

사용후핵연료 건식 저장 용기의 허용 방출을 결정

이우교, 차길용, 노경용, 백창열*, 김태만*, 김순영

(주)레드코어, 대전시 유성구 테크노중앙로 65 남정빌딩 2차 503호

*한국방사성폐기물관리공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

sykim@radcore.co.kr

1. 서론

국내 원전에서 배출된 사용후핵연료의 양이 증가하여 습식 저장고가 점차 포화되고 있으며, 사용후핵연료에 대한 국가 정책이 결정되지 않았기 때문에 처분 혹은 재사용하기 전까지는 중간저장 시설에 저장하여야 한다. 이에 따라 운반, 저장용기 및 중간저장시설에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 중간저장시설의 방사선 영향 평가를 위한 저장용기의 최대 허용 방출을 결정이 필요하다.

본 연구에서는 개념 설계된 21다발 용기의 최대 허용 방출을 계산하기 위하여 ORIGEN-ARP[1]를 사용하여 선원항을 계산하였고, 계산된 모든 방사성 핵종에 대하여 A₂ 값을 고려하여 21 다발 용기의 A₂ 값과 최대 허용 방출을 각각 계산하였다.

2. 본론

2.1 이론

혼합 방사성핵종에서 각 방사성핵종의 원소 및 방사능을 알고 있는 경우에는 식 1)을 사용하여 A₁ 또는 A₂ 값을 계산한다.

$$A_1 \text{ 또는 } A_2 = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 f(i)는 혼합 방사성물질 중 핵종 i의 방사능 또는 방사능 농도의 비율이며, X(i)는 IAEA TS-R-1[2]에 제시된 핵종 i의 A₁ 값 또는 A₂ 값을 나타낸다. 정상 시 허용방출률(Allowable Release Rate, R_N)은 10CFR71에서 규정하고 있으며, 식 2)로 나타낼 수 있다.

$$R_N = L_N C_N \leq A_2 \times 2.78 \times 10^{-10} / s \dots\dots\dots (2)$$

여기서, L_N은 정상 시 최대 허용누출률[cm³/s]이고, C_N은 누출되는 가스의 방사능 밀도[Ci/cm³]를 나타낸다.

기체, 휘발성, 분말 핵종 및 크러드(crud)에 대한 C_N을 구하는 식은 식 3), 식 4), 식 5) 및 식 6)에 나타내었다.

$$C_{gas} = (A_G \cdot f_B \cdot f_G) / V_C \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{vol} = (A_V \cdot f_B \cdot f_V) / V_C \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{fines} = (f_F \cdot f_B \cdot A_R \cdot W_R) / V_C \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{crud} = (f_C \cdot S_C \cdot S_{AR} \cdot N_R \cdot N_A) / V_C \dots\dots\dots (6)$$

여기서 A_G는 용기 내 기체 핵종의 총 방사능, f_B는 용기 내 집합체의 파쇄 비율, f_G는 파쇄된 집합체를 탈출하는 기체 핵종 비율, V_C는 용기 내 자유 공간, A_V는 용기 내 휘발성 핵종의 총 방사능, f_V는 파쇄된 피복관에서 방출되는 휘발성 핵종 비율, f_F는 파쇄된 피복관으로부터 방출되는 분말 핵종 비율, f_B는 피복관 파쇄 비율, A_R은 파쇄된 피복관으로부터 방출하는 분말 핵종의 비 방사능, W_R는 케이스크 내 핵연료 총 질량, f_C는 크러드 파쇄 비율, S_C는 크러드 표면 방사능, S_{AR}은 연료봉(rod) 표면적, N_R은 집합체의 연료봉 수, N_A는 집합체 수를 나타낸다.

2.2 선원항 계산

본 연구에 사용된 사용후핵연료는 현재까지 가장 많이 배출된 WH17x17 집합체를 선원화하였고, 초기 농축도 4.5 wt%, 연소도는 45000 MWd/MTU, 냉각기간은 10년인 사용후핵연료를 계산에 사용하였다.

2.3 A₂ 값 및 R_N 계산

ORIGEN-ARP를 사용하여 계산된 핵종을 기체, 휘발성 및 분말형태로 분류한 후 식 1)를 이용하여 A₂ 값을 계산하였다. 표 1은 대상 핵연료

에 대하여 계산된 기체, 휘발성 및 분말 핵종에 대한 A₂ 값이다.

Table 1. Calculated A₂ Values of the Gas, Volatiles, and Fine Nuclides for the Spent Fuel.

Spent fuel	A ₂ (Ci)		
	Gas	Volatiles	Fines
4.5 wt%, 45000 MWd/MTU, 10년 냉각	2.83E+2	1.61E+1	7.77E-1

표 1에서 보는바와 같이 핵종에 대한 A₂ 값은 기체에 대한 A₂ 값이 가장 크게 나타났고, 분말 핵종에 대한 A₂ 값이 상대적으로 작게 나타났다.

초기 농축도가 4.5 wt%, 연소도는 45000 MWd/MTU이고 냉각기간이 10년인 사용후핵연료 21 다발이 용기에 담겨있을 때, 그 용기에 대한 A₂ 값을 계산하기 위하여 식 3), 식 4), 식 5) 및 식 6)을 이용하였다. 정상 및 가상사고 시 방사능 밀도를 계산할 때 설정되는 여러 인자 값은 NUREG/CR-6487[3]에 수록된 PWR 자료를 참고하였고, 연료봉에 관련된 여러 인자 값은 KOFA(Korean Optimized Fuel Assembly) 체원을 사용하였다. 표 2는 A₂ 및 R_N 값을 구하기 위하여 방사능 밀도를 계산하는데 사용한 인자 값을 나타낸 것이다. 표 1의 A₂ 값과 계산된 방사능 밀도를 바탕으로 사용후핵연료 21다발 용기에 대한 A₂ 및 최대 허용 방출을 R_N 값을 결정하였다.

Table 2. Used Factor to Calculate the Density of the Activities for the Normal Condition and the Hypothetical Accident Condition.

Factor	Normal	Accident	Factor	Normal	Accident
				Normal	Accident
f _v	0.0002	0.0002	f _G	0.3	0.3
f _F	0.6	0.6	S _C	1.4E-4	1.4E-4
f _B	0.03	1	A _R	0.6	0.6
f _C	0.15	1			

표 3은 정상 및 가상사고 시, 초기 농축도 4.5 wt%, 연소도 45000 MWd/MTU 및 냉각기간 10년인 사용후핵연료 21 다발을 적재한 용기에 대한 A₂ 및 R_N 값을 나타낸 것이다. 표 3에서 보는

바와 같이 가상사고 시의 R_N 값은 정상 시 보다 18배 증가하였다.

Table 3. Comparison of the Calculated R_N values for the Normal Condition and the Hypothetical Accident Condition.

	45000 MWd/MTU	
	Normal	Accident
A ₂ (Ci)	6.75E+00	1.25E+02
R _N (Ci/s)	1.88E-09	3.48E-08

3. 결론

본 연구에서는 초기 농축도가 4.5 wt%, 연소도가 45000 MWd/MTU, 냉각기간 10년인 사용후핵연료의 선원항을 ORIGEN-ARP로 계산하고, 이 선원항을 바탕으로 21 다발 용기에 대한 A₂ 값과 최대 허용 방출을 결정하였다. 사용후핵연료 21다발 용기에 대한 최대 허용 방출을 R_N 값은 정상 및 가상사고 시 각각 1.88E-9 Ci/s 및 3.48E-8 Ci/s로 계산되었다. 사용후핵연료 21다발 용기에 대한 R_N 값은 저장 시설 관리 구역 경계를 설정하는 기초자료가 될 것으로 사료된다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 방폐물관리기술개발 중장기 기획사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] Oak Ridge National Laboratory, ORIGEN-ARP: Automatic Rapidly Processing for Spent Fuel Depletion, Decay, and Source Term Analysis, ver. 6, 2005.
- [2] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Requirements TS-R-1, 2009 Edition.
- [3] B. L. Anderson, R. W. Carlson, L. E. Fischer, Containment Analysis for Type B Packages Used to Transport Various Contents, NUREG/CR-6487, 1996.