

건식저장시 사용후핵연료의 건전성을 평가하기 위한 단위시험 장비 구축

국동학, 장정남, 권형문, 김성근, 김도식
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
syskook@kaeri.re.kr

1. 서론

최근 사용후핵연료 건식저장은 습식저장에 비해 설치와 확장성이 용이하고 유사시 이동이 편리하며 사고시 상대적으로 안전하다는 측면에서 현실적인 사용후핵연료 관리방안으로 널리 적용되고 있다. 사용후핵연료 건식저장의 최종 목표는 시설의 운영기간동안 사용후핵연료에 대량 파손이 발생되지 않도록 하며 궁극적으로 시설 운영 종료 시에도 회수성을 보장하는 것이다[1]. 이러한 회수성은 건식저장이 영구적인 해결방안이 아닌 '중간' 혹은 '임시'의 성격을 태생적으로 갖고 있기 때문에 그 중요성이 강조되고 있다.

최근 미국에서는 유카마운틴 처분장 프로젝트가 유보되면서 상대적으로 건식저장에 대한 의존도가 상당히 높아졌고 일부에서는 '영구 저장'이라는 새로운 개념도 논의가 되고 있는 상황이다. 그러나 이 경우에도 저장시설의 운영 종료시점에서의 사용후핵연료의 건전성 예측은 환경 영향 평가 측면에서 더욱 중요해진다. 심지층 처분의 경우 보수적 계산을 위해서 사용후핵연료의 건전성이 매우 빠른 시간 이내에 유실되어 방사성핵종이 처분장 주위로 침출되는 것으로 가정하여 백만년 이후 생태계에서의 피폭량을 최종적인 평가 기준으로 사용하고 있다. 그러나, 미국에서 현재 고려중인 이백년 이상의 초장기 저장(extended storage)의 경우와 아직 초기 개념 단계에 불과한 영구 저장의 경우 사용후핵연료의 건전성이 어느 시점에서 유실되는가에 따라 환경영향평가의 선원 평가에 많은 영향을 미치고, 심부지질이 아닌 지상위에 놓인 저장시설로부터 누출되는 방사성핵종의 영향은 처분에 비해 더욱 심각한 상황을 초래할 것이기 때문이다.

건식저장 시스템의 중요한 안전성 평가 항목들에는 구조적 안전성, 격납기능, 차폐, 미임계, 열적 안전성 및 재료적 안전성 등이 있으며, 마지막의 두 가지 안전성 항목은 사용후핵연료 건전성에 가장 많은 영향을 미친다. 건식저장 시스템 내의 최대 온도 값을 갖는 피복관은 시스템 설계 기준

에 핵심적인 영향을 미치며, 또한 이 온도는 자연 냉각을 기본으로 하는 건식저장 시스템에게 우리가 설정할 수 있는 유일한 항목이기도 하다[2]. 사용후핵연료의 건전성을 약화시키는 주요 열화기구들이 다양하게 있지만, 건식저장 중에는 크립과 수소에 의한 효과가 가장 중요하게 작용한다. 왜냐하면 이 두 가지 이외의 열화기구들은 대부분 원전 운영이 끝난 후부터는 더 이상 전개되지 않기 때문이다. 대표적으로 부식을 예를 들 수 있다.

따라서 가까운 시기에 사용후핵연료에 대한 가장 현실적인 관리방안으로 고려될 건식저장 시스템의 안전성을 평가하기 위해서 크립시험과 수소화물 재배열 시험은 필수적인 단위시험(single effect) 연구항목이다. 최근 한국원자력연구원 내의 조사후시험시설 방사선구역에 이 시험장비들이 설치되었으며 현재 성능검사 중이다.

2. 본론

2.1 평가 기준 핵연료

평가에 사용되는 피복관은 한국에서 발생한 약 78%의 사용후핵연료에 사용된 Zircaloy-4 이다. 연소도는 50,000 MWd/MtU 이하이며, 10년 냉각된 사용후핵연료를 대상으로 한다. 실제 사용후핵연료 피복관 뿐만 아니라 상대적 비교분석과 조사시험 이전 시험절차 안전성 확인 측면에서 사용후핵연료를 모사하는 수소 함유 미조사 피복관에 대한 시험도 같이 수행한다.

2.2 크립 시험

건식저장 운영 초기에는 핵분열기체에 의한 봉내압에 의해 바깥쪽으로 진행되는 크립 현상이 건식저장에서 가장 중요한 열화요인이라고 생각하였다. 그러나, 최근에는 크립 현상이 지속적으로 일어나지 않는 것으로 관찰되면서 그 중요도가 상대적으로 낮게 평가되고 있다. 이유는 크립에 의해 봉의 반경이 넓어짐에 따라 체적이 커지고, 닫혀진 계인 핵연료 봉내의 압력은 그만큼 떨

어지기 때문에 피복관 내벽에 가해지는 hoop stress는 지속성을 갖기 어렵기 때문이다. 그러나, 아직도 건식저장에 경험이 많은 선진국에서는 저장기간 동안 피복관의 크립 변형에 대한 제한치 1%를 규제에 적용해 오고 있으므로, 이에 대한 시험이 기본적으로 요구된다.

크립시험은 일반적으로 시간이 많이 걸리기 때문에 세 개의 독립적인 시험장비를 구축하였다. 시편은 25 cm 길이의 튜브형이며, 아르곤 불활성 기체를 튜브 안으로 가압하여 사용후핵연료의 봉내압과 그에 따른 피복관의 hoop stress를 모사하게 된다. 단기간에 크립에 의한 변형이 잘 일어나지 않으므로, 400 °C 이상 온도로 가속시험을 수행할 예정이며, 이 때 시험 온도는 400 °C와 해당 압력에서 적용되는 같은 크립 메카니즘 범위내의 최고 온도를 설정한다.

이 시편의 방사능 예비 평가결과, 표면에서 2 Sv/h라는 높은 값을 나타내어 크립시험기 및 가열로 전체를 차폐하는 납 8 cm 두께의 대형 실린더를 제작하였다. 시편의 이송 및 설치 등에 필요한 차폐창과 차폐블럭 역시 제작되어 설치될 예정이다.

크립변형 측정은 기존에 많이 사용되는 LVDT 방법 대신 Laser Extensometer를 사용하게 된다. 조사된 시편의 크립을 측정하기 때문에 이 장비는 작업자의 피폭량을 현저히 줄이고 변형 측정을 위해 시험장비 운영에 변화를 줄 필요도 없으므로 더욱 안정되고 정밀한 결과 값을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 조사된 시편에서부터 발생하는 감마선에 신호가 왜곡되는 것을 방지하기 위해서 레이저 빔은 거울을 이용하여 'ㄷ'자 형태의 궤적을 따라가고, 시편 변형을 측정하기 위하여 가열로 벽면에 수정 창을 설치한 것이 중요한 특징 중에 하나이다.

2.3 수소화물 재배열 시험

시간의 경과에 따라 건식저장시스템의 온도가 떨어지면, 낮은 온도에서 활발해지는 수소 및 수소화물의 거동이 피복관에 큰 영향을 미치게 된다. 수소와 관련된 여러 가지 열화기구 중에 수소화물 재배열 현상이 가장 중요하다. 그 이유는 다음과 같다. 건식저장의 내재적 특성상 건식과정(drying process)는 필연적이며, 이 때 물 대신 진공 혹은 헬륨과 같은 불활성기체에 의한 열전달 상황에 의해 시스템내의 온도가 400 °C 이상까지

도 올라가게 된다. 이 온도에 의해 피복관 내에 존재하던 환형방향 수소화물들이 기지 내로 용해되고, 차후 시설이 운영되는 동안 온도가 떨어지고 그에 따라 고용도 한계를 넘어서면서 수소화물들이 다시 재침출되는데, 이때 지속적으로 존재하는 봉내압의 응력을 해소하기 위해서 반경방향으로 수소화물이 침출된다. 이러한 반경방향 수소화물의 분율이 높을수록 재료적 취성이 증가하여 저장이후 수송과정에서 피복관이 외부 충격에 버티기 힘든 상황이 발생된다[3].

시편은 5 mm 길이의 링 형태이며, stress 해석을 위해 dog bone 형태의 단차를 두게 된다. 수소화물 재배열 시험에서는 온도 변화(thermal cycle), hoop stress, 냉각속도 그리고 수소농도가 매우 중요한 매개 변수이며 이들을 종합적으로 제어할 수 있는 시험시스템을 설치하였다.

3. 결론

건식저장은 사용후핵연료 관리방안 중에서 곧 가장 현실적인 방안이 될 것이며, 시스템의 안전성 평가를 위해 사용후핵연료의 건전성 평가는 필수적인 연구항목이다. 여러 열화기구 중에서 크립과 수소화물 재배열 시험이 가장 기본적이고 필수적인 시험항목이며, 이 장비들이 최근 조사후 시험시설 내에 설치되어 수개월의 미조사 시편에 대한 시험에 이어, 실제 사용후핵연료의 시편을 대상으로 시험이 수행될 예정이다. 시험의 결과 값은 건식저장의 궁극의 목표인 회수성 가능여부를 판단할 기초 자료가 된다.

4. 참고문헌

- [1] U.S. NRC, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility", NUREG-1536 Rev.1 (2010).
- [2] I. S. Levy et al, "Recommended temperature limits for dry storage of spent light water reactor Zircaloy-clad fuel rods in inert gas", PNL-6189 (1987).
- [3] B. Hanson, H. Alsaed, C. Stockman, D. Enos, R. Meyer and K. Sorenson "Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel", PNNL-20509 (2012).