

# 輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

## — 中性子照射效果의 基礎 —

### 1. 壓力容器的 使用環境과 照射量

鋼材가 中性子照射을 받으면 強度의 上昇과 延性, 靱性이 低下된다. 이에 따라서 原子爐 壓力容器에서는 監視試驗片을 이용하여 靱性低下의 程度를 확인하면서 사용한다. 다음은 이 靱性低下가 어떤 機構로 일어나는가에 對해 정리한 것이다.

먼저 壓力容器鋼材가 어떤 條件에서 照射을 받는가를 명백히 할 必要가 있다. 輕水爐에서 BWR은 爐心과 壓力容器사이에서 제트 펌프 등이 설치되므로 이 사이의 물에 의해서 減衰가 생겨 中性子束은 PWR에 비해 한자리정도 낮아지는 것이 일반적이다. 다만, 爐心上部의 蒸氣存在를 고려하여 上下方向의 플루엔스分布도 고려할 必要가 있다.

PWR에서는 爐心燃料의 壓力容器 周方向 照射量이 변화하므로 가장 심각한 照射條件의 위치를 명백히 하고, 거기에서의 靱性低下를 評價할 必要가 있다. 個個의 原子爐에서 다른데, 가장 심각한 위치에서의 使用期間末期 플루엔스는 典型的으로 BWR  $5 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ , PWR  $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$  ( $E > 1 \text{MeV}$ ) (32EFPY, 40年) 정도이다.

그림1에 Browns Ferry 3號(BWR)의 中速中性子 플럭스( $E > 1 \text{MeV}$ )를 나타내었다. 두께가 두꺼운 鋼材中에서도 상당히 큰 플루엔스 및 스펙트럼의 變化가 존재한다. 동시에 溫度勾配의 존재도 무시할 수 없다. 이와같이 두께가 두꺼

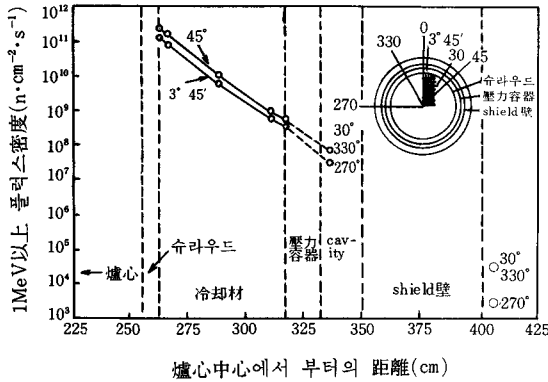
운 材料의 照射條件은 材料中의 위치에 依存하고 매우 복잡하다.

그림2는 大型鋼材試片中에서는 스펙트럼中의 低에너지成分이 증가하고 한편 高에너지成分이 감소함을 나타내고 있다. 이와 같은 것에서  $E \geq 1 \text{MeV}$ 의 플루엔스를 사용하거나 혹은 dpa를 사용함으로써 鋼材内部의 損傷分布評價가 상당히 變化하는 것을 주의할 必要가 있다. 그림3은 鋼材中 高速中性子 플루엔스의 計算值인데, 鋼材中에 거의 5cm들어갈 때마다 플루엔스가 約半分됨을 알 수 있다.

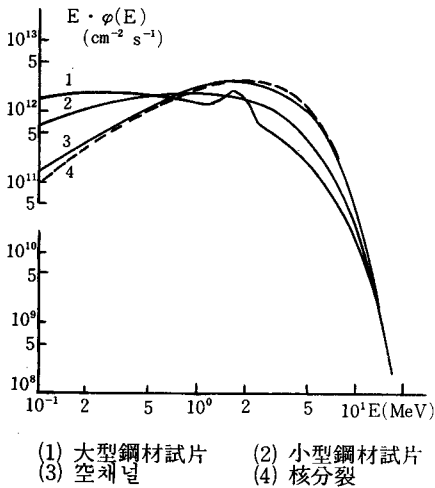
靱性評價에는 高速中性子が 가장 효과가 있다고 생각되고 있는데, 종래 中性子照射量評價에서는  $E \geq 1 \text{MeV}$ 의 高速中性子 플루엔스가 채택되어 왔다. 그러나 그림4에서와 같이  $E \geq 1 \text{MeV}$ 보다는  $E > 0.18 \text{MeV}$ 의 플루엔스를 취했을 때가 無延性遷移溫度의 變化  $\Delta \text{NDT}$ 에 對해 相關이 좋다는 것이 明瞭하다.

FBR爐心構造材의 austenite鋼에 대해서는  $E \geq 0.1 \text{MeV}$ 의 플루엔스가 관습적으로 채택되어 온지 오래이다. 또 dpa(displacement per atom)도 잘 이용되고 있는데, 壓力容器鋼에 대해서도 이것을 채택하는 것이 遷移溫度上昇이나 靱性低下와 보다 좋은 相關이 얻어진다고 고려되므로 dpa를 사용한 評價도 提唱되고 있다. dpa를 計算할 경우에는 中性子 스펙트럼의 知識이 不可欠하다.

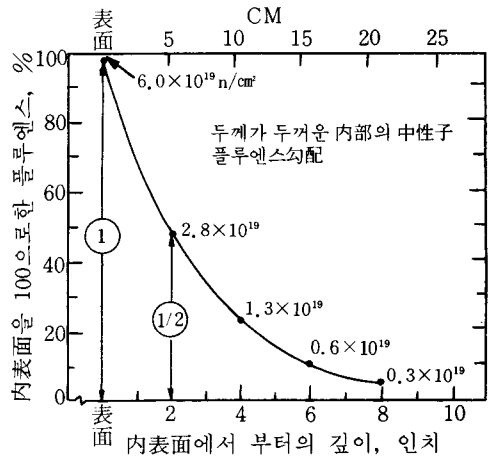
〈그림1〉 Browns Ferry 3號爐의 徑方向플럭스



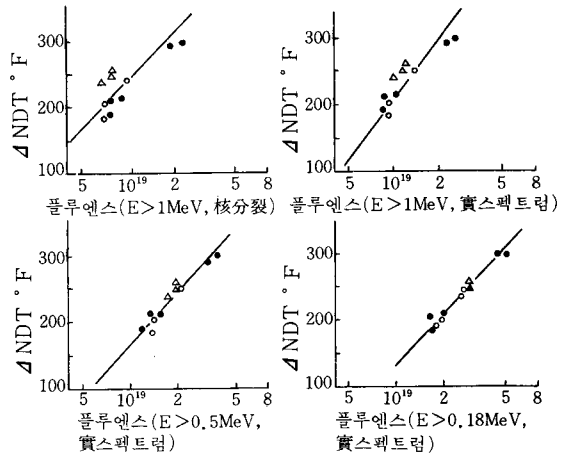
〈그림2〉 爐內에서의 中性子스펙트럼



〈그림3〉 8 인치 두께의 爐壓力容器에서의 플루엔스 減衰 (容器內面에서의 値를 100%)



〈그림4〉 遷移溫度上昇과 여러가지 플루엔스 指標와의 相關



照射溫度는 높은 쪽이 ΔNDT가 작아진다는 것이 알려져 있으나, 최근에는 鋼材中 Cu量이 많을 수록 ΔNDT의 照射溫度依存性이 크다는 것이 보고되고 있다.

플럭스의 效果에 대해서는 아직 반드시 明確하다고는 할 수 없으나, 低플럭스의 경우 脆化에 飽和의 傾向이 보여지고 있다. 이것은 溫度依存性과도 관련해서 照射中에 일부 結합의 anneal이 일어나고 있는 가능성을 나타낸다.

anneal의 問題에 대해서는 照射에 의해 材料中에 導入되는 結합의 舉動과 密接하게 관련된다고 생각한다.

## 2. 照射損傷의 機構

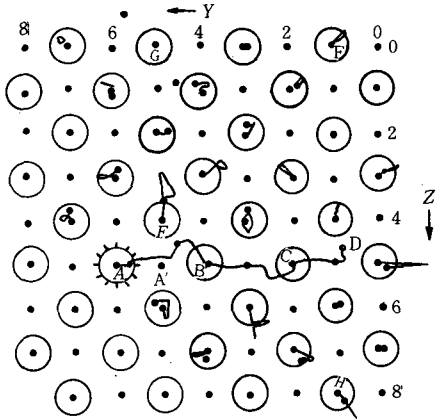
### 2.1 原子의 ぬ킹아웃과 그 計算法

照射效果를 가져오는 原因은 여러가지가 있는데, 鋼材의 照射에 의한 韌性低下에 관해서는 高速中性子에 의한 原子의 ぬ킹아웃이 主要原因이라고 생각된다.

中性子和 格子原子의 충돌에 의해서 格子位置에 있는 原子가 튕겨 나오게 되면(ぬ킹아웃) 格子間 原子와 空格子點의 雙(프란켈雙)이 만들어진다(그림5).

高速中性子和 충돌해서 튕겨나오는 原子(1次

〈그림5〉 프란켈變의 生成過程 (原子A에  $-15^\circ$  Y方向에 40eV의 에너지가 주어진 후  $3.24 \times 10^{-13}$  秒間の 各原子의 움직임, A에 空格子點, D에 格子間原子가 생긴다)



녹킹아웃 原子 또는 PKA)는 큰 에너지를 갖고 있으므로 다시 原子를 튕겨낼(녹킹아웃) 수가 있어서 캐스케이드의인 튕겨내는 충돌이 일어난다. 이 양상을 模式的으로 그림6에 나타냈다.

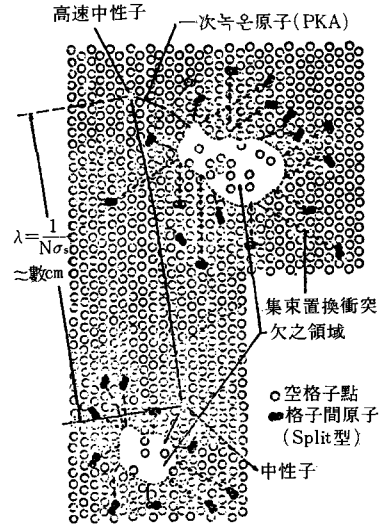
原子의 튕겨내는 數는 dpa로 表示되는데, dpa란 displacement per atom 즉 原子 1個當 몇번 튕겨나오는가를 나타내는 數字이다. 이것을  $C_d$ 라고 하면,

$$C_d = \int_0^t \int_0^\infty \int_{E_d}^{E_p \max} \phi(E) \frac{d\sigma(E, E_p)}{dE_p} \times \nu(E_p) dE_p dE dt \dots\dots\dots (1)$$

로 주어진다. 여기서  $E_p$ 는 入射中性子에 의해서 튕겨나오는 原子(PKA)의 에너지,  $E_{p \max}$ 는 그 最大值,  $\nu(E_p)$ 는 에너지  $E_p$ 인 PKA에서 부터 캐스케이드의으로 튕겨나오는 原子의 數,  $d\sigma(E, E_p)/dE_p$ 는 에너지  $E$ 인 入射中性子에 의해  $E_p \sim E_p + dE_p$ 의 PKE가 만들어지는 微分斷面積,  $\phi(E)dE$ 는  $E \sim E + dE$ 의 中性子 플럭스,  $E_d$ 는  $E_p \geq E_d$ 에서 튕겨나오이 일어나는 문턱(threshold)에너지로서 튕겨나오는 에너지(displacement energy)라고 한다.  $t$ 는 照射時間이다. 여기서,

$$D(E) = \int \frac{d\sigma(E, E_p)}{dE_p} \nu(E_p) dE_p \dots\dots\dots (2)$$

〈그림6〉 高速中性子에 의한 녹킹아웃(模式圖)



는 타겟物質만에 依存하는 量으로서 損傷斷面積(Damage Cross Section)이라고 한다.

플루엔스  $\phi_t$ 를  $\Phi$ 라고 하면  $D(E)$ 를 사용해서

$$C_d = \int_0^\infty D(E)\Phi(E)dE \dots\dots\dots (3)$$

로 表示할 수 있다. 照射效果를 정리할 경우 高速中性子 플루엔스, 즉  $\Phi(E > 0.1 \text{ MeV})$ 나  $\Phi(E > 1 \text{ MeV})$ 와 같은 照射單位를 사용하기 보다는 dpa를 사용하는 편이 照射效果의 量과 相關性이 좋다는 것이 몇가지 實驗에서 이미 나타나고 있다.

그리고 앞에서의 式中  $\nu(E_p)$ 에 대해서는 1972年 IAEA 專門家會議의 推獎에 따라 다음과 같은 方法이 鉄, 鋼, 니켈基合金에 대해 標準的인 것으로 사용하게 되었다. 즉,

$$\nu(E_p) = \beta E_D, \beta = 10 \text{ keV}^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $E_D$ 는 損傷에너지의 量으로서  $Z, A$ 를 타겟의 原子番號, 質量數로 하여,

$$\left. \begin{aligned} E_D &= E_p / [1 + k g(\epsilon_p)] \\ k &= 0.13372 Z^{2/3} / A^{1/2} \\ g(\epsilon) &= 3.4008 \epsilon^{1/6} + 0.40244 \epsilon^{3/4} + \epsilon \\ \epsilon_p &= E_p \cdot (86,931 Z^{7/3})^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

( $E_p$ 는 eV를 單位로 한다)

이 方法은 PKA의 에너지 일부가 電子勵起에

의해서 잃어버릴 것을 받아들여서 Lindhard의 이론에 따라서提唱된 NRT모델(Norgett, Robinson, Torrens모델)에서  $E_d = 40eV$ , 캐스케이드 효율을 0.8로 취한 것에 상당한다. 앞에 式을 NPT標準모델이라고 한다.  $E_d$ 는 PKA의 에너지에서 부터 최종적으로 캐스케이드中에서 電子勵起에 의해 잃어버린 에너지를 뺀 것에 상당한다.

## 2.2 硬化的 機構

照射에 의해서 一般的으로 材料가 단단해진다는 것은 잘 알려져 있다. 이 照射硬化를 일으키는 原因은 텅겨나옴(녹킹아웃)에 의한 것이 주이나, 核變換에 의한 不純物의 效果와 텅겨나옴에 의해 야기되는 副次的效果(예를 들면, 析出) 등의 原因도 고려된다.

텅겨나옴이 硬化的의 主原因이기는 하지만 반드시 空格子點이나 格子間原子가 硬化를 야기시키는 것은 아니다. 생각될 수 있는 照射硬化의 機構를 列舉하면 다음과 같다.

① 點欠陥: 空格子點·格子間原子(V.I): 단, 孤立된 V.I의 硬化로의 기여는 적다.

② 核變換不純物: 이것도 그 自體로는 硬化는 적다. 그러나 硼素의 熱中性子에 의한 (n,  $\alpha$ )反應이나, 거의 대부분의 元素에 對해 高速中性子領域이 되면 일어나게 되는 (n,  $\alpha$ )反應 등에서 생기는 He은 高溫에서 粒界에 모이게 되면 헬륨脆性이라고 불리는 照射脆化를 야기한다.

③ V. 클러스터: (캐스케이드의 中心 부근에 밀집한 V가 집합한 것 등).

④ 轉位루프: V가 평면적으로 모여서 둘러싸여져서 생긴 V루프, I가 평면적으로 모여서 생긴 I루프가 있다. 이들에는 積層欠陥을 가진 것(積層欠陥루프), 가지지 않은 것(完全轉位루프)이 있다.

⑤ 轉位: 원래 있었던 轉位 및 루프가 相互作用하여 엉켜서 생긴 轉位.

⑥ 空洞(cavity, void, 氣泡)

⑦ 析出物

硬化에는 大別하여 轉位の 增殖源이 作動하기 어려워지는 轉位源硬化(source hardening)와 轉位가 運動하기 어려워지는 摩擦硬化(frictional hardening)가 있다.

轉位源硬化의 例로는 BCC金屬의 降伏現象, 轉位채널링 등의 현상을 들 수 있다. 한편, 摩擦硬化로는 ① 轉位間의 長距離相互作用, ② 轉位の 短距離相互作用이나 轉位の 運動에 대한 障害物의 效果, ③ 欠乏領域, 즉 캐스케이드損傷의 中心部에 생기는 原子密度가 낮아진 영역, ④ 析出物, void, ⑤ 點欠陥이 모여서 생긴 轉位루프 등이 원인이라고 생각된다

## 2.3 鋼中の 點欠陥 攀動과 照射硬化

鋼의 베이스로 되어 있는 純鐵中에서의 格子間原子는 0.3eV 移動의 活性化에너지를 가지며 거의 100K 정도의 낮은 온도에서 움직일 수가 있다. 또 최근의 高純度鐵의 데이터에서는 空格子點도 약 0.6eV로 낮은 活性化에너지를 가지며 200K 정도의 低溫에서 움직이는 것이 거의 확실하다. 따라서 純鐵과 같은 物質에서는 室溫以上에서 照射를 行하면 照射中에 프란켈雙이 움직여서 많은 것이 소멸되어 버린다.

鋼의 경우에는 탄소 등의 合金元素가 포함되어 있어서 事情은 다르다. 최근에는 高純度二元素 혹은 三元素純合金에서의 點欠陥과 溶質原子의 相互作用이 상당히 명백하게 되어가고 있으며, 특히 母體全屬보다 사이즈가 작은 置換型溶質原子는 格子間原子와 安定한 混合亞鈴型格子間原子를 만들어 移動의 活性化에너지는 상당히 커진다고 알려져 있다.

한편, 溶媒原子보다 사이즈가 큰 置換型溶質原子는 空格子點과 결합하여 이것을 움직이기 어렵게 한다고 생각된다.

侵入型不純物原子도 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 鐵中の 탄

소 존재는 空格子點이 움직일 수 있는 온도를 200K에서 약 200°C (活性化에너지로 0.6eV에서 1.2eV)까지 높여버린다. 格子間原子와 侵入型不純物原子의 상호작용에 대해서는 아직 충분히 밝혀져 있지 않으나, 큰 彈性的相互作用이 생긴다고 생각된다.

實用鋼材에서는 많은 溶質原子가 포함되어 있으므로 照射欠陷은 바로 이들 溶質原子에 트랩 되든가, 雙을 만든다고 생각된다. 合金添加元素가 照射效果感受性에 큰 영향을 줄 수 있는 것도 이와 같은 상호작용에 의한 것이라고 생각된다.

照射에 의한 硬化를 생각하면 鐵 등의 BCC 金屬에서는 侵入型不純物原子(탄소, 질소, 산소)가 포함되기 쉽고 또 이들은 室溫부근에서 움직일 수가 있으므로 여러가지 현상이 일어난다. 例를 들면, ① 降伏點現象이나 ② 照射燒純硬化(R. A. H.)는 이들 侵入型不純物이 관여하고 있다. RAH는 캐스케이드損傷에 의해서 만들어진 欠乏領域(depleted zone)이나 轉位루프의 消滅溫度보다 낮은 온도에서 侵入型不純物原子가 움직임으로서 點欠陷클러스터나 轉位루프가 侵入型不純物에 의해서 강화되어 보다 강한 배리어가 되기 때문에 일어나는 硬化이다. 鋼材의 脆化機構는 아직 명확한 것은 아니나, 欠乏領域이나 탄소원자 등의 溶質原子가 관여하고 있다고 생각된다.

그런데, 硬化와 脆化는 밀접한 관계가 있음이 알려져 있으므로 이에 대해서 간단히 설명한다.

Cottrell-Petch의 理論에 의하면 降伏應力 $\sigma_y$ 는 粒徑을  $d$ 로 해서,

$$\sigma_y = \sigma_i + K_y d^{-1/2} \dots\dots\dots (6)$$

으로 표시된다. 여기서  $\sigma_i$ 는 轉位の 運動에 대한 摩擦應力이다. 한편, Tetelman과 McEvily에 의하면 破壞의 臨界應力  $\sigma_{crit}$ 는 破面을  $x$ 面으로 하고 여기에 수직인 引張·壓縮應力을  $\sigma_{xx}$ ,

剛性率을  $G$ , 表面張力을  $\gamma$ 로 해서,

$$\sigma_{crit} \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_i) = \frac{4G\gamma}{d} \dots\dots\dots (7)$$

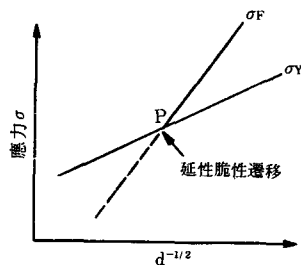
단, 여기서 평균적으로 引張應力  $\sigma$ 과 剪斷應力  $\tau$ 의 사이에  $\sigma = 2\tau$ 를 가정했다. 降伏이 일어나는 곳에서는  $(\sigma_{xx} - \sigma_i) = K_y d^{-1/2}$ 라고 할 수 있으므로 破壞應力  $\sigma_F$ 는,

$$\sigma_{crit} = \sigma_F = \frac{4G\gamma}{K_y} d^{-1/2} \dots\dots\dots (8)$$

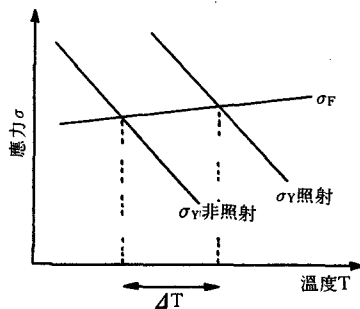
가 된다.  $\sigma_y$  및  $\sigma_F$ 와 粒徑  $d$ 와의 관계를 그림7에 나타내었다.  $\sigma_y$ 와  $\sigma_F$ 의 交點 P에서 부터 左側에서는 降伏이 일어나면 동시에 파괴가 일어나게 되므로 延性·脆性遷移는  $\sigma_y$ 와  $\sigma_F$ 가 일치하는 점에서 주어진다. 이것을 Ludwig Davidenkov條件이라고 한다.

照射感受性(radiation sensitivity)를 생각하면 (6)식에서  $\sigma_i$ 는 摩擦應力이므로 여러가지 機構에 따라서 照射感受性이 크다. 한편,  $K_y$ 는 轉位源을 작동시키는 應力에 관계한 量이며, 鋼에서는 不純物에 의한 轉位の 靚정지효과가 작용하고 있으므로 照射의 영향은 적은 것으로 생각된다.

(그림 7) 降伏應力, 破壞應力과 延性脆性遷移 (d는 粒徑)



(그림 8) 遷移溫度上昇의 定性的說明



앞의 조건에서 DBTT 또는 NDT는  $\sigma_F = \sigma_y$ 가 되는 온도에 상당하는데,  $\sigma_F$ 는 높은 탄성定數의 溫度依存性程度에서 그다지 크게 온도에 의존하고 있지 않다고 생각된다. 한편,  $\sigma_y$ 는 특히 低溫에서 크게 온도에 의존하며 低溫側에서 커진다. 그래서  $\sigma_F = \sigma_y$ 에서 그림 8에서와 같이 延性脆性遷移溫度가 정해진다.

遷移溫度의上昇을 생각하면 遷移點近傍에서는 (8)式에 의해,

$$\sigma_y \cdot K_y = 4G \gamma d^{-1/2} \dots\dots\dots (9)$$

가 된다. 여기서 右邊은 照射, 溫度에 의해 그다지 변하지 않는 定數라고 볼 수 있다. 따라서,

$$\sigma_y \cdot K_y \approx \text{const.}$$

$$\therefore \sigma_y dK_y + K_y d\sigma_y = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} dK_y &= (\partial K_y / \partial T) dT + (\partial K_y / \partial \sigma_i) d\sigma_i \\ d\sigma_y &= (\partial \sigma_y / \partial T) dT + (\partial \sigma_y / \partial \sigma_i) d\sigma_i \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

라고 쓸 수가 있다. 여기서 轉位源硬化를 무시하면  $K_y$ 는 轉位源硬化係數이기는 하나,

$$\partial K_y / \partial \sigma_i = 0$$

가 되므로 Cottrell-Petch의 式에서,

$$\partial \sigma_y / \partial \sigma_i = 1$$

이것들을 (11) 式에 대입해서,

$$\frac{dT}{d\sigma_i} = \frac{\Delta T_D}{\Delta \sigma_i} = - \left( \frac{\sigma_y}{K_y} - \frac{\partial K_y}{\partial T} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial T} \right)^{-1} \dots\dots\dots (12)$$

가 된다. 실험에서 照射에 의한 遷移溫度의上昇  $\Delta T_D$ 는,

$$\Delta T_D / \Delta \sigma_i = 3 \sim 5^\circ\text{C} / 10^4 \text{ kN/m}^2 \dots\dots\dots (13)$$

가 된다. 照射材의 경우  $\Delta \sigma_y$ 는 주로 滑面上的의 장해물에 의한다고 생각되며 강철에서 약 300°C 정도의 온도에서는 장해물로 여러가지의 가능성이 생각된다. 예를 들면, 캐스케이드 損傷에 의한 欠乏領域이라든가, 不純物原子에 의해 安定化된 轉位루프 등이 가능성으로 생각된다.

轉位の 運動에 대해서 摩擦力으로 작용하는 이들 欠陷集合體는 轉位에 대해 포텐셜 에너지  $U_0$ 의 장해물로 생각할 수가 있다. 障壁의 높이

즉 活性化에너지는 應力이 附加되면 낮아져서 이와 같은 것을 받아들인 Seeger의 모델에 의하면, 예를 들면 欠乏領域에 의한 降伏應力의上昇  $\sigma_s$ 는,

$$\sigma_s = \sigma_s^0 [1 - (T/T_c)^{2/3}]^{3/2} \dots\dots\dots (14)$$

와 같은 溫度依存性을 가진다.  $\sigma_s^0$ 는 活性化에너지가 0이 되는 應力の 値이며 特性溫度  $T_c$ 는 轉位密度를  $\rho$ , 마그 스펙트럼의 크기를  $b$ , 轉位の 振動數를  $\nu$ , 비틀어짐 속도를  $\dot{\epsilon}$ , 欠乏領域의 반경을  $r$ , 單位體積當의 밀도를  $N$ 이라 하면  $k$ 를 Boltzman定數로 해서,

$$T_c = \frac{U_0}{k \ln [\rho b \nu / \dot{\epsilon} (2rN)^{1/2}]} \dots\dots\dots (15)$$

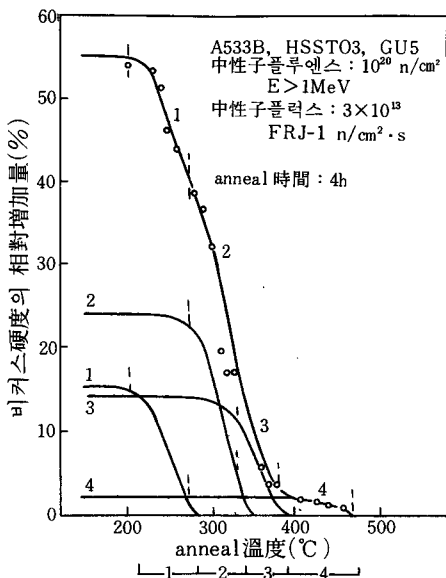
로 주어진다. 鐵鋼의 경우, 降伏應力이 강한 溫度依存性을 나타내는 低溫側(예를 들면,  $T < -350^\circ\text{C}$ )에서는  $\sigma_s$ 는  $\sigma_y$ 의 上昇에서 알 수 있다 ( $\sigma_s = \Delta \sigma_y$ ). 그러나 高溫에서는 장벽이 되고 있는 결함의 annealing이 일어나기 때문에 온도와 함께  $\sigma_s$ 는 (14) 式에서 예상되는 値보다 급격하게 작아진다. 이 annealing의 온도는 不純物原子의 종류나 量에 의존한다.

통상, Fe-C系나 이와 유사한 V-O系의 금속에서는 轉位の 장벽이 되고 있다고 생각되는 欠陷集合體가 回復에 의해 소멸하면 C나 O 등의 侵入型不純物原子가 固溶體로 복원하는 현상이 보여진다. Cu 등 韌性低下에 나쁜 영향을 가진 원소가 있으면 復元溫度가 高溫側으로 시프트하는 것이 보이는데, 이것은 Cu가 예를 들면 空格子點型欠陷集合體를 보다 安定화하기 때문이라고 생각된다. 이와 같이 照射한 鋼의 annealing 舉動을 조사하는 것은 硬化의 機構를 조사하는데 있어서 중요하다.

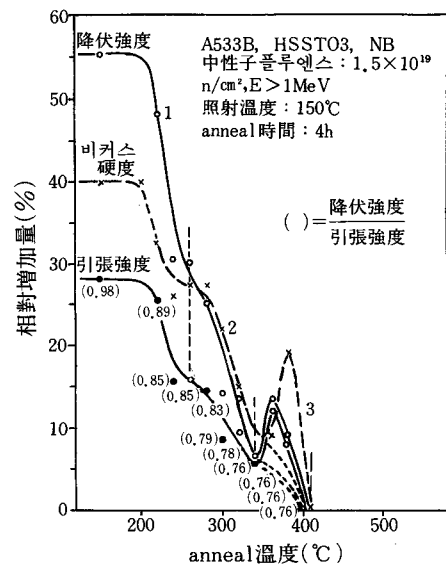
### 3. 照射損傷의 아닐링과 照射溫度依存性

아닐링實驗에 의해서 照射硬化를 가져올 欠陷의 安定性이나 移動度, 相互作用 등에 대한 지식을 얻을 수가 있다. 그림 9는 A533B 鋼을

〈그림 9〉 150°C에서照射한 A533B 鋼의 비커스 硬度的回復曲線

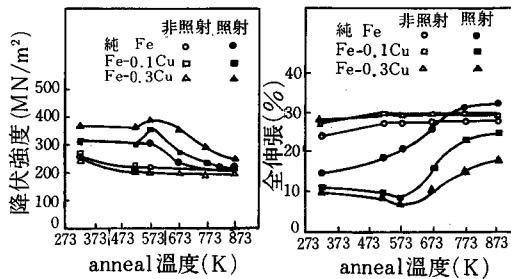


〈그림 10〉 150°C에서照射한 A533B 鋼의 降伏強度, 引張強度, 비커스硬度的回復曲線



150°C에서  $10^{20}n/cm^2$  ( $E > 1MeV$ )照射한 후 비커스硬度測定에 의해서 구했을 때의 等時燒鈍曲線이다(단, 實驗에서는 各點 한개의 試料를 사용하고 있다). 이 그림에서 4種의 回復段階가 있다고 생각된다. 그림10은 동일하게 150°C에서  $1.5 \times 10^{19}n/cm^2$  ( $E > 1MeV$ )照射한 A533B 鋼의 降伏強度, 引張強度, 비커스硬度的 等時燒鈍曲線이다. 이때, 약 350°C 이상에서 照射燒鈍硬化

〈그림 11〉 純鐵 및 Fe-Cu合金의 照射後 等時燒鈍에 의한 (a)降伏強度 및 (b)全伸張의 回復



〈表 1〉 試料의 分析值

試料	C	N	Cu	기타
Pure Fe	0.012	0.010	—	
Fe-0.1Cu	0.009	0.010	0.094	
Fe-0.3Cu	0.009	0.007	0.280	
Fe-Cu-Al	0.009	0.004	0.088	Al : 0.40
Fe-Cu-Si	0.008	0.009	0.088	Si : 0.062
Fe-Cu-Ti	0.010	0.006	0.088	Ti : 0.380

가 보이고 있다.

이들의 回復段階가 각각 어떤 機構로 일어나는가에 대해서는 아직 定說은 없다. 前述한 것처럼 純鐵中과는 달리 탄소를 포함한 순도가 낮은 材料에서는 약 200°C 이상에서 空格子點이 움직이는 것으로 알려져 있으며 그 機構는 C-V 雙의 分解에 의한 V의 移動이 생각되고 있다.

侵入型不純物以外的 不純物을 포함하는 경우는 더욱 복잡하다. 그림11은 純鐵 (~100wtppm 정도의 탄소를 포함) 및 여기에 銅을 첨가한 試料를 JMTR에서 약 250°C (523K),  $5 \times 10^{18}n/cm^2$  ( $E > 1MeV$ )로 照射後, 等時燒鈍했을 경우의 降伏強度 및 全伸張의 變化를 나타내고 있으며 이들 시료의 分析值는 表1에 표시하였다.

銅의 첨가와 함께 약 300°C의 回復段階가 高溫側으로 び나가 있는 것을 알 수 있다. 内部摩擦의 측정에 의한 鐵中의 탄소는 照射欠陥에 捕捉해서 이것이 약 300°C 이상에서 照射欠陥의 消失에 따라서 解放되는 것이 명백하나, 銅이 첨가되었을 경우 이 탄소의 復元現象이 高溫側으로 移動하는 것이 알려져 있으며 이들의 結果를 중

합하면 Cu添加에 의해서 탄소를 포획하여 安定化된 照射欠陥이 한층 安定化되어 硬化가 高温까지 유지됨을 알 수 있다.

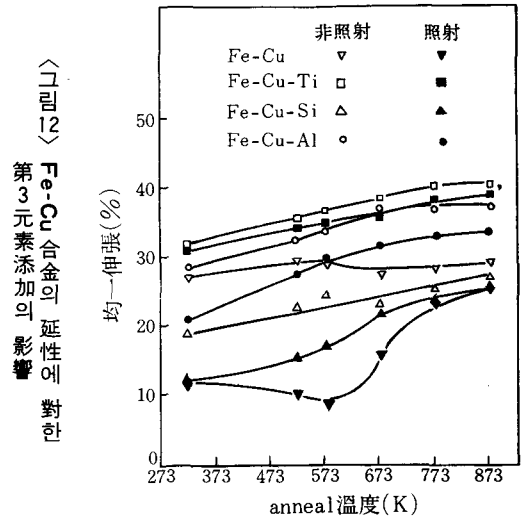
그림12는 第三元素添加效果를 나타낸다. 탄소에 대해 강한 scavenging效果를 가진 Ti을 첨가하면 延性的 劣化가 억제되는 것이 나타나고 있다. 이것은 Ti形成으로 C-Cu-Vn(n는 클러스터中的 空格子點數)와 같은 硬化에 기여하는 欠陥클러스터의 形成이 방해되기 때문이라고 해석되고 있다. 이상과 같이 實用鋼材에서는 거의 ~200°C以上에서 여러가지의 回復段階가 나타나는데, 따라서 ~200°C以上에서 照射하면 照射中 annealing이 進行하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 遷移溫度上昇도 高温에서 照射할 수록 작아진다. 遷移溫度上昇의 照射溫度依存性의 一例를 그림13에 나타냈다.

이와 같이 照射中에 결함의 生成과 消滅이 동시에 일어나고 있으므로 照射速度를 變하게 하면 이론적으로는 결함의 生成·소멸의 均衡이 變하여 線量率效果가 나타날 것으로 여겨진다. 지금까지 明確한 線量率效果를 나타낸 실험은 없다.

최근 重照射效果의 研究에서 주목받고 있는 照射誘起偏析問題를 알아보면, 壓力容器鋼에서 보다 많은 照射를 받는 PWR의 경우 壽命期間 末期에서도 그 照射量은 0.1dpa程度라고 생각되므로 이 효과는 그다지 현저해지리라고는 생각되지 않으나, 合金系에서는 點欠陥의 消滅에 따라서 成分元素의 偏析이 일어난다.

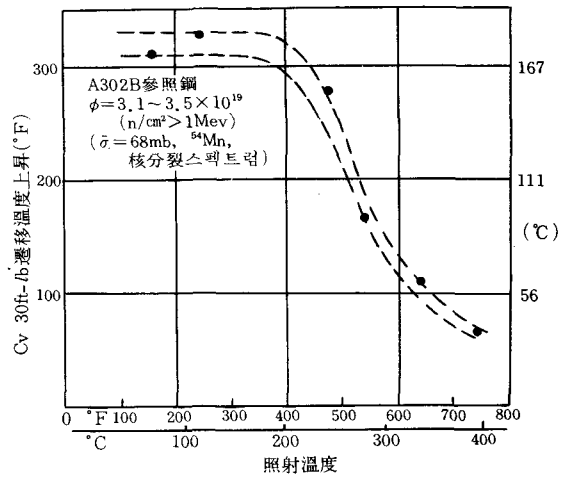
格子間原子는 母體原子보다 사이즈가 작은 溶質原子와 混合亞鈴型格子間原子(Mixed dumbbell interstitial)를 形成하여 溶質原子를 同行자로 해서 移動하므로 즉, 表面이나 粒界, 轉位 등 點欠陥이 소멸하는 장소에 溶質原子가 농축된다. 그림14는 混合亞鈴型格子間原子의 移動모드를 나타낸 것이다.

한편, 空格子點에 대해서는 溶質原子와의 位



〈그림12〉 Fe-Cu合金의 延性에 對한 第三元素添加의 影響

〈그림13〉 A302-B鋼의 Cv 30ft-lb遷移溫度上昇에 對한 照射溫度의 影響

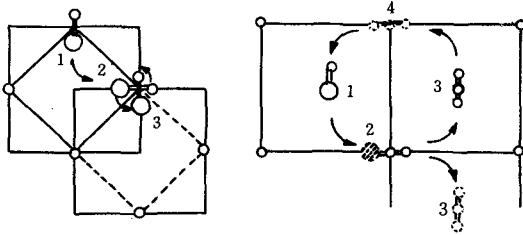


置交換 및 空格子點-溶質原子複合體의 移動모드가 고려되며(그림15), 각각에 따라서 sink에 溶質原子가 欠乏하는 경우와 농축하는 경우가 생각된다. 그러나 종래의 실험에서는 많은 경우 사이즈가 큰 溶質原子는 點欠陥의 sink에서 欠乏하는 것이 인정되고 있다.

참고로 Cu는 Fe에 비해 사이즈가 큰 原子이며 空格子點과 어느 정도 結合에너지를 가지고 있는 것이 알려져 있다. 照射된 Fe-Cu合金의 破面이 粒界破壞를 띠고 있는 것은 粒界에 모



〈그림14〉 格子間原子에 의한 溶質原子의 長距離移動모드

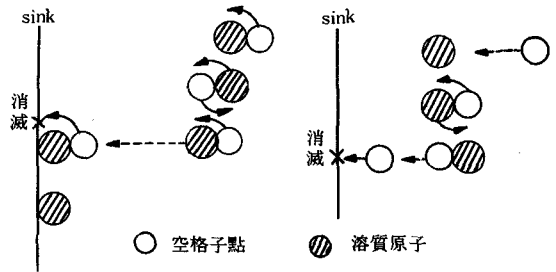


여진 극히 얇은 層의 Cu原子때문이 아닐까 하는 억측도 있으며, 앞으로 溶質原子中에서도 照射硬化에 나쁜 영향이 있다고 여겨지는 여러 元素의 照射에 의한 移動·集積을 세밀하게 추적할 필요가 있다.

Ni의 영향에 관해서는 現象論적으로 아직 명백한 것은 아니나, 바람직하지 못한 영향이 존재하는 것은 확실하다. 그 機構에 관해서는 i) Ni가 Cu의 溶解度에 영향을 준다, ii) Cu-空格子點클러스터보다도 Cu-Ni-空格子點클러스터가 보다 安定하며 硬化가 高溫까지 유지된다 등의 사고방식이 나오고 있다.

〈그림15〉 空格子點의 消滅과 溶質原子의 移動

(a) V·S複合體의 擴散 (b) 單獨V의 擴散



鐵과 가장 유사한 바나듐合金으로 侵入型不純物原子와 溶質原子의 상호작용을 조사한 결과에 의하면 어떤 경우에는 溶質原子의 주변이 侵入型不純物에 대해 排除領域이 되어 그 결과 겉으로 볼때 侵入型不純物濃度가 상승하는 것 같은 현상이 보여지는데, 鐵中의 Ni의 경우도 탄소나 空格子點에 대해 反發的相互作用이 생겨서, 例를 들면 Cu-C-V 클러스터를 安定化하는 것 같은 역할을 한다고 생각된다. 이와 같은 機構에 대해서는 더한층 基礎的인 研究가 필요할 것이다.

韓國原産 個人會員 加入 案内

韓國原子力産業會議(會長 朴正基)는 原子力産業에 관련된 事業을 營爲하거나, 原子力産業 振興에 관심을 가진 기업체, 학계, 기관 및 사회단체 등 國內外 各계各층이 참여하고 있는 원자력관련 公益法人으로서 1985年3月 現在 72個 會員社(團體會員)로 구성되어 원자력산업에 관한 先進技術 情報蒐集 및 配布, 조사연구, 국제 협력, 원자력 인재 양성 및 국민홍보 등 여러가지 사업을 추진하여 우리나라 原子力産業界의 중심적 역할을 하고 있습니다.

이와 아울러 1985年度부터 當 會議에서는 個人會員도 확보하여 명실공히 原子力界 人士를 총망라하는 원자력산업의 요람으로 육성코자 합

니다.

1. 범 위 : 원자력관련 학계, 연구기관 및 산업계 인사와 當 法人의 목적과 취지에 찬동하거나 관심이 있으신 분.
2. 혜 택 : 會誌 「原子力産業」(月刊) 배포, 각종 학술행사 및 간담회 초대, 각종 정보자료 열람, 원자력산업이용 상담, 국제회의의 참가 및 해외 원자력산업시찰 안내 등.
3. 회 비 : 20,000원/년
4. 문의처 : 當 會議 총무부(755-0163/4)

社團 韓國原子力産業會議  
法人