

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 16 R <u>6</u>
提出年月日	令和3年 <u>12</u> 月 <u>22</u> 日

設工認に係る補足説明資料

耐震設計の基本方針に関する

配管系の評価手法（定ピッチスパン法）について

1. 文章中の下線部は，R 5 から R 6 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 6）は，10月13日に提示した「配管系の評価手法（定ピッチスパン法）についてR 5」に対し，ヒアリングにおける主な指摘事項である応力比較用のモデルの妥当性を踏まえ，記載内容を見直したものである。

目次

1. 概要	1
2. 定ピッチスパン法について (ダクト, 配管収納容器, 漏えい液受皿については後次回申請時に示す)	2
2.1 配管系の設計について	2
2.2 再処理事業所の配管系の設計について	3
2.2.1 当社の適用範囲	3
2.2.2 定ピッチスパン法の設計内容	5
2.2.3 二次応力の考慮について	13
2.2.4 固有振動数に対する考慮事項	15
3. 分割申請における対応内容	16
4. まとめ	16

添付－1 実施工配管に対する耐震性の確認

添付－2 電路類について

添付－3 既設工認時に設定した標準支持間隔に対する評価手順

別紙－1 標準支持間隔の振動数とピーク振動数の比較結果

別紙－2 建屋間相対変位に対する確認結果

: 後次回申請において提示

: 商業機密の観点から公開できない箇所

1. 概要

本資料は、再処理施設，廃棄物管理施設，MOX 燃料加工施設の設計基準対象施設及び再処理施設，MOX 燃料加工施設の重大事故等対処施設に対する基本方針を補足説明するものである。

配管系の耐震評価については，原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（以下，「JEAG4601」という。）に基づき，設工認添付書類の配管系の耐震支持方針に評価方針を記載している。

ここでは，設工認添付書類の基本方針「配管系の耐震支持方針」に記載の標準支持間隔法（以下，「定ピッチスパン法」という。）に対する評価内容を示す。

2. 定ピッチスパン法について

2.1 配管系の設計について

再処理事業所の配管系については、様々な建屋、階層に流体を移送する必要があり実際に施工される配管は建屋と水平方向、鉛直方向に敷設する配管、建屋間を跨る配管等 3 次元的な広がりを持っているが、配管自体の形状構成としては、直管部分と曲がり及び分岐等の形状にて構成されている。

これら配管系の設計手法としては、JEAG4601の中で簡易設計法である定ピッチスパン法と多質点解析による評価の 2 種類の手法が設定されており、いずれの手法についても各種配管系の形状に対する設計は可能であるが、再処理事業所においては個々の配管系の仕様、特性に応じた評価手法の使い分けを行っているため、それぞれの配管系の設計手法を示した上で再処理事業所の配管設計の考え方を示す。

JEAG4601で設定されている 2 種類の配管系の設計手法のうち、多質点系はモデルによる評価の具体的な設計方法としては、個別の実機配管系の形状をモデル化した設計方法となっている。

一方、簡易設計法である定ピッチスパン法による設計としては、直管部分と規則的に敷設されたサポート、配管系の曲がり部分、分岐部分等の形状で構成された配管系に対し、評価としては配管系の直管部分のモデル化を行い、各方向の地震力^{*}を考慮した直管部の支持間隔（以下、「標準支持間隔」という。）長さを算出している。

※入力地震力として、水平方向地震力及び鉛直方向地震力を入力し支持間隔を設定しているため、水平、鉛直配管系双方に対する設計方針となっている。

また、直管部以外の形状である曲がり部、分岐部等については直管部と同等以上の耐震性を有する設計として、標準支持間隔の応力以内及び振動数以上となるよう、支持間隔との比率（以下、「低減係数」という。）を示したグラフ（以下、「支持間隔グラフ」という。）を用い標準支持間隔以内に設計することで、実配管の固有振動数は標準支持間隔より剛側となり応力が小さくなる傾向となるため、実配管は標準支持間隔と同等以上の耐震性を確保出来る設計方法となっている。

なお、定ピッチスパン法は簡易設計法であるため、算出する応力は一次応力となっており、二次応力である熱膨張変位及び建屋間相対変位の考慮が必要となる。

次項では再処理事業所におけるそれぞれの設計手法の適用範囲、二次応力を含む具体的な定ピッチスパン法の設計内容を示す。

2.2 再処理事業所の配管系の設計について

2.2.1 当社の適用範囲

JEAG4601の設計手法としては、動的解析法である多質点系はりモデルによる評価と簡易設計法である定ピッチスパン法が記載されている。

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987

表 6.6.3-2 配管の標準的設計手法

配管分類		標準的設計手法	
使用温度	口径	動的解析法	簡易設計法
高い	大口徑	△	○
	小口径	△	○
低い			○

○ 原則として適用する設計手法

△ 簡易設計法が適用し難い場合について動的解析を行う。(Cクラス配管は除く)

ただし上記は標準的設計手法であり、必要に応じ動的解析を行うものとする。配管の耐震設計に係る部分の手順例を図6.6.3-40に示す。

b. 支持点の設定

簡易設計法のうち、振動数基準定ピッチスパン法及び応力基準定ピッチスパン法の場合、基準振動数、配管口径等によりあらかじめ定められた支持間隔で支持点を設定する。ただし、曲がり部、集中質量部、分岐部などの特殊な部分では、それぞれの特性を考慮した支持スパンとなるようにする。

簡易設計法のうちの修正震度法、及び動的解析法では配管系を多質点系でモデル化して仮サポート位置を設定し、修正震度法においては1次固有振動数を、動的解析法においては数次の固有振動数を求める。

この手法には、一般的な固有値解析法を用いる。

再処理事業所においては様々な建屋に流体を移送する必要があり、膨大な物量の配管を有しているため、これら膨大な物量の配管設計に当たっては、主に定ピッチスパン法を用いた設計をしており、高温かつ大口徑の配管は多質点系はりモデルによる設計を行っている。

定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる評価の適用の識別としては、JEAG4601に記載されているPWR電力の例と同様、口径100A以上かつ温度151℃以上を基準とし、基準に該当する配管は多質点系はりモデルを用いた評価、それ以外の配管については定ピッチスパン法にて評価を行うこととしている。

本基準の考え方として、大口徑の配管は配管にかかる曲げモーメントに対し、曲げモーメントを受ける面積が大きくなり地震による発生応力が小さくなるため、標準支持間隔としては長くなる傾向である。標準支持間隔が長くなった場合、高温時には二次応力の1つである熱膨張変位が大きくなり、地震により発生する応力と熱膨張変位により発

生ずる応力の双方を満足する必要があるため、より詳細な評価である多質点系はりモデルにて評価を行っている。

なお、これ以外に多質点系はりモデルを用いる評価として、今回設工認においては狭隘部等の補強困難な配管系について、より詳細な評価が必要な場合には多質点系はりモデルによる評価を適用することとしている。

以上のことから、当社の配管設計における実施内容としては、用途に応じた設計手法を識別しており、主に定ピッチスパン法を適用して設計を行っている。

定ピッチスパン法の具体的な設計内容として、直管部及び直管部以外の形状に対する評価内容、熱膨張変位以外の二次応力である建屋間相対変位による応力の考慮方法、固有振動数に対する考慮事項を次項以降に示す。

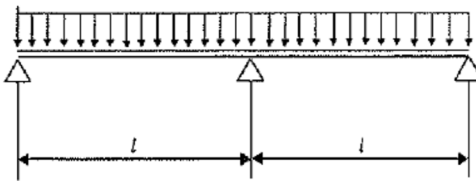
2.2.2 定ピッチスパン法の設計内容

定ピッチスパン法については、JEAG4601に振動数基準定ピッチスパン法と応力基準定ピッチスパン法の2種類が定義されている。

振動数基準定ピッチスパン法については、配管系を地震による過度の振動がないようあらかじめ基準振動数をベースに基準支持スパンを定めるものであるため、地震時配管に生じる応力については、許容値に対して十分安全側となるように定めるものである。

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
(a) 振動数基準定ピッチスパン法 (i) 原則 ① 配管系を地震による過度の振動がないようにするために、配管系の各支持区間について、あらかじめ基準振動数をベースに定められる基準支持スパン以下となるように支持する。 ② 基準振動数は、地震時配管に生じる応力が許容値に対し、十分安全側となるように定めるものとする。

応力基準定ピッチスパン法については、固有振動数によらず配管を支持スパンで3点支持した等分布荷重連続はりにモデル化し、固有振動数を算出し、動的及び静的解析により地震応力値等が許容値内にあるように最大支持スパン（＝直管部標準支持間隔）を求めるものである。

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
(b) 応力基準定ピッチスパン法による支持 (i) 原則 配管系を直管部、曲がり部、分岐部及び集中質量部等の標準的な構造要素に分け、各要素について要素の固有振動数、地震応力値等が許容値内にあるように、その支持スパンを定める。 配管系全体としては、各要素の組合せを考え、配管の支持点等を定めるものとする。
(ii) 直管部の支持 各種配管を下図のように、支持スパン l で3点支持した等分布荷重連続はりにモデル化し、動的及び静的解析により最大支持スパンを求め、これ以内になるよう支持する。  <p>(このモデル支持点は軸直方向のみを拘束するものとし、軸方向、回転に対しては自由とする。)</p>

支持点については、配管を最大支持スパン以内になるように設定し、直管部以外の曲がり部、分岐部及び集中質量部等の要素についても標準支持間隔を適用することで耐震性を確保出来る設計である。

当社は、実配管の施工方法に自由度を持たせることを目的に既設工認時から「応力基準定ピッチスパン法」を採用している。

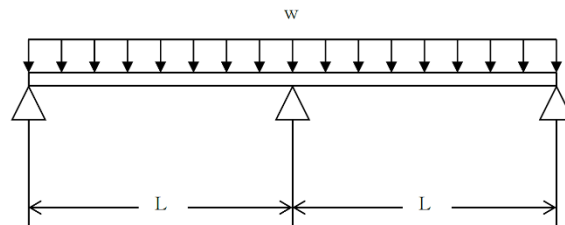
<直管部に対する評価内容>

定ピッチスパン法でははりの運動方程式に境界条件を与えて解析的に解くことにより得られた理論式に基づき，配管系の固有振動数が20Hz未満のスパンについては，各振動モードの固有振動数，固有ベクトル，刺激係数を算出した上で床応答曲線から選択した応答加速度を適用することによって応答スペクトル解析を行っている。

以下に運動方程式から求められる式の導出手順を示す。

(1) 配管系のモデル化

配管系のモデル化については，配管を第2.2.2-1図のようにスパンLで3点支持した等分布荷重にてモデル化を行っている。



L : 直管部標準支持間隔
w : 単位長さ当たり重量

第2.2.2-1図 等分布荷重2スパン3点支持モデル

第2.2.2-1図に示すはりモデルの振動を表す運動方程式は，以下の様になる。

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{EI}{w} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad \dots (1)$$

ここで w : 単位長さ当たり重量
E : 縦弾性係数
I : 断面二次モーメント
x : 軸方向位置
y : 変位
t : 時間

(2) 固有値解析

(1)式の運動方程式を解くことによって固有振動数，固有関数，刺激係数を算出する。

運動方程式の解を

$$y=Y(x)(A\cos(\omega t)+B\sin(\omega t)) \quad \dots (2)$$

とにおいて，運動方程式に代入すると，次式が得られる。

$$\frac{d^4Y}{dx^4}-k^4Y=0$$

ここで， $k^4=\frac{w}{EI}\omega^2$ とおく。

また，運動方程式の一般解については次式となる。

$$y=A_r\cos(kx)+B_r\sin(kx)+C_r\sinh(kx)+D_r\cosh(kx) \quad \dots (3)$$

ここで， A_r ， B_r ， C_r ， D_r の係数は支持点の境界条件によって求められる。

以上の関係式及び解析モデルの境界条件を踏まえて以下の関係式が算出される。

1 スパン目のはりの固有関数

$$y_1=A_2(\operatorname{cosec}(kL)\cdot\sin(kx)-\operatorname{cosech}(kL)\cdot\sinh(kx)) \quad \dots (4)$$

同様に2スパン目のはりの固有関数

$$y_2=A_2(\cos(kx)-\cosh(kx)-\cot(kL)\cdot\sin(kx)+\coth(kL)\cdot\sinh(kx)) \quad \dots (5)$$

また，固有振動数 f_p が求められる。

$$f_p=\frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2}\sqrt{\frac{EI}{w}} \quad \dots (6)$$

ここで， λ_n は振動数係数である。また，固有関数より刺激係数 β_n が求まる。

$$\beta_n=\frac{\int_0^L n y_1 dx}{\int_0^L n y_1^2 dx} \quad \dots (7)$$

ここで， β_n ：刺激係数

$n y_1$ ： n 次固有関数

一方，配管-サポート連成系の振動数 f_{ps} の算出は，

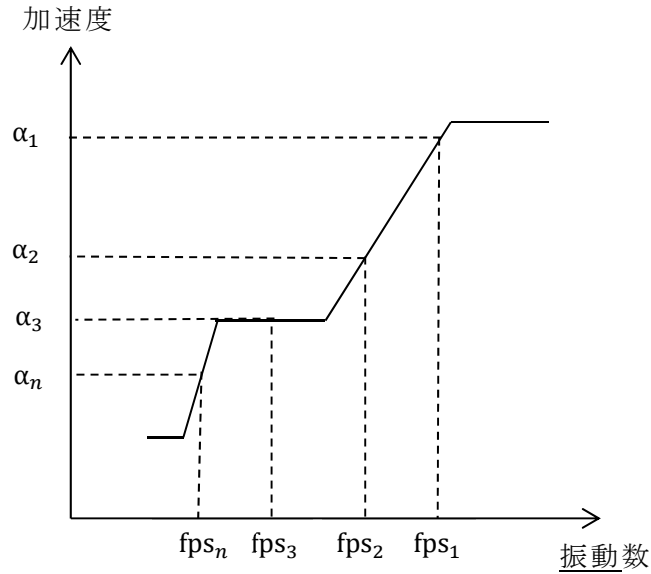
$$f_{ps}=\frac{f_p}{\sqrt{1+(\frac{f_p}{f_s})^2}} \quad \dots (8)$$

となる。サポートの固有振動数 f_s は配管とサポートの質量を付加した状態で算出されており，式(8)で配管とサポートの固有振動数を合成することによって，サポートの質量の効果が配管系の固有振動数に反映される。

(3) 応答加速度の読み取り

定ピッチスパン法で用いる床応答スペクトルは、床応答スペクトルの右肩下がりの領域での設計を回避するため、谷埋め及びピーク保持を行う。

評価に用いる応答加速度 α_n は、作成した床応答スペクトルから各モードの配管系の振動数 f_{ps} で決定する。床応答スペクトルから各モードの応答加速度を求める方法を第2.2.2-2図に示す。



第 2.2.2-2 図 床応答スペクトル

(4) 応答算出（応答合成）

モーメントは以下の材料力学のはり理論式に基づき、先に求めた変位関数を微分して求める。

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2}$$

なお、最大モーメントは2スパンはりの中央支持点に生じることから $x = L$ とおいて、

$${}_n M_{\max} = -2wL^2 \cdot \beta_n \cdot \alpha_n \cdot \frac{1}{\lambda_n} \quad \dots (9)$$

また、曲げモーメント式を配管の断面係数で割ると配管応力が得られる。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{Z} = -2wL^2 \cdot \beta_n \cdot \alpha_n \cdot \frac{1}{\lambda_n} \cdot \frac{1}{Z} \quad \dots (10)$$

定ピッチスパン法ではモード合成を実施していることから、配管応力は以下となる。

$$\sigma_{\max} = 2wL^2 \cdot \frac{1}{Z} \cdot \left[\sum_{n=1}^n \left\{ \alpha_n \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_n^2} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots (11)$$

なお、配管系の固有振動数が20Hz以上の場合は、モード合成の必要がないため以下に示す等分布荷重 2 スパン 3 点支持モデルに対して静的な解法により曲げモーメントを求める。

$$M = \frac{wL^2\alpha}{8} \quad \dots (12)$$

α : 加速度 (1.2ZPA)

上記で示す曲げモーメント式を配管の断面係数で割ると配管応力が得られる。

$$\sigma = \frac{wL^2\alpha}{8Z} \quad \dots (13)$$

(5) 応力評価

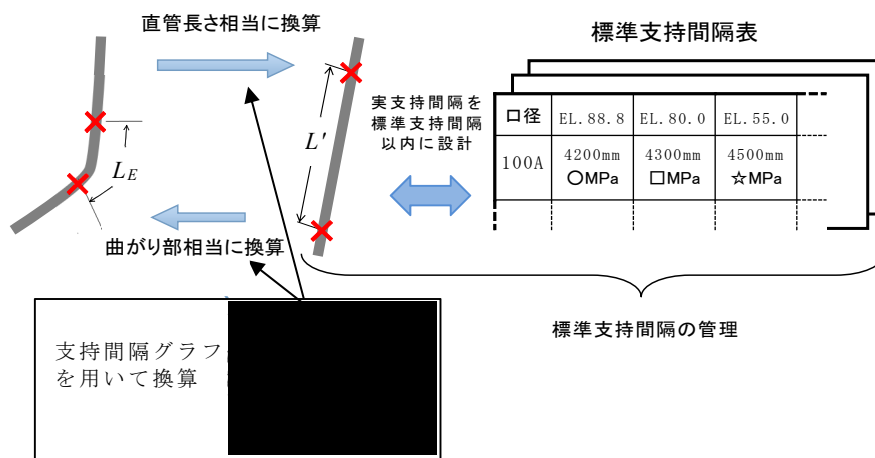
JEAG4601の規程に従い応力評価を行う。

<直管部以外の形状に対する評価内容>

a. 設計方法

直管部以外の形状については、算出した支持間隔以内で支持するよう設計するため、耐震性を確保出来る設計としている。

具体的な直管部以外の形状の設計については、直管部と同等以上の耐震性を有するよう標準支持間隔の応力以内及び振動数以上になるような支持間隔比である低減係数を支持間隔グラフから求め、各形状の支持間隔を算出する。直管部以外の形状のうち曲がり部の設計イメージを第 2.2.2-3 図に示す。



第 2.2.2-3 図 配管の曲がり部の設計イメージ

b. 支持間隔グラフの作成方法

再処理事業所が適用している直管部以外の形状としては、第2.2.2-1表の7形状であり、これらの形状に対し支持間隔グラフを作成した上で設計を行っている。

第2.2.2-1表 直管部以外の形状

No.	形状
1	曲がり部
2	集中質量部
3	分岐部
4	Z形部（平面Z形部）※
5	Z形部（立体Z形部）※
6	門形部※
7	分岐+曲がり部※

※No. 1～3は先行発電プラントと共通となっている。

No. 4～7の形状については、既設工認時よりNo. 1～3の形状を組み合わせた配管を多数設計することを把握していたため、支持間隔グラフを作成している。

支持間隔グラフの作成に当たっては、定ピッチスパン法にて算出した直管部標準支持間隔を基に行っている。

定ピッチスパン法にて算出する直管部標準支持間隔は、口径、板厚、材質、加速度等の配管仕様、条件を考慮して算出しており、曲がり部等は、直管部を基準とした際の形状の違いを考慮して算出している。また、応力が集中する曲げ部等の形状変化部位及び構造不連続部位については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版を含む)) <第 I 編 軽水炉規格> JSME S NC1に基づいた応力係数を考慮している。

例えば、第2.2.2-4図の曲がり部の支持間隔グラフは曲がり部の長さ比、曲がり部支持間隔/標準支持間隔比、曲がり角度ごとに許容領域の設定を行う。

許容領域の設定に当たっては、前述の曲がり部の長さ比等に応じた配管形状ごとに算出し、算出した結果の内側を許容領域の線図としている。



第 2.2.2-4 図 曲がり部の支持間隔グラフ

配管設計において曲がり部の設計を行う際は、直管部標準支持間隔に対して設定した支持間隔グラフの線図の内側となっていることの確認を行い、直管部標準支持間隔以下となるような設計を行っている。

なお、曲がり部以外の形状も設計を行う際は許容領域線図の内側になっていることの確認を行っている。そのうち集中質量部の支持間隔グラフについては、弁等の重量物を模擬している他、曲がり部等に対する配管軸方向荷重の影響を考慮するため、配管軸方向の配管重量を集中荷重とみなして設計を行っている。

設工認に示している標準支持間隔については設計方針であり，その長さに対して実施工の配管が収まるよう施工を行っているため，実配管は標準支持間隔と同等以上の耐震性を確保した設計となっている。

耐震性が確保されていることの確認として，設工認に示している標準支持間隔と実施工した配管の比較を添付－1に示す。

2.2.3 二次応力の考慮について

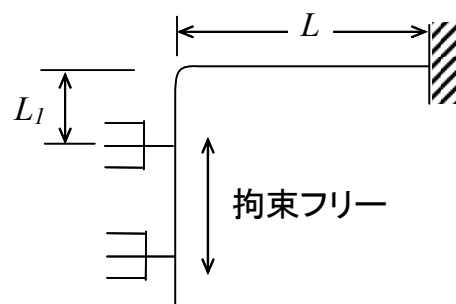
定ピッチスパン法を用いた配管系の設計に当たっては，二次応力の影響を適切に考慮しているため，二次応力を考慮した配管設計及び評価方法を示す。

(1) 二次応力を考慮した配管設計

二次応力の考慮方法としては，地震時に配管に生じる建屋間相対変位に対し二次応力を算出し，一次応力と組み合わせることで一次＋二次応力が許容値以下となることの確認を行っている。

地震時の相対変位によって生じる二次応力は，一次応力と異なり，支持間隔が長くなることで相対変位による応力を吸収出来るため，第2.2.3-1図に示すとおり，実施工した水平方向配管Lに生じる相対変位に対し，曲がり部以降の第一支持構造物位置 L_1 を相対変位が吸収出来る長さ以上とする。

よって，配管設計に当たっては一次応力と二次応力とを同時に満足する必要がある。



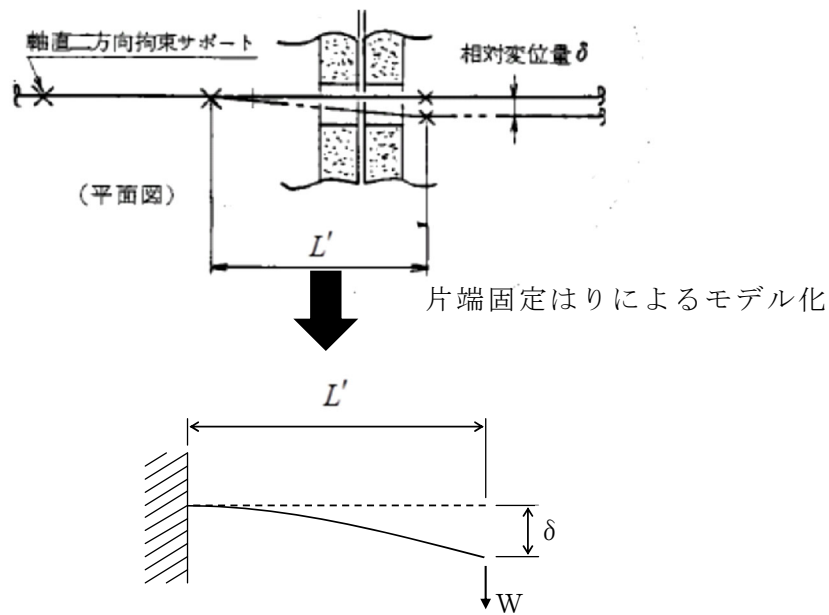
第 2.2.3-1 図 二次応力の評価モデル

(2) 評価方法

配管が異なる建屋間に渡って敷設される部分については、建物間の相対変位による発生応力を算出する。

一次応力については定ピッチスパン法にて算出し、建物間相対変位を考慮する二次応力の算出については、第 2.2.3-2 図に示すとおり実施工の支持間隔を用いて片端固定はりモデルにより算出する。

以上を踏まえた一次＋二次応力の算出方法としては、各々算出した一次応力と二次応力の組み合わせを行い、一次＋二次応力の許容値以下となることを確認する。



L' : 建屋間を渡る配管の直管部長さ

δ : 建屋間相対変位

$W = \frac{3EI\delta}{L^3}$: 建屋間相対変位により生じる荷重

$M = WL'$: 建屋間相対変位により生じるモーメント

$\sigma = \frac{i_2 M}{Z}$: 二次応力

第 2.2.3-2 図 片端固定はりモデルによる応力算出方法

なお、定ピッチスパン法で設計している配管について、二次応力の算出は主に片端固定はりモデルにより算出することとなるが、許容値を超える場合は多質点系はりモデルを用いて確認を行う。

2.2.4 固有振動数に対する考慮事項

定ピッチスパン法の固有振動数については、JEAG4601に基づき設計上の配慮として「配管系全体の固有振動数は、建屋床応答スペクトルのピーク振動数領域を避けることを原則とする。」と記載されている。

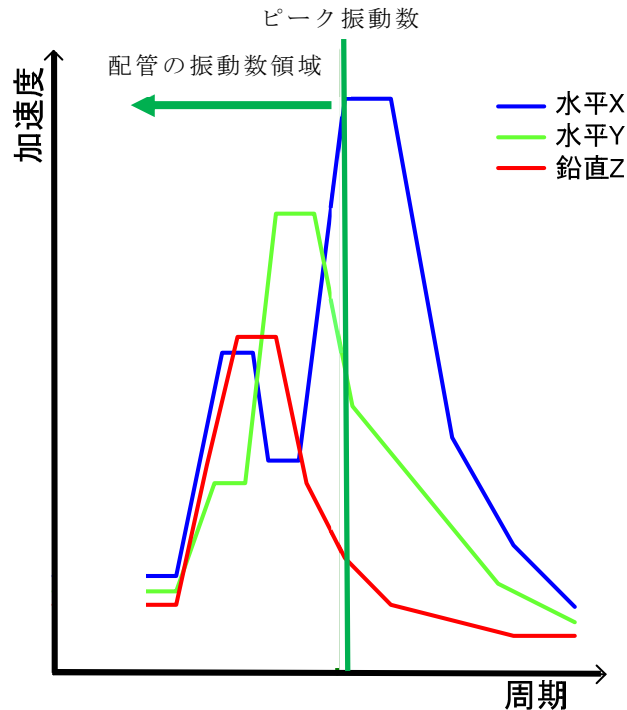
原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987

◎ 配管系の振動数

配管系全体の固有振動数は、建屋床応答スペクトルのピークの振動数領域を避けることを原則とする。

定ピッチスパン法に用いる床応答スペクトルは、谷埋め及びピーク保持を行っており、定ピッチスパン法における配管系の固有振動数は、原則建屋ごとに配管設計に用いる床応答スペクトルの水平方向及び鉛直方向の最も大きい加速度ピークとなる振動数（以下、「ピーク振動数」という。）より短周期側となるように設計している。

標準支持間隔の振動数と建屋ごとの配管設計に用いる床応答スペクトルのピーク振動数との比較については別紙-1に示す。



以上が具体的な標準支持間隔の設計内容となっており、これらの内容に基づき設計を行うことで耐震性が確保出来る設計となっている。

なお、電路類についても定ピッチスパン法を用いて評価を行っているため、電路類に対する内容を添付-2に示す。

3. 分割申請における対応内容

今回設工認においては本定ピッチスパン法を用いた評価を行っており、既設工時に設定した標準支持間隔（以下、「既設工認スパン」という。）に対する対応と新たに設定した標準支持間隔に対する対応の2通りの対応を行っている。

既設工認スパンに対する対応としては、狭隘部等の補強困難な配管系が存在するため、既設工認スパンを変更せず、新規制基準対応における地震動を用いた応力評価を行っている。

新たに設定した標準支持間隔に対する対応としては、既設工認時と同様に新規制基準対応の地震動に対する新たな標準支持間隔を算出している。

第1回申請設備は新たに標準支持間隔を算出しているため、本補足説明資料にて示した内容で対応を行っている。既設工認スパンに対する対応は既設設備に行っており、これに対する評価手順は後次回申請時に添付に示す。

また、建屋間相対変位に対する対応としては、一次応力同様、設工認上で設計方針として応力評価式を示した上で二次応力を考慮した設計を行う。

設工認に示している標準支持間隔は今後設計する配管に対する網羅的な設計方針であり、実配管の設計は配管施工時に標準支持間隔以内に収まっていることを確認^{*}している。

これを踏まえた建屋間相対変位の確認としては、設工認上で示している網羅的な設計条件にて算出した直管部標準支持間隔に対して、配管毎の材質、実形状等の設計情報を用いた応力を算出し許容応力以下となっていることを確認することとなるため、実配管に対する確認結果を補足説明資料の中で示す。

第1回申請設備である冷却塔配管の範囲は冷却塔に敷設されている範囲となっており、建屋間相対変位が生じる冷却塔から建屋等に渡り敷設される配管の確認結果は、後次回申請時に本補足説明資料の別紙にて示す。

※実配管が設工認上の標準支持間隔に収まっていることの確認方法としては、配置設計後、使用前事業者検査にて確認しているため、設工認上は設計方針までとなっている。

4. まとめ

当社の配管系に対する設計手法としては、多質点系はりモデルによる評価と定ピッチスパン法があり、いずれの手法も再処理事業所の配管系全てに対し設計出来る手法となっているが、それぞれの評価手法の識別としては、配管系の用途に応じ適用している。

そのうち、定ピッチスパン法については設工認上では設計方針を示しているため、設工認上で示している設計方針と実施工配管の比較を行い、実施工配管が標準支持間隔に対して耐震性を確保出来る設計手法であることを確認した。

添付－ 1

実施工配管に対する耐震性の確認

1. 概要

簡易設計法である標準支持間隔法（以下、「定ピッチスパン法」という。）については、配管系の形状を直管部分にモデル化しており、直管部の支持間隔（以下、「標準支持間隔」という。）長さを算出している。

実施工の配管は、その長さ以内に収まるよう施工しているため、設工認に示している標準支持間隔に対し耐震性を満足した設計となっている。

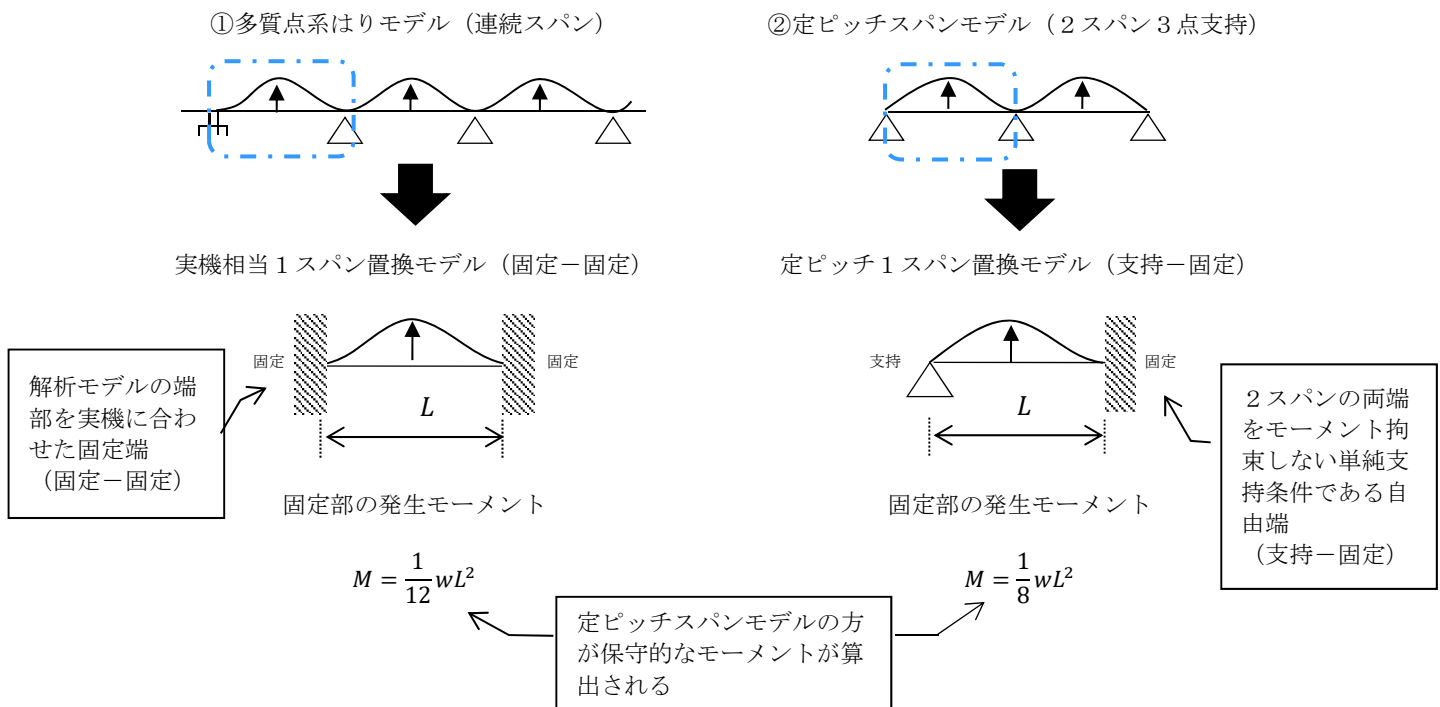
ここでは、実施工配管の耐震性が確保されていることの確認として、定ピッチスパン法と実施工配管のモデル及び応力の比較を行う。

2. 解析モデルの比較

定ピッチスパン法に用いる解析モデル（以下、「定ピッチスパンモデル」という。）の設定としては、配管の直管部を2スパン3点支持としてモデル化しており、2スパンの両端をモーメント拘束しない単純支持条件（自由端）として扱っている。

定ピッチスパン法の応力は自由端で発生する応力を含んだスパン間の最大応力であるため、多質点系はりモデルの固定端に対して大きなモーメントが算出される傾向のモデルとなっている。

第 2.1 図で多質点系はりモデル及び定ピッチスパンモデルの端部に対する設定方法を示す。



第 2.1 図 多質点系はりモデルと定ピッチスパンモデルの比較

3. 応力の比較

定ピッチスパン法にて設計した実施工の配管に対し、耐震性を確保した設計となっていることの確認として、定ピッチスパン法の応力、多質点系はりモデルの応力の比較を行う。

(1) 確認方法

a. 直管部に対する確認

直管部の確認については、定ピッチスパン法にて算出した①直管部標準支持間隔の応力（設計値）と実配管形状を模擬した②多質点系はりモデルの応力（実配管）との比較を行う。

b. 直管部以外の形状に対する確認（7形状）

直管部以外の形状の確認に当たっては直管部と異なり、設工認上応力は算出しておらず、施工上の対応として支持間隔グラフに収まっていることを確認している。

応力の算出方法としては、支持間隔グラフより低減係数を求め、直管部相当の支持間隔（以下、「等価直管長さ」という。）を算出し、定ピッチスパン法にて応力を算出する。

よって、確認方法としては、等価直管長さを用いて定ピッチスパン法にて算出した①'直管部以外の形状に対する応力（実配管）と②多質点系はりモデルの応力（実配管）との比較を行う。

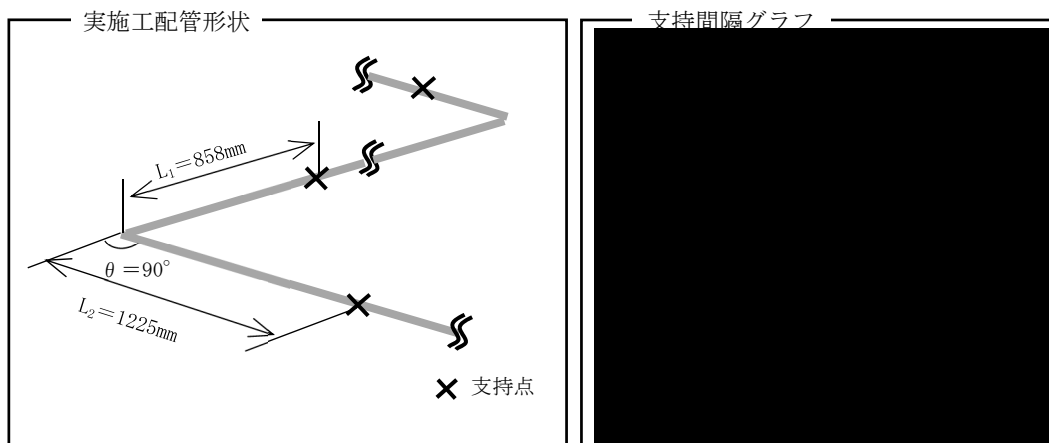
なお、集中質量部の支持間隔グラフについては弁等の重量物を模擬している他、配管軸方向の配管重量を集中荷重と見なして設計を行っているため、軸方向が拘束されていない（軸方向に長い）曲がり部についても①'の応力と②の応力との比較を行う。

一例として、曲がり部と配管軸方向に対する等価直管長さの算出方法を以下に示す。

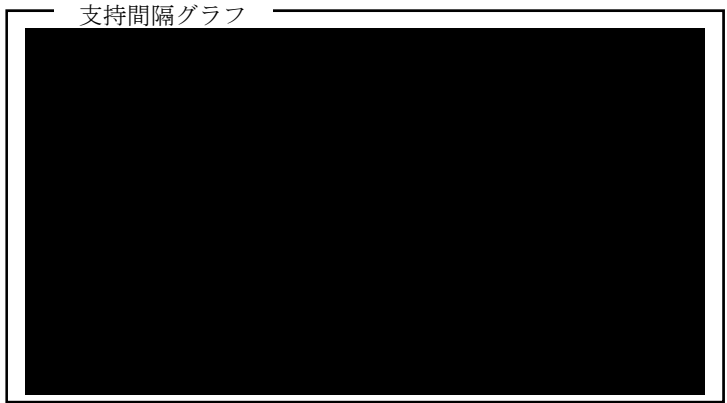
<手順1 曲がり部 配管形状の確認>

支持間隔グラフにおける配管形状（ L_1 、 L_2 、 L_E 、 θ ）を実施工配管にて確認する。

$$L_1=858\text{mm} \quad L_2=1225\text{mm} \quad L_E=L_1+L_2=2083\text{mm} \quad \theta=90^\circ$$



<手順2 低減係数 α の算出>



<手順3 等価直管長さの算出>

手順2にて求めた低減係数 α を用いて等価直管長さ L' を算出する。

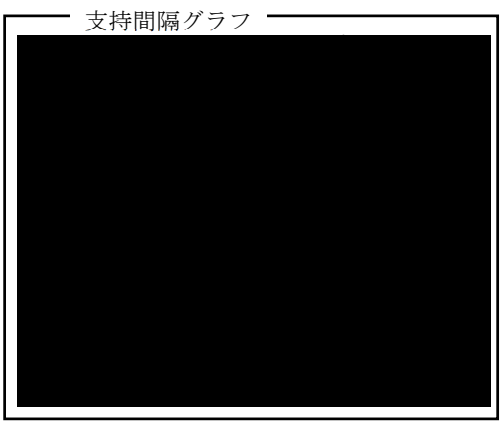
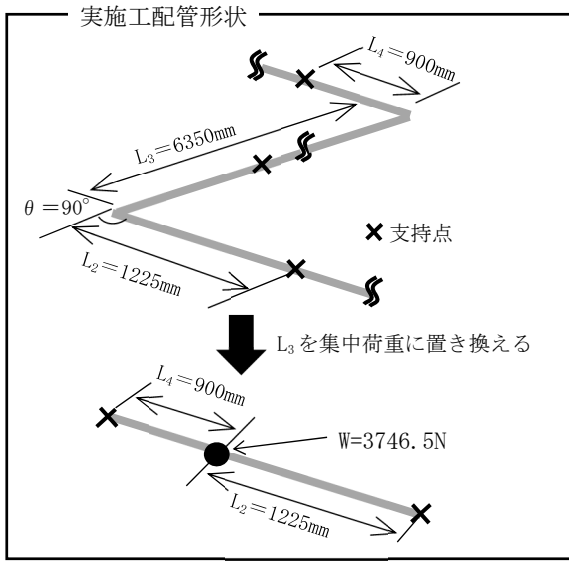
$$L' = L_E / \alpha = 2083 / \blacksquare \approx \blacksquare$$

<手順4 配管軸方向 配管形状の確認>

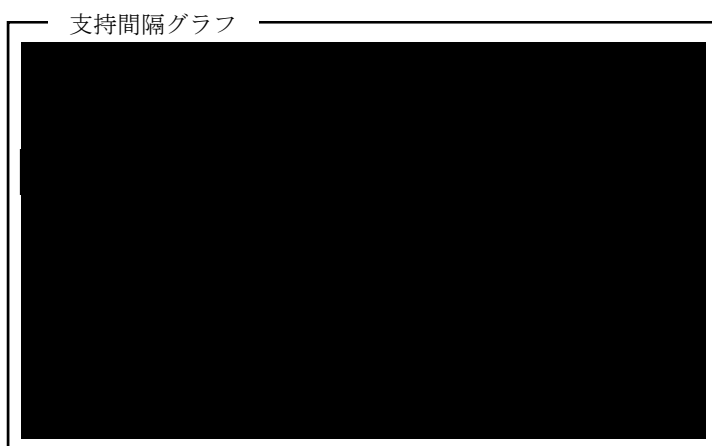
支持間隔グラフにおける配管形状 (L_w , L_0 , w , W) を実施工配管にて確認する。

$$L_2 = 1225\text{mm} \quad L_3 = 6350\text{mm} \quad L_4 = 900\text{mm} \quad L_w = L_2 + L_4 = 2125\text{mm} \quad L_0 = 7800\text{mm}$$

$$w = 589.99\text{N/m} \quad W = L_3 \times w = 6350 / 1000 \times 589.99 \approx 3746.5\text{N}$$



<手順5 配管軸方向 低減係数 α の算出>



<手順6 配管軸方向 等価直管長さの算出>

手順5にて求めた低減係数 α を用いて等価直管長さ L' を算出する。

$$L' = L_W / \alpha = 2125 / \blacksquare \approx \blacksquare$$

<設工認上の標準支持間隔との比較>

手順3, 手順6で算出した等価直管長さ (\blacksquare mm, \blacksquare mm) については, 設工認上で示している標準支持間隔 (7800mm) 以内に施工されており, すべての配管系は標準支持間隔以内となるよう設計を行っている。また, 応力については谷埋め及びピーク保持の床応答スペクトルを用いて算出するため, 標準支持間隔よりも等価直管長さによる応力が小さい発生応力になる傾向である。

(2) 評価条件

対象配管の選定としては, 直管部と直管部以外の形状に対して耐震性が確保されていることを確認するため, 直管部及び当社が適用している直管部以外の7形状の確認が可能な配管を選定する。

確認に用いる地震波については, 定ピッチスパン法と同一条件 (同階層, 基準地震動 S_s) の地震波を用いる。

(3) 解析モデル

本確認にて用いる多質点系はりモデルについては、端部にアンカー相当として扱う水平及び鉛直方向の3方向をそれぞれ2回ずつ拘束するサポート群（以下、「みなしアンカー」という。）を設定している。

多質点系はりモデルの端部については原則アンカーとなっており、アンカーの目的としては並進3方向と回転3方向の6方向を拘束し、評価対象配管を独立の振動系とするために解析モデル範囲を区分することを目的としている。

みなしアンカーは水平及び鉛直方向の3方向をそれぞれ2回拘束することで6方向拘束を模擬しており、1回目の拘束の方向としては並進方向、2回目の拘束の方向は回転方向を拘束しているため、その範囲まではアンカーと同等の効果が得られる。

以上を踏まえ、端部をアンカーとした場合とみなしアンカーとした場合の固有周期としては、端部をアンカーとした場合の1次固有周期は0.052 s、みなしアンカーの1次固有周期は0.053 sとなっており、同等の効果であることを確認した。

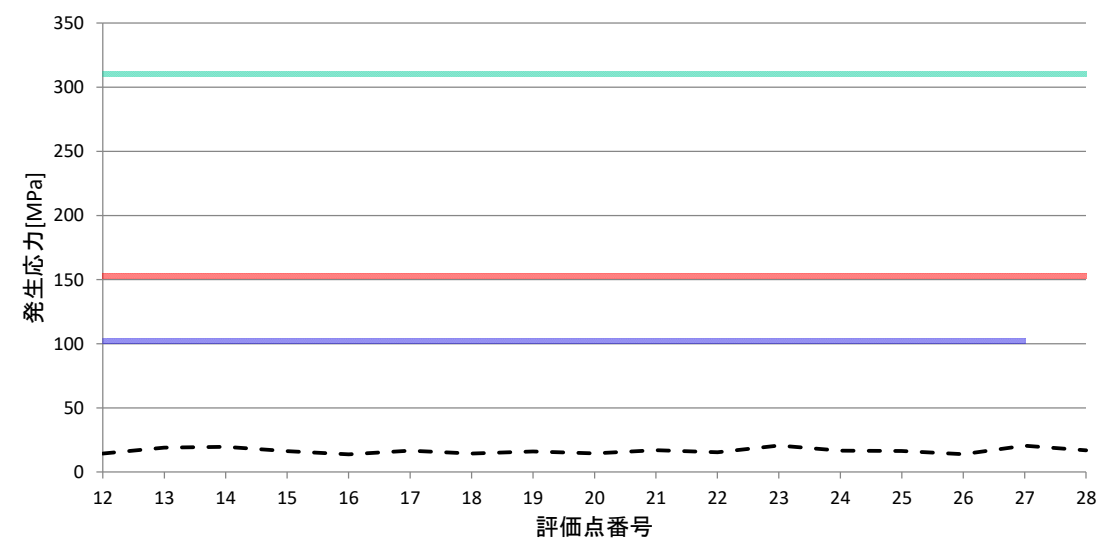
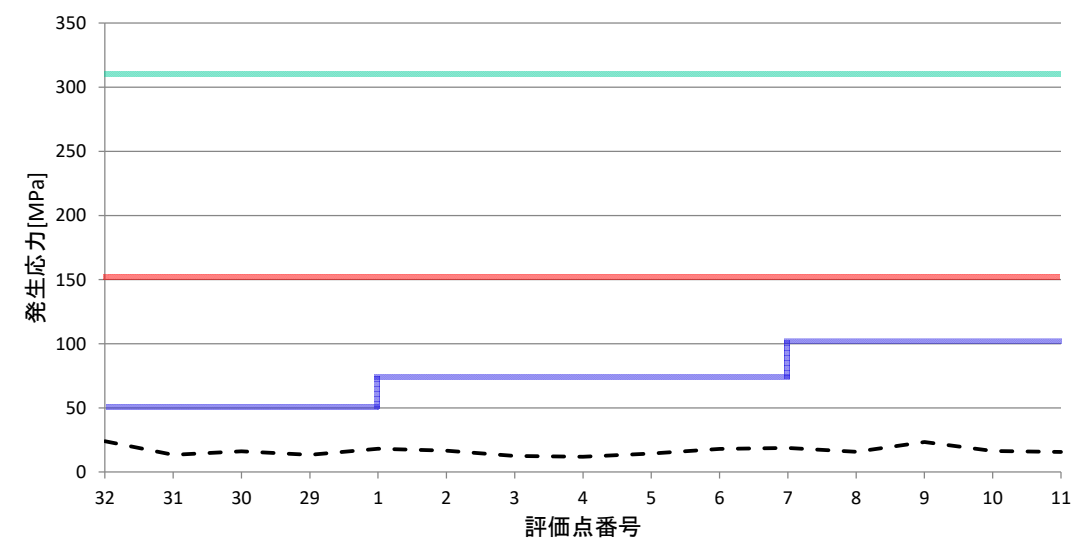
固有周期 (s)	端部：アンカー	端部：みなしアンカー
	0.052	0.053

(4) 確認結果

定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる評価との比較を行った結果、定ピッチスパン法の応力が多質点系はりモデルより大きな応力が算出されることを確認した。

定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる比較結果（直管部，曲がり部（軸方向含む），分岐+曲がり部，集中質量部，立体Z形部）

確認方法	形状	評価点番号	定ピッチスパン法にて算出した応力		②多質点系はりモデルの応力（実配管）	
			①直管部標準支持間隔の応力（設計値）	①'直管部以外の形状に対する応力（実配管）		
a.	直管部	27	152	-	21	
		28			17	
b.	曲がり部	1	152	78	19	
		2			17	
		3			13	
		4			12	
		5			15	
		6			19	
		7			19	
	分岐+曲がり部	8			16	
		9			24	
		10			17	
		11			16	
		12			15	
		13			19	
		14			20	
		15			17	
		16			14	
		17			17	
		集中質量部			18	15
					19	16
					20	15
					21	18
					22	16
	立体Z形部	22			102	21
		23				17
		24				17
		25				14
		26				21
		27				24
	曲がり部（軸方向確認）	31			50	14
		30				17
		29				14
		1				19

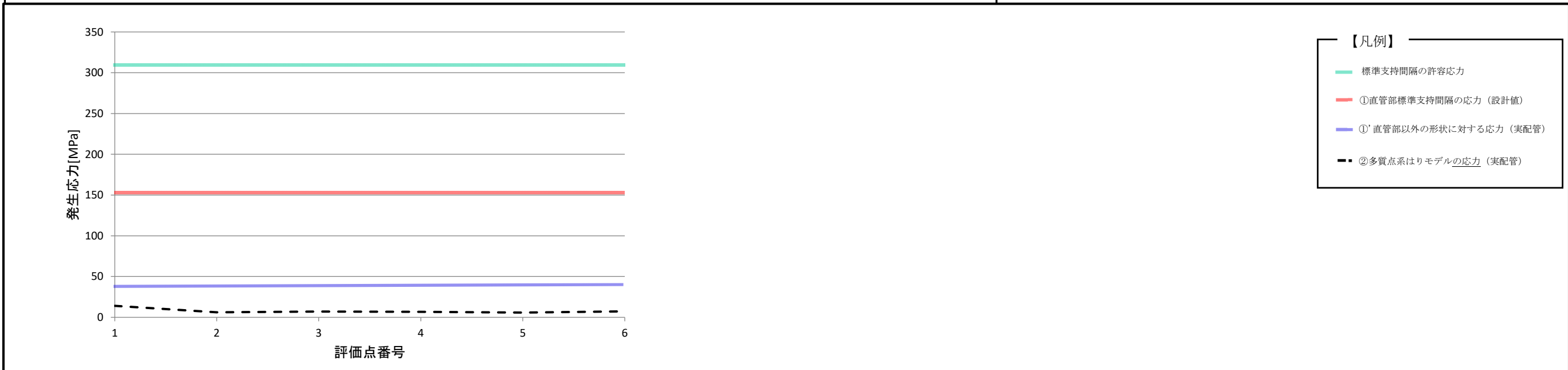


- 【凡例】
- 標準支持間隔の許容応力
 - ①直管部標準支持間隔の応力（設計値）
 - ①'直管部以外の形状に対する応力（実配管）
 - - ②多質点系はりモデルの応力（実配管）

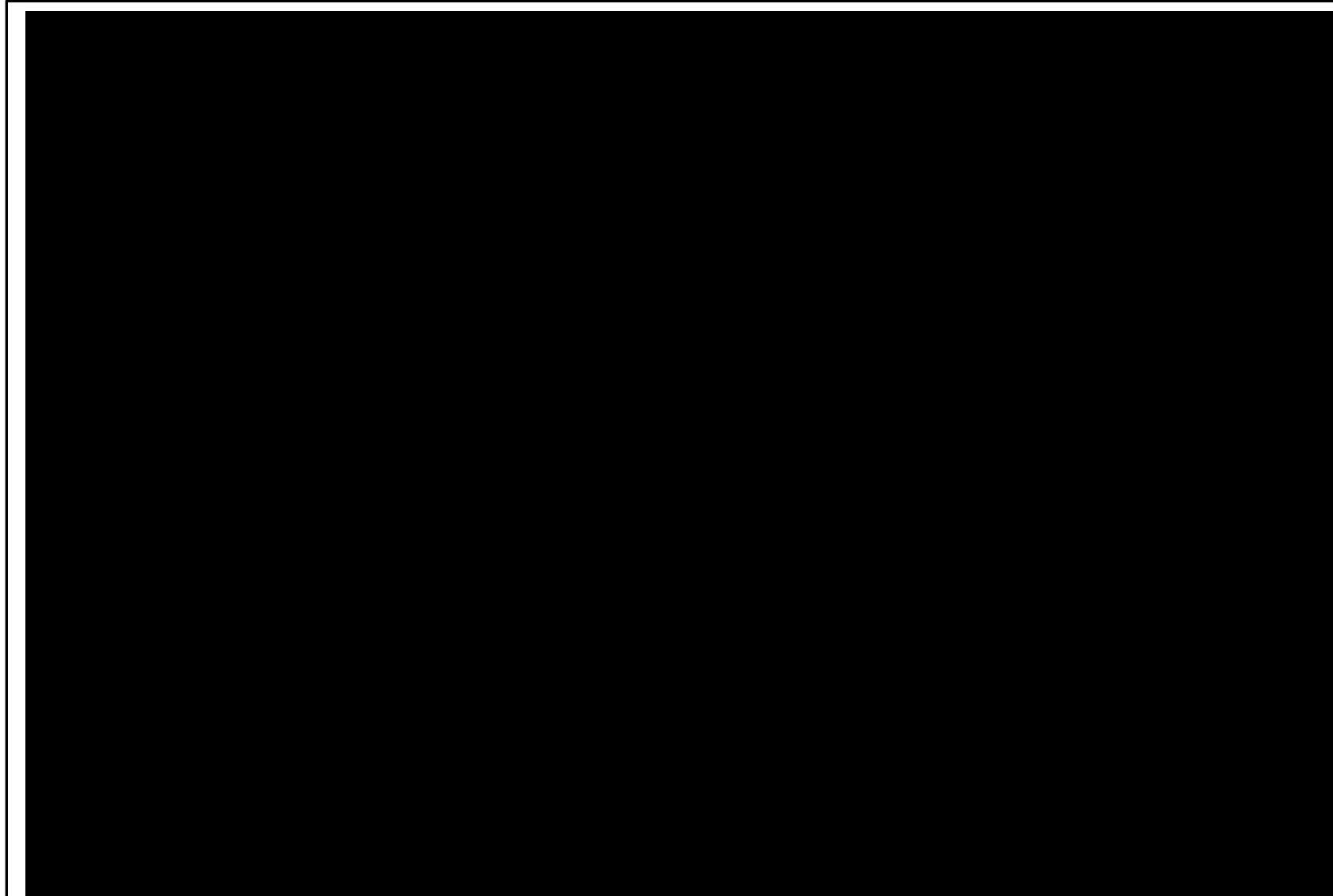
定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる比較結果 (平面Z形部)



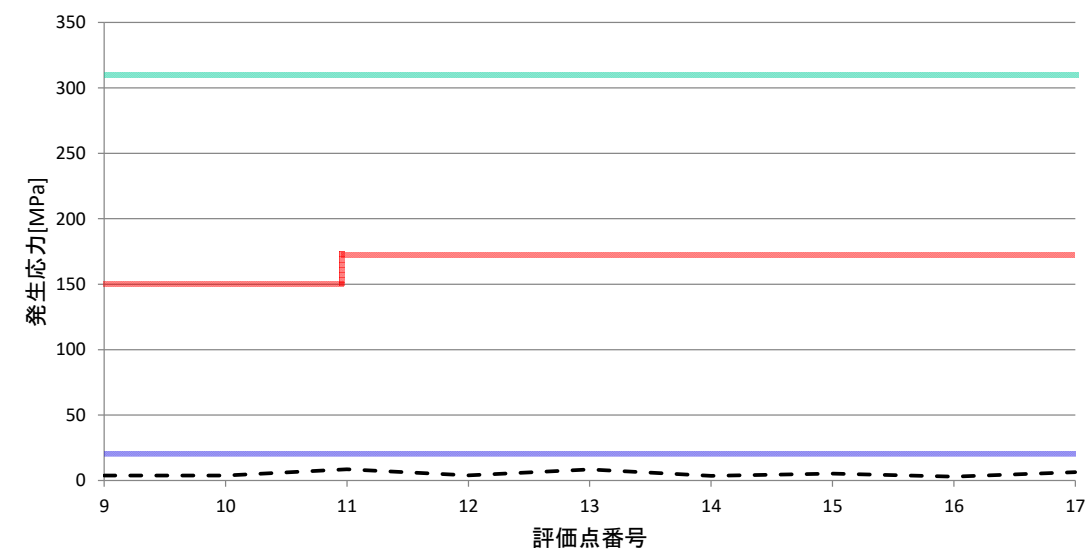
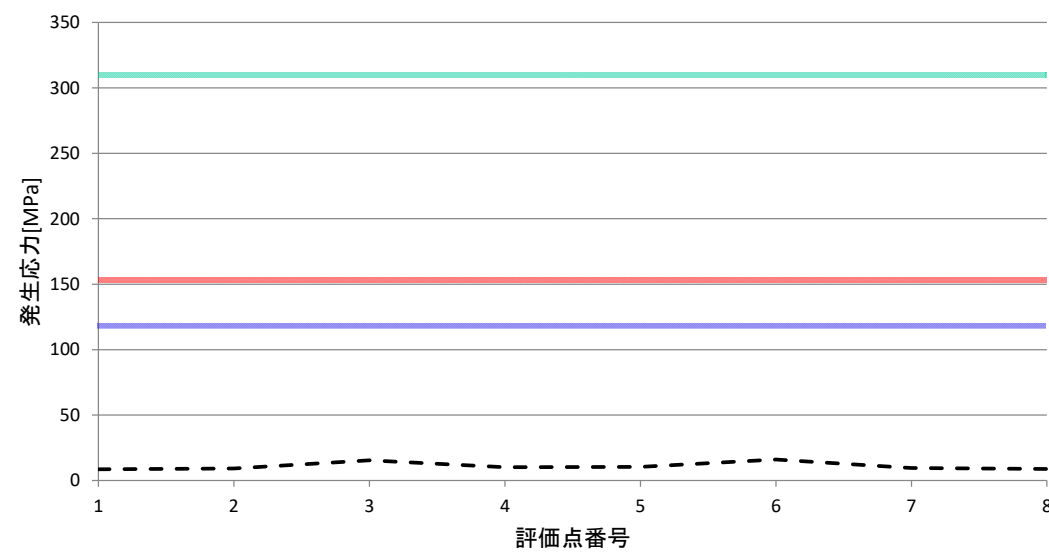
確認方法	形状	評価点番号	[MPa]		
			定ピッチスパン法にて算出した応力		② 多質点系はりモデルの応力 (実配管)
			① 直管部標準支持間隔の応力 (設計値)	①' 直管部以外の形状に対する応力 (実配管)	
b .	平面Z形部	1	153	43	15
		2			7
		3			8
		4			7
		5			6
		6			8



定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる比較結果（門形部，分岐部）



確認方法	形状	評価点番号	定ピッチスパン法にて算出した応力		②多質点系はりモデルの応力（実配管）
			①直管部標準支持間隔の応力（設計値）	①'直管部以外の形状に対する応力（実配管）	
b.	門形部	1	153	120	9
		2			10
		3			16
		4			11
		5			11
		6			16
		7			10
		8			9
	分岐部	9	150	23	4
		10			4
		11			9
		12	172		4
		13			9
		14			4
		15			6
		16			3
		17			7



- 【凡例】
- 標準支持間隔の許容応力
 - ①直管部標準支持間隔の応力（設計値）
 - ①'直管部以外の形状に対する応力（実配管）
 - - ②多質点系はりモデルの応力（実配管）

添付－ 2

電路類について

目次

1. 概要	1
2. 定ピッチスパン法について.....	1
2.1 電路類の設計について	1
2.2 再処理事業所の電路類の設計について	2
2.2.1 当社の適用範囲	2
2.2.2 定ピッチスパン法の設計内容.....	4
2.2.3 建屋間相対変位の考慮について	4
2.2.4 固有振動数に対する考慮事項	5

1. 概要

電線管及びケーブルトレイ（以下、「電路類」という。）の耐震評価については、原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（以下、「JEAG4601」という。）に基づき、設工認添付書類の「IV-1-1-1-2 電気計測制御装置等の耐震支持方針」に評価方針を記載している。

ここでは、設工認添付書類の「IV-1-1-1-2 電気計測制御装置等の耐震支持方針」に記載の標準支持間隔法（以下、「定ピッチスパン法」という。）に対する評価内容を示す。

2. 定ピッチスパン法について

2.1 電路類の設計について

再処理事業所の電路類については、様々な建屋、階層にケーブルを布設する必要があり実際に施工される電路は建屋と水平方向、鉛直方向に布設する電路、建屋間を跨る電路等3次元的な広がりを持っているが、電路自体の形状構成としては、直管部分と曲がり及び分岐等の形状にて構成されている。

これら電路類の設計手法としては、JEAG4601の中で簡易設計法である定ピッチスパン法と多質点解析による評価の2種類の手法が設定されており、いずれの手法についても各種電路類の形状に対する設計は可能であるが、再処理事業所においては個々の電路類の仕様、特性に応じた評価手法の使い分けを行っているため、それぞれの電路類の設計手法を示した上で再処理事業所の電路設計の考え方を示す。

2種類の電路類の設計手法のうち、多質点系はりモデルによる評価の具体的な設計方法としては、個別の実機電路類の形状をモデル化した設計方法となっている。

一方、簡易設計法である定ピッチスパン法による設計としては、直管部分と規則的に布設されたサポート、電路類の曲がり部分、分岐部分等の形状で構成された電路類に対し、評価としては電路類の直管部分のモデル化を行い、各方向の地震力^{*}を考慮した直管部の支持間隔（以下、「標準支持間隔」という。）長さを算出している。

^{*}入力地震力として、水平方向地震力及び鉛直方向地震力を入力し支持間隔を設定しているため、水平、鉛直電路類双方に対する設計方針となっている。

また、直管部以外の形状である曲がり部、分岐部等については直管部と同等以上の耐震性を有する設計として、標準支持間隔の応力以内及び振動数以上となるよう、支持間隔との比率（以下、「低減係数」という。）を示したグラフ（以下、「支持間隔グラフ」という。）を用い標準支持間隔以内に設計することで、実電路の固有振動数は標準支持間隔より剛側となり応力が小さくなる傾向となるため、実電路は標準支持間隔と同等以上の耐震性を確保出来る設計方法となっている。

なお、定ピッチスパン法は簡易設計法であるため、算出する応力は一次応力となっており、加えて建屋間相対変位の考慮が必要となる。

次項では再処理事業所における電路類のそれぞれの設計手法の適用範囲、建屋間相対変位を含む具体的な定ピッチスパン法の設計内容を示す。

2.2 再処理事業所の電路類の設計について

2.2.1 当社の適用範囲

JEAG4601の設計手法に基づき電路類は、構造的に健全ならば機能が維持されるので構造検討のみを行うこととしている。また、耐震設計では、基本的には、配管・ダクト等の耐震設計と同様、支持構造物によって支持された系が与えられた地震入力条件で過大な応答を生じることがなくケーブル支持の機能が確保されるよう設計を行うこととしている。さらに、電路類については、地震時の慣性力に対して機能が保たれるようにサポートスパン長を確保することとしている。

以上のことから、当社の電路類の設計における実施内容としては、再処理事業所における配管に準じた設計手法で、定ピッチスパン法又は多質点系はりモデルによる解析を適用して構造的健全性を満足できる設計を行っている。

(4) 電路類 (図6.7-4参照)

電路類は、構造的に健全ならば機能が維持されるので構造的検討のみを行う。この際に、耐震クラス及び固有振動数に応じて動的解析による方法、あるいは剛構造となる場合には静的解析による方法を用いて、構造的健全性を確認する。また、各建屋間、建屋と建屋外地盤とにまたがって設置されるものについては、それらの地震時の相対変位を吸収できる構造とする。

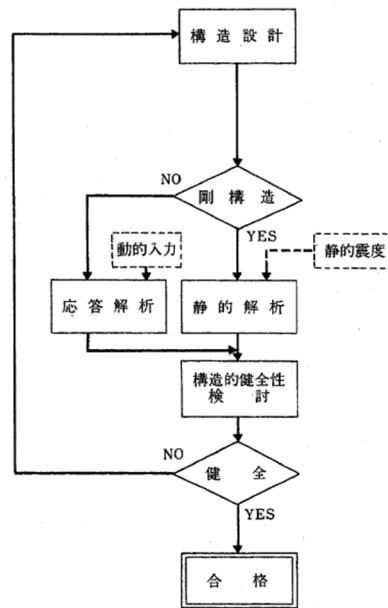


図6.7-4 電路類の耐震設計フローチャート

(d) ケーブルトレイ類

ケーブルトレイの耐震設計では、基本的には配管・ダクト等の耐震設計と同様、支持構造物によって支持された系が与えられた地震入力条件で過大な応答を生じることなくケーブル支持の(強度)機能が確保されるよう設計を行う。

- (2) ケーブルトレイ及び電線管については、地震時の慣性力に対して機能が保たれるようにサポートスパン長を確保すること。

2.2.2 定ピッチスパン法の設計内容

当社は、再処理事業所における配管系の設計に準じて、実電路の施工方法に自由度を持たせることを目的として「応力基準定ピッチスパン法」を採用している。

<直管部に対する評価内容>

定ピッチスパン法では、再処理事業所における配管系の設計に準じて、はりの運動方程式に境界条件を与えて解析的に解くことにより得られた理論式に基づき、電路類の固有振動数が20Hz未満のスパンについては、各振動モードの固有振動数、固有ベクトル、刺激係数を算出した上で床応答曲線から選択した応答加速度を適用することによって応答スペクトル解析を行っている。

<直管部以外の形状に対する評価内容>

直管部以外の形状については、算出した支持間隔以内で支持するよう設計するため、耐震性を確保出来る設計としている。

具体的な直管部以外の形状の設計については、再処理事業所における配管系の設計に準じて、直管部と同等以上の耐震性を有するよう低減係数の支持間隔グラフを用いて許容領域線図の内側になっていることの確認を行い、直管部標準支持間隔以下となるような設計を行っている。

2.2.3 建屋間相対変位の考慮について

電路類については地震時に相対変位を吸収できる構造とすると記載がある。

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 抜粋

静的解析による方法を用いて、構造的健全性を確認する。また、各建屋間、建屋と建屋外地盤とにまたがって設置されるものについては、それらの地震時の相対変位を吸収できる構造とする。

電路類が異なる建屋間にわたって布設される部分については、適切な離隔距離をもつか、可とう電線管を設けることで地震時の相対変位を吸収できる構造とする。

なお、熱膨張を考慮しなければならないものについては、その荷重に対して構造的健全性を確認する。

2.2.4 固有振動数に対する考慮事項

定ピッチスパン法に用いる床応答スペクトルは谷埋め及びピーク保持を行っており，定ピッチスパン法における電路類の固有振動数は，再処理事業所における配管系の設計に準じて，原則建屋ごとに電路設計に用いる床応答スペクトルの水平方向及び鉛直方向のピーク振動数より短周期側となるように設計している。

別紙

耐震機電16 【配管系の評価手法(定ピッチスパン法)について】

別紙				備考
資料No.	名称	提出日	Rev	
別紙-1	標準支持間隔の振動数とピーク振動数の比較結果	8/24	0	
別紙-2	建屋間相対変位に対する確認結果			後次回で示す範囲
別紙-3				
別紙-4				
別紙-5				
別紙-6				
別紙-7				
別紙-8				
別紙-9				
別紙-10				
別紙-11				
別紙-12				
別紙-13				
別紙-14				
別紙-15				

別紙-1

標準支持間隔の振動数とピーク振動数の比較結果

目次

1. 概要	1
2. 比較結果	1

1. 概要

応力基準定ピッチスパン法における配管系の固有振動数は、原則建屋ごとに配管設計に用いる床応答スペクトルの水平方向及び鉛直方向の最も大きい加速度ピークとなる振動数より短周期側となるよう設計しているため、標準支持間隔の振動数と建屋ごとの配管設計に用いる床応答スペクトルのピーク振動数との比較結果を示す。

2. 比較結果

第1回申請対象である配管（安全冷却水 B 冷却塔～前処理建屋）については、XXXXXXXXXX床応答スペクトルのピークを回避出来ている。

なお、後次回申請時に申請する剛ではない標準支持間隔については、標準支持間隔の振動数と建屋ごとの配管設計に用いる床応答スペクトルのピーク振動数との比較を行い、床応答スペクトルのピークを回避出来ていることを示す。