

審査の結果の要旨

氏名 陳良

原子力システムの安全性を長期間にわたり確保するためには、機器・構造物の機能に着目し供用期間中の運転状態を検討した上で、機能劣化をもたらす要因を明らかにして、適切な保全活動を実施していくことが求められる。軽水炉の一次冷却水バウンダリを構成する圧力容器には低合金鋼が用いられてきたが、高速中性子照射に伴って脆化が進行することが知られている。加圧熱衝撃事象等の事故時における脆性破壊リスク評価の不確実性を排除し、軽水炉システムの時間的使用限界を把握するためには、長期間運転に伴う照射脆化を定量的に予測することが求められている。照射脆化挙動については、低合金鋼の不純物元素成分に影響することが明らかにされ、特に銅不純物については製鋼段階での低減が図られてきた。しかし銅以外の不純物元素についてもミクロな観点から溶質原子集合体の形成過程を機構論的に明らかにすることが必要となっている。これらを背景として、本研究ではレーザー3次元アトムプローブ法により溶質集合体を直接測定して、中性子照射及び熱時効の複合的影響を考慮した溶質原子集合体の形成・成長過程の機構解明を行うことを目的としている。

本論文は、8章から構成されており、第1章は背景と近年の圧力容器材料に関する経時的なリスク評価研究をとりまとめた上で、上記の研究目的を述べている。

第2章は、適用した材料及びその熱時効、中性子照射及びイオン照射試験の条件を議論するとともに、3次元アトムプローブ法の原理に加えて、針状試料から得られるナノメートルレベルの微小溶質原子集合体形成に関するデータ処理手法及び統計学的な意味について述べている。

第3章は、鉄-銅二元合金について、熱時効試料及び熱時効後に中性子照射を行った試料について、3次元アトムプローブによって銅不純物の集合体のサイズ分布を評価した結果を比較しており、中性子照射は熱時効後であっても新たな集合体形成を促すとともに、熱時効で形成された集合体を成長させることを明らかにしている。

第4章は、鉄-銅合金にニッケル及びマンガンが添加された試料について、熱時効及び中性子照射試験を行い、溶質原子集合体の形成過程を調べた結果を述べている。銅不純物が存在する環境においては、中性子照射に伴う銅を主成分とする溶質原子集合体の核形成がマンガン不純物によって大きく加速されることを明らかにした。またニッケルは、マン

ガンのように溶質原子集合体濃度の大きな増大はもたらさないものの、銅を主成分とする溶質原子集合体とマトリックスの境界付近に濃化することを見出し、銅による溶質原子集合体の核を安定化させる効果を持つことを明らかにしている。さらにニッケルとマンガンが同時に不純物として存在する場合は、ほぼ1 : 1の組成比で溶質原子集合体内に存在することを明らかにしており、規則化したニッケル-マンガン金属間化合物の熱力学的な安定性が影響していることを見出している。

第5章では、銅、ニッケル、マンガンに加えて、シリコンが不純物として存在する場合の溶質原子形成過程についても検討しており、銅を主成分とする溶質原子集合体にはシリコンが取り込まれないことを明らかにしている。

第6章では、第3から5章での熱時効試料に対する中性子照射後のミクロな溶質原子集合体形成挙動に関する知見に基づいて、銅不純物量が低減された比較的新しい圧力容器鋼で課題となりうるニッケルとシリコンの不純物どおしの相互作用に着目して、鉄-ニッケル-シリコン三元合金に対して高い照射量までの鉄の自己イオン照射試験を行っている。イオン照射による損傷導入部位のみを取り出して針状試料とする微細加工手法を考案し、3次元アトムプローブ法による溶質原子集合体形成過程を観察した結果、ニッケルとシリコンの双方が濃化した溶質原子集合体を確認し、銅を主成分とする溶質原子集合体形成がない場合には、ニッケルとシリコンの相互作用に基づく集合体形成が重要となることを実験的に証明することに成功している。さらにイオン照射表面のマクロな硬度変化を検討して、溶質原子集合体による硬化と欠陥集合体形成に伴う硬化を分離しできることを示している。

第7章は、以上の成果を総括して、多様な不純物を含む圧力容器鋼の溶質原子集合体に関する機構マップを構成して、各種不純物及び照射欠陥が動的に相互作用するメカニズムに関して議論を行っている。ミクロな溶質原子集合体の形成過程等に基づいた照射脆化定量化モデルの構成法について、日本電気協会規格 JEAC4201 の最新版に適用されている現行モデル化手法に対して追加すべき点及び改善すべき点を取りまとめるとともに、超長期の予測に必要な熱時効効果についても議論している。

第8章はまとめであり、以上の研究成果を総括するとともに、7章で検討した機構マップに基づいた機構論的モデルの工学的な適用性について議論するとともに、今後の課題を取りまとめている。

以上から、本論文は、新規性、有用性、学術的価値の観点から、原子力工学及び原子力材料学に寄与するところが少なくない。

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。