

重点課題 - 設備運用・保全技術の高度化

原子炉压力容器・炉内構造物健全性評価

背景・目的

軽水炉の安全かつ安定な運転を実現するため、原子炉压力容器・炉内構造物を対象として、経年劣化に関する諸現象のメカニズムの解明、予測手法の開発と改良といった技術的基盤の拡充と強化を図る。これにより、原子炉压力容器・炉内構造物の構造健全性を的確に評価することによって、リスクの定量

的な把握を目指す。

本課題では、压力容器鋼の照射脆化に係わる健全性評価手法の高度化、ステンレス鋼のマイクロ組織変化に関する照射影響評価、マスターカーブ法の実機適用技術の開発、ノズルコーナーき裂に対する破壊評価法の適用性を検証する。

主な成果

1 压力容器鋼の照射脆化に係わる健全性評価手法の高度化

廃炉となった压力容器鋼のナノ組織を原子レベルで観察できるアトムプローブトモグラフィ（APT）で観察した。国内廃炉材は入手できないため、既に廃炉となったドイツ グライフスバルト発電所の压力容器溶接金属を対象とした。国内の压力容器鋼とは異なった規格の材料ではあるが、運転中の中性子

照射によってナノメートルオーダーの溶質原子クラスターが形成していることが確認された（図1）。また、溶質原子クラスター以外にも、材料の強度に関係する微細炭化物も観察されるなど、今後国内廃炉材を分析する上で重要な知見を得た。

2 ステンレス鋼のマイクロ組織変化に関する照射影響評価

照射誘起応力腐食割れ（IASCC）の原因の一つに考えられている、結晶粒界での元素の偏析をAPTで調査した。中性子照射により実機において劣化が観察されるレベルの5.5 dpa*まで損傷した304ステンレス鋼におい

て、粒内および粒界での元素偏析が観察された（図2上）。粒界にはNi、Si、P、C、Bが偏析し、Cr、Mnが欠乏しており（図2下）、今後これらの偏析がIASCCに及ぼす影響を明らかにする。

3 マスターカーブ法の実機適用技術の開発

監視試験片は貴重であるため、シャルピー衝撃試験で使用した試験片を再加工して作製した平面寸法10ミリ角程度の超小型試験片を使ったマスターカーブ法を開発した。図3に示すように、超小型試験片を使用しても、大型試験片と同等の破壊靱性を評価で

きることを確認した。同法の妥当性を確認するため、国内外の研究機関の参加の下、ラウンドロビン試験を主導し、他機関でも同様の結果を得たことから、規格への反映を関係機関と協力して進めていく^[1]。

4 ノズルコーナーき裂に対する破壊評価法の適用性検証

日本電気協会の規程^[2]では、原子炉容器のノズル内面コーナー部に仮想欠陥を想定した場合でも健全性が確保されることを評価することが求めている。国内の原子炉においては、運転期間延長認可制度への対応の

適否を把握する必要があることから、各種の評価式に基づく応力拡大係数の予測結果を有限要素解析結果と比較し、評価式の適用性が検証されたことから、評価手法の整備を進めていく（図4）。

* dpa (displacement per atom): 材料の原子が一個当たり何回はじき出されたかを示す値。

[1] M. Yamamoto, et al., Sixth International Symposium on Small Specimen Test Techniques, 2014

[2] 日本電気協会, 「原子力発電用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」, JEAC4206-2007

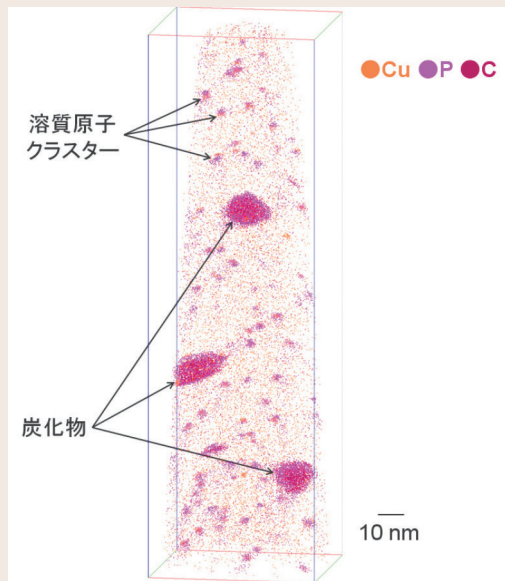


図1 廃炉となった実機プラントの圧力容器溶接金属の原子マップ

廃炉となったドイツ グライフスバルト発電所4号機の圧力容器から切り出された溶接金属のAPT観察結果を示す。中性子照射によって形成したと考えられる銅、リンの偏析を特徴とする溶質原子クラスターの形成が確認できる。また、鋼材中の微細炭化物とその周りにリンが偏析している様子も観察されている。

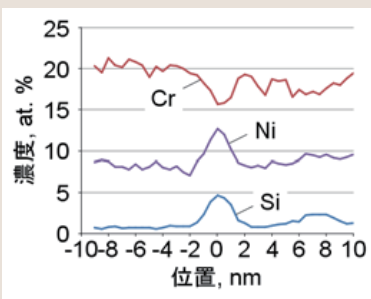
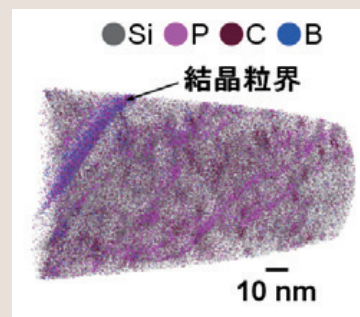


図2 中性子照射された304ステンレス鋼の原子マップ(上)および粒界分析結果(下)

照射により5.5dpaまで損傷した304ステンレス鋼のAPT観察結果を示す。原子マップより、粒内でシリコン、リン、炭素の偏析が確認され、粒界においてはニッケル、シリコンが偏析し、クロムが欠乏している様子が確認できる。

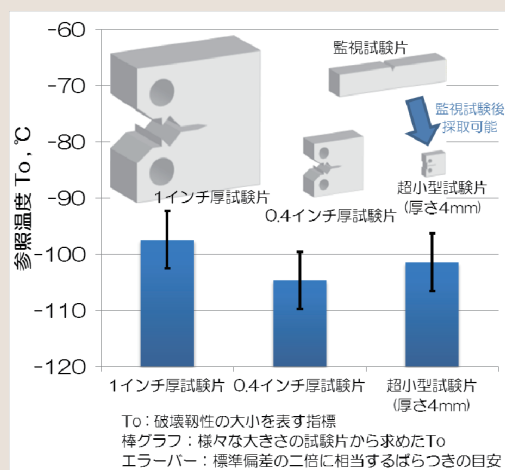


図3 超小型試験片、より大きな試験片を用いて得られた参照温度の比較

マスターカーブ法にしたがって計算された参照温度(破壊靱性の大小を温度で表した指標)の比較結果を示す。超小型試験片から得られた参照温度は、より大きな試験片から得られたそれとほぼ同等であることがわかる。

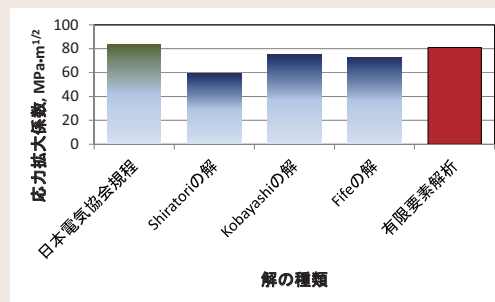
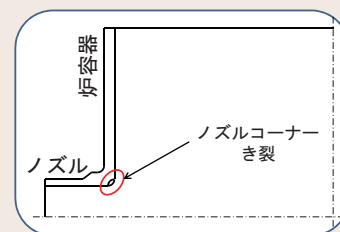


図4 ノズルコーナーき裂の応力拡大係数の比較

有限要素解析結果に比べ、いずれの評価式もこれに近い応力拡大係数を与えている。ただし、日本電気協会規程の評価式は炉容器に働く一様応力しか扱えないのに対し、それ以外の評価式はノズルコーナー部の複雑な応力分布を考慮できるといった特長を備えている。