

輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

— 中性子照射效果의 冶金學的因子 —

壓力容器用 鋼材의 實際 製造에 있어서는 이론적인 검토외에 대규모 實驗에 의해 확인된 有害因子를 極力排除함으로써 최종제품인 原子爐壓力容器的 健全性 確保를 도모하고 있다. 다음은 中性子照射脆化에 영향을 미치는 여러 因子中 鋼材製造上 특히 配慮가 필요한 化學組成의 영향을 설명한 것이다.

1. 化學組成과 照射脆化 感受性

鋼材의 照射脆化 感受性에 영향을 미치는 因子로서는 일반적으로 다음과 같은 것이 고려된다.

- ① 化學組成
- ② 金屬組織
- ③ 中性子照射量
- ④ 中性子에너지스펙트럼
- ⑤ 中性子束
- ⑥ 照射溫度
- ⑦ 附加應力

이중에서 ①化學組成, ②金屬組織이라는 冶金因子는 鋼材의 제조, 열처리 및 압력용기의 가공단계에서 결정된다. 특히, 화학조성에 대해서는 中性子照射脆化에 미치는 영향이 크다고 생각되므로 輕水爐의 건설초기단계에서 많은 연구가 오랫동안 수행되었다.

즉, 實用爐에 앞서 研究爐에 의한 기초검토에 의해서 어떤 종류의 불순물원소가 中性子照射

脆化를 촉진시키는가가 판명되었고, 그후 20여년에 걸친 實用爐에서의 서베일런스 테스트의 결과도 이를 뒷받침하고 있다. 그 결과 현재는 規格으로 이들 불순물원소에 대해 극히 적은량으로 규제되고 있어서 原子爐壓力容器的 健全性이 향상되었다.

1.1 合金元素의 影響

合金元素란 鋼材의 강도, 韌性 등을 확보하기 위해 의도적으로 鋼材에 첨가하는 원소이다. C, Si, Mn 외에 Ni, Mo, Cr 등이 여기에 해당되며 첨가량은 鋼材의 종류에 따라 다소 다르나, 비교적 많이 첨가하는 것이 특징이다.

表1에 輕水爐壓力容器 鋼材로 사용되고 있는 鋼의 화학조성 허용범위를 나타내었다.

1) C, Mn에 관하여

C와 Mn은 鋼의 기본특성인 강도와 韌性을 결정하는 가장 기본적인 元素이며 Si와 함께 合金設計의 기초가 되는 元素이다.

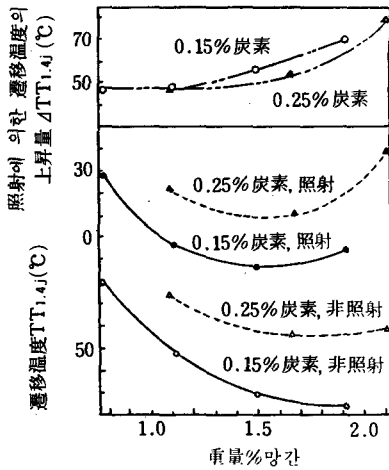
實際로 原子爐用 鋼材를 대상으로 한 研究에서 M. Vacek 등은 實驗室溶解材를 사용해서 C와 Mn의 영향을 검토했다. 그 결과를 그림1에 표시하였다.

C量的 증가에 의해 照射에 의한 遷移溫度의 Shift($\Delta TT_{1.4}$)가 약간 감소하여 C量的 증가는 照射脆化를 약간 완화시킨다. 그러나 이 현상은 C가 적극적으로 照射脆化를 완화시키는 것이 아니고 侵人型原子인 C의 존재가 照射에 의해서

〈表 1〉 原子爐壓力容器鋼材의 化學組成 許容範圍

材 料 規 格 ASME (JIS)		化 學 成 分 (wt %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
主된 初期의 鋼種	鋼板 SA212B	≤0.33	0.15 ~0.30	≤0.9	≤0.04	≤0.05	-	-	-
	板 SA302B	<0.25	"	1.15 ~1.50	≤0.035	≤0.04	-	-	0.45 ~0.60
	鍛 SA105	≤0.35	≤0.35	0.60 ~1.05	≤0.04	≤0.05	-	-	-
	鋼 SA336	≤0.27	0.15 ~0.30	0.50 ~0.80	"	"	0.5 ~0.9	0.25 ~0.45	0.55 ~0.70
主된 現用 鋼種	鋼板 SA533BC1.1 (JIS SQV 2A 相當)	≤0.25	"	1.15 ~1.50	≤0.035	≤0.04	0.4 ~0.7	-	0.45 ~0.60
	鍛 SA508C1.2 (JIS SFQ2A 2 相當)	≤0.27	0.15 ~0.40	0.50 ~1.00	≤0.025	≤0.025	0.5 ~1.0	0.25 ~0.45	0.55 ~0.70
	鋼 SA508C1.3 (JIS SFQ1A 3 相當)	≤0.25	"	1.20 ~1.50	"	"	0.4 ~1.0	≤0.25	0.45 ~0.60

〈그림 1〉 照射脆化에 미치는 C, Mn의 影響

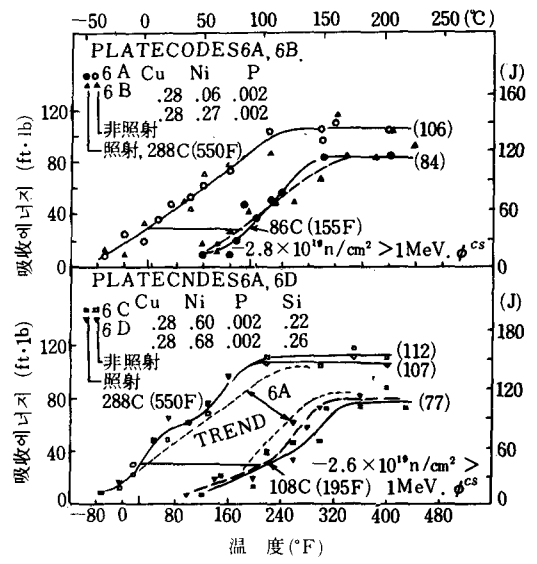


생기는 空格子點과 置換型原子 (Mn) 雙의 소멸을 惹起시켜 置換型原子의 나쁜 影響을 완화한다고 보아야 할 것이다.

Mn量이 1.0%를 넘어서 증가하면 照射脆化는 촉진된다. 그러나 Mn의 첨가는 照射前의 韌性值를 향상시킨다. 이로 인해 照射後 韌性의 절대치는 1.5% 정도의 Mn量에서 가장 양호해 진다. 表1에서와 같이 현재 널리 사용되고 있는 SA533B C1.1 및 SA508C1.3鋼은 1.50% 정도의 Mn이 첨가되어 있어서 앞의 결과로도 바람 직한 수준이라고 할 수 있다.

2) Si에 관하여

〈그림 2〉 照射脆化에 미치는 Si, Ni의 影響



Si의 影響에 대해서는 명확한 定說은 없다. Howthone에 의한 실험결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 兩鋼種에 照射脆化量의 차이가 없으므로 Si量의 차이가 影響을 미치지 않음을 알 수 있다.

한편, Varsik 등은 SA533B 및 SA508鋼에 관한 데이터를 통계적으로 해석하여 (1)式에서 표시하는 量(C. R. : Chemistry Relation)이 照射脆 化量과 關係가 있음 을 유도하였다.

$$C. R. = \frac{1.5Ni + Si + 0.5C + (Mn - 0.5) \times Cu}{0.5 + 0.5Mo} \quad (1)$$

(atomic %)

(1)식에 의하면 Si는 照射脆化를 촉진시킨다. 그러나 Leitz 등은 오히려 Si가 照射脆化를 억제한다고 보고하고 있다.

Cr-Mo鋼에서는 不純物元素(P 등)가 높으면 Si의 증가가 燒炭脆化를 조장한다고 보고되어 있으므로 Si의 영향을 판정할 경우에는 燒炭脆化에 관해서도 고려할 필요가 있다.

Naval Research Lab. (美國)에서 수행된 Howthorne의 研究를 고려하면 SA533B鋼의 규격범위 내(Si:0.15~0.30%)에서는 Si량의 증가가 照射脆化量에 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

3) Ni에 관해서

Ni는 韌性を 손상시키지 않고 강도를 향상시키는 유일한 元素이며, 특히 韌性要求가 엄격한 재료의 제조에 빠질 수 없는 원소이다.

原子爐用 鋼材에서는 주로 韌性向上과 燒入性向上의 관점에서 Ni이 첨가되고 있는데, 특정한 조건하에서는 照射脆化를 촉진하는 것으로 알려져 있으며 많은 研究報告가 있다.

이들의 많은 것은 P, Cu와의 相乘效果를 고려한 검토이며, 하나의 例로 Astafév 등에 의한 Ni, P, Cu와 照射脆化量의 관계를 (2)식에 나타내었다.

$$\Delta T_x = 110 - 1224[C]^2 - 76[Ni] + 129[Cu] + 45.43[Ni][P] + 164[Ni][Cu] - 10320[Cu][P] + 15.8F - 0.17Tirr \quad (2)$$

ΔT_x : 照射에 의한 延性-脆性遷移溫度의 上昇量(℃)

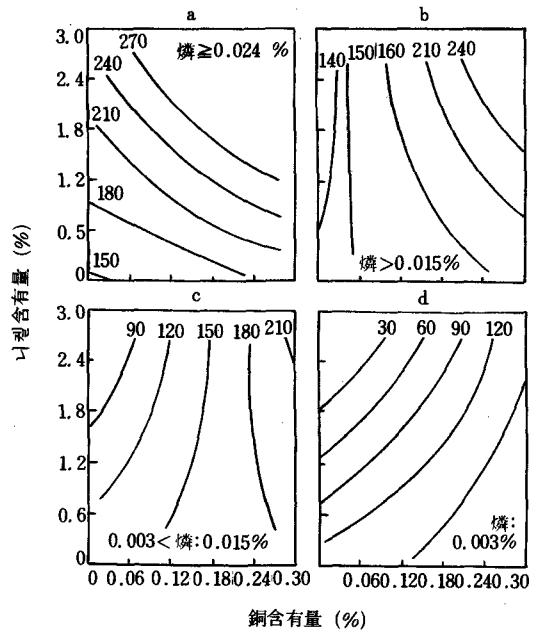
[C], [Ni], [Cu], [P]: 元素量(%)

F: 照射量 10^{19} (n/cm²)

Tirr: 照射溫度(℃)

(2)식을 사용해서 P의 含有量別로 Ni와 Cu의 照射脆化에 미치는 영향을 그림 3에 나타내었다. 그림중의 數字는 遷移溫度의 Shift量을 표시한다.

〈그림 3〉 照射脆化에 미치는 磷, 銅, 니켈의 複合效果



이 그림에서 不純物元素인 P나 Cu가 높을 경우 Ni의 증가는 照射脆化를 촉진시킴을 알 수 있다(그림 a, b). 그러나 P나 Cu가 적을 경우 Ni의 증가는 오히려 照射脆化를 저감시킨다(그림 d).

또한 Hawthorne도 Cu함유량이 많을 경우(Cu=0.28%) Ni의 증가가 대폭적으로 照射脆化를 초래하는데 비해 Cu량이 적을 경우(Cu=0.05%) Ni의 증가에 의한 照射脆化의 촉진은 거의 없음을 나타내고 있다.

따라서 原子爐用 鋼材에서 Ni량의 照射脆化에 미치는 영향을 생각할 때는 Ni의 절대량보다 오히려 불순물원소인 P, Cu의 수준을 먼저 고려해야 할 것이며, 최선의 溶製法으로 제조되는 P, Cu량이 대단히 적은 原子爐用 鋼材에 있어서는 Ni에 의한 照射脆化의 증대는 발생하지 않는다고 생각된다.

4) Mo, Cr에 관하여

Mo, Cr에 관한 검토의 例는 많지 않다. Mo에 대해서는 Varsik가 (1)식에서와 같이 Mo은 照射脆化를 억제함을 나타내고 있다. 한편, Leitz

는 반대로 Mo이 照射脆化를 촉진시킨다고 보고하고 있다.

Cr에 대해서도 역시 Leitz의 報告가 있으며, Cr의 첨가는 照射脆化를 억제한다.

Mo, Cr에 대해서는 충분한 데이터가 없어서 정확한 판단은 곤란하나, 현재로서는 Mo, Cr의

함유량이 특별히 큰 영향을 미치지 않는다고 생각하는 것이 타당하다.

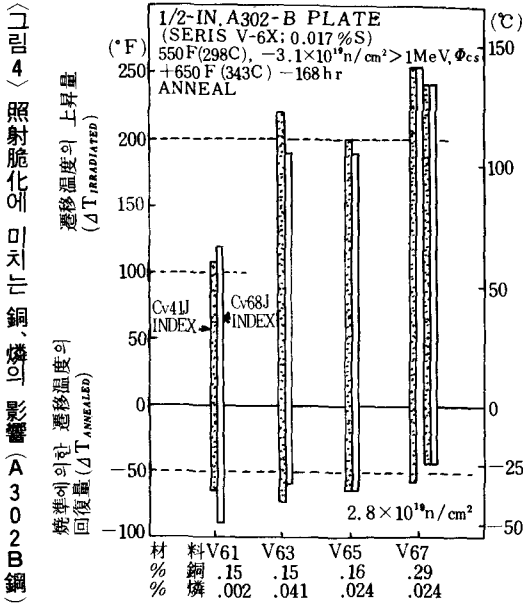
1.2 不純物元素의 影響

不純物元素란 鋼材의 溶製段階에서 제거시킬 수가 없어서 鋼材에 殘存하는 無効成分으로서 때로는 韌性, 溶接性 등의 劣化를 생기게 한다. 이로 인해서 불순물원소의 제거를 목적으로 각종 取鋼精鍊技術이 개발되고 또 原子爐用 鋼材 등 高級鋼에 대해서는 순도가 높은 溶銑(高爐에서 얻어지는 銳鉄)의 사용이나 스크랩管理 등 미세한 제조상의 배려가 이루어지고 있다. 그 결과 현재는 대단히 불순물이 적은 鋼이 壓力容器 製造會社에 공급되고 있다.

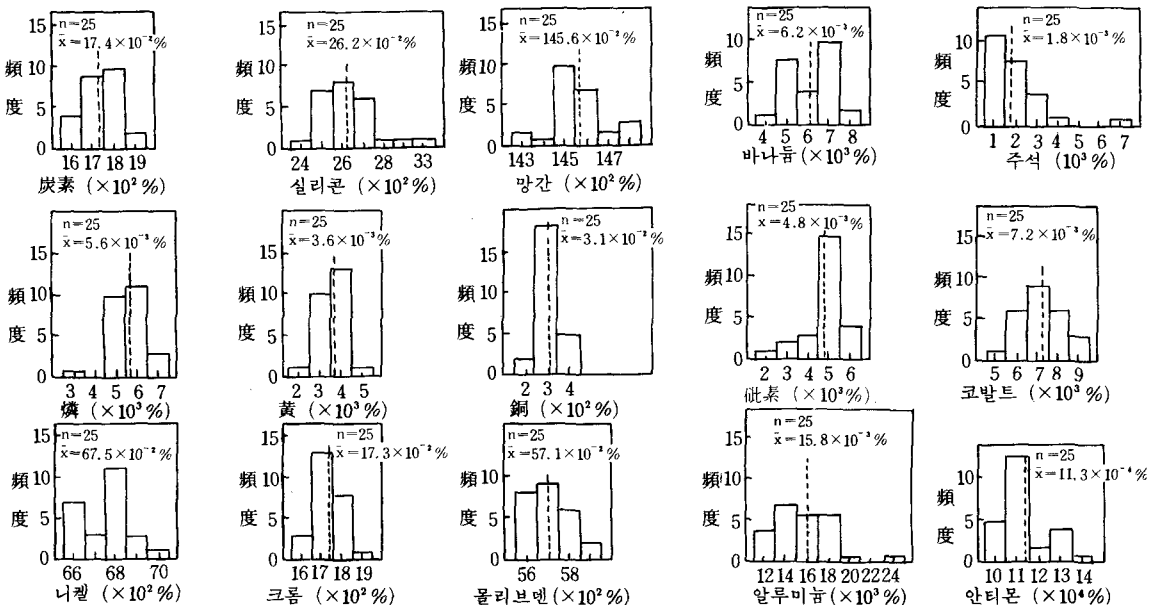
1) P에 관하여

P는 Cu와 함께 가장 照射脆化를 촉진시키는 元素이며 많은 검토결과가 있다. 즉, Astafév의 예도 Hawthorne, Guionnet, Leitz 등의 보고가 있는데, 모두 P의 증가가 照射脆化를 대폭 촉진시키는 것으로 나와있다.

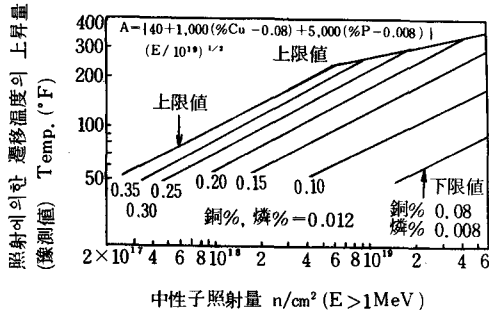
구체적인 예로 Hawthorne가 SA302B 鋼板을 사용해서 행한 결과를 그림 4에 나타내었다. P



〈그림 5〉 RPV用 SA533B C1.1 鋼板(板두께 163mm)의 化學成分 分布



〈그림 6〉 照射脆화에 미치는 磷, 銅의 影響



의 증가에 따라 照射에 의한 遷移温度的 상승량도 대폭 증대하고 있다. 단, 이 검토에서는 0.014%에서 0.024%로 P의 증가에 대한 遷移温度上昇의 증대는 그다지 크지 않다.

USNRC Regulatory Guide 1.99에 의하면 P ≤ 0.008% 이하의 경우 P에 의한 照射脆化는 최소한으로 억제할 수 있다고 한다. 이를 위해 日本에서는 製造되는 原子爐用 鋼材의 대부분을 0.008% 이하의 低水準으로 P를 조정하고 있다.

최근 日本에서 제조된 原子爐用 鋼板의 P 및 Cu 등 불순물원소를 포함한 化學組成을 그림 5에 나타내었다.

2) Cu에 관하여

Cu에 관한 검토는 대부분의 경우 P와 동시에 행해지고 있는데, 모두 有害하다고 報告되고 있다. Cu와 P의 照射脆화에 미치는 영향을 나타낸 대표적인 것으로 USNRC Regulatory Guide 1.99가 있으며, Cu와 P에 의한 遷移温度的 Shift量은 (3)式 및 그림 6에서 豫測된다.

$$\text{遷移温度的 Shift "A"} = [40 + 1000(\%Cu - 0.08) + 5000(\%P - 0.008)] \times [f/10^{19}]^{1/2} \text{ (°F)} \dots\dots\dots (3)$$

f : 照射量 (n/cm², E > 1MeV)

또 (2)式에 의하면 P, Cu와 Ni는 照射脆화에 관해서 相乘效果를 갖고 있음이 지적되고 있다. 照射脆화에 미치는 P와 Cu의 영향이 加算的인가, 相乘的인가는 앞으로의 研究結果를 기다리는 바 크나, USNRC Regulatory Guide가 정한 下

〈表 2〉 現在 提案되고 있는 照射脆化 豫測式 一覽

Astafér	$\Delta T_{\kappa} = 110 - 1,224[C]^2 - 76[Ni] + 129[Cu] + 4,543[Ni][P] + 164[Ni][Cu] - 10,320[Cu][P] + 15.8F - 0.17$ T _{irr} (2) ΔT _κ = 照射에 의한 延性-脆性遷移温度的上昇量(°C) [C], [Ni], [Cu], [P] : 元素量(%) F : 照射量(10 ¹⁹ n/cm²) T _{irr} : 照射温度(°C)
USNRC Regulatory Guide 1.99	遷移温度的 shift "A" = [40 + 1,000(%Cu - 0.08) + 5,000(%P - 0.008)] [f/10 ¹⁹] ^{1/2} (°F) (3)
Guthrie	$\Delta RT_{NDT} \text{ (°F)} = [-10 + 470Cu + 350CuNi] (f/10^{19})^{0.27} + 2\sigma$ (4)
MPC의 Trend Curve	$\Delta RT_{NDT} \text{ (°F)} = (3.58 + 539.9Cu) (f/10^{19})^{0.316}$ (5)
Randall (NRC)의 Trend Curve	高 Ni의 경우 $\Delta RT_{NDT} \text{ (°F)} = [30 + 1,000(\%Cu - 0.05)] (f/10^{19})^{0.35}$ (6) 低 Ni의 경우 > 5 × 10 ¹⁸ n/cm²에 對해서 $\Delta RT_{NDT} \text{ (°F)} = [21 + 747(\%Cu - 0.05)] (f/10^{19})^{0.18}$ (7) < 5 × 10 ¹⁸ n/cm²에 對해서 $\Delta RT_{NDT} \text{ (°F)} = [23 + 800(\%Cu - 0.05)] (f/10^{19})^{0.25}$ (8)
芳 野	$\Delta RT_{NDT} \text{ (Circum)} = 212.583Cu + 49.562Ni + 3.074f10^{18} - 22.267$ (9) $\Delta RT_{NDT} \text{ (Axial)} = 293.199Cu + 60.719Ni + 3.067f10^{18} - 58.656$ (10)

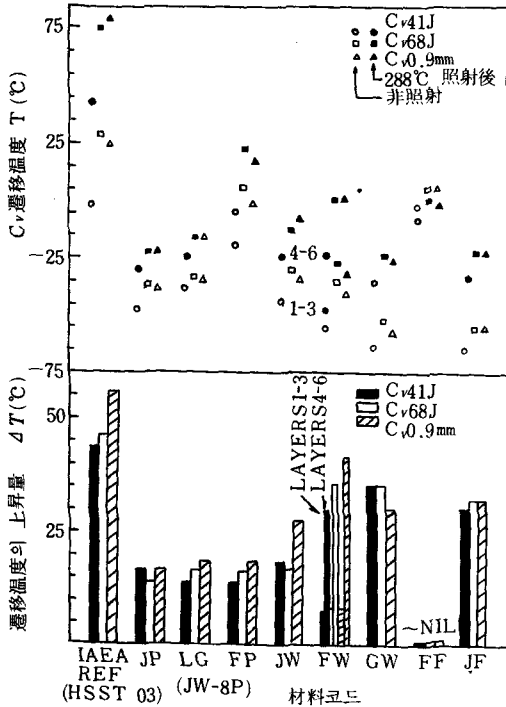
限值 0.08%이하로 Cu량을 제한하는 것이 照射脆化의 방지에 有效할 것이다.

3) Sn, As에 관하여

Guionnet는 Sn의 有害성에 대해서 報告하고 있으며, Leitz는 용접금속에서 As가 照射脆化를 조장한다고 하고 있다. 이 兩不純物元素는 P와 함께 Cr-Mo鋼에서 燒戻脆化를 촉진하는 원소이며 P도 포함해서 燒戻脆化의 관점에서 검토가 필요할 것이다. 단, 이들 元素는 그림 5에서와 같이 P에 비해 含有量이 낮아서 實用上에는 큰 問題가 되지 않는다.

以上 各 元素의 照射脆화에 미치는 영향을 알아보았는데, 實用鋼에서 문제가 되는 것은 不純

〈그림 7〉 IAEA CRP (Phase II) 에서의
各國材料의 照射脆化特性



IAEA REF : 美國材 (HSST03)
 JP : 日本産材 (銅材) FP : 프랑스材 (銅板)
 LG : " FW : 프랑스 (溶接金屬)
 JW : 日本産材 (溶接金屬) FF : 프랑스 (鍛造材)
 JF : " (鍛造材) GW : 西獨材 (溶接金屬)

物元素中에서 영향도가 큰 P와 Cu이며 이들의
 含有量이 높을 경우에 한해서 Ni도 照射脆化를
 촉진시키는 것 같다.

2. 照射脆化의 豫測式

原子爐壓力容器에 사용되고 있는 鋼材의 化學
 成分이나 照射條件에서 稼動期間中の 照射脆化
 를 예측할 수 있다면 壓力容器的 健全性을 추정
 하는데 대단히 유익할 것이다. 따라서 이를 위
 해 많은 검토가 이루어지고 있으며 몇가지의 照
 射脆化豫測式이 제안되고 있다.

豫測式의 一覽을 表2에 나타내었다. 이 중
 에서 가장 널리 사용되는 것은 USNRC Regula-
 tory Guide 1.99에서 채택하고 있는 (3)式이다. 이

式은 不純物元素인 P와 Cu의 영향만을 고려한
 것이나, 오랫동안 鋼材의 成分設計나 實稼動中
 原子爐의 남은 수명예측에 유력한 방침이 되어
 있다.

近年에 合金元素인 Ni가 이들 不純物元素와
 相乘效果를 갖는 것이 명백해졌기 때문에 Ni의
 影響을 포함한 새로운 式이 제안되고 있다. 그
 一例로 Guthrie는 (4)式을 제안하고 있다. 또 As-
 tafév도 P, Cu, Ni, C의 影響을 (2)式으로 나타
 내고 있다.

그 외에 照射脆化量의 豫測式에 관해서는 서
 베일런스 테스트 데이터가 풍부한 美國에서의
 제안이 많으며 (5)~(8)의 豫測式이 있다. 여기
 서 MPC의 경향곡선 [(5)式]에서는 有害不純物
 元素인 P가 고려되고 있지 않는데, 그 이유는
 측정데이터에서 P와 Cu가 비례관계에 있기 때
 문에 Cu를 代表元素로 하여 데이터를 정리했기
 때문이다.

ISES (高温構造安全技術研究組合) 第17委員
 會 172워킹그룹의 활동 일환으로 日本의 芳野
 는 美國 原子爐의 서베일런스 테스트 결과를 해
 석해서 (9), (10)式을 유도했다.

3. 最近의 照射脆化研究 動向

IAEA에서는 美國, 日本, 유럽 여러나라가 중
 심이 되어 오랫동안 照射脆化의 研究를 하고 있
 다. 1977~1983년까지의 CRP (Coordinated Re-
 search Program) Phase II計劃은 美國, 프랑스,
 日本 등의 재료특성이 조사되어 있으며, 그림7
 에 各國材料의 照射脆化特性을 나타내었다.

금년말부터 시작될 예정인 IAEA 프로그램 Ph-
 ase III에서는 不純物이 높은 初期의 原子力鋼材
 와 동등한 材料 및 최근에 제조되고 있는 不純
 物이 적은 材料를 사용해서 照射脆化特性을 평
 가하는 외에 P, Cu, Ni의 상승효과를 확인하기
 위해 이들 元素의 含有量을 계획적으로 변화시
 킨 材料의 照射試驗도 계획되고 있다.