

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BRL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

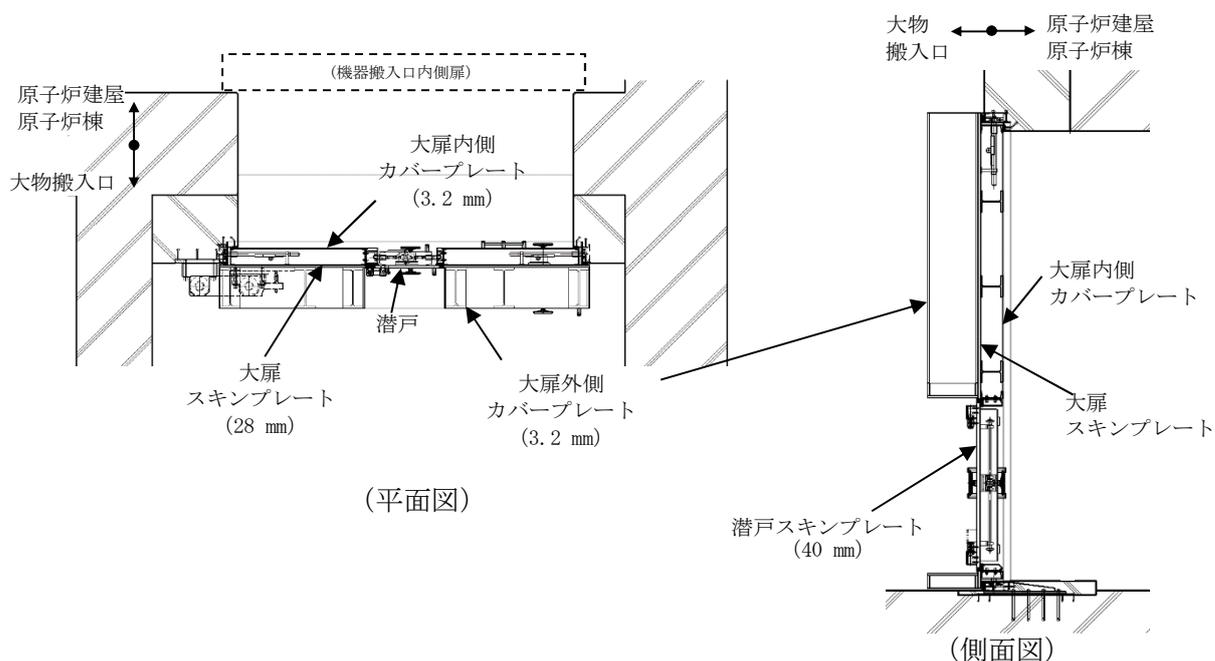


図1 原子炉建屋原子炉棟水密扉

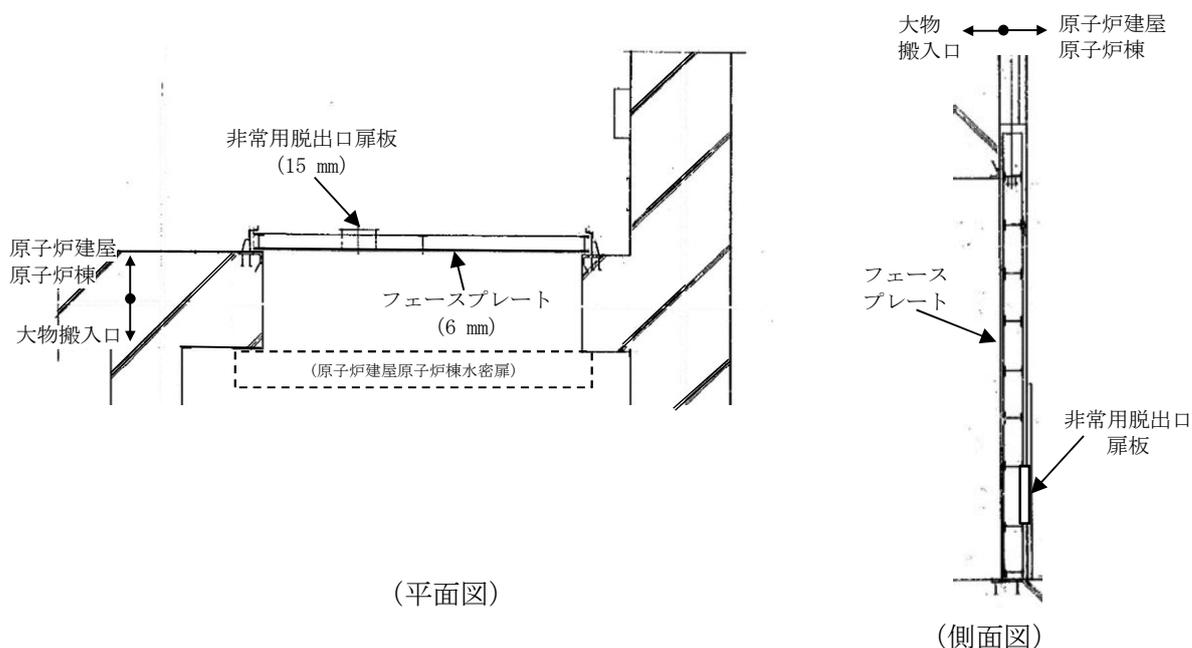


図2 機器搬入口内側扉

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。

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

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32mmとなるが、潜戸のスキンプレートの板厚はこれを上回る40mm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32mm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(0.5mV²)があることに着目し、式を変形すると

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

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BRL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 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
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	0.028	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	0.006	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： $e_1 \sim e_3$

$$e_1 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.079)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0032)^{\frac{3}{2}}$$

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

$$e_2 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.079)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.028)^{\frac{3}{2}}$$

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

$$e_3 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.079)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.0032)^{\frac{3}{2}}$$

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

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

$$e_4 = \left\{ 1.4396 \times 10^9 \times 1^2 \times (0.079)^{\frac{3}{2}} \right\} \times (0.006)^{\frac{3}{2}}$$
$$= 14.8 \text{ (kJ)}$$

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、

$$E_0 = 0.5 \times 135 \times 512$$
$$= 175.6 \text{ (kJ)}$$

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

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⁽¹⁾ 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⁽²⁾ 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。

(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