

# 原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究

(受託者) 国立大学法人京都大学

(研究代表者) 笠田竜太 エネルギー理工学研究所

(研究開発期間) 平成22年度～23年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

本事業では、原子力機器材料として用いられる鉄-クロム系合金の経年劣化事象として重要な熱時効脆化に関連する相分離現象とその照射影響の理解を進めるために、イオン加速器照射実験と相分離過程を支配する拡散過程のモデル化を軸とした研究を進めるとともに、新たな相分離検出法としての陽電子消滅測定法の適用性について検証することを目的とする。

本研究開発の背景は、クロム含有量が約12～90%の鉄-クロム系材料を320～540℃程度の温度範囲で長時間時効すると、硬さや引張強度が増加し、延性や靱性が著しく低下する熱時効脆化現象、すなわち「475℃脆化」(あるいは475℃脆性)と呼ばれる経年劣化事象である。軽水炉機器材料においては、一次冷却材管・継手、ポンプ、弁の耐圧部等に使用されている2相ステンレス鋼(鉄-クロム-ニッケル合金)が、軽水炉の運転温度である300℃付近においても長時間の熱時効により相分離を生じ、脆化することが判ってきており、高経年化技術評価審査事象として破壊力学的な検討が詳細に行われている。また、高経年化技術評価事象とはされていないが、軽水炉圧力容器鋼の内表面には防食の観点から2相ステンレス鋼がクラッド材として使用されており、中性子照射量は低いものの熱時効脆化に及ぼす照射影響は興味深い課題である。高速炉開発に目を向けると、燃料被覆管やラッパー管用の材料として検討されているPNC-FMSや酸化物分散強化(ODS)鋼は9～15%程度のクロムを含有するフェライト-マルテンサイト系材料であるため、熱時効脆化や照射脆化は経年劣化事象として重要な研究課題である。このように、軽水炉や高速炉において、鉄-クロム系合金は広く照射環境下で用いられており、当該材料の本質的な特性である475℃脆化現象に対して照射損傷がどのように、そしてどの程度影響するのかについて知見を得ることは、これらの原子力機器の安全・安心・高効率利用に寄与するものと考えられる。

## 2. 研究開発成果

アーク溶解炉等を用いて、本研究で使用する鉄-クロム合金を作製し、475℃で、100時間および300時間の熱時効試験を実施し、475℃脆化に及ぼすクロム量の影響をビッカース硬さ試験によって調査したところ、図1に示すように、クロム濃度によって異なる475℃脆化特性が明らかとなった。475℃脆化の原因は、基本的には鉄-クロム系状態図の約540℃以下の温度領域に存在する相分離(溶解度ギャップ)曲線のために、クロムリッチ相と鉄リッチ相に分離するために生じるとされている。相分離曲線の内側にはスピノーダル線が存在しており、その内側ではスピノーダル分解により相分離が生じ、スピノーダル線と相分離曲線の間では核生成・成長型の相分離が生じると理解されている。これらの熱時効材における陽電子消滅特性を調べたところ、図2のFe-70%Crの結果が示すように、相分離の進行に対応すると考えられる同時係数ドップラーブロードニング(CDB)スペクトルの変化が明確に観察された。図3には、陽電子CDBスペクトルから計算したWパラメータの変化率をクロム量に対してプロットした。鉄-クロム合金の受入まま材は、鉄とクロムの合金濃度に比例して、それぞれの元素の内殻電子と消滅しておらず、クロム濃度が30%以上の場合には、鉄の内殻電子と優先的に消滅していることが明らかとなった。本結果は、鉄

ークロム系合金における電子状態がクロム量によって変化することを陽電子消滅法によって明らかにした世界初の重要な成果である。更に、相分離の進行とともに、陽電子が鉄の内殻電子と消滅する割合が増加していることが明確に示され、鉄-クロム合金における相分離の検出法として陽電子消滅法を用いることが可能であることを実証した。

また、475°Cでの6.4MeV鉄イオン照射実験(5dpa、2.5時間)を行ったところ、Fe-70%Crについてはナノインデント試験による硬さの変化は見られないにも関わらず、陽電子消滅測定は相分離が生じていることを示唆する結果を示したが、照射影響については更なる検討を必要とする。

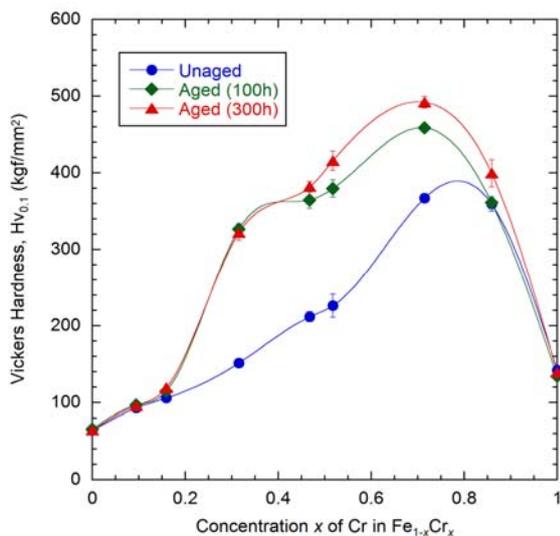


図1 鉄-クロム合金のビッカース硬さのクロム濃度依存性と475°C時効の影響。

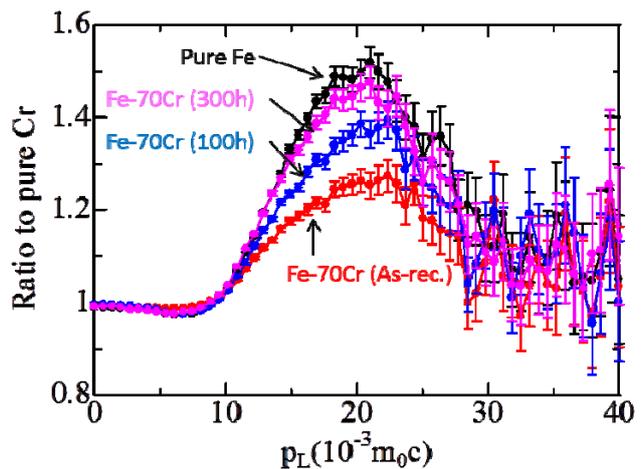


図2 純鉄受入材 (Pure-Fe) および Fe-70Cr (受入材、時効材) の CDB 比率曲線 (純クロムに対する)。

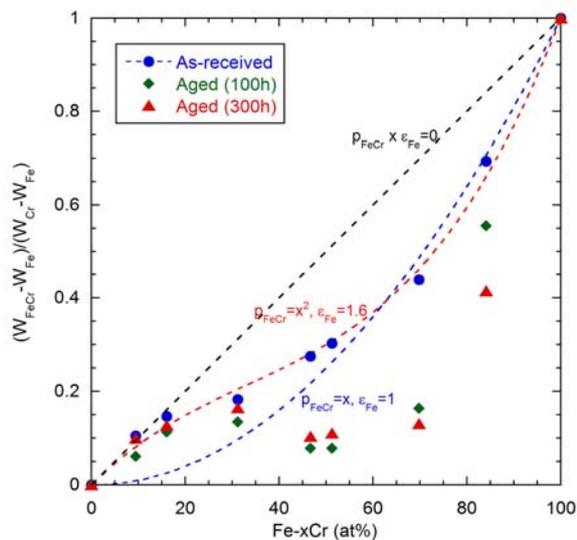


図3 陽電子 CDB スペクトルから計算した W パラメータ変化率のクロム濃度依存性。

### 3. 今後の展望

本事業計画の終了までに、以下の点について検討する予定である。

- 1000 時間時効材の評価を行い、陽電子消滅法による相分離検出限界について議論する。
- 陽電子消滅法によるイオン照射材の評価を進める。
- これらの結果から、相分離に及ぼす照射影響についてのモデルを提案してまとめる。