

資料3

# 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性について

平成24年1月23日

九州電力株式会社

甲第159号証



# 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性について

## 目次

1. 原子炉容器照射脆化の確認方法
2. 監視試験片（母材）による確認結果
3. 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性評価結果
4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）
5. まとめ

## 1. 原子炉容器照射脆化の確認方法

原子炉容器の中性子照射脆化に係る評価は、原子力安全・保安院により既に技術評価されている以下の技術基準により行う。

- 「原子炉構造材の監視試験方法（JEAC4201-2007）[2010年追補版]」（以下、「JEAC4201-2007」という。）
- 「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法（JEAC4206-2007）」（以下、「JEAC4206-2007」という。）

## 1. 原子炉容器照射脆化の確認方法

### (1) JEAC4201-2007の概要

JEAC4201-2007は、原子炉容器の監視試験片の試験計画(材料、形状、数量、照射条件等)、試験条件、試験結果の記録に関する事項を規定している。

- 試験用カプセルの取り出し時期
- 監視試験片の取り出しスケジュールの規定。
- 監視試験方法
- 監視試験の実施要領及び監視試験データからの関連温度(以下、「 $RT_{NDT}$ 」という。)調整値と上部棚吸収エネルギーの評価要領の規定。
- 中性子照射による $RT_{NDT}$ 移行量及び上部棚吸収エネルギー減少率の予測
- 監視試験データから評価した $RT_{NDT}$ 移行量及び上部棚吸収エネルギーを用いて、これらの値の将来予測をする要領を規定。

## 1. 原子炉容器照射脆化の確認方法

### (2) $RT_{NDT}$ 移行量の予測 (JEAC4201-2007予測法) の概要

- $RT_{NDT}$ 移行量の予測値 ( $\Delta RT_{NDT}$ 予測値) 及び評価に用いる $RT_{NDT}$ 調整値は次式で与えられる (2個以上の監視試験による $\Delta RT_{NDT}$ 実測値がある場合)。

$$RT_{NDT} \text{調整値} = RT_{NDT} \text{初期値} + \Delta RT_{NDT} \text{予測値}$$

$$\Delta RT_{NDT} \text{予測値} = [\Delta RT_{NDT} \text{計算値} + M_C] + M_R$$

$M_C$  : 実測値で補正する場合に用いるマージン(°C)

$M_R$  :  $\sigma_{\Delta R}$  ( $\Delta RT_{NDT}$ 計算値 に対する標準偏差(10°C))

- $\Delta RT_{NDT}$ 計算値は電力中央研究所による文献※を用いて求めることができる。
- $\Delta RT_{NDT}$ 実測値が $\Delta RT_{NDT}$ 予測値を上回った場合には、実測値を包絡するように $M_R$ を定めなおす。  
⇒  $\Delta RT_{NDT}$ 予測値は、 $\Delta RT_{NDT}$ 実測値を包含して安全側に設定される。

※ 電力中央研究所報告 Q06019. (財)電力中央研究所

## 1. 原子炉容器照射脆化の確認方法

### (3) JEAC4206-2007の概要

JEAC4206-2007は、原子炉容器を含む機器について、非延性破壊を防止するための材料の破壊靱性の妥当性を確認しなければならぬ範囲、試験方法及び合格基準等について規定している。

具体的には、JEAC4206-2007の以下の要求に対し問題ないことを評価する。

- JEAC4201-2007予測法により評価された $\Delta RT_{NDT}$ 等を用いて加圧熱衝撃事象に対する評価を実施し、原子炉容器の健全性に問題がないこと。
- 評価された $RT_{NDT}$ を用い、JEAC4206-2007に基づき運転制限を定め、これを満足する様に1次冷却材温度及び圧力を運転管理する。
- 原子炉容器の上部棚吸収エネルギーの予測値は68J以上であること（68Jを下回る場合には追加要求有）。



## 2. 監視試験片（母材）による確認結果

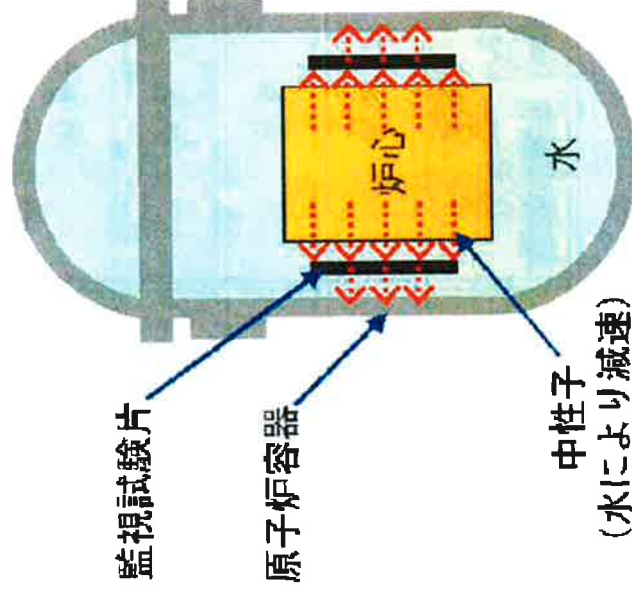
### (1) 監視試験片について

- 原子炉容器と同じ材料でできた監視試験片を、あらかじめ原子炉容器内に装着しておき、この監視試験片を取出して機械試験等を行うことにより、 $RT_{NDT}$ の上昇量を確認する。
- 監視試験片は原子炉容器より炉心に近い位置にあり、将来の影響を先行して確認できる。
- 取出した監視試験片は、専門の調査機関で約1年かけて機械試験等を実施し、健全性評価を行う。
- 監視試験片を収納した容器数は法令要求より余裕を持って装着している。

#### 【玄海1号機の監視試験片を収納した容器数】

|       |     |
|-------|-----|
| 法令要求数 | 4個  |
| 初期装着数 | 6個※ |

※ 取り出し数4個



## 2. 監視試験片（母材）による確認結果

### (2) 照射試験片のRT<sub>NDT</sub>実測値

技術基準の要求に従い算出した、玄海1号機の監視試験片（母材）のRT<sub>NDT</sub>実測値を以下に示す。

| 取出回数 | 取出時期                | 中性子照射量<br>( $\times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> )<br>[E > 1MeV] | 監視試験片の中性子照射量<br>から換算した原子炉容器の<br>相当運転年数※1 | 監視試験片（母材）<br>のRT <sub>NDT</sub> (°C)<br>[実測] |
|------|---------------------|--|--|--|
| 第1回  | 第1回定検<br>(昭和51年11月) | 0.5  | 約5EFPY (昭和57年頃)                          | 35   |
| 第2回  | 第4回定検<br>(昭和55年4月)  | 2.1  | 約20EFPY (平成15年頃)                         | 37   |
| 第3回  | 第14回定検<br>(平成5年2月)  | 3.5  | 約33EFPY (平成31年頃) ※2                      | 56   |
| 第4回  | 第26回定検<br>(平成21年4月) | 6.5  | 約66EFPY (平成72年頃) ※2                      | 98   |

※1 EFPYは定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数。容器内面から板厚1/4の位置で算出。

※2 平成23年度から稼働率0.8として算出(0.8EFPY=1年)

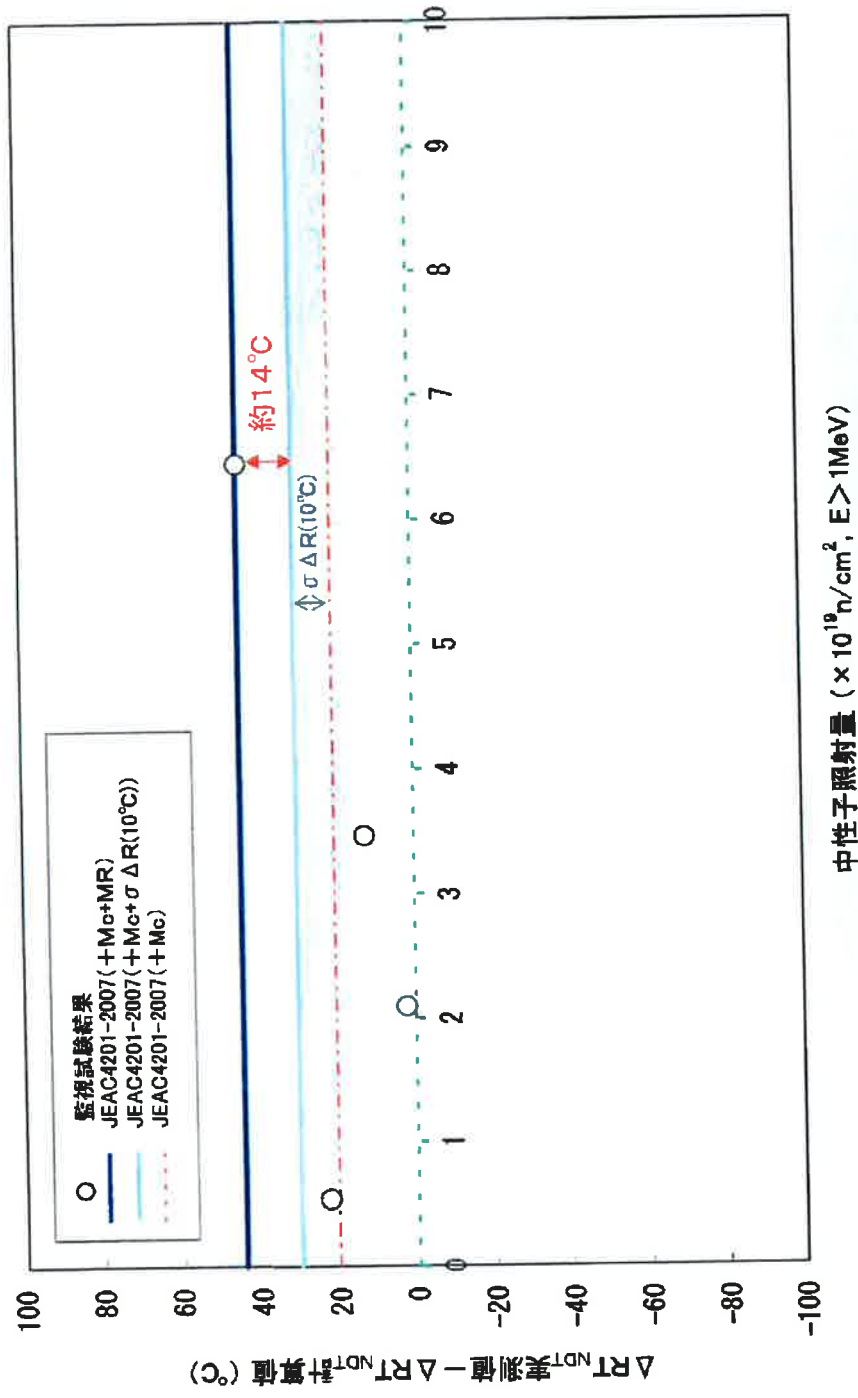
※3 RT<sub>NDT</sub>初期値は、-16°C。



## 2. 監視試験片（母材）による確認結果

### (3) 確認結果（ $\Delta RT_{NDT}$ 予測値と実測値）

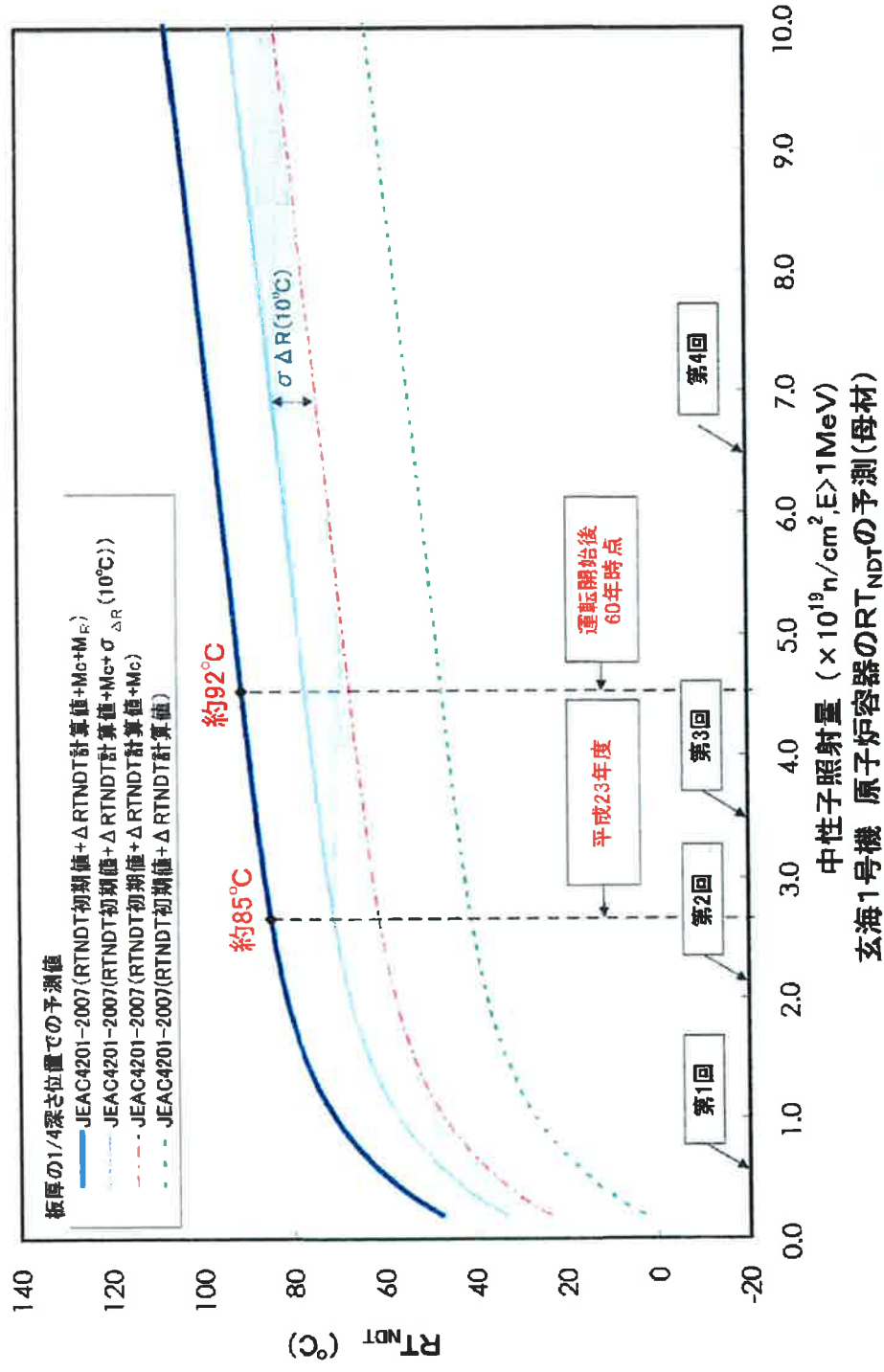
JEAC4201-2007による $\Delta RT_{NDT}$  予測値と監視試験片（母材）の $\Delta RT_{NDT}$  実測値の関係を以下に示す。



## 2. 監視試験片（母材）による確認結果

### (4) 確認結果（JEAC4201-2007予測カーブ）

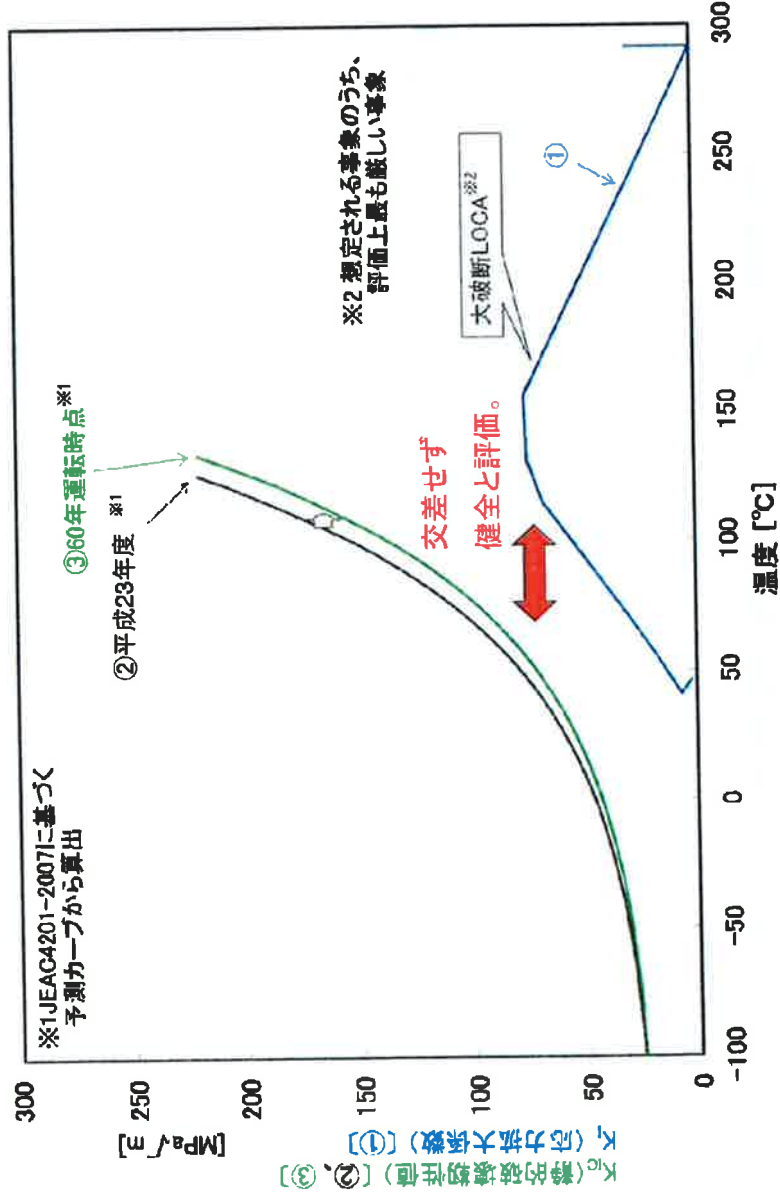
監視試験結果から算出したJEAC4201-2007による $RT_{NDT}$ 予測カーブを以下に示す。



### 3. 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性評価結果

#### (1) 加圧熱衝撃事象に対する評価結果

運転開始後60年を想定しても、材料の持つ粘り強さを示す $K_{IC}$ 曲線 (③ 緑線) は、加圧熱衝撃事象の応力拡大係数 $K_I$ を (① 青線) 上回ることから、脆性破壊は起こらないと評価される。

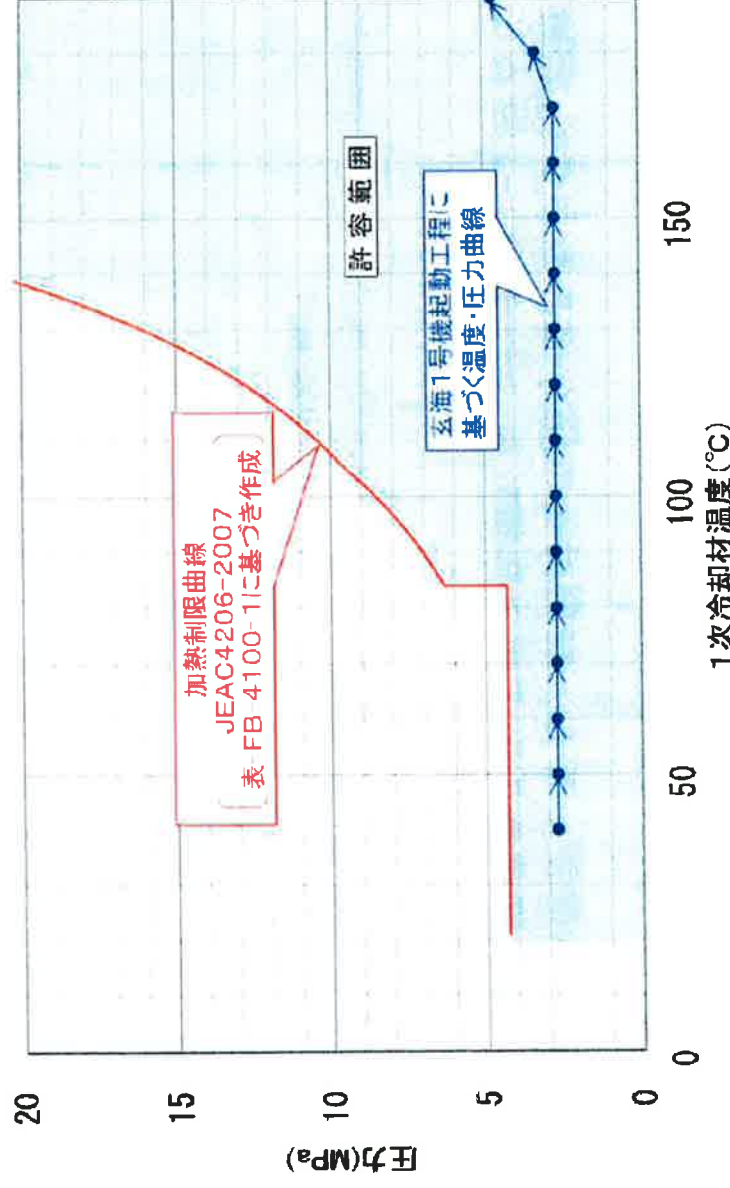


### 3. 玄海原子力発電所 1号機原子炉容器の健全性評価結果

#### (2) 運転管理(1次冷却材温度及び圧力)

- 評価された $RT_{NDT}$ を用い、JEAC4206-2007に基づき運転制限を定め、これを満足するように1次冷却材温度及び圧力を運転管理する。

(参考) 玄海1号機第27回定検(平成22年7月～11月)での起動工程概要(実績)

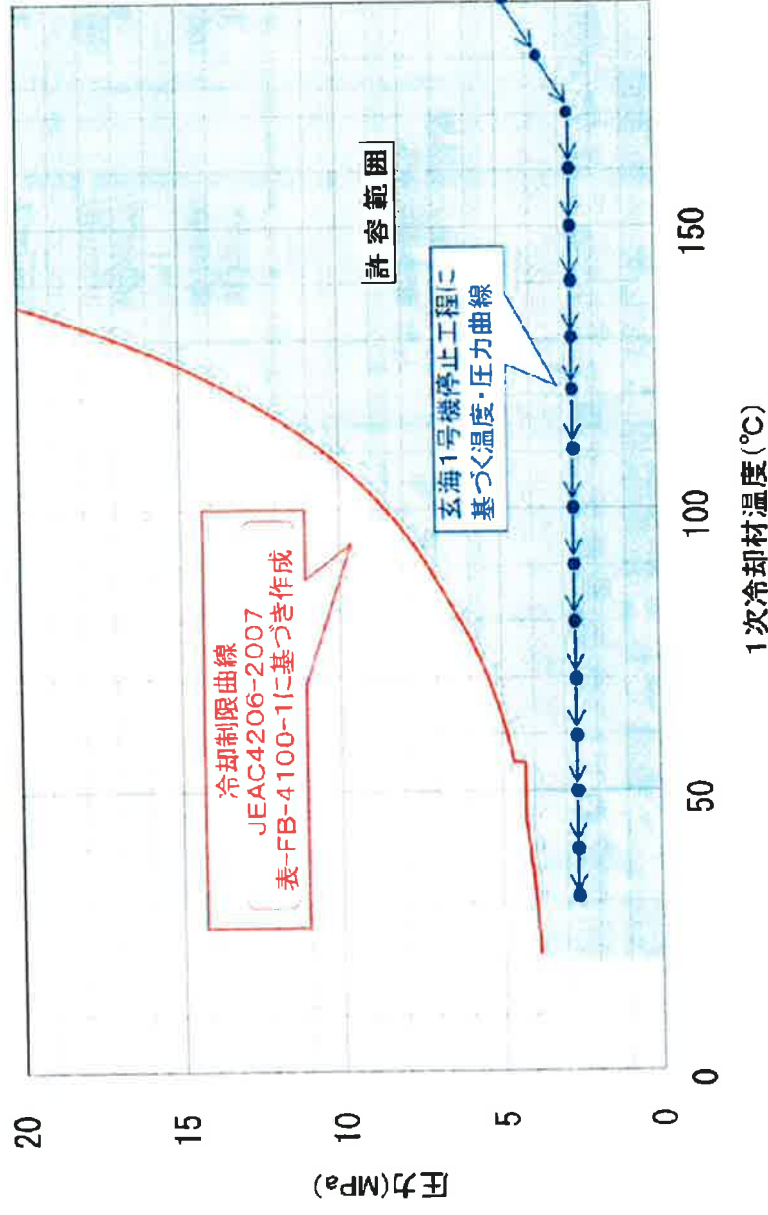


プラント起動時の温度と圧力の管理(玄海1号機 第27回定検の例)

### 3. 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性評価結果

#### (2) 運転管理(1次冷却材温度及び圧力) (続き)

(参考) 玄海1号機第28回定検(平成23年12月～)での停止工程概要(実績)



プラント停止時の温度と圧力の管理(玄海1号機第28回定検の例)



### 3. 玄海原子力発電所1号機原子炉容器の健全性評価結果

#### (3) 上部棚吸収エネルギー(USE)による評価結果

- 60年運転を想定した場合でも上部棚吸収エネルギー予測値は、JEAC4206-2007で定めている基準値を上回っていることから問題ない。  
**[ 上部棚吸収エネルギー予測値 (72J) ≧ 基準値 (68J) ]**

|         | 原子炉容器鋼材        | 母材   | 試験片照射量から換算した相当運転年数     | 備考                  |
|---------|----------------|------|------------------------|---------------------|
|         | 銅含有量 (%)       | 0.12 | —                      | —                   |
|         | USE測定値(初期値)(J) | 103  | —                      | —                   |
| 第1回取出   | USE低下量(J)      | 25   | 約5EFPPY<br>(S57年頃)     | 第1回定検<br>(昭和51年11月) |
|         | USE測定値(J)      | 78   |                        |                     |
| 第2回取出   | USE低下量(J)      | 24   | 約20EFPPY<br>(H15年頃)    | 第4回定検<br>(昭和55年4月)  |
|         | USE測定値(J)      | 79   |                        |                     |
| 第3回取出   | USE低下量(J)      | 29   | 約33EFPPY<br>(H31年頃) ※1 | 第14回定検<br>(平成5年2月)  |
|         | USE測定値(J)      | 74   |                        |                     |
| 第4回取出   | USE低下量(J)      | 22   | 約66EFPPY<br>(H72年頃) ※1 | 第26回定検<br>(平成21年4月) |
|         | USE測定値(J)      | 81   |                        |                     |
| 60年運転相当 | USE低下量(J)      | 31   | —                      | 予測評価                |
|         | USE予測値(J)      | 72   |                        |                     |

※1 : 平成23年度から稼働率0.8として算出(0.8EFPPY=1年)

### 3. 玄海原子力発電所 1号機原子炉容器の健全性評価結果

JEAC4201-2007及びJEAC4206-2007に基づく評価を行い、原子炉容器の健全性は問題ないことを確認した。

- 加圧熱衝撃事象に対する評価結果  
原子炉容器が急冷される事象に対する健全性を、 $\Delta RT_{NDT}$ 等に基づき評価した結果、万一の事故において冷却水が注入され原子炉容器表面が急冷されても、**原子炉容器の健全性に問題ないことを確認した。**
- JEAC4206-2007に基づき運転制限を定め、運転管理を行っていることから**原子炉容器の健全性に問題はない。**
- 上部棚吸収エネルギーによる評価結果  
上部棚吸収エネルギー予測値は基準値を上回っており、**原子炉容器の健全性に問題ないことを確認した。**  
〔上部棚吸収エネルギー予測値 (72J)  $\geq$  基準値 (68J)〕
- 第4回監視試験片 (母材) の $RT_{NDT}$ 実測値 98°Cについて  
 $RT_{NDT}$ 実測値の98°Cは平成72年頃までの運転を想定した場合の原子炉容器の照射脆化の傾向を示すものであり、**原子炉容器が割れる温度ではない。**  
原子力発電所では、確認した $RT_{NDT}$ に基づき1次冷却材の温度及び圧力を管理しながら運転しており、**原子炉容器の健全性に問題はない。**

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### (1) 第4回監視試験結果を受けた対応について

原子炉容器の健全性は、技術基準に基づき評価を行い問題ないことを確認している。しかしながら、第4回監視試験片(母材)の $\Delta RT_{NDT}$  実測値が、JEAC4201-2007による予測値( $+M_C + \sigma_{\Delta R}(10^\circ C)$ )を上回ったことから、その要因について調査検討する。

➤ 監視試験片のミクロ組織観察を行い、JEAC4201-2007の引用文献において、照射脆化に影響を与える主要因として考慮されている溶質原子クラスタ<sup>※1</sup>及びマトリックス損傷<sup>※2</sup>の形成の影響を確認する。

➤ 原子炉容器（母材）の化学成分に大きなバラつきがない事を確認する。

※1 中性子照射で生じる銅等によるクラスタ(かたまり)を、溶質原子クラスタとして扱い、照射脆化に寄与するものとして考慮する。なお、照射脆化に対する溶質原子クラスタの寄与は、体積率の平方根に比例する。

※2 中性子照射で生じる転位ループが、マトリックス損傷として照射脆化に寄与することを考慮する。なお、照射脆化に対するマトリックス損傷の寄与は、数密度の平方根に比例する。

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### (2) JEAC4201-2007での照射脆化メカニズムの概要

- JEAC4201-2007の引用文献による脆化予測式は、照射によるミクロ組織変化（溶質原子クラスター及びマトリックス損傷の形成）から $RT_{NDT}$ 上昇量を計算するものである。脆化予測法モデルの概要を示す。

$$\Delta RT_{NDT} \text{計算値} = ((\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2)^{1/2}$$

$$\Delta T_{SC} = \xi_a \times (\text{溶質原子クラスター体積率})^{1/2}$$

$$\Delta T_{MD} = \xi_b \times (\text{マトリックス損傷数密度})^{1/2}$$

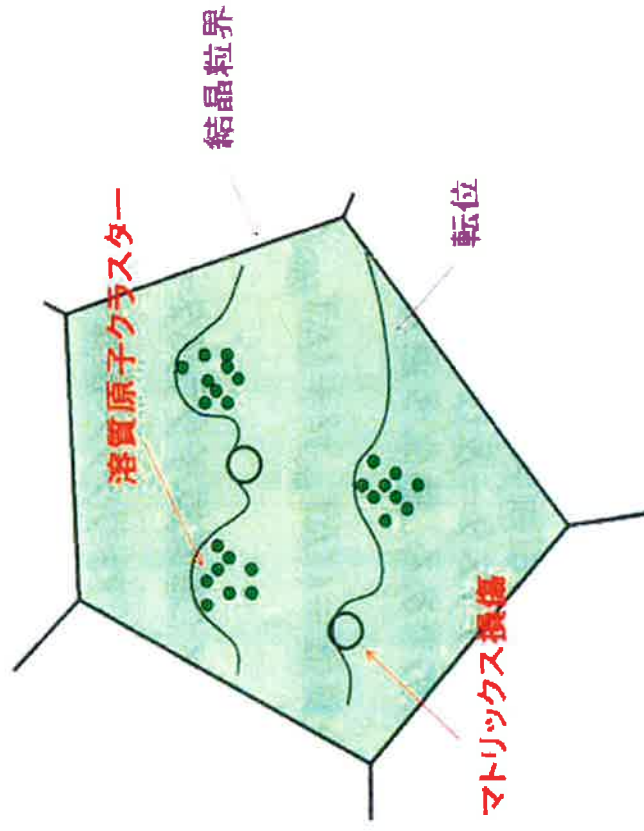
$\xi_a$ 、 $\xi_b$ : 監視試験データに基づいて決定する係数

- 脆化予測式中で用いられる係数は、平成18年12月末までの国内全プラント監視試験データに基づいて決定されている。なお引用文献中では、今後の展望として高照射領域での脆化予測法の精度向上を目指すとしている。

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

(2) JEAC4201-2007での照射脆化メカニズムの概要（続き）

- 照射脆化に影響を与える主要因として考慮されている溶質原子クラスター及びマトリックス損傷のイメージを以下に示す。

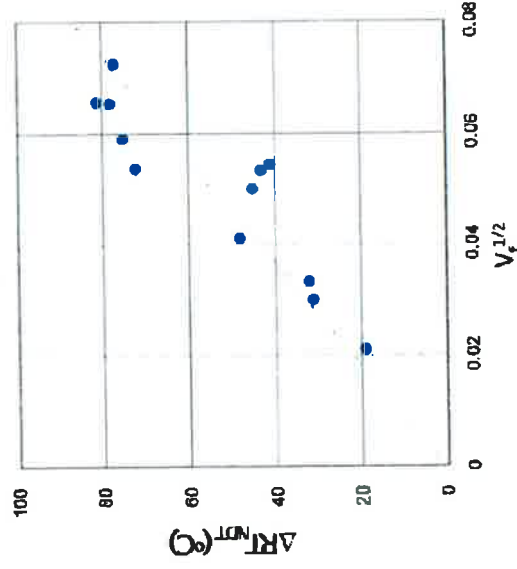




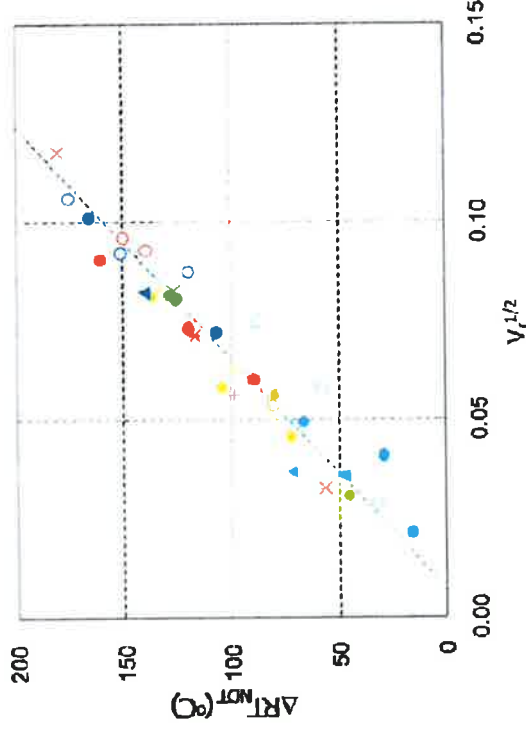
## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### (2) JEAC4201-2007での照射脆化メカニズムの概要（続き）

- 溶質原子クラスターの体積率平方根 ( $V_f^{1/2}$ ) と  $\Delta RT_{NDT}$  の相関については、国内プラントの監視試験データ※1において確認されているのみならず、高照射量領域の脆化予測(PRE)事業のデータ※2においても確認されている。



国内監視試験データ※1



PRE事業データ※2

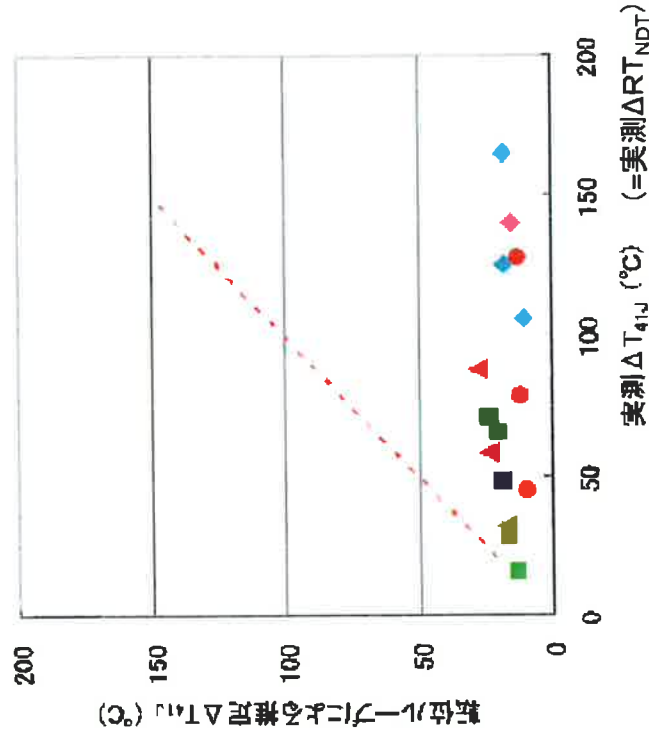
※1 「電力中央研究所報告Q06019, (財)電力中央研究所」より引用

※2 「高線量領域の照射脆化予測に関する報告書, (独)原子力安全基盤機構」より引用

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### (2) JEAC4201-2007での照射脆化メカニズムの概要（続き）

- マトリックス損傷の影響が $\Delta RT_{NDT}$ に寄与する割合は、溶質原子クラスターの影響に比べ低いと考えられている。



PRE事業データ※1

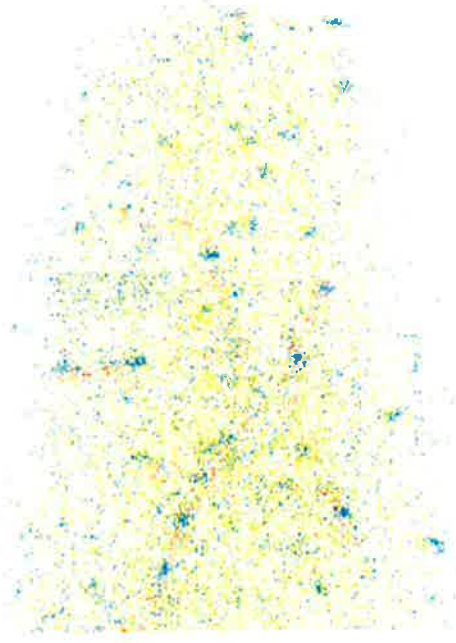
※1 「高線量領域の照射脆化予測に関する報告書, (独)原子力安全基盤機構」より引用

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

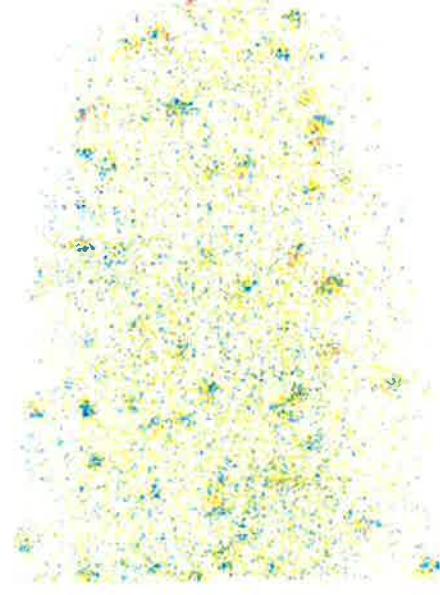
### （3）溶質原子クラスター形成の確認結果

第3回及び第4回の監視試験片（母材）について、脆化要因の一つと考えられている溶質原子クラスター形成を確認する手段の一つとして、アトムプローブ測定法※1にて監視試験片の元素の分布を観察した。

●Cu ●Si ●P  
10nm



第3回監視試験片（溶質原子クラスター）



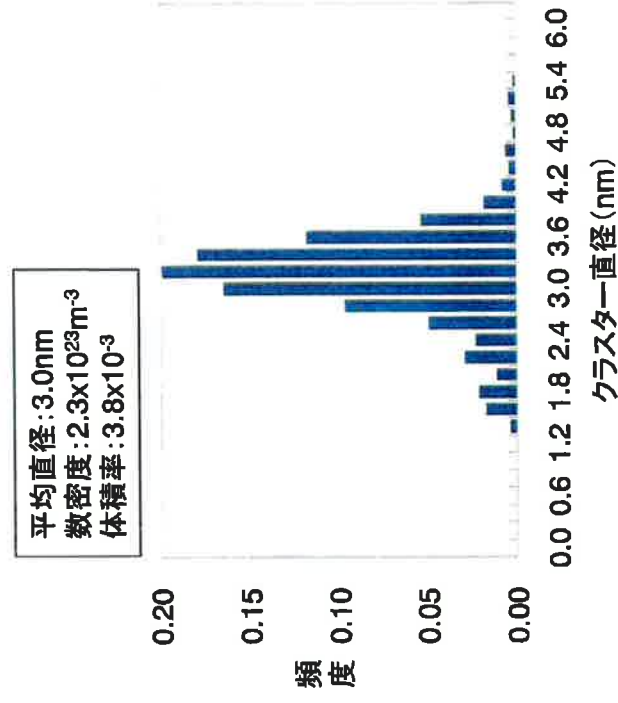
第4回監視試験片（溶質原子クラスター）

※1 アトムプローブ測定法は2006年から実施されている。なお現在保管されているのは第3回及び第4回監視試験片のみ。

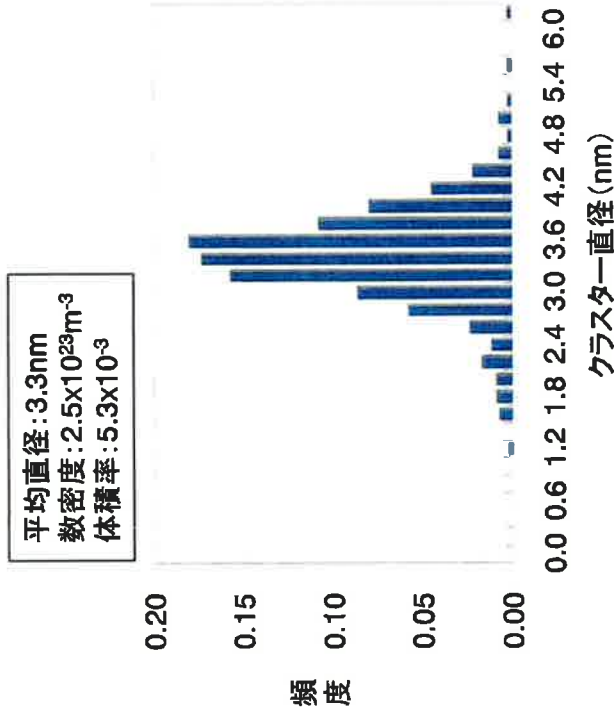
## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### （3）溶質原子クラスター形成の確認結果（続き）

第3回及び第4回の監視試験片（母材）について元素の分布を観察し、溶質原子クラスター体積率等について測定した。



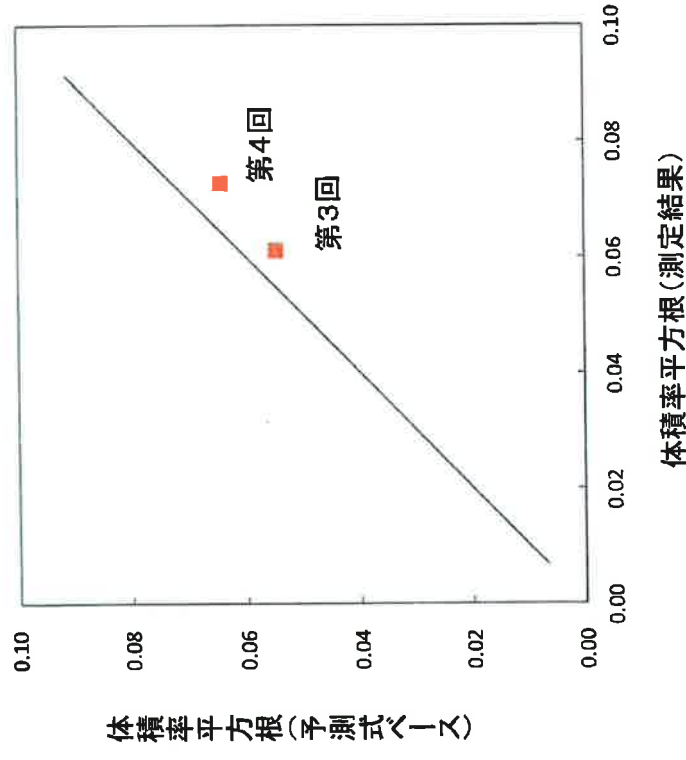
第3回監視試験片（母材）観察結果



第4回監視試験片（母材）観察結果

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

- (3) 溶質原子クラスター形成の確認結果（続き）
- 第3回と第4回監視試験片（母材）の溶質原子クラスターの体積率平方根の測定結果は概ね予測式結果と整合している。
  - 溶質原子クラスターの形成は一定の増加傾向を示しているものの、特異な増加は認められなかった。



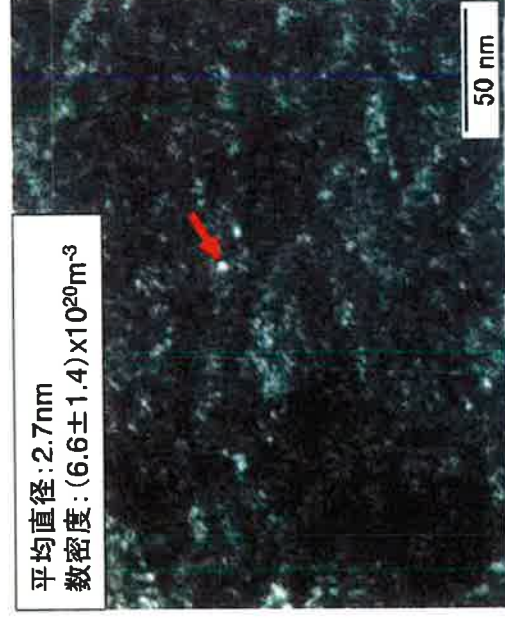


## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

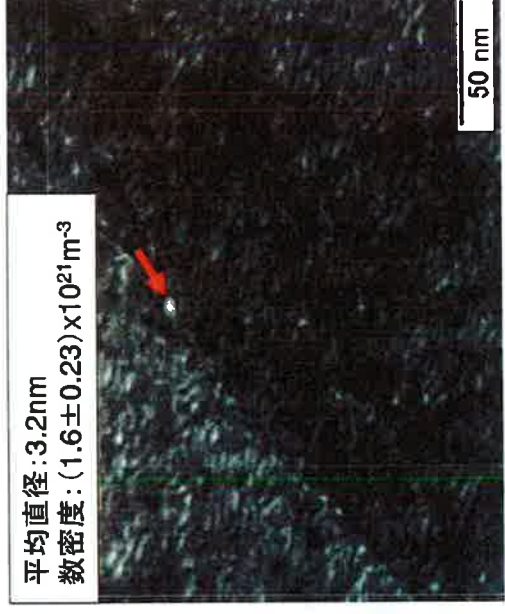
### (4) マトリックス損傷形成の確認結果

第3回及び第4回の監視試験片(母材)について、脆化要因の一つと考えられているマトリックス損傷を把握する手段の一つとして、透過型電子顕微鏡にて形成された転位ループを測定した。

- 監視試験片(母材)の転位ループを測定した結果、数密度( $10^{21}\text{m}^{-3}$ オーダー)は、溶質原子クラスターの数密度( $10^{23}\text{m}^{-3}$ オーダー)に比べ小さく、転位ループの特別な増加は認められなかったことから、脆化への寄与は小さいと考えられる※1。



第3回監視試験片(転位ループ)



第4回監視試験片(転位ループ)

※1 参考としてPRE事業の手法で、第4回測定結果から転位ループによる $\Delta RT_{\text{NDT}}$ を見積もると数°Cから10数°C程度となる(第3回から第4回の上昇としては数°C程度)。

## 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

### (5) 原子炉容器(母材)化学成分の確認結果

- 原子炉容器（母材）の化学成分を確認した結果、現時点では照射脆化に影響を与えることが知られているCu、Ni、Pの成分に大きなバラつきは認められず、JEAC4201-2007の適用範囲にある。

### 玄海1号機 原子炉容器(母材)化学成分

|                                | Cu (mass%) | Ni (mass%) | P (mass%) |
|--------------------------------|------------|------------|-----------|
| 日本製鋼所溶鋼分析※1                    | 0.12       | 0.56       | 0.010     |
| 日本製鋼所製品分析※1                    | 0.12       | 0.57       | 0.012     |
| 三菱重工業製品分析※2                    | 0.12       | 0.56       | 0.010     |
| 【参考】<br>JEAC4201-2007（国内脆化予測法） | 0.25以下     | 0.5~1.1    | 0.025以下   |

※1 鋼材製作時

※2 監視試験片採取時

#### 4. 第4回監視試験結果を受けた取組み（課題）

$\Delta RT_{NDT}$  実測値が、JEAC4201-2007による予測値( $+M_C + \sigma_{\Delta R}(10^\circ C)$ )を上回ったことから、監視試験片のミクロ組織観察等を行い、その要因を調査検討した。結果として、JEAC4201-2007による照射脆化メカニズムを逸脱するような要因は、現時点では認められなかった。

- 原子炉容器（母材）の化学成分のバラつきによる影響は小さいと考えられる。
- アトムプローブ測定法で測定した結果、溶質原子クラスタ一体積率は一定の増加傾向を示しているものの、特異な増加は認められなかった。
- 透過型電子顕微鏡で測定した結果、転位ループ数密度は一定の増加傾向を示しているものの、特異な増加は認められなかった。
- JEAC4201-2007の脆化予測式中で用いられる係数は、平成18年12月末までの国内監視試験データを用いて最適化されており、玄海1号第4回監視試験結果を含め近年得られた高照射領域のデータが考慮されていない。これから拡充される高照射領域データもふまえて、脆化予測式の精度向上に引き続き取り組んでいく。

## 5. まとめ

- (1) 第4回監視試験で得られた $RT_{NDT}(98^{\circ}C)$ に対してJEAC4201-2007及びJEAC4206-2007に基づく評価を行い、**60年の運転を想定しても原子炉容器の健全性は問題ないことを確認した。**
- (2) 原子炉容器（母材）について調査した結果、現時点においてはJEAC4201-2007による照射脆化メカニズムを逸脱するような要因は認められなかった。
- (3) 今後、高照射領域の監視試験片データが拡充されてくるため、脆化予測式中で用いられる係数の見直しも含め、脆化予測式の精度向上に、引き続き取り組んでいく。

(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表1-1 第1回シャルピー衝撃試験結果 (母材) 表1-2 第1回シャルピー衝撃試験結果 (溶接金属) 表1-3 第1回シャルピー衝撃試験結果 (熱影響部)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 100          | 82             |
| 80           | 75             |
| 80           | 75             |
| 60           | 83             |
| 60           | 78             |
| 35           | 39             |
| 35           | 38             |
| 35           | 37             |
| 12           | 37             |
| 10           | 29             |
| -12          | 25             |
| -12          | 15             |

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 100          | 127            |
| 80           | 128            |
| 80           | 123            |
| 60           | 116            |
| 60           | 111            |
| 35           | 101            |
| 35           | 95             |
| 12           | 57             |
| 12           | 56             |
| 10           | 65             |
| -12          | 37             |
| -12          | 34             |

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 40           | 149            |
| 10           | 154            |
| -12          | 120            |
| -12          | 88             |
| -30          | 78             |
| -30          | 67             |
| -55          | 61             |
| -55          | 45             |



(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表2-1 第2回シャルピエ衝撃試験結果(母材)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 130          | 78             |
| 100          | 77             |
| 100          | 76             |
| 75           | 83             |
| 50           | 63             |
| 50           | 60             |
| 50           | 52             |
| 18           | 34             |
| 16           | 33             |
| 16           | 32             |
| -12          | 15             |
| -12          | 14             |

表2-2 第2回シャルピエ衝撃試験結果(溶接金属)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 130          | 28             |
| 100          | 21             |
| 100          | 13             |
| 75           | 15             |
| 50           | 99             |
| 50           | 88             |
| 50           | 88             |
| 18           | 47             |
| 16           | 37             |
| 16           | 30             |
| -12          | 16             |
| -12          | 9              |

表2-3 第2回シャルピエ衝撃試験結果(熱影響部)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 50           | 148            |
| 18           | 158            |
| -12          | 83             |
| -12          | 68             |
| -40          | 76             |
| -40          | 47             |
| -70          | 32             |
| -70          | 9              |

# (参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表3-1 第3回シヤルピ一衝撃試験結果(母材)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 120          | 76             |
| 120          | 76             |
| 120          | 69             |
| 100          | 66             |
| 75           | 52             |
| 75           | 49             |
| 50           | 41             |
| 50           | 35             |
| 25           | 30             |
| 25           | 28             |
| -10          | 8              |
| -10          | 6              |

表3-2 第3回シヤルピ一衝撃試験結果(溶接金属)

| 試験温度<br>°C | 吸収エネルギー<br>[J] |
|------------|----------------|
| 120        | 111            |
| 120        | 102            |
| 120        | 101            |
| 80         | 86             |
| 80         | 85             |
| 50         | 62             |
| 50         | 58             |
| 25         | 39             |
| 25         | 38             |
| 25         | 32             |
| -10        | 19             |
| -10        | 16             |

表3-3 第3回シヤルピ一衝撃試験結果(熱影響部)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 100          | 141            |
| 100          | 135            |
| 60           | 131            |
| 25           | 123            |
| 5            | 64             |
| -10          | 45             |
| -10          | 15             |
| -35          | 23             |

(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表4-1 第4回シャトルビーム衝撃試験結果(圧材) 表4-2 第4回シャトルビーム衝撃試験結果(溶接金属) 表4-3 第4回シャトルビーム衝撃試験結果(熱影響部)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 140          | 87             |
| 140          | 30             |
| 140          | 75             |
| 120          | 66             |
| 120          | 62             |
| 100          | 47             |
| 100          | 44             |
| 100          | 43             |
| 80           | 30             |
| 80           | 17             |
| 60           | 24             |
| 60           | 25             |

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 160          | 127            |
| 160          | 125            |
| 160          | 125            |
| 130          | 119            |
| 100          | 82             |
| 75           | 77             |
| 75           | 66             |
| 50           | 65             |
| 50           | 60             |
| 50           | 45             |
| 25           | 20             |
| 25           | 13             |

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|
| 150          | 170            |
| 150          | 168            |
| 110          | 156            |
| 110          | 123            |
| 80           | 126            |
| 19           | 67             |
| 0            | 33             |
| 0            | 29             |

(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表5-1 照射前シャルピド衝撃試験結果(母材)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] | 試験温度差<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|---------------|----------------|
| 100          | 98             | -12           | 42             |
| 100          | 98             | -12           | 37             |
| 100          | 104            | -12           | 63             |
| 75           | 104            | -30           | 24             |
| 75           | 107            | -30           | 39             |
| 75           | 101            | 30            | 30             |
| 50           | 107            | -50           | 20             |
| 50           | 107            | 50            | 13             |
| 50           | 104            | -50           | 22             |
| 25           | 78             | -75           | 13             |
| 25           | 84             | -75           | 9              |
| 25           | 84             | -75           | 11             |
| 8            | 78             | -100          | 8              |
| 8            | 71             | -100          | 8              |
| 8            | 65             | -100          | 11             |

表5-2 照射前シャルピド衝撃試験結果(溶接金属)

| 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] | 試験温度<br>[°C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 100          | 155            | -12          | 89             |
| 100          | 152            | -12          | 101            |
| 100          | 152            | -12          | 92             |
| 75           | 138            | -30          | 63             |
| 75           | 141            | -30          | 39             |
| 75           | 138            | -30          | 42             |
| 50           | 138            | -50          | 25             |
| 50           | 144            | -50          | 22             |
| 50           | 155            | 50           | 20             |
| 25           | 138            | -75          | 15             |
| 25           | 127            | -75          | 11             |
| 25           | 121            | -75          | 13             |
| 8            | 113            | -100         | 8              |
| 8            | 107            | -100         | 5              |
| 8            | 110            | -100         | 5              |

# (参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表5-3 照射前シャルピエ衝撃試験結果 (熱影響部)

| 試験温度<br>C | 吸収エネルギー<br>[J] | 試験温度<br>[C] | 吸収エネルギー<br>[J] |
|-----------|----------------|-------------|----------------|
| 100       | 194            | 30          | 127            |
| 100       | 202            | -30         | 113            |
| 100       | 164            | -30         | 121            |
| 75        | 188            | 50          | 78             |
| 75        | 188            | -50         | 76             |
| 75        | 202            | -50         | 95             |
| 50        | 183            | -75         | 37             |
| 50        | 194            | -75         | 20             |
| 50        | 188            | 75          | 50             |
| 8         | 167            | -100        | 15             |
| 8         | 170            | -100        | 15             |
| 8         | 183            | -100        | 22             |
| -12       | 155            | -125        | 8              |
| -12       | 152            | -125        | 8              |
| -12       | 144            | -125        | 8              |

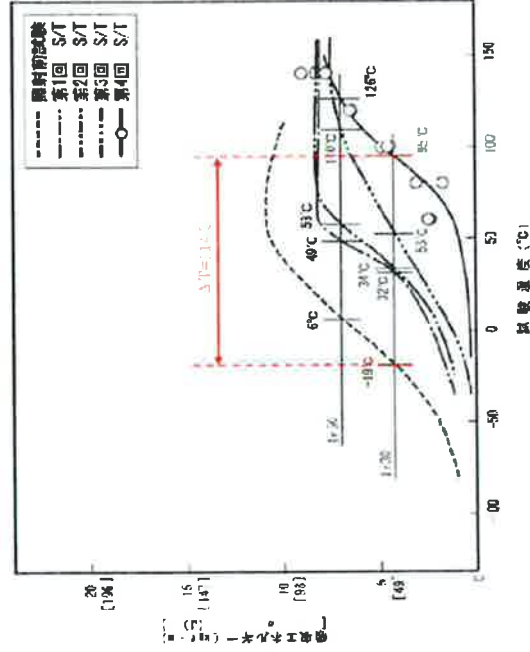


図 玄海1号機照射前～第4回シャルピエ衝撃特性 (母材)

T:30 : 衝撃試験において4Jの吸収エネルギーを示す遷移温度のことをいう。  
 T:50 : 衝撃試験において68Jの吸収エネルギーを示す遷移温度のことをいう。

○: 第1回試験片の開速温度 (脆性遷移温度)

第4回試験片の開速温度:  
 - 開速温度初期値(-10C) + 温度移行量ΔT(114C) = -95C

- ※1 : 開速温度は、開速温度初期値に温度移行量ΔTを加算することで算出する。
- ※2 : 開速温度初期値は、落重試験及びシャルピエ衝撃試験を両方実施して算出する。
- ※3 : 温度移行量ΔT = 照射前試験と第4回試験のシャルピエ衝撃試験による吸収エネルギー差に相当する温度の差 = 95C (-19C) = 114C
- 照射前試験結果(シャルピエ衝撃試験)による吸収エネルギー: 4Jに相当する温度 = 19C
- 第4回試験結果(シャルピエ衝撃試験)による吸収エネルギー: 12Jに相当する温度 = 95C



# (参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表6-1 第1回静的破壊靱性試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] |
|------|--------------|-------------------|
| 母材   | 288          | — <sup>※</sup>    |
|      | 14           | 120               |
|      | -100         | 80                |
| 溶接金属 | 288          | —                 |
|      | 14           | 132               |
|      | -100         | 52                |

※：脆性破壊せず、評価対象外

表6-2 第2回静的破壊靱性試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] |
|------|--------------|-------------------|
| 母材   | 288          | —                 |
|      | 16           | 156               |
|      | -100         | 71                |
| 溶接金属 | 288          | —                 |
|      | 16           | 110               |
|      | -100         | 43                |

※：脆性破壊せず、評価対象外

表6-3 第3回静的破壊靱性試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] |
|------|--------------|-------------------|
| 母材   | 120          | — <sup>※</sup>    |
|      | 50           | 123               |
|      | 0            | 116               |
| 溶接金属 | 120          | — <sup>※</sup>    |
|      | 12           | 108               |
|      | -40          | 74                |

※：脆性破壊せず、評価対象外

表6-4 第4回静的破壊靱性試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] |
|------|--------------|-------------------|
| 母材   | 150          | — <sup>※</sup>    |
|      | 80           | 145               |
|      | 15           | 55                |
| 溶接金属 | 150          | — <sup>※</sup>    |
|      | 50           | 93                |
|      | 0            | 69                |

※：脆性破壊せず、評価対象外

(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表6-5 照射前静的破壊靱性試験結果

| 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] | 試験温度<br>[°C] | 静的破壊靱性<br>[MPa√m] |
|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| 300          | —*1               | 300          | —*1               |
| 0            | 205               | 300          | —*1               |
| 0            | —*2               | 0            | —*2               |
| -50          | 212               | 0            | —*2               |
| -50          | 221               | -50          | —*2               |
| -100         | 88                | -50          | —*2               |
| -100         | 72                | -100         | 86                |
| -140         | 59                | -100         | 70                |
| -140         | 55                | -140         | 50                |
| -196         | 46                | -140         | 59                |
| -196         | 46                | -196         | 38                |
|              |                   | 196          | 44                |

\*1：脆性破壊せず、評価対象外

\*2：評価対象部位以外が破断したため、評価対象外

表7-1 第1回引張試験結果

| 試験温度<br>[°C] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|------------------------------|
| 238          | 634                          |
| 14           | 663                          |
| 100          | 776                          |
| 238          | 671                          |
| 14           | 703                          |
| 100          | 844                          |

表7-2 第2回引張試験結果

| 試験温度<br>[°C] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|------------------------------|
| 238          | 663                          |
| 16           | 689                          |
| -100         | 813                          |
| 238          | 694                          |
| 16           | 737                          |
| -100         | 829                          |

(参考) 玄海原子力発電所1号機 原子炉容器監視試験片の機械試験結果

表7-3 第3回引張試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|------|--------------|------------------------------|
| 母材   | 288          | 667                          |
|      | 150          | 662                          |
|      | 20           | 710                          |
| 溶接金属 | 288          | 715                          |
|      | 150          | 722                          |
|      | 20           | 733                          |

表7-4 第4回引張試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|------|--------------|------------------------------|
| 母材   | 288          | 702                          |
|      | 150          | 691                          |
|      | 25           | 745                          |
| 溶接金属 | 288          | 751                          |
|      | 150          | 754                          |
|      | 25           | 818                          |

表7-5 照射前引張試験結果

|      | 試験温度<br>[°C] | 引張強さ<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|------|--------------|------------------------------|
| 母材   | 350          | 592                          |
|      | 350          | 585                          |
|      | 300          | 551                          |
|      | 300          | 554                          |
|      | 250          | 544                          |
|      | 250          | 546                          |
|      | 17           | 613                          |
|      | 17           | 611                          |
|      | -50          | 674                          |
|      | -50          | 673                          |
|      | 100          | 747                          |
|      | -100         | 740                          |
| 溶接金属 | 350          | 592                          |
|      | 350          | 599                          |
|      | 300          | 595                          |
|      | 300          | 592                          |
|      | 250          | 578                          |
|      | 250          | 590                          |
|      | 17           | 686                          |
|      | 17           | 643                          |
|      | -50          | 706                          |
|      | -50          | 706                          |
|      | 100          | 747                          |
|      | -100         | 753                          |
| -140 | 812          |                              |
| 140  | 807          |                              |
| -196 | 1012         |                              |
| -196 | 1013         |                              |