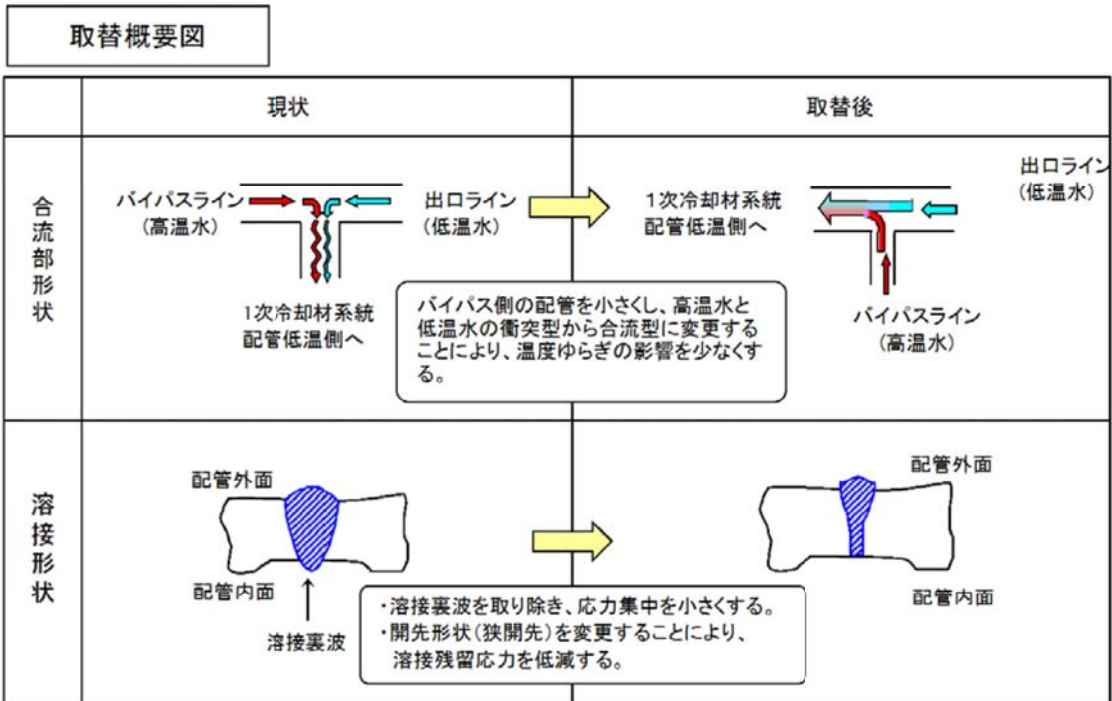
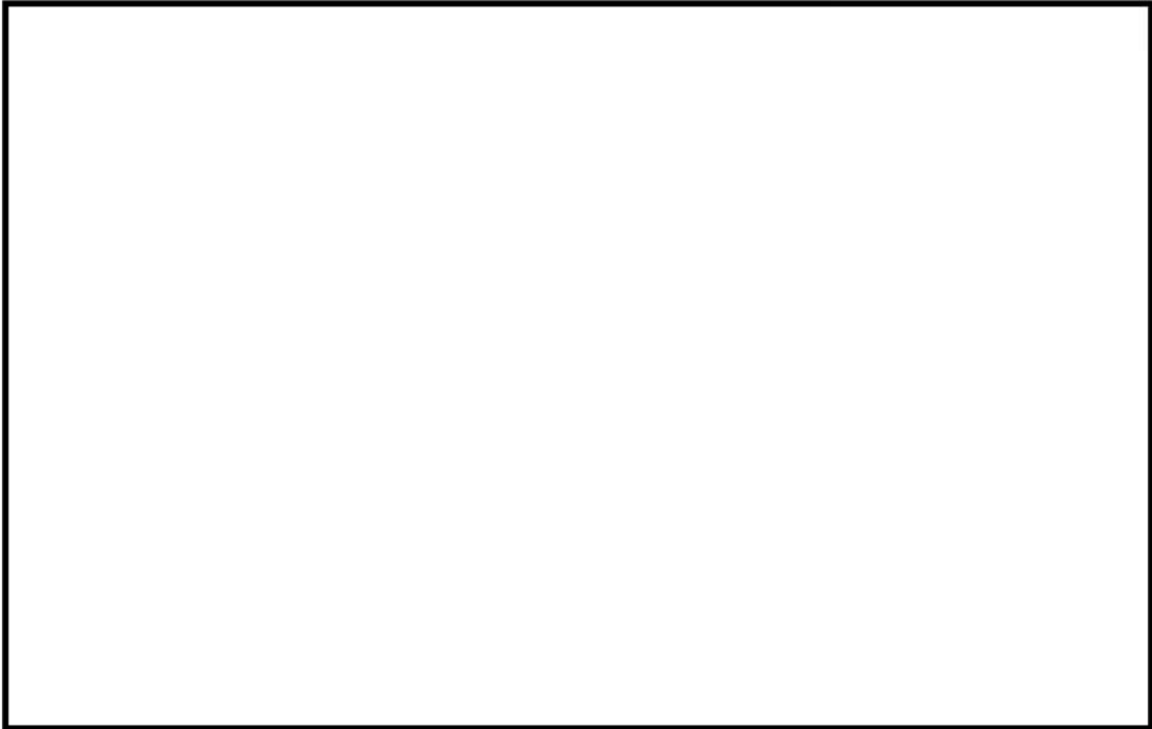


|     |  |       |
|-----|--|-------|
| No. | 高浜 1－低サイクル疲労－ 1  | 事象：疲労 |
| 質 問 | <p>(本冊-(7)改善活動-18頁)</p> <p>熱疲労割れ事象の予防保全の観点から実施された余熱除去系統配管取替工事の経緯、工事内容及び効果の確認についての説明を提示すること。</p>  |       |
| 回 答 | <p>余熱除去系統配管取替工事は国内PWRプラントにおける高サイクル熱疲労による損傷事例を踏まえて予防保全として実施したものです。</p> <p>当該事例に関連して、旧原子力安全・保安院より「発電用原子力設備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1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（2007年度～2008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> |       |



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表及び第2図～第5図に示す。

内は商業機密に属しますので公開できません

### 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図に示す。

使用する解析コードは、「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。

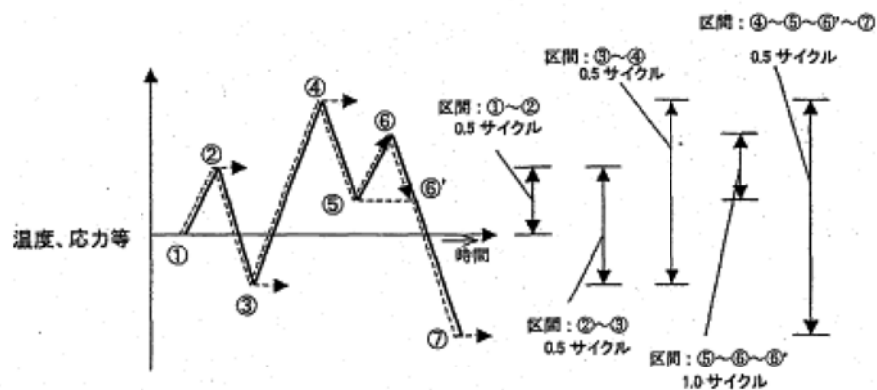
なお、現在は米国MSC社によって保守されている。

### 3.5 計算結果

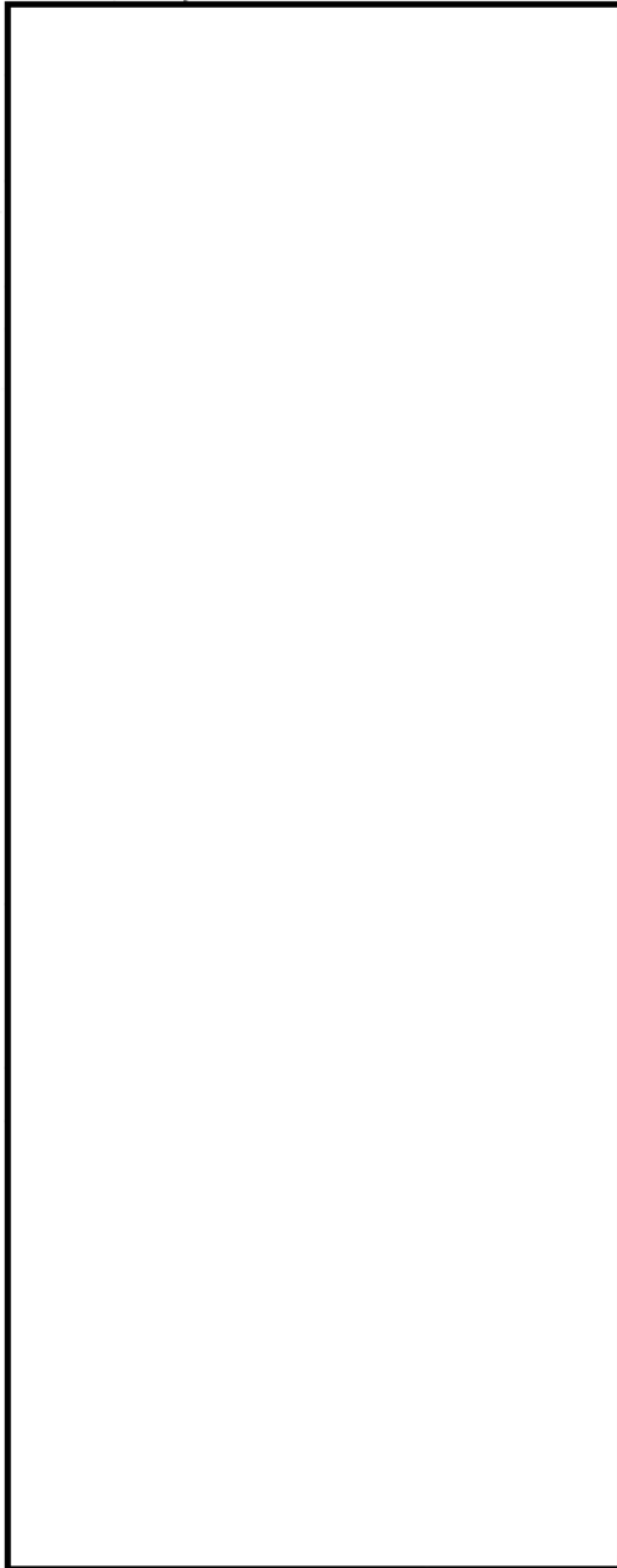
応力履歴をレインフロー法（注2）により処理し算出した疲労累積係数を、第2表に示す。

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、温度揺らぎが激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



第1図 評価部位  
(余熱除去設備概略系統構成)

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<br>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<br>i) 昇 温<br>ii) 冷 却 |    | 第 4 図<br>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 60%稼働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                                   | [Redacted] | [Redacted] | 1.0 |
| 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) 温度揺らぎが激しくなる主管上流側の評価結果を示す。

[Redacted] 内は商業機密に属しますので公開できません

|     |  |       |
|-----|--|-------|
| No. | 高浜1ー低サイクル疲労ー2 rev1   | 事象：疲労 |
| 質 問 | <p>(本冊-4.2.3経年劣化事象の抽出-29頁)</p> <p>運転経験により建設時考慮されていない有意な低サイクル応力変動(熱成層等)が把握された部位およびそれを抽出したプロセスを整理して提示すること。</p>   |       |
| 回 答 | <p>高経年化技術評価書で想定している経年劣化事象については、評価対象機器の使用条件(型式、材料、環境条件等)を考慮し、これまでの高経年化技術評価で想定されている部位と経年劣化事象の組合せを取り纏めた日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」附属書A(規定)「経年劣化メカニズムまとめ表」を参考に抽出します。</p> <p>さらに、前述のまとめ表作成以降の知見については、それ以降に認可されたPLM評価書を参考にするとともに、国内外の新たな運転経験及び最新知見についても、以下に示すとおり継続的に劣化状況評価への影響を整理し、技術評価への反映要否を判断します。</p> <p>1. 運転経験</p> <p>国内運転経験として、原子力安全推進協会が運営している原子力発電情報公開ライブラリーにおいて公開されている「トラブル情報」、「保全品質情報」を、海外運転経験として、NRC(米国原子力規制委員会; Nuclear Regulatory Commission)のBulletin(通達)、Generic Letter及びInformation Noticeを対象としてスクリーニングを実施。期間中の情報において、新たに劣化状況評価書に反映すべき運転経験を抽出します。</p> <p>2. 最新知見</p> <p>原子力規制委員会文書、日本機械学会、日本電気協会、日本原子力学会の規格・基準類、並びに原子力規制委員会のホームページに公開されている試験研究の情報等を検討し、劣化状況評価を実施する上で、新たに反映が必要な知見を抽出します。</p> <p>例えば、運転経験により建設時考慮されていない低サイクル疲労(熱成層)については、上述の「原子力発電所の高経年化対策実施基準」附属書A(規定)「経年劣化メカニズムまとめ表」で疲労想定部位として抽出され、附属書E「経年劣化事象一覧表」にて熱成層が生じる場所において想定要となっています。熱成層が想定される部位は、日本機械学会基準「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」において損傷事例が記載されています。</p> <p>熱成層による疲労の損傷事例としては、(1)キャビティフロー型熱成層、(2)弁シートリーク型熱成層、(3)弁グランドリーク型熱成層、(4)運転操作型熱成層が考えられます。</p> <p>このうち、キャビティフロー型熱成層については、発生の可能性のある箇</p> |       |

所を「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」に基づいて評価し、構造上有意となる温度変動の発生を回避できることを確認しています。

弁シートリーク型熱成層については、対象となる隔離弁の定期的な分解点検によって弁のシートリークを防止しています。

弁グランドリーク型熱成層については、対象となる隔離弁の定期的な分解点検時に弁ディスク位置を調整して、弁シート部の隙間を適正に管理していくことで弁ディスクの熱膨張による閉止が生じないようにしており、熱成層の発生、消滅の繰り返しを防止しています。

一方で運転操作型熱成層については、今後熱成層が発生しない運転操作をすることが困難であるため、熱成層の発生を想定し評価を行っています。

運転操作型熱成層を考慮している部位は「蒸気発生器給水管台」、「加圧器サージ配管」、「加圧器スプレ配管」、「加圧器スプレイライン用管台」の4箇所です。

| No.     | 高浜1-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)<br/> 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<br/> 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<br/> 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;"> </td> <td>290.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>3. 最大評価点の選定<br/> 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<br/> 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) |  |  |  | 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) |    |      |        |  |                      |         |  |  |  |       |    |        |         |        |
|         |  |                      | 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. Ke係数および環境評価パラメータ

評価に用いたKe係数および環境評価パラメータ（環境効果補正係数fen）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   |         |
|----|------|----------|---------|
|    |      | Sm (MPa) | 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. Ke係数および環境評価パラメータ

評価に用いたKe係数および環境評価パラメータ（環境効果補正係数fen）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

(疲れ累積係数除く)

| 評価点 |    |    | 一次+二次応力強さ | 疲れ累積係数 |
|-----|----|----|-----------|--------|
| 管板部 | 1  | 入口 |           |        |
|     |    | 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 | (0.17367) |        |
|     |    | 出口 |           |        |
|     | 10 | 入口 |           |        |
|     |    | 出口 |           |        |
| 11  | 入口 |    |           |        |
|     | 出口 |    |           |        |

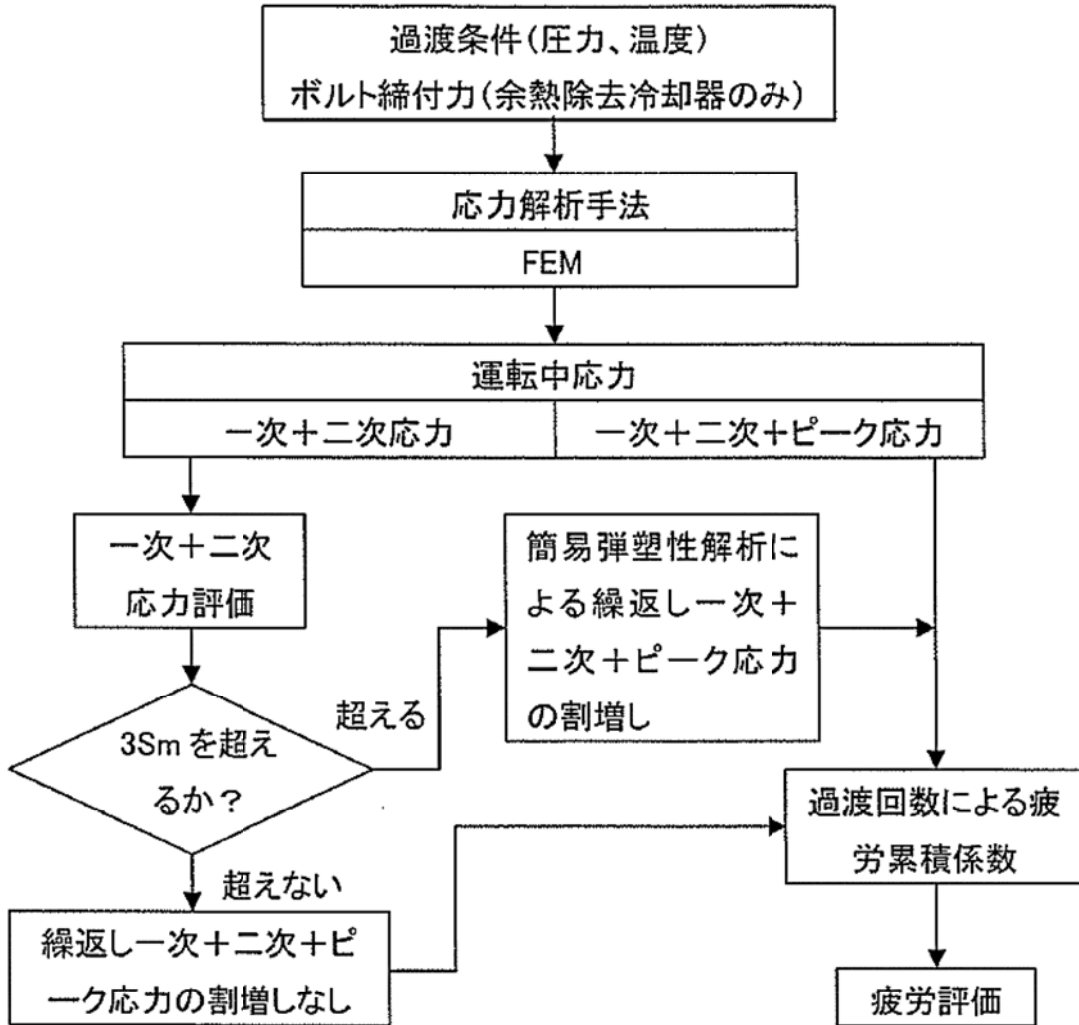
注) 1. ( )はそれぞれの部位での最大値を示す。

→通常UF : 0.174

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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 歪過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|-----------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | sain | KE        | 補正前<br>sail    | 補正後<br>sail' | n         | n*          | u      | fen          | uen                 |
|            |   |                   |      |           |                |              |           |             |        |              |                     |

合計：0.17367  
→通常UF：0.174

合計：0.22156  
→環境UF：0.222

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) 再生クーラ

a. 過渡1H1,1F2

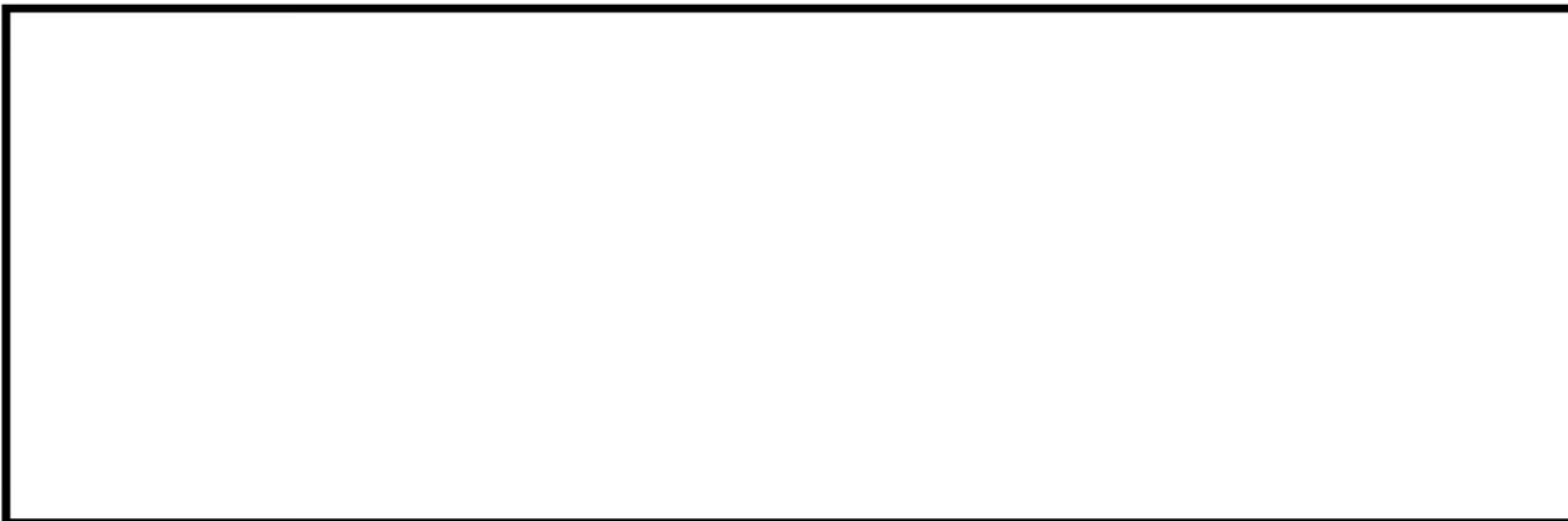


b. 過渡1I1,1G1



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

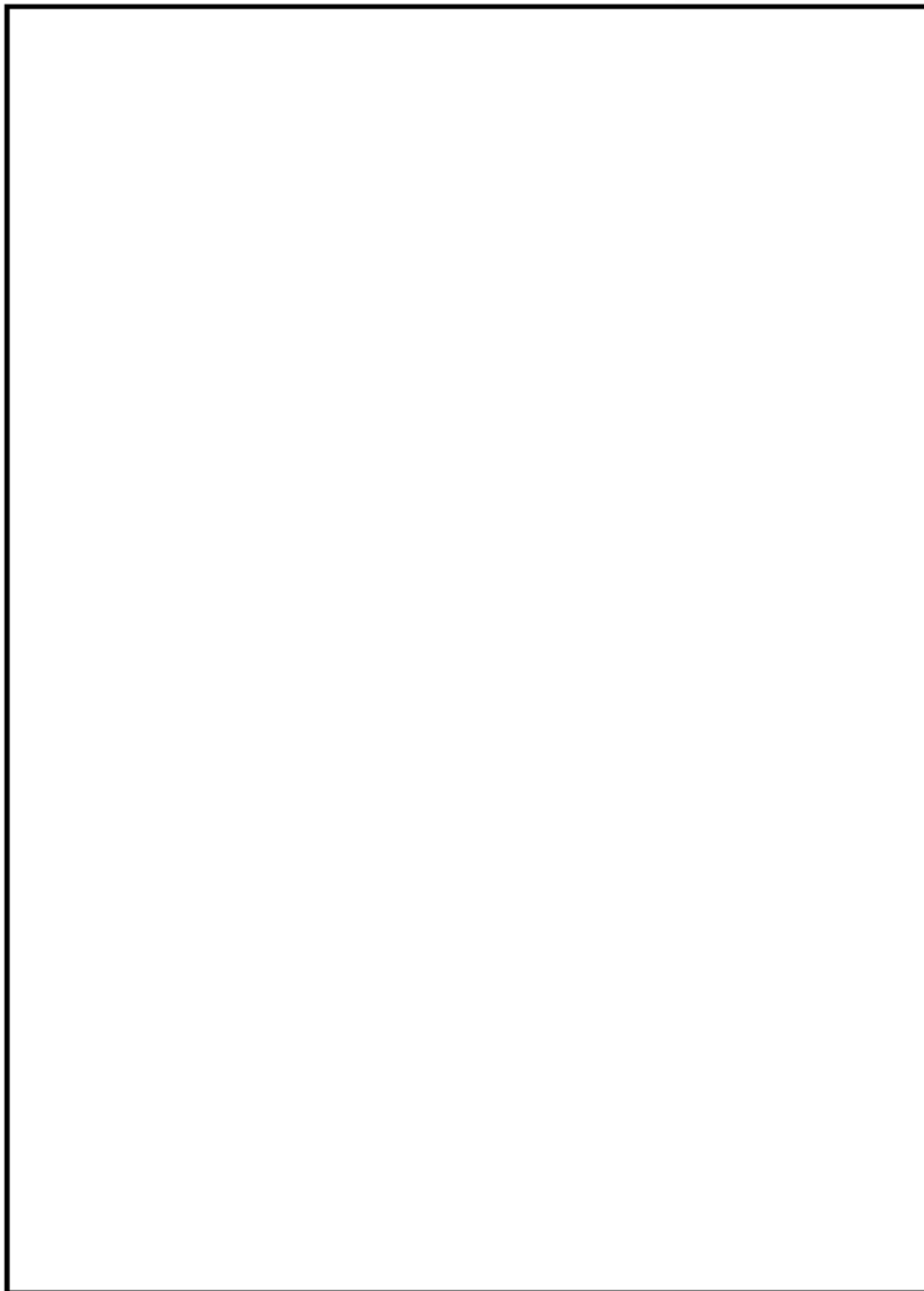


 内は商業機密に属しますので公開できません

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 |           |        |           |
|     |    | 出口 |           |        |           |
|     | 2  | 入口 |           |        |           |
|     |    | 出口 |           |        |           |
|     | 3  | 入口 |           |        |           |
|     |    | 出口 |           |        |           |
|     | 4  | 入口 |           |        |           |
|     |    | 出口 |           |        |           |
|     | 5  | 入口 |           |        | (0.04896) |
|     |    | 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 : 0.049

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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |             | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|-----------|----------------|-------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | snin |           | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |           |                |             |           |             |        |              | 合計： 0.06801         |

合計：0.04896

→通常UF：0.049

→環境UF：0.069

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

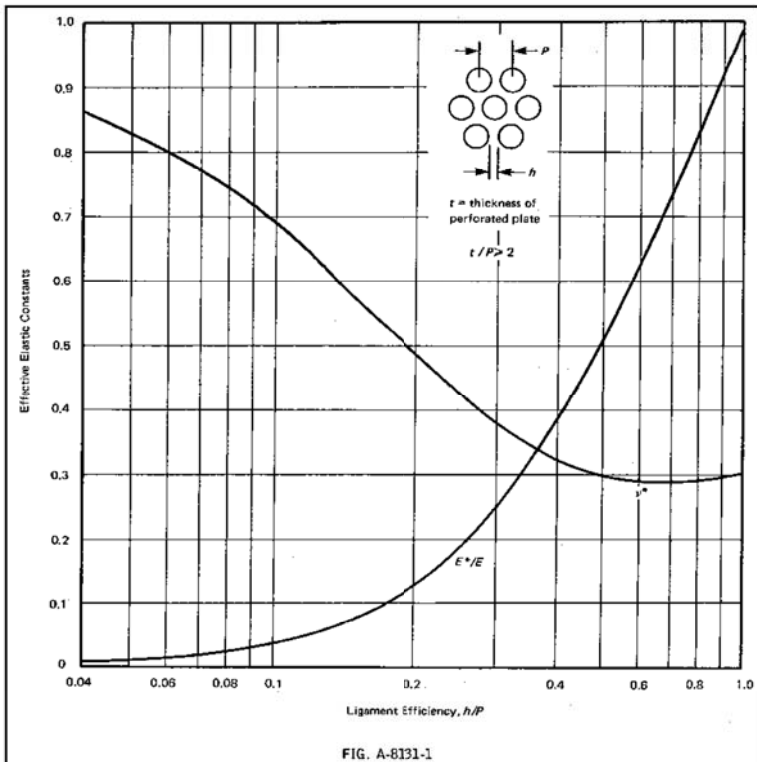


図1 等価縦弾性係数と等価ポアソン比

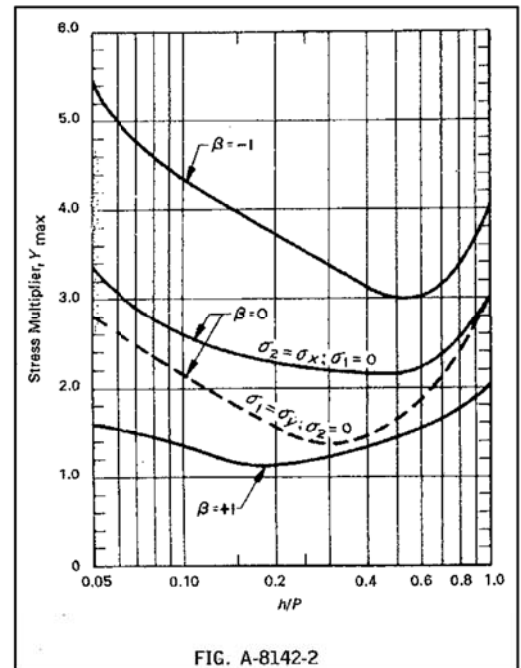


図2 応力指数

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1-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-22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</p> <p>解析モデルを添付1に示します。</p> <p>2. 材料物性値</p> <p>材料物性値を以下に示します。</p> <table border="1" data-bbox="368 987 1417 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="2" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> <td rowspan="2"></td> </tr> <tr> <td>管板及び管板廻り</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"> <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px; 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> <p>3. 最大評価点の選定</p> <p>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</p> <p>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 1369 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</p> <p>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。

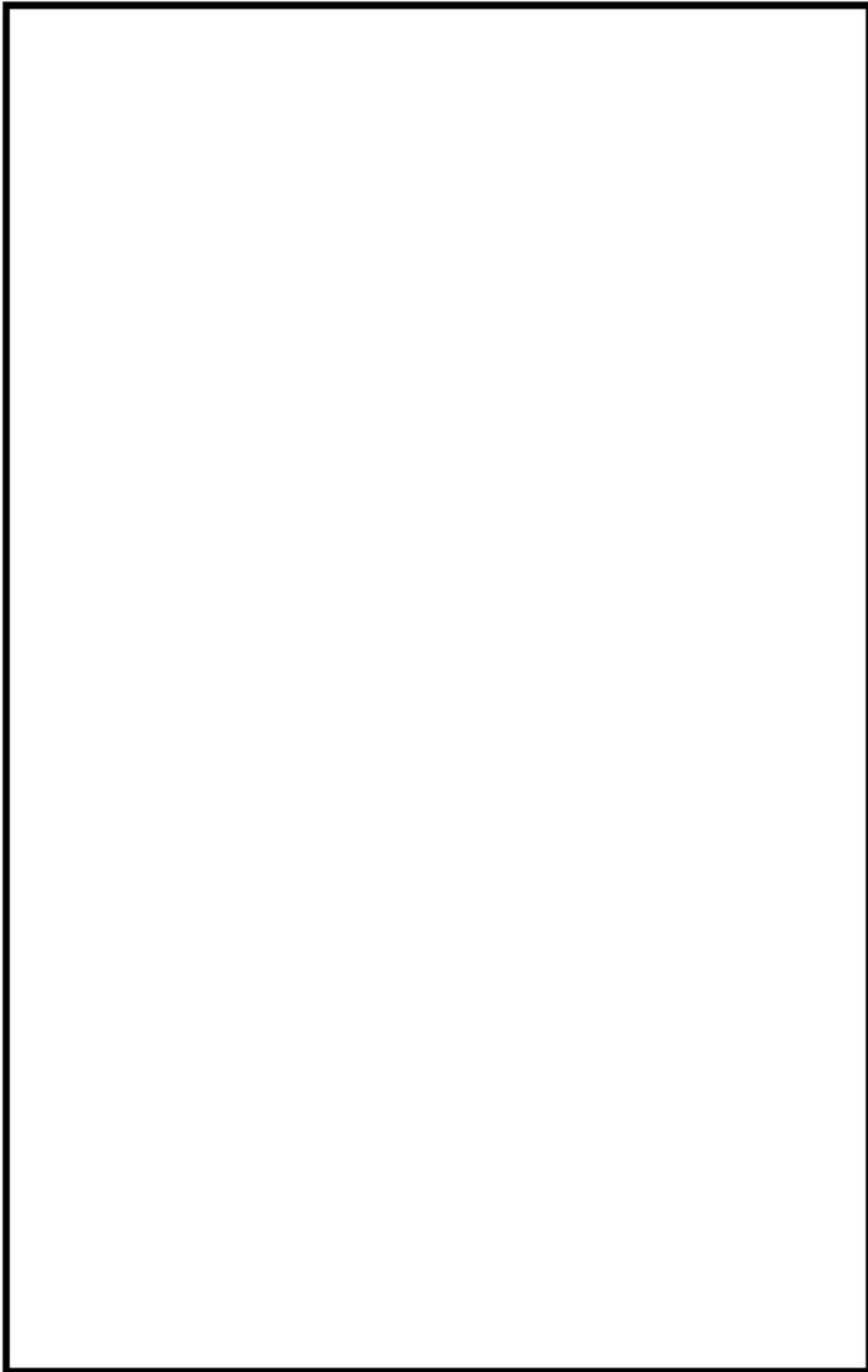
管板及び管板廻りについては、設計・建設規格による評価において疲労累積係数が最大となる評価点が、ニッケル基合金の内張りにより接液しないため、内張りを施していない接液部で疲労累積係数が最大となる評価点の疲労累積係数を用いて環境疲労評価を実施しています。

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。

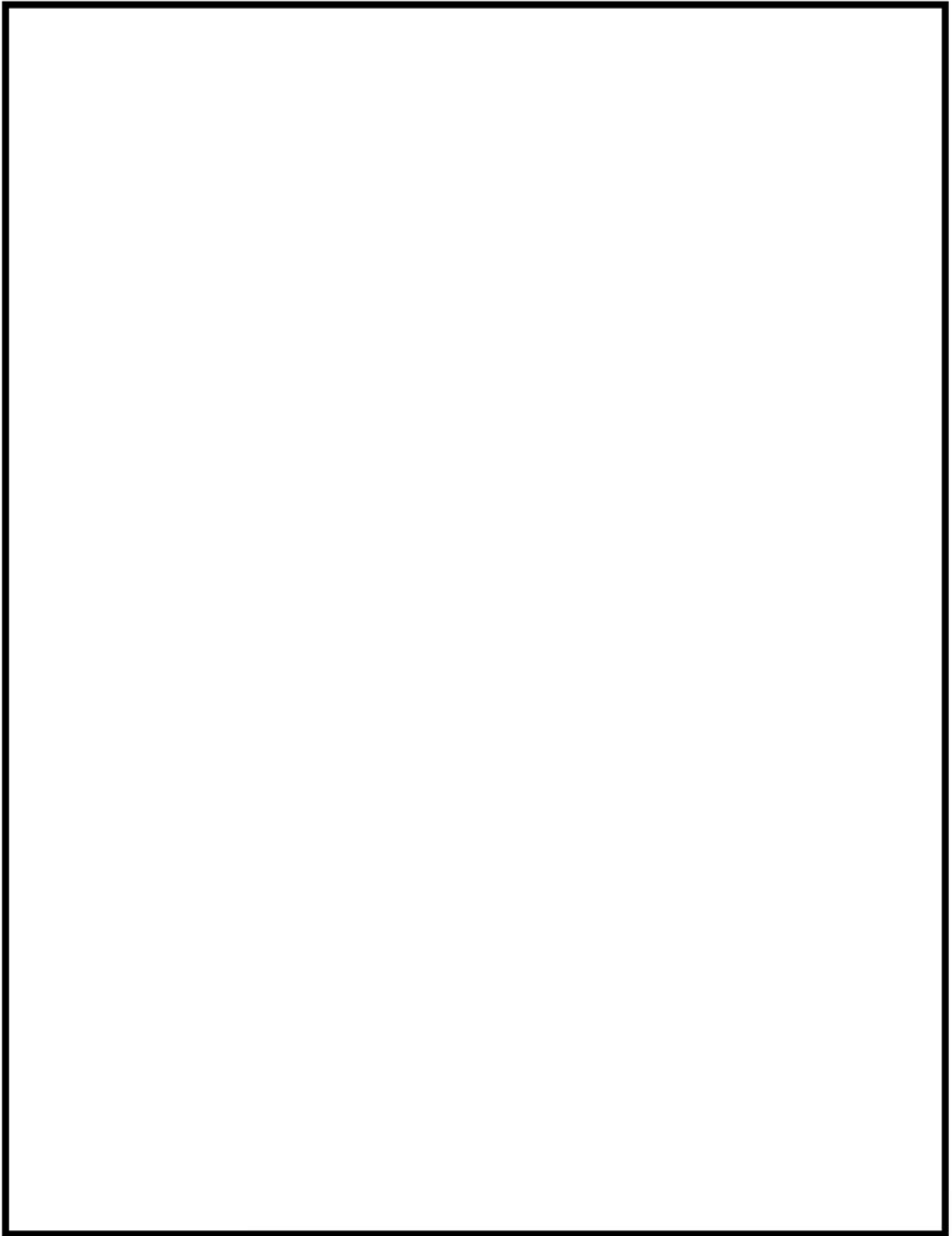
| 評価部位     | 設計・建設規格による<br>解析結果 |                 | 環境疲労評価手法に<br>よる解析結果 |     | 評価点参照    |
|----------|--------------------|-----------------|---------------------|-----|----------|
|          | U f                | 評価点             | U f e n             | 評価点 |          |
| 管板及び管板廻り | 0. 1 2 3           | 1次側<br>R/R*=1.0 | 0. 0 9 9            | 1   | 添付2（1／6） |
| 給水入口管台   | 0. 0 7 3           | 7               | 0. 2 3 5            | 1   | 添付2（2／6） |

以上



蒸気発生器本体 管板及び管板廻り 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



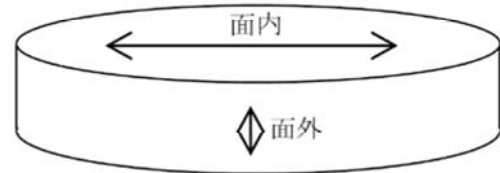
蒸気発生器本体 給水入口管台 解析モデル

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。



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

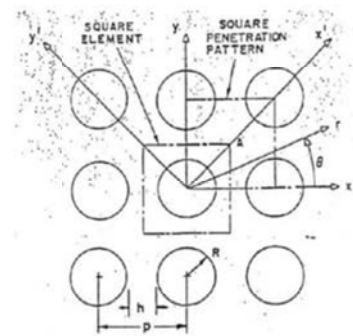
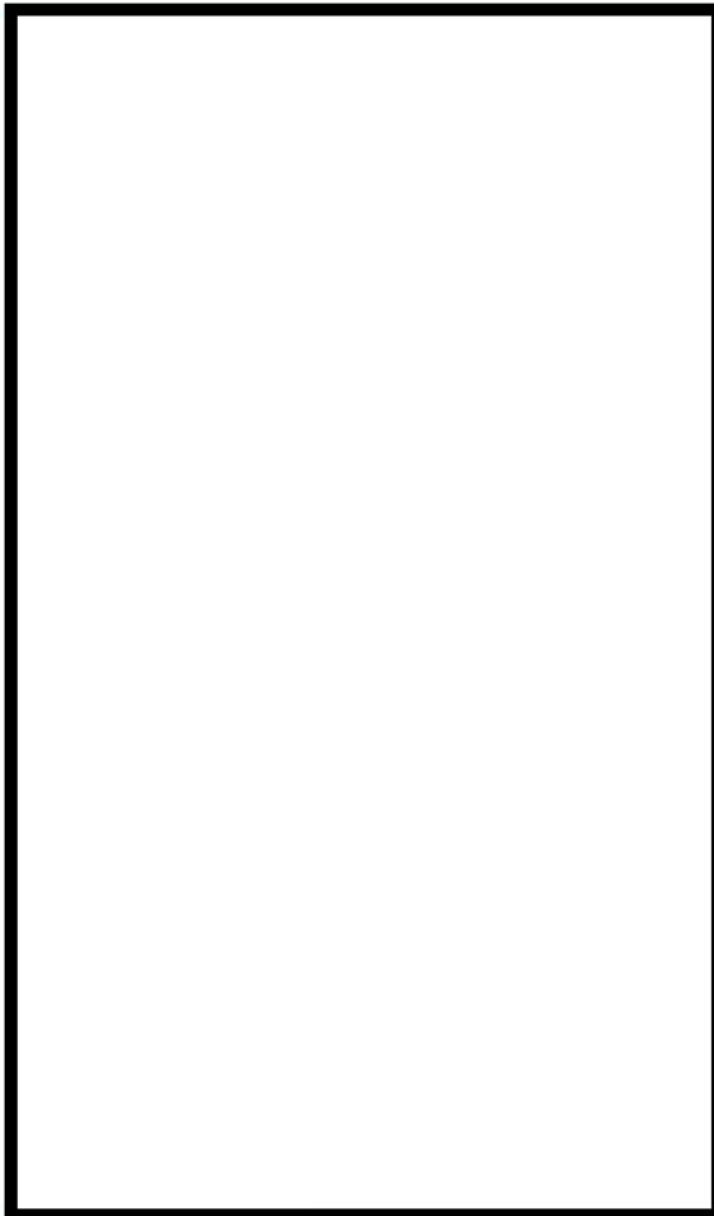
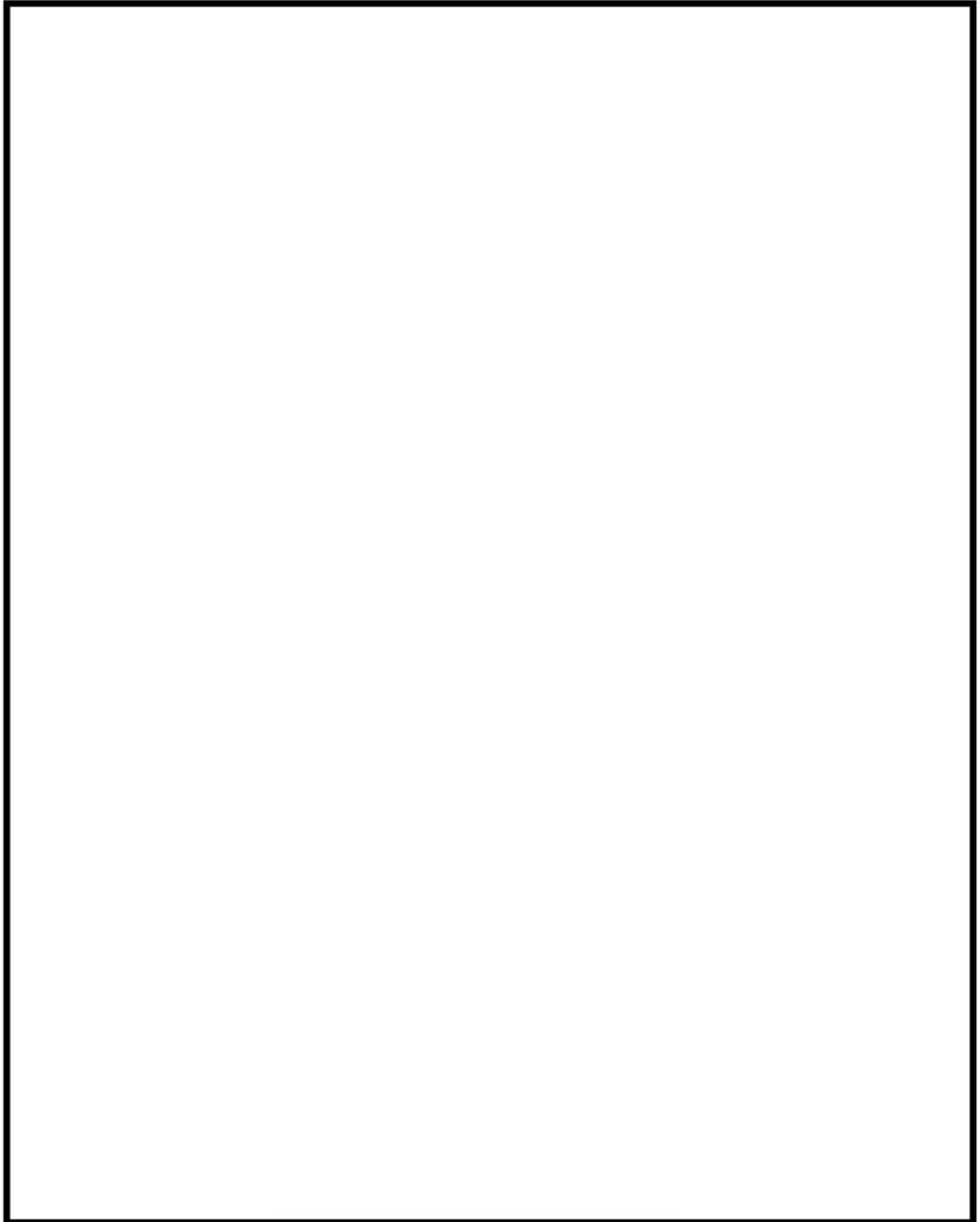


図 2 適用条件となる管穴配列 (正四角形の場合)



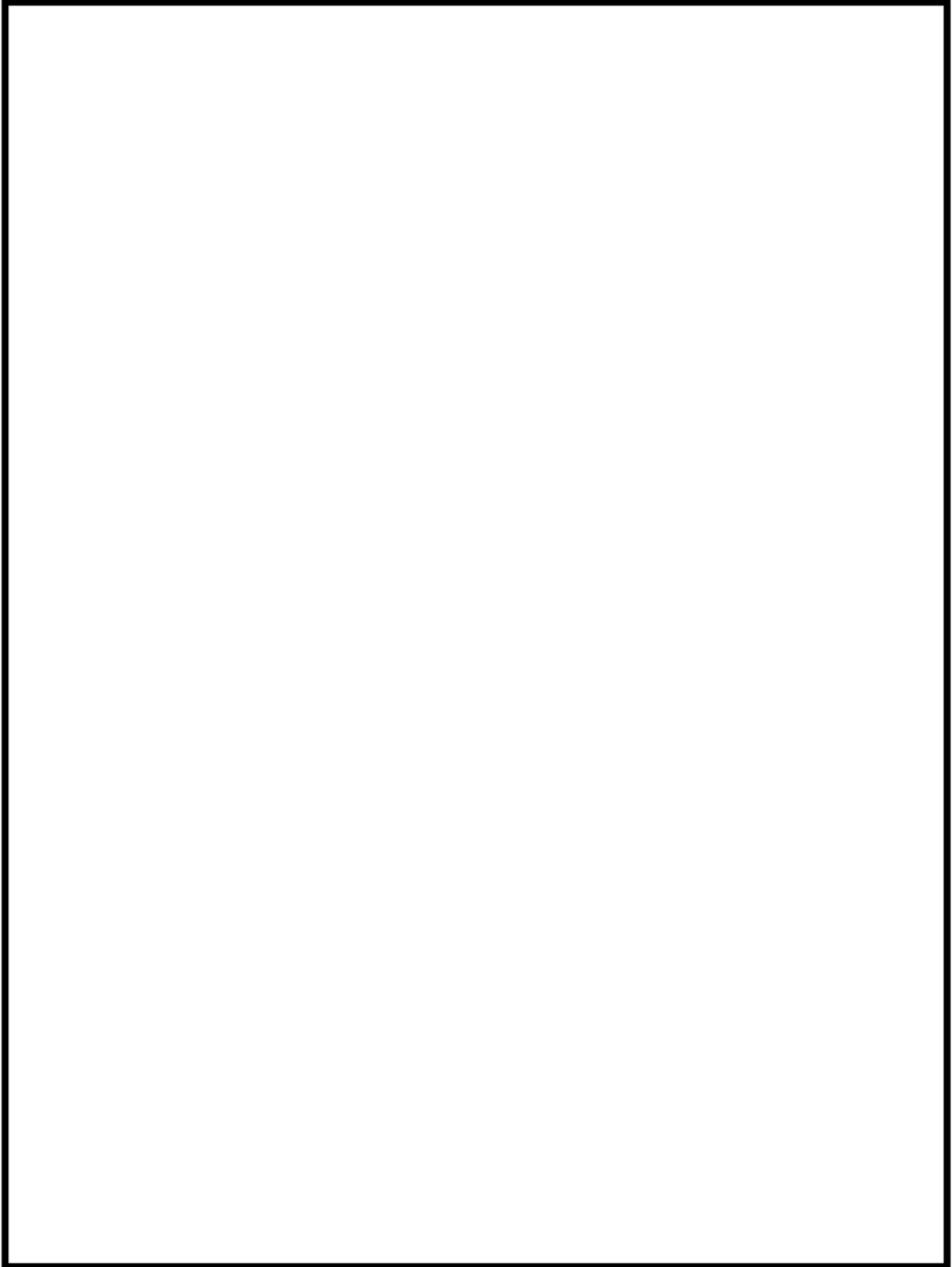
図 1 評価対象機器の管穴配列

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

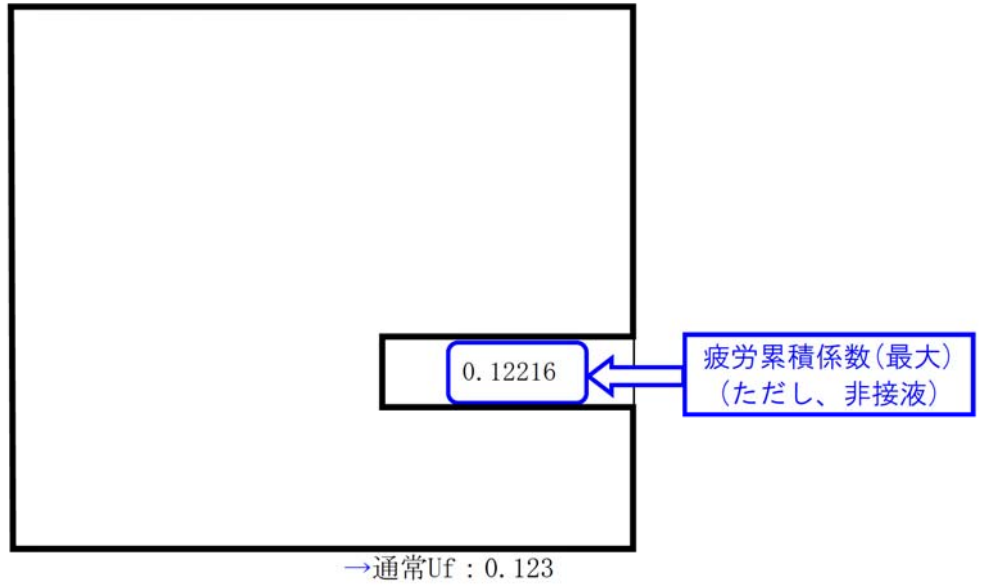
内は商業機密に属しますので公開できません



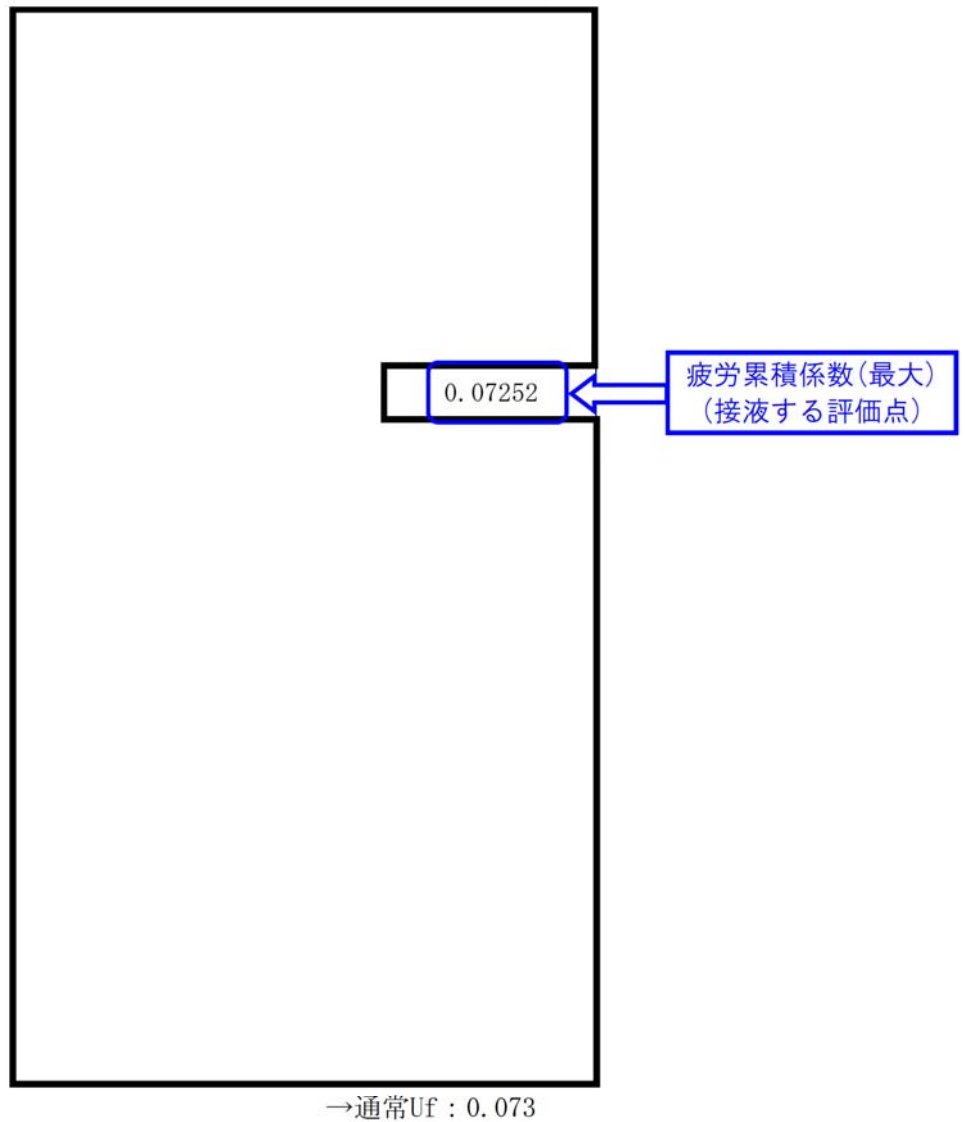
蒸気発生器本体 給水入口管台 評価点

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



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



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             |
|---|-----------|-------|------------------|
| <div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div> |           |       |                  |
|   |           |       | 疲労累積係数 = 0.12216 |

K<sub>s</sub> : 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:0.123

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:7) (1/2)

評価点 - 7  
(S12)

| 応力強さ (単位: MPa) | 繰返し回数 | 疲労係数 |
|----------------|-------|------|
|                |       |      |

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 : 7) ( 2 / 2 )

評価点 : 7  
( S12 )

| 応力強さ ( 単位 : Ma ) |     |       |     |     | 繰返し回数 |       | 疲労係数        |
|------------------|-----|-------|-----|-----|-------|-------|-------------|
| 極大値              | 極小値 | $K_e$ | ALT | ALT | N     | $N^*$ | (=N $N^*$ ) |
| [Redacted Data]  |     |       |     |     |       |       |             |

疲労累積係数 = 0.07252

$K_e$  : 割増し係数

ALT : 繰返しピーク応力強さ

ALT :  $ALT \times (207000) / (\text{材料の使用温度における縦弾性係数})$  を乗じて得た値

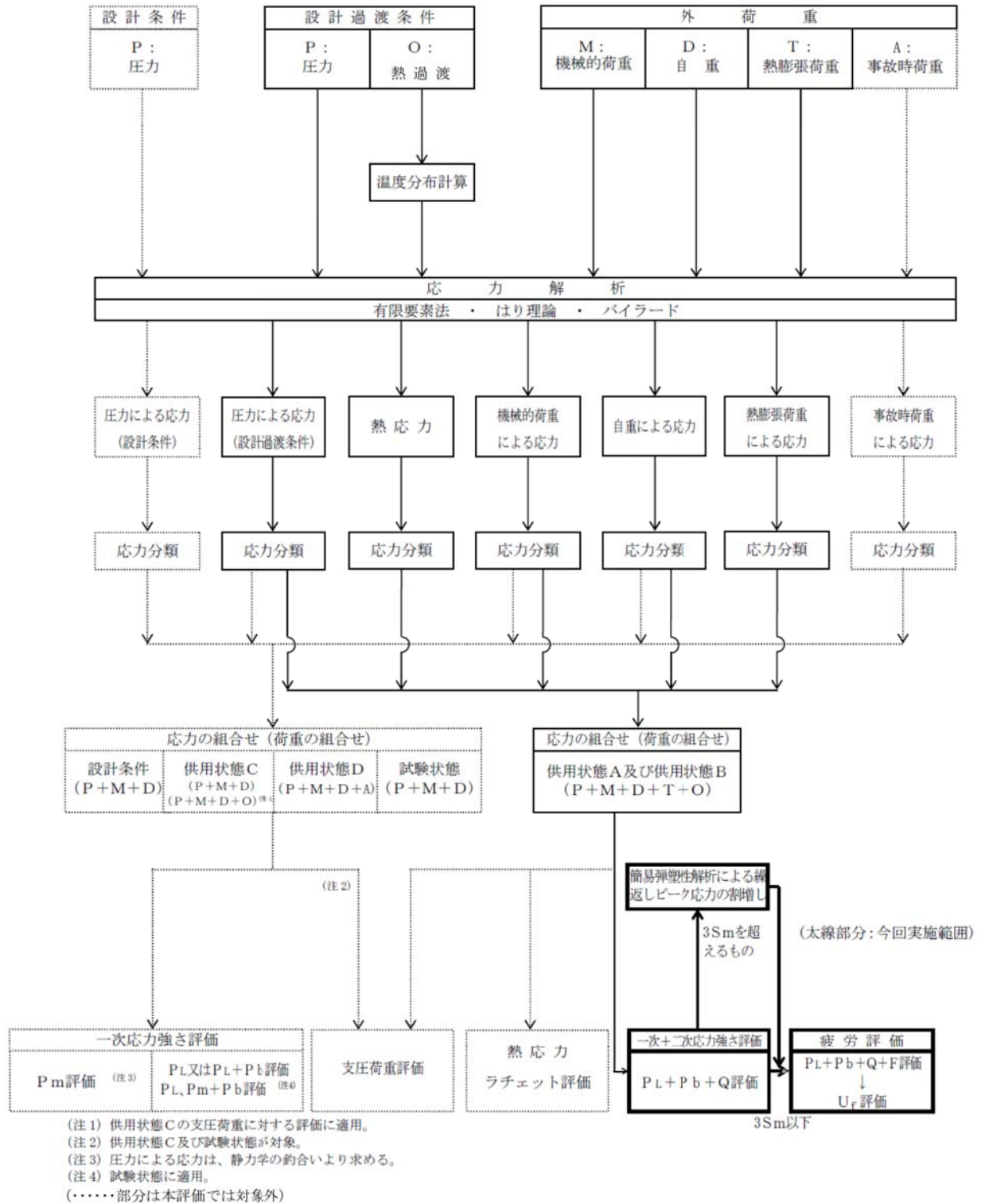
→ 通常 UF : 0.073

N : 設計繰返し回数

$N^*$  : 許容繰返し回数

[Redacted] 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 (管板及び管板回り 評価点①) (詳細評価手法)

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

|   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

合計 : 0.09818

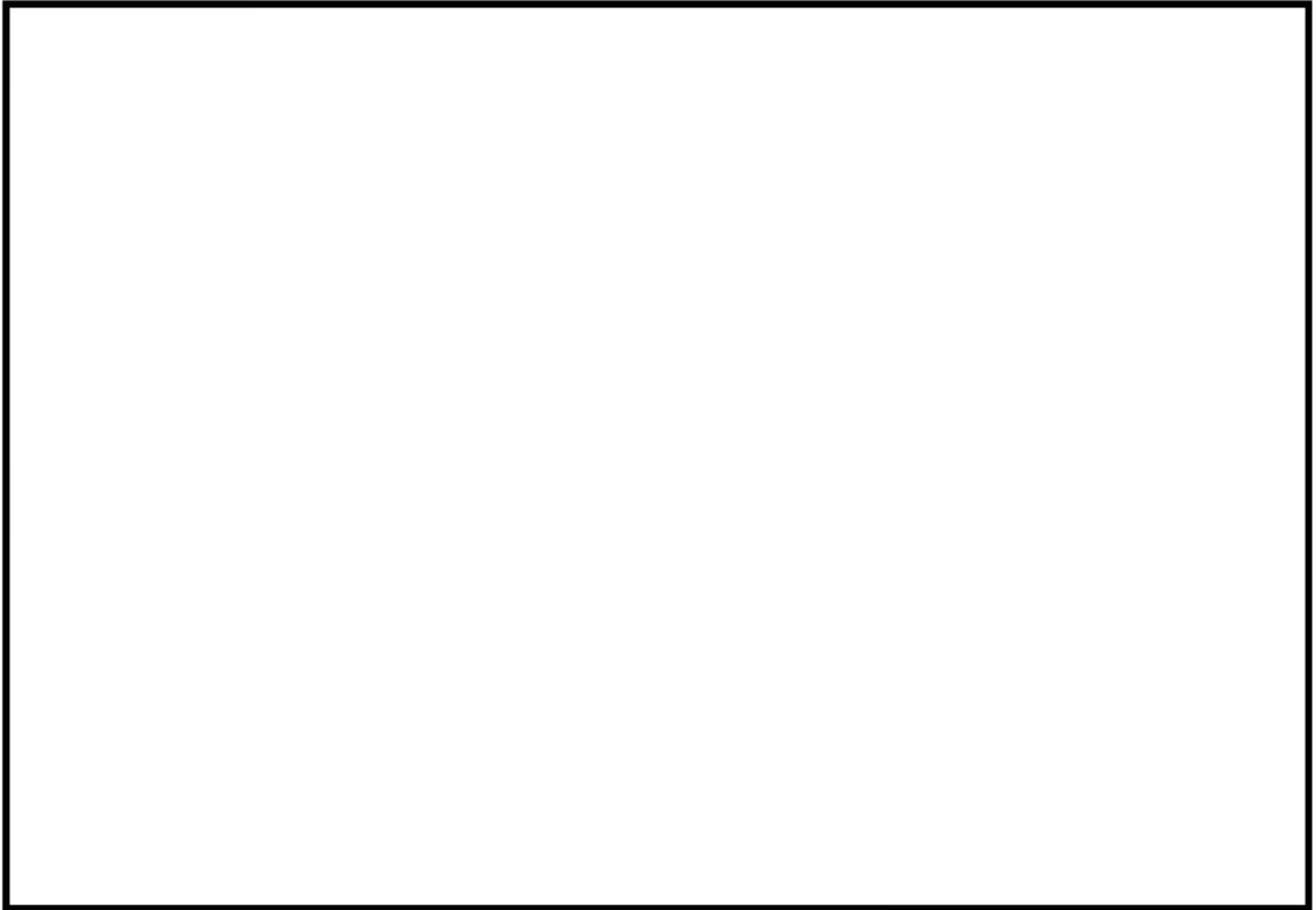
内は商業機密に属しますので公開できません

→ 環境Uf : 0.099

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

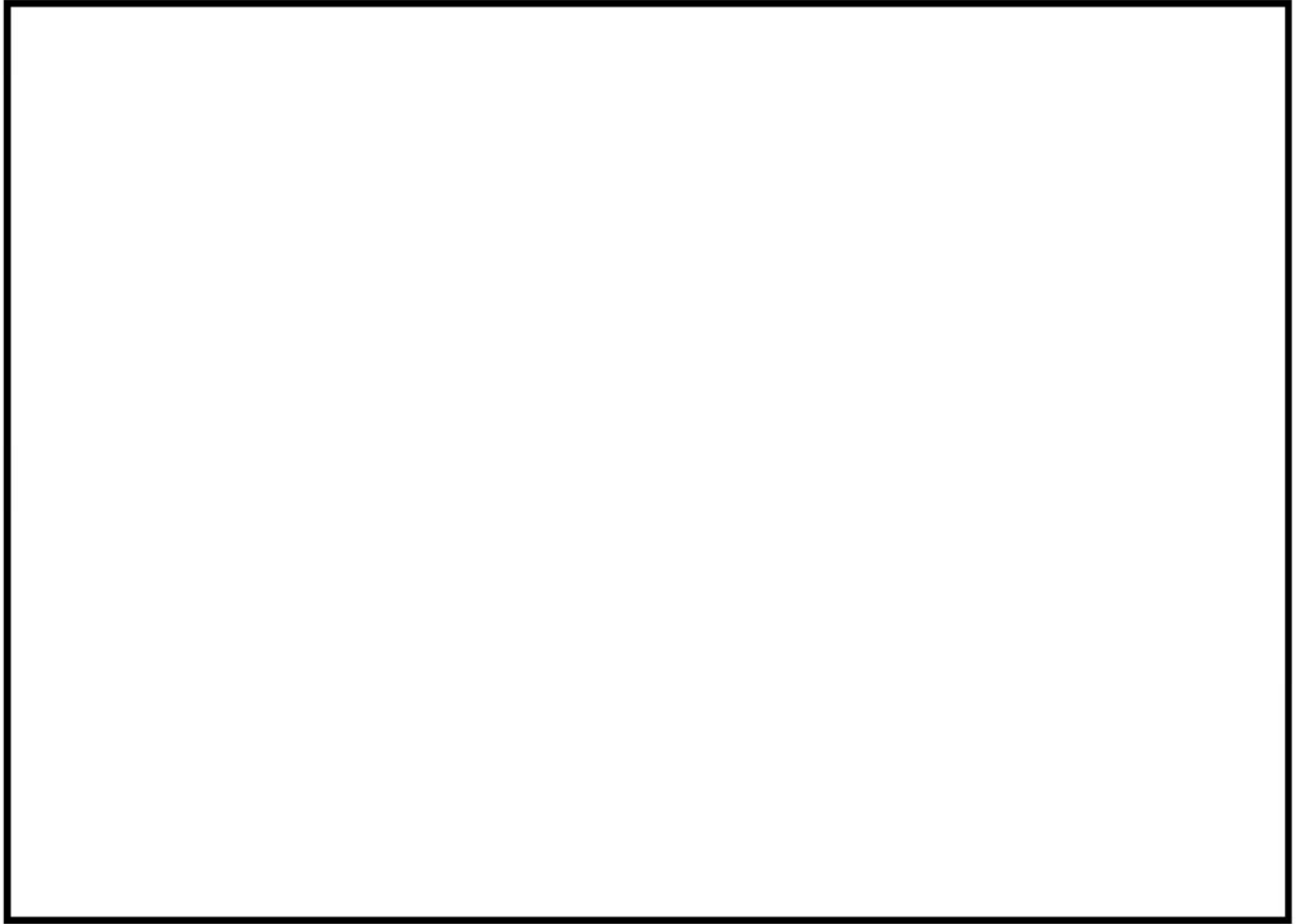
c. 過渡1A1, 1D1

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①) (詳細評価手法)

| 過渡条件<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin |            | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        | 合計 :         | 0.23438             |

→ 環境Uf : 0.235

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1B1, 2T1



b. 過渡1A1, 2T1



内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡2T1, 2D5

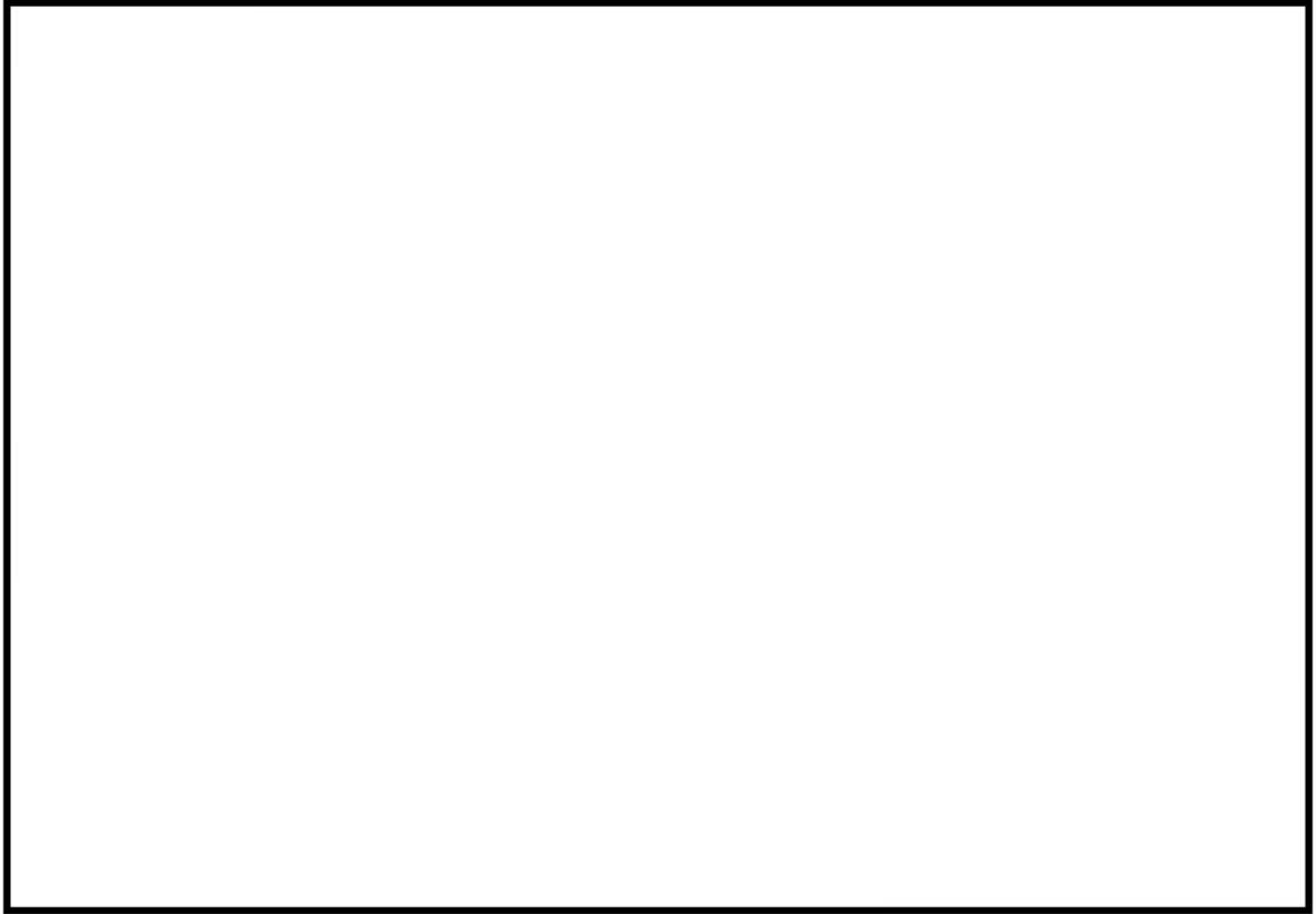
d. 過渡2T1, 2G1



内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡2T1, 1N1

f. 過渡1A1, 1N1

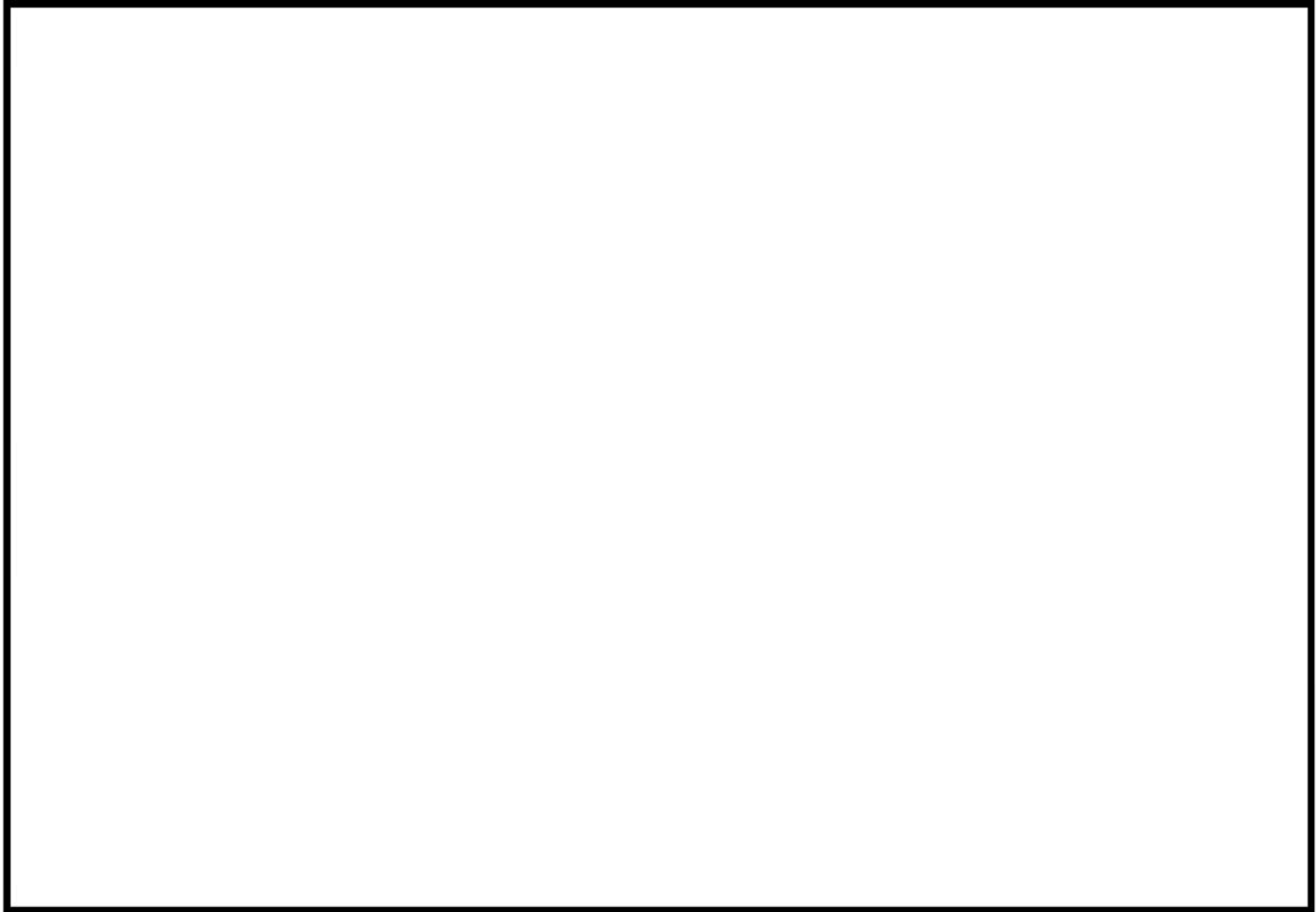


 内は商業機密に属しますので公開できません



g. 過渡1N1, 1N1

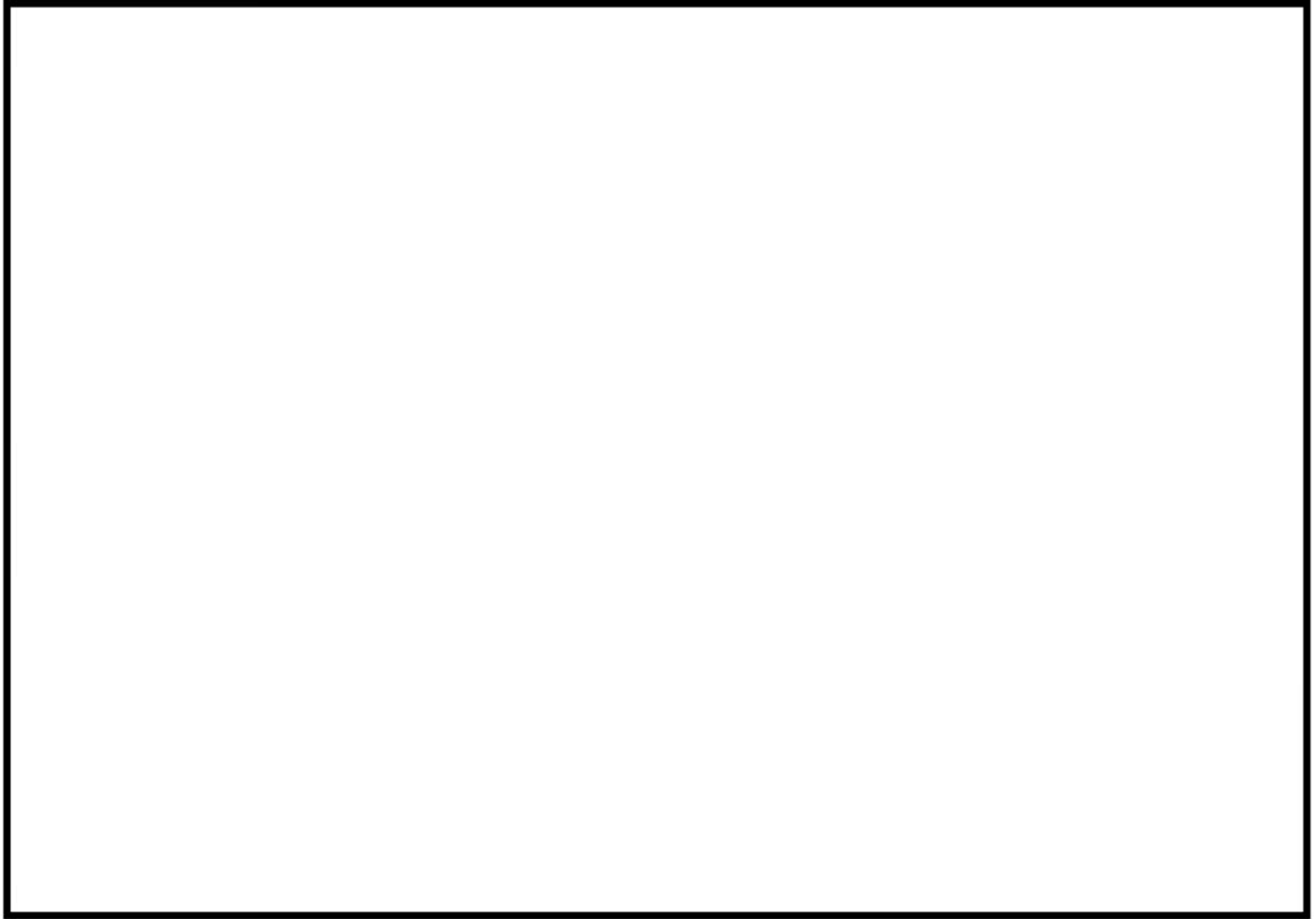
h. 過渡1N1, 2D3




 内は商業機密に属しますので公開できません

i. 過渡1N1, 2E1

j. 過渡1N1, 2B1



 内は商業機密に属しますので公開できません

|     |  |       |
|-----|--|-------|
| No. | 高浜1-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-22頁)<br/>         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に示します。</p> |       |

高浜 1 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  $0.235 < 1.0$  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。

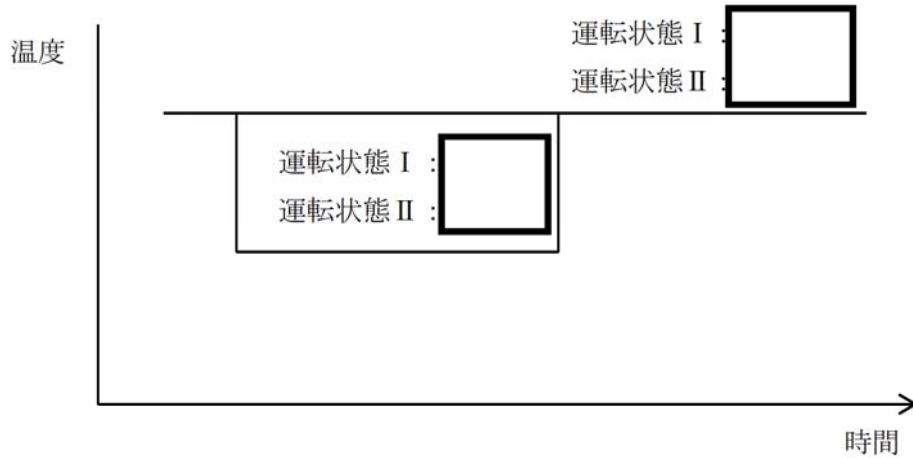
解析に使用したモデルを図 2, 3, 4 に示す。

#### (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。



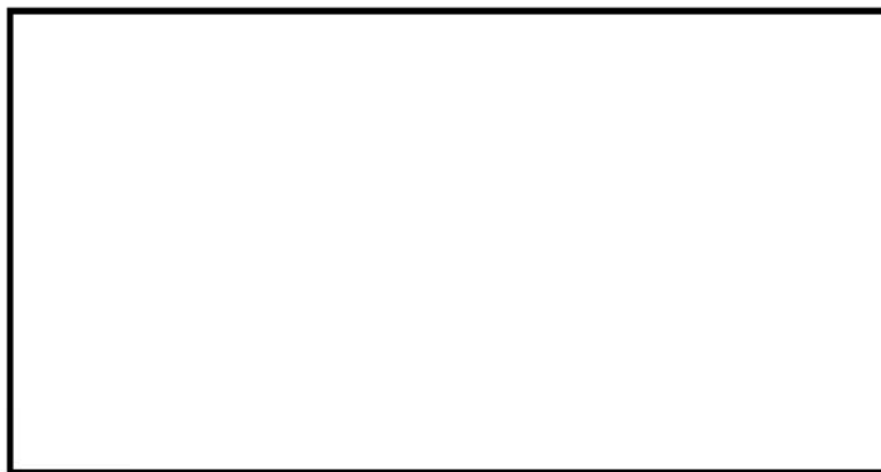
(4) 熱伝達率

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 |
|---------|-------|----|---|----|-----|
| 運転状態 I  | 熱成層なし | 上部 |   |    |     |
|         |       | 下部 |   |    |     |
|         | 熱成層あり | 上部 |   |    |     |
|         |       | 下部 |   |    |     |
| 運転状態 II | 熱成層なし | 上部 |   |    |     |
|         |       | 下部 |   |    |     |
|         | 熱成層あり | 上部 |   |    |     |
|         |       | 下部 |   |    |     |

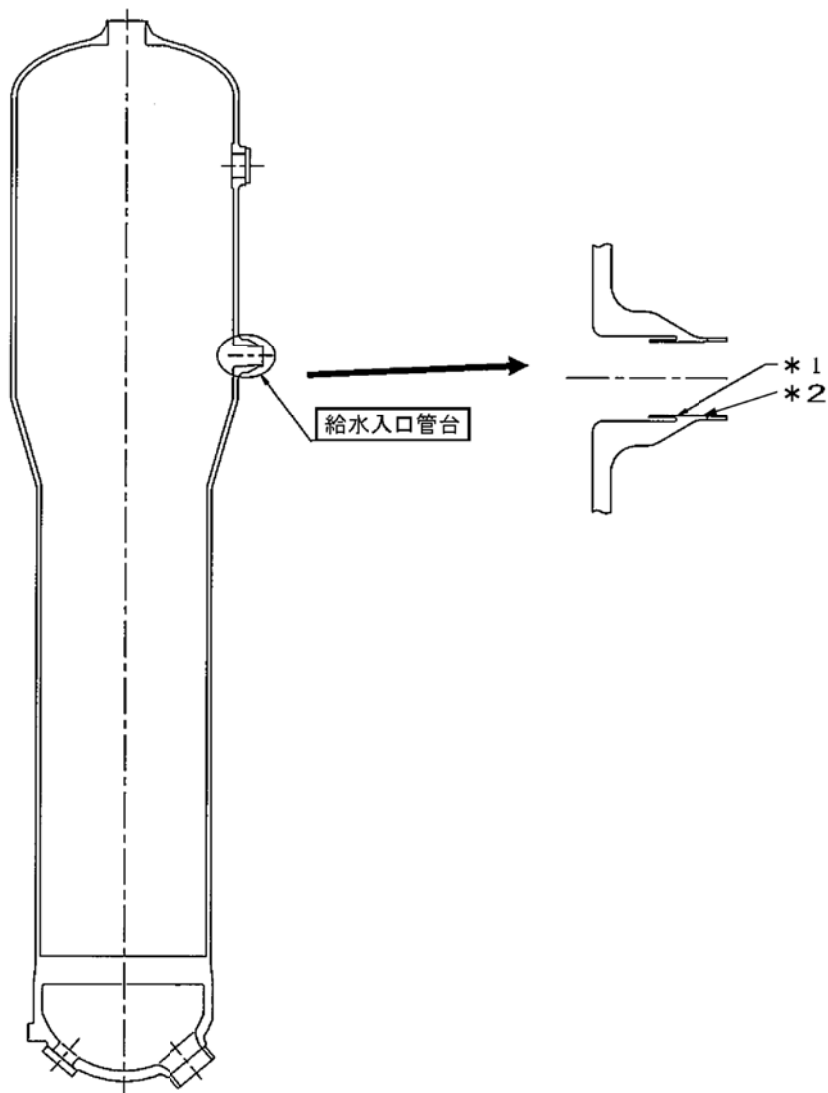
(注) 熱伝達率の領域分けは下図のとおりである。



(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。

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1号炉 蒸気発生器給水入口管台の疲労割れ評価対象部位

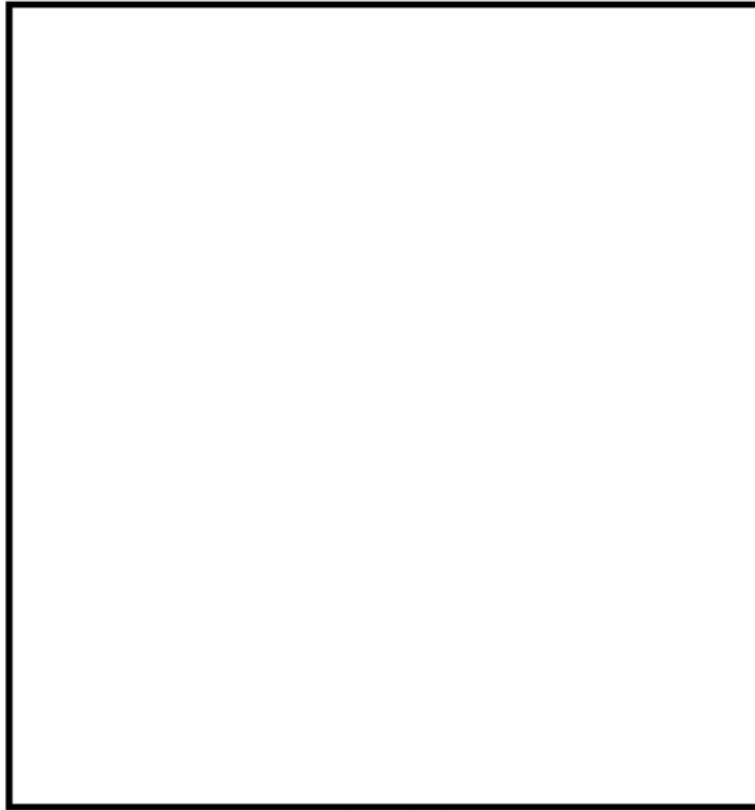


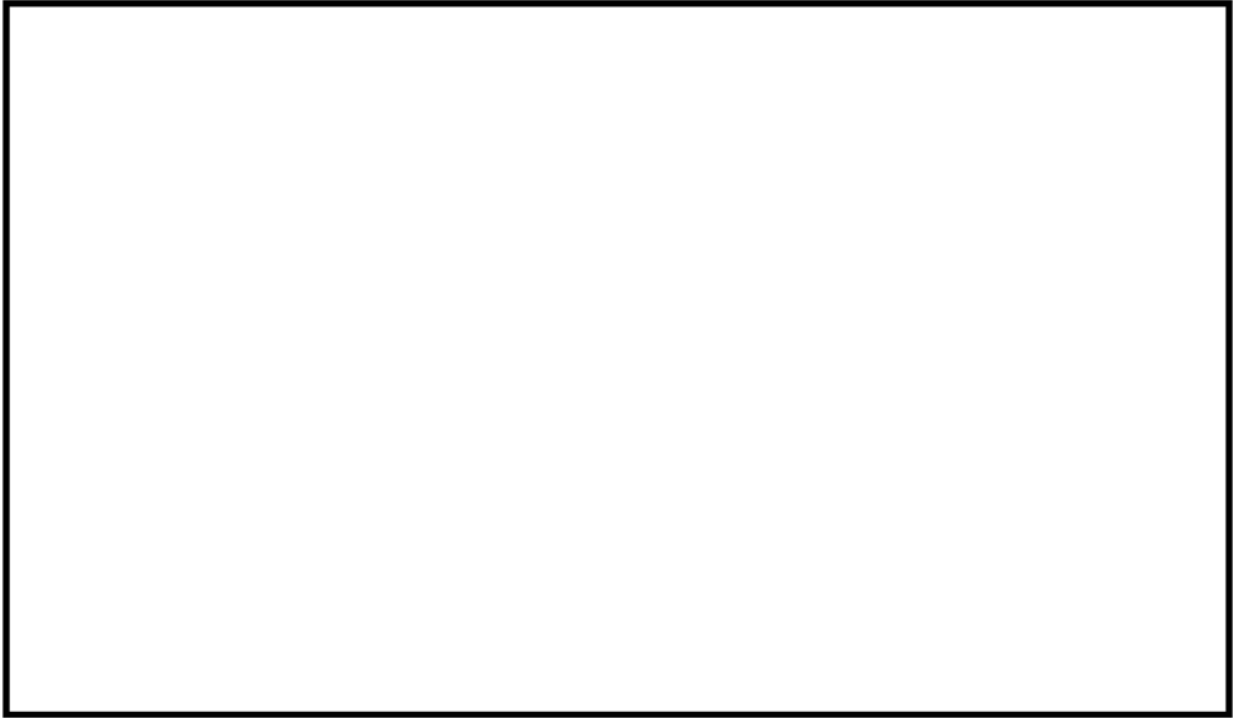
図 2 解析モデル (全体図)



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

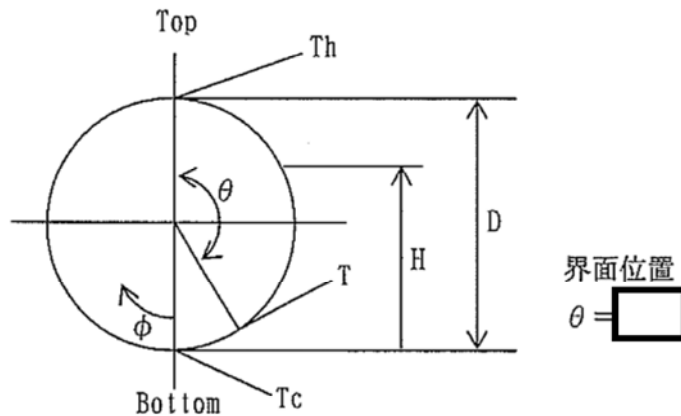
表 1 材料物性値

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

(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 1 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。



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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin | KE         | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' | n         | n*          | u      | fen          | uen                 |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        | 合計:          | 0.23438             |

→環境UF0.235

表3 過渡記号

| 記号   | 過渡事象                              |
|------|-----------------------------------|
| 1A1  | 起動(温度上昇率55.6°C/h)                 |
| 1B1  | 停止(温度下降率55.6°C/h)                 |
| 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

| No.                | 高浜1-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)<br/>                 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<br/>チャート</th> <th data-bbox="608 831 746 976">荷重の組合<br/>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<br/>点及び解析<br/>モデル</th> <th data-bbox="1018 831 1157 976">最大評価点<br/>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<br/>ラメータ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="331 976 472 1122">スプレイ<br/>ライン用<br/>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<br/>表2-3</td> <td data-bbox="1292 976 1433 1122">表2-3<br/>(詳細評価)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="331 1122 472 1267">サージ用<br/>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<br/>表3-3</td> <td data-bbox="1292 1122 1433 1267">表3-3<br/>(詳細評価)</td> </tr> </tbody> </table> |            |       |                       |                |              |                |  | 応力フロー<br>チャート | 荷重の組合<br>せ | 材料物性値 | 形状、評価<br>点及び解析<br>モデル | 最大評価点<br>の選定結果 | Ke係数 | 環境評価パ<br>ラメータ | スプレイ<br>ライン用<br>管台 | 図1 | 表1-1 | 表1-2 | 図2 | 表2-1 | 表2-2<br>表2-3 | 表2-3<br>(詳細評価) | サージ用<br>管台 | 図3 | 表3-1 | 表3-2<br>表3-3 | 表3-3<br>(詳細評価) |
|                    | 応力フロー<br>チャート  | 荷重の組合<br>せ | 材料物性値 | 形状、評価<br>点及び解析<br>モデル | 最大評価点<br>の選定結果 | Ke係数         | 環境評価パ<br>ラメータ  |  |               |            |       |                       |                |      |               |                    |    |      |      |    |      |              |                |            |    |      |              |                |
| スプレイ<br>ライン用<br>管台 | 図1   | 表1-1       | 表1-2  | 図2                    | 表2-1           | 表2-2<br>表2-3 | 表2-3<br>(詳細評価) |  |               |            |       |                       |                |      |               |                    |    |      |      |    |      |              |                |            |    |      |              |                |
| サージ用<br>管台         |  |            |       | 図3                    | 表3-1           | 表3-2<br>表3-3 | 表3-3<br>(詳細評価) |  |               |            |       |                       |                |      |               |                    |    |      |      |    |      |              |                |            |    |      |              |                |

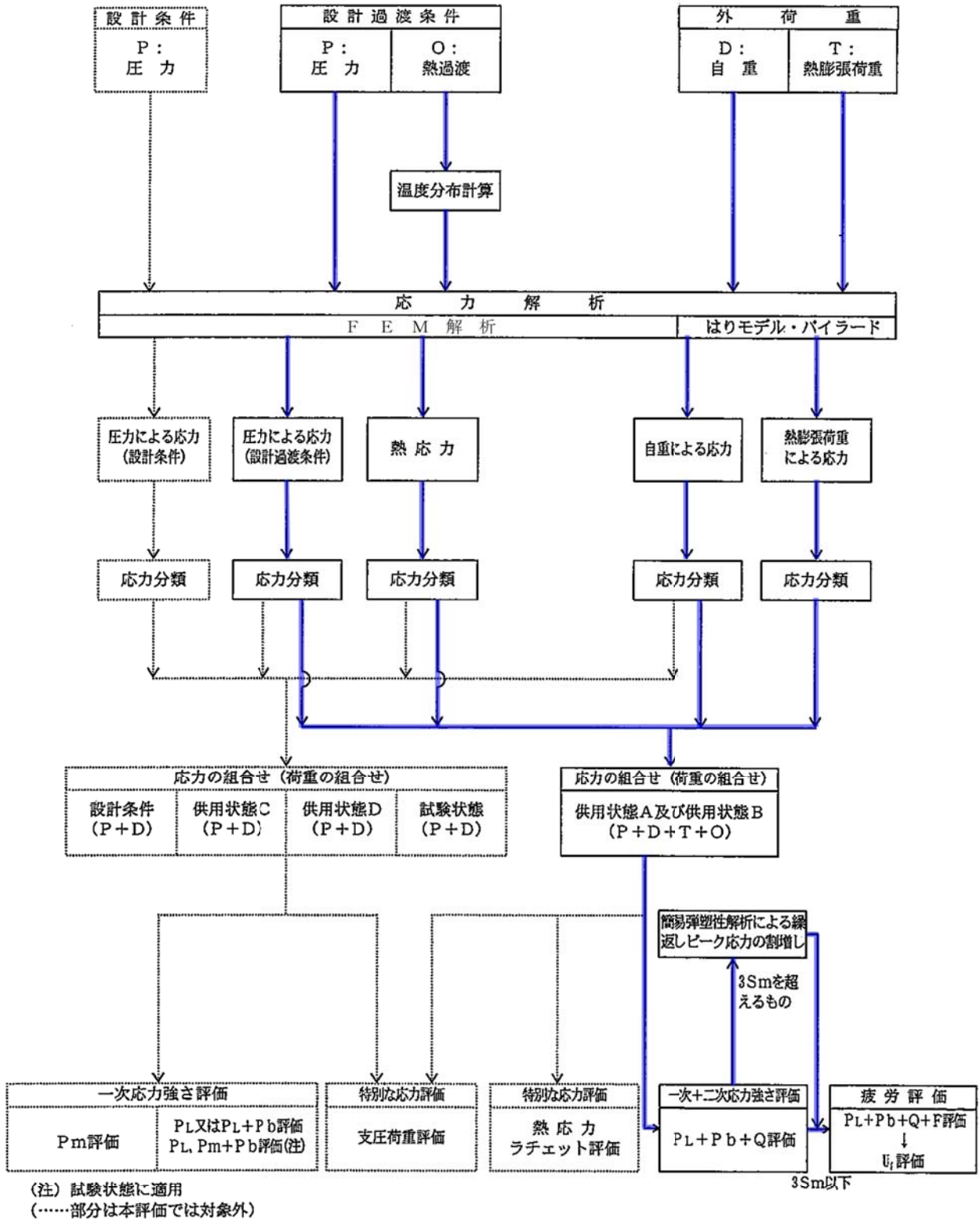


図1 応力評価フローチャート

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、<br>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 |
|--|----------------------|

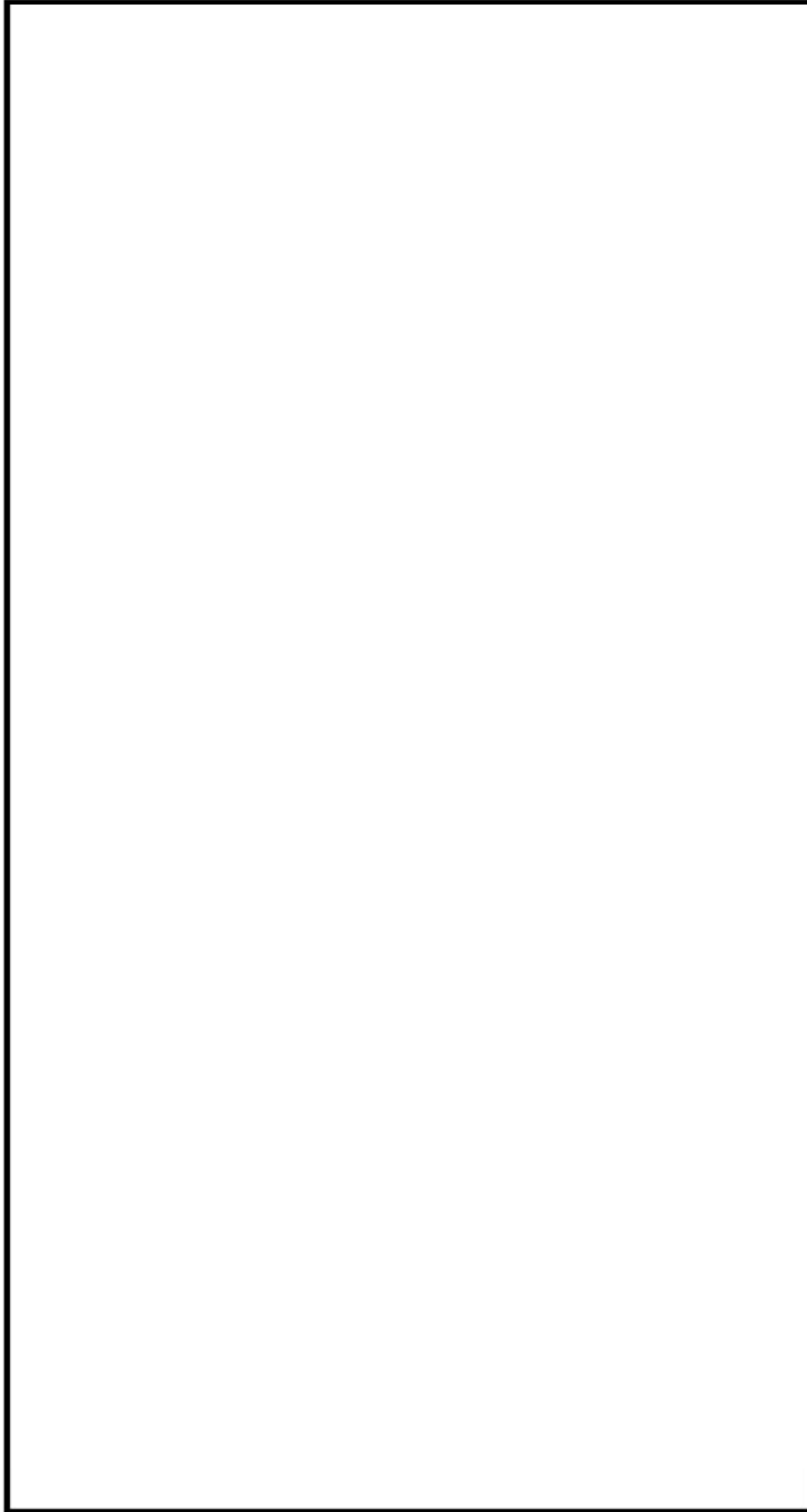


図2 スプレイライン用管台形状寸法、評価点及び解析モデル

内は商業機密に属します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   |        |        | 0.18902 |
| 2   |        |        |         |
| 3   |        |        |         |
| 4   |        |        |         |
| 5   |        |        |         |
| 6   |        |        |         |
| 7   |        |        |         |
| 8   |        |        |         |
| 9   |        |        |         |
| 10  |        |        |         |
| 11  |        |        |         |
| 12  |        |        |         |
| 13  |        |        |         |
| 14  |        |        |         |
| 15  |        |        |         |
| 16  |        |        |         |
| 17  |        |        |         |
| 18  |        |        |         |

許容値  $U_i=1.0$ 

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) (1 / 2)

評価点 - 1  
( S31 )

| 応力強さ (単位 : MPa) |     |    | 繰返し回数 |      | 疲労係数<br>(=N/N#) |   |
|-----------------|-----|----|-------|------|-----------------|---|
| 極大値             | 極小値 | Ke | ALT   | ALT' |                 | N |
| [Empty Cell]    |     |    |       |      |                 |   |

Ke : 増し係数  
 ALT : 繰返しヒック応力強さ  
 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2-2 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<br>(=N/N*) |
|--------------------|-----|----|-------|----|-----------------|
| 極大値                | 極小値 | Ke | N     | N* |                 |
| [Redacted Content] |     |    |       |    |                 |
| 疲労累積係数 =           |     |    |       |    | 0.18902         |

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

→通常UF:0.190

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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |             | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|-------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin |            | KE             | 補正前<br>sall |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |             |           |             |        |              |                     |

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

合計: 0.01862

(注) ひずみ振幅 $\leq 0.110\%$  (sall' $\leq 214.5$ ) 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

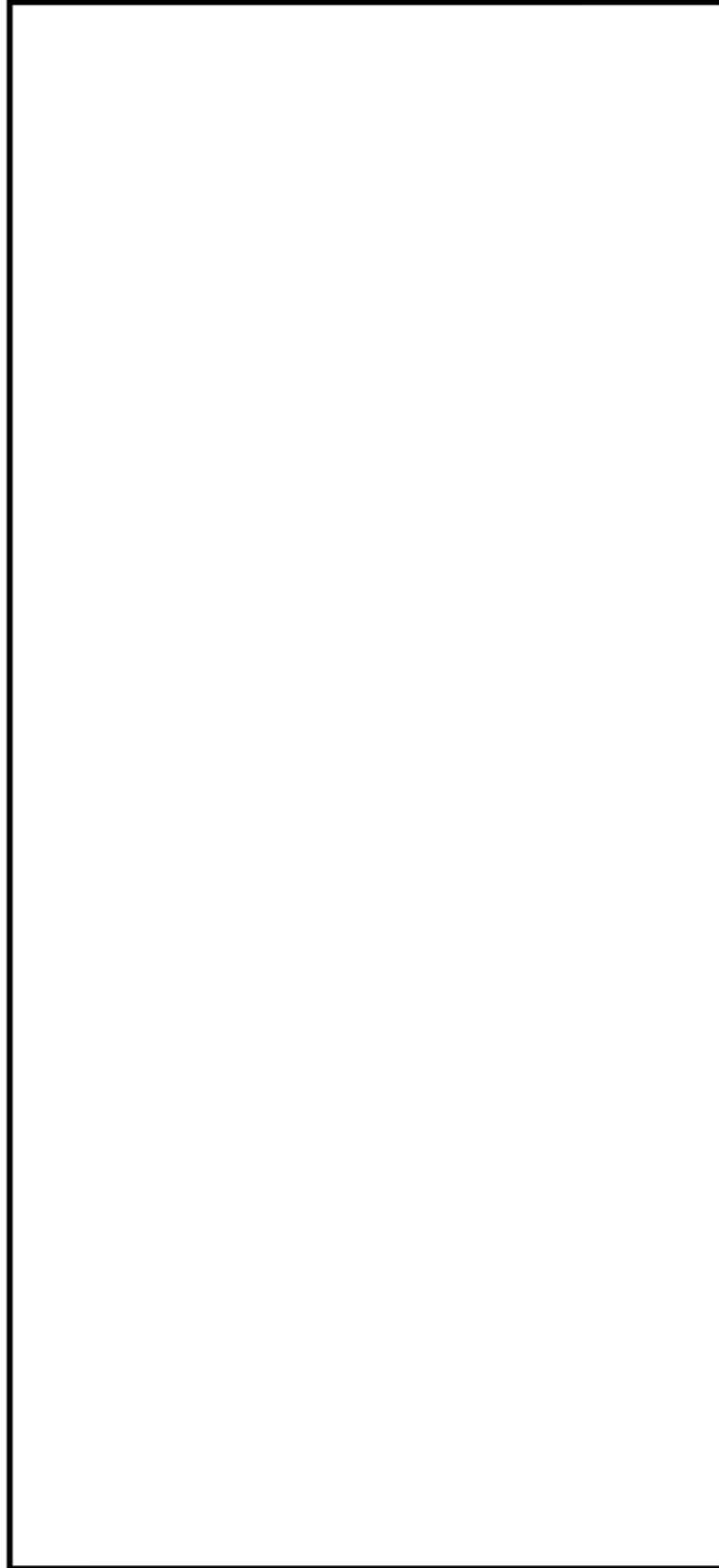


図3 サージ用管台形状寸法、評価点及び解析モデル

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  | 0.02083 |        |        |
| 20  |         |        |        |
| 21  |         |        |        |
| 22  |         |        |        |

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<br>(=N/N*) |
|----------|-----|-----------|-----|------|-------|----|-----------------|
| 極大値      | 極小値 | Ke        | ALT | ALT' | N     | N* |                 |
|          |     |           |     |      |       |    |                 |
| 疲労累積係数 = |     |           |     |      |       |    | 0.02083         |

→通常UF:0.021

- 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

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

合計: 0.05070

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

→環境UF:0.051

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, 2H1



b. 過渡NSS, 1B2



内は商業機密に属しますので公開できません

c. 過渡2D3, 1B2



d. 過渡1C1, 1B2



内は商業機密に属しますので公開できません

e. 過渡2B1, 1B2



f. 過渡1A2, 1B2



 内は商業機密に属しますので公開できません

g. 過渡1A2, 1A2



h. 過渡1L1, 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, 1A2



内は商業機密に属しますので公開できません

| No.   | 高浜 1 - 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)<br/>                 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<br/>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<br/>の選定結果</th> <th data-bbox="1110 741 1265 846">K e 係数</th> <th data-bbox="1265 741 1410 846">環境評価<br/>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<br>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<br>の選定結果 | K e 係数 | 環境評価<br>パラメータ | 図-1 | 表-1 | 表-2 | 図-2 | 図-3 | 表-3 | 表-4 |
| 応力フロー<br>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<br>の選定結果 | K e 係数 | 環境評価<br>パラメータ |        |       |       |                |        |               |     |     |     |     |     |     |     |
| 図-1   | 表-1   | 表-2   | 図-2   | 図-3            | 表-3    | 表-4           |        |       |       |                |        |               |     |     |     |     |     |     |     |

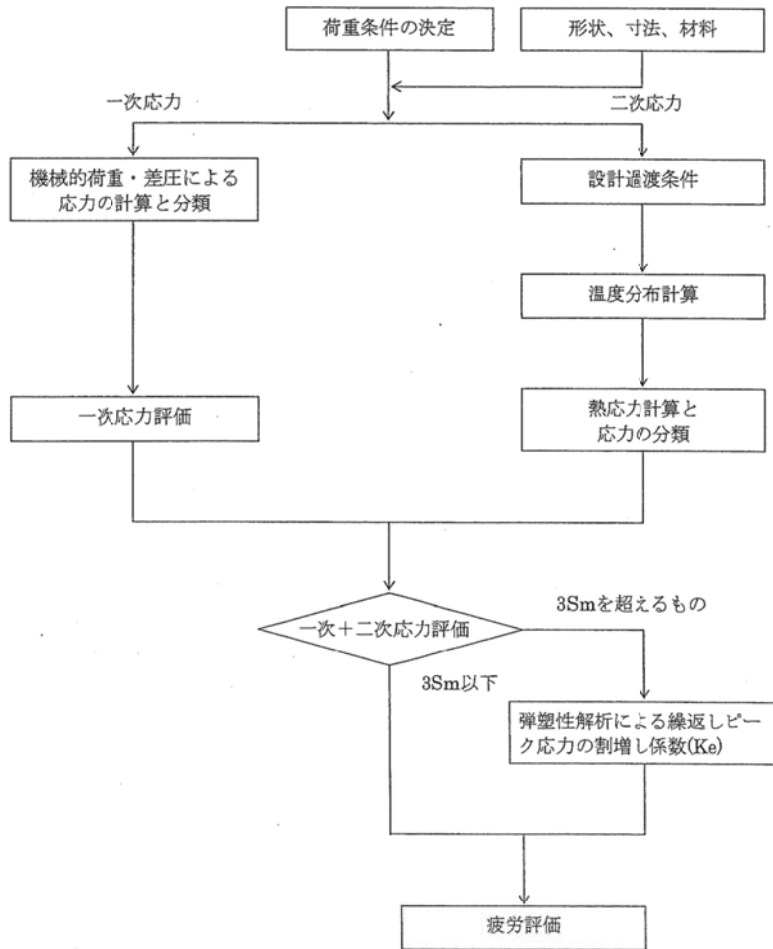


図-1 応力評価フローチャート

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<br>(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℃<br>(Tcold) | 322.8℃<br>(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

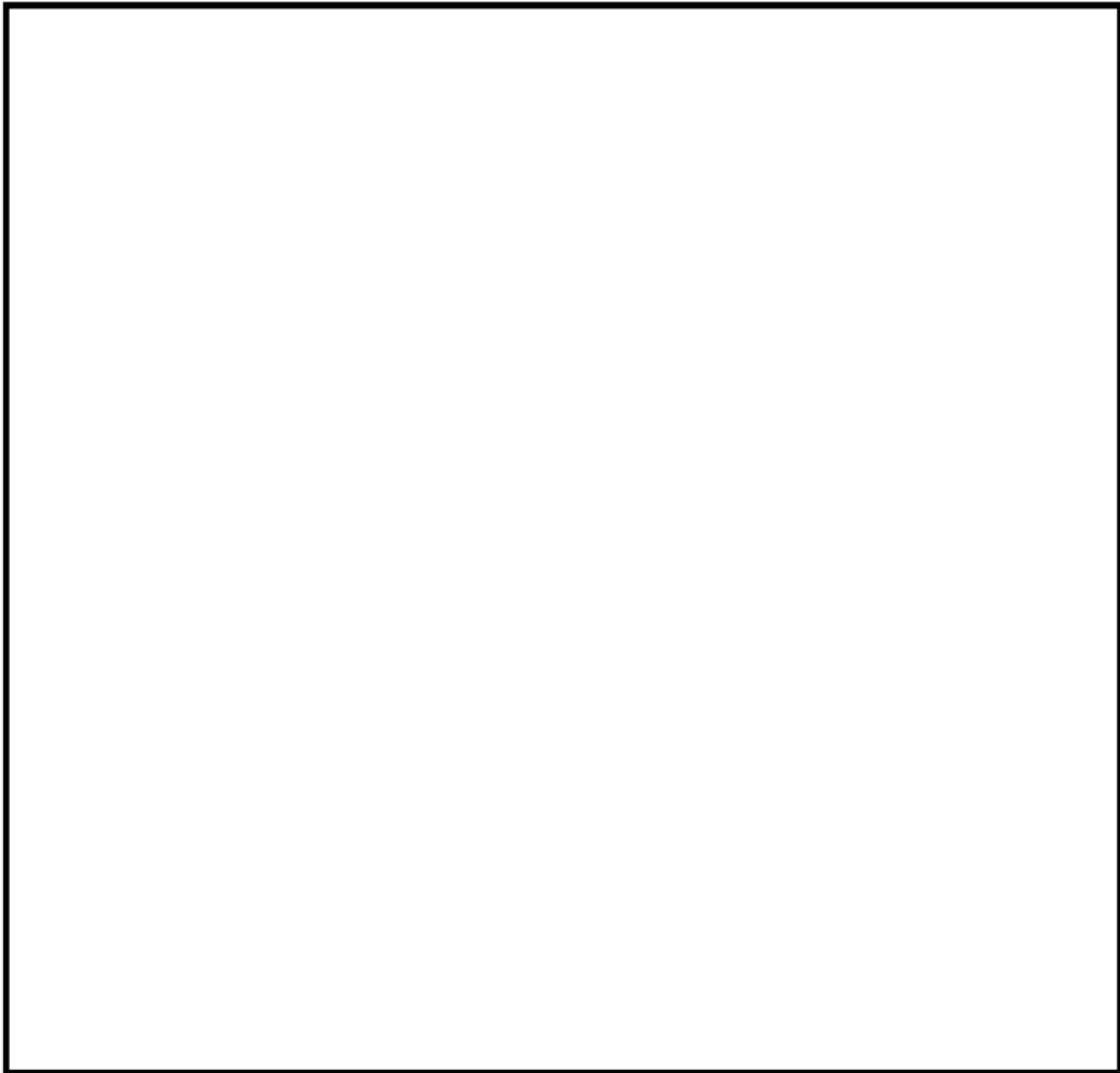


図-2 (1 / 2) 解析モデル (上部炉心支持構造物組立体の解析モデル (1 / 8 分割モデル))

 内は商業機密に属しますので公開できません

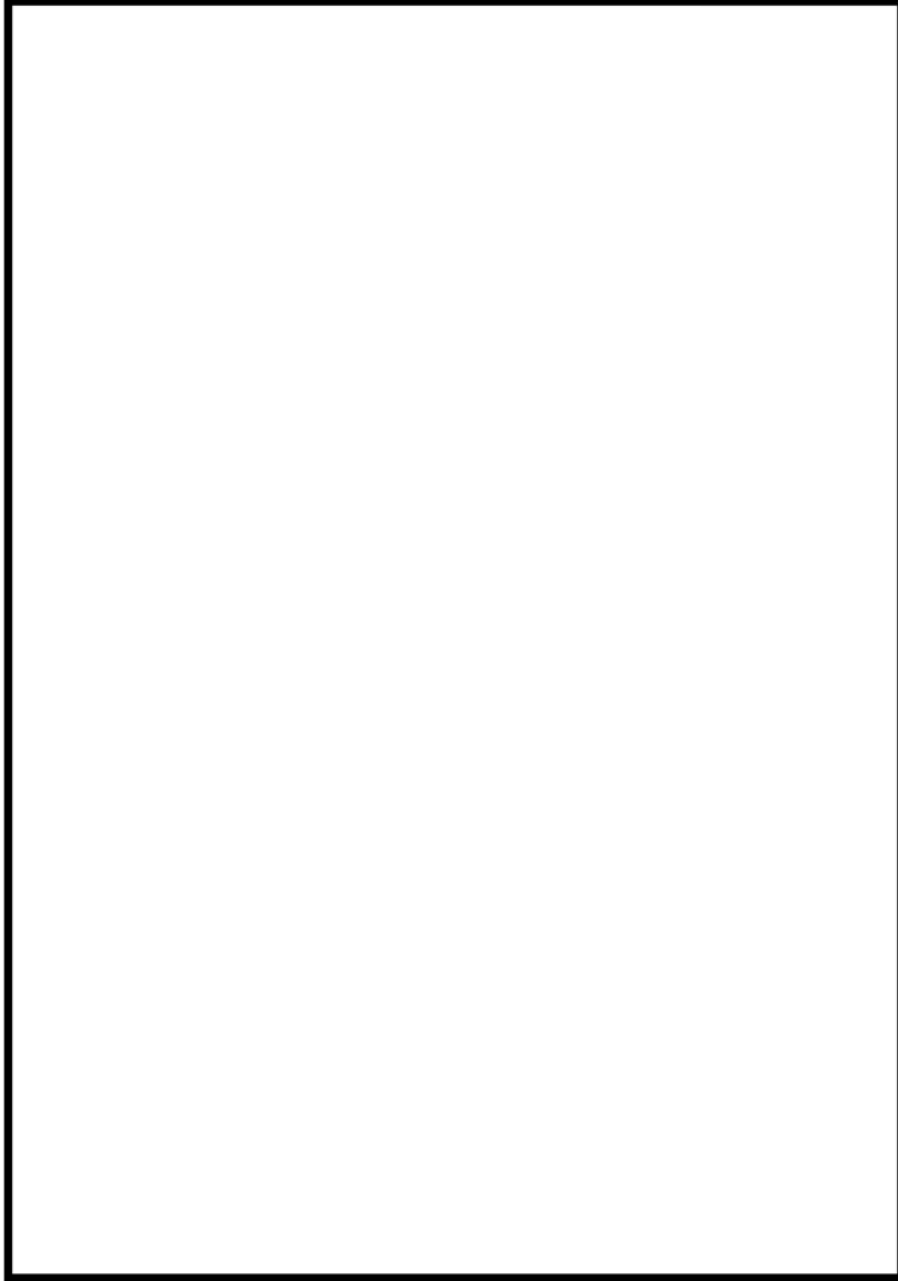


図-2 (2 / 2) 解析モデル (下部炉心支持構造物組立体の解析モデル (1 / 8 分割モデル))

内は商業機密に属しますので公開できません

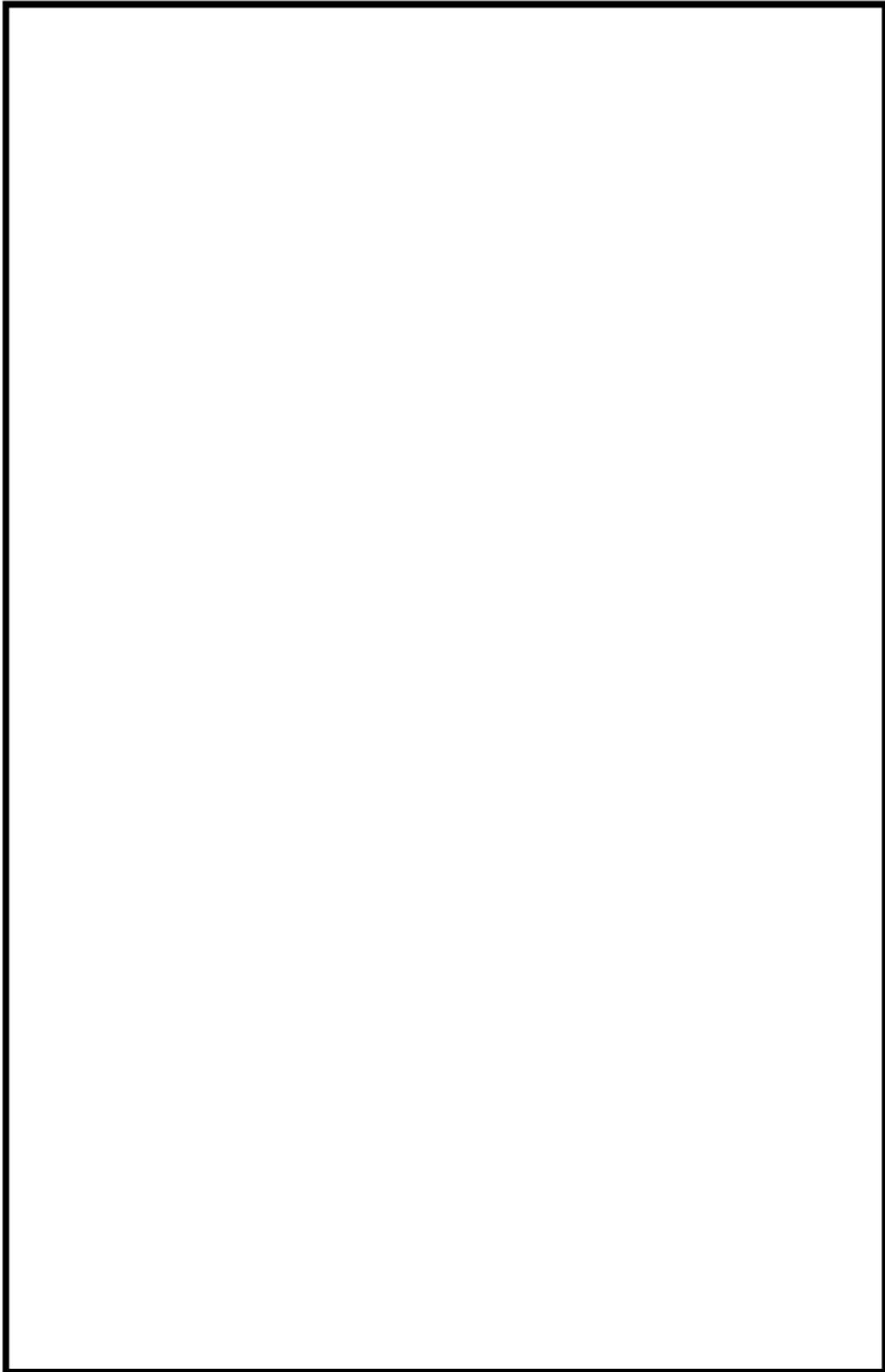


図-3 (1 / 4) 最大評価点の選定結果 (上部炉心支持板)

内は商業機密に属しますので公開できません

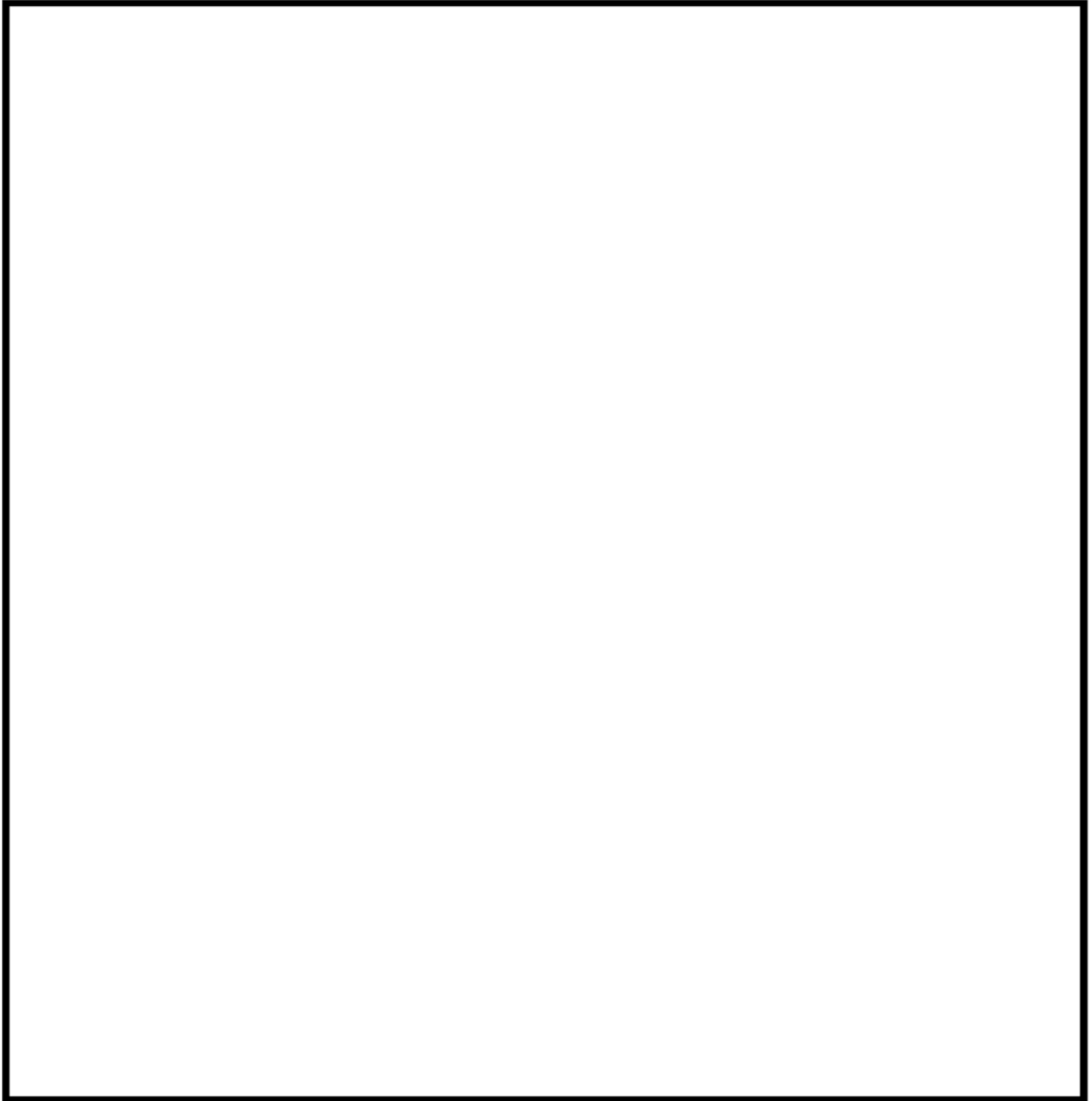


図-3 (2 / 4) 最大評価点の選定結果 (上部炉心支持柱)

内は商業機密に属しますので公開できません

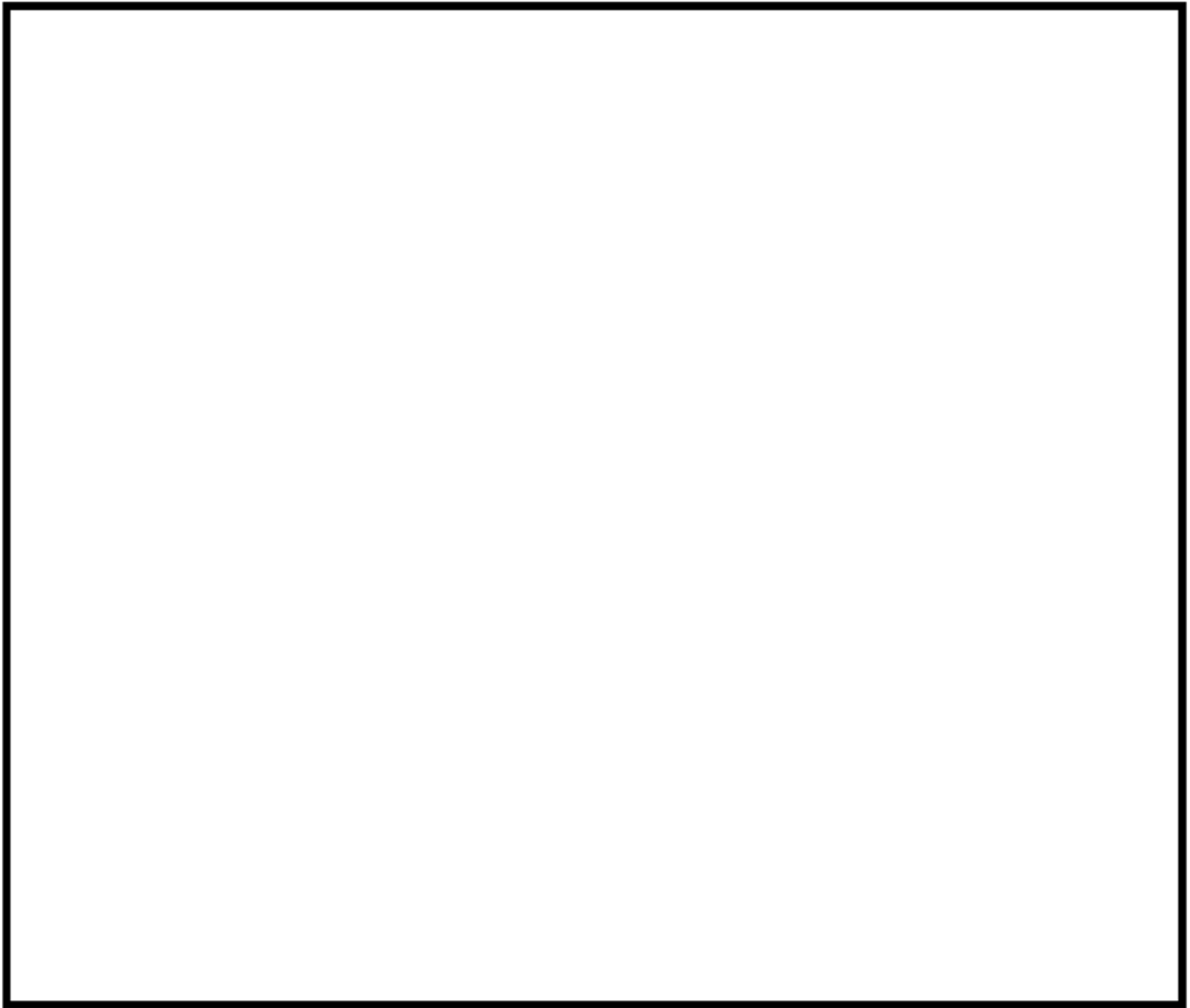


図-3 (3 / 4) 最大評価点の選定結果 (下部炉心支持柱)

内は商業機密に属しますので公開できません

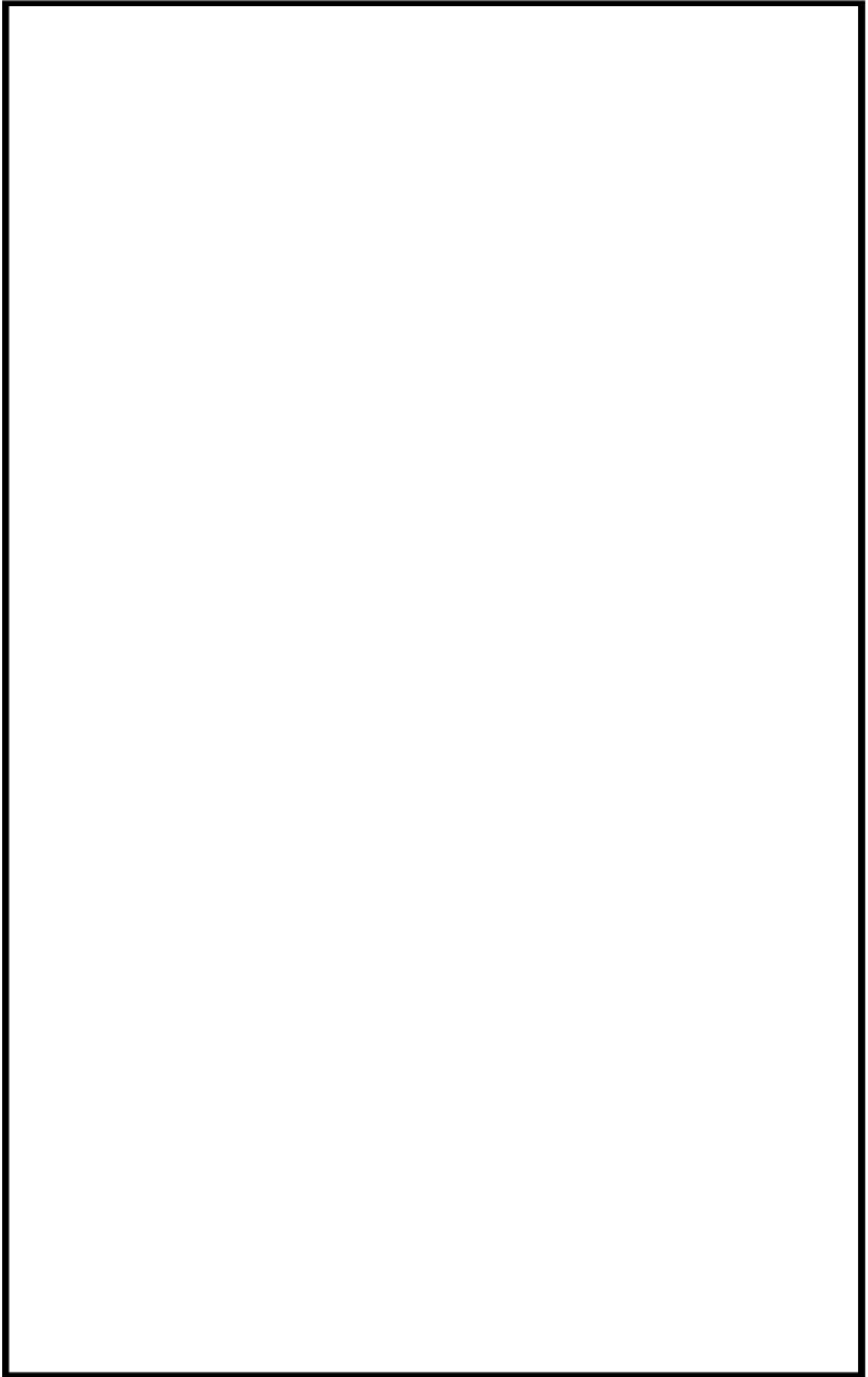


図-3 (4 / 4) 最大評価点の選定結果 (下部炉心支持板)

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 | Ke | 繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup> | 実際の繰返し回数N | 許容繰返し回数N* |                         |
|                |     |    |                           |           |           |                         |

疲労累積係数 = 0.01546

(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 : 0.016

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 | Ke | 繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup> | 実際の繰返し回数N | 許容繰返し回数N* |                         |
|                |     |    |                           |           |           |                         |

疲労累積係数 = 0.00259

(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 | Ke | 繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup> | 実際の繰返し回数N | 許容繰返し回数N* |                         |
|                |     |    |                           |           |           |                         |

疲労累積係数 = 0.00005

(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

| 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 | Ke | 繰返しピーク応力強さ <sup>(注)</sup> | 実際の繰返し回数N | 許容繰返し回数N* |                          |
| [Redacted Data] |     |    |                           |           |           |                          |

(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 = 0.00136  
→ 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<br>記号 (注1) |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数<br>(注2) | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数<br>(注5) | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 (注6) |
|-----------------|---|-------------------|------|--------------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|----------------------|--------------------------|
| A               | B | smax              | smin |                    | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' |           |             |        |                      |                          |
|                 |   |                   |      |                    |                |              |           |             |        |                      |                          |
|                 |   |                   |      |                    |                |              |           |             |        |                      | 合計: 0.18070              |

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

→環境UF : 0.181

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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin |            | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              | 合計: 0.02979         |

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

→環境UF : 0.030

☐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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin |            | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        | 合計:          | 0.00005             |

(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<br>記号 |   | 一次+二次+<br>ピーク応力強さ |      | 割り増し<br>係数 | 繰返しピーク<br>応力強さ |              | 実過渡<br>回数 | 許容繰返し<br>回数 | 疲労累積係数 | 環境効果<br>補正係数 | 環境効果を考慮した<br>疲労累積係数 |
|------------|---|-------------------|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|--------|--------------|---------------------|
| A          | B | smax              | smin |            | 補正前<br>salt    | 補正後<br>salt' |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        |              |                     |
|            |   |                   |      |            |                |              |           |             |        | 合計:          | 0.01658             |

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

→環境UF : 0.017

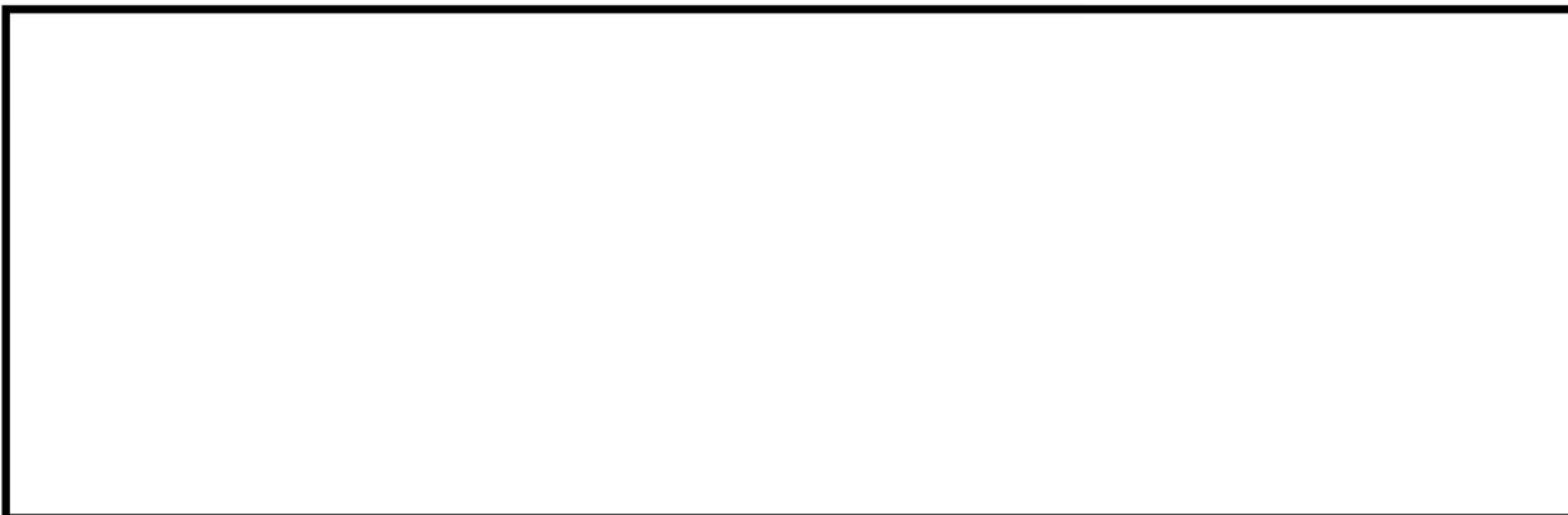
内は商業機密に属しますので公開できません

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 1 - 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)<br/> 「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: 100px;"> <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 $f_1$ 及び定格負荷相当年数 $EFPY_1$ 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 $EFPY_2$ を乗じて算出する。

$$f = \underbrace{f_1 \div EPY_1}_{\text{カプセル位置での中性子束}} \div \underbrace{LF}_{\text{内表面位置での中性子束}} \times \exp(-0.24 \times t \div 4 \div 25.4) \times EPY_2$$

1/4t深さ位置での中性子束

評価時期における1/4t深さ位置での中性子照射量

高浜 1 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                     |
|------------------------------|-----------------------------|
| $f_1 (\times 10^{19}n/cm^2)$ | <input type="text"/>        |
| $EFPY_1$                     | <input type="text"/>        |
| $EFPY_2$                     | (2015年4月時点)<br>(運転開始後60年時点) |
| $LF$                         | <input type="text"/>        |
| $t$ (mm)                     | <input type="text"/>        |

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

$$f = \frac{\text{[ ]}}{\text{[ ]}}$$

- ② 原子炉容器内表面：運転開始後60年時点

$$f = \frac{\text{[ ]}}{\text{[ ]}}$$

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

$$f = \frac{\text{[ ]}}{\text{[ ]}}$$

- 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

$$f = \frac{\text{[ ]}}{\text{[ ]}}$$

以上

|     |   |          |
|-----|---|----------|
| No. | 高浜1-IASCC-2 rev1  | 事象：IASCC |
| 質 問 | <p>(別冊-7炉内構造物-41頁)<br/>                 バッフルフォーマボルトのIASCCについて、最新知見を用いて行った損傷本数評価の妥当性確認の内容を提示すること。</p>  |          |
| 回 答 | <p>バッフルフォーマボルトの損傷本数評価については、バッフル構造をモデル化した応力解析結果と、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術」事業で得られた最新知見に基づき設定したIASCC発生しきい線との比較により損傷可能性を評価しています。</p> <p>応力解析手法については、国内外の学会に解析内容を発表しており、有識者の評価を得ております。なお、応力解析におけるスウェリング量については、米国の実験炉EBR-II炉心の中性子反射体要素(SUS304材)から採取したデータを基に作成したdpaレイト補正Foster-Flinn式を用いて評価しています。本評価式は照射量、dpaレイト(照射速度)、温度のスウェリング量への影響を定式化したものとなっています。クリープ量については、国プロ「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業において示された照射下クリープ評価式を用いた評価を行っています。本評価式は、Halden炉での照射下クリープデータに基づき作成されたものです。</p> <p>IASCC発生しきい線については、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術」事業で得られたバッフルフォーマボルト材のIASCC発生試験結果の下限を取って設定しています。</p> <p>以上のことから、今回実施したバッフルフォーマボルトの損傷本数評価は妥当であると判断しています。</p> <p>なお、上記の評価手法については、原子力安全推進協会にて「PWR炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト]第2版」として規格化されており、平成26年3月に正式発行されています。</p> <p>また、高浜1号炉と類似の米国のW社製3ループプラントで、且つバッフルフォーマボルトの点検実績があるSurry1.2u、Farley1.2u、Robinson2uのバッフルフォーマボルト点検結果と、高浜1号炉のIASCC評価結果との比較を実施した結果、実機の損傷本数と損傷本数評価結果がおおむね整合していることを確認いたしました。(表1、図1参照)</p> |          |

表1. 米国3ループプラント・バッフルフォーマボルト点検結果

|                                       | Surry1u | Surry2u | Farley1u | Farley2u | Robinson2u |
|---------------------------------------|---------|---------|----------|----------|------------|
| 点検時間                                  | 28EFPY  | 28EFPY  | 16.6EFPY | 15.1EFPY | 31.4EFPY   |
| 損傷本数<br>(高浜1号炉<br>評価結果 <sup>※1)</sup> |         |         |          |          |            |

※1. 各プラントの点検時間における評価損傷本数

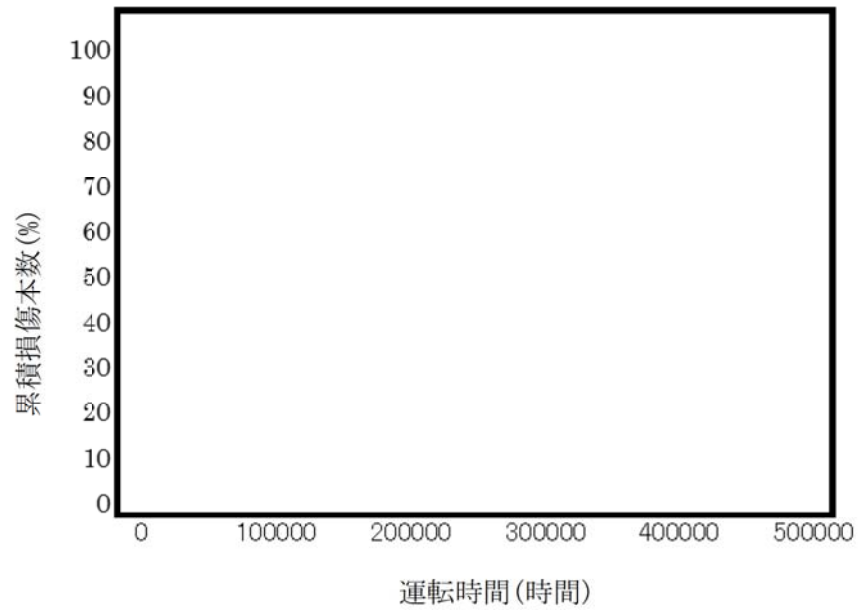


図1. 高浜1号炉 IASCC評価結果と米国点検実績の比較

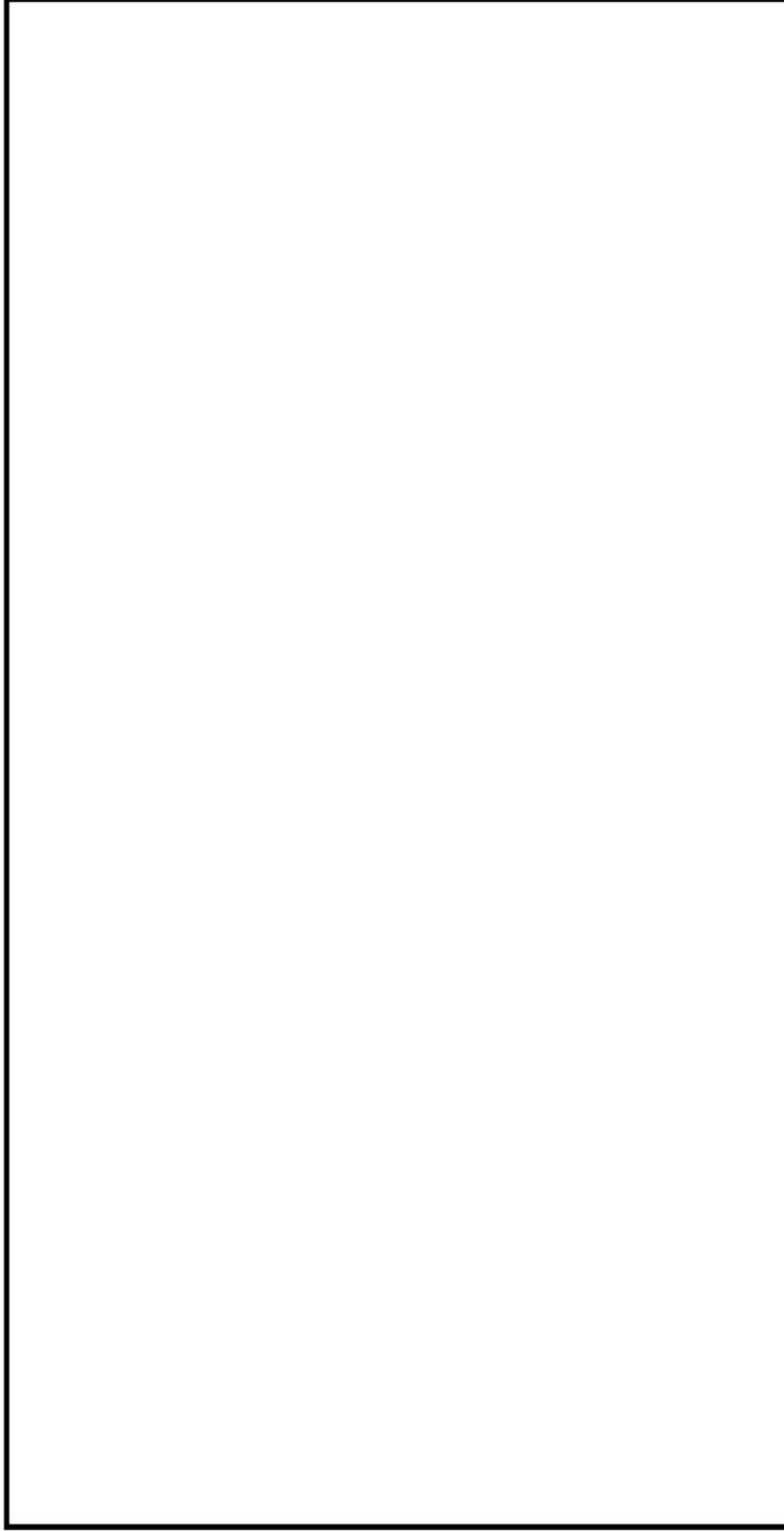
以上

内は商業機密に属しますので公開できません



|     |  |          |
|-----|--|----------|
| No. | 高浜1-IASCC-3rev1  | 事象：IASCC |
| 質 問 | <p>(別冊-7炉内構造物-46頁)<br/>                 バッフルフォーマボルトについて、日本機械学会維持規格(JSME S NA1-2008)に基づく試験の方法及び実施時期を提示すること。</p>   |          |
| 回 答 | <p>バッフルフォーマボルトについて、日本機械学会維持規格(JSME S NA1-2008)には、高浜1号炉が属するグループ2のプラントは「供用開始から運転時間で50年以内」と試験実施時期が定められています。試験方法としては、ボルト首下部を試験範囲とした超音波探傷試験が規定されております。(添付1参照)</p> <p>なお、運転開始後60年時点<sup>※</sup>の運転時間は約□万時間(約□年)程度になると予測しているため、現時点で具体的な点検計画はありません。また、高浜1号炉については炉内構造物の取替を計画しています。</p> <p>※ □</p> <p style="text-align: right;">以上</p> <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> |          |

パツフルフォーマボルト超音波探傷試験の方法 (概要)



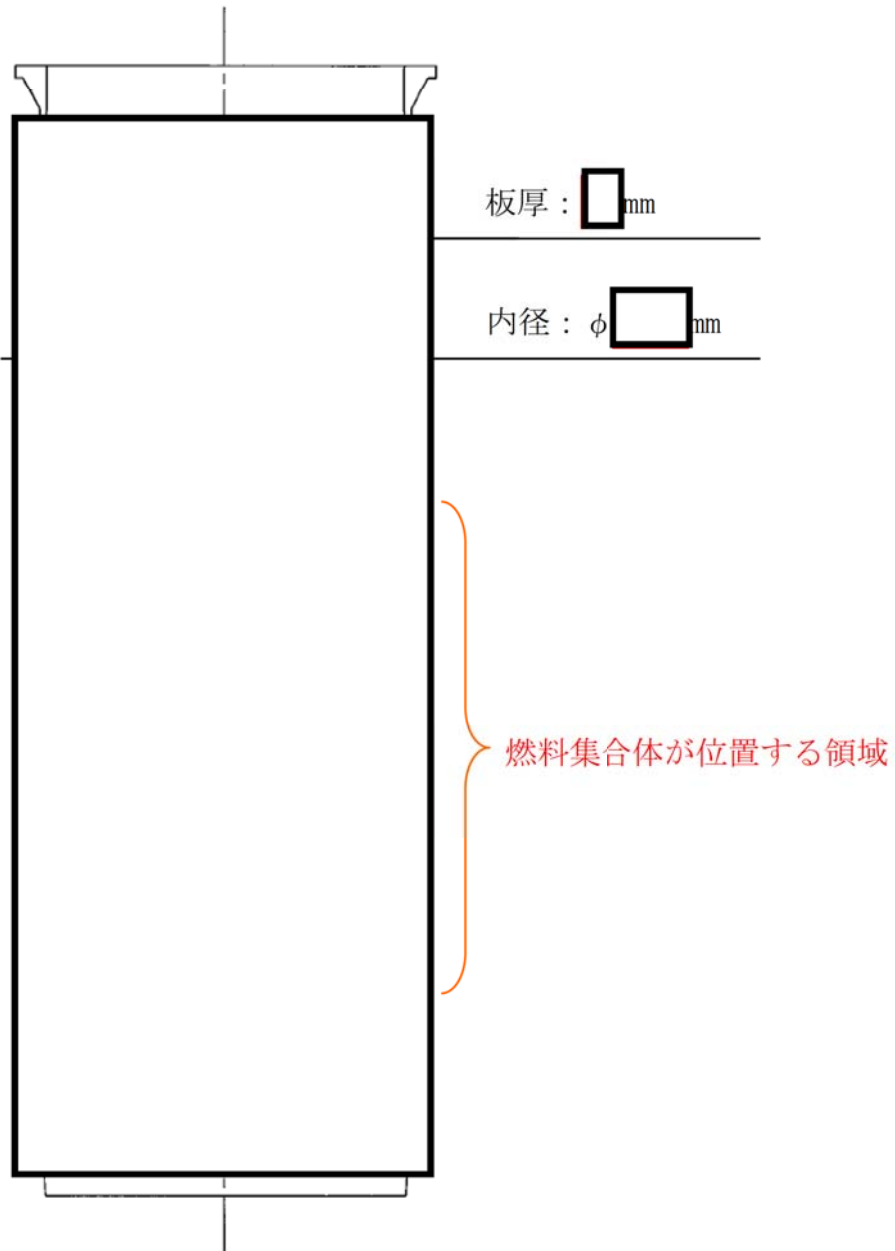
内は商業機密に属しますので公開できません

|     |   |          |
|-----|---|----------|
| No. | 高浜1-IASCC-4   | 事象：IASCC |
| 質 問 | <p>(別冊-7炉内構造物-40頁)<br/>         炉心そう溶接部の残留応力を含む溶接部の応力がバップルフォーマボルト首下部の応力よりも小さいと考えられる根拠を提示すること。</p>   |          |
| 回 答 | <p>炉心そうについては、運転中の炉心そう溶接部に発生する応力を評価するため、溶接残留応力や機械荷重・熱応力を考慮したFEM解析を実施しています。各応力の評価方法を以下に示します。また、添付資料に炉心そうの材質、板厚等を示します。</p> <p>①溶接残留応力を算出<br/>         材料の弾塑性を考慮した非定常熱伝導解析、弾塑性解析により、炉心そう溶接部残留応力を評価</p> <p>②機械荷重・熱応力を算出<br/>         ・機械荷重条件：下部炉心構造物の自重、燃料集合体の自重、炉心そう内外差圧を設定<br/>         ・温度条件：CFD解析により求めたフォーマ領域冷却材温度分布を考慮して求めた炉心そうの温度分布を設定</p> <p>上記の通り炉心そう溶接部の発生応力を算出した結果、運転初期で約 <input type="text"/> MPaと評価しております。<br/>         一方、バップルフォーマボルトは運転初期で約 <input type="text"/> MPaと評価していることから、炉心そうに発生する応力はバップルフォーマボルト以下であると判断しております。</p> <p style="text-align: right;">以上</p> <p style="text-align: center;"><input type="text"/> 内は商業機密に属しますので公開できません</p> |          |

炉心そのの材質、板厚等について

○ 材質：

○ 板厚等：下図に示します。



- - - : IASCC感受性の発生が考えられる溶接部


内は商業機密に属しますので公開できません

|     |   |          |
|-----|---|----------|
| No. | 高浜1-IASCC-5 rev1  | 事象：IASCC |
| 質 問 | <p>(別冊-14機械設備-5非核燃料炉心構成品-8頁)<br/>         制御棒クラスタの被覆管のIASCCについて、使用期間中の中性子照射量及び中性子吸収体の照射スエリングによる被覆管応力の評価を提示すること。</p>   |          |
| 回 答 | <p>制御棒クラスタは中性子照射量が <input type="text"/> (n/cm<sup>2</sup>[E&gt;0.625eV]) を超えるまでに取替を実施する運用としています。</p> <p>高浜1号炉の制御棒クラスタは改良型の制御棒クラスタに取替済みであり、中性子照射量が大きくなる先端部分について中性子吸収体と被覆管の間にギャップを設けることで、中性子吸収体の照射スエリングによる膨張によって被覆管に有意な応力が発生しにくい構造となっています。</p> <p>また、仮に有意な応力が発生しても、応力は周方向であり、被覆管の強度に影響するような周方向のクラックは発生しません。さらに、仮にクラックが発生したとしても、中性子吸収体の1次冷却材中への溶出は微量であり、制御棒の機能（制御能力）に影響することはありません。</p> <p style="text-align: right;">以上</p> <p style="text-align: center;"><input type="text"/> 内は商業機密に属しますので公開できません</p> |          |

| No.   | 高浜1-コンクリート鉄骨-1  | 事象：共通 |    |      |   |   |   |   |
|---|---|-------|----|------|---|---|---|---|
| 質 問   | (別冊-11コンクリート構造物-1~7頁)<br>対象構造物、代表構造物の選定過程を提示すること。   |       |    |      |   |   |   |   |
| 回 答   | <p>高浜1号炉におけるコンクリート構造物および鉄骨構造物のうち、対象構造物及び代表構造物の選定過程は以下のとおりです。</p> <p>(1) 対象構造物</p> <table border="1" data-bbox="406 884 1332 1429"> <thead> <tr> <th data-bbox="406 884 869 922">分類</th> <th data-bbox="869 884 1332 922">選定過程</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="406 922 869 1205"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ PS-1、2およびMS-1、2に該当する構造物、または該当する機器を支持する構造物</li> <li>・ PS-3およびMS-3に該当する機器のうち高温・高圧環境下にある機器を支持する構造物</li> </ul> </td> <td data-bbox="869 922 1332 1205"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 色塗り系統図等により該当する構造物および機器を支持する構造物を抽出</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="406 1205 869 1429"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 常設重大事故等対処設備に属する構造物、常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物</li> <li>・ 浸水防護施設に属する構造物</li> </ul> </td> <td data-bbox="869 1205 1332 1429"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事計画認可申請書(予定)により、該当する構造物および機器(添付資料1参照)を支持する構造物を抽出</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table> <p>コンクリート構造物および鉄骨構造物における対象構造物を、高経年化技術評価書別冊P3表1-1に示しています。</p> <p>(2) 代表構造物<br/>対象構造物の使用条件(高温部の有無、放射線の有無など)の影響の大きさに基づき、代表構造物を選定しています。その内容の詳細は、高経年化技術評価書別冊P7表1-2に示しています。</p> |       | 分類 | 選定過程 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ PS-1、2およびMS-1、2に該当する構造物、または該当する機器を支持する構造物</li> <li>・ PS-3およびMS-3に該当する機器のうち高温・高圧環境下にある機器を支持する構造物</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 色塗り系統図等により該当する構造物および機器を支持する構造物を抽出</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 常設重大事故等対処設備に属する構造物、常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物</li> <li>・ 浸水防護施設に属する構造物</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事計画認可申請書(予定)により、該当する構造物および機器(添付資料1参照)を支持する構造物を抽出</li> </ul> |
| 分類  | 選定過程  |       |    |      |   |   |   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ PS-1、2およびMS-1、2に該当する構造物、または該当する機器を支持する構造物</li> <li>・ PS-3およびMS-3に該当する機器のうち高温・高圧環境下にある機器を支持する構造物</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 色塗り系統図等により該当する構造物および機器を支持する構造物を抽出</li> </ul>   |       |    |      |   |   |   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 常設重大事故等対処設備に属する構造物、常設重大事故等対処設備に属する機器を支持する構造物</li> <li>・ 浸水防護施設に属する構造物</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事計画認可申請書(予定)により、該当する構造物および機器(添付資料1参照)を支持する構造物を抽出</li> </ul>   |       |    |      |   |   |   |   |

ル 再結合装置の名称、種類、容量、最高使用圧力、最高使用温度、再結合効率、主要寸法、材料、個数及び取付箇所並びに電熱器の名称、種類、容量、個数及び取付箇所

・常設

|    |   |   | 変更前 | 変更後  |
|----|---|---|-----|--|
| 名称 |   |   |     | 静的触媒式水素再結合装置   |
| 種  | 類 | — |     | 静的触媒式  |
| 容  | 量 | — |     | —(反応熱による自然対流)  |
| 最  | 高 | 使 | 用   | 圧  |
| 力  |   |   |     | —(耐圧部材なし)  |
| 最  | 高 | 使 | 用   | 温  |
| 度  |   |   |     | 500  |
|    |   |   |     | (注2)   |
| 再  | 結 | 合 | 効   | 率  |
|    |   |   |     | 1.2<br>(水素濃度 4vol%、圧力 0.15MPa)   |
| 主  | 要 | 横 | mm  | 430 (注3)   |
|    |   | 奥 | mm  | 326 (注3)   |
|    |   | 高 | mm  | 1,400 (注3)   |
| 材  | 本 | 体 | —   | SUS304相当<br>(1.4301/DIN EN 10088-2)  |
| 個  | 数 | — |     | 5  |
| 取  | 付 | 系 | —   | —  |
|    |   | 統 | —   | —  |
|    |   | 名 | —   | —  |
|    |   | ( | —   | —  |
| 設  | 置 | 床 | —   |  |
| 溢  | 水 | 防 | 護   |  |
| 上  | の | 区 | 画   |  |
| 番  | 号 | — | —   |  |
| 溢  | 水 | 防 | 護   | 上  |
| の  | 配 | 慮 | が   | 必  |
| 要  | な | 高 | さ   | —  |

(注1) 重大事故等時における使用時の値

(注2) 再結合効率は、メーカー型式FR1-380Tの性能評価式の代表点での値

(注3) 公称値

※高浜1号機の工事計画認可申請書から抜粋

 内は商業機密に属しますので公開できません

|     |   |         |
|-----|---|---------|
| No. | 高浜 1 - コンクリート鉄骨 - 3   | 事象：塩分浸透 |
| 質 問 | <p>(別冊-11コンクリート構造物-14頁)<br/>                 塩分浸透の評価対象の選定過程を提示すること。</p>   |         |
| 回 答 | <p>塩分浸透の評価対象の選定過程は以下のとおりです。</p> <p>塩分浸透の評価対象は、対象構造物のうち、飛来塩分および海水とその飛沫の影響により厳しい塩分浸透環境下にある状況および特別点検の結果を踏まえ、選定しています。具体的には、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 飛来塩分および海水とその飛沫の影響により厳しい塩分浸透環境下にある</li> <li>(2) 特別点検により確認する塩化物イオン濃度が最も大きい</li> </ul> <p>の2つに該当するものを選定しています。</p> <p>高浜 1 号炉については、海水と接触しており、より厳しい塩分浸透環境下にある取水構造物と非常用海水路を、特別点検の結果として、塩化物イオン濃度が最大となる取水構造物を選定しました。</p> |         |



|     |   |       |
|-----|---|-------|
| No. | 高浜 1 - 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)<br/>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>PLM学会標準2008版等に基づき抽出した全ての経年劣化事象から、主要6事象については、原則、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象とし、それ以外の経年劣化事象のうち、下記イ、ロのいずれかに該当する場合は、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して整理していません。</p> <p>イ．想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考えがたい経年劣化事象であって、想定した劣化傾向等に基づき適切な保全活動を行っているもの</p> <p>ロ．現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象</p> <p>高浜1号炉における腐食による鉄骨の強度低下については、イに対して「劣化の可能性は否定できないが、保全により有意な劣化進展を防止しているもの」という考え方で該当すると判断し、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して整理しました。</p> |       |

|     |   |         |
|-----|---|---------|
| No. | 高浜1-コンクリート鉄骨-10   | 事象：塩分浸透 |
| 質 問 | <p>(別冊-11コンクリート構造物-31頁)<br/>                 塩分浸透の評価点の選定過程を提示すること。</p>  |         |
| 回 答 | <p>塩分浸透の評価点については、以下の選定過程に基づいて選定しています。</p> <p>塩分浸透の代表構造物のうち、取水構造物については、高経年化技術評価審査マニュアル（JNES-RE-2013-9012）に基づき、環境条件が異なることから、気中帯、干満帯および海中帯をそれぞれ評価点として選定しました。</p> |         |

| No.            | 高浜1-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)<br>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 1400 1300 1821"> <thead> <tr> <th rowspan="2">対象の部位</th> <th colspan="3">鉄筋の腐食減量 (×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>)</th> </tr> <tr> <th>調査時点</th> <th>運転開始後<br/>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<br/>(気中帯)</td> <td>3.5</td> <td>5.8</td> <td>88.1</td> </tr> <tr> <td>取水構造物<br/>(干満帯)</td> <td>0.5</td> <td>1.2</td> <td>88.1</td> </tr> <tr> <td>取水構造物<br/>(海中帯)</td> <td>7.2</td> <td>14.6</td> <td>90.1</td> </tr> <tr> <td>非常用海水路</td> <td>2.6</td> <td>4.6</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 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> ) |  |  | 調査時点 | 運転開始後<br>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<br>(気中帯) | 3.5 | 5.8 | 88.1 | 取水構造物<br>(干満帯) | 0.5 | 1.2 | 88.1 | 取水構造物<br>(海中帯) | 7.2 | 14.6 | 90.1 | 非常用海水路 | 2.6 | 4.6 | 90.1 |
| 対象の部位          | 鉄筋の腐食減量 (×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )  |                  |                       |       |  |  |  |      |                  |                       |                |     |     |      |                |     |     |      |                |     |      |      |        |     |     |      |
|                | 調査時点  | 運転開始後<br>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<br>(気中帯) | 3.5   | 5.8              | 88.1                  |       |  |  |  |      |                  |                       |                |     |     |      |                |     |     |      |                |     |      |      |        |     |     |      |
| 取水構造物<br>(干満帯) | 0.5   | 1.2              | 88.1                  |       |  |  |  |      |                  |                       |                |     |     |      |                |     |     |      |                |     |      |      |        |     |     |      |
| 取水構造物<br>(海中帯) | 7.2   | 14.6             | 90.1                  |       |  |  |  |      |                  |                       |                |     |     |      |                |     |     |      |                |     |      |      |        |     |     |      |
| 非常用海水路         | 2.6   | 4.6              | 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<br>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> )  | 1.24  | 1.23 | 7.83 | 2.36       | 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<br>拡散係数(mm <sup>2</sup> /年)   |       |      |      |            |                   |
| Cl: 鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )<br>(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(%)  |       |      |      |            |                   |
| q <sub>1</sub> : 調査時点(40年経過)の鉄筋の腐食減量<br>(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )                | 3.5   | 0.5  | 7.2  | 2.6        |                   |
| q <sub>1</sub> : 運転開始後60年経過時点の鉄筋の<br>腐食減量(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> )               | 5.8   | 1.2  | 14.6 | 4.6        |                   |
| Q <sub>CR</sub> : かぶりコンクリートにひび割れが発生する<br>時点の鉄筋の腐食減量 推定値(×10 <sup>-4</sup> g/cm <sup>2</sup> ) | 88.1  | 88.1 | 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>)  
C<sub>0</sub>: 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

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

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

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO \\ + 0.01ZN + 60.81HO + 3.36HN + 7.32ON$$

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304 N$$

q: 鉄筋の腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
q<sub>1</sub>: 塩分環境下での腐食速度(×10<sup>-4</sup>g/cm<sup>2</sup>/年)  
q<sub>2</sub>: 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)  
q<sub>2</sub>': 寿命予想対象部位で、  
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