(243) 鉄鋼の照射効果に関する現象論

東大工学部 ○井形直弘
仝上 橋口隆吉

§1 序 原子炉圧力容器用鋼材では中性子照射にもとづく遷移温度の上昇が問題となる。筆者等はすでに照射敏感性におよぼす金属組織要因の影響について検討を加えたが，更に照射前の遷移温度も併せ考え照射後の遷移温度がどのように金属組織要因によって影響を受けるかを検討すべきである。ここではこれに関して解析を試みた。

§2 仮定 (i) 降伏強度 σ_y および破壊強度 σ_f は次式であらわされるとする。

$$\sigma_y = \sigma_{oy}(T) + \sigma_{oy}^* + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1) \qquad \sigma_f = \sigma_{of}^* + k_f d^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_{oy}(T) = \sigma_0(T) + k_{cy}^{(T)}[C] + k_{ay}(T)[A] \quad (3) \qquad \sigma_{of}^* = k_{pf}\lambda^{-\frac{1}{2}} + k_{\rho f}\rho^{\frac{1}{2}} + k_{cf}[C] + k_{af}[A]$$

$$\sigma_{oy}^* = k_{py}\lambda^{-\frac{1}{2}} + k_{\rho y}\rho^{\frac{1}{2}} \quad (4) \qquad (5)$$

ここで d は結晶粒の大きさ，[C] は固溶窒素あるいは炭素の濃度，[A] は置換型合金原子の濃度，λ は炭化物(又は窒化物)の間隔，ρ は転位密度を示す。また粒度に依存しない項の中で $\sigma_{oy}(T)$ は温度に依存する部分を示し，σ_{oy}^* および σ_{of}^* は温度に依存しない部分を示す。

(ii) 脆性延性遷移温度は $\sigma_y = \sigma_f$ の条件で決まるものとする。

§3 理論的解析 §2の仮定より次に示すような解析結果が得られる。

金属組織要因	場合	照射前遷移温度への影響	照射敏感性への影響	照射後遷移温度への影響
粒度	$k_y(T)$ (i) $k_{y\phi}$ 不変 (ii) $k_{y\phi}$ 減少 (iii) $k_{y\phi}$ 増加 k_y^* (i) $k_{y\phi}$ 不変 (ii) $k_{y\phi}$ 減少	$\frac{\partial T}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{k_f - k_y}{\frac{\partial\sigma_{oy}}{\partial T} + \frac{\partial k_y}{\partial T}d^{-\frac12}} < 0$ $\frac{\partial T}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{k_f - k_y}{\frac{\partial\sigma_{oy}}{\partial T}} < 0$	$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}}\left(\frac{dk_y}{dT}\right) < 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{\Delta k_{y\phi}\frac{\partial\sigma_y}{\partial T} + \Delta\sigma_{y\phi}\frac{\partial k_y}{\partial T}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}} < 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{-\Delta k_{y\phi}\frac{\partial\sigma_y}{\partial T} + \Delta\sigma_{y\phi}\frac{\partial k_y}{\partial T}}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)^2} \gtrless 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial d^{-\frac12}} = 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial d^{-\frac12}} = \frac{\Delta k_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_0}{\partial T}} < 0$	$\frac{\partial T_\phi}{\partial d^{-\frac12}} < 0$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial d^{-\frac12}} < 0$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial d^{-\frac12}} \gtrless 0$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial d^{-\frac12}} < 0$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial d^{-\frac12}} < 0$
固溶窒素あるいは炭素濃度	$k_y(T)$ $k_c(T)$ (i) $k_{cy\phi}$ 不変 (ii) $k_{cy\phi}$ 減少 (iii) $k_{cy\phi}$ 増加	$\frac{\partial T}{\partial[C]} = \frac{k_{cf} - k_{cy}}{\frac{\partial\sigma_0}{\partial T} + \frac{\partial k_y}{\partial T}d^{-\frac12}} > 0$	$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial[C]} = \frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)^2}\frac{dk_c}{dT} < 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial[C]} = \frac{\Delta k_{cy\phi}\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right) + \Delta\sigma_{y\phi}\left(\frac{\partial k_c}{\partial T}\right)}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)^2} < 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial[C]} = \frac{-\Delta k_{cy\phi}\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right) + \Delta\sigma_{y\phi}\left(\frac{\partial k_c}{\partial T}\right)}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)^2} \gtrless 0$	(i) $\frac{\partial T_\phi}{\partial[C]} \lesseqgtr 0$ $\left\lvert\frac{k_{cf} - k_{cy}}{\frac{\partial k_c}{\partial T}}\right\rvert \lesseqgtr \left\lvert\frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}}\right\rvert$ (ii) $\frac{\partial T_\phi}{\partial[C]} \lesseqgtr 0$ $\left\lvert\frac{-k_{cy\phi}}{\frac{\partial k_c}{\partial T}}\right\rvert \lesseqgtr \left\lvert\frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}}\right\rvert$
析出物間隔	k_y^* (i) $\sigma_{f\phi}$ 不変 (ii) $\sigma_{f\phi}$ 減少	$\frac{\partial T}{\partial\lambda^{-\frac12}} = \frac{k_{pf} - k_{py}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}} < 0$	$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial\lambda^{-\frac12}} = 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial\lambda^{-\frac12}} = \frac{\Delta k_{pf\phi}}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)} < 0$	$k_{pf} > k_{py}$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial\lambda^{-\frac12}} < 0$
置換型合金原子濃度	(i) $k_{ay\phi}$ 変化(増大) (ii) $k_{af\phi}$, $k_{ay\phi}$ 増大	$\frac{\partial T}{\partial[A]} = \frac{k_{af} - k_{ay}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}} \lesseqgtr 0$	$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial[A]} = \frac{-\Delta k_{ay\phi}\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right) + \Delta\sigma_{y\phi}\left(\frac{\partial k_c}{\partial T}\right)}{(\partial\sigma/\partial T)^2}$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial[A]} = \frac{(\Delta k_{af\phi} - \Delta k_{ay\phi})\frac{\partial\sigma_y}{\partial T} + \Delta\sigma_{y\phi}\left(\frac{\partial k_c}{\partial T}\right)}{(\partial\sigma/\partial T)^2}$	$\frac{\partial T_\phi}{\partial[A]} \lesseqgtr 0$ $\left\lvert\frac{k_{af} - k_{ay\phi}}{\frac{\partial k_a}{\partial T}}\right\rvert \lesseqgtr \left\lvert\frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}}\right\rvert$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial[A]} \lesseqgtr 0$ $\left\lvert\frac{k_{af\phi} - k_{ay\phi}}{\frac{\partial k_a}{\partial T}}\right\rvert \lesseqgtr \left\lvert\frac{\Delta\sigma_{y\phi}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}}\right\rvert$
転位密度 (予歪)	(i) $k_{\rho y\phi}$ 減少 (ii) $k_{\rho f\phi}$, $k_{\rho y\phi}$ 減少	$\frac{\partial T}{\partial\rho^{\frac12}} = \frac{k_{\rho f} - k_{\rho y}}{\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}} > 0$	$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial\rho^{\frac12}} = \frac{\Delta k_{\rho y\phi}}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)} < 0$ $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial\rho^{\frac12}} = \frac{-\Delta k_{\rho f\phi} + \Delta k_{\rho y\phi}}{\left(\frac{\partial\sigma_y}{\partial T}\right)} < 0$	$\frac{\partial T_\phi}{\partial\rho^{\frac12}} \leq 0$ $\frac{\partial T_\phi}{\partial\rho^{\frac12}} \leq 0$

上の表の中で (T) は温度依存の場合 * は温度依存でない場合を示す。また ϕ は照射後の値 Δ は変化量