

# 輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

## — 中性子照射材의 破壞靱性和 照射後燒鈍 —

### 1. 序 言

發電用原子爐의 壓力용기재료는 中性子照射 環境에 있기 때문에 使用기간중에 그 기계적 성질이 변화하여 주로 강도의 상승과 靱性的의 저하가 생긴다. 이로 인해 원자로 壓力용기의 제조에서는 되도록 이들의 中性子照射效果가 적고 또한 靱性이 뛰어난 재료가 사용되고 있으며, 使用期間中에는 監視試驗에 의해서 기계적 성질의 변화를 정확하게 파악하여 健全성을 유지하도록 도모되고 있다.

다음은 원자로 壓力용기재료 성질의 健全성 평가에 있어서 기본이 되는 破壞靱性和 재질의 健全성이 불충분하다고 생각되는 경우에 靱性的의 회복방법으로 검토되고 있는 照射後燒鈍에 대한 최근의 研究動向이다.

### 2. 中性子照射材 破壞靱性的의 評價

#### 2. 1 原子爐壓力容器材料的 破壞靱性

原子爐壓力容器的 非延性破壞防止策으로는 線型彈塑性破壞力學에 따른 評價方法이 취해지고 있는데, 이것은 壓力용기의 제조시 뿐만 아니라 使用기간의 평가시에도 같다. 이 평가에서 대상이 되는 破壞靱性(材料的 破壞抵抗特性)은 線型破壞力學과라미터의 應力擴大係數,  $K_I$ 에 대응하는  $K_{Ic}$ (靜的負荷에서의 破壞靱性),  $K_{Ia}$ (動的負荷에서의 破壞靱性) 및  $K_{Ia}$ (龜裂傳播停止破壞靱性)이다.

그리고 壓力용기의 健全性評價에서 사용되는 破壞靱性值는 실제로 측정된 것이 아니라 非照射材에 대해서는 落重試驗 또는 살피시험에 의한  $RT_{NDT}$ 를 參照值로 하는 基準曲線(ASME Code Sec. III의  $K_{Ic}$ 曲線 및 同 Sec. XI의  $K_{Ic}$ 曲線과  $K_{Ia}$ 曲線, 단  $K_{Ic}$ 曲線과  $K_{Ia}$ 曲線은 동일곡선)에서 구해지며, 中性子照射材에 대해서는 化學成分 또는 살피흡수에너지遷移曲線에서 추정되는  $RT_{NDT}$ 의 上昇量을 조정한 基準曲線에서 구해진다.

따라서 원자로 壓力용기의 構造安全性에 관한 現행의 평가에서 破壞靱性은 近年 발달한 線型彈塑性破壞力學의 方法과 종래의 經驗적인 靱性評價方法인 살피시험 및 落重試驗을 組合시켜 公學적으로 安全側의 평가가 되게 고려된 것이며, 기준곡선의 不確實性, 上部棚領域에서의 평가부족 등의 문제가 남아 있다.

한편, 원자로 壓力용기재료의 재료특성으로 破壞靱性을 평가하는 방법에서는  $K_{Ic}$ ,  $K_{Ia}$  및  $K_{Ia}$ 의 각 시험방법에 대한 검토와 데이터의 축적이 도모되어 왔다. 이들 시험에서 특히 문제가 되는 것은 高靱性領域에서는 250mm두께 정도의 매우 두꺼운 試驗片을 사용하더라도 K평가가 유효해지지 않는다는 것이며, 이를 위해 彈塑性破壞力學의 방법이 도입되었다.

彈塑性破壞力學과라미터의 대표적인 것은 J積分이며, J積分值를 통한 破壞靱性值( $K_{Ic}(J)$ ,  $K_{Ia}(J)$  등으로 표시된다)가 요구되고 있다. 또한 최

근에는 上部棚領域에서의 破壞靱성에 대해서도 彈塑性破壞力學에 따른 方法에 의해서 연구가 行해져 왔는데, 代表적인 破壞靱性으로 J-R 曲線을 기본으로 하는  $J_{IC}$  및 테어링係數(Tearing Modulus) 등이 검토되고 있다.

이상과 같은 破壞靱性的 연구는 非照射材를 대상으로 한 것이 많으며 中性子照射材에 대해서는 그 例가 아직 적으나, 上記의 壓力容器의 健全性評價에 반영시키도록 中性子照射材의 破壞靱性에 관한 여러가지 검토가 추진되고 있다. 다음은 中性子照射材의 破壞靱性을 主對象으로 하는 最近의 試驗例와 평가方法의 동향에 대한 概說이다.

2. 2 中性子照射材의 破壞靱性試驗例

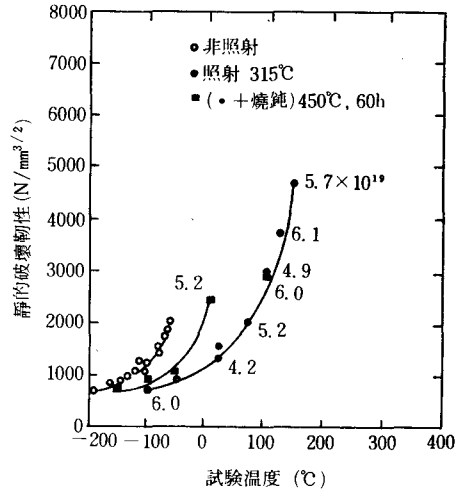
(1)  $K_{IC}$ ,  $K_{Ia}$  및  $K_{IIa}$  試驗

① 25mm~100mm 두께의 比較적 대형의 WOL型 試驗片에 의한  $K_{IC}$  試驗이 E. N. Klusnitzer 등에 의해 報告되고 있다. 試驗材는 22 NiMoCr 37鋼을 母材로 하는 submerged arc 溶接(溶接金屬은 NiCrMo1)을 行한후 용접금속에서 채취한 것인데, 照射後의 燒鈍材에 대한 시험도 行해지고 있다. 그 결과를 그림 1에 나타냈는데, 그림 1의 照射材의  $K_{IC}$  shift量은  $2000N/mm^{3/2}$  ( $204kgf/mm^{3/2}$ )의 레벨에서  $130^{\circ}C$ 로서  $\Delta_v T_{R_{30}}$ (살피흡수 에너지遷移曲線의 30ft-lb(4.1kgf-m)에 대응하는 온도의 shift量)의 약  $150^{\circ}C$ 에 비해 安全側으로 되어 있다.

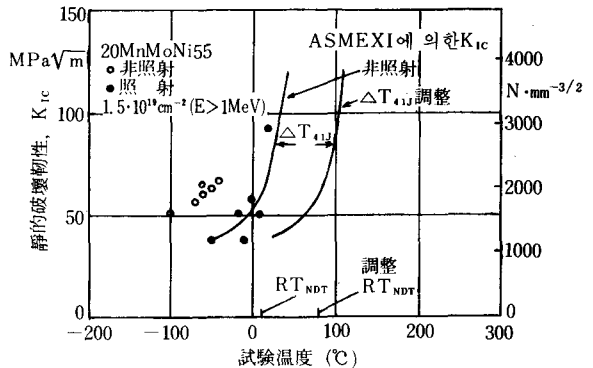
② J. Föhl 등은 22 NiMoCr 37鋼 및 20 MnMoNi 55鋼의 鍛造材(鍛造링 및 鍛造슬랩)에 대해 40mm 두께 CT 시험편에 의한  $K_{IC}$  試驗을 行하였다. 그 결과의 한가지 例를 그림 2에 나타내었다.

이 시험에서는 非照射材 및 照射材 모두 다 같이,  $K_{IC}$  參照曲線 및 調整  $K_{IC}$  參照曲線에 비해  $40^{\circ}C$  이상 安全側에 있음을 보여주고 있다. 이 시험에서는 또한 水環境 및 豫歪의 효과에 대해서도 시험이 行해졌는데, 照射後의 破壞靱性에 대해서 이들의 효과가 없음을 報告하고 있

〈그림 1〉 25mm~100mm 두께 WOL型 試驗片에 의한 靜的破壞靱性試驗結果



〈그림 2〉 40mm 두께 CT 試驗片에 의한 照射前後的  $K_{IC}$ 와 參照曲線과의 比較

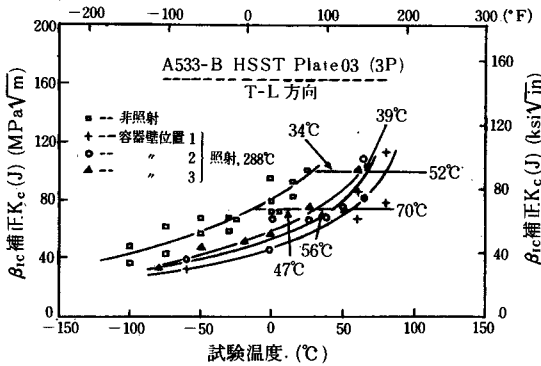


다.

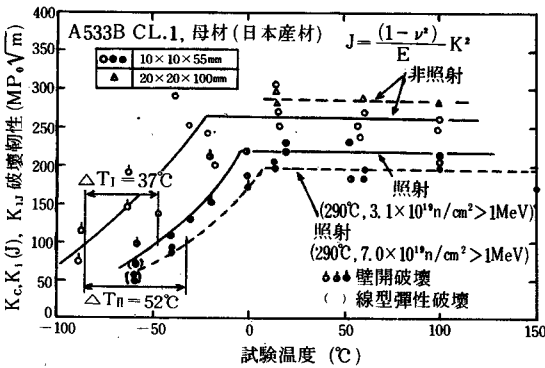
③ NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission)의 照射試驗 프로그램에서 J. R. Hawthorne 등은 J積分에 의한 평가방법과  $\beta_{IC}$  補正方法에 의해 0.5 T (12.7mm 두께)와 1T (25.4mm 두께)의 CT 試驗片을 사용한  $K_{IC}$  試驗을 行하였다. 그 결과의 한가지 例를 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 시험은 HSST03鋼板에 대해서 照射溫度  $288^{\circ}C$ , 照射量  $1.5 \sim 6 \times 10^{19}n/cm^2 > 1MeV$ 로 照射한 것이다. 그 외의 照射條件 및 SA 302B鋼에 대한 시험도 포함해서  $\beta_{IC}$  補正  $K_{IC}$ 의  $100MPa\sqrt{m}$  ( $322kgf/mm^{3/2}$ )에 대응하는 온도의

〈그림 3〉 容器壁韌술材에 의한  $\beta_{rc}$  補正  $K_c$  (J)의 温度依存性



〈그림 4〉 살피크기法 試驗片에 의한 靜的破壞 韌性 試驗結果

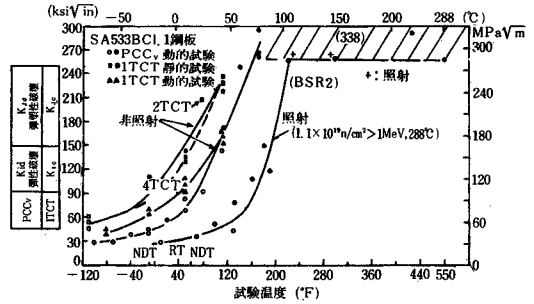


shift量은  $\Delta vTr_{30}$ 보다 적은 경향에 있으나,  $\beta_{rc}$  補正을 하지 않은  $K_c$  (J)경우의 shift量은  $\Delta vTr_{30}$  보다 큰 경향에 있음이 結論내려지고 있다.

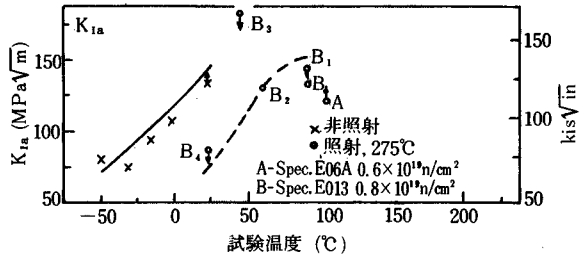
④ 일본의 古平 등은 日本産 原子爐壓力容器 鋼材에 대해 J積分方法을 사용해서 살피크기法의 小型試驗片에 의한 靜的破壞 韌性試驗을 하고 있다. SA533BCL.1鋼에 대한 시험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 遷移領域의 破壞 韌性值은 破壞發生時의 J值를 K值로 환산한 것으로, 上部棚領域은 延性龜裂發生時의  $J_{ic}$ 에 대응하고 있는데,  $J_{ic}$ 는 電位差法에 의해서 구한 것이다. 그림 4 이외의 供試材의 시험결과도 포함해서  $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 온도의 shift量은  $\Delta vTr_{30}$ 과 거의 동등한 것으로 되어 있다.

⑤  $K_{Ia}$ 試驗에 相當하는 中性子照射材에 대한

〈그림 5〉 SA 533 BCL.1 鋼에 대한 照射前後의 疲勞豫龜裂付計裝化 살피크試驗의 結果 (非照射材 데이터는 1TCT 試驗片에 의한 데이터도 포함. 그림중의 中空印은 全面降伏前, 中實印은 全面降伏後의 破壞 韌性을 표시)



〈그림 6〉 SA 508 CL.3 鋼의 서브머지드 아크에 대한 照射前後의  $K_{Ia}$ 試驗結果



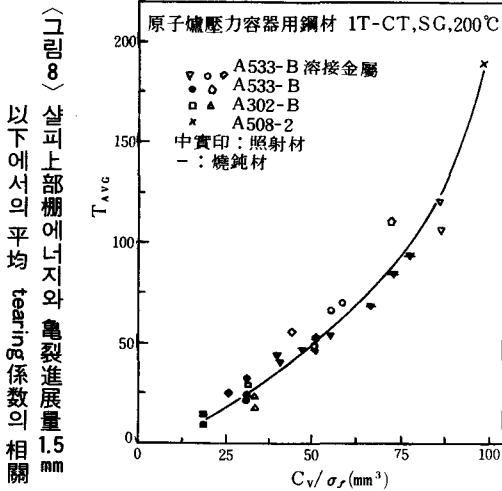
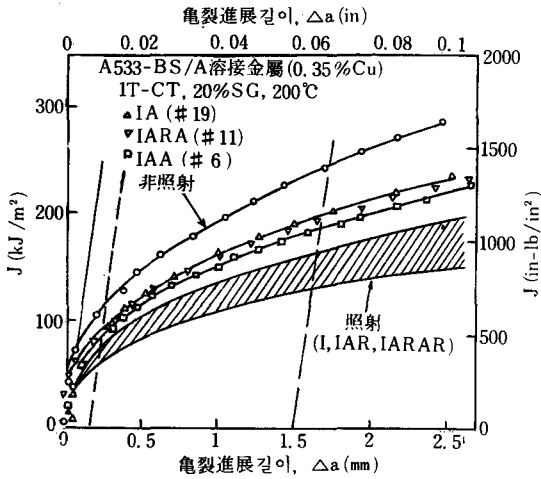
破壞 韌性試驗은 대단히 적으나, 이에 준하는 것으로 疲勞予龜裂付計裝化 살피 (PCCV)試驗이 행해지고 있다. 그 例로서 J.R. Hawthorne 등에 의한 시험결과를 그림 5에 나타내었다.

이 시험의 破壞 韌性值은 古平 등의 시험과 마찬가지로 J積分에 의한 評價方法을 사용한 것인데, 上部棚의 값은  $J_{ic}$ 에 相當하는 것이 아니고 最高荷重時의 韌性值이다. 또 전체적인 시험결과로  $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 온도의 shift量에  $\Delta vTr_{30}$ 과 동등하게 되어 있다.

⑥  $K_{Ia}$ 試驗에 대한 試驗例도 公表된 것은 대단히 적으나, 한가지 例로 A. R. Rosenfield 등에 의한 SA 508 CL.3鋼의 submerged arc 용접금속에 대한 照射前後의 시험결과를 그림 6에 나타내었다.

混成型콤팩트試驗片을 사용해서 행한 것인데 試驗에 성공한 試驗片數는 적으나,  $K_{Ia}$ 의 shift

〈그림7〉 照射(I), 焼鈍(A) 및 再照射(R)의 複合處理를 포함한 各種條件에서 J-R曲線 比較



量的 傾向은 살피흡수에너지遷移曲線의 shift量에 비해 적으며 安全側에 있는 것으로 추정되고 있다.

(2) J-R 曲線試驗

① F.J.Loss 등은 Cu含有量이 큰 SA 533B Cl.1 鋼 submerged arc 溶接金屬의 2供試材 (0.35% Cu)에 대해서 照射(I), 燒鈍(A) 및 燒鈍後再照射(R)을 조합시킨 處理를 행하고, 20% side group付 1TCT試驗片을 사용하여 單數試驗片除荷 컴플라이언스法에 의해 J-R曲線을 구했다. 그 결과의 例를 그림 7에 나타내었다.

照射溫度는 288°C, 燒鈍은 399°C × 168h, 照射量은 I가  $1.3 \times 10^{19} \text{n/cm}^2 > 1 \text{MeV}$ , R은 約  $0.7 \times 10^{19} \text{n/cm}^2 > 1 \text{MeV}$ 이다. 그림7은 試驗溫度가 200°C인 경우인데 시험온도의 영향으로는 J<sub>IC</sub>는 거의 변하지 않으며, T<sub>AVG</sub>(平均 Tearing Modulus)는 韌性이 좋은 것일수록 高溫側에서 저하한다고 보고되고 있다.

이 보고에서는 다른 原子爐壓力容器鋼材에 대한 데이터도 포함해서 T<sub>AVG</sub>와 살피上部棚吸收에너지(C<sub>v</sub>)를 流動應力(σ<sub>f</sub>)에서 표준화한 것(C<sub>v</sub>/σ<sub>f</sub>)의 相關을 검토하여 그림 8에서와 같은 相關이 있음을 나타내고 있다. 다만, T<sub>AVG</sub>는 시험온도에 영향을 받으나, C<sub>v</sub>는 거의 영향을 받지 않기 때문에 그림 8에서의 데이터는 각각 特征의 온도에 대한 T<sub>AVG</sub>를 플롯트한 것이다.

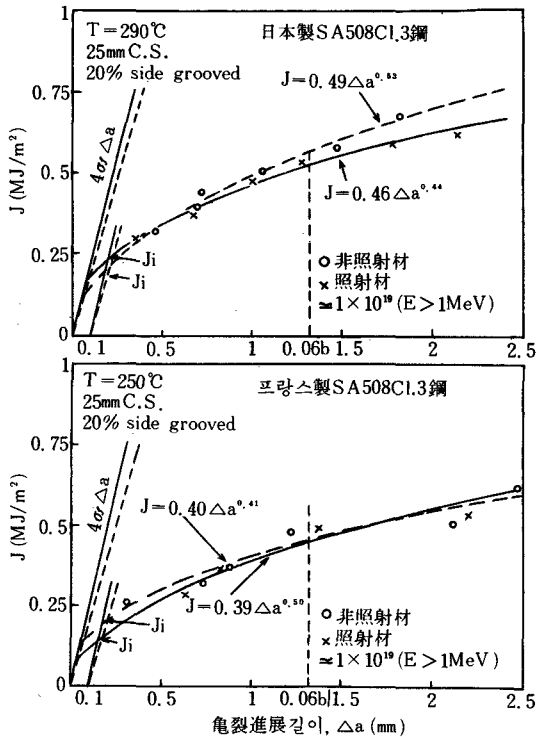
IAEA CRP Phase II 計劃에서 L. M. Davies 등에 의한 照射試驗에서 日本製 SA 508 Cl. 3 鋼과 프랑스製 SA 508 Cl. 3 鋼에 대한 J-R曲線試驗(主目的은 J<sub>IC</sub>試驗)이 행해졌다. 그 결과를 그림 9에 나타내었는데, 이 시험은 20% side group付 1TCT試驗片을 사용해서 多數試驗片完全除荷法에 의해 행해졌으며, 시험온도는 290°C였다. 그림 9의 결과에서 프랑스製, 日本製 供試材 모두 照射에 의한 J-R曲線의 變化는 대단히 적으며, 日本製 供試材가 프랑스製 供試材보다 큰 龜裂進展抵抗을 나타내고 있는데, 이 供試材의 차이는 上部棚에너지의 차이와 相關이 있다고 추정되고 있다.

2. 3 中性子照射材의 破壞韌性評價方法에 關한 問題

(1) 遷移溫度領域에서의 破壞韌性試驗方法

J<sub>IC</sub>試驗은 당초 有効한 K<sub>IC</sub>를 구할 수 없는 작은 시험편으로 K<sub>IC</sub>에 대응하는 破壞韌性值를 구할 수 있다고 생각해서 많은 연구가 행해졌다. 그러나 현재 J<sub>IC</sub>시험에 의한 K<sub>IC</sub>는 脆性龜裂이 발생하는 遷移領域의 K<sub>IC</sub>試驗으로 인정되고 있지 않으며, K<sub>IC</sub>測定에서 시험편 크기의 문제는

〈그림 9〉 IAEA CRP Phase II 計劃에서 照射 前後의 J-R 曲線 比較



남아있다. 이로 인해  $K_{Ic}$  ( $K_{Ia}$  등을 포함해서) 를 小型試驗片에 의해서 工學的으로 구하는 방법의 개발이 필요하며, 이것은 특히 시험편의 크기가 한정되는 中性子照射材의 시험에서 요구된다.

이와 같은 방법 몇가지는 현재 검토가 진행되고 있는데, 그 주된 방법은 다음과 같다.

① 와이블分布函数法: 와이블의 分布函数를 사용해서  $K_c(J)$ 의 最小値를 추정하여  $K_{Ic}$ 로 한다. 1溫度에 대해 約 5本 以上の 試驗片이 필요하다.

② 極値法:  $K_c(J)$  홀어짐의 下限値를 몇本の 試驗片에 대해서 구하여  $K_{Ic}$ 로 한다. 1溫度에 대해 約 5本 以上の 시험편이 필요하다.

③ Irwin方法 ( $\beta_{Ic}$ 補正法): G.R.Irwin의  $K_{Ic}$ 와  $K_c$ 의 關係를  $K_{Ic}$ 와  $K_c(J)$ 에 적용하는 것으로 J. R.Hawthorne 등은  $\beta_{Ic}$ 補正이라 부르고 있다. 1溫

度에 대해 1本の 시험편으로도 양호하다.

이상의 방법중  $\beta_{Ic}$ 補正法은 판의 두께와 推定精度의 關係 등을 포함해서 그 有効성이 더욱 확인되면 中性子照射材의 破壞韌性試驗에 대 然히 有效한 方法이 될 것으로 기대된다.

(2) 参照破壞韌性曲線의 不確定性

ASME Code Sec. III의  $K_{IR}$ 曲線, 同 Sec. XI의  $K_{Ic}$ 曲線은 HSST프로그램破壞韌性데이터를 기초로 해서 정해진 것으로 落重試驗에서의  $T_{NDT}$ 에 대해 살펴시험결과를 가한  $RT_{NDT}$ 는 約 22°C 高温側에 있으며, 기초가 된 破壞韌性데이터의 下限界曲線에 대해서  $K_{IR}$ 曲線,  $K_{Ic}$ 曲線 모두 약 22°C의 여유가 있는 것이었다. 따라서 材料의 製造技術이 진보하여 우수한 韌性을 갖는 재료에서는  $RT_{NDT}$ 가  $T_{NDT}$ 와 동일해지며,  $T_{NDT}$ 도 低温側의 값이 된 現狀에서  $K_{IR}$ 曲線,  $K_{Ic}$ 曲線이 下限値로 有效한가 가 문제 가 된다.

이점에 관해서는 日本溶接協會 原子力研究委員會 HST小委員會의 日本産 原子爐壓力容器鋼材에 대한 破壞韌性確性研究에서 破壞韌性値의 下限界曲線에 대해서  $K_{IR}$ 曲線과  $K_{Ic}$ 曲線은 餘裕는 없으나 대 然히 좋은 指標가 되어 있음이 확인되었다.

또한 中性子照射材의 参照破壞韌性曲線으로 는  $\Delta vTr_{30}$ 에 의한 調整  $RT_{NDT}$ 에 의한 方法이 사용되고 있다. 이 方法에 관해서 는 破壞韌性試驗例에 나와있는 것처럼 破壞韌性遷移曲線의 shift量은  $100MPa\sqrt{m}$  레벨에서  $\Delta vTr_{30}$ 과 동등하게 될 경우가 많다. 따라서  $\Delta vTr_{30}$ 은 破壞韌性曲線의 shift量과 對應은 있으나, 中性子照射에 의한 破壞韌性曲線의 變化는 溫度軸에 따라 移行하며 그 勾配도 變化한다고 생각된다. 이로인해 中性子照射後의 調整参照破壞韌性曲線의 下限界曲線으로서의 신뢰성에 대해서는 앞으로 다 시 검토할 필요가 있을 것이다.

W. Oldfield 등은 参照破壞韌性曲線의 문제점으로 韌性和 溫度의 關係가 일정하지 않다는 것,

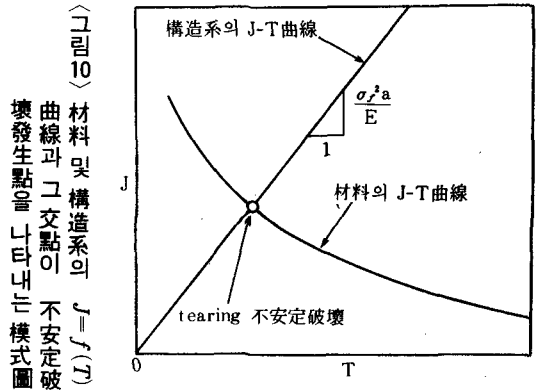
統計的 基盤이 없다는 것, 上部棚領域의 評價가 없다는 것 등의 이유때문에 다른 참조곡선을 검토하고 있다. 그 참조곡선의 기본은 破壞靱性曲線을 tanh曲線으로 近似시키는 것이다. 그 방법은 먼저 살피시험 또는 計裝化살피시험과 같이 소형이고 간편한 시험에 대해서 tanh曲線近似的을 한다. 靱性值, 溫度에 대해서 2개씩의 계수가 얻어지며, 이들을 사용하면 破壞靱性데이터에 대해서 標準化破壞靱性值와 標準化溫度가 얻어진다. 이 표준화한 破壞靱性值와 온도를 많은 供試材에 대해서 구하고, 다시 이들에 대해 tanh曲線近似的을 함으로서 4개의 參照係수가 얻어진다. 이 참조계수와 小型簡便試驗에서 얻어지는 4개의 계수를 사용하면 破壞靱性值를 推定할 수가 있다. 이상의 방법에서 참조계수를 統計的方法을 기초로 구하면 추정된 破壞靱性值의 신뢰성도 명확해진다. 이와 같은 방법에 따른 下限界破壞靱性值의 결정법의 검토가 現在 ASME(American Society of Mechanical Engineers)와 MPC(Metal Properties Council)의 워킹그룹에서 행해지고 있다.

그러나 上記의 방법에 대해서도 上部棚靱性值로 무엇을 취하는가(最高荷重時의  $K_c(J)$ 인가,  $J_{Ic}$ 에 對應하는  $K_{Ic}(J)$ 인가), tanh曲線近似的의 妥當性 등의 문제를 생각할 수 있다. 따라서 上部棚領域을 포함한 새로운 參照破壞靱性曲線에 대해서는 앞으로 彈塑性破壞力學的方法에 따른 시험에 의해 더욱 검토를 추진해야만 한다.

(3) 上部棚領域에서의 破壞靱性評價方法

原子爐壓力容器的 健全성을 유지하는데는 10 CFR50의 요구에 의해 사용기간중 압력용기재료의 살피上部棚에너지가 50ft-lb(6.9kgf-m) 이상이라야 한다. 近年의 원자로 압력용기에서는 이점에 대해서 전혀 문제가 없다.

美國에서 運轉歷史가 긴 원자로에서는 압력용기의 재질에 따라서 中性子照射效果에 의해 이 요구가 만족되지 못할 가능성이 고려된다. 그



러나 이와 같은 압력용기의 健全性 評價方法에 대해서는 지금까지 구체적인 검토가 행해지지 않았다. 다음에 최근 NRC에서 정리한 검토결과를 간단히 소개한다.

評價피라미터로 J積分을 사용하면 構造系의 J와 재료와의 值를 비교함으로서 균열의 평형상태를 평가할 수 있다. 즉, 균열의 進展은 J值를 비교함으로서 평가되며, 그 균열의 進展이 불안정하게 되는가는 tearing係數(T)를 비교함으로서 평가할 수 있다. 이 균열進展과 不安定破壞의 조건은,

$$J_{app} \geq J_{mat}, T_{app} \geq T_{mat} \dots\dots\dots (1)$$

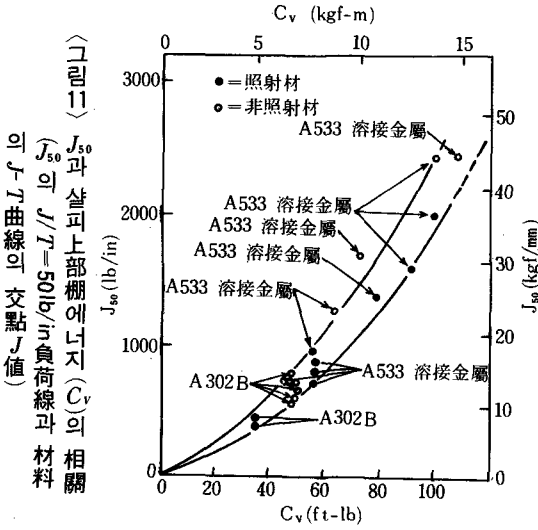
여기서  $J_{app}, T_{app}$ 는 構造系의 J積分値와 tearing係數,  $J_{mat}, T_{mat}$ 는 재료의 J積分値와 tearing係數이다.

彈塑性狀態에 있는 幅廣平板에 균열이 있을 경우는

$$(J/T)_{app} = \alpha \sigma_f^2 / E \dots\dots\dots (2)$$

가 되며,  $J_{app}$ 와  $T_{app}$ 의 관계는 線型이 된다. 여기서 a는 균열의 길이,  $\sigma_f$ 는 流動應力, E는 彈塑性係數이다.

(2)式과 재료의 J-T曲線( $J_{mat} = f(T_{mat})$ )을 비교하여 (1)式的 조건에서 그림10과 같은 破壞限界가 구해진다. 彈塑性狀態의 容器에 관한 J-T法에 의한 解析도 행해졌으며, 모델容器에 대한 실험과 解析에서 그 解析의 타당성이 인정되고 있다.

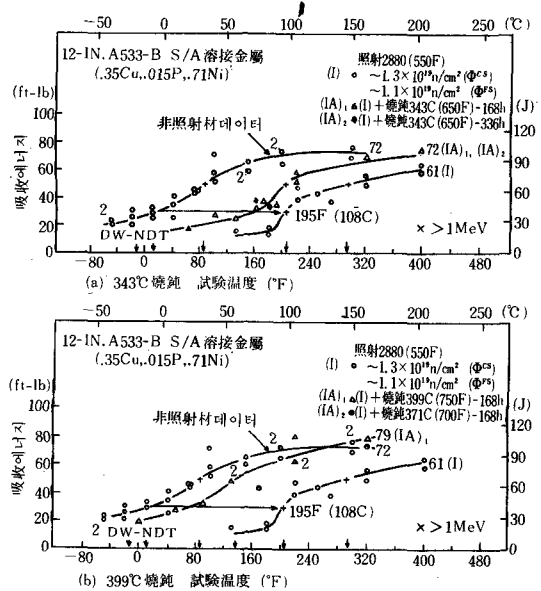


上記の方法는 J-R曲線를 구하는 것이 필요한데, 압력용기에 따라서는 J-R曲線測定 試驗片을 얻을 수 없는 경우가 있다. 이와 같은 경우에는 살피상부棚에너지( $C_v$ )와  $J_{mat}$ 의 相關을 그림11을 사용해서  $C_v$ 에서  $J_{mat}$ 를 추정한다. 그림11은  $(J/T)_{app} = 50 \text{ lb} \cdot \text{in}/\text{in}^2$  ( $0.9 \text{ kgf} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ ) 과 재료의 J-T曲線의 交點  $J_{mat}(J_{50})$ 을 구하고, 그 재료의  $C_v$ 에 대해  $J_{50}$ 을 플롯한 것으로서 中性子照射의 有無를 포함한 각종 압력용기재료에 대한 데이터가 포함되어 있다. 그림11에서 추정되는  $J_{mat}$ 를 限界J值로 하고, 이 J值에 달하는 荷重을 限界荷重으로 한다.

이 방법에서  $(J/T)_{app} = 50 \text{ lb} \cdot \text{in}/\text{in}^2$ 의 假定負荷線이 대단히 안전측의 가정이기 때문에 압력용기의 不安定破壞에 대해서 安全側의 평가를 할 수 있다고 기술되고 있다. 그리고 NRC의 上部棚韌性的의 평가방법으로서 다음과 같이 정해져 있다.

- ① 原子爐壓力容器的의 모든 재료에 대해서 實測의 J-R曲線 또는 그림11의 相關에서 J-T關係를 얻는다.
- ② 規格에 따라서 원자로 플랜트의 定年時의 上部棚에너지를 구하며, 그것이 50ft-lb 이하로 판단되었을 경우에는 이 보고에서와 같은 방법

(그림 12) SA 533 BCl.1 鋼溶接金屬의 照射後燒鈍에 의한 韌性的의 回復舉動



에 의해서 解析을 행하거나 또는 韌性回復의 燒鈍을 한다.

以上 NRC의 사고방식은 上部棚領域에서의 不安定破壞發生에 관한 것으로서 脆性龜裂傳播停止에 대한 고려가 부족하나, 앞으로 검토지침의 참고가 될 것이다.

### 3. 中性子照射材의 韌性回復燒鈍

原子爐壓力容器材料의 中性子照射에 의한 韌性的의 저하가 燒鈍에 의해서 회복되는 것은 일찍부터 알려져 있었는데, 照射後燒鈍에 관한 연구가 실질적으로 충실해진 것은 美國에서 破壞韌性基準이 강화되었기 때문이다. 그리고 최근에는 NRC의 上部棚韌性的의 평가에서와 같이 살피상부棚에너지가 50ft-lb以下가 될 것으로 생각되는 오래된 원자로 압력용기의 健全성 유지의 한가지 방법으로 압력용기의 燒鈍에 관한 연구가 추진되고 있다. 다음은 輕水爐壓力容器에 관한 기술의 現況紹介로서 美國에서의 연구를 중심으로 照射後燒鈍에 관한 연구의 概要이다.

J.R.Hawthorne 등은 照射-燒鈍사이클의 효과에 대해 燒鈍溫度를 변경하여 검토한 결과, 그 시험결과중 SA 533 BCL 1鋼溶接金屬에 대한 照射 및 照射後燒鈍材의 시험결과를 그림12에 표시했다. 살피上部棚에너지는 낮은 온도에서 거의 100% 회복되는데 비해 살피遷移溫度는 高溫 燒鈍에서도 완전히 회복되지 않는다. 이 살피遷移溫度의 回復舉動은 破壞韌性試驗例에서의 燒鈍에 의한 破壞韌性的 회복(그림 1 및 7)과 대응하고 있다.

照射後燒鈍에 의한 韌性的 回復舉動에는 많은 要因이 있으며 그 메카니즘은 불명확한 점이 많으나, J.R.Hawthorne 등은 이와 같은 요인에 대해 검토한 결과 주된 要因은 다음과 같다.

- ① 照射溫度: 低溫照射材일수록 回復量이 크다.
- ② 中性子照射量: 거의 영향을 주지 않는다. 高溫 燒鈍의 경우에 照射量의 증가에 따라 약간 回復量이 커진다.
- ③ 化學成分: 0.3% 이상의 Cu에서는 회복이 늦어진다. 0.7% 이상의 Ni에서는 回復量이 크다. 低溫 燒鈍에서는 Cu, P, S의 영향이 없다.
- ④ 燒鈍溫度: 照射溫度以上の 加熱이 필요하다. 온도상승과 함께 현재 334°C 또는 399°C가 적당한 燒鈍溫度이다.
- ⑤ 燒鈍時間: 168h가 적당한 保持時間, 이 이상에서도 회복은 진행되지 않는다.
- ⑥ 照射, 燒鈍, 再照射의 되풀이: 燒鈍材는 非燒鈍材에 비해 照射에 의한 韌性低下가 크다. 燒鈍을 되풀이 함으로서 破壞韌성을 일정한 레벨로 유지할 수 있다.

다음에 현재 고려되고 있는 實機의 燒鈍方法에는 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 爐心を 꺼내지 않고서의 濕式 燒鈍: 1次系統 冷却材를 넣어둔 채 핵연료의 열을 이용한다. 온도는 343°C 이하.
- ② 爐心を 꺼내고 濕式 燒鈍: 核燃料를 빼내고 1次系統 冷却材를 넣어둔 채 非核熱源에 의해

서 가열한다. 온도는 343°C 이하.

③ 爐心を 꺼내고 乾式 燒鈍: 343°C 보다 고온으로 가열할 때 사용되나, 여러가지의 곤란이 예상된다.

實機의 燒鈍이 행해진 예는 1967년 미국의 軍用爐 SM-1A 爐의 例뿐이며, 현재 사용중인 發電用 原子爐에 대한 예는 없다. 따라서 實機의 燒鈍을 실제로 행하기 위해서는 周邊機器로의 영향, 작업원의 放射線被曝, 주위의 放射能汚染 등 많은 문제가 있으며 상세한 검토가 필요하다.

#### 4. 結 論

發電用 原子爐 壓力容器材料의 中性子照射 효과와 관련해서 中性子照射材의 破壞韌性的의 평가 및 照射後 燒鈍의 효과와 그 적용에 대해 지금까지의 주요한 연구성과와 최근의 동향을 概說했는데, 이 분야에서의 연구실적이 충분하지 못하므로 앞으로 검토해야 할 점이 많다. 中性子照射에 의한 압력용기재료의 기계적 성질의 변화에 관해서는 최근 加壓熱衝擊의 문제도 있으므로 광범위한 연구가 추진되고 있다.



現在 發電用 原子爐의 8割을 占하는 輕水爐는 爐心內的 연료에서 발생한 열을 물을 사용하여 爐外로 운반해내는(水冷却)型式이기 때문에 熱除去의 效率上 물을 極力加壓해서 고온에서도 액체로 사용하고 있으므로 爐心容器는 壓力容器(PV)로 되어있다. 이 압력용기는 核燃料體처럼 교체하는 소모품이 아니고, 爐内部品이나 1次系統의 小部品들처럼 그 부품만을 교환할 수도 없다.

우리나라의 輕水爐壓力容器는 輕水爐의 先發인 미국의 초기의 것이 아니므로 加壓熱衝擊事象의 영향은 미국 초기의 것보다 적을 것으로 고려되며 또한 우리나라 壓力容器의 照射年齡은 아직 상당히 젊다.