

# RPV 保全最適化のための 3D-CFD&FEM による PTS 時の構造健全性評価：非対称原子炉冷却の効果

Pressurized Thermal Shock Analysis of a Reactor Pressure Vessel for Optimizing the Maintenance Strategy: Effect of Asymmetric Reactor Cooling

京都大学、量研六ヶ所 院 小勇  
京都大学 森下 和功

Xiaoyong RUAN Member  
Kazunori MORISHITA Member

## Abstract

The structural integrity of a reactor pressure vessel (RPV) is significant for nuclear plant safety. In assessing the integrity of the RPV, one of the most severe situations to be considered is pressurized thermal shock (PTS) during emergency water cooling. Many efforts have been made to understand this PTS, and these efforts assumed symmetric reactor cooling injection. However, once extreme circumstances occur, such as a major earthquake, some of the cooling injections will fail. This failure makes symmetric injection impossible, leading to more serious conditions. In this study, the effect of asymmetric reactor cooling was investigated using three-dimensional computational fluid dynamics and the finite element method. Our results indicate that the most asymmetric injections provide approximately 30% more serious situations than symmetric injections. Additionally, a risk-based methodology was proposed for optimizing the maintenance strategy of an emergency cooling system, where the probabilities of the occurrence of RPV fracture are used as indicators representing the risk.

**Keywords:** Reactor Pressure Vessel, Pressurized Thermal Shock, Asymmetric Cooling Injection, Structural Integrity Assessment, Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics, Finite Element Method

## 1. 緒言

原子炉压力容器 (RPV) の構造健全性は、原子力発電所の安全にとって重要である。構造健全性を評価する際に考慮すべき最も厳しい状況の 1 つは、加圧熱衝撃 (PTS) 負荷である。これは、冷却材損失 (LOCA) 時には非常用冷却水が RPV に注入される。注水によって RPV は冷却され容器内表面と外表面での温度差が大きくなる。この温度差によって、RPV 内面に高い引張応力が発生することが知られている。中性子照射脆化が進んだ RPV に PTS が生じた場合、RPV 内に存在するき裂が進展し炉心の十分な冷却が行えなくなる可能性がある<sup>1)</sup>。したがってこのような事故を防ぐためには、压力容器鋼の脆化度合いとき裂の存在や状態から PTS 発生時におけるき裂進展の評価が行われている。

PTS 負荷による解析には、通常に破壊力学に基づいて

解析される。開発された方法論は、過去数十年にわたって実質的な進歩を遂げた。欧州連合 (EU) と中国は、主に決定論的構造健全性評価法を適用している。この方法論では、固定サイズのき裂と特定の材料特性を採用している。想定されるき裂の応力拡大係数 (SIF)  $K_I$  を材料の破壊靱性値  $K_{IC}$  と比較し、計算された  $K_I$  が  $K_{IC}$  よりも高い場合、RPV 材料は破壊していると見なされる。一方に、確率論的構造健全性評価では、さまざまなき裂サイズと材料特性の変動に対して解析が実行される。この解析では、 $K_I$  の分布を破壊靱性値  $K_{IC}$  の分布と比較し、RPV の条件付き破壊確率を評価する。この方法論に基づいて、FAVOR や PASCAL などの確率論コンピュータコードが日米で広く使われている。

最近の研究には、一次元 (1D) 熱水力学解析 (昔に採用する手法) の結果を三次元 (3D) 熱水力学解析 (最新に採用する手法) の結果と比較し、 $K_I$  が 1D 解析よりも 3D 解析の方が 40% 以上高いことを発見した<sup>2)</sup>。3D 熱水力学解析では、対称冷却注入が適用されたが、結果として生じる冷却は、プルーム冷却効果のために空間的に非対称でした。この非対称冷却の発見に基づいて、冷却注入が

より非対称である場合、より深刻な状況が発生する可能性があることを容易に予想できる。このような非対称の冷却注入は、大地震の際、および緊急コア冷却注入の一部が失敗した場合に発生する可能性がある。

本研究の目的は、PTS 負荷による RPV の構造健全性に対する非対称冷却注入の影響を調査することである。4 ループ RPV のリファレンスデザインが適用され、対称または非対称の状況である緊急コア冷却注入提案の 5 つの異なるケースが検討される。5 つのケースにおける RPV の位置に関する  $K_I$  は、包括的なフレームワークの流体力学、構造力学、および 3D-CFD と FEM に基づく破壊力学に基づいて取得された。これらの場合のマスターカーブの一部として含まれている破壊靱性値と組み合わせ、RPV の破壊発生確率を注入失敗数の関数として評価した。最後に、RPV の破壊発生確率は、RPV 機能喪失のリスクを表す指標と見なされ、RPV の検査と保全の優先順位を最適化するためにさらに使用される。

## 2. 方法

### 2.1 3D-CFD と FEM による決定論的構造健全性評価

図 1 は、本研究で実施された決定論的構造健全性評価のフローチャートを表している。 $K_I$  を評価するために、線形弾性破壊力学 (LEFM) 解析が使用された。正確な評価のために、き裂先端の塑性域の影響も考慮された。図に示すように、RPV の応力分布は、(1) モデル構築、(2) 3D 熱水力学解析 (3D-CFD シミュレーション)、および (3) 応力解析の 3 つのステップを使用して取得された。ステップ (3) には、3 つのセクションがある。1 つのセクションは CFD によって取得された温度分布に基づく熱応力解析、2 つ目のセクションは RPV の内面の圧力に基づく機械応力解析であり、最後のセクションは、熱弾塑性解析である。これは溶接オーバーレイクラッドによって引き起こされる残留応力分布を評価するために使用される。 $K_{IC}$  を評価するために、ASME 標準が使用され、破壊靱性値  $K_{IC}$  は次の式で与えられる。

$$K_{IC} = 36.5 + 22.78 \exp[0.036(T - RT_{NDT})], \quad (1)$$

ここで、 $RT_{NDT}$  は、中性子照射効果を含めるためのパ

ラメーターである。 $K_I$  と  $K_{IC}$  を比較することにより、RPV の構造健全性が決定論的に評価される。

4 ループ PWR プラントの RPV は、3D-CFD シミュレーション用に構築された<sup>3)</sup>。RPV の構造健全性に対する非対称注入の影響を調査するために、非対称注入と対称注入の 5 つの異なるケースが設計された。5 つのケースすべて SIP の総質量流量 (MFR) は、さまざまな MFR 値の影響を排除するために 120 kg/s に固定された。詳細な説明を表 1 に示す。

### 2.2 3D-CFD と FEM による確率論的構造健全性評価

図 2 は、本研究で実施した確率的構造健全性評価のフローチャートを示す。上記の決定論的構造健全性評価では、き裂サイズは固定されていると想定された。確率論的構造健全性評価では、き裂サイズが変化した。いずれの場合も、き裂サイズ分布関数を使用して、RPV 上の  $K_I$  の分布を評価した。我々の以前の研究<sup>3)</sup>では、RPV 上の  $K_I$  の分布を評価するために、き裂サイズ分布関数とき裂位置の空間分布が考慮された。しかしながら、本研究では、大量の計算を回避するために、き裂位置の空間分布は考慮されていないである。この単純化は、調査の最終目標である以下のリスク評価には実質的に影響しません。

破壊靱性値  $K_{IC}$  の分布を得るために、マスターカーブ法が使用された。ASTME1921 によって、破壊靱性値  $K_{IC}$  は次の式で与えられる。

$$K_{IC} = 20 + \left[ \ln \left( \frac{1}{1-P} \right) \right]^{0.25} \{1 + 77 \exp[0.019(T - T_0)]\}, \quad (2)$$

ここで、 $P$  は累積破壊確率、 $T$  は温度、 $T_0$  は中性子照射効果を考慮した基準温度である。 $K_{IC}$  の確率密度分布は、次の式で与えられるワイブル分布に従う。

$$f(K_{IC}) = \frac{4}{K_0 - 20} \times \left( \frac{K_{IC} - 20}{K_0 - 20} \right)^3 \times \exp \left[ - \left( \frac{K_{IC} - 20}{K_0 - 20} \right)^4 \right], \quad (3)$$

ここで、 $K_0$  はスケールパラメータである。

次に、上記で取得した  $K_I$  と  $K_{IC}$  の確率密度分布を使用

して、PTS 負荷による RPV の条件付き破壊確率  $P_f$  を決定した。

$$P_f = \int_0^{\infty} \left\{ \int_{K_{IC}}^{\infty} g(K_I) dK_I \right\} f(K_{IC}) dK_{IC}, \quad (4)$$

ここで、 $f(K_{IC})$  は式 (3) の  $K_{IC}$  の確率密度分布であり、 $g(K_I)$  は  $K_I$  の確率密度分布であり、3D-CFD とさまざまなき裂サイズの FEM によって取得される。

最後に、RPV の破壊発生確率  $F_r$  は次の式で与えられる。

$$F_r = P_{ECCS} \times P_f, \quad (5)$$

ここで、 $P_{ECCS}$  は冷却注入失敗の確率であり、注入失敗の数の関数として与えられる。ここで定義された RPV の破壊発生確率  $F_r$  は、RPV 機能喪失のリスクの大きさを表す指標として使用される。

## 3. 結果と考察

### 3.1 決定論的構造健全性評価

我々の以前の研究<sup>3)</sup>は、RPV の最低温度位置が最高の温度勾配と熱応力を提供することを示した。これは RPV 破壊の最も危険な位置と見なすことができる。本研究では、5つのケースの最低温度位置を特定する試みが行われ、次に、個々の最低温度位置にあると想定されるき裂の  $K_I$  値が計算された。

#### 3.1.1 LOCA の最も厳しい段階での RPV の円周方向の温度プロファイル

最初に、冷却パイプの中心から RPV の軸に沿って 3.5m の高さで RPV の円周方向の温度プロファイルを検討した。この高さは、中性子による高強度の照射が予想される領域に対応する。この高さの領域を領域 A と呼ぶ。表 1 にリストされている 5つのケースのそれぞれについて、き裂は領域 A に仮定された。決定論的解析では、き裂は半楕円形を仮定された。深さ 17mm、アスペクト比 (長さ/深さ) 6 の長さである。領域 A のき裂位置の詳細は、RPV の円周方向に 0 度から 360 度の角度で表される。領域 A にある個々の想定き裂について、き裂先

端の温度が得られた。

図 3 は、ケース 1 (表 1) の説明例を示しており、き裂位置と、き裂位置角度の関数として計算された温度プロファイルを示している。図 3 (b) は、このケースでは冷却水注入が 1 本しか利用できないため、温度プロファイルが大幅に不均一であることを示している。最低温度位置は円周方向に 90 度で、冷却プルームの真ん中にある。最大温度差は 68°C に達す。

図 4 は、5つのケースで計算された円周方向の温度プロファイルを示している。この図から、冷却方法が異なれば温度プロファイルも異なり、最低温度に対して異なる位置が示されることがわかる。図に示すように、最も非対称的な注入のケース 1 の温度変動が最も大きく、最も対称的な注入のケース 5 の温度変動が最も小さくなっている。上記のように、最低温度位置が特定され、各ケースの  $K_I$  を評価するための想定き裂位置として採用され、 $K_I$  値を計算することである。

#### 3.1.2 5つのケースの $K_I$ 値の比較

図 5 は、5つのケースについて上記の位置で計算された  $K_I$  値を表している。ケース 1 (最も非対称的な注入) は最大の  $K_I$  を取り、ケース 5 (最も対称的な注入) よりも 31.63% 大きくなる。この図には、ASME 標準を使用して評価された  $K_{IC}$  値も示されている。ここで、 $RT_{NDT}$  は、60 年間の運用に対応する実際の監視データである<sup>3)</sup>。一般に、 $K_I$  の曲線と  $K_{IC}$  の曲線が交差すると、RPV 材料が破壊する。しかしながら、この図はそのような状況を示していないである。ここで調査した条件では、RPV は破壊しないと結論付けることができる。一方に、結論は 5つのケースのいずれでも同じですが、 $K_I$  値と  $K_{IC}$  値の間の近接性はケースごとに異なる。この近接性は、以下の確率的整合性評価の中で定量的に議論することができる。

## 3.2 確率論的構造健全性評価

### 3.2.1 5つのケースの RPV の条件付き破壊確率

図 6 は、き裂サイズ分布関数を使用して得られた 5つのケースの  $K_I$  の確率密度分布を示している。 $K_{IC}$  の確率密度分布も図に示されている。これは上記のマスターカーブ法によって評価された。図 7 (b) に示すように、2つの分布と式 (4) を使用して、RPV 破壊の条件付き確率を評価した。冷却注入が失敗せず、したがって最も対

称的な注入のケース5では、RPVの条件付き破壊確率は $1.9 \times 10^{-5}$ と計算される。これは、ここで調査したケースの中で最も低い値である。図に示すように、RPVの条件付き破壊確率は、注入の失敗回数が増えるにつれて増加する。ケース1（最も非対称な注入）の条件付き破壊確率が最大であり、ケース5（最も対称的な注入）の最小確率の27倍以上である。この図によって、PTS負荷の中に大きな温度勾配とそれに関連する高い熱応力が発生しないようにするために、対称注入が非常に重要であることを示している。

### 3.2.2 LOCAによるRPV機能喪失のリスク

前のセクションで、緊急コア冷却注入の失敗は、RPVの条件付き破壊確率の深刻な増加につながる可能性があることが判断された。この結果は、RPVの構造健全性の観点から、緊急冷却注入システムの検査と保全がRPVの破壊の可能性を減らすために非常に重要であることを示しているようである。しかしながら、現時点では、このメンテナンス戦略が本当に最優先事項であることを強く強調することは非常に困難である。この戦略では、冷却注入の失敗が通常はほとんど発生しないという事実が考慮されていないためである。したがって、このセクションでは、冷却注入の失敗の可能性について説明する。

冷却注入の失敗の確率は、注入の失敗の数 $N$ の関数として、以下のように4ループRPVに対して簡単に与えられる。

$$P_{\text{ECCS}} = \begin{cases} (1-P_e)^4 & \text{for } N=0 \\ 4(1-P_e)^3(P_e)^1 & \text{for } N=1 \\ 2(1-P_e)^2(P_e)^2 & \text{for } N=2 \text{ (symmetric)} \\ 4(1-P_e)^2(P_e)^2 & \text{for } N=2 \text{ (asymmetric)} \\ 4(1-P_e)^1(P_e)^3 & \text{for } N=3 \\ (P_e)^4 & \text{for } N=4 \end{cases}, (6)$$

ここで、 $P_e$ は、LOCAが原因で緊急コア冷却注入の1つが失敗する確率である。実際の $P_e$ 値は、SIPシステム、電源システム、冷却水供給システム、およびECCS配管の故障率から推定できる。これらの故障率はすべて、コンポーネントの経年劣化の程度、機器のメンテナンスの頻度、メンテナンスの技術的能力、地震などの外

部ハザードの発生頻度など、さまざまな要因によってさらに評価する必要がある。簡単にするために、この研究では、 $P_e$ は $10^{-4}$ の定数値を持つと仮定された。この値を使用して、図7(a)に示すように、冷却注入失敗の確率 $P_{\text{ECCS}}$ が得られた。

図7(a)の冷却注入失敗の確率 $P_{\text{ECCS}}$ と図7(b)のRPVの条件付き破壊確率 $P_f$ を上記の式(5)とともに使用すると、RPVの破壊発生確率 $F_f$ は次のように得られ、図7(c)に示す。この確率は、RPV機能喪失のリスクの大きさを表す指標と見なされるため、保全戦略を構築する際に非常に役立つ。この図から、RPV破壊の発生確率 $F_f$ は、注入失敗数 $N$ の減少関数を示している。この結果は、冷却注入の失敗が増える可能性が非常に低いために発生するが、冷却注入の失敗が増えると、RPV破壊のより深刻な条件付き破壊確率につながる可能性がある。この挙動から、ここで採用した条件下では、注入失敗によるRPV機能喪失のリスクはそれほど高くなく、したがって、非常用冷却注入システムの検査と保全は最優先事項ではないと結論付けられる。

これまでのところ、 $P_e$ は $10^{-4}$ に設定されている。この値は、LOCAが10000年ごとに発生するため、4つの緊急コア冷却注入の1つが失敗することを意味する。この値の妥当性は現在不明であり、この調査の範囲を超えている。しかしながら、関心のある主題として、RPV機能喪失のリスクの値 $P_e$ への依存性についてここで説明できる。図8は、 $10^{-4}$ から0.5の範囲のさまざまな $P_e$ 値について、RPV関数損失のリスクの $N$ への依存性を示している。明らかに、依存性の傾向は、 $P_e$ が0.1より大きい小さいかによって異なる。 $P_e$ が0.01以下の場合、RPV破壊の発生確率は $N$ の減少関数ですが、 $P_e=0.5$ の場合には増加関数である。 $P_e$ が0.1の場合、5つのケースのRPV破壊の発生確率はほぼ同等である。つまり、 $P_e$ が0.1以上の場合、保全戦略に関する上記の結論は完全に逆になる。このような場合、非常用冷却注入システムの検査とメンテナンスが最優先事項になる。しかしながら、実際には $P_e$ は0.1をはるかに下回ると予想されるため、このケースは現実とは一致しません。

## 4. 結論

PTS負荷中のRPVの構造健全性に対する非対称緊急冷却注入の影響には、3次元計算流体力学(3D-CFD)と有限要素法(FEM)を使用して調査した。この問題に

は、ハザード曲線と脆弱性曲線を使用したアーキテクチャのリスク評価の従来のフレームワークが適用され、冷却注入失敗の確率、RPVの条件付き破壊確率、およびRPV破壊の発生確率が注入失敗の数の関数として評価された。RPV破壊の発生確率は、RPV機能喪失のリスクの大きさを表す指標として採用された。このリスクを使用して、保全戦略を最適化する方法論が提案され、4ループRPVに関しては、非常用冷却注入システムの検査と保全は最優先事項とは見なされていません。

### 参考文献

- [1] G.R. Odette and G.E. Lucas, ASTM STP 909, ASTM International, Philadelphia, PA, USA, 1986, pp. 206-241.
- [2] G. Qian, M. Niffenegger, M. Sharabi, N. Lafferty, Fatigue Fract Eng Mater Struct. 41(7), 2018, pp. 1559-1575.
- [3] X Ruan, T Nakasuji, K Morishita. J. Pressure Vessel Technol 140(5). 2018.
- [4] X Ruan, K Morishita. Nuclear Engineering and Design, Vol. 373. 2021.

表1 注水ケース<sup>[4]</sup>

	Mass Flow Rate, [kg/s]				SIP, temp [K]	Initial temp [K]
	SIP, Leg 1	SIP, Leg 2	SIP, Leg 3	SIP, Leg 4		
Case 1	120	0	0	0	293	550
Case 2	60	60	0	0		
Case 3	60	0	60	0		
Case 4	40	40	40	0		
Case 5	30	30	30	30		

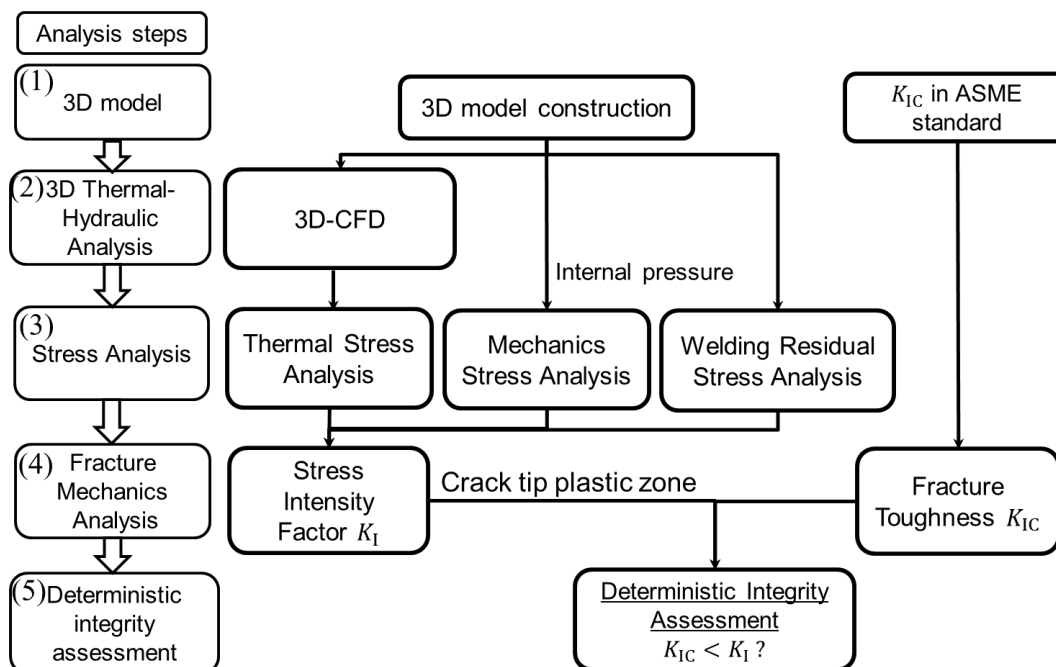


図1 決定論的構造健全性評価の流れ<sup>[4]</sup>

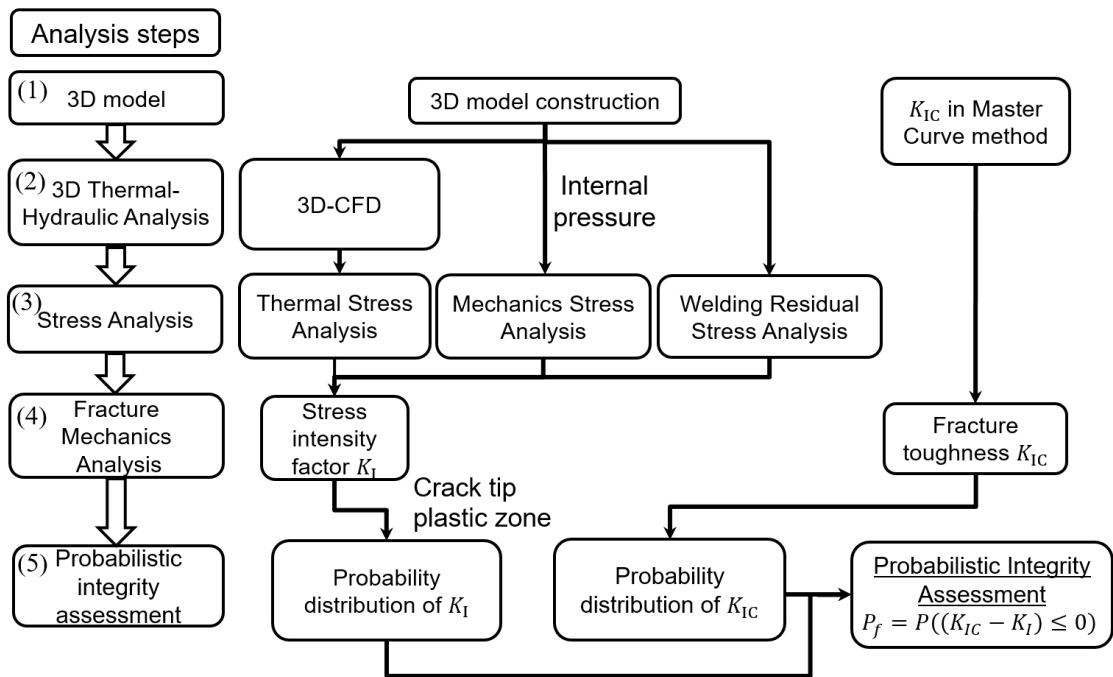


図2 確率論的構造健全性評価の流れ<sup>[4]</sup>

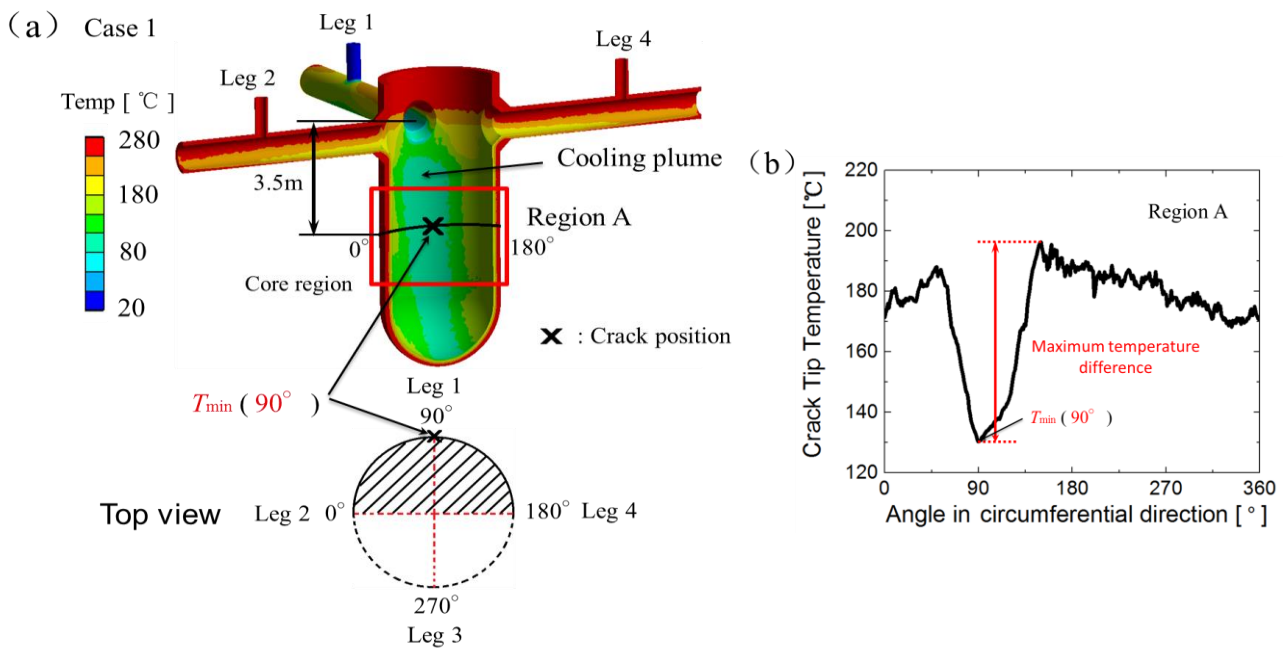


図3 ケース1に関して、(a) き裂位置および (b) LOCA の最も深刻なフェーズが発生する PIS イベントの開始後 750 秒でのき裂先端温度のスナップショット。横軸は RPV の円周方向の角度を示す<sup>[4]</sup>

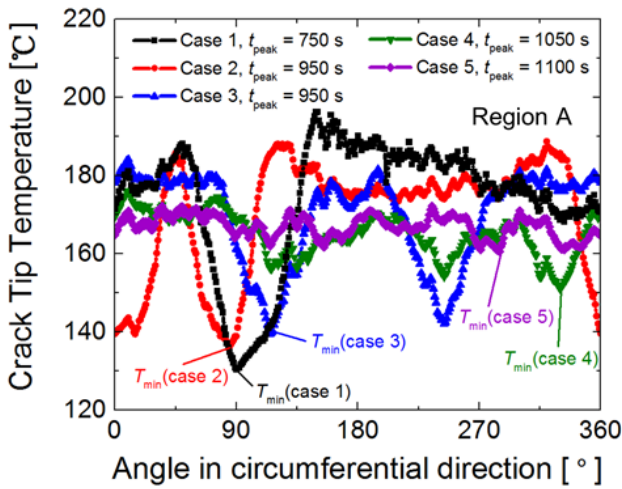


図4 LOCAの最も深刻なフェーズが5つのケースのき裂先端温度の計算された分布。横軸はRPVの円周方向の角度を示す<sup>[4]</sup>

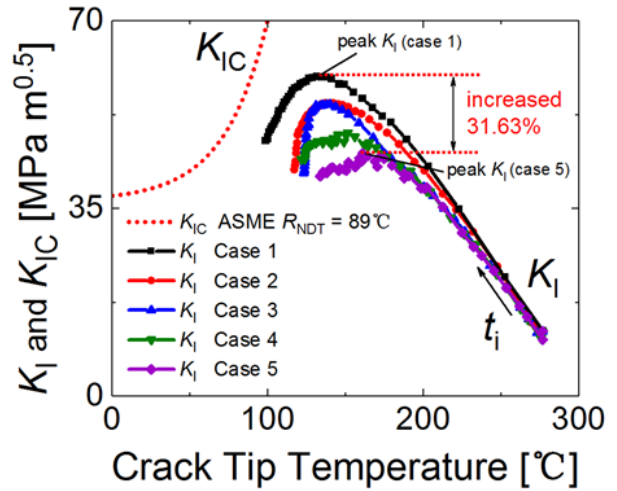


図5 5つのケースでのPTSイベント中の応力拡大係数( $K_I$ )の変化。また、 $RT_{NDT} = 89^\circ\text{C}$ でASME法により得られた破壊靱性 $K_{IC}$ も示されている<sup>[4]</sup>

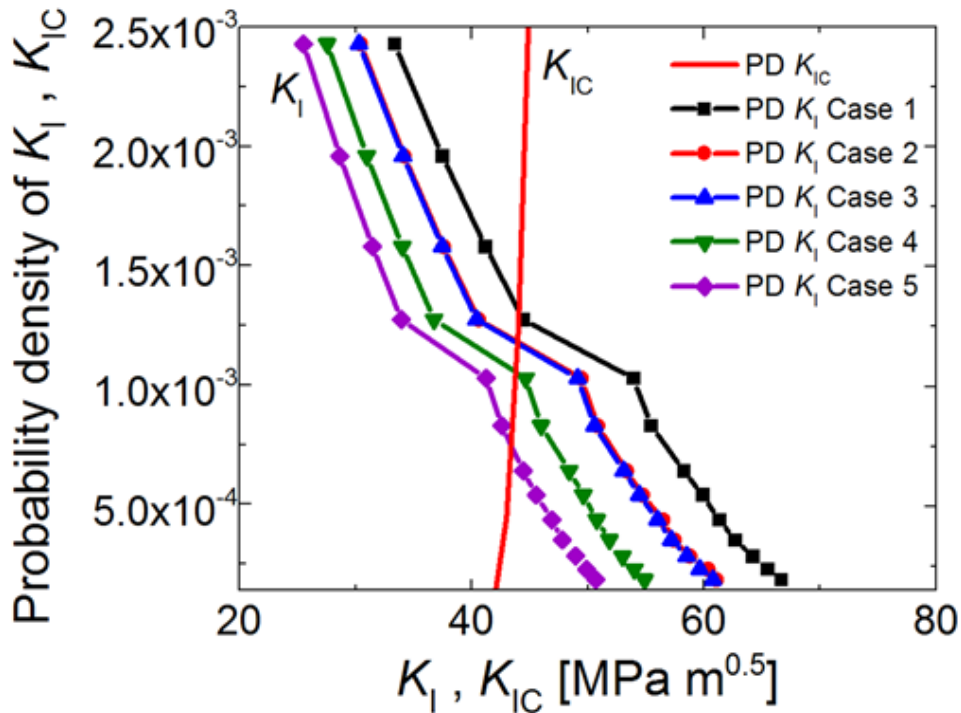


図6 5つのケースにおける応力拡大係数( $K_I$ )と破壊靱性( $K_{IC}$ )の確率密度。いずれの場合も、 $K_I$ の値はき裂サイズ分布関数を反映するように変更される。 $K_{IC}$ の値は $T_0 = 10.5^\circ\text{C}$ を仮定したマスターカーブによって取得される<sup>[4]</sup>

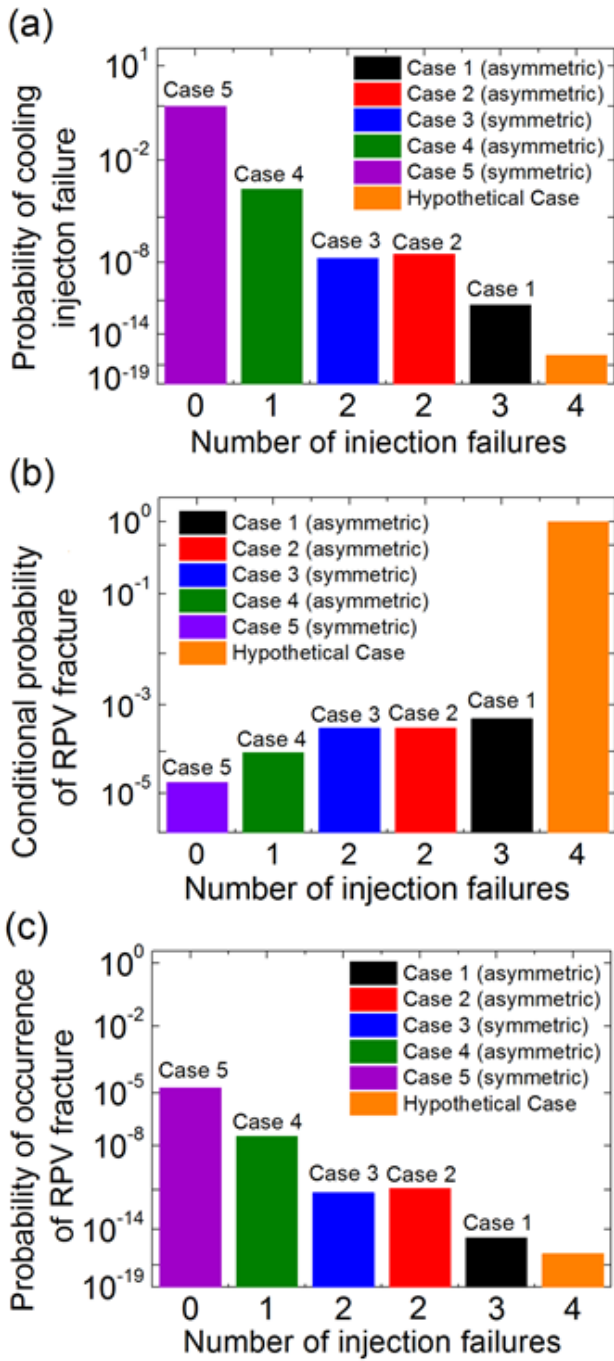


図7 (a) 冷却注入の失敗の確率、(b) RPVの条件付き破壊確率、および (c) 4ループRPV内の非常用冷却注入の失敗の数の関数としてのRPV破壊の発生の確率。RPV破壊の発生の確率は、RPV機能喪失のリスクの大きさを表す指標である。(b)では、すべての冷却注入が失敗した場合、RPV破壊の条件付き確率は1であると想定されている<sup>[4]</sup>

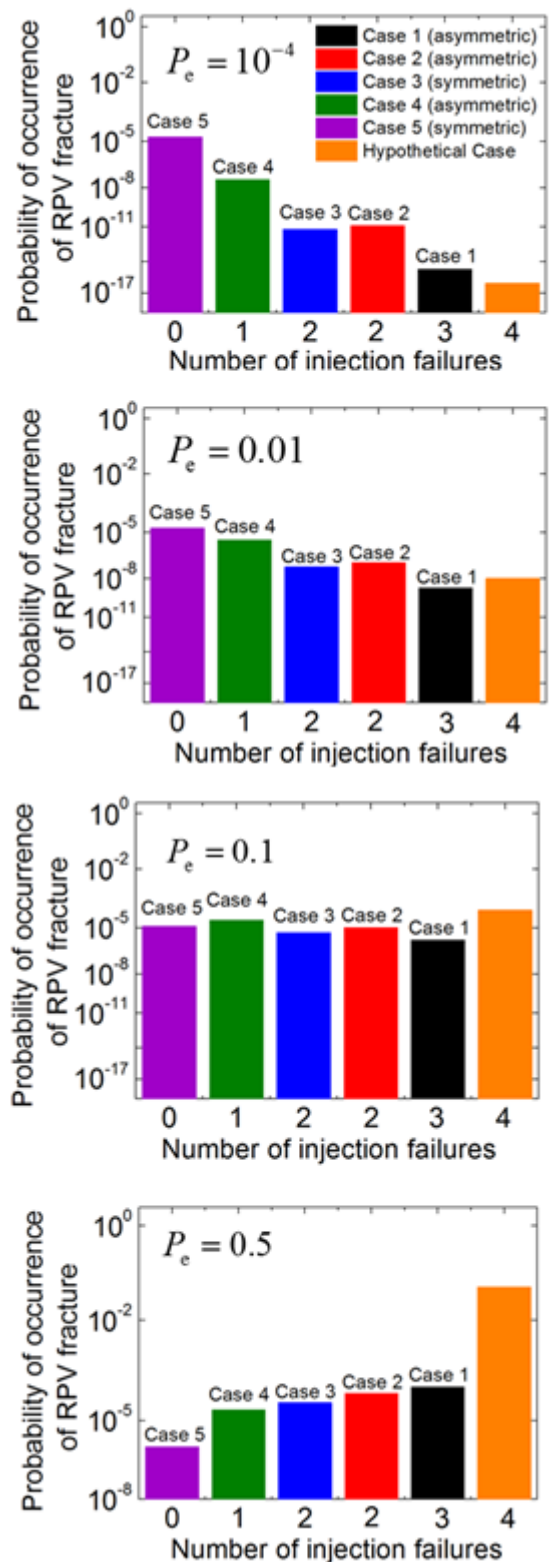


図8  $10^{-4}$ から0.5の範囲の $P_e$ に対して、非常用冷却注入の失敗の数の関数としてのRPV破壊の発生の確率<sup>[4]</sup>