

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	補足-440 改 21
提出年月日	平成 30 年 9 月 27 日

## 工事計画に係る補足説明資料

補足-440 【竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の

全般の補足説明】

平成 30 年 9 月

日本原子力発電株式会社

## 補足説明資料目次

### I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
  - 1.1 風力係数について
  - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
  - 1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について
  - 1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について
  
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
  - 2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について
  - 2.2 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について
  - 2.3 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について
  - 2.4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について
  - 2.5 飛来物として設定する車両の設定について
  - 2.6 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
  - 2.7 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について
  - 2.8 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について
  - 2.9 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
  - 2.10 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について
  
3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料
  - 3.1 海水ストレーナの評価対象部位について
  
4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
  - 4.1 固縛装置の設計における保守性について
  - 4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について
  - 4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について
  - 4.4 固縛装置の評価対象部位について
  
5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料
  - 5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について
  - 5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について
  
6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料
  - 6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について

7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料

7.1 シャックルの許容限界について

7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について

7.3 金網の設計裕度の考え方

7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて

7.5 ワイヤロープの初期張力について

7.6 補助金網の影響について

7.7 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について

8. 排気管，放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料

8.1 ディーゼル発電機排気管の許容応力について

: 本日まで説明の資料

## I. はじめに

### 1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するものである。  
本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ 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

表一1 補足説明資料と添付資料との関連 (1/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
<p>1. 強度計算の方針に関する補足説明資料</p> <p>1.1 風力係数について</p> <p>1.2 強度計算時の施設の代表性について</p> <p>1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について</p>	<p>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」</p> <p>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」</p> <p>V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>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」</p> <p>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」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管及び弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管及びびべント管の強度計算書」</p> <p>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」</p> <p>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」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>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」</p> <p>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」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管及び弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管及びびべント管の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p>

表一1 補足説明資料と添付資料との関連 (2/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
<p>1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について</p>	<p>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 1-1-10-2 「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」</p>
<p>2. 竜巻より防護すべき施設を内包する補足説明資料</p> <p>2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について</p> <p>2.2 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について</p> <p>2.3 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について</p> <p>2.4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について</p> <p>2.5 飛来物として設定する車両の設定について</p>	<p>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」</p>

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (3/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
2.6 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について	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」
2.7 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について	
2.8 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について	
2.9 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について	
2.10 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について	

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (4/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料	
3.1 海水ストレーナの評価対象部位について	V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去海水系ストレーナの強度計算書」 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」
4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料	
4.1 固縛装置の設計における保守性について	
4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について	
4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について	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」
4.4 固縛装置の評価対象部位について	
5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料	
5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について	
5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について	V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」



表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (5/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
6. デイゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料	
6.1 デイゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について	V-3-別添 1-1-8 「デイゼル発電機吸気口の強度計算書」
7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料	
7.1 シヤックルの許容限界について	
7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について	
7.3 金網の設計裕度の考え方	
7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのためについて	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」
7.5 ワイヤロープの初期張力について	
7.6 補助金網の影響について	
7.7 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について	
8. 排気管、放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料	
8.1 デイゼル発電機排気管の許容応力について	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」

## 2.4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能に ついて

## 1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）は、使用済燃料を収納した使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「貯蔵容器」という。）を24基保管するが、貯蔵容器で使用済燃料の崩壊熱を貯蔵建屋内の空気の自然対流によって除熱するよう設計する。

本資料は、竜巻防護対策として、貯蔵建屋上部の排気口に追設する使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設（防護ネット及び車両防止柵）によって、貯蔵建屋の除熱設計に影響がないことを確認するものである。

## 2. 基本条件

### 2.1 貯蔵容器の仕様

- |                |                |
|----------------|----------------|
| (1) 外径×全長      | φ 2391×5725 mm |
| (2) 発熱量（1基当たり） | 17.1 kW        |

### 2.2 貯蔵建屋給排気温度

- |                |       |
|----------------|-------|
| (1) 給気温度（外気温度） | 32 °C |
| (2) 排気温度       | 45 °C |

### 2.3 評価モデル

- (1) 貯蔵建屋のドラフト高さ

貯蔵容器蓋表面と排気口中心の高さの差とする。

- (2) 評価領域

貯蔵建屋貯蔵エリアの1スパン（7 m）当たり、給排気口が各2組配置されている。除熱計算は、図 2-1 に示すように車両防止柵により圧損の大きくなる東側の給排気口1組とし、4基の貯蔵容器が収納された状態で評価する。

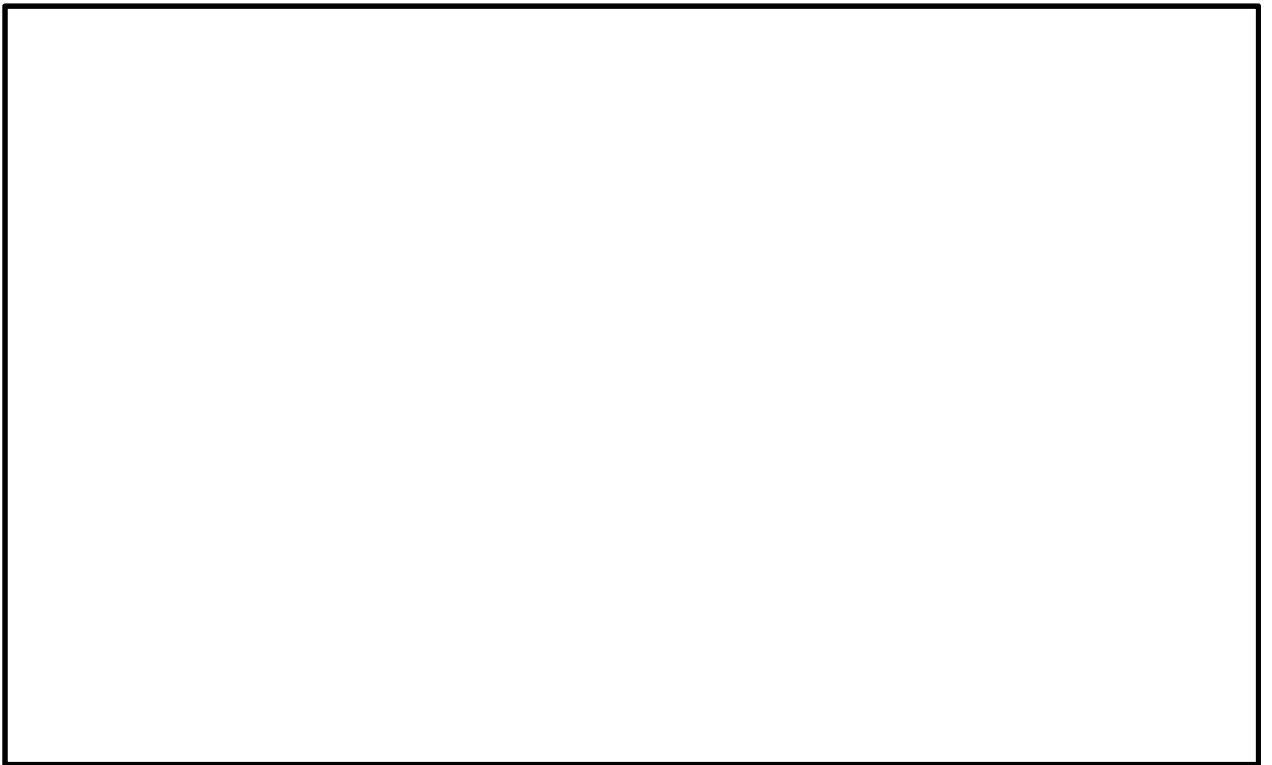
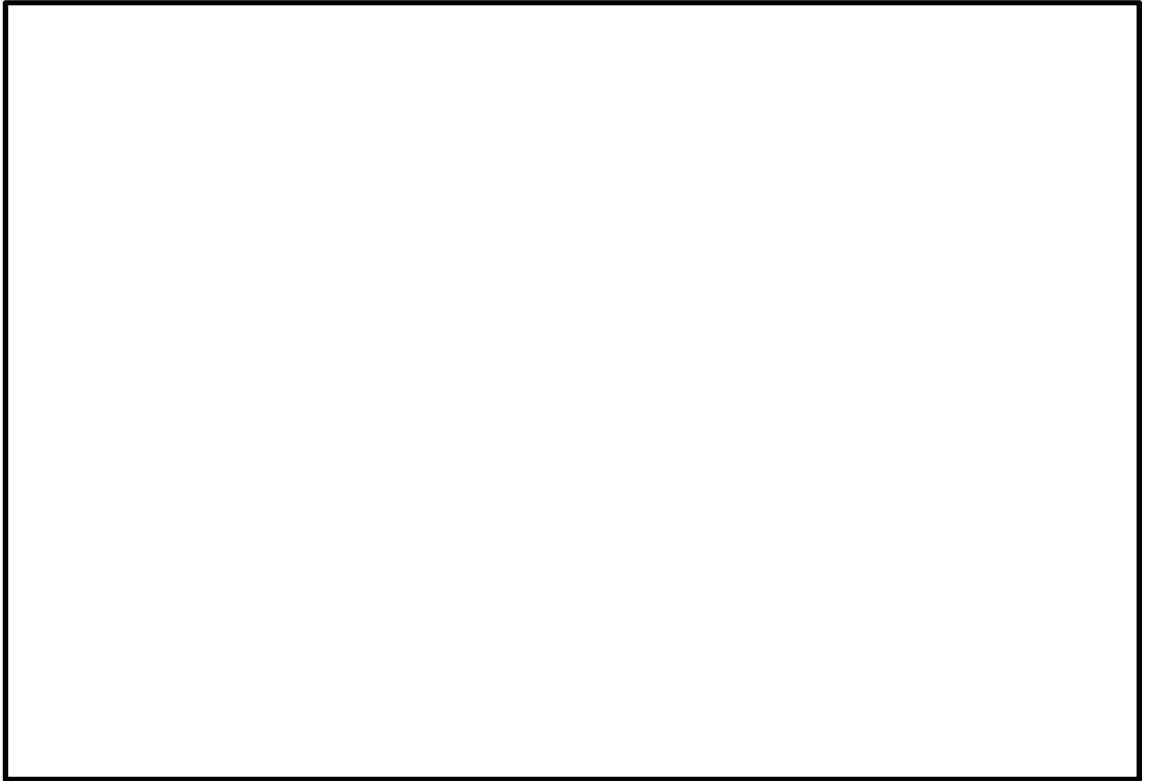


図 2-1 評価領域及び検討対象流路

(3) 流路の形状, 寸法

評価対象流路の形状, 寸法を表 2-1 に示す。

表 2-1 評価対象流路の形状, 寸法

(単位 : m)

対象流路	部位	流路寸法 (高さ×幅)	圧損計算用寸法	備考
給気流路	ガラリ A	図 2-1① 3.92±0.01 ×4.545±0.01	3.91×4.53	開口率 60%
	防虫金網	図 2-1② 3.92±0.01 ×4.545±0.01	3.91×4.53	
	給気流路	図 2-1③ 2.0±0.04 ×5.8±0.04	1.96×5.76	
	吐出口	図 2-1④ 2.0±0.04×5.8±0.04 6.075×7.0±0.04	1.96×5.76 6.07×6.96	
貯蔵容器横断流 (最速部)	図 2-1⑤ 6.075×2.178 (7±0.04-2×2.391)	6.07×2.17		
排気流路	ガラリ 誘導部	図 2-1⑥ 2.898±0.04 ×5.8±0.04	2.85×5.76	
	ガラリ B	図 2-1⑦ 2.8±0.01 ×5.345±0.01	2.79×5.33	開口率 50%
	防虫金網	図 2-1⑧ 2.8±0.01 ×5.345±0.01	2.79×5.33	
	防護ネット	図 2-1⑨ 2.8±0.01 ×5.345±0.01	2.79×5.33	追設部
	車両防止柵	図 2-1⑩ 2.8±0.01 ×5.345±0.01	2.79×5.33	追設部 開口率 80%

2.4 評価方法

本貯蔵建屋では貯蔵容器の冷却を空気の自然対流によって行うため, 冷却性能は熱ドラフトと空気の圧力損失の平衡点で決まる。

熱ドラフトは, 貯蔵建屋の排気部の高さ及び外気との温度差で決まり, また圧力損失は風路の圧力損失係数と風量で決まる。

排気温度が 45℃以下の場合, 貯蔵容器及び周辺設備の健全性が確保されることより, 給排気温度差 (13℃) による貯蔵建屋の熱ドラフトが空気の圧力損失より大きいことを確認する。

### 3. 記号の定義

表3-1 評価に用いる記号

記号	単位	定義
W	m <sup>3</sup> /s	評価領域当たりの必要風量
Q	kW	貯蔵容器1基分の発熱量
n	—	評価領域に設置される貯蔵容器の数量
ρ	kg/m <sup>3</sup>	給排気の平均密度
ρ <sub>1</sub>	kg/m <sup>3</sup>	給気（外気）の密度
ρ <sub>2</sub>	kg/m <sup>3</sup>	排気の密度
C <sub>P</sub>	kJ/kg°C	空気の比熱
ΔT	°C	給排気の温度差
ΔP	Pa	空気の圧力損失
ζ <sub>i</sub>	—	各流路の圧力損失係数
A <sub>i</sub>	m <sup>2</sup>	各流路の断面積
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
h	Pa	貯蔵建屋の熱ドラフト
H	m	貯蔵建屋のドラフト高さ

### 4. 計算方法

#### (1) 必要風量

$$W = \frac{n \cdot Q}{\rho \cdot C_P \cdot \Delta T}$$

#### (2) 圧力損失

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i}{A_i} \times \frac{\rho \cdot W^2}{2}$$

#### (3) 熱ドラフト

$$h = (\rho_1 - \rho_2) \times g \times H$$

5. 計算結果

(1) 空気の密度と比熱

表 5-1 空気の密度と比熱

	32°C	45°C	平均値
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.158	1.110	1.134
比熱 $C_P$ (kJ/kg°C)	1.007	1.007	1.007

(2) 必要風量

表 5-2 必要風量

Q (kW)	n	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_P$ (kJ/kg°C)	$\Delta T$ (°C)	W (m <sup>3</sup> /s)

(3) 圧力損失

表 5-3 圧力損失

$\sum_i \zeta_i / A_i^2$ (m <sup>-4</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta P$ (Pa)

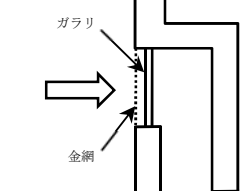
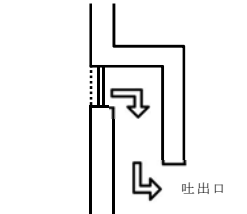
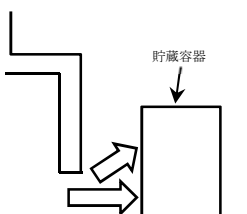
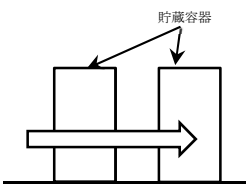
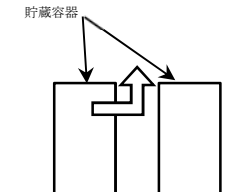
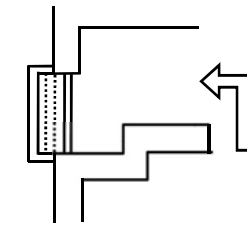
※：圧力損失係数の算出方法は表 5-5 による。

(4) 貯蔵建屋の熱ドラフト

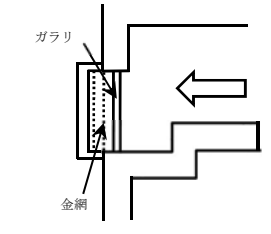
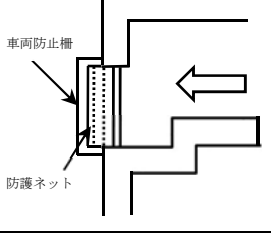
表 5-4 貯蔵建屋の熱ドラフト

$\rho_1$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	H (m)	g (m/s <sup>2</sup> )	h (Pa)

表 5-5 流路の圧力損失係数

No.	流路形状	部位	流路面積 (m <sup>2</sup> )	圧損係数 (-)	$\zeta_i / A_i^2$ (m <sup>-4</sup> )	圧損係数の 出典
① ②		給気側の ガラリ・ 金網				
③		給気風路 の曲がり				
④		貯蔵エリ アへの吐 出口				
⑤	 	貯蔵容器 を横切る 流れ  横切る流 れ～上昇 流				
⑥		排気口へ の曲がり				



No.	流路形状	部位	流路面積 (m <sup>2</sup> )	圧損係数 (-)	$\zeta_i / A_i^2$ (m <sup>-4</sup> )	圧損係数の 出典
⑦ ⑧	 <p>ガラリ 金網</p>	排気口の ガラリ, 金網, 防 護ネット				
⑨ ⑩	 <p>車両防止柵 防護ネット</p>	排気口の 防護ネッ ト, 車両 防止柵				

6. 評価結果

自然対流による空気の圧力損失 (  Pa ) に対して, 貯蔵建屋の熱ドラフト  
(  Pa ) が大きく, 除熱性能は満足されている。

### 3.1 海水ストレーナの評価対象部位について

1. 概要

本資料は、添付書類「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」及び「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」における、海水ストレーナ（残留熱除去系海水系ストレーナ，ディーゼル発電機用海水ストレーナ）の評価対象部位について、選定理由及び評価内容を説明するものである。

2. 評価対象部位の選定理由及び評価内容

海水ストレーナの評価対象部位の選定理由及び評価内容を表 2-1 に示す。

表 2-1 海水ストレーナの評価対象部位の選定理由及び評価内容

部位*	考慮する荷重及び選定理由		評価内容
	風荷重（水平）		
支持脚	—	J E A G 4 6 0 1 の横型ポンプの評価式を準用し基礎ボルトを選定（補足）	—
胴板	—	同上	—
蓋	—	同上	—
基礎ボルト	○	同上	風荷重による水平荷重により発生する引張，せん断応力を算出。

注記 \*：外荷重による応力を受ける主要構造部材

（補足）

風荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、J E A G 4 6 0 1 の横形ポンプの評価\*を準用している。

海水ストレーナの概略図を図 2-1 に、J E A G 4 6 0 1 のポンプモデル図を図 2-2 に示す。

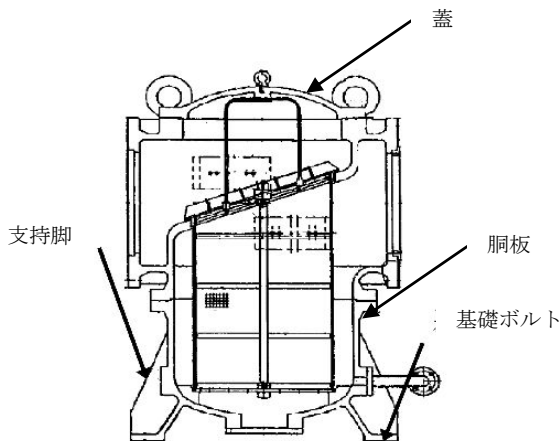


図 2-1 海水ストレーナ概略図

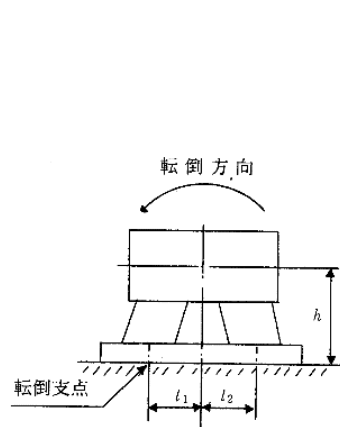


図 2-2 横型ポンプモデル図 (JEAG)

注記 \* : J E A G 4 6 0 1 の横型ポンプの「(i)固有周期の計算」の項において「横軸ポンプは、構造的に1個の大きなブロック状をしており、重心の位置がブロック状のほぼ中心にあり、かつ下面が基礎ボルトにて固定されている。したがって、全体的に一つの剛体とみなせる」としており、横形ポンプの強度評価は基礎ボルトのみの評価である。  
 海水ストレーナの構造についても、一般的な横形ポンプ同様支持脚が鋳物一体成型であり、構造的に1個の大きなブロック状で全体的に一つの剛体とみなせることから、風荷重の計算においては J E A G 4 6 0 1 の横形ポンプの評価を準用し、基礎ボルトの評価としている。

参考として、以下に支持脚と基礎ボルトの発生応力の比較を行う。

J E A G 4 6 0 1 の引張応力の式は以下で表される。

$$F = \frac{W_w \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n \cdot L_1}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

F : 引張力
W <sub>w</sub> : 風圧力による荷重
h : 基礎～ストレーナ重心高さ
m : 質量
g : 重力加速度 (g=9.80665)
L <sub>H</sub> : 重心からの水平距離
n <sub>f</sub> : 引張力を受ける箇所数
L <sub>1</sub> : 支点間水平距離
σ <sub>t</sub> : 引張応力
A : 断面積

支持脚が高い場合は重心高さhが大きくなり、転倒モーメント(W<sub>w</sub>・h)が大きくなるが、安定モーメント(m・g・L<sub>H</sub>)は変わらないため、発生応力は支持脚が低い場合に比べ、より大きくなる傾向となる。

支持脚が低い場合は重心位置が低くなり、転倒モーメントを安定モーメントが打ち消す作用が大きいため、支持脚、胴板に作用する応力は小さい傾向となることから、断面積の小さい基礎ボルトを評価対象部位として選定している。

残留熱除去系海水系ストレーナに竜巻の風荷重が作用した場合を例とし、支持脚に発生する引張応力について表 2-2 に、基礎ボルトに発生する引張応力について表 2-3 に示す。

基礎ボルトに発生する応力に対し、支持脚に発生する応力は十分小さく、許容応力については、基礎ボルトの許容応力の方が支持脚の許容応力より小さいことから、基礎ボルトの評価の方が保守的な結果となる。

表 2-2 支持脚に発生する引張応力

条件	対象部位	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
風荷重 (100m/s)	残留熱除去系海水系ストレーナの支持脚 (SCS14)	1.46	185	0.008

表 2-3 基礎ボルトに発生する引張応力

条件	対象部位	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
風荷重 (100m/s)	残留熱除去系海水系ストレーナの基礎ボルト (SS400)	25	173	0.145

### 3. 接続配管の扱い

風荷重を受けた場合、海水ストレーナの接続配管についても機器本体に発生する応力は伝達されるが、応力を分担することで機器本体の発生応力は小さくなるため、保守的に配管はないものとして評価を行う。

## 5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について

## 1. 概要

添付書類「V-3-別添 1-1-4 主排気筒の強度計算書」で実施する主排気筒の強度評価において、設計飛来物による影響は鉄塔部材を損傷させることで考慮することとしている。

本資料は、添付書類「V-3-別添 1-1-4 主排気筒の強度計算書」において、「鉄塔部材の損傷を想定する箇所については、座屈の観点から軸力（圧縮）の影響を考慮し、損傷想定時の評価と同一の手法により求められた、健全時に負担する軸力（圧縮）が最大であり、損傷による荷重の再配分の影響が最も大きい最下層の支柱の補助柱とする」としていることに関し、その詳細について説明するものである。

## 2. 構造

主排気筒の構造を以下に示す。

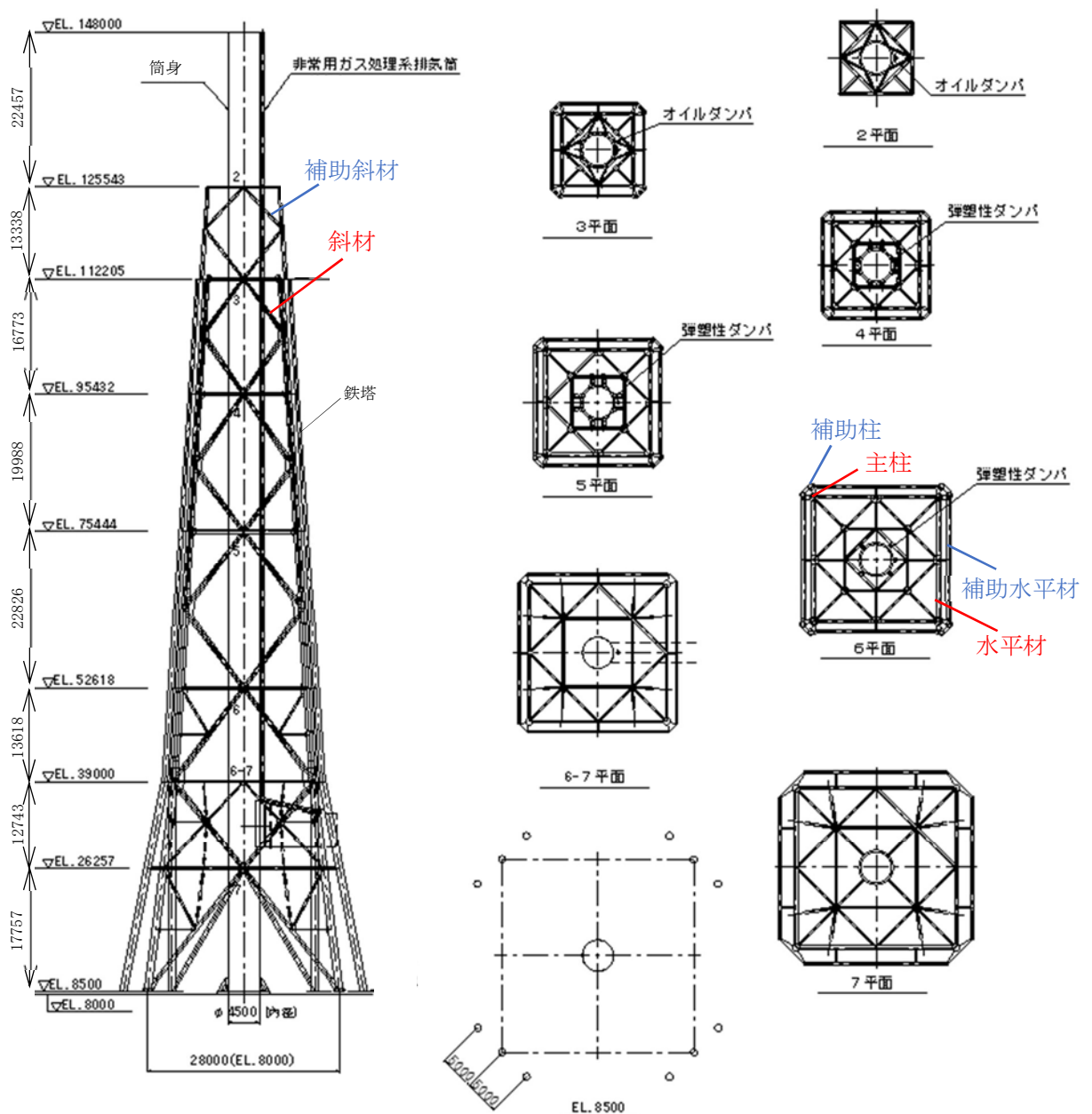


図 2-1 主排気筒の構造  
5-1-1

3. 健全時に鉄塔の各部材に生じる軸力

(1) 主柱

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
112.205	Φ 406.4×6.4	STK400	118
95.432	Φ 406.4×12.7	STK400	287
75.444	Φ 558.8×12.7	STK400	1669
52.618	Φ 812.8×12.7	STK400	2888
26.257	Φ 1016.0×12.7	STK400	4245

(2) 補助柱

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
125.543	Φ 406.4×19.0	STK400	85
112.205	Φ 508.0×19.0	590材	213
95.432	Φ 508.0×19.0	590材	563
75.444	Φ 609.6×19.0	590材	1797
52.618	Φ 812.8×19.0	590材	3153
26.257	Φ 1016.0×19.0	590材	5147

(3) 斜材

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
112.205	Φ 355.6×6.4	STK400	37
95.432	Φ 457.2×6.4	STK400	803
75.444	Φ 508.0×6.4	STK400	593
52.618	Φ 508.0×6.4	STK400	783
26.257	Φ 508.0×6.4	STK400	948



(4) 補助斜材

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
125.543	Φ 355.6×12.7	STK400	45
112.205	Φ 355.6×12.7	STK400	159
95.432	Φ 457.2×12.7	STK400	1042
75.444	Φ 508.0×12.0	STK490	995
52.618	Φ 508.0×12.0	STK490	1207
26.257	Φ 558.8×19.0	590材	1980

(5) 水平材

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
112.205	Φ 355.6×6.4	STK400	80
95.432	Φ 457.2×6.4	STK400	114
75.444	Φ 508.0×6.4	STK400	173
52.618	Φ 508.0×6.4	STK400	207
26.257	Φ 508.0×6.4	STK400	369

(6) 補助水平材

EL. (m)	使用部材	材質	軸力 (kN)
125.543	Φ 355.6×6.4	STK400	34
112.205	Φ 355.6×6.4	STK400	96
95.432	Φ 457.2×6.4	STK400	709
75.444	Φ 508.0×6.4	STK400	127
52.618	Φ 508.0×6.4	STK400	341
26.257	Φ 508.0×6.4	STK400	329

4. 損傷させる部材の選定

「3. 健全時に鉄塔の各部材に生じる軸力」より、健全時に負担する軸力（圧縮）が最大であり、損傷による荷重の再配分の影響が最も大きい部位である、最下層の補助柱を損傷させる部材として選定する。

## 7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料

## 7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について

## 1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的とした防護ネットに関して、飛来物がオフセット衝突した場合の影響について説明するものである。

## 2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、防護ネットに対して展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列1列と衝突した場合の展開方向の金網交点列1列の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電力中央研究所報告書を参考に、飛来物が展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列1列と衝突した場合の飛来物と金網の挙動を以下のように仮定する。

- ① 金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- ② 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって推移する。
- ③ 最大変形時の金網全長は破断時展開方向金網長さとする。

以上の仮定から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置によらず、破断時展開方向金網長さで一定となり、最大変形時の衝突位置点P'の軌跡は、図2-1のとおり楕円形状となる。

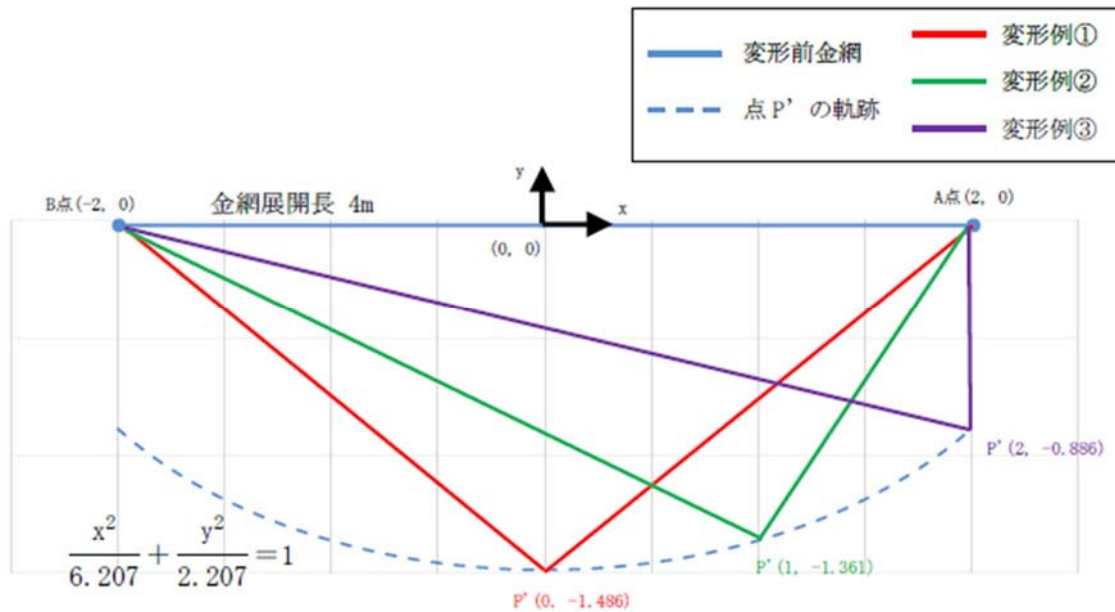


図 2-1 展開方向の金網交点列1列の衝突点P'の軌跡

金網は変位制御により評価可能であることから、図2-2に示す交点列の伸び率 $\epsilon_j$ を0から破断伸び率 $\epsilon_{cr}$ まで微小変形の積み重ねとして、徐々に変化させ、衝突点の移動量と交点列の張力から吸収エネルギーを算出する。ここで、破断伸び率 $\epsilon_{cr}$ は、添付書類「V-3-別添1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」の「4. 評価条件」のネット1目合い対角寸法aとネット1目合いの破断変位 $a_s$ より、以下のとおり、求められる。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{13.9}{57} \doteq 0.25$$

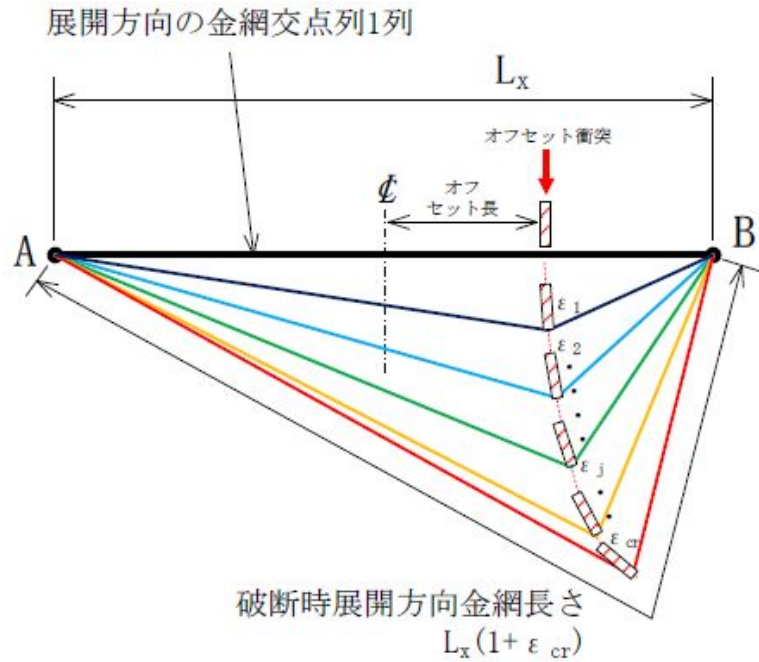


図 2-2 展開方向オフセット衝突時の展開方向の金網交点列 1 列の変位挙動図

また、図 2-3 に展開方向に展開方向オフセット衝突した場合を想定した伸び率  $\varepsilon_j$  時の金網交点列 1 列の変形状態の模式図を示す。

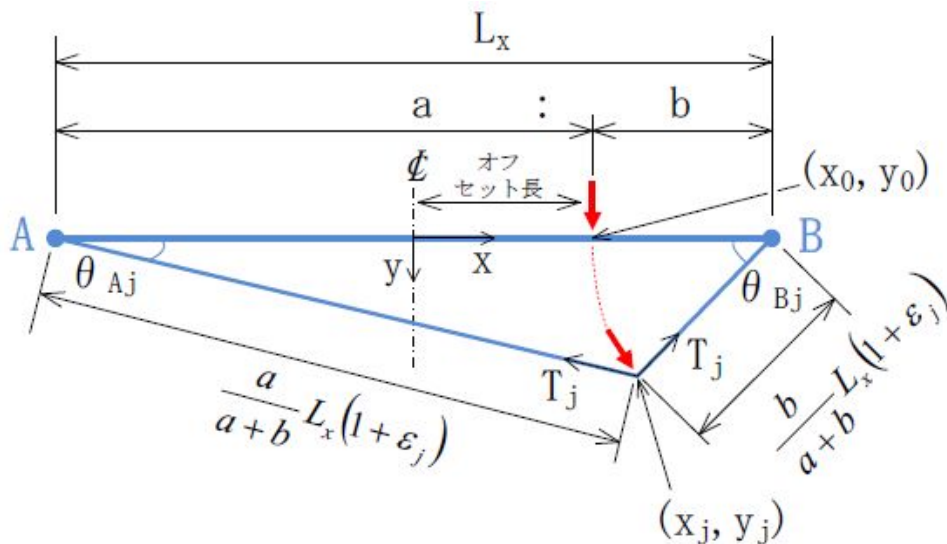


図 2-3 展開方向オフセット衝突の交点列 1 列の変形状態の模式図

添付書類「V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」の「4. 評価条件」のネット 1 目合い対角寸法 a, ネット 1 目合いの等価剛性 K とすると, 展開方向の金網交点列 1 列の剛性  $K_x$ , 展開方向の金網交点列 1 列の張力  $T_j$  は以下のとおりとなる。

$$K_x = \frac{K}{L_x/a}$$

$$T_j = K_x L_x \varepsilon_j = \frac{K}{L_x/a} L_x \varepsilon_j$$

伸び率が  $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$  間で微小量だけ増加すると, 衝突点の座標も  $(x_{j-1}, y_{j-1})$  から  $(x_j, y_j)$  と微小量だけ移動し, x 方向変位  $\Delta x_j$ , y 方向変位  $\Delta y_j$  はそれぞれ  $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$ ,  $\Delta y_j = y_j - y_{j-1}$  となる。このとき, 展開長を a : b で分割する点を衝突位置とし, 伸び率  $\varepsilon_j$  時の衝突点の座標を  $(x_j, y_j)$ , A 点, B 点のたわみ角を  $\theta_{Aj}$ ,  $\theta_{Bj}$  とすると, 伸び率  $\varepsilon_j$  時の展開方向の金網交点列 1 列の張力  $T_j$  を x 方向成分と y 方向成分に分割でき, それぞれ x 方向反力  $H_j$ , y 方向反力  $V_j$  となる。よって, 伸び率が  $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$  間で微小量だけ増加した際の吸収エネルギーの増分  $\Delta W_j$  は, 以下のとおりとなる。

$$H_j = T_j \cos \theta_{Aj} - T_j \cos \theta_{Bj}$$

$$V_j = T_j \sin \theta_{Aj} + T_j \sin \theta_{Bj}$$

$$\Delta W_j = \frac{1}{2} (H_{j-1} + H_j) \times \Delta x_j + \frac{1}{2} (V_{j-1} + V_j) \times \Delta y_j$$

以上より, 1 金網交点列の限界吸収エネルギーは下式となる。

$$W = \sum_j^{\varepsilon_{cr}} \Delta W_j$$

展開長 4 m の 40 mm 目合金網の交点列に, 中央衝突, 展開方向 1/4 オフセット衝突 (展開方向オフセット長 1 m) した場合の吸収エネルギーを比較する。図 2-4 に交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを示す。

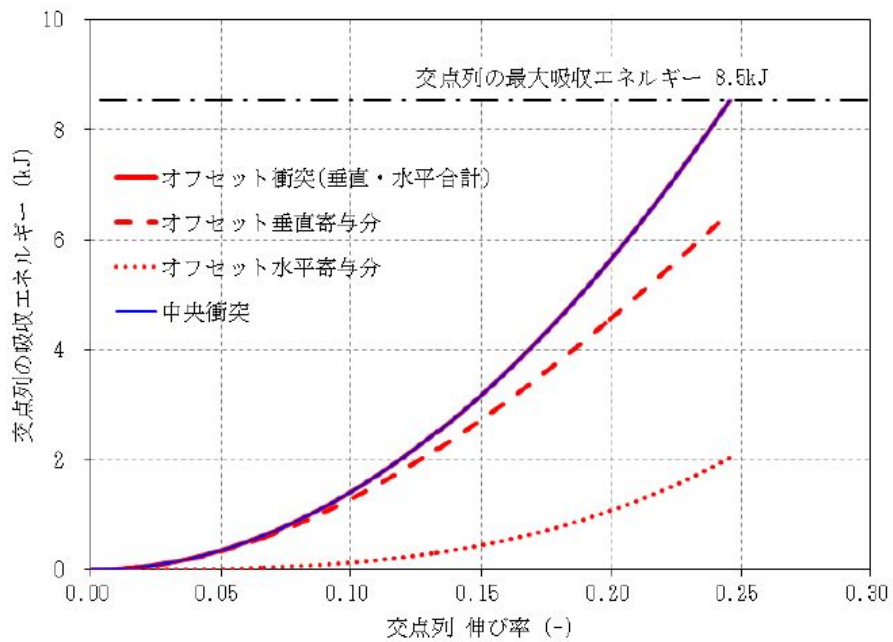


図 2-4 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較

展開方向オフセット衝突では、垂直方向から飛来物が衝突することから、伸び率が小さな初期の段階では、垂直寄与分吸収エネルギーが支配的である。伸び率 0.1 程度になると、金網張力の分担から、衝突点は水平方向に移動し、徐々に水平寄与分の吸収エネルギーが増加していく。金網の張力の分担による衝突点の移動に飛来物が追従した場合、中央衝突時と展開方向オフセット衝突時（垂直寄与分と水平寄与分の合計）は、いずれも同等(8.5 kJ)となり、衝突点の違いによる吸収エネルギーへの影響はないと考えられる。

また、図 2-5 に展開方向オフセット衝突位置の違いによる 40 mm 目合交点列最終変位形態及び飛来物が衝突後、停止するまでの軌跡を累積移動量として示す。

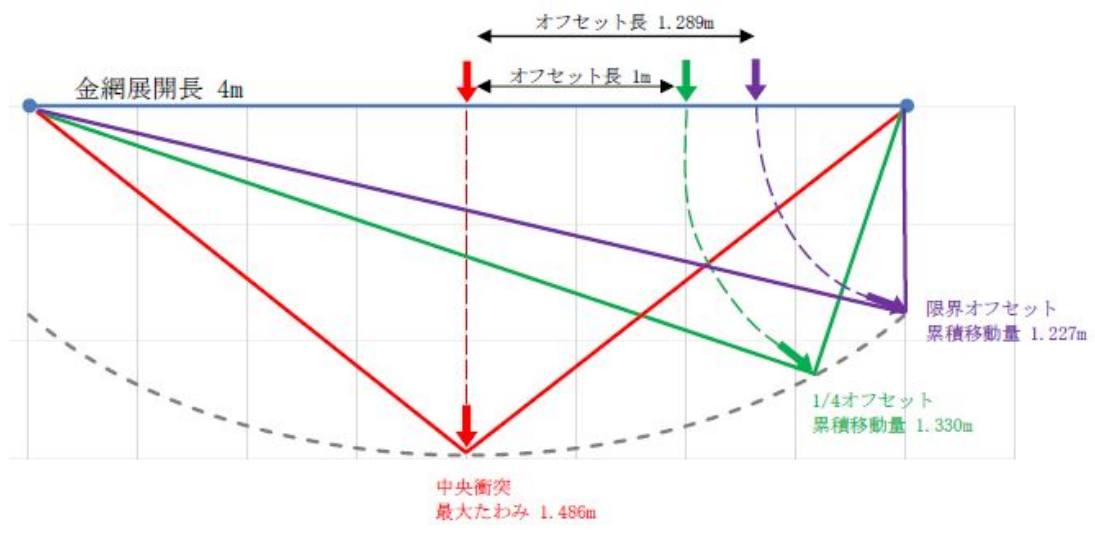


図 2-5 各衝突位置の 40 mm 目合交点最終変形図

金網中央からの衝突点までの距離（以下、展開方向オフセット長）が大きくなると、交点列の最終形状は次第に直角三角形に近づき、さらに、展開方向オフセット長が大きくなると、衝突点の軌跡が支持部の外に飛び出したり、架台と衝突することが考えられるため、飛来物が防護対象施設に衝突することはないと考えられる。よって、展開方向オフセット評価では、交点列の最終形状が直角三角形となる衝突位置（限界オフセット）までを検討範囲とする。

表 2-1 に各展開方向オフセット長の 40 mm 目合 1 交点列の最大吸収エネルギーと累積移動量を示す。

表 2-1 展開方向オフセット衝突時の応答値一覧（40 mm 目合）

展開方向オフセット長 (m)	1 交点列最大吸収エネルギー (kJ)	累積移動量 (m)
0.000	8.5	1.486
1.000	8.5	1.330
1.289	8.5	1.227

以上より、飛来物の展開方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時と同等となるため、展開方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

### 3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、防護ネットに対して展開直角方向オフセット位置で金網と衝突した場合の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電力中央研究所報告書を参考に、飛来物の衝突位置を、中央衝突以外に展開直角方向オフセット衝突位置を以下のとおり設定し、金網（展開方向 4 m×展開直角方向 3 m）の吸収エネルギーを算出する。

- ① 中央
- ② 展開直角方向 1/4 オフセット（展開直角方向オフセット長 0.75 m）

図 3-1 に上記の 2 種類の衝突位置図を示す。



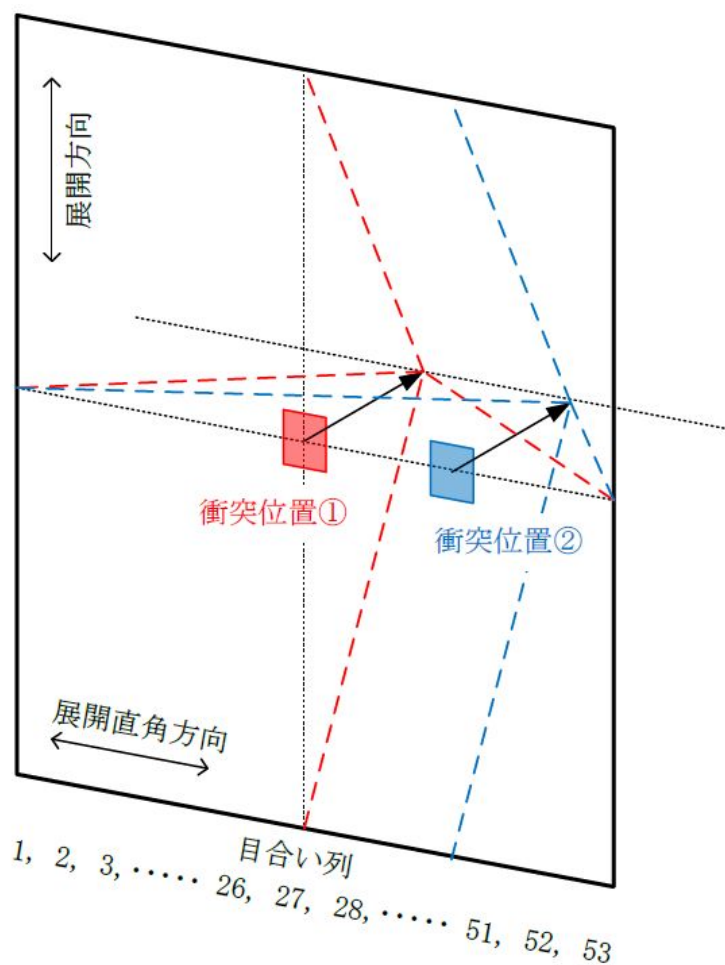


図 3-1 展開直角方向オフセット衝突位置図

図 3-1 に示すとおり、衝突位置で金網が最も大きく変形し、そこからネット端部までの間を段階的に減少していくとすると、目合い列 1 列ごとの吸収エネルギーは V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」の「3.4(1) 吸収エネルギー評価」に示す以下の式により求められる。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left( \sqrt{4 \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで、 $E_i$  :  $i$  番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー

$K_x$  : ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性

(「2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー」に示す。)

$L_x$  : ネット展開方向寸法 (4m)

$\delta_i$  :  $i$  番目の列における金網変形量

上式より、図 3-2 に各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布を、表 3-1 に金網 1 枚分の吸収エネルギー量を示す。

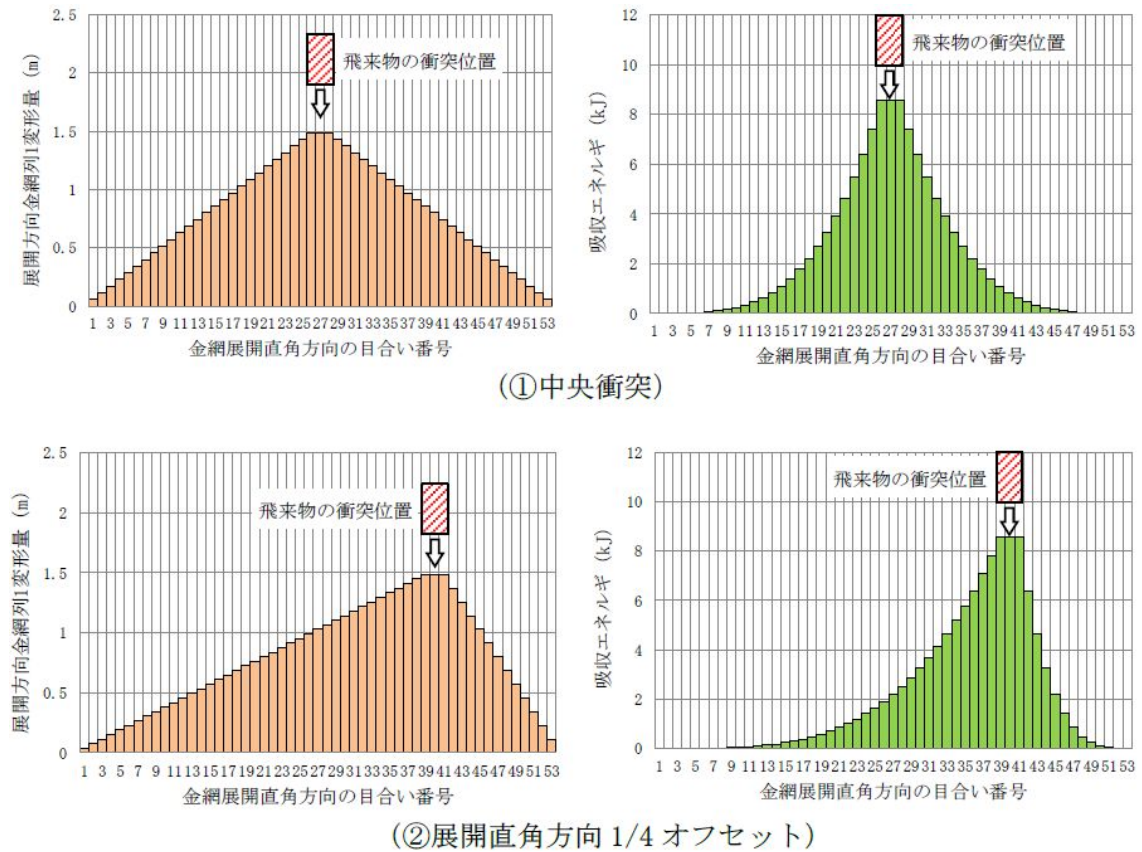


図 3-2 展開直角方向オフセットでの各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布図

表 3-1 展開直角方向オフセット衝突時の吸収エネルギー量 (40 mm 目合)

衝突位置	吸収エネルギー (kJ)
① 中央	111.8
② 展開直角方向 1/4 オフセット	111.9

図 3-2 及び表 3-1 のとおり、展開直角方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時とほぼ同等となるため、展開直角方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

#### 4. オフセット衝突時の衝撃荷重

衝撃荷重  $F_a$  については、下式により算出している。

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta}$$

上式より、衝撃荷重  $F_a$  は防護ネットのたわみ量  $\delta$  に反比例していることが分かる。

同じ飛来物の中央衝突とオフセット衝突を比較する場合、表 2-1 から、防護ネットの累積移動量（たわみ量）はオフセット衝突の方が短く衝撃荷重が大きくなることから、オフセット衝突における衝撃荷重の増加率は、下式により算出できる。

$$\begin{aligned} \text{衝撃荷重の増加率} &= (\text{中央衝突時の累積移動量}) / (\text{オフセット衝突時の累積移動量}) \\ &= 1.486 / 1.227 \\ &= 1.211 \end{aligned}$$

よって、上式により算出される荷重を 1.22 倍することで、オフセット衝突を考慮した補正を行う。

### 7.3 金網の設計裕度の考え方

## 1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的とした高強度金網の設計裕度に関して、金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値の設定の考え方について説明するものである。

## 2. 金網の機械的特性値

高強度金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値は、金網の交点引張試験から算定している。

金網（40 mm 目合い）の交点引張試験結果（全 15 データ）を図 2-1 に示す。

また、図 2-1 より算出した金網の等価剛性、破断伸び量、破断荷重の平均値及び変動係数を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、金網の等価剛性、破断伸び量、破断荷重の変動係数は、全て 0.05 未満であり、金網の交点引張試験結果はバラツキの少ない結果となっている。

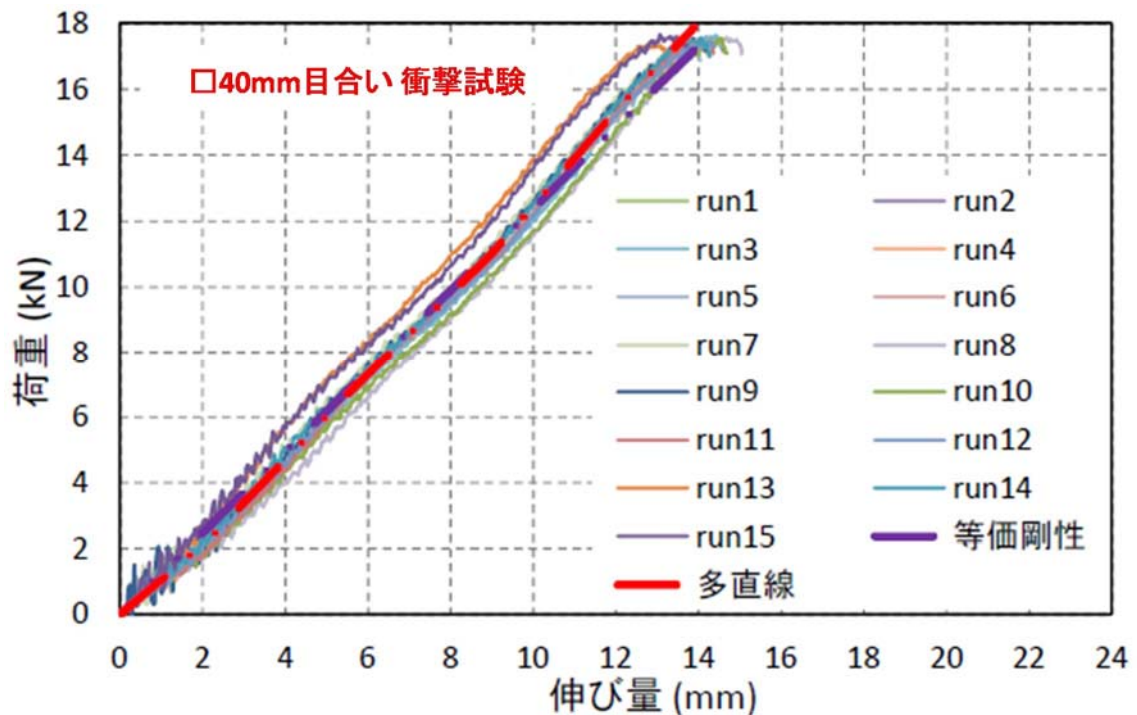


図 2-1 金網の交点引張試験結果

表 2-1 金網の交点引張試験結果の平均値及び変動係数

	等価剛性 (kN/m)	破断伸び量 (mm)	破断荷重 (kN)
平均値	1239	13.9	17.2
変動係数	0.0471	0.0371	0.0117

### 3. 耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値

高強度金網の耐衝撃性能評価（吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価）において、評価に用いる機械的特性値によっては、評価項目毎に安全裕度への寄与が相反する場合がある。

したがって、高強度金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値には、バラツキの少ないデータが得られている金網の交点引張試験の全データの平均値（表 3-1）を用いることにする。

一方で、高強度金網の設計においては、想定される設計飛来物に対して、十分裕度を持った設計とすることで、システム全体として保守性を確保する。

表 3-1 強度計算に用いた金網交点諸元

等価剛性 (kN/m)	破断伸び量 (mm)	破断荷重 (kN)
1239	13.9	17.2

### 4. 設計上の裕度について

金網の耐衝撃性能評価（吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価）においては、金網の機械的特性値を評価条件として用いている。

吸収エネルギー評価及びたわみ評価では、等価剛性及び破断伸び量を用いており、破断評価では破断荷重を用いて評価を実施している。

各評価における機械的特性値のバラツキの考慮について、以下に示す。

#### (1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、金網の機械的特性のうち等価剛性の値が評価に影響する。

図 2-1 の交点引張試験から算出された等価剛性及び多直線近似を用いて、金網の吸収エネルギーを算出した結果を図 4-1 に示す。

等価剛性より算出された吸収エネルギー（図 4-1 実線）と多直線近似より算出された吸収エネルギー（図 4-1 点線）を比較すると、たわみの小さい箇所では等価剛性より算出された吸収エネルギー（図 4-1 実線）が多直線近似より算出された吸収エネルギー（図 4-1 点線）よりも最大で約 17 %高めに算定されているが、発電所に設置する金網の設計にて考慮する領域では、等価剛性より算出された吸収エネルギー（図 4-1

実線)が多直線近似より算出された吸収エネルギー(図4-1点線)よりも最大で約3%吸収エネルギーが高めに算定されている。

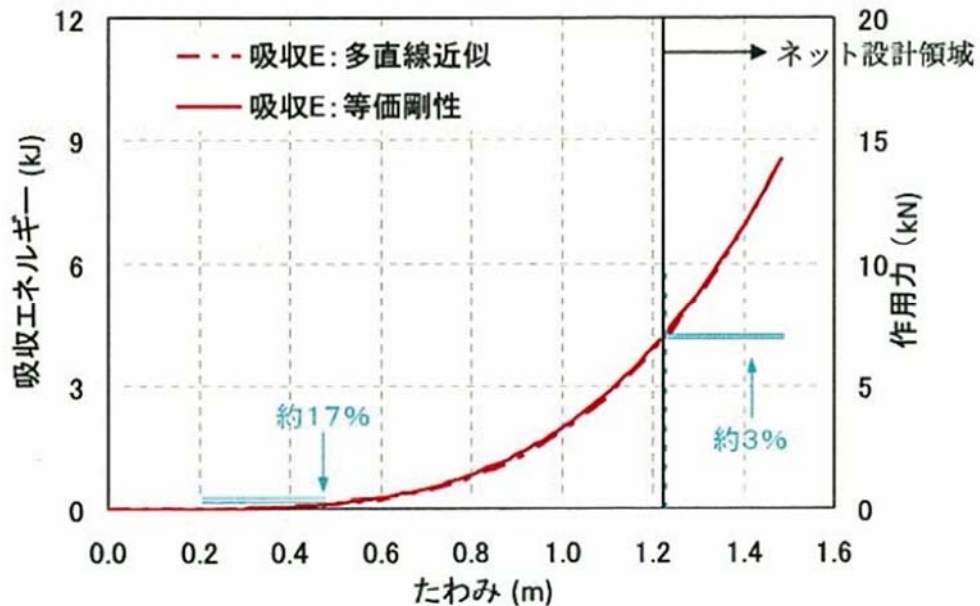


図 4-1 等価剛性と多直線近似の差異

以上の結果を踏まえ、等価剛性より算出された吸収エネルギーが多直線近似より算出された吸収エネルギーよりも最大で3%吸収エネルギーが高めに算出されることを考慮し、添付書類「V-3-別添1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」において等価剛性の平均値を用いて算出した金網の限界吸収エネルギー $E_{max}$ の代わりに、本影響を考慮した限界吸収エネルギー $E_{max}' (=E_{max}/1.03)$ と各金網に生じる吸収エネルギーを比較した結果を表4-1に示す。表4-1に示すとおり、3%の裕度を考慮した場合であっても各金網に生じる吸収エネルギーは許容値内におさまる。

表 4-1 吸収エネルギー評価結果(3%の裕度考慮)

	$E_t$ (kJ)	$E_{max}'$ (kJ)
ディーゼル発電機室ルーフ ベントファン	80	234
中央制御室換気系冷凍機	80	151
海水ポンプエリア	80	216
原子炉建屋外側ブローアウトパネル	183	223
使用済燃料乾式貯蔵容器	182	194

※各防護対策施設における最も厳しい箇所を記載

(2) 破断評価

破断評価においては、金網の機械的特性のうち破断荷重の値が許容限界の算出に影響を与える。(1) 吸収エネルギー評価より、設計にて考慮する領域において最大で3%吸収エネルギーが高めに算出されることから、金網の剛性においても等価剛性が多直線近似により算出した剛性に比べ3%程度高めになっているといえる。また、剛性、破断伸び量、破断荷重の関係（破断荷重＝剛性×破断伸び量）より、破断荷重についても3%程度高めになっているといえる。

以上の関係を踏まえ、添付書類「V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」において用いた破断荷重Fの代わりに、本影響を考慮した破断荷重F' (=F/1.03)を用いて算出した許容限界F<sub>1</sub>'と金網に生じる荷重F<sub>2</sub>を比較した結果を表4-2に示す。表4-2に示すとおり、3%の裕度を考慮した場合であっても各金網に生じる荷重は許容値内におさまる。

表 4-2 破断評価結果(3%の裕度考慮)

	F <sub>2</sub> (kN)	F <sub>1</sub> ' (kN)
ディーゼル発電機室ルーフ ベントファン	258	1001
中央制御室換気系冷凍機	293	1001
海水ポンプエリア	277	1001
原子炉建屋外側ブローアウトパネル	469	1001
使用済燃料乾式貯蔵容器	478	1001

注記：各防護対策施設における最も厳しい箇所を記載

(3) たわみ評価

たわみ評価は、金網の機械的特性のうち等価剛性の値が評価結果に影響する。たわみ量の算出においては、金網の変位量と吸収エネルギーとの関係式より、金網に設計飛来物である鋼製材が衝突した場合のたわみ量を算出しており、(1) 吸収エネルギー評価より、剛性のバラつきを考慮するとたわみ量は小さく算出される。

以上を踏まえ、金網のたわみ量に3%の裕度を考慮するが、ここでは保守的に添付書類「V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」において算出した金網及びワイヤロープを含めたネット全体のたわみ量に対して、3%の裕度を考慮し、算出されるたわみ量 $\delta_t$ に対して、最大たわみ量 $\delta_t'$ は、 $\delta_t' = \delta_t \times 1.03$ より算出する。算出結果を表4-3に示す。表4-3に示すとおり、3%の裕度を考慮した場合であっても各金網に生じるたわみ量に対して十分な離隔距離が確保されている。



表 4-3 たわみ評価結果(3 %の裕度考慮)

	$\delta_t'$ (m)	$L_{min}$ (m)
ディーゼル発電機室ルーフ ベントファン	1.62	1.70
中央制御室換気系冷凍機	1.20	1.58
海水ポンプエリア	1.55	2.29
原子炉建屋外側ブローアウト パネル	1.60	2.04
使用済燃料乾式貯蔵容器	1.55	1.88

注記：各防護対策施設における最も厳しい箇所を記載

#### 7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて

## 1. 概要

防護ネットはネット本体の変形の外、防護ネット周辺を固定するワイヤロープの変形によってもたわみが生じる。そのためネットシステムのたわみ量の評価では、ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価を行うこととしている。

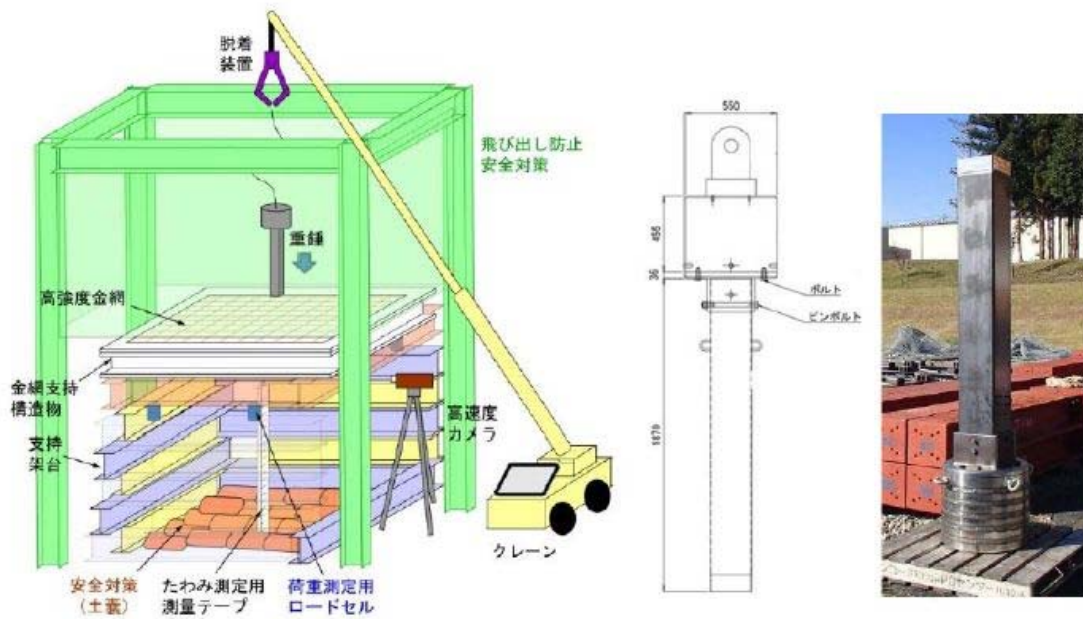
本資料は、その評価手法及び電中研試験結果との比較について説明するものである。

## 2. 評価手法の妥当性確認に用いる試験条件及び結果

ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価手法が妥当であることを確認するため、比較対象とする試験条件及び結果を表 2-1 に、試験概要図を図 2-1 に示す。

表2-1 試験条件及び結果一覧

	項目	条件及び結果
条件	ネット構成	40 mm目合い金網 2.5 m (展開方向長さ) × 2.15 m (展開直角方向長さ) : 2 枚 2.15 m (展開方向長さ) × 2.5 m (展開直角方向長さ) : 1 枚(補助)
	ワイヤロープ全長 (評価上の有効長)	4.65 m (1 本当たり)
	落下物	角形鋼管 (先端形状 : 250 × 250 × t4.5 mm)
	落下物質量	1133 kg
	衝突位置	中央
	落下高さ	9.0 m
結果	ネット最大変位	1.04 m
	総吸収エネルギー	112 kJ



(a) 重錘落下試験概要

(b) 重錘構造図

図 2-1 試験概要図

表 2-1 及び図 2-1 に示す試験に対し、電中研評価手法を用いたネット本体のたわみ量に加え、ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出し、試験結果との比較評価を行う。

### 3. ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量

電中研報告書にて報告されている試験体サイズを図 3-1 に示す。当該試験体の構成（40 mm 目合い 2 枚 + 補助ネット）は、東海第二発電所の評価で考慮している構成に一致している。

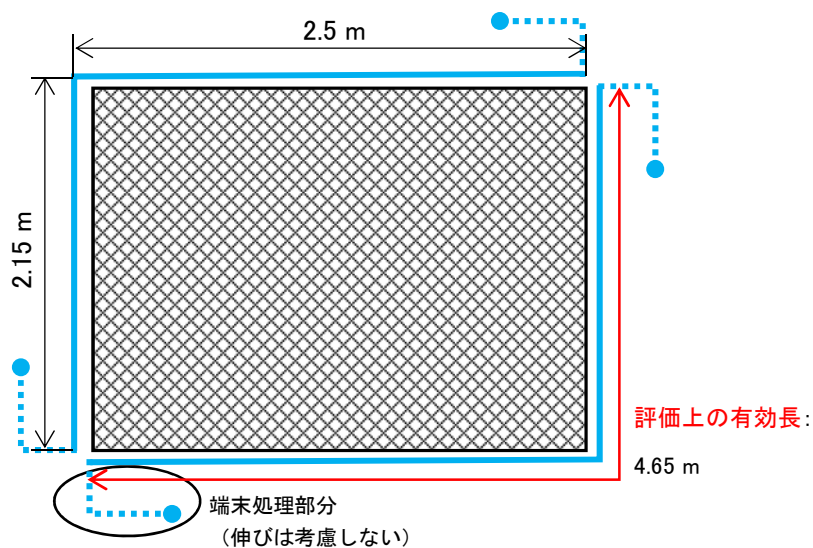


図 3-1 試験体サイズ

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は、添付書類「V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書」（以下「V-3-別添 1-2-1-1」という。）の「3.5(3) たわみ評価」に示す評価フローに基づき評価を実施する。たわみ評価のフローを図 3-2 に示す。

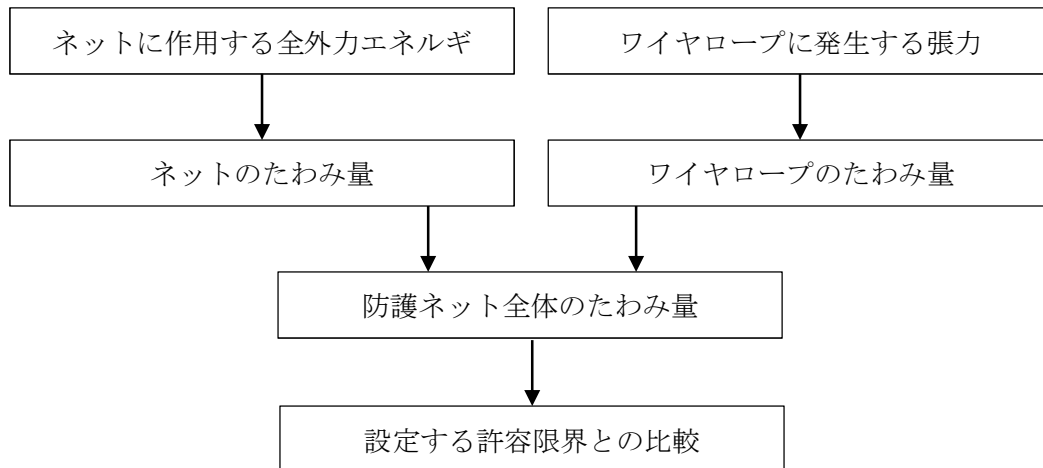


図 3-2 たわみ評価の評価フロー

たわみ評価においては、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.4(1) 吸収エネルギー評価」に示す吸収エネルギー算出モデルを用い、飛来物の運動エネルギー、風圧力による荷重、自重及び上載荷重によるエネルギーを吸収するために必要となるネットのたわみ量を導出する。また、ワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても導出する。

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出する上で以下の条件を仮定する。

- ① ワイヤロープのたわみ量は、飛来物の衝撃荷重並びに自重及び上載荷重による荷重によりワイヤロープに等分布荷重が発生する。
- ② ワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果（荷重－ひずみ曲線）から変形後のワイヤロープ長さを求める。
- ③ ワイヤロープは放物線状に変形する。

### 3.1 ネットシステムのたわみ量評価

電中研報告書に従い、まずはネットのたわみ量  $\delta$  を算出する。ネットのたわみ量  $\delta$  については、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(3) たわみ評価」で示す以下の式より、ネットの変位量と吸収エネルギーの関係から算出する。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left( \sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで、 $K_x$  及び  $L_x$  は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

とすることで、飛来物の運動エネルギーに応じたたわみ量  $\delta$  を算出することができ、表 2-1 に示す試験の運動エネルギー 112 kJ を吸収するためのネットのたわみ量  $\delta$  の算出値は 0.9 m となる。

次に各ワイヤロープの張力を算出する。

ネットが受ける衝撃荷重は、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、ネットのたわみ量と飛来物の運動エネルギーから算出する。

$$F_a = \frac{8E_t}{3 \cdot \delta}$$

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重による衝撃荷重の増加分による係数 1.22 を考慮し、衝撃荷重の最大値  $F_a'$  は、

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

よって、運動エネルギー 112 kJ がネットに作用した際の衝撃荷重は 409 kN となる。ネット展開方向にかかる張力は、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、ネットのたわみ角とネットが受ける衝撃荷重から算出する。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \sin \theta}$$

たわみ角  $\theta$  は以下の式で求められ、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 \delta}{L_x}$$

ネット展開方向にかかる張力  $T'$  は、350 kN となる。

そこから、ワイヤロープは、ネット展開方向 1 辺とネット展開直角方向 1 辺を 1 本のワイヤロープで L 字形に設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計 2 本でネットを支持することにより、展開方向及び展開直角方向の各辺のワイヤロ

ープが結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ1本が負担する張力は  $T' / 2$  と設定する。また、表 2-1 で示す試験ではネットを2枚と、補助ネットを1枚重ねて設置しているため、補助ネットを支持しているワイヤロープに発生する張力  $T_1'$  は以下の式より、

$$T_1' = \frac{F_a}{4 \sin \theta} \cdot \left( \frac{1.5}{1.5+1} \right)$$

補助ネットを支持しているワイヤロープ1本あたりの張力は105 kNとなる。

補助ネットを支持しているワイヤロープ1本あたりの張力(105 kN)を用い、表 3-1 に諸元を示すワイヤロープに張力(105 kN)が負荷されたとき、図 3-2 の引張試験結果より、ひずみは0.0065 と求められる。

表 3-1 ワイヤロープの諸元

	仕様	径	破断荷重 (kN)
ワイヤロープ	7×7	16	165*

注記 \* : JIS G 3549 の破断強度

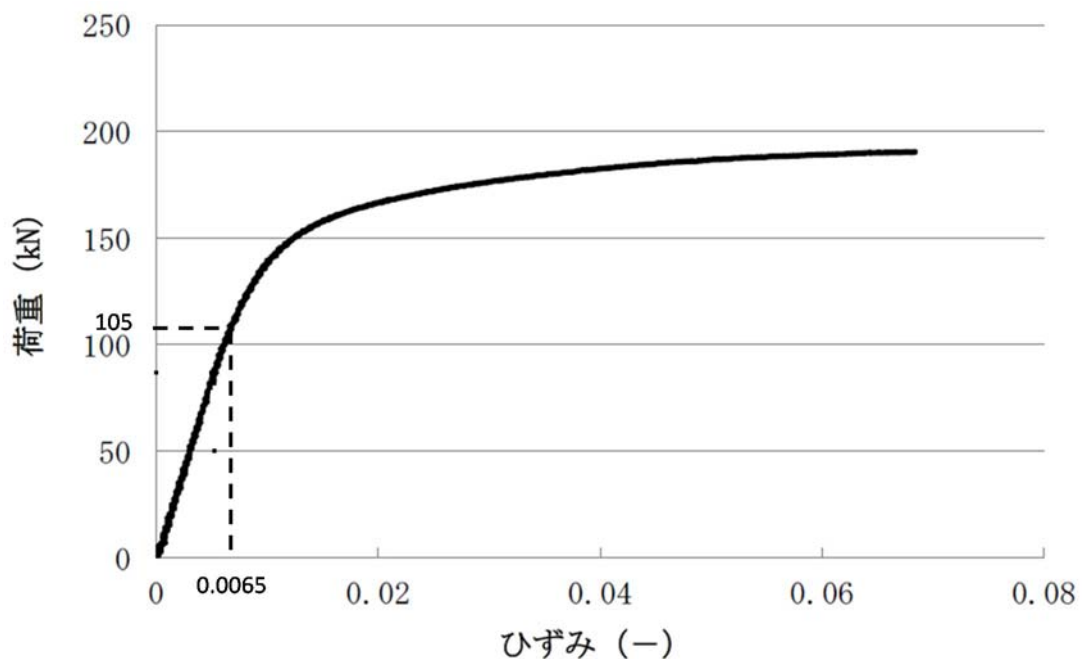
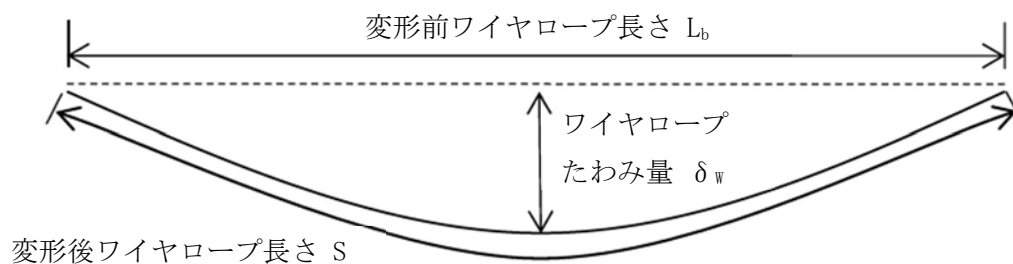


図 3-2 ワイヤロープ引張試験結果

ワイヤロープはネット長辺側と短辺側が結合されており、その発生張力は均一であると考えられる。したがって、変形後のワイヤロープ一本あたりの全長  $S_t$  は、ワイヤロープの一本あたりの全長 ( $9.3/2=4.65$  m) が変形するものと考えられ、以下のとおり算出される。

$$S_t = 4.65 \text{ (m)} \times 1.0065 \\ = 4.68 \text{ (m)}$$

また、飛来物の衝突によりワイヤロープが放物線上に変形すると図 3-3 のとおりとなり、変形後のワイヤロープ長さ  $S$  は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。



$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + 16 \delta_w^2} + \frac{L^2}{8 \delta_w} \ln \left( \frac{4 \delta_w + \sqrt{L^2 + 16 \delta_w^2}}{L} \right)$$

図 3-3 ワイヤロープ変形図

ここで、長さ  $L_x$  (2.5 m) のワイヤロープのたわみ量を  $\delta_{wx}$ 、長さ  $L_y$  (2.15 m) のワイヤロープのたわみ量を  $\delta_{wy}$  とすると、長さ  $L_x$  のワイヤロープの変形後の長さ  $S_x$  と長さ  $L_y$  のワイヤロープの変形後の長さ  $S_y$  の合計が  $S_t$  となることから、

$$S_t = \frac{1}{2} \sqrt{L_x^2 + 16 \delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8 \delta_{wx}} \ln \left( \frac{4 \delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16 \delta_{wx}^2}}{L_x} \right) \\ + \frac{1}{2} \sqrt{L_y^2 + 16 \delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8 \delta_{wy}} \ln \left( \frac{4 \delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16 \delta_{wy}^2}}{L_y} \right) \\ 4.68 = \frac{1}{2} \sqrt{L_x^2 + 16 \delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8 \delta_{wx}} \ln \left( \frac{4 \delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16 \delta_{wx}^2}}{L_x} \right)$$



$$+\frac{1}{2}\sqrt{L_y^2+16\delta_{wy}^2}+\frac{L_y^2}{8\delta_{wy}}\ln\left(\frac{4\delta_{wy}+\sqrt{L_y^2+16\delta_{wy}^2}}{L_y}\right)\dots\dots\textcircled{1}$$

と表される。

一方、ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は、図3-4のとおり表される。

ここで、ネットのたわみ量 $\delta=0.9\text{m}$ は決まっているため、三平方の定理より、長さ $L_x$ のワイヤロープの変形後の長さ $S_x=1.54\text{m}$ 、長さ $L_y$ のワイヤロープの変形後の長さ $S_y=1.40\text{m}$ と算出される。

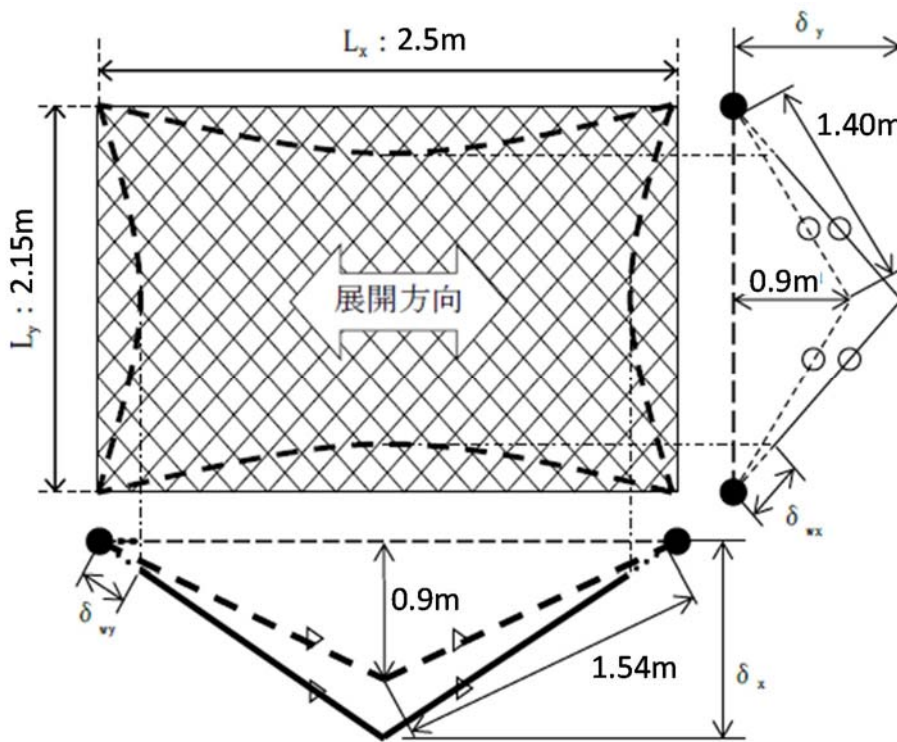


図3-4 たわみ量の足し合わせ

図3-4より、ネット本体のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量 $\delta_x$ 及び $\delta_y$ はそれぞれ

$$\begin{aligned}\delta_x &= \sqrt{(\delta_{wy}+1.54)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wy}+1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2}\dots\dots\textcircled{2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_y &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots \textcircled{3}\end{aligned}$$

と算出され、 $\delta_x$ 及び $\delta_y$ は双方とも同じネットシステムのたわみ量であり、等しいことから

$$\sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots \textcircled{4}$$

と表される。

以上より、①式と④式を連立して解くことで $\delta_{wx}$ 及び $\delta_{wy}$ を導出することができ、それぞれの値は、

$$\delta_{wx} = 0.12 \text{ m}$$

$$\delta_{wy} = 0.11 \text{ m}$$

と算出される。よって、ネット本体のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量は、②式及び③式を用い、

$$\delta_x = \sqrt{(0.11 + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = 1.08 \text{ m}$$

$$\delta_y = \sqrt{(0.12 + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} = 1.08 \text{ m}$$

$$\delta_x = \delta_y = 1.08 \text{ m}$$

と算出される。

#### 4. 試験における実測値との比較

ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量の試験における実測値と計測値との比較を以下に示す。

試験条件を表 4-1 に、また、実測値との比較を表 4-2 に示す。

表 4-1 電中研試験一覧

ケース	ネット枚数 (枚)	ネットサイズ* (m)	落下物	落下物質量 (kg)	衝突位置	落下高さ (m)	エネルギー (kJ)
1	2 (補助1枚)	2.5×2.15 (2.15×2.5)	角形鋼管 (先端形状： 250×250×t4.5 mm)	1133	中央	9.0	112

注記 \*：寸法については，（展開方向長さ）×（展開直角方向長さ）の順

表 4-2 電中研試験におけるたわみ量の実測値と計算値の比較

ケース	ネットシステムのたわみ量	
	計算値 (m)	実測値 (m)
1	1.08	1.04

表 4-2 より，ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量は「実測値<計算値」であり，実測値にはネット，ワイヤロープ及び緩衝装置の変形によるたわみ量が含まれている。

したがって，本評価によりネットシステムのたわみ量を安全側に評価可能であることが確認された。

## 5. 実機設備への展開

本評価は，電中研報告書に記載の2.5 m×2.15 mの試験体に対して実施したものであるが，以下の観点から実機ネットに対しても適用可能と判断している。

### 5.1 ネットサイズ

本評価では，ネットシステムの仕様に応じて，飛来物捕捉時の衝撃荷重に基づくワイヤロープ張力が算定可能であり，それに応じたワイヤロープのたわみ量を算出できる。

以上より，本評価はネットサイズの影響が考慮されていると判断している。

### 5.2 ワイヤロープ張力

電中研報告書においては，試験時におけるワイヤロープの最大張力は約 103 kN であり，実機に適用するワイヤロープの張力の許容限界 132 kN より小さい値となっているが，図 5-1 に示されるとおり，本評価に用いる，電中研報告書に示される多項式による近似式が 132 kN 以下の範囲において実験値とよく一致していることから，

103 kN を超える領域においても、算出される張力には信頼性があると判断している。

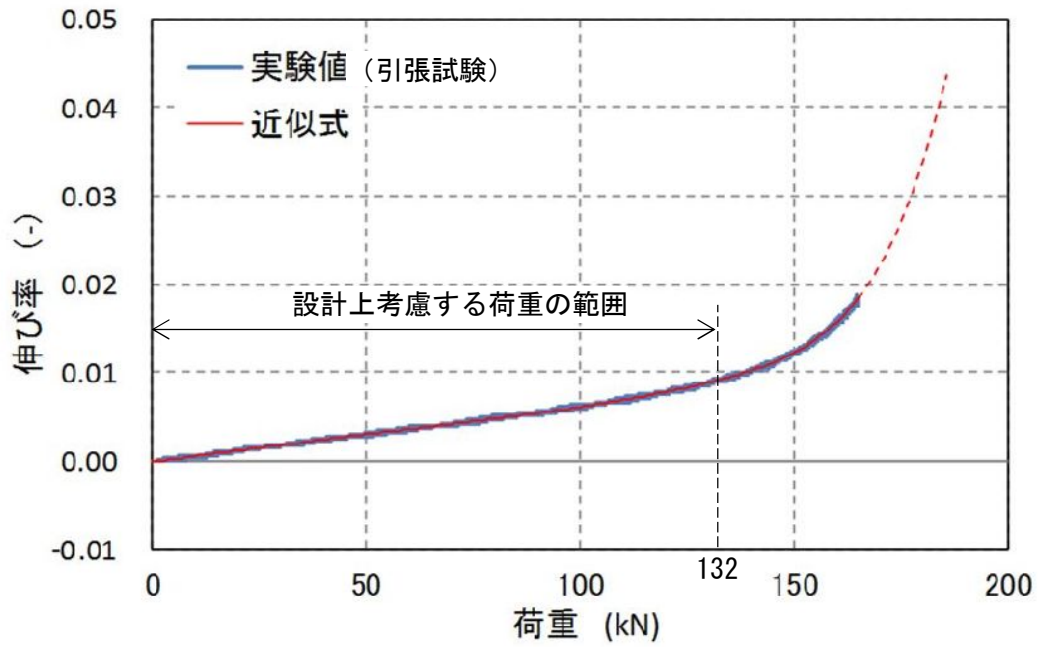


図 5-1 ワイヤロープ引張試験結果 (近似式との比較)