

핀란드 올킬루오토 중저준위 방사성 폐기물 처분장 건설에 따른 교훈

황용수 · 이연명 · 한경원

한국원자력연구소

1. 서 론

1950년대 말부터 전 세계적으로 수행되고 있는 방사성 폐기물 처분 사업을 수행하는데 있어 아래와 같이 윤리적인 책임이 강조되고 있다.

(1) 방사선의 영향으로부터 현재 및 미래에 대한 인간 건강과 환경을 보호하여야 한다.

(2) 후세대에 불합리한 부담을 주지 않아야 한다.

(3) 환경 보호가 개발 과정의 통합적인 부분이 되어야 하고 개발은 자연 환경의 파괴 없이 유지되어야 한다.

우리 나라를 비롯한 방사성 폐기물 영구 처분 연구 사업을 추진하고 있는 세계 여러 나라들에서는 이러한 윤리적 책임을 완수하기 위해 활발한 연구 사업을 추진하고 있으며, 2000년 초 국가 원자력 중장기 연구 개발 내 중저준위 방사성 폐기물 영구 처분에 관한 연구가 재개되어 현재 한국원자력연구소(KAERI)와 한국전력공사(KEPCO)가 공동 연구를 수행 중이다. 또한 1990년대 초부터 한국원자력안전기술원(KINS)을 중심으로 추진되던 관련 규제 설정 연구도 결실을 이루게 되어 기존의 과기부 고시 96-16, "중저준위 방사성 폐기물 처분 시설에 관한 성능 기준" 개정 작업이 현재 활발히 수행되고 있다. 현재 개정 시안¹⁾에서 제안한 중저준위 방사성 폐기물 처분 관련 주요 항목은 아래와 같다.

(1) 성능 목표 : 중저준위 방사성 폐기물 처분 시설은 폐쇄 후 자연 현상으로 인하여 일반 국민에게 예상되는 영향이 연간 $0.1 \text{ mSv}^{\text{2)}$ 를 초과하지 않도록 설계되어야 한다.

(2) 인간 침입에 대한 방호 : 중저준위 방사성 폐기물 처분 시설은 인간 침입의 가능성과 그 침입에 따른 방사선 영향을 가능한 한 낮추도록 설계되어야 한다.

(3) 아래 각 호의 조건을 만족하는 안전성 평가가 수행되어야 한다.

1. 처분 시설이 폐쇄된 시점으로 천 년의 기간에 대하여 평가한다.

2. 합리적으로 보수적인 시나리오를 사용하여 평가한다.

3. 해당 결정 집단을 대표하는 개인에 대하여 평가한다.

4. 현재의 환경 조건이 그대로 유지되는 사례에 대한 평가를 포함하도록 한다.

위와 같은 윤리적 법적 책임을 완수하기 위해 국내 처분장 건설 시에도 그 안전성이 무엇보다도 강조된다. 본 기술 보고 논문에서는 상기 윤리적 법적 요건을 만족하는 처분장 건설 운영 및 폐쇄를 뒷받침하기 위해 방사선적 종합 성능 평가 연구를 수행하는데 필요한

(1) 규제 요건 만족을 위한 연구 방향은 무엇이며

(2) 관련 해외 최신 처분 시설 성능 평가 방향은 어떠한가

(3) 현재 연구의 현안은 무엇이고 그에 대한 향후 대처 방안은 무엇인가

에 대해 중저준위 방사성 폐기물 동굴 처분 사업을 활발히 추진하여 1990년대 올킬루오토와 로비사 두 부지에 영구 처분장을 건설하고 최근 사용후 핵연료 영구 처분 부지 승인을 받은 핀란드의 사례를 벤치 마킹하기로 하겠다.

2. 핀란드 올킬루오토 VLJ 처분장 성능 평가 분석

핀란드는 1990년대에 들어 동굴 형식으로 중저준위 방사성 폐기물을 처분한 유일한 국가이다. 민영 TVO 발전소는 1990년대 중반 유라조키 지역 올킬루오토 섬에 올킬루오토 원자력 발전소에서 발생하는 중저준위 방사성 폐기물을 영구 처분할 수 있는 두 개의 사일로로 결정질 기반암에 건설하였으며, 옛 IVO도 90년대 후반 로비사 발전 단지 내에 중저준위 방사성 폐기물을 영구 처분할 수 있는 시설을 준공하였다. 두 처분장 모두 향후 원전 해체시 발생할 해체 방사성 폐기물을 저

장할 수 있는 공간을 처분장 내에 확보하였다. 두 곳의 지질 구조는 국내 대표적인 화강암반과 매우 유사하고 처분장이 연안에 위치하고 있다는 점에서 국내 중저준위 방사성 폐기물 동굴 처분장 관련 연구 사업에 시사하는 바가 크다.

핀란드에서는 1990년 초, 구 소련이 붕괴하기 전까지는 로비사 발전 단지에서 발생하는 모든 방사성 폐기물은 구 소련으로 반환되었고, 다만 올킬루오토에서 발생하는 방사성 폐기물의 처분만이 현안이었다. 핀란드에서는 원자력 발전이 시작된 1970년대 말부터 이미 사용후핵연료를 포함한 방사성 폐기물의 영구 처분을 위한 연구 사업이 추진되었다. TVO는 내부에 방사성 폐기물을 관리할 부서를 설립하고 핀란드 국립연구소인 VTT, 암반공학 전문 엔지니어링 회사인 S&R, FINTEC 등과 연계하여 활발한 부지 조사, 성능 평가 관련 연구들을 국제 공동 연구 및 국내 연구 등을 통하여 수행하였다.

구 소련의 완전 붕괴와 핀란드의 EU 가입은 핀란드 처분 프로그램에 커다란 변화를 가져왔다. 우선 로비사에서 발생되던 방사성 폐기물을 소련으로 반환하는 작업이 중단되었으며, 유럽 연합 가입 직전 핀란드 의회는 방사성 폐기물을 포함한 유해 폐기물의 수출입을 엄

격히 금지시키는 법안을 통과시켰다. 이에 따라 핀란드는 자국 내에서 발생하는 사용후핵연료를 포함하는 방사성 폐기물을 모두 국내에서 처분해야만 하게 되었다. 이러한 환경 변화에 따라 옛 IVO는 로비사 발전 단지 내에 중저준위 방사성 폐기물 처분장을 건설 운영하게 되었으며, 현재는 이 두 기관이 60:40(TVO가 60임)의 비율로 출자한 독립 비영리 법인인 POSIVA가 핀란드 방사성 폐기물 관리 사업을 총괄하고 있다.

2.1 처분 시설 개요

올킬루오토 부지에서 발생한 폐기물은 주당 수 차례 지하 50-100 m 심도로 굴착된 tonalite 기반암에 설치된 두 개의 사일로에 저장된다. 진입 터널 입구에서 실제 폐기물 적치 구역인 사일로까지의 거리는 약 670 m이며 사일로 상부에서 하단까지 높이는 60 m이다. 그림 1에 도시된 바와 같이 사일로의 크기는 지름 24 m, 높이 34 m이다. 저준위용 사일로는 슛크리트로, 비교적 준위가 높은 중저준위용 사일로는 강화 콘크리트로 보강되었다. 사일로의 덮개는 25 cm 두께의 콘크리트 구조물이고 두 개의 사일로는 길이 65 m의 홀로 연결되어 있다.

건설 기간 동안 굴착 상태로 있던 공사용과 보조 작업 공간은 운영 기간이 종료되면 처분장 굴착시 발생한

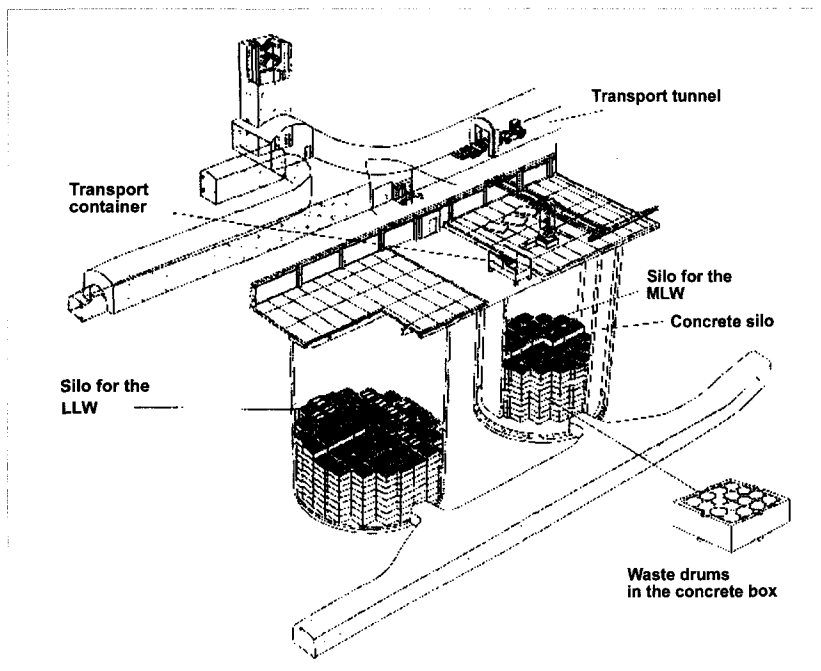


그림 1. 핀란드 올킬루오토 VLJ 처분장 내 사일로²⁾.

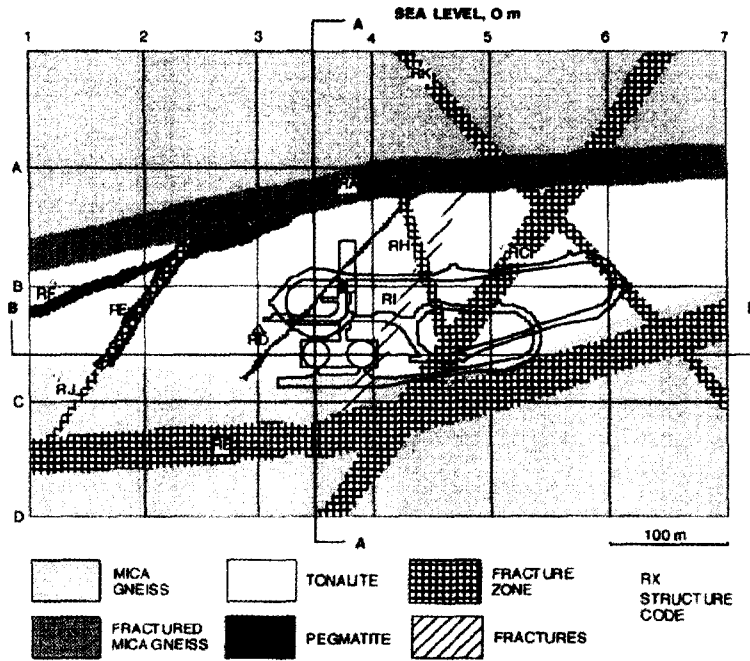


그림 2. 울킬루오트 처분장 주변 지역에 분포하는 단열²⁾.

파쇄 암반으로 충전되는 등 모든 공간들은 지하수 침투와 이에 따른 핵종 유출을 방지하기 위해 밀봉된다.

처분장은 섬 내 Ulkopaa 봉 지하에 건설되는데 발전소에서 1 km 내에 위치한다. 이 곳은 지질적으로 안정된 곳이며, 처분장은 지하수 유동을 고려하여 지표 지형이 가장 높은 곳 하부에 위치한다. 섬과 부근 바다에서는 두께 3-5 m, 내륙에는 10 m 정도 점토가 표면을 덮고 있는 지역이 있다. 지표면의 토양층은 silt와 clay로 구성되어 있다. 주요 분포 암반으로는 tonalite gneiss, 운모 편마암, 페그마타이트 dyke이다. 처분 시설은 대표적인 결정질 암반 특성을 지니고 있는 tonalite gneiss 지역에 설치될 것이다. 처분장의 암석들은 풍화된 흔적이 거의 없으며, 단단하고, 크고, 단열도 거의 없다.

처분장 주변 지질 조사에 따르면, 그림 2에 도시된 바와 같이 아래의 5 종류로 대별되는 총 12곳의 파쇄대가 존재한다.

- (1) I: 주로 RA (처분장의 북쪽), RB (처분장의 남쪽) 단열 영역.
- (2) II: RC, RG, RH, RJ 단열 구조.
- (3) III: RE, RF 단열.
- (4) IV: RI 영역에서의 단열은 주위 영역보다 밀집되어 있다.

(5) V: 개개 단열과 단열 RD, RO.

울킬루오트 처분장의 안전성은 공학적 방벽과 천연 방벽 등 다중 방벽에 의해 보장되는데 핀란드 처분 개념에서는 국내와는 달리 천연 방벽의 역할이 특히 중요하다. 우선 공학적 방벽의 역할에 관해 살펴보면 아래와 같다.

(1) VLJ 처분장에서 공학 방벽은 고정화된 폐기물, steel 드럼, 콘크리트 상자 및 콘크리트 사일로를 포함한다.

(2) 파쇄 암반을 이용한 충전 물질들은 핵종이 폐기물과 콘크리트 사일로부터 방출되는 것을 막는 역할을 한다.

(3) 암반 벽면에 보강된 슛크리트 층은 지하수와 핵종의 이동을 저지한다.

(4) 기반암 내 존재하는 단열을 밀봉함으로써 구조적 안정성을 향상시키며 암반내 지하수 유동을 억제하고 또한 향후 인간 및 동물의 활동으로 인한 침입을 막고, 지하수에 의해 운반된 핵종을 저지하는 역할을 한다.

공학적 방벽은 폐기물의 활동이 약 1/100로 감소하는 기간인, 초기 몇 백년동안 가장 중요한 핵종 이동 저지 방벽으로의 역할을 수행하며 이 기간 후 장기 안전성은 천연 방벽에 의해 보장된다.

핀란드 규제 기관인 STUK이 제시한 중저준위 방사성 폐기물 처분장 안전성 분석에 요구되는 규제 조건들은 아래와 같다.

(1) 처분장에 의해 야기되는 연간 개인 선량 한계치 (annual individual dose limit): 0.1 mSv.

(2) 자연현상 및 인간활동에 의해 야기되는 가능한 사건의 결과에 의한 연간 개인 선량 한계치: 5 mSv.

이러한 선량 평가 시에 고려되는 주요 사건들로는 기반암 이동에 의한 방벽의 손상, 처분장 근처에서의 우물 굴착, 인간이 처분장으로 침입하는 사건 등이 있다.

처분장 시설 운영과 관련하여 핀란드의 기준은 처분장 시설이 방벽의 기능을 현저하게 손상시킬 수 있는 폐기물의 팽윤, 생성된 가스의 영향, 폐기물 내의 화학적으로 활동적인 물질들의 상호작용을 단시간 내에 배제할 수 있도록 설계되어야 한다고 규정한다.

2.2 안전성 분석 및 시나리오 계산 수행

안전성 분석을 위한 FEP 분석과 이에 의거한 시나리오 개발을 통하여 크게 (1) 보수적인 기준 시나리오, (2) 보다 현실적인 시나리오, (3) 자연 재해와 같은 시나리오들이 규명되었다.

2.2.1 올킬루오토 처분장의 기준 시나리오

기준 시나리오란 현재의 생태계 조건 하에서 지진과 같은 자연 재해가 아닌 정상적인 지하수 침투로 인하여 처분 용기가 부식되고 지하수에 용해된 핵종들이 지하수 흐름을 따라 외부로 방출되는 것을 말한다. 일반적으로 기준 시나리오에서는 핵종 이동 단계를 아래와 같이 4단계로 구분한다.

▶ 지하수 유동(groundwater flow 모델)²⁾: 처분장 부근에서의 지하수 체계, 처분장을 통과하는 지하수량, 처분장에서 생태계까지의 지하수 이동경로 및 시간을 산정하여 최종적으로 유출된 방사성 물질들이 기반암을 통과하면서 어떤 경로를 거쳐 대수대로 유입, 희석되는가를 규명함.

▶ 천연 방벽으로의 핵종 유출(near-field 모델): 공학적 방벽의 열화(degradation)와 핵종의 용해, 이동 등에 미치는 지화학 조건을 평가하고 이에 따른 핵종 이동 현상을 규명함.

▶ 천연 방벽에서의 핵종 이동(migration 모델): 단열 암반내 발달한 단열망을 타고 유출된 핵종들이 다양한 지질 구조를 가진 암반 내를 어떻게 이동하는가를 규명함.

▶ biosphere에서 핵종 이동(biosphere 모델): 올킬루오토 주변 내륙, 해양 생태계로 유입되는 핵종 이동량을 분석하고 이에 따른 주민 피폭량을 평가함.

기준 시나리오 평가에서는 다음과 같은 사항들이 고려되었다.

- (1) 기반암과 처분장에서의 지하수 흐름
- (2) 지하수의 처분장으로의 침투, 처분 용기 부식, 지하수로 인한 핵종 용해 및 유출
- (3) 공학적 방벽 내에서 확산과 지하수에 의한 핵종 이동
- (4) 기반암 내 단열을 통한 핵종 이동
- (5) 고화 폐기물의 팽윤
- (6) 사용되지 않은 양이온 교환수지, 운영 폐기물에서의 유기물과 같은 폐기물 내 유해 화학 물질들의 영향
- (7) 주요 공학적 방벽인 콘크리트의 물리적 화학적 열화
- (8) 처분장 주변의 용기 및 응력 변화에 따른 해수면 변화
- (9) 우물 굴착
- (10) 지반 침하
- (11) 상수 및 관계용수로 오염된 지하수 사용
- (12) 기반암과 방벽의 특성에 따른 지하수 유동 속도 영향
- (13) 방사성 물질의 붕괴
- (14) 고화 폐기물 내부에서 진행되는 방사성 물질 이동 지연 영향
- (15) 콘크리트 및 파쇄 암반 내에서의 방사능 물질의 지연
- (16) 단열 주변 다공 암반 내 공극에서의 방사능 물질의 확산
- (17) 대수층 등에서 발생하는 방사성 물질 희석

2.2.2 현실적인 시나리오

현실적인 시나리오에서는 기준 시나리오에서 사용한 지하수 흐름, 공학방벽의 열화율, 지연 인자 등에 대해 보수적인 값 대신에 몇몇 항목들에 대해서 실제 타당한 값들을 채택하였다. 그러나 생태계 관련 선량 인자 등을 사용할 때에는 실제 값이 사용되지 않고 기준 시나리오 평가에서 사용하였던 보수적인 인자 값들이 사용되었다.

2.2.3 기타 재해와 사고 시나리오

VLJ 처분장의 안전성 평가 시 기준시나리오에서 고려된 인자들 외에 영향을 미칠 수 있는 현상들을 아래와 같이 분류 평가하였다.

- (1) 가스 생성 및 이동

사일로의 덮개 상부에는 파쇄 암반으로 채워져 있는 통로가 설치된다고 가정되었고, 통로를 통한 방사성 핵종의 확산 및 지하수 유동이 발생한다고 고려되었으며 이러한 경로를 따라 발생한 부식 가스 등이 이동하는 것이 고려되었다.

(2) 콘크리트 사일로의 손상

일반적인 평가에서는 콘크리트 사일로는 최소한 10 cm의 두께를 유지한다고 가정하였다. 그러나 사고 발생과 같은 최악의 경우 사일로는 침투 지하수로 인하여 물로 가득 차고 외부 수압이 없는 경우, 콘크리트의 장력을 초과하는 압력이 사일로의 벽에 형성되어 사일로 구조 건전성이 침해를 받을 수 있다. 이러한 장력 변화로 인하여 사일로 벽면 2-10 m 높이에서 수직 단열이 발생할 수 있는 바, 손상정도는 주변 기반암과 콘크리트 벽 사이의 완충재의 종류와 강도에 따라 달라진다. 완충재가 적절히 채워졌을 경우 단열의 폭은 대략 0.2 mm 정도인데 설계 기준에서 허용되는 단열의 폭은 0.1 ~ 0.15 mm이지만, 실제 단열 폭이 0.2 mm이어도 건전성을 유지하는 데는 문제가 없을 것이다.³⁾ 사일로의 구조 건전성에 영향을 주는 또 하나의 사건은 울킬루오토 지역에서 발생하는 지진이다. 주변 지역에 대한 장기 지진 관측 자료 분석에 의하면 10,000년에 한번 일어나는 지진의 최대 강도는 5.9이며, 100,000년에 한 번 일어나는 지진의 최대 강도는 6.5로 판명되었다.⁴⁾ 지진 발생에 따른 사일로의 구조 건전성을 평가하기 위해 울킬루오토 지역에서 일어날 확률이 연간 10^{-4} 이하인 크기 4.9의 지진의 영향을 조사하였으며, 지진의 중심이 처분장에서 3 km 떨어져 있어도 처분장이 손상되지 않았다는 연구 결과를 도출하였다. 핀란드에서 발생하는 지진의 중심은 대부분 깊이 7-15 km이며 진도가 높은 지진은 지하 더 깊은 곳에서 발생하는 것으로 밝혀졌다.^{5,6)} 이상에서 요약한 바와 같이 지진 혹은 다른 요인으로 인해 콘크리트 사일로는 손상될 가능성은 연간 10^{-4} 로 매우 낮다.

(3) 빙하 및 발생 확률이 낮은 사건들로 인한 영향

새로이 도래하는 빙하시대 이후 빙하의 후퇴로 인한 지반 융기는 방사능 핵종의 방출을 현저히 가속화할 수는 없다는 주장이 핀란드 안전성 평가 시에 고려되었다. 따라서 평가 대상 기간 동안 새로운 빙하기가 도래하더라도 섭생을 제외한 기타 처분장 조건은 크게 변화하지 않을 것으로 핀란드에서 가정하였으며 평가 시에는 섭생 변화에 대한 여러 가지 불확실성 요인이 존재하기 때문에 현재의 섭생 패턴을 기준으로 선량을 평가하였다.

또한 새로운 기반암 구조를 형성하는 지질학적 현상, 화산, 운석 영향, 침식에 대한 발생 확률이 극히 희박하여 안전성에 영향을 미치지 않는다고 가정하고 별도의 평가는 수행하지 않았다.

(4) 시추 등으로 인한 인간 침입

우물 굴착과 같은 시추 활동은 발생 확률이 높아 평가 대상 모든 시나리오에서 고려되었다.

(5) Disturbed evolution and accident 시나리오

- ▶ MLW 사일로의 초기 손상 사건이 발생할 때
- ▶ 공학적 방법의 열화 속도가 예상보다 빠를 때
- ▶ 지하수 흐름이 기준 시나리오 평가시 사용한 인자 값보다 크고 주변 암반으로의 확산에 대한 credit가 예상외로 중요하지 않을 때
- ▶ 기체 생성에 의해 지하수가 오염되어 유동할 때

상기와 같은 사건들의 영향을 분석하기 위해 기준 시나리오에서 사용된 인자 값보다 더 보수적인 인자 값들이 사용되었다.

2.3 지하수 유동 평가

2.3.1 입력 자료 및 모델링 방법

VLJ 처분장 사업 기관인 TVO는 지하수 유동 분석에 이용될 자료들을 VLJ 처분장 건설 중에 실측하였다.

지하수 유동은 VTT 국립연구소에서 개발한 다공 매질 내에서 유동 현상을 유한 요소법으로 해석하는 FEFLOW⁷⁾로 평가되었다.

VTT 연구진은 VLJ 처분장의 지하수 유동을 평가하기 위해 총 다섯 가지 종류의 모델링을 수행하였다. 우선 기준 유동 모델(repository model)에서 평가하는 영역은 600 m × 350 m × 200 m로 9300 element와 8900 nodes로 이 영역을 모델링하였다. 기본 모델에서 적용한 경계 조건은 더 넓은 지역에 대한 부지 모델(site model) 평가 결과로부터 구할 수 있었다. 유속 및 유출량은 처분장 인접 지역을 대상으로 한 처분장 모델(silo model)에서 계산되는데 가장 대상 영역이 작은 이 모델링에서 평가 대상 영역은 10 m × 10 m × 10 m 크기이다. 높은 수리학적 전도도를 가지면서 기반암 표면에 위치한 그림 3에 나타난 구조 R0의 특성을 자세히 평가하기 위하여 표면 모델(surface model)이 설정되었으며, 핀란드 지질 구조의 특징인 빙하기 후 지반 융기 현상에 천이적인 지하수 유동 변화 현상을 규명하기 위해서는 해양 융기 모델(sea area model)이 설정되었다. 지하수 모델은 시추공에서 측정된 지하수의 수리학적 수두, 처분장으로 유입되는 지하수와 기반암으로 침투되는 강우량

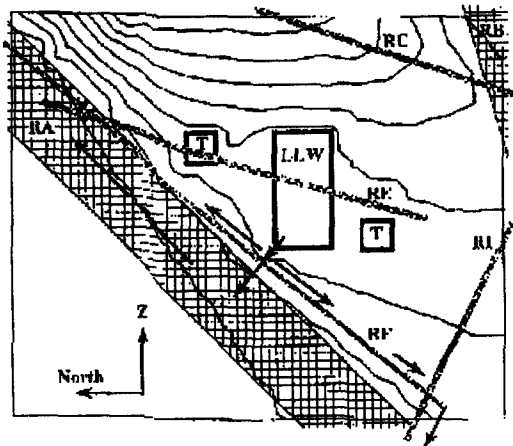


그림 3. 중준위 사일로 주변 지하수 유동 평가 결과²⁾.

을 고려하여 조정(calibration)되었다.

3.2 지하수 유동 체계와 유속 평가

VLJ 처분장은 지표면에서 약 150 m, 처분장 바닥높이에서 약 70 m 폭의 v-자 모양의 토널라이트 편마암대 (tonalite gneiss)에 위치한다. 처분 시설 인접 지역의 지하수 유동은 남쪽 가장자리에 위치한 평행한 단열 RB와 북쪽 가장자리에 위치한 평행한 단열 흑운모 편마암 (micca gneiss) RA 영역에 의해 큰 영향을 받는다. RA

는 위치와 수리학적 전도도가 높아 처분장에서 기반암으로 침투하는 대부분의 지하수를 지표면까지 전도한다. 사일로로 유입되는 지하수는 사일로의 윗 부분과 남쪽으로 유입되어 아래 방향과 북쪽으로 RA 구조 방향으로 유출된다.

지하수 유동 평가 시에 처분장 내부를 다공 암반과 같이 물성이 균일하고 수리 전도도는 파쇄 암반과 비슷하다고 가정하였다. 따라서 각각의 사일로로 유입되는 유량은 총유량을 사일로의 갯수로 나눈 것과 같다. 처분장으로 유입되는 지하수는 주로 RI, 기둥과 운반터널의 플러그, 다공 암반층을 통한다. 지하수는 두 사일로 사이로 균등하게 배분 유입되며 홀로 유입되는 대부분의 지하수는 처분장 내 보조 공간을 통과한다.

기준 유동 시나리오 분석에서는 홀로 유입되는 유량을 연간 6 l/m²로, 사일로를 통과하는 유량을 연간 2 l/m²로 가정하였다. 한편 핀란드와 지질 구조가 유사한 스웨덴 SFR 처분장의 경우 처분장 부지가 해저에서 용기하는 경우 지하수 유동 평가 결과 지하수 유동량은 연간 5 l/m²로 예측되었는데, 이 결과물은 핵종 이동 평가 시에 사용된다.⁸⁾

중준위 사일로를 통과하는 지하수는 북쪽으로 RA 방향으로 흐른다. 기준 시나리오 평가 결과 45%는 다공 암반을 통하여, 35%는 RE 구조를 통하여, 20%는 RI 구조를 통과하는 것으로 나타났다. 그림 4는 이러한 지하수 유동 평가 결과를 도시한 것이다. 중준위 사일로

표 1. 중준위 사일로로부터의 지하수 유출 경로.

시나리오	유량 (m ³ /년)	유동방향	MLW 사일로에서의 유출경로
유동 분석의 기준 시나리오	0.9	하향	matrix (45%) RE (35%) RI (20%)
sensitivity and uncertainty 분석[수리전도도 K(m/s), 투수도 T(m ² /s)]			
S0 모든 구조	9.4	하향	matrix (45%) RE (35%) RI (20%)
S1 matrix:	4.8	하향	matrix (60%)
S2 RI:	5.6	하향	RI, 플러그
S3 RE:	2.2	상향	RE, 플러그
S4 RF:	3.1	상향	보조공간
S5 RA:	1.6	하향	기준시나리오의 경우
S6 shaft:	1.3	상향	matrix, 보조공간
S7 shaft and plugs:	0.7	하향	기준 시나리오의 경우
S8 shaft:	1.4	하향	기준 시나리오의 경우
S9 shaft and plugs:	6.3	하향	plug (80%)
밀봉재 열화			
S9 shaft and plugs:	6.3	하향	plug
R1 shaft and plugs:	36	하향	plug
R2 shaft and plugs:	49	하향	plug
R3 hydraulic head in room	10~30(측정)	하향	건설 진입로를 따라 하향
hall과 보조공간 사이의 plug	2.6	하향	사일로 바닥에서 plug (35%) matrix (25%)

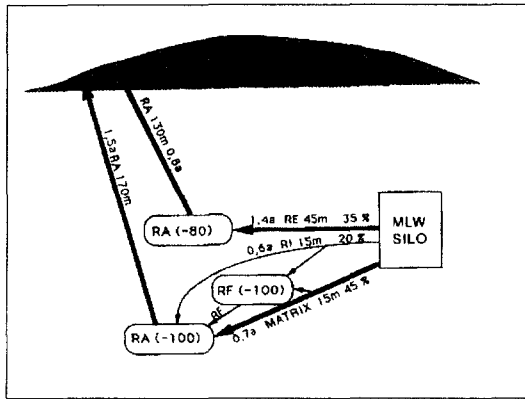


그림 4. 저준위 사일로 주변 지하수 유동 평가 결과²⁾.

에서의 유출되는 지하수 유출 경로들은 표 1에 요약되어 있다. 표 1의 S3, S4, S5와 같이 사일로 바닥에서 플러그를 통하여 사일로로 물이 유입되는 경우와 지하수가 잠시동안 사일로 내에 머무르는 경우, 플러그를 통해 유입되어 바로 기반암으로 유출되는 유동 경로 등이 평가 결과 주요 유동로로 판명되었다.

저준위 사일로부터 유출되는 지하수는 대부분 다공 암반체와 RF 구조를 통과하고, 사일로 바닥에서 주변 다공 암반을 통하여 유출되는 지하수도 같은 구조를 통하여 외부로 유출된다. 기준 유동 시나리오 분석에서, 사일로부터 유출되는 지하수 유량 중 50%는 RF로 흘러 들어오는데 이렇게 RF로 유입된 지하수의 대부분은 남서쪽으로 이동하여 RJ 구조로 유입된다. 저준위 사일로부터 유출된 나머지 50%는 RF 구조를 통과하여 다공 암반체를 거쳐 RA 구조로 흘러 들어간다. 이와 같이 저준위 사일로 주변 지하수 유동 체계 평가 결과물은 그림 4에 도시하였다. 일반적으로 저준위 사일에서도 중준위 사일과 거의 같은 지하수 유동 형태가 나타난다.

핀란드 연구에서는 기반암 모델, 투수도와 처분시설 밀봉 구조의 수리학적 전도도와 같은 구조변화에 따른 지하수 체계 변화와 유속에 대한 민감도 분석을 S0에서 S9 경우에 대해 평가하였고 시간에 따른 처분장 밀봉 구조의 점진적인 열화에 따른 영향 평가 및 최종적인 열화 상태 도달에 따른 영향 분석을 S9, R1, R2, R9과 같이 네 경우로 나누어 각각 평가하였다.

수리전도도에 대한 민감도와 불확실성 분석 결과 처분장 모델 구역 밖의 지하수 유동은 이와 같은 민감도와 불확실성에 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다. 또한 민감도 분석 결과 처분장 인접지역의 일반적인 지하

수 체계도 영향을 받지 않는 것으로 알려졌다. 불확실성과 민감도 분석을 통한 처분장 내 지하수 유동 평가 결과는 지하수는 홀과 사일로의 윗 부분으로 유입되어 바닥 부분과 북쪽 면으로 유출된다.

단열이 있는 지표면에서 기반암으로 침투하는 평균 강수량은, 부지 면적인 20 ha 면적에서는 강수량(precipitation)의 약 1.9%, VLJ 처분장 면적인 1.3 ha 면적에서는 강수량의 2%이다. 만약 수리학적 전도도가 열 배 증가한다면, 더 넓은 면적에서의 침투율은 2.5%로, VLJ 처분장 위에서는 5%로 증가할 것으로 예측되었다. 이런 침투율은 기반암 표면에서의 수직 수리전도도에 의해서만 영향을 받으므로 실제 지하수 유동을 변화시킬 만큼 중요한 역할을 하지 못한다.

수직갱(shaft)의 수리 전도도가 S6 경우와 같이 기준 시나리오의 1/10이거나, S3, S4, S5의 경우와 같이 RE, RF, RA 구조의 전도도가 각각 10배가 될 때, 사일로의 수리학적 수두는 기준 시나리오의 값보다 더 낮아진다. 이런 경우 물이 사일로 바닥에서 플러그를 통하여 사일로로 유입되어 콘크리트 구조물을 부식시키고 궁극적으로 핵종을 용해시킨 후 외부로 유출시킬 것이다. RE 구조의 수리 전도도가 S3 경우와 같이 증가하면 지하수는 RE 구조를 통하여 약간 위쪽 방향으로 사일로로 이동하고, 홀을 통하여 보조 공간으로 유입된다. RF 구조의 수리 전도도가 S4 경우처럼 증가하면 지하수는 보조 공간을 통하여 RF 구조로 흘러 들어가고, 중준위 사일 내부에서의 지하수 유동은 상부로 향하게 된다. 만일 수직갱의 수리 전도도가 감소하면 지하수가 홀로 유입되어 보조 공간으로 상향 유입될 것이다.

기준 유동 시나리오를 변형하여 굴착 교란 지역(EDZ) 발생에 따른 지하수 유동 변화를 평가하기 위하여 수직갱과 터널이 폭 10 cm, 수리 전도도가 2×10^{-7} m/s의 불안정한 영역으로 굴착한다고 가정하였다. 이 영역에 대한 플러그의 수리 전도도가 10^{-8} m/s 정도로 증가하면 이로 인해 지하수 유동이 이러한 플러그와 수직갱을 타고 주도될 것이다. R3의 경우처럼 처분장의 수두가 5 m이고, 사일로를 통한 유속이 사일로당 연간 10~30 m³라고 가정하고 밀봉재가 열화된 후 지하수 유동 상황을 평가하였다.

2.3.3 핵종 이동 평가를 위한 입력 자료로서 지하수 유동 평가 결과물

지하수 유동 평가 결과는 표 2에 정리되어 있다. 표 2에 나타난 바와 같이 이동 경로와 이동시간은 처분장에서 기반암 표면까지의 가장 짧은 경로와 가장 빠른 시간을 의미한다. 세 가지 지하수 유동 주요 경로가 저

표 2. 지하수 유동 평가 결과 요약.

	평가	범위
사일로 당 유량 (m ³ /년)	1	0.1~10
지표면까지 최단 이동거리(m)		
- MLW 사일로에서	170	150~250
- 경로 1 LLW 사일로에서	170	150~250
- 경로 2 LLW 사일로에서	300	200~500
- 경로 3 LLW 사일로에서	500	200~500
지표면까지 최소 이동시간(년)		
- MLW 사일로에서	2	0.4~20
- 경로 1 LLW 사일로에서	2	0.4~20
- 경로 2 LLW 사일로에서	20	2~200
- 경로 3 LLW 사일로에서	50	2~200
기반암에서의 희석 배수		
- MLW 사일로에서	300	15~3000
- 경로 1 LLW 사일로에서	300	15~3000
- 경로 2 LLW 사일로에서	100	5~1000
- 경로 3 LLW 사일로에서	>100	
MLW 사일로에서 밀봉구조 열화 후		
- 유속	5	1~30
- 지표면까지 최단 이동거리(m)	300	150~500
- 지표면까지 최소 이동시간(년)	15	0.4~100
- 기반암에서 희석 배수	60	5~300

준위 사일로에서 발생하며, 가장 짧은 지하수 유동은 중준위 사일로에서 발생하는 지하수 유동과 같이, 기반암 표면에서 끝난다.

기반암에서 발생할 수 있는 희석 효과 또한 평가되었다. 희석 인자는 처분장을 통과하는 유동과 배출 지점에서 유출되는 총 지하수량의 비율로 계산된다. 따라서 토양에 의한 희석과 기반암 표면에서의 희석은 고려하지 않았다.

안전성 분석에서 사용할 지하수 유동 평가 결과 자료들이 표 2에 도시되어 있다. 기준 유동 시나리오에서 계산된 사일로당 연간 유량은 10 m³이다. 민감도 분석 결과 기준 유동 시나리오 조건에서 연간 지하수 유동량의 평균 값은 연간 23 l/m³ 이고 밀봉 부분이 열화되었다고 가정하면 유동량은 년 간 30 m³ 증가되는 것으로 나타났다.

지하수를 따라 유출된 방사성 핵종의 천연 방벽 내 이동 경로는 두 가지로 대별된다. 이중 짧은 경로 모델에서는 유출된 핵종이 천연 방벽에서 50 m를 유동하다가 단층 RA 구조를 관통하는 우물물로 유입되는 것이다. 다시 이러한 모델에 대해 몇 가지 이동시간을 변화

시키며 그 영향을 평가하였는데 현실적인 시나리오에서는 우물까지의 이동시간이 0.5년, 기준 시나리오에서는 0.25년, 민감도 분석 시나리오에서는 이동시간이 0.125년으로 각각 다르게 입력되었다. 또한 지하수 배출지역에서 가까운 우물까지의 이동 경로의 길이가 150 m로 긴 경우에도 지하수 이동시간을 변화하면서 그 영향을 평가하였다. 현실적인 시나리오일 경우 3년으로 가정되었으며 기준 시나리오에서는 1.5년, 민감도 분석 시나리오에서는 0.75년으로 가정되었다. 지하수 전체 이동의 경우도 처분장에서 시작하는 위의 이동 경로로 모델링 되어서 이와 병행하여 땅의 용기 현상에 의해 발생한 호수와 이 현상과 관련한 침전 시나리오 등 지하수 유동에 따른 다양한 결과물들이 핵종 이동 평가 모델에 입력되었다.

2.3.4 핀란드 지하수 유동 평가 교환

핀란드 VLJ 처분장에 대한 지하수 영향 평가 방법론은 향후 국내 처분장 관련 지하수 유동 평가 시에도 상당 부분 적용될 수 있다. 핀란드 VTT가 사용한 FEFLOW는 국내에서 사용되고 있는 CONNECTFLOW 기능의 일부분만을 가지고 있다. 따라서 핀란드와 지질 조건이 비슷한 우리나라의 경우 CONNECTFLOW를 이용하여 지하수 유동을 평가하는 것은 인허가 관점에서 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

핀란드의 경우 콘크리트 사일로 열화에 따른 방사선적 영향 평가와 지하수 유동 평가가 상세하게 진행되었다. 국내의 경우 아직 처분 방식이 결정되지 않아 어떤 공학적 방벽이 적용될지 불분명하나 콘크리트도 주요 방벽으로 사용될 것으로 예상된다. 따라서 OPC 등 세계 처분 사업에서 널리 활용되고 있는 콘크리트의 열화 전 후 투수 전도도 변화 등에 관한 자료를 확보하는 것이 중요하다고 판단된다. VLJ 처분 시 특기 사항의 하나가 지반 용기에 따른 천이적인 지하수 유동을 심도 있게 평가했다는 것이다. 국내의 경우 처분장 후보지가 확정되지 않았는데 향후 처분 후보 부지에 적합한 지하수 유동 평가 모델을 개발하여 안전성을 확인하는 작업이 필요하겠다.

2.4 생태계(Biosphere) 평가

방사성폐기물 처분장 종합 성능 평가 시 생태계 평가 연구⁹⁾에는

- (1) 생태계에서 핵종의 이동과
- (2) 농도와 선량 전환 인자의 계산 등을 포함한다.

몇몇 핵종들의 경우 어느 특정 생태계 부분에서의 체

류 시간이 상대적으로 길기 때문에, 정상상태 선량 전환 인자를 사용할 경우, 농도 및 선량이 과잉 평가될 수 있다.

생태계 연구에서는 현장과 그 인접 지역에서의 농도 및 선량 전환율 조사 작업이 필요하다. 조사 대상 지역으로는,

- (1) 처분장에 굴착 될 가능성이 있는 우물,
- (2) 처분장이 위치할 Ulkopaa 봉에서 떨어진 바닷가 지역,
- (3) 지반의 용기 작용으로 현재 바다 지역에 형성될 수 있는 호수지역이 선별되었다.

호수 시나리오에서는 모든 유출 경로는 퇴적(sediment) 시나리오에 포함되어 있고, 모든 핵종의 평균 농도가 호숫물로 관개한 경작지에서의 농도를 초과하지 않을 때 호수 바닥을 경작지로 이용한다고 가정한다. 호수 시나리오와 퇴적 시나리오는 최소 1,000년 후에 가능할 것으로 가정한다.

지역 주민들에 대한 방사능 물질 이동 경로로는 수돗물, 음식 : 우유, 육류, 곡식, 야채, 어류 섭취와 직접적인 외부 피폭으로 대별된다.

핀란드 처분 연구에서 고려한 생태계 시나리오들은 아래와 같다.

- (1) 우물 시나리오:
 - 1) 수돗물 음용,
 - 2) 가축의 음용수로 우물물 이용 시 우유 섭취,

- 3) 가축의 음용수로 우물물 이용 시 육류 섭취,
- 4) 우물물을 정원수로 사용 시 곡식 및 채소,
- 5) 우물물을 정원수로 사용 시 먼지 흡입,
- 6) 외부 방사능에 의한 전이
- (2) 해양 시나리오: 어류를 통한 전이
- (3) 호수 및 퇴적 시나리오:
 - 1) 호수 물 섭취,
 - 2) 호수 내 어류 섭생,
 - 3) 가축용 음용수와 목초지 관개 용수로 호숫물 사용에 따른 우유 섭취,
 - 4) 가축용 음용수와 목초지 관개 용수로 호숫물 사용에 따른 육류 섭취,
 - 5) 관개 용수로 호숫물 이용에 따른 곡식과 채소,
 - 6) 호숫물을 이용한 경작지와 퇴적 시나리오에서 경작지로 이용된 부분적으로 건조된 호수 바닥으로부터의 먼지 흡입,
 - 7) 외부 방사능에 의한 투여

생태계 분석은 VTT 국립연구소에서 개발 검증한 DETRA 모델로 수행하였다.¹⁰⁻¹²⁾ 생태계의 여러 부분들 사이의 핵종의 이동 계수, 핵종 각각에 대한 농도변환 인자와 선량 전환 인자, 투여 경로 등이 계산되었는데 그 결과물은 아래 표 3에 요약되었다.

우물물에 의해 발생하는 방사성 피폭의 58-100%는 음용수에 의한 것이며, C-14의 영향이 가장 적고, 초우라늄 원소들의 영향이 가장 높은 것으로 판명되었다. 해

표 3. 선량 변화 인자: 단위 누출(1Bq/년)에 대한 선량(Sv/년).

핵종	우물(Sv/Bq)	바다(Sv/Bq)	호수(Sv/Bq)	sediment 시나리오(Sv/Bq)
C-14	1.9×10^{-12}	1.4×10^{-16}	2.6×10^{-13}	2.7×10^{-13}
Co-60	1.8×10^{-11}	1.0×10^{-16}	6.2×10^{-14}	1.3×10^{-13}
Ni-59	1.4×10^{-13}	2.7×10^{-19}	1.9×10^{-16}	3.9×10^{-15}
Ni-63	3.8×10^{-13}	7.4×10^{-19}	5.0×10^{-16}	4.4×10^{-15}
Sr-90	1.1×10^{-10}	3.6×10^{-17}	2.5×10^{-13}	4.9×10^{-13}
Tc-99	8.0×10^{-13}	5.1×10^{-19}	1.6×10^{-15}	1.8×10^{-14}
I-129	2.0×10^{-10}	9.8×10^{-17}	4.4×10^{-13}	1.2×10^{-12}
Cs-135	6.8×10^{-12}	2.8×10^{-17}	8.7×10^{-14}	2.0×10^{-13}
Cs-137	4.0×10^{-11}	2.1×10^{-16}	6.1×10^{-13}	8.3×10^{-13}
Pu-238	2.0×10^{-9}	1.9×10^{-15}	3.5×10^{-13}	2.8×10^{-12}
Pu-239	2.2×10^{-9}	1.9×10^{-15}	3.7×10^{-13}	7.6×10^{-12}
Pu-240	2.2×10^{-9}	1.9×10^{-15}	3.7×10^{-13}	7.6×10^{-12}
Pu-241	4.9×10^{-11}	4.6×10^{-17}	8.3×10^{-15}	1.7×10^{-14}
Am-241	2.5×10^{-9}	2.3×10^{-15}	4.3×10^{-13}	6.7×10^{-12}
Cm-244	1.2×10^{-9}	1.1×10^{-15}	2.1×10^{-13}	4.1×10^{-13}

양 시나리오에서는 어류 섭취에 의해서만 핵종 전이가 발생되며, 호수 시나리오의 경우 호수의 어류 섭취로 인한 피폭이 가장 중요하다. 대부분 핵종의 60-80%, C-14의 100%가 상기 시나리오에서 주민들에 전이된다.

핀란드에서는 처분 사일로가 10 m 콘크리트 층, 파쇄 및 발파 암반 잔해, 고화 폐기물, 기타 폐기물, 금속 scrap 등 다중 방벽으로 보호되어 있고, 부식 및 분해 산물들에 의해 지하수질이 악화될 것이기 때문에, 처분장 폐쇄 후 오랜 기간이 경과하여 처분 시설에 대한 모든 정보가 분실될 경우에도, 우물을 시추하거나 폐기물 사일로에서 직접 지하수를 채취할 가능성은 거의 없다고 판단하였다. 실제 VLJ 처분장에서 채취한 지하수 샘플에서 황화수소(H_2S)에 의해 악취가 발생한 것을 관찰할 수 있었다.¹³⁾ 하지만 처분장 부근에서 우물이 시추될 가능성을 배제할 수는 없다.

우물 사용에 의해 야기되는 방사능 노출은 처분장에서 서로 다른 거리에 떨어져 있는 두 우물을 조사함으로써 분석한다. 우물 1에서는 깊이 50 m, 핵종평균 이동 거리 50 m로 가정하고 우물 2에서는 지하수 배출지역에 가까이 위치하며 처분장으로부터의 거리는 150 m로 가정하였다.

안전성 분석에서 우물물의 최소 희석은 우물 1에 대한 희석수량 ($360 m^3/년$) 때문에 발생하고, 우물 2의 지하수 희석수량은 연간 $1000 m^3$ 로 가정하며 천연 방벽을 이동하는 동안에 발생하는 희석 효과까지 포함하였다. 또한 처분장을 통과하는 유동량은 기준 시나리오의 경우 연간 $10 m^3$, 밀봉이 분해된 후 연간 각 사일로당 $30 m^3$ 로 가정하였다. 희석 배수는 우물 1일 경우, 기준 시나리오에서는 36, 열해 진행 완료 후에는 12, 우물 2일 경우 각각 100과 33으로 산정하였다. 이들은 지하수 분석에서 나온 표 2에 요약된 결과값 보다 보수적으로 더 낮은 값들이다.

현재 핀란드에는 수 만~수 십만^{14,15)}개의 우물이 있는 것으로 추정된다. 가정용 수원으로 우물을 사용하는 사람들의 수는 약 150,000명¹⁵⁾으로 예상된다. 우물은 저지대에 굴착되며 따라서 기반암 내 단열 영역과 교차하게 된다. 핀란드의 경우 충분한 유량의 지하수를 채취할 수 있는 적정 우물 심도는 50~60 m로 조사 결과 나타났다.

핀란드 면적의 1/10 되는 크기에 총 30,000 개의 우물이 있다고 가정할 때, 평균 우물 빈도 수는 단위 평방 킬로미터 당 1우물이 될 것이다. 이와 비교하여, 면적이 약 $10 km^2$ 인 Olkiluoto 섬에는 현재 8개의 우물이 존재한다.¹⁶⁾ 이 자료를 기준으로 하면 처분장이 존재했다는 정

보가 유실된 경우, 넓이 $370 m \times 330 m$ 인 처분장에서 50 m 떨어진 곳에 우물을 굴착할 가능성은 0.02이다. 안전성 분석에서 처분장 폐쇄 후 최소 200년 후에 우물 1이 굴착될 확률을 보수적으로 0.05, 100~200년 기간 중에는 0.025로 가정하였다. 또한 처분장 근처에 우물을 초기 100년 동안 굴착하는 사건은 행정적으로 방지될 수 있다고 가정하였다.

같은 방법으로, 처분 시설의 150 m 내에 우물 2가 건설될 최대 가능성은 0.12이다. 안전성 분석에서는 이와 같은 자료를 근거로 처분장 폐쇄 후 적어도 200년까지 우물이 굴착될 확률을 1, 100~200년은 0.5, 100년까지는 0.1로 가정하였다.

2.5 기체 발생 및 이동 규명 연구

1950년대 후반부터 시작된 중저준위 방사성 폐기물 처분과 관련된 안전성 평가시에 아직까지 현안이 되고 있는 문제가 기체 발생이다. 일반적으로 처분 시설로부터의 기체 발생원은 크게 방사성 기체와 비방사성 기체로 대별된다. 방사성 기체는 그 양이 작기 때문에 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 안전성에 크게 영향을 미치지 않으나 비방사성 기체는 안전성에 영향을 미칠 수도 있다는 것이 스웨덴과 핀란드 등 천층 동굴 처분을 수행한 나라들의 규제 기관의 일관된 입장이었다.

실제 스웨덴 SFR 인허가 과정에서는 비방사성 기체 발생이 문제가 되어 최종안전성 평가보고서가 제출된 후에도 규제 기관이 기체 발생 관련 보안을 사업 기관에 요청하였으며 이로 인하여 사일로 전체에 대한 처분이 이루어지지 못하고 일부만 방사성 폐기물을 적치토록 하다가, 기체 배기 장치를 개선하고 최종적으로 기체 발생이 안전성에 미치는 요인이 미미하다는 것을 증명할 후에야 전체 사일로에 대한 처분이 수행되었다.

중저준위 방사성 폐기물에는 셀룰로오스 성분이 약 40%를 차지하고 있는데 이러한 셀룰로오스들이 지하수와 반응하여 가수 분해를 거쳐 CH_4 , CO_2 , H_2S 등의 비방사성 기체를 발생시킨다. 또한 카본철, 스테인레스로 만들어진 처분 용기가 부식하는 과정에서 추가적으로 비방사성 기체들이 발생하게 된다. 만일 이러한 기체들이 외부로 배기되지 못하고 처분장에 잔류할 경우 기체압 증가가 발생하고 최악의 경우 기체압 증가로 인해 처분 시설 내 공학적 방벽과 주변 암반에 단열이 발생하게 될 것이며, 이러한 단열의 발생으로 말미암아 지하수에 용해된 방사성 핵종들이 빠르게 이동할 수 있게 되고, 또한 미량이나마 폐기물에 포함되어 있는 C_{14} , I와 같은 방사성 기체들도 단열을 통해 빠르게 이동하게

된다.

이러한 관점에서 처분 시설의 안전성을 규명하기 위해서는 일차로 과연 얼마만큼의 비방사능 기체가 발생하고, 발생한 기체들이 어떤 경로를 통해 외부로 유출되는지를 규명하는 것이 중요하다. EU가 중심이 된 유럽 각국의 최근 연구에서는 우선 중저준위 방사성폐기물로부터 발생하는 기체량을 GAMMON17 등의 전산 모델을 통해 규명하고 이를 대규모 실증 실험을 통하여 검증하는 연구가 활발히 수행되어 왔는바, 본 기술 보고 논문에서는 기체 발생을 대상으로 연구 현황을 살펴 보았다.

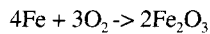
2.5.1 기체 발생 기구

대부분의 방사성 폐기물 처분장에서 폐기물과 용기로부터 기체가 발생한다. 각 원자력 발전소의 원전 종류와 운전 이력, 그리고 폐기물 관리 체제에 따라 다양한 중저준위 방사성 폐기물이 발생된다. 외국의 사례로 추론해 볼 때 폐기물 양의 40% 이상은 기체를 발생시키는 셀룰로오스 성분을 포함하고 있다. 원자력발전소 운전원들이 착용하는 의복, 장갑, 종이류 등은 대표적으로 셀룰로오스를 함유하는 것들이다. 이러한 셀룰로오스를 포함하는 폐기물은 원형 그대로 super compaction 된 후, 혹은 소각 처리된 후 드럼에 적치되고 드럼 내 빈 공간은 시멘트 등 충전 물질로 채워진다. 소각 처리되지 않은 폐기물 내에는 많은 양의 셀룰로오스 성분들이 남아있게 된다.

처분장 운영이 개시되어 처분된 폐기물 드럼은 초기에는 처분장 건설 운영 기간 동안 유입된 공기와 접촉하여 산화 반응을 보여 용기 부식 및 기체 발생도 이와 같은 화학 조건에 따라 일어나게 된다. 그러나 곧이어 처분장이 폐쇄되고 남아있던 공기마저 미생물 반응 등으로 인하여 소멸되면 처분장 환경은 환원 환경으로 전환되며 이후에는 혐기성 조건에서의 부식과 미생물 활동들이 활발해진다. 이외에도 radiolysis에 의한 기체 발생과 방사성 붕괴로 인한 기체 발생이 예상된다.

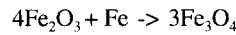
아래 화학 반응식들은 이와 같은 처분장 화학 조건 변화에 따른 부식 및 미생물 분해에 따른 기체 발생 주요 반응을 표시한 것이다. 이와 같은 화학 반응에서 발생하는 기체량은 GAMMON과 같은 기체 발생 코드에서 평가할 수 있다.

▶ 호기성 조건에서의 철 부식

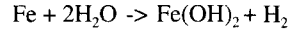
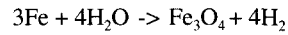


▶ 혐기성 조건에서의 철 부식 : 기존 산화막 필름의

감소 반응



▶ 산화막 소멸 후 혐기성 부식



상기 두 반응에 의한 부식 기체 발생량은 아래와 같이 표시된다.

$$N \text{ (mole/yr)} = S M C / M_i$$

여기서 S = 처분 용기의 표면적

M = 철용기의 부피 질량 = 7.8 g/cm³

C = 부식률, [cm/yr]

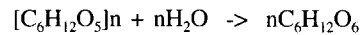
M_i = 부식 금속의 분자 질량

▶ 셀룰로오스 성분의 용해

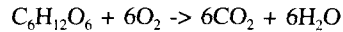
처분 용기 내 대량의 셀룰로오스 -> 용해하기 쉬운 oligosaccharide와 polysaccharide로 전환

▶ 수화 반응

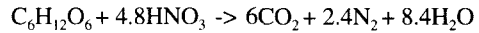
용해하기 쉬운 carbohydrate 글루코즈 형태의 중간 물질



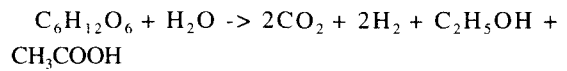
▶ 미생물 반응 1(유기물의 호기성 분해)



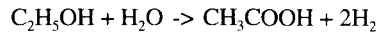
▶ 미생물 반응 2(질산 환원)



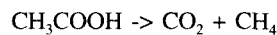
▶ 미생물 반응 3(혐기성 산 생성 반응)



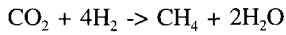
▶ 미생물 반응 4(혐기성 아세트산 생성 반응)



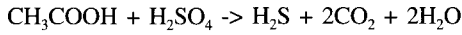
▶ 미생물 반응 5(아세트산 분해에 따른 메탄 기체 생성 반응)



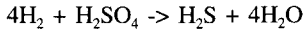
▶ 미생물 반응 6(수소 기체가 개입된 메탄 기체 생성 반응)



▶ 미생물 반응 7(황산의 환원에 따른 황화수소 및 이산화탄소 기체 생성 반응)



▶ 미생물 반응 8(황산과 수소 반응에 의한 황화수소 생성 반응)



상기 반응과 관련된 미생물 밀도는 아래와 같은 요인과 관련된다.

- (1) pH
- (2) NH_4^+ 량
- (3) 수분량

이상에서 살펴 본 바와 같이 중저준위 방사성 폐기물에서는

- (1) 부식
- (2) 미생물 반응
- (3) Radiolysis
- (4) 방사성 붕괴

등으로 인해 기체가 발생하게 된다.

2.5.2 기체 발생량 규명을 위한 대규모 실증 시험(LSE)

유럽 연합에서는 중저준위 방사성 폐기물 처분장에서 비방사성 기체 발생량을 산정하기 위한 노력의 일환으로 PEGASUS와 PROGRESS 등 일련의 공동 연구를 수행해 왔다. 현재 진행 중인 PROGRESS 프로젝트에는 여러 유럽 여러 기관들이 참여하고 있다. 이 중에서도 우리나라 지질 환경과 매우 유사한 핀란드의 대형 기체 발생 실험을 분석하였다. 핀란드 올킬루오트 중저준위 방사성 폐기물 처분장에서는 유럽 연합 프로젝트의 일환으로 대규모 기체 발생 실증 연구를 수행하여 실제 처분장 조건에서의 기체 발생량을 산정하였다. 처분장 환경에서 기체 발생은 주변 지화학 및 밀접한 연관성이 있으며 기체 발생은 또한 지화학 조건을 변화시킨다. 핀란드 실험에서는 선원함을 대표하는 16개의 방사성 폐기물 처분 용기가 선정되어 지하 100 m의 처분장 조건에서 실험되고 있다. 이 연구에서 산출하고 있는 주요 자료로는 기체 발생률과 발생 기체의 구성원이며 이와 병행하여 지하수 화학 조건 및 미생물 구성 변화이다.

실험의 선행 조건인 폐기물 성분 분석을 위해 발전소에서 1.6톤의 표준 폐기물이 수거되어 성분 분석을 수

표 4. LSE에 사용된 중저준위 방사성폐기물 구성 물질.

물질 (처분 용기에 압축)	무게, [Kg]	중량비, [%]
1) 셀룰로오스 포함 물질 (41)		
-면옷과 장갑	240	15
-종이와 마분지	270	18
-기름기가 있는 의복	85	6
-기름종이	15	1
2) 셀룰로오스가 없는 물질 (59)		
-플라스틱	454	30
-대부분 스테인강인 금속	85	6
-라텍스 장갑	47	3
-전기 부품	47	3
-방화복	47	3
-PVC	36	2
-폴리카본계 의류	35	2
-열교환기 세척물	21	1
-방호복 카트리지	10	1
-기타	123	8
총 폐기물량	1514	100
드럼수	294	

행하였다. 본 연구에서 사용한 처분 용기는 카본철로 두께는 1 mm이며 중량은 18.4 kg이며 25 μm 두께로 페인트칠되어 있다. 표 4는 이와 같은 16개 드럼에 내재되어 있는 생분해 가능 물질들의 중량과 백분율을 도시한 것이다.

처분 환경 모사를 위해서 지표수를 사용하는 경우 자칫 미생물 반응을 촉진할 우려가 있기 때문에 처분장으로 침투하는 지하수와 동일 조성을 가지는 물을 시험에 사용하기 위해 정제되지 않은 강물을 사용하였다.

그림 6은 LSE 탱크의 개요도이다. 그림에 표기된 바와 같이 탱크에는 3-way 솔레노이드 밸브가 반응로, 부피 및 압력 측정기 등과 연결되어 있다. 발생된 기체는 약간 과압력 상태까지는 탱크 내부에 잔류하다가 일정 기준을 넘어서면 유출되게 된다. 초기에 강물을 주입한 후 보충되는 물은 터널 내 시추공에서 채집되어 사용된다. 그림 5에 나타나 있는 수면 조절기를 통해 항상 일정량의 물이 탱크 내에 공급된다. 이밖에도 탱크에는 처분장의 온도 조건을 모사하기 위해 그림 6에 나타난 바와 같이 냉각 장치가 장착되어 있다. 화학 특성을 계측하기 위한 자동 계측 장치에서는 pH, 전기전도도, redox potential, 온도, 용존 산소량 등을 계측하며 이외에도 지하수 화학적 특성을 분석하기 위한 추가적인 실험이 수행되어 시험 장치 내 3곳에서 샘플링을 하는데 통상적

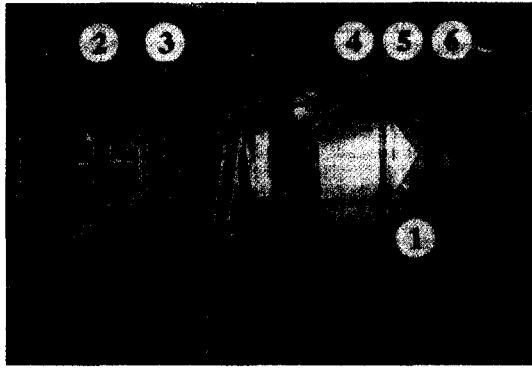


그림 5. 핀란드 LSE 장치 개요³⁰⁾.

주) 1. Heat insulator가 장착된 실험 탱크 2. 원격 조작이 가능한 마이크로 컴퓨터 3. On-line 물 수지 분석기 4. 기체 측정 장치 및 물 수위 조절기 5. 고체 표본 추출을 위한 샘플판 6. 창

인 샘플링 위치는 처분 용기의 두껍 위치인 시험 장치 내 가운데 부분에서 수행되며 이와 같은 샘플링을 통해 용존 유기물량, Ca, Na, Mg, Fe(II), Fe_{tot} 등 양이온량, Cl, SO₄, S(-II)_{tot} 등의 음이온량, N_{tot}, P_{tot}, PO₄, NO₃, NO₂, NH₄ 등의 부영양 미생물량, 미량의 CH₄, CO₂, H₂, O₂, H₂S 등의 용존 기체량을 측정한다. 또한 LSE에서는 기체 발생 측정을 위하여 CH₄, CO₂, H₂, O₂, N₂, H₂S 등의 발생량이 관측된다.

1997년부터 1999년 사이에 수행된 시험 결과 발생 기체의 구성비가 규명되었다. 초기에는 부식 반응으로 인한 수소 기체가 주로 발생하였으나 일정시간이 경과한 후에는 이산화탄소가 다량으로 검출되었으며 얼마 후에는 메탄 기체가 검출되기 시작하였다. 독립적으로 수행한 실험실 분석 결과 상당량의 질소 기체도 검출되었다. 표 5에 나타난 침출수 내 용존 기체 분석 결과는 질소 기체가 압도적으로 많고 그 다음으로 메탄 기체, 산소 기체, 이산화탄소 기체 등의 순서로 기체가 발생된다.

표 5. 침출수내 용존 기체 농도.

구성 기체	단위 지하수 부피당 함유된 용존 기체 부피 [mL/L]
질소	52.5
메탄	1.0
산소	0.3
이산화탄소	0.006
수소	0.8
황화수소	검출 안됨

이상에서 살펴 본 바와 같이 중저준위 방사성 폐기물에서 발생하는 기체들의 양은 부식과 미생물 반응들을 통하여 발생되었고 장기적인 이들의 발생량은 GAMMON과 같은 코드를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션과 이를 검증하기 위한 장기 실험을 통해서 산정될 수 있을 것이다. 1999년 일단계 종료된 PROGRESS 프로젝트는 이와 같이 장기적으로 기체 발생량을 실측하기 위해 2005년 이후까지 계속해서 수행될 예정이다.

3. 국내 중저준위 방사성 폐기물 처분 연구 사업을 위한 제언

중저준위 방사성 처분 안전성 관련 향후 연구 사업을 위하여 본 절에서는 앞 절에서 논의된 각 세부 지침들을 중저준위 방사성 폐기물 처분장 건설, 운영 및 폐쇄 관련 인허가 보고서에 작성할 것인가에 대한 분석과 이러한 작성을 뒷받침할 향후 연구 방향은 무엇인지에 관하여 논의하도록 하겠다.

3.1 평가기간에 관한 논의

금번 개정 제안된 KINS의 기술 기준에 의하면 처분장 폐쇄 후 방사선적 안전성 평가 대상 기간에 대하여 “처분 시설이 폐쇄된 시점으로 천 년의 기간에 대하여 평가한다”고 규정하고 있다. 이는 기존의 평가 대상 기간을 개정하지 않은 것이나, 이러한 규정에도 불구하고 평가 결과물이 천 년 대상 기간 동안 방사성 핵종 선량의 최고점(peak)을 나타내지 못할 경우 최고점을 포함하도록 평가 기간을 연장하는 것으로 이해된다. P-KAERI 94 연구 결과¹⁸⁾에서도 잘 나타나 있는 바와 같이 처분장에서 생태계까지의 유동 경로가 비교적 긴, 정상 시나리오들에 관한 평가 결과에 의하면 선량의 최고점은 상당 경우 평가 대상 기간인 1,000년 후에 발생할 개연성이 농후하다.

이러한 경우에는 선량이 최고치를 보이는 기간까지 평가 기간을 연장하여 평가를 수행하는 것이 필요하다. 다만 이 경우 평가에서 중요한 주민 섭생에 관한 변화가 예상된다. KINS는 이와 같은 섭생 형태의 변화 등에 대해 현재의 섭생 형태 등을 그대로 적용하는 것이 타당할 것이라는 견해를 밝힌바 있다. 그러나 안전성에 관한 보다 확고한 공감을 얻기 위해서 성능 평가 수행 기관이 섭생 형태에 대한 변화를 고려한 평가 결과물을 보조 자료로 인허가나 공청회 등에서 제시하는 방안에 대해 신중히 고려하여야 하겠다.

만일 이러한 평가 기간 연장 및 이에 따른 섭생 변화

를 고려해야 할 때에도 우리가 현재 알고 있는 자료들을 활용하는 수준에서 평가가 이루어져야 할 것이다. 즉 우리 나라의 기후가 장기적으로 지금의 온대성 기후에서 아열대 기후, 사막 기후, 열대 기후 및 한대 기후로 변화할 때 주민들의 섭생과 그에 따른 흡수 선량이 어떻게 변화하는가를 평가하는 것이 필요하겠다.

현재 국내 연구에서는 이와 같은 기후 변화에 따른 섭생 패턴 파악을 위한 연구가 미약하므로 향후 연구에서는 섭생 변화 관련 상세 연구가 진행되는 것이 실질적인 성능 평가를 위해 중요하다고 할 수 있다.

3.2 시나리오 평가에 관한 논의

성능 평가 관련 과기부 고시에서는 중저준위 방사성 폐기물 처분 관련시 “합리적으로 보수적인 시나리오를 사용하여 평가한다” 고 규정하고 있다. 1995년까지 KAERI에서 수행된 FEP시나리오 연구에서는 미국 샌디아 연구소에서 개발한 수형도(fault tree)⁽¹⁹⁾ 방법을 적용하여 스웨덴 등 해외 기관에서 개발한 FEP들을 조합하여 성능 평가에 필요한 시나리오들을 개발하였다. 이 접근 방법론은 나름대로의 타당성을 가지고 있으나 FEP의 개수가 많을 때 표현해야 할 경우의 수가 많아 관련 전문가가 아닌 일반인들이 어떻게 시나리오가 형성되었으며 시나리오를 형성하고 있는 각 FEP들의 상관 관계들을 파악하는데 애로가 있었다.

90년대 들어 더욱 강조된 처분장 안전성에 관한 투명성(transparency)을 제고하기 위한 방안들이 해외 여러 기관들에 개발되었는데 그 대표적인 것들이 RES⁽²⁰⁾와 PID⁽²¹⁾이다. 이와 같은 방법론들은 각 시나리오를 구성하는 FEP들의 연계성을 도식적으로 표시하여 일목요연하게 FEP들의 상관 관계를 파악하고 이를 통해 자연스럽게 시나리오가 형성되도록 하고 있다.

KAERI가 추진 중인 심지층 처분 시스템 개발 연구에서는 우선 SKB, Nirex, OECD/NEA, Sandia 등의 FEP 연구 결과들을 토대로 관련 시나리오⁽²²⁾와 KAERI FEP 리스트들을 개발⁽²³⁾하였으며 최근 이들 FEP을 선정(screen)하는 연구를 수행 중에 있다. 이러한 연구 결과를 이용하여 중저준위 동굴 처분에서 고려되어야 할 주요 FEP들이 KAERI 및 국내 유관 기관들의 전문가들에 의하여 선별되었으며 이렇게 선별된 FEP을 조합하여 관련 기술 기준에 부합하고자 보수적인 관점에서 처분 안전성 관련 시나리오들을 개발하고자 한다.

3.3 실질적인 안전성 평가에 대한 논의

KINS에서 제시한 방사선적 성능 목표는 우선 성능

목표치를 “자연 현상으로 인하여 일반 국민에게 예상되는 위험도”에 국한시키고 있다. 즉 처분장 폐쇄 후, 방사성 핵종들이 침투 지하수에 용해되고 유출되어 공학적 천연 방벽을 통과하여 생태계로 유출된 후 최종적으로 인간에게 흡수되는 경로와 장기간에 걸친 자연 변화에 따른 안전 규제치를 명시하는데 국한하고 있고 우물 굴착 등과 같이 인간에 의해 야기되는 기타 사건(human induced accident)에 따른 안전성 목표는 현 단계에서는 제시하지 않고 있다. 미국의 WIPP⁽²⁴⁾에서 나타난 바와 같이 인간 침입 사건은 부지 특성(site specific)에 영향을 받는다. 따라서 현 단계에서 일반적인 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 성능 목표치를 규정함에 있어서 복잡한 인간 침입에 따른 안전성 평가를 요구하지 않는 점은 바람직하며 다만 선연적인 의미로 침입 가능성을 저감하기 위한 노력을 강조한 것으로 판단된다.

이와 같은 평가를 위한 기본 tool들은 현재 KAERI가 보유한 MASCOT-K⁽²⁵⁾, CONNECTFLOW⁽²⁶⁾, PHREEQ⁽²⁷⁾ 등의 코드 체계와 KEPCO가 보유한 MASCOT, MODFLOW⁽²⁸⁾, CONNECTFLOW, HARPHRQ⁽²⁹⁾ 등으로 각각 동굴과 vault 형 처분장에 대한 예비 안전성 평가를 수행하는데 충분한 것으로 판단된다. 다만,

- (1) 기체 발생 및 이동에 관한 평가 코드 보완과
- (2) 확률론적 지하수 유동 평가를 위한 세부적인 방법론 개발이 향후 수행되어야 하겠다. 최종적인 처분장 안전성 평가를 위해서는 부지 특성적인 요소들이 고려되어야 할 것이다. 따라서 향후 국내에 처분 부지가 결정되고 부지 특성이 충분히 파악된 경우 추가적인 평가 코드 개발이 요구될 가능성이 높다.

KINS가 제안한 성능 목표에서는 목표치를 연간 개인 피폭 선량(annual individual dose)으로 설정하였다. 미국 WIPP의 경우 누적 위해도로 안전성을 평가하도록 규제하고 있다. 따라서 향후 국내 안전성 평가에서는

- (1) 연간 개인 피폭 선량을 위주로 평가하되 보수적으로
- (2) 선량 환산 인자를 이용하여 연간 위해도로 표시하고
- (3) 누적 위해도를 병행하여 사용하도록 한다.

연간 개인 피폭 선량 최고치는 10 mRem/yr이다. 따라서 심지층 처분 시스템 개념을 개발하고 이에 대한 성능 평가 연구를 진행하는 데는 이와 같은 기준치의 1/10 값인 1 mRem을 내부 목표치로 설정하는 것이 타당하겠다. 향후 “자연 현상”으로 인한 방사선적 성능 평

가에서는 이와 같은 KAERI 내부 목표치에 의거하여 안전성을 평가할 예정이다.

현재 수준에서 중저준위 방사성 폐기물 동굴 처분과 관련된 KAERI의 현황과 향후 연구 방향은 아래와 같다.

(1) 확률론적 예비 방사선적 성능 평가를 위해서는 기존의 MASCOT-K 체제로 충분하다. 현재의 개념으로는 1차원 종합 성능 평가 코드인 MASCOT-K를 이용하여 결정론적 보수적 평가를 우선 수행하고 이와 병행하여 입력 자료의 불확실성을 평가하기 위한 확률론적 평가를 수행하는 것이 바람직하다. MASCOT-K에 소요되는 입력 자료 평가를 위해서

- 1) PHREEQ 프로그램을 적용하여 기준 지하수 성분 에 대한 최고 용해도와 핵종 이동 지연 인자 평가를 수행하며
- 2) PRISM30 코드를 이용하여 선량 전환 인자(dose conversion factor)를 계산하며
- 3) CONNECTFLOW 코드를 적용하여 지하 매질 내 지하수 유동 경로 길이와 이동 시간을 평가한다.
- 4) 또한 NDT 방법이나 직접적인 파괴 검사 등을 통하여 핵종 inventory를 파악한다.

이와 같은 MASCOT-K 체계를 이용한다면 일반적인 (generic) 성능 평가는 현 기술 수준으로도 충분히 가능할 것으로 판단된다. 다만 부지 특성적인 문제는 향후 부지가 결정되고 해당 부지에 대한 지질학적 특성이 파악된 단계에서 구체적인 보완 모델을 개발하여 평가하는 것이 바람직하다. 만일 KINS에서 일차원적 평가가 아닌 다차원적 평가 결과를 보조적인 자료로서 요구한다면 고준위 처분 연구에서 수행 예정 중인 다차원 평가 코드를 이용하는 것이 바람직 할 것이다. 또한 인간 침입 사건을 평가하는 모델 개발도 요구되는바 우선 인간 침입 확률을 계산하는 연구 착수가 필요하며 구체적인 인간 침입에 따른 성능 평가 방법론 개발도 요구된다.

(2) 입력 자료 중 주민 생태계 특성 등과 같은 기본 자료와 공학적 방벽의 기본 물성 자료들도 빠른 시일 내에 확보되어야 하며 관련 검증 연구도 수행되어야 한다. 구체적으로 결정 집단(critical group)의 섭생 및 활동에 관한 구체적인 자료가 조사되어야 하며 평가 대상 기간이 1,000년의 범위를 넘어서 현재 생태계 특성에 관한 불확실성이 증대되는 경우에 대비하여 다양한 기 후에 따른 섭생 패턴 연구가 요구되는 바, 이와 관련된 연구는 고준위 처분 연구와 병행하여 수행하는 것이 바

람직 할 것이다.

(3) 안전성 평가 FEP과 시나리오 관련 연구는 성능 평가 투명성을 확보하기 위하여 매우 중요하다. 따라서 향후에도 지속적으로 FEP 리스트를 보완하고 시나리오를 개발, 선별하는 연구가 지속되는 게 바람직하다. 이에 따라 2000년도 국내 전문가에 의해 선정된 FEP list에 대한 평가를 보다 확대된 다양한 국내 전문가 그룹을 대상으로 수행하는 것이 바람직하며 최종 FEP list에 관해 해외 전문가들의 자문을 받는 방법도 고려할 수 있다. 또한 체계적인 시나리오 개발을 위해 각 부시나리오(sub-scenario) 별로 자세한 interaction matrix를 개발하는 것도 고려할 수 있다.

(4) 지하수 유동을 보다 효과적으로 확률론적으로 평가하는 방법론을 개발하는 것이 요구되는 바 이 연구는 고준위 처분 연구 결과들을 활용하는 것이 바람직하다. 이와 같은 연구를 통하여 각 지질 매질별 이동 경로 길이 및 시간을 확률밀도함수(pdf)로 표기하여 MASCOT-K에 입력함으로써 보다 효율적인 확률론적 평가가 가능할 것이다.

(5) 국내 중저준위 방사성 폐기물을 처분할 때 발생하는 기체량과 이동 현상을 평가하기 위한 코드 및 방법론 정립이 요구된다. 현재 유럽을 중심으로 동굴 처분용으로 많이 사용되고 있는 GAMMON 모델을 보완하여 기체 발생을 예측하고 PORES³¹¹ 등과 같이 기체 이동 모사 코드를 확보하여 지하 매질 내에서 기체 이동 현상을 규명하는 연구가 수행되어야겠다.

주 : 대표적 방사선 관련 단위

1. Bq : 방사성 원소의 원자 하나가 단위 시간 동안 붕괴되는 것을 의미하는 단위로 흔히 1 dps(disintegration per second)라고 한다.

2. Rem : 흡수 선량이란 단위 질량에 흡수되는 방사능 에너지를 말하는데 흔히 아래와 같은 Rad라는 단위가 사용된다.

$$1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ J/Kg}$$

신체 등에 흡수된 방사선은 각 방사능 종류에 따라 인체에 다른 영향을 미친다. 이와 같이 다른 방사선으로 인해 생물학적 영향이 다른 현상을 보정해 주는 값을 Quality Factor라 하고, 최종적으로 인체에 미치는 방사능 영향은 흡수선량에다가 Quality Factor를 곱한 값으로 나타난다. 만일 흡수 선량이 1 Rad이고 이때 방사선의 Quality Factor가 1일 때 1 Rem이라 정의한다. 자연 상태에서 존재하는 방사성 물질로 인해 우리가 연간 개인적으로 받는 피폭 선량은 200 mRem을 상회하며

각국에서는 방사성 폐기물 처분 지하 영구 시설 안전성 기준으로 대략 이러한 시설로부터 발생하는 연간 개인 피폭 선량을 2-10 mRem으로 제한하고 있다.

3. Sv : 1 Sv = 100 Rem으로 정의된다.

감사의 글

이 논문에 실린 연구는 한국원자력연구소가 수행중인 “국가원자력중장기연구개발사업”의 일환으로 추진되었습니다.

참고문헌

1. 정찬우 외, 2001, 중저준위 방사성 폐기물 처분 시설에 관한 성능 기준, 대한 방사선 방호학회지, under review.
2. V. Taivassalo, V. and A Saarenheimo, 1991, Groundwater Flow Analysis for the VLJ Repository, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-91-10.
3. J. Berghall, 1991, Mechanical Strength of the Concrete Silo in the VLJ Repository under Post-closure Loads; TVO-VLJ Repository, Work Report 91-03.
4. P. Varpasuo and J. Purronen, 1984, Study on the Seismic Risks in the Southern Finland, Imatran Vioma Oy.
5. H. Korhonen et al, 1978, Preliminary Study on the Earthquake Risk in Finland, University of Helsinki, Department of Seismology.
6. A. Koskiahde et al., 1985, Generic Study on the Earth-quakes and the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companiew, Report YJT-85-18.
7. Minsitry of Trade and Industry-Energy of Finland, 1991, Publicly Financed Nuclear Waste Management Research Programme, Annual Report 1990, Ministry of Trade and Industry-Energy Department, Series B.
8. H. Ahokas and K. Aikas, 1991, Geology and hydrology of the Cape Ulkopaa at Olkiluoto, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-91-05.
9. SKB, 1986, SFR 1 Report, SKB., Stockholm.
10. R. Korhonen and I Savolainen, 1984, Biospheric Transfer Model DETRA for Assessment of Radiation Impacts, Technical Research Centre of Finland, Research Reports 323.
11. R. Korhonen and V. Savolainen, 1984, General Description of DETRA Code and Input Guide, Technical Research Centre of Finland, Nuclear Engineering Laboratory, Technical Report ALMA-3/84.
12. R. Korhonen and V. Savolainen, 1990, Description of the VAX version of DETRA Code and Input Guide, Technical Research Centre of Finland, Nuclear Engineering Laboratory, Research Report YDI033/90.
13. P. Pitkanen and M. Snellman, Geochemical Interpretation of Bedrock Groundwater at Olkiluoto, Ulkopaa, TVO/VLJ Repository, Work Report 90-12.
14. Water Society, 1986, Applied Hydrology, Helsinki.
15. Radon working group/National Board of Health., 1982, Radon-tyoryh man mietinto, Helsinki.
16. TVO, 1990, Drilled Wells at Olkiluoto, Teollisuuden Vioma Oy, Memorandum O-AJ-M-32/90.
17. G. Purdon and P. J. Agg, 1994, GAMMON, A Computer Program Addressing Gas Generation in Radioactive Waste Repositories, Part A; Overview, UK Nirex NSS/R338 Version 1A.
18. P. Agg et al., 1994, P-KAERI 94 Performance and Environmental Assessment of a Radioactive Waste Repository in Korea, AEA-ESD-0095, AEAT, United Kingdom.
19. R. M. Cranwell et al, 1987, Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste; Scenario Selection Procedure, SAND80, NUREG/CR-1667, Sandia National Laboratory.
20. T. Vieno et al., 1994, Application of the RES Methodology for Identifying Features, Events, and Processes for Near-Field Analysis of Copper-Steel Canister, YJT 94-21, Nucear Waste Commission of Finnish Power Company, Finland.
21. J. Andersson and L. King-Clayton, 1996, Evaluation of the Practical Applicability of PID and RES Scenario Approaches for Performance and Safety Assessments in the Finnish Nuclear Spent Fuel Disposal Programme", Work Report TURVA 96-02, POSIVA, Finland.
22. 강철형 외, 1997, 방사성폐기물 처분장에서의 핵종 누출 및 이동에 관한 정상 시나리오 개발, KAERI/CR-34197/97, 한국원자력연구소.
23. 강철형 외, 2001, KAERI FEP for Permanent Disposal of Radioactive Waste, in preparation, KAERI.
24. R. P. Rechard, 1993, An Introduction to the Mechanics of Performance Assessment Using Examples of Calculations Done for the Waste Isolation Pilot Plant between 1990 and 1992, SAND93-1378, Sandia National Laboratory.
25. 황용수 외, 2001, MASCOT-K, Code for PSA on the Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal, under development, KAERI.
26. L. J. Hartley, 1996, CONNECTFLOW Release 1.0 User Guide", AEAT, United Kingdom.
27. D. L. Parkhurst et al., 1980, PHREEQE A Computer Program for Geochemical Calculations, US Geo-logical Survey, Water Resources Investigations.
28. Waterloo Hydrology, 2001, Visual MODFLOW

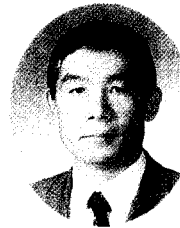
- Pro.
29. P. L. Brown et al., 1991, HARPHRQ A Geochemical Speciation Program Based on PHREEQE, UK Nirex Report NSS/R188.
30. U. Bergstron et al., 1995, Assessment Model validity Document. BIOPATH/PRISM; Codes for Calculating Turnover of Radionuclides in the Biosphere and Dose to Man, SKB Working Report AR 95-19, SKB.
31. W. R. Rodwell and P. J. Nash, 1991, Modelling of Far Field Gas Migration from a Deep Radioactive Waste Repository, in Proceedings of a Workshop on Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories, 23-26 September, Paris.

황용수



1983년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사
 1985년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사
 1992년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학박사
 Tel : 042-868-2034
 E-mail : yshwang@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 책임연구원

한경원



인하대학교 화학공학과 박사

현재 한국원자력연구소 책임연구원
 방사성폐기물처분기술개발팀장

이연명



1983년 한양대학교 공과대학 원자력공학과 공학사
 1985년 한국과학기술원 원자력공학과 공학석사
 1995년 한국과학기술원 원자력공학과 공학박사
 Tel : 042-868-2853
 E-mail : ymlee@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 책임연구원