

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 藤 岡 照 高

発電用高温圧力機器の設計は設計規格に基づいてなされる。米国のボイラーおよび圧力容器規格（ASME Boiler & Pressure Vessels Code）では、火力発電機器に対しては、内圧を受ける軸対称体における弾性応力公式に代表される「公式設計」が（ASME Section I）、原子力発電用機器に対しては、有限要素法に基づく「解析設計」が採用されている（ASME Section III）。解析設計には、本来は非弾性変形を伴う各種の損傷メカニズムの評価を弾性解析に基づき行うため、応力分類法が採用されている。すなわち解析の結果得られる応力を、まずその発生原因に基づき、内圧等の荷重制御型応力を一次応力、熱応力等のひずみ制御・変位制御型応力を二次応力に分類した上で、板厚方向の平均成分を膜応力、板厚方向に線形近似した際の勾配成分を曲げ応力、さらにこれら以外のピーク成分に分類し、それぞれ損傷に寄与する性質に応じた許容性判定に持ち込まれる。このように現状の設計規格類では、公式設計では軸対称体に対する公式が用いられ、解析設計では一次元的な応力分布の線形近似が求められ、いずれも軸対称形状を前提とし、三次元解析を行った場合の許容性判定法は明確でない。

塑性およびクリープの非弾性変形の影響が顕著になる高温機器に対しては、米国高温原子力発電機器設計規格（ASME Section III Subsection NH（策定当時は Code Case N-47））において、クリープ疲労損傷と累積ひずみの制限に非弾性解析が導入され、応力分類法を一部不要とした。しかし Subsection NH では、累積ひずみの制限において、主ひずみの板厚方向線形近似が求められ、三次元形状の取扱いの問題は完全に解決されてはいない。また、非弾性解析の適用にあたって考慮すべき、負荷履歴等の不確かさの影響に対する考え方が明確化されず、解析者の任意性が介在し得る。我が国の高速増殖原型炉設計方針（文部科学省内規）では、このような任意性の影響を回避するため、弾性解析を基調として、各種の簡易評価法によって非弾性変形の影響を考慮可能としているが、応力分類法が必要になっている。

一方、運用中の機器の健全性を確保する上では、各種の余寿命評価が行われる。特に、有害性が高い場合があるき裂状損傷に対しては、非クリープ領域に対する米国原子力発電機器検査規格（ASME Section XI）において、応力拡大係数に基づく評価法が規格化されているが、高温機器の評価で必要になる、二

次応力による顕著な塑性変形やクリープの影響を考慮した評価法は、規格化の水準に達していない。英国 **British Energy** 社が発行する高温構造健全性評価手順書 (**R5**) には、参照応力法を用いて塑性やクリープの影響を考慮するき裂状損傷評価法が記載されているが、参照応力法は本来、外力に対して導かれていることから、二次応力問題への適用方法など、未解決な点は多い。

本研究は、解析労力と解析者の任意性の影響を軽減するため、全面的な非弾性解析の適用を回避しながらも、形状一般性の欠如等の問題を解消し得る簡易構造健全性評価法を開発することを目的とした。無き裂構造の設計手法に関しては、高速増殖原型炉設計方針が必要とする損傷メカニズムの範囲をカバーし、かつ同方針をベースとしてその高度化を図り、既存設計規格類との整合性を確保することとした。また、き裂状損傷の評価については、塑性やクリープを生じる条件下で、き裂進展挙動と相関関係を有する非弾性 J 積分 (弾塑性体における弾塑性 J 積分とクリープ体におけるクリープ J 積分とを総称的にこう呼ぶ) の簡易評価法を取り上げ、**R5** をベースとして、その高度化を図ることで荷重条件に対する一般性を確保することとした。

本論文では、上記の背景および目的の下に、以下のように検討を進めた。

第1章では、既存の設計規格類や余寿命評価法について、その概略を述べ、既存手法が持つ前述の問題点を明らかにした。また、実際の発電用高温圧力機器で考慮すべき損傷メカニズムの概要をレビューし、本論文提案法に求められるものを明らかにした。

そして、簡便な非弾性構成式を仮定した簡易非弾性解析に基づく簡易構造健全性評価法の開発方針を立てた。ここで非弾性構成式に、弾塑性ひずみに対する **Ramberg-Osgood** 則およびクリープひずみ速度に対する **Norton** 則、すなわちともに応力のべき乗で表現される構成式を仮定すれば、簡易非弾性解析の結果が、構造の寸法や荷重の大きさに依存しない無次元化構造応答パラメータによって表現可能なことに着目し、同一形状および同一応力指数に対するパラメータの解が既知であれば、弾性解析のみからでも高精度な構造健全性評価が可能となる見通しを述べた。

第2章では、本研究が提案する簡易法のベースとなる各種の構造応答パラメータについて、その理論的根拠と決定方法を明確化した。

このようなパラメータとしては、参照応力の簡易解を厳密解に近づける「実断面応力補正係数」、二次応力の緩和挙動を表現する「弾性追従係数」、参照応力法に基づく非弾性 J 積分の近似解を厳密解に近づける「極限荷重補正係数」などがあり、いずれも弾塑性解析によって一意的に決定可能で、構造の寸法や荷重の大きさに依存しないこと、さらに **Hoff** の類似に基づけば、弾塑性解析で得られたパラメータを、同一応力指数を持つクリープ問題にも適用可能である

ことを述べた。

第3章では、外力が定義されることから参照応力法に基づく厳密な検討が可能な荷重制御問題の取扱方法を述べた。

まず、設計規格が求める一次応力制限の力学的意味を近似理論的に明確化し、複数荷重の取扱方法や、加工硬化を伴う弾塑性解析と弾完全塑性体に基づく極限解析の対応関係を明確化した。

き裂状損傷に対しては、複数荷重を受けるき裂入り円筒の弾塑性解析により、実断面応力補正係数と極限荷重補正係数の有効性を確認した。また、定常クリープ状態に到達する前の小規模クリープ状態における一般的なクリープ J 積分の簡易評価法を初めて提案した。そして、弾塑性解析から決定される実断面応力補正係数と極限荷重補正係数、および本小規模クリープ評価法を用いることで、保持開始直後から定常クリープ状態に至るまでの全期間におけるクリープ J 積分が簡便かつ高精度で評価できることを、き裂入り円筒の弾塑性クリープ解析で検証した。

第4章では、変位規定点における反力を外力とみなすことで荷重制御と同様な取扱が可能な、変位制御問題を取り上げた。二次応力の取扱にあたっては、高速増殖原型炉設計方針が採用する弾性追従係数に着目し、非弾性体の応力状態を弾性解析結果から推定する方法を検討した。

まず、変位保持を受ける任意形状のクリープ体におけるひずみの挙動を検討し、応力分布の形状が変化しない準定常クリープ状態では、任意点における弾性追従係数が、形状と応力指数のみに依存した一定値になることを解析的に初めて証明した。さらに Hoff の類似に基づけば、同様な性質は全面塑性状態におかれる弾塑性体でも成立し、弾性追従係数は、弾塑性解析において変位を増大させた時、形状と応力指数に固有の、クリープ体と共通の一定値に収束することを示した。

また、定常クリープ状態到達前の応力再配分過程に対しては、既往研究を参考に、応力-ひずみ線図上で Neuber 則に従う双曲線型の応力緩和軌跡を辿り、時間の経過に伴い、上記の弾性追従係数の収束値で表現される直線に漸近することを、変位保持を受ける切欠き付き丸棒の弾性クリープ解析で確認した。

これより、一意的に決定可能な応力緩和軌跡に基づくピークひずみ、ピーク応力緩和履歴の簡易評価法を提案した。提案法の有効性は、上記の切欠き付き丸棒に対する弾塑性解析および弾性クリープ解析で検証した。また、これらの非弾性解析を通じて、弾性追従係数は応力指数が大きいほど大きく、弾塑性体では荷重の増加とともに増大する傾向を確認した。

き裂状損傷に対しては、R5 では明確にされていなかった、参照応力に対する弾性追従係数の決定方法を、初めて理論的に明確化した上で、弾性追従係数の

収束値を荷重の大きさによらずに使用する簡易非弾性 J 積分評価法を提案した。提案法の有効性は、強制変位を受けるき裂入り平板の弾塑性解析によって検証した。

第5章では、高温圧力機器において重要な熱応力問題を取り上げた。熱応力に対しても第4章に示した変位制御問題と同様な性質が成立すると考えた。

まず、クリープ疲労損傷評価のベースとなるピークひずみ範囲・ピーク応力の挙動を表現する弾性追従係数の収束性と応力指数への依存性について、非線形温度勾配を受ける平滑円筒および軸方向温度勾配を受けるテーパ付き円筒の弾塑性解析によって検討し、変位制御問題と同様な性質を持つことを確認した上で、弾性追従係数の収束値は、応力指数が大きいほど大きいことから、弾完全塑性モデルを用いた解析によって、弾性追従係数を安全側に決定する方法を提案した。こうして決定可能な弾性追従係数を荷重の大きさによらずに使用するピークひずみ、ピーク応力緩和履歴の簡易評価法を提案し、その有効性を上記の平滑円筒の弾塑性解析およびテーパ付き円筒の弾塑性ならびに弾性クリープ解析によって検証した。

き裂状損傷に対しては、英国き裂状損傷評価手順書 (R6) が推奨する、応力分類法を要さない簡易弾塑性 J 積分評価法、Neuber 法をクリープ問題に拡張した。また、第3章で提案した小規模クリープ評価法を修正し、二次応力問題に適用可能とした。これらの組合せに基づく簡易クリープ J 積分評価法の有効性は、熱応力を受けるき裂入り円筒の弾塑性クリープ解析によって検証した。

また、累積ひずみの評価に関して、高速増殖原型炉設計方針が採用する Bree の線図において非ラチェット領域と弾性核の存在条件とが一致することから、相対弾性核寸法に基づく制限法を初めて提案した。提案法の有効性は、内圧と熱応力繰返しを受ける円筒の弾塑性解析によって検証した。

第6章では、本研究で得られた知見を要約して述べ、本論文の結論とした。

以上