

건식저장 시 사용후핵연료 건전성에 대한 미국과 일본의 평가방법 및 기준 분석

국동학, 양용식, 권형문, 장정남, 최종원
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 svskook@kaeri.re.kr

1. 서론

국내의 누적되는 PWR 사용후핵연료 문제를 근시일내에 해결할 수 있는 사용후핵연료 건식저장 연구가 최근들어 활발히 진행되고 있다[1]. 건식저장의 궁극의 목표는 시설의 운전 종료시에 사용후핵연료를 저장시스템으로부터 다시 인출하였을 때, 원래의 상태를 그대로 유지하는 건전성 확보이므로, 이에 대한 평가 방법 및 기준 설정은 매우 중요하다. 따라서, 건식저장에 가장 앞선 미국과 최근 들어 활발히 건식저장을 진행하려는 일본의 사용후핵연료 건전성 평가 방법 및 기준을 비교 분석함으로써, 우리나라가 취해야할 방향설정에 참고하고자 하였다.

2. 본론

건식저장 시 시스템 내부 온도는 사용후핵연료의 건전성을 위협하는 여러 열화기구들을 활성화시키는 가장 핵심적인 인자이며, 이와 연계된 봉내압에 의한 HS¹⁾ 역시 최근들어 매우 중요한 인자로 평가되고 있다.

2.1 미국의 평가방법과 기준

미국은 1970~80년대 약 1,200개의 핵연료봉 시험을 바탕(CSFM²⁾ 프로그램)으로 피복관의 건식저장 허용 온도를 설정하였으며, 1985년부터 시작한 상용 시스템에 곧바로 적용하였다. 이후 표1과 같이 연소도 증가 및 수송과정에 대한 중요도가 높아지면서 추가적인 제한사항들을 도출하여 적용해왔다. 최근 수정 발간된 심사자규제지침[8]은 이와같은 이력을 모두 반영하고 또한 각 평가항목들에 대한 위험도 등급을 상중하로 나누어 평가의 우선 순위를 구분하였다.

정상운전 상태에서는 Creep에 의해 피복관이 변형되는 제한치를 핵심적으로 적용하고 있으며, 수송과정에 대해서는 Vacuum Drying 과정에서 생

성될 수 있는 HR³⁾ 발생을 억제하기 하기 위한 제한치를 적용하고 있다.

미국은 20여년의 경험을 바탕으로 지르코늄 계열 피복관의 정상상태 최대허용온도를 400℃로 획일화시켜서 운전 마진을 높게 설정한 만큼, hair line crack이나 pinhole 등의 사소한 결함을 갖고 있는 사용후핵연료에 대해서도 몇 단계의 FGR⁴⁾ 레벨로 구분하고 저장을 허용한다.

또한 저장시스템 제작회사가 정부로부터 General License에 대한 CoC⁵⁾를 받기 위해서는 위의 기준에 대한 사용후핵연료 건전성을 독자적으로 증명해야한다.

Table 1. 정상운전상태에 대한 미국의 기준 변화

연도	주요 내용	비고
1980s	• MATL ⁶⁾ 적용	냉각기간별, 재료별, 연소도별 다양한 온도 기준 적용 [2]
1997	• DCCG ⁷⁾ 고려	[3]
1999	• DCCG 배제 • 고연소 정의: 45GWd/MtU 이상	[4]
2000	• Creep strain 제한치: 1% 이하	[5]
2002	• Creep이 가장 중요 • 수송시 HR 고려	400℃ 기준 및 6.5℃ 이내의 TC ⁸⁾ 제한 [6]
2003	• 지연소도의 경우 온도 대신 HS 제한치 선택 사용 가능	[7] HS < 90 MPa
2010	• ISG 시리즈 반영 • Risk Inform base • 지르코늄 피복관은 400℃ 단일 기준	연소도 60 GWd/MtU까지 인허가 [8]

2.2 일본의 평가방법과 기준

- 3) Hydride Re-orientation
- 4) Fission Gas Release
- 5) Certificate of Compliance
- 6) Maximum Allowable Temperature Limit
- 7) DCCG: Diffusion-Controlled Cavity Growth
- 8) Thermal Cycling

1) Hoop Stress
 2) Commercial Spent Fuel Management

일본은 미국 기준을 참조로 하고 CRIEPI를 중심으로 약 20여년간 건식저장 건전성 시험 데이터를 생산하여 이를 바탕으로 1990년대 중반부터 작은 규모⁹⁾로 건식저장을 수행하였으며, 2000년대 들어 JNES¹⁰⁾를 중심으로 건전성 시험 데이터를 생산하여 이를 바탕으로 2012년 운영을 시작하려는 5,000 MtU 규모의 무츠저장시설을 준비 중에 있다. 최근들어 건식저장 기간이 자주 변경되는 미국과 달리 사용후핵연료 재처리가 국가 정책인 일본은 건식저장 운영 목표기간을 50년으로 한정하였다.

JNES는 10년간 Creep 시험, Hydride Effect 시험(HR시험, 기계적특성시험), 조사손상회복 시험을 수행하였으며, HR이 전혀 일어나지 않은 피복관에서 피복관의 연성이 감소하는 현상을 발견함으로써, 미국처럼 HR이 일어나지 않는 단일한 기준을 설정하는 것보다 피복관의 기계적성질이 열화되지 않는 보다 엄격한 기준을 제시하였다. 이러한 기본 방침에 따라 일본은 아래 그림1과 같이 대상 핵연료 피복관의 종류별, 연소도별로 온도기준과 HS의 제한치를 동시에 적용하도록 하였으며, 이는 저장시스템 운영마진의 폭을 줄이는 결과로 나타난다.

그러나, 미국과 달리 일본은 저장대상 사용후핵연료는 아무런 결함을 갖고 있지 않도록 제한하고 있으며, 규제기관에서 다양한 조건의 실험을 바탕으로 엄격한 규제기준을 설정한 만큼, 저장시스템 제작회사는 사용후핵연료 건전성을 독자적으로 증명할 필요가 없다.

Cladding Type		Threshold of No Ductility Degradation Affected by Hydride Recrystallization	
		Temperature (°C)	Hoop Stress (MPa)
BWR (RO)	40GWd/t No Liner	≤200	≤70
	50GWd/t with Liner	≤300	≤70
	55GWd/t with Liner	≤300	≤70
PWR (SR)	39GWd/t	≤275	≤100
	48GWd/t	≤275	≤100
	55GWd/t MDA	≤250	≤90
	55GWd/t ZIRLO	≤250	≤90

2.3 우리나라의 방향에 대한 제언

미국과 일본에 비해서 원자력 발전이 각각 20, 10여년 뒤늦은 우리나라는 사용후핵연료 건식저장에 대한 필요성, 연구, 산업화가 같은 기간만큼

차이를 두고 있다. 일본이 미국의 기준을 참조하고 시험 자료를 생산하여 건식저장에 대한 자신만의 필요성에 따라 독자적인 저장기준을 설정하고 고유한 상용 저장시스템을 개발한 과정을 우리는 참조할 필요가 있다.

선진국과의 차이를 빠른 시일내에 줄일 필요가 있는 우리로서는 우선 국내 사용후핵연료에 대한 시험자료를 생산하여 기존 선진국들의 평가방법 및 기준에 부합되는 지 여부를 판단하고, Capacity Factor등이 높은 국산 핵연료만의 특징적인 부분에 대한 재해석과 사용후핵연료의 관리 정책, 저장기간, 저장 대상 핵연료 범위(연소도, 손상정도, 냉각기간, 집합체 종류)를 고려한 고유 저장기준을 설정하는 것이 필요하다. 이와같은 과정은 독자적인 상용 저장시스템을 개발하는 데 가장 필수적인 과정이며, 향후 저장시스템의 수출까지 목표를 확장할 경우에는 그 필요성은 더욱 커진다.

3. 결론

건식저장 선진국인 미국과 일본의 사용후핵연료 건전성 평가방법과 기준을 참조하고 국산 연료에 대한 시험자료를 확보하여, 우리 고유의 저장기준 및 저장시스템을 개발하여야 한다.

4. 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.2009T100200031)

5. 참고문헌

- [1] SF 수송/저장 시스템 상용화 기술개발, 지경부
- [2] PNL-6189, 1987
- [3] NUREG-1536, 1997
- [4] Interim Staff Guide-11
- [5] Interim Staff Guide-11 Revision 1
- [6] Interim Staff Guide-11 Revision 2
- [7] Interim Staff Guide-11 Revision 3
- [8] NUREG-1536 R1, 2010

9) 후쿠시마 & 토카이 원전 내 금속캐스크

10) Japan Nuclear Energy Safety Organization