水が流れ込まないことによる、ギャップに存在する水による除熱量の低下を模擬するものである。また、有効性評価では最初に貫通部の溶接部破損が生じているが、貫通部近傍でのギャップ冷却は実験例がなく、ギャップ水による除熱量が平板体系と比較してどの程度になるかには不確かさがある。</p> <p>以上より、感度解析ケースでは、溶融炉心と下部プレナムが接触している状態を模擬するための設定とした評価を実施する。</p> <p>図4.3-11に、下部プレナムギャップの除熱量に係る係数の感度解析結果を示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムに移行した後は、感度解析ケースにおいて下部プレナムギャップの水による除熱がないため、下部プレナムの温度がより早く上昇するが、下部プレナムの水がドライアウトするまでの間しか影響を及ぼさないことから、原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻に対する感度としては非常に小さい。また、いずれのケースも原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力は2.0MPa[gage]以下であり大きな感度はないことが確認された。</p> <p>(2) まとめ</p> <p>以上、溶融炉心と上面水プールとの伝熱、溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達に関して感度解析を行った結果、原子炉圧力容器破損時刻への影響はわずかであることが確認された。</p>	<p>したがって、下部プレナム内の溶融炉心とギャップに浸入した水との間の限界熱流束に関する感度解析を行い、その影響を把握する。</p> <p>溶融炉心と下部ヘッドのギャップに存在する水による除熱量には不確かさがあり、ベースケースではギャップへの熱流束にかかる係数として最確値を与えている。この係数は、下部ヘッドギャップの水による除熱量にかかるファクタとして定義され、ベースケースではギャップによる除熱量の評価式により計算された除熱量がそのまま適用される。一方、係数を小さくすることは、ギャップに十分な水が流れ込まないことによる、ギャップに存在する水による除熱量の低下を模擬するものである。また、有効性評価では最初に貫通部の溶接部破損が生じているが、貫通部近傍でのギャップ冷却は実験例がなく、ギャップ水による除熱量が平板体系と比較してどの程度になるかには不確かさがある。以上より、感度解析ケースでは、溶融炉心と下部ヘッドが接触している状態を模擬するための設定とした評価を実施する。</p> <p>図4.3-19に、下部ヘッドギャップの除熱量にかかる係数の感度解析結果を示す。ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が下部プレナムに移行した後は、感度解析ケースにおいてプレナムギャップによる除熱が無いため、下部ヘッドの温度がより早く上昇することから、クリーブ破損割合や貫通部破損割合は感度解析ケースの方が急峻に上昇する傾向となる。ただし、このパラメータは下部プレナムの水がドライアウトするまでの間しか影響を及ぼさないことから、1次冷却材圧力及び原子炉容器破損時刻に対する感度としては非常に小さい</p> <p>(2) まとめ</p> <p>以上、溶融炉心と上面水プールとの伝熱、溶融炉心と原子炉容器間の熱伝達に関して感度解析を行った結果、原子炉容器破損時刻への影響はわずかであることが確認された。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図 4.3-10 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果              (溶融炉心と上面水プールとの伝熱)</p>	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p> <p>図 4.3-18 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果              (溶融炉心と上面水プールとの伝熱)</p>	
<p>図 4.3-11 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果              (溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達)</p>	<p>図 4.3-19 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析結果              (溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達)</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.6 原子炉圧力容器破損 [原子炉圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>原子炉圧力容器破損及びそれに伴う溶融炉心の流出挙動に関しては、体系的な実験等による研究がなく、特に実機スケール現象について有効なデータが得られていない状況であり、ベンチマーク解析による妥当性確認が困難であるが、海外での考察等による知見に基づいてMAAPコードの解析モデルが開発されていることから、一定の妥当性は有すると判断できる。しかしながら、現象自体が持つ不確かさもあることを踏まえ、原子炉圧力容器破損に関わる一連の現象を取り扱っている添付1「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の防止について」において、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。</p> <p>(1) 原子炉圧力容器破損</p> <p>A) 原子炉圧力容器破損について</p> <p>下部プレナムに溶融炉心が堆積し、溶融炉心が冷却されない状態が継続すると、原子炉圧力容器の破損に至る。原子炉圧力容器は、原子炉圧力、原子炉圧力容器壁・溶融炉心温度、材料物性、形状等に応じて様々なモードで破損すると考えられる。</p> <p>B) 解析モデルに関する考察</p> <p>MAAPコードでは、原子炉圧力容器の破損について、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、原子炉圧力容器のクリーブ破損等、複数の破損モードを模擬しており、最も早く判定される破損モードが適用される。以下に、有効性評価における原子炉圧力容器破損の主要因である制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、クリーブ破損への影響因子について、MAAPコードの解析モデルの妥当性を考察する。</p> <p>a) 限界せん断応力（制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損）</p> <p>貫通部の溶接部が溶融炉心によって加熱されることで強度を失い、貫通部が飛び出すことによって原子炉圧力容器が破損する。具体的には、貫通部の溶接部のせん断応力は、原子炉圧力容器と原子炉格納容器の圧力差と釣り合った状態になっているが、せん断応力が限界せん断応力を超えると貫通部が飛び出し、原子炉圧力容器が破損する。この限界せん断応力は温度に依存しており、MAAPコードでもこの温度依存性がデータとして考慮されているため、MAAPコードのモデルは妥当と判断できる。</p> <p>b) ひずみ（制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損）</p> <p>溶融炉心が下部プレナムに落下することにより、高温かつ高圧の環境下にある原子炉圧力容器の壁にひずみを生じ、溶接部にも同様にひずみが発生し、溶接部のひずみ量がしきい値を超えた場合に、破損が発生したと判定している。このしきい値は実験によって妥当性が確認されたものであるが、実験結果のばらつきも考慮し、ひずみのしきい値に関する感度を確認する。</p>	<p>4.3.8 原子炉容器破損</p> <p>原子炉容器破損及びそれに伴う溶融炉心の流出挙動に関しては、体系的な実験等による研究がなく、特に実機スケール現象について有効なデータが得られていない状況であり、ベンチマーク解析による妥当性確認が困難である。また、海外での考察等による知見に基づいてMAAPコードの解析モデルが開発されていることから、一定の妥当性は有すると判断できるが、現象自体が持つ不確かさもあることを鑑み、添付1及び添付2において不確かさの整理及び感度解析による影響評価を行っており、以下に概要を示す。</p> <p>(1) 原子炉容器破損</p> <p>A) 原子炉容器破損について</p> <p>下部プレナムに溶融炉心が堆積し、溶融炉心が冷却されない状態が継続すると、原子炉容器の破損に至る。原子炉容器は、1次冷却材圧力、原子炉容器壁温度、溶融炉心温度、材料物性及び形状等に応じて様々なモードで破損すると考えられる。</p> <p>B) 解析モデルに関する考察</p> <p>MAAPコードでは、原子炉容器の破損について、計装用案内管溶接部の破損、原子炉容器のクリーブ破損など、複数の破損モードを模擬しており、最も早く判定される破損モードが適用される。以下に、有効性評価における原子炉容器破損の主要因である計装用案内管溶接部の破損、クリーブ破損への影響因子について、MAAPコードのモデルの妥当性を考察する。</p> <p>a) 限界せん断応力（計装用案内管溶接部の破損）</p> <p>貫通部の溶接部が溶融炉心によって加熱されることで強度を失い、貫通部が飛び出すことによって原子炉容器が破損する。具体的には、貫通部の溶接部のせん断応力は、1次冷却系と原子炉格納容器の圧力差と釣り合った状態になっているが、せん断応力が限界せん断応力を超えると貫通部が飛び出し、原子炉容器が破損する。この限界せん断応力は温度に依存しており、MAAPコードでもこの温度依存性がデータとして考慮されているため、MAAPコードモデルは妥当と判断できる。</p> <p>b) 歪み（計装用案内管溶接部の破損）</p> <p>溶融炉心が下部プレナムに落下することにより、高温かつ高圧の環境下にある原子炉容器の壁に歪みを生じ、溶接部にも同様に歪みが発生し、溶接部の歪み量がしきい値を超えた場合に、破損が発生したと判定している。このしきい値は実験によって妥当性が確認されたものであるが、実験結果のばらつきも考慮し、歪みのしきい値に関する感度を確認する。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>c) Larson-Miller パラメータ（クリーブ破損）</p> <p>Larson-Miller パラメータ手法は、応力と破損時間の関係を整理した Larson-Miller パラメータを利用しクリーブ破損寿命を予測する一般的な手法である。MAAPコードでは、応力として圧力、温度、熔融炉心の荷重を考慮し、Larson-Miller パラメータを使用してクリーブ破損寿命を予測しており、そのモデル化は妥当と判断できる。</p> <p>C) 原子炉圧力容器破損に関する感度解析</p> <p>溶接部破損時のひずみのしきい値に関する感度解析を実施した。図 4.3-12 に溶接部破損時の最大ひずみの感度解析結果を示す。</p> <p>感度解析では、ひずみのしきい値の有意な感度を確認する目的で、早期に破損に至る条件として、溶接部破損時のひずみのしきい値を 1/10 に低下させた。その条件であっても、原子炉圧力容器破損はたかだか 13 分程度早くなる結果であった。したがって、ひずみのしきい値が原子炉圧力容器破損の時期に与える感度は小さいと言える。</p> <p>D) 原子炉圧力容器破損に関するまとめ</p> <p>熔融炉心の格納容器下部への落下時期は原子炉圧力容器破損モデルに依存する。原子炉圧力容器破損モデルには、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損、原子炉圧力容器のクリーブ破損等があり、これらは原子炉圧力容器内外圧力差、熔融炉心の水頭、原子炉圧力容器壁温度等の評価パラメータによって計算される。原子炉圧力容器破損モデルについては、「限界せん断応力」、「ひずみ」及び「Larson-Miller パラメータ」に関して、MAAPコードの解析モデルにおいて、実現象に即した模擬を行っているため、いずれも構造強度の一般的な評価式を用いており、不確かさは小さい。</p> <p>また、評価パラメータについては、同じ事故シーケンスであれば大きくは変わらないことから、不確かさは小さい。以上から、原子炉圧力容器破損に関するモデルは有効性評価に適用することは妥当と判断できる。</p> <p>(2) 熔融炉心流出</p> <p>A) 熔融炉心流出について</p> <p>原子炉圧力容器が破損すると、その破損口から熔融炉心（熔融プール、粒子状熔融炉心、熔融スチール）が格納容器下部へ流出する。熔融炉心が流出する際、原子炉圧力容器破損口は侵食によって拡大する。</p> <p>MAAPコードでは制御棒駆動機構貫通部破損、原子炉圧力容器下部のクリーブ破損等の種々の原子炉圧力容器下部破損モードがモデル化されており、最も早く破損条件に至った破損モードにより破損が生じるが、有効性評価においては制御棒駆動機構ハウジング溶接部の</p>	<p>c) Larson-Miller パラメータ（クリーブ破損）</p> <p>Larson-Miller パラメータ手法は、応力と破損時間の関係を整理した Larson-Miller パラメータを利用しクリーブ破損寿命を予測する手法であり、一般的な手法である。MAAPコードでは、応力として圧力、温度、熔融炉心の荷重を考慮し、Larson-Miller パラメータを使用してクリーブ破損寿命を予測しており、そのモデル化は妥当と判断できる。</p> <p>C) 原子炉容器破損に関する感度解析</p> <p>溶接部破損時の歪みのしきい値に関する感度解析を実施した。</p> <p>図 4.3-20 に溶接部破損時の最大歪みの感度解析結果を示す。</p> <p>感度解析では、歪みのしきい値の有意な感度を確認する目的で、早期に破損に至る条件として、溶接部破損時の歪みのしきい値を 1/10 に低下させ、その場合、原子炉容器破損が 5 分程度早くなる結果を得た。したがって、歪みのしきい値が原子炉容器破損の時期に与える感度は小さいと言える。</p> <p>D) 原子炉容器破損に関するまとめ</p> <p>熔融炉心の原子炉下部キャビティへの落下時期は原子炉容器破損モデルに依存する。原子炉容器破損モデルには、計装用案内管溶接部の破損あるいは原子炉容器のクリーブ破損があり、これらは原子炉容器内外圧力差、熔融炉心の水頭、原子炉容器壁温度の評価パラメータによって計算される。原子炉容器破損モデルについては、「限界せん断応力」、「歪み」及び「Larson-Miller パラメータ」に関して、MAAPコードの解析モデルにおいて、実現象に即した模擬を行っているため、いずれも構造強度の一般的な評価式を用いており、不確かさは小さい。また、評価パラメータについては、同じ重要事故シーケンスであれば大きくは変わらないことから、不確かさは小さい。以上から、熔融炉心の原子炉下部キャビティに関する落下の時期に関するモデルは有効性評価に適用することは妥当と判断できる。</p> <p>(2) 熔融炉心流出</p> <p>A) 熔融炉心流出について</p> <p>原子炉容器が破損すると、その破損口からクラストを除く熔融炉心（熔融プール、デブリ粒子、熔融スチール）が原子炉下部キャビティへ流出する。破損箇所は必ずしも原子炉容器底部とは限らないため、破損口よりも上部に堆積している熔融炉心が流出し、破損口より下部に堆積している熔融炉心は原子炉容器内に残存する。原子炉容器内に残存している熔融炉心が十分に冷却されない場合には、2 回目の破損が原子炉容器底部で発生し、残存している熔融炉心が流出する。熔融炉心が流出する際、原子炉容器破損口は侵食によって拡大する。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>破損による制御棒駆動機構ハウジング逸出が最も早く発生する。これにより約 15cm 径の破損口が原子炉圧力容器下部に開き、下部プレナム内の溶融炉心が格納容器下部に落下することになる。他の原子炉圧力容器下部貫通配管が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。</p> <p>B) 解析モデルに関する考察</p> <p>MAAPコードでは前述した原子炉圧力容器破損後の溶融炉心流出挙動をモデル化しており、原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の流出挙動への影響因子について、MAAPコードのモデルの妥当性を考察する。</p> <p>a) 開口部の閉塞</p> <p>溶融炉心が流出する際、粒子状溶融炉心も一緒に原子炉圧力容器外に流出するモデルとなっているが、実現象では開口部が粒子状溶融炉心によって閉塞し、溶融炉心が格納容器下部へ流出しない可能性がある。しかしながら、MAAPコードでは粒子状溶融炉心の溶融も同時にモデル化しており、また、実現象においても、冷却ができずに原子炉圧力容器が破損する状況では粒子状溶融炉心は崩壊熱によって再溶融するため、開口部での閉塞の可能性は小さく、したがって、破損口より上部に堆積している溶融炉心が流出するMAAPコードのモデルは妥当と判断できる。</p> <p>b) 破損口の侵食による拡大</p> <p>破損口を溶融炉心が通過する際に、破損口の側面が溶融炉心により溶かされ、破損口が拡大する現象も考えられ、MAAPコードの原子炉圧力容器の破損モデルにおいては、溶融炉心と破損口側面の伝熱計算に基づき、破損口が溶融し拡大するモデルを備えていることから、実現象に即しており、妥当と判断できる。</p> <p>c) 原子炉圧力容器2次破損</p> <p>最初の原子炉圧力容器破損が発生した後、溶融炉心は水頭圧により流れることから、破損口よりも高い部分の溶融炉心のみが格納容器下部に落下し、残りの溶融炉心は残存する。また、冷却がなければ、残存した溶融炉心が原子炉圧力容器を加熱し、溶融炉心の自重も加わることによって、原子炉圧力容器がクリーブ破損することが、実機において考えられ、MAAPコードのモデルはこの挙動を模擬できるものであり、妥当と判断できる。</p>	<p>B) 解析モデルに関する考察</p> <p>MAAPコードでは前述した原子炉容器破損後の溶融炉心流出挙動をモデル化しており、原子炉容器破損時の溶融炉心の流出挙動への影響因子について、MAAPコードのモデルの妥当性を考察する。</p> <p>a) 開口部の閉塞</p> <p>溶融炉心が流出する際、デブリ粒子も一緒に原子炉容器外に流出するモデルとなっているが、実現象では開口部がデブリ粒子によって閉塞し、溶融炉心が原子炉下部キャビティへ流出しない可能性がある。</p> <p>しかしながら、MAAPコードではデブリ粒子の溶融も同時にモデル化しており、また、実現象においても、冷却ができずに原子炉容器が破損する状況ではデブリ粒子は崩壊熱によって再溶融するため、開口部での閉塞の可能性は小さく、したがって、破損口より上部に堆積している溶融炉心が流出するMAAPコードのモデルは妥当と判断できる。</p> <p>b) 破損口の侵食による拡大</p> <p>破損口を溶融炉心が通過する際に、破損口の側面が溶融炉心により溶かされ、破損口が拡大する現象も考えられ、MAAPコードの原子炉容器の破損モデルにおいては、溶融炉心と破損口側面の伝熱計算に基づき、破損口が溶融し拡大するモデルを備えていることから、実現象に即しているが、このモデルの感度を確認するために、初期破損口径に関する感度解析を実施する。</p> <p>c) 原子炉容器2次破損</p> <p>最初の原子炉容器破損が発生した後、溶融炉心は重力と水頭圧により流れることから、破損口よりも高い部分の溶融炉心のみが原子炉下部キャビティに落下し、残りは溶融炉心が残存する。また、冷却がなければ、残存した溶融炉心が原子炉容器を加熱し、溶融炉心の自重も加わることによって、原子炉容器がクリーブ破損することが、実機において考えられ、MAAPコードのモデルはこの挙動を模擬できるものであり、妥当と判断できる。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>C) 熔融炉心流出に関するまとめ</p> <p>熔融炉心の落下量は原子炉圧力容器破損位置に依存する。原子炉圧力容器破損位置は、原子炉圧力容器下部のノードの代表点を基準にそれよりも上に存在する熔融炉心が落下するモデルとなっている。ノード内の破損位置には不確かさがあるが、破損口は熔融炉心によって拡大し、原子炉圧力容器の底部の方向に開口部が広がることから、開口部の下端の高さの不確かさは小さくなる。以上から、熔融炉心の流出に関するモデルを有効性評価に適用することは妥当と判断できる。</p>	<p>C) 熔融炉心流出に関する感度解析</p> <p>初期破損口径を大きくすることで、破損口の侵食速度が高い場合と同等の状況を評価する。図4.3-21に原子炉容器の破損口径の感度解析結果を示す。</p> <p>初期破損口径を約3倍に設定しても、初期のデブリジェットの流れが多くなるものの、その後の事象進展への影響はほとんどなく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。</p> <p>D) 熔融炉心流出に関するまとめ</p> <p>熔融炉心の落下量は原子炉容器破損位置に依存する。原子炉容器破損位置は、原子炉容器下部ヘッドのノードの代表点を基準にそれよりも上に存在する熔融炉心が落下するモデルとなっている。ノード内の破損位置には不確かさがあるが、破損口は熔融炉心によって拡大し、原子炉容器の底部の方向に開口部が広がることから、開口部の下端の高さの不確かさは小さくなる。以上から、熔融炉心の落下量に関するモデルは有効性評価へ適用できる。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p>	
<p>図 4.3-12 制御棒駆動機構ハウジング破損時の最大ひずみに関する感度解析結果</p>	<p>図 4.3-20 溶接部破損時の最大歪みに関する感度解析結果</p>	
	<p>図 4.3-21 原子炉容器の破損口径に関する感度解析結果</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.7 原子炉圧力容器外FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）[原子炉格納容器（炉心損傷後）]</p> <p>FCI現象に関しては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言える。</p> <p>そこで、添付2「溶融炉心と冷却材の相互作用について」では、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。</p> <p>(1) 知見の整理</p> <p>A) FCI 実験</p> <p>国内外のFCI実験として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ALPHA 実験(旧原子力研究所 JAERI)</li> <li>・KROTOS 実験(欧州 JRC(Joint Research Center)、イスブラ研究所)</li> <li>・FARO 実験(欧州 JRC(Joint Research Center)、イスブラ研究所)</li> <li>・COTELS 実験(カザフスタン国立原子力センター(NNC: National Nuclear Center))</li> <li>・TROI 実験(韓国原子力研究所(KAERI))</li> </ul> <p>について調査を行い、知見を整理した。</p> <p>B) 原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発の発生可能性</p> <p>UO<sub>2</sub>を用いた大規模FCI実験である KROTOS 実験、FARO 実験、COTELS 実験及び TROI 実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと結論付けた。</p> <p>なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸気爆発解析コード（JASMINE<sup>[26]</sup>）及び構造応答解析コード（AUTODYN<sup>[26]</sup>若しくはLS-DYNA<sup>[27]</sup>）を用いて、水蒸気爆発のトリガを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ベドスタル構造部への影響を評価し、原子炉格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。</p>	<p>4.3.9 原子炉容器外 FCI（溶融炉心細粒化、熱伝達）</p> <p>FCI現象に関しては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言える。</p> <p>そこで、添付2では、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認している。</p> <p>以下に概要を示す。</p> <p>(1) 知見の整理</p> <p>A) FCI 実験</p> <p>国内外の FCI 実験として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・FARO 実験（欧州 JRC（Joint Research Center）、イスブラ研究所）</li> <li>・KROTOS 実験（欧州 JRC（Joint Research Center）、イスブラ研究所）</li> <li>・ALPHA 実験（旧原子力研究所 JAERI）</li> <li>・COTELS 実験（カザフスタン国立原子力センター（NNC: National Nuclear Center））</li> </ul> <p>について調査を行い、知見を整理した。</p> <p>B) 原子炉容器外 FCI における水蒸気爆発の発生可能性</p> <p>UO<sub>2</sub>を用いた大規模 FCI 実験である FARO 実験、KROTOS 実験及び COTELS 実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて低いと結論付けた。</p> <p>また、参考文献[27]に示す JASMINE コードを用いて水蒸気爆発が発生したという条件における格納容器破損確率の評価について考察した。同文献での評価で想定した条件（トリガリング及び融体ジェット直径）が実機解析に比べて厳しくなるよう選定し、水蒸気爆発時のエネルギーが高くなるように評価され、かつ、保守的なフラジリティ分布を用いた場合の条件付確率であるのに対し、実機においてトリガリングとなり得る要素は考えにくいこと、水蒸気爆発が発生した場合でも流体の運動エネルギーはフラジリティカーブと重ならず、格納容器破損確率は十分低くなることから原子炉格納容器への脅威にはならないと結論付けた。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 不確かさの整理</p> <p>原子炉圧力容器外FCIについて、実現象と解析モデルの差に着目しつつ、不確かさの整理を行い、原子炉圧力容器外FCIによる格納容器圧力に影響する要因として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度、水位）</li> <li>・溶融炉心の落下量及び粒子化（破損口径、粒子化割合、落下速度）</li> <li>・プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）</li> <li>・原子炉格納容器内での水蒸気の流動</li> </ul> <p>を抽出し、それぞれについて不確かさ及びその取り扱いを以下のとおり整理した。</p> <p>A) 格納容器下部（ペDESTAL）領域のプール水の状態（サブクール度、水位）</p> <p>ペDESTAL領域の水温が高い場合には、水蒸気発生量が多くなり圧力スパイクは厳しくなる。なお、MAAPでは、蒸気の上昇速度がフラッディング臨界速度よりも大きい場合には、周囲の水が蒸気の流れによって巻き込まれ、巻き込まれた水による蒸気の凝縮により蒸気発生量が減少する効果がモデル化されている。ペDESTAL領域の水は、ペDESTALへの注水によって形成されるので、その水温はペDESTAL注水温度に影響される。有効性評価では、ペDESTAL注水は外部水源から注水され、その水温は水源温度の実績値に対して高めの温度を設定している。したがって、圧力スパイクを厳しくする保守的な水温を設定しているが、本影響因子は解析モデルパラメータではないため、不確かさ評価は行わない。</p>	<p>(2) 不確かさの整理</p> <p>原子炉容器外FCIについて、実現象と解析モデルの差に着目しつつ、不確かさの整理を行い、原子炉容器外FCIによる原子炉格納容器圧力に影響する要因として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉下部キャピティ水温及び水量</li> <li>・原子炉下部キャピティへの注入量</li> <li>・デブリジェット径</li> <li>・1次冷却材圧力</li> <li>・エントレイン量</li> <li>・冷却水とデブリ粒子の伝熱</li> <li>・原子炉格納容器内での水蒸気の流動</li> </ul> <p>を抽出し、それぞれについて不確かさ及びその取り扱いを以下のとおり整理した。</p> <p>A) 原子炉下部キャピティ水温及び水量</p> <p>原子炉下部キャピティ水温が高い場合（＝サブクール度が低い場合）には、水蒸気発生が促進され、圧力スパイクの観点では厳しい方向となる。MAAPコードの解析モデルでは、原子炉下部キャピティ水は、1次冷却系から放出された冷却水とスプレイ水が混合したものであり、これらの質量及びエネルギーバランスより、原子炉下部キャピティ水温が決定される。1次冷却系から放出された冷却水の初期状態は、プラント設計に基づき設定されるものであり、不確かさは小さいと言える。また、スプレイ水は、再循環前はRWSTを水源とし、再循環後は格納容器再循環サンプル水から熱交換器を通して得られた水温が使用される。ここで、有効性評価の解析ではRWSTの水温を、現実的な範囲内で高めの値である夏季温度を設定している。したがって、不確かさが存在する場合でも、原子炉下部キャピティ水温は、解析で仮定した条件よりも低くなる方向であり、水蒸気の大量発生観点から、不確かさは問題とならない。また、FCIによる圧力スパイクは、水の顕熱よりも潜熱の寄与が大きいため、水温の圧力スパイクに対する感度は小さい。</p> <p>なお、有効性評価では格納容器破損シーケンスとして、全交流動力電源喪失+補助給水失敗も選定されており、この場合の原子炉下部キャピティ水温について述べる。大破断LOCAでは高温の1次冷却系からの破断流が初期より原子炉下部キャピティに放出されるため原子炉下部キャピティ水温はより早期に上昇するが、全交流動力電源喪失では主に代替格納容器スプレイから注水されるため初期の温度は低くなるものの、原子炉容器破損までの時間が長いことから、次第に飽和温度に近づいていき、原子炉容器破損時点での原子炉下部キャピティ水温は、大破断LOCAとほぼ同程度となる。ただし、全交流動力電源喪失では原子炉容器破損が遅いことから、原子炉容器破損時点での原子炉格納容器圧力も高めとなっており、サブクール度は大破断LOCAよりも高くなり、水蒸気発生に必要なエネルギー量も大きく、水蒸気発生しにくくなる。また、破損時点での原子炉下部キャピティ水量は注水の期間が短い大破断LOCAの方が、原子炉下部キャピティ水が飽和に達しやすく、水蒸気が発生しやすくなる。したがっ</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ベDESTAL領域の水位に関しては、水深が深い方が溶融炉心の細粒化量が大きくなる傾向がある。この場合、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなるので、圧力スパイクは厳しくなる方向である。本影響因子は解析モデルパラメータではないため、ここでは感度解析による確認は行わない。</p> <p>B) 溶融炉心の落下量及び粒子化（破損口径、粒子化割合、落下速度）</p> <p>溶融炉心の落下量は、原子炉圧力容器の破損口径に依存する。原子炉圧力容器の破損は、原子炉圧力容器下部の制御棒駆動機構ハウジングの溶接部が破損し、制御棒駆動機構ハウジングが逸出することを想定している。原子炉圧力容器底部の口径が大きい貫通部として制御棒駆動機構ハウジングを想定している。なお、MAAPでは溶融物流出に伴う破損口の径方向侵食による破損口拡大も考慮されている。</p> <p>細粒化量に関して、MAAPコードでは Ricou-Spalding モデルで評価される。Ricou-Spalding モデルでは、デブリ粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径、圧力（わずかではあるが水の密度に影響）及びプール水深である。このうち溶融ジェット径は保守的に設定しており、また、プール水深は解析モデルパラメータではない。</p> <p>エントレインメント係数については、MAAPでは代表的なFCIの大規模実験であるFARO試験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定している。FAROのベンチマーク解析でのエントレインメント係数の不確かさ範囲は、<input type="text"/>～<input type="text"/>となっている。以上より、粒子化量の不確かさとしてエントレインメント係数の感度を確認する。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">       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>	<p>て、全交流動力電源喪失では、大破断LOCAよりも、原子炉容器外FCIによる圧力スパイクの規模が小さくなると考えられる。</p> <p>一方、原子炉下部キャビティ水量に関しては、水深が深い方が、溶融炉心の細粒化量が多くなる傾向がある。MAAPコードの解析モデルでは、原子炉格納容器内の流動は、ノードジャンクションモデルによって、ブローダウン水、スプレイ水等の原子炉下部キャビティへの流入量を計算し、原子炉下部キャビティの幾何形状に基づき、水位（水深）を計算している。即ち、原子炉格納容器形状とスプレイ開始のタイミング（重要事故シーケンス）で決まる。原子炉格納容器形状に関してはプラント設計データにより設定されることから不確かさは小さい。一方で、溶融炉心の落下時にも原子炉下部キャビティへの注水が継続した状態であることから、原子炉下部キャビティへの注水や溶融炉心の落下のタイミングによっては、原子炉下部キャビティ水深が変化し得ることから重要事故シーケンスに基づく不確かさは存在すると考えられる。したがって、原子炉下部キャビティ水深の感度を確認する。</p> <p>B) 溶融炉心の落下量（落下速度）と細粒化量</p> <p>溶融炉心の落下量及び落下速度は、原子炉容器の破損口径と破損時の1次冷却材圧力及び下部プレナム内の溶融炉心の水頭に依存する。</p> <p>原子炉容器の破損口径に関しては、原子炉容器下部ヘッドに貫通部が存在し、主たる破損モードは、貫通部（計装案内管）の溶接部が破損し、貫通部程度の開口が生じるものと仮定している。したがって、破損の際、貫通部と同等の破損口が形成されるのか貫通部の周辺も溶融破損するののかについては不確かさがあることから、破損口径の感度を確認する必要がある。なお、原子炉容器破損形態に関しても、不確かさが存在するが、破損口径として整理できる。</p> <p>1次冷却材圧力に関して、圧力が高ければ原子炉容器下部ヘッド破損口からの溶融炉心の落下（噴出）を加速させる傾向がある。炉心溶融時に1次冷却材圧力が高い状態の重要事故シーケンスにおいては、炉心損傷の検知による運転員等操作による加圧器逃がし弁の開放に伴い、溶融炉心の落下前に、1次冷却系は十分に減圧された状態となる。</p> <p>細粒化量に関して、MAAPコードでは、Ricou-Spaldingの式から細粒化量を計算している。エントレインメント係数について、MAAPコードではFCIの大規模実験に対するベンチマーク解析によって、その範囲を設定しており、有効性評価の解析ではその中間的な値（最確値）を設定している。ここで、エントレインメント係数の最大値是最確値に対して<input type="text"/>割程度大きく、これを不確かさとして見込む。デブリジェットの落下速度は、原子炉容器内外圧力差と溶融炉心の水頭圧から計算される。大破断LOCAシーケンスでは、原子炉容器内外圧力差は大きくなく、不確かさも小さいと考えられるが、溶融炉心の水頭については、原子炉容器の破損位置により不確かさがある。原子炉容器の破損位置は、原子炉容器下部ヘッドのノード代表点で表されるため、落下速度の不確かさ幅は2割程度となる。</p> <p>以上より、落下速度の不確かさ幅はエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されることから、細粒化量の不確かさ幅でエントレインメント係数の感度を確認する。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">       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>	



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>                     熔融炉心の落下速度は、原子炉圧力容器内外の圧力差、熔融炉心の高さ（水頭）及び熔融炉心の落下距離に依存する。原子炉減圧により原子炉圧力容器内外の圧力差が十分小さくなることから、圧力差の不確かさの影響は小さい。また、有効性評価では原子炉圧力容器の下部ブレナム部に全量に近い熔融炉心が堆積しており、原子炉圧力容器の破損位置も原子炉圧力容器底部中心となっているため、熔融炉心の水頭が高い状態となっている。この場合、熔融炉心の流出速度が大きく落下量も多くなるため、圧力スパイクの評価も厳しくなる。したがって、熔融炉心の水頭の不確かさ評価は必要ない。一方、落下距離については、プール水深に不確かさがある。                 </p> <p>                     BWR 5Mark-I 改良型格納容器プラントの例では、落下距離の不確かさをプール水位の最大変動幅（3.4m）と仮定すると、ベDESTAL底部から原子炉圧力容器底部までの距離（約9.5m）の4割程度である。熔融炉心の落下速度が、落下距離の平方根に比例すると考えると、落下速度の不確かさは2割程度である。熔融炉心の落下速度（ジェット速度）の不確かさはエントレインメント係数の不確かさとして評価できる。また、落下速度の不確かさはエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されている。したがって、熔融炉心の落下速度の不確かさの影響は、エントレインメント係数の不確かさ評価で確認できるため、落下速度の不確かさ評価は行わない。                 </p> <p>                     C) プール水とデブリ粒子との伝熱（デブリ粒子径）                 </p> <p>                     水中でエントレインされた高温のデブリ粒子は、その周囲を蒸気膜が覆う状態となり、デブリ粒子の熱伝達は膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に支配される。MAAPではエントレインしたデブリ粒子の温度を、これらの熱伝達を考慮した機構論的モデルにより計算する。また、デブリ粒子から水への伝熱は、デブリ粒子の径に直接依存する。MAAPでは、デブリ粒子径はジェットの表面張力に依存するモデルにより計算される。デブリ粒子径の導出式には、粒子径ファクタ（モデルパラメータ）が乗じられている。MAAPでは代表的なFCIの大規模実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定しているため、デブリ粒子の伝熱の不確かさは粒子径の不確かさとして考慮する。なお、格納容器下部の粒子径ファクタは、固定値 <input type="checkbox"/> を設定している。                 </p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;">                     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> <p>                     D) 格納容器内での水蒸気の流動                 </p> <p>                     FCIによる圧力スパイクの評価の観点では、ベDESTAL領域の開口部からドライウェル側への気体の流れのモデルも不確かさの要因として考えられる。MAAPでは、原子炉格納容器内の流動は、ノード・ジャンクションモデルを適用しており、格納容器下部領域からドライウェル領域への流れは、ノードの圧力、ジャンクションの圧力損失により、差圧流や臨界流として扱われる。ジャンクションの圧力損失は、一般的な流動モデルを扱っていることから、不確かさは小さいと考えられる。                 </p>	<p>                     C) 冷却水とデブリ粒子の伝熱                 </p> <p>                     水中にエントレインされたデブリ粒子は、高温かつ崩壊熱による発熱状態にあり、周囲の水が膜沸騰となることから、デブリ粒子自体は蒸気膜に覆われた状態である。MAAPコードでは、この伝熱を膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達に関する相関式でモデル化しており、伝熱量はデブリ粒子の径に依存する。有効性評価の解析では、デブリ粒子の径を、UO<sub>2</sub>及びZrO<sub>2</sub>を用いた大規模実験に基づき設定していることから妥当であると考えられるが、解析において設定したデブリ粒子の径は、実験での平均的な値であり、実験ケースによってばらつきが存在していることから、デブリ粒子の径の感度を確認する。                 </p> <p>                     D) 原子炉格納容器内での水蒸気の流動                 </p> <p>                     FCIによる圧力スパイクの評価の観点では、原子炉下部キャビティ区画から他区画への気体の流れのモデルも不確かさの要因として考えられる。MAAPコードでは、原子炉格納容器内の流動はノード・ジャンクションモデルであり、原子炉下部キャビティ区画から他区画への流れは、ノードの圧力、ジャンクションの圧力損失により、差圧流や臨界流として取り扱われる。ジャンクションの圧力損失に関しては、一般的な流動モデルを扱っていることから、不確かさは小さいと判断する。                 </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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) 感度解析による確認</p> <p>上記の検討により、原子炉圧力容器外 F C I における圧力スパイクに関して、解析モデルでの不確かさは、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Ricou-Spalding モデルのエントレインメント係数</li> <li>・ デブリ粒子径</li> </ul> <p>に代表され、それぞれの不確かさ幅を考慮した感度解析を実施した（解析条件及び結果は添付2参照）。</p> <p>その結果、いずれのパラメータにおいても、原子炉圧力容器外 F C I により生じる圧力スパイクへの感度は小さく、有効性評価の結果に影響を与えないことを確認した。</p>	<p>(3) 感度解析による確認</p> <p>上記の検討により、原子炉容器外 FCI における圧力スパイクに関して、解析モデルでの不確かさは、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉下部キャビティ水深</li> <li>・ 破損口径</li> <li>・ Ricou-Spalding のエントレインメント係数</li> <li>・ デブリ粒子の径</li> </ul> <p>に代表され、それぞれをパラメータとした感度解析を実施した（解析条件及び結果は添付2参照）。</p> <p>その結果、いずれのパラメータについても、原子炉容器外 FCI により生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。これは、国内 PWR プラントでは、大きな自由体積を有する原子炉格納容器を採用しており、原子炉容器外 FCI による水蒸気発生に伴う圧力スパイクを抑制し得る能力があることを示している。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.3.8 格納容器下部床面での熔融炉心の拡がり、熔融炉心と格納容器下部プール水との伝熱、熔融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガスの発生〔原子炉格納容器(炉心損傷後)〕</p> <p>これらは、MCCIに関する物理現象である。MCCIは重要な格納容器破損モードと考えられ、これまで種々の実験や解析モデルの開発が行われてきている。そこで、添付3「熔融炉心とコンクリートの相互作用について」では、知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。以下に概要を示す。</p> <p>(1) 知見の整理</p> <p>A) MCCI 実験</p> <p>国内外での MCCI に関する実験及び研究として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ACE 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ SURC-4 実験 (サンディア国立研究所 (SNL)) (国際標準問題 ISP-24)</li> <li>・ BETA 実験 (カールスルーエ研究所 (KfK))</li> <li>・ SWISS 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))</li> <li>・ WETCOR 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))</li> <li>・ MACE 実験 (米国電力研究所 (EPRI))</li> <li>・ COTELS 実験 (テスト B/C 及び A) (原子力発電技術機構 (NUPEC))</li> <li>・ MCCI 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ KROTOS 実験 (欧州 JRC (Joint Research Center), イスブラ研究所)</li> <li>・ FARO 実験 (欧州 JRC (Joint Research Center), イスブラ研究所)</li> <li>・ DEFOR 実験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))</li> <li>・ SPREAD 実験 (国内 BWR 産業界)</li> <li>・ PULiMS 実験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))</li> <li>・ KATS 実験 (カールスルーエ研究センター (KIT, 旧 FZK))</li> <li>・ セルフレベリング実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ SSWICS 実験 (OECD/MCCI プロジェクト)</li> <li>・ MET 実験 (OECD/MCCI プロジェクト)</li> <li>・ CCI 実験 (OECD/MCCI プロジェクト)</li> <li>・ クラスト破損実験 (OECD/MCCI プロジェクト)</li> </ul> <p>について調査し、知見を整理した。</p>	<p>4.3.10 原子炉下部キャビティ床面での熔融炉心の拡がり、熔融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱、熔融炉心とコンクリートの伝熱</p> <p>これらは、MCCIに関する物理現象である。MCCIについては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言える。</p> <p>そこで、添付3では、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。</p> <p>以下に概要を示す。</p> <p>(1) 知見の整理</p> <p>国内外での MCCI に関する実験及び研究として、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ACE 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ SURC-4 実験 (サンディア国立研究所 (SNL)) (国際標準問題 ISP-24)</li> <li>・ SWISS 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))</li> <li>・ WETCOR 実験 (サンディア国立研究所 (SNL))</li> <li>・ MACE 実験 (米国電力研究所 (EPRI))</li> <li>・ COTELS 実験 (テスト B/C 及び A) (原子力発電技術機構 (NUPEC))</li> <li>・ CCI 実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ DEFOR-A 実験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))</li> <li>・ セルフレベリング実験 (アルゴンヌ国立研究所 (ANL))</li> <li>・ SSWICS 試験 (OECD-MCCI プロジェクト)</li> <li>・ クラスト強度の解析研究 (原子力安全基盤機構 (JNES))</li> <li>・ FARO 実験 (欧州 JRC (Joint Research Center)、イスブラ研究所)</li> <li>・ PULiMS 試験 (スウェーデン王立工科大学 (KTH))</li> </ul> <p>について調査し、知見を整理し、実験結果の実機への適用性を考察し、以下のとおり整理した。</p>	<p>※MCCI に関する重要現象差による調査対象/整理/不確かさの相違</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>B) 得られた知見</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ドライ条件でのコンクリート侵食            熔融炉心に注水が行われない場合の侵食速度は、ACE 実験や SURC-4 実験で確認されている。また、MAAPコードによる SURC-4 実験解析が行われており、解析で得られた侵食速度は実験結果と良く一致している（1時間あたり 20cm 程度）。</li> <li>・ウェット条件（Top Flooding）でのコンクリート侵食            SWISS 実験、WETCOR 実験及び MACE 実験では、熔融炉心上面へ注水をした場合（Top Flooding）のコンクリート侵食実験が行われたが、結果として、熔融炉心上面に安定なハードクラストが形成されて熔融炉心内への水の浸入を妨げ、コンクリート侵食が継続する結果が得られた。コンクリート侵食が停止しなかった主な原因は、熔融炉心模擬物上面に形成されたクラストが側壁（側壁に耐火物を採用した一次元侵食実験）あるいは電極と側壁の両者に固着し、クラストとその下の熔融炉心模擬物とが分離したことにより、熔融炉心模擬物の効果的な除熱がなされなかったためであるとされている。            COTELS 実験では、熔融物の落下過程を含めて模擬した MCCI 実験が実施され、結果として、側壁侵食部に水が浸入し、コンクリート侵食が停止する結果が得られた。            実機規模で安定化クラストが形成されるか否かを解明するため、OECD/MCCI プロジェクトが行われ、クラスト強度、クラスト浸水、二次元コンクリート侵食挙動等を分離効果的に調べる実験が実施された。その結果、実機規模では、安定クラストは形成されず、ハードクラストは割れて水が内部に浸入し、MCCI により発生したガスにより熔融物がクラストの割れ目から噴出する火山型のクラストが形成されるとの結果が得られている。また、CCI 試験の結果から玄武岩系コンクリートに侵食の異方性が見られる結果が得られている。            これらの知見は、MCCI 評価のためにはデブリから水プールやコンクリートへの熱伝達の扱いが重要であることを示唆している。</li> <li>・水張りによる熔融物の粒子化            熔融ジェットが水中へ落下する場合の粒子化挙動については、FCI 実験等により確認されている。粒子化割合は、主に水深やジェット径に依存する。粒径（質量中央径）は、比較的大きく、実験条件（初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度）に対する依存性は低いと報告されている。各 UO<sub>2</sub> 混合物実験の平均的な粒子径は、熔融物量の多い FARO 実験では 2.6～4.8mm、COTELS 実験では 6mm 程度である。また、粒子化割合を評価する解析モデルが提案されている（Ricou-Spalding モデルや Saito モデル等）。</li> <li>・熔融物の拡がり            Mark-I 型格納容器のシェルアタックに関わる実験や評価により、初期水張りによるシェルアタック防止の有効性が確認されるとともに、熔融物の拡がり評価する解析コードが作成されている。熔融物の拡がりには、デブリ落下流量、デブリ成分、デブリ過熱度が主に影響す</li> </ul>		

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ることが示されている。KTH では、水中での溶融物の拡がり挙動と固化性状を調べる PULiMS 実験が実施され、溶融物の拡がる過程は、流体力学と固化の2つの競合プロセスに支配される      として、流体力学には重力、慣性力、粘性力及び表面張力が影響し、固化には溶融物から周囲      への熱伝達、崩壊熱発生及び溶融物の相変化が影響するとしている。また、KIT (旧 FZK) に      おいて KATS 実験が実施され、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ことが示されている。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おり、実験データをもとに検証が行われている。</p> <p>また、ANL でのセルフベリング実験により、水プール中に不均質に堆積させた粒子状ベッ      ドにおいて、内部沸騰によって短時間にベッドの厚さが均一化されることが示されている。</p> <p>・粒子状ベッドの冷却性</p> <p>粒子状ベッドの冷却性については、ドライアウト熱流束が種々の実験で確認されており、主      に粒子径に依存するとの結果が得られている。また、ドライアウト熱流束を評価する解析モデ      ルがいくつか提案されているが、Lipinski 0-D モデル<sup>[28]</sup>が広く使われている。</p>	<p>【溶融炉心落下時】</p> <p>溶融炉心は完全には粒子化せず、床上を溶融炉心が拡がり、床面との間にケーキが形成      される。ジェットの一部は粒子化して溶融炉心上に降下する。クラストが形成されるまで      は水と溶融炉心の間において比較的高い熱流束が維持される。この時の現象は、小規模実      験で溶融物へ注水を開始した時点と同等と考えられ、MACE 実験、CCI 実験では、1MW/m<sup>2</sup>      以上の値が観測されている。</p> <p>【長期冷却時】</p> <p>溶融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破碎してい      く（JNES 解析研究より）ため、時間の経過とともに亀裂の入ったクラストが成長し、溶      融炉心全体が固化する。下部のケーキの部分を除いて浸水性があり、その際の限界熱流束      は、CCI 実験より 0.5MW/m<sup>2</sup> 程度であると考えられる。溶融炉心全体が固化した後の挙動に      おいては、溶融炉心固化物の熱伝導が律速となるが、ひび割れによる伝熱面積の増大と内      部への水浸入により除熱が促進される。また、コンクリートと溶融炉心の境界にギャップ      が発生し、水がギャップへ浸入することで冷却が促進される（COTELS 実験より）。</p> <p>コンクリート混入がある場合のドライアウト熱流束については、SSWICS 実験において      確認されており、コンクリートの混入割合が15%程度に達した場合にドライアウト熱流束      は0.125MW/m<sup>2</sup> 程度となっている。</p> <p>溶融炉心が固化し安定化クラストが形成され、溶融炉心温度が1,500K 程度まで下が      った場合の熱流束は0.2MW/m<sup>2</sup> 程度と考えられる（WETCOR 試験、MACE 試験より）。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 不確かさの整理</p> <p>MCCIの過程ごとに不確かさ要因を整理する。MCCIは以下の過程で段階的に進展する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程</li> <li>・熔融物の落下・堆積過程</li> <li>・MCCI進行と注水によるデブリ冷却過程</li> </ul> <p>各過程での物理現象及び解析モデルに関し、不確かさ要因を整理し、感度解析が必要なパラメータを確認する。</p> <p>A) 原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程</p> <p>この過程の不確かさは、下部ヘッドの破損面積や熔融炉心の流出量となる。それぞれについて、評価モデルと評価条件の考え方を示す。</p> <p>下部ヘッドの破損面積は、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損や下部ヘッドクリップ破損等の種々の下部ヘッド破損モードがモデル化されており、最も早く破損条件に至った破損モードにより破損が生じる。破損面積は、熔融物流出に伴う破損口の径方向侵食による拡大も考慮されている。</p> <p>MAAPコードによる有効性評価の解析結果から、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損による制御棒駆動機構ハウジング逸出が最も早く発生する。これにより約15cm径の破損口が下部ヘッドに開き、下部プレナム内の熔融炉心が格納容器下部に流出することになる。他の下部ヘッド貫通配管が破損してもこれ以上の破損サイズにはならないことから、制御棒駆動機構ハウジングの逸出が最も厳しい条件となっている。</p> <p>なお、制御棒駆動機構ハウジング溶接部が破損しても外部サポートが設置されている場合には、制御棒駆動機構ハウジングの逸出は起きにくいと考えられるため、この扱いは保守的である。</p> <p>熔融炉心流出流量は駆動差圧として原子炉圧力容器内とベDESTALとの圧力差に水及び熔融炉心の水頭圧を考慮して計算されている。MAAPコードによる解析結果から、最終的な流出総量は、全炉心相当と評価されており、厳しい条件となっている。</p> <p>以上に示したように、下部ヘッドの破損面積や熔融炉心の流出量について、いずれも厳しい条件が使用されているため、感度解析を行う必要はない。</p>	<p>(2) 不確かさに関する整理</p> <p>MCCIは、原子炉下部キャビティ底に堆積した熔融炉心が周囲のコンクリートや原子炉下部キャビティ水と伝熱する過程でコンクリートが加熱され侵食を引き起こす現象である。国内PWRプラントでは、コンクリート侵食を防止するために、炉心損傷検知後速やかに原子炉下部キャビティに水を張り、高温の熔融炉心を水中に落下させることによって細粒化及び固化を促進させる方策を採っている。したがって、コンクリート侵食に至る過程は、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 熔融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程</li> <li>② 熔融炉心の冷却過程</li> <li>③ コンクリートの侵食過程</li> </ol> <p>のように段階的に進展する。以下、各過程での物理現象及び解析モデルに関し、不確かさの観点で整理した。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>B) 溶融物の落下・堆積過程</p> <p>この過程では、原子炉圧力容器下部ヘッドが破損し、溶融炉心が事前水張りされたペDESTALへ落下するため、溶融物が水中で粒子化することが想定され、粒子化されない溶融炉心はペDESTAL床に溶融プールとして堆積する。この過程では、溶融炉心の水中での粒子化に不確かさが想定される。</p> <p>MAAPコードでは、粒子化割合は、Ricou-Spalding モデルで計算される。Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液-液混合問題において広く利用されている相関式である。落下する溶融炉心は円柱ジェットで冷却水中に突入することを想定し、円柱ジェット外周部の侵食として粒子化割合を評価している。</p> <p>溶融炉心粒子化割合に影響するパラメータは、エントレインメント係数、溶融ジェット径及びプール水深であり、このうちモデルパラメータとしてエントレインメント係数と溶融ジェット径に不確かさが想定される。</p> <p>エントレインメント係数については、MAAPコードでは代表的なFCIの大規模実験であるFARO実験に対するベンチマーク解析によってその設定値及び不確かさ範囲を設定している。FARO実験のベンチマーク解析でのエントレインメント係数の不確かさ範囲は、<input type="text"/>～<input type="text"/>となっている。MAAP解析ではエントレインメント係数として<input type="text"/>が使用されており、実験解析により、実験結果の粒子化割合をよく再現するか、又は小さめに評価する入力となっている。溶融ジェット径は、下部ヘッド破損口径により決まることから、前述のように大きい値としている。これは、粒子化割合を小さめにする扱いをしていることになる。</p> <p>ちなみに、Ricou-Spaldingモデルを使用して、実機で想定される水張り水深2m、溶融ジェット径0.15mの条件の場合で約63%程度が粒子化される。</p> <p>以上のことから、エントレインメント係数については、不確かさ幅が設定されており、溶融炉心が水中に落下した際の粒子化割合とその過程での蒸気発生やデブリ粒子の酸化による水素ガス発生に影響することから、不確かさ幅の範囲で感度解析を実施する。</p>	<p>A) 溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程</p> <p>a) エントレイン量（溶融炉心の細粒化量）</p> <p>エントレインされたデブリ粒子は、水中に拡散しており、かつ、水との接触面積が大きいことから、塊状の溶融炉心に比べ、冷却が促進された状態であり、MCCI現象においてコンクリートの侵食を促進する観点からは、エントレイン量が少ない方が、厳しいと言えるが、溶融プール上に堆積した状態では、溶融プール上面の伝熱を低下させる要因となる。</p> <p>原子炉下部キャビティ水量に関しては、水深が浅い方が、溶融炉心の細粒化量が少なくなる傾向がある。MAAPコードの解析では、原子炉下部キャビティ水量は、原子炉格納容器形状とスプレイ開始のタイミングで決まる。原子炉格納容器形状に関してはプラント設計データにより設定されることから不確かさは小さい。原子炉下部キャビティへの注水や溶融炉心の落下のタイミングによっては、原子炉下部キャビティ水深が変化し得ることから、重要事故シーケンスに基づく不確かさは存在すると考えられることから、代替格納容器スプレイの作動タイミングの感度を確認することによって、水深の不確かさの影響を把握する。</p> <p>エントレイン量について、MAAPコードでは、Ricou-Spaldingの式に基づき細粒化量を計算し、エントレインメント係数はFCI実験に対するベンチマーク解析により設定された範囲の中間的な値（最確値）を設定している。ここで、当該係数の最小値は最確値に対して<input type="text"/>割程度小さく設定されているため、これを不確かさとして見込む。</p> <p>一方、デブリジェットの落下速度は、原子炉容器内外圧力差と溶融炉心の水頭から計算される。大破断LOCAシーケンスでは、原子炉容器内外圧力差は大きくなく、不確かさも小さいと考えられるが、溶融炉心の水頭については、原子炉容器の破損位置により変わるため、落下速度の不確かさ幅は2割程度となる。</p> <p>デブリジェット径は、Ricou-Spaldingのエントレインメント則で使用されるパラメータではないものの、実機スケールではデブリジェット全体が細粒化するわけではなく、ジェット径の増加はエントレインメント割合の減少と等価であることから、エントレイン量の不確かさの一部として取り扱う。デブリジェット径は原子炉容器の破損口径と等価として扱われており、実機では、最終的な破損口径は、初期径及び侵食の拡大幅によって決まり、侵食の拡大幅は破損口を通過する溶融炉心の量に依存する。初期径の不確かさとして、「添付2 溶融炉心と冷却水の相互作用について」の「5 感度解析と評価」において約3倍の不確かさを想定した場合、侵食後の原子炉容器貫通部の破損口径は、ベースケースと比較して約1%拡大している。侵食の拡大幅の不確かさとして、「添付1 高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱の防止について」の「4 感度解析と評価」においてリロケーションが早く進むことを想定した場合、原子炉容器貫通部の破損口径は、ベースケースと比較して約3割増加している。</p>	<p>相違理由</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。

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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>以上より、エントレインメント係数、破損口径及び落下速度の不確かさはエントレインメント量の不確かさとしてまとめて考えることができ、エントレインメント係数、落下速度、破損口径の不確かさを重量させると、不確かさ幅は約5割となり、不確かさの大きいエントレインメント係数を代表して感度を確認する。</p> <p>一方、堆積した状態のデブリ粒子に関しては、物理現象としては溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態となるが、MAAPコードの解析モデルでは、溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態としては取り扱っておらず、クラストと溶融プールから構成される均一な組成の平板状の発熱体として模擬しており、そのモデルの不確かさについては「溶融炉心の冷却過程」で取り扱う。溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態では、溶融プールから原子炉下部キャビティ水への伝熱の点で影響があり、不確かさが存在する（感度解析に関しては、後述の「溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱」にて整理する）。</p> <p>b) 溶融炉心の拡がり及び堆積形状</p> <p>溶融炉心の原子炉下部キャビティ床面への拡がりについては、水がないドライ状態では、溶融させたステンレス鋼により溶融炉心を模擬した実験より均一に拡がるという知見が得られている。国内PWRプラントでは、炉心損傷を検知した後に、原子炉下部キャビティへの水張りを行うことから、溶融炉心は冷却され表面にクラストを形成しつつ拡がることとなる。クラストは、溶融炉心の相変化時（固化時）の収縮によりクラックが生じ、溶融炉心の自重によってクラストは崩壊して、拡がっていくが、ドライの状態に比べて、拡がりが増大されることも報告されており、今後、知見の拡充が必要である。</p> <p>MAAPコードの解析モデルでは、原子炉下部キャビティ底に落下した溶融炉心は均一に混合された状態を仮定し、原子炉下部キャビティ床面への拡がりについては、拡がり面積を入力条件として与えている。重大事故の緩和策の有効性評価では、原子炉下部キャビティ床全面に均一に拡がることを前提として評価している。これは、米国の新設炉に対する電力要求では炉心出力から原子炉下部キャビティ床面積を求める要求があり、ここでは溶融炉心が床全面に均一に拡がることを前提にした考え方が採用されており、本有効性評価においても同様の考え方に則っている。しかしながら、上述のとおり、冠水した原子炉下部キャビティ床面への溶融炉心の拡がり面積については、DEFOR実験において堆積形状が山状になるという結果が得られているものの拡がりの観点で詳細に研究がなされているものではなく、知見の拡充が必要であり、現象として不確かさがある。よって、原子炉下部キャビティ床面への拡がりについての感度を確認する。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>C) MCC I 進行と注水によるデブリ冷却過程</p> <p>この過程では、熔融炉心の拡がり、デブリベッドの冷却性、コンクリート侵食に不確かさが想定される。</p> <p>熔融炉心の拡がり、MAAPコードでは落下した熔融炉心はベDESTAL床面に均一に拡がると仮定している。</p> <p>Mark-I 型格納容器のライナーアタックに関する研究によれば、水張りがないと熔融炉心は格納容器シェル壁（拡がり距離7m程度）まで到達するが、水張りがあれば熔融炉心の拡がりは抑えられ、拡がり距離は落下量等にも依存するが5m程度となる結果が得られている。有効性評価で想定している制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定すると、ABWR（ベDESTAL直径約11m）で床上に水がある場合でも、床全面に熔融物が拡がること示されており、ABWR以外のBWRではベDESTAL床面積がABWRより小さいこと（Mark-I 改良型格納容器の場合、ベDESTAL直径は約6.4m）を考慮すると、水張りを行っている場合でも熔融炉心は、落下位置に依らず床全面に拡がる可能性が高いと考えられる。これは、熔融物の拡がりに影響する因子のうち、主に想定しているデブリ落下流量が大きい（全炉心相当の熔融炉心が1分程度で落下することを想定）ことによるものと考えられる。以上のことから、熔融炉心の拡がり距離については、不確かさを考慮しても床全面に拡がるものと想定される。</p> <p>次に、熔融炉心の堆積形状については、落下直後の初期段階では、不均一に堆積することが想定されるが、粒子状ベッド内の継続的沸騰による粒子の攪拌によるセルフレベルリング効果により、時間と共に堆積厚さが均一化することが想定される。ただし、熔融炉心がベDESTALの中心からずれた位置に落下する場合を想定すると、セルフレベルリング効果により均一化に向かっていくが、偏った堆積形状でMCC I が進行する可能性も考えられる。均一堆積形状（円柱）の扱いが、熔融炉心から水への伝熱を小さくし、結果的にコンクリートへの伝熱を大きくしているため、MCC I 評価の観点から保守的な扱いと考えられるが、堆積形状の不確かさの影響を見るため、拡がりを抑制した場合の感度解析の実施が必要と考えられる。ただし、熔融炉心の拡がりについては、ベDESTALの形状や事前水張りの深さに依るところが大きいため、個別プラントにおけるこれらの状況を踏まえて感度解析等の取り扱いを行うことが適切と考えられる。</p> <p>熔融炉心から水への熱流束は、熔融炉心上面の性状により大きく影響されるため、大きな不確かさが想定される。</p> <p>熔融炉心上面から水への熱流束は、上部クラスト-水プール間の熱伝達モデルである Kutateladze 型の水平平板限界熱流束相関式の係数を調整することにより評価可能である。</p> <p>前述のように事前水張り対策により熔融炉心の一部は粒子化して、熔融炉心上部に粒子状ベッドを形成し、下部には粒子化しなかった熔融炉心が熔融プールを形成すると想定される。これは、水中に熔融炉心を落下させた実験的知見から、安定クラストは形成されず、粒子状ベッドが形成されていることから妥当と考えられる。熔融炉心上面は粒子状</p>	<p>B) 熔融炉心の冷却過程</p> <p>a) 熔融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱</p> <p>熔融炉心から原子炉下部キャビティ水への伝熱は、熔融プールの表面に形成されるクラストに、原子炉下部キャビティ水によって亀裂が入り、その中に原子炉下部キャビティ水が浸入することによって行われる。</p> <p>MAAPコードでは、クラストから水への伝熱は沸騰熱伝達として扱っており、その熱流束は Kutateladze の式を用いて計算され、その Kutateladze 係数<math>C_K</math>は、SWISS 実験において報告されている熔融体から水プールへの熱流束が <math>0.8 \text{ MW/m}^2</math> であることに基づき<math>C_K = 0.1</math>としている。実機条件においては、強度評価によってクラストは破損すると評価されており、上面水プールと熔融炉心が直接接触することによって、高い熱流束が維持されるといえる。</p> <p>Kutateladze の式を原子炉下部キャビティ床に堆積した熔融炉心に対する限界熱流束の式として用いる場合、本来平板に適用する相関式を山状に堆積するクラストや粒子ベッドに適用することになるため、MAAPコードのモデルには不確かさが存在する。クラストと水の界面は、諸外国での実験で示されているように、クラストに亀裂を生じており、そこに水が浸水することが考えられ、解析モデル上はその影響を考慮していないことから、不確かさを有すると言えるが、その場合、クラストと水の接触面が大きくなり、熔融炉心の冷却は促進されることから、クラストの亀裂に関しては、不確かさの観点では問題とならない。また、クラストの表面形状に凹凸が生じる可能性については、伝熱面積が大きくなるから、不確かさの観点では問題とならない。また、上面クラストの温度低下については、熔融炉心が冷却される方向であり、これについても不確かさの観点では問題とならない。一方、熔融プール上にデブリ粒子が堆積することにより、クラストと水の接触が阻害され、熔融炉心の冷却が悪くなることも考えられる。解析モデルでは、このプロセスは模擬されず、熱伝達が悪化することから、不確かさが存在する。これらの不確かさは、熔融炉心の冷却の悪化（熱伝達係数の低下）であるから、熱伝達係数の感度を確認する。</p> <p>細粒化時の熱伝達については、デブリ粒子の顕熱及び潜熱から水プールへの伝熱が計算され、その伝熱量は膜沸騰及び輻射熱伝達によって計算される。デブリ粒子からの熱量は水蒸気生成と水の温度上昇に変換される。デブリ粒子から水への熱伝達については、細粒化割合と相関があることから、この不確かさについては「エントレインメント係数」の中で整理する。</p> <p>b) 熔融炉心とコンクリートの伝熱</p> <p>原子炉下部キャビティ底に堆積した熔融炉心は、下側のコンクリート床と側面のコンクリート壁と伝熱する。熔融炉心からコンクリートへの伝熱は、熔融プールからクラストへの伝熱とコンクリートへの伝熱に分けられる。</p> <p>熔融プールとクラストとの間は、対流熱伝達によって伝熱される。対流熱伝達は、熔融プールのバルク温度と融点温度の差及び熔融プールと炉心クラストとの間の熱伝達係数</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>ベッドが形成されることを想定し、MAAPコードの熔融炉心上面から水への熱伝達のモデルパラメータである Kutateladze の係数 <math>F_{chf}</math> を変えることにより、粒子状ベッドの冷却性の不確かさ評価を行う。ここでは、Lipinski 0-Dモデルを使用して粒子状ベッドのドライアウト熱流束の不確かさを評価した。主なパラメータは、粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力であり、以下のように想定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>粒子径は、これまでの実験等の知見により3～7mmと報告されているため<sup>[29]</sup>、この範囲を不確かさの範囲と想定する。</li> <li>ポロシティは、おおむね0.3以上が報告されているが、粒子の充填状態の幅を考慮して、0.26（面心立方格子、最稠密）、0.32（体心立方格子）、0.4（MAAP標準値）、0.48（単純立方格子）の範囲を想定する。</li> <li>粒子状ベッドの堆積高さは、全炉心相当が落下した場合1m以上となるが、破損口径の拡大を考慮しても33%以上の粒子化が想定されるため、30cm以上とする。</li> <li>圧力は、MCCIが発生する時間では格納容器圧力は0.4MPa[abs]以上となっているため、0.4MPa[abs]以上とする。</li> </ul> <p>Lipinski 0-Dモデルによる評価結果を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>圧力が0.4MPa[abs]以上では、ポロシティの最も小さい0.26のケースでも800kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。この場合、大気圧状態では400kW/m<sup>2</sup>程度となっている。また、ポロシティの最も大きい0.48のケースでは、大気圧状態では2,000kW/m<sup>2</sup>程度となっている。</li> <li>粒子径が3mm以上では、ポロシティの最も小さい0.26のケースでも800kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。</li> <li>粒子ベッド高さが30cm以上ではドライアウト熱流束はほとんど変化がなく、ポロシティの最も小さい0.26のケースでも800kW/m<sup>2</sup>以上のドライアウト熱流束となる。</li> </ul> <p>以上の評価結果より、有効性評価条件として、大気圧状態で800kW/m<sup>2</sup>で圧力依存性を考慮した上面熱流束を使用することは、妥当と判断される。これは、MAAPコードのKutateladze式の係数 <math>F_{chf}</math> をデフォルトの0.1に設定することに相当する。また、デブリ上面熱流束の不確かさの下限値は、800kW/m<sup>2</sup>程度と考えられるため、粒子径やポロシティ等の不確かさによる上面熱流束の不確かさの影響を確認するため、800kW/m<sup>2</sup>一定を仮定した感度解析を実施する。</p> <p>コンクリートの種類（玄武岩系や石灰岩系）により、侵食挙動やガス発生挙動が異なる。また、玄武岩系コンクリートに関しては、壁方向と床方向の侵食量に相違が見られる知見が出ている。この侵食の異方性は、いまだ十分な理解が得られておらず、現状モデルでも扱われていないが、モデルパラメータの感度解析により、この侵食異方性の影響を検討する。</p> <p>評価モデルは以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート表面から深さ方向に1次元熱伝導を解き温度分布を計算している。</li> </ul>	<p>から計算される。また、クラスト内の温度分布は、熔融炉心とクラストの境界からコンクリート表面への熱流束を用いて、準定常の1次元熱伝導方程式を解くことで計算される。熔融炉心からコンクリート床及び側壁に対する熱流束は、熔融炉心プールから下部及び側部クラストへの伝熱と、クラスト内での発熱によるものである。</p> <p>熔融プールとクラストとの間の熱伝達については、熔融プール内の状態（固化燃料の割合）に関する不確かさや対流の不確かさが存在する。熔融プールとクラストとの間の熱伝達が大い場合には、クラストが溶融し、コンクリートへの伝熱量が増大するため、コンクリート侵食がしやすくなる傾向となる。ただし、有効性評価の状態（原子炉下部キャビティへ注水した状態）においては、熔融炉心からの除熱は、熔融炉心と温度差が大きい、冷却水側（上面）が支配的になることから、不確かさは存在するものの、影響としては小さいものと考えられる。</p> <p>クラストとコンクリートの間の熱伝達については、ACE 実験及び SURC 実験に対するベンチマーク解析の結果から実験データと同等の侵食深さがMAAPコードにより模擬できていることから、熔融炉心からコンクリートへの伝熱は、適切に模擬できていると判断する。しかしながら、熔融炉心とコンクリートの接触に関してはMAAPコードでは、理想的な平板で密着した状態で取り扱っていることから、接触面積に不確かさが存在する。接触面積が小さいとコンクリートへの伝熱量が少なくなることが考えられ、解析モデル上はその影響を考慮していないことから、不確かさを有すると言えるが、その場合、クラストとコンクリートの接触面が小さくなり、コンクリート侵食が抑制されることから、接触面積に関しては、不確かさの観点で問題とならない。</p> <p>C) コンクリートの侵食過程</p> <p>a) コンクリート組成</p> <p>コンクリートには主に玄武岩系のコンクリートと石灰岩系のコンクリートがある。コンクリート組成が異なると、コンクリート侵食挙動にも違いが生じる。玄武岩系のコンクリートの特徴はSiの含有量が多い。一方、石灰岩系のコンクリートの特徴はCa、CO<sub>2</sub>が比較的多く含まれていることである。しかしながら、コンクリート組成については、物性値が把握できており、不確かさに対する感度解析は不要である。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
<p>・クラスト-コンクリート界面の温度がコンクリート溶融温度以上である場合にコンクリート侵食が計算される。</p> <p>・コリウムからの伝熱量と分解/溶融潜熱により侵食量が評価される。</p> <p>・コンクリート分解による自由水・結合水・CO<sub>2</sub>の発生を考慮し、溶融コリウム中での化学熱力学平衡計算による未酸化金属との反応により H<sub>2</sub> 及び CO 発生が計算される。反応熱は、溶融炉心の崩壊熱に加算される。</p> <p>コンクリートの種類は、国内プラントでは玄武岩系コンクリートが主流であるが、一部のプラントでは石灰岩系コンクリートが使用されている。コンクリートの種類により物性値を使い分けている。これらのコンクリートの侵食モデルは、ACE 実験、SURC-4 実験等のドライ実験に対するMAAPモデルの実験解析により妥当性確認が行われている。</p> <p>OECD/MCCI プロジェクトの CCI 実験で確認された玄武岩系コンクリートの侵食の異方性について、この原因について明確な理解は得られていないが、溶融炉心から壁方向と床方向への熱伝達に関してコンクリート種類により相違があることを示唆している。この侵食の異方性の影響を確認するため、MAAPコードでは、溶融プールから横方向と下方向の対流熱伝達係数を調整して熱伝達の配分を変更することにより感度解析を実施する。対流熱伝達係数の幅は、CCI-3の試験結果を考慮し、底部を側壁のモデルパラメータの推奨値の1/4とした場合、側壁を底部のモデルパラメータの推奨値の1/4とした場合を想定する。</p> <p>(3) 感度解析による確認                  上記の検討により、MCCIに関して、解析モデルでの不確かさは、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・エントレインメント係数</li> <li>・上面熱流束係数</li> <li>・溶融プール-クラスト間の熱伝達係数</li> </ul> <p>に代表され、これらをパラメータとした感度解析を実施した。また、参考としてコンクリートの種類の違いについても解析を実施した（解析条件及び結果は添付3参照）。</p> <p>評価の結果、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程度であることが確認された。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コードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。</p> <p>なお、この分野は複雑な多成分・多相熱伝達現象であり知見が十分であるとは言えず、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ほとんどないことから、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>(3) 感度解析による確認                  前項の検討において抽出された不確かさの項目及びそれらの組み合わせた条件で感度解析により影響を確認した。解析結果については、添付3に示しており、ここでは条件設定の考え方や評価についてまとめる。</p> <p>A) 原子炉下部キャビティ水深                  炉心損傷を検知した後30分で代替格納容器スプレイを実施することとしており、さらに30分遅れる場合の感度を確認した。</p> <p>感度解析の結果、代替格納容器スプレイ操作が遅れることで、原子炉下部キャビティ水深が約半分となり、コンクリート侵食深さは、ベースケースの約3mmに対して、感度解析ケースでは約4mmであり、影響はわずかであった。</p> <table border="1" data-bbox="1171 1198 1834 1310"> <thead> <tr> <th></th> <th>解析条件</th> <th>コンクリート侵食深さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>代替格納容器スプレイ作動： 炉心溶融後30分</td> <td>約3mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>ベースケース+30分</td> <td>約4mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>B) Ricou-Spaldingのエントレインメント係数</p>		解析条件	コンクリート侵食深さ	ベースケース	代替格納容器スプレイ作動： 炉心溶融後30分	約3mm	感度解析ケース	ベースケース+30分	約4mm	
	解析条件	コンクリート侵食深さ									
ベースケース	代替格納容器スプレイ作動： 炉心溶融後30分	約3mm									
感度解析ケース	ベースケース+30分	約4mm									

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<p>エントレインメント係数は、FCIの大規模実験に対するベンチマーク解析において検討された範囲の中間的な値（最確値＝<input type="text"/>）を設定しているが、その範囲の中で細粒化割合が最も低く評価される値（＝<input type="text"/>）とした場合の感度を確認した。</p> <p>感度解析の結果、エントレインメント係数を小さくしたことで、塊状のまま原子炉下部キャビティ床面に到達する溶融炉心量が多くなり、冷却の観点で厳しい条件となるが、コンクリート侵食深さは、ベースケースの約3mmに対して、感度解析ケースでは約4mmであり、影響はわずかであった。一方、ジェットの径及び落下速度の不確かさについては、(2)A)で述べたとおり、エントレインメント係数の不確かさと重畳させると約5割の不確かさがあり結果を厳しくする方向であるが、上記の感度解析結果から、影響は小さいと言える。</p> <table border="1" data-bbox="1146 496 1821 598"> <thead> <tr> <th></th> <th>解析条件</th> <th>コンクリート侵食深さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>エントレインメント係数：<input type="text"/></td> <td>約3mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>エントレインメント係数：<input type="text"/></td> <td>約4mm</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1547 627 1942 692" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>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> <p>C) 溶融炉心の拡がり面積</p> <p>水中での溶融炉心の落下過程において、溶融炉心の冷却が進むと、拡がり面積が小さくなり、冷却されないと拡がり面積が大きくなる傾向が、PULiMS試験（KTH）、BNL実験（KTH）、SPREAD実験（日立製作所）、KATS実験（カールスルーエ研究センター、FZK）及びCORINE実験（CEA/DRN/DTP）の実験結果から考察されている。水中での溶融物の拡がりの挙動については、これまで実験による知見も少なく、複雑であることから、実現象の不確かさを網羅するという観点で、</p> <p>①落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース</p> <p>②落下時に細粒化などにより冷却が進むケース</p> <p>の条件が考えられ、①は、評価上、最初の原子炉容器破損による溶融炉心の落下により、原子炉下部キャビティ床面に約47m<sup>2</sup>の広さで拡がり、原子炉下部キャビティ床面積とほぼ同等となる。その後、断続的に溶融炉心が落下するため、溶融炉心は床全面を超えて拡がると考えられるが、実際は原子炉下部キャビティ壁により拡がりは制限されるため、溶融炉心の拡がり面積としては原子炉下部キャビティ床一面を設定すればよく、ベースケースの設定と同等である。</p> <p>一方、②の落下時に細粒化などにより冷却が進むケースでは、添付3の添付3-1に示すように、PULiMS実験により得られた知見から溶融炉心の水中での拡がり挙動を定式化しており、溶融炉心の質量約50t（MAAPコードにおける1回目の原子炉容器破損による溶融炉心落下量相当）に対して評価した拡がり面積（約1.8m<sup>2</sup>）に対して、溶融炉心の堆積高さが原子炉下部キャビティ水面より高くなった場合は、原子炉下部キャビティ水面より高い部分については、原子炉下部キャビティ水による冷却がないことから溶融状態のまままで</p>		解析条件	コンクリート侵食深さ	ベースケース	エントレインメント係数： <input type="text"/>	約3mm	感度解析ケース	エントレインメント係数： <input type="text"/>	約4mm	
	解析条件	コンクリート侵食深さ									
ベースケース	エントレインメント係数： <input type="text"/>	約3mm									
感度解析ケース	エントレインメント係数： <input type="text"/>	約4mm									



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
	<p>あり、固化しないと考えられることから、溶融炉心の堆積の高さとしては原子炉下部キャビティ水深までとし、それ以降の堆積は横に広がることを加味し、原子炉下部キャビティ床面積の約1/10を初期値として、落下量に応じて拡がり面積が拡大する条件を設定した。ただし、この条件では、拡がり面積が小さくなるよう、溶融炉心の過熱度分がすべて原子炉下部キャビティ水に伝熱され溶融炉心の融点まで冷却されることを想定しているのに対し、実際は、溶融ジェット径が0.5m程度と大きいため、落下過程で冷却されずに過熱度を保ったまま原子炉下部キャビティ床に到達する溶融ジェットの割合が高いと考えられることから、実機条件よりも厳しい条件を与えるものである。</p> <p>感度解析の結果、溶融炉心の拡がり面積（＝溶融炉心と水の接触面積）が小さくなることで、溶融炉心の単位時間当たりの除熱量が少なくなり、溶融炉心の冷却に時間を要し、コンクリート侵食深さはベースケースが約3mmであるのに対して、感度解析ケースでは約18cmとなった。このケースは、前述のとおり、実機条件よりも厳しい条件を与えるものあり、実機でのコンクリート侵食量は、感度解析よりも厳しくなることはないと考えられる。また、この結果から、コンクリート侵食が進む場合でも、原子炉下部キャビティ水により溶融炉心は冷却され、最終的にコンクリート侵食が停止し得ることが確認された。</p> <table border="1" data-bbox="1189 683 1800 858"> <thead> <tr> <th></th> <th>解析条件</th> <th>コンクリート侵食深さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1</td> <td>約3mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース</td> <td>溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大</td> <td>約18cm</td> </tr> </tbody> </table> <p>D) 水と溶融炉心間の熱伝達係数</p> <p>溶融炉心が原子炉下部キャビティ水に落下する際は、溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の間で熱伝達が行われ、それにより溶融炉心が冷却されるとともに、原子炉下部キャビティ床に堆積する際に溶融炉心表面にクラストが形成されることが考えられている。したがって、溶融炉心落下直後は熱流束が比較的高い状態が持続され、この間に溶融炉心の保有する熱は原子炉下部キャビティ水によって除熱される。その後、溶融炉心表面にクラストが形成されると、熱流束は低下する傾向となる。</p> <p>また、CCI実験においても、溶融物への注水直後は高い熱流束が確認され、その後クラストが冷却されて熱流束も低下する結果が得られているとともに、クラストが自重及び原子炉下部キャビティ水の水頭などによる破損により、原子炉下部キャビティ水と直接接触することで再び高い熱流束が得られている。さらに、実機スケールの現象ではクラストにひび割れが生じるため、高温の溶融炉心と上面水プールが再度直接接触して、高い熱流束が生じる現象が継続的に発生すると判断できる。</p> <p>以上を踏まえて、本パラメータについて、次の4ケースの感度解析を実施する。</p>		解析条件	コンクリート侵食深さ	ベースケース	溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1	約3mm	感度解析ケース	溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大	約18cm	
	解析条件	コンクリート侵食深さ									
ベースケース	溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1	約3mm									
感度解析ケース	溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大	約18cm									

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																		
	<p>感度解析ケース1は、CCI実験において観測されている初期のバルク冷却期間中の熱流束である 3MW/m<sup>2</sup> を条件とし、熔融炉心の温度が低下した場合に崩壊熱相当の熱流束に低下されることを想定したものである。</p> <p>感度解析ケース2は、原子炉下部キャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の熔融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2及びCCI-3実験において初期のピークを除外した熱流束である 0.5MW/m<sup>2</sup> を設定したものである。</p> <p>感度解析ケース3は、段階的に水と熔融炉心間の熱伝達係数を変化させるケースである。熔融炉心内部にプールがある状態では、クラストは破損、浸水を繰り返し、安定したクラストは形成されないと考えられ、その状態では熔融物から水への高い伝熱となり、一律に 0.8MW/m<sup>2</sup> を適用する。その後、熔融炉心全体が固化した後は、熔融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮しない熱流束として 0.5MW/m<sup>2</sup> を適用する。さらに、SSWICS実験で得られた知見として、コンクリート混入がある場合に、コンクリートの混入割合が15%程度以上の場合にドライアウト熱流束が 0.125MW/m<sup>2</sup> 程度に低下することを模擬して、コンクリート混入割合が15%に達するまで、コンクリート混入割合に比例させて、ドライアウト熱流束を低下させたものである。</p> <p>感度解析ケース4は、クラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束である 0.2MW/m<sup>2</sup> を一律に適用するものであり、熔融炉心の落下直後は高い熱流束の状態を無視した仮想的なケースである。</p> <p>感度解析の結果、感度解析ケース1、2、3においては、設定した条件に応じてコンクリート侵食深さにわずかな変化はあるものの、有意なコンクリート侵食には至らず、その不確かさが有効性評価の結果へ与える影響は小さい。一方、熔融炉心の落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定した条件のケース4では、コンクリート侵食が有意に進む結果となった。このケースは、前述のとおり、熔融炉心の落下直後は高い熱流束の状態を無視した仮想的なケースであり現実的に起こり得るものではないと考えられる。</p> <table border="1" data-bbox="1220 997 1803 1316"> <thead> <tr> <th></th> <th>解析条件</th> <th>コンクリート侵食深さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>Kutateladze係数：0.1（0.8 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）</td> <td>約3 mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース1</td> <td>Kutateladze係数：0.375（3MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）</td> <td>約0 mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース2</td> <td>Kutateladze係数：0.0625（0.5 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）</td> <td>約7 mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース3</td> <td>Kutateladze係数：                      熔融物存在時：0.1（0.8 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）                      全体固化時：0.0625（0.5 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）                      コンクリート15%混入時：                      0.015625（0.125 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）</td> <td>約3 mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース4</td> <td>Kutateladze係数：0.025（0.2 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(1)</sup>）</td> <td>約20 cm</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 大気圧条件</p> <p>E) 感度解析パラメータの組合せ</p>		解析条件	コンクリート侵食深さ	ベースケース	Kutateladze係数：0.1（0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約3 mm	感度解析ケース1	Kutateladze係数：0.375（3MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約0 mm	感度解析ケース2	Kutateladze係数：0.0625（0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約7 mm	感度解析ケース3	Kutateladze係数： 熔融物存在時：0.1（0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ） 全体固化時：0.0625（0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ） コンクリート15%混入時： 0.015625（0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約3 mm	感度解析ケース4	Kutateladze係数：0.025（0.2 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約20 cm	
	解析条件	コンクリート侵食深さ																		
ベースケース	Kutateladze係数：0.1（0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約3 mm																		
感度解析ケース1	Kutateladze係数：0.375（3MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約0 mm																		
感度解析ケース2	Kutateladze係数：0.0625（0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約7 mm																		
感度解析ケース3	Kutateladze係数： 熔融物存在時：0.1（0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ） 全体固化時：0.0625（0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ） コンクリート15%混入時： 0.015625（0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約3 mm																		
感度解析ケース4	Kutateladze係数：0.025（0.2 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(1)</sup> ）	約20 cm																		



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>MCCI現象は、原子炉下部キャビティ底に堆積した熔融炉心が周囲のコンクリートや原子炉下部キャビティ水と伝熱する過程でさまざまなパターンの不確かさが考えられること、また直接的な実験例が少なく知見が不十分であることから、A)～D)のパラメータの組合せを考慮し、感度解析を実施した。</p> <p>解析条件の設定に当たっては、C)で述べた、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース</li> <li>②落下時に細粒化などにより冷却が進むケース</li> </ul> <p>に着目して、パラメータの組合せを考慮した。</p> <p>感度解析ケース1（①の場合）は、細粒化が進みにくくなるよう設定するため、エントレインメント係数を推奨範囲の最小値とし、熔融炉心の拡がり面積としては、原子炉下部キャビティ床面積を設定した。</p> <p>感度解析ケース2（②の場合）は、細粒化が進みやすくなるよう設定するため、エントレインメント係数は推奨範囲の最大値とし、熔融炉心の拡がり面積としては、C)で設定した面積とした。水深については不確かさの範囲では結果への影響が小さいため、ベースケースの値を使用する。水と熔融炉心間の熱流束については、両ケースとも不確かさとして考慮させることとし、現実的な不確かさの幅を確認する観点から、D)の感度解析ケース3の熱流束を使用する。</p> <p>感度解析の結果、感度解析ケース1は熔融炉心の落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースであり、水と熔融炉心間の熱流束は、最初の落下時に大気圧条件相当で0.8MW/m<sup>2</sup>に達するものの、その後は瞬時に全体が固化するため、大気圧条件相当で0.5MW/m<sup>2</sup>となる。このため、熔融炉心温度、コンクリート表面温度はベースケースよりも高温の期間が若干長く維持される。その結果、コンクリート侵食深さは、ベースケースの約3mmに対して、感度解析ケース1が約4mmとなり、わずかに増加する程度であった。なお、感度解析ケース1では、原子炉下部キャビティでの水素生成量がベースケースに比べてわずかながら減少した。具体的には、ベースケースではMCCIによる水素発生量が約3kg、細粒化によるジルコニウム-水反応による水素発生量が約18kgであるのに対して、感度解析ケース1では、MCCIによる水素発生量が約4kg、細粒化によるジルコニウム-水反応による水素発生量が約10kgとなった。これは、感度解析ケース1においてエントレインメント係数を小さくしたことから、細粒化によるジルコニウム-水反応量が少なくなったためである。</p> <p>感度解析ケース2は、熔融炉心の落下時に細粒化などにより冷却が進むケースである。水と熔融炉心間の熱流束について、熔融炉心の拡がり面積を制限したことで、熔融炉心と水の接触面積が小さくなり、その結果熔融炉心の単位時間当たりの除熱量が少なくなったことで、熱流束が高く維持される時間が長くなっている。また、熔融炉心温度、コンクリート表面温度もベースケースに比べて高温の期間が長く維持され、特にコンクリート表面は融点温度に達している期間が長く、この間にコンクリート侵食が継続する。その後、コンクリート表面温度の低下に伴い、コンクリート侵食は停止する。その結果、コンクリート侵食深さは約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</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
	<p>り、侵食深さは十分小さいことが確認できた。なお、感度解析ケース2においては、コンクリート侵食深さが増加したことにより水素発生量は約53kgであり、大部分がRV破損後30分までに発生し、最終的な原子炉格納容器内の水素濃度は6vol%（ドライ条件換算）に達するが、水素処理装置（PAR及びイグナイタ）を使用することで処理が可能なレベルに収まっている。また、エントレインメント係数を大きくしたことにより、細粒化によるジルコニウム-水反応量が多くなり、約24kgとなっている。原子炉容器内での水素発生量とMCCIによる水素発生量を合わせると、全炉心内のジルコニウム量の約37.9%が水と反応する結果となっている。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った。</p> <table border="1" data-bbox="1167 488 1845 946"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>パラメータ</th> <th>コンクリート侵食深さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベースケース</td> <td>代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数：0.1 (0.8 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>)</td> <td>約3mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース1</td> <td>代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>)</td> <td>約4mm</td> </tr> <tr> <td>感度解析ケース2</td> <td>代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m<sup>2</sup>相当<sup>(注)</sup>)</td> <td>約19cm</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 大気圧条件</p>	項目	パラメータ	コンクリート侵食深さ	ベースケース	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約3mm	感度解析ケース1	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約4mm	感度解析ケース2	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約19cm	<p>相違理由</p>
項目	パラメータ	コンクリート侵食深さ												
ベースケース	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約3mm												
感度解析ケース1	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の1/1 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約4mm												
感度解析ケース2	代替格納容器スプレイ作動：炉心溶融後30分 エントレインメント係数：[ ] 溶融炉心の拡がり面積：原子炉下部キャビティ床面積の約1/10から落下量に応じて拡大 Kutateladze係数： 溶融物存在時：0.1 (0.8 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) 全体固化時：0.0625 (0.5 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> ) コンクリート15%混入時： 0.015625 (0.125 MW/m <sup>2</sup> 相当 <sup>(注)</sup> )	約19cm												
<p>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>(4) 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、下記パラメータ個別の感度解析及び下記パラメータを組み合わせた感度解析を行い、コンクリート侵食への影響を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉下部キャビティ水深</li> <li>・Ricou-Spaldingのエントレインメント係数</li> <li>・溶融炉心の拡がり</li> <li>・水と溶融炉心間の熱伝達係数</li> </ul>														

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<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と溶融炉心の間の熱伝達係数については、コンクリート侵食量への感度は小さく、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、溶融炉心の過熱度分がすべて原子炉下部キャビティ水に伝熱され溶融炉心の融点まで冷却されることを想定し、局所的に堆積する条件を仮定した場合でも、コンクリート侵食は約18cmにとどまる結果であった。</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、継続的なコンクリート侵食は生じないことが確認できた。また、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6vol%程度（ドライ条件換算）にとどまり、水素処理装置（PAR及びパイグナイタ）による処理が可能なレベルに収ま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った。</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、溶融炉心の拡がりが増えることが明らかとなった。一方で、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に水を張ること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、溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）については、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）

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）

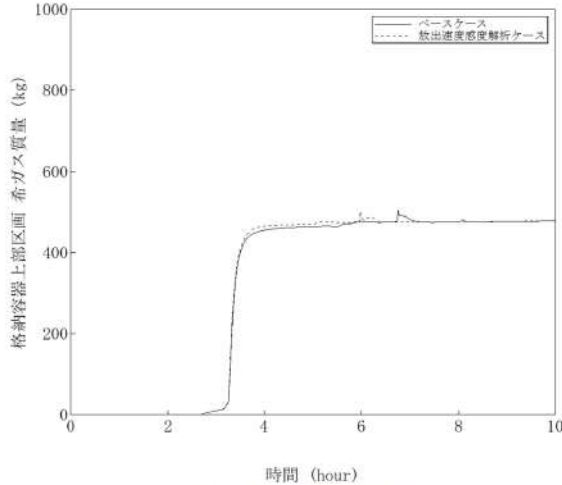
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>4.3.11 1次系内FP挙動、原子炉格納容器内FP挙動</p> <p>炉心損傷の検知直後に直ちに実施する運転員等操作としては、1次冷却系減圧操作と原子炉格納容器注水操作があり、炉心損傷の検知手段の1つとして格納容器内線量率がある。このため、炉心損傷とそれに伴うFPの原子炉格納容器への放出による原子炉格納容器内線量率の上昇のタイミングが適切に評価される必要がある。そこで、FP放出モデルの感度がFPの原子炉格納容器内放出タイミングへどの程度影響するかを確認する。</p> <p>有効性解析で採用しているFP放出モデルの炉心損傷検知の観点での妥当性を検討するために、炉心からのFP放出速度を変更した感度解析によって、炉心損傷検知判断に影響があるかを確認する。着目するFPは、最も早期に放出され、放出過程で沈着せず、原子炉格納容器線量率に最も影響する希ガスとする。</p> <p>炉心損傷検知判断が遅れる可能性があるという観点から、FP放出モデル間の放出速度の相違の幅を参照し、炉心からのFP放出速度に係る係数を1割低減し、どの程度影響があるかを感度解析によって評価した。評価対象シーケンスは、FPの原子炉格納容器への放出が加圧器逃がしタンクを経由するため、LOCA事象よりも遅くなる「全交流動力電源喪失+補助給水失敗」を想定した。</p> <p>原子炉格納容器上部区画の希ガス量を図4.3-22に示す。ベースケースとFP放出率に係る係数を1割低減させたケースとを比較すると、いずれの場合も、原子炉格納容器上部区画の希ガス量は、燃料被覆管破損時点から増加し始め、炉心が本格的に熔融するにしたがって急激に増加し、最終的にほぼ同じ量になった。したがって、FP放出速度が1割低減しても、炉心損傷検知判断への影響はほとんどないといえる。この結果はFPが加圧器逃がしタンクを経由せず、直接原子炉格納容器へ放出されるLOCA事象にも適用可能であると考えられる。</p> <p>また、炉心熔融時点における原子炉格納容器内線量率は、感度解析ケースにおいてベースケースよりも約2%高くなる結果となった。感度解析ケースでは、FP放出速度を低下させているが、その分崩壊熱が燃料内に蓄積され、炉心の温度が高くなることから、FP放出量が増加し、炉心熔融時点における原子炉格納容器上部区画のFP質量は感度解析ケースの方が多くなっており、その結果線量率もわずかに増加した。しかしながら、炉心熔融開始後、原子炉格納容器内の線量率は急激に増加することから、いずれにしても炉心損傷検知判断への影響はほとんどないと考えられる。</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）

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="1563 172 1960 240">「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」</p>  <p data-bbox="1361 751 1653 775">図 4.3-22 FP 放出速度感度解析</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.4 実機解析への適用性</p> <p>4.4.1 事故解析及び実験解析の実機への適用性</p> <p>4.3において実施した各種の事故解析及び実験解析に基づき、各解析モデルの実機への適用性について評価する。</p> <p>(1) 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生[圧力容器(炉心損傷後)]、燃料被覆管酸化、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形[炉心(燃料)]、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達[圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心ヒートアップの解析において重要な燃料被覆管酸化、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関するモデルの妥当性は、TMI事故解析及びCORA実験解析を通じて確認した。</p> <p>解析により得られた炉心ヒートアップ時の水素ガス発生量及びその発生期間は、TMI事故の分析結果とおおむね一致することを確認した。また、事故発生後約220分における炉心状態について、解析結果がTMI事故の分析結果と良く一致することを確認した。さらに、原子炉圧力容器壁面温度についても、解析においてTMI事故の分析結果と同等な結果が得られていることを確認した。また、CORA実験解析における、燃料被覆管、制御棒及びチャンネルボックスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。</p> <p>TMI及びCORA実験とBWR実機において、燃料被覆管酸化、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管変形、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する基本的な現象に有意な差はなく、したがってこれらの現象に関するモデルについて、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p>	<p>4.4 実機解析への適用性</p> <p>4.4.1 事故解析及び実験解析の実機への適用性</p> <p>各種の事故解析及び実験解析によりモデルの妥当性を確認し、さらに、スケール性に関する考察を行い、実機への適用性を確認する。確認結果を以下に記述する。</p> <p>(1) 冷却材放出（加圧器）</p> <p>加圧器逃がし弁からの放出量は、加圧器逃がし弁の設定圧における流量特性を入力値として与えることから、作動時の流量には妥当性がある。TMI事故解析（実機スケール）において、事故発生から加圧器逃がし弁元弁閉止（約139分）までの1次冷却材圧力及び加圧器水位に着目した考察を行った結果、1次冷却材圧力及び加圧器水位は、TMI事故データの特徴を模擬できていることから、加圧器逃がし弁からの冷却材放出モデルが妥当であることを確認した。</p> <p>TMI2号機は、国内の3ループプラントと同程度の出力であるが、大型の貫流型蒸気発生器を採用した2ループプラントであることが特徴である。MAAPコードによる解析は、このような特徴を入力条件として与えており、そこで得られた応答が事故データを模擬しているものであれば、解析モデルも妥当性を有すると考えられる。また、MAAPコードの1次冷却系モデルは、健全側ループを1ループに縮約した2ループモデルであるが、この取扱いは、多くのコードで採用された実績があり、3ループプラントや4ループプラントへの適用性を有すると考えられる。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、気液界面の熱伝達 [格納容器]</p> <p>格納容器各領域間の流動並びに構造材との熱伝達及び内部熱伝導に関するモデルの妥当性は、HDR 実験解析及び CSTF 実験解析を通じて確認した。また、気液界面の熱伝達に関するモデルの妥当性は、HDR 実験解析を通じて確認した。</p> <p>HDR 実験解析 (E11.2 実験) では、格納容器圧力及び温度について解析結果と測定データの比較を行った。評価の結果、雰囲気からヒートシンクへの伝熱が過小に予測されている可能性が示唆されており、それに起因して格納容器温度を十数℃程度高めに、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられ、主要な傾向を再現できることを確認した。実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなると考えられ、より適切に模擬する方向になると考えられる。また、非凝縮性ガス濃度変化の解析結果が測定データと良く一致することを確認した。CSTF 実験解析では、格</p>	<p>なお、有効性評価では、格納容器破損防止対策として加圧器逃がし弁開放による1次冷却系強制減圧を行い、加圧器逃がし弁からの冷却材放出が減圧挙動に影響するが、臨界流の計算に用いている Henry-Fauske モデルでは、蒸気単層放出に対しては、参考文献[4]に示されるように、その理論式は、低圧の領域においても実験結果をよく再現することが示されている。</p> <p>以上より、MAAP コードは加圧器からの冷却材放出に関して実機解析に適用できる。</p> <p>(2) 1次冷却系から2次冷却系への熱伝達、冷却材放出（臨界流・差圧流）、2次側水位変化・ドライアウト（蒸気発生器）</p> <p>MB-2 実験の解析結果より、「1次冷却系から2次冷却系への熱伝達」、「冷却材放出」及び「2次側水位変化・ドライアウト」については、適正に評価されることを確認した。不確かさは小さいが、2次冷却系からの液相放出を伴う場合には、ともに過大評価する傾向があることを確認した。</p> <p>MB-2 実験装置は、実機よりも規模が小さい1/7スケールであるものの、幾何的かつ熱水力的には同等に設計され、内部構造物も模擬したものである。したがって、ここで評価された「1次冷却系から2次冷却系への熱伝達」の不確かさについては、実機スケールにおいても適用できると考えられる。「冷却材放出（臨界流・差圧流）」については、有効性評価では、主蒸気逃がし弁や主蒸気安全弁からの放出であり、設計に基づいた容量を入力値で与え、その上で、上述の液相放出時の不確かさを扱えば良く、実機スケールにおいても適用できると考えられる。「2次側水位変化・ドライアウト」については、実験装置の伝熱管高さ比は実機に比べ約2/5であり、スケール比を加味しても、不確かさが過度に拡大することはない、実機スケールにおいても適用できると考えられる。</p> <p>また、蒸気発生器は、2～4ループプラントで、ほぼ同等なものが設置されており、プラントのループ数に対する依存性はない。</p> <p>以上より、MAAP コードの蒸気発生器モデルは、実機解析に適用できる。</p> <p>(3) 区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）、構造材との熱伝達</p> <p>HDR 実験（実機スケール、70ノード）、CSTF 実験（実機スケールの0.3倍、4ノード）の種々の解析結果より、「構造材との熱伝達」を小さめに評価することを確認した。これに起因して原子炉格納容器内温度については十数℃程度高めに、原子炉格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向を確認した。これらは、HDRの縦長格納容器形状及び高い注入点の条件により温度成層化を高めに評価した結果生じた可能性があり、PWRの原子炉格納容器及び低位置の1次冷却系では、上記の傾向は緩和され、より適切に模擬する方向になると考えられる。</p> <p>一方、HDR 実験、CSTF 実験の解析結果より、原子炉格納容器中に放出した非凝縮性ガスの濃度は、実験結果をよく模擬していることを確認した。</p> <p>また、詳細なノード分割（70ノード）を行っているHDR 実験と実機解析と同程度のノード分割を行っているTMI事故及びCSTF 実験（いずれも4ノード）において、同様の挙動が確認され</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>納容器温度及び非凝縮性ガス濃度変化について解析結果と測定データの比較を行った。解析結果が測定データと良く一致することを確認した。</p> <p>HDR 及び CSTF の格納容器はBWR実機と異なるものの、実験解析を通じて格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導並びに気液界面の熱伝達に関する基本的な妥当性を確認しており、これらのモデルは実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p style="text-align: center;">【比較の為掲載順を入れ替えた】</p> <p>(1) 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生[圧力容器(炉心損傷後)], 燃料被覆管酸化, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形 [炉心(燃料)], リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心ヒートアップの解析において重要な燃料被覆管酸化, 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形, リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関するモデルの妥当性は, TMI 事故解析及び CORA 実験解析を通じて確認した。</p> <p>解析により得られた炉心ヒートアップ時の水素ガス発生量及びその発生期間は, TMI 事故の分析結果とおおむね一致することを確認した。また, 事故発生後約 220 分における炉心状態について, 解析結果が TMI 事故の分析結果と良く一致することを確認した。さらに, 原子炉圧力容器壁面温度についても, 解析において TMI 事故の分析結果と同等な結果が得られていることを確認した。また, CORA 実験解析における, 燃料被覆管, 制御棒及びチャンネルボックスの温度変化について, 測定データと良く一致することを確認した。</p> <p>TMI 及び CORA 実験と BWR 実機において, 燃料被覆管酸化, 放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生, 燃料棒内温度変化, 燃料棒表面熱伝達, 燃料被覆管変形, リロケーション, 構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する基本的な現象に有意な差はなく, したがってこれらの現象に関するモデルについて, 実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>(3) 熔融炉心とコンクリートの伝熱, コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生 [格納容器(炉心損傷後)]</p> <p>熔融炉心とコンクリートの伝熱並びにコンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関するモデルの妥当性は, ACE 実験解析及び SURC-4 実験解析を通じて確認した。</p> <p>ACE 実験解析及び SURC-4 実験解析では, コリウム温度及びコンクリート侵食深さについて, 解析結果が測定データと良く一致することを確認した。</p> <p>ACE 実験及び SURC-4 実験は, 冷却水の注水がなく, かつコリウム及びコンクリートの配置があらかじめ決められている。したがって, 熔融炉心とコンクリートの伝熱, コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生に関するモデルの妥当性を確認する上で, 冷却水の挙動や幾何形状といっ</p>	<p>ていることから、実機解析のノード分割数においても、原子炉格納容器内の挙動を適切に模擬できることを確認した。</p> <p>さらに、ループ数が異なるプラントにおいても、蒸気、ガス及び液体の基本的な流動は共通である。ループ数が異なることにより、流体の移動に係る駆動力や凝縮等の熱的变化の度合いが異なるが、MAAPコードでは、異なるサイズや形状を持つHDR実験及びCSTF実験に対して同様の挙動が確認されており、ループ数が異なることによる原子炉格納容器内の流動の差は、コードにより十分に模擬されるものと判断できる。</p> <p>以上より、MAAPコードは、原子炉格納容器の流動に関して実機解析に適用できる。</p> <p>(4) 炉心ヒートアップ (燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形)、リロケーション、下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達、水素濃度変化</p> <p>炉心ヒートアップ時の水素発生について、水素発生量及びその発生期間が TMI 事故の分析結果と概ね一致する結果が得られることを確認した。</p> <p>炉心ヒートアップ (燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形) に引き続き計算された炉心のリロケーションについては、220 分時点の炉心状態について、TMI 事故の分析結果と一致する状態が得られていることを確認した。下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達として、原子炉容器壁面の温度の挙動に着目し、同様に、TMI 事故の分析結果と同等な結果が得られていることを確認した。</p> <p>TMI-2号機の炉心は、国内の3ループプラントと同程度のサイズであり、また、炉心ヒートアップやリロケーションに関する基本的な現象は、ループ数を問わず同様の経過となるものと考えられる。</p> <p>以上より、炉心ヒートアップ (燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形) モデル、炉心リロケーションモデル、下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達モデルについて、実機解析に適用できる。</p> <p>(5) 熔融炉心とコンクリートの伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生</p> <p>熔融炉心とコンクリートの伝熱及びそれに伴うコンクリート分解挙動においては、実機の床面積及び熔融炉心の体積に基づいた熔融炉心の厚さが伝熱挙動モデルに反映され、下方向及び横方向にそれぞれ1次元的挙動として扱われている。ACE実験及びSURC実験は、注水がなく、かつ、熔融炉心の堆積状態が既知であることから、注水による冷却や粒子ベッド形状といった他の要因の影響が小さい状態でのコンクリート侵食挙動が確認でき、「熔融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」の現象モデルの確認として有効である。</p> <p>ACE実験及びSURC実験のコンクリート侵食挙動に対し、MAAPコードの解析結果は、熔融炉心温度及びコンクリート侵食深さの時間変化を比較的適切に模擬している。なお、ACE実験で</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>た要因の影響が小さい状態でのコンクリート侵食挙動が確認できる。さらに、ACE実験のうちL7実験では、部分的に酸化したBWR燃料を模擬したコリウム溶解物が用いられており、コリウムの熱的物性もBWR実機と同等である。したがって、ACE実験解析及びSURC-4実験解析による妥当性確認に基づき、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>なお、実機におけるコンクリート侵食挙動に関しては、格納容器下部におけるFCI現象も含めた熔融炉心の堆積の仕方や水による冷却等がコンクリートへの伝熱挙動にも影響する複合的な現象であることから、添付3において知見の整理、不確かさの分析及び感度解析による影響評価を行っている。</p> <p>(4) 原子炉圧力容器内FP挙動 [圧力容器(炉心損傷後)], 原子炉格納容器内FP挙動 [格納容器(炉心損傷後)]</p> <p>原子炉圧力容器内FP挙動及び原子炉格納容器内FP挙動に関するモデルの妥当性は、PHEBUS-FP実験解析及びABCVE実験解析を通じて確認した。</p> <p>PHEBUS-FP実験解析では、FP放出割合の解析結果と測定データの比較から、FP放出の開始時刻を良く再現できることを確認している。炉心の加熱出力が増加した後は、測定データに比べて被覆管温度を高めに評価するとともに、より急激なFP放出を予測している。FP放出が顕著になる実験開始後、約11,000秒以降は、測定データが時間とともに一定の割合で増加するのに対し、解析結果は約0.5まで急激に増加した後、緩やかな増加を示している。解析結果と測定データの差異は、実験における小規模な炉心体系の模擬に起因していると考えられるが、実機体系では、局所的な挙動による影響は相対的に小さくなるため、この種の不確かさは小さくなると考えられ、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>ABCVE実験解析では、格納容器中に発生させたエアロゾルについて気相中の濃度変化を評価した。解析結果は、エアロゾルの生成に伴う濃度の増加、その後の凝集及び沈着による濃度の減衰を良く模擬していることを確認した。エアロゾルの凝集に伴い沈降速度が増大する挙動は区画の大きさに依存しないので、スケールの観点においても実機解析への適用性を有すると判断できる。</p>	<p>は二酸化ウランと酸化ジルコイなどの混合物が使用されており、熱的物性も実機に近い条件となっている。熔融炉心からコンクリートへの熱移動は、基本的にクラスト内の熱伝導や熔融炉心に接するコンクリート内の熱伝導が主要な熱移動挙動になるため、下方向の侵食挙動に関しての不確かさは比較的小さいと考えられる。</p> <p>以上より、ACE実験及びSURC実験のような熔融炉心の形状が既知の場合に、MAAPコードのモデルにおいて実験で観測されたコンクリート侵食挙動を再現できることが確認され、「熔融炉心とコンクリートの伝熱」及び「コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生」の現象モデルの不確かさは小さく、実機解析に適用可能と考えられる。このように、床面積及び熔融炉心の体積に基づいた熔融炉心の厚さに応じた挙動を取り扱うことができ、ループ数に依らず、適用可能である。</p> <p>なお、実機におけるコンクリート侵食挙動に関しては、原子炉下部キャビティでのFCI現象も含めた熔融炉心の堆積の仕方（即ち、粒子ベッド形状）や水による冷却などがコンクリートへの伝熱挙動にも影響する複合的な現象であることから、添付3において総合的な検討を行っている。</p> <p>(6) 1次系内FP挙動、原子炉格納容器内FP挙動</p> <p>PHEBUS-FP実験に対するMAAPコードによる実験解析をベースにMAAPコードのFP挙動関連モデルの妥当性を検討した。ギャップ放出のタイミングについては適切に評価されるが、その後の燃料被覆管酸化反応熱を大きめに評価し、燃料被覆管温度が高めに推移し、燃料破損後のFP放出開始のタイミングも早く評価する結果となっている。燃料からのFP放出割合では、最終的な放出割合について実験と同程度となっているものの、燃料被覆管温度を高めに評価し、放出の時間変化に相違がある。これらは、小規模な炉心体系の模擬性に起因していると考えられるが、実機スケールでは、ノード分割数が多く、この種の不確かさは小さくなると考えられ、実機解析へ適用可能であると考えられる。</p> <p>ABCVE-AB5実験に対するMAAPコードの解析結果をベースに気相からFPエアロゾルが重力沈降により離脱する挙動モデルの妥当性を確認した。この試験では、FPエアロゾルが凝集し、粒子径が成長することで重力沈降速度が高くなり、その結果、気相のFP濃度の減衰する挙動を測定している。MAAPコードでは試験結果を良く模擬しており、また厳密な計算結果とも良い一致性を示し、原子炉格納容器内の気相中のFP濃度が減衰する挙動を模擬できている。実験では高さ20m、床面積45m<sup>2</sup>で原子炉格納容器の区画のスケールと大きな相違がないことや、エアロゾルの凝集に伴い沈降速度が増大する挙動は区画の大きさに依存しないので、スケールの観点においても実機への適用は可能であると考えられる。</p> <p>FP放出開始のタイミングは運転員等操作検討のための炉心損傷検知の観点で重要になり、原子炉格納容器へのFP放出量、1次冷却系内及び原子炉格納容器内の空間内における気相中のFPの減衰挙動は、環境への潜在的な放出可能な量であり重要になると考えられる。これらの2つの観点で概ね妥当に評価されていることを考慮するとMAAPコードのFP挙動モデルは実機への適用性を有すると考えることができる。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>4.4.2 感度解析等による検討の整理</p> <p>重要現象に関連したパラメータの不確かさを分析し、その不確かさが重要現象に与える影響を感度解析等に基づき評価することで、実機解析への適用性を確認する。</p> <p>(1) 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流〔炉心（熱流動）〕</p> <p>これらは原子炉圧力容器内の炉心水位挙動に関連する現象であり、原子炉圧力容器内水位の低下が比較的緩慢なTQUXシーケンス及び比較的速い中小破断LOCAシーケンスを対象としてSAFERコードとの比較評価を行った。</p> <p>比較評価においては、CCFLの取り扱い等により、水位変化に差異が生じるものの、水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。なお、感度解析はBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードのこれらの現象に対する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p>	<p>4.4.2 感度解析による検討の整理</p> <p>感度解析では、重要現象に関連したパラメータの不確かさ幅を分析し、感度解析を実施することによって、その重要現象に対する影響を把握し、実機解析への適用性を確認する。</p> <p>(1) 沸騰・ボイド率変化、気液分離（炉心水位）・対向流（炉心）、気液分離・対向流（1次冷却系）</p> <p>これらは炉心水位挙動に関連する現象であり、有効性評価において炉心水位挙動が評価指標に直接影響する「ECCS再循環機能喪失」に対して、MAAPコードとM-RELAP5コードの比較を行うことで、不確かさの評価を行った。</p> <p>MAAPコードとM-RELAP5コードの解析結果の比較から、①炉心及び上部プレナム領域のボイド率について上部プレナム領域ではやや過小評価するものの、両コードで同等であること、②MAAPコードでは高温側配管領域（水平部から蒸気発生器伝熱管の鉛直部まで）の保有水量を多めに評価する傾向があること、及び、③蒸気発生器伝熱管への液相流入が少なく、2次側からの伝熱により発生した蒸気による1次側の圧力損失の増加（いわゆる「スチームバイディング効果」）が小さくなるが、高温側配管領域の液相分布に影響することから、その影響は②項に含まれていることを、それぞれ確認した。代表3ループプラントの場合、M-RELAP5コードとの比較より、高温側配管領域の保有水量を多めに評価することによりECCS再循環切替失敗後の炉心露出までの時間を約15分遅く評価することを確認した。</p> <p>また、1次冷却系の保有水量を多めに評価する影響として、原子炉格納容器圧力を低めに評価するが、MAAPコードとM-RELAP5コードの計算結果から得られる放出エネルギーの差から見積もられる原子炉格納容器圧力の差はわずかである。</p> <p>一方、比較に用いたM-RELAP5コードについては、MAAPコードの計算結果を境界条件に用いることが解析結果に与える影響は軽微であること、「第1部 M-RELAP5コード」に示すようにECCS再循環機能喪失後の炉心露出予測について非保守的な傾向とはならないことを確認している。</p> <p>これらの結果から、再循環切替失敗までの高温側配管領域の保有水量を多めに評価することにより炉心露出までの時間を長く評価する傾向をMAAPコードの不確かさとして取り扱う。この影響は、代表3ループプラントの場合は約15分であり、プラント毎に評価を要する。</p> <p>以上より、MAAPコードによるECCS再循環機能喪失シーケンスの評価結果に対して、炉心露出までの時間を長めに評価する不確かさを考慮することで、ECCS再循環機能喪失に係る炉心損傷防止対策の有効性を確認することが可能である。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>(2) ECCS 蓄圧タンク注入</p> <p>蓄圧タンクからの注入流量は蓄圧タンク内圧と1次冷却材圧力の差圧及び配管圧力損失に基づき計算するモデルであり、また、一般的な状態方程式及び差圧流モデルが使用されていることから、解析モデルとしての不確かさは小さいと考えられるが、「高压溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」（及び「格納容器過温破損」）においては、1次冷却系強制減圧時の1次冷却材圧力に影響を与える可能性があるため、影響程度の把握を目的として感度解析を行った。蓄圧注入ラインの流動抵抗（圧力損失）を50%増加させた場合でも、事象進展に与える影響は軽微であり、蓄圧タンク内圧と1次冷却材圧力の差圧流に関するモデルの感度が小さいことを確認した。感度解析を行った重要事故シークエンスでは、1次冷却材圧力の低下が緩やかであり、蓄圧タンクからの注入量が少なく、注入ラインの流動抵抗の差が注入量自体に影響しないことを示している。</p> <p>この感度解析は4ループプラントの条件で実施したものであるが、ループ数によらず解析モデルの取扱いは同じであり、また、実機設備は炉心出力（崩壊熱）に応じて蓄圧タンク容量が決定されており、2、3ループプラントに対しても同様の結果が適用可能であると判断される。したがって、MAAPコードは蓄圧注入特性に関して、個別のプラントにおいても、実機解析に適用できる。</p> <p>(3) 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</p> <p>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については、原子炉格納容器内に水素が存在する場合の影響を確認した。代表3ループプラントの場合、最大水素濃度（ドライ条件換算で13vol%）を想定すると、水素が存在しない場合に対し、除熱量で約7%、流速で約10%の性能低下が見込まれ、感度解析による影響評価の結果、原子炉格納容器圧力を0.016MPa、温度を2℃程度高めに評価することを確認した。不確かさを考慮することで、原子炉格納容器の最高使用圧力の2倍及び原子炉格納容器内温度200℃までの余裕は少なくなる傾向となるが、水素による性能低下の影響は、最高使用圧力の2倍及び200℃に対する余裕に比べて1桁程度小さい。なお、本評価は、最大限水素濃度が増加するとした場合（ドライ条件換算13vol%）に対する評価であり、実際の性能低下は水素濃度に依存する。</p> <p>上記は、代表3ループプラントを対象とした結果であり、ループ数によらず各プラントで同様の格納容器内自然対流冷却の方式（メカニズム）を採用していることから、原子炉格納容器内に水素が存在する場合に圧力及び温度を高めに評価する傾向については各プラントでも同様であり、MAAPコードの自然対流冷却に関するモデルは、水素が存在する場合の影響評価手法も含め、実機解析への適用性を有すると判断される。ただし、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冷却性能等の条件はプラントによって異なることから、水素による性能低下の幅及びその影響程度はプラント毎に評価を要する。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(2) 燃料被覆管酸化〔炉心（燃料）〕</p> <p>炉心ヒートアップに関する解析モデルについては、4.2.1に示したTMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることを踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。</p> <p>炉心ヒートアップは、崩壊熱及びジルコニウム-水反応の酸化反応熱により進展することから、酸化反応が促進されることを模擬してジルコニウム-水反応速度の係数を変化させた場合の感度解析を行った。感度解析においては、仮想的な厳しい想定ではあるがベースケースの2倍とした。感度解析は代表的にBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントを対象とし、炉心部への蒸気供給の差が生じることから、TQUVシーケンス及び大破断LOCAシーケンスについて実施した。</p> <p>その結果、炉心溶融時刻については、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度が小さいことを確認した。また、炉心溶融後の事象進展として、下部プレナムへのリロケーション開始時刻は、両シーケンスともベースケースとほぼ同時であり、炉心溶融開始から原子炉压力容器破損までは3～4時間程度の時間を要することから、原子炉压力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされており、実機解析への影響はない。さらに、TQUVシーケンスでは、原子炉压力容器破損時の原子炉圧力も2.0MPa[gage]以下であり、格納容器圧力への影響もわずかとなることから、実機解析への影響はない。水素ガス発生観点では、感度解析においては被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的に被覆管表面積を大きくしているものであり、実機の被覆管表面積は形状により決まることから影響しない。</p> <p>以上、酸化反応が促進されることを模擬し、仮想的な条件としてジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした場合の影響を評価した。なお、感度解析はBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。また、コンクリート侵食量については、原子炉压力容器破損時刻への感度は小さく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。したがって、MAAPコードの炉心ヒートアップに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p>	<p>(4) 炉心ヒートアップ</p> <p>炉心ヒートアップに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見を基に開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心ヒートアップに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響程度を把握した。</p> <p>炉心ヒートアップは、崩壊熱及びジルコニウム-水反応の酸化反応熱により進展することから、酸化反応が促進されることを模擬してジルコニウム-水反応速度の係数を変化させた場合の感度解析を行った。感度解析においては、仮想的な厳しい想定ではあるが、2倍とする条件とした。感度解析は代表4ループプラントを対象とし、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、SBOシーケンスとLOCAシーケンスについて実施した。</p> <p>その結果、運転員等操作の起点となる炉心溶融については、SBO、LOCAシーケンスのいずれも感度は小さいことを確認した。また、炉心溶融後の事象進展として、下部プレナムへのリロケーション開始は、SBOシーケンスの場合に14分早まる結果であったが、原子炉容器破損時点の1次冷却材圧力は2.0MPa[gage]を下回り、SBOシーケンスは事象進展が遅く、炉心溶融開始から原子炉容器破損までは3～4時間程度の時間がかかるため、原子炉下部キャビティへの注水も十分になされた状態である。また、原子炉格納容器圧力への影響もわずかである。一方、LOCAシーケンスの場合は約30秒早まる結果であり、事象進展への影響は小さい。これは、LOCAシーケンスでは1次冷却系保有水量が早期に減少することで、炉心の過熱が早く進むためである。</p> <p>以上、酸化反応が促進されることを模擬し、仮想的な条件としてジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした場合の影響程度を把握した。実際には、2倍に相当する程度まで酸化反応が促進されることは考えにくく、また、MAAPコードで採用しているBaker-Just相関式は、酸化反応量を過大に推定するように導出した式であり、ヒートアップを早めに評価する傾向となる。</p> <p>この結果は4ループプラントに対して評価したものであるが、現象のメカニズムは2、3ループプラントでも同じであり、感度解析と同様の傾向となる。MAAPコードの炉心ヒートアップに関する解析モデルは、実機解析に適用できると判断される。</p> <p>一方、「ECCS再循環機能喪失」では、炉心が露出する場合の重要現象として「燃料棒表面熱伝達」が挙げられているが、有効性評価では炉心露出を判断基準としており、炉心が冠水した状態では「燃料棒表面熱伝達」が炉心水位や燃料被覆管温度に与える影響は小さく、実機解析に適用できると判断される。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(3) リロケーション [圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることを踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。</p> <p>MAAPコードでは、燃料の温度履歴に応じて炉心ノードが崩壊するまでの時間を計算しており、炉心ノード崩壊のパラメータをベースケースから□□引き下げること、リロケーションが早く進展する状態を模擬した。感度解析は代表的にBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントを対象とし、炉心領域の冷却材による除熱の効果により差が生じることから、TQUVシーケンス及び大破断LOCAシーケンスについて実施した。</p> <p>炉心溶融時刻については、TQUV、大破断LOCAシーケンスのいずれも感度は小さい。なお、原子炉圧力容器破損時刻についても、両シーケンスで感度は小さく、実機解析への影響はない。さらに、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は2.0MPa[gage]以下であり、実機解析への影響はない。コンクリート侵食量については、原子炉圧力容器破損時刻への感度は小さく、格納容器下部への注水量に大きな差は生じないことから、影響は小さいと考えられる。</p> <p>以上、炉心ノード崩壊のパラメータを、大幅ながら□□引き下げること、リロケーションが早く進展する状態を模擬した感度解析を行い、TQUV及び大破断LOCAシーケンスのいずれについても感度が小さいことを確認した。また、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は2.0MPa[gage]以下であり、かつ格納容器下部には十分な注水があることから、実機解析での評価に影響を与えるものではない。なお、感度解析はBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードのリロケーションに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <div data-bbox="322 1358 1037 1406" 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>	<p>(5) リロケーション</p> <p>炉心のリロケーションに関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果と比較し、妥当な結果が得られている。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故あるいはその後の検討により得られた知見を基に開発されていることも踏まえると、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、炉心のリロケーションに関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響程度を把握した。</p> <p>MAAPコードでは、燃料の温度履歴に応じて燃料ペレットが崩壊するまでの時間を計算しており、その判定基準を□□引き下げること、リロケーションが早く進展する状態を模擬した。</p> <p>SBOシーケンスの場合、リロケーションの開始自体は、早期に発生するが、初期の段階では崩壊した燃料は炉心部に留まるために、下部プレナムへのリロケーション量が多くなる時間としては約20分早まり、原子炉容器破損時刻は、感度解析ケースの方が約26分早くなったが、原子炉容器破損時点の1次冷却材圧力は2.0MPa[gage]を下回り、SBOシーケンスは事象進展が遅く、炉心溶融開始から原子炉容器破損までは3~4時間程度の時間がかかるため、原子炉下部キャビティへの注水も十分になされた状態である。一方、LOCAシーケンスの場合は、リロケーション開始が約24秒、原子炉容器破損が約3分、それぞれ早くなり、大きな感度はない結果であった。これは、LOCAシーケンスでは1次冷却系保有水量が早期に減少することで、炉心の過熱が早く進むためである。</p> <p>以上、燃料ペレットが崩壊する条件を、大幅ながら、□□引き下げること、リロケーションが早く進展する状態を模擬した感度解析を行い、SBOシーケンスに対して感度があるものの、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力は2.0MPa[gage]以下であり、かつ、原子炉下部キャビティには十分な注水があることから、実機解析での評価に影響を与えるものではない。</p> <p>この結果は4ループプラントに対して評価したものであるが、現象のメカニズムは2、3ループプラントでも同じであり、感度解析と同様の傾向となる。MAAPコードのリロケーションに関する解析モデルは、実機解析に適用できると判断される。</p> <div data-bbox="1648 1358 1951 1422" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>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>	



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(4) 原子炉圧力容器内FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）[圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>原子炉圧力容器内FCIにより生じる圧力スパイクは、冷却材圧力バウンダリや格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損時刻とあいまって影響することが考えられる。圧力スパイクの大きさは溶融炉心の細粒化割合及び粒子径の影響が大きいため、ここでは溶融ジェット径、細粒化モデルにおけるエントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を実施した。</p> <p>いずれのパラメータに対する感度解析においても、圧力スパイクは原子炉圧力容器破損までに終息する結果となっており、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度は小さい。このことは、原子炉圧力容器内FCIは下部プレナムの冷却材がすべて蒸発すると終息するが、その後、冷却材による溶融炉心からの除熱量の減少によって下部ヘッドへの伝熱量が大きくなることで原子炉圧力容器破損が発生するため、両者が重畳しにくいことを示している。なお、感度解析はBWR5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても炉心質量と冷却材体積の比は大きく変わらないため、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードの原子炉圧力容器内FCIに関するモデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>(5) 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達 [圧力容器(炉心損傷後)]</p> <p>下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルについては、4.2.1に示したように、TMI事故の分析結果との比較を通じて、その妥当性を確認した。また、MAAPコードの解析モデルがTMI事故及びその後の検討により得られた知見をもとに開発されていることを踏まえ、MAAPコードの解析モデルは一定の妥当性を有していると判断できる。しかしながら、炉心溶融時の実機の挙動に関しては、現段階では十分な知見が得られていない状況であることから、ここでは、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する解析モデルに関連したパラメータに対する感度解析により、その影響を評価した。</p> <p>溶融炉心と上面水プールとの伝熱は限界熱流束により制限されるが、この制限を低下させた条件で感度解析を実施した。その結果、原子炉圧力容器破損時刻にほとんど感度がないことが確認された。</p> <p>一方、溶融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達については、ギャップにおける限界熱流束で制限される。この制限を低下させた条件で感度解析を実施した結果についても、原子炉圧力及び原子炉圧力容器破損時刻にほとんど感度がないことが確認された。</p>	<p>(6) 原子炉容器内FCI（溶融炉心細粒化、熱伝達）</p> <p>原子炉容器内FCIにより生じる圧力スパイクは、原子炉冷却材圧力バウンダリや原子炉格納容器の破損に対する脅威とはならないと考えられるが、高圧溶融物噴出を防止する観点で、原子炉容器破損の時期とあいまって、影響するものと考えられることから、不確かさの整理と感度解析によりその影響を把握した。</p> <p>圧力スパイクの大きさは溶融炉心の細粒化割合及び粒子径の影響が大きいため、細粒化モデルとして適用しているRicou-Spaldingモデルにおけるエントレインメント係数、デブリ粒子の径をパラメータとして感度解析を実施した。</p> <p>その結果、いずれの場合でも圧力スパイクは原子炉容器破損までに収束する結果となっており、原子炉容器破損時点での1次冷却材圧力に対する感度は小さい。このことは、原子炉容器内FCIは下部プレナムのドライアウトとともに収束し、原子炉容器破損は下部ヘッドへの伝熱量が多くなるドライアウト後に発生するため、両者が重畳しにくいことを示している。</p> <p>この結果は4ループプラントに対して評価したものであるが、炉心質量と1次冷却系体積の比は2、3ループプラントと同程度であるため、感度解析パラメータの影響は4ループプラントで代表でき、結果への影響も小さい。これにより、MAAPコードのモデルの不確かさの影響が確認できたため、MAAPコードの原子炉容器内FCIに関するモデルは、実機解析に適用できると判断される。</p> <p>(7) 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達</p> <p>下部プレナムでの溶融炉心の状態により、原子炉容器の破損時期に影響が考えられる。4.2.1において、下部ヘッドの温度挙動に関してTMI事故の分析結果と比較した結果からは、一定の妥当性があると判断される一方で、下部プレナムでの溶融炉心の冷却挙動に関する現象は、不確かさが大きいと考えられる。そこで、下部プレナムでの溶融炉心の冷却挙動に関する解析モデルに関して感度解析を行い、その影響程度を把握した。</p> <p>溶融炉心と上面水プールとの伝熱は限界熱流束により制限されるが、この制限を低下させた条件で感度解析を実施した。その結果、原子炉容器下部ヘッドの計装案内管溶接部の破損割合及び原子炉容器下部ヘッドのクリープ破損割合の増加はわずかであり、原子炉容器破損時刻にほとんど感度がないことが確認された。</p> <p>一方、溶融炉心と原子炉容器間の熱伝達については、ギャップにおける限界熱流束で制限される。この制限を低下させた条件で感度解析を実施した結果、原子炉容器下部ヘッドの計装案内管溶接部の破損割合及び原子炉容器下部ヘッドのクリープ破損割合の増加はわずかであり、原子炉容器破損時刻にほとんど感度がないことが確認された。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>融融炉心と上面水プールとの伝熱及び融融炉心と原子炉压力容器間の熱伝達ともに感度が小さい結果となっているが、この理由はこれらの現象による影響が下部プレナムにおいてドライアウトが生じるまでの期間に限定されることによる。</p> <p>なお、感度解析はBWR 5Mark-I 改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードにおける下部プレナムでの融融炉心の熱伝達に関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>(6) 原子炉压力容器破損 [压力容器 (炉心損傷後)]</p> <p>有効性評価の解析において、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損は、溶接部のひずみ量としきい値の比較により判定される。そこで、このしきい値をベースケースの1/10に低下させた解析を実施し、原子炉压力容器破損時刻の感度を評価した。評価の結果、原子炉压力容器破損時刻は約13分早まることを確認した。評価では有意な影響を検知する目的から、しきい値を仮想的にベースケースの1/10まで低下させたが、実機において破断ひずみがここまで大幅に低下することは考えにくい。溶接部のひずみ量しきい値の影響は十分に小さいと判断される。</p> <p>なお、感度解析はBWR 5Mark-I 改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても制御棒駆動機構ハウジングの構造は大きく変わらないため同様の傾向が得られる。したがって、MAAPコードの原子炉压力容器破損に関するモデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p>	<p>融融炉心と上面水プールとの伝熱、融融炉心と原子炉容器間の熱伝達ともに感度が小さい結果となった。これは、下部プレナムがドライアウトするまでの期間のみの作用にとどまるためである。また、融融炉心と原子炉容器間の熱伝達について原子炉容器破損時期への影響が小さいことは、融融炉心と原子炉容器への浸水があることで、原子炉容器への伝熱を抑制する効果があることを示している。</p> <p>上記の感度解析は4ループプラントを対象に評価したものであるが、原子炉容器下部プレナムでの融融炉心の熱伝達挙動は、ループ数によらず同様の取扱いとなっている。感度解析パラメータの影響は4ループプラントにおいて結果への影響が小さいため、2、3ループプラントにおいても同様の傾向となる。これにより、MAAPコードのモデルの不確かさ幅が確認できたため、MAAPコードは下部プレナムでの融融炉心の熱伝達に関して、実機解析に適用できると判断される。</p> <p>(8) 原子炉容器破損</p> <p>計装用案内管溶接部の破損は、溶接部の歪み量と、最大歪み（しきい値）を比較することで判定している。そこで、最大歪み（しきい値）を1/10に低下させた場合の感度解析を実施した結果、原子炉容器破損時間が5分早まることを確認した。この結果は、有意な感度を確認する目的から最大歪み（しきい値）を1/10に低下させているが、実機解析においては、最大歪がここまで低下することは無いので、影響は大きくないものと判断される。</p> <p>この結果は4ループプラントを対象に評価したものであるが、原子炉容器本体や計装用案内管の構造は個別プラントによらず大きな違いはないため、2、3ループプラントにおいても、4ループプラントと同程度の影響があると考えられる。これにより、MAAPコードのモデルの不確かさ幅が小さいことが確認でき、原子炉容器破損に関するモデルは、実機解析に適用できると判断される。</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>(7) 原子炉圧力容器外FCI（溶融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）〔格納容器（炉心損傷後）〕</p> <p>原子炉圧力容器外FCIについては、添付2において国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。</p> <p>原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては、U<sub>02</sub>を用いた大規模FCI実験であるFARO実験、KROTOS実験、COTELS実験及びTROI実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと結論付けた。なお、参考として、水蒸気爆発の発生を仮定した場合の影響についても、水蒸気爆発解析コード（JASMIN<sup>[26]</sup>）及び構造応答解析コード（AUTODYN<sup>[26]</sup>若しくはLS-DYNA<sup>[27]</sup>）を用いて、水蒸気爆発のトリガを解析的条件として与えることで水蒸気爆発の発生を模擬した解析を行うことにより、水蒸気爆発による格納容器ペダスタル構造部への影響を評価し、格納容器の健全性に影響を及ぼさないことを確認している。以上より、有効性評価において、原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては発生可能性が低く、水蒸気爆発挙動及びその後の格納容器の動的挙動に関する評価は必須とはならない。</p> <p>原子炉圧力容器外FCIにおける圧カスパイクに関しては、解析モデルでの不確かさはRicou-Spaldingモデルのエントレインメント係数及び溶融粒子の径に代表され、それぞれをパラメータとした感度解析を実施した。その結果、いずれのパラメータについても、原子炉圧力容器外FCIにより生じる圧カスパイクへの感度が小さいことを確認した。</p> <p>なお、感度解析はBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであり、原子炉圧力容器外FCIによる圧カスパイクは、格納容器下部に落下する溶融炉心の量や格納容器下部プール水位等の条件に依存して変化し得るものの、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られる。したがって、MAAPにおける原子炉圧力容器外FCIに関する解析モデルは、実機解析への適用性を有すると判断できる。</p> <p>(8) 格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり、溶融炉心と格納容器下部プール水との伝熱、溶融炉心とコンクリートの伝熱〔格納容器（炉心損傷後）〕</p> <p>格納容器下部床面での溶融炉心の拡がりについては、関連する実験や評価に関する知見に基づくと、落下した溶融炉心は床上全体に均一に拡がると想定される。ただし、堆積形状の不確かさが想定されるため、個別プラントのペダスタルの形状や事前水張りの深さを踏まえて、拡がりを抑制した感度解析等の取扱いを行うことが適切と考えられる。</p>	<p>(9) 原子炉容器外FCI（溶融炉心細粒化、熱伝達）</p> <p>原子炉容器外FCIについて、添付2において、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。</p> <p>原子炉容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては、U<sub>02</sub>を用いた大規模FCI実験であるFARO実験、KROTOS実験及びCOTELS実験の結果から、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと結論付けた。また、参考文献[27]に示すJASMINEコードを用いて水蒸気爆発が発生したという条件における格納容器破損確率の評価について考察し、評価で想定した条件（トリガリング及び融体ジェット直径）が実機解析に比べて厳しくなるよう選定され、水蒸気爆発時のエネルギーが高くなるように評価されたものであることから、実機において発生エネルギーは原子炉格納容器への脅威にはならないと結論付けた。以上より、有効性評価において、原子炉容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては発生可能性が低く、水蒸気爆発挙動及びその後の原子炉格納容器の動的挙動に関する評価は必須とはならない。</p> <p>原子炉容器外FCIにおける圧カスパイクに関しては、解析モデルでの不確かさは①原子炉下部キャビティ水深、②原子炉容器破損口径、③Ricou-Spaldingモデルのエントレインメント係数及び④デブリ粒子の径に代表され、それぞれをパラメータとした感度解析を実施した。その結果、いずれのパラメータについても、原子炉容器外FCIにより生じる圧カスパイクへの感度が小さいことを確認した。</p> <p>原子炉容器外FCIによる圧カスパイクは、原子炉下部キャビティに落下する溶融炉心の量や原子炉下部キャビティ水深等の条件に依存して変化し得るものの、そのメカニズムはループ数に依存しないこと、また、PWRプラントの原子炉格納容器が十分大きな自由体積を有しており原子炉容器外FCIに伴う水蒸気発生に対する原子炉格納容器圧力の上昇を抑制しうることから、原子炉容器外FCIに関する不確かさが有効性評価結果に与える影響は小さく、実機解析への適用性を有すると考えられる。</p> <p>また、次項で述べるとおり、MCCIへの影響の観点で、①原子炉下部キャビティ水深及び②Ricou-Spaldingモデルのエントレインメント係数をパラメータとした感度解析を実施しており、その結果、コンクリート侵食深さに有意な影響はなく、感度が小さいことを確認した。</p> <p>(10) 原子炉下部キャビティ床面での溶融炉心の拡がり、溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱</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、①原子炉下部キャビティ水深及び②Ricou-Spaldingモデルのエントレインメント係数、③溶融炉心の拡がり及び④水と溶融炉心間の熱伝達係数をパラメータとした個別の感度解析及びこれらを組み合わせ、格納容器破損防止の「溶融炉心・コンクリート相互作用」の事象をベースに感度解析を行い、コンクリート侵食への影響を確認した。</p>	



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<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、エントレインメント係数、上面熱流束係数及び熔融プールクラスト間の熱伝達係数をパラメータとした感度解析を行い、コンクリート侵食への影響を評価した。評価の結果、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程度であることが確認された。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コードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。</p> <p>なお、感度解析はBWR 5Mark-I改良型格納容器プラントに対して実施したものであるが、その他のBWRプラントにおいても現象のメカニズムは同じであり、同様の傾向が得られると考えられる。しかしながら、熔融炉心・コンクリート相互作用については、複雑な多成分・多相熱伝達現象であり知見が十分であるとはいえないこと、また事前水張り時の落下熔融炉心の冷却性を直接調べた実験例がほとんどないことから、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>	<p>原子炉下部キャビティ水深、Ricou-Spalding モデルのエントレインメント係数及び水と熔融炉心の間の熱伝達係数については、コンクリート侵食量への感度が小さいことを確認した。</p> <p>熔融炉心の拡がりについては、拡がり面積が小さくなるよう、熔融炉心の過熱度分がすべて原子炉下部キャビティ水に伝熱され熔融炉心の融点まで冷却されることを想定し、拡がり面積として原子炉下部キャビティ床面積の約1/10を初期値とし、落下量に応じて拡がり面積が拡大する条件を設定した場合に、コンクリート侵食深さは約18cmであった。また、①～④に関してコンクリート侵食に対して厳しい条件を組み合わせた場合の感度解析を行い、コンクリート侵食は約19cmに達する結果となったが、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。このときの、MCCIによる水素発生を加えても、最終的な原子炉格納容器内の水素濃度は6vol%程度（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程度であった。</p> <p>上記の感度解析は、熔融炉心が拡がりにくくなるよう、実機条件よりも厳しい条件を与えるものであり、実機でのコンクリート侵食量は、感度解析よりも厳しくなることはないと考えられ、これを不確かさとして設定する。</p> <p>この結果は3ループプラントを対象としたものであり、MAAPコードの解析モデルとしては各プラントの実機解析に適用できると考えられるが、その不確かさ幅については、熔融炉心の総量等に影響を受けると考えられることから、プラント毎に評価が必要である。</p> <p>(11) 1次系内FP挙動、原子炉格納容器内FP挙動</p> <p>炉心損傷検知判断が遅れる可能性があるという観点から、FP放出モデル間の放出速度の相違の幅を参照し、炉心からのFP放出速度に係る係数を1割低減し、どの程度影響があるかを感度解析によって評価した。その結果、ベースケース、感度解析ケースともに、原子炉格納容器上部区画の希ガス量は、燃料被覆管破損時点から増加し始め、炉心が本格的に熔融するにしたがって急激に増加し、最終的にほぼ同じ量になった。したがって、FP放出速度が1割低減しても、炉心損傷検知判断への影響はほとんどないといえる。</p> <p>この結果は4ループプラントを対象に評価したものであるが、FP放出速度は燃料に関連するもので個別プラントへの依存性は小さいと考えられることから、2、3ループプラントに対しても同様の傾向となると考えられる。</p> <p>以上より、MAAPコードは1次系内FP挙動、原子炉格納容器内FP挙動に関して、実機解析に適用できると判断される。</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）

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (1/6)				表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (1/6)				
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	
炉心(核)	崩壊熱	炉心モデル(原子炉出力及び崩壊熱)(3.3.2(2))	不要	炉心(燃料)	燃料棒表面熱伝達	炉心モデル(炉心熱水力モデル)(3.3.2(3))	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 入力値に含まれる。</li> <li>○ TMI 事故解析における炉心ヒートアップ時の水素ガス発生、炉心領域での溶融進展状態について、TMI 事故分析結果と良く一致することを確認した。</li> <li>○ CORA 実験解析における、燃料被覆管、制御棒及びチャナネルボックスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。</li> <li>○ 炉心ヒートアップ速度の増加(被覆管酸化の促進)を想定し、仮想的な厳しい振り幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析により影響を確認した(BWR5 Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。</li> <li>・ TQUV、大破断 LOCA シーケンスとともに、炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。</li> <li>・ 下部プレナムへのリロケーションの開始時刻は、ほぼ変化しない。</li> </ul>	
	燃料棒表面熱伝達	炉心モデル(炉心熱水力モデル)(3.3.2(3))	TMI 事故解析(4.2.1) CORA 実験解析(4.2.2) 感度解析(4.3.2 及び添付1)		燃料棒被覆管酸化	溶解炉心の挙動モデル(炉心ヒートアップ)(3.3.6(1))		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ TQUX シーケンス及び中破断 LOCA シーケンスに対して、MAAP コードと SAFER コードの比較を行い、以下の傾向を確認した。(BWR5 Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。</li> <li>・ MAAP コードでは SAFER コードで考慮している CCFL を取り扱っていないこと等から、水位変化に差異が生じたものの水位低下幅は MAAP コードの方が保守的であり、その後の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。</li> </ul>
	燃料棒被覆管変形	炉心モデル(炉心水位計算モデル)(3.3.2(4))			感度解析(4.3.1)	沸騰・ボイド率変化		
気液分離(水位変化)・対向流	炉心モデル(炉心水位計算モデル)(3.3.2(4))	感度解析(4.3.1)	沸騰・ボイド率変化	気液分離(炉心水位)・対向流	1次冷却系モデル(1次冷却系の熱水力モデル)(3.3.3(2))	<ul style="list-style-type: none"> <li>○「ECCS 再循環機能喪失」について、MAAP コードと M-RELA P5 コードの比較から、以下により炉心露出までの時間を長く評価する傾向があることを確認した。</li> <li>①炉心及び上部プレナム領域のボイド率について上部プレナム領域ではやや過小評価するものの、両コードでほぼ同等である。</li> <li>②高温側配管領域(水平部から蒸気発生器伝熱管の鉛直部まで)の保有水量を多めに評価する。</li> <li>③蒸気発生器伝熱管への溶相流入が少なく、2次側からの伝熱により発生した蒸気による1次側の圧力損失の増加(いわゆる「スチームペインディング効果」)が小さいことが高温度側配管領域の液相分布に影響するが、②項に含まれる。</li> <li>○また、1次冷却系の保有水量を多めに評価する影響として、原子炉格納容器圧力を低めに評価するが、MAAP コードと M-RELA P5 コードの計算結果から得られる放出エネルギーの差から見積られる原子炉格納容器圧力の差はわずかである。</li> <li>○比較に用いた M-RELA P5 コードについては、MAAP コードの計算結果を境界条件に用いることが解析結果に与える影響は軽微であること、ECCS 再循環機能喪失後の炉心露出予測について非保守的な傾向とはならないことを確認している。</li> <li>○以上より、MAAP コードが高温度側配管の保有水量を多めに評価することに伴い炉心露出までの時間を長く評価する傾向を、不確かさとして取り扱い、その影響程度はプラント毎に評価を要する。</li> </ul>		

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（第3部 MAAPコード）

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (2/6)				表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (3/6)			
女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉			
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認
(逃がし安全弁含む) 原子炉压力容器	冷却材放出 (臨 界流・差圧流) ECCS注水 (給水 系・代替注水設 備含む)	原子炉压力容器モデル (破断流モデル) (3.3.3(3))	不要	蒸気発生器	冷却材放出 (臨 界流・差圧流) 2次側水位変化・ド ライアアウト	1次冷却系モデル 1次冷却系破損モデル (3.3.3(4))	不要
		安全系モデル (非常用炉 心冷却系) (3.3.5(1)) 安全系モデル (代替注水 設備) (3.3.5(4))	不要			2次冷却系モデル (加 圧器モデル) (3.3.3(3))	不要
原子炉格納容器	格納容器 各領域間 の流動 構造材との熱伝 達及び内部熱伝 導 気液界面の 熱伝達	格納容器モデル (原子炉 格納容器の熱水力モデ ル) (3.3.4(2))	CSTF 実 験解析 (4.2.4)	ECCS	ECCS 蓄圧タンク注 入	安全系モデル (格納容器 スプレイ) (3.3.5(2)) 安全系モデル (代替注水 設備) (3.3.5(4))	不要
		格納容器モデル (原子炉 格納容器の熱水力モデ ル) (3.3.4(2))	HDR 実験 解析 (4.2.3)			安全系モデル (蓄圧タ ンク) (3.3.6(2))	不要
原子炉格納容器	放射線水分解等 による水素ガ ス・酸素ガス発 生	—	—	ECCS	ECCS 蓄圧タンク注 入	—	不要
		—	—			—	不要

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (2/6)				表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (3/6)			
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認
蒸気発生器	構造材との熱伝達 ECCS蓄圧タンク注 入	1次冷却系モデル (1 次冷却系破損モデル) (3.3.3(4))	不要	蒸気発生器	冷却材放出 (臨 界流・差圧流) 2次側水位変化・ド ライアアウト	1次冷却系モデル (加 圧器モデル) (3.3.3(3))	不要
		安全系モデル (ECCS) (3.3.6(1))	不要			安全系モデル (蓄圧タ ンク) (3.3.6(2))	不要
原子炉格納容器	区画間の流動 (蒸気、 非凝縮性ガス) 構造材との熱伝達及 び内部熱伝導	蒸気発生器モデル (3.3.4)	不要	原子炉格納容器	区画間の流動 (液体)	原子炉格納容器モデ ル (原子炉格納容器の 熱水力モデル) (3.3.5(2))	不要
		—	不要			安全系モデル (格納容 器スプレイ) (3.3.6(3))	不要



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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉				相違理由
表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (3/6)				表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (3/6)				
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	不確かさ	分類	重要現象	妥当性確認	不確かさ
原子炉格納容器	格納容器 ベント	格納容器モデル（原子炉格納容器の熱水力モデル） (3.3.4(2))	不要	○ 入力値に含まれる。 ○ MAAPコードでは格納容器ベントについては、設計流量に基づいて流路面積を入力値として与え、格納容器各領域間の流動と同様の計算方法が用いられている。	原子炉格納容器	水素濃度変化	原子炉格納容器モデル（水素発生） (3.3.5(4))	○ TMI 事故解析における水素発生期間と水素発生量について、TMI 事故分析結果と一致することを確認した。
	サブレーション・プールの冷却	安全系モデル（非常用炉心冷却系） (3.3.5(1))	不要	○ 入力値に含まれる。		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	原子炉格納容器再循環ユニットモデル (3.3.6(5))	・ 感度解析 (4.3.3)
(逃がし安全を含む) 原子炉圧力容器器（炉心損傷後）	リロケーション	溶融炉心の挙動モデル (リロケーション) (3.3.6(2))	TMI 事故解析 (4.2.1) 感度解析 (4.3.3 及び添付1)	○ TMI 事故解析における炉心領域での溶融進展状態について、TMI 事故分析結果と良く一致することを確認した。 ○ リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により影響を確認した (BWR5 Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。 ・ TQUV、大破断 LOCA シーケンスともに、炉心溶融時刻、原子炉圧力容器の破損時刻への影響が小さいことを確認した。	原子炉圧力容器器	原子炉圧力容器内 FCI (溶融炉心細粒化)	感度解析 (4.3.4 及び添付1)	○ 原子炉圧力容器内 FCI に影響する項目として、溶融ジェット径、エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度が小さいことを確認した (BWR5 Mark-I 改良型格納容器プラント対象)。
	構造材との熱伝達					原子炉圧力容器内 FCI (デブリ粒子熱伝達)		
	原子炉圧力容器器							
原子炉容器器（炉心損傷後）	リロケーション	溶融炉心挙動モデル (リロケーション) (3.3.7(2))	・ TMI 事故解析 (4.2.1) ・ 感度解析 (4.3.5 及び添付1)	○ TMI 事故解析における炉心損傷挙動について、TMI 事故分析結果と一致することを確認した。 ○ リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心崩壊に至る温度を下げた場合の感度解析により影響を確認した (代表4ループプラントを例とした)。 ・ 下部プレナムへのリロケーション後の原子炉容器の破損時刻は、SBO シーケンスの場合約26分、LOCA シーケンスの場合約3分、それぞれ早まる。ただし、仮想的な条件を裁定した場合の結果である。	原子炉容器器	溶融炉心挙動モデル（下部プレナムでの溶融炉心挙動） (3.3.7(3))	○ 原子炉容器内 FCI に影響する項目として「デブリジェット径（炉心部下層クラスターの破砕口径）」、「Ricou-Spalding のエントレインメント係数」及び「デブリ粒子の径」をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、1次冷却材圧力の過渡的な変化に対して影響はあるものの、原子炉容器破損時点での1次冷却材圧力に対する感度は小さいことを確認した。	

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（第3部 MAAPコード）

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (4/6)		女川原子力発電所2号炉	
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認
		溶融炉心の挙動モデル (下部プレナムでの溶融炉心の挙動) (3.3.6(3))	TMI事故解析 (4.2.1) 感度解析(4.3.5及び添付1)
原子炉压力容器(炉心損傷後)	下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達	溶融炉心の挙動モデル (原子炉压力容器破損モデル) (3.3.6(4))	不確かさ ○ TMI事故解析における下部プレナムの温度挙動について、TMI事故解析結果と良く一致することを確認した。 ○ 下部プレナム内の溶融炉心と上面プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を行い、原子炉压力容器破損時刻等の現象進展に対する影響が小さいことを確認した (BWR5 Mark-I改良型格納容器プラント対象)。 ○ 原子炉压力容器破損に影響する項目として制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)をパラメータとした感度解析を行い、原子炉压力容器破損時刻が約13分早まることを確認した (BWR5 Mark-I改良型格納容器プラント対象)。ただし、仮想的な厳しい条件に基づく解析結果であり、実機における影響は十分小さいと判断される。 ○ 炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、TMI事故解析を通じて分析結果と良く一致することを確認した。
		放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生	TMI事故解析 (4.2.1)
原子炉压力容器(炉心損傷後)	原子炉压力容器内FP挙動	格納容器モデル(水素ガス発生) (3.3.4(3))	—
		原子炉压力容器内FP挙動	ABCOVE 実験解析 (4.2.7) (4.2.8)
原子炉格納容器	原子炉格納容器内FP挙動	核分裂生成物(FP)挙動モデル(3.3.7)	PHEBUS-FP実験 解析 (4.2.7)
		原子炉格納容器内FP挙動	—
○ PHEBUS-FP実験解析により、FP放出の開始時刻を良く再現できているものの、燃料棒被覆管温度を高めめに評価することにより、急激なFP放出を示す結果となった。ただし、この原因は実験における小規模な炉心体系の模擬によるものであり、実機の大規模な体系においてこの種の不確かさは小さくなると考えられる。 ○ ABCOVE実験解析により、格納容器内のエアロゾル沈着挙動を適正に評価できていることを確認した。			

表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (4/6)		泊発電所3号炉	
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認
		溶融炉心挙動モデル (下部プレナムでの溶融炉心挙動) (3.3.7(3))	・TMI事故解析(4.2.1) ・感度解析(4.3.7及び添付1)
原子炉格納容器(炉心損傷後)	下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達	溶融炉心挙動モデル (原子炉压力容器破損モデル) (3.3.7(4))	不確かさ ○ TMI事故解析における下部プレナムの温度挙動についてTMI事故解析結果と一致することを確認した。 ○ 下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する項目として「溶融炉心と上面プールとの熱伝達」をパラメータとして感度解析を行い、原子炉压力容器破損時刻及び破損時刻に対して感度が小さいことを確認した。また、「溶融炉心と原子炉容器間の熱伝達」をパラメータとして感度解析を行い、1次冷却材圧力及び原子炉压力容器破損時刻に対して感度が小さいことを確認した(代表4ループプラントを例とした)。 ○ 原子炉压力容器破損に影響する項目として「計装用案内管溶接部の破損判定に用いる最大歪み(しきい値)」をパラメータとした場合の感度解析を行い、原子炉压力容器破損時間が5分早まることを確認した。ただし、仮想的な厳しい条件を与えたケースであり、実験解析への影響は小さいと判断される。 ○ 原子炉压力容器外FCI現象に関する項目として「原子炉下部キャビティ水深」、「Ricoiu-Spaldingのエントレインメント係数」、「デブリ粒子の径」及び「原子炉压力容器破損口径」に関して、格納容器破損防止の「原子炉压力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用」をベースとする感度解析を行い、原子炉压力容器外FCIにより生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。 ○ MCCI現象への影響の観点で、「原子炉下部キャビティ水深」及び「Ricoiu-Spaldingのエントレインメント係数」に関して、格納容器破損防止の「溶融炉心・コンクリート相互作用」の現象をベースに感度解析を行い、MCCIによるコンクリート侵食量への感度が小さいことを確認した。
		原子炉压力容器破損、溶融	・感度解析(4.3.8及び添付1)
原子炉格納容器(炉心損傷後)	原子炉压力容器外FCI(溶融炉心細粒化、熱伝達)	溶融炉心挙動モデル (原子炉下部キャビティでの溶融炉心挙動) (3.3.7(5))	・感度解析(4.3.9及び添付2)
		原子炉格納容器(炉心損傷後)	・感度解析(4.3.10及び添付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 (第3部 MAAPコード)

女川原子力発電所2号炉				泊発電所3号炉				相違理由		
表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (6/6)				表 4.4-1 重要現象の不確かさの整理 (6/6)						
分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	不確かさ	分類	重要現象	解析モデル	妥当性確認	不確かさ	相違理由
原子炉格納容器 (炉心損傷後)	格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり		感度解析 (4.3.8及び添付3)	○ 溶融炉心の拡がり実験や評価に関する知見に基づき、落下した溶融炉心は床上全体に均一に拡がると想定される。ただし、堆積形状の不確かさが想定されるため、個別プラントのペデスタルの形状や事前水張りの深さを踏まえて、拡がりを抑制した感度解析等の取扱いを行うことが適切と考えられる。	原子炉格納容器 (炉心損傷後)	1 次系内FP挙動	FP挙動モデル (3.3.8)	・ PHEBUS-FP 実験解析 (4.2.7) ・ ABCOVE 実験解析 (4.2.8) ・ 感度解析 (4.3.11)	不確かさ	
	溶融炉心と格納容器下部ブールとの伝熱	溶融炉心の挙動モデル (格納容器下部での溶融炉心挙動) (3.3.6(5))		○ MCCI現象に関する不確かさの要因分析より、エントレインメント係数、上面熱流束及び溶融ブールからクラストへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を行った。評価の結果、コンクリート侵食量を対して上面熱流束の感度が支配的であることを確認した。また、上面熱流束を下限値とした場合でも、コンクリート侵食量が22.5cm程度であることを確認した (BWR5 Mark-I改良型格納容器プラント対象)。		○ PHEBUS-FP 実験解析により、ギャップ放出のタイミングについては適切に評価されるが、燃料被覆管温度を高めめに評価し、燃料破損後の FP 放出開始のタイミングも早く評価する結果となったが、実験の小規模な炉心体系の模擬によるものであり、実機の大規模な体系においてこの種の不確かさは小さくなる。	原子炉格納容器内FP挙動	原子炉格納容器内FP挙動	○ ABCOVE 実験解析により、原子炉格納容器内のエアロゾル沈着挙動をほぼ適正に評価できることを確認した。 ○ 炉心損傷検知に影響する項目として「炉心からのFP放出速度」を低減させた場合の感度解析を行い、原子炉格納容器上部区画の希ガス量への影響は小さいことを確認した。	
	コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生		ACE実験解析 (4.2.5) SURC-4実験解析 (4.2.6) 感度解析 (4.3.8及び添付3)	○ 上記の感度解析は、想定される範囲で厳しい条件を与えて感度を見たものもあり、不確かさを考慮しても実機でのコンクリート侵食量は感度解析よりも厳しくなることはないと考えられる。						
	溶融炉心とコンクリートの伝熱			○ ACE実験解析及びSURC-4実験解析より、溶融炉心堆積状態が既知である場合の溶融炉心とコンクリートの伝熱及びそれに伴うコンクリート侵食挙動について妥当に評価できることを確認した。						
	コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生			○ 実験で確認されている侵食の不均一性については、実験における侵食のばらつきがMAAPコードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した (BWR5 Mark-I改良型格納容器プラント対象)。						



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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>5. 有効性評価への適用性</p> <p>4章の妥当性確認において得られた重要現象に対する不確かさと、その不確かさが有効性評価に与える影響を表5-1に示す。</p> <p>5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）</p> <p>5.1.1 崩壊熱 [炉心（核）]</p> <p>有効性評価では崩壊熱として、ANSI/ANS-5.1-1979を用いている。ANSI/ANS-5.1-1979はANSの軽水炉向け標準規格として発行されたものであり、設計値等に基づく信頼性の高い評価モデルである。有効性評価においては、平衡炉心のサイクル末期燃焼度に対し1.1倍したものを使用しており、崩壊熱を大きくするよう考慮している。炉心損傷防止の観点では、大きめの崩壊熱を与えることで、原子炉格納容器圧力及び温度に対して厳しい結果を与える。</p> <p>格納容器破損防止の観点でも、大きめの崩壊熱を与えることで、いずれの格納容器破損モードでも、炉心ヒートアップ、熔融進展を早める傾向となる。「格納容器過圧・過温破損」の場合、原子炉格納容器圧力及び温度に対して厳しい結果を与える。「高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の場合、原子炉圧力容器破損までの事象進展を早める傾向となり、高圧熔融物放出防止に対して厳しい結果を与える。「熔融燃料－冷却材相互作用」の場合、熔融炉心と冷却材の相互作用に伴う圧カスパイクを大きめに評価する結果を与える。「水素燃焼」の場合、酸素ガスの発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、酸素濃度に対して厳しい結果を与える。「熔融炉心・コンクリート相互作用」の場合、熔融炉心の冷却がされにくくなり、コンクリート侵食に対して厳しい結果を与える。</p> <p>以上、いずれについても、厳しい結果を与えるものの、炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性の判断には影響しない。</p> <p>5.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流 [炉心（熱流動）]</p> <p>これらは原子炉圧力容器内の炉心水位挙動に関する現象であり、原子炉圧力容器内水位の低下が比較的緩慢なTQUXシーケンス及び比較的速い中小破断LOCAシーケンスを対象としてSAFERコードとの比較評価を行った。</p> <p>MAAPコードはSAFERコードで考慮しているCCFL現象を取り扱っていないこと等から水位変化に差異が生じたものの、水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後</p>	<p>5. 有効性評価への適用性</p> <p>4の妥当性確認において得られた重要現象に対する不確かさと、その不確かさが有効性評価に与える影響を表5.2-1に示す。</p> <p>5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点）</p> <p>5.1.1 崩壊熱</p> <p>崩壊熱について、有効性評価では、崩壊熱の不確かさ及び実機運用による変動を考慮した大きめの崩壊熱曲線を使用する。この影響について以下に述べる。</p> <p>炉心損傷防止の観点では、「原子炉格納容器の除熱機能喪失」の場合、1次冷却系からの長期的な冷却材放出量が多くなり、原子炉格納容器圧力を高めに評価する傾向となる。「ECCS再循環機能喪失」の場合、大きめの崩壊熱曲線を与えることで、代替再循環後の崩壊熱による冷却材の蒸散が多くなるために炉心露出が早くなり、また、露出後の燃料被覆管温度を高めに評価する傾向となる。</p> <p>格納容器破損防止の観点では、大きめの崩壊熱曲線を与えることで、いずれの格納容器破損モードでも、炉心ヒートアップ、熔融進展を早める傾向となる。「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の場合、長期的な熔融炉心からの放出エネルギー量が多く評価されるため、原子炉格納容器圧力・温度に対して厳しい結果を与える。「高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の場合、炉心熔融から原子炉容器破損までの事象進展を早める傾向となり、高圧熔融物放出防止に対して厳しい結果を与える。「原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」の場合、熔融炉心と冷却材の相互作用に伴う圧カスパイクを大きめに評価する結果を与える。「水素燃焼」の場合は、ジルコニウム－水反応による水素発生を早め、かつ、発生量を多めに、コンクリート分解による水素発生量も多めに評価する傾向となり、水素濃度評価に対して厳しい結果を与える。「熔融炉心・コンクリート相互作用」の場合、熔融炉心の冷却がされにくくなり、コンクリート侵食に対して厳しい結果を与える。</p> <p>以上、いずれについても、厳しい結果を与えるものの、炉心損傷防止策及び格納容器破損防止策の有効性の判断には影響しない。</p> <p>5.1.2 沸騰・ボイド率変化、気液分離（炉心水位）・対向流（炉心（熱流動））、気液分離・対向流（1次冷却系）</p> <p>これらは炉心水位挙動に関連する現象であり、有効性評価において炉心水位挙動が評価指標に直接影響する「ECCS再循環機能喪失」に対して、MAAPコードとM-RELAP5コードの比較を行い、MAAPコードには高温側配管領域（水平部から蒸気発生器伝熱管の鉛直部まで）の保有水量を多めに評価する傾向があり、これを主要因として、炉心露出までの時間を長く評価する傾向がある。また、1次冷却系の保有水量を多めに評価し、原子炉格納容器への放出エネルギーが少なくなることから、原子炉格納容器圧力を低めに評価することが考えられるが、M</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>の注水操作による有効燃料棒頂部までの水位回復時刻は両コードで同等であることから、原子炉圧力容器内挙動を含めた全体挙動を適正に評価していると判断できる。</p> <p>5.1.3 冷却材放出（臨界流・差圧流）〔原子炉圧力容器〕          逃がし安全弁からの冷却材放出については、設計値に基づき流量が適正に計算されている。</p> <p>5.1.4 格納容器各領域間の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、気液界面の熱伝達、格納容器ベント〔原子炉格納容器〕          格納容器各領域間の流動及び気液界面の熱伝達については、挙動が適正に評価され、不確かさは小さい。構造材との熱伝達及び内部熱伝導については、HDRの縦長格納容器形状や水蒸気注入位置といった実験体系に起因するものと考えられるが、短期的な応答として格納容器温度を十数℃程度高めに、原子炉格納容器圧力を1割程度高めに評価する結果となった。実機体系においてはこの種の不確かさは小さくなると考えられるが、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇を実際の挙動よりも大きめに評価する可能性がある。なお、格納容器ベントについては、設計流量に</p>	<p>AAPコードとM-RELAP5コードの計算結果から得られる放出エネルギーの積算値の差から見積もられる原子炉格納容器圧力の差はわずかであり、M-RELAP5コードでMAAPコードの不確かさを含む原子炉格納容器圧力等を境界条件に用いることが解析結果に与える影響は軽微であると考えられる。</p> <p>「原子炉格納容器の除熱機能喪失」では、大破断LOCA+格納容器スプレイ失敗を想定し、ECCSは、注入モード及び再循環モードともに成功することから、LOCA後の再冠水以降の期間では炉心は冠水しており、炉心冷却の観点からは影響はないと考えられる。一方、原子炉格納容器圧力及び温度については、ピーク値に到達する時間が長く（事故後8時間以上）、放出エネルギー積算値が上記よりはるかに大きいため、1次冷却系保有水量が多めに評価される影響は上記よりさらに軽微になると考えられる。</p> <p>「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」及び「熔融炉心・コンクリート相互作用」では、大破断LOCA（高温側配管）+ECCS注入失敗+格納容器スプレイ失敗を想定する。「水素燃焼」では、大破断LOCA+ECCS注入失敗を想定する。高温側配管破断の場合、上部プレナム、高温側配管、蒸気発生器1次側の冷却材は放出されて、水位が形成されないことから、MAAPコードの炉心水位計算に係る不確かさは影響しないと考えられる。</p> <p>「格納容器過温破損」及び「高圧熔融物・格納容器雰囲気直接加熱」では、全交流動力電源喪失+補助給水失敗を想定し、炉心損傷前は加圧器安全弁からの冷却材流出が支配的となり、早期に上部プレナム、高温側配管は蒸気領域になり、MAAPコードの炉心水位計算に係る不確かさは影響しないと考えられる。</p> <p>5.1.3 冷却材放出（臨界流・差圧流）（加圧器）          加圧器逃がし弁の設定圧における流量特性を入力値として与えているため、作動時の流量には妥当性があると考えられる。また、TMI事故データでは、加圧器逃がし弁からの放出量に関しては、直接的なデータは得られていないが、事故発生から加圧器逃がし弁弁閉止までの1次冷却材圧力及び加圧器水位の挙動から加圧器逃がし弁からの冷却材放出は適正に評価していると判断できる。</p> <p>したがって、有効性評価において、加圧器からの冷却材放出を伴う「格納容器過温破損」及び「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」への適用性を有する。</p> <p>5.1.4 構造材との熱伝達（1次冷却系）          過熱蒸気と構造材の熱伝達は、炉心部と同じくDittus-Boelterの相関式を用い、1次冷却系配管のクリープ破損については、Larson-Millerパラメータ手法を適用している。いずれも、工学分野でクリープ破損評価に広く使用されるモデルであり、妥当性を有すると考えられる。</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）

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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>基づいて流路面積を入力値として与え、格納容器各領域間の流動と同様の計算方法が用いられている。</p> <p>5.1.5 ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）[原子炉圧力容器]、スプレイ冷却、サブプレッション・プール冷却 [原子炉格納容器]</p> <p>ECCS注水及びスプレイ冷却については、設計値に基づき注入特性を与えることで、冷却に対して保守的な条件となるよう設定している。スプレイによる混合挙動については、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルであるが、液滴の伝熱面積が大きいことにより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する結果となる。したがって、モデルの不確かさによる影響はないと考えられる。サブプレッション・プール冷却については、ポンプ流量及び除熱量を設計値に基づき与えており、適正に評価される。</p>	<p>5.1.5 ECCS注入系特性（1次冷却系）</p> <p>強制注入系の動作は炉心損傷防止の場合のみ仮定し、その注入特性は入力値で与え、目的に応じて保守的な流量となるよう設定する。</p> <p>「原子炉格納容器の除熱機能喪失」では、再循環水が飽和に近い状態で循環するため、注入水による蒸気凝縮効果がほとんどなく、原子炉格納容器圧力への影響は小さい。「ECCS再循環機能喪失」では、ECCSの注入特性として大きめの流量を設定することで、水源が早期に枯渇することから、解析の方が再循環切替の時期が早まる。再循環切替失敗後の代替再循環については、少なめの流量を設定することで、炉心水位の回復を保守的に評価できる。</p> <p>なお、格納容器破損防止の場合、いずれの格納容器破損モードでも、強制注入系の不作為を仮定しているため、影響はない。</p> <p>5.1.6 ECCS蓄圧タンク注入（1次冷却系）</p> <p>有効性評価では、いずれの事象に対しても、蓄圧タンクの条件は入力値で与え、注入量が少なくなるよう設定し、炉心冷却に対して保守的な条件を与えている。</p> <p>炉心損傷防止の場合、「原子炉格納容器の除熱機能喪失」では、長期的には格納容器圧力に与える影響は小さい。「ECCS再循環機能喪失」の場合、再循環切替時には蓄圧タンクからの注入が終了し、強制注入系から注入されている状態であり、再循環切替以降は注入がなく、事象進展に与える影響は小さい。</p> <p>格納容器破損防止の場合でLOCAを想定する「格納容器過圧破損」、「原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用」、「水素燃焼」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用」の場合は、炉心損傷以降の挙動を着目しており、蓄圧注入流量の影響は小さい。全交流動力電源喪失を想定する「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」の場合も同様であるが、蓄圧タンクからの注入時は1次冷却系が緩やかに圧力低下する状態であり、蓄圧タンクから断続的に注入されるため、注入量自体は事象進展に与える程度ではない。</p> <p>以上、蓄圧タンク注入特性の入力値を注入量が少なくなるよう設定することで、一部の事象で、事象進展を早める厳しい結果を与える傾向となるが、炉心損傷防止策及び格納容器破損防止策の有効性の判断には影響するものではない。</p> <p>5.1.7 1次冷却系から2次冷却系への熱伝達、冷却材放出（臨界流・差圧流）、2次側水位変化・ドライアウト（蒸気発生器）</p> <p>冷却材放出については、液相放出がない場合は、適正に評価され、液相放出がある場合は、過大評価する傾向となった。1次冷却系から2次冷却系への熱伝達についても、同様に、液相放出</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<p>がない場合は、適正に評価され、液相放出がある場合は、冷却材放出を大きめに評価し、それにより伝熱量が大きめとなる傾向がある。</p> <p>重要事故シーケンスとしてLOCAを想定する「原子炉格納容器の除熱機能喪失」、「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」、「水素燃焼」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用」の場合は、早期に1次冷却系保有水量が減少することから、「1次冷却系から2次冷却系への熱伝達」の影響自体が小さく、また、2次冷却系から冷却材が放出される状態とはならないことから、いずれも、評価指標に対する不確かさの影響は小さいと考えられる。また、「ECCS再循環機能喪失」の場合も、同様であるが、再循環によって1次冷却系保有水量が回復し、蒸気発生器での熱伝達がわずかに生じる場合が考えられ、熱伝達は適正に評価されると考えられ、不確かさの影響は小さい。</p> <p>一方、重要事故シーケンスとして全交流動力電源喪失を想定する「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」の場合は、蒸気発生器2次側の冷却材放出を伴う。しかし、蒸気発生器2次側の減圧が無いことから、二相水位は上昇せず液相放出とはならないことから、「1次冷却系から2次冷却系への熱伝達」、「冷却材放出」及び「2次側水位変化・ドライアウト」は適正に評価されると考えられる。</p> <p>以上、MAAPコードの蒸気発生器モデルについては、不確かさの評価指標に対する影響は小さく、有効性評価への適用性を有する。</p> <p>5.1.8 区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）、構造材との熱伝達</p> <p>「区画間の流動（蒸気、非凝縮性ガス）」は蒸気及び非凝縮性ガスの流動や蒸気の凝縮に伴う非凝縮性ガス濃度の上昇など挙動は比較的妥当に評価され、不確かさは小さい。「構造材との熱伝達」については、HDRの縦長格納容器と高い位置での水蒸気注入が影響したものと推測されるが、短期的な応答として原子炉格納容器内温度については十数℃程度高めに、原子炉格納容器圧力を1割程度高めに評価する結果となった。実験解析では結果がより厳しめな方向となるが、実験体系及び注入位置の条件がPWRの条件に置き換われれば、不確かさは低減される方向となると判断される。</p> <p>したがって、有効性評価において長期的な原子炉格納容器圧力及び温度の挙動に着目する「原子炉格納容器の除熱機能喪失」、「格納容器過温破損」及び「格納容器過圧破損」並びに圧力スパイク時の原子炉格納容器圧力挙動に着目する「原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」については、MAAPコードによる解析結果は、原子炉格納容器圧力及び温度の上昇を実機の挙動よりも大きめに評価する影響があり、実際の原子炉格納容器圧力及び温度の上昇は解析結果に比べて小さくなり、最高使用圧力の2倍及び200℃に対する余裕は大きくなる。</p> <p>5.1.9 区画間の流動（液体）</p> <p>「区画間の流動（液体）」は、FCI現象やMCCI現象に関する事象進展に影響のある重要現象として抽出されるが、原子炉格納容器の形状（流路高低差や堰高さ）に基づく静水頭による流動が主であり、不確かさは小さいものと判断される。</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（第3部 MAAPコード）

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;">【参考のため再掲】</p> <p>5.1.5 ECCS注水（給水系・代替注水設備含む）[原子炉圧力容器]、スプレイ冷却、サブプレッション・プール冷却 [原子炉格納容器]</p> <p>ECCS注水及びスプレイ冷却については、設計値に基づき注入特性を与えることで、冷却に対して保守的な条件となるよう設定している。スプレイによる混合挙動については、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルであるが、液滴の伝熱面積が大きいことにより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する結果となる。したがって、モデルの不確かさによる影響はないと考えられる。サブプレッション・プール冷却については、ポンプ流量及び除熱量を設計値に基づき与えており、適正に評価される。</p> <p>5.1.6 燃料被覆管酸化 [炉心（燃料）]、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生 [原子炉格納容器] [原子炉圧力容器（炉心損傷後）]</p> <p>炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は Baker-Just の相関式（高温）又は Cathcart の相関式（低温）を用いて計算され、これらのモデルはTMI事故解析により妥当性が確認されている。なお、BWRでは窒素置換による格納容器雰囲気の不活性化が行われることにより、酸素濃度が低いため、短期的に爆轟が生じることはない。長期的には水の放射線分解により酸素ガスが発生するが、電力共通研究の実験結果<sup>[30]</sup>に基づいたG値を用いて酸素ガス発生量を評価している。BWRでは格納容器内がウェット環境にあるが、酸素濃度の判定基準への適合性について、水蒸気濃度を除いたドライ条件下で行うことにより、保守的に評価している。これらのことから、有効性評価の結果に与える影響はない。</p>	<p>5.1.10 格納容器スプレイ</p> <p>流量については保守的に算出し、境界条件として与えているため、圧力上昇は過大に評価される。混合挙動については、液滴径を入力し、液滴と気相部の界面熱伝達により気相部が冷却されるモデルであるが、液滴の伝熱面積が大きいことより、スプレイされた水は気相部温度と等しくなって液相に落下する結果となる。したがって、モデルの不確かさによる結果への影響は無いと考えられる。</p> <p>5.1.11 水素濃度変化</p> <p>炉心ヒートアップ時の水素発生について、ジルコニウム-水反応に伴う水素発生量及びその発生期間が、TMI事故の分析結果と概ね一致する結果が得られることを確認した。水素の発生期間については、燃料被覆管あるいは熔融炉心と水の反応により発生するものであることから、炉心ヒートアップ開始から熔融炉心が下部プレナム部にリロケーションするまでの期間であり、有効性評価においても同様の傾向となると考えられる。</p> <p>水素発生量については、有効性評価では、MAAPコードで得られた水素発生量変化を、全炉心のジルコニウム75%分の水素発生量で補正して原子炉格納容器内水素濃度の評価を行うことから、有効性評価の結果に与える影響はない。</p> <p>5.1.12 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</p> <p>格納容器再循環ユニットの除熱性能に関する不確かさは入力値に含まれる。</p> <p>水素が存在する場合に、格納容器再循環ユニットでの除熱量は水素濃度に応じて変化するため不確かさがある。</p> <p>炉心損傷防止の「原子炉格納容器の除熱機能喪失」の場合は、水素発生を伴わないことから、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における原子炉格納容器気相部の冷却は適正に評価される。</p> <p>「格納容器過温破損」及び「格納容器過圧破損」では、水素の発生があり、格納容器再循環ユニットでの除熱量は水素濃度に応じて低下するため、実際の原子炉格納容器圧力及び温度は解析結果よりも高めに推移する傾向となる。代表3ループプラントの場合は、最大限水素が発生した状態（ドライ条件換算13vol%）で原子炉格納容器圧力を0.016MPa、温度を2℃程度高めに評価することを確認した。不確かさを考慮することで、原子炉格納容器の最高使用圧力の2倍及び原子炉格納容器内温度200℃までの余裕は少なくなる傾向となるが、水素による性能低下の影響は、最高使用圧力の2倍及び200℃に対する余裕に比べて1桁程度小さい。この結果は代表3ループプラントに対する評価結果であり、格納容器再循環ユニットによる格納容器内</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>5.1.7 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形〔炉心（燃料）〕、リロケーション、構造材との熱伝達及び下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達〔原子炉圧力容器（炉心損傷後）〕</p> <p>炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）に関する現象については、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、MAAPコードの解析モデルは、TMI 事故や CORA 実験等のその後の実験の知見に基づいて開発され、そのモデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析及び CORA 実験解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各事故シーケンスの評価に適用できる。</p> <p>また、炉心ヒートアップ現象に関し、ジルコニウム-水反応速度に対する感度解析を実施し、影響を確認した。TQUV、大破断 LOCA シーケンスともに、炉心熔融開始時刻及び下部プレナムへのリロケーションの開始時刻等の事象進展への影響は小さく、「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の熔融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響は小さい。また、「高圧溶融物・格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力が 2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響はない。「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時間への影響が小さく、原子炉圧力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされていることから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。「水素燃焼」については、酸素ガスの発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響はない。リロケーションに関する現象については、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、MAAPコードの解析モデルは、TMI 事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、その解析モデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各事故シーケンスの評価に適用できる。</p>	<p>5.1.13 炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）、水素濃度変化</p> <p>炉心ヒートアップ（燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形）に関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、MAAPコードのモデルは、TMI 事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、そのモデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各重要事故シーケンスの評価に適用できる。</p> <p>また、炉心ヒートアップ現象に関する感度を確認するために、ジルコニウム-水反応の速度（解析上はジルコニウム-水反応速度の係数）に対し、格納容器破損防止の事象をベースに感度解析により影響を確認した。LOCA シーケンス、SBO シーケンスともに、炉心熔融開始時期への感度は小さく、また、炉心ヒートアップする状態では炉心出口温度は 350℃を超過し、炉心損傷を起点とする運転員等操作への影響は小さい。下部プレナムへのリロケーションの開始時間は、SBO シーケンスにおいては、有意に早まる結果であったが、「格納容器過温破損」では炉心熔融開始から原子炉容器破損まで 3~4 時間あり、原子炉容器破損時点で原子炉下部キャビティに十分な注水がなされていることから、原子炉格納容器内温度への影響も軽微であり、有効性評価の結果に与える影響はない。また、「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、原子炉容器破損時の 1 次冷却材圧力も 2.0MPa[gage]を下回ることから、格納容器破損防止の有効性評価結果の成立性に影響しない。LOCA シーケンスに対しては感度が小さく、「格納容器過圧破損」及び「原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」については、1 次冷却系保有水量が減少し除熱が悪化することからヒートアップの感度は小さく、原子炉格納容器圧力に対する影響は小さい。「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉容器破損時間への影響が小さく、原子炉下部キャビティへの注水量の影響も小さいため、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。「水素燃焼」については、燃料被覆管酸化反応熱の増加を想定して仮想的にジルコニウム-水反応速度の係数を大きくしており、実機の燃料被覆管反応表面積は形状により決まり、有効性評価では、MAAPコードで得られた水素発生量の変化を全炉心内の Zr の 75%が反応するように補正して評価していることから、有効性評価の結果に与える影響はない。</p> <p>5.1.14 リロケーション</p> <p>リロケーションに関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少ない。しかしながら、MAAPコードのモデルは、TMI 事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、そのモデルを用いて実施された TMI 事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、妥当性があると判断でき、各重要事故シーケンスの評価に適用できる。</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）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>また、リロケーションに関する感度を確認するために、炉心ノード崩壊のパラメータに対し、感度解析を行った。TQUV、大破断LOCAシーケンスともに、炉心熔融やリロケーション後の原子炉圧力容器の破損時刻に与える感度は小さく、事象進展への影響は限定的であり、「格納容器過圧・過温破損」及び「原子炉圧力容器外の熔融炉心-冷却材相互作用」の評価指標に与える影響はない。「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」については、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力は2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の有効性に与える影響はない。「水素燃焼」について、酸素ガスの発生量について崩壊熱を用いた評価を行っており、評価指標に与える影響はない。「熔融炉心・コンクリート相互作用」については、原子炉圧力容器破損時点で格納容器下部に十分な注水がなされていることから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</p> <p>下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少なく、現象自体に不確かさが大きいと考えられる。しかしながら、MAAPコードの解析モデルは、TMI事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、その解析モデルを用いて実施されたTMI事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、MAAPコードによる解析結果は一定の妥当性を有するものと考えられる。また、下部プレナム内の熔融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を実施し、影響を確認した。原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展に大きな相違はないため、不確かさによる原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展への影響は小さく、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。</p> <p>5.1.10 原子炉圧力容器内FCI（熔融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達）[原子炉圧力容器（炉心損傷後）]</p> <p>原子炉圧力容器内FCIに影響する項目として、熔融ジェット径、エントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度が小さいことを確認した。</p> <p>「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、高圧熔融物放出を防止する観点で、原子炉圧力容器破損時刻とあいまって、原子炉圧力容器内FCIによる原子炉圧力変化が原子炉</p>	<p>また、リロケーションに関する感度を確認するために、燃料ペレットが崩壊する判定条件に対し、格納容器破損防止の事象をベースに感度解析により影響を確認した。SBOシーケンスで炉心熔融やリロケーション後の原子炉容器の破損時刻が有意に早まる結果であったが、「格納容器過温破損」では炉心熔融開始から原子炉容器破損まで3~4時間あり、原子炉容器破損時点で原子炉下部キャビティに十分な注水がなされており、原子炉格納容器内温度への影響も小さく、有効性評価の結果に与える影響はない。「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、原子炉容器破損時の1次冷却材圧力は2.0MPa[gage]を上回ることなく、格納容器破損防止対策の成立性に影響しない。LOCAシーケンスに対しては、感度は大きくなく、「格納容器過圧破損」及び「原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」については、1次冷却系保有水量が減少し除熱が悪化し、早期にヒートアップするため、リロケーションの感度は小さく、原子炉容器破損時間への影響も小さいため、原子炉格納容器圧力への影響は小さい。「水素燃焼」について、燃料崩壊前の発生量には影響はなく、その後はリロケーションに応じて変化し得るが、有効性評価では、MAAPコードで得られた水素発生量の変化を全炉心内のZrの75%が反応するように補正して評価していることから、有効性評価の結果に与える影響はない。「熔融炉心・コンクリート相互作用」について、原子炉容器破損時点での原子炉下部キャビティへの注水量に大きな差は生じないことから、コンクリート侵食量への影響は小さいと考えられる。</p> <p>5.1.15 原子炉容器内FCI（熔融炉心細粒化、熱伝達）</p> <p>原子炉容器内FCIに影響する項目として「デブリジェット径（炉心部の下部クラストの破損口径）」、「Ricou-Spaldingのエントレインメント係数」及び「デブリ粒子の径」をパラメータとして感度解析を行い、いずれについても、1次冷却材圧力の過渡的な変化に対して影響はあるものの、原子炉容器破損時点での1次冷却材圧力に対する感度は小さいことを確認した。</p> <p>「高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」では、高圧熔融物噴出防止の観点で、原子炉容器破損の時期とあいまって、原子炉容器内FCIによる1次冷却材圧力変化が影響すると考え</p>	<p>相違理由</p> <p>※PWRは次ページで下部プレナムの熱伝達に関して記載</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（第3部 MAAPコード）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>圧力容器破損時点での原子炉圧力に影響すると考えられるが、上記のとおり、原子炉圧力容器破損時点での原子炉圧力に対する感度は小さく、2.0MPa[gage]を上回ることはいない。</p> <p style="text-align: center;"><b>【参考のため再掲】</b></p> <p>下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少なく、現象自体に不確かさが大きいと考えられる。しかしながら、MAAPコードの解析モデルは、TMI事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、その解析モデルを用いて実施されたTMI事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、MAAPコードによる解析結果は一定の妥当性を有するものと考えられる。また、下部プレナム内の熔融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を実施し、影響を確認した。原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展に大きな相違はないため、不確かさによる原子炉圧力容器破損時刻等の事象進展への影響は小さく、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。</p> <p style="text-align: center;"><b>【参考のため掲載順を入れ替えた】</b></p> <p><b>5.1.8 原子炉圧力容器破損 [原子炉圧力容器 (炉心損傷後)]</b></p> <p>原子炉圧力容器破損に影響する項目として「制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ (しきい値)」をパラメータとした場合の感度解析を行い、原子炉圧力容器破損時刻が約13分早まることを確認した。ただし、この結果は仮想的な厳しい条件を与えたケースであり、実機における影響は十分小さいと判断され、各事故シーケンスの評価指標への影響は小さいと考えられる。</p> <p><b>5.1.11 原子炉圧力容器外FCI (熔融炉心細粒化、デブリ粒子熱伝達) [格納容器 (炉心損傷後)]</b></p> <p>原子炉圧力容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さく、有効性評価においては、水蒸気爆発挙動及びその後の格納容器の動的挙動に関する評価は必須ではなく、各事故シーケンスの評価に対して影響するものではない。</p> <p>原子炉圧力容器外FCIにおける圧カスパイクに関しては、解析モデルでの不確かさがエントレインメント係数及びデブリ粒子径に代表され、感度解析により原子炉圧力容器外FCIに</p>	<p>られるが、上記のとおり、原子炉容器破損時点での1次冷却材圧力に対する感度は小さく、2.0MPa[gage]を上回ることはいない。</p> <p><b>5.1.16 下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達</b></p> <p>下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達に関する現象に関しては、実機スケールで確認された例が少なく、現象自体に不確かさが大きいと考えられる。しかしながら、MAAPコードのモデルは、TMI事故やその後の実験等の知見に基づいて開発され、そのモデルを用いて実施されたTMI事故のベンチマーク解析において再現性も確認されていることから、MAAPコードによる解析結果は一定の妥当性を有するものと考えられる。</p> <p>また、下部プレナム内の熔融炉心と上面水プールとの間の限界熱流束、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数に対する感度解析を実施し、結果への影響を確認した。原子炉容器破損時期等の事象進展に大きな相違はないため、不確かさによる原子炉容器破損時期等の事象進展への影響は小さく、各重要事故シーケンスの評価指標への影響は小さい。</p> <p><b>5.1.17 原子炉容器破損</b></p> <p>原子炉容器破損に影響する項目として「計装用案内管溶接部の破損判定に用いる最大歪み (しきい値)」をパラメータとした場合の感度解析を行い、原子炉容器破損時間が5分早まることを確認。ただし、仮想的な厳しい条件を与えたケースであり、実機解析への影響は小さいと判断される。</p> <p>全交流動力電源喪失を起因とする「格納容器過温破損」及び「高压熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」を対象とした原子炉容器破損モデルに関する感度解析により、原子炉容器破損時刻に大きな感度はなく、各重要事故シーケンスの評価結果への影響は小さい。</p> <p>大破断LOCAを起因とする「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」、「水素燃焼」及び「熔融炉心・コンクリート相互作用」では、下部プレナムへの熔融炉心の落下が早く、下部ヘッドの加熱も早く進むことから、上記よりも感度は小さくなり、各重要事故シーケンスの評価結果への影響は小さいと考えられる。</p> <p><b>5.1.18 原子炉容器外FCI (熔融炉心細粒化、熱伝達)</b></p> <p>原子炉容器外FCIにおける水蒸気爆発に関しては、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて低く、有効性評価においては、水蒸気爆発挙動及びその後の原子炉格納容器の動的挙動に関する評価は必須ではなく、各重要事故シーケンスの評価指標に対して影響するものではない。</p> <p>原子炉容器外FCIにおける圧カスパイクに関しては、解析モデルでの不確かさが①原子炉下部キャビティ水深、②原子炉容器破損口径、③Ricou-Spaldingモデルのエントレインメント係数及び④デブリ粒子の径に代表され、感度解析により原子炉容器外FCIにより生じる圧カスパ</p>	