

福島第二原子力発電所 4 号炉 高経年化技術評価
(中性子照射脆化)

補足説明資料

目 次

1. はじめに.....	2-1
2. 技術評価.....	2-1

別紙 1～8

別紙 1 原子炉圧力容器内面で照射量が 1.0×10^{21} n/m ² をこえる範囲 及び炉心領域について.....	2-5
別紙 2 原子炉圧力容器内面で照射量が 1.0×10^{21} n/m ² をこえる範囲の母材 及び溶接金属について.....	2-7
別紙 3 監視試験片の化学成分について.....	2-8
別紙 4 監視試験片の配置, 試験片数, 各カプセルの取り出し時期, 中性子照射量, 中性子束及びリードファクターについて.....	2-9
別紙 5 これまでに取り出した監視試験片の取出時期と EFPY の対応 及び JEAC 4201 記載の取出時期との対応について.....	2-12
別紙 6 近傍にノズルのような大きな応力集中源がある場合の健全性評価結果について.....	2-13
別紙 7 現時点 (平成 27 年 8 月 25 日時点) の関連温度, 上部棚吸収エネルギーの予測, 破壊力学的検討によるマージン及び胴の最低使用温度の計算過程について.....	2-16
別紙 8 至近の供用期間中検査における超音波探傷検査, 漏えい検査の要領 及び結果について.....	2-22

1. はじめに

本資料は、原子炉压力容器中性子照射脆化の高経年化技術評価の補足として、評価結果を示すと共に、評価内容の補足資料を取り纏めたものである。

原子炉压力容器の炉心領域部においては、中性子照射と共に遷移温度（関連温度）の上昇と上部棚の靱性が低下することは広く知られており、中性子照射脆化と呼ばれている。

金属材料の破壊形態は温度などに依存し、高温において延性破壊を生じるが、温度の低下に伴い、延性破壊から非延性破壊へ破壊形態が変化（遷移）する温度を遷移温度（関連温度）という。

また、遷移温度より高温側の延性破壊領域で、その温度でのすべての試験片の破面率が 100%延性破面の領域を上部棚領域といい、その吸収エネルギーの平均値を上部棚吸収エネルギーという。

2. 技術評価

(1) 健全性評価

① 評価点の抽出

中性子照射脆化に対する健全性評価上厳しい箇所は、炉心領域の胴である。胴内表面での中性子照射量は、平成27年8月25日時点*1 で $4.1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV) 程度と評価される。

また、評価に用いる板厚1/4 深さ位置での中性照射量は、平成27年8月25日時点*1 で $2.8 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV) 程度と評価される。

*1：中性子照射量については、平成23年3月11日の震災時のスクラムにより中性子照射が停止し、それ以降の中性子照射量の累積がないことから、平成23年3月11日時点での中性子照射量とする。

本評価では福島第二4号炉の監視試験結果と「日本電気協会 電気技術規程」（以下、「JEAC」という）に基づいた評価を示す。

なお、JEAC「監視試験の対象」である相当運転期間末期の最大中性子照射量が容器内面で $1.0 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV) を超えると予測される炉心領域には、運転開始後平成27年8月25日時点において、胴以外に低圧注水ノズルが含まれるが、胴に比べ中性子照射量が小さいことから、中性子照射脆化に対する健全性評価は、胴で実施する。

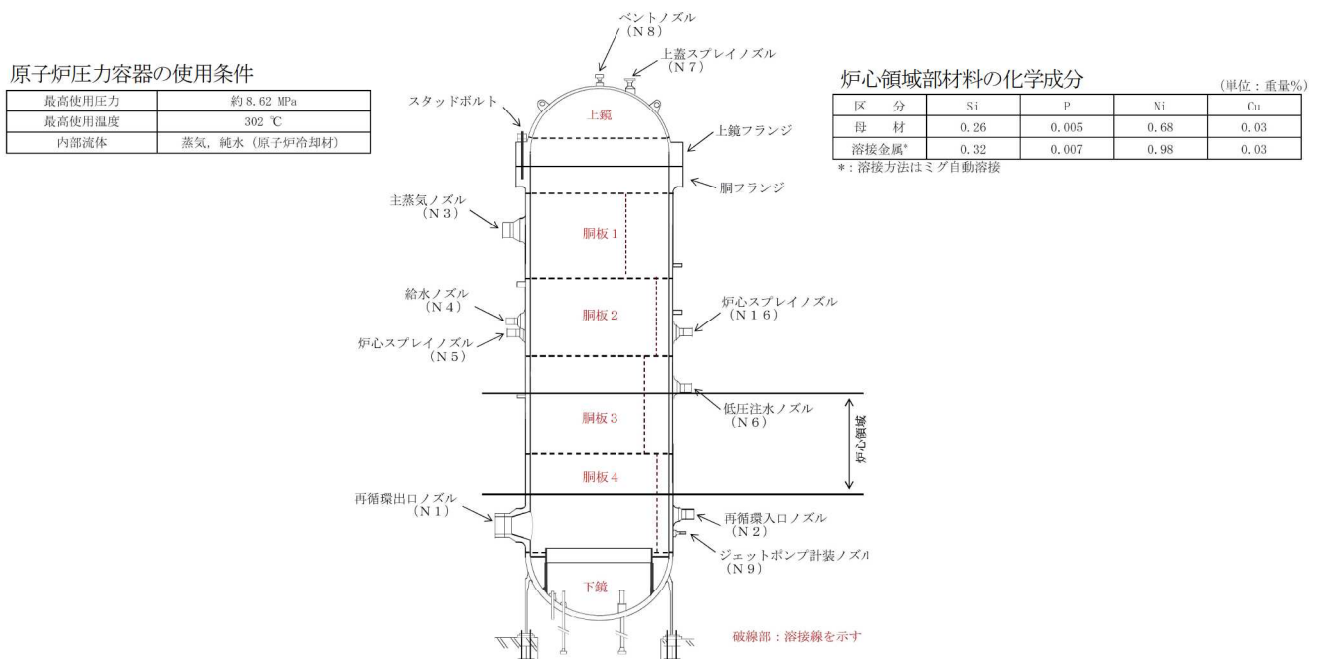


図1 炉心領域（中性子照射脆化評価部位）

② 監視試験結果

日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法」(JEAC 4201)等に規程に従い、これまで計2回の監視試験を実施している。監視試験結果を表1に示す。

表1 監視試験結果

回数	中性子照射量 ($\times 10^{23}n/m^2$) ($E > 1 MeV$)	関連温度及び関連温度移行量 (°C)						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
関連温度 初期値	0	-40		-65		-40		199	202	216
第1回 (加速)	0.068 (約30 EFPY*)	関連温度 移行量	関連温度	関連温度 移行量	関連温度	関連温度 移行量	関連温度	188	176	185
		13	-27	13	-52	11	-29			
第2回	0.019 (約9 EFPY*)	2	-38	12	-53	-11	-51	222	212	223

*：定格負荷相当年数

③ 関連温度評価

日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法」(JEAC 4201-2007/2013追補版) (以下、「JEAC 4201-2007」という)の国内脆化予測法による関連温度予測値を表2に示す。

表2 関連温度予測値

評価時期	材 料	関連温度 初期値 (°C)	関連温度 移行量 (°C)*	関連温度 (°C)	破壊力学的 検討による マージン(°C)	胴の最低使用 温度(°C)
平成27年8月25日 時点	母材	-40	25	-15	24	9
	溶接金属	-65	25	-40		
	熱影響部	-40	25	-15		

*：圧力容器内壁面から板厚1/4深さでの予測値

JEAC 4201-2007により求めた関連温度移行量の予測値と測定値は、図2に示す通り、予測式にマージンを見込んだものの範囲にあり、測定値について特異な脆化は認められない。

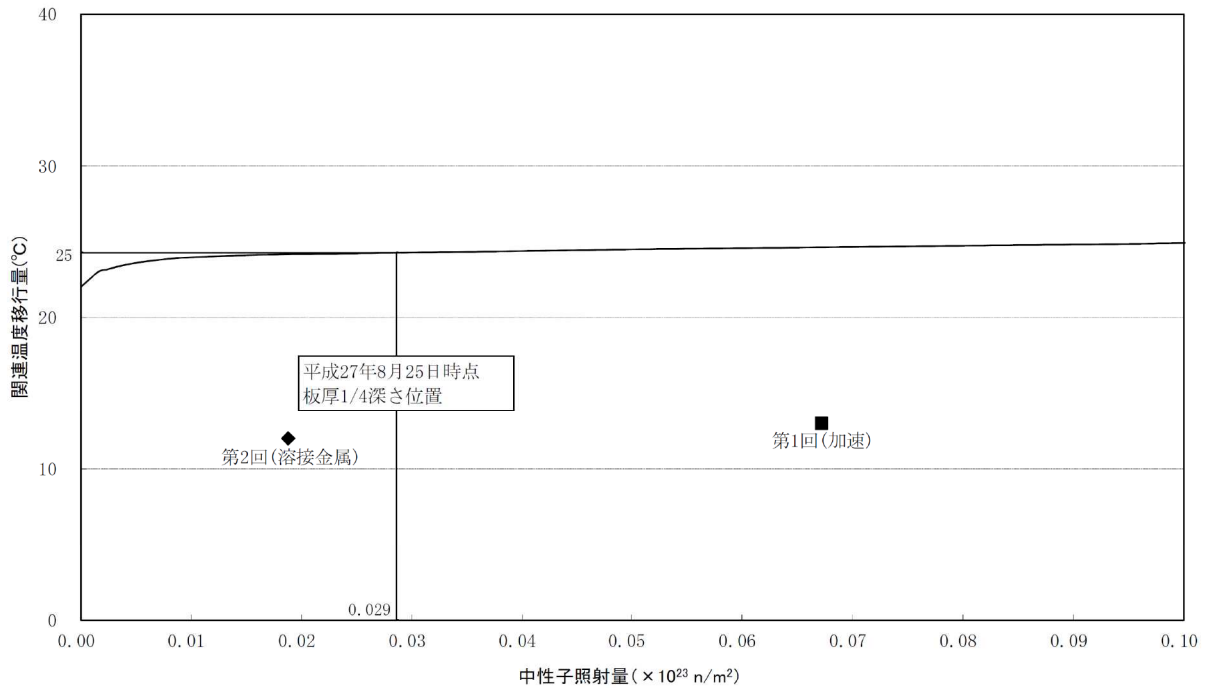


図2 関連温度移行量の測定値と予測値

④ 上部棚吸収エネルギー評価

上部棚吸収エネルギーの変化についてJEAC 4201-2007（附属書B「中性子照射による関連温度移行量及び上部棚吸収エネルギー減少率の予測」）に基づいて評価した結果を表3に示す。

最も上部棚吸収エネルギーが低下するのは、実測値から推定される溶接金属であり、建設時（未照射材）202 J、平成27年8月25日時点で166 J程度となっている。

いずれの場合もJEAC 4206-2007で規定されている68 Jを上回っている。

表3 上部棚吸収エネルギー予測値

（単位：J）

	方向	初期値	平成27年8月25日時点
母材	T方向	199	171
溶接金属	溶接線に直角方向	202	166
熱影響部	溶接線に直角方向	216	185

⑤ 加圧熱衝撃評価

JEACにおいては、PWRプラントの原子炉（圧力）容器の炉心領域部の非延性破壊に対して供用状態C、Dで最も厳しい条件として加圧熱衝撃（PTS）評価を要求しているが、BWRプラントの原子炉圧力容器は通常運転時には蒸気の飽和圧力温度となっており、事故時に非常用炉心冷却系が作動しても冷却水の注入に伴って圧力が低下するため、高圧（高い応力がかかった状態）のまま低温になることがなく、BWRプラントでは実施する必要がない。

(2) 現状保全

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、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））」（以下、「設計・建設規格」という）及びJEAC 4201-2007等に基づいて、計画的に監視試験を実施し平成27年8月25日時点の破壊靱性の変化を予測している。

監視試験片は、JEAC 4206-2007等に基づく最低使用温度により漏えい検査を実施しており、全4セット中2セットを取り出し済みである。

原子炉圧力容器に対しては、供用期間中検査で超音波探傷検査及び漏えい検査を実施し、有意な欠陥の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、現状までの運転において炉心領域部材の照射脆化が問題となる可能性は小さい。今後は安定停止維持の状態において劣化進展する事象ではないため、健全性に対して影響を及ぼす可能性は無いと判断する。

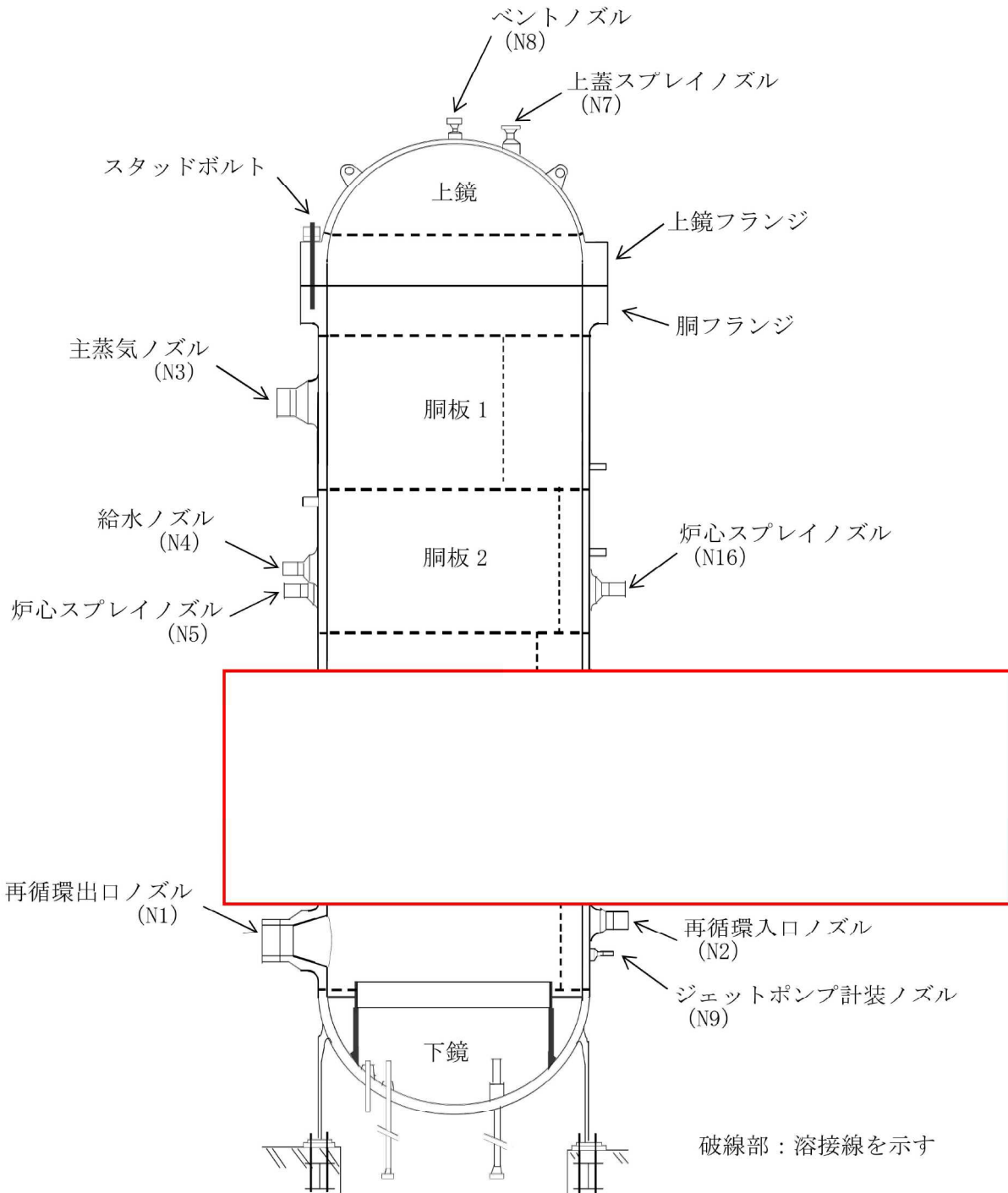
(4) 高経年化への対応

炉心領域部（胴）の中性子照射脆化については、最新の脆化予測式による評価を採用する。

以 上

タイトル	原子炉圧力容器内面で照射量が 1.0×10^{21} n/m ² をこえる範囲及び炉心領域について
説明	<p>平成 27 年 8 月 25 日時点において、原子炉圧力容器内面で照射量が 1.0×10^{21} n/m² をこえる範囲の主な部位と照射量を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・胴板 3, 4 : 約 4.1×10^{21} n/m² ・低圧注水ノズル (N6) : <input type="text"/> n/m²/s (中性子束) × 17.45 EFPY <input type="text"/> n/m² <input type="text"/> n/m²/s (中性子束) × 17.45 EFPY <p>以下、参考として、主な炉内構造物における照射量を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・炉心シュラウド : 約 5.5×10^{24} n/m² ・上部格子板 : 約 5.5×10^{25} n/m² ・周辺燃料支持金具 : 約 5.5×10^{24} n/m² ・炉心支持板 : 約 5.5×10^{23} n/m² ・制御棒案内管 : 約 5.5×10^{23} n/m² <p>なお、炉心領域を示した図 (原子炉圧力容器のプレートナンバーやノズルの番号、照射量 1.0×10^{21} n/m² をこえる範囲) について添付-1 に示す。</p> <p>また、板厚及びクラッド厚さを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・板厚 : <input type="text"/> mm (最小値) ・クラッド厚さ : <input type="text"/> mm (最小 <input type="text"/> mm) <p style="text-align: right;">以 上</p>

内は商業機密に属しますので公開できません



原子炉压力容器概要図

内は商業機密に属しますので公開できません

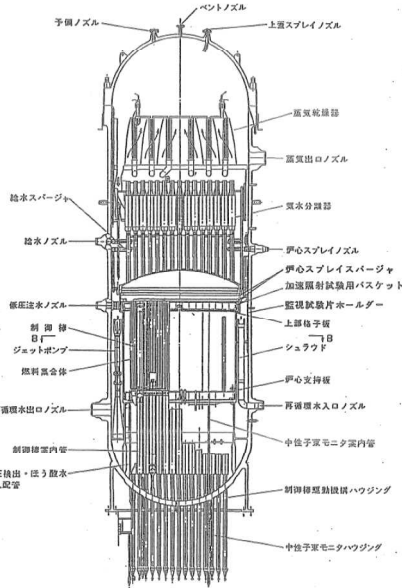
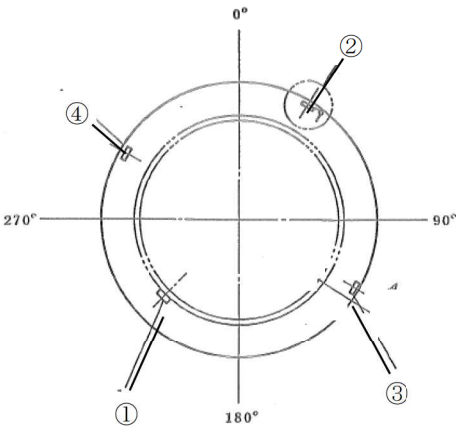
タイトル	原子炉圧力容器内面で照射量が $1.0 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ をこえる範囲の母材及び溶接金属について																					
説明	<p>原子炉圧力容器内面で照射量が $1.0 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ をこえる範囲（別紙 1 で規定される範囲（原子炉圧力容器の炉心領域部））の母材及び溶接金属の成分を下表に示す。</p> <p style="text-align: right;">（単位：重量 %）</p> <table border="1" data-bbox="443 730 1321 987"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>Ni</th> <th>Cu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">母材</td> <td>胴板 3 (1)</td> <td colspan="4" rowspan="4" style="border: 2px solid red;"></td> </tr> <tr> <td>胴板 3 (2)</td> </tr> <tr> <td>胴板 4 (1)</td> </tr> <tr> <td>胴板 4 (2)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">溶接金属</td> <td>0.32</td> <td>0.007</td> <td>0.98</td> <td>0.03</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">以 上</p>			Si	P	Ni	Cu	母材	胴板 3 (1)					胴板 3 (2)	胴板 4 (1)	胴板 4 (2)	溶接金属		0.32	0.007	0.98	0.03
		Si	P	Ni	Cu																	
母材	胴板 3 (1)																					
	胴板 3 (2)																					
	胴板 4 (1)																					
	胴板 4 (2)																					
溶接金属		0.32	0.007	0.98	0.03																	

内は商業機密に属しますので公開できません

タイトル	監視試験片の化学成分について																			
説明	<p data-bbox="389 573 831 607">監視試験片の化学成分は以下の通り。</p> <p data-bbox="1174 613 1386 647">(単位：重量 %)</p> <table border="1" data-bbox="363 654 1401 927"><thead><tr><th data-bbox="363 654 620 734">区分</th><th data-bbox="620 654 836 734">Si</th><th data-bbox="836 654 1027 734">P</th><th data-bbox="1027 654 1219 734">Ni</th><th data-bbox="1219 654 1401 734">Cu</th></tr></thead><tbody><tr><td data-bbox="363 734 620 828">母 材</td><td data-bbox="620 734 836 828">0.26</td><td data-bbox="836 734 1027 828">0.005</td><td data-bbox="1027 734 1219 828">0.68</td><td data-bbox="1219 734 1401 828">0.03</td></tr><tr><td data-bbox="363 828 620 927">溶接金属</td><td data-bbox="620 828 836 927">0.32</td><td data-bbox="836 828 1027 927">0.007</td><td data-bbox="1027 828 1219 927">0.98</td><td data-bbox="1219 828 1401 927">0.03</td></tr></tbody></table> <p data-bbox="1318 972 1406 1005">以 上</p>					区分	Si	P	Ni	Cu	母 材	0.26	0.005	0.68	0.03	溶接金属	0.32	0.007	0.98	0.03
区分	Si	P	Ni	Cu																
母 材	0.26	0.005	0.68	0.03																
溶接金属	0.32	0.007	0.98	0.03																

タイトル 監視試験片の配置，試験片数，各カプセルの取り出し時期，中性子照射量，中性子束及びリードファクターについて

説明 1. 監視試験片の配置，試験片数，各カプセルの取り出し時期
 建設時に「原子力発電設備に関する構造等の技術基準（告示 501）S45（1970）.9.3」に基づき，炉内へ装荷しているカプセル数は，3 カプセル（このほか自主として加速照射試験片 1 カプセル）である。
 試験片数についても，建設時に「同技術基準」に基づき，母材，溶接金属，熱影響部について，衝撃：8 個以上，引張：2 個以上の規定数を装荷している。



配置		取出時期	試験片個数					
場所	角度		衝撃試験片			引張試験片		
			母材	溶接金属	熱影響部	母材	溶接金属	熱影響部
①上部格子板 (加速照射)	225							
②圧力容器壁	30							
③圧力容器壁	120							
④圧力容器壁	300							

 内は商業機密に属しますので公開できません

説明
(続き)

2. 関連温度及び関連温度移行量
各監視試験結果は以下の通り。

回数	関連温度及び関連温度移行量 (°C)					
	母材		溶接金属		熱影響部	
関連温度初期値	-40		-65		-40	
	関連温度移行量	関連温度	関連温度移行量	関連温度	関連温度移行量	関連温度
第1回 (加速照射)	13	-27	13	-52	11	-29
第2回	2	-38	12	-53	-11	-51

3. 各カプセルの中性子照射量, 中性子束
各カプセルの中性子照射量及び中性子束は以下の通り。

	中性子照射量 (n/cm ²)	中性子束 (n/cm ² /sec)
第1回 (加速照射)		
第2回		

内は商業機密に属しますので公開できません

説明
(続き)

4. 各カプセルのリードファクター

第1, 2回監視試験結果より, 監視試験片位置, 压力容器 1/4t 位置における中性子束のリードファクターは以下の通り。

<第1, 2回監視試験>

		压力容器 内表面	監視試験片 位置	压力容器 1/4t 位置
高速中性子束 相対値	第1回 上部格子板 (加速照射)			
	第2回 压力容器壁			

なお, 中性子束分布の解析コードが取出年代で相違し, 第1回時は [] , 第2回時は [] を使用していることから, リードファクターに相違が発生している。
ただし, 評価は, 第2回時の压力容器壁を使用している。



監視試験片及び中性子ドジメータの炉内配置

以上

[] 内は商業機密に属しますので公開できません

タイトル	これまでに取り出した監視試験片の取出時期と EFPY の対応及び JEAC4201 記載の取出時期との対応について												
説明	<p>これまでに取り出した監視試験片は、第 1 回上部格子板 (加速照射), 第 2 回圧力容器内壁の 2 回である。</p> <table border="1" data-bbox="371 689 1401 981"> <thead> <tr> <th data-bbox="371 689 675 772"></th> <th data-bbox="675 689 908 772">取出時期(年月)</th> <th data-bbox="908 689 1144 772">EFPY</th> <th data-bbox="1144 689 1401 772">JEAC 4201 (年度)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="371 772 675 869">第 1 回 上部格子板 (加速照射)</td> <td colspan="2" data-bbox="675 772 1144 981" rowspan="2"></td> <td data-bbox="1144 772 1401 869">電力自主</td> </tr> <tr> <td data-bbox="371 869 675 981">第 2 回 圧力容器内壁</td> <td data-bbox="1144 869 1401 981">6 EFPY (1991)</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">以 上</p>				取出時期(年月)	EFPY	JEAC 4201 (年度)	第 1 回 上部格子板 (加速照射)			電力自主	第 2 回 圧力容器内壁	6 EFPY (1991)
	取出時期(年月)	EFPY	JEAC 4201 (年度)										
第 1 回 上部格子板 (加速照射)			電力自主										
第 2 回 圧力容器内壁			6 EFPY (1991)										

内は商業機密に属しますので公開できません

タイトル	近傍にノズルのような大きな応力集中源がある場合の健全性評価結果について
説明	<p>低圧注水ノズル（以下、N6 ノズル）の評価にあたって非延性破壊防止の観点で破壊靱性上最も厳しい運転条件である耐圧試験圧力（<input type="text"/> MPa）で実施した。</p> <p>評価条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ H27. 8. 25 時点の EFPY : 18 EFPY (17. 45) ・ 関連温度初期値 : <input type="text"/> °C ・ 化学成分 (母材) : Cu = <input type="text"/> mass% , Ni = <input type="text"/> mass% ・ 板厚 : t = <input type="text"/> mm , 1/4t 位置での深さ : a = t/4 = <input type="text"/> mm ・ N6 ノズル部の中性子束 ϕ : <input type="text"/> n/cm²/s ・ 1/4t 位置での中性子束 : <math>\phi_c = \text{<input type="text"/>} \cdot \exp(-0. 24a/25. 4) = \text{<input type="text"/>}</math> n/cm²/s <p>平成 27 年 8 月 25 日時点の N6 ノズルの関連温度移行量は <input type="text"/> °C となる。 関連温度及びそれを決定するために求めたマージンならびに設定根拠（過程）を示した計算書を添付-1 に示す。 また、N6 ノズルの破壊力学的検討によるマージン（°C）は、<input type="text"/> °C となった。 計算根拠は以下の通り。</p> $1/0. 036 \times \ln((K_I - 36. 48)/22. 78) = \text{} \text{ } ^\circ\text{C} (\text{} \text{ } ^\circ\text{C})$ <ul style="list-style-type: none"> ・ 応力拡大係数 K_I は、<input type="text"/> (MPa\sqrt{m}) <p>なお、応力拡大係数 K_I (MPa\sqrt{m}) は JEAC 4206-2007 付属書 F-4200 の手法により算出した。計算過程を以下に示す。</p> $K_I = f \times F \times \sigma_h \times \sqrt{(\pi \times a) \div \sqrt{1, 000}}$ <ul style="list-style-type: none"> ・ 安全係数 (f) : <input type="text"/> ・ 係数 (F) : <input type="text"/> (半径 r_n = ノズル内半径 <input type="text"/> mm) + 0. 29 \times <input type="text"/> mm (ノズルコーナ曲率半径)) ・ 応力 (σ_h) : <input type="text"/> (N/mm²) ・ π : 3. 141593 ・ 仮想欠陥寸法 (a) : <input type="text"/> mm (板厚)/16

内は商業機密に属しますので公開できません

説 明

以下に N6 ノズルの関連温度予測値をまとめる。

(続 き)

N6 ノズルの関連温度予測値

関連温度 初期値 (°C)	関連温度 移行量 (°C) *	関連温度 (°C)	破壊力学的検討による マージン (°C)	最低使用温度 (°C)

* : 圧力容器内壁面からの板厚 1/4 深さでの予測値

以 上

 内は商業機密に属しますので公開できません

JEAC 4201-2007 及び JEAC 4201-2007 [2013 追補版] に基づく関連温度移行量評価 (18 EFPY)

1. 国内脆化予測法について

母材等，溶接金属と同様に JEAC 4201-2007 附属書 B に規定されている国内脆化予測法に基づき，N6 ノズル部の評価を行う。

2. 関連温度移行量の評価手法

母材等，溶接金属と同様手法にて，N6 ノズル部の評価を行う。

3. 4号炉の関連温度移行量評価

平成 27 年 8 月 25 日時点 (17.45 EFPY) における ΔRT_{NDT} 予測値の算出過程を示す。

(1) N6 ノズル部の評価

4号炉 N6 ノズル部のデータは次の通りである。

板厚：t = mm, 1/4t 位置での深さ：a = t/4 = mm

N6 ノズル部の中性子束 ϕ : n/cm²/s,

1/4t 位置での中性子束： $\phi_c = \text{} \cdot \exp(-0.24a/25.4) = \text{}$ n/cm²/s

Cu = mass%, Ni = mass%

17.45 EFPY に近い 18 EFPY, Cu = mass% における表の読み値と，Ni に対して比例補間した値は表 1 の通りとなる。JEAC 4201-2007 附属書 B の式 (5) より，中性子束 $\phi_c = \text{}$ n/cm²/s に対する ΔRT_{NDT} 計算値は次の通りである (小数点第 2 位を切り上げ)。

ΔRT_{NDT}

表 1 4号炉 N6 ノズル部の Ni に対する補間後の ΔRT_{NDT} 計算値

JEAC 4201-2007 の 脆化予測評価表 (対応する中性子束 n/cm ² /s)	Ni [mass%]	
	ΔRT_{NDT} (読み値) [°C]	ΔRT_{NDT} (補間後の値) [°C]
附属書表 B-2100-2 (3/14) (2.0 × 10 ⁸)		
附属書表 B-2100-2 (4/14) (4.0 × 10 ⁸)		

(2) マージンの算出

炉壁試験片による実測値は 1 個しかないため，マージン M_R は以下の通りである。

$M_R = 22$ °C

以上より，N6 ノズル部の ΔRT_{NDT} 予測値は， [°C]

以 上
 内は商業機密に属しますので公開できません

タイトル	現時点（平成 27 年 8 月 25 日時点）の関連温度，上部棚吸収エネルギーの予測，破壊力学的検討によるマージン及び胴の最低使用温度の計算過程について																							
説明	<p>福島第二 4 号炉における原子炉圧力容器胴の中性子照射脆化について以下に示す。</p> <p>○適用規格について 最低使用温度及び上部棚吸収エネルギーの評価においては，下記の規格に基づき評価を行っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉構造材の監視試験方法（JEAC 4201-2007） ・原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法（JEAC 4206-2007） <p>○健全性評価における胴内表面の照射量及び評価に用いた板厚 1/4 深さ位置での中性子照射量について</p> <table border="1" data-bbox="395 974 1257 1144"> <tr> <td>胴内表面の中性子照射量</td> <td>$4.1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)</td> </tr> <tr> <td>評価に用いた板厚 1/4 深さ位置での中性子照射量</td> <td>$2.8 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)</td> </tr> </table> <p>○原子炉圧力容器の炉心領域部材料の化学成分について (単位：重量%)</p> <table border="1" data-bbox="391 1265 1091 1393"> <thead> <tr> <th>区分</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>Ni</th> <th>Cu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>母材</td> <td>0.26</td> <td>0.005</td> <td>0.68</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>溶接金属</td> <td>0.32</td> <td>0.007</td> <td>0.98</td> <td>0.03</td> </tr> </tbody> </table> <p>○EFPY について</p> <table border="1" data-bbox="395 1473 1082 1601"> <thead> <tr> <th>EFPY</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17.45 (18*)</td> <td>平成 27 年 8 月 25 日時点</td> </tr> </tbody> </table> <p>*：「JEAC 4201-2007 附属書表 B-2100-2 原子炉圧力容器に対する ΔRT_{NDT} 計算値」で ΔRT_{NDT} 計算値を算出する際に適用した EFPY 値を示す。</p> <p>平成 27 年 8 月 25 日時点の EFPY は，18 EFPY である。 平成 23 年 3 月 11 日までの 4 号炉の総発電量=168,088,440 MWh。これ以降，東北地方太平洋沖地震により発電はしていない。 このため，平成 27 年 8 月 25 日時点の EFPY=総発電量/(1100×365×24)=17.45 EFPY。これを切り上げ 18 EFPY としている。</p>	胴内表面の中性子照射量	$4.1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)	評価に用いた板厚 1/4 深さ位置での中性子照射量	$2.8 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)	区分	Si	P	Ni	Cu	母材	0.26	0.005	0.68	0.03	溶接金属	0.32	0.007	0.98	0.03	EFPY	備考	17.45 (18*)	平成 27 年 8 月 25 日時点
胴内表面の中性子照射量	$4.1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)																							
評価に用いた板厚 1/4 深さ位置での中性子照射量	$2.8 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ (>1MeV)																							
区分	Si	P	Ni	Cu																				
母材	0.26	0.005	0.68	0.03																				
溶接金属	0.32	0.007	0.98	0.03																				
EFPY	備考																							
17.45 (18*)	平成 27 年 8 月 25 日時点																							

説明
(続き)

○評価結果について

・最低使用温度

JEAC 4206-2007 及び JEAC 4201-2007 により求めた関連温度移行量, 関連温度, 最低使用温度は, 以下の通り。なお, 計算過程を添付-1 に示す。

評価時期	材 料	関連温度 初期値 (°C)	関連温度 移行量 (°C)*	関連温度 (°C)	破壊力学的 検討による マージン(°C)	胴の最低 使用温度(°C)
平成 27 年 8 月 25 日時点	母材	-40	25	-15	24	9
	溶接金属	-65	25	-40		
	熱影響部	-40	25	-15		

*: 压力容器内壁面から板厚 1/4 深さでの予測値

・上部棚吸収エネルギー予測値

上部棚吸収エネルギー予測値は, 以下の通りであり, JEAC 4206-2007 で規定されている 68 J を上回っている。なお, 計算過程を添付-2 に示す。

	方向	初期値	平成 27 年 8 月 25 日時点
母材	T 方向	199	171
溶接金属	溶接線に直角方向	202	166
熱影響部	溶接線に直角方向	216	185

○破壊力学的検討によるマージンについて

最低使用温度 = 関連温度 + 破壊力学的検討によるマージン

ここで, 破壊力学的検討によるマージン = $1/0.036 \times \ln((K_{IC} - 36.48)/22.78) =$
 °C

K_{IC} : 破壊靱性値 MPa

応力拡大係数 K_I は, JEAC 4206-2007 A-3222 の (7) 式による。また, A-3222 の (1) 項の内容により, K_{IC} として K_I を使用している。

$$\begin{aligned}
 K_I &= 1.5 \cdot K_{IP} + K_{Iq} \\
 &= 1.5 \cdot M_m \cdot \sigma_M + (2/3) \cdot M_m \cdot \sigma_q \\
 &= 1.5 \times \text{} + (2/3) \times \text{} \\
 &= \text{}
 \end{aligned}$$

応力 (N/mm ²)		応力拡大係数 K_I
σ_M	σ_q	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

以上

内は商業機密に属しますので公開できません

JEAC 4201-2007 及び JEAC 4201-2007 [2013 追補版] に基づく関連温度移行量評価 (18 EFPY)

1. 4号炉の関連温度移行量評価

JEAC 4201-2007 附属書 B に規定される国内脆化予測法に基づき評価を行う。

平成 27 年 8 月 25 日時点 (17.45 EFPY) における ΔRT_{NDT} 予測値の算出過程を示す。

板厚 : $t = \square$ mm, $1/4t$ 位置での深さ : $a = t/4 = \square$ mm,

銅板内面の中性子束 $\phi : \square$ n/cm²/s,

$1/4t$ 位置での中性子束 : $\phi_c = \square \cdot \exp(-0.24a/25.4) = \square$ n/cm²/s

① 脆化予測評価表の選定

4号炉第2回監視試験より, $1/4t$ (t :板厚) 位置での中性子束 $\phi_c = \square$ n/cm²/s であるため, $\phi_a = 4.0 \times 10^8$ n/cm²/s, $\phi_b = 6.5 \times 10^8$ n/cm²/s に対応した表を選定する。

② ΔRT_{NDT} 計算値の算出

(1) 母材部及び熱影響部の評価

4号炉母材部及び熱影響部の化学成分は次の通りである。

Cu = 0.03 mass%, Ni = 0.68 mass%

17.45 EFPY に近い 18 EFPY, Cu = \square mass% における表の読み値と, Ni に対して比例補間した値は表 1 の通りとなる。JEAC 4201-2007 附属書 B の式 (3) より, 中性子束 $\phi_c = \square$ n/cm²/s に対する ΔRT_{NDT} 計算値は次の通りである (小数点第 2 位を切り上げ)。

ΔRT_{NDT}

表 1 4号炉母材部及び熱影響部の Ni に対する補間後の ΔRT_{NDT} 計算値

JEAC4201-2007 の 脆化予測評価表 (対応する中性子束 n/cm ² /s)	Ni [mass%]	
	ΔRT_{NDT} (読み値) [°C]	ΔRT_{NDT} (補間後の値) [°C]
附属書表 B-2100-2 (4/14) (4.0×10^8)		
附属書表 B-2100-2 (5/14) (6.5×10^8)		

(2) 溶接金属の評価

4号炉溶接金属の化学成分は次の通りである。

Cu = \square mass%, Ni = \square mass%

18 EFPY, Cu = \square mass%, Ni = \square mass% における表の読み値は表 2 の通りとなる。

JEAC 4201-2007 附属書 B の式 (3) より, 中性子束 $\phi_c = \square$ n/cm²/s に対する ΔRT_{NDT} 計算値は次の通りである (小数点第 2 位を切り上げ)。

ΔRT_{NDT}

 内は商業機密に属しますので公開できません

表2 4号炉溶接金属の化学成分に対する ΔRT_{NDT} 計算値

JEAC 4201-2007 の 脆化予測評価表 (対応する中性子束 $n/cm^2/s$)	Ni [mass%]	
	ΔRT_{NDT} (読み値) [°C]	ΔRT_{NDT} (補間後の値) [°C]
附属書表 B-2100-2 (4/14) (4.0×10^8)		
附属書表 B-2100-2 (5/14) (6.5×10^8)		

③ マージンの算出

炉壁試験片による実測値は1個しかないため、マージン M_R は以下の通りである。

$$M_R = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

JEAC 4201-2007 附属書Bの式(2)より求めた ΔRT_{NDT} 予測値と、炉壁試験片による実測値を表3に示す。

ΔRT_{NDT} 予測値は監視試験による実測値を上回っており M_R を求めなおす必要はない。

表3 4号炉 ΔRT_{NDT} 予測値と実測値の比較

	ΔRT_{NDT} 予測値 [°C]	第2回試験(炉壁試験片)での ΔRT_{NDT} 実測値 [°C]
母材		2
溶接金属		12
熱影響部		-11

以上

内は商業機密に属しますので公開できません

上部棚吸収エネルギー予測値評価

中性子照射による上部棚吸収エネルギー (USE : Upper Shelf Energy) の低下について評価した結果は表1の通りである。なお、予測値は小数点以下第1位を切り捨てている。

表1 USE 予測値

	方 向	初期値	平成27年8月25日時点
母材	T方向(主圧延方向に直角な方向)	199	171
溶接金属	溶接線に直角方向	202	166
熱影響部	溶接線に直角方向	216	185

最も上部棚吸収エネルギーが低下するのは溶接金属の値であり、建設時(未照射材)で202 J、平成27年8月25日時点で166 J程度となっている。なお、いずれもJEAC 4206規定の68Jを上回っている。これらの導出に必要な事項を以下に示す。

$$\text{USE調整値(J)} = \text{USE初期値} \times (1 - \Delta\text{USE予測値}/100), \quad \Delta\text{USE予測値} = C_0 + [\text{CF}_0] \times [\text{FF}_0] + \text{Mu}$$

C_0 : 母材は -0.95, 溶接金属は -2.78

ここで, $[\text{CF}_0]$ は表2に示す化学成分, $[\text{FF}_0]$ は中性子照射量(平成27年8月25日時点) $4.1 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ をパラメータとしてそれぞれ算出した。

Muは監視試験による最大の ΔUSE の実測値が上記の ΔUSE 予測値を上回った場合は実測値を包絡するようにMuを定めることが定められており、これに従いMu(実測値包絡)を定めた。

表3に監視試験データを示すが、USE実測値が初期値より大きいものがあり、この値を使用した方法によりMuを設定すると負の値となり、適切な予測ができない可能性があるため、Mu(実測値包絡)は ΔUSE の実測値が2個未満の場合に規定される式 $[\text{Mu} = 2 \sigma_{\Delta\text{U}} (\sigma_{\Delta\text{U}}: \text{母材(熱影響部含む)})$ は6.9%, 溶接金属は7.5%)により設定している。なお、予測値は小数点以下第2位を切り上げている。また、表4に ΔUSE 算出のためのパラメータを示す。

表2 RPV胴板材料の化学成分 (単位: wt%)

	Si	P	Ni	Cu
母材	0.26	0.005	0.68	0.03
溶接金属	0.32	0.007	0.98	0.03
熱影響部	0.26	0.005	0.68	0.03

表3 監視試験データ

回 数	上部棚吸収エネルギー(J)		
	母材	溶接金属	熱影響部
初期値	199	202	216
第1回(加速)	188	176	185
2回	222	212	223

表4 ΔUSE 算出のためのパラメータ

	CF _v	平成27年8月25日時点		
		FF _v	M ₀ (実測値包絡)	ΔUSE 予測値(%)
母材				
溶接金属				
熱影響部				

以上

内は商業機密に属しますので公開できません

タイトル	至近の供用期間中検査における超音波探傷検査，漏えい検査の要領及び結果について
説明	<p>原子炉圧力容器の供用期間中検査については，社団法人日本機械学会 JSME S NA1-2008「発電用原子力設備規格 維持規格（2008 年改訂版）」に準拠し，第 4 号機第 17 保全サイクル定期事業者検査のクラス 1 機器供用期間中検査として検査を実施した。</p> <p>原子炉圧力容器の超音波探傷検査，漏えい検査を実施し判定基準を満足していることを確認している。</p> <p>【超音波探傷検査】</p> <p>B-A 原子炉圧力容器の炉心外周域耐圧部分の溶接継手 2 継手</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>