

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 09 R4
提出年月日	令和 3 年 6 月 2 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

B R L 式に適用する等価直径について

(再処理施設)

目 次

1. 概要	1
2. 防護板に対する貫通評価式（BRL式）に適用する等価直径について	1
3. 等価直径（D）の入力方法に関する最新の知見について	2
3.1 円形衝突部の影響について	3
3.2 飛翔体質量と衝突速度の影響について	3
3.3 多角形の衝突部形状の影響について	4
4. 最新の研究報告の適用に係る考察	5
4.1 最新の研究報告について	5
4.2 設計飛来物へのBRL式の適用について	5
4.3 最新の研究報告の適用について	7
5. まとめ	8
6. 参考文献	8

1. 概要

本資料は、再処理施設の設計基準対象施設に対する後次回申請を含めた竜巻防護対策設備等の強度計算の方針について補足説明するものである。

ここでは、再処理施設の評価対象施設に対する鋼板の貫通評価にて使用するBRL式の等価直径の適用について説明する。

評価対象施設の鋼板の貫通評価については、タービンミサイル評価等で用いられているBRL式^{※1}を用いて貫通限界厚さを算出しており、評価式に含まれる等価直径(D)の考え方によって、貫通限界厚さは変動する。先行発電炉では、接触面積が同等な円の直径を等価直径(D)としている。

一方、再処理施設では防護板の厚さについて、保守性を持ちながらも、耐震性の観点から合理的な厚さとするため、最新の知見を取り入れて周長と同じ円周を持つ円の直径を等価直径(D)として設定することとしている。

また、本資料は、第1回申請(令和2年12月24日申請)のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「V-別添1-3 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「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」

※1:「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会)」の中で鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。

2. 防護板に対する貫通評価式(BRL式)に適用する等価直径について

防護板の貫通評価は、タービンミサイル評価等で用いられているBRL式により貫通限界厚さを算出している。

〈BRL式〉

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot D^{\frac{3}{2}}}$$

T: 貫通限界厚さ (m)

D: 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

K: 鋼板の材質に関する係数

m: 飛来物の質量 (kg)

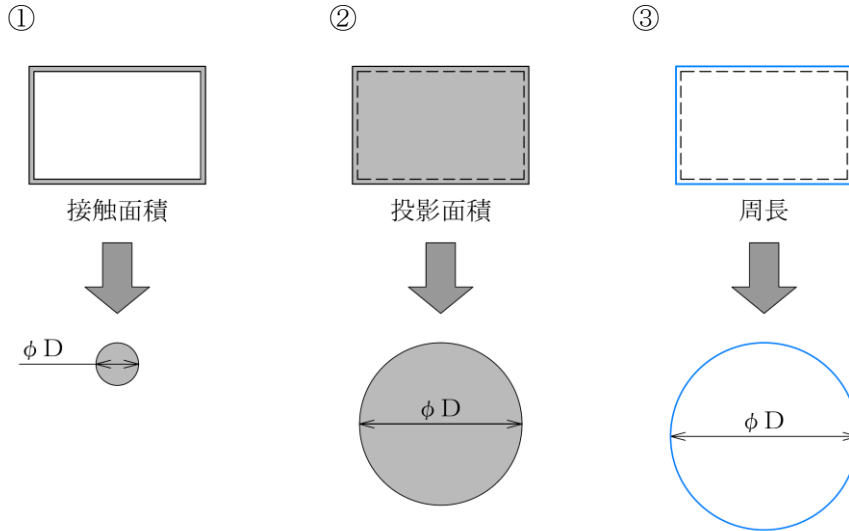
v: 飛来物の飛来速度 (m/s)

ただし、BRL式が記載されている「構造物の衝撃挙動と設計法(土木学会)」においては、この評価式の成り立ちに関する実験条件等が明確に示されておらず、衝突面が角型である飛来物を、BRL式の等価直径(D)に入力する方法が明らかになっていない。

衝突面が角型の飛来物を、BRL式の等価直径(D)に入力する方法として、以下の3つが挙げられる。第1図に等価直径(D)の入力方法イメージを示す。

- ① 衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径

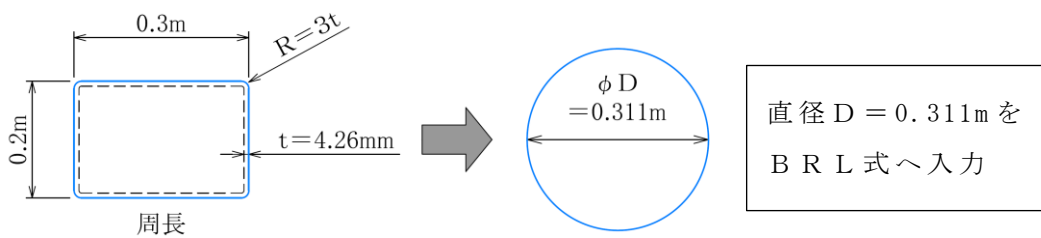
- ②衝突部の投影面積と等価な面積の円の直径
- ③衝突部の周長と等価な周長の円の直径



第1図 等価直径（D）の入力方法イメージ

等価直径（D）の入力方法が明らかになっていないため、先行発電炉では「①衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径」を等価直径（D）として入力しているのに対し、再処理施設では次項で示す最新知見を用いて「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力している。

再処理施設におけるBRL式の等価直径(D)の考え方を第2図に示す。



第2図 等価直径（D）の考え方

3. 等価直径（D）の入力方法に関する最新の知見について

2019年度電力中央研究所の研究報告（参考文献（1））（以下、「最新の研究報告」という。）では、飛来物の衝突パラメータ（接触面積，質量，衝突速度，形状）を考慮したBRL式への等価直径（D）の入力方法，耐貫通性能に及ぼす影響及びBRL式の適用性について実験結果から評価している。

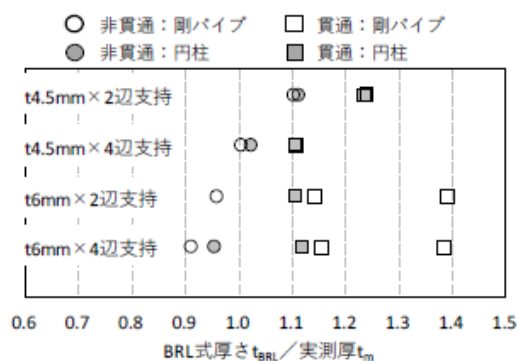
3.1 円形衝突部の影響について

最新の研究報告では、外径が等価で接触面積が異なる剛パイプと円柱を鋼板に衝突させる試験を実施している（第3図参照）。衝突部の外径は50mmである。

第4図に示す試験結果に有意な差が見られないことから、衝突時の接触面積による耐貫通性能への影響は小さいと結論付けている。すなわち、耐貫通性能への影響は外径に依存すると考えられるため、等価直径の設定において「①衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径」を等価直径とすることにより得られる評価結果には非常に大きな保守性が含まれているものと言える。



第3図 飛翔体の衝突部形状（参考文献(1)より）



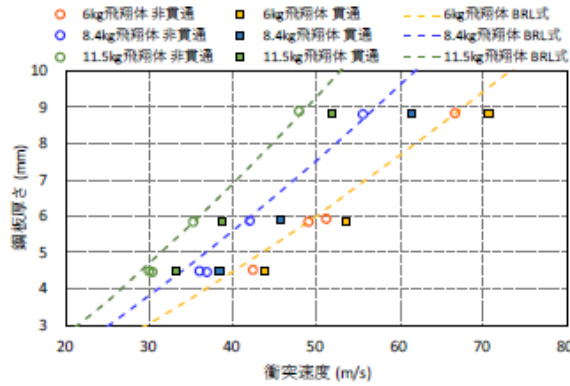
第4図 円形衝突部の試験結果（参考文献(1)より）

3.2 飛翔体質量と衝突速度の影響について

最新の研究報告では、円柱に対し、質量と衝突速度を変化させた貫通試験を実施している。質量は6kg, 8.4kg, 11.5kgの3種類としている。

試験結果を第5図に示す。BRL式による評価は、ある衝突速度に対する鋼板の貫通限界厚さを表しているのと同時に、ある鋼板厚さに対する貫通限界衝突速度を表している。試験結果によると、貫通が生じた試験ケースはいずれの飛翔体質量においてもBRL式により求めた貫通限界厚さを下回る右側の領域(すなわち、貫通限界衝突速度よりも速度が大きい領域)

でのみ観察されており，BRL式は飛翔体質量及び衝突速度によらず，試験結果を保守的に評価していると結論付けている。

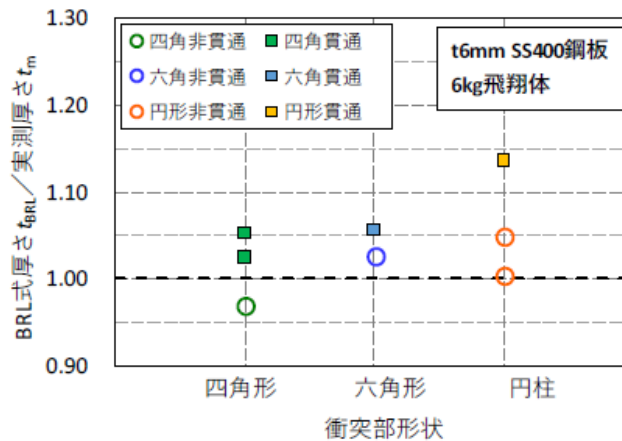


第5図 試験結果とBRL式の比較（参考文献(1)より）

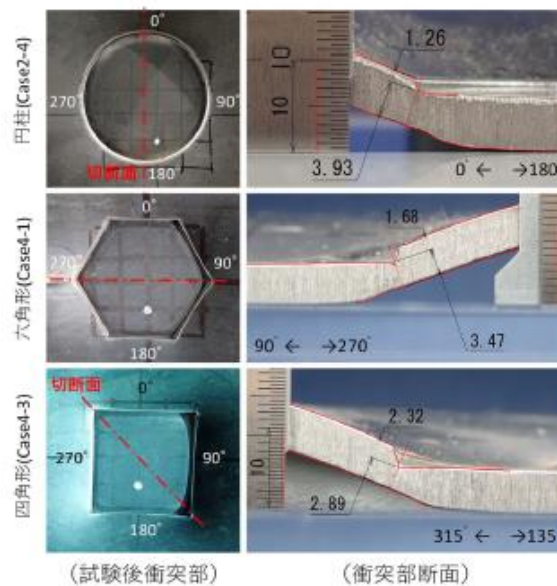
3.3 多角形の衝突部形状の影響について

最新の研究報告では，3.1に示した接触面積が貫通性能に与える影響は小さいとの結果を踏まえ，円形衝突部と周長を同一とする四角形，六角形衝突部による貫通試験を実施することにより多角形の衝突部形状の影響について確認している。

第6図に，多角形衝突部による試験結果を示す。また，第7図に多角形衝突部の試験後断面を示す。この結果，多角形の場合は円形に比べて試験後断面から過酷な衝突条件になることがわかるものの，BRL式へ入力する等価直径（D）を「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」とすることで，多角形衝突部の耐貫通性能についても保守的に評価可能であると結論付けている。



第6図 多角形衝突部による貫通試験結果（参考文献(1)より）



第7図 多角形衝突部の試験後断面（参考文献(1)より）

4. 最新の研究報告の適用に係る考察

4.1 最新の研究報告について

3.2より、剛飛来物の質量及び衝突速度を変化させた場合においても、試験結果に有意な差はなく、 B R L式による評価は実現象よりも保守的に評価できることが分かった。また、3.3より、剛飛来物の形状が多角形（四角形、六角形）の場合であっても、その周長が等価な円の直径を等価直径(D)として入力することにより、鋼板の貫通限界厚さ(又は貫通限界衝突速度)を保守的に評価可能であることが分かった。

以上のことが実験的に確認された飛来物に比べ、設計飛来物の質量及び寸法はいずれも異なるため、最新の研究報告の適用の妥当性について4.2及び4.3に示す。

4.2 設計飛来物へのB R L式の適用について

2015年度電力中央研究所の研究報告（参考文献（2））（以下、「従来の研究報告」という。）では、設計飛来物と等価な断面形状（250×250mm（設計飛来物は200×300mm））及び質量を大きくすることにより同等以上の運動エネルギー（182～186kJ（設計飛来物は176kJ））を有する飛来物による衝突試験を実施している。竜巻影響評価ガイドに例示される設計飛来物の質量（135kg）及び寸法（200×300×4200mm）から、その板厚は4.26mmと算出できるが、本試験では設計飛来物より厚い板厚（4.5mm）の飛来物による試験を実施し、衝突部の変形によってエネルギーの一部が吸収され、9mmの板厚で非貫通の試験結果が得られたとしている（第8図、第1表参照）。

また、BRL式はタービンミサイルや設計飛来物に対する貫通評価において使用されてきた実績があることから、BRL式は飛来物の質量の大きさに係らず適用できるといえる。したがって、BRL式は設計飛来物の質量及び寸法においても適用できる。



第8図 試験後の柔パイプ重錘の変形状況（参考文献(2)より）

第1表 設計飛来物と等価な断面形状及びエネルギーを有する試験体を用いた鋼板（SS400：板厚9mm）の貫通試験の結果（参考文献(2)より）

	設計飛来物	貫通試験 SS-5 (柔飛来物)	(参考) 貫通試験 SS-1 (剛飛来物) ※
飛来物サイズ (mm)	200×300×t4.26	250×250×t4.5	250×250×t16
衝突エネルギー (kJ)	176	182	186
衝突速度 (m/s)	51	18.3	18.3
現象時間 (sec)	-	0.0652	0.0156
貫通の有無	-	無	有

※：貫通試験SS-1（剛飛来物）は、衝突断面の周長が設計飛来物とほぼ同等ではあるものの、その板厚（16mm）を前提とした場合、質量又は奥行きが設計飛来物と異なるため、本試験結果は参考とする。

4.3 最新の研究報告の適用について

4.1より、飛来物の質量を6 kg～11.5kgの範囲で変化させた場合でも、試験結果に有意な差はなく、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を用いたBRL式で貫通限界厚さを評価できることを確認した。

さらに、4.2より、BRL式は飛来物の質量の大きさに係らず適用できることを確認した。

以上より、設計飛来物の質量及び寸法においても、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することにより、鋼板の貫通限界厚さは評価可能であるといえる。

最新の研究報告は、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することで貫通限界厚さを評価できることを多数の実験データから確認しているものであり、かつ、これと相反するような実験データは確認されていないことから、十分な信頼性があるものといえる。しかし、四角形衝突部の場合の貫通限界厚さ付近の実験データは十分とはいえない。したがって、最新の研究報告を設計飛来物に適用するにあたっては、実験的に非貫通の結果が確認されている値を貫通限界厚さとして採用することとする。

具体的には、実験的に非貫通の結果が確認された比率（BRL式による貫通限界厚さ／実験的に非貫通が確認された実測厚さ）を考慮する。すなわち、BRL式の算出結果を当該比率で除することによって得られる8.2mmを設計上担保する貫通限界厚さとする。

（設計飛来物を対象としたBRL式による貫通限界厚さ）÷（研究報告の実験時のBRL式による貫通限界厚さ／研究報告で実験的に非貫通が確認された実測厚さ）

$$= 7.9 \div 0.97 = 8.2$$

なお、飛来物が鋼板に対して斜めに衝突する場合、局部的に厳しい結果となることが予想されるが、飛来物が貫通するために鋼板が破断する範囲は垂直に衝突する場合よりも大きくなる。また、実際には鋼板に衝突した際の角度を維持したままではなく、回転方向の運動になることが考えられる。したがって、鋼板に対して垂直に衝突しなければ、飛来物自体が鋼板を貫通し、さらに竜巻防護対象施設へ衝突することは考えられないため、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。

5. まとめ

以上のことから、最新の研究報告の内容は、設計飛来物の質量及び寸法に対する鋼板の貫通評価においても適用できる。

最新の研究報告は、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することで貫通限界厚さを評価できることを多数の実験データから確認しているものであり、かつ、これと相反するような実験データは得られていないことから、十分信頼性があるものといえる。しかし、四角形衝突部の場合の貫通限界厚さ付近の実験データは十分ではないことを踏まえ、周長が同一の円の直径を等価直径としてBRL式で評価した結果に、実験的に非貫通の結果が確認されている値を採用することとし、設計上担保する貫通限界厚さを8.2mmとする。

6. 参考文献

- (1) 電力中央研究所報告O19003：竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究-BRL式の適用性に関する基礎検討-
- (2) 電力中央研究所報告N15004：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

以上