

사용후핵연료 건식저장의 건전성 평가방법

국동학, 조동진, 정중태, 최희주, 최종원
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
svskook@kaeri.re.kr

1. 서론

우리나라의 지속적인 원자력발전을 위해서는 사용후핵연료의 누적문제를 해결해야 하며, 아직 국가 정책이 확정되지 않은 상황에서 발전소내 수중 저장능력은 2016년에 포화되는 것으로 보고되고 있다[1]. 그러나, 사용후핵연료를 상용규모로 재활용하거나 직접 처분을 하기 위해서는 현재로서는 최소 20여년 이상의 준비가 필요하다. 따라서 국가 정책이 확정되기 전까지 사용후핵연료 문제에 대한 해결책으로는 외국에서 이미 30년 이상의 상용운전으로 안전성이 입증된 중간저장이 현실적으로 유일한 대안이며, 여러 중간저장 방식 중에서도 안전성과 운영 용이성이 커다란 장점으로 꼽히는 건식저장이 매우 유력하고 이는 또한 세계적인 추세이기도 하다. 올해부터 새롭게 조직된 방사성폐기물관리공단에서는 위와 같은 배경을 토대로 방사성폐기물관리기술개발사업의 일환으로 '사용후핵연료 건식저장 건전성 평가기술 개발' 과제를 추진하고 있는 상황이며 올해 안으로 실질적인 과제 착수가 진행될 전망이다. 이에 따라 사용후핵연료 건식저장에 대한 안전성 평가에 대한 개념정립과 향후 어떠한 일을 할 것인가에 대한 고찰이 필요한 시점이다. 건식저장의 안전성을 평가하는 요소는 크게 사용후핵연료와 저장시설의 건전성, 수송 안전성, 그리고 시설의 운영 안전성 등으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 사용후핵연료(소결체 및 피복판)의 건전성 평가에 초점을 맞추고 있다. 연구의 진행 방향은 먼저 사용후핵연료의 건전성 평가에 대한 정의와 필요성을 살펴보고, 건전성 평가에 필요한 자료들을 종합한 후, 현재 우리에게 필요한 부분을 점검함으로써 건식저장 건전성 평가방법에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

2. 본론

2.1 사용후핵연료 건전성 평가의 정의

사용후핵연료의 건식저장 건전성 평가는 사용후핵연료가 재활용이나 처분 등의 최종적인 단계를 위해 회수되기 전까지 저장시설내에 저장되는 동안 파손되지 않고 본래의 상태를 유지할 수 있는 지 여부를 실험 및 예측을 통하여 판단하는 과정으로 정의할 수 있다.

2.2 건전성 평가의 필요성

건전성 평가의 필요성은 그 자체의 정의에서 충분히 설명되지만, 구체적인 규제지침을 통하여 살펴보는 것이 더욱 의미가 있다. 사용후핵연료 건식저장에 관해서는 여러 선진국들이 이미 30여년전부터 건전성 평가를 수행하여 왔으며, 그 중에서도 사용후핵연료 건식저장에 대한 산업과 기술이 가장 발달한 미국의 규제지침을 살펴봄으로써 건전성 평가의 필요성을 구체적으로 파악할 수 있다. 대표적인 건식저장 규제지침은 '건식 캐스크 저장시스템에 관한 규제지침[2]'과 '사용후핵연료 건식저장시설에 관한 규제지침[3]'이 있으며, 이 두 지침에서 요구하는 핵심적인 주요 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 사용후핵연료 피복판은 저장기간동안 대량 파열을 유발할 수 있는 변성현상으로부터 보호되어야 한다.
- 저장시스템은 추가적인 처리 또는 처분을 위한 회수가 가능하도록 설계되어야 한다.
- 핵연료의 피복판의 온도 제한치는 연소이력, 피복판의 두께, 핵연료봉 제조기간 동안의 압력, 연소도, 핵분열 기체, 그리고 피복판이 받는 내부 응력(hoop stress) 등의 복합적인 고려를 통하여 설정하여야 한다.
- 건식 저장을 하려는 모든 핵연료 형태에 대하여 신청자가 설정한 피복판 온도제한치가 적절함을 증명하여야 하며, 시설 운영(연료 이송 포함) 기간과 발생할 수 있는 최악의 사고 조건에서도 핵연료 피복판의 온도가 설정된 온도 제한치를 넘지 않는 것을 입증해야만 한다.
- 핵연료 혹은 그에 상응하는 피복판 물질 시편을 저장 상황에 해당되는 조건(온도, 응력, 변형속도) 하에서 실험하였음을 증명해야 한다.

2.3 건전성 평가 방법

사용후핵연료의 건전성을 평가하는 방법은 크게 해석적인 모델을 통해 사용후핵연료의 손상정도를 예측하는 단계와 주어진 조건에서의 구체적인 시험을 통해 실측자료를 확보하는 단계로 순차적으로 구성되어야 하며, 이 두가지 단계의 결과를 종합적으로 검증하여 최종적인 평가를 완성하여야 한다.

① 건전성 평가모델 개발

사용후핵연료의 건식저장에서 사용후핵연료 자체 건전성에 대한 가장 기본적인 안전성 기준은 사용후핵연료 피복관의 온도가 주어진 상황에 맞게 설정된 허용 제한치를 넘지 않아야 한다는 것이다. 이러한 허용 온도 제한치를 설정하기 위해서는 사용후핵연료가 전체 저장기간동안 겪어야 하는 상황에 따라 건전성을 상실할 수 있는 여러 가지 원인들을 파악하고 또한 그 과정을 해석적으로 잘 모사할 수 있는 모델들이 필요하다. 이러한 모델들은 사용후핵연료가 최초 원자로 운전이 장입되기 전부터의 상태에서부터 발전종료 후 수조내의 냉각기간을 거쳐 장기간의 건식저장 운전기간 동안의 상태를 예측할 수 있도록 개발되어야 하며, 결국 각 모델들의 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 단일한 코드 개발로 이어져야 한다. 이 코드를 완성하기 위해서는 첫째로, 사용후핵연료의 건전성을 저하시킬 수 있는 모든 열화기구에 대하여 기존의 모델들의 특징을 종합한 참조모델을 선정하고, 둘째로, 참조모델의 적용범위 및 국내 사용후핵연료 고유 특성과의 부합성을 판단한 후 국내 고유의 독자적인 원형모델을 개발하여야 한다.

② 건전성 시험

사용후핵연료 건식저장에 필요한 주요 자료는 연소도, 조사이력, 냉각기간, 핵연료 형태(fuel type), 크기 제원, 농축도, 피복관 종류, 핵분열 기체 정보, 열하중, 피복관 변형정도, 피복관 산화막 두께, 내부 용력, 수소함유량, 저장 분위기 등이며, 건전성 시험을 위해서는 먼저 위에서 열거한 항목들 중에서 주요 부분에 대한 그룹핑 경우의 수에 따라 시험 행렬(matrix)을 설정한 후 구체적인 시험을 수행하여야 한다. 시험은 크게 세 단계로 실시하여야 하는데, 첫째는 저장대상이 되는 사용후핵연료의 기본적인 특성(봉내압, 피복관 산화 두께, 내부 용력 등)을 파악하는 특성시험, 둘째는 단일한 열화기구의 특성을 평가할 수 있는 단위 시험들, 마지막으로 각종 열화기구들의 종합적인 거동을 평가할 수 있는 종합시험이다.

③ 검증과정

검증과정은 위에서 언급한 각종 열화기구들에 대하여 개발한 원형모델들의 예상값과 건전성 시험(특성/단위/종합)들 통하여 실측한 값들을 서로 비교하여 장기 건식저장 조건하에서의 건전성 유지 여부를 판단하는 과정을 의미한다. 이 과정을 통하여 각자 개발된 원형모델들과 실측된 시험자료들을 종합할 수 있는 평가코드를 개발하여야 하며, 이 코드를 통하여 국내 고유의 사용후핵연료 건식저장 시스템의 저장 건전성 유지 기준을 설정하여야 한다.

3. 결론

국내 고유의 사용후핵연료 건식저장 시스템의 완성을 위해서는 독자적인 건전성 평가체계가 필요하며, 본 연구에서는 평가방법에 대한 방향을 크게 세 단계로 나누어 제시하였다.

참고문헌

1. 제253차 원자력위원회(2004. 12. 17) 의결 사항
2. Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems (NUREG-1536), 1997
3. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities (NUREG-1567), 2003