

## 방사성폐기물 가상 처분장에 대한 성능평가

김창락, 최희주, 조찬희, 이명찬  
한국원자력연구소

### 요 약

방사성폐기물 처분장 폐쇄후 처분시설의 성능평가를 수행하기 위해 해안에 위치한 임의의 지역을 가정하여 평가하여 보았다. 성능평가를 위해 영국 AEA Technology가 개발한 확률론적 종합 성능평가 코드인 MASCOT을 이용하였다. 임해지역에 위치한 가상 처분장에 대해 MASCOT을 이용하여 계산하여 본 결과 생태계에서 개인이 받게되는 예상 최대 위험확률은 폐쇄후 4,000년에  $9.45 \times 10^{-7} \text{yr}^{-1}$ 로서 이는 성능목표치를 만족할 수 있음을 알 수 있었다. 가상 처분장에 대해 성능평가를 수행함으로써 향후 방사성폐기물 처분부지가 결정되었을 경우, 결정된 처분부지의 특성에 따른 성능평가 및 환경영향평가를 원활히 수행할 수 있을 것이다.

### 1. 서 론

방사성폐기물 처분장 폐쇄후 처분시설내의 방사성폐기물이 어떻게 누출되어 인간 생활권에 영향을 미치는가를 평가해 보는 것이 본 논문의 목적이다. 이에 대한 분석은 먼저 누출 가능한 경로를 시나리오 분석을 통하여 선별하고, 각 선별된 경로에 대한 발생 확률 추정 및 수학적 모델링을 통하여 누출량이 예측된다. 누출경로를 선별하기 위하여 국내에서 고려하고 있는 처분 시스템에 대한 시나리오 분석이 2차례의 연구를 통하여 이루어졌다[1,2]. 이 시나리오 분석 결과, 지하 동굴처분장의 경우 발생확률이 1인 정상누출 경로로서 기공이나 균열을 통해서 침투한 지하수가 저장용기를 부식시키고 충전재를 통과해 방사성핵종을 우물이나 샘으로 이동시키는 경우를 선별하였다. 본 시나리오에 따라 영국 AEA Technology가 개발한 확률론적 종합 성능평가 코드인 MASCOT을 사용하여 성능평가를 수행하였다.

### 2. 임의의 방사성폐기물 처분장에 대한 성능평가

#### 2.1 MASCOT

확률론적 성능평가 코드인 MASCOT은 선원함모델, 지하핵종이동모델, 생태계모델의 세부분으로 구성되어 있다[3]. MASCOT에서 다루고 있는 선원함모델로는 단순침출모델, solubility limited release, band release, top-hat release 등의 개념이 이용되고 있으며, 이상의 모델로부터 선원함이 결정되면 다음에는 지하매질을 통한 핵종이동을 예측하여야 한다. 지하 핵종 이동을 지배하는 주요 현상으로는 지하수 이동, 다공성 매질내에서의 분산, 지하매질과의 화학적 반응에 의한 지연, 암반내로의 확산등이 있다. MASCOT에서는 암반을 다공성 매질일 경우와 열극대/다공성 매질일 경우에 대해 각각 고려하는 것이 가능하도록 되어 있다.

생태계모델은 처분장으로부터 방사성물질의 누출로 인해 야기되는 생태계내에서의 방사성핵종의 이동과 누적에 관련되는 모든 과정을 모사한다. 생태계 계산과 관련한 가장 중요한 성능평가 자료는 예상가능한 최대 피폭된자의 피폭선량 예측치이다. 본 평가에서는 처분장의 생태계에 미치는 방사선적 영향을 평가할 수 있도록 만들어진 BIOS 모델을 사용하여, 이 결과를 MASCOT에서의 피폭선량 계산에 입력으로 사용하였다.

## 2.2 가상 처분장에 대한 폐쇄후 성능평가

1993년 수행된 저준위 방사성폐기물 처분장의 개념설계 결과 (그림 1 참조)에 따르면, 방사성폐기물 배치 계획은 표 1과 같다[4]. 처분동굴내 방사성폐기물 용량은 약 10만 드럼으로 처분 대상 폐기물을 형태별 종류 및 준위에 따라 각각 다른 동굴에 처분할 예정이다. 본 논문에 소개한 가상 성능평가에서는 2014년까지 원전 폐기물의 발생량을 반영하여 농축폐액 26,440 드럼, 폐수지 21,571 드럼, 폐필터 5,340 드럼, 잡고체 49,555 드럼을 처분대상 방사성폐기물로 가정하였다.

이에따라 농축폐액의 경우 10,273 드럼은 중준위 폐기물로 분류하여 중준위 동굴에 적재하고 나머지 드럼중 3,597 드럼은 저준위 III동굴에, 12,570 드럼을 저준위 I동굴에 적재한다고 보았다. 잡고체 드럼의 경우 이는 모두 초고압 압축시킨 드럼으로 저준위 II동굴에 36,288 드럼을 적재하고, 저준위 III동굴에 나머지 드럼을 적재한다고 보았다. 폐필터의 경우 1차 냉각계통(17%)에서 발생된 908 드럼을 중준위 동굴에 적재하고 저준위 I동굴에 나머지 드럼을 적재한다고 보았다. 폐수지의 경우 고리 1호기의 95년 이후 발생량과 건설 또는 계획중인 원전으로부터 2014년까지 발생 예정인 고감용을 위해 진조후 HIC 용기에 적재될 5,387드럼을 제외한 16,184 드럼중 사용후 핵연료 저장조(29%)로부터 발생되는 4,693 드럼을 저준위 I 동굴에 적재하고 나머지 준위가 높은 11,491 드럼과 고감용 처리된 5,387 드럼을 중준위 동굴에 적재한다고 가정하였다.

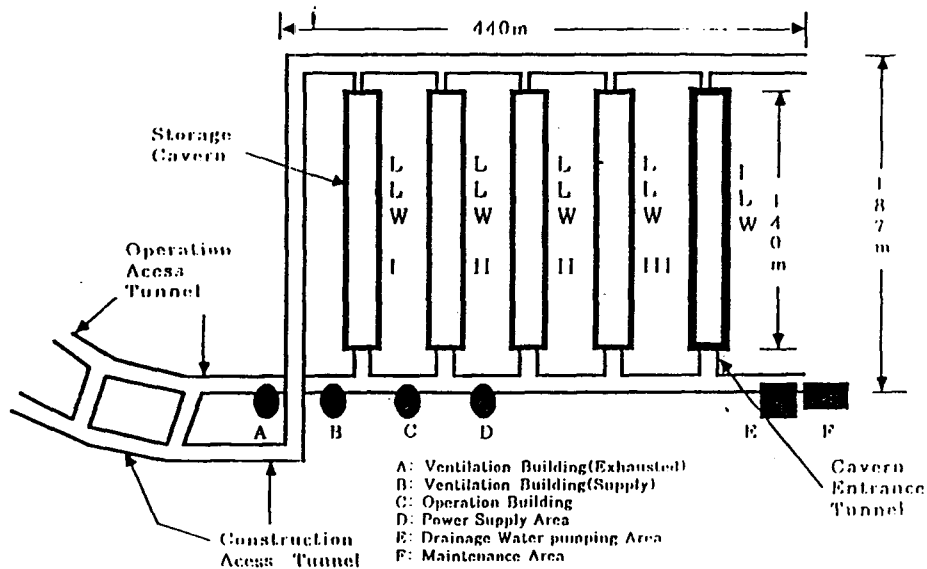


그림 1. 처분시설 배치 개념도

표 1. 지하 처분동굴의 제원 및 동굴별 처분대상 폐기물 종류

처분동굴 분류	처분 폐기물 종류	동 굴 제 원
저준위 I동굴 (약 23,000 드럼/동굴)	농축폐액 폐수지 페필터	단면: 6-PACK 8줄(폭)X6단(높이) = 48개 길이: 6-PACK 단면(48모듈)X길이(8모듈) = 384모듈 단위 10그룹 총량: 6-PACK 3,840모듈/동굴
저준위 II동굴 18,144드럼/동굴 2개소 (36,288 드럼)	잡고체	단면: 6-PACK 8줄(폭)X6단(높이) = 48개 길이: 6-PACK 단면(48모듈)X길이(7모듈) = 336모듈 단위 9그룹 2개소 총량: 6-PACK 6,048 모듈/동굴
저준위 III 동굴 (16,864 드럼/동굴)	농축폐액 잡고체	단면: 6-PACK 11줄(폭)X5단(높이)=55개(농축폐액) 6-PACK 8줄(폭)X6단(높이)=48개(잡고체) 길이: 6-PACK 단면(55모듈)X길이(8모듈) = 440 모듈단위 5그룹(농축폐액) 6-PACK 단면(48모듈)X길이(7모듈) = 336 모듈 단위 4그룹(잡고체) 총량: 4-PACK 2,200 모듈/동굴(농축폐액) 6-PACK 1,344 모듈/동굴(잡고체)
중준위 동굴 (약 30,700 드럼/동굴)	농축폐액 폐수지 페필터	단면:8-PACK 6줄(폭)X10단(높이)=60개 길이:8-PACK 단면(60모듈)X길이(8모듈) = 480 모듈단위 8그룹 총량:8-PACK 3,840 모듈/동굴

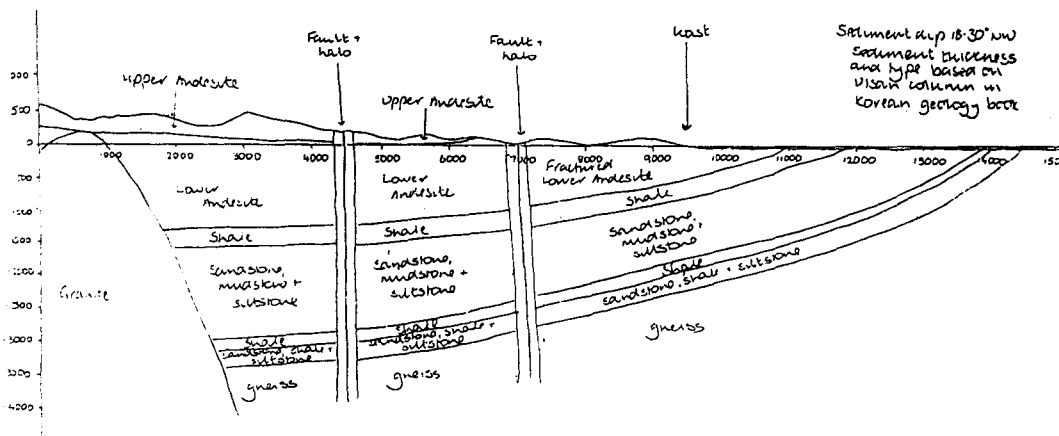


그림 2. 임해지역 가상처분장의 지질 단면도

처분시설이 위치할 부지는 임의로 해안 지역을 선정하여 이를 모델로 하였다. 고려된 가상 부지의 단면도는 그림 2에 나타난 바와 같다. 이 단면도는 가상 부지내에서 가장 높은 산으로 부터 처분장을 관통하여 해안으로 향하도록 설정하였는 데, 이 지역의 수계 발달 방향을 고려하여 결정한 것이다. 이 지역 지표 주요 암반은 안산암(Andesite)이었으며, 광역 지질 조사 자료를 근거로 지층구조를 가상하였다. 또한 부지 지역내에 2개의 커다란 단층 지대가 존재하는 것으로 파악되고 있어, 이 단층도 고려하였다. 처분장의 위치는 지표 조사 결과에 따라 결정하였으며, 심도는 해수면으로부터 50 m 와 -50 m에 가정하였다. 상기한 처분시설이 임의로 선택한 임해 지역에 위치하였다는 가정하에 다음과 같이 성능평가를 실시하여 보았다. LLW1 동굴에 대해서는 시멘트로 고화된 농축폐액 드럼들(ST1A), 시멘트로 고화된 이온교환수지 드럼들(ST1B) 그리고 시멘트로 고화된 폐필터 드럼들(ST1C) 등 세가지의 선원항을 고려하여야 한다. 이들 세가지 선원항은 각각 MASCOT의 Solubility limited source term 모델을 사용하여 평가했다. 두개의 LLW2 동굴은 압축된 잡고체 드럼만이 들어가므로 ST2라고 표기할 단일 선원항만을 고려하면 된다. 고화체에 흡착이 없고 되매움이 되지 않을 동굴의 상태인 약간 산성분위기의 지하수 환경을 고려하여, 용해도가 비교적 높고 흡착을 고려하지 않은 Solubility limited source term 모델을 사용하여 매우 빠른 침출을 모사하였다. LLW3 동굴은 시멘트로 고화된 농축폐액 드럼들(ST3A)과 압축된 잡고체 드럼들(ST3B)의 두가지 선원항이 필요하다. 비록 Solubility limited source term 모델이 두가지의 선원항에 모두 사용되지만 실제로 각각에 사용할 데이터는 매우 다르다. 시멘트 고화드럼의 경우는 높은 pH와 환원 분위기에서의 ST1A와 같은 화학적 파라미터를 사용하게 되고, 압축 잡고체 드럼은 지하수의 pH와 환원 분위기에서의 ST2와 같은 화학적 파라미터를 사용한다. ILW 동굴은 세가지의 서로 상이한 선원항을 사용하는데, 파라핀 고화된 건조 농축폐액 드럼들(ST4A)과 HIC 용기에 담긴 건조된 이온교환수지 드럼들(ST4B)은 MASCOT의 단순침출모델을 사용하며, 시멘트 고화된 폐필터 드럼들(ST4C)은 Solubility limited source term 모델을 사용하여 평가한다. 단순침출모델은 단지 침출율만을 입력으로 필요로한다. ST4A와 ST4B의 폐기물 형태에 대한 침출 데이터가 없는 관계로 매우 보수적으로  $10^2 \text{yr}^{-1}$ 을 가정하였다. 되매움재는 별도의 방벽으로 취급하여 확산과 흡착에 의한 물질이동을 그림 3과 같이 BARR 부모모델을 사용한다. HIC 용기의 Containment time은 용기 자체의 인허가 조건을 고려하여 300년으로 한다. 이와 반대로 보통의 철제 드럼은 전혀 방벽기능이 없다고 보수적으로 가정한다.

그림 3과 같이 MASCOT을 이용한 핵종이동 및 위험도 평가를 수행하였다. 앞서 설명한 선원항을 각 동굴별로 적용하고 중준위 폐기물 동굴에 대해서는 10% 벤토나이트/90%잡석으로 되매움한 경우, 콘크리트로 되매움한 경우, 전혀 되매움하지 않은 경우의 세가지를 각각 평가하였다. 자연방벽을 통한 핵종이동은 지하수 유동해석 코드인 NAMMU를 가지고 지하수 이동경로중 안산암(AND1AB)과 단층대(FAULTB)를 거친후 안산암(AND2A)을 다시 통과하여 지상으로 나오는 긴 경로를 구분하여 각각의 경로를 택할 분율을 계산하여 DISTRIBUTER인 DIST3에 의해 나누어서 각기 다른 핵종이동 부모모델을 사용하였다.

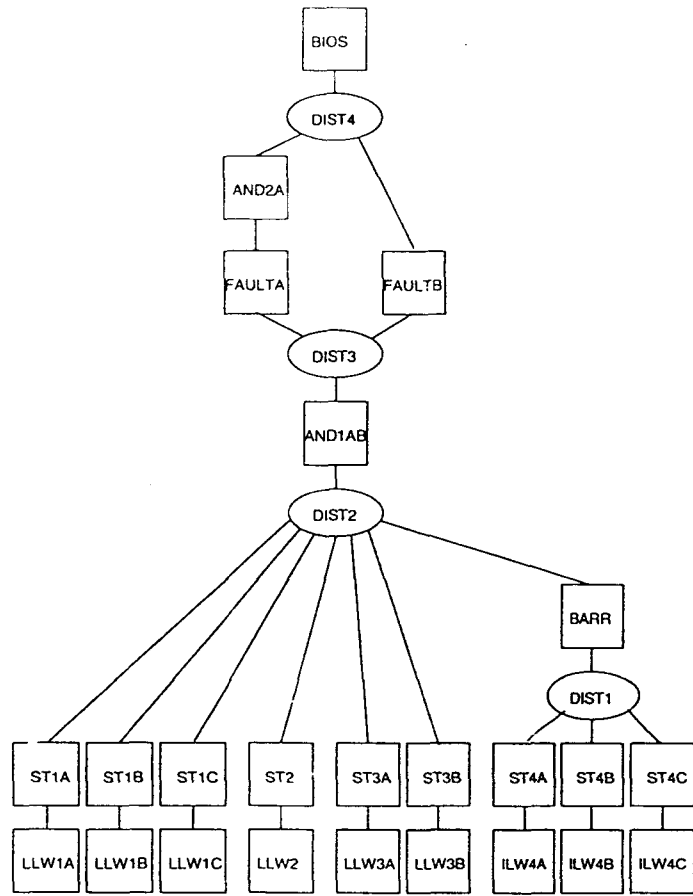


그림 3. MASCOT을 이용한 핵종이동 및 위험도 평가를 위한 계통도

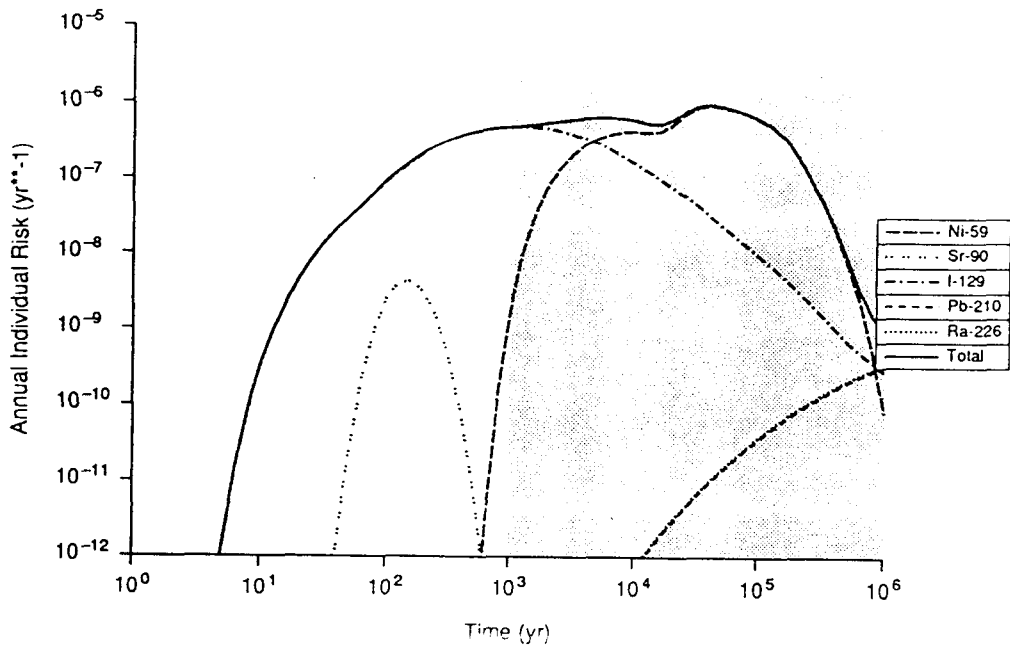


그림 4. 생태계에서의 예상 연간 위험확률

그림 3의 계통도에 따라 MASCOT을 통해 계산한 생태계에서의 예상 연간 위험확률은 그림 4에 나타났다. 그림 4에서 알 수 있듯이 생태계에 영향을 미치는 주요 핵종으로는 I-129와 Ni-59이며 생태계에서 받게되는 최대 예상 위험확률은 폐쇄후 약 4,000년이 경과했을때 약  $9.45 \times 10^{-7} \text{yr}^{-1}$ 로서 이는 처분시설의 성능등에 관한 규정(과기처 고시 제94-2호)의 성능목표치인 예상 연간 위험확률  $10^{-6}$ 을 초과하지 않음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

해안에 위치한 임의의 지역을 가정하여 방사성폐기물 처분장에 대한 성능평가를 수행하여 보았다. 평가에 사용된 MASCOT 코드는 영국 AEA Technology가 개발한 확률론적 종합 성능평가 코드이다. 현재의 평가 결과로는 중저준위 방사성폐기물의 경우 생태계에서 받게되는 연간 최대 위험확률은 폐쇄후 약 4,000년이 경과했을때 약  $9.45 \times 10^{-7} \text{yr}^{-1}$ 로서 성능목표치를 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 현재 고려중인 폐기물에서 생태계로 누출되어 영향을 주는 주요 핵종으로는 I-129와 Ni-59가 있다. 본 성능평가를 통하여 향후 방사성폐기물 처분부지가 결정되었을 경우, 결정된 처분부지의 특성에 따른 성능평가를 원활히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 강창순외, "폐기물 처분장의 방사성물질 유출 시나리오 개발 및 확률론적 분석방법에 관한 연구," 위탁용역 연구보고서, 원자력환경관리센터, 1992.
2. 이건재외, "저준위폐기물 처분장에 관한 안전성평가 시나리오 연구," 위탁용역 연구보고서, 원자력환경관리센터, 1992.
3. J. E. Sinclair, et al., "MASCOT and MOP Programs for Probabilistic Safety Assessment," NSS/R336, NIREX, 1994.
4. 박현수외, "저준위폐기물 영구 처분시설 건설을 위한 기본 설계요건 분석," KAERI-NEMAC/PR-32/93, 원자력환경관리센터, 1994.