

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 32
提出年月日	平成 30 年 7 月 13 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 主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口の強度計算書
 - 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 1-2-1-2 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	62
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**外部事象**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、**外部事象**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。

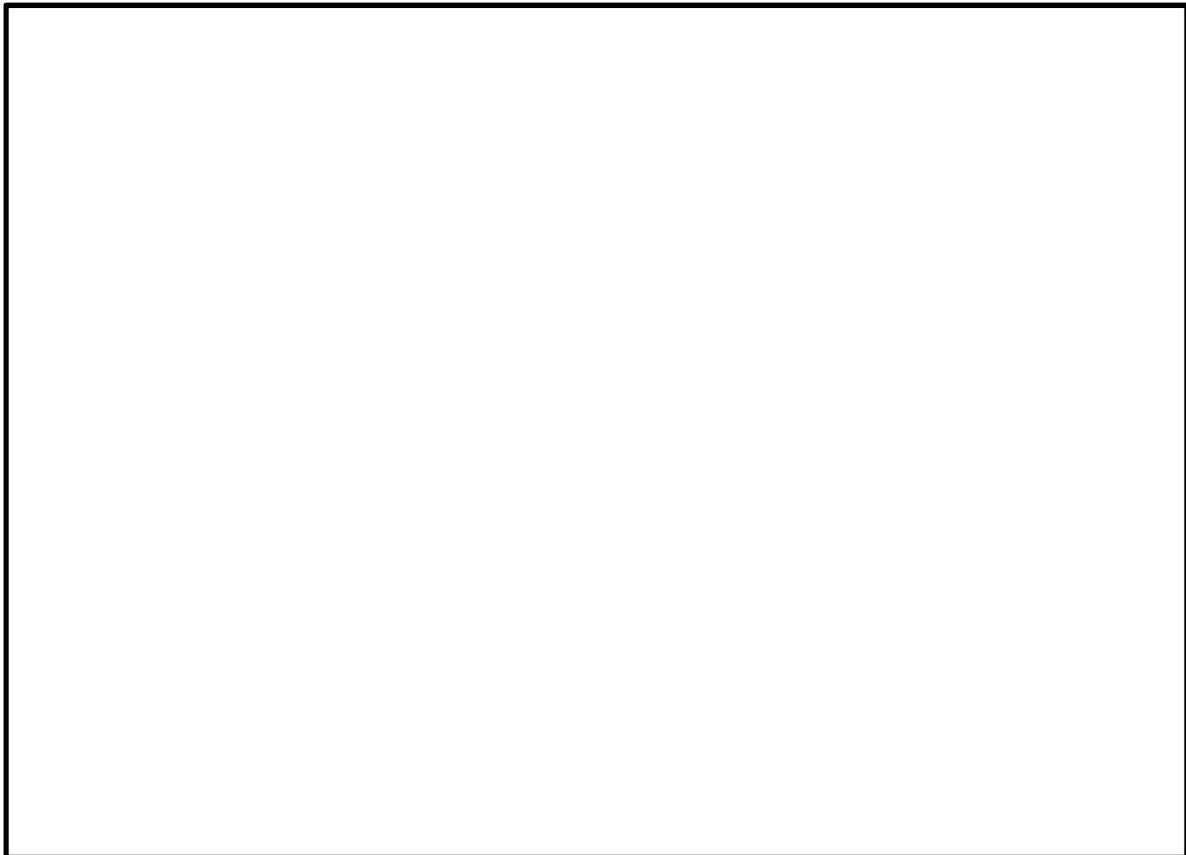


図 2-1 防護鋼板の設置位置図

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。

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、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設、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は、鋼板で構成する鋼製構造物である。

(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。

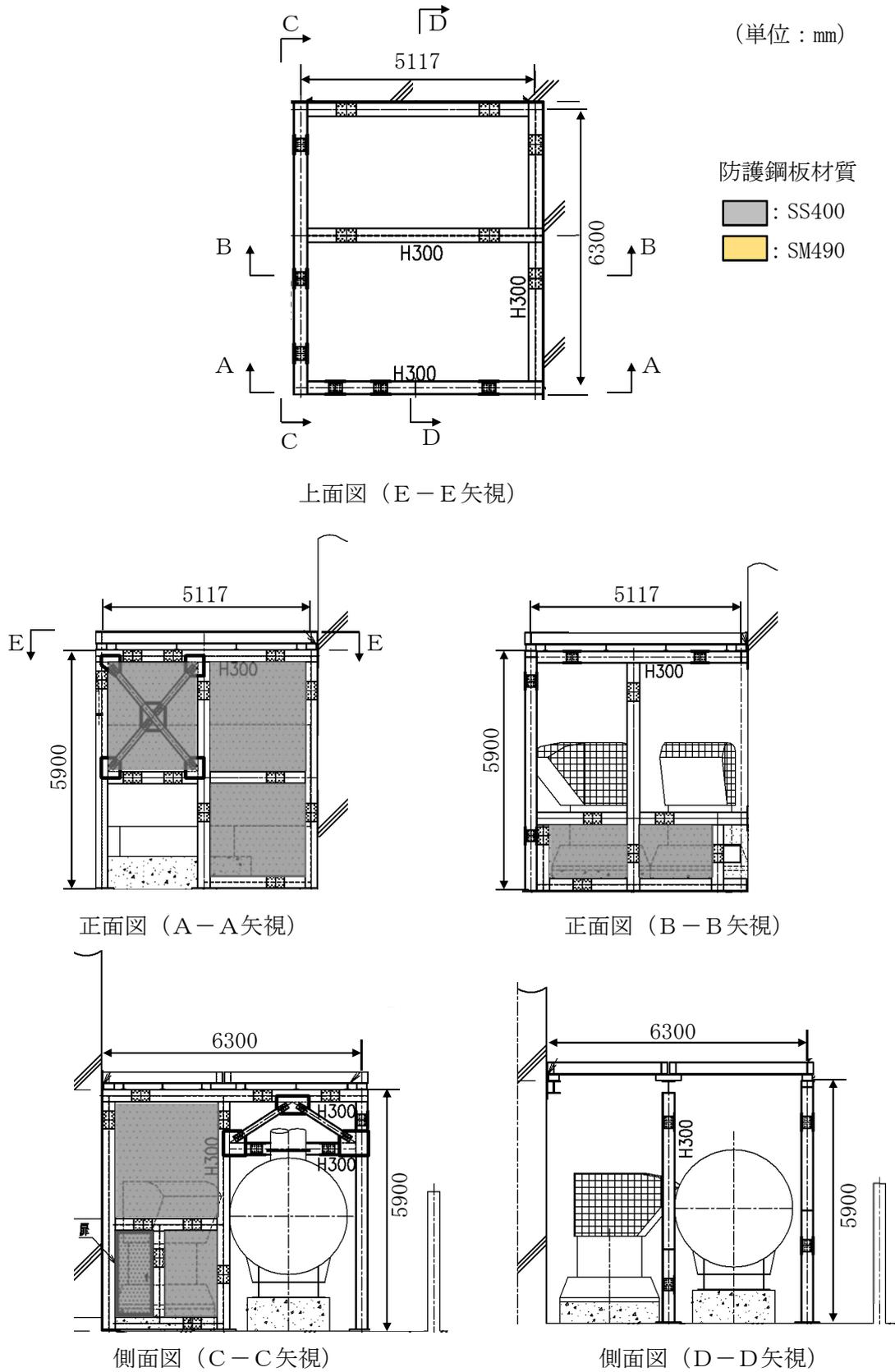


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(1/4)
 (2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

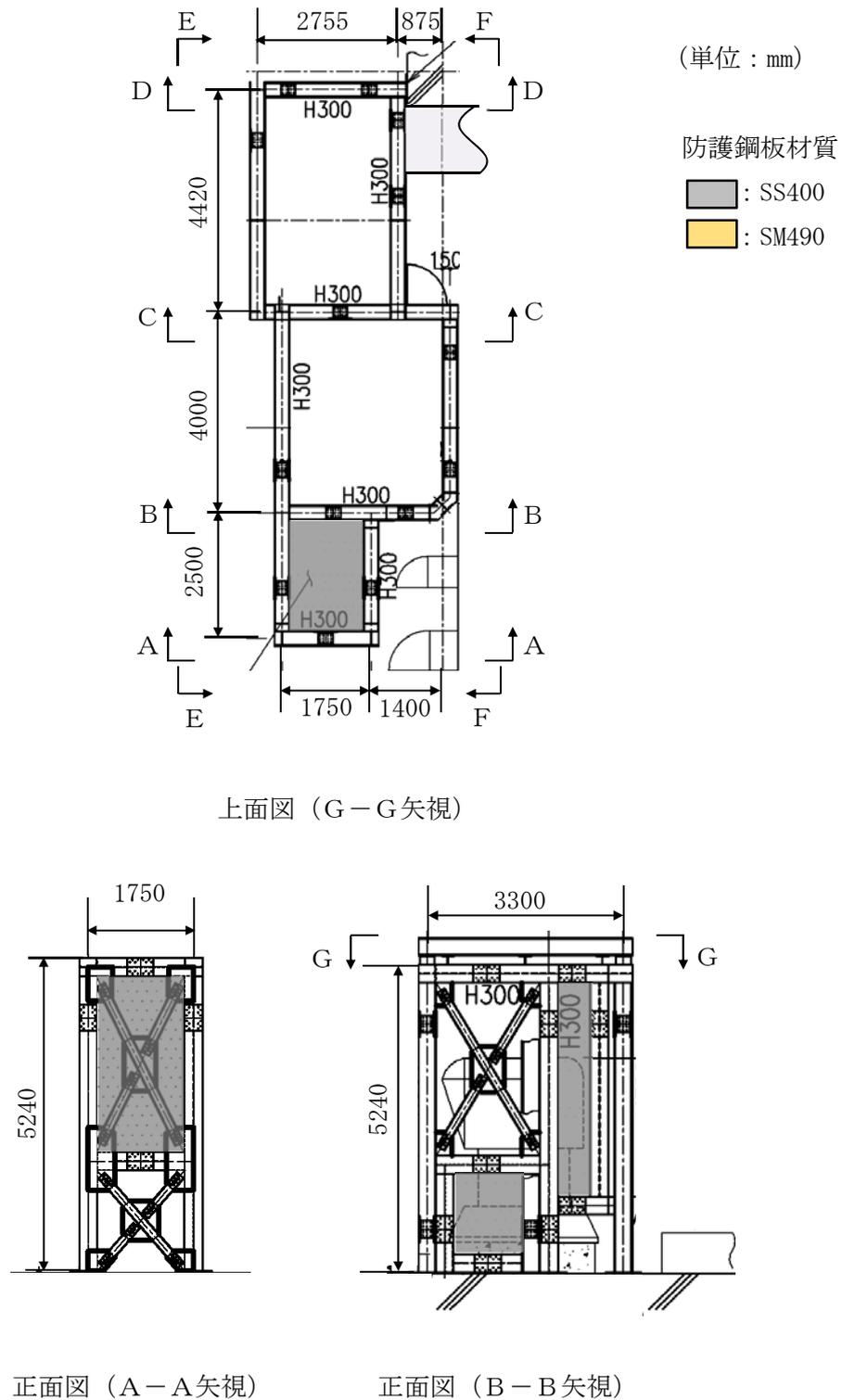


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))

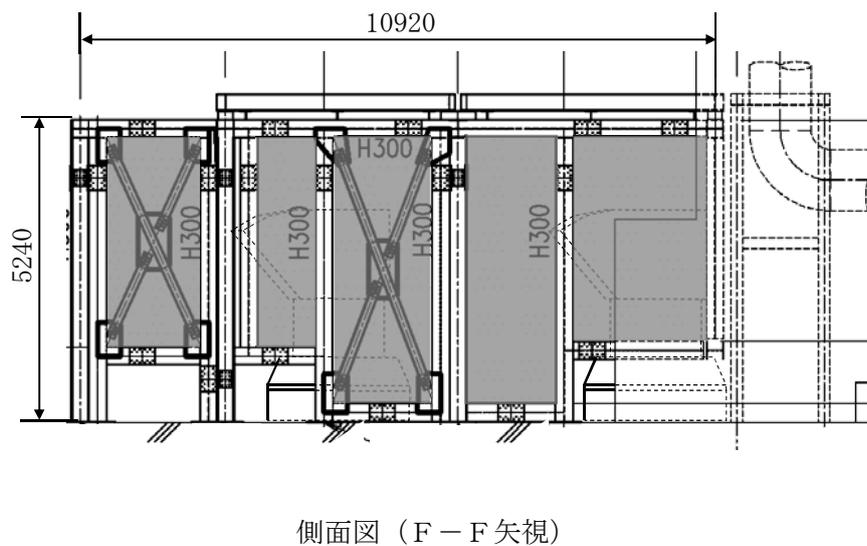
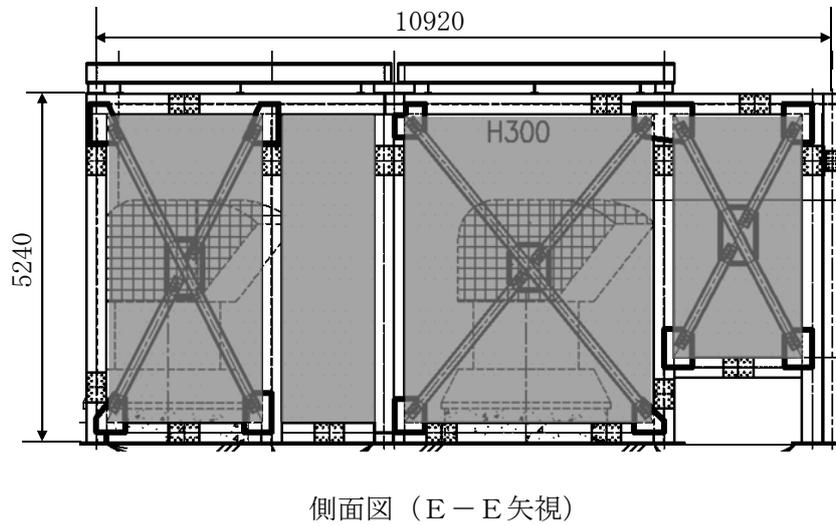
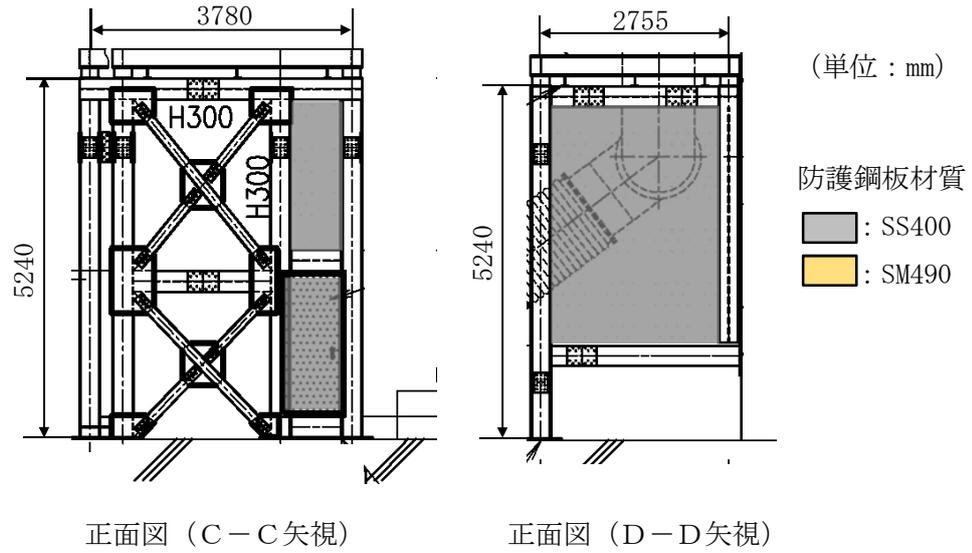


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン防護対策施設防護鋼板の構造図(3/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

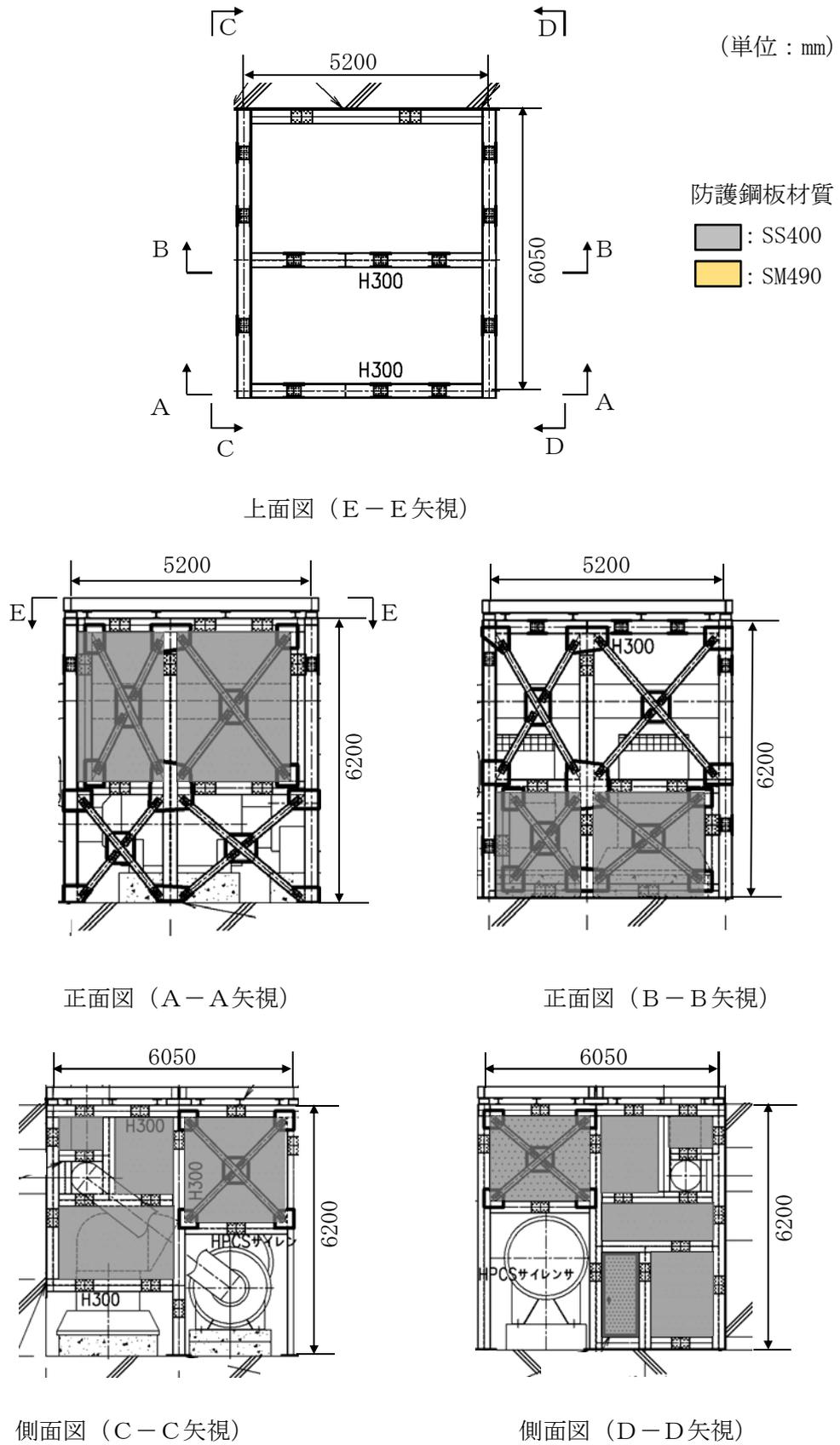


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン防護対策施設防護鋼板の構造図(4/4)
 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

(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。

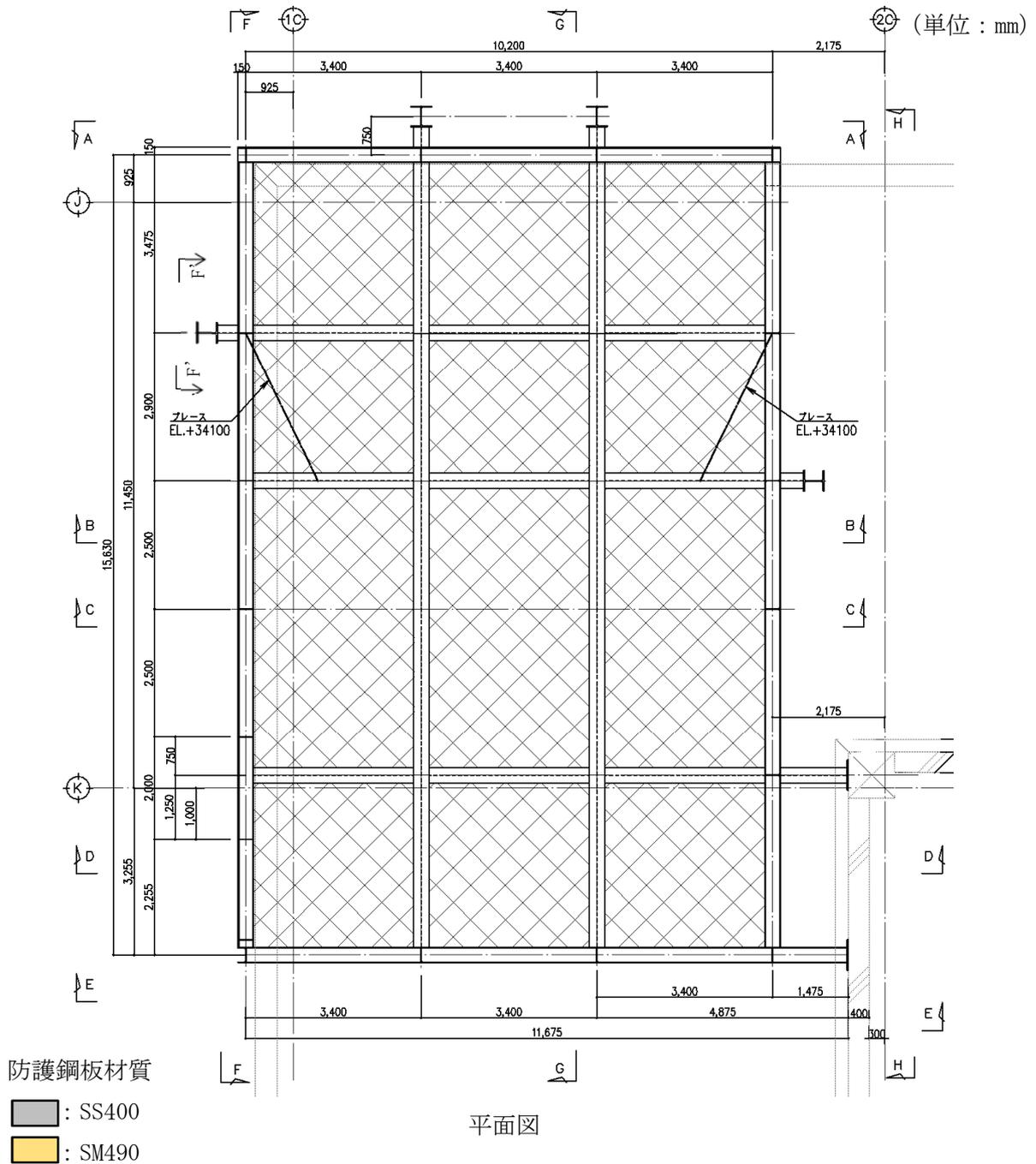
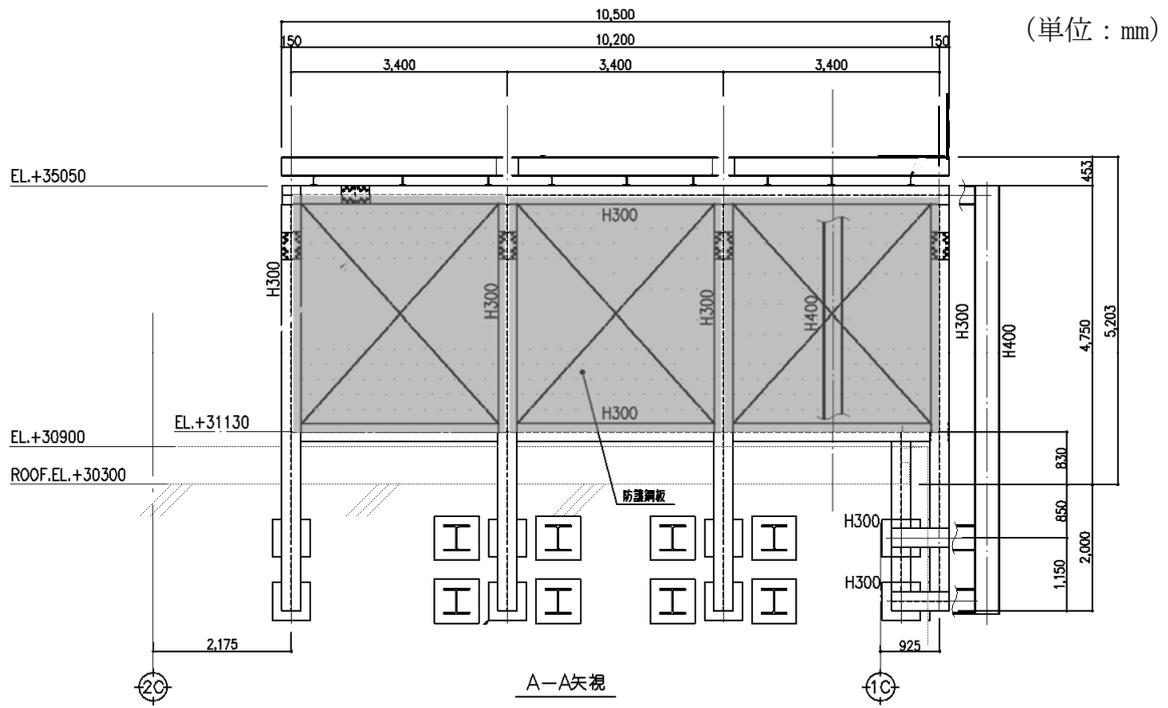


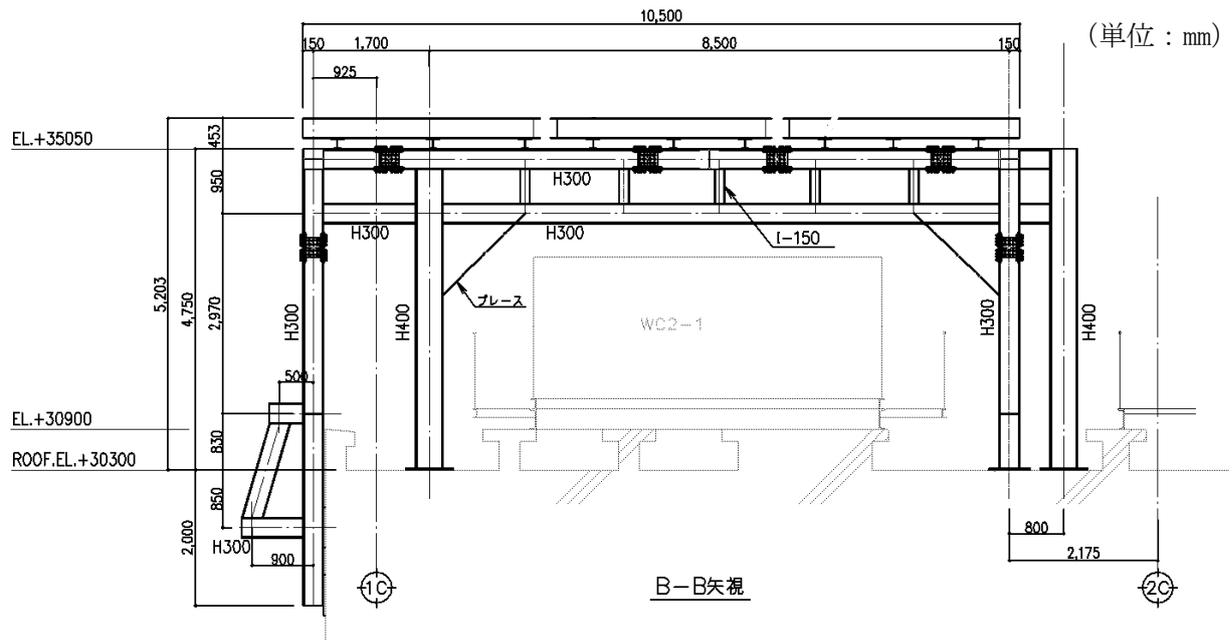
図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(1/6)



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

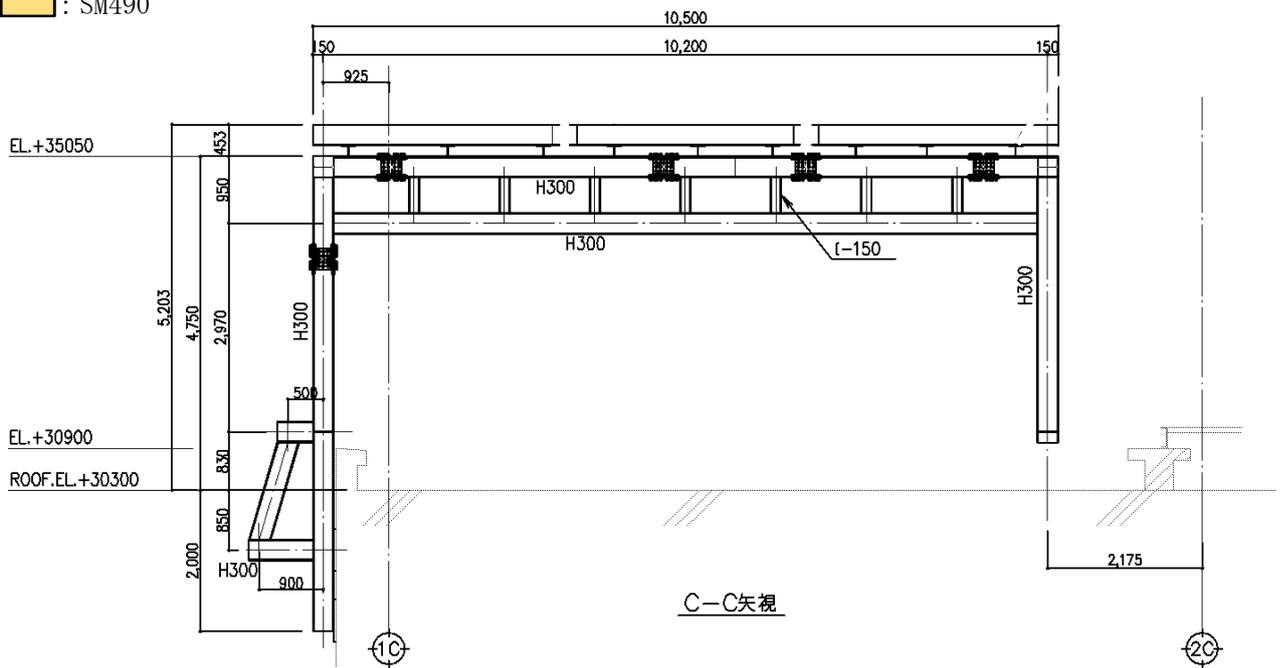
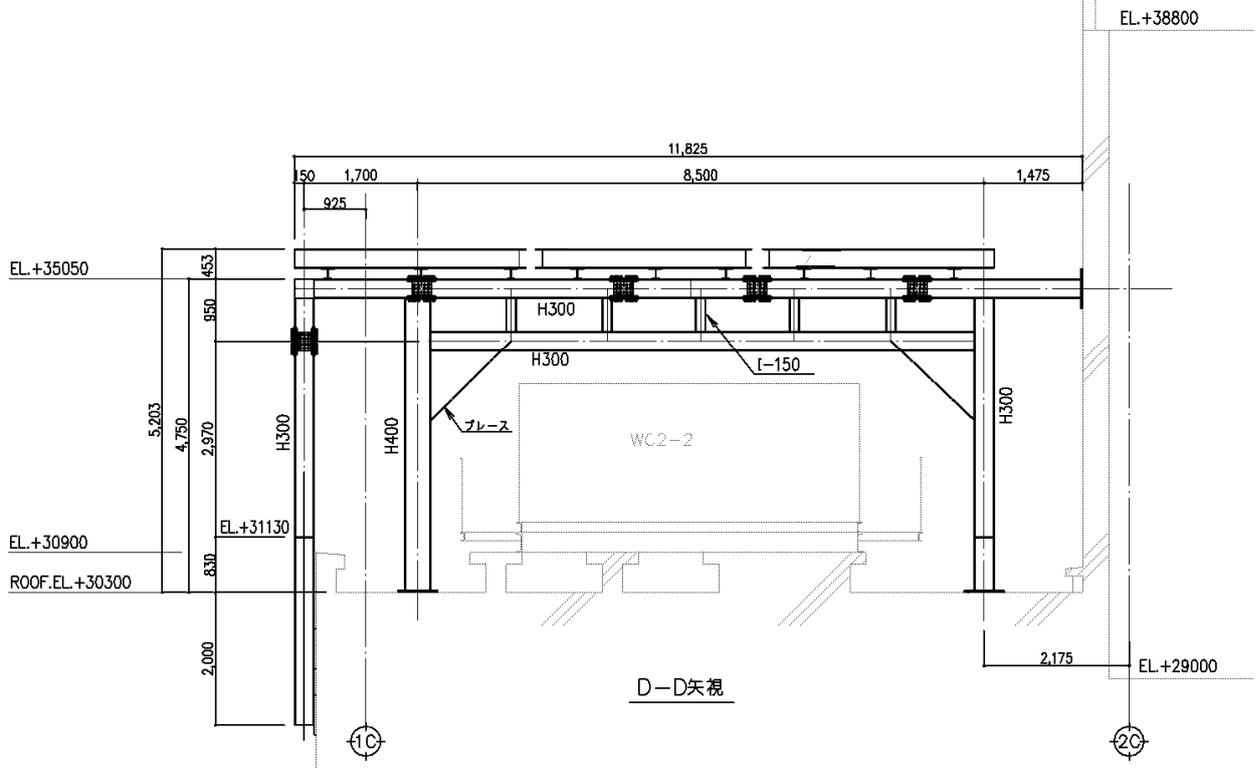


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(3/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質

- : SS400
- : SM490

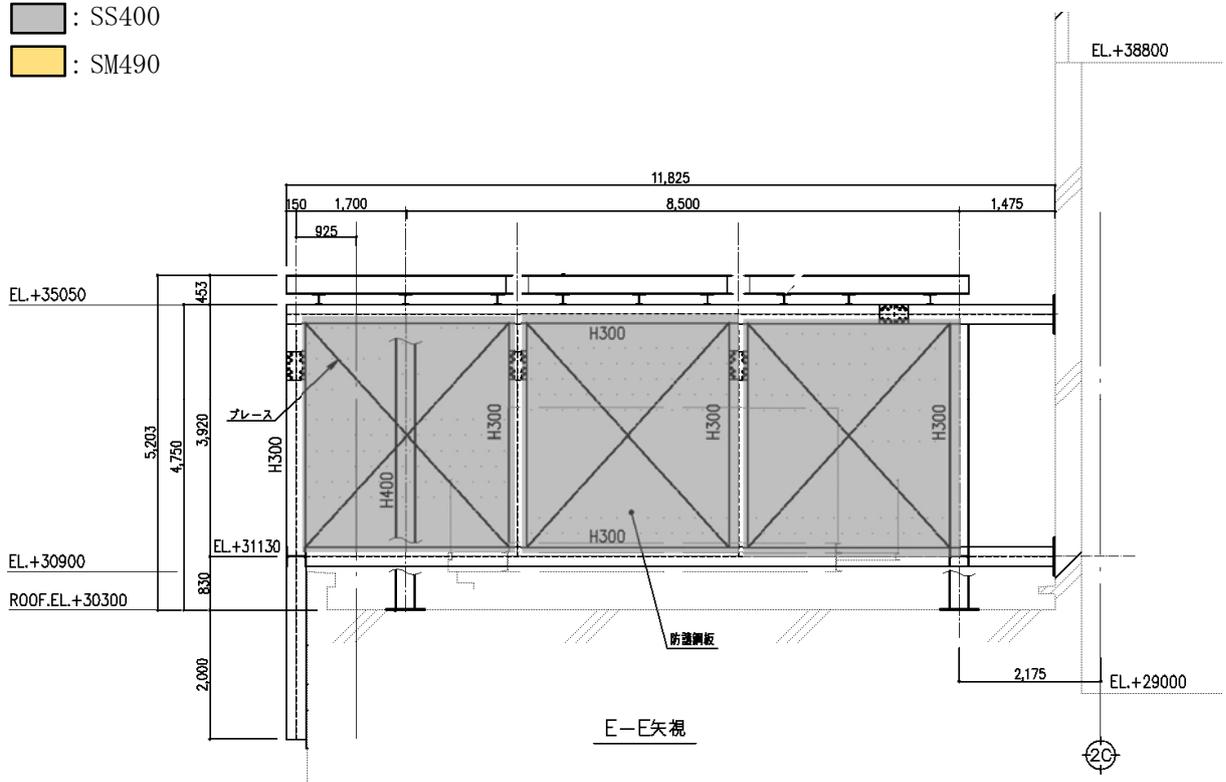
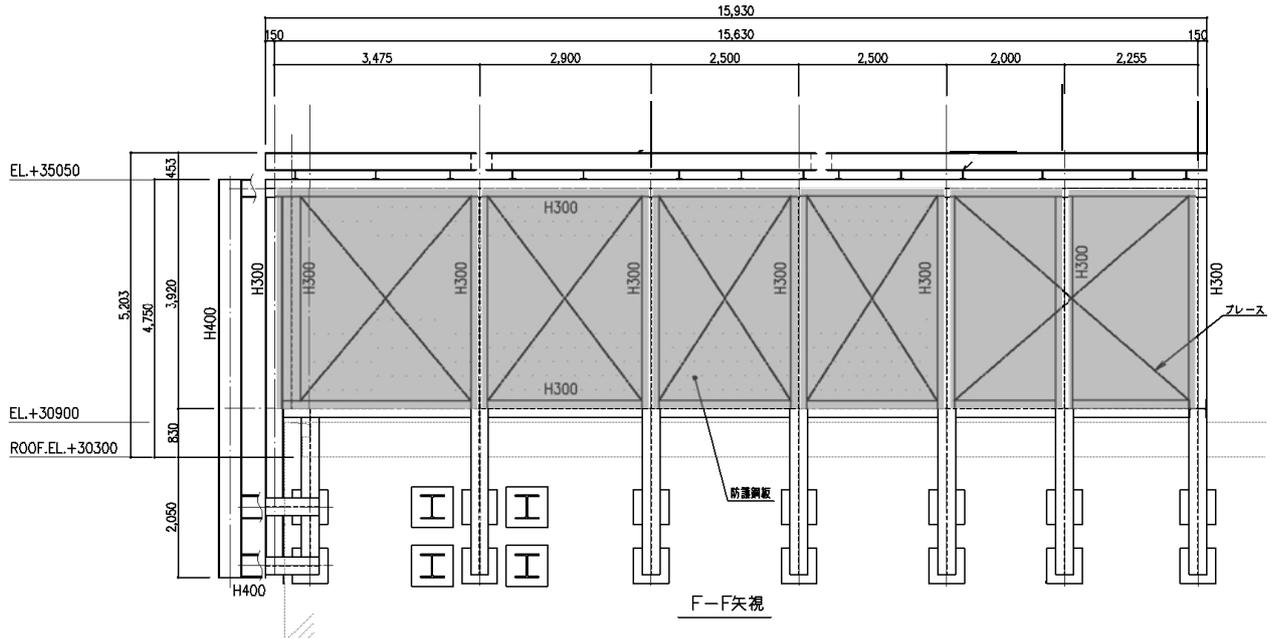


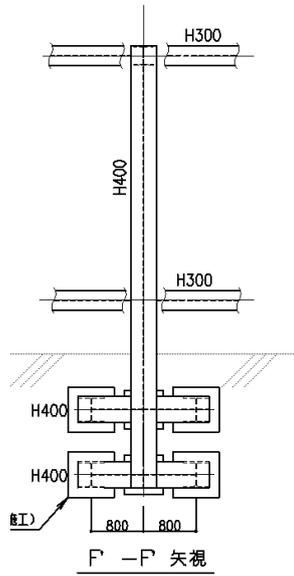
図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(4/6)

(単位：mm)



防護鋼板材質

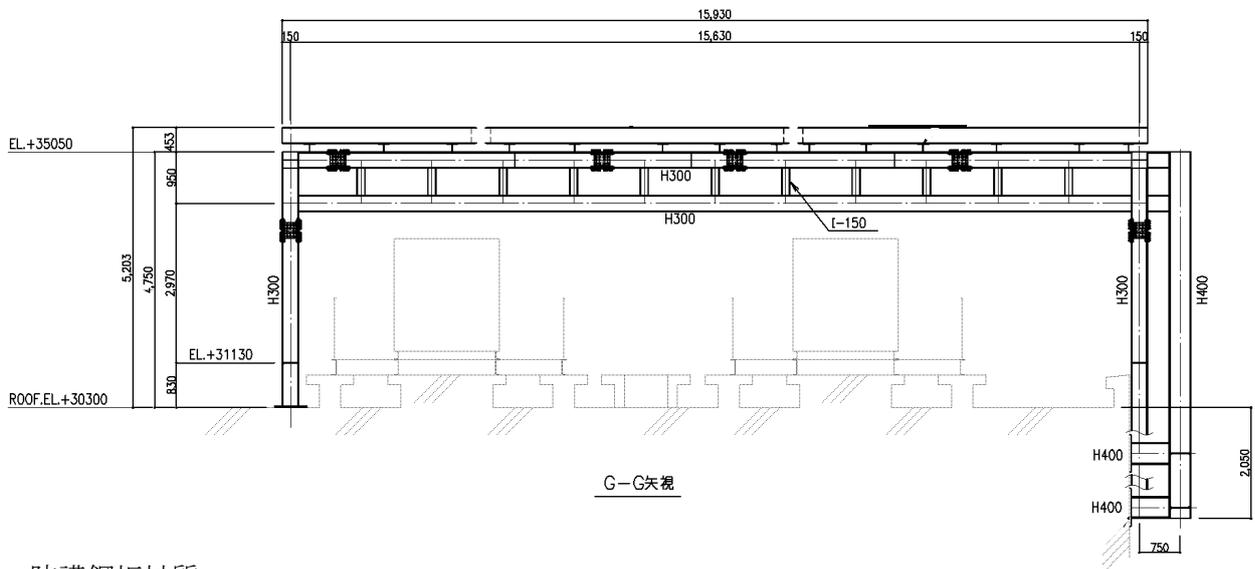
- : SS400
- : SM490



NT2 補② V-3-別添 1-2-1-2 R6

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)



防護鋼板材質

■ : SS400

■ : SM490

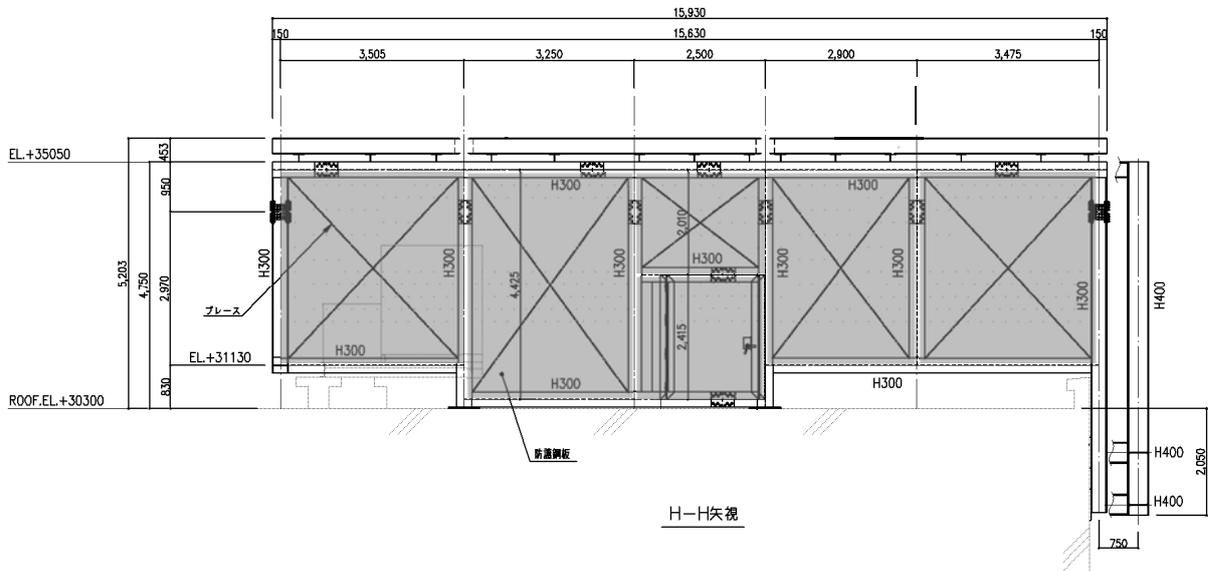
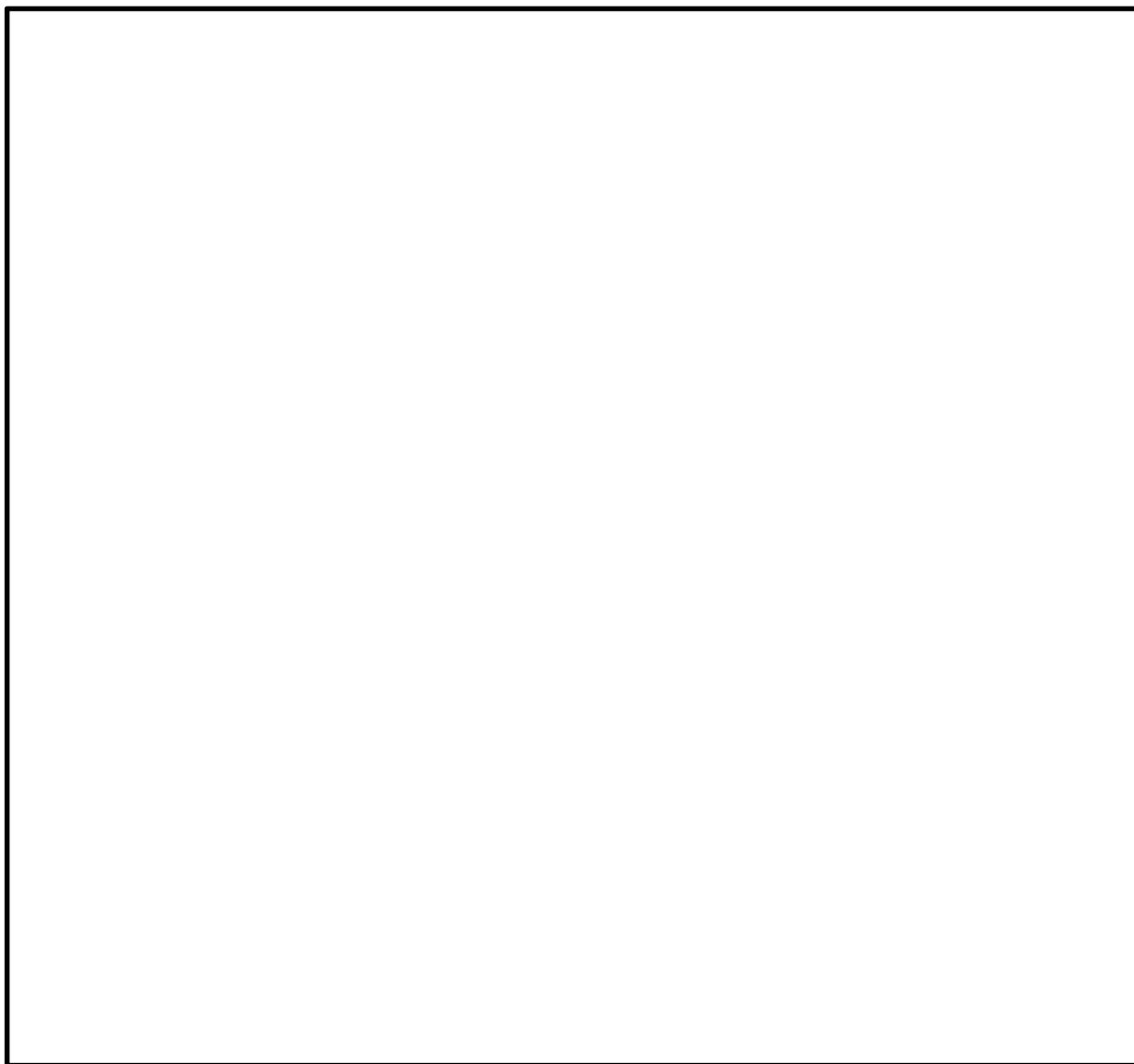


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図(6/6)

(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。



側面図 (A-A 矢視)

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)

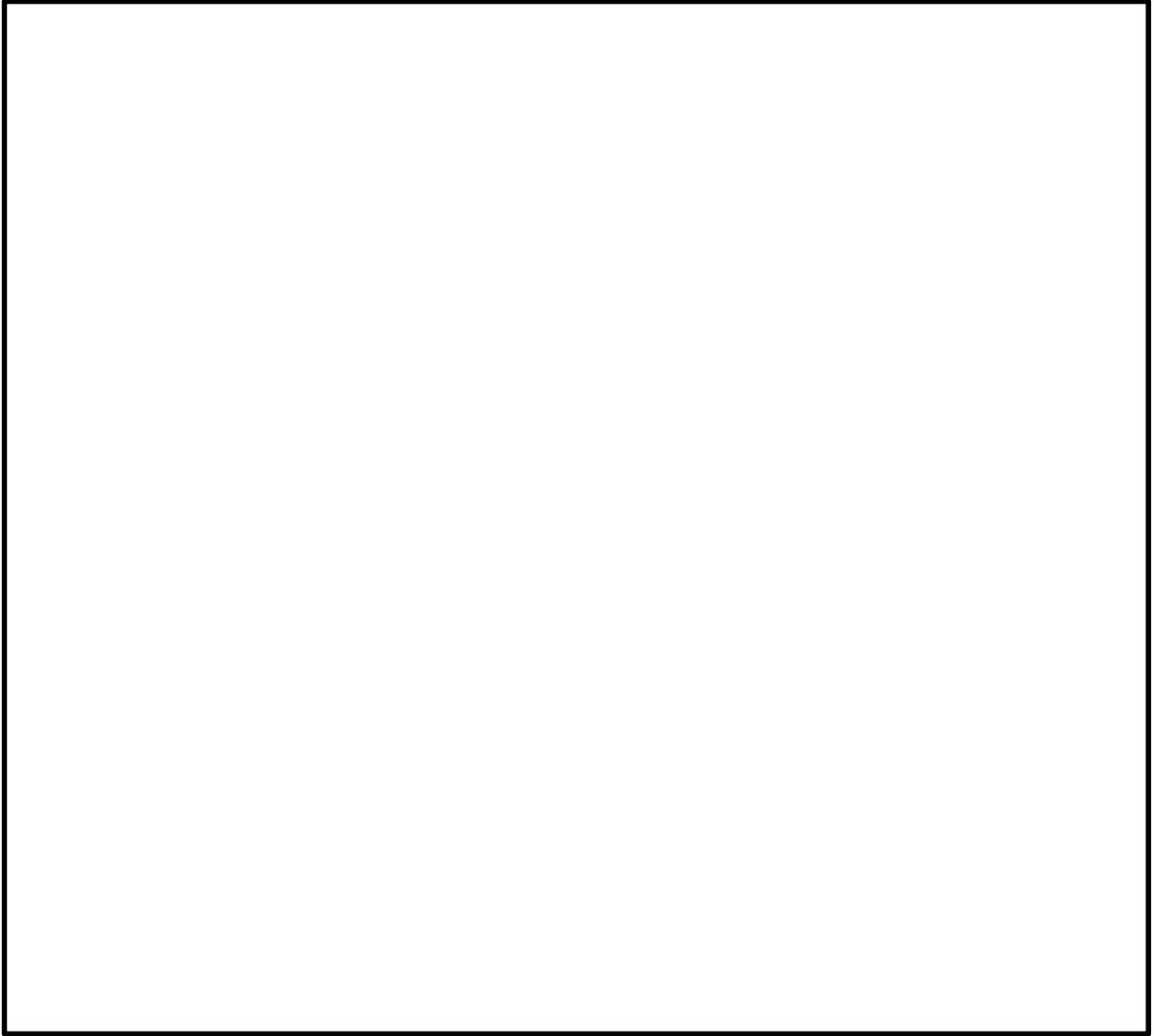
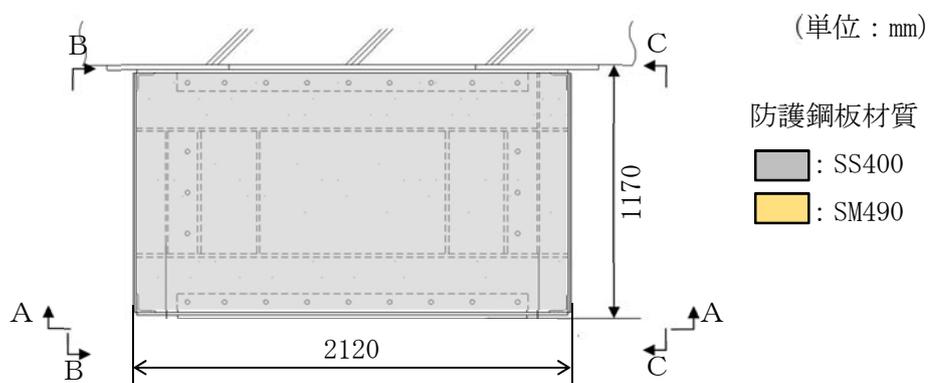


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図 (2/2)

(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皮となる。

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。



防護鋼板材質

■ : SS400

■ : SM490

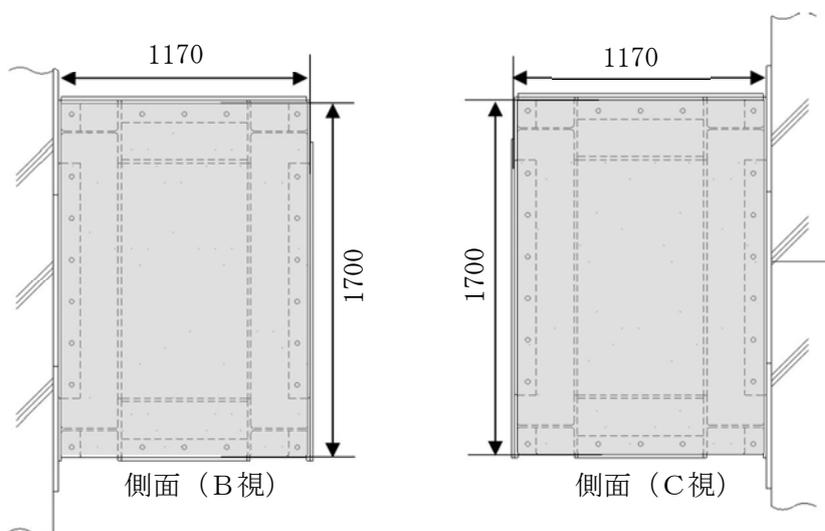
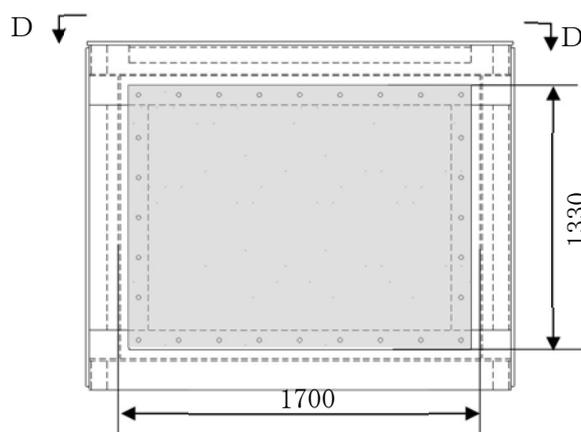


図 2-5 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(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。

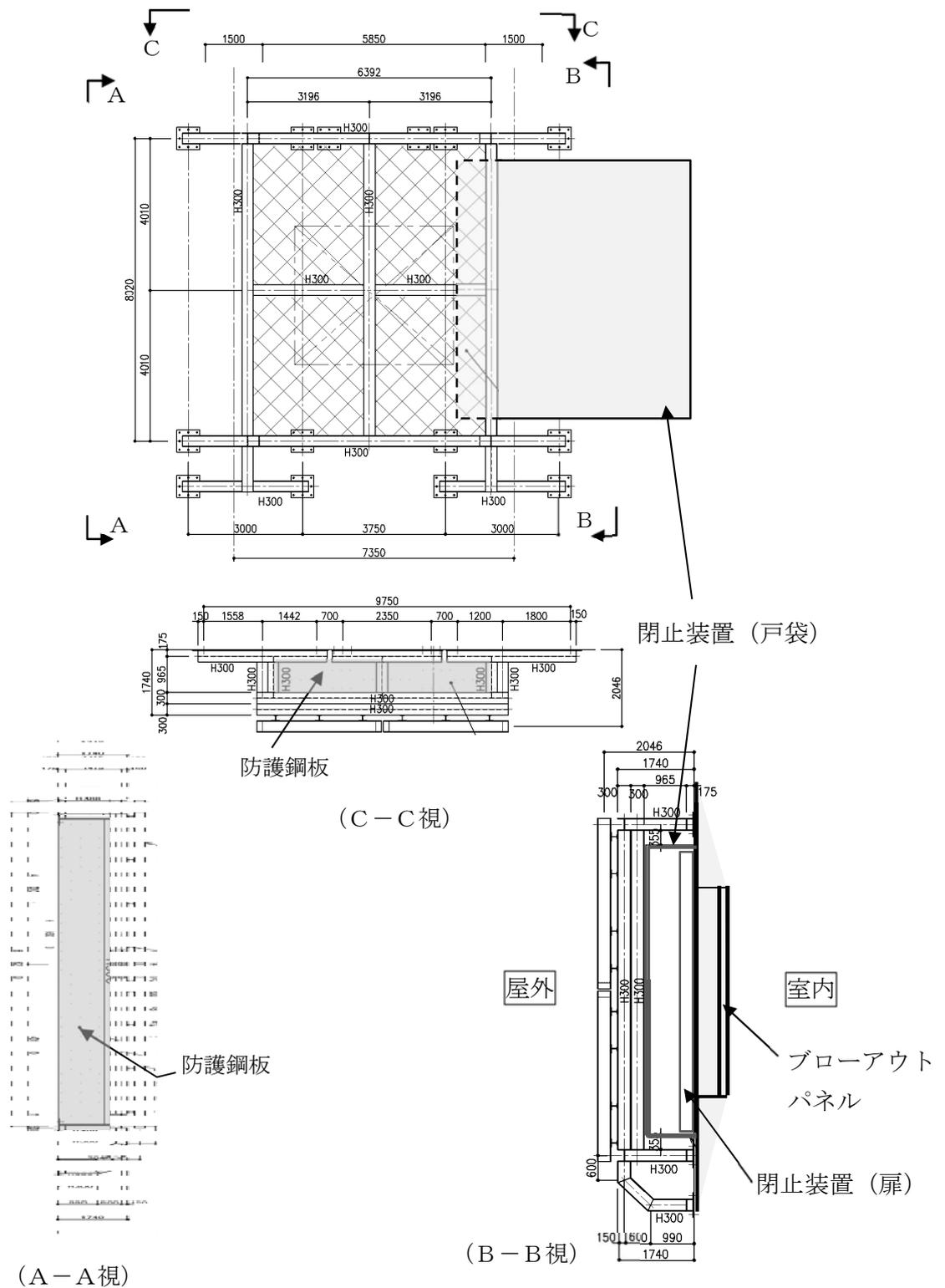
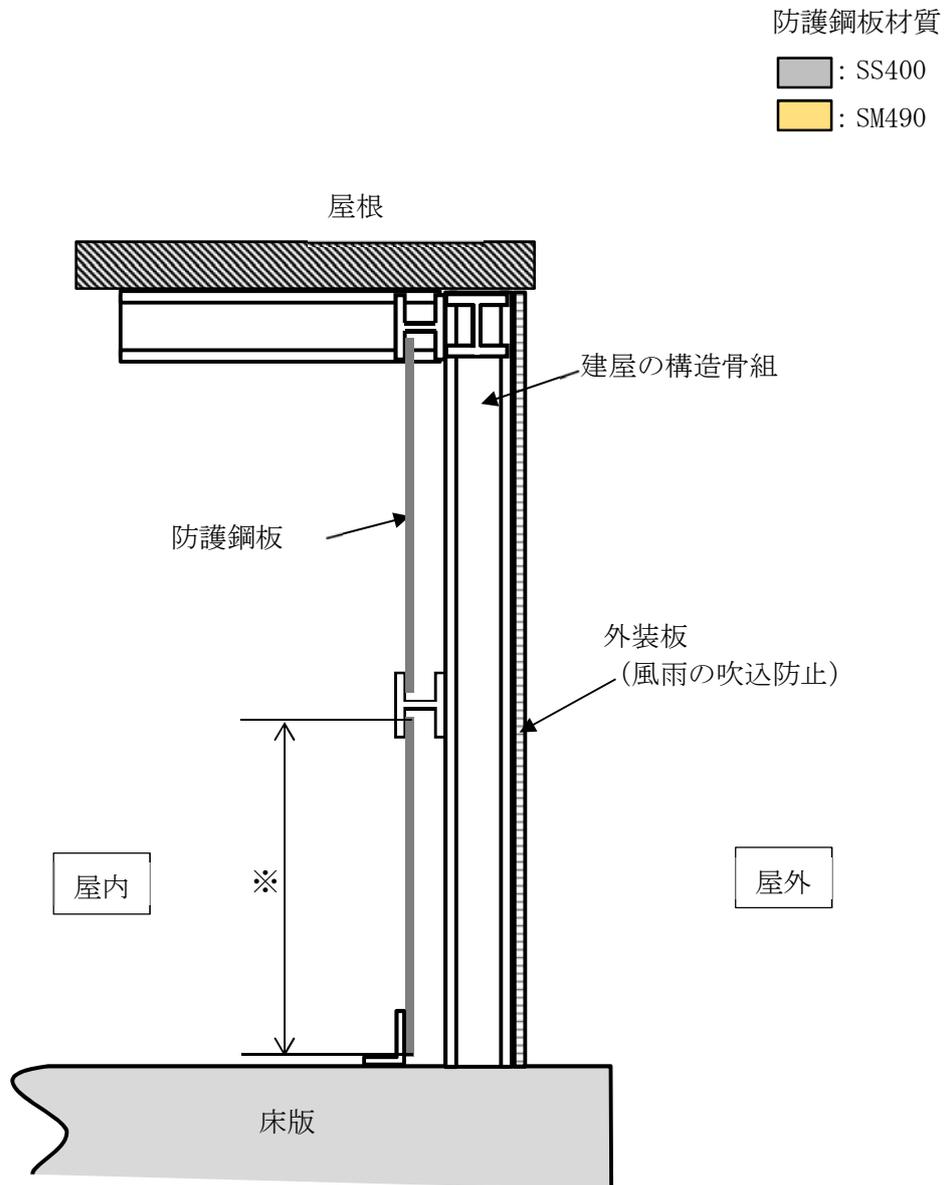


図 2-6 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

(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最小寸法以上

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。

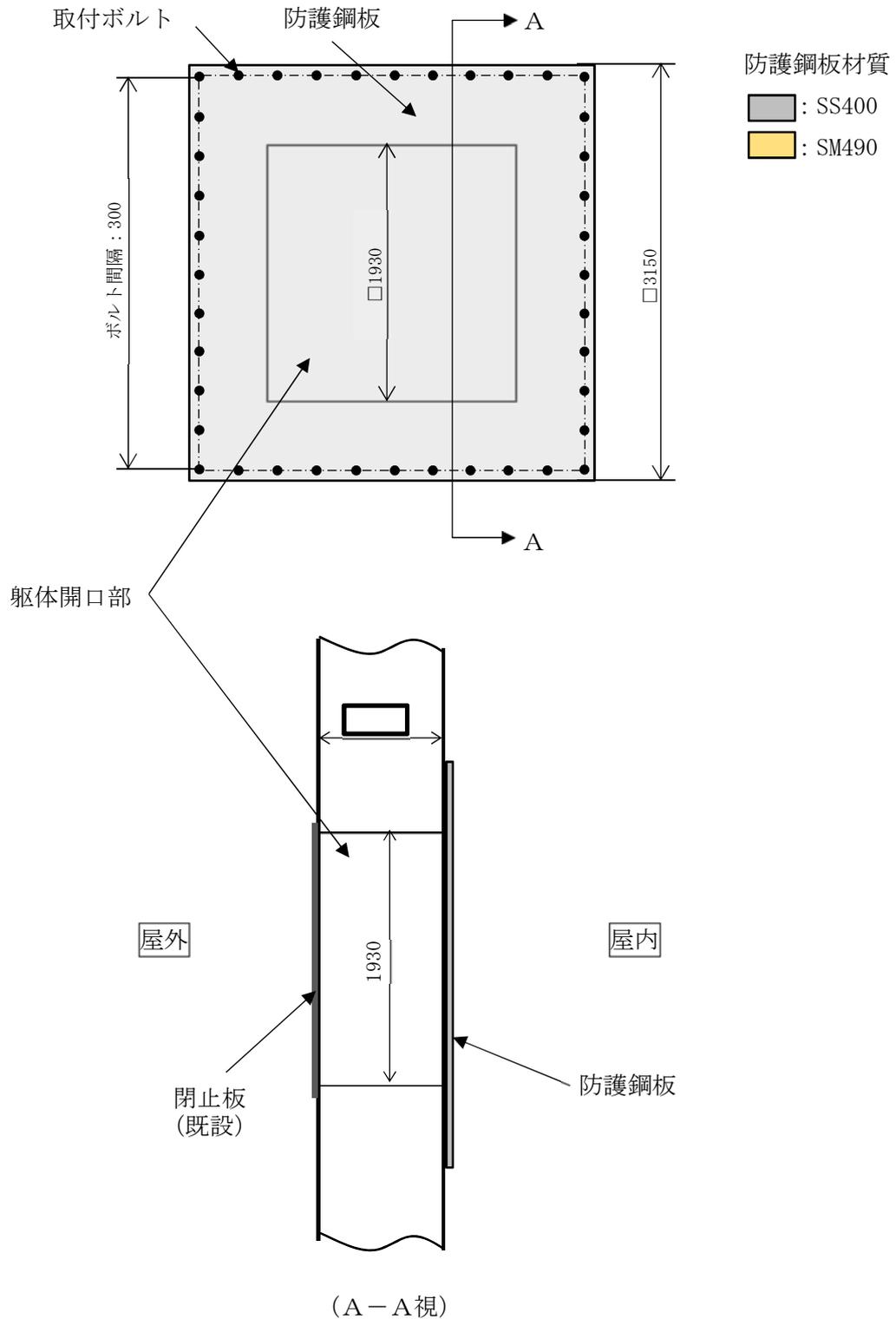


図 2-8 原子炉建屋付属棟開口閉鎖部竜巻防護対策施設防護鋼板の構造図

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。

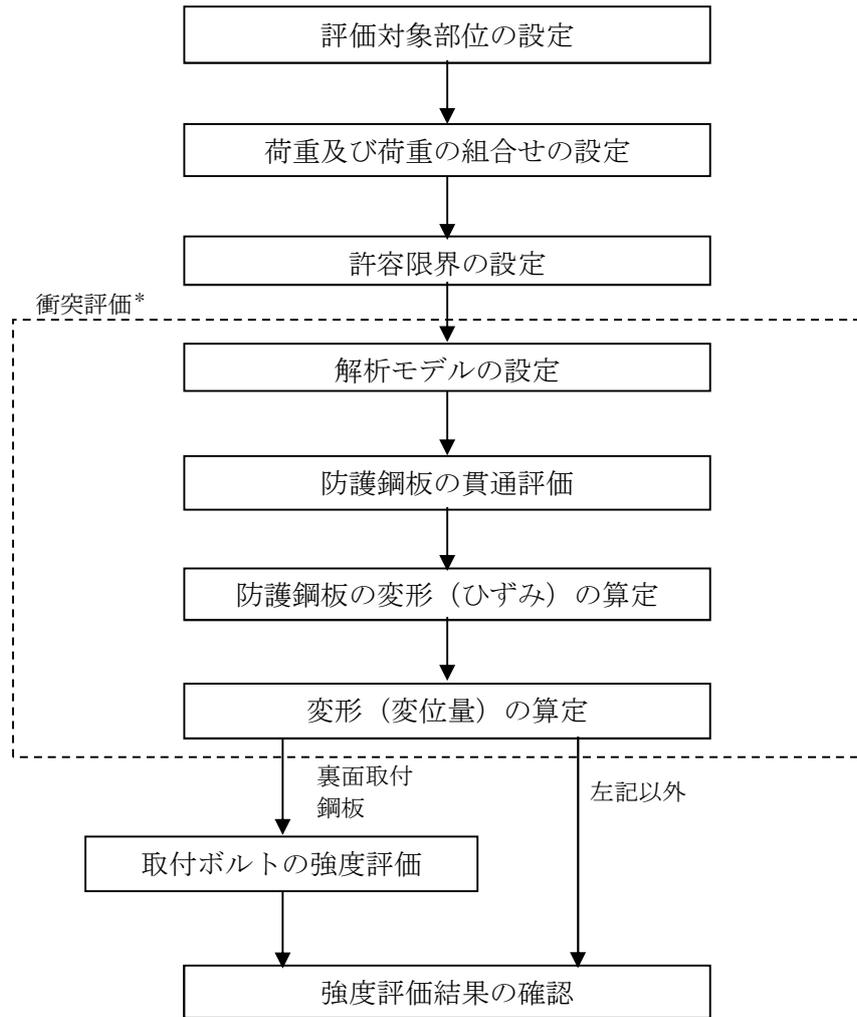
具体的には、飛来物が**外部事象**防護対象施設に衝突する直接的な影響の評価として、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板に対する衝突評価を実施する。

衝突評価においては、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**外部事象**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及び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)
- 「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)

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 ²	防護鋼板の受圧面積
C	—	防護鋼板の風力係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ΔP _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度
F _t	N	取付ボルトに対し作用する引張力
A _b	mm ²	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 _b	N/mm ²	取付ボルト 1 本当たりの引張応力
τ _b	N/mm ²	取付ボルト 1 本当たりのせん断応力

3.2 評価対象部位

3.2.1 衝突評価

衝突評価として、「2.3 評価方針」に示すとおり、防護対策施設の外殻を構成する防護鋼板を対象とする。

(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	827×933		SM490	

(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		SM490
2	1850×2000		SM490

3.2.1 裏面取付鋼板ボルト評価

裏面取付鋼板ボルト評価として、「2.3 評価方針」に示すとおり、ボルトにて設計荷重を全て受け止める構造となる、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の取付ボルト及び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取付ボルトを対象とする。

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 ΔP_{max} (N/m ²)
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。なお、防護対策施設は外殻に面する部材に気圧差は生じないことから、気圧差による荷重は考慮しない。

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/m²）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/m²）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、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

(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	SM490	[Redacted]

(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外部事象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	SM490 (3800×4712)	[Redacted]
2	SM490 (1850×2000)	[Redacted]

(3) 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_AS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 _A S	一次応力	引張	$1.5 f_t$
		せん断※	$1.5 f_s$
		組合せ※	$\text{Min} \{1.5 f_t, (1.4 \times 1.5 f_t - 1.6 \tau)\}$ (τ : ボルトに発生するせん断応力)

※一方の荷重が卓越する場合は評価しない

具体的な許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 裏面取付鋼板ボルトの許容限界 (1/2)

(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	SM490	40	325	490	243	187

表 3-10 裏面取付鋼板ボルトの許容限界 (2/2)

(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)

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						

追而

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。

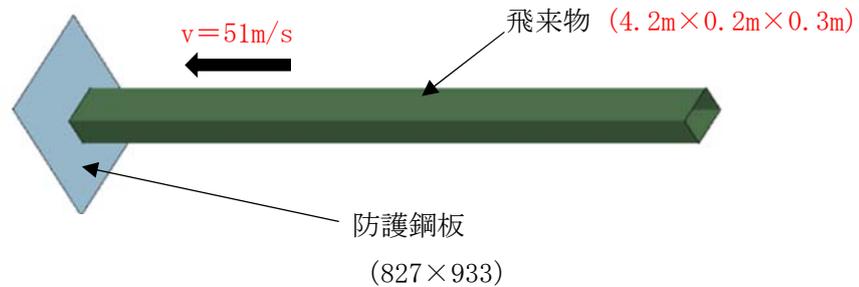


図 3-1 防護鋼板及び飛来物の解析モデル図

(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 3-11 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 3-11 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_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	2.05×10^5	0.3
防護 鋼板	SM490			2.05×10^5	0.3

(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。

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

ここで、 $\sigma_{e,q}$ は動的応力、A は降伏応力、B は硬化係数、 ε_{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 3-12 に示す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式 (WES 式) にフィッティングする様に選定した。

表 3-12 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	SM490
B		
n		
$D (s^{-1})$		
q		

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。

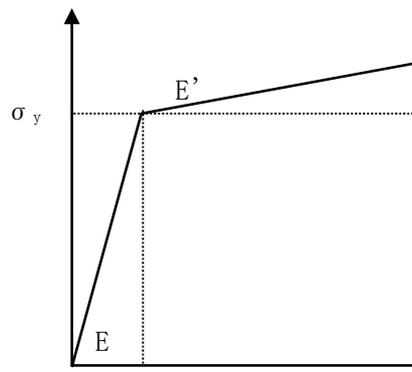


図 3-2 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

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 3-13 に示す。

表 3-13 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	SM490		2.0	

※：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

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

$$\text{鉛直方向} : F_V = C_V \cdot m$$

ロ. 発生応力

$$\text{引張} : \sigma_b = F_H / (N \cdot A_b)$$

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

また、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取付ボルトに対しても、地震荷重に対し以下のとおり評価する。

鋼板の単位幅当たりの地震荷重

$$\text{水平方向} : F_H = C_H \cdot m'$$

$$\text{鉛直方向} : F_V = C_V \cdot m'$$

C_H : 水平方向震度

C_V : 鉛直方向震度

m' : 鋼板の単位幅当たりの重量

取付ボルトの発生応力

$$\text{引張} : \sigma_b = F_H / (N' \cdot A_b)$$

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

N' : 鋼板の単位幅当たりの取付ボルト本数

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。

表 4-1 風荷重の算出に用いる条件（共通）

q (N/m ²)	G (-)
6.1×10 ³	1.0

防護鋼板の貫通評価及び変形評価における風荷重の算出条件を、表 4-2 に示す。

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 ²)		
1.2	貫通評価	ケース 1	0.772
	変形評価	ケース 1	17.9
		ケース 2	3.70

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取付ボルトの竜巻評価の条件を、表 4-3 に示す。

表 4-3 裏面取付鋼板ボルトの評価条件（竜巻）

（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）

C (-)	A (m ²)	W _w (kN)	W _M (kN)	ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
0.8	3.73	34	4000	M24	40	452

ここで、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荷重W_Mは、貫通評価及び変形評価に用いた鋼板及び別途衝突解析を実施し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データを基に、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_M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。

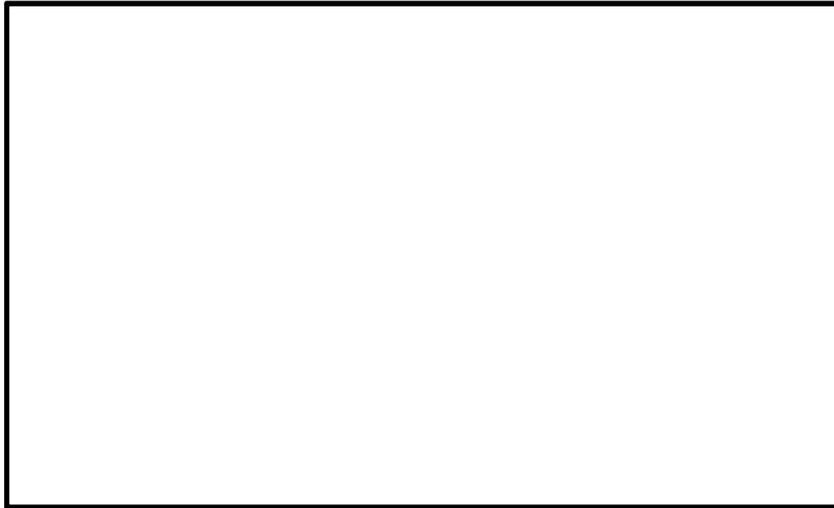


図 4-1 防護鋼板固定端に作用する荷重

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作用する耐震評価の条件については、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（地震）
（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	13
鉛直	0.78		10

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取付ボルトの耐震評価の条件については、表 4-5 のとおり。

表 4-5 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耐震評価条件

方向	震度 (-)	鋼板質量 (kg/m)	地震荷重 (kN/m)	ボルト径	N' (1/m)	A _b (mm ²)
水平	追而					
鉛直						

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	0.044	

(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，防護鋼板が外部事象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	追而	
2	79	

(3) 裏面取付鋼板ボルト評価

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取付ボルト評価の結果を表 5-3 及び表 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，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）

(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)

発生応力 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)
	243

表 5-4 裏面取付鋼板ボルト評価結果（地震）

(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)

応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	29	243
せん断	23	187
組合せ	29	243

また、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取付ボルト評価の結果を表5-5に示す。取付ボルトに発生する応力は許容限界を超えず、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が脱落することはない。

表 5-5 裏面取付鋼板ボルト評価結果（地震）
（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）

応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	追而	追而
せん断		
組合せ		

V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

目次

1. 概	要
.....	1
2. 基	針
.....	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	19
2.4 適用規格	21
3. 強度評価方法	22
3.1 記号の定義	22
3.2 評価対象部位	22
3.3 荷重及び荷重の組合せ	23
3.4 許容限界	24
3.5 評価方法	26
4. 評価条件	37
5. 強度評価結果	41
5.1 貫通評価	41
5.2 支持機能評価	41

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、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の架構が、設置（変更）許可申請書に示す設計飛来物（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外部事象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、外部事象防護対象施設の安全機能維持を考慮して、架構の主要な構造部材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、架構の「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

架構は、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）、海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。

架構の設置位置図を図 2-1 に示す。

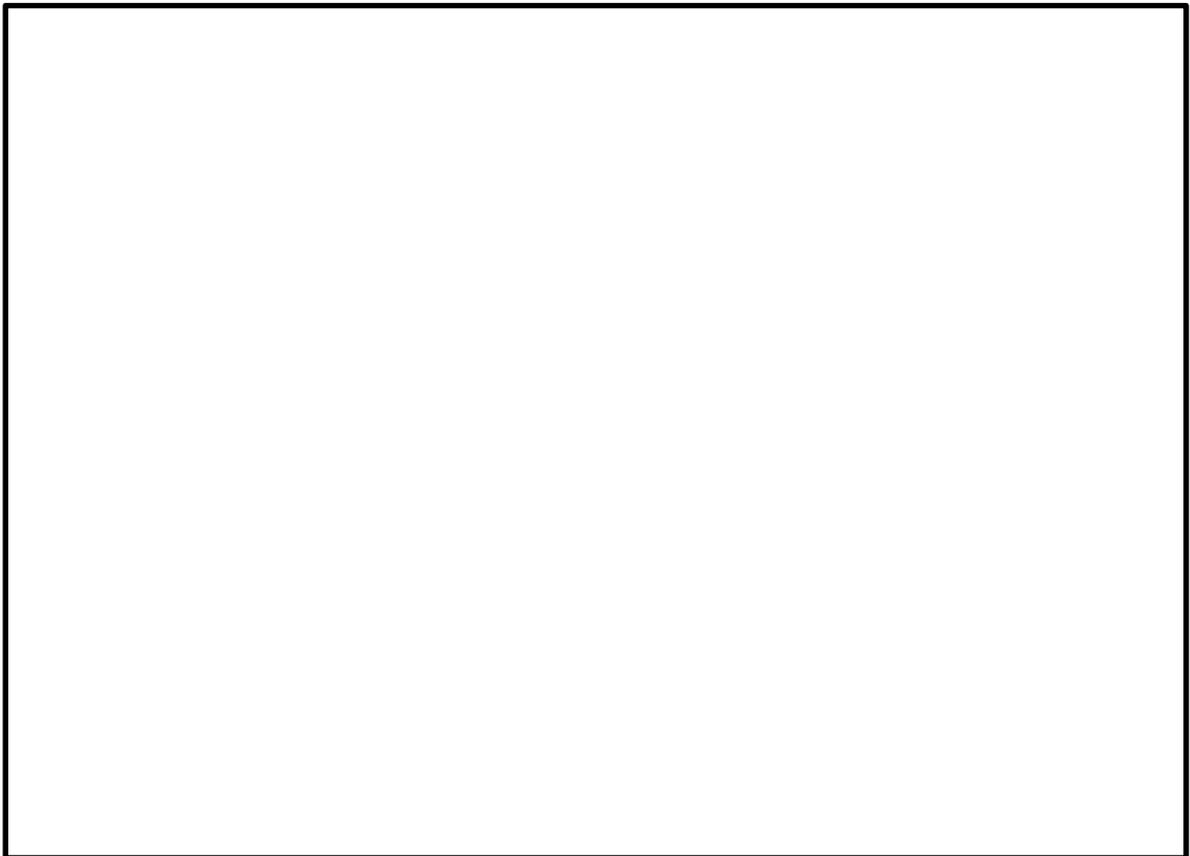


図 2-1 架構の設置位置図

2.2 構造概要

架構の構造は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.3 架構の構造設計」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架構

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の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、外部事象防護対象施設であるディーゼル発電機室ルーフベントファンを内包する施設として、柱、はり等により構成される。

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架構の構造を図 2-2 に示す。

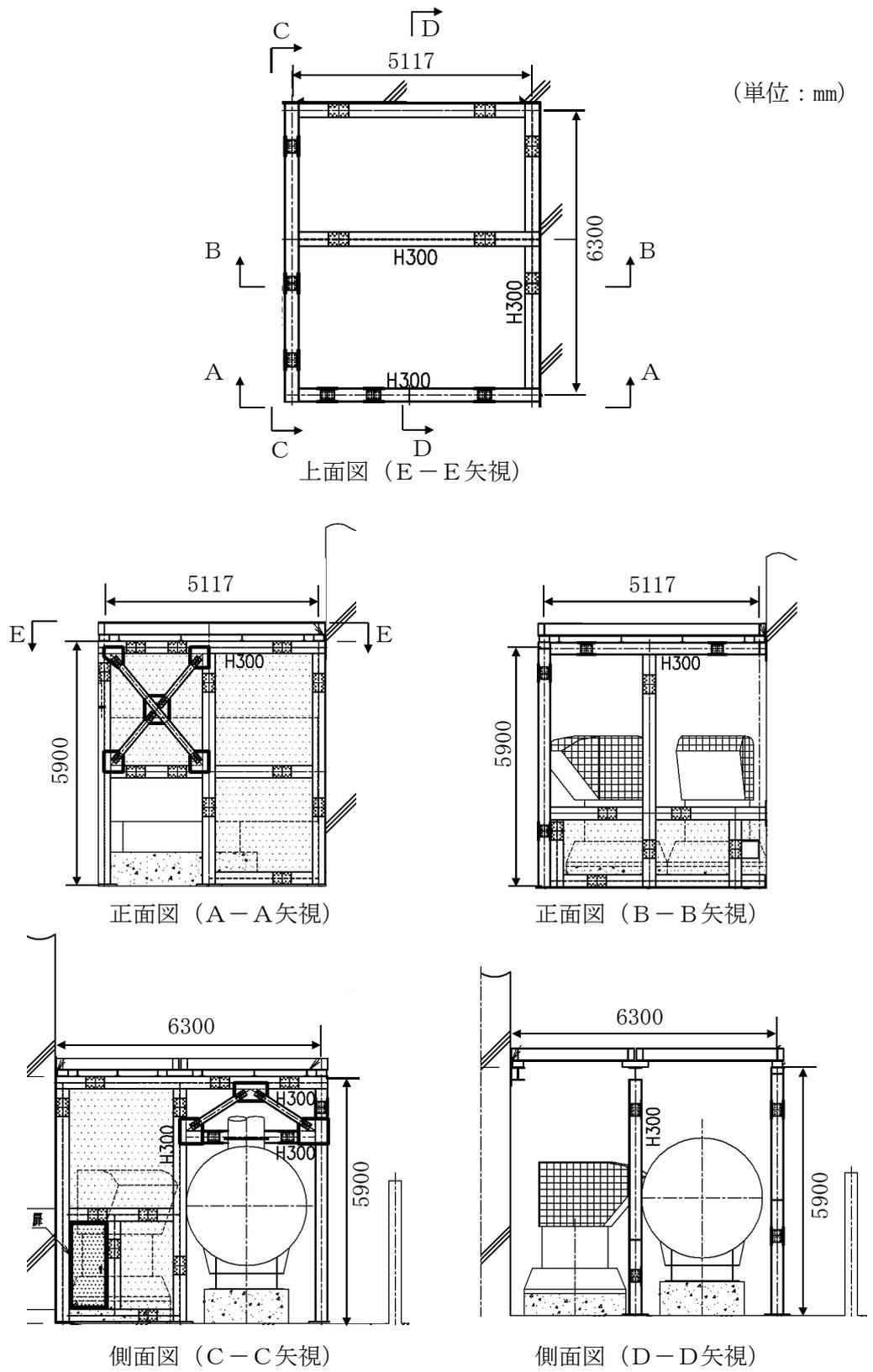


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(1/4)
 (2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

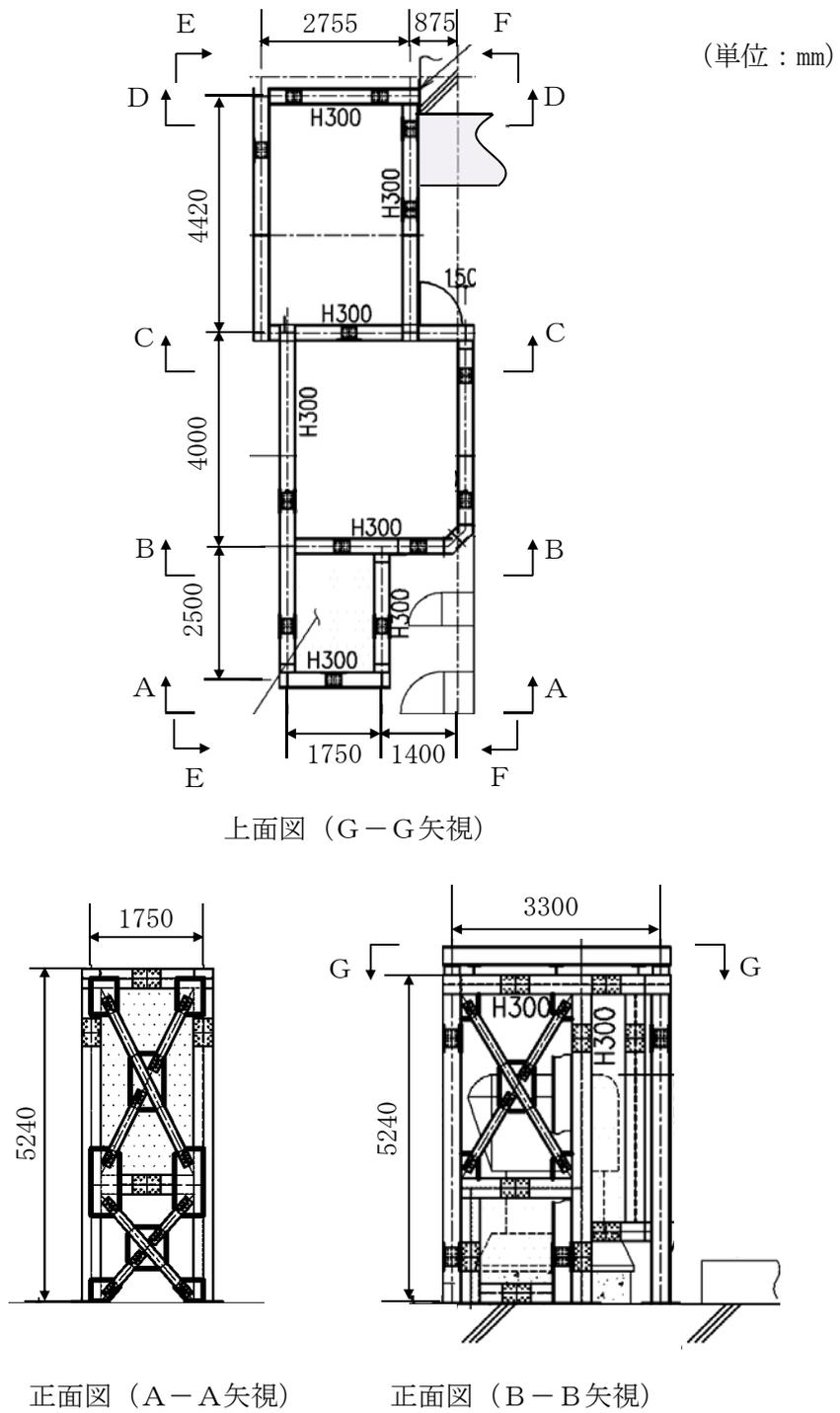
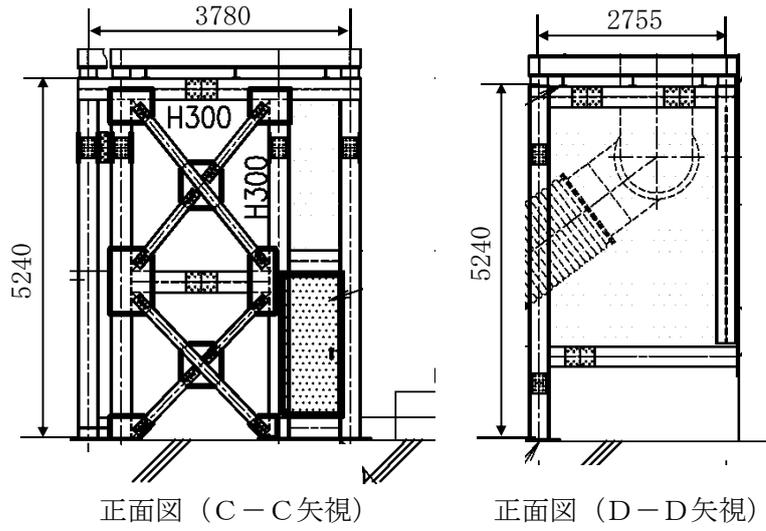


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(2/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(1/2))



(単位 : mm)

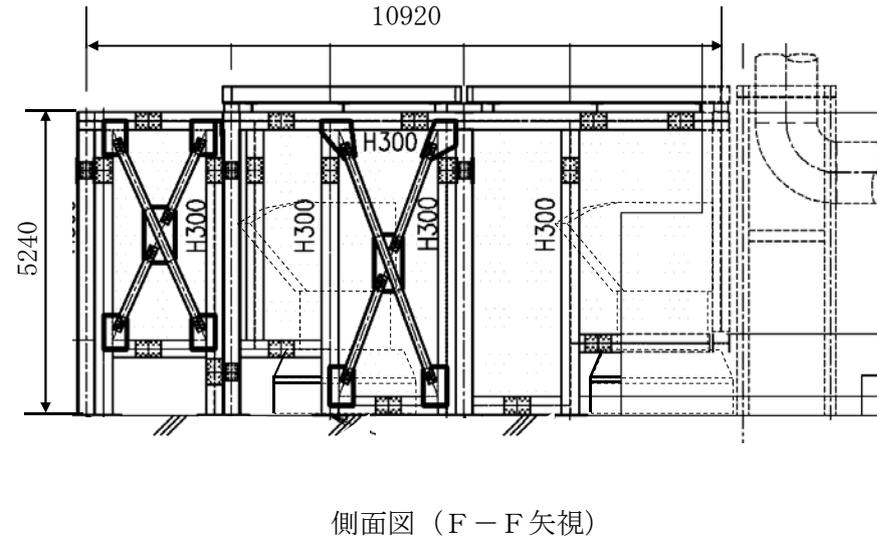
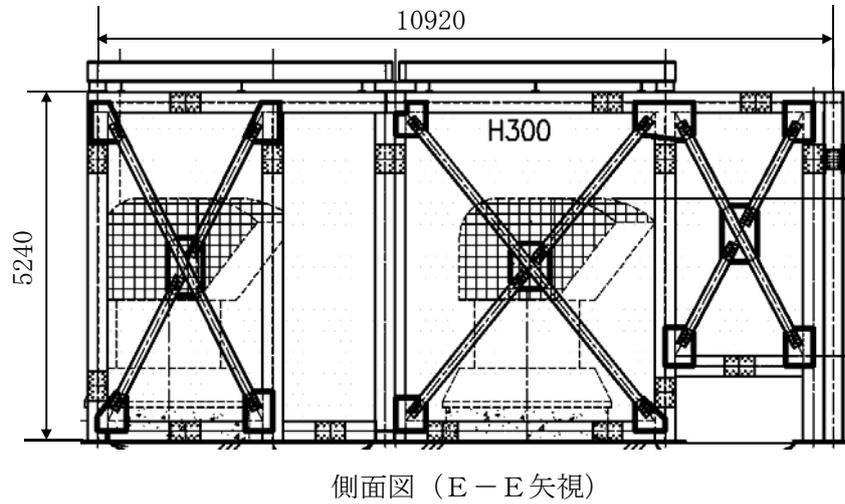


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図(3/4)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設(2/2))

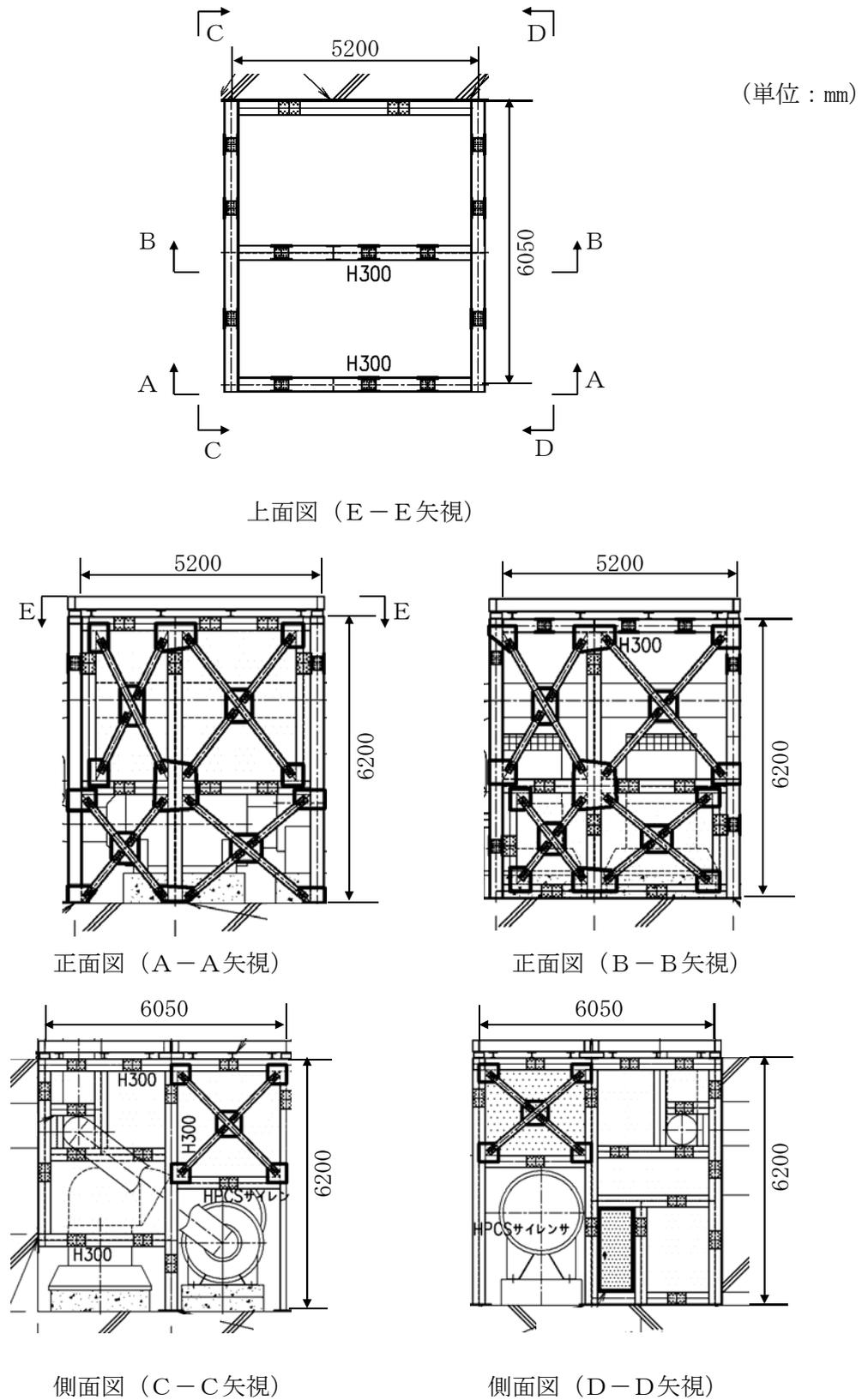


図 2-2 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構の構造図 (3/4)
 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、外部事象防護対象施設である中央制御室換気系冷凍機を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-3 に示す。

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。

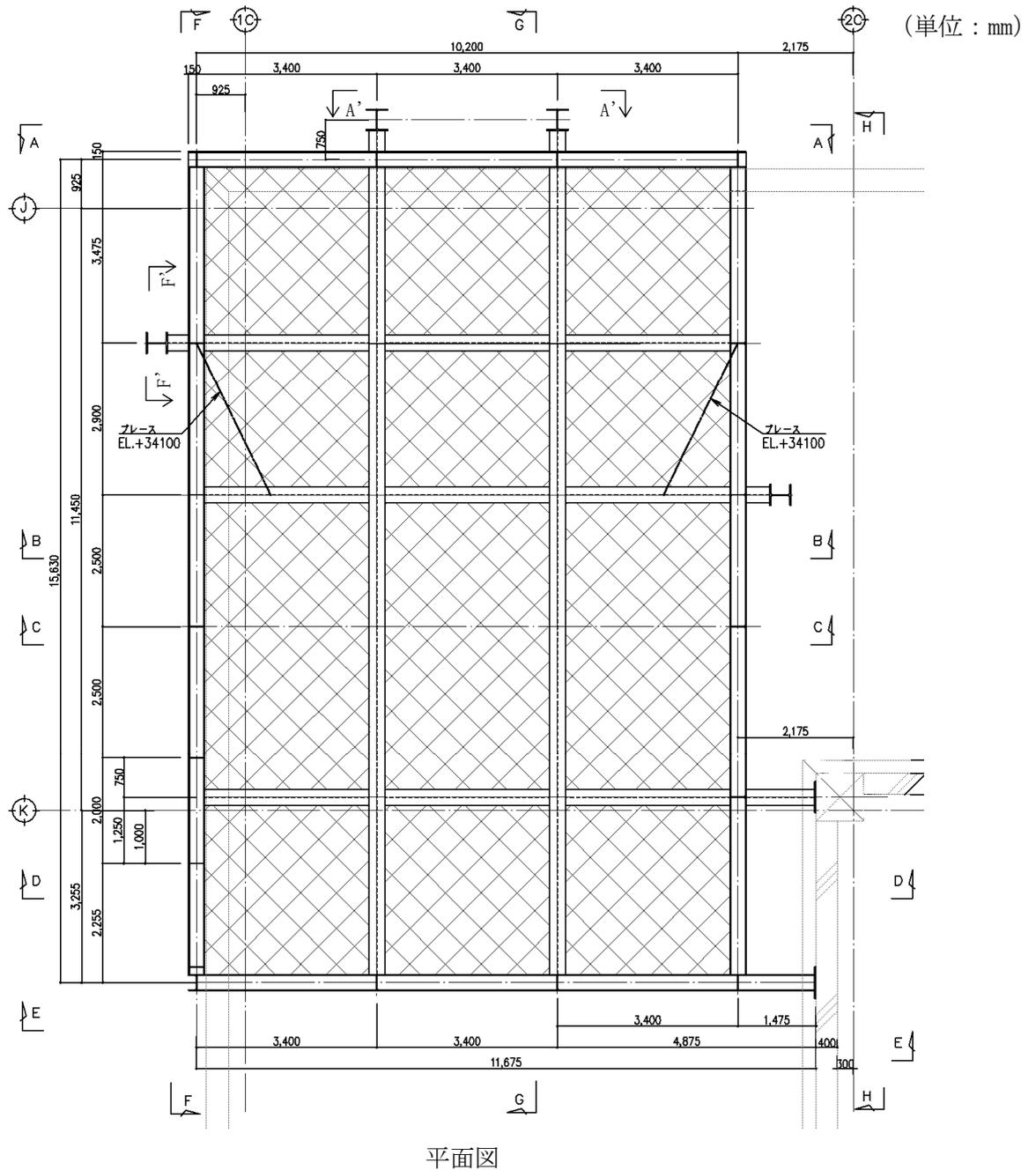


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(1/6)

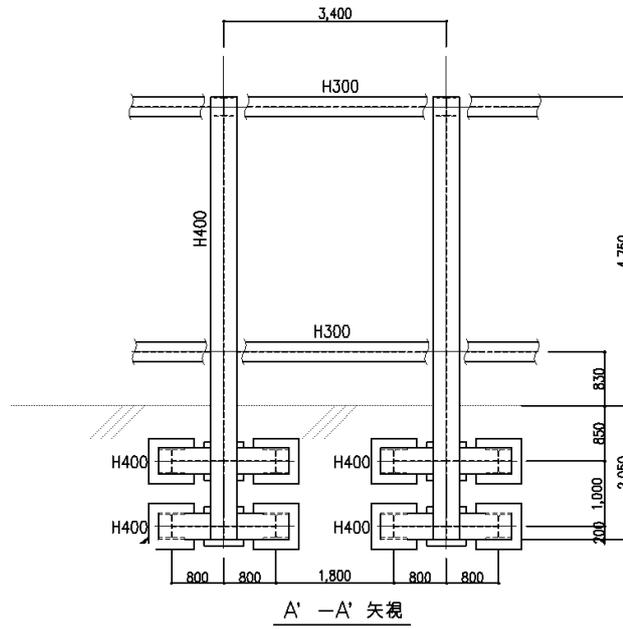
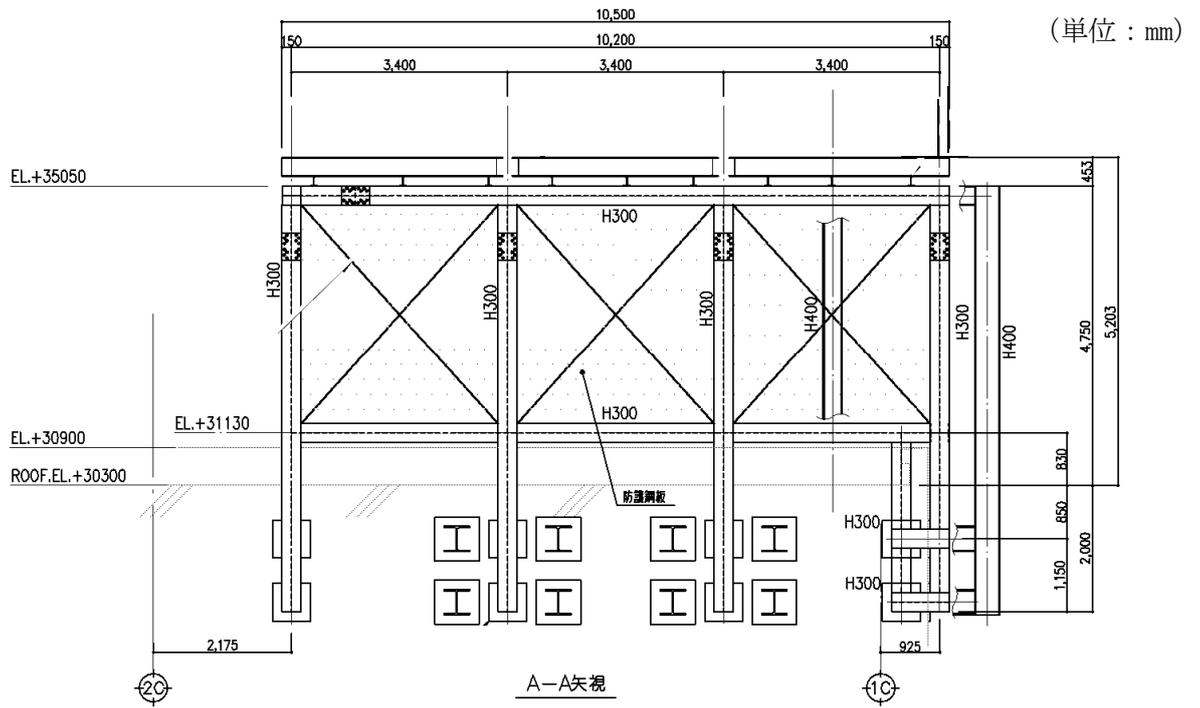


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(2/6)

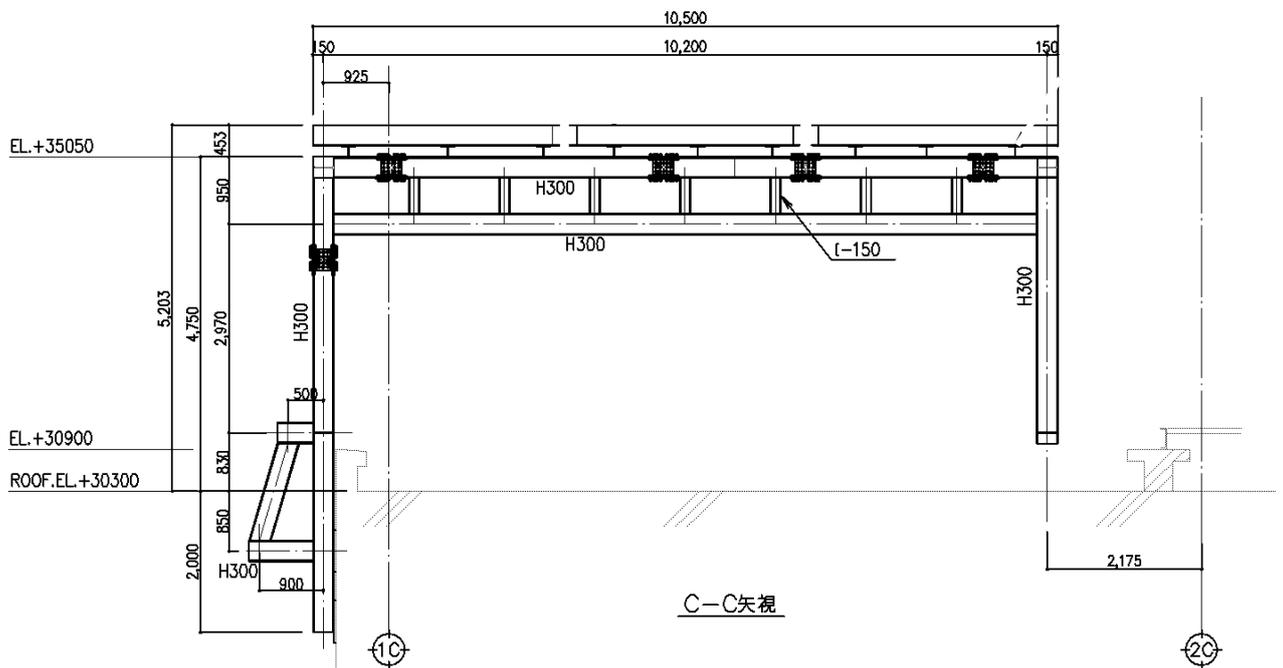
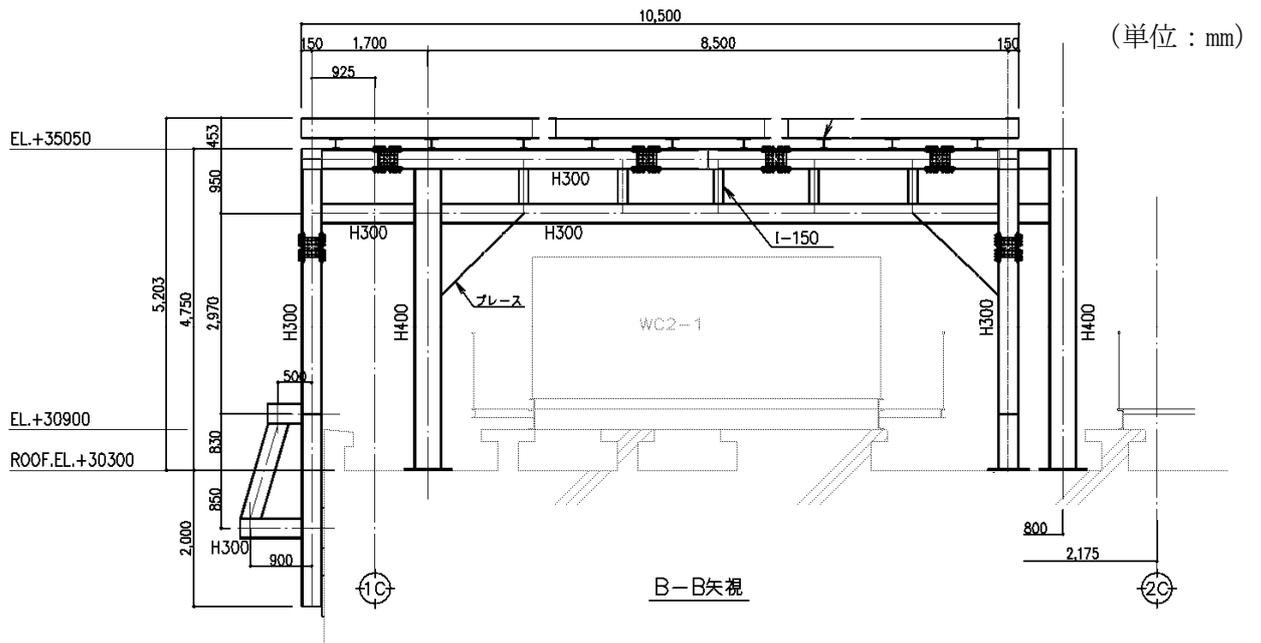


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(3/6)

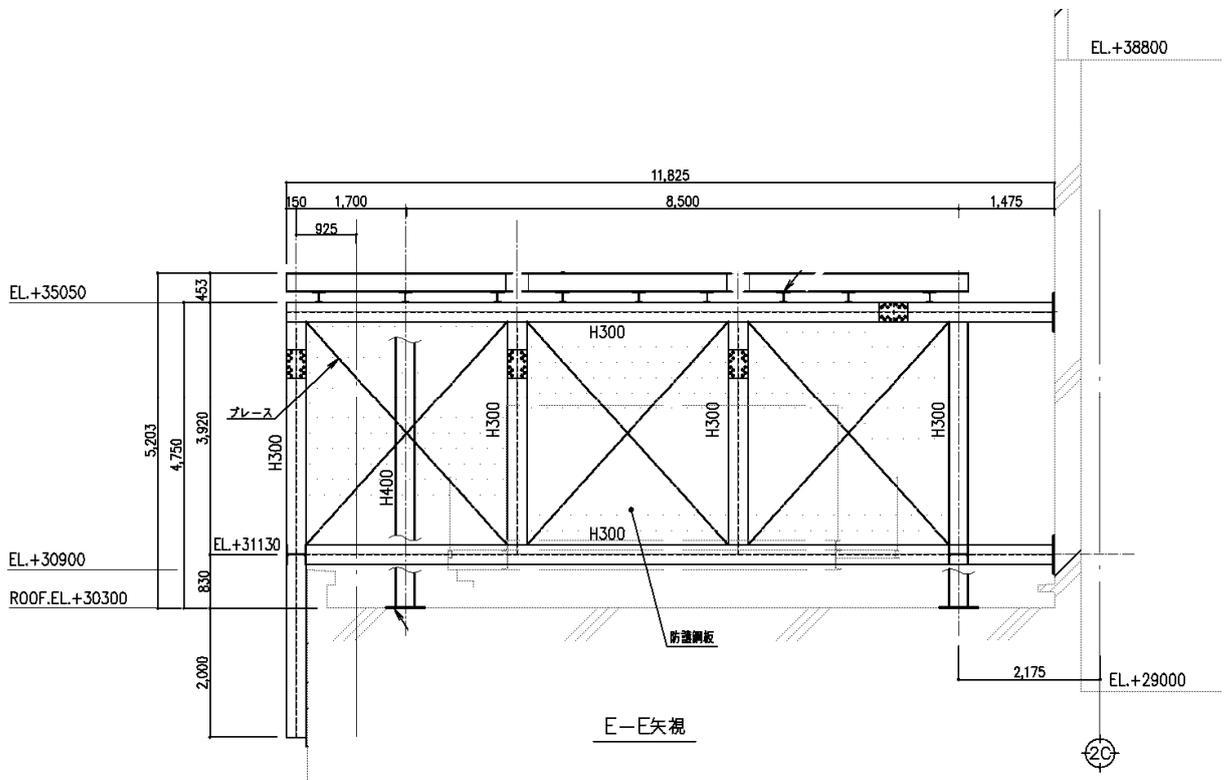
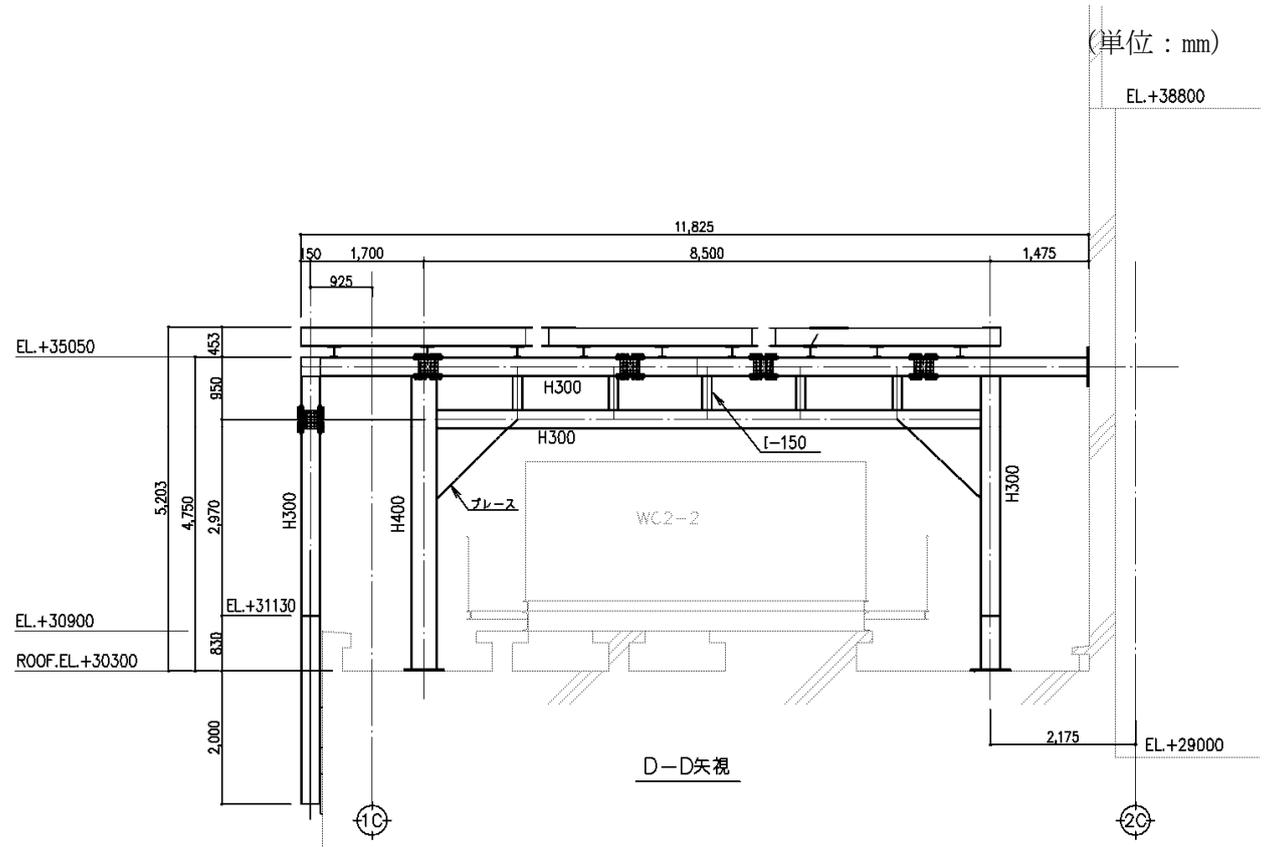


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(4/6)

(単位：mm)

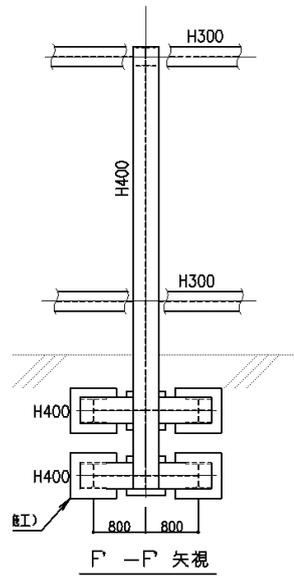
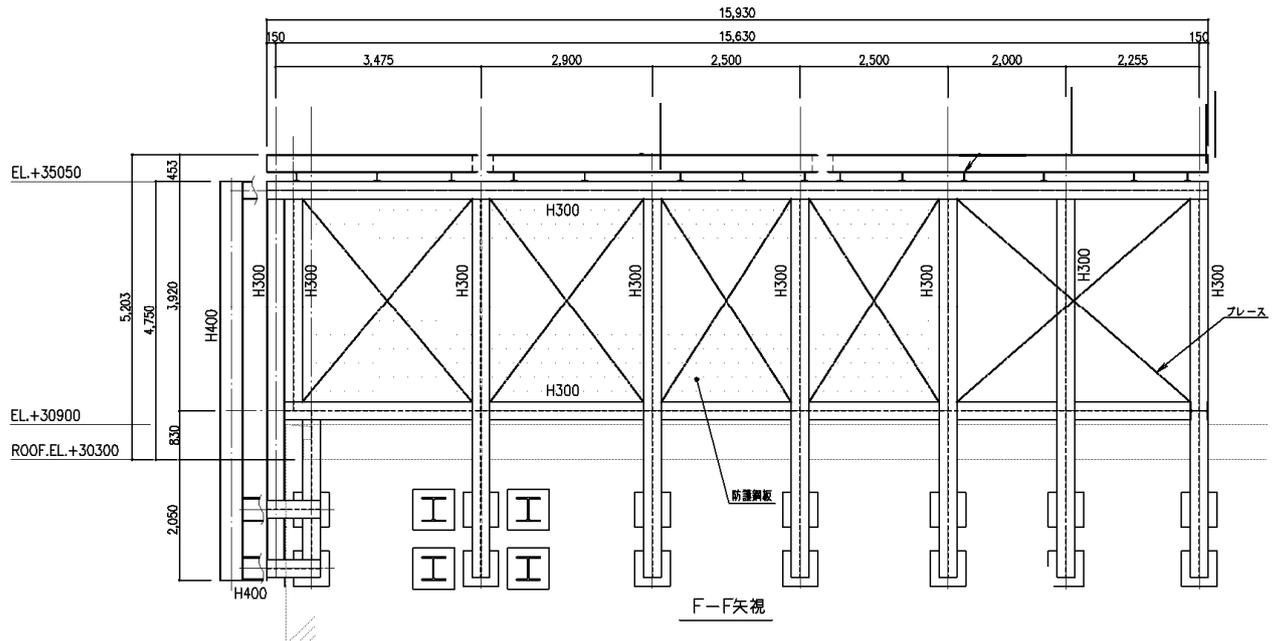
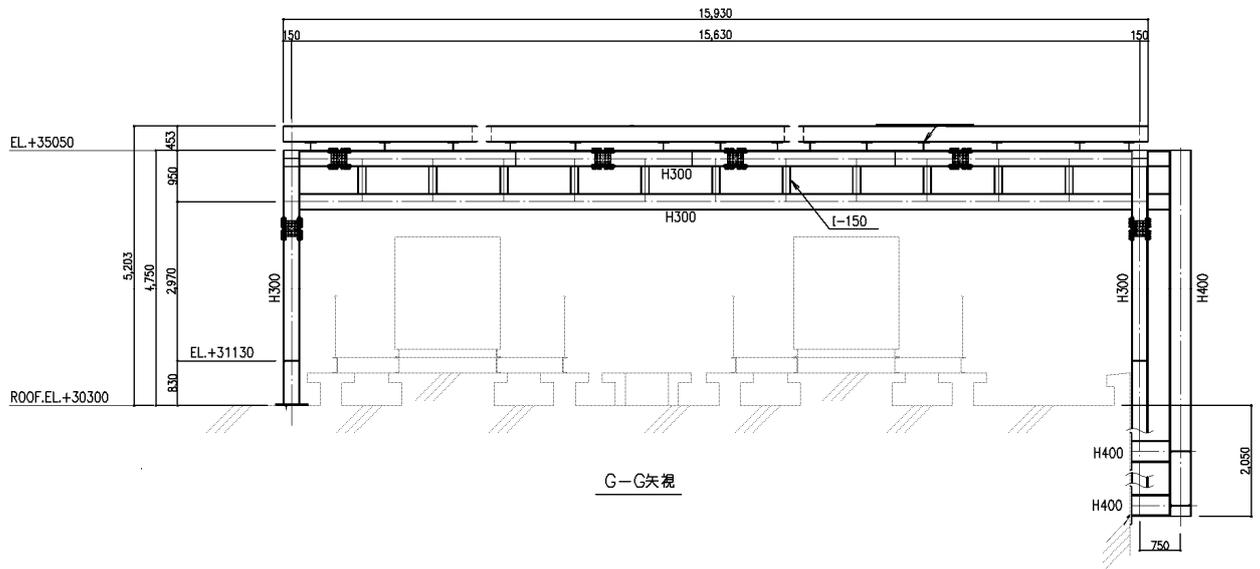
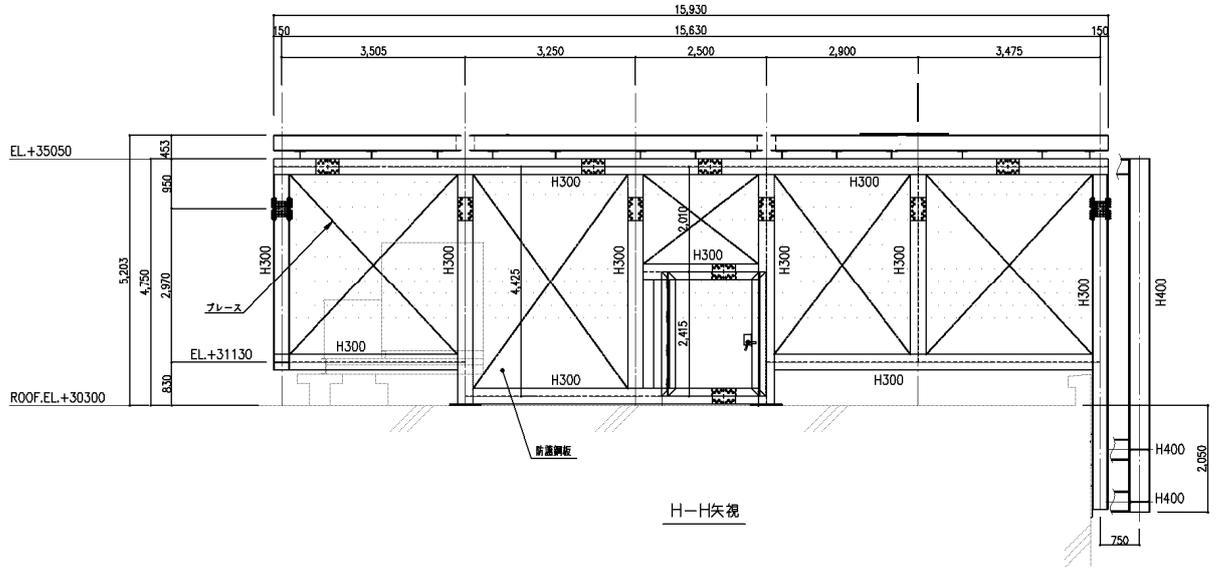


図 2-3 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構の構造図(5/6)

(単位：mm)



G-G矢視



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架構の構造図(6/6)

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-3 R7

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、外部事象防護対象施設である残留熱除去系海水系配管等を内包する施設として、柱、はり等により構成される。

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図を図 2-4 に示す。

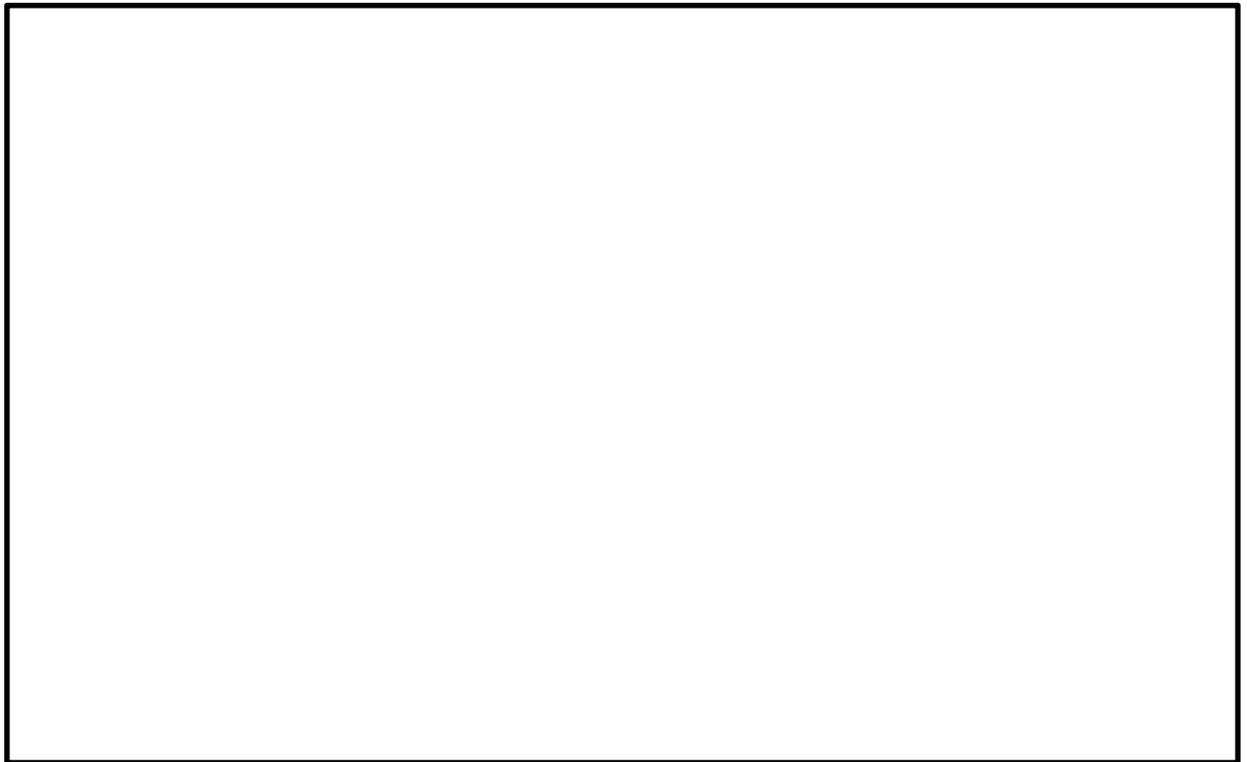
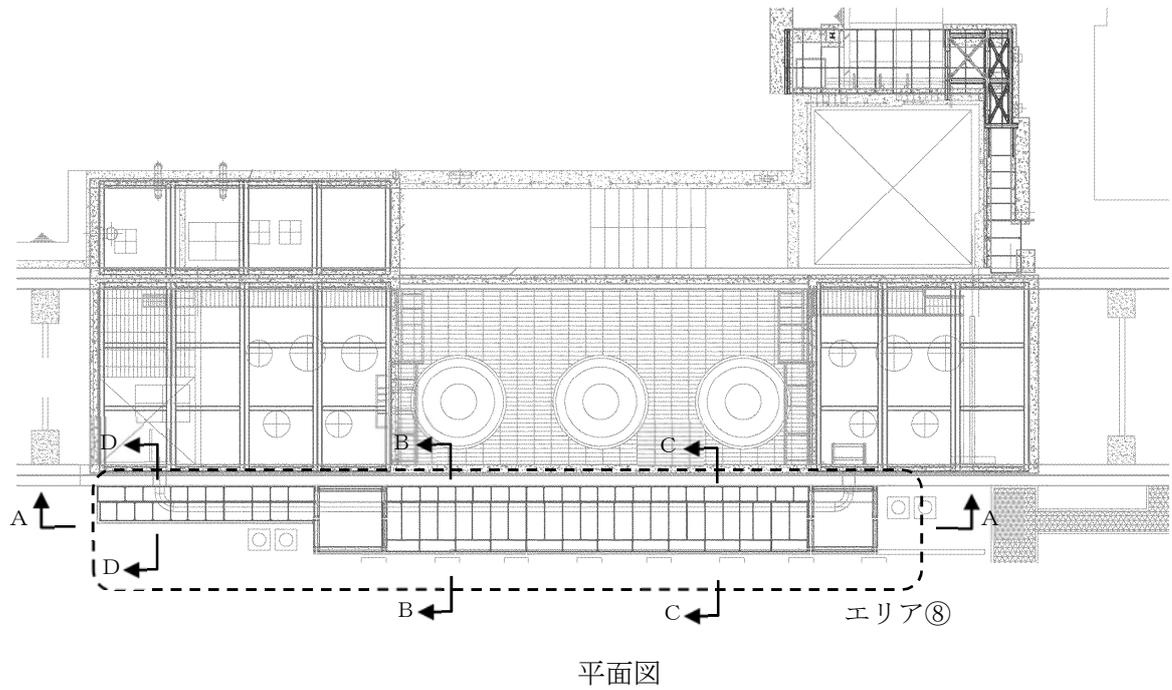


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図(1/2)

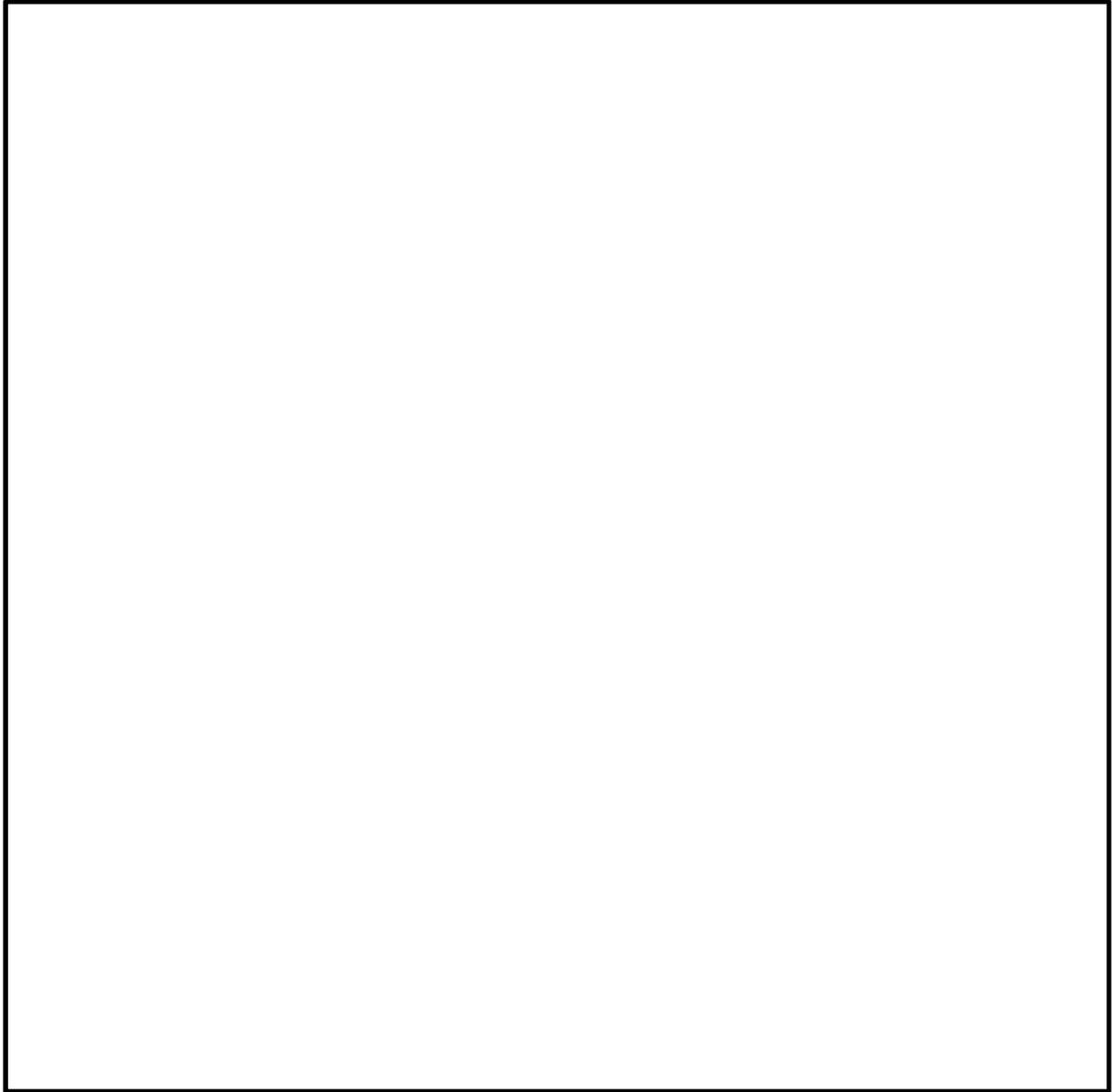


図 2-4 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構の構造図(2/2)

(4) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構は、防護ネット及び防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、外部事象防護対象施設である原子炉建屋外側ブローアウトパネル及び原子炉建屋原子炉棟 6 階設置設備（使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁）を内包する施設として柱、はり等により構成される。

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-5 に示す。

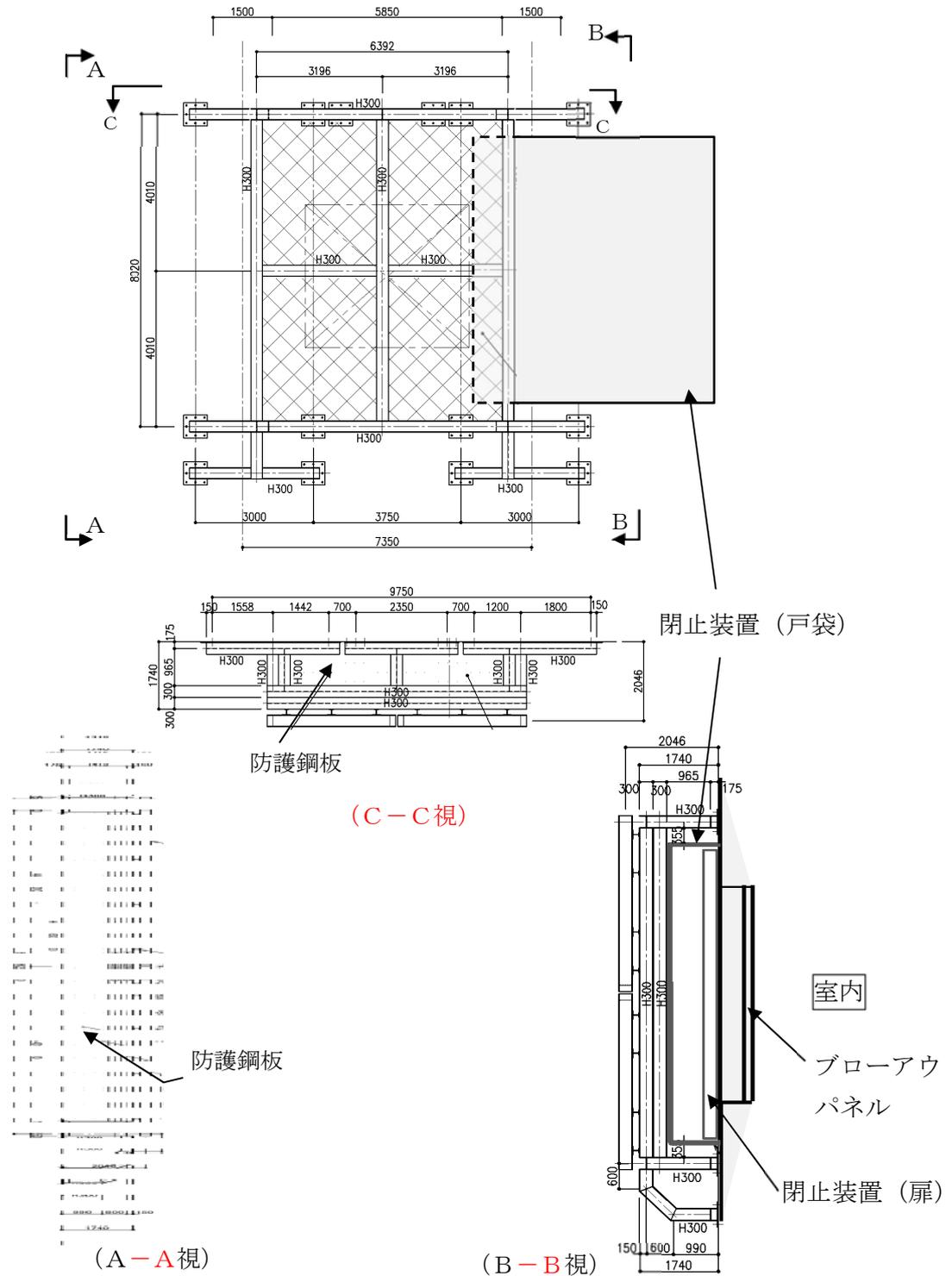


図 2-5 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構の構造図

(5) 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構は、防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、外部事象防護対象施設である中央制御室換気系ファン等を内包する施設として柱、はり等により構成される。

中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-6 に示す。

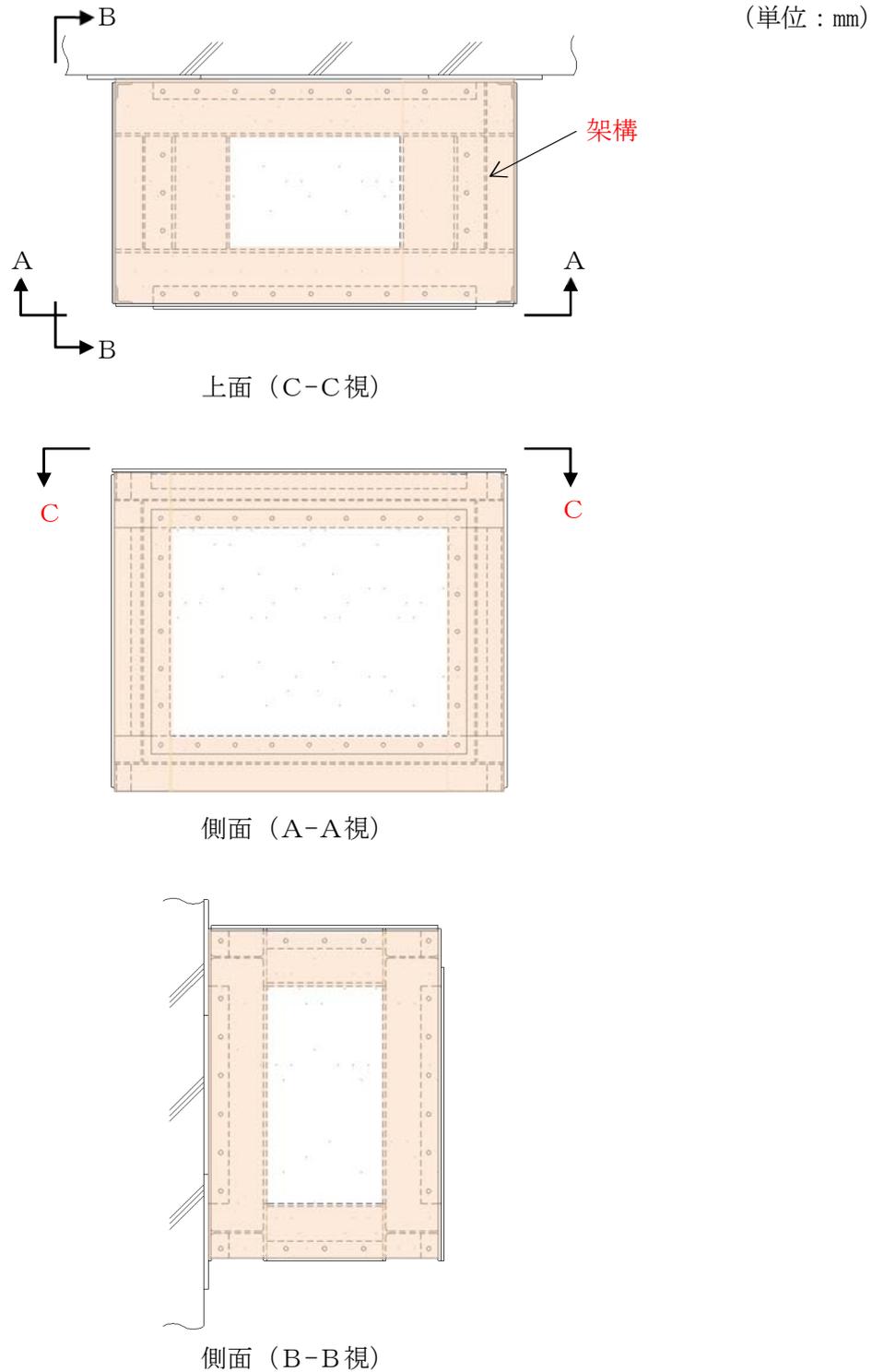
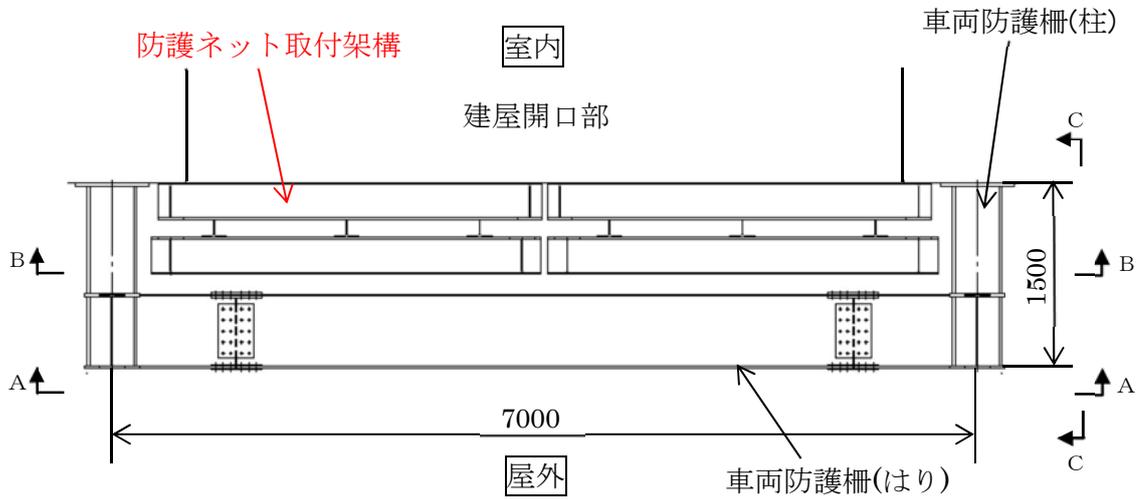


図 2-6 中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構の構造図

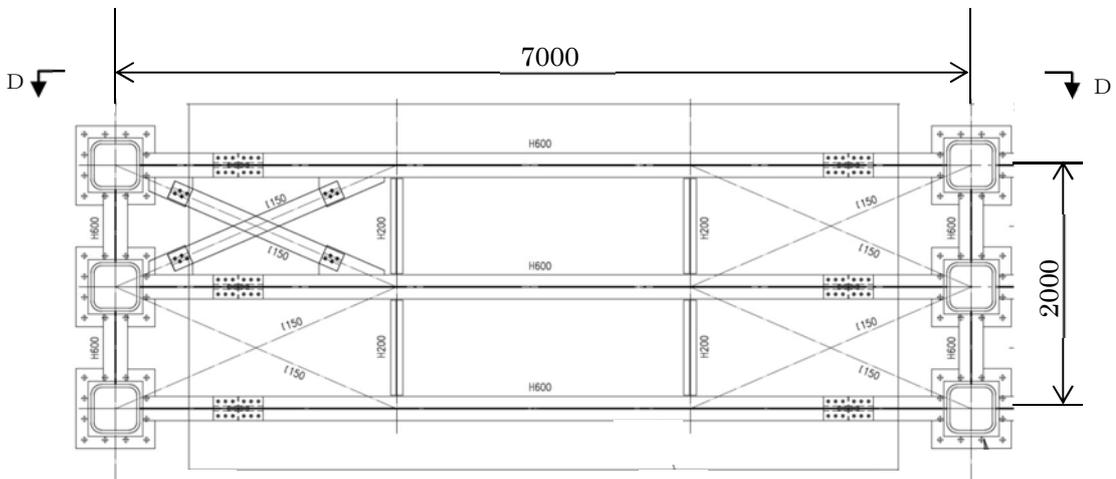
(6) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構は、**防護ネットの取付枠及び車両防護柵**としての機能を有する鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造を図 2-7 に示す。



上面図 (D-D 矢視)



正面図 (A-A 矢視)

図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図(1/2)

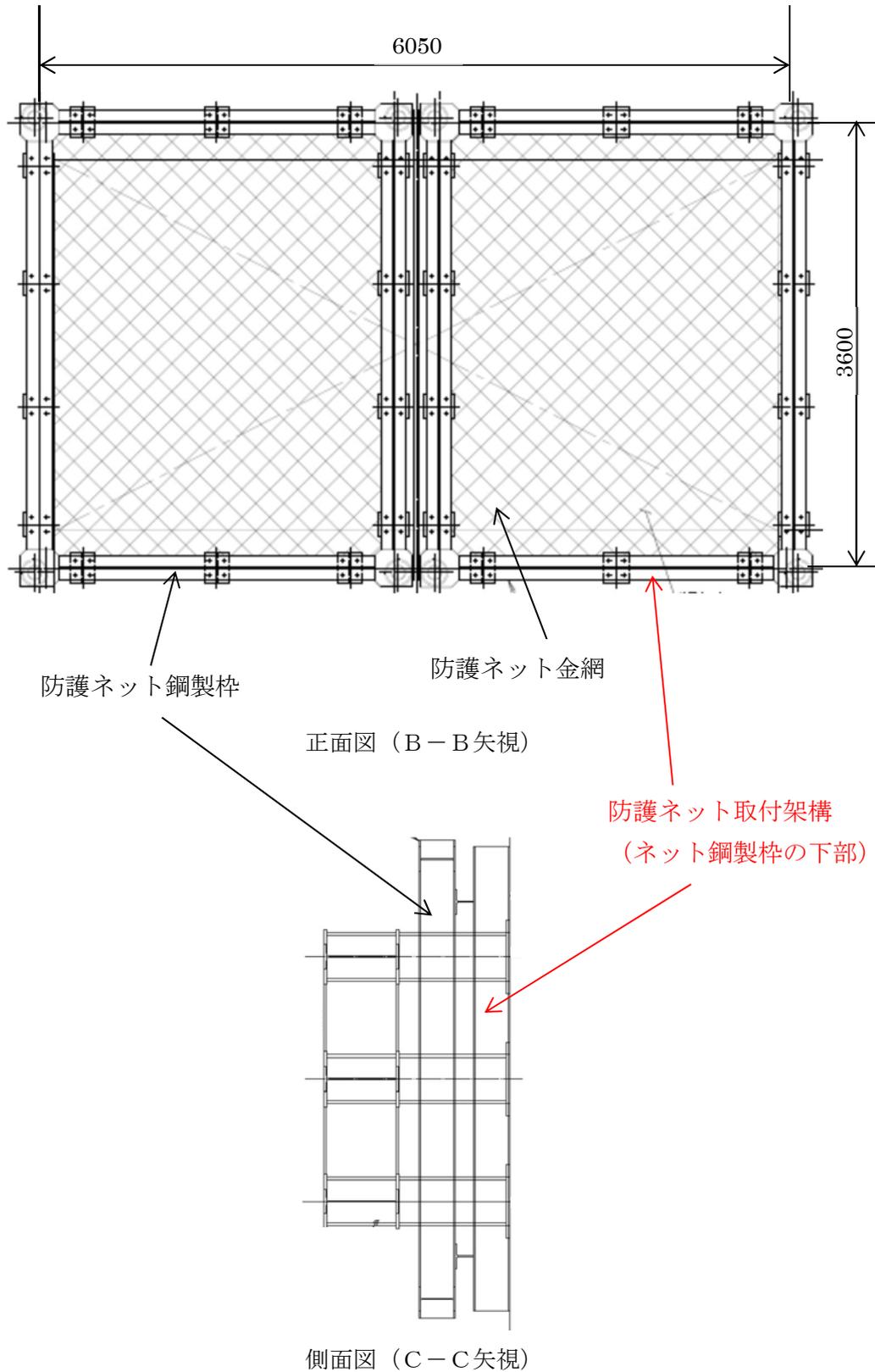


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構の構造図 (2/2)

2.3 評価方針

架構の強度計算は、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、架構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。

架構の評価フローを図 2-8 に示す。

架構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、設計荷重に対して、外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が架構を構成する柱、はり等の部材（以下「架構部材」という。）を貫通し外部事象防護対象施設へ衝突しないことを確認するための、架構部材に対する貫通評価を実施する。また、架構に上載する防護ネット及び防護鋼板を支持する機能を保持可能な構造強度を有することを確認するための、架構部材及び架構全体に対する支持機能評価を実施する。

さらに、設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、架構が倒壊し外部事象防護対象施設に機械的な波及的影響を与えないことを確認するための、波及的影響評価を実施する。

以下に、これらの評価にて確認する評価項目を示す。

(1) 貫通評価

飛来物の架構への直接衝突により、架構部材（母材部）を飛来物が貫通しないことを確認する。

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物の架構、防護ネット及び防護鋼板への衝突において、架構部材（母材部）に全断面欠損に至るようなひずみが生じないように、十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度に対して、防護対策施設の倒壊に至るような架構の変形が生じないように、架構及び架構と建屋等の接合部に十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

なお、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構全体に対する支持機能評価については、「V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書」における架構鋼製部材（鉄骨）の損傷を仮定した場合の評価に包含されるため、評価を省略する。

また、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネット取付架構の部材については、当該部材が損傷し、防護ネットが壁面から落下すると想定した場合においても、施設

直下には外部事象防護対象施設が存在せず、波及的影響を与えないことから、支持機能評価に関しては評価対象外とする。

(3) 波及的影響評価

波及的影響評価については、「2.3(2) 支持機能評価」の評価に同じ。

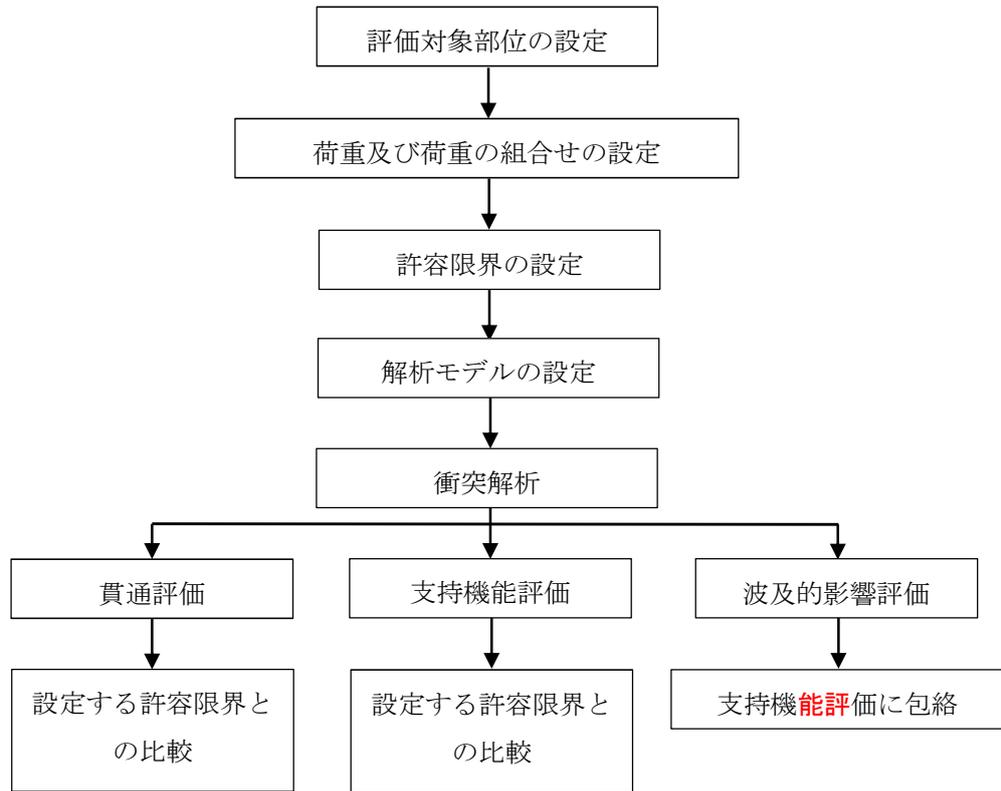


図 2-8 架構の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」
（（社）日本機械学会（以下「JSME」という。））
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補 - 1984」 （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 -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
- ・日本工業規格(J I S)
- ・「建築物荷重指針・同解説」 （（社）日本建築学会，2004 改定）
- ・「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）
- ・「鋼構造接合部設計指針」 （（社）日本建築学会，2012 改定）
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「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

3.1.1 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 ²	受圧面積
C	—	風力係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _w	N	風圧力による荷重
Δ P _{max}	N/m ²	最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

3.2.1 貫通評価

(1) 車両に対する評価

車両防止柵の部材に対する車両の衝突は局部的な事象ではなく、貫通という損傷モードは考慮しない。（「3.2.2 支持機能評価」の中で、曲げに対する破断の有無を評価する）

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構部材の貫通評価として、飛来物が架構部材に直接衝突した場合についての解析を行う。架構部材の変形が最も大きくなるよう、架構部材のうち、部材厚さが薄く、長さが最短となるものを代表として抽出し解析を行う。

3.2.2 支持機能評価

架構全体の支持機能評価として、飛来物が防護対策設備に衝突した場合の架構全体の支持機能についての評価を行う。

本評価は、バネー質点系でモデル化した飛来物及び防護設備の応答解析結果より算出した、飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に作用する応答加速度を用いた静的解析を行う。

この評価においては、各防護対策施設の架構及びアンカーボルトを評価対象部位として選定する。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、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。

3.3.1 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 3-2 に示す。

表 3-2 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 ΔP_{max} (N/m^2)
100	15	85	8900

(1) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、次式により算定する。

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

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

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

(2) 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 3-3 及び表 3-4 に示す飛来物の衝突に伴う荷重とする。

また、架構全体の支持機能評価に用いる衝撃荷重は、飛来物の衝突により施設に発生する応答加速度から算出する。応答加速度の算出方法及び結果については、「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」に示す。

表 3-3 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
車両	3.6×2.5×8.6	5000	52	—※	使用済燃料乾式貯蔵容器 竜巻防護対策施設のう ち、車両防止柵
鋼製材	4.2×0.2×0.3	135	51	34	上記以外の防護対策施設

※：建屋排気口からの侵入は、構造上水平方向のみを考慮すれば良い。

表 3-4 飛来物の特性値

飛来物	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	剛性 (N/m)
車両	—	—	2.94×10 ³
鋼製材	2.05×10 ⁵	0.3	—

(3) 常時作用する荷重(F_d)

架構部材の自重，架構に取り付く防護ネット及び防護鋼板等の荷重を考慮する。

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 1-2 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 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の組合せ

評価内容		荷重の組合せ
貫通評価		W _w +W _M +F _d
支持機能評価	架構部材	
	架構全体	

3.4 許容限界

架構の許容限界は，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，「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

貫通評価及び支持機能評価の許容限界を以下に示す。

(1) 貫通評価

飛来物である鋼製材の貫通防止を満足する許容限界として，部材が破断しない飛来物の貫入深さを設定する。架構部材のうちH形鋼はフランジ面を防護施設に対して外向きとして設定していることから，部材せいを貫入深さの許容限界とする。

貫通評価において許容限界とする部材せい位置を図 3-1 に示す。

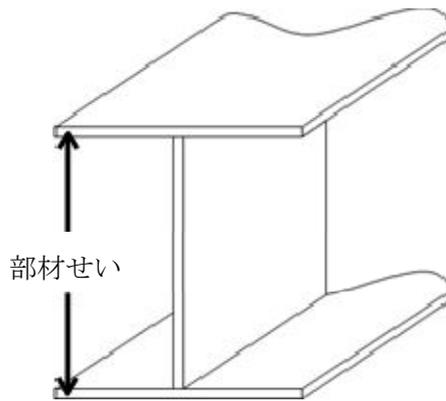


図 3-1 貫通評価における許容限界とする部材せい

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構及び防護鋼板に衝突する場合は、衝突部において貫通が防止できても、架構部材が曲げ等により破断し架構の支持機能が保持されないことが考えられることから、架構部材の曲げによる破断が生じないことを確認する。

許容限界としては、FEM 解析を実施しない部材（使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のうち、車両防止柵）については、発生する応力により判断し、FEM 解析を実施した部材については、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の車両防止柵の応力については、接触する部材をはりと見なしたモデルに基づき、弾性限界を許容限界として設定する。破断ひずみについては、「4. (1)c. (c) 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值を基に設定するが、「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。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

設定した許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 許容限界(架構部材の支持機能評価)

材質	許容限界	対象
SM490 []	降伏応力 (短期許容応力度)	使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のうち、車両防止柵
SM490 []	破断ひずみ (真ひずみ) []	上記以外の防護対策施設

b. 架構全体の支持機能評価

飛来物が架構又は防護鋼板に衝突する場合、衝撃荷重により架構は衝突方向に変位するが、架構の終局耐力以上の荷重が作用した場合は、変位が止まらず倒壊に至る。防護対策施設の倒壊により外部事象防護対象施設に影響を与えないという観点で、許容限界を以下のとおり設定する。

鋼製材もしくは車両の衝突により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有することを確認するため、JSME 及び建築学会「鋼構造設計規準」，「各種合成構造設計指針・同解説」に基づき設定した架構の許容応力を表 3-7 に、使用材料の許容応力を表 3-8 に示す。

表 3-7 許容応力(その他の支持構造物)

許容限界 (ボルト以外)				許容限界 (ボルト等)	
一次応力				一次応力	
引張	せん断	圧縮	曲げ	引張	せん断
$1.5 f_t$	$1.5 f_s$	$1.5 f_c$	$1.5 f_b$	$1.5 f_t$	$1.5 f_s$

(注) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

表 3-8 使用材料の許容応力(単位：MPa)

評価箇所	材料	評価用 温度 (°C)	S_y	S_u	許容応力			
					$1.5 f_t$	$1.5 f_s$	$1.5 f_c$	$1.5 f_b$
架構	SM400 ($5 < t \leq 16$)	40	245	400	245	141	(注 1)	(注 2)
	SM490 ($5 < t \leq 16$)	40	325	490	325	187		
アンカー ボルト	SS400 ($16 < t \leq 40$)	40	235	400	176	135	—	—

(注 1) 規定に基づき算出する。

(注 2) 規定に基づき算出する。

3.5 評価方法

(1) 車両に対する評価

車両防止柵の強度評価は、架構全体の支持機能評価においては、解析コード「MSC/NASTRAN」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。

(2) 鋼製材に対する評価

鋼製材の衝突を想定する架構の強度評価は、貫通評価及び架構部材の支持機能評価においては、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、架構全体の支持機

能評価においては、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架構、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構、中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては、解析コード「MSC/NASTRAN」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。

(1) 貫通評価

飛来物の衝突による衝突箇所の衝突評価においては、架構の主要部材に飛来物を直接衝突させた解析を行うことで評価する。この評価では、図 3-2 に示すとおり、架構部材の解析モデルの評価対象部位に設計飛来物の解析モデルを衝突させた解析を行う。

飛来物による衝撃荷重は、架構部材の変形が最大となるよう、部材の中央に作用させることを基本とする。

飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるようにするため、鋼製材は先端部（衝突部）を開口として接触断面積を小さくモデル化し、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。

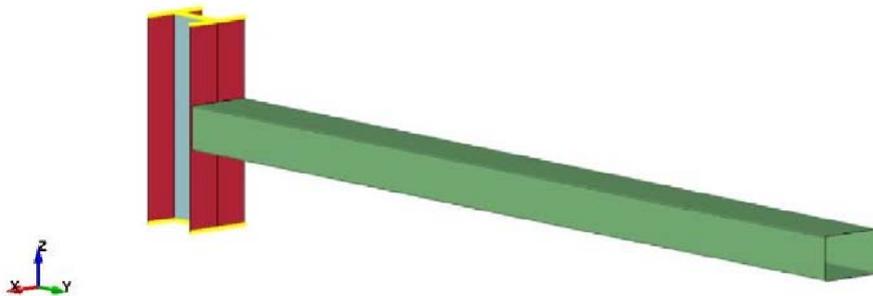


図 3-2 貫通評価モデル図(代表部材モデルと飛来物)

(2) 支持機能評価

a. 架構部材の支持機能評価

飛来物が架構部材に衝突する場合については、「3.5(1) 衝突評価」で評価した解析モデルにおいて、飛来物が架構部材に衝突する場合の架構部材端部に発生するひずみ量を算出し、架構部材端部に破断が生じないことを確認する。飛来物が架構部材に衝突の場合に架構部材端部に破断が生じないことを確認することにより、その部材の近傍の部材についても、破断が生じないことを確認する。

最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

b. 架構全体の支持機能評価

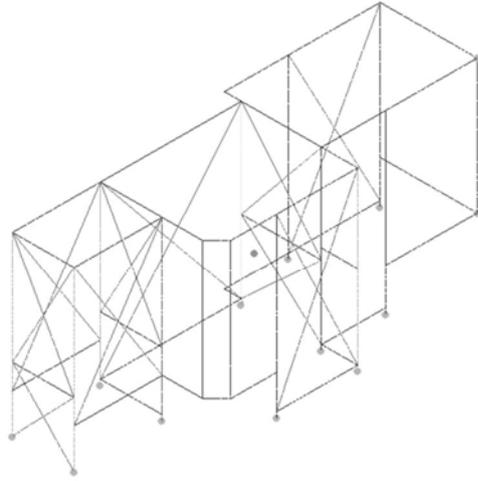
非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，飛来物が衝突した際の応答加速度を3次元FEMモデルの質点に入力し，設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析を実施する。

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の車両防止柵においては，車両と車両防止柵を2自由度系のバネ質点モデルでモデル化し，両者の応答を連成させた評価により算出した，車両防止柵に生じる応答加速度に基づく荷重を3次元FEMモデルに入力し，自重も考慮した静的解析を実施する。

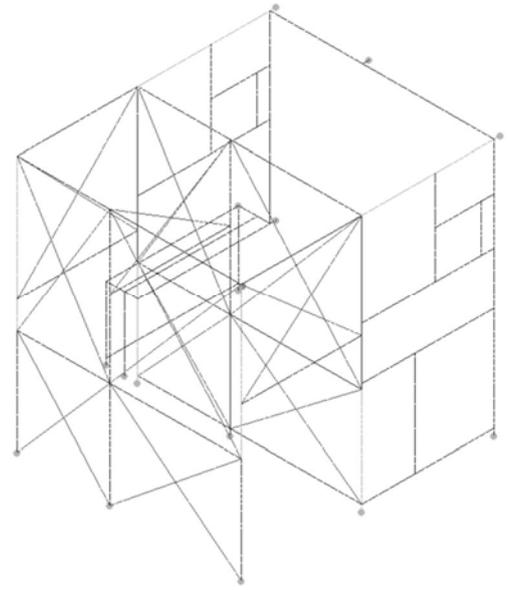
(a) 解析モデル及び諸元

解析モデルは，防護壁を構成する架構部材をはり要素にてモデル化した3次元FEMモデルとする。架構に取り付けられる防護ネット及び防護鋼板の質量は，解析モデルの中で考慮している。

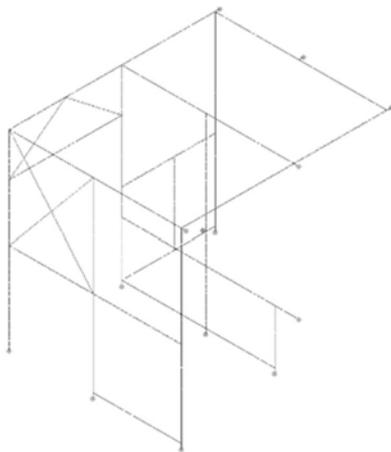
解析モデルを図3-3～図3-7に，用いられる部材の諸元を表3-9に示す。



(2D 非常用ディーゼル)



(高圧炉心スプレイ系ディーゼル)



(2C 非常用ディーゼル)



図 3-3 解析モデル図(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架構)

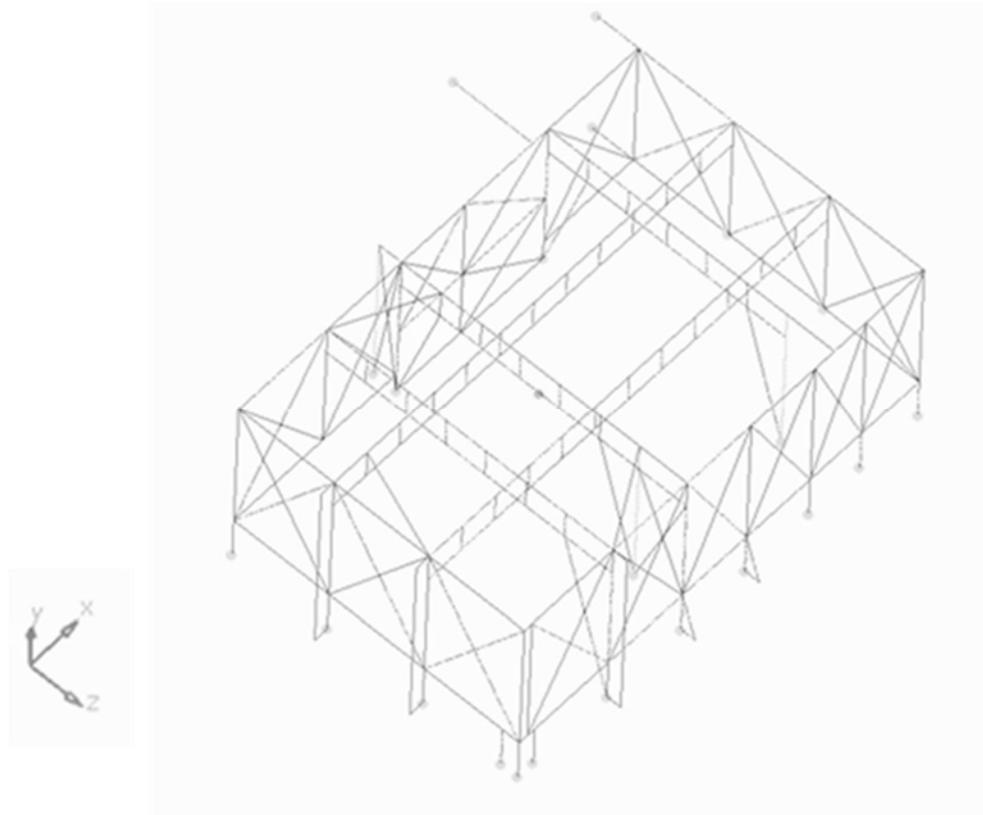


図 3-4 解析モデル図(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

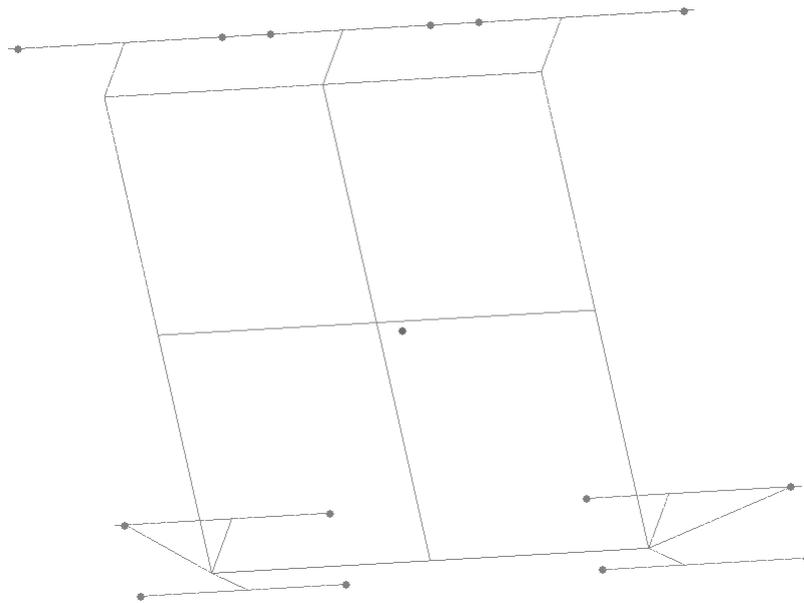


図 3-5 解析モデル図(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

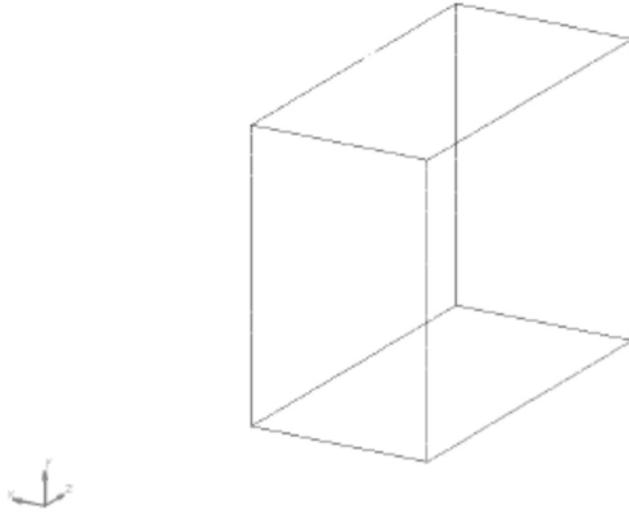


図 3-6 解析モデル図(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

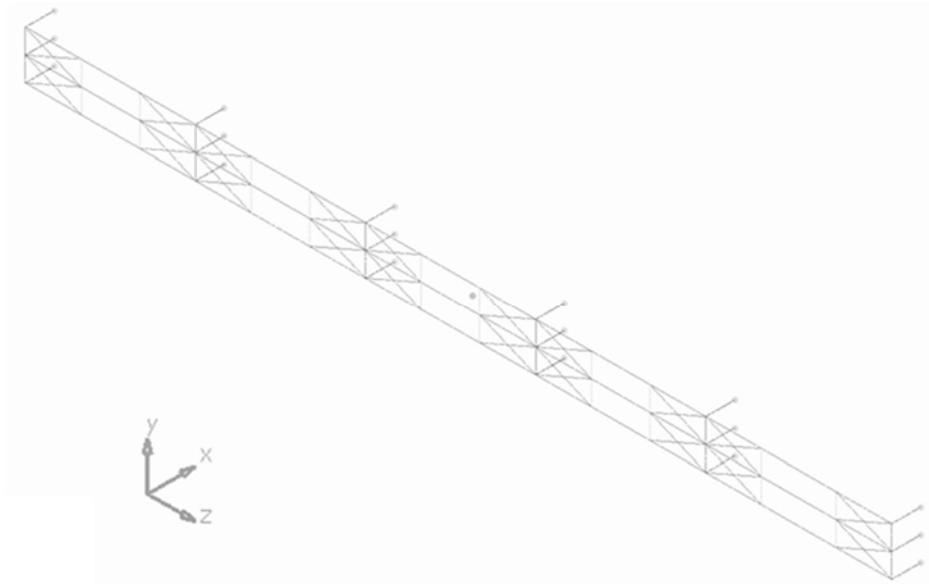


図 3-7 解析モデル図(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構)

表 3-9 部材の諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	-	-	SM400, SM400
温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	40
縦弾性係数	E	MPa	2.05×10^5
ポアソン比	ν	-	0.3

(b) 固有値解析

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架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構，中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構及び原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構においては，図 3-3～図 3-6 の解析モデルに対し，解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて，固有値解析を行う。

(c) 応答加速度の算出

設計飛来物の衝突による防護対策施設の応答加速度は，解析コード「LS-DYNA」を用いて，飛来物を FEM モデル，防護対策施設を図 3-8 に示す 1 自由度のバネ-質点系でモデル化し，両者の応答を連成させた評価により算出する。飛来物の衝突速度については，水平方向のバネ定数については水平方向の飛来速度を，鉛直方向のバネ定数については鉛直方向の飛来速度を用いる。なお，飛来物の解析モデル及び材料特性等は「3.5(1) 衝突評価」と同様である。

防護対策施設のバネ定数 k は，「3.5(2)b. (b) 固有値解析結果」にて算出した固有振動数 f と防護対策施設の質量 M を用いて以下の式で求める。

$$k = M(2\pi f)^2$$

ここで，固有振動数 f については，各方向において最も刺激係数が大きいモード振動次数のものを選定する。また，防護施設の質量 M については，応答加速度はバネ定数が大きい方が大きくなる傾向であることを踏まえ，防護施設の全体質量とする。

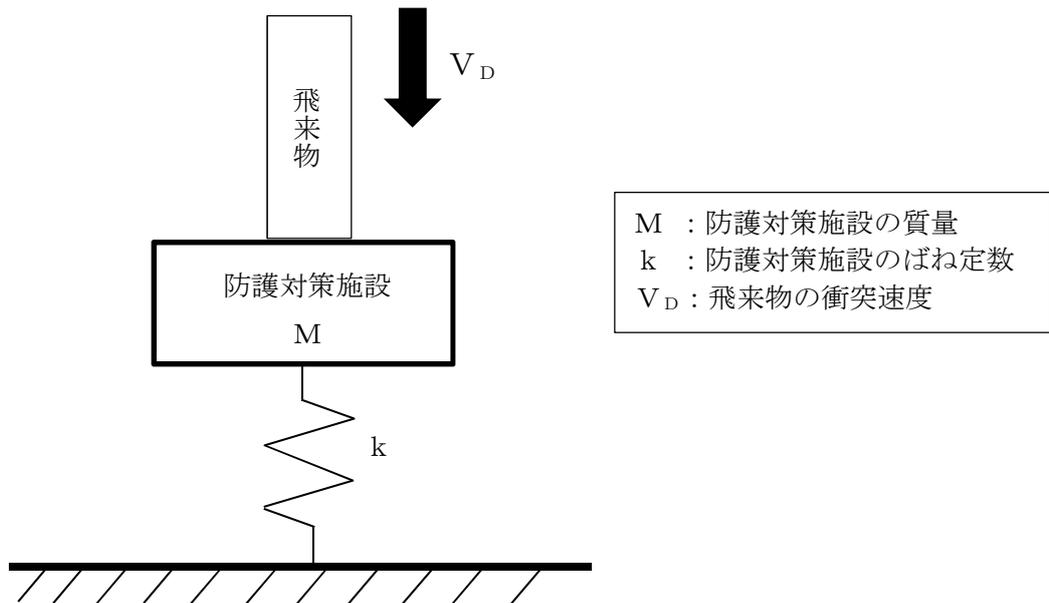


図 3-8 応答加速度評価モデル

車両の衝突による防護対策施設の応答加速度は、図 3-9 に示す 2 自由度系のバネ質点モデルでモデル化し、両者の応答を連成させた評価により算出する。排気ガラルの位置で衝突する車両の衝突速度については、水平方向の飛来速度を用いる。

防護対策施設に作用する加速度 \ddot{x}_1 は、以下の式で求められる。

$$\ddot{x}_1 = \frac{m_n(v_2 - v_1)}{m_1} \omega \sin \omega t$$

ここで、

$$m_n = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$$

$$\omega = \sqrt{k_n / m_n}$$

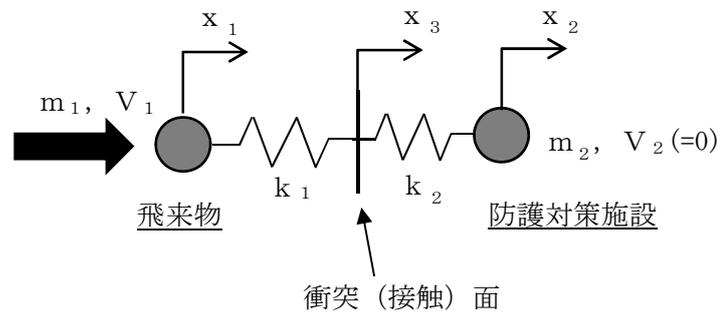
$$k_n = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)}$$

これより、加速度 \ddot{x}_1 の最大値 \ddot{x}_{1m} は以下のとおりとなる。

$$\ddot{x}_{1m} = \frac{m_n(v_2 - v_1)}{m_1} \omega$$

本評価においては、防護対策施設に作用する加速度の最大値 \ddot{x}_{1m} は車両防止柵のはりの中心における加速度として与えられ、当該加速度にはりの全質量を乗じて、車両防止柵に作用する荷重を算定する。なお、実際にははりの両端が拘束されていることから、中心から離れたはりの部位に働く加速度は、図 3-10 に示す様にはりの中心の加速度 \ddot{x}_{1m} より小さくなる。このため、はりの全質量にはり中心の加速度 \ddot{x}_{1m} を乗じて

荷重を算定することには、保守性が確保されている。



m : 質量
k : ばね定数
x : (衝突時の) 初期位置からの変位
V : (衝突時の) 初期速度

図 3-9 2 自由度系のバネ質点モデル

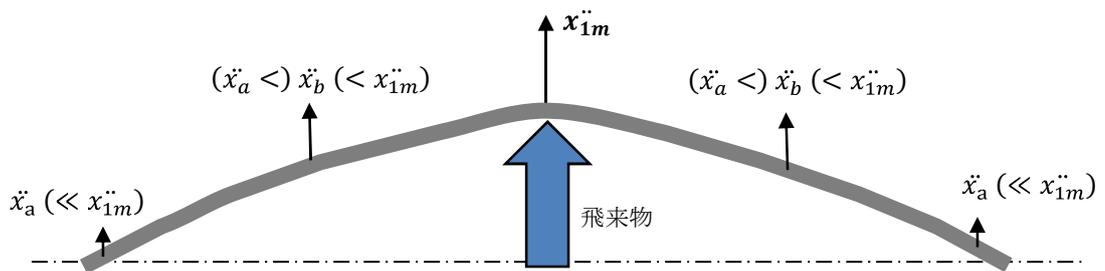


図 3-10 はりに作用する加速度の分布イメージ

(d) 各部材の発生応力の算出

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架構，中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構及び中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構，海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構，原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設架構においては，架構全体の支持機能評価においては，「3.5(2)b.(c) 応答加速度の算出」で算出した飛来物が衝突した際の応答加速度を図 3-3～図 3-7 に示す 3 次元 FEM モデルに入力し，設計竜巻の風圧力による荷重及び自重も考慮した静的解析により，各部材に生じる曲げモーメント，せん断力及び軸力を算出し，評価対象部位の発生応力を求め，許容限界に収まっていることを確認する。架構の応力計算式を表 3-10 に，アンカーボルトの応力計算式を表 3-11 に示す。

表 3-10 架構の応力計算式

応力の種類		単位	応力計算式
引張応力 σ_t		MPa	$\frac{N_t}{A}$
圧縮応力 σ_c		MPa	$\frac{N_c}{A}$
曲げ応力 σ_{by}, σ_{bz}		MPa	$\frac{M_y}{Z_y}, \frac{M_z}{Z_z}$
せん断応力 τ_y, τ_z		MPa	$\frac{Q_y}{A_{sy}}, \frac{Q_z}{A_{sz}}$
組合せ 応力	圧縮+曲げ	-	$\max\left(\frac{\sigma_c + \sigma_{bx} + \sigma_{by}}{1.5f_c + 1.5f_b}, \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by} - \sigma_c}{1.5f_t}\right)$
	引張+曲げ	-	$\max\left(\frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_t}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5f_b}\right)$
	曲げ+せん断	-	$\max\left(\frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_z^2}}{1.5f_t}, \frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_y^2}}{1.5f_t}\right)$ 軸力が引張の場合は、 σ_c を σ_t とする。

ここで、

- A : 断面積 (mm)
- Z_y, Z_z : 断面係数 (Y, Z 軸回り) (mm)
- A_{sy}, A_{sz} : せん断断面積 (Y, Z) (mm)
- N_t, N_c : 軸力 (引張, 圧縮) (N)
- M_y, M_z : 曲げモーメント (Y, Z 軸回り) (N・mm)
- Q_y, Q_z : せん断力 (Y, Z 軸) (N)

表 3-11 ボルトの応力計算

応力の種類		単位	応力計算式
引張応力 σ_b		MPa	$\frac{F_x}{A_b}$
せん断応力 τ_b		MPa	$\frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{A_b}$
組合せ 応力	せん断+引張	—	$\frac{F_x}{A_b}$

ここで

F_x, F_y, F_z : 引張力(X軸), せん断力(Y軸, Z軸) (N)

A_b : ボルトの断面積(mm²)

4. 評価条件

(1) 衝突評価及び架構部材の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

衝突評価の代表として選定する架構部材の仕様を表 4-1 に、飛来物の仕様を表 4-2 に示す。

表 4-1 架構部材の仕様

評価対象	評価部材番号	寸法	評価方法	材質
<ul style="list-style-type: none"> ・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架構 ・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 	①-1	H-300×300×10×15 長さ：900	貫通評価 (部材せい：300)	SM490
	①-2	H-300×300×10×15 長さ：6050	支持機能評価 たわみ評価	
	①-3	H-300×300×10×15 長さ：8020	支持機能評価 たわみ評価	
<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構 	②-1	 長さ：1250	部材破断評価 (部材せい： )	SS400
	②-2	 長さ：8915	支持機能評価 たわみ評価	
	②-3	 長さ：10320		

表 4-2 飛来物の仕様

飛来物	サイズ 長さ×幅×高さ (m)	質量 (kg)	材質
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	SS400
車両	3.6×2.5×8.6	5000	—(注 1)

(注 1) 車両の剛性は 2.94×10^6 N/m とする。

b. 材料定数

飛来物及び架構部材に使用する鋼材の材料定数を表 4-3 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 4-3 使用材料の材料定数

	材質	厚さ (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比
鋼製材	SS400	5 を超え 16 以下	245	2.05×10^5	0.3
架構 部材	SS400			2.05×10^5	0.3
	SM490	5 を超え 16 以下	245	2.05×10^5	0.3
		16 を超え 40 以下	235	2.05×10^5	0.3

c. 動的解析における鋼製材料の非線形特性

飛来物の衝突に対する動的解析を行う場合は、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。

(a) 材料の応力—ひずみ関係

以下に示す Cowper—Symonds の式を適用する。

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

ここで、 σ_{eq} は動的応力、A は降伏応力、B は硬化係数、 ε_{pl} は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{pl}$ 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。ひこれらのパラメータを表 4-4 に示す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式（WES 式）にフィッティングする様に選定した。

表 4-4 Cowper-Symonds 式への入力パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	架構部材	
材料	SS400	SS400	SM490
B			
n			
D (s ⁻¹)			
q			

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第 4-1 図に示す。

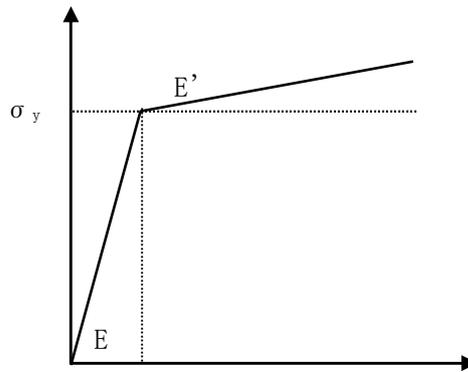


図 4-1 バイリニア型応力-ひずみ関係の概念図

(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 T F (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 T F=2.0 を考慮する。T F については、架構のみ 2.0 とする。

なお鋼製材は、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。

材料ごとの破断ひずみを表 4-5 に示す。

表 4-5 架構部材の破断ひずみ

ケース	材質	JIS 規格値 (伸び)	T F	破断ひずみ※
1	SS400		2.0	0.081
2	SM490		2.0	0.081

※：真ひずみ換算値

(2) 架構全体の支持機能評価

a. 使用材料及び寸法

各架構に用いられる材料及び寸法は、表 4-1 で評価した部材の条件から逸脱しない様に選定する。

なお、衝突評価を実施しない、使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設車両防止柵については、表 4-6 のとおりとする。

表 4-6 架構の使用材料及び寸法の仕様

評価対象	評価部材番号	仕様	材質
使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設車両防止柵	③-1	H-600×200×11×17	SM490

b. 材料定数

架構の使用材料の材料定数を表 4-7 に示す。

表 4-7 架構の使用材料の材料定数

材料	単位体積重量 (kg/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
SM400	7850	2.05×10 ⁵	0.3
SM490	7850	2.05×10 ⁵	0.3

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

飛来物の架構への貫通評価結果を表 5-1 に示す。

評価部材のすべてのケースにおいて貫入深さが部材せいを下回っており、架構部材の全断面喪失は発生しないため、飛来物が架構部材を貫通し、防護対策施設の内側に侵入することはない。

表 5-1 飛来物の架構部材への衝突評価結果

	評価部材 番号	飛来物	貫入深さ (mm)	許容限界 (mm)
<ul style="list-style-type: none"> ・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架構 ・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 	①-1	鋼製材	35	300
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	②-1	鋼製材	82.5	□

5.2 支持機能評価

5.2.1 部材の支持機能評価

(1) 架構への衝突時の支持機能評価

飛来物の架構への衝突時の支持機能評価結果を表 5-2 に示す。架構部材端部に生じる最大ひずみが破断ひずみを上回るケースも認められたが、全断面の破断に至ることはなく、架構部材端部で破断が生じることなく部材は支持される。また、部材の最大ひずみが破断ひずみを下回っていることから、荷重が作用する箇所付近の部材についても破断に至ることはない。

表 5-2 支持機能評価(架構部材への衝突時)

評価対象	評価部材 番号	飛来物	最大 ひずみ	破断ひずみ (許容限界)
<ul style="list-style-type: none"> ・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架構 ・中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構 ・中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構 ・原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構 	①-2	鋼製材	>0.081 但し、全断面の破断には至らない	0.081
	①-3		追而	
海水ポンプエリア竜巻防護対策施設架構	②-2	鋼製材	0.0006	0.081
	②-3		0.0002	

5.2.2 架構全体の支持機能評価

(1)固有値解析

図 3-3～図 3-11 の解析モデルによる固有値解析結果を表 5-15～表 5-20 に示す。

表 5-15 固有振動数(2C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架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
2	2.09×10 ⁴	22.292	0.04486	1.66	0.00	0.05	X 方向
4		29.145	0.03431	-0.90	-0.06	-1.99	Z 方向
15		59.359	0.01685	0.32	-1.13	0.06	Y 方向

表 5-16 固有振動数(2D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架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
6	4.16×10 ⁴	18.834	0.05310	3.69	-0.11	0.14	X 方向
7		21.787	0.04590	0.32	-0.05	-3.40	Z 方向
31		42.496	0.02353	-0.20	-1.26	0.32	Y 方向

表 5-17 有振動数(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン
竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
9	3.32×10 ⁴	24.313	0.04113	-0.01	-0.06	1.40	Z 方向
13		32.885	0.03041	2.04	-0.19	0.20	X 方向
30		56.570	0.01768	-0.01	-1.07	0.31	Y 方向

表 5-18 固有振動数(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	1.21×10 ⁵	6.055	0.1652	8.11	-0.11	-0.23	X 方向
2		6.674	0.1498	0.16	0.06	7.52	Z 方向
55		15.974	0.0626	-0.46	3.10	1.36	Y 方向

表 5-19 固有振動数(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	2.44×10 ⁴	10.344	0.0967	-2.47	-0.512	-0.103	X 方向
3		14.074	0.0711	0.0762	-0.325	3.87	Z 方向
4		15.603	0.0641	-0.894	3.89	0.369	Y 方向

表 5-20 固有振動数(中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構)

次数	質量 (kg)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			卓越方向
				X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	3310	122.863	0.0081	0.00	-1.26	0.00	Y 方向
3		160.005	0.0063	0.00	0.00	1.21	Z 方向
8		269.641	0.0037	0.70	-0.02	0.00	X 方向

(3) 各部材の発生応力の算出

架構各部材に発生する応力の算出結果を表 5-22 に示す。

なお、評価結果は許容応力に対する発生応力の比（検定比）が最も大きいものを記載している。検定比が最大となる点を、図 5-1～図 5-7 に示す。

表 5-22 架構全体の支持機能評価結果

	評価部位	応力分類	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	備考
2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフトントファン竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	110	325	
	アンカーボルト	引張	165	176	
		せん断	13	135	
		組合せ	165	176	
2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフトントファン竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	134	325	
	アンカーボルト	引張	151	176	
		せん断	41	135	
		組合せ	151	176	
高圧炉心スプレイ系非常用ディーゼル発電機室ルーフトントファン竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	108	325	
	アンカーボルト	引張	175	176	
		せん断	23	135	
		組合せ	175	176	
中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	226	325	
	アンカーボルト	引張	139	176	
		せん断	5	135	
		組合せ	139	176	
中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	87	325	
	アンカーボルト	引張	8	176	
		せん断	99	135	
		組合せ	8	88	
原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構	架構	曲げ+せん断	188	325	
	アンカーボルト	引張	70	176	
		せん断	28	135	
		組合せ	70	176	
使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設設車両防止柵	架構	曲げ+せん断	247	325	
	アンカーボルト	引張	86	176	
		せん断	85	135	
		組合せ	86	110	

(注) ボルトの引張応力とせん断応力との組合せ応力 f_{ts} の評価基準値は以下の通り。

$$f_{ts} = \text{Min}\{1.5 f_t, 1.4 \times 1.5 f_t - 1.6 \tau\} \quad (\tau : \text{ボルトに作用するせん断応力})$$

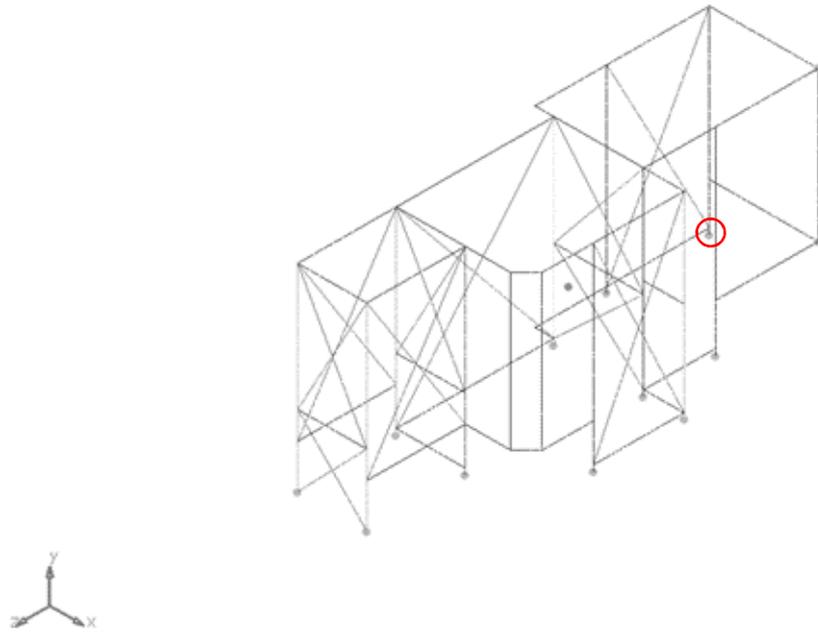


図 5-1 架構の最大検定比発生点（2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン
竜巻防護対策施設架構）

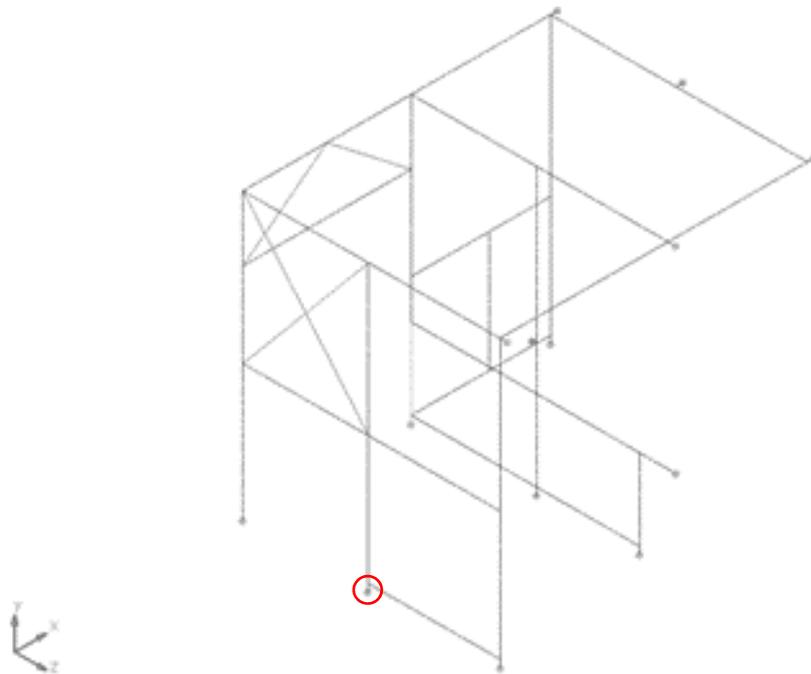


図 5-2 架構の最大検定比発生点（2 D 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン
竜巻防護対策施設架構）

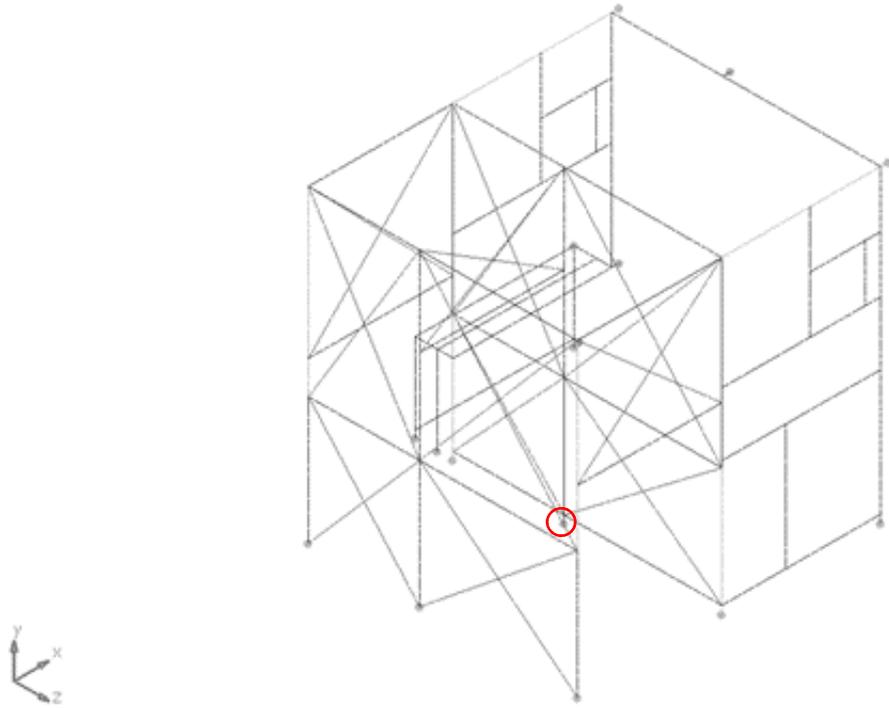


図 5-3 架構の最大検定比発生点（高圧炉心スプレイ系非常用ディーゼル発電機室
ルーフベントファン竜巻防護対策施設架構）

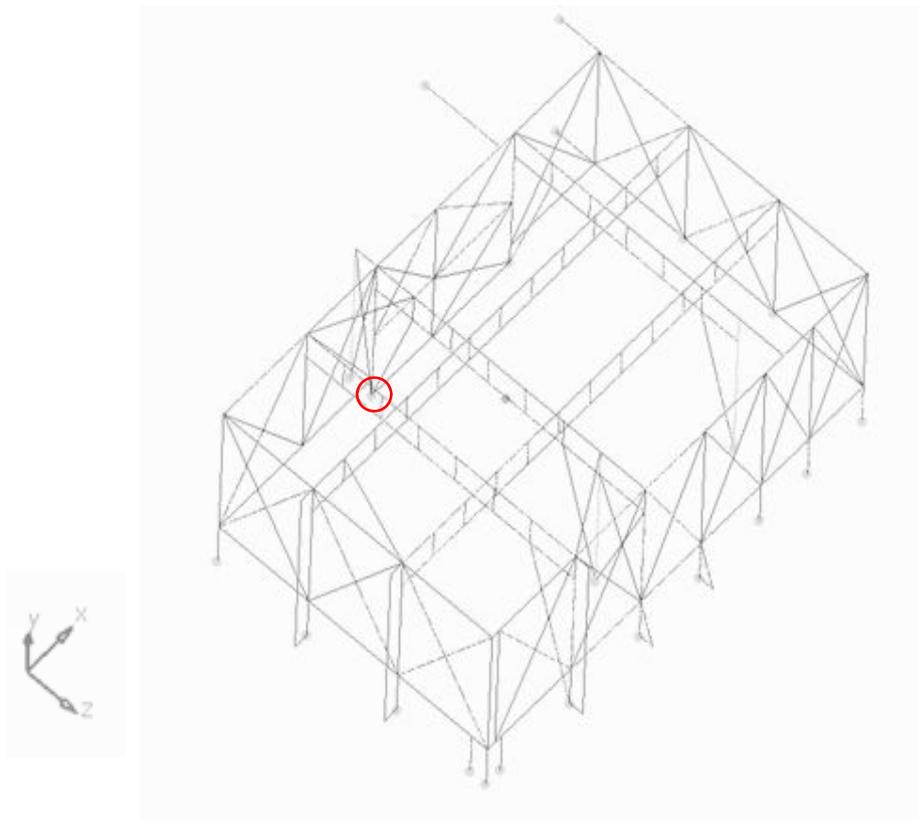


図 5-4 架構の最大検定比発生点（中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設架構）

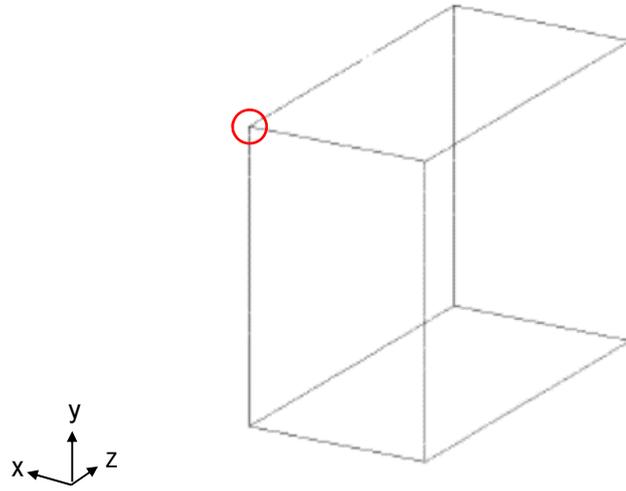


図 5-5 架構の最大検定比発生点（中央制御室換気系開口部竜巻防護対策施設架構）

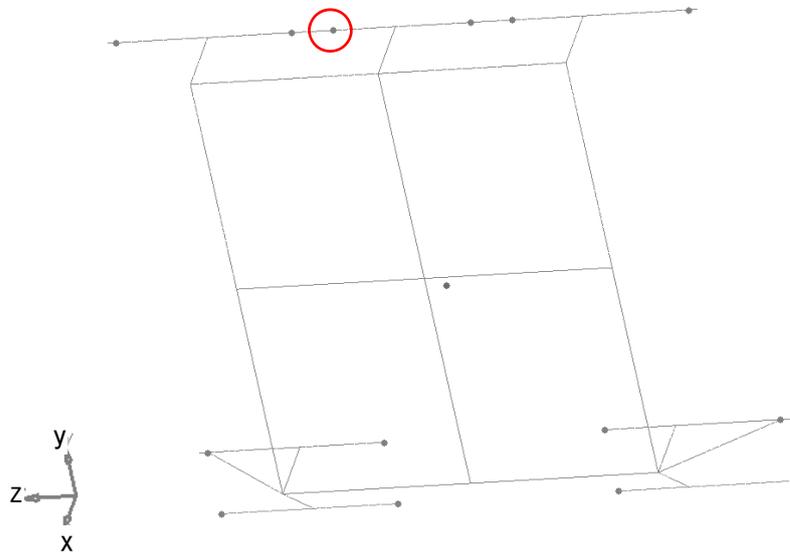


図 5-6 架構の最大検定比発生点（原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設架構）

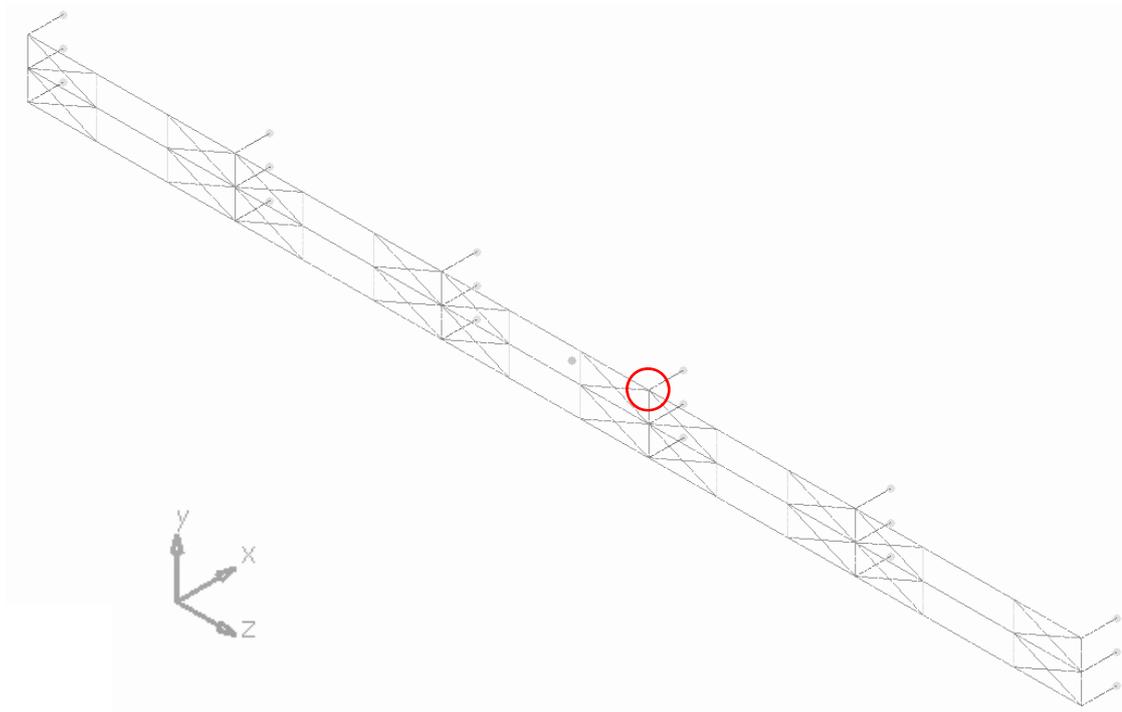


図 5-7 架構の最大検定比発生点（使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設設車両防止柵）