

# 圧力容器の照射脆化と健全性評価

## 背景・目的

原子炉で使用される金属材料は、放射線や熱などの使用環境に置かれることで機械特性が変化(脆化)する。プラント運転中の機器の健全性を確保するために、原子炉圧力容器や炉内構造物では中性子照射の影響を、また二相ステンレス鋼を用いた一次系配管やポンプ等では高温に置かれること(熱時効)

の影響を明らかにする必要がある。

本課題では、中性子で高照射された圧力容器鋼の脆化量予測手法の高精度化と脆化量のモニター手法の開発、二相ステンレス鋼の熱脆化メカニズムの解明、中性子照射による照射ステンレス鋼のミクロ組織変化の解明などの研究を行う。

## 主な成果

### 1 圧力容器鋼の照射脆化への照射温度の影響

照射脆化への照射温度の影響を調べるために、異なる照射温度で照射された銅含有量の高い鋼材および低い鋼材のミクロ組織と脆化量の相関を調べた。照射温度が低いほど溶質原子のクラスター(集合体)の形成が高密度・微細化し(図1)、その傾向は銅含有量が高い鋼材でより顕著であった。

しかし溶質原子クラスターの形成形態によらず、照射による降伏応力の上昇量(脆化量に比例)は溶質原子クラスターの体積率の平方根に比例することを明らかにした(図2) [Q11019]。これにより、照射脆化量を、照射温度に関わらず、クラスター体積率のみで評価できる可能性を示した。

### 2 圧力容器鋼の硬化および銅濃縮クラスター形成への元素の影響

溶質原子クラスター形成へのニッケル、マンガン、シリコンの影響を明らかにするために、鉄と銅の二元合金にこれらの元素を順次添加したモデル合金を熱時効し、硬さとミクロ組織の変化を調べた。ニッケル

添加は最大となる硬さ(ピーク硬さ)を減少させるが、ピーク硬さまでの時間は変わらない。一方、マンガン添加はピーク硬さまでの時間を短縮することを明らかにした(図3) [Q11026]。

### 3 ミニチュアCT試験片によるマスターカーブ法のラウンドロビン試験

シャルピー衝撃試験片の破断材から加工可能なミニチュア試験片を用いたマスターカーブ破壊靱性試験法の確立を目指して、複

数の国内研究機関とともにラウンドロビン試験を実施した。いずれの機関においても妥当な参照温度 $T_{0}^*$ を決定できた。

### 4 二相ステンレス鋼の熱脆化メカニズムの温度依存性

二相ステンレス鋼の熱時効への時効温度の影響を調べるために、350~450℃の温度範囲で最長8000時間の熱時効試験とミクロ組織観察を実施した。時効温度が低いほどニッケル、シリコン、マンガンなどが凝集した析出物(G相)の数密度が高い傾向にあること、G相の大きさおよび相分離組織を特

徴付けるクロムの凝集-希薄領域間の代表長さは熱時効を続けると大きくなり、時効温度が高いほどG相と相分離組織の成長が速いこと、G相は時効温度に依らず相分離組織よりも速く成長すること(図4)、などミクロ組織の時効温度依存性が明らかになった。

\* 靱性の程度を表す指標でありマスターカーブ上で破壊靱性値(き裂の進展に対する抵抗値) $K_{Ic}$ が $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる点に対応する温度。

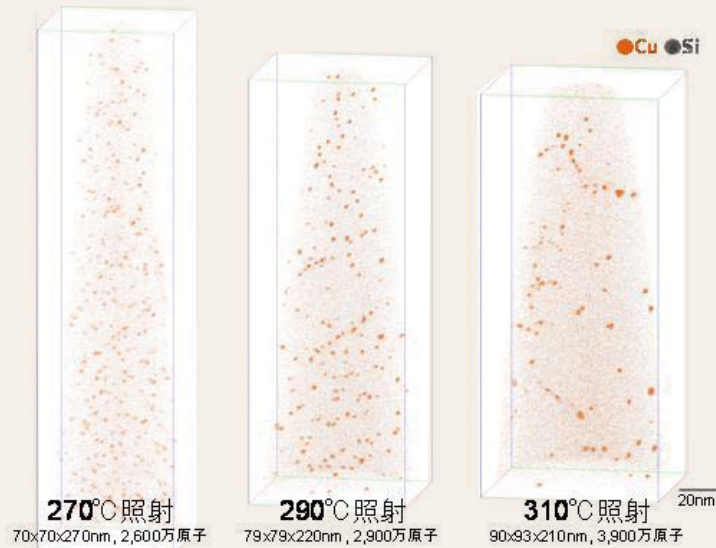


図1 銅含有量の高い鋼材(0.2wt.%Cu)における溶質原子クラスター形成への温度の影響

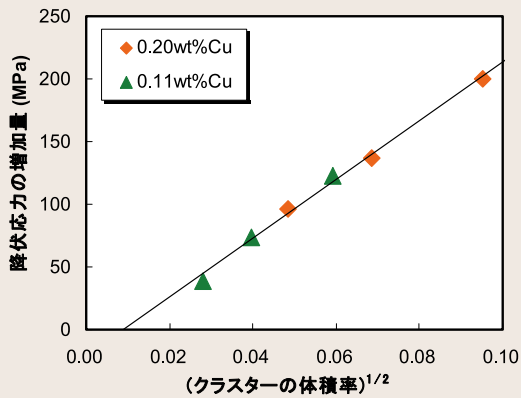


図2 ミクロ組織変化(体積率)と機械特性(降伏応力上昇)の相関

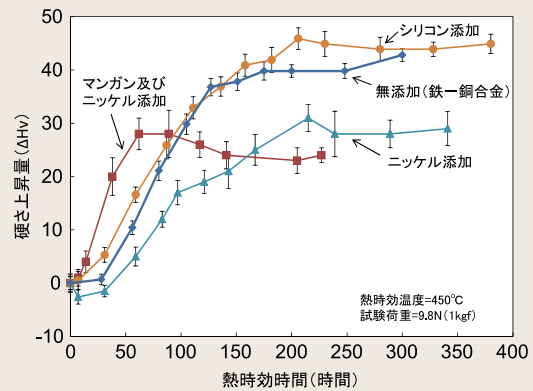
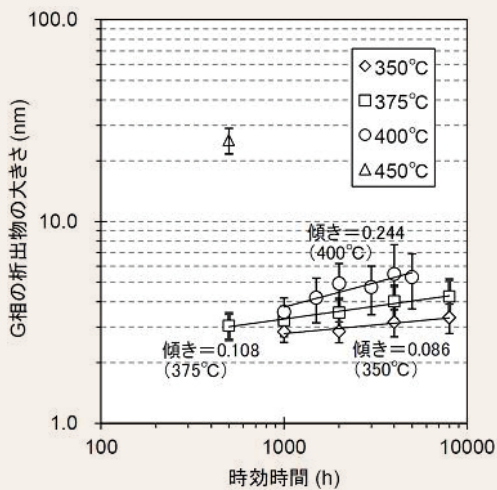
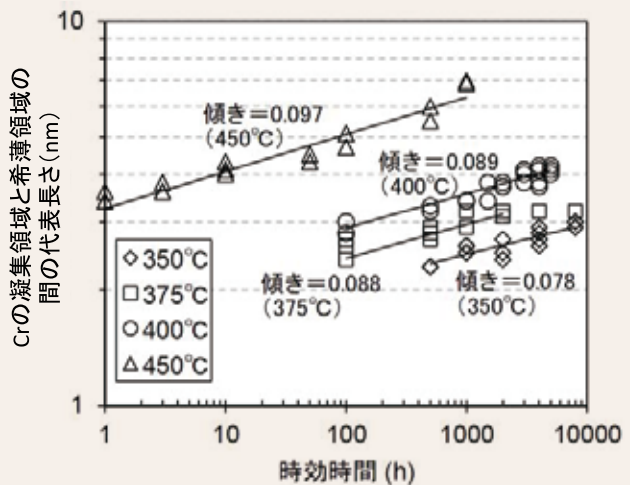


図3 熱時効による硬化への添加元素の影響



(a) G相の大きさ



(b) Crの凝集-希薄領域間の代表長さ

図4 ミクロ組織の特徴量の時効時間依存性