

월성 중수로 건식저장 사용후핵연료 건전성 평가를 위한 선행 연구

김영준*, 주용선, 허기수, 진영관, 안상복, 전용범

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*yjkim05@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 건식저장은 운영비용이 저렴하고, 용량확장이 용이하며, 장기저장 유지 측면에서 습식저장에 비해 유리하다. 현재 월성원자력 발전소 중수로 사용후핵연료는 수년간 습식저장조에서 냉각기간을 거친 후 건식저장 시설에 중간 저장되고 있다. 월성발전소의 건식저장시설은 1992년 콘크리트 사일로를 시작으로 20년 이상 운영되고 있으며 저장용량 확대를 위해 MACSTOR/KN-400 모듈을 개발, 2010년부터 운영하고 있다. 중간저장 중 사용후핵연료의 건전성 유지는 환경으로의 방사성 물질 누출 방지 등 안전성 확보 측면에서 매우 중요하며 저장 종료 후 사용후핵연료의 이송, 재포장 등을 위해 최종 처분 시까지 재회수성 확보 측면에서도 중요하다. 월성원자력발전소 부지 내 건식저장 시설에서 중간 저장되고 있는 중수로 사용후핵연료 건전성 평가에 앞서 건식 저장 조건 및 환경에 대해 알아보고 건전성 검증을 위한 열화메커니즘 분석 및 평가 방법에 대해 살펴보았다.

2. 본론

2.1 사용후핵연료 다발 및 연료봉

월성 원자력발전소 중간저장 시설에 저장되고 있는 중수로 사용후핵연료는 CANDU-6 핵연료로 37개의 연료봉으로 구성되어 있다. 중수로 핵연료는 천연우라늄 연료를 사용하며 다발(Bundle)의 길이는 약 495 mm, 직경은 약 102 mm이다. Zircaloy-4 피복재(sheath)를 사용하며 직경은 약 13 mm, 두께는 약 0.4 mm 이다.

2.2 사용후핵연료 저장 현황 및 환경

현재 월성 원자력발전소의 건식저장 시설은 콘크리트 사일로와 저장 효율을 높인 MACSTOR/KN-400 모듈이 있으며 저장용량은 각각 162,000다발과 168,000 다발이다. 콘크리트 사일로 방식과 MACSTOR 모듈에 저장되는 설계기준 사용후핵연료는 동일하며 이를 Table 1에 나타내었다 [1]. 월성 건식저장 시설에

저장되는 사용후핵연료는 최소 6 년 이상 습식저장조에서 냉각기간을 거친 후 저장되며 건전 연료 뿐만 아니라 비밀봉연료도 함께 저장한다. 중수로 사용후핵연료는 최대 방출연소도로 제한하는 경우로 사용후연료와 달리 평균 방출연소도의 개념을 사용한다. 이는 중수로 사용후연료의 경우 연료다발별 방출연소도를 확인하여 대상 연료를 선별하기가 어렵고 확인한다 하더라도 이송대상 다발수가 연간 수천다발이상이 때문에 비록 적은 확률일지라도 오류의 소지가 있기 때문이다. CANDU 연료 건식저장시설의 최대 허용초기온도는 저장 방식 및 환경에 따라 조금씩 차이가 있으나 160~180°C 온도 범위인 것으로 알려져 있으며 피복재의 경우 300°C이다. 피복재 온도 제한치가 300°C임에도 건식 저장 최대운전온도가 약 150°C로 낮은 이유는 비밀봉연료도 함께 저장하기 때문이다. 비밀봉연료의 경우 UO₂ 펠렛이 바스켓 커버 가스인 공기에 노출될 가능성이 있으며 이로 인한 UO₂ 산화가 발생하여 사용후핵연료 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 실제 건식저장 시설은 UO₂ 펠렛의 온도제한치보다 낮은 온도에서 운영되어진다.

Table 1. Characteristic of design basis spent fuel

항목	규격
저장대상연료	CANDU-6 천연우라늄 연료
기준 연료 냉각기간	최소 6년
연료 다발 평균연소도	7,800 MWd/MTU
기준 연료 붕괴열	6.08 Watts
연료 건전성	건전 연료 및 비밀봉연료
연료 허용온도	180°C

Table 2. Temperature limit of MACSTOR/KN-400

재료	MACSTOR/KN-400 최대운전온도			온도 제한치
	정상조건	비정상조건	사고조건	
피복재	<150.5°C	<150.5°C	<154.5°C	≤300°C
UO ₂ 펠렛	<150.5°C	<150.5°C	<154.5°C	<168°C

2.3 사용후핵연료 안전 규제 현황

월성 원자력발전소 건식저장 시설의 경우 중간저장시설이 아닌 원자로 및 관계시설 중 핵연료물질 취급 및 저장시설로 허가받아 운영 중이다 [3]. 핵

연료 및 연료손상율에 대한 상세한 허용 기준은 없으며 IAEA Safety Series No.116, NUREG-1536, CSA N292.2 등을 참고하여 설계 기준 및 안전성 평가 시 반영하고 있다.

2.4 사용후핵연료 건전성 평가 항목

건식저장 시 증수로 사용후핵연료를 열화시키는 열화기구는 UO_2 핵연료 산화, 피복재의 크리프 (creep), 응력부식균열(SCC), 수소영향 등이 있다.

비밀봉연료의 경우 UO_2 펠렛이 바스켓 커버 가스인 공기에 노출될 가능성이 있으며 이로 인한 UO_2 산화가 발생할 가능성이 있다. UO_2 가 U_3O_7 또는 U_4O_9 으로 산화될 경우 부피팽창이 발생하지 않지만 U_3O_8 까지 산화가 진행될 경우 부피 팽창으로 인해 피복재에 스트레인 (strain)을 발생시킬 수 있다. 스트레인이 2% 이하일 경우 크랙이 전파되지 않으며 UO_2 가 U_3O_8 으로 모두 산화된다고 가정할 때 스트레인이 2%가 되기 위해서는 펠렛의 무게가 약 0.6% 증가하여야 한다고 알려져 있다 [4].

피복재 크리프는 피복재의 온도와 후프 응력(hoop stress)에 영향을 받으며 크리프 속도(creep rate)를 통해 평가한다. 크리프 속도를 고려하였을 때 저장 기간 동안 크리프에 의한 피복재 파단이 발생되지 않아야 한다. 미국 PWR 사용후핵연료의 경우 크리프에 의한 스트레인을 1%미만으로 제한하고 있다.

응력부식균열은 핵연료생성물인 Iodine, cesium 등에 의한 부식과 피복재에 가해지는 압력에 의해 발생하는 현상으로 피복재 내면과 end-cap 용접부에서 발생할 가능성이 있다. 응력부식균열에 대한 실험 및 평가가 1989년 Chalk River Laboratory에서 수행된 경험이 있으며 300°C, 공기 조건하에서 100년 동안 저장될 경우 연료봉당 0.1% 정도의 낮은 확률로 피복재 손상이 발생할 것으로 평가하였다 [4].

수소영향에는 수소취화(hydride embrittlement), 지연수소화균열(DHC), 수소화물재배열(hydride reorientation) 등이 있다.

피복재 내 수소화물이 석출될 경우 수소취화 현상을 발생시키며 이송 중이나 취급 중 충격 하중 또는 진동이 발생 할 경우 피복재 손상이 발생 할 수 있다. 수소취화 현상은 일반적으로 온도별 압축 시험(ring compression test)을 통해 연성-취이 천이온도(ductile to brittle transition temperature)를 확인하고 이를 통해 평가한다.

지연수소화균열은 피복재 내 응력이 집중되는 균열선단이 존재할 경우 응력 또는 수소농도 차이에

의해 균열선단으로 수소가 이동하게 되어 발생하는 현상으로 피복재의 손상을 발생시킬 수 있다.

일반적으로 피복재 내 수소화물의 방향은 원주방향으로 석출되는 것이 피복재 건전성 측면에서 안전하며 이를 위해 피복관 재조시 압연과정 (pilgering)을 통해 원주방향으로 석출되도록 제조한다. 하지만 피복재 내 수소화물이 온도와 후프 응력에 영향을 받게 되면 반경방향으로 석출되는 현상이 발생하며 이를 수소화물재배열이라 한다. 수소화물재배열이 발생되기 시작하는 문턱응력(threshold hoop stress)는 300°C기준 약 60~100MPa 사이로 알려져 있다. 반경방향의 수소화물이 석출되어 있을 경우 피복재의 연성-취이 온도를 상승시키며 지연수소화균열을 촉진시킬 수 있다.

3. 결론

월성원자력발전소 부지 내 건식저장 시설에서 중간 저장되고 있는 증수로 사용후핵연료는 CANDU-6 천연우라늄 연료로 습식저장조에서 최소 6년이상 냉각 후 저장한다. 건전 연료 뿐만 아니라 비밀봉연료도 함께 저장하며 평균연소도는 7,800 MWd/MTU로 확인되었다. 또한 증수로 사용후핵연료는 약 150°C 조건하에서 저장되고 있는 것으로 확인되었다. 건식 저장 시 증수로 사용후핵연료를 열화시키는 열화기구는 UO_2 핵연료 산화, 피복재의 크리프, 응력부식균열, 수소영향 등이 있으며 건전성 평가 시 이에 대한 평가 및 분석이 필요한 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- [1] 한국수력원자력, "CANDU 사용후연료 조밀건식 저장시스템 개발(최종보고서)", 2004.
- [2] Jim Lian, "Integrity Assessment of CANDU Spent Fuel During Interim Dry Storage in MACSTOR", IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Power Reactors, Vienna, May 31-June 4 (2010).
- [3] 한국원자력안전기술원, "사용후핵연료 건식 저장 시설의 안전성 평가 지침 조사 분석", 2012.
- [4] A.K.Miller, "Estimates of Zircaloy Integrity During Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, REP/EPRI-NP-6387, 1989.