

PWR 사용후핵연료 건식저장 구조재료 적용 현황

이영호, 양용식, 방제건, 김형규, 송근우, 최종원
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 leevh@kaeri.re.kr

현재까지 CANDU형 원전을 제외한 국내 경수로에서 발생하는 사용후핵연료는 모두 습식저장으로 각 발전소 내에서 보관하고 있으며, 저장시설 확충을 위한 조밀랙 설치를 고려하더라도 2016년에 이르러 포화상태를 이룰 것으로 예상된다. 또한, 사용후핵연료 발생량을 획기적으로 줄일 수 있는 Pyroprocess 공정과 소듐고속로(SFR) 기술은 현재의 진행 상태로 보아 실용화하기까지 상당한 예산 및 시간이 필요하다. 따라서 아직까지 사용후핵연료 처리방식에 대한 국가차원의 정책이 명확해진 않지만 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는 건식저장방식이 유일한 대안으로 고려되고 있다. 건식저장의 장점은 사용후핵연료 냉각을 자연대류 방식으로 수행하므로 추가적인 전력이 필요 없으며(단, Vault 방식 제외), 주기적인 관리 및 모니터링을 통하여 장기간 동안 건전성을 유지할 수 있다는 것이다(표 1 참조). 또한 습식저장에 비해 제작 및 관리비용이 저렴한 특징을 가지며(예로써 2004년 기준으로 5,000 ton의 사용후핵연료를 저장할 때 건식저장에서는 USD 1,090,500이 필요하나 습식저장에서는 USD 2,440,000이 필요), 비용 및 제조성 관점에서 Cask의 재질을 금속보다는 콘크리트를 우선적으로 선호하고 있다[1]. 이에 따라 다양한 건식저장 시스템 중에서 수평식 NUHOMS[®] Cask가 미국에서 현재 상용으로 널리 사용되고 있다[2].

한편, 국내 경수로형 원전에서 경제성 향상을 위해 적용하고 있는 고연소도 핵연료는 사용후핵연료의 양을 감소시키는 장점이 있으나 사용후핵연료 자체의 건전성은 상대적으로 취약하게 된다. 따라서 고연소도 사용후핵연료 건식저장 시스템을 국내 독자 기술로 제작하기 위해서는 피복열 증가가 추가적인 피복관 손상을 발생시키지 않는다는 것을 입증해야 하고 관련 모델을 개발하여 이에 대한 새로운 건전성 기준이 수립되어야 한다[3]. 이것은 결국 건식저장 시스템 저장환경 조건의 변화로 이어지며 장기 저장 기간동안 저장 시스템의 구조재료/부품의 특성 변화를 일으킬 수 있다. 따라서 고연소도 사용후핵연료를 적용하기 위한 건식저장용기의 구조재료 및 부품에 대한 장기 건전성 기준을 분석하고 이를 근거로 장기 열화특성을 평가해야 한다.

표 1. 사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel, SNF) 저장방식 장단점 비교[1]

저장형태	장점	단점
습식저장		
Pool	1. Inspection, 2. SNF changing	1. Purity, cooling and H2O level control 2. Corrosion
Racks modification	1. Inspection, 2. SNF changing 3. More space provided in pools	1. Purity, cooling and H2O level control 2. Corrosion
Rods consolidation	1. More space provided in pools	1. Purity, cooling and H2O level control 2. Corrosion
Centralized pools	1. SNF cylinders mobility	1. Purity, cooling and H2O level control 2. SNF transportaion
건식저장		
Vaults	1. No SNF corrosion	1. Lack of inspection, 2. Forced cooling
Silos	1. No SNF corrosion, 2. Passive cooling	1. Lack of inspection
Metallic casks	1. No SNF corrosion, 2. Passive cooling 3. Tranport cask is the same as storage 4. Casks mobility	1. Lack of inspection
Concrete casks	1. No SNF corrosion, 2. Passive cooling 3. Tranport cask is the same as storage 4. Casks mobility, 5. Lower cost than metallic	1. Lack of inspection

SRP(NUREC-1567)에서는 최소한 20년 이상 건전성을 유지하기 위해서는 피복관의 허용온도가 정상/비정상 상태시 각각 380℃/570℃ 이하로 유지되어야 한다고 명시하고 있다. 피복관의 허용 온도를 명시하는 이유는 온도 및 연료봉 내압 증가에 의한 hoop stress가 피복관의 Creep 현상을 발생시키기 때문이다. 이와 유사하게 Cask 표면의 허용온도 또한 명시하고 있는데 최대 허용온도가 명시된 이유는 재질

강도의 변화와 균열생성을 발생시키는 열 및 인장응력을 피하기 위함이다. 특히 구조재료의 열화(Creep, 피로, 균열성장 및 부식 등)는 환경(온도, 습도 등) 및 조사량에 매우 민감하며, 건식저장 환경을 모사한 부식 실험 결과(그림 1)로부터 적용 재질의 부식속도를 유추할 수 있으나 단기간의 실험결과를 이용하여 추정하는 방법이 대부분이다. 또한 겨울철 저온에서도 취성과파괴 등과 같은 금속 구조물 열화, Seal 재료의 탄성력의 손실 등이 고려된다. 무엇보다도 Cask 표면온도의 제한은 저장된 사용후핵연료의 피복판 온도를 허용한도 내에서 유지하기 위함이다. 일반적으로 적용하는 최대 및 최소 허용온도 범위는 Cask 재질 및 적용환경에 따라 다소 차이가 있으나 대략 각각 72~75°C/-13~-15°C를 유지한다. 구조재료의 경우 취급 시 문제가 될 수 있는 구조변형을 방지하기 위해서 Basket과 Canister의 기계구조는 열/구조 응력, 부식, 환경영향 등을 충분히 고려하여 적용하고 있다.

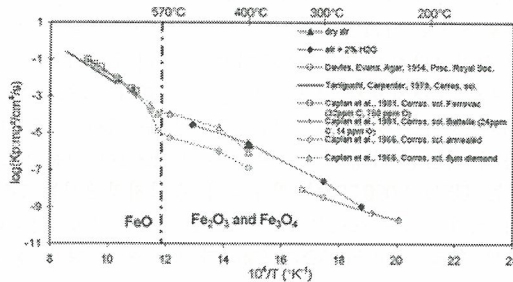


그림 1. 건식저장 환경 모사조건에서 온도에 따른 부식 속도상수[4]

일반적으로 건식저장 구조재료로는 차폐재가 도포된 스테인레스 강, 저탄소강(low carbon steel) 등이 사용된다. 스테인레스강은 건식저장 환경에서 부식속도가 매우 느린 것으로 알려져 있으나 국내 원전 모두 해안가에 위치한 것을 고려해 볼 때 염분이 많고 고온다습한 여름철에서는 부식이 빠르게 진행할 수 있다. 특히 습기가 많은 환경하에서 조사에 의한 질소산화물을 형성하게 되는데 이때에는 용접부 등과 같은 금속학적으로 취약한 부위에 국부적인 부식손상을 발생시킬 수 있다. 국외에서 14년 동안 관찰한 결과, 스테인레스 강의 basket 및 lid에서는 별다른 부식손상이 없는 것으로 보고하고 있으나 국내의 기후조건과 다소 상이하므로 이에 대한 충분한 연구가 필요하다. 저탄소강은 Cask, 냉각핀 및 Basket assemblies (Zn 혹은 Al 코팅)에 적용되며 용접부에서의 탄화물 석출을 억제, 재질 예민화 현상을 현저히 줄일 수 있다. 또한 부식환경하에서 모재인 탄소강 대신 코팅재질(Zn 혹은 Al)이 우선적으로 산화되므로 주기적인 관리를 통해 열화를 최소화 할 수 있다. 건식저장용 Cask 및 Canister에 적용되는 금속 seal의 재질은 스테인레스 강, 인코넬 합금 등이 적용되거나 혹은 알루미늄, 은 및 구리와 같이 연성이 큰 재질을 코팅하여 사용한다. 일부 건식저장 시스템은 저장 중 누출을 감지하기 위하여 Double O-ring을 적용, 두 seal 사이의 공간에서 압력을 모니터링 하여 건전성을 확인하며 일부 O-ring에서는 Galvanic 부식에 의한 O-ring 손상을 보고하고 있다.

건식저장 시스템에 적용되고 있는 주요 구조재료/부품에 대한 요건 및 재료/부품의 현황으로부터, 고연소도 사용후핵연료의 저장과 참조 연소도 사용후핵연료의 50년 이상 장기 저장을 위해서는 국내 사용후핵연료 특성을 고려한 고유 수송/저장 시스템 선정 단계에서 예상되는 열화거동 특성을 평가해야 하며 이를 이용하여 구체적인 구조재료/부품 적용기준을 설정할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] 'Advantages on Dry Interim Storage for Spent Nuclear Fuel', First American IRPA Congress 2006.
 [2] 'Spent Fuel Storage-Dry Storage Options and Issues', International Conference on Nuclear Energy for New Europe 2007.
 [3] 'PWR 사용후핵연료 건식저장기준 현황 및 국내 핵연료 적용성 평가', 2006년도 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집.
 [4] 'Dry Oxidation Behaviour of Metallic Containers during Long Term Interim Storages', ATALANTE 2004 Advances for future nuclear fuel cycles, France.