

泊発電所3号機
竜巻影響評価結果
補足説明資料

平成26年3月4日
北海道電力株式会社

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

目 次

I. 竜巻影響評価について

1. 基準竜巻の設定について
2. 相関係数の算出及び検定方法について
3. 総観係数の分布図
4. 襟裳岬から東側の海岸線等における竜巻発生数
5. 円形構造物に対する竜巻移動方向の依存性について
6. 竜巻発生個数の補正方法の妥当性について
7. 竜巻集中地域の評価について
8. ポアソン分布を用いたハザード曲線の評価
9. 地形効果による竜巻風速の増幅について
10. 竜巻防護施設の評価対象施設の抽出について
11. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
12. 想定飛来物の抽出及び設計飛来物の設定について
13. 運転時荷重の組み合わせを考慮していない理由について
14. 雹を飛来物として想定した場合の影響評価について
15. 設計基準事故時荷重の組み合わせを考慮していない理由について
16. 建物・構築物等の構造健全性の確認内容について
17. 評価式の妥当性及び評価方法について
18. デッキプレート等によるコンクリート片の飛散防止について
19. 評価対象施設の評価実施項目および考え方について
20. 評価対象施設の評価方法について
21. BRL 式の妥当性および評価内容について
22. 使用済燃料ピット内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件および評価式について
23. 新燃料貯蔵庫内へ設計飛来物が進入した場合の影響評価に係る評価条件等について
24. 燃料移送装置および使用済燃料ピットクレーンへの設計飛来物による影響評価について
25. 評価対象施設の評価結果について
26. 飛来物対策について
 - 添付資料－1 作業中の業務車両退避訓練の状況について
 - 添付資料－2 防護ネット等の設置による防護対象設備のメンテナンス性への影響について
27. 竜巻襲来時において排気筒に求められる機能について
28. 気圧差の影響を受けることが想定される設備の影響評価について

II. 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドへの適合状況について

 は今回ご説明資料を示す（今回見直し）

I. 竜巻影響評価について

26. 飛来物対策について

泊発電所構内には、屋外に保管されている各種資機材、車両等、飛来物になり得るものが存在している。設計竜巻によりこれら飛来物が竜巻防護施設に衝突した場合は、貫通等の損傷により安全機能の維持に影響を与えることも考えられることから、以下の対策を実施する。

(1) 基本方針

a. 飛来物発生防止対策

飛来物になり得るものを極力減らすことが重要であるため、次の事項を遵守し飛散防止を図る。

(a) 作業等で使用しないもの

- ・ 発電所構内に置かない（撤去する）。

(b) 作業等で使用するもの

- ・ アンカーにより建屋等堅牢な構造物等へ固縛する。
- ・ 十分な重さのウエイト取付ける、または複数纏めて固縛する。
- ・ 業務車両は竜巻が襲来する恐れが生じた場合に速やかに移動できる体制を取る。
- ・ 業務車両以外の車両は構内への入構を禁止する。
- ・ 重大事故等対処設備は必要時の利用可能性を確保しつつ、十分な重さのウエイトを取付ける、またはアンカーにより地面へ固縛する。
- ・ 飛散および横滑りを考慮して、竜巻防護施設から十分な離隔距離を確保する。

b. 飛来物防護対策


上記1. 項の飛来物発生防止対策を実施したとしても、作業のために設置している仮設足場等、飛来物になり得るものをゼロにするのは困難と考えられるため、竜巻防護施設に対する設計飛来物による構造健全性等への影響を評価し、設計飛来物が衝突した場合に安全機能を喪失する可能性のある竜巻防護施設（設備）については、安全機能の維持に影響を与えないよう、防護ネット、防護板等を設置し飛来物から防護する。


(2) 飛来物発生防止対策

上記基本方針に基づき、想定飛来物に対して飛散防止対策を実施する。

表-1 に主な想定飛来物の飛散防止対策方法を示す。

表-1 主な想定飛来物の飛散防止対策方法

No.	想定飛来物	飛散防止対策方法
1	コンテナ※	<ul style="list-style-type: none"> ・ 十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ ウエイトの重量については、コンテナの自重+ウエイトの重量により空力パラメータが0.0026以下となる重量とする。  <p>コンテナの飛散防止対策例</p>

2	鋼製パイプ※	<ul style="list-style-type: none"> • 単品で置かず複数本を束にして固縛する。 • 束にする本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。  <p style="text-align: center;">鋼製パイプの飛散防止対策例</p>
3	鋼製材※	<ul style="list-style-type: none"> • 単品で置かず複数本を重ねて固縛する、または十分な重さのウェイトを取付ける。 • 重ねる本数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。 • ウェイトの重量については、鋼製材の自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。
4	仮設足場材	<ul style="list-style-type: none"> • 単品で置かず複数枚を重ねて固縛し、十分な重さのウェイトを取付ける、またはアンカーにより建屋等堅牢な構造物へ固縛する。 • ウェイトの重量については、仮設足場材の重量+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。
5	鋼板	<ul style="list-style-type: none"> • 単品で置かず複数枚を重ねて固縛する。 • 重ねる枚数については、空力パラメータが 0.0026 以下となる枚数とする。
6	マンホール蓋	<ul style="list-style-type: none"> • 容易に飛散しないよう高さ方向への飛散防止対策を行う（マンホール蓋上面からの固定、マンホール蓋へのチェーン接続など）。
7	車両（重大事故等対処設備含む）	<p><高さ方向へ飛散する車両></p> <ul style="list-style-type: none"> • 車両の飛散距離（表-2 参照）を考慮し、竜巻防護施設から 350m の範囲内（図-1 参照）について下記の対策を実施する。 • 十分な重さのウェイトを取付ける。 • ウェイトの重量については、車両の自重+ウェイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。 • 作業中の業務車両については、竜巻が襲来する恐れが生じた場合に速やかに竜巻防護施設から 350m の範囲外に退避できる体制を取る旨マニュアルに反映することとしており固縛不要とする。 • 業務車両以外の車両については、構内への入構を禁止する。 <p><高さ方向へは飛散しないが横滑りする車両></p> <ul style="list-style-type: none"> • 車両の移動距離（表-3 参照）を考慮し、竜巻防護施設から 170m の範囲内（図-1 参照）について下記の対策を実施する。 • アンカーにより地面へ固縛する（対策の計算例を別紙-1 に示す）。

※：設計飛来物であり評価対象施設への影響評価を実施しているが飛散防止対策を実施する。

表-2 高さ方向へ飛散する車両の飛散距離一覧

名称	長さ (m)	幅 (m)	厚さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータCDA/m (m ² /kg)	飛散距離 (m)
自動車	4.60	1.80	1.70	1600	0.0079	323
自動車	4.90	1.87	1.87	2230	0.0065	307
自動車	4.83	1.79	1.91	2140	0.0066	308
自動車	4.63	1.79	1.68	1500	0.0084	328
自動車	4.42	1.69	1.48	1200	0.0091	333
自動車	4.53	1.69	1.43	1130	0.0097	337
自動車	3.39	1.47	1.76	740	0.0121	346
可搬型大型送水ポンプ車	8.79	2.50	2.88	12450	0.0029	187
可搬型中型送水ポンプ車	7.63	2.30	2.75	10050	0.0029	187
可搬型注水ポンプ車	8.45	2.50	2.75	12510	0.0027	174
シルトフェンス車 (4t車)	8.20	2.46	2.30	7000	0.0042	254
SWPモータ運搬用トラック (11tユニック車)	12.00	2.50	1.60	12000	0.0029	187
4tユニック車	8.17	2.37	1.50	8000	0.0029	187
モニタリングカー	5.50	1.90	2.90	2800	0.0075	319
代替非常用発電機 (48G) 付属品車	11.00	2.50	3.55	14600	0.0034	219
可搬型モニタリングポスト等運搬車輛	3.40	1.48	1.98	2200	0.0061	302

表-3 高さ方向へ飛散しないが横滑りする車両の移動距離一覧

名称	長さ (m)	幅 (m)	厚さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータCDA/m (m ² /kg)	移動距離 (m)
トラック	5.00	1.90	1.30	4750	0.0026	158
クレーン車	12.00	6.30	4.99	102500	0.0011	46
重機	8.82	2.80	3.15	23000	0.0018	92
電源車	10.00	2.49	3.38	24620	0.0018	92
代替海水取水ポンプ車 (HS900)	13.37	2.50	3.27	22700	0.0025	158
代替海水取水ポンプ車 (HS1200)	13.37	2.50	3.27	24860	0.0023	139
ホース延長・回収車 (送水車用)	9.00	2.50	3.25	15420	0.0026	166
ホース延長・回収車 (放水砲用)	8.73	2.50	3.13	21930	0.0017	83
可搬型代替電源車 (コーラー)	17.05	2.50	4.20	37000	0.0022	130
代替非常用発電機 (1号用)	12.00	2.50	3.40	26000	0.0020	110
代替非常用発電機 (2号用)	17.60	3.00	4.10	47000	0.0019	101
代替非常用発電機 (3号用)	15.00	2.50	3.80	35000	0.0020	110
タンクローリー (18k1)	11.00	2.50	2.95	25000	0.0018	92
タンクローリー (4k1)	6.00	2.20	2.20	8000	0.0026	166
シルトフェンス車 (10t車)	11.90	2.50	2.30	15800	0.0026	166
屋外ルート軽油汲み上げ資機材搬送車輛	6.20	2.20	1.40	6600	0.0025	158
ホイールローダ	6.60	2.50	1.60	9500	0.0022	130
バックホウ	9.50	2.80	3.00	20000	0.0021	121
ブルドーザ	5.70	4.00	3.25	21700	0.0017	83

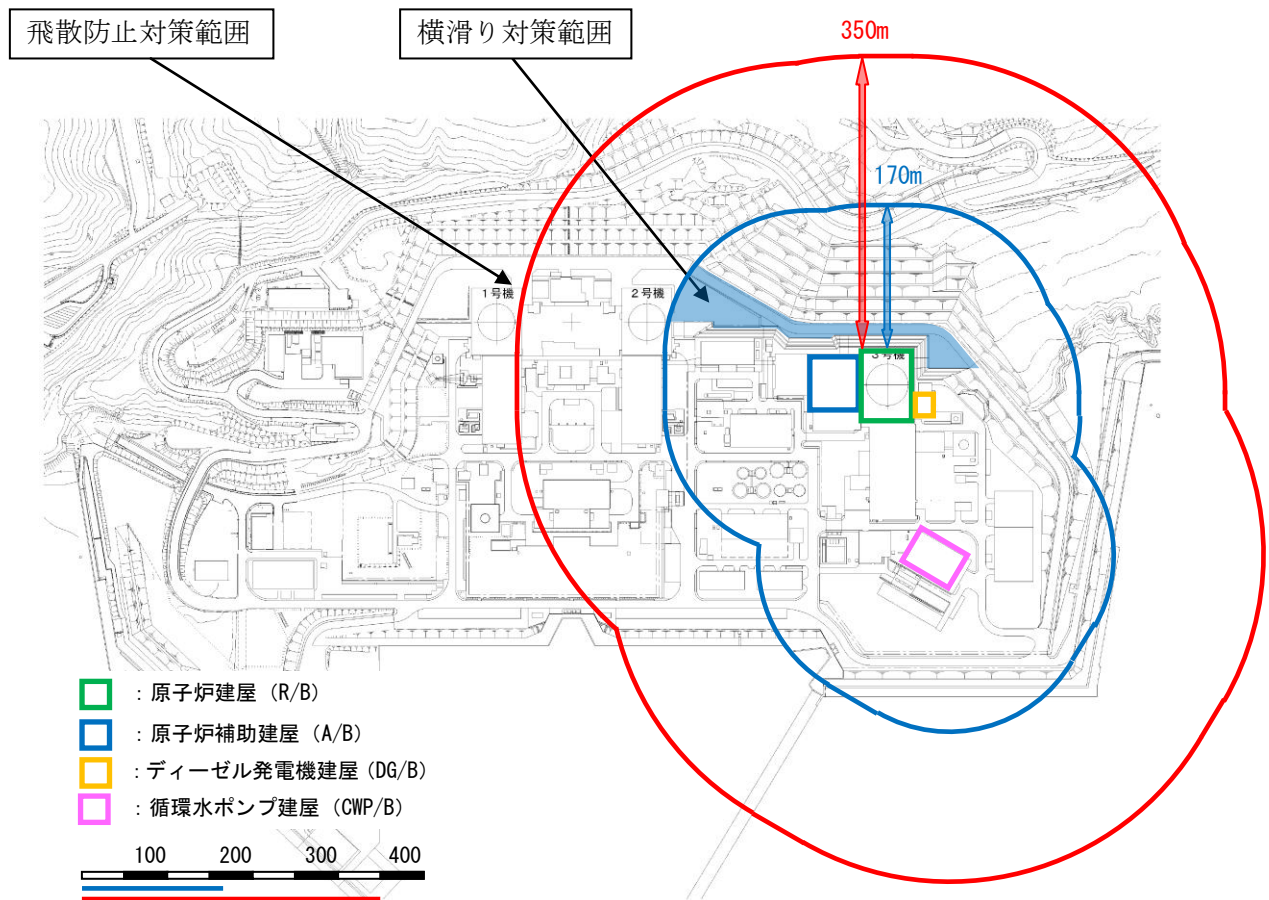


図-1 泊発電所における車両の飛散防止対策範囲および横滑り対策範囲

■飛散防止対策の計算例

<可搬型代替電源車の場合>

(可搬型代替電源車の諸元)

全長：17.05m、高さ：4.2m、幅：2.5m

重量：m=37,000kg



(空力パラメータの確認)

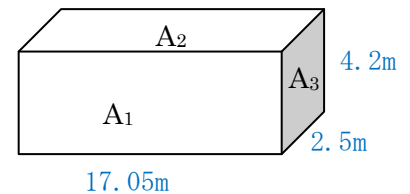
$$C_D A/m = c \times (C_{D1} \times A_1 + C_{D2} \times A_2 + C_{D3} \times A_3) / m$$

$$= 0.33 \times (2.0 \times 71.61 + 2.0 \times 42.625 + 2.0 \times 10.5) / 37000$$

$$= 82.326 / 37000$$

$$= 0.0022$$

空力パラメータ ($C_D A/m$) が、0.0026 未満であることから可搬型代替電源車は、高さ方向に飛散しない。



空力パラメータ算出上のモデル
($C_{D1} = C_{D2} = C_{D3} = 2.0$)

(水平方向風荷重)

$$\text{風荷重} = q_H \times C_D \times G_D \times A$$

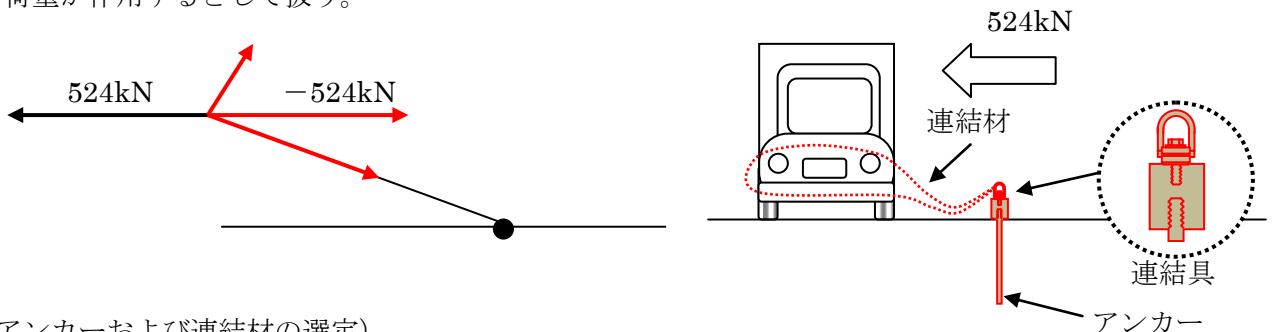
$$= 1.22 \times 100^2 / 2 \times 1.2 \times 1.00 \times 71.61$$

$$= 524 \text{ kN}$$

q_H : 速度圧 ($= \rho \times V^2 / 2$)
 ρ : 空気密度 ($= 1.22 \text{ kg/m}^3$)
 V : 設計竜巻の最大風速 ($= 100 \text{ m/s}$)
 C_D : 風力係数 ($= 1.2$)
 G_D : 風方向ガスト係数 ($= 1.00$)
 A : 受圧面積 (車輻の側面積の最大値)

(横滑り防止のための連結材に作用する荷重)

可搬型代替電源車については、高さ方向の荷重は自重が勝り、下方向に作用していることから、水平方向風荷重により横滑りした際の荷重は、下図のとおりとなるが、連結材の張力として水平方向風荷重が作用するとして扱う。



(アンカーおよび連結材の選定)

固定する連結材 (スリング) の扱い易さを考慮し、可搬型代替電源車の固定に必要な張力 524kN を受けるアンカーは 3 本とし、1 本あたり 200kN の水平・垂直荷重に耐えうるよう $\phi 50 \text{ mm} \times$ 埋込長 2000mm (SUS304) を設置する。この場合、1 本あたり定格 200kN のスリング (200mm 幅以下の製品が選択可能) を使用する。スリングとアン

カーの接続は、連結具（汎用吊冶具とアンカー頂部を丸鋼で一体化）にシャックルを取り付けて使用する。

○アンカーのせん断に対する検討

ステンレスアンカーの許容せん断力は、建築基準法施行令第90条「鋼材の短期許容応力度」より

$$\tau_s = F \times 1.5 \div (1.5\sqrt{3})$$

SUS304 の JIS G4303 (ステンレス鋼棒) に示されている以下に記載の耐力を用いる。

$$F = 205 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = 205 \times 1.5 / 1.5\sqrt{3} \approx 118 \text{ N/mm}^2$$

アンカーに求められるせん断耐力は 200kN であるから、アンカー鋼の必要断面積 A は、

$$A = 200,000 / 118 = 1,695 \text{ mm}^2$$

上記を満足するステンレス丸鋼として φ50 を選定する (断面積 A=1,964 mm²)

○アンカーの必要長さの検討

可搬型代替電源車設置場所 (T.P.31m) の岩盤は硬岩と考えられるが、余裕を考慮し、周面摩擦抵抗は、「軟岩」相当の下限値である 1.0N/mm²*を使用する。

(※：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（地盤工学会編）より)

アンカーの引抜きに対する摩擦抵抗力は、次のとおり。

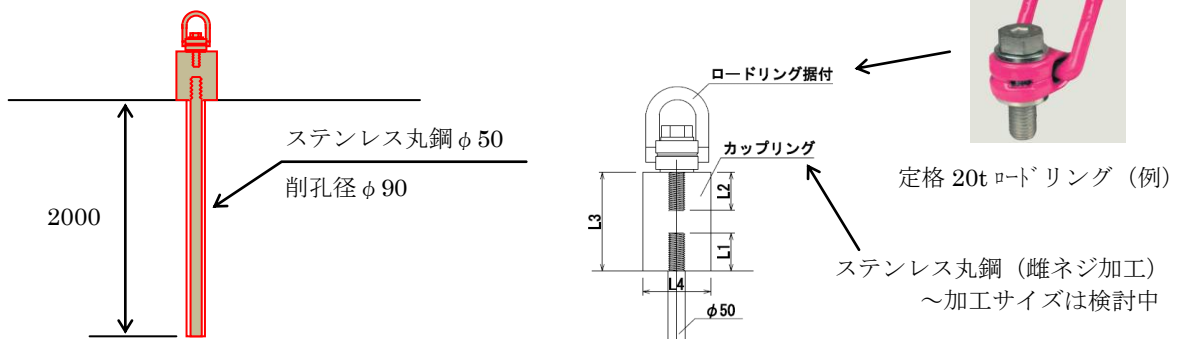
$$L = F \times P / (L1 \times \mu)$$

L	: 必要アンカー長
F	: 安全率=1.5
P	: 引抜き力
L1	: アンカー周長=50×π=157.1mm
μ	: 周面摩擦抵抗=1.0N/mm ²

アンカーに求められる引抜き耐力は 200kN であるから、アンカーの必要長さ L は、

$$L = 1.5 \times 200,000 / 157.1 \times 1.0 = 1,910 \text{ mm}$$

上記を満足するアンカー長として 2,000mm を選定する。



なお、アンカーについては、グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（地盤工学会編）に基づき、引抜き試験を実施する計画である。

(3) 飛来物防護対策

上記基本方針に基づき、以下の飛来物防護対策を実施する。

なお、設計飛来物のうち鋼製パイプおよび鋼製材については、作業のために設置する仮設足場等を使用されており、確実に飛散を防止することが困難と考えられることから、飛来物防護対策にあたっては、両者のうち運動エネルギーが大きく、飛来物の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さが厚い（貫通しやすい）鋼製材を飛来物として想定する。

ただし、新燃料ラックについては、燃料被覆管が破損する可能性があるとの評価結果となった鋼製パイプを想定する。

a. 飛来物防護対策の概要

設計飛来物が衝突した場合に安全機能を喪失する可能性のある竜巻防護施設（以下「防護対象設備」という）については、安全機能の維持に影響を与えないよう、防護ネットまたは防護板を設置し飛来物から防護することとしており、防護対象設備毎の防護対策の概要を以下に示す。

(a) 原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）／配管、弁およびろ過装置（原子炉補機冷却海水系統）

当該設備（原子炉補機冷却海水ポンプ等）が設置されている循環水ポンプ建屋は鉄骨造であり飛来物は天井（コンクリート）・外壁（外装材）を貫通して進入してくることが想定されるため、当該設備設置エリア上部の開口部（循環水ポンプ建屋床面（T.P. 10.3m））に防護ネットを設置し、当該設備を飛来物から防護する。

本対策のイメージ図を図-2 に示す。

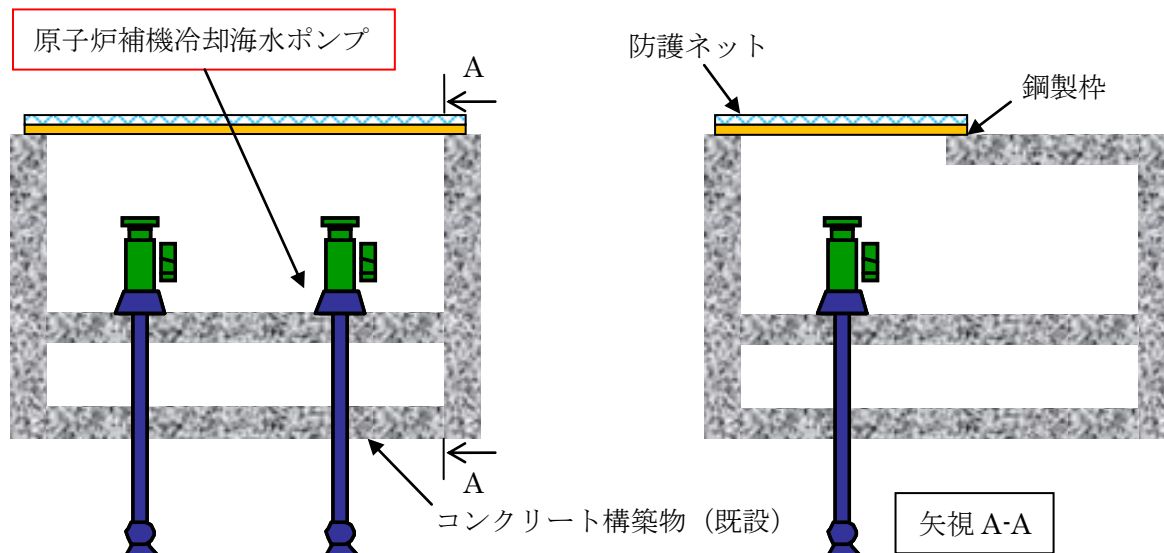


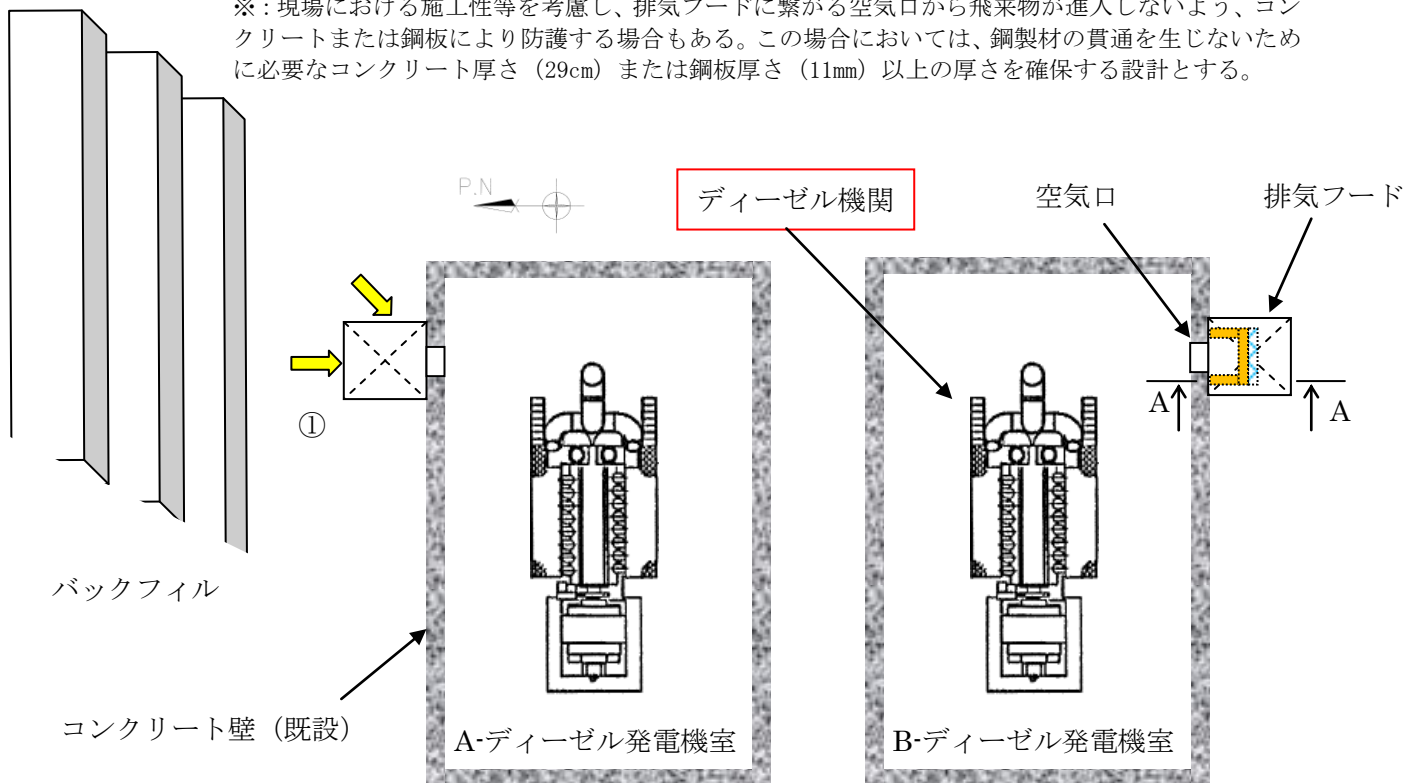
図-2 原子炉補機冷却海水ポンプの飛来物防護対策イメージ図

(b) ディーゼル機関

当該設備はディーゼル発電機建屋のディーゼル発電機室に設置されているが、飛来物は当該区画の排気フードを貫通して空気口から進入してくることが想定されるため、当該区画の排気フードに繋がる空気口の前面に防護ネット*を設置し、当該設備を飛来物から防護する。

本対策のイメージ図を図-3 に示す。

※：現場における施工性等を考慮し、排気フードに繋がる空気口から飛来物が進入しないよう、コンクリートまたは鋼板により防護する場合もある。この場合においては、鋼製材の貫通を生じないために必要なコンクリート厚さ（29cm）または鋼板厚さ（11mm）以上の厚さを確保する設計とする。



①飛来物がA-ディーゼル発電機室（A-DG室）の排気フードを貫通してディーゼル機関に衝突する方向としては、北方向あるいは北東（北～東方向の間）方向が考えられるが、A-DG室北側にはバックフィルがあるため、飛来物はバックフィルの高さより高いところから斜め下向きに進入することになり、この場合は当該フードを貫通したとしても、飛来物がディーゼル機関に衝突することはないと考える。

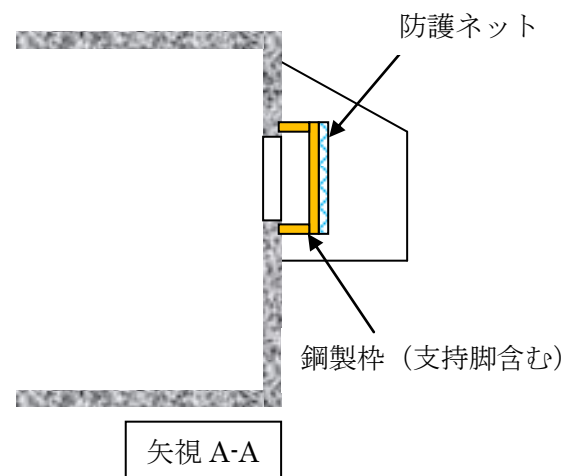
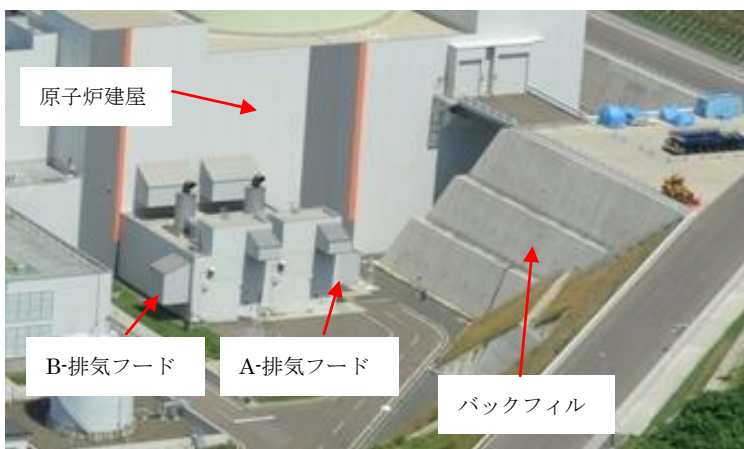


図-3 ディーゼル機関の飛来物防護対策イメージ図

(c) 蓄熱室加熱器

イ. 蓄熱室

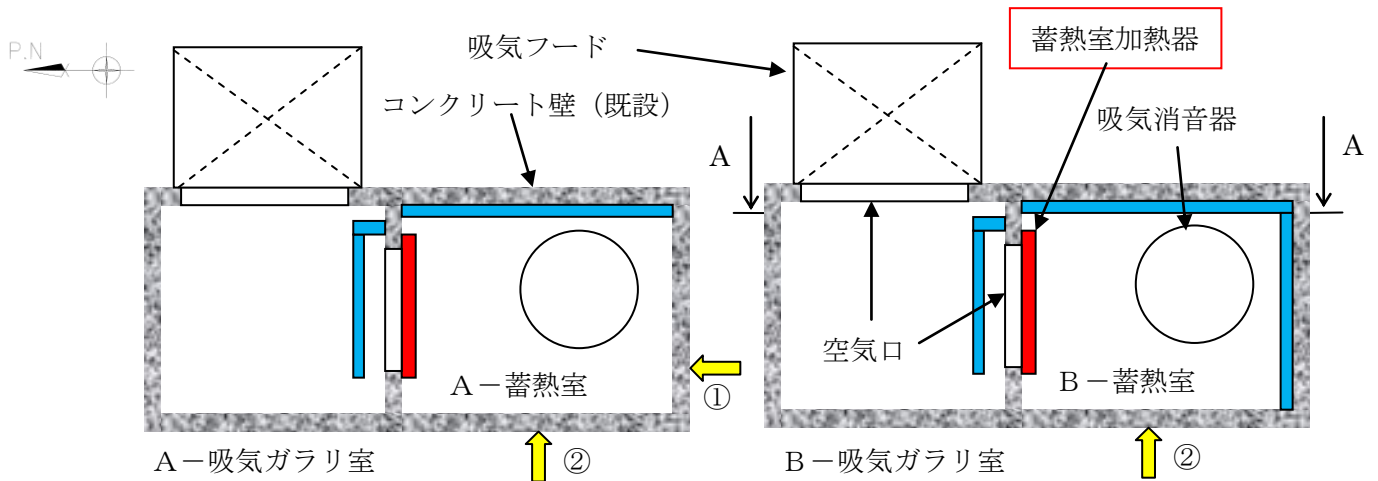
蓄熱室加熱器が設置されている蓄熱室はディーゼル発電機建屋の塔屋部にあり、飛来物は外壁（コンクリート）を貫通して進入してくるとの評価結果が得られたことから、蓄熱室の外壁に鋼板製の防護板を内張りし、当該設備を飛来物から防護する。

本対策のイメージ図を図-4 示す。

ロ. 吸気ガ拉里室

蓄熱室加熱器が設置されている蓄熱室に隣接して吸気ガ拉里室があり、飛来物は当該ガ拉里室の吸気フードを貫通して空気口から進入し直接蓄熱室加熱器背面に衝突することが考えられることから、蓄熱室加熱器背面にある空気口の前面に鋼板製の防護板等を設置し、当該設備を飛来物から防護する。

本対策のイメージ図を図-4 に示す。



- ① A-蓄熱室に近接してB-吸気ガ拉里室があり、プラント南側から進入してきた飛来物はB側の塔屋部に当たると考えられるため、A-蓄熱室南側の壁面に飛来物が衝突することはないと考える。
- ② 当該塔屋部西側には原子炉建屋があり、プラント西側から進入してきた飛来物は原子炉建屋に当たると考えられるため、A、B-蓄熱室西側の壁面に飛来物が衝突することはないと考える。

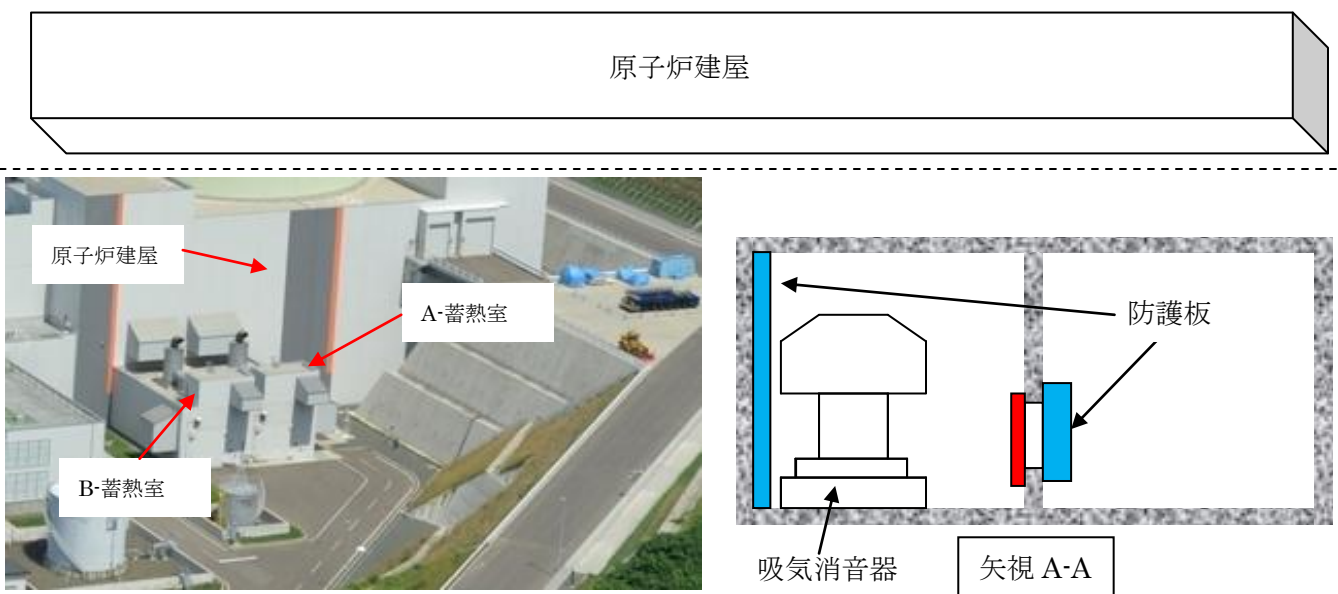


図-4 蓄熱室加熱器の飛来物防護対策イメージ図

(d) 配管および弁（主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統）

当該設備は原子炉建屋の主蒸気管室に設置されているが、飛来物は当該区画のブローアウトパネル（隣接建屋であるタービン建屋との境界部に設置）を貫通して進入してくることが想定されるため、当該ブローアウトパネルの前面（主蒸気管室外）に防護ネットを設置し、当該設備を飛来物から防護する。

本対策のイメージ図を図-5 に示す。

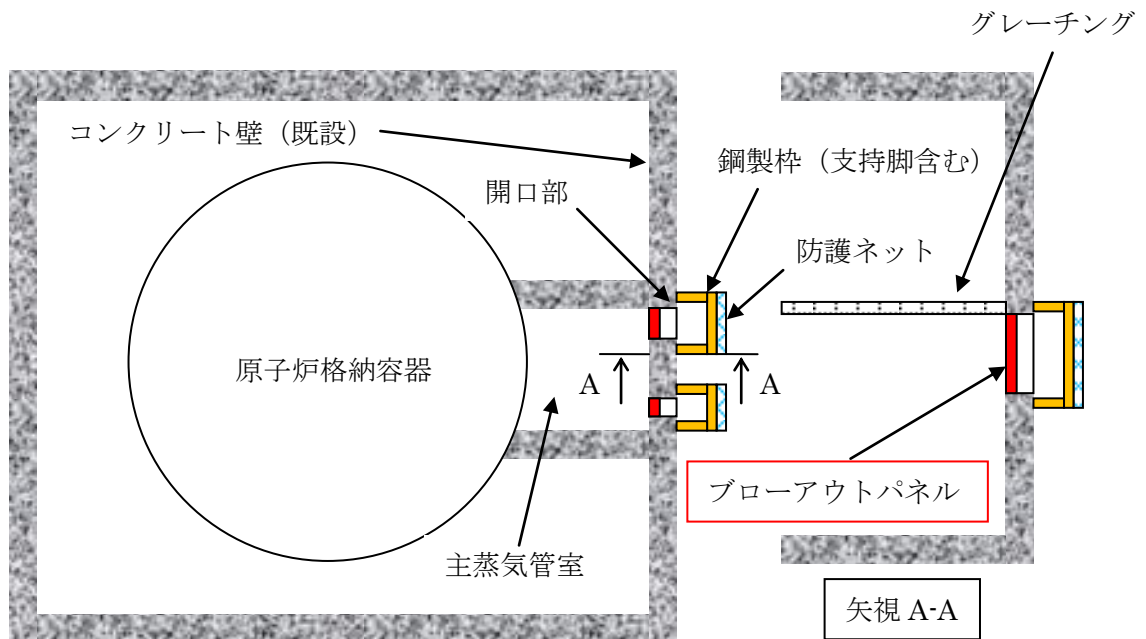


図-5 配管および弁（主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統）の
飛来物防護対策イメージ図

(e) 新燃料ラックに貯蔵している燃料集合体

当該設備は原子炉建屋の上屋（燃料取扱棟）に設置されているが、飛来物は燃料取扱棟の外壁（外装材）を貫通して進入してくることが想定されるため、当該設備（ラックセル）に燃料集合体を貯蔵した場合は、ラックセルの上部に鋼板製の防護板等（鋼製パイプ貫通防止蓋）を設置し、当該設備に貯蔵している燃料集合体を飛来物から防護する。

また、当該貫通防止蓋設置により、新燃料ラックの耐震性に影響を与えない設計とする。

本対策のイメージ図を図-6 に示す。

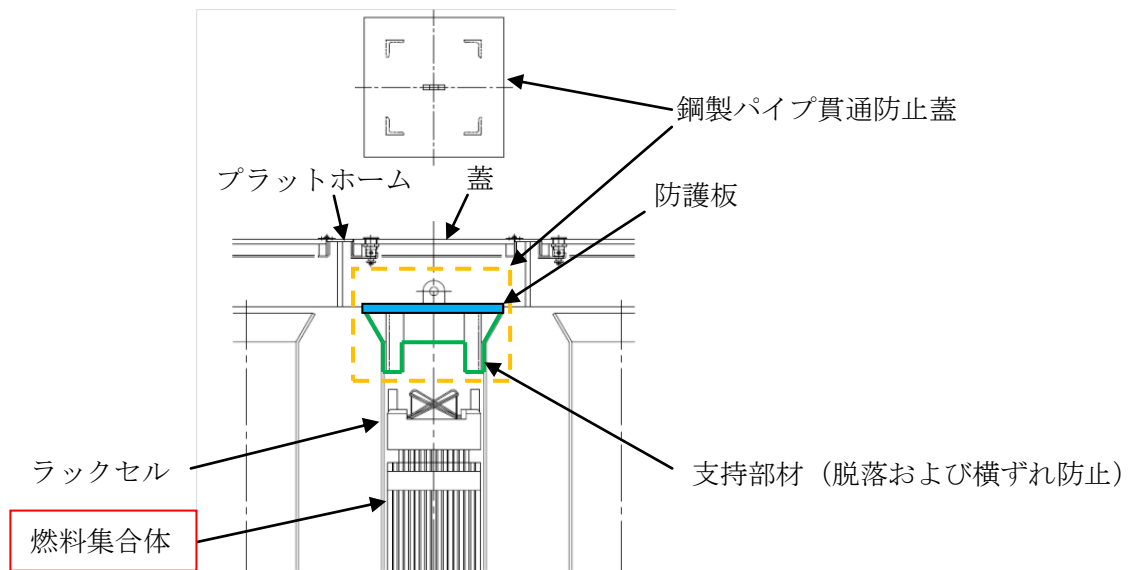


図-6 新燃料ラックの飛来物防護対策イメージ図

b. 防護ネットの設計

(a) 基本方針

- ・ 防護ネットは金網を2枚重ねとし、飛来物捕捉時に金網の変形を拘束しないよう、金網の四辺はワイヤーロープにて支持して、ワイヤーロープを鋼製枠に締結する構造とする（図-7参照）。
- ・ 鋼製枠の四隅にはワイヤーロープに発生する張力の急激な増加を緩和する目的で緩衝機構を設置する（図-7参照）。
- ・ 金網の吸収エネルギーについては、飛来物の衝突エネルギーおよび風圧力により金網が受けるエネルギーを上回るよう設計する。
- ・ 防護ネットは飛来物を捕捉した際に防護対象設備あるいは既存建屋に接触しないよう、適切な離隔距離を確保した上で、設置箇所の既存建屋床あるいは壁（コンクリート）に設置する。
- ・ 防護ネットと防護対象設備あるいは既存建屋との離隔を適切に取る観点から、必要に応じて鋼製枠には支持脚を設置する。
- ・ 防護ネットを構成する金網、ワイヤーロープ等については、飛来物捕捉時に発生する荷重に対して十分な強度を有する設計とする。
- ・ 地震により防護ネットが落下して防護対象設備の安全機能に影響を与える可能性がある場合は、基準地震動に対して耐震性を確保する等、防護対象設備の安全機能に影響を及ぼさない設計とする。
- ・ 防護ネットについては、防護対象設備の保守点検に伴う取り外し等を考慮して、以下のとおり設置する。

<既存建屋床に設置する場合>

○鋼製枠をアンカーボルトにて固定する。

または、

○位置決め用の枠をアンカーボルトにて固定し、その枠内に鋼製枠を置く形で設置する。

<既存建屋壁に設置する場合>

○鋼製枠をアンカーボルトにて固定する。

- 既存建屋床に位置決め用の枠を設置する場合は、飛来物衝突時の反力あるいは風圧力による鋼製枠の浮き上がりを考慮して、鋼製枠が位置決め枠から外れないように設計する。

以上の基本方針を踏まえ、金網、ワイヤーロープ、鋼製枠が設計飛来物を捕捉するのに十分な強度を有しているか検討した。

防護ネットは設置箇所全てに共通仕様であり、今回、防護ネットを設置する箇所の開口寸法と設置する防護ネット（金網）の寸法を表-4に示す。

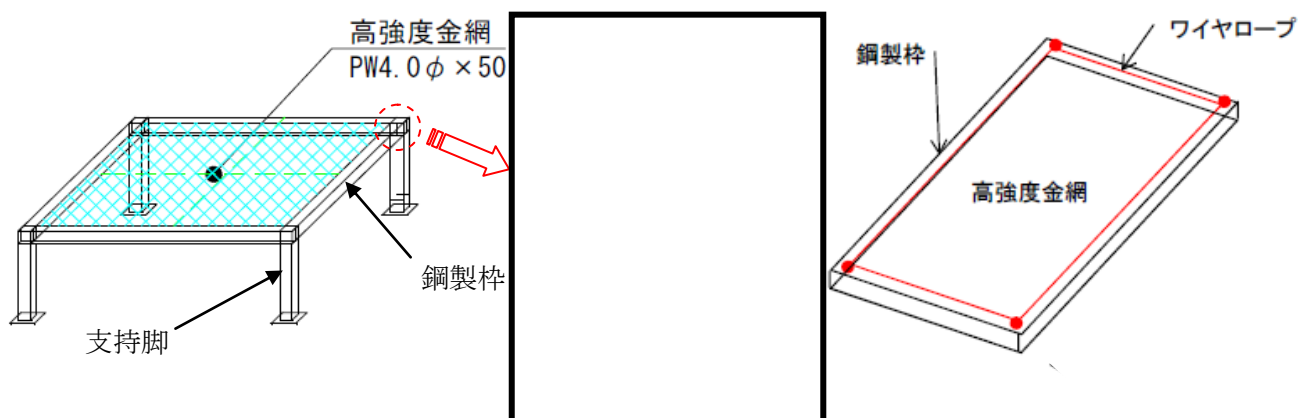


図-7 防護ネットの構造イメージ図

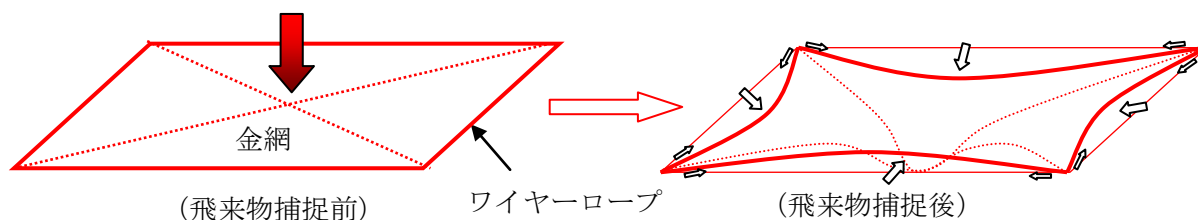


図-8 金網とワイヤーロープの変形イメージ

表-4 防護ネット設置箇所の開口寸法と防護ネット（金網）の寸法一覧

防護対象設備	防護ネット設置箇所	開口寸法	金網寸法（計画）
原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）	防護対象設備設置エリア上部開口部（2箇所）	9.5m×5.2m	5.0m×4.55m/組 （2組設置）
配管、弁およびろ過装置（原子炉補機冷却海水系統）	防護対象設備設置エリア上部開口部	9.2m×2.4m	9.2m×2.4m
ディーゼル機関	ディーゼル発電機室の壁面開口部	2.4m×2.4m	4.3m×4.3m
配管および弁（主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統）	ブローアウトパネル開口部（2箇所）	3.5m×1.75m	4.3m×4.3m
		1.5m×1.75m	

(b) 金網の強度評価

金網の強度評価は、次のとおり実施する。

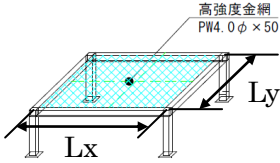
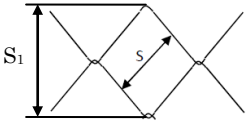
- ・ 金網の引張試験結果から破断時の金網の伸び量を設定する
- ・ 破断時の金網の伸び量から金網変位角を求める
- ・ 破断時の金網変位角から金網最大変位量を求める
- ・ 金網最大変位量から各列の金網変位量を求める
- ・ 各列の金網変位量から金網の吸収エネルギーを求める
- ・ 金網の吸収エネルギーが鋼製材の衝突エネルギー等より大きいことを確認する
(裕度 1.15 以上)

以下に原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）設置エリア上部開口部に設置する金網の強度評価例を示す。

イ. 金網の諸元

金網の諸元を表-5 に示す。

表-5 金網の諸元

材質	JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A) JIS G3548 亜鉛めっき鋼線
寸法	 Lx=5.0m、Ly=4.55m
素線径	d=φ4mm
金網の目合い	 S=50mm $S_1 = 50 \times \sqrt{2} = 70.7\text{mm}$
素線の引張強さ	1400N/mm ²
破断時の金網1目当たりの伸び量	L=20mm ※：金網メーカーの引張試験結果（30回実施）から抽出した伸びの小さい3回の試験データ（図-9参照）を用いて、各々の最大荷重発生時の伸び量の平均値から設定

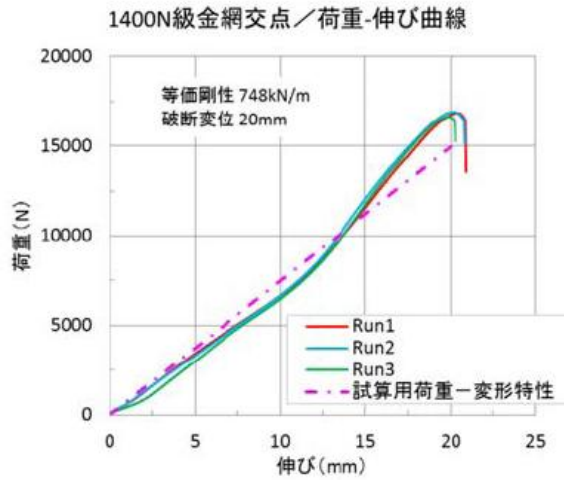


図-9 荷重-伸び曲線（引張試験結果）

<等価剛性について>

金網の設計にあたっては、設計の簡便性と最大変形時のエネルギーの等価性を考慮し、等価剛性を用いている。

等価剛性は金網メーカーの引張試験結果（30回実施）から抽出した伸びの小さい3回の試験データ（図-9参照）を用いて、各々の最大荷重発生時までの最大エネルギーを算出し、これらの平均値と等価となる剛性（748kN/m）として設定している。

「図-9 荷重-伸び曲線」を等価剛性近似（一定）した場合と多直線近似した場合（図-10参照）の荷重と吸収エネルギーの比較を図-11に示す。最大変形時は等価剛性近似と多直線近似の吸収エネルギーは等価となるが、それよりたわみの小さい領域では、等価剛性近似の方が多直線近似より最大で約13%吸収エネルギーが高めに算定されることとなる。

以上より、金網の最大変形時には、等価剛性近似により金網の吸収エネルギーを適切に評価できることから、強度評価にあたっては、金網の最大変形時の吸収エネルギーが、鋼製材の衝突エネルギーを上回っていることを確認できれば十分であるが、保守的に鋼製材の衝突エネルギーに対して1.15以上の裕度を確保する設計とする。

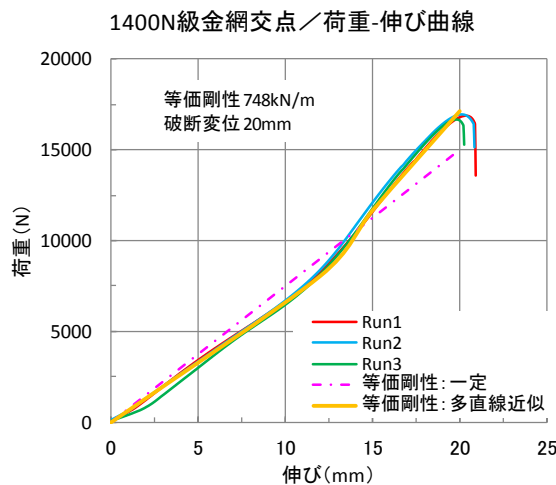


図-10 荷重-伸び曲線（等価剛性近似と多直線近似）

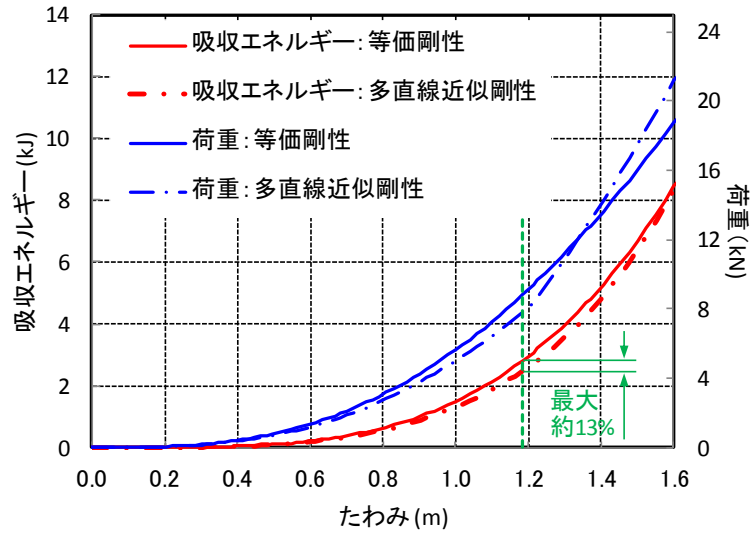


図-11 等価剛性近似と多直線近似をした場合の荷重と吸収エネルギーの比較

ロ. 飛来物の諸元

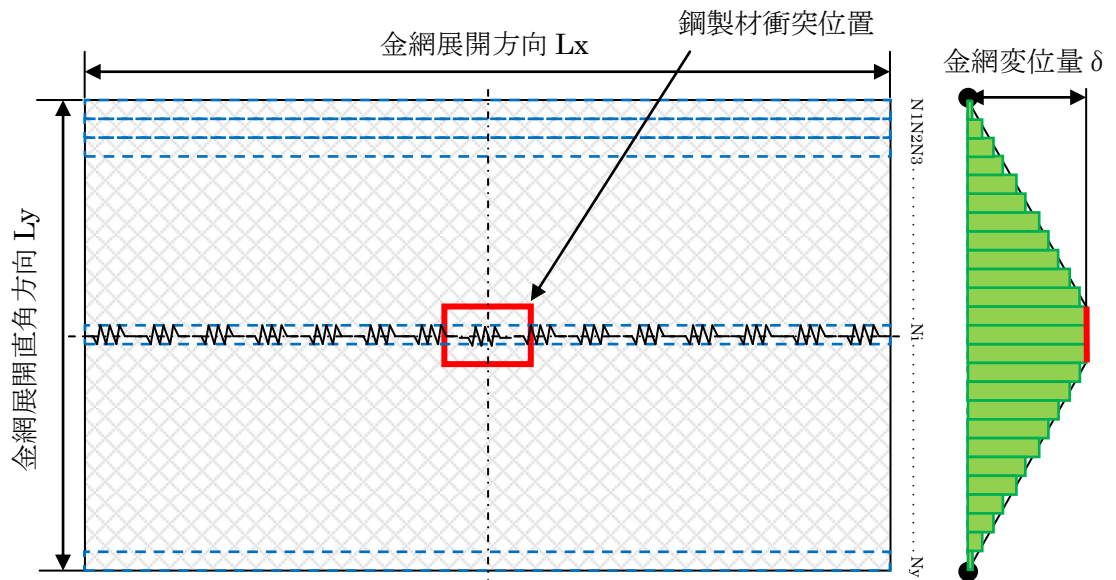
飛来物として想定する鋼製材の諸元を表-6 に示す。

表-6 鋼製材の諸元

サイズ	4.2m×0.3m×0.2m
質量	m=135kg
最大水平速度	V _h =57m/s
最大鉛直速度	V _v =38m/s
衝突速度	V=57m/s (Max (V _h , V _v) とする)
金網への衝突エネルギー	E=1/2×m×V ² /1000=219.3kJ ⇒ 220kJ

ハ. 金網の吸収エネルギー

金網の吸収エネルギーは、下図のとおり金網を金網展開直角方向に1目合い毎(□)で囲った形)に分割し、N1からNyまでの各列で分担する吸収エネルギーを各列の金網展開方向変位量から算出して、各列の吸収エネルギーを積算することにより評価する。また、各列の吸収エネルギーは、金網を1目合い毎に「図-9 荷重-伸び曲線(引張試験結果)」から算出した等価剛性748kN/mを持つばねがNx(=Lx/70.7mm)個直列につながった状態と模擬して評価する。



(イ) 各列の金網変位量

- ・ 金網変位角

表-5 より、金網の目合い対角寸法 S_1 は 70.7mm、破断時の金網 1 目当たりの伸び量 L は 20mm であることから、破断時の金網変位角 θ は、

$$\theta = \cos^{-1} [S_1 / (S_1 + L)] = 38.8^\circ$$

となる。

- ・ 金網展開方向長さ

$$L_x = 5.0\text{m}$$

- ・ 金網最大変位量

$$\delta_{\max} = L_x / 2 \times \tan \theta = 2.01\text{m}$$

- ・ 各列の金網変位量

鋼製材と接触する列の金網変位量は「金網最大変位量 δ_{\max} 」となるため、それ以外の列の金網変位量は「金網最大変位量 δ_{\max} 」から比例計算により算出する。

(算出例)

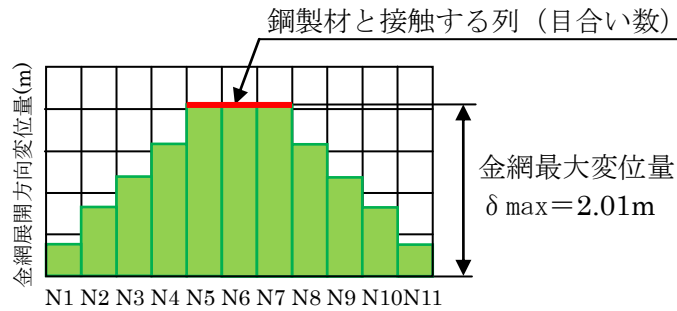
- ・ 金網展開直角方向長さ L_y : 780mm

- ・ 金網展開直角方向目合い数 N_y : 780mm/70.7mm=11 個

- ・ 鋼製材との接触目合い数 (金網展開直角方向における接触する列の数):
250mm*/70.7mm=3 個

※: 鋼製材の形状は短辺 0.2m×長辺 0.3m であるため、短辺と長辺の平均値である 0.25m (等価円直径 0.27m より小さいものとして選定) と仮定。

- ・ N1 列の金網変位量: $\delta_{\max} \times 1/5 = 0.40\text{m}$
- ・ N2 列の金網変位量: $\delta_{\max} \times 2/5 = 0.80\text{m}$
- ・ N3 列の金網変位量: $\delta_{\max} \times 3/5 = 1.21\text{m}$
- ・ N4 列の金網変位量: $\delta_{\max} \times 4/5 = 1.61\text{m}$
- ・ N5~N7 列の金網変位量: $\delta_{\max} = 2.01\text{m}$
- ・ N8~N11 列の金網変位量: N4~N1 列に同じ



以下に今回設置する原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）設置エリア上部開口部に設置する金網の算出結果を示す。

金網展開直角方向長さ Ly		4.55m					
金網展開直角方向目合い数 Ny		4.55m×1000/70.7mm=64 個					
鋼製材との接触目合い数		250mm/70.7mm=3 個					
列	N1, N63	N2, N62	N3, N61	N4, N60	N5, N59	N6, N58	N7, N57
変位量(m)	0.06	0.13	0.19	0.26	0.32	0.39	0.45
列	N8, N56	N9, N55	N10, N54	N11, N53	N12, N52	N13, N51	N14, N50
変位量(m)	0.52	0.58	0.65	0.71	0.78	0.84	0.91
列	N15, N49	N16, N48	N17, N47	N18, N46	N19, N45	N20, N44	N21, N43
変位量(m)	0.97	1.04	1.10	1.17	1.23	1.30	1.36
列	N22, N42	N23, N41	N24, N40	N25, N39	N26, N38	N27, N37	N28, N36
変位量(m)	1.43	1.49	1.56	1.62	1.68	1.75	1.81
列	N29, N35	N30, N34	N31, N32, N33				
変位量(m)	1.88	1.94	2.01				

(ロ) 金網の吸収エネルギー

前述のとおり、各列の吸収エネルギーは、金網を 1 目合い毎に等価剛性 748kN/m を持つばねを N_x ($=L_x/70.7\text{mm}$) 個直列につなげた状態と模擬して評価する。

この時の 1 つの列の剛性（金網展開剛性 K_x ）は、金網展開剛性 $K_x=748/N_x$ となるため、 i 番目の列における張力 P_i は、

$$P_i = 2K_x \cdot (X_i/2) = K_x \cdot X_i$$

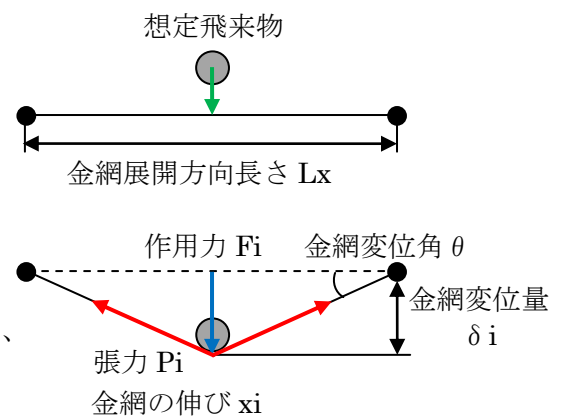
となり、作用力 F_i は、

$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \cdot \sin \theta = 2k_x \cdot x_i \cdot \sin \theta \\ &= 2k_x \cdot L_x \cdot (\tan \theta - \sin \theta) \\ &= 4k_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) \end{aligned}$$

となる。

また、 i 番目の列における吸収エネルギー E_i は、

$$\begin{aligned} E_i &= \int F_i d\delta_i = \int 4k_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i \\ &= 2k_x \cdot \delta_i^2 - k_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \end{aligned}$$



となり、金網の吸収エネルギーEは、N1からNyまでの各列の吸収エネルギーを積算することにより求められる。

$$E = \sum_{i=N_1}^{N_y} E_i$$

(算出例)

- ・ 金網展開方向長さ Lx : 5.0m
- ・ 金網展開方向目合い数 Nx : 5000mm/70.7mm = 70 個
- ・ 金網展開剛性 Kx : 748/70 = 10.69kN/m
- ・ N1列の吸収エネルギー :

$$2 \times 10.69 \times 0.40^2 - 10.69 \times 5.0 \times (\sqrt{4 \times 0.40^2 + 5.0^2} - 5.0) = 0.02 \text{kJ}$$

- ・ N2列の吸収エネルギー :

$$2 \times 10.69 \times 0.80^2 - 10.69 \times 5.0 \times (\sqrt{4 \times 0.80^2 + 5.0^2} - 5.0) = 0.33 \text{kJ}$$

- ・ N3列の吸収エネルギー :

$$2 \times 10.69 \times 1.21^2 - 10.69 \times 5.0 \times (\sqrt{4 \times 1.21^2 + 5.0^2} - 5.0) = 1.65 \text{kJ}$$

- ・ N4列の吸収エネルギー :

$$2 \times 10.69 \times 1.61^2 - 10.69 \times 5.0 \times (\sqrt{4 \times 1.61^2 + 5.0^2} - 5.0) = 4.79 \text{kJ}$$

- ・ N5～N7列の吸収エネルギー :

$$2 \times 10.69 \times 2.01^2 - 10.69 \times 5.0 \times (\sqrt{4 \times 2.01^2 + 5.0^2} - 5.0) = 10.71 \text{kJ}$$

- ・ N8～N11列の吸収エネルギー : N4～N1列に同じ
- ・ 金網の吸収エネルギーE :

$$\sum_{i=N_1}^{N_{10}} E_i = (0.02 + 0.33 + 1.65 + 4.79) \times 2 + (10.71 \times 3) = 45.71 \text{kJ}$$

以下に今回設置する原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）設置エリア上部開口部に設置する金網の算出結果を示す。

金網展開方向長さ Lx	5.0m					
金網展開方向目合い数 Nx	5.0m×1000/70.7mm=70個					
金網展開剛性 Kx	748/70=10.69kN/m					
列	N1, N63	N2, N62	N3, N61	N4, N60	N5, N59	N6, N58
吸収エネルギー(kJ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
列	N7, N57	N8, N56	N9, N55	N10, N54	N11, N53	N12, N52
吸収エネルギー(kJ)	0.03	0.06	0.09	0.15	0.21	0.30
列	N13, N51	N14, N50	N15, N49	N16, N48	N17, N47	N18, N46
吸収エネルギー(kJ)	0.40	0.55	0.70	0.92	1.14	1.45
列	N19, N45	N20, N44	N21, N43	N22, N42	N23, N41	N24, N40
吸収エネルギー(kJ)	1.75	2.16	2.56	3.09	3.60	4.27
列	N25, N39	N26, N38	N27, N37	N28, N36	N29, N35	N30, N34
吸収エネルギー(kJ)	4.90	5.60	6.50	7.35	8.43	9.43
列	N31, N32, N33					
吸収エネルギー(kJ)	10.71					
金網の吸収エネルギーE	163.4kJ					

(ハ) 風による影響

竜巻襲来時においては、防護ネットに風圧力が作用するため、設計竜巻の最大風速 V_D (=100m/s) の風圧力による金網への影響を評価した。

上記(ロ)項の金網の吸収エネルギー評価と同様に、金網を金網展開直角方向に1目間合い毎に分割し、分割された1列に作用する風圧力 P_D は次のとおり算出できる。

$$P_D = q \times G \times C \times A = \frac{1}{2} \times \rho \times V_D^2 \times G \times C \times A = 0.522 \text{ kN}$$

$$\text{ここで、設計用速度圧 } q = \frac{1}{2} \times \rho \times V_D^2$$

空気密度 ρ : 1.22kg/m³

ガスト影響係数 G : 1.0

風力係数 C : 1.4

$$\text{受圧面積 } A = \left\{ \left(\frac{S + 2d}{1000} \right)^2 - \left(\frac{S}{1000} \right)^2 \right\} \times \frac{1000 \times Lx}{S_1}$$

ここで、素線径 d : ϕ 4mm

金網の目合い S : 50mm

金網の目合い対角寸法 S_1 : $50 \times \sqrt{2}$ mm

金網展開方向長さ Lx : 5.0m

上記で算出した風圧力 P_D が全て金網展開方向 Lx の中央に作用したとして、上記(ロ)項の金網に生じる作用力及び金網の吸収エネルギーの評価式から、1列に作

用する風圧力により金網が受けるエネルギーを算出し、それを列数倍して、金網全体が受けるエネルギーを算出する。

$$F = P_D = 4kx \cdot \delta i \cdot \left(1 - \frac{Lx}{\sqrt{4\delta i^2 + Lx^2}} \right)$$

$$E = 2kx \cdot \delta i^2 - kx \cdot Lx \cdot \left(\sqrt{4\delta i^2 + Lx^2} - Lx \right)$$

以下に今回設置する原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）設置エリア上部開口部に設置する金網の算出結果を示す。

- ・風圧力により金網1枚が受けるエネルギー：5.2kJ

(二) 評価結果

金網は2枚重ねて設置することから、金網2枚で吸収できるエネルギーは上記を2倍したものとなり326.8kJとなる。これに対して、鋼製材の衝突エネルギーは220kJ、風圧力により金網が受けるエネルギーは金網2枚で10.4kJであるため、金網の吸収エネルギーの方が大きく、裕度は1.41（＝326.8/230.4）であり1.15以上確保されることから、金網で鋼製材を受け止めることができることを確認した。また、金網最大変位量 δ_{max} は2.01mであり、防護対象設備と金網の離隔距離は2.01m以上確保することから、金網が防護対象設備に接触することはない。

(c) ワイヤロープの強度評価

ワイヤロープの強度評価は、次のとおり実施する。

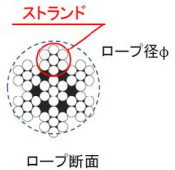
- ・飛来物捕捉時の金網に発生する衝突荷重からワイヤロープに発生する張力を求める
- ・ワイヤロープに発生する張力が許容荷重以内であることを確認する

以下に原子炉補機冷却水ポンプの強度評価例を示す。

イ. ワイヤロープの諸元

ワイヤロープの諸元を表-7に示す。

表-7 ワイヤロープの諸元

断面構成		7×7 鋼製
ロープ径		$\phi = 16\text{mm}$
断面積		$A_w = 125\text{mm}^2$
弾性係数		$E_w = 100\text{kN/mm}^2$
破断荷重		$T_b = 165\text{kN}$
許容荷重		$T_y = 82.5\text{kN}$ (安全率2)

ロ. ワイヤロープに発生する張力

- ・金網の最大変位量

$$\delta_{max} = 2.01\text{m}$$

- 鋼製材衝突時に金網に発生する衝突荷重
後述 (g) 項の「飛来物衝突部における金網の局部貫通評価」より、衝突荷重 F は、

$$F = Qt = \frac{120m}{t} = \frac{120 \times 135}{0.050} = 324$$

となる。

ここで、鋼製材の質量 $m=135\text{kg}$

$$\text{衝突時間 } t = \frac{\delta_{\max}}{40} = \frac{2.01}{40} = 0.050\text{s}$$

- 金網変位角
 $\theta = 38.8^\circ$
- ワイヤーロープに発生する張力
 $F=2P\sin\theta$ より、金網に発生する張力 P は、
 $P=F/(2 \times \sin\theta)$

となる。

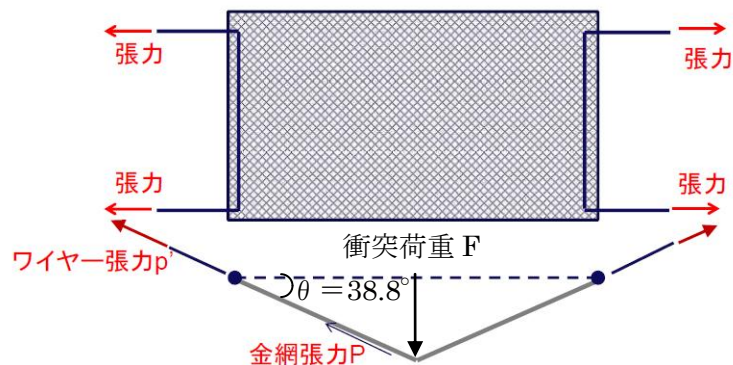
ここで、ワイヤーロープに発生する張力を p' とすると、 $P=2p'$ となることから、
 $p' = F/(4 \times \sin\theta)$

となる。

金網は 2 枚重ねて設置するため、上記 p' は 2 枚の金網のワイヤーロープに発生する張力となることから、1 枚の金網のワイヤーロープに発生する張力は上記 p' の半分となり、

$$F/(8 \times \sin\theta) = 324/(8 \times \sin 38.8) = 64.7\text{kN}$$

となる。



ハ. 評価結果

鋼製材の衝突によりワイヤーロープに発生する荷重は 64.7kN であり、許容荷重 82.5kN 以内であることを確認した。

(d) 鋼製枠の強度評価

ワイヤーロープを固定する鋼製枠は下図に示す反力 R_p, N_p, M_p を外力として、この外力により鋼製枠に発生する応力度が許容応力度を満足することを確認する (ワイヤーロープ許容荷重での評価条件であり、他の鋼製枠設置箇所も同評価となる)。

イ. 鋼製柱の諸元

鋼製柱の諸元を表-8 に示す。

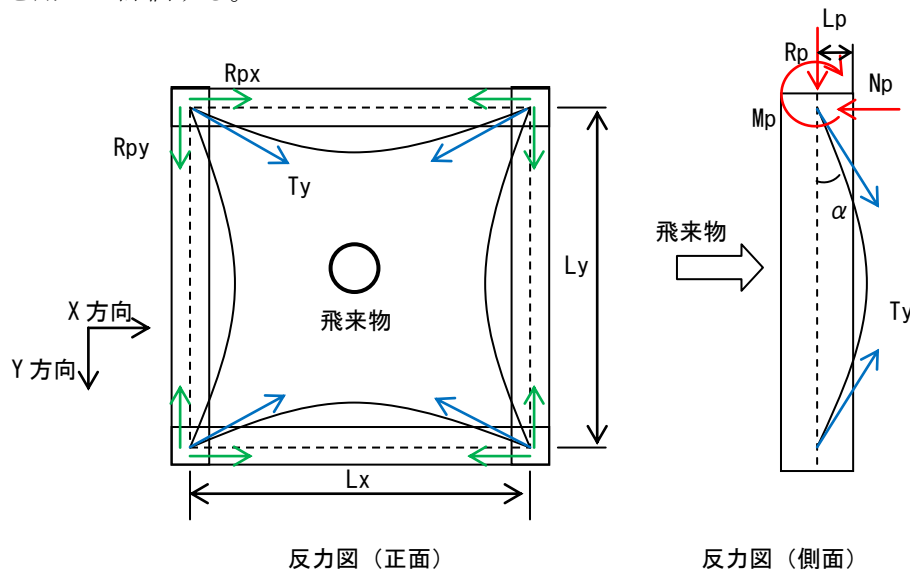
表-8 鋼製柱の諸元

サイズ	H-294×200×8×12
断面積	A=7105mm ²
断面係数	Z _y =160000mm ³ (弱軸)
断面二次モーメント	I _y =16000000mm ⁴ (弱軸)
断面二次半径	47.5mm (弱軸)
許容曲げ応力度	0.21kN/mm ² (短期)
許容圧縮応力度	40.59N/mm ² (短期) ※

※：許容圧縮応力度は金網の固定間隔（金網寸法）に依存し、固定間隔が長くなる程小さくなることから、今回設置する金網の中で固定間隔が最長となる9.2mにて評価を行った。

ロ. 鋼製柱に発生する外力

鋼製材の衝突荷重は、金網およびワイヤーロープを介して鋼製柱に作用することから、鋼製柱への入力荷重は、ワイヤーロープ荷重（T_y）であり、ワイヤーロープの許容荷重を用いて評価する。



- ワイヤーロープ許容荷重
 $T_y = 82.5 \text{ kN}$
- ワイヤーロープ変位角
 $\alpha = \tan^{-1}(4 \times f / L_x) = 38.7^\circ$
 ここで、f：ワイヤーロープたわみ量 = $0.2^* \times L_x$
 ※：金網メーカーの試験結果より固定間隔の20%とする。(別紙-2 参照)
- 軸方向外力
 $N_p = (N_1 + N_2) \times \sqrt{2} \times T_y \times \sin \alpha = 145.9 \text{ kN}$
 ここで、N₁, N₂：金網設置枚数 = 2 枚
- 軸直角方向外力
 $R_p = (N_1 + N_2) \times \sqrt{2} \times T_y \times \cos \alpha = 182.1 \text{ kN}$

- ・底面にかかるモーメント
 $M_p = R_p \times L_p = 27.32 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 ここで、 L_p ：鋼製枠定着面からロープ取付点までの距離=0.15m
- ・鋼製枠に作用する曲げ応力
 $M_p / Z_y = 0.17 \text{ kN/mm}^2$
- ・軸直角方向（x成分、y成分）外力
 $R_{px} = R_{py} = R_p / \sqrt{2} = 128.8 \text{ kN}$
- ・鋼製枠に作用する軸方向圧縮応力
 $R_{px} / A = 18.13 \text{ N/mm}^2$

ハ. 評価結果

鋼製枠に発生する曲げ応力は 0.17 kN/mm^2 であり、許容曲げ応力度 0.21 kN/mm^2 を満足することを確認した。また、軸直角方向外力により鋼製枠に発生する軸方向圧縮応力は 18.13 N/mm^2 (X, Y 方向とも) であり、許容圧縮応力度 40.59 N/mm^2 を満足することを確認した。

(e) 鋼製パイプ対策

設計飛来物のうち鋼製パイプについては、作業のために設置する仮設足場等に使用されており、確実に飛散を防止することは困難と考えられる。鋼製パイプの直径は 50 mm であり、 50 目合いの防護ネット（金網）をすり抜ける可能性があることから、 50 目合いの金網を下図のように $1/2$ 目合いずらして設置し、すり抜けを防止する。

表-9に金網の網目寸法のメーカー規格値を示す。金網の網目寸法の許容差は $\pm 1.5 \text{ mm}$ 、金網の素線径は $\phi 4 \text{ mm}$ であることから、2枚のネットが完全に重なって鋼製パイプがすり抜けることは考え難いが、現地据付段階においては完全に重なる箇所がないか確認し、万一、鋼製パイプがすり抜ける箇所があれば、金網の設置位置を調整する。

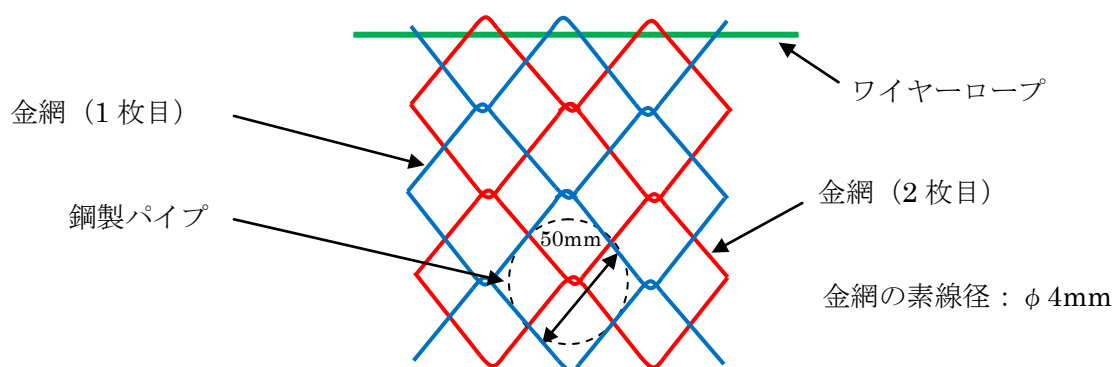


表-9 金網の網目寸法のメーカー規格値

網目寸法 (mm)	許容差 (%)	メーカー規格値 (mm)
50	±3%	48.50~51.50mm

(f) 鉄骨部材への飛来物衝突時の影響

防護ネットは、金網、金網を支持するワイヤーロープ、ワイヤーロープを締結する鋼製枠、鋼製枠を支持する支持脚*から構成する設計としている（前述「図-7 防護ネット

の構造イメージ図」参照)。

※：原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁を含む）設置エリア（以下「海水ポンプ等設置エリア」という）、配管、弁およびろ過装置（原子炉補機冷却海水系統）設置エリア（以下「海水ポンプ出口ストレーナ等設置エリア」という）上部の開口部に設置する防護ネットについては、支持脚を設置しなくても防護対象設備との離隔を確保できることから、支持脚は設置しない。

支持脚（H型鋼：294×200×8×12）に鋼製材が衝突した場合は、支持脚の変形等により、防護ネットが落下する可能性が考えられるため、その影響について評価した。

今回設置する防護ネットのうち、海水ポンプ等設置エリア、及び海水ポンプ出口ストレーナ等設置エリア上部の開口部に設置する防護ネットについては、上記のとおり支持脚は設置しないことから、防護対象設備に影響を与えることはない。また、これ以外の防護ネットについては、設置箇所と防護対象設備の位置関係から、支持脚の変形等により防護ネットが落下したとしても、防護対象設備に影響を与えることはない。

一方、海水ポンプ等設置エリア上部の開口部に設置する防護ネットについては、現場での施工性を考慮し、当該開口部に対して2組設置することとしており（前述「表-4 防護ネット設置箇所の開口寸法と防護ネットの寸法一覧」参照）、2組の防護ネット（鋼製枠（H型鋼：294×200×8×12））が接する位置に鋼製材が衝突した場合は、当該部位の変形により鋼製材が防護ネットをすり抜ける可能性があるため、防護対象設備である海水ポンプ等に影響を与えないよう、当該部位に軽みぞ型鋼（t4.5×450×75）を設置して、鋼製材衝突時の影響をLS-DYNAを用いて解析した。図-12に海水ポンプ等設置エリア上部の開口部に設置する防護ネットのイメージ図を示す。

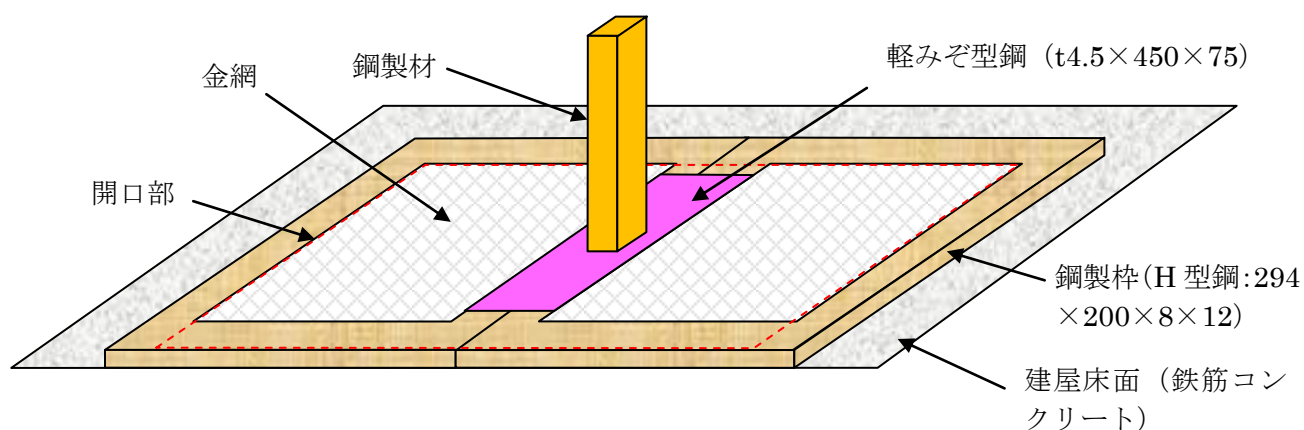


図-12 海水ポンプ等設置エリア上部の開口部に設置する防護ネットのイメージ図

H型鋼をシェル要素でモデル化して2列に並べ、その上に軽みぞ型鋼を載せて鉄筋コンクリート（RC）上に設置し、2つのH型鋼の中間（5mm間隔）にシェル要素でモデル化した鋼製材（質量135kg）を衝突させた結果、H型鋼に変形が認められるものの、鋼製材のすり抜けを防止できることを確認した。表-10に材料物性値、図-13に解析モデル図、図-14に鋼製材衝突時の変形図、図-15に鋼製材衝突時の相当応力分布図を示す。

表-10 材料物性値

	材質	質量密度 [ton/mm ³]	ヤング率 [MPa]	ポアソン比
H型鋼 軽みぞ型鋼	SS400	7.85×10^{-9}	205000	0.3
RC	鉄筋コンクリート	2.40×10^{-9}	22960	0.2
鋼製材	SN490	7.65×10^{-9}	205000	0.3

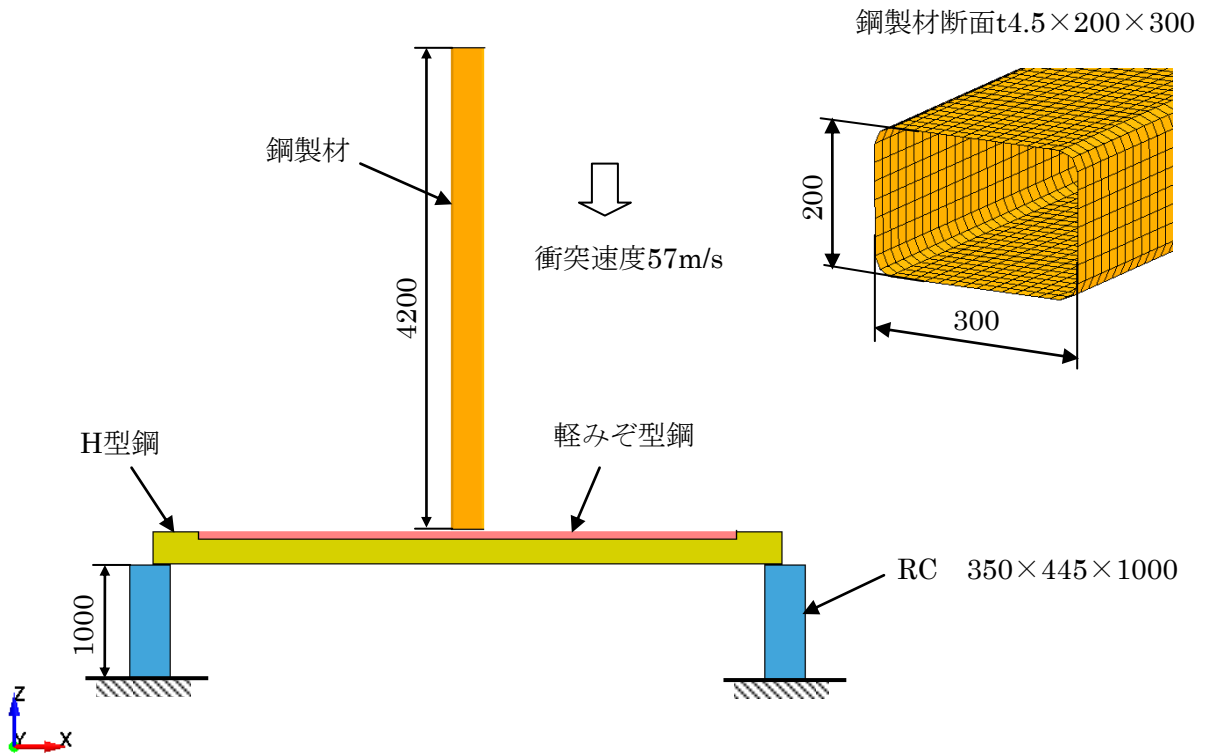
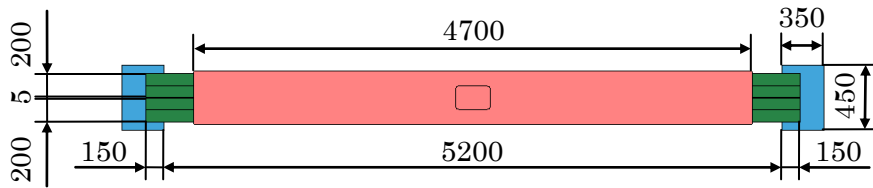
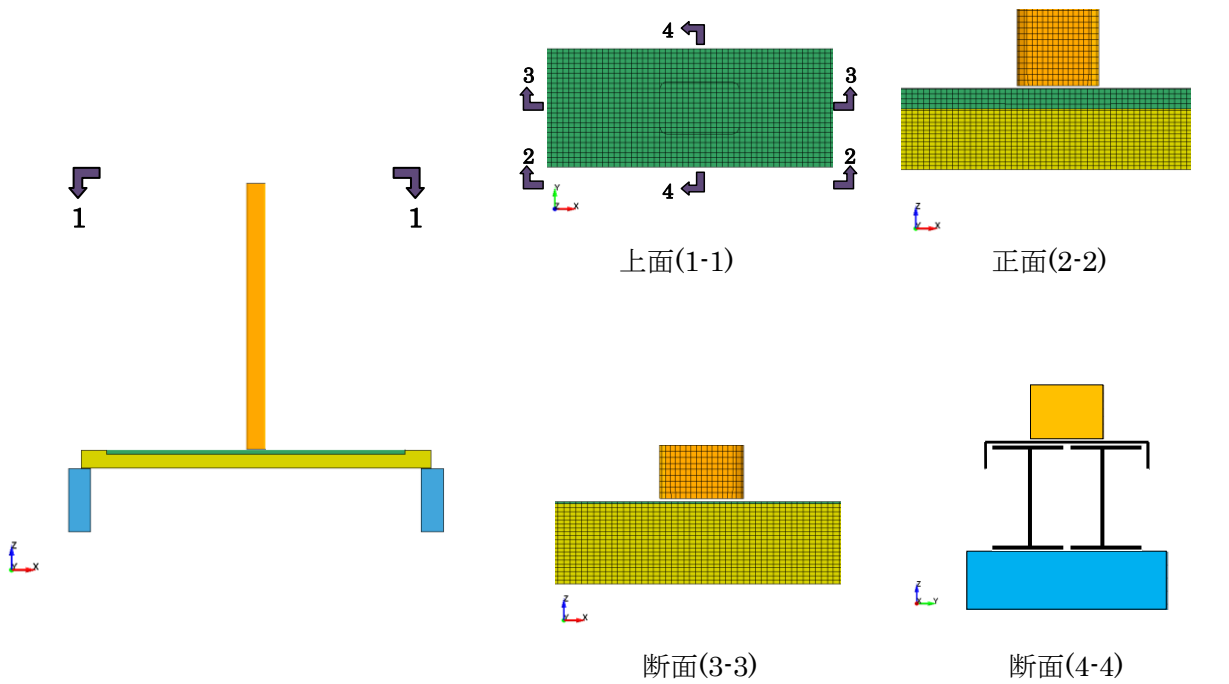
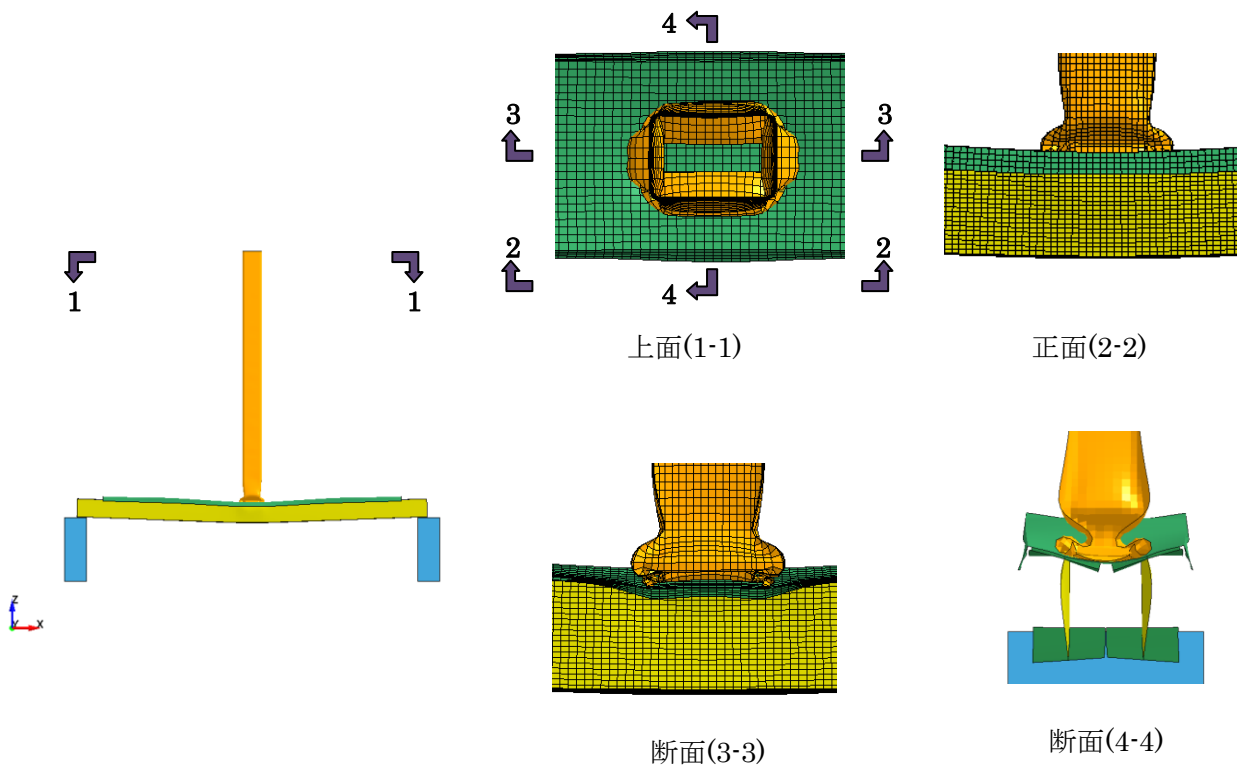


図-13 解析モデル図

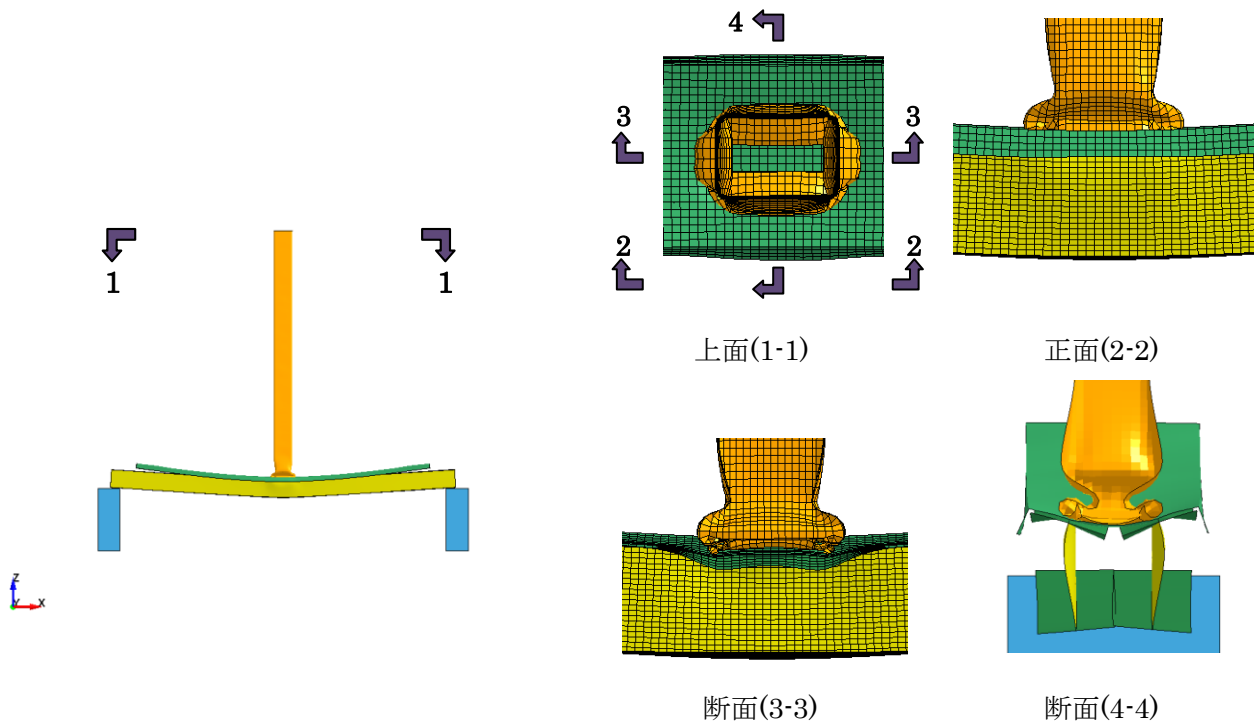


衝突直前

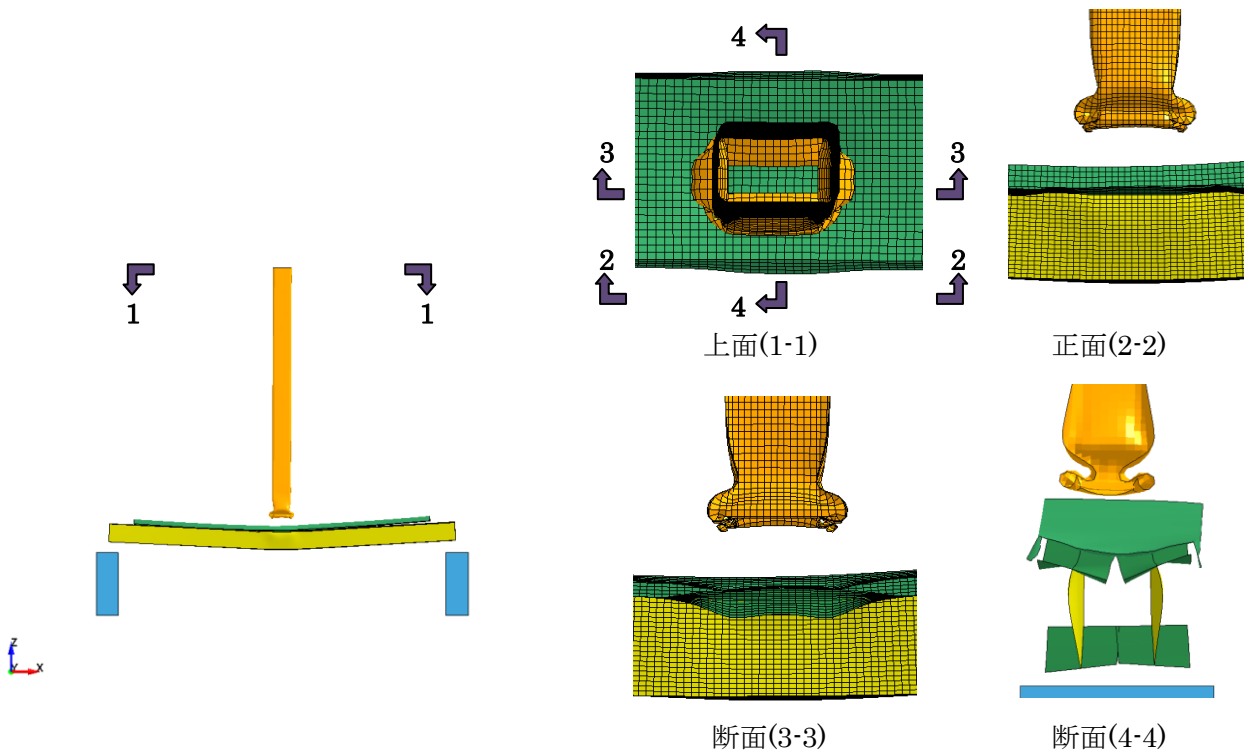


衝突直後 (0.011 秒後)

図-14 鋼製材衝突時の変形図 (1/2)



衝突後 (0.022 秒後)



衝突後 (0.1 秒後)

図-14 鋼製材衝突時の変形図 (2/2)

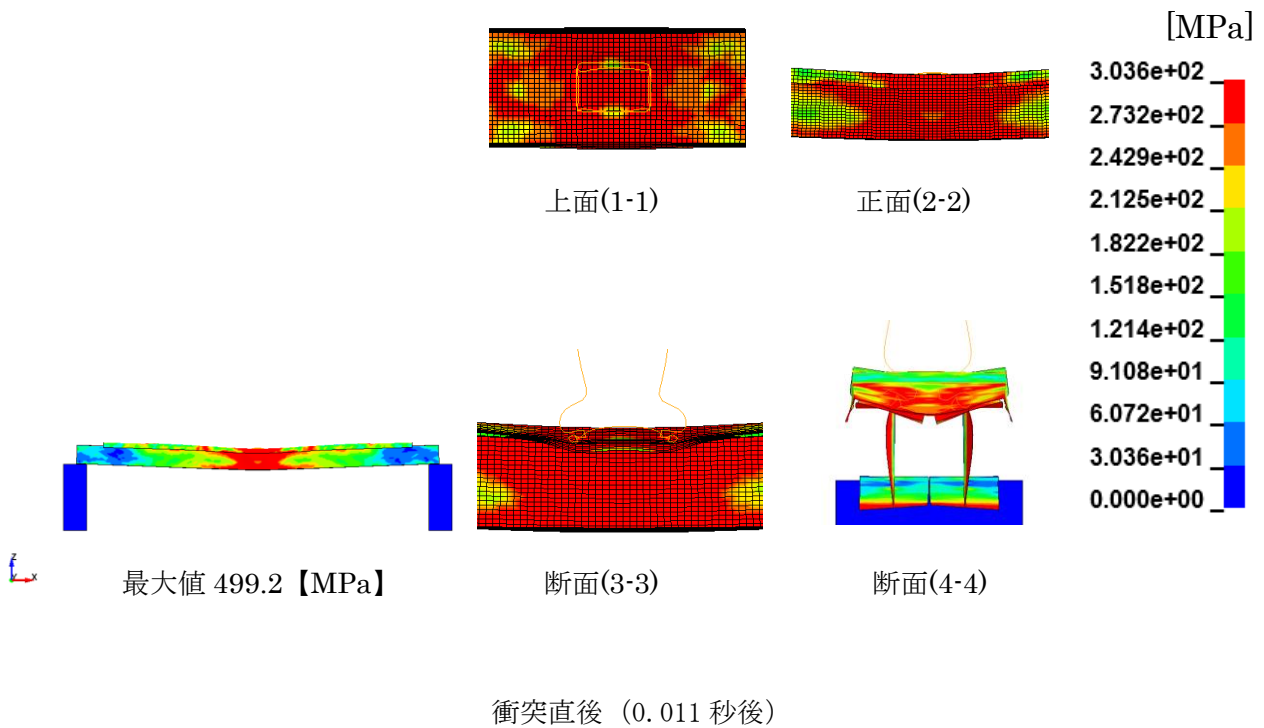
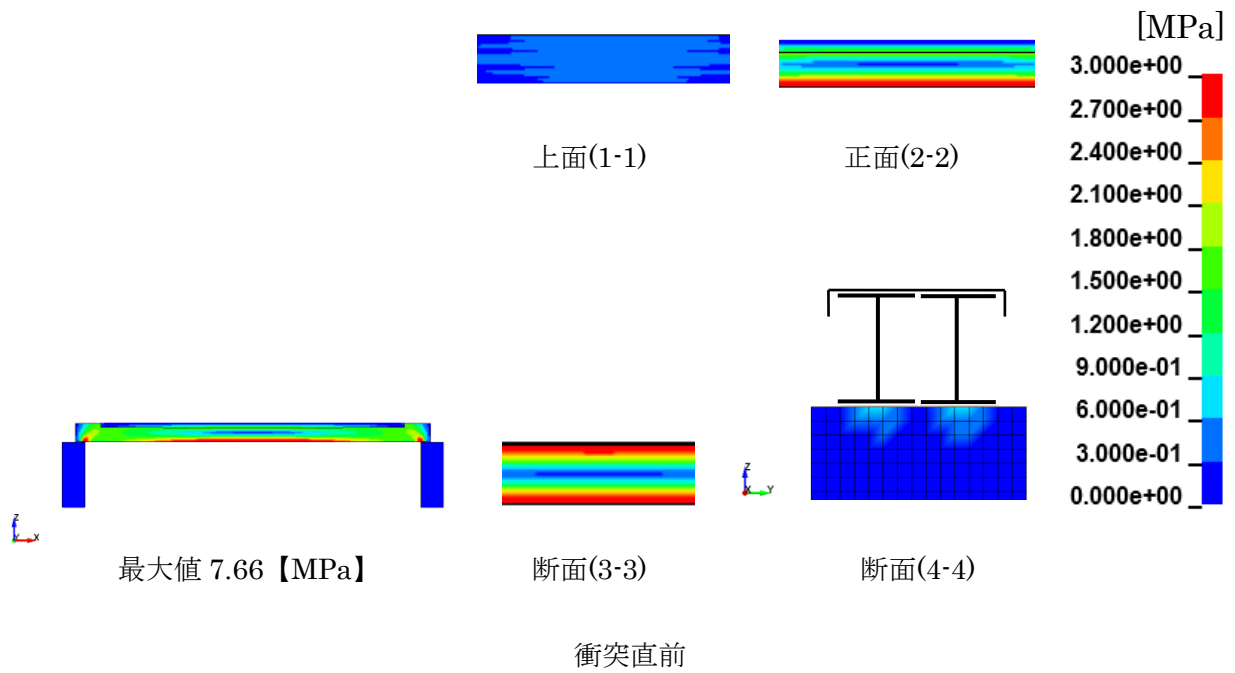
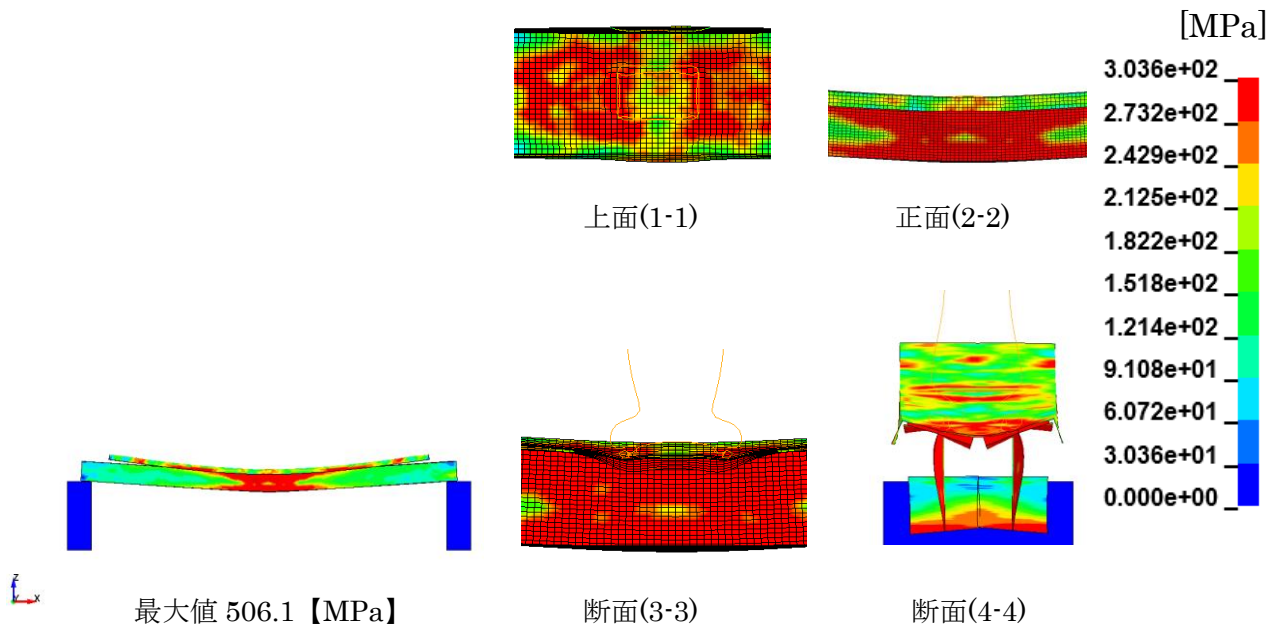
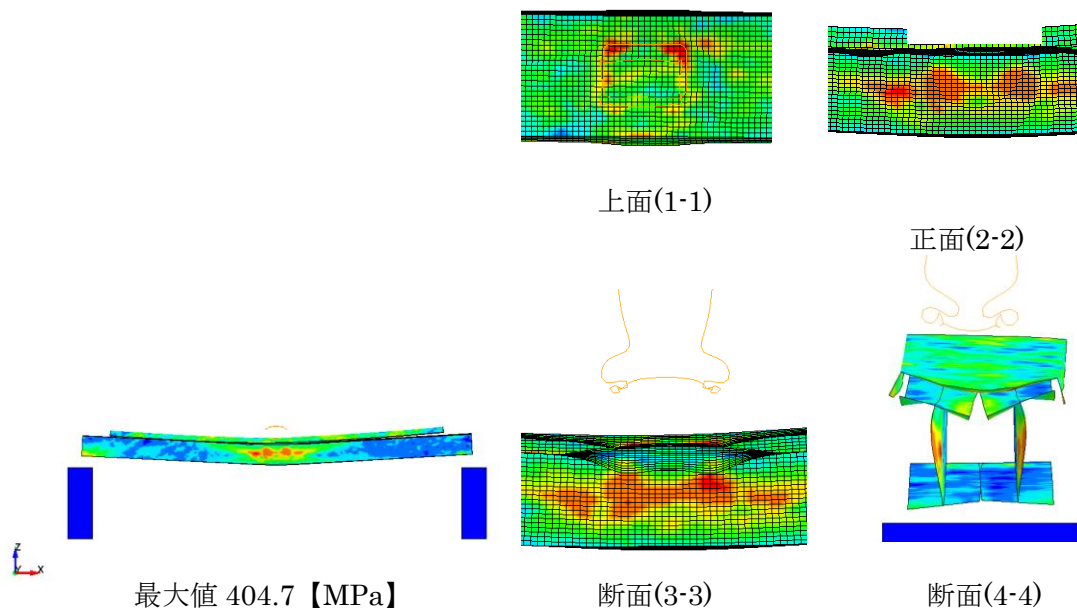


図-15 鋼製材衝突時の相当応力分布図 (1/2)



衝突後 (0.022 秒後)



衝突後 (0.1 秒後)

図-15 鋼製材衝突時の相当応力分布図 (2/2)

(g) まとめ

表-11 に上記で計算過程を示した原子炉補機冷却海水ポンプを含む防護対象設備毎の評価結果を示すが、防護対象設備を飛来物から防護するために設置する防護ネット（金網）については、飛来物防護対策にあたって想定する飛来物である鋼製材の衝突エネルギーを吸収でき、防護対象設備（あるいは設置建屋）と防護ネット（金網）との離隔を適切に取ることにより、防護対象設備への飛来物の衝突を防止できることを確認した。

表-11 防護対象設備毎の評価結果一覧

防護対象設備	①金網の吸収エネルギー (kJ)	②衝突エネルギー (kJ)	③風圧力によるエネルギー (kJ)	裕度 $\left(\frac{\text{①}}{\text{②}+\text{③}}\right) \geq 1.15$	最大変位量 (m)	ワイヤーロープ張力 (kN) ≤ 82.5 kN
原子炉補機冷却海水ポンプ (配管および弁含む)	326.8	220.0	10.4	1.41	2.01	64.7
配管、弁およびろ過装置 (原子炉補機冷却海水系統)	346.8		21.2	1.43	3.70	35.4
ディーゼル機関	266.8		7.4	1.17	1.73	75.3
配管および弁 (主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統)	266.8		7.4	1.17	1.73	75.3

なお、今回設置する防護ネットの設計に当たって用いた金網の吸収エネルギー評価式の妥当性を確認するため、今回設置する金網と同仕様の金網（材質：JIS G3506 硬鋼線材、目合い寸法：50mm、素線径 4mm、素線の引張強さ 1400N/mm²）に対して行った自由落下試験の結果から、金網の吸収エネルギー算定値 E_{Design} と試験時の落下エネルギー E_{Drop} の比較を行った。自由落下試験は、重錘（直径 50cm、質量 1.5t）を実物大の金網（寸法 3m×4m）に衝突させる本試験（実物大スケール）と、防護ネットの候補材選定のため、鉄球（φ210mm、質量 37.8kg）を実物大の 1/4 程度の金網（寸法 1m×1m）に衝突させる予備試験（要素スケール）を実施しており、これら自由落下試験の全体概要図を図-16 に、試験結果を図-17 に、 E_{Design} と E_{Drop} の比較結果を図-18 に示す。

$E_{\text{Design}} > E_{\text{Drop}}$ の領域においては、いずれの試験においてもの貫通は発生せず捕捉する結果となったことから、当該評価式は妥当であると考えられる。

また、鋼製パイプを模擬した飛来物（直径 φ60mm×長さ 655mm×厚さ 4mm、質量 8.5kg）を高速（60m/s）で衝突させる試験を 2 回実施し、いずれも捕捉する結果となった（高速衝突試験の全体概要図を図-19 に、試験結果を図-20 に示す）。

高速衝突試験においては飛来物を金網の 1/4 高さにオフセット衝突させているため、オフセット衝突時の吸収エネルギーを評価して、当該評価式（中央衝突）を用いて設計することの妥当性を確認するとともに、飛来物衝突部における金網の局部貫通評価を行い、高速飛来物に対する当該評価式の適用性を確認した。

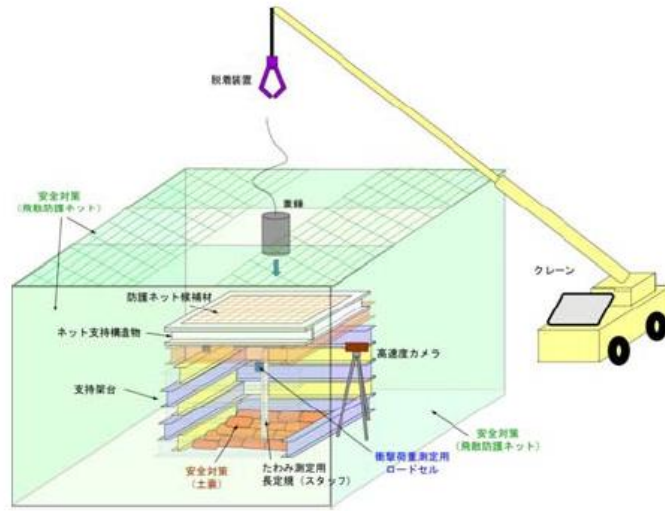


図-16 自由落下試験全体概要図（重錘落下の場合）

本試験（実物大スケール：金網寸法3m×4m）

試験ケース	枚数	支持条件	飛来物（重錘）			落下高さ (m)	最大変位 測定値(m)	落下エネルギー (kJ)	吸収エネルギー 算定値(kJ)	試験結果
			直径 (mm)	質量 (kg)	衝突 位置					
HS2-F1	2	可動	500	1500	中央	17.0	2.0	279		○
HS2-F2	2	短辺固定				19.5	-	310		×
HS2-F3	2	短辺固定				19.5	-	310		×
HS2-F4	2	短辺固定				19.5	-	310		×
HS2-F5	2	短辺固定				19.5	-	310		×
HS2-F6	2	可動				17.0	1.91	278		○
HS2-F7	2	可動				17.0	-	276		×
HS2-F8	2	可動				15.4	2.10	257		○
HS2-F9	2	可動				15.4	1.73	252		○
HS3-F1	3	短辺固定				21.6	-	341		×

○：貫通無し，×：貫通有

※：緩衝装置の吸収エネルギー含む

予備試験（要素スケール：金網寸法1m×1m）

試験ケース	枚数	支持条件	飛来物（鉄球）			落下高さ (m)	最大変位 測定値(m)	落下エネルギー (kJ)	吸収エネルギー 算定値(kJ)	試験結果					
			直径 (mm)	質量 (kg)	衝突 位置										
HS1-3	1	全周固定	210	37.8	中央	25.0	-	0.98		○					
HS1-4	1	全周固定				21.0		7.78		○					
HS1-5	1	全周固定				41.0		15.19		×					
HS1-6	1	全周固定				41.0		15.19		×					
HS1-7	1	全周固定				34.0		12.59		○					
HS1-8	1	可動				34.0		12.59		○					
HS1-9	1	可動				41.0		15.19		○					
HS1-10	1	可動				41.0		15.19		○					
HS2-3	2	全周固定				210		37.8		中央	25.0	-	0.98		○
HS2-4	2	全周固定									21.0		7.78		○
HS2-5	2	全周固定	41.0	15.19	○										
HS2-6	2	全周固定	41.0	15.19	○										
HS2-7	2	全周固定	41.0	15.19	○										

○：貫通無し，×：貫通有

図-17 自由落下試験結果（1/2）

<自由落下試験時の金網変形状況例 (HS2-F9) >

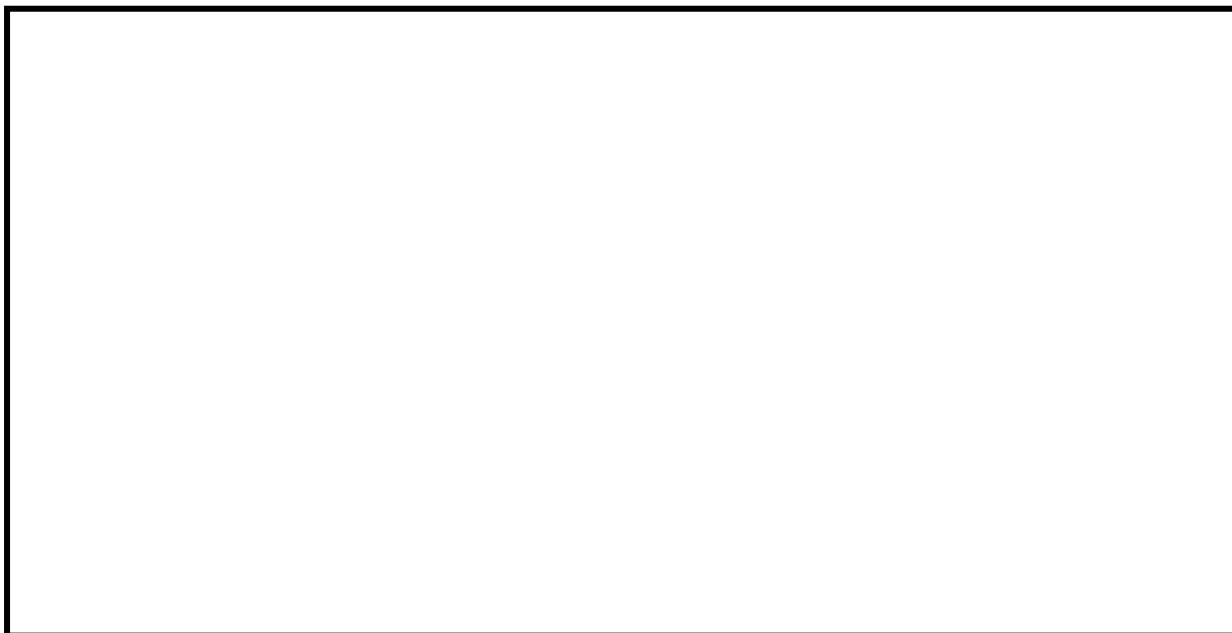


図-17 自由落下試験結果 (2/2)

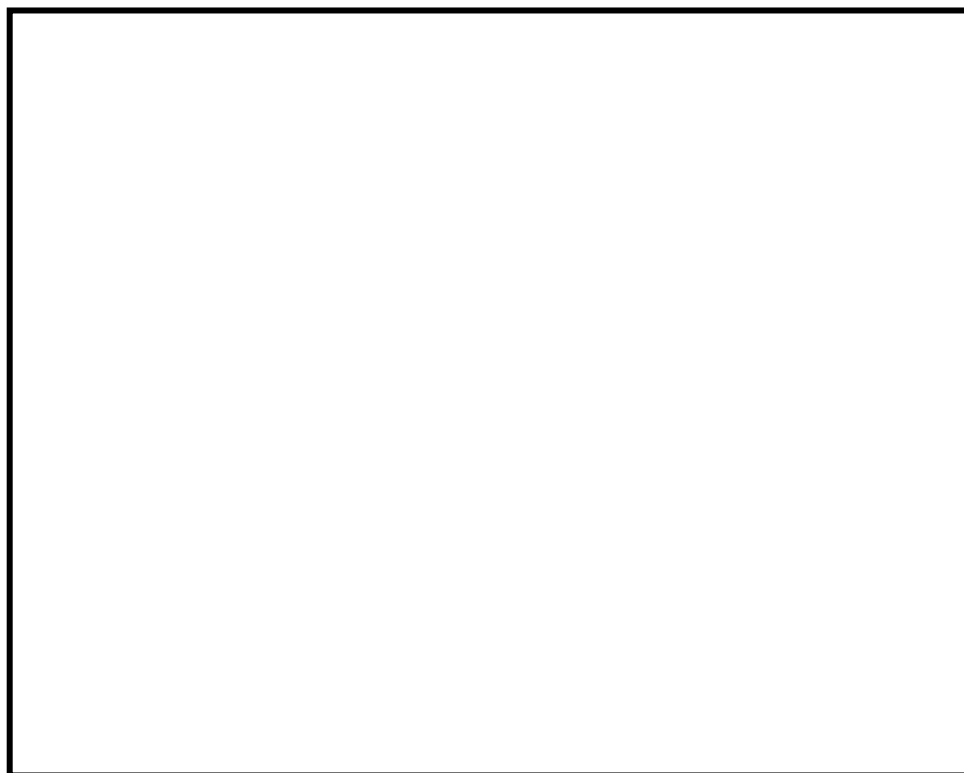


図-18 E_{Design} と E_{Drop} の比較結果



図-19 高速衝突試験全体概要図

高速衝突試験(実物大スケール:金網寸法3m×4m)

試験ケース	枚数	支持条件	飛来物(ハイク形状)			衝突速度 (m/s)	最大変位 測定値(m)	衝突エネル ギー(kJ)	吸収エネルギー 算定値(kJ)	試験結果
			直径 (mm)	質量 (kg)	衝突 位置					
HS-TM-1	2	可動	60	8.5	1/4	60.3	0.75	15.5	□	○
HS-TM-2	2	可動			高さ	59.5	0.74	15.0		○

○:貫通無し,×:貫通有

< 高速衝突試験時のネット変形状況例 (HS-TM-1) >



図-20 高速衝突試験結果

<オフセット衝突時の吸収エネルギー評価について>

①オフセット衝突時の飛来物の挙動

展開方向長さ 4m の金網の中央 (座標 0, 0) を原点として、金網固定点を A 点 (座標 -2000, 0)、B 点 (座標 2000, 0) として、飛来物により y 軸方向に最大変形した後の飛来物停止位置を点 P' とすると、AP' + BP' は一定となり、点 P' の軌跡は楕円となる。図-20 に展開方向長さ 4m の金網における飛来物停止位置 (衝突点) の軌跡を示す。

$$\text{点 } P' \text{ の軌跡 } \frac{x^2}{2566^2} + \frac{y^2}{1607^2} = 1$$

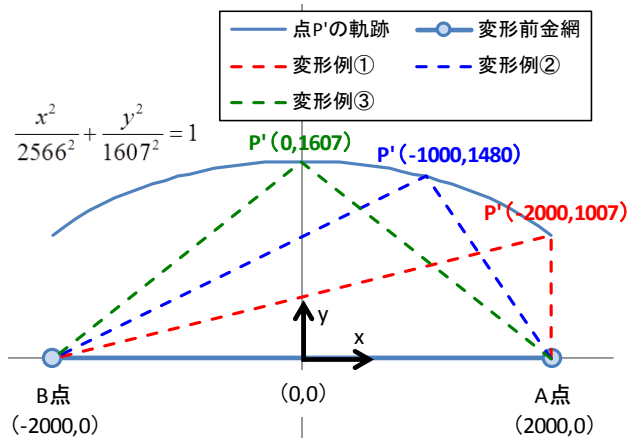


図-20 展開方向長さ 4m の金網における飛来物停止位置 (衝突点) の軌跡

図-20 において、y 軸方向に進行する飛来物がオフセット位置で金網に衝突して金網がたわみ始めると、衝突位置左右の金網の x 軸方向張力の差分により、飛来物は金網の中心から離れる方向に力を受け、図-20 で示した楕円軌道上で停止する。図-21 に展開方向長さ 4m の金網におけるオフセット衝突 (中央から 1.2m 位置) した場合の飛来物の軌跡を示すが、この場合、飛来物が中央に衝突した際の y 軸方向の最大たわみは約 1.6m となるが、中央から 1.2m オフセットした位置に衝突した際の最大たわみは約 1.0m となる。

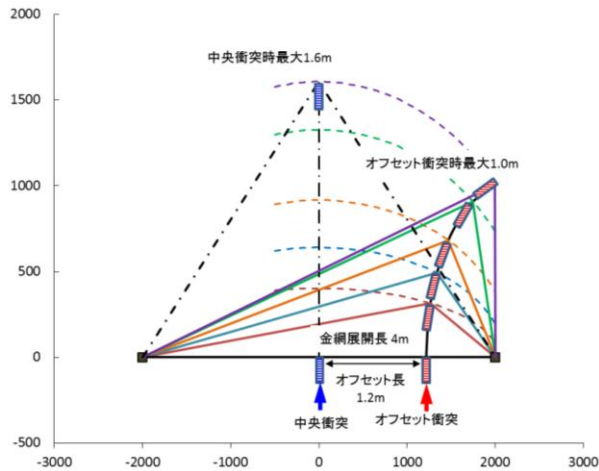


図-21 展開方向長さ 4m の金網におけるオフセット衝突 (中央から 1.2m 位置) した場合の飛来物の軌跡

②オフセット衝突時の吸収エネルギー評価（展開方向）

飛来物が金網の展開方向にオフセット衝突した場合、飛来物のエネルギーは垂直方向寄与分と水平方向寄与分に分解され、各々が金網の吸収エネルギーに変換されることとなる。図-22に展開方向長さ4mの金網におけるオフセット衝突（中央から1.2m位置）した場合の金網の吸収エネルギーとたわみの関係を示すが、飛来物が中央から1.2m オフセットした位置に衝突した場合、最大たわみ量はオフセット位置から短い側の金網の最大たわみ量（図-21に示す約1.0m）に制限されるが、金網の吸収エネルギーは飛来物が垂直方向に金網を引っ張るエネルギーと、水平方向に引っ張るエネルギーとの合計となり、その値は中央衝突した場合の吸収エネルギーと同じになると考えられる。

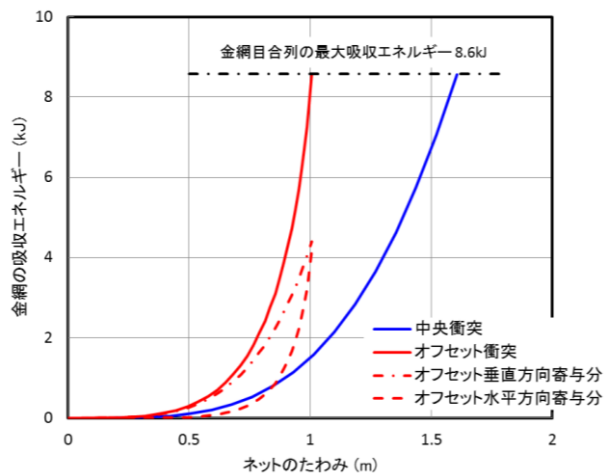


図-22 展開方向長さ4mの金網におけるオフセット衝突（中央から1.2m位置）した場合の吸収エネルギー

③オフセット衝突時の吸収エネルギー評価（展開直角方向）

金網の展開直角方向にオフセット衝突した場合の金網の吸収エネルギーへの影響について、①中央部に衝突した場合、②展開直角方向端部に衝突した場合、③展開直角方向の1/4高さに衝突した場合の3ケースを比較する形で検討した。

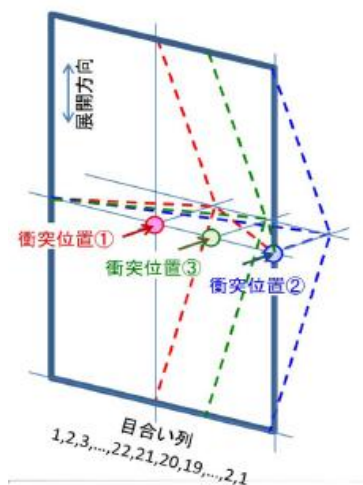
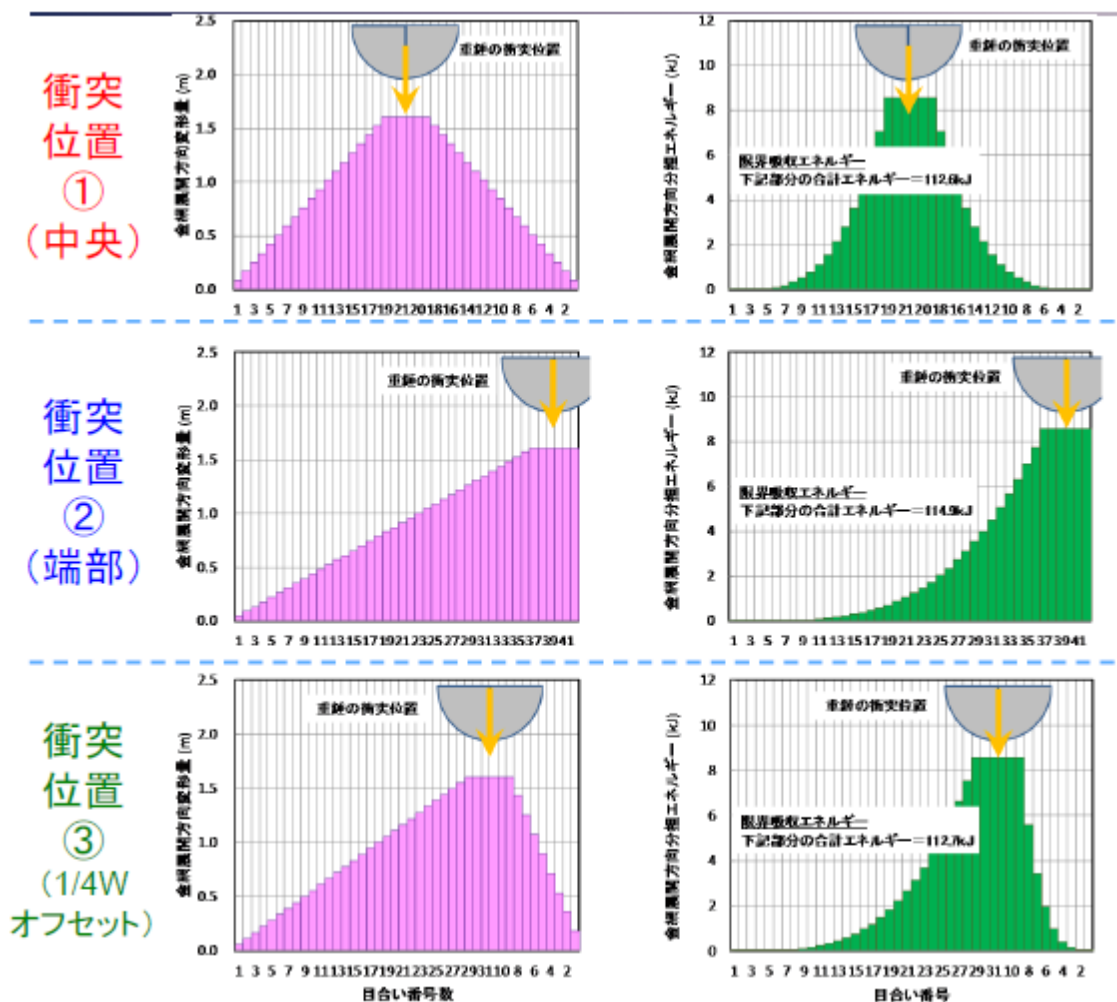


図-23 展開直角方向オフセット衝突位置（検討ケース）

図-23 に示す展開直角方向オフセット衝突位置（検討ケース）における金網の吸収エネルギーを算定した結果（表-12 参照）、衝突位置が中央から離れるほど、金網の吸収エネルギーが大きくなる結果となった。これは衝突位置が中央から離れるほど、衝突位置からオフセットした方向とは反対側の金網端部までの距離が長くなるため、飛来物の衝突により金網が大きく変形する範囲が増え、金網の吸収エネルギーが大きくなったものと考えられる。

表-12 展開直角方向オフセット衝突位置における金網の吸収エネルギー

衝突位置	金網の吸収エネルギー（1枚分）
①中央	112.6kJ
②端部	114.9kJ
③1/4高さ	112.7kJ



④まとめ

以上より、展開方向にオフセット衝突した場合の吸収エネルギーは、中央衝突した場合の吸収エネルギーと同じであり、一方、展開直角方向にオフセット衝突した場合の吸収エネルギーは、中央衝突した場合の吸収エネルギーよりも大きくなるため、当該評価式（中央衝突）を用いた設計とすることは妥当と考える。

<飛来物衝突部における金網の局部貫通評価>

飛来物が金網に衝突した場合の局部貫通評価を次のとおり実施した。

- ①飛来物衝突による衝突荷重を算定
- ②衝突部の金網から交点1点当たりの荷重を算出
- ③交点1点当たりの荷重が交点強度以下であることを確認

①飛来物衝突による衝突荷重を算定

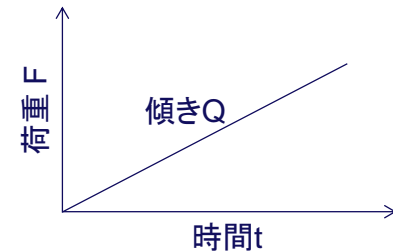
鋼製材が4m（金網展開方向長さ L_x ）×3m（金網展開直角方向長さ L_y ）の金網に衝突した場合の衝突荷重を以下のとおり算出した。

鋼製材が金網に衝突する速度を、最大水平速度 57m/s を切り上げて 60m/s、鋼製材の質量を m とすると、衝突荷重 F 、時間 t 秒後の飛来物の速度 v および変位量 δ は次式で表される。

$$F = Qt$$

$$v = -\frac{1}{m} \int Qt = -\frac{Qt^2}{2m} + 60$$

$$\delta = -\int \left(-\frac{Qt^2}{2m} + 60 \right) = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t$$



ここで、最大変位量 δ_{\max} に到達したときの飛来物速度は $v=0$ であるため、

$$-\frac{Qt^2}{2m} + 60 = 0$$

より、

$$Qt^2 = 120m$$

$$\delta_{\max} = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t = -\frac{120mt}{6m} + 60t = -20t + 60t = 40t$$

となることから、

$$t = \frac{\delta_{\max}}{40}$$

$$F = Qt = \frac{120m}{t}$$

となる。

鋼製材の質量は $m=135\text{kg}$ であるため、4m×3m の金網の最大変位量 δ_{\max} は、金網の吸収エネルギー評価式より、

$$\delta \max = \frac{Lx}{2} \times \tan \theta = \frac{4}{2} \times \tan 38.8 = 1.608m$$

となるため、

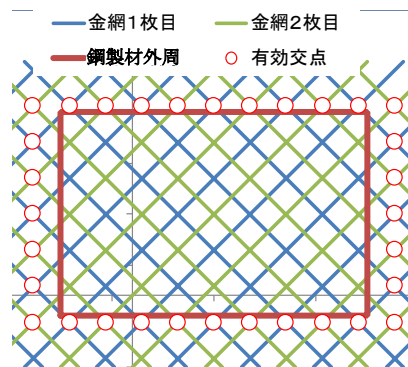
$$\text{衝突時間 } t = \frac{\delta \max}{40} = \frac{1.608}{40} = 0.040s$$

$$\text{衝突荷重 } F = Qt = \frac{120m}{t} = \frac{120 \times 135}{0.040} = 405kN$$

となる。

②衝突部の金網から交点 1 点当たりの荷重を算出

鋼製材の形状は短辺 0.2m×長辺 0.3m であり、防護ネットは 50 目合いの金網を 1/2 目合いずらして 2 枚重ねて設置することから、鋼製材が金網に衝突した時の鋼製材外周近傍の金網交点は下図のとおり 32 点となるため、この交点数にて鋼製材が金網に衝突した際の衝突荷重を受け止めることとなる。



上記①のとおり、鋼製材が金網に衝突した際の衝突荷重 $F=405kN$ となることから、交点 1 点当たりの荷重は、

$$\text{交点 1 点当たりの荷重} = \frac{405}{32} = 12.7kN$$

となる。

③交点 1 本当たりの荷重が交点強度以下であることを確認

「図-9 荷重-伸び曲線（引張試験結果）」より、交点の破断荷重（交点強度）は $14.96kN$ （等価剛性 $748kN/m \times$ 破断時の金網 1 目当たりの伸び量 $20mm = 14.96kN$ ）であり、交点 1 点当たりの荷重 < 交点強度となり、鋼製材の衝突による金網の局部貫通は発生しない。

④まとめ

上記同様に今回設置する金網の局部貫通評価を行った結果（表-13 参照）、いずれの金網も交点 1 点当たりの荷重が交点強度を下回っており、鋼製材の衝突による金

網の局部貫通は発生しないことから、高速飛来物に対しても当該評価式は適用可能と考える。

表-13 今回設置する金網の局部貫通評価結果一覧

防護対象設備	最大変位量 δ_{\max} (m)	衝突時間 t (S)	衝突荷重 F (kN)	交点1点当たりの荷重 ($< 14.96\text{kN}$)
原子炉補機冷却海水ポンプ (配管および弁含む)	2.01m	0.050	324	10.2
配管、弁およびろ過装置 (原子炉補機冷却海水系統)	3.70	0.092	177	5.6
ディーゼル機関	1.73	0.043	377	11.8
配管および弁 (主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統)	1.73	0.043	377	11.8

<ワイヤーロープ曲がり部緩衝機構設置による影響>

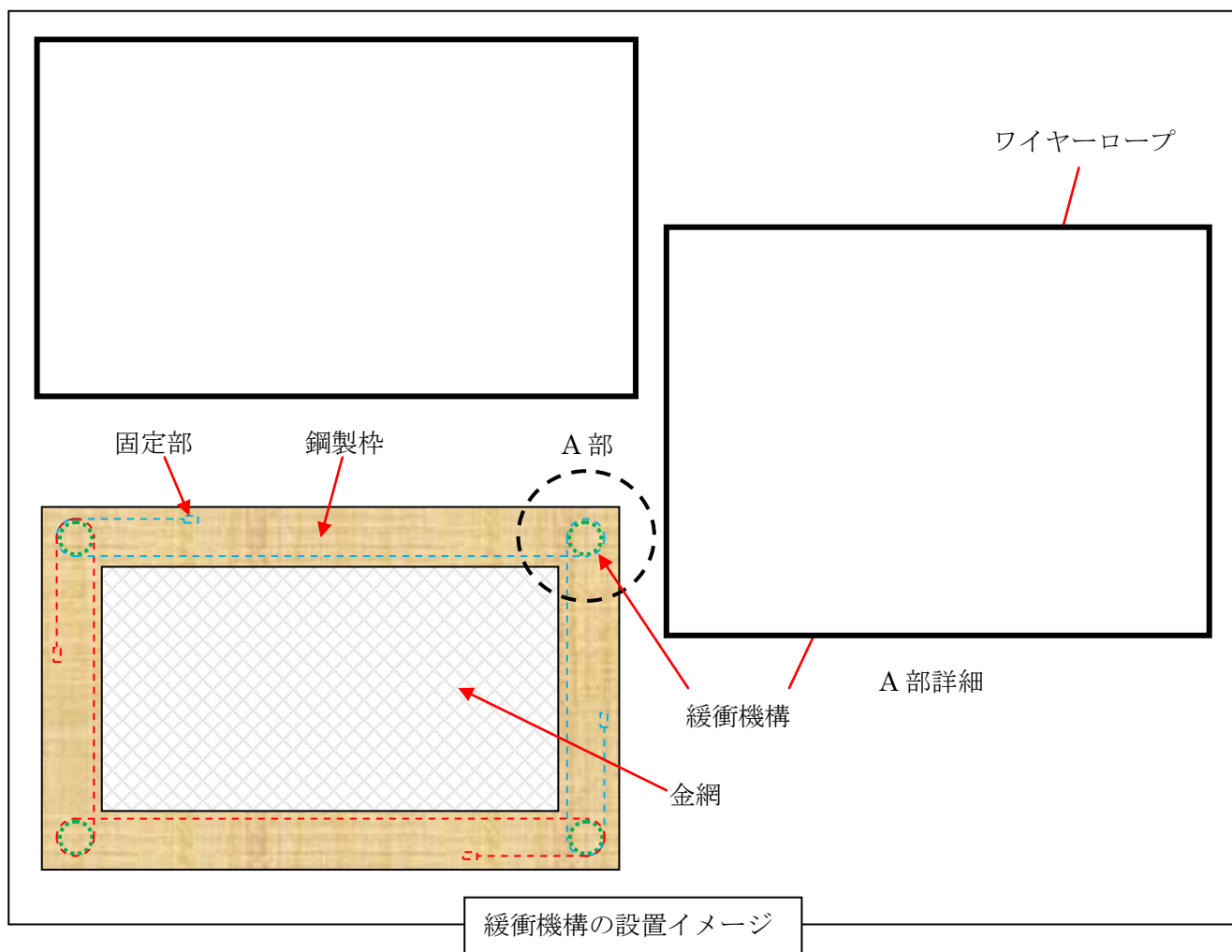
防護ネットは金網を2枚重ねとし、金網の四辺はワイヤーロープにて支持して、ワイヤーロープを鋼製枠に締結する構造としており、この鋼製枠の四隅に緩衝機構を設置し、ワイヤーロープを緩衝機構に沿わせて締結することによって、ワイヤーロープに発生する張力の急激な増加を緩和することとしている。緩衝機構は、鋼製枠にボルト止めされる固定部と、ワイヤーロープに沿わせる可動部に分かれており、飛来物衝突時には、ワイヤーロープの変形により可動部が動作し、緩衝機構内の部材が変形することによって、ワイヤーロープに発生する張力の急激な増加を緩和するものであり、飛来物衝突時のエネルギーを吸収する効果も期待できる。

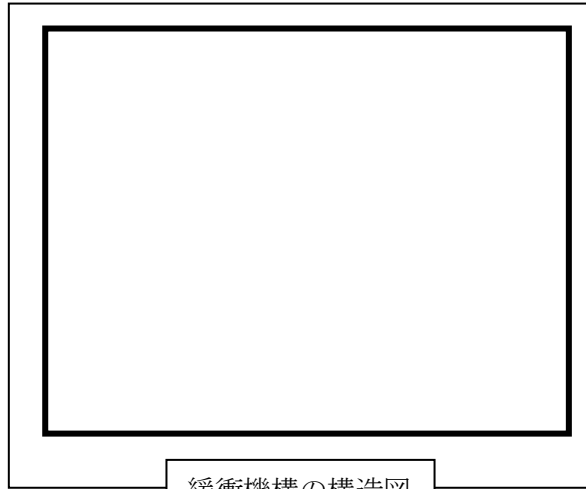
地震時に金網に作用する地震力等によって緩衝機構が動作した場合、外径保持管が斜め方向に最大で約70mm変位するため、金網を支持しているワイヤーロープにたるみが生じて金網にたわみが発生することから、この状態で飛来物が衝突した場合の影響を評価した。評価結果を表-14に示す。

緩衝機構が動作した状態では動作しない状態と比較して、初期たわみが発生する分、金網変位角が大きくなり最大変位量が増加するため、金網の吸収エネルギーは若干ではあるが増加することになり、必要な裕度は確保されることを確認した。一方、最大変位量は上記のとおり増加するため、防護ネット（金網）が防護対象設備（あるいは設置建屋）に接触しないよう、緩衝機構が動作した状態を考慮して、防護対象設備（あるいは設置建屋）と防護ネット（金網）との離隔距離を確保する。

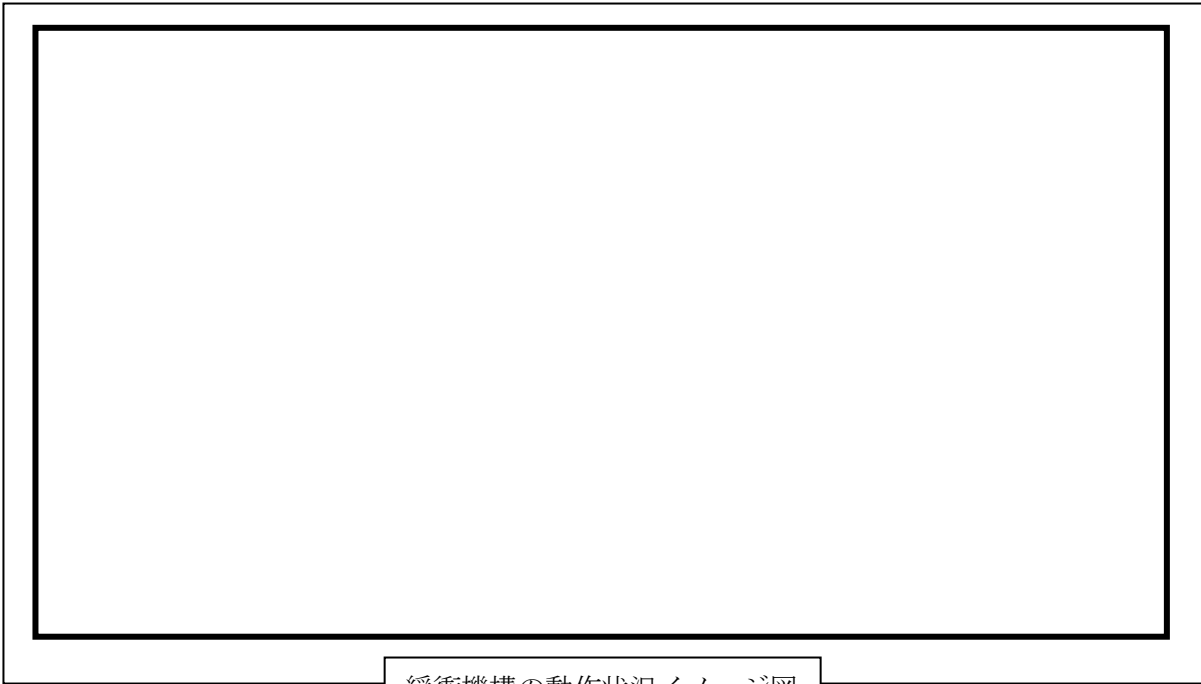
表-14 飛来物衝突時の緩衝機構動作状況の違いによる防護対象設備毎の評価結果一覧

防護対象設備	①金網の吸収エネルギー (kJ)		②衝突エネルギー (kJ)	③風圧力によるエネルギー (kJ)	裕度 $\left(\frac{\text{①}}{\text{②+③}}\right) \geq 1.15$		最大変位量 (m)	
	動作前	動作後			動作前	動作後	動作前	動作後
飛来物衝突時の緩衝機構動作状況								
原子炉補機冷却海水ポンプ (配管および弁含む)	326.8	333.0	220.0	10.4	1.41	1.44	2.01	2.07
配管、弁およびろ過装置 (原子炉補機冷却海水系統)	346.8	348.0		21.2	1.43	1.44	3.70	3.75
ディーゼル機関	266.8	269.4		7.4	1.17	1.18	1.73	1.79
配管および弁 (主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統)	266.8	269.4		7.4	1.17	1.18	1.73	1.79





緩衝機構の構造図



緩衝機構の動作状況イメージ図

c. 防護板の設計

蓄熱室加熱器が設置されている蓄熱室および隣接する吸気ガラリ室に設置する防護板については、既存建屋床もしくは壁（コンクリート）にアンカーボルトにて固定する。一方、新燃料ラックの上部に設置する防護板（鋼製パイプ貫通防止蓋）については、防護板の裏面に脱落および横ずれ防止用の支持部材（アングル材）を設け、当該ラック上部に置くだけの構造とする。

以下に防護板が鋼製材の貫通を防止できる強度を有しているか検討した。

(a) 防護板の強度評価

イ. 蓄熱室加熱器

(イ) 蓄熱室

鋼製材は蓄熱室のコンクリート壁を貫通して防護板に衝突することになるため、防護板の板厚はコンクリート壁の厚さを考慮して算出する。

蓄熱室のコンクリート壁厚さは 18cm であるため、コンクリートの貫通評価に用いている「修正 NDRC 式」(①式)、「Degen 式」(②式) から、衝突速度 V を仮定して、貫通厚さ t_p を算出すると、衝突速度 $V=33\text{m/s}$ の時に貫通厚さ $t_p=18\text{cm}$ となる。

$$x_c = \alpha_c \sqrt{4KWND \left(\frac{V}{1000D} \right)^{1.8}}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} < 2.0 \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

$$t_p = \alpha_p D \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c D} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c D} \right)^2 \right\}, \text{ for } \frac{x_c}{\alpha_c D} \leq 1.52 \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、

x_c : 貫入深さ (in)	α_c : 飛来物低減係数	$K : 180/\sqrt{F_c}$
W : 飛来物重量 (lb)	N : 形状係数	D : 飛来物直径 (in)
V : 衝突速度 (ft/s)	F_c : コンクリート強度 (psi)	
t_p : 貫通厚さ (in)	α_p : 飛来物低減係数	

表-15 コンクリート貫通評価諸元

低減係数 α_c, α_p	コンクリート強度 F_c	飛来物重量 W	形状係数 N	飛来物直径 D	衝突速度 V
1.0	24 (N/mm ²) ↓ 3480 (psi)	135 (kg) ↓ 298 (lbf)	1.14	27.6 (cm) ↓ 10.9 (in)	33 (m/s) ↓ 108.3 (ft/s)

<貫通評価>

$$x_c = 1.0 \sqrt{4 \times \frac{180}{\sqrt{3480}} \times 298 \times 1.14 \times 10.9 \left(\frac{108.3}{1000 \times 10.9} \right)^{1.8}}$$

$$= 3.35 \text{ (in)}$$

$$t_p = 1.0 \times 10.9 \left\{ 2.2 \left(\frac{3.35}{1.0 \times 10.9} \right) - 0.3 \left(\frac{3.35}{1.0 \times 10.9} \right)^2 \right\}$$

$$= 7.07 \text{ (in)}$$

$$= 17.95 \text{ (cm)} \Rightarrow 18 \text{ (cm)}$$

鋼製材が蓄熱室のコンクリート壁に衝突する際の運動エネルギーは、鋼製材の最大水平速度 $V_1=57\text{m/s}$ から下記のとおり算出される。

$$\cdot WV_1^2/2/1000=220\text{kJ}$$

また、鋼製材が蓄熱室のコンクリート壁を貫通する際に吸収される運動エネルギーは、上記で算出した衝突速度 $V=33\text{m/s}$ から下記のとおり算出される。

$$\cdot WV^2/2/1000=73\text{kJ}$$

以上より、鋼製材が蓄熱室のコンクリート壁を貫通した後の鋼製材の速度 V_2 は下記のとおり算出される。

$$\cdot V_2 = \sqrt{2 \times \frac{(220-73)}{135} \times 1000} = 46.7\text{m/s}$$

上記で算出したコンクリート壁貫通後の速度 V_2 から、鋼板の貫通評価で用いている BRL 式（下式）により、鋼製材の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さを算出すると 8mm となる。

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

ここで、

T : 鋼板貫通厚さ (in)

M : ミサイル質量 ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$)

V : ミサイル速度 (ft/s)

D : ミサイル直径 (in)

K : 鋼板の材質に関する定数=1

表-16 鋼板貫通評価に係る諸元

ミサイル質量 M	ミサイル速度 V	ミサイル直径 D
13.77 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)	46.7 (m/s)	276.40 (mm)
↓	↓	↓
9.25 ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$)	153.3 (ft/s)	10.9 (in)

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

$$T = \sqrt[3]{\left(\frac{0.5 \times 9.25 \times 153.3^2}{17400 \times 1^2 \times 10.9^{3/2}}\right)^2}$$

$$= 0.31 \dots (in)$$

$$= 7.90 \dots (mm) \Rightarrow 8 (mm)$$

以上より、防護板の板厚は必要最少厚さ 8mm 以上確保することから、鋼製材の貫通を防止できる。

(ロ) 吸気ガラリ室

鋼製材は吸気フードを貫通して直接防護板に衝突すると考えられるため、鋼製材の最大水平速度 57m/s (=187.01ft/s) から、上記同様、鋼板の貫通評価で用いている BRL 式により、鋼製材の貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さを算出すると 11mm となる。

以上より、防護板の板厚は必要最少厚さ 11mm 以上確保することから、鋼製材の貫通を防止できる。

ロ. 新燃料ラックに貯蔵している燃料集合体

鋼製パイプは燃料取扱棟の外壁を貫通して直接防護板に衝突すると考えられるため、鋼製パイプの最大水平速度 49m/s (=160.76ft/s) から、前述した鋼板の貫通評価で用いている BRL 式により、鋼製パイプの貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さを算出すると 8mm となる。

表-17 鋼板貫通評価に係る諸元

ミサイル質量 M	ミサイル速度 V	ミサイル直径 D
0.86 (kg·s ² /m)	49 (m/s)	50 (mm)
↓	↓	↓
0.58 (lb·s ² /ft)	160.76 (ft/s)	1.97 (in)

$$T^{3/2} = \frac{0.5MV^2}{17400K^2D^{3/2}}$$

$$T = \sqrt[3]{\left(\frac{0.5 \times 0.58 \times 160.76^2}{17400 \times 1^2 \times 1.97^{3/2}}\right)^2}$$

$$= 0.28 \dots (in)$$

$$= 7.35 \dots (mm) \Rightarrow 8 (mm)$$

以上より、防護板の板厚は必要最少厚さ 8mm 以上確保することから、鋼製パイプの貫

通を防止できる。

(b) まとめ

以上より、防護対象設備を飛来物から防護するために設置する防護板については、飛来物防護対策にあたって想定する飛来物である鋼製材あるいは鋼製パイプの貫通を生じないために必要な鋼板の最小厚さ以上の板厚を確保することにより、防護対象設備への飛来物の衝突を防止できることを確認した。

d. 飛来物防護対策による防護対象設備の安全機能への影響

飛来物防護対策として今回設置する防護ネット（支持脚含む）および防護板（支持部材含む）（以下「防護ネット等」という）については、防護対象設備近傍に設置するため、防護対象設備の安全機能に影響を与える可能性があることから、防護対象設備の安全機能に影響を与える恐れがないか以下に検討した。

(a) 防護ネット等の損傷等により防護対象設備に及ぼす波及的影響

防護ネット等を防護対象設備近傍に設置する場合、防護ネット等の損傷により防護対象設備に波及的影響を与える可能性がある。

イ. 地震による防護ネット等の落下・転倒

地震により防護ネット等が落下もしくは転倒すると、防護対象設備の安全機能に悪影響を与える可能性がある。

ロ. 防護ネット等の腐食

防護ネット等を支える支持脚、支持部材等が腐食により破損すると、防護対象設備に波及的影響を与える可能性も考えられるが、防護ネットの構成部材である金網、ワイヤーロープは亜鉛メッキが施されており、鋼製枠は防食塗装を施すこととしている。また、防護板の構成部材である防護板（鋼製）、支持部材（鋼材）は防食塗装を施すこととしている等、耐食性を有していることから、防護ネット等の腐食による波及的影響はないものと考えている。

ハ. 火災

防護ネット等が燃え火災となれば防護対象設備に波及的影響を与える恐れがあるが、防護ネットの構成部材である金網（硬鋼線）、鋼製枠（鋼製）、ワイヤーロープ（鋼線）、および防護板の構成部材である防護板（鋼製）、支持部材（鋼材）は可燃性ではなく耐火性を有していることから、防護ネット等に起因する火災による波及的影響はないものと考えている。

(b) 防護ネット等の設置により防護対象設備の周辺環境が変化することによる悪影響

防護ネット等の設置により防護対象設備の冷却、アクセス性などの周辺環境が変わることにより、防護対象設備の安全機能に影響を与える可能性がある。

イ. 冷却空気等の流路阻害

防護ネット等は飛来物の進入が想定される建屋開口部や防護対象設備を収めるピット開口部に設置するケースがあるが、これらは防護対象設備にとって必要な冷却空気等の流路でもあり、防護ネット等がこれを阻害し防護対象設備の安全機能に悪影響を及ぼす

可能性がある。

ロ. 消火活動への悪影響

防護ネット等が防護対象設備周辺で発生した火災の消火活動の妨げになり、防護対象設備の安全機能に悪影響を及ぼす可能性がある。

(c) 評価結果

上記 (a)、(b) 項から、防護対象設備に影響を与える可能性のある①地震による防護ネット等の落下・転倒、②冷却空気等の流路阻害、③消火活動への悪影響による防護対象設備の安全機能への影響について評価した結果、①防護ネット等は基準地震動に対して耐震性を確保すること、②防護ネット等が開口部を閉塞することはないこと、③防護ネット等が消火あるいは消火活動の妨げになることはないこと等から、防護対象設備の安全機能に影響を与えないことを確認した。評価結果を表-18に示す。

表-18 飛来物防護対策による防護対象設備の安全機能への影響評価結果一覧

項目		防護対象設備への影響内容	評価結果				
			原子炉補機冷却海水ポンプ (配管、弁および過装置含む)	ディーゼル機関	蓄熱室加熱器	配管および弁 (主蒸気系統、主給水系統、 制御用空気圧縮系統)	新燃料ラック
防護対象設備に及ぼす波及的影響	地震による防護ネット等の落下・転倒	地震により防護ネット等が落下もしくは転倒すると、防護対象施設の安全機能に悪影響を与える可能性がある。	防護ネットは基準地震動に対して耐震性を確保するため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	防護ネット（支持脚含む）が仮に落下しても排気流路は確保されることから、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	<p><蓄熱室> 防護板の設置に当っては基準地震動に対する耐震性を確保するため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。</p> <p><吸気ガラリー室> 防護板が仮に転倒しても吸気流路を閉塞させることは考えがたいことから、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。</p>	防護ネット（支持脚含む）が仮に落下してもタービン建屋内であり防護対象設備がないことから、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	防護板（鋼製パイプ貫通防止蓋）は新燃料ラック上部に置く形で設置するため、防護板の裏面に脱落および横ずれ防止用の支持部材（アングル材）を設けることから、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。また、当該貫通防止蓋設置による当該ラックの耐震性に影響を与えない設計とする。
	防護ネット等の腐食	防護ネット等を支える支持脚、支持部材等が腐食により破損すると、防護対象施設に波及的影響を与える可能性がある。	防護ネットの構成部材である金網、ワイヤーロープは亜鉛メッキが施されており、鋼製枠は防食塗装を施すこととしている。また、防護板の構成部材である防護板（鋼製）、支持部材（鋼材）は防食塗装を施すこととしている等、耐食性を有していることから、防護ネット等の腐食による波及的影響はないものと考えている。				
	火災	防護ネット等が燃え火災となれば防護対象設備に波及的影響を与える恐れがある。	防護ネットの構成部材である金網（硬鋼線）、鋼製枠（鋼製）、ワイヤーロープ（鋼線）、および防護板の構成部材である防護板（鋼製）、支持部材（鋼材）は可燃性ではなく耐火性を有していることから、防護ネット等に起因する火災による波及的影響はないものと考えている。				
防護ネット等の設置により防護対象設備の周辺環境が変化することによる悪影響	冷却空気等の流路阻害	防護ネット等は飛来物の進入が想定される建屋開口部や防護対象設備を取めるピット開口部に設置するケースがあるが、これらは防護対象設備にとって必要な冷却空気流路でもあり、防護ネット等がこれを阻害し防護対象設備の安全機能に悪影響を及ぼす可能性がある。	防護ネット（金網）が開閉口を閉塞することではなく、冷却空気流路は十分に確保できるため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	防護ネット（金網）が開閉口を閉塞することではなく、冷却空気流路は十分に確保できるため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	防護板は既給気開口面積を上回るよう設置するため、開口部を閉塞することではなく、吸気流路は十分に確保できることから、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	防護ネット（金網）が開閉口を閉塞することではなく、蒸気排出流路は十分に確保できるため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	当該ラックに貯蔵される燃料集合体（新燃料）は冷却を要しないため、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。
	消火活動への悪影響	防護ネット等が防護対象設備周辺で発生した火災の消火活動の妨げになり、防護対象設備の安全機能に悪影響を及ぼす可能性がある。	海水ポンプエリアの消火が必要な場合においても防護ネットと床との間には十分な隔離を確保すること、ネット自体も水を通すことから、消火活動に悪影響を与えることはない。防護ネット設置後においても、開口部を閉塞することはないため、消火活動の妨げになることはなく、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	当該エリアはCO2消火自動設備を備えており、排気口付近にCO2放出口はないこと、防護ネット設置により密閉することを阻害しないことから、防護ネットが消火の妨げになることはなく、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	壁面の防護板が消火活動の妨げになることはなく、蓄熱室加熱器との隔離も十分にとることから、消火活動の妨げになることはなく、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。なお、当該エリアには可燃物等はなく火災発生の可能性はない。	設置箇所は壁面近傍であり消火活動に影響を与えることはなく、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。	当該ラック内に可燃物はないこと、防護板（鋼製パイプ貫通防止蓋）は当該ラック上部に置く形で設置することから、消火活動に影響を与えることはなく、防護対象設備の安全機能に影響を与えることはない。

ワイヤーロープのたわみ量の設定について

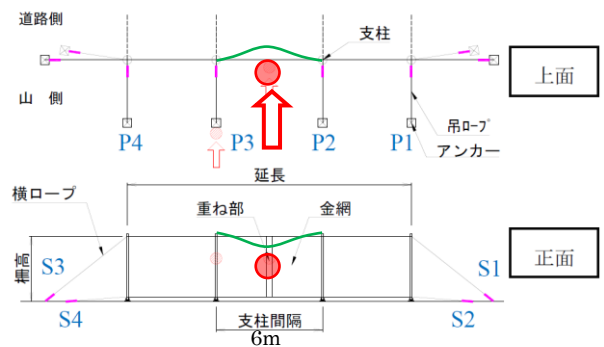
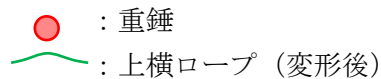
防護ネットの設計において、ワイヤーロープを締結する鋼製枠の設計条件として、ワイヤーロープのたわみ量を固定間隔の20%としている根拠は次のとおりである。

(メーカー確認試験)

硬鋼線網を使用した防護ネットについて衝撃吸収装置の有効性を確認した試験において、従来ワイヤーロープを使用した比較対象ケースの試験結果が、今回、設置する防護ネットと同様、高強度金網+ワイヤーロープの組合せを使用している。

名称	寸法・規格
高強度金網	φ4.0×50
上横ロープ	3×7 φ18

(防護ネットのロープは、7×7 φ16)

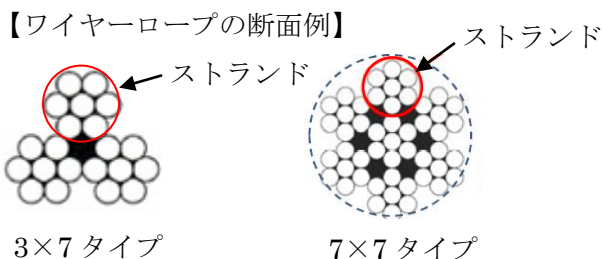


【試験装置 概要図】

当該試験の結果、および防護ネット設計に適用するロープたわみ量の考え方は次のとおり。

- ✓ 重錘の衝突エネルギー137.8kJを受けてネット変位量は最大2.4mに達し、上横ロープは破断した。上横ロープが破断する直前のネット変位量は2.0mであることから、画像により判断したところ1.2mのたわみ量を計測した。
- ✓ 上横ロープの固定間隔は支柱間隔と同じ6.0mであり、破断前のロープたわみ量1.2mから、ロープのたわみ量と固定間隔の比は、 $1.2\text{m}/6.0\text{m}=0.2$
- ✓ よって、ネットに衝突した際のネットを固定しているロープのたわみ量fは固定間隔の20%と設定した。

上記試験で使用されているワイヤーロープは3×7タイプ(7本よりで1本にしたストランドを3本よりにした製品)であるが、今回使用するワイヤーロープは7×7タイプであり、ロープ径はφ18とφ16でほぼ同じである。同一径のロープでは、一般にストランド数が増加するほどストランド径は細くなり、ロープは柔軟性を増してよりたわみやすいことから、上記試験結果を適用することは妥当と考える。



試験状況を次ページに示す。

(試験状況)

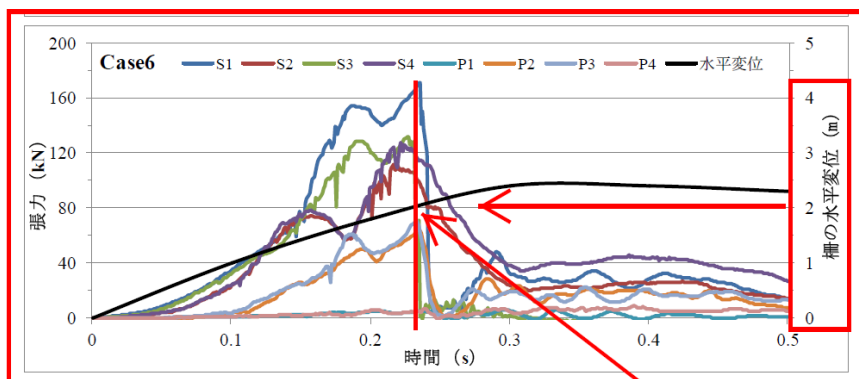
1. 重錘衝突前のネット状況



2. 重錘衝突位置のネット変位量が 2.0m に達した状況 (ワイヤー健全状態での伸び位置)



3. 上横ロープが部分破断し、重錘衝突位置のネット変位量が最大 2.4m に達した状況



重錘先端（網位置）の変位（黒線）から 2.0m 時点（2.時点）では各部張力が働いておりワイヤーロープは破断していないが、その後破断（3. 時点）し、張力が低下している。

防護ネット等の設置による防護対象設備のメンテナンス性への影響について

１．はじめに

防護ネットおよび防護板（以下「防護ネット等」という）は新たに設置するものであるため、巡視点検に影響を与える可能性が考えられる。

また、防護ネット等のうち、防護対象設備である原子炉補機冷却海水ポンプ設置エリア上部開口部に設置する防護ネット（以下「海水ポンプ防護ネット」という）については、当該ポンプの保守点検時に取り外す必要があるため、当該ポンプの保守点検に影響を与える可能性が考えられる。更には、新燃料ラック上部に設置する防護板（以下「新燃料防護板」という）については、新燃料装荷時に取り外す必要があるため、新燃料装荷作業に影響を与える可能性が考えられる。一方、上記以外の防護ネット等については、防護対象設備の保守点検時に取り外しは不要であり、これら防護対象設備の保守点検に影響を与えることはない。

以上より、巡視点検への影響ならびに海水ポンプ防護ネットおよび新燃料防護板の固定方法について検討した。

＜防護ネット等の設置箇所一覧＞

防護対象設備	防護対策	設置箇所
原子炉補機冷却海水ポンプ（配管および弁含む）	防護ネット	防護対象設備設置エリア上部開口部
配管、弁およびろ過装置（原子炉補機冷却海水系統）	防護ネット	防護対象設備設置エリア上部開口部
ディーゼル機関	防護ネット	防護対象設備が設置されているディーゼル発電機室の壁面開口部（当該室の換気口）
蓄熱室加熱器	防護板	防護対象設備が設置されている蓄熱室壁面および隣接する吸気ガラリ室の壁面開口部（当該加熱器背面の空気口）
配管および弁（主蒸気系統、主給水系統、制御用空気圧縮系統）	防護ネット	防護対象設備が設置されている主蒸気管室の壁面開口部（ブローアウトパネル）（２箇所）
新燃料ラックに貯蔵している燃料集合体	防護板	新燃料ラック上部※ ※：当該ラックに燃料集合体を貯蔵した場合に設置

2. 巡視点検への影響

防護ネット等については、巡視点検に影響を与えないよう防護対象設備からある程度距離が離れた飛来物の進入口となる開口部等に設置するとともに、巡視点検の移動経路には設置しない設計とする。また、新燃料防護板については、新燃料ラックへの新燃料受け入れ時に外観検査を実施した上で設置すること等から、新燃料防護板設置による外観検査への影響はない。

3. 海水ポンプ防護ネットおよび新燃料防護板の固定方法

(1) 海水ポンプ防護ネット

原子炉補機冷却海水ポンプの保守点検時は海水ポンプ防護ネットの取り外しが必要となるため、当該ポンプの保守点検に影響を与えないよう、アンカーボルトにて固定する構造とする等、当該ポンプ保守点検用クレーンにて容易に取り外し可能な設計とする。

(2) 新燃料防護板

新燃料装荷時は新燃料防護板の取り外しが必要となるため、新燃料装荷作業に影響を与えないよう、防護板の裏面に脱落および横ずれ防止用の支持部材を設けた鋼製パイプ貫通防止蓋を新燃料ラック上部に置く構造とし、人力で容易に取り外し可能な設計とする。