

## 중·저준위방사성폐기물처분시설에 대한 위험도평가 방안

정찬우, 안상면, 박상훈, 석태원

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

icw@kins.re.kr

국내 처분시설의 건설·운영을 위한 허가신청서류의 하나인 안전성분석보고서는 과학기술부고시 <중·저준위방사성폐기물처분시설에 관한 방사선위해 방지기준>에 따라 위험도평가를 통해 자연적 또는 인위적 확률현상으로 인한 처분시설의 방사선위험이 용인할 만한 수준(위험도 <math>10^{-6}/\text{yr}</math>)임을 입증해야 한다. 처분시설의 궁극적인 성능이 요구되는 폐쇄 후 먼 미래에 걸쳐 처분시스템 및 평가에 내포되는 다양한 불확실성 속에서 안전성을 객관화하기 위해서는 위험도평가 방법의 양식화가 절실히 요구된다. 이 논문은 이러한 요구에 부응하는 위험도평가방법을 제안한다.

처분시설에 대한 위험도평가는 다음과 같은 절차에 기초하여 수행될 수 있다: (1)피폭으로 이끄는 사건 연쇄들을 나타내기 위한 시나리오들의 구축; (2)선정된 시나리오들에 대한 발생확률의 평가; (3)시나리오에 따른 결과선량의 계산; (4)결과선량에 연관된 위험도의 평가; (5)평가된 위험도와 해당기준의 비교. 자연방벽의 역할이 강조되는 처분시설에 대한 위험도평가에는 원전과 같이 구성기기에 걸친 전개의 체계적 분석이 가능한 시스템에 유용한 본격적인 PSA기법보다는 처분 사례의 특성에 따라 단순화하여 해당 안전목표에 대한 부합성 판단에 적합한 결과를 도출할 수 있는 통합적인 접근법이 효과적이다.

처분시설 위험도평가에서 고려할 만한 현상을 <표 1> 과 같이 대별할 수 있다. 예시된 소분류 현상들은 하나의 독립적인 시나리오로 전개될 수도 있고 서로 연합하여 하나의 시나리오를 형성할 수도 있다. 처분시스템 특성에 따라서는 보다 조직화된 시나리오 분별법이 필요할 수도 있다. 시나리오가 일단 설정되면 그 개시사건들과 전개의 빈도를 추정하여 시나리오 발생확률을 정량화하는 것이 필요하다. 위험도평가의 대상은 최대“위험”에 놓이리라 합리적으로 예상되는 결정집단을 대표하는 개인으로 한다. 즉, 샘플링 기법을 사용하여 잠재피폭경로 조합들을 두루 탐구해가면서 가정된 지질계 누출에 대하여 생태계에서의 최대위험도에 상응하는 하나의 실제적인 조합을 분별해낸다. 각 경로와 핵종에 대하여 단위피폭이 먼저 고려되고 자세한 거동 특성은 이 경로들을 수학적 샘플링 방법을 사용하여 조합한 위험도가 최대가 되는 프로세스를 통하여 정의한다. 시나리오 개발에 대하여도 이러한 귀납적 접근법을 유사한 방식으로 적용하여 위험도평가의 관점에서 주요 현상을 대표할 수 있는 서로 독립적인 시나리오들을 분별하고 거기에 내포되는 세부 사건/프로세스에 걸쳐 통합적인 발생확률을 부여하여 평가를 수행하는 전략이 효과적일 수 있다.

<표 1> 처분시설 위험도평가를 위한 자연적, 인위적 현상의 분류(예)

대분류	소분류	항목 (예시)
자연현상	지질학적 사건/프로세스	단층활동, 지진활동
	수리지질학적 프로세스	지하수 흐름의 중대한 변화
인간활동	인지하지 못한 결함의 존재	부지조사 시 발견하지 못한 부지 결함(단층 등)
	시스템의 실패	설계/시공 상의 오류, 배수계통 장애
	부적절한 운영관리	부적절한 폐기물 정치/처분
	미래의 침입	(인간침입은 별도로 평가)

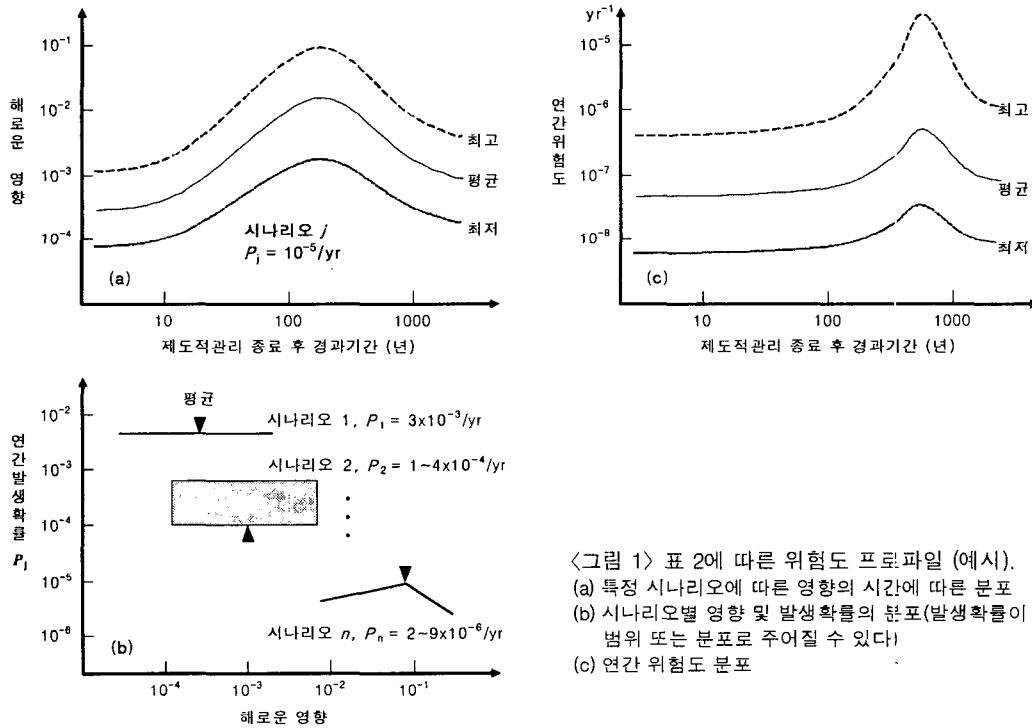
위험도평가의 양식화를 위하여 발생확률의 측면에서 시나리오와 평가기간의 범위를 한정하는 것이 필요하다. 처분시설 안전성평가의 목적상  $10^{-2}/\text{yr} \sim 10^{-6}/\text{yr}$  범위의 발생확률을 갖는 시나리오를 고려하는 것이 적절하다.  $10^{-2}/\text{yr}$  이상의 발생확률을 갖는 시나리오 또는 사건의 연쇄는 통상 정상피폭시나리오의 범주에 포함할 수 있으며 정상 자연현상에 대한 성능평가에서 불확실성분석으로 커버될 수 있다. 반면에,  $10^{-6}/\text{yr}$  이하의 극히 낮은 발생확률을 갖는 시나리오는 현실적으로 그 결말의 크기에 상관없이 고려대상에서 제외할 수 있으며 수치적으로 나타나는 위험도 값도 많은 경우에 무시할 만한 수준이 될 것으로 예상된다. 한편, 시나리오의 발생시점은 처분시설 폐쇄 시점부터 천년의 기간으로 하되, 결말평가의 기간은 제도적관리가 종료되는 시점부터 폐쇄 후 천년(천년 이후에 피크가 나타나는 경우에는 그 시점)까지로 하는 것이 합리적이다.

위험도는 방사선량을 받을 확률과 그 선량에 따른 해로운 영향의 곱이다. 주요 현상들로 인한 결정집단 대표개인의 위험을  $\sum_j P(D_j) \cdot D_j \cdot y$  로 나타낼 수 있다. 여기서,  $P(D_j)$ 는 피폭시나리

오  $j$ 를 통해 선량  $D_j$ 를 받을 연간확률(즉, 피폭시나리오의 연간발생가능성),  $\gamma$ 는 단위선량 당 해로운 효과의 확률( $0.05/Sv$ )이며,  $\Sigma$ 는 해당 위험도가 중요한 시나리오들에 대해 합산됨을 나타낸다. 그러나 많은 경우에 위험도는 서로 다른 사건연쇄 또는 피폭시나리오들의 결과로 그 발생확률을 함께 나타내는 위험도 프로파일(risk profile)들을 다각적으로 분석하여 평가되어야 한다. 상기 위험도 표현에서  $D_j \cdot \gamma$ 는 시나리오  $j$ 로 인해 “어떤 특정의 해”에 예상할 수 있는 해로운 영향(예; 치사암 발생 가능성)이라는 점에 주목하라. 즉, 해당 시나리오의 발생시점과 피폭시점에 따라 어떤 특정의 해에 예상되는 위험도가 달라질 수 있다. 처분시설 안전성평가의 문맥에서 위험도 프로파일은 <표 2>에 제시된 조합을 기본으로 하여 사례의 특성에 따라 적절히 응용될 필요가 있다. 주요 시나리오들을 망라하여 적절히 구성된 위험도 프로파일은 해당 사례의 위험도를 전체적으로 조망할 수 있게 해주며 안전수준과 부합성 판단에 필요한 직관을 제공한다.

<표 2> 위험도 프로파일 구성방법

x축	y축	구성 내용
시간대, yr	$D_j \cdot \gamma$	시나리오별로 전체 평가대상기간에 대해 예상 영향의 분포도를 최저(또는 5 <sup>th</sup> percentile), 평균, 최고(또는 95 <sup>th</sup> percentile) 등으로 제시
$D_j \cdot \gamma$	$P_j$	전체 평가대상기간에 걸쳐 시나리오 각각에 대해 수평 막대그래프 형식으로 예상 영향의 최소, 평균, 최대값을 표시
시간대, yr	$\Sigma P_j \cdot D_j \cdot \gamma$	전체 평가대상기간에 걸쳐 위험도를 최저(또는 5 <sup>th</sup> percentile), 평균, 최고(또는 95 <sup>th</sup> percentile) 세 가지 곡선으로 표시



<그림 1> 표 2에 따른 위험도 프로파일 (예시).  
 (a) 특정 시나리오에 따른 영향의 시간에 따른 분포  
 (b) 시나리오별 영향 및 발생확률의 분포(발생확률이 범위 또는 분포로 주어질 수 있다)  
 (c) 연간 위험도 분포

시나리오별 위험도를 합산하여 총위험도를 산출하는 접근법에 대한 전통적인 반론은 특정 시점에서 피폭자가 모든 시나리오에 동시에 노출되는 것은 아니라는 것이다. 이러한 문제점은 다음과 같은 방식으로 완화될 수 있다. 먼저, 동시에 발생할 수 없음이 명백한 배타적인 시나리오들의 세트에 대해서는 평가시점에서 가장 큰 위험도를 나타내는 시나리오만을 적용한다. 다음으로, 위험도 성능목표와 부합성 비교를 위한 값으로 위험도 분포에서 평균값을 채택한다.

제시된 방법을 적용하기 위해서는 여러 시나리오에 대해 대략 천년의 시나리오 발생시점별로 천년 정도에 걸친 평가를 해야 하므로  $10^7$  단위의 연도별 위험도 데이터를 산출하고 다루어야 한다. 이런 방대한 작업량과 평가의 불확실성을 감안하면서 평가의 목적을 효과적으로 달성하기 위해서는 적절한 단순성 및 보수성과 안정성이 있는 성능평가코드를 사용하는 것이 바람직하다.\*