

## 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より機械特性が変化（照射脆化や熱時効）する。機器の健全性を確保するためには、原子炉圧力容器や炉内構造物では中性子照射脆化の影響を、二相（フェライト／オーステナイト）ステンレス鋼を用いた一次系配管やポンプ等では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予測手法の高精度化と脆化モニター手法の開発、中性子照射によるステンレス鋼のマイクロ組織変化の解明、二相ステンレス鋼の熱脆化メカニズム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における加速照射の影響評価

高照射量域での圧力容器鋼の脆化を実機に先行して調べるためには、試験炉による加速照射試験が必要である。加速照射の影響を明らかにするために、試験炉で加速照射した実機材と実機監視試験での照射材の機械特性とマイクロ組織の変化を比較した。その結果、不純物の銅含有量が0.16wt.%と多い鋼材では加速照射材の脆化量は実機照射材よりも大きくなる可能性があるが、銅が0.04wt.%と少ない鋼材では大きな影響は認められない（図1）。また、加速照射材では脆化の原因となる溶質原子クラスターの微細化と高密度化が認められた。

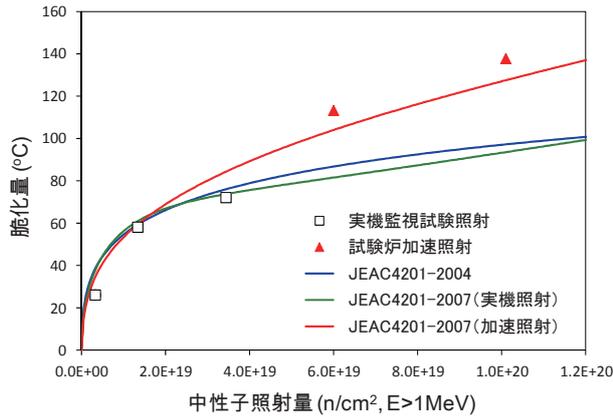
#### 2. 照射ステンレス鋼におけるマイクロ組織変化の評価

中性子照射されたステンレス鋼の靱性低下や照射誘起応力腐食割れのメカニズムを解明する上でマイクロ組織変化の理解が重要である。当研究所は米国電力研究所と共同で、実機から廃却された炉内構造物ステンレス鋼のマイクロ組織観察を実施した。その結果、中性子照射によりニッケルとシリコンが濃化した溶質原子のクラスターが形成され（図2）、その化学組成は照射量の増大とともにニッケルとシリコンの比が3:1に近づくこと（図3）、アルミニウムなどの不純物元素もクラスターを形成すること、微量に含まれるボロンは照射によりリチウムに核変換し粒界に偏析することなど、メカニズム解明に必要なマイクロ組織変化の詳細が明らかとなった。

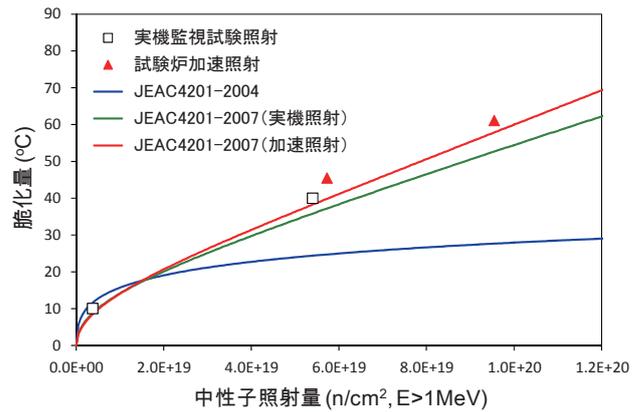
#### 3. 二相ステンレス鋼の熱脆化メカニズムの検討

熱時効された二相ステンレス鋼のフェライト相における相分離（クロム濃度の高い部分と低い部分の形成）および析出物（G相）の形成と硬さ変化の相関を調べた（図4、図5）。熱時効温度が400℃と450℃の時効材では相分離の程度（クロム濃度差）と硬さ変化量は比例関係にあるが傾きは時効温度に依存すること、G相が析出すると急激に硬くなること、などが明らかとなった（図5）。

その他の報告書 [Q10035] [Q10016]



(a) 銅含有量の高い (0.16wt.%) 鋼材



(b) 銅含有量の低い (0.04wt.%) 鋼材

図1 試験炉加速照射材と実機監視試験照射材の比較

加速照射では実機照射より50倍速く照射が行われる。当研究所の成果をベースに作成されたJEAC4201-2007の予測法では照射時間を考慮に入れており、監視試験と加速試験のデータをいずれも良く予測できているが、従来使われていたJEAC4201-2004の予測法は精度が十分ではないことが示された。

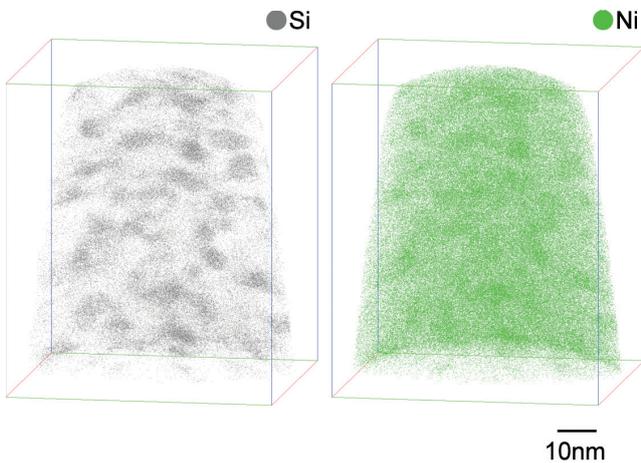


図2 照射ステンレス鋼中のシリコン (Si) とニッケル (Ni) の分布

数ナノメートルの大きさで溶質原子が濃化した領域が形成されている。

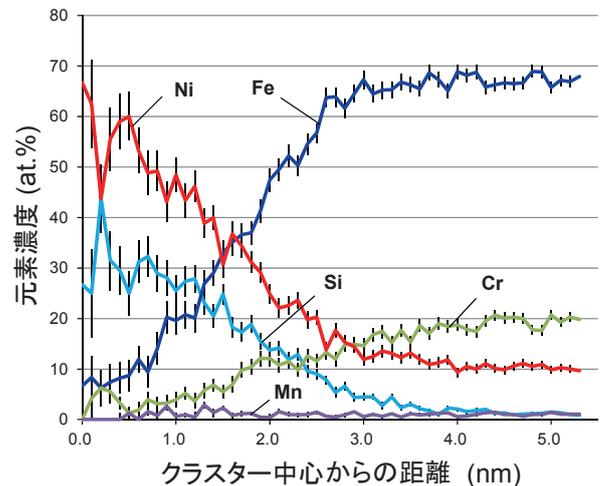


図3 溶質原子が濃化している領域の化学組成  
中心領域では鉄 (Fe) が減少し、ニッケル (Ni) とシリコン (Si) の比が3:1に近くなる。

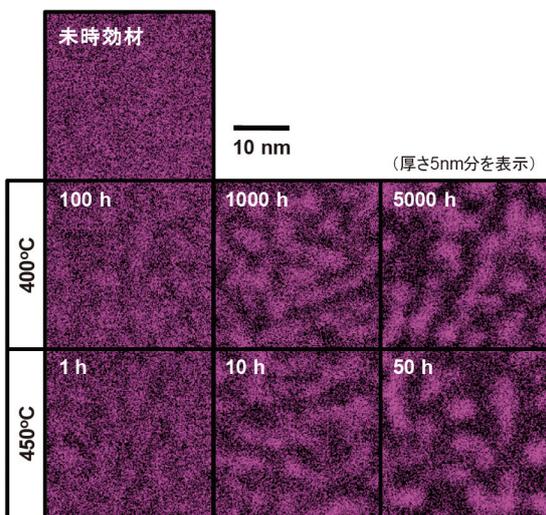


図4 二相ステンレス鋼のフェライト相での相分離の様子

図中ピンクの点がクロム原子を表す。

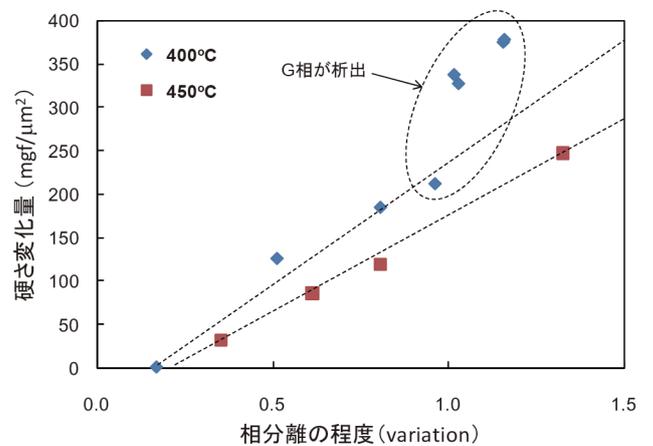


図5 硬さ変化とマイクロ組織の相関

相分離の程度 (variation) はクロム濃度差を表す。G相が析出していない範囲では variation と硬さ変化量には線形の相関が認められるが、勾配は時効温度に依存する。