

가압중수로 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 방사선안전성 예비 검증평가

정재학, 김병수, 정찬우

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

radwaste@kins.re.kr

사용후핵연료 건식저장시설(Spent Nuclear Fuel Interim Dry storage: SNUFI-D)에 저장된 사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel: SNF) 내에 존재하는 방사성물질은 피복관 및 다중 격납경계(바스켓, 실린더, 캐스크 등)를 통해 누설된 후 궁극적으로 환경(대기중)으로 방출될 가능성이 있다. 이에 따라 정상운전, 예상운전과도 및 가상적인 사고시 건식저장시설 운영에 따른 안전성평가를 위하여 보수적으로 방사성물질의 누설을 가정하여 격납기능 및 방사선방호 측면에서의 적합성을 평가하는 것이 일반적인 접근방법이다.

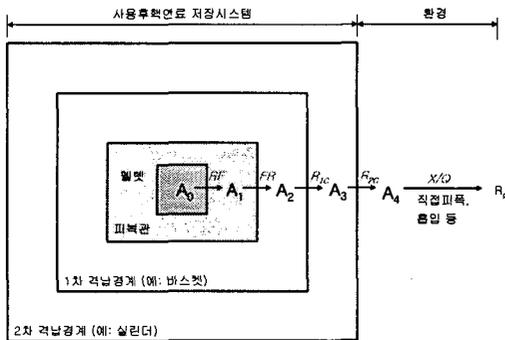


Fig. 1. SNUFI-D 방사성물질 누설경로 및 환경 누설량 평가모델

Fig. 1에 도시한 바와 같이 핵분열생성물 등을 함유한 펠렛은 피복관에 의해 일차적으로 격납된다. 일반적으로 펠렛 내에 존재하는 방사성핵종 중에서 일부만이 "누설 가능한 상태"로 존재하며, 이러한 방사성핵종의 일부가 피복관을 통해 누설될 수 있다. 피복관 외부로 누설된 방사성핵종은 1차 또는 2차 격납경계에 의해 격납되어 외부로의 추가 누출이 억제된다. 그러나 대부분의 경우 1차 격납경계가 방사성물질에 대한 격납기능의 대부분을 수행하게 되며, 2차 격납경계는 보조적인 역할을 수행하게 된다. 따라서 다중의 격납경계를 갖는 저장시스템의 경우, 안전성평가 측면에서는 보조적인 기능을 갖는 2차 격납경계의 기능을

고려하지 않는 것이 일반적인 관행이다.

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 방사성물질 환경누설 경로를 고려하여, SNUFI-D로부터 환경으로 누설될 수 있는 방사성물질의 수량을 예측하는 모델을 개발하였다. 방사성핵종 i 의 누설률은 다음과 같은 관계식으로 계산할 수 있다:

$$R_i = A_{B,i} \cdot FR \cdot RF_i \cdot N_{B/1C} \cdot N_{1C/2C} \cdot N_{2C} \cdot R_{1C} \cdot \frac{1}{LT_{2C}},$$

여기서, $A_{B,i}$ = 핵연료 다발당 핵종 i 의 재고량(Bq), FR = 핵연료 손상률(-), RF_i = 누설가능 상태로 존재하는 핵종 i 의 비율(-), $N_{B/1C}$ = 1차 격납경계 구조물 내부 다발 수(개), $N_{1C/2C}$ = 2차 격납경계 구조물 내부 1차 격납경계 구조물의 수, N_{2C} = 2차 격납경계 구조물의 수, R_{1C} = 1차 격납경계의 누설비율(1/s), LT_{2C} = 2차 격납경계의 누설 억제계수(-).

Table 1. SNUFI-D 예비 안전성평가용 표준 입력변수(안)

항목	정상운전	예상운전과도	가상사고
누설 가능 비율	기체핵종	30%	30%
	휘발성핵종	0.02%	0.02%
	입자핵종	0.003%	0.003%
	크러드	15%	100%
핵연료 손상비율		1%	100%
대기 확산 조건	방법론	RG 1.145	RG 1.145
	안정도	D	D
	풍속	5m/s	5m/s
연간 피폭시간		8,760h	8,760h
			720h
호흡률	성인	$3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	$3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
	연령군별	KINS/GR-199 준용	
통제구역 최솟거리	100m	100m	100m

Table 2. 기존 원자력부지에 위치한 SNUFI-D의 규제제한치(안)

항목	정상운전	예상운전과도	가상사고
운영허가단위	감마선 공기선량	0.1mG/y	0.1mG/y
	베타선 공기선량	0.2mG/y	0.2mG/y
	외부 유효선량	0.05mSv/y	0.05mSv/y
	외부 피부선량	0.15mSv/y	0.15mSv/y
	입자 등에 의한 장기선량	0.15mSv/y	0.15mSv/y
	제한구역 농도	배출관리기준	배출관리기준
저장시설	유효선량	0.05mSv/y	0.05mSv/y
	통제구역 농도	배출관리기준	배출관리기준
부지	유효선량	0.25mSv/y	0.25mSv/y
	감상선선량	0.75mSv/y	0.75mSv/y
	제한구역 농도	배출관리기준	배출관리기준

본 연구에서는 SNUFI-D에서 환경으로 누설될 수 있는 방사성물질에 의한 예상 피폭방사선량 규제검증평가를 위하여, 각종 주요 입력변수의 표준값을 도출하였다. 이를 위하여 시설의 운전조건을 정상운전, 예상운전과도 및 가상사고 조건으로 세분화하고, 각 운전상태에 대해 적용될 표준 입력변수를 선정하였다(Table 1 참조). 또한 SNUFI-D를 기존 발전용원자로가 운영중인 부지에 함께 건설할 경우 적용되어야 할 각종 규제제한치(안)를 도출하여 Table 2에 도시하였다.

가압중수로용 SNF에 존재하는 방사성핵종 재고량은 ENDF 27군 중성자 라이브러리와 SCALE 18군 감마선 라이브러리를 이용하여 ORIGEN-ARP 5.0으로 평가하였다. 한편 통제구역의 공기중 방사성물질 농도와 유효선량은 본 연구에서 개발한 스프레드시트를 이용한 평가도구 RASS-SNUFI(Radiological impact Assessment Spread Sheet for Spent Nuclear Fuel Interim storage)로 평가하였다. 배출관리기준 평가모듈은 방사성물질의 누설률과 대기확산인자를 고려하여 제한구역경계에서 핵종별 농도를 산출하고 이를 배출관리기준과 비교할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 유효선량 평가모듈은 기본적으로 불활성기체에 의한 잠김(Submersion) 및 흡입에 의한 피폭경로를 고려할 수 있으며 필요시 직접방사선에 의한 외부피폭을 추가로 고려할 수 있도록 개발하였다. 한편 동일 부지내 다수의 원자력시설의 운영에 따른 영향을 종합적으로 고려하기 위해서는 보다 복잡한 피폭경로를 고려해야 하며, 이와 관련하여 국내 원자력이용시설에 대한 안전심사에 적용하기 위한 목적으로 개발된 INDAC(Integrated Dose Assessment Code package for KINS) 코드의 GASDOS 모듈을 평가도구로 이용할 수 있다. 표준 입력변수는 KINS/GR-199 선량평가지침에 제시된 기본 입력변수를 활용할 수 있으며, INDAC/GASDOS 모듈을 이용해 불활성기체에 의한 잠김, 지표면 침적, 흡입, 음식물 섭취 등에 의한 다양한 피폭경로를 모두 고려한 세부평가가 가능할 것이다.

선정된 표준조건(즉, M/KN-400 개념설계)에 대하여 전술한 방사성물질 누설경로 및 누설량 평가모듈을 적용하여 환경으로 누설 가능한 방사성물질의 수량을 평가하였다. 정상운전 및 예상운전과도시 누설방사능이 큰 핵종은 Kr-85, H-3, Co-60, Fe-55, Cs-137, Sb-125, Sr-90, Ru-106 등의 순서이며, 이중 Kr-85와 H-3의 방사능이 총방사능의 대부분(약94%)을 점유하는 것으로 나타났다. 한편 가상 사고시에는 Co-60, Fe-55, Sb-125 등의 부식생성물의 누설률이 크게 증가하는 경향을 보여주었다.

상기 사례에 대하여 RASS-SNUFI를 이용해 정상운전, 예상운전과도 및 가상사고시 통제구역의 공기중 방사능 농도를 평가하였다(Fig. 2 참조). 정상운전시 통제구역에서 배출관리기준 대비 핵종별 농도비는 $1.94 \times 10^{-37} \sim 3.59 \times 10^{-6}$ 의 범위였으며, 예상운전과도시 비율은 $1.94 \times 10^{-35} \sim 3.59 \times 10^{-4}$ 범위로 나타났다. 한편 배출관리기준에 대한 예상농도의 비율이 높은 핵종은 Pu-241, Co-60, Sr-90, Ru-106, Cs-137, Sb-125, Rh-106, Ce-144, Ba-137m, Fe-55 등의 순서로 분석되었다.

동일한 사례에 대하여 RASS-SNUFI를 이용해 정상운전, 예상운전과도 및 가상사고시 통제구역에서 예상 피폭방사선량(유효선량)을 평가하고 그 결과를 Fig. 2에 함께 도시하였다. 정상운전 및

예상운전과도시 선량 기여도가 큰 핵종은 Pu-241, Sr-90, Co-60, Cs-137, Sb-125, Ru-106 등의 순서이며, 이들 핵종의 선량기여도가 대부분을 차지(약 99%)하는 것으로 나타났다. 한편 가상사고시 선량 기여도가 큰 핵종은 Co-60, Pu-241, Sr-90, Sb-125, Cs-137, Ru-106 등의 순서이며, 이들 핵종의 선량기여도가 대부분을 차지(약 99%)함을 알 수 있다.

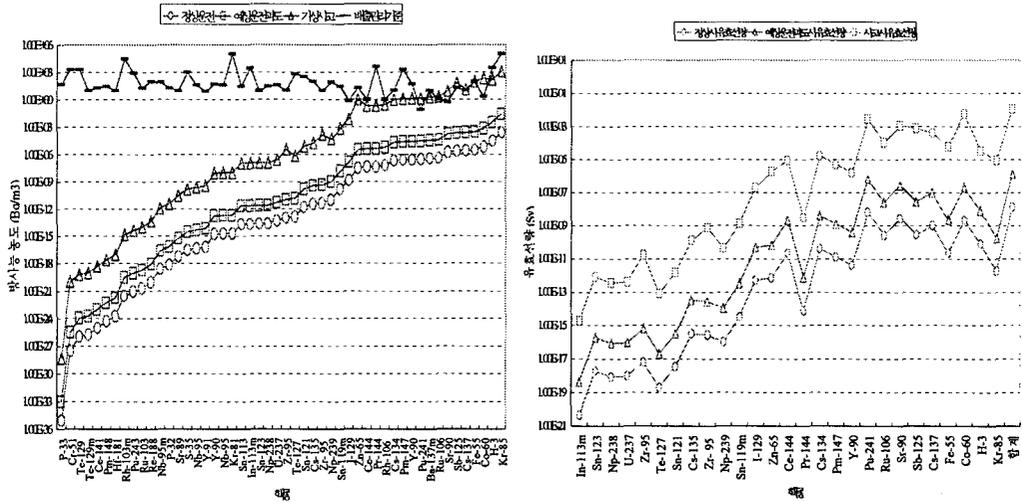


Fig. 2. SNUFI-D 통제구역경계 방사성물질 농도와 유효선량 평가결과(예비 사례연구결과)