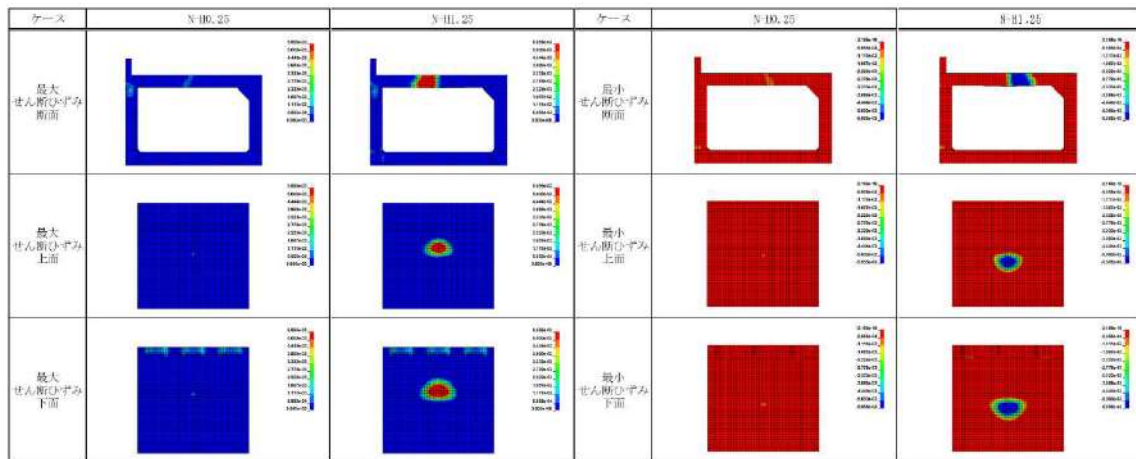


【最小主ひずみ】



【最大せん断ひずみ】

【最小せん断ひずみ】

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

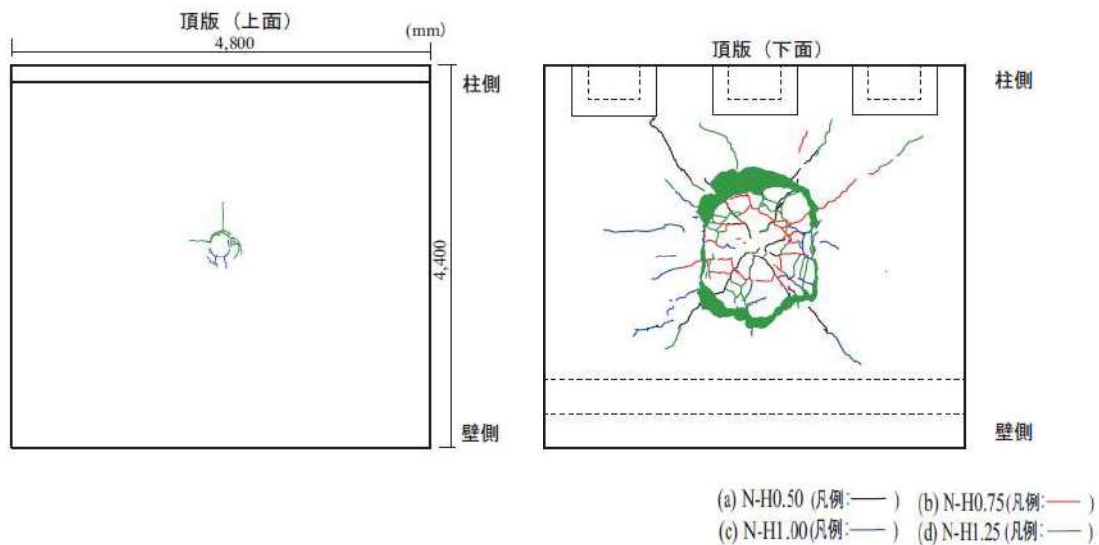


図 4-6 試験のひび割れ状況

## (2) メッシュ分割の感度解析

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 要素及び Lagrange Shell 要素の要素幅を、 に設定している。

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、 でメッシュ分割は妥当である。

: 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。

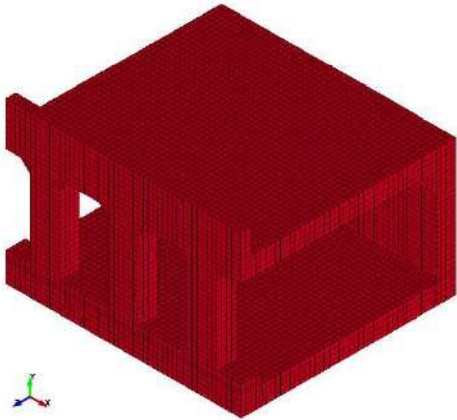
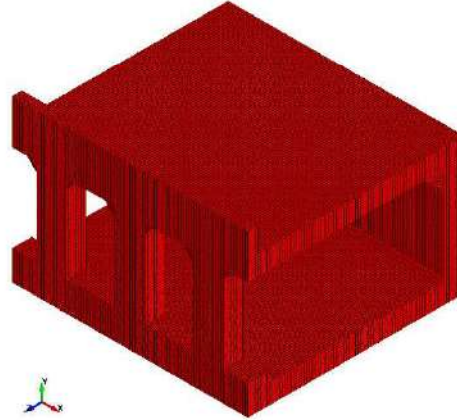
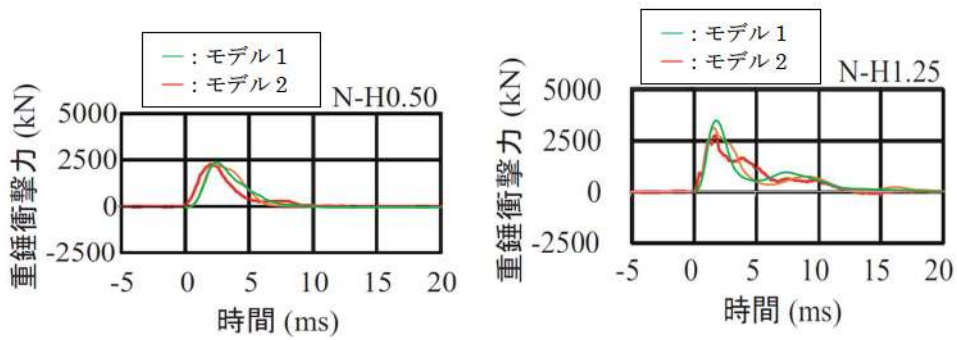
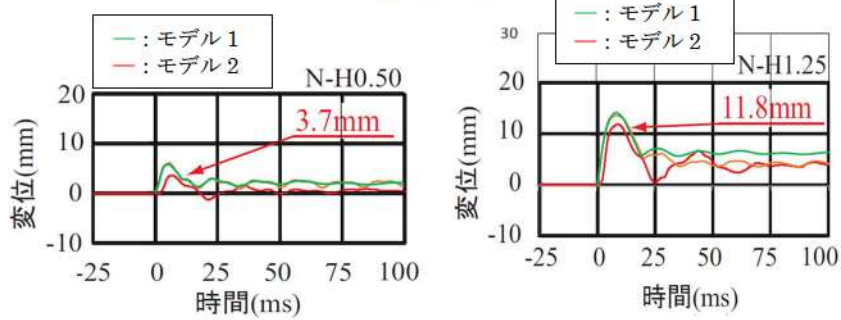
	モデル1	モデル2
要素幅		
解析モデル		

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

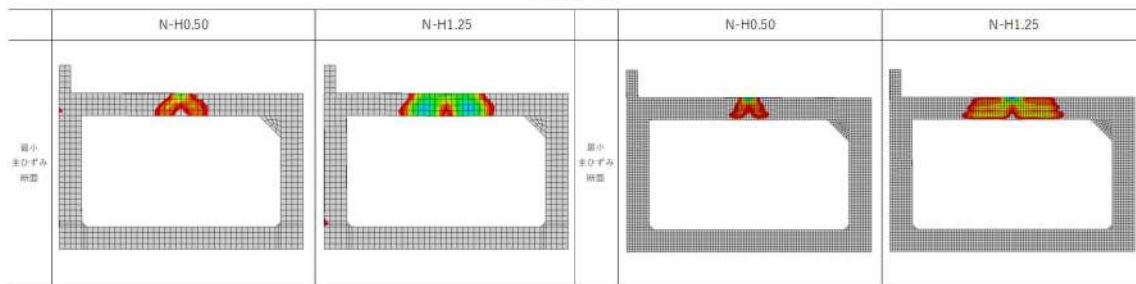
: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



【衝撃力】



【変位】



【モデル1】

【モデル2】

【最小主ひずみ分布】

図 4-8 要素サイズの異なるモデルの解析結果の比較


## 5. 参考文献

- [1] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER' S MANUAL VOLUME1, 2007
- [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
- [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
- [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



## 添付 1 反射波の考慮について

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。

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  mm）を設定し解析している。

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に、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。

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。

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。

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。

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。

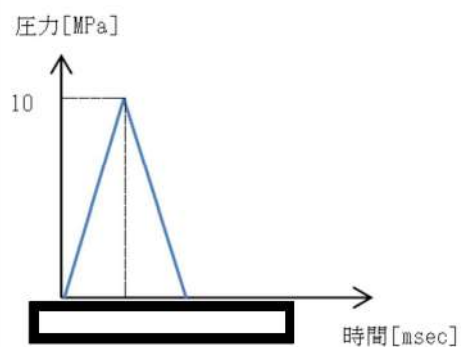
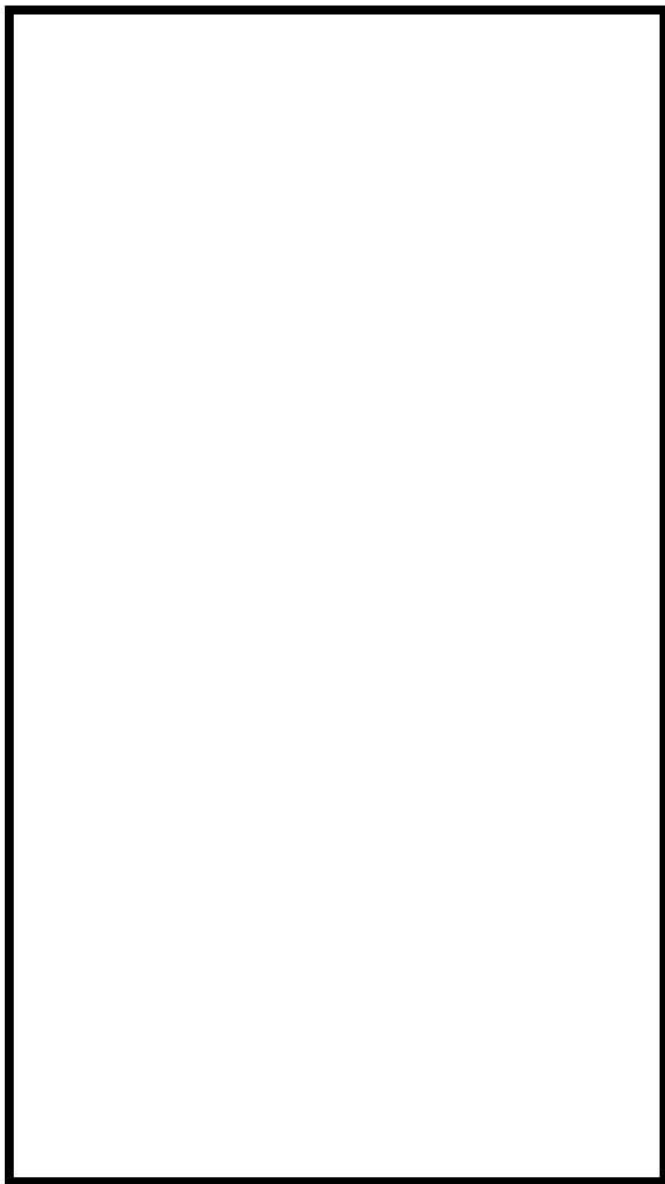
また、同様のモデルを用いて反射波の重畳の効果についても確認した。解析モデルと荷重条件を添付図 1-4 に示す。添付図 1-4 に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点の Lagrange 要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図 1-5 に示す。

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。


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。

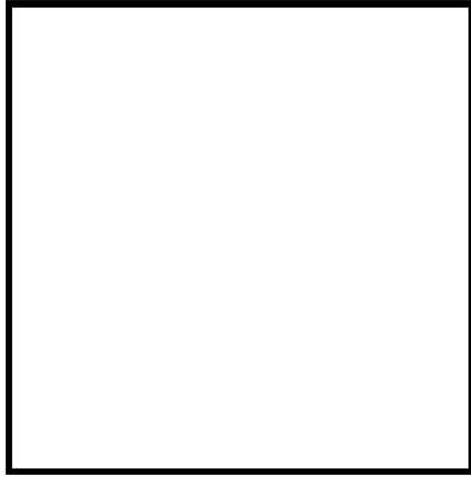
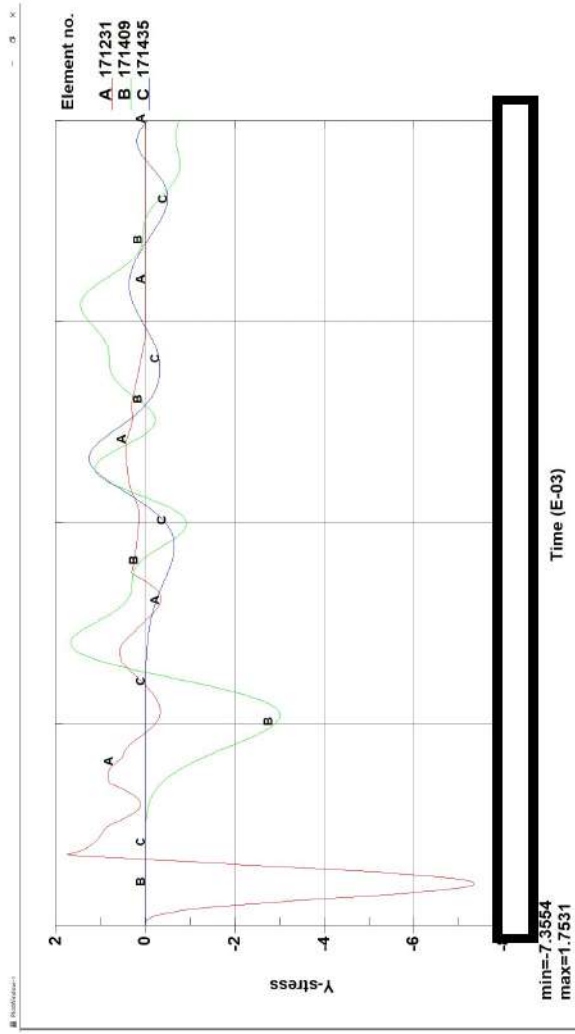
今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間（ミリ秒単位）で作用する事象であり、爆発エネルギーの開放直後の圧力波による発生応力が支配的となると考えられる。実際の解析評価においても、添付図 1-6 に示したように、水蒸気爆発によって生じる圧力波の爆発初期のピークによる圧力が、以降の反射波による圧力ピー

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。



添付図 1-1 解析モデルと荷重条件

 : 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。

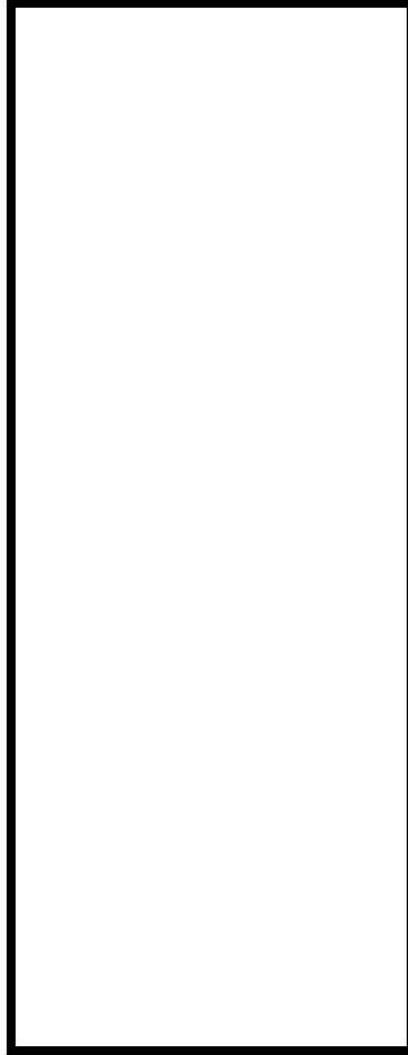
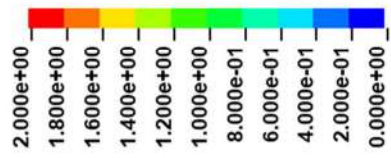


添付図 1-2 Lagrange 要素の代表点における応力場の履歴

: 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。



応力値 (MPa)



添付図 1-3 応力場分布の推移

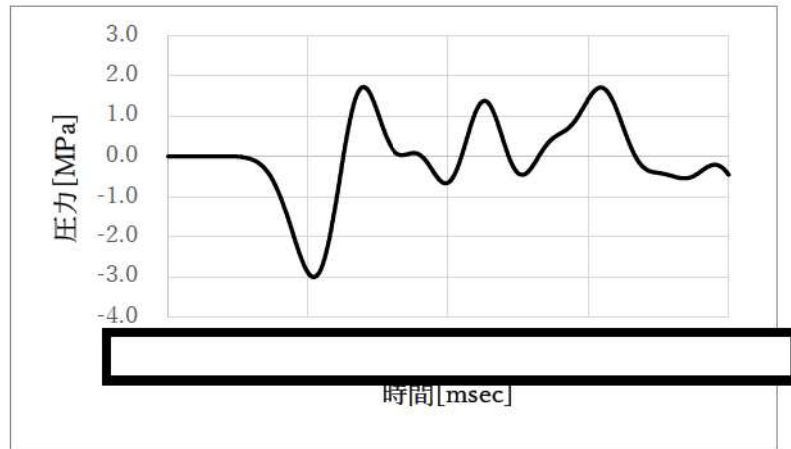
□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



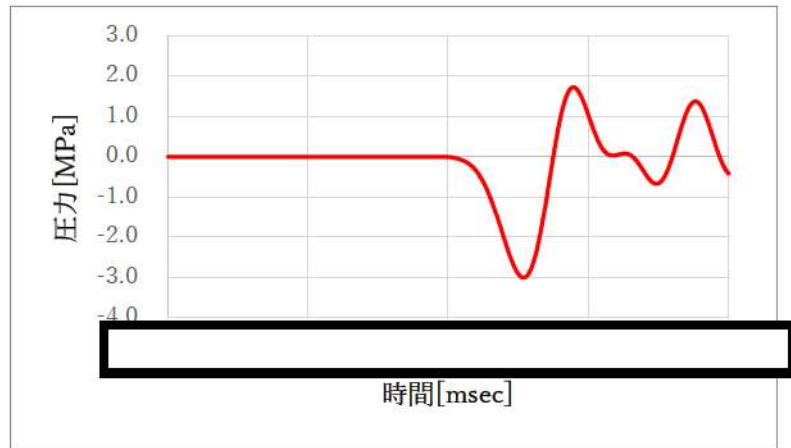
添付図 1-4 解析モデルと荷重条件

: 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。

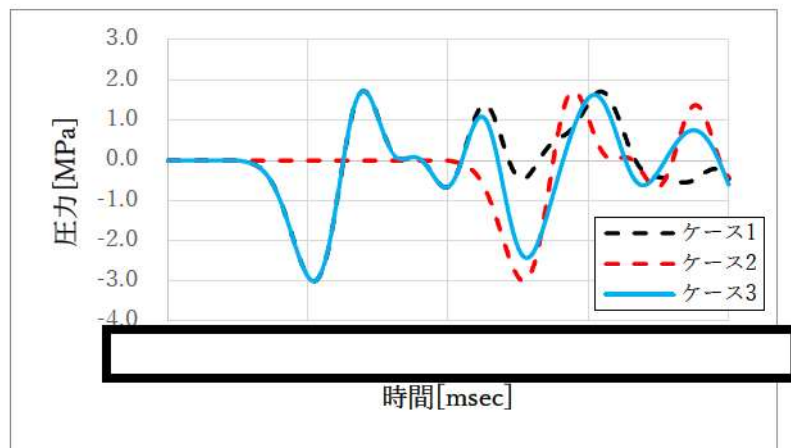
<ケース 1>



<ケース 2>

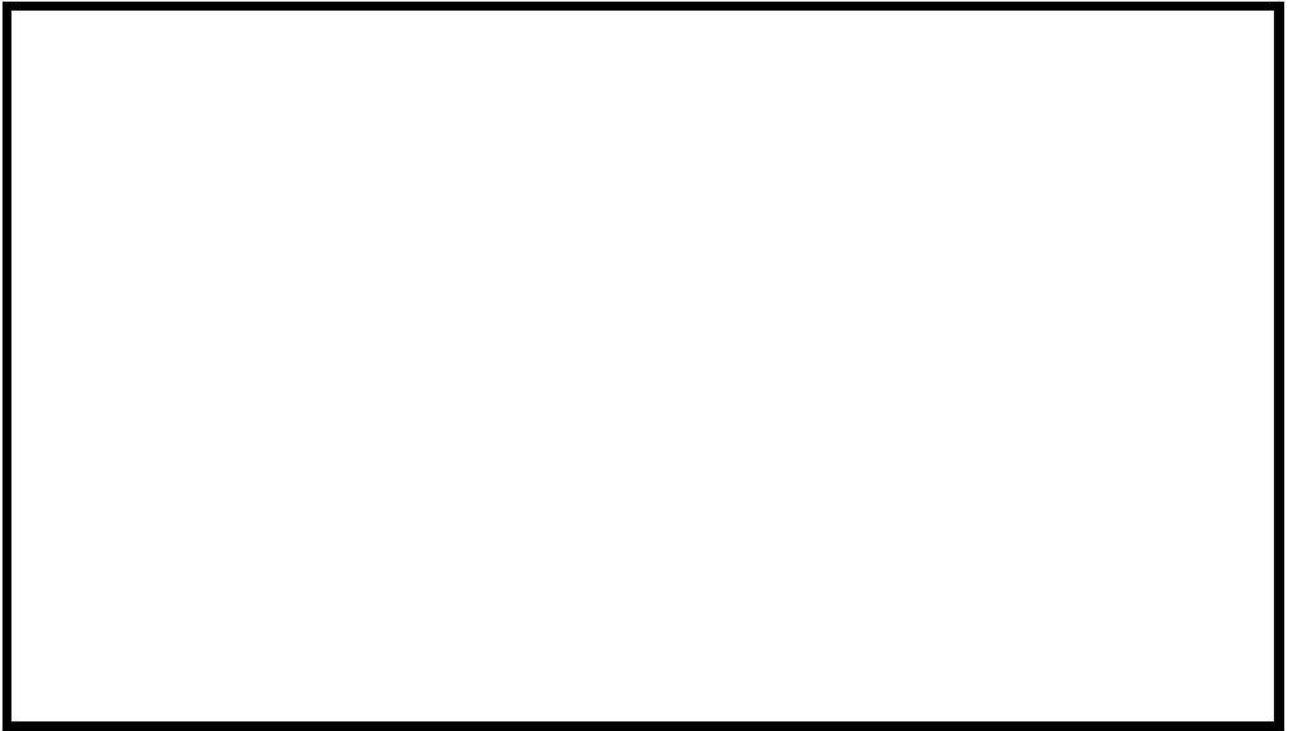


<ケース 3>



添付図 1-5 各ケースの圧力履歴

□ : 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。



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

: 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。

## 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

### 1. 原子炉下部キャビティ壁の支持機能について

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。

### 2. 許容ひずみについて

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。

曲げ引張破壊モードにおいては、JSME S NX3-2015<sup>[1]</sup>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。

せん断破壊モードにおいては、NEI07-13<sup>[2]</sup>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。

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 ( $Fc24:1114\mu$ ,  $Fc36:1349\mu$ ) 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。

### 3. 代表的な解析結果と判断基準に対する傾向の確認

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  $1167\mu$  に達しており、許容ひずみ  $1114\mu$  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。

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。

### 4. 参考文献

- [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

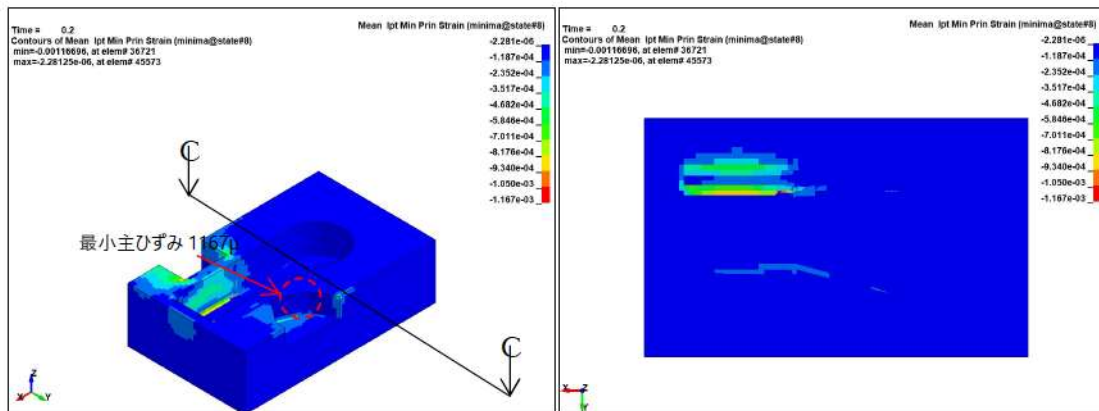


ート製格納容器編)」，日本機械学会，JSME S NX3-2015，2015年9月

- [2] “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design”，Nuclear Energy Institute(NEI)，NEI07-13(Rev. 8P)，2011.4

添付表 3-1 LS-DYNA 解析結果

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 $\mu$ (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 $\mu$ 以上とならないこと
	最小主ひずみ (上部(Fc36))	1273 $\mu$	1次遮蔽壁全断面で1349 $\mu$ 以上とならないこと



(a) 最小値発生箇所

(b) C-C 断面

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