

## 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について

## 1. 概要

図 1 及び図 2 に示す原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉及び機器搬入口内側扉）についての貫通評価は以下のとおり実施しており、各手法について説明する。

- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉（潜戸）：
  - スキンプレート厚さと B R L 式による貫通限界厚さとの比較
- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉（大扉）及び機器搬入口内側扉：
  - 両扉の鋼板によるエネルギー吸収量と設計飛来物の運動エネルギーとの比較

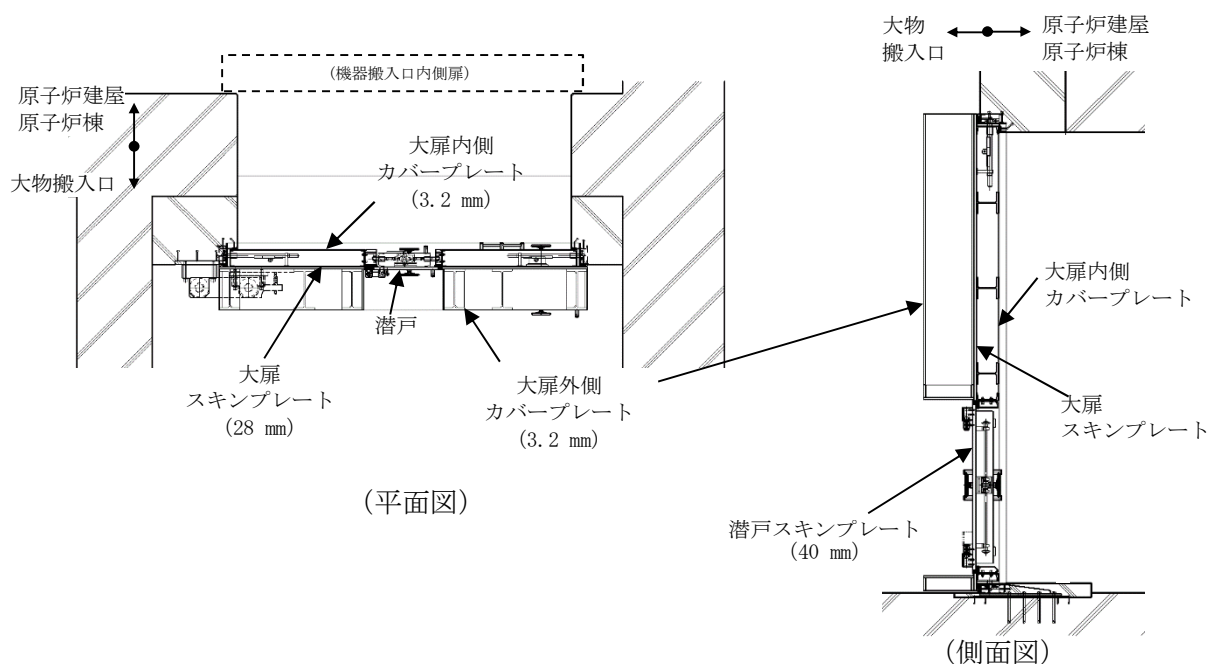


図 1 原子炉建屋原子炉棟水密扉

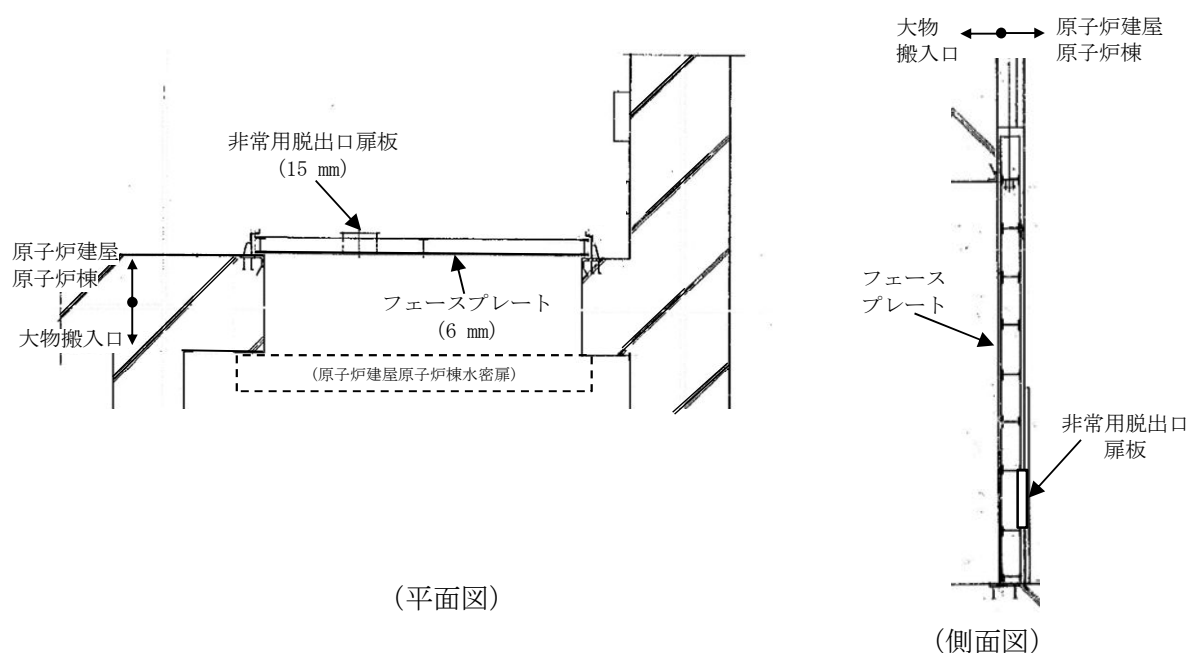


図 2 機器搬入口内側扉



## 2. 貫通評価手法

### 2.1 原子炉建屋原子炉棟水密扉（潜戸）の貫通評価

鋼板の貫通限界厚さを評価するために用いられるBRL式は以下の式で示される。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5mV^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}} \quad \dots \textcircled{1}$$

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)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 ( = 1.0)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の飛来速度 (m/s)

表1に示すBRL式への入力値から、水平に衝突する設計飛来物に対する貫通限界板厚は以下のとおり 32 mm となるが、潜戸のスキンプレーットの板厚はこれを上回る 40 mm であるため、潜戸を設計飛来物が貫通することはない。

表1 BRL式への入力値

記号	単位	値	備考
d	m	0.079	設計飛来物（鋼製材）の衝突断面の等価直径
K	—	1.0	鋼板の材質に関する係数
m	kg	135	設計飛来物（鋼製材）の質量
V	m/s	51	設計飛来物（鋼製材）の水平速度

貫通限界板厚：T

$$T = \left\{ \frac{0.5 \times 135 \times 51^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot 1^2 \cdot (0.079)^{\frac{3}{2}}} \right\}^{\frac{2}{3}}$$

$$= 32 \text{ (mm)}$$

### 2.2 原子炉建屋原子炉棟水密扉（大扉）及び機器搬入口内側扉の貫通評価

原子炉建屋原子炉棟水密扉（大扉）及び機器搬入口内側扉の扉板は、単品では上記の 32 mm 未満の厚さとなるため、以下に示すエネルギー吸収量に基づく貫通評価を実施した。

BRL式の右辺の分子には飛来物の運動エネルギーに相当する項（ $0.5mV^2$ ）があることに着目し、式を変形すると

$$0.5mV^2 = \left( 1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}} \right) \cdot T^{\frac{3}{2}} \quad \dots \textcircled{2}$$

となることから、BRL式は、ある厚さTの鋼板を貫通するために必要な飛来物の運動エネルギー



ギを評価する式と見なすことが出来る。

いま、複数の鋼板（ $n$  枚）を考慮し、 $i$  枚目の板厚を  $t_i$  とすると、 $i$  枚目の板で吸収可能なエネルギー  $e_i$  は、

$$e_i = \left( 1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}} \right) \cdot t_i^{\frac{3}{2}} \quad \dots \textcircled{3}$$

$n$  枚の板により吸収可能な飛来物の運動エネルギー  $E$  は

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

となり、 $E_{(n)}$  が飛来物の初期の運動エネルギー  $E_0$  を上回れば、飛来物の貫通を阻止できることになる。

図 1 及び図 2 に示すとおり、原子炉建屋大物搬入口扉（原子炉建屋原子炉棟水密扉及び機器搬入口内側扉）は直列に配置されており、扉には計 4 枚の鋼板が取り付けられている。

表 1 に示す B R L 式への入力値から、両扉による吸収可能エネルギー  $E$  は以下のとおりとなる。

表1 B R L 式への入力値

記号	単位	値	備考
d	m	0.0790	設計飛来物（鋼製材）の衝突断面の等価直径
K	—	1.0	鋼板の材質に関する係数
$t_1$	m	0.0032	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 （大扉外側カバープレート）
$t_2$	m	0.0280	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 （大扉スキンプレート）
$t_3$	m	0.0032	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 （大扉内側カバープレート）
$t_4$	m	0.0060	機器搬入口内側扉の板厚 （フェースプレート※）

※：非常脱出口扉板（15 mm）とのうち薄い方で代表

原子炉建屋原子炉棟水密扉（大扉）による吸収可能エネルギー： $e_1 \sim e_3$

$$e_1 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.0790)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0032)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 5.7 \text{ (kJ)}$$

$$e_2 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.0790)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0280)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 149.7 \text{ (kJ)}$$

$$e_3 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.0790)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0032)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 5.7 \text{ (kJ)}$$



機器搬入口内側扉（フェースプレート）による吸収可能エネルギー： $e_4$

$$e_4 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.0790)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0060)^{\frac{3}{2}}$$
$$= 14.8 \text{ (kJ)}$$

両扉による吸収可能エネルギー： $E$

$$E = e_1 + e_2 + e_3 + e_4$$
$$= 175.9 \text{ (kJ)}$$

となる。

一方，設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー $E_0$ は，

$$E_0 = 0.5 \times 135 \times 51^2$$
$$= 175.6 \text{ (kJ)}$$

であるため，両扉にて設計飛来物の運動エネルギーを全て吸収可能であり，設計飛来物の貫通を防止できると評価した。



## 複数枚の障壁による貫通評価の考え方について

## 1. BRL式による残留速度評価の事例

米国原子力委員会（AEC）（当時）の承認を受けた、Bechtel 社のトピカルレポート<sup>(1)</sup>の「2.3 Multiple Element Barriers」において、複数の鋼板を考慮した貫通評価における残留速度を、下式により評価する方針が示されている。

$$V_r = \left( V_s^2 - V_p^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$V_r$  : ある要素を貫通した後の飛来物の残留速度

$V_s$  : 衝突前の飛来物の速度

$V_p$  : ある要素を貫通する場合に必要な最低速度（BRL式により求める）

この式は、同文献の Appendix C にも示されているとおり、貫通前後の飛来物の運動エネルギーの差を表す

$$0.5m V_r^2 = 0.5m V_s^2 - 0.5m V_p^2$$

から導出されたもので、この中の  $0.5m V_p^2$  は、個々の障壁をちょうど貫通するために必要な運動エネルギーとして、BRL式に当該障壁の厚さ  $T$  を入力することで求められる（③式の  $e_i$  に相当する）。

即ち、今回用いた手法である、個々の障壁により吸収される飛来物の運動エネルギーをBRL式にて評価していることと同じ考えに基づいたものとなっている。

また、上記のように、残留速度を障壁通過前後の速度の2乗の差の平方根（＝運動エネルギーの差）から導出する考え方は、その他の文献<sup>(2)</sup>にも記載されており、工学的には特殊なものではないと考えている。

## 2. 評価における保守性の確保について

今回の評価に際しては、保守性について以下のとおり考慮している。このため、算出された評価値は許容限界にほぼ等しい値となっているものの、実際には余裕が確保されているものと判断している。

## 2.1 BRL式に含まれる保守性の把握

公開されている衝突試験において、BRL式による貫通限界板厚の評価値は、実際の限界板厚に対し保守的な結果を示すことが示されている<sup>(3)</sup>。

即ち、1枚の障壁が吸収する飛来物の運動エネルギーを少なめに評価していることとなり、今回の評価も保守側の結果になる。

## 2.2 実現象を考慮した保守性の確保

実際の複数枚の障壁の貫通において想定される以下事象について、保守性を考慮している。

## a. 障壁通過後の飛来物の姿勢の変化

障壁を通過した後では、飛来物の姿勢が変化することで次の障壁に対し垂直に入射しない



ことも考えられるが、本評価では、全ての障壁に対し垂直に入射し続けるものとして扱っている。

b. 障壁通過後の飛来物の先端形状の変化

障壁を通過した後では、飛来物の先端が変形し鈍い形状に変化することも考えられるが、本評価では、飛来物によらず次の障壁に衝突する場合も当初の先端形状を維持するものとして扱っている。

なお、衝突時において飛来物は平板から圧縮荷重を受けることになるため、衝突によって非保守側の変形（先端が鋭くなる様な変形）は起こらないと判断している。

### 2.3 端数処理による影響

今回の評価で端数処理をしている箇所は下表のとおりであり、全て保守側の設定となっている。

パラメータ	端数処理	備考
設計飛来物の 等価直径： $d$	切捨	③式より、 $d$ が小さい方がエネルギー吸収量は小さくなる
扉の吸収エネルギー： $e_1 \sim e_4$	切捨	
設計飛来物の 運動エネルギー： $E_0$	切上	

#### <参考文献>

- (1) DESIGN OF STRUCTURES FOR MISSILE IMPACT, BC-TOP-9A Rev.2, Bechtel Power Corp., 1974
- (2) Concrete Structures Under Projectile Impact, Fang, Q, Wu, H, Springer Nature, 2017
- (3) 電力中央研究所, 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手法の提案, 研究報告 N15004, 2015.10

以 上