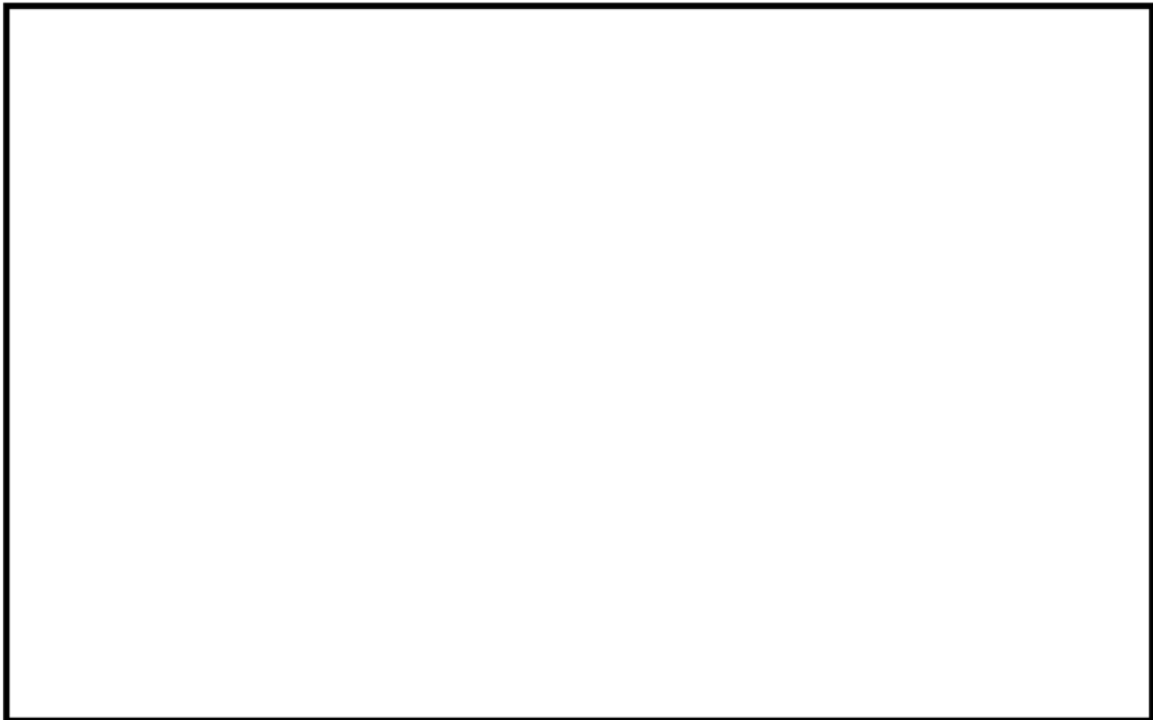


No.	高浜 2－低サイクル疲労－ 1	事象：疲労
質 問	<p>(本冊-(7)改善活動-18頁)</p> <p>熱疲労割れ事象の予防保全の観点から実施された余熱除去系統配管取替工事の経緯、工事内容及び効果の確認についての説明を提示すること。</p>	
回 答	<p>余熱除去系統配管取替工事は国内PWRプラントにおける高サイクル熱疲労による損傷事例を踏まえて予防保全として実施したものです。</p> <p>当該事例に関連して、旧原子力安全・保安院より「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令の改正に伴う電気事業法に基づく定期事業者検査の実施について」（平成17・12・22原院第6号）が発行され、当社は高浜2号炉の高サイクル熱疲労による損傷の防止に関する評価結果を、旧原子力安全・保安院に報告しています。</p> <p>余熱除去設備はプラントの起動停止時の原子炉を除熱する機能を有し、余熱除去クーラ出口では、余熱除去クーラを通過する低温水とクーラをバイパスする高温水が合流する箇所があります。この合流箇所は高浜1号炉の評価の結果、高サイクル熱疲労割れの発生が否定できない部位と判断され、当該部位の健全性を検査で確認しています。</p> <p>この結果を受けて、信頼性向上を図るために、第25回定期検査時（2008年度～2009年度）に当該箇所を熱疲労評価上優位性のある合流形状、応力集中の小さい溶接形状に変更しました。（添付1参照）</p> <p>変更工事による効果については、工事計画認可申請書の中で、温度揺らぎを考慮した疲労累積係数は許容値を下回っていることを確認しています。（工事計画認可申請書抜粋：添付2参照）</p>	



取替概要図		
	現状	取替後
合流部形状	<p>バイパスライン (高温水)</p> <p>出口ライン (低温水)</p> <p>1次冷却材系統 配管低温側へ</p>	<p>1次冷却材系統 配管低温側へ</p> <p>バイパスライン (高温水)</p> <p>出口ライン (低温水)</p>
	<p>バイパス側の配管を小さくし、高温水と低温水の衝突型から合流型に変更することにより、温度ゆらぎの影響を少なくする。</p>	
溶接形状	<p>配管外面</p> <p>配管内面</p> <p>溶接裏波</p>	<p>配管外面</p> <p>配管内面</p>
	<p>・溶接裏波を取り除き、応力集中を小さくする。 ・開先形状(狭開先)を変更することにより、溶接残留応力を低減する。</p>	

内は商業機密に属しますので公開できません

資料 6 流体振動又は温度変動による損傷の防止に関する説明書

1. 概要

余熱除去設備主配管の改造に伴い、流体振動又は温度変動による損傷の防止について確認する。

2. 配管内円柱状構造物の流力振動評価

申請範囲には、配管内円柱状構造物は設けないため、日本機械学会「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」（JSME S 012-1998）の適用対象外である。

### 3. 配管の高サイクル熱疲労に関する評価

#### 3.1 評価方針

日本機械学会「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」(JSME S 017-2003、以下「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」という。)の「3. 高低温水合流部の温度揺らぎによる高サイクル熱疲労」に基づき評価し、疲労累積係数が 1.0 以下であることを確認する。

#### 3.2 評価対象

評価対象とする現象は、高温水・低温水合流部の温度揺らぎによる高サイクル熱疲労である。

評価対象部位は、第 1 図「評価部位」に示す余熱除去クーラバイパスライン合流部である。

#### 3.3 評価条件

##### 3.3.1 設計条件

	余熱除去クーラ出入口配管
最高使用圧力 (MPa)	
最高使用温度 (°C)	
主管の外径 (mm)	
分岐管の外径 (mm)	

##### 3.3.2 設計過渡条件

高サイクル熱疲労を評価するために設定した余熱除去クーラバイパス流量及び温度、余熱除去クーラ出口流量及び温度の過渡条件を、第 1 表「余熱除去系統設計過渡条件」及び第 2 図「運転状態 I (起動時)」～第 5 図「運転状態 II (1 次系漏えい試験・冷却時)」に示す。

### 3.4 FEM解析モデル及び解析条件

応力履歴を算出するための解析モデル（境界条件を含む）を、第6図「解析モデル」に示す。

使用する計算機コードは、「MARC」（注1）である。

なお、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」に基づき、内面熱伝達率は、合流部近傍での温度変動が非定常であることから、非定常熱伝達率を用いる。また、外面熱伝達率は、配管外面に保温材を施しており、十分小さい値（ $=1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ）を用いる。

（注1）ロンドン大学とブラウン大学で研究教育機関に携わったペドロ・V・マサー博士によって開発され整備・拡張が行われてきた有限要素法による構造解析用汎用コードであり、応力解析、熱応力解析、伝熱解析、動的解析等を行うことができる。特に、非線形解析が容易に行えることがMARCの特長であり、国内外の各分野で長年使用され、十分な実績を持つものである。

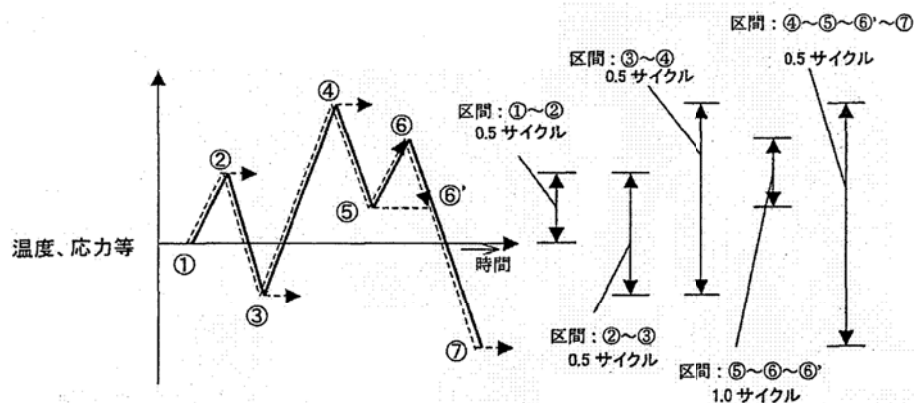
なお、現在は米国MSC社によって保守されている。

### 3.5 計算結果

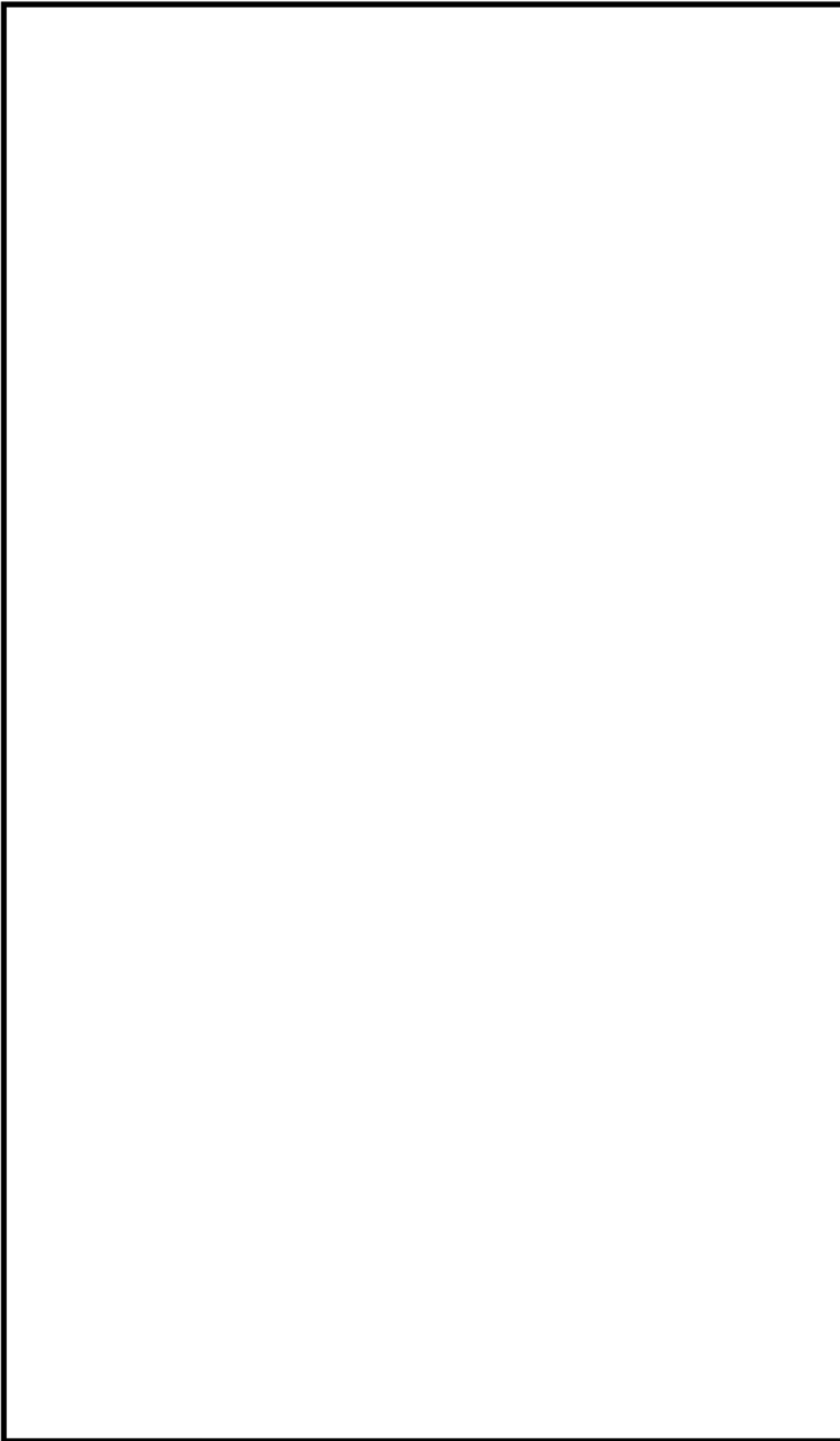
応力履歴をレインフロー法（注2）により処理し算出した疲労累積係数を、第2表「評価結果」に示す。

なお、合流部については、流況によって温度変動が大きくなる箇所が異なるため、第2表「評価結果」の疲労累積係数については、合流部を主管上流側と主管下流側に分け、温度揺らぎが厳しくなる側の結果を示している。

（注2）レインフロー法は以下の処理例に従った。



出所：「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」B74 図 B3.2.2-(7)-1 温度（応力）の処理例



内は商業機密に属しますので公開できません

第 1 表 余熱除去系統設計過渡条件

運転状態 I、II				
記号	過渡条件	回数	設計過渡 図番	備考
I-a	起 動		第 2 図	運転実績をもとにして作成した。
I-b	停 止		第 3 図	運転実績をもとにして作成した。
II-a	1 次系漏えい試験 i) 昇 温 ii) 冷 却		第 4 図 第 5 図	運転実績をもとにして作成した。

(注) 起動及び 1 次系漏えい試験の昇温については、片系列運転のため 60%稼動として疲労累積係数を計算した。

内は商業機密に属しますので公開できません



第2表 評価結果

a) 余熱除去クーラバイパスライン合流部

設計過渡	各過渡の疲労累積係数	疲労累積係数	許容値
起 動			
停 止			
1次系漏えい試験			
評価：疲労累積係数は1.0以下であり、温度変動による損傷を回避できる。			

(注) 温度揺らぎが厳しくなる主管上流側の評価結果を示す。

内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜2-低サイクル疲労-5 rev1	事象：疲労															
質 問	<p>(別冊-2熱交換器-1多管円筒形熱交換器-49頁)  再生クーラ及び余熱除去クーラの管板の疲労累積係数の算出根拠(解析モデル、材料物性、最大評価点の選定、応力分類、Ke係数、環境評価パラメータ、伝熱管最外周部の穴周りの応力算出法を含む)を提示すること。</p>																
回 答	<p>再生クーラおよび余熱除去クーラの管板の疲労累積係数の算出根拠を以下に示します。</p> <p><b>【再生クーラ】</b></p> <p>1. 解析モデル  添付1に解析モデルおよび評価点を示します。</p> <p>2. 材料物性  材料物性値を以下に示します。</p> <table border="1" data-bbox="443 1075 1337 1361"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材料</th> <th rowspan="2">使用部位</th> <th colspan="2">設計応力強さ</th> </tr> <tr> <th>S<sub>m</sub> (MPa)</th> <th>温度 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3" style="background-color: #cccccc;">[Redacted]</td> <td>290.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>3. 最大評価点の選定  解析モデル上の評価点及び最大評価点の選定結果を、添付2に示します。</p> <p>4. 応力分類  評価における荷重の組み合わせを以下に示します。また、応力評価のフローを添付3に示します。</p> <table border="1" data-bbox="424 1787 1359 1957"> <thead> <tr> <th>状態</th> <th>荷重の組合せ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>供用状態A、B</td> <td>内圧+熱過渡</td> </tr> </tbody> </table>			材料	使用部位	設計応力強さ		S <sub>m</sub> (MPa)	温度 (°C)	[Redacted]			290.0	状態	荷重の組合せ	供用状態A、B	内圧+熱過渡
材料	使用部位	設計応力強さ															
		S <sub>m</sub> (MPa)	温度 (°C)														
[Redacted]			290.0														
状態	荷重の組合せ																
供用状態A、B	内圧+熱過渡																

内は商業機密に属しますので公開できません

5. 環境評価パラメータ

評価に用いたK e 係数および環境評価パラメータ（環境効果補正係数 f<sub>en</sub>）を添付4に示します。

【余熱除去クーラ】

6. 解析モデル

添付5に解析モデルおよび評価点を示します。

7. 材料物性

材料物性値を以下に示します。

材料	使用部位	設計応力強さ	
		S <sub>m</sub> (MP a)	温度 (°C)
			95.0
			95.0
			200.0

8. 最大評価点の選定

解析モデル上の評価点及び最大評価点の選定結果を、添付6に示します。

9. 応力分類

評価における荷重の組み合わせを以下に示します。また、応力評価のフローを添付3に示します。

状態	荷重の組合せ
供用状態A、B	内圧+ボルトの締付力+熱過渡

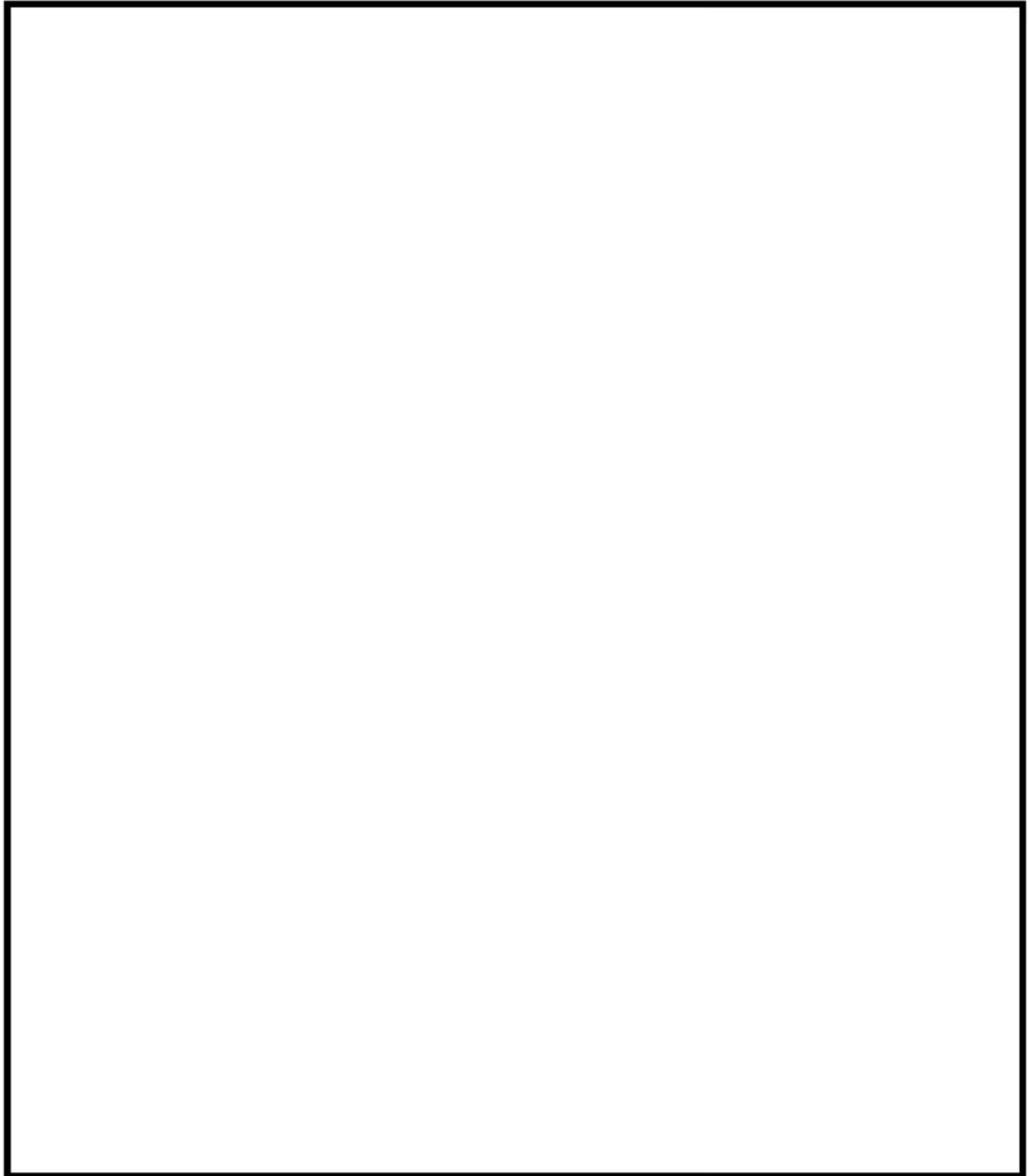
10. K e 係数および環境評価パラメータ

評価に用いたK e 係数および環境評価パラメータ（環境効果補正係数 f<sub>en</sub>）を添付7に示します。

11. 伝熱管最外周部の穴周りの応力算出法

伝熱管最外周部の穴周りの応力算出法については添付8に示します。

内は商業機密に属しますので公開できません



再生クーラ 解析モデルおよび評価点

解析モデルは、上記のように中心軸対称として作成している。温度条件は充てん水の入口側と出口側で水室の温度条件が異なるが、入口条件、出口条件それぞれの過渡を入力して評価している。

内は商業機密に属しますので公開できません

再生クーラ 最大疲労評価点の選定

評価点			一次＋二次応力強さ	疲れ累積係数
管板部	1	入口		
		出口		
	2	入口		
		出口		
	3	入口		
		出口		
	4	入口		
		出口		
一般部	5	入口		
		出口		
	6	入口		
		出口		
	7	入口		
		出口		
	8	入口		
		出口		
	9	入口	(0.16331)	
		出口		
	10	入口		
出口				
11	入口			
	出口			

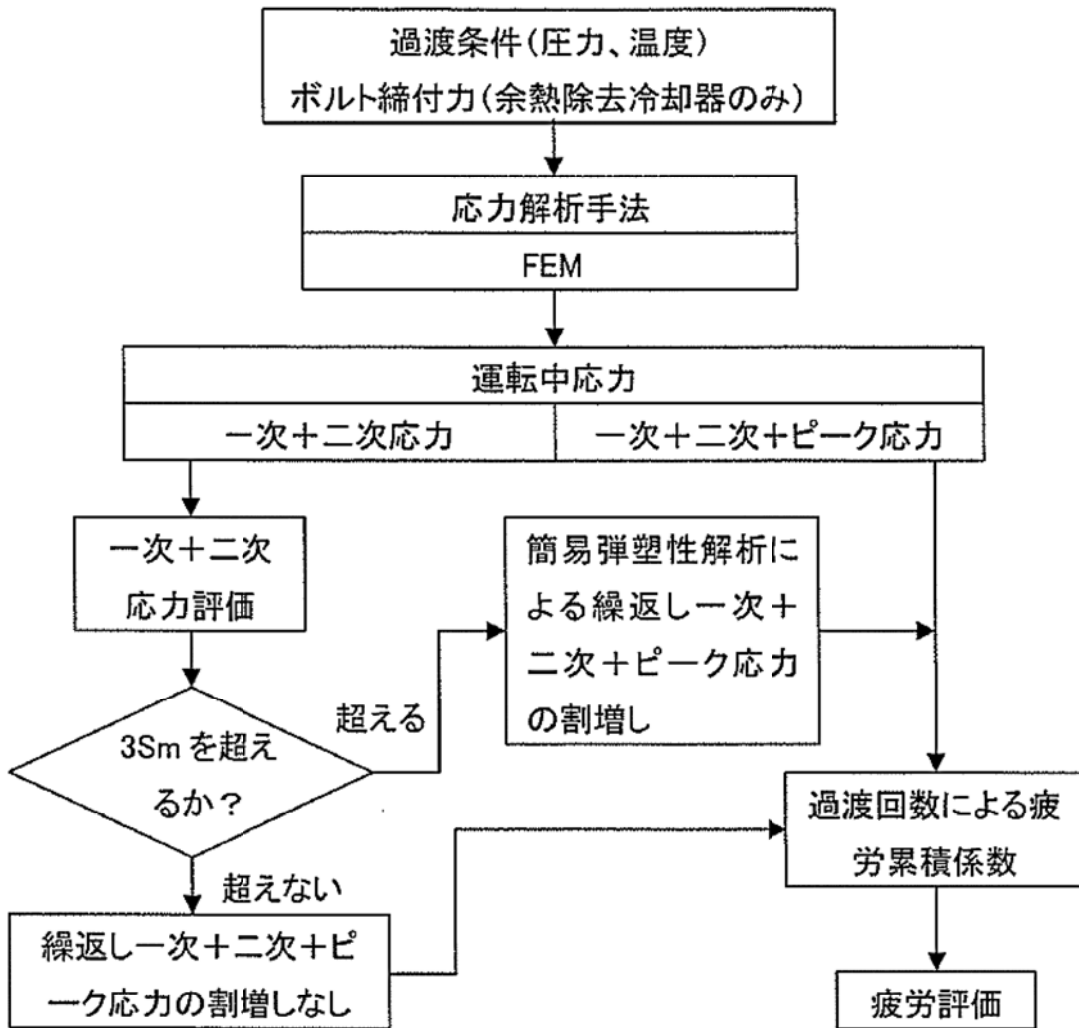
注) 1. ( )はそれぞれの部位での最大値を示す。

→通常UF : 0.164

2. 評価点における入口と出口とは評価に用いる過渡の入口側と出口側のことを示す。

内は商業機密に属しますので公開できません

応力評価フロー



Ke 係数と環境疲労パラメータ（再生クーラ）（詳細評価手法）

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		突過渡 回数	許容繰返し 回数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数
A	B	smax	smin	KE	補正前 salt	補正後 salt'	n	n*	u	fen	uen

合計 : 0.16331

→通常UF : 0.164

合計 : 0.20833

→環境UF : 0.209

内は商業機密に属しますので公開できません

環境効果補正係数（fen）の算出根拠

環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える過渡の温度、ひずみ履歴を示す。

再生クーラ

a. 過渡1H1,1F2



b. 過渡1I1,1G1



内は商業機密に属しますので公開できません




c. 過渡NSS,1G1



d. 過渡NSS,1D2




 内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡NSS,1E1

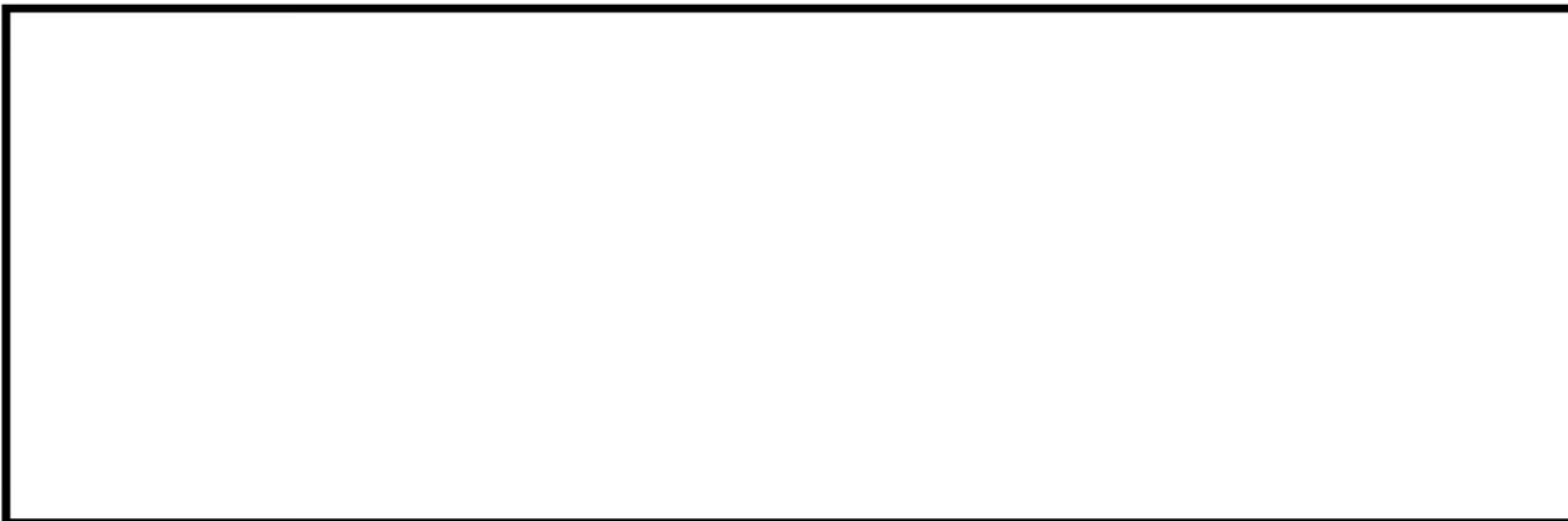


f. 過渡NSS,1H1



内は商業機密に属しますので公開できません

g. 過渡NSS,1A2




h. 過渡NSS,1B2

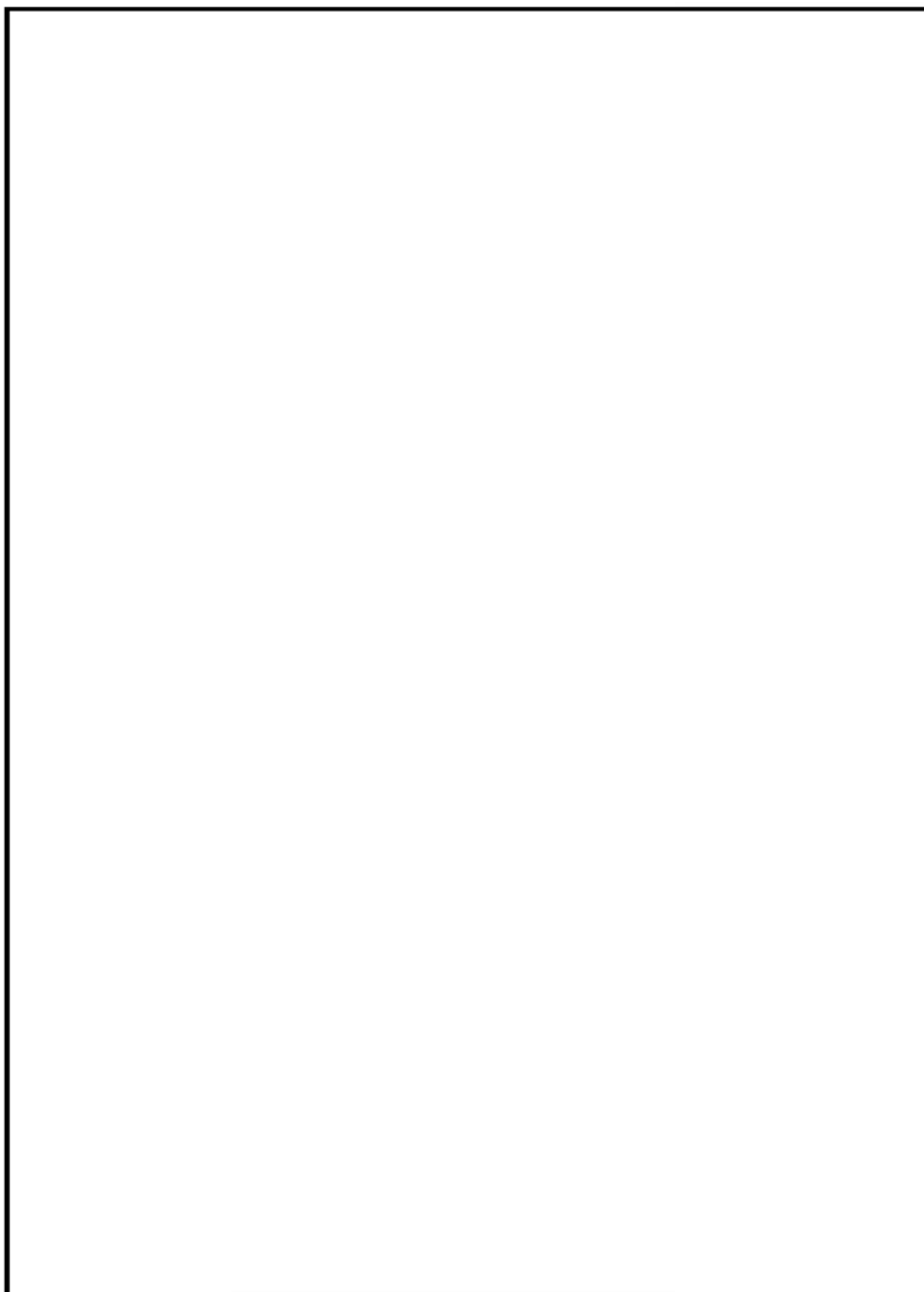


内は商業機密に属しますので公開できません

i. 過渡NSS,1C2



内は商業機密に属しますので公開できません



余熱除去クーラ 解析モデルおよび評価点

解析モデルは、上記のように中心軸対称として作成している。温度条件は1次冷却水の入口側と出口側で水室の温度条件が異なるが、入口条件、出口条件それぞれの過渡を入力して評価している。

内は商業機密に属しますので公開できません

余熱除去クーラ 最大疲労評価点の選定

(MPa (疲れ評価を除く))

評価点			一次+二次応力強さ	疲れ累積係数
管板部	1	入口	(0.03730)	
		出口		
	2	入口		
		出口		
	3	入口		
		出口		
	4	入口		
		出口		
	5	入口		
		出口		
一般部	6	入口		
		出口		
	7	入口		
		出口		
	8	入口		
		出口		
	9	入口		
		出口		
	10	入口		
		出口		
	11	入口		
		出口		
	12	入口		
		出口		
13	入口			
	出口			
14	入口			
	出口			

注) 1. ( )はそれぞれの部位での最大値を示す。

→通常UF : 0.038

2. 評価点における入口と出口とは評価に用いる過渡の入口側と出口側のことを示す。

内は商業機密に属しますので公開できません

Ke 係数と環境疲労パラメータ (余熱除去クーラ) (詳細評価手法)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数	許容繰返し 回数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数	
A	B	smax	smn		補正前 salt	補正後 salt'						n
											合計 : 0.03730	合計 : 0.05197

→通常UF : 0.038

→環境UF : 0.052

内は商業機密に属しますので公開できません

環境効果補正係数 (fen) の算出根拠

環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える過渡の温度、ひずみ履歴を示す。

余熱除去クーラ

a. 過渡1C1,NSS



b. 過渡1A1,NSS



 内は商業機密に属しますので公開できません



伝熱管最外周部の穴周りの応力算出法

管板は穴明き部を簡易的に評価するため、ASME「ARTICLE A-8000 STRESSES IN PERFORATED FLAT PLATES」に基づき等価中実円板にモデル化して評価しております。

ここで、管板を等価中実円板としてモデル化するために縦弾性係数及びポアソン比は図1のグラフ(A-8131-1)に基づき補正しております。等価縦弾性係数と縦弾性係数の比、及び等価ポアソン比を表1に示します。

また、応力集中については図2に示す応力指数のグラフ(A-8142-2)からYmaxを読み取り、式(1)の通り発生応力に応力指数を掛け合わせております。なお、読み取りに必要なβは等価中実円板の半径方向応力と周方向応力の比となりますので、Ymaxの値は解析モデルの要素ごとに変わる値となります。

$$S = Y_{max}(p/h) \sigma_1 + P \dots \dots \text{式 (1)}$$

S: 応力強さ、Ymax: 応力指数、p: 管穴ピッチ、h: リガメント幅、σ1: 主応力、P: 圧力

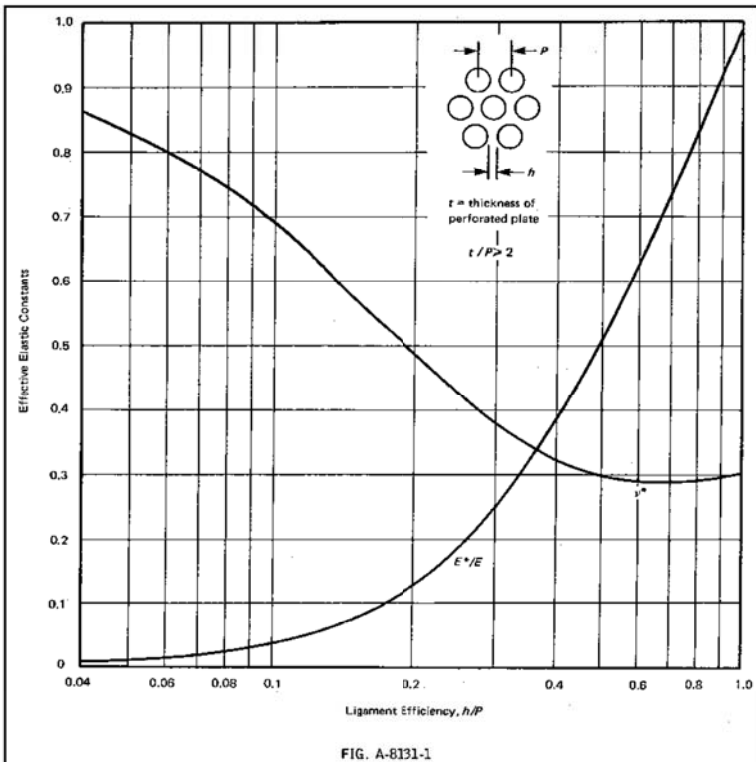


図1 等価縦弾性係数と等価ポアソン比

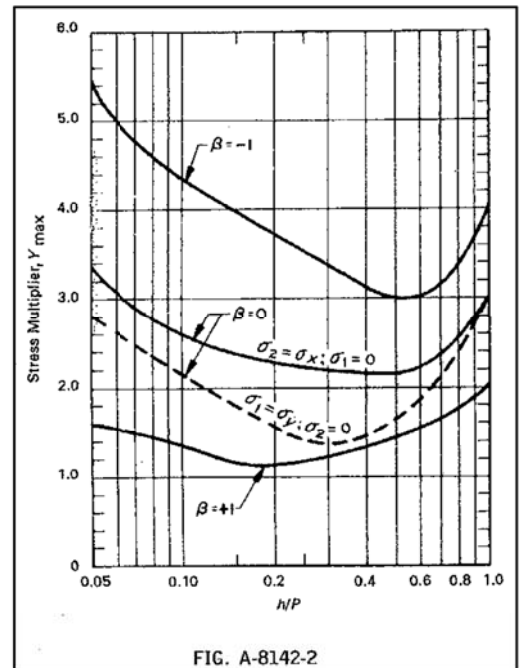


図2 応力指数

表1 等価縦弾性係数E\*と縦弾性係数Eの比、及び等価ポアソン比ν\*

		h [mm]	p [mm]	η = h/p	E*/E	ν*
高浜1号機	再生クーラ	[Redacted]				
	余熱除去クーラ					

η: リガメント効率、E\*: 等価縦弾性係数、E: 縦弾性係数、ν\*: 等価ポアソン比

□ 内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜2-低サイクル疲労-6	事象：疲労															
質 問	<p>(別冊-2熱交換器-2蒸気発生器-21頁)</p> <p>蒸気発生器本体管板及び給水入口管台の疲労累積係数の算出根拠(解析モデル、材料物性、最大評価点の選定、応力分類、Ke係数、環境評価パラメータ、伝熱管最外周部の穴周りの応力算出法を含む)を提示すること。</p> <p>また、疲労累積係数について、設計・建設規格による解析結果と環境疲労評価手法による解析結果が各々最大となる評価点の位置とその値を提示すること。</p>																
回 答	<p>蒸気発生器本体管板及び給水入口管台の疲労累積係数の算出根拠は以下の通りです。</p> <p>1. 解析モデル 解析モデルを添付1に示します。</p> <p>2. 材料物性値 材料物性値を以下に示します。</p> <table border="1" data-bbox="368 987 1414 1256"> <thead> <tr> <th rowspan="2">使用箇所</th> <th rowspan="2">材料</th> <th colspan="2">設計応力強さ</th> </tr> <tr> <th>S<sub>m</sub> (MPa)</th> <th>温度 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>給水入口管台</td> <td colspan="3" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>管板及び管板廻り</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">□内は商業機密に属しますので公開できません</p> <p>3. 最大評価点の選定 解析モデル上の評価点及び設計・建設規格による最大評価点の選定結果を、添付2に示します。</p> <p>4. 応力分類 評価における荷重の組み合わせを以下に示します。また、応力評価のフローを添付3に示します。</p> <table border="1" data-bbox="416 1686 1366 1843"> <thead> <tr> <th>状態</th> <th>荷重の組合せ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>供用状態 A, B</td> <td>圧力、機械的荷重、自重、熱膨張荷重、熱過渡</td> </tr> </tbody> </table> <p>5. Ke係数 評価に用いたKe係数を添付2、添付4に示します。</p>		使用箇所	材料	設計応力強さ		S <sub>m</sub> (MPa)	温度 (°C)	給水入口管台				管板及び管板廻り	状態	荷重の組合せ	供用状態 A, B	圧力、機械的荷重、自重、熱膨張荷重、熱過渡
使用箇所	材料	設計応力強さ															
		S <sub>m</sub> (MPa)	温度 (°C)														
給水入口管台																	
管板及び管板廻り																	
状態	荷重の組合せ																
供用状態 A, B	圧力、機械的荷重、自重、熱膨張荷重、熱過渡																

6. 環境評価パラメータ

評価に用いた環境評価パラメータ（環境効果補正係数 $f_{en}$ ）を、添付4に示します。

7. 評価点の位置と数値

設計・建設規格による解析結果と環境疲労評価手法による解析結果が各々最大となる評価点の位置とその値を以下に示します。

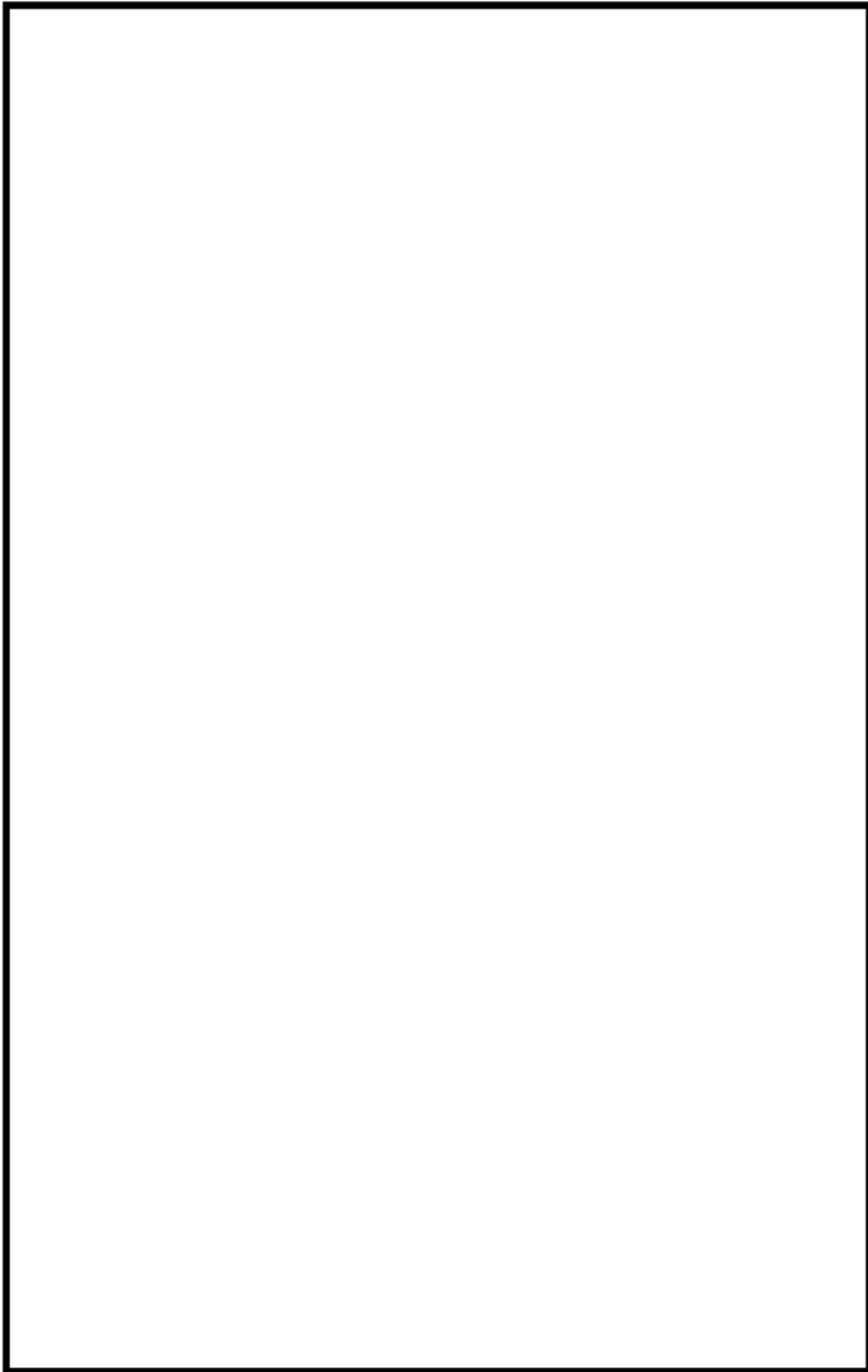
管板及び管板廻りについては、設計・建設規格による評価において疲労累積係数が最大となる評価点が、ニッケル基合金の内張りにより接液しないため、内張りを施していない接液部で疲労累積係数が最大となる評価点の疲労累積係数を用いて環境疲労評価を実施しています。

また、給水入口管台については、熱成層による影響を考慮して最大となる環境疲労評価を示しています。

評価点の位置については、添付2を参照下さい。

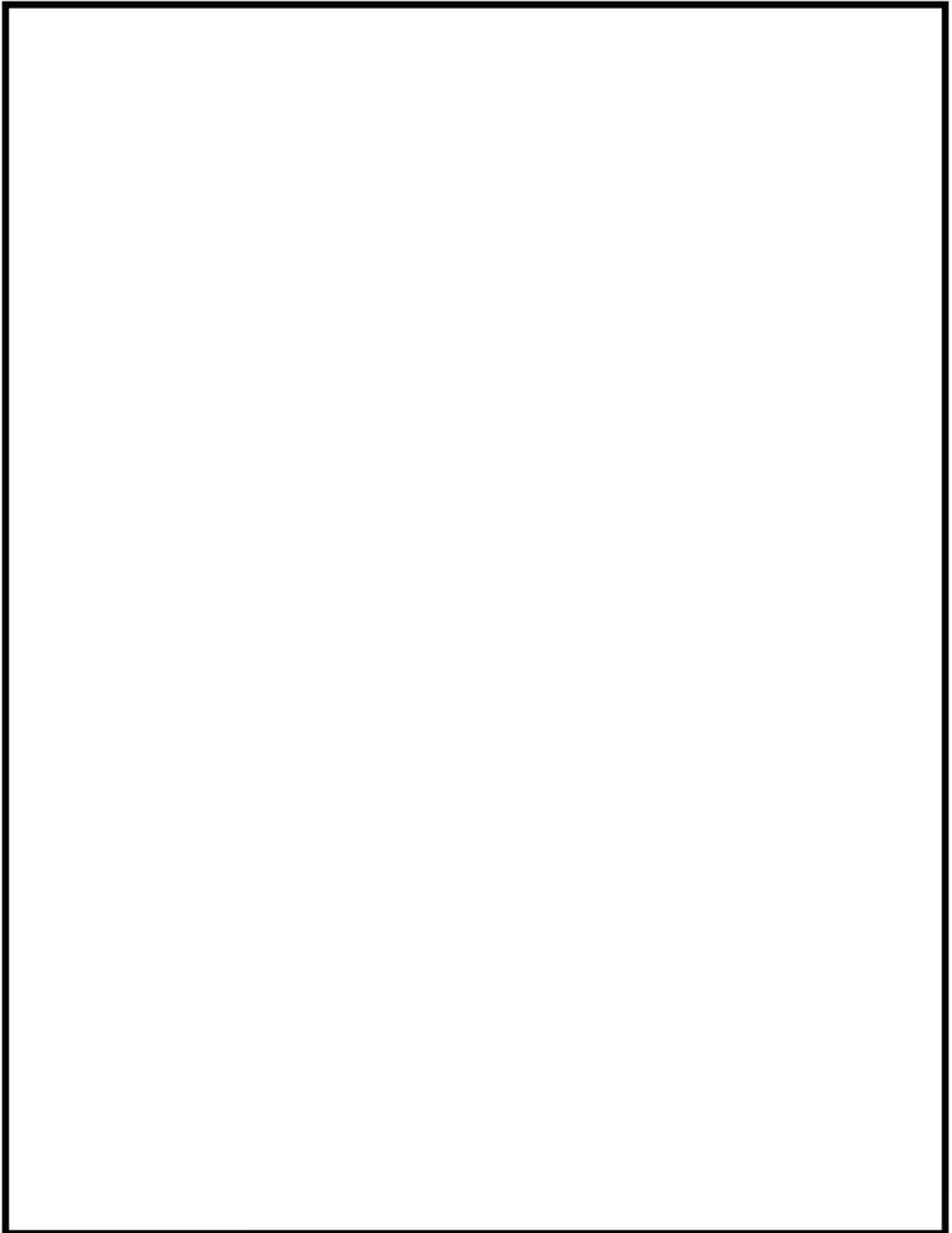
評価部位	設計・建設規格による 解析結果		環境疲労評価手法に よる解析結果		評価点参照
	U f	評価点	U f e n	評価点	
管板及び管板廻り	0. 1 1 5	1次側 R/R*=1.0	0. 1 0 2	1	添付2（1／5）
給水入口管台	0. 1 0 2	9 L	0. 6 5 8	5	添付2（2／5）

以上



蒸気発生器本体 管板及び管板周り 解析モデル

内は商業機密に属しますので公開できません



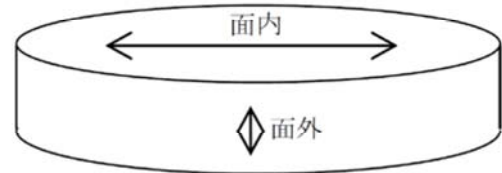
蒸気発生器本体 給水入口管台 解析モデル

内は商業機密に属しますので公開できません

管板部の伝熱管穴周りの応力算出

管板部の伝熱管穴周りの応力算出 (高浜 1/2 号炉 共通)

管板のモデル化は、管板の穴明き部を簡易的に評価するため、等価中実円板に置き換えてモデル化を行っている。



等価中実円板とは、寸法が多孔板と同一で変位が等しくなるように、縦弾性係数及びポアソン比を修正した中実円板です。管板（多孔板部）は次のとおり等価剛性を考慮します。

- 1) 面内方向の  $E^*/E$  及び  $\nu^*$  は、文献「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns」Table2 及び Table3 より

$E^*$  : 等価縦弾性係数  
 $E$  : 縦弾性係数  
 $\nu^*$  : 等価ポアソン比

	$\eta$	0.3		0.4
管穴ピッチ方向	$E^*/E$	0.420		0.525
	$\nu^*$	0.173		0.216
管穴対角方向	$E^*/E$	0.239		0.380
	$\nu^*$	0.529		0.433

リガメント効率 :  $\eta = h/p =$  [ ]  
 管穴ピッチ :  $p =$  [ ]  
 最小リガメント :  $h =$  [ ]

から、管穴ピッチ方向と管穴対角方向を平均し、 $E^*/E =$  [ ]  $\nu^* =$  [ ] となる。

- 2) 面外方向の  $E^*/E$  は、面積比より  $E^*/E = 1 - [(\pi \cdot r'^2) / p^2] =$  [ ] となる。

等価伝熱管内半径 :  $r' =$  [ ]  
 管穴ピッチ :  $p =$  [ ]

面外方向  $\nu^*$  は、中実と変わりなく、 $\nu^* = 0.3$  となる。

[ ] 内は商業機密に属しますので公



管板部の伝熱管周りの応力算出 (補足説明)

管穴の配列について

多孔板の等価剛性を求める手法として ASME 「ARTICLE A-8000 STRESSES IN PERFORATED FLAT PLATES」が存在するが、適用条件として管穴配列が正三角形であることが必要である。しかしながら、高浜 1 号炉及び 2 号炉の蒸気発生器の管板の管穴配列は図 1 に示すとおり、正四角形であることから ASME は適用できない。

そこで、適用条件として管穴配列が正四角形の場合も記載されている文献「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns」※ (適用条件となる管穴配列は図 2 参照) を適用しています。

※ T. Slot, W. J. O' Donnell : Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns, Journal of Engineering for Industry, 1971

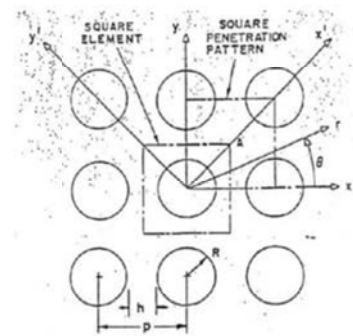
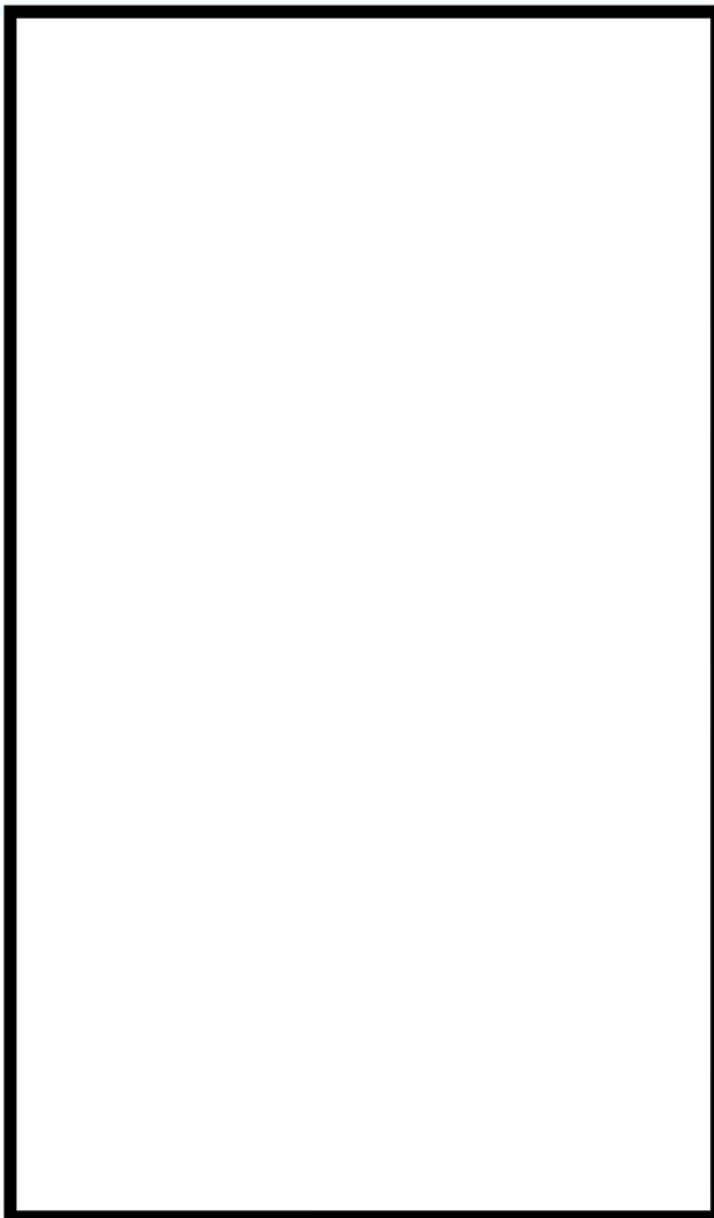
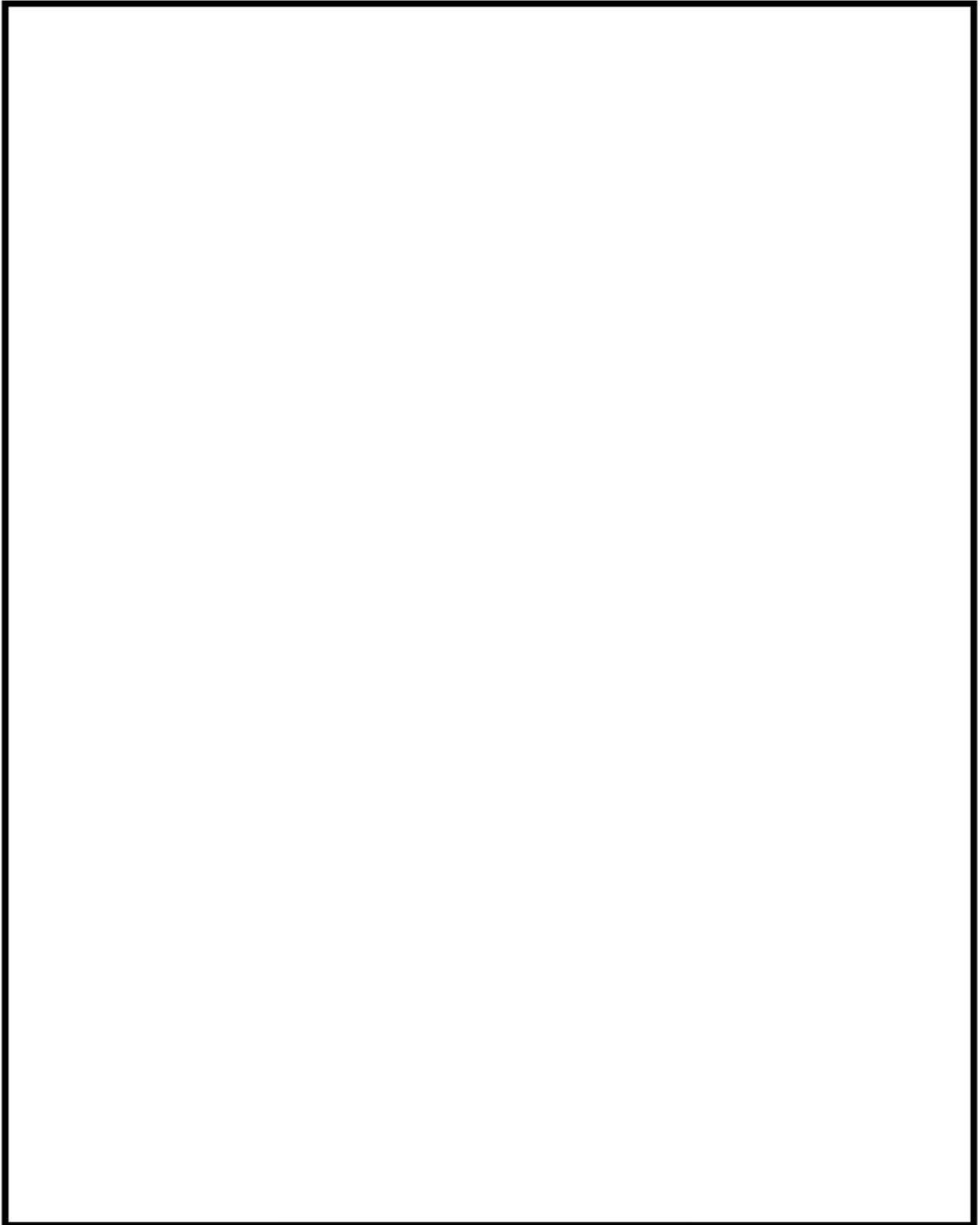


図 2 適用条件となる管穴配列 (正四角形の場合)



図 1 評価対象機器の管穴配列

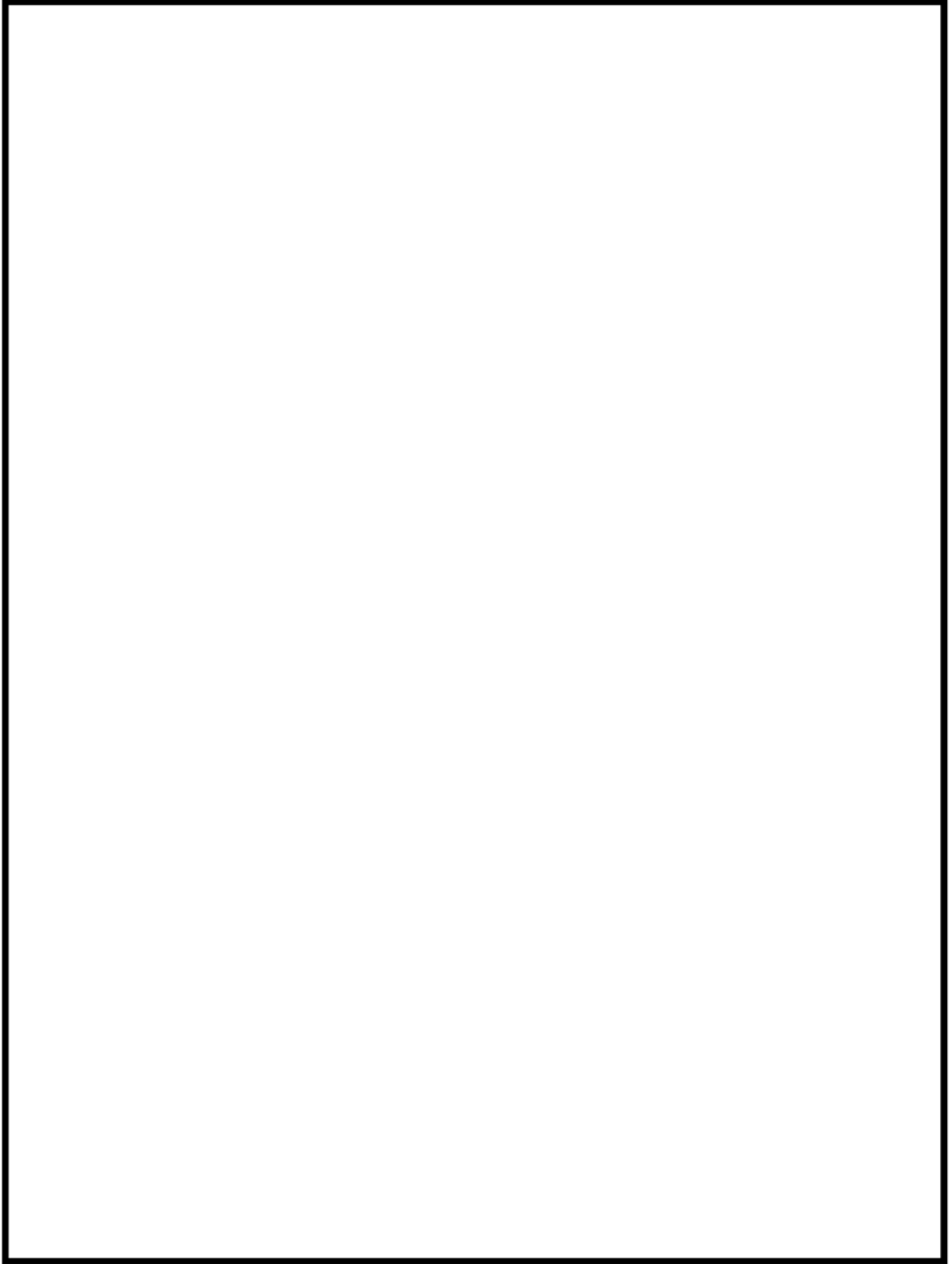
上段 : 高浜 1 号炉 蒸気発生器  
下段 : 高浜 2 号炉 蒸気発生器



蒸気発生器本体 管板及び管板廻り 評価点

内は商業機密に属しますので公開できません

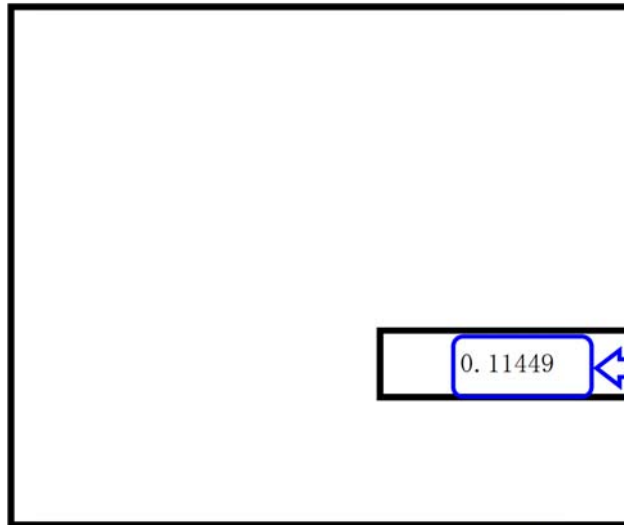




蒸気発生器本体 給水入口管台 評価点

内は商業機密に属しますので公開できません

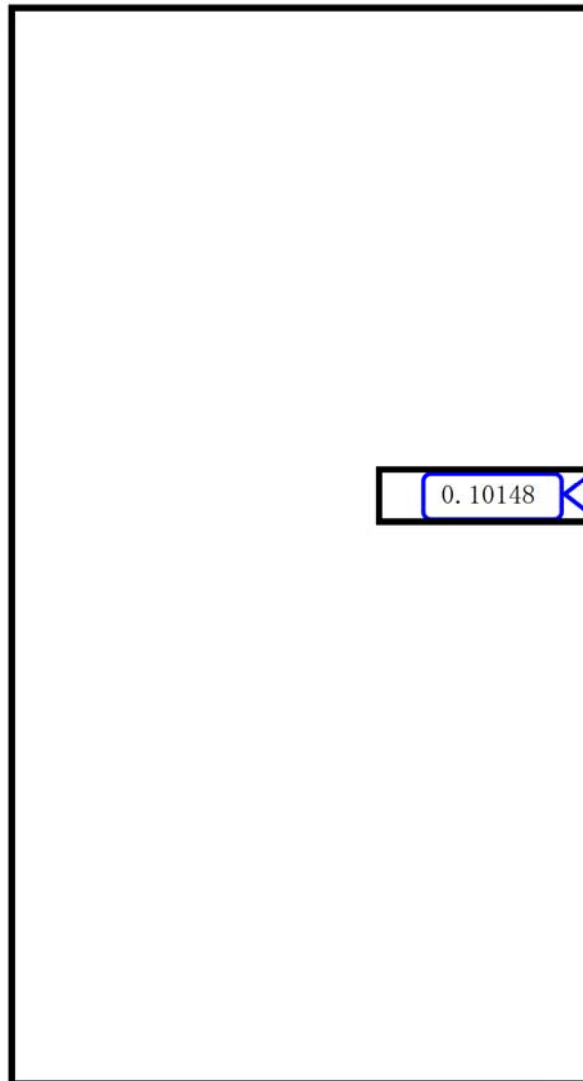
蒸気発生器本体 最大疲労評価点の選定 (1/2)  
管板および管板廻り



疲労累積係数(最大)  
(ただし、非接液)

→通常Uf : 0.115

蒸気発生器本体 最大疲労評価点の選定 (2/2)  
給水入口管台



疲労累積係数(最大)  
(接液する評価点)

→通常Uf : 0.102

蒸気発生器本体 疲労評価結果 管板及び管板廻り (評価点 : 1次側 R/R\*=1.0)

評価点 - P1 SIDE R/R\* = 1.0

応力強さ ( 単位 : MPa )	繰返し回数	疲労係数
疲労累積係数 =		0.11449

Ke : 割増し係数

ALT : 繰返しピーク応力強さ

ALT' : ALT に (207000) / (材料の使用温度における縦弾性係数) を乗じて得た値

N : 設計繰返し回数

N\* : 許容繰返し回数

→通常UF:0.115

内は商業機密に属しますので公開できません

蒸気発生器本体 疲労評価結果 給水入口管台 (評価点: 9L)

評価点 - 9L  
( S23 )

応力強さ ( 単位 : MPa )	繰返し回数	疲労係数
疲労累積係数 =		0.10148

Ke : 割増し係数

ALT : 繰返しピーク応力強さ

ALT' : ALTに(207000)/(材料の使用温度における縦弾性係数)を乗じて得た値

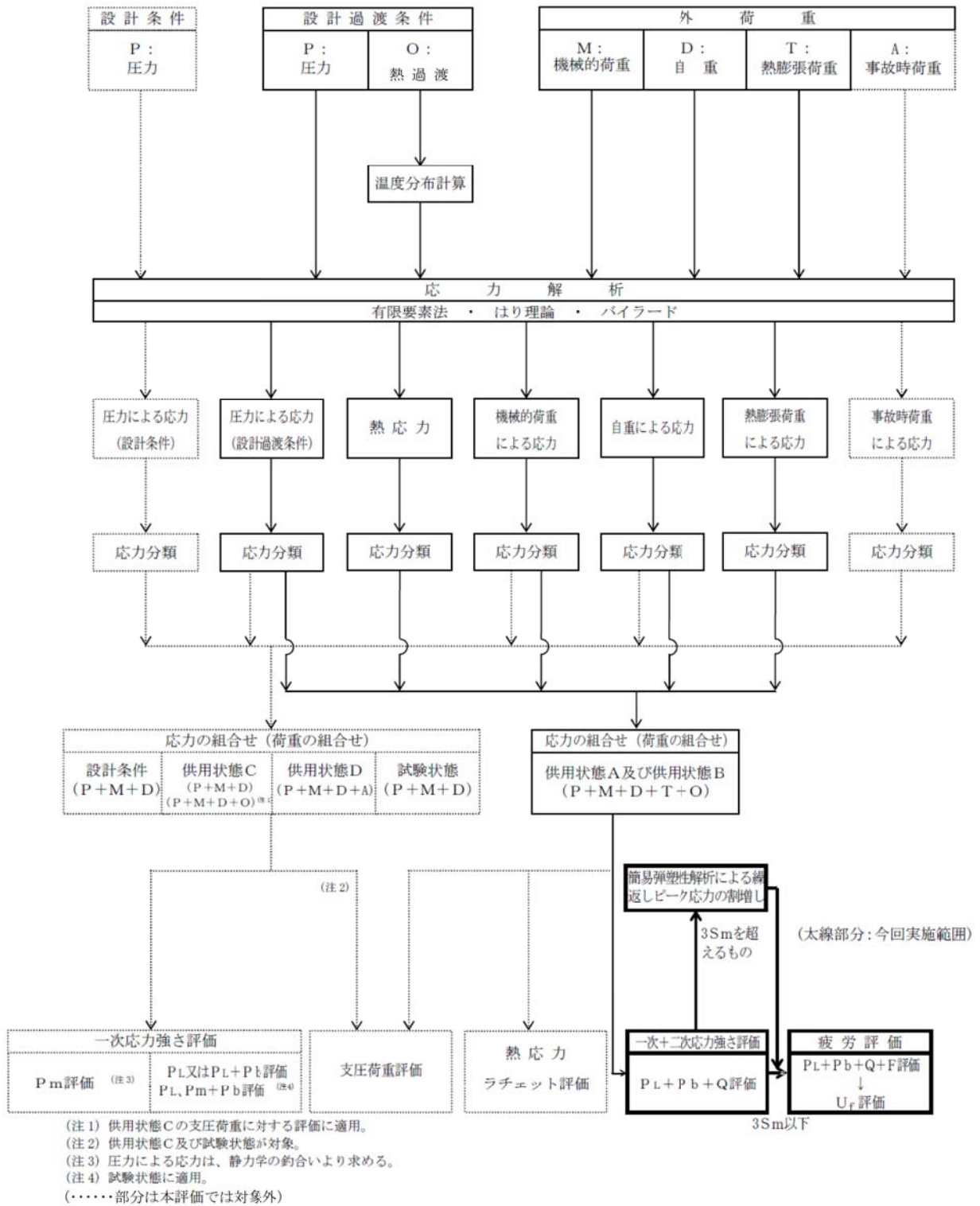
N : 設計繰返し回数

N\* : 許容繰返し回数

→通常UF:0.102

内は商業機密に属しますので公開できません

応力評価フロー



K e 係数と環境疲労パラメータ (管板及び管板廻り 評価点①) (詳細評価手法)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回 数	許容繰返し 回 数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					

--

合計： 0.10185

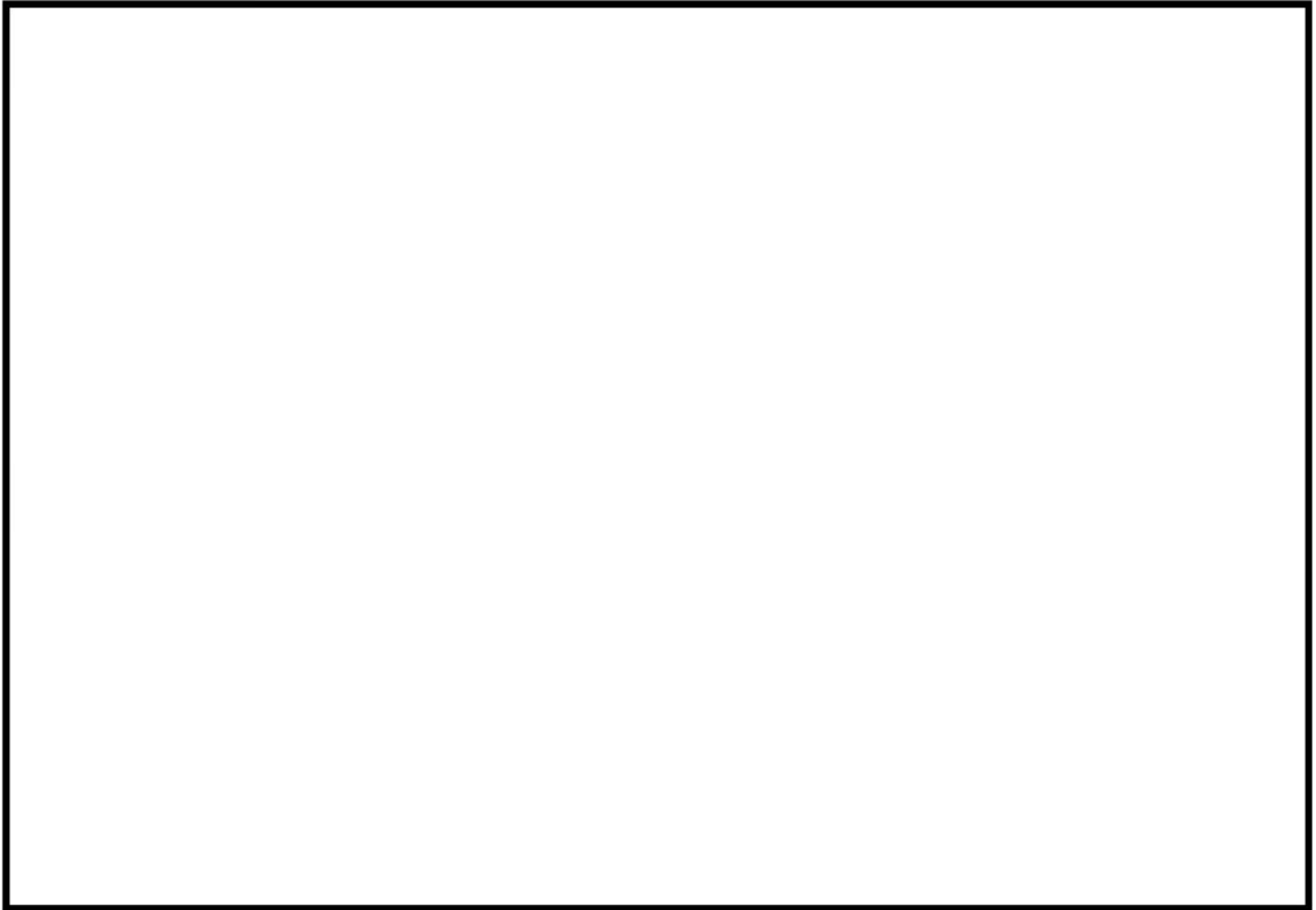
内は商業機密に属しますので公開できません

→ 環境Uf : 0.102

環境効果補正係数 (fen) の算出根拠

環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える、U f が大きい過渡の温度、ひずみ履歴を6例示す。

a. 過渡2J1, 2E1



b. 過渡2J1, 2K1



内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡1A1, 1D1

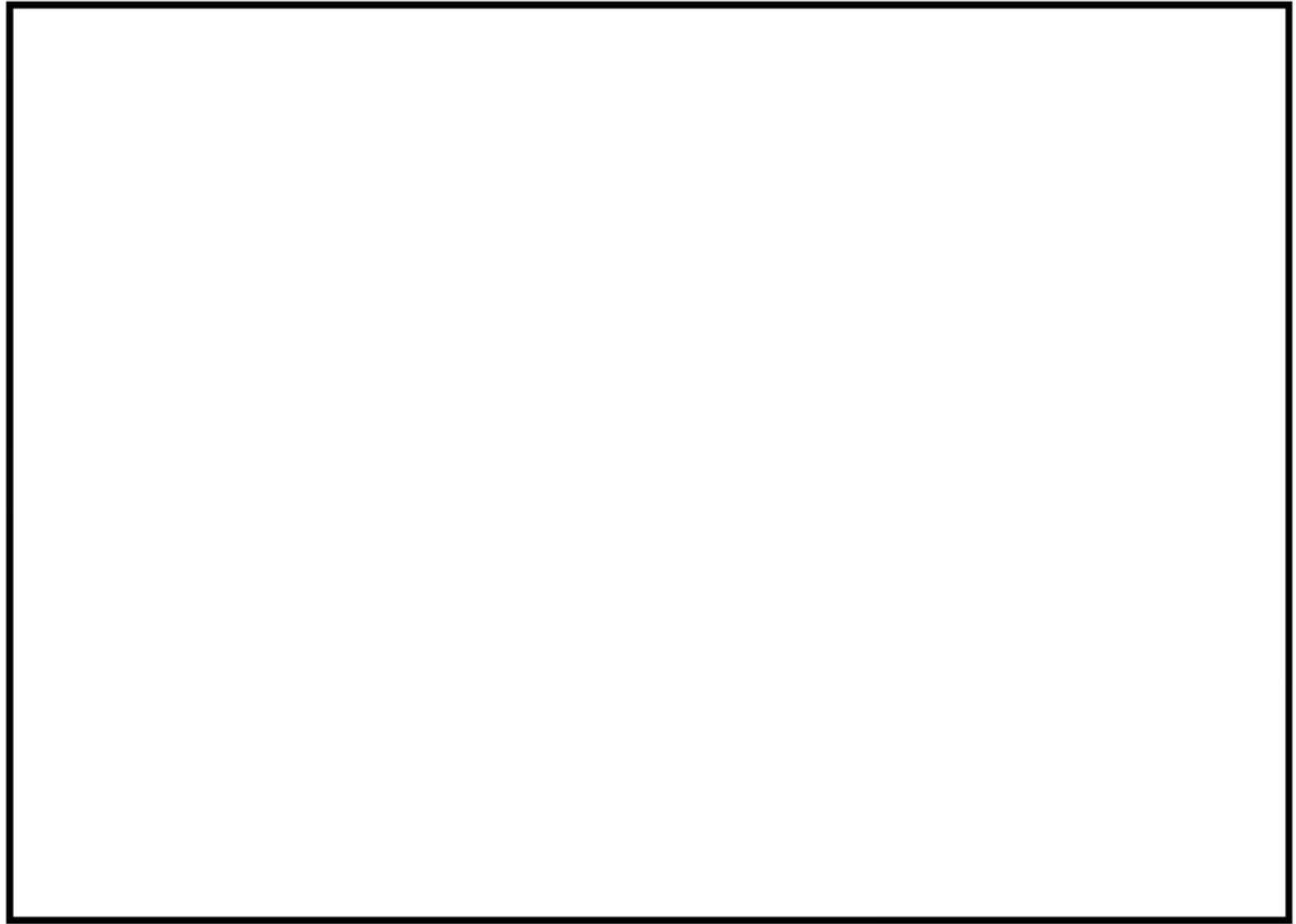
d. 過渡1C1, 1D1

内は商業機密に属しますので公開できません



e. 過渡1C1, 1K1

f. 過渡NSS, 1A1



内は商業機密に属しますので公開できません

Ke係数と環境疲労パラメータ (給水入口管台 評価点⑤) (詳細評価手法)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数 KE	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回 数 n	許容繰返し 回 数 n*	疲労累積係数 u	環境効果 補正係数 fen	環境効果を考慮した 疲労累積係数 uen
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt					
										合計 :	0.65720

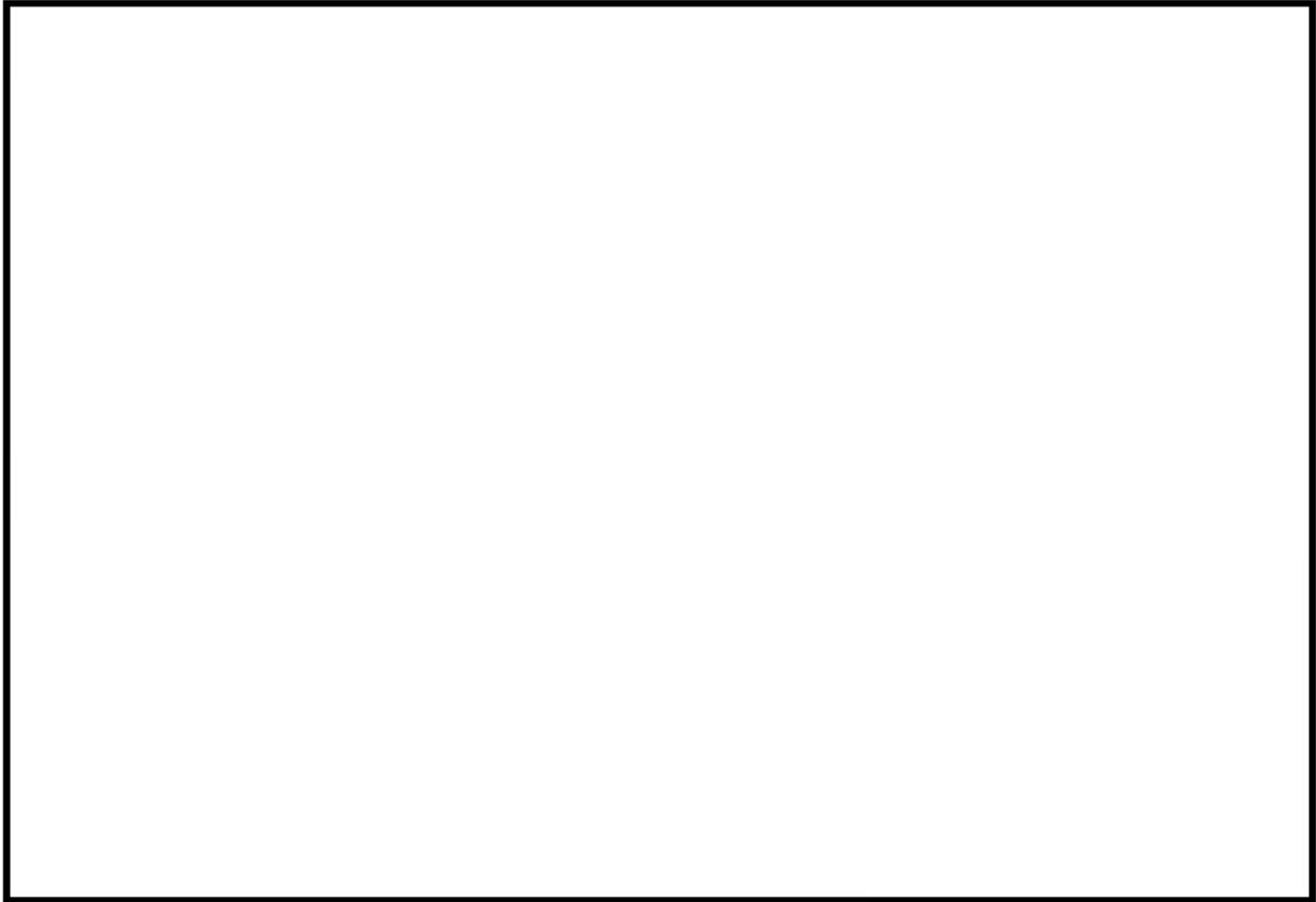
→ 環境Uf : 0.658

内は商業機密に属しますので公開できません

環境効果補正係数（fen）の算出根拠

環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える過渡の温度、ひずみ履歴を示す。

a. 過渡2T1, 2G1



b. 過渡2T1, 2D5



内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡2T1, 2E1

d. 過渡2T1, 2D3



内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡2T1, 2T1

f. 過渡1N1, 2T1



内は商業機密に属しますので公開できません

g. 過渡1N1, 2B1

h. 過渡1N1, 1N1



内は商業機密に属しますので公開できません

i. 過渡1C1, 1N1



内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜2-低サイクル疲労-7 rev2	事象：疲労
質 問	<p>(別冊-2熱交換器-2蒸気発生器-21頁) 給水入口管台において、熱成層現象の想定と根拠、熱過渡・応力評価の方法及び評価結果を提示すること。</p>	
回 答	<p>蒸気発生器給水入口管台では、プラント起動・停止時等における低温水の微小給水および停止により、熱成層の発生・消滅が繰返される可能性があることから、熱成層の発生を想定した環境疲労評価を行っています。</p> <p>環境疲労評価における熱成層現象の想定と根拠、熱過渡・応力評価の方法及び評価結果を添付1に示します。</p> <p>なお、高浜2号機の給水入口管台のサーマルスリーブは差込構造となっています(高浜1号機は溶接構造)。当該部分はH23年度に目視にて健全性を確認しております。(添付2)</p>	



高浜 2 号炉 蒸気発生器給水入口管台の環境疲労評価 (熱成層考慮)

1. 概要

本資料は、蒸気発生器給水入口管台の環境疲労評価の結果についてまとめたものである。  
その結果、環境疲労累積係数 (以降 環境 U. F. と記す) は  $0.658 < 1.0$  であり、問題ないことを確認した。

## 2. 評価方針

### 2.1 適用規格・基準

- 1) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」  
(JSME S NC1-2005/2007、以降「設計・建設規格」と記す。)
- 2) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 環境疲労評価手法」  
(JSME S NF1-2009、以降「環境疲労評価手法」と記す。)

### 2.2 評価手法

#### (1) 環境疲労評価手法

環境疲労評価は、環境疲労評価手法に従って評価を行うものとし、設計・建設規格に基づき算出したU. F. に環境効果補正係数 (Fen) を掛け合わせるにより求める。

$$\text{環境U. F.} = \text{U. F.} \times \text{Fen}$$

## 3. 給水入口管台の疲労評価条件

### 3.1 解析モデル化の方法

給水入口管台の環境疲労評価対象部位を図1に示す。

熱成層応力の解析は3次元の有限要素法解析により行う。

#### (1) 熱成層応力の解析モデル

熱成層応力の解析においては、評価部位周辺を3次元モデルでモデル化した有限要素法解析により行う。

管台及び管台近傍の配管を3次元ソリッド要素でモデル化し、その箇所からアンカーサポートまでをはり要素でモデル化する。

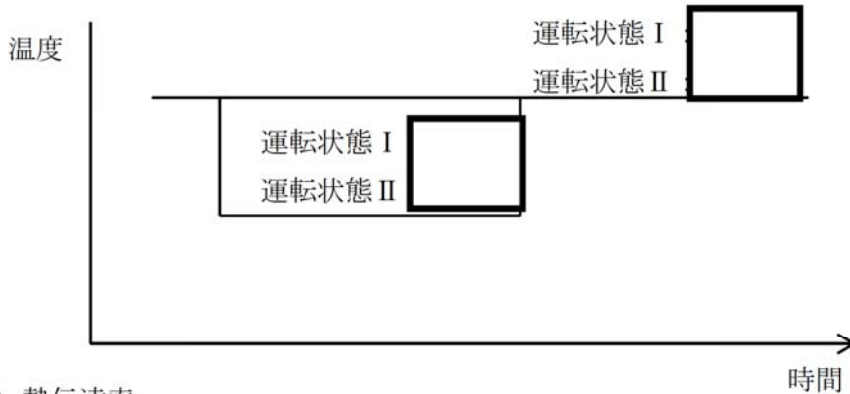
解析に使用したモデルを図2, 3, 4に示す。

#### (2) 解析コード

解析コードはABAQUS Ver. 6.3を使用する。

(3) 過渡条件

熱成層の発生・消滅過程は、安全側にステップ状に発生・消滅するものとする。



(4) 熱伝達率

熱成層による応力の解析に用いる熱伝達率は、以下に示すとおり流量及び温度から給水管台部を領域分けして設定している。

単位：W/(m<sup>2</sup>·K)

領域 (注)			I	II	III	IV
運転状態 I	熱成層	上部	[Redacted]			
	なし	下部				
	熱成層	上部				
	あり	下部				
運転状態 II	熱成層	上部				
	なし	下部				
	熱成層	上部				
	あり	下部				

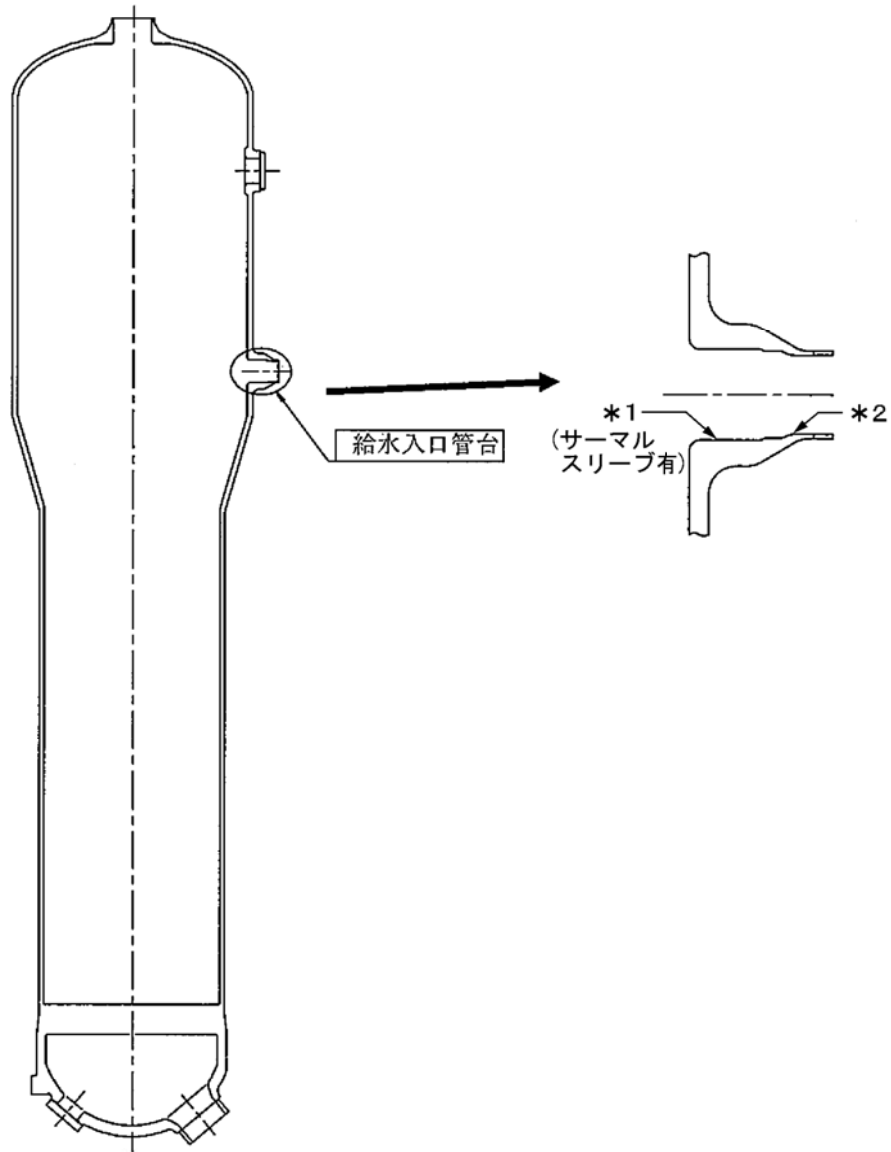
(注) 熱伝達率の領域分けは下図のとおりである。



(5) 物性値

熱成層による応力の解析に用いる材料の物性値は表1に示すとおりである。

[Redacted] 内は商業機密に属しますので公開できません



\*1 : 「設計・建設規格」に基づく疲労評価対象部位(最大)

(非接液部の場合は ( ) 内に理由を記載)

\*2 : 「環境疲労評価手法」に基づく疲労評価対象部位(最大) (接液部が対象)

図1 高浜2号炉 蒸気発生器給水入口管台の疲労割れ評価対象部位

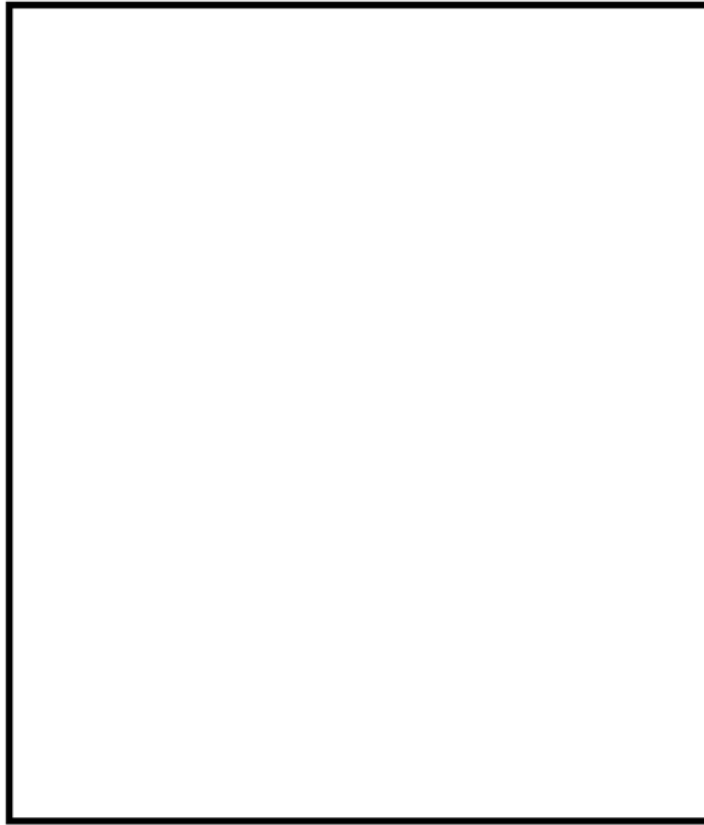


図2 解析モデル (全体図)

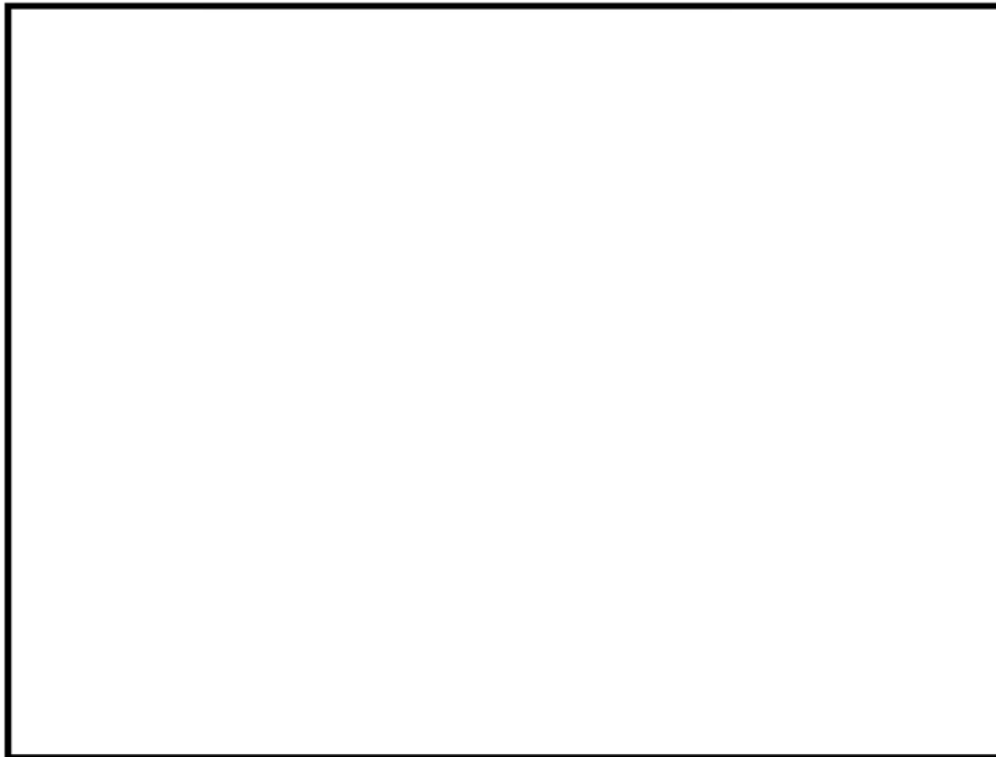
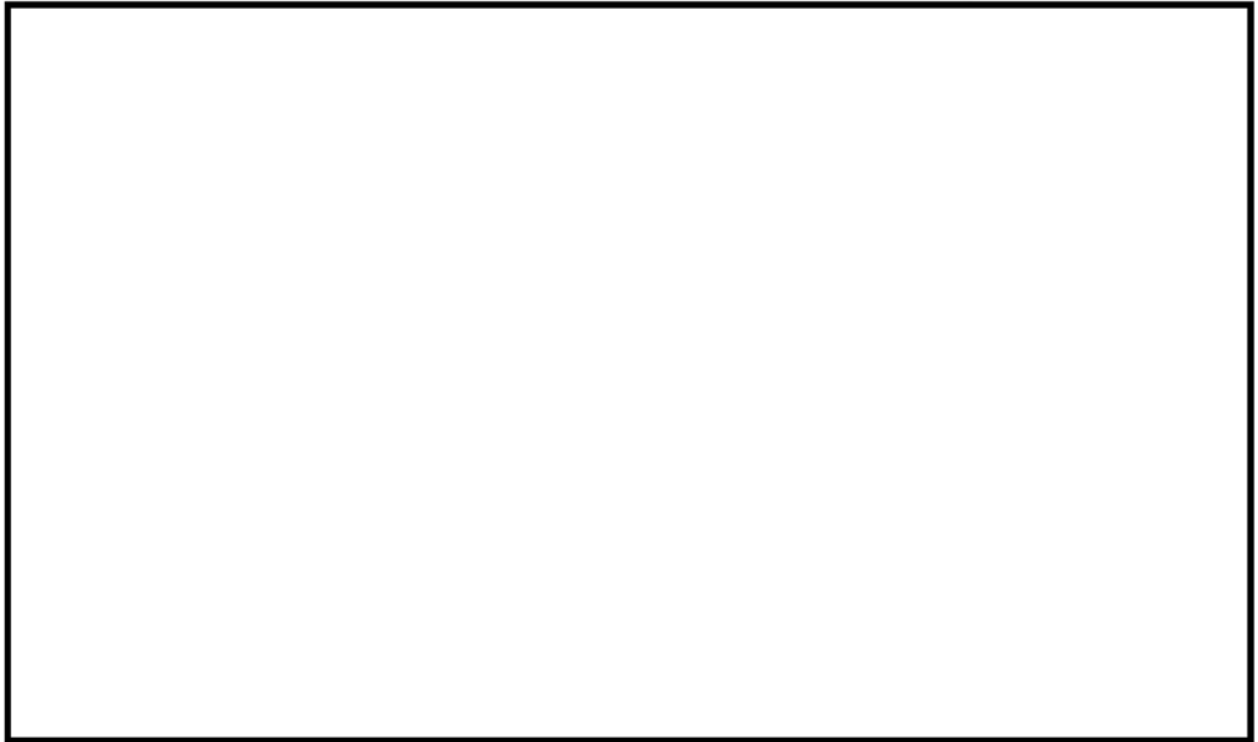


図3 解析モデル (断面図)

内は商業機密に属しますので公開できません



\* 1 : 接液部のうち熱成層による熱応力の影響が大きいと判断される箇所

図 4 解析モデル (拡大図)

内は商業機密に属しますので公開できません

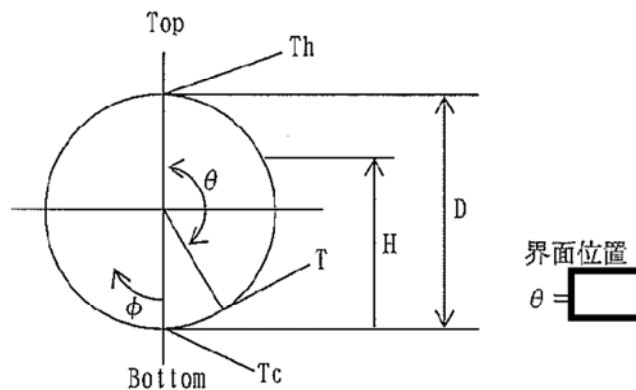
表1 材料物性値

部位	主給水管	給水入口管台	上部胴
材料			
熱伝導率 (W/mK)			
熱容量 ( $\times 10^3$ kJ/m <sup>3</sup> K)			
熱膨脹率 ( $\times 10^{-6}$ mm/mm $^{\circ}$ C)			
縦弾性係数 (MPa)			
ポアソン比 (-)			

(注) 上記物性値は蒸気発生器2次側の定格出力運転時の温度 (276.9 $^{\circ}$ C) における値であり、解析上は温度依存性を考慮してそれぞれの時刻の温度に基づく値を使用している。

(6) 温度プロファイル

過去に他実機プラントである大飯1号機での給水管内熱成層発生時の応力を計測しており、熱成層界面位置が水平頂部からの角度  $\theta = \square$  の場合に最大応力が確認されている。大飯1号機と高浜2号機では給水管台の形状(口径)が同等であることから、大飯1号機にて最大応力が確認された水平配管頂部からの角度  $\theta = \square$  を界面位置に設定している。



$\square$  内は商業機密に属しますので公開できません

### 3.2 過渡条件

#### (1) 過渡回数

これまでの運転実績に基づく運転開始後60年時点での推定過渡回数で評価を実施する。

#### (2) 温度条件

低温水の微小給水・給水停止の繰返しによる熱成層の発生・消滅を評価する。

### 4. 評価結果

熱成層を考慮した環境疲労評価結果を表 2 に、過渡記号を表 3 に示す。

以上



表2 給水入口管台環境疲労評価結果(環境U. F. が最大となる評価点)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数	許容繰返し 回数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数
A	B	smax	smin		KE	補正前 salt					
										合計 :	0.65720

→ 環境Uf:0.658

表3 過渡記号

記号	過渡事象
1C1	負荷上昇(15%から100%出力)
1G1	100%からの大きいステップ状負荷減少
1N1*	運転状態 I における冷水注入
2B1	外部電源喪失
2D3	100%からの原子炉トリップ 不注意な冷却を伴うトリップ
2D5	100%からの原子炉トリップ 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ
2E1	1次冷却系の異常な減圧
2G1	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動
2T1*	運転状態 II における冷水注入

\* : 熱成層の発生を考慮している過渡

内は商業機密に属しますので公開できません

高浜 2 号機 第 2 7 回定検

蒸気発生器 2 次側構造物保全計画策定に向けた調査（取替 S G） 報告書抜粋

4.2 給水内管サーマルスリーブ

給水内管サーマルスリーブ内面先端部を目視調査した結果、有意な腐食・傷・変形は認められなかった。また、給水管台とサーマルスリーブ外面の隙間（サーマルスリーブ外面のスペーサ 4 箇所周辺）についても、目視調査した結果、有意な腐食・傷・変形は認められなかった。給水内管サーマルスリーブ内面先端部の撮影写真を図 4-2-1、サーマルスリーブ外面のスペーサの撮影写真を図 4-2-2 に示す。

なお、高浜 2 号機の給水内管サーマルスリーブは Cr-Mo 鋼製であるため、基本的には経年劣化が想定される箇所ではないが、今回材質改善による対策の効果を確認する目的で供用期間の長い高浜 2 号機を代表プラントとして調査を実施したものである。今回の調査にて現時点（SGR 後 12.5 万時間経過時点）で顕著な減肉傾向がないことを確認したことにより、改めて Cr-Mo 鋼製給水内管サーマルスリーブにおいては流れ加速型腐食（FAC）による減肉を経年劣化モードとして想定する必要性が小さいことが示された。

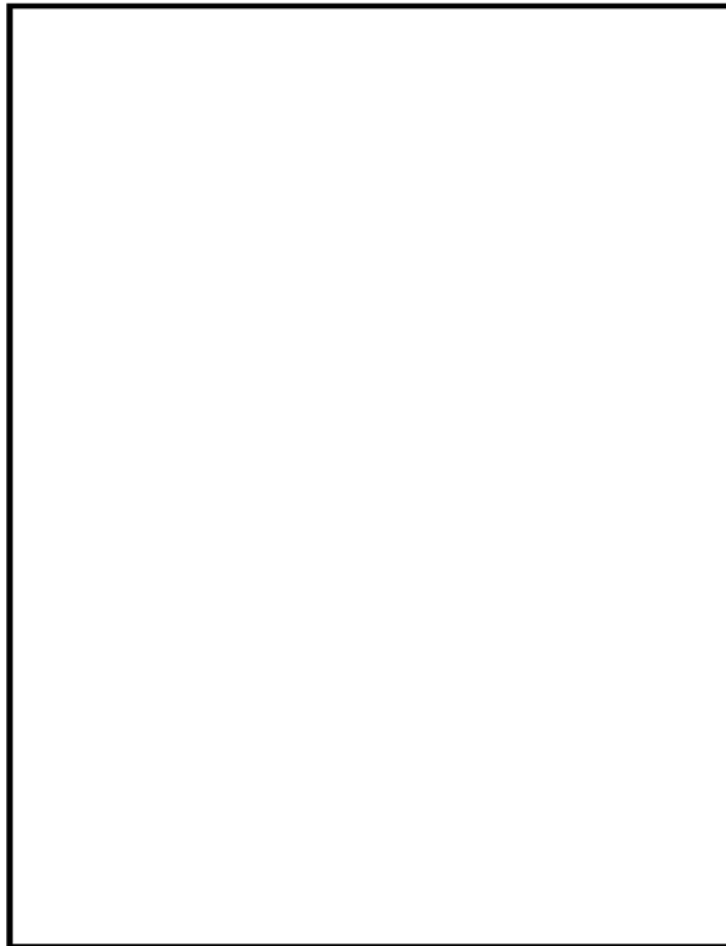


図 4-2-1 給水内管サーマルスリーブ内面の目視調査結果

本調査にて A-S G のサーマルスリーブ他の目視点検を実施した。その結果サーマルスリーブには有意な腐食、傷、変形が認められず、写真に示すようにサーマルスリーブの位置ずれ、外れも認められない。このため、サーマルスリーブの長期健全性は問題ないと考えられる。

内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜2-低サイクル疲労-9		事象：疲労																									
質 問	<p>(別冊-4容器-2.1加圧器本体-13頁)                  加圧器本体スプレイライン用管台及びサージ用管台の疲労累積係数の算出根拠(解析モデル、材料物性、最大評価点の選定、応力分類、Ke係数、環境評価パラメータ、熱成層の考慮に係る内容を含む)を提示すること。</p>																											
回 答	<p>加圧器本体スプレイライン用管台及びサージ用管台の疲労累積係数の算出根拠を添付に示します。</p> <table border="1" data-bbox="331 831 1433 1267"> <thead> <tr> <th data-bbox="331 831 472 976"></th> <th data-bbox="472 831 608 976">応力フロー チャート</th> <th data-bbox="608 831 746 976">荷重の組合 せ</th> <th data-bbox="746 831 882 976">材料物性値</th> <th data-bbox="882 831 1018 976">形状、評価 点及び解析 モデル</th> <th data-bbox="1018 831 1157 976">最大評価点 の選定結果</th> <th data-bbox="1157 831 1292 976">Ke係数</th> <th data-bbox="1292 831 1433 976">環境評価パ ラメータ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="331 976 472 1122">スプレイ ライン用 管台</td> <td data-bbox="472 976 608 1122" rowspan="2">図1</td> <td data-bbox="608 976 746 1122" rowspan="2">表1-1</td> <td data-bbox="746 976 882 1122" rowspan="2">表1-2</td> <td data-bbox="882 976 1018 1122">図2</td> <td data-bbox="1018 976 1157 1122">表2-1</td> <td data-bbox="1157 976 1292 1122">表2-2 表2-3</td> <td data-bbox="1292 976 1433 1122">表2-3 (詳細評価)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="331 1122 472 1267">サージ用 管台</td> <td data-bbox="882 1122 1018 1267">図3</td> <td data-bbox="1018 1122 1157 1267">表3-1</td> <td data-bbox="1157 1122 1292 1267">表3-2 表3-3</td> <td data-bbox="1292 1122 1433 1267">表3-3 (詳細評価)</td> </tr> </tbody> </table>								応力フロー チャート	荷重の組合 せ	材料物性値	形状、評価 点及び解析 モデル	最大評価点 の選定結果	Ke係数	環境評価パ ラメータ	スプレイ ライン用 管台	図1	表1-1	表1-2	図2	表2-1	表2-2 表2-3	表2-3 (詳細評価)	サージ用 管台	図3	表3-1	表3-2 表3-3	表3-3 (詳細評価)
	応力フロー チャート	荷重の組合 せ	材料物性値	形状、評価 点及び解析 モデル	最大評価点 の選定結果	Ke係数	環境評価パ ラメータ																					
スプレイ ライン用 管台	図1	表1-1	表1-2	図2	表2-1	表2-2 表2-3	表2-3 (詳細評価)																					
サージ用 管台				図3	表3-1	表3-2 表3-3	表3-3 (詳細評価)																					

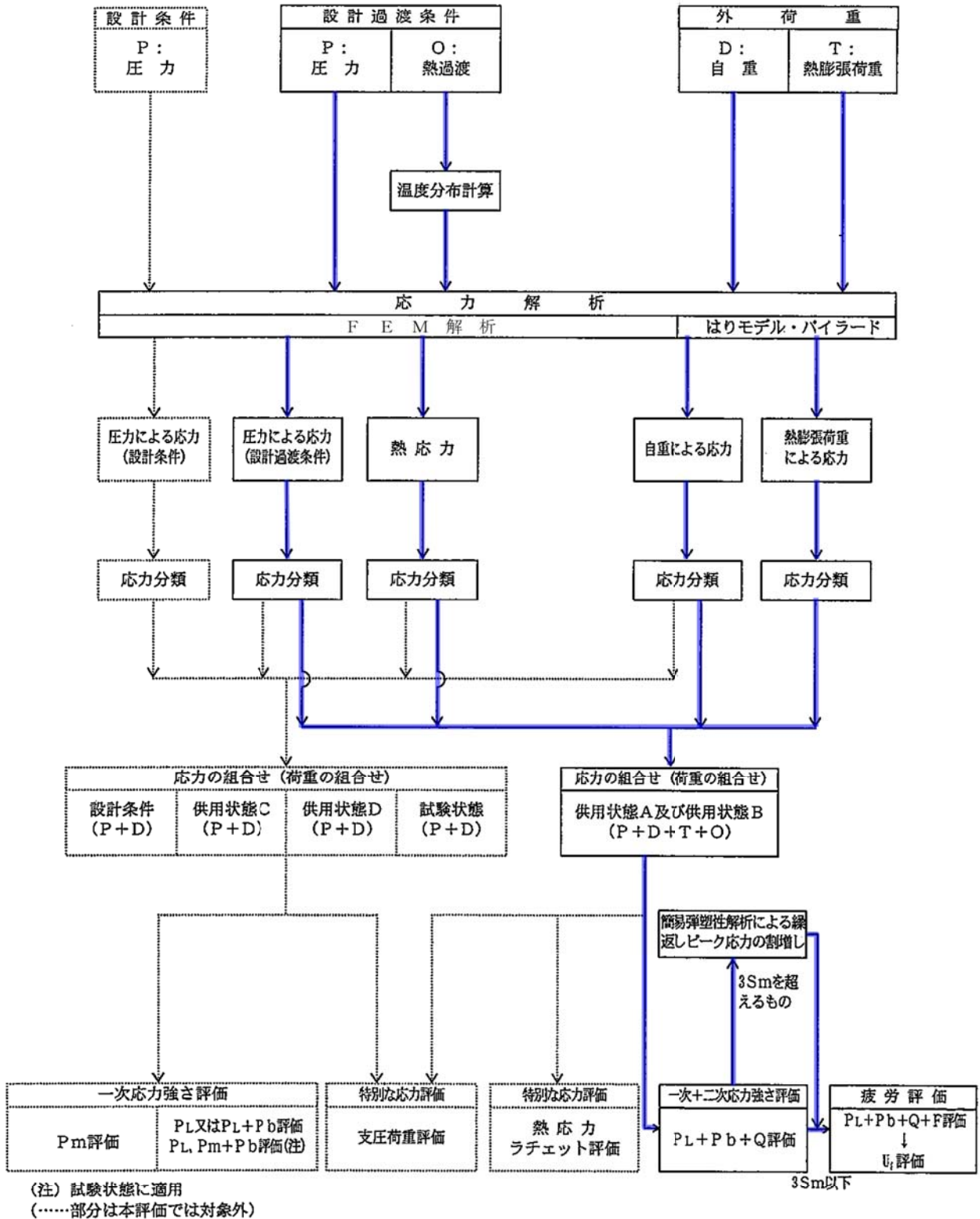


図1 応力評価フローチャート

表1-1 荷重の組合せ

状 態	荷重の組合せ
供用状態A, B	P + O + D + T

(記号)

P : 圧力 O : 熱過渡 D : 自重 T : 熱膨張荷重

表1-2 材料物性値 (設計応力強さ)

評価部位	材料	設計応力 (MPa)
		345°C
スプレイライン用管台、 サージ用管台		
スプレイライン用管台セーフエンド		
サージ用管台セーフエンド		

	内は商業機密に属しますので公開できません
--	----------------------

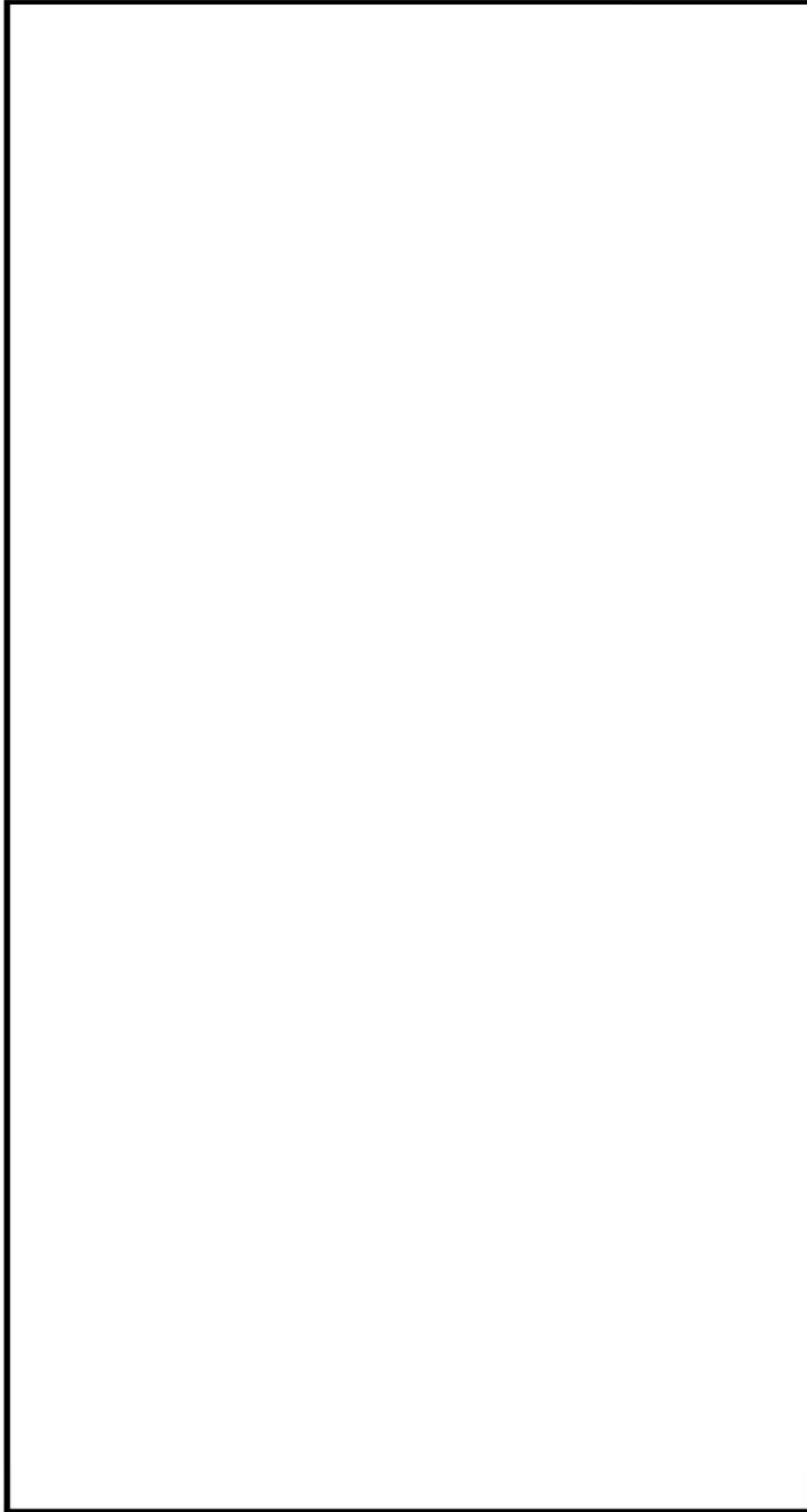


図2 スプレイライン用管台形状寸法、評価点及び解析モデル

しませので公開できません

表2-1 疲労累積係数 (スプレイライン用管台)

評価点	U(S12)	U(S23)	U(S31)
1			0.12085
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

許容値  $U_f=1.0$ 

--

 内は商業機密に属しますので公開できません





表2-2 疲労解析結果 (スプレイライン用管台) (2 / 2)

評価点 - 1  
(S31)

応力強さ (単位: MPa)					繰返し回数		疲労係数 (=N/N*)
極大値	極小値	Ke	ALT	ALT'	N	N*	
[Redacted Data]							
疲労累積係数 =							0.12085
→通常UF:0.121							

Ke : 割増し係数  
 ALT : 繰返しピーク応力強さ  
 ALT' : ALTに(195000/(材料の使用温度における縦弾性係数))を乗じて得た値  
 N : 設計繰返し回数  
 N\* : 許容繰返し回数

内は商業機密に属しますので公開できません

表2-3 環境疲労評価結果 (スプレイライン用管台 評価点① 熱成層考慮)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数 KE	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数 n	許容繰返し 回数 n*	疲労累積係数 u	環境効果 補正係数 fen	環境効果を考慮した 疲労累積係数 uen
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数 KE	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数 n	許容繰返し 回数 n*	疲労累積係数 u	環境効果 補正係数 fen	環境効果を考慮した 疲労累積係数 uen
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					

合計: 0.01887

(注) ひずみ振幅 ≤ 0.110% (salt' ≤ 214.5) の場合、fen=1.0

→環境UF: 0.019

内は商業機密に属しますので公開できません

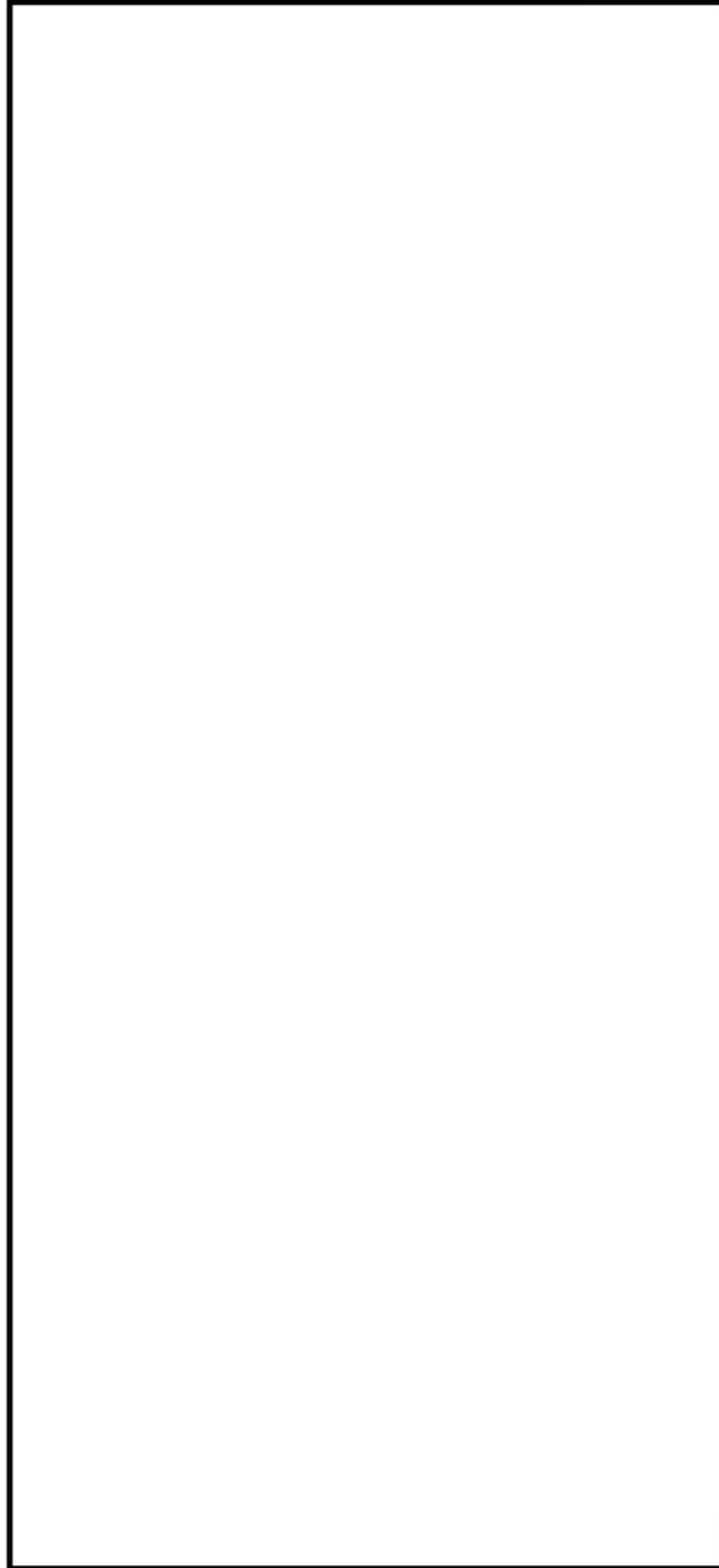


図3 サージ用管台形状寸法、評価点及び解析モデル

内は商業機密に属しますので公開できません

表3-1 疲労累積係数(サージ用管台)

評価点	U(S12)	U(S23)	U(S31)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19	0.01662		
20			
21			
22			

許容値  $U_T=1.0$ 

--

内は商業機密に属しますので公開できません

表3-2 疲労解析結果(サージ用管台)

評価点 - 19  
(S12)

応力強さ			(単位: MPa)			繰返し回数		疲労係数 (=N/N*)
極大値	極小値	Ke	ALT	ALT'	N	N*		
[Empty table content]								

疲労累積係数 = 0.01662

→通常UF:0.017

- Ke : 割増し係数
- ALT : 繰返しヒーク応力強さ
- ALT' : ALTに(207000)/(材料の使用温度における縦弾性係数)を乗じて得た値
- N : 設計繰返し回数
- N\* : 許容繰返し回数

内は商業機密に属しますので公開できません

表3-3 環境疲労評価結果(サージ用管台 評価点①)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数 KE	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回 数 n	許容繰返し 回 数 n*	疲労累積係数 v	環境効果 補正係数 fen	環境効果を考慮した 疲労累積係数 uen
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					
合計:											0.06011

(注) ひずみ振幅 $\leq 0.110\%$  (salt' $\leq 214.5$ ) の場合、fen=1.0

→環境UF:0.061

内は商業機密に属しますので公開できません

環境効果補正係数 (fen) の算出根拠

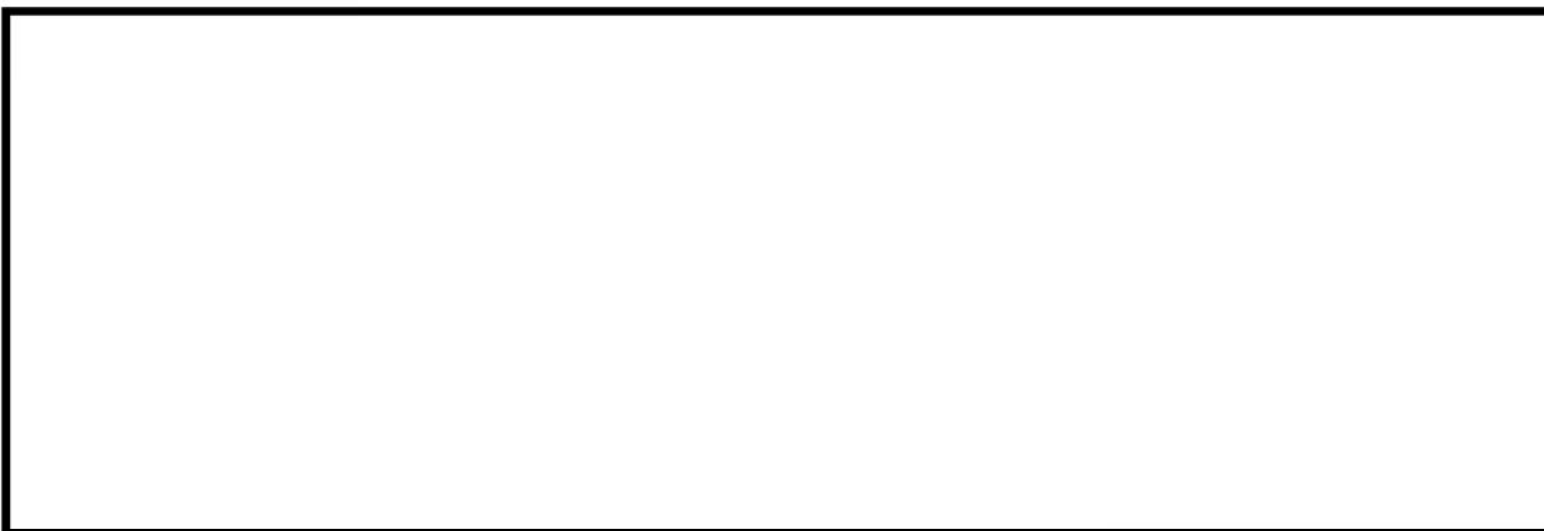
環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える過渡の温度、ひずみ履歴を示す。

(1) スプレイライン用管台

a. 過渡2E2, 2E2



b. 過渡1A6, 1B8



内は商業機密に属しますので公開できません

(2) サージ用管台

a. 過渡2G1, 1B2



b. 過渡2D3, 2H1



内は商業機密に属しますので公開できません



c. 過渡1C1, 1B2



d. 過渡2B1, 1B2



内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡1A2, 1B2



f. 過渡1A2, 1A2



内は商業機密に属しますので公開できません

g. 過渡1L1, 1A2



h. 過渡1B2, 1A2



内は商業機密に属しますので公開できません

i . 過渡1B2, 2G1



内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜2-低サイクル疲労-17	事象：疲労																	
質 問	<p>(別冊-7炉内構造物-32頁)                  炉心支持構造物の疲労累積係数の算出根拠(解析モデル、材料物性、最大評価点の選定、応力分類、Ke係数、環境評価パラメータを含む)を提示すること。</p>																		
回 答	<p>炉心支持構造物の疲労累積係数の算出根拠を添付に示します。</p>																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="336 741 491 846">応力フロー チャート</th> <th data-bbox="491 741 646 846">荷重の組合せ</th> <th data-bbox="646 741 801 846">材料物性値</th> <th data-bbox="801 741 956 846">解析モデル</th> <th data-bbox="956 741 1110 846">最大評価点 の選定結果</th> <th data-bbox="1110 741 1265 846">Ke係数</th> <th data-bbox="1265 741 1410 846">環境評価 パラメータ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="336 846 491 898">図-1</td> <td data-bbox="491 846 646 898">表-1</td> <td data-bbox="646 846 801 898">表-2</td> <td data-bbox="801 846 956 898">図-2</td> <td data-bbox="956 846 1110 898">図-3</td> <td data-bbox="1110 846 1265 898">表-3</td> <td data-bbox="1265 846 1410 898">表-4</td> </tr> </tbody> </table>						応力フロー チャート	荷重の組合せ	材料物性値	解析モデル	最大評価点 の選定結果	Ke係数	環境評価 パラメータ	図-1	表-1	表-2	図-2	図-3	表-3	表-4
応力フロー チャート	荷重の組合せ	材料物性値	解析モデル	最大評価点 の選定結果	Ke係数	環境評価 パラメータ													
図-1	表-1	表-2	図-2	図-3	表-3	表-4													

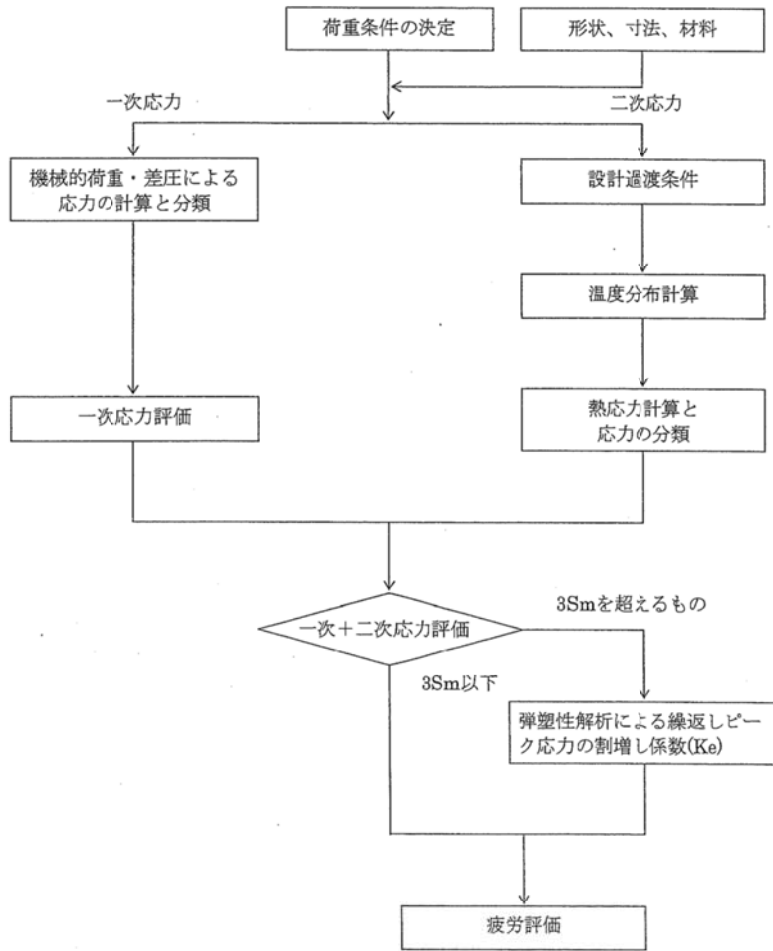


図-1 応力評価フローチャート

表-1 荷重の組合せ

状態		荷重の組合せ
設計条件		D + M + P
供用状態	A、B	D + M + P + T

記号 D : 炉内構造物重量

M : 流体荷重、燃料集合体荷重、スクラム荷重等の機械的荷重

P : 最高使用圧力 (炉心そう : 最大差圧)

T : 過渡変化時の熱荷重

表-2 (1 / 3) 材料物性値 [ ] 比熱・密度・熱伝導率)

温度	[ ]		
	比熱C	密度ρ	熱伝導率λ
[ ]			

(※) 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第5版を参照

表-2 (2 / 3) 材料物性値 [ ] 最高使用温度における縦弾性係数)

材質	最高使用温度
	343℃
オーステナイト系ステンレス鋼	173000MPa

(※) JSME S NC1-2005 / 2007 参照

表-2 (3 / 3) 材料物性値 [ ] 定格温度における縦弾性係数)

材質	設計疲労線図 (JSME S NC1 2005 / 2007年版 第1編 第4章添付4-2)	設計疲労線図に与えられた縦弾性係数	定格温度	
			288.6℃ (Tcold)	322.8℃ (Thot)
オーステナイト系 ステンレス鋼	図添付4-2-2 (1)	195000MPa	176000MPa	174000MPa

(※) JSME S NC1-2005 / 2007 参照

[ ] 内は商業機密に属しますので公開できません

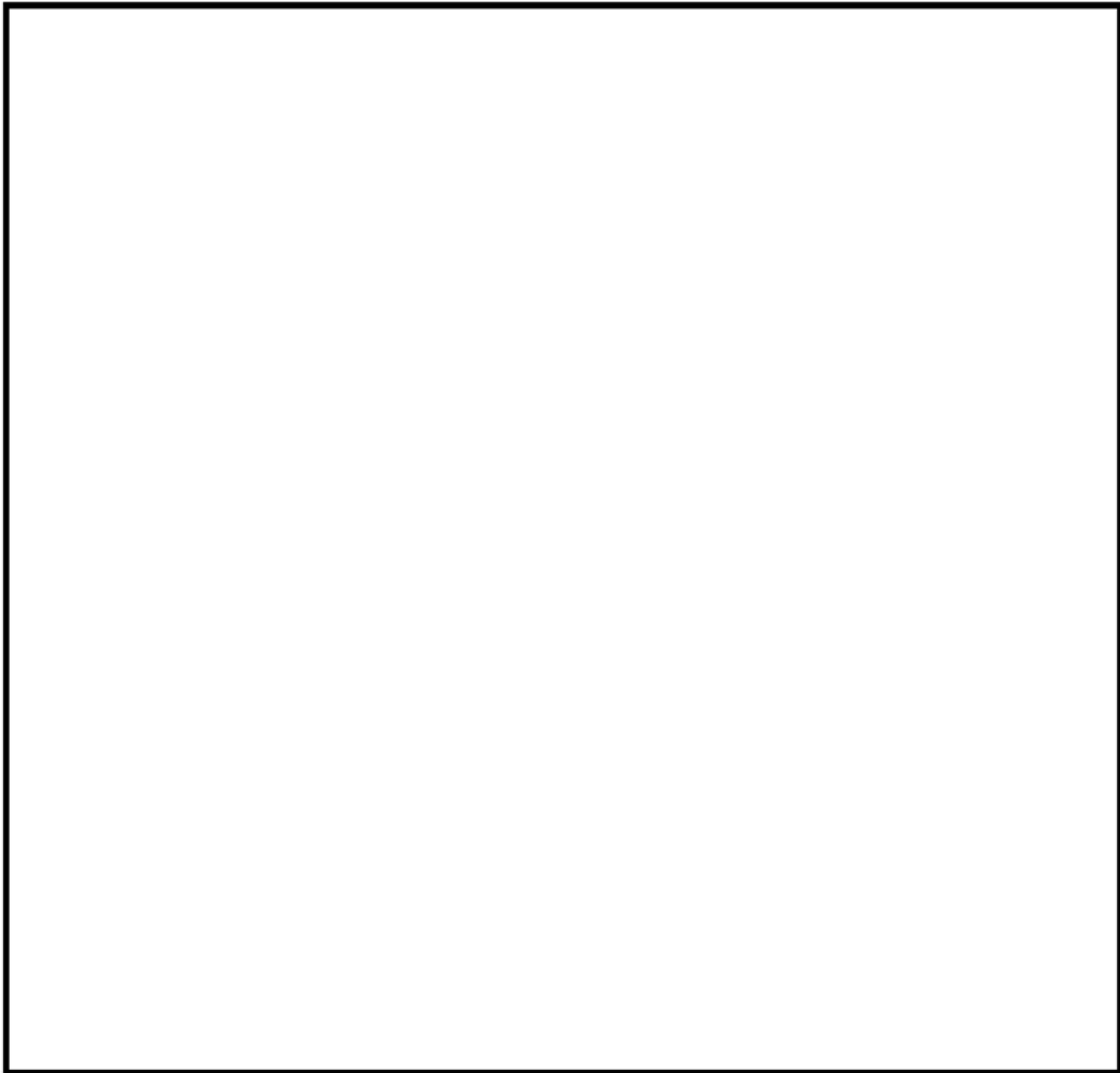


図-2 (1 / 2) 解析モデル (上部炉心支持構造物組立体の解析モデル (1 / 8 分割モデル))

 内は商業機密に属しますので公開できません



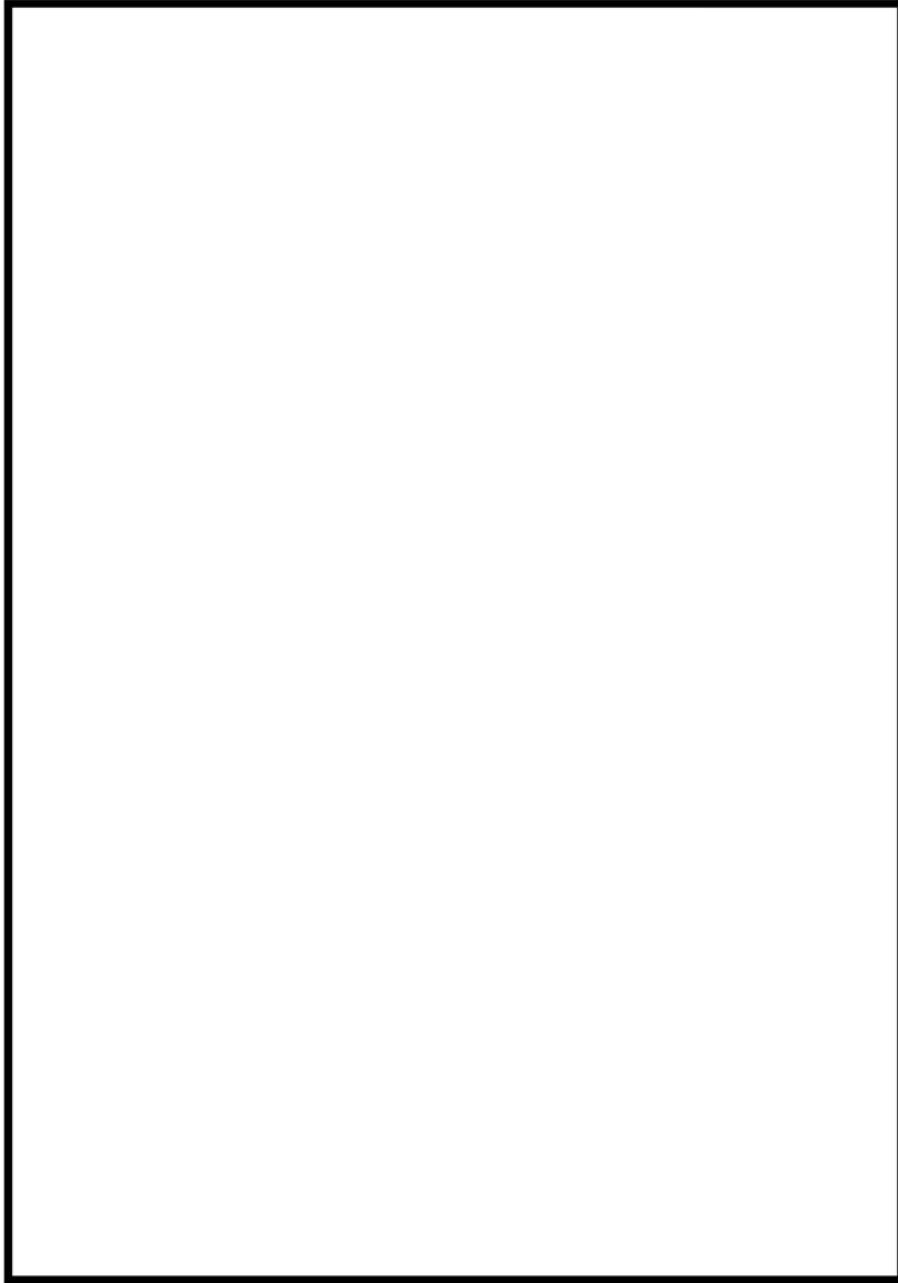


図-2 ( 3 / 3 ) 解析モデル ( 下部炉心支持構造物組立体の解析モデル ( 1 / 8 分割モデル ) )

内は商業機密に属しますので公開できません

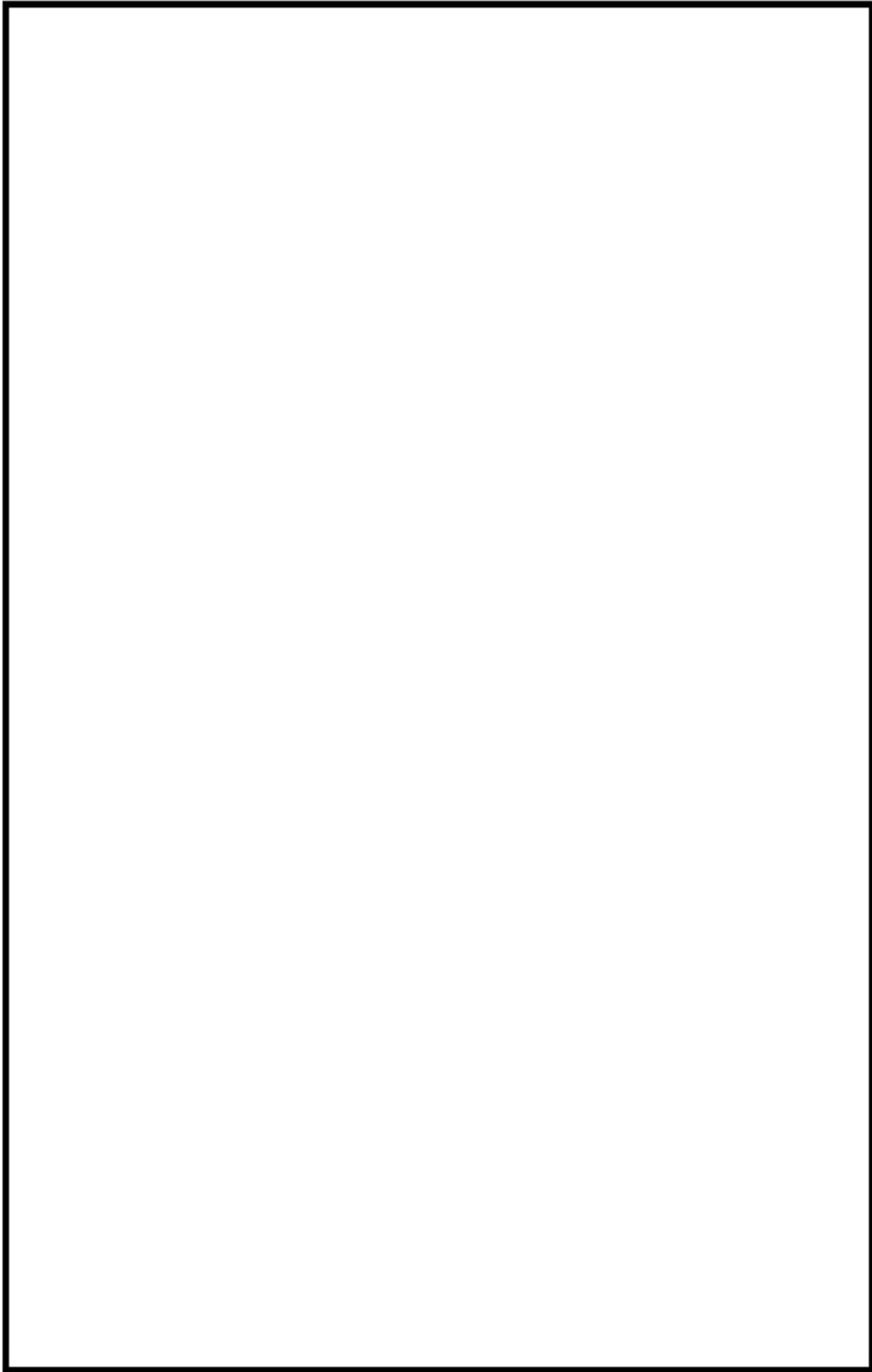


図-3 (1 / 4) 最大評価点の選定結果 (上部炉心支持板)

内は商業機密に属しますので公開できません

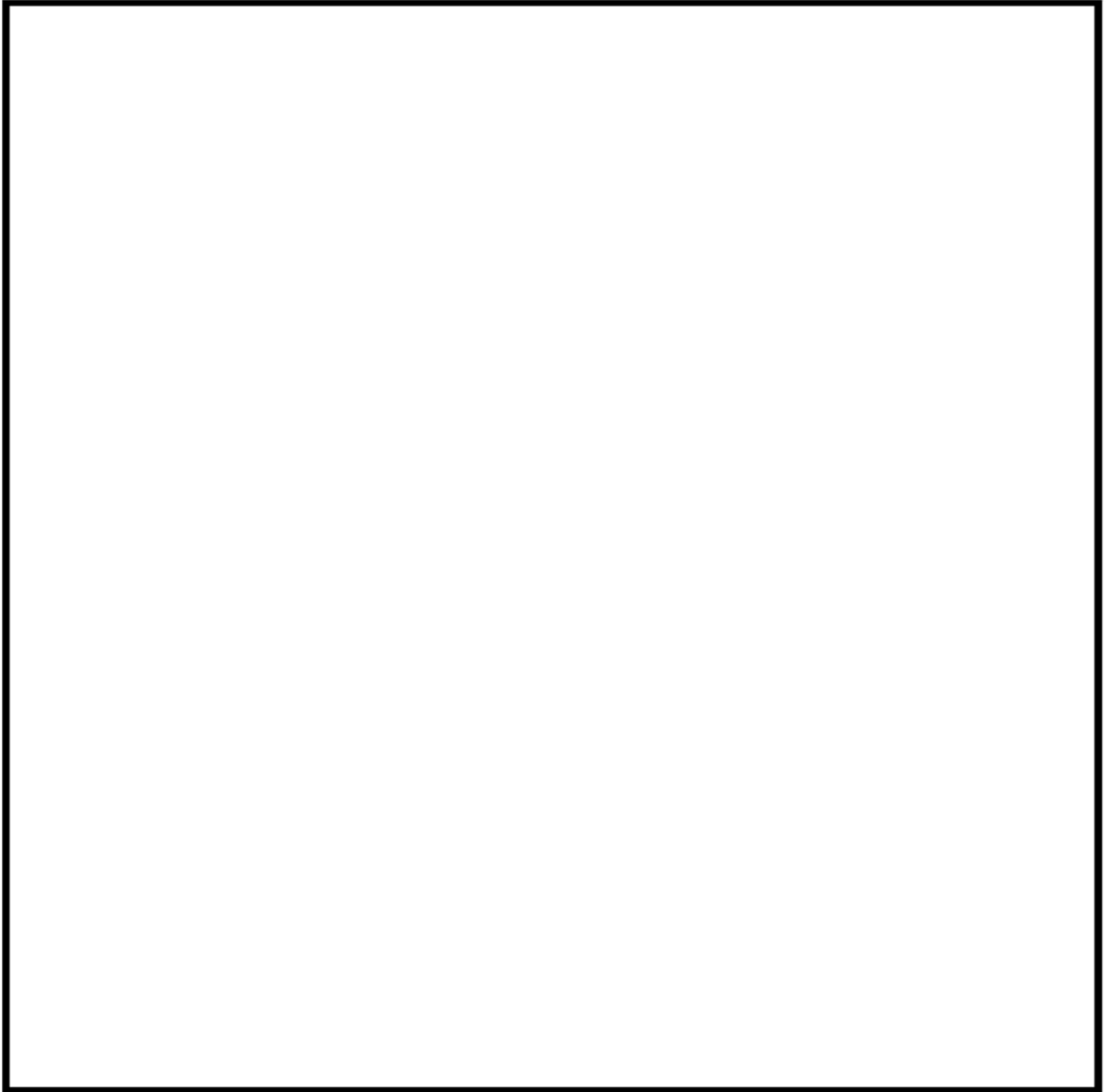


図 - 3 (2 / 4) 最大評価点の選定結果 (上部炉心支持柱)

内は商業機密に属しますので公開できません

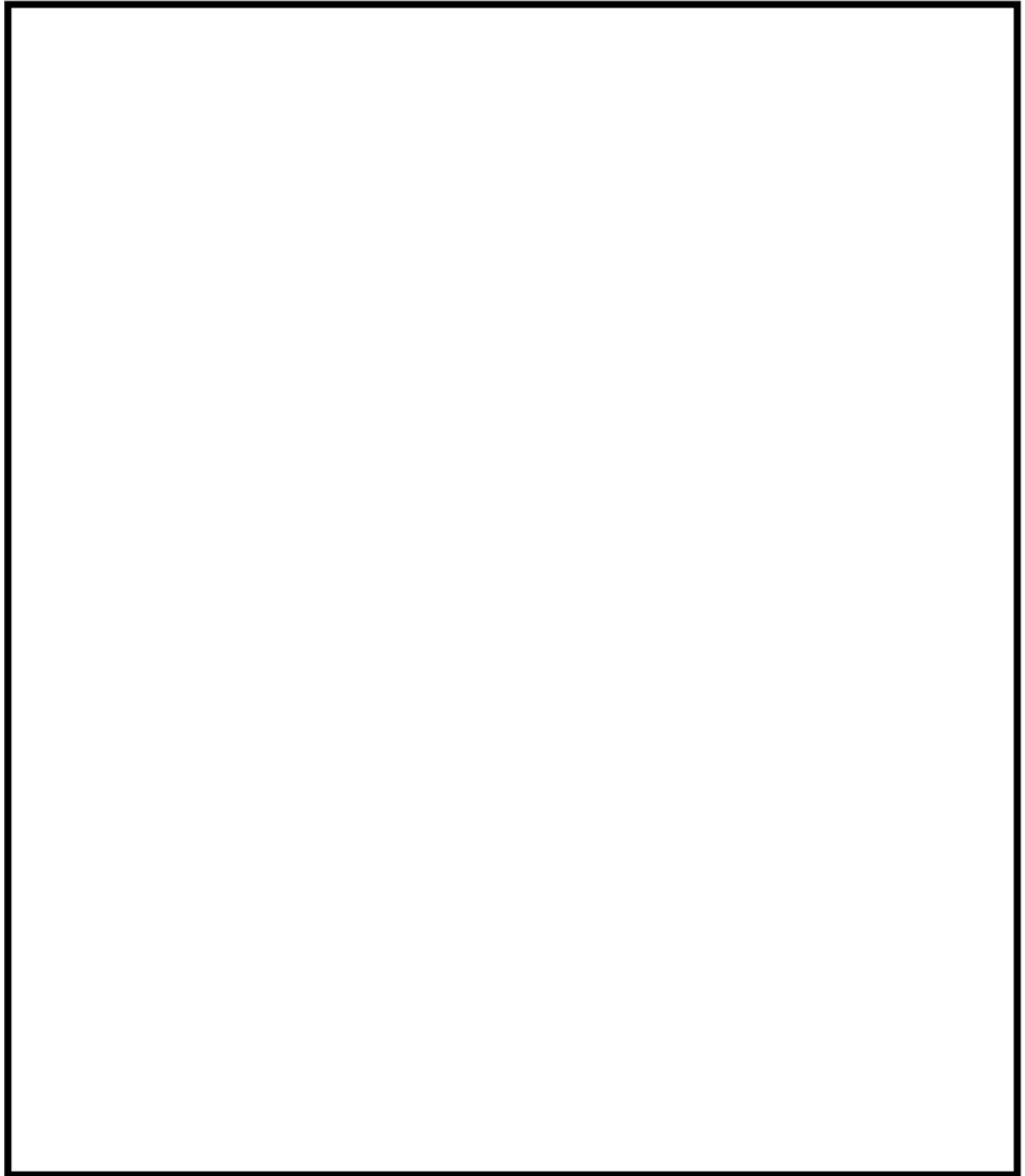


図-3 (3 / 4) 最大評価点の選定結果 (下部炉心支持柱)

内は商業機密に属しますので公開できません

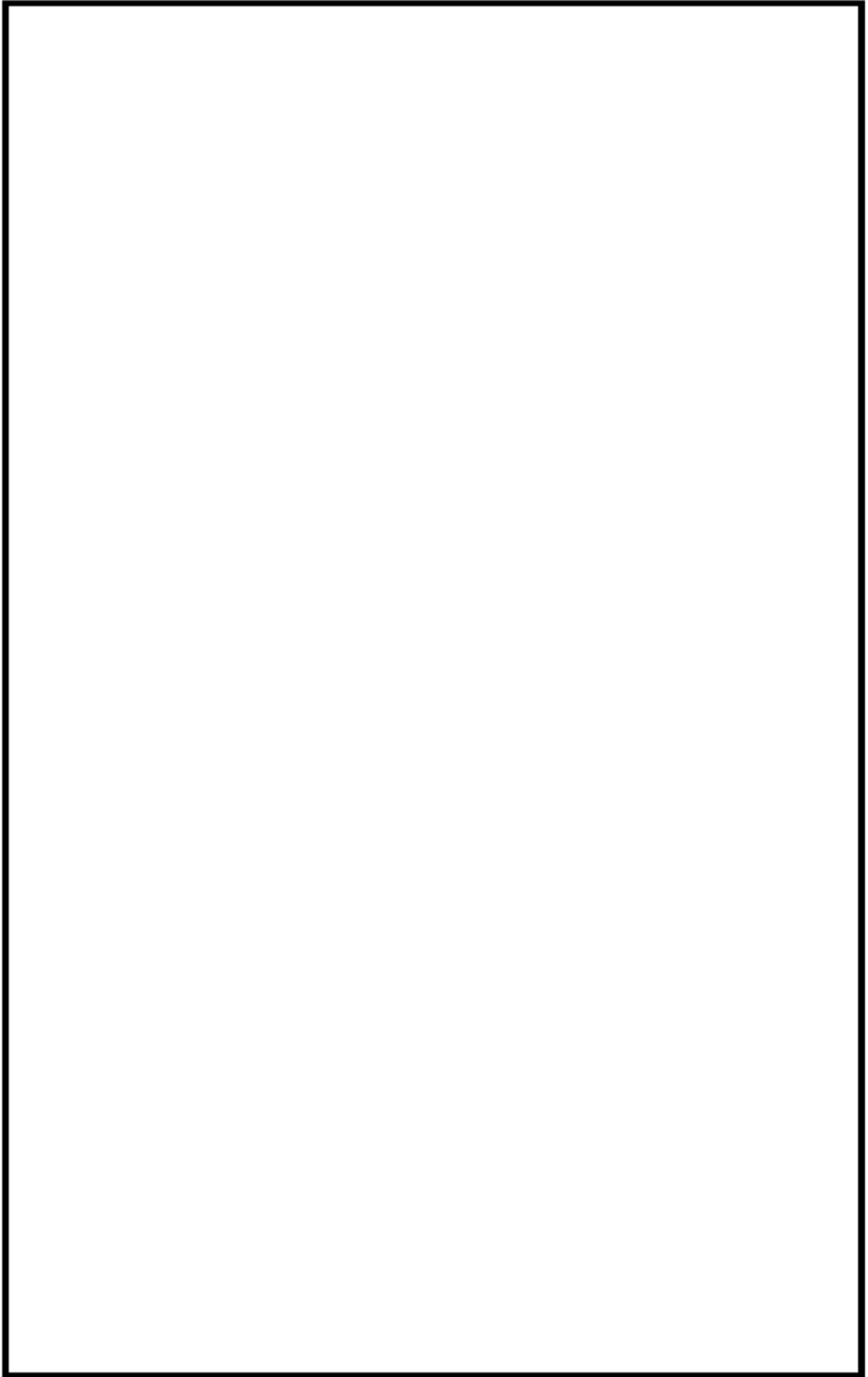


図-3 (4 / 4) 最大評価点の選定結果 (下部炉心支持板)

内は商業機密に属しますので公開できません

表-3 (1 / 4) 疲労評価結果 (上部炉心支持板)

周縁部下面

応力強さ (単位: MPa)		繰返し回数		疲労係数 $(=\frac{N}{N^*})$
最大値	最小値	繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup>	実際の繰返し回数 N	
		Ke		

疲労累積係数 = 0.01317

(注) 括弧内の数字は,  $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$  を乗じて得た値である。

→ 通常UF : 0.014

表-3 (2 / 4) 疲労評価結果 (上部炉心支持柱)

下端

応力強さ (単位: MPa)		繰返し回数		疲労係数 $(=\frac{N}{N^*})$
最大値	最小値	繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup>	実際の繰返し回数 N	
		Ke		

疲労累積係数 = 0.00201

(注) 括弧内の数字は,  $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$  を乗じて得た値である。

→ 通常UF : 0.003

表-3 (3 / 4) 疲労評価結果 (下部炉心支持柱)

上端

応力強さ (単位: MPa)		繰返し回数		疲労係数 $(=\frac{N}{N^*})$
最大値	最小値	繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup>	実際の繰返し回数 N	
		Ke		

疲労累積係数 = 0.00004

(注) 括弧内の数字は,  $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$  を乗じて得た値である。

→ 通常UF : 0.001

内は商業機密に属しますので公開できません

表 - 3 (4 / 4) 疲労評価結果 (下部炉心支持板)

中央部下面

最大値		最小値		応力強さ (単位: MPa)		繰返し回数		疲労係数 (= $\frac{N}{N_s}$ )
		Ke	繰返しピーク応力強さ(注)	実際の繰返し回数N	許容繰返し回数Ns			
[Redacted Content]								

(注) 括弧内の数字は、 $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$  を乗じて得た値である。

疲労累積係数 = 0.00153  
→ 通常UF : 0.002

[Redacted] 内は商業機密に属しますので公開できません

表 - 4 (1 / 4) 環境疲労評価結果詳細 (上部炉心支持板) (詳細評価手法)

過渡条件記号(注1)		一次+二次+ピーク応力強さ		割り増し係数(注2)	繰返しピーク応力強さ		実過渡回数	許容繰返し回数	疲労累積係数	環境効果補正係数(注5)	環境効果を考慮した疲労累積係数(注6)
A	B	smax	smin	KE	補正前 salt(注3)	補正後 salt'(注4)	n	n*	u	fen	uen
										合計:	0.15948

(注) ひずみ振幅 ≤ 0.110% (salt' ≤ 214.5) の場合、fen=1.0

→環境UF : 0.160

上表は繰返しピーク応力強さが疲労限以上で、大きな過渡の組合せから順に記載している。

(注1) A : 応力強さの最大値の時の過渡条件, B : 応力強さの最小値の時の過渡条件

(注2) KE : 簡易弾塑性解析を行う際に繰返しピーク応力強さに乗じる値

なお、弾性解析ではKE=1とする

(注3) Salt : 応力強さの変動幅に 0.5 を乗じた値

(注4) Salt' : Salt に  $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾係数}}$  を乗じた値

(注5) fen : ひずみ振幅 ≤ 0.110% (Salt' ≤ 214.5) の場合、fen=1.0

(注6) uen : 疲労累積係数に環境効果補正係数を乗じた値

表 - 4 (2 / 4) 環境疲労評価結果詳細 (上部炉心支持柱) (詳細評価手法)

過渡条件記号		一次+二次+ピーク応力強さ		割り増し係数	繰返しピーク応力強さ		実過渡回数	許容繰返し回数	疲労累積係数	環境効果補正係数	環境効果を考慮した疲労累積係数
A	B	smax	smin	KE	補正前 salt	補正後 salt'	n	n*	u	fen	uen
										合計:	0.02221

(注) ひずみ振幅 ≤ 0.110% (salt' ≤ 214.5) の場合、fen=1.0

→環境UF : 0.023

☐内は商業機密に属しますので公開できません



表-4 (3 / 4) 環境疲労評価結果詳細 (下部炉心支持柱) (詳細評価手法)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数	許容繰返し 回数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					
										合計:	0.00004

(注) ひずみ振幅 $\leq 0.110\%$  (salt'  $\leq 214.5$ ) の場合、fen=1.0

→環境UF : 0.001

表-4 (4 / 4) 環境疲労評価結果詳細 (下部炉心支持板) (詳細評価手法)

過渡条件 記号		一次+二次+ ピーク応力強さ		割り増し 係数	繰返しピーク 応力強さ		実過渡 回数	許容繰返し 回数	疲労累積係数	環境効果 補正係数	環境効果を考慮した 疲労累積係数
A	B	smax	smin		補正前 salt	補正後 salt'					
										合計:	0.01957

(注) ひずみ振幅 $\leq 0.110\%$  (salt'  $\leq 214.5$ ) の場合、fen=1.0

→環境UF : 0.020

内は商業機密に属しますので公開できません

環境効果補正係数 (fen) の算出根拠

環境補正係数については、各過渡の温度、ひずみ履歴より値を読み取り、環境疲労評価手法に従って算出している。以下に環境補正係数が1を超える過渡の温度、ひずみ履歴を示す。なお、下部炉心支持柱については、環境補正係数が1を超えるのはなかった。

(1) 上部炉心支持板

a. 過渡F, 1A1



b. 過渡E, 1A1



 内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡C, 1A1



d. 過渡A-2, 1A1



内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡A-2, B-1



f. 過渡D-2, B-1



内は商業機密に属しますので公開できません

g. 過渡B-2, B-1



 内は商業機密に属しますので公開できません

(2) 上部炉心支持柱

a. 過渡NSS, D-1



b. 過渡NSS, F




 内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡NSS, E



d. 過渡NSS, C




 内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡NSS, D-2



f. 過渡NSS, B-2



 内は商業機密に属しますので公開できません



(3) 下部炉心支持板

a. 過渡F, D-2



b. 過渡E, D-2



 内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡E, NSS



内は商業機密に属しますので公開できません

No.	高浜 2 - 中性子照射脆化 - 1 rev1	事象：中性子照射脆化
質 問	<p>(別冊-4容器-1原子炉容器-23頁)  「内表面」及び「内表面から板厚tの1/4深さ」に係る、2015年4月時点及び運転開始後60年時点の中性子照射量の計算過程について提示すること。</p>	
回 答	<p>「内表面」及び「内表面から板厚tの1/4深さ」に係る、2015年4月時点及び運転開始後60年時点*の中性子照射量の計算過程について添付 1 に示します。</p> <p>※ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 500px; height: 20px; vertical-align: middle;"></span></p> <p style="text-align: right;">以上</p> <p style="text-align: center; margin-top: 200px;"> <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span> 内は商業機密に属しますので公開できません </p>	

中性子照射量算出要領

評価時期における原子炉容器内表面および原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置での中性子照射量fは、第4回監視試験により得られた中性子照射量f<sub>1</sub>及び定格負荷相当年数EFPY<sub>1</sub>を用いて算出した中性子束に対し、原子炉容器内表面のリードファクタLF及び板厚方向の減衰係数を考慮し、評価時点での定格負荷相当年数EFPY<sub>2</sub>を乗じて算出する。

$$f = \underbrace{f_1 \div \text{EFPY}_1}_{\text{カプセル位置での中性子束}} \div \underbrace{\text{LF}}_{\text{内表面位置での中性子束}} \times \underbrace{\exp(-0.24 \times t \div 4 \div 25.4)}_{\text{1/4t深さ位置での中性子束}} \times \text{EFPY}_2$$

評価時期における1/4t深さ位置での中性子照射量

高浜2号炉の中性子照射量算出に用いる値を下表に示す。

表 中性子照射量算出に用いる値

記号	算出に用いる値
f <sub>1</sub> (×10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup> )	□
EFPY <sub>1</sub>	□
EFPY <sub>2</sub>	(2015年4月時点) (運転開始後60年時点)
LF	□
t (mm)	□

2015年4月時点及び運転開始後60年時点における原子炉容器内表面での中性子照射量fは以下となる。

- ① 原子炉容器内表面：2015年4月時点

f = □  
≒ □

- ② 原子炉容器内表面：運転開始後60年時点

f = □  
≒ □

2015年4月時点及び運転開始後60年時点における原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置での中性子照射量fは以下となる。

- ③ 原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置：2015年4月時点

f = □  
≒ □

- ④ 原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置：運転開始後60年時点

f = □  
≒ □

以上

No.	高浜 2 - コンクリート鉄骨 - 1	事象：共通
質 問	<p>(別冊-11コンクリート構造物-1～7頁)                  対象構造物、代表構造物の選定過程を提示すること。</p>	
回 答	<p>「高浜 1 - コンクリート鉄骨 - 1」の回答と同様です。</p> <p style="text-align: right;">以上</p>	

No.	高浜 2 - コンクリート鉄骨 - 3	事象：塩分浸透
質 問	(別冊-11コンクリート構造物-14頁) 塩分浸透の評価対象の選定過程を提示すること。	
回 答	<p data-bbox="475 734 1152 768">「高浜 1 - コンクリート鉄骨 - 3」の回答と同様です。</p> <p data-bbox="1289 808 1353 842" style="text-align: right;">以上</p>	

No.	高浜 2 - コンクリート鉄骨 - 5	事象：腐食
質 問	<p>(別冊-11コンクリート構造物-16頁)  腐食による強度低下を高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象とする理由を提示すること。</p>	
回 答	<p>「高浜 1 - コンクリート鉄骨 - 5」の回答と同様です。</p> <p style="text-align: right;">以上</p>	

No.	高浜 2 - コンクリート鉄骨 - 1 0	事象：塩分浸透
質 問	(別冊-11コンクリート構造物-31頁) 塩分浸透の評価点の選定過程を提示すること。	
回 答	<p data-bbox="475 728 1181 766">「高浜 1 - コンクリート鉄骨 - 1 0」の回答と同様です。</p> <p data-bbox="1289 801 1353 840" style="text-align: right;">以上</p>	



No.	高浜2-コンクリート鉄骨-11	事象：塩分浸透																								
質 問	(別冊-11コンクリート構造物-32頁) 表2.3-5の鉄筋の腐食減量の算定過程(方法、条件、パラメータ)及び結果を提示すること。																									
回 答	<p>鉄筋の腐食減量の算定過程(方法、条件、パラメータ)および結果は以下のとおりです。</p> <p>1. 方法</p> <p>(1) 拡散方程式により、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測</p> <p>(2) 森永式により、コンクリートにひび割れが発生する腐食減量を予測することで、鉄筋の腐食減量の評価を実施</p> <p>2. 条件およびパラメータ</p> <p>添付-1「塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定の過程および結果」に示すとおり。</p> <p>3. 結果</p> <p>運転開始60年時点の鉄筋腐食減量が、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っていることを確認しました。鉄筋の腐食減量の算定結果は、以下に示すとおり。</p> <table border="1" data-bbox="453 1397 1299 1823"> <thead> <tr> <th rowspan="2">対象の部位</th> <th colspan="3">鉄筋の腐食減量 (<math>\times 10^{-4}g/cm^2</math>)</th> </tr> <tr> <th>調査時点</th> <th>運転開始後 60年経過時点</th> <th>かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>取水構造物 (気中帯)</td> <td>10.7</td> <td>21.1</td> <td>90.1</td> </tr> <tr> <td>取水構造物 (干満帯)</td> <td>0.4</td> <td>1.2</td> <td>90.1</td> </tr> <tr> <td>取水構造物 (海中帯)</td> <td>3.1</td> <td>7.1</td> <td>90.1</td> </tr> <tr> <td>非常用海水路</td> <td>4.0</td> <td>7.6</td> <td>90.1</td> </tr> </tbody> </table> <p>添付-1 塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定の過程および結果</p>			対象の部位	鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )			調査時点	運転開始後 60年経過時点	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点	取水構造物 (気中帯)	10.7	21.1	90.1	取水構造物 (干満帯)	0.4	1.2	90.1	取水構造物 (海中帯)	3.1	7.1	90.1	非常用海水路	4.0	7.6	90.1
対象の部位	鉄筋の腐食減量 ( $\times 10^{-4}g/cm^2$ )																									
	調査時点	運転開始後 60年経過時点	かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点																							
取水構造物 (気中帯)	10.7	21.1	90.1																							
取水構造物 (干満帯)	0.4	1.2	90.1																							
取水構造物 (海中帯)	3.1	7.1	90.1																							
非常用海水路	4.0	7.6	90.1																							

塩分浸透による鉄筋の腐食減量の推定値算定過程および結果

	取水構造物			非常用 海水路	備考
	気中帯	干満帯	海中帯		
x: かぶり厚さ(mm)					
C: 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	5.11	0.99	4.17	4.05	特別点検結果(塩分浸透の点検結果)
Co: コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )					
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の 拡散係数(mm <sup>2</sup> /年)					
Ci: 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> ) (推定値)					
x: かぶり厚さ(mm)					
d: 鉄筋径(mm)					
W: 単位水量(kg/m <sup>3</sup> )					
W/C: 水セメント比(比)					
T: 温度(°C)					
RH: 相対湿度(%)					
O: 酸素濃度(比)					
N: 練り混ぜ水の塩分濃度(%)					
qi: 調査時点(39年経過)の鉄筋の腐食減量 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )					
qi: 運転開始後60年経過時点の鉄筋の 腐食減量(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )	21.1	1.2	7.1	7.6	
Q <sub>CR</sub> : かぶりコンクリートにひび割れが発生する 時点の鉄筋の腐食減量 推定値(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )	90.1	90.1	90.1	90.1	

- : (1)拡散方程式により、  
コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測するに必要なパラメータ
- : (1)の予測結果
- : (2)森永式により、鉄筋の腐食減量の評価を実施するのに必要なパラメータ
- : (2)の推定結果

拡散方程式

$$C = C_0 \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

C: 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)  
Co: コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)  
erf: 誤差関数

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

x: かぶり厚さ(mm)  
D: コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数(mm<sup>2</sup>/年)  
t: 材齢(年)

森永式

$$q = q_1 \cdot \frac{q_2}{q_2'}$$

$$q_1 = \frac{d}{c^2} \left[ -0.51 - 7.60N + 44.97(W/C)^2 + 67.95N(W/C)^2 \right]$$

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO + 0.017N + 60.81HO + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304 N$$

q: 鉄筋の腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
q1: 塩分環境下での腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
q2': 寿命予測対象部位で、塩分環境下での腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
q2: 寿命予測対象部位で、  
標準環境下(温度15°C、湿度69%、酸素濃度20%)での腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
Q<sub>CR</sub>: かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の腐食減量(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
d: 鉄筋径(mm)  
c: かぶり厚さ(mm)  
N: 練り混ぜ水の塩分濃度(%)  
W/C: 水セメント比(比)  
T: 温度(°C)  
H: 湿度に関する項 H=(RH-45)/100  
RH: 相対湿度(%)  
O: 酸素濃度(比)

内は商業機密に属しますので公開できません