

圧力容器モデル合金の照射脆化に及ぼすMn, Ni 添加効果

Effects of Mn, Ni addition on radiation induced hardness in RPV model alloys

九州大学 応用力学研究所	渡邊 英雄	Hideo Watanabe	会員
九州大学 総合理工学府	入江 拓也	Takuya Irie	非会員
同上	合屋 佑介	Gouya Yusuke	同上

Abstract

The neutron irradiation of Fe based model alloys and steels leads to an increase in the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) with a decrease in the upper shelf energy. It is well known that the Cu content has a strong influence on the embrittlement phenomena; especially, the Cu-rich precipitates have been thought to be directly responsible for the embrittlement. In contrast, mechanical property studies for the steels with different Cu levels have shown that so-called matrix defects are dominant in the embrittlement of low-Cu steels as well as in that of high-Cu steels at high fluences. To study the effect of dislocation loop formation at high fluencies and high flux on radiation hardening in those steels, neutron and ion irradiation have been conducted for Fe-based model alloys with different Ni and Mn levels. The neutron irradiation was performed in BR2 (BAMI and CALLISTO). Hardness tests were conducted before and after the ion irradiation at room temperature. After the irradiations, microstructure was observed by Cs-corrected microscope (ARM200FC).

Keywords: Cu precipitate, dislocation loop, STEM-EDS, Cs corrected TEM

1. はじめに

原子炉圧力容器鋼は、運転中に中性子照射を受けることにより、照射欠陥が形成され、高経年化に伴い脆化する。この照射脆化の主要因として、照射によって導入された点欠陥集合体と考えられるマトリックス欠陥の形成や鋼材中の不純物である Cu や他の添加元素の集合体から成る照射欠陥クラスターの形成などが挙げられる。しかし、高照射領域での Ni, Mn などによる照射脆化のメカニズムについて不明な点が多い。本研究では圧力容器鋼モデル合金に中性子照射を行い、硬度試験、引張試験及び内部組織観察により溶質原子クラスター・転位ループによる脆化挙動を考察した。

2. 実験方法

本研究では、Fe をベースとした 21 種類のモデル合金と銅濃度の異なる 2 種類の実用鋼を使用した。試料の焼鈍条件は、Pure-Fe は 800 °C で 1 時間、その他のモデル合金は 1000 °C で 24 時間焼鈍した後空冷し、800°C で 1 時間焼鈍する。また、実用鋼である A533B 材の焼鈍条件は 900°C 1 時間の後 664°C で 4 時間、600°C 40 時間の 3 段階焼鈍を施した。(表 1)

中性子照射は、日本原子力研究開発機構保有の JJR3 炉にて低温低照射(100°C以下、0.0024dpa) とベルギ

ー・モル研究所に設置されている BR2 炉にて低温高照射(100°C以下、0.24dpa)、高温高照射(290°C、0.1dpa、0.16dpa)の条件で実施した。

HMV-1-SNJ ビッカース硬度試験機を用いて、荷重条件[1kgf、15sec]で硬度試験を実施した。引張試験は、引張速度 0.2mm/min で行った。引張試験片には SSJ3 規格を使用した。硬度の回復過程を熱処理による焼鈍実験により調べた。中性子照射したモデル合金を段階的に真空中で 600°C まで 30 分間熱処理し、熱処理が終了後、ビッカース硬度を測定した。この実験により、熱処理による硬度の低下幅の大きな温度帯を特定した。

試料には原子炉 (BR2) で中性子照射した Ni, Mn の含有量が異なるモデル合金を用いた。また照射条件 (CALLISTO) は、照射温度: 290°C, 照射量: $8.28 \times 10^{23} [n/m^2]$ (約 0.16dpa), 照射条件 (BAMI) は、照射温度: 100°C 以下, 照射量: $1.25 \times 10^{24} [n/m^2]$ (約 0.24dpa) である。照射後、東北大学の量子エネルギー材料科学国際研究センターにて、硬さ測定並びに引張試験を実施した。また、試料温度を 350°C から 550°C まで 100°C 刻みで 30 分間、真空中で熱処理し、ビッカース硬度試験及び引張試験、内部組織観察を行った。

連絡先: 渡邊英雄、〒816-8580 春日市春日公園 6-1
九州大学応用力学研究所
E-mail: watanabe@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 実験結果及び考察

(Mn 添加効果)

図1に高温高照射(290°C, 0.1dpa, 0.16dpa)によるビッカース硬度の変化を示す。図1から、全ての試料において照射量依存性が見られなかった。これは0.1dpaの照射で既に脆化が飽和している為だと考えられる。Mnを含んでいる試料と含まない試料を比較すると、Mnを含む試料での硬度上昇幅が大きく、Mnによる硬度上昇の影響が非常に強い事が分かる。

図2にFe-1.4Mn-xNi と Fe-xNi の硬度回復実験の結果を示す。図2から、Fe-1.4Mn-xNi の硬度回復温度のピークは、450~500°Cである事が分かる。この結果からFe-1.4Mn-xNi の試料では、熱安定性の高い転位ループが形成されており、脆化の要因として支配的であると推定できる。一方、Fe-xNi の硬度回復温度のピークは、350°C~400°Cである為、硬度上昇の主な要因は転位ループではなく、転位ループの核となる微小Ni クラスタだと推定できる。

(Ni 添加効果)

図1よりFe-1.4Mn-xNi の試料では、Ni の溶質濃度が増加するに従って、硬度上昇幅も増加する。硬度回復実験の結果から、Fe-1.4Mn-xNi の硬度上昇の要因は転位ループだと推測できる為、Mnが含まれている試料では、Ni の添加が転位ループの形成を促進する働きがあると考えられる。

図3は、低温高照射(100°C以下、0.24dpa)によるビッカース硬度の変化を示す。図4よりCuを添加した試料と未添加の試料の硬度上昇幅を比較すると、その差は10HV程度あり、Cu 0.1wt%では、主要な脆化要因とは言えず、低温照射におけるCuの影響は低い。図4は高温高照射(290°C, 0.16dpa) ビッカース硬度の変化を示している。図4の結果からCuを含んでいる試料は、Cuを含まない試料より、大きく硬度が上昇している。特にその傾向は、Ni, Mnの含有量が多い試料で顕著である。これは、微小なCuを核とするクラスターにNi, Mnが集積し、溶質原子クラスターが成長することにより推測できる。

表 1

MATERIAL	Mn	Ni	Cu	Fe
1			(0.1)	balance
2	0.6		(0.1)	
3	1.4		(0.1)	
4		0.4		
5		0.8		
6		1.4		
7	1.4	0.4	(0.1)	
8	1.4	0.8	(0.1)	
9	1.4	1.4	(0.1)	

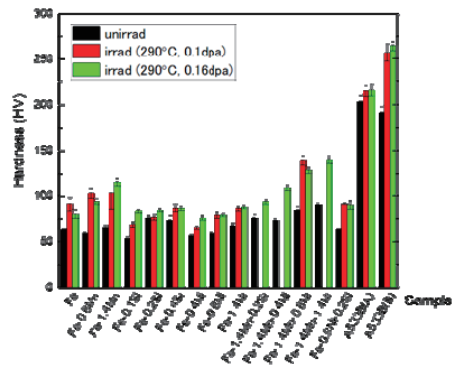


図 1

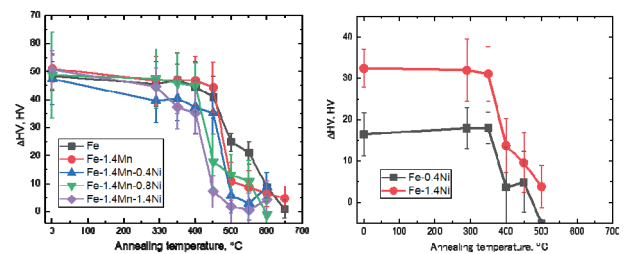


図 2

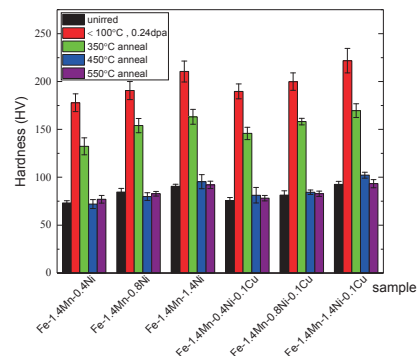
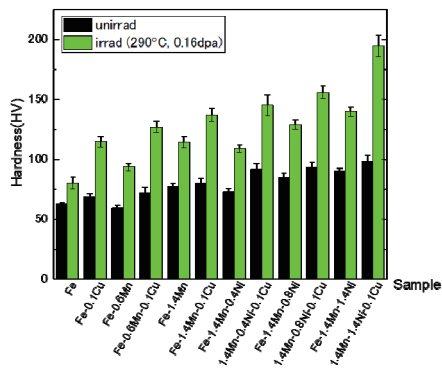


図 3



参考文献

- [1] Watanabe, H., Masaki, S., Masubuchi, S., Yoshida, N., Kamada, Y., Journal of Nuclear Materials 417(2011) 932.
- [2] Watanabe, H., Arase, S., Yamamoto, T., Well, P., Onishi, T., Odette, G. R., Journal of Nuclear Materials 471(2016) 343.