

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 31 R <u>1</u>
提出年月日	令和 4 年 <u>3</u> 月 <u>18</u> 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護対策設備の強度計算に関する 支持架構の解析手法の妥当性について

1. 文章中の下線部は，R 0 から R 1 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 1）は，令和 4 年 1 月 26 日に提示した「竜巻防護対策設備の強度計算に関する支持架構の解析手法の妥当性について R 0」に対し，ヒアリングにおける主な指摘事項である主語の明確化を踏まえた記載の見直し及び記載内容の適正化を図ったものである。

目 次

1.	概要	1
2.	飛来物衝突解析手法	1
3.	飛来物衝突解析手法の動的物性値及び破断ひずみの設定	4
4.	飛来物衝突解析手法の妥当性に係る評価	5
5.	電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較	5
6.	試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の比較	7
7.	電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の比較	8
8.	まとめ	8
9.	参考文献	9

1. 概要

本資料は、再処理施設の第1回設工認申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下の添付書類に示す竜巻防護対策設備の強度計算の方針を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-4-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」
- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-5-2 竜巻防護対策設備の強度計算書」

本資料では、再処理施設の竜巻防護対策設備の支持架構に対する飛来物衝突解析手法について補足する。

なお、本資料で示す竜巻防護対策設備の支持架構に対する飛来物衝突解析手法については、今回申請対象以外の再処理施設の竜巻防護対策設備の支持架構に対しても適用するものである。

また、本資料は、第1回設工認申請の対象設備を対象とした記載であることから、第2回設工認申請以降の申請対象を踏まえて、記載を拡充していく。

2. 飛来物衝突解析手法

竜巻防護対策設備の支持架構を構成する鋼製部材の飛来物衝突解析手法については、添付書類「VI-1-1-1-2-5-2 竜巻防護対策設備の強度計算書」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、米国・原子力エネルギー協会（Nuclear Energy Institute, NEI）のNEI 07-13 Rev.8「新プラント設計に対する航空機衝突評価を実施するための手法」（以下、「NEI 07-13」という。）に示された動的増加係数（Dynamic Increase Factors, DIF）を適用している。また、NEI 07-13は評価基準として破断ひずみ制限を採用しており、本評価においてもNEI 07-13の制限値を適用する。

このNEI 07-13の評価手法は、航空機衝突に対する設備の健全性を示すために使用可能であることが、2011年に米国原子力規制委員会（NRC）により確認されており、国内軽水炉の設備に対する竜巻飛来物の影響評価でも適用された実績のある手法である。

本資料では、上述の動的物性値及び破断ひずみの設定方法を踏まえ、飛来物衝突解析手法の妥当性について、以下に示す内容を確認する。

- ・飛来物衝突解析手法の動的物性値及び破断ひずみの設定（3項に示す）
- ・飛来物衝突解析手法が実際の衝突現象を再現できており、妥当な解析であること（4.①項に示す）
- ・材料物性値の変更により、飛来物衝突解析手法が保守性を有すること（4.②項に示す）
- ・飛来物衝突解析手法が実際の衝突よりも貫通が生じやすい結果を得られること（4.③項に示す）

3. 飛来物衝突解析手法の動的物性値及び破断ひずみの設定

飛来物の衝突解析は、変形速度が大きいことからひずみ速度効果を考慮するため、NEI 07-13 に則り、第 3-1 表の動的増加係数を考慮した動的物性値及び第 3-2 表の破断ひずみを適用している。

第 3-1 表 炭素鋼の動的増加係数 (NEI 07-13 より抜粋)

Material	DIF	
	Yield Strength	Ultimate Strength
Carbon Steel Plate	1.29	1.10

第 3-2 表 炭素鋼の破断ひずみ (NEI 07-13 より抜粋)

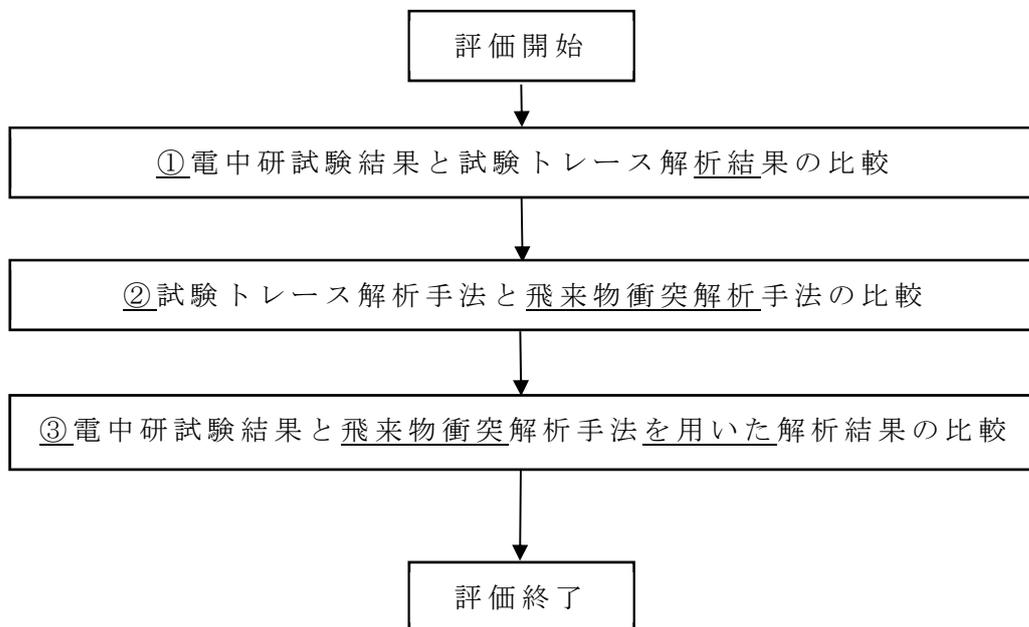
Material	Strain Measure	Limiting Value
SA 516 Steel Plate	Local Ductile Tearing Effective Strain	0.140/TF*

注記 * : Triaxiality Factor の略で、多軸性係数。

NEI 07-13 では TF=2.0 とすることを推奨している。

4. 飛来物衝突解析手法の妥当性に係る評価

飛来物衝突解析手法の妥当性に係る評価フローを第4-1図に示す。



第4-1図 飛来物衝突解析手法の妥当性に関する評価フロー

① 電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較

実際の衝突試験結果を解析にて再現することを目的に試験トレース解析を実施する。具体的には、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。）の重錘自由落下衝突試験（以下、「電中研試験」という。）の試験結果と、試験トレース解析結果を比較し、試験トレース解析結果が実際の衝突試験結果を再現できており、妥当な解析であることを確認する。

② 試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の比較

飛来物衝突解析手法が試験トレース解析手法より保守性を有した結果を得ることを目的に、材料物性値を変更する。試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の材料物性値を比較し、飛来物衝突解析手法における材料物性値が保守性を有していることを確認する。

③ 電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の比較

飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の保守性を確認することを目的に、電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果を比較し、飛来物衝突解析手法を用いた解析結果が電中研試験結果よりも貫通が生じ易い結果が得られることを確認する。

なお、上記の確認は鋼板を対象にしたものであるが、飛来物の衝突評価は部位の局部的影響に着目した解析であることから、形状が異なる支持架構についても適用可能である。

5. 電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較（第4-1図①）

(1) 試験トレース解析について

解析によって実際の衝突試験を再現し，妥当な解析であることを確認するために，電中研試験を模擬した試験トレース解析を実施する。

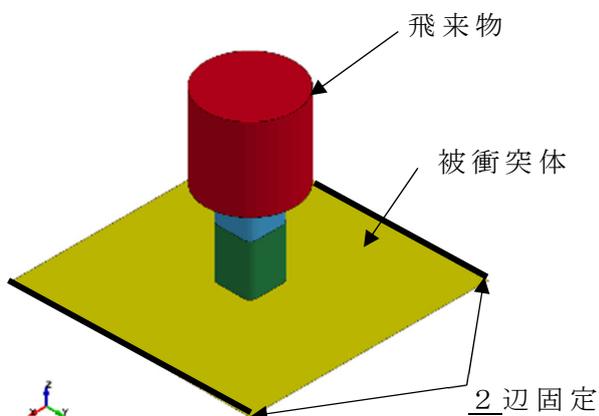
試験トレース解析では，電中研試験を模擬した条件として，電中研報告の材料試験結果に基づき材料物性値を設定する。電中研報告の材料試験結果を第5-1表に示す。

また，解析モデルは電中研試験と同様に2辺固定とする。解析モデルを第5-1図に示す。

なお，動的増加係数については，飛来物衝突解析手法に合わせ，第3-1表に示す値とする。

第5-1表 電中研報告の材料試験結果

部材	板厚 (mm)	材料試験結果（平均値）			
		降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	引張ひずみ (-)	ヤング率 (GPa)
鋼板 (SS400)	9	322.3	474.4	0.1624	209.7



第5-1図 解析モデル

(2) 電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較

電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較を第5-2表に示す。

電中研試験結果と試験トレース解析結果との間で貫通有無が整合すること、また、貫通が発生したケースにおける残留速度が電中研試験結果の残留速度と同等以上であることから、試験トレース解析手法は、実際の衝突試験結果を再現できており、妥当な解析であることを確認した。

第5-2表 電中研試験結果と試験トレース解析結果の比較

試験 (解析) ケース	試験条件			貫通有無 (貫通時の残留速度)	
	飛来物	被衝突体*	落下高さ (m)	電中研 試験結果	試験トレース 解析結果
SS-1	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	17.0	貫通有 (8.5m/s)	貫通有 (9.8m/s)
SS-2	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	12.5	貫通有 (2.9m/s)	貫通有 (5.2m/s)
SS-4	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	11.0	貫通無し	貫通無し
SS-3	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	9.5	貫通無し	貫通無し

注記 * : 有効開口部サイズ 1.4m×1.4m, 2辺固定, 板厚 9 mm

6. 試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の比較（第4-1図②）

飛来物衝突解析手法では、試験トレース解析手法より保守性を有した結果を得られる（貫通や変形が発生し易くする）ように材料物性値を材料試験結果の値から JIS 規格の値に変更を行っている。

試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の比較を第6-1表に示す。飛来物衝突解析手法については、「静的な物性値」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を確認した。

第6-1表 試験トレース解析手法と飛来物衝突解析手法の比較結果

比較項目	試験トレース解析手法	飛来物衝突解析手法	比較結果	
解析コード	LS-DYNA	同左	どちらも LS-DYNA を採用しており差異はない。	
材料物性値	静的な物性値	材料試験結果による JIS 規格値による	静的な物性値については、引張試験において得られた材料試験値に対し、JIS 規格値を使用していることから、試験トレース解析より降伏しやうい設定となっており、保守性を有している。 (例. SS400 鋼板の材料試験値の降伏応力 322.3MPa に対して JIS 値は 245MPa)	
	動的増加係数	NEI 07-13 による	同左	どちらも NEI 07-13 を採用しており差異はない。
	破断ひずみ (破断条件)	材料試験結果の引張ひずみを 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 : 7.8%)	NEI 07-13 の破断ひずみを TF=2 で除した値に達した場合 (例. SS400 の場合 : 7.0%)	破断ひずみについては、材料試験結果を基に設定した値に対し、小さな値を採用していることから、 <u>試験トレース解析より破断しやうい設定となっており、保守性を有している。</u>

7. 電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の比較 (第4-1図③)

飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の保守性を確認することを目的に、電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果との比較を行った。その結果を第7-1表に示す。なお、解析モデルは第5-1図と同じモデルである。

第7-1表の比較結果により、電中研試験結果において貫通が発生しなかったケースにおいても、飛来物衝突解析手法を用いた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電中研試験結果の残留速度よりも大きいことから、飛来物衝突解析手法を用いた解析結果は、電中研試験結果より貫通が生じ易い結果が得られることを確認した。

第7-1表 電中研試験結果と飛来物衝突解析手法を用いた解析結果の比較

試験 (解析) ケース	試験条件			貫通有無 (貫通時の残留速度)	
	飛来物	被衝突体*	落下高さ (m)	電中研 試験結果	<u>飛来物衝突解 析手法を用い た解析結果</u>
SS-1	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	17.0	貫通有 (8.5m/s)	貫通有 (10.1m/s)
SS-2	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	12.5	貫通有 (2.9m/s)	貫通有 (7.5m/s)
SS-4	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	11.0	貫通無し	貫通有
SS-3	剛パイプ重錘	鋼板 (SS400)	9.5	貫通無し	貫通有

注記 * : 有効開口部サイズ 1.4m×1.4m, 2辺固定, 板厚 9 mm

8. まとめ

以上より、飛来物衝突解析手法を用いた衝突解析は、実際の衝突現象を再現できており、妥当な解析であること及びより貫通が生じ易い結果が得られることから、保守性を有した解析であることを確認した。このため、竜巻防護対策設備の支持架構の衝突解析に飛来物衝突解析手法を適用することにより保守性を有した解析結果が得られる。

9. 参考文献

- ・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 平成 27 年 10 月 電力中央研究所