

습식저장조에서의 사용후핵연료 부식 건전성 평가

전지훈*, 김소영, 신혜인, 이성기

한전원자력연료(주), 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 242

*jhjeun@knfc.co.kr

1. 서론

사용후핵연료의 안전한 관리를 위해서는 운반 및 저장 중에 기계적 건전성이 확보되어야 하며, 사용후핵연료 운반을 위해서는 저장조 내의 핵연료 건전성이 우선적으로 평가 되어야 한다[1]. 사용후핵연료의 건전성 평가에서, 피복관 부식은 피복관 두께를 감소시키고 재료취화를 유발하는 등 기계적 건전성에 크게 영향을 미치는 인자이다. 따라서 이 논문에서는 발전소 사용후핵연료 저장조에서 사용후핵연료에 대한 부식 건전성 평가를 위한 방법론을 제시하고 그에 대한 평가를 수행하였다.

2. 평가 방법

2.1 대상 핵연료 및 평가조건

사용후핵연료 부식 건전성 평가는 현재 상용공급 중인 핵연료에 대해 APR1400 노심자료를 적용하여 수행하였다. 운반 대상 사용후핵연료는 WH형 혹은 OPR형 발전소에서 연소된 연료이지만, 보수적인 평가를 위해 이들보다 높은 출력으로 설계된 APR1400 노심자료를 활용하였다. 또한, 기존 상용 원전에 공급된 개량 피복관 및 Zry-4 피복관에 대해 평가하였다.

사용후핵연료의 보수적인 평가를 위해 5년 습식 저장 및 자연대류환경 조건을 가정하였으며, 저장 온도는 40°C, 압력은 2기압으로 설정하였다[2].

2.2 해석코드 선정

사용후핵연료 부식건전성 평가를 위해 운전중 열전달조건 뿐만 아니라, 2.1절의 자연대류상태의 열전달 조건을 적용할 수 있는 모델[4]을 포함하고 있는 KNF의 연료봉 성능해석코드인 ROPER[5]를 이용하였다.

2.3 평가 방법론

2.3.1 붕괴열

저장조 내에서 발생하는 붕괴열은 아래와 같이

정의된다[3].

$$\frac{P(t)}{P_0} = 5.8 \times 10^{-3} [t^{-2} - (t+t_0)^{-2}] \quad (1)$$

여기서, t 는 원자로 정지 후 일수, t_0 는 정상출력 (P_0) 운전일수이다.

본 연구에서는 운전 최대 출력을 가정했으며 사용후핵연료 부식건전성 평가에 사용된 전체 출력역은 Fig. 1과 같다.

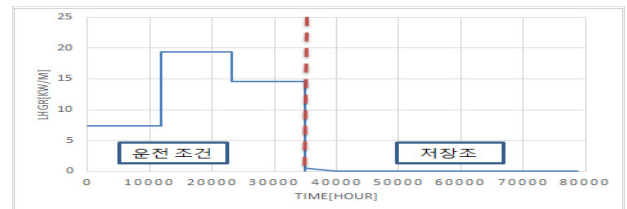


Fig. 1. Linear heat generation rate in operation and storage tank environment.

2.3.2 부식 모델

ROPER 코드에 사용된 지르코늄 합금의 부식모델은 아래와 같다.

$$\Delta W^3 = k_e t \quad (\text{천이 전}) \quad (2)$$

$$\Delta W = k_t t \quad (\text{천이 후}) \quad (3)$$

여기서, ΔW 는 무게증가량, k_e 와 k_t 는 속도 상수, t 는 시간이다. 초기에는 천이 전 모델을 적용하고, 산화막이 일정량 생성되고 나면 천이 후 모델을 적용한다.

2.3.3 운전조건에 대한 계산 및 보수적 연료 선정

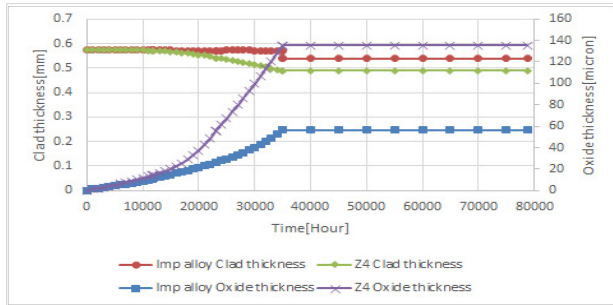
천이 전후의 부식을 연속적으로 반영하기 위해 운전조건에서의 계산을 수행하였다. APR1400 핵설계 자료를 활용해 저장조 내 모든 연료에 대해 운전조건에서 개량 피복관 및 Zry-4 피복관의 산화막 두께와 수소함량을 포함한 부식량을 계산하여 부식량이 가장 높은 연료를 선정하였다.

2.3.4 저장조 조건의 부식량 계산

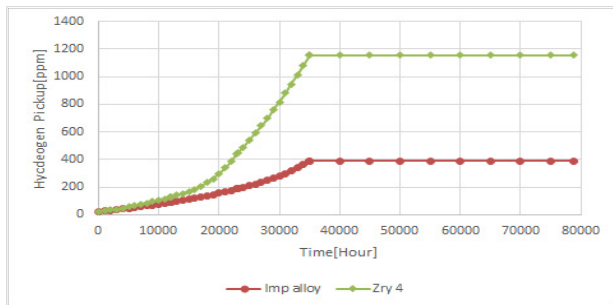
운전 이후 영출력 조건과 식 (1)의 붕괴열 그리고 2.1절의 저장조 조건을 이용하여 선정된 연료에 대해 저장조 조건에서의 산화막 두께와 수소함량을 계산하였다.

3. 평가 결과

개량 피복관 및 Zry-4 피복관의 부식 평가 결과는 Fig. 2에 나타내었다.



(a) Oxide thickness and Clad thickness



(b) Hydrogen pickup amount

Fig. 2. Improved clad and Zry-4 clad fuel corrosion evaluation results on operation and storage tank.

3.1 개량 피복관 부식 계산 결과

Figure 2에 나타난 바와 같이 개량 피복관의 경우 운전 중 산화막 두께 및 수소함량은 설계기준인 100 μ m 및 600ppm을 넘지 않았으며, 저장조 내에서도 산화가 거의 일어나지 않아 피복관 두께를 유지함을 확인하였다.

3.2 Zry-4 피복관 부식 계산 결과

Zry-4 피복관의 경우, 부식 성능이 개선된 개량 피복관을 기준으로 설계된 APR1400의 보수적 출력을 사용하여 운전 중 산화막 두께 및 수소 함량이 설계기준을 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 Zry-4 피복관의 경우에도 저장조 내에서 산화막 두께 및 수소 함량은 증가하지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 습식저장조조건에서 사용후핵연료 건전성평가의 주요 인자인 피복관 부식 건전성을 평가하기 위한 방법론을 제시하고 이에 대한 평가를 수행하였다. 보수적인 가정을 통해 습식 저장조 조건에서 개량 피복관 및 Zry-4 피복관을 사용한 사용후핵연료에 대한 부식건전성을 평가한 결과, 선행 연구[1]들과 유사하게 습식저장조 조건이 사용후핵연료의 건전성에 미치는 영향이 없음을 확인하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014171020166C)

6. 참고문헌

- [1] IAEA, "Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management, NF-T-3.8(2011).
- [2] 설광원 외, "사용후핵연료저장조의 냉각성능 및 피동응축냉각탱크의 열제거성능 정밀해석", KINS/RR-1019 (2013).
- [3] 김창효 외, "핵공학개론", 한국원자력학회 (1989).
- [4] Stuart W. Churchill, Humbert H. S. Chu, "Correlating Equation for Laminar and Turbulent Free Convection from A vertical Plate", Int. J. Heat. Mass Transfer. Vol.18, 1323-1329 (1975).
- [5] J.M. Choi, Y.H. Heo, H.T. Han, "A Fuel Rod Performance Analysis and design code - ROPER", KNS spring, (2009).