

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添3-013-05改01
提出年月日	2023年3月8日

VI-3-別添 1-5 架構の強度計算書

2023年3月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	4
2.3 評価方針	13
2.4 適用規格・基準等	15
3. 強度評価方法	16
3.1 記号の定義	16
3.2 評価対象部位	17
3.3 荷重及び荷重の組合せ	20
3.4 許容限界	22
3.5 評価方法	24
4. 評価条件	26
5. 強度評価結果	28
5.1 構造強度評価	28

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻防護対策設備のうち竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を支持する架構が、竜巻時及び竜巻通過後においても構造健全性を保持し、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を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」,「3.3 架構の構造設計」及び「5. 許容限界」を踏まえて,竜巻防護対策設備架構の「2.1 位置」,「2.2 構造概要」,「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

竜巻防護対策設備架構は,取水槽(取水槽海水ポンプエリア,取水槽循環水ポンプエリア),燃料移送ポンプエリア及び建物開口部に設置する。架構の位置図を図2-1,取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の位置図を図2-2,燃料移送ポンプエリア防護対策設備の位置図を図2-3に示す。

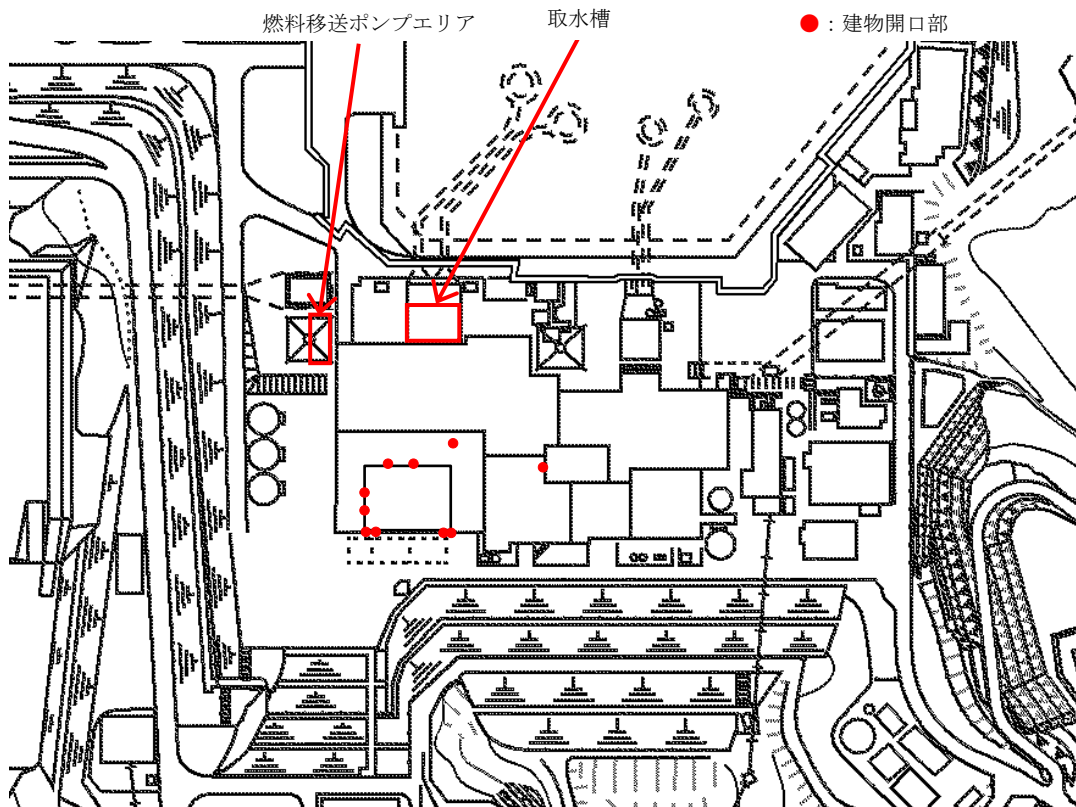


図2-1 架構の位置図

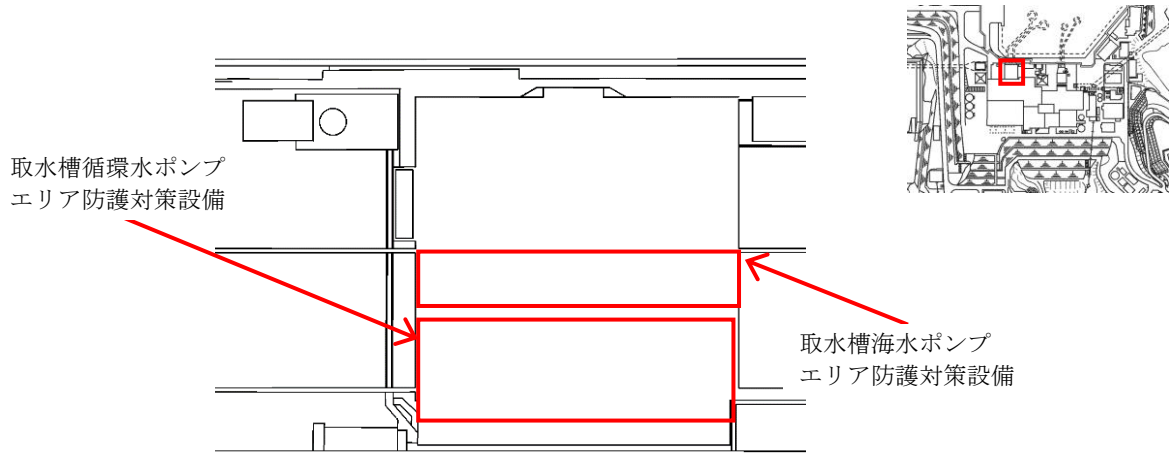


図 2-2 取水槽海水ポンプエリア及び取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の位置図

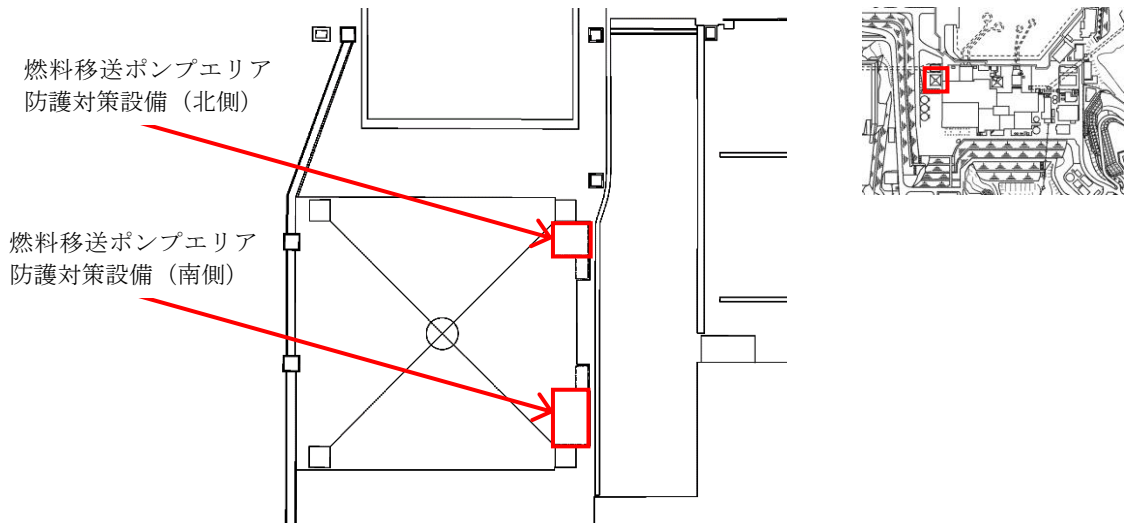


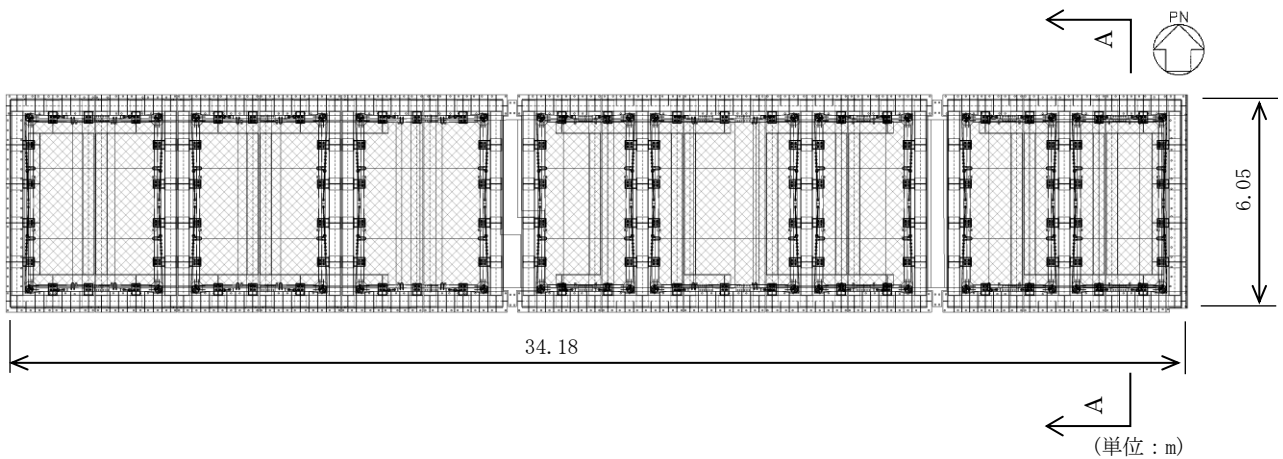
図 2-3 燃料移送ポンプエリア防護対策設備の位置図

2.2 構造概要

VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「3.3 架構の構造設計」に示す構造計画を踏まえて、竜巻防護対策設備架構の構造を設定する。

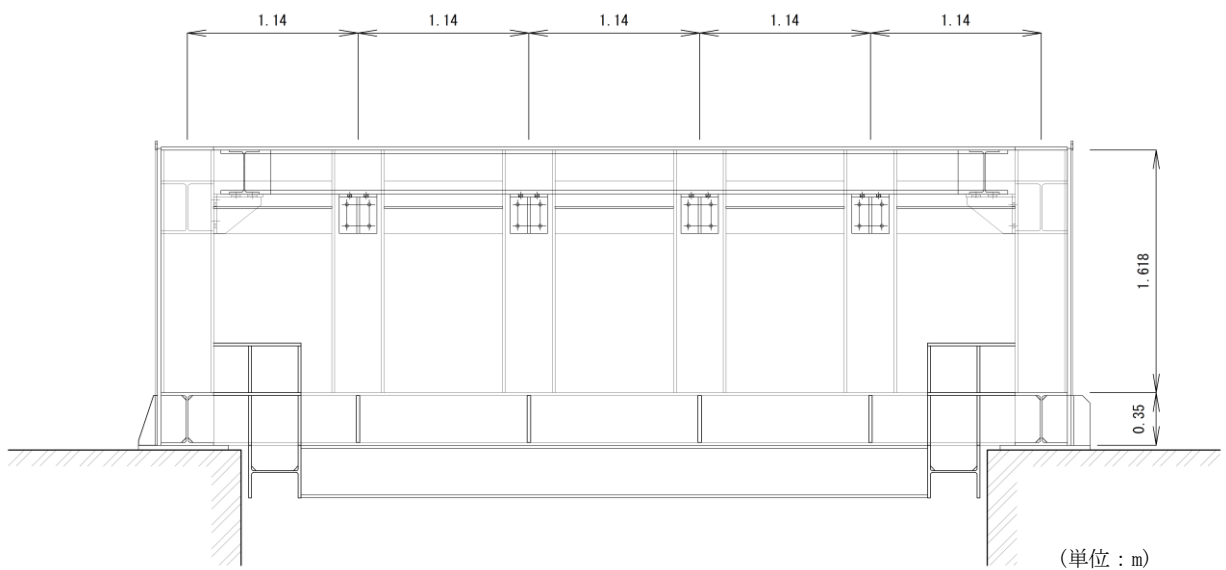
(1) 取水槽海水ポンプエリア架構

取水槽海水ポンプエリア架構は、竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。取水槽海水ポンプエリア防護対策設備の平面図を図 2-4、断面図を図 2-5 に示す。



仕様	材質
	SS400
	SS400

図 2-4 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備の平面図

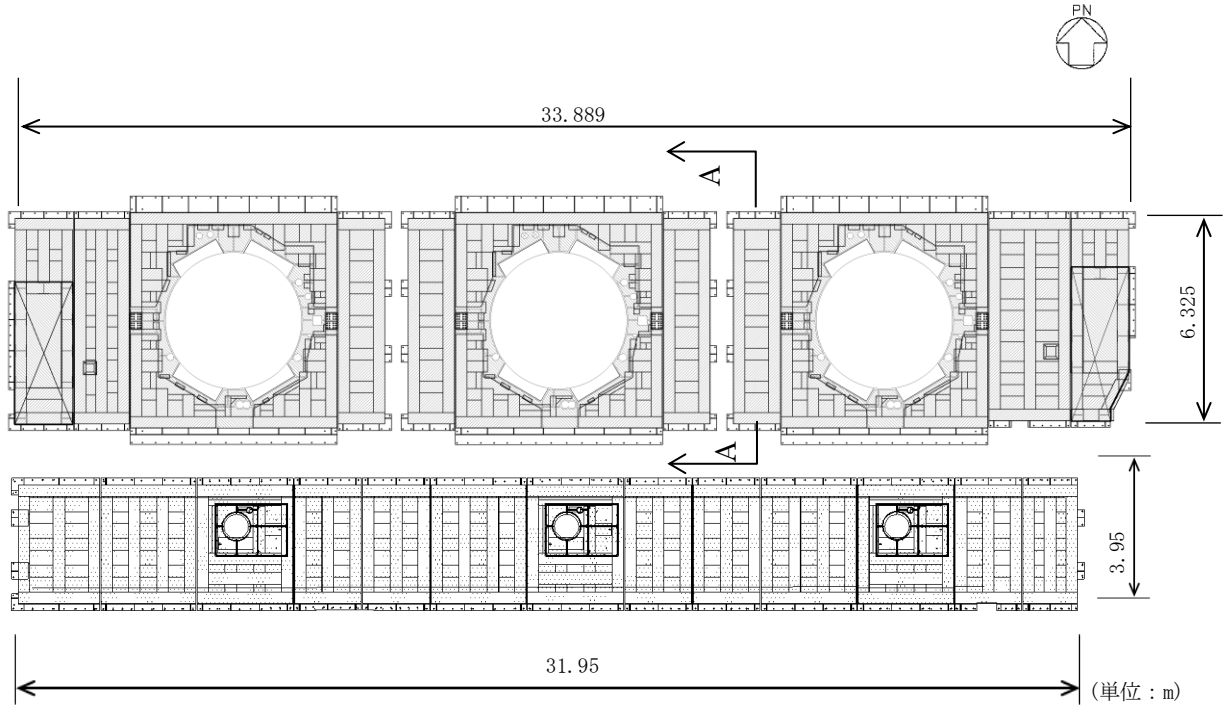


A-A断面図

図 2-5 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備の断面図

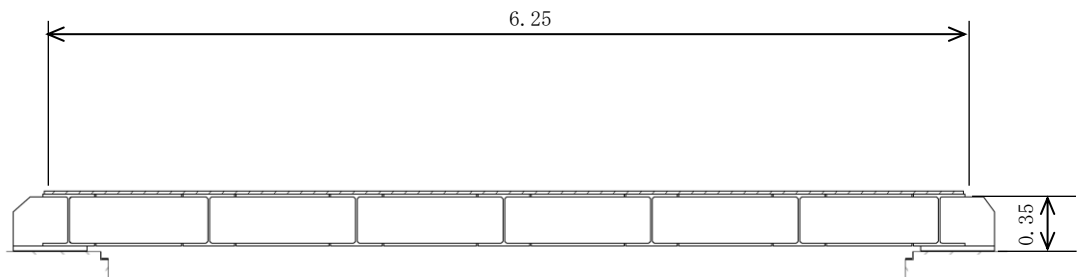
(2) 取水槽循環水ポンプエリア架構

取水槽循環水ポンプエリア架構は、竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の平面図を図 2-6、断面図を図 2-7 に示す。



仕様	材質
	SS400

図 2-6 取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の平面図



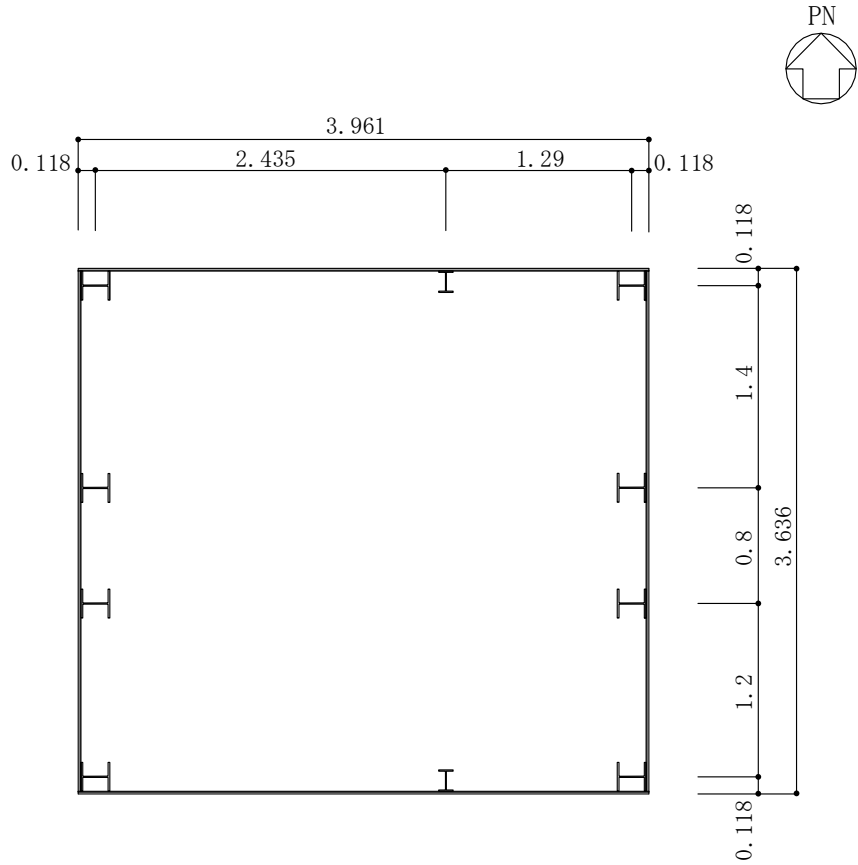
A-A断面図

(単位：m)

図 2-7 取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の断面図

(3) 燃料移送ポンプエリア架構

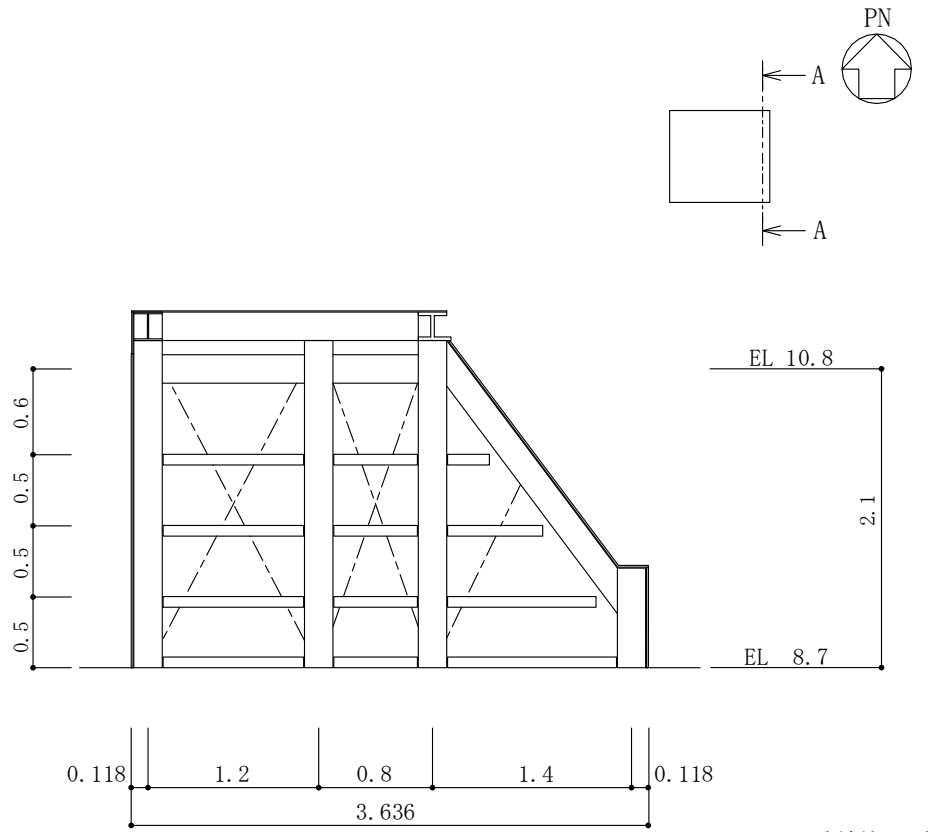
燃料移送ポンプエリア架構は、竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。燃料移送ポンプエリア防護対策設備の平面図を図 2-8 及び 10、断面図を図 2-9 及び 11 に示す。



(単位 : m)

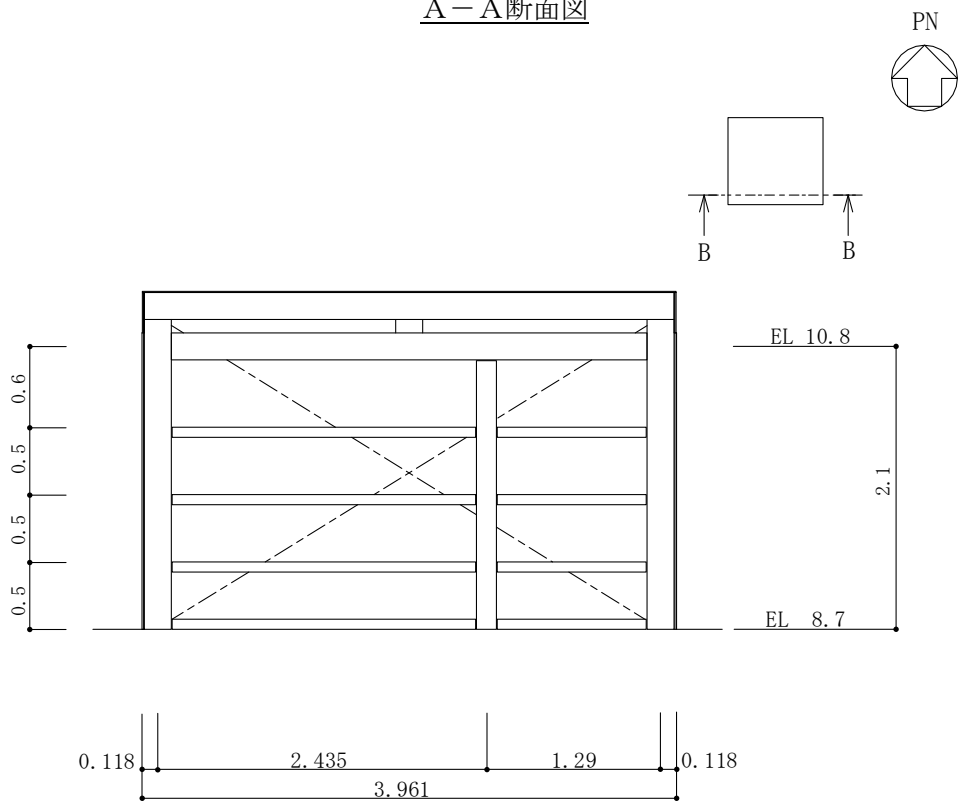
仕様	材質
	SS400
	SS400
	SS400
	SS400
	SS400
	SS400

図 2-8 燃料移送ポンプエリア防護対策設備（北側）の平面図



A-A断面図

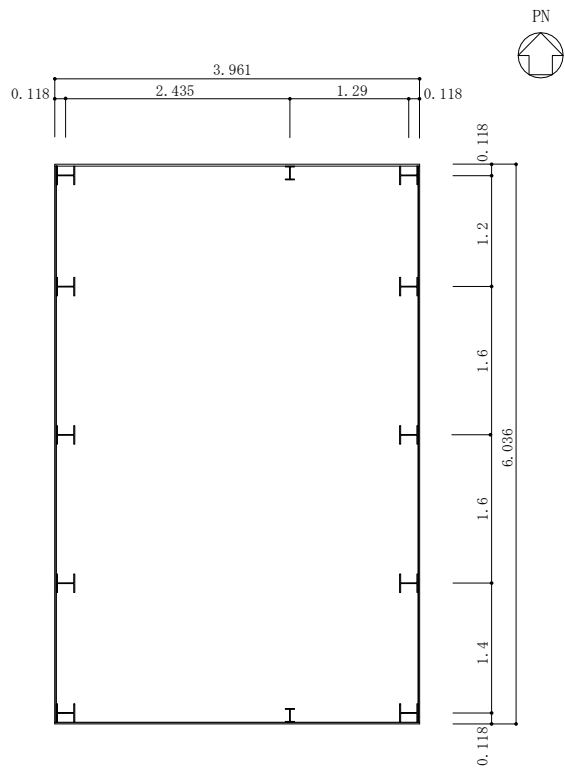
(単位：m)



B-B断面図

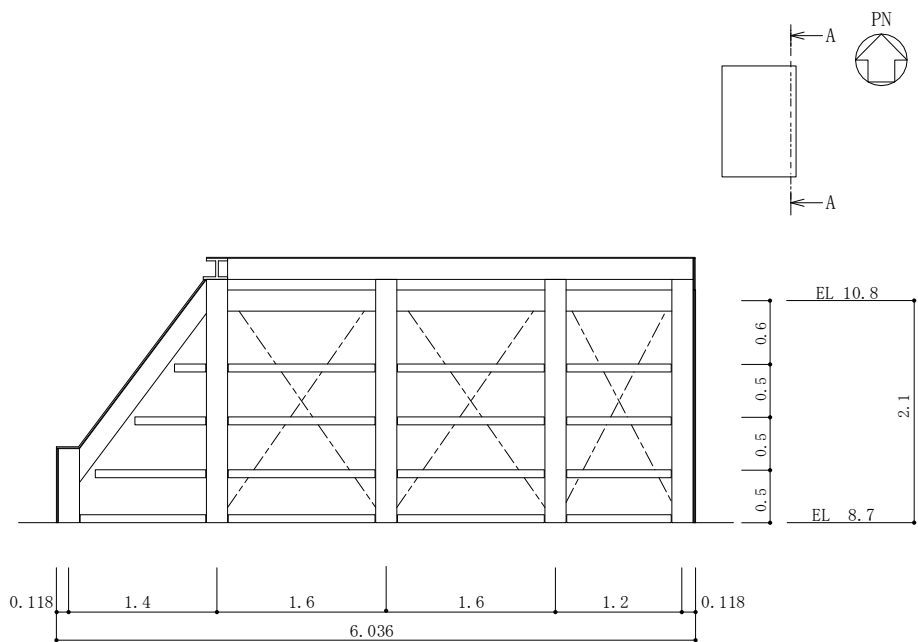
(単位：m)

図 2-9 燃料移送ポンプエリア防護対策設備（北側）の断面図



(単位：m)

図 2-10 燃料移送ポンプエリア防護対策設備（南側）の平面図



(単位：m)

図 2-11 燃料移送ポンプエリア防護対策設備（南側）の断面図（1/2）

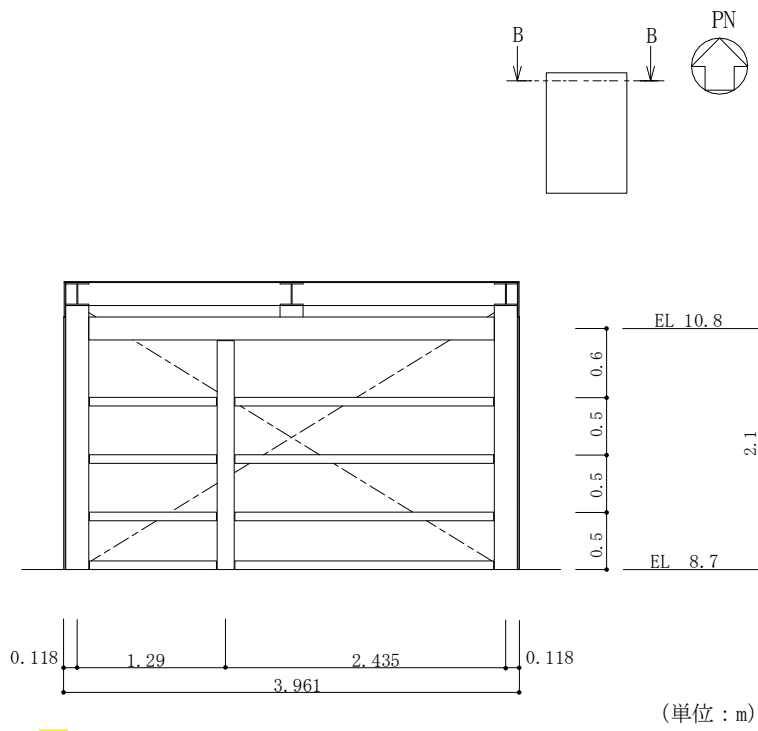


図 2-11 燃料移送ポンプエリア防護対策設備（南側）の断面図（2/2）

(単位：m)

(4) 建物開口部架構

建物開口部架構は、鉄筋コンクリート造の原子炉建物又は廃棄物処理建物に竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を設置するための鉄骨構造であり、柱、はり等により構成される。建物開口部防護対策設備の概要図を図 2-12～図 2-14 に示す。

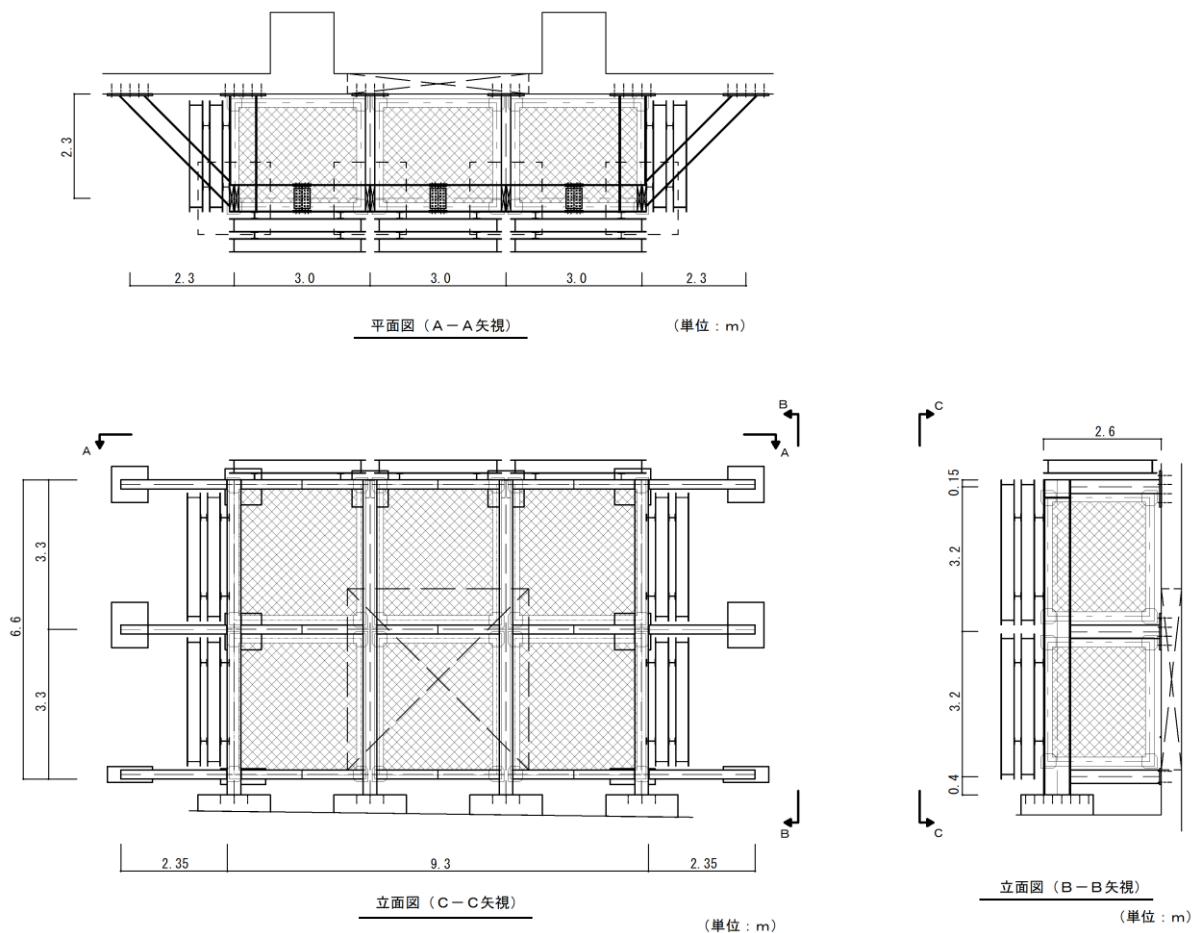
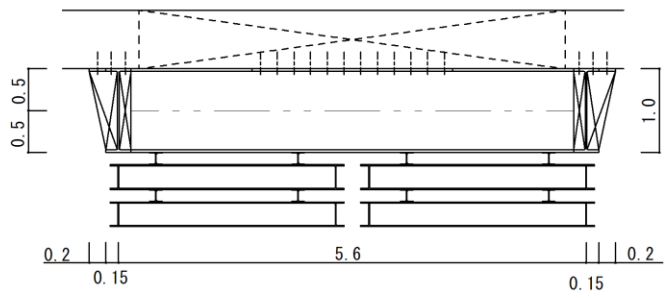
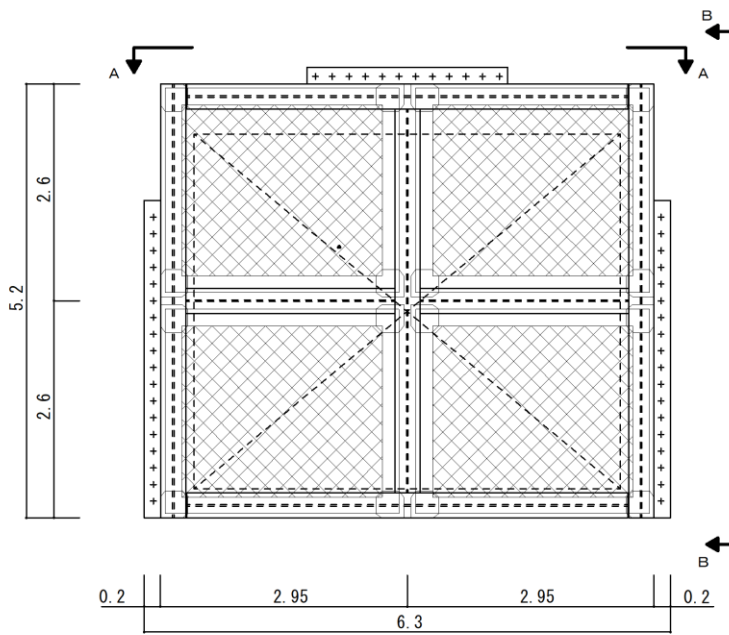


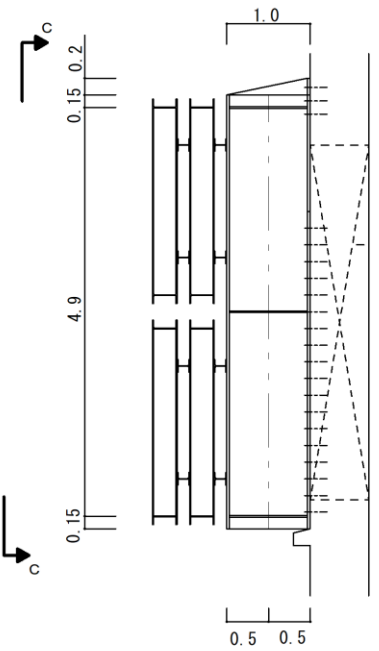
図 2-12 建物開口部防護対策設備の概要図



平面図 (A-A 矢視) (単位: m)



立面図 (C-C 矢視) (単位: m)



立面図 (B-B 矢視) (単位: m)

仕様	材質
	SS400
	SS400

図 2-13 建物開口部防護対策設備の概要図

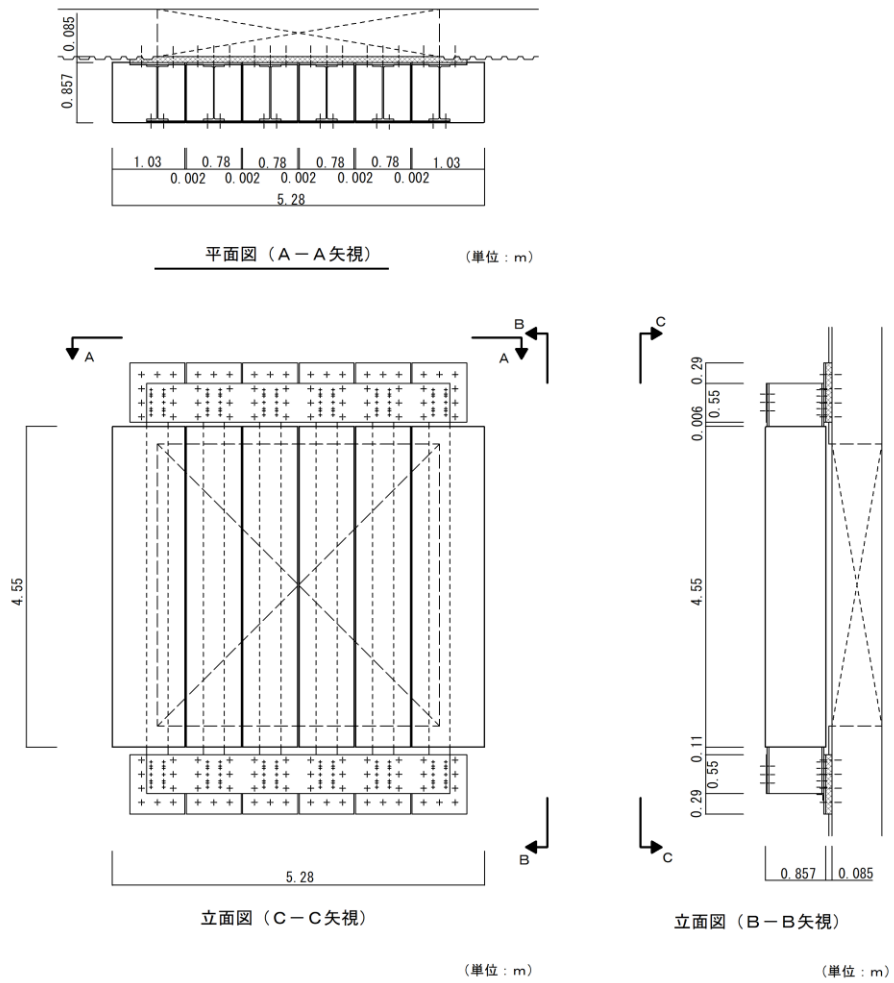


図 2-14 建物開口部防護対策設備の概要図

2.3 評価方針

竜巻防護対策設備架構の強度評価は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 許容限界」を踏まえて、架構の評価対象部位に生じる変形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」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、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、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

架構の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図 2-15 に示す。

- ・設計荷重に対して、架構を構成する部材に転倒及び脱落を生じない設計とするために、架構に終局状態に至るようなひずみが生じないことを確認する。（以下「変形評価」という。）
- ・架構の外側には竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板が設置されており、設計飛来物が直接衝突することはないことから、設計飛来物による架構の貫通は考慮しない。

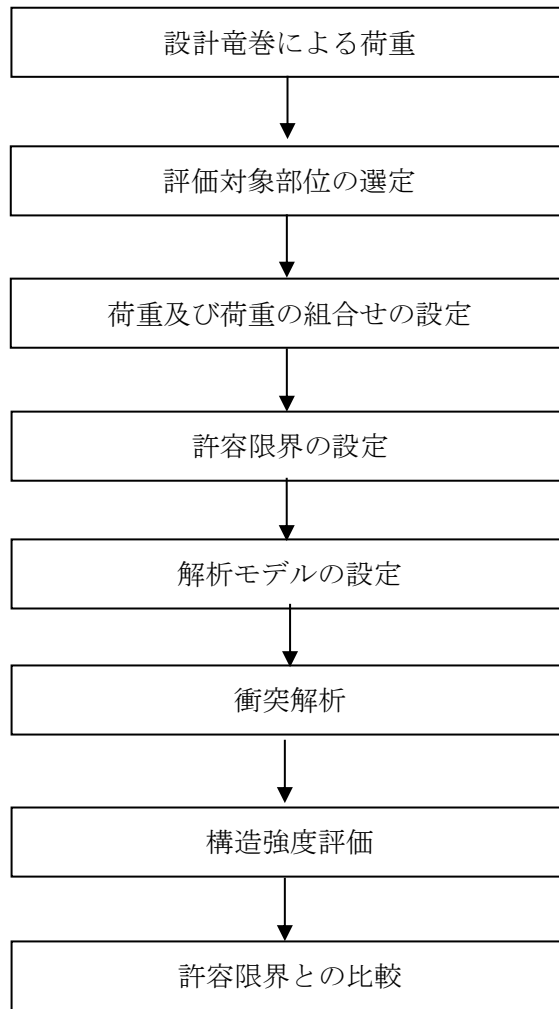


図 2-15 架構の衝突評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」((社) 日本建築学会 (2005))
- ・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))
- ・「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」原子力規制委員会制定
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8(NEI 07-13))
- ・「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)
- ・日本産業規格(J I S) (以下「J I S」という。)
- ・動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物のぜい性破壊性能評価方法 (WES2808 : 2003) ((社) 日本溶接協会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 変形評価の記号の定義

変形評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 変形評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
C	—	風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E'	MPa	塑性硬化係数
F _d	N	常時作用する荷重
G	—	ガスト影響係数
ΔP	N/m ²	最大気圧低下量
q	N/m ²	設計用速度圧
T	°C	想定するひずみ速度時の温度
T ₀	°C	基準ひずみ速度時の温度
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	最大接線風速
V _T	m/s	移動速度
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _w	N	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度
$\dot{\varepsilon}$	—	想定するひずみ速度
ε'	—	破断ひずみ
$\dot{\varepsilon}_0$	—	基準ひずみ速度
σ _T	MPa	想定するひずみ速度時の引張強さ
σ _{T0}	MPa	基準ひずみ速度時の引張強さ
σ _Y	MPa	想定するひずみ速度時の降伏応力
σ _{Y0}	MPa	基準ひずみ速度時の降伏応力

3.2 評価対象部位

竜巻防護対策設備架構の評価対象部位は、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「5.3 架構の許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、選定する。

(1) 変形評価の評価対象部位

設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の支持間隔が長いほどたわみ量が大きくなる傾向にある。このため、竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を支持する架構部材の支持間隔が最長となる箇所を選定する。衝突位置については、たわみ量が大きくなるよう部材の中央とする。

・取水槽海水ポンプエリア架構

竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる鋼板を支持する架構の中央を選定する。取水槽海水ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-1 に示す。

・取水槽循環水ポンプエリア架構

竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる架構部材の中央を選定する。取水槽循環水ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-2 に示す。

・燃料移送ポンプエリア架構

竜巻防護鋼板を架構により支持する構造であり、設計飛来物の衝突位置は、部材に生じる曲げモーメントが最大となる架構部材の中央を選定する。燃料移送ポンプエリア架構の評価対象部位を図 3-3 に示す。

・建物開口部架構

竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を建物外壁に接した架構により支持する構造である。竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板に作用する設計飛来物による衝撃荷重は、架構を介して建物外壁に伝達されること（図 3-4 参照）並びに建物開口部架構は、他の竜巻防護対策設備架構の評価対象部位となる架構と同等以上の強度を有する部材を使用していることから、架構に有意な変形は生じないため、建物開口部架構は変形評価の対象としない。取水槽循環水ポンプエリア架構及び建物開口部架構の材料仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 取水槽循環水ポンプエリア及び建物開口部の架構

竜巻防護対策設備	仕様	スパン (m)
取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備		約 6.3
建物開口部防護対策設備		約 4.6

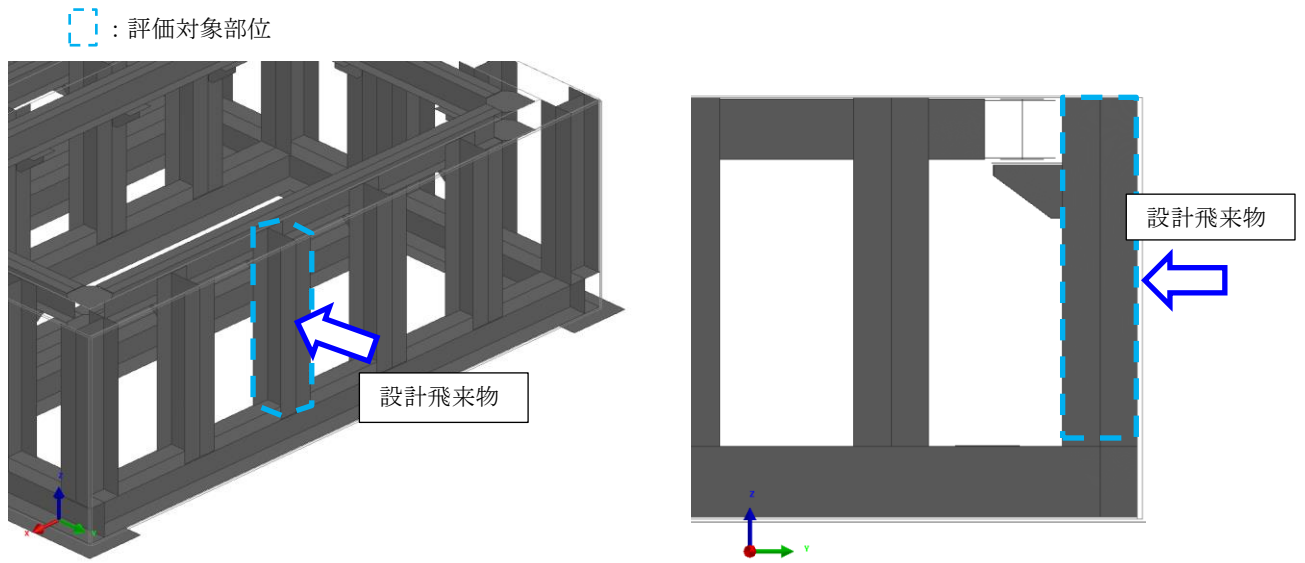


図 3-1 変形評価の評価対象部位（取水槽海水ポンプエリア防護対策設備）

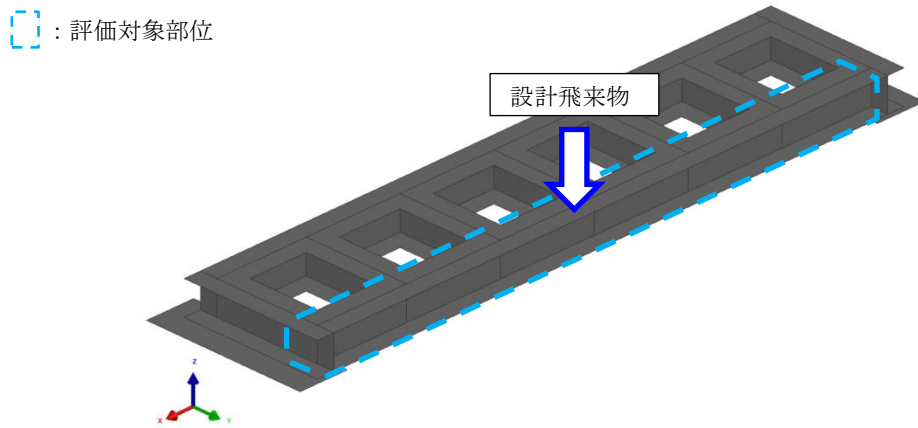


図 3-2 変形評価の評価対象部位（取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備）

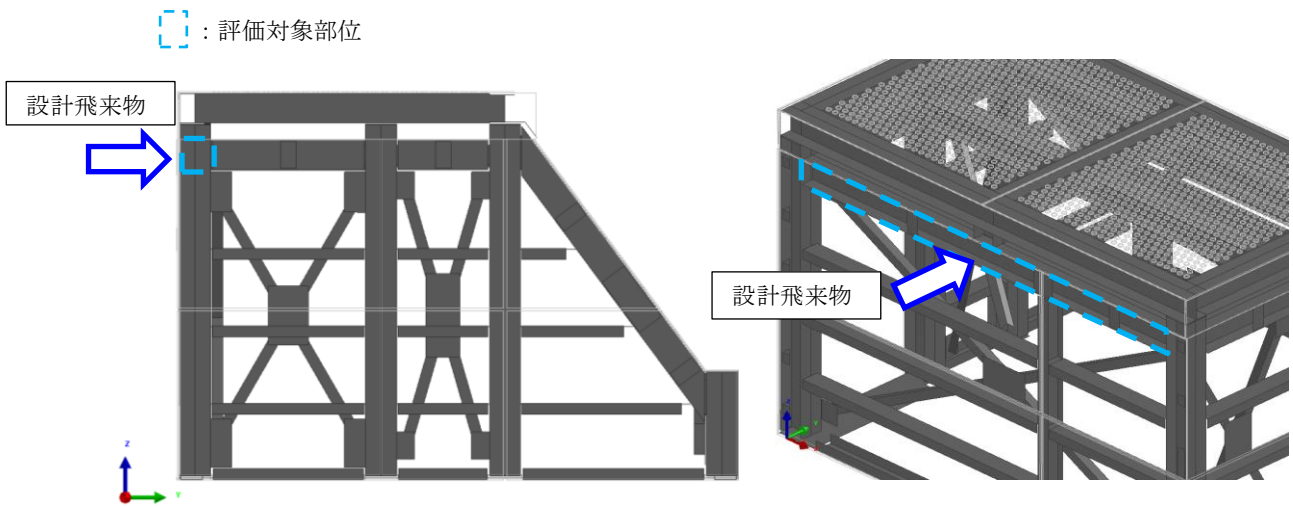


図 3-3 変形評価の評価対象部位（燃料移送ポンプエリア防護対策設備）

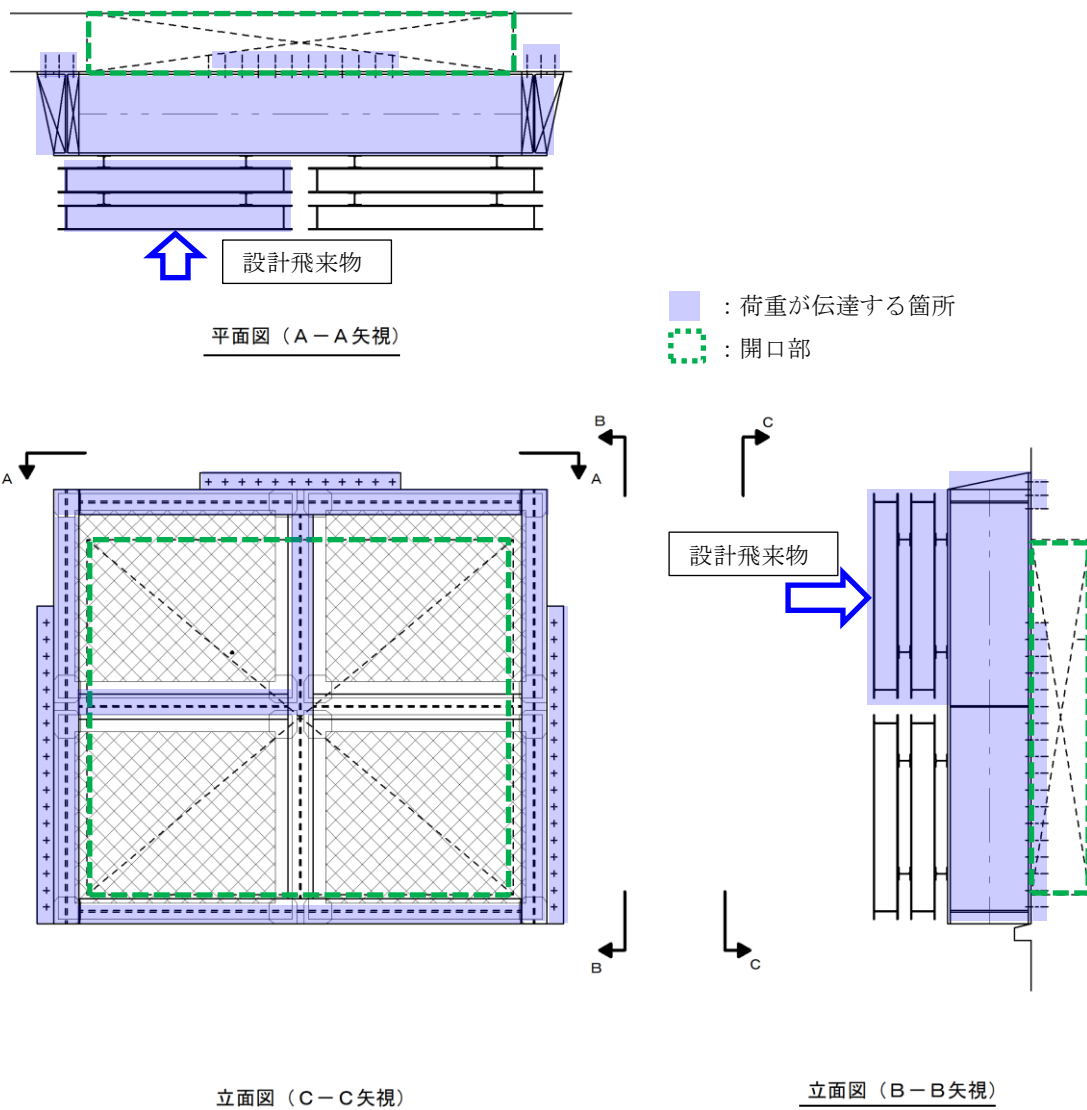


図 3-4 建物開口部防護対策設備における設計飛来物による衝撃荷重の伝達箇所

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は，VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

衝突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 3-3 に示す。

表 3-3 荷重算定に用いる竜巻の特性値

V_D (m/s)	V_T (m/s)	V_{Rm} (m/s)	ΔP (N/m ²)
92	14	78	7500

(a) 竜巻による荷重

イ. 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。

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

設計用速度圧 q は，次式により算定する。

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

ロ. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) については，表 3-4 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また，設計飛来物の材料定数を表 3-5 に示す。

表 3-4 設計飛来物の諸元

設計飛来物	サイズ 長さ×幅×奥行き (m)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	質量 (kg)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	51	34	135

表 3-5 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	σ_{Y0} (MPa)	E (MPa)	ポアソン比
鋼製材	245	2.06×10^5	0.3

(b) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 (F_d) としては、架構部材の自重、架構に取り付く竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の上載荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

衝突評価に用いる荷重の組合せは、VI-3-別添 1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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、設計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。

衝突評価において考慮す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
波及的影響評価	$W_w + W_M + F_d$

3.4 許容限界

竜巻防護対策設備架構の許容限界は、VI-3-別添1-2「竜巻防護対策設備の強度計算の方針」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」にて設定している部位における機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 評価対象部位の材料仕様

構造強度評価にて選定する架構の材料及び寸法の仕様を表3-7に示す。

表3-7 評価対象部位の材料仕様

設置エリア	仕様	材質
取水槽海水ポンプエリア		SS400
取水槽循環水ポンプエリア		SS400
燃料移送ポンプエリア		SS400

(2) 評価対象部位の材料定数

使用材料の材料定数を表3-8に示す。材料定数は、JIS及び「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」に基づき設定する。

表3-8 評価対象部位の材料定数

材質	厚さ (mm)	σ_{Y0} (MPa)	E (MPa)	σ_{T0} (MPa)	ϵ' (-)	E' (MPa)
SS400			2.06×10^5	400		
			2.06×10^5	400		
			2.06×10^5	400		

(3) 構造強度評価の許容限界

設計飛来物が架構及び竜巻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、架構部材端部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、架構部材端部及びその近傍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、材料の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「4.(3)c.破断ひずみ」に示すとおり、J I S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2軸引張状態で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、破断ひずみを超える範囲が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3-9に示す。

表3-9 許容限界 (波及的影響評価)

材質	J I S規格値	破断ひずみ* (TF=2.0のとき)
SS400		
SS400		
SS400		

注記* : 真ひずみ換算値

3.5 評価方法

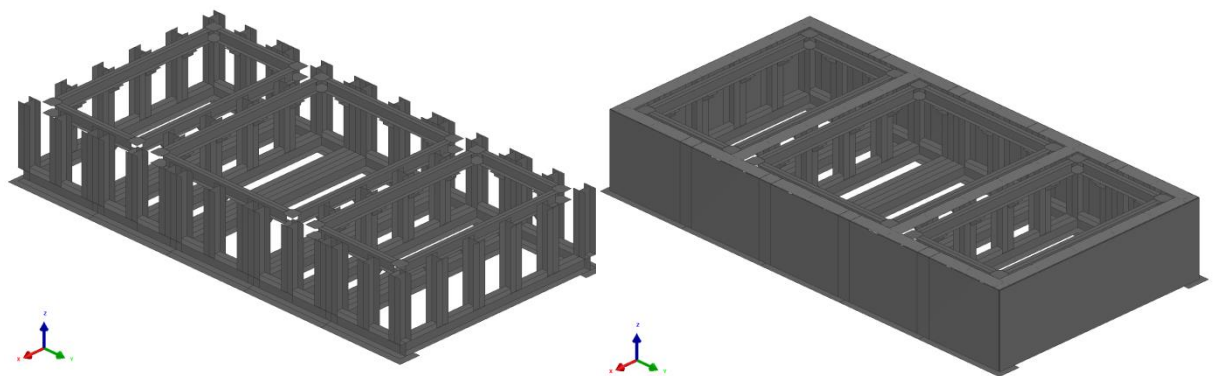
(1) 構造強度評価

竜巻防護対策設備架構の強度評価は、架構又は竜巻防護鋼板に設計飛来物が衝突した場合の波及的影響評価においては、解析コード「Virtual Performance Solution」を用いて3次元FEMによりモデル化し評価を実施する。

取水槽海水ポンプエリア防護対策設備、取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備及び燃料移送ポンプエリア防護対策設備の衝突解析モデル並びに設計飛来物の解析モデルを図3-5～図3-8に示す。これらの解析モデルを用いて、設計飛来物が架構に衝突する場合に、架構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。

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。

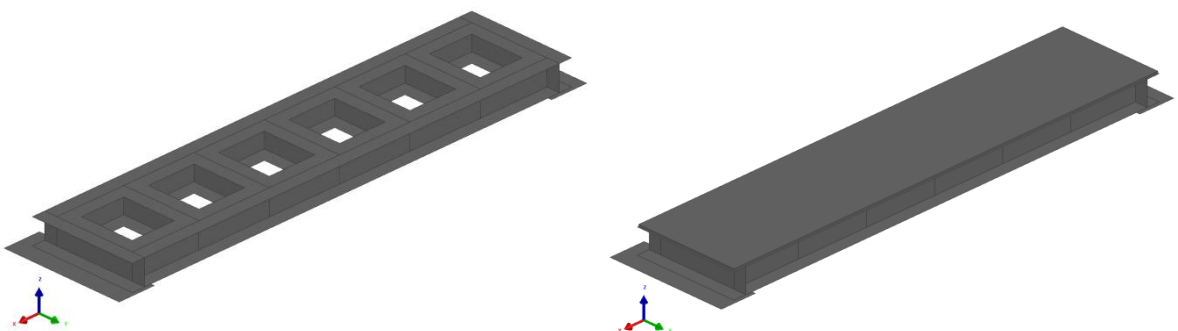
なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5-43「計算プログラム（解析コード）の概要・Virtual Performance Solution」に示す。



竜巻防護鋼板非表示

竜巻防護鋼板表示

図3-5 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備の衝突解析モデル



竜巻防護鋼板非表示

竜巻防護鋼板表示

図3-6 取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備の衝突解析モデル

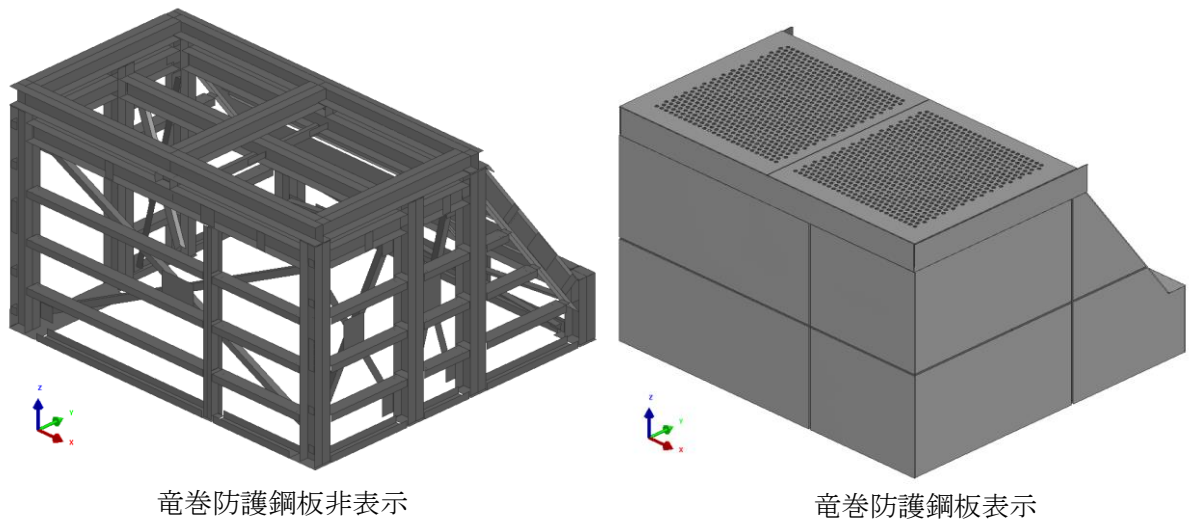


図 3-7 燃料移送ポンプエリア防護対策設備の衝突解析モデル

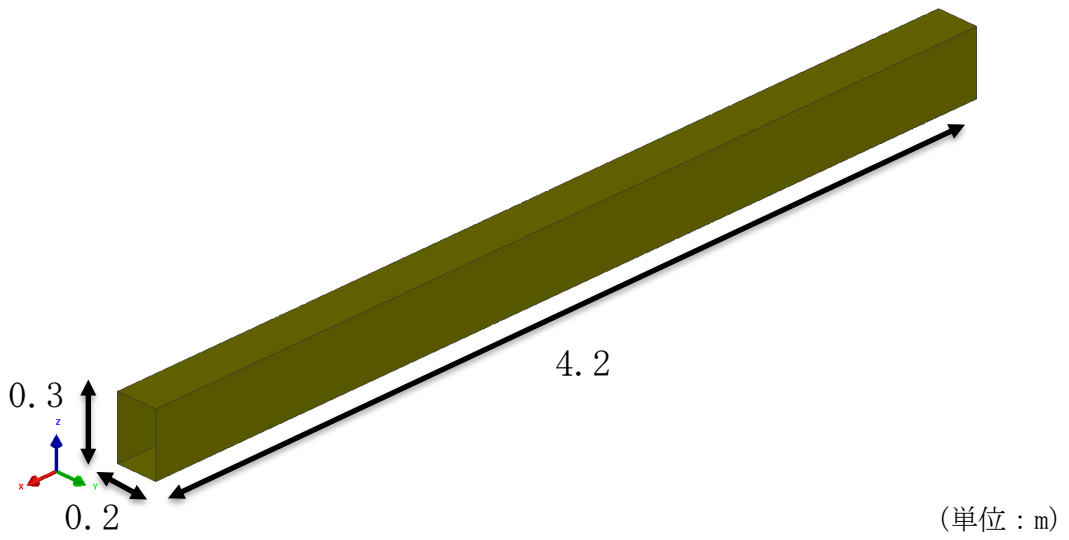


図 3-8 設計飛来物 (鋼製材) の解析モデル

4. 評価条件

(1) 使用材料及び寸法

波及的影響評価にて選定する架構の材料及び寸法の仕様については、「3.4(1) 評価対象部位の材料仕様」に示すとおり設定する。

(2) 材料定数

架構の材料定数については、「3.4(2) 評価対象部位の材料定数」に示すとおり設定する。

(3) 材料の非線形特性

a. 材料の応力－ひずみの関係

材料モデルでは、架構の破断ひずみを設定し、破断ひずみを越えた要素が荷重を負担しないことを考慮する。材料の応力－ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後の塑性硬化係数（2次係数E'）は、表3-7に示す値とする。材料に適用するバイリニア型の応力－ひずみの関係を図4-1に示す。

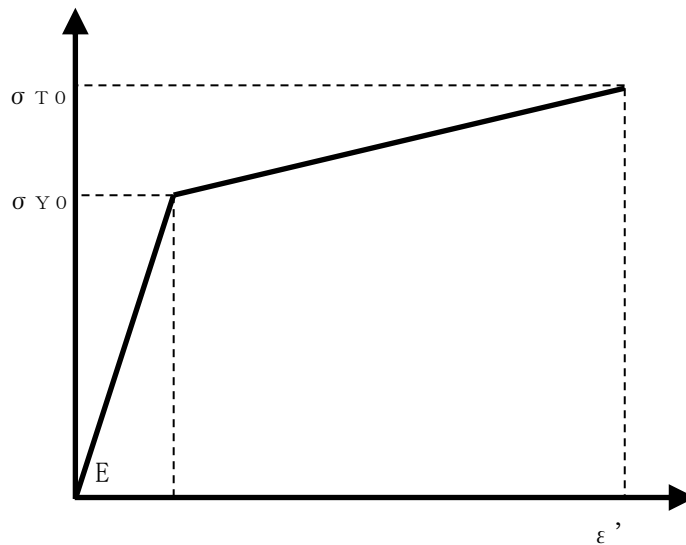


図4-1 架構及び設計飛来物（鋼製材）の応力－ひずみ線図

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いため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す日本溶接協会の推定式（以下「WES式」という。）から得られる動的増大効果を線形補間し設定する。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left\{ 8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \frac{1}{T \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon}_0)} \right\}$$

c. 破断ひずみ

破断ひずみは、J I S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2軸引張状態でT F=2.0を考慮する。T Fについては、架構のみ考慮する。

なお、安全側の評価として、架構の破断ひずみを超えた要素は削除することとし、鋼製材の破断ひずみを超えた要素は削除せず、荷重を伝達するものとする。

材料ごとの破断ひずみを表4-1に示す。

表4-1 架構の破断ひずみ

種別	材質	J I S規格値	T F	破断ひずみ*
架構	SS400		2.0	
	SS400		2.0	
	SS400		2.0	

注記*：真ひずみ換算値

5. 強度評価結果

5.1 構造強度評価

(1) 取水槽海水ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-1、図 5-1 及び図 5-2 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えず、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-1 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ*
取水槽海水ポンプエリア架構		

注記*：真ひずみ換算値

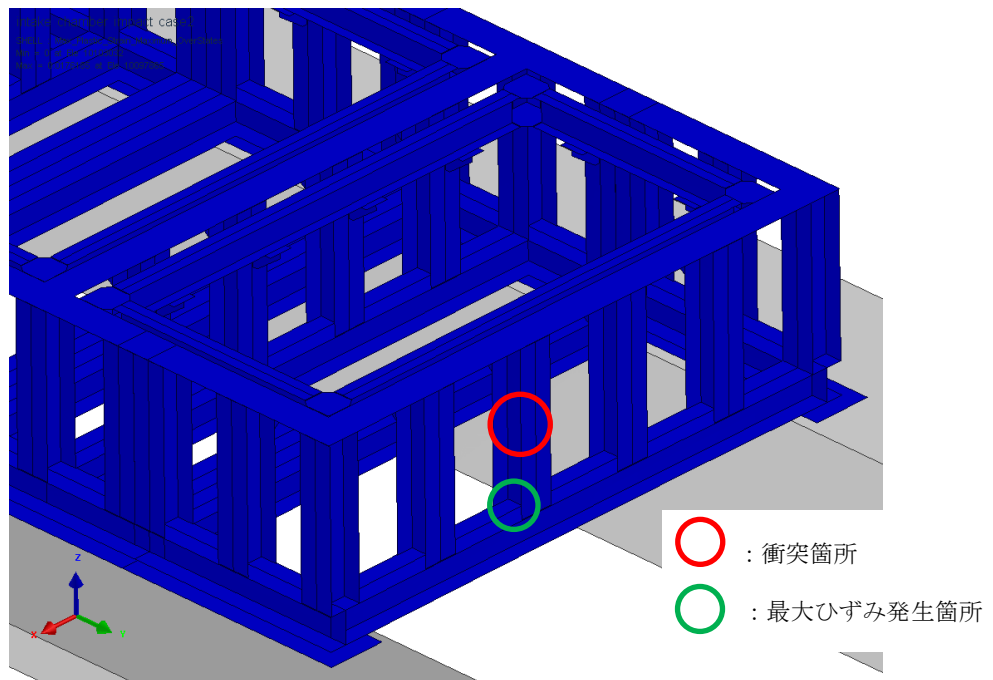


図 5-1 ひずみ分布図（部材変位最大時）

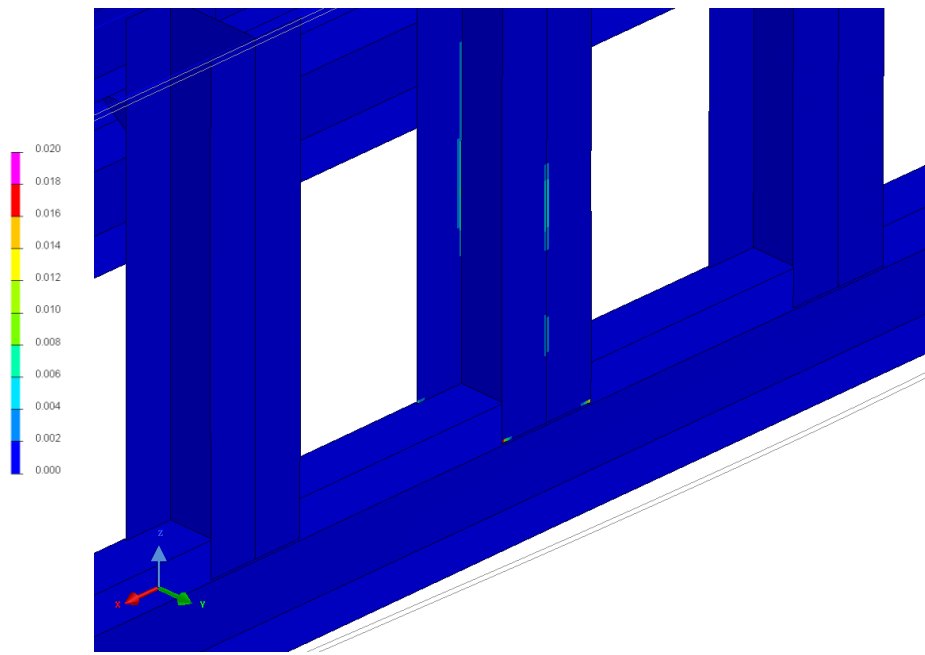


図 5-2 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)

(2) 取水槽循環水ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-2、図 5-3 及び図 5-4 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えず、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-2 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ*
取水槽循環水ポンプエリア架構		

注記*：真ひずみ換算値

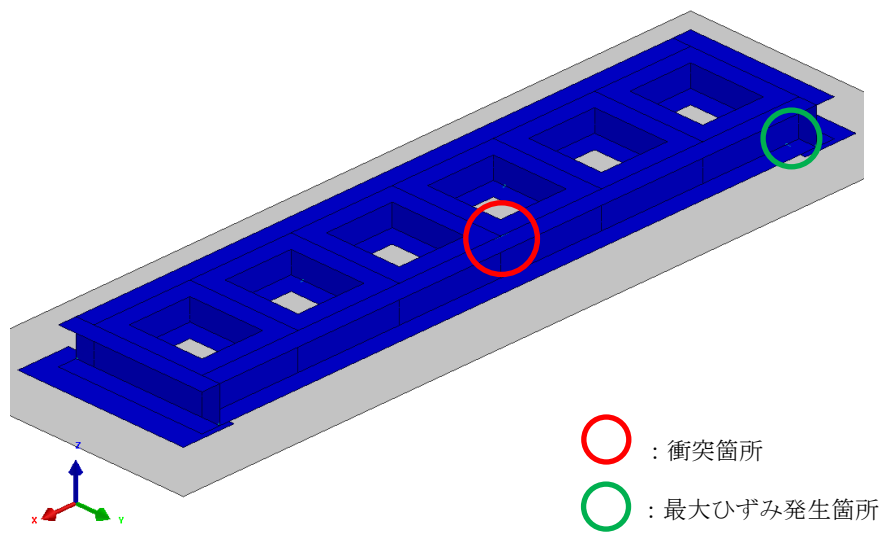


図 5-3 ひずみ分布図 (部材変位最大時)

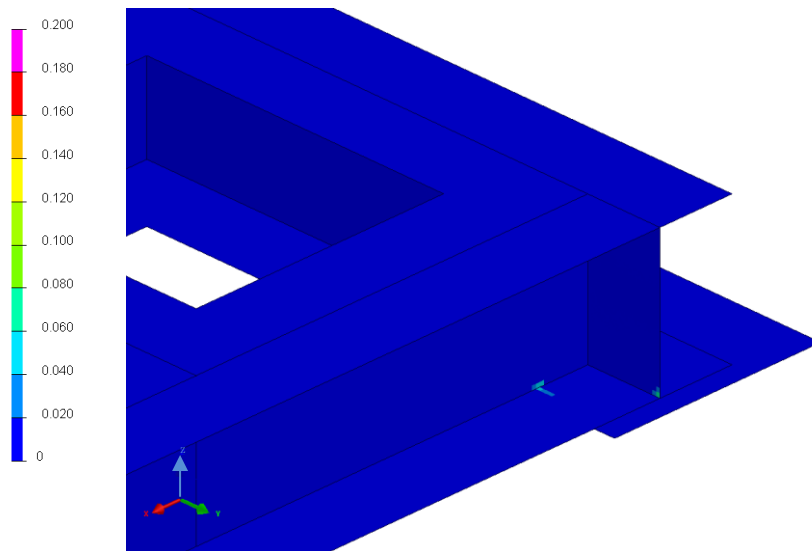


図 5-4 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)

(3) 燃料移送ポンプエリア架構

設計飛来物の架構への衝突時の構造強度評価結果を表 5-3、図 5-5 及び図 5-6 に示す。架構を構成する部材の最大ひずみは、破断ひずみを超えるが、その範囲は局所的であり、架構を構成する部材に転倒及び脱落は生じない。

表 5-3 構造強度評価結果

評価対象	最大ひずみ	破断ひずみ*
燃料移送ポンプエリア架構		

注記*：真ひずみ換算値

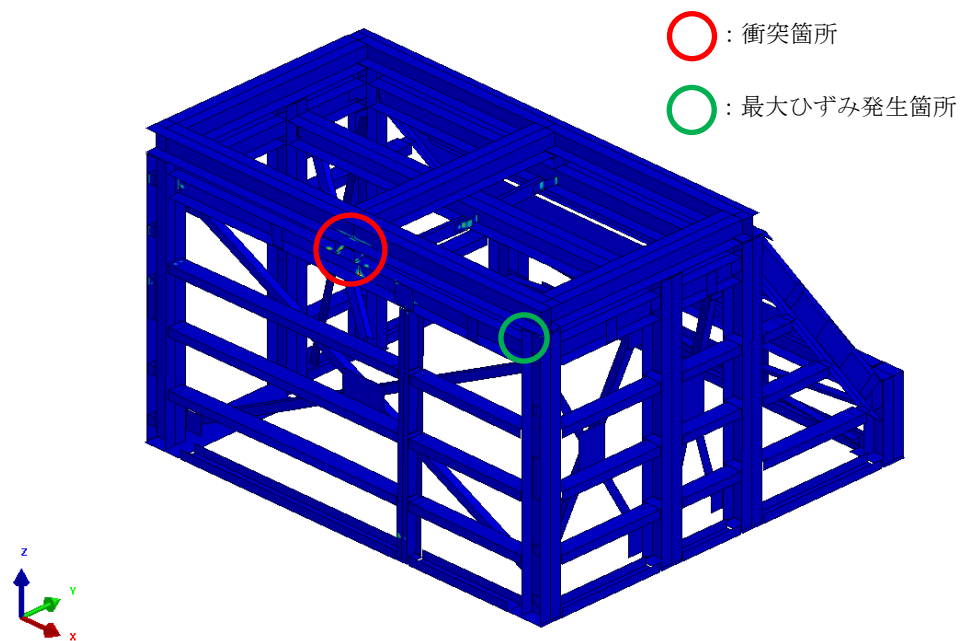


図 5-5 ひずみ分布図 (部材変位最大時)

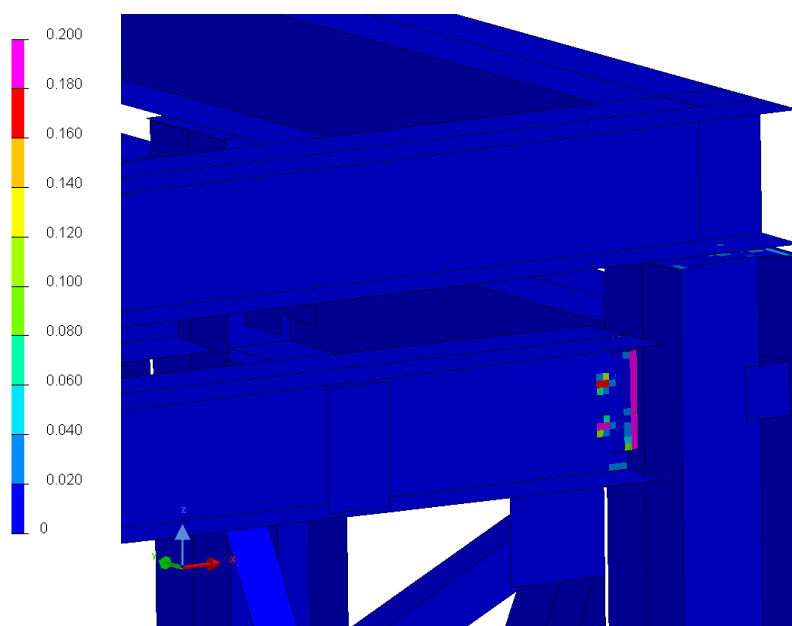


図 5-6 ひずみ分布図 (最大ひずみ発生箇所拡大図)