

高浜発電所 3、4号炉 劣化状況評価 原子炉容器の中性子照射脆化

関西電力株式会社

2023年12月14日

目次

1. 概要	2
2. 基本方針	2
3. 評価対象と評価手法	
3.1 評価対象	3
3.2 評価手法	3
4. 技術評価	
4.1 評価点の抽出	4
4.2 監視試験結果	5
4.3 関連温度評価	7
4.4 上部棚吸収エネルギー評価	12
4.5 加圧熱衝撃評価	13
4.6 温度・圧力の制限範囲	17
4.7 現状保全	20
4.8 総合評価	21
4.9 高経年化への対応	21
5. 経年劣化傾向の評価	22
6. まとめ	
6.1 審査基準適合性	26
6.2 長期施設管理方針として策定する事項	27

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」第113条の規定に基づき実施した劣化状況評価のうち、原子炉容器の中性子照射脆化の評価結果を説明するものである。

2. 基本方針

原子炉容器の中性子照射脆化に対する評価の基本方針は、原子炉容器について中性子照射による脆化予測および健全性評価を行い、運転開始後60年時点までの期間において「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の要求事項を満たすことを確認することである。

3. 評価対象と評価手法

3.1 評価対象

原子炉容器を評価対象とする。

3.2 評価手法

以下に示す規格等に基づき評価を行った。

- ・ 日本電気協会 原子炉構造材の監視試験方法（JEAC4201-2007[2013年追補版]）
（以下、「JEAC4201」という。）
- ・ 日本電気協会 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」という。）
- ・ 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈
別記－1 日本電気協会「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）」の適用に当たって（以下、「技術基準規則解釈別記－1」という。）

4. 技術評価—評価点の抽出

4.1 評価点の抽出

中性子照射脆化に対し健全性評価上厳しい箇所は、炉心領域の下部胴である。運転開始後60年時点における中性子照射量が $1.0 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) を超えると予測される範囲には、下部胴以外に上部胴、トランジションリングおよびその溶接部が含まれるが、炉心の有効高さを直接囲んでいる下部胴に対して、その他の部位では中性子照射量が小さく相当運転期間における関連温度移行量が十分に小さく炉心領域に含まれないことから、下部胴を対象として評価を実施した。

○評価点：胴部（炉心領域部）

○胴内表面での中性子照射量*1（ $E > 1 \text{MeV}$ ）

（高浜3号機）

2021年3月末時点： $4.74 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 程度

運転開始後60年時点*2： $9.54 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 程度

（高浜4号機）

2021年3月末時点： $4.70 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 程度

運転開始後60年時点*2： $9.53 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 程度

主な仕様(胴部)

材料	低合金鋼（ステンレス鋼内張り）	
使用条件	最高使用圧力	最高使用温度
	約17.2MPa	約343°C

中性子照射脆化に影響を与える化学成分(胴部(炉心領域部))[重量%]

高浜3号炉

区分	Si	P	Ni	Cu	Mn	C
母材	0.23	0.007	0.57	0.03	1.39	0.18
溶接金属	0.31	0.008	0.88	0.02	1.25	0.077

高浜4号炉

区分	Si	P	Ni	Cu	Mn	C
母材	0.26	0.005	0.58	0.050	1.37	0.21
溶接金属	0.29	0.007	0.86	0.014	1.22	0.065

*1: 第5回監視試験片の中性子照射量実測値と、炉内中性子束解析により求めた監視試験片位置と胴内表面との中性子束の比率に基づき算出。

*2: 2021年3月以降、稼働率90%で運転すると仮定して算出。

4. 技術評価－監視試験結果(1/2)

4.2 監視試験結果(1/2)

(1) 高浜3号炉

これまで計5回の監視試験を実施しており、監視試験結果を以下に示す。

高浜3号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する監視試験結果

監視試験	取出時期 (年月)	中性子照射量 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	Tr30(°C)*1			上部棚吸収エネルギー(J)		
			母材	溶接金属	熱影響部	母材	溶接金属	熱影響部
初期値	—	0	-39	-50	-114	213	184	222
第1回	1985年11月	0.5 [約4EFPY] *2	-34	-36	-99	212	210	221
第2回	1992年7月	3.1 [約26EFPY] *2	-24	-26	-81	195	184	198
第3回	2000年2月	6.3 [約49EFPY] *2	-7	-16	-57	205	193	199
第4回	2009年6月	9.0 [約69EFPY] *2	12	11	-7	218	166	203
第5回	2020年8月	14.7 [約109EFPY] *2	34	26	9	181	163	169

*1:シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーが41Jとなる温度。関連温度はTr30の移行量と関連温度初期値から算出する。

【関連温度初期値】 高浜3号炉 母材:-25°C、溶接金属:-60°C、熱影響部:-50°C

*2: 内表面から板厚tの1/4t深さでのEFPY。EFPYとは、定格負荷相当年数であり、定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数を示す。

4. 技術評価—監視試験結果(2/2)

4.2 監視試験結果(2/2)

(2) 高浜4号炉

これまで計5回の監視試験を実施しており、監視試験結果を以下に示す。

高浜4号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する監視試験結果

監視試験	取出時期 (年月)	中性子照射量 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	Tr30(°C) *1			上部棚吸収エネルギー(J)		
			母材	溶接金属	熱影響部	母材	溶接金属	熱影響部
初期値	—	0	-48	-53	-96	190	226	227
第1回	1986年4月	0.5 [約4EFPY] *2	-38	-35	-95	196	228	238
第2回	1992年9月	3.1 [約26EFPY] *2	-21	-28	-87	187	211	227
第3回	2002年1月	6.4 [約50EFPY] *2	6	-12	-51	179	209	225
第4回	2010年2月	10.0 [約76EFPY] *2	41	3	-19	193	211	221
第5回	2020年10月	14.0 [約104EFPY] *2	66	28	5	176	192	205

*1:シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーが41Jとなる温度。関連温度はTr30の移行量と関連温度初期値から算出する。

【関連温度初期値】 高浜4号炉 母材:-30°C、溶接金属:-60°C、熱影響部:-35°C

*2:内表面から板厚tの1/4t深さでのEFPY。EFPYとは、定格負荷相当年数であり、定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数を示す。

4. 技術評価—関連温度評価(1/5)

4.3 関連温度評価(1/5)

JEAC4201の国内脆化予測法による関連温度予測値を下表に示す。

原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する関連温度の予測値

高浜3号炉

評価時期	中性子照射量*1 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	関連温度*2(°C)		
		母材	溶接金属	熱影響部
2021年3月末時点	2.98	6	-21	20
運転開始後60年時点*3	5.99	25	-2	38

高浜4号炉

評価時期	中性子照射量*1 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$) [E>1MeV]	関連温度*2(°C)		
		母材	溶接金属	熱影響部
2021年3月末時点	2.95	20	-21	3
運転開始後60年時点*3	5.99	40	-2	23

*1: 内表面から板厚 t の $1/4 t$ 深さでの中性子照射量。内表面の中性子照射量にJEAC4201 附属書Bに示される式で求めた減衰率を乗じて算出。

*2: 内表面から板厚 t の $1/4 t$ 深さでの予測値。

*3: 2021年3月以降、稼働率90%で運転すると仮定して算出。

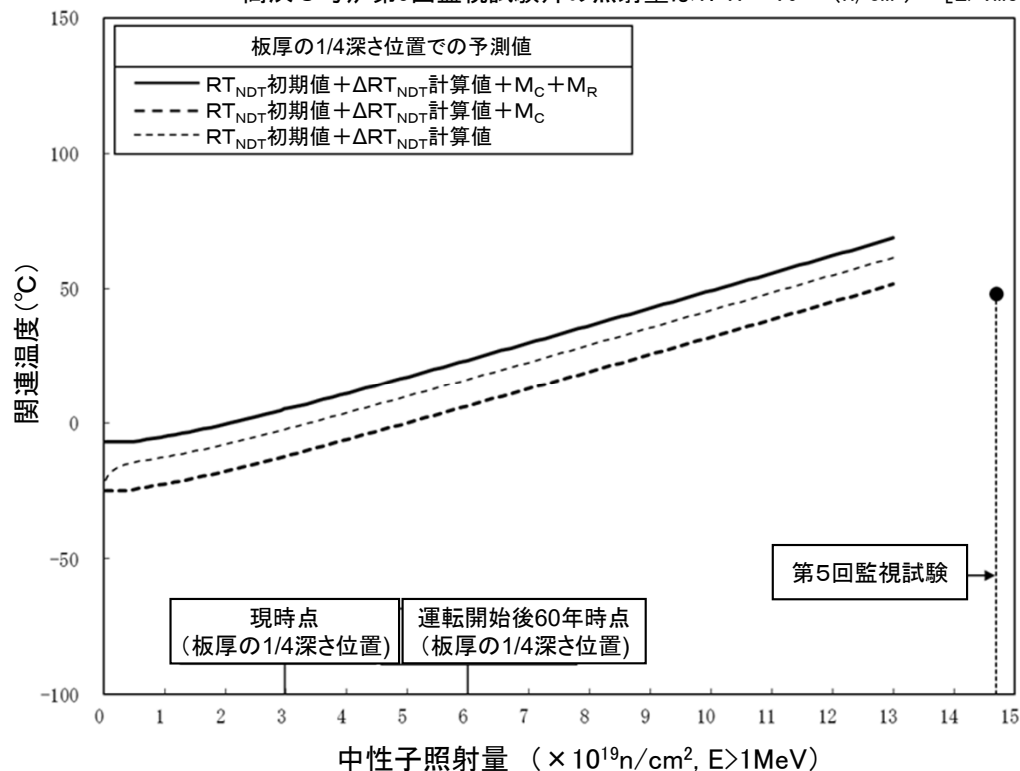
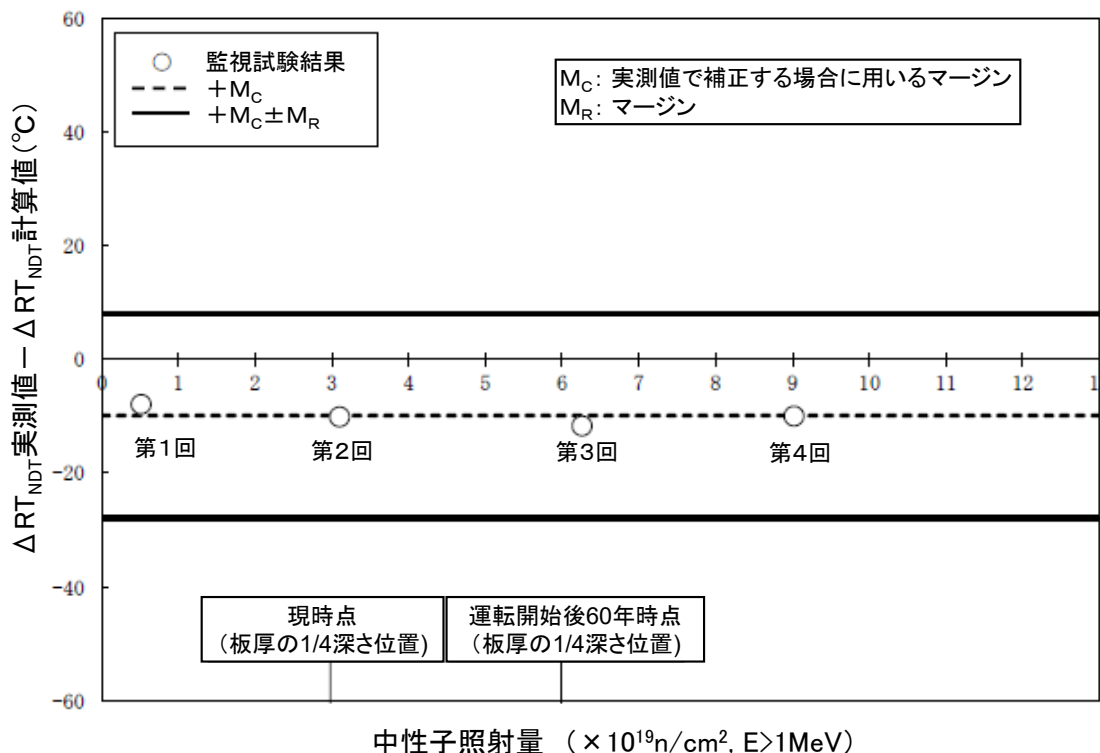
4. 技術評価—関連温度評価(2/5)

4.3 関連温度評価(2/5)

(1) 高浜3号炉

高浜3号炉のJEAC4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(母材)を下図に示す。関連温度予測値と監視試験結果から、当該部位の中性子照射脆化は、国内脆化予測法による予測の範囲内であることを確認した。なお、第5回監視試験については中性子照射量がJEAC4201の国内脆化予測法の適用範囲を超える*1 ため、適用範囲までの予測結果の傾向と比較した結果、特異な脆化は生じていないと考えている。

*1: JEAC4201の脆化予測式の適用上限 1.3×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV] に対し、高浜3号炉第5回監視試験片の照射量は 1.47×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]



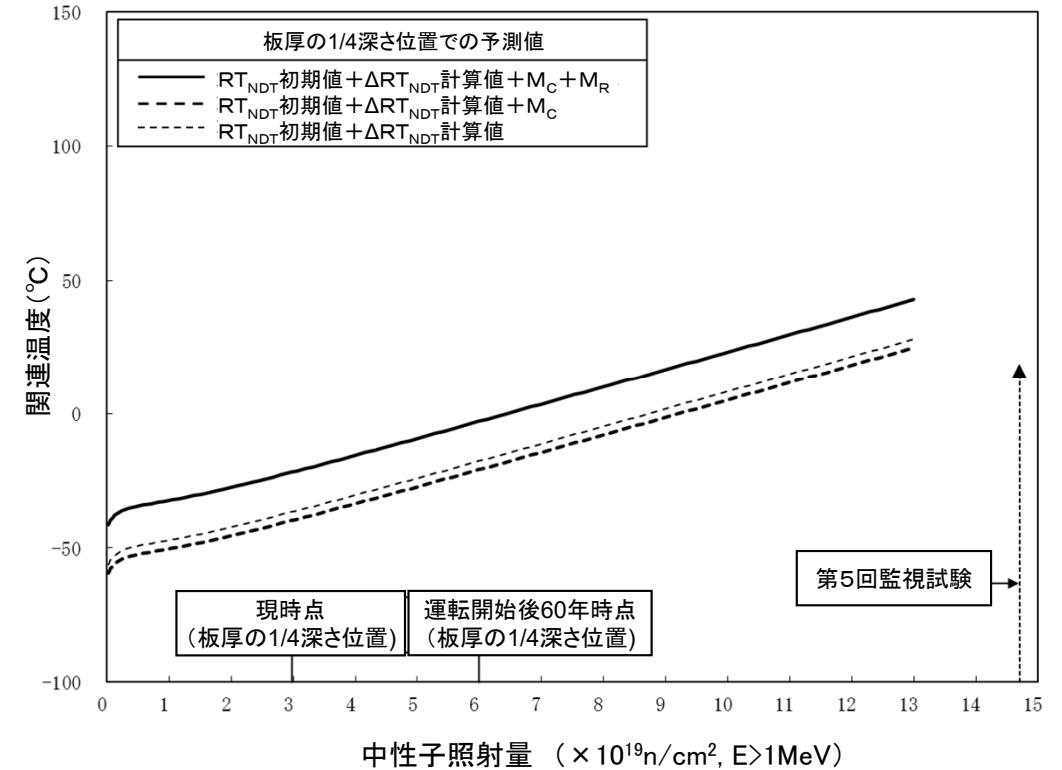
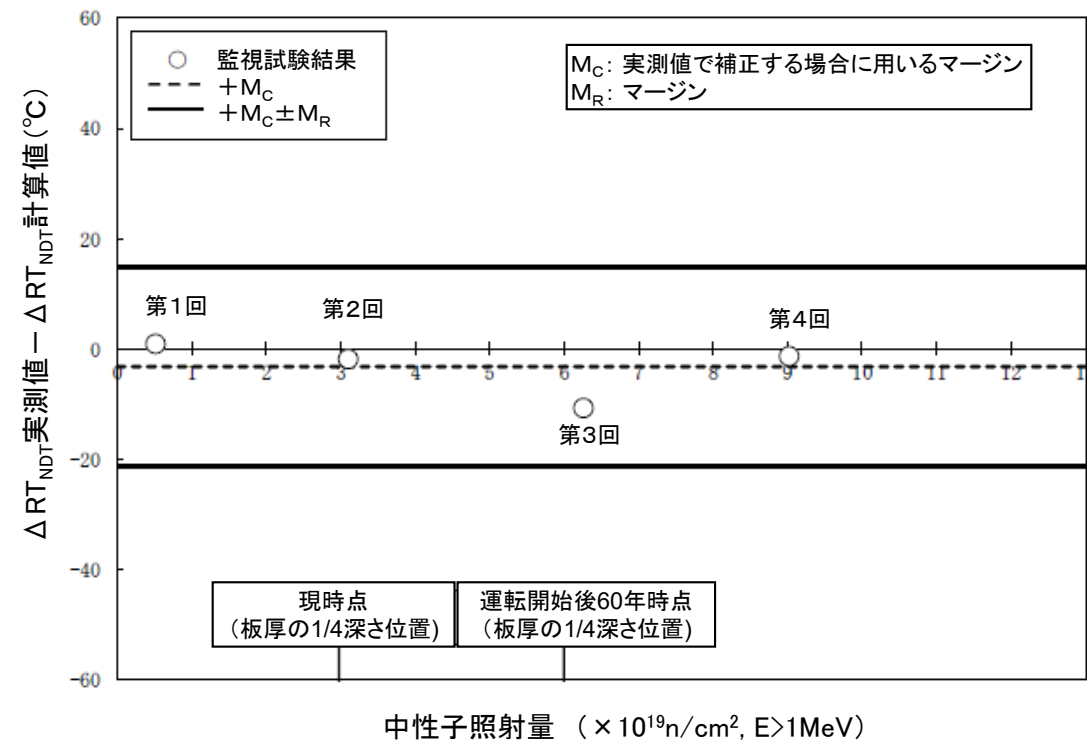
高浜3号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(母材)

4. 技術評価—関連温度評価(3/5)

4.3 関連温度評価(3/5)

(1) 高浜3号炉

高浜3号炉のJEAC4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係（溶接金属）を下図に示す。



高浜3号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(溶接金属)

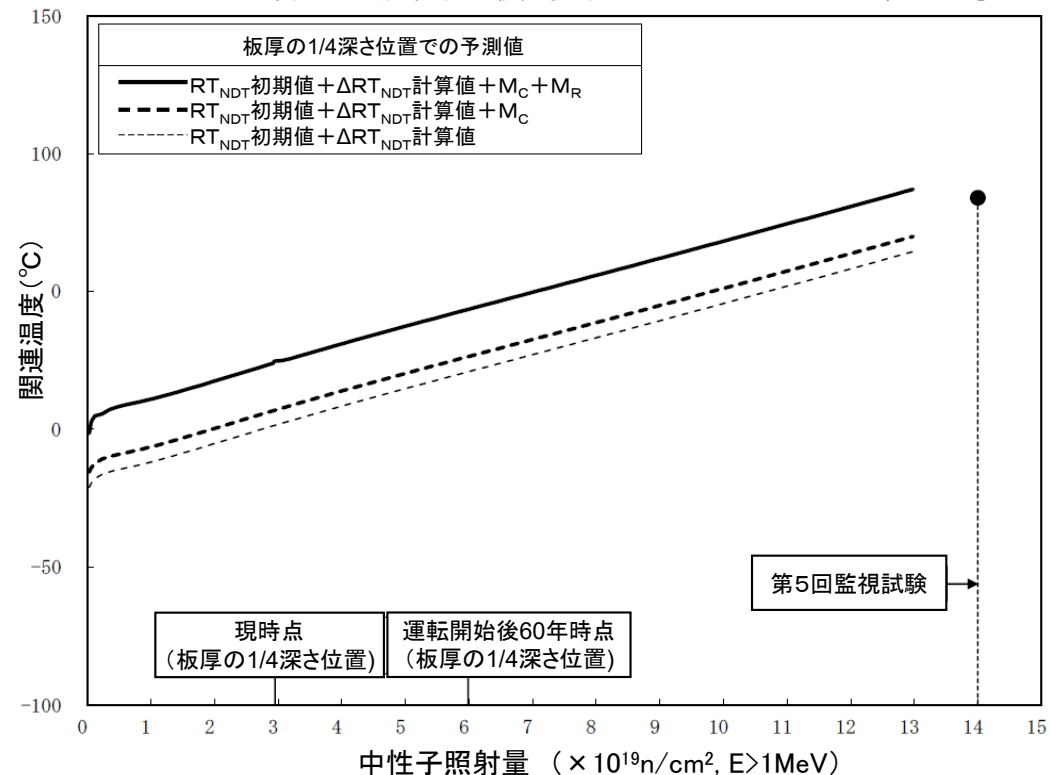
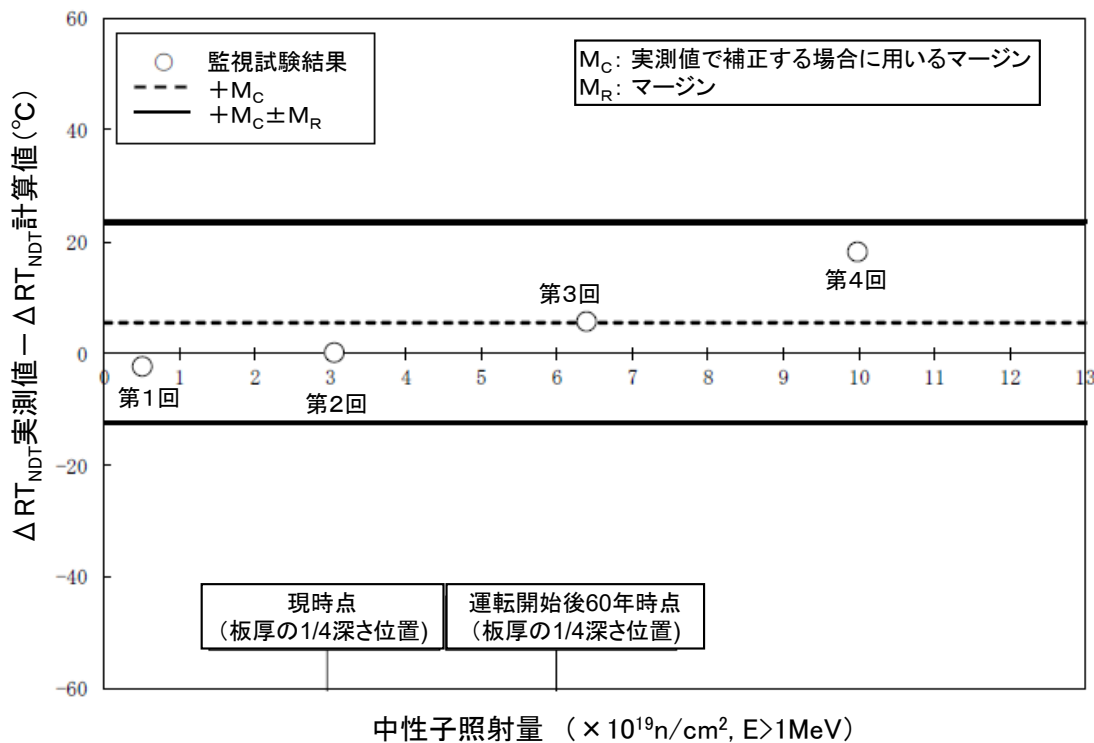
4. 技術評価—関連温度評価(4/5)

4.3 関連温度評価(4/5)

(2) 高浜4号炉

高浜4号炉のJEAC4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(母材)を下図に示す。関連温度予測値と監視試験結果から、当該部位の中性子照射脆化は、国内脆化予測法による予測の範囲内であることを確認した。なお、第5回監視試験については中性子照射量がJEAC4201の国内脆化予測法の適用範囲を超える*1ため、適用範囲までの予測結果の傾向と比較した結果、特異な脆化は生じていないと考えている。

*1: JEAC4201の脆化予測式の適用上限 1.3×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV] に対し
高浜4号炉第5回監視試験片の照射量は 1.40×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]



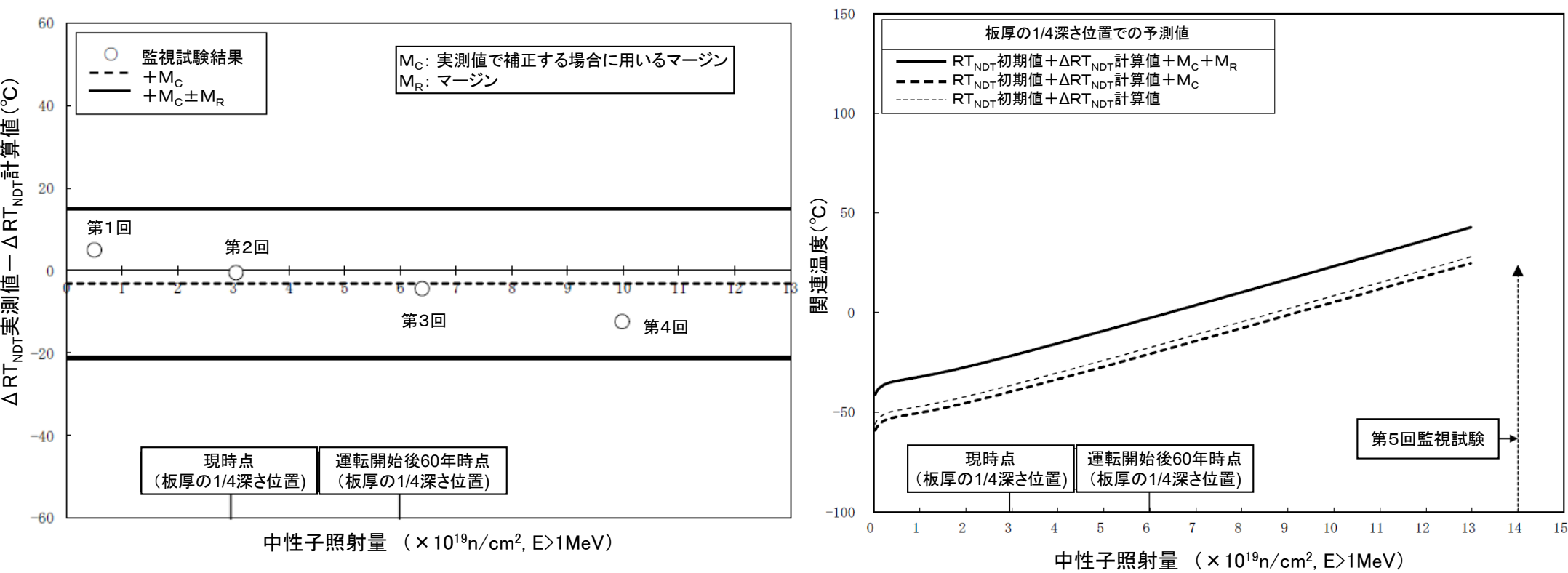
高浜4号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(母材)

4. 技術評価—関連温度評価(5/5)

4.3 関連温度評価(5/5)

(2) 高浜4号炉

高浜4号炉のJEAC4201の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係（溶接金属）を下図に示す。



高浜4号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する
関連温度の国内脆化予測法による予測と監視試験結果の関係(溶接金属)

4. 技術評価—上部棚吸収エネルギー—評価

4.4 上部棚吸収エネルギー(USE)評価

国内プラントを対象とした上部棚吸収エネルギーの予測式 (JEAC4201附属書Bの国内USE予測式) を用いて運転開始後60年時点での上部棚吸収エネルギー予測値を評価した。

その結果、JEAC4206で要求している68 J以上を満足しており、十分な上部棚吸収エネルギーがあることを確認した。

原子炉容器胴部(炉心領域部)の中性子照射脆化に対する上部棚吸収エネルギーの予測値

高浜3号炉

(単位:J)

高浜4号炉

(単位:J)

	方 向	初期値	2021年3月 末時点*1	運転開始後 60年時点*1*2
母材	L方向*3	216	199	195
	T方向*4	213	195	191
溶接金属	溶接線に 直角方向	184	174	169

	方 向	初期値	2021年3月 末時点*1	運転開始後 60年時点*1*2
母材	L方向*3	198	178	174
	T方向*4	190	182	179
溶接金属	溶接線に 直角方向	226	215	209

*1: 内表面から板厚 t の 1 / 4 t 深さでの予測値。
 *2: 2021年3月以降、稼働率90%で運転すると仮定して算出。
 *3: 試験片の長手方向が圧延方向に並行
 *4: 試験片の長手方向が圧延方向に垂直

4. 技術評価—加圧熱衝撃評価(1/4)

4.5 加圧熱衝撃評価(1/4)

・ 評価方法

JEAC4206に定められた加圧熱衝撃 (PTS: Pressurized Thermal Shock) 評価手法*1および技術基準規則解釈別記-1に基づき高浜3、4号炉原子炉容器胴部 (炉心領域部) 材料の評価を実施した。

なお、PTS事象は小破断LOCA、大破断LOCA、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失事象を対象とした。

中性子照射脆化による材料の靱性低下の予測について、国内脆化予測法を用いて、実測 K_{IC} データを運転開始後60年時点*2まで温度軸に対してシフトさせ、その予測破壊靱性 (K_{IC}) の下限を包絡した以下の K_{IC} 曲線を設定する。(予測破壊靱性 (K_{IC}) の下限を包絡するよう下式の T_p を定める。)

$$K_{IC} = 20.16 + 129.9 \exp \{ 0.0161 (T - T_p) \} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$$

健全性評価は K_{IC} 下限包絡曲線とPTS状態遷移曲線を比較することであり、評価結果を次頁に示す。

*1: JEAC4206附属書C「供用状態C、Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」

*2: 2021年3月以降、稼働率90%で運転すると仮定して算出。

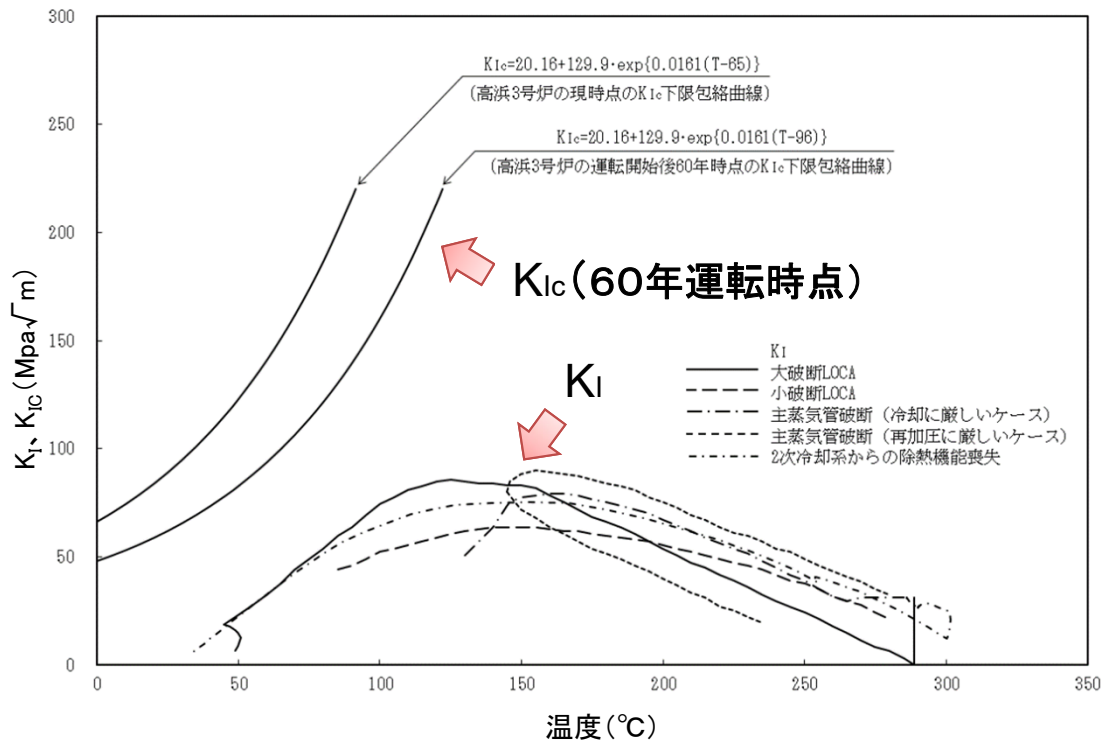
4. 技術評価—加圧熱衝撃評価(2/4)

4.5 加圧熱衝撃評価(2/4)

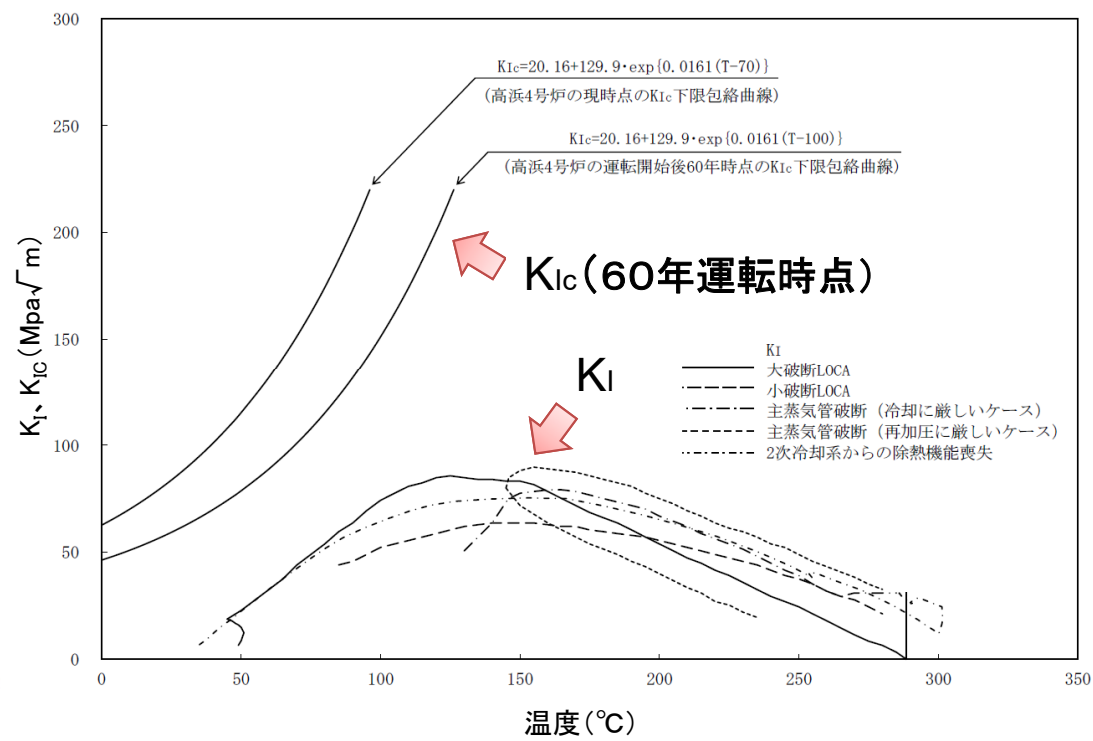
(1) 深さ10mmの想定亀裂を用いた評価結果

JEAC4206および「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」等の規定に従い、深さ10mm*1の亀裂を想定した評価を実施した結果、脆性破壊に対する抵抗値（材料自身の持つねばり強さ）を示す K_{Ic} 曲線は、負荷状態を応力拡大係数 K_I （脆性破壊を起こそうとする値）で示すPTS状態遷移曲線を上回っていることから、脆性破壊は起こらないことを確認した。

*1：深さ10mm位置での中性子照射量は、原子炉容器内表面の値を用いた。



高浜3号炉 深さ10mmの想定亀裂を用いたPTS評価結果



高浜4号炉 深さ10mmの想定亀裂を用いたPTS評価結果

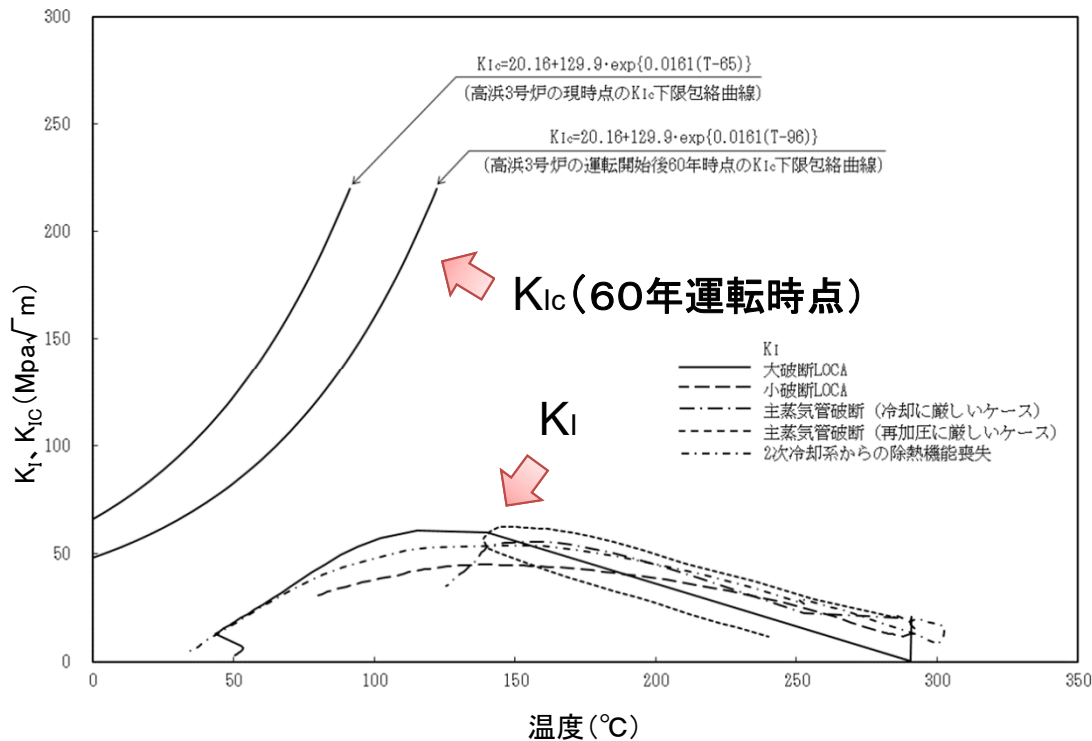
4. 技術評価—加圧熱衝撃評価(3/4)

4.5 加圧熱衝撃評価(3/4)

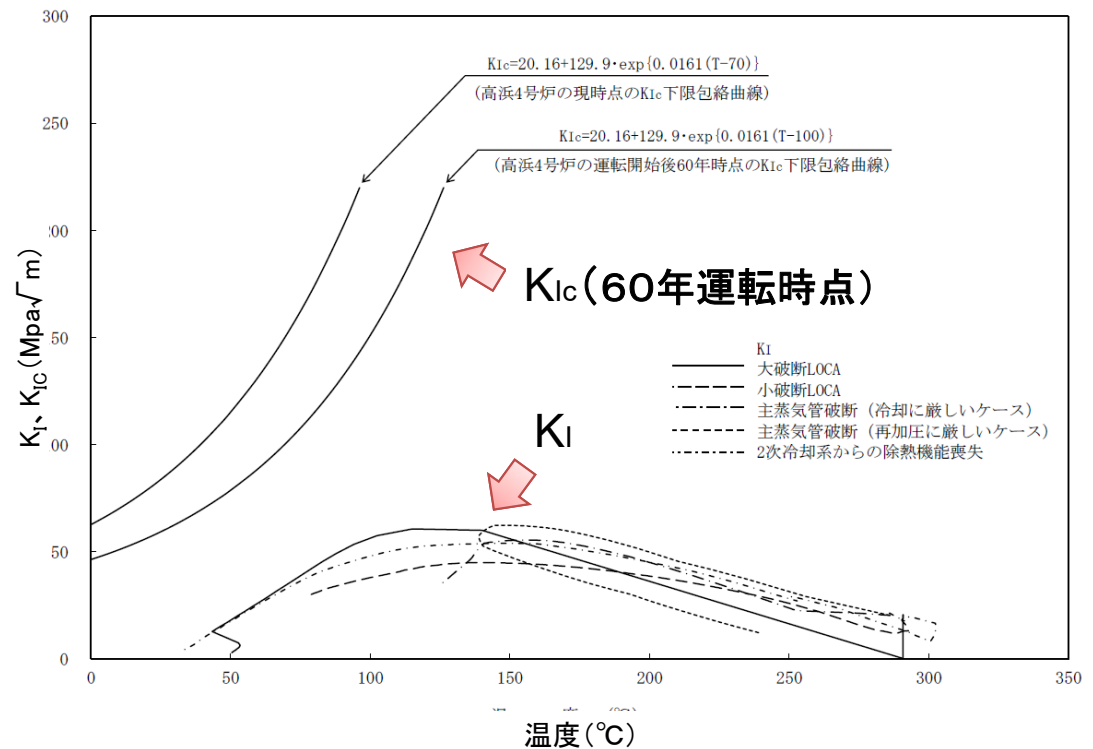
(2) 特別点検結果を踏まえた評価結果

運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、原子炉容器炉心領域部全域の母材および溶接部に対して超音波探傷検査を実施した結果、有意な欠陥（深さ4.8mm以上の欠陥）は認められなかったことや、60年時点までの残りの運転期間を考慮して疲労亀裂進展評価を実施した結果を踏まえて、想定亀裂を深さ5mm*1とした場合のPTS評価を実施し、 K_{Ic} 曲線が K_I 曲線を上回ることを確認した。

*1：深さ5mm位置での中性子照射量は、原子炉容器内表面の値を用いた。



高浜3号炉 深さ5mmの想定亀裂を用いたPTS評価結果



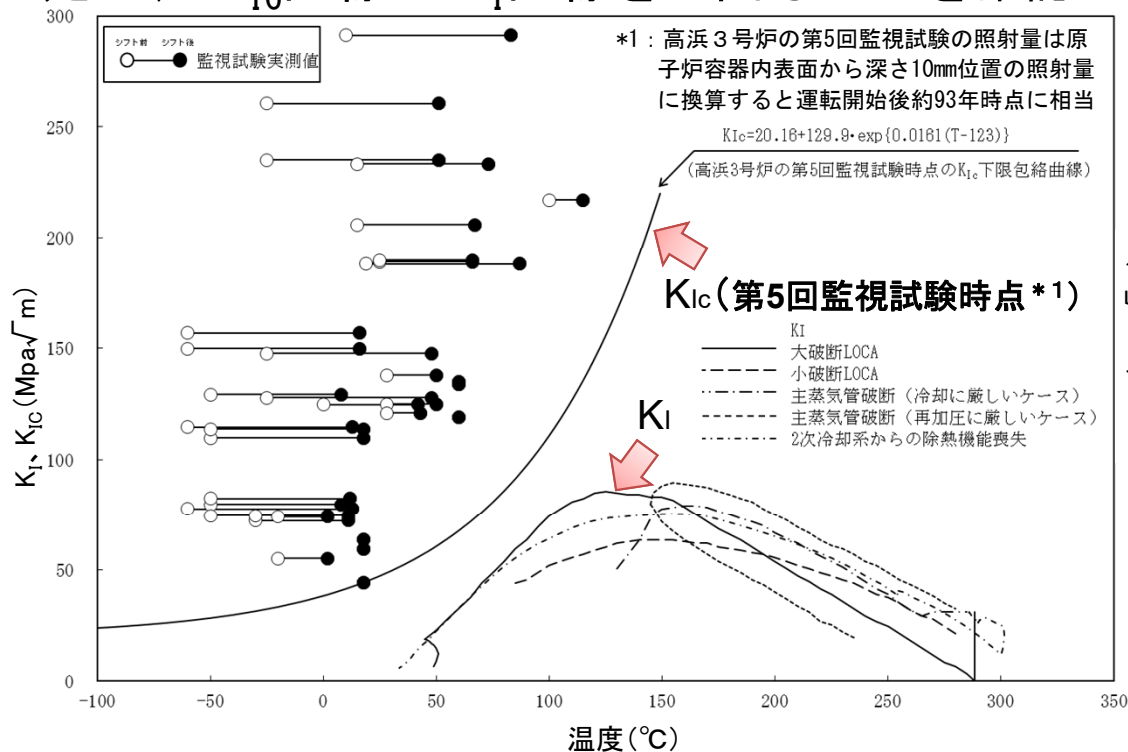
高浜4号炉 深さ5mmの想定亀裂を用いたPTS評価結果

4. 技術評価—加圧熱衝撃評価(4/4)

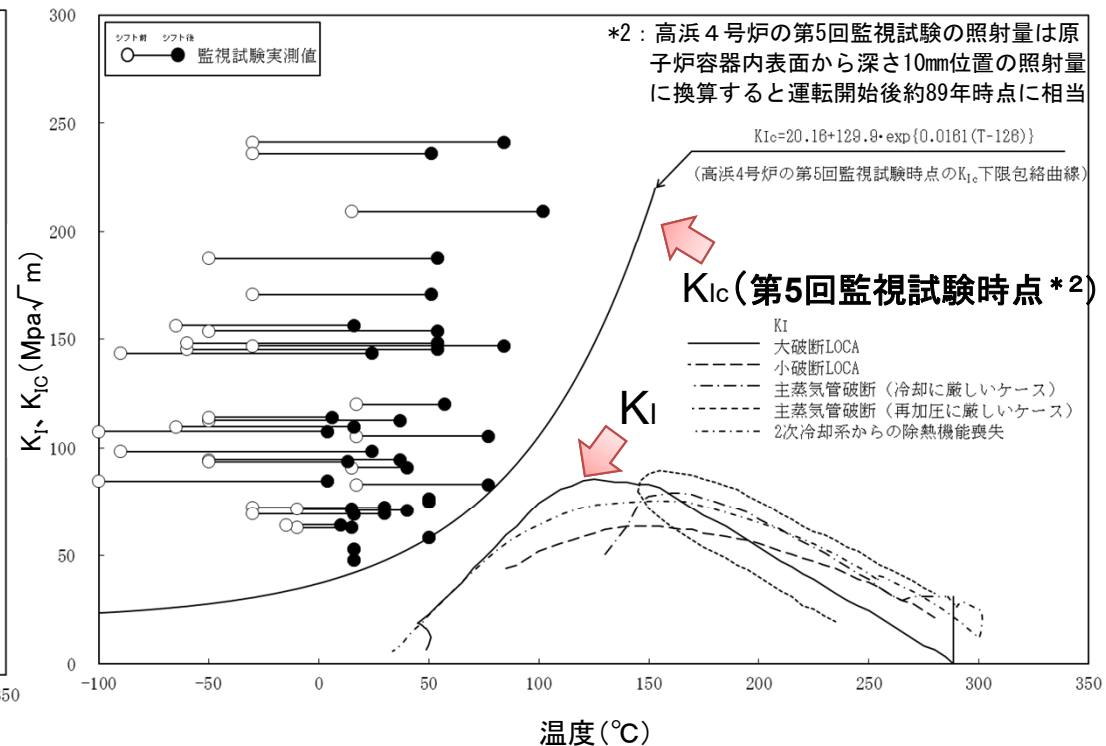
4.5 加圧熱衝撃評価(4/4)

(3) 照射脆化の将来予測を伴わない実測データに基づく評価結果 (想定き裂深さ 10mm)

「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」および「実用発電用原子炉施設における高経年化対策実施ガイド」の規定に従い、これまで実施した監視試験によって採取した破壊靱性実測値のうち、第1～4回監視試験のデータについてはそれぞれの T_{r30} 実測値と第5回監視試験の T_{r30} 実測値の差分だけ温度シフトさせ、第5回監視試験で得られたデータと共にプロットした。JEAC4206の附属書Cに従い、これらを下限包絡した K_{IC} 曲線を設定し、 K_{IC} 曲線が K_I 曲線を上回ることを確認した。



高浜3号炉 照射脆化の将来予測を伴わない
実測データに基づく評価



高浜4号炉 照射脆化の将来予測を伴わない
実測データに基づく評価

4. 技術評価－温度・圧力の制限範囲(1／3)

4.6 温度・圧力の制限範囲(1／3)

高浜3, 4号炉の運転開始後60年時点での関連温度を想定し、通常の1次冷却系の加熱・冷却時の1次冷却材温度・圧力の制限範囲および原子炉冷却材圧力バウンダリに対する供用中の漏えいもしくは水圧検査時の原子炉冷却材の最低温度について評価した。

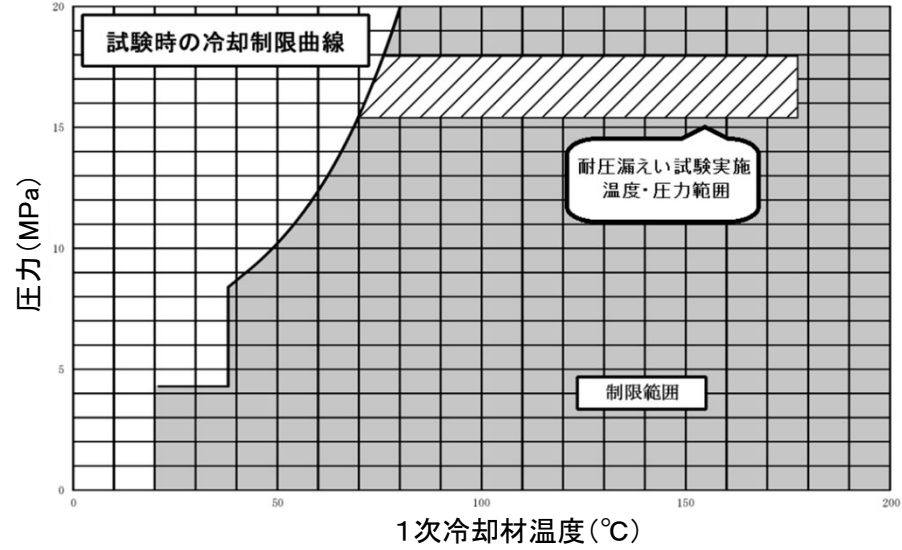
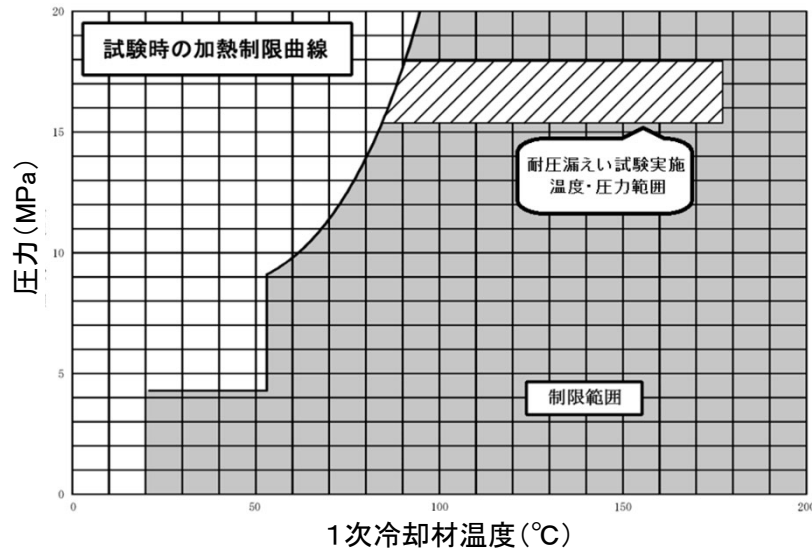
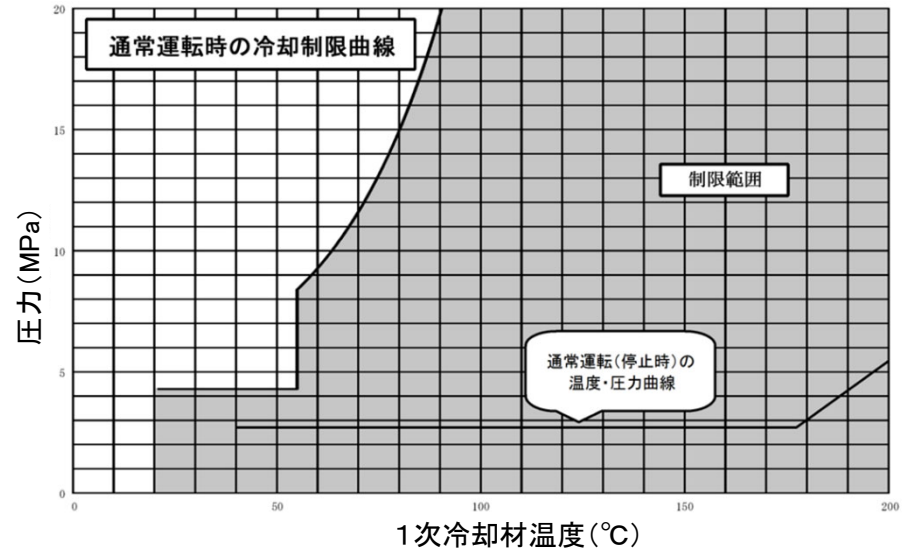
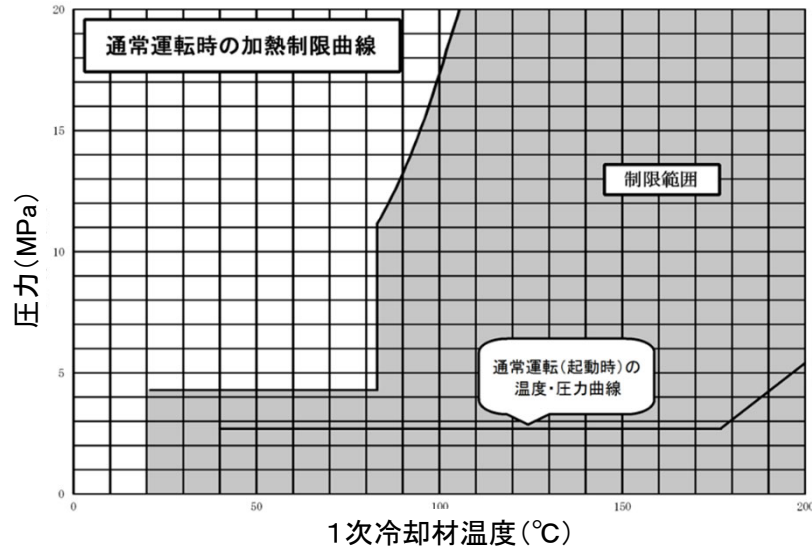
これらの温度・圧力の制限範囲に対して、通常実施する原子炉の起動・停止工程に基づく温度・圧力曲線および耐圧漏えい試験時の温度・圧力範囲と比較することにより、通常運転時および試験時に制限範囲を遵守可能であることを確認した。

評価結果を次頁以降に示す。

4. 技術評価—温度・圧力の制限範囲(2/3)

4.6 温度・圧力の制限範囲(2/3)

高浜3号炉の評価結果は以下のとおり。

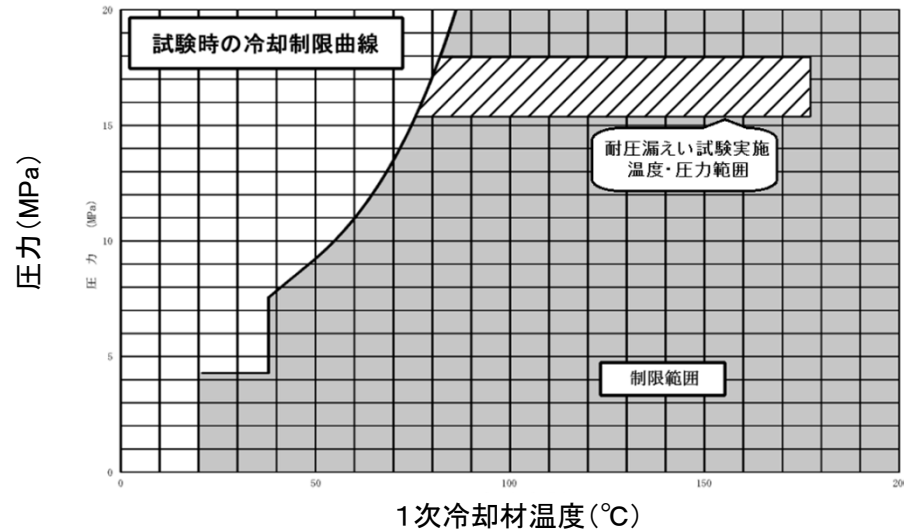
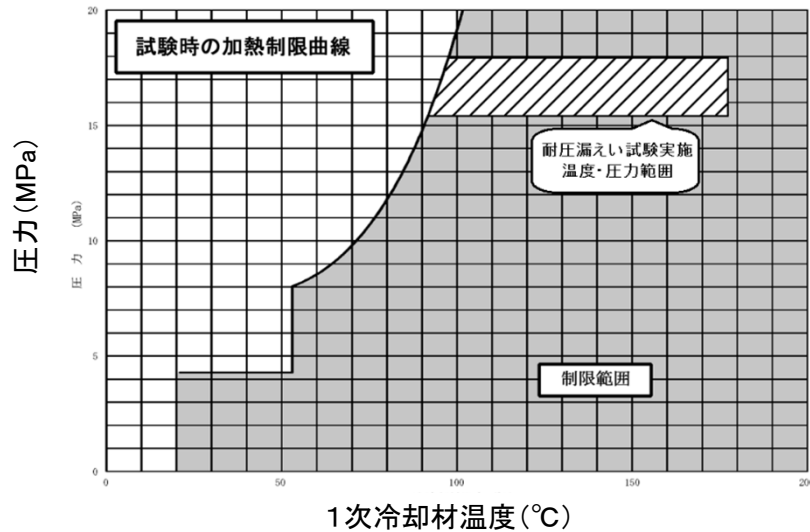
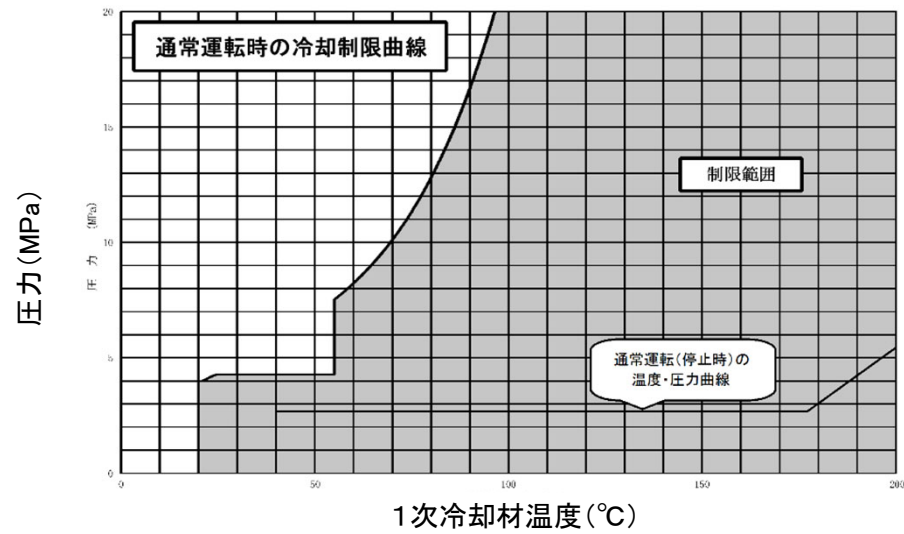
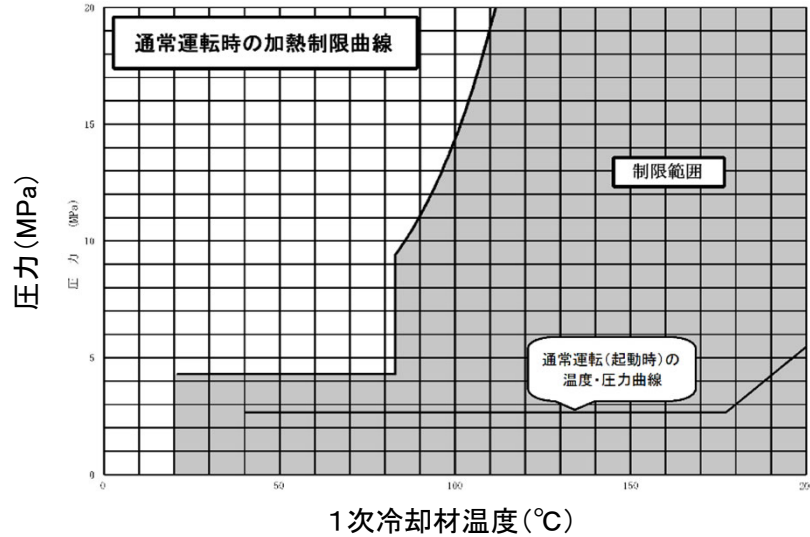


高浜3号炉 通常運転時・試験時の加熱冷却制限曲線評価結果(運転開始後60年時点)

4. 技術評価—温度・圧力の制限範囲(3/3)

4. 6 温度・圧力の制限範囲(3/3)

高浜4号炉の評価結果は以下のとおり。



高浜4号炉 通常運転時・試験時の加熱冷却制限曲線評価結果(運転開始後60年時点)

4. 技術評価－現状保全

4.7 現状保全

- ・ 胴部（炉心領域部）材料の中性子照射による機械的性質の変化については、JEAC4201に基づいて、計画的に監視試験を実施し、破壊靱性の変化の傾向を把握している。
高浜3，4号炉は、当初監視試験カプセルを6体挿入し、現在までに5体のカプセルを取り出し、将来の運転期間に対する脆化予測を行っている。
- ・ 今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して、運転期間50年を迎える前の適切な時期に第6回監視試験を実施する。また、第7回監視試験については、これまでに実施した試験済みの試験片を適切な時期に再装荷し、適切な時期に取り出して試験を実施することとしている。
- ・ 監視試験結果から、JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱・冷却制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用している。
- ・ 溶接部について定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認している。
至近実績：高浜3号炉 第24回定期検査時
高浜4号炉 第24回定期検査時
- ・ 運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、原子炉容器炉心領域部の母材及び溶接部に対して超音波探傷検査を実施した結果、有意な欠陥は認められなかった。

4. 技術評価—総合評価及び高経年化への対応

4.8 総合評価

健全性評価結果から判断して、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。

ただし、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後も計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認する必要がある。

胴部（炉心領域部）材料については、機械的性質の予測は監視試験により把握可能であり、また、有意な欠陥のないことを超音波探傷検査により確認していることから、保全内容として適切である。

4.9 高経年化への対応

JEAC4201に基づき計画的に監視試験を実施するとともに、定期的に超音波探傷検査を実施していく。

また、監視試験結果から、JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱・冷却制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用していく。

なお、健全性評価の結果から胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が原子炉の安全性に影響を及ぼす可能性はないと考えるが、今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して第6回監視試験の実施計画を策定する。

5. 経年劣化傾向の評価(1/4)

5. 経年劣化傾向の評価(1/4)

高浜3、4号炉の30年目の評価実施後、2020年に共に第5回目の監視試験片の取り出しを実施し、照射脆化の監視試験を実施した。

(1) 関連温度

60年時点の関連温度の予測値について、30年目と40年目の評価を比較した結果を24ページに示す。

第5回の監視試験片の照射量は脆化予測式の適用範囲外^{*1}であり、第5回の監視試験の関連温度実測値と予測式との比較はできないが、第4回までの結果からの予測の傾向を踏まえると、特異な脆化は認められないと考える。

また、30年目および40年目の評価では深さ10mmの想定欠陥を用いた加圧熱衝撃評価を実施し、原子炉容器の60年時点の健全性を確認しているが、運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検において、原子炉容器胴部炉心領域の母材部・溶接部全面の超音波探傷検査（深さ4.8mm以上の欠陥であれば十分検出可能）を実施し、脆性破壊の起点となるような有意な欠陥がないことが確認出来ていることから、30年目および40年目の評価で実施した加圧熱衝撃評価は十分保守的な評価手法であり、評価結果の妥当性が確認できたと考える。25ページに30年目と40年目のPTS評価の比較した結果を示す。

*1 : JEAC4201の脆化予測式の適用上限 1.3×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV] に対し
高浜3号炉第5回監視試験片の照射量は 1.47×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]
高浜4号炉第5回監視試験片の照射量は 1.40×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]

5. 経年劣化傾向の評価(2/4)

5. 経年劣化傾向の評価(2/4)

(2) 上部棚吸収エネルギー

60年時点の上部棚吸収エネルギーの予測値について、30年目と40年目の評価を比較した結果を24ページに示す。

第5回の監視試験片の照射量は国内USE予測式の適用範囲外*1 であるが、第5回の監視試験の上部棚吸収エネルギー実測値は68Jを上回っている。

60年時点の上部棚吸収エネルギーの予測値は、30年目の評価と同様に、68Jを上回っており、十分な上部棚吸収エネルギーがあることを確認している。

*1 : JEAC4201の国内USE予測式の適用上限 1.2×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV] に対し
高浜3号炉第5回監視試験片の照射量は 1.47×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]
高浜4号炉第5回監視試験片の照射量は 1.40×10^{20} (n/cm²) [E>1MeV]

また、定期的に超音波探傷検査を実施し、有意な欠陥のないことを確認できている。

以上のことから、原子炉容器の照射脆化については、30年目の評価およびそれ以降の保全は有効であったと評価できる。

5. 経年劣化傾向の評価(3/4)

5. 経年劣化傾向の評価(3/4)

高浜3号炉 原子炉容器 関連温度と上部棚吸収エネルギーの比較

機器・設備	項目	部位	60年時点の予測値		
			30年目評価		40年目評価
			JEAC4201-2007/ 2010追補版	JEAC4201-2007/ 2013追補版	JEAC4201-2007/ 2013追補版
原子炉容器	関連温度(°C)	胴部(母材)	17	25	25
		胴部(溶接金属)	-8	-2	-2
		胴部(熱影響部)	45	38	38
	上部棚吸収 エネルギー(J)	胴部(母材)	192	同左	191
		胴部(溶接金属)	169	同左	169
		胴部(熱影響部)	195	同左	194

高浜4号炉 原子炉容器 関連温度と上部棚吸収エネルギーの比較

機器・設備	項目	部位	60年時点の予測値		
			30年目評価		40年目評価
			JEAC4201-2007/ 2010追補版	JEAC4201-2007/ 2013追補版	JEAC4201-2007/ 2013追補版
原子炉容器	関連温度(°C)	胴部(母材)	47	45	40
		胴部(溶接金属)	-4	3	-2
		胴部(熱影響部)	30	28	23
	上部棚吸収 エネルギー(J)	胴部(母材)	179	同左	179
		胴部(溶接金属)	208	同左	209
		胴部(熱影響部)	223	同左	224

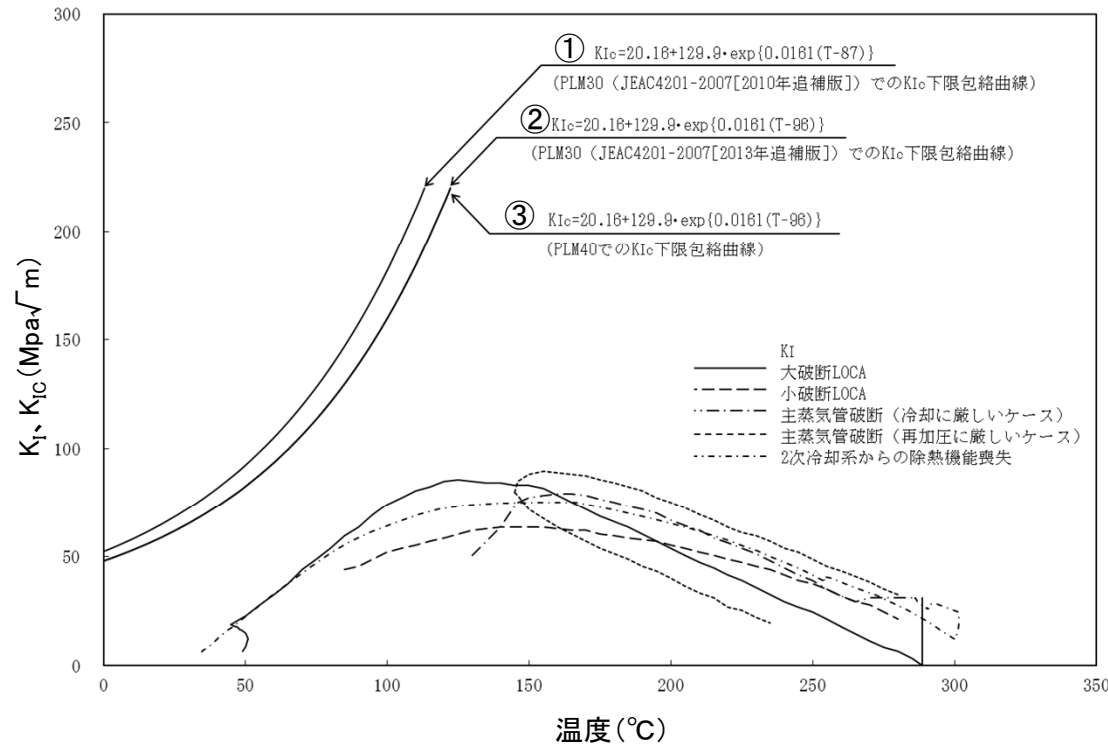
5. 経年劣化傾向の評価(4/4)

5. 経年劣化傾向の評価(4/4)

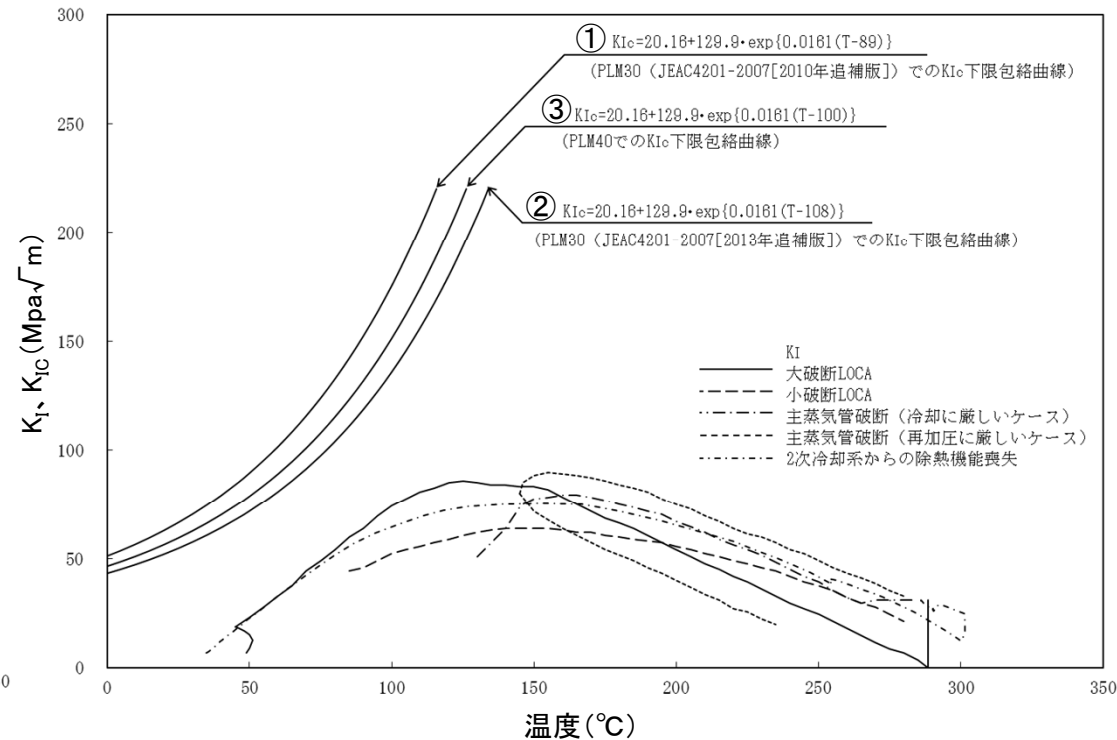
深さ 10mmの想定亀裂を用いたPTS評価について、

- ① PLM30時点の評価 (JEAC4201-2007[2010年追補版]を用いた評価)
- ② PLM30時点の評価 (JEAC4201-2007[2013年追補版]を用いた評価)
- ③ PLM40時点の評価

として、30年目の評価と40年目の評価を比較した結果を以下に示す。
 いずれの評価でも原子炉容器の60年時点の健全性を確認できている。



高濱3号炉 PTS評価結果の比較



高濱4号炉 PTS評価結果の比較

6. まとめ(1/2)

6.1 審査基準適合性

以上の評価結果について、原子力規制委員会「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」に規定されている延長しようとする期間における要求事項との対比を示す。

延長しようとする期間における要求事項との対比（中性子照射脆化）

評価対象事象 又は評価事項	要求事項	健全性評価結果
中性子 照射脆化	○加圧熱衝撃評価の結果、原子炉圧力容器の評価対象部位において静的平面ひずみ破壊靱性値が応力拡大係数を上回ること。	「4.5 加圧熱衝撃評価」に示すとおり、設計基準事故時における、中性子照射脆化を考慮した加圧熱衝撃評価の結果、原子炉圧力容器の対象部位において静的平面ひずみ破壊靱性値が応力拡大係数を上回ると評価した。
	○原子炉圧力容器について供用状態に応じ以下を満たすこと。 ただし、上部棚吸収エネルギーの評価の結果、68J以上である場合は、この限りでない。 ・延性亀裂進展性評価の結果、評価対象部位において亀裂進展抵抗が亀裂進展力を上回ること。 ・亀裂不安定性評価の結果、評価対象部位において亀裂進展抵抗と亀裂進展力が等しい状態で亀裂進展抵抗の微小変化率が亀裂進展力の微小変化率を上回ること。 ・欠陥深さ評価の結果、原子炉圧力容器胴部の評価対象部位において母材厚さの75%を超えないこと。 ・塑性不安定破壊評価の結果、評価対象部位において塑性不安定破壊を生じないこと。	「4.4 上部棚吸収エネルギー評価」に示すとおり、上部棚吸収エネルギー予測値が、2021年3月末時点および運転開始後60年時点のいずれの場合においても、68Jを上回っており基準を満足していることを確認した。
	○上記評価の結果から、運転上の制限として遵守可能な、通常の1次冷却系の加熱・冷却時の1次冷却材温度・圧力の制限範囲又は原子炉冷却材圧力バウンダリに対する供用中の漏えい若しくは水圧検査時の原子炉冷却材の最低温度が設定可能と認められること。	「4.3 関連温度に基づく評価」に示すとおり、JEAC4201により求めた関連温度移行量の予測値と測定値は、国内脆化予測式（マージン含む）の範囲内にあることを確認した。 水圧検査時の原子炉冷却材の最低温度は、試験時の加熱制限曲線から、水圧検査時の圧力下において、原子炉冷却材の最低温度が設定可能であることを確認した。

6. まとめ(2/2)

6.2 長期施設管理方針として策定する事項

胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後も計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認する必要があることから、長期施設管理方針を下表のとおり定め、高浜発電所原子炉施設保安規定に記載し、確実に実施していく。

高浜発電所3号炉 長期施設管理方針(抜粋)

機器名	長期施設管理方針	実施時期
原子炉容器	原子炉容器胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して第6回監視試験の実施計画を策定する。	中長期*1

*1：2025年1月17日からの10年間

高浜発電所4号炉 長期施設管理方針(抜粋)

機器名	長期施設管理方針	実施時期
原子炉容器	原子炉容器胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、今後の原子炉の運転サイクル・照射量を勘案して第6回監視試験の実施計画を策定する。	中長期*2

*2：2025年6月5日からの10年間