

# 確率論的破壊力学解析：白か黒か灰色か？

眞崎浩一<sup>i</sup>

## Probabilistic Fracture Mechanics - Black, White or Gray? -

Koichi MASAKI

確率論的破壊力学を用いると、種々のパラメータの不確実性を考慮し、評価対象の破損頻度を定量的に評価することができる。各パラメータの破損頻度に与える影響を定量的に比較することができれば、構造物の健全性を維持するために特に重視すべき項目を判断する一助となるだろう。現行の国内原子炉压力容器の健全性評価は、決定論的な破壊力学を用いた評価であるが、国外の事例を踏まえて、確率論的破壊力学を適用するための検討が各機関で進められてきた。本報告では、この確率論的破壊力学の考え方やメリット、その課題等について紹介する。

(キーワード): 破壊力学, 確率, 原子力, PFM

### 1 はじめに

現行の規格に規定されている国内原子炉压力容器の健全性評価手法は、各パラメータを保守的に設定する決定論的な破壊力学を用いた評価に基づいている。一方で、破壊に寄与する様々なパラメータの不確実さを考慮し、対象の破損頻度を定量的に評価することのできる確率論的破壊力学 (Probabilistic Fracture Mechanics, PFM) という評価手法があり、国外において規制への適用事例<sup>1)</sup>もある。そのため、国内においても PFM の原子炉压力容器 (Reactor Pressure Vessel, RPV) の健全性評価への適用に関する検討が進められてきた。

この現状を踏まえて、日本電気協会によって、国内プラントの RPV に対して、PFM 解析を用いた破損頻度計算を行うための標準的な方法を規定した指針「確率論的破壊力学に基づく原子炉压力容器の破損頻度の算出要領」(JEAG4640-2018)<sup>2)</sup>が策定された。本指針は、今後も PFM 解析事例の蓄積に基づいて改定されることになっているが、改定状況を踏まえて、「原子炉压力容器の供用期間中の非延性破壊及び延性破壊に対する破壊靱性の妥当性の確認に関する規定」(JEAC4206)<sup>3)</sup>への取り込みも検討していくこと

が記載されている。本報告では、この PFM の考え方や適用するメリット、その課題等について紹介するものである。なお、本報告では、平易な表現を優先するために正確性を若干欠いた表現も使用したが、ご容赦願いたい。

### 2 決定論的破壊力学

破壊力学という言葉を知ることがないという方であっても、表記を見れば「ははあ、破壊に関連する分野なのだろうな」と推測できるのではないだろうか。その考えの通り、破壊力学とは亀裂を持った構造物がある荷重を受けた場合に、破壊に至るか否かを評価するための学問分野である。破壊力学では、亀裂の寸法や発生位置、材料の特性や加えられている加重などの条件を基に、破壊を引き起こす力の強さを表す応力拡大係数 ( $K_I$ ) と、材料の持つ破壊に対する抵抗値である破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ) を比較し、下式が成立する状態であれば、破壊は起こらないと判定する。

$$K_I < K_{Ic} \quad (1)$$

このような決定論的な破壊力学を用いた評価で得

<sup>i</sup> サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム チーフコンサルタント 博士 (情報工学)

られる結果は、基本的には白か黒かの 2 択、すなわち「評価対象に破壊が発生しない」もしくは「評価対象に破壊が発生する」のどちらかである。

しかし、その結果を導く様々な諸条件、即ちパラメータについては、その正確な値を取得することが非常に困難である。評価対象の存在する環境が異なれば、温度などのパラメータも変化するし、材料を製作する時の条件によっても、材料に含まれる化学組成に違いが生じることだろう。これらのパラメータは、統計的なばらつきや不確実性を持っているのである。

ここで、もし不正確なパラメータを使って評価を行ってしまうと、得られる結果も不正確なものになってしまう。破壊すると判定された構造物が、壊れなかったというのであれば被害は無いが、破壊しないと評価された構造物が、評価に反して破壊してしまうと大変危険である。そのような事態を回避するため、破壊評価に用いる各パラメータについては、安全性を考慮し、余裕を持った値を設定するのが一般的となっている。例えば、想定する加重の大きさを 1 とするならば、少し大きめに 1.2 と設定する。逆に材料の強度に関するパラメータについては、材料の強度が少し小さくなるように設定する。このような考え方は、工学分野以外でも、医学や薬学のように安全を重視する分野においては一般的なものであり、この値は安全係数などと呼ばれる。このように余裕を持ったパラメータを設定することで、パラメータの値が多少くらい増減しても、安全を担保することができるわけである。

だが、この余裕を大きく取りさえすれば良いというものでもない。余裕を持たせ過ぎたパラメータを設定すると、現実的な評価から乖離した評価になってしまう。浅い小川を渡るために頑強な鉄橋が求められるようでは、適切な評価がなされているとはいえないだろう。また、1 つ 1 つのパラメータに対してはさほど大きくない余裕を持たせたとしても、パラメータの数が膨大であれば、全体として含有する余裕の度合いは非常に大きくなってしまふ点にも注意が必要である。

例えば、あなたが打ち合わせのために、遠方にある顧客の会社に訪問すると仮定しよう。初めて訪れる場所であれば、あなたは約束の時間に遅れないようにと、移動に要する時間を多めに見積もることだろう。訪問地に到着するまでに何度も電車や交通機関を乗り継ぐ必要があれば、それぞれの乗り継ぎに十分な余裕を設定し、徒歩での移動が必要であれば、道

に迷っても大丈夫なように時間を見込んでおきたいものである。そのように考えて、私鉄から JR への乗り換えに 10 分の余裕を、新幹線に乗る際に切符を買う時間を含めて 20 分の余裕を、駅から顧客の会社への移動に 20 分の余裕をと、乗り換えや移動ごとに余裕を持たせた結果、あなたは訪問先近くのカフェで 1 時間以上の時間を潰すことになる。

この比喩は、決定論的な破壊力学を用いた評価における課題の 1 つを示すものである。仮に、各パラメータに対して 1.2 倍の余裕を考慮するとしても、パラメータが 10 個あれば、単純計算では全体で約 6.2 倍の余裕を持つことになる。

もちろん、原子力発電プラントをはじめとして、重要な施設・設備においては、安全に過ぎるということはない。だが、安全を確保するための人員とコストは有限であり、安全性を高めるためにどのような箇所、仕組みにコストをかけることが適切であるかという判断のためにも、より合理的な評価が求められる。確率論的破壊力学 (PFM) は、このような要求に応えることができる評価手法である。

### 3 確率論的破壊力学

PFM では、各パラメータの不確実性を考慮して、破壊の頻度を定量的に評価する。PFM ではパラメータの不確実性は確率的な分布として与えられ、分布型や中央値、標準偏差などが設定される。これによって、各パラメータから算出される応力拡大係数や破壊靱性の値も分布を持ち、この破壊靱性の値が応力拡大係数の値を下回る確率が、評価対象物が破壊する確率として算出される (図 1)。

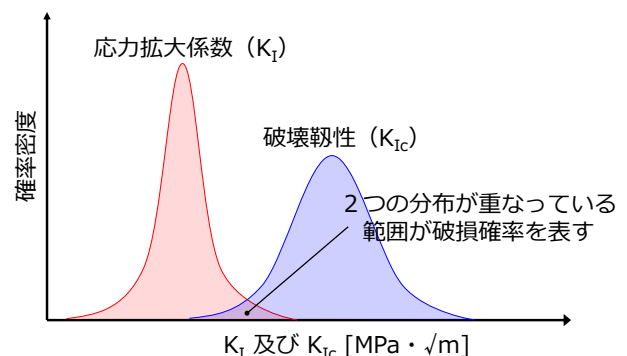


図 1 破損確率と  $K_I$  及び  $K_{Ic}$  の関係図

これが決定論的な評価であれば、図 2 に示すように応力拡大係数も破壊靱性も分布を持たない固定値

となり、単純に前者と後者を比較して、前者が後者を上回れば破壊が発生することになる。図2の例では、破壊靱性の値が応力拡大係数の値より大きいので、この評価では破壊は発生しない。仮に評価に用いるパラメータの値が変われば、2つの値も増減し、二者の位置関係が逆転した段階で破壊が発生する。

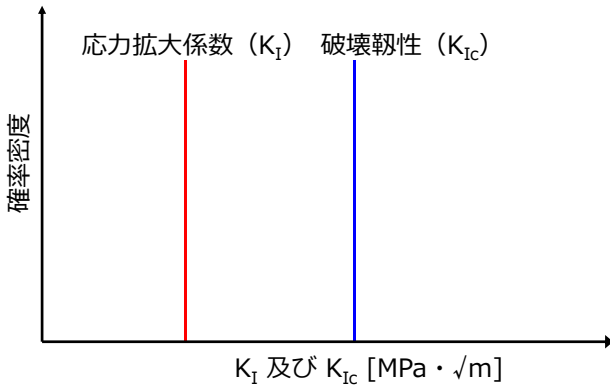


図2 決定論的評価における  $K_I$  及び  $K_{Ic}$  の関係図

さて、PFM ではパラメータを確率分布として取り扱うと言っても、具体的にどのような手法を用いているのかという疑問もあるだろう。PFM において、破損確率の値を算出する手法は幾つかあるが、代表的な確率計算手法の1つにモンテカルロ法が挙げられる。モンテカルロ法は、乱数を用いて、確率を近似的に求める手法であり、N 回のシミュレーションを行って、ある事象が m 回発生した場合、その事象の発生する確率を  $m/N$  と近似する手法である。モンテカルロ法を用いた PFM 解析の具体的な計算の手順とフローチャート (図3) を以下に紹介する。

1. 設定された確率分布に従って、各パラメータの値をサンプリングする。
2. 1のサンプリングで得られたパラメータのセットを用いて、決定論解析を実施する。パラメータのセット1つごとに「評価対象は破壊に至らない」もしくは「評価対象に破壊が発生する」という結果が得られる。
3. 1から2を1000回、10000回、100000回と繰り返し、破壊と判定された回数をカウントする。
4. 十分な回数の計算を実行した後、破壊回数 / 計算回数を破壊確率として算出する。

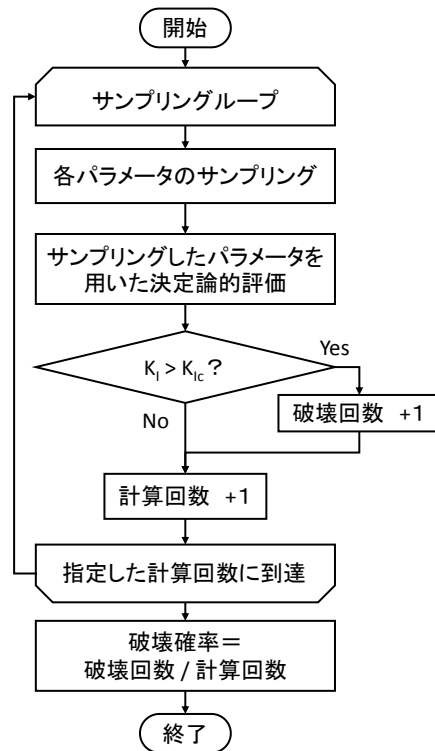


図3 モンテカルロ法のフローチャート

モンテカルロ法を用いた PFM は、言ってみれば、確率分布に従った乱数でサンプリングしたパラメータを使って、何度も何度も決定論評価を実施しているに過ぎない。仮に10000回の評価を繰り返して、そのうち破壊に至る結果が得られたパラメータセットが3セットあったとすれば、その評価対象が破壊に至る確率は0.03%と算出される。このようにして、PFM を用いた評価では、評価対象の破壊確率を得ることができる。白か黒かの2択ではなく、どの程度の灰色であるのかを判定できるのである。

もちろん、ある条件下で評価対象が破壊に至らないことを確認するだけであれば、従来の決定論的な破壊力学で十分であろう。だが、評価対象の破壊確率が具体的な数値として得られることには大きなメリットがある。例えば、特定のパラメータを変化させた場合に破壊確率がどの程度変化するか、といった定量的な比較に使用することができる。あるパラメータは10倍にしても破壊確率がほぼ変わらないが、別のパラメータを1.5倍にすると破損確率が10倍になる等の知見が得られれば、評価対象の健全性を確保する上で、特に重視すべき項目を絞り込むことが可能となる。

## 4 原子炉圧力容器の健全性評価手法

3章で紹介した破壊力学は、橋梁などの大型構造物をはじめとして、船舶や航空機、更には電子部品に至るまで、幅広い領域で用いられているが、それらの中でも特に安全性が求められる分野として原子力分野が挙げられる。

原子力発電プラントにおいて、最も重要な機器の1つであるRPVは、供用年数が増加するに伴い、炉心からの中性子照射による脆化が生じ、破壊靱性の値が低下することが知られている。そのため、脆化したRPVの健全性が維持されていることを確認することが重要であり、日本電気協会の原子力規格委員会による規格「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法」(JEAC 4206-2016)<sup>3)</sup>において、決定論的な破壊力学評価を用いて保守的に評価することが定められている。このRPVの健全性評価においては、亀裂が存在した状態で加圧熱衝撃(Pressurized Thermal Shock, PTS)事象が発生したと仮定し、RPVが破損するか否かを評価する。ここで発生を仮定するPTS事象とは、RPVにとって最も過酷な事象の1つであり、炉心に緊急炉心冷却水が注入されることで、加圧下のRPVの内面が急激な冷却を受ける事象である。このPTS事象を仮定した決定論的な評価では、十分に大きな亀裂を想定することや、破壊靱性の値として下限値を用いることで、保守的な健全性評価を実施している。

一方、パラメータの不確か性を考慮して破壊頻度を評価できるPFMを用いた原子力発電プラントの評価については、国外において活用事例がある。例えば米国においては、RPVのPTS事象に対する脆性破壊防止の基準として、PFMを用いて定められたスクリーニング基準が規定されている<sup>4)</sup>。

こうした背景を踏まえ、国内においても、より合理的な評価のために、PFM活用に向けた研究が進められている。例えば日本溶接協会では、1987年よりPFM関連技術の調査及び応用研究が進められてきた。特に1996年から現在までは、日本溶接協会原子力研究委員会内にPFM小委員会という専門委員会が設置されており、この小委員会から「リスク活用のための確率論的破壊力学技術 -基礎と応用-」<sup>4)</sup>というタイトルで、PFM技術に関する書籍が日本溶接協会のWebサイト上に無料で公開されている。この書籍は、小委員会に参画している各機関のPFM研究の成果と今後の展開について、分かりやすくまとめたものとなっ

ている。

また、原子力に関する研究や技術開発を行う国立研究法人である日本原子力研究開発機構(JAEA)においては、PTS事象が発生した場合におけるRPVの破壊頻度を算出するPFM解析コード(PASCAL)の開発が進められており、2017年にはPASCALを用いた実用研究等により得られた知見を取りまとめた「原子炉圧力容器を対象とした確率論的破壊力学に基づく健全性評価に関する標準的解析要領(JAEA-Research-2016-022)」<sup>5)</sup>が公開されている。

更に2019年には、日本電気協会においても、RPVの破損頻度をPFMによって算出できるようにするための指針である「確率論的破壊力学に基づく原子炉圧力容器の破損頻度の算出要領(JEAG4640-2018)」<sup>2)</sup>が定められた。この指針については次章で説明する。

このように、PFMを用いた評価について、これまで各機関で研究・検討されてきた成果が、ここ数年間で要領や指針などの形で結実しつつある。

## 5 原子炉圧力容器の破損頻度の算出要領

日本電気協会の原子力規格委員会によりまとめられた指針であるJEAG4640-2018<sup>2)</sup>は、軽水型発電用原子力設備の原子炉圧力容器の胴部を対象として、破壊現象に影響するパラメータの不確かさ等を考慮し、非延性破壊の発生や亀裂が炉壁を貫通する破損頻度を、PFMに基づいて計算するための標準的な方法を定めたものである。

本指針に記載された破損頻度の計算手順を簡単に図示したものが図4である。本指針で算出される値は、評価対象プラントにおける亀裂進展頻度(Frequency of Crack Initiation, FCI)及び亀裂貫通頻度(Through-Wall Cracking Frequency, TWCF)である。この頻度とは、運転期間1年間のうちにその事象が何回発生するかという回数で表される。このFCIとTWCFの計算手順は大きく3つのプロセスに分かれている。

1つ目が応力拡大係数の算出である。ここでは、想定する過渡事象ごとの圧力や温度の時刻暦を考慮した応力解析を行い、RPVの板厚内における応力分布の時刻暦を算出する。続いて、算出した応力分布の時刻暦に、RPVの製造時のクラッド溶接や継手溶接による溶接残留応力を加えた上で、想定亀裂の幾何形状を考慮した応力拡大係数を評価する。亀裂進展に伴って、亀裂形状が変化する場合は、亀裂進展後の形状

に応じた応力拡大係数を算出する。

2つ目は破壊靱性の算出である。破壊靱性及び亀裂伝播停止破壊靱性の値は、材料中の化学成分の組成に加えて、中性子照射による脆化の影響を受けるため、評価時期に対応した中性子照射量を設定する。なお、このプロセスで評価される亀裂伝播停止破壊靱性とは、進展中の亀裂が停止するか否かを評価するための値である。

3つ目のプロセスは破損頻度の算出であり、応力拡大係数と破壊靱性値を比較することで、亀裂が進展する確率や亀裂が貫通する確率を評価する。進展した亀裂については、RPVの板厚の8割の深さに達した段階で貫通と評価される。確率を算出する計算手法としては、先に紹介したモンテカルロ法以外にも、ラテン超方格法、数値積分等の手法を用いることができる。算出されたこれらの条件付亀裂進展確率や条件付亀裂貫通確率に、過渡事象の発生頻度や亀裂の個数などを考慮し、FCI及びTWCFを算出する。

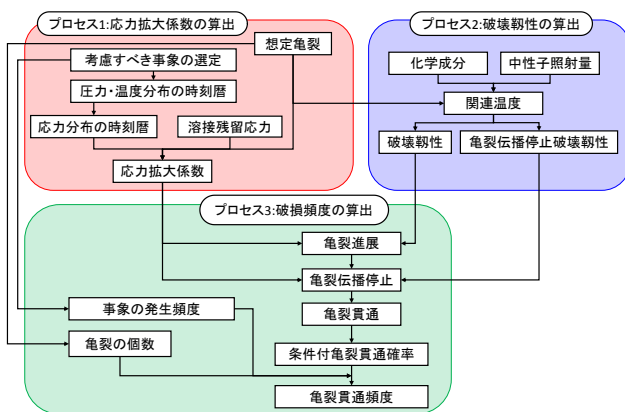


図4 破損頻度の計算手順 (JEAG4640-2018<sup>2)</sup>を参考に作成)

ただし、計算によって得られたFCIやTWCFといった破損頻度が、どの程度の値以下であれば安全と見なすのかという許容基準については、性能目標などに基いて別途定められるものであるため、本指針の範囲外となっている。評価対象が破壊するか否かを判定する決定論的な破壊評価とは異なり、結果が定量的に得られるPFMを評価に用いるためには、この許容基準を定める必要がある。参考までに例を挙げると、米国のPTS再評価プロジェクト<sup>9)</sup>では、この許容基準としてTWCF=10<sup>-6</sup>回/炉年という値が用いられた。

また、本指針ではPFM解析によりRPVの健全性評価を行う際に使用する解析コードの検証方法につ

いても触れられている。ただし、この検証は解析コードが正しく動作することの検証(verification)を対象としており、実際の現象との整合性を確認する妥当性確認(validation)については範囲外である。特にPFM解析コードに関しては、発生が稀な事象を取り扱うことが多いため、実際の現象との整合性を確認する妥当性確認は非常に困難である。

これらのことから分かるように、PFMは不確実性を考慮した上で、定量的な評価を行うためのツールとして大変に有用であるが、実際の健全性評価に用いるためには、許容基準の設定や解析コードの検証などの条件をクリアする必要がある。

## 6 まとめ

パラメータの不確実性を考慮し、定量的な評価を可能とするPFMを用いた評価については、国内の原子力分野においても活用に向けた研究が進められており、近年、各機関によってPFM解析のための要領や指針がまとめられている。PFMを用いた定量的な評価は、評価対象の健全性を確保する上で、特に重視すべき項目を絞り込むために有用であり、活用に向けた今後の動きが期待される。

## 引用文献

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission : Alternate fracture toughness requirements for protection against pressurized thermal shock events, 10CFR50.61a, (2010)
- 2) 一般社団法人日本電気協会 : 電気技術指針原子力編 確率論的破壊力学に基づく原子炉压力容器の破損頻度の算出要領, JEAG4640-2018, (2019)
- 3) 一般社団法人日本電気協会 : 電気技術規程原子力編 原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法, JEAC4206-2016, (2017)
- 4) 一般社団法人日本溶接協会 原子力研究委員会 PFM小委員会 : リスク活用のための確率論的破壊力学技術 -基礎と応用-, (2017), URL:<http://www-it.jwes.or.jp/ae/free/ae-1204/ae-1204-00.pdf>
- 5) 勝山 他 : 原子炉压力容器を対象とした確率論的破壊力学に基づく健全性評価に関する標準的解析要領, JAEA-Research 2016-022, (2016).
- 6) EricksonKirk, M., et al. : Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock PTS Screening Limit in the PTS rule (10CFR50.61), NUREG-1806, (2006)