

屋内の施設で外気と繋がっている施設の竜巻影響評価

1. 評価方針

高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の建家内に設置され、外気と繋がっているセル換気系統、緊急放出系統、槽類換気系統、セル換気系統及び固化セル換気系統のうち、ダクト（配管）、排風機及びフィルタのケーシングについて、廃止措置計画用設計竜巻（以下「設計竜巻」という。）による気圧差による荷重に対する構造健全性を評価する。

構造健全性としては、ダクト（配管）、排風機及びフィルタのケーシングの鋼板に面外荷重と面内荷重による応力が生じることを考慮し、設計竜巻荷重により鋼板が塑性変形せず、系統の健全性が維持されることを確認する。なお、ダクト（配管）、排風機及びフィルタのケーシングは建家内に設置されていることから、竜巻による風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は考慮しない。

また、外気の気圧低下が発生した場合において一時的に差圧が逆転した際に、閉じ込め機能の喪失に至らないことを確認する。

2. 評価対象及び評価部位

2.1 評価対象

○高放射性廃液貯蔵場（HAW）

- ・セル換気系のダクト（角ダクト、丸ダクト）
- ・セル換気系のフィルタ（ケーシング）
- ・セル換気系の排風機（ケーシング）
- ・緊急放出系のダクト（丸ダクト）
- ・緊急放出系のフィルタ（ケーシング）

○ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟

- ・槽類換気系の配管
- ・槽類換気系のフィルタ（ケーシング）
- ・槽類換気系の排風機（ケーシング）
- ・セル換気系のダクト（丸ダクト）
- ・セル換気系のフィルタ（ケーシング）
- ・セル換気系の排風機（ケーシング）
- ・固化セル換気系のダクト（丸ダクト）
- ・固化セル換気系のフィルタ（ケーシング）

- ・固化セル換気系の排風機（ケーシング）

2.2 評価部位

- ・ダクトの鋼板（配管）
- ・排風機（ケーシング）
- ・フィルタ（ケーシング）

3. 評価方法

3.1 角ダクト

3.1.1 考慮すべき荷重

角ダクトの鋼板に作用する荷重の概要図を図3.1.1-1に示す。角ダクトの設計竜巻による気圧差による影響評価で考慮する荷重は以下のとおり。

- ・竜巻によりダクトにかかる外圧P
(P = 最大気圧低下量 ΔP_{\max} (別添6-1-1-4 「基準竜巻及び設計竜巻の設定」 参照))
- ・運転時の圧力
- ・ダクト自重

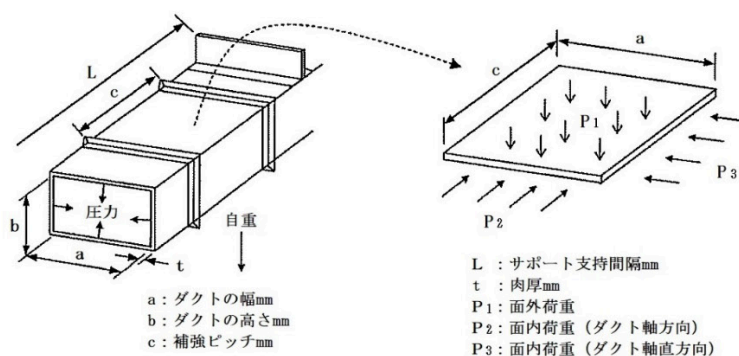


図3.1.1-1 角ダクト鋼板に作用する荷重の概要図

3.1.2 発生応力の設定

(1) 面外荷重による発生力

面外荷重に対する評価は、ダクト鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された4辺単純支持（周辺で水平、垂直方向の変位拘束、たわみ角は自由）の矩形板と仮定して行う。ダクト鋼板は、面外荷重により大きく撓み、膜引張応力状

態で応力の釣合いが保たれるため、大撓みの式が適用できる。

大撓みの式に、鋼板の自重 D_p と外圧 P を適用したものを式①、②に示す。式①、②により、鋼板における最大発生応力 σ_{max} 及び最大変位量 δ_{max} が得られる。

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \delta_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{max}+4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{max}+4t)}{c^2} \right\} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^6 E t^4} (P + g D_p) = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 c^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left(\frac{\delta_{max}}{t} \right)^3 \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、

- σ_{max} : 最大発生応力 (MPa)
- δ_{max} : 最大変位量 (mm)
- a : ダクト幅 (内寸) (mm)
- c : 補強ピッチ (mm)
- t : ダクト板厚 (mm)
- P : ダクトにかかる外圧 (MPa)
- D_p : 単位面積当たりのダクト鋼板の質量 (kg/mm²)
- g : 重力加速度 9.80665 (m/s²)
- π : 円周率
- E : ヤング率 (MPa)
- ν : ポアソン比

(2) 面内荷重による発生力

薄肉の鋼板は圧縮荷重によって弾性座屈を起こすが、ダクト自体の耐力は弾性安定限界より遥かに大きく、クリッピングの発生限界によって定まるものとして評価を行う。軸方向と軸直方向の面内荷重の概要図を図 3.1.2-1 に、鋼板と補強部材による面内荷重の概要図を図 3.1.2-2 に示す。

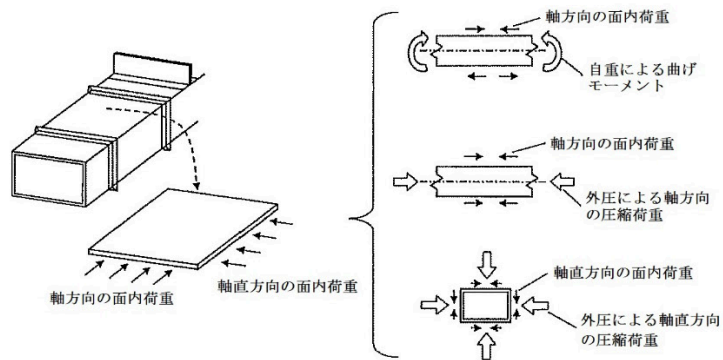


図 3. 1. 2-1 軸方向と軸直方向の面内荷重

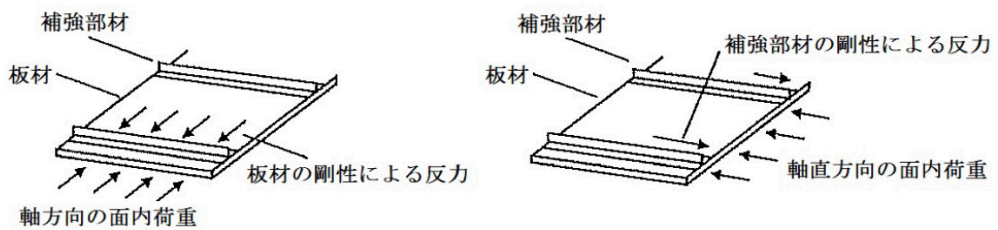


図 3. 1. 2-2 鋼板と補強部材による面内荷重

クリッピングの発生限界を評価するための概念としては、“有効巾” という考えがある。鋼板を図 3. 1. 2-3 に示すように、両面のウェブにより単純支持された梁と仮定すると、鋼板の中央部は面内荷重により弾性座屈を起こし、荷重を負担することができない状態となる。

ただし、支持端より一定の範囲では圧縮荷重を負担できる範囲が存在する。この範囲を有効巾 ω と呼ぶ。

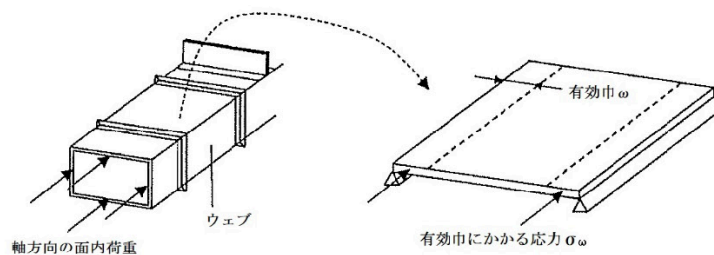


図 3. 1. 2-3 有効巾の算出に適用するモデル

面内荷重により有効巾にかかる応力を σ_ω とすると、有効巾 ω と σ_ω は式③の関係を
持つ事が知られている。

$$\omega = \frac{\pi t}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_\omega}} \quad \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

σ_ω が降伏応力 σ_y を超えた時にクリッピングが生じると仮定すると、 $\sigma_\omega = \sigma_y$ とし
た場合の ω がクリッピングの生じない範囲での最小値の ω となる。

当該評価では $\sigma_\omega = \sigma_y$ とした場合の ω を用いる。

a. 外圧による発生応力

外圧により、鋼板には abP で表される大きさの軸方向の圧縮荷重が与えられ
る。これを図 3.1.2-4 に示す $8\omega t$ の面積で負担すると仮定すると、この面積にお
ける発生応力 σ_{P1} は式④で表される。

$$\sigma_{P1} = \frac{abP}{8\omega t} \quad \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

式③にて、 $\sigma_\omega = \sigma_y$ とした場合の ω を式④に代入すると、式⑤が得られる。

$$\sigma_{P1} = \frac{abP}{8\pi t^2} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{E}} \quad \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

ここで、

- σ_{P1} : 外圧による発生応力 (MPa)
- a : ダクト幅 (内寸) (mm)
- b : ダクト高さ (内寸) (mm)
- t : ダクト板厚 (mm)
- π : 円周率
- E : ヤング率 (MPa)
- ν : ポアソン比
- σ_y : 降伏応力 (MPa)

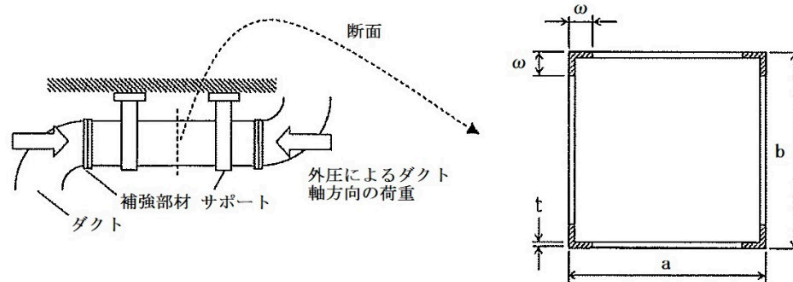


図 3.1.2-4 荷重を負担する領域

b. 自重による発生応力

自重等により、ダクトには曲げモーメントが生じる。この曲げモーメントに関し、ウェブでの応力分布が線形で、中立面がフランジの両側から等距離の中央線上にあると仮定すると、曲げモーメントによる引張側のフランジにおける発生応力 σ_T と圧縮側のフランジにおける発生応力 σ_{P2} の関係式は式⑥で表される。フランジにおける荷重を負担する領域の概要図を図3.1.2-5に示す。

$$2\omega t\sigma_{P2} = at\sigma_T \quad \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

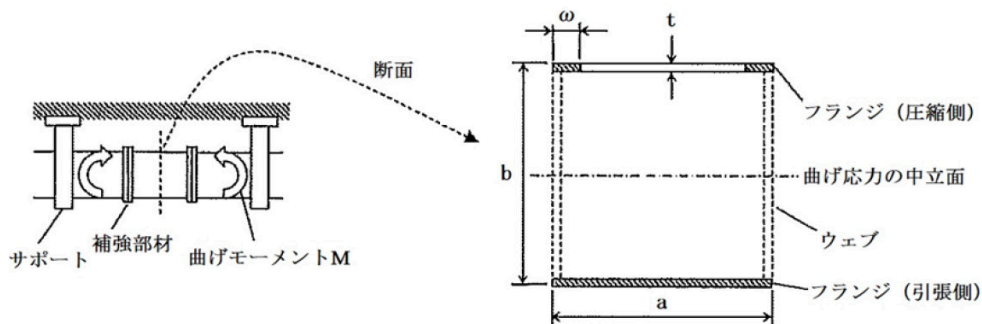


図 3.1.2-5 フランジにおける荷重を負担する領域

ダクトの断面 2 次モーメントを I とすると、ダクトにかかる曲げモーメント M は式⑦で表される。

$$M = \frac{2I\sigma_T}{b} \quad \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

式⑥、⑦を σ_T について整理すると式⑧が得られる。

$$M = \frac{4I\omega\sigma_{P2}}{ab} \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

式⑧に、 $\sigma_{\omega} = \sigma_y$ とした場合の ω を代入すると、 σ_{P2} と M の関係を示す式⑨が得られる。

$$M = \frac{tI}{ab} \sqrt{\frac{4\pi^2 E \sigma_{P2}^2}{3(1-\nu^2)\sigma_{\omega}}} = \frac{tI}{ab} \sqrt{\frac{4\pi^2 E (\sigma_{\omega} - \sigma_{P1})^2}{3(1-\nu^2)\sigma_{\omega}}} \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

$$\sigma_{\omega} = \sigma_{P1} + \sigma_{P2}$$

ここで、

M : ダクトにかかる曲げモーメント (N・mm)

σ_{P1} : 外圧による発生応力 (MPa)

a : ダクト幅 (内寸) (mm)

b : ダクト高さ (内寸) (mm)

I : 断面 2 次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{(a + 2t)(b + 2t)^3 - ab^3}{12}$$

t : ダクト板厚 (mm)

π : 円周率

E : ヤング率 (MPa)

ν : ポアソン比

3.1.3 許容値

竜巻による負圧を短期荷重とみなし、構成するダクト鋼板の変形を弾性域に抑えるため、長期荷重 (自重) + 短期荷重 (竜巻) による応力が降伏応力を超えない事を制限とする。

(1) 面外荷重による許容応力

長期荷重 (自重) + 短期荷重 (竜巻) による最大発生応力 σ_{max} を降伏応力 σ_y 以下とする。

$$\sigma_{max} (\text{面外荷重による最大発生応力}) \leq \sigma_y (\text{許容応力})$$

(2) 面内荷重による許容応力

a. 外圧に対する許容応力

外圧による軸方向の圧縮応力 σ_{P1} が降伏応力 σ_y 以下となるようにする。

$$\sigma_{P1} \text{ (外圧による発生応力)} \leq \sigma_y \text{ (許容応力)}$$

b. 長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対する許容応力

外圧（竜巻による差圧）、自重による軸方向の圧縮応力の和 σ_ω が降伏応力 σ_y を超えない事とし、下式を満足するものとする。

$$M_p \leq \frac{tl}{ab} \sqrt{\frac{4\pi^2 E(\sigma_y - \sigma_{P1})^2}{3(1 - \nu^2)\sigma_y}}$$

ここで、

$$M_p = \frac{g\mu L^2}{8}$$

g : 重力加速度 9.80665 (m/s²)

L : ダクトサポートの支持間隔 (mm)

μ : ダクトの単位長さ当たりの質量 (kg/mm)

3.2 丸ダクト（配管）

3.2.1 考慮すべき荷重

丸ダクトに作用する荷重の概要図を図3.2.1-1に示す。丸ダクト（配管）の設計竜巻による気圧差による影響評価で考慮する荷重は、以下のとおり。

- ・ 竜巻により丸ダクト（配管）にかかる外圧 P （＝最大気圧低下量 ΔP_{\max} ）
- ・ 運転時の圧力
- ・ 丸ダクト（配管）自重

丸ダクト（配管）は、耐圧壁を構成する管状の鋼板と成形・接続用の補強部材から成る。ダクトの耐力はクリッピングの発生限界にて規定される。

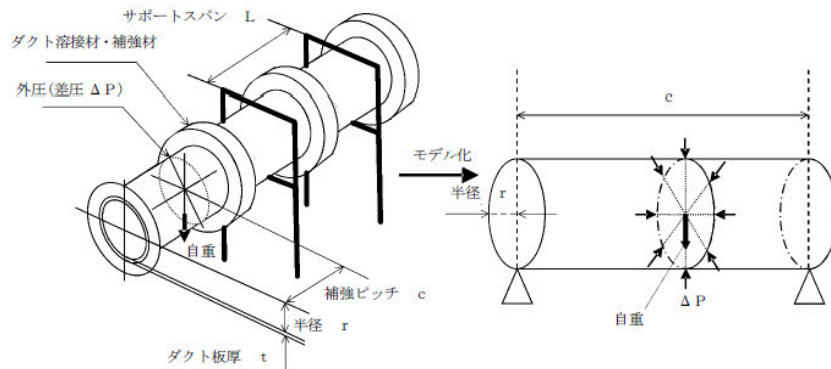


図3.2.1-1 丸ダクトの評価モデルの概要図

3.2.2 発生応力の設定

(1) 外圧によるクリッピング発生条件

外圧によりクリッピングが生じる際の周方向応力（座屈応力） σ_{crip} は、式⑩にて求められる。

$$\sigma_{crip} = \frac{k_p \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2 \quad \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

$$k_p = \frac{(1 + \beta^2)^2}{0.5 + \beta^2} + \frac{12Z_c^2}{\pi^4(1 + \beta^2)^2(0.5 + \beta^2)}$$

$$\beta = \frac{cn}{\pi r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{rt} \sqrt{1 - \nu^2}$$

ここで、

σ_{crip} : 周方向応力（座屈応力）(MPa)

k_p : 座屈係数

β : 円筒かくの座屈応力の式における係数

n（波数）は、「1, 2, 3……」と上げていき、 σ_{crip} が最小値となる値とする。

Z_c : 形状係数

r : 丸ダクト（配管）のダクト半径 (mm)

c : 補強ピッチ (mm)

- t : ダクト板厚 (mm)
- π : 円周率
- E : ヤング率 (MPa)
- ν : ポアソン比

(2) 自重によるクリッピング発生条件

自重等による曲げによりクリッピングが生じる際の曲げモーメント M_{crip} は、式⑪にて求められる。

$$M_{crip} = \frac{4\sqrt{2}}{27} \pi \frac{E}{1-\nu^2} r t^2 \quad \dots \dots \dots \textcircled{11}$$

3.2.3 許容値

(1) 外圧に対する許容値

外圧による周方向応力は、座屈応力 σ_{crip} を超えないこととする。

$$\sigma_{crip1} \text{ (外圧による周方向応力)} \leq \sigma_{crip} \text{ (座屈応力)}$$

ここで、

$$\sigma_{crip1} = \frac{Pr}{t} \quad \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

(2) 長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対する許容値

自重による曲げモーメント M_p と外圧 P の組合せが、下式を満足するものとする。

$$\left(\frac{M_p}{M_{crip}} \right)^2 + \frac{\sigma_{crip1}}{\sigma_{crip}} \leq \frac{1}{1.1} (= 0.9)$$

ここで、

$$M_p = \frac{g\mu L^2}{8}$$

L : ダクト（配管）サポートの支持間隔 (mm)

μ : ダクト（配管）の単位長さ当たりの質量 (kg/mm)

3.3 排風機（ケーシング）

3.3.1 考慮すべき荷重

排風機（ケーシング）に設計竜巻による気圧差による影響評価で考慮する荷重は、以下のとおり。

- ・排風機（ケーシング）にかかる外圧 P （＝最大気圧低下量 ΔP_{\max} ）
- ・運転時の圧力
- ・排風機（ケーシング）の自重

排風機（ケーシング）を丸ダクトとして考え、耐力はクリッピングの発生限界にて規定されるものとして評価する。

3.3.2 発生応力の設定

(1) 外圧によるクリッピング発生条件

外圧によりクリッピングが生じる際の周方向応力（座屈応力） σ_{crip} は、前述の式⑩にて求められる。

(2) 自重によるクリッピング発生条件

自重等による曲げによりクリッピングが生じる際の曲げモーメント M_{crip} は、前述の式⑪にて求められる。

3.3.3 許容値

(1) 外圧に対する許容値

外圧による周方向応力は、前述の式⑫で表される座屈応力 σ_{crip} を超えないこととする。

(2) 長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）に対する許容値

自重による曲げモーメント M_p と外圧 P の組合せが、下式を満足するものとする。

$$\left(\frac{M_p}{M_{crip}}\right)^2 + \frac{\sigma_{crip1}}{\sigma_{crip}} \leq \frac{1}{1.1} (= 0.9)$$

ここで,

$$M_p = \frac{g\mu L^2}{8}$$

g : 重力加速度 9.80665 (m/s²)

L : ケーシング長さ (mm)

μ : ケーシングの単位長さ当たりの質量 (kg/mm)

3.4 フィルタ (ケーシング)

3.4.1 考慮すべき荷重

フィルタ (ケーシング) 鋼板の設計竜巻による気圧差による影響評価で考慮する荷重は、以下のとおり。

- ・ ケーシング等の鋼板にかかる外圧 P (=最大気圧低下量 ΔP_{max})
- ・ 運転時の圧力
- ・ ケーシング等の鋼板の自重

3.4.2 発生応力の設定

最大面積を持つケーシングを4辺単純支持 (周辺で水平, 垂直方向の変位拘束, たわみ角は自由) の矩形板と仮定する。ケーシングの鋼板は, 面外荷重により大きく撓み, 膜引張応力状態で応力の釣合いが保たれるため, 大撓みの式が適用できる。

大撓みの式に, ケーシングの自重 D_p と外圧 P を適用したものを式⑬, ⑭に示す。式⑬, ⑭により, 鋼板における最大発生応力 σ_{max} 及び最大変位量 δ_{max} が得られる。

$$\sigma_{max} = \frac{\pi^2 E \delta_{max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{max} + 4t)}{b^2} \right\} \quad \cdot \cdot \text{⑬}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^6 E t^4} (P + gD_p) = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \frac{\delta_{max}}{t} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{\delta_{max}}{t} \right)^3 \quad \cdot \cdot \text{⑭}$$

ここで,

σ_{max} : 最大発生応力 (MPa)

δ_{max} : 最大変位量 (mm)

a, b : 矩形形状寸法 (mm) (ただし, 矩形寸法の短辺を a , 長辺を b とする。)

t : ケーシングの板厚 (mm)

P : ケーシングにかかる外圧 (Pa)

D_p	: 単位面積当たりのフィルタ（ケーシング）等の鋼材の質量 (kg/mm ²)
g	: 重力加速度 9.80665 (m/s ²)
π	: 円周 3.14159
E	: ヤング率 (MPa)
ν	: ポアソン比 0.3

3.4.3 許容値

竜巻による負圧を短期荷重とみなし、フィルタ（ケーシング）の鋼板の変形を弾性域に抑えるため、長期荷重（自重）＋短期荷重（竜巻）による最大発生応力 σ_{max} を降伏応力 σ_y 以下とする。

$$\sigma_{max} \text{ (面外荷重による最大発生応力)} \leq \sigma_y \text{ (許容応力)}$$

4. 外気の気圧低下時において一時的に差圧が逆転した場合の閉じ込め機能への影響

設計竜巻により、外気の気圧低下が発生した場合は、施設の負圧が一時的に担保できない可能性がある。一時的な差圧の逆転は、再処理施設安全審査指針に記載されている「原則として、常時負圧が保たれていること」との要求事項に対し、換気設備の過渡的な運転状態において以下のとおり安全上問題がないことを整理している。

- 外部電源喪失においては、換気系統の排風機の排気機能が一時的に低下するものの、非常用発電機系統に接続することにより、閉じ込め機能を維持することができる。
- 排風機の故障により、換気系統の排風機の排気機能が一時的に低下するものの、予備機が自動的に立ち上がることにより、閉じ込め機能を維持することができる。
- 仮に、換気系統の排風機が停止し、予備機が自動的に切り替わらず、排気機能が停止しても運転員による対応が可能であり、閉じ込め機能を維持することができる。

また、一時的に差圧の逆転が生じる可能性のある建家の換気系統の排風機の停止時には、入域者に対し、半面マスクの着用、実施中の作業の中断及び当該建家からの退避を指示することが定められている。

5. 評価結果

5.1 構造健全性評価

角ダクトの評価結果を表5-1に、丸ダクト（配管）の評価結果を表5-2、排風機（ケーシング）の評価結果を表5-3に、フィルタ（ケーシング）の評価結果を表5-4に示す。これら結果のとおり、設計竜巻により生じる気圧差による荷重に対して構造健全性は確保できる。

5.2 外気の気圧低下時において一時的に差圧が逆転した場合の閉じ込め機能への影響

設計竜巻により、換気設備の過渡的な運転状態における一時的な差圧の逆転が生じたとしても、放射性物質が機器及び換気系統内に閉じ込められている状態であること、竜巻による気圧低下が非常に短時間であること、あらかじめ対応要領が定められていることで排風機の起動、切り替え対応等が可能であることから、閉じ込め機能は維持できると考える。

表5-1 角ダクトの評価結果

施設	ダクトサイズ [幅×高さ×板厚] (mm)	材質	評価温度 (°C)	ヤング率*1 E (MPa)	面外荷重 (MPa)		外圧による面内荷重 (MPa)		長期(自重) + 短期(竜巻)による面内荷重		評価
					発生応力 $\bar{\sigma}_{max}$	許容応力*1 $\bar{\sigma}_y$	発生応力 $\bar{\sigma}_{PI}$	許容応力*1 $\bar{\sigma}_y$	発生モーメント M_P (kN・mm)	許容値*2 (kN・mm)	
高放射線 廃液貯蔵場 (HAW) セル換気系	400×400×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	107	215	1.7	215	2.4×10 ³	3.6×10 ⁴	○
	650×250×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	116	215	1.8	215	1.6×10 ³	1.9×10 ⁴	○
	800×450×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	120	215	3.9	215	4.1×10 ²	3.5×10 ⁴	○
	800×800×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	120	215	6.8	215	3.8×10 ²	7.0×10 ⁴	○
	1000×1000×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	128	215	10.6	215	9.3×10 ²	8.6×10 ⁴	○
	1100×600×2.3	SPCC	40	2.01×10 ⁵	132	215	7.0	215	7.9×10 ²	4.6×10 ⁴	○

*1: SS400として評価。

$$*2: \frac{tI}{ab} \sqrt{\frac{4\pi^2 E(\sigma_y - \sigma_{PI})^2}{3(1-\nu^2)\sigma_y}}$$

表5-2 丸ダクト (配管) の評価結果 (1/2)

施設	対象ダクト	外径 (mm) 又は呼び径 (A) ×板厚 (mm) ×補強ピッチ (m)	材質	評価温度 (°C)	ヤング率 *1 E (MPa)	気圧差による周方向 応力 (MPa)		長期(自重)+短期(巻巻) による制限値	評価	
						発生応力 σ_{cripl}	許容応力 σ_{crip}			組合せ荷重比 *2
高放射性 廃液貯蔵場 (HAW)	セル 換気系	$\phi 850 \times 3.0 \times \text{約} 3.4$	SPOC	40	2.01×10^5	1.9	14.7	0.13	0.9	○
		$\phi 850 \times 3.0 \times \text{約} 1.8$	SPOC	40	2.01×10^5	1.9	27.0	0.07	0.9	○
	緊急 放出系	$400 \times 9.0 \times \text{約} 7.3$	SUS304L	100	1.89×10^5	0.3	44.9	0.01	0.9	○
		$400 \times 9.0 \times \text{約} 1.5$	SUS304L	100	1.89×10^5	0.3	225.1	0.01	0.9	○
ガラス固化 技術開発施設 (TVF)	セル 換気系	$\phi 1400 \times 4.0 \times \text{約} 4.0$	SUS304	60	1.92×10^5	5.2	13.4	0.38	0.9	○
		$\phi 1400 \times 3.2 \times \text{約} 4.3$	SEHC	60	2.00×10^5	6.5	9.5	0.68	0.9	○
		$\phi 1400 \times 3.2 \times \text{約} 3.0$	SEHC	60	2.00×10^5	6.5	13.2	0.49	0.9	○
		$\phi 1400 \times 3.2 \times \text{約} 3.0$	SEHC	60	2.00×10^5	6.5	13.2	0.49	0.9	○
		$\phi 2000 \times 3.2 \times \text{約} 2.6$	SEHC	60	2.00×10^5	9.3	12.9	0.71	0.9	○
		$\phi 1300 \times 3.2 \times \text{約} 2.0$	SEHC	60	2.00×10^5	6.0	21.0	0.29	0.9	○

*1 : SPOC 及び SEHC は、SS400 として評価。

*2 : 組合せ荷重比 : $\left(\frac{M_P}{M_{crip}} \right)^2 + \frac{\sigma_{cripl}}{\sigma_{crip}}$

表5-2 丸ダクト (配管) の評価結果 (2/2)

施設	対象ダクト	外径 (mm) 又は呼び径 (A) ×板厚 (mm) ×補強ピッチ (m)	材質	評価温度 (°C)	ヤング率*1 E (MPa)	気圧差による周方向応力 (MPa)		長期(自重)+短期(巻巻)による制限値		評価
						発生応力 σ_{cripl}	許容応力 σ_{crip}	組合せ荷重比*2	制限値	
ガラス固化 技術開発施設 (TVF)	槽類 換気系	φ 165. 2×5. 0×約 3. 7	SUS304	190	1. 83×10 ⁵	1. 1	66. 2	0. 02	0. 9	○
		φ 216. 3×6. 5×約 1. 9	SUS304	190	1. 83×10 ⁵	1. 1	236. 4	0. 01	0. 9	○
		φ 216. 3×6. 5×約 5. 2	SUS304	260	1. 76×10 ⁵	0. 5	61. 8	0. 01	0. 9	○
ガラス固化 技術開発棟	固化 セル 換気系	φ 318. 5×10. 8×約 28. 1	SUS304	260	1. 76×10 ⁵	0. 5	74. 1	0. 01	0. 9	○
		φ 267. 4×9. 3×約 14. 7	SUS304	60	1. 92×10 ⁵	0. 2	85. 3	0. 01	0. 9	○
		φ 267. 4×9. 3×約 28. 4	SUS304	60	1. 92×10 ⁵	0. 6	85. 1	0. 01	0. 9	○

*1 : SPCC 及び SEHC は, SS400 として評価。

*2 : 組合せ荷重比 : $\left(\frac{M_p}{M_{crip}}\right)^2 + \frac{\sigma_{cripl}}{\sigma_{crip}}$

表5-3 排風機（ケーシング）の部材の強度評価結果

施設	対象	外板の最大面積 [外径×高さ×板厚] (mm)	材質	評価 温度 (°C)	ヤング率 *1 E (MPa)	気圧差による 周方向応力 (MPa)		長期(自重)+短期(竜巻) による制限値		評価
						発生 応力 σ_{cripl}	許容 応力 σ_{crip}	組合せ荷重比 *2	制限値	
高放射性 廃液貯蔵場 (HAW)	セル換気系 排風機 (ケーシング)	1376×1350×3.2	SPHC	40	2.01×10^5	3.0	84.4	0.04	0.9	○
	槽類換気系 排風機 (ケーシング)	800×614×3.2	SUS304	160	1.85×10^5	3.7	82.5	0.05	0.9	○
ガラス固化 技術開発施設 (TVF)	セル換気系 排風機 (ケーシング)	2367×720×4.5	SS400	40	2.01×10^5	4.1	76.3	0.06	0.9	○
	ガラス固化 技術開発棟	1140×100×4	SUS304	60	1.92×10^5	1.8	834.2	0.01	0.9	○

*1: SPCC 及び SEHC は、SS400 として評価。

$$*2: \text{組合せ荷重比} = \left(\frac{M_p}{M_{crip}} \right)^2 + \frac{\sigma_{cripl}}{\sigma_{crip}}$$

表5-4 フィルタ（ケーシング）の部材の強度評価結果

施設	対象	外板の最大面積 [幅×高さ×厚さ] (mm)	材質	評価 温度 (°C)	ヤング率*1 E (MPa)	着巻による気圧差 による最大発生応力 σ_{max} (MPa)	許容応力 σ_y (MPa)	評価	
高放射性 廃液貯蔵場 (HAW)	セル換気系 フィルタ (ケーシング)	850×2000×3	SUS304	100	1.89×10 ⁵	108	170	○	
	緊急放出系 フィルタ (ケーシング)	3740×2085×2.85	SUS304L	110	1.88×10 ⁵	133	142	○	
ガラス固化技 術開発施設 (TVF) ガラス固化技 術開発棟	槽類換気系 フィルタ (ケーシング)	910×2200×6	SUS304	100*2	1.89×10 ⁵	149	170	○	
	セル換気系 フィルタ (ケーシング)	2550×2270×3	SUS304	40	1.93×10 ⁵	130	205	○	
	セル換気系 フィルタ (ケーシング)	2490×2275×3.2	SEHC	40	2.01×10 ⁵	116	215	○	
	セル換気系 フィルタ (ケーシング)	830×2270×3	SUS304	40	1.93×10 ⁵	112	205	○	
	セル換気系 フィルタ (ケーシング)	2490×2270×3	SUS304	40	2.01×10 ⁵	111	205	○	
	固化セル換気系 フィルタ (ケーシング)	850×2640×5	SUS304	60	1.92×10 ⁵	97	188	○	

*1： SEHC は、SS400 として評価。

*2： 後段の排風機の吸込側の温度（60°C～100°C（参考値））から設定。

設計飛来物に対する建家外壁の健全性評価

1. 評価方針

竜巻影響評価のうち、竜巻防護施設を内包する高放射性廃液貯蔵場 (HAW) 及びガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の竜巻防護施設を内包する建家の側壁面及び屋上スラブに対して、設計飛来物として選定した鋼製材 (4.2 m×0.3 m×0.2 m, 135 kg) が衝突した際の健全性評価を行う (図 1, 2 参照)。

なお、建家の開口部 (窓, 扉等) については、竜巻防護対策として鋼板等による閉止措置を実施する。

2. 評価方法

コンクリートに対する貫通力は、設計飛来物の衝突に対する評価として、NEI07-13 及び米国 NRC の基準類に算定式として記載されている修正 NDRC 式 (①式) ⁽¹⁾ を用いて貫入深さ x_c を、Degen の式 (②式) ⁽²⁾ により貫通限界厚さ t_p を求めた。また、Chang の式 (③式) ⁽³⁾ により裏面剥離厚さ t_s を算定し、屋上スラブ及び側壁面の健全性を評価する。

$\frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 2$ の場合

$$\frac{x_c}{d} = 2 \left\{ \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

$\frac{x_c}{\alpha_c d} > 2$ の場合

$$\frac{x_c}{d} = \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1$$

①

$\frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52$ の場合

$$t_p = \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\}$$

$1.52 \leq \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 13.42$ の場合

$$t_p = \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) \right\}$$

②

ここで、

- x_c : 貫入深さ (cm)
 t_p : 貫通限界厚さ (cm)
 F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)
高放射性廃液貯蔵場 (HAW) : 210 (kgf/cm²)
ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟 : 225 (kgf/cm²)
 d : 設計飛来物の等価直径 27.6 (cm)
(飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)
 M : 設計飛来物の質量 135 (kg)
 V : 飛来物の衝突速度 (m/s)
水平 : 51 (m/s), 鉛直 : 34 (m/s)
 N : 飛来物の先端形状係数 1.14
「構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法」(土木学会) を参考に設定。保守的な評価となる, 非常に鋭い場合の数値を一律使用した。
 α_c : 飛来物の低減係数 : 1.0
 α_p : 飛来物の低減係数 : 1.0
保守的な評価となる, 剛の場合の数値を一律使用した。

$$t_s = 1.84 \cdot \alpha_s \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.13} \cdot \frac{\left(\frac{W \cdot V^2}{0.0980}\right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c'^{0.4}} \quad \text{③}$$

ここで、

- t_s : 裏面剥離厚さ (cm)
 f_c' : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)
高放射性廃液貯蔵場 (HAW) : 210 (kgf/cm²)
ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟 : 225 (kgf/cm²)
 d : 設計飛来物の直径 27.6 (cm)
(飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)
 W : 設計飛来物の質量 135 (kg)
 V_0 : 飛来物基準速度 61 (m/s)
 V : 飛来物の衝突速度 (m/s)
水平 : 51 (m/s), 鉛直 : 34 (m/s)
 α_s : 飛来物の低減係数 1.0
(保守的な評価となる, 剛の場合の数値を使用した。)

簡易評価の結果、裏面剥離や貫通する可能性のある側壁面及び屋上スラブに対して、「コンクリート構造物の衝撃破壊挙動解析に係るコード整備」（平成 15 年度 独立行政法人 原子力安全基盤機構）において検討例があり、更に JSMES NX6-2019「発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン」に詳細な解析手法に用いることができるものとして示されている衝突解析ソフト（AUTODYN）を用いて詳細評価を行った。

その結果、すべての評価ケースにおいて、衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋に破損は生じず、コンクリートの裏面剥離も生じない結果を得られている（別紙参考 6-1-4-4-4-7-1「設計飛来物の衝突による建家外殻の局部破壊（貫通又は裏面剥離）の詳細評価」参照）。

以上のことから、設計飛来物の衝突により、建家内の竜巻防護施設の健全性を維持できるものと考えている。

<参考文献>

- (1) KENNEDYR, P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design 37, 1976.
- (2) Degen, P.P.: Perforation of reinforced concrete slab by rigid missiles, ASCE, Vol. 106, No. ST7, pp. 1623-1642, 1980. 7.
- (3) CHANG, W. S.: Impact of solid missiles on concrete barriers, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 107. No. ST2, Feb. 1981.



図 1 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の平面図 (1/5)



図 1 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の平面図 (2/5)



図1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の平面図（3/5）

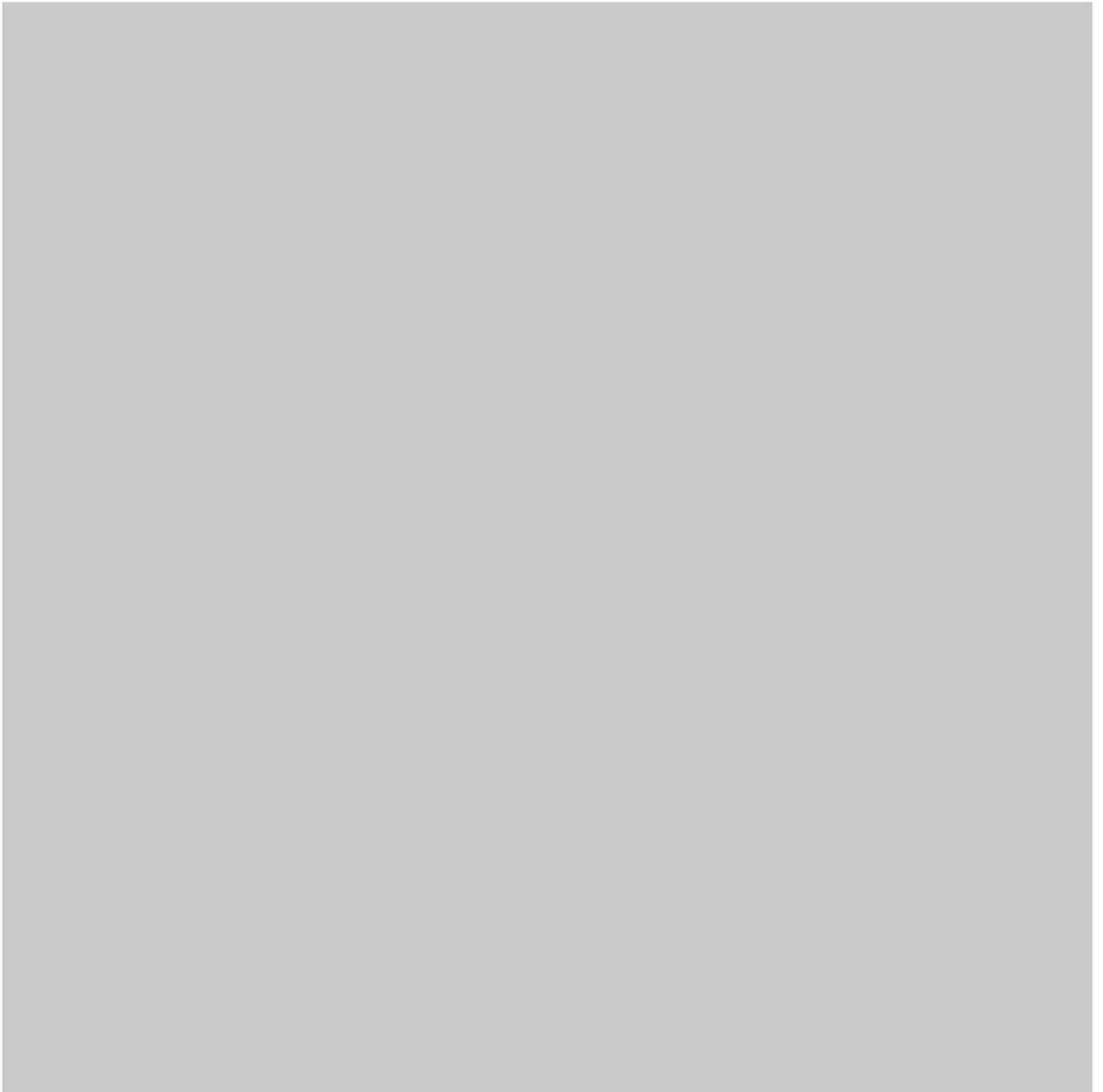


図1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の平面図（4/5）

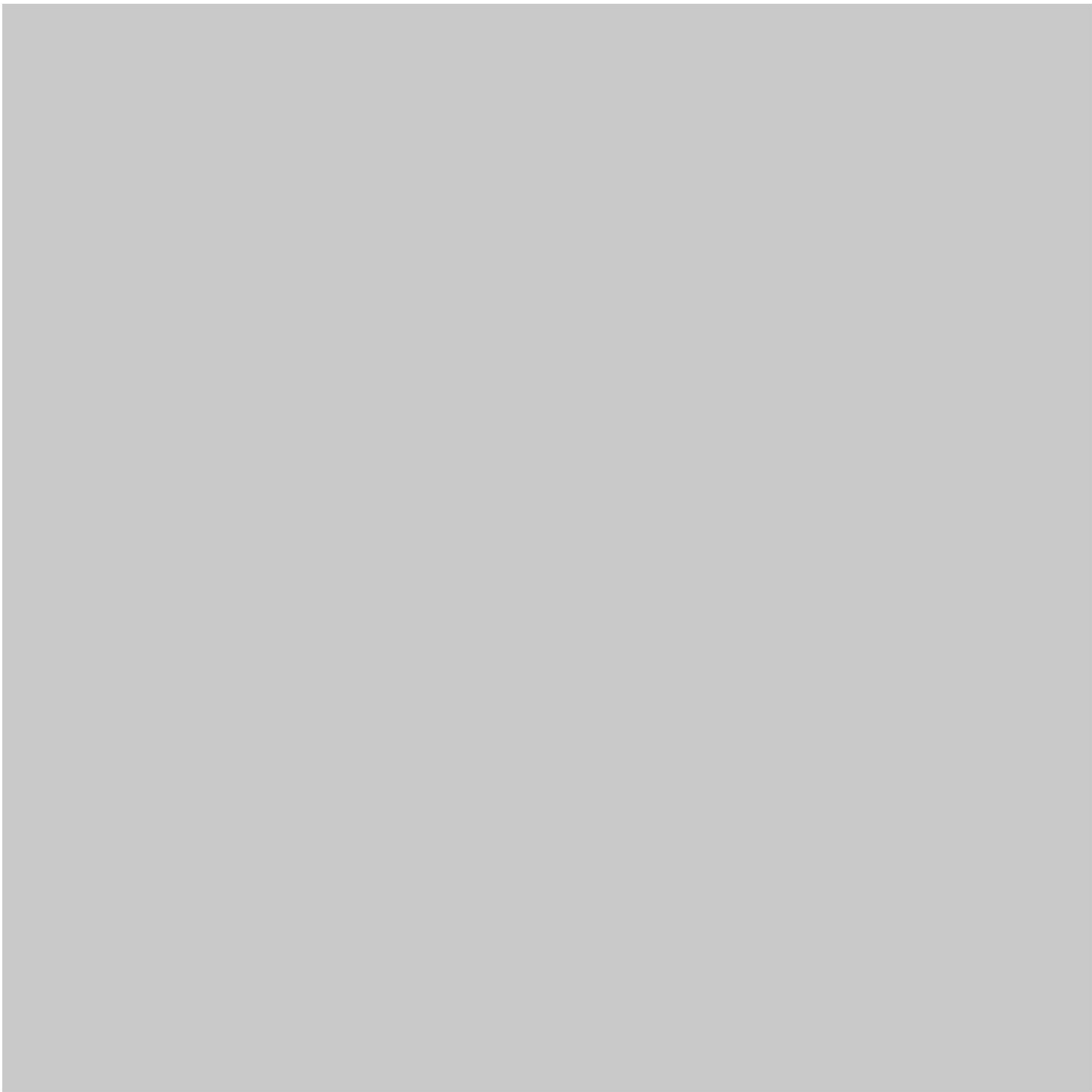


図1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の平面図（5/5）

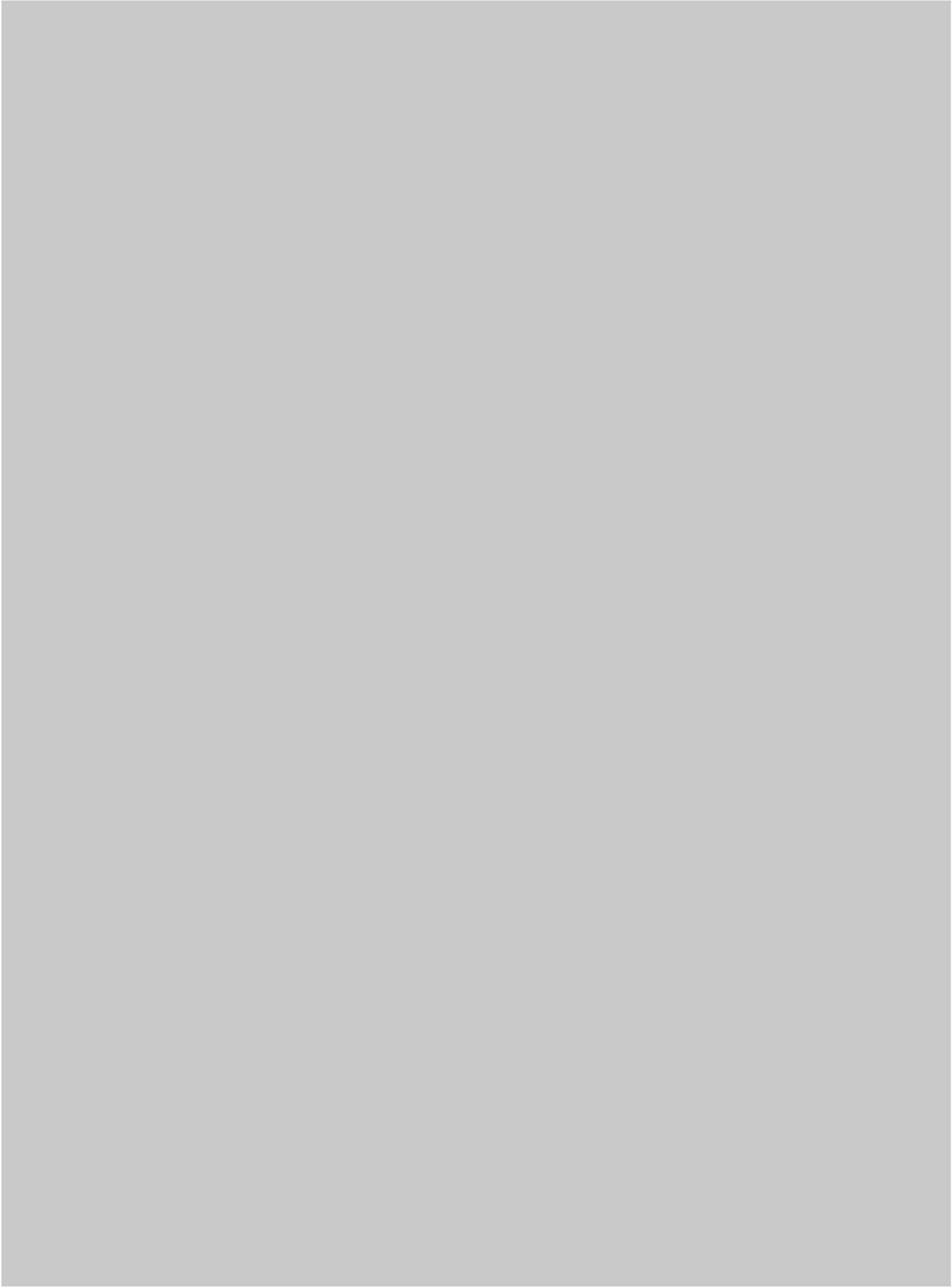


図2 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (1/4)



図2 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (2/4)



図 2 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (3/4)



図2 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (4/4)

表 1 設計飛来物によるコンクリートの局部破壊評価結果 (高放射性廃液貯蔵場 (HAW))

部位	簡易評価		詳細評価 (AUTODYN)
	貫通	裏面剥離	
側壁面	必要防護厚 (mm)	269	衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋は破損せず、裏面剥離は生じない。
	躯体厚 (mm)	しない	
屋上スラブ	必要防護厚 (mm)	191	衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋は破損せず、裏面剥離は生じない。
	躯体厚 (mm)	しない	

表 2 設計飛来物によるコンクリートの局部破壊評価結果 (ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟)

部位	簡易評価		詳細評価 (AUTODYN)	
	貫通	裏面剥離		
側壁面	必要防護厚 (mm)	265	衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋は破損せず、裏面剥離は生じない。	
	躯体厚 (mm)	しない		生じる可能性あり
		しない		
屋上スラブ	必要防護厚 (mm)	188	衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋は破損せず、貫通及び裏面剥離も生じない。	
	躯体厚 (mm)	生じる可能性あり		

*1 設計基準強度が同じ鉄筋コンクリート厚さと押えコンクリート厚さを考慮している値

*2 鉄筋コンクリートと押えコンクリートの設計基準強度が違いことから、鉄筋コンクリート厚さのみを考慮

設計飛来物の衝突による建家外殻の局部破壊（貫通又は裏面剥離）の詳細評価

1. 評価方針

再処理施設の竜巻影響評価として、竜巻防護施設を内包する施設である高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の外殻（屋上スラブ及び側壁面）に設計飛来物が衝突した際に裏面剥離又は貫通が生じることのないことを確認する。

2. 解析コード及び解析モデル

JSME S NX6-2019「発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン」に詳細な解析手法として示されている衝突解析ソフトである ANSYS AUTODYN（以下「AUTODYN」という。）を用いて詳細評価を行う。

AUTODYNにより、側壁面及び屋上スラブと設計飛来物との衝突によって生じる現象を解析し、貫通及び裏面剥離等の損傷状態を評価する。解析モデルは3次元体系とする。

2.1 設計飛来物の解析モデル

設計飛来物は外形 4200 mm×300 mm×200 mm の角形鋼管の鋼製材である（表 2.1-1）。設計飛来物はシェル要素でモデル化し、要素サイズは約 20 mm とした。設計飛来物は 300 mm×200 mm の面で、軸方向で側壁面及び屋上スラブに衝突するものとする。設計飛来物とした鋼製材の質量は 135 kg であり、材質は SS400 である。

設計飛来物の衝突速度は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成 25 年 6 月 19 日制定，令和元年 9 月 6 日改定）に記載されている鋼製材の最大速度を使用し、側壁面には最大水平速度 51 m/s を、屋上スラブには最大鉛直速度 34 m/s を使用する。

図 2.1-1 に要素分割図を示す。

2.2 側壁面及び屋上スラブの解析モデル

高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟に対して、竜巻防護施設の外殻として期待する側壁面及び屋上スラブのうち、躯体厚さが薄く、柱又は梁による支持間隔が長い側壁面及び屋上スラブを対して詳細解析を行う。

設計飛来物である鋼製材は、側壁面又は屋上スラブの中央に垂直に衝突するものとした。側壁面及び屋上スラブの周囲 4 面は境界条件によって固定した。側壁面及


び屋上スラブは、鉄筋コンクリートで構成されている。鉄筋コンクリートについては、コンクリートを6面体ソリッド要素、鉄筋をビーム要素でモデル化した。なお、押えコンクリートのあるものについては、押えコンクリートについても6面体ソリッド要素でモデル化した。

詳細評価に用いた各施設の側壁面及び屋上スラブの諸元を表 2.2-1 に、詳細評価に用いたコンクリートの物性値を表 2.2-2 に、詳細評価に用いた鉄筋の物性値を表 2.2-3 に示す。また、高放射性廃液貯蔵場（HAW）の側壁面及び屋上スラブの解析モデルを図 2.2-1 及び図 2.2-2 に、ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の側壁面及び屋上スラブの解析モデルを図 2.2-3 及び図 2.2-4 に示す。


3. 解析結果

- 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の側壁面 （鉄筋コンクリート厚さ+押えコンクリート厚さ）


衝突後の損傷状態図を図 3-1 に、鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図を図 3-2 に、相当塑性ひずみ及び設計飛来物の衝突方向速度の時刻歴を図 3-3 に、要素の衝突方向変位と時刻歴を図 3-4 に示す。

- 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の屋上スラブ （鉄筋コンクリート厚さ+押えコンクリート厚さ）

衝突後の損傷状態図を図 3-5 に、鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図を図 3-6 に、相当塑性ひずみ及び設計飛来物の衝突方向速度の時刻歴を図 3-7 に、要素の衝突方向変位と時刻歴を図 3-8 に示す。

- ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の側壁面 （鉄筋コンクリート厚さ）

衝突後の損傷状態図を図 3-9 に、鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図を図 3-10 に、相当塑性ひずみ及び設計飛来物の衝突方向速度の時刻歴を図 3-11 に、要素の衝突方向変位と時刻歴を図 3-12 に示す。

- ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の屋上スラブ （鉄筋コンクリート厚さ+押えコンクリート厚さ）

衝突後の損傷状態図を図 3-13 に、鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図を図 3-14 に、相当塑性ひずみ及び設計飛来物の衝突方向速度の時刻歴を図 3-15 に、要素の衝突方向変位と時刻歴を図 3-16 に示す。

4. 評価まとめ

以下に示す結果より、すべての評価ケースにおいて、衝突面から裏面にかけて亀裂が生じるものの、鉄筋に破損は生じず、コンクリートの裏面剥離も生じないものと判断できる。

- 設計飛来物は、衝突面より反跳していること、鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴とともに設計飛来物の衝突方向速度の時刻歴にほぼ変動がないことから、現象は収束し、有意な変形挙動はこれ以上生じないものと考えられる。
- 裏面の中央部では、ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の屋上スラブにおいて、最大約 21 mm 程度の変位が生じたものの、変位はそれ以上増加せず、弾性振動を繰り返していることから、裏面剥離は生じないものと判断できる。
- コンクリートには、衝突面から裏面にかけて十字状に亀裂が生じたものの貫通には至らず、コンクリートの速度ベクトル図から、すべての計算要素の変位は弾性振動しており、計算完了時まで、常に飛散方向の速度を持つ計算要素は存在しないことを確認した。
- 鉄筋に生じた最大相当塑性ひずみは、ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の屋上スラブに生じているものの、衝突面側で 0.56%、裏面側で 1.63%程度であり、破断ひずみ 14.8%に比べて十分小さく、破断には至らない。

表 2.1-1 設計飛来物の諸元

項目	値
質量	135 kg
形状	角形鋼管 長さ×幅×高さ：4200 mm×300 mm×200 mm
板厚	4.17 mm (形状(体積), 質量及び密度から算出)
材質	SS400
衝突方向	300 mm×200 mm の面で衝突

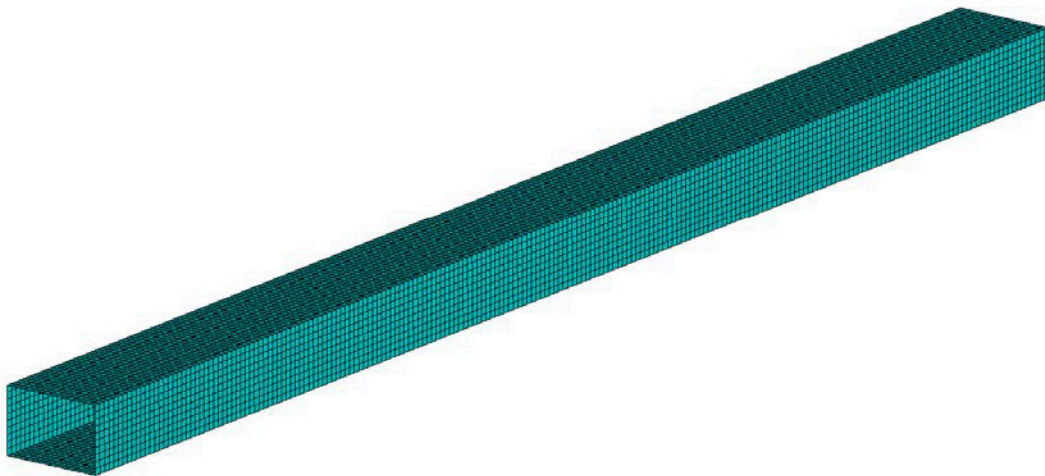


図 2.1-1 設計飛来物のモデルの要素分割図 (要素サイズ約 20 mm)

表 2.2-1 詳細評価に用いた各施設の屋上スラブ及び側壁面の諸元

		高放射性廃液貯蔵場 (HAW)		ガラス固化技術開発施設 (TVF)		ガラス固化技術開発棟	
		屋上スラブ	側壁面	屋上スラブ	側壁面		
形状 (幅 m×長さ m×厚さ m)		3.4×8.5×0.365	5.27×36.65×0.325	3.5×6.5×0.225	7.5×9.5×0.4		
押え	厚さ						
コンクリート	密度	1800 kg/m ³ *1	2400 kg/m ³ *1	2400 kg/m ³ *3			
	設計基準強度	180 kgf/cm ² *2	210 kgf/cm ² *3	150 kgf/cm ² *4			
鉄筋	厚さ						400 mm
コンクリート	密度	2400 kg/m ³ *1	2400 kg/m ³ *1	2400 kg/m ³ *3			2400 kg/m ³ *3
	設計基準強度	210 kgf/cm ² *3	210 kgf/cm ² *3	225 kgf/cm ² *3			225 kgf/cm ² *3
	材料 (相当する現規格)	SD30 (SD295A)	SD30 (SD295A)	SD30 (SD295A)			SD35 (SD345)
鉄筋	配筋	D16@200 (短辺・長辺方向)	D16@200 (短辺・長辺方向)	短辺方向 D10・D13 交互@200 (上端) D10@200 (下端)			D19@200 (短辺・長辺方向)
				長辺方向 D10@200			
	かぶり厚さ	20 mm	30 mm	30 mm			50 mm

*1 建家構造計算書より引用

*2 建設工事検査報告書より引用

*3 再処理施設に関する設計及び工事の方法より引用

*4 工事請負契約書より引用

表 2.2-2 詳細解析に用いたコンクリートの物性値

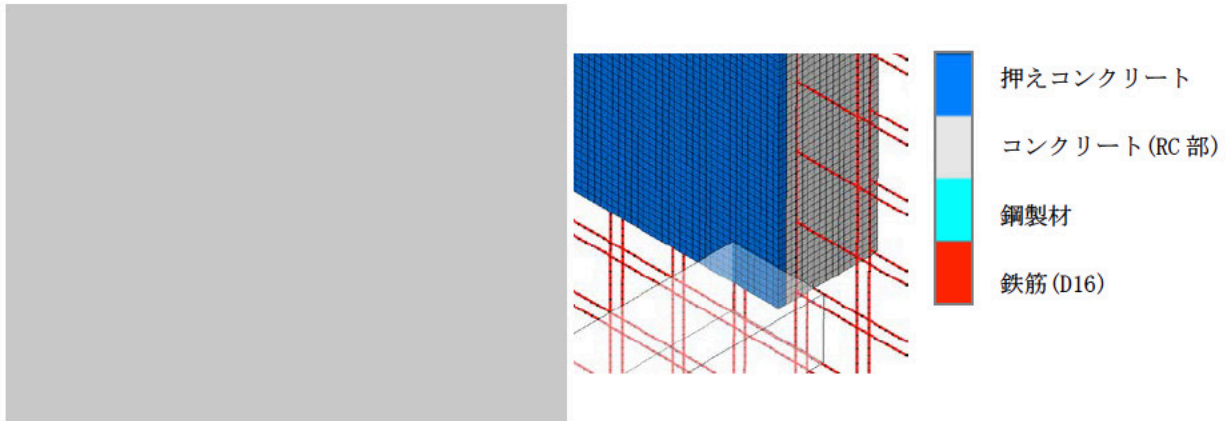
項目		高放射性廃液貯蔵場 (HAW)		ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟	
		鉄筋コンクリート	押えコンクリート	鉄筋コンクリート	押えコンクリート
密度	側面壁	2330 kg/m ³ *	2400 kg/m ³	2320 kg/m ³ *	—
	屋上スラブ		1800 kg/m ³	2340 kg/m ³ *	2400 kg/m ³
ヤング率		21.5 GPa		22.1 GPa	19.3 GPa
ポアソン比		0.2		0.2	0.2
せん断弾性係数		8.96 GPa		9.21 GPa	8.04 GPa
圧縮強度		20.6 MPa		22.1 MPa	14.7 MPa
引張強度		1.73 MPa		1.81 MPa	1.38 MPa

* 鉄筋コンクリート全体の密度，コンクリート及び鉄筋の重量比から算出

表 2.2-3 詳細解析に用いた鉄筋の物性値

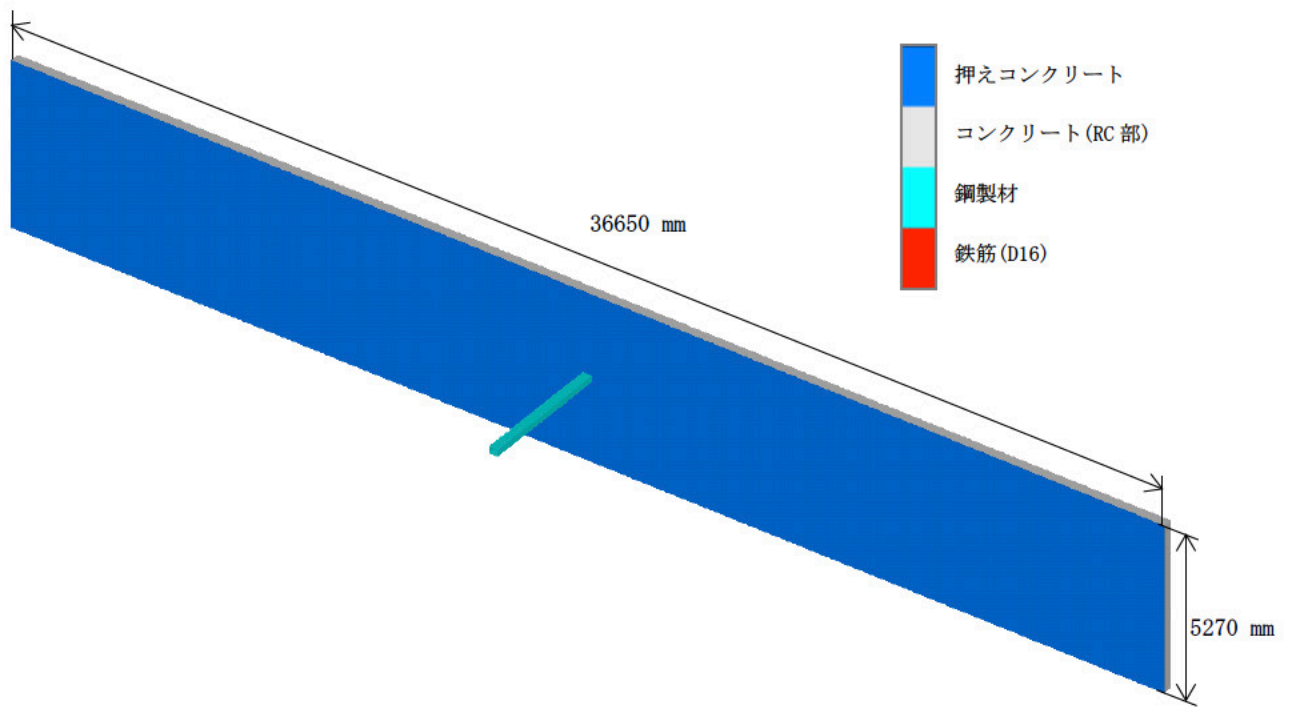
項目	高放射性廃液貯蔵場 (HAW)	ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟
	SD295A	SD345
密度	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³
ヤング率	205 GPa	205 GPa
ポアソン比	0.3	0.3
体積弾性率	171 GPa	171 GPa
せん断弾性係数	78.8 GPa	78.8 GPa
降伏応力	295 MPa	345 MPa
耐力	510 MPa	578 MPa
破断ひずみ (伸び) *1	14.8%	16.6%

*1 JIS 規格値の公称ひずみを対数ひずみ (破断ひずみの値として評価) に変換し、応力とひずみの関係の評価する。公称ひずみ e から対数ひずみ ε は、 $\varepsilon = \ln(e+1)$ で求めることができる。



側壁面の断面形状

解析モデル (衝突部の要素分割図)



解析モデルの全体

図 2.2-1 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の側壁面  の解析モデル概要

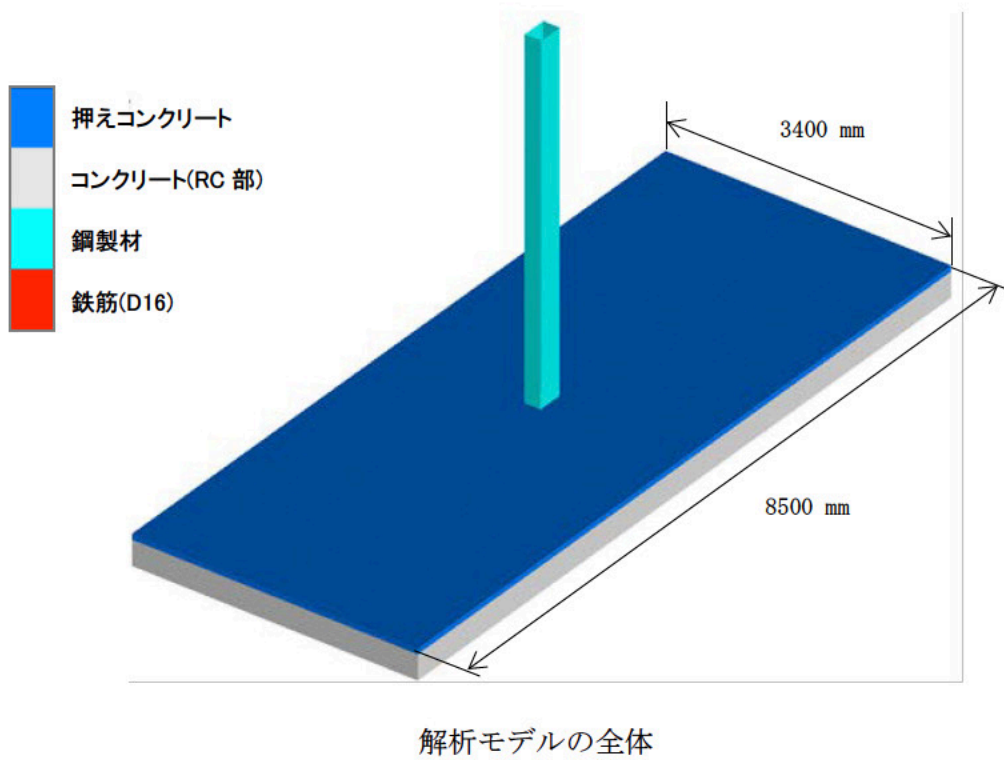
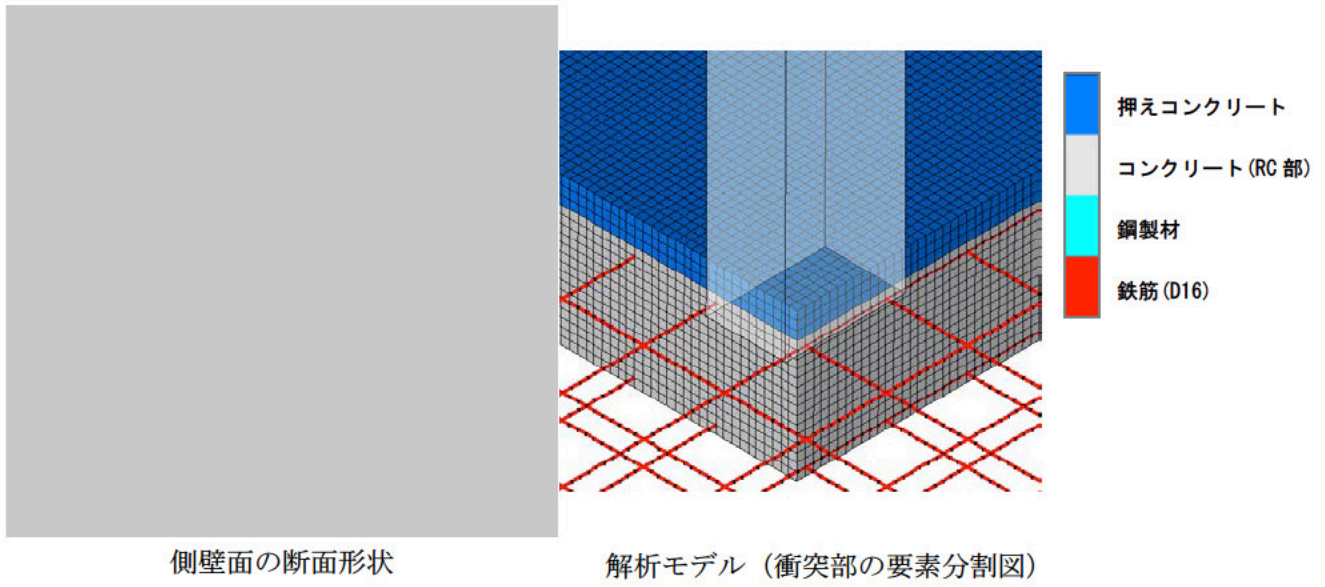


図 2.2-2 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の屋上スラブの解析モデル概要

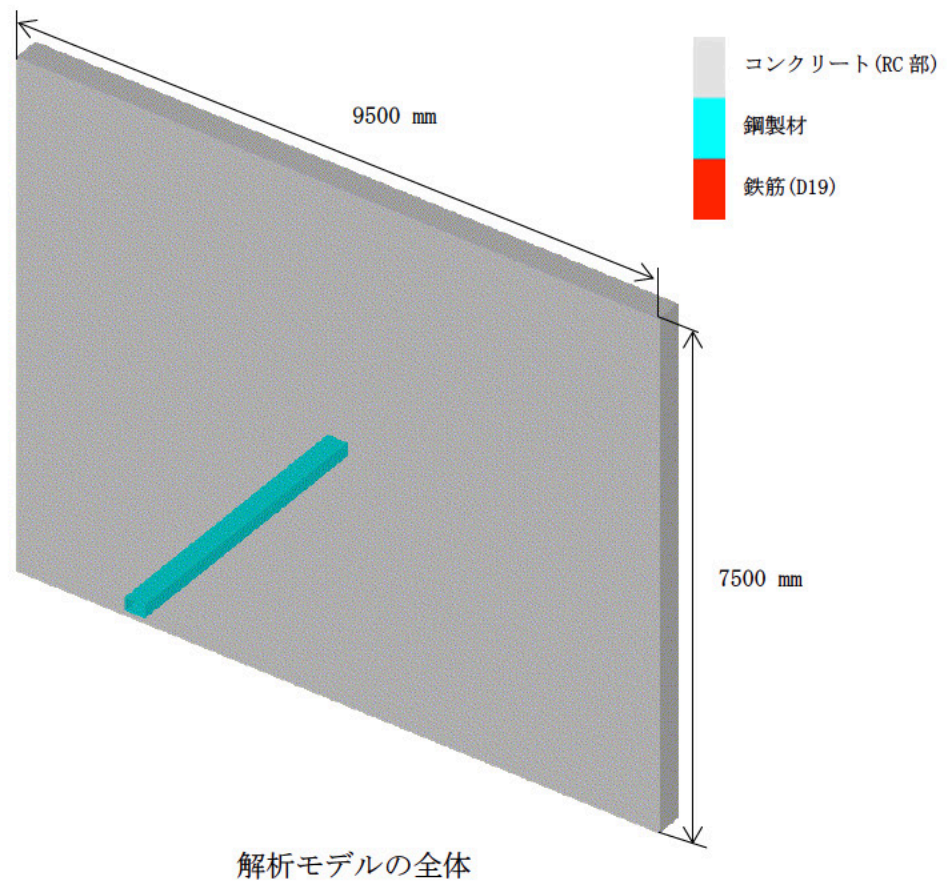
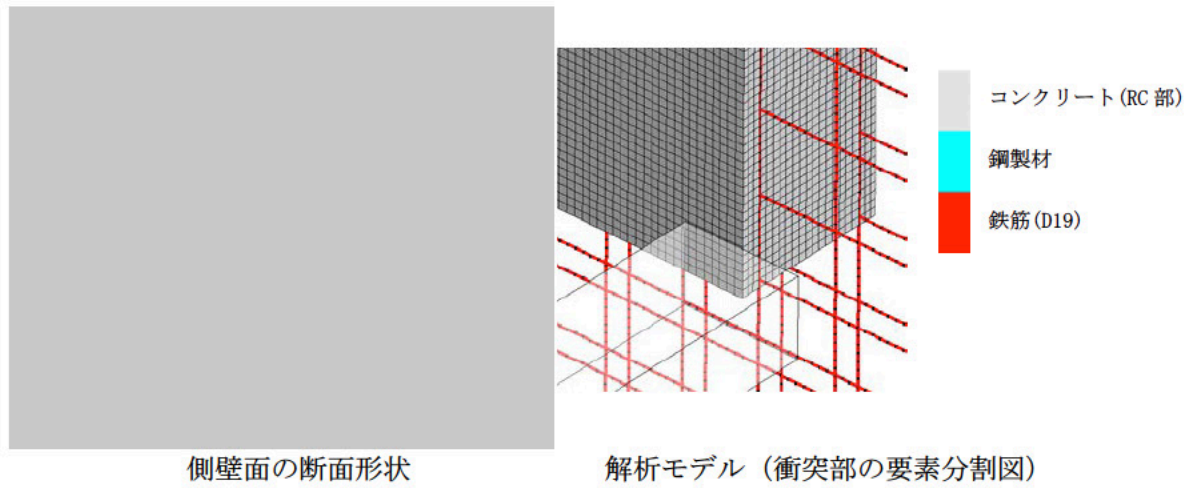
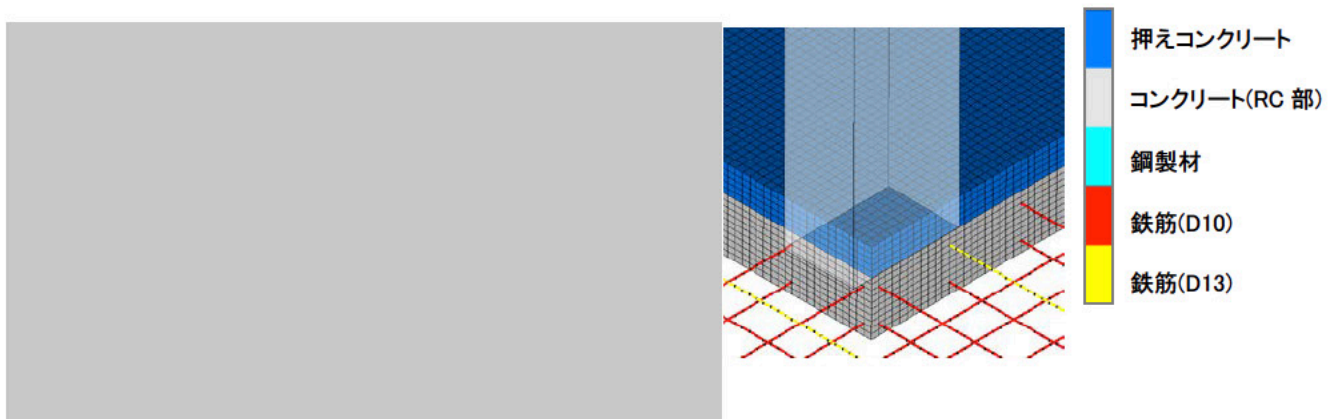
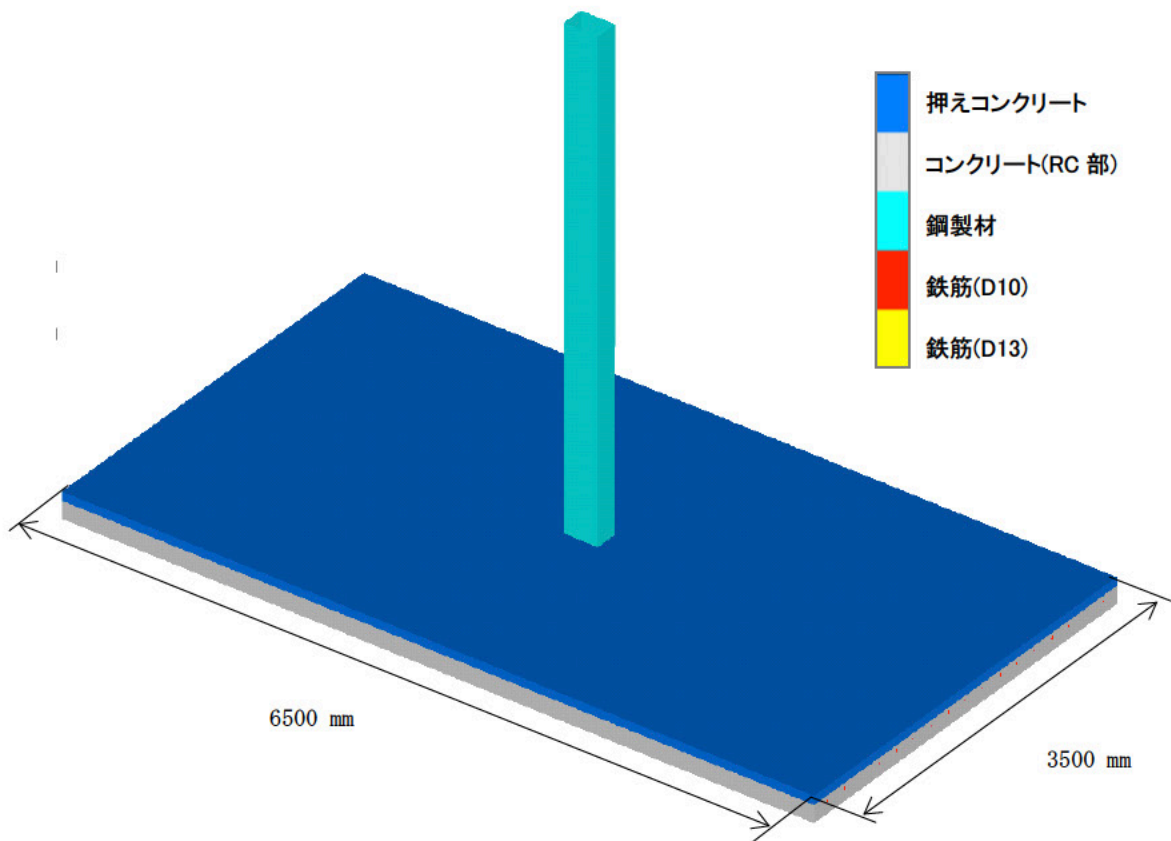


図 2.2-3 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の側壁面の解析モデル概要



側壁面の断面形状

解析モデル（衝突部の要素分割図）



解析モデルの全体

図 2.2-4 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の
屋上スラブの解析モデル概要

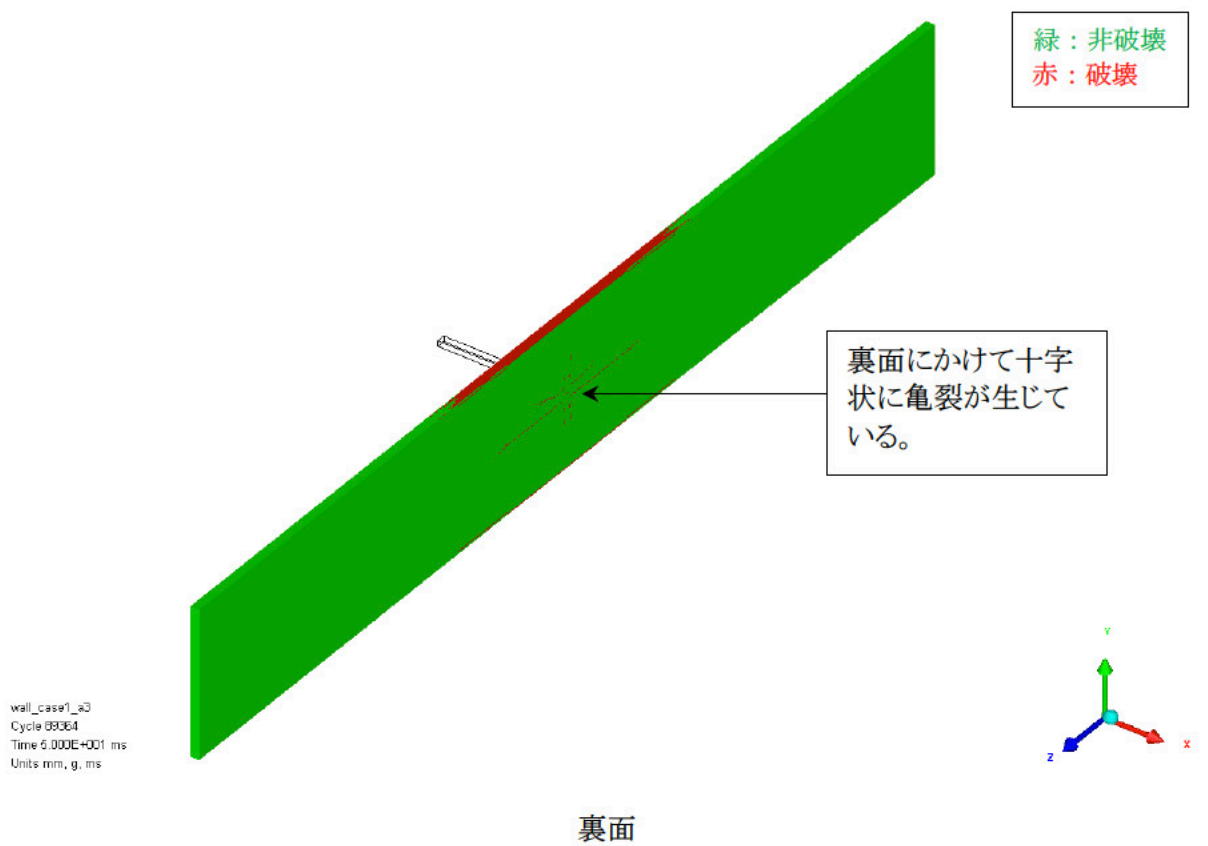
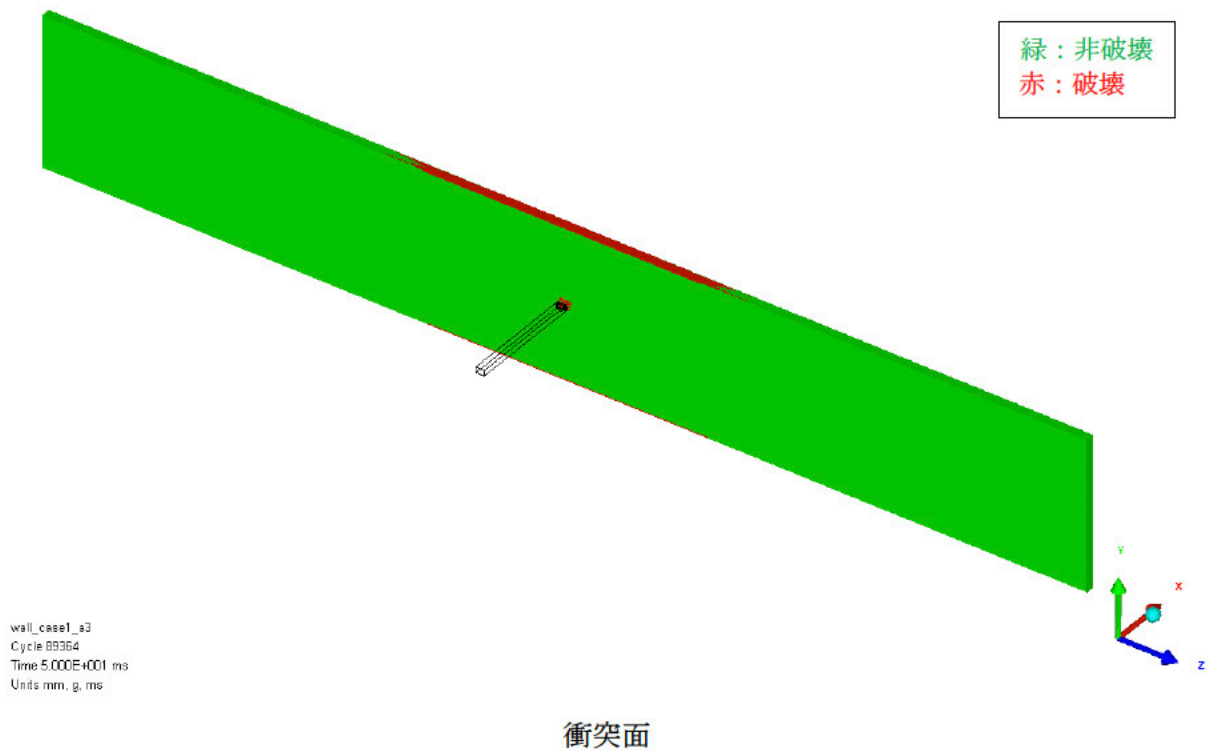


図 3-1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の側壁面の損傷状態図（1/2）
（衝突後 50 ms 全体）

緑：非破壊
赤：破壊

設計飛来物の衝突方向

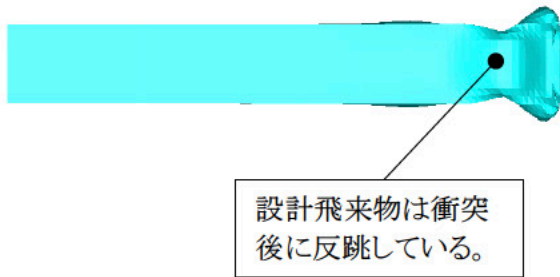


wall_case1_s3
Cycle 89364
Time 5.000E+001 ms
Units mm, g, ms

短辺方向中央断面図（全体）

緑：非破壊
赤：破壊

設計飛来物の衝突方向



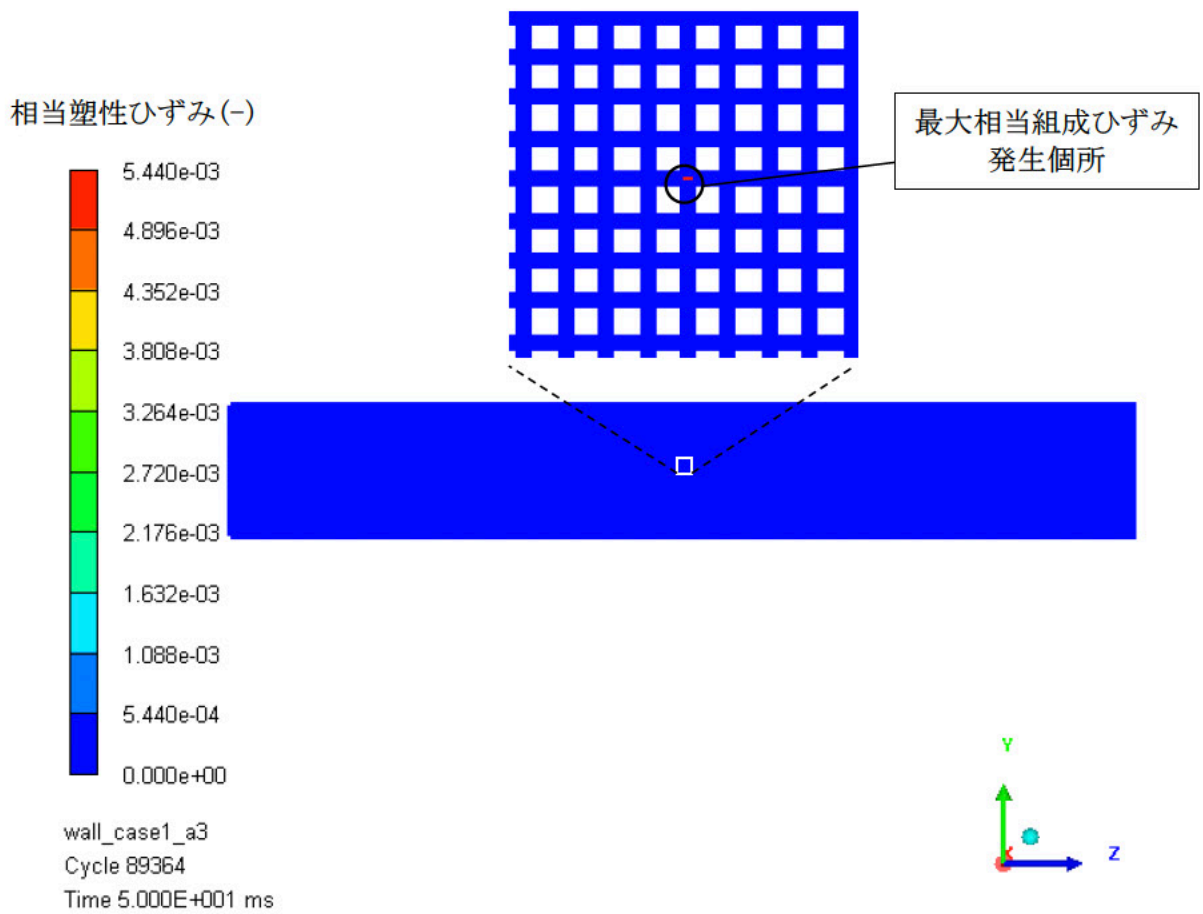
設計飛来物は衝突後に反跳している。



wall_case1_s3
Cycle 89364
Time 5.000E+001 ms
Units mm, g, ms

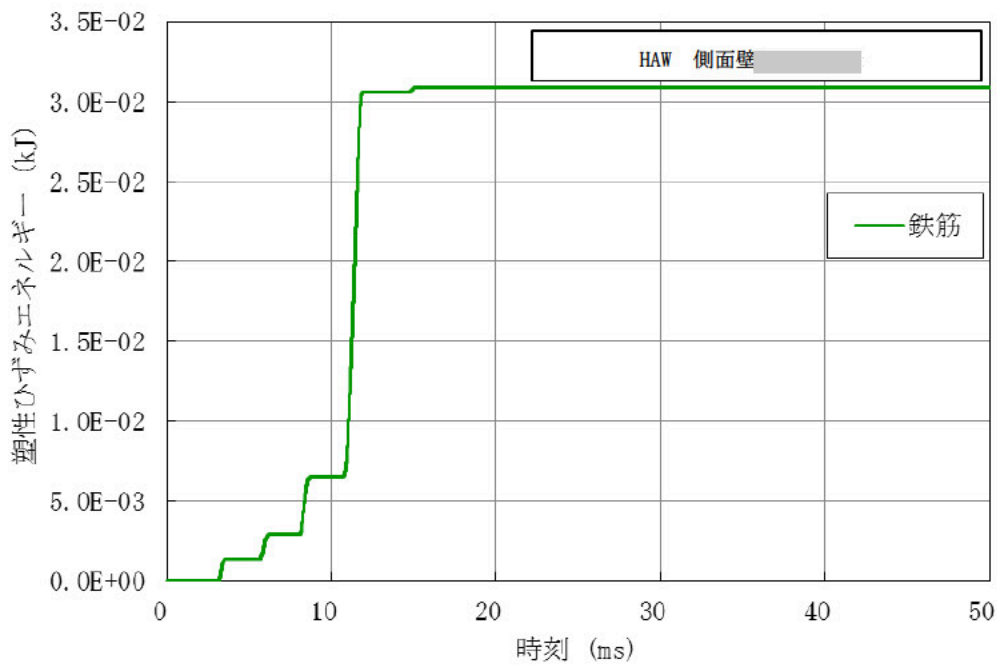
短辺方向中央断面図（衝突位置拡大）

図 3-1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の側壁面の損傷状態図（2/2）
（衝突後 50 ms 短辺方向中央断面図）

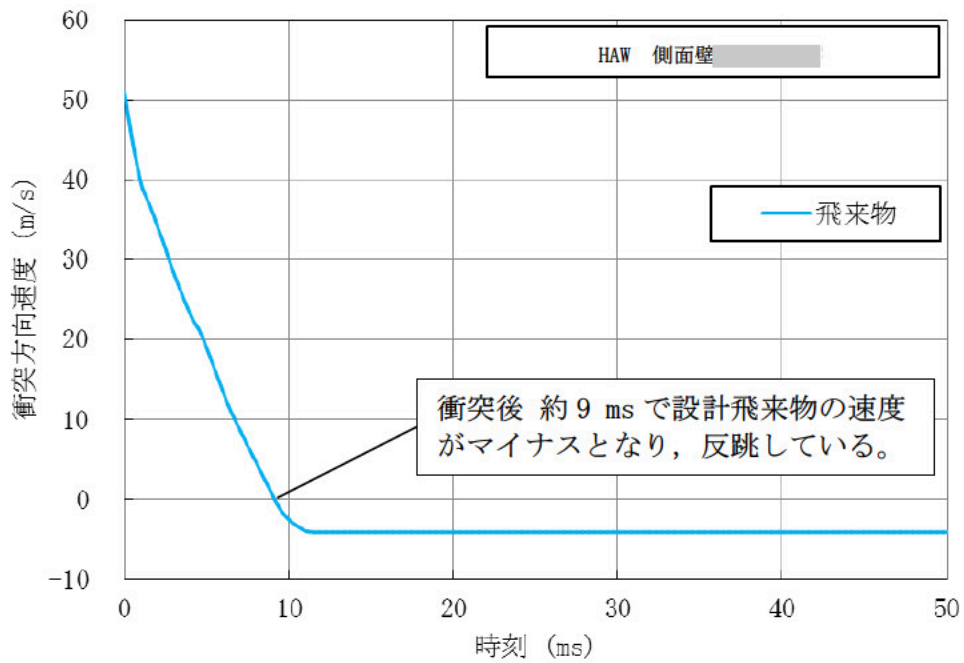


裏面側全体図

図 3-2 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の側壁面の鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図 (衝突後 50 ms)

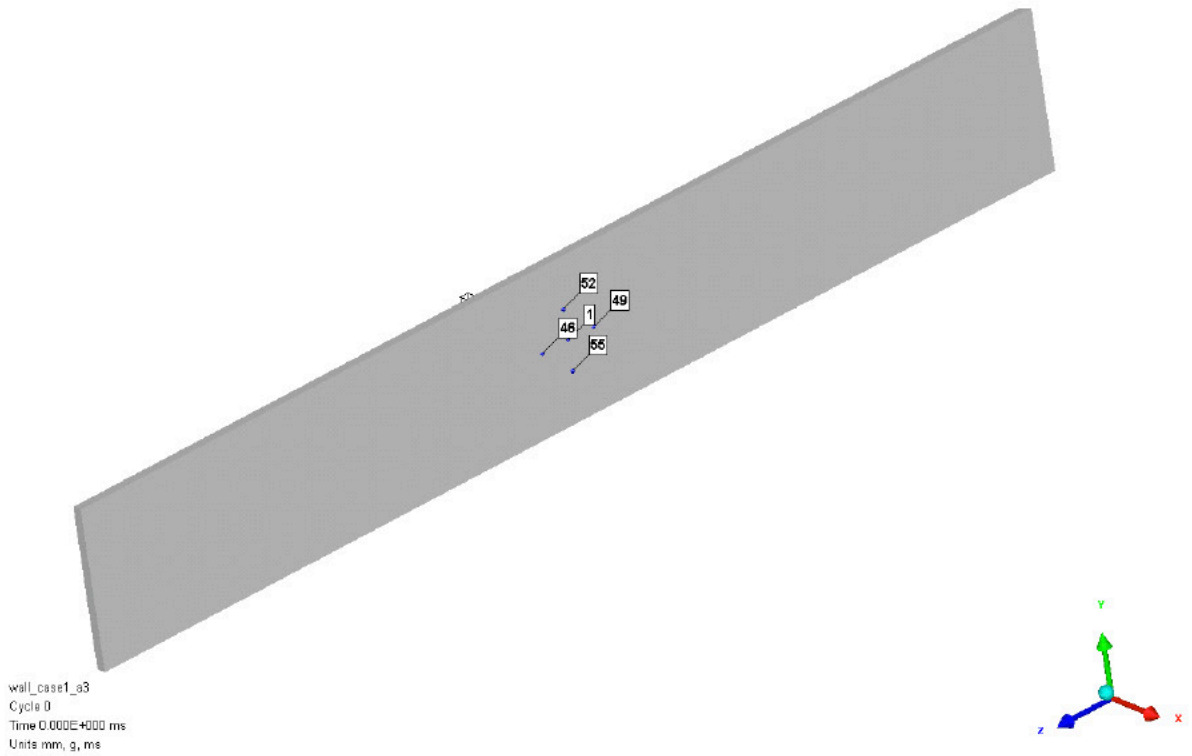


a) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴

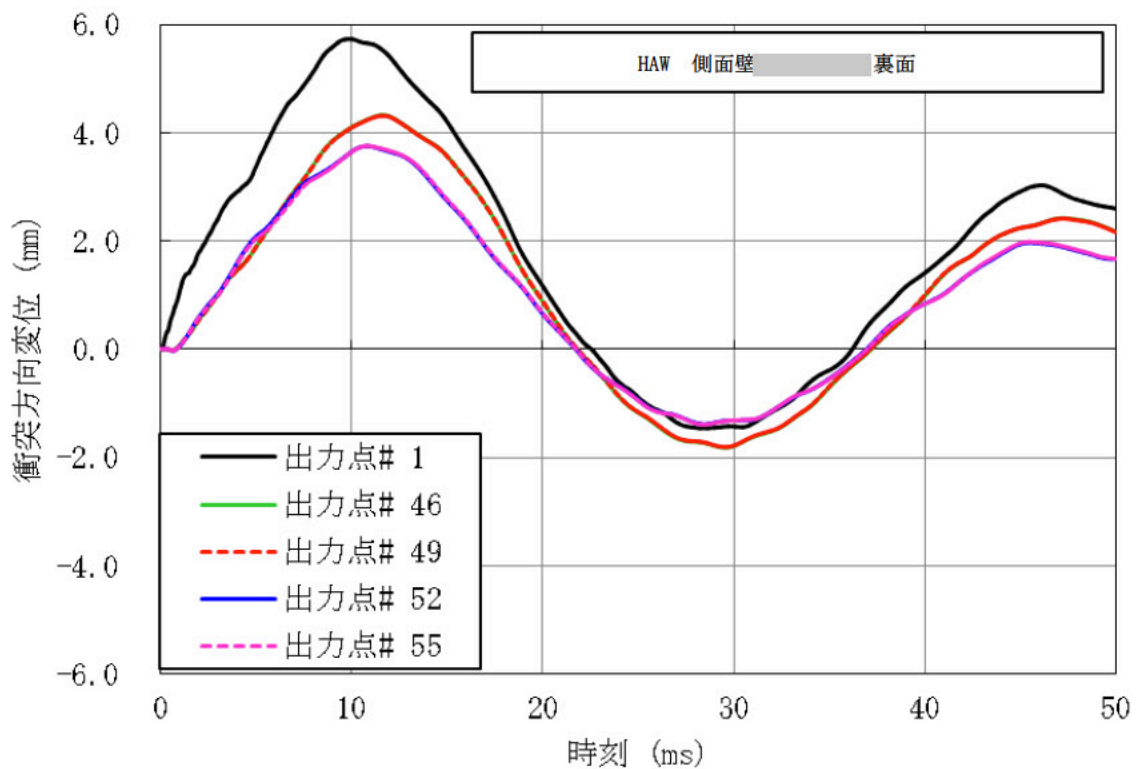


b) 設計飛来物の衝突方向速度時刻歴

図 3-3 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の側面壁の時刻歴
(鉄筋の塑性ひずみエネルギー及び設計飛来物の衝突方向速度)



a) 変位時刻歴データを抽出する要素の位置 (衝突位置の裏面の中心1点と周囲4点)



b) 変位時刻歴データを抽出した要素の変位時刻歴

図 3-4 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の側面壁の衝突方向変位と時刻の関係

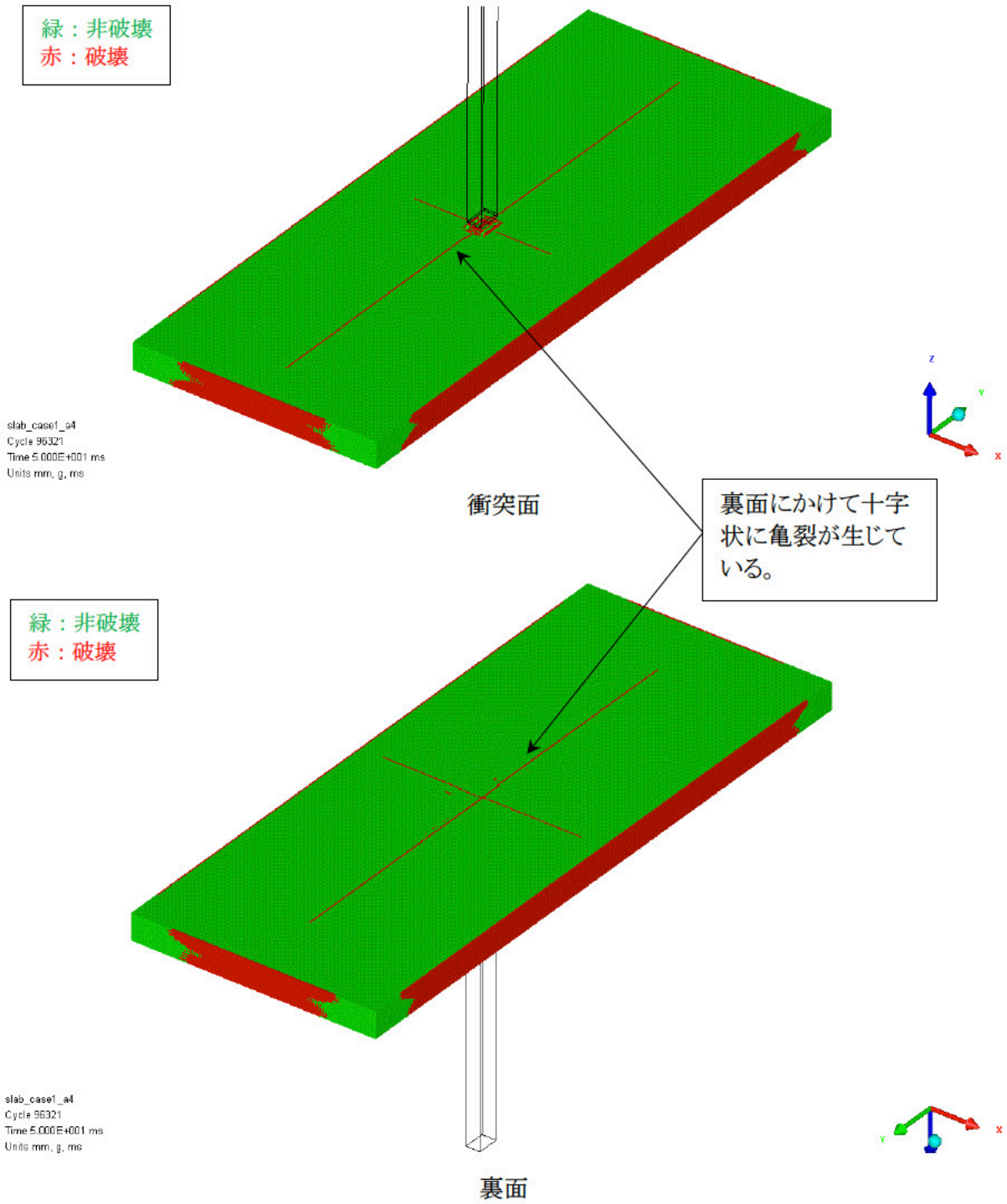


図 3-5 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の屋上スラブの損傷状態図 (1/2)
(衝突後 50 ms 全体)

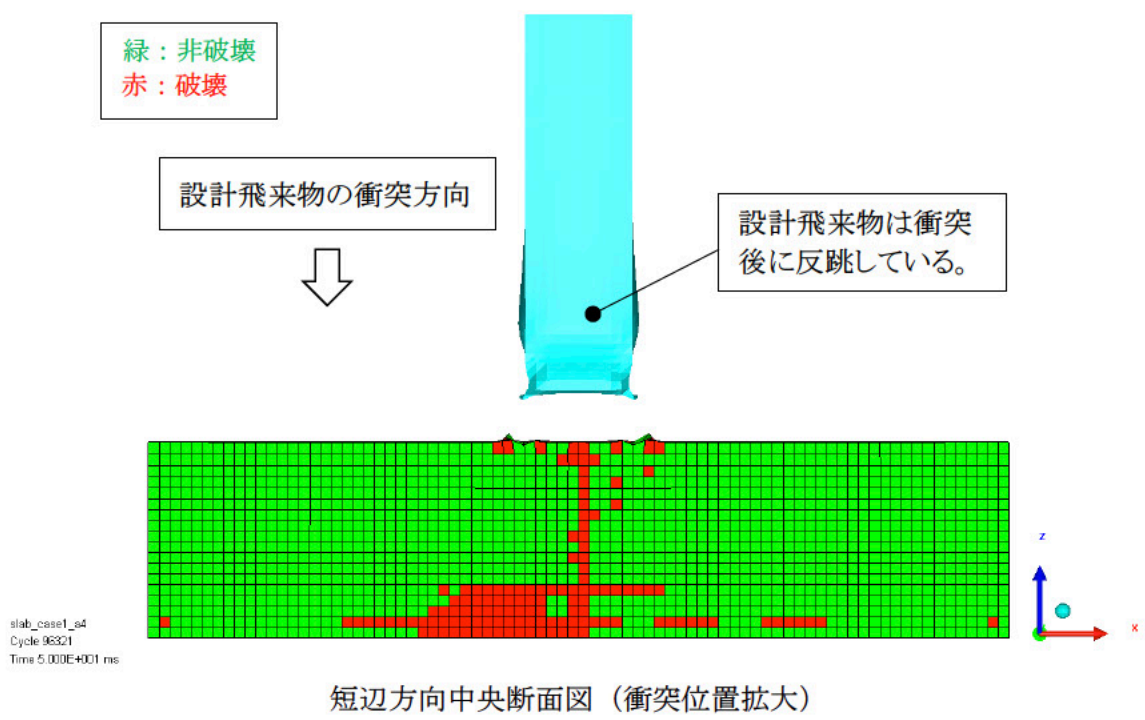
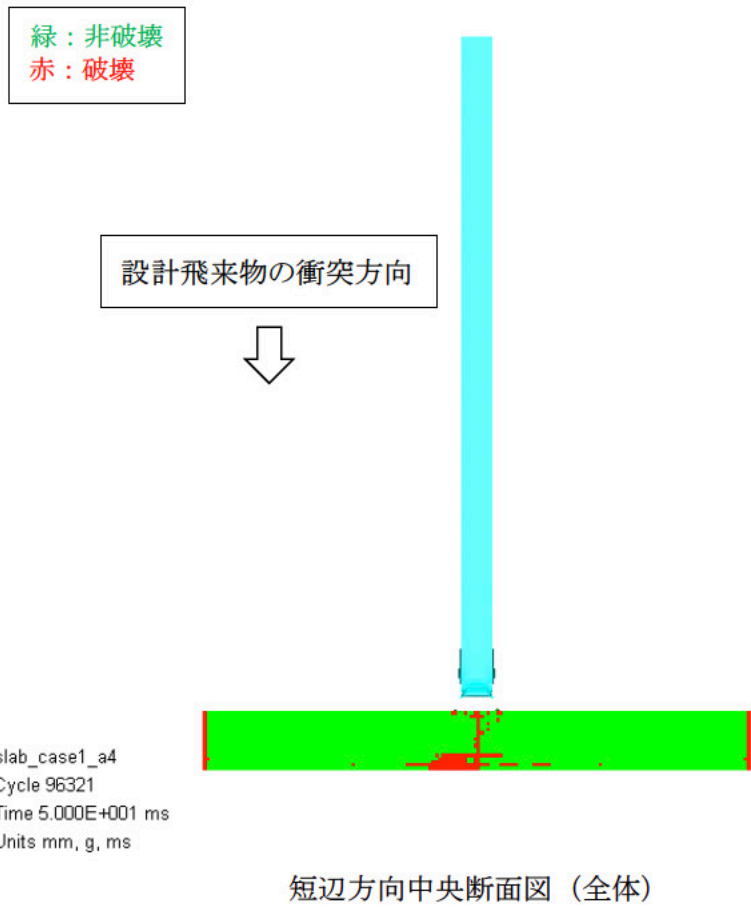


図 3-5 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の屋上スラブの損傷状態図（2/2）
（衝突後 50 ms 短辺方向中央断面図）

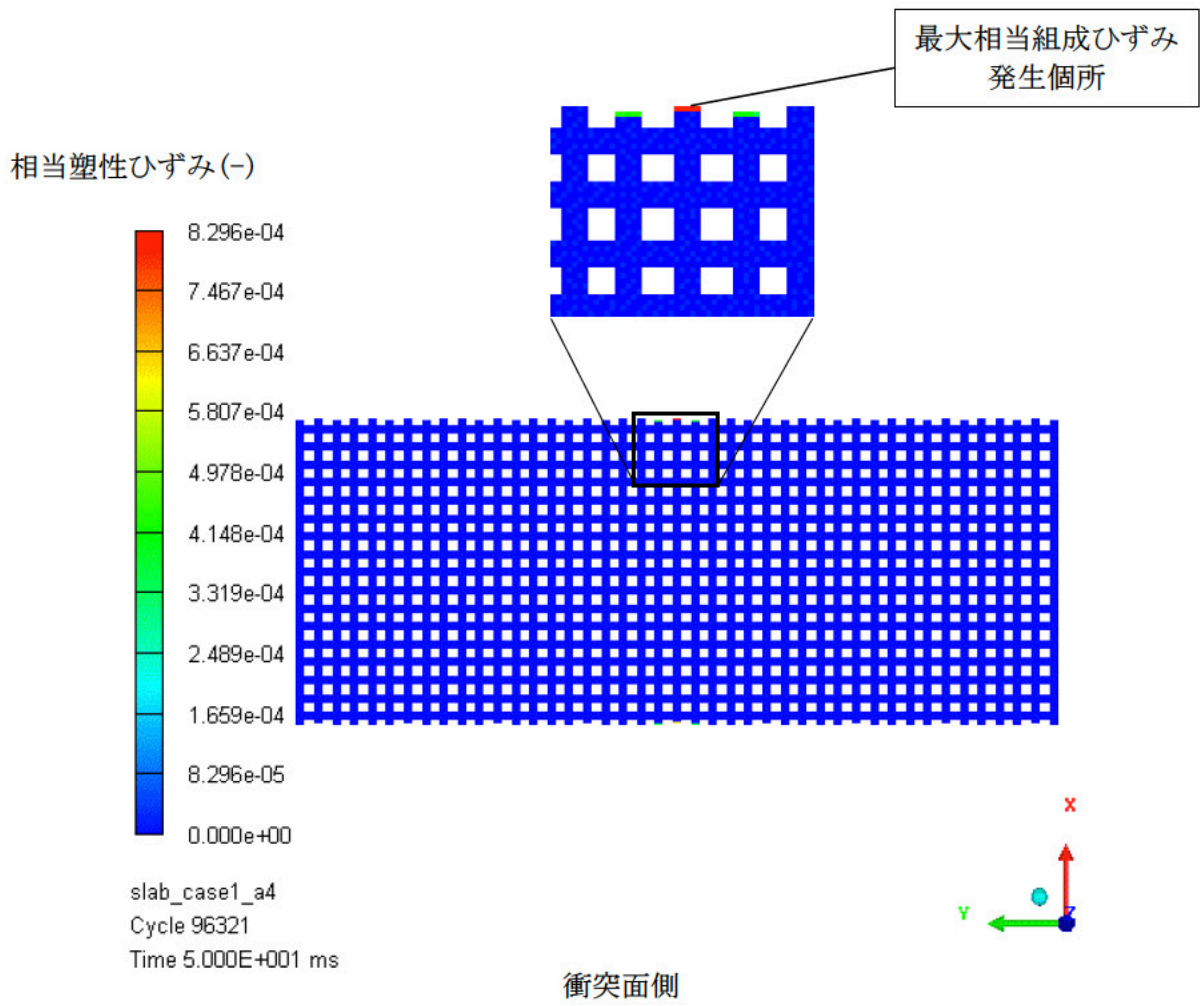
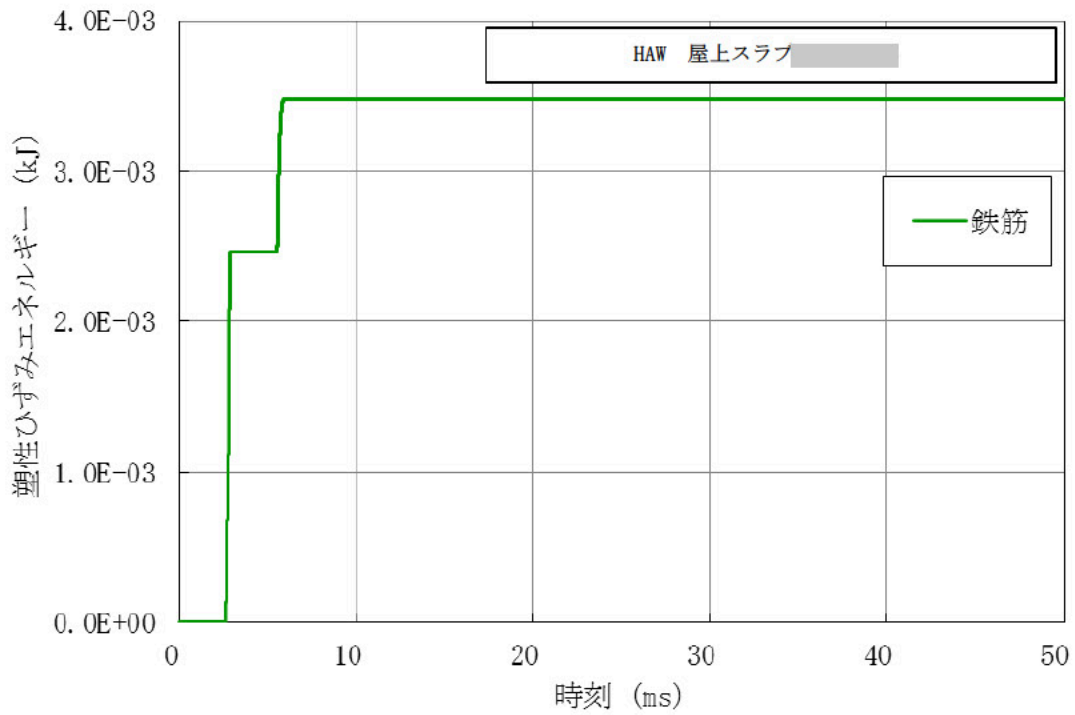
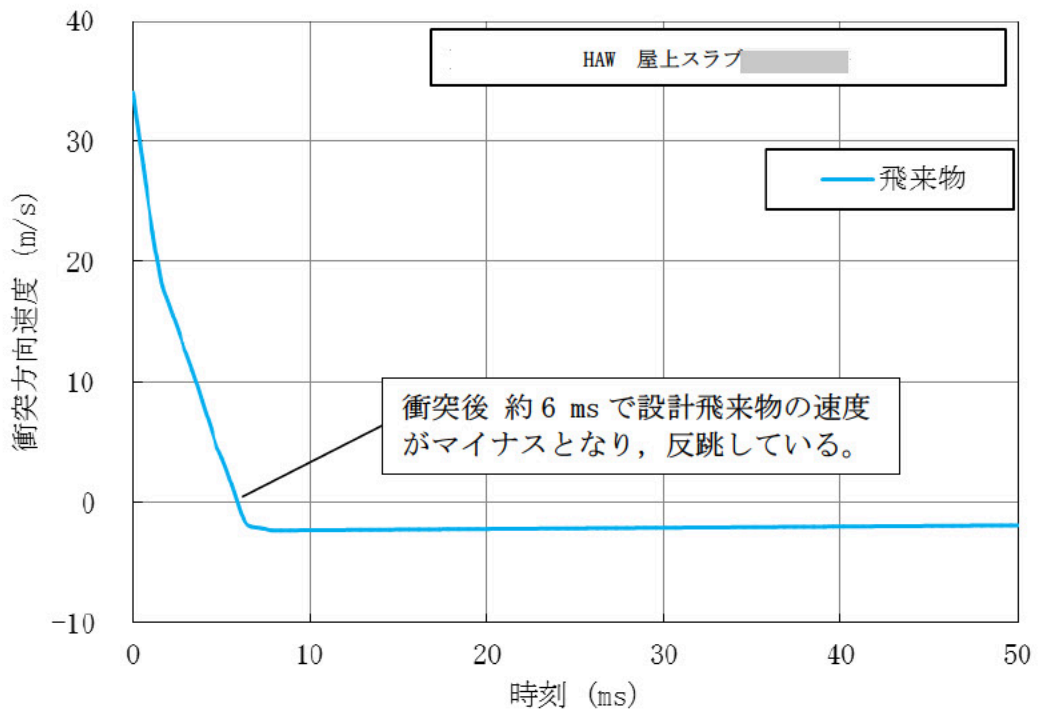


図 3-6 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の屋上スラブの鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図 (衝突後 50 ms)

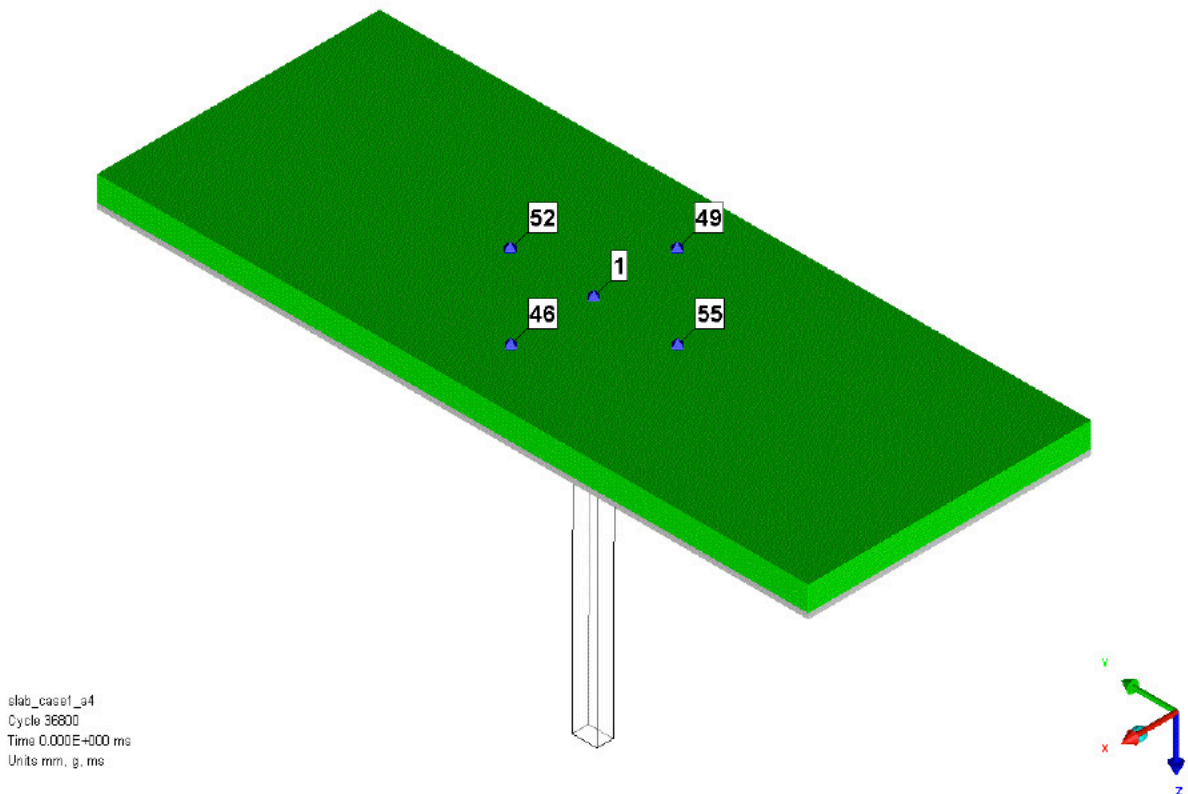


a) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴

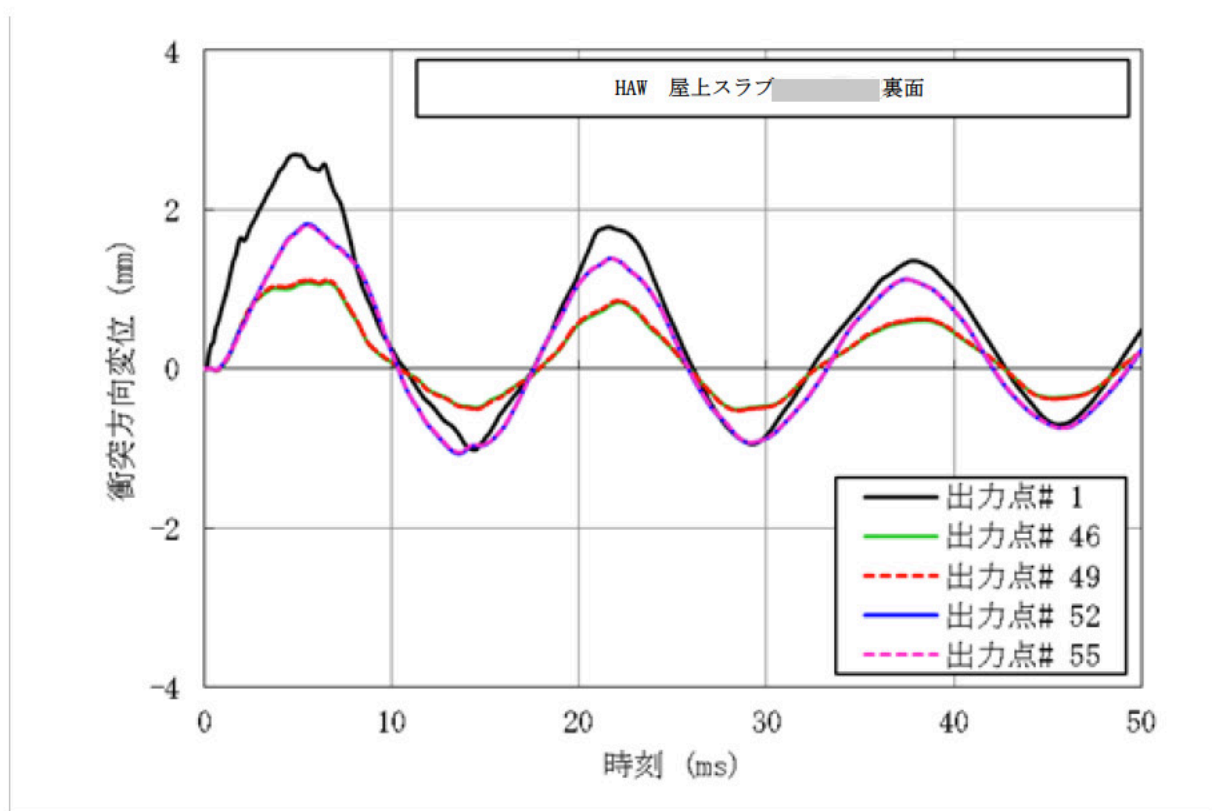


b) 設計飛来物の衝突方向速度時刻歴

図 3-7 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の屋上スラブの時刻歴
(鉄筋の塑性ひずみエネルギー及び設計飛来物の衝突方向速度)



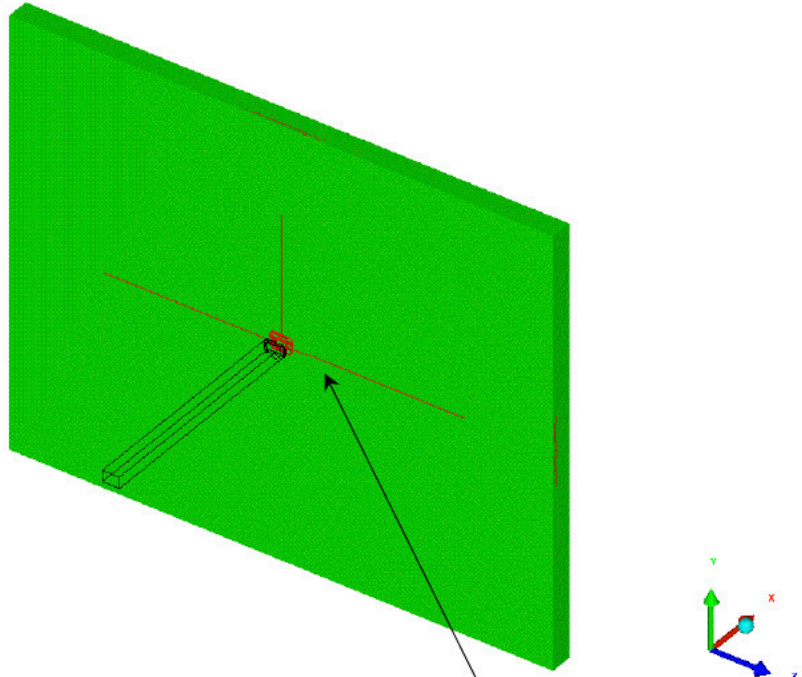
a) 変位時刻歴データを抽出する要素の位置（衝突位置の裏面の中心1点と周囲4点）



b) 変位時刻歴データを抽出した要素の変位時刻歴

図 3-8 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の屋上スラブ 裏面 の衝突方向変位と時刻の関係

緑：非破壊
赤：破壊

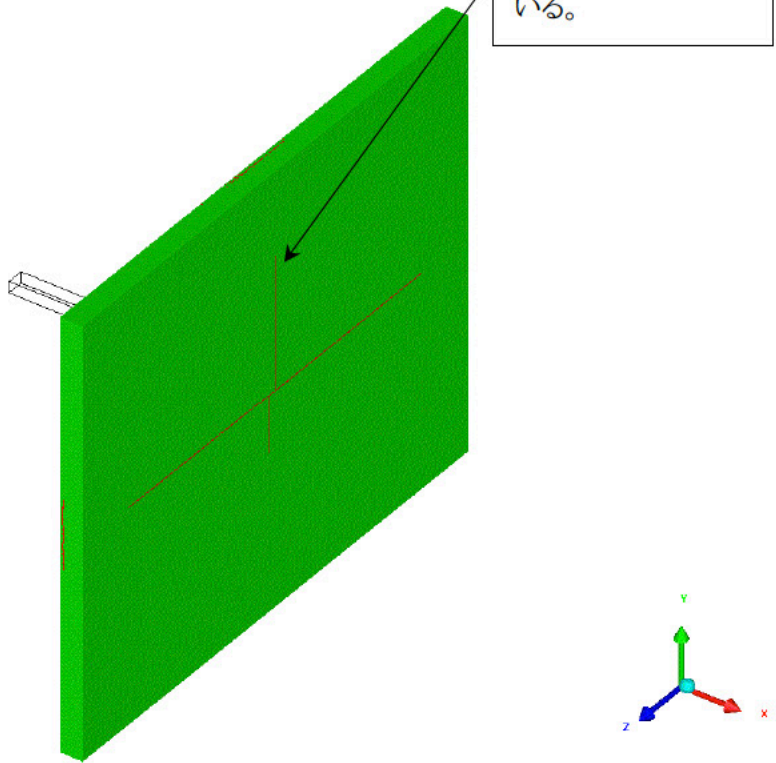


wall_case2_s3
Cycle 69327
Time 5.000E+001 ms
Units mm, g, ms

衝突面

裏面にかけて十字状に亀裂が生じている。

緑：非破壊
赤：破壊



wall_case2_s3
Cycle 69327
Time 5.000E+001 ms
Units mm, g, ms

裏面

図 3-9 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の側壁面の損傷状態図 (1/2)
(衝突後 50 ms 全体)

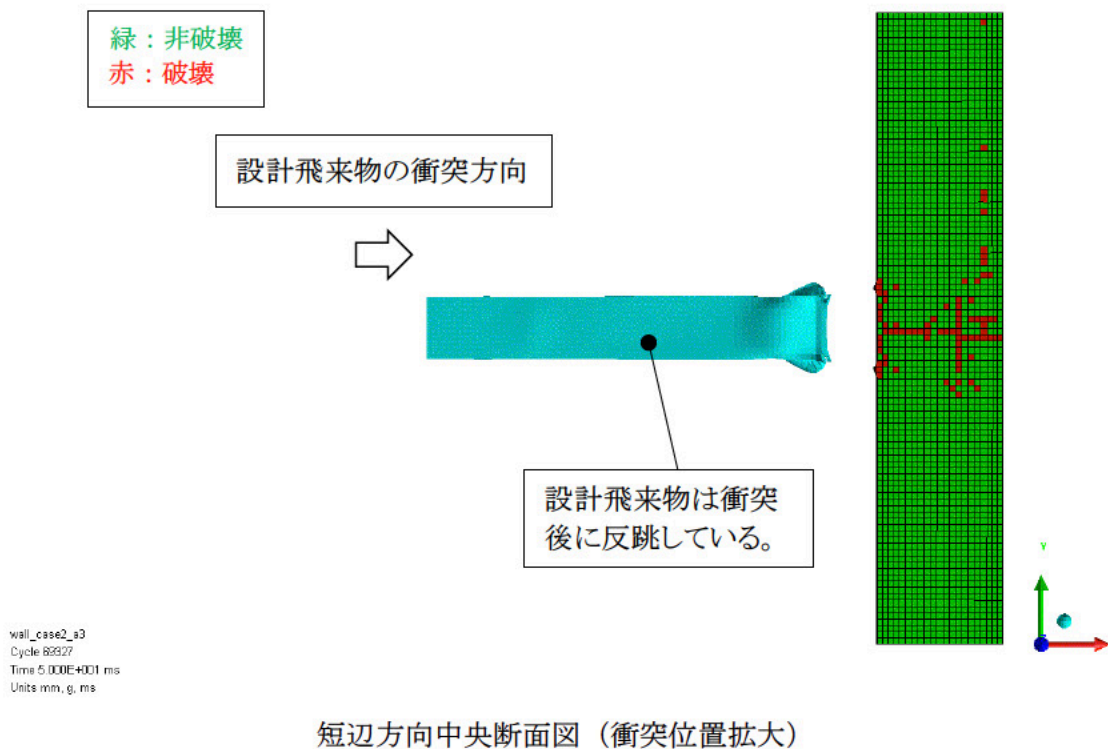
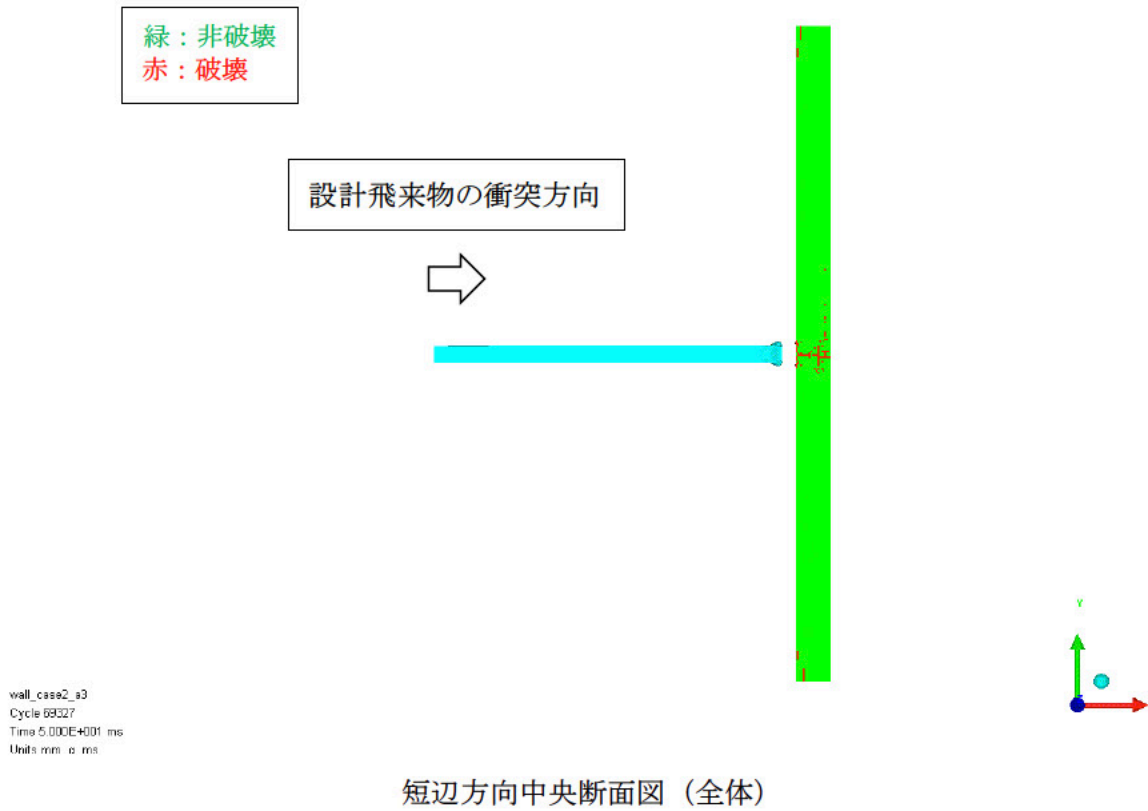


図 3-9 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の側壁面の損傷状態図（2/2）
（衝突後 50 ms 全体）

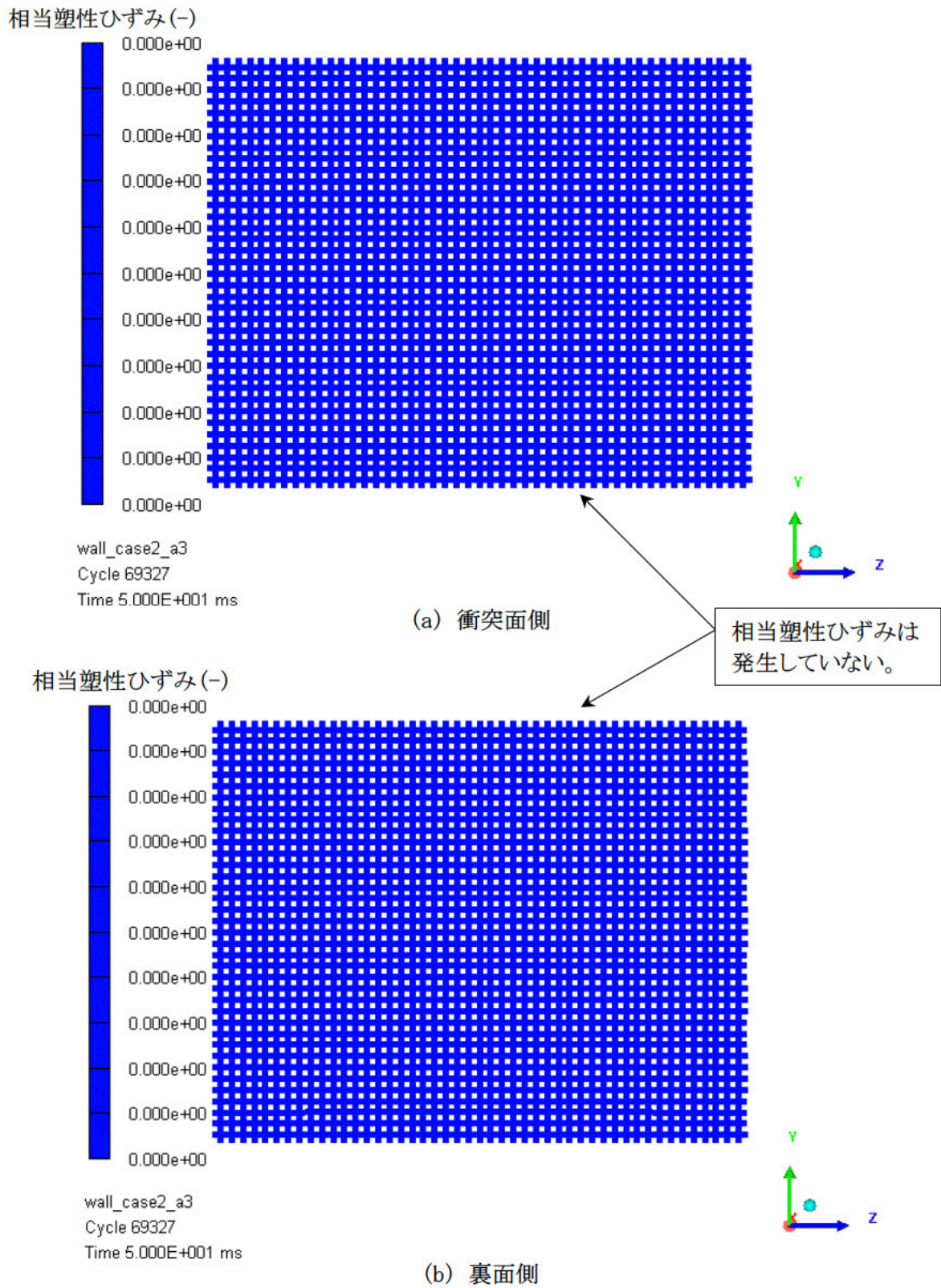
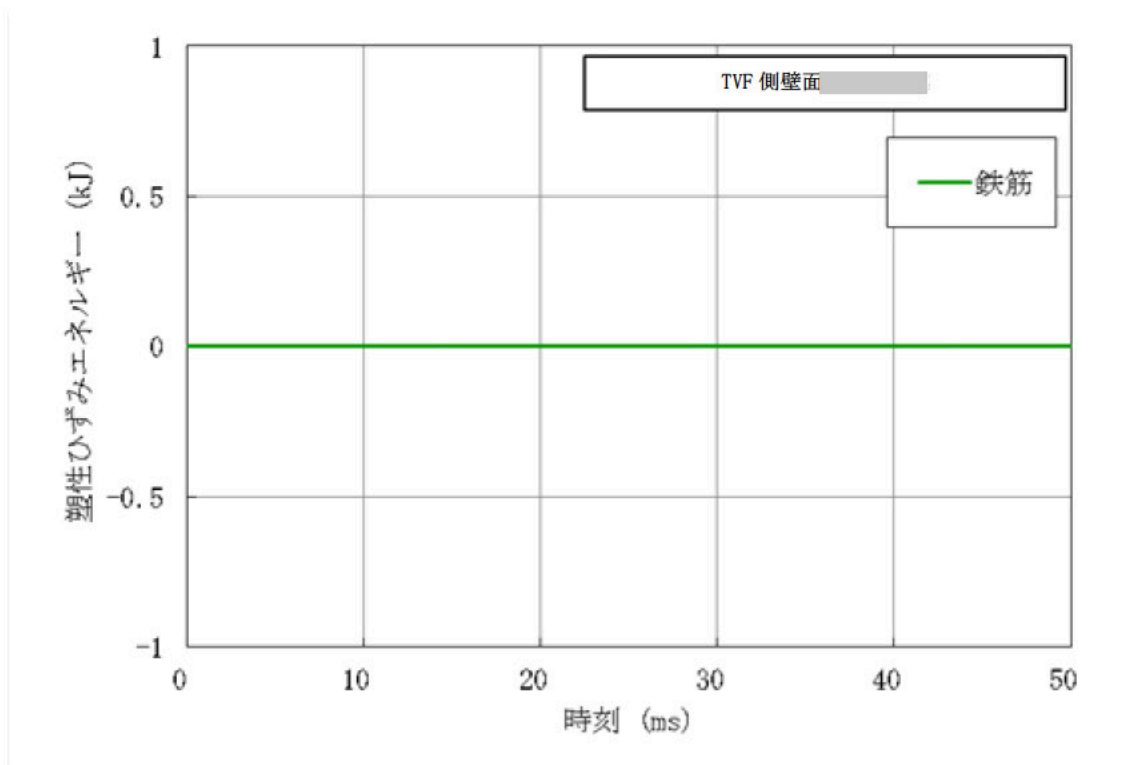
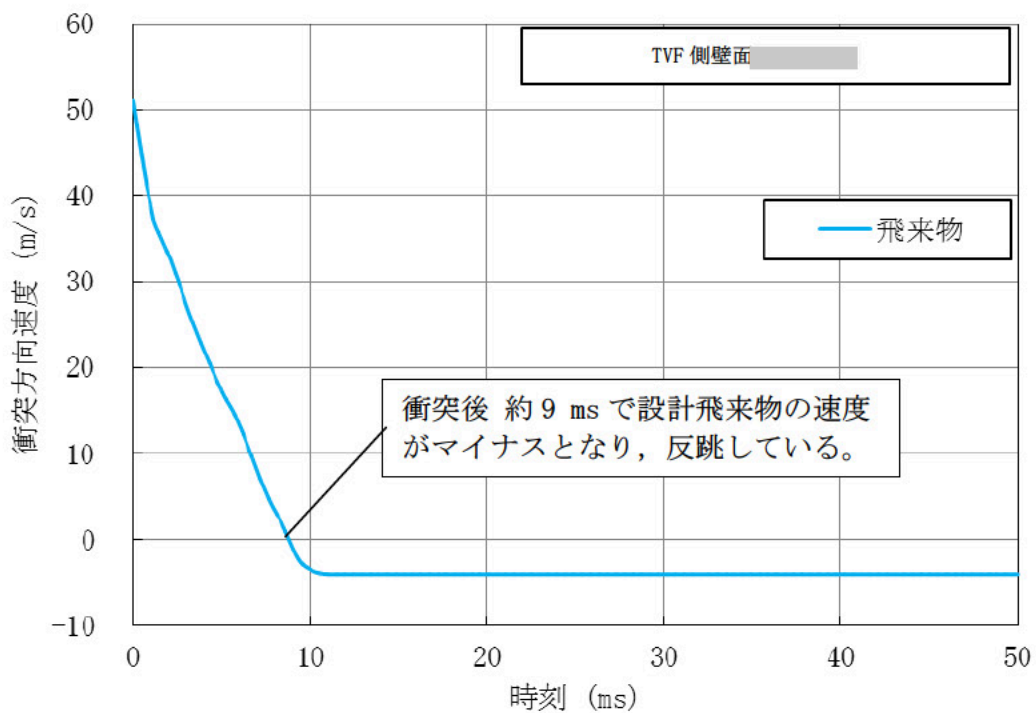


図 3-10 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の側壁面の鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図 (衝突後 50 ms)

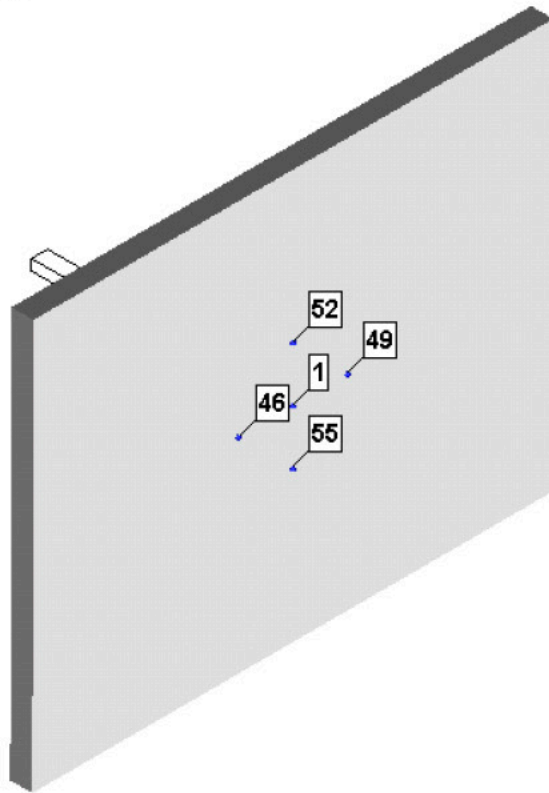


a) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴

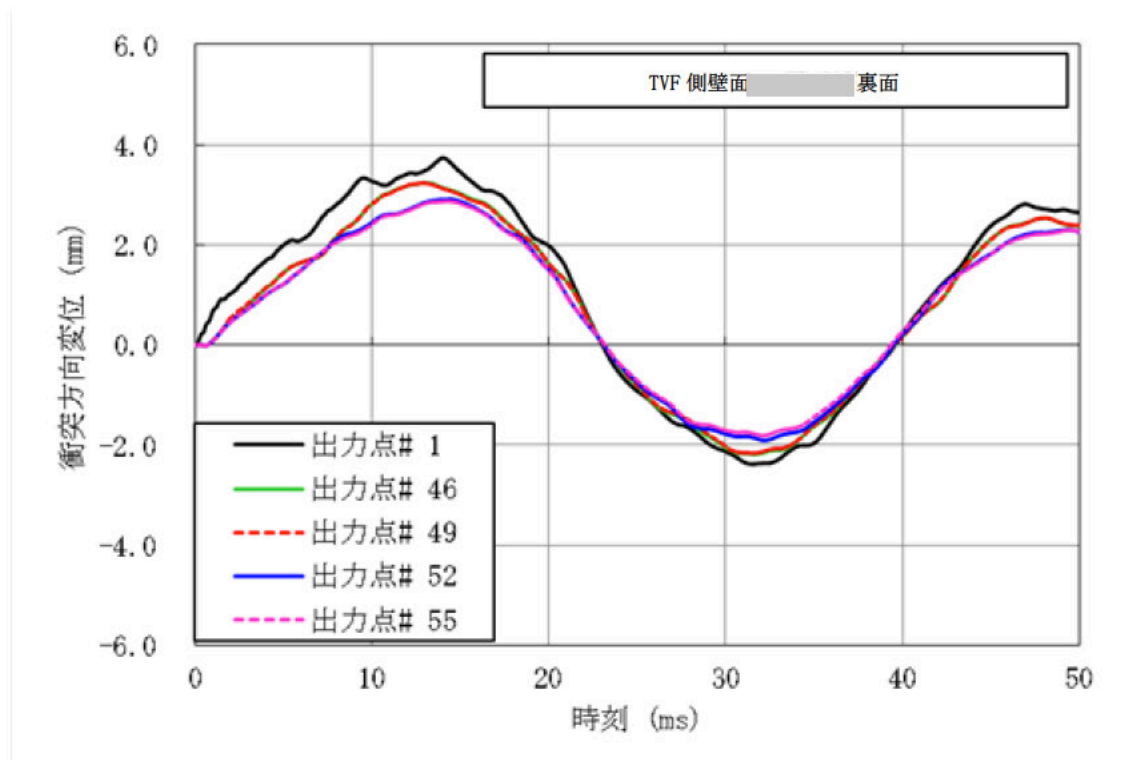


b) 設計飛来物の衝突方向速度時刻歴

図 3-11 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の側壁面 の時刻歴 (鉄筋の塑性ひずみエネルギー及び設計飛来物の衝突方向速度)



a) 変位時刻歴データを抽出する要素の位置 (衝突位置の裏面の中心 1 点と周囲 4 点)



b) 変位時刻歴データを抽出した要素の変位時刻歴

図 3-12 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の側壁面 の突方向変位と時刻の関係

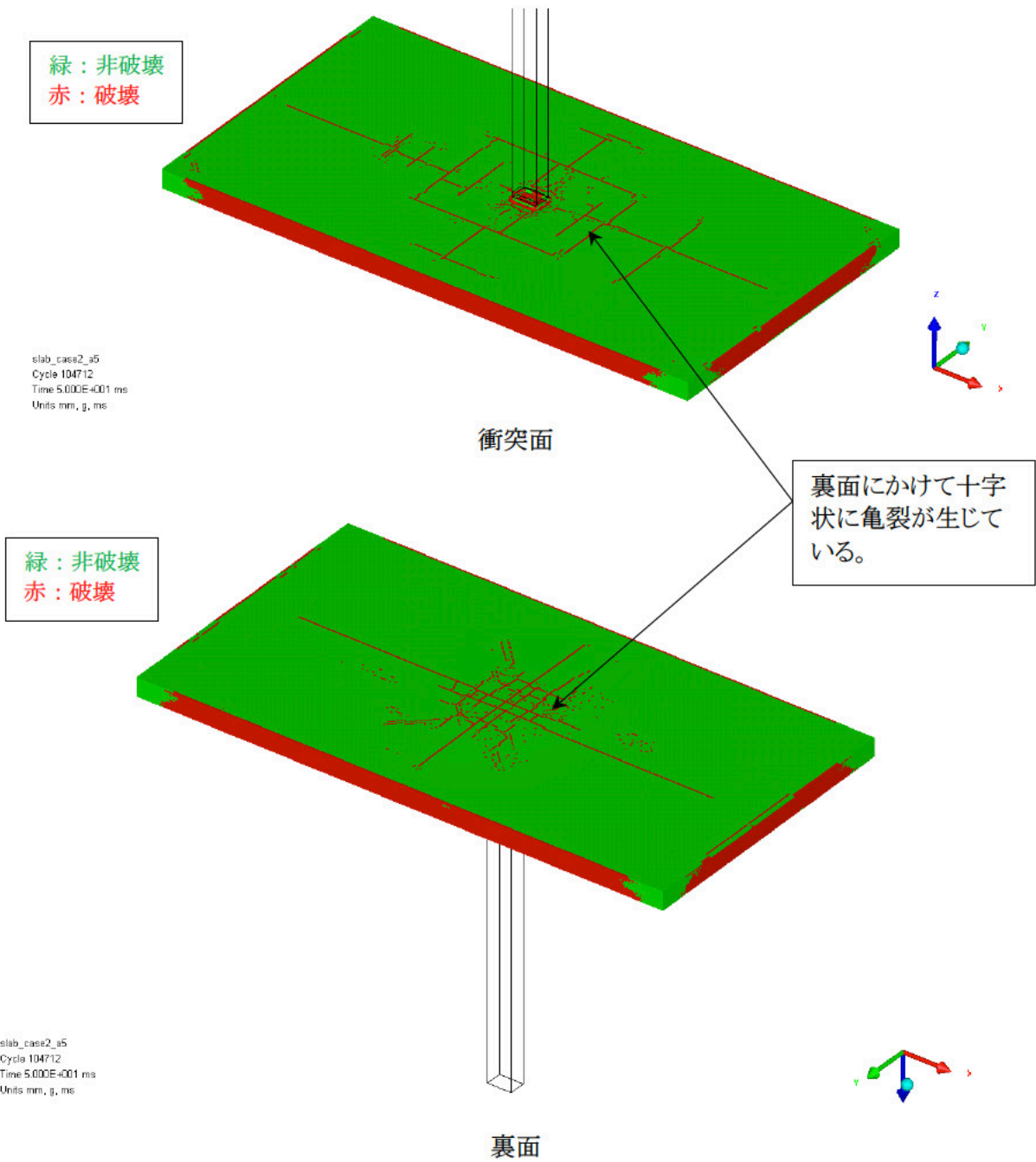
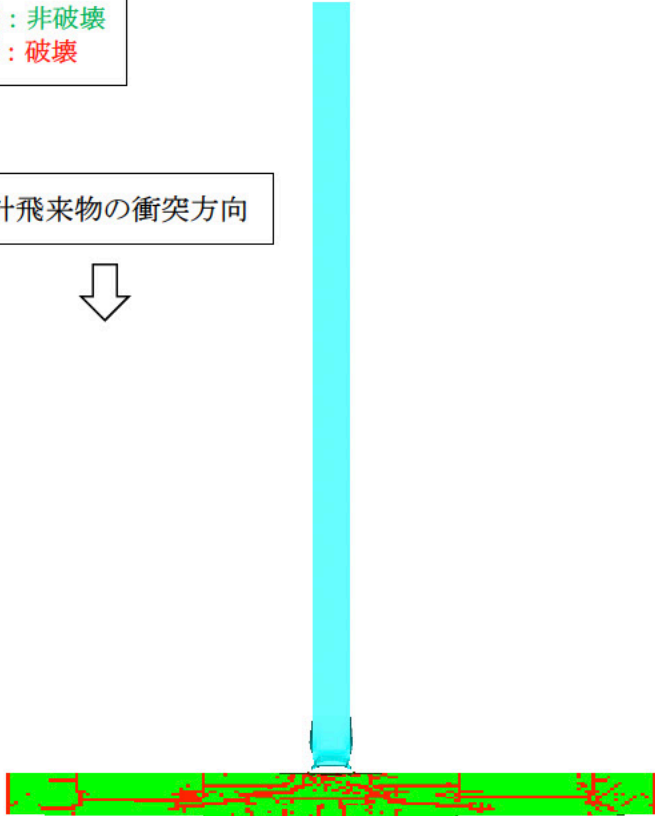


図 3-13 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の屋上スラブの損傷状態図 (1/2)
(衝突後 50 ms 全体)

緑：非破壊
赤：破壊

設計飛来物の衝突方向



短辺方向中央断面図（全体）

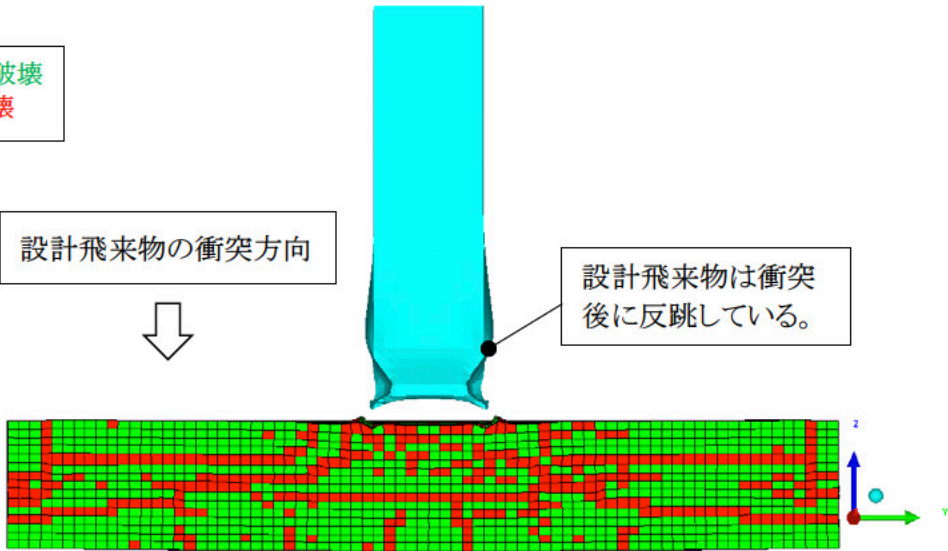
緑：非破壊
赤：破壊

設計飛来物の衝突方向



設計飛来物は衝突後に反跳している。

slab_case2_u6
Cycle 104712
Time 5.000E+001 ms
Units mm, g, ms



短辺方向中央断面図（衝突位置拡大）

図 3-13 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の屋上スラブの損傷状態図（2/2）
（衝突後 50 ms 全体）

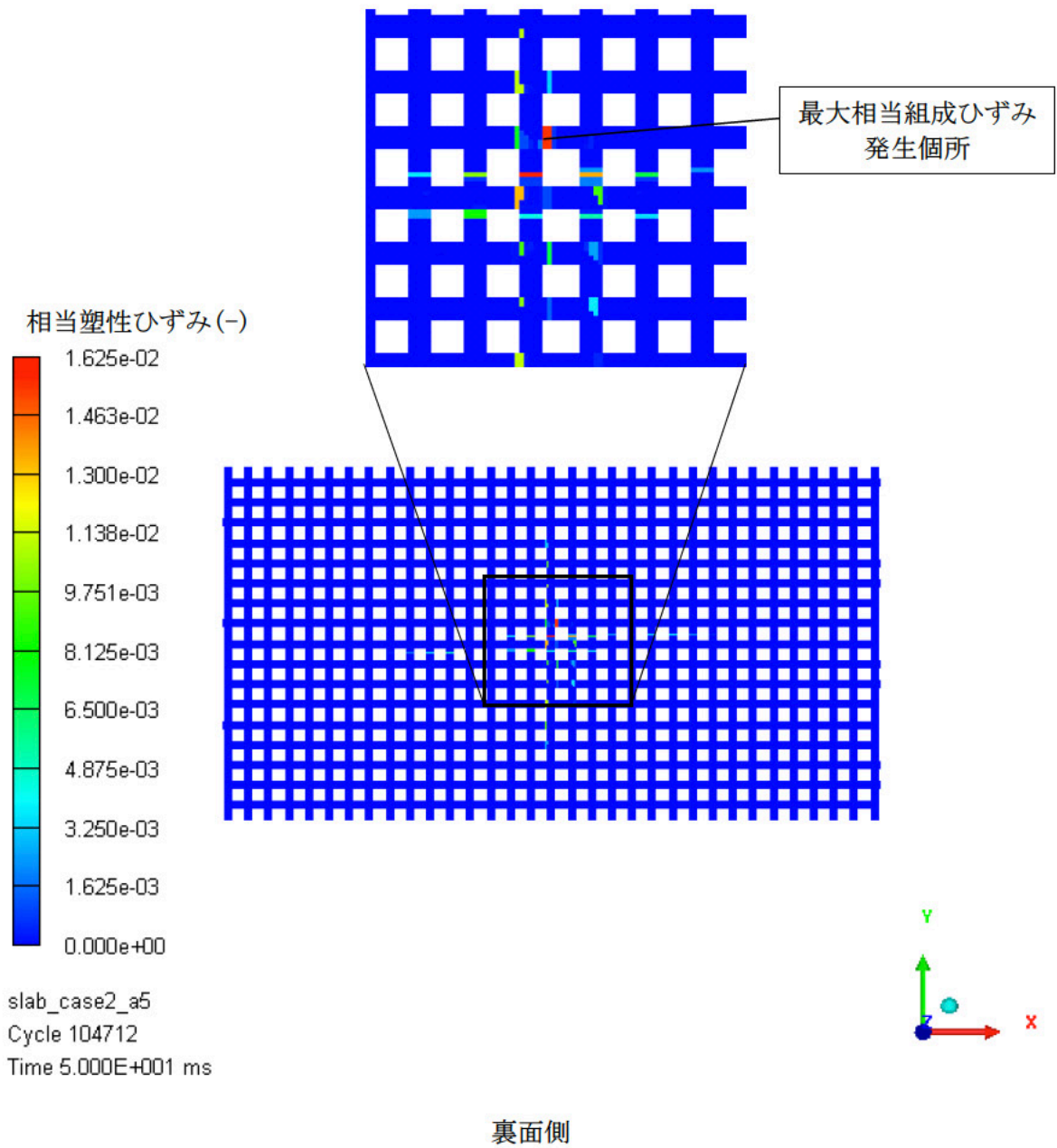
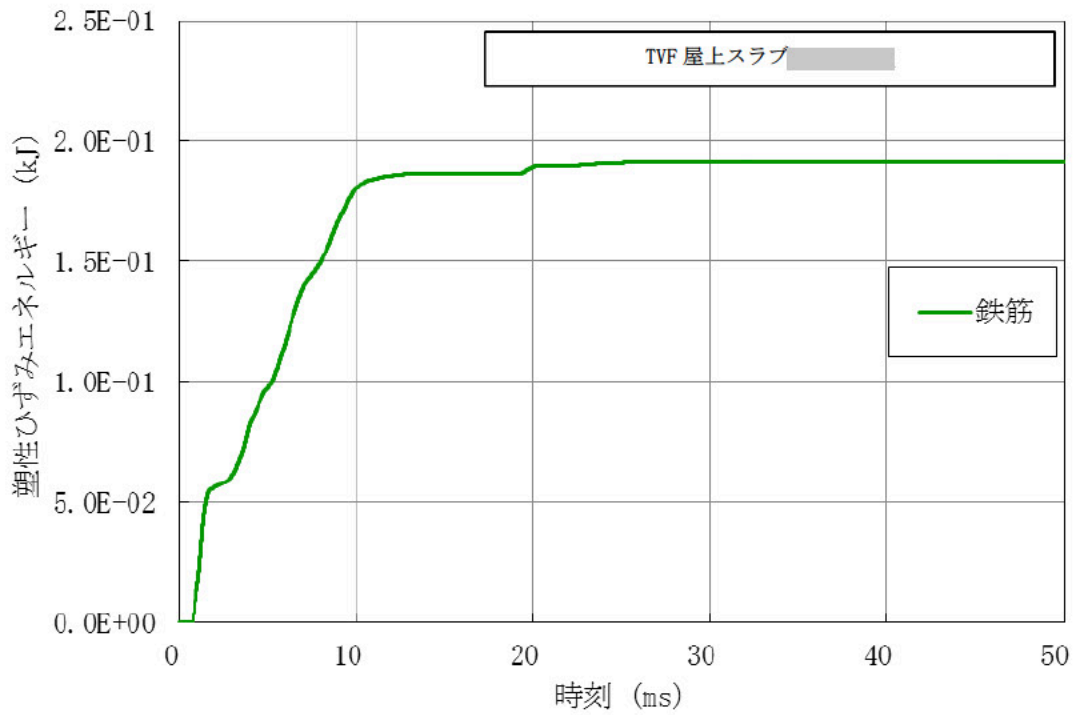
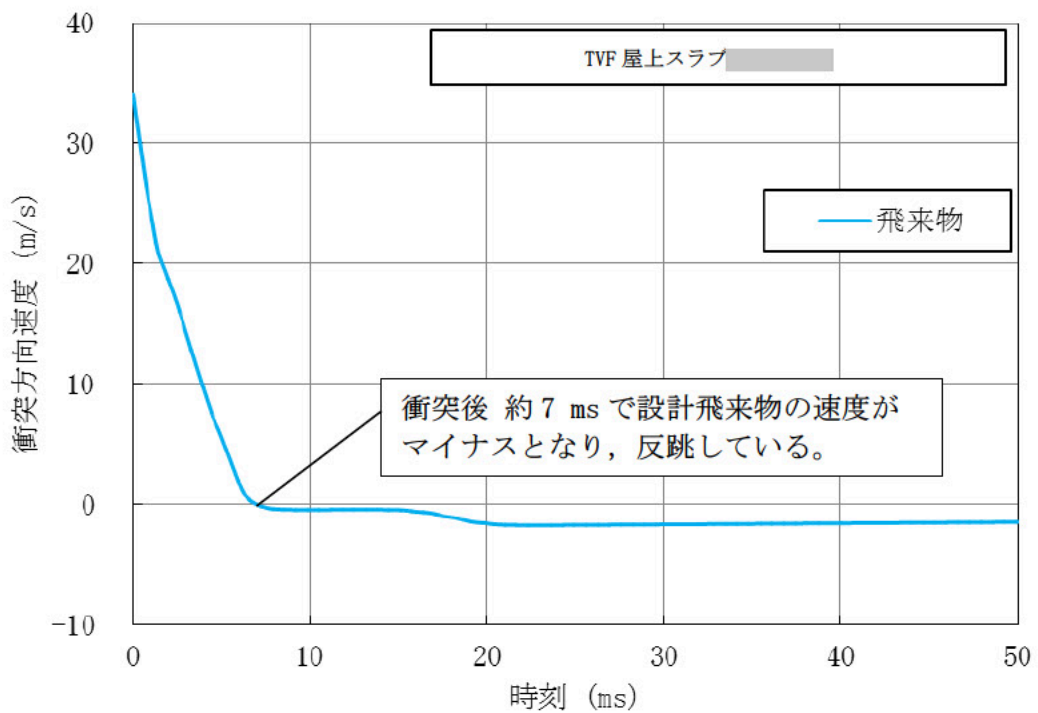


図 3-14 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の屋上スラブの鉄筋の最大相当塑性ひずみコンター図 (衝突後 50 ms)

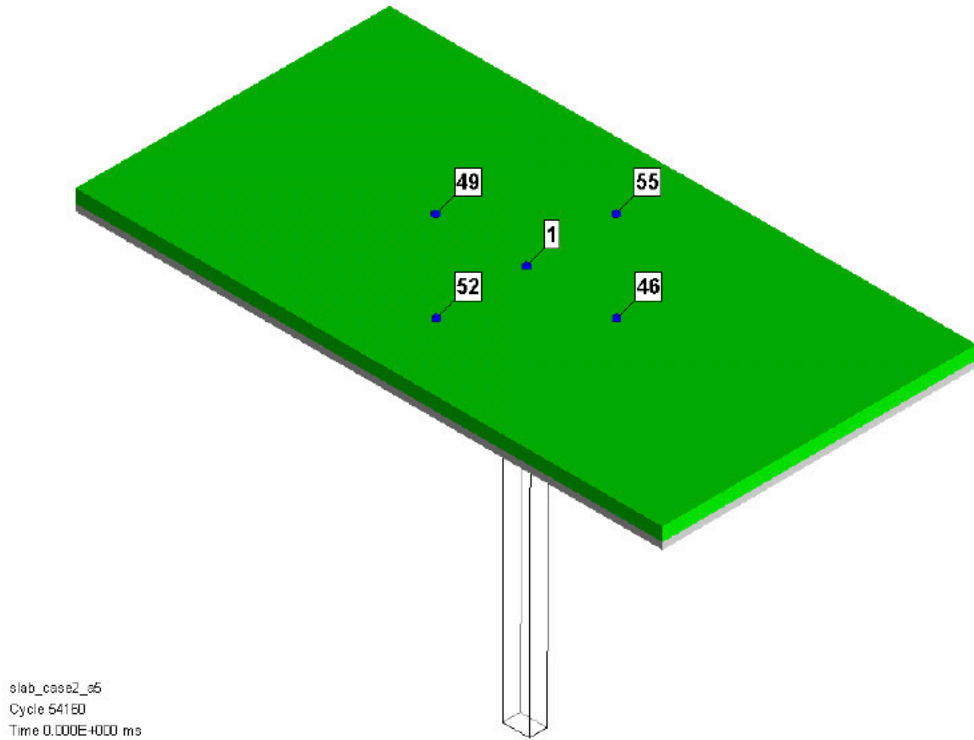


a) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー時刻歴

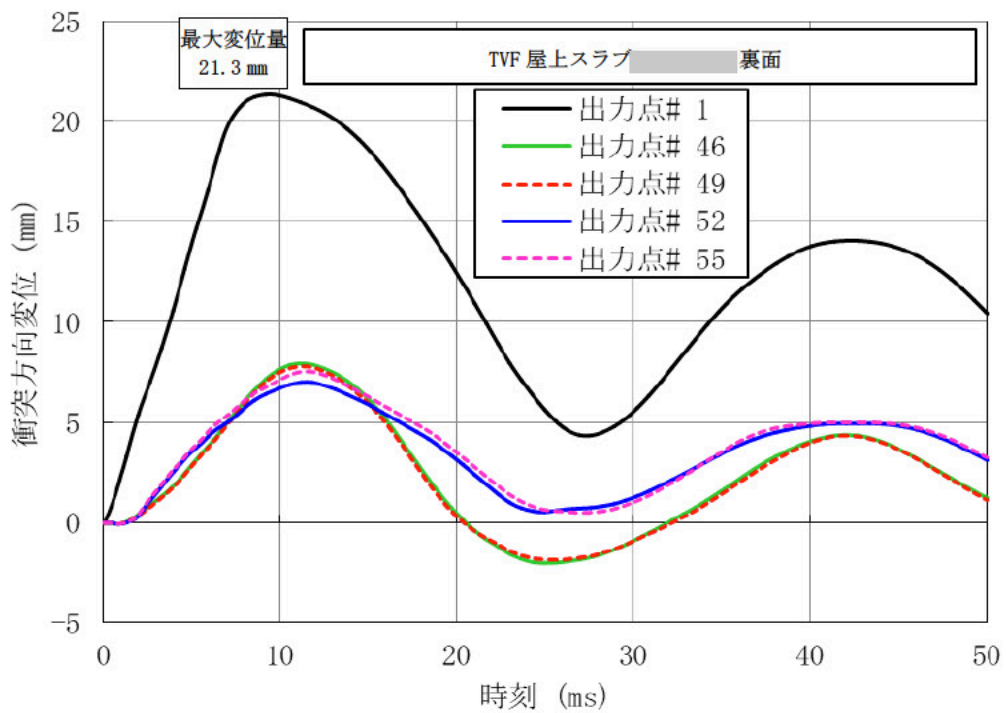


b) 設計飛来物の衝突方向速度時刻歴

図 3-15 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の屋上スラブの時刻歴 (鉄筋の塑性ひずみエネルギー及び設計飛来物の衝突方向速度)



a) 変位時刻歴データを抽出する要素の位置（衝突位置の裏面の中心1点と周囲4点）



b) 変位時刻歴データを抽出した要素の変位時刻歴

図 3-16 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の屋上スラブの突方向変位と時刻の関係

計算プログラム（解析コード）ANSYS AUTODYNの概要

1. 概要

再処理施設の設計飛来物に対する建家の健全性評価に用いた解析コードであるANSYS AUTODYN（以下「AUTODYN」という。）について、検証等を行った結果を以下に示す。

2. コードの概要及び検証等

コード名	ANSYS AUTODYN
開発機関	米国Century Dynamics社（2005年 ANSYS社と合併）
開発時期	1985年
使用バージョン	Version 14
使用目的	衝撃問題の非線形時刻歴応答解析
コードの概要	<p>AUTODYNは、爆発・衝撃問題といった非線形時刻歴応答解析の専用ツールとして、1985年に米国Century Dynamics 社（2005年 ANSYS社と合併）によって開発されている。</p> <p>AUTODYNは、陰解法ソルバを採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法※ソルバを採用しているため、爆発・衝撃のような非線形性の強い問題の解析に適している。</p> <p>※ 時刻歴応答解析には「陰解法」と「陽解法」の2種類の手法があり、陰解法は解を求めるために収束計算を必要とすることから、非線形性の強い問題の場合は解が発散して計算が継続できなくなる場合がある。一方、陽解法は収束計算の必要がないことから、比較的短時間で安定して解が得られる。</p> <p>AUTODYNには、気体/液体/固体等の解析対象に応じた要素の使い分けや、異なる要素タイプ間での連成解析が可能であり、変形レベルの大きい流体部分と比較的変形レベルの小さい構造物部分の要素を使い分けてモデル化し、それらを連成させて計算することで、衝撃荷重を伴う流体－構造連成問題を解くことができる。AUTODYNの基礎方程式は以下の3つである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・質量保存則 ・運動量保存則 ・エネルギー保存則

<p>コードの概要</p>	<p>これら3保存則に加え、物質の特性を決定づける状態方程式と構成則を連立して解いている。さらに、破壊則を定義することで物体の破壊挙動を評価できる。</p>
<p>検証及び 妥当性確認</p>	<p>AUTODYN Version 14は、竜巻飛来物と建家外壁の衝突解析に使用している。</p> <p>【検証】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄筋コンクリート版への衝突問題について、AUTODYN Version 13 による解析結果が実験結果をよく再現していることを確認している⁽¹⁾。 ・ 本解析業務と同様な手法によるAUTODYN Version 13を用いた鉄筋コンクリート版への衝突解析の結果と実験値を比較した結果、飛来物（剛体）の実験での貫入深さに対して、解析による貫入深さがよく合っていることを確認している⁽²⁾。 ・ OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）による航空機等の衝突に対する原子力施設の安全性評価技術の改良整備を目的とした国際プロジェクト（IRIS）に参加した原子力安全基盤機構による鉄筋コンクリート版に対する衝突試験を再現する解析において「3次元FEM モデルを用いた当機構コード（AUTODYN Version 6.1 とCAPROUS 構成則の組合せ）によるミサイル衝突解析方法は、コンクリート材料構成則パラメータを適切に設定すれば、ある程度精度が高い計算を実施できると思われる。」と評価されていることを確認している⁽³⁾。 ・ AUTODYNのVersion 6.1, Version 13及びVersion 14との間で計算結果に大きな差異が生じないことを確認している。 <p>【妥当性確認】</p> <p>AUTODYNを竜巻により発生する飛来物の衝突解析の評価に使用することは次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JSME S NX6-2019 発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドラインにおいて、詳細評価に用いる解析コードとして記載されている。 ・ 本解析コードは、爆発・衝撃問題といった非線形時刻歴応答解析の専用ツールとして開発されたコードであり、使用目的が合致している。 ・ コンクリート材料構成則パラメータを適切することで、ある程度精度が高い計算を実施できる。

3. 検証方法

3.1 衝突試験と解析結果の比較⁽²⁾

1) 衝撃試験

ほぼ剛体とみなすことができる飛翔体の衝突実験^{(4)~(7)}を公開論文から選択し、それらを対象として2次元解析を実施している。衝突実験は、飛翔体の先端が先の尖った弾あるいは平坦な形状で実施している。

実験条件を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 衝突実験の条件⁽²⁾

試験	飛翔体			コンクリート
	先端形状	速度 (m/s)	質量 (kg)	圧縮強度 (N/mm ²)
Forrestal-1	尖頭型	277~800	0.9	32~40
Forrestal-2	尖頭型	405~651	1.6	51
EMI	平坦型	155~213	2.2	33~40
Koshika	平坦型	400	0.098	24.3

2) 解析

解析体系は2次元軸対称として解析を行っている。飛翔体とコンクリート板の要素分割を図 3.1-1 に示す。飛翔体とコンクリート板の計算要素にはラグランジュ表示の四角形ソリッド要素を用いた。

なお、ラグランジュ・ソリッド要素は過度に変形すると解析の続行を阻害するため、相当ひずみが200%を超える要素は、解析体系から自動的に削除している。

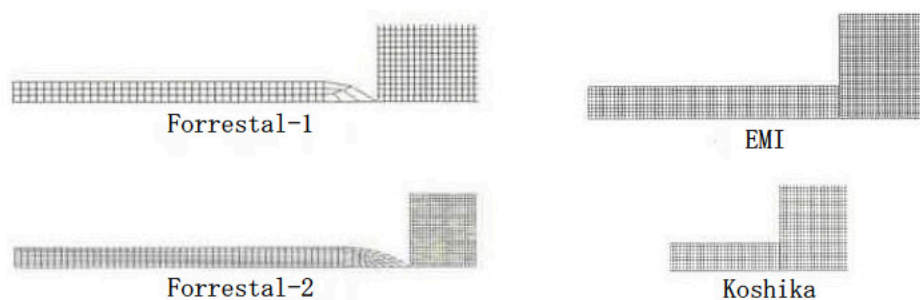


図 3.1-1 2次元解析の計算メッシュ⁽²⁾

3) 解析結果と評価

表 3.1-2 に、剛飛翔体の実験ケースに対する貫入深さの比較を示す。Forrestal-1 の衝突速度が 277 m/s のケースと EMI の衝突速度が 213 m/s のケースでは 10% を越える誤差があるが、それ以外では解析による貫入深さは実験値とよく合っている。飛翔体の先端形状や衝突速度、コンクリート強度が異なっても、精度よく模擬できることが確認できる。

図 3.1-2 には代表的な解析ケースのコンクリート板の損傷状況を示した。赤色の領域はスポール破壊した計算要素を表している。

表 3.1-2 実験による貫入深さと解析結果の比較⁽²⁾

ケース	衝突試験	飛翔体				コンクリート板		貫入深さ (mm)		誤差 (%)
		質量 (kg)	直径 (mm)	速度 (m/s)	先端形状	板厚 (mm)	圧縮強度 (MPa)	実験結果	解析結果	
1	Forrestal-1	0.9	26.9	277	尖頭型	760	35.2	173	194	+12
2				410		910	37.8	310	322	+4
3				499		760	33.5	480	456	-5
4				591		1830	40.1	513	553	+8
5				631			35.4	607	633	+4
6				642			34.7	620	657	+6
7				800			32.4	958	940	-2
8	Forrestal-2	1.6	30.5	405	尖頭型	1000	51	370	375	+1
9				446				420	417	-1
10				545				560	557	-1
11				651				780	731	-6
12	EMI	2.16	45	155	平坦型	231	33	68	67	-2
13				203			40	106	109	+3
14				213			34	130	146	+12
15	Koshika	0.098	20	400	平坦型	130	24.3	62	65	+5

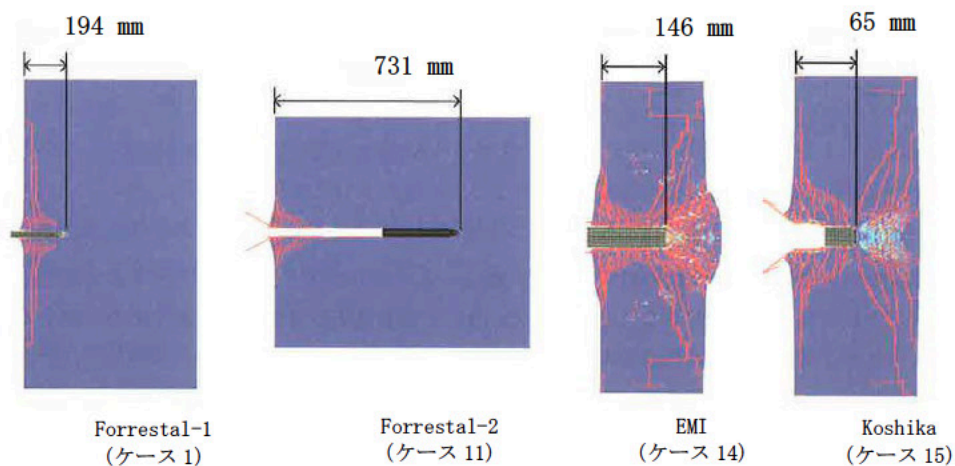


図 3.1-2 2次元解析によるコンクリート板の損傷図⁽²⁾

<参考文献>

- (1) Itoh, M. et al., Numerical Simulations of RC Slabs Subject to Impact Loadings by Using the Improved Caprous Constitutive Model, 10th international conference on Shock & impact Loads on Structures, 2013
- (2) 高速衝撃を受けるコンクリート構造物の局所破壊に対する設計ガイドライン（案），平成26年3月，防衛施設学会，150-165.
- (3) 安全研究年報（平成24年度）（JNES-RE-2013-0001-Rev.1），平成25年8月，独立行政法人原子力安全基盤機構，105-107.
- (4) Forrestal, M.J. et al., An empirical equation depth of ogive-nose projectiles into concrete targets, International Journal of Impact Engineering, 1994, 15, 395-405.
- (5) Forrestal, M.J. et al., Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles, International Journal of Impact Engineering, 1996, 18, 465-476.
- (6) Langheim, H., Impactuntersuchungen an armierten betonplatten, Ernst Mach Institute Report, E14, Part3, 1977.
- (7) Muto, K. et al., Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles part 1: outline of test programs and small-scale test, Trans. of 10th SMIRT, 1989, 257-264.

設計飛来物に対する竜巻防護対策（開口部の閉止措置）の概要

1. 防護方針

高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の建家内に設置する閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能を担う施設は、廃止措置計画用設計竜巻の荷重に対して、建家外殻の防護機能により当該健全性を維持する。

建家内に設置する閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能を担う施設のうち、一部の施設は、窓等の開口部に近接しており、設計飛来物の衝突等により機能喪失することがないように、開口部の閉止措置を実施する。

2. 対策箇所

2.1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）

設計飛来物の衝突等を考慮する必要がある地上階における屋内の閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能を担う施設の配置図を図 2.1-1～図 2.1-2 に示す。

なお、浸水防止対策を実施している箇所で、浸水防止扉等の鋼材厚さが設計飛来物の貫通限界厚さを超えるものについては、浸水防止対策により設計飛来物に対しても防護機能に期待できるものとして、新たな対策を実施しないものとする。

2.2 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟

設計飛来物の衝突等を考慮する必要がある地上階における屋内の閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能を担う施設の配置図を図 2.2-1～図 2.2-2 に示す。

なお、浸水防止対策を実施している箇所で、浸水防止扉等の鋼材厚さが設計飛来物の貫通限界厚さを超えるものについては、浸水防止対策により設計飛来物に対しても防護機能に期待できるものとして、新たな対策を実施しないものとする。

3. 設計飛来物への防護対策の考え方

「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）」中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている BRL 式を用いて貫通限界厚さ T を算定し、鋼板に対する設計飛来物の貫通厚さ T を超える鋼板厚さで開口部の閉止措置を設計することとする。

BRL 式

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

$$T = \left\{ \frac{0.5MV^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 \cdot d^2} \right\}^{\frac{2}{3}}$$

≒ 8.91 (mm)

ここで、

T : 鋼板貫通限界厚さ (m)

M : 設計飛来物の質量 135 (kg)

V : 設計飛来物の最大水平衝突速度 51 (m/s)

d : 設計飛来物の直径 0.276 (m)

(設計飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1)

4. 竜巻防護対策の概要

高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の閉止措置等の対策を表 4-1 に、ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の閉止措置等の対策を表 4-2 に示す。また、開口部に対する竜巻防護対策の概要を図 4-1～図 4-3 に示す。

以上

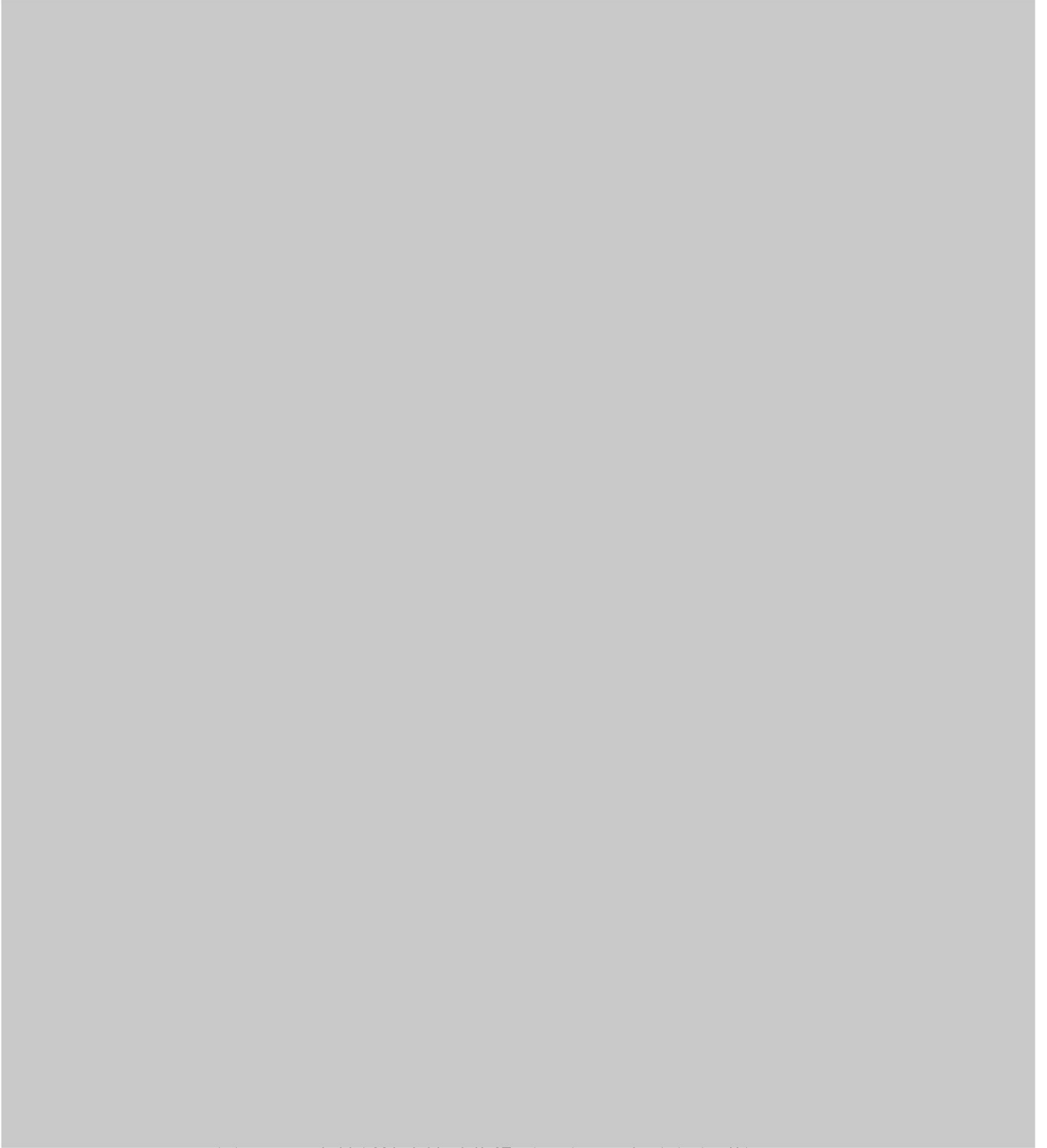


図 2.1-1 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の平面図 (3階)

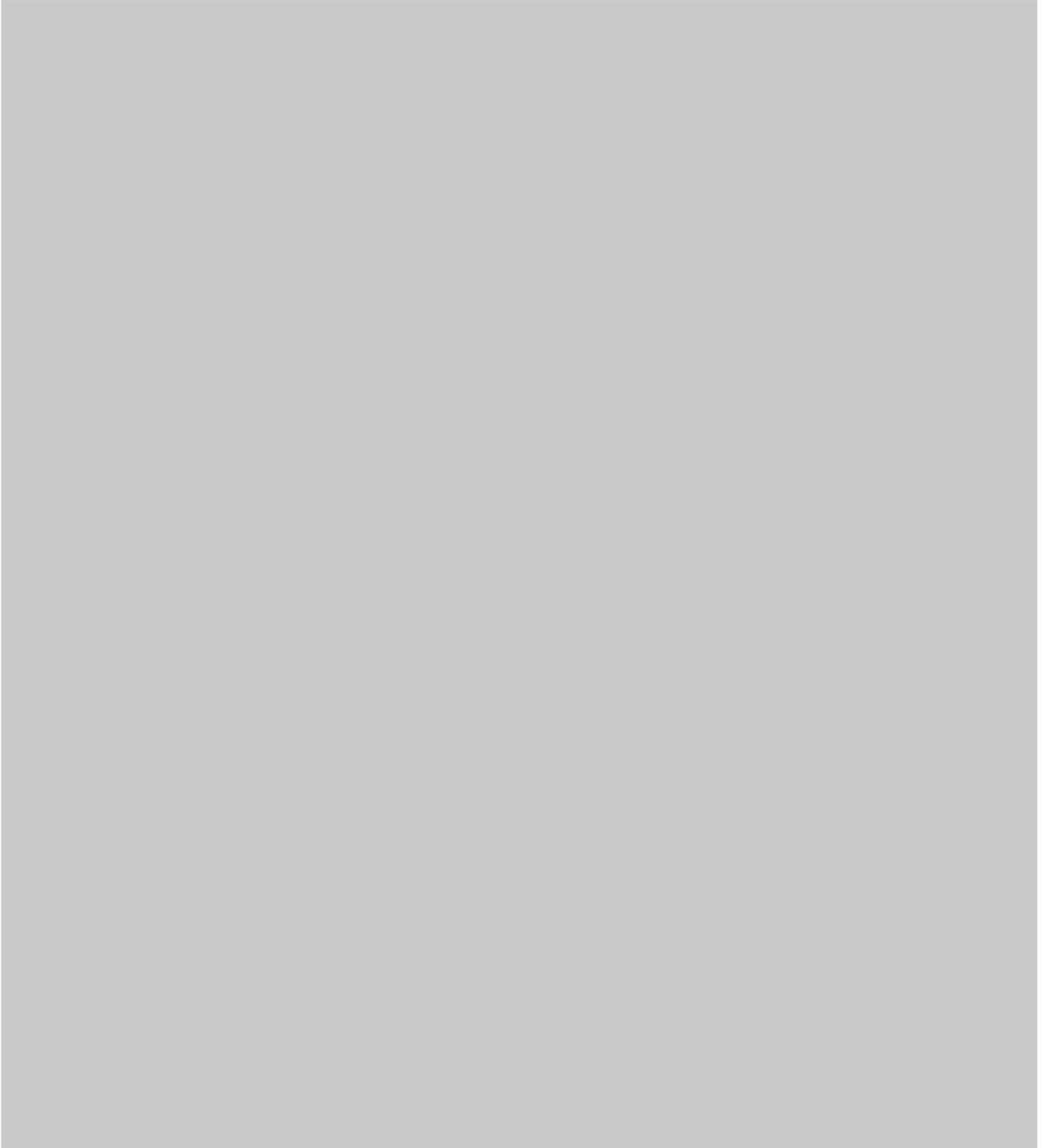


図 2.1-2 高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の平面図 (4 階)



図 2.2-1 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (2 階)



図 2.2-2 ガラス固化技術開発施設 (TVF) ガラス固化技術開発棟の平面図 (3 階)

表 4-1 高放射性廃液貯蔵場（HAW）の閉止措置等の対策箇所

開口部の位置	種類	基数	防護対策イメージ
3階 (廊下-屋外)	窓	5	図 4-1
	扉（閉止板（盾式角落とし）有）	1	図 4-2
4階 (廊下-屋外)	窓	5	図 4-1
	扉	1	図 4-2
	ガラリ	1	図 4-3

表 4-2 ガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の閉止措置等の対策箇所

開口部の位置	種類（現状）	基数	防護対策の概要
2階 (電気室-屋外)	窓（アクリル板 有）	4	図 4-1
	扉（閉止板（盾式角落とし）有）	1	図 4-2
	ガラリ	3	図 4-3
2階 (制御室-屋外)	窓（鋼板（6 mm）有）	7	図 4-1
	扉（閉止板（盾式角落とし）有）	1	図 4-2
2階 (休憩室-屋外)	窓（鋼板（6 mm）有）	2	図 4-1
2階 (空調機械室-屋外)	扉（閉止板（盾式角落とし）有）*1	1	図 4-2
2階 (排気フィルタ室-屋外)	扉（閉止板（盾式角落とし）有）	1	図 4-2
3階 (ユーティリティ室-屋外)	窓	4	図 4-1
	扉	1	図 4-2
	ガラリ	2	図 4-3
3階 (給気室-屋外)	窓	7	図 4-1
	扉	1	図 4-2
	ガラリ	2	図 4-3
3階 (排気機械室-屋外)	扉	2	図 4-2
3階 (電気室-屋外)	ガラリ	1	図 4-3

*1 設計飛来物が当該扉を貫通した場合、内側にある壁による防護に期待できなく、フィルタが損傷するおそれがあることから閉止措置を行う。

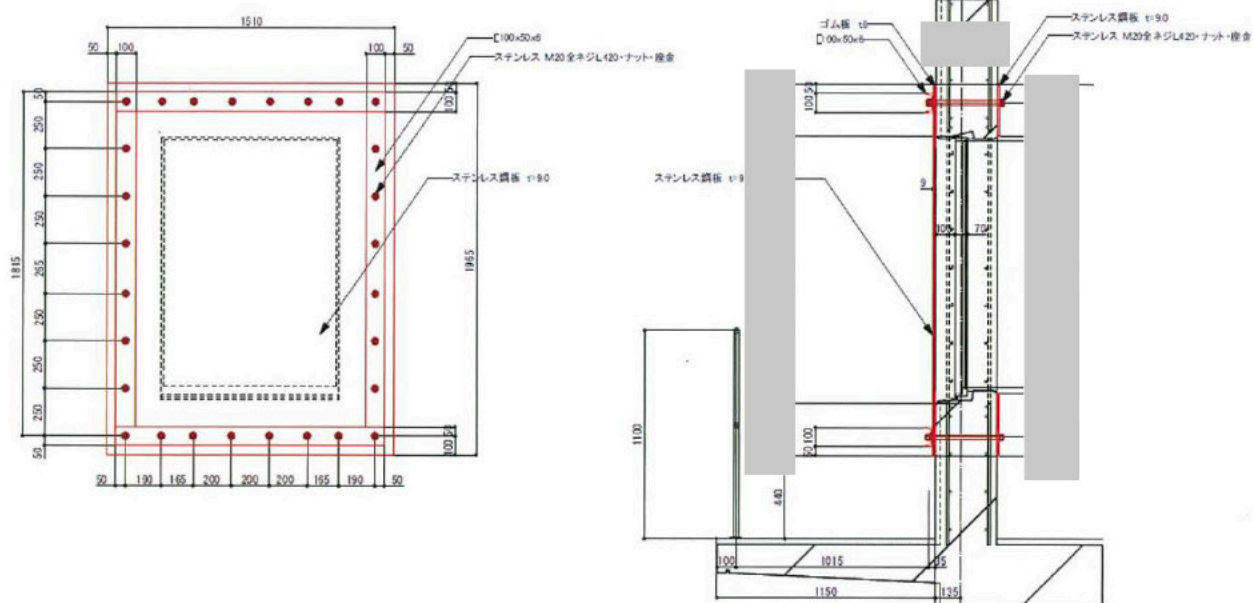


図 4-1 窓に対する閉止措置のイメージ図

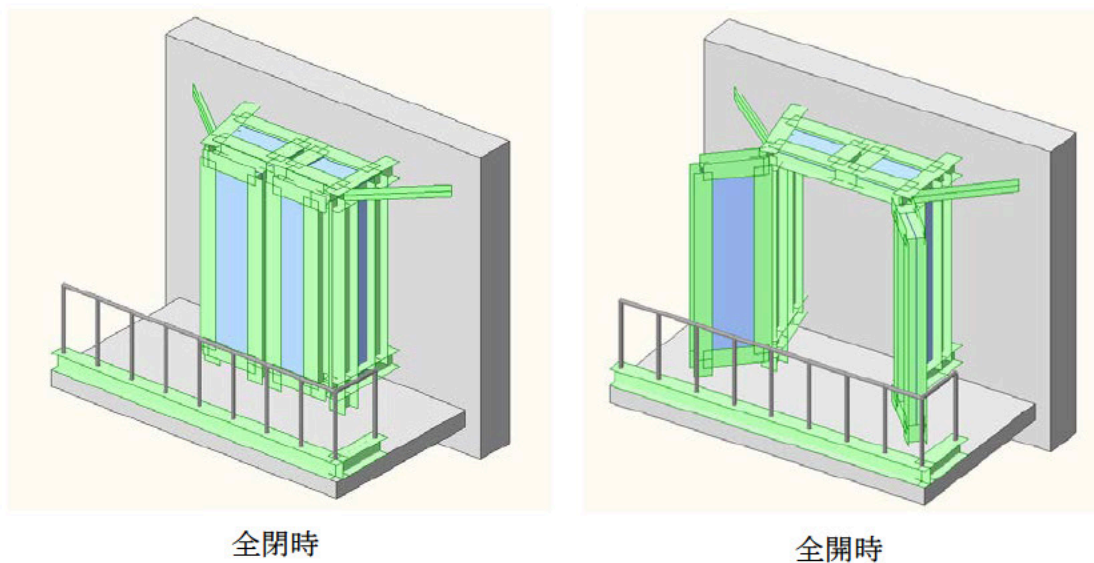
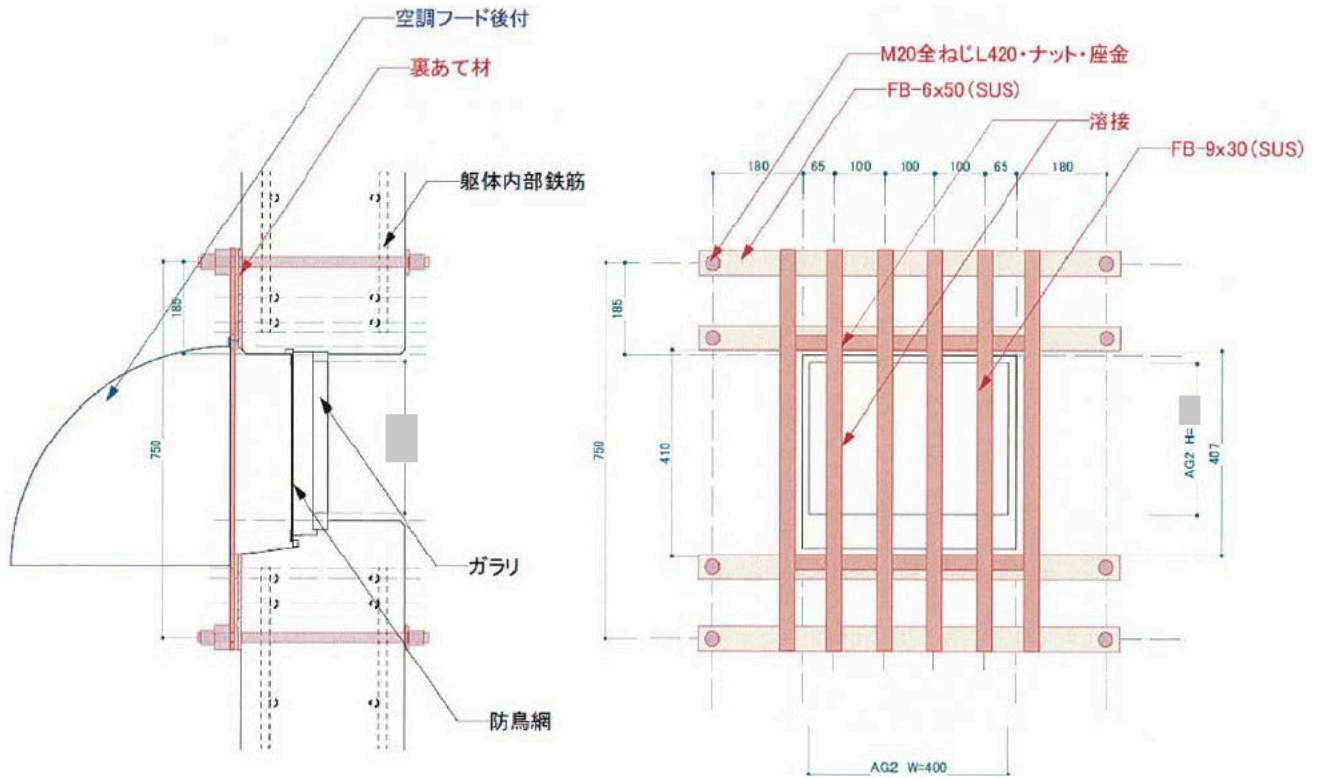
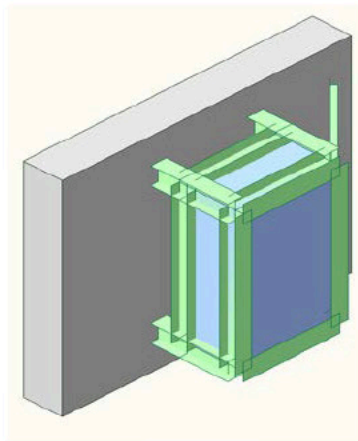


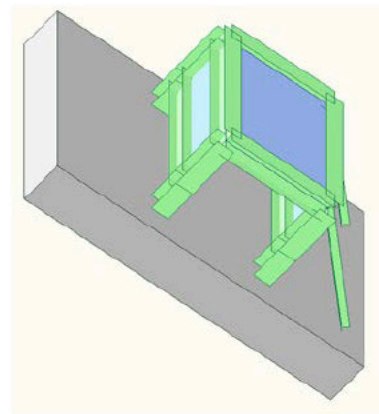
図 4-2 扉に対する閉止措置のイメージ図



ガラリに対する閉止措置の方法①



全体



見上げ

ガラリに対する閉止措置の方法②

図 4-3 ガラリに対する閉止措置のイメージ図

再処理施設の火山事象対策の基本的考え方

再処理施設の火山事象対策の基本的考え方

廃止措置段階にある再処理施設においてはリスクが特定の施設に集中している。高放射性廃液に伴うリスクが集中する高放射性廃液貯蔵場（HAW）と、長期間ではないものの分離精製工場（MP）等の工程洗浄や系統除染に伴う廃液処理を含めて一定期間使用するガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟については、安全対策を最優先で講ずる必要がある。

このため、高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟については、地震対策や津波対策と同様、廃止措置計画用火山事象に基づく降下火砕物による影響に対しても、設備と運用による対策を組み合わせ、重要な安全機能（閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能）が損なわれることのないよう以下の対策を講ずる。

- ・ 閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能を担う設備^{*1}を降下火砕物から防護するために、それら設備を内包する高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟の建家を降下火砕物の堆積荷重に耐え得るようにすることで重要な安全機能（閉じ込め機能及び崩壊熱除去機能）を損なわない設計とする。
- ・ 建家の防護設計では、想定する降下火砕物の荷重に加え、常時作用する荷重及び自然現象（積雪）の荷重を組み合わせる。
- ・ 気象庁の発表等による火山の噴火及び降灰予報情報に基づき、降下火砕物により高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟に影響が及ぶおそれがある場合には、屋上に堆積する降下火砕物の除去や換気系給気フィルタの交換等の必要な措置を行う。
- ・ 降下火砕物の影響による高放射性廃液貯蔵場（HAW）及びガラス固化技術開発施設（TVF）ガラス固化技術開発棟に電力やユーティリティを供給する既設の恒設設備（外部電源及び非常用発電機、蒸気及び工業用水の供給施設）の機能喪失を想定し、代替策としての有効性を確認した上で事故対処設備として配備する設備^{*2}等が使用できるよう必要な対策を実施する。
- ・ 上記で使用する可搬型の事故対処設備については、降下火砕物が直接堆積しないように屋内に設置する、あるいは屋外に設置する場合はカバー等を設けるとともに降灰が観測された場合には堆積物の除去等の対策を行う。

上記以外の施設については、今後とも安全かつ継続して施設を運用し計画的に廃止措置を進めることができるよう、それぞれのリスクに応じた対策を講ずることとする。

※1 別添 6-1-2-1「再処理施設の廃止措置を進めていく上での地震対策の基本的考え方」に示した崩壊熱除去機能及び閉じ込め機能を担う設備。

※2 別添 6-1-2-1「再処理施設の廃止措置を進めていく上での地震対策の基本的考え方」に示した事故対処設備。