

## 米国 PWR の炉心そう溶接部で発見された亀裂に関する事業者の対応

2024 年 1 月 25 日  
技術基盤課  
システム安全研究部門

### 1. 経緯

米国ロビンソン発電所 2 号機<sup>1</sup>の炉心そう<sup>2</sup>上部周方向溶接部（Upper Girth Weld、以下「炉心そう溶接部」という。）で発生した亀裂（以下「本事象」という。）について、第 61 回技術情報検討会において関連する米国情報を収集・整理し、また、日本国内における対応について原子力エネルギー協議会及び電気事業者（以下「事業者等」という。）からの聞き取りを行い、報告した。同検討会において、今後、以下の情報収集等を行い、適宜、技術情報検討会に報告することとなった。

- ① 安全停止できるとする技術的根拠及び今後の取組について、事業者等から説明を受ける。
- ② 米国産業界の原因調査は、2024 年秋以降に完了する見込みであることから、今後も原因調査に関する情報収集を継続し、適宜 NRC との意見交換を実施する。
- ③ 亀裂解釈<sup>3</sup>には、具体的な炉心そうの健全性評価手法が規定されていないことから、今後の維持規格の技術評価を見据え、原子力規制庁においても炉心そうの健全性評価手法について、情報収集を行う。

このうち、①について、面談で資料を受領したことから概要を報告する。

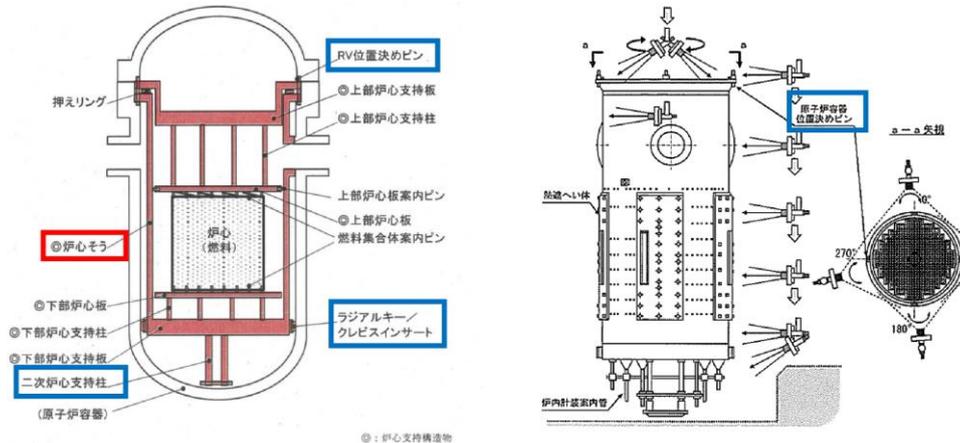


図 1 炉内構造物の概要<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> サウスカロライナ州ハーツビル近郊の PWR プラント。出力は 759MW、1971 年運転開始。

<sup>2</sup> 原子炉の内部に設置された構造物で、上部が原子炉容器位置決めピンで原子炉に固定され、下部はラジアルキーにより回転しないように水平方向が、原子炉容器位置決めピン及び二次炉心支持構造物により上下方向が固定されている。その役割は、水平方向の炉心支持及び位置決め、冷却水流路の維持及び流量適正配分とされている。

<sup>3</sup> 「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」（原規技発第 2107219 号（令和 3 年 7 月 21 日原子力規制委員会決定））

<sup>4</sup> PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [一般点検]「図 1 解説図 1-3-2 「炉心支持・位置決め」機能に関連する機器・部品」, 原子力安全推進協会

<sup>5</sup> H.B. ロビンソン 2 号機 炉心槽割れに関する事業者の受け止めについて（令和 5 年 9 月 21 日 原子力エネルギー協議会との面談資料）, 原子力安全推進協会



図2 炉心そうの模式図<sup>6</sup>

## 2. 事業者等の資料の概要

原子力規制庁は、PWR の炉心そう溶接部に対する事業者等の対応状況について、面談を実施し、以下の内容について説明を受けた（参考参照）。

### 2. 1 目視試験（VT-3<sup>7</sup>）の見直し結果

事業者等は 2023 年 9 月～12 月に掛けて、国内 PWR プラントにおける下部炉心構造物の可視可能な範囲の溶接線（内外面）に対して過去に ISI（供用期間中検査）で実施した目視試験（VT-3）の録画映像を再確認した（ただし、泊 3 号機の外面に対する供用期間中検査は今後の ISI で実施予定）。「溶接線付近に亀裂はありえる」という意識で図 3 及び図 4 の青実線で示された溶接線を再確認した。その結果、録画映像で確認できる範囲で、溶接部近辺に変形、破損及び機器表面における異常はなかった。

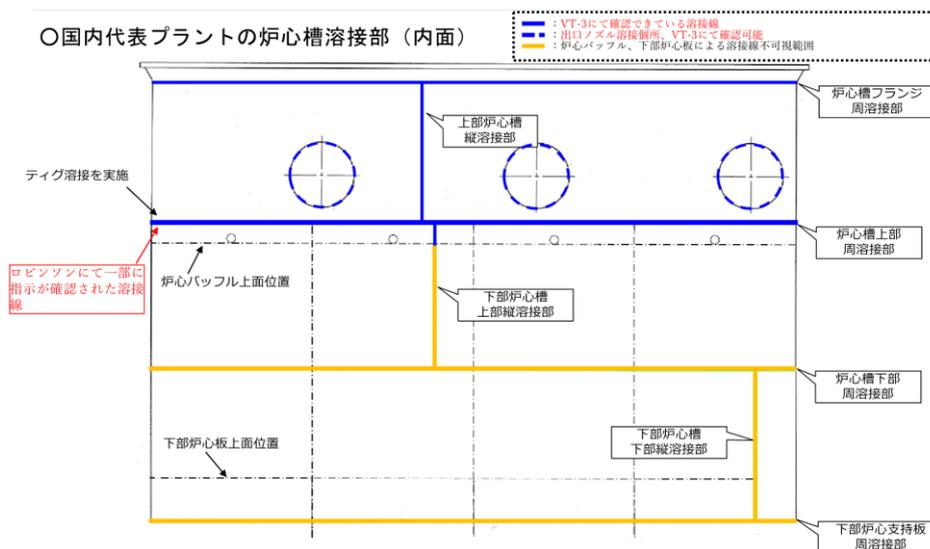


図3 下部炉心構造物内面の再確認範囲（青実線部）<sup>5</sup>

<sup>6</sup> 米国電力中央研究所 (EPRI) の Materials Reliability Program: Pressurized Water Reactor Internals Inspection and Evaluation Guidelines (Revision 1-A)

<sup>7</sup> VT-3 は機器の変形、心合せ不良、傾き、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、部品の破損、脱落及び機器表面における異常の検出に使用される目視試験の方法で、日本機械学会維持規格 (IA-2523) で定義されている。

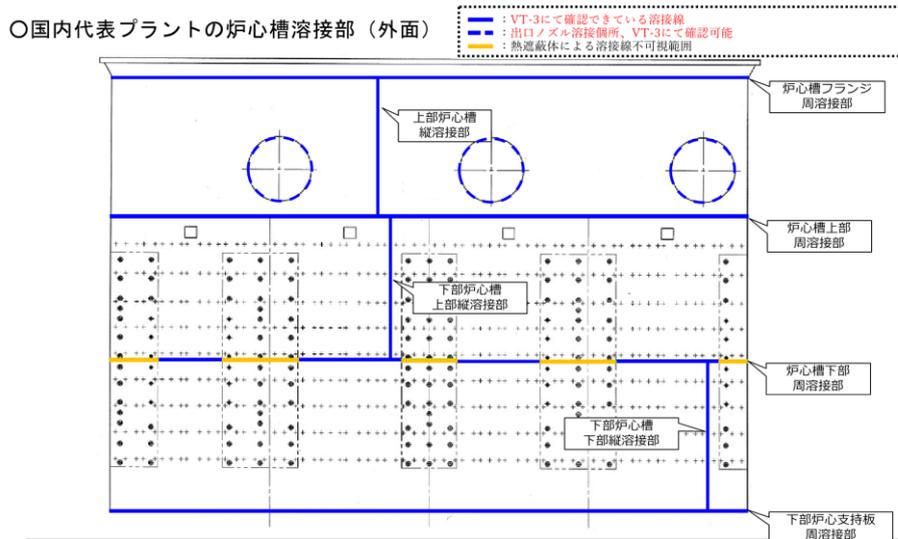


図4 下部炉心構造物外面の再確認範囲（青実線部）<sup>5</sup>

## 2. 2 安全停止できるとする技術的根拠

事業者等から炉心そうの全周破断時の安全停止について、静的及び動的な観点から説明があった。

### (1) 炉心そう溶接部の全周破断時の炉心降下量の制限について

- 炉心そう溶接部が全周破断した場合でも炉心降下量が制限されるよう設計している。
  - 炉心そう破断により下部炉心構造物が落下すると二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。
  - ショックアブソーバが塑性変形することで炉心落下時のエネルギーを吸収する構造となっている。
  - 炉心降下量よりも燃料案内ピンの嵌り込み量が大きいため、燃料案内ピンが外れることはなく、燃料集合体への制御棒挿入機能は維持される。

### (2) 炉心そう溶接部の全周破断時の制御棒挿入性の担保について

- 炉心そう溶接部が全周破断した場合の制御棒挿入性を担保するために、炉内構造物、制御棒及び燃料集合体は以下の設計上の考慮をしている。
  - 燃料案内ピンの挿入長さ管理：燃料集合体への燃料案内ピンの挿入長さを炉心降下量以上に設定している。
  - 制御棒の初期挿入長さ管理：燃料集合体への制御棒の初期挿入長さを炉心降下量以上に設定している。
  - 炉心降下量の制限：原子炉容器と底板との隙間、ショックアブソーバ構造により炉心降下量を制限している。
  - 上部炉内構造物・炉心そうフランジ部の変形・回転拘束：上部炉内構造物・炉心そうフランジ部は、原子炉容器上部ふた及び押えリングで挟むことに

より鉛直方向、水平方向及び回転を拘束している。

- 下部炉内構造物の回転拘束：下部炉内構造物（炉心そう下部）の下端は、ラジアルキーとクレビスインサートが凹凸形状で取り合うことで、下部炉内構造物の回転を拘束している。

### （３）炉心そう溶接部の全周破断時の安全停止について

- 炉心そう溶接部の全周破断と地震が同時に発生し、炉心そうの破断部から炉心そう内側にバイパス流が発生するとともに、炉内構造物や燃料集合体等が地震により加振しても安全停止するよう設計している。
  - 設計上の配慮により炉心そう破断時の炉心降下量を制限しており、バイパス流や地震による振動を考慮しても制御棒は挿入される。
  - この炉心降下量の制限により冷却材流路は確保されるため、蒸気発生器を介した炉心の冷却は可能であり、安全に停止する。

### （４）押えリングの応力緩和の影響について

- 仮に押えリングが応力緩和（リラクゼーション）した場合、炉心そう上端の支持条件が変化するため、炉心そうの振動挙動が変化する可能性があるが、国内プラントについては、応力緩和によって押えリングが機能を喪失する可能性がないことを高経年化技術評価で確認済みであり、炉心そうの振動挙動が有意に変化することはない。

## 2. 3 本事象対応に係る今後のスケジュール

事業者等から本事象に対する今後のスケジュール案について説明があった。

### （１）炉心そう溶接部の詳細検査（MVT-1<sup>8</sup>、UT<sup>9</sup>）装置の製作等

- PWR 電力共同委託により検査装置を製作する。
- モックアップ実証、検査要員の訓練を実施する。

### （２）炉心そうの健全性評価手法及び非破壊検査基準の整備

- PWR 電力共同委託により検討を進める。
- JANSI 炉内構造物ガイドラインの制定を検討する。
- 日本機械学会維持規格の制定を検討する。

### （３）詳細検査の実施

- 2024 年秋以降に完了見込みである米国産業界による原因調査の結果を精査し、

<sup>8</sup> MVT-1 は機器の表面について、摩耗、亀裂、腐食、浸食等の異常を検出するために行う遠隔目視試験の方法で、日本機械学会維持規格 (IA-2525) で定義されている。

<sup>9</sup> UT（超音波探傷試験）により目視試験で検出された傷等のサイジング（長さ及び深さの測定）を行う。

国内においても早期の実施が必要と判断される場合は詳細検査を行う。

- 詳細検査に向けて、健全性評価手法及び非破壊検査判定基準を文書化し、暫定基準として原子力規制庁へ提案、協議する。
- 詳細検査として内面及び外面の MVT-1 を実施する。
- MVT-1 で傷等を検出した場合は UT を実施する。

### 3. 今後の進め方

本事象について、安全停止できるとする技術的根拠及び今後の取組について、事業者等からの聞き取りを行った。過去の ISI における録画映像による VT-3 の見直し結果については、「溶接線付近に亀裂はありえる」という意識で確認し異常は認められなかったとのことであり、現時点で追加の検査等の必要はないと考える。また、安全停止できるとする技術的根拠についても説明を受け、仮に炉心そう溶接部に亀裂が発生し、全周破断したとしても、制御棒の挿入等に支障はない設計であることを確認した。今後、事業者等は、炉心そう溶接部の詳細検査（MVT-1、UT）装置の製作等、炉心そうの健全性評価手法及び非破壊検査基準の整備を行うとしていることから、引き続き聴取等を行い、適宜、技術情報検討会に報告する。

なお、上記 1. ②の NRC との意見交換は、3 月に実施する予定であり、その結果も、適宜、技術情報検討会に報告する。

（参考）（令和 6 年 1 月 18 日 原子力エネルギー協議会との面談資料）

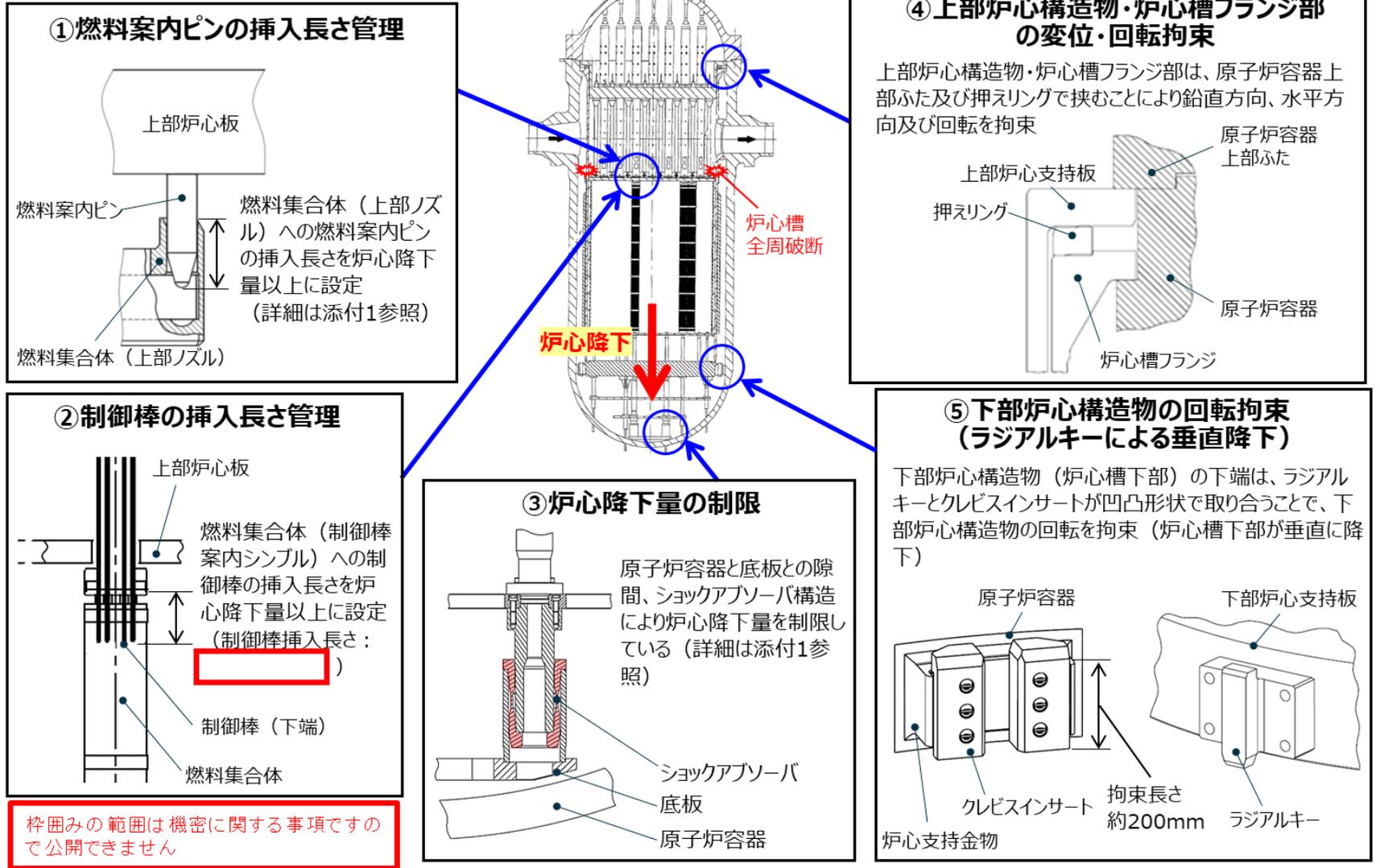
# H.B.ロビンソン2号機 炉心槽割れに係る 対応状況について

2024年1月18日  
原子力エネルギー協議会

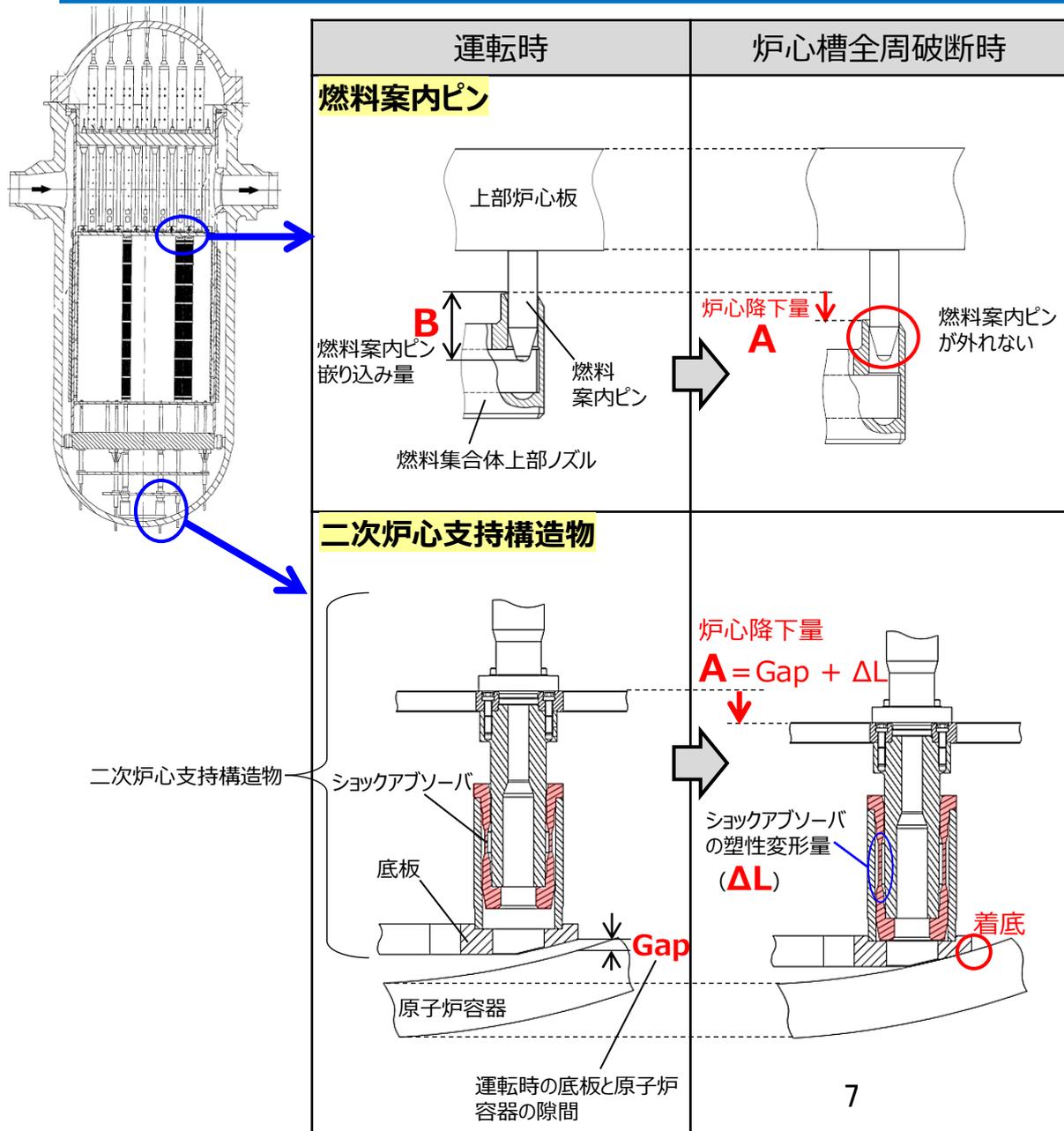
## 1. 炉心槽破断時の安全停止について 〔質問回答〕

# 炉心槽全周破断時の制御棒挿入性の担保について

炉心槽が破断した場合に制御棒挿入性を担保するため、炉内構造物、制御棒及び燃料集合体は以下の設計上の配慮をしている。



# 炉心槽全周破断時の炉心降下量の制限について



## ◆万一の炉心槽全周破断時

- 炉心槽破断により下部炉心構造物が落下すると、二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。
- ショックアブソーバが塑性変形することで炉心落下時のエネルギーを吸収する構造である。

- 炉心降下量 (A) よりも燃料案内ピンの嵌り込み量 (B) が大きいと、燃料案内ピンが外れることは無く、**燃料集合体への制御棒挿入機能は維持される。**

	2ループ	3ループ	4ループ
B			
A			
GAP			

枠囲みの範囲は機密に関する事項ですので公開できません

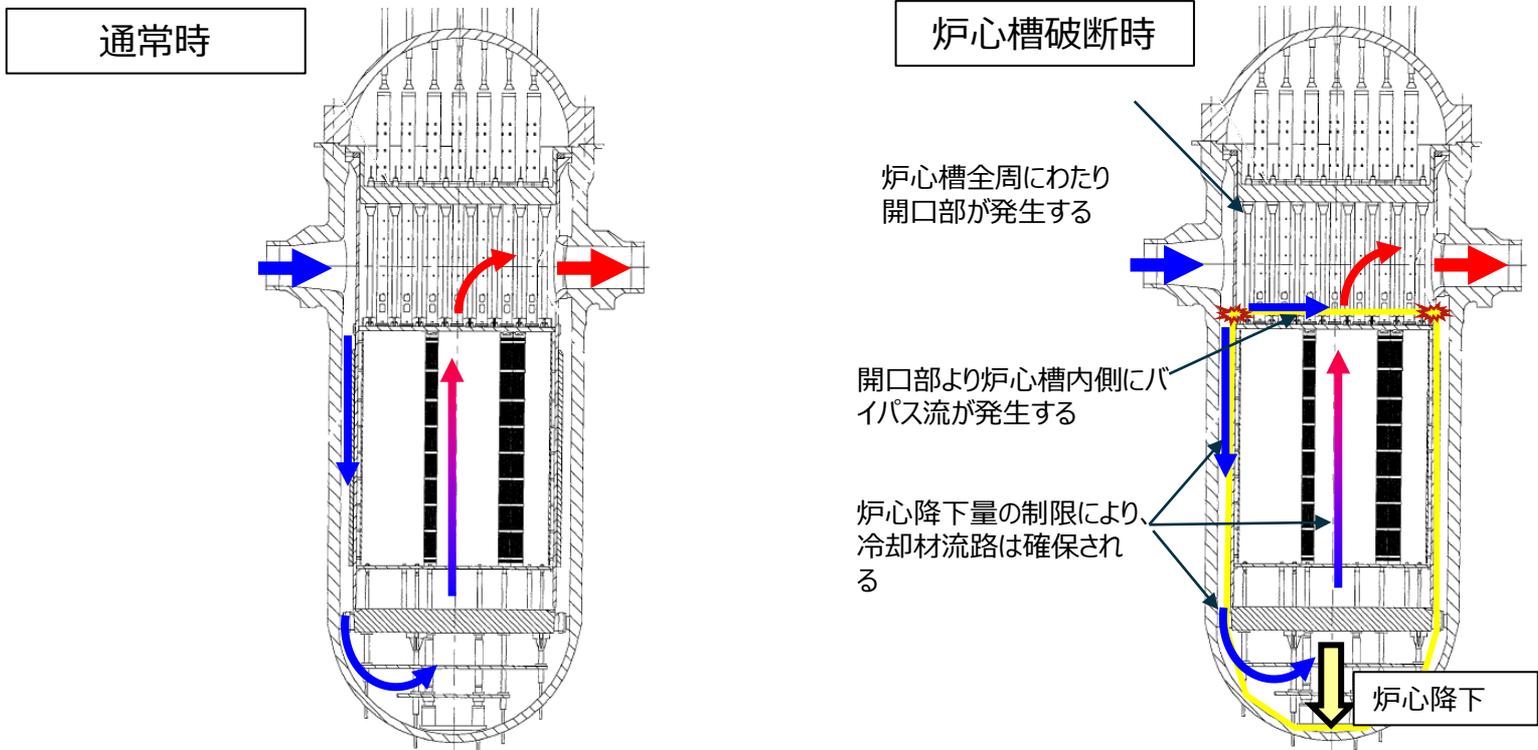
## [補足] ショックアブソーバの設計

炉心降下量は以下の式で表される。  
 $A = \text{Gap} + \Delta L$

(Gap : 運転時の底板と原子炉容器の隙間)  
( $\Delta L$  : ショックアブソーバの塑性変形量)

# 炉心槽全周破断時の安全停止について①

- 炉心槽溶接部の全周破断と地震が発生すると、炉心槽の破断部から炉心槽内側にバイパス流が発生するとともに、炉内構造物や燃料集合体等は地震により加振される。
- 設計上の配慮により炉心槽破断時の炉心降下量を制限しており、バイパス流や地震による振動を考慮しても制御棒は挿入される（添付2）。また、この炉心降下量の制限により冷却材流路は確保されるため、蒸気発生器を介した炉心の冷却は可能であり、炉心は安全に停止する。

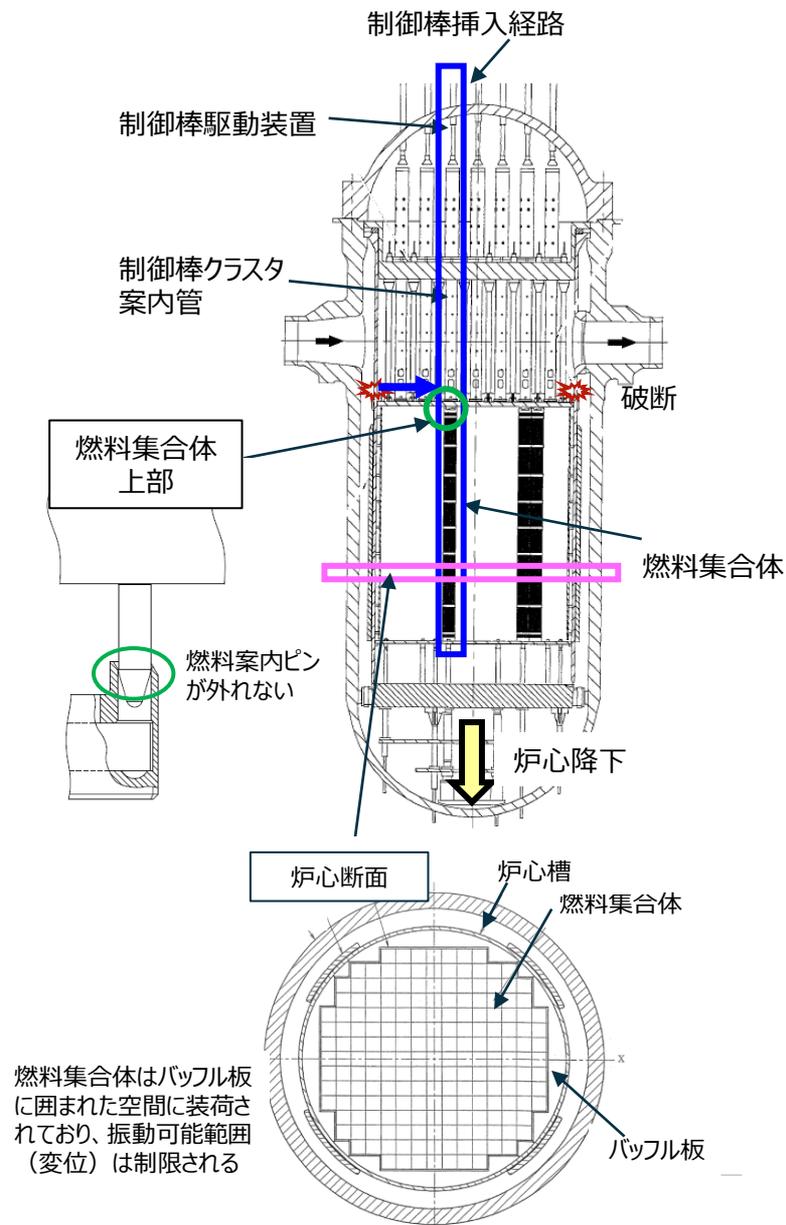


Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

# 炉心槽全周破断時の安全停止について② (地震時)

添付2 5

- 制御棒の挿入経路は、制御棒駆動装置、制御棒クラスタ案内管及び燃料集合体である。
- 制御棒駆動装置及び制御棒クラスタ案内管の支持状態は炉心槽破断前後で変わらないため、地震時の変位は変わらない。
- 炉心槽破断により炉心は降下するが、燃料案内ピンから燃料集合体は抜けず、燃料集合体の上下端は燃料案内ピンとかん合した状態である。また、燃料集合体は炉心槽内側のバッフル板で囲まれた空間にあり、地震時には限られた空間で振動するため、変位は制限される。
- 炉心降下の状態でも制御棒先端は燃料集合体に挿入されており、また、地震により加振された場合でも制御棒の挿入経路の変位は制限されるため、制御棒は燃料集合体に挿入される。
- 通常運転時において、炉心槽出口ノズルの近傍にある制御棒クラスタ案内管は、出口ノズルへ向かう1次冷却材が作用する厳しい横流れ環境で、制御棒挿入性に問題ないことを確認している。炉心槽破断に伴いバイパス流（炉心槽外面から内側に向かう流れ）が発生するが、その分、主流の割合は低下するため、横流れが有意に厳しくなることはなく、制御棒の挿入性に問題はないと考えられる。



燃料集合体はバッフル板に囲まれた空間に装荷されており、振動可能範囲(変位)は制限される

## 【押えリングの応力緩和による影響について】

- 仮に押えリングが応力緩和（リラクゼーション）した場合、炉心槽上端の支持条件が変化するため、炉心槽の振動挙動が変化する可能性があるが、国内プラントについては、応力緩和によって押えリングが機能を喪失する可能性がないことを高経年化技術評価のとおり確認済みであり、炉心槽の振動挙動が有意に変化することは無い。

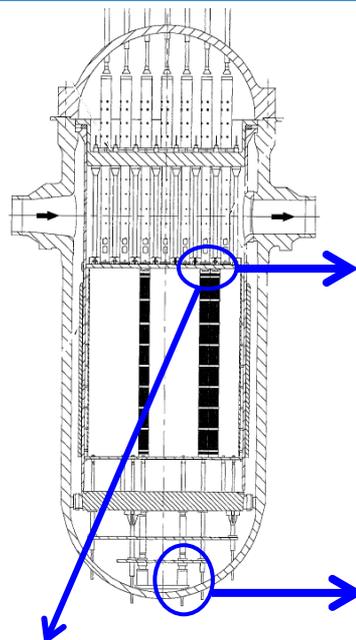
### ＜押えリングの応力緩和に関する高経年化技術評価：高浜2号機の例＞

部 位	経年変化事象	健全性評価	現 状 保 全	総 合 評 価	高経年化への対応
押えリング	応力緩和	リラクゼーション試験で得られたデータを基に、押えリングのリラクゼーション解析を実施した結果、炉内構造物の保持性を喪失する可能性はなく、健全性評価上問題ないと考える。 なお、運転開始後20年経過した国内他プラントでの計測結果に基づき評価した結果、十分な保持力を有していることを確認している。	定期的に下部炉内構造物を取り出して、水中テレビカメラによる目視検査を実施し、有意な変形がないことを確認している。	健全性評価結果から判断して、現時点の知見においては、押えリングの応力緩和は問題となる可能性はないと考え、今後、現状保全の適正化が可能と考える。	押えリングの応力緩和に対しては、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはないと判断する。

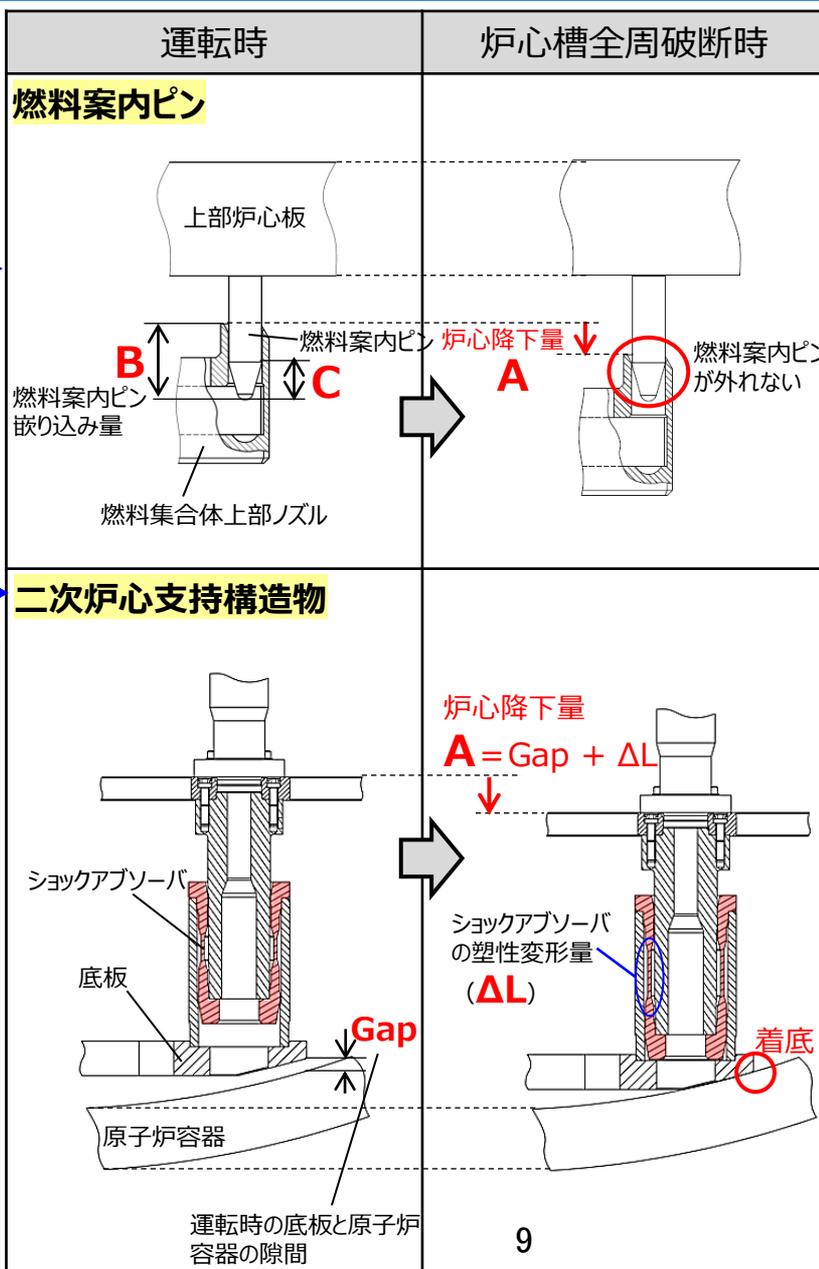
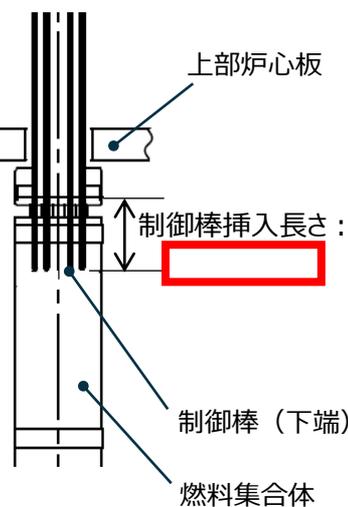


Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

## ＜参考＞ 炉心槽全周破断時の制御棒機能維持



### 制御棒の挿入長さ



・炉心槽破断により下部炉心構造物が落下すると、二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。

・加えて、制御棒挿入長さ( )は、炉心降下量よりも十分長いことから、万一の炉心槽破断時においても、制御棒挿入機能は維持される。

	2ループ	3ループ	4ループ
B			
(C)			
A (注1)			
GAP			
(注1)			

枠囲みの範囲は機密に関する事項ですので公開できません

## 2. 至近の供用期間中検査のVT-3ビデオ画像見直し結果

### 至近の供用期間中検査のVT-3ビデオ画像見直し結果

プラント	対象：LCI内面			対象：LCI外面		
	I S I 実績年月	VT-3動画見直し		I S I 実績年月	VT-3動画見直し	
		実施日	結果		実施日	結果
泊1号機	第16回 (2010年1月)	2023/12/7	✓	第15回 (2008年8月)	2023/12/7	✓
泊2号機	第16回 (2011年9月)	2023/12/7	✓	第15回 (2010年5月)	2023/12/7	✓
泊3号機	第1回 (2011年1月)	2023/12/7	✓	未実施		
敦賀2号機	第17回 (2010年4月)	2023/12/15	✓	第16回 (2007年9月)	2023/12/15	✓
美浜3号機 (CIR後)	第26回 (2021年11月)	2023/12/20	✓	第26回 (2021年11月)	2023/12/20	✓
高浜1号機	第27回 (2023年2月)	2023/9/7(*1)	✓	第27回 (2023年2月)	2023/9/7(*1)	✓
		2023/12/20	✓		2023/12/20	✓
高浜2号機	第27回 (2011年12月)	2023/12/25	✓	第27回 (2011年12月)	2023/12/25	✓
高浜3号機	第26回 (2023年12月)	2023/12/25	✓	第24回 (2020年8月)	2023/11/30	✓
高浜4号機	第24回 (2022年9月)	2023/12/25	✓	第24回 (2022年7月)	2023/12/25	✓
大飯3号機	第19回 (2022年9月)	2023/12/20	✓	第15回 (2011年4月)	2023/12/20	✓
大飯4号機	第17回 (2020年11月)	2023/12/20	✓	第18回 (2022年4月)	2023/12/20	✓
伊方3号機	第11回 (2008年9月)	2023/12/14	✓	第13回 (2011年5月)	2023/12/14	✓
	第13回 (2011年5月)					
川内1号機	第25回 (2020年6月)	2023/9/27	✓	第25回 (2020年6月)	2023/9/27	✓
川内2号機	第25回 (2022年3月)	2023/9/27	✓	第25回 (2022年3月)	2023/9/27	✓
玄海3号機	第16回 (2022年7月)	2023/10/31	✓	第16回 (2022年6月)	2023/10/31	✓
玄海4号機	第15回 (2022年10月)	2023/10/31	✓	第15回 (2022年10月)	2023/10/31	✓

- 結果欄の「✓」は、供用期間中検査(VT-3)の録画映像で確認できる範囲で、「溶接線付近に亀裂がありえる」という意識づけ(本事象の周知教育)を行った上でビデオを見直した結果、溶接線付近に変形、破損および機器表面における異常は認められなかったことを示す。
- (\*1)2023年9月はロビンソン事象のあった周溶接部のみ。2023年12月は残りの溶接部を確認。

### 3. 炉心槽割れ事象対応に係るスケジュール（案）

### 炉心槽割れ事象対応に係るスケジュール（案）

	2022年度	2023年度				2024年度				2025年度				2026年度				2027年度～	
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q		
	▼11 HBロビンソン2 OE ▼12 当該炉定検終了 ▼2 米国産業界検討チーム発足 ▼5 米国暫定ガイド制定					▽5 米国暫定ガイド発効													
1. 炉心槽溶接線の詳細検査（MVT-1、UT）装置の製作等																			
PWR電力共同委託による、検査装置の製作、モックアップ実証、要員トレーニングの実施																			
2. 炉心槽健全性評価手法、非破壊検査判定基準の整備																			
<ベースケース>																			
PWR電力共同委託による炉心槽健全性評価手法、非破壊検査判定基準の検討																			
JANSI炉内構造物点検評価ガイドライン「炉心槽」作成										ガイドライン制定									
JSME維持規格										▽#83検討会(制定の考え方) ▽#84検討会(制定案) ▽#85検討会(発行承認)				規格制定				NRA技術評価	
										評価作業会→維持規格分科会→原子力専門委→規格委									
<早期詳細検査ニーズ発生ケース>																			
産業界にて健全性評価手法、非破壊検査基準を至急文書化、NRAへ暫定基準として提案、協議																		暫定基準協議	
炉心槽上部周溶接線の詳細検査（内面MVT-1、外面MVT-1（炉心槽吊り出し定検時））、傷検出時はUT実施																		詳細検査	

原則として、BWRシュラウドと同様、維持規格制定・エンドースを目指す。

早期詳細点検ニーズ発生の場合、委託成果を早期に文書化し、NRAへ暫定基準として提案、協議→検査

- 炉心槽健全性評価手法の素案が作成できた段階、ガイドラインが制定できた段階等、節目ごとに進捗状況を報告する。
- また、米国原因調査等の情報を継続的に収集し、適宜、共有する。