

2-3. 主要な研究成果(1) 原子力発電の利用価値向上



原子力発電

鋼材のミクロ組織の分析に基づき原子炉压力容器鋼の照射脆化メカニズムの理解を進展

● 予測精度と説明性を向上させた次世代の脆化評価法の構築に貢献

背景

軽水炉では、**原子炉压力容器(RPV)の照射脆化^{*1}**が**長期運転時の主要な経年劣化事象**となることから、RPVの健全性評価のために脆化評価式を用いて脆化量が予測されます。国内のRPVで用いられる鋼材は、製造方法(圧延または鍛鋼)によりニッケル(Ni)濃度が異なります。また、BWRとPWRでは炉内温度や時間当たりを受ける照射量に違いがあります。これらの**化学成分や照射条件**の差異が脆化に及ぼす影響を正確に把握することは、**脆化評価式の予測精度と説明性を向上**させる上で不可欠です。当所では、アトムプローブトモグラフィー^{*2}(APT)等の先端的なナノスケール組織分析技術を活用し、次世代の高精度な脆化評価法の基盤となる**脆化メカニズムの解明**を進めています。

*1 照射脆化：原子力プラント運用中に燃料の核分裂で発生する中性子の照射を受け、原子炉構造物を構成する材料が脆くなること

*2 アトムプローブトモグラフィー：材料中の原子の三次元位置と種類を測定できる分析手法

成果の概要

◇鋼材のNi濃度が溶質原子クラスターの形成に及ぼす影響を解明

RPVで用いられる鋼材の脆化要因の一つである溶質原子クラスター^{*3}(SC)について、鋼材中の不純物として銅(Cu)濃度が高い場合に形成される**Cu富裕クラスター(CRC)の形成挙動**を、APTにより分析しました。その結果、鋼材中のNi濃度が高いほどCRCの数密度が増えること、一方でNi濃度が低いほどCRCの中心部にCuが集まりやすく(図1)、CRCへのCuの集積が低照射量でも高照射量と同程度まで進むこと(図2)を見出しました。これにより、脆化の進行の予測精度に大きく影響するCRCの微細構造や形成速度に、Niの存在が大きく影響を与えることが明らかとなり、脆化評価式の高精度化へ向けてNi濃度が鍵であることがわかりました。

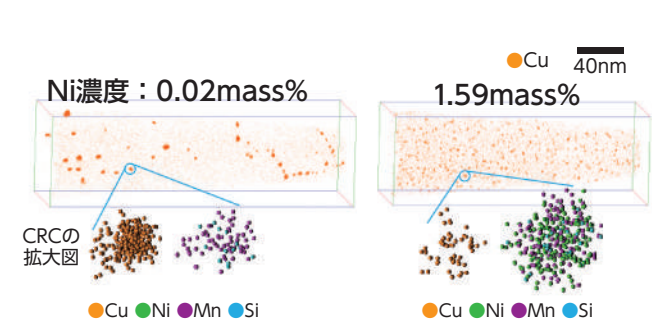


図1 鋼材のNi濃度によるCRCの形成挙動と構造の違い

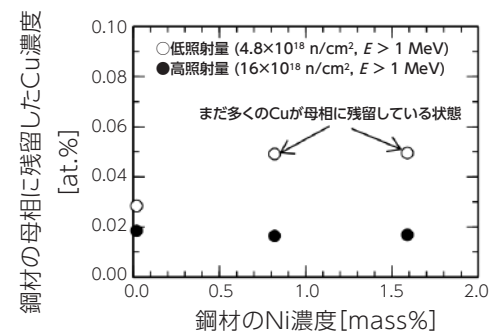


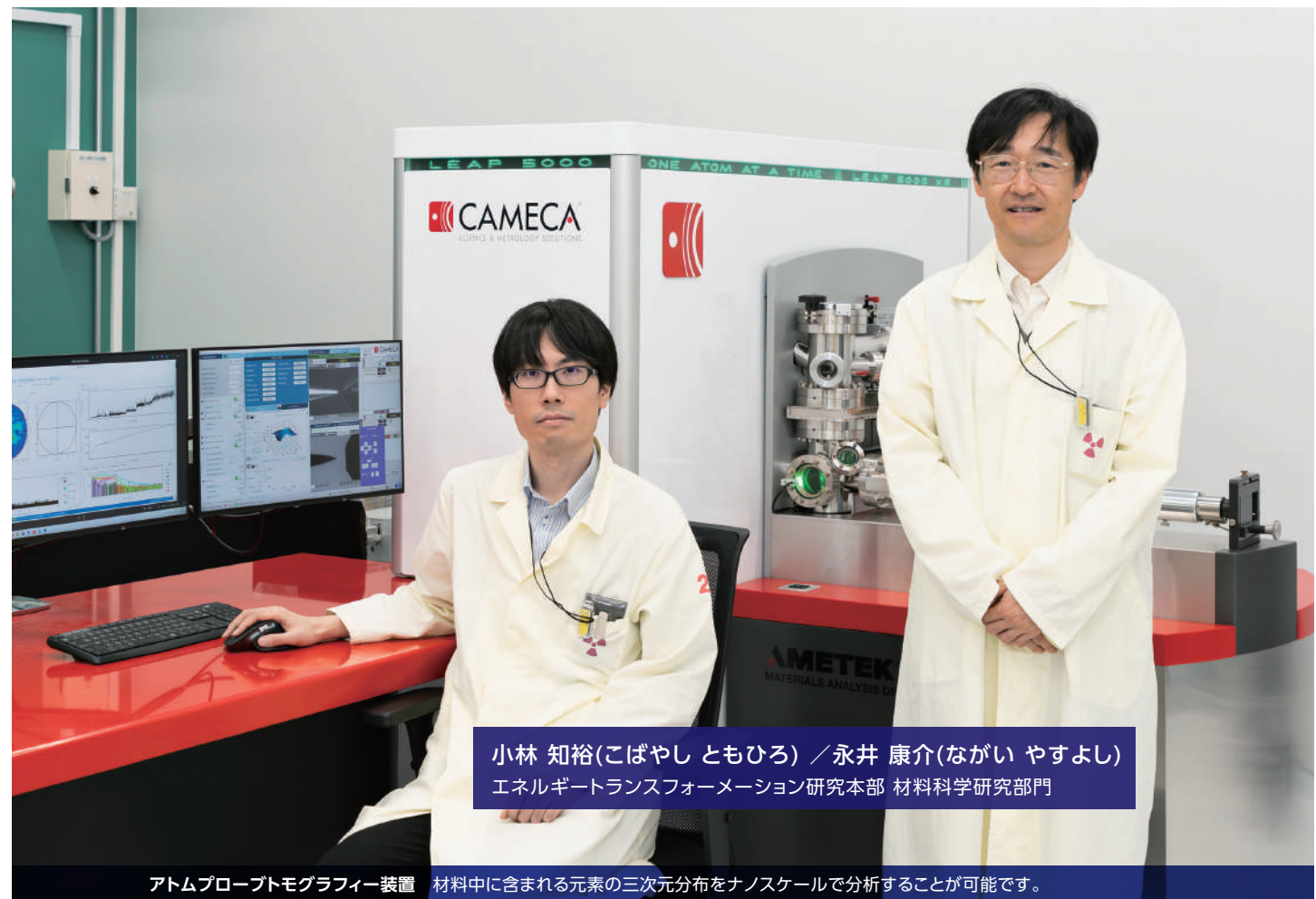
図2 鋼材の母相に残留したCu濃度のNi濃度依存性

Ni濃度が高い場合には、母相に残留したCu濃度は高照射量にならないと大きく減少しませんが、Ni濃度が低い場合には低照射量ですですに大きく減少しており、CRCへのCuの集積速度が速いことを示しています。

◇照射温度が溶質原子クラスターの形成に及ぼす影響を解明

実機プラント条件を含む温度領域で中性子照射したRPV鋼をAPTで分析した結果、照射温度が高いほどCRCの数密度は低下し、主にCu原子がより多く集積するためにサイズは大きくなることわかりました(図3左)。さらに、**APT分析と古典析出モデルを組み合わせ**てCuの拡散の活性化エネルギーを推定した結果、CRC形成速度を高める効果(いずれの温度でも認められ、とりわけ低温で顕著)は、照射によるCuの拡散促進が主因であることがわかりました(図3右)。これらの結果から、CRCの微細構造や形成速度に照射温度が大きく影響を与えることが明らかとなり、Ni濃度と同様に、脆化評価式の高精度化に向けて照射温度も鍵であることがわかりました。

*3 溶質原子クラスター：中性子照射によって添加元素や不純物が集まり、数ナノメートルサイズの塊となったもの



アトムプローブトモグラフィー装置 材料に含まれる元素の三次元分布をナノスケールで分析することが可能です。

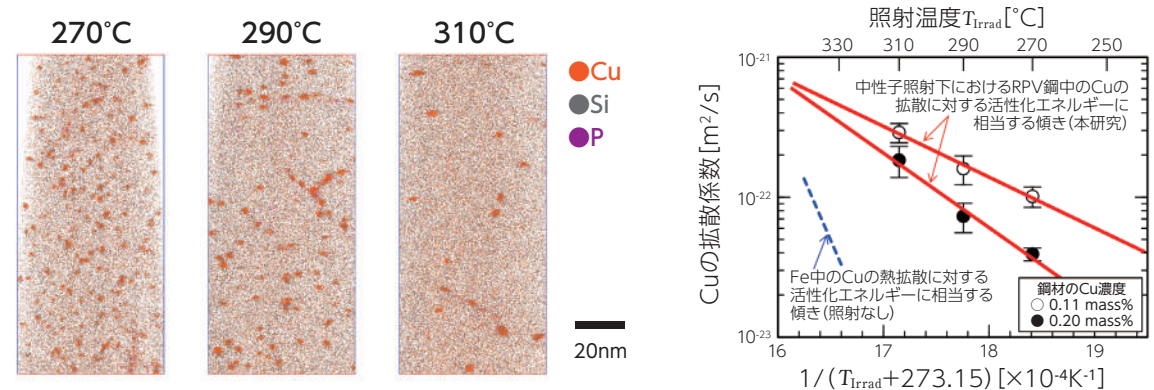


図3 照射温度によるCRC形成挙動の違い(左図)とCuの拡散係数(右図)

右図の傾きは、拡散の活性化エネルギーに相当します。中性子照射材の傾き(右図の**赤実線**)が熱拡散の傾き(**青破線**)よりも小さいことは、照射によりCuが拡散しやすくなっていることを示しています。

成果の活用先・事例

得られた成果は、将来の脆化評価式において、**SC形成挙動の予測精度と説明性を高めるための活用**が期待されます。さらに、照射脆化メカニズムに関する最新の科学的知見を継続的に蓄積することで、次世代の脆化評価法の構築と日本電気協会の技術規程JEAC4201への反映に貢献し、**長期運転に伴う軽水炉の高経年化対策を支援**します。

(参考) 小林ほか、日本金属学会2026年春期(第178回)講演大会 講演番号97 (2026)
小林ほか、日本原子力学会2026年春の年会 講演番号1105 (2026)