

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK補-III-7 改3
提出年月日	平成30年3月29日

東海第二発電所 劣化状況評価
(耐震安全性評価)

補足説明資料

平成30年3月29日
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目次

1. はじめに	1
2. 耐震安全性評価の目的	1
3. 評価対象機器	1
4. 耐震安全性評価の評価手順	2
5. 耐震安全性評価の概要	6
6. 耐震安全性評価内容及び結果	9
7. 耐震安全性評価のまとめ	21
8. 高経年化への対応	21
9. 審査基準適合性	21
参考：基準地震動の特性について	23
別紙 1. 弁の動的機能維持評価について	27
別紙 2. 水平 2 方向を考慮した耐震評価について	36
別紙 3. 制御棒挿入性評価について	37
別紙 4. 工事計画認可申請の内容を踏まえ劣化状況評価の見直しがある場合の見直し 前後の相違点について	38
別紙 5. 建設後の耐震補強の実績について	39
別紙 6. 震災が評価に与える影響とその考え方について	47
別紙 7. 低サイクル疲労割れに対する耐震安全性評価について	59
別紙 8. 中性子照射脆化に対する耐震安全性評価について	69
別紙 9. 照射誘起型応力腐食割れに対する耐震安全性評価について	70
別紙 10. 主要 6 事象以外の経年劣化事象に対する耐震安全性評価	
別紙 10-1. シュラウドサポートの粒界型応力腐食割れに対する耐震安全性評価につい て	71
別紙 10-2. 流れ加速型腐食に対する耐震安全性評価について	77
別紙 10-3. 機器付基礎ボルトの腐食に対する耐震安全性評価について	92
別紙 10-4. 後打ちアンカの耐震安全性評価について	106
別紙 11 浸水防護施設の耐震安全性評価について	107
参考 1 V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書	
参考 2 V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書	

制御棒挿入性評価について

表 1 に示すとおり、制御棒の挿入性に影響を与える可能性のある経年劣化事象について影響評価を行った結果、制御棒の挿入性に影響する経年劣化事象はないものと評価する。

表 1 制御棒挿入性に影響を与える可能性のある経年劣化事象及び制御棒挿入性への影響評価

評価対象機器	経年劣化事象	制御棒挿入性への影響評価	制御棒挿入性に対する影響有無
制御棒	ローラ、ピンの摩耗	耐摩耗性の高いコバルト基合金、ニッケル基合金を使用されていること、且つ定期検査毎に制御棒駆動水圧系機能検査、制御棒駆動機構機能検査により動作不良が認められていないことから、制御棒の挿入性に与える影響はない。	無
	制御材被覆管、シース、タイロッド、ピン、上部ハンドルの靱性低下、照射誘起型応力腐食割れ	制御棒の動作性に問題が生じていないことを、定期検査毎に制御棒駆動水圧系機能検査、制御棒駆動機構機能検査により確認しているため、制御棒の挿入性に与える影響はない。	無
	制御材被覆管、シース、タイロッド、ソケット、ピン、上部ハンドルの粒界型応力腐食割れ		無

一方、工事計画認可申請書「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」において、以下 2 点が確認されている。

- ・ 基準地震動 S_s を用いて評価した燃料集合体の最大応答相対変位は 16.8 mm であること
- ・ 実機を模擬した試験により、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、90% ストロークスクラム時間が 3.5 秒以内であること

したがって、基準地震動 S_s を考慮しても制御棒の挿入性に影響を与えることはない。

前述の通り、制御棒の挿入性に影響する経年劣化事象はないものと評価しており、経年劣化を考慮した地震時の燃料集合体の変位を評価した結果は工事計画認可申請書で確認した 16.8 mm となり、機能確認済相対変位である約 40 mm 以下となる。

工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」を参考-1 に示す。また、工事計画認可申請書添付書類「V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書」を参考-2 に示す。

建設後の耐震補強の実績について

耐震設計審査指針の改正後の耐震バックチェックに関連して実施した耐震補強について表 1 に示す。

表 1 過去の耐震補強概要

種別	内容	評価への影響有無 ^{*1}
配管類	サポート追設・撤去, サポート取替 (容量変更), 架構補強, ラグ改造, 拘束方向変更 (16 系統, 約 350 箇所)	○
電路類	ケーブルトレイのサポート改造 (約 260 箇所)	×
	電線管のサポート改造 (約 70 箇所)	×
機器類	中央制御室換気空調系ダクトサポートの追設, 補強	×
	残留熱除去系熱交換器架台のサポート追設	○
建物・構築物, 屋外土木構造物	取水口護岸部 (南北) 兩岸の地盤の改良	×
	非常用海水系配管 (二重管) 下部の地盤の改良	×
	主排気筒鉄塔の一部撤去, 制震ダンパ, 弾塑性ダンパ取付け, 鉄塔補強	○
	原子炉建屋 6 F の屋根トラスの鉄骨補強, 原子炉建屋 6 F 天井走行クレーンのクレーンガータの振れ止め敷設	×
	非常用ガス処理系屋外配管のルート変更, 変更後配管用高架陸橋 (架構) 設置	×

*1: 耐震安全性評価書に記載される評価結果に影響を及ぼす工事を○, 評価結果に影響を及ぼさない工事を×とする。

今後予定されている耐震補強工事のうち, 耐震安全性評価に係る耐震補強について表 2 に示す。

表 2 今後の耐震補強工事概要

種別	内容
配管類	サポート追設・撤去, サポート取替 (型式・容量変更), ラグ改造, 拘束方向変更 (242 箇所)
機器類	残留熱除去系熱交換器架台のサポート追設
建物・構築物, 屋外土木構造物	主排気筒鉄塔の一部撤去, 制震ダンパ, 弾塑性ダンパ取付け, 鉄塔補強

表 1 で評価への影響有とした耐震補強工事, 並びに表 2 に示す今回の劣化状況評価における耐震安全性評価において現状の構造から補強のため変更を加えて評価を行った機器について, 補強概要を次項以降に示す。

(1) 配管等サポート類耐震補強

配管等サポート類耐震補強のうち、耐震安全性評価を実施する範囲においてサポート追設等を実施した箇所の内訳を表1に示す。

系統	30年目 PLM 評価以降で耐震補強によりサポート追設等を実施した箇所数	評価に伴い40年目 PLM 評価での耐震安全性評価によりサポート追設等を実施する箇所数
原子炉再循環系	11	23* ¹
残留熱除去系	14* ³	19* ^{1, *3}
原子炉系（蒸気部）	20	84* ¹ / 93* ²
原子炉系（純水部）	10	6* ¹ / 6* ²
給水系	4	2* ²
復水系	—	7* ²
給水加熱器ドレン系	—	2* ²

*1：配管の疲労割れを考慮した耐震安全性評価によるサポート追設等の実施箇所数を示す

*2：配管の腐食（流れ加速型腐食）を考慮した耐震安全性評価によるサポート追設等の実施箇所数を示す

*3：原子炉再循環系の解析モデルに含まれる範囲におけるサポート追設等の実施箇所数を示す

30年目 PLM 耐震評価以降に実施した耐震補強概要を①～⑤、40年目 PLM 評価での耐震評価により実施する耐震補強概要を⑥～⑩にそれぞれ示す。

① 原子炉再循環系

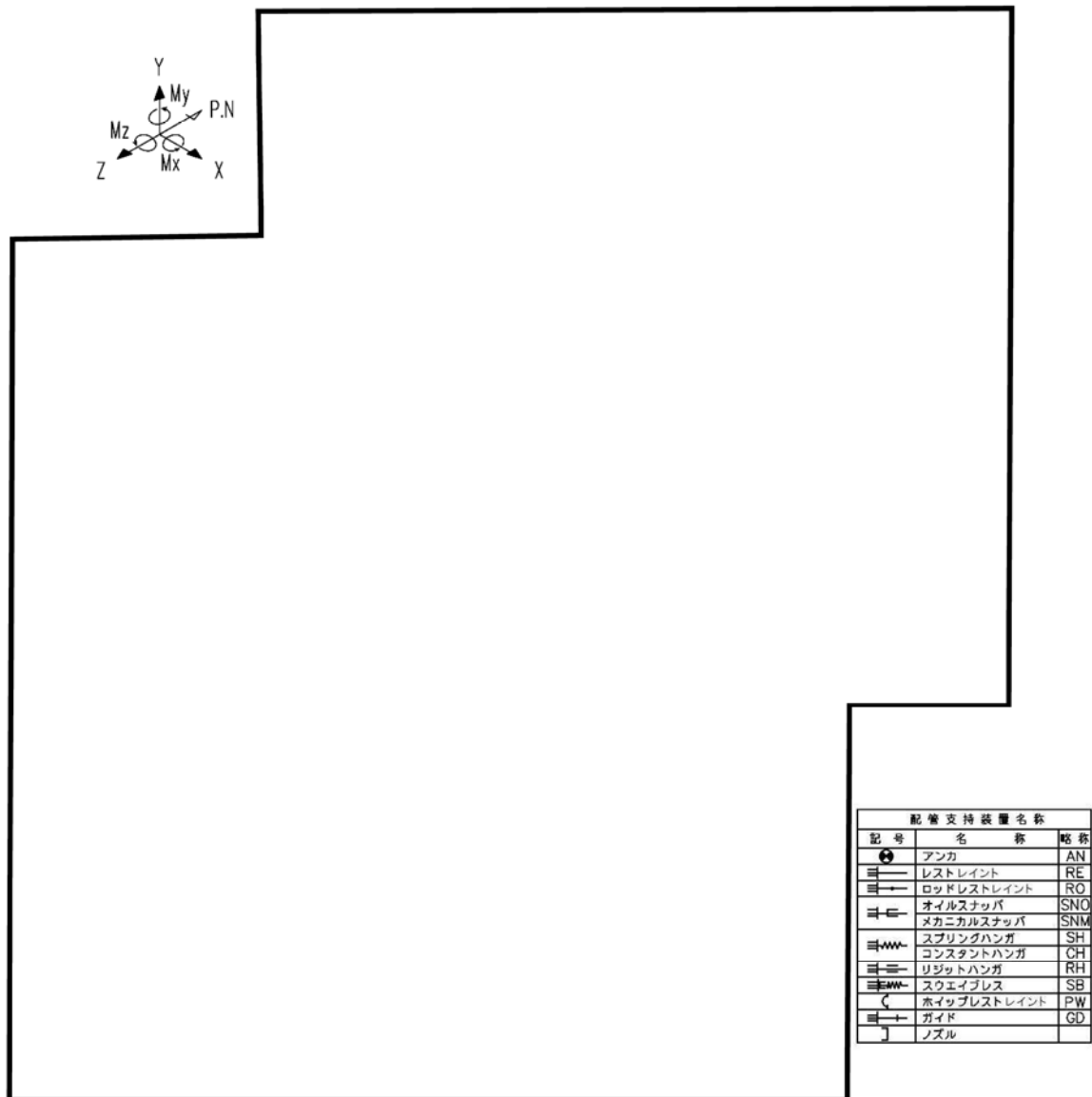
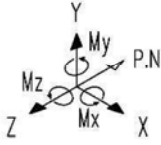
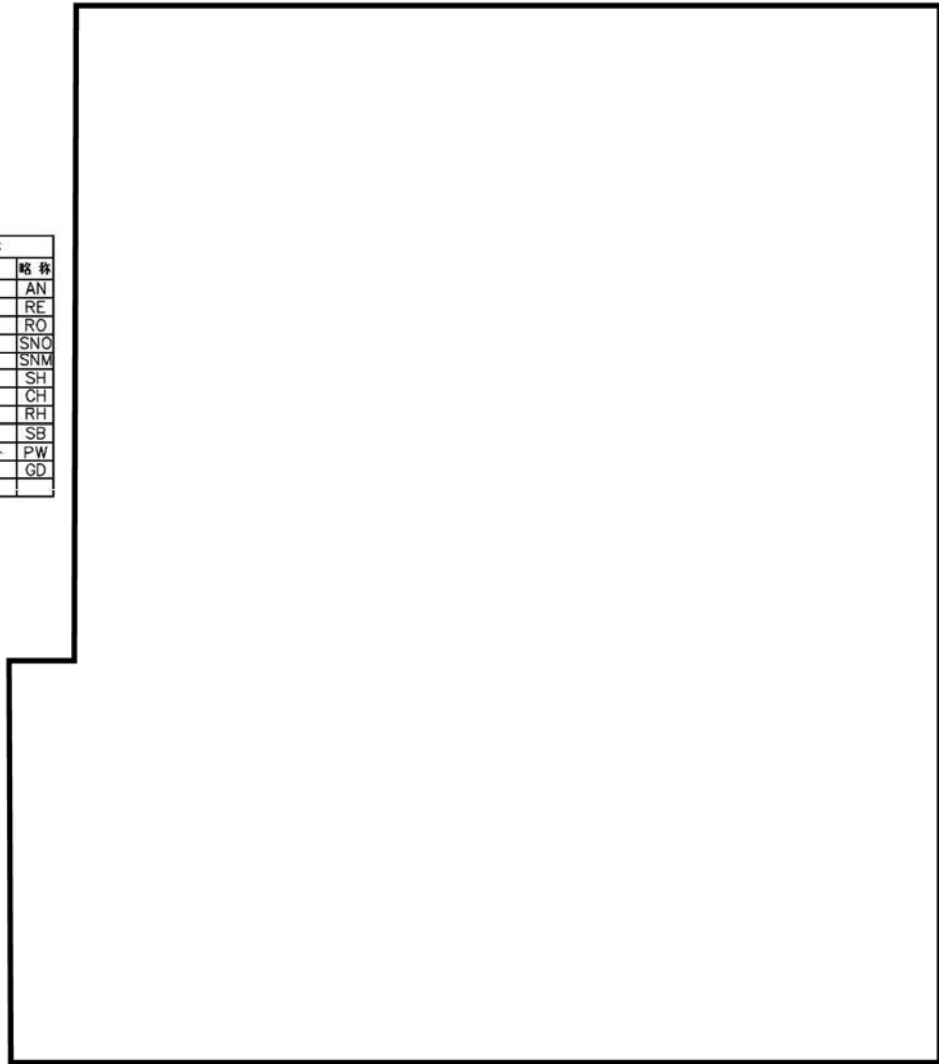


図 1 (1/2) 30 年目 PLM 耐震評価以降に実施した耐震補強実施箇所【原子炉再循環系】



配管支持装置名称		
記号	名称	略称
	アンカ	AN
	レストレイント	RE
	ロッドレストレイント	RO
	オイルスナッパ	SNO
	メカニカルスナッパ	SNM
	スプリングハンガ	SH
	コンスタントハンガ	CH
	リジッドハンガ	RH
	スウェイブレス	SB
	ホイップレストレイント	PW
	ガイド	GD
	ノズル	



○ : 30年目 PLM 耐震評価
以降に実施した補強箇所

図 1 (1/2) 30年目 PLM 耐震評価以降に実施した耐震補強実施箇所【原子炉再循環系】

表1 30年目 PLM 評価以降に実施した補強内容

サポート番号	補強内容
SNO-PLR-SA1	サポート容量変更 (100 kN → 160 kN)
SNO-PLR-SA2	サポート容量変更 (100 kN → 160 kN)
SNO-PLR-SA8	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN), 架構補強
SNO-PLR-SA11	架構補強
SNO-PLR-SA14	架構補強
SNO-PLR-SA22	架構補強
SNO-PLR-SA23	サポート容量変更 (100 kN → 250 kN), 架構補強
SNO-PLR-SB8	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN), 架構補強
SNO-PLR-SB14	架構補強
SNO-PLR-SB22	架構補強
SNO-PLR-SB23	サポート容量変更 (100 kN → 250 kN), 架構補強

サポート番号：SNO-PLR-SA1 サポート容量変更



サポート番号：SNO-PLR-SA11 架構補強

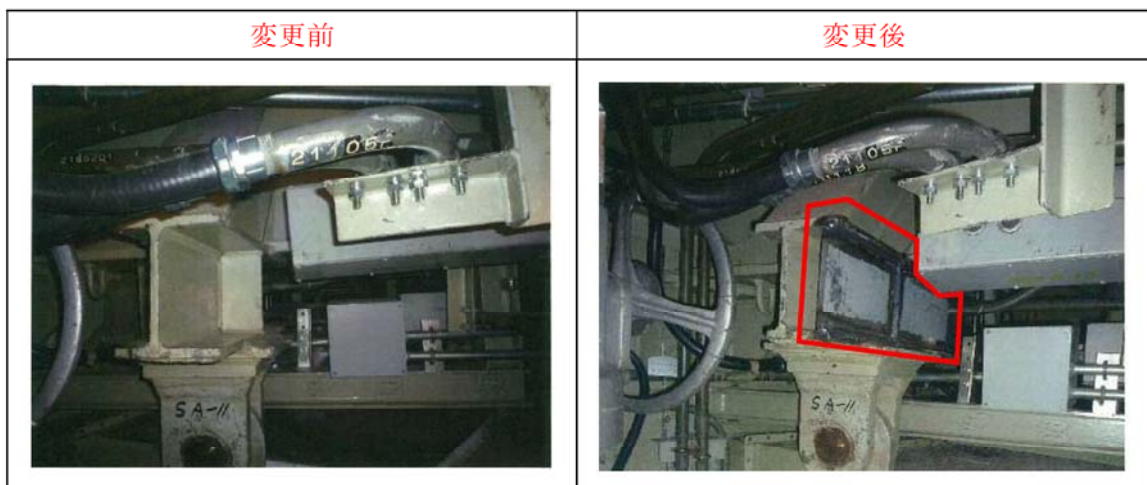
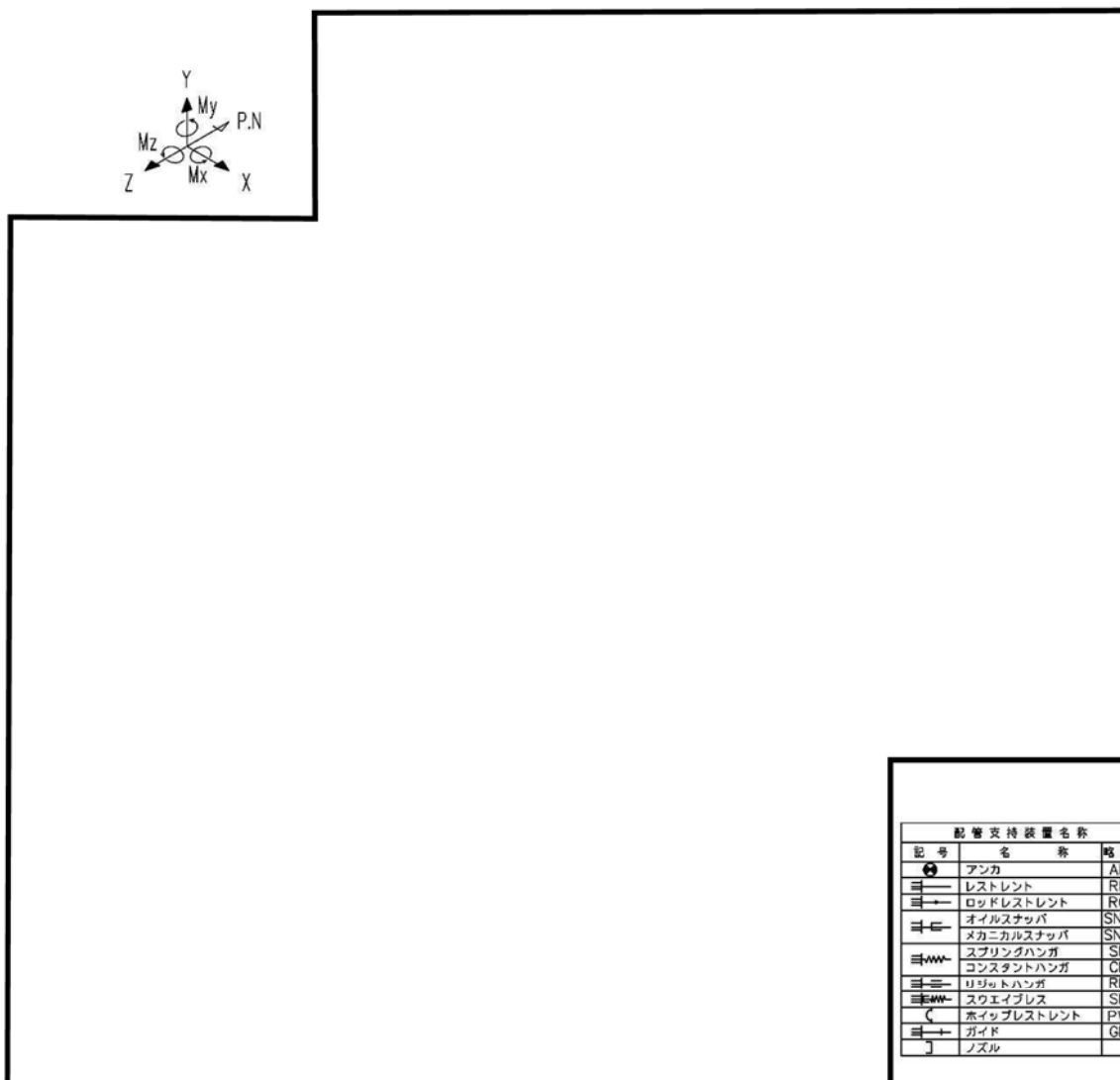


図2 サポート変更概要現場写真

②～⑤は追々とさせていただきます。

⑥ 原子炉再循環系

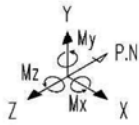


配管支持装置名称		
記号	名称	略称
●	アンカ	AN
≡	レストレスト	RE
≡→	ロッドレストレスト	RO
≡	オイルスナップ	SNO
≡	メカニカルスナップ	SNM
≡	スプリングハンガ	SH
≡	コンスタントハンガ	CH
≡	リジッドハンガ	RH
≡	スウェイブレス	SB
≡	ホイップレストレスト	PW
≡→	ガイド	GD
┘	ノズル	

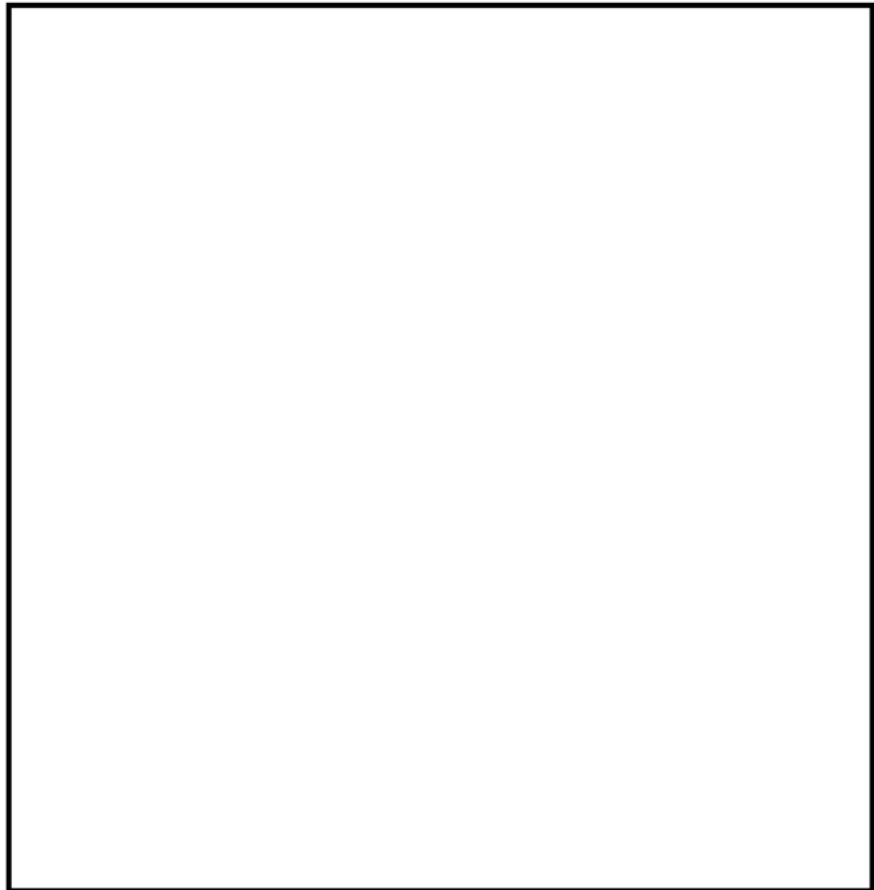
○ : 30年目 PLM 耐震評価
以降に実施した補強箇所

○ : 40年目 PLM 耐震評価にて
実施する補強実施箇所

図 1 (1/2) 40年目 PLM 評価により実施する耐震補強実施箇所【原子炉再循環系】



配管支持装置名称		
記号	名称	略称
	アンカ	AN
	レストレイント	RE
	ロッドレストレイント	RO
	オイルスナッチャ	SNO
	メカニカルスナッチャ	SNM
	スプリングハンガ	SH
	コンスタントハンガ	CH
	リジッドハンガ	RH
	スクエイブレス	SB
	ホイップレストレイント	PW
	ガイド	GD
	ノズル	



: 30年目 PLM 耐震評価
以降に実施した補強箇所
 : 40年目 PLM 耐震評価にて
実施する補強実施箇所

図 1 (2/2) 40年目 PLM 評価により実施する耐震補強実施箇所【原子炉再循環系】

⑦～⑩は追而とさせていただきます。

表1 40年目 PLM 評価により実施する補強内容

サポート番号	補強内容
SNO-PLR-SA3	サポート容量変更 (500 kN → 1000 kN)
SNO-PLR-SA4	サポート容量変更 (500 kN → 1000 kN)
SNO-PLR-SA5	サポート容量変更 (300 kN → 600 kN)
SNO-PLR-SA12	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN)
SNO-PLR-SA14	サポート容量変更 (100 kN → 600 kN)
SNO-PLR-SA15	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN)
SNO-PLR-SA22	サポート撤去
(評価点 512)	SNO (160 kN×2 本) 追加
(評価点 1401)	SNO (160 kN) 追加
SNO-PLR-SB1	サポート容量変更 (100 kN → 250 kN)
SNO-PLR-SB2	サポート容量変更 (100 kN → 250 kN)
SNO-PLR-SB3	サポート容量変更 (500 kN → 1000 kN)
SNO-PLR-SB4	サポート容量変更 (500 kN → 1000 kN)
SNO-PLR-SB5	サポート容量変更 (300 kN → 600 kN)
SNO-PLR-SB6	サポート容量変更 (100 kN → 400 kN)
SNO-PLR-SB12	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN)
SNO-PLR-SB14	サポート容量変更 (100 kN → 600 kN)
SNO-PLR-SB15	サポート容量変更 (50 kN → 100 kN)
SNO-PLR-SB22	撤去
(評価点 1401)	SNO (160 kN) 追加
(評価点 5101)	SNO (160 kN×2 本) 追加

震災が評価に与える影響とその考え方について

(1) 評価対象機器の選定

東海第二発電所 運転期間延長認可申請（共通事項）補足説明資料にて東北地方太平洋沖地震（以下、TPO 地震という）における東海第二発電所への影響（震災影響）のうち耐震安全性評価について検討する。

耐震安全性評価は以下の経年劣化事象と組み合わせて実施している。

- ・疲労割れ
- ・中性子照射脆化
- ・照射誘起型応力腐食割れ
- ・腐食（流れ加速型腐食を含む）
- ・応力腐食割れ

このうち、TPO 地震を考慮した耐震安全性評価への影響が大きいと考えられる疲労割れについて、TPO 地震と組み合わせた、耐震安全性評価を実施する。

評価対象機器は疲労割れを考慮して耐震評価を実施した機器のうち、「基準地震動 S_s による疲労累積係数」が最大である原子炉系（蒸気部）配管を選定した。

(2) 評価内容

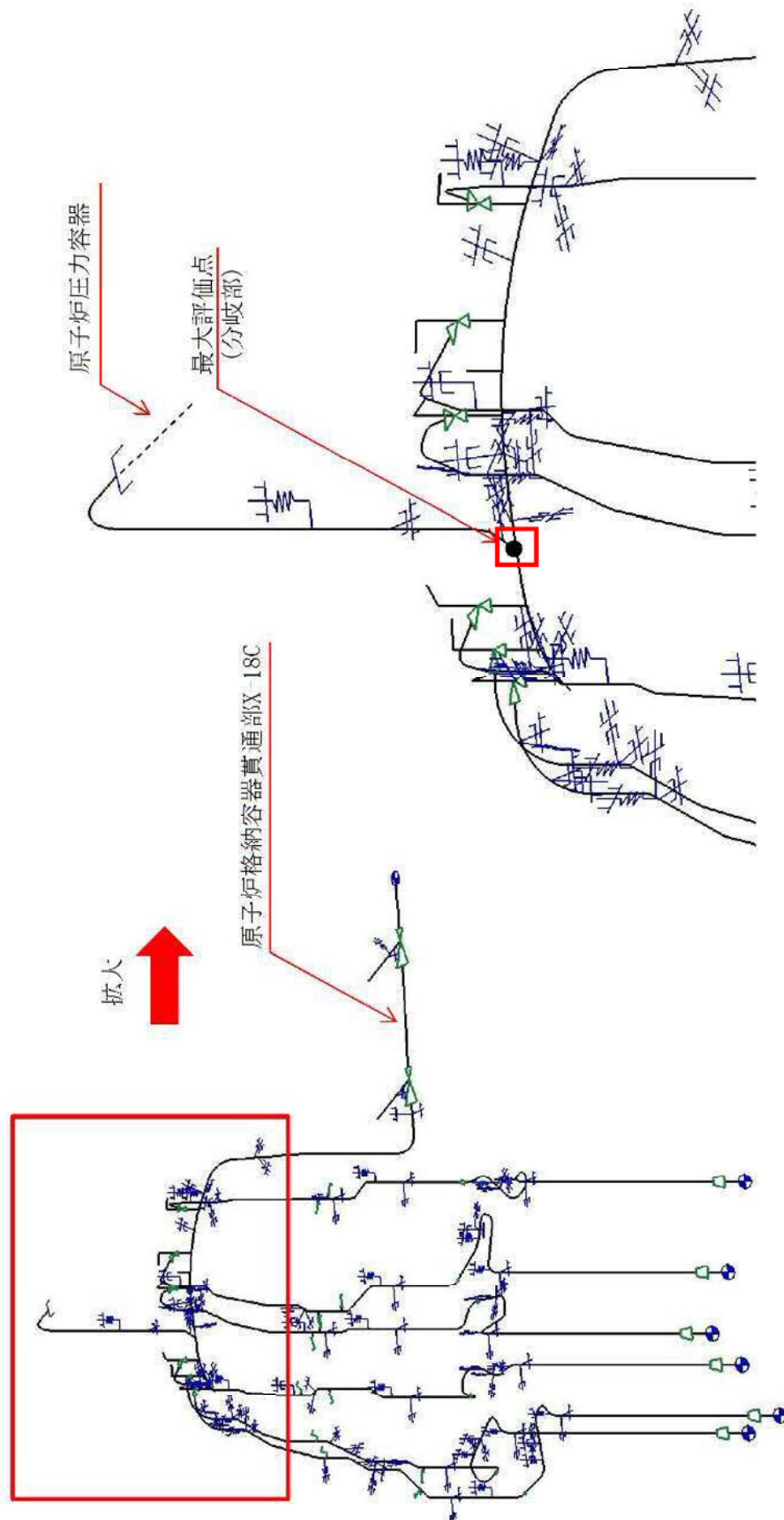
原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数に TPO 地震による疲労累積係数を足し合わせた合計値が、許容値 1 を下回ることを確認する。

- ① 原子炉系（蒸気部）配管の運転実績回数に基づく疲労累積係数並びに基準地震動 S_s による疲労累積係数（表 1 参照）

表 1 原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数

系統	運転実績回数に基づく疲労累積係数	地震動による疲労累積係数
原子炉系（蒸気部）	0.0853	0.4509

原子炉系（蒸気部）配管の疲労評価モデル図を図 1 に示す。



評価モデル全体図

図 1 原子炉系（蒸気部）配管の疲労解析モデル

② TPO 地震による疲労累積係数

a. TPO 地震による繰返し回数の算定方法

TPO 地震による繰返し回数は「工事計画審査資料 補足-342 東海第二発電所 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料（耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について）」に記載される繰返し回数の設定方法と同様、ピーク応力法による等価繰返し回数として算定した。

以下に TPO 地震による繰返し回数の算定方法を示す。

(a) 時刻歴変位応答波形の算定

原子炉格納容器内に設置される原子炉系（蒸気部）配管の TPO 地震による繰返し回数は、原子炉格納容器内の各設備の繰返し回数を包絡して設定する。

各評価点の繰返し回数を求めるため、原子炉建屋—大型機器・炉内構造物連成解析の結果から算出される時刻歴加速度応答波を用いて、1 質点系の時刻歴変位応答波形を算定する。

原子炉建屋—大型機器・炉内構造物連成モデルを図 2 及び図 3 に、入力地震動の加速度時刻歴波形を図 4-1～図 4-3 に示す。

(b) 時刻歴ピーク応力値の設定

設備に発生するピーク応力の最大値を (a) で求めた時刻歴変位応答波形の最大値とすることで、応力の時刻歴波を作成する。最大ピーク応力に対する時刻歴波の応力算定概念図を図 5 に示す。

最大ピーク応力については、「耐震設計の標準化に関する調査報告書」（軽水炉改良標準型耐震設計小委員会、昭和 55 年）の検討において十分とされた値^{*1}である 150 kg/mm^2 (1471MPa) を使用する。

*1：「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書」での整理。

現在用いられている材料において原子炉压力容器本体材料である SQV2A 及び SFVV3 の一次＋二次応力に対する許容値が最も高く、その値は $3S_m = 56.4 \text{ kg/mm}^2$ となる。

応力係数の極大値 5 とすれば、ピーク応力の値としては片振幅に対して、 $56.4 \times 5 \div 2 = 141 \text{ kg/mm}^2$ となることから、最大ピーク応力としては、 150 kg/mm^2 まで考えれば十分としている。

(c) 疲労累積係数 UF の算定

各ピーク点の応力に対する許容繰返し回数を設計疲労線図より求め、疲労累積係数 UF を求める。

発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年 (2007 年追補版含む)) MANDATORY APPENDIX 添付 4-2 設計疲労線図「図 添付 4-2-1」の炭素鋼、低合金鋼及び高張力鋼に対する設計疲労線図を用い、応力時刻歴波に対して各時刻歴振幅に対する許容繰返し回数を算定する。設計疲労線図を図 6 に示す。

各応力時刻歴波の振幅に対する許容繰返し回数とピークのサイクル数から UF を算定する。UF 算定方法を図 7 に示す。

(d) 等価繰返し回数の算定

疲労累積係数 UF と、最大ピーク応力に対する許容繰返し回数 N_0 の積をとり、最大ピーク応力に対する等価繰返し回数 N_e を求める。

$$N_e = UF \times N_0$$

b. 算定結果

原子炉圧力容器等の大型機器の各質点の水平 (NS, EW) 及び鉛直 (UD) 方向の時刻歴加速度応答波から求めた 1 質点系の応答に対する等価繰返し回数を表 2 に示す。

原子炉系 (蒸気部) 配管の等価繰返し回数は、各評価点の等価繰返し回数を包絡した 回と設定する。

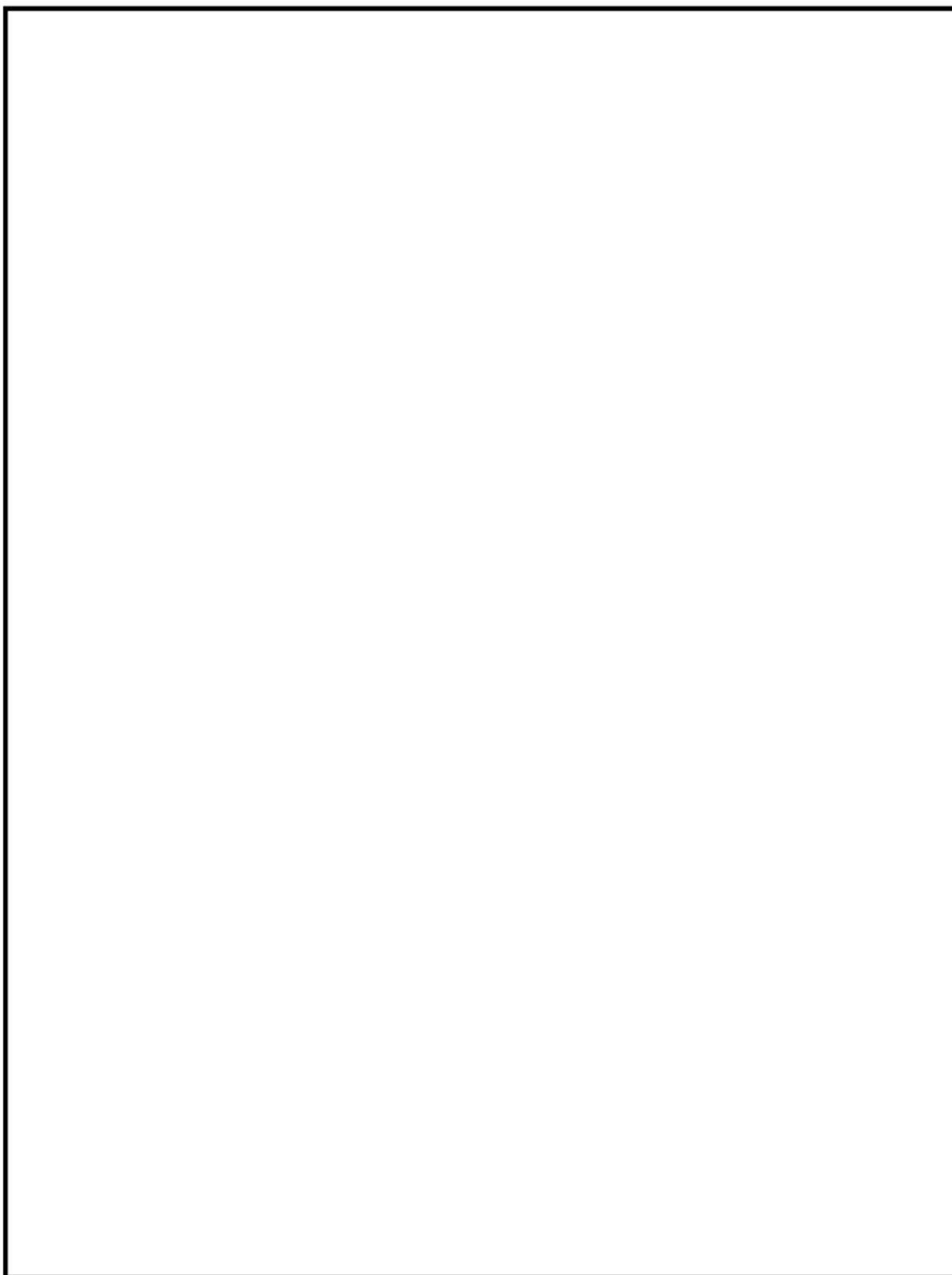


図 2 原子炉建屋—大型機器・炉内構造物系連成解析モデル（水平方向）

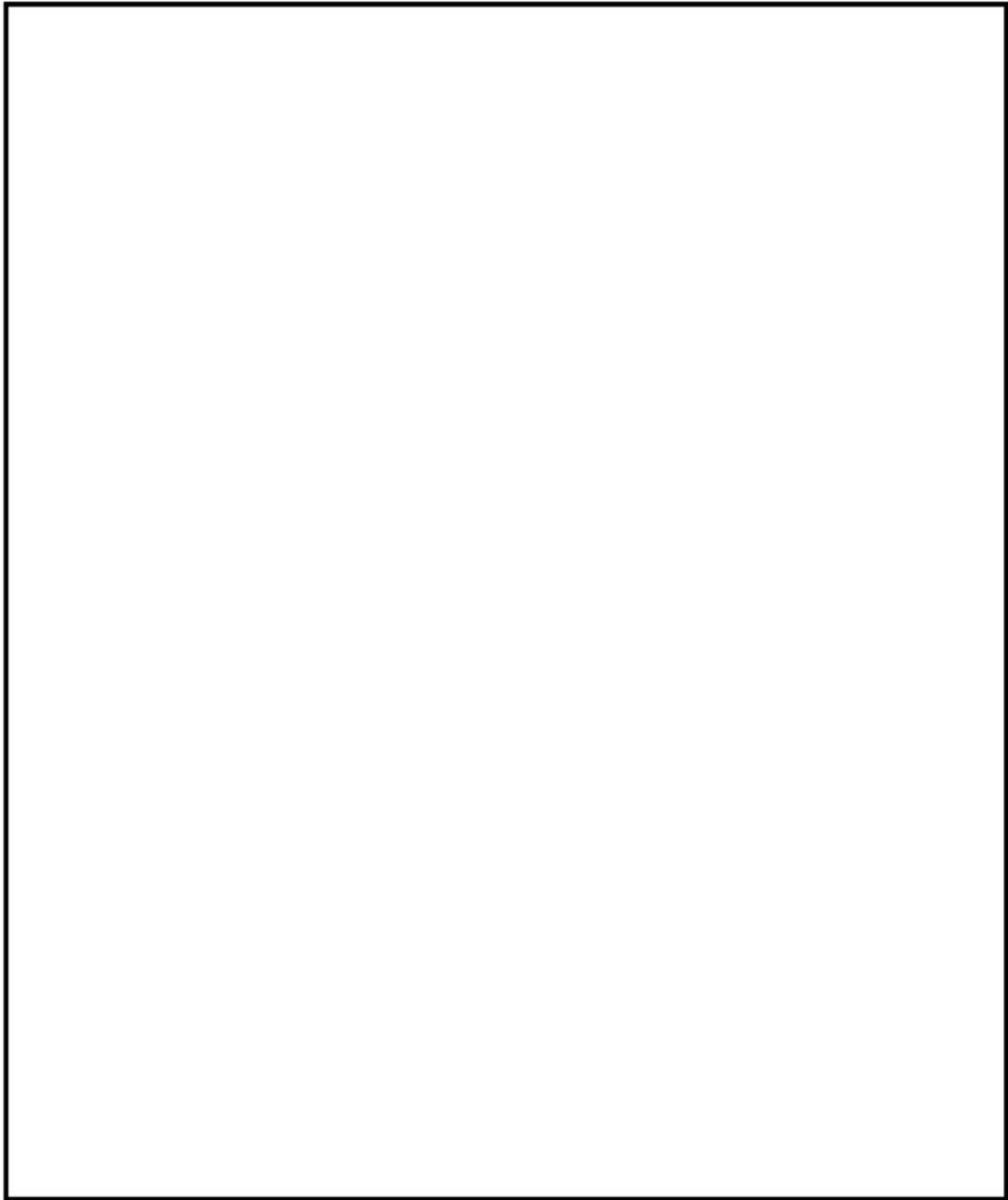


図 3 原子炉建屋—大型機器・炉内構造物系連成解析モデル（鉛直方向）

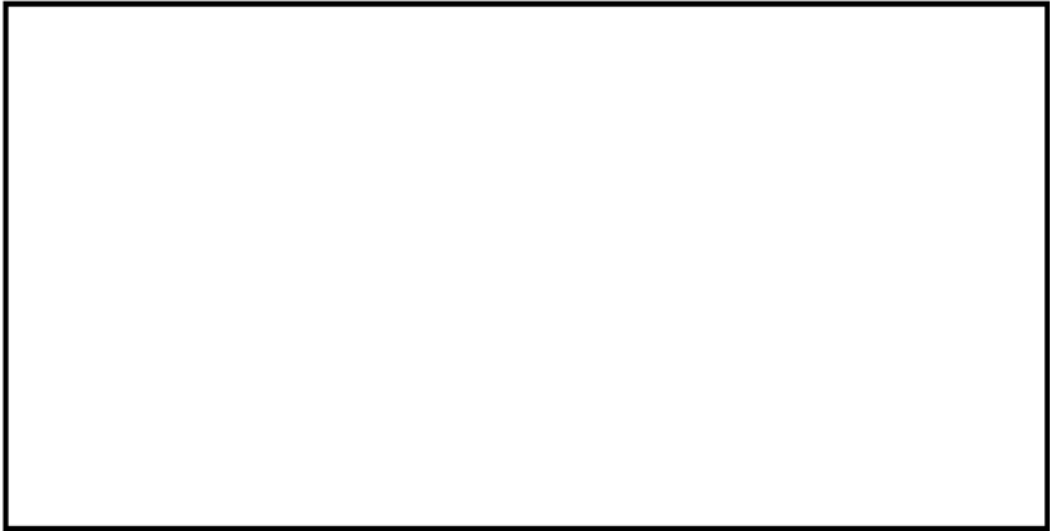


図 4-1 入力地震動（水平（NS）方向）の加速度時刻歴波形

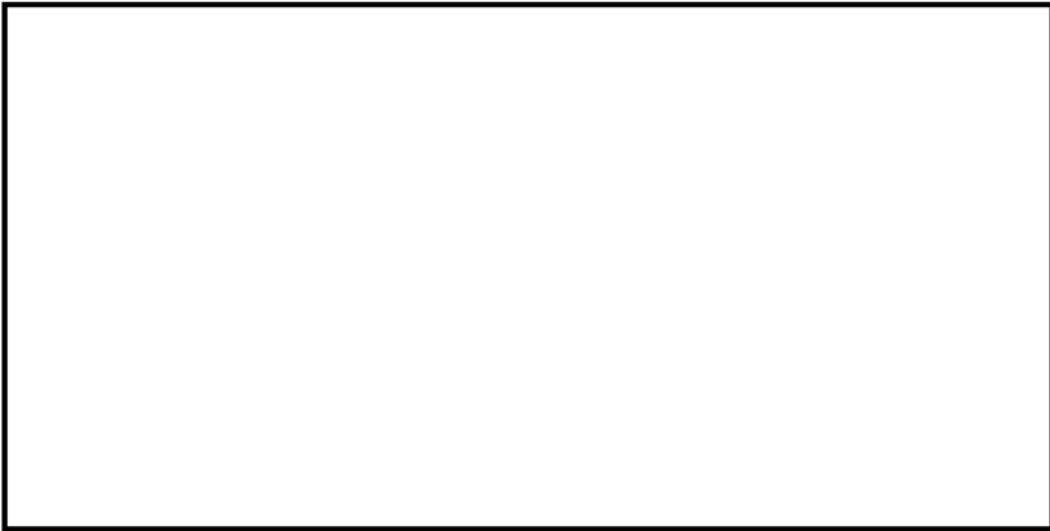


図 4-2 入力地震動（水平（EW 方向）の加速度時刻歴波形



図 4-3 入力地震動（鉛直（UD）方向）の加速度時刻歴波形

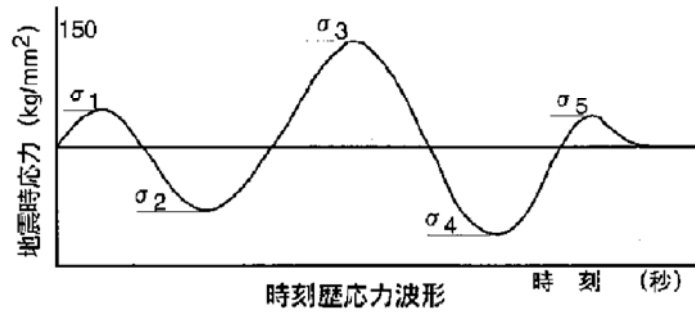


図5 最大ピーク応力に対する時刻歴波の応力算定概念図

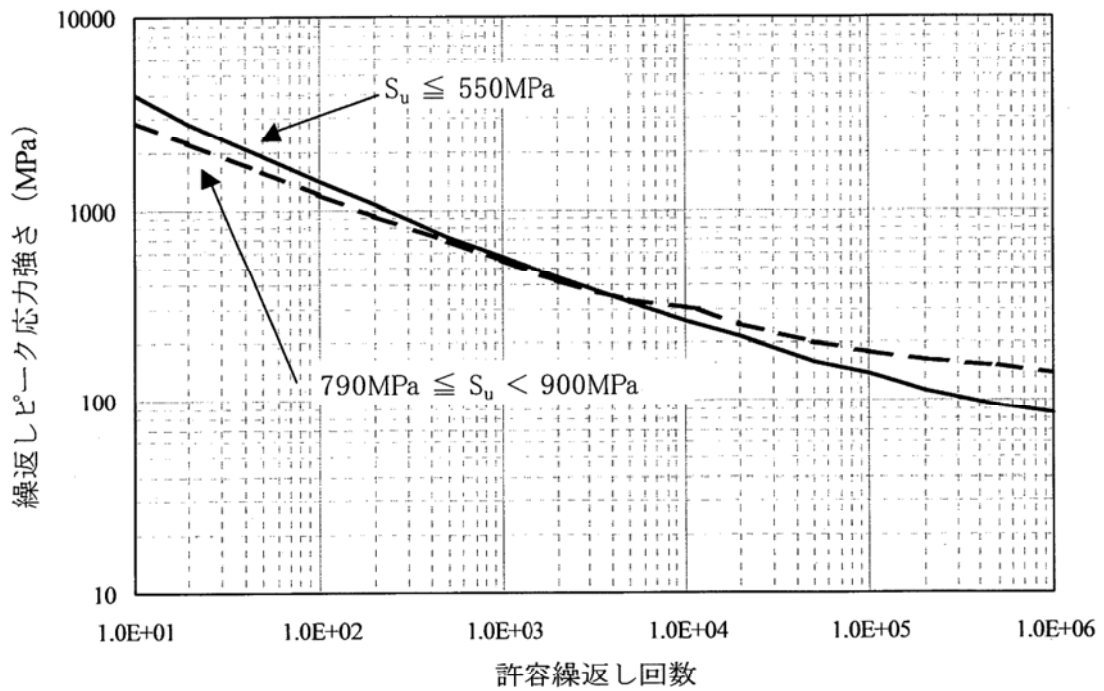


図6 炭素鋼，低合金鋼及び高張力鋼の設計疲労線図
(設計・建設規格 図添付 4-2-1 抜粋)

$$\text{地震 UF} = \frac{n_{\max}}{N_{\max}} + \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2}$$

ここで、 n_i : 各ピークのサイクル数

N_i : 各ピークに対する許容繰返し回数

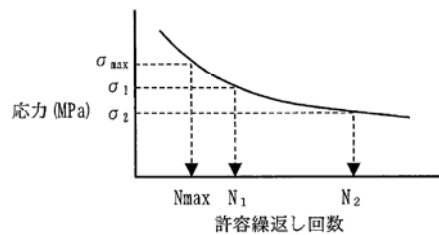


図7 UF 算定方法

表 2 各評価点における NS, EW, 鉛直方向の等価繰返し回数

評価点	減衰定数*1	等価繰返し回数			評価用 繰返し回数
		NS	EW	鉛直	
原子炉格納容器 EL. 36. 431m	h=				
	h=				
原子炉格納容器 EL. 33. 431m	h=				
	h=				
原子炉格納容器 EL. 27. 432m	h=				
	h=				
原子炉格納容器 EL. 24. 422m	h=				
	h=				
原子炉格納容器 EL. 18. 420m	h=				
	h=				
原子炉格納容器 EL. 16. 319m	h=				
	h=				
原子炉遮蔽 EL. 34. 643m	h=				
	h=				
原子炉遮蔽 EL. 28. 308m	h=				
	h=				
原子炉本体の基礎 EL. 19. 856m	h=				
	h=				
原子炉本体の基礎 EL. -2. 167m	h=				
	h=				
原子炉圧力容器 EL. 39. 215m	h=				
	h=				
原子炉圧力容器 EL. 34. 656m	h=				
	h=				
原子炉圧力容器 EL. 31. 535m	h=				
	h=				
原子炉圧力容器 EL. 20. 292m	h=				
	h=				
最大値	h=				
	h=				

*1：減衰定数は、機器・配管系に適用される最小の減衰定数である 0.5%、及び 1.0% に設定する。

(3) TPO 地震による疲労累積係数の算出

東海第二発電所 設置変更許可申請書（平成 29 年 11 月 8 日提出）で設定された基準地震動 S_s においては、図 8 に示す TPO 地震の解放基盤波の比較のとおり、TPO 地震の地震応答加速度を上回る加速度で設定されていることから、TPO 地震時の疲労累積係数の算出については、保守的に基準地震動 S_s の疲労累積係数に対して TPO 地震による等価繰返し回数 回を基に算定する。

なお、基準地震動 S_s での繰返し回数は、東海第二発電所 工事計画審査資料「東海第二発電所 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料（耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点に整理について）」にて設定された原子炉格納容器、原子炉压力容器等の大型機器の等価繰返し回数である 回とする。

したがって、TPO 地震による疲労累積係数は以下のとおり算出される。

TPO 地震による疲労累積係数

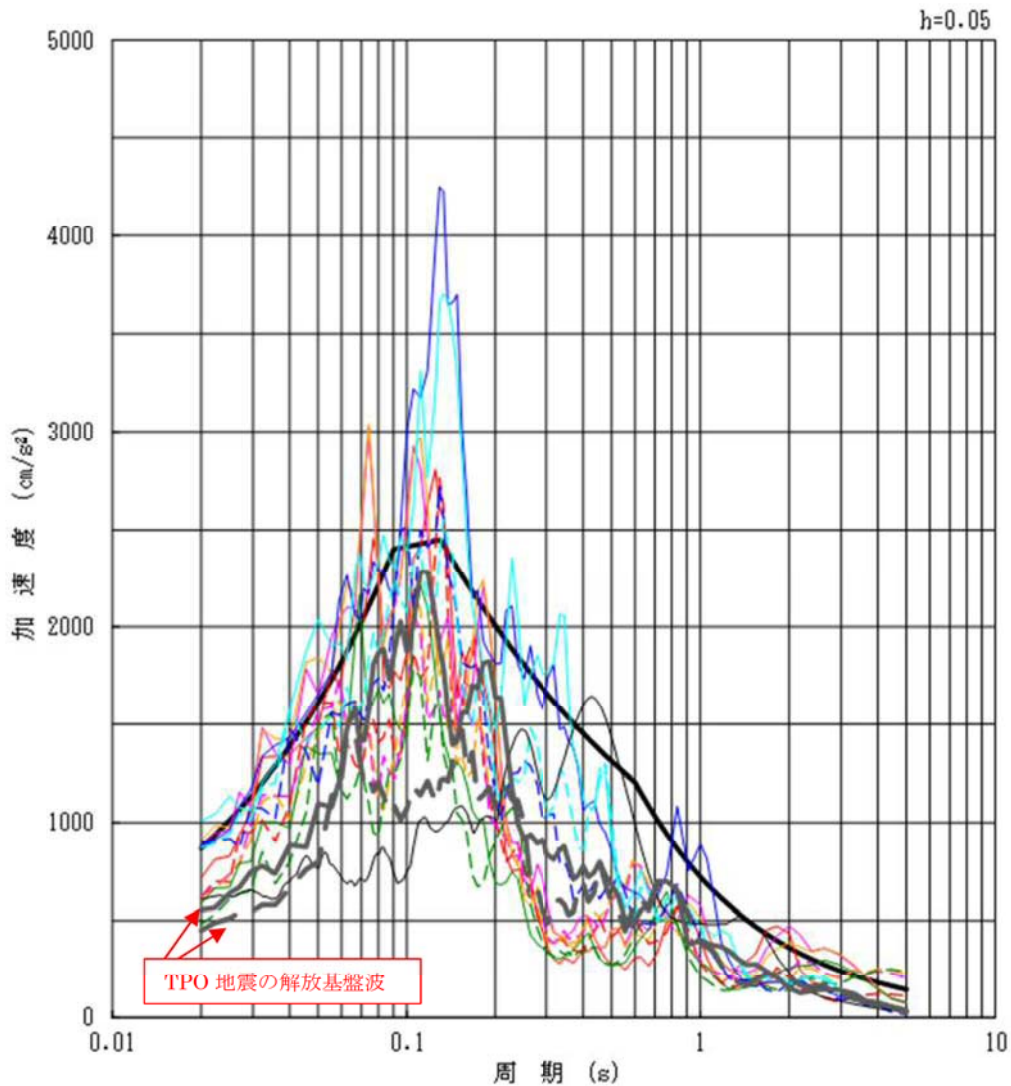
$$= \text{基準地震動 } S_s \text{ での疲労累積係数} \times \frac{\text{TPO 地震での繰返し回数}}{\text{基準地震動での繰返し回数}}$$

$$= 0.4509 \times \text{} = \text{$$

上記の算出結果により、TPO 地震を考慮した疲労累積係数は表 3 のとおりとなり、許容値 1 を下回ることを確認した。

表 3 TPO 地震を考慮した原子炉系（蒸気部）配管の疲労累積係数

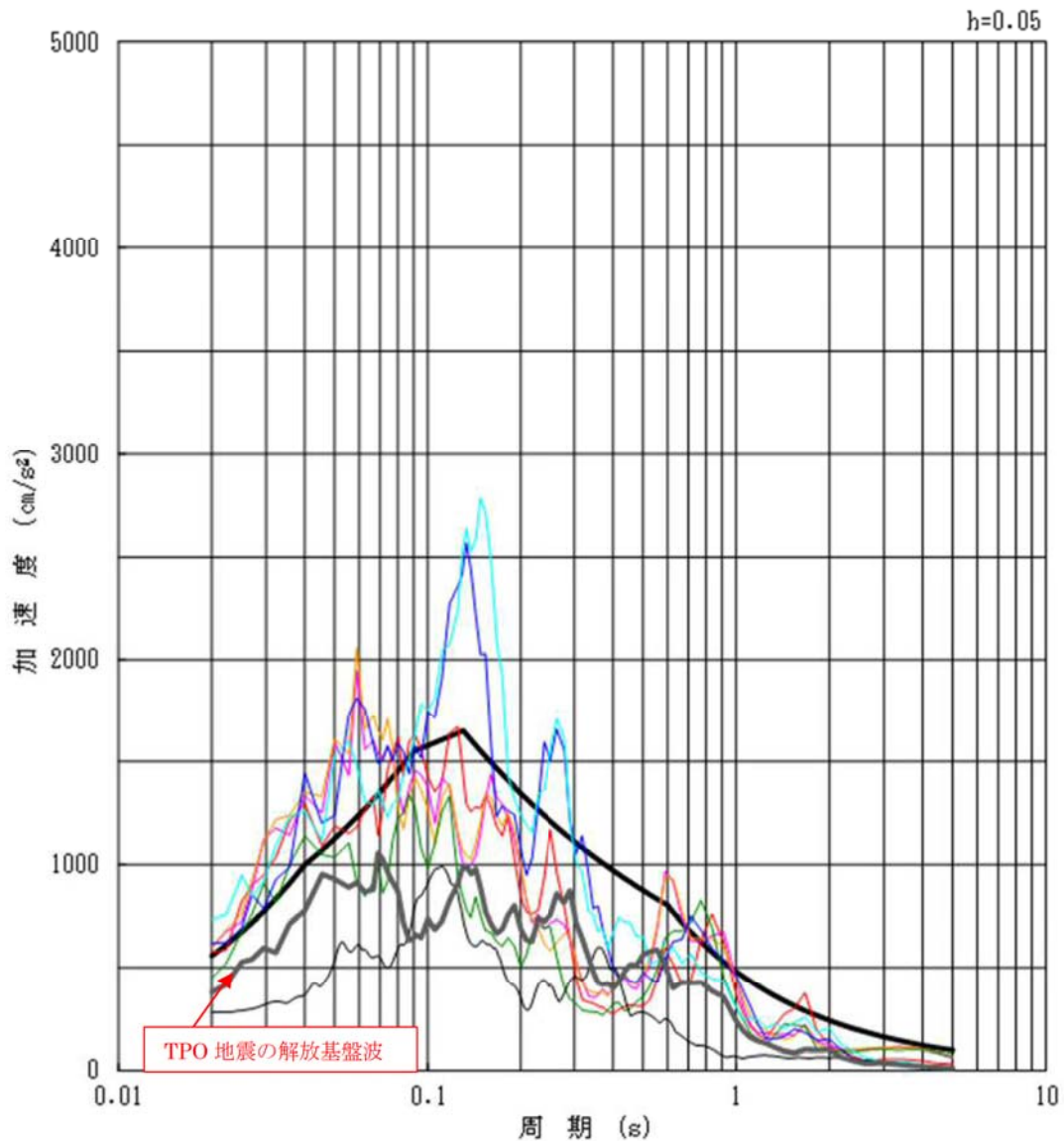
系統	運転実績回数に基づく疲労累積係数	基準地震動 S_s による疲労累積係数	TPO 地震による疲労累積係数	合計 (許容値：1 以下)
原子炉系 (蒸気部)	0.0853	0.4509	<input type="text"/>	<input type="text"/>



- S_s -D 1
- S_s -1 1 F 1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1) ※
- S_s -1 2 F 1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2) ※
- S_s -1 3 F 1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3) ※
- S_s -1 4 F 1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2) ※
- S_s -2 1 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ) ※
- S_s -2 2 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳) ※
- S_s -3 1 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- 2011年東北地方太平洋沖地震の解放基盤波 ※

※実線はN S方向, 破線はE W方向

図 8(1/2) 基準地震動 S_s と TPO 地震の解放基盤波の比較 (水平方向)



- S_s-D1
- S_s-11 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-12 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-13 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-14 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-21 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- S_s-22 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- 2011年東北地方太平洋沖地震の解放基盤波

図 8(2/2) 基準地震動 S_s と TPO 地震の解放基盤波の比較 (鉛直方向)

流れ加速型腐食に対する耐震安全評価について

流れ加速型腐食に対する耐震安全性評価については、以下の劣化事象について実施する。

1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）
2. 管支持板の腐食（流れ加速型腐食）（第3給水加熱器）
3. 伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）

1. 配管内面の腐食（流れ加速型腐食）（炭素鋼配管）に対する耐震安全性評価

(1) 評価対象ラインの抽出について

東海第二の劣化状況評価における、「配管の腐食（流れ加速型腐食）」に対する耐震安全性評価は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格（JSME S NH1-2006）」（以下、JSME 減肉管理規格という）において、流れ加速型腐食の可能性が小さいとされている FAC-1 管理範囲以外の箇所を含むラインを評価対象ラインとして選定した。

(2) 評価対象ライン数

評価対象として抽出され評価を実施したライン数は合計 46 ラインであり、系統分類毎に以下のとおりである。

・原子炉系（蒸気部）	5 ライン
・原子炉系（純水系）	2 ライン
・給水系	5 ライン
・復水系	31 ライン
・ヒータドレン系	3 ライン

(3) 評価対象ライン

評価対象ラインの概略図を図1に、評価対象ラインのうち、劣化状況評価書に評価結果を記載した代表ラインの解析モデル図を図2～図10に示す。

解析モデルは、3次元多質点系モデルとし、その他のモデル化の条件は、工事計画認可申請の評価と同等とする。解析は、計算機コード「H I S A P」を使用する。

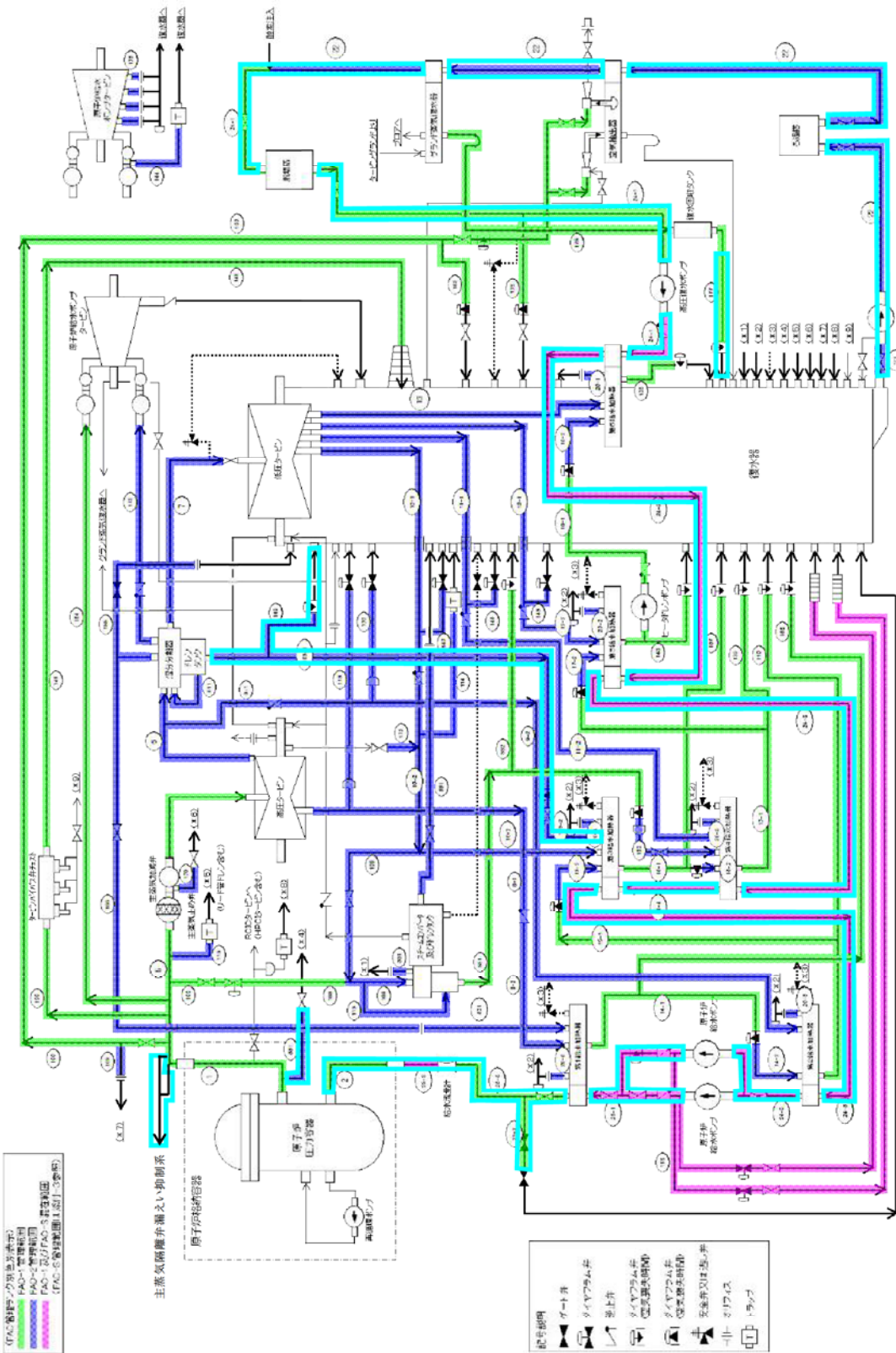
また、地震動による配管応力解析及び発生応力が許容応力を上回った際に実施する疲労累積係数の評価を計算機コードにより実施する。

(4) 使用する地震動

耐震評価を行うにあたり使用する地震動は、東海第二発電所設置変更許可申請書（平成29年11月8日補正）及び工事計画認可申請書（平成29年11月24日補正）に記載される基準地震動 S_s (SD-1～SD-31) の8波, 弾性設計用地震動 S_d 等を用いて原子炉建屋, タービン建屋各床レベルの地震応答解析結果に基づき作成された床応答スペクトルを包絡したスペクトル波にて評価を行った。

5. 評価内容及び結果

評価内容及び結果は追々とさせていただきます。



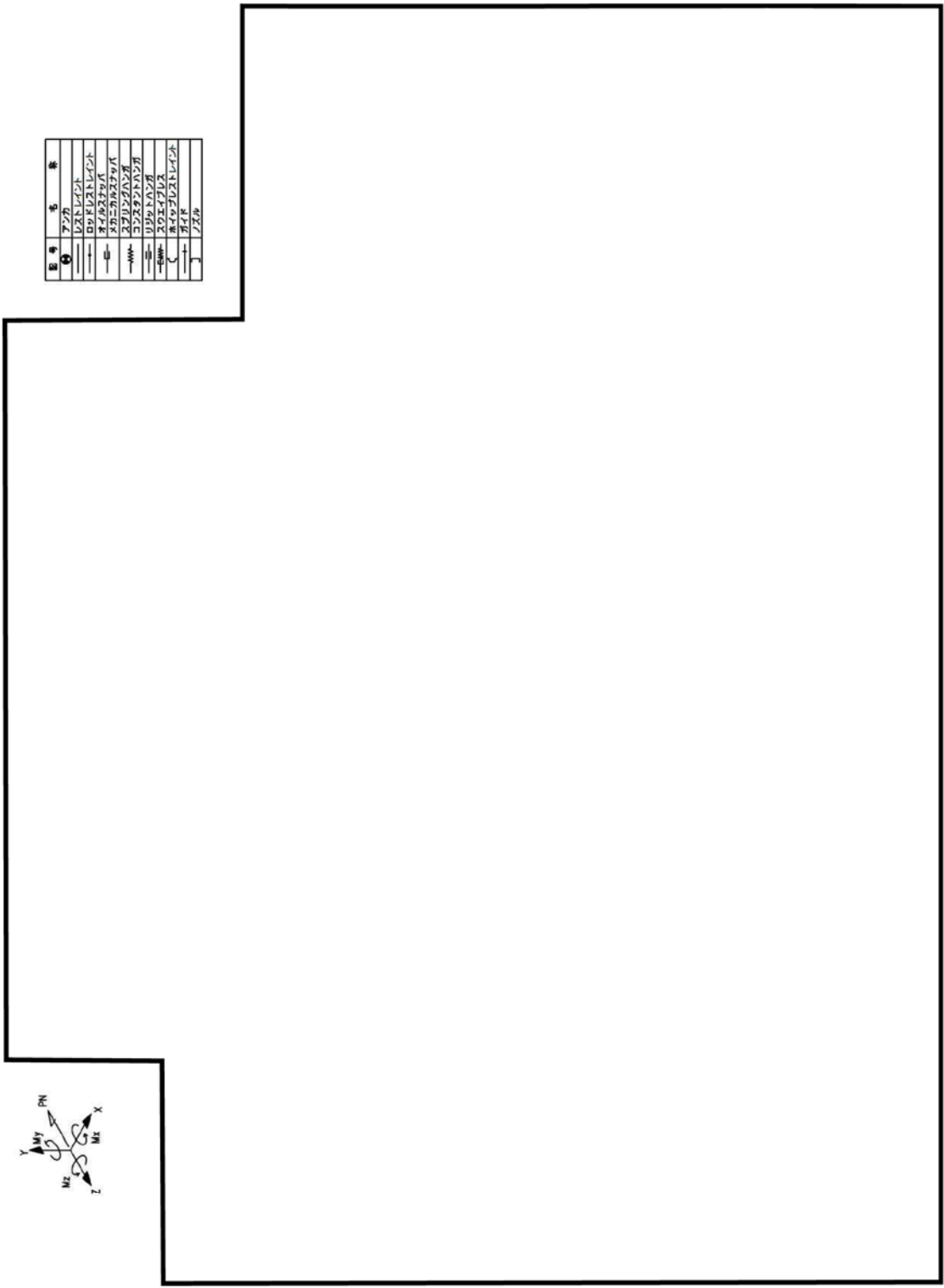
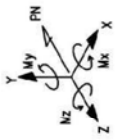


図2 原子炉系（純水部）[クラス1ー耐震Sクラス] アイソメ図



記号	名称
①	アンカ
—	レストレイント
—	ロッドレストレイント
—	オイルスタンプ
—	スプリングハンダ
—	コンスタントハンダ
—	リフトハンダ
—	スロエーブル
—	ワイヤレストレイント
—	ガイド
—	ノズル

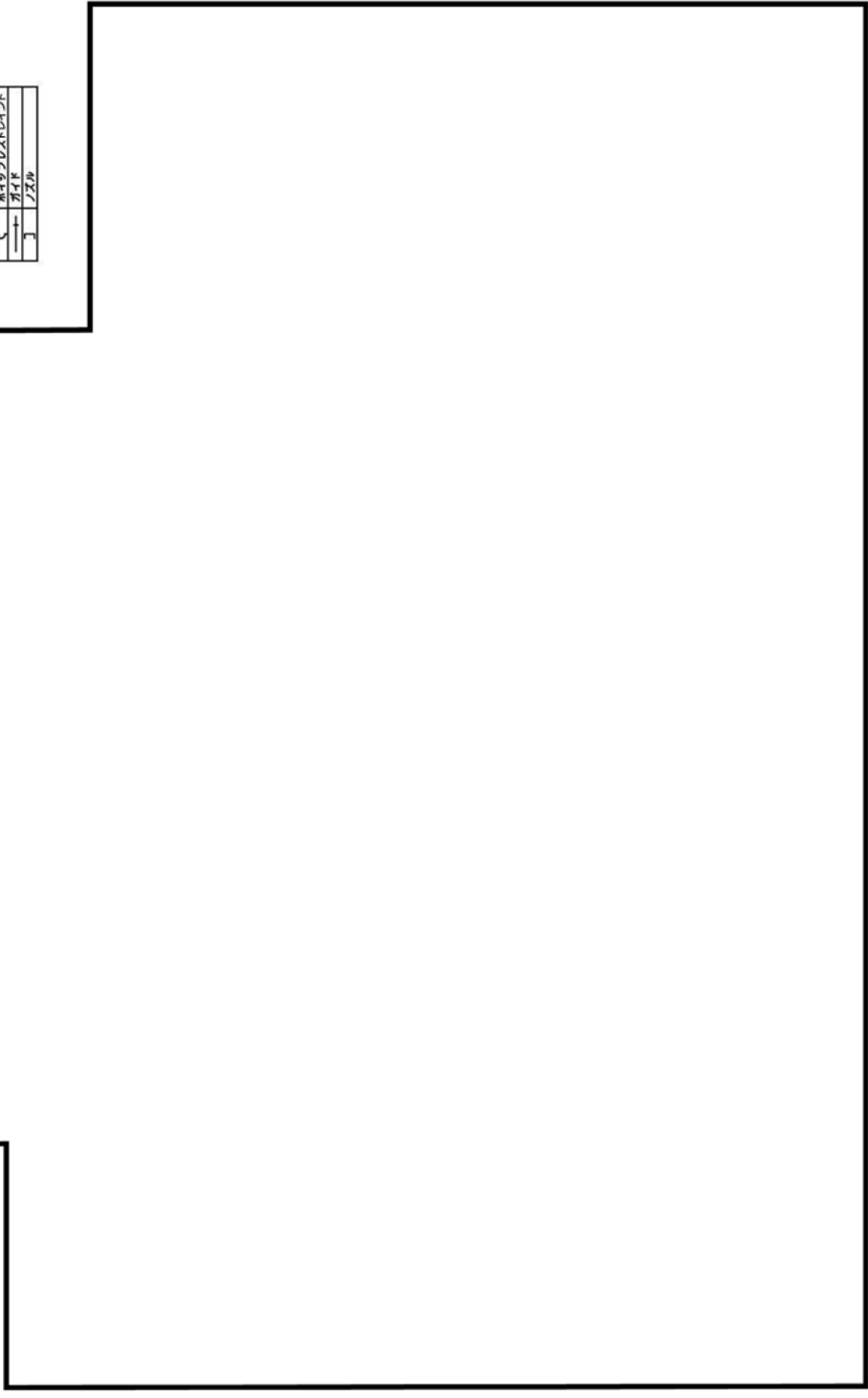
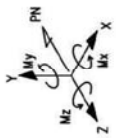
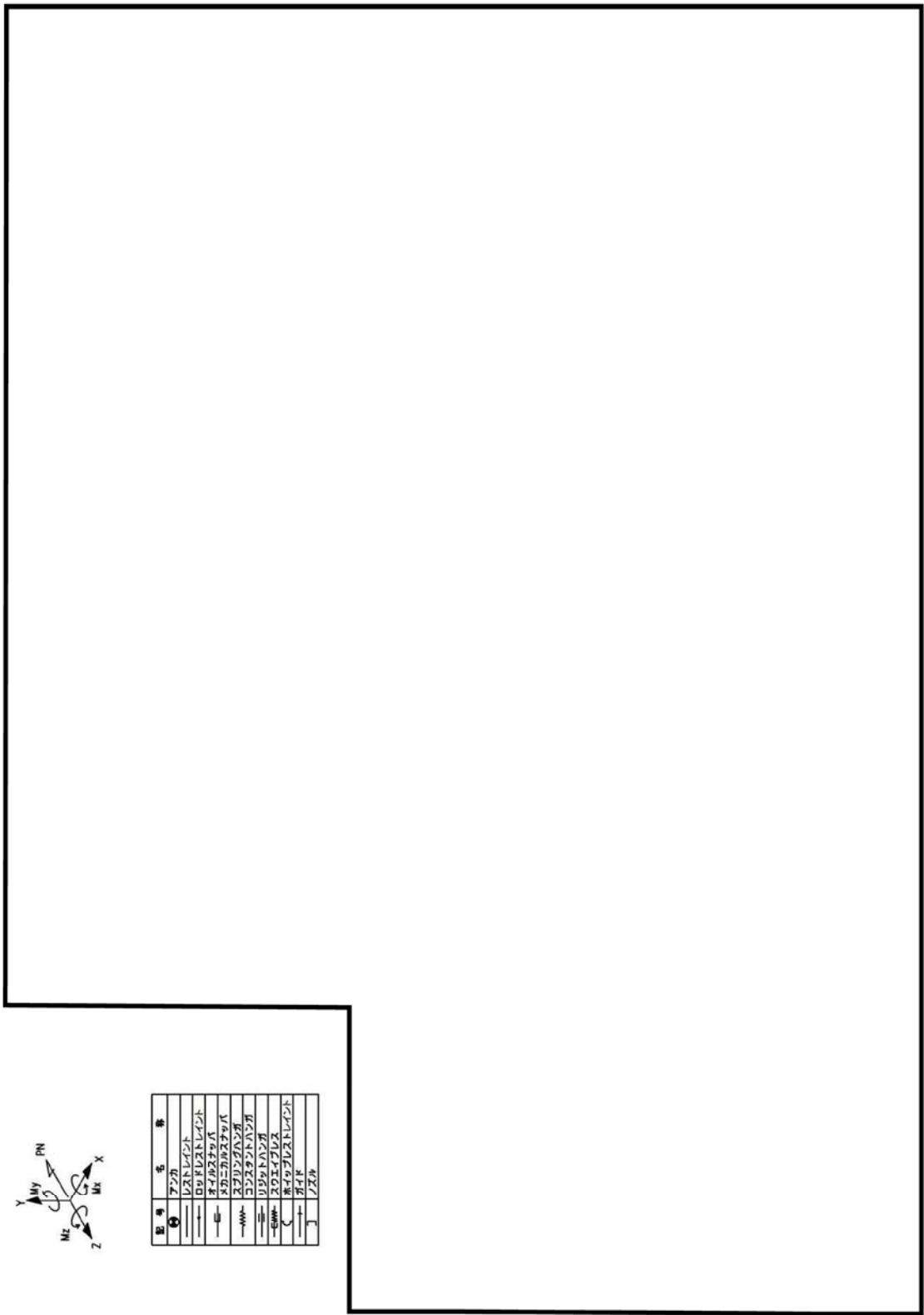
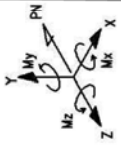
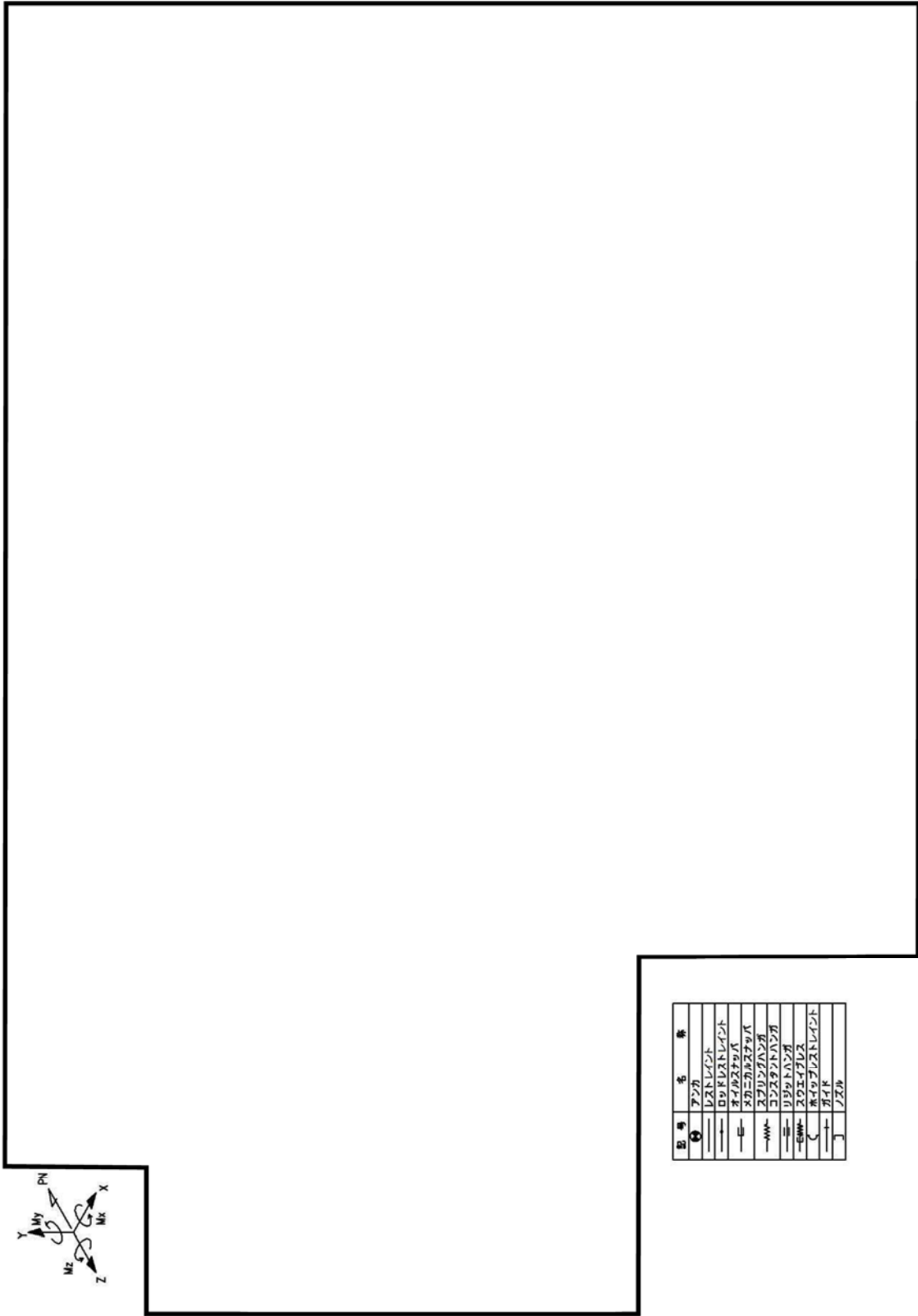


図3 原子炉系（純水部）[クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



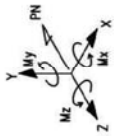
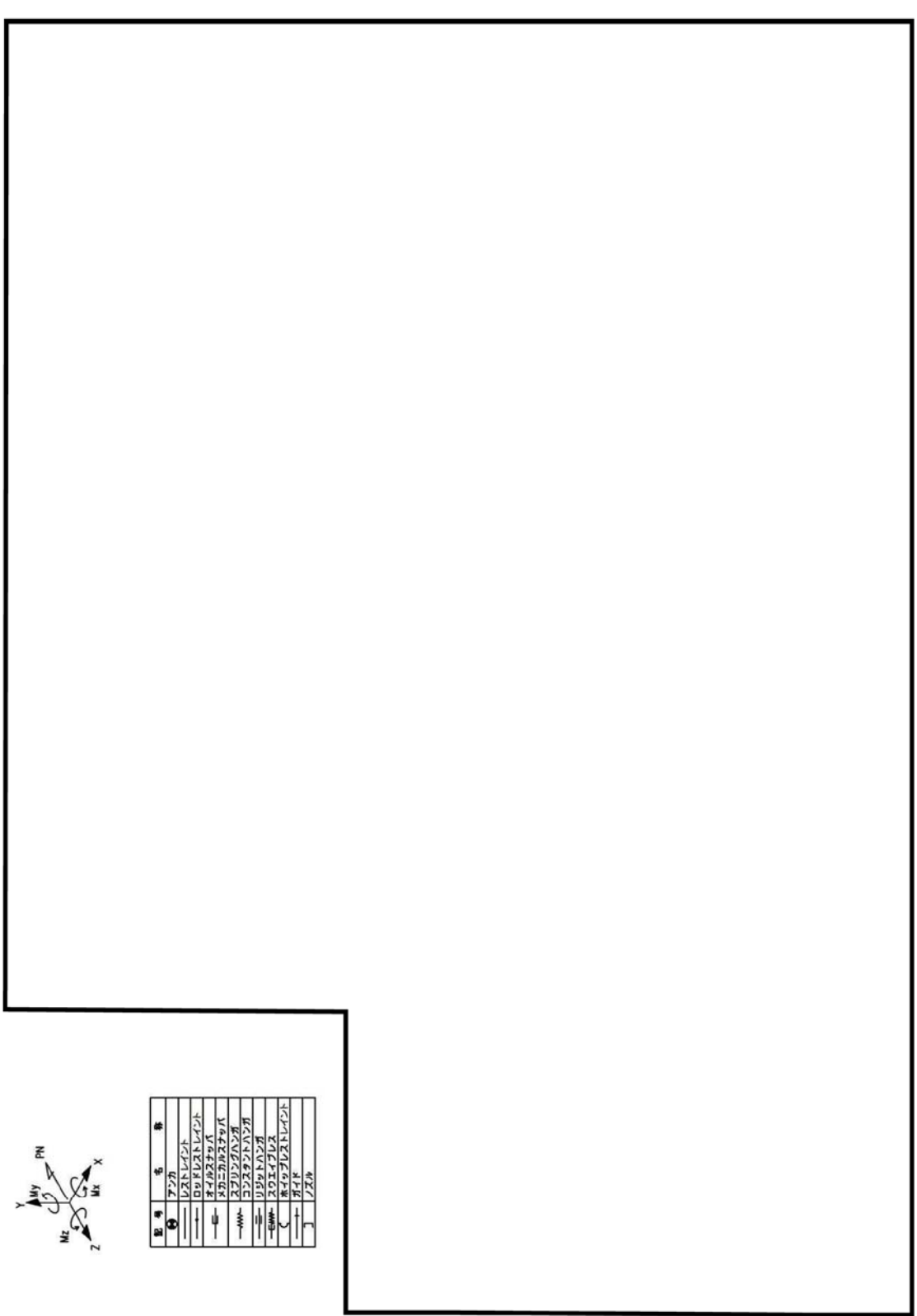
記号	名称
\odot	727
\ominus	728
\rightarrow	729
\leftarrow	730
\uparrow	731
\downarrow	732
\bullet	733
\circ	734
\square	735
\triangle	736
\diamond	737
\times	738
\div	739
$\%$	740
$\&$	741
$\#$	742
$\$$	743
$\%$	744
$\&$	745
$\#$	746
$\$$	747
$\%$	748
$\&$	749
$\#$	750
$\$$	751
$\%$	752
$\&$	753
$\#$	754
$\$$	755
$\%$	756
$\&$	757
$\#$	758
$\$$	759
$\%$	760
$\&$	761
$\#$	762
$\$$	763
$\%$	764
$\&$	765
$\#$	766
$\$$	767
$\%$	768
$\&$	769
$\#$	770
$\$$	771
$\%$	772
$\&$	773
$\#$	774
$\$$	775
$\%$	776
$\&$	777
$\#$	778
$\$$	779
$\%$	780
$\&$	781
$\#$	782
$\$$	783
$\%$	784
$\&$	785
$\#$	786
$\$$	787
$\%$	788
$\&$	789
$\#$	790
$\$$	791
$\%$	792
$\&$	793
$\#$	794
$\$$	795
$\%$	796
$\&$	797
$\#$	798
$\$$	799
$\%$	800

図 4 (1/2) 原子炉系 (蒸気部) [クラス 1-耐震 S クラス] アイソメ図



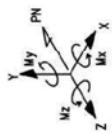
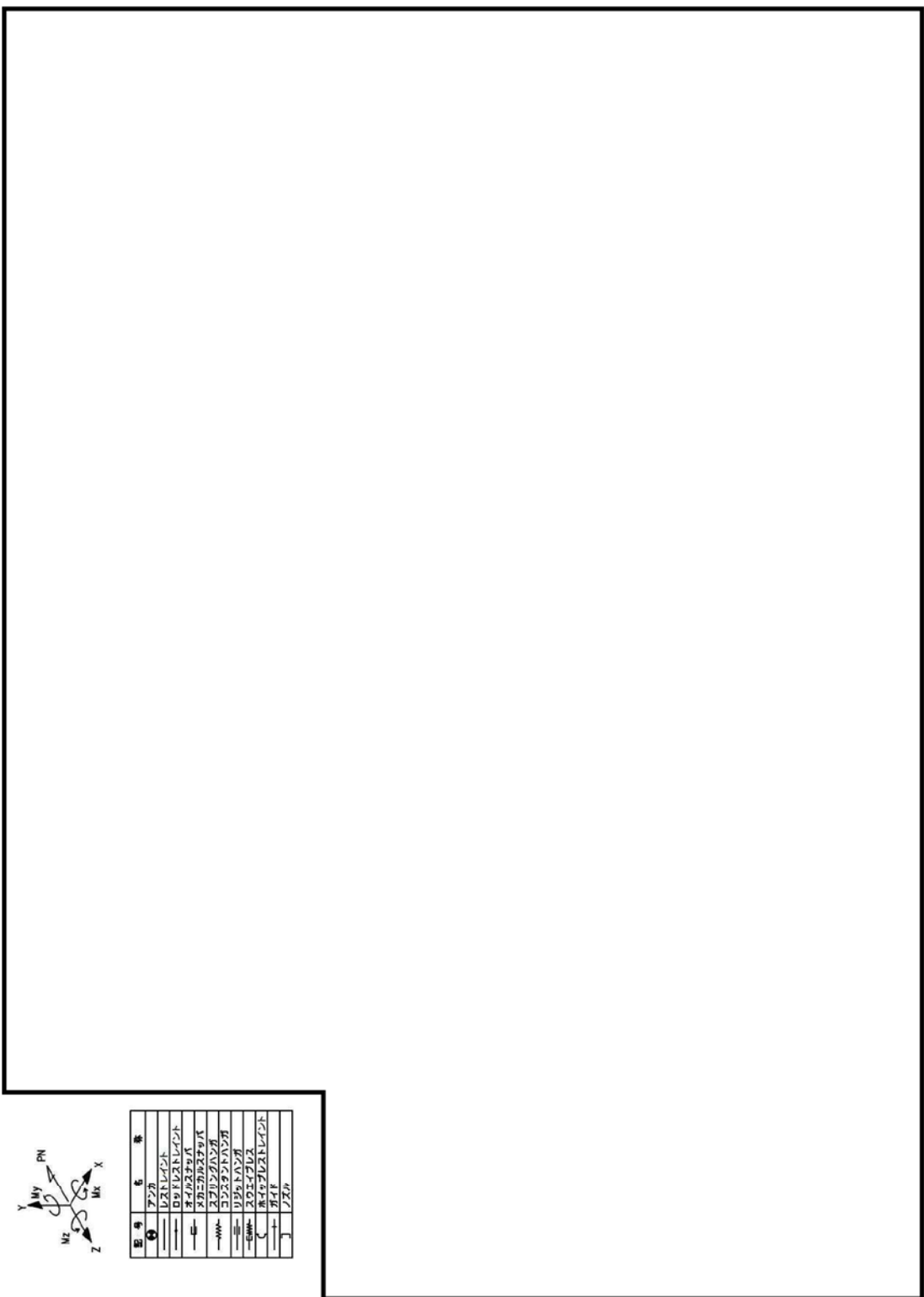
記号	名称
ア	アンカ
レ	レストレイント
ロ	ロッドレストレイント
オ	オイルスタンプ
メ	メカニカルスタンプ
ス	スプリングハンダ
コ	コンスタントハンダ
リ	リリフトハンダ
ス	スウェイブレス
ホ	ホイップレストレイント
ブ	ブライク
ノ	ノズル

図 4 原子炉系 (2/2) (蒸気部) [クラス 1-耐震 S クラス] アイソメクス



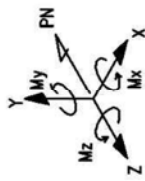
記号	名称
\odot	727
\ominus	728
\rightarrow	729
\leftarrow	730
\uparrow	731
\downarrow	732
\bullet	733
\circ	734
\square	735
\triangle	736
\diamond	737
\times	738
\div	739
$\%$	740
$\&$	741
$\#$	742
$\$$	743
$\%$	744
$\&$	745
$\#$	746
$\$$	747
$\%$	748
$\&$	749
$\#$	750
$\$$	751
$\%$	752
$\&$	753
$\#$	754
$\$$	755
$\%$	756
$\&$	757
$\#$	758
$\$$	759
$\%$	760
$\&$	761
$\#$	762
$\$$	763
$\%$	764
$\&$	765
$\#$	766
$\$$	767
$\%$	768
$\&$	769
$\#$	770
$\$$	771
$\%$	772
$\&$	773
$\#$	774
$\$$	775
$\%$	776
$\&$	777
$\#$	778
$\$$	779
$\%$	780
$\&$	781
$\#$	782
$\$$	783
$\%$	784
$\&$	785
$\#$	786
$\$$	787
$\%$	788
$\&$	789
$\#$	790
$\$$	791
$\%$	792
$\&$	793
$\#$	794
$\$$	795
$\%$	796
$\&$	797
$\#$	798
$\$$	799
$\%$	800

図5 原子炉系（蒸気部）[クラス2-耐震Sクラス] アイソメ図



記号	記号	名称
①	ア	ア
—	レ	レ
—	ロ	ロ
—	ハ	ハ
—	ニ	ニ
—	ホ	ホ
—	ヘ	ヘ
—	ト	ト
—	チ	チ
—	リ	リ

図6 復水系 [クラス3-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
●	アンカ
—	レストレイント
—	ロックレストレイント
—	オイルスタンプ
—	メカニカルスタンプ
—	スプリングハンガ
—	コンスタントハンガ
—	リジッドハンガ
—	スウェイブレス
—	ホイップレストレイント
—	ガイド
—	ワズル

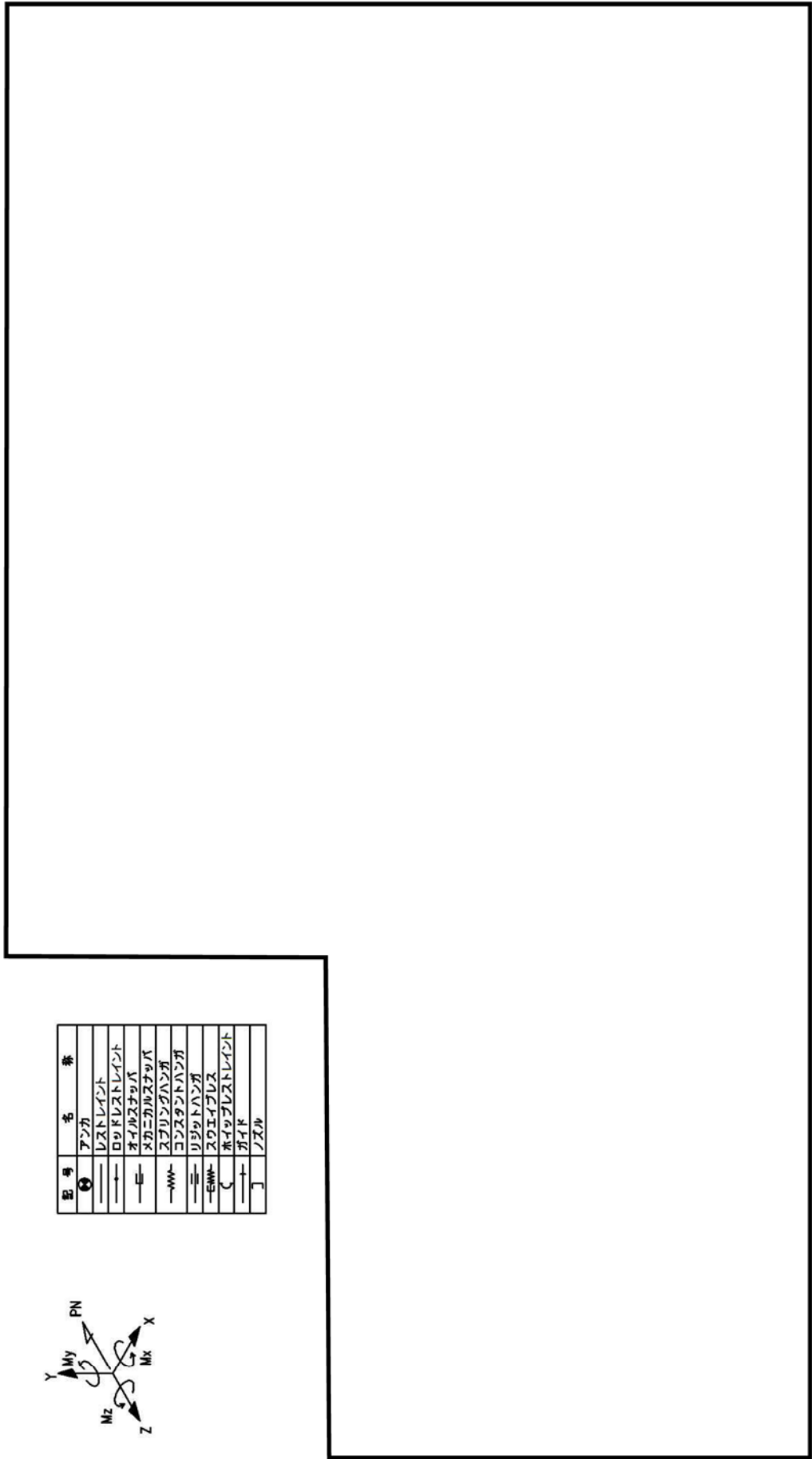
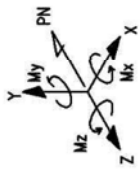


図7 給水系 [クラス2-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
⊕	アソカ
—	レストレイント
—	ロットレストレイント
—	オイルシヤツバ
—	メカニカルスタツバ
—	スプリングハンダ
—	コンスタントハンダ
—	リフトハンダ
—	スウェィチレス
⌋	ワイヤレストレイント
—	ワイヤ
⌋	ノズル

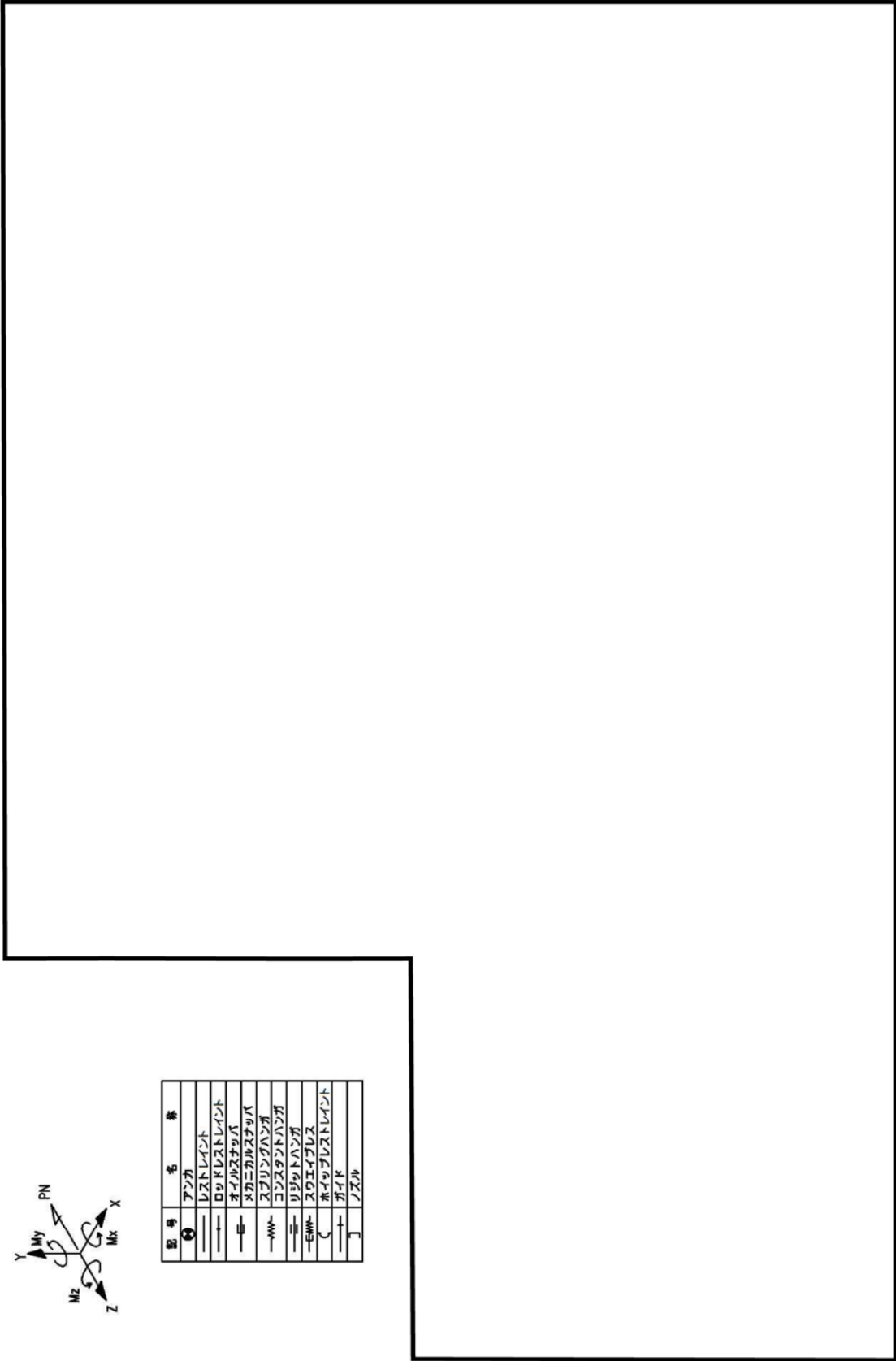
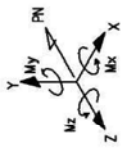


図 8 給水系 [クラス 2-耐震 B クラス] アイソメ図



記号	名称
\odot	アング
\ominus	レストレスト
\rightarrow	ロトルストレスト
\leftarrow	キカスツバ
\sim	クニニシキツバ
\sim	スツバツバ
\sim	コナツバ
\sim	リツバ
\sim	スツバ
\sim	クニニシキツバ
\sim	リツバ

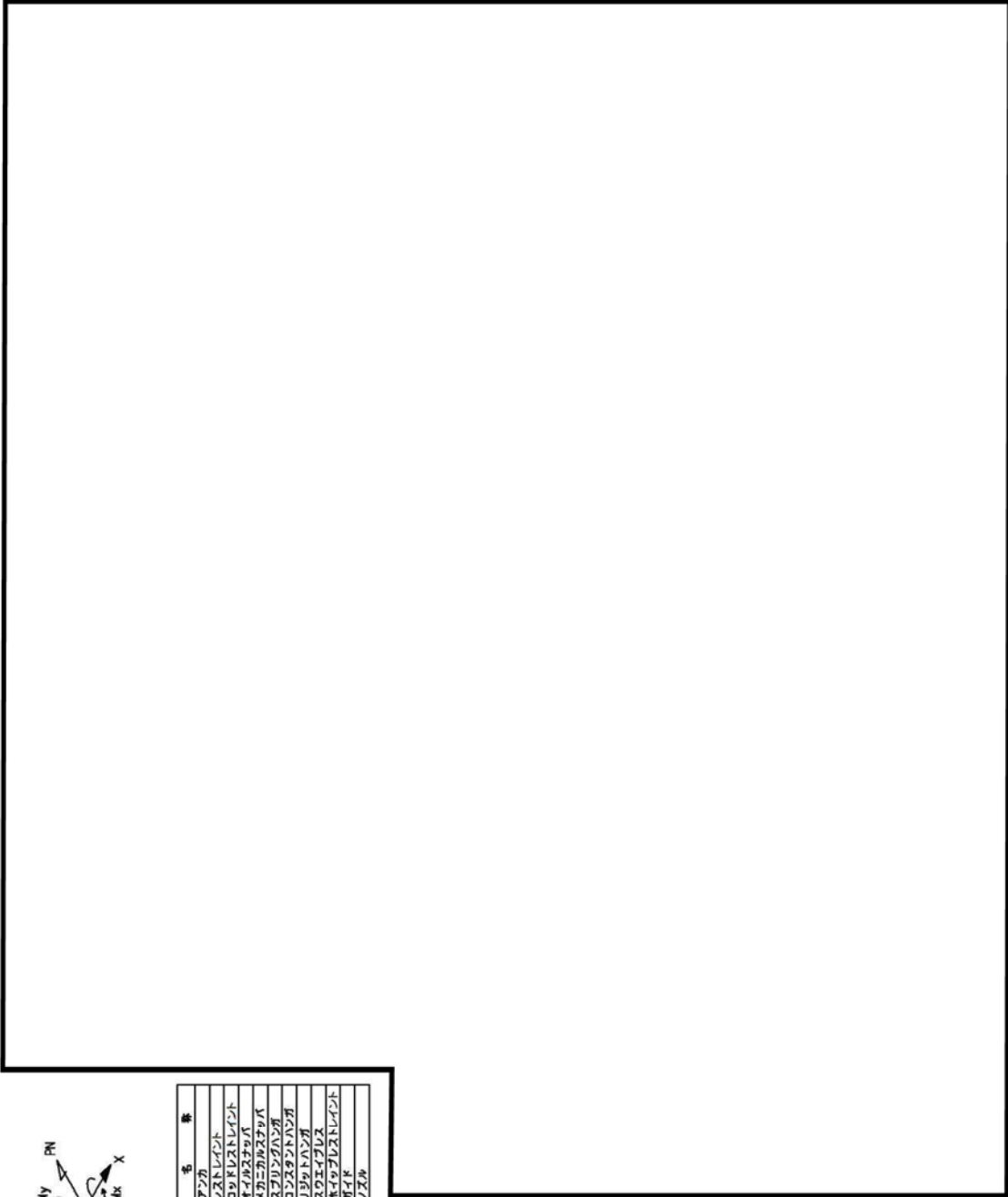
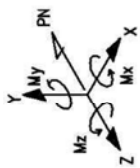


図9 給水系 [クラス3-耐震Bクラス] アイソメ図



記号	名称
⑥	アンカ
—	レストレイント
—	ロックレストレイント
—	オイルスタンプ
—	スリニカメスタンプ
—	スプリングハンガ
—	コンスタントハンガ
—	リリットハンガ
—	スウェイブレス
C	ハイブリッドレストレイント
—	ガイド
J	ノズル

図 10 給水加熱器ドレン系 [クラス 3—耐震 B クラス] アイソメ図

基礎ボルトの耐震安全性評価に関する計算過程について

耐震安全性評価書における基礎ボルトの評価は、原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987) に基づき実施しており、評価に伴う計算過程については、表1のとおり JEAG4601-1987 に基づく評価手法ごとに、ボルトに作用する力を解析コードで求めるか否かを分類し、その中で発生応力に対して許容応力の裕度が低い機器を代表として説明することとする。

なお、主排気筒は建築基準法に準じて評価するため代表とし、添付番号9として説明する。

表1 JEAG4601の基礎ボルト評価手法と補足説明代表機器

JEAGの基礎ボルト評価手法	解析コード	補足説明資料として代表する機器	添付番号
スカート支持たて置円筒形容器	有	—	—
	無	濃縮廃液貯蔵タンク	1
平底たて置き円筒形容器	有	—	—
	無	ほう酸水注入系ほう酸水貯蔵タンク	2
四脚たて置円筒形容器	有	—	—
	無	活性炭ベット	3
横置円筒形容器	有	—	—
	無	廃液濃縮器復水器	4
ラグ支持たて置円筒形容器	有	残留熱除去系熱交換器	5
	無	廃液濃縮器蒸発缶	6
立形ポンプ	有	残留熱除去系海水系ポンプ	7
	無	—	—
横形ポンプ	有	—	—
	無	残留熱除去系海水系ポンプ出口ストレーナ	8

残留熱除去系海水系ポンプの耐震安全性評価

(基礎ボルトの強度計算)

【立形ポンプ】

1. 立形ポンプの基礎ボルトの耐震計算書（算出応力が最大となる静解析）を以下に示す。

1.1 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s) (解析値)		弾性設計用地震動 S_d		基準地震動 S_s		ポンプ振動による震度	評価温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向震度	鉛直方向震度	水平方向震度	鉛直方向震度		
残留熱除去海水系ポンプ	S	取水ポンプ室 EL 0.3 ^{*1}	0.067	0.023	$C_H=0.69$	$C_V=2.66$	$C_H=0.69$	$C_V=2.66$	$C_P=0.09$	50

注記 *1：基準床レベルを示す。ポンプの設置床レベルは EL 0.8m

1.2 機器要目

部材	m_i (kg)	D_i (mm)	A_{bi} (mm ²)	n_i	n_{fi}	M_p (N・mm)	S_{yi} (MPa)	S_{ui} (MPa)	F_i (MPa)	
									弾性設計用地震動 S_d	基準地震動 S_s
基礎ボルト ($i=1$)	26844	2000	1.346×10^3 ^{*1} (M42)	8	8	-	260 ^{*2} (径 ≤ 100 mm)	430 ^{*2} (径 ≤ 100 mm)	260	301

注記 *1：直径 0.6mm の減肉を考慮する。

*2：周囲環境温度で算出

予想最大両振幅 (μm)	回転速度 (min^{-1})
$H_p=65$	$N=1500$

1.3 計算数値

1.3.1 ボルトに作用する力

部材	M_i (N・mm)		Q_{bi} (N)	
	基準地震動 S_s (静解析)	弾性設計用地震動 S_d (静解析)	基準地震動 S_s (静解析)	弾性設計用地震動 S_d (静解析)
基礎ボルト ($i=1$)	3.161×10^8		1.689×10^5	

1.3.2 固有周期 (単位：s)

モード	固有周期
水平 1次	$T_{H1}=0.067$
鉛直 1次	$T_{V1}=0.023$

1.4 評価結果

1.4.1 ボルトの応力の計算結果 (計算過程については次項に示す。)

以下の評価結果より、引張、せん断ともに評価応力は、許容応力以下である。

部材	基礎ボルト	
	S22C	
材料		
評価応力	引張 (N・mm ²)	せん断 (N・mm ²)
基準地震動 S_s (静解析)	$\sigma_{bi}=97$	$\tau_{bi}=16$
弾性設計用地震動 S_d (静解析)	$\sigma_{bi}=97$	$\tau_{bi}=16$
許容応力*1	195	150

*1：設計建設規格 Part5 表 8, 表 9 より求まる値であり、 s_s 地震力が s_d 地震力及び S クラスの機器に適用される静的地震力より大きく、 s_s 地震力による評価応力が III_AS の許容応力を下回る機器については、S クラス機器は III_AS の許容応力とする。

1.5 残留熱除去系海水系ポンプの基礎ボルトの耐震評価は、原子力発電所耐震設計技術指針「JEAG4601-1987」の「立形ポンプ」に準拠し評価を行う。

計算に使用する記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_{bi}	ボルトの軸断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_P	ポンプ振動による震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D_i	ボルトのピッチ円直径	mm
d_i	基礎ボルトの軸径	mm
F_i	設計・建設規格 SSB-3131 又は SSB-3133 に定める値	MPa
F_{bi}	ボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
f_{sbi}	せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力	MPa
f_{tsi}	引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
H_P	予想最大両振幅	μm
M	計算モデルによる多質点解析により求められるモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_i	それぞれのボルトを支点とする地震及び水平方向のポンプ振動による転倒モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_P	ポンプ回転により作用するモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
m_i	運転時質量	kg
N	回転速度（原動機の同期回転速度）	min^{-1}
n_i	ボルトの本数	—
n_{fi}	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数	—
Q_{bi}	地震及び水平方向のポンプ振動によりボルトに作用するせん断力	N
S_{ui}	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_{yi}	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
T_{Hi}	水平方向固有周期	s
T_{Vi}	鉛直方向固有周期	s
σ_{bi}	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_{bi}	ボルトに生じるせん断応力	MPa

注1：「設計・建設規格」とは、発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC1-2005（日本機械学会 2005年9月））をいう。

注2： A_{bi} 、 D_i 、 d_i 、 F_i 、 F_{bi} 、 f_{sbi} 、 f_{tsi} 、 M_i 、 n_i 、 n_{fi} 、 Q_{bi} 、 S_{ui} 、 S_{yi} 、 σ_{bi} 及び τ_{bi} の添字 i の意味は、以下のとおりとする。

$i=1$ ：基礎ボルト

注 3 : m_i の添字 i の意味は、以下のとおりとする。

$i=1$: 据付面

注 4 : T_{Hi} 及び T_{Vi} の添字 i の意味は、固有周期の次数を示す。

1.6 評価に使用した計算式

(1) 引張応力

円形計算モデルの場合のボルトに対する引張力は、転倒支点から正比例した力が作用するものとし、最も厳しい条件として転倒支点から最も離れたボルトについて計算する。計算手法を以下に示す。

① 引張力

S クラスポンプであり鉛直震度を考慮する。

$$F_{bi} = \frac{\sum_{i=1}^3 W_i (C_H + C_p) h_i - \sum_{i=1}^3 W_i (1 - C_p - C_v) \frac{D_i}{2}}{\frac{3}{8} \times n_f \times D_i}$$

…① (JEAG4601-1987 式(6.6.3-514)より)

ここで、

$$W_i (C_H + C_p) h_i = M_i$$

M_i は計算機コード「NASTRAN」により求める。よって、

$$F_{bi} = \frac{M_i - (1 - C_p - C_v) \times m_i \times g \times \frac{D_i}{2}}{\frac{3}{8} \times n_f \times D_i}$$

② 引張応力

$$\sigma_{bi} = \frac{F_{bi}}{A_{bi}}$$

…② (JEAG4601-1987 式(6.6.3-515)より)

(2) せん断応力

ボルトに対するせん断力は、ボルト全本数で受けるものとして計算する。なお、基礎ボルトについては、ポンプ回転によるモーメントは作用しない。

① せん断力

せん断力は計算機コード「NASTRAN」により求める Q_{bi} 及びポンプ回転により作用するモーメント M_p を考慮して求める。

② せん断応力

$$\tau_{bi} = \frac{Q_{bi} + 2 \times \frac{M_p}{D_i}}{n_i \times A_{bi}}$$

…③ (JEAG4601-1987 式(6.6.3-511)より)

(3) 許容応力

(1) で算出した引張応力 σ_{bi} は次式より求めた許容引張応力 f_{tsi} 以下であること。

(2) で算出したせん断応力 τ_{bi} は次式より求めた許容せん断応力 f_{sbi} 以下であること。

$$f_{tsi} = 1.4f_{toi} - 1.6 \tau_{bi}$$

…④ (JEAG4601-1987 式(6.6.3-63)より)

かつ,

$$f_{tsi} \leq f_{toi}$$

ただし, f_{toi} 及び f_{sbi} は下表による。

	許容引張応力 f_{toi}	許容せん断応力 f_{sbi}
計算式	$\frac{F_i}{2} \times 1.5$	$\frac{F_i}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \times 1.5$

2. 基礎ボルトの耐震計算の算出過程

算出応力が最大となる静解析を例に算出経過を以下に示す。

2.1 入力データ

	項目	記号	入力	単位
分類・ 設置	機器名称	残留熱除去系海水系ポンプ		
	耐震設計上の重要度分類	S		
	据付場所	取水ポンプ室		
	基準床レベル	EL	0.3	m
震度	地震による鉛直方向設計震度(S_d)	C_{V1}	2.66	
	地震による鉛直方向設計震度(S_s)	C_{V2}	2.66	
温度条件	※2 評価用温度	t1	50	°C
質量	原動機質量	mM	14204	kg
	原動機台質量	mF	2325	kg
	ポンプ質量	mP	7237	kg
	ポンプ水質量	mW	1570	kg
	ベース質量	mB	1508	kg
	アウターケーシング質量	mCo	0	kg
原動機他	原動機出力	P	900	kW
	ポンプ回転数	N	1500	min ⁻¹
	予想最大両振幅	H _p	65	μm
基礎ボルト				
1	基礎ボルトのピッチ円直径	D_1	2000	mm
	※1 基礎ボルトの軸径	d_1	41.4	mm
	基礎ボルトの本数	n_1	8	本
	引張力を受ける基礎ボルトの本数	n_{f1}	8	本
2	* 基礎ボルトに作用する転倒モーメント(S_d)	$M_1 S_d$	316130260	N・mm
	* 基礎ボルトに作用するせん断力(S_d)	$Q_{b1} S_d$	168910.14	N
	* 基礎ボルトに作用する転倒モーメント(S_s)	$M_1 S_s$	316130260	N・mm
	* 基礎ボルトに作用するせん断力(S_s)	$Q_{b1} S_s$	168910.14	N
※1 腐食による減肉を考慮した軸径（ボルト呼び径に対して直径0.6mmの減肉を考慮する。） ※2 評価用温度は周囲環境温度 π ; 3.141592654 g ; 9.80665				

	項目	記号	入力	単位
	基礎ボルト材料	S22C	—	—
	評価温度（下記による。中間値は線形補間により算出）（温度）	ta	tb	—
		40	75	°C
	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8（設計降伏点）	S _{ya}	S _{yb}	
		265	250	MPa
	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9（設計引張強さ）	S _{ua}	S _{ub}	—
		440	406	MPa

2.2 耐震計算書

2.2.1 基礎ボルト（弾性設計用地震動 S_d ）

2.2.1.1 計算各値

ポンプ振動による震度は以下のとおり求める。

$$C_p = \frac{1}{2} \times \frac{H_p}{1000} \times \frac{\left(2 \times \pi \times \frac{N}{60}\right)^2}{g \times 1000}$$

小数点以下第3位切上げ

$$= \frac{1}{2} \times \frac{65}{1000} \times \frac{\left(2 \times \pi \times \frac{1500}{60}\right)^2}{9.80665 \times 1000} = 0.081771 \dots \rightarrow 0.09$$

運転時質量は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned} m_1 &= m_M + m_F + m_P + m_W + m_B + m_{Co} \\ &= 14204 + 2325 + 7237 + 1570 + 1508 + 0 \\ &= 26844 \text{ kg} \end{aligned}$$

ポンプ回転により働くモーメントは以下のとおり求める。

$$\begin{aligned} M_p &= (60 \div 2 \div \pi \div N) \times 10^6 \times P \\ &= (60 \div 2 \div \pi \div 0) \times 10^6 \times 0 = 0 \rightarrow \quad - \quad \text{N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

(基礎ボルトに M_p は作用しない)

ボルトの軸断面積は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned} A_{b1} &= \frac{\pi}{4} \times d_1^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \times 41.4^2 = 1346.14103 \dots \rightarrow 1346 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

有効数字5桁目四捨五入

2.2.1.2 引張応力の計算

引張力は式①より

$$\begin{aligned} F_{b1sd} &= \frac{M_{1Ss} - (1 - C_p - C_{v1}) \times m_1 \times g \times \frac{D_1}{2}}{\frac{3}{8} \times n_{f1} \times D_1} \\ &= \frac{316130260 - (1 - 0.09 - 2.66) \times 26844 \times 9.80665 \times \frac{2000}{2}}{\frac{3}{8} \times 8 \times 2000} \\ &= 129469.54284 \dots \rightarrow 129500 \text{ N} \end{aligned}$$

有効数字5桁目四捨五入

引張応力は式②より

$$\begin{aligned}\sigma_{b1sd} &= \frac{F_{b1sd}}{A_{b1}} \\ &= \frac{129469.54284}{1346.141185} = 96.17827 \dots \rightarrow 97 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第 1 位切上げ}\end{aligned}$$

2.2.1.3 せん断応力の計算

せん断応力は式③より

$$\begin{aligned}\tau_{b1sd} &= \frac{\left(Q_{b1sd} + 2 \times \frac{M_p}{D_1}\right)}{n_1 \times A_{b1}} \\ &= \frac{\left(168910.14 + 2 \times \frac{0}{2000}\right)}{8 \times 1346.14118} = 15.68466 \dots \rightarrow 16 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第 1 位切上げ}\end{aligned}$$

2.2.1.4 許容応力 「JSME」SSB-3132（供用状態Cでの許容応力）

(1) 設計・建設規格 SSB-3131 又は SSB-3133 に定める値 F_1

設計・建設規格 SSB-3131 又は SSB-3133 に定める値： F_1 は以下のとおりとなる。

$$F_1 = \min(S_{y1}, 0.7S_{u1})$$

評価温度における設計降伏点 S_{y1} を以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}S_{y1} &= S_{ya} + (S_{yb} - S_{ya}) \times (t_1 - t_a) \div (t_b - t_a) \\ &= 265 + (250 - 265) \times (50 - 40) \div (75 - 40) \\ &= 260.71428 \dots \rightarrow 260 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第 1 位切捨}\end{aligned}$$

評価温度における設計引張強さ S_{u1}

$$\begin{aligned}S_{u1} &= S_{ua} + (S_{ub} - S_{ua}) \times (t_1 - t_a) \div (t_b - t_a) \\ &= 440 + (406 - 440) \times (50 - 40) \div (75 - 40) \\ &= 430.28571 \dots \rightarrow 430 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第 1 位切捨}\end{aligned}$$

$$0.7S_{u1} = S_{u1} \times 0.7 = 430 \times 0.7 = 301$$

したがって、 F_1 は以下のとおりとなる。

$$F_1 = \min(S_{y1}, 0.7S_{u1}) = \min(260, 301) = 260 \text{ MPa}$$

(2) 許容引張応力

許容引張応力 f_{to1} は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}
 f_{to1} &= \frac{F_1}{2} \times 1.5 \\
 &= \frac{260.7143}{2} \times 1.5 = 195.53572 \dots \rightarrow 195 \text{ MPa} \\
 &\quad \text{小数点以下第1位切捨}
 \end{aligned}$$

(3) 組合せ許容引張応力

組合せ許容引張応力は式④より

$$\begin{aligned}
 f_{ts1} &= 1.4 \times f_{to1} - 1.6 \times \tau_{b1sd} \\
 &= 1.4 \times 195.5357 - 1.6 \times 15.68466 = 248.65452 \dots \\
 &\quad \rightarrow 248 \text{ MPa} \quad \text{小数点以下第1位切捨}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{ts1} &= \min(f_{to}, f_{ts}) \\
 &= \min(195, 248) = 195 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

(4) 許容せん断応力

許容せん断応力 f_{sb1} は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}
 f_{sb1} &= \frac{F_1}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 \\
 &= \frac{260.7143}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 150.52347 \dots \rightarrow 150 \text{ MPa} \\
 &\quad \text{小数点以下第1位切捨}
 \end{aligned}$$

2.2.2 基礎ボルト (基準地震動 S_s)

2.2.2.1 計算各値

ポンプ振動による震度は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}C_p &= \frac{1}{2} \times \frac{H_p}{1000} \times \left(2 \times \pi \times \frac{N}{60}\right)^2 \div 9806.65 \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{65}{10000} \times \left(2 \times \pi \times \frac{1500}{60}\right)^2 \div 9806.65 \\ &= 0.0817715 \dots \rightarrow 0.09\end{aligned}$$

小数点以下第3位切上げ

運転時質量は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}m_1 &= m_M + m_F + m_P + m_W + m_B + m_{Co} \\ &= 14204 + 2325 + 7237 + 1570 + 1508 + 0 \\ &= 26844 \text{ kg}\end{aligned}$$

ポンプ回転により働くモーメントは以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}M_p &= (60 \div 2 \div \pi \div N) \times 10^6 \times P \\ &= (60 \div 2 \div \pi \div 0) \times 10^6 \times 0 = 0 \rightarrow \quad - \quad \text{N} \cdot \text{mm} \\ &\quad (\text{基礎ボルトに} M_p \text{は作用しない})\end{aligned}$$

ボルトの軸断面積は以下のとおり求める。

$$\begin{aligned}A_{b1} &= \frac{\pi}{4} \times d_1^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \times 41.4^2 = 1346.14103 \dots \rightarrow 1346 \text{ mm}^2 \\ &\quad \text{有効数字5桁目四捨五入}\end{aligned}$$

2.2.2.2 引張応力の計算

(1) 引張力 (①式より)

引張力は①式より)

$$\begin{aligned}F_{b1Ss} &= \frac{M_{ISs} - (1 - C_p - C_{v1}) \times m_1 \times g \times \frac{D_1}{2}}{\frac{3}{8} \times n_{f1} \times D_1} \\ &= \frac{316130260 - (1 - 0.09 - 2.66) \times 26844 \times 9.80665 \times \frac{2000}{2}}{\frac{3}{8} \times 8 \times 2000} \\ &= 129469.54284 \dots \rightarrow 129470 \text{ N} \\ &\quad \text{有効数字5桁目四捨五入}\end{aligned}$$

(2) 引張応力は式②より

$$\begin{aligned}\sigma_{b1Ss} &= \frac{F_{b1Ss}}{A_{b1}} \\ &= \frac{129469.54284}{1346.141185} = 96.178279 \dots \rightarrow 97 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第1位切捨}\end{aligned}$$

2.2.2.3 せん断応力の計算 (式③より)

せん断応力の計算は式③より

$$\begin{aligned}\tau_{b1Ss} &= \frac{\left(Q_{b1Ss} + 2 \times \frac{M_p}{D_1}\right)}{n_1 \times A_{b1}} \\ &= \frac{\left(168910.14 + 2 \times \frac{0}{2000}\right)}{8 \times 1346.14118} = 15.68466 \dots \rightarrow 16 \text{ MPa} \\ &\quad \text{小数点以下第1位切捨}\end{aligned}$$

2.2.2.4 許容応力「JSME」SSB-3133 (供用状態Dでの許容応力)

許容応力は、設計建設規格 Part5 表 8, 表 9 より求まる値であり, Ss 地震力が Sd 地震力及び S クラスの機器に適用される静的地震力より大きく, Ss 地震力による評価応力が III_{AS} の許容応力を下回るため III_{AS} の許容応力とする。

したがって、立形ポンプの基礎ボルトの腐食を想定した耐震評価については、許容応力に対して発生応力が下回っていることを確認した。

V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書

目次

1. 概要	1
2. 構造説明	2
2.1 構造計画	2
3. 燃料集合体の地震応答解析	3
4. 制御棒の挿入性試験	5
4.1 試験装置	5
4.2 試験方法	5
4.3 試験結果	5
5. 検討結果	11

1. 概要

本計算書は、制御棒の耐震性について示すものである。

地震時において制御棒に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保である。

制御棒の挿入機能の確保については、原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1・補-1984）にしたがって、地震時における制御棒の挿入性についての検討を行い、基準地震動 S_s に対し制御棒の挿入性が確保されることを試験により確認する。

制御棒の挿入機能確保に必要な形状を維持するための構造部材は、シース、ハンドル、タイロッド、落下速度リミッタであり、制御棒挿入試験により挿入機能が確認される。

なお、ボロンカーバイド型制御棒の運転寿命は、核的寿命、機械的寿命のうち核的寿命によって定まる。

ボロンカーバイド型制御棒のボロンカーバイド粉末を充填した中性子吸収棒については、中性子照射によるガス等の発生に伴い中性子吸収棒の内圧が上昇するが、寿命末期において中性子吸収棒の変形は生じない。

以上より、制御棒の寿命中において中性子吸収材によるシースの変形はないことから、制御棒の挿入性に影響を与えることはない。

2. 構造説明

2.1 構造計画

制御棒の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図
	基礎・支持構造	主体構造	
1. 制御材 (1) 制御棒	制御棒は、カップリングソケットにより制御棒駆動機構に支持される。	十字形制御棒	

3. 燃料集合体の地震応答解析

燃料集合体の地震応答解析は圧力容器内部構造物の一部として実施している。

設計用地震波としては、基準地震動 S_s を採用している。

応答解析は、時刻歴応答解析法を適用して建屋の N-S, E-W 両方について実施している。

燃料集合体の計算された最大応答相対変位を図 3-1 に示すが、最大応答相対変位は 16.8 mm となる。

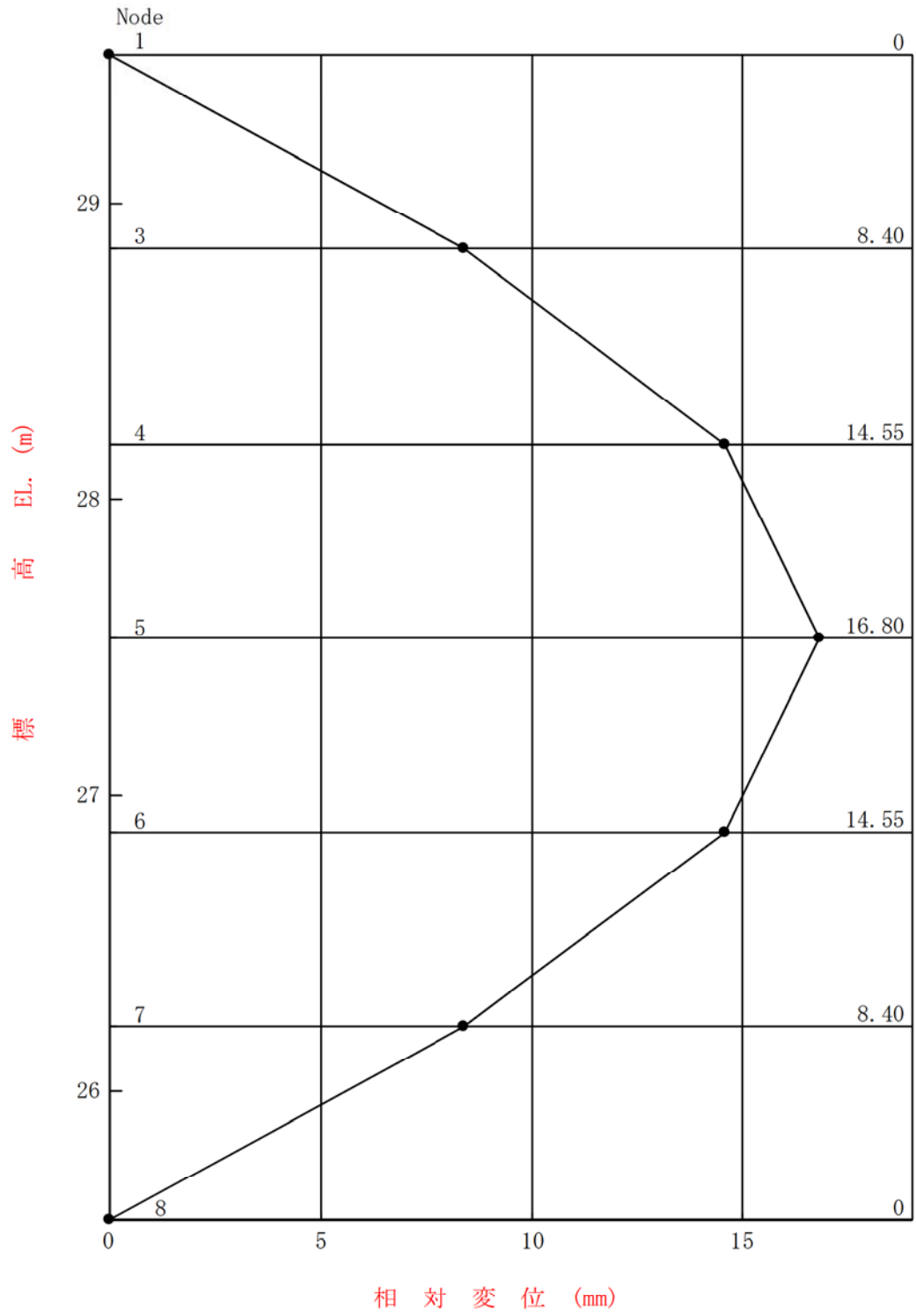


圖 3-1 燃料集合體最大応答相對變位

4. 制御棒の挿入性試験

4.1 試験装置

試験装置の概要を図 4-1 に示す。試験装置は炉心を模擬するために、試験容器内に上部格子板、燃料集合体、制御棒案内管を据え付け、下部に制御棒駆動機構ハウジングを接続している。

試験用機器仕様の概要を表 4-1 に示す。燃料集合体の質量を模擬するため、燃料ペレットに鉛を使用している。制御棒*及び制御棒駆動機構等の供試体は実機仕様である。

試験に用いた計測装置の概要を図 4-2 に示す。

注記*：制御棒はフォロー付で実施しているが、制御棒の質量が増加する分、挿入時間は増す方向であり、試験としては安全側である。

4.2 試験方法

試験条件を表 4-2 に示す。

図 4-1 に示す試験容器内に 4 体の質量模擬燃料集合体を組み込んで、試験容器中央部に設けられている油圧加振機により試験容器を介して燃料集合体を強制加振し、スクラム試験を実施した。

試験では、燃料集合体の相対変位（振幅）及び制御棒の挿入時間を測定した。

4.3 試験結果

図 4-3 に燃料集合体相対変位と 90 %ストロークスクラム時間の関係を示す。

これによると、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、90 %ストロークスクラム時間が 3.5 秒以内である。

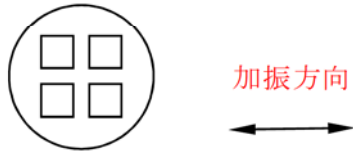
なお、制御棒挿入試験後において制御棒の外観に有意な変化はなかった。

表 4-1 試験用機器仕様の概要

試験用機器	仕様の概要
燃料集合体	質量模擬燃料集合体 (質量模擬のため、燃料ペレットに鉛を使用)
制御棒	実機仕様*
燃料支持金具	実機仕様
制御棒案内管	実機仕様
制御棒駆動機構	実機仕様
水圧制御ユニット	実機仕様
油圧加振機	加振力 : 水平 2.5×10^5 N ストローク : ± 100 mm

注記* : 制御棒はフォロワ付で実施しているが、制御棒の質量が増加する分、挿入時間は増す方向であり、試験としては安全側である。

表 4-2 試験条件

項目	条件
温度	室温
圧力	常圧*
加振条件	<p>加振方向 : 水平方向</p>  <p>加振振幅 : 燃料集合体の最大振幅が 0~40 mm の範囲</p> <p>加振振動数 : 約 5~6 Hz (燃料集合体の 水中固有振動数相当)</p> <p>加振波形 : 正弦波</p>
スクラム開始時の制御棒位置	全引き抜き状態

注記* : アクムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力
(6.93 MPa[gage]) 時のスクラムを模擬

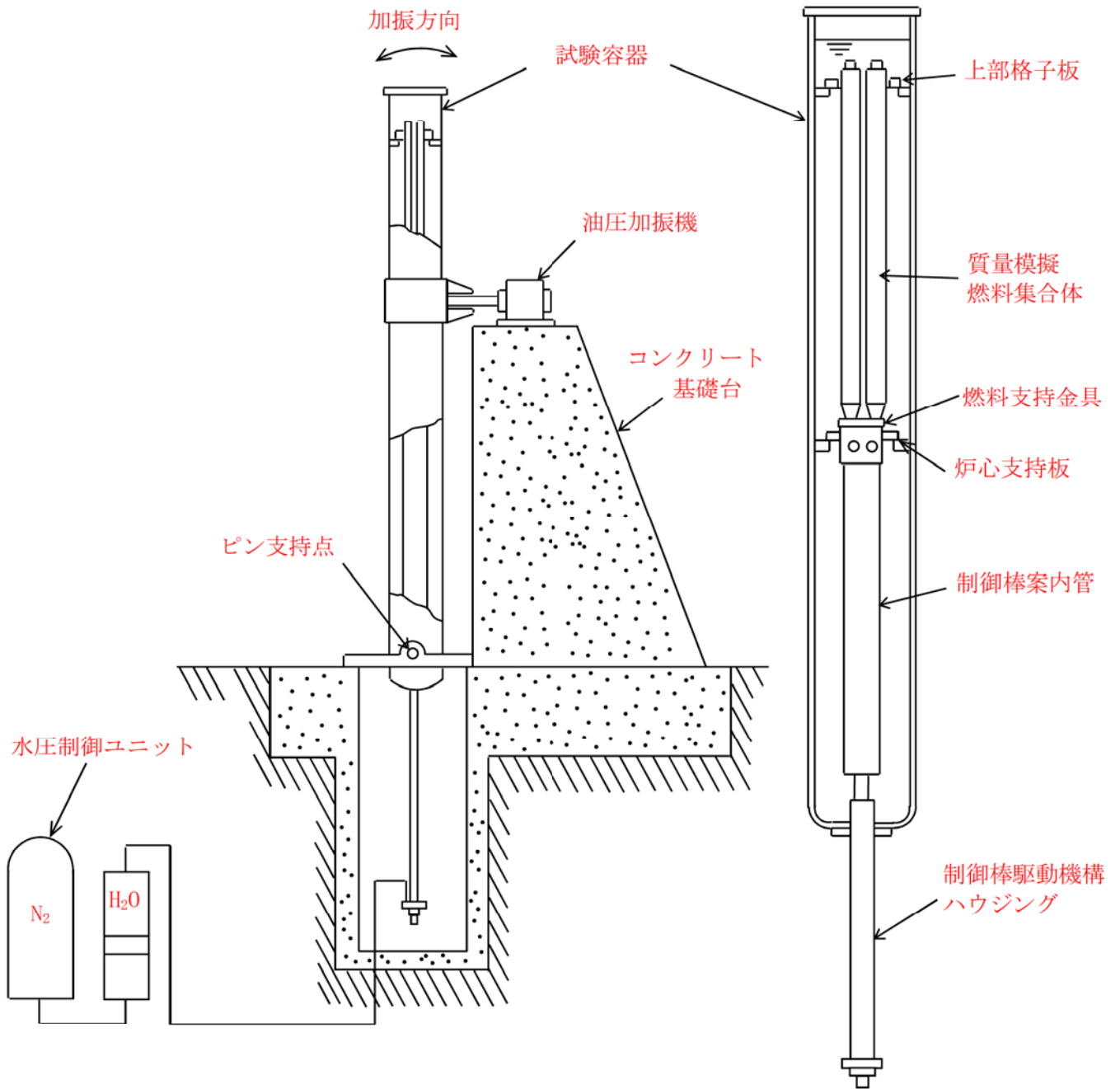


図 4-1 試験装置の概要

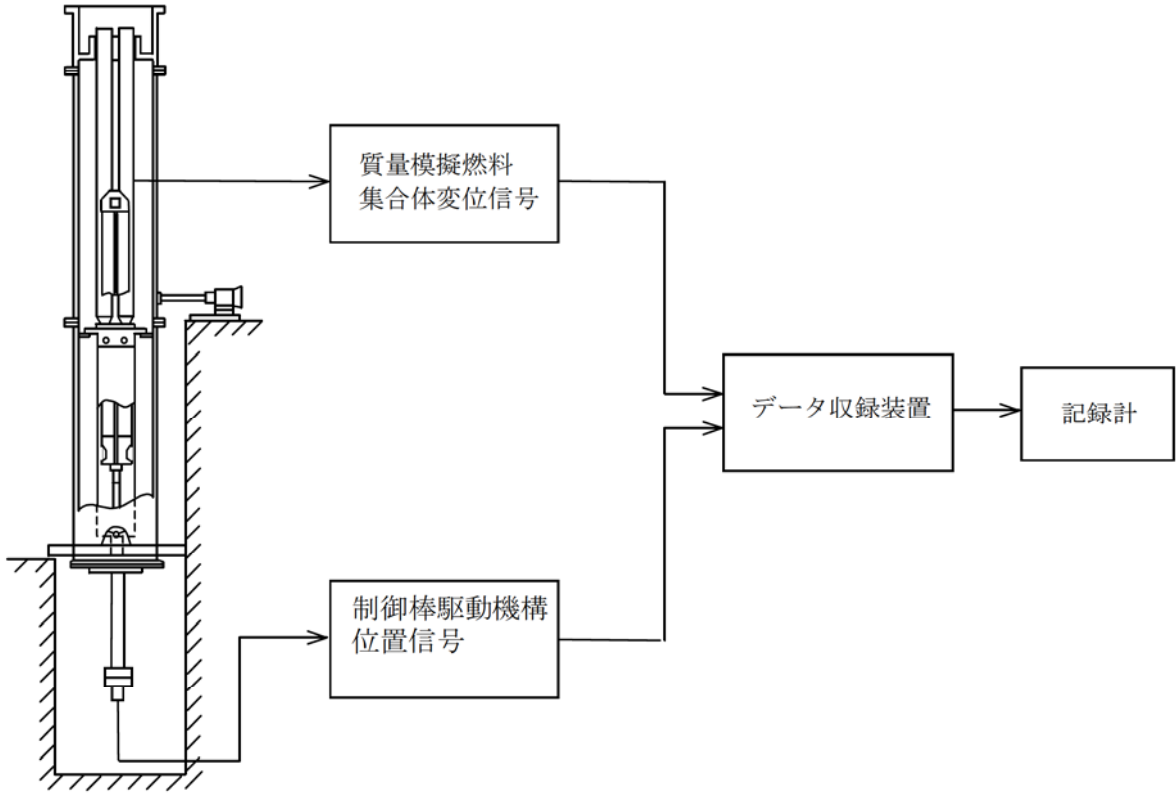


図 4-2 計測装置の概要

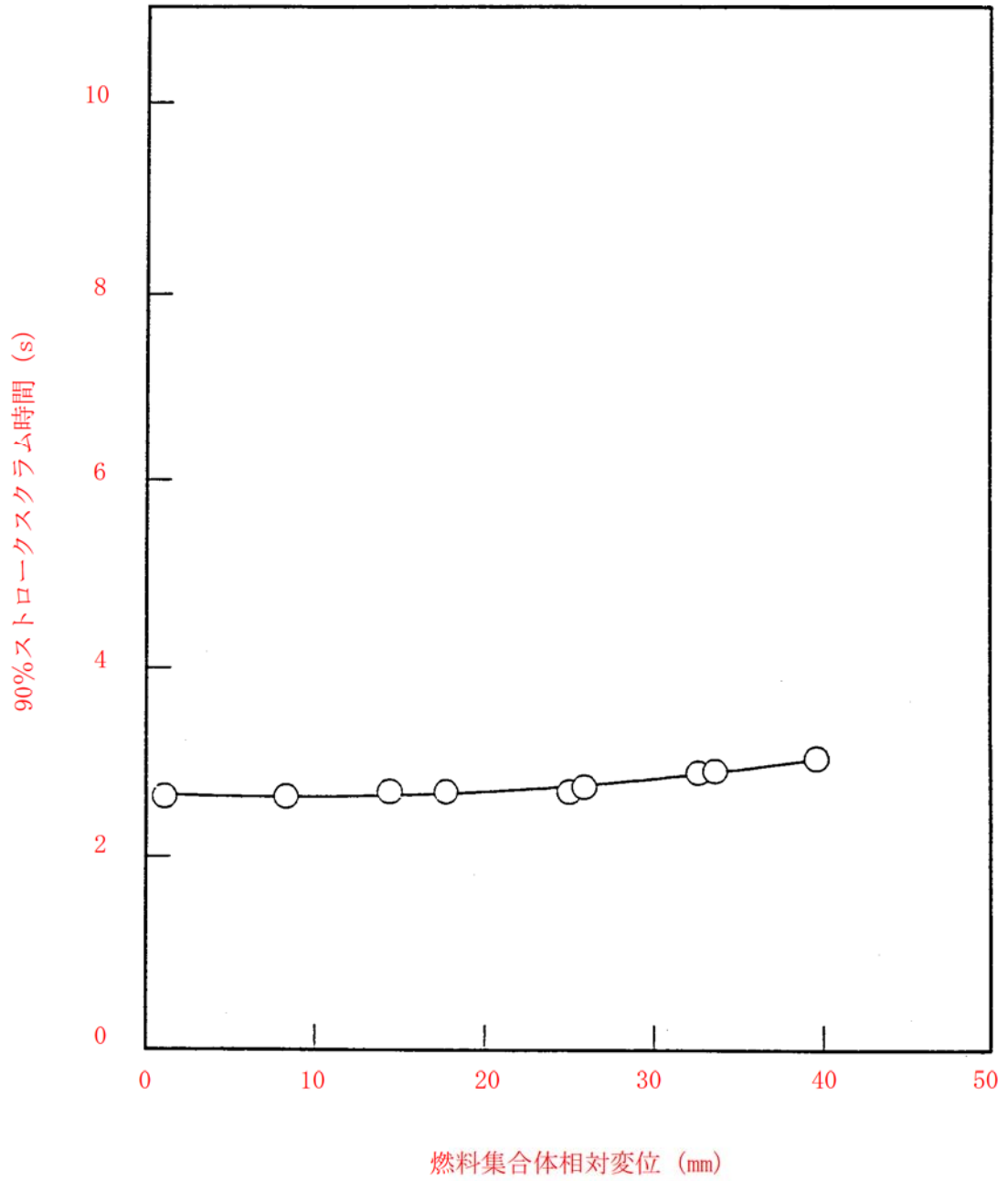


図 4-3 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響

5. 検討結果

燃料集合体の地震応答解析の結果、燃料集合体の最大応答相対変位は図 3-1 に示したように 40 mm 以下である。

また、制御棒挿入試験の結果より、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、通常のスラム仕様値 90 %ストローク 3.5 秒以内であり、試験後において制御棒の外観に有意な変化がないことが確認された。

したがって、基準地震動 S_s による最大相対変位に対し制御棒の挿入性と健全性は確保される。

V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書

目 次

1. 概 要	1
2. 基本方針	2
2.1 構造の説明	2
2.2 評価方針	3
3. 燃料集合体の地震応答解析	4
4. 地震時の制御棒挿入性試験検討	7
4.1 検討方法	7
4.2 検討結果	7
5. 地震時の燃料集合体の応力評価	8
5.1 燃料集合体の応力評価に用いる地震加速度	8
5.2 地震時の応力評価の方法	8
5.3 検討内容	9
5.4 検討結果	9

1. 概 要

本計算書は、燃料集合体の耐震性について示すものである。

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保及び崩壊熱除去可能な形状の維持である。

制御棒の挿入機能の確保については、原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編（JEAG4601・補-1984）に従って、地震時における制御棒の挿入性についての検討を行い、基準地震動 S_s に対し制御棒の挿入性が確保されることを試験により確認する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、燃料集合体を支持している炉心支持構造物が耐震設計上の重要度分類Sクラスで設計されており、その支持機能は地震時においても維持されるので、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、ここではさらに、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求める。

2. 基本方針

2.1 構造の説明

燃料集合体の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 燃料集合体の構造計画

主要区分	計画の概要		説明図
	基礎・支持構造	主体構造	
燃料集合体	<p>炉心は十字型制御棒とそれを囲む4体の燃料集合体を1ユニットとして構成される。燃料集合体の下部は下部タイププレートの着座面が炉心支持板上の燃料支持金具に嵌合して支持され、上部はユニットを構成する燃料集合体とともに上部炉心格子板内で水平方向に支持される。上下部タイププレート、スペーサ、ウォータロッド及びタイロッドには結合又は支持により骨格を形成する。4体の燃料集合体の外側にはめたチャンネルボックスの外面が制御棒の通路を構成する。</p>	<p>9×9燃料(A型)の燃料集合体は74本の燃料棒と2本のウォータロッドを、9×9燃料(B型)の燃料集合体は72本の燃料棒と1本のウォータチャンネルを、それぞれ9×9の正方格子に配列して7個のスペーサにより束ね、それらの上下端が上部タイププレート及び下部タイププレートと嵌合することにより形成される。燃料集合体を炉心に装荷する際には、外側にはチャンネルボックスをはめる。</p>	<p>The diagram illustrates the fuel assembly structure. The top part shows a cross-section of the fuel assembly within the core, highlighting the fuel collection body, channel box, control rod, and the upper core grid plate. The middle part shows the fuel assembly supported by the core support plate, lower type plate, and fuel support fixture. The bottom part shows a detailed view of the fuel assembly components, including the upper type plate, tie rod, spacer, fuel rod, water rod, channel box, and lower type plate.</p>

制御棒の構造計画の詳細は「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に示されている。

2.2 評価方針

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保及び崩壊熱除去可能な形状の維持である。

制御棒の地震時挿入性の評価については、炉心を模擬した実物大の部分モデルによる加振時制御棒挿入試験結果から挿入機能に支障を与えない最大燃料集合体変位を求め、地震応答解析から求めた燃料集合体変位がその最大燃料集合体変位を下回ることを確認する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、燃料集合体を支持している炉心支持構造物の支持機能が維持されれば、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求める。燃料被覆管の地震時応力は、運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）に燃料被覆管に作用している荷重と地震力を組み合わせて評価する。また、運転中に燃料に生じる燃料被覆管の腐食等の照射の影響を考慮して、燃料被覆管の地震時応力を求めている。

燃料集合体の耐震評価の方法は、平成14年7月1日付け平成14・05・16原第3号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

3. 燃料集合体の地震応答解析

燃料集合体の地震応答解析は原子炉压力容器内部構造物の一部として実施されており、この詳細は「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び压力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に示されている。燃料集合体の剛性はチャンネルボックスにより支配され，燃料集合体の質量は燃料タイプによらず同等であることから，燃料集合体の地震応答は燃料タイプによらず，この燃料集合体の地震応答解析結果が適用可能である。設計用地震波としては，基準地震動 S_s を採用している。

応答解析は，時刻歴応答解析法を適用して建屋の NS，EW 両方について実施している。

計算された燃料集合体の最大応答相対変位を図 3-1 に示すが，最大応答相対変位は約 11.1 mm となる。また，燃料集合体の最大応答加速度を図 3-2 及び図 3-3 に示すが，最大応答加速度は，水平方向で 13.2 m/s^2 ，鉛直方向で 8.07 m/s^2 となる。

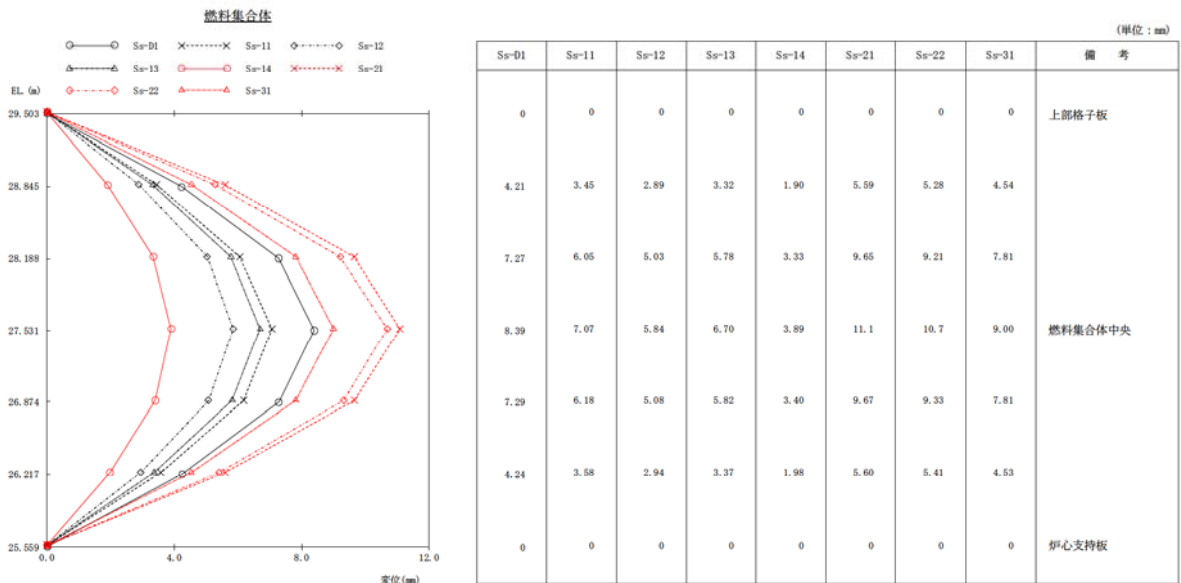
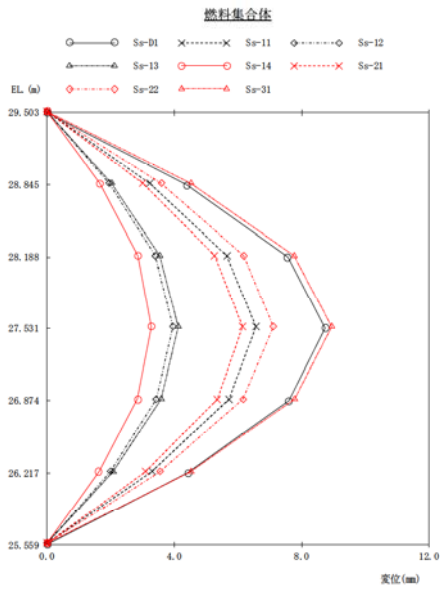


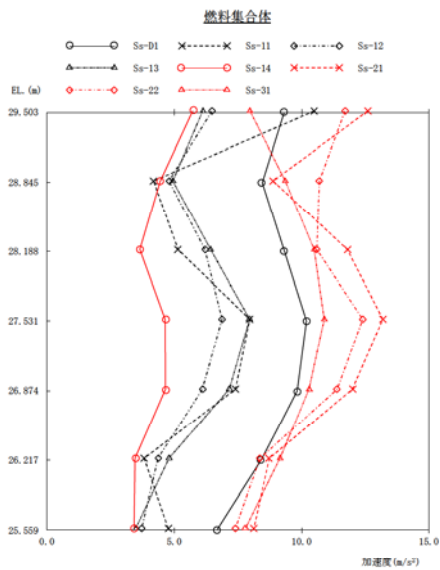
図 3-1(1) 燃料集合体最大応答相対変位 (NS 方向)



(单位: mm)

Ss-01	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
0	0	0	0	0	0	0	0	上部格子板
4.38	3.23	1.95	2.03	1.66	3.01	3.59	4.52	燃料集合体中央
7.57	5.65	3.40	3.55	2.86	5.27	6.19	7.77	
8.74	6.57	3.95	4.13	3.28	6.14	7.12	8.95	
7.60	5.72	3.43	3.59	2.84	5.35	6.16	7.78	
4.42	3.30	1.99	2.08	1.64	3.10	3.56	4.52	炉心支持板
0	0	0	0	0	0	0	0	

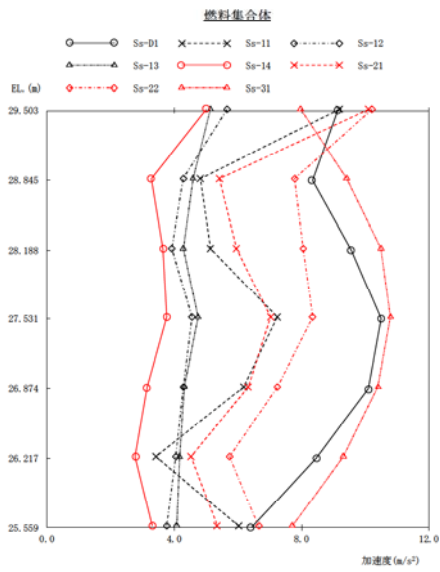
图 3-1(2) 燃料集合体最大応答相对变位 (E W方向)



(单位: m/s²)

Ss-01	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
9.31	10.5	6.48	6.12	5.74	12.6	11.7	7.97	上部格子板
8.45	4.19	4.80	4.95	4.46	8.88	10.7	9.36	燃料集合体中央
9.32	5.15	6.21	6.43	3.65	11.8	10.6	10.5	
10.2	7.97	6.88	7.96	4.65	13.2	12.4	10.9	
9.83	7.41	6.11	7.16	4.66	12.0	11.4	10.3	
8.41	3.82	4.37	4.80	3.47	8.73	8.37	9.15	炉心支持板
6.67	4.76	3.73	3.50	3.43	8.12	7.41	7.79	

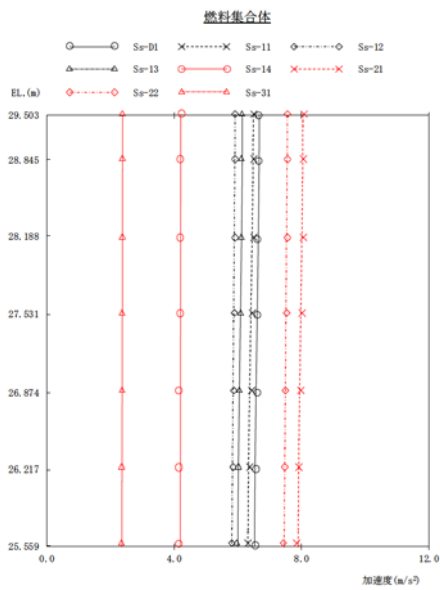
图 3-2(1) 燃料集合体最大応答加速度 (N S方向)



(単位: m/s²)

Ss-01	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
9.13	9.19	5.66	5.14	5.01	10.1	10.2	7.97	上部格子板
8.34	4.82	4.28	4.99	3.29	5.41	7.78	9.42	燃料集合体中央
9.56	5.14	3.93	4.28	3.65	5.95	8.05	10.5	
10.5	7.24	4.96	4.75	3.77	7.02	8.35	10.8	
10.1	6.18	4.29	4.31	3.15	6.32	7.25	10.4	
8.45	3.42	4.05	4.16	2.77	4.52	5.75	9.31	炉心支持板
6.41	6.02	3.77	4.07	3.32	5.35	6.65	7.70	

図 3-2(2) 燃料集合体最大応答加速度 (EW方向)



(単位: m/s²)

Ss-01	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
6.63	6.51	5.92	6.12	4.21	8.08	7.56	2.37	上部格子板
6.63	6.51	5.92	6.11	4.20	8.07	7.56	2.37	燃料集合体中央
6.62	6.50	5.91	6.10	4.19	8.05	7.55	2.37	
6.61	6.47	5.90	6.08	4.17	8.01	7.53	2.36	
6.59	6.43	5.87	6.04	4.15	7.97	7.50	2.36	
6.57	6.38	5.85	6.01	4.15	7.91	7.46	2.35	炉心支持板
6.54	6.32	5.81	5.96	4.15	7.84	7.42	2.34	

図 3-3 燃料集合体最大応答加速度 (鉛直方向)

4. 地震時の制御棒挿入性試験検討

4.1 検討方法

地震時における制御棒挿入性についての検討方法は、工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」にてその詳細を示す。

4.2 検討結果

工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に示すとおり、制御棒挿入試験の結果、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、通常のスクリム仕様値 90 %ストローク 3.5 秒以内であり、検査後において制御棒の外観に優位な変化がないことが確認された。

したがって、基準地震動 S_s による最大相対変位に対し制御棒の挿入性と健全性は確保される。

5. 地震時の燃料集合体の応力評価

5.1 燃料集合体の応力評価に用いる地震加速度

地震時における燃料被覆管の応力評価では、3章に記載した基準地震動 S_s よりも大きな加速度として、燃料集合体に作用する水平地震加速度は 20 m/s^2 を、鉛直地震加速度は 12 m/s^2 を用いる。

5.2 地震時の応力評価の方法

地震時における燃料被覆管の応力評価は、簡易弾性解析によりせん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づき相当応力（一次応力の値）を求め、原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1991 追補版）で定められた許容応力 $0.7 S_u$ (S_u : 引張強さ) に対する相当応力の比（設計比）を評価する。許容応力は、被覆管の温度及び照射の影響を考慮した値を用いる。

本手法は、平成 14 年 7 月 1 日付け平成 14・05・16 原第 3 号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

(1) 応力の計算

応力計算は、通常運転時または、過渡時の応力に地震により発生する応力を加えて三軸方向（半径方向、円周方向及び軸方向）について解析し、それらより相当応力を計算する。

(2) 発生応力

9 × 9 燃料（A 型）については、
通常運転時及び過渡時に発生する応力として、

- ・内外圧力差に基づく応力
- ・水力振動に基づく応力
- ・楕円度に基づく応力
- ・膨張スプリングの圧縮力に基づく応力

を考慮する。

さらに地震時には、水平地震加速度により発生する応力として、

- ・燃料棒のたわみに基づく応力

鉛直地震加速度により発生する応力として、

- ・鉛直地震加速度に基づく応力

を考慮する。

9 × 9 燃料（B 型）については、

通常運転時及び過渡時に発生する応力として、

- ・冷却材による外圧及び燃料要素内圧によって生じる応力
- ・燃料被覆管楕円度による曲げ応力

- ・流力振動による応力

を考慮する。

さらに地震時には、水平地震加速度及び鉛直地震加速度により発生する応力として、

- ・支持格子間のたわみに基づく応力

を考慮する。

発生する応力の計算式及び計算式で使用した記号の説明を9×9燃料（A型）については表5-1及び表5-2に、9×9燃料（B型）については表5-3及び表5-4に示す。

(3) 設計比の評価

設計比の評価では、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、モンテカルロ法により統計評価を行う。ここで、燃料被覆管温度、燃料棒内圧については、燃料棒熱・機械設計コードによる解析結果を用いる。

モンテカルロ法による評価では、1回の試行ごとに乱数を用い、統計的分布に従い設定される入力条件から1つの設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより設計比の統計的分布を求め、設計比の95%確率上限値が1以下であることをもって、燃料集合体の耐震性を確認する。

5.3 検討内容

燃料集合体を支持している炉心支持構造物は、地震時にもその支持機能は維持されるので、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。ここではさらに、基準地震動 S_s による地震力並びに静的地震力に対し崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認するため、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求めたところ、設計比の95%確率上限値が1を下回る結果を得た。

地震時における水平地震加速度及び鉛直地震加速度を考慮した応力評価の結果を、設計比（95%確率上限値）が最大となるスペーサ間について表5-5に示す。

5.4 検討結果

設計比が最大となるのは寿命初期であり、水平地震加速度及び鉛直地震加速度を考慮した場合でもその値は0.37である。

表 5-1 地震時の応力の計算式
(9×9燃料(A型))

応力の種類	応力の成分	内 面	外 面
(1) 内外圧力差に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2) 水力振動に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(3) 楕円度に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(4) 膨張スプリングの圧縮力に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(5) 燃料棒のたわみに基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(6) 鉛直地震加速度に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 5-2 地震時の応力計算式の記号の説明
(9×9燃料(A型))

記号	説明
P_c	冷却材圧力 *1
P_g	燃料棒内圧 *2
r_1	被覆管外半径
r_2	被覆管内半径
r_m	被覆管平均半径
t	被覆管肉厚 *3
d	被覆管楕円度
q_{cr}	被覆管臨界座屈荷重
ℓ	スペーサ間距離
δ	水力振動による振幅
E	被覆管の縦弾性係数
ν	被覆管のポアソン比
G_h	地震時水平方向最大加速度
W_s	スペーサ間距離当たりの燃料棒質量
Z	被覆管断面係数 *3
F	膨張スプリングにより燃料棒に作用する力
G_v	地震時鉛直方向最大加速度
W_r	燃料棒全質量

*1: 評価結果が厳しくなる圧力過渡時の冷却材圧力を使用。

*2: 外圧支配条件において評価結果が厳しくなる寿命初期の内圧を使用。

*3: ライナ部を無視し、照射に伴う腐食減肉を考慮。

表 5-3 地震時の応力の計算式
(9×9燃料 (B型))

応力の種類	成分	内 面	外 面
(1) 冷却材外圧及び 燃料要素内圧に よって生じる応 力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2) 燃料被覆管楕円 度による曲げ応 力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(3) 流力振動による 応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(4) 支持格子間たわ みによる応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 5-4 地震時の応力計算式の記号の説明
(9×9燃料(B型))

記号	説明
P_i	燃料要素内圧 (MPa)
P_o	冷却材圧力 (MPa)
r_i	燃料被覆管内半径 (mm)
r_o	燃料被覆管外半径 (mm)
r_m	燃料被覆管平均半径 (mm)
D_o	燃料被覆管外径 (mm)
D_i	燃料被覆管内径 (mm)
$D_{i\max}$	燃料被覆管最大内径 (mm)
$D_{i\min}$	燃料被覆管最小内径 (mm)
t	燃料被覆管肉厚 (mm)
ν	ポアソン比
E	被覆管ヤング率 (MPa)
I	燃料被覆管の断面二次モーメント (mm ⁴) $I = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_i^4)$
ω	$\omega = \frac{1}{4} \cdot (D_{i\max} - D_{i\min})$
P_{cr}	$P_{cr} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{r_m}\right)^3$
l	スペーサ間距離 (mm)
A	流力振動振幅 (=0.05 mm)
W_o	燃料要素単位長重量 (kg/mm)
G	地震時加速度 (m/s ²)
C_1	定数

表 5-5 地震時のスペーサ間の設計比

	9 × 9 燃料 (A型)	9 × 9 燃料 (B型)
寿命初期	0.36	0.37
寿命中期	0.22	0.28
寿命末期	0.23	0.26