

論文の内容の要旨

論文題目 統計的手法を導入したマスターカーブ法による
原子炉压力容器の破壊靱性評価に関する研究

氏 名 三浦 直樹

軽水炉発電プラントの安全で合理的な維持管理のためには、機器に想定される経年劣化が健全性に及ぼす影響を把握するための高経年化技術評価が必要である。その重要な課題の一つとして原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化が挙げられる。従来、原子炉压力容器鋼の破壊靱性の評価では、温度に対する破壊靱性データを下限包絡してその評価曲線 (K_{Ic} 曲線) を決めるといった方法が採られていたが、多分に経験的な手法であり、鋼材によっては K_{Ic} 曲線が著しく保守側となることといった理由から、これに代わる評価法が求められていた。近年、破壊靱性が本来有する統計分布特性を考慮してその信頼限界を理論的に定める方法、いわゆるマスターカーブ法が提案された。同法は、同一条件下におけるフェライト鋼の破壊靱性のばらつきを最弱リンクモデルに基づくワイブル分布により表現し、分布の中間値の温度依存性を鋼材ごとに決まる参照温度なる指標を唯一のパラメータとする一本の曲線 (マスターカーブ) によって記述する手法である。原子炉压力容器鋼にマスターカーブ法を適用することの妥当性についてはこれまでに検証がなされているが、同法を実機の健全性評価に活かすための指針は未だ整備されていない。その理由は、中性子照射脆化の進行をモニタするための監視試験プログラムの中に破壊靱性試験の実施がそもそも規定されておらず、実機と同等の照射を受けた材料の調達のしようがなかったことにある。

本論文は、かかる状況を勘案し、原子炉压力容器鋼の破壊靱性を評価するにあたり、統計的手法を導入したマスターカーブ法の実機への適用を可能ならしめる方法を新たに提案するものである。

第 1 章「緒 論」では、はじめにマスターカーブ法に関する既往研究事例、マスターカーブ法に関連する国内外の規格基準の整備状況について概観した。同法を実機に適用する

には、現行の監視試験プログラムと共存し得ることが必須の要件であり、使用済みの監視試験片（破断後のシャルピー試験片）の有効活用がそのための解決策であることを指摘した。有効活用を図るための鍵となるのは、「少ない試験片数」で、「小さな試験片」を用いてマスターカーブ法を適用できるようにする、という二点であって、前者に対応する課題として、「試験データ数と統計分布特性の推定精度の関係に基づくマスターカーブ下限界曲線の合理的な設定」を、また後者に対応する課題として、「使用済みの監視試験片から採取可能な超小型試験片を用いたマスターカーブ法の実現」をそれぞれ抽出した。

第 2 章「国産原子炉圧力容器鋼に対するマスターカーブ法の有用性の検討」では、我が国の代表的な原子炉圧力容器鋼材三種を供試材とし、板厚が 100、50、25、10 mm の C(T) 試験片、10 mm の三点曲げ試験片、および 10 mm の PCCv（予き裂付きシャルピー）試験片を用いた破壊靱性試験を 460 体実施し、破壊靱性基礎データを取得した。これにより、鋼種、試験温度、評価法（単一温度法、複数温度法の違い）、試験片寸法・形状ごとに有効な参照温度が決定可能であり、参照温度に及ぼす試験温度、評価法、試験片寸法の影響はいずれも小さく、有意な差が認められないことを初めて体系的に明らかにした。また、破壊靱性の統計分布特性を調べ、同一条件下の破壊靱性が鋼種や試験片寸法・形状によらずワイブル指数を 4 とするワイブル分布にしたがうことを初めて体系的に確かめた。さらに、破壊靱性基礎データに基づき決定されたマスターカーブ下限界曲線を現行規格の K_{Ic} 曲線と比較し、いずれの評価曲線もほぼすべての破壊靱性データを安全側に包絡できることを実証した。

これらの結果を通じて、国産原子炉圧力容器鋼に対しマスターカーブ法が適用可能であること、かつマスターカーブ法を適用することで同鋼の破壊靱性を適切に評価できることを体系的に明らかにした。参照温度に及ぼす試験温度、評価法、試験片寸法の影響は小さく、マスターカーブ法が評価法としてのロバスト性を備えている一方で、異なる鋼種に対する参照温度の違いは歴然としており、仕様が同じ材料であっても個別に参照温度を決定することの必要性を見出した。破壊靱性のばらつきがワイブル指数 4 のワイブル分布にしたがい、それが鋼種や試験温度の違いによらず成立するという事実は、試験片の寸法補正や信頼限界決定の評価式が使えるための前提条件が満たされていることを意味しており、これによりマスターカーブ法の適用の無謬性を明らかにした。

第 3 章「破壊靱性下限界曲線の合理的設定方法の提案」では、ワイブル分布にしたがう

破壊靱性の母集団からサンプリングを行って破壊靱性を推定するとの観点でマスターカーブ法を捉え、サンプルサイズの影響を的確に考慮しながら破壊靱性の下側信頼限界を理論的に決定する方法について、現行基準の下限界の設定方法を理論的に拡張した手法を新たに提案した。また、指数パラメータが 4 であるワイブル分布を正規分布に置き換えることが適切であることを理論的検討およびシミュレーションにより明らかにし、この置き換えを通じて参照温度の分布特性を解析的に推定する方法を導出した。以上の検討結果をまとめて、統計的な信頼性に明確な意味付けをしたマスターカーブ下限界を設定する方法を新たに提案し、その妥当性を破壊靱性基礎データとの比較により検証した。

これら一連の検討によって得られた意義は大きく二つあって、第一に統計的手法を導入してマスターカーブの下限界曲線を設定する方法を提案したこと、第二に現行基準で必要とされているよりもデータ数が少ない場合であっても、相応の下限界を決定できるようにしたことである。前者については、実質的な国際標準である、米国試験材料協会基準がサンプルサイズは無限大であるとの仮定に基づいているのに対し、サンプルサイズの影響を的確に考慮した下限界曲線の評価式を明確化したことをもって、下限界曲線の「合理的」な設定方法の提案に至った。一方後者については、第 1 章で抽出された、「実機材にマスターカーブ法を適用するには少ない試験片数で同法を使えるようにしなければならない」との要請に応える成果であり、これによってマスターカーブ法の実機適用への途が拓かれた。

第 4 章「ミニチュア試験片を用いた破壊靱性評価法の提案」では、監視試験片の再利用を前提としたミニチュア試験片を設計・製作し、これを用いた破壊靱性試験を行った。はじめに破壊靱性基礎データを基にミニチュア試験片の成立性について机上検討を行い、破断後の監視試験片から加工が可能なサイズの試験片を用いてマスターカーブを決定できる見通しを得た。この結果に基づき、厚さ 4 mm のミニチュア C(T)試験片、および厚さ 3.33 mm のサブサイズ PCCv 試験片の二種類の試験片を設計・製作した。このように設計したミニチュア試験片を用いてマスターカーブ法による破壊靱性試験 183 体を実施した。これにより、ミニチュア試験片を用いても、標準試験片やそれ以上の寸法の試験片と同等の参照温度を決定できることを明らかにした。また、マスターカーブの決定に必要な試験片数について考察し、ミニチュア C(T)試験片を用いた試験では、試験温度を適切に（参照温度より 30°C ないし 50°C 低め）に設定することにより、有効な参照温度を現実的な試験片数（10 体以下）で決定できるのに対し、サブサイズ PCCv 試験片においては有効な参照温

度の決定にはるかに多数の試験片を要し、現実的な評価には向かないことを見出した。

以上により、国産原子炉圧力容器鋼の破壊靱性の評価に対し、ミニチュア C(T)試験片を用いたマスターカーブ法が適用可能であることを明らかにした。

第 5 章「実機適用に向けての展望」では、我が国で現在運用されている原子炉圧力容器の破壊靱性の確認試験方法の現状を概観し、これにマスターカーブ法を導入した場合の効用について論じた。日本電気協会の定める技術規程では関連温度を基準とする K_{Ic} 曲線が設定されるに留まっており、照射材の K_{Ic} 曲線の決定には監視試験データが必須であるのに対し、米国機械学会事例規格では参照温度を間接的に利用した K_{Ic} 曲線が採用されており、マスターカーブ法単独で照射材の K_{Ic} 曲線を決定できるといった違いがあることを示した。次に、監視試験プログラムと並立させてマスターカーブ法による破壊靱性評価を行うことによる利点について考察し、破壊靱性の統計分布特性の理論的根拠を明確化できる、参照温度を直接決定できる、関連温度の初期値とその移行量を別々に求めるといった煩瑣な手順に拠らなくてよい、といった利点に加え、参照温度を指標として用いることで、異なるデータセットに対しても概ね一定の裕度を確保できることを確認した。

第 6 章「結論」では、上記の各章において得られた成果を総括するとともに、今後に残された課題について整理し、提案法の実機適用に向けた展望を示した。本論文で示された提案法に基づき、実機原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価に統計的手法を導入したマスターカーブ法を適用することで、現行の監視試験プログラムと共存しながらも、信頼性の高い構造健全性評価が実現できるようになると期待される。