

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-091 改 19
提出年月日	平成 30 年 5 月 23 日

## V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

## 目次

### V-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針

- V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書
- V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書
- V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書
- V-3-別添 1-1-4 排気筒の強度計算書
- V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書
- V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書
- V-3-別添 1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書
- V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書
- V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書
- V-3-別添 1-1-10 波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書
  - V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書
  - V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書
  - V-3-別添 1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書

### V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針

- V-3-別添 1-2-1 防護対策施設の強度計算書
  - V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書
  - V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書
  - V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

### V-3-別添 1-3 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針

- V-3-別添 1-3-1 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書

: 今回ご説明分

V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の  
強度計算書

## 目次

1.	概要.....	1
2.	基本方針.....	1
2.1	位置.....	1
2.2	構造概要.....	2
2.3	評価方針.....	12
2.4	適用規格.....	14
3.	強度評価方法.....	15
3.1	記号の定義.....	15
3.2	評価対象部位.....	16
3.3	荷重及び荷重の組合せ.....	17
3.4	許容限界.....	20
3.5	評価方法.....	23
4.	評価条件.....	45
4.1	貫通評価.....	45
4.2	裏面剥離評価.....	47
4.3	変形評価.....	47
5.	強度評価結果.....	53
5.1	貫通評価.....	53
5.2	裏面剥離評価.....	54
5.3	変形評価.....	55

## 1. 概要

本資料は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「建屋」という。）及び軽油貯蔵タンクタンク室（以下「構造物」という。）が、設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力及び気圧差に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

## 2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、建屋及び構造物の「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

建屋及び構造物の配置図を図2-1に示す。

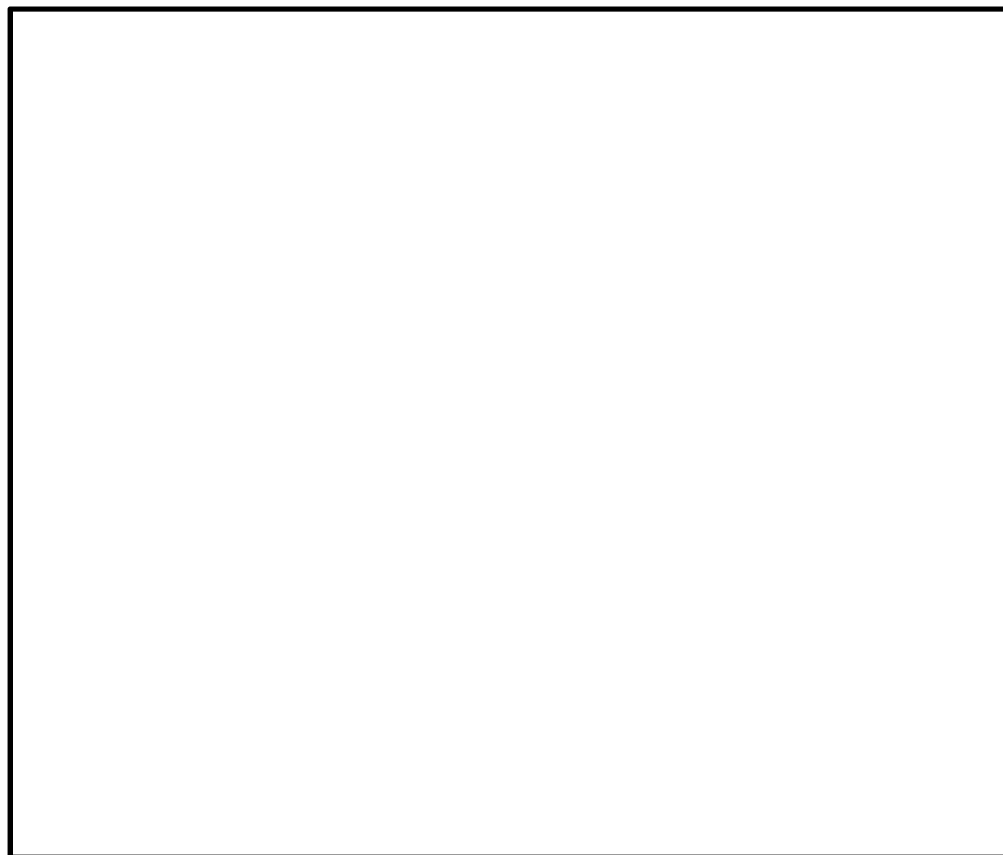


図 2-1 建屋及び構造物の配置図

## 2.2 構造概要

建屋及び構造物は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、一部鉄骨造を有する構造である。また、原子炉建屋には、外殻を構成する部材として鋼製の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）、原子炉建屋付属棟 1 階電気室搬入口水密扉等の扉が設置されている。

軽油貯蔵タンクタンク室は、地中に埋設された構造物であり、地上部に露出する頂版を含めた外殻の躯体は鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出する開口部の蓋は鋼製である。

建屋及び構造物の概略平面図及び概略断面図を図 2-2～図 2-9 に示す。

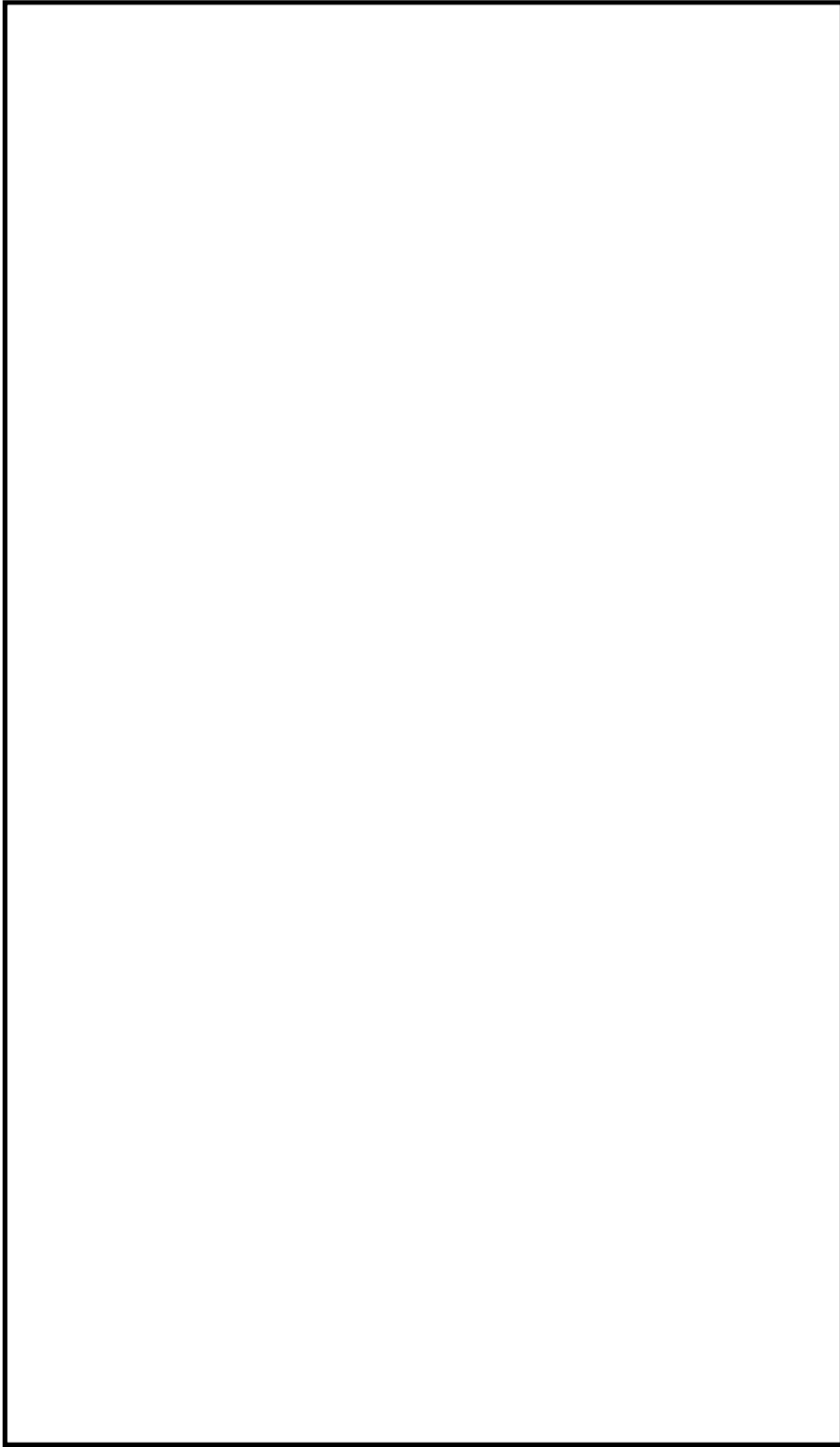


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

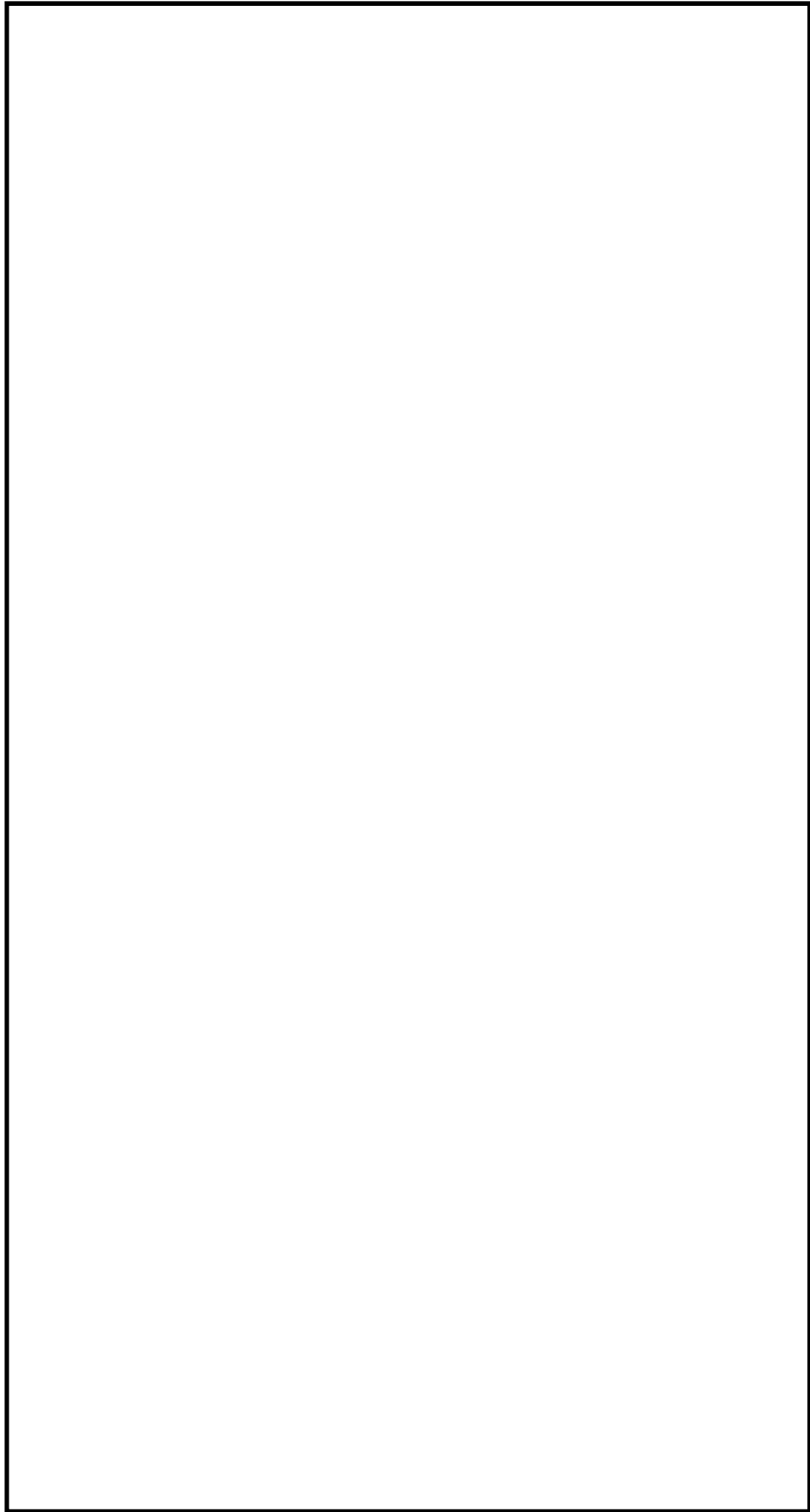


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(1/2)





図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(2/2：鉄骨構造部)

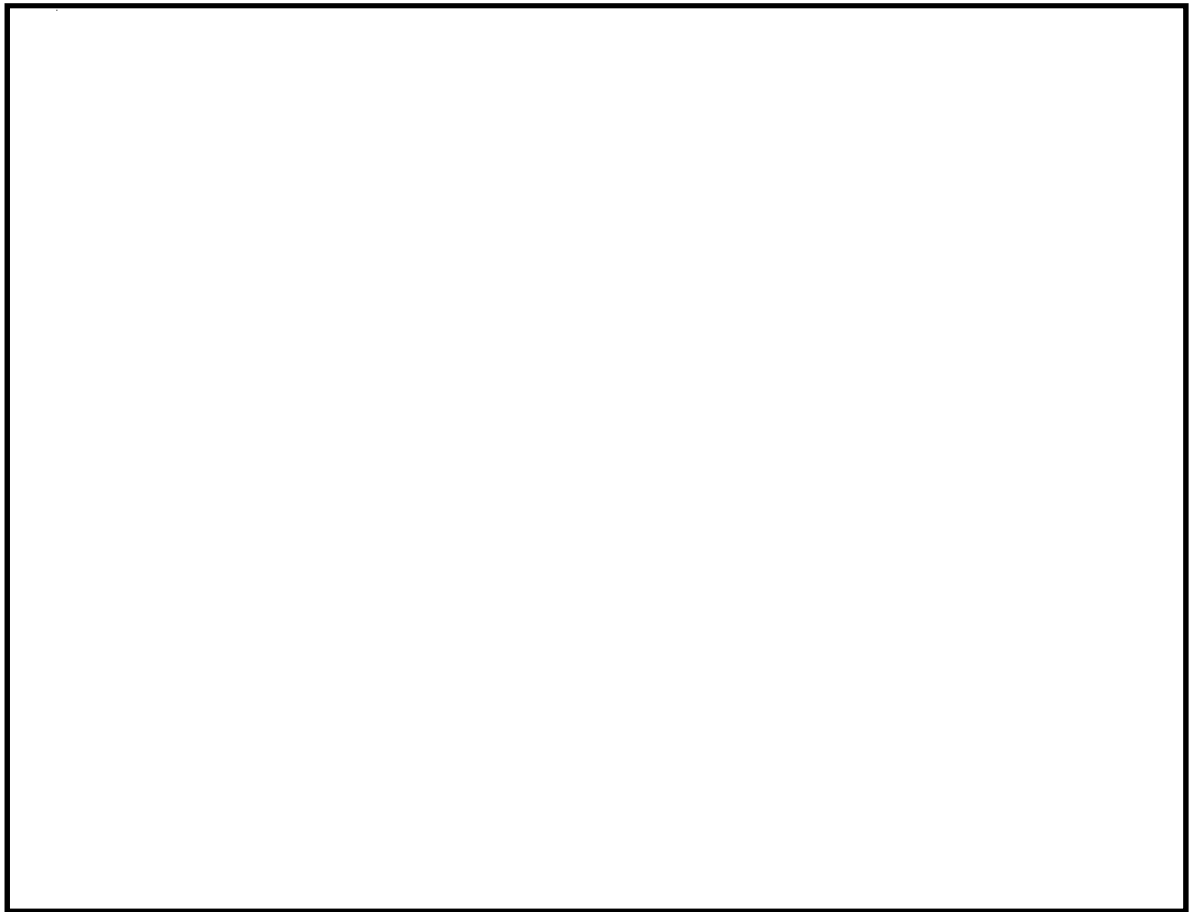


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

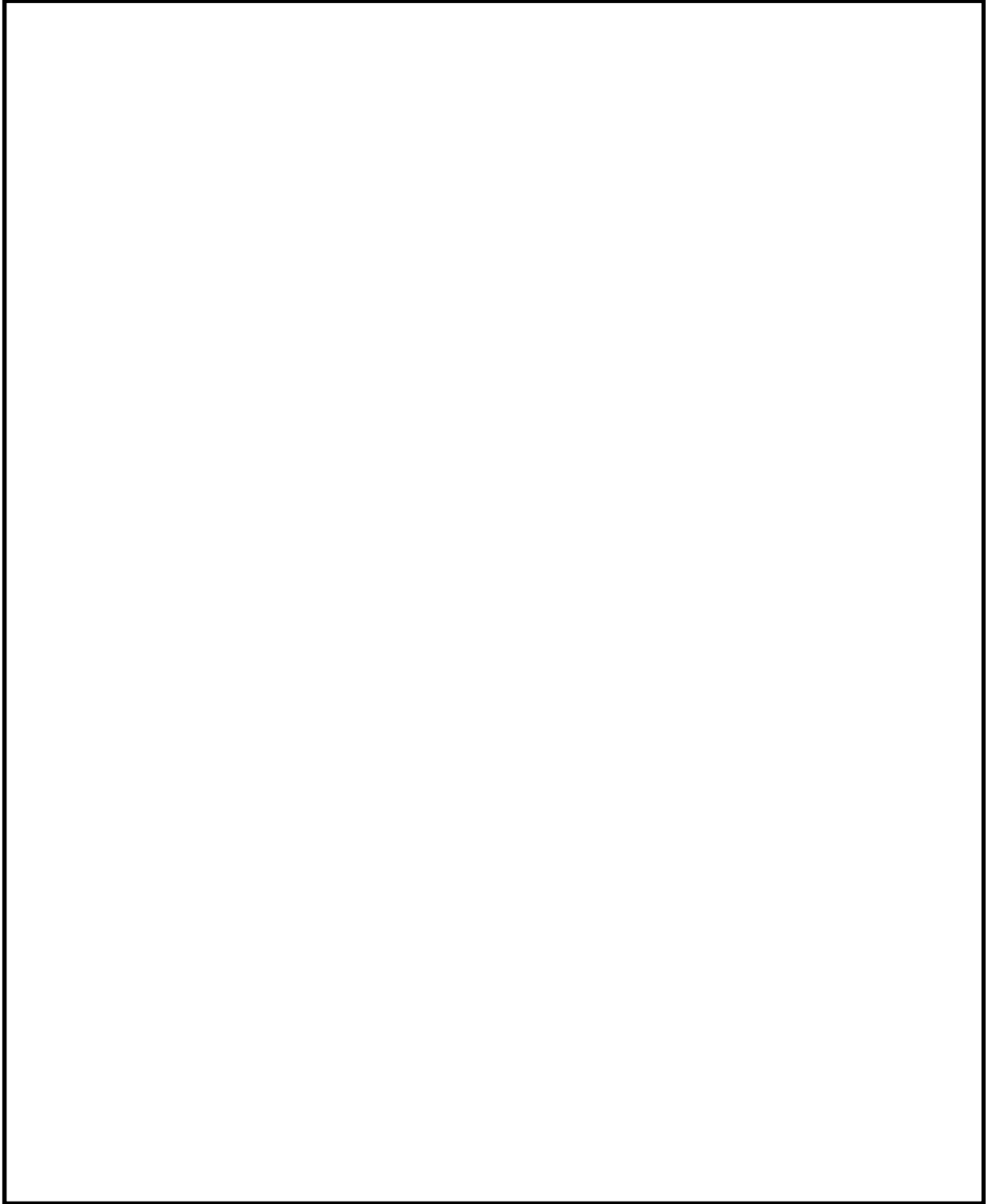


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

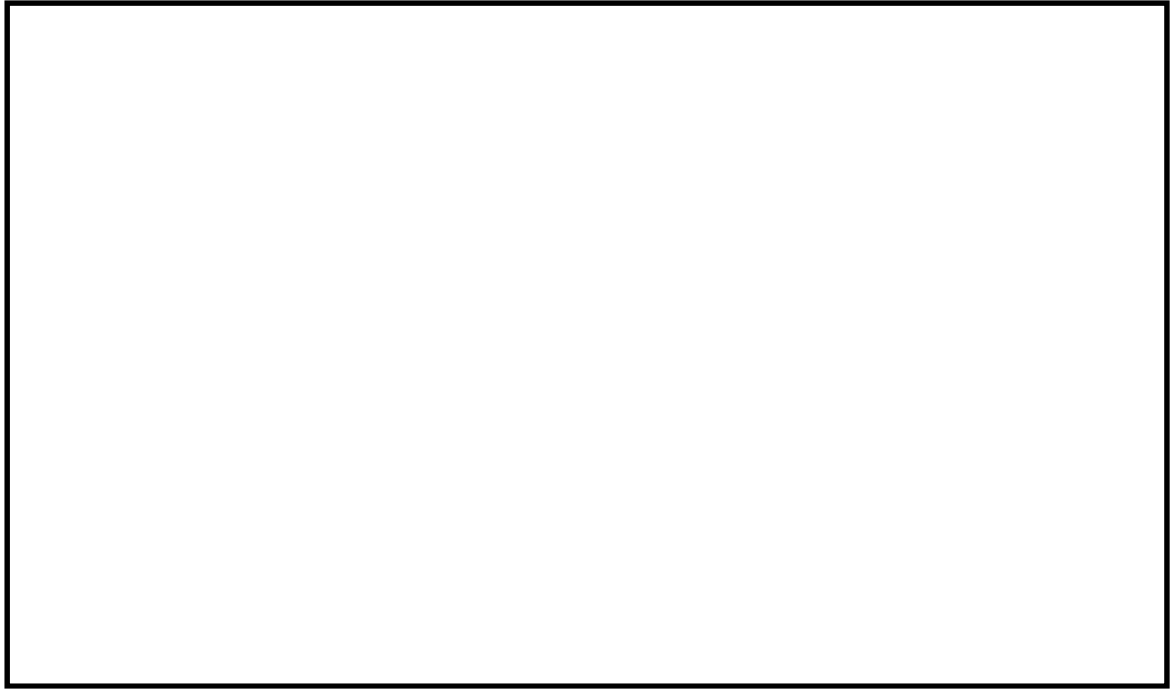


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

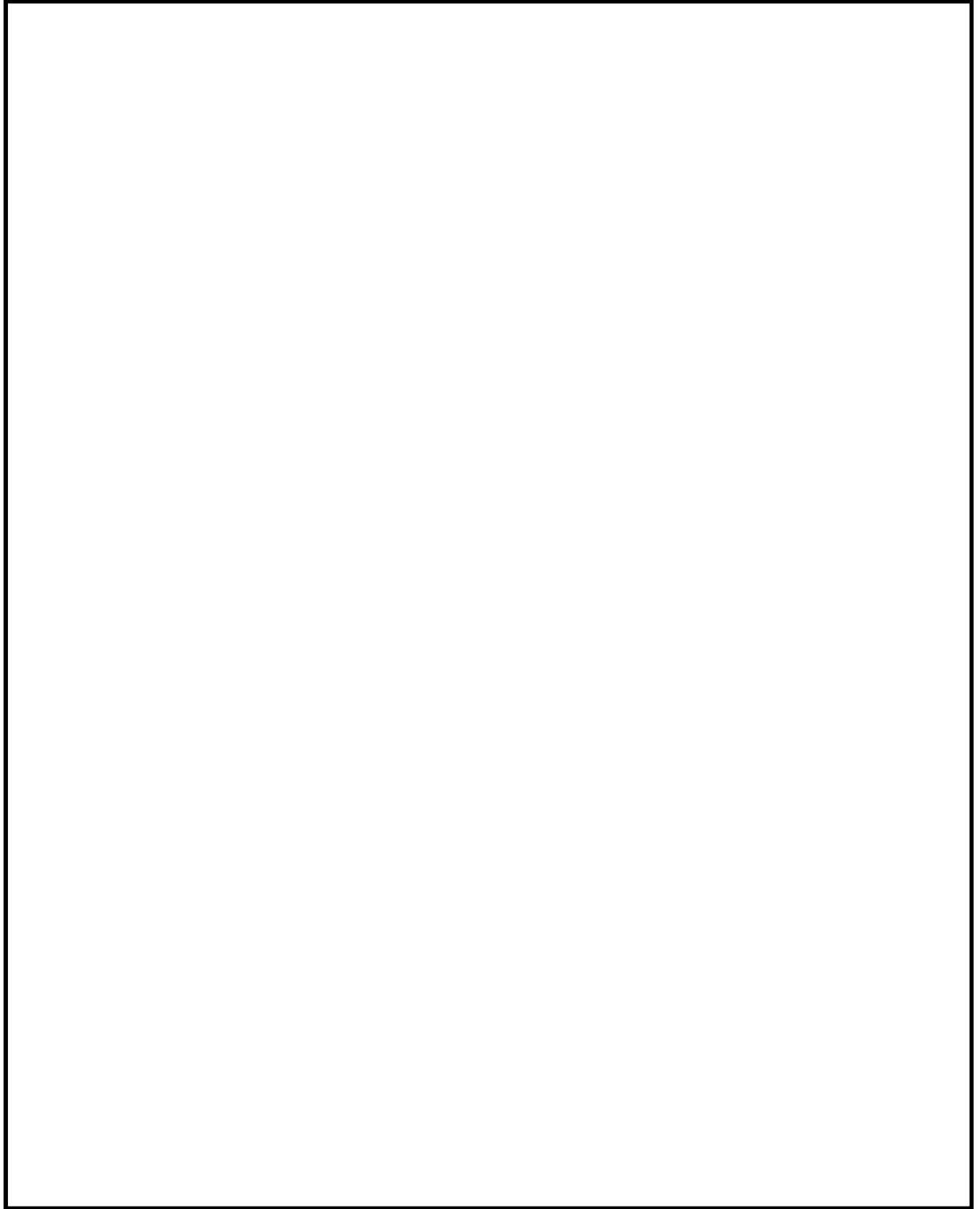


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

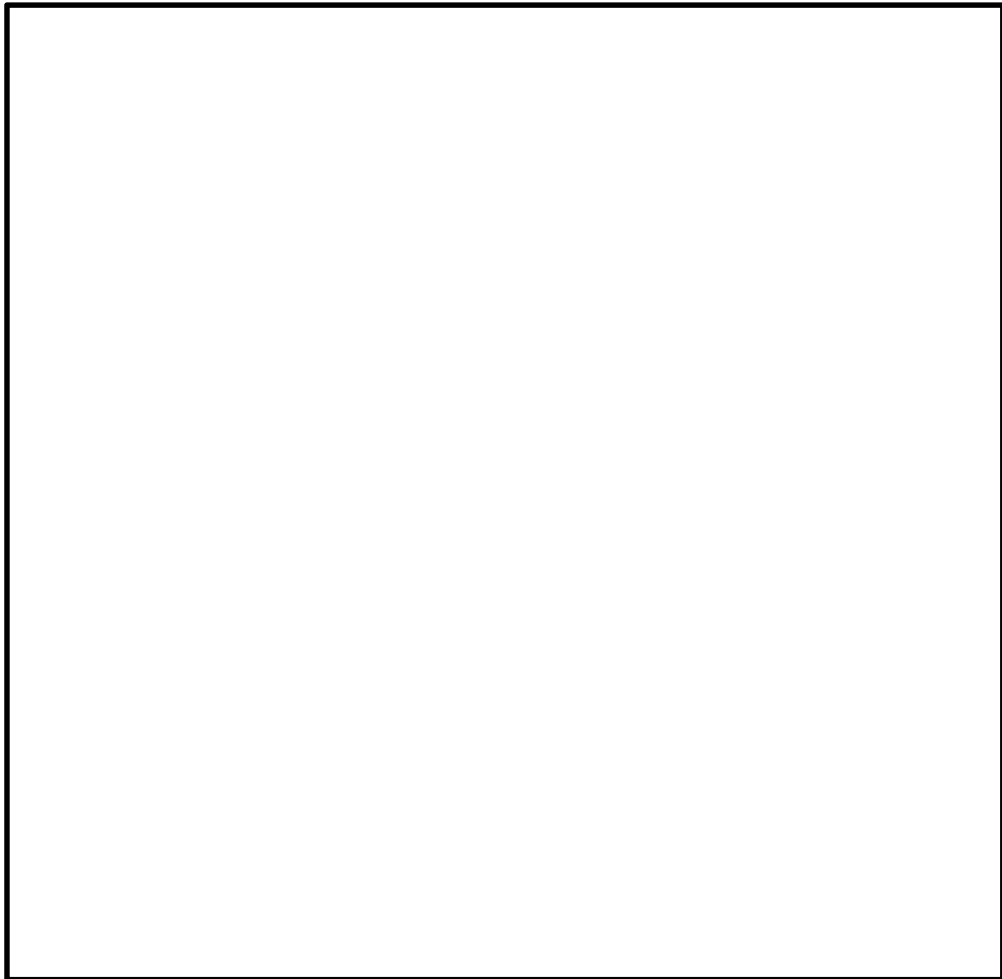


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

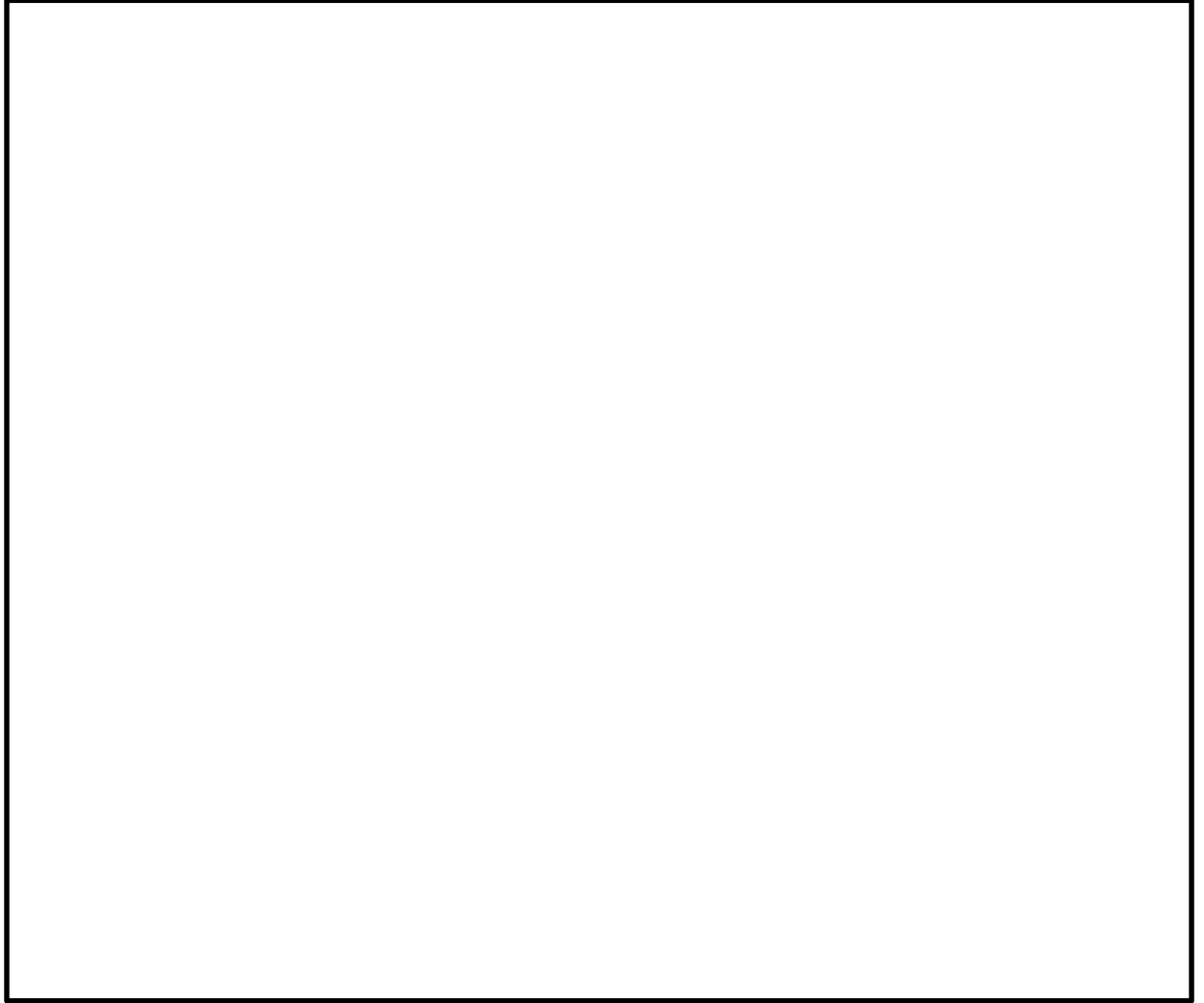


図2-10 緊急時対策所の概略平面図

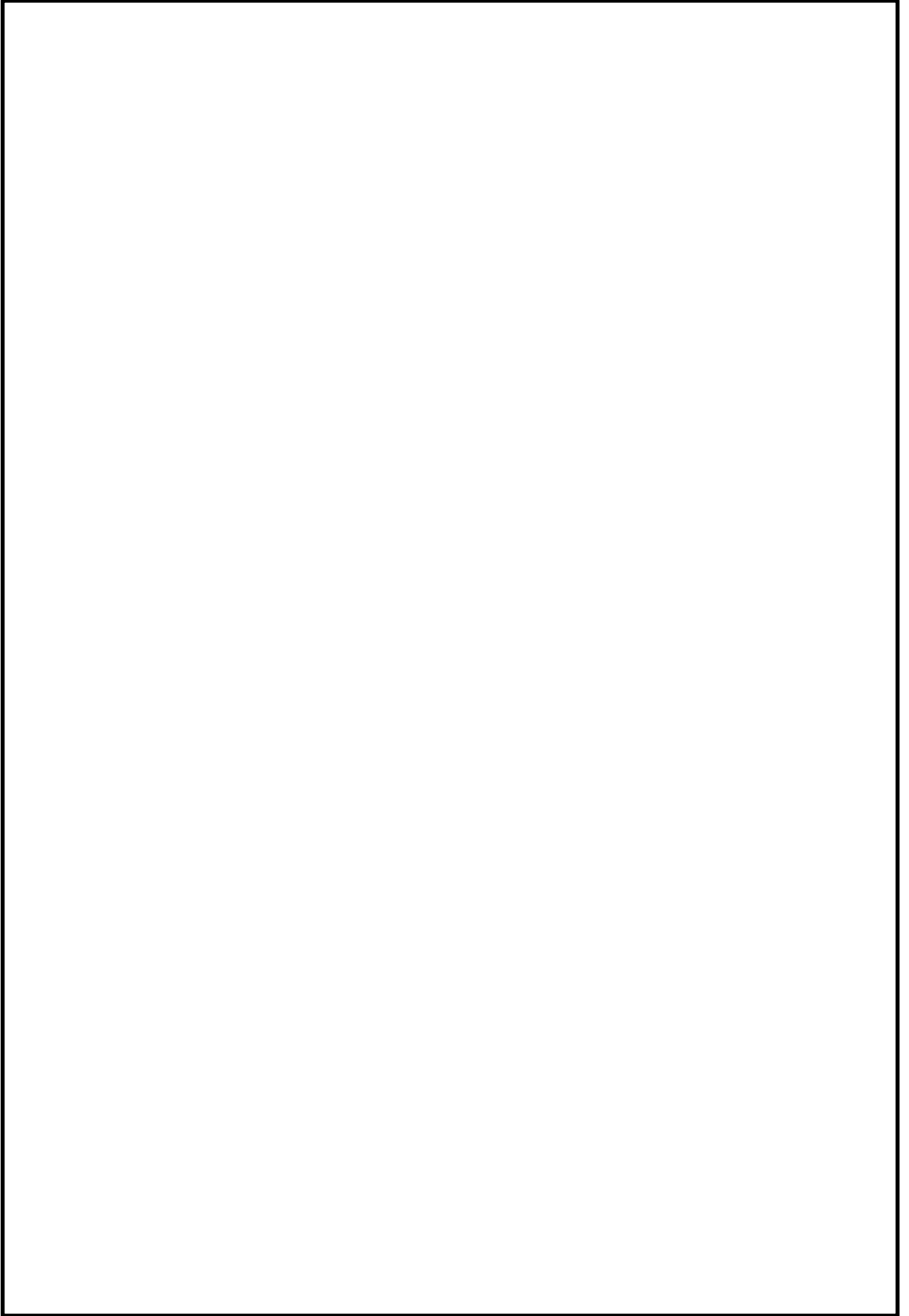


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

## 2.3 評価方針

建屋及び構造物の強度評価は、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

建屋及び構造物の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材に対する「衝突評価」を行う。また飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響並びに建屋及び構造物の外殻を構成する部材の転倒・脱落の影響に対する「構造強度評価」を行う。

### 2.3.1 貫通評価

飛来物が建屋及び構造物の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、飛来物による衝撃荷重に対し、防護すべき施設の外殻を構成する部材が設計飛来物の貫通を生じないことを計算若しくは解析により確認する。

具体的には、防護すべき施設の外殻となる区画の屋根、外壁及び内壁、並びに開口部建具並びに構造物の地上露出部が、設計飛来物の貫通を生じない厚さを有していることを、計算により確認する。貫通を生じない厚さを有していることの確認が出来ない場合においては、これらに終局状態に至るようなひずみを生じないことを、解析により確認する。

### 2.3.2 構造強度評価

飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落により防護すべき施設の機能を喪失しないために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散により防護すべき施設の機能を喪失しないことを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

具体的には、RC造の建屋及び構造物について、飛来物による衝撃荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる屋根スラブ、外壁及び内壁並びに構造物の鉄筋コンクリートが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

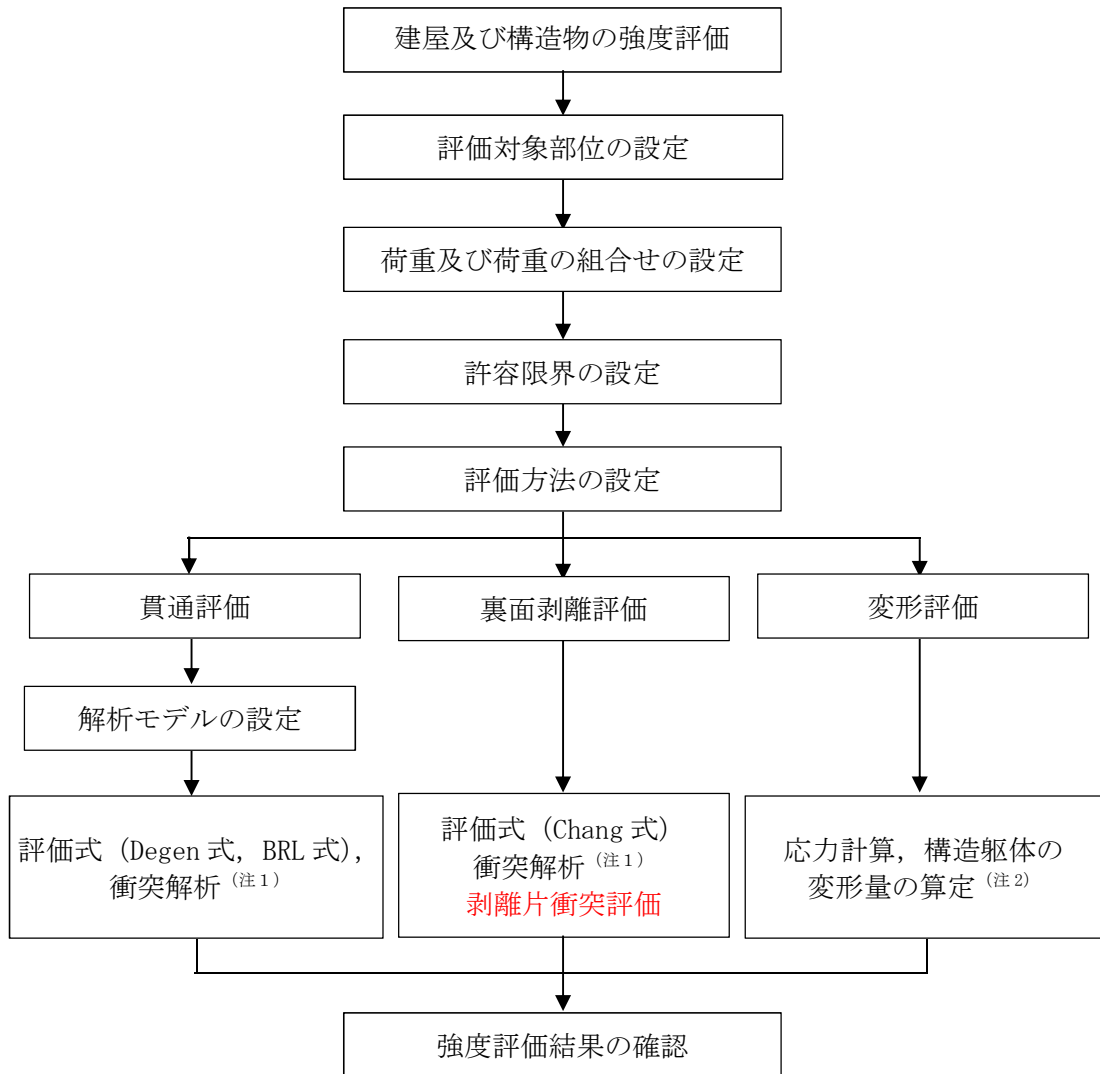
外殻を構成する部材で、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることの確認ができない場合は、裏面剥離の影響を受ける防護対象施設が当該部位の近傍にないことを確認するか、裏面剥離が生じない構造であることを解析により確認する。または、想定される剥離片の衝突により、防護すべき施設の機能を喪失しないことを確認する。

また、外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計荷重に対し、外殻となる屋根スラブ、屋根スラブのスタッドボルト、外壁及び内壁に終局状態



に至るようなひずみ又は応力が生じないこと、鉄骨架構に終局状態に至るような変形が生じないことを計算及び解析により確認する。（以下「変形評価」という。）

建屋及び構造物の設計荷重作用時の強度評価フローを図2-10に示す。



(注1) 3次元FEMモデルを用いた動的評価を実施する。

(注2) 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図2-10 強度評価フロー

## 2.4 適用規格

- 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- ( (社) 日本建築学会, 2005改定)
- Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev 8P(NEI07-13)) (以下「NEI07-13」という。)
- 建築基準法及び同施行令
- 建築物荷重指針・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2004改定)
- ISES7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」 (高温構造安全技術研究組合)
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ( (社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「RC規準」という。)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」 ( (社) 日本電気協会)
- 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」 ( (社) 日本電気協会)
- 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」 (社) 日本機械学会
- 日本工業規格 ( J I S )
- 「各種合成構造設計指針・同解説」 ( (社) 日本建築学会, 2010改定) (以下「各種合成指針」という。)
- 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 ( (社) 日本建築学会, 1990 改定)

## 3. 強度評価方法

## 3.1 記号の定義

建屋及び構造物の評価に用いる記号を表3-1～表3-4に示す。

表 3-1 貫通評価に用いる記号 (Degen 式)

記号	単位	定義	
D	kgf/cm <sup>3</sup>	飛来物直径密度 $D = W / d^3$	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
e	cm	貫通限界厚さ (コンクリート)	
F <sub>c</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
N	—	飛来物の形状係数	
V	m/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
W	kgf	飛来物重量	
X	cm	貫入深さ	
$\alpha_e$	—	低減係数	

表 3-2 貫通評価に用いる記号 (BRL 式)

記号	単位	定義
d	cm	飛来物の (等価) 直径
k	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ (鋼製部材)
V	m/s	飛来物の衝突速度 (鉛直)

表 3-3 裏面剥離評価に用いる記号 (Chang 式)

記号	単位	定義	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
f <sub>c</sub> '	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	cm/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
V <sub>0</sub>	cm/s	飛来物基準速度	
W	kgf	飛来物重量	
$\alpha_s$	—	低減係数	

表 3-4 変形評価に用いる記号（水密扉）

記号	単位	定義
$A_k$	$\text{mm}^2$	カンヌキ断面積
$A_p$	$\text{mm}^2$	カンヌキ受けピン断面積
$A_b$	$\text{mm}^2$	カンヌキ受けボルト断面積
$A_d$	$\text{m}^2$	扉の受圧面積
$L_k$	$\text{mm}$	カンヌキ支持間距離
$L_p$	$\text{mm}$	カンヌキ受けピン支持間距離
$M_k$	$\text{kN/mm}$	カンヌキに生じる曲げモーメント
$M_p$	$\text{kN/mm}$	カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント
$n$	箇所	カンヌキ部箇所数
$n_b$	本	カンヌキ受けボルト本数
$Q_k$	$\text{kN}$	カンヌキに生じるせん断力
$Q_p$	$\text{kN}$	カンヌキ受けピンに生じるせん断力
$R$	$\text{kN}$	気圧差による荷重による反力
$T$	$\text{kN}$	引張力
$W_p$	$\text{kN}$	気圧差による荷重
$Z_k$	$\text{mm}^3$	カンヌキの断面係数
$Z_p$	$\text{mm}^3$	カンヌキ受けピンの断面係数
$\Delta P$	$\text{N/m}^2$	単位面積当たりの最大気圧低下量
$\sigma_b$	$\text{N/mm}^2$	曲げ応力度
$\sigma_t$	$\text{N/mm}^2$	引張応力度
$\sigma_x$	$\text{N/mm}^2$	組合せ応力度
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	せん断応力度

### 3.2 評価対象部位

建屋及び構造物の評価対象部位は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

#### 3.2.1 貫通評価

##### (1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、建屋については、屋根スラブ、外壁並びに防護すべき施設の外殻となる建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面並びに開口部建具のうち原子炉建屋機器搬入口扉、原子炉建屋附属棟1階電気室搬入口扉、また、重大事故対処施設の環境条件維持に関与する扉を評価対象部位として選定する。

## (2) 構造物

外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、鋼製蓋及び鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

### 3.2.2 裏面剥離評価

#### (1) RC造建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離により防護すべき施設の機能を喪失しないことの確認において、建屋については、防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ、外壁並びに建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面を評価対象部位として設定する。

#### (2) 構造物

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離により防護すべき施設の機能を喪失しないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

### 3.2.3 変形評価

#### (1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が防護対象施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、建屋については、設計荷重が外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、耐震壁を介して直接岩盤に支持する基礎版へ伝達されるため、設計荷重が直接作用する、防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ及び外壁のうち、屋根スラブについては、代表として部材厚が最も薄い原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブを、並びに外壁については原子炉建屋（RC造部及び鉄骨造部）、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建及び緊急時対策所建屋を評価対象部位として設定する。

#### (2) 構造物

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が竜巻により防護すべき施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、軽油貯蔵タンクタンク室については、地中に埋設され竜巻の風荷重を受け難い構造であることから、評価は不要とする。

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは、V-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

#### 3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、下式により算定する。

風力係数 $C$ は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

(2) 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重 $W_p$ については、気圧差による荷重が最大となる「閉じた施設」を想定し、下式により算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

(3) 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、表3-4に示す飛来物の衝突に伴う荷重とするが、この荷重は瞬間的に作用するものであり、またこれら飛来物に対し質量が十分に大きな建物および構造物が評価の対象であるため、これらの施設の全体的な挙動に対する評価（変形評価）においては考慮せず、評価対象施設に対する瞬間的且つ局所的な影響の評価（貫通、裏面剥離）時のみ考慮する。

表3-4 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	衝突対象
鋼製材	4.2×0.2× 0.3	135	51	34	設計飛来物として、全ての 建屋及び構造物を対象
車両	3.6×2.5× 8.6	5000	52	—※	隣接事業所からの飛来物の 代表的なものとして、以下 の施設を対象 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・緊急時対策所

※：種々の車両の飛散解析結果と衝突対象建屋の屋根スラブの高さ及び厚さの関係から、車両が屋根に到達することは考え難く、仮に屋根に到達した場合でも、飛跡頂点から屋根までの落下距離は僅かであり、有意な衝突速度にならないと考えられるため。

(4) 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重 $F_d$ として、自重及び上載荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえ、設計竜巻荷重及び常時作用す

る荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表3-5 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位	荷重の組合せ	
貫通評価	(式による評価) ・屋根スラブ, 外壁及び内壁 ・扉板	$W_M$	
	(解析による評価) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + W_M + F_d$
裏面剥離評価	(式による評価) ・屋根スラブ, 外壁及び内壁	$W_M$	
	(解析による評価) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ ・原子炉建屋外壁	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + W_M + F_d$
変形評価	(式による評価) ・原子炉建屋 (RC造部及び鉄骨造部) ・タービン建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋	複合荷重 $W_{T2}$	$W_W + 1/2W_P + F_d$
	(式による評価) ・水密扉(カンヌキ部)	$W_P$	

$W_M$  : 風圧力による荷重       $W_P$  : 気圧差による荷重

$W_M$  : 飛来物による衝撃荷重       $F_d$  : 常時作用する荷重

### 3.4 許容限界

建屋及び構造物の許容限界は、V-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界を踏まえて、評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

#### 3.4.1 貫通評価

貫通評価の許容限界は、式による評価を行う場合においては表 3-6 に示す最小部材厚さとする。

表3-6 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位	
貫通評価 (式による評価)	コンクリート	原子炉建屋
		タービン建屋
		使用済燃料乾式貯蔵建屋
		軽油貯蔵タンクタンク室
		緊急時対策所
	扉板（鋼板）	

※1：防護すべき施設の外壳となる、タービン建屋オペレーティングフロア床版，気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）

※3：地中の構造物のため，側壁は露出していない。

※4：複数枚の板が直列の構成となっている，原子炉建屋機器搬入口扉が該当する。

式による評価を満足せず，解析による評価を行う場合における許容限界を，表3-7に示す。

表3-7 貫通評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位	破断ひずみ
貫通評価 (解析による評価)	鉄筋 (原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ)	0.081



### 3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価において、式による評価を行う場合においては表 3-8 に示す最小部材厚さとする。

表3-8 裏面剥離評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位		最少部材厚さ(mm)	
			鉛直方向	水平方向
裏面剥離評価 (式による評価)	コンク リート	原子炉建屋		
		タービン建屋		
		使用済燃料乾式貯蔵建屋		
		軽油貯蔵タンクタンク室		
		緊急時対策所		

※1：防護すべき施設の外殻となる，タービン建屋オペレーティングフロア床版，気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※3：地中の構造物のため，側壁は露出していない。

式による評価を満足せず，解析による評価を行う場合における許容限界は，表3-9に示すコンクリート内面のライナ若しくはデッキプレートの破断ひずみとする。

表3-9 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位		破断ひずみ
裏面剥離評価 (解析による評価)	裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレートが）無いコンクリート版	下層の鉄筋	0.002
	裏面に内張材（ライナ若しくはデッキプレート）があるコンクリート版	内張材	0.081

### 3.4.3 変形評価

屋根スラブ及びスタッドボルトの変形評価の許容限界は、それぞれ RC 規準及び各種合成指針に基づく強度とし、RC 造の建屋全体の変形評価の許容限界は、耐震壁のせん断ひずみに関する許容限界に基づく  $2000\mu$  とする。

変形評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表3-10 変形評価の許容限界

評価内容	評価対象部位	許容限界	
変形評価 (屋根スラブ)	屋根スラブ	「RC 規準」に基づく終局強度	
	スタッドボルト (屋根支持部)	「各種合成指針」に基づく許容耐力	
変形評価 (建物全体)	建物の構造躯体	RC 造部	せん断ひずみ $2 \times 10^{-3}$
		鉄骨造部	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」に準じた短期許容応力度
変形評価 (水密扉)	カンヌキ部	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」に準じた短期許容応力度	

### 3.5 評価方法

#### 3.5.1 貫通評価

##### (1) 鉄筋コンクリート造部分

貫通限界厚さ  $e$  を，別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき，以下に示すDegen式を用いて算出し，外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

$$X/d \leq 1.52 \text{ の場合,}$$

$$e = \alpha_e \{2.2(X/d) - 0.3(X/d)^2\} \cdot d$$

ここで，貫入深さ  $X$  は，

$$X/d \leq 2.0 \text{ の場合,}$$

$$X/d = \{(48580/\sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8}\}^{0.5}$$

##### (2) 鋼製部

貫通限界厚さ  $e$  を，別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき，以下に示すBRL式を用いて算出し，外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.439 \cdot 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

##### (3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する衝突解析

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する貫通評価については，風圧力による荷重  $W_w$ ，気圧差による荷重  $W_p$ ，飛来物による衝撃荷重  $W_M$  及び常時作用する荷重  $F_d$  を考慮し，3次元FEMモデルを用いた衝突解析により屋根及び外壁の鉄筋に生じるひずみを算出し，許容限界を超えないことを確認する。

評価対象範囲は，原子炉建屋搭屋部の屋根スラブ及び外壁のうち躯体厚さが最も薄い部分とする。

衝突解析には，解析コード「LS-DYNA」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙1「計算プログラム（解析コード）の概要」に示す。

##### a. 解析モデル

###### (a) 屋根スラブ

屋根スラブのモデル化範囲及び飛来物の衝突位置を図3-1に示す，屋根トラスの主トラス間の長さはほぼ同等であることより，評価上重要な使用済燃料貯蔵プール直上となる部位とし，屋根スラブのコンクリート，鉄筋及びデッキプレートをモデ

ル化する。

コンクリートはソリッド要素，鉄筋はビーム要素及びデッキプレートはシェル要素でモデル化する。

屋根スラブの解析モデルを図3-2，解析モデルの境界条件を表3-8に示す。

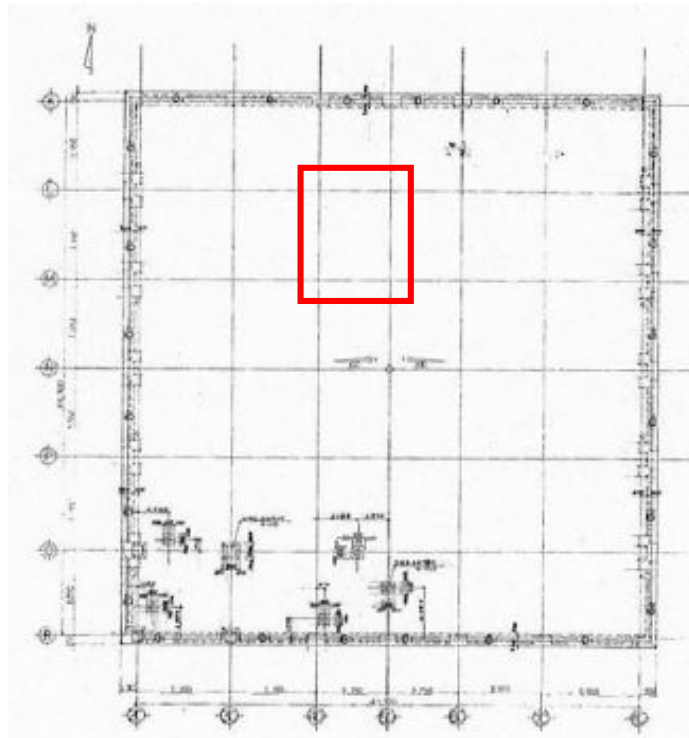


図3-1 原子炉建屋搭屋部屋根スラブモデル化範囲

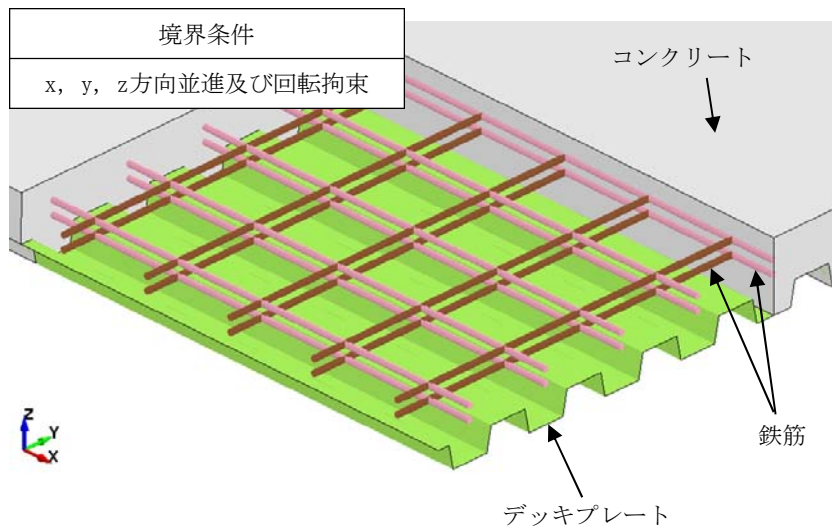


図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(c) 飛来物

飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるよう接触断面積を小さくするため、鋼製材は先端部（衝突部）を開口としてシェル要素でモデル化し、自重及び竜巻による風圧力による荷重を作用させた状態で衝突させる。

飛来物の解析モデル図を図3-3に示す。

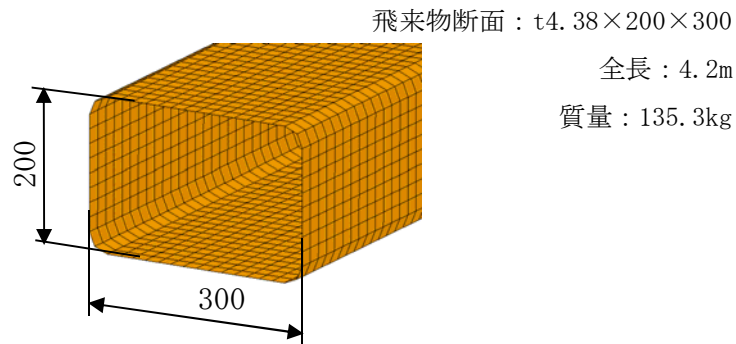


図3-5 飛来物の解析モデル図

b. 解析モデル

(a) 屋根スラブ及び外壁

コンクリートの材料定数を表3-11、鉄筋の材料定数を表3-12に示す。

表3-11 コンクリートの材料定数

コンクリート 種類	設計基準強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )
普通 コンクリート	22.1	$2.21 \times 10^4$	0.2	23.0

表3-12 鉄筋の材料定数

鉄筋 種類	降伏強度 $F_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )
SD295	324	$2.05 \times 10^5$	0.3	77.0

(b) 飛来物

飛来物の仕様について表3-13に示す。

表3-12 飛来物の仕様

飛来物	サイズ 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	材質
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	SS400

c. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側が圧縮強度に到達後もその応力を保持するバイリニア型とする。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図3-6に、鋼製材の応力-ひずみ関係を図3-7に示す。

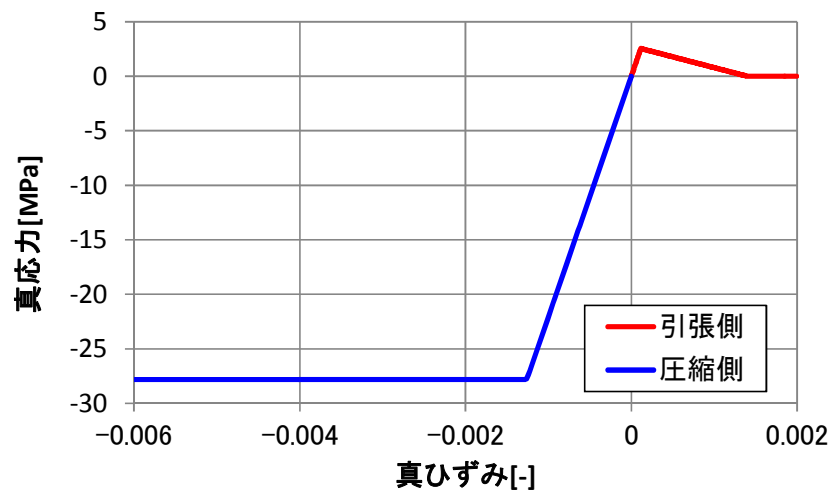


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)

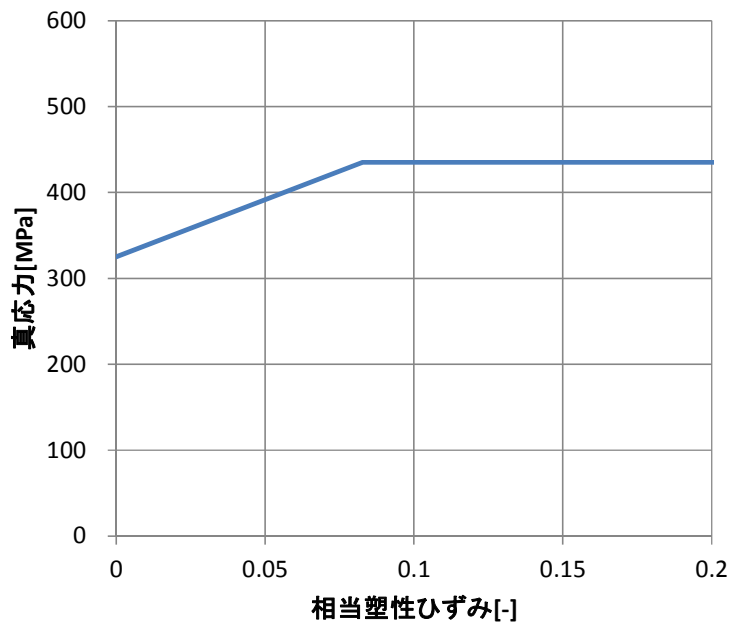


図3-7 応力-ひずみ関係（鉄筋）

(b) ひずみ速度効果

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、このひずみ速度効果として、NEI07-13で規定された割増係数（鉄筋：1.10（降伏応力）、1.05（引張強度）、デッキプレート・飛来物：1.29（降伏応力）、1.10（引張強度））を考慮する。

(c) 破断ひずみ

金属材料の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI 07-13においてTF（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=2.0を考慮する。TFについては、鉄筋のみ2.0とする。鋼製材は保守的に破断ひずみを超えても荷重を負担するものとする。鉄筋の破断ひずみを表3-13に示す。

表3-13 鉄筋の破断ひずみ

材質	JIS規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ
SD295	0.17	2.0	0.081

3.5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さSを、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すChang式を用いて算定し、許容限界を超えないことを確認する。

$$S = 1.84 \alpha_s \cdot \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left( \frac{W \cdot V^2}{980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

Chang式による限界厚さを満足しない箇所について、鋼製材に対しては、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、鉄筋に発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

FEM評価の対象となる箇所の構造及び解析モデルを図3-8に示す。

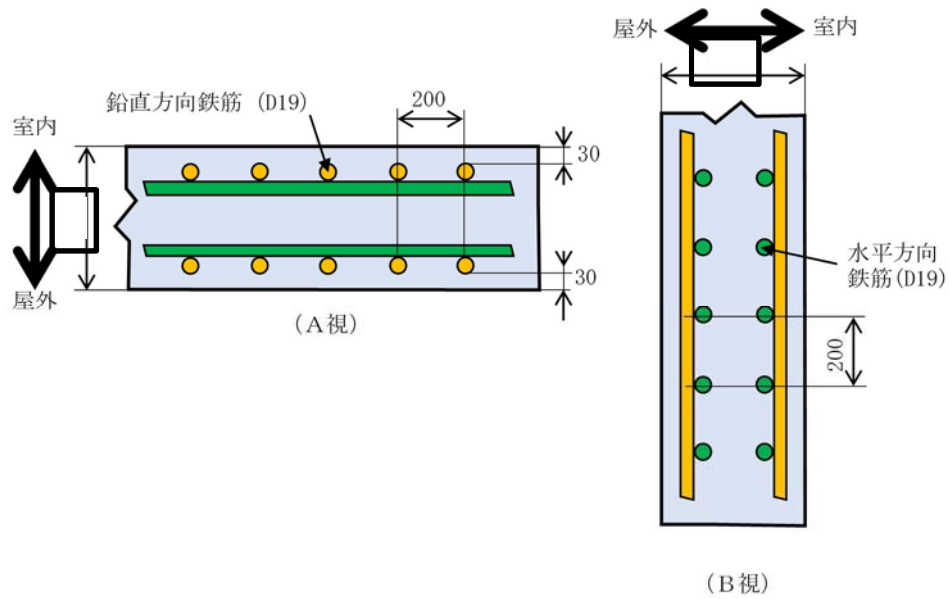


図3-8 裏面剥離評価に関するFEM解析対象箇所の構造 (1/2)



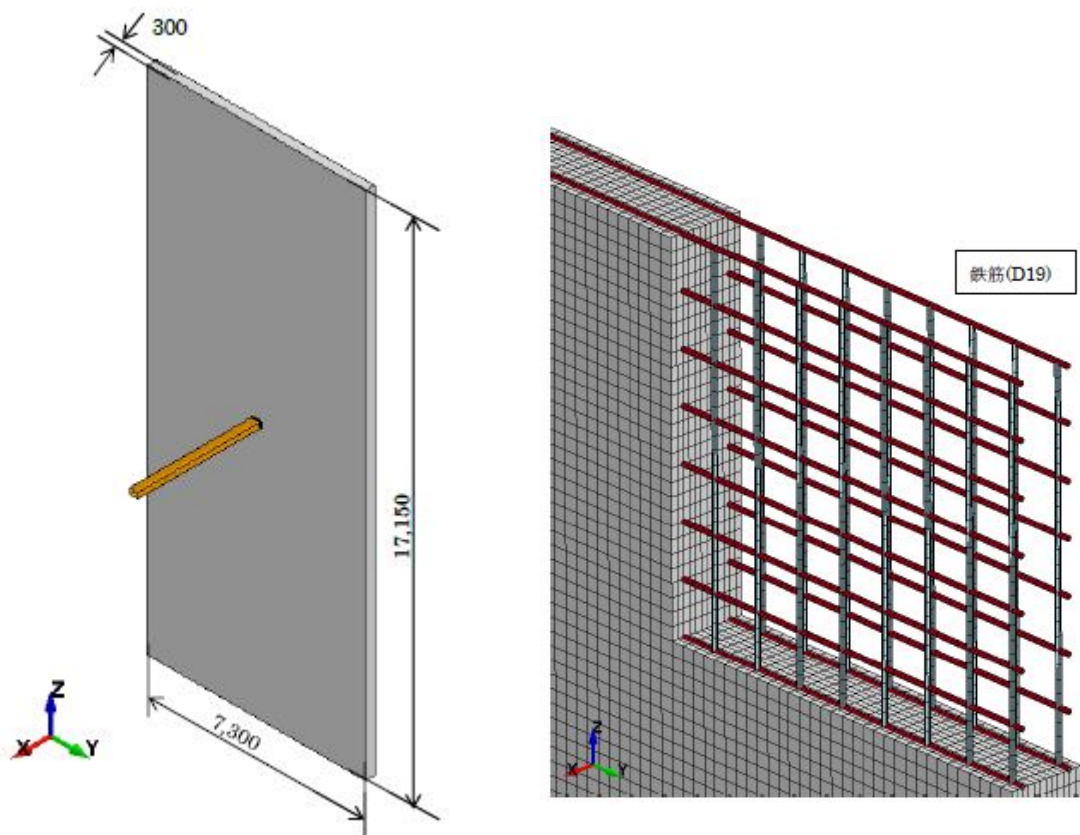


図3-8 裏面剥離評価に関するFEM解析対象箇所構造 (2/2)

材料物性については、コンクリートは貫通評価と同じものとなる。鉄筋の物性については、表3-14及び表3-15に示す。

表3-14 鉄筋の材料定数 (裏面剥離評価)

鉄筋種類	降伏強度 $F_y$ ( $N/mm^2$ )	ヤング係数 $E$ ( $N/mm^2$ )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\rho$ ( $kN/m^3$ )
SD345	345	$2.05 \times 10^5$	0.3	77.0

表3-15 鉄筋の破断ひずみ (裏面剥離評価)

材質	JIS規格値 (下限値)	T F	破断ひずみ
SD345	0.19	2.0	0.089

また、隣接事業所からの飛来物として想定した車両の衝突により裏面剥離が生じる可能性が認められた場合は、想定される剥離片が、剥離片が防護すべき施設の機能を喪失しないことを、式による評価にて確認する。

この場合の、防護すべき対象は使用済燃料乾式貯蔵建屋であり、剥離片の衝突が想定される容器外表面の鋼材のうち、最も薄い部分を貫通しないことを確認する。

剥離片の衝突による使用済燃料乾式貯蔵容器の許容限界を表3-16に示す。

表3-16 使用燃料乾式貯蔵容器の許容限界（裏面剥離評価）

対象	最小部材厚さ (mm)
容器外面	

### 3.5.3 変形評価

- (1) 原子炉建屋（RC構造部）、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋

原子炉建屋（RC構造部）、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の変位は、設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力-せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ ）関係より算定する。

原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の $Q-\gamma$ 関係は、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」及びV-2-2-4「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」に示されるせん断スケルトンカーブ（ $\tau-\gamma$ 関係）に基づき算出する。

タービン建屋の $Q-\gamma$ 関係は、地震応答解析モデルが多軸の質点系モデルを用いており各軸に対しせん断スケルトンカーブを算出していることから、層全体の評価を行うため、各軸のせん断スケルトンカーブを層全体の値に集約したせん断スケルトンカーブに基づき算出する。

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の地震応答解析モデルを図3-9から図3-11に， $Q - \gamma$  関係を表3-17から表3-20に示す。

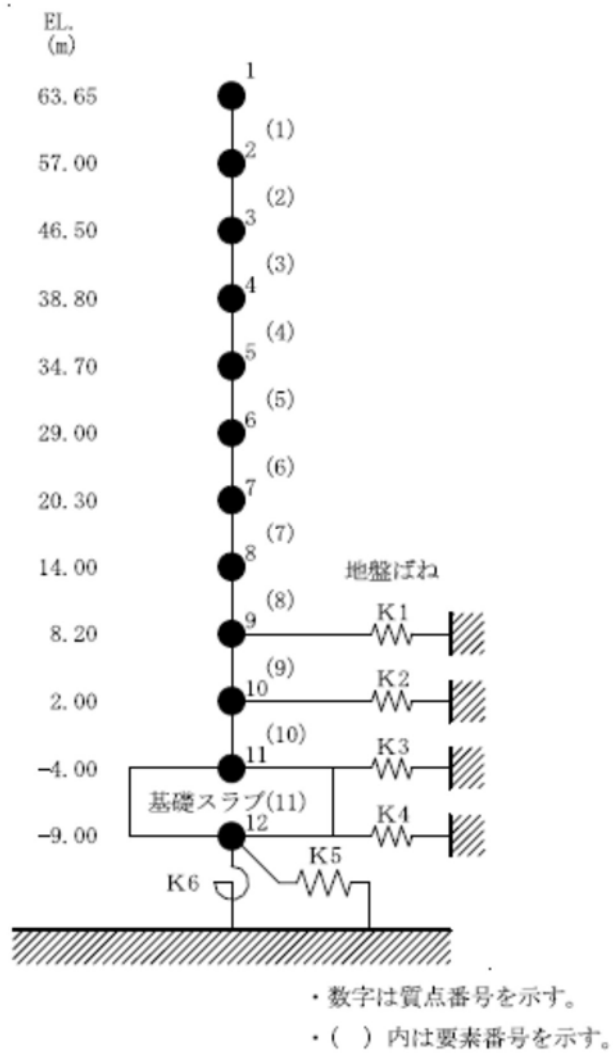


図3-9 原子炉建屋の地震応答解析モデル

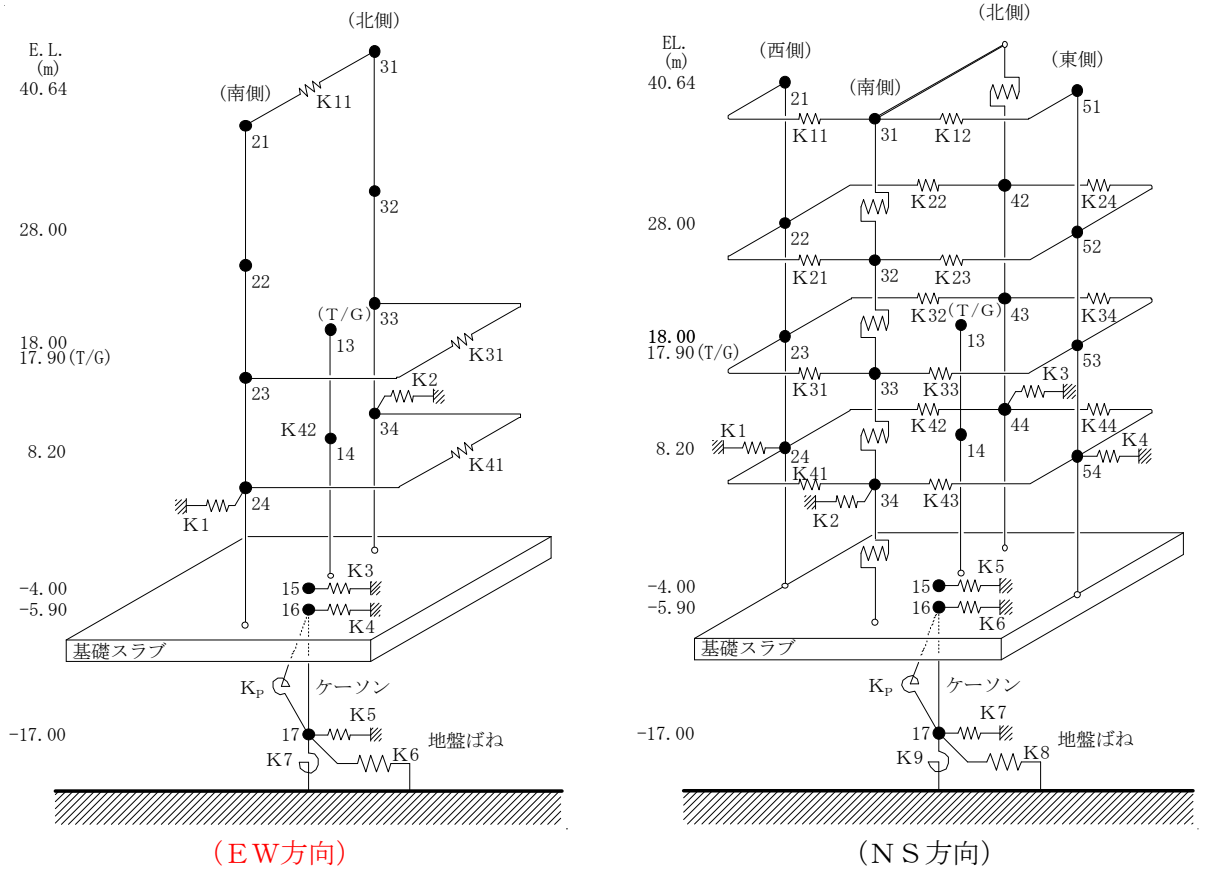


図3-10 タービン建屋の地震応答解析モデル

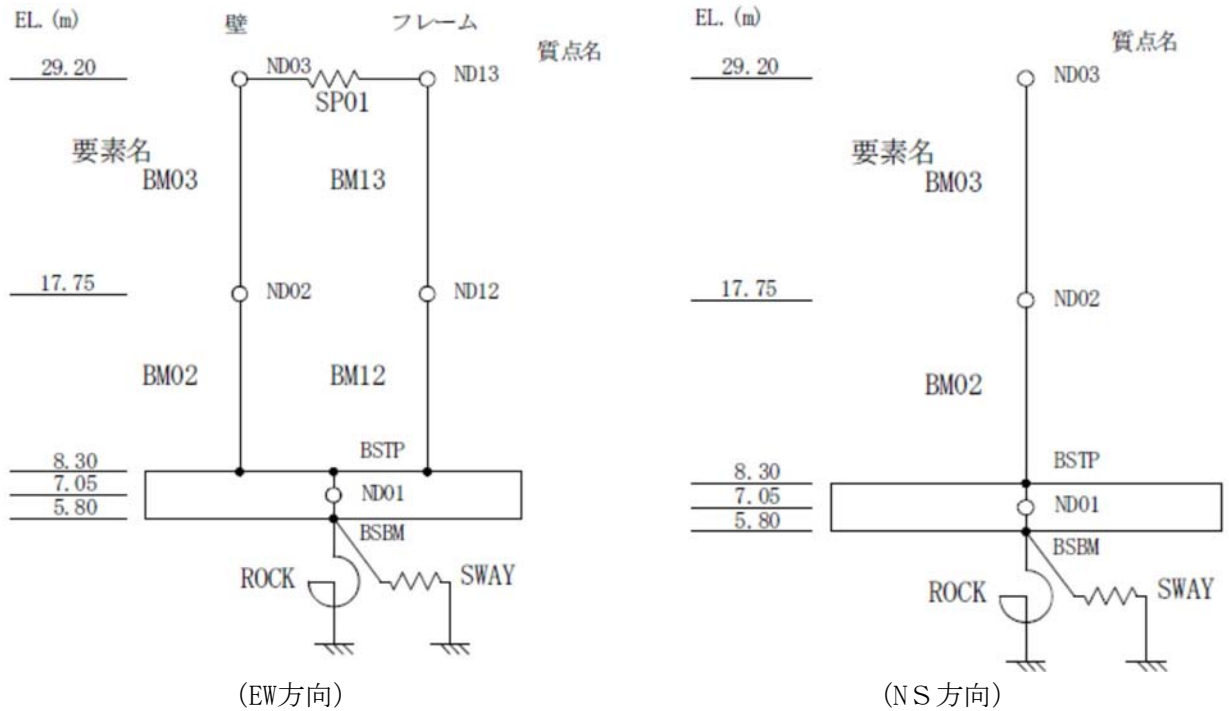


図3-11 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

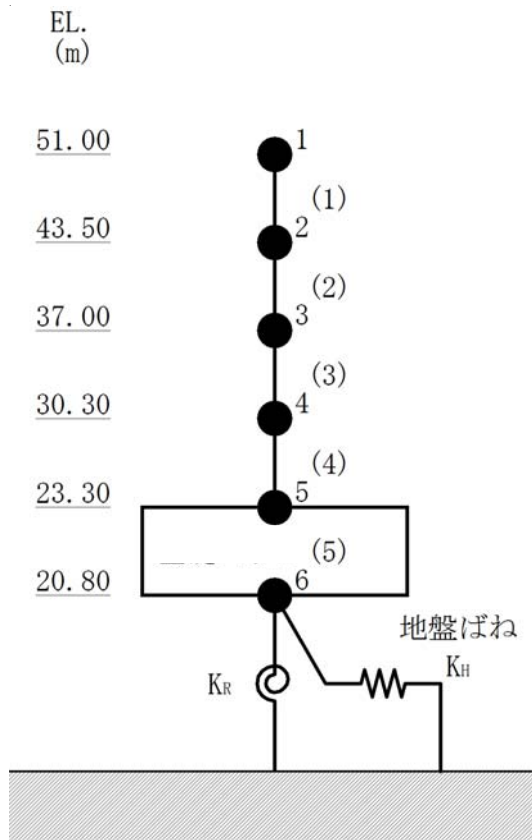


図3-12 緊急時対策所建屋の地震応答解析モデル

表3-17 原子炉建屋のQ- $\gamma$ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
63.65 ~ 57.00	1	4.37E+04	5.90E+04	1.24E+05	0.174	0.522	4.0
57.00 ~ 46.50	2	4.67E+04	6.31E+04	1.26E+05	0.185	0.555	4.0
46.50 ~ 38.80	3	3.37E+05	4.56E+05	9.29E+05	0.173	0.519	4.0
38.80 ~ 34.70	4	1.78E+05	2.41E+05	5.55E+05	0.145	0.435	4.0
34.70 ~ 29.00	5	1.83E+05	2.47E+05	5.59E+05	0.139	0.417	4.0
29.00 ~ 20.30	6	3.20E+05	4.32E+05	9.29E+05	0.159	0.477	4.0
20.30 ~ 14.00	7	3.90E+05	5.25E+05	1.18E+06	0.174	0.522	4.0
14.00 ~ 8.20	8	6.62E+05	8.94E+05	1.68E+06	0.183	0.549	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
63.65 ~ 57.00	1	4.08E+04	5.51E+04	1.16E+05	0.174	0.522	4.000
57.00 ~ 46.50	2	4.36E+04	5.89E+04	1.18E+05	0.185	0.555	4.000
46.50 ~ 38.80	3	2.46E+05	3.33E+05	7.13E+05	0.173	0.519	4.000
38.80 ~ 34.70	4	2.10E+05	2.83E+05	6.20E+05	0.162	0.486	4.000
34.70 ~ 29.00	5	2.17E+05	2.93E+05	6.26E+05	0.151	0.453	4.000
29.00 ~ 20.30	6	3.10E+05	4.19E+05	8.82E+05	0.143	0.429	4.000
20.30 ~ 14.00	7	3.56E+05	4.82E+05	1.02E+06	0.172	0.516	4.000
14.00 ~ 8.20	8	5.80E+05	7.83E+05	1.56E+06	0.182	0.546	4.000

表3-18 タービン建屋のQ- $\gamma$ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
40.64 ~ 28.00	1	6.32E+04	8.54E+04	1.18E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	1.84E+05	2.51E+05	3.21E+05	0.228	0.684	4.000
18.00 ~ 8.20	3	4.54E+05	6.26E+05	8.18E+05	0.233	0.699	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
40.64 ~ 28.00	1	1.03E+05	1.39E+05	2.37E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	2.09E+05	2.91E+05	4.39E+05	0.213	0.639	4.000
18.00 ~ 8.20	3	3.82E+05	5.24E+05	7.58E+05	0.230	0.690	4.000

表3-19 使用済燃料乾式貯蔵建屋のQ- $\gamma$ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.50E+04	6.07E+04	1.36E+05	0.198	0.594	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.05E+04	8.15E+04	1.56E+05	0.214	0.642	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 $Q_1$	第2折点 $Q_2$	終局点 $Q_3$	第1折点 $\gamma_1$	第2折点 $\gamma_2$	終局点 $\gamma_3$
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.19E+04	5.66E+04	1.14E+05	0.191	0.573	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.19E+04	8.37E+04	1.62E+05	0.197	0.590	4.0

表3-20 緊急時対策所建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
43.50 ~ 51.00	1	1.18E+05	1.59E+05	2.96E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	3.23E+05	4.35E+05	7.75E+05	0.181	0.542	4.000
30.30 ~ 37.00	3	3.29E+05	4.44E+05	7.56E+05	0.193	0.579	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.77E+05	5.10E+05	8.44E+05	0.205	0.614	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q <sub>1</sub>	第2折点 Q <sub>2</sub>	終局点 Q <sub>3</sub>	第1折点 γ <sub>1</sub>	第2折点 γ <sub>2</sub>	終局点 γ <sub>3</sub>
(m)	-	(kN)			(×10 <sup>-3</sup> (-))		
43.50 ~ 51.00	1	8.43E+04	1.14E+05	1.89E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	2.57E+05	3.46E+05	6.04E+05	0.179	0.538	4.000
30.30 ~ 37.00	3	2.69E+05	3.62E+05	6.05E+05	0.192	0.577	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.21E+05	4.34E+05	7.11E+05	0.204	0.613	4.000

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ は、建屋の内部から外部に作用し、建屋層全体の評価においては相殺される荷重であるが、保守的に $W_w$ と同じ方向にのみ作用すると見なす。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、瞬間的に作用するものであり、またこれら建屋の質量が飛来物に対し十分に大きなものであることから、建屋の全体的な挙動に対する影響は軽微と考えられるため考慮しない。

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）については、図3-13に示す付属棟東部のモデルの様に、原子炉建屋原子炉棟との接合部をピン支持とした3次元フレームモデルについて、風圧力による荷重 $W_w$ 、気圧差による荷重 $W_p$ 及び常時作用する荷重 $F_d$ により部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

飛来物による衝撃荷重 $W_M$ については、瞬間的に作用するものであり、当該部の質量は飛来物に対し十分に大きなものであること、また当該部は頑健な原子炉建屋（RC造部）に支えられた構造となっていることから、飛来物の衝突荷重で当該部の全体的な倒壊を起こすことは考え難いが、衝突による架構構成部位（鉄骨）の部分的な損傷を生じた場合には、その後に作用する自重若しくは風荷重により倒壊しないことが必要となる



ため、飛来物の衝突荷重は、柱若しくははりの一本を喪失したものと置き換えたモデルとして考慮する。

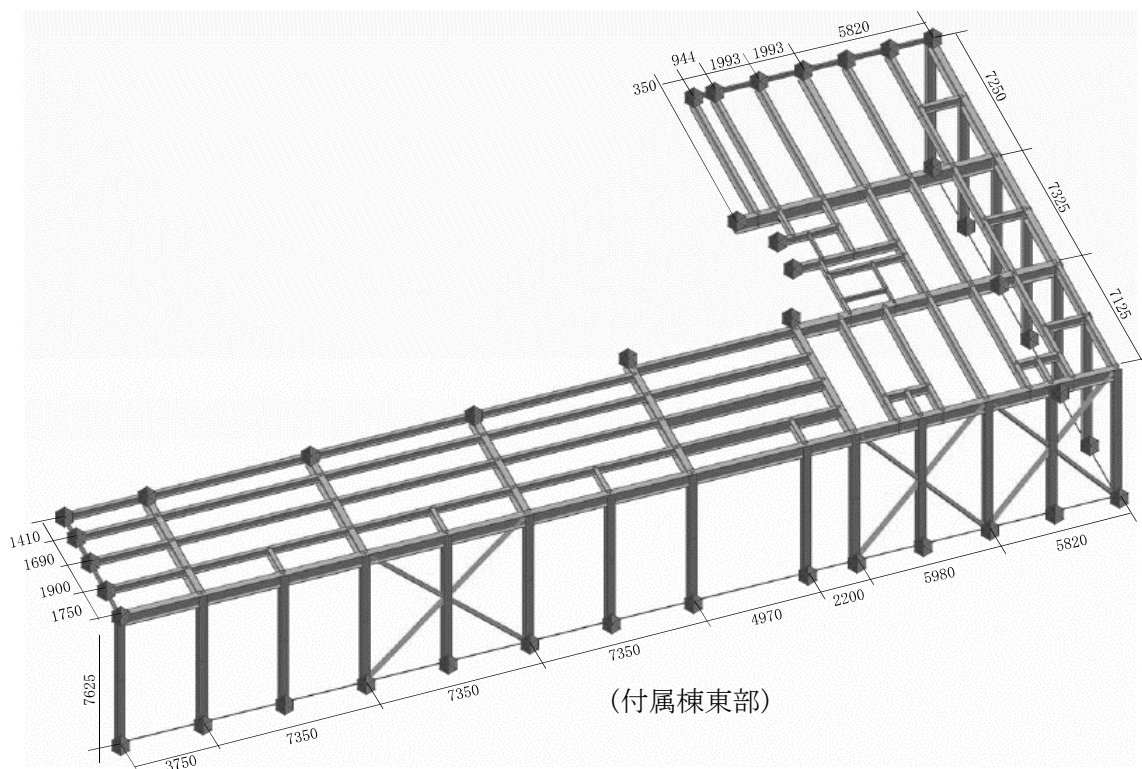


図3-13 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル

### (3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブについて、風圧力による荷重 $W_w$ 、気圧差による荷重 $W_p$ 及び常時作用する荷重 $F_d$ により発生する曲げモーメント及びせん断力を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブは、鉄骨はりにスタッドを介して接続しているため、はり位置を支持点とした一方向版とし、両端の固定条件はピンとして評価する。スタッドに作用する引張力は、単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

屋根スラブの発生曲げモーメント $M$ 及び発生せん断力 $Q$ 並びにスタッドの発生引張力 $T$ の算定式を以下に示す。また、屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-13に示す。

単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

$$M = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L^2}{8}$$

単位幅の屋根スラブにおける発生せん断力

$$Q = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L}{2}$$

スタッド 1 本あたりの発生引張力

$$T = Q \cdot \frac{p}{1000}$$

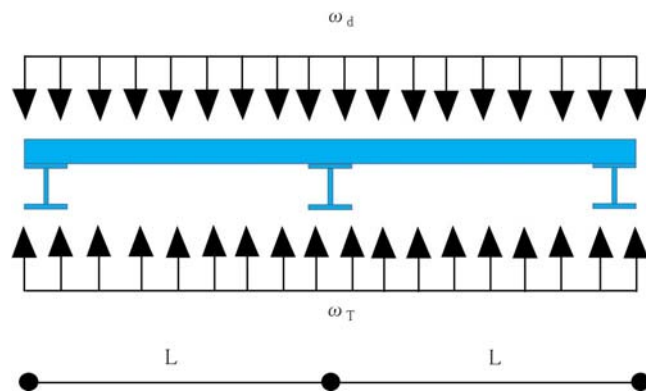


図3-14 屋根スラブに作用する荷重の概要

許容限界である終局強度については、「RC規準」に基づき算定する。

スタッドの許容引張力は、「各種合成指針」に準拠し、スタッドの降伏により定まる許容引張力  $P_{a1}$  及びコンクリート部のコーン状破壊により定まる許容引張力  $P_{a2}$  のうち小さい値とする。

屋根スラブの許容曲げモーメント  $M_a$  及び許容せん断力  $Q_a$  並びにスタッドの許容引張力  $P_a$  の算定式を以下に示す。

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$Q_a = b \cdot j \cdot f_s$$

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a2})$$

#### (4) 扉

扉のカンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）等、扉の閉状態を維持する部材について、気圧差による荷重  $W_p$  により発生する応力を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

##### a. 応力評価

下記の扉を評価対象とする。

- ・原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
- ・原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉
- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・ベイラー室脇水密扉
- ・原子炉建屋付属棟南側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉
- ・原子炉建屋付属棟南東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉及び原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)についての，カンヌキ部（カンヌキ，カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に作用する荷重，発生曲げモーメントM，発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。その他の扉についても，扉留め部に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。

(a) カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 $W_P$ をカンヌキ部 $n$ 箇所で負担した場合に発生する反力 $R_P$ から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-14に示す。

$$W_P = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_P}{n}$$

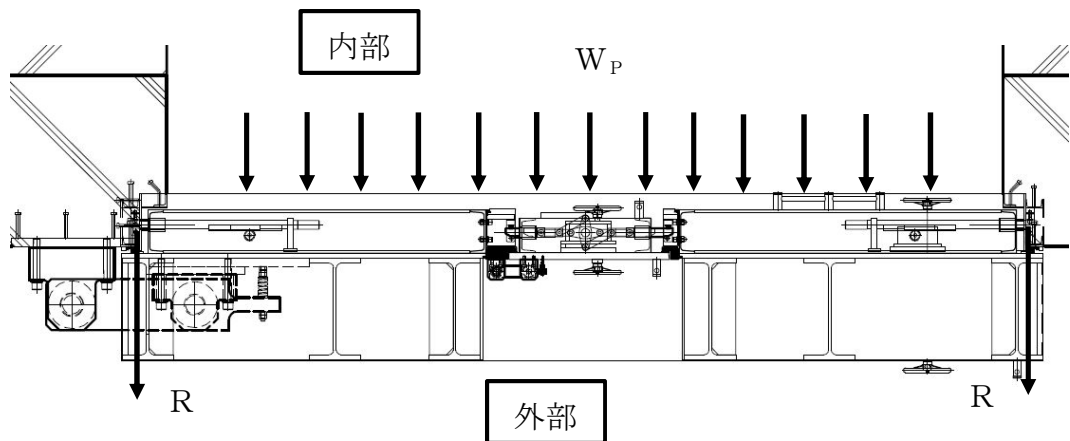


図3-15 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

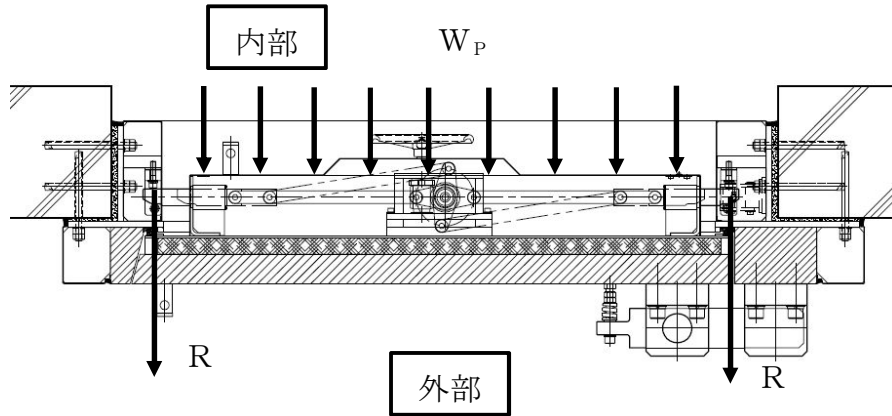


図3-16 カンヌキ部に生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

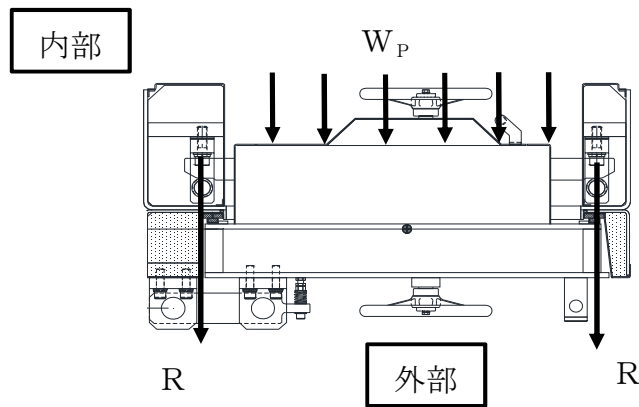


図3-17 カンヌキ部に生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げモーメント $M_k$ 及びせん断力 $Q_k$ は次式により算定する。  
カンヌキに生じる荷重を図3-18～図3-20に示す。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

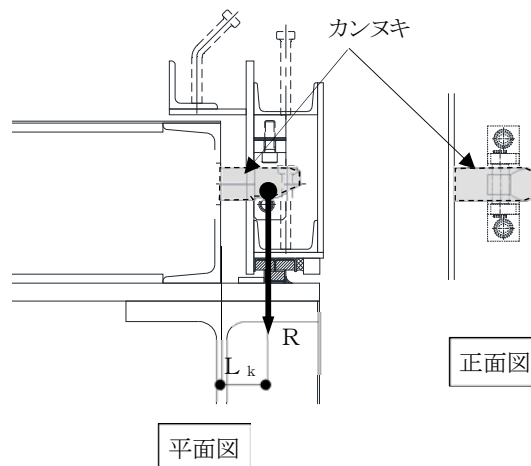


図3-18 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

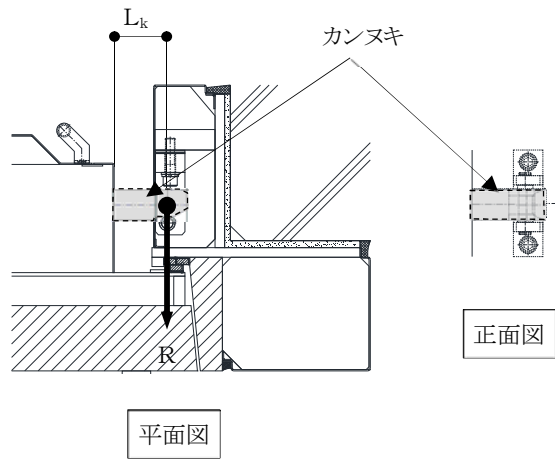


図3-19 カンヌキに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

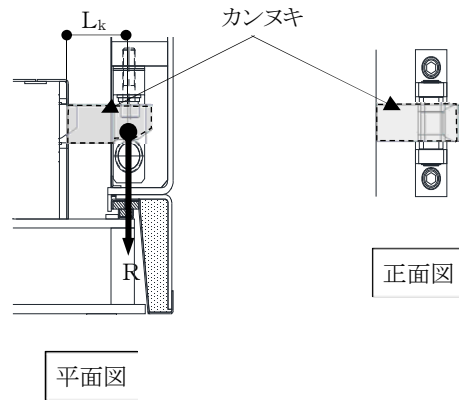


図3-20 カンヌキに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント $M_p$ とせん断力 $Q_p$ は次式により算定する。カンヌキ受けピンに生じる荷重を図3-21～図3-23に示す。

$$M_p = \frac{R \cdot L_p}{4} \quad L_k$$

$$Q_p = R$$

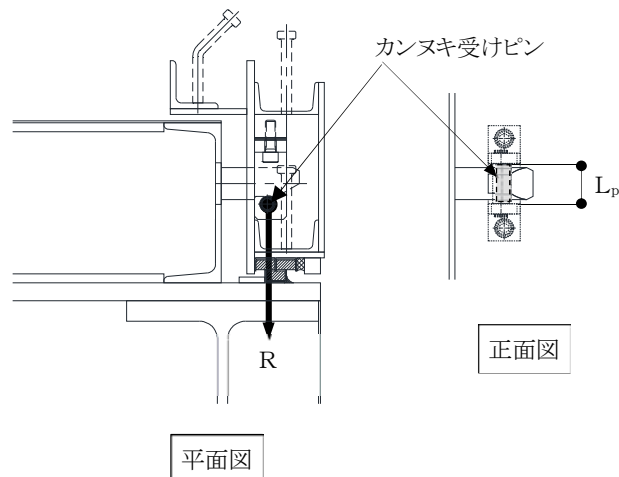


図3-21 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

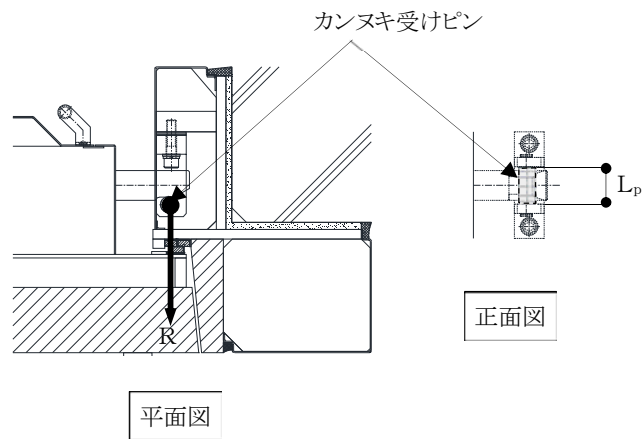


図3-22 カンヌキ受けピンに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

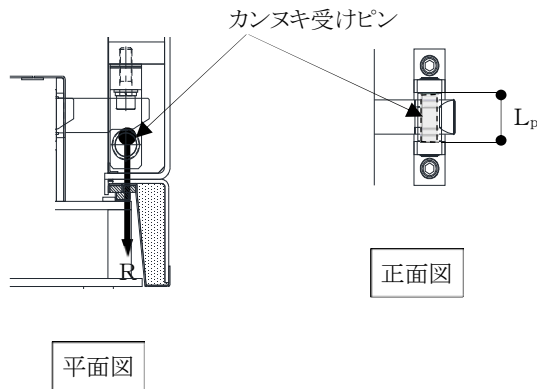


図3-23 カンヌキ受けピンに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力Tは次式により算定する。カンヌキ受けボルトに生じる荷重を図3-24～図3-26に示す。

$$T = R$$

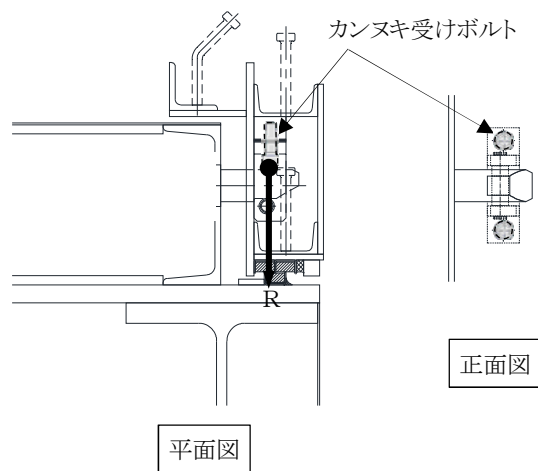


図3-24 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉)

カンヌキ受けボルト

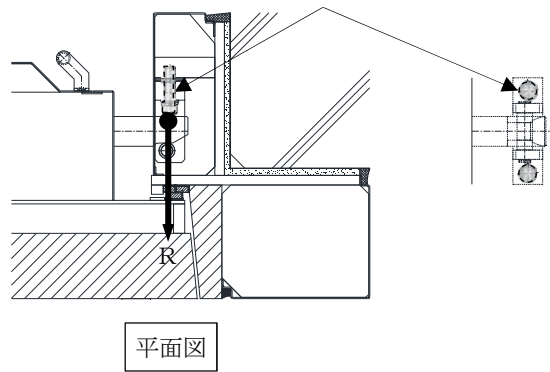


図3-25 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(電気室搬入口水密扉)

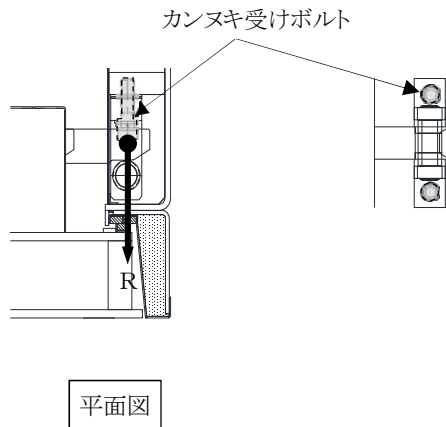


図3-26 カンヌキ受けボルトに生じる荷重(原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸))

b. 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。

評価対象部位の許容限界を表3-21に示す。

(a) カンヌキ

カンヌキに生じる生じる曲げ応力度及びせん断応力度から組合せ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{M_k}{Z_k}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q_k}{A_k}\right)^2}$$

(b) カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、評価結果が厳しい方の値が短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

$$\tau = Q_p / 2 \cdot A_p$$

(C) カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / (n_b \cdot A_b)$$

表3-21 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値(kN/mm <sup>2</sup> )	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
	カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
		S45C	345	199
	カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—



4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

4.1.1 鉄筋コンクリート造部

鉄筋コンクリート造部の貫通評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 貫通評価に用いる入力値（鉄筋コンクリート造部）

記号	記号の説明		数値		単位
$\alpha_e$	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.60		—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		cm
$F_c$	コンクリートの設計基準強度		原子炉建屋	225	kgf/cm <sup>2</sup>
			タービン建屋	225	
			使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240	
			緊急時対策所建屋	300	
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14		—
		車両	0.72		—
D	飛来物直径密度 $W/d^3$	鋼製材	$6.42 \times 10^{-3}$		kgf/cm <sup>3</sup>
		車両	$1.29 \times 10^{-4}$		kgf/cm <sup>3</sup>
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	m/s
			鉛直	—※	

※：表3-4を参照

4.1.2 鋼製部

鋼製部の貫通評価に用いる条件を表4-2に示す。

表4-2 貫通評価に用いる入力値（鋼製部）

記号	記号の説明		数値	単位
d	飛来物直径	鋼製材	7.90	cm

k	鋼板の材質に関する係数		1	—
M	飛来物重量	鋼製材	135	kg
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51
			鉛直	34

#### 4.1.3 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、屋根に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-3に、解析ケース図を図4-1に示す。

表4-3 解析ケース

評価対象	飛来物	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 原子炉棟 屋根スラブ	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート(最小部 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> mm) 鉄筋(D13@180, 200)

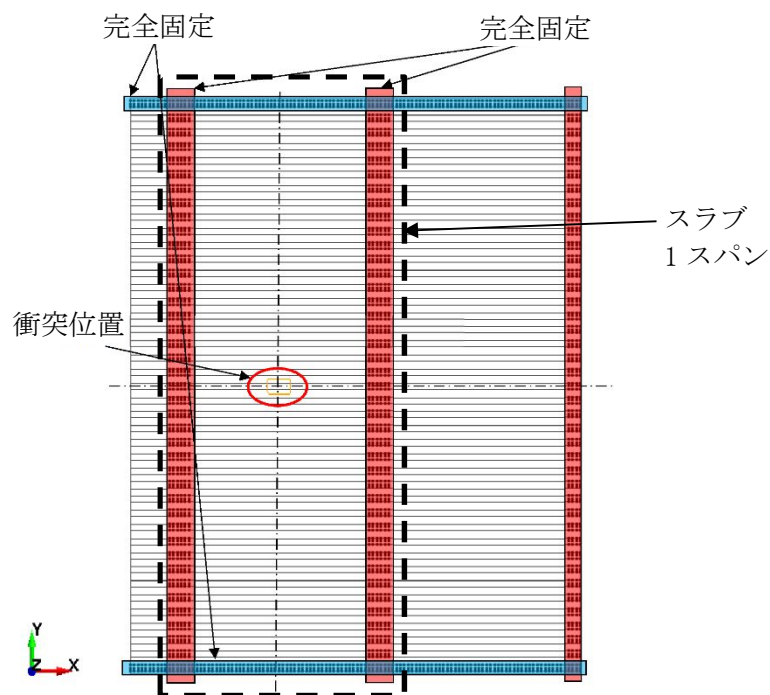


図4-1 解析ケース図

#### 4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価に用いる条件を表 4-4 に示す。

表4-4 屋根スラブの裏面剥離評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値		単位
$\alpha_s$	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.55		
$V_o$	飛来物基準速度	鋼製材	60.96		m/s
		車両	60.96		
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		
$f_c'$	コンクリートの設計基準強度	原子炉建屋	225		kgf/cm <sup>2</sup>
		タービン建屋	225		
		使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240		
		緊急時対策所建屋	300		
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

また、使用済燃料乾式貯蔵容器に対する剥離片の貫通評価に用いる条件を表4-5に示す。

表4-5 貫通評価に用いる入力値（使用済燃料乾式貯蔵容器）

記号	記号の説明		数値		単位
d	飛来物直径	剥離片	17.8		cm
k	鋼板の材質に関する係数		1		—
M	飛来物重量	剥離片	30		kg
V	飛来物の衝突速度	剥離片	水平	52	m/s

#### 4.3 変形評価

##### (1) 外壁

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所の変形評価に用いる条件を表4-6から表4-9に示す。

表4-6 原子炉建屋変形評価の評価条件 (1/2) (RC構造部)

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	63.65	風上	0.8	331	354
		風下	0.4		
2	57.00	風上	0.8	447	478
		風下	0.4		
3	46.50	風上	0.8	328	351
		風下	0.4		
4	38.80	風上	0.8	175	187
		風下	0.4		
5	34.70	風上	0.8	266	283
		風下	0.4		
6	29.00	風上	0.8	581	570
		風下	0.4		
7	20.30	風上	0.8	430	432
		風下	0.4		
8	14.00	風上	0.8	396	398
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/2) (鉄骨造部分)

区画	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	E. L. 22.0 ～ E. L. 35.0	風上	0.8	153	250
		風下	0.4		
付属棟 東側	E. L. 14.0 ～ E. L. 22.0	風上	0.8	— <sup>※2</sup>	370
		風下	0.4		
隔離弁室 ①	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	45	50
		風下	0.4		
隔離弁室 ②	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	8.4	91
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：構造上、N-S方向に対し見附面を有しない。

表4-8 タービン建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	40.64	風上	0.8	1408	585
		風下	0.4		
2	28.00	風上	0.8	1129	733
		風下	0.4		
3	18.00	風上	0.8	1034	696
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表4-9 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数 <sup>※1</sup>	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
BM03	29.20	風上	0.8	318	658
		風下	0.4		
BM02	17.75	風上	0.8	254	525
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表4-10 緊急時対策所建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	51.00	風上	0.8	154	228
		風下	0.4		
2	43.50	風上	0.8	256	251
		風下	0.4		
3	37.00	風上	0.8	283	305
		風下	0.4		
4	30.30	風上	0.8	275	318
		風下	0.4		

(2) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価に用いる条件を表4-11に示す。

表4-11 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の評価条件

記号	記号の説明	数値	単位
q	設計用速度圧	6100	N/m <sup>2</sup>
C	風力係数	1.6	—
G	ガスト影響係数	1	—
$\Delta P$	最大気圧低下量	8900	N/m <sup>2</sup>
$A_c$	コーン状破壊面の有効投影面積	33123	mm <sup>2</sup>
$A_0$	頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積	442.3	mm <sup>2</sup>
$s_c a$	頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	284	mm <sup>2</sup>
b	部材幅	1000	mm
d'	部材の有効せい	47	mm
L	屋根スラブの支持スパン	1530	mm
p	頭付きアンカーボルトの間隔	360	mm
D	頭付きアンカーボルト頭部の直径	30.4	mm
d	頭付きアンカーボルト軸部の直径	19	mm
$F_c$	コンクリートの設計基準強度	22.1	N/mm <sup>2</sup>
$f_n$	コンクリートの支圧強度	132.6	N/mm <sup>2</sup>
$f_s$	コンクリートの許容せん断応力度	1.07	N/mm <sup>2</sup>
$f_t$	鉄筋の許容引張応力度	324.5	N/mm <sup>2</sup>
$a_t$	引張鉄筋断面積	705	mm <sup>2</sup>
j	応力中心間距離 ( $j = (7/8) \cdot d'$ )	41.1	mm
$l_{ce}$	頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ( $l_{ce} = l_e$ )	88.6	mm
$l_e$	頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ	88.6	mm
$c\sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	6.851	N/mm <sup>2</sup>
$s\sigma_{pa}$	頭付きアンカーボルトの引張強度	235	N/mm <sup>2</sup>
$s\sigma_y$	頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度	235	N/mm <sup>2</sup>
$\phi_1$	低減係数	1	—
$\phi_2$	低減係数	0.67	—
$\omega d$	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重	3.472	kN/m
$\omega T1$	評価に用いる竜巻の荷重 $W_{T1}$ による単位幅あたりの荷重	-8.9 <sup>*</sup>	kN/m
$\omega T2$	評価に用いる竜巻の荷重 $W_{T2}$ による単位幅あたりの荷重	-14.21 <sup>*</sup>	kN/m

※：下向きの荷重を正の値とする。

- (3) 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉  
 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価に用いる条件を表4-12に示す。

表4-12 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	25.90	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	14	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	66.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	490.9	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	91.0	mm
		$Z_p$	断面係数	1534	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本

- (4) 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉  
 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価に用いる条件を表4-13に示す。

表4-13 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	3.606	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	106.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	314.2	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	79.0	mm
		$Z_p$	断面係数	785.4	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本

(5) その他の外殻となる扉

a. 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)

原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価に用いる条件を表4-14に示す。

表4-14 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		$A_d$	水密扉受圧面積	1.570	$m^2$
		$\Delta P$	単位面積当たりの最大 気圧低下量	8900	$N/m^2$
		$n$	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	$A_k$	断面積	1963	$mm^2$
		$L_k$	軸支持間距離	95.0	mm
		$Z_k$	断面係数	12270	$mm^3$
	カンヌキ受けピン	$A_p$	断面積	314.2	$mm^2$
		$L_p$	軸支持間距離	90.0	mm
		$Z_p$	断面係数	785.4	$mm^3$
	カンヌキ受けボルト	$A_b$	ボルト1本あたりの 断面積	157.0	$mm^2$
		$n_b$	ボルト本数	2	本



5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

貫通限界厚さと許容限界の比較を表5-1に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋根スラブについては、解析による評価にてデッキプレートが破断しないことを確認した。

表5-1 貫通評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版	鋼製材		
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材		
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		外壁	鋼製材		
			車両		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材		
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		建屋外壁	鋼製材		
車両					

※：表5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-1 貫通評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
	原子炉棟				

5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を表5-2に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった部位については、解析による評価にてデッキプレート若しくはライナが破断しないことを確認した。

表 5-2 裏面剥離評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
裏面剥離評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版	鋼製材		
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材		
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		外壁	鋼製材		
			車両		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材		
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材		
			車両		
		建屋外壁	鋼製材		
車両					

※：表 5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

表5-2 裏面剥離評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
評価 裏面剥離	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	追而	
		外壁	鋼製材		

5.3 変形評価

(1) 外壁

建屋に生じるせん断ひずみと許容限界の比較を表5-3に示す。建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 5-3 変形評価結果（建屋）

評価項目	評価結果	評価結果	許容限界
建屋の せん断ひずみ	原子炉建屋	追而	
	タービン建屋		
	使用済燃料乾式貯蔵建屋		
	緊急時対策所		

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）の部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

評価項目	評価結果	許容限界
	追而	

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに生じる荷重と許容限界の比較を表5-4に示す。スラブ及びスタッドに生じる荷重が建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表5-4 変形評価結果（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ）

評価項目	評価結果	許容限界
屋根スラブの曲げモーメント	追而	
屋根スラブのせん断力		
スタッドの発生引張力		

(3) 扉

評価対象の扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-5に示す。カンヌキ部に生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-5 変形評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm <sup>2</sup> )	許容限界値 (N/mm <sup>2</sup> )	
原子炉棟水密扉 原子炉建屋	カンヌキ部	カンヌキ	90	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	245	686
		カンヌキ受けボルト	53	651
電気室搬入口水密扉 原子炉建屋一階	カンヌキ部	カンヌキ	70	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	202	686
		カンヌキ受けボルト	26	651
原子炉棟水密扉(潜戸) 原子炉建屋	カンヌキ部	カンヌキ	28	205
		カンヌキ受けピン <sup>(注1)</sup>	101	345
		カンヌキ受けボルト	12	651

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書

## 目次

1. 概要	39
2. 基本方針	39
2.1 位置	39
2.2 構造概要	40
2.3 評価方針	57
2.4 適用規格	58
3. 強度評価方法	59
3.1 記号の定義	59
3.2 評価対象部位	59
3.3 荷重及び荷重の組合せ	60
3.4 許容限界	61
3.5 評価方法	63
4. 評価条件	67
5. 強度評価結果	69

## 1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設及び原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設の防護鋼板が、**設置（変更）許可申請において示す**設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても防護対象施設に飛来物を衝突させず、また、機械的な波及的影響を与えず、防護対象施設の安全機能維持を考慮して、防護鋼板が構造健全性を有することを確認するものである。

## 2. 基本方針

V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、防護鋼板の「2.1 位置」、 「2.2 構造概要」、 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

防護鋼板は、原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上、原子炉棟外壁及び付属棟屋上並びに外壁）及び海水ポンプ室周りに設置する。

防護鋼板の設置位置図を図 2-1 に示す。

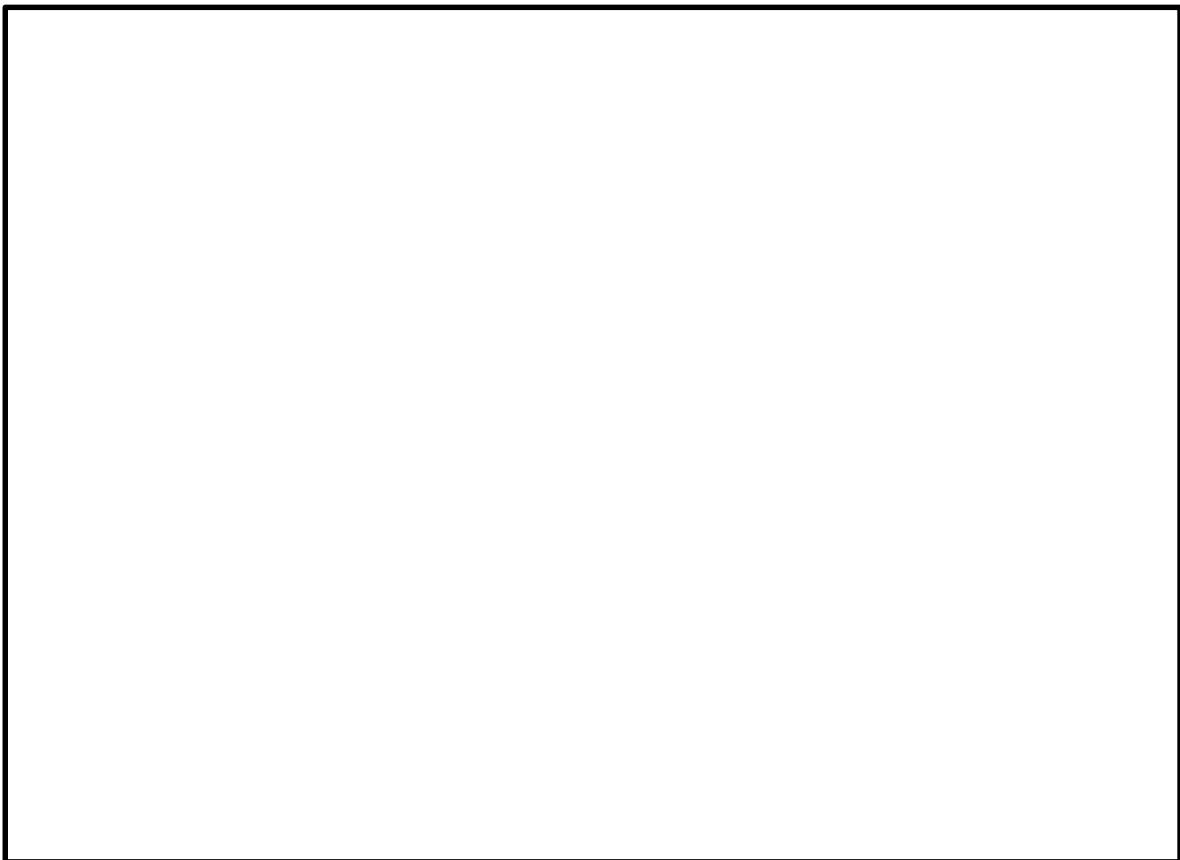


図 2-1 防護鋼板の設置位置図

## 2.2 構造概要

防護鋼板の構造は、V-3-別添 2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.2 防護鋼板の構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

### (1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-2 に示す。



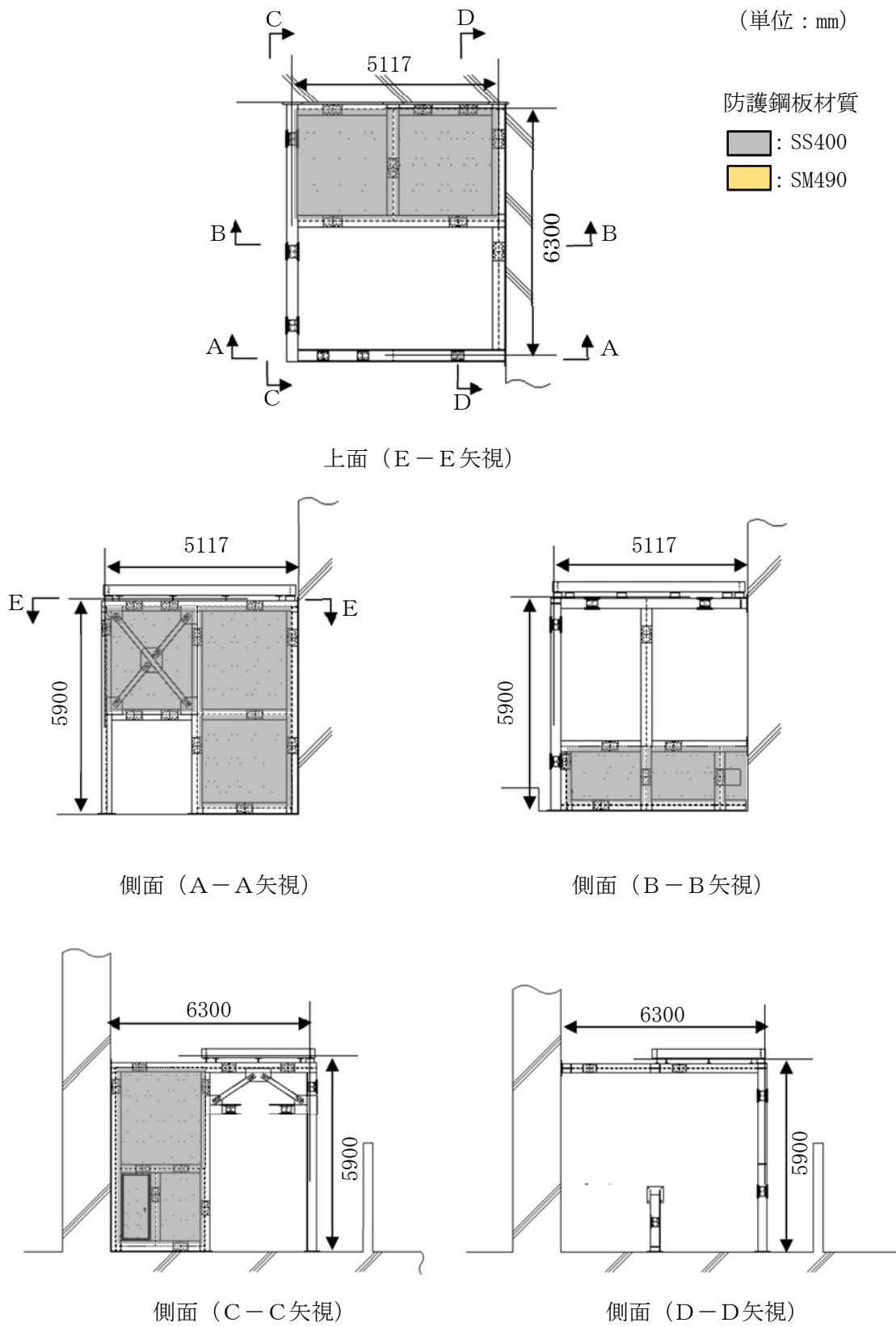


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)  
 (2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

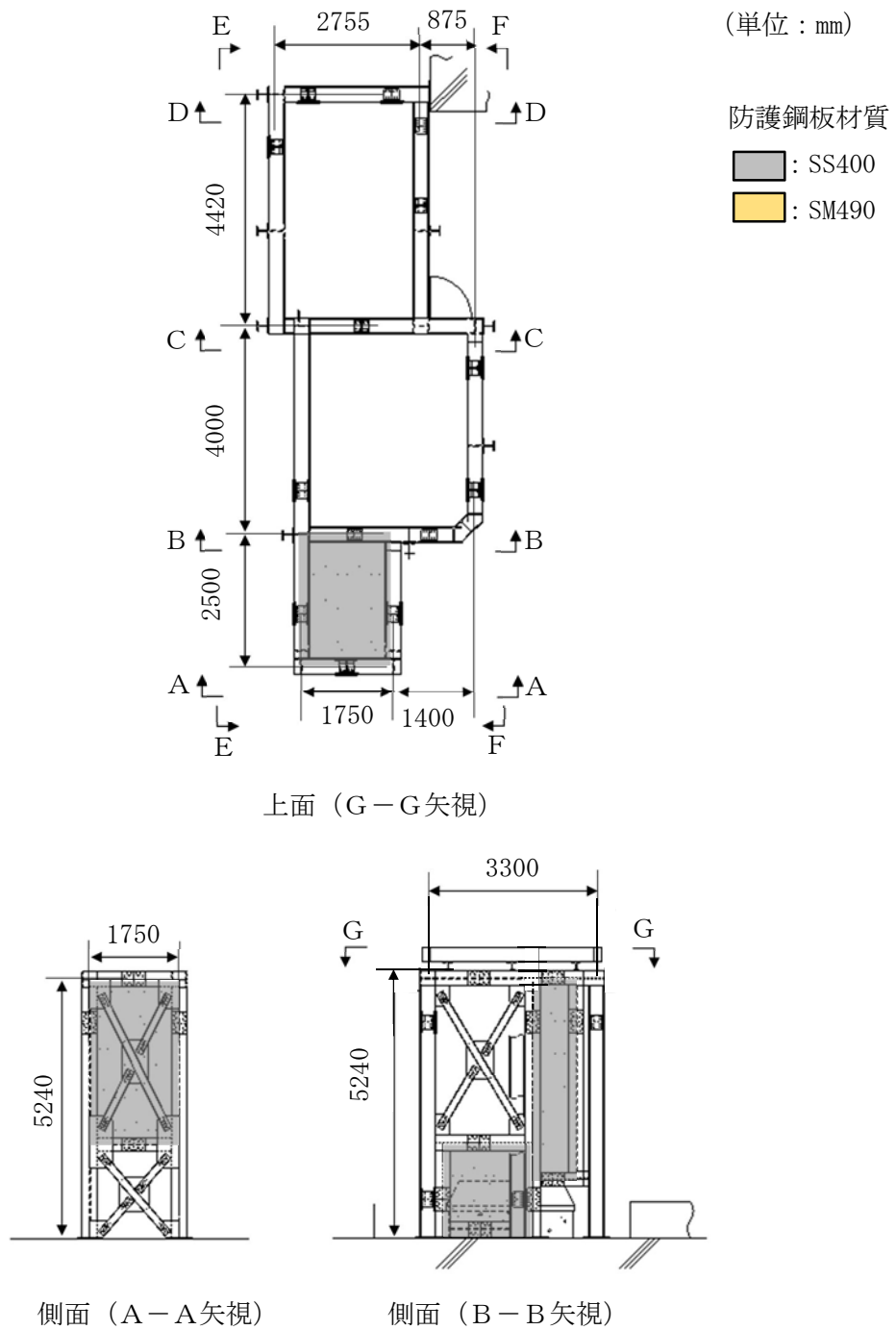


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(2/4)  
 (2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

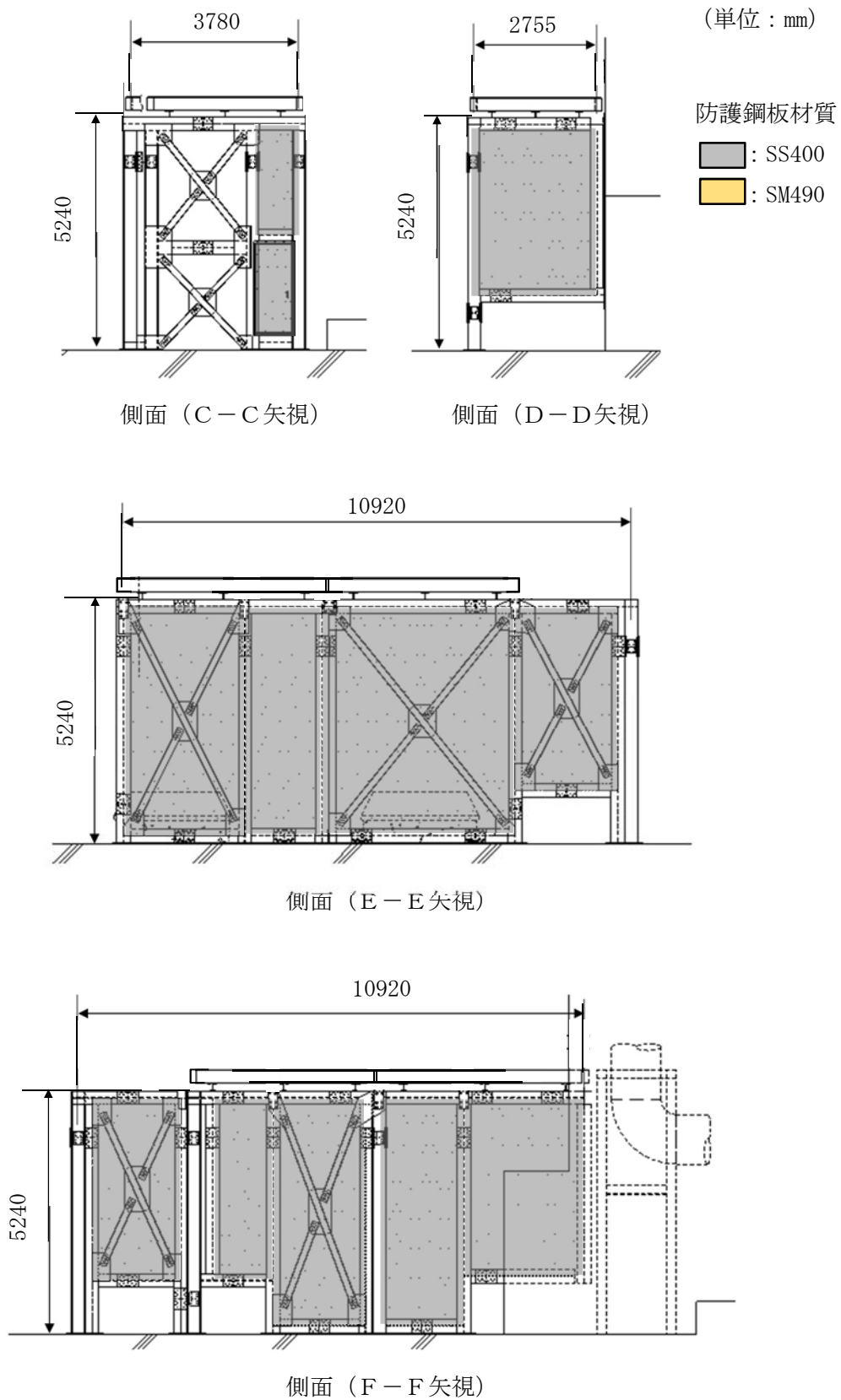


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(3/4)  
 (2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

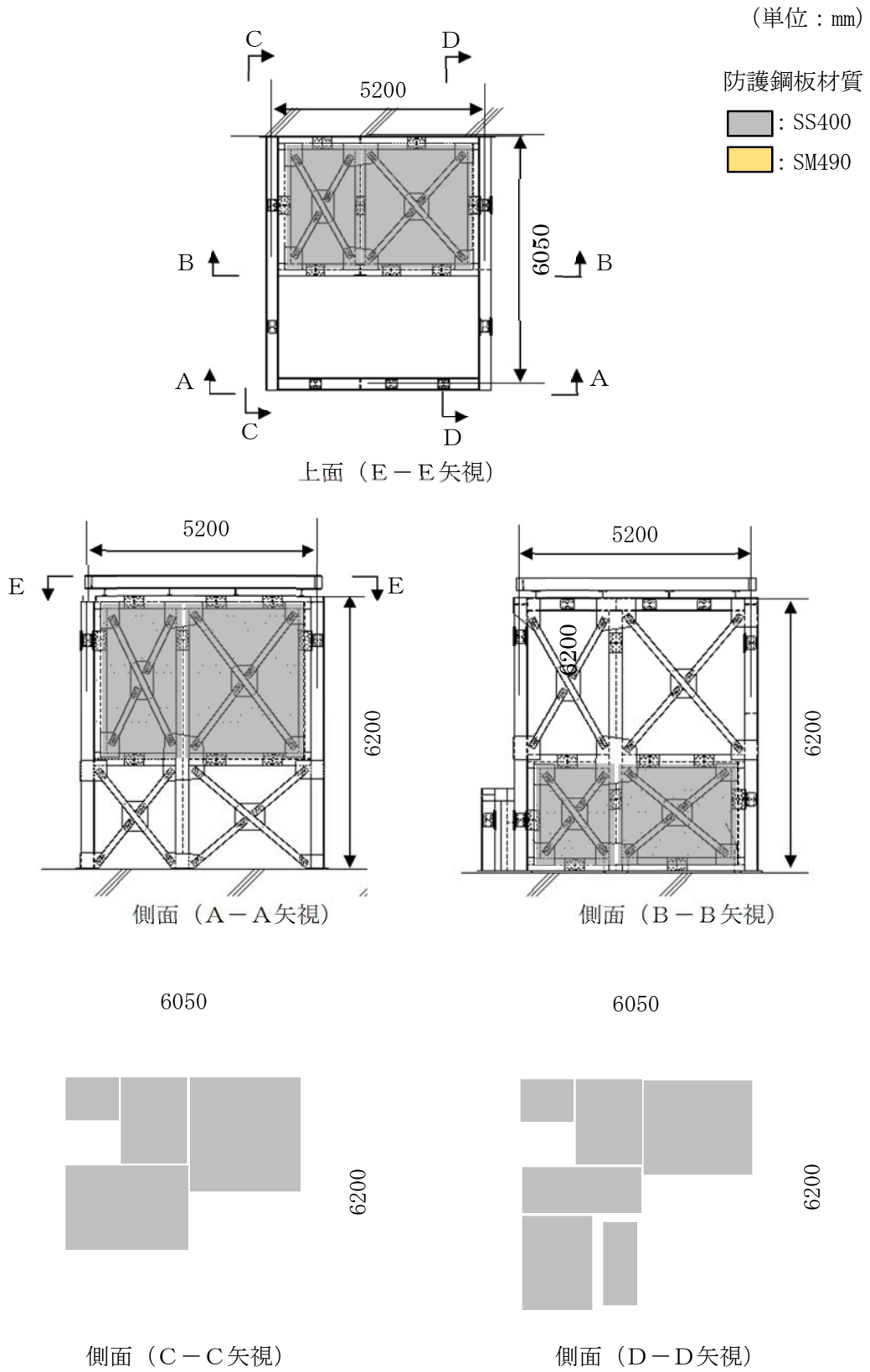


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン防護対策施設防護鋼板の構造図(4/4)  
 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外皮となる。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-3 に示す。

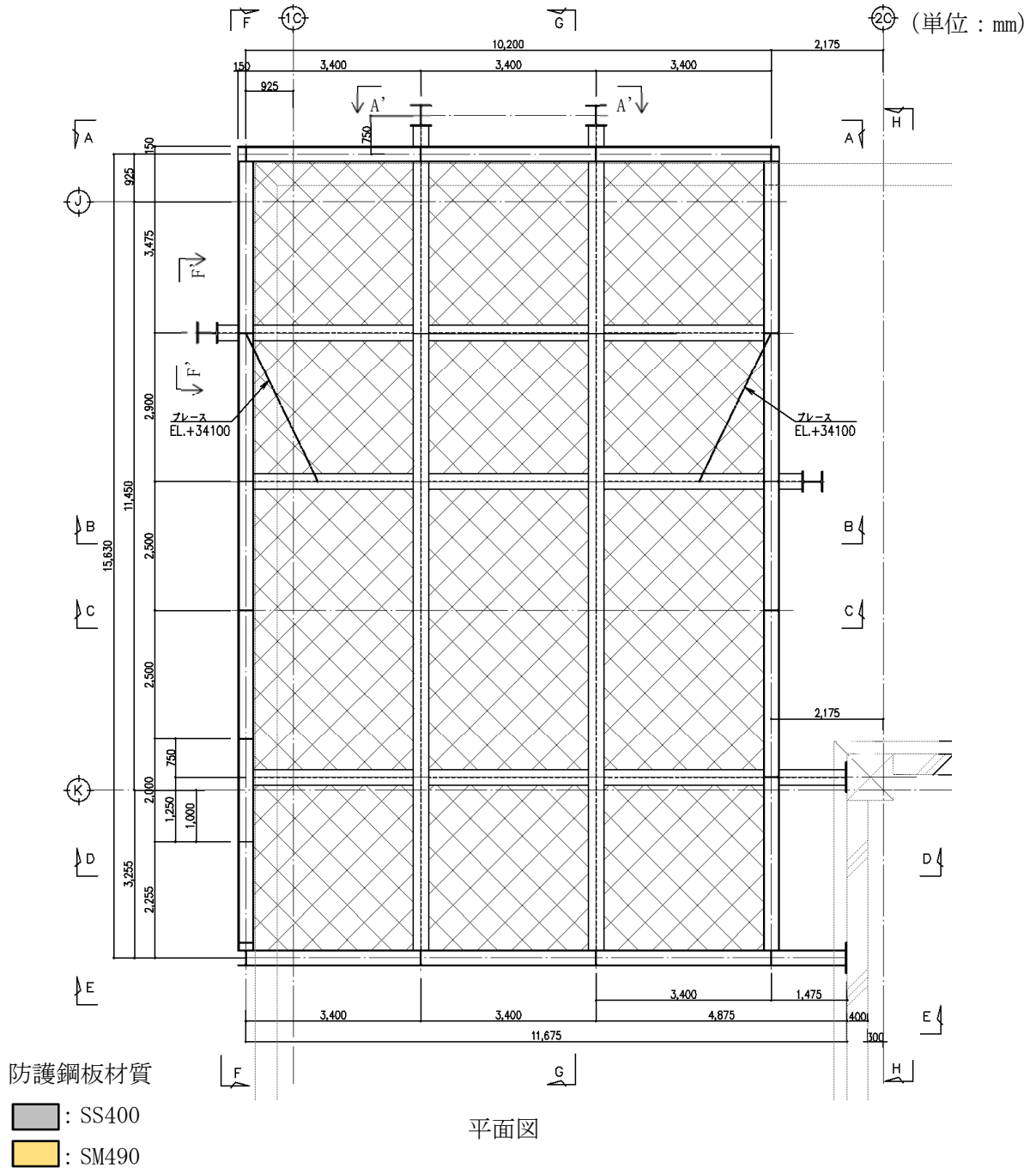
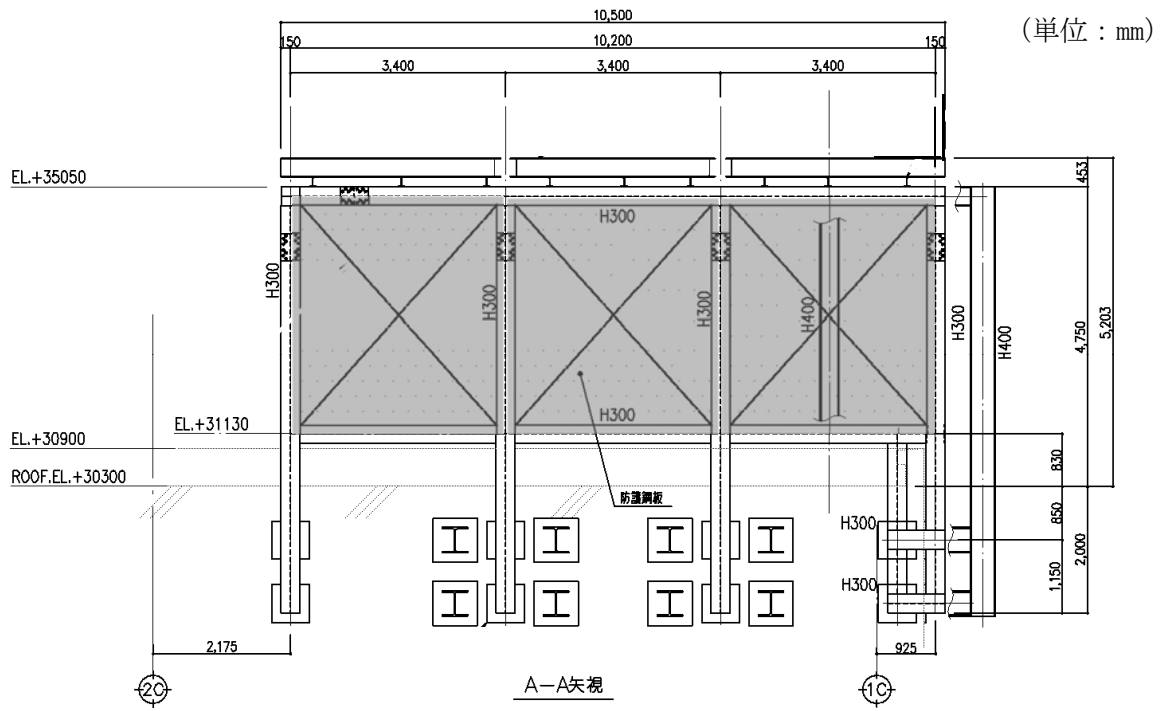


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(1/6)



防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

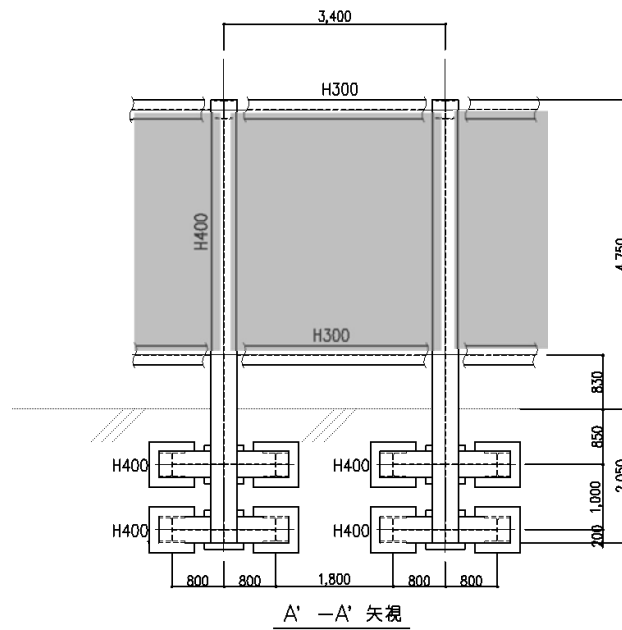
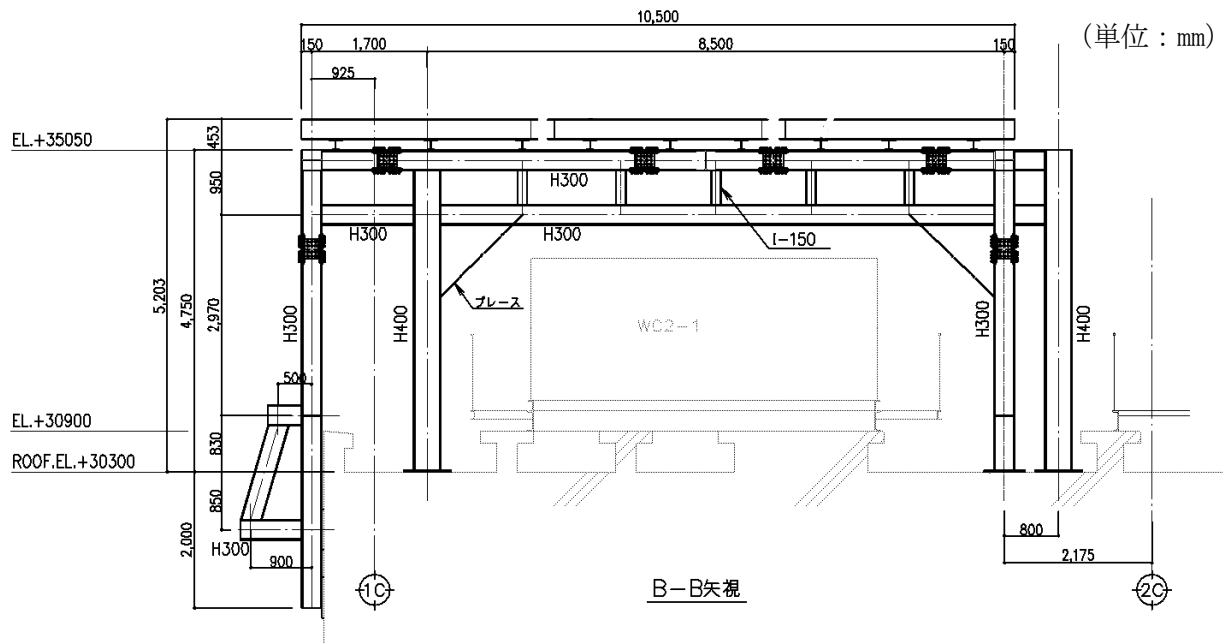


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/6)



防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

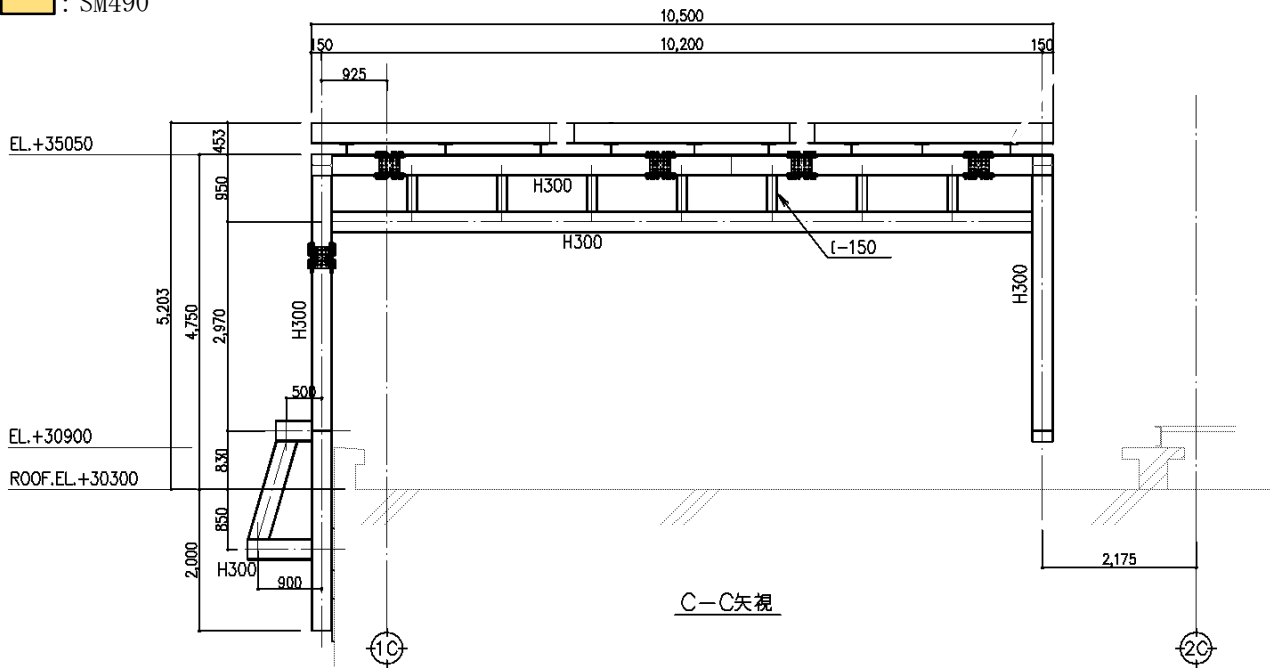
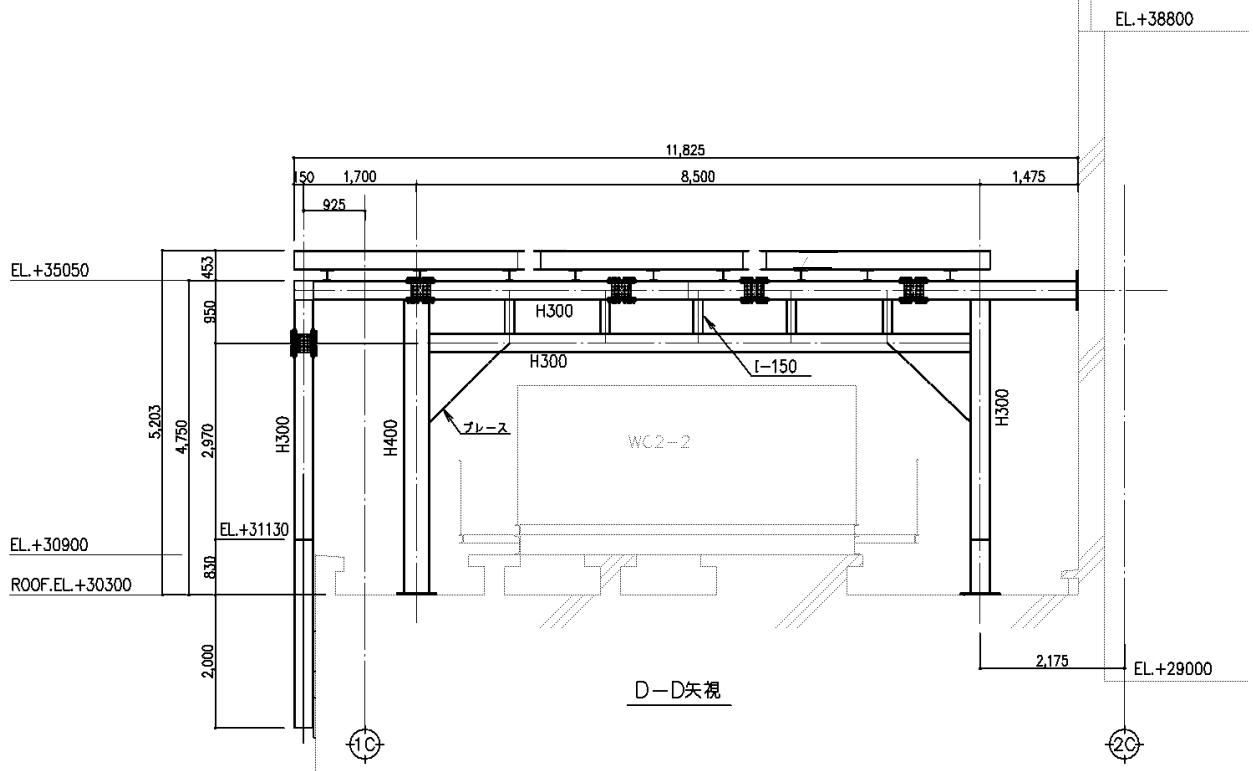


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(3/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

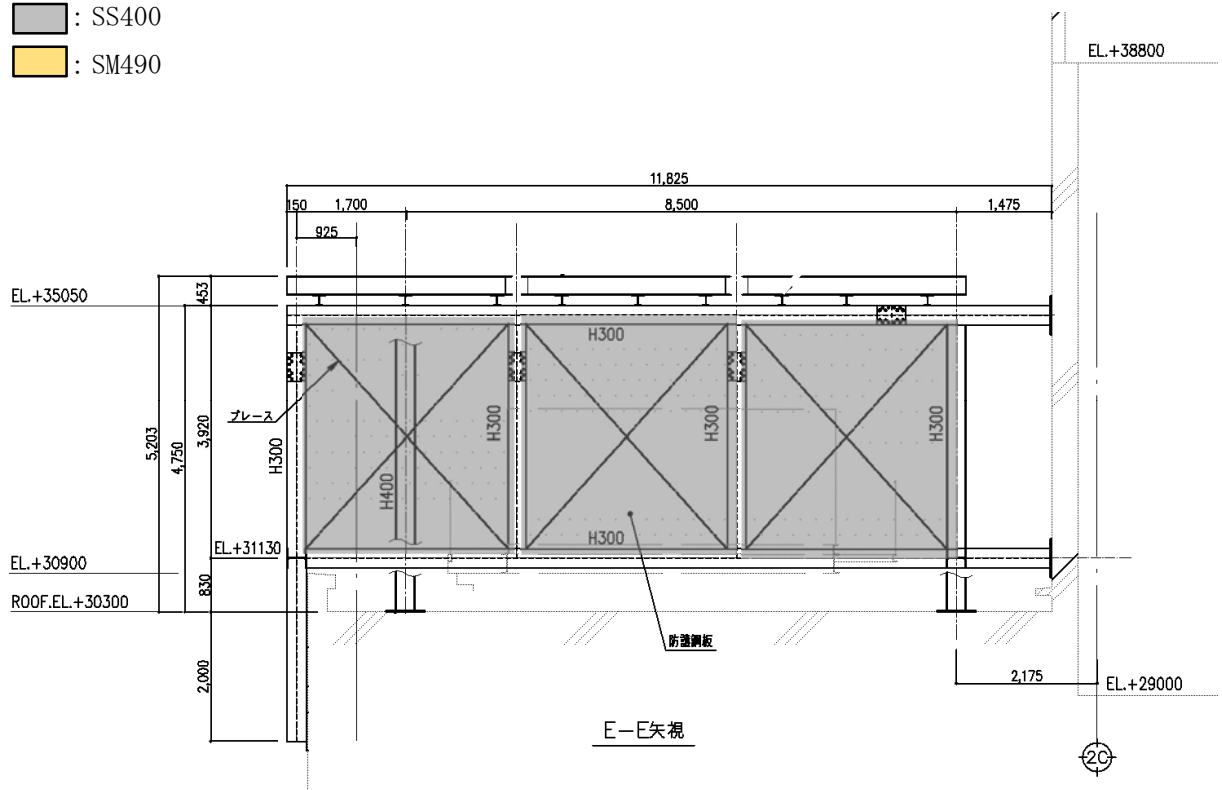
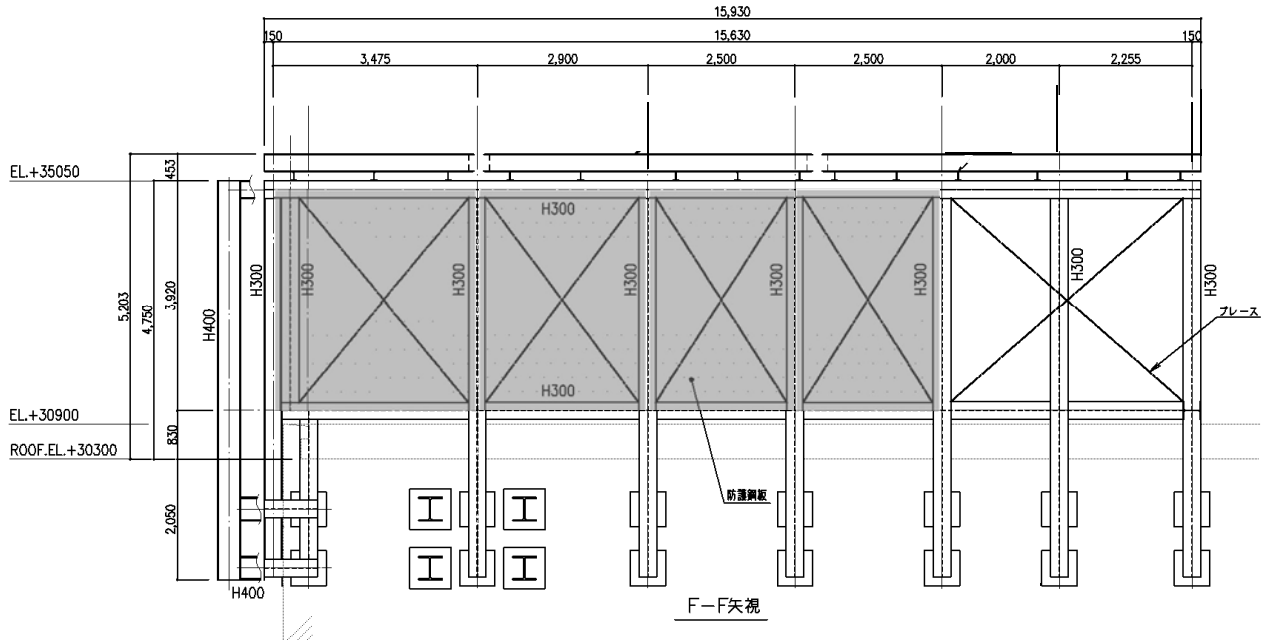


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(4/6)



(単位：mm)



NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R4E

防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

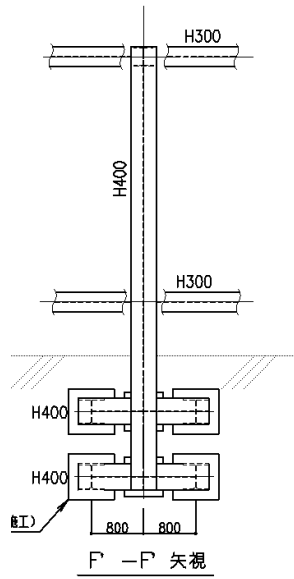
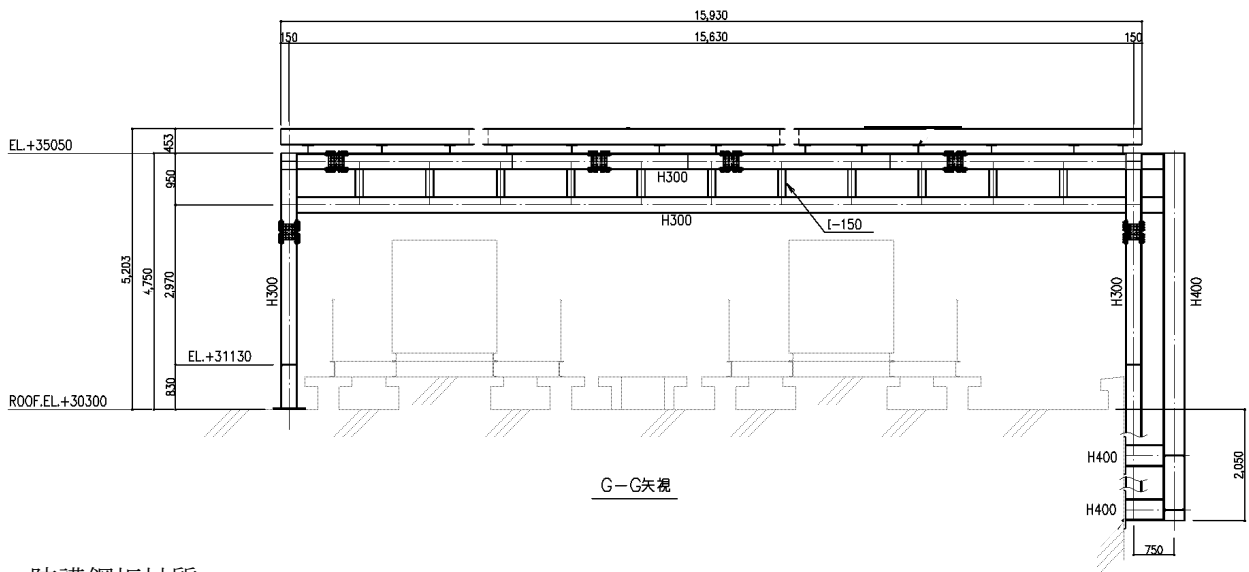


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(5/6)

(単位：mm)

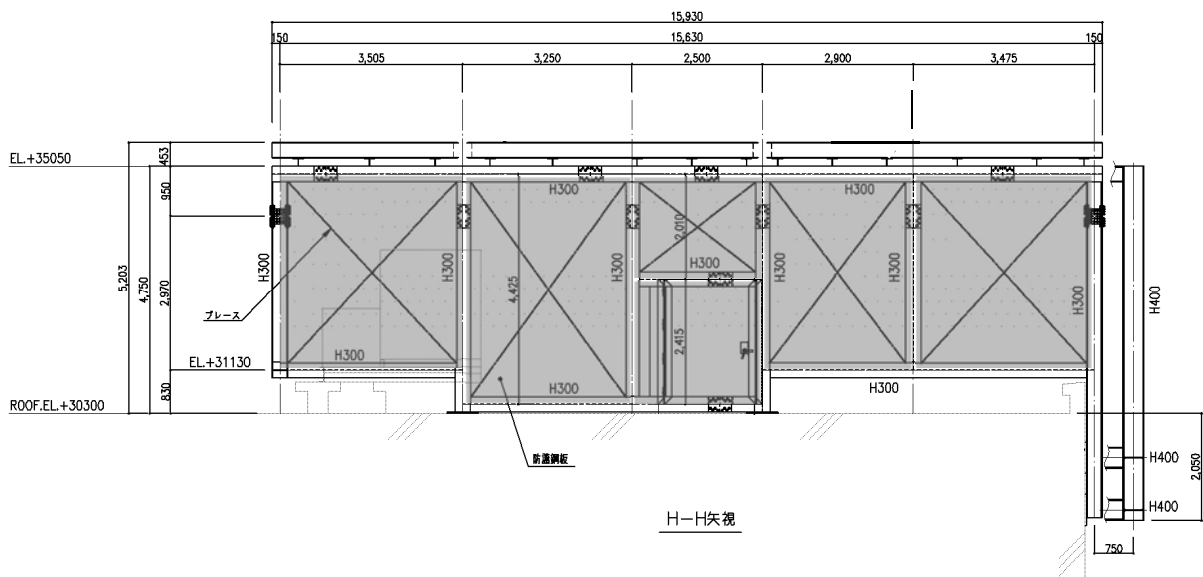


G-G矢視

防護鋼板材質

■ : SS400

■ : SM490



H-H矢視

図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(6/6)

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R4E

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-4 に示す。

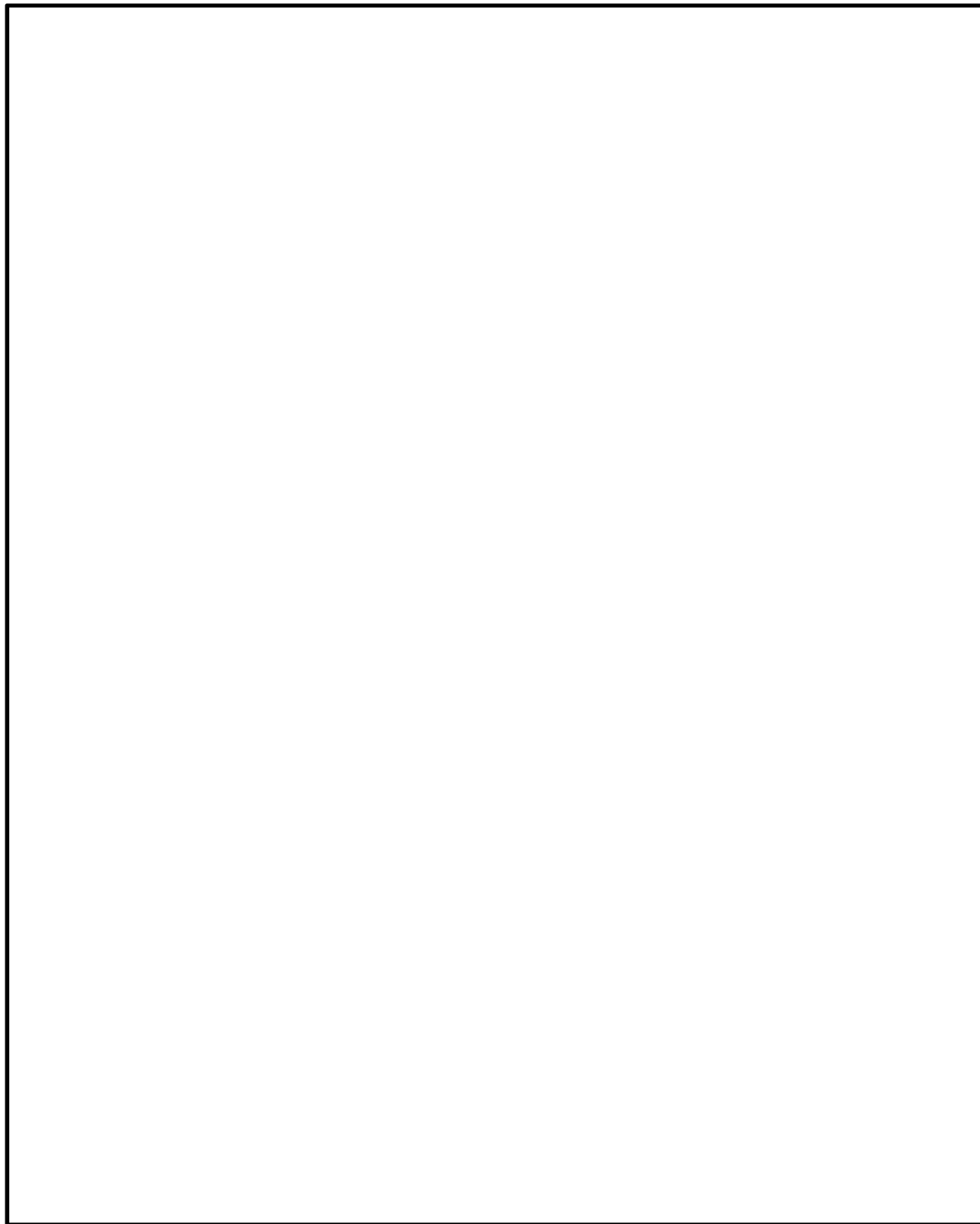


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (1/2) (エリア⑦)

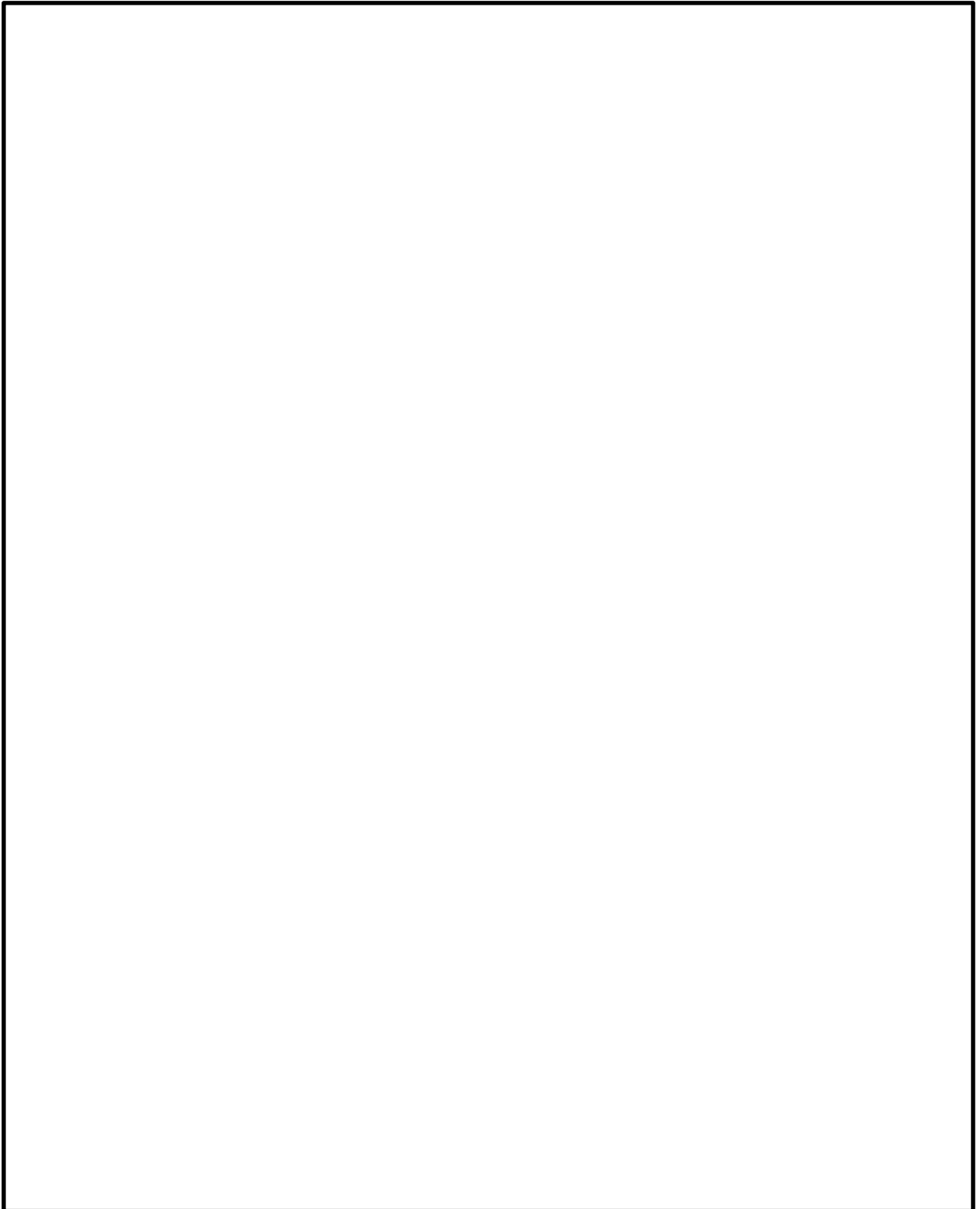


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/2) (エリア⑧)

(4) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設の防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外殻となる。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-5 に示す。

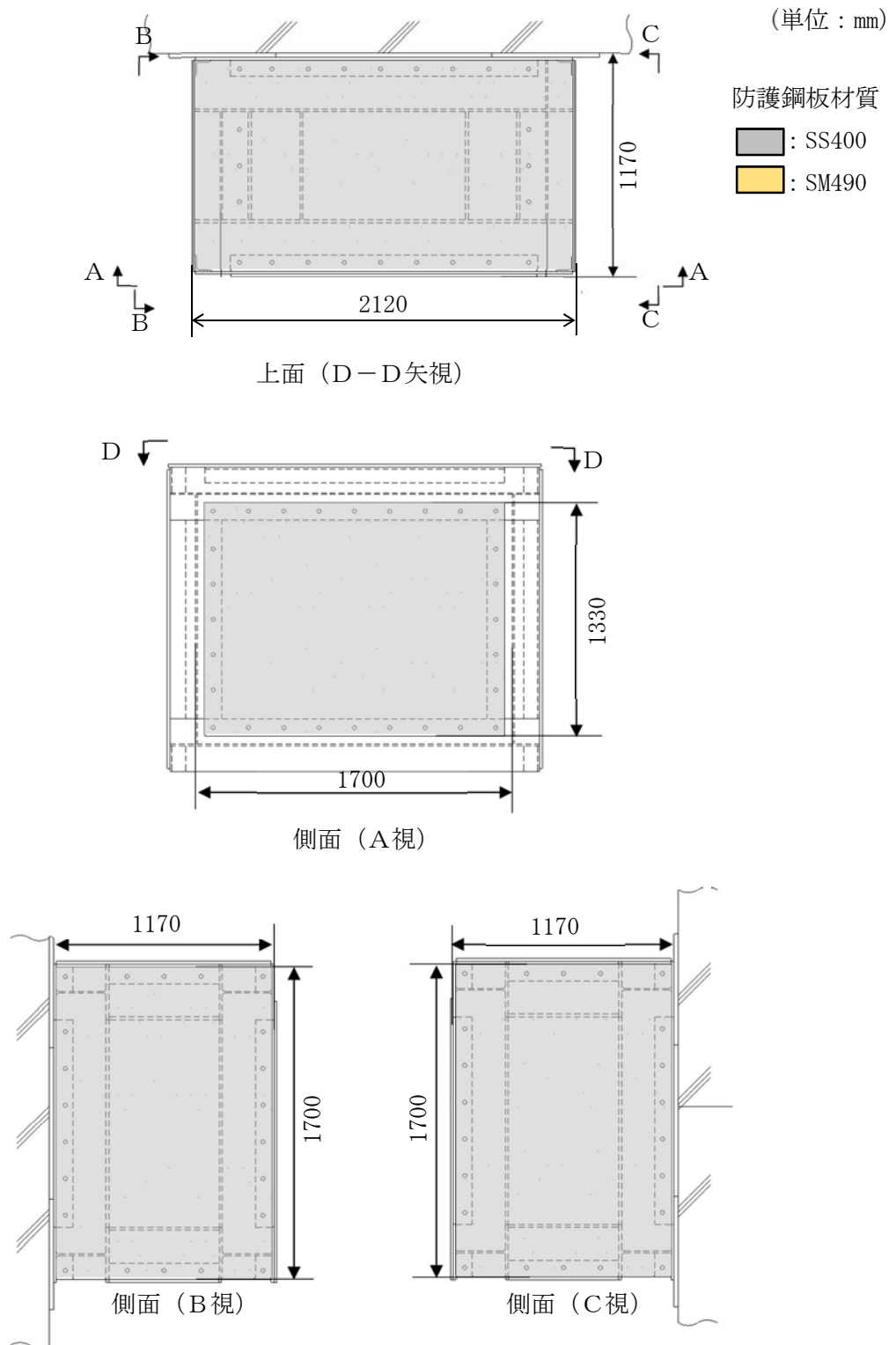


図 2-5 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(5) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外壳となる。

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-6 に示す。

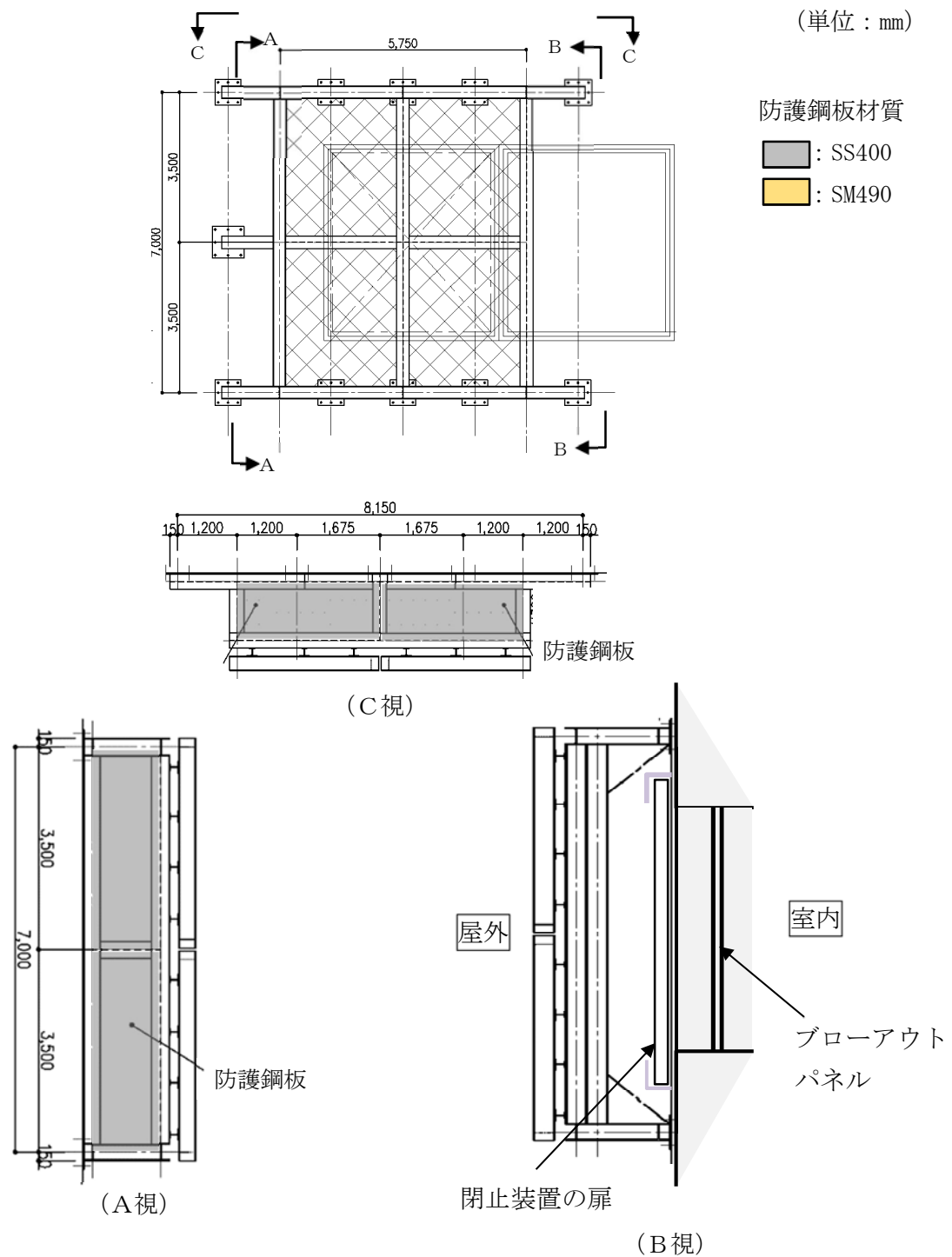
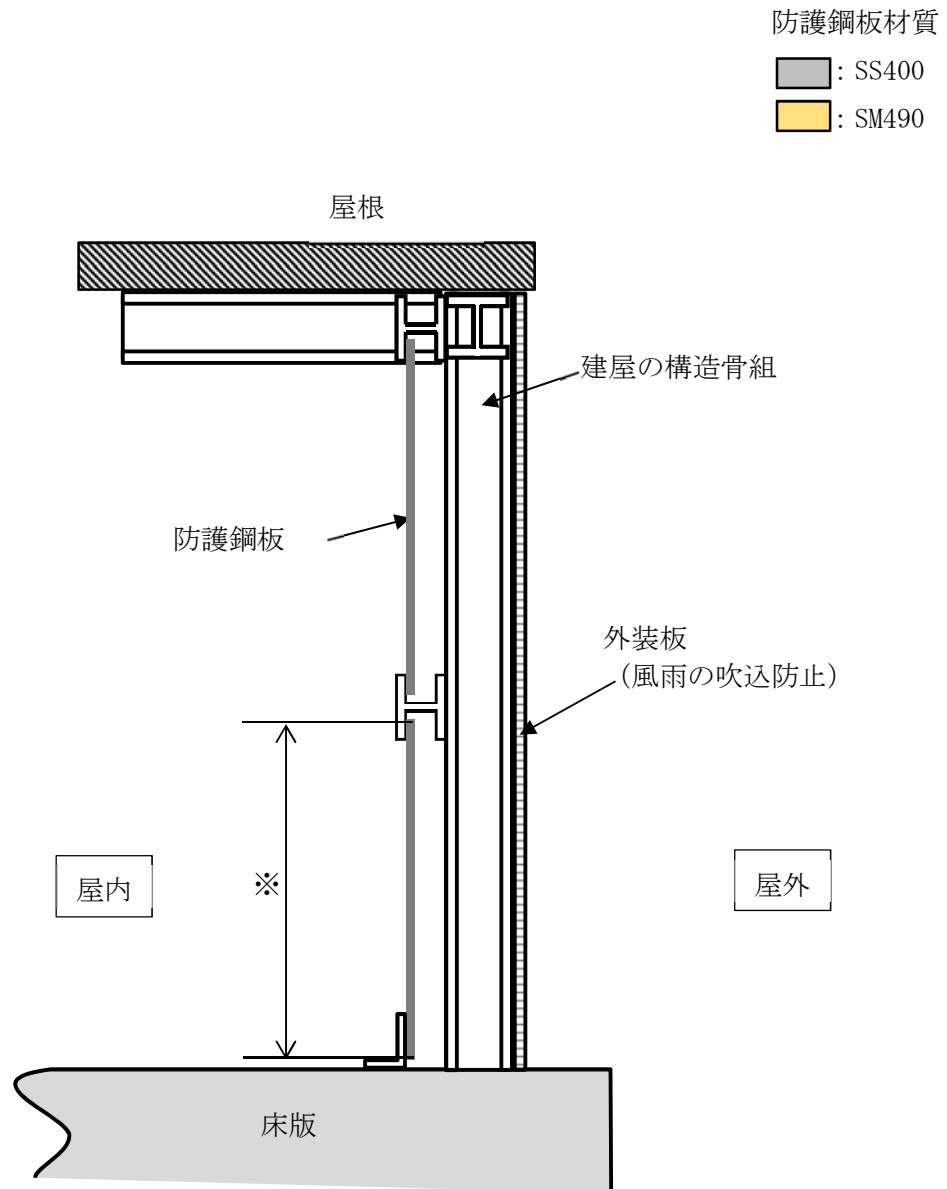


図 2-6 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(6) 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板は、建屋の構造骨組に取り付けられ、竜巻に対する施設の外皮となる。

原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図を図 2-7 に示す。



※：貫通評価で健全性が確認された寸法内で割付

図 2-7 原子炉建屋付属棟軽量外壁部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(7) 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板

原子炉建屋排気隔離弁竜巻防護対策施設防護鋼板は、当該防護対策施設の架構に取り付けられ施設の外壳となる。

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部防護鋼板の構造図を図 2-8 に示す。

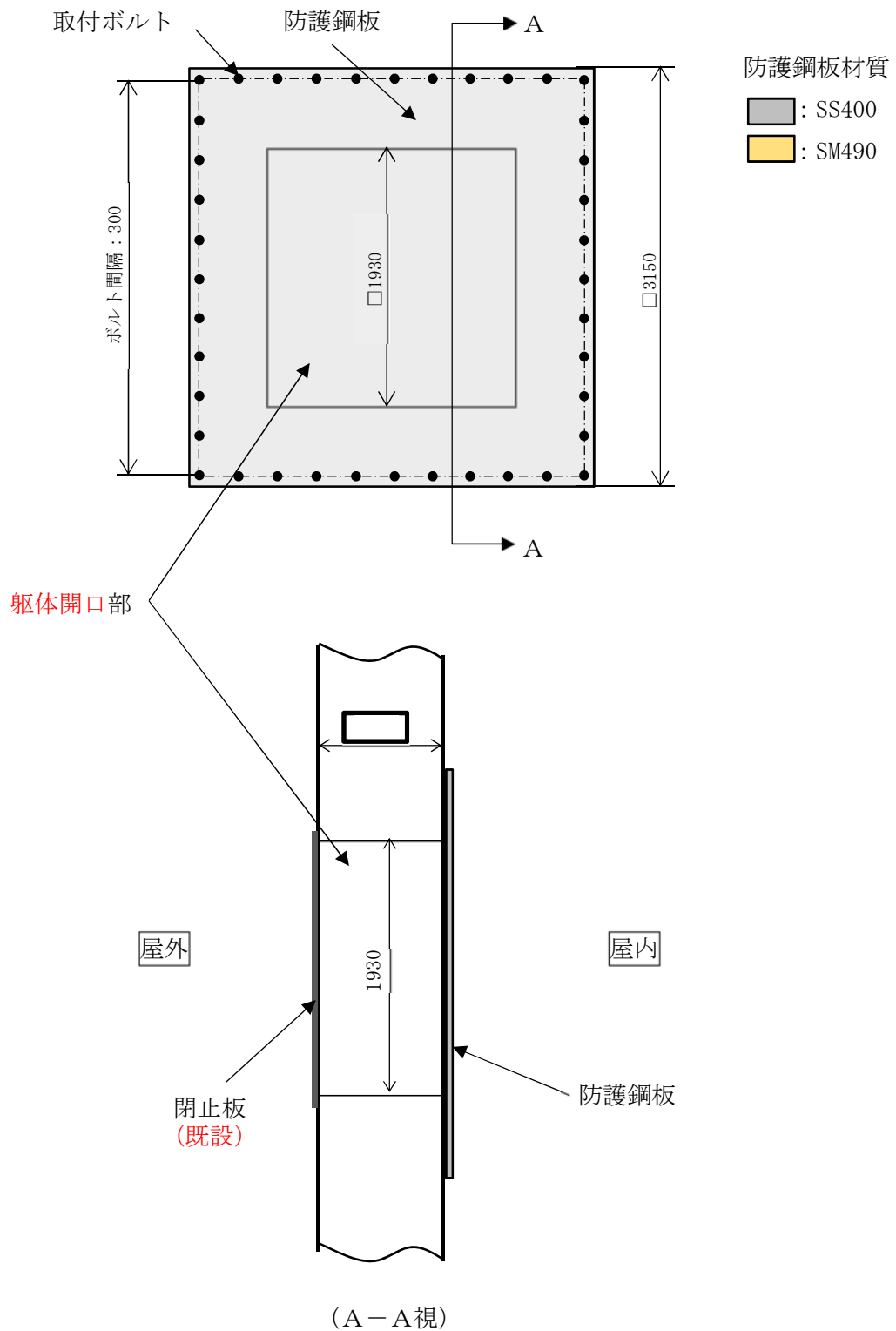


図 2-8 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図



## 2.3 評価方針

防護鋼板の強度計算は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、防護鋼板の評価対象部位に作用する応力等が許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

防護鋼板の評価フローを図 2-9 に示す。

防護鋼板の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

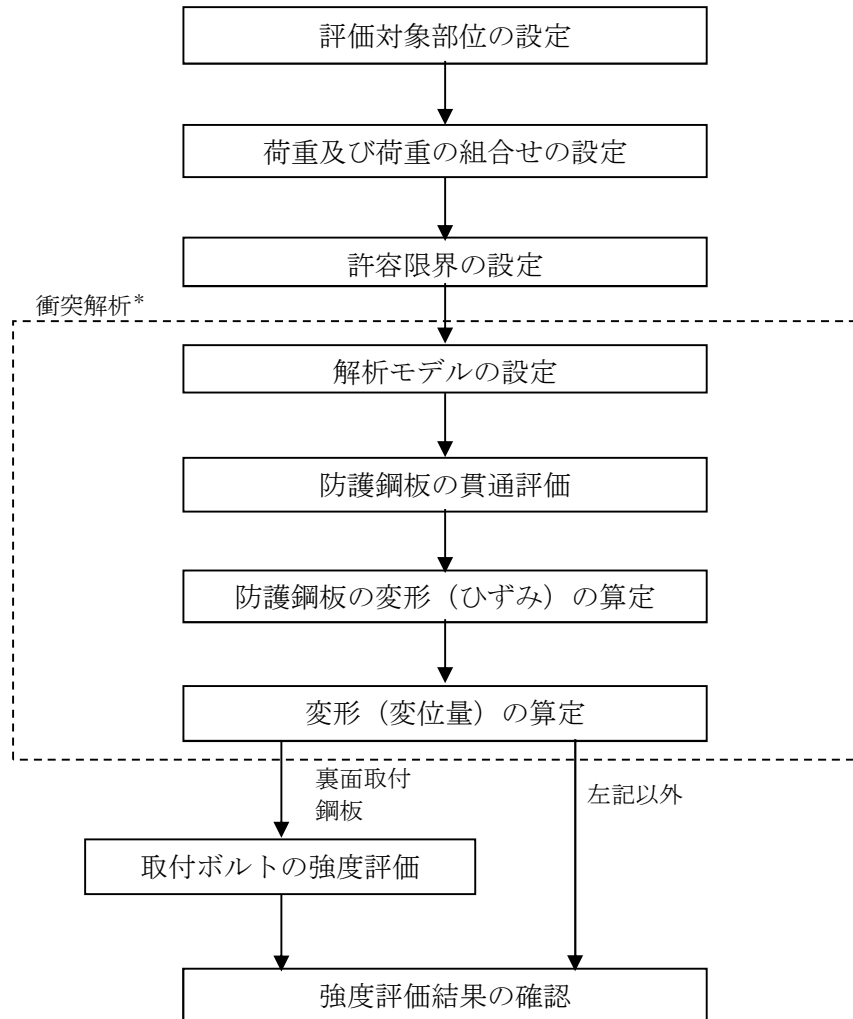
具体的には、飛来物が防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板に対する貫通評価を実施する。

貫通評価においては、設計荷重に対して、施設の外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないために、防護鋼板が終局状態に至るようなひずみを生じないこと（貫通評価）及び防護鋼板の変形量が防護対策施設と防護対象施設の離隔距離に対して妥当な安全余裕を有すること（変形評価）を確認する。

終局状態に至るようなひずみが確認される場合においては、その範囲を確認し、飛来物が貫通するものではないことを確認する。

また、防護鋼板をボルトで留める際には、支持構造物の設計荷重に対する表側の面に設置し、防護鋼板に作用する設計荷重を、支持構造物側に流す設計を基本とする。但し、建屋の内表面へのボルト留めが必要な構造となる、原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板については、ボルトにて設計荷重を全て受け止める構造となることから、据付ボルトが設計荷重に対し破断し、防護鋼板が脱落しないことを確認する（裏面取付鋼板ボルト評価）。

防護鋼板を支持し、鋼板に作用する荷重が伝達される架構の強度評価は、V-3-別添 1-2-1-3「架構の強度計算書」に示す。



注記\* : 衝突解析については、3次元FEMモデル解析を実施する。

図 2-9 防護鋼板の評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NE I 07-13))
- ・日本工業規格 (J I S)
- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」  
( (社) 日本機械学会 (以下「J S M E」という。))
- ・「建築物荷重指針・同解説」 (社) 日本建築学会 (2004 改定)
- ・「伝熱工学資料 (改訂第 4 版)」 ( (社) 日本機械学会)

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

##### (1) 荷重の設定

荷重の設定に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の設定に用いる記号

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	防護鋼板の受圧面積
C	—	防護鋼板の風力係数
F <sub>d</sub>	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m <sup>2</sup>	設計用速度圧
V <sub>D</sub>	m/s	竜巻の最大風速
V <sub>Rm</sub>	m/s	最大接線風速
V <sub>T</sub>	m/s	移動速度
W <sub>M</sub>	N	飛来物による衝撃荷重
W <sub>W</sub>	N	風圧力による荷重
ΔP <sub>max</sub>	N/m <sup>2</sup>	最大気圧低下量
ρ	kg/m <sup>3</sup>	空気密度
F <sub>t</sub>	N	取付ボルトに対し作用する引張力
A <sub>b</sub>	mm <sup>2</sup>	取付ボルトの軸断面積
d	mm	取付ボルトの呼び径
N	—	取付ボルトの本数
σ <sub>bt</sub>	N/mm <sup>2</sup>	取付ボルト 1 本当たりの引張応力

#### 3.2 評価対象部位

##### (1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価として、飛来物が防護鋼板に直接衝突した場合についての解析を行う。

飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の荷重負担面積が小さいほど衝突エネルギーが分散されず、貫通に係る局所的な損傷が大きくなる傾向にある。従って、貫通評価としては荷重負担面積の小さい部位に代表性があるため、評価対象となる防護鋼板の材質ごとに、開口部寸法が小さく厚みが薄い箇所を踏まえ選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律  とすることから、開口部寸法が小さい箇所が代表となる。

貫通評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 貫通評価に用いる防護鋼板の仕様

ケース	寸法 縦(mm)×横(mm)	厚さ	材質	備考
1	1030×1030			幅, 高さの最小寸法の組合せ
2	827×933			

(2) 変形評価

防護鋼板の変形評価として、飛来物が防護鋼板に直接衝突した場合についての解析を行う。

飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。従って、変形評価としては、評価対象となる防護鋼板の材料ごとに、開口部寸法が大きく厚みが薄い箇所を踏まえ選定する。なお、防護鋼板の設計においては、厚さを一律   とすることから、開口部寸法が大きい箇所が代表となる。

変形評価に用いる防護鋼板の仕様を表 3-3 に示す。

表 3-3 変形評価に用いる防護鋼板の仕様

ケース	寸法 縦(mm)×横(mm)	厚さ	材質
1	3800×4712		
2	1850×2000		

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 荷重の設定

強度評価には以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$ (N/m <sup>2</sup> )
100	15	85	8,900

a. 風圧力による荷重( $W_w$ )

風圧力による荷重 $W_w$ は、下式により算定する。

$$W_w = q \times G \times C \times A$$

設計用速度圧  $q$  は、下式により算定する。

$$q = (1/2) \rho \times V_D^2$$

b. 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) は、表 3-5 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。飛来速度については、評価の代表性を考慮し、水平、鉛直の飛来速度のうち大きい方である水平方向速度を設定する。

表 3-5 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	飛来速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51

c. 常時作用する荷重 ( $F_D$ )

常時作用する荷重 ( $F_D$ ) としては、自重を考慮する。

(2) 荷重の組合せ

貫通評価、変形評価に用いる荷重の組合せは、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」のとおり、風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

評価内容	荷重の組合せ
貫通評価 変形評価 裏面取付鋼板ボルト評価	$W_W + W_M + F_D$

なお、貫通評価及び変形評価においては、風圧力による荷重と自重の組合せを考えた場合、鉛直設置鋼板への飛来物衝突時の変形方向（水平）においては、想定する風圧力（想定最大値：6100=7320 N/m<sup>2</sup>）が卓越する。これは、水平設置鋼板の衝突時変形方向（鉛直下向き）に作用する、風圧力（上向きのため考慮しない）と鋼板の自重（約    N/m<sup>2</sup>）の和より大きくなることから、評価においては、代表性を考慮し鉛直設置鋼板の風圧力を想定した荷重を設定する。

3.4 許容限界

防護鋼板の許容限界は、V-3-別添 1-2 「防護対策施設の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

## (1) 貫通評価

貫通評価の許容限界としては、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「3.5.(3)b. 破断ひずみ」に示すとおり、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI 07-13」という。)においてTF(多軸性係数)を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=2.0を考慮して設定する。

貫通評価の許容限界を表3-7に示す。

表3-7 許容限界(防護鋼板の貫通評価)

ケース	材質	破断ひずみ (真ひずみ)
1		
2		

## (2) 変形評価

変形評価の許容限界としては、防護鋼板の材質ごとに、それぞれが適用されている部位における防護対象施設との離隔距離未満の変形量を設定する。

変形評価の許容限界を表3-8に示す。

表3-8 許容限界(防護鋼板の変形評価)

ケース	材質	衝突方向変位量(mm)
1		
2		

## (2) 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価の許容限界としては、J E A G 4 6 0 1を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した許容応力を許容限界とする。

裏面取付鋼板ボルト評価の許容限界を表3-9に示す。

表 3-9 許容限界(裏面取付鋼板ボルト評価評価)

許容応力 状態	応力の種類		許容限界
Ⅲ <sub>A</sub> S	一次 応力	引 張	$1.5f_t$
		せん断*	$1.5f_s$
		組合せ*	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$

※：地震のみ考慮（竜巻では引張応力が卓越するため考慮しない）

### 3.5 評価方法

#### 3.5.1 貫通評価及び変形評価

##### (1) 解析モデル

防護鋼板の貫通評価及び変形評価は、解析コード「LS-DYNA」を用いて3次元FEMモデルによりモデル化し評価を実施する。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

防護鋼板はシェル要素でモデル化し、境界条件は、防護鋼板の端部を完全固定とする。飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるよう接触断面積を小さくするため、先端部（衝突部）を開口としてシェル要素でモデル化する。

防護鋼板及び飛来物の解析モデル図を図3-1に示す。

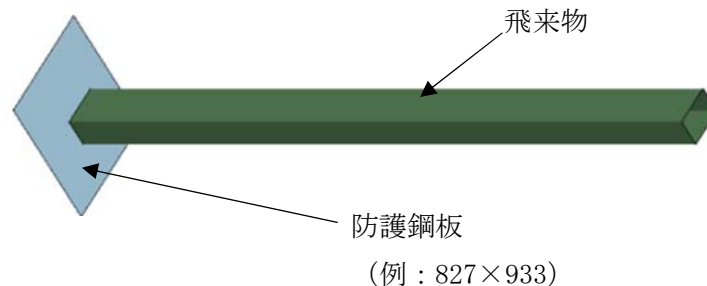


図 3-1 防護鋼板及び飛来物の解析モデル図

##### (2) 材料定数

飛来物及び防護鋼板に使用する鋼材の材料定数を表3-9に示す。

材料定数は、JIS及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会（2005改定）」に基づき設定する。

表 3-9 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比
飛来物 (鋼製材)	SS400	5 を超え 16 以下	245	$2.05 \times 10^5$	0.3
防護 鋼板					

(3) 鋼製材料の非線形特性

a. 材料の応力-ひずみ関係

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

$$\sigma_{e_q} = (A + B \varepsilon_{p1}^n) \left\{ 1 + (\dot{\varepsilon}_{p1} / D)^{1/q} \right\}$$

ここで、 $\sigma_{e_q}$ は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 $\varepsilon_{p1}$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{p1}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。これらのパラメータを表 3-10 に示す。

表 3-10 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	防護鋼板	
材料	SS400	SS400	SM490
B	1420	2350	2590
n	1	1	1
D (s <sup>-1</sup> )	118000	120500	180000
q	6.0	6.0	4.9

材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型とする。

バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図を図 3-2 に示す。



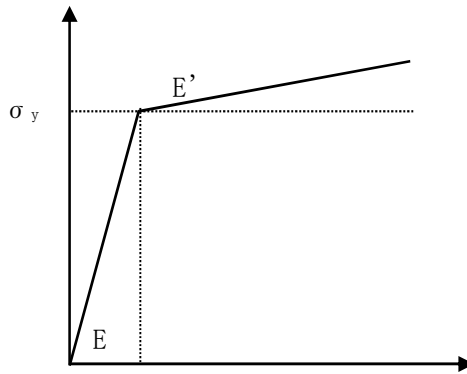


図 3-2 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

b. 破断ひずみ

破断ひずみは、JIS に規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、「NEI 07-13」においてTF（多軸性係数）を 2.0 とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF= 2.0 を考慮する。TFについては、防護鋼板のみ 2.0 とする。

鋼製材は、保守的に破断ひずみを超えても要素を削除せず、荷重を負担するものとする。防護鋼板の破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 防護鋼板の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	TF	破断ひずみ※
1				
2				

※：真ひずみ換算値

3.5.2 裏面取付鋼板ボルト評価

(1) 評価モデル

原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の、裏面取付鋼板ボルト評価における引張応力は、防護鋼板の受圧面積に対する風圧力及び設計飛来物の衝突荷重に対し、これを全て取付ボルトで受けるものとして計算する。

イ. 引張力

$$F_t = W_w + W_M$$

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bt} = F_{bt} / (N \cdot A_b)$$

ここで、

$$A_b = \pi \cdot d^2 / 4$$

また、地震荷重に対しては、以下のとおり評価する。

イ. 地震荷重

$$\text{水平方向： } F_H = 3 \times C_H \times m$$

$$\text{鉛直方向： } F_V = C_V \times m$$

ロ. 発生応力

$$\text{引 張： } \sigma_{bt} = F_H / (N \cdot A_b)$$

$$\text{せん断： } \sigma_{bs} = F_V / (N \cdot A_b)$$

4. 評価条件

「3.強度評価方法」に用いる評価条件を、表 4-1 から表 4-3 に示す。

表 4-2 風荷重の算出に用いる条件 (共通)

q (N/m <sup>2</sup> )	G (-)
6.1×10 <sup>3</sup>	1.0

表 4-2 風荷重の算出に用いる条件 (貫通評価, 変形評価)

C (-)	A (m <sup>2</sup> )		
1.2	貫通評価	ケース 1	1.06
		ケース 2	0.772
	変形評価	ケース 1	17.9
		ケース 2	3.70

表 4-3 裏面取付鋼板ボルトの評価条件

(原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板) (1/2)

C (-)	A (m <sup>2</sup> )	W <sub>M</sub> (kN)	ボルト サイズ	N (-)	A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )
0.8	3.73	4000	M24	40	452

開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の荷重W<sub>M</sub>は、貫通評価及び変形評価に用いた鋼板に作用する単位長さ当たりの荷重が、図 4-1 に示すとおり 4 辺の長さが大きくなるほど低下する傾向にあることを踏まえ、以下のとおり設定した。

- ・ 開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の固定端 4 辺の長さの合計 : 12.0 m
  - ・ 図 4-1 で、12.6 m より小さい最近ケースの単位長さ当たりの荷重 :  kN/m
- より、開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板に作用するW<sub>M</sub>は、

$$W_M = 12.0 \times \text{}$$

$$= \text{} \text{ kN}$$

となり、これを保守側に丸めて 4000 kN とした。

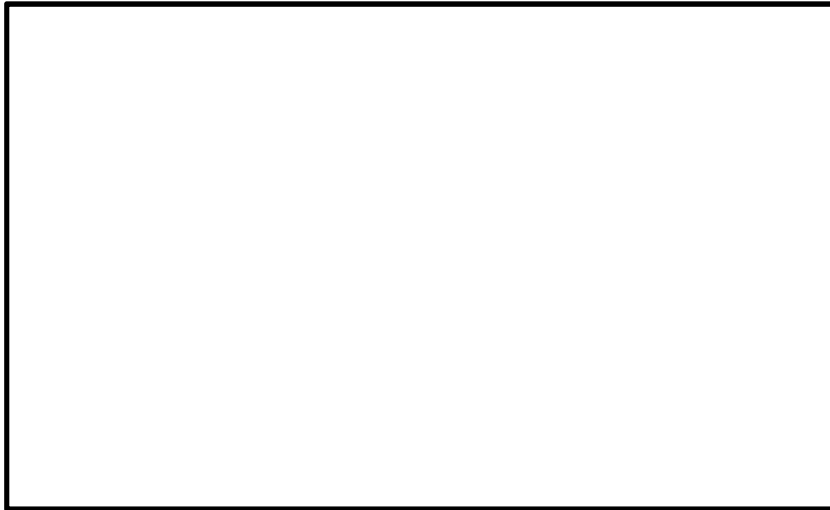


図 4-1 防護鋼板固定端に作用する荷重

また，地震荷重については表 4-4 のとおり。

表 4-4 裏面取付鋼板ボルトの耐震評価条件  
(原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板)

方向	震度 (-)	鋼板質量 (kg)	荷重 (kN)
水平	1.03	1247	38
鉛直	0.78		10

表 4-5 裏面取付鋼板ボルト評価に用いる条件  
(原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板)

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)	$S_U$ (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
取付ボルト						

5. 強度評価結果

(1) 貫通評価

防護鋼板の貫通評価結果を表 5-1 に示す。防護鋼板のひずみは許容限界を超えず，設計飛来物は防護鋼板を貫通しない。

表 5-1 貫通評価結果

ケース	ひずみ	
	評価結果	許容限界
1		
2		

(2) 変形評価

防護鋼板の変形評価結果を表 5-2 に示す。衝突方向変位量は許容限界を超えず，防護鋼板が防護対象施設に接触することはない。

表 5-2 変形評価結果

ケース	衝突方向変位量	
	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
1		
2		

(3) 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価の結果を表 5-3 に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず，防護鋼板が脱落することはない。

表 5-3 裏面取付鋼板ボルト評価結果 (竜巻)

衝突方向変位量	
発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )	許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )

また、地震に対する評価結果を表 5-4 に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず、防護鋼板が脱落することはない。

表 5-3 裏面取付鋼板ボルト評価結果（地震）

応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	85	243
せん断	23	187
組合せ	85	211