

# 玄海原子力発電所 3 号炉

## 炉内構造物の技術評価書

[運転を断続的に行うことを前提とした評価]

九州電力株式会社

玄海3号炉で使用されている炉内構造物の高経年化に係る技術評価についてまとめたものである。

表1に評価対象部位を示す。

本評価書における技術評価結果で現状保全を継続すべき項目としたものについては、現状保全の点検手法の適切性を確認しており、現状保全を継続することで健全性の維持は可能であると考ええる。

なお、点検等で確認した結果、異常が認められた場合、速やかに対策を施すこととしており、異常が認められた場合に、対策を実施する旨の記載は省略している。

また、制御棒は「機械設備の技術評価書」にて評価を実施するものとし、本評価書には含まれていない。

表1 評価対象部位一覧

部 位 名 称	重 要 度*1
上部炉心板	PS-1、重*2
上部炉心支持柱	PS-1、重*2
上部炉心支持板	PS-1、重*2
下部炉心板	PS-1、重*2
下部炉心支持柱	PS-1、重*2
下部炉心支持板	PS-1、重*2
炉 心 槽	PS-1、重*2
ラジアルキー	—*3
上部燃料集合体案内ピン	PS-1
下部燃料集合体案内ピン	PS-1
制御棒クラスタ案内管	MS-1
支持ピン	MS-1
炉心バッフル	PS-1
炉心バッフル取付板	PS-1
バッフルフォーマボルト	PS-1
バレルフォーマボルト	PS-1
炉内計装用シンプルチューブ	PS-2
熱遮蔽体	PS-1
熱遮蔽体取付ボルト	PS-1
押えリング	PS-1

\*1：機能は最上位の機能を示す

\*2：重要度クラスとは別に常設重大事故等対処設備に属する機器及び構造物であることを示す

\*3：安全重要度分類上、性能に関する規定は特にはないが、炉内構造物一式として他部位とあわせて評価する

# 1 炉内構造物

## 目 次

1. 対象機器 .....	1
2. 炉内構造物の技術評価 .....	2
2.1 構造、材料及び使用条件 .....	2
2.2 経年劣化事象の抽出 .....	19
2.3 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の評価 .....	31

## 1. 対象機器

玄海3号炉で使用されている炉内構造物の主な仕様を表1-1に示す。

表1-1 玄海3号炉 炉内構造物の主な仕様

機器名称 (台数)	重要度*1	使用条件		
		運 転	最高使用圧力 (MPa[gage])	最高使用温度 (°C)
炉内構造物 (1)	PS-1、重*2	連 続	約17.2	約343

\*1：機能は最上位の機能を示す

\*2：重要度クラスとは別に常設重大事故等対処設備に属する機器及び構造物であることを示す

## 2. 炉内構造物の技術評価

### 2.1 構造、材料及び使用条件

#### (1) 構造

玄海3号炉の炉内構造物は、炉心の支持、1次冷却材の流路形成・配分等の機能を有し、上部炉内構造物と下部炉内構造物とに分かれている。それぞれ一体として原子炉容器から取り外すことができる構造となっている。

炉内構造物は大部分がステンレス鋼であり、一部ニッケル基合金を用いている。

上部炉内構造物と下部炉内構造物は燃料集合体を上下からはさむ形で支持しており、それら自身は原子炉容器フランジ部で、押えリングをはさむ形で支持されている。

上部炉内構造物は、上部炉心支持板、上部炉心支持柱及び上部炉心板の組立体である上部炉心支持構造物に、制御棒クラスタ案内管等の構造物を取り付けられたものである。制御棒クラスタ案内管は上部炉心支持板にボルト固定され、支持ピンが上部炉心板にはまり込む構造となっている。

下部炉内構造物は、炉心槽、下部炉心支持板、下部炉心支持柱及び下部炉心板の組立体である下部炉心支持構造物に、炉心バッフル、熱遮蔽体等が取り付けられたものである。

玄海3号炉の炉内構造物の構造を図2.1-1に示す。

#### (2) 材料及び使用条件

玄海3号炉の炉内構造物の使用材料及び使用条件を表2.1-1及び表2.1-2に示す。

No.	部 位
(上部炉内構造物)	
①	上部炉心板
②	上部燃料集合体案内ピン
③	上部炉心支持柱
④	上部炉心支持板
⑤	制御棒クラスタ案内管
⑥	支持ピン
(下部炉内構造物)	
⑦	下部炉心板
⑧	下部燃料集合体案内ピン
⑨	下部炉心支持柱
⑩	下部炉心支持板
⑪	炉 心 槽
⑫	炉心バツフル
⑬	炉心バツフル取付板
⑭	バツフルフォーママボルト
⑮	バレルフォーママボルト
⑯	熱遮蔽体
⑰	熱遮蔽体取付ボルト
(その他)	
⑱	押えリング
⑲	炉内計装用シンブルチューブ
⑳	ラジアルキー

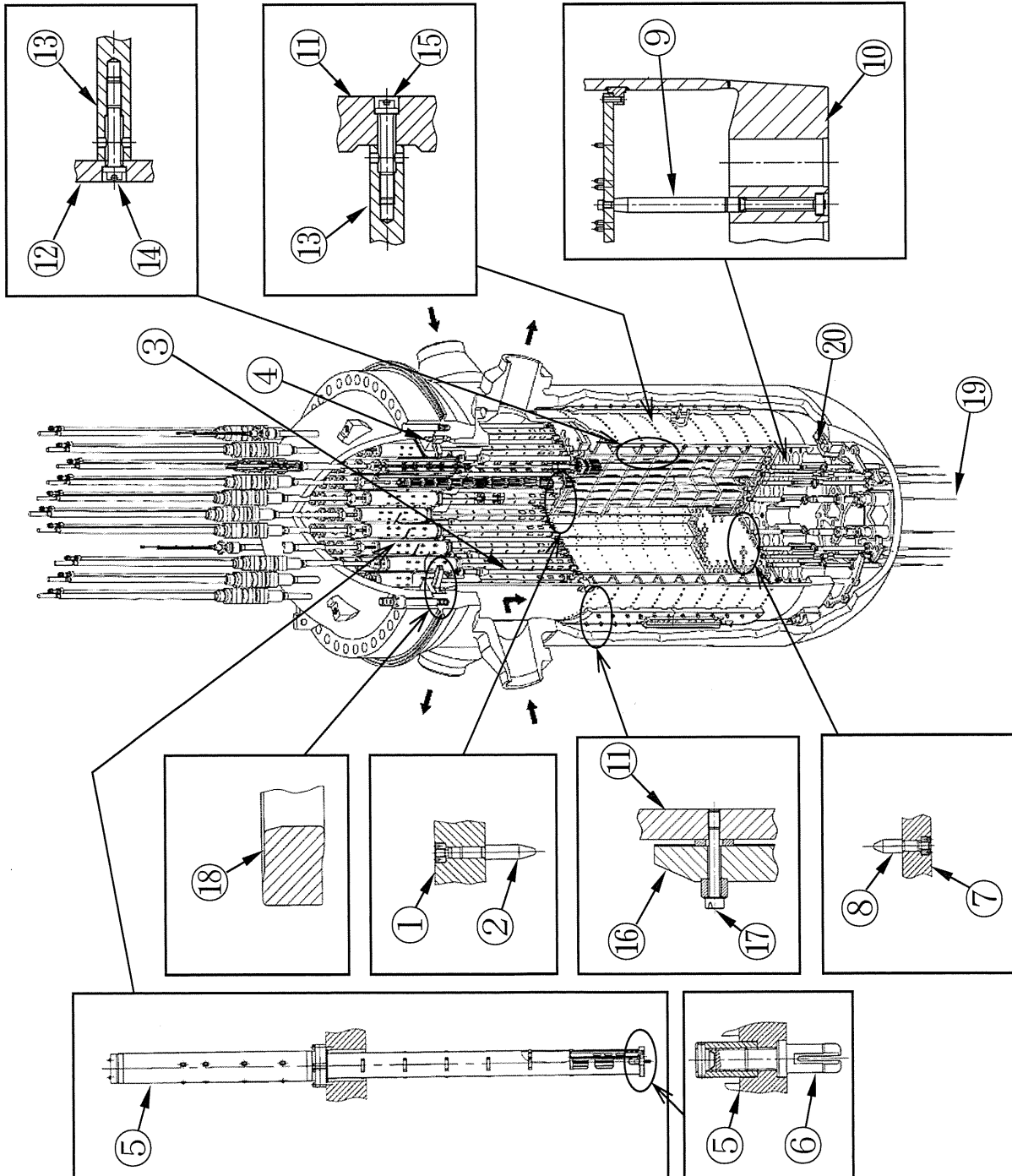


図2.1-1(1/14) 玄海3号炉 炉内構造物全体図



No.	部 位
①	上部炉心板
②	上部燃料集合体案内ピン
③	上部炉心支持柱
④	上部炉心支持板
⑤	制御棒クラスタ案内管
⑥	支持ピン

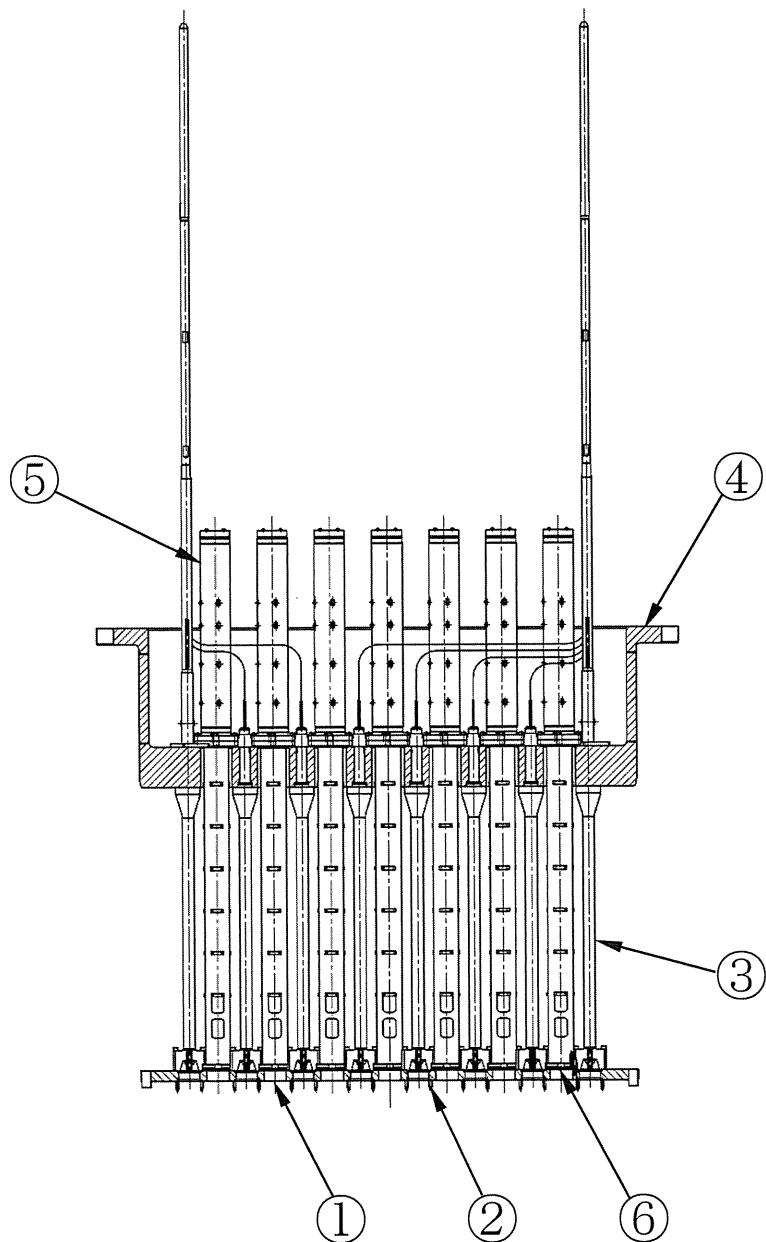


図2.1-1(2/14) 玄海3号炉 炉内構造物 上部炉内構造物構造図

No.	部 位
①	上部炉心板
②	上部燃料集合体案内ピン

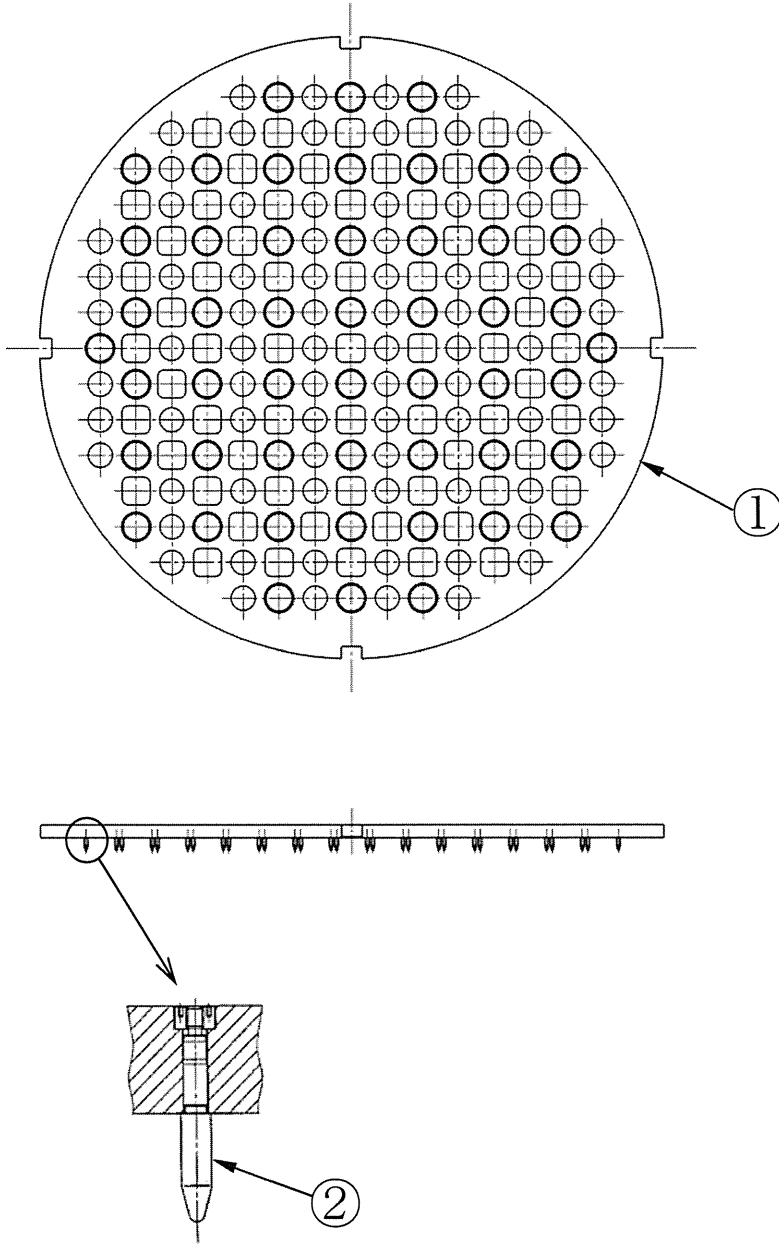


図2.1-1(3/14) 玄海3号炉 炉内構造物 上部炉心板組立図

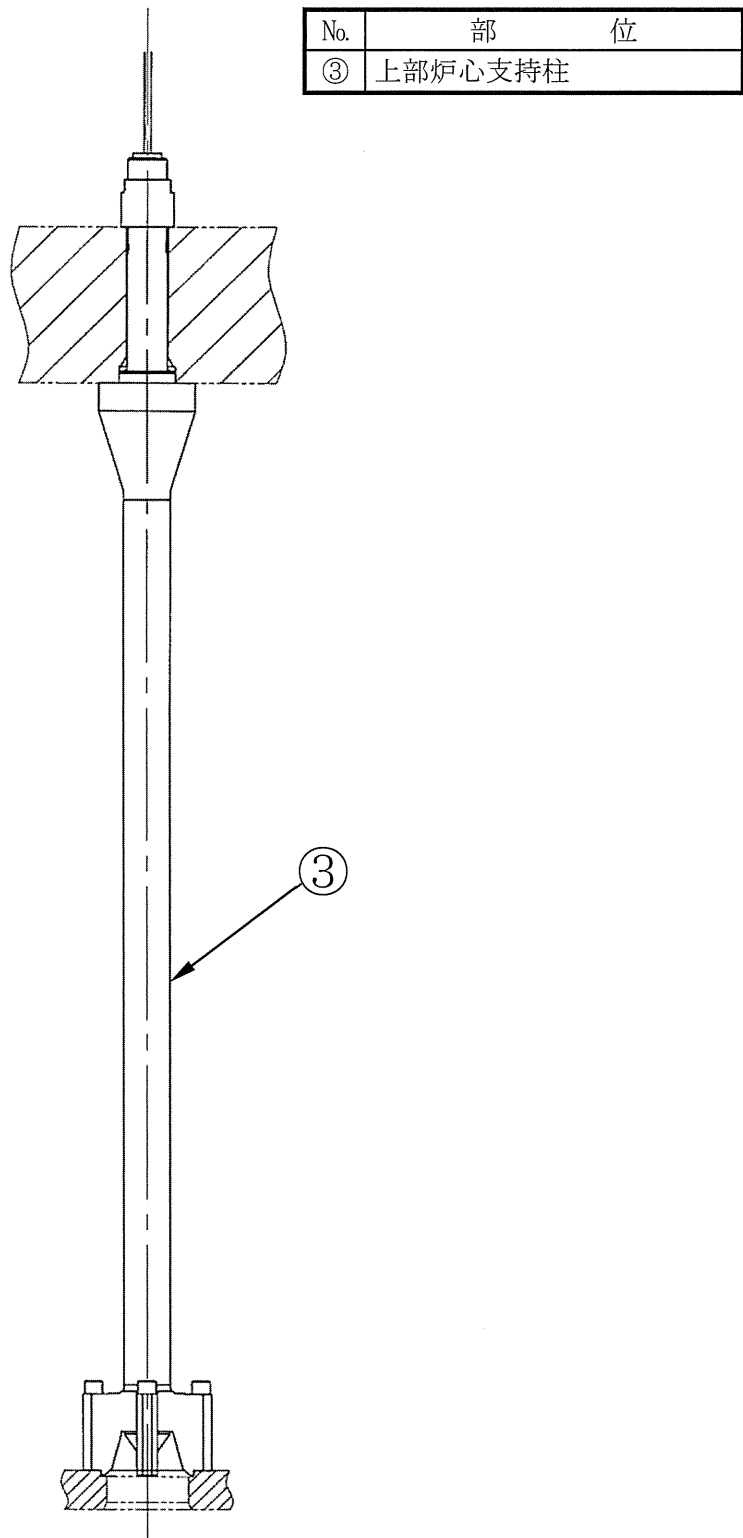


图2.1-1(4/14) 玄海3号炉 炉内构造物 上部炉心支持柱组立图

No.	部 位
④	上部炉心支持板

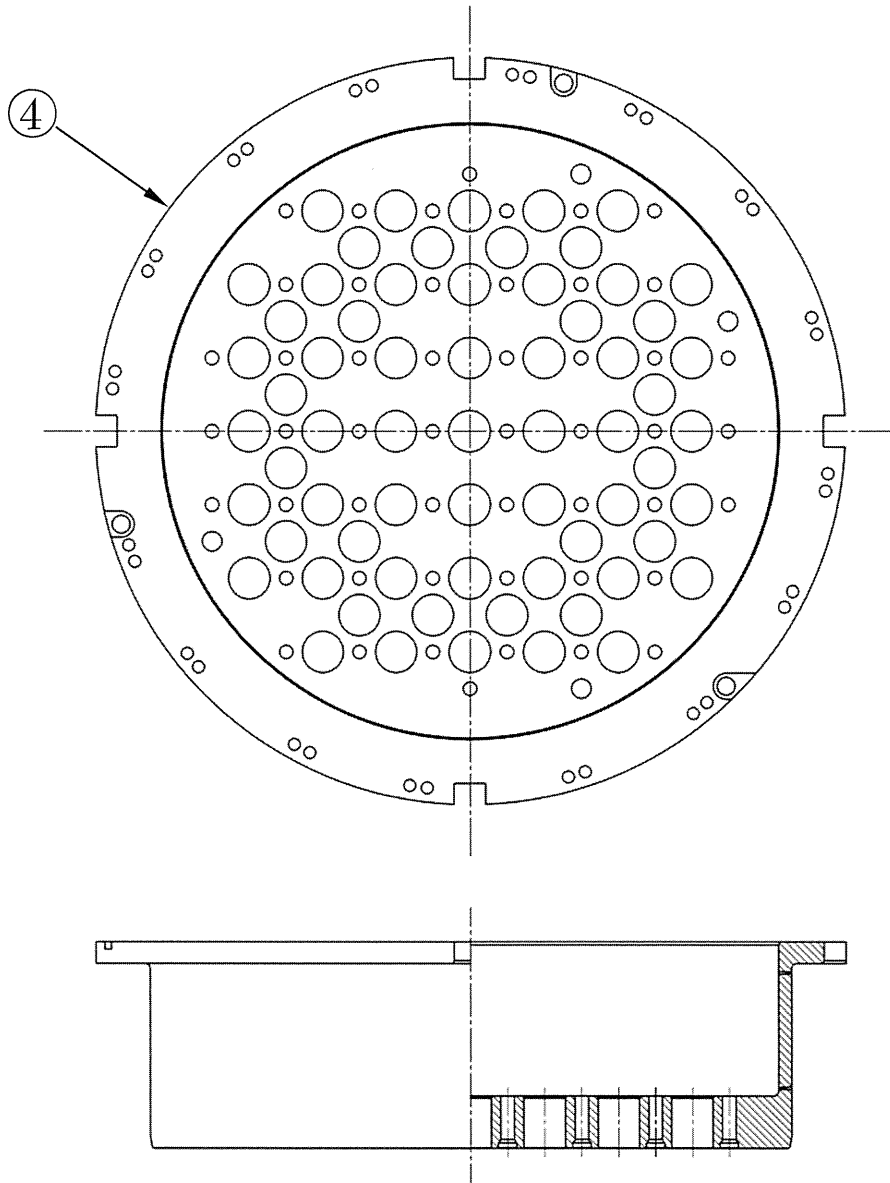
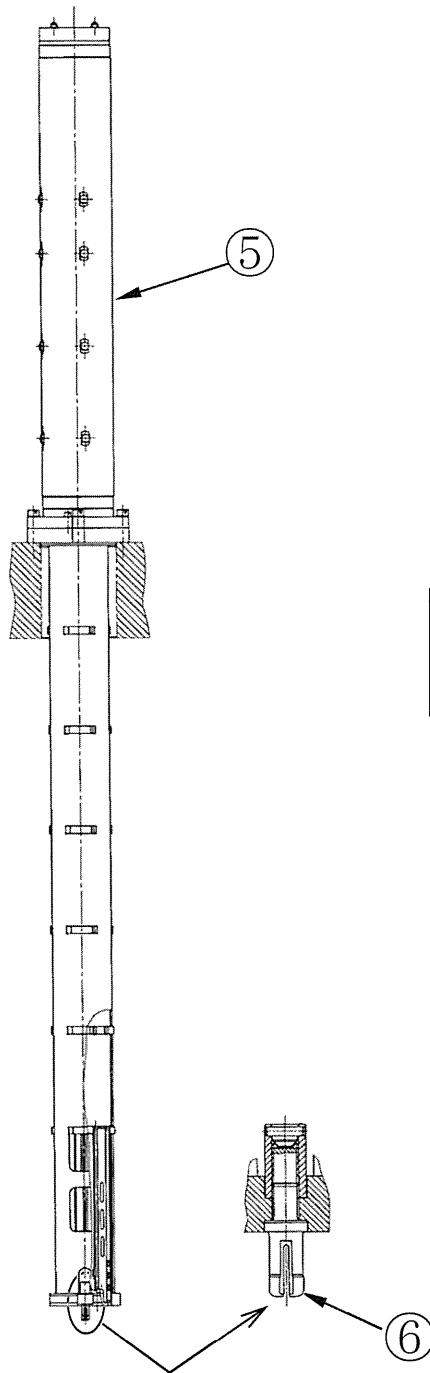


图2.1-1(5/14) 玄海3号炉 炉内构造物 上部炉心支持板组立图



No.	部 位
⑤	制御棒クラスタ案内管
⑥	支持ピン

図2.1-1(6/14) 玄海3号炉 炉内構造物 制御棒クラスタ案内管組立図

No.	部 位
⑦	下部炉心板
⑧	下部燃料集合体案内ピン
⑨	下部炉心支持柱
⑩	下部炉心支持板
⑪	炉 心 槽
⑫	炉心バップル
⑬	炉心バップル取付板
⑭	バップルフォーマボルト
⑮	バレルフォーマボルト
⑯	熱遮蔽体
⑰	熱遮蔽体取付ボルト
⑳	ラジアルキー

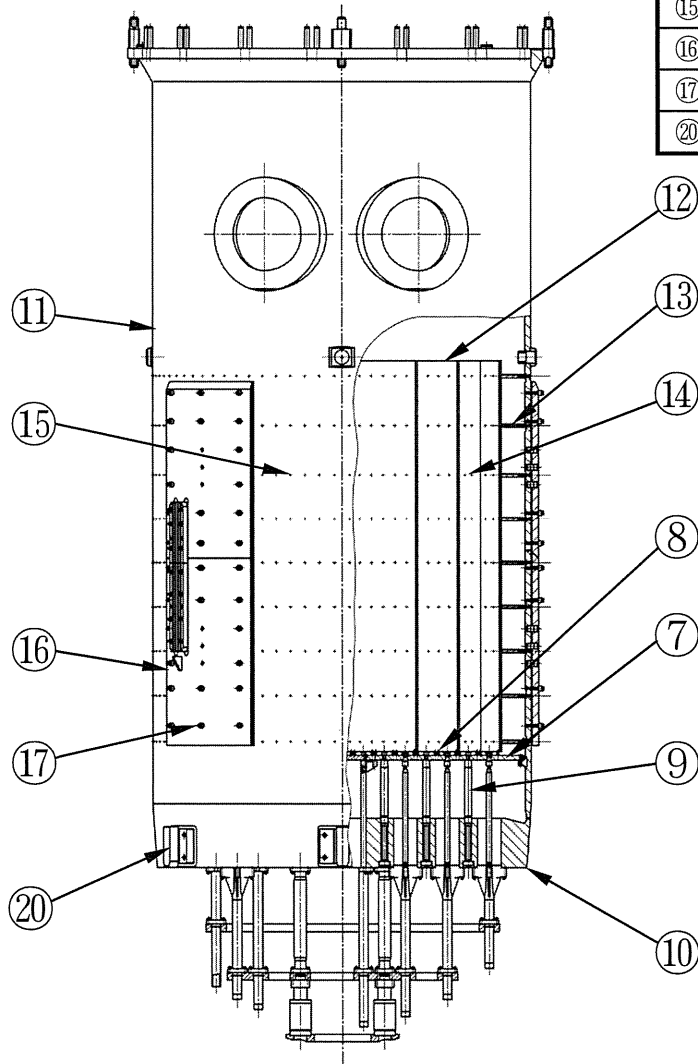


図2.1-1(7/14) 玄海3号炉 炉内構造物 下部炉内構造物構造図

No.	部 位
⑦	下部炉心板
⑧	下部燃料集合体案内ピン

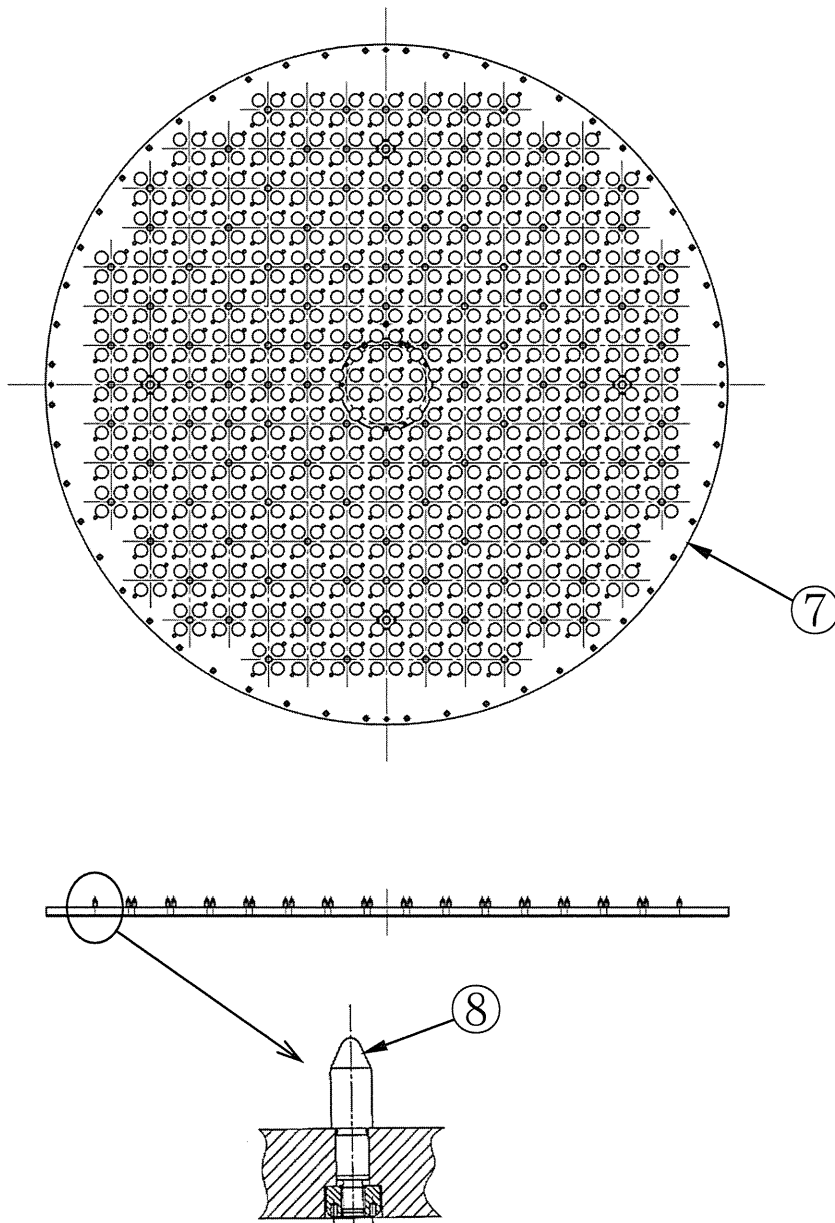


図2.1-1(8/14) 玄海3号炉 炉内構造物 下部炉心板組立図

No.	部	位
⑨	下部炉心支持柱	

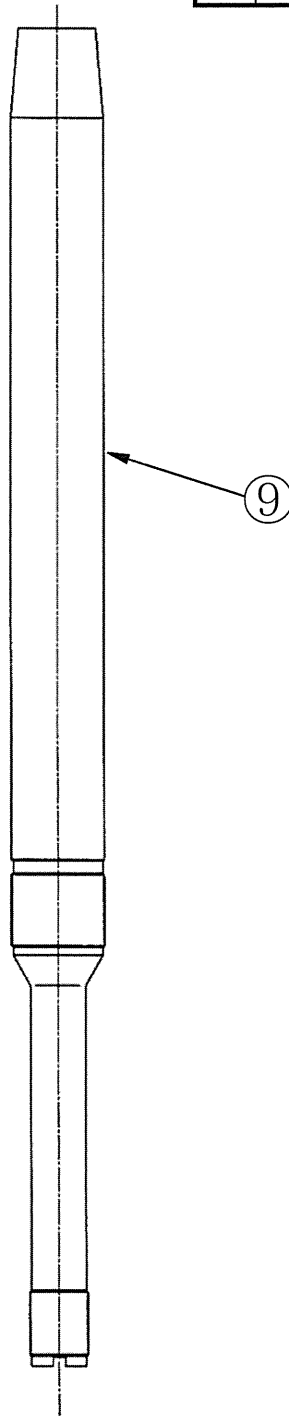


图2.1-1(9/14) 玄海3号炉 炉内构造物 下部炉心支持柱组立图



No.	部 位
⑦	下部炉心板
⑨	下部炉心支持柱
⑩	下部炉心支持板
⑪	炉 心 槽

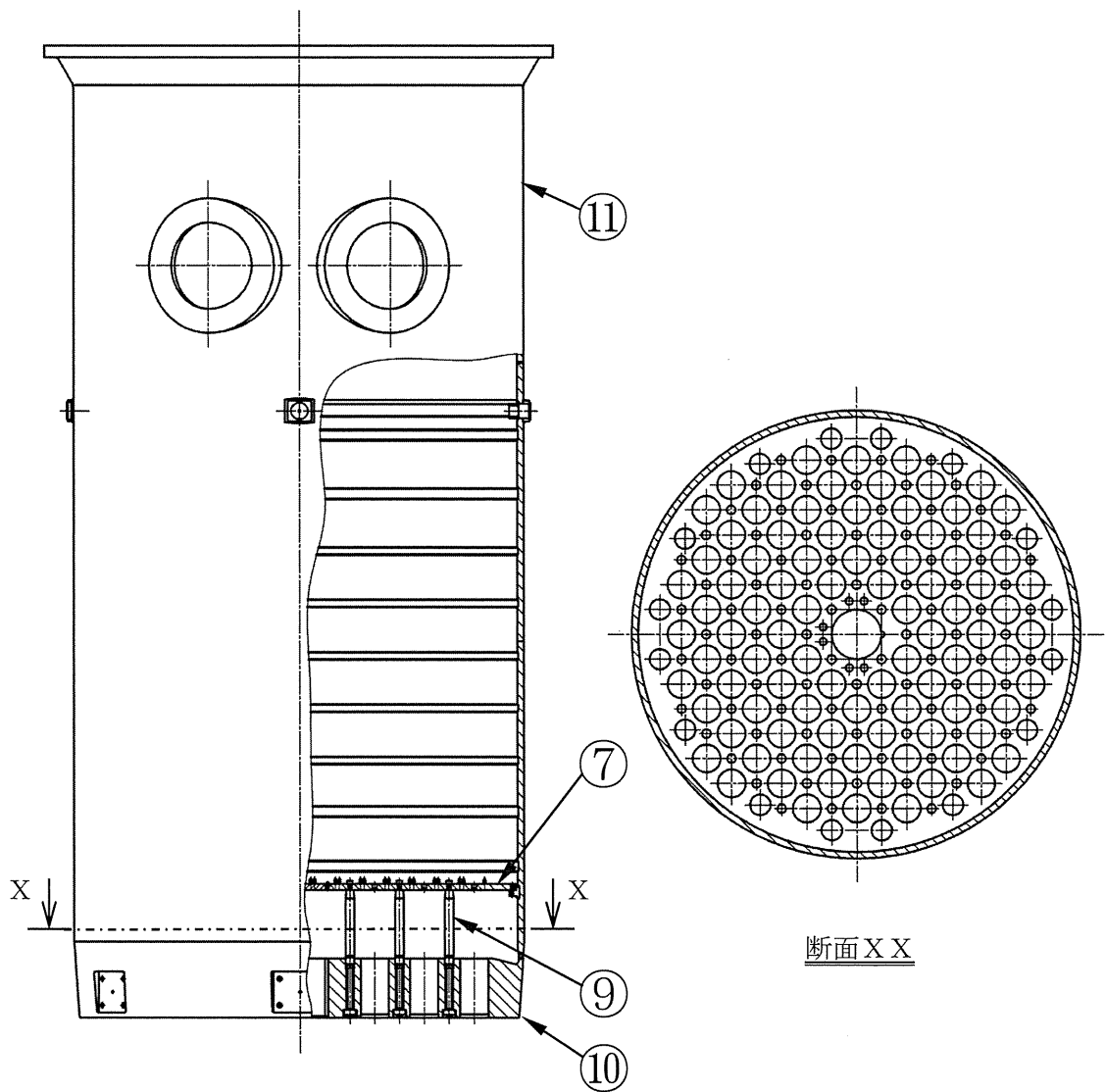
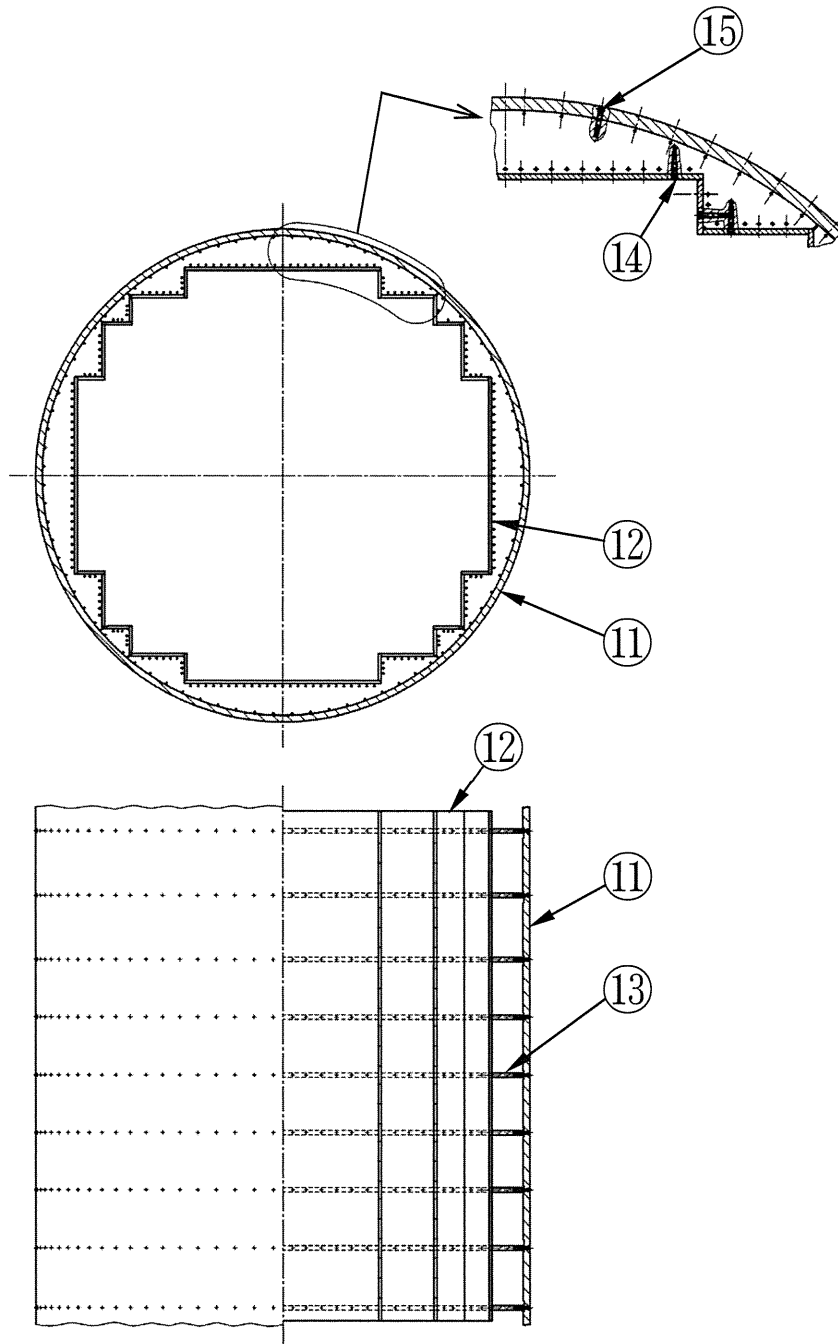


图2. 1-1(10/14) 玄海3号炉 炉内构造物 炉心槽组立图



No.	部 位
①	炉 心 槽
②	炉心バツフル
③	炉心バツフル取付板
④	バツフルフォーマボルト
⑤	バレルフォーマボルト

図2.1-1(11/14) 玄海3号炉 炉内構造物 炉心バツフル組立図

No.	部 位
⑪	炉 心 槽
⑬	熱 遮 蔽 体
⑰	熱 遮 蔽 体 取 付 ボ ル ト

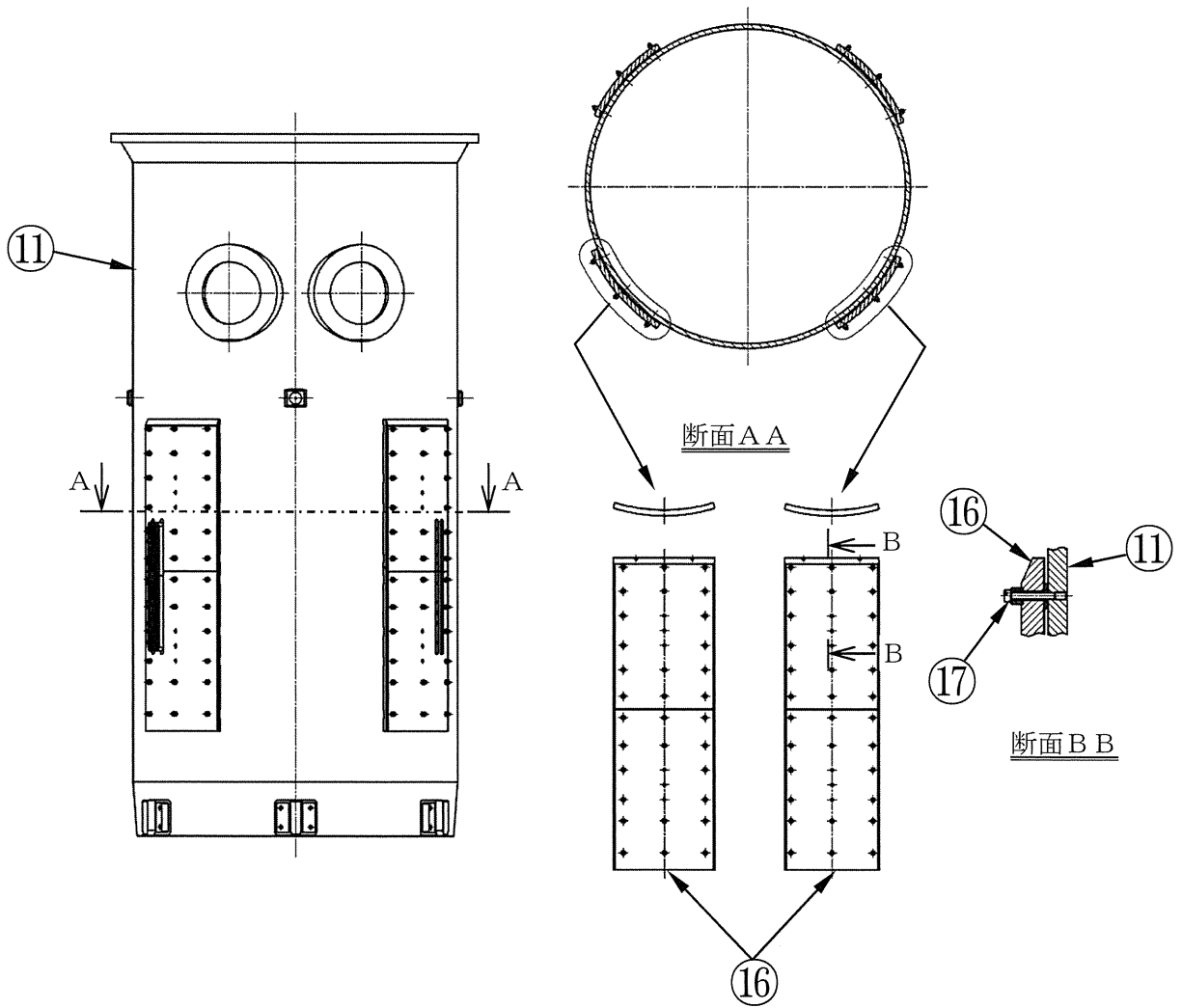
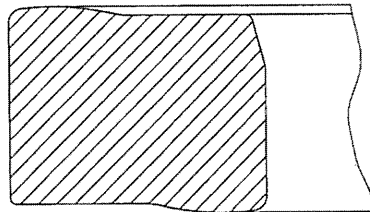
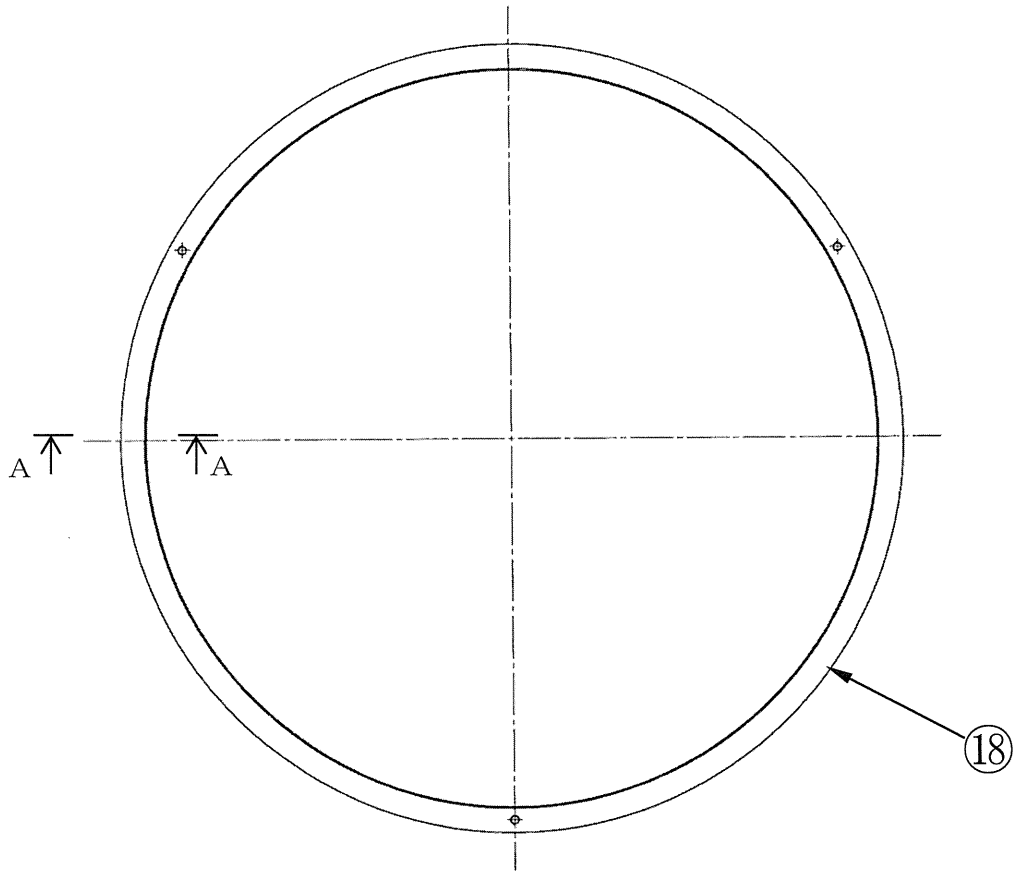


図2. 1-1 (12/14) 玄海3号炉 炉内構造物 熱遮蔽体組立図



断面AA

No.	部	位
⑱	押えリング	

図2.1-1(13/14) 玄海3号炉 炉内構造物 押えリング

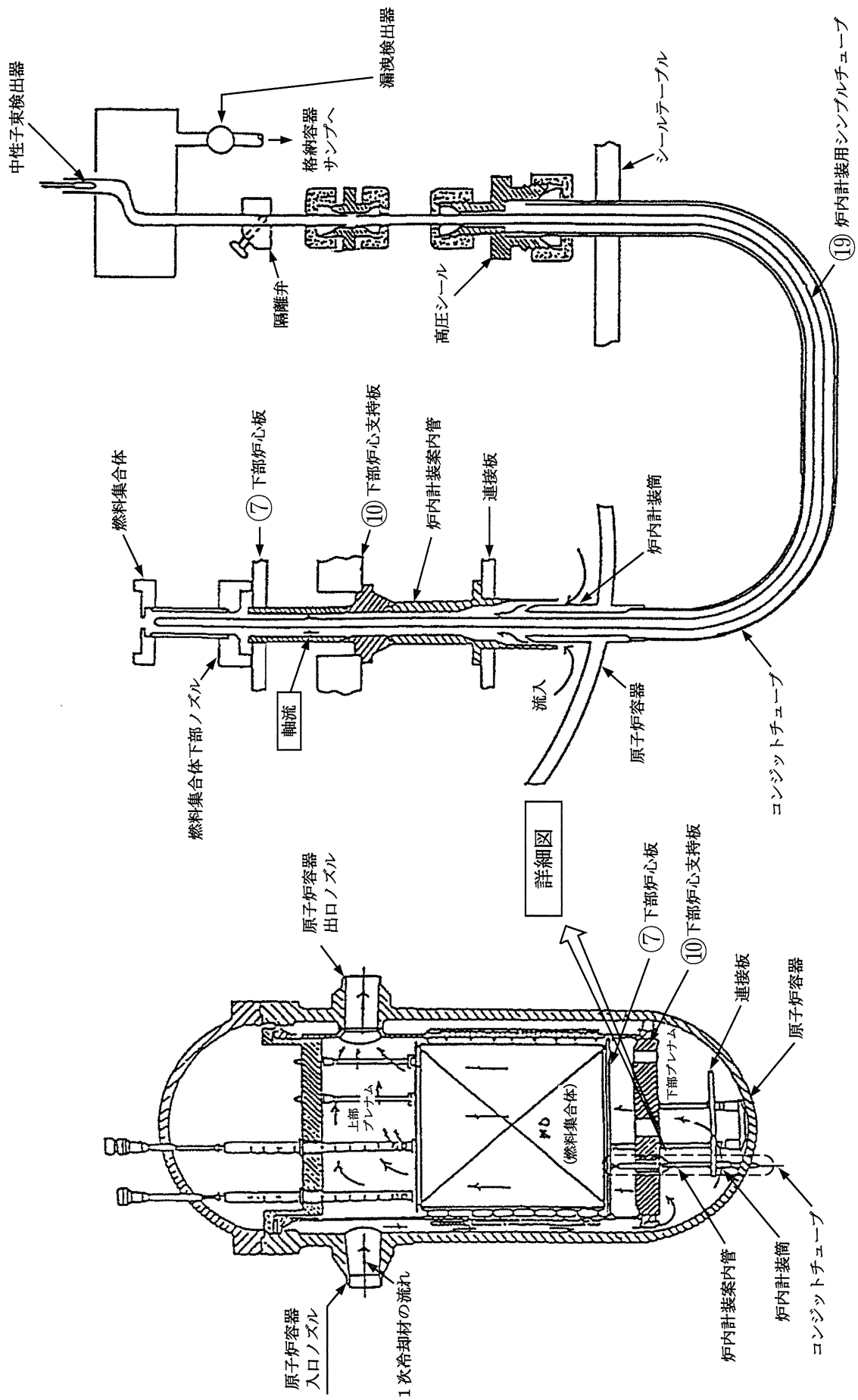


図2.1-1(14/14) 炉内計装用シンブルチューブ概念図

表2.1-1 玄海3号炉 炉内構造物主要部位の使用材料

部 位	材 料
上部炉心板	ステンレス鋼
上部炉心支持柱	ステンレス鋼
上部炉心支持板	ステンレス鋼
下部炉心板	ステンレス鋼
下部炉心支持柱	ステンレス鋼
下部炉心支持板	ステンレス鋼
炉 心 槽	ステンレス鋼
ラジアルキー	ステンレス鋼
上部燃料集合体案内ピン	ステンレス鋼
下部燃料集合体案内ピン	ステンレス鋼
制御棒クラスタ案内管	ステンレス鋼
支持ピン	ニッケル基合金
炉心バッフル	ステンレス鋼
炉心バッフル取付板	ステンレス鋼
バッフルフォーマボルト	ステンレス鋼
バレルフォーマボルト	ステンレス鋼
炉内計装用シンプルチューブ	ステンレス鋼
熱遮蔽体	ステンレス鋼
熱遮蔽体取付ボルト	ステンレス鋼
押えリング	ステンレス鋼

表2.1-2 玄海3号炉 炉内構造物の使用条件

最高使用圧力	約17.2MPa[gage]
最高使用温度	約343℃
内部流体	1次冷却材

## 2.2 経年劣化事象の抽出

### 2.2.1 機能達成に必要な項目

炉内構造物の機能である、

- ・ 炉心、すなわち燃料集合体の支持及び位置決め
- ・ 制御棒クラスタの位置決め、案内及び保護
- ・ 1次冷却材の流路形成及び流量の適正配分
- ・ 炉内計装の通路形成、支持及び保護
- ・ 原子炉容器に対する中性子しゃへい

を維持するためには、次の6つの項目が必要である。

- ① 炉心支持及び炉心位置決め部材信頼性の維持
- ② 制御棒クラスタ案内構造信頼性の維持
- ③ 1次冷却材流路形成構成部材信頼性の維持
- ④ 炉内計装案内構造部材信頼性の維持
- ⑤ 中性子しゃへい構造信頼性の維持
- ⑥ 機器の支持構造信頼性の維持

### 2.2.2 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象

炉内構造物について、機能達成に必要な項目を考慮して主要な部位に展開した上で、個々の部位の構造、材料、使用条件（水質、圧力、温度等）及び現在までの運転経験を考慮し、表2.2-1に示すとおり想定される経年劣化事象を抽出した。

この結果、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象（表2.2-1で○となっているもの）としては以下の事象がある。

#### (1) 炉心支持構造物の疲労割れ

プラントの起動・停止時等に発生する1次冷却材の温度、圧力及び流量変化により疲労が蓄積する可能性があることから、経年劣化に対する評価が必要である。

#### (2) ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れ

仏国における1988年のブジェー（Bugey）発電所2号炉及びその後の類似プラントにおいて確認されたバッフルフォーマボルトの損傷事例及び1998年に米国で確認された同様の事例より、高照射領域にある高応力のステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れの可能性が考えられるため、経年劣化に対する評価が必要である。



### 2.2.3 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象

以下の事象（表2.2-1で△又は▲となっているもの）については、想定される経年劣化事象であるが、

- 1) 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
- 2) 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、又は進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象

に該当するものについては、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではないと判断した。

上記の1)又は2)に該当する事象であるが、保全によりその傾向が維持できていることを確認している事象（日常劣化管理事象）を以下に示す。

#### (1) 上部炉心支持柱等のステンレス鋼の応力腐食割れ

ステンレス鋼の上部炉心支持柱等は、応力腐食割れが想定される。

しかしながら、PWRプラントの1次冷却材の水質は、溶存酸素濃度5ppb以下に管理しており、ステンレス鋼の応力腐食割れが発生する可能性は小さい。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

なお、水中テレビカメラによる目視確認により、機器の健全性を確認している。

(2) 上部炉心支持柱等の高サイクル疲労割れ

炉内構造物のうち、1次冷却材高速流れにさらされている下部炉内構造物の炉心槽、上部炉内構造物の上部炉心支持柱と制御棒クラスタ案内管において、流体によるランダム振動が発生し、上部炉心支持柱と制御棒クラスタ案内管に繰り返し応力が生じることから、高サイクル疲労割れが発生する可能性が考えられる。

しかしながら、3ループプラントを対象に1/5スケールモデルを用いた流動試験結果をもとに玄海3号炉について評価した結果、高サイクル疲労に対して問題ないことを確認している。

また、1999年7月に敦賀2号炉の再生熱交換器連絡管において、温度の異なる1次冷却材の合流による温度ゆらぎ（サーマルストライピング）が生じ、高サイクル熱疲労による疲労割れが発生しているが、炉内構造物において温度の異なる1次冷却材が合流する炉心槽出口ノズル部、上部炉心支持板及び制御棒クラスタ案内管等については、最大の温度差を考慮しても発生応力が疲労限より小さいため、高サイクル疲労割れ発生の可能性はない。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

なお、水中テレビカメラによる目視確認により、機器の健全性を確認している。

### (3) 炉心槽の中性子照射による靱性低下

炉心槽に使用しているステンレス鋼は、中性子照射により靱性低下等の機械的特性が変化する。

中性子照射による靱性低下は、従来より原子炉容器を中心に検討評価されてきている。原子炉容器に使用されている材料はフェライト系の材料であり、この材料は中性子照射によって、関連温度の上昇や上部棚吸収エネルギーの低下が顕著なため、従来から重要な経年劣化事象として評価されている。

一方、炉心支持構造物であり強度上重要な炉心槽に使用されている材料はオーステナイト系の材料であって、フェライト系材料とは金属結晶構造が異なり、靱性が高い材料である。しかし、(財)発電設備技術検査協会の「平成8年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」によるとオーステナイト系照射ステンレス鋼の破壊靱性値  $J_{IC}$  試験の結果、図2.2-1に示すように、中性子照射に対して、靱性値の低下が認められる。

しかしながら、中性子照射による脆化が進行しても材料の脆化のみでは不安定破壊は発生せず、炉内構造物に有意な欠陥が存在しなければ、不安定破壊を起こす可能性は小さいと考える。なお、炉心槽溶接部は、応力集中がなく照射量が少ないため、「(社)日本機械学会 維持規格 (JSME S NA1-2012)」に基づく評価では、照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性は小さい。

さらにここで、万一有意な欠陥が存在すると仮定し、地震発生時のき裂安定性評価を実施した。想定欠陥は、「(社)日本機械学会 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」を準用し深さを板厚の  $1/4$ 、長さは板厚の  $1.5$  倍の表面欠陥を周方向に仮定した (図2.2-2)。平板中の半楕円表面き裂の応力拡大係数  $K$  を求める  $Raju-Newman$  の式 (Raju, I.S. and Newman, J.C., Jr., NASA Technical Paper 1578, 1979.) を用いて想定欠陥の応力拡大係数  $K$  を算出した結果、 $6.5 MPa\sqrt{m}$  となった。一方、図2.2-1中の  $J_{IC}$  最下限値  $14 kJ/m^2$  から、換算式により破壊靱性値  $K_{IC}$  を求めると  $51 MPa\sqrt{m}$  となる。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)}} \times J_{IC}$$

$E$  : 縦弾性係数 (173,000 MPa at 350°C)

$\nu$  : ポアソン比 (0.3)

$J_{IC}$  : 破壊靱性値の下限 (14 kJ/m<sup>2</sup> at 350°C)

よって、想定欠陥の応力拡大係数は、破壊靱性値を下回っており、不安定破壊は生じないことを確認した。

また、炉心槽の中性子照射による靱性低下については、定期的に可能な範囲について、水中テレビカメラによる目視確認を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

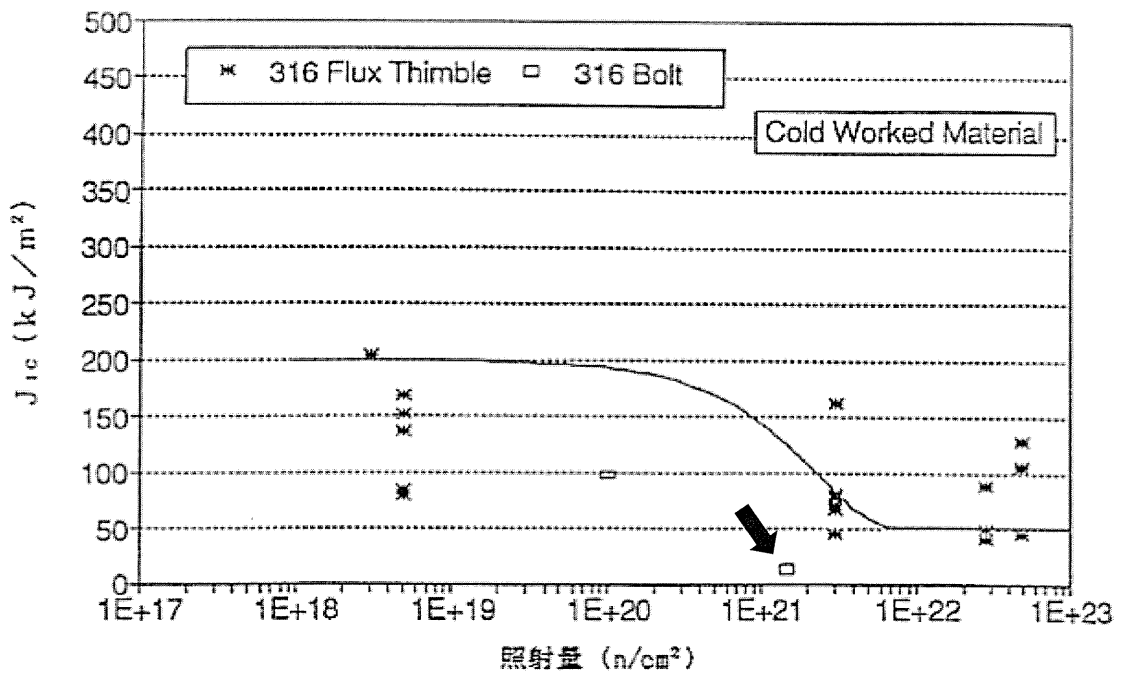


図2.2-1 破壊靱性値  $J_{1c}$  と照射量の関係

[出典：(財)発電設備技術検査協会「平成8年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」]

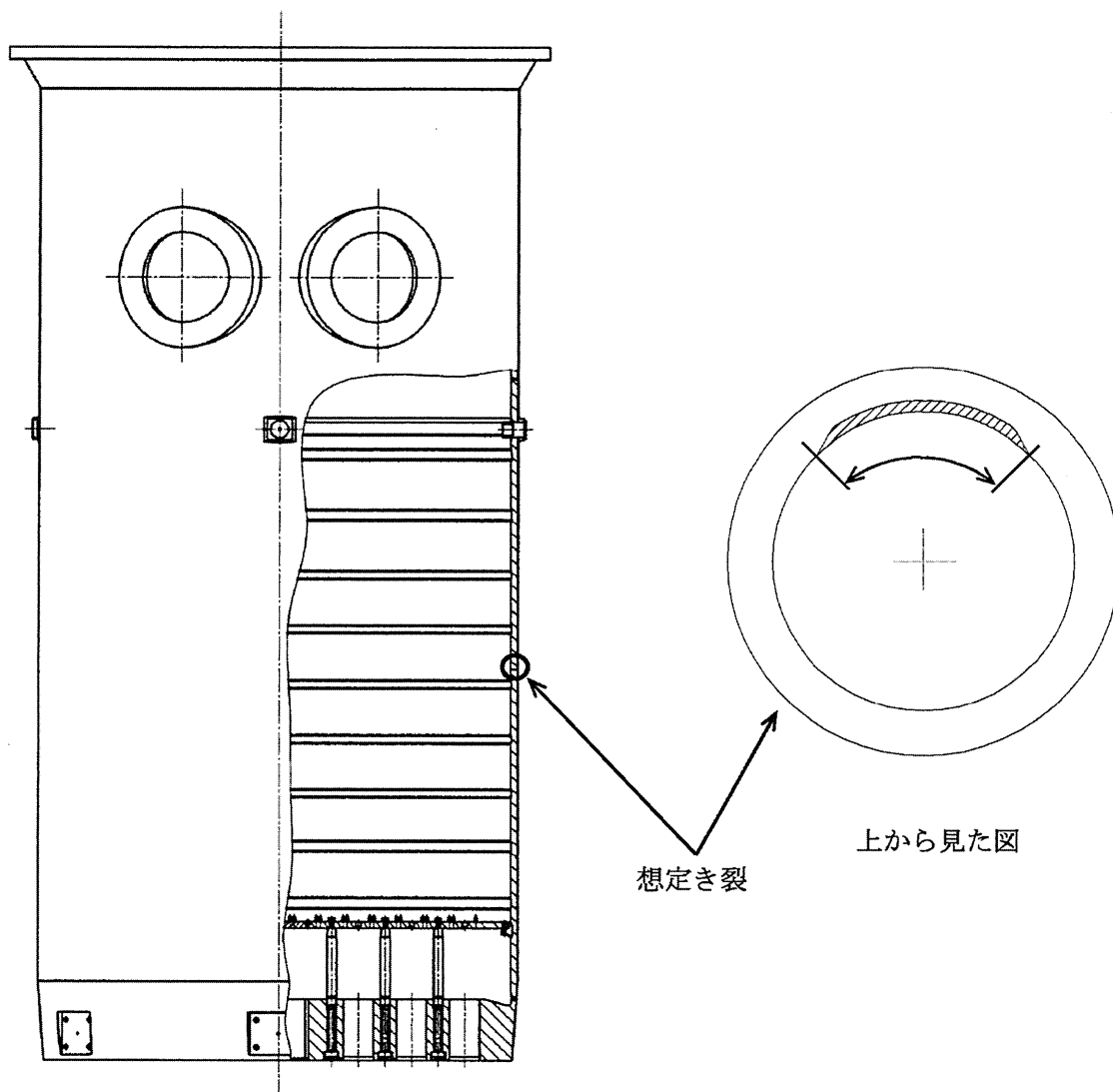


図2.2-2 玄海3号炉 炉心槽ステンレス鋼の中性子照射による靱性低下想定き裂

#### (4) 制御棒クラスタ案内管（案内板）の摩耗

通常運転時の1次冷却材の流れにより、制御棒クラスタ案内管内で制御棒が流体振動を起こす。その結果、制御棒と制御棒クラスタ案内管（案内板）との間で摩耗が発生する可能性がある。

制御棒被覆管については摩耗減肉が認められていることから、長期的には制御棒クラスタ案内管（案内板）側が摩耗する可能性は否定できない。

制御棒クラスタ案内管（案内板）の摩耗により、制御棒の案内機能に影響を及ぼす可能性がある事象としては、制御棒クラスタ案内管（案内板）からの抜け出しが考えられる。制御棒被覆管の摩耗が進行し、径が細くなると、制御棒クラスタ案内管（案内板）から抜け出しやすい状態となる。現行の制御棒の管理では、制御棒被覆管が貫通するまでに制御棒を取り替えることとしており、制御棒被覆管が全部摩耗することはないが、安全側に制御棒被覆管がない状態を想定した場合、抜け出しの可能性が出てくると考えられるのは図2.2-3に示す摩耗長さで68%（管理摩耗長さ）と評価される。

玄海3号炉は第16回定期検査時（2021年度～2022年度）に制御棒クラスタ案内管（案内板）の摩耗データを採取しており、採取時のプラント運転時間と摩耗量の関係から、「(社)日本機械学会 維持規格 (JSME SNA1-2012)」に基づき評価を実施した結果、玄海3号炉の摩耗長さが管理摩耗長さ（68%）に相当する摩耗体積に達するまでの時間は約65万時間と評価される。一方、2022年1月時点の運転実績は約15.6万時間である。

以上より、玄海3号炉の制御棒クラスタ案内管（案内板）の摩耗が制御棒の案内機能に影響を及ぼす可能性はないと考える。

また、制御棒クラスタ案内管（案内板）の摩耗による制御棒の案内機能への影響は、定期的に全制御棒の落下試験を実施しており、挿入時間に問題がないことによりその健全性を確認している。

さらに、運転時間25万時間での摩耗計測を実施予定である。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

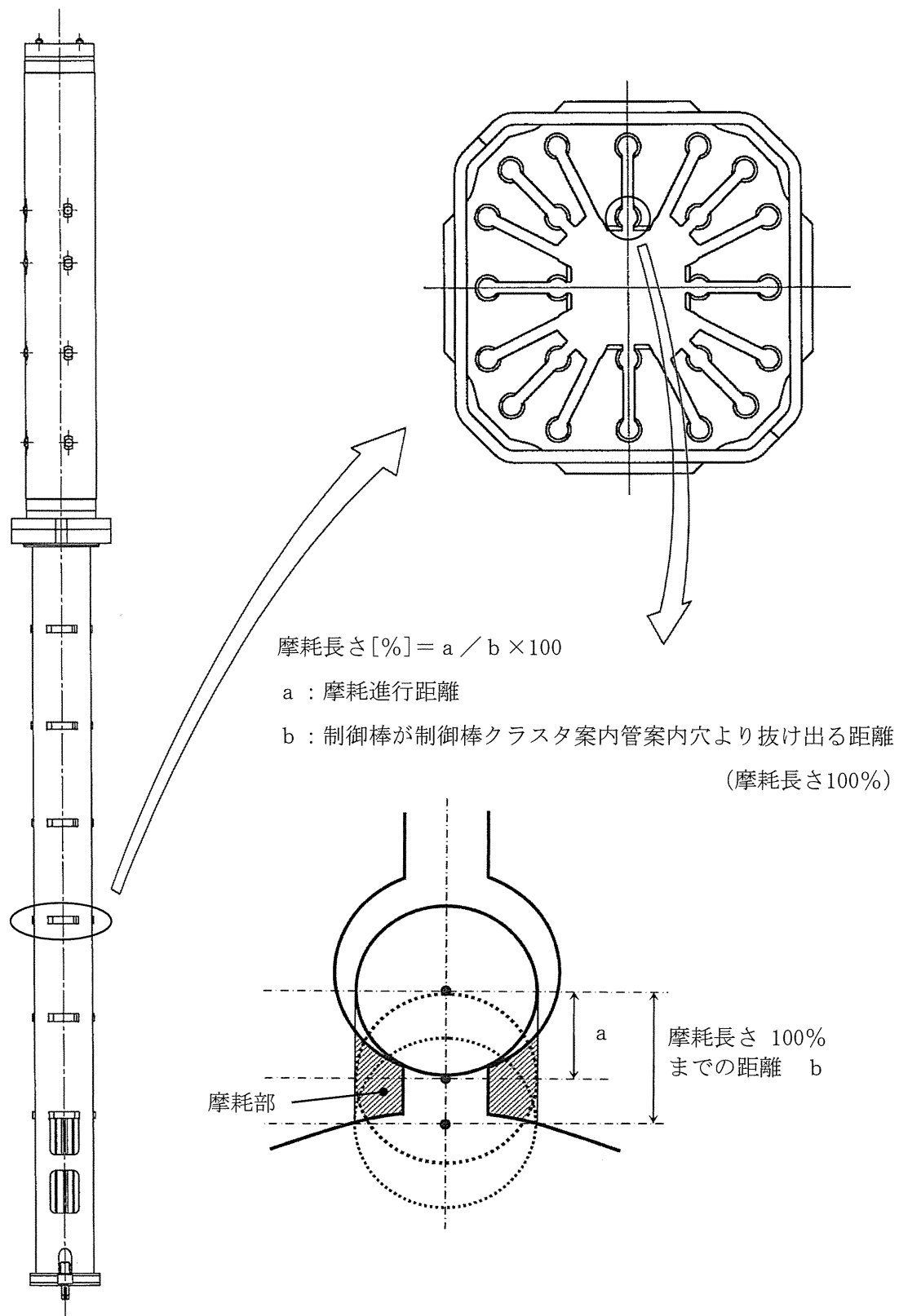


図2.2-3 玄海3号炉 制御棒クラスタ案内管（案内板）摩耗長さ

(5) 支持ピンの応力腐食割れ

ニッケル基合金の支持ピンについては1978年10月美浜3号炉にて応力腐食割れが認められている。

しかしながら、玄海3号炉の支持ピンは、応力腐食割れ感受性低減のため、新熱処理材応力低減化構造としていることから、応力腐食割れが発生する可能性は小さい。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

なお、水中テレビカメラによる目視確認により、機器の健全性を確認している。

(6) 炉内計装用シンプルチューブの摩耗

1981年3月、米国セーレム（Salem）発電所1号炉他で炉内計装用シンプルチューブの摩耗による減肉が認められており、国内でも同様の事象が認められていることから、摩耗が発生する可能性がある。

炉内計装用シンプルチューブの減肉が、シンプルチューブまわりの軸流による流体振動に起因すること等を実スケールによるモックアップテストにより確認している。また、プラント運転時における減肉した炉内計装用シンプルチューブの耐圧健全性を確認するため、実機での減肉形状を模擬して外圧による圧壊試験を行い、限界減肉率を求めている。

一方、摩耗に関する一般知見として、現象が同じであれば単位時間あたりの摩耗体積は一定であり、炉内計装用シンプルチューブ及び炉内計装案内管の各形状（図2.2-4）から、摩耗の進展に応じて、X部・Y部では接触面積が大きくなり、摩耗深さの進展は緩やかになる。

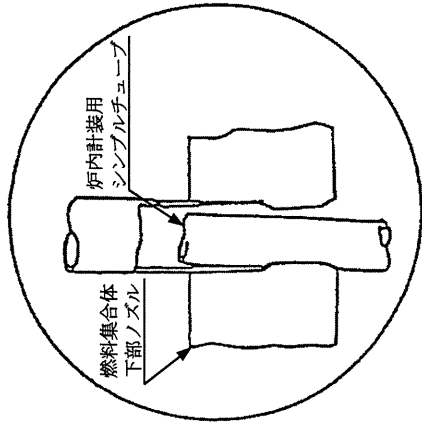
炉内計装用シンプルチューブの摩耗による減肉については、限界減肉率に比べ小さい状態で管理している。

また、炉内計装用シンプルチューブに対しては、定期的に渦流探傷検査により摩耗状況を確認するとともに、必要に応じ、位置変更又は取替えの措置を実施することとしている。

したがって、今後も機能の維持は可能であることから、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。



X 部



Y 部

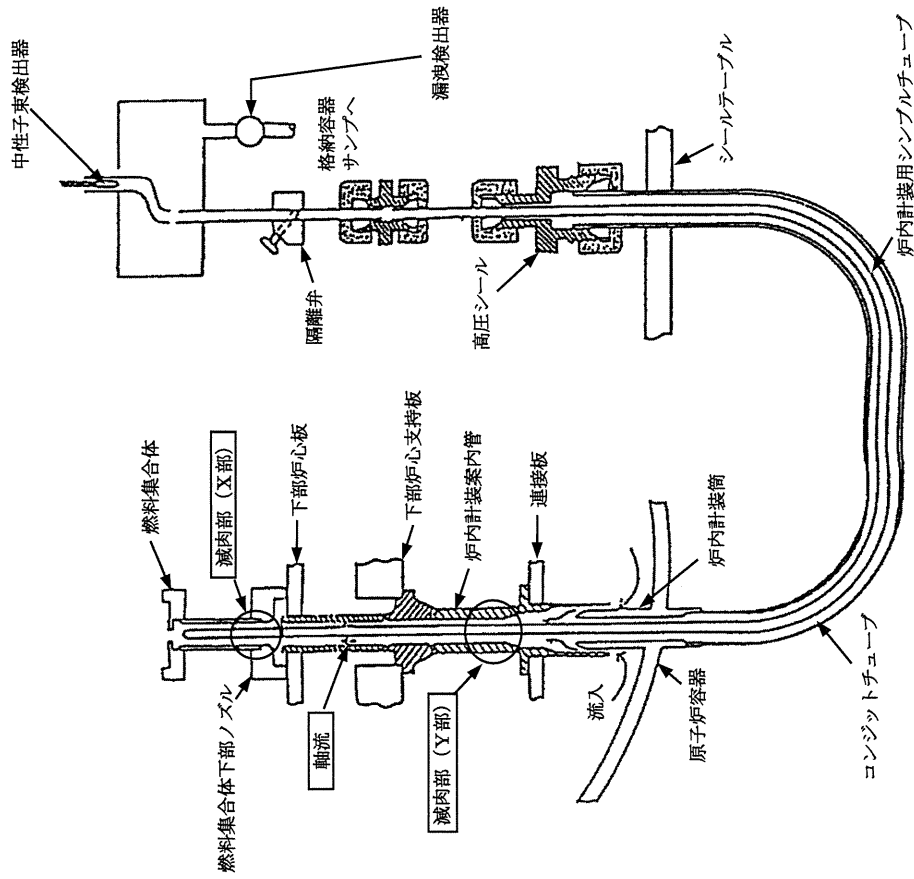
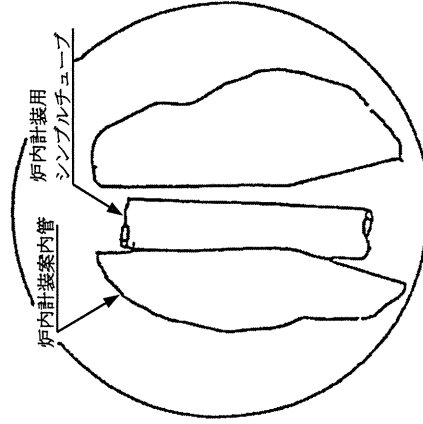


図2.2-4 炉内計装用シンブルチューブ減肉部位及び形状概念図

前述の2)に該当する事象のうち、日常劣化管理事象を除く事象（日常劣化管理事象ではない事象）を以下に示す。

(7) 炉心槽等の照射クリープ

高照射環境下で使用される炉心槽及びバッフルフォーマボルト（ステンレス鋼）には照射クリープが生じる可能性がある。

しかしながら、クリープ破断は荷重制御型の応力発生下で生じるが、荷重制御型応力は微小であり、プラント運転に対し問題とはならない。

したがって、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

(8) 炉心バッフルの照射スウェリング

PWRプラントでの照射スウェリング量は小さく、炉心バッフルの上下に十分な隙間が存在することから、炉心バッフルの炉心形成機能が失われるようなことはなく、また、運転時間が先行している海外PWRプラントでもそのような事例が発生していないため、高経年化対策に有意でない事象と考える。

したがって、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

(9) 押えリングの変形（応力緩和）

プラント運転中の押えリングは、高温環境下で一定圧縮ひずみのまま保持されているため、変形（応力緩和）を起こす可能性がある。

しかしながら、押えリングに使用されているステンレス鋼（ASME SA182 Gr. F6b）は、応力緩和を生じにくい材料である。

したがって、高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない。

表2.2-1 玄海3号炉 炉内構造物に想定される経年劣化事象

機能達成に必要な項目	部 位	消耗品・ 定期 取替	材 料	経 年 劣 化 事 象					備 考	
				摩 耗	腐 食	割 れ	材 質 変 化			そ の 他
							疲 勞 割 れ	熱 時 効		
炉心支持及び炉心位置 決め部材信頼性の維持	上部炉心板		ステンレス鋼			○	△	△		*1: 高サイクル疲労 割れ
	上部炉心支持柱		ステンレス鋼			○	△	△		*2: 高サイクル熱疲労 割れ
	上部炉心支持板		ステンレス鋼			○	△	△		*3: 照射誘起型 応力腐食割れ
	下部炉心板		ステンレス鋼			○	△	△		*4: 中性子照射による 韌性低下
	下部炉心支持柱		ステンレス鋼			○	△	△		*5: 照射スウェリング *6: 照射クリーブ
	下部炉心支持板		ステンレス鋼			○	△	△		*7: 変形 (応力緩和)
	炉 心 槽		ステンレス鋼			○	△	△	▲	
	ラジアルキー		ステンレス鋼							
	上部燃料集合体案内ピン		ステンレス鋼							
	下部燃料集合体案内ピン		ステンレス鋼							
制御棒ラスタ案内構 造信頼性の維持	制御棒ラスタ案内管		ステンレス鋼	△		△	△	△		
	支持ピン		ニッケル合金							
	炉心バツフル		ステンレス鋼						▲	
	炉心バツフル取付板		ステンレス鋼							
	バツフルフォーマボルト		ステンレス鋼						▲	
	バレルフォーマボルト		ステンレス鋼							
	炉内計装用シングルチューブ		ステンレス鋼	△						
	熱遮蔽体		ステンレス鋼							
	熱遮蔽体取付ボルト		ステンレス鋼							
	押えリング		ステンレス鋼							▲

○：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象

△：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象 (日常劣化管理事象)

▲：高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象 (日常劣化管理事象以外)

## 2.3 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象の評価

### 2.3.1 炉心支持構造物の疲労割れ

#### a. 事象の説明

炉心支持構造物はプラントの起動・停止時等による熱過渡を繰り返し受けるため、疲労が蓄積する可能性がある。

#### b. 技術評価

##### ① 健全性評価

炉心支持構造物の健全性評価にあたっては、構造が不連続であり、かつ、変形に対する拘束が大きいため比較的大きな熱応力の発生する部位を対象として「(社)日本機械学会 設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007)」に基づき疲労評価を行った。

評価対象部位の代表箇所を図2.3-1～図2.3-5に示す。

また、使用環境を考慮した疲労評価について「(社)日本機械学会 環境疲労評価手法(JSME S NF1-2009)」に基づき評価した。

疲労評価に用いた推定過渡回数を表2.3-1に示す。なお、2018年度末までの運転実績に基づき推定した2019年度以降の評価対象期間での推定過渡回数を包含し、より保守的に設定した過渡回数とした。

それぞれの代表箇所における評価結果を表2.3-2に示すが、許容値を満足する結果を得た。

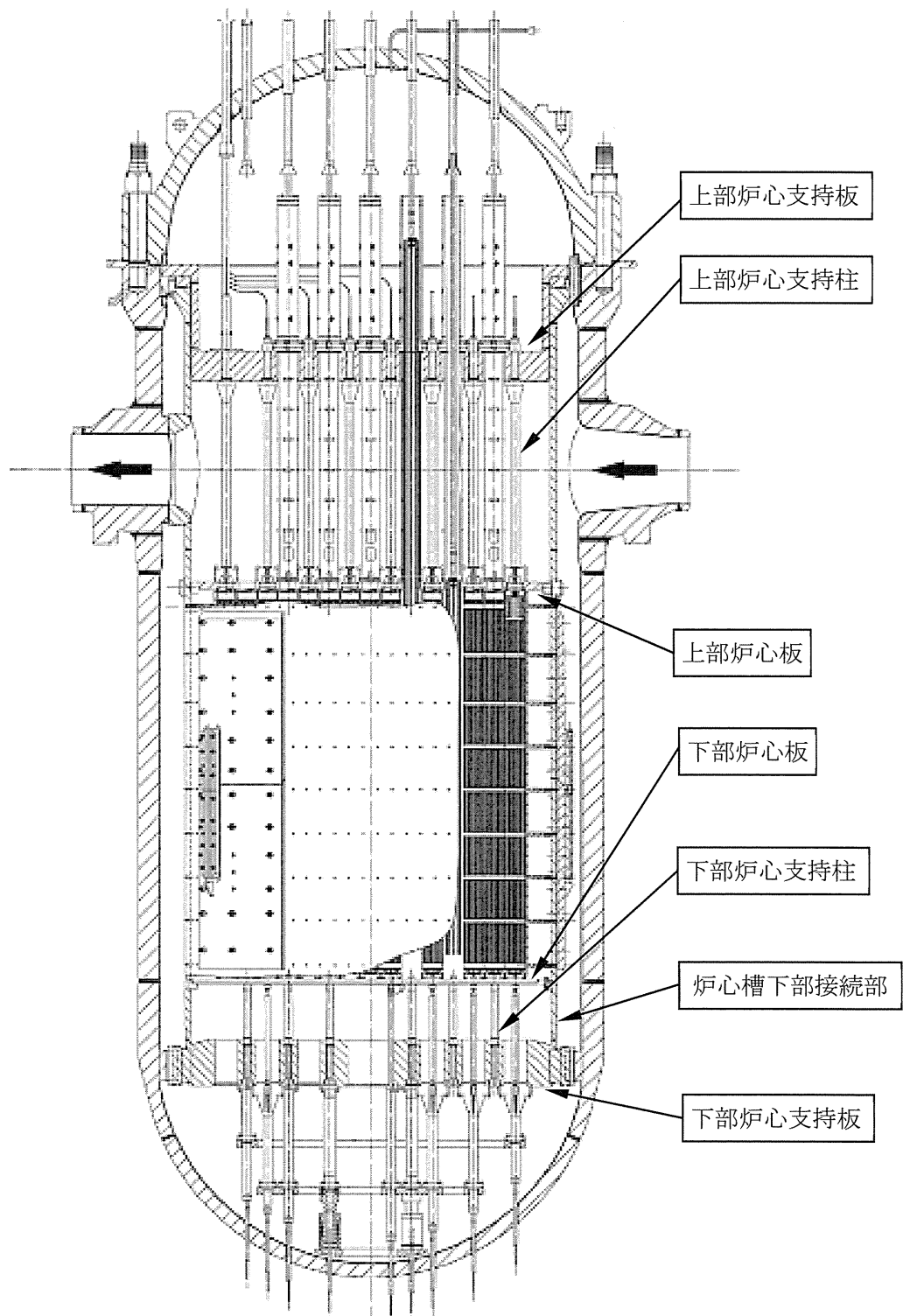


図2.3-1 玄海3号炉 炉心支持構造物の疲労評価対象部位

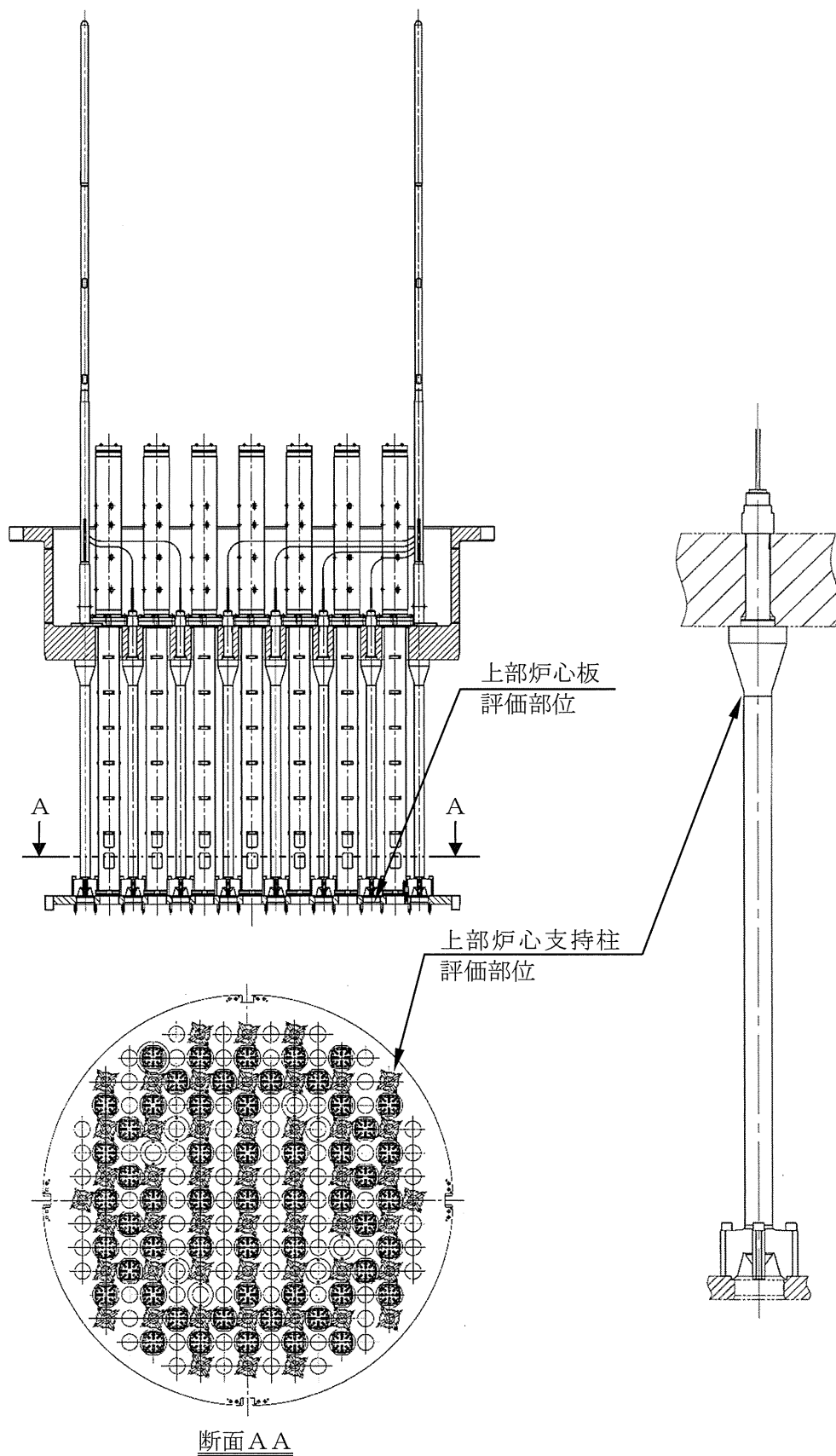


図2.3-2 玄海3号炉 上部炉心支持柱及び上部炉心板疲労評価対象部位

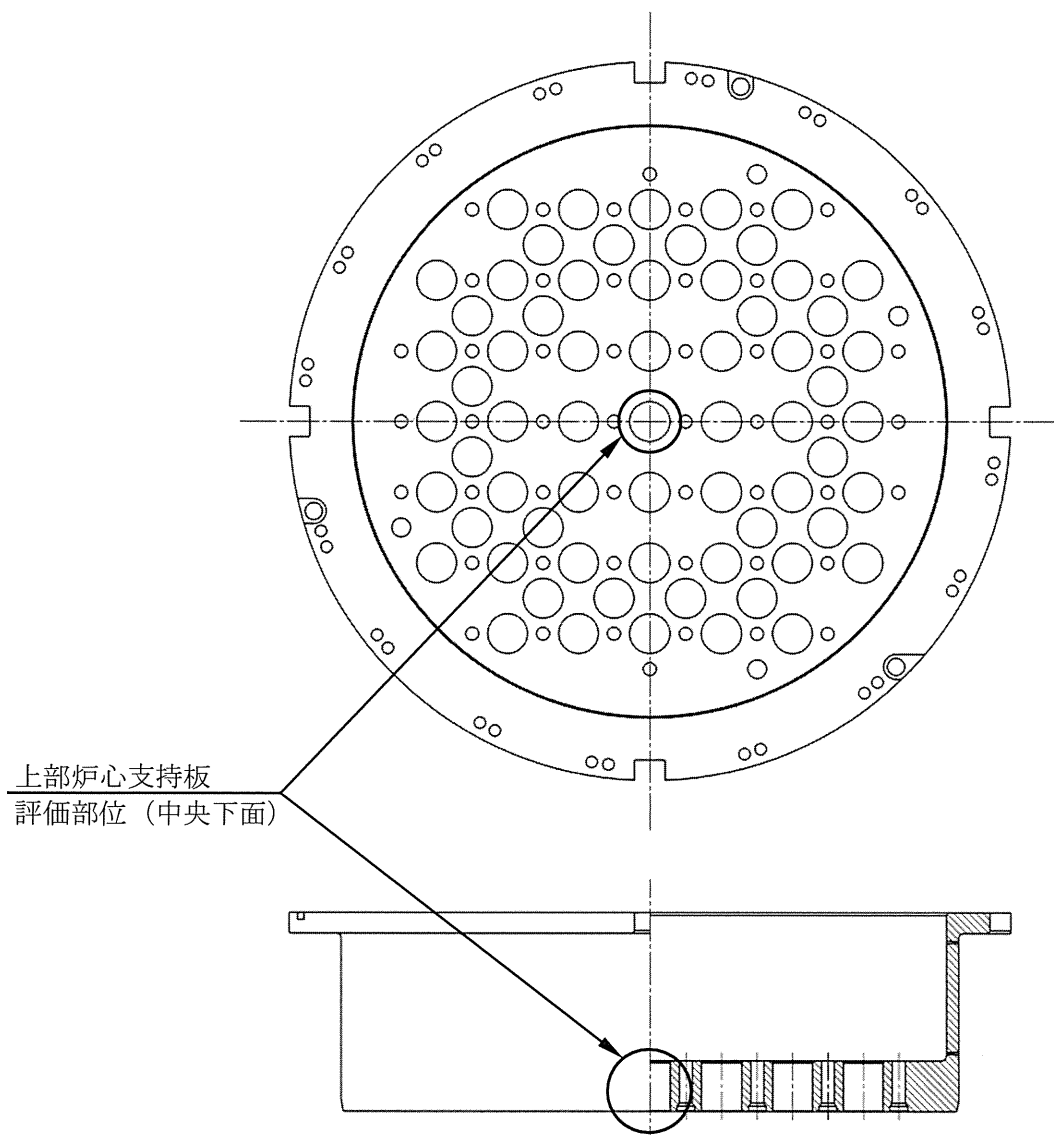


図2.3-3 玄海3号炉 上部炉心支持板の疲労評価対象部位

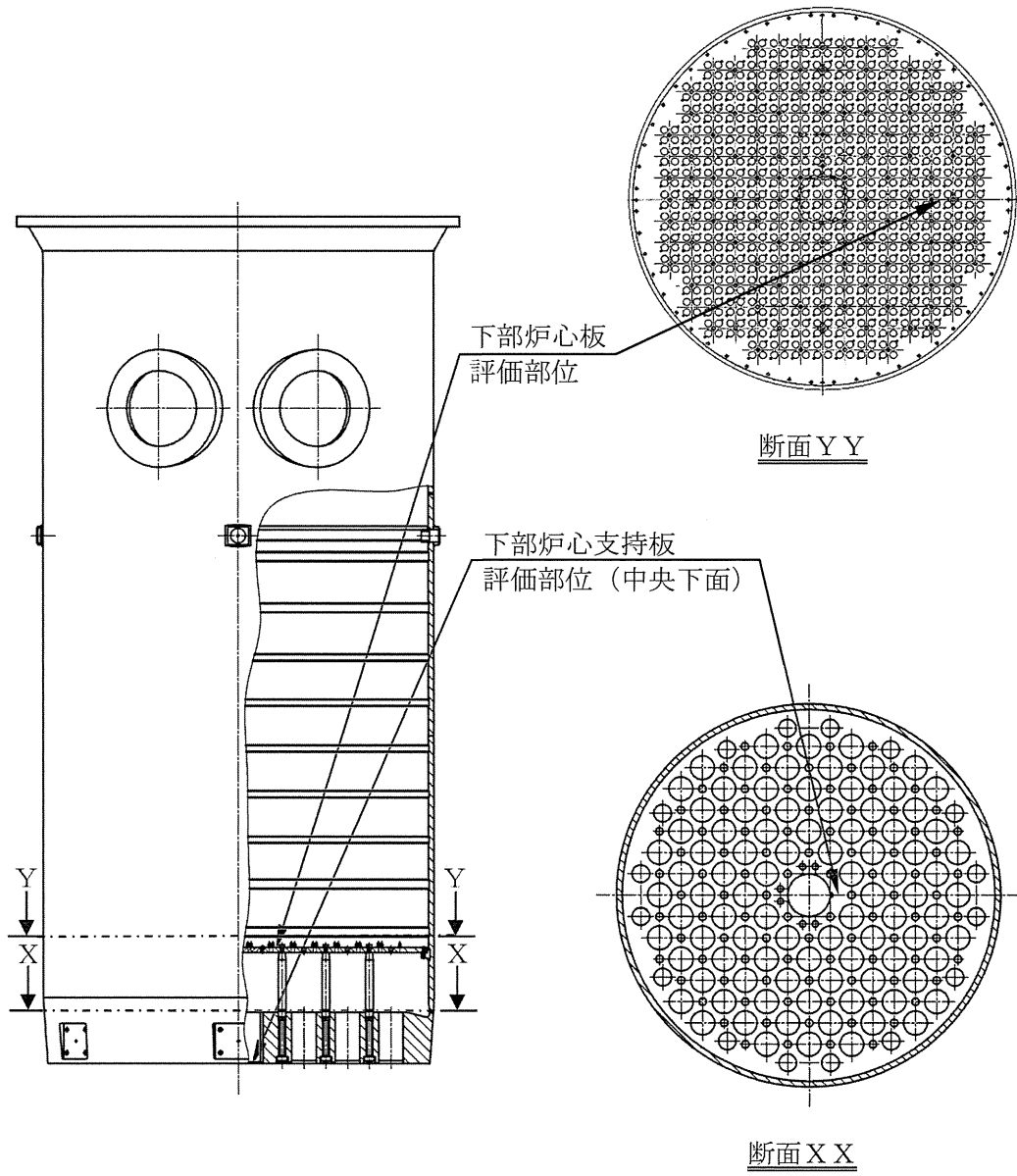


図2.3-4 玄海3号炉 下部炉心支持板及び下部炉心板疲労評価対象部位



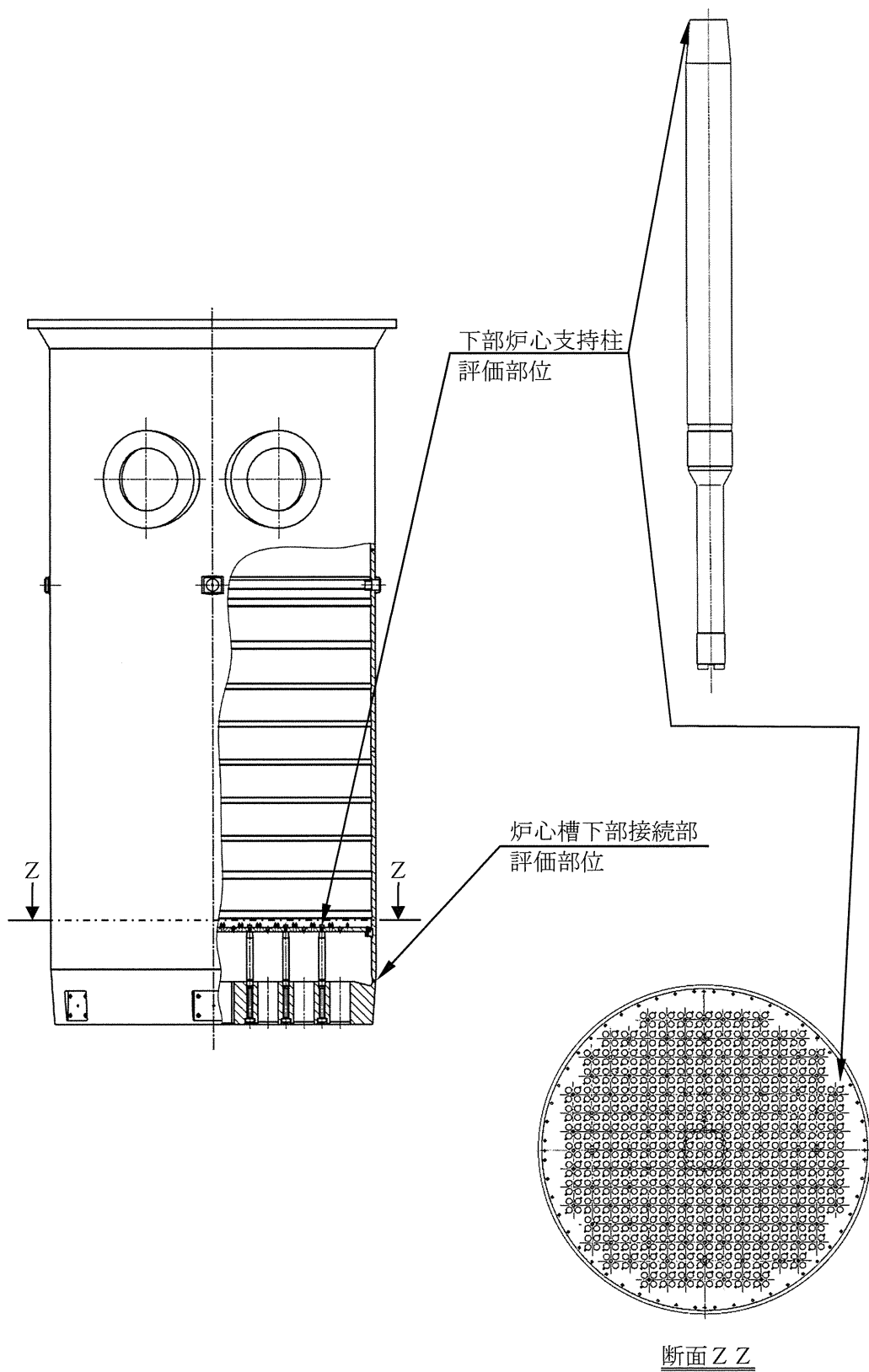


图2.3-5 玄海3号炉 下部炉心支持柱及び炉心槽下部接続部疲労評価対象部位

表2.3-1 玄海3号炉 炉心支持構造物の疲労評価に用いた過渡回数

運転状態 I

過 渡 項 目	運転実績に基づく過渡回数	
	2019年3月末時点	運転開始後60年 時点での推定値
起動 (温度上昇率55.6°C/h)	23	60
停止 (温度下降率55.6°C/h)	22	60
負荷上昇 (温度上昇率5%/min)	201	884
負荷減少 (温度減少率5%/min)	193	876
90%から100%へのステップ状負荷上昇	2	4
100%から90%へのステップ状負荷減少	2	4
100%からの大きいステップ状負荷減少	1	4
定常負荷運転時の変動 <sup>*1</sup>	—	—
燃料交換	15	68
0%から15%への負荷上昇	24	64
15%から0%への負荷減少	17	57
1 ループ停止 / 1 ループ起動		
I) 停 止	0	2
II) 起 動	0	2

運転状態 II

過 渡 項 目	運転実績に基づく過渡回数	
	2019年3月末時点	運転開始後60年 時点での推定値
負荷の喪失	4	7
外部電源喪失	1	5
1次冷却材流量の部分喪失	0	2
100%からの原子炉トリップ		
I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	1	8
II) 不注意な冷却を伴うトリップ	0	2
III) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	0	2
1次冷却系の異常な減圧	0	2
制御棒クラスタの落下	0	3
出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	0	2
1次冷却系停止ループの誤起動	0	2
タービン回転試験	6	6
1次系漏えい試験	21	59

\*1: 設計評価においては、1次冷却材温度は高温側±1.4°C、低温側±2.4°C、1次冷却材圧力+0.39MPa、-0.29MPaの変動があるものとしているが、この過渡項目の疲労累積係数への寄与は小さく、また、実際には通常運転中のゆらぎとして、このような変動は生じていない

表2.3-2 玄海3号炉 炉心支持構造物の疲労評価結果

評価部位	疲労累積係数 (許容値：1以下)	
	設計・建設規格 による解析	環境疲労評価手法 による解析
上部炉心支持板	0.004	0.029
上部炉心支持柱	0.001	0.001
上部炉心板	0.001	0.003
下部炉心板	0.001	0.002
下部炉心支持柱	0.003	0.028
下部炉心支持板	0.001	0.007
炉心槽下部接続部	0.001	0.001

② 現状保全

炉心支持構造物の疲労割れに対しては、定期的に可視範囲について水中テレビカメラによる目視確認を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。さらに、高経年化技術評価にあわせて、実績過渡回数に基づく評価を実施することとしている。

③ 総合評価

健全性評価結果から判断して、疲労割れ発生の可能性はないと考える。

ただし、疲労評価は、実績過渡回数に依存するため、今後も実績過渡回数を把握し評価する必要がある。

また、疲労割れは目視確認にて検知可能であり、点検手法として適切である。

c. 高経年化への対応

炉心支持構造物の疲労割れに対しては、実績過渡回数の確認を継続的に実施し、運転開始後60年時点の推定過渡回数を上回らないことを確認する。

## 2.3.2 ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れ

### a. 事象の説明

ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れの発生要因としては、材料、応力及び環境の3要因が考えられ、運転時間が経過し、非常に高い中性子照射量を受けると応力腐食割れとして顕在化してくる可能性がある。

#### ① 材料要因

ステンレス鋼については、PWR 1次系水質環境においては溶存酸素濃度が低いために、たとえ材料が溶接等の熱影響により鋭敏化していても応力腐食割れ感受性がないことが知られている。

しかしながら、長年の中性子照射によってステンレス鋼の材料特性に経年劣化が生じ、非常に高い中性子照射量を受けたステンレス鋼においては、PWR 1次系水質環境において応力腐食割れ感受性があることが明らかになっている。

#### ② 応力要因

材料が応力腐食割れ感受性を有する場合、熱荷重や外荷重、溶接残留応力等により大きな応力が作用する部位には応力腐食割れが発生する可能性がある。他の応力腐食割れと同様に、照射誘起型応力腐食割れについても、応力腐食割れが発生し破断するまでの時間は応力レベルに依存しており応力が高いほど破断時間の短いことが知られている。

#### ③ 環境要因

PWR 1次系環境下における応力腐食割れの環境要因としては、溶存酸素濃度や塩化物イオン濃度等の化学成分及び温度が重要要因となるが、一般的にPWRの1次系水は、水素注入や脱塩処理により、溶存酸素濃度や塩化物イオン濃度等を極力低減している。

また、定期分析等により十分な水質管理を行っており、水環境の悪化は考え難い。よって、環境要因としては温度が重要要因となる。

温度依存性については温度が高いほど、応力腐食割れ感受性が高くなることが知られている。

b. 技術評価

① 健全性評価

(財) 発電設備技術検査協会の「平成8年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」で得られた照射ステンレス鋼を用いたPWR 1次系水質環境での低ひずみ速度引張試験結果及び電力共同研究の結果をあわせて図2.3-6及び図2.3-7に示す。

325℃の場合、 $1.0^{21} \text{ n/cm}^2 [E > 0.1 \text{ MeV}]$  オーダー以上の中性子照射を受けたステンレス鋼に対して応力腐食割れ感受性が発生している。また、温度が高くなるほどその応力腐食割れ感受性発生の中性子照射量しきい値が低下している。

また、(独) 原子力安全基盤機構「平成20年度 照射誘起応力腐食割れ(IASCC) 評価技術に関する報告書」で得られた照射ステンレス鋼を用いたPWR 1次系水質環境での定荷重応力腐食割れ試験結果を図2.3-8に示す。高応力であるほどき裂発生までの時間が短いことが示されている。

以上の知見を踏まえ、炉内構造物のステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れについて、実機の中性子照射量、応力、温度条件及び海外での損傷事例をもとに、各部に対するき裂発生の可能性の評価を実施し、その結果を表2.3-3に示す。なお、中性子照射量は2020年度以降、設備利用率90%で運転すると仮定して算出している。

これにより、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性に対して検討を要するのは、バッフルフォーマボルトと考える。

バッフルフォーマボルト以外については、バッフルフォーマボルトの評価結果を基準に、相対的な評価を行っている。

○ 炉心バッフル、炉心バッフル取付板

中性子照射量及び温度条件はバッフルフォーマボルトと同等であるが、発生応力レベルが小さいため、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さいと判断した。

○ 炉心槽

温度条件はバッフルフォーマボルトと同等であるが、中性子照射量が小さい。また、炉心槽溶接部の残留応力値を考慮してもバッフルフォーマボルトに比べて発生応力レベルが小さい。したがって、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さいと判断した。

○ 下部炉心板、熱遮蔽体取付ボルト

発生応力レベルはバッフルフォーマボルトと同等であるが、中性子照射量及び温度条件が緩やかであるため、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さいと判断した。

○ 上部燃料集合体案内ピン、上部炉心板、下部燃料集合体案内ピン、下部炉心支持柱、熱遮蔽体

バッフルフォーマボルトに比べて、中性子照射量、発生応力レベル及び温度条件が緩やかであるため、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さいと判断した。

○ バレルフォーマボルト

温度、発生応力レベルはバッフルフォーマボルトと同等であるが、中性子照射量が小さい。また、「(社)日本機械学会 維持規格(JSME S NA1-2012)」によると、照射量、発生応力等を考慮し評価した結果、バッフルフォーマボルトに比べて十分余裕のある損傷予測結果となっており、照射誘起型応力腐食割れの発生の可能性は小さいと判断した。

バッフルフォーマボルトは、多数のボルトによりその機能を維持しており、仏国では一部のバッフルフォーマボルトが損傷しても炉内構造物全体の健全性は残りの健全なバッフルフォーマボルトにより十分確保されるとして適宜点検により損傷本数を確認しながら運転が継続されている。また、米国ではクリティカルボルト(炉心の健全性が確保できる配置、本数のバッフルフォーマボルト)について取替えを実施してきている。

一方、国内では、「(社)日本機械学会 維持規格(JSME S NA1-2012)」に基づくと、バッフルフォーマボルトは縦列に2本のボルトが残存すればよく、ボルト本数全体の約7割が損傷した場合でも炉心の健全性は確保可能であると評価されている。

また、「(社)日本機械学会 維持規格(JSME S NA1-2012)」では、バッフルフォーマボルトの仕様に従い、グループ1～4に分類がなされ、損傷ボルト本数が管理損傷ボルト数(全体の20%)に至るまでの期間として、グループ1では運転時間で約30年、グループ2では運転時間で約50年と評価した損傷予測曲線が示されている。

なお、(独) 原子力安全基盤機構「平成20年度 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」に示されている照射誘起型応力腐食割れ発生に関する評価ガイド(案)及び(社) 原子力安全推進協会「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3版)」に基づく評価をした結果、運転開始後60年時点でボルト損傷は発生せず、安全に関わる機能を維持できることから、炉心の健全性に影響を与える可能性は小さいと考える。

以上より、バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れが炉心の健全性に影響を与える可能性は低いと考えられる。

表2.3-3(1/2) 玄海3号炉 ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れの可能性評価

部 位	実 機 条 件			海外の損傷事例	可 能 性 評 価
	中性子照射量レベル*1 [n/cm <sup>2</sup> ·E > 0.1MeV]	応力レベル*2 (応力支配因子)	温 度 [°C]		
バツフルフオーマボルト	約1×10 <sup>23</sup>	大 〔縮付＋熱曲げ ＋照射スウェリング〕	約325	有	発生の可能性有り。炉心バツフルの照射スウェリングにより応力増加が生じるため、き裂発生の可能性が大きくなる。海外損傷事例もあり最も最も厳しい。
炉心バツフル	約1×10 <sup>23</sup>	小 (熱応力)	約325	無	バツフルフオーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉心バツフル取付板	約1×10 <sup>23</sup>	小 (熱応力)	約325	無	バツフルフオーマボルトよりも応力レベルが小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
バレルフオーマボルト	約9×10 <sup>21</sup>	大 (縮付＋熱曲げ)	約325	無	応力レベルは大きい、バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
炉 心 槽	約1×10 <sup>22</sup>	大*3 (溶接部) (溶接残留応力)	約325	無	溶接残留応力が存在し応力レベルは大きい、バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
上部燃料集合体案内ピン	約2×10 <sup>21</sup>	小 (縮付け)	約325	無	バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量及び応力レベルが小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
上部炉心板	約2×10 <sup>21</sup>	小 (熱応力)	約325	無	バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量及び応力レベルが小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。

\*1：中性子照射量レベルは運転開始後60年時点での各部位の推定最大中性子照射量レベルを示す

\*2：応力レベルは各部位の最大応力値を示す

応力レベル 大：> Sy (非照射材の降伏応力) 中：≒ Sy (非照射材の降伏応力) 小：< Sy (非照射材の降伏応力)  
 バツフルフオーマボルト、バレルフオーマボルト及び熱遮蔽体取付ボルトは、初期縮付応力に加えて炉心バツフル組立体及び炉心槽と熱遮蔽体との組立体の熱変形による熱曲げ応力が作用するため、高応力となる

\*3：炉心槽溶接部の残留応力は大きい、(社) 日本機械学会 維持規格 (JSME S NAI-2012) にて、炉心槽溶接部応力は、照射誘起型応力腐食割れ発生に対し余裕があると評価されている



表2.3-3(2/2) 玄海3号炉 ステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れの可能性評価

部 位	実 機 条 件			海外の損傷事例	可 能 性 評 価
	中性子照射量レベル*1 [n/cm <sup>2</sup> : E > 0.1MeV]	応力レベル*2 (応力支配因子)	温 度 [°C]		
下部燃料集合体案内ピン	約1×10 <sup>22</sup>	小 (縮付け)	約289	無	バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心板	約1×10 <sup>22</sup>	大 (熱応力)	約289	無	応力レベルは大きい、バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量及び温度が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
下部炉心支持柱	約4×10 <sup>21</sup>	中 (曲げ)	約289	無	バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽体	約6×10 <sup>21</sup>	小 (熱応力)	約289	無	バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量、応力レベル及び温度が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。
熱遮蔽体取付ボルト	約6×10 <sup>21</sup>	大 (縮付け+熱曲げ)	約289	無	応力レベルは大きい、バツフルフオーマボルトよりも中性子照射量及び温度が小さいため、バツフルフオーマボルトに比べて発生の可能性は小さい。

\*1：中性子照射量レベルは運転開始後60年時点での各部位の推定最大中性子照射量レベルを示す

\*2：応力レベルは各部位の最大応力値を示す

応力レベル 大：> S y (非照射材の降伏応力) 中：≒ S y (非照射材の降伏応力) 小：< S y (非照射材の降伏応力)  
 バツフルフオーマボルト、バレルフオーマボルト及び熱遮蔽体取付ボルトは、初期締付応力に加えて炉心バツフル組立体及び炉心槽と熱遮蔽体との組立体の熱変形による熱曲げ応力が作用するため、高応力となる

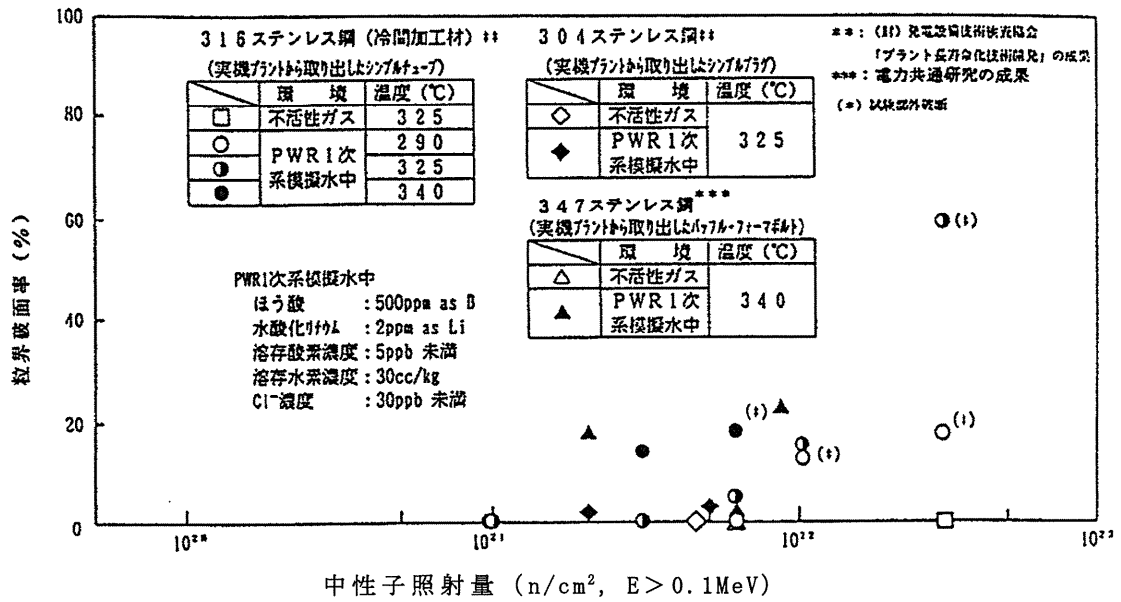


図2.3-6 粒界破面率と照射量の関係

[出典：(財) 発電設備技術検査協会「平成8年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」]

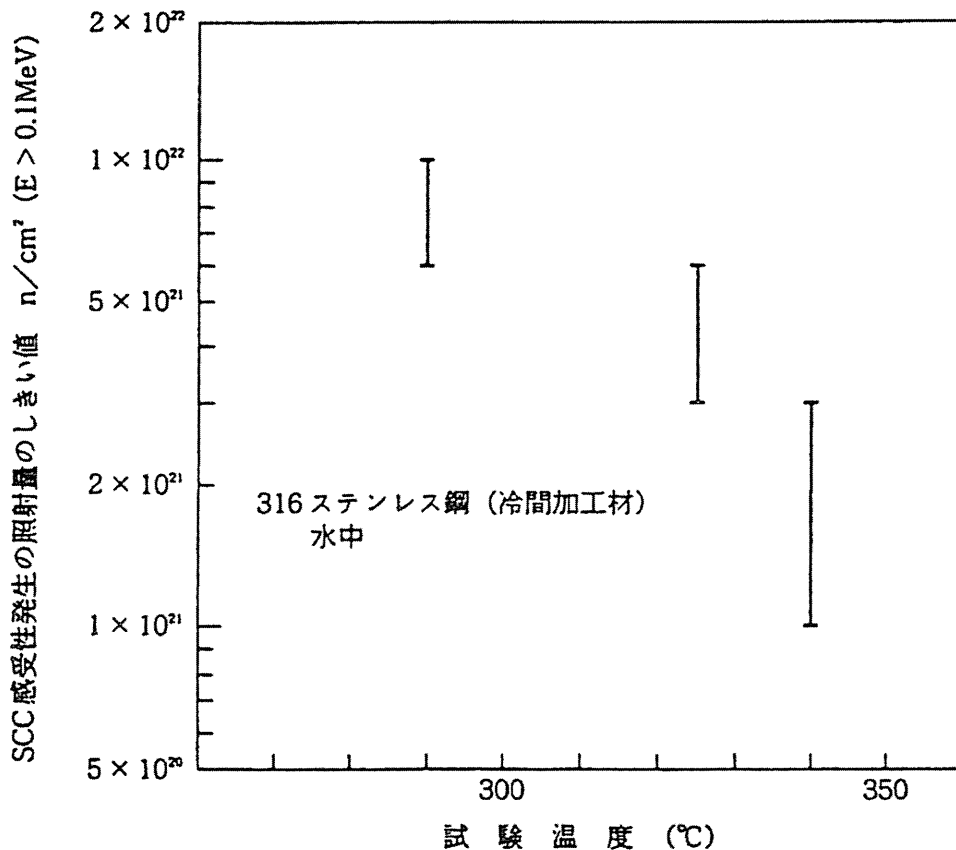


図2.3-7 応力腐食割れ (SCC) 感受性発生の中性子照射量のしきい値と試験温度の関係

[出典：(財) 発電設備技術検査協会「平成8年度 プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書」]

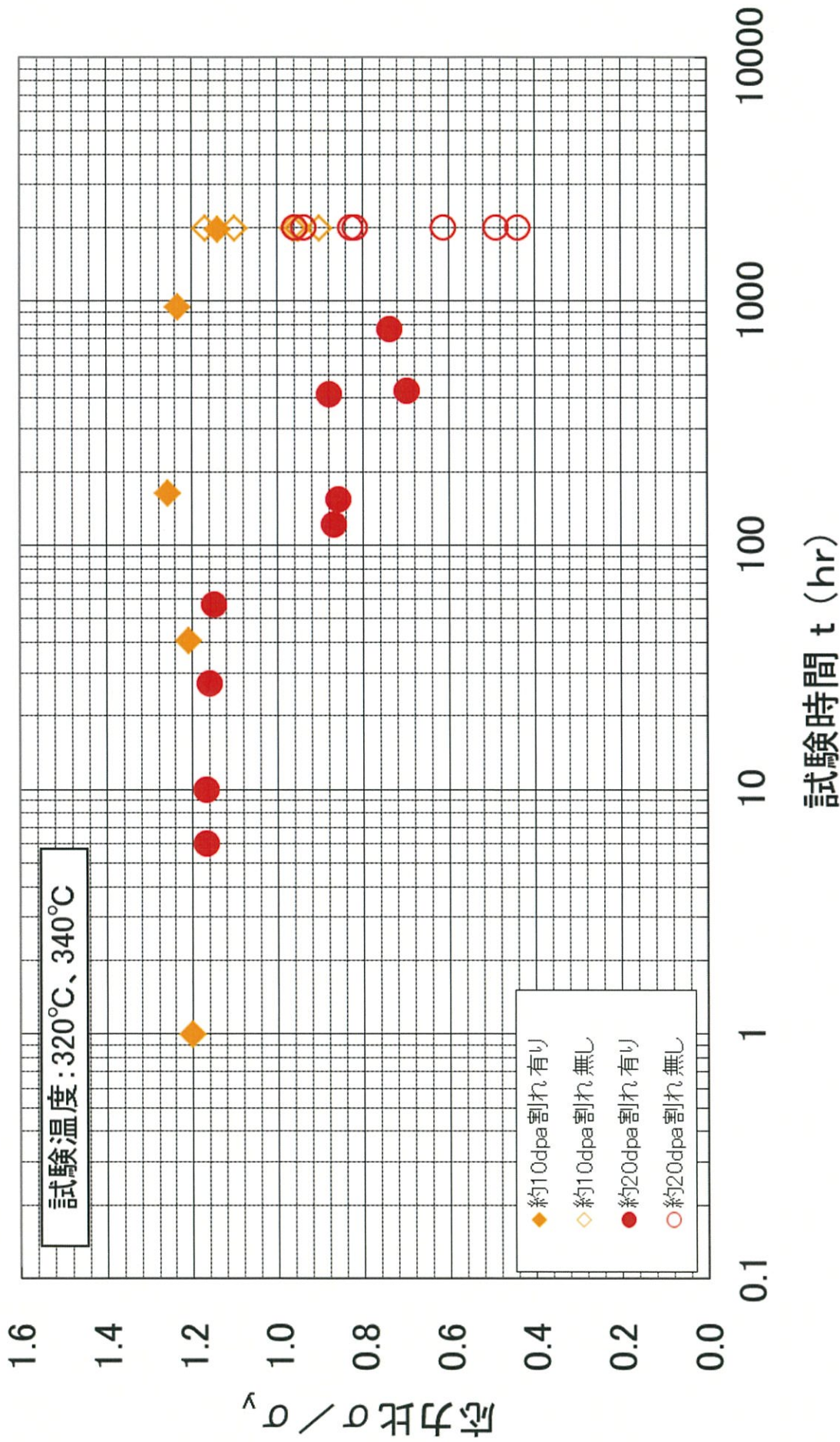


図2.3-8 定荷重応力腐食割れ試験結果 (316ステンレス鋼 (冷間加工材)、 $>1.5 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>)

[出典：原子力安全基盤機構「平成20年度 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」

(パフプロフォーマボルトデータのみプロット)]

② 現状保全

炉内構造物のステンレス鋼の照射誘起型応力腐食割れについては、定期的に可能な範囲について、水中テレビカメラによる目視確認を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。

③ 総合評価

健全性評価結果から判断して、バッフルフォーマボルトについては、損傷発生予測の結果、運転開始後60年時点までに損傷が発生する可能性は小さい。

また、バッフルフォーマボルト以外の部位については、最も厳しいバッフルフォーマボルトの損傷発生予測の結果、運転開始後60年時点までは損傷の可能性は小さいと評価されていることから、照射誘起型応力腐食割れ発生の可能性は小さいと考える。

c. 高経年化への対応

バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れに対しては、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはないと判断する。