

사용후핵연료 저장조 사고 분석

정성환*, 김기영

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*sunghchung@khnp.co.kr

1. 서론

원전의 노심에서 나온 사용후핵연료를 수중에서 보관하는 저장조와 저장대 등 저장구조물은 구조적 건전성은 물론, 연료의 핵임계 방지, 붕괴열 냉각에 대하여 구조물과 여러 계통이 안전하게 유지관리되어야 한다. 그러나 후쿠시마 사고이후 사용후핵연료의 과밀저장과 함께 저장조내 사고에 대한 우려가 점차 증가하고 있기 때문에 사용후핵연료 저장조에서 발생 가능한 사고를 분석하였다.

2. 본론

○ 냉각계통 기능상실

저장조의 냉각수 냉각계통이 전원상실로 기능을 발휘할 수 없으면 수온이 상승하고 일정온도 이상에서 증발하여 냉각수가 유실되며, 사용후핵연료의 붕괴열이 제거되지 못하여 연료와 구조물이 용융된다(Fig. 1). 이러한 사고에 대하여 저장조의 수온이 상승된다고 가정하여 냉각수의 온도를 달리하여 평가하며, 수온증가로 일부 또는 전부 증발한다고 가정하여 평가하여야 한다. 또한 연료와 저장구조물이 용융되어 저장조 하부에 균질화된 상태를 가정하여 평가하여야 한다.

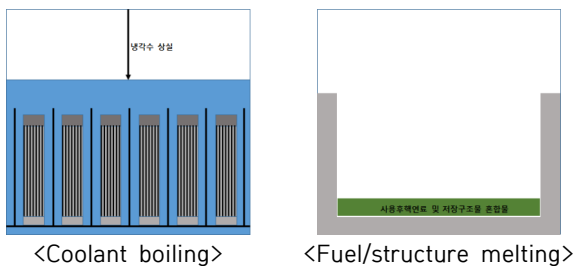


Fig. 1. Functional loss of cooling system.

○ 연료낙하

저장조에서 사용후핵연료를 취급하는 도중 연료집합체가 낙하하는 경우 사용후핵연료는 낙하충격으로 인해 파손, 절단 등의 손상이 예상되며, 저장대 구조물 또한 변형될 수 있다. 연료낙하로 인하여 저장대 하부판이 파손되어 연료가 저장조 콘크리트 바닥에 위치하는 상태, 연료의 하단고정체가 낙하 충격으로 인해 유실된 상태, 연료봉 하단부가 휘어지는 상태, 연료의 중심부가 절단되어 있는 상태

등을 가정하여야 한다(Fig. 2). 연료가 저장조내로 낙하하는 사고는 수직낙하로 인한 충격과 연료가 저장대 상부에 수평으로 낙하하는 경우와 수직이동 중 회전하여 수평으로 낙하하는 충격을 고려할 수 있는데, 피복관에 가해지는 영향이 심각한 쪽을 선택한다. 수직낙하는 저장된 연료가 저장대 상부보다 아래에 위치하므로 하나이상의 연료에 충격을 가할 수 없으며, 충격은 낙하되는 연료의 하단고정체가 저장된 연료의 상단고정체에 충격을 줄 때 연료의 양 끝단 사이에서 발생할 수 있다. 저장조내로의 수직 및 수평 낙하는 연료에 작용하는 하중의 합을 평가하여 피복관의 허용응력을 초과하는 지 여부를 판단한다.

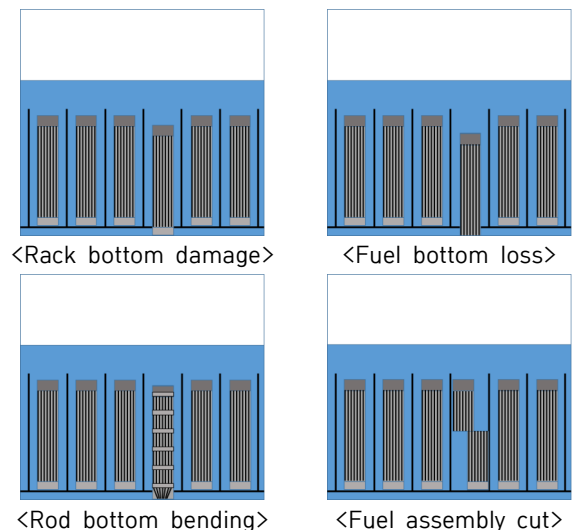


Fig. 2. Fuel drop.

원전 FSAR 및 USNRC 10CFR50 App.A에 명시된 발생 가능한 연료낙하사고에 대하여 건전성이 유지되어야 하는 기준에 따라 연료와 취급장치가 저장대에 낙하하는 경우 천층낙하(저장대 상단에 충돌), 심층낙하-1(저장대 지지대 경간사이 밑판에 충돌), 심층낙하-2(저장대 밑판에 충돌)로 구분하여 구조물 건전성은 물론, 연료의 기하학적 변형에 따른 임계가능성을 평가하여야 한다.

○ 연료피복관 열화

원자로 운전중 또는 연료를 장기간 저장하는 경우 피복관의 열화로 인하여 연료봉이 집합체로부터 분리되거나, 연료봉이 파손되어 소결체가 연료봉으로

부터 유출될 수 있다(Fig. 3). 연료봉 일부 또는 전부가 유출되어 유출된 연료봉이 바닥에 쌓인다고 가정하며, 피복관 열화나 연료봉의 충격으로 소결체가 유출되는 사고를 가정하여야 한다.

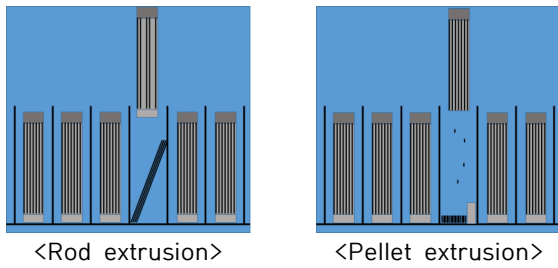


Fig. 3. Fuel cladding degradation.

○ 지진

후쿠시마원전 사고이후 설계지진을 초과하는 지진에 대하여 국내원전도 설계지진을 재검토하는데(Table 1), 현 원전의 설계지진에 대한 개선이 예상된다. 지반가속도 0.2 g로 설계된 원전에서 기준을 초과하는 지진이 발생한 경우도 안전성을 확보하기 위하여 내진성을 신규원전 기준인 0.3g 수준으로 보강하도록 하고 있는데, 사용후핵연료 저장구조물도 0.3 g에 대한 평가가 필요하며, 아울러 기존의 저장구조물이 어느 정도의 지진까지 견디는지 확인하는 것도 필요하다.

Table 1. Comparison of Fukushima earthquake

호기	관측값(gal)			설계기준지진(gal)		
	남-북	동-서	상향	남-북	동-서	상향
1	460	447	258	487	489	412
2	348	550	302	441	438	420
3	322	507	231	449	441	429
4	281	319	200	447	445	422
5	311	548	256	452	452	427
6	290	431	244	445	448	415

○ 연료취급사고시 방사선피폭

저장구조물의 건전성을 검증하기 위하여 방사선적 영향을 정량적으로 평가하고, 장기관리에 대한 방사선적 안전성을 확보하기 위하여 정상조건에서 냉각수 표면방사선량률과 사고조건에서의 방사선적 안전성을 평가하여야 한다. 정상조건에서 냉각수의 표면방사선량률은 허용치인 25 μ Sv/h를 초과하지 않아야 한다. 노심에서 방출되어 72 시간 동안 냉각된 단일연료가 파손되어 연료봉 내부의 핵분열생성물의 방출로 인한 잠재적 인체피폭이 고려되어야 한다. 사고조건에서의 방사성물질 호흡 및 흡입에 의한 피폭선량을 평가하기 위하여 방사선원 자료, 방사성물질 누출자료 및 공학적 안전설비 자료를 분석하여야 하며, 이를 기반으로 원전부지의 제한

구역경계 및 저인구지역 외곽경계에서의 갑상선 및 전신 피폭선량을 평가하여야 한다.

○ 운반용기 낙하

사용후핵연료 운반을 위하여 운반용기는 연료건물에서 용기취급크레인을 이용하여 제염조로 이동하고, 장전조로 이동하여 연료를 장전하며, 다시 제염조로 이동하여 차량에 상차된다(Fig. 4). 장전조와 제염조로의 운반용기 이동시 운반용기가 낙하사고가 발생하면 장전조(CLP)나 제염조(DP)의 바닥면 위로 운반용기가 직접 충격하게 되는데, 운반용기가 100여톤의 중량물이므로 바닥면인 콘크리트 구조물의 건전성을 보장하기 어렵다. 제염조와 장전조의 바닥면은 사용후핵연료 저장조의 바닥면과 연결된 일체의 구조물이므로 운반용기가 낙하하면 제염조와 장전조 바닥면에 손상이 가고, 아울러 저장조 바닥면의 손상을 야기하여 저장조의 냉각수가 누출되는 심각한 사고가 발생할 수 있다. 운반용기의 중량이 취급크레인의 정격용량에 근접하므로 연료건물에서 운반용기는 아주 신중하게 취급하여야 한다. 따라서 제염조 또는 장전조에서의 운반용기 낙하사고 시에도 저장조 구조물에 영향이 없도록 건전성 확보대책을 마련하는 것이 필요하다.

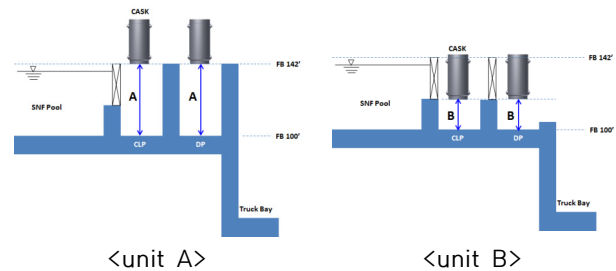


Fig. 4. Cask handling in the fuel building.

3. 결론

본 논문은 사용후핵연료 저장조에 대한 사고분석 방법론에 대하여 정리한 것이다. 특히 기존 사고해석을 기반으로 추가로 고려해야 하는 조건 및 가정사항을 제시하였으며, 장기적으로 국내원전 적용에 대비하는 차원에서 각각의 사고조건에 대한 재검토가 필요 할 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

[1] EPRI 3002000499, Spent Fuel Pool Accident Characteristics, 2013.
 [2] US NAS, Safety and Security of commercial Spent Nuclear Fuel Storage, 2006.
 [3] USNRC NUREG-1353, Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, 1989.