

VVER-440 PWR의 脆性轉移溫度

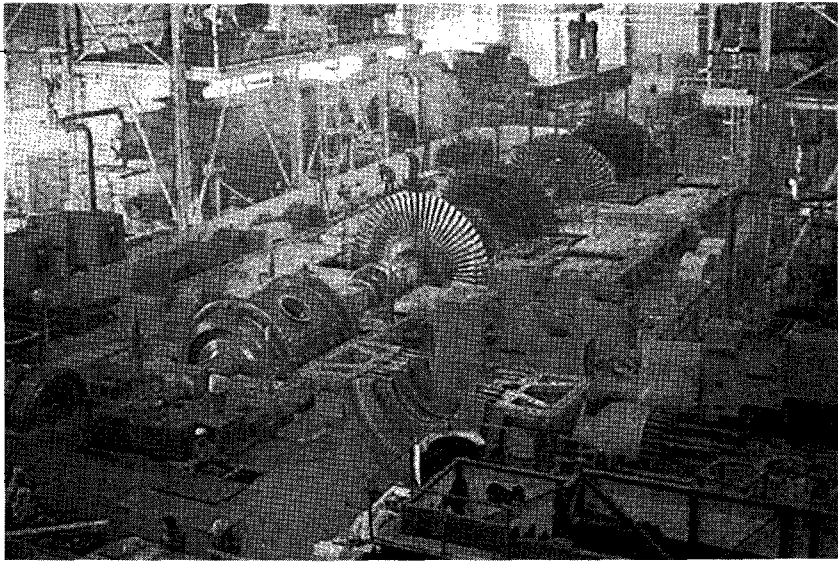
本稿는 原子力の 취성전이온도에 관한 Nuclear Engineering International誌 1990년 7월호 內容을 발췌한 것이다.

VVER-440의 脆性轉移溫度(이하, 전이온도라고 부름)의 상승을 억제하기 위해 ① 재료 개발, ② 특수연료집합체 사용, ③ 취성화 회복 열처리 등이 시행돼 왔다. ①에 관해서는 銅과 燐이 적은 AA급 재료가 개발돼 80년 이후의 모델 V213에 사용되고 있다. ②에 관해서는 가장 바깥 둘레의 연료집합체 일부를 스테인레스 스틸 봉으로 교체해 가급적 고속중성자를 散亂·흡수시켜 압력용기로의 누설을 적게 하는 것으로 핀란드의 Loviisa 원전과 불가리아의 Kozluduy 원전에서 실시돼 약 4분의 1의 중성자속으로 억제하고 있다. ③에 관해서는 연구실 규모의 실험에서 시작한 다음 초기의 원형로라고 할 수 있는 소련의 Novovoronezh-2 호기에서 실제로 열처리를 시험한 후 Novovoronezh-3호기부터 본격적으로 실용화하고 있다. 기초연구 결과 80% 이상의 회복률을 얻기 위해서는 열처리온도 Tannel(°C)를 운전조사온도 Tirrad보다 180~200°C 높게 유지하면 되는 것으로 밝혀졌다. Novovoronezh-3호기에서는 430°C의 열처리온도에서 시행되었는데 그 다음해인 88년에는 소련의 Armenia-1호기, 동독의 Greifswald-1호기에서는 460°C로 시행되었다. 열처리의 조건은 모두 같은 것은

아니고 여러가지 변수를 변경해 최적조건을 모색하고 있는 것 같다. Greifswald-1호기에서의 열처리시간을 152시간이나 되고 전이온도는 190°C에서 90°C로 70%의 회복률에 머물러 있다.

세계의 VVER-440을 <표1>에 표시했는데 이중에서 Loviisa-1호기는 V213형인데도 불구하고 1980년 이전에 건설되었기 때문에 AA급의 재료가 사용되었다. 감시시험편은 Shroud의 바로 바깥쪽의 노중심 수평위치에 장전돼 있는데 銅 0.17%, 燐 0.031%, 니켈 0.17%의 조건에서 불과 285일의 운전일수에도 불구하고 1MeV 이상의 중성자 fluence는 $4.6 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 나 되어 전이온도는 125°C였다. 이것은 감시시험편의 fluence와 전이온도지만 압력용기의 수치는 lead time을 감안해도 매우 높은 것이다. 서방의 원전이 설계수명인 40년간에 받는 fluence를 불과 몇년내에 받는 계산이 된다. 이것은 놀라운 사실이다.

헝가리의 Paks 원전의 압력용기는 소련 특허로 체코의 Skoda Power Machinery Plant에서 제조되었다. 이 압력용기는 Cr-Mo-V 합금의 통칭 15ch2MFA라고 불리우는 AA급 재료로 만들어져 있어 銅과 燐이 낮게 억제돼



〈表1〉 運轉/ 建設中인 VVER-440

불가리아			Greifswald-3	V 230	1978
Kozlodui-1	V 230	1974年 運轉開始	Greifswald-4	V 230	1979
Kozlodui-2	V 230	1975	Greifswald-5	V 212	申請中
Kozlodui-3	V 230	1980	Greifswald-6	V 212	建設中
Kozlodui-4	V 230	1982	Greifswald-7	V 213	建設中
쿠바			Greifswald-8	V 213	建設中
Juragua-1	V 213	建設中	헝가리		
Juragua-2	V 213	建設中	Paks-1	V 213	1983
체코			Paks-2	V 213	1984
Bohunice-1	V 230	1978	Paks-3	V 213	1986
Bohunice-2	V 230	1980	Paks-4	V 213	1987
Bohunice-3	V 213	1984	폴란드		
Bohunice-4	V 213	1985	Zarnowiec-1	V 213	建設中
Dukovany-1	V 213	1985	Zarnowiec-2	V 213	建設中
Dukovany-2	V 213	1986	Zarnowiec-3	V 213	計劃中
Dukovany-3	V 213	1986	Zarnowiec-4	V 213	計劃中
Dukovany-4	V 213	1987	蘇聯		
Mochovce-1	V 213	建設中	Kola-1	V 230	1973
Mochovec-2	V 213	建設中	Kola-2	V 230	1974
Mochovec-3	V 213	建設中	Kola-3	V 213	1982
Mochovec-4	V 213	建設中	Kola-4	V 213	1984
핀란드			Armenia-1	V 230	1977(1988年 閉鎖)
Loviisa-1	V 213	1977	Armenia-2	V 230	1980(1988年 閉鎖)
Loviisa-2	V 213	1981	Novovoronezh-3	V 230	1972
東獨			Novovoronezh-4	V 230	1973
Greifswald-1	V 230	1973	Rovno-1	V 213	1980
Greifswald-2	V 230	1975	Rovno-2	V 213	1981

있다. 1~4호기에 사용한 본재료와 용접부의 화학성분은 <표2>와 같다. 감시시험편은 Loviisa 원전과 같은 형으로 1set가 각각 12개의 Charpy V시험편 및 Charpy 사이즈 10TPB (three point bend)시험편, 6개의 인장시험편 그리고 철, 동, 나오븀의 dosimeter로 되어 있다. dosimeter는 1MeV 이상의 fluence(나오븀은 0.1MeV 이상)를 모니터하기 위한 것이고 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{65}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$, $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ 반응을 이용한 것이다. 1호기의 시험편은 84년에 N0.2 set(이하 84-2로 약칭) 85-3, 86-5, 86-6, 87-4이 채취되었고 2호기도 85-2, 86-3, 86-5, 87-6, 88-4, 또 4호기도 88-2, 89-3, 89-5, 90-6이 채취되었다. 시험결과 흥미있는 결론을 얻었다.

즉, 압력용기와 용접부에 AA급 재료를 사용하면 설계수명을 30년으로 잡아도 전이온도는 100 °c 이하로 억제할 수 있어 특별히 안전을 위협하는 요인은 되지 않는다. 시험편과 압력용기 내벽 부분의 lead time을 평가하기 위해 Monte Carlo 계산을 했다. 압력용기의 안전성

을 보면 소규모 破斷 LOCA사고에 따른 加壓熱衝擊이 가장 심각한 결과를 가져오는데 이것은 가압기 압력완화밸브가 열린 채로 고착되었거나 증기발생기 전열과의 파열에 의해 일어나고 있다. 지금까지 초음파검사나 파괴역학적인 검토를해본 결과 설령 가압열충격이 일어난다 해도 균열이 진전되는 등의 압력용기의 안전성을 손상시키는 일은 없는 것으로 나타났다. 노심과 압력용기의 거리를 변경하지 않고 다만 AA급 재료를 사용하는 것 만으로 이와 같이 전이온도를 억제할 수 있다는 것은 놀라운 일이다. 재료중의 銅 불순물도 특별히 적은 것도 아는데 30년간에 100°C 이하라고 하는 결론은 도저히 믿어지지 않는다. 전이온도를 이 정도로 억제할 수 있다면 확실히 가압열충격도 위협이 되지 않는다. Paks 원전의 감시시험편의 시험결과가 정확한 것이라면 압력용기의 안전성이 우려되는 것은 VVER-440의 V230형만으로 AA급 재료를 사용하고 있는 1980년 이후의 V213형은 관계가 없는 것이다.

<表2> 15 ch 2MFA 의化學成分

	C%	Si%	Mn%	Cr%	MO%	Ni%	V%	P%	S%	Cu%
1號機										
本材料	0.16	0.29	0.54	2.70	0.68	0.07	0.28	0.014	0.018	0.09
鎔接部	0.04	0.64	1.25	1.34	0.50	0.06	0.21	0.014	0.013	0.08
2號機										
本材料	0.13	0.20	0.51	2.87	0.60	0.06	0.34	0.013	0.014	0.07
鎔接部	0.03	0.58	1.26	1.46	0.48	0.05	0.24	0.016	0.013	-
3號機										
本材料	0.17	0.21	0.44	2.85	0.66	0.08	0.32	0.017	0.016	0.08
鎔接部	0.03	0.60	1.13	1.31	0.52	0.05	0.19	0.010	0.015	0.06
4號機										
本材料	0.18	0.27	0.45	2.89	0.71	0.07	0.32	0.017	0.014	0.08
鎔接部	0.04	0.65	1.11	1.34	0.50	-	0.18	0.011	0.017	-