

火力・原子力高温圧力機器の構造設計および 余寿命評価のための各種簡易構造健全性評価法の開発

背景

我が国のボイラ、圧力容器等の発電用圧力機器の構造設計に適用される設計規格^{*1}には円筒などの2次元形状の応力解析を前提とする処理（応力分布の線形近似）を含む簡易構造健全性評価法が採用されている。このため3次元形状の機器に対する簡易構造健全性評価法は確立されていない。米国高速炉設計規格^{*2}に採用されている詳細非弾性解析に基づく評価法ではひずみの線形近似処理が必要とされ、同様な問題を含んでいる。また、詳細非弾性解析は弾性解析よりも解析に要する労力が高い上、荷重履歴の依存性の取扱方法等が明確化されていないため、評価結果が解析者の考え方に依存し得る。これらの問題点は機器の保守管理にあたって重要性が増しているき裂状損傷の余寿命評価法にも共通している。

目的

発電用高温圧力機器を対象として、3次元解析を行った場合でも構造設計およびき裂状損傷の余寿命評価を容易にし得る、弾性解析を基調とした簡易構造健全性評価法を開発する。

主な成果

べき乗型の関数で表される簡便な応力-ひずみ曲線^{*3}を用いた弾塑性解析から得られる各種の構造応答パラメータを活用する各種の簡易構造健全性評価法を開発した。これらのパラメータは荷重の大きさや機器の寸法に依存せず、パラメータの値が既知の形状であれば、弾性解析に基づく構造健全性評価が可能となる。また、弾塑性解析から決定したパラメータは同一応力指数^{*3}を持つクリープ問題にもそのまま適用できる。

1. 構造設計法の開発

既存の弾性解析に基づく設計規格が求める「荷重制御型応力」、「クリープ疲労損傷」および「累積ひずみ」の評価については、2次元解析を前提としない簡易評価法を開発した。

荷重制御型応力については、米国軽水炉設計規格^{*4}における極限解析法について検討し、これまで明確でなかった複数荷重の取扱法の力学的根拠を与えた。また、極限解析法と不整合を持つ同規格の二倍勾配法を改良した「弾性勾配減少法」を新たに提案し、極限解析法との整合を確認した（図1-（1））。

クリープ疲労損傷については、我が国の高速炉設計方針^{*5}に採用されているピークひずみおよびクリープ中のピーク応力緩和履歴の評価に用いられる「弾性追従係数」の性質を検討し、弾性追従係数が熱応力に対する収束性を持つことを初めて示し、その収束値を荷重の大きさによらず一定値として用いるピークひずみ・ピーク応力緩和履歴の簡易評価法を提案し、その妥当性を確認した（図1-（2））。

累積ひずみについては、米国高速炉設計規格が求めるひずみの線形近似を要さない「相対弾性核寸法」に基づく評価法を提案し、提案法が既存手法と同等な許容応力を与えることを確認した。

2. 非弾性J積分評価法の開発

き裂の進展予測に用いる非弾性J積分（疲労に対する弾塑性J積分とクリープに対するクリープJ積分）について既存の簡易法を改良し、精度向上および適用範囲の拡大を図った。

荷重制御下での参照応力法^{*6}の精度を向上させる実断面応力補正係数および極限荷重補正係数を導入し、その効果を確認した。また、高温保持開始直後のクリープJ積分が高い状態（小規模クリープ状態）を考慮する手法を新たに提案し、その妥当性を確認した（図2-（1））。

熱膨張等の変形が与えられる条件下（変位制御下）で、参照応力に対する弾性追従係数の決定法を初めて明確化し、変形量に対する収束性があることを初めて示した。さらに得られた収束値を一定として用いる簡便な方法によって、非弾性J積分を高精度で近似可能とした（図2-（2））。2次元解析を前提としない熱応力下でのクリープJ積分評価法を初めて提案し、その妥当性を確認した（図2-（3））。

今後の展開

構造設計手法は発電用設備規格への反映を働きかけ、700℃超級先進超々臨界圧ボイラ等の設計合理化に資する。き裂状損傷評価法は火力高温機器の余寿命評価技術の高度化・簡便化に反映する。

主担当者 エネルギー技術研究所 プラント工学領域 上席研究員 藤岡 照高

関連報告書 「無次元化構造応答パラメータに基づく発電用高温圧力機器の簡易構造健全性評価法の開発」
電力中央研究所総合報告：M03（2007年8月）

*1：日本機械学会発電用火力設備規格および発電用原子力設備規格

*2：ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NH

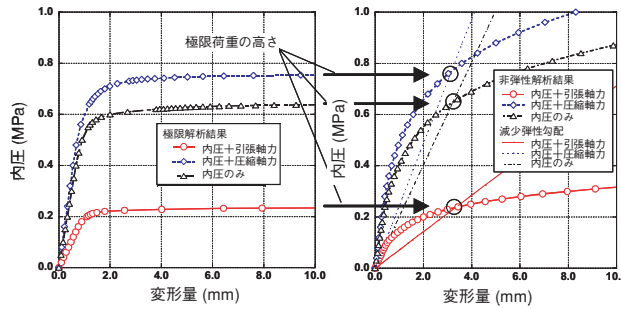
*3：弾塑性に対するRamberg-Osgood 則およびクリープに対するNorton 則のこと、その乗数を応力指数と呼ぶ

*4：ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III

*5：高速増殖原型炉（もんじゅ）の高温構造設計方針（科学技術庁内規）

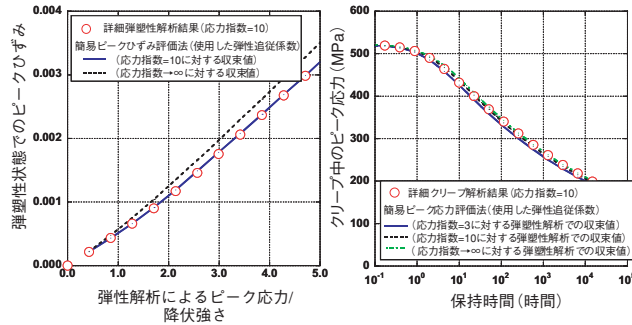
*6：英国の構造健全性評価手順書（R5およびR6）に取り入れられている簡易非弾性J積分評価法

内圧と軸力の組合せを受ける複雑形状容器の解析により、二倍勾配法に替わる弾性勾配減少法（減少弾性勾配と非弾性解析結果との交点で極限荷重（荷重の許容性判定に使用する）を決定）が極限解析法と整合する極限荷重を与えることを確認



(1) 荷重制御型応力の評価法

応力集中部を持つノズル形状の解析により、べき乗型の簡便な応力-ひずみ曲線を仮定した弾塑性解析から得られる弾性追従係数の収束値を一定として使用し、弾塑性状態でのピークひずみやクリープ中応力の緩和履歴を精度よく評価できることを確認



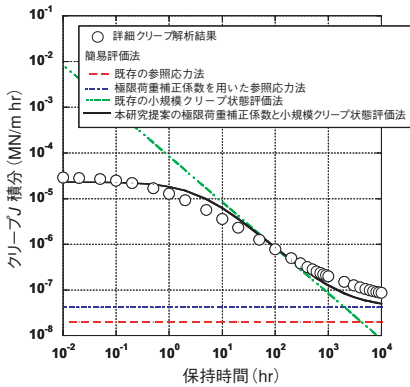
(2) 熱応力下ピークひずみ、ピーク応力緩和履歴の簡易評価法

図1 二次元解析を前提としない構造設計法の妥当性検証例

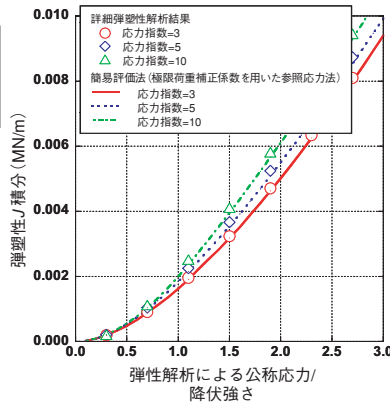
小規模クリープ状態の考慮方法を提案し、荷重保持を受けるき裂入り円筒におけるクリープJ積分を保持時間によらずに精度よく評価することを確認

変位制御下での弾塑性追従係数決定法を初めて具体化し、き裂入り平板における弾塑性J積分を精度よく評価することを確認

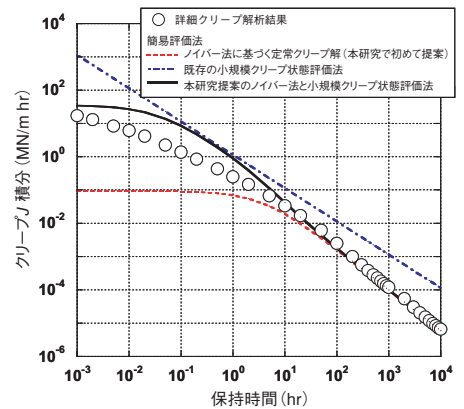
二次元解析を前提としないクリープJ積分評価法を初めて提案し、熱応力を受けるき裂入り円筒におけるクリープJ積分を精度よく評価することを確認



(1) 小規模クリープ状態を含む荷重制御下クリープJ積分



(2) 変位制御下での弾塑性J積分



(3) 熱応力下でのクリープJ積分

図2 二次元解析を前提としない非弾性J積分簡易評価法の妥当性検証例