

사용후핵연료 운반성 평가항목 도출

최우석^{1*}, 조상순¹, 유승환¹, 방경식¹, 이주찬¹, 육대식²

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

²한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

*wschoi@kaeri.re.kr

1. 서론

2016년 7월 입법예고된 고준위방사성폐기물 관리 기본계획에 따르면 현재 발전소 습식저장조에 임시 보관되고 있는 사용후핵연료는 단기적으로는 소내 저장시설로 이동하여 저장되고 그후에 중간저장시설로 이송되어 저장된 이후에 최종적으로 처분장으로 처분될 예정이다. 소내저장시설에서 중간저장시설로, 또는 중간저장시설에서 최종 처분장으로 사용후핵연료를 운반하기 위해서는 사용후핵연료의 운반성이 담보되어야 한다.

사용후핵연료의 운반성이라함은 발전소에서 연소되고 나온 사용후핵연료가 저장기간을 통해 열화되어 재료적 성능이 저하된 상태로 운반될 때, 사용후핵연료가 구조 및 열적으로 운반이 가능한 상태를 담보할 수 있는가 하는 문제이다. 따라서, 사전에 사용후핵연료의 운반성을 평가할 수 있는 체계가 규제차원에서 수립되어야 한다. 이를 위해서 본 연구는 운반성 평가를 위한 평가항목을 도출한 내용에 대하여 기술한다.

2. 사용후핵연료 운반성 평가항목

2.1 사용후핵연료 운반성

사용후핵연료의 운반성을 평가하기 위해서는 사용후핵연료의 회수성이 담보되는가의 여부를 판단할 수 있어야 한다. 사용후핵연료의 회수성은 사용후핵연료를 담고 있는 캐니스터를 운반용기 또는 사용후핵연료를 처리할 수 있는 장소로 이동시킬 수 있는 능력으로 정의한다. 또한 개별 사용후핵연료 또는 포장된 사용후핵연료 다발을 취급할 수 있는 능력을 유지하는 것을 의미한다. 이러한 회수성은 정상 및 비정상 사건에 적용하며 설계기준사고 사건에는 적용하지 않는다. 이는 사용후핵연료 자체를 회수하는 능력은 정상 및 비정상조건에 대하여 담보되어야 하며, 사고조건에 대해서는 사용후핵연료 자체의 회수성을 적용하는 것은 아님을 의미한다. 반면에, 설계기준사고조건 하에서의 저장된 방

사성물질을 안전한 상태로 되돌릴 수 있는 능력을 회복성(recovery)이라 한다.

2.2 구조분야 평가항목

운반용기의 기술기준은 IAEA SSR-6, 원안위고시 2014-50호, 10CFR Part 71 등에 잘 정립되어 있는 반면에, 사용후핵연료 자체에 대한 기술기준은 상대적으로 잘 정립되어 있지 않다. 그 이유는 운반용기에 대한 기술기준의 기본적인 근간이 운반용기 내부의 운반내용물의 손상여부와 상관없이 정상 운반조건 및 가상사고조건에 대하여 운반용기가 궁극적으로 누설 성능을 만족하면 운반내용물이 외부로 비산되거나 유출되지 않고, 이에 따라 안전성이 보장된다고 볼 수 있다라는 생각이 있기 때문이다.

반면에, 2.1절에서 언급한 바와같이 사용후핵연료의 회수성을 담보해야 하는 정상 및 비정상운반조건에 대하여는 사용후핵연료가 구조, 열, 임계, 차폐 건전성을 유지하는데 필요한 평가항목 및 평가항목에 대한 요건이 구비되어야 한다.

구조적 관점에서의 사용후핵연료 집합체 및 피복관의 운반성 평가를 위한 평가항목은 사용후핵연료 집합체가 정상 및 비정상운반조건하에서 받는 가속도값과 피복관에 발생하는 변형률로 나타낼 수 있다.

운반용기의 취급 및 이송도중 낙하사고가 발생할 수 있으면 이러한 낙하조건에서 사용후핵연료 집합체는 Fig. 1과 같이 좌굴 및 굽힘에 의한 파손이 발생할 수 있다. 맨 아래의 지지격자체 사이의 연료봉은 좌굴거동을 한다. 이러한 축방향 좌굴에 기초한 임계하중은 선행연구에서 Table 1과 같이 그 범위가 넓게 분포한다. 좌굴을 발생시키는 임계하중에 대한 평가를 수행하기 위해서 평가모델 개발이 수행되었다. 평가모델은 본 논문에서는 제외한다. 펠렛이 클래딩에 부착되어 중량에 기여하는 효과도 영향을 미친다.

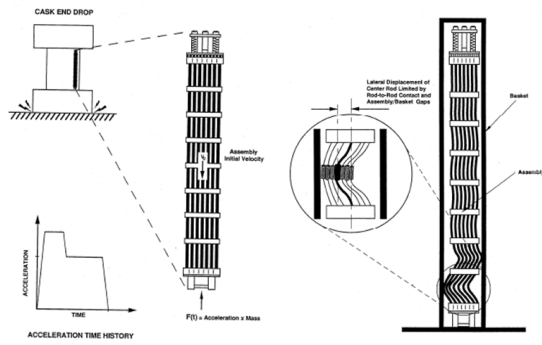


Fig. 1. Buckling deformation of fuel assembly at vertical drop condition.

Table 1. Critical g's value calculated from buckling critical load

Source	Assumption		Critical g' s value based on buckling load.
	Buckling resistance	Fuel Participation	
SNL SAND90-2406	Cladding	10%-100% of BWR Fuel Bonded to Cladding	220 ~ 54
	Column Only	75%-100% of PWR Fuel Bonded to Cladding No fuel participates with cladding.	40 ~ 32
LLNL UCID-21246	Cladding	(No fuel bonded to cladding)	∞
	Column Only	Vertical Drop (initial ~ 20 years storage)	82 ~ 95
		Side Drop (initial ~ 20 years storage)	63 ~ 74
ISG-12	Cladding	100% of PWR Fuel Bonded to Cladding	14 g.
	Column Only	∞	∞

2.3 열분야 평가항목

사용후핵연료 저장관련 법규인 10 CFR Part 72.122(h)(1)에서 "사용후핵연료의 피복관은 저장기간 동안 감손으로부터 보호되어야 한다"고 규정하고 있다. 이와 관련하여 미국의 규제기관인 NRC의 법규지침서인 NUREG-1536에서는 지르코늄 합금 재질의 피복관 또는 스테인리스 강 재질의 피복관 건전성을 보장하기 위해서 몇 가지 규정을 제시한다. 이에 기초하면 사용후핵연료를 저장 이후 운반할 경우 정상 저장조건 및 단기 장전 작업의 조건을 적용하여야 할 것으로 여겨진다. 따라서, 사용후핵연료 피복관의 최고온도는 400°C 이하로, 단기 장전 작업 동안 열 순환(thermal cycling)에서 피복관의 온도 변화는 65°C를 초과할 때 10회 이하로 제한되어야 할 것이다.

2.4 핵연료재배치 평가항목

"연료 재배치"는 저장 및 운반시스템 내의 일반적인 핵연료집합체의 배치의 변화를 의미한다. 많은 연료 재배치들이 물리적으로는 발생가능성은 낮지만 고려가 필요하다고 판단된다. 연료집합체의 기하학적 변화, 즉 연료 재배치가 4 개의 기술전문분야인 임계, 차폐(선량율), 격납, 열에 대해 미치는 광범위한 영향평가가 필요하다.

연료 재배치와 관련하여 세 가지 범주가 고려되어야 한다.

- 가. 범주 1: 피복관 파손 - Fig. 2와 같이 갈라지거나 손상된 사용후핵연료봉이 해당
- 나. 범주 2: 피복관 파손없는 봉/집합체 변형 - 피복관의 파손은 발생하지 않았으나 수직낙하 및 수평낙하에 의해 핵연료봉 집합체가 변형하여 형상이 재배치된 경우
- 다. 범주 3: 피복관 파손없는 집합체의 축방향 배열 변화

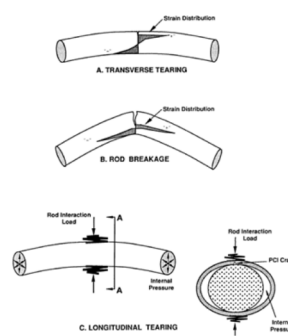


Fig. 2. Fuel rod failure mechanisms.

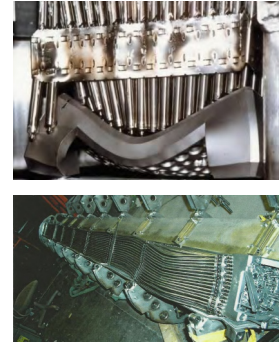


Fig. 3. Fuel assemblies after 9-m end drops.

각각의 범주에 따라 가능한 사고시나리오에서 임계, 차폐, 격납에 미치는 영향을 평가하였다. 임계 측면에서는 반응도(reactivity) keff가 5% Δkeff 이상 크게 증가하는 경우가 있었고, 차폐측면에서는 운반용기 표면 최대선량율을 상당히 크게(2.1~23.6 배) 증가시키는 경우가 있었으며, 연료재배치에 따라 허용누설율이 증가하고 연료미세입자가 흘러나오는 경우가 발생하였다. 따라서, 사용후핵연료의 운반성 평가를 위해 핵연료 재배치에 의한 임계, 차폐, 격납평가를 수행해야 한다.

3. 감사의 글

본 연구는 원자력안전연구사업(1503003-0115-SB120)의 지원으로 수행되었습니다.

4. 참고문헌

[1] SAND90-2406, A Method for Determining the Spent-Fuel Contribution to Transport Cask Containment Requirements, SNL.
 [2] NUREG/CR-7203, A Quantitative Impact Assessment of Hypothetical Spent Fuel Reconfiguration in Spent Fuel Storage Casks and Transportation Packages, Sep. 2015, U.S. NRC.