

圧力容器の照射脆化予測における Mn 成分の影響

Influence of Mn Concentration on the Prediction of Irradiation Embrittlement of RPV

京都大学エネルギー理工学研究所 木村晃彦 Akihiko KIMURA Member
京都大学エネルギー理工学研究所 藪内聖皓 Kiyohiro YABUCHI
京都大学エネルギー理工学研究所 笠田竜太 Ryuta KASADA

For extension of lifetime of light water reactors, it is essential to estimate irradiation embrittlement of reactor pressure vessel steels (RPVS) more precisely. In the current estimation method, manganese is not considered to be the important element causing embrittlement. However, recently, it was observed that manganese remarkably enhanced neutron irradiation hardening of iron alloys at a neutron fluence higher than $3 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ that corresponds to more than 30 years operation of reactors. In this study, the roles of manganese in the acceleration of irradiation hardening will be discussed, and the influence of the manganese on the prediction of lifetime of RPVS is shown.

Keywords: Reactor pressure vessel, Acceleration of irradiation embrittlement, Lifetime extension

1. 緒言

我国の近い将来におけるエネルギー事情と原子力に対する社会的情勢を考慮した場合、現在稼働中の原子力プラントの長寿命化はエネルギー政策上免れないと予想される。一方、営業運転を開始して以来、既に30年を経過した原子力発電所が現実に存在しており、これらの高経年原子力発電所を今後も高効率に、しかも安全に運転していくためには、先ず、原子炉構造材料の経年変化を正しく評価し、出来るだけ高精度に予測するための保全技術を充実させることが肝要である。

そこで本研究では、プラントの長寿命化により派生する脆化予測課題として、軽水炉圧力容器の照射脆化評価に及ぼすマンガン(Mn)元素の影響に着目し、従来の照射脆化予測をさらに合理化および高精度化するための科学的基礎知見を得ることを目的とする。

2. 国内照射脆化予測

2.1 予測式

圧力容器鋼の照射脆化は、落重試験で得られる関連温度、 RT_{NDT} (Reference Temperature Nil Ductility Transition) や Charpy 衝撃試験による延性脆性遷移温度、DBTT (Ductile-Brittle Transition Temperature) の照射によるシフト量 (ΔT) で評価されており、照射

脆化の予測は、このシフト量の経時変化、すなわち照射量依存性を予測することである。我国において用いられている脆化予測式は、日本電気協会の電気技術規定原子力編[1]に示されている。基本的に ΔRT_{NDT} は、(1)式で与えられている。

$$\Delta RT_{NDT} (\text{°C}) = [CF] \times f^{a-b \log f} \quad (1)$$

ここで、[CF]は、Cu, Ni, P (母材のみ) および Si (溶接金属のみ) の関数であり、 a および b は定数、 f は中性子照射量 ($\times 10^{23} \text{ n/m}^2$, $E > \text{MeV}$) である。Mn の影響は考慮されていない。

2.2 照射脆化機構

監視試験結果からその後の挙動をより正確に予測するためには、欠陥集合体などの照射脆化の支配因子を明確にし、その発達機構を理解することが肝要である。(a)マトリックス欠陥: 不純物銅の少ない我国の圧力容器においては、銅析出物よりもマトリックス欠陥による脆化への寄与が重要である。鋼中不純物銅原子の数には限りがあるため、銅の照射下析出は照射量が 10^{23} n/m^2 以下で完了することがこれまでの研究において示唆されている。一方、弾き出し損傷は照射が進む限り継続するため、寿命延長時には、これら欠陥集合体の蓄積効果の発現することが懸念される。圧力容器鋼における代表的な欠陥集合体としては、マイクロボイドや格子間型転位ループ (I-loop) があげられる [2-4]。前者は陽電子消滅測定 (PAS) からその存在が示唆されているが、後者に関しては TEM などでは観察されておらず、非常に微細 (<1nm) であると考えられている。

連絡先: 木村晃彦, 〒611-0011 宇治市五ヶ庄
京都大学エネルギー理工学研究所
TEL: 0774-38-3476
e-mail: kimura@iae.kyoto-u.ac.jp

尚, A533B 鋼を約 400°C で照射すると I-loop が成長して, TEM で観察されるようになる。

PAS を用いた Fe モデル合金の照射後焼鈍実験により, マイクロボイドは 350°C (30min) の焼鈍で分解するが, 照射硬化の回復は 400°C の焼鈍で始めて生じることから, 照射硬化の主な支配因子を I-loop と考えることは妥当である。この I-loop の蓄積が中性子照射量 10^{24} n/m^2 まで継続すると考えられるため, 寿命延長時における脆化の主要因となる可能性がある。

3. マンガン影響

マンガンは圧力容器鋼に含まれている合金元素の中で最も含有量が高いが, その照射影響に関する研究は意外に少ない。鉄に比べオーバーサイズの Mn は, 空孔との相互作用が強いと予測されることから, 空孔集合体あるいは空孔集合体と密接に関連している銅クラスターとの相互作用が予測される。最近の研究によれば, Mn は他の合金元素に比べ, 鉄基モデル合金の照射硬化を著しく促進することが示されている。

図 1 は, 鉄基 2 元合金の照射硬化量の照射量依存性を示したもので, Fe-Mn 合金の照射硬化量が Fe-Cu 合金に匹敵する値を示していることがわかる。通常, 銅は不純物元素として鋼中に混入し, 照射下において銅の集合体を形成することにより照射脆化を促進することが明らかになっている。一方, Fe-Mn 合金における特徴としては, 照射硬化量が顕著になるのは中性子照射量が 10^{23} n/m^2 台になってからであり, いわゆる圧力容器が蒙る照射量としては寿命延長時 (30 年以降) に相当するため, 長寿命化における寿命評価においてはマンガン影響を明らかにしておく必要がある。

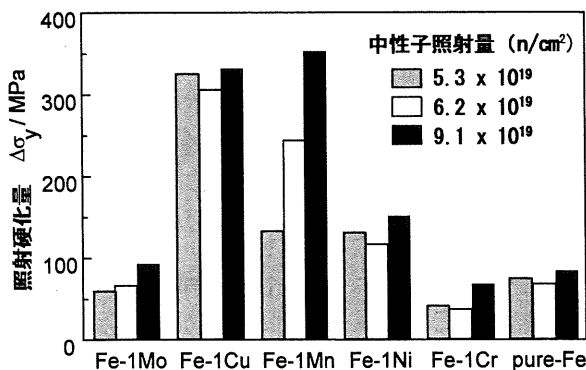


図 1: 各鉄基 2 元系合金における照射硬化量の照射量依存性。溶質元素濃度は全て, ほぼ 1at% である。

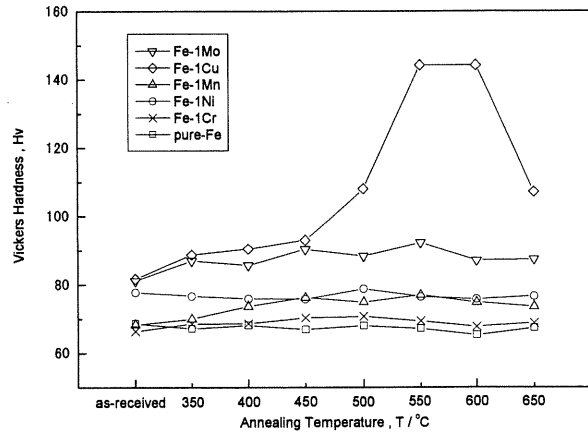


図 2: 鉄基 2 元合金の熱時効に伴う硬さ変化。Fe-Cu 合金のみが顕著な時効硬化を示しており, Fe-Mn 合金などの他の合金は硬化を示さない。

マンガンによる照射硬化促進機構としては照射促進析出が考えられるが, 熱時効による時効脆化は Fe-Cu 合金においてのみ観察されており, Fe-Mn 合金では見られない (図 2)。

4. 決言

圧力容器鋼の主要な合金元素であるマンガンの照射硬化に及ぼす影響を調べ, マンガン影響が他の合金元素に比べ極めて顕著であり, しかも, 軽水炉の寿命延長時期に相当する中性子照射量において初めて発現することが判明した。現行の照射脆化予測式にはマンガン影響が取り込まれていないことから, 長寿命圧力容器の照射脆化予測におけるマンガン影響調査が必要である。

参考文献

- [1] 電気技術規程 原子力編 「原子炉構造材の監視試験方法」 JEAC4201-2000 (社) 日本電気協会 電気技術基準調査委員会
- [2] R. Kasada, A. Kimura, H. Matsui, M. Narui, J. Nucl. Mater., 258-263 (1998) 1199
- [3] R. Kasada, T. Morimura, H. Matsui, M. Narui and A. Kimura, 19th Effects of Radiation on Materials, ASTM STP 1366 (2000) 448
- [4] T. Kudo, R. Kasada, A. Kimura, K. Fukuya, K. Hono, H. Matsui, Trans. JIM, in press.