PWR 사용후핵연료 건식저장기준 현황 및 국내 핵연료 적용성 평가

양용식, 김선기, 김대호, 방제건, 송근우
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
yys@kaeri.re.kr

사용후핵연료의 중간저장방식은 크게 습식저장과 건식저장으로 나뉘며 현재 국내에서는 CANDU형 사용후핵연료를 제외한 핵연료가 습식저장방식으로 저장되고 있다. 1년동안 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 고리1호기와 같은 60만kW급에서는 매년 약 14톤, 100만kW급에서는 매년약 19톤이 발생하고 있다. 국내 사용후핵연료 저장량은 2005년말 현재 합계 7,961톤(최대 저장용량의 81%)의 핵연료가 저장되어 있으며 각 site에 따라 차이는 있지만 대략 울진은 2007년, 고리 및 영광은 2008년에 현재 저장능력이 포화될 예정이다. 또한, 조밀렉 방법에 의한 시설확충이 고리 1,2호기의 경우에는 불가능하여 고리 3,4호기의 저장시설에 임시로 저장하고 있으며, 각 발전소의 조밀렉 확충이후에도 약 2016년에는 포화에 도달할 것으로 예상된다(표 1). 따라서, 핵연료 중간저장시설로서의 건식저장기술의 개발은 시급히 해결해야 할 문제이다.

표 1. 사용후핵연료 저장관리 현황 (2005년 12월 기준, 단위:톤) - 과학기술부 통계자료

구 분	저장용량	저 장 량	예상 포화년도	
			현 용량기준시	저장능력 확충시
고 리	1,737	1,475	2008	2016
영 광	1,696	1,249	2008	2021
울 진	1,563	949	2008	2018
월 성	4,960	4,287	2006	2017
계	10,035	7,960	-	-

- 사용후핵연료 건식저장의 현재 기준 및 체계

사용후핵연료의 건식저장은 영구처분이 아닌 중간저장이며 영구처분 혹은 재처리를 위해서 저장 핵연료는 반드시 다시 인출되어야 하기 때문에 건식저장 중 핵연료의 손상이 발생하지 않도록 하여야 한다. NRC에서 작성된 10CFR72는 저장기간동안 피복관의 건전성이 유지됨을 보이는 것을 의무화 하였으며 SRP(NUREG-1567)에서는 최소한 20년 이상 핵연료봉이 건전하기 위해서는 정상/비정상 상태시 각각 피복관 허용온도가 380℃/570℃이하로 유지되어야만 할 것과 40년간의 저장시 손상확률이 0.5%이하임을 보이도록 하고 있다. SRP에서 제시된 피복관 온도 기준은 건식저장 중 주요 핵연료 피복관 손상 메커니즘인 피복관 크립, SCC(Stress Corrosion Cracking), DHC(Delayed Hydride Cracking), Hydrogen re-orientation등에 대한 실험을 통해 설정되었다.

기준온도 설정을 위한 실험은 대부분이 PNNL에서 수행되었으며 1980년대 중반에 주로 사용되던 Zircaloy 피복관 핵연료를 대상으로 시험이 수행되었으며 최대 봉평균연소도는 약 40MWd/kgU까지 였다. PNNL에서 건전성 시험을 통해 제안한 기준은 핵연료 피복관 온도 및 저장되는 핵연료의 초기 hoop stress 로서 각각 400℃/90MPa을 기준으로 제시하였다. NRC에서는 보수성을 고려하여 PNNL에서 제시한 피복관 온도보다 낮은 380℃, 연소도는 28MWd/kgU을 인/허가 기준으로 삼았으며 이 이상의 연소도에서는 기준 온도를 변경하여야 함을 명시하였다. 단, 피복관에 가해지는 hoop stress는 당시 인출되던 핵연료의 봉내압이 매우 낮아 보수성이 매우 높아 제외되었다. 따라서, 현재 건식저장 방식의 기준을 종합하면 봉평균 연소도 28MWd/kgU, 저장기간 20년 내에서 피복관 온도 380℃/570℃(정상/사고시) 이하 및 최대 hoop stress 90MPa이라 할 수 있으며 연소도의 증가 혹은 저장기간의 연장시에는 새로운 건전성 기준의 제시 및 관련 시험자료/모델의 제출을 의무화하고 있다.

- 기존 건식저장 건전성 기준의 국내 사용후핵연료 적용성

핵연료 경제성의 향상을 위해 꾸준히 진행되어 온, 핵연료 연소도의 증가는 사용후핵연료의 발생량을 줄이는데에 큰 기여를 하였지만 연소된 핵연료의 건전성은 기존 저연소도 핵연료에 비해 매우 취약하게 되었다. 그림 1에 나타난 바와 같이 90년이후 인출된 대부분의 핵연료들은 봉평균

연소도를 고려할 때 이미 기존 건식저장 인허가 범위인 28MWd/kgU을 넘어서고 있기 때문에 기존 건식저장 기준의 적용에 제한을 받게 된다. 또한, 최근에 사용되기 시작한 Zirlo등과 같은 신합금과 기존의 Zircaloy는 조성이 다르기 때문에 이 역시 기존의 건전성 시험자료를 이용한 저장 기준의 적용은 불가능하다. 고연소도 핵연료는 저연소도 핵연료에 비해 건전성이 떨어지는 첫 번째 이유로는 붕괴열의 증가가 있다. 그림 1,2에 나타난 바와 같이 고연소도 핵연료는 저연소도 핵연료에 비해 약 1.4~1.6배까지 발열량이 큰 것으로 나타나고 있으며 이는 피복관 온도 상승에 큰 영향을 끼치게 된다.

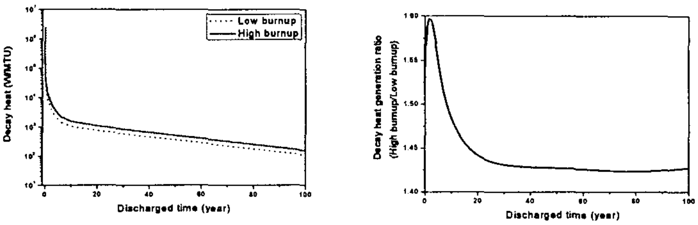

그림 1. 저장 기간에 따른 저연소도/고연소도 핵연료의 붕괴열 변화

두 번째로 연소도증가와 함께 수반되는 핵분열기체방출량의 증가는 인출된 핵연료의 봉내압을 증가시켜 creep, SCC등 압력에 민감한 파손기구들을 가속화 시킬 것으로 예상된다. 그림 2에 나타난 바와 같이 현재의 고연소도 핵연료들은 PNNL에서 제시한 90MPa 기준을 쉽게 초과할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

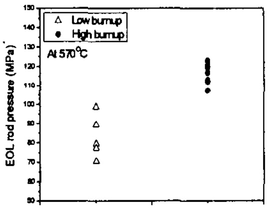

그림 2. 핵연료 연소도에 따른 봉내압 증가

마지막으로 고연소도 핵연료는 저연소도 핵연료에 비해 피복관의 산화 및 수소침투가 크기 때문에 작은 충격에도 쉽게 파손되는 특성을 가지게 된다. 그림 4에 나타난 바와 같이 고연소도 피복관은 저연소도 피복관에 비해 매우 큰 수소함량을 가지기 때문에 작은 변형에서도 파손이 쉽게 발생할 수 있다.

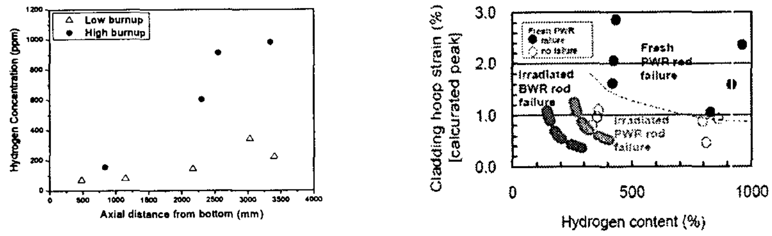

그림 4. 연소도 증가에 따른 피복관 수소함량 증가 및 피복관 건전성 감소 (Nakamura et al.,)

따라서, 고연소도 핵연료의 건식저장을 위해서는 고연소도 핵연료를 이용한 새로운 저장건전성 시험결과 및 관련 모델들에 대한 개발 및 새로운 건전성 기준 수립이 선행되어야 할 것이다.