

審査の結果の要旨

氏名 土井 莊一

原子力発電の安全性確保と効率的利用を実現するには、合理的な燃料安全性基準の確立が重要である。本論文では、主に延性破損を念頭とした基準に代わるものとして、延性破壊と脆性破壊を組み合わせる合理的に加圧水型原子力炉燃料の破損限界評価手法の基盤を検討した成果をとりまとめている。また、従来の考え方とは逆に、燃料安全性を確保するための被覆材要求性能を設定することが有効であることを示し、特性測定手法の確立とともに有効性の確認を体系的に行う手法を提案して、燃料破損限界を適正に評価することで、性能向上を目指した改良材料の有効性評価への適用性を検討している。

本論文は9章で構成されている。

第1章では、今後の燃料安全研究の課題とあるべき姿を述べている。

第2章は、本論文における研究の背景並びに目的を述べている。燃料被覆管の延性特性及び脆化特性の双方の観点から燃料破損評価手法を確立するとともに、被覆管の脆化評価手法を確立して、燃料要求性能に対する必要被覆管特性を設定することを本論文の目的と設定している。

第3章は、燃料の安全基準について議論しており、燃料破損限界破損限界は、主に被覆管材特性に支配されていることから、材料特性に基づく破損限界評価手法を確立することによって、多様な燃料使用環境下での性能限界、あるいは改良被覆管材における性能向上を適切に評価することが可能となり、科学的合理性を持った燃料安全基準が達成されることを詳述している。

第4章は、過出力時における燃料機械的破損評価手法を体系的に検討している。使用期間中において、中性子照射脆化と水素脆化が進行してゆく被覆管に対しては、過出力条件での燃料ペレットの温度上昇による熱膨張から破損にいたるまでの評価手法として、歪みエネルギー密度による延性破損評価と破壊靱性に基づく脆性破損評価が必要であることを論じている。また、破損判断基準としての限界歪みエネルギー密度を引張試験結果からの降伏強さ、応力指数、破断伸びから算出し、被覆管外面酸化膜厚データに基づいて、延性の低下は主に水素吸収量の増加によることを論じている。また破壊靱性値についても、温度、中性子照射量、水素吸収量に依存するモデルを構築することに成功している。

さらに本章においては、使用期間中に脆化が進んだ薄肉材料としての被覆管における破壊靱性値測定手法として、マイクロインデンテーション法の適用性を実験的に検討している。高水素吸収ジルカロイ4材及び高温酸化ジルカロイ4材において、ポップイン量と亀裂長が比例関係にあることを示しており、また、亀裂が生じなくても圧痕の対角長の亀裂が生じていると仮定することで、保守的に最小破壊靱性値が評価できることを示し、燃料

破損評価への適用性を議論している。

第5章では、開発した燃料破損限界評価手法を、各種の燃料の試験炉におけるパルス照射試験へ適用することを試みている。被覆管温度が室温からの試験である NSRR パルス試験に対しては、過渡変化時燃料挙動解析コード FRAP-T6 を用いて過出力状態での被覆管応力を解析し、投入される燃料エンタルピー増加に対する歪みエネルギー密度及び応力拡大係数を検討している。試験での燃料破損結果に基づいて、水素吸収に伴う破壊靱性値の低下による破損判断基準が適切であることを検証している。さらに 290℃以上の高温で実施された CABRI パルス試験に対しても同様な評価を行い、被覆管の延性破損が支配的である場合と、燃焼度に伴い水素吸収による脆化が進むに伴い、脆性破損が見られることを明確に示すことに成功している。これらの検討から、脆性破壊評価を加えることで照射脆化の進んだ被覆管材に対して適正な破損予測が可能となったこと、また、材料の脆化の支配的要因の一つである水素吸収量で破損限界が評価できることから、水素吸収量を低減する改良被覆管材に対してもその性能向上が評価可能となることを議論している。

第6章においては、燃料の負荷条件に対して燃料破損を回避するために必要な被覆管材特性を評価しており、第4章で開発したインデンテーション法により評価可能な最小破壊靱性値に基づいて、燃料安全性の観点から要請される被覆管材料性能を提示できることを示している。

第7章及び第8章は、本論文のまとめと結論を示している。

また、第9章と添付資料は、それぞれ謝辞と実験結果の詳細を示している。

以上を要するに、本論文は、加圧水型原子炉燃料での過出力条件下での燃料破損評価を被覆管機械特性に基づいて評価する手法を確立して、燃料材料特性に対する要求性能を設定できることを提示したものであり、新しい燃料使用条件下での燃料安全性を従来の照射試験実績に基づく検証より容易かつ合理的に達成するとともに、被覆管材料改良の方向性を明示することを可能とするものであると高く評価できる。

以上から本論文は、システム量子工学、特に原子炉燃料システム工学の発展に寄与することが少なくない。よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。