

参 考 資 料 1

(補足説明)

2020年3月末時点及び運転開始後60年時点での定格負荷相当年数 (EFPY) は、発電電力量から下記の通り算出した。

<2020年3月末時点のEFPY>

=2020年3月末時点の累積発電電力量 ÷ 定格電気出力 ÷ (24 × 365.25)

$$= \frac{208,550,599 \text{ (MWh)}}{890 \text{ (MW)} \times 24 \text{ (時間/日)} \times 365.25 \text{ (日/年)}}$$

≒26.8

<運転開始後60年時点のEFPY>

= (2020年3月末時点の累積発電電力量 + 2020年4月以降の累積発電電力量※1) ÷ 定格電気出力 ÷ (24 × 365.25)

$$= \frac{208,550,599 \text{ (MWh)} + 189,249,600 \text{ (MWh)}}{890 \text{ (MW)} \times 24 \text{ (時間/日)} \times 365.25 \text{ (日/年)}}$$

≒51.0

※1 : 2020年4月～運転開始後60年時点 (2044年7月3日) までの期間、稼働率を100%と想定し算出した。

評価時期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、第5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。

川内1号炉の中性子照射量算出に用いる値を下表に示す。

$$f = \underbrace{f_1 \div EFPY_1}_{\text{カプセル位置での中性子束}} \div LF \times \exp(-0.24 \times t \div 4 \div 25.4) \times EFPY_2$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{内表面位置での中性子束}}$
 $\underbrace{\hspace{25em}}_{\text{板厚}t\text{の}1/4t\text{深さ位置での中性子束}}$
 評価時期における板厚 t の $1/4t$ 深さ位置での中性子照射量

川内1号炉の中性子照射量算出に用いる値

	記号	算出に用いる値
監視試験カプセルの中性子照射量	f_1 ($\times 10^{19}n/cm^2$) [E>1MeV]	12.4
監視試験カプセル取出時の定格負荷相当年数	$EFPY_1$	26.26
評価時点の定格負荷相当年数	$EFPY_2$	26.8 (2020年3月末時点) 51.0 (運転開始後60年時点)
監視試験カプセルの原子炉内表面に対するリードファクタ	LF	2.72
原子炉容器板厚	t (mm)	□

□ 内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

2020年3月末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。

(a) 原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置 : 2020年3月末時点

$$f = 12.4 \times 10^{19} \div 26.26 \div 2.72 \times \exp(-0.24 \times \square \div 4 \div 25.4) \times 26.8$$

$$\doteq 2.92 \times 10^{19} (\text{n/cm}^2, E > 1\text{MeV})$$

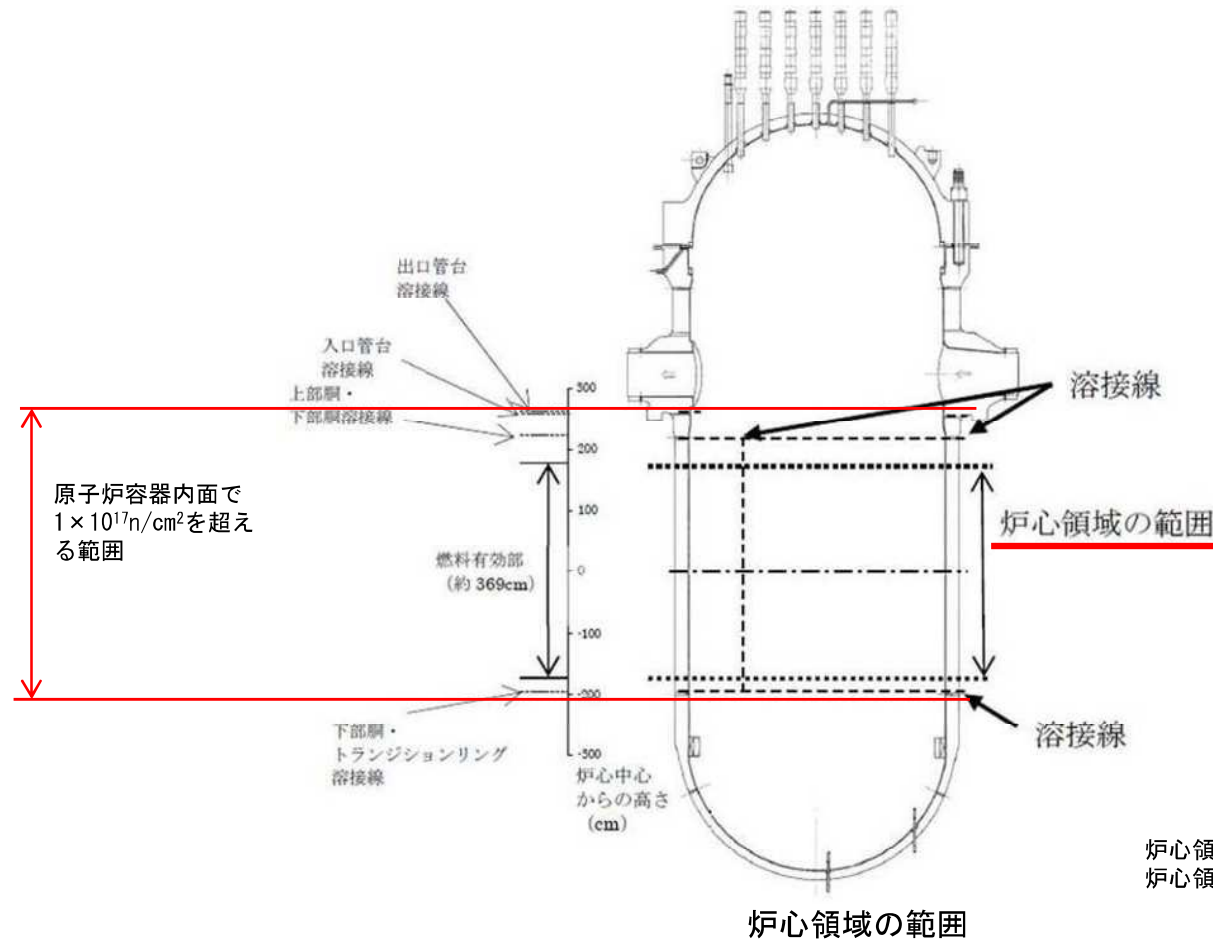
(b) 原子炉容器内表面から板厚tの1/4t深さ位置 : 運転開始後60年時点

$$f = 12.4 \times 10^{19} \div 26.26 \div 2.72 \times \exp(-0.24 \times \square \div 4 \div 25.4) \times 51.0$$

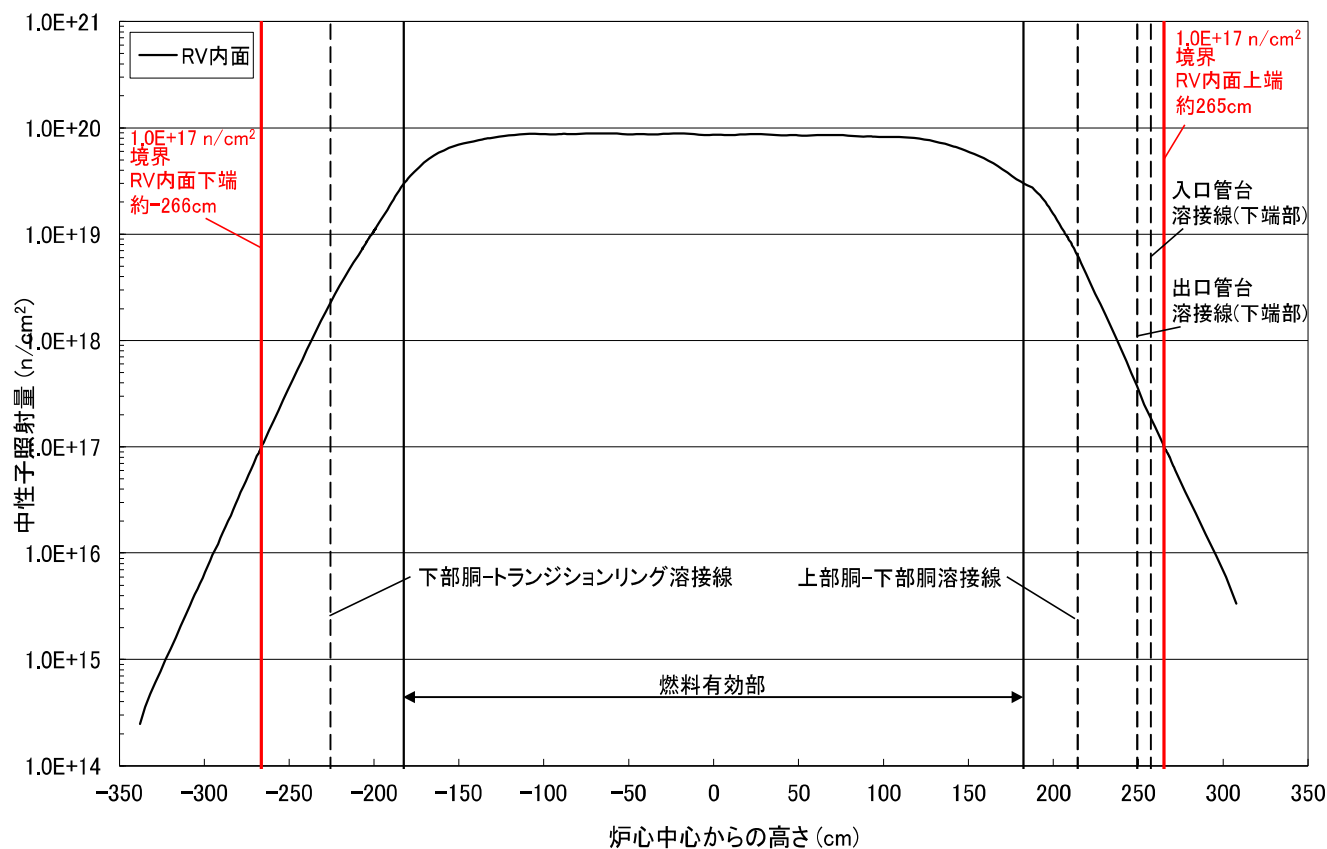
$$\doteq 5.56 \times 10^{19} (\text{n/cm}^2, E > 1\text{MeV})$$

評価点の抽出

運転開始後60年時点における中性子照射量が $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) 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及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、上部胴、トランジションリング及びその溶接部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。原子炉容器の炉心領域は以下のとおり。



運転開始後60年時点の原子炉容器軸方向中性子照射量分布を以下に示す。



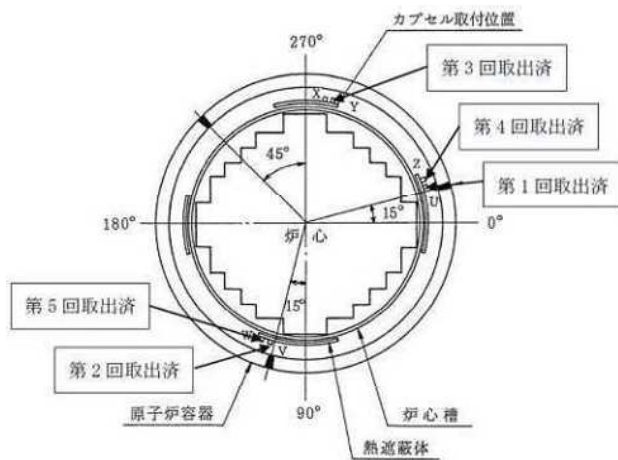
原子炉容器内表面の軸方向中性子照射量分布

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、破壊靱性の変化を把握している。

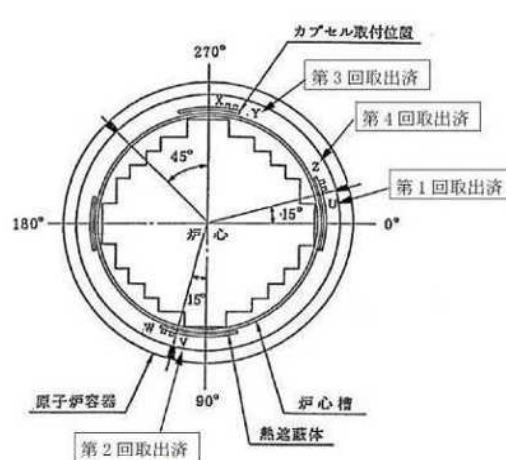
- ・ 川内1号炉は、当初監視試験カプセルを6体挿入し、現在までに5体のカプセルを取り出し、将来の運転期間に対する脆化予測を行い、原子炉容器の健全性を評価している。
- ・ 川内2号炉は、当初監視試験カプセルを6体挿入し、現在までに4体のカプセルを取り出し、将来の運転期間に対する脆化予測を行い、原子炉容器の健全性を評価している。

監視試験片の配置、試験片数、各試験片の化学成分、各カプセルの取出し時期及び監視試験結果を各号炉ごとに以降に示す。



1号炉

監視試験片の全カプセル数：6体（5体を取出し済）



2号炉

監視試験片の全カプセル数：6体（4体を取出し済）

試験片数（1カプセルあたり）

	引張試験片	シャルピー試験片	CT試験片
母材	6体	33体	8体
溶接金属	3体	18体	4体
熱影響部	—	18体	—

国内PWRに対しては、発電技検「溶接部等熱影響部信頼性実証試験」のうち、「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験」において、設計基準事象から主蒸気管破断事故、小破断冷却材喪失(LOCA)事故、大破断冷却材喪失(LOCA)事故が制限的なPTS事象として選定されており、これらを評価対象として、現行のJEAC4206に反映されている。PTS評価は、これに従って評価を実施している。

(参考) 溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験」[総まとめ版] (平成4年3月、財団法人 発電設備技術検査協会)

遷移曲線設定条件およびPTS評価における応力拡大係数の計算条件を表1および表2に示す。表1および表2は標準3ループプラントでの評価であり、PTS事象の中で最も厳しくなる大破断LOCAの条件について、主要条件を掲載している。

①ステップ状温度低下幅 (初期温度 約291℃→ 約27℃)

標準3ループプラントは初期温度が約291℃であるのに対し、川内1号炉は約□℃であり、ステップ状温度低下幅は標準3ループプラントと同等。

②再循環切替時間 (約27℃→ 約47℃)

標準3ループプラントは約□sであるのに対し、川内1号炉は約□sであり、再循環切替時間は標準3ループプラントよりも短く、安全側の評価となっている。

③圧力

川内1号炉は他の標準3ループプラントと同条件。

④冷却水温度 (27℃)

川内1号炉は他の標準3ループプラントと同条件。

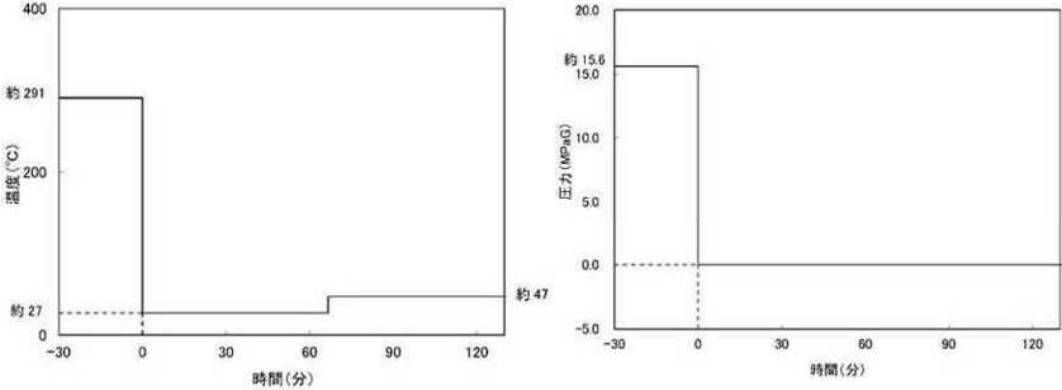
また、工事計画 (原規規発第1503181号 平成27年3月18日認可) の内容を反映したPTS評価結果を図1に示す。工事計画において、低温/高圧となりPTS事象の観点から設計基準事故状態よりも厳しい状態となる可能性のある事象を複数の炉心損傷防止シーケンスから検討した結果、2次冷却系からの除熱機能喪失を選定している。

表1 標準3ループプラントの状態遷移曲線 (大破断LOCA)

パラメータ	標準3ループプラントの状態遷移曲線
き裂形状 ①深さ ②軸方向長さ	【JEAC4206に基づく設定】 ①10mm ②60mm
温度条件	約291℃→約27℃にステップ状に変化 【PTS評価上最も厳しい大破断LOCAで評価】
圧力条件	約15.6 MPaG→0MPaGにステップ状に変化 【PTS評価上最も厳しい大破断LOCAで評価】

□内は商業機密に係る事項であるため公開できません。

表2 PTS評価における応力拡大係数の計算の条件

項目	算出方法	備考
<p>過渡条件</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 主蒸気管破断事故 ▪ 小破断冷却材喪失事故(小破断LOCA) ▪ 大破断冷却材喪失事故(大破断LOCA) ▪ 2次冷却系からの除熱機能喪失 <div style="text-align: center;">  <p>例：大破断冷却材喪失事故（大破断LOCA）</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1次冷却材温度が低温となりPTS評価上厳しい過渡を選定。 ▪ 選定した過渡のうち、PTS評価上厳しい大破断LOCAは、安全側に冷却水の混合を考慮しないステップ状の温度変化を与えている。
<p>応力解析</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 内圧による応力は、厚肉円筒の式より算出 ▪ 熱による応力は、厚肉円筒の内外温度差による熱応力の式を使用し算出 	
<p>応力拡大係数の算出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ C. B. Buchalet & W. H. Bamford の応力拡大係数式より算出 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 応力解析により求められた応力分布に基づき仮想欠陥最深部での応力拡大係数を算出。 ▪ 評価式はJEA04206-2007 C-3120 (3)に規定されている。

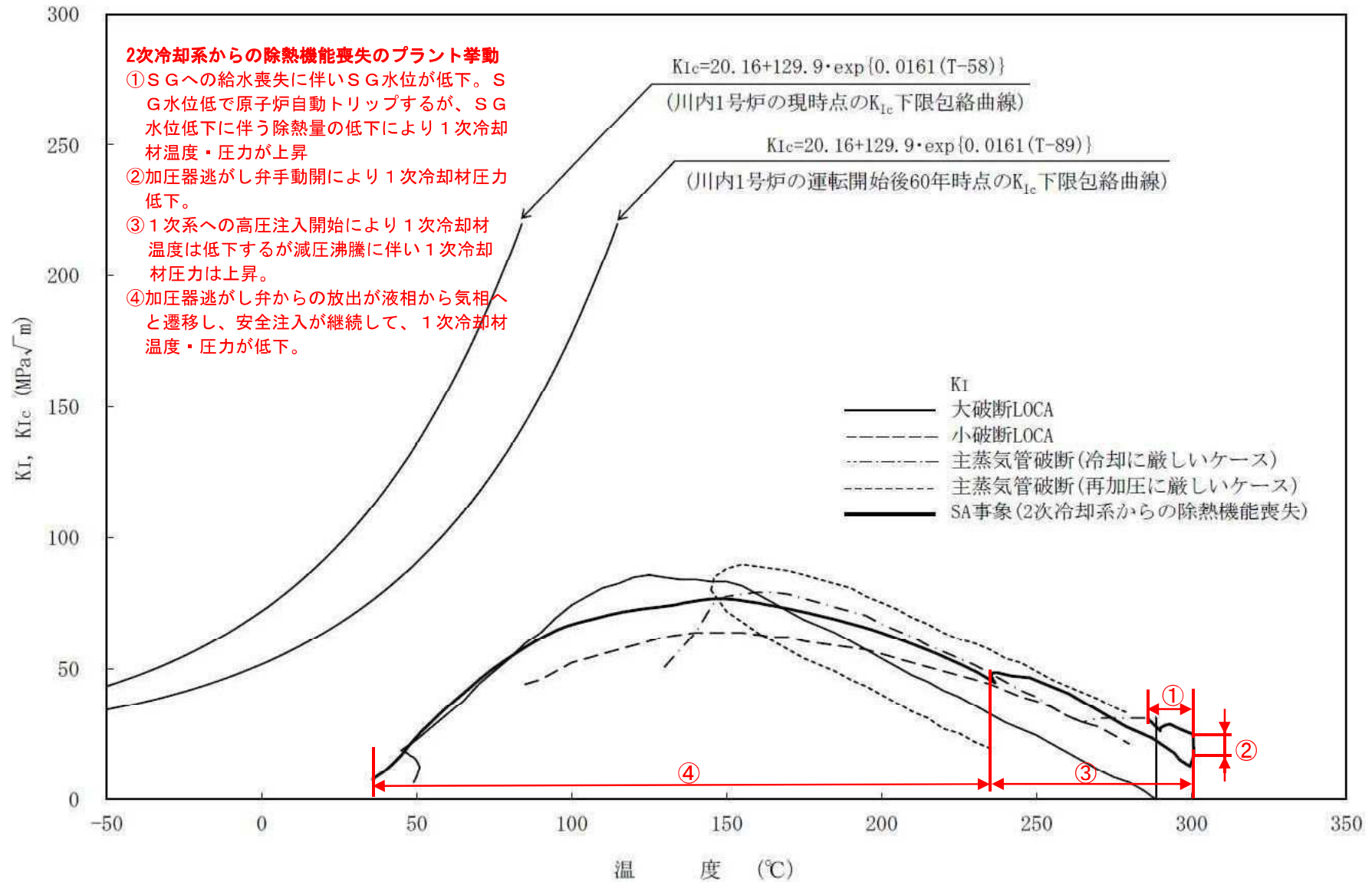


図1 川内1号炉 原子炉容器胴部(炉心領域部)中性子照射脆化に対するPTS評価結果 [深さ10mmの想定き裂を用いた評価]

深さ10mm位置の破壊靱性値の評価を行う上で用いたTpの値、Tpの設定に用いた全ての監視試験データ（破壊靱性）、中性子照射量、2020年3月末時点および運転開始後60年時点の温度移行量とその計算過程について示す。

監視試験データはJEAC4206-2007附属書Cに規定されている一般評価により計算し、Tpを設定している。脆化予測には、JEAC4201-2007/2013追補版の附属書Bに規定されている国内脆化予測法および技術基準規則解釈別記-1を適用している。

川内1号炉のTpの評価に用いた詳細データを添付1に示す。

また、2020年3月末時点において下限包絡線で厳しくなる第5回監視試験での母材の試験結果（試験温度50°Cにおいて $K_{IC}=92.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）および運転開始後60年時点において下限包絡線で厳しくなる第3回監視試験での溶接金属の試験結果（試験温度-30°Cにおいて $K_{IC}=55.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）に対するTpを算出した結果を以下に示す。

2020年3月末時点

$$\Delta TK_{IC} = \Delta RT_{NDT}(\text{評価時期}) - \Delta RT_{NDT}(\text{監視試験時点}) + \sigma_{\Delta} = 48.3 - 95.9 + 18 = -29.6^{\circ}\text{C}$$

$$T(\text{シフト後温度}) = T(\text{試験温度}) + \Delta TK_{IC} = 50 + (-29.6) = 20.4^{\circ}\text{C}$$

$$Tp = T(\text{シフト後温度}) - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{K_{IC}-20.16}{129.9}\right) = 20.4 - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{92.0-20.16}{129.9}\right) \doteq 58$$

運転開始後60年時点

$$\Delta TK_{IC} = 61.6 - 42.4 + 18 = 37.2^{\circ}\text{C}$$

$$T(\text{シフト後温度}) = (-30) + 37.2 = 7.2^{\circ}\text{C}$$

$$Tp = 7.2 - \frac{1}{0.0161} \ln\left(\frac{55.5-20.16}{129.9}\right) \doteq 89$$

【記号の説明】

- Tp : 当該プラントにおけるプラント評価時期の破壊靱性遷移曲線を設定する際に定まるプラント個別の定数 (°C)
- ΔTK_{IC} : 破壊靱性(K_{IC})の温度移行量 (°C)
- ΔRT_{NDT} : 関連温度移行量の計算値 (°C)
- σ_{Δ} : 標準偏差 (°C) (JEAC4201-2007/2013追補版の M_R と読み替える)
- T : 破壊靱性試験片の試験温度 (°C)

参考資料 1 (PTS評価におけるTpの計算過程 (1号炉の例))

添付 1

川内 1 号炉の2020年3月末時点におけるTp算出結果 (1/2)

チャージ名	監視試験 回次	シフト前 温度 (°C)	シフト後 温度 (°C)	KIc (MPa√m)	Tp (°C)	評価
78C621-1-1	0	-50	9.1	134.7	16.92	
78C621-1-1	0	-50	9.1	215.8	-16.34	
78C621-1-1	0	-100	-40.9	46.8	-	
78C621-1-1	0	-100	-40.9	103.7	-	
78C621-1-1	0	-150	-90.9	33.1	-	
78C621-1-1	0	-150	-90.9	63.8	-	
78C621-1-1	1	-50	3.9	123.1	18.35	
78C621-1-1	1	-50	3.9	116.3	22.59	
78C621-1-1	2	0	31.3	199.4	11.30	
78C621-1-1	2	-40	-8.7	67.3	-	
78C621-1-1	2	-80	-48.7	85.6	-	
78C621-1-1	2	0	31.3	134.0	39.50	
78C621-1-1	2	-40	-8.7	69.5	-	
78C621-1-1	2	-80	-48.7	88.4	-	
78C621-1-1	3	12	22.7	225.8	-5.83	
78C621-1-1	3	-30	-19.3	106.1	-	
78C621-1-1	3	-60	-49.3	80.3	-	
78C621-1-1	3	12	22.7	141.7	26.83	
78C621-1-1	3	-30	-19.3	84.4	-	
78C621-1-1	3	-60	-49.3	59.5	-	
78C621-1-1	4	21	11.1	168.0	3.06	
78C621-1-1	4	-15	-24.9	100.0	-	
78C621-1-1	4	-45	-54.9	108.0	-	
78C621-1-1	4	21	11.1	108.0	35.40	
78C621-1-1	4	-15	-24.9	124.0	-	
78C621-1-1	4	-45	-54.9	61.0	-	

参考資料 1 (PTS評価におけるTpの計算過程 (1号炉の例))

添付 1

川内 1 号炉の2020年3月末時点におけるTp算出結果 (2/2)

チャージ名	監視試験 回次	シフト前 温度 (°C)	シフト後 温度 (°C)	KIc (MPa√m)	Tp (°C)	評価
78C621-1-1	5	50	20.4	92.0	57.19	○
78C621-1-1	5	20	-9.6	80.4	-	
78C621-1-1	5	-20	-49.6	102.0	-	
78C621-1-1	5	50	20.4	103.0	48.34	
78C621-1-1	5	20	-9.6	108.0	-	
78C621-1-1	5	-20	-49.6	68.4	-	
W-1003-1	0	-50	0.3	121.0	16.03	
W-1003-1	0	-50	0.3	112.5	21.50	
W-1003-1	0	-100	-49.7	51.3	-	
W-1003-1	0	-100	-49.7	49.6	-	
W-1003-1	0	-150	-99.7	42.9	-	
W-1003-1	0	-150	-99.7	34.6	-	
W-1003-1	1	-50	-10.1	104.5	-	
W-1003-1	2	0	26.8	174.3	16.17	
W-1003-1	2	-40	-13.2	82.5	-	
W-1003-1	2	-80	-53.2	57.1	-	
W-1003-1	3	9	19.3	115.1	38.77	
W-1003-1	3	-30	-19.7	55.5	-	
W-1003-1	3	-60	-49.7	50.2	-	
W-1003-1	4	21	9.8	99.0	40.82	
W-1003-1	4	-15	-26.2	61.0	-	
W-1003-1	4	-45	-56.2	37.0	-	
W-1003-1	5	50	17.9	92.8	54.00	
W-1003-1	5	20	-12.1	68.1	-	
W-1003-1	5	-20	-52.1	40.2	-	

参考資料 1 (PTS評価におけるTpの計算過程 (1号炉の例))

添付 1

川内 1 号炉の60年時点におけるTp算出結果 (1/2)

チャージ名	監視試験 回次	シフト前 温度 (°C)	シフト後 温度 (°C)	K _{Ic} (MPa√m)	T _p (°C)	評価
78C621-1-1	0	-50	33.9	134.7	41.72	
78C621-1-1	0	-50	33.9	215.8	8.46	
78C621-1-1	0	-100	-16.1	46.8	-	
78C621-1-1	0	-100	-16.1	103.7	-	
78C621-1-1	0	-150	-66.1	33.1	-	
78C621-1-1	0	-150	-66.1	63.8	-	
78C621-1-1	1	-50	28.7	123.1	43.15	
78C621-1-1	1	-50	28.7	116.3	47.39	
78C621-1-1	2	0	56.1	199.4	36.10	
78C621-1-1	2	-40	16.1	67.3	79.06	
78C621-1-1	2	-80	-23.9	85.6	-	
78C621-1-1	2	0	56.1	134.0	64.30	
78C621-1-1	2	-40	16.1	69.5	76.23	
78C621-1-1	2	-80	-23.9	88.4	-	
78C621-1-1	3	12	47.5	225.8	18.97	
78C621-1-1	3	-30	5.5	106.1	31.16	
78C621-1-1	3	-60	-24.5	80.3	-	
78C621-1-1	3	12	47.5	141.7	51.63	
78C621-1-1	3	-30	5.5	84.4	49.24	
78C621-1-1	3	-60	-24.5	59.5	-	
78C621-1-1	4	21	35.9	168.0	27.86	
78C621-1-1	4	-15	-0.1	100.0	-	
78C621-1-1	4	-45	-30.1	108.0	-	
78C621-1-1	4	21	35.9	108.0	60.20	
78C621-1-1	4	-15	-0.1	124.0	-	
78C621-1-1	4	-45	-30.1	61.0	-	

参考資料 1 (PTS評価におけるTpの計算過程 (1号炉の例))

添付 1

川内 1 号炉の60年時点におけるTp算出結果 (2/2)

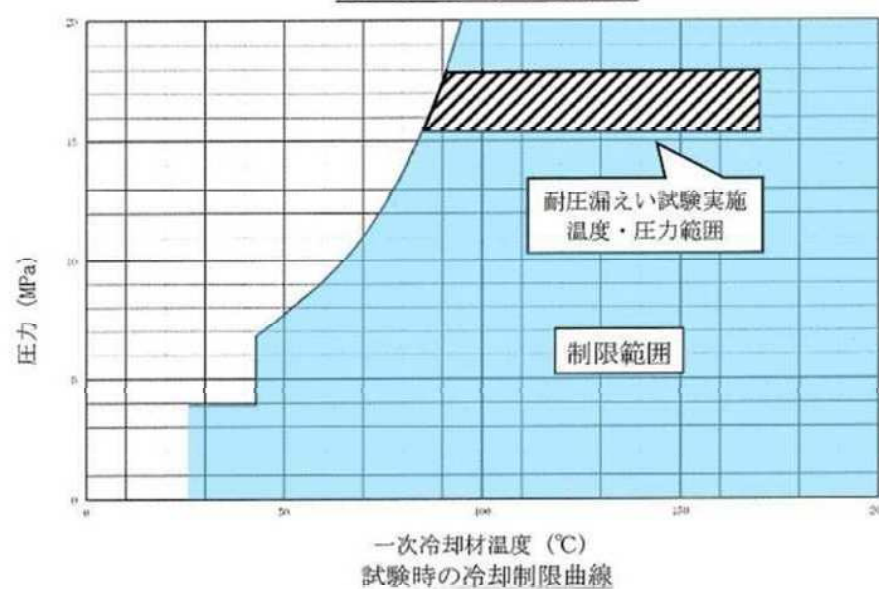
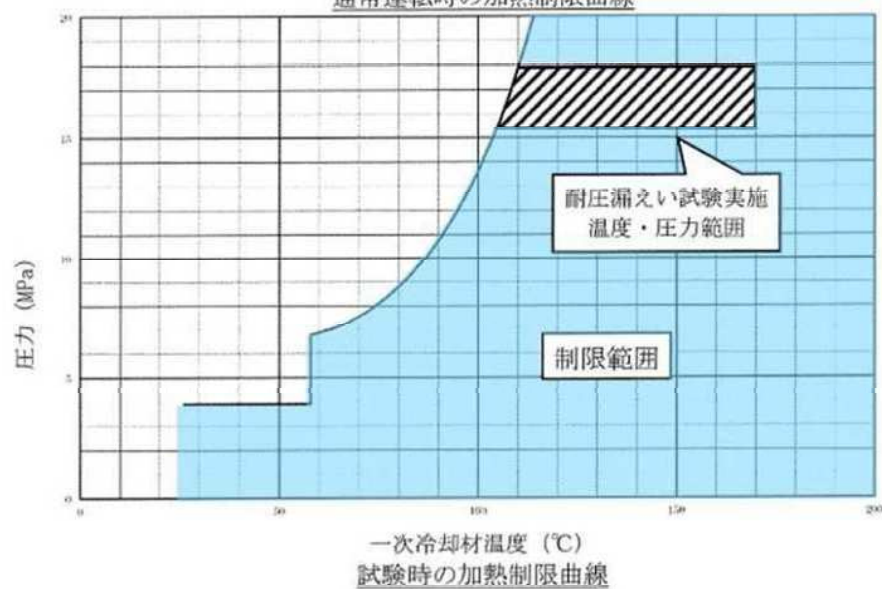
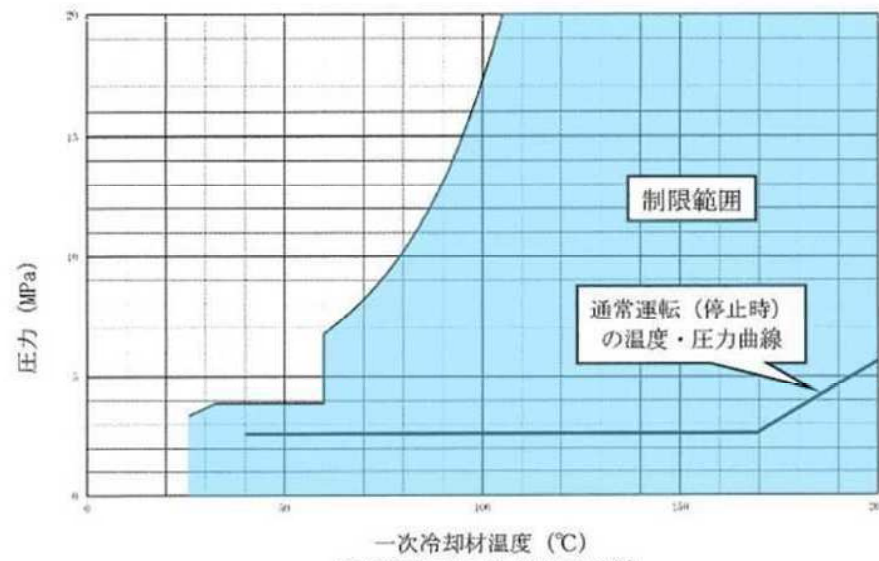
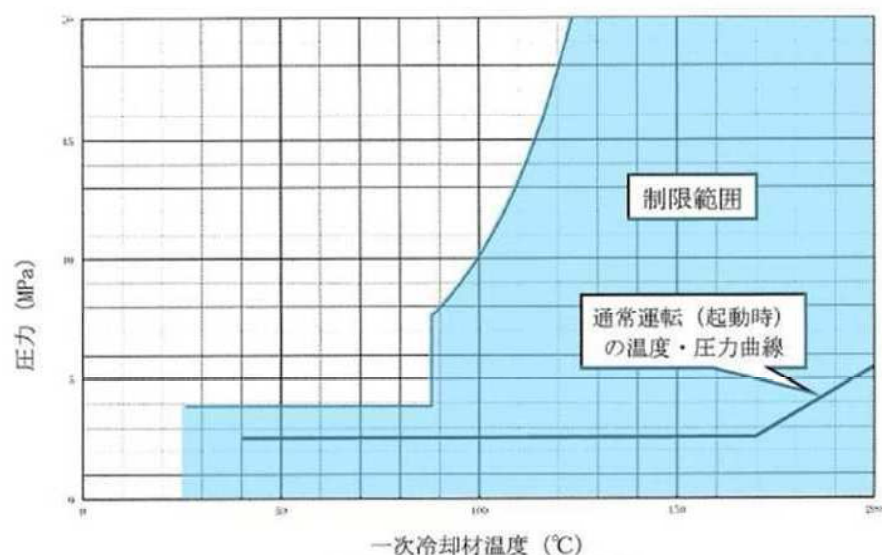
チャージ名	監視試験 回次	シフト前 温度 (°C)	シフト後 温度 (°C)	KIc (MPa√m)	Tp (°C)	評価
78C621-1-1	5	50	45.2	92.0	81.99	
78C621-1-1	5	20	15.2	80.4	62.93	
78C621-1-1	5	-20	-24.8	102.0	-	
78C621-1-1	5	50	45.2	103.0	73.14	
78C621-1-1	5	20	15.2	108.0	39.50	
78C621-1-1	5	-20	-24.8	68.4	-	
W-1003-1	0	-50	27.2	121.0	42.93	
W-1003-1	0	-50	27.2	112.5	48.40	
W-1003-1	0	-100	-22.8	51.3	-	
W-1003-1	0	-100	-22.8	49.6	-	
W-1003-1	0	-150	-72.8	42.9	-	
W-1003-1	0	-150	-72.8	34.6	-	
W-1003-1	1	-50	16.8	104.5	43.63	
W-1003-1	2	0	53.7	174.3	43.07	
W-1003-1	2	-40	13.7	82.5	59.30	
W-1003-1	2	-80	-26.3	57.1	-	
W-1003-1	3	9	46.2	115.1	65.67	
W-1003-1	3	-30	7.2	55.5	88.05	○
W-1003-1	3	-60	-22.8	50.2	-	
W-1003-1	4	21	36.7	99.0	67.72	
W-1003-1	4	-15	0.7	61.0	72.57	
W-1003-1	4	-45	-29.3	37.0	-	
W-1003-1	5	50	44.8	92.8	80.90	
W-1003-1	5	20	14.8	68.1	76.71	
W-1003-1	5	-20	-25.2	40.2	-	

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）及び耐圧漏えい試験温度を設けて運用している。

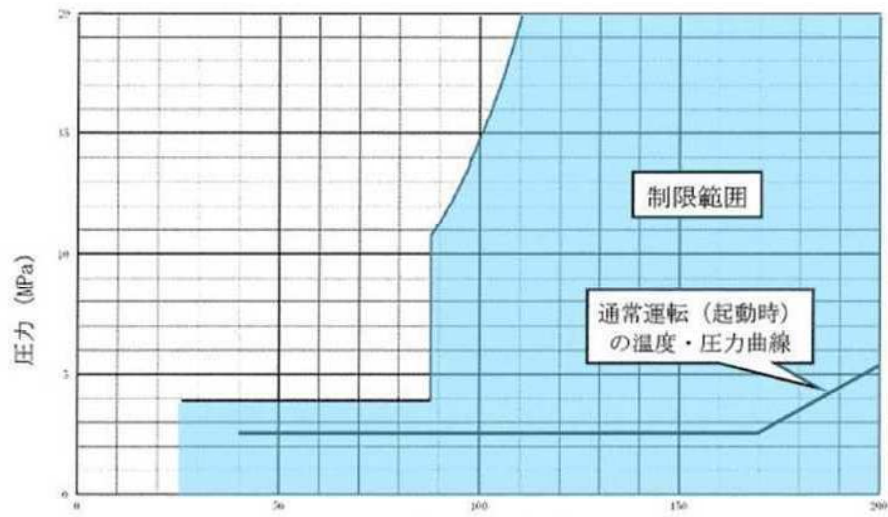
運転開始後60年時点での関連温度を想定し、通常の1次冷却系の加熱・冷却時の1次冷却材温度・圧力の制限範囲及び原子炉冷却材圧力バウンダリに対する供用中の漏えいもしくは耐圧検査時の原子炉冷却材の最低温度について評価した。

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・圧力曲線及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、通常運転時及び試験時に制限範囲を遵守可能であることを確認した。

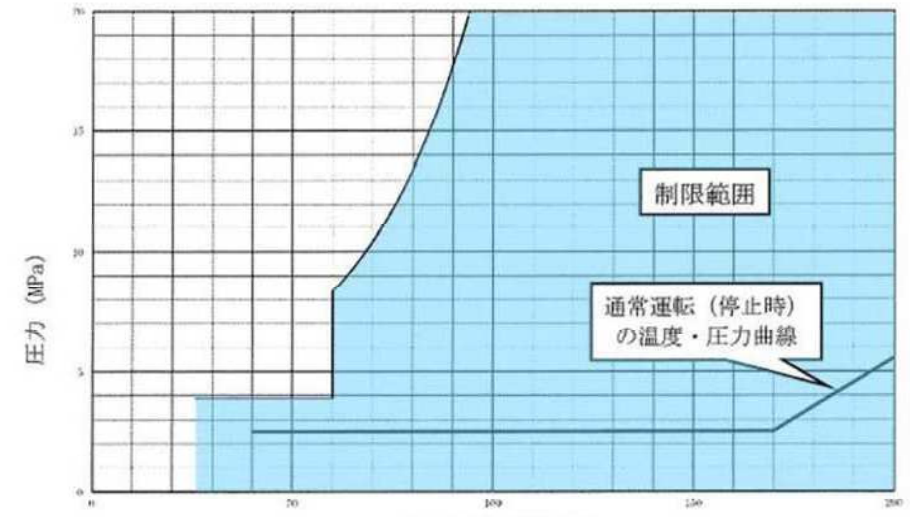
通常運転時・試験時の加熱冷却制限曲線評価結果(運転開始後60年時点)を次頁以降に示す。



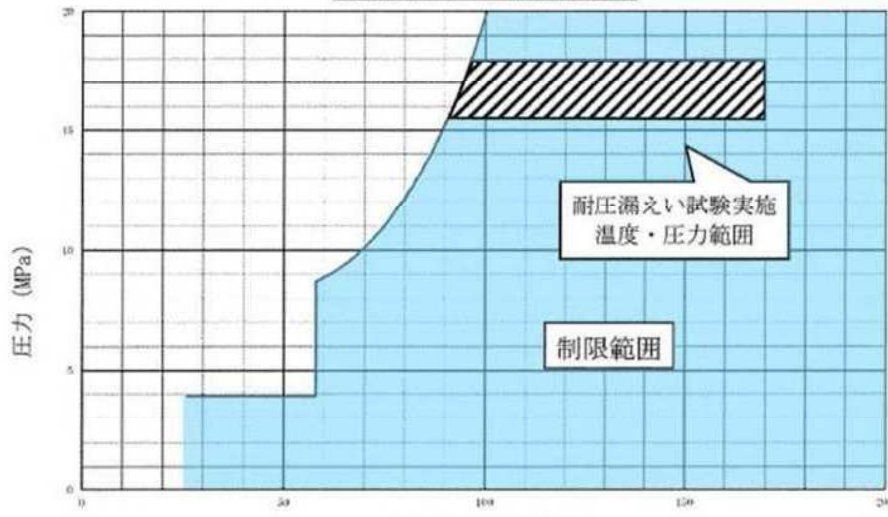
川内 1 号炉 通常運転時・試験時の加熱冷却制限曲線評価結果 (運転開始後60年時点)



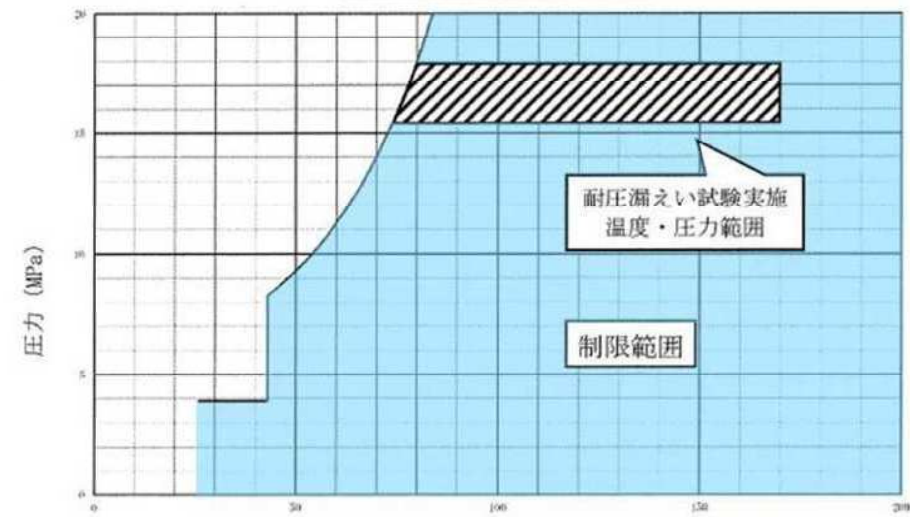
一次冷却材温度 (°C)
通常運転時の加熱制限曲線



一次冷却材温度 (°C)
通常運転時の冷却制限曲線



一次冷却材温度 (°C)
試験時の加熱制限曲線



一次冷却材温度 (°C)
試験時の冷却制限曲線

川内 2 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)