

# 圧力容器の照射脆化と健全性評価

## 背景・目的

長期運転経年炉で考慮すべき事象の一つに、核分裂で発生する中性子の照射を受けて圧力容器鋼材の機械特性が変化すること（照射脆化）があり、原子炉を長期にわたって安全に運転するためには、照射脆化を精度良く予測することが必要である。当研究所ではマイクロ組織レベルでの照射脆化の機構の理解に基づく照射脆化予測法を開発し、その成果は日本電気協会技術規程JEAC4201-2007に反映された。今後予想される長期運転に備えて、照射量が高い場合の照射脆化予測の精度向上と圧力容器の健全性評価手法の高度化が必要とされている。

本課題では、高照射量領域での照射脆化の機構解明を行い、予測法の検証と改良を進めるとともに、健全性評価の高度化に必要な新たな技術開発を行う。

## 主な成果

### 1. 照射脆化への照射速度の影響評価

長期運転に相当する照射を短時間で行うために、時間当たりの照射量（照射速度）を大きくした試験が行われる。米国カリフォルニア大学との共同研究において、当研究所の三次元アトムプローブ観察技術を用いて照射速度が原子レベルのマイクロ組織に与える影響を調べた。照射により形成される溶質原子のクラスター（図1）は、照射速度が非常に大きいと、大きさが小さく、個数が増えることがわかった。また、照射された材料を高温に加熱してマイクロ組織を調べたところ、照射速度が大きいほど加熱によるマイクロ組織の変化が大きいことがわかった（図2）。これは照射速度が違くと異なるマイクロ組織が形成されることを示している [Q09021]。

### 2. マイクロ組織形成機構の解明のための計算機シミュレーション

三次元アトムプローブで観察される溶質原子のクラスター形成の機構を調べる上で、スーパーコンピュータを用いた計算機シミュレーションは有効な研究手段である。ここでは、第一原理分子動力学法により原子空孔の拡散と溶質原子の相互作用を高精度に求め、これを用いた空孔の拡散による溶質原子のクラスター形成のシミュレーションを実施した。原子空孔を核として溶質原子が集合しクラスターを形成する様子を捉えた（図3） [Q09022]。

### 3. 微小硬さ試験法を用いた高精度硬さ測定

硬さ試験法は照射脆化を測定する簡便な実験手法であるが、測定間のばらつきが大きいことが課題であった。ここでは、数グラムの荷重による微小硬さ試験法を用いて、1000点以上の多点硬さ測定を行うことの有効性を検討した。その結果、硬さのばらつきは金属組織に対応していること（図4）、多点測定により硬さの分布を比較することにより、照射による僅かな硬さ変化を精度よく求められることを示した（図5） [Q09014]。

その他の報告書 [Q09029] [Q09026] [Q09015]

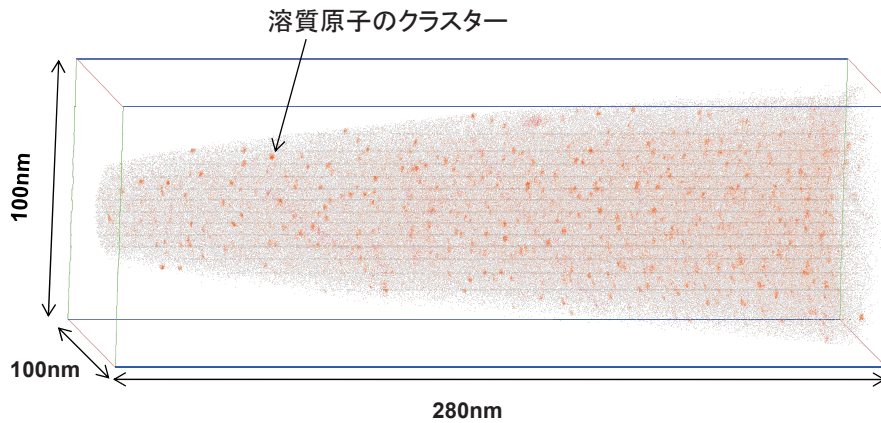


図1 三次元アトムプローブにより観察された原子マップ

測定体積内に5400万個の原子が含まれるが、ここでは銅とシリコンの原子だけを表示している（オレンジ色の点：Cu、グレー色の点：Si）。銅が集合したクラスターが高密度で形成されている様子がわかる。

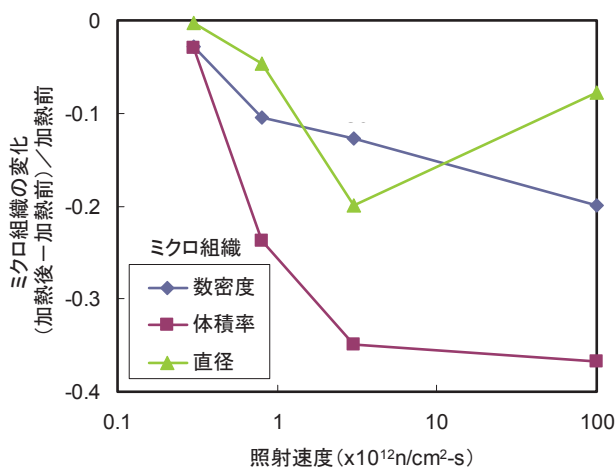


図2 加熱によるマイクロ組織の変化

照射速度が小さい条件では加熱による変化はないが、照射速度が大きいと加熱により大きく変化し、照射速度によりマイクロ組織が異なることがわかる。

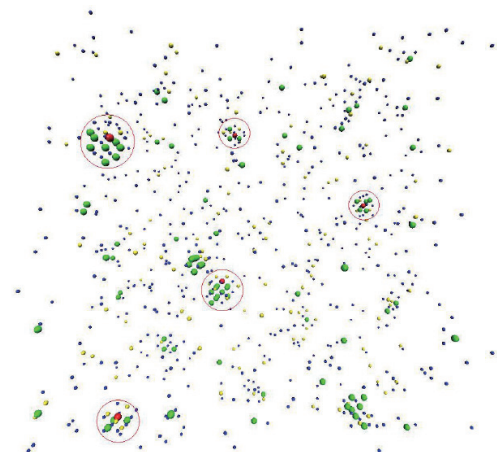


図3 原子空孔（赤）の拡散による溶質原子（緑：Cu、青：Ni、黄：Si）クラスターの形成  
原子空孔を核にクラスターが形成されている。

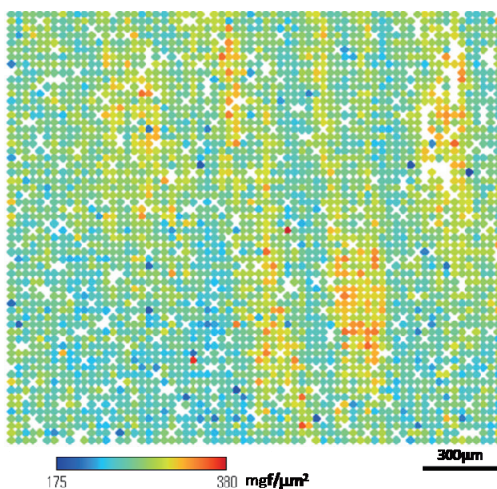


図4 微小硬さ試験機により多点測定した2×2mmの領域内の硬さ分布

黄色から赤の硬い領域は炭化物等が多く形成されており、硬さと金属組織が良く対応する。

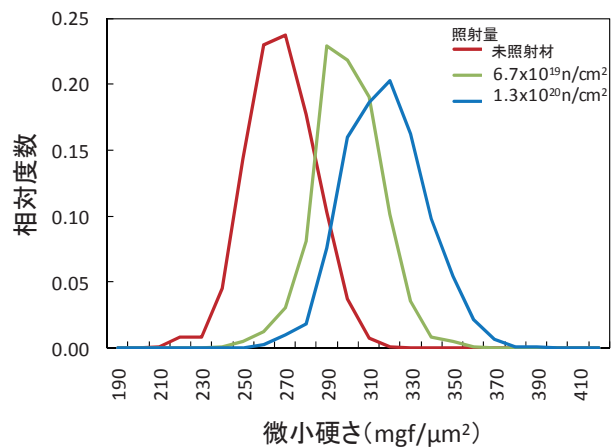


図5 中性子照射された压力容器鋼の硬さ分布分布を比較することで、僅かな硬さの変化を正確に測定可能することができる。