

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付1 水蒸気爆発時のウォーターハンマーについて</p> <p>炉外において水蒸気爆発が発生した場合、発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン状に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が建造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝撃と圧力波の2つの効果に分けられるが、ペDESTALにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。</p> <p>この水塊の上昇について、軽水炉のSA時を想定した気泡急成長に伴う水撃力に関する研究(稲坂ら、2004)では容器下部から注入した気泡によって、水位がピストン状に押し上げられ、気泡が水面に達して吹き抜けるまで水塊として上昇する様子が観察されている。</p> <p>水塊による水位上昇は、主に容器の径: D と初期水位: H_0 のアスペクト比 (H_0/D) によって整理できるとされており、建造物をこの水塊の到達範囲外に配置することにより水撃力の影響を回避できると結論付けている。添付図1-1に実験装置、添付図1-2に水塊の到達範囲の整理結果、添付図1-3に水塊挙動の実験結果を示す。</p> <p>女川2号炉、浜岡4号炉、島根2号炉及び柏崎刈羽6号及び7号炉では、ペDESTAL径と初期水位のアスペクト比による無次元水位はそれぞれ0.6、0.5、0.65及び0.2程度である。この知見を適用した場合、添付図1-2より上記のアスペクト比において水塊群到達範囲が最も大きくなるのは島根2号炉のアスペクト比0.65であり、そのときの水塊の上昇を含む最大水位は約7.5m(ペDESTAL径の1.25倍程度)となる。これより、島根2号炉の場合、水塊はペDESTAL床から約7.5mまで上昇する可能性があるが、これはペDESTAL床面からのRPV底部高さ約9.0mよりも低いことから、RPV支持機能の健全性に与える影響はないといえる。</p> <p>本実験では、水蒸気爆発時の水塊運動の主要パラメータとして、容器径、初期水位、気泡圧力を変更したケースについて実験を実施している。これらの実験パラメータ範囲の実機条件への適用性は以下のとおりである。</p> <p>容器径については、大型容器(内径1.0m)と小型容器(内径0.428m)の実験を行い、容器径のスケール効果を考慮している。実験結果より、容器径で規格化した無次元水面上昇距離は、小型容器と大型容器で同一のアスペクト比条件における実験結果の観察結果から、ほぼ一致すると評価されている。添付図1-2の水塊到達範囲の実験相関式は、これらの実験装置のデータより整理されたものである。したがって、実機の格納容器下部領域の径は本実験装置の容器径よりも大きくなるが、実験相関式は容器のスケール効果を考慮しており、実機条件にも適用できると考えられる。</p> <p>また、この実験では、圧縮空気を水張り容器の底部から供給して水蒸気爆発による気泡運動の水位上昇への影響を調査しているが、実機では必ずしも底部から気泡が成長を始めるわけではない。しかしながら、底部から供給される気泡は一次元軸方向への運動が支配的となる一方で、実機では蒸気泡がより三次元的に運動できるため、軸方向への水位上昇を評価する観点では、この実験方法は実機と比較して保守的であると考えられる。</p> <p>初期水位は、無次元初期水位を変更したケース(0.6、0.8、1.0、1.2、1.4)の実験を行っているが、実験の実水位は最大1.4m(容器径1.0mの場合)となる。実機条件では、実験条件の実水位よ</p>	<p>【参考のため泊の補足12を再掲】</p> <p>炉外において水蒸気爆発が発生した場合、発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン状に押し上げられ、この水塊衝突による衝撃力が建造物の健全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。ウォーターハンマーは、この水塊衝撃と圧力波の2つの効果に分けられるが、原子炉下部キャビティにおいては水面の上に気相部があり圧力波は問題とならないため、水塊衝突について以下に考察を示す。</p> <p>この水塊の上昇について、軽水炉のSA時を想定した気泡急成長に伴う水撃力に関する研究(稲坂ら、2004)では容器下部から注入した気泡によって、水位がピストン状に押し上げられ、気泡が水面に達して吹き抜けるまで水塊として上昇する様子が観察されている。</p> <p>この実験の2.0MPaの圧力条件は実機炉心相当で約11tの落下溶融炉心による蒸気発生量に対応するとしている¹。一方で、泊3号炉を想定した解析条件(添付資料7.2.3.1、別紙)では、溶融炉心の原子炉容器外への放出後、溶融炉心重量は百数十秒で約11tに達するが、水蒸気爆発が約0.6秒で生じることを考慮すれば、この実験条件の設定は泊3号炉で生じる事象よりも桁違いで大きな気体の発生を想定している。また、この実験研究は空気を対象としたものであるが、水蒸気を対象とした場合には、蒸気泡に対する凝縮効果のため、水塊の上昇と水撃力が抑制されるとする知見がある(稲坂ら、2007)。</p> <p>よって、泊3号炉において大規模な水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さいと考えられるが、仮に水蒸気爆発が発生した場合においても、発生した気体によって水塊が急加速を受けながらピストン状に押し上げられるとは考え難い。</p> <p>なお、図1は泊3号炉を想定した解析に基づき、原子炉容器底部にかかる合計荷重を評価した結果である。ピーク荷重は約2.6×10^6 N (=約260t)であり、原子炉容器の自重(約720t)よりも十分小さく原子炉容器を上昇させるような影響はないことが確認できる。</p>	<p>※BWRでは参考文献からウォーターハンマーの影響について考察しているが、泊では爆発規模の観点から同参考文献は適用範囲外である。したがって、同等の説明とするために泊では個別解析を基に定量的な資料とした。個別解析を根拠とした説明としているため、本説明は補足12に掲載している。参考のため泊欄には泊補足12を再掲</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>り高くなると想定される。しかし、初期水位と水位上昇の関係は、容器径で規格化された無次元初期水位（容器径と初期水位の比）及び無次元水塊到達範囲（容器径と水位上昇の比）で整理される（添付図1-2）。この無次元水位でみると実機条件は、実験範囲にあり、実機条件に適用できると考えられる。</p> <p>気泡の圧力条件は、気泡圧力を変更したケース（0.5MPa, 1.0MPa, 2.0MPa）を行っている。実験結果より、圧力が大きくなると気泡が吹き抜けやすくなり、水塊が押し上げられる範囲は圧力に依存しなくなる傾向がある。このため、高圧条件（10MPa以上）での水塊到達範囲はほぼ同じになるとされている。これより、実機での水蒸気爆発では、実験条件よりも圧力が高くなることが想定されるが、添付図1-2の水塊到達範囲は実機条件にも適用できると考えられる。</p> <p>なお、この実験の圧力条件は実機における落下溶融炉心の重量を想定して設定されており、2.0MPaの圧力条件は実機炉心相当で約11tの落下溶融炉心による蒸気発生量に対応している¹。表2-4に示す実機を想定した解析条件では、溶融炉心のRPV外への放出後、溶融炉心重量は数秒で約11tに達するが、水蒸気爆発が1秒前後で生じることを考慮すれば、この実験条件の設定は実機で生じる事象と同程度のオーダーであると考えられる。</p> <p>また、この実験研究は空気を対象としたものであるが、水蒸気を対象とした場合には、蒸気泡に対する凝縮効果のため、水塊の上昇と水撃力が抑制されるとする知見がある（稲坂ら、2007）。</p> <p>以上より、本実験結果による水塊運動の範囲の結果は、実機条件でも適用できると考えられる。</p> <p>【参考文献】</p> <p>(1) 稲坂, 安達, 汐崎, 綾, 成合, 2004. 「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」, 海上技術安全研究報告書 第4巻 第3号, p.323-343.</p> <p>(2) 稲坂, 安達, 村田, 綾, 2007. 「軽水炉のシビアアクシデント時における蒸気急発生による水撃力」, 日本原子力学会和文論文誌 6, p.289-297.</p> <p>1 溶融炉心の潜熱及び比熱をそれぞれ 323kJ/kg, 0.526kJ/(Kg-K)として、実験体系における空気容量と同等の蒸気発生量となる溶融炉心重量を概算し、実験体系と実機の空間スケール(～1/10スケール)の違いを踏まえて算出(稲坂ら, 2004)</p>	<p>【参考文献】</p> <p>(1) 稲坂, 安達, 汐崎, 綾, 成合, 2004. 「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」, 海上技術安全研究報告書 第4巻 第3号, p.323-344.</p> <p>(2) 稲坂, 安達, 村田, 綾, 2007. 「軽水炉のシビアアクシデント時における蒸気急発生による水撃力」, 日本原子力学会和文論文誌 Vol.6 No.3, p.289-297.</p> <p>1 溶融炉心の潜熱及び比熱をそれぞれ 323kJ/kg, 0.526kJ/(Kg-K)として、実験体系における空気容量と同等の蒸気発生量となる溶融炉心重量を概算し、実験体系と実機の空間スケール(～1/10スケール)の違いを踏まえて算出(稲坂ら, 2004)</p> <p>【再掲終了】</p>	

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="291 231 884 678" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="241 694 936 726" data-label="Caption"> <p>添付図 1-2 水塊がコヒーレント性を保ったまま上昇する範囲 (稲坂ら, 2004)</p> </div> <div data-bbox="161 746 1025 1364" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="212 1391 965 1423" data-label="Caption"> <p>添付図 1-3 気泡の成長と水塊挙動の実験結果 ($P_0=0.5\text{MPa}$, $H_0^*=0.6$) (稲坂ら, 2004)</p> </div>		

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																										
<p>添付2 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p> <p>1. はじめに 水蒸気爆発時の発生エネルギーを議論するうえで、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータであり、各研究機関で実施された水蒸気爆発実験においても、実験時に確認されたパラメータに基づきエネルギー変換効率が評価されている。また、水蒸気爆発解析において、粗混合過程、爆発過程の解析モデルの妥当性を確認するためのベンチマークの一つとして、実験時に確認されているエネルギー変換効率との比較が実施されている。 本資料では、水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較結果をまとめる。</p> <p>2. 水蒸気爆発実験でのエネルギー変換効率 (1) エネルギー変換効率について 一般的には以下の式①によりエネルギー変換効率は評価されている。 ① エネルギー変換効率(%)=機械的エネルギー/デブリの持つ熱エネルギー×100 機械的エネルギー：試験容器内の温度、圧力挙動からの評価、構造物への荷重評価等より機械的エネルギーを評価 デブリの持つ熱エネルギー：落下させる全デブリ質量、温度、比熱からデブリの持つ保有エネルギーを評価 上式①に基づくエネルギー変換効率は、粗混合過程と爆発過程の二つのプロセスが影響するパラメータとして扱う必要がある。粗混合過程は、落下デブリ質量に対して、デブリ注入速度、プール水位等といった実験条件が、粗混合融体質量に大きく影響する。一方、爆発過程は、粗混合粒子の微細化から爆発的な伝熱挙動といった物理現象であるため、体系等の実験条件の影響は低いと考えられる。 したがって、以下の式②により定義されたエネルギー変換効率を用いることで、実験条件の影響を小さくできると考える。 ② エネルギー変換効率(%)=機械的エネルギー/粗混合融体の持つ熱エネルギー×100 粗混合融体の持つ熱エネルギー：温度がデブリ融点以上かつボイド率0.75%以下の領域に存在する融体質量のエネルギー (2) TROI 実験におけるエネルギー変換効率 UO2 デブリを用いた水蒸気爆発実験において、比較的高いエネルギー変換効率が確認されている TROI 実験を対象に式②でエネルギー変換効率を評価した結果を添付表 2-1 に示す。 添付表 2-1 TROI 実験におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="152 1289 1032 1406"> <thead> <tr> <th></th> <th>TS1</th> <th>TS2</th> <th>TS3</th> <th>TS4</th> <th>TS6</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.12%</td> <td>0.28%</td> <td>0.22%</td> <td>0.35%</td> <td>0.66%</td> <td>参考文献(1)より</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>0.36%</td> <td>0.81%</td> <td>0.54%</td> <td>1.25%</td> <td>2.49%</td> <td>参考文献(2)より</td> </tr> </tbody> </table>		TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考	式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献(1)より	式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献(2)より	<p>添付1 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較について</p> <p>1. はじめに 水蒸気爆発時の発生エネルギーを議論するうえで、デブリの持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されるエネルギー変換効率は重要なパラメータであり、各研究機関で実施された水蒸気爆発実験においても、実験時に確認されたパラメータに基づきエネルギー変換効率が評価されている。また、水蒸気爆発解析において、粗混合過程、爆発過程の解析モデルの妥当性を確認するためのベンチマークの一つとして、実験時に確認されているエネルギー変換効率との比較が実施されている。 本資料では、水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率の比較結果をまとめる。</p> <p>2. 水蒸気爆発実験でのエネルギー変換効率 (1) エネルギー変換効率について 一般的には以下の式①によりエネルギー変換効率は評価されている。 ① エネルギー変換効率(%) = 機械的エネルギー / デブリの持つ熱エネルギー × 100 機械的エネルギー：試験容器内の温度、圧力挙動からの評価、構造物への荷重評価等より機械的エネルギーを評価 デブリの持つ熱エネルギー：落下させる全デブリ質量、温度、比熱からデブリの持つ保有エネルギーを評価 上式①に基づくエネルギー変換効率は、粗混合過程と爆発過程の二つのプロセスが影響するパラメータとして扱う必要がある。粗混合過程は、落下デブリ質量に対して、デブリ注入速度、プール水位等といった実験条件が、粗混合融体質量に大きく影響する。一方、爆発過程は、粗混合粒子の微細化から爆発的な伝熱挙動といった物理現象であるため、体系等の実験条件の影響は低いと考えられる。 したがって、以下の式②により定義されたエネルギー変換効率を用いることで、実験条件の影響を小さくできると考える。 ② エネルギー変換効率(%) = 機械的エネルギー / 粗混合融体の持つ熱エネルギー × 100 粗混合融体の持つ熱エネルギー：温度がデブリ融点以上かつボイド率 0.75%以下の領域に存在する融体質量のエネルギー (2) TROI 実験におけるエネルギー変換効率 UO₂ デブリを用いた水蒸気爆発実験において、比較的高いエネルギー変換効率が確認されている TROI 実験を対象に式②でエネルギー変換効率を評価した結果を表 1 に示す。</p> <p>表 1 TROI 実験におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="1122 1326 1890 1430"> <thead> <tr> <th></th> <th>TS1</th> <th>TS2</th> <th>TS3</th> <th>TS4</th> <th>TS6</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.12%</td> <td>0.28%</td> <td>0.22%</td> <td>0.35%</td> <td>0.66%</td> <td>参考文献[1]より</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>0.36%</td> <td>0.81%</td> <td>0.54%</td> <td>1.25%</td> <td>2.49%</td> <td>参考文献[2]より</td> </tr> </tbody> </table>		TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考	式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献[1]より	式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献[2]より	<p>※泊は補足 6 を改めて参考資料 JASMINE の添付 1 として記載</p>
	TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考																																						
式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献(1)より																																						
式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献(2)より																																						
	TS1	TS2	TS3	TS4	TS6	備考																																						
式①	0.12%	0.28%	0.22%	0.35%	0.66%	参考文献[1]より																																						
式②	0.36%	0.81%	0.54%	1.25%	2.49%	参考文献[2]より																																						

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
<p>3. 実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率との比較</p> <p>実プラントの水蒸気爆発評価結果に基づき式①と式②より算出したエネルギー変換効率を添付表 2-2 にまとめる。</p> <p>ここで、TROI 実験並びに実プラントの条件におけるジェット分裂長を評価した結果、TROI 実験 (TS1~TS4, TS6) の実験条件におけるジェット分裂長は約 1m であり、プール水位は 1m であるため、TS1~TS4, TS6 はプール底部到達までにジェットがほぼ完全に分裂すると推測される。また、A BWR プラント実機体系におけるジェット分裂長は、約 4~5m であり、7m 水位ではジェットが完全に分裂すると推測される。</p> <p>したがって、ジェットがほぼ完全に分裂する条件となっている TS1~TS4, TS6 と A BWR プラント実機体系 7m 水位条件について、式②によるエネルギー変換効率で比較を行うと、TS1~TS4, TS6 にて確認されたエネルギー変換効率を A BWR プラント実機体系が上回る結果となることが確認できた。</p> <p>上記より A BWR プラント実機体系における J A S M I N E 解析においては、同等の条件の実験と比較するとエネルギー変換効率は保守的な結果を与えていることが確認できた。</p> <p>添付表 2-2 A BWR プラント実機体系におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="389 703 801 810"> <thead> <tr> <th></th> <th>水位 7m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>0.8%</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>3.0%</td> </tr> </tbody> </table> <p>4. 参考文献</p> <p>(1) NEA/CSNI/R(2014)15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions</p> <p>(2) 堀田, 森田, 梶本, 丸山, 2017. 「JASMIN Version 3 による溶融燃料-冷却材相互作用 SERENA2 実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌 (2017)</p>		水位 7m	式①	0.8%	式②	3.0%	<p>3. 実プラントの水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率との比較</p> <p>実プラントの水蒸気爆発評価結果に基づき式①と式②より算出したエネルギー変換効率を表 2 にまとめる。</p> <p>ここで、TROI 実験並びに実プラントの条件におけるジェット分裂長を評価した結果、TROI 実験 (TS1~TS4, TS6) の実験条件におけるジェット分裂長は約 1m であり、プール水位は 1m であるため、TS1~TS4, TS6 はプール底部到達までにジェットがほぼ完全に分裂すると推測される。また、泊 3 号の水蒸気爆発評価におけるジェット分裂長は、約 1.4m であり、原子炉下部キャビティに 4.1m の水張りがされている場合、原子炉下部キャビティ床面到達までにジェットが完全に分裂されることが推定される。</p> <p>したがって、実験条件の影響の小さい式②によるエネルギー変換効率で比較を行うと、TS1~TS4, TS6 にて確認されたエネルギー変換効率を泊 3 号の水蒸気爆発評価が上回る結果となることが確認できた。</p> <p>上記より泊 3 号の水蒸気爆発評価においては、同等の条件の実験と比較するとエネルギー変換効率は保守的な結果を与えていることが確認できた。</p> <p>表 2 泊 3 号の水蒸気爆発評価におけるエネルギー変換効率</p> <table border="1" data-bbox="1330 711 1675 802"> <thead> <tr> <th></th> <th>水位 4.1m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>式①</td> <td>約 2.5%</td> </tr> <tr> <td>式②</td> <td>約 3.3%</td> </tr> </tbody> </table> <p>4. 参考文献</p> <p>[1] NEA/CSNI/R (2014) 15, OECD/SERENA Project Report Summary and Conclusions</p> <p>[2] 堀田, 森田, 梶本, 丸山. 「JASMIN Version 3 による溶融燃料-冷却材相互作用 SERENA2 実験解析」, 日本原子力学会和文論文誌 (2017)</p>		水位 4.1m	式①	約 2.5%	式②	約 3.3%	
	水位 7m													
式①	0.8%													
式②	3.0%													
	水位 4.1m													
式①	約 2.5%													
式②	約 3.3%													

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

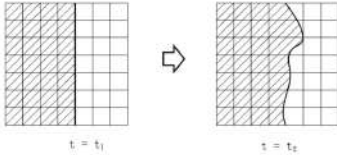
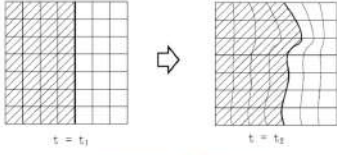

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

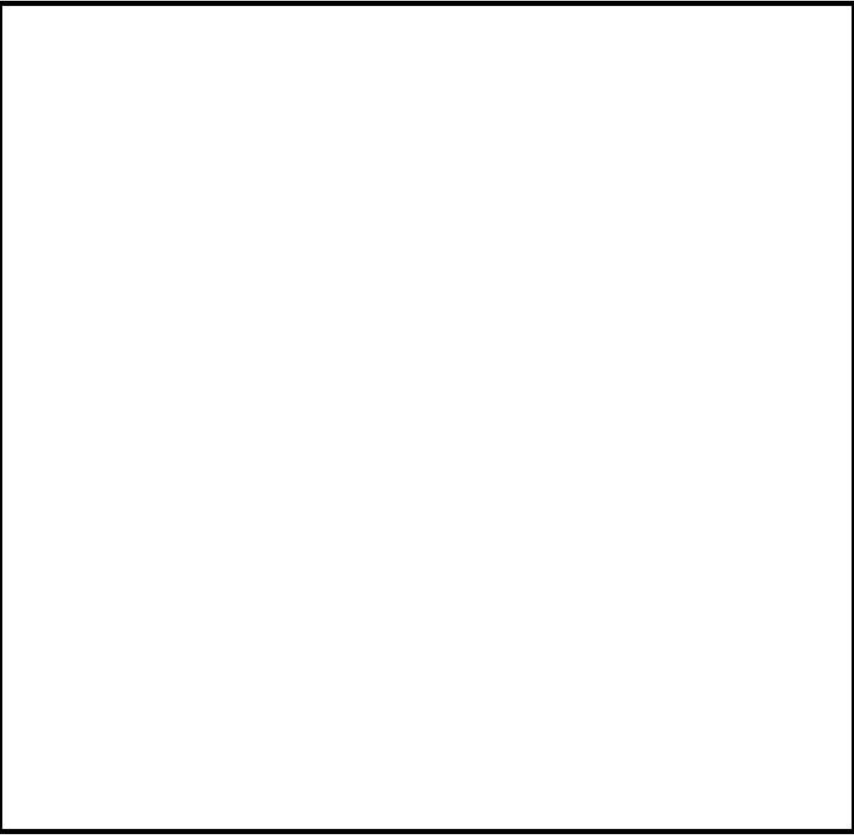
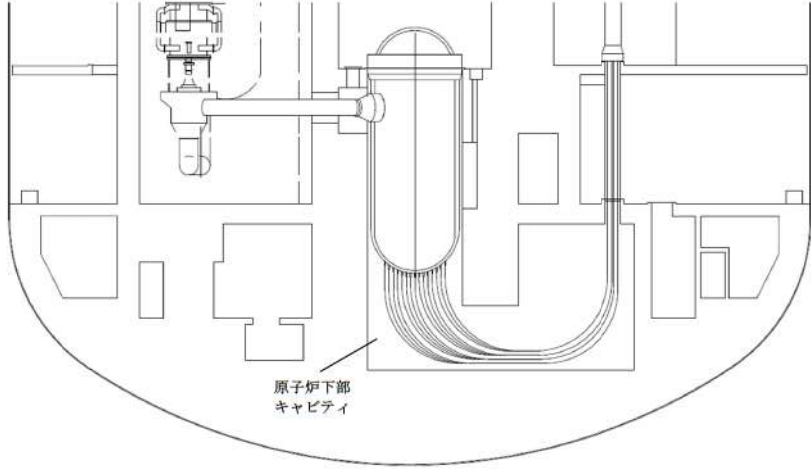
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div style="text-align: center;">  <p>(a) Euler 要素の概念</p>  <p>(b) Lagrange 要素の概念</p>  <p>(c) ALE 要素の概念</p> </div> <p>図3-1 各要素タイプの場合</p>		<p>解析手法の相違により、流体はモデル化しない</p>

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="161 220 1034 1329" style="border: 2px solid black; height: 695px; width: 390px;"></div> <div data-bbox="465 1358 728 1382" style="text-align: center;"> <p>図3-3 FCI 解析時の拘束条件</p> </div> <div data-bbox="454 1401 1025 1441" style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1070 794 1944 1289" style="border: 2px solid black; height: 310px; width: 390px;"></div> <div data-bbox="1361 1326 1659 1350" style="text-align: center;"> <p>図3-2 構造応答解析時の拘束条件</p> </div> <div data-bbox="1384 1358 1944 1382" style="text-align: center;"> <p>：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	<p>圧力容器支持構造、及び解析手法の相違</p>

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表


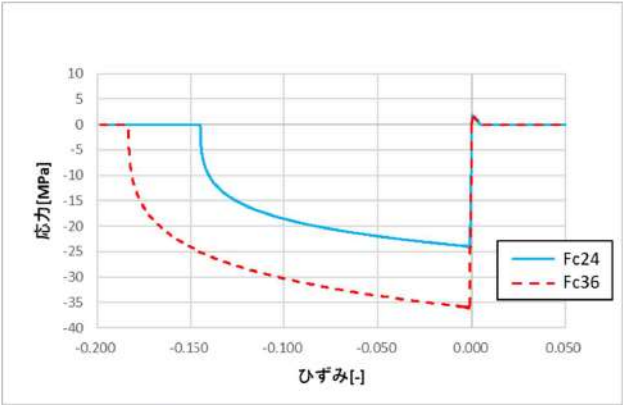
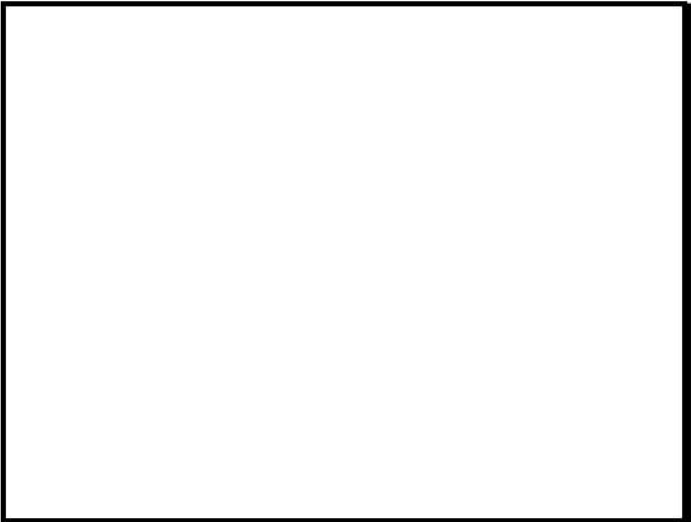
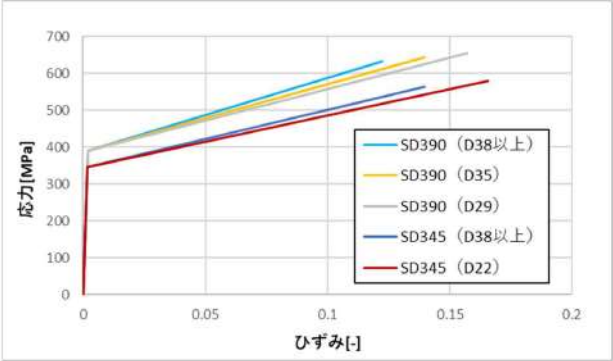
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

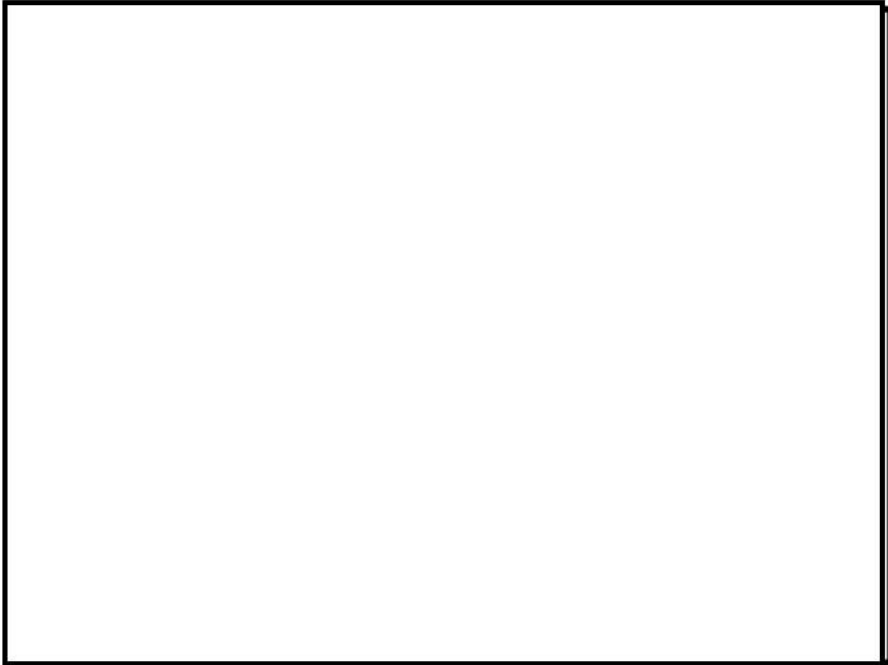
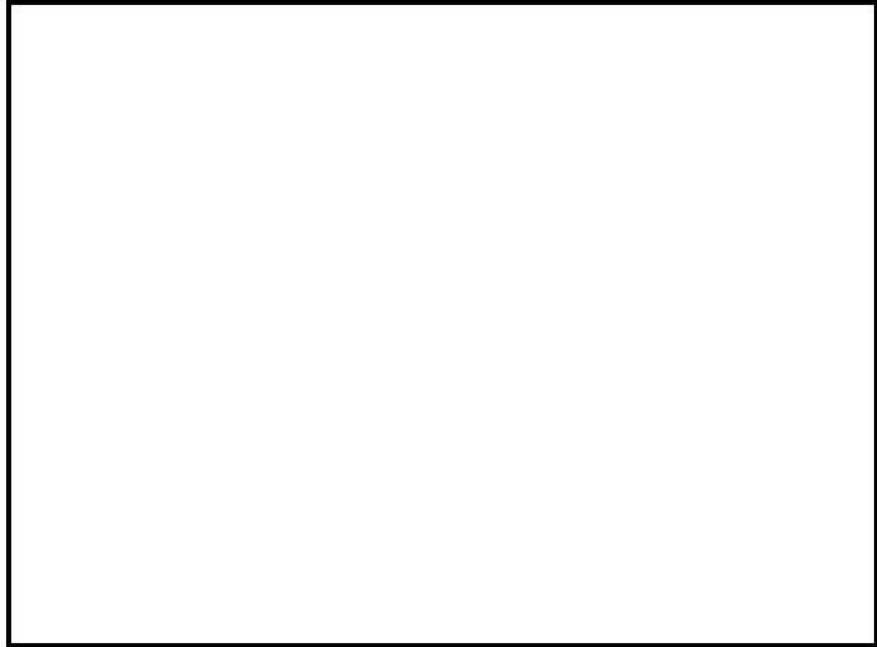

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.3.5 メッシュ分割</p> <p>図3-6～図3-10に各部のメッシュ分割について示す。ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 <input type="text"/> mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。また、構造材に力を伝える流体（ALE要素）のメッシュサイズは、ALE法を用いることを考慮し、境界面における伝達ロスが生じないように構造材（Lagrange要素）のメッシュサイズと同等とする。以下に各要素のメッシュ分割例を示す。</p> <div data-bbox="159 539 1032 1187" style="border: 1px solid black; height: 400px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: center;">図3-6 コンクリート部のメッシュ例</p> <div data-bbox="383 1326 954 1362" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	<p>3.3.4 メッシュ分割</p> <p>図3-5～図3-6に各部のメッシュ分割について示す。原子炉下部キャビティの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 <input type="text"/> mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。以下に各要素のメッシュ分割例を示す。</p> <div data-bbox="1084 544 1951 1254" style="border: 1px solid black; height: 445px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: center;">図3-5 コンクリート部のメッシュ例</p> <div data-bbox="1384 1326 1951 1362" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <input type="text"/>：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。 </div>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

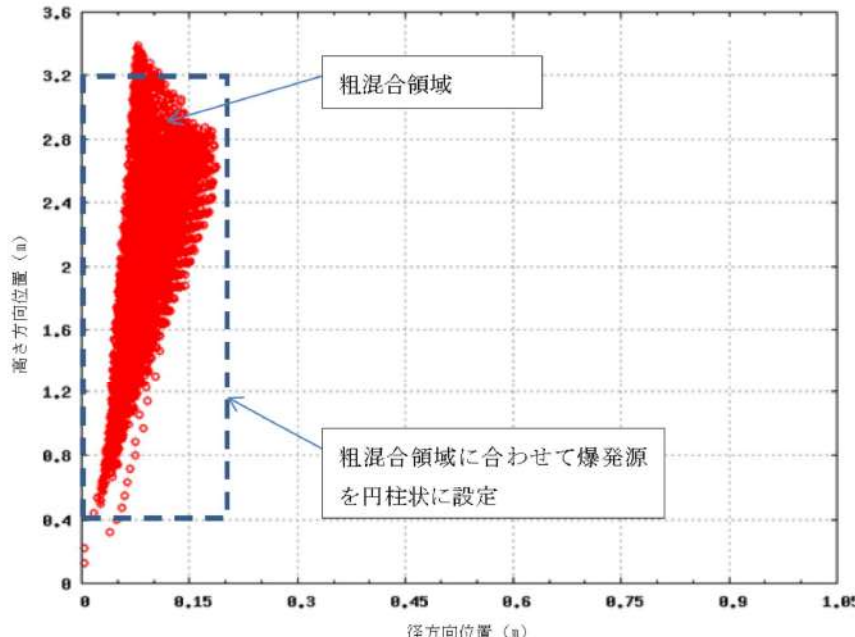
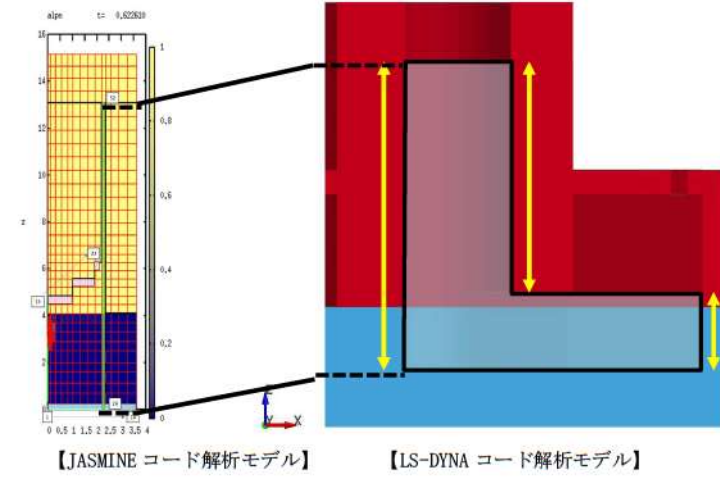
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
		<p>解析手法の相違により爆発源はモデル化しない</p>
<p>図3-7 鋼板部のメッシュ例</p>	<p>図3-6 鉄筋部のメッシュ例</p>	
	<p>□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	
<p>図3-8 爆発源のメッシュ例</p> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>		

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>3.4 爆発源の設定方法 爆発源の設定方法を以下に示す。</p> <p>3.4.1 爆発源の形状 仮定する爆発源の形状は、JASMIN Eコードの解析による粗混合領域の分布形状に合わせて円柱状に設定する。下図3-11に粗混合領域の分布形状の例を示す。</p>  <p>図3-11 粗混合領域の分布形状の例</p> <p>なお、粗混合粒子の分布が少ない領域は、爆発に大きく寄与しないため無視する。また、ポイド率が大きく、爆発に寄与しない上部領域も無視して設定している。</p> <p>3.4.2 爆発源の圧力 実際の爆発は、起爆点より粗混合粒子が連鎖的に爆発していくため、爆発源領域の圧力履歴は、粗混合粒子位置により異なり、それぞれ個別の圧力ピークをとる。LS-DYNAコードにおいて、多数の爆発源が連鎖的に起爆する解析を模擬することは煩雑なため、全爆発源領域で同時に爆発が発生すると仮定している。今回の評価では、各粗混合粒子位置の圧力履歴のうち、最大となった圧力値を全爆発源領域の初期圧力として設定する。下図3-12に粗混合領域の圧力履歴の例を示す。</p>	<p>3.4 衝撃圧力の設定方法 LS-DYNAコードでは、JASMIN Eコードの解析結果から出力された原子炉下部キャビティ壁に対する高さ方向の圧力履歴分布を、対応する高さ位置における各要素に境界条件として入力する。</p> <p>なお、JASMIN Eコードでは、原子炉下部キャビティを2次元軸対称の円筒形モデルで模擬しているが、LS-DYNAコードではトンネル部を含めた実機と同等の躯体形状にてモデル化しているため、トンネル部に差し掛かる範囲は圧力入力範囲をトンネル部側面まで拡張する。下図3-7にJASMIN EコードのセルとLS-DYNAコードの要素の対応を示す。</p>  <p>図3-7 JASMIN EコードのセルとLS-DYNAコードの要素の対応</p>	<p>解析手法の相違 解析手法の相違により、LS-DYNAコードへの入力条件が異なる。</p> <p>解析手法の相違</p>

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="138 220 1039 799" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="315 831 873 861" data-label="Caption"> <p>図 3-12 J A S M I N E 解析による粗混合領域の圧力履歴の例</p> </div> <div data-bbox="138 901 427 930" data-label="Section-Header"> <p>3.4.3 爆発源の開放エネルギー</p> </div> <div data-bbox="138 935 1043 1104" data-label="Text"> <p>J A S M I N E コードの解析による流体の運動エネルギーは、L S - D Y N A コードで直接入力することはできない。そのため、今回の評価では、この流体運動エネルギーを再現するため、爆発源の開放エネルギーを適切に設定し、L S - D Y N A コードの解析結果としての流体運動エネルギーの最大値が J A S M I N E コードの解析の最大運動エネルギー相当となるよう調節している。これらの設定方法を図 3-13 に示す。</p> </div> <div data-bbox="138 1109 1048 1174" data-label="Text"> <p>なお、この流体の最大運動エネルギーを保存する解析手法は、添付 1 に示す通り保守的な評価となる。</p> </div>		<p data-bbox="1966 901 2123 930">解析手法の相違</p>

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

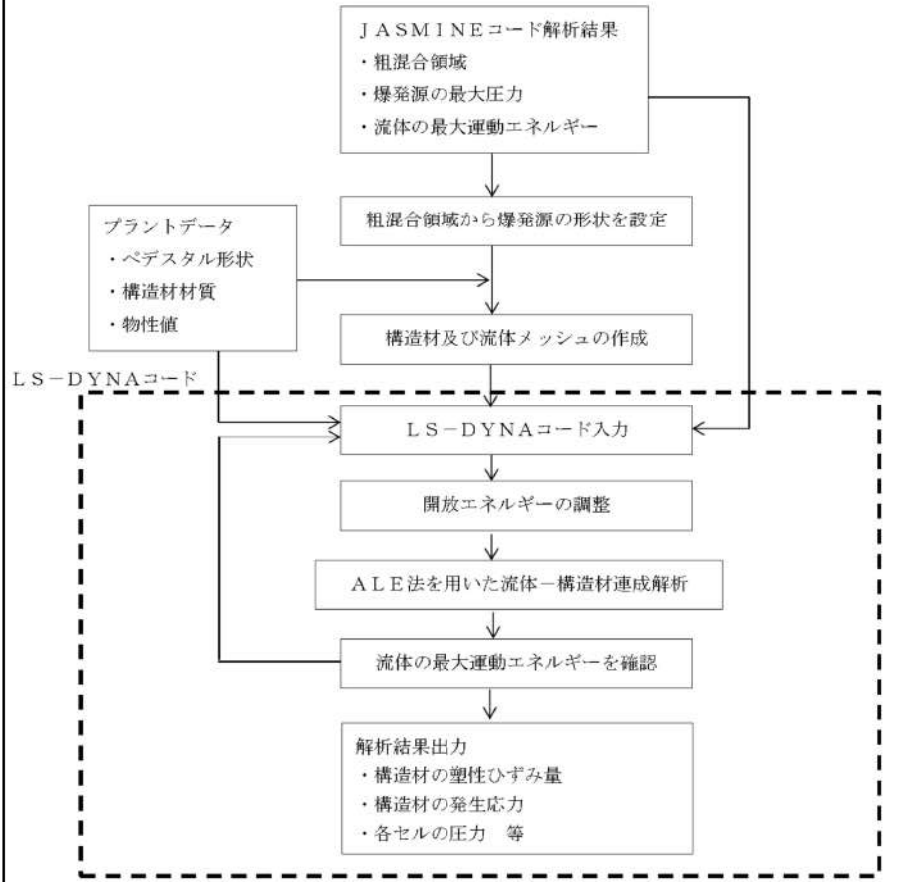
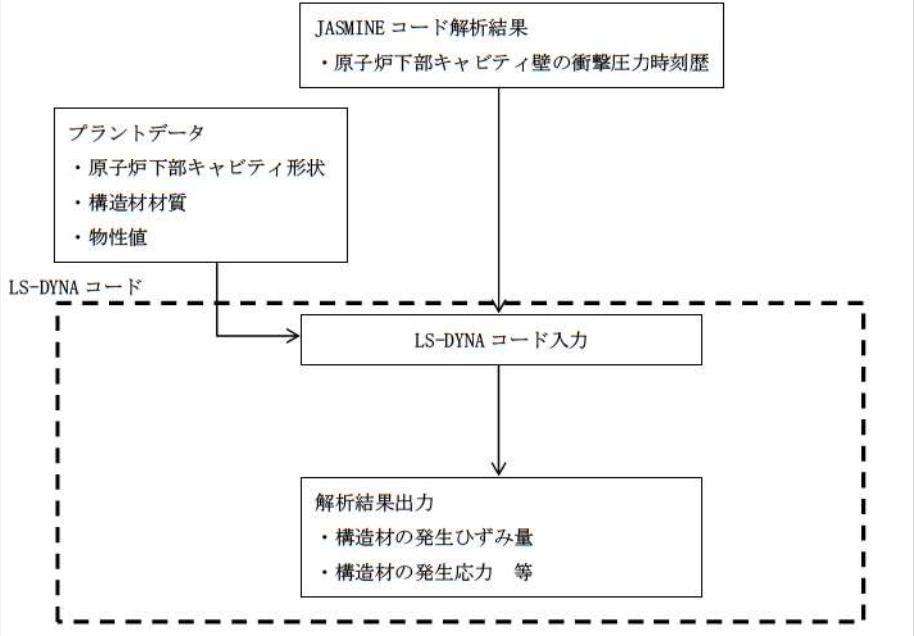
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																																																
<p>3.7 解析結果の例示</p> <p>代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。</p> <p>(1) 解析モデル及び境界条件</p> <p>LS-DYNAコードによる解析モデルについて図3-15に示す。この図に示す通り、気相部、液相部、爆発源、鋼板、コンクリート及び縦リブ鋼板を模擬している。拘束条件については、図3-15に示すΔで示したコンクリートで埋設されている部分は全方位で拘束されているとし、\squareで示したベダスタル頂部、液相底面（ベダスタル床面）、気相頂部は、Z方向のみ拘束されているとした。</p> <p>模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表3-5に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 3-5 要素分割の詳細</p> <table border="1" data-bbox="331 528 857 852"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> <th>要素数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>爆発源</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> <td rowspan="6" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>液相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>気相</td> <td>ALE 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 材料物性</p> <p>代表プラントのベダスタルの構成材料（充填コンクリート及び鋼板）の密度、ヤング率、ポアソン比を表3-6に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図3-4及び図3-5に示すとおりである。</p> <p style="text-align: center;">表 3-6 ベダスタルの構成材料の物性値</p> <table border="1" data-bbox="150 1118 1032 1297"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>密度 (g/cm³)</th> <th>ヤング率 (Pa)</th> <th>ポアソン比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>充填コンクリート</td> <td colspan="3" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td colspan="3" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> </tbody> </table> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p>	部位	要素	要素数	爆発源	ALE 要素 (Solid)		液相	ALE 要素 (Solid)	気相	ALE 要素 (Solid)	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	鋼板	Lagrange 要素 (Solid)			材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	充填コンクリート				鋼板				<p>3.7 解析結果の例示</p> <p>代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。</p> <p>(1) 解析モデル及び境界条件</p> <p>LS-DYNAコードによる解析モデルについて図3-9に示す。この図に示す通り、コンクリート及び鉄筋を模擬している。拘束条件については、図3-9に示すようにコンクリート底面はZ方向のみ拘束とし、側面部は完全拘束されているとした。</p> <p>模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表3-4に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 3-4 要素分割の詳細</p> <table border="1" data-bbox="1223 517 1845 687"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>要素</th> <th>要素数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>Lagrange 要素 (Solid)</td> <td rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>鉄筋</td> <td>Lagrange 要素 (Shell)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 材料物性</p> <p>代表プラントの原子炉下部キャビティの構成材料（コンクリート及び鉄筋）の密度、ヤング率、ポアソン比を表3-5に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図3-3及び図3-4に示すとおりである。</p> <p style="text-align: center;">表 3-5 原子炉下部キャビティの構成材料の物性値</p> <table border="1" data-bbox="1066 1107 1957 1305"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>密度 (g/cm³)</th> <th>ヤング率 (Pa)</th> <th>ポアソン比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>コンクリート</td> <td>2.35</td> <td>2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>鉄筋</td> <td>7.85</td> <td>2.05E+11</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">\square：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	部位	要素	要素数	コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)		鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)	材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	コンクリート	2.35	2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)	0.2	鉄筋	7.85	2.05E+11	0.3	<p>圧力容器支持構造及び解析手法の相違</p>
部位	要素	要素数																																																
爆発源	ALE 要素 (Solid)																																																	
液相	ALE 要素 (Solid)																																																	
気相	ALE 要素 (Solid)																																																	
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比																																															
充填コンクリート																																																		
鋼板																																																		
部位	要素	要素数																																																
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)																																																	
鉄筋	Lagrange 要素 (Shell)																																																	
材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (Pa)	ポアソン比																																															
コンクリート	2.35	2.37E+10 (Fc24) 2.71E+10 (Fc36)	0.2																																															
鉄筋	7.85	2.05E+11	0.3																																															

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

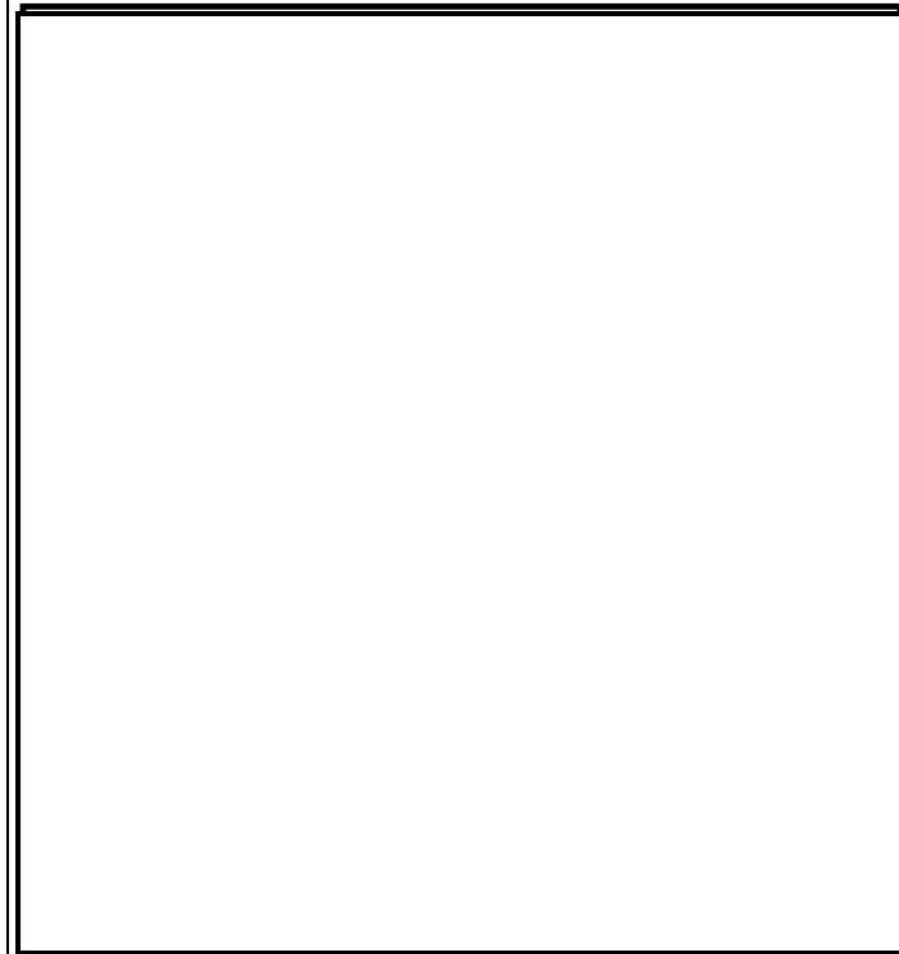
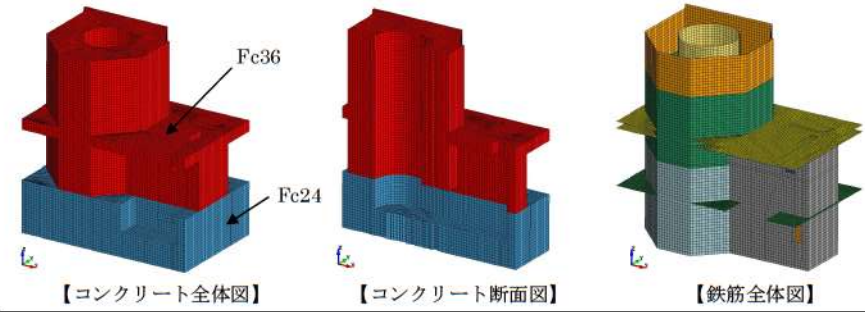
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

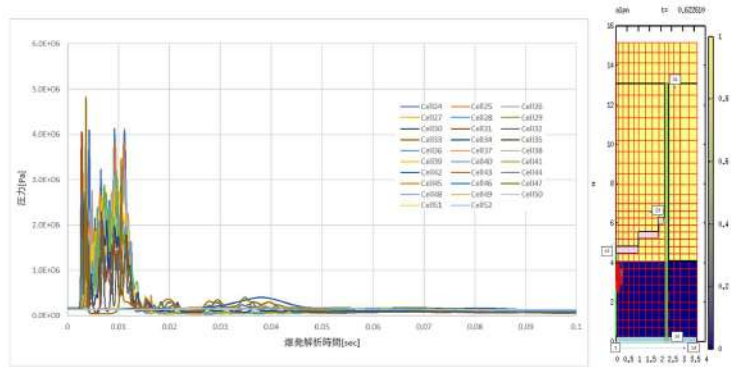
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="176 228 1001 730" style="border: 1px solid black; height: 315px; width: 368px;"></div> <div data-bbox="176 767 1001 1270" style="border: 1px solid black; height: 315px; width: 368px;"></div> <div data-bbox="304 1284 882 1351" style="text-align: center;"> <p>図 3-16 爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布 （上：内側鋼板，下：外側鋼板）</p> </div> <div data-bbox="465 1391 981 1420" style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1120 244 1883 783" style="text-align: center;"> </div> <div data-bbox="1171 798 1839 826" style="text-align: center;"> <p>図 3-11 爆発発生から 0.2 秒後までの鉄筋の相当塑性ひずみの最大値分布</p> </div>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

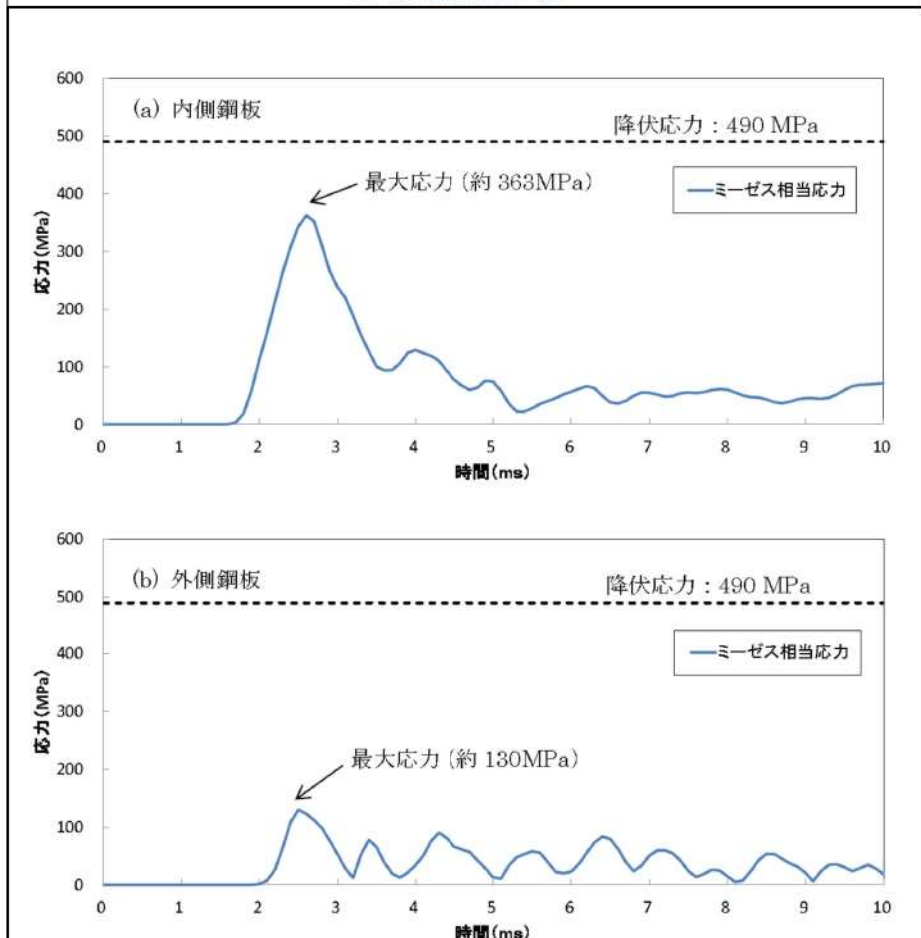
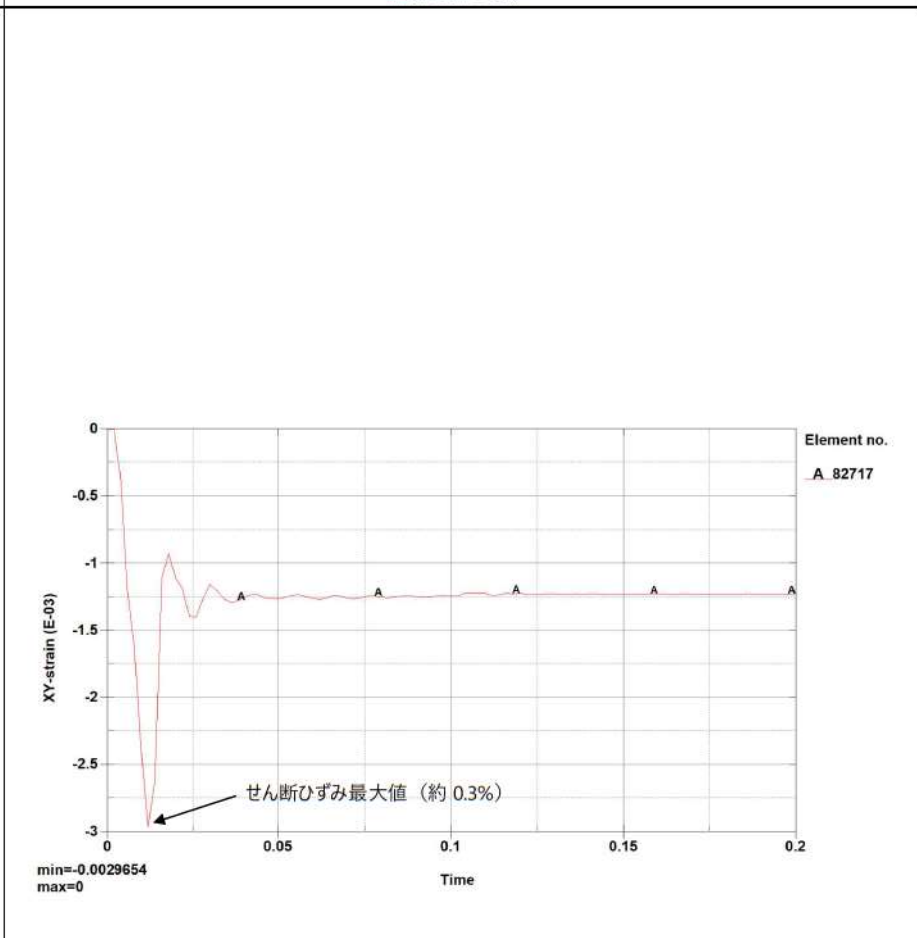
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<div data-bbox="1160 183 1861 671"> </div> <p data-bbox="1346 694 1659 719">(a)最大発生箇所（絶対最大値評価）</p> <div data-bbox="1160 762 1861 1251"> </div> <p data-bbox="1451 1257 1570 1283">(b)A-A 断面</p>	

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

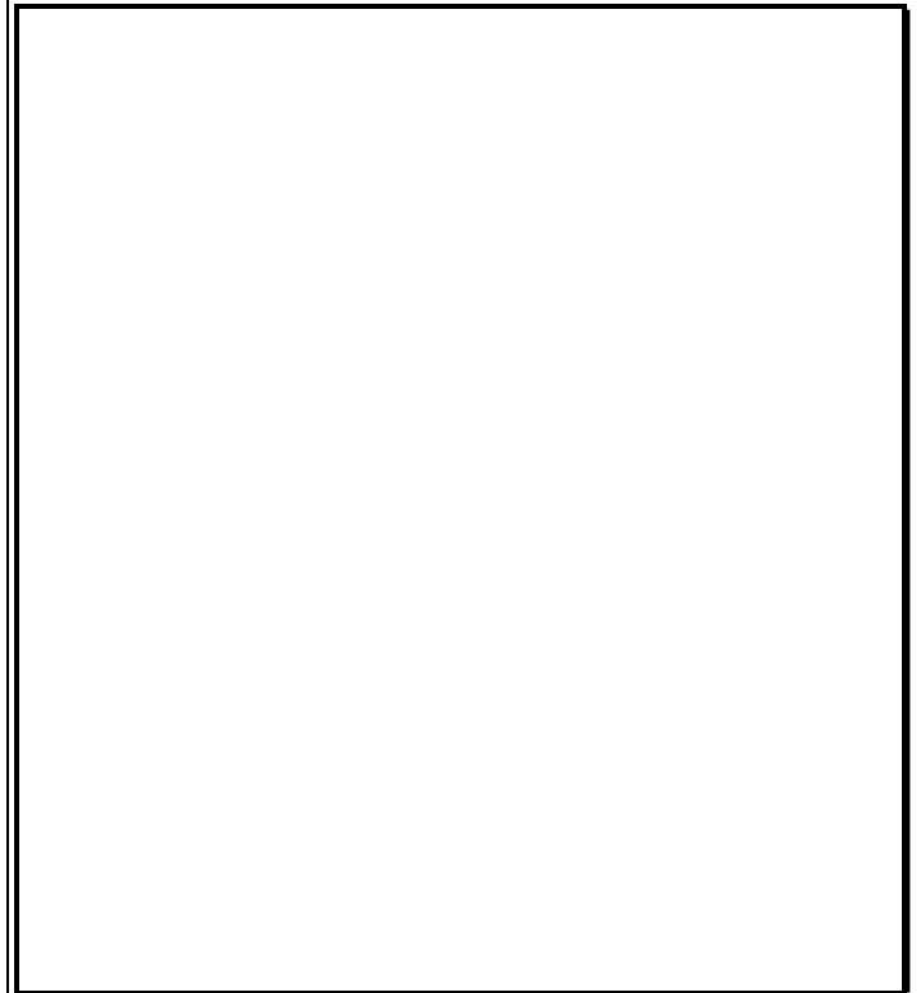
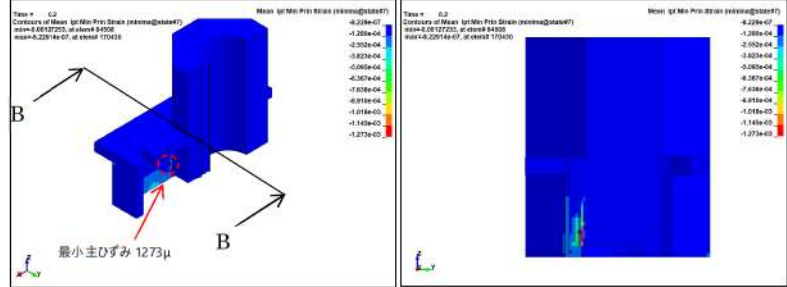
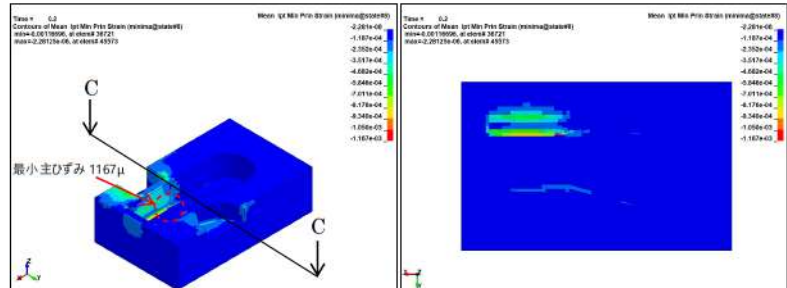
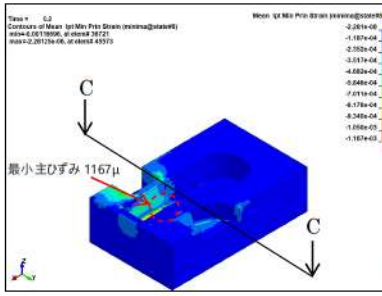
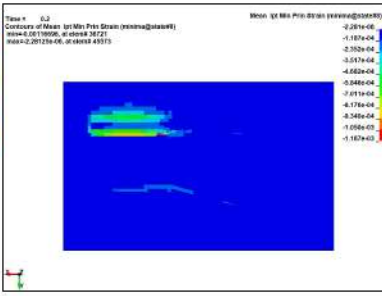
赤字：設備、運用又は体制の相違（設計方針の相違）
 青字：記載箇所又は記載内容の相違（記載方針の相違）
 緑字：記載表現、設備名称の相違（実質的な相違なし）

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

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

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

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a)最小値発生箇所</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b)B-B 断面</p> </div> </div> <p>【上部コンクリート】</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a)最小値発生箇所</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b)C-C 断面</p> </div> </div> <p>【下部コンクリート】</p> </div>	
<p>図3-18 発生応力が最大となる時間での応力分布（内側鋼板）</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; text-align: center;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	<p>図3-14 爆発発生から0.2秒後までのコンクリートの最小主ひずみの最小値の分布 (上：上部コンクリート，下：下部コンクリート)</p>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

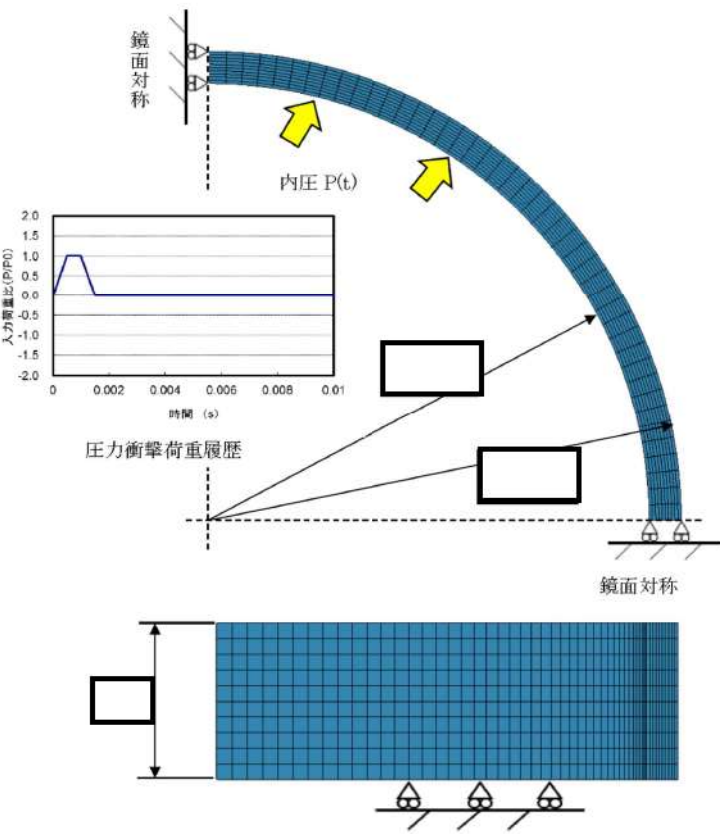
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 209 1010 890" style="border: 2px solid black; height: 427px; width: 383px;"></div> <p data-bbox="315 903 862 932">図3-19 発生応力が最大となる時間での応力分布（外側鋼板）</p> <div data-bbox="421 1070 992 1110" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 100px;"> <p data-bbox="443 1077 969 1101">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1144 201 1861 647"> <p data-bbox="1413 659 1599 687">【上部コンクリート】</p> </div> <div data-bbox="1144 730 1861 1177"> <p data-bbox="1413 1150 1599 1179">【下部コンクリート】</p> </div> <p data-bbox="1144 1219 1865 1281">図3-15 コンクリートの最小主ひずみ最小値発生位置での最小主ひずみの時刻歴 (上：上部コンクリート，下：下部コンクリート)</p>	

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由															
<p>4. 解析結果の検証</p> <p>本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いたベDESTALの構造応答解析は、鋼板、放射状リブ及びコンクリート部を三次元ソリッド要素でモデル化して実施していることから、検証はベDESTAL構造とほぼ同形状をモデル化したソリッド要素とする。</p> <p>(1) 理論解との比較</p> <p>連続体要素を扱う動的解析の基本的な例題として、リング（円環）の面内振動を取り上げた。衝撃荷重が作用する構造物の応答では、図4-1に示すように構造物の固有周波数 f が大きく関係し^[4]、弾性範囲では図4-1に示されるような動的倍率（静的変位に対する倍率）の理論解が与えられる^[5]。</p> <div data-bbox="246 542 940 1053"> <table border="1" data-bbox="309 1077 940 1289"> <thead> <tr> <th>時間区分</th> <th>荷重の式</th> <th>動的倍率（=動的変位、u/静的変位、δ_0）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① $0 \leq t \leq t_0$</td> <td>$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$</td> </tr> <tr> <td>② $t_0 \leq t \leq 2t_0$</td> <td>$P(t) = P_0$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> <tr> <td>③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$</td> <td>$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> <tr> <td>④ $3t_0 \leq t$</td> <td>$P(t) = 0$</td> <td>$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$</td> </tr> </tbody> </table> </div>	時間区分	荷重の式	動的倍率（=動的変位、 u /静的変位、 δ_0 ）	① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$	② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$	③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$	④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$	<p>4. 解析結果の検証</p> <p>本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と試験結果の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いた原子炉下部キャビティ壁の構造応答解析では、鉄筋の弾塑性挙動やコンクリートが一部破損するような挙動を評価するため、検証には同様の事象が発生する山口らの鉄筋コンクリート製ロックシェッド模型への重錘落下試験の結果^[4]を用いる。</p> <p>(1) 試験との比較</p> <p>山口らの試験におけるロックシェッド模型及び重錘の概略図を図4-1に示す。原子炉下部キャビティ壁と同条件となるように、ロックシェッド模型はコンクリートをソリッド要素、鉄筋を等価板厚のシェル要素でモデル化し、ソリッド要素でモデル化した重錘の落下高さに相当する入力エネルギーに対するコンクリートの挙動を試験結果と比較する。解析モデル図を図4-2に示す。</p> <div data-bbox="1187 558 1814 861"> </div> <div data-bbox="1299 869 1702 901"> <p>図4-1 ロックシェッド模型及び重錘の概略図</p> </div> <div data-bbox="1097 925 1904 1292"> </div> <div data-bbox="1187 1308 1814 1348"> <p>コンクリート（ソリッド要素） 鉄筋（シェル要素）</p> </div> <div data-bbox="1411 1356 1601 1388"> <p>図4-2 解析モデル図</p> </div>	<p>検証手法の相違</p>
時間区分	荷重の式	動的倍率（=動的変位、 u /静的変位、 δ_0 ）															
① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{t}{t_0} \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$															
② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$															
③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_0} = 3 - \frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$															
④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_0} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$															

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

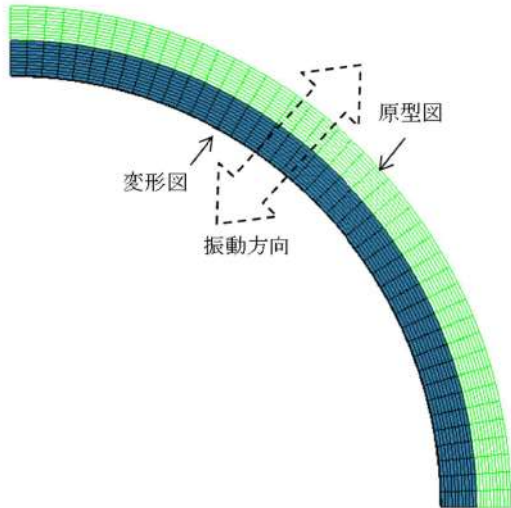
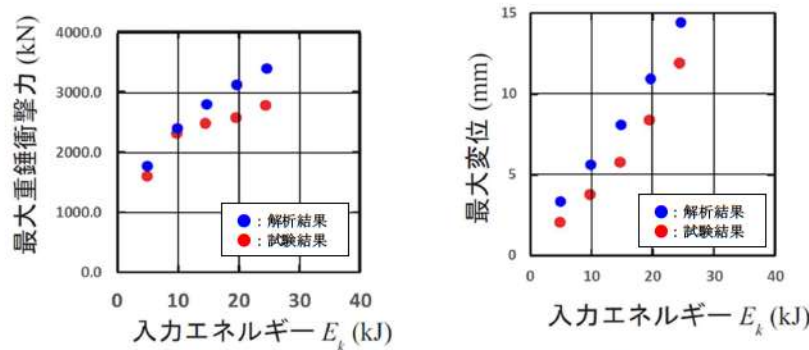
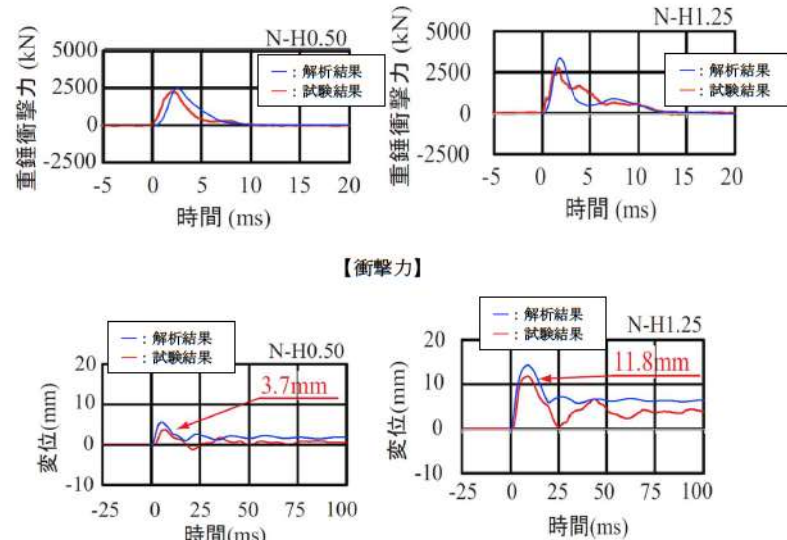
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>図4-2に解析モデルを示す。リング形状は内半径 <input type="text"/> m, 外半径 <input type="text"/> m で解析モデルは対称性から1/4モデルとした。拘束条件としてリング周方向端部は鏡面对称、径方向には自由で、高さ方向は片側が固定されている。計算に用いた材料物性、内圧の最大値は以下の数値を用いた。図4-2に示す圧力衝撃荷重履歴は、最大圧力荷重を1としたときの荷重比の履歴として表している。</p> <p>縦弾性係数 E : <input type="text"/> (MPa) 質量密度 ρ : <input type="text"/> (kg/m³) ポアソン比 ν : <input type="text"/> (-)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div> <p>内圧 P0 : 1.0 (MPa)</p>  <p style="text-align: center;">図 4-2 解析対象モデル</p>		

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

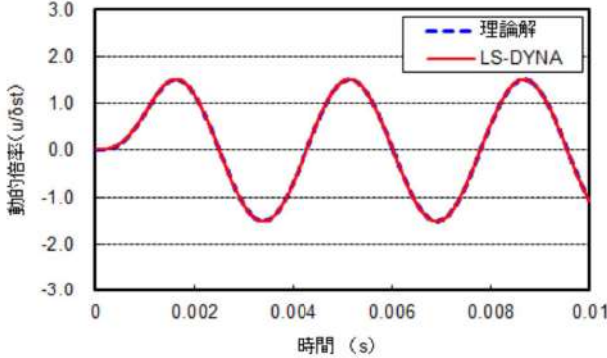
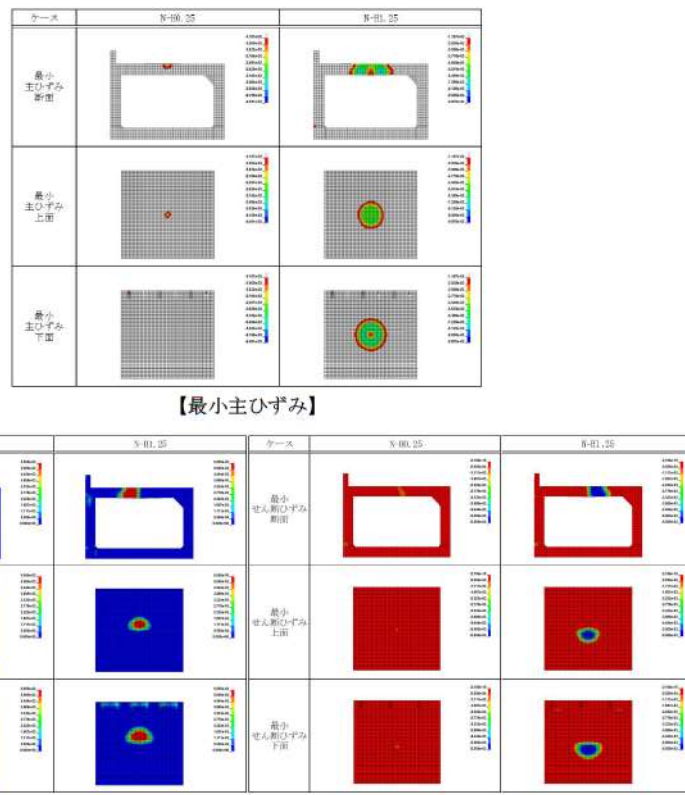
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由												
<p>(a) 円形リングの面内振動の固有振動数</p> <p>参考文献[4]より円形リングの固有振動数の理論解は、表 4-1 に示すように 283.80Hz である。</p> <p>表 4-1 円形リングの固有振動数（理論解）</p> <table border="1" data-bbox="331 316 853 564"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>縦弾性係数 E (MPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td></td> </tr> <tr> <td>密度 (kg/m³)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>固有周波数 (Hz)</td> <td>283.80</td> </tr> <tr> <td>周期 T (s)</td> <td>3.52×10^{-3}</td> </tr> </tbody> </table> <p>LS-DYNAコードの固有値計算値は、図 4-3 に示すように 283.37Hz であり、誤差-0.15%で理論解と良く一致している。</p>  <p>図 4-3 LS-DYNAコードの固有値解析結果 (径方向に振動する固有値モード)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>	項目		縦弾性係数 E (MPa)		ポアソン比		密度 (kg/m ³)		固有周波数 (Hz)	283.80	周期 T (s)	3.52×10^{-3}	<p>(a) コンクリートに作用する最大衝撃力と最大変位</p> <p>鉄筋コンクリートの落下高さに相当する入力エネルギーに対する最大衝撃力とコンクリートの最大変位の比較を図 4-3 に、衝撃力と変位の時刻歴の比較を図 4-4 にそれぞれ示す。試験と解析結果は概ね一致しており、解析結果は試験結果より保守的な値となっている。</p>  <p>図 4-3 衝撃力と変位の最大値の試験結果と解析結果の比較</p>  <p>図 4-4 衝撃力と変位の時刻歴の試験結果と解析結果の比較</p>	<p>検証手法の相違</p>
項目														
縦弾性係数 E (MPa)														
ポアソン比														
密度 (kg/m ³)														
固有周波数 (Hz)	283.80													
周期 T (s)	3.52×10^{-3}													

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

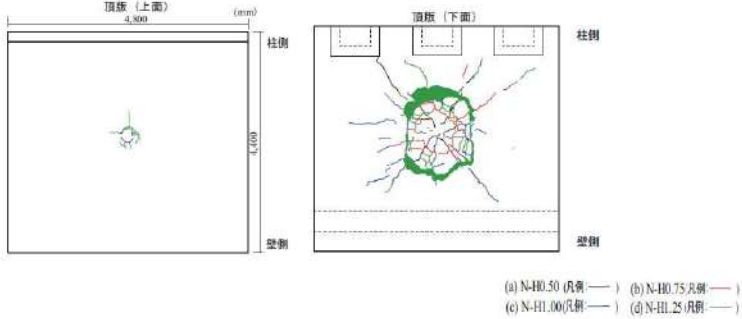
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

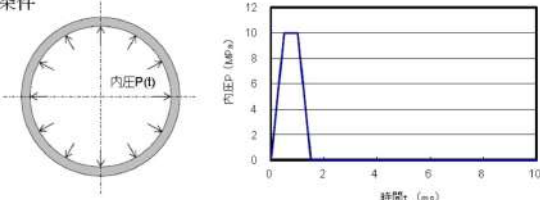
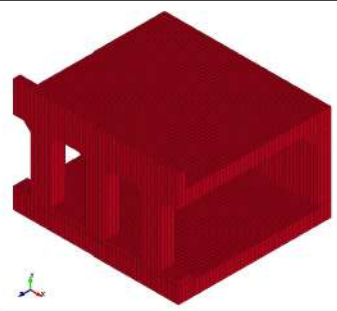
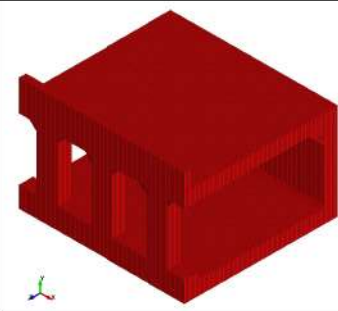
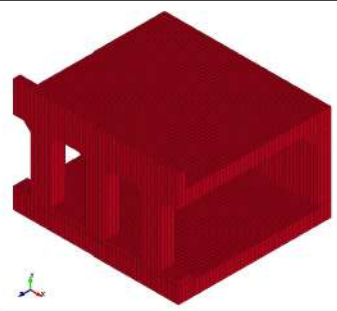
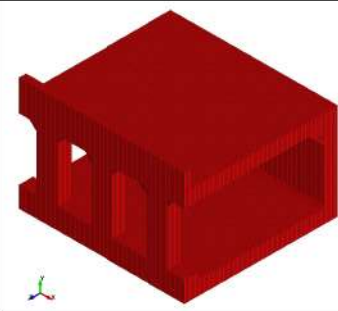
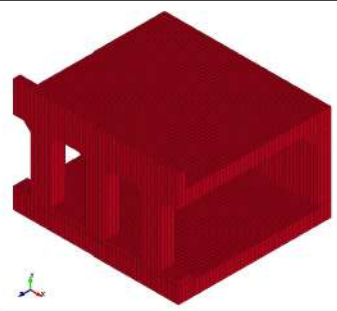
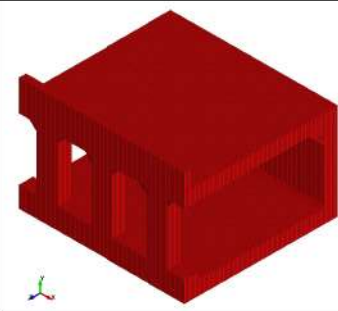
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																	
<div data-bbox="224 223 772 327"> <p>検討した円環の概略寸法 内径：ϕ [] m 壁厚：t [] m 高さ：h [] m</p> <p>検討した円環の物性 ヤング率：E [] Pa 密度：ρ [] kg/m³ ポアソン比：ν []</p> </div> <table border="1" data-bbox="190 383 907 941"> <thead> <tr> <th></th> <th>モデル1 (FCI評価時と同等の要素サイズ)</th> <th>モデル2 (FCI評価時の約1/2の要素サイズ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>要素分割数</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">[]</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">[]</td> </tr> <tr> <td>横断面</td> </tr> <tr> <td>縦断面</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="201 965 1030 1189"> <p>荷重条件</p>  <p>FCIと同程度の荷重作用時間</p> </div> <div data-bbox="336 1212 851 1244"> <p>図4-5 要素サイズの比較検討に用いた円環モデルの概要</p> </div> <div data-bbox="246 1316 817 1356" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>		モデル1 (FCI評価時と同等の要素サイズ)	モデル2 (FCI評価時の約1/2の要素サイズ)	要素分割数	[]	[]	横断面	縦断面	<table border="1" data-bbox="1108 758 1915 1189"> <thead> <tr> <th></th> <th>モデル1</th> <th>モデル2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>要素幅</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">[]</td> </tr> <tr> <td>解析モデル</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="text-align: center;">  </td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1243 1220 1769 1252"> <p>図4-7 要素サイズの比較検討に用いた解析モデルの概要</p> </div> <div data-bbox="1377 1284 1948 1324" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>[]：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>		モデル1	モデル2	要素幅	[]		解析モデル			<p>検証手法の相違</p>
	モデル1 (FCI評価時と同等の要素サイズ)	モデル2 (FCI評価時の約1/2の要素サイズ)																	
要素分割数	[]	[]																	
横断面																			
縦断面																			
	モデル1	モデル2																	
要素幅	[]																		
解析モデル																			

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

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

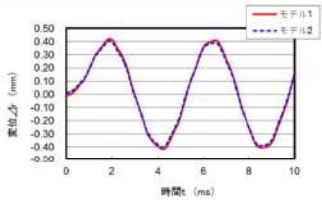
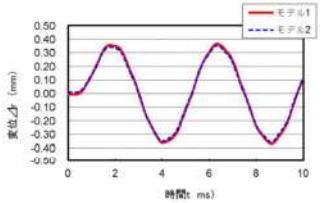
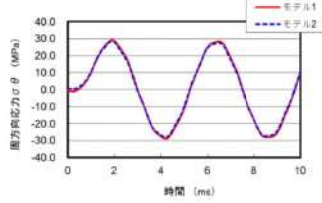
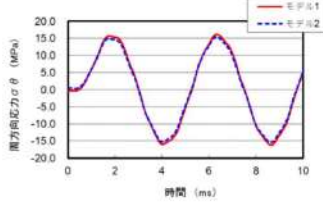
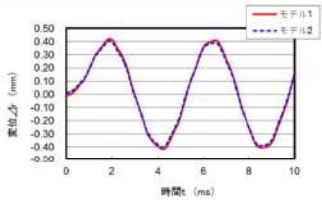
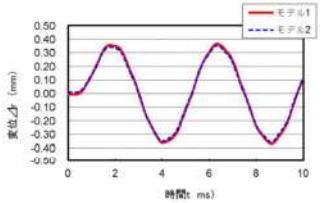
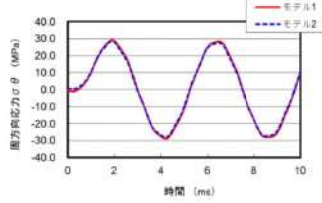
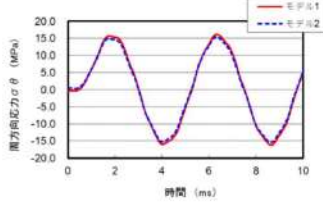
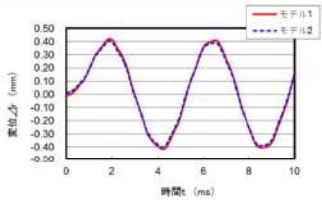
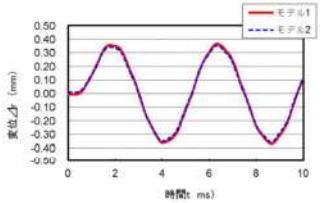
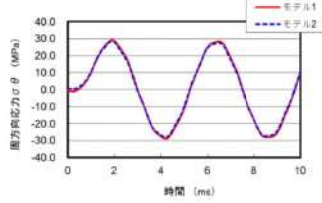
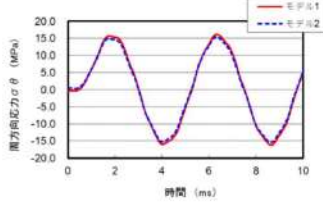
女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由									
<div data-bbox="241 247 913 555" data-label="Image"> </div> <table border="1" data-bbox="203 598 1025 1098"> <thead> <tr> <th></th> <th>評価点：A（内壁）</th> <th>評価点：B（外壁）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>径方向変位</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>周方向応力</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		評価点：A（内壁）	評価点：B（外壁）	径方向変位			周方向応力			<div data-bbox="1167 236 1839 459" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1205 480 1794 746" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1064 837 1921 1050" data-label="Figure"> </div>	<p>検証手法の相違</p>
	評価点：A（内壁）	評価点：B（外壁）									
径方向変位											
周方向応力											

図 4-6 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較

図 4-8 要素サイズの異なるモデルの解析結果の比較

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

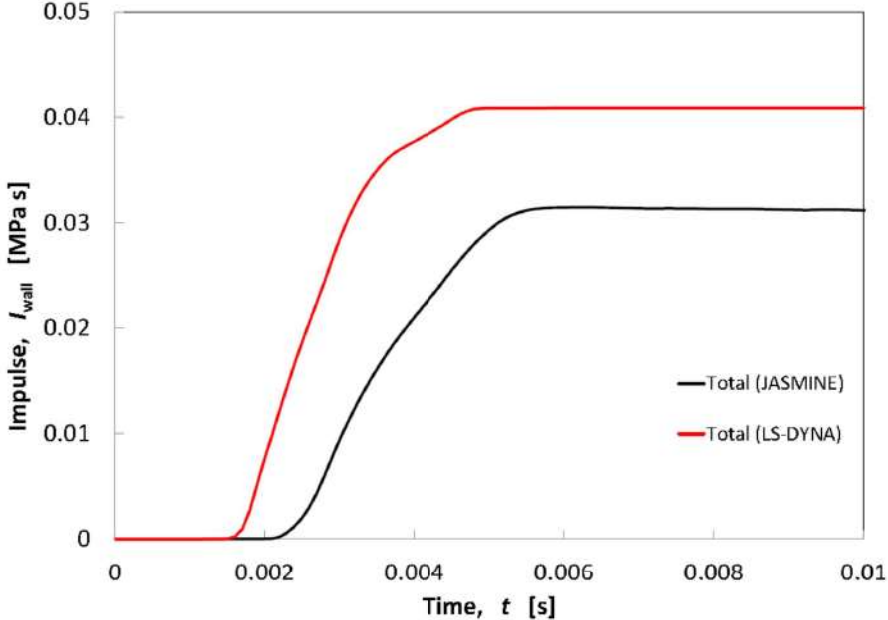
泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
 <p data-bbox="376 869 817 893">添付図 1-1 水蒸気爆発による壁面力積履歴の比較</p>		

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 204 1016 810" style="border: 2px solid black; height: 380px; width: 386px;"></div> <div data-bbox="174 826 922 1348"> <p>添付図 1-2 ペDESTAL側壁の局所位置における力積のコード間比較</p> </div> <div data-bbox="436 1401 1010 1441" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。 </div>		

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="138 172 1043 231">クによる圧力が、以降の反射波による圧力ピークに比べて大きく、爆発初期の圧力波が構造応答評価に対して支配的となることを確認できる。</p> <div data-bbox="190 284 1037 815"> </div> <p data-bbox="450 834 761 861">添付図 2-1 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="392 1054 965 1094" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="421 1062 936 1086">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p data-bbox="1055 172 1960 231">のピークによる圧力が、以降の反射波による圧力ピークに比べて大きく、爆発初期の圧力波が構造応答評価に対して支配的となることを確認できる。</p> <div data-bbox="1064 240 1939 1075"> </div> <p data-bbox="1355 1114 1666 1141">添付図 1-1 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="1379 1182 1951 1214" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="1391 1190 1939 1214">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="152 223 1025 638"> </div> <div data-bbox="336 654 851 686"> <p>添付図 2-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴</p> </div> <div data-bbox="168 702 1025 1085"> </div> <div data-bbox="448 1101 739 1141"> <p>添付図 2-3 応力場分布の推移</p> </div> <div data-bbox="414 1244 996 1284"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1064 279 1960 630"> </div> <div data-bbox="1232 654 1769 686"> <p>添付図 1-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴</p> </div> <div data-bbox="1075 718 1960 1085"> </div> <div data-bbox="1366 1101 1657 1141"> <p>添付図 1-3 応力場分布の推移</p> </div> <div data-bbox="1377 1173 1960 1212"> <p>□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

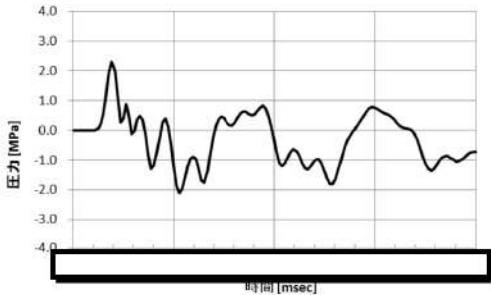

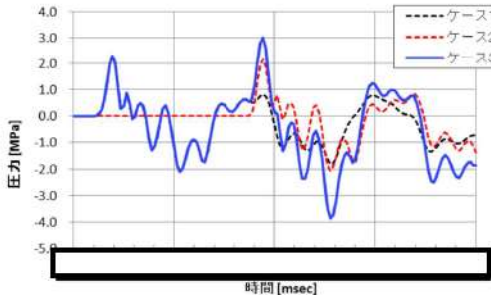
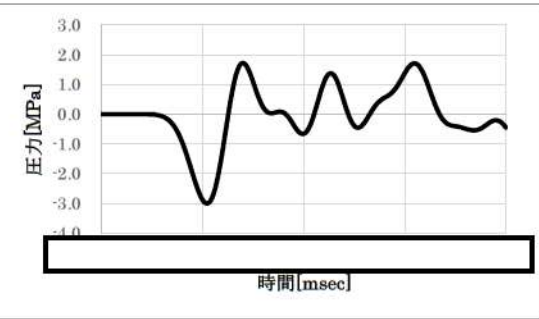
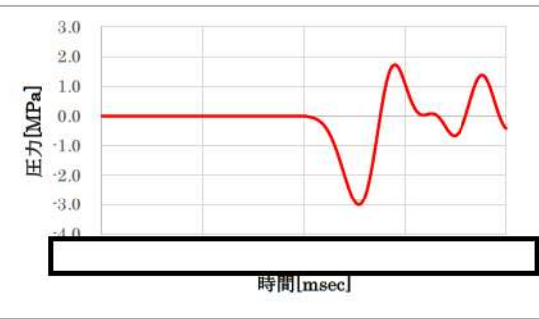
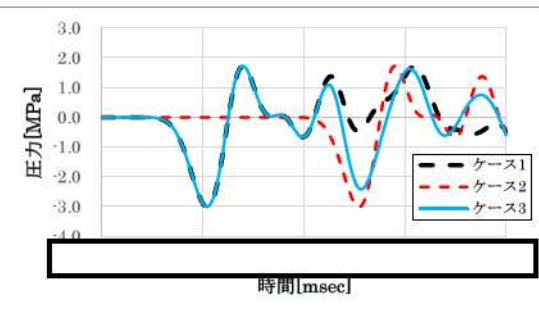
付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（参考資料2）

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="159 220 1025 1054" style="border: 2px solid black; height: 500px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="443 1082 748 1104">添付図 2-4 解析モデルと荷重条件</p> <div data-bbox="421 1252 992 1289" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 20px;"> <p data-bbox="443 1257 958 1279">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1066 188 1962 1054" style="border: 2px solid black; height: 500px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="1357 1082 1662 1104">添付図 1-4 解析モデルと荷重条件</p> <p data-bbox="1384 1220 1944 1246">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p data-bbox="241 220 362 244"><ケース1></p>  <p data-bbox="241 566 362 590"><ケース2></p>  <p data-bbox="241 909 362 933"><ケース3></p>  <p data-bbox="459 1284 739 1308">添付図 2-5 各ケースの圧力履歴</p> <div data-bbox="459 1380 1019 1412" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="481 1380 996 1404">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<p data-bbox="1064 172 1164 196"><ケース1></p>  <p data-bbox="1064 555 1164 579"><ケース2></p>  <p data-bbox="1064 938 1164 962"><ケース3></p>  <p data-bbox="1366 1324 1646 1348">添付図 1-5 各ケースの圧力履歴</p> <div data-bbox="1377 1356 1948 1388" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p data-bbox="1400 1356 1926 1380">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p> </div>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<div data-bbox="168 236 1032 842" style="border: 2px solid black; height: 380px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="331 869 869 893">添付図 2-6 圧力によってペダスタル外側壁面に作用する荷重</p> <div data-bbox="226 930 965 975" style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p data-bbox="264 938 927 962">本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1064 312 1960 823" style="border: 2px solid black; height: 320px; width: 100%;"></div> <p data-bbox="1189 869 1832 893">添付図 1-6 圧力によって原子炉下部キャビティ外側壁面に作用する荷重</p> <p data-bbox="1384 903 1951 927">□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。</p>	

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由
<p>添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について</p> <p>1. ペDESTALの支持機能について</p> <p>炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、ペDESTALが圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。</p> <p>保守的な想定として、内側鋼板、コンクリート及び縦リブ構造材を無視し、ペDESTALの外側鋼板のみを考慮した場合の降伏強度について以下に評価する。</p> <p>ペDESTALの外側鋼板の断面積は、</p> $A_0 = \pi/4 \times (D_0^2 - D_1^2) = \boxed{} \text{ mm}^2$ <p>外側鋼板の降伏応力は、</p> $S_y = 490 \text{ MPa}$ <p>よって、外側鋼板の降伏耐力は、</p> $P_y = \boxed{} \text{ mm}^2 \times 490 \text{ MPa} = \boxed{} \text{ kN}$ <p>となる。一方、ペDESTAL評価箇所に加わる主な荷重としては、</p> <p>① 圧力容器からの作用荷重（約 $\boxed{}$ ton） ② 原子炉遮へい壁からの作用荷重（約 $\boxed{}$ ton） ③ ペDESTALの基礎に直接作用する荷重（約 $\boxed{}$ ton）</p> <p>があり、鉛直方向の荷重は合計で約 $\boxed{}$ kN（$\boxed{}$ ton）である。したがって、外側鋼板のみでもペDESTALに加わる荷重に対して降伏することはない。</p> <p>以上に示すように、ペDESTALの支持機能は外側鋼板のみで成立するため、炉外 FCI 時の水蒸気爆発評価においては、衝撃荷重によるペDESTAL外側鋼板の健全性への影響を確認する。</p> <p>2. 許容ひずみについて</p> <p>鋼板の健全性は、爆発荷重によって生じるひずみが許容ひずみ範囲内であることをもって確認する。</p> <p>炉外 FCI 評価に用いるペDESTAL鋼板の許容ひずみは、材料データの既往知見（NUPEC 試験^[1]）の最大荷重点でのひずみより 10%としている。以下ではその設定の考え方について示す。</p> <p>ペDESTAL鋼板の材質は SPV490 である。SPV490 の JIS 規格では破断ひずみを 19%以上である。これに対して、既往知見の一つである NUPEC 試験データに SPV490 の最大荷重点でのひずみ 10%がある。</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">本資料のうち、枠囲み部分は商業秘密に属しますので公開できません。</p>	<p>添付2 原子炉下部キャビティ構造応答評価における判定基準について</p> <p>1. 原子炉下部キャビティ壁の支持機能について</p> <p>炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、原子炉下部キャビティ壁が圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。</p> <p>2. 許容ひずみについて</p> <p>鉄筋コンクリート構造の破壊モードとしては、引張側の鉄筋が破断する曲げ引張破壊、コンクリートにせん断力が作用し脆性的に破壊されるせん断破壊、及び圧縮側のコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊が考えられ、鉄筋コンクリートの健全性は、爆発荷重によって生じるひずみを各破壊モードにおける許容値と比較評価し、構造が全体的に崩壊する挙動とならないことをもって確認する。</p> <p>曲げ引張破壊モードにおいては、JSME S NX3-2015^[1]で示される破断ひずみを真値に換算した値 11.9%を鉄筋の相当塑性ひずみの許容ひずみとして採用する。</p>	<p>圧力容器支持構造、及び評価手法の相違</p>

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

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

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

泊発電所3号炉 有効性評価 比較表

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

女川原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉	相違理由																		
<div data-bbox="367 212 875 667" style="border: 1px solid black; height: 285px; width: 227px; margin-bottom: 20px;"></div> <div data-bbox="264 724 936 1155"> <p>添付図 3-1 炉外 FCI 評価における外側鋼板の応力コンター図（最大応力発生時）及び代表位置における応力履歴</p> </div> <div data-bbox="450 1321 1023 1358" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。</p> </div>	<div data-bbox="1375 209 1637 231" style="text-align: center;">添付表 3-1 LS-DYNA 解析結果</div> <table border="1" data-bbox="1108 236 1910 523"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>評価パラメータ</th> <th>発生値</th> <th>許容値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鉄筋</td> <td>塑性ひずみ</td> <td>0%</td> <td>11.9%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">コンクリート</td> <td>せん断ひずみ</td> <td>0.3%</td> <td>0.5%</td> </tr> <tr> <td>最小主ひずみ (下部(Fc24))</td> <td>1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)</td> <td>1次遮蔽壁全断面で1114 μ以上とならないこと</td> </tr> <tr> <td>最小主ひずみ (上部(Fc36))</td> <td>1273 μ</td> <td>1次遮蔽壁全断面で1349 μ以上とならないこと</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1115 639 1895 928" style="margin-top: 20px;"> <p>(a) 最小値発生箇所 (b) C-C断面</p> </div> <p data-bbox="1128 1018 1888 1040" style="text-align: center;">添付図 3-1 爆発発生から 0.2 秒後までのコンクリートの最小主ひずみの最小値の分布</p>	部位	評価パラメータ	発生値	許容値	鉄筋	塑性ひずみ	0%	11.9%	コンクリート	せん断ひずみ	0.3%	0.5%	最小主ひずみ (下部(Fc24))	1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)	1次遮蔽壁全断面で1114 μ 以上とならないこと	最小主ひずみ (上部(Fc36))	1273 μ	1次遮蔽壁全断面で1349 μ 以上とならないこと	
部位	評価パラメータ	発生値	許容値																	
鉄筋	塑性ひずみ	0%	11.9%																	
コンクリート	せん断ひずみ	0.3%	0.5%																	
	最小主ひずみ (下部(Fc24))	1167 μ (トンネル内壁及び 階段室の表層のみ)	1次遮蔽壁全断面で1114 μ 以上とならないこと																	
	最小主ひずみ (上部(Fc36))	1273 μ	1次遮蔽壁全断面で1349 μ 以上とならないこと																	