

## **Post Closure Long Term Safety of the Initial Container Failure Scenario for a Potential HLW Repository**

### **고준위 방사성 폐기물 처분장 불량 용기 발생 시나리오에 대한 폐쇄후 장기 방사선적 안전성 평가**

**Yong-Soo Hwang, Eun-Jin Seo, Yeon-Myung Lee and Chul-Hyung Kang**

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseong-gu, Daejeon

[yshwang@kaeri.re.kr](mailto:yshwang@kaeri.re.kr)

**황용수, 서은진, 이연명, 강철형**

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received December 6, 2003 / Approved February 10, 2004)

#### **Abstract**

A waste container, one of the key components of a multi-barrier system in a potential high level radioactive waste (HLW) repository in Korea ensures the mechanical stability against the lithostatic pressure of a deep geologic medium and the swelling pressure of the bentonite buffer. Also, it delays potential release of radionuclides for a certain period of time, before it is corroded by intruding impurities. Even though the material of a waste container is carefully chosen and its manufacturing processes are under quality assurance processes, there is a possibility of initial defects in a waste container during manufacturing. Also, during the deposition of a waste container in a repository, there is a chance of an incident affecting the integrity of a waste container. In this study, the appropriate Features, Events, and Processes(FEP's) to describe these incidents and the associated scenario on radionuclide release from a container to the biosphere are developed. Then the total system performance assessment on the Initial waste Container Failure (ICF) scenario was carried out by the MASCOT-K, one of the probabilistic safety assessment tools KAERI has developed. Results show that for the data set used in this paper, the annual individual dose for the ICF scenario meets the Korean regulation on the post closure radiological safety of a repository.

---

**Key Words** : HLW disposal, Scenario, FEP, Total system performance assessment, Initial container failure, Dose, MASCOT-K

#### **요약**

고준위 방사성 폐기물 처분장에서 적용하고 있는 다중 방벽의 한 부분인 처분 용기는 벤토나이트 완

층재의 팽윤과 지압으로부터 폐기물을 역학적으로 안정하게 보호함과 동시에 일정 기간 방사성폐기물의 유출을 억제하는 역할을 한다. 처분 용기의 긴전성은 엄격한 재질 선정과 품질 보증을 통해 확보된다. 그러나 용기 제작 과정이나 수송 중 예상치 못한 사건으로 인해 불량 용기가 발생할 가능성이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 경우 방사성폐기물로 인해 생태계에 미치는 환경 영향을 연간 개인 선량으로 평가하였다. 연구결과 일부 불량 처분 용기가 발생하더라도 현 평가에 사용한 입력 데이터 범위에서는, 국내 고준위 방사성폐기물 처분 개념이 방사선적 안전성을 확보할 수 있는 것으로 판명되었다.

**중심단어:** 고준위 방사성폐기물 처분, 처분 종합 성능 평가, 불량 용기 시나리오, 선량, MASCOT-K

## I. 서론

고준위 방사성폐기물을 안전하게 처분하기 위해서는 처분 방법의 하나인 처분 용기 선정이 중요하다. 현재 대부분의 나라들에서는 주철, 니켈 합금, 구리 등 역학적 안정성을 보장할 수 있으면서도 환원 환경에서의 내부식성이 높은 재질들을 처분 용기 후보 매질로 선정하였는데 국내에서도 해외에서 고려하고 있는 처분 용기 후보 재질들의 특성 및 비용을 평가하여 국내 실정에 맞는 최적 용기 재질을 선정할 예정이다. 이들 재질 중 주철이나 스테인레스 스틸들은 가격이 저렴하고 가공성이 뛰어나고 역학적 안정성도 우수하며, 구리의 경우 백 만년 이상의 용기 수명을 기대할 수 있는 장점이 있다.

처분 용기 후보 재질을 선정할 때 고려해야 할 중요한 요인 중 하나가 용기 수명이나 불량 용기 발생 확률이 처분장 폐쇄 후 장기적 방사선적 안전성에 미치는 영향이다. 일반적인 경우 비교적 저렴한 용기 재질을 사용할 경우 용기 수명이 줄어 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 또한 엄격한 품질 보증 절차적 용에도 불구하고 제조 과정에서 일부 불량 용기가 발생해 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로, 용기 재질 선정 시에는 이와 같은 요소들을 고려한 안전성 평가 결과를 고려해야 한다. 본 논문에서는 이와 같은 관점에서 우선 주철과 같이 용기 수명이 1,000 년 정도로 비교적 짧은 재질을 사용할 경우, 처분 시 불량 용기가 포함되는 경우를 고려해 방사선적 안전성을 평가하여 주철 등의 처분 용기 재질로서의 적정성을 평가하고자 하였다.

본 연구에서는 평가를 위해 먼저 불량 용기 발생으로 인한 핵종 이동과 관련된 FEP들을 선별, 조합해 처분장 안전성 평가 시나리오 구성에서 널리 사용되는 Rock Engineering System (RES) 행렬[1]을 구성하였다. 또한 RES 행렬의 대각 요소 (Diagonal element)들의 상호 반응으로 나타나는 비대각 요소 (Off diagonal element)들을 조합하여 용기 부식, 지하수 유동, 핵종 이동 등의 부 시나리오 (Sub scenario)들을 도출하고, 최종적으로 이들을 조합하여 전체 ICF 시나리오를 도출하였다. 이와같은 시나리오 도출을 위해 FEP to Assessment through Scenario (FEAS) 프로그램[2]를 사용하여 관련 FEP들을 선정한 후, 유사한 FEP들을 그룹화 하여 Integrated FEP (IFEP)를 개발하고, 이들 IFEP들을 RES 행렬 내 대각 및 비대각 요소로 도입하여 RES 행렬을 구성한 후, RES 각 행렬 요소들을 연결하여 용기 부식, 지하수 유동 등과 같은 부 시나리오들을 도출하여 최종적으로 ICF 시나리오를 개발하였다.

연구 결과 도출된 ICF 시나리오의 Assessment Method Flowchart (AMF)에 따라 현재 한국원자력연구소가 개발 보유하고 있는 MASCOT-K[3]를 이용하여 확률론적 방사선적 안전성을 평가하였다.

## II. 시나리오 개발

한국원자력연구소가 수행하고 있는 고준위 방사성폐기물 처분 연구에서는 국내외 FEP 연구 결과를 종합하여 고준위 방사성폐기물 처분장에서 발생 가능성이 있는 사건들을 정리하여 KAERI FEP list[2]를

개발하였으며, 전문가 평가를 통해 주요 FEP들을 선별하고 중요도를 평가하였다. 도출된 FEP들을 그룹화하고 이들을 RES 방법을 이용하여 8×8 행렬로 도출하였다. 일반적으로 시나리오 도출을 위한 방법론으로는 복잡한 FEP들 간의 연계성을 도시하는 Process Influence Diagram(PID) 방법론[1]과 주요 사항들만 행렬 형식으로 도시하고 이들 행렬 각 요소들의 상호 반응을 연결하는 RES 방법론이 대표적이다, RES 방법론을 이용해 한국 처분장 조건에 적합한 기준 시나리오를 도출하여 이에 대한 확률론적 안전성 평가를 수행하였다[4].

본 연구에서는 불량 용기 발생을 가정하지 않는 기준 시나리오 평가 시와 달리 처분 용기가 초기에 불의의 사고나 제작 결함으로 일부 파손되어 방사성 핵종들이 처분 시점부터 외부로 유출되는 시나리오를 선정하였다. 이를 위해 각종 문헌 조사를 통해 용기 불량과 관련된 FEP 과 발생 빈도를 조사해 보수적인 관점에서 불량 용기 발생 확률을 0.1 %로 가정할 수 있었다[5-6].

용기 불량에 따른 방사선적 처분 안전성을 정량적으로 평가하기 위해 관련 FEP들을 조합하여 ICF 시나리오를 도출하였다. 그림 1은 FEP 리스트로부터 도출된 ICF 시나리오 관련 RES 행렬을 도시한다. 이와 같은 RES 행렬의 각 요소들의 반응을 연결하여 최종적으로 ICF 시나리오를 도출하였다. 그림 2는 그림 1에 도시된 불량 용기 발생 관련 RES 행렬 요소들을 연결한 부 시나리오의 하나로 지하수 침투로부터 용기 부식까지의 반응을 순차적으로 나타낸다.

그림 2에서 도시된 바와 같이 처분장 폐쇄 후 암반 내 지하수가 벤토나이트 충전재 층으로 유입된 후 처분 용기와 접촉하여 이미 불량 용기 발생 결과로 존재하는 용기 표면의 구멍(Initial defective hole)을 통해 처분 용기 내부로 유입되어 고화 상태의 폐기물을 용해시킨다. 이와 병행하여 침투 지하수가 암반과 벤토나이트 층 내 부식원을 처분 용기 표면으로 수송해 건전한 처분 용기 표면을 부식시켜 용기 표면에 구멍을 발생시킨다. RES 행렬을 이용해 지하수 유동, 유출된 방사성 핵종 이동과 같은 불량 용기와 관련된 부 시나리오들을 도출하였고 최종적으로

그림 1에 도시된 전체 RES의 대각 행렬 요소간의 상호 반응들을 연결하여 ICF 시나리오를 구성하였다. 이와 같이 도출된 ICF 시나리오에 대해 주요 구성사건 별 평가 방법론을 AMF[2]를 이용해 확정하였다.

### III. 평가

고준위 방사성폐기물 처분 안전성을 평가하기 위해서는 다양한 시나리오에 대한 위해도가 평가되어야 한다. 안전성 평가에서 사용된 기준 시나리오에서는 처분장 및 주변 공학적, 천연 방벽들이 설계 및 부지 요건에서 정한 정상 기능을 수행한다고 가정한다. 이와 같은 기준 시나리오에 대해 AMBER[7]를 이용한 안전성 평가 결과를 그림 3에 도시하였다[4]. 그림 3에 나타난 바와 같이 기준 시나리오의 경우 처분 후 1,000 년 후 용기가 부식되고 난 후 I-129에 의한 유출이 전체 안전성을 좌우하며 수 천만 년이 지난 후에야 초우라늄 계열 원소(TRU)들에 의한 영향이 중요함을 알 수 있다. ICF 시나리오 평가에 사용되는 입력 데이터 값들은 불량 용기의 발생 확률이나 용기 수명을 제외하고는 기준 시나리오 평가 시 사용한 데이터 값들과 동일하다.

#### 가. 입력 자료

기준 시나리오 평가에서는 미국 등 해외 사례를 고려해 처분 용기 수명을 1,000 년으로, 불량 용기 발생 확률을 0으로 가정했는데, ICF 시나리오 평가에서는 용기 수명의 불확실성을 고려하여 이를 확률 밀도 함수로 표시하였으며, 불량 용기 발생 확률도 확률 분포로 주어 이와 같은 불량 용기 발생 확률과 용기 수명에 대한 확률이 전체 처분 안전성에 미치는 영향을 규명하고자 했다. 또한 처분장의 지화학적 조건에 따라 폐쇄 후부터 환원 조건이 유지되는 경우(CASE A)와 폐쇄 후 일정 기간 동안 알파 방사분해(Alpha radiolysis)에 의해 산화 조건이 발생하는 경우(CASE B)가 있는데[6], 본 연구에서는 이 두 가지 경우 중 초기부터 환원 환경이 유지된다는 경우인 CASE A를 평가하고, 향후 추가 연구에서 알파 방사분해에 의한 영향을 평가할 예정이다. 표 1은

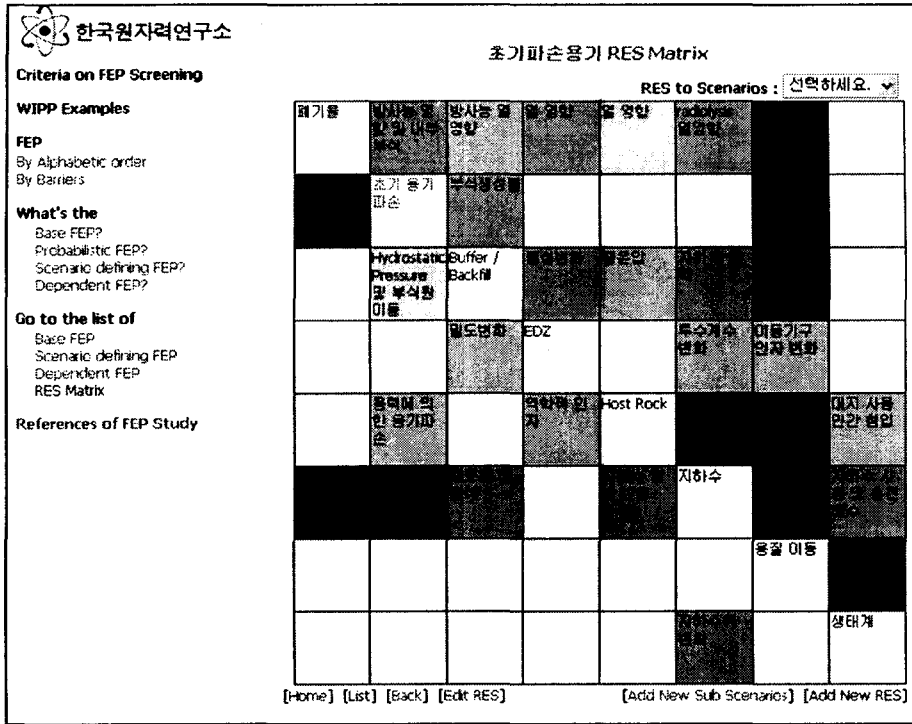


그림 1. 불량 용기 관련 RES 행렬 구조

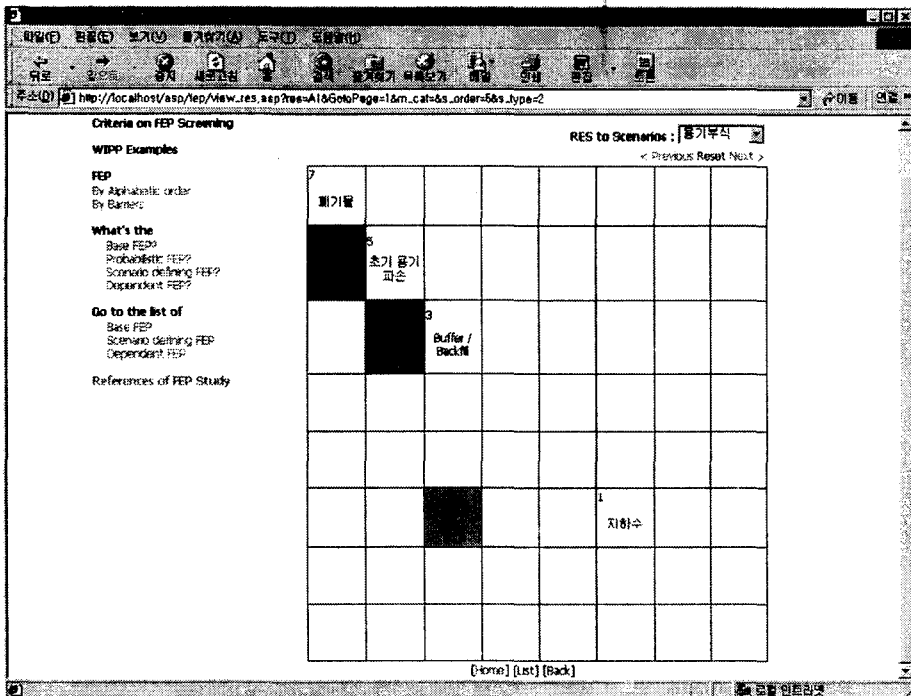


그림 2. 불량 용기 시나리오 중 지하수 침투에 따른 용기 부식을 모사하는 부 시나리오

ICF 시나리오 평가에서 사용한 불량 용기 발생 확률과 용기 수명 등에 관한 각 케이스 별 데이터 값들을 도시한 것이다.

표 1에 도시된 바와 같이 본 평가에서는 주철과 같은 후보 용기 매질을 고려하여 문헌 자료 조사를 통해 이러한 재질을 사용한 용기의 평균 수명을 1,000년으로, 불량 용기 발생 확률을 0.1%로 가정하였다. 이와 같은 자료와 표 2에 도시된 입력 자료 등을 사용해 CASE 1.1.A에서는 우선 결정론적 방법으로 안전성 평가를 수행하였다. CASE 1.2.A에서는 평균 수명을 최소 300년, 최대 10,000년, 평균 1,000년의 삼각 분포로, 불량 용기 발생 확률은 0.1%로 가정하고, 이와 같은 용기 수명의 불확실성으로 인한 방사선적 안전성 측면의 영향을 평가하였다. CASE 1.3.A에서는 불량 용기 발생 확률 최소값을 0, 최대값을 1, 평균값을 0.1%인 삼각 함수로, 용기 수명을 1,000년으로 가정하여, 불량 용기 발생 확률의 불확실성에 따른 방사선적 안전성을 정량적으로 평가하였다. 최종적으로 CASE 1.4.A에서는 용기 수명과 불량 용기 발생 확률을 모두 확률 밀도 함수로 놓고 그 영향을 평가하였다.

삼각 분포 함수로 용기 수명이나 불량 용기 발생 확률이 설정된 경우 확률론적 평가를 위해 MASCOT-K에서 100 번의 샘플링을 수행하였다. 또한 100 번의 샘플링이 확률 분포를 대표할 수 있는지를 검증하기 위해 샘플링 횟수를 CASE 1.2.A의 경우 500 번으로 증가하여 샘플링 횟수 변화로 인한 영향을 조사하였는데 그 결과가 100 번 샘플링 경우와 동일해 100 번 샘플링으로도 확률 밀도 함수를 충분히 대표할 수 있음을 알 수 있었다.

나. 모델링

본 연구에서는 사용후핵연료 집합체 내 대부분의 빈 공간이 주철 등으로 충전된다고 가정해 처분 용기 내 gap 채적은 사용후핵연료 집합체 내의 빈 공간으로 가정하였다. 세슘이나 요오드와 같이 고용해도를 가지는 Instant Release Fraction(IRF) 핵종들은 처분 시점에 이미 사용후핵연료의 피복판까지 이동해 있어, 지하수가 용기를 부식시키고 사용후핵연료와 접촉하여 사용후핵연료 내 gap으로 유입되면 지하수에 용해된 후 지하수 유동 경로를 따라 외부로 쉽게 유출된다. 이와는 달리 기타 핵종들은 이산화우라늄 집합체와의 조화 유출을 통해 외부로 유출된다. 이때 불량 용기가 존재할 경우 불량 용기로부터의 유출은 처분 직후 시작되며, 건전한 용기들로부터의 유출은 용기 수명이 지난 시점부터 시작될 것이다. 이와 같은 점을 고려하여 안전성 평가를 위해 사용한 MASCOT-K 모델링에서는 그림 4에 도시된 바와 같이 불량 용

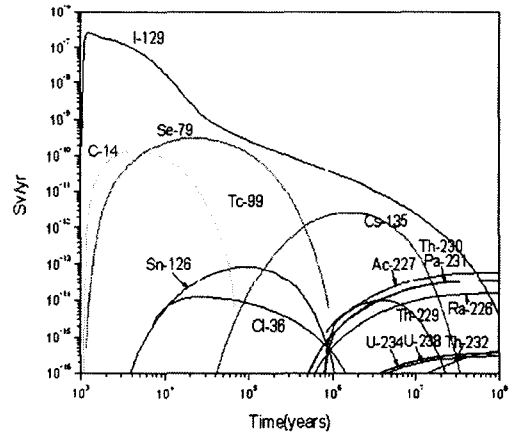


그림 3. 기준 시나리오에서의 연간 개인 선량 평가

표 1. 평가 대상 CASE 특성 (A는 환원 환경을 의미)

CASE	용기 수명		불량 용기 확률	
	확률밀도 함수	함수값 (년)	확률밀도 함수	함수값 (%)
1.1.A	단일 값	1,000	단일 값	0.1
1.2.A	삼각분포	(300, 1000, 10000)	단일 값	0.1
1.3.A	단일 값	1,000	삼각분포	(0, 0.1, 1)
1.4.A	삼각분포	(300, 1000, 10000)	삼각분포	(0, 0.1, 1)

기로 인한 선원향과 그렇지 않은 경우를 구분하기 위해 불량 용기로부터의 선원향에 대해서는 기호 "1"을 사용하였다.

조화 유출과 gap 유출된 핵종들은 벤토나이트 충전재 층을 통과한 후 결정질 단일 암반을 통과해 궁극적으로 Major Water Conducting Feature (MWCF)를 만난 후 유동하다가 최종적으로 생태계로 유출된다. MASCOOT-K 내 gap 유출 모델링 모듈에서는 벤토나이트 충전재 층이 포함되어 있으므로 그림 4에 도시된 바와 같이 gap으로부터의 유출은 단일 암반으로의 유출을 평가하는 "Fractured porous medium" 모듈로 직접 연결되나, 조화 유출 모델링 모듈은 벤토나이트 충전재 층을 포함하지 않고 있으므로 별도로 벤토나이트 충전재 층을 모사하는 "Porous Geosphere" 모듈과 연결된 후 최종적으로 단일 암반 모듈로 연결된다.

본 평가에서는 보수적인 관점에서 벤토나이트 충전재 층에서부터 MWCF까지의 거리를 나타내는 단일의 길이를 100 m로 가정하였는데, 향후 상세한 심부 지질 연구를 통해 정확한 거리에 대한 입력 자료가 도출되면 이를 이용해 추가적인 평가를 수행할 예정이다. 또한 핀란드 TILA-99 보고서[5]와 스웨덴 SR 97 보고서[6]에서 고려한 처분 용기 부식 구멍의 크기에 비례하여 유출률이 결정된다는 가정을 지양하고, 보수적으로 처분 용기 불량 제작이나 부식으로 인해 국부적으로 관통이 일어날 경우, 처분 용기

가 더 이상 방벽으로의 역할을 수행하지 못한다고 가정하였다. 본 평가에서는 이와 같은 보수적인 가정들을 적용하더라도 주어진 용기 재질 조건 하에서 한국형 처분장의 안전성이 보장될 수 있음을 규명하고자 하였다.

**다. 결과분석**

표 1에 요약된 바와 같이 네 가지 경우에 대해서 ICF 시나리오에 대한 방사선적 안전성 평가를 MASCOOT-K를 이용해 수행하였다. 그림 5에 도시된 CASE 1.1.A에 대한 결정론적 방법에 의한 평가 결과는 그림 3에 도시된 불량 용기 발생을 고려하지 않은 기존 평가 결과와 비교 시 유사점과 상이점을 보여준다.

두 시나리오 모두 I-129에 의한 영향이 처분 후

입력 인자명	인자 값
CANDU 처분 용기 수	2,529
PWR 처분 용기 수	11,375
버퍼 충전재 두께	38 cm
단일 길이(MWCF까지 거리)	100 m
단일 내 지하수 유동 속도	0.7 m/yr
단일 폭	0.0001 m
MWCF(다공 암반) 층 길이	800 m
MWCF(다공 암반) 내 유속	20 m/yr

표 2. ICF 시나리오 평가에 사용된 주요 입력 자료

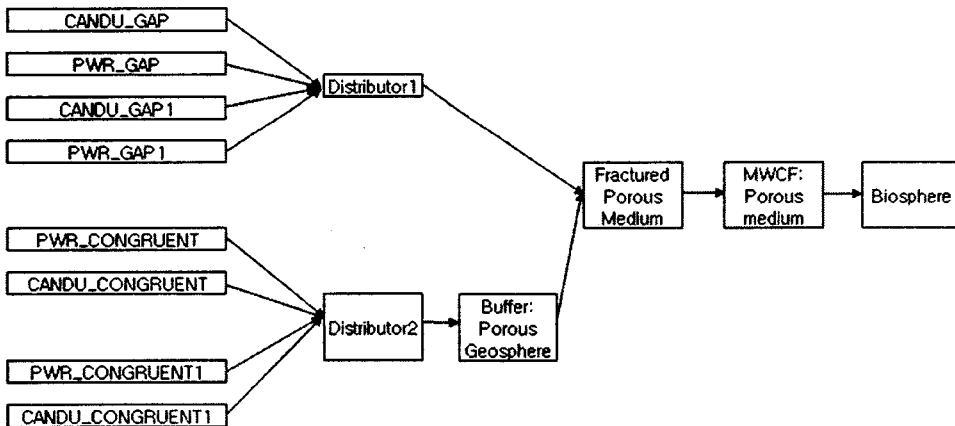


그림 4. MASCOOT-K로 모델링된 ICF 시나리오

100 만년 이상 주도적으로 나타나고 수천 만년 이후에야 TRU들의 영향이 나타나 그림 5의 경우에서도 처분 후 수 천만년까지는 I-129에 대한 영향이 절대적이므로 연간 개인 선량이 시간에 따라 감소하다가 이후의 시간대에서는 다양한 TRU들의 영향으로 인한 효과가 나타나게 되어 전체 선량에 변화가 일어난다. 다만 CASE 1.1.A에서는 기준 시나리오와는 달리 불량 용기 발생 확률이 존재하므로 그림 3의 기준 시나리오와 달리 처분 후 1,000 년 이전에도 일부 불량 용기로부터 유출이 시작되어 생태계에 영향을 미치게 된다.

CASE 1.2.A의 경우 처분 용기 수명에 대한 최소값이 300년, 최대값이 10,000년 최빈값이 1,000년이므로 그림 5에 도시된 평균값에서 나타나듯이 CASE 1.1.A보다 일찍 건전한 용기들로부터의 유출이 시작됨을 알 수 있다. 그러나 CASE 1.1.A와 비교할 때 연간 개인 선량의 최고값에 미치는 영향은 미미하다. 따라서 처분 용기 평균 수명이 1,000 년 전후인 용기 재질을 사용할 경우 처분 용기 수명의 변화가 전체 처분 안전성에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.

CASE 1.3.A의 경우 불량 용기 발생 확률의 최소값을 0, 최대값을 1, 최빈값을 0.1%로 가정했을 때 주어진 용기 수명인 1,000 년의 경우 불량 용기 발생 확률이 전체 처분 안전성에 미치는 영향을 평가한 것이다. 불량 용기 발생 확률이 높아지면 그림 5에 도시된 바와 같이 1,000 년 이전에도 선량값이 증가함을 알 수 있으나 연간 개인 선량 최고값에는 큰 영향을

미치지 못한다. 따라서 일부 불량 용기가 발생하더라도 전체 처분 안전성에 미치는 영향은 미미하다.

CASE 1.4.A에서는 CASE 1.2.A와 CASE 1.3.A에서 독립적으로 살펴 본 용기 수명의 불확실성과 불량 용기 발생 확률의 불확실성을 함께 규명하였다. 그 결과 CASE 1.2.A와 CASE 1.3.A에서 판명된 바와 같이 용기 수명과 불량 용기 발생 확률의 불확실성은 전체 처분 안전성에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

이와 같은 평가로부터 비교적 저렴한 비용의 처분 용기 재질을 사용하더라도 처분장 안전성에 미치는 영향이 없다는 결론을 도출할 수 있었으며 또한 일부 불량 용기가 발생하더라도 실질적으로 안전성을 위협하지는 않는다는 것을 알 수 있었다. 한편 이와 같은 평가 결과는 IRF 핵종의 중요성을 잘 보여주는 것으로 한국형 핵연료에서의 IRF 선원항 규명이 중요함을 나타낸다. 특히 I-129와 같은 IRF 핵종들은 흡착 저지능이 매우 낮으므로 벤토나이트 완충재 층만으로는 유출을 억제하기 힘들다. 따라서 이들이 안전성에 미치는 영향을 저감시키기 위해서는 천연 방벽의 역할이 중요하다. 또한 일본, 독일 등 재처리 고준위 방사성폐기물 처분을 시도하는 국가들과는 달리 국내 상황에서는 상대적으로 TRU의 영향이 미미하므로 이들 원소들에 대한 공학적 방벽 및 천연 방벽에서의 핵종 이동 지연 인자 계수 등을 규명하는 것보다 국내 사용후핵연료 내 IRF 양을 정확히 규명하는 연구 등이 상대적으로 중요함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 한국형 처분 개념에 대한 방사선적 안전성 평가의 일환으로 주요 대안 시나리오 (Alternative scenario)로 고려되고 있는 ICF 시나리오를 개발하고 MASCOT-K를 이용해 확률론적 평가를 수행하였다. 평가 결과 불량 용기 평균 발생 확률이 0.1 %이고, 용기 평균 수명이 1,000 년인 용기 재질을 사용할 경우 주어진 입력 자료 범위에서는 처분 개념에 대한 방사선적 안전성이 확보됨을 보일 수 있었다.

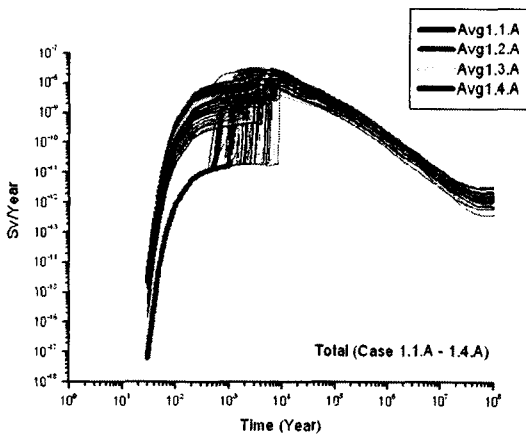


그림 5. ICF 시나리오에 대한 연간 개인 선량 평가

향후 연구에서는 용기 수명이 높은 구리를 사용했을 경우 처분 안전성을 상대적으로 얼마나 향상시킬 수 있는지를 정량적으로 규명하고, 또한 본 논문에서 적용한 환원 분위기 조건이 아닌 다양한 지화학 조건에서의 용기 수명과 불량 용기 발생 확률의 불확실성이 전체 처분 안전성에 미치는 영향을 규명해 보고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 국가 원자력 중장기 연구 개발 사업의 일환으로 추진되었습니다.

## 참고 문헌

1. J Andersson and L King-Clayton, "Evaluation of the Practical Applicability of PID and RES Scenario Approaches for Performance and Safety Assessments in the Finnish Nuclear Spent Fuel Disposal Programme", POSIVA Work Report TURVA-96-02, April 1996.
2. 서은진, 황용수, 강철형, "Building Transparency of the TSPA on Radioactive Repository through the Development of the FEAS Program", 한국암반공학회지, 13(4), pp 270-278, (2003).
3. 강철형 외, "심지층처분시스템개발", KAERI/RR-2336/2002, 한국원자력연구소, (2003).
4. 황용수, 김성기, 강철형, "Uncertainty in Scenarios and Its Impact on Post Closure Long Term Safety Assessment in a Potential HLW Repository," 한국원자력학회지 35(2), pp 108-120, (2003).
5. T Vieno and H Nordman, "Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, TILA-99", POSIVA 99-07, March 1999.
6. SKB, "SR97", Stockholm, 1999.
7. Enviro Quantisci, "AMBER, User Guide for Version 4.5", Abingdon, 2003.