

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK 補-III-2-1 改0
提出年月日	平成30年3月22日

東海第二発電所 劣化状況評価
(中性子照射脆化)
(耐震安全性評価)
共通事項に関する補足説明資料

平成30年3月22日
日本原子力発電株式会社

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

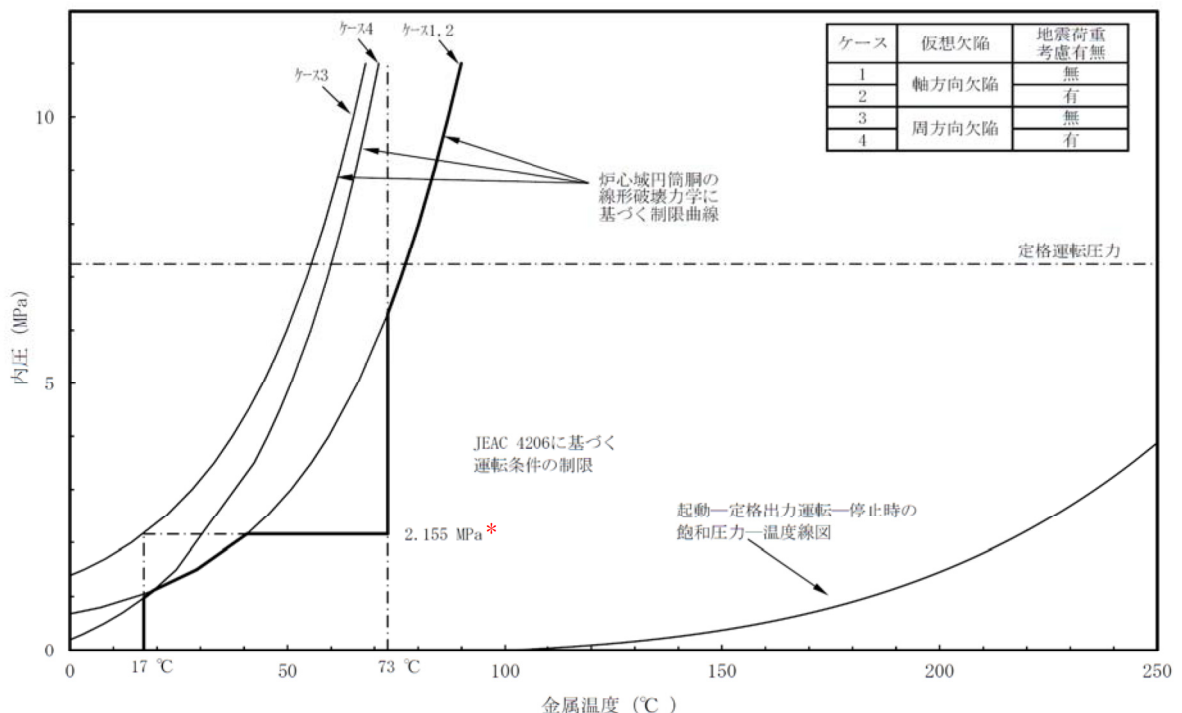
d. 運転上の制限に関する評価

原子炉圧力容器円筒胴（炉心領域）に、中性子照射脆化（運転開始後 60 年時点）と地震を考慮した場合の圧力・温度制限曲線を求め健全性を評価した。評価は JEAC4206 に基づくものとし、欠陥は、深さを原子炉圧力容器の板厚の 1/4 倍、長さを板厚の 1.5 倍とし、地震荷重の寄与が大きい周方向及び評価上厳しい軸方向の両方を想定した。

原子炉圧力容器の圧力・温度制限曲線（60 年時）（炉心領域円筒胴，炉心臨界時）を図 8 に示す。17 °C 及び 73 °C の圧力・温度制限曲線は、JEAC4206 に基づく運転条件の制限（臨界炉心）であり、ケース 1～4 は欠陥を想定した場合の線形破壊力学に基づく運転条件の制限である。脆性破壊防止の観点から、原子炉圧力容器の運転上の制限範囲は、これら曲線（圧力・温度制限曲線）より高温側の条件で運転温度の管理が要求される。ケース 1 及び 2 に示すように、軸方向欠陥に地震が作用しても円筒胴の円周方向応力は有意な変化をしないため、圧力・温度制限曲線は地震荷重の有無に係わらずほとんど変化しない。周方向欠陥に地震が作用した場合は、軸方向応力の増加に寄与するため、地震荷重を考慮しないケース 3 に比べて考慮したケース 4 の方が厳しくなる。

以上より、原子炉圧力容器の運転は図 8 に参考で示した飽和圧力－温度線図に従うことから、中性子照射脆化に対する耐震性を考慮した運転制限に対しても、十分な安全性が確保されている。

原子炉圧力容器の圧力・温度制限曲線は、JEAC 4206 FB-4100 「原子炉圧力容器に対する供用期間中の耐圧・漏えい試験及び運転条件の制限」に従い作成しており、その算出根拠を別紙 3 に示す。



*：供用前の耐圧試験圧力の 20 %を示す（最高使用圧力 8.62 MPa）×（供用前耐圧 1.25）×（20 %）=2.155 MPa

図 8 原子炉圧力容器の圧力・温度制限曲線（60 年時）（炉心領域円筒胴，炉心臨界時）

<圧力-温度制限曲線の算出根拠>

耐震安全性評価（原子炉压力容器）において、炉心領域の円筒胴について、JEAC4206 FB-4100「原子炉压力容器に対する供用期間中の耐圧・漏えい試験及び運転条件の制限」に従い、圧力-温度制限曲線（以下、「P-T 線図」という）（炉心臨界時）を作成し、評価を実施している。P-T 線図は、供用中耐圧試験温度の設定において、厳しい評価となった母材に対して作成しており、その算出根拠を以下に示す。

1. 材料データ

① 円筒胴（炉心領域の材料）

- ・RT_{NDT} 初期値：-25 °C
- ・運転開始後 60 年時点での ΔRT_{NDT} 予測値：36 °C

② 胴体フランジ（ボルト締付荷重が作用する部分の材料）

- ・RT_{NDT} 初期値*：-16 °C *：JEAC4206 附属書 E による推定値

2. 寸法

① 円筒胴内径 Di： mm② 円筒胴の最小肉厚 t： mm

3. 仮想欠陥及び荷重の想定

- ① 欠陥方向：軸方向／円周方向の 2 ケース
- ② 荷重：地震荷重なし／ありの 2 ケース
- ③ 欠陥寸法：深さ a = t/4, 長さ l = 1.5 × t

4. 応力値

① 円筒胴の応力（計算においては、外面腐食代 0.8 mm を考慮した寸法を用いる。）

- ・円筒胴の板厚 T = t - 0.8 = mm
- ・円筒胴の内半径 Ri = Di / 2 = mm
- ・円筒胴の外半径 Ro = Ri + T = mm
- ・円筒胴の断面積 A = π (Ro² - Ri²) = × 10⁶ mm²
- ・円筒胴の断面係数 Zo = π / 4 × (Ro⁴ - Ri⁴) / Ro = × 10⁹ mm²

② 円筒胴の最高使用圧力 (Pd = 8.62 MPa) に対する応力

- ・円周方向応力 σ_{t1m} = Pd × Ri / T = MPa （一次膜応力）
- ・軸方向応力 σ_{11m} = Pd × Ri² / (Ro² - Ri²) = MPa （一次膜応力）
- ・円周方向応力 σ_{t2b} = Pd × (1 + (Ro/Ri)²) / ((Ro/Ri)² - 1) - σ_{t1m} = MPa
（二次曲げ応力）

③ 円筒胴の供用状態 A 及び B+地震荷重による応力

- ・鉛直荷重 V = kN（供用状態 A 及び B） + kN（地震荷重 S_S）
= kN
- ・モーメント M = kN・m（保守的にスカート下端での荷重を使用）
- ・軸方向応力 σ_{11mS} = V / A + M / Zo = MPa （一次膜応力）

5. K_{IT} (円筒胴の板厚方向の温度勾配による応力拡大係数)

K_{IT} は、JEAC4206 附属書 F-3100 (3) 項より示される以下式により求められる。

$$K_{IT} = Mt^{*1} \times \Delta T_w^{*2} = \boxed{} = \boxed{} \text{MPa}$$

*1 : JEAC4206 附属書図 F-3100-2 で与えられる係数 (円筒胴板厚 $\boxed{}$ mm)

*2 : 板厚方向の温度差の最大値 (図 1 円筒胴の温度分布解析結果による)

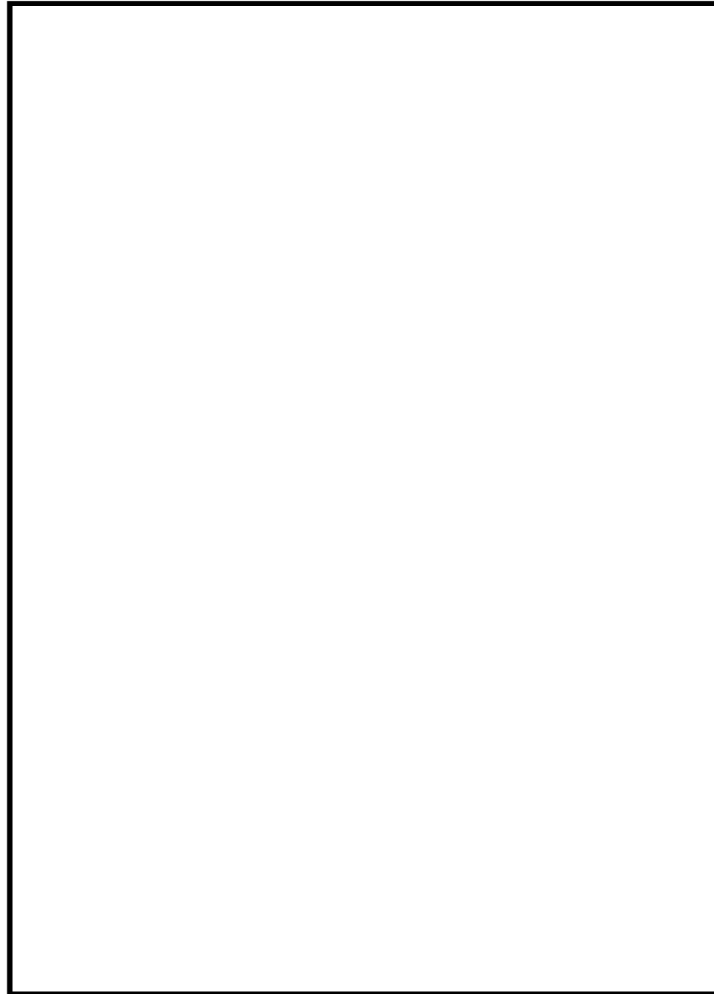


図 1 円筒胴の温度分布解析結果

6. 円筒胴の破壊力学的手法による P-T 線図

円筒胴に対して、仮想欠陥の方向及び地震荷重の有無により、以下 4 ケースを想定する。

ケース 1 : 軸方向欠陥 + 地震荷重なし (内圧 + 熱応力のみ)

ケース 2 : 軸方向欠陥 + 地震荷重あり (内圧 + 熱応力 + 地震荷重)

ケース 3 : 円周方向欠陥 + 地震荷重なし (内圧 + 熱応力のみ)

ケース 4 : 円周方向欠陥 + 地震荷重あり (内圧 + 熱応力 + 地震荷重)

これらの想定したケースを、JEAC4206 附属書 A の破壊力学的手法により評価する。

具体的には、以下のとおり内圧による応力、供用状態 A 及び供用状態 B の荷重、地震荷重及び熱応力による応力より K_I 、 K_{IT} 及び要求温度を算出した上で P-T 線図を作成している。

(1) 内圧による応力

ケース 1 及びケース 2 については最高使用圧力に対する円周方向応力 σ_{t1m} 及び σ_{t2b} を、ケース 3 及びケース 4 については供用状態 A 及び供用状態 B の軸方向応力 σ_{11m} を圧力値の比率で補正する。

ケース 1 及びケース 2 :

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times (\sigma_{t1m} \times P / 8.62 \times M_m) + (\sigma_{t2b} \times P / 8.62 \times M_b)$$

ケース 3 及びケース 4 :

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times (\sigma_{11m} \times P / 8.62 \times M_m)$$

(2) 地震荷重による応力

ケース 4 について、4. ③のとおりに地震荷重による軸方向応力による K_I を考慮する。

$$\text{応力拡大係数} : K_I = S_f \times \sigma_{11mS} \times M_m$$

なお、ケース 1 及びケース 3 については、地震荷重への考慮なしであり、ケース 2 についても、地震荷重による応力は軸方向応力であることから軸方向欠陥への影響はなく、考慮なし（ケース 1 と同一の結果）となる。

(3) 熱応力

5. に示すとおり、図 1 の温度分布解析結果から、最大温度差による K_{IT} を一律に考慮する。

(4) T-RT_{NDT}

T-RT_{NDT} の算出は、JEAC4206 附属書 A-3222 (7) 式による。

$$K_{IC} = 36.48 + 22.78 \exp[0.036 (T - RT_{NDT})]$$

ここで、関連温度の要求値を計算するため、T-RT_{NDT} についての式に変形する。

$$T - RT_{NDT} = 1 / 0.036 \times \ln ((K_{IC} - 36.48) / 22.78)$$

関連温度の要求値は、 K_I が K_{IC} を超えない T-RT_{NDT} の最大値として以下式より求める。

$$T - RT_{NDT} \geq 1 / 0.036 \times \ln ((K_I - 36.48) / 22.78)$$

(5) 要求温度 T

T の算出にあたっては、関連温度 RT_{NDT} とともに、JEAC4206 表 FB-4100-1 に規定される炉心が臨界の場合のマージン 22 °C を加える。

P-T 線図作成にあたって、運転開始後 60 年時点における要求温度の計算例を表 1 に示す。

別紙 3 (4/7)

表 1 要求温度の計算例 (運転開始後 60 年時点 : ケース 4 (地震荷重の考慮 : 有))

応力成分 : $\sigma \ell$
 板厚 : $t = \square$ mm
 欠陥深さ : $a/t = 0.25$
 安全係数 : $Sf = 2$ (一次応力の K_I に関して)
 関連温度 : $RT_{NDT} = 11$ °C (60年中長期の推定値)

荷重組合せ	内圧 P (MPa)	応力 (N/mm ²) *1				補正係数		温度勾配 による 応力拡大係数 K_{It} (MPa \sqrt{m})	応力拡大 係数 K_I *4 (MPa \sqrt{m})	計算 された $T - RT_{NDT}$ (°C)	要求 温度 T (°C)	要求温度 + 22°Cマージン T + 22 (°C)
		σ_{m1}	σ_{b1}	σ_{m2}	σ_{b2}	M_m *2 (\sqrt{m})	M_b *3 (\sqrt{m})					
最高使用圧力												
死荷重+地震荷重												
Load Combination 1												
Load Combination 2												
Load Combination 3												
Load Combination 4												
Load Combination 5												
Load Combination 6												
Load Combination 7												
Load Combination 8												
Load Combination 9												
Load Combination 10												
Load Combination 11												
Load Combination 12												
Load Combination 13												
Load Combination 14												
Load Combination 15												
Load Combination 16												
Load Combination 17												

*1 : 内圧及び死荷重 + 地震荷重による応力
 *2 : 膜応力による K_I 算出のための補正係数 (WRC Bulletin No.175 Appendix 3により算出)
 *3 : 曲げ応力による K_I 算出のための補正係数 (WRC Bulletin No.175 Appendix 3により算出)
 *4 : 内圧及び死荷重+地震荷重による応力から求められた応力拡大係数に, K_{It} を加えたもの。

7. 制限線

P-T 線図は、JEAC4206 表 FB-4100-1 に従い、「圧力・温度制限の要求」と「最低温度要求」により設定される。制限線を設定するにあたり、JEAC4206 表 FB-4100-1 「原子炉压力容器に対する圧力・温度要求」の最低温度要求結果を表 2 に示す。表 2 より以下の制限線が設定される。

(1) 17 °C の制限線

供用前の水圧試験圧力の 20 % 以下の圧力であり、炉心が臨界の場合（BWR で通常水位内での運転がなされる場合）に対する制限線である。

(2) 73 °C の制限線

供用前の水圧試験圧力の 20 % を超える圧力であり、炉心が臨界の場合に対する制限線である。

表 2 最低温度要求の結果

供用状態		原子炉压力容器の圧力	最低温度要求	
耐圧・漏えい試験（未臨界）	燃料装荷後	≤20 %	ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 33 \text{ °C}$	$-16 + 33 = 17 \text{ °C}$
	燃料装荷後	>20 %	（ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 50 \text{ °C}$ ）と（ボルト締付荷重が作用しない部分の材料の最も高い RT_{NDT} ）の高い方	$34 \text{ °C} (= -16+50)$ と 11 °C の高い方
	燃料装荷前	すべて	压力容器材料の最も高い $RT_{NDT} + 33 \text{ °C}$	$-12 + 33 = 21 \text{ °C}$
供用状態 A 及び供用状態 B（耐圧・漏えい試験を除く）	炉心が未臨界	≤20 %	ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 33 \text{ °C}$	$-16 + 33 = 17 \text{ °C}$
	炉心が未臨界	>20 %	（ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 67 \text{ °C}$ ）と（ボルト締付荷重が作用しない部分の材料の最も高い RT_{NDT} ）の高い方	$51 \text{ °C} (= -16+67)$ と 11 °C の高い方
	炉心が臨界	≤20 %	（「耐圧・漏えい試験」に対して要求される温度）と（ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 33 \text{ °C}$ ）の高い方	37 °C と $17 \text{ °C} (= -16 + 33)$ の高い方
	炉心が臨界	>20 %	（「耐圧・漏えい試験」に対して要求される温度）と（ボルト締付荷重が作用する部分の材料の最も高い $RT_{NDT} + 89 \text{ °C}$ ）の高い方	37 °C と $73 \text{ °C} (= -16 + 89)$ の高い方

8. 炉心臨界時及び耐圧・漏えい試験時の P-T 線図の差異について

前述のとおり、耐震安全性評価（原子炉圧力容器）では、供用状態 A 及び B（耐圧・漏えい検査を除く）である炉心臨界時の P-T 線図で評価を実施している。

一方、原子炉圧力容器の材料の脆性破壊防止の観点において、破壊靱性上最も厳しい運転条件は、低温高圧の運転管理となる耐圧・漏えい試験時である。

そのため、評価を実施した炉心臨界時と耐圧・漏えい試験時の P-T 線図の差異について、以下に説明する。

なお、中性子照射脆化の補足説明資料の本文 4. (3) で述べたとおり、供用状態 C 及び D においては、脆性破壊に対して厳しくなる事象はなく、耐圧・漏えい試験時に対する評価で代表されるとともに、重大事故等時の温度・圧力条件は従来想定されている設計基準事象に包絡される。

(1) 許容基準

JEAC4206 附属書 A-3225 に示されるとおり、炉心臨界時と耐圧・漏えい試験時では許容基準が異なり、耐圧・漏えい試験時に比して供用状態 A 及び供用状態 B である炉心臨界時の方が厳しい。

- ・供用状態 A 及び供用状態 B（耐圧・漏えい試験を除く）

$$K_I = 2 \cdot K_{Ip} + K_{Iq} < K_{IC}$$

- ・耐圧・漏えい試験

$$K_I = 1.5 \cdot K_{Ip} + K_{Iq} < K_{IC}$$

ここで、 K_{Ip} は一次応力による応力拡大係数、 K_{Iq} は二次応力による応力拡大係数を示す。

(2) K_{It} （円筒胴の板厚方向の温度勾配による応力拡大係数）

5. 及び 6. にて示したとおり、炉心臨界時の評価では、 K_{It} は JEAC4206 附属書 F-3100 (3) 項の式を用いて温度差による K_{It} を考慮する必要があるが、耐圧・漏えい試験時の評価では原子炉圧力容器内外で温度勾配は生じないことから、 K_{It} は考慮不要となる。

(3) 圧力・温度制限の要求におけるマージン

6. にて示したとおり、炉心臨界時の要求温度は各内圧に対して $T-RT_{MDT}$ から算出し、JEAC4206 表 FB-4100-1 に規定されたマージンである 22 °C を加えて求めている。

一方、耐圧・漏えい試験時には、マージン 22 °C の考慮は不要である。

以上より、炉心臨界時の P-T 線図は耐圧・漏えい試験時に比して飽和圧力温度曲線までの裕度が小さく保守的であることから、耐震安全性評価では炉心臨界時の P-T 線図で評価を実施している。耐圧・漏えい試験時の P-T 線図を図 2 に示す。

追而 (耐圧・漏えい試験時 P-T 線図)

図 2 原子炉圧力容器の P-T 線図 (運転開始後 60 年時点：耐圧・漏えい試験時)