

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	山本泰功
論文題目	軽水炉保全高度化のためのモデリング研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、軽水炉保全の高度化に必要な原子力材料の挙動予測技術と管理の最適化を論じた結果をまとめたもので、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、研究の背景および本研究の意義が示されている。福島原発事故の反省として、原子力安全のための深層防護の実装が不十分であったことを挙げ、原子力安全の深層防護は、原子炉の設計段階だけでなく、運用段階においても適用される必要があり、運用段階の異常事象に対応するには異常の発生・進展を精度よく予測することが重要であると指摘している。異常の発生メカニズムを掘り下げて考えると、使用環境に対する材料の応答性や、もしくは材料そのものの経年変化をその要因の出発点としているものがほとんどであることから、保全の高度化には材料学的な視点を含む必要があるとの結論に達している。さらに、使用環境下での材料の劣化状態やその予測に応じて安全対策を立案する必要があること、材料損傷の未然防止策とともに損傷した場合の影響緩和策についても併せて整理する必要があることを指摘している。そこで本研究の目的は、原子力材料の劣化予測技術向上と材料損傷の管理の最適化のモデリング研究を通じて、原子力安全の向上を材料学の視点も取り入れながら検討し、軽水炉保全の高度化について論じることとしている。</p> <p>第2章では、燃料被覆管材料の酸化進展予測技術について論じている。これまでに燃料の高燃焼度化が段階的に進められており、炉内での使用期間の長期化に伴い被覆管酸化量の増加が材料強度の低下や熱伝導率の低下を引き起こす要因となっている。そのため、被覆管の酸化量は燃料の健全性を予測するうえで重要な指標であるが、酸化反応の律速過程については十分な理解が得られておらず、実験事実にもとづく経験的な予測式(酸化の初期段階で酸化量が時間の1/3乗に比例する、いわゆる“1/3乗則”)が用いられている。本研究では、第一原理量子計算によってZrO₂酸化膜中の酸素拡散の活性化エネルギーについて応力依存性を評価し、その解析結果をもとに、1次元拡散モデルによって酸化速度の応力依存性を検討している。本研究によって、これまで明らかにならなかった実験的に報告されている被覆管の酸化速度が、酸素拡散の応力依存性によって説明し得ることを明らかにしている。</p>			

第3章では、材料の照射損傷過程について、反応速度論にもとづく数値解析を行っている。原子力材料は一般の工業材料とは異なり、高エネルギー粒子の照射を受ける過酷な環境で使用されるため、照射に起因して材料の硬化、脆化、体積膨張等の材料特性変化が引き起こされ問題となる。そのため、原子力材料の健全性を予測するには材料の照射損傷の進展を正確に予測することが重要である。本章では、材料の照射損傷プロセスの時間的・空間的マルチスケール性を説明し、様々な数値解析手法を相補的に用いた評価が重要であることを指摘している。また、本章では、分子動力学法やモンテカルロ法による解析結果を相補的に用い、これまで理論的な扱いが困難であった欠陥集合体形成過程を、定常核生成の仮定を用いずに記述するモデリングの方法論を新たに提示し、集合体形成に関するモデルの適用範囲を高温側へと拡張することに成功している。

第4章では、材料損傷に備えた管理に関して、運用中の被覆管材料の破損問題（いわゆる燃料リーク問題）への対応を最適化するための新たな方法論をケーススタディとして示している。原子炉の安全評価に使われている確率論的リスク評価手法に着目し、ハザード曲線を用いて、モンテカルロ法による解析結果をもとに、事象の発生頻度とその検査頻度の関係を論じ、燃料被覆管の材料破損と取替の相関を分析し、新たな安全解析手法を提案している。

第5章では、本論文の総括が記されている。本章では、原子力材料の劣化予測技術及び管理の最適化のためのモデリング研究を通して得られた知見をまとめている。さらに、燃料被覆管材料を例に、材料破損と破損後の影響、および、材料破損の詳細なメカニズムに関する因果関係を階層的に構造化して示している。こうした因果関係ダイアグラムをもとに、本研究の位置付けを改めて明示し、本研究の実施対象が、異常発生の未然防止から発生後の影響緩和策に至るまで、広範囲に及んでいることを示すとともに、材料の視点からも合理的な安全対策を整理することの重要性について論じている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、軽水炉保全の高度化に必要な原子力材料の挙動予測技術と管理の最適化について研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

被覆管酸化の予測に関しては、経験的に知られる“1/3乗則”が実際の安全評価においても使われている。本研究では、第一原理量子計算による原子レベルの解析を行うことで、経験的に知られていた酸化速度が、酸素拡散に対する応力依存性と酸化膜厚さ変化に伴う時間依存性により理論的に説明し得ることを示した。これは、軽水炉燃料被覆管の劣化予測式に理論的根拠を与え、予測精度の向上に寄与する知見である。この知見により、酸化挙動の遷移に関する実験的知見と合わせることで、遷移現象の理解が可能となり、被覆管材料の酸化脆化現象の理解に貢献しうると認められる。

材料の照射損傷プロセスの理解は、炉内の過酷な環境で使用される原子力材料の状態を理解し、それに基づいて軽水炉保全を高度化する上で重要である。本研究では、分子動力学法やモンテカルロ法による解析結果を相補的に用いた反応速度論解析を実施することで、照射損傷プロセスの時間的・空間的マルチスケール性を記述する新たな方法論を提案している。本モデルの特筆すべき点は、欠陥集合体の核生成プロセスを定常核生成の仮定を用いず表現したことであり、その結果、欠陥集合体が熱的に不安定になる高温側へもモデルの適用範囲を拡張できた点である。また、本研究で構築した反応速度論モデルを用いた解析結果は、ボイドスエリングのピーク温度の存在や、ピーク温度の損傷速度依存性に関する実験結果と定性的に一致することが確認された。照射劣化予測精度の向上に大いに貢献しうる知見と認められる。

材料破損後の影響緩和策に係る燃料保安全管理の最適化のために、確率論的リスク評価手法と整合する保全戦略がケーススタディとして提案された。このモデルをもとに、材料破損に起因する事象の発生頻度から、合理的な検査保全頻度の設定が可能となる。原子力安全の深層防護を、対策の重要度に応じて合理的に実装するための方法論が示されている。

以上要するに、本論文は、材料劣化の予測技術の向上に資する知見の取得、及び材料破損後の影響緩和策の最適化に関する方法論の提案を通じて、材料学的な視点も取り入れながら、原子力安全の深層防護の各レベルでの安全性向上戦略を論じており、原子力材料学への貢献はもとより、軽水炉保全の高度化に影響を与えると期待され、得られた結果は、エネルギー科学において学術上、実際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年2月20日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降