

고준위방사성폐기물 심층처분의 위험도기준에 대한 부합성평가 방안

정찬우*, 서은진, 박진용, 정효숙, 방제헌

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

*jcw@kins.re.kr

1. 서론

최근 제정된 「고준위방사성폐기물(HLW) 심층처분에 관한 일반기준」은 HLW 심층처분에 대한 안전목표로서 위험도제약치를 채용하고 있다[1]. 이에 따라 국내 심층처분시스템 Safety case를 개발하려면 이 안전기준의 배경[2]에 맞게 해당 처분의 위험도를 평가해야 한다. 이를 위해 당해 부합성 입증을 위한 위험도평가의 방향을 제시한다.

2. 본론

2.1 HLW 처분안전기준

심층처분에 대한 안전기준은 다음과 같다[1,2].

- ① 처분폐기물로 인한 연간 총위험도(안전목표)가 대표인에 대하여 10^{-6} 을 넘지 않도록 하되;
 - ② 보조적으로, 총위험도를 구성하는 비정상 또는 침입의 개별시나리오에 따른 선량이 대표인에 대해 연간 10 mSv를 넘지 않아야 함;
 - ③ 공학적방벽은 정상조건에서 수천년 이상 핵종 유출을 제한할 수 있어야 하고;
 - ④ 격납성능의 정량평가와 연동하여 안전목표치에 대한 부합성비교의 기간으로 1만 년을 적용하되;
 - ⑤ 부합성기간 이후에는 결정론적 영향을 유발할 수 있는 급격한 피폭증가 추세가 없어야 함.
- Table 1은 당해 심층처분의 안전기준을 국내 천층처분의 안전기준과 비교한다.

Table 1. Safety Criteria for Radioactive Waste Disposal [1,2]

	Low- and Intermediate-level waste Near surface disposal	High level waste Deep geological disposal
Safety objectives	Performance objective (constraint) • 0.1 mSv/y from normal-natural process • 10 ⁻⁶ /y risk from abnormal-natural events Intruder protection (reference level) • 1 mSv/y for inadvertent intrusion	• 10 ⁻⁶ /y risk (constraint) for representative person from all exposure scenarios • * under 10 mSv/y (reference level) for each scenario
Compliance period	After this, no abrupt exposure shall be expected for deterministic effects.	
	1,000 years	10,000 years
	Maximum expected period for performance of engineered barrier system	

2.2 Dose-Likelihood Aggregation

처분폐기물로부터 피폭이 일어날 확률과 그 피폭 방사선량에 의한 보건위험 확률의 곱으로 정의되는 “위험도” R 는 다음과 같이 형식화 할 수 있다[3].

$$R \equiv \gamma E[D] = \gamma \int P(D) D dD \approx \gamma \sum_{k=1}^n P^k D^k \quad (1)$$

여기서, γ =위험도계수[0.05/Sv]; E =기댓값; D =선량[Sv]; P =발생확률; k =피폭경로.

식(1)은 대표인의 피폭환경(habitat)과 연계하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R \approx \gamma \sum_{k=1}^n E[C^k] W^k f^k \quad (2)$$

여기서, C =환경오염준위[예: Bq/kg]; W =대표인의 오염접촉률/habit data [예: kg/y]; f =선량계수[Sv/Bq].

환경오염준위의 기댓값 $E[C^k]$ 는 다음과 같이 처분 폐기물에 따른 오염시나리오 i 와 연계할 수 있다.

$$E[C^k] \approx \sum_{i=1}^{\ell} E[C_i^k] = \sum_{i=1}^{\ell} P_i C_i^k \quad (3)$$

즉, 처분 후 시간에 따라 가능성 있는 누출시나리오들로부터 미래 주변 환경매체에 기대되는 오염준위 $E[C^k]$ 를 평가하고 여기에 식(2)와 같이 대표인을 적용하여 식(1)의 위험도를 어림할 수 있다.

오염시나리오는 해당 누출을 일으키는 사건이나 과정에 따라 식(3)과 같이 한통으로 적용할 수도 있고, 사건수목과 비슷한 방식으로 핵종의 누출과 이동에 관여하는 성분들의 향으로 결합할 수도 있다. 일례로, 오염시나리오를 공학적방벽_누출(i)의 향과 천연방벽_이동(j)의 향으로 결합한다면 식(3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다[3](Fig. 1).

$$E[C^k] = \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^m p_{ij} c_{ij}^k = \sum_{i=1}^{\ell} p(i) \left[\sum_{j=1}^m p(j|i) c_{ij}^k \right] \quad (4)$$

$p(i)$ =누출시나리오 발생확률; $p_{ij}=p(i) \times p(j|i)$;

$p(j|i)$ =시나리오(i)별 경로(j) 경우 확률.

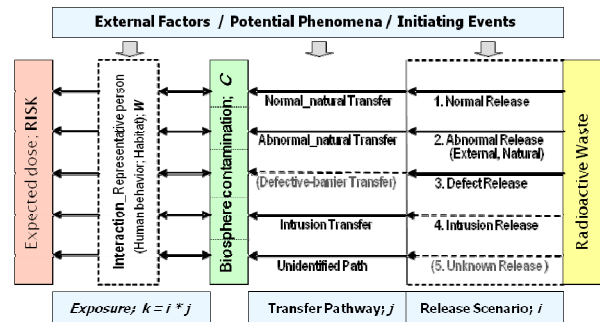


Fig. 1. Construction of Scenarios for Risk Assessment [3].

통합지표인 위험도제약치와 부합함을 보이기 위해 특히 대표인의 설정에 유의해야 한다[4]. 일반적으로 선량의 대표인과 위험도의 대표인은 다르며 이는 피폭시나리오 또는 피폭경로에도 의존한다. 선량과 위험도를 시나리오별로 구하는 경우에는 시나리오별 대표인이 전체 피폭상황에 대해 하나로 유효함을 보장할 수 없다. 이런 문제를 피하기 위해서도 시나리오들을 기대오염준위의 향으로 통합하고 이에 대표인을 상응시키는 상기의 접근법이 유용하다.

평가시나리오는 위험도기준의 취지[2]에 맞게 그 목적을 충족하도록 구성해야 하는 바, Fig. 1에 포함된 5개 범주는 그 예시가 될 수 있다[5]. 또한 식(1)의 관점에서 발생확률이 $10^{-6}/y$ 이상 의미있는 시나리오에 초점을 맞출 필요가 있다(예; Fig. 2). 시나리오는 그 유형 특성에 맞게 발생확률과 선원향을 안배하여 평가에 적용해야 한다. 어떤 파괴적 시나리오는 특정 방벽에 대하여는 일단 일어나면 재발이 무의미한 반면, 다수의 처분고에 대하여는 여러번 일어날 수도 있다. 또한, 침입을 비롯한 일부 시나리오는 처분고에 직접 일어날 수도 있고 다른 시나리오의 전개 과정에 간섭적으로 일어날 수도 있다. 요컨대, 해당 처분시스템으로부터 예상되는 주요 잠재피폭상황들을 포괄하도록 피폭시나리오 세트를 구성해야 한다.

2.3 Risk Profile 구성하기

식(2)로 위험도를 평가하는 데 다음 절차를 적용할 수 있다: ①해당 처분시설의 폐쇄 후 매년(t) 각 누출-이동 시나리오 i 를 전개하여 평가범위의 생태환경에서 평가기간($t \sim T_p$)에 걸쳐 환경오염준위 C_i^k 를 구하고(예; Fig. 3); ②여기에 해당 시나리오가 출발한 해(t)의 발생확률(예; Fig. 2)을 곱하여 오염의 기대준위 $E[C_i^k]$ 를 평가대상의 환경매체 k ($=1 \sim n$)에 대해 평가기간에 걸쳐 구성한다. 이 과정을 모든 평가시나리오($i=1 \sim \ell$)에 대해 반복한다; ③ $E[C_i^k]$ 를 평가기간에 걸쳐 시점별로 합산하여 $E[C^k]$ ($k=1 \sim n$)의 시간분포를 구성한다(예; Fig. 3); ④시점 t 의 $E[C^k]$ 에 상응하는 대표인 habit data W^k 를 분별한다[4]; ⑤시점 t 에서의 $E[D_i]$ 와 R_i 를 $R_i = \gamma E[D_i] = \gamma \sum_{k=1}^n E[C_i^k] W^k f^k$ 로부터 구한다; ⑥위에 서 구한 $E[D_i]$ 와 R_i 를 $i=1 \sim \ell$ 에 걸쳐 합산하여 시점 t 에서의 $E[D]$ 와 R 를 얻는다. ⑦전체평가기간($1 \sim T_p$)을 커버하도록 발생시점 t 를 증가시키며

①~⑥의 과정을 반복한다. 실행 편의를 위해 시간에 관해 적절한 보간법을 적용할 수도 있다.

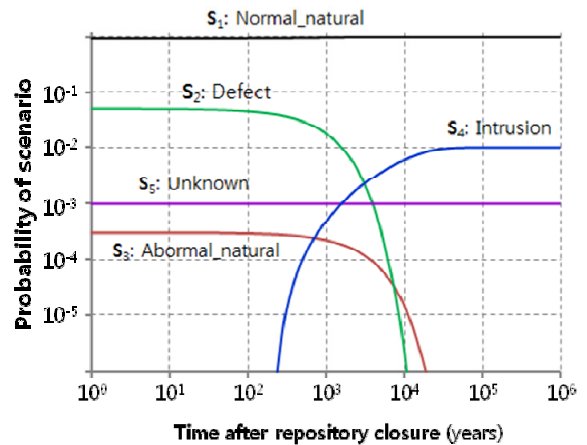


Fig. 2. Probability Distributions of Scenarios (an example).

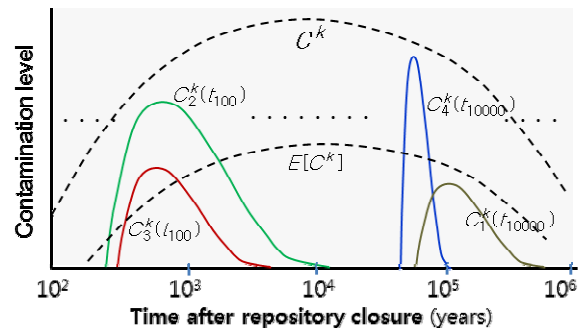


Fig. 3. Scenario Realizations for Constructing $E(C^k)$ ($C_i^k(t_{100})$ 과 $C_i^k(t_{10000})$ 은 각각 폐쇄 후 100 년과 10,000 년에 시작된 시나리오에 따른 환경농도를 나타낸다).

3. 결론

국내 심층처분시스템의 safety case를 개발하려면 양식화된 선량-확률 통합접근법으로 위험도기준에 부합함을 입증해야 한다. 여기서 제시한 방법은 해당 위험도평가를 위한 지침이 될 수 있다.

4. 참고문헌

- [1] 원자력안전위원회고시, 고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준 ('16.1.6).
- [2] 정찬우外, "고준위폐기물 심층처분에 대한 방사선안전기준의 배경과 적용", 대한방사선방어학회 2016 춘계학술발표회 논문요약집.
- [3] E.J. Seo et al., J. Rad. Prot. 35(1) 6-11 (2010).
- [4] E.J. Seo et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50(5) 534-535 (2013).
- [5] KINS/RR-1221(vol.2), 심층처분 안전성검증지침 개발: II. Safety Case 개발 기본지침 초안 (2015.12).