

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-440-1 改 12
提出年月日	平成 30 年 7 月 26 日

## 工事計画に係る補足説明資料

### 補足-440-1 【竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書 の全般の補足説明】

平成 30 年 7 月

日本原子力発電株式会社

## 補足説明資料目次

### I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
  - 1.1 風力係数について
  - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
  - 1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について
  - 1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について
  
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
  - 2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について
  - 2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について
  - 2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について
  - 2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について
  - 2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について
  - 2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について
  - 2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について
  - 2.8 飛来物として設定する車両の設定について
  - 2.9 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
  - 2.10 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について
  - 2.11 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について
  - 2.12 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
  
3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料
  - 3.1 海水ストレーナの評価対象部位について
  
4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
  - 4.1 固縛装置の設計における保守性について
  - 4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について
  - 4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について
  
5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料
  - 5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について
  - 5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について
  
6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料
  - 6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について

- 7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料
  - 7.1 シャックルの許容限界について
  - 7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
  - 7.3 金網の設計裕度の考え方
  - 7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて
  - 7.5 ワイヤロープの初期張力について
  - 7.6 補助金網の影響について
  - 7.7 防護対策施設の設計の考え方について
  - 7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について
  
- 8. 排気管，放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料
  - 8.1 ディーゼル発電機排気管の許容応力について

7.8 : 今回ご説明分

## I. はじめに

### 1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するものである。  
本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (1/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
<p>1. 強度計算の方針に関する補足説明資料</p>	
<p>1.1 風力係数について</p>	<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレナの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機海水ポンプの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレナの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
<p>1.2 強度計算時の施設の代表性について</p>	<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレナの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機用海水ストレナの強度計算書」                      V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-9 「配管及び弁の強度計算書」                      V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管及びベント管の強度計算書」</p>
<p>1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について</p>	<p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p>

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (2/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について	V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」 V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」 V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」 V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機海水ポンプの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」 V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」 V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」 V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料	
2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について	
2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について	
2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について	V-3-別添 1-1-1 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」
2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について	
2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について	

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (3/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料（竜巻）	該当添付資料
2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について	V-3-別添 1-1-1 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」
2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について	
2.8 飛来物として設定する車両の設定について	
2.9 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について	
2.10 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について	
2.11 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について	
2.12 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について	

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (4/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料				
3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="226 402 1034 518">3.1 海水ストレーナの評価対象部位について</td> <td data-bbox="1034 402 2011 518">V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」</td> </tr> </table>	3.1 海水ストレーナの評価対象部位について	V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」		
3.1 海水ストレーナの評価対象部位について	V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」				
4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="226 571 1034 687">4.1 固縛装置の設計における保守性について</td> <td data-bbox="1034 571 2011 925" rowspan="3">V-3-別添 1-3 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」 V-3-別添 1-3-1 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書」</td> </tr> <tr> <td data-bbox="226 687 1034 804">4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について</td> </tr> <tr> <td data-bbox="226 804 1034 925">4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について</td> </tr> </table>	4.1 固縛装置の設計における保守性について	V-3-別添 1-3 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」 V-3-別添 1-3-1 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書」	4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について	4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について
4.1 固縛装置の設計における保守性について	V-3-別添 1-3 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」 V-3-別添 1-3-1 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書」				
4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について					
4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について					
5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="226 978 1034 1094">5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について</td> <td data-bbox="1034 978 2011 1212" rowspan="2">V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」</td> </tr> <tr> <td data-bbox="226 1094 1034 1212">5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について</td> </tr> </table>	5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について	V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」	5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について	
5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について	V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」				
5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について					
6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="226 1265 1034 1378">6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について</td> <td data-bbox="1034 1265 2011 1378">V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</td> </tr> </table>	6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について	V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」		
6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について	V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」				



表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (5/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料	
7.1 シャックルの許容限界について	
7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について	
7.3 金網の設計裕度の考え方	
7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて	V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」
7.5 ワイヤロープの初期張力について	V-3-別添 1-2-1-2 「防護鋼板の強度計算書」
7.6 補助金網の影響について	V-3-別添 1-2-1-3 「架構の強度計算書」
7.7 防護対策施設の設計の考え方について	
7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について	
8. 排気管、放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料	
8.1 ディーゼル発電機排気管の許容応力について	V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管及びベント管の強度計算書」

## 5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について

竜巻影響評価においては、設計荷重に対し、設計対象施設の構造健全性等が維持され、安全機能が維持されることを確認することとされている。

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という。）において、「安全機能」は次のように定義されている。

五 「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であって、次に掲げるものをいう。

イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能

ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能

ここで、主排気筒の有する安全機能、つまり放射性物質の放出低減機能は、「発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能」に該当する。

しかしながら、竜巻を起因として放射性物質の放出を伴う事象が発生することはないことから、竜巻影響評価においては、主排気筒に求められる安全機能要求はないと判断している。（表 1-1 参照）また、主排気筒に損傷が確認された場合は、安全上支障の無い期間に損傷箇所の補修を行うこととする。

設置許可基準規則の安全機能には該当しないが、通常運転時においても、気体廃棄物等の放出により主排気筒からの高所放出をしており、本書では、ALARA の観点から、通常運転時に損傷した主排気筒から放出した場合の被ばく評価を実施する。なお、通常運転時に放出される放射性物質の放出量は、プラント停止時における放出も考慮している。

表 1-2 に通常運転時（プラント停止時含む）において損傷した主排気筒から放出した場合に想定される被ばく評価の結果を示す。その結果、主排気筒が破損した場合においても通常運転時（プラント停止時含む）における線量目標値を満足することを確認した

以 上

表 1-1 設計基準事故（環境への放射性物質の異常な放出を伴う事象）に関する竜巻による影響

設計基準事故(環境への放射性物質の異常な放出を伴う事象)	事象の概要	評価結果
放射性気体廃棄物処理施設の破損	放射性気体廃棄物施設の一部が破損し、貯留されていた気体状の放射性物質環境に放出される。	放射性気体廃棄物処理設備である活性炭式希ガスホルドアップ装置、隔離弁等は原子炉建屋及びタービン建屋内にあり、竜巻により破損することはない。
燃料集合体の落下	燃料交換時に燃料集合体が落下して破損し、放射性物質が環境に放出される。	使用済燃料プールがある原子炉建屋原子炉棟には、有意な飛来物は侵入しない。また、竜巻準備体制発令時は燃料交換作業を中止する運用とする。したがって、竜巻により燃料集合体が落下・破損することはない。
原子炉冷却材喪失	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管あるいはこれに付随する機器等の破損等により、冷却材が系外に流出する。	原子炉冷却材圧力バウンダリは原子炉格納容器内及び原子炉建屋原子炉等内にあり、竜巻により破損することはない。
制御棒落下	制御棒駆動機構あるいは同ハウジングの損傷等により制御棒が炉心外に落下し、冷却材が系外に流出する。	制御棒駆動機構あるいは同ハウジングは原子炉格納容器内にあり、竜巻により破損することはない。

表 1-2 通常運転時（プラント停止時含む）における主排気筒破損時の被ばく評価結果

被ばく経路	主排気筒破損時の 1 年間の累積線量* ( $\mu\text{Sv/y}$ )	目標値 ( $\mu\text{Sv/y}$ )
希ガス	約 10	—
よう素	約 24	—
液体（よう素除く）	約 5.2	—
合計	約 39	50

注記\* 評価条件は以下のとおり。

- ・補修に必要な期間として 6 ヶ月を想定し、最初の 6 ヶ月を地上放出、補修完了後の 6 ヶ月を高所放出とした。
- ・地上放出は放出源有効高さ 0m とし、気象データは地上観測データとした。
- ・その他の条件は、設置変更許可申請（平成 26 年 5 月 20 日）と同じとした。

## 7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について

## 1. 概要

本資料は、V-3-別添1「竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書」のうち、V-3-別添1-2-1-2「防護鋼板の強度計算書」及びV-3-別添1-2-1-3「架構の強度計算書」に関する補足説明資料である。

防護鋼板及び架構を構成する鋼製部材については、それぞれV-3-別添1-2-1-2及びV-3-別添1-2-1-3において3次元FEMモデルを用いた飛来物衝突評価を実施しており、これらの評価における鋼材の動的物性値の設定は、電力中央研究所報告「竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案（研究報告：N15004）」（以下、電中研報告という）において実施している重錘の自由落下衝突試験のための事前解析の解析手法を参考に実施している。

本資料においては、上述の動的物性値の設定手法について示すとともに、参照した電中研報告における解析手法（以下、電中研解析手法という）が重錘の自由落下衝突試験結果と整合していること、及び当社の設定条件が電中研報告の試験結果に対し保守性を有していることについて記載する。

設定条件の保守性に係る評価フローを図1-1に示す。

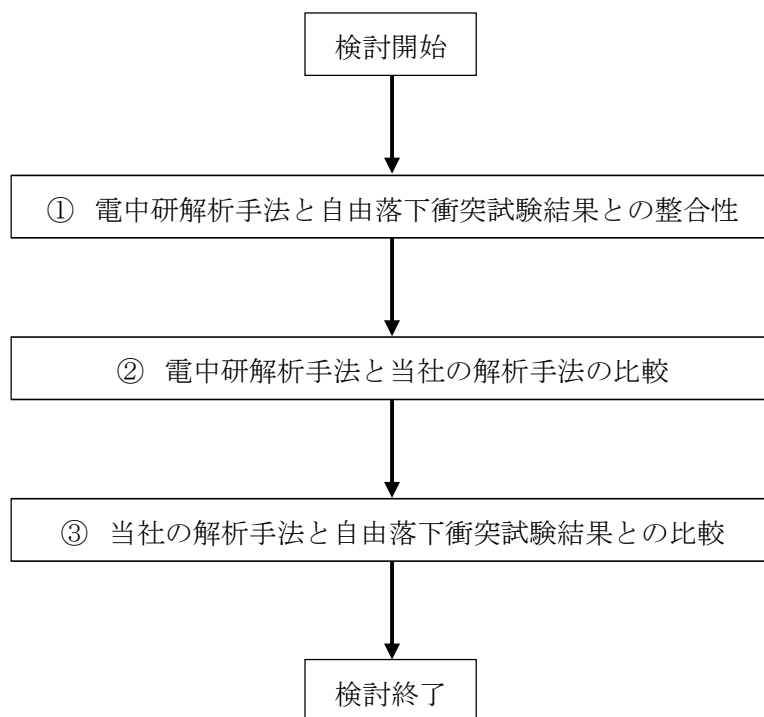


図 1-1 防護鋼板解析手法の保守性に関する評価フロー

## 2. 動的物性値の選定手法

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用している。

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{pl}^n) \left\{ 1 + (\dot{\varepsilon}_{pl}/D)^{1/q} \right\}$$

ここで、 $\sigma_{eq}$ は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 $\varepsilon_{pl}$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{pl}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式（WES 式）にフィッティングする様に選定した。

以下に、選定したパラメータ（表 2-1 参照）とその選定方法を示す。

表 2-1 Cowper-Symonds 式へ入力するパラメータ（防護鋼板）

	防護鋼板
材料	SM490
B	
n	
D (s <sup>-1</sup> )	
q	

降伏応力及び引張強さに関する WES 式は以下のとおり。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left[ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left( \frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^8/\dot{\varepsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8/\dot{\varepsilon}_0)} \right\} \right]$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left[ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left( \frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^9/\dot{\varepsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9/\dot{\varepsilon}_0)} \right\} \right]$$

ここで、 $\sigma_Y$ 、 $\sigma_{Y0}$ は降伏応力、 $\sigma_T$ 、 $\sigma_{T0}$ は引張強さ、T、 $T_0$ は温度、 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ はひずみ速度、Eはヤング係数を示す。

図 2-1 に WES 式及び Cowper-Symonds 式により求めたひずみ速度-真応力の関係を示す。また、ひずみ速度-真応力の関係を求める際に用いたパラメータを表 2-2 に示す。

鋼製部材の動的物性値を選定するにあたり、以下の項目を考慮した。

- (1) 貫通評価における許容値は破断ひずみとしていることから、Cowper-Symonds 式により算出した引張強さが WES 式で算出した値にフィッティングする様、パラメータを適切に設定した。
- (2) (1)と併せて、電中研報告書では、ひずみ速度 10 s<sup>-1</sup> 近傍において、Cowper-Symonds 式で算出した引張応力が WES 式で算出したものよりも小さくなるように設定し、貫通評価に対して保守的になるように配慮していることを参考に、ここではひずみ速度 0.1~100 s<sup>-1</sup> の範囲において WES 式で算出した値よりも小さくなるように設定した。



表 2-1 に示すパラメータを適用したときの動的物性値について、WES 式による値と合わせ  
 図 2-1 に示す。

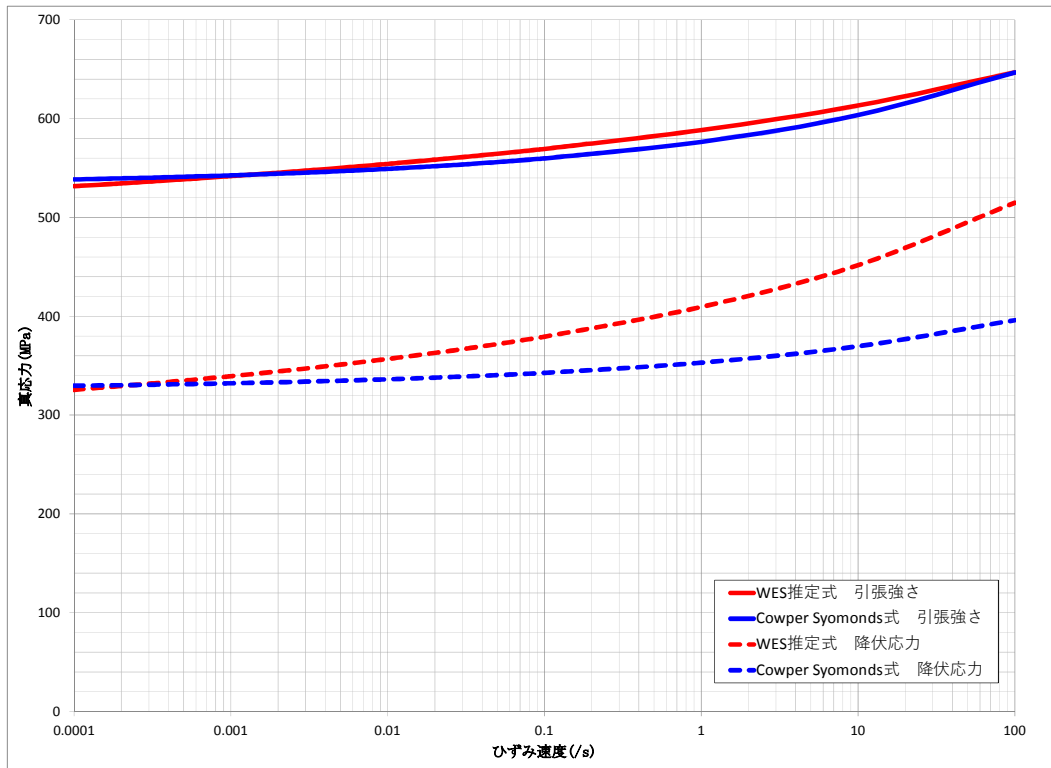


図 2-1 防護鋼板におけるひずみ速度-真応力曲線

### 3. 電中研解析手法と自由落下衝突試験結果との整合性について

上記の動的物性値設定手法の設定に際し参照した、電中研解析手法の妥当性について以下に示す。

#### 3.1 事前解析における塑性ひずみ及び試験結果における貫通有無について

電中研報告においては、事前解析にて得られた衝突エネルギーと鋼板に発生する相当塑性ひずみの関係を求め、試験の重錘落下高さに反映を行っている。その際に得られた事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無の関係を表3-1に示す。

表 3-1 事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無

試験(解析) ケース	試験条件			試験結果による貫通有無	事前解析で得られた相当塑性ひずみ(%)
	飛来物	被衝突体 <sup>※1</sup>	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有	17.4
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有	14.9
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	14.1
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	13.0

※1：有効開口部サイズ 1.4m×1.4m×t9mm，接続部 2 辺固定

上記の試験結果及び事前解析結果より、試験ケース SS-2 においては、貫通が発生しており、事前解析により得られた相当塑性ひずみは、14.9%である。また、試験ケース SS-4 においては、貫通が発生しておらず、事前解析により得られた相当塑性ひずみは、14.1%である。したがって、試験結果及び事前解析結果より、SS400 鋼板については、相当塑性ひずみが 14.1%~14.9%の間で貫通が発生することが考えられる。

#### 3.2 SS400 鋼板の引張試験における塑性ひずみについて

表 3-2 に自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の引張試験で得られた材料特性値を示す。ここで、試験に使用した被衝突体である SS400 鋼板の材料試験値から得られた引張ひずみに相当する塑性ひずみが 14.9%であることから、被衝突体である SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.9%付近に達した場合に飛来物が貫通することが考えられる。

表 3-2 自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の材料試験値他

部材	材料試験結果 (平均値)				引張ひずみを真 ひずみに換算し た値 (-)	塑性ひずみ(左 記から弾性ひ ずみを差し引 いた値)
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	引張ひずみ (-)	ヤング率 (GPa)		
鋼板(SS400)	322.3	474.4	0.1624	209.7	0.151	0.149

### 3.3 電中研解析手法及び自由落下衝突試験結果と材料試験値の整合性

3.1により事前解析における相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無より、飛来物衝突により発生する SS400 鋼板の相当塑性ひずみが 14.1~14.9%に達した場合に貫通することが考えられること、3.2の SS400 鋼板の引張試験における材料試験値より SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.9%であることから、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験結果は材料試験結果とよく整合していることが確認できる。

したがって、電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合している解析手法であるといえる。表 3-3 に、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果並びに材料試験から得られた結果を示す。

表 3-3 電中研報告書における事前解析，自由落下衝突試験及び材料試験から得られた結果

事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果	材料試験から得られた結果	結論
SS400 鋼板については、飛来物衝突により相当塑性ひずみが 14.1%~14.9%に達した場合に貫通する。	自由落下衝突試験に使用した SS400 鋼板の引張ひずみに相当する塑性ひずみが 14.9%	左記より電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合しているといえる。

### 4. 電中研解析手法と当社の解析手法の比較について

電中研解析手法と当社の解析手法の比較を表 4-1 に示す。本比較表より、当社の解析手法については、「静的な物性値の出典」及び「破断ひずみ (破断条件)」において保守性を有しており、その他については差異がないことから、当社の解析手法は電中研解析手法に比べ保守性を有しているといえる。

表 4-1 電中研解析方法と当社の解析手法の差異

比較項目		電中研解析手法	当社の解析手法	備考
解析コード		AUTODYN	LS-DYNA	「原子力安全基盤機構：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 (JNES/SSD08-014,平成20年11月)」におい て、AUTODYNとLS-DYNAとの間でコードに依存 する特性は少ないことが確認されていること から、解析コードに有意な差はないといえ る。
材料 物性値	静的な物性値 の出典	材料試験値	JIS 規格値	電中研解析手法については、引張試験におい て得られた材料試験値を使用しており、JIS規 格値を使用している当社の解析手法に保守性 有 (例. SS400 鋼板の材料試験値の降伏応力 322MPa に対してJIS 値は245MPa)
	動的な物性値 の出典	WES 式※1	同左	※1：(社)日本溶接協会「動的繰返し大変形を 受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方 法, WES2808:2003」による推定式
	応力-ひずみ 関係	Cowper Symonds モデル※2	同左	※2：「原子力安全基盤機構：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 (JNES/SSD08-014,平成20年11月)」において 使用しているひずみ速度を考慮したモデル
	破断ひずみ (破断条件)	相当塑性ひずみ がJSME 規格※3 の限界3 軸ひず み $\epsilon_L$ における TF=2 の値に達し た場合を提案 (例. SS400 の 場合：12.8%)	破断伸びのJIS 規 格値をTF=2 で除 し、真ひずみに変 換した値に達した 場合 (例. SS400 の場合：8.1%)	破断ひずみについて電中研提案の値に対し、 <u>小さな値を採用していることから破断しやす い設定となっております、保守性を有している。</u> ※3：「日本機械学会：発電用原子力設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイ ドライン<BWR 鋼製格納容器編>(2014年7 月)」

5. 当社の解析主王の保守性について

当社の解析手法の保守性を確認することを目的として、表 4-1 に記載している当社の解析手法における設定値を用いて、電中研報告における重錘の鋼板上への自由落下衝突試験（以下、電中研試験という）の追解析を行った。その結果を表 5-1 に、解析モデルを図 5-1 に示す。解析モデルは電中研試験と同様 2 辺固定とし、重錘部については、密度を大きくした要素を採用することで重錘の重量を模擬している。また、本検討においては、解析ソフトとして Virtual Performance Solution（以下「VPS」という。）を用いた。VPS については、別紙に示すとおり、AUTODYNE との間に有意な差はないといえるため、同様に AUTODYNE と差がないと評価されている、強度計算書の計算に用いた LS-DYNA においても、同様の結果が得られると考えられる。

表 5-1 の追解析結果より、自由落下衝突試験において貫通が発生しなかったケースにおいても、当社の解析手法による解析結果においては貫通が発生していること、また貫通が発生したケースにおける残留速度が自由落下衝突試験結果の残留速度よりも大きいことから、当社の解析手法は保守性を有しているといえる。

表 5-1 当社の解析手法による自由落下衝突試験の追解析

試験ケース	試験条件			試験結果による貫通有無(残留速度(m/s))	当社の解析手法を用いた追解析による貫通有無(残留速度(m/s))
	飛来物	被衝突体	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有(8.5m/s)	
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有(2.9m/s)	
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	

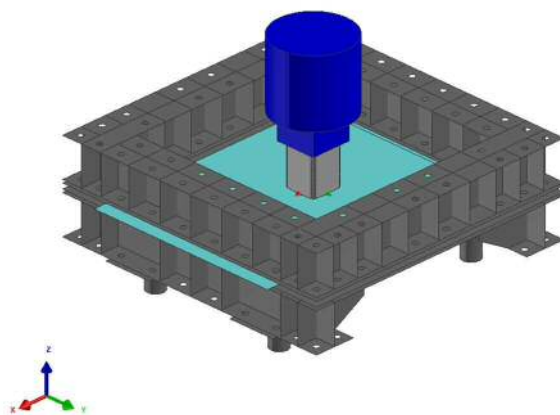


図 5-1 解析モデル

## AUTODYNE と Virtual Performance Solution の比較検証結果

電中研報告の試験結果に対する動的物性値設定手法の保守性の検討においては、解析ソフトに Virtual Performance Solution (VPS) を用いた。以下に、電中研解析で適用している AUTODYNE と VPS との間に有意な差異がないことの検証結果を示す。

AUTODYNE と VPS の間における、解析コードに依存する差異の有無を確認するために、材料物性値、固定条件等の入力条件を同一とし、その解析結果を比較した。

解析条件は、表 1 に示す、電中研に

よる自由落下衝突試験の条件とした。また、解析により得られた、鋼板に生じる変位を図 1 に、鋼板に生じる相当塑性ひずみを図 2 に示す。

表 1 影響評価に用いる解析条件

解析ケース	解析条件		
	飛来物	被衝突体	落下高さ (m)
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5

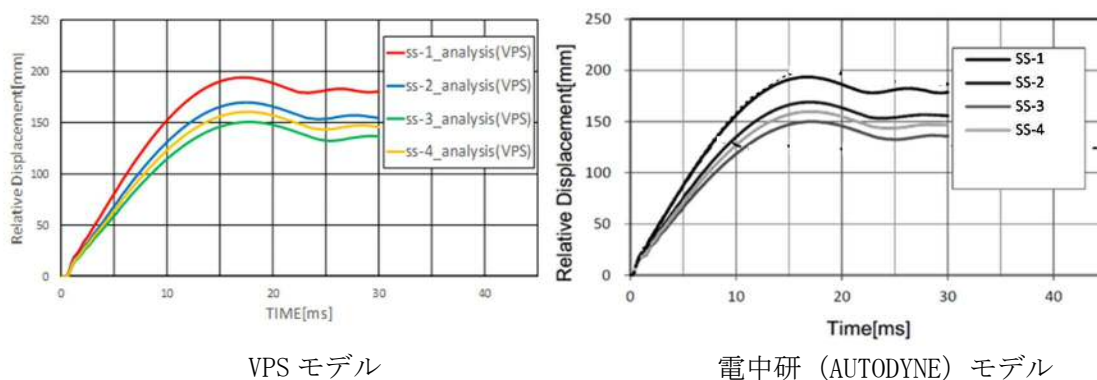
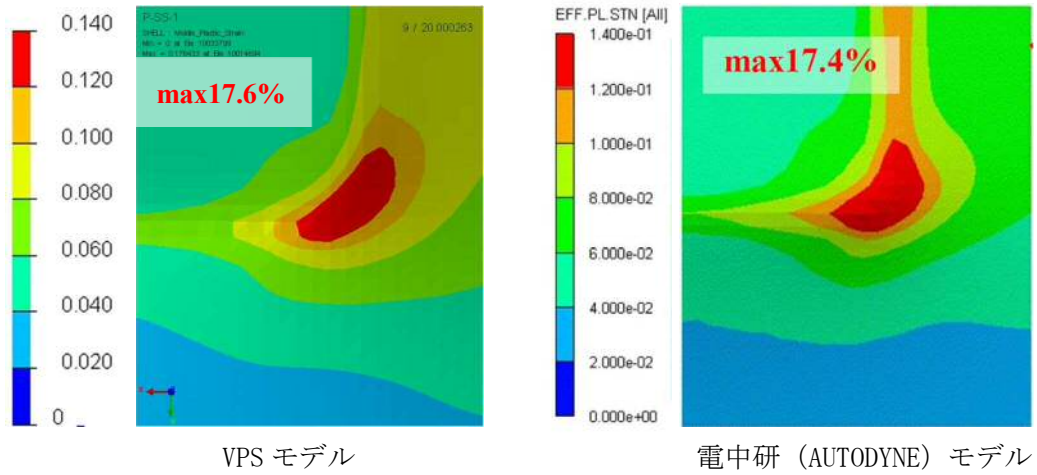
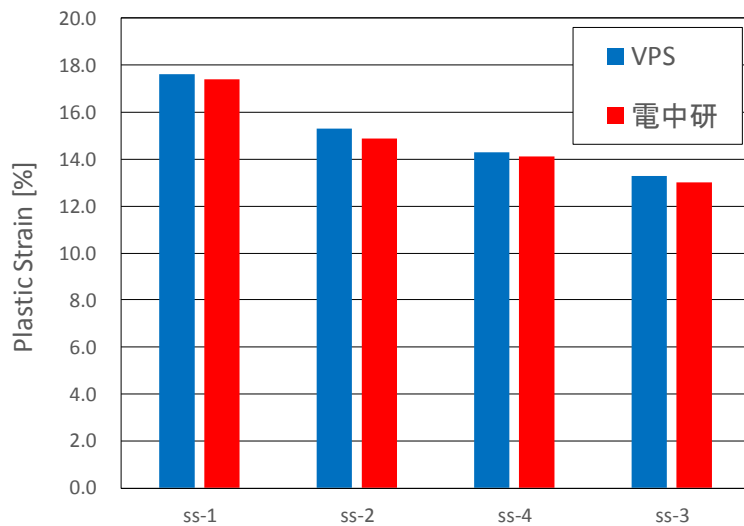


図 1 AUTODYNE と VPS の比較検証結果(鋼板の変位)



(a) 相当塑性ひずみコンタ図 (ケース : SS-1)



(b) 相当塑性ひずみ最大値比較

図2 AUTODYNE と VPS の比較検証結果 (相当塑性ひずみ)

図1及び図2より、AUTODYNE と VPS の解析結果に有意な差がないことから、AUTODYNE と VPS の間に有意な差異はないといえる。

以 上