

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足-07 r2
提出年月日	2022年 4月 25日

タービンミサイルの評価内容について

2022年 4月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 概要

本資料は、蒸気タービンの損壊に伴い想定されるタービンミサイルの評価内容についてまとめたものである。

2. ミサイル到達確率評価方法と条件

2.1 ミサイルによる防護対象の損傷頻度評価方法

ミサイルによる防護対象の損傷頻度は、「タービンミサイル評価について」（原子炉安全専門審査会 昭和 52 年 7 月 20 日）（以下、「タービンミサイル評価について」という。）に基づき、下記の式にて評価する。

$$(\text{損傷頻度}) = \sum_i (P_{1i} \times P_{2i} \times P_{3i})$$

P_1 : ミサイル発生頻度(回/炉・年)

P_2 : ミサイルの防護対象への到達確率(-)

P_3 : ミサイル到達時の防護対象の損傷確率(-)

i : ミサイル種（低圧タービン羽根，T-G カップリング，低圧タービンディスク，その他（タービンロータ，発電機ロータ等））

2.2 発生頻度 (P_1)

タービンミサイル発生頻度は、 5×10^{-5} (回/炉・年)とする。

2.3 ミサイル防護対象への到達確率 (P_2)

到達確率評価方法は、米国 SRP3.5.1.3 Appendix A 又は立面の効果を考慮できる同等の方法を準用するものとする。また、遮へい物貫通後のミサイル速度の評価は、鋼板は BRL 式、コンクリートは修正 NDRC 式を用いる。以下では、「タービンミサイル評価について」に従う個別の評価方法を示す。

タービン回転速度上昇事象の対策として、主調速機構にて蒸気加減弁にてタービン回転速度を制御しており、蒸気加減弁による回転速度制御が不能となり、回転速度がさらに過速した場合でも、非常用調速機が作動し、主蒸気止め弁を閉鎖することで、最悪の場合でも回転過速度は定格回転速度の 120%を超えることはないため、回転過速度の設計上限値は定格回転速度の 120%とする。

2.3.1 低圧タービン羽根ミサイル評価方法

低圧タービン羽根ミサイル評価方法(1)～(4)は、「タービンミサイル評価について」に基づく。

- (1) 低圧タービン最終段動翼（羽根植込部を含む）1 枚がミサイル化する。
- (2) 低圧タービン最終段動翼は、回転過速度の設計上限値で破損し、ミサイル化する。
- (3) この破損した最終段動翼が外部ケーシングから飛び出したときに残存するエネルギー

率を2%として、ケーシング貫通後速度を決める。

- (4) ミサイルの回転面からの振れ角の確率分布は $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ （外側）の偏角内で一様とする。

2.3.2 T-Gカップリングミサイル評価方法

T-Gカップリングミサイル評価方法(1)～(4)は、「タービンミサイル評価について」に基づく。

- (1) T-Gカップリングはシャフトから脱落し、ミサイル化する。
- (2) T-Gカップリングは、回転過速度の設計上限値でシャフトから脱落する。
- (3) この脱落したT-Gカップリングが飛び出したときに残存するエネルギー率を4.5%として、飛び出し並進速度を決める。
- (4) ミサイルの回転面からの振れ角の確率分布は $\pm 25^{\circ}$ の偏角内で一様とする。

2.3.3 低圧タービンディスクミサイル評価方法

低圧タービンディスクミサイル評価方法(1)～(4)は、「タービンミサイル評価について」に基づく。

- (1) 低圧タービンディスクのうち1段がミサイル化したと考え、各段の到達確率を平均する。さらに、低圧タービン3台それぞれの到達確率を平均する。
- (2) ミサイルの回転面からの振れ角の確率分布は、最終段ディスクが $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ （外側）、中間段ディスクが $\pm 5^{\circ}$ の偏角内で一様とする。
- (3) 低圧タービンディスクは、回転過速度の設計上限値で破損しミサイル化する。
- (4) 低圧タービンディスクは4等分割し、上方2片がミサイル化する。

2.4 破損確率 (P_3)

タービンミサイルが評価対象施設に到達した際に、同施設を損傷させる確率は、保守的に100%とする。

2.5 評価条件

タービンミサイル評価の評価条件を表2.5-1に示す。各ミサイルについての諸元を表2.5-2のa～cに示す。

他号機のタービンをミサイル源とするタービンミサイル評価（以下、相互間評価）における確率計算については対象プラントに対する他プラントからのタービンミサイルの影響を考慮するため、表2.5-3に示す通り、自号機及び他号機をミサイル源とするタービンミサイルの衝突確率の総和とする。

表 2.5-1 タービンミサイル評価条件一覧

想定	評価条件
想定ミサイル	低圧タービン最終段動翼 T-G カップリング 低圧タービンディスク
低圧タービンディスクミサイル諸元*	表 2.5-2a
低圧タービン羽根ミサイル諸元*	表 2.5-2b ミサイルは破損時重心速度相当のエネルギーの 2% で飛び出すものとする
T-G カップリングミサイル諸元*	表 2.5-2c ミサイルは脱落時角速度相当のエネルギーの 4.5% で飛び出すものとする
低圧タービン羽根ミサイル発生頻度	5.0×10^{-5} (回/炉・年)
T-G カップリングミサイル発生頻度	5.0×10^{-5} (回/炉・年)
低圧タービンディスクミサイル発生頻度	5.0×10^{-5} (回/炉・年)
低圧タービン座標 (A, B, C), T-G カップリング及びターゲット座標	表 2.5-4, 図 2.5-1 参照
タービン回転面に対するミサイル飛出し最大角度 Δ と確率分布	低圧タービン最終段動翼 0~25 度 一様 T-G カップリング ± 25 度 一様 低圧タービン最終段ディスク 0~25 度 一様 低圧タービン中間段ディスク ± 5 度 一様
ミサイル発生数	低圧タービンディスク 2 個 低圧タービン最終段動翼 1 枚 T-G カップリング 1 個
コンクリート圧縮強さ	330 (Kg/cm ²) (普通コンクリート) 135 (Kg/cm ²) (軽量コンクリート)
鋼板 Grade 係数	1.0 (—)
ターゲット	KK-5/6/7 使用済燃料プール
ターゲット面積	表 2.5-4
ミサイル到達時のターゲット損傷確率	1.0 (—)

注記* : 蒸気タービン取替に伴う質量や形状の変更により評価条件が変更となる。

表 2.5-2a 低圧タービンディスクミサイル諸元

		ケーシング貫通後 最大速度(m/s)	質量 (kg)	投影面積	
				最小(m ²)	最大(m ²)
最終段(L-0)					
中間 段	L-1				
	L-2				
	L-3				
	L-4				
	L-5				
	L-6				

表 2.5-2b 低圧タービン羽根ミサイル諸元

		破損時の重心速度 (m/s)	質量 (kg)	投影面積	
				最小(cm ²)	最大(cm ²)
最終段(L-0)					

表 2.5-2c T-G カップリングミサイル諸元

	慣性 モーメント (kg-m ²)	脱落時の 角速度 (rad/s)	質量 (kg)	最小投影面積 (m ²)
T-G カップリング				

表 2.5-3 相互間評価における衝突確率の算出

対象プラント ミサイル源	K-5	K-6	K-7
K-5	P_{55}	P_{56}	P_{57}
K-6	P_{65}	P_{66}	P_{67}
K-7	P_{75}	P_{76}	$P_{77}=P_{66}$
衝突確率	$P_{55}+P_{65}+P_{75}$	$P_{56}+P_{66}+P_{76}$	$P_{57}+P_{67}+P_{66}$

表 2.5-4 相互間評価における解析条件（位置関係*）

対象プラント ミサイル源	方向	KK-5	KK-6	KK-7
KK-7 (m)	X			
	Y			
	Z			
ターゲット面積 (m ²)	—			

注記*：KK サイトにおける位置関係については図 2.5-3 を参照。



図 2.5-1 低圧タービン/T-G カップリングと使用済燃料プールの平面位置図

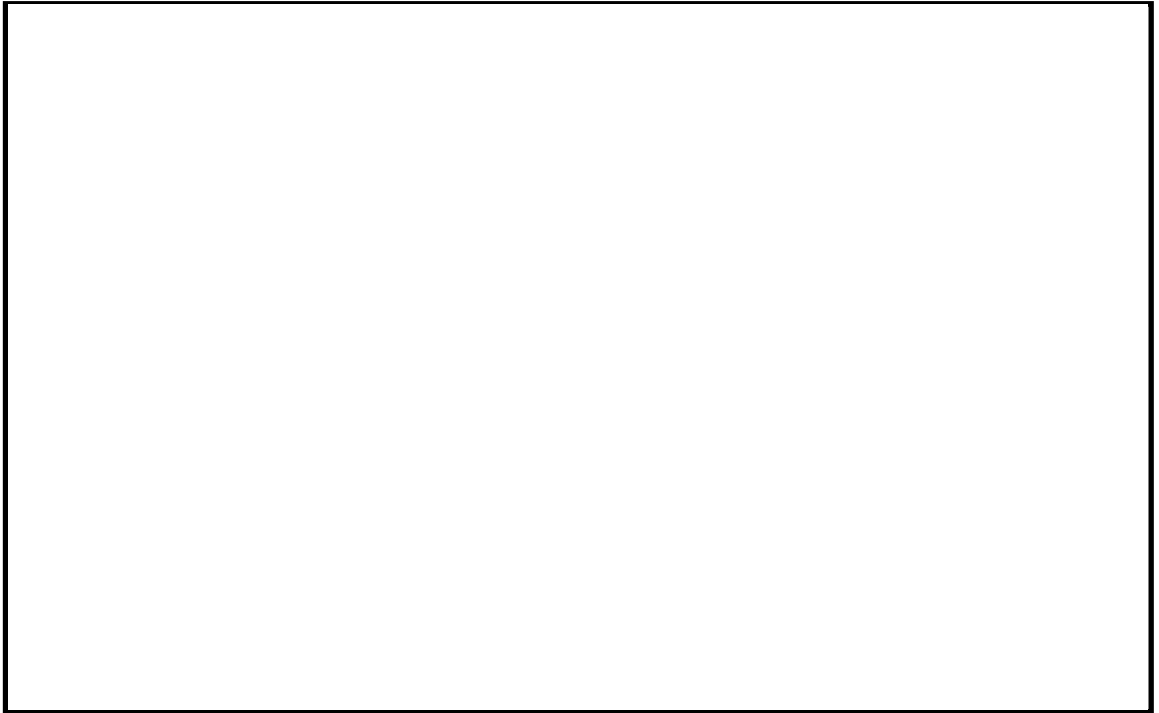


図 2.5-2 タービン周り遮へい物形状（コンクリート壁，鋼板）

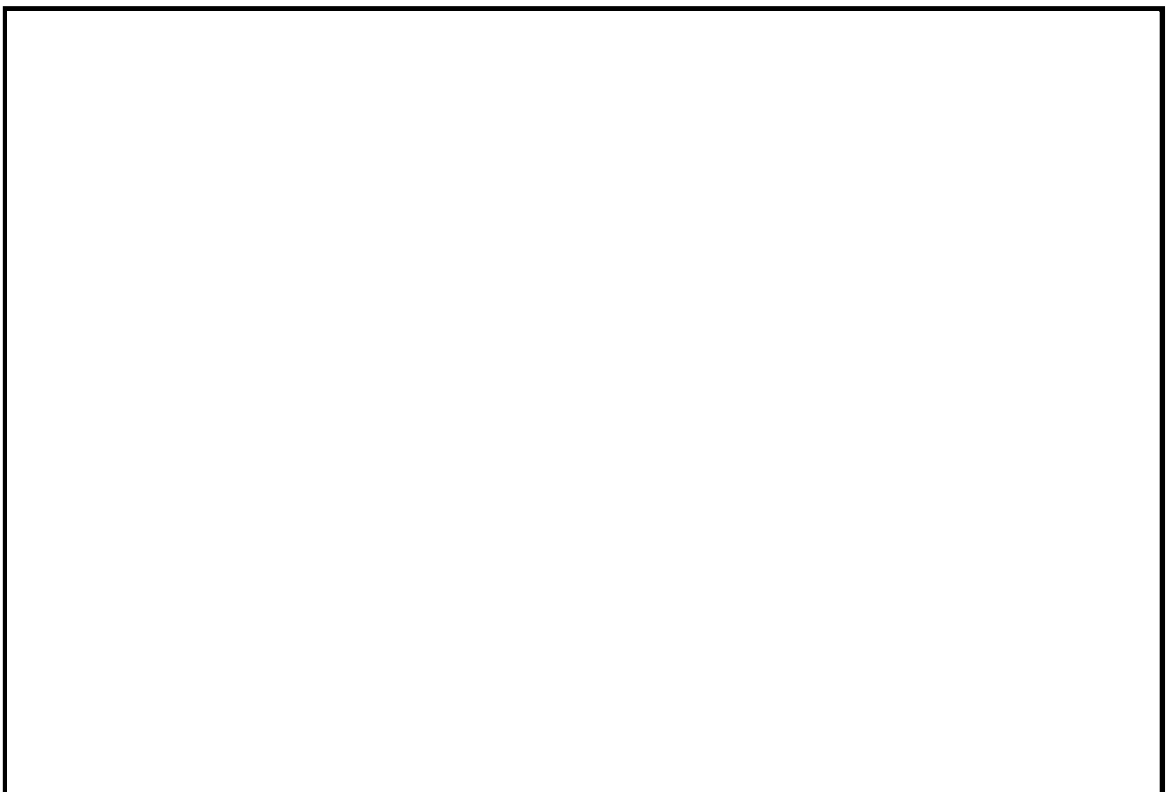


図 2.5-3 KK サイト位置関係図

3. 使用済燃料プール損傷頻度

3.1 KK-7 低圧タービン羽根ミサイルによる使用済燃料プール損傷頻度

低圧タービン羽根ミサイルは、壁等の遮へい物に阻まれ、使用済燃料プールまで到達しない。したがって、すべてのケースにて到達確率は0であり、すなわち損傷頻度も0である。

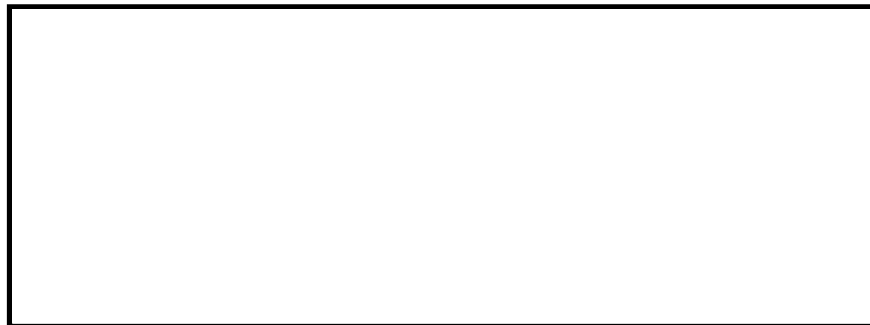
3.2 KK-7 T-G カップリングミサイルによる使用済燃料プール損傷頻度

T-G カップリングミサイルは、壁等の遮へい物に阻まれ、使用済燃料プールまで到達しない。したがって、すべてのケースにて到達確率は0であり、すなわち損傷頻度も0である。

3.3 KK-7 低圧タービンディスクミサイルによる使用済燃料プール損傷頻度

ディスクミサイルによる使用済燃料プール損傷頻度について、表 3.3-1 に評価結果を示す。各使用済燃料プールへのミサイル到達確率の総和は、判断基準である 10^{-7} (回/炉・年) を下回った。

表 3.3-1 評価結果一覧 (使用済燃料プール損傷頻度)



4. まとめ

KK-5/6/7 使用済燃料プール損傷頻度を評価した。KK-5/6/7 の使用済燃料プールを損傷する頻度は、判断基準 10^{-7} (回/炉・年) を下回る結果となった。

なお、高圧ロータ及び発電機ロータについては今回取替対象ではないことから形状や質量に変更はない。また、定格回転速度にも変更がなく、評価に用いる定格の120%の回転速度も同様である。そのため、建設時の高圧ロータ及び発電機ロータからの飛散物が車室内にとどまりミサイルとならないという評価結果に変更はない。

遮蔽物貫通後速度評価方法

ミサイルによる遮へい物貫通厚さの評価には、内規に示される修正 NDRC の式^[1]（コンクリート壁）及び BRL の式^[2]（鋼板）を用いる。

(1) 記号の定義

T : コンクリート (or 鋼板) 壁厚さ (in)

D : ミサイル直径 (in)

f : ミサイル入射角 (deg)

W : ミサイル質量 (lb)

FC : コンクリート圧縮強さ (lb/in²)

FN : NOSE PERFORMANCE FACTOR (ミサイル先端の形状係数) (—)

FS : 鋼板 grade 係数 (—)

V : 貫通前のミサイル速度 (ft/sec)

U : 貫通後のミサイル速度 (ft/sec)

Φ : ミサイルの飛び出し方向と水平面のなす角度 (仰角)

(2) コンクリート壁に対する評価 (修正 NDRC 式)

$$R = \frac{T}{D \cdot \cos^2 \Phi}$$

(i) $R < 3.0$ のとき

$$S = \frac{3.19 - \sqrt{10.1761 - 2.872 \cdot R}}{1.436}$$

$$G = \left(\frac{S}{2.0} \right)^2$$

(ii) $3.0 \leq R < 18$ のとき

$$S = \frac{1}{1.24} (R - 1.32)$$

$$S < 2.0 \text{ のとき } G = \left(\frac{S}{2.0} \right)^2$$

$$S \geq 2.0 \text{ のとき } G = S - 1.0$$

貫通エネルギーEは、以下のようになる。

$$E=10^6 \cdot \left(\frac{G \cdot D^{2.8} \cdot \sqrt{FC}}{180 \cdot FN \cdot W} \right)^{\frac{2}{1.8}}$$

(3) 鋼板壁に対する評価 (BRL 式)

$$E = \frac{1119655 \cdot FS^2}{W} \cdot \left(\frac{T \cdot D}{\cos^2 \Phi} \right)^{1.5}$$

(4) 遮へい物貫通後の速度評価

$$V^2 \geq E \text{ のとき } U = \sqrt{V^2 - E}$$

$$V^2 < E \text{ のとき } U = 0$$

従って

$$\frac{dU}{dV} = \frac{V}{\sqrt{V^2 - E}} = \frac{V}{U}$$

参考文献

- [1] R.P.Kennedy, "A Review of Procedures for the Analysis Design of Concrete Design Structures to Resist Missile Impact Effects," Nucl. Eng. Des., 37, pp. 183~203 (1976)
- [2] Department of the Army, "Fundamentals of Protective Design," TM-5-855-1 (1965)