

壓力容器的 Annealing 處理

압력용기의脆性化가 동유럽의 많은 VVER-440 원자로의 수명을 단축시키는 요인이 되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 소련의 관련기관에서는 Annealing 기술을 개발했다.

VVER-440 원자로 압력용기의 취성화문제가 1980년대 초에 표면화되었다. 연구결과 취성화의 원인이 압력용기의 鋼재료속의 銅과 磷 성분이 높은데에 있는 것으로 밝혀졌다. 가장 취약한 부위는 압력용기의 노심 높이 부분(중성자속 밀도가 가장 높은 부위)의 円周방향 용접부분으로 밝혀졌다.

VVER-440 원자로의 취성화를 완화시키기 위한 대책으로 다음과 같은 대책이 마련되었다.

- 원자로를 가열 또는 냉각시킬 때의 압력 및 온도의 변화를 최소화시킨다. 수압시험 시행시의 허용온도를 낮춘다.

- 사고시의 원자로용기의 온도변화를 최소화시킨다. 이를 위해 비상노심냉각수를 예열하고 cold leg의 물 대신에 순환루프의 hot leg의 물을 사용할 수 있도록 비상급수펌프 시스템을 개조한다.

- 증기라인이 파열될 때에 1차계통이 냉각되는 것을 방지하기 위해 증기발생기 증기라인과 수증기 헷더 사이에 고속동작 밸브를 설치한다.

- 압력용기에의 중성자 충돌을 줄이기 위해 바깥 둘레의 연료집합체를 스테인레스 강의 차

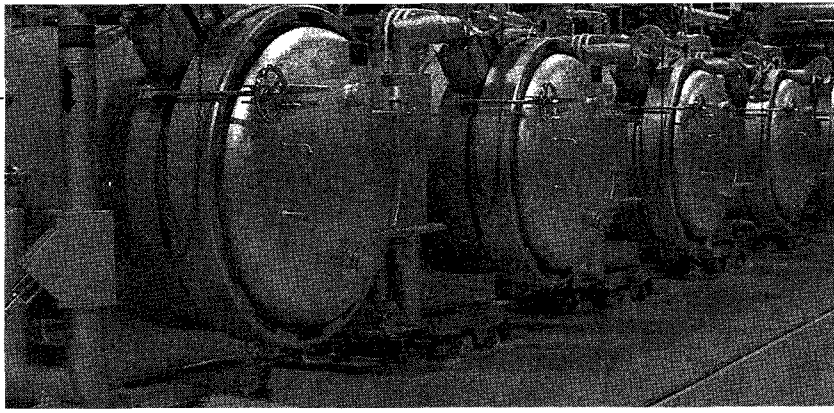
폐집합체로 대체한다.

- 압력용기 특히 노심 높이의 취약한 용접부분을 검사한다.

취성화문제에 대한 장기적인 해결책으로는 압력용기를 고온에서 annealing하는 방법이 있다. 이 방법은 조사된 금속내의 결함부분이 열역학적으로 불안정상태에 놓이게 된다는 원리를 이용한 것이다. 장시간 고온으로 가열함으로써 취성화는 거의 완전히 해소된다.

Novovoronezh-3호기와 Armenia-1호기에서의 annealing실험을 거친 다음 실용적인 annealing방법이 일단의 소련기관들에 의해 개발되었다. 각기관의 연구결과를 취합해 상업적인 서비스를 제공하기 위해 MOKHT Otshig이라고 하는 새로운 기관이 설립되었다. MOKHT Otshig사에 자료를 제공하고 있는 기관은 OKB Hidropress, Kurchatov 연구소, NPO TZNIITMASH, VNIIAES, TZNIL KM. Prometei, PO Izhorskij, Zavod, Atomenergoexport 등이다.

1990년 가을까지 이 상업적인 annealing 방법이 적용된 유닛은 7기로 Greifswald-1, 2, 3호기, Kozloduy-1, 3호기(2호기는 1991년



에 완료예정), Kola-1, 2호기 등이다.

Annealing 처리법

실제 압력용기의 수명을 결정짓는 요인은 취약한 용접부분의 취성화인데 이 문제를 실질적으로 해결할 수 있는 방법이 annealing인 것이다. 즉 안전운전과 압력용기의 수명연장은 용접부분 주위를 annealing함으로써 달성할 수 있기 때문에 압력용기 전체를 열처리할 필요는 없다. Novovoronezh와 Armenia 원전에서 실시한 초기의 실험에서도 용접부분 주위를 1m 길이로 annealing하면 충분한 것으로 나타났다.

소련에서 개발한 실용적인 annealing처리법에 사용되는 가열장치는 가열유니트와 카버(생물학적 및 열적 방어를 위한) 및 이 둘을 연결하는 부품으로 구성돼 있다. 가열유니트는 54개의 가열기가 3개의 冂形 열로 배열돼 있고 각 원형열에는 18개의 전기가열기를 가지고 있다. 전기가열기의 각열은 독립적으로 제어되는 3개의 부분으로 나뉘어져 있는데 각 부분에는 annealing할 부분의 용기온도를 모니터하기 위한 2쌍의 thermocouple이 있다. Thermocouple는 모두 18개가 된다.

Annealing처리를 위한 준비작업은 원자로용기로 부터 연료를 완전히 제거하는데서부터 시작된다. 그 다음 용기에서 물을 빼고 깨끗이 한 다음 건조시킨다. 원자로 Pit내에 있는 용기 주변의 모든 기기의 냉각시스템은 annealing 작업중에 과열되지 않도록 이를 검사한다.

가열, annealing 또는 냉각중에 원자로용기 내로 물, 찬 공기, 기타 유체가 들어가지 않도록 대책을 강구한다.

• 주냉각재계통중의 작업과 관련된 부분을 완전히 분리하지 않은 상태에서는 증기발생기, 원자로냉각재펌프와 가압기에서의 작업은 금한다.

• 모든 주요 게이트밸브가 잠겨있는지 확인한다.

• 원자로냉각재펌프와 주요 게이트밸브와 관련되는 전기회로를 분리한다.

• 냉각Pond의 hydroseal과 연료장전 채널의 누설시험을 한다.

• 원자로의 주요 조인트의 누설여부를 확인하기 위한 inspection pulse tube상의 밸브가 잠겨져 있는지 확인한다.

• 압력용기의 보온재속의 맨홀이 닫혀져 있는지 확인한다.

압력용기 용접부분의 annealing은 $475 \pm 15^\circ\text{C}$ 에서 150시간 지속함으로써 시행된다. 압력용기상태는 특수장비를 사용해 용기내벽에 부착한 thermocouple에 의해 감시된다. 이 시스템은 annealing작업중의 압력용기의 열팽창시에도 thermocouple이 용기벽에 밀착되도록 설계돼있다.

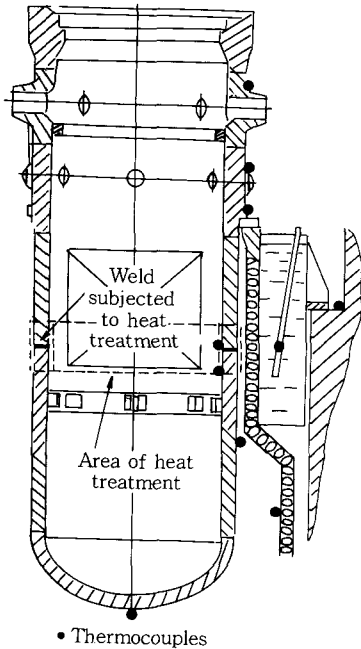
열처리작업중에 압력용기의 강도와 원자로 pit내 기기의 열적 탄성이 저하되는 것을 방지하기 위해 다음과 같은 사항을 지켜야 한다.

• 가열속도는 시간당 20°C 를 초과해서는 안 된다.

• 냉각속도는 시간당 30°C 를 초과해서는 안 된다.

• 용기를 지지하고 있는 shoulder의 온도는 300°C 를 초과해서는 안 된다.

• 生體遮蔽용 탱크수의 수온은 90°C 를 초과해서는 안 된다.



▲압력용기 annealing 작업시의 가열장비와 thermocouple 배치도

- 탱크지지물 주변의 원자로 pit의 콘크리트 온도는 90℃를 초과해서는 안된다.
- 같은 위치의 thermocouple간의 온도측정치의 차는 50℃를 초과해서는 안된다.

온도지속과정이 끝나면 가열장치를 끄고 압력용기를 서서히 70℃ 이하까지 냉각시켜 물로 채운다.

품질보증

압력용기의 annealing처리에서는 용기의 재질분석과 열처리의 품질관리가 특히 중요하다. VVER-440 원자로 압력용기 annealing처리 과정에는 압력용기의 특성확인고 재료샘플채취와 경도측정(耐蝕 피복이 안돼있는 압력용기의 경우)을 통한 기계적 특성의 회복상태의 평가 등이 포함된다. VNIAES(全蘇원자력발전소 운전연구소)는 원자로압력용기의 내부표면으로부터 용접부분의 샘플을 채취하기 위한 장치를 개발, 제작했다. 이 장치는 압력용기벽을 5mm

깊이 이상 관통하지 않고 화학분석을 할 수 있을 정도의 크기의 금속편을 채취하고 샘플을 채취한 곳을 연마하도록 되어있다.

샘플 채취는 3개소에서의 용접軸에 따라 이루어진다. 샘플의 화학분석을 통해 용접부분의 燐과 銅의 불순물량을 알아내고 열처리된 원자로용기의 脆性강도를 계산에 의해 체크할 수 있다.

硬度측정은 열처리 전후에 실시하게 되는데 여기에는 VNIAES에서 설계, 제작한 원격조종 자동경도계인 DT-4M이 사용된다. 이 경도계는 원자로용기 3개점에서의 용기내면의 Brinell 경도를 측정하게 되어있다. 측정점은 용접軸 위와 아래의 샘플채취점에 매우 가까운 곳을 택한다.

실용적인 Annealing장비

원자로용기 annealing작업은 유니트의 예방보수기간중에 약 15일간 실시되는데 이 작업은 샘플채취와 열처리 전후의 경도측정작업으로 이루어진다. 소련은 현재 2세트의 annealing장비를 보유하고 있는데 지금까지 이 장비를 사용해 매년 모두 4번의 annealing작업을 실시해왔다. 이 열처리장비는 조립식이어서 소련국내외의 원자력발전소에서 사용할 수 있다. 제염부분은 별도로 돼있어 이 작업을 보다 효율적으로 철저히 할 수 있고 장비수동에도 편리하다. 완전조립된 장비는 크지만 각부분이 용기속에 별도로 포장되어 도로, 철도 또는 선편으로 수송이 가능하다.

같은 용기에 annealing처리를 반복해도 되느냐 하는 문제에 대해서는 더 연구가 필요한 것으로 여겨지고 있다. 최근의 연구에서 샘플을 460℃로 가열해 이 온도를 1,500~3,000시간 동안 유지했었는데 열에 의한 노화현상을 발견할 수 없어 원자로용기에 annealing처리를 반복해도 지장이 없는 것으로 나타났다(최소한 총 1,000시간의 가열유지시간까지는). 발전소 운영자들은 정기적으로 압력용기를 annealing처리하는 프로그램을 마련할 것을 고려중이다.