

중수로 사용후핵연료 장기저장 건전성 검증방안

정성환, 정운창, 박종길

한국수력원자력(주), 대전시 유성구 유성대로 1312번길 70

shchung@khnp.co.kr

1. 서론

사용후핵연료 건식저장은 무동력(passive) 냉각 계통 구비, 화재, 충돌, 폭발 등의 사고조건은 물론 지진, 지진해일, 태풍, 홍수 등 자연재해에 대하여도 건전하며, 복잡한 설비가 필요없고, 운영 비용이 저렴하고, 용량확장이 용이하며, 장기저장 건전성 유지 등 습식저장에 비해 유리한 점이 많기 때문에 1980년대부터 각국의 원전에서 여러 종류의 건식저장시설이 운영되고 있다. 그러나 저장시설이 제한된 수명기간동안 구조물과 재료에 대하여 시간계약을 받기 때문에 IAEA를 비롯하여 미국, 일본 등은 사용후핵연료 장기저장에 대한 안전한 성능을 보장하고자 노력하고 있으며, IAEA는 장기저장에 대하여 주기적으로 평가하여야 한다고 하였다. 우리나라도 월성에서 1992년부터 중수로 사용후핵연료 건식저장시설을 운영해 오고 있는데(Fig. 1), 중간저장시설의 확보가 불확실하여 장기저장이 지속될 가능성이 높고, 후쿠시마 사고이후 사용후핵연료 저장시설에 대한 건전성 제기가 집중하고 있으므로 장기저장관리에 대한 안전성을 확보하고 나아가 대국민 수용성을 제고할 필요가 있다. 이를 위하여 중수로 사용후핵연료 장기저장에 대한 건식저장시설의 건전성 검증방안을 모색해보고자 한다.

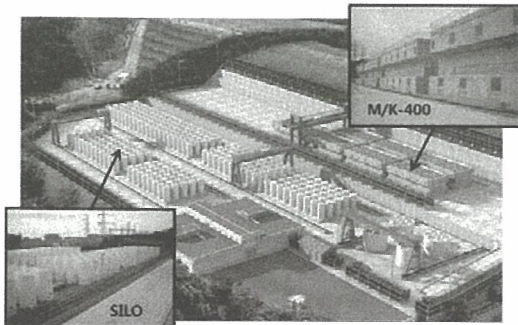


Fig. 1. 월성 중수로 사용후핵연료 건식저장시설.

2. 본론

월성원전의 중수로 사용후핵연료 건식저장시설은 2가지 방식의 건식저장계통이 운영되고 있는

며, 캐나다 AECL에서 개발한 콘크리트 사일로와 한수원(주)와 AECL이 공동으로 개발하여 재료 및 부지 효율성을 높인 M/K-400 콘크리트 모듈이 있다. 콘크리트 사일로(Fig. 2) 현재 300기(전체용량 162,000번들), M/K-400 콘크리트 모듈(전체용량 168,000번들)은 현재 7기가 설치되어 있다. 콘크리트 사일로는 1991년부터 4단계에 걸쳐 시공되어 1992년부터 사용후핵연료를 저장하기 시작하였으며, 콘크리트 모듈은 2010년부터 저장이 개시되었다. 이러한 건식저장시설에서의 사용후핵연료 장기저장 건전성 검증을 위한 열화메커니즘 분석·평가 및 장기거동에 대한 기술적 차이 등을 분석할 방안을 살펴보았다.

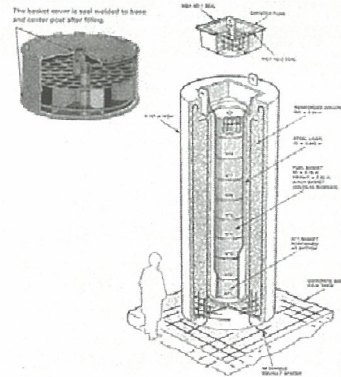


Fig. 2. 콘크리트 사일로 건식저장계통.

핵연료는 원자로의 고온 고압으로 인한 하중으로 변형되고 재료에 영향을 미치는 화학적 부식이 발생된 상태로 방출되어 저장시설에 저장되는데, 방출초기 고온의 사용후핵연료는 습식저장조의 상당기간 저장되었다가 다시 건식저장계통에 이송, 저장되어 고온 분위기에서 저장된다. 이러한 가혹한 열적조건에 대하여 연료의 기계적 또는 화학적 열화거동을 평가하여야 한다.

미국 10 CFR Part 72에 따른 건식저장시설의 구조물, 계통 및 구성품의 기술기준은 열적 성능, 방사선 방호, 제한계통, 미임계 및 연료회수성을 유지하는 것이다. 열적성능은 내외부의 열을 전달하는 것으로, 열적성능의 유지에 대한 장기열화는 열을 전달하는 능력을 저하시키는 것을 포함하는데, 내부의 열화메커니즘은 내부로의 공기유입과

관련이 있으며, 유입된 공기는 열전달을 위한 표면을 부식시키고 열전도도를 떨어뜨린다. 공기는 기밀재의 파괴와 내부벽면의 부식으로 유입된다. 차폐에 대한 방사선방호는 차폐재의 차폐성능을 유지하여야 하는데, 주요 차폐재를 콘크리트를 사용하는 저장계통은 콘크리트의 균열, 파쇄 또는 과도건조가 차폐성능을 감소시킨다. 격납기능은 기체를 포함한 방사성물질의 누설이 없음을 보장하여야 하는데, 특히 공기유입을 방지하여야 한다. 미미계 유지를 위하여 최초의 저장구조와 기능이 입증되어야 하는데, 비정상운전 또는 사고로 인하여 기계적 손상과 공기유입에 인한 부식으로 건전성이 손상될 가능성이 있다. 장기저장 이후의 사용후핵연료 회수성을 보장하기 위하여 계통내부 및 연료자체의 건전성을 유지하여야 하는데, 내부구조물의 기계적 변형과 공기유입에 인한 부식으로 연료인출이 어려울 가능성이 높다.

사용후핵연료 장기저장에 영향을 미치는 열화메커니즘은 사용후핵연료와 건식저장계통에 대한 열화메커니즘으로 구분된다. 사용후핵연료 열화메커니즘은 피복재와 연료요소에 대하여 구분할 수 있는데, 피복재 열화메커니즘은 creep(크리이프), DCCG(확산제어공동성장), 수소영향, SCC(응력부식균열), 산화, thermal annealing(열적풀립), crud 파쇄 등이 있으며, 연료요소 열화메커니즘은 파쇄, 산화 등이 있다. 이러한 메커니즘이 최초 저장기간동안 연료봉에 변화를 가져오는지, 장기저장동안 계속 작용하는지, 장기저장시 규제요건을 만족시키지 못하는 정도로 연료가 현저하게 열화되는지를 평가하여야 한다. 건식저장계통 열화메커니즘은 온도상승으로 인한 부식, 고온으로 인한 증성자차폐재 열화, 고온으로 인한 콘크리트 열화, 금속 내외부표면의 습분조건 부식, 정상조건 온도변화로 인한 피로, 방사선분해로 인한 부식과 금속의 경화 등을 야기하는 방사선영향 열화 및 일반적으로 건식저장시설 구조물에 사용되는 시멘트와 보강재를 포함한 콘크리트의 균열, 화학반응 등으로 인한 콘크리트 열화 등이 있다. 저장동안 붕괴열은 건식저장시설 내에서의 온도를 증가시키는데, 저장동안 잔열제거능력이 현저히 감소하지 않으면 온도는 저장기간이 길어질수록 감소할 것이다. 온도상승은 열적 활성화 열화과정이 심화되고 건식저장시설에서의 관련과정은 응력 및 연성의 증가로 인한 피복재 크리이프, 피복재의 수소화물 배치, 금속의 부식증가, 차폐재 열화, 콘크리트 건조 및 균열 등을 포함한다.

사용후핵연료 건식저장환경에서 연료와 재료의 열화 및 건전성에 대하여 체계적으로 평가하는

것이 필요하며, 저장시설에 대한 효과적인 관리는 저장시설의 응력부식균열로 인한 열화를 완화시키는 것이 중요하므로 먼저 시설의 구성재료와 저장환경을 이해하여야 한다.

각국은 사용후핵연료 저장시설의 저장가능기간에 대하여 심도있게 논의하고 있으며, 저장확장, 간접사항 및 최종대안의 요건만족에 직면하고 있는데, 신뢰성있는 저장으로 경제적이고 적합한 대안을 마련하고자 하고 있다. 저장에서 가장 중요한 요건은 저장기간의 종료후 사용후핵연료의 회수를 보장할 수 있어야 하는데, 건식저장계통에서 인출되는 사용후핵연료는 운반 또는 영구처분에 대한 기술적 요건을 만족시키기 위하여 건전성을 유지하여야 한다. 이를 위하여 IAEA는 사용후핵연료 장기저장을 위한 건식저장시설의 열화관리 프로그램 및 기술기준을 수립하였으며, 장기저장 요건으로 건식저장계통은 설계수명의 이상을 보장하여야 하며, 안전성 및 환경영향을 평가하여야 하며, 연료의 격납에 대한 열화가능성을 재평가하여야 하며, 감시프로그램을 수립하여야 하는 등을 제시하고 있다.

3. 결론

중수로 사용후핵연료 장기저장에 대한 안전한 성능을 보장하기 위하여 건식저장시설과 사용후핵연료의 열화가능성에 대한 메커니즘 분석, 장기저장에 대한 기술적 차이분석 등 건전성 검증을 위한 기술확보는 물론, 건식저장에 대한 장기관리 프로그램을 수립하는 것이 필요하다.

4. 참고문헌

- [1] Nucleonics Week, "Long-Term Spent Fuel Storage a Necessity, IAEA Says", Vol.51, 2010. 6. 3.
- [2] EPRI Technical Report, "Technical Bases for Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel", 1003416, 2002.
- [3] EPRI Technical Report, "Dry Cask Storage Characterization Project", 1003010, 2001.
- [4] Julia Milman et. al, "Assessing Managing Aging of Nuclear Safety Related Concrete Structures-Recent AECL Experiences", Transaction of SMIRT19, 2007.
- [5] IAEA Technical Report Series, "Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities", No.443, 2006.
- [6] IAEA Safety Standards, "Storage of Spent Fuel", Draft Safety Guide DS371, 2008.