

美國 PWR 壓力容器的 中性子脆性化

경수로의 설계수명은 40년으로 되어있으니 이것을 기준한다면 미국에서는 2000년경부터 수명을 다한 경수로가 속출하게 된다. 일본은 미국 보다 10년쯤 늦게 시작했으니 2010년부터라고 할 수 있다. 미국을 중심으로 경수로의 「長壽命化 연구」가 활발히 진행되고 있는데 이 과정에서 매우 심각한 문제가 대두되었다.

경수로의 수명은 압력용기의 「중성자 脆性化」 정도로 정해진다고 할 수 있다. 경수로의 「脆性轉移溫度 설계치」는 93°C지만 미국에서는 취성화가 과도하게 진행돼 「加壓熱衝擊」과의 관계로 이것을 완화해 132°C로 변경했다.

BWR의 압력용기부의 고속중성자속은 PWR의 것 보다 한단 낮기 때문에 설사 10~20년 장수화한다 해도 전이온도는 93°C 이내가 될 가능성이 많다. 그런데 미국의 대부분의 PWR는 장수화하기 전에 전이온도가 132°C에 달해 장수화는 그렇게 간단치 않다는 것이 판명되었다.

이 전이온도의 안전기준은 원자로의 안전성을 고려할 때 결정적인 의미를 갖는다. 전이온도의 설계치가 왜 93°C로 되어있는지 여러가지 문헌을 찾아보아도 확실한 것을 알 수 없었다. 93°C라는 숫자에 특별한 물리적 의미가 감춰져 있다고는 볼 수 없고 이것을 정하는데 매우 조잡한 방법을 쓴 것 같다. 즉, 93°C를 화씨로 환산하면 200°F가 되는데 어떤 실험치에 안전여유도를 고려해서 반올림한 숫자인 것 같다. 전

이온도의 설계치는 비밀 데이터로 그 근거는 WH사나 GE사만이 알고 있다.

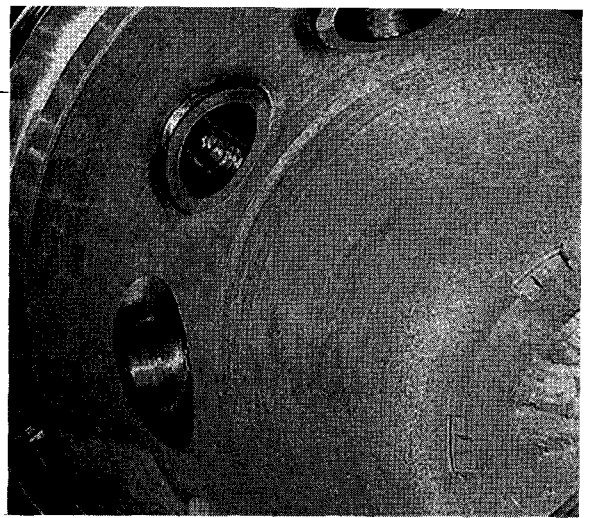
압력용기는 A533B class 1이라던가 A508 class2 또는 3의 「低合金鋼」으로 제작된다. 이들 강재의 전이온도 初期値는 -20°C지만 중성자를 조사하면 「照射損傷」을 입어 결과적으로 전이온도는 서서히 높아진다. Marshall Report에 의하면 조사되지 않은 압력용기의 파괴확률은 연간 평균 1억분의 1이하로 전이온도가 93°C 이하면 40년의 수명 말기에 평균 2,000만분의 1 정도가 된다. 어떤 사고시에 ECCS의 고압주입계통이 동작해 압력용기의 내벽이 전이온도 이하로 냉각되면 「脆性破壞」 확률이 높아진다. 전이온도의 안전기준을 완화하면 압력용기의 파괴확률을 높이는 결과가 된다.

미국에서는 많은 PWR의 전이온도가 93°C를 초과했을 때 NRC에서는 이것들을 廢爐시킬 것인지, 아니면 높은 파괴확률을 각오하고 안전기준을 완화시킬 것인지 검토한 일이 있다. 과거 미국에서 일어난 심한 過渡현상중에서 32건을 적출해 그중 8건을 가열열충격으로 보고

운전기록을 통해 냉각속도나 냉각온도를 분석했다. Crystal River-3호기나 TMI-2호기에서 일어난 가압열충격은 특히 심했는데 당시 미국의 PWR는 350로·년의 운전경험이 있어 이들의 발생확률을 연간 100분의 1 이하로 판단, 2건을 생략하고 冷却下限温度를 320°F로 평가했다. 여기에 50°F의 안전여유도를 감안해 270°F 즉 132°C로 했다. 전이온도의 안전기준을 이렇게 완화함으로써 압력용기의 파괴확률이 2자리나 커져 연간 평균 20만분의 1로 뛰었다. 이것이 미국에서 적용하고 있는 안전기준이다. 미국의 PWR에서 전이온도가 더 높아졌다 해도 이미 이 안전기준을 또다시 완화한다는 것은 안전상 허용될 수 없는 수준에 이르고 있다.

중성자취성화를 촉진하고 전이온도를 높이는 요인은 조사된 「고속중성자 fluence」와 「강제 중의 불순물의 양」이다. 특히 불순물로는 銅의 영향이 지배적이고 니켈, 燐, 유황 등도 무시할 수 없다. 압력용기를 설계하기 전에 중성자 취성화의 메카니즘을 재료시험로를 사용해서 충분히 해명됐을 터인데 이 銅이 취성화를 촉진한다는 것이 판명된 것은 72년이었고 미국기계학회(ASME)의 안전기준에 반영된 것은 74년이었다. 압력용기를 제작하는데 3년, 현장설치에서 운전개시까지 5년이라고 하면 미국의 PWR로 70년대에 운전을 시작한 것은 銅의 영향이 고려되지 않았다는 것을 알 수 있다. 미국은 비교적 건설기간이 길다는 것을 감안하면 80년대 전반기에 운전을 시작한 것은 모두의 심스럽다.

압력용기의 중성자 취성화가 미국에서는 치명적일 정도로 심각한데도 일본에서는 그렇게 문제가 되지 않는 것은 재료의 제조기술이 높기 때문에 銅같은 불순물이 적었기 때문이다. Marshall Report에 의하면 미국의 대표적인 재료에는 0.117 중량%의 銅 불순물이 포함되어 있는데 일본 것은 겨우 0.015 중량% 밖에 포함돼 있지 않다. 그러나 이것들은 대표적인 예로 미국의 압력용기는 용접시에 銅 불순물이 들어가기 때문에 더 나쁜 것이 많다.



〈表〉 미국PWR의 脆性化對策

PLSA	H.B.Robinson-2
HVFD	Turkey Point-2, -4
L	San Onofre-1
	Point Beach-1, -2
	Ginna, Zion -1, -2
	Salem-1, -2, ANO-1
	D.C.Cook-1, -2
	Indian Point-2, -3
	McGuire-1, -2
	J.M.Farley-1, -2
	Fort Calhoun
	Oconee-1, -2, -3
	Three Mile-1
	Crystal River-3
	Rancho Seco-1
	Davis Besse-1

미국에서는 아무런 취성화 저감대책도 마련하지 않고 운전을 계속하면 완화된 안전기준인 132°C도를 초과하기 때문에 「low leakage 노심」을 적극적으로 사용하고 있다. 〈표〉에서 L (low leakage core loading)은 연료장전 패턴을 고려한 low leakage 노심이며 PLSA(part length shield assembly)는 가장 바깥 둘레의 연료집합체의 연료봉을 부분적으로 스테인레스 스틸 봉으로 교체한 것이다. HVFD는 Hafnium Vessel Flux Depression Assembly의 약자다. PLSA를 사용하면 고속중성자속을 중전의 몇분의 1에서 1자리 정도 줄일 수 있다.