

# これまでの委員からの質問への回答 (第 4 回分科会時の質問)

2022年9月6日



| No. | 資料   | 質問事項   | 質問者          | 頁  |
|-----|--|--|--------------|--|
| 4-1 | 【資料1】<br>原子炉容器の<br>特別点検(個別<br>確認・評価)<br>結果について | 検出能力及び試験片と実機で予想される欠陥との同等性について説明すること。試験片については、加工方法も示すこと。  | 佐藤委員         | 次回以降<br>2号RV特別<br>点検に係る説<br>明時に併せて<br>説明予定 |
| 4-2 |  | クラッドは強度部材ではないので、強度計算では存在を無視していると思うが、考慮しないことにより、非保守側となる要素はないか説明すること。  | 後藤委員         |  |
| 4-3 |  | 炉心領域の検査範囲について説明すること。   | 渡邊委員         |  |
| 4-4 |  | 欠陥検出性5mmに対して、加圧熱衝撃事象(以下「PTS事象」という。)評価で10mm深さの欠陥を想定する意味を説明すること。   | 大畑委員         |  |
| 4-5 |  | 原子炉容器の破壊モード3つの関連性は(独立かそれぞれ干渉するのか)。また、原子炉容器胴部で材料の異方性はどうか説明すること。   | 後藤委員         |  |
| 4-6 |  | クラッドを溶接したときの熱影響部はどのくらいの厚さか説明すること。  | 渡邊委員         |  |
| 4-7 | 【資料2】<br>原子炉容器の<br>中性子照射<br>脆化について             | 応力拡大係数(以下「 $K_I$ 」という。)の算出過程を構成する温度分布解析、応力評価、応力拡大係数の計算の各ステップについて、わかりやすく説明すること。この際、熱伝達率の計算方法や $K_I$ 曲線とPTS事象のシナリオの対応についても触れること。 | 佐藤委員<br>後藤委員 | 3~7  |
| 4-8 |  | アトムプローブ等で観察された監視試験片の内部組織(クラスターの量など)と予測式が想定する状況を対比して、脆化予測法に対する検証を行っているか。<br>検討結果があるなら、30年から40年の間に得られた知見として示すこと。                 | 渡邊委員<br>釜江座長 | 8, 9                                       |
| 4-9 |  | 1/4t位置での評価と10mm位置での評価が高経年技術評価(以下「PLM評価」という。)内で混在しているが、すみ分けを示すこと。また、PTS評価で、破壊靱性値のカーブと応力拡大係数のカーブがそれぞれどの深さで評価されているのか説明すること。       | 佐藤委員         | 10, 11                                     |

| No.  | 資料                                 | 質問事項   | 質問者                             | 頁          |
|------|------------------------------------|--|---------------------------------|------------|
| 4-10 | 【資料2】<br>原子炉容器の<br>中性子照射<br>脆化について | 現行のPTS評価では、応力拡大係数、破壊靱性のそれぞれに見た目以上の保守性があると思われる。例えば、応力拡大係数の算定にクラッドの存在を無視していることであるが、残留応力の扱いなども含めて説明すること。  | 大畑委員                            | 12, 13     |
| 4-11 | 【資料3】<br>照射誘起型<br>応力腐食割れ<br>について   | 高照射量のため、脆性材料へ物性変化が考えられるが、破壊力学について説明すること。（脆性材料に変化しているため破壊力学の計算が必要。バッフルフォーマーボルト（以下「BFB」という。）にもいえる。それだけの照射量を受けている。物性の変化に基づいた脆性材料としての考え方は。）                                  | 佐藤委員                            | 14, 15     |
| 4-12 |                                    | BFBの首下形状について、首下のコーナー部（2Rとパラボリック）の応力集中係数を示すこと。  | 佐藤委員                            | 16         |
| 4-13 |                                    | 0.1MeVと1MeV以上の場合の炉心の中性子分布を示すこと。  | 渡邊委員                            | 次回以降<br>説明 |
| 4-14 |                                    | 中性子照射量をdpaであらわした際の中性子量は、0.1MeVと1MeV以上のどちらであるか示すこと。   | 渡邊委員                            | 17         |
| 4-15 |                                    | 照射誘起型応力腐食割れは、事象の知見が少ないため、評価対象設備の代表性について、あらためて説明すること。   | 渡邊委員                            | 次回以降<br>説明 |
| 4-16 |                                    | 割れが発生した際の進展速度データはあるか。ある場合はデータを示すこと。（発生と進展と破断は別問題。進展速度のデータはあるか。今の時点ではよくても、次のサイクルで進展して破断するのでは。）<br>ひび割れの進展について、Rカーブ（ひび割れ進展抵抗曲線、ひび割れ長さ<br>と破壊靱性値との関係）のデータを示すこと。（なければ推定でもよい） | 佐藤委員<br>橋高委員                    | 18         |
| 4-17 |                                    | 【資料4】<br>第3回分科会<br>時の質問  | 設計の経年化について、長期運転を踏まえた取組みを説明すること。 | 守田委員       |

## 1. 質問事項

$K_I$ の算出過程を構成する温度分布解析、応力評価、応力拡大係数の計算の各ステップについて、わかりやすく説明すること。この際、熱伝達率の計算方法や $K_I$ 曲線とPTS事象のシナリオの対応についても触れること。

## 2. 回答

以下の表1に、 $K_I$ の算出過程を構成する温度分布解析、応力評価、応力拡大係数の算出について示す。なお、温度条件、圧力条件については保守性を考慮しステップ状の変化を与えている（図1及び図2）。また、図3～5に、PTS評価結果と主なシナリオ関係性を示す。

表1 各ステップの評価概要

|           | 評価概要   |
|-----------|--|
| 温度分布解析    | PTS事象の進捗に伴い生じる原子炉容器内面に接液する冷却材の温度変化に対して、胴部板厚内の温度分布を時刻歴で計算する。<br>温度分布解析においては、クラッドの存在を考慮し、クラッド内面には熱伝達率として、JEAC4206-2007に基づき、強制対流の式の値に上向き自然対流の効果（Jackson-Fewsterの式）を加味して求めた値を使用する。 |
| 応力評価      | 前段で求めた温度分布の変化に対して熱応力を、また、PTS事象での冷却材圧力の変化に対して内圧による応力を求めて、時刻歴での応力分布を把握する。応力評価においては、強度部材ではないクラッドの存在は考慮しない。  |
| 応力拡大係数の算出 | 得られた応力分布から、JEAC4206-2007に基づき、Buchalet and Bamfordの応力拡大係数の式を用いて、時刻歴で応力拡大係数を算出する。応力拡大係数の算出においては、ある程度き裂の開口に抵抗する効果が期待できるクラッドの存在を無視しており、保守的な応力拡大係数を得ている。                            |

PTS評価における温度分布解析等に使用する温度条件、圧力条件については、保守性を考慮し、下図に示すステップ状の変化を与えている。

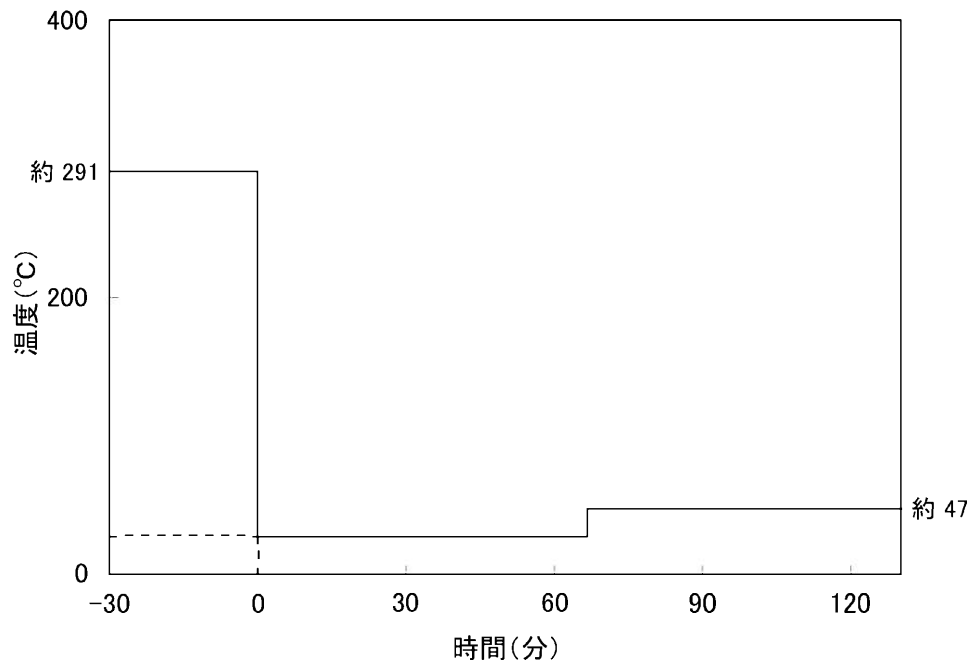


図1 温度条件

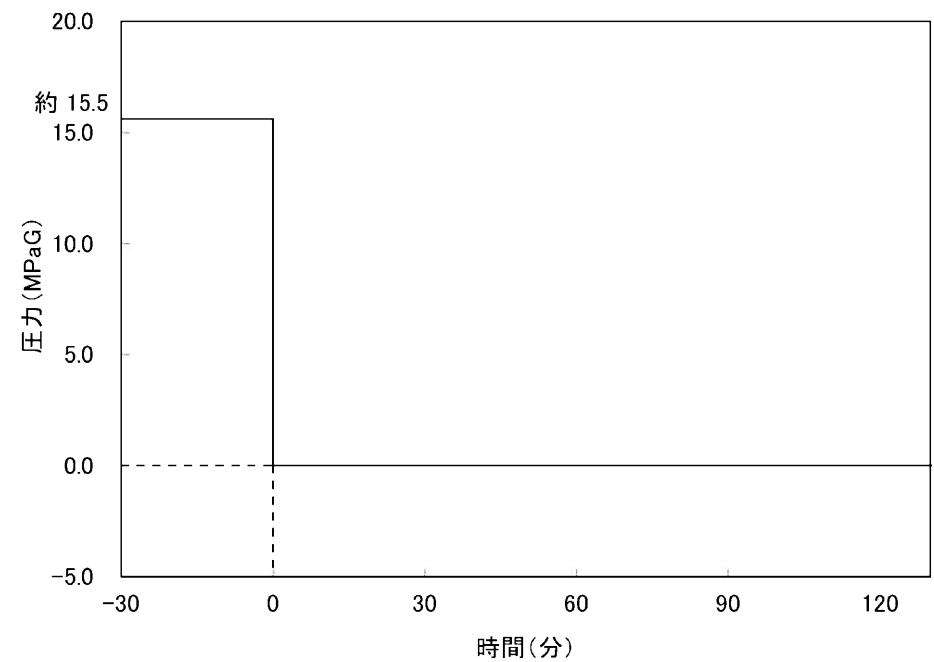


図2 圧力条件

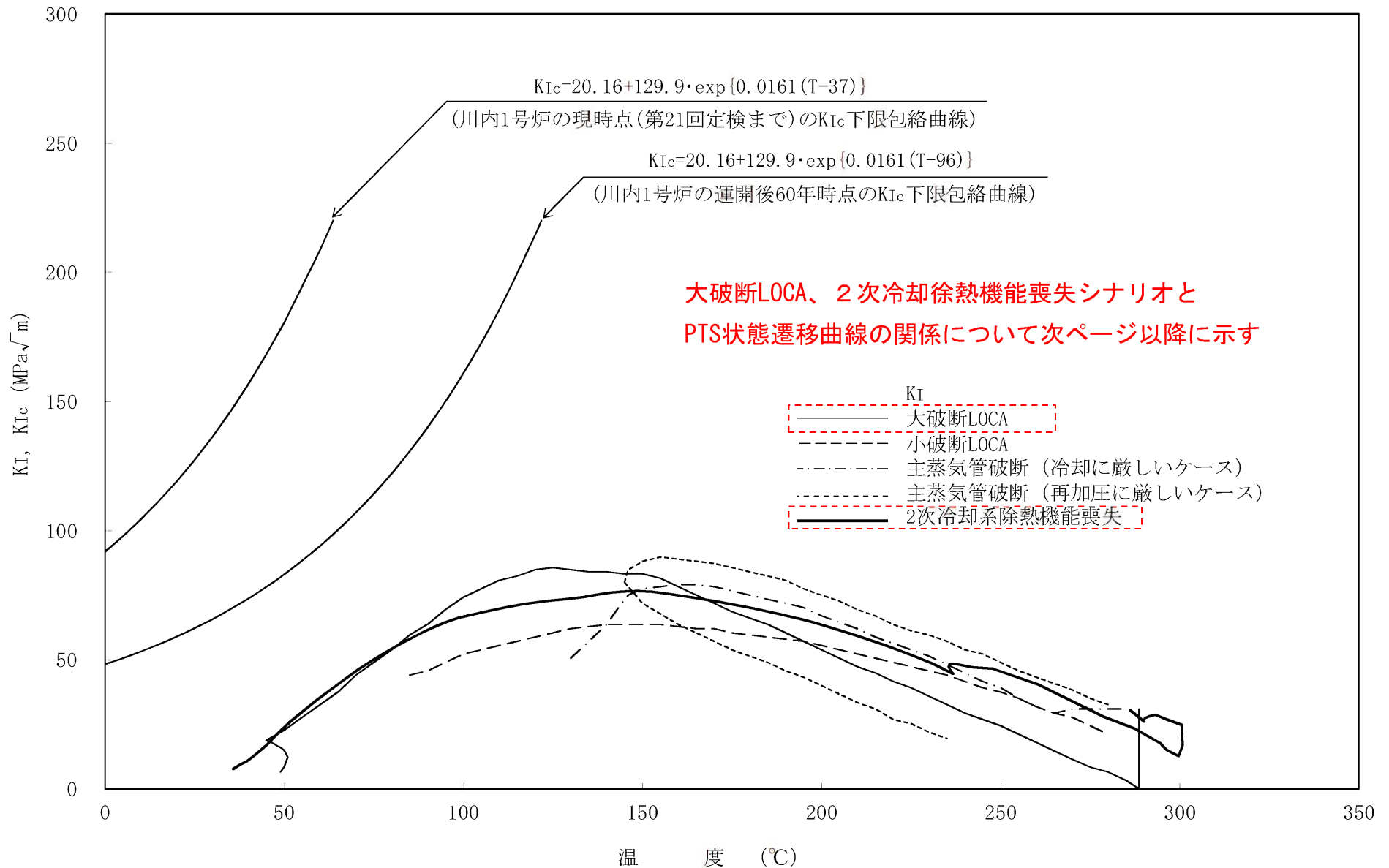


図3 原子炉容器胴部（炉心領域部）中性子照射脆化に対するPTS評価結果（JEAC4201-2007 [2013追補版]）

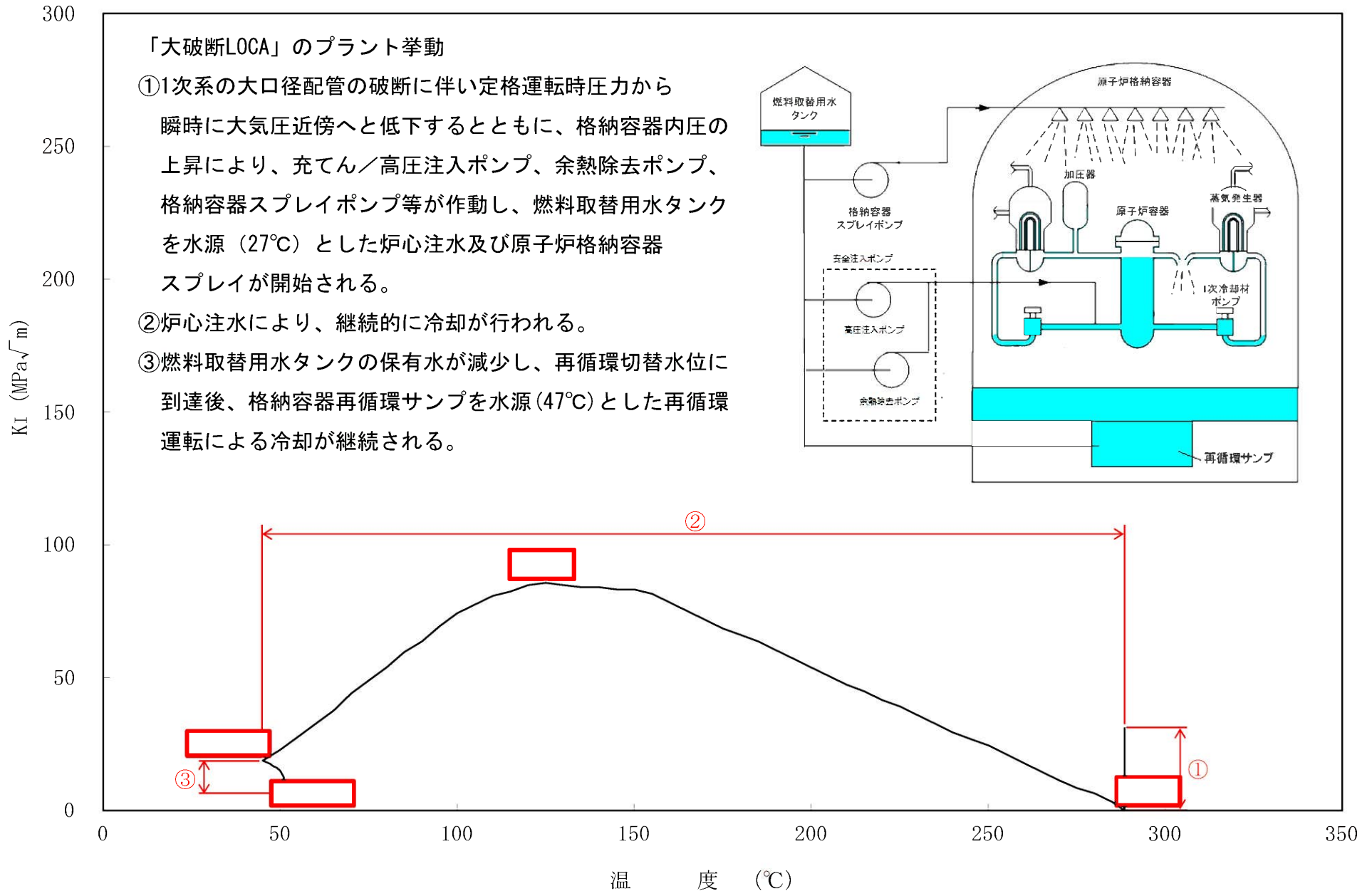


図4 大破断LOCAのPTS状態遷移曲線とPTS事象シナリオの関係

内は商業機密事項であるため公開できません

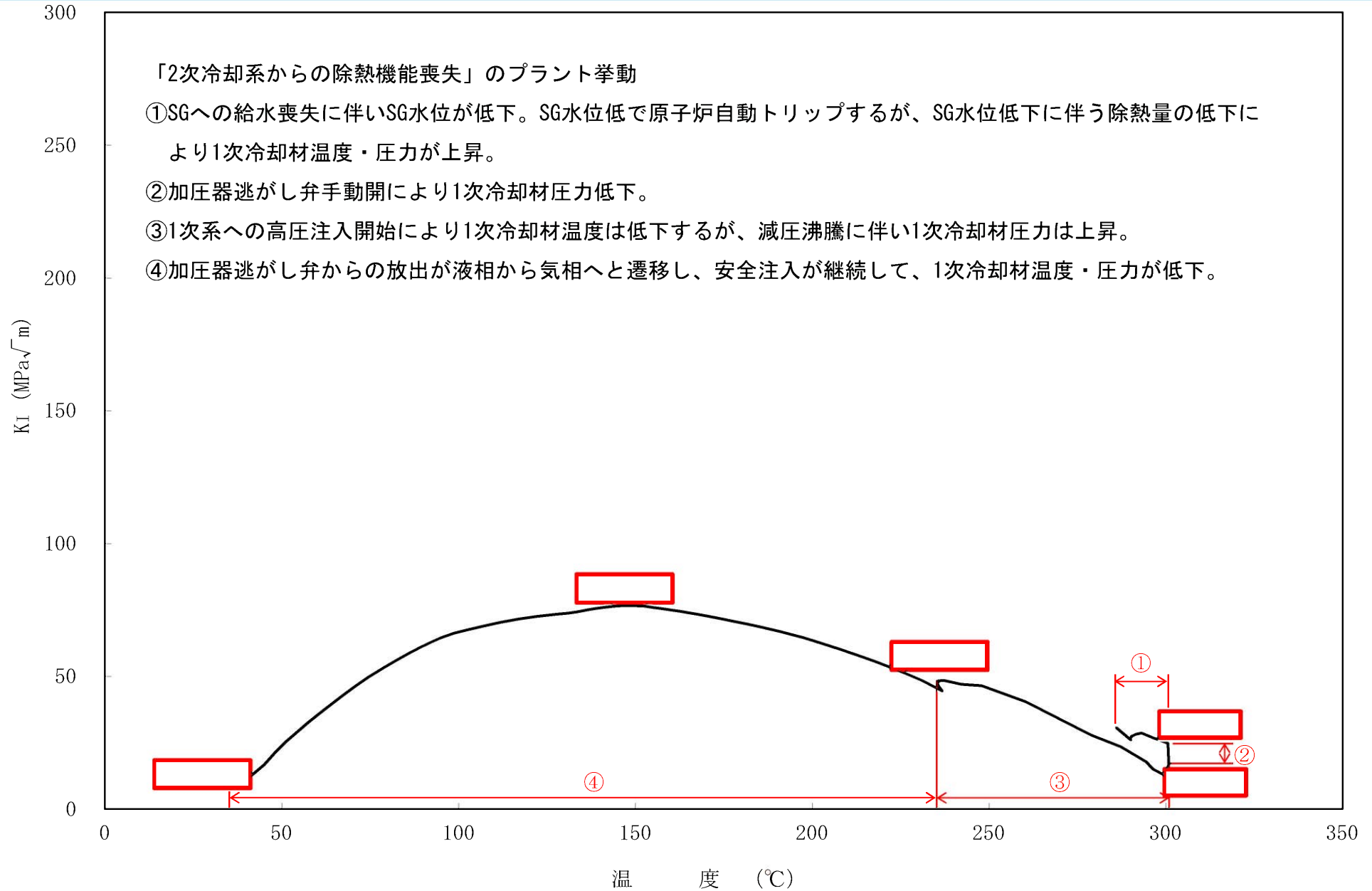


図5 2次冷却系除熱機能喪失のPTS状態遷移曲線とPTS事象シナリオの関係

内は商業機密事項であるため公開できません



1. 質問事項

アトムプローブ等で観察された監視試験片の内部組織（クラスターの量など）と予測式が想定する状況を対比して、脆化予測法に対する検証を行っているか。検討結果があるなら、30年から40年の間に得られた知見として示すこと。

2. 回 答

○現行の照射脆化予測法の策定時に、これまでに試験を実施した川内1号第3回及び第4回並びに川内2号第3回の監視試験片の残材を用いて、アトムプローブ測定法による元素の分布観察等を行っている。

○なお、至近で取出した川内1号第5回の監視試験片の試験後の残材について、知見拡充としてアトムプローブ測定等の実施を検討している。

アトムプローブ測定により溶質原子クラスター体積率平方根を算出

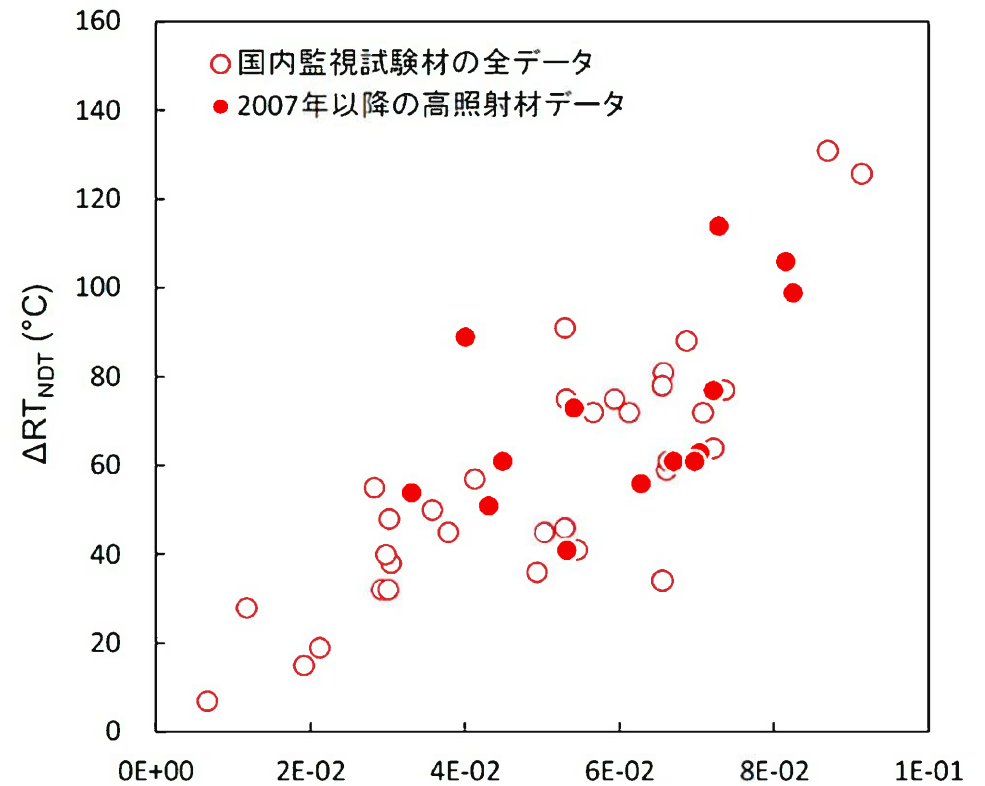


図 22 国内監視試験材における溶質原子クラスターの体積率と遷移温度上昇の相関

「電力中央研究所報告Q12007  
(一財) 電力中央研究所」より引用



1. 質問事項

1/4t位置での評価と10mm位置での評価がPLM評価内で混在しているが、すみ分けを示すこと。  
 また、PTS評価で、破壊靱性値のカーブと応力拡大係数のカーブがそれぞれどの深さで評価されているのか説明すること。

2. 回 答

以下に、中性子照射脆化に対する評価の概要を示す。

表1 中性子照射脆化に対する評価の概要

| 評価項目                      | 想定欠陥                              | 照射量               | 準拠規格  | 評価内容                                   |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|---|--|
| ① 上部棚吸収エネルギー (USE) に関する評価 | —                                 | 内表面から<br>1/4t深さ位置 | JEAC4201-2007 附属書B<br>JEAC4206-2007 FB-4200 (1) a.          | 評価時期において、予測値が68Jを下回らないことを確認            |
| ② 関連温度の算出 (RTNDTの算出)      | —                                 | 内表面から<br>1/4t深さ位置 | JEAC4201-2007 附属書   | P-Tカーブの設定等に利用する内表面から1/4t深さ位置の予測値を参考に記載 |
| ③ 加熱冷却制限曲線 (P-Tカーブ) の設定   | 内外表面の軸方向半だ円<br>(1/4t深さ×1.5t長さ) ※1 | 内表面から<br>1/4t深さ位置 | JEAC4201-2007 附属書B<br>JEAC4206-2007 FB-4100,<br>附属書A        | プラントの起動・停止時における想定欠陥からの脆性破壊の発生を防止       |
| ④ PTS事象に関する評価             | 内面の軸方向半だ円<br>(10mm深さ×60mm長さ) ※2   | 内表面               | JEAC4201-2007 附属書B<br>JEAC4206-2007 FB-4200 (1) b.,<br>附属書C | PTS事象において、想定欠陥から脆性破壊が発生しないことを確認        |

※1：起動・停止、耐圧漏洩試験のように通常運転で毎回発生する過渡に対する評価であり、検査で検出もれとならない欠陥サイズに対して、非常に安全側に設定されている。

※2：事故時の評価であり、発生頻度が少ないことから、より現実的な寸法として設定されているが、国プロ等において、十分に検出可能であり、保守性を有することが確認されている。

以下に、PTS事象に関する評価のイメージを示す。

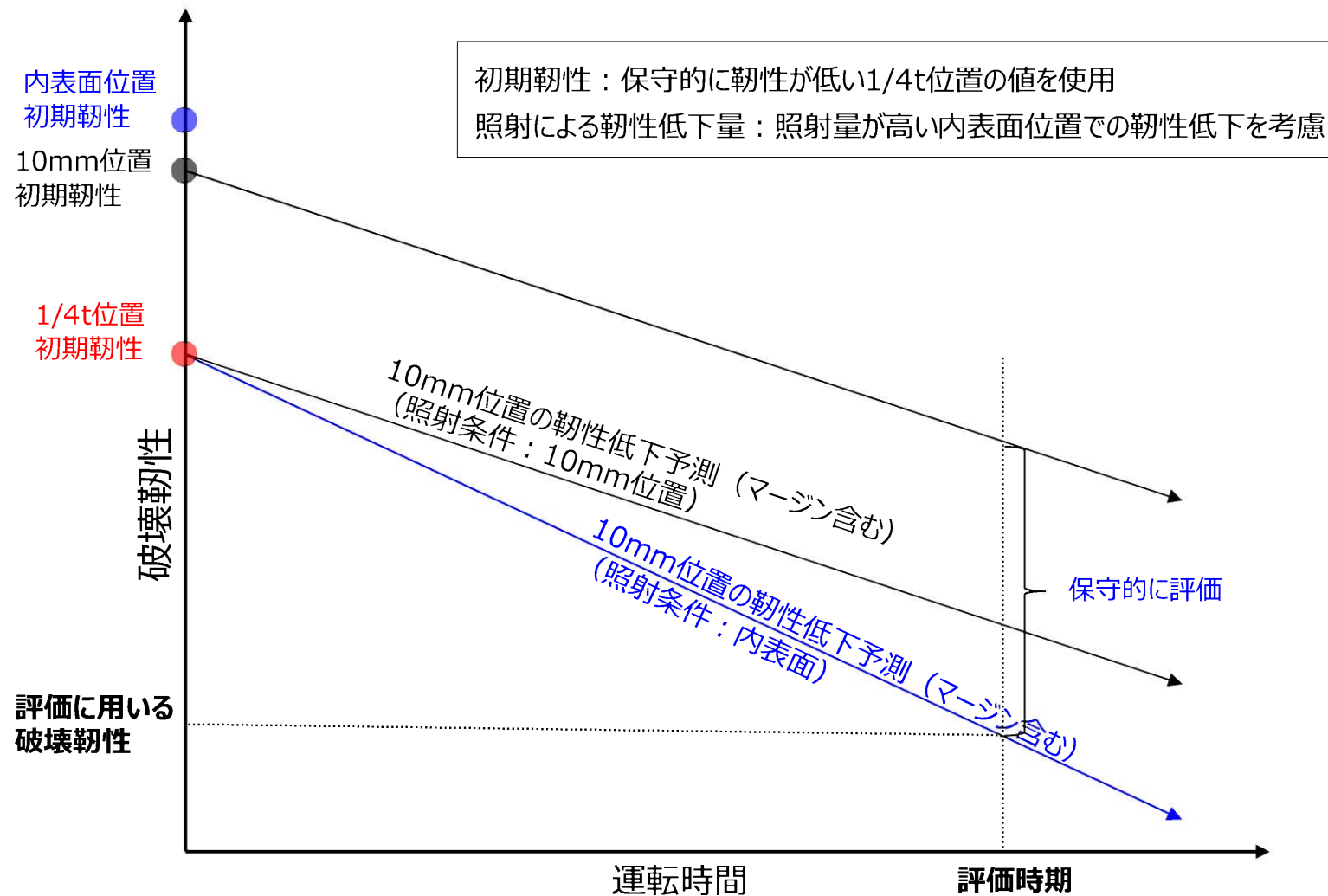


図1 PTS事象に関する評価のイメージ

1. 質問事項

現行のPTS評価では、応力拡大係数、破壊靱性のそれぞれに見た目以上の保守性があると思われる。例えば、応力拡大係数の算定にクラッドの存在を無視していることであるが、残留応力の扱いなども含めて説明すること。

2. 回 答

次頁に、PTS評価における保守性を示す。

表1 PTS評価における保守性

| 項目                              | 保守性   |
|---------------------------------|---|
| PTS状態遷移曲線<br>(応力拡大係数)<br>の設定    | 検出限界 (5mm以上) より大きな寸法の欠陥 (10mm深さ) を想定し、K値を計算   |
|                                 | き裂の開口に抵抗する効果が期待できるクラッドの存在を無視して、応力拡大係数を計算  |
|                                 | 保守的に原子炉容器内面が運転温度から安全注入水温へのステップ状の温度過渡を受けると仮定し、非常に高い熱応力を加味  |
| 破壊靱性遷移曲線<br>の設定                 | き裂先端 (10mm深さ) に対し、10mm深さの照射量ではなく、内表面の照射量に相当する脆化量を想定<br>初期靱性は1/4t位置のものを使用  |
| PTS状態遷移曲線と<br>破壊靱性遷移曲線<br>の比較評価 | 内表面の想定欠陥からの脆性破壊の発生の有無をPTS評価の判定としているが、き裂が伝播する外面側では金属温度が高く、また、板厚内部での中性子照射の減衰から破壊靱性が高い。また、熱応力は外面側では圧縮であり、き裂の伝播とともに応力拡大係数が低下することがあるため、実際にはき裂が板厚を貫通せず停止する可能性がある。(き裂伝播停止) |

## 1. 質問事項

高照射量のため、脆性材料へ物性変化が考えられるが、破壊力学について説明すること。

(脆性材料に変化しているため破壊力学の計算が必要。BFBにもいえる。それだけの照射量を受けている。物性の変化に基づいた脆性材料としての考え方は。)

## 2. 回 答

○ご指摘の通り、中性子照射を受けることで未照射の状態に比べて破壊靱性値が低下する。このため、維持規格に基づき、炉内構造物のうち照射量が高くかつ比較的応力の高い箇所として図1に示す炉心そう溶接部の仮想亀裂に対して破壊力学的評価（不安定破壊評価）を実施している。

○なお、BFBについては、BFBの応力が照射誘起型応力腐食割れ（以下「IASCC」という。）しきい線以上となって亀裂が発生した場合を想定し、当該亀裂に対して破壊力学的評価を実施することも考えられるが、BFBは細径（ $\Phi 13\text{mm}$ ）であり、応力も高いことから亀裂が生じた場合は直ちに機能喪失（破断）するものとして保守的に評価している。

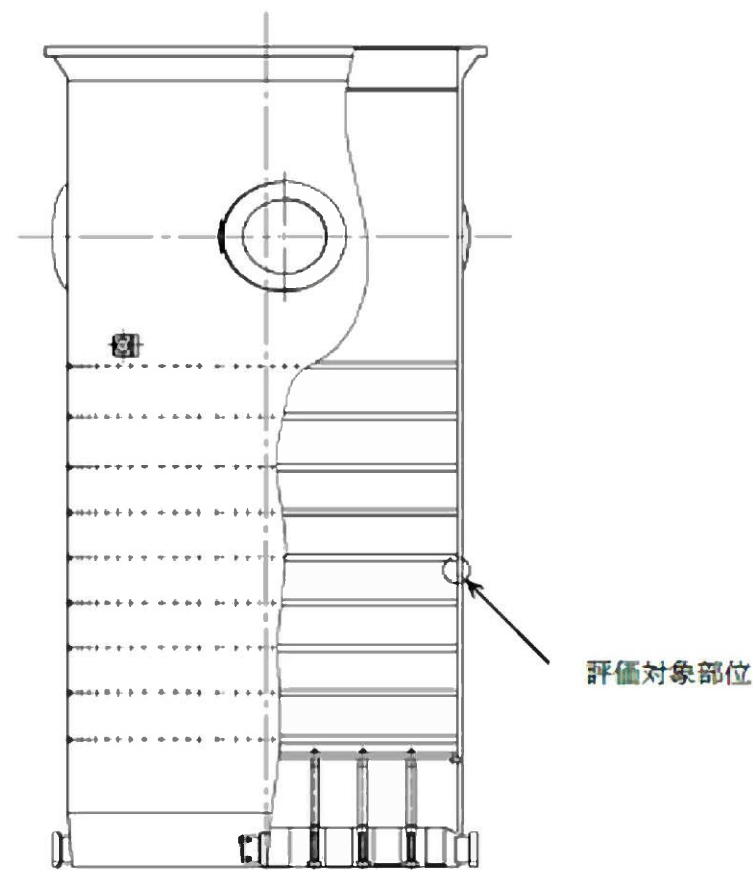


図1 評価対象の炉心そう溶接部

○炉心そうの評価について、評価を実施する溶接部は、下部炉心そうの上部胴-下部胴の接続部であり、燃料集合体の存在する高さ位置にあるため中性子照射量が高い部位とする。この位置にIASCCによりき裂が発生したと仮定して、き裂の安定性評価を実施する。

○評価に当たっては、維持規格 (JSME S NA1-2008) 添付EJG-P-3 (炉心そうの欠陥評価) に基づき、残留応力分布、機械・熱応力及び地震荷重 (Ss) を考慮し算出し、応力拡大係数の最大値は図2に示す通り、約    MPa√mとなる。

○また、評価に用いるステンレス鋼の破壊靱性値 ( $K_{IC}$ ) は、(財)発電設備技術検査協会の「プラント長寿命化技術開発」で得られた照射ステンレス鋼の破壊靱性値JIC 試験結果より求めた破壊靱性値  $K_{IC}=51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  とする。

○以上より、評価にて得られた応力拡大係数の最大値約    MPa√mは、破壊靱性値  $K_{IC}=51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  を下回っており、不安定破壊が発生することはないと判断できる。

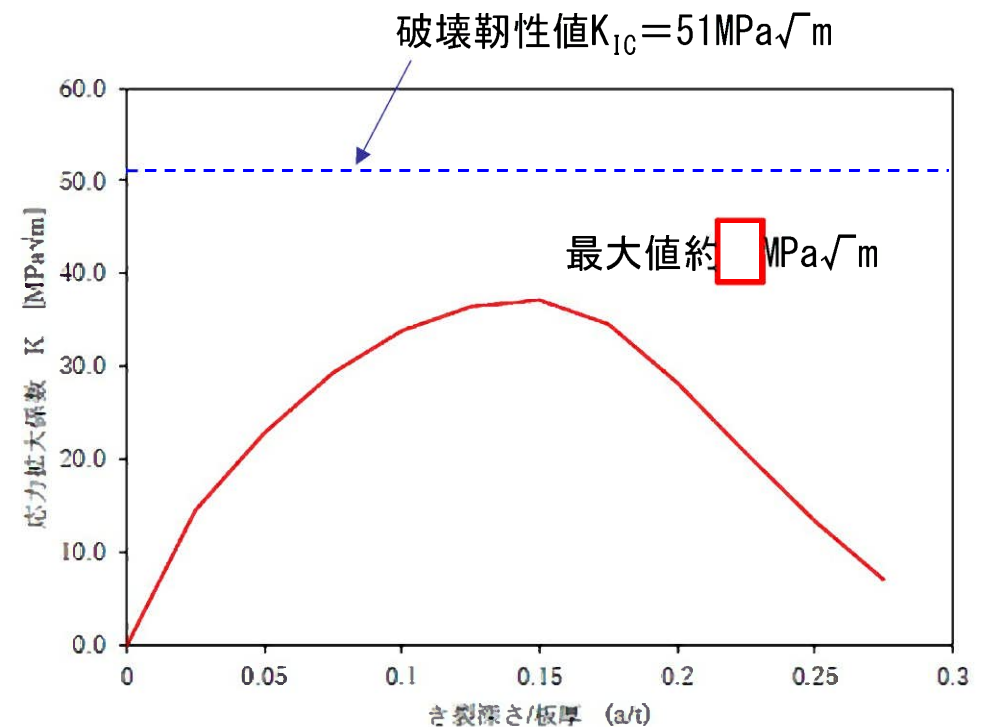


図2 応力拡大係数の算出結果

   内は商業機密事項であるため公開できません

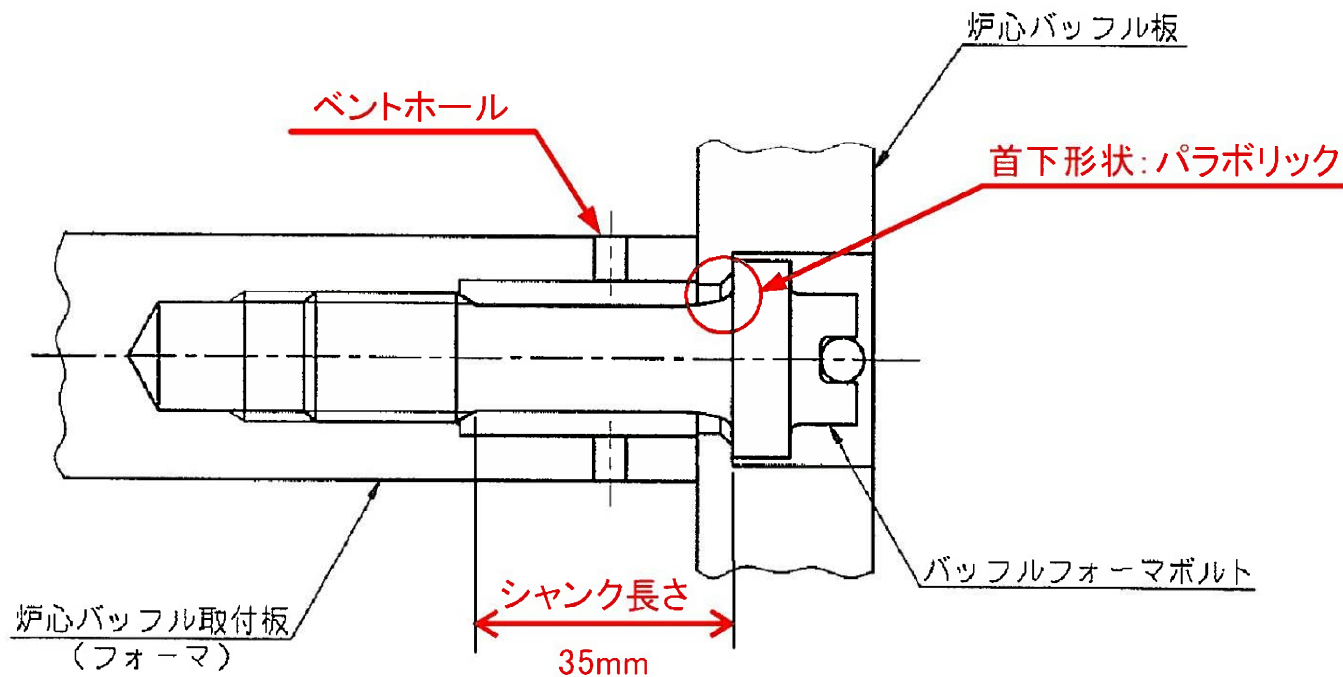


1. 質問事項

BFBの首下形状について、首下のコーナー部（2Rとパラボリック）の応力集中係数を示すこと。

2. 回 答

川内1号炉のBFBは、応力低減等を図った仕様としてパラボリックを採用することで、応力集中を低減している。応力集中係数(曲げ)は、グループ2のR2mmの場合には1.5であるのに対し、パラボリックの場合には1.1である。



## 1. 質問事項

中性子照射量をdpaであらわした際の中性子量は、0.1MeVと1MeV以上のどちらであるか示すこと。

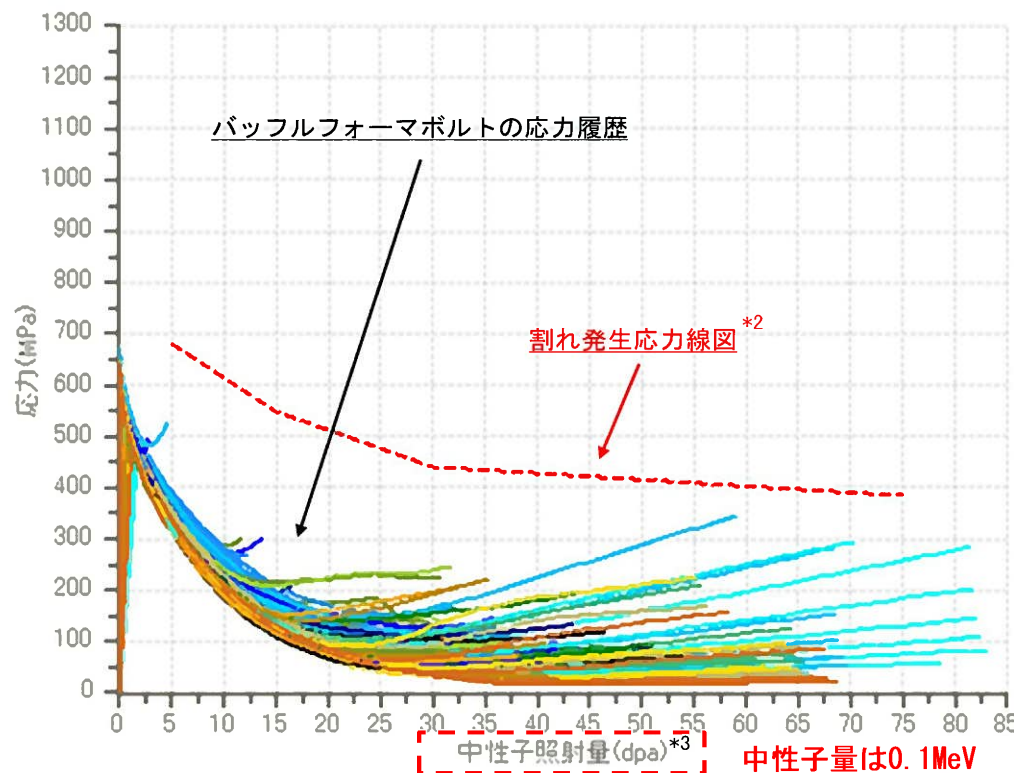
## 2. 回答

中性子照射量をdpaであらわした際の中性子量は、0.1MeVである。

第4回分科会資料3より抜粋

<評価ガイド(案)に基づく評価結果>

評価の結果、運転開始60年までにバッフルフォーマボルト(全数<sup>\*1</sup>)の応力履歴が割れ発生応力線図を超えることはなかった。



\*1: 全1,080本のバッフルフォーマボルトのうち、対象性を考慮した135本(=1,080÷8本)の応力履歴を算出している。  
【図4参照】

\*2: 「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」【(独)原子力安全基盤機構】に示された評価ガイド(案)において、照射誘起型応力腐食割れが発生する可能性があるとするしきい線を示す。

\*3:  $1.0 \times 10^{22} \text{n/cm}^2 = 6.5 \text{dpa}$ で換算(評価ガイド、中性子照射量の評価より)

図6 バッフルフォーマボルト(全数)の応力履歴と割れ発生応力線図の重ね合:

## 1. 質問事項

割れが発生した際の進展速度データはあるか。ある場合はデータを示すこと。

（発生と進展と破断は別問題。進展速度のデータはあるか。今の時点ではよくても、次のサイクルで進展して破断するのでは。）

ひび割れの進展について、Rカーブ（ひび割れ進展抵抗曲線、ひび割れ長さ と破壊靱性値との関係）のデータを示すこと。（なければ推定でもよい）

## 2. 回 答

ご指摘の通り、いったんき裂が発生すれば次サイクルまでに破断することは考えられる。

一方で、実機BFBに生じる応力は、き裂の進展により変化する可能性があるなど複雑であり、一定荷重を与え続ける実験室形態と異なっている等、実機のき裂進展の予測は非常に困難である。このことを踏まえ、保守的に進展は考慮せず、き裂の発生時点で直ちに機能喪失（破断）するものとして評価している（亀裂が発生しなければ進展することはない）。

また、上記理由より進展速度を評価していないことから、Rカーブ（ひび割れ進展抵抗曲線、ひび割れ長さ と破壊靱性値との関係）についても評価していない。