

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 16 R <u>2</u>
提出年月日	令和 3 年 <u>7</u> 月 <u>20</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

目次

- 1. 概要 1
- 2. 実施内容 1

添付－1 応力基準による標準支持間隔法の評価内容

添付－2 標準支持間隔法に対する評価の保守性

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

添付－4 建屋間相対変位の考慮方法

別紙－1 配管標準支持間隔の振動数とピーク振動数の比較結果

: 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類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「配管類の耐震支持方針」に記載の応力基準による標準支持間隔法（以下、「定ピッチスパン法」という。）の評価内容、定ピッチスパン法に対する評価の保守性、既設工認時に設定した標準支持間隔に対する評価手順及び配管に対する建屋間相対変位の考慮方法に対する各種評価内容を示す。

2. 実施内容

今回設工認における定ピッチスパン法の評価の妥当性に対する補足説明内容について以下に示す。

（1）応力基準による標準支持間隔法の評価内容（添付－1）

定ピッチスパン法については、JEAG4601にて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種類定義されており、当社は応力基準定ピッチスパン法を採用している。

応力基準定ピッチスパン法の適用に当たり、配管系の固有振動数に対する考慮事項及び応力算出方法を示す。

（2）標準支持間隔法に対する評価の保守性（添付－2）

定ピッチスパン法については、配管系の仕様（口径、板厚等）ごとに支持間隔を定めている設計方針であり、保守的に応力が算出される評価手法であるため、多質点解析等の詳細評価結果と定ピッチスパン法の評価結果の比較を行った上で評価の保守性を示す。

（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（添付－3）

後次回申請の配管については、狹隘部の補強が難しい等の理由により既設工認時に設定した標準支持間隔に対する評価を行っている。評価内容としては、既設工認時に設定した評価条件を詳細化した評価等を行っているため、今回設工認における定ピッチスパン法に対する評価フロー、評価手順を示す。

なお、第1回申請設備は補強設備であり、既設工認時に設定した標準支持間

隔を用いた評価ではなく、新しく標準支持間隔を算出した上で評価を行っているため、既設工認時に設定した標準支持間隔に対する評価手順は後次回申請時に示す。

(4) 建屋間相対変位の考慮方法（添付－4）

建屋間相対変位の評価内容としては、後次回申請の配管にて異なる建屋を渡って敷設される部分について相対変位を考慮する必要があるため、評価方法及び評価結果を示す。

なお、第1回申請設備は冷却塔に敷設している配管となっており、冷却塔から建屋等に渡り敷設される配管は第1回申請範囲ではないため、建屋間相対変位に対する評価方法等は対象配管を申請する後次回申請時に示す。

応力基準による標準支持間隔法の評価内容

1. 配管の標準支持間隔法の評価内容

再処理事業所の配管設計手法の採用に対する考え方を次項で示した上で、採用している評価内容を説明する。

1.1 配管の設計手法

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（以下、「JEAG4601」という。）に記載の配管の標準的設計手法は多質点系はりモデルを用いた動的解析法と簡易設計法が定義されている。

簡易設計法は標準支持間隔法及び修正震度法の2種類があり、そのうち標準支持間隔法は「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」が定義されている。

原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 抜粋			
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			○

当社配管の設計手法について、設工認添付書類「IV-1-1-11-1 配管の耐震支持方針」に示す通り耐震重要度分類Sクラスは、口径100A以上、151℃以上を基準とし、該当する配管は多質点系はりモデルを用いた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す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う。

その基準としては口径100A以上かつ温度151℃以上に設定している。なお、本設定については定ピッチスパン法による設計を主で行っているPWR電力と同様の考え方で設計を行っている。

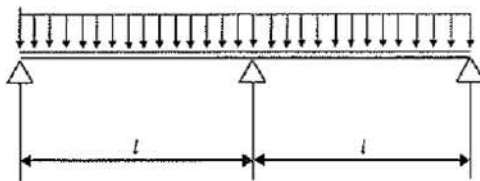
1.2 振動数基準定ピッチスパン法

簡易設計法のうち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 抜粋
(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。

1.3 応力基準定ピッチスパン法

応力基準定ピッチスパン法とは、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 抜粋
(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 style="text-align: right;">（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直管部標準支持間隔を適用することで耐震性を確保できる設計である。

1.4 当社にて採用している定ピッチスパン法

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、配管に対し耐震性を有する設計を行っている。

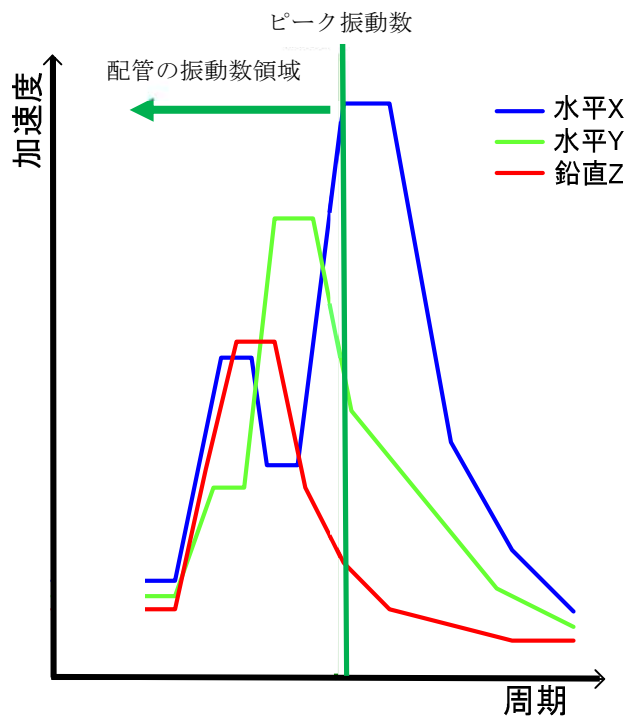
次項より応力基準定ピッチスパン法における配管系の固有振動数の考慮事項及び応力算出方法を示す。

2. 配管系の固有振動数に対する考慮事項

応力基準定ピッチスパン法（以下、「定ピッチスパン法」という。）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 抜粋
◎ 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。

そのため、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。



3. 定ピッチスパン法の固有振動数及び応力算出方法

配管は水平方向と鉛直方向の3方向に広がりを持って敷設するよう設計するものであり、定ピッチスパン法にて算出した支持間隔（以下、「スパン」という。）は従来から水平配管、鉛直配管を設計できるよう、各方向の地震力^{*}を考慮した評価を行っている。

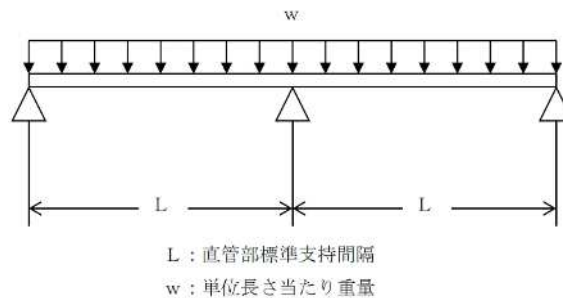
※入力地震力として、水平方向地震力及び鉛直方向地震力を入力し支持間隔を設定しているため、水平配管、鉛直配管双方に対する設計方針となっている。

定ピッチスパン法では梁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3.-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。



第3.-1図 等分布荷重 2 スパン 3 点支持モデル

第3.-1図に示す梁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 : 分布荷重
- 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。

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

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 スパン目の梁の固有関数

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

同様に2 スパン目の梁の固有関数

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

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

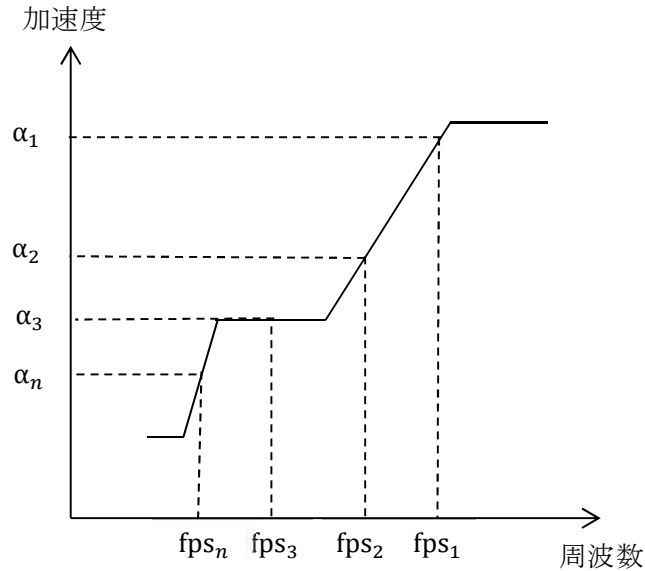
一方，配管－サポート連成系の振動数 f_{ps} の算出は，

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

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

応答加速度 α_n は作成した床応答曲線から各モードの配管系の振動数 f_{ps} で決定する。床応答曲線から各モードの応答加速度を求める方法を第3.-2図に示す。



第 3.-2 図 床応答曲線

(4) 応答算出 (応答合成)

モーメントは以下の材料力学の梁理論式に基づき、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 スパン梁の中央支持点に生じることから $x=L$ とおいて、

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

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。

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

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。

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

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。

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

(5) 応力評価

JEAG4601の規程に従い応力評価を行う。

4. まとめ



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本補足説明資料にて示す。

標準支持間隔法に対する評価の保守性

1. 標準支持間隔法の概要

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、各床区分において配管系に作用する地震力並びに配管仕様（口径、板厚等）に基づき直管部に生じる一次応力が許容値以下となる最大の支持間隔（以下、「標準支持間隔」という。）を算出し、算出した標準支持間隔以内に設計する設計法である。

定ピッチスパン法は簡易設計法であるため、多質点系はりモデルによる評価より保守性を有した評価手法となっている。

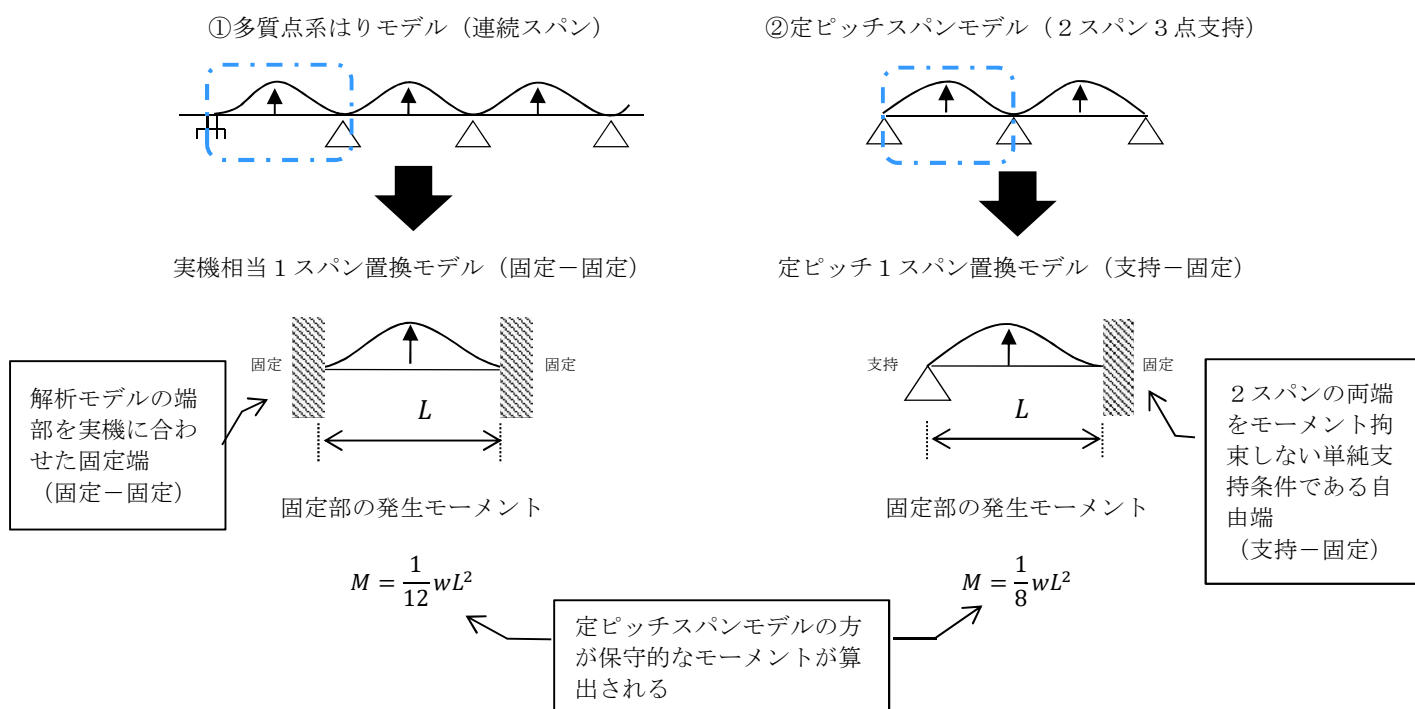
ここでは、定ピッチスパン法のモデル及び設計上の保守性を示し、保守性の確認としては多質点系はりモデルとの評価結果の比較を行う。

2. 定ピッチスパン法の保守性

2.1 解析モデルの保守性

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保守的な応力が算出されるモデルとなっている。第2.1図に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

2.2 設計上の保守性

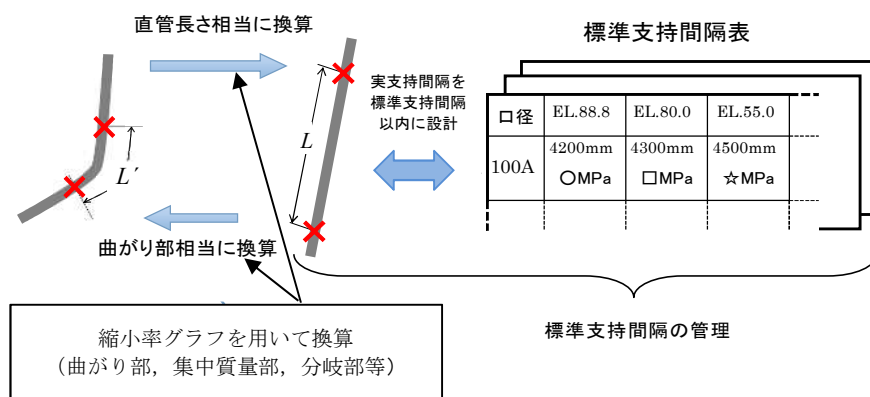
定ピッチスパン法は配管直管部の標準支持間隔を算出し，標準支持間隔以内に設計することで直管部は保守性を確保している。直管部以外の形状である曲がり部，分岐部等に対しても直管部標準支持間隔を用いて設計を行っているため，曲がり部等に対する設計上の配慮事項を示す。

a. 設計方法

各形状については，算出した支持間隔以内で支持するよう設計するため，耐震性を確保できる設計としている。

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及び振動数以内になるような支持間隔比（以下「低減係数」という。）を縮小率グラフから求め，各構成部の支持間隔を算出する。

直管部以外の構成部のうち曲がり部の設計イメージを第 2.2-1 図に示す。



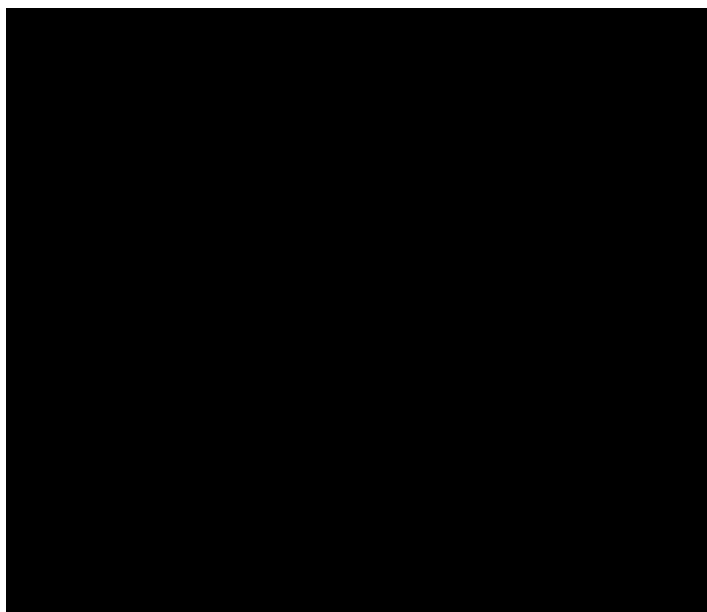
第 2.2-1 図 配管の曲がり部の設計イメージ

b. 縮小率グラフの作成方法

直管部以外の形状の設計は、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いる。

これに対し曲がり部等は、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おり、例えば、第 2.2-2 図の曲がり部の縮小率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プロットし、許容領域の線図としている。



第 2.2-2 図曲がり部の低減係数

配管設計において曲がり部等の設計を行う際は、直管部標準支持間隔に対して設定した縮小率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同様に縮小率グラフを作成しており、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。

以上より、設工認上に示している直管部標準支持間隔については、実配管の直管部及び直管部以外の形状が収まっているため、保守的な設計となっている。

次項では定ピッチスパン法にて設計した配管に対し、定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる方法にて算出した応力の比較を行う。

3. 定ピッチスパン法と多質点系はりモデルの応力比較結果

定ピッチスパン法で設計した当社の配管系が十分に耐震性を有していることを示す。

(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と②多質点系はりモデルの応力との比較を行う。

b. 曲がり部等に対する確認

曲がり部等の確認に当たっては直管部と異なり、設工認上曲がり部の応力は算出しておらず、施工上の対応として実配管に対し縮小率グラフに収まっていることを確認している。よって、曲がり部の応力については実施工を行った配管に対して確認を行う。

確認方法としては、①' 曲がり部等に対する応力と②多質点系はりモデルとの比較を行う。

(2) 評価条件

対象配管の選定としては、再処理施設の配管のうち弁の集中質量部、分岐部、曲がり部等の部位を有しているモデルを選定する。

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 Ss）の地震波を用いる。

(3) 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を行った結果、定ピッチスパン法の応力は 152MPa、多質点系はりモデルの応力は 24MPa となっており、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（詳細は別添-1 参照）。

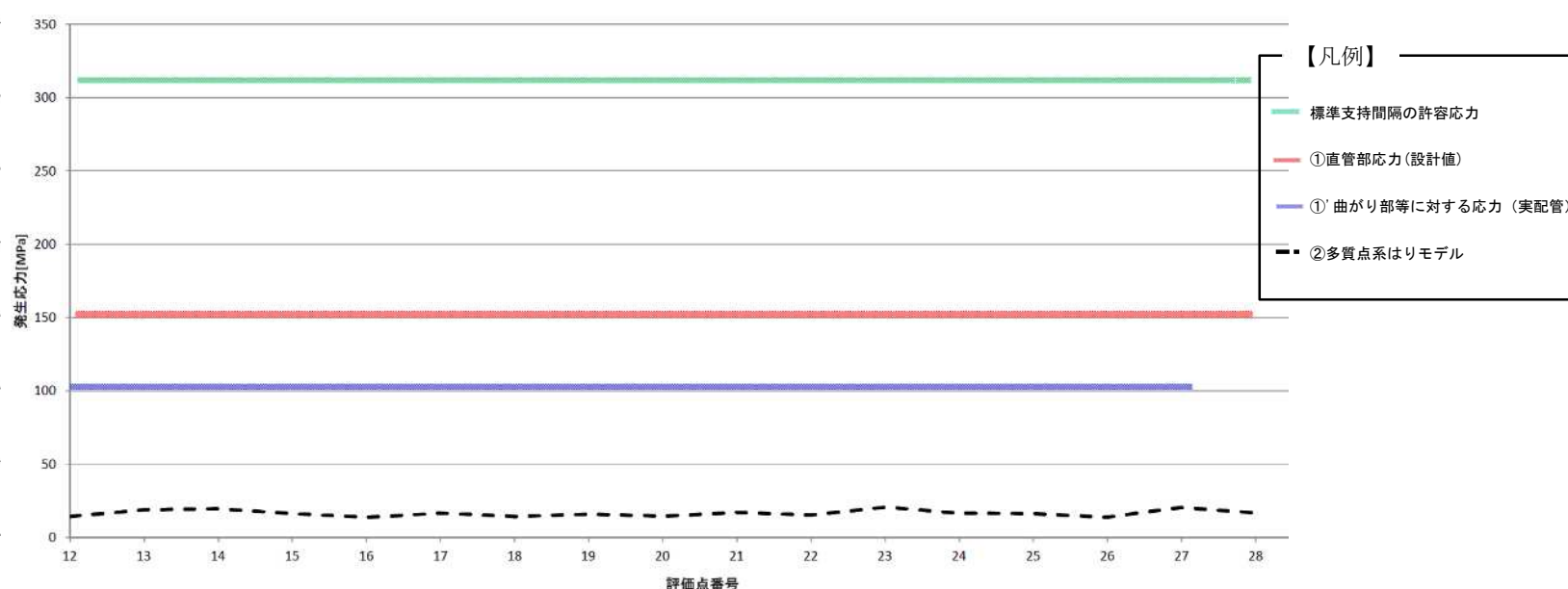
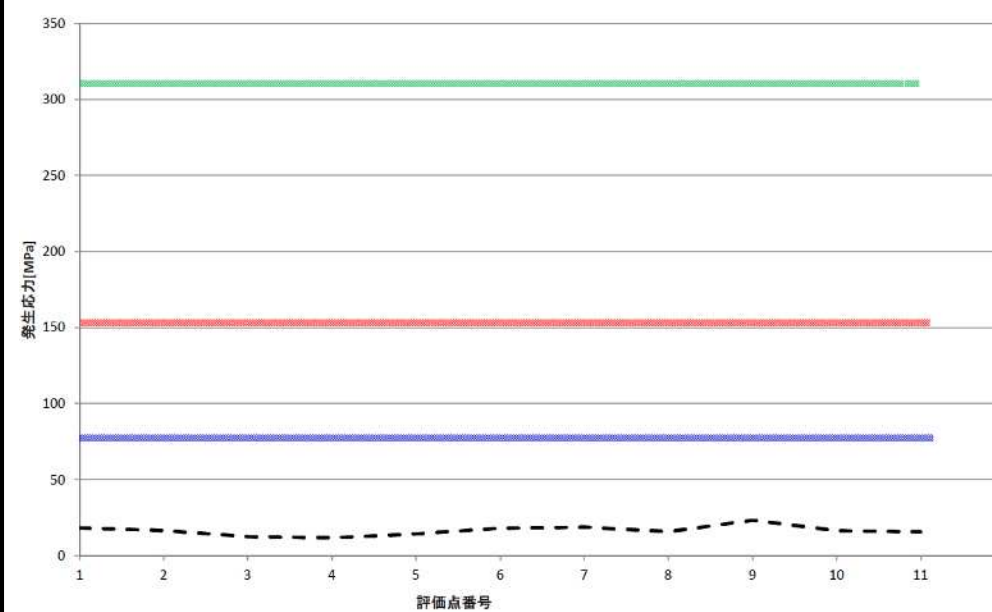
4. まとめ

定ピッチスパン法はモデル及び設計上の保守性を有しており、また、定ピッチスパン法と多質点系はりモデルによる評価結果の比較を行い、定ピッチスパン法の評価結果が保守的であることを確認した。

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

確認方法	形状	評価点番号	定ピッチスパン法の応力		② 多質点系はりモデル 応力
			① 直管部 応力 (設計値)	①' 曲がり部等 に対する 応力 (実配管)	
b.	曲がり部	1	152	78	19
		2			17
		3			13
		4			12
		5			15
		6			19
		7			19
	分岐部	8			16
		9			24
		10			17
		11			16
		12			15
		13			19
		14			20
		15			17
		16			14
		17			17
		18			15
	集中質量部	19			16
		20			15
		21			18
		22			16
	曲がり部	23			21
		24			17
		25			17
		26			14
		27			21
	a.	直管部			27
		28		17	

□: 定ピッチスパン法の応力と多質点系はりモデルの応力の差が一番小さい評価点



【凡例】

- 標準支持間隔の許容応力
- ①直管部応力 (設計値)
- ①'曲がり部等に対する応力 (実配管)
- - ②多質点系はりモデル