

## 사용후핵연료 장기저장 기술동향

정성환, 김학수, 박종길

한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원, 대전시 유성구 유성대로 1312번길 70

shchung@khnp.co.kr

### 1. 서 론

IAEA는 현재까지의 사용후핵연료 발생량은 약 225,000톤에 이르며 2020년 약 445,000톤, 2050년 약 2,000,000톤 등으로 발생량은 급속하게 증가할 것이라고 하였다.[1] 우리나라의 사용후핵연료 누적량은 2011년말 기준으로 약 12,000톤 정도이다. 이러한 사용후핵연료의 누적량이 증가함에 따라 각국은 사용후핵연료 저장시설을 운영하고 있으며, 저장시설의 수명을 연장하고 장기저장에 대하여 안전한 성능을 보장하고자 사용후핵연료와 건식 및 습식 저장시설의 장기거동과 장기저장에 대한 규제요건 등에 대하여 기술개발을 추진하고 있다. IAEA는 규제기관의 관점에서 장기저장에 따른 건전성을 주기적으로 평가하여 안전성을 확보하여야 하며, 적절한 주기에 따라 인허가를 갱신하는 방식이 좋을 것이며, 설계수명기간이 120년이라 하더라도 지속가능성 입장에서 최소 50년에 한 번은 건전성을 평가할 필요가 있다고 하였다[1]. 우리나라도 사용후핵연료의 장기저장에 대비한 습식 및 건식 저장시설과 사용후핵연료에 대한 건전성 평가기술의 확보가 필요하며, 향후의 사용후핵연료 장기저장관리프로그램의 수립에 활용하고, 또한 사용후핵연료의 연소도 증가에 대비하기 위하여 국외의 기술동향을 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 사용후핵연료 장기저장 건전성 평가

사용후핵연료 관리정책(직접처분, 재처리, 중간저장 또는 관망)이 지연되면 사용후핵연료 저장량의 증가 및 저장기간의 연장이 불가피하며, 이에 따라 사용후핵연료 저장시설의 용량을 확장시켜야만 한다. 이러한 저장시설의 용량확장은 경쟁력 있는 비용으로 전력을 생산하기 위하여 MOX 연료를 비롯하여 고농축도, 고연소도 연료의 적용에 따라 복잡한 양상으로 전개되고 있다.

지난 50여년간 각국은 사용후핵연료 저장시설을 운영하여 왔다. 그러나 대부분의 저장시설이 제한된 수명기간동안 구조물과 재료에 대한 시간제약을 받고 있기 때문에 기존 및 신규 습·건식 저장

시설의 수명을 연장하고 장기저장에 대하여 안전한 성능을 보장하고자 노력하고 있다. 이를 위하여 사용후핵연료 장기거동, 건식 및 습식 저장시설의 장기거동, 사용후핵연료 장기저장 규제요건 등에 대하여 기술개발을 추진하고 있다.

사용후핵연료 열화가능성에 대한 메커니즘을 분석할 필요가 있으며, 장기저장에 대한 기술적 차이(gap)를 확인하여야 한다. 여러 저장기술 중에서 용기저장방식이 저장초기의 고온으로 인하여 연료피복재의 장기 건전성에 가장 취약하며, 응력, 변형률 및 응력 제한치 등이 연료피복재의 건전성을 평가하는 가장 중요한 기준이 된다. 습식저장은 이제는 성숙된 기술이며, 이에 비하여 건식저장은 지난 20여년간 계속하여 개발 중인 기술이다. 습식저장과 달리 건식저장은 열적활성화를 야기하는 고온으로 인하여 연료의 설계변경과 연소도 증가에 보다 민감하다. 습식저장은 수명증가에 관하여 현안문제는 없지만, 모니터링 또는 기술적 최적화가 이루어져야 할 필요성이 있으며, 건식저장은 기술자료 보완, 장전연료의 연소도 고려 및 계통의 장기적 성능보장에 대하여 어느 정도 문제가 있다고 보고 있다.

고연소도 및 MOX 연료에 대하여 피복재 재료의 creep 거동에 대한 기술개발을 필요로 하며, 검사프로그램으로 용기와 연료의 장기거동을 입증하여야 한다. 건식저장계통의 개발을 위하여 효율적인 계통성능 등에 대한 연구개발이 필요하다. 그리고 규제목적은 어느 나라나 유사하지만, 규제기준은 기술적 변화의 관점과 재료거동 또는 장기저장기간에 대한 성능의 추정을 고려하고 있다.

각국은 사용후핵연료 저장시설의 저장가능기간 및 저장위치에 대하여 심도있게 논의하고 있으며, 저장확장, 간섭사항 및 최종대안의 요건만족에 직면하고 있는데, 신뢰성있는 저장으로 경제적이고 적합한 대안을 마련하고자 하고 있다. 중간저장은 기술적으로 뿐만 아니라 사회적 및 인프라 현안을 제기하는 미래기술개발을 위하여 시간을 벌 수 있으며 최종처분에 대하여 관심을 가질 수 있는데, 중간저장의 중요한 점은 설계, 운영 및 설비에 의하여 저장기간의 종료 후 사용후핵연료의 회수를 보장할 수 있어야 한다. 저장기간을 통하여 물리적으로 건전성을 유지하는 것이 향후의

재처리 또는 처분을 위한 중요한 기술적 요건으로 고려되어야 한다. 그러나 회수성은 사용후핵연료가 장전되어 있는 동안 바스켓 또는 저장캐니스터의 건전성을 고려하여야 한다.

미국의 경우, 사용후핵연료 관리계획이 불투명하고 원전부지내 사용후핵연료 저장량이 점점 증가하고 있으며, 기존원전의 수명연장에 따라 사용후핵연료 장기저장에 대한 건전성 평가 및 기존 건식저장시설의 인허가 수명연장을 추진하고 있다[2]. EPRI 등은 기존 건식저장시설의 인허가 수명연장(20~80년)을 위한 건식저장계통 및 연료피복재에 대한 열화메커니즘을 분석하였으며, 특히, EPRI는 사용후핵연료 습식 및 건식 장기저장에 대비한 기술적 기반을 구축하기 위한 계획을 수립하였다[3]. IAEA 역시 사용후핵연료 장기저장을 위한 습식 및 건식 저장시설의 열화관리프로그램 및 기술기준을 수립하였다[4]. 또한, 사용후핵연료 습식 및 건식 저장시설의 설계, 안전운전 및 안전성 평가에 대한 지침을 개정하기 위하여 검토 중에 있는데, 장기저장은 한정기간 저장이어야 하며, 장기운영을 위하여 설계수명의 이상을 보장하여야 하며, 인허가 이전에 안전성 및 환경영향을 평가하여야 하며, 연료의 격납에 대한 열화가능성을 재평가하여야 하며, 감시프로그램을 수립하여야 하는 등의 사용후핵연료 장기저장 요건을 제시하고 있다[5].

**2.2 고연소도 연료**

원전의 사용후핵연료 저장용량 한계, 노심출력 증가 및 핵확산저항성의 증가 등으로 인하여 연소도를 70~100GWD/MTU까지 높이고자 많은 관심을 기울이고 있다[6]. 각국의 사용후핵연료 평균방출연소도는 점점 증가하는 추세에 있는데, 이는 연료주기를 늘리기 위한 재장전연료의 농축 및 장전주기의 증가로 가능하며 원전의 성능을 증대시켜 비용을 감소시킨다. 그러나 고준위폐기물 처분비용 등 후행핵주기에 대한 비용문제가 민감하므로 고연소도 연료에 대한 경제성은 불확실하다. 고연소도 연료는 피복재가 얇아지므로 장기저장을 위한 장기거동에 예측은 불확도가 아주 높으며, 고연소도로 인하여 사용후핵연료의 온도가 증가하고 방사성위험도가 증가하므로, 사용후핵연료 저장방식의 선정은 물론, 저장공간 확대, 고온에 유리한 재료 및 차폐성능 증가 등 저장계통의 설계에 중요한 영향을 미친다[7][8].

고연소도 연료는 원전의 운전유연성을 증가시킬 수 있고, 사용후핵연료 발생량이 감소하여 저장시설 및 처분시설의 규모를 감소시킬 수 있는

장점이 있으나, 연료의 연소도를 어느 정도의 범위까지 증가시키는 것이 가능하며, 장기저장으로 인하여 연료의 열화가능성 증가 및 처분을 위한 연료회수성 등 고연소도 연료의 기술적 제한 등에 대한 분석이 필요하다. IAEA, US NRC 및 OECD/NEA 등은 이러한 고연소도 사용후핵연료의 저장, 운반, 취급 및 처분 등에 대하여 기술기준과 규제요건을 정립시키고자 노력하고 있다.

**3. 결론**

사용후핵연료 장기저장에 대비하여 저장시설과 사용후핵연료의 건전성 평가를 위한 기술을 확보하여야 하며, 사용후핵연료 장기저장관리프로그램 수립이 필요하며, 경수로 사용후핵연료 습식저장조 및 중수로 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 장기 건전성평가에 대한 기술개발의 추진과 아울러 국외기관의 연구결과 활용 및 협력도모 등을 검토하여야 할 것이다.

고연소도 연료의 증가추세에 대하여 노심설계, 연료설계, 연료재료에 대한 기술개발이 필요하며, 노심코드, 중성자이송코드, 감손/붕괴연쇄반응모델 및 고농축도 임계평가 등에 대한 적합성과 유효성을 검증하여야 하며, 사용후핵연료의 장기저장과 연계하여 연소도로 인한 영향이 적은 재료를 개발하는 것이 필요하다.

**4. 참고문헌**

- [1] Nucleonics Week, "Long-Term Spent Fuel Storage a Necessity, IAEA Says", Vol.51, 2010.6.3.
- [2] INL, "Strategic Plan for LWR Research and Development", 2007.
- [3] EPRI Technical Report, "Used Fuel and High-Level Radioactive Waste Extended Storage Collaboration Program, 1020780, 2010.
- [4] IAEA Technical Report Series, "Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities", No.443, 2006.
- [5] IAEA Safety Standards, "Storage of Spent Fuel", Draft Safety Guide DS371, 2008.
- [6] OECD/NEA Technical Report, "Very High Burn-ups in Light Water Reactors", 2006.
- [7] IAEA Technical Report, "Optimization Strategies for Cask Design and Container Loading in Long Term Spent Fuel Storage", TECDOC- 1523, 2006.
- [8] IAEA Technical Report, "Selection of Away From Reactor Facilities for Spent Fuel Storage", TECDOC-1558, 2007.