

Disposal Approach for Long-lived Low and Intermediate-Level Radioactive Waste

장반감기 중저준위 방사성폐기물의 국외 처분동향과 처분방안

Jin Beak Park, Joo Wan Park, Chang Lak Kim,
Nuclear Environment Technology Institute, P.O.149, Yuseong, Daejeon

박진백, 박주완, 김창락
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전광역시 유성우체국 사서함 149호
jbpark@khnp.co.kr

Abstract

There certainly exists the radioactive inventory that exceeds the waste acceptance criteria for final disposal of the low and intermediate-level radioactive waste. In this paper, current disposal status of the long-lived radioactive waste in several nations are summarized and the basic procedures for disposal approach are suggested. With this suggestion, intensive discussion and research activities can hopefully be launched to set down the possible resolutions to dispose of the long-lived radioactive waste.

Key Words : Long-lived Low and Intermediate-Level Radioactive Waste, Waste Acceptance Criteria, Waste Classification

요약문

중저준위 방사성폐기물 중 장반감기핵종의 농도가 처분시설의 인수기준을 초과하는 경우에 대비한 처분방안이 필요하다. 본 논문에서는 장반감기 중저준위폐기물의 처분을 수행하고 있거나 계획하고 있는 대표적인 국가들의 사례를 정리하였으며, 각국의 사례를 중심으로 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분방안 설정을 위한 기본절차를 도출하였다. 국내에서도 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분을 위한 활발한 논의가 필요하다고 하겠다.

중심단어 : 장반감기 중저준위 방사성폐기물, 인수기준, 폐기물 분류

1. 서론

가. 개요

우리나라에서는 2005년 5월 현재 총 20기의 원자로가 가동되고 있으며, 전력수요의 증가와 함께 안정적인 전력공급원으로서 그 이용이 지속적으로 증가하고 있고, 향후에도 원자력 의존도는 계속 증가할 것으로 예상된다.

우리나라를 비롯한 원자력발전소 운영국가들은 단반감기 중저준위 방사성폐기물의 지중처분하고 있거나 고려하고 있으며, 공학적 방법과 자연방벽 그리고 제도적 관리를 통하여 처분시설의 안전성을 확보하기 위한 노력을 하고 있다. 또한 원자력발전소의 운영에 따라 발생하는 장반감기 고

준위 방사성폐기물은 심지층 처분이 고려되고 있으며, 일반적으로 사용후 핵연료가 해당된다.

방사성폐기물을 중저준위와 고준위로 구분하는 방안은 간단하지만, 실제 존재하는 방사성폐기물을 모두 포함하기는 어려운 현실이다. 실제 열을 발생하지 않은 장반감기 중준위 방사성폐기물들이 존재하며 중저준위 처분시설에 적용되는 폐기물인수기준 (WAC: Waste Acceptance Criteria)을 넘어서는 방사성폐기물들이 핵주기 뿐 아니라 원자력발전을 이용하지 않는 국가에서도 발생하고 있다. 이들 장반감기 중준위 방사성폐기물에 의한 방사선적 위해도가 크기 때문에 그 처분방안에 대한 필요성이 대두되고 있다.

나. 장반감기 폐기물의 특성

(1) 장반감기 중저준위 폐기물의 발생원

장반감기 중저준위 방사성폐기물은 원자력발전소의 운영뿐 아니라 제염/해체, 제처리 등의 핵연료 주기와 원자력발전소의 사고 시 발생되며 의료기관 및 산업체에서 이용한 폐밀봉선원 등도 함께 고려될 수 있다. 또한 NORM¹⁾/TENORM²⁾과 우라늄 광산에서도 상당히 많은 부피의 장반감기 폐기물들이 발생하지만 본 논문의 범위에는 포함하지 않았다.

(2) 장반감기 중저준위 폐기물의 정의 및 범위

방사성폐기물의 분류에 있어 핵종별 반감기와 WAC에서 총방사능 또는 비방사능으로 제시되는 핵종농도는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 고준위폐기물(HLW)/사용후핵연료(SNF)과 중저준위 방사성폐기물을 구분하는 것은 어렵지 않으나 중저준위 폐기물 중에서 장반감기폐기물과 단반감기 핵종의 명확한 구분은 실제적을 쉽지않은 현실이지만, 국내의 고시 성격의 문헌들에서는 규제 및 인허가를 위하여 제시하고 있다. 또한 방사성폐기물에 포함된 장반감 핵종들의 농도측정 방법도 매우 다양하며 직접 측정보다는 계산 또는 척도인자 등의 간접적인 방법을 이용하고 있다.

또한 장반감기 핵종이 인체에 미치는 영향은 장반감기 핵종의 재고량과 핵종이 사람에게 미치는 독성을 정량화하여 안전성평가에 사용되는 선량환산인자로 도출된다. 이때 장반감기 핵종은 안전성 평가기간 동안 핵종붕괴에 의한 효과가 거의 없게 된다.

각국에서 사용하는 핵종분류방법은 IAEA 권고에서 핵종별 농도에 따라 규제면제폐기물(exempt waste at or below clearance level), 중저준위폐기물 (열발생율 2kW/m³ 이하)<고준위 폐기물(HLW)로 구분하며 중저준위 폐기물을 다시 단반감기폐기물과 장반감기 폐기물로 구분하고 있다.[1] IAEA에서 분류하는 중저준위폐기물 중 단반감기폐기물과 장반감기 폐기물의 명확한 구분은 제시되지 않았지만 일반적으로 알파핵종의 비방사능(specific activity)가 400~4000kBq/kg 사이가 받아들여지고 있다. IAEA의 분류체계에 대한 처분방안으로 고준위 폐기물과 장반감기 중저준위 폐기물들은 지중처분(geological disposal)을, 단반감기 중저준위폐기물은 천층처분(near-surface disposal)를 권고하고 있다. 최근 IAEA에서는 저준위폐기물과 중준위 폐기물을 구분에 대한 논의가 이루어지고 있다.

미국의 경우 방사성폐기물을 방사능 준위보다는 발생원(origin)에 따라 총 5개로 분류하고 있으며, 중준위 방사성폐기물(Intermediate level radwaste)이라는 분류명칭을 사용하지는 않지만, 본 논문에서 고려하는 장반감기 중준위폐기물에는 군사프로그램에서 발생하는 TRU폐기물과 저준위 폐기물 중 Class B, Class C 그리고 그 이상(GTCC)이 해당된다고 하겠다.[2]

(3) 핵연료 주기에서 발생하는 장반감기 폐기물

핵연료 주기에서 발생하는 장반감기 폐기물은 핵연료의 제조와 발전소의 운전 및 핵연료의 저장과 재처리과정 등 핵연료의 취급과정에서 발생하거나, 발전소 및 재처리시설의 재염 및 해체과정에서 운전 중 조사된 물질 그리고 원자력분야 연구개발과정에서 발생하게 된다. 특히 경수로타

1) NORM : Naturally Occurring Radioactive Material
 2) TENORM : Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material

입의 원자로 1차계통의 핵심부품과 가스로 및 RBMK 원자로의 경우 적지 않은 양의 조사된 흑연(irradiate graphite)이 장반감기 폐기물에 해당될 수 있다. 또한 과거 원자력시설에서 발생한 사고로 발생된 폐기물이 있으면 이러한 사고폐기물은 그 폐기물의 양이 방대하며 다양한 핵종들을 포함하고 있게 된다.

(4) 의료, 연구 및 산업기관에서 발생하는 장반감기 폐기물

비교적 적은 양의 장반감기 폐기물들이 의료, 연구 및 산업기관의 동위원소 이용기관에서 사용 후 용도가 폐기된 방사성 동위원소 중 일부는 장반감기 폐기물로 취급될 수 있다. 이러한 장반감기 폐기물들의 부피는 작지만 핵종반감기와 독성이 강한 특징을 가지고 있다. 의료기관에서 진단 등의 목적으로 C-14, Cl-36의 핵종들이 사용되며, 산업체에서 사용되는 측정장비에서는 C-14, Ni-63, Ra-226과 Pu/Be, Am/Be, Ra/Be의 중성자 선원들이 사용된다. 특히, 연기감지기에서는 104~107의 Am-241이나 Pu-239 핵종을 사용하고 있어 이들 폐기물을 모두 고려할 경우 그 발생량뿐만 아니라 대부분의 천층처분시설을 위한 WAC에서 제시하는 핵종농도를 초과할 수 있다.

(5) 장반감기 폐기물의 부피

방사성폐기물의 처분방안을 고려할 때 처분대상 폐기물의 부피는 중요한 역할을 하게 된다. 특히 폐기물 발생원에서 처분까지 인허가규정에 따라 폐기물의 수송과 처분시설의 운영을 위한 폐기물의 처리(conditioning)과정은 발생폐기물 부피를 증가시키거나 감소시킬 수 있다.

2. 장반감기 폐기물 처분시설의 현황

가. 오스트레일리아

오스트레일리아는 저준위폐기물과 중준위 폐기물이 의료/연구/산업기관에서 발생되고 있으며 국가처분장 (Commonwealth Radioactive Waste Facility:공학적 다중덮개와 인공방벽을 갖춘 트랜치 처분방식)의 건설을 위해 현재 3군데 후보부지에 대한 부지조사를 하고 있다. 후보부지들에 대한 순위를 15개월 이내에 결정하고 개념 및 상세설계와 환경영향평가 그리고 인허가 과정을 거쳐 2011년 운영개시를 예정하고 있다. 그림 1에서는 중준위 및 저준위 폐기물을 위한 국가처분시설의 개념(예)를 나타내었다.

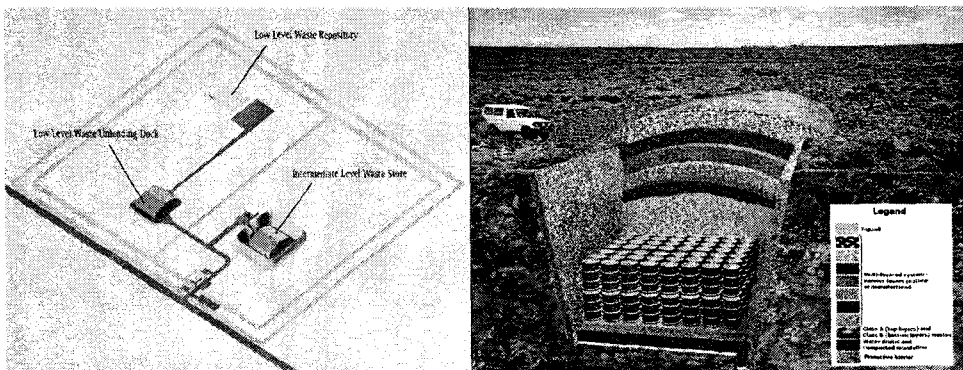


그림 1. 오스트레일리아의 국가처분장 개념(안)

오스트레일리아 정부는 현재 총 3,600 m³의 저준위 방사성폐기물을 가지고 있으며 연간 30m³의 저준위 폐기물이 발생되며, 총 400 m³의 중준위 방사성폐기물을 가지고 있으며 연간 5m³의 중준위 폐기물이 추가로 발생되고 있다. 저준위 폐기물은 현재 압축처리 된 포장드럼을 40년 이상 여러 장소에 나누어 저장하고 있으며 중준위 폐기물은 시멘트 고화하여 저장하고 있다. 그림 1은 시멘트 고화된 중준위 폐기물 용기를 나타내었다.

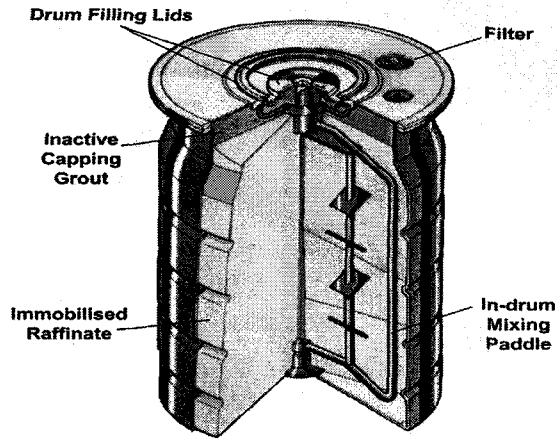
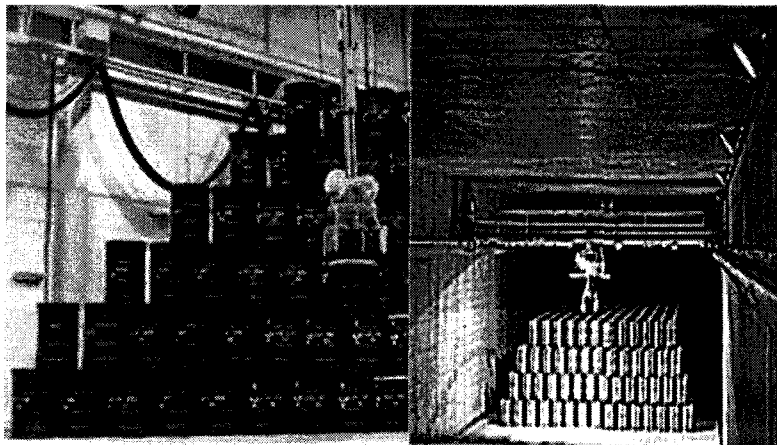


그림 3 오스트레일리아의 중준위폐기물 저장드럼

나. 벨기에

벨기에는 연구기관(SCK/CEN)과 MOX 플랜트 그리고 EUROCHEMIC 플랜트에서 방사성폐기물이 발생되고 있으며 벨기에의 방사성폐기물관리기관(ONDRAF/NIRAS)에서 처분사업을 담당하고 있다. 핵종의 반감기 30년을 기준으로 단반감기와 장반감기폐기물로 분류하고 있으며, 장반감기 중저준위 폐기물은 300년 이상의 격리(isolation)을 규정하고 있다. 방사성폐기물은 압축과 시멘트고화의 처리를 거쳐 중간저장 후 지중처분을 계획하고 있다. 그림 4에서는 저준위 방사성폐기물과 중준위 방사성폐기물의 임시저장시설을 나타내었으며 그림 5에서는 지하 225m 깊이에 현재 계획 중인 처분개념을 나타내었다.



저준위 폐기물의 임시저장

중준위 폐기물의 임시저장

그림 4. 벨기에의 임시저장 중인 중저준위 방사성폐기물

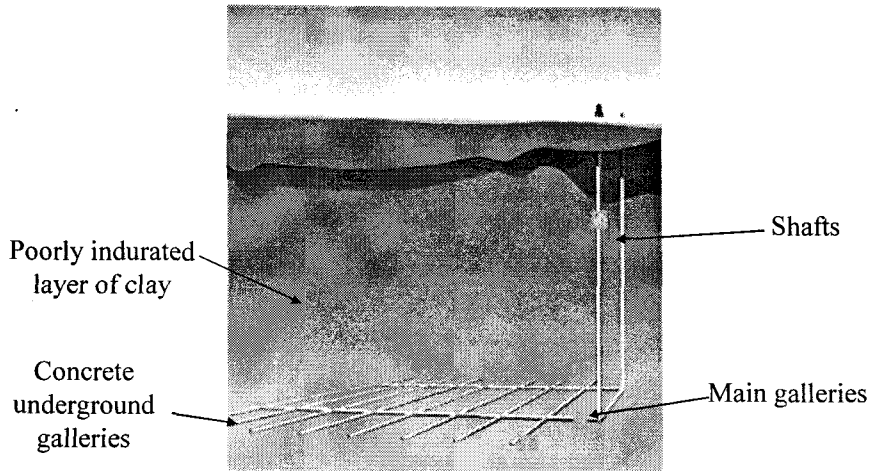


그림 5. 벨기에의 중저준위 방사성폐기물 처분시설의 개념

다. 불가리아

불가리아는 Kozloduy 발전소의 운영과 해체, 연구용원자로(IRT-2000), 동위원소의 이용과 우라늄광산(mining, milling 및 extraction)에서 장반감기 폐기물이 발생되고 있다. Novi Han 처분장에는 폐밀봉선원과 non-conditioned 고체폐기물과 생물학적 폐기물(biological waste)을 위한 처분고(disposal vault)가 있으며, 사고폐기물을 위한 공학적방벽과 임시덮개가 존재하는 처분시설이 있으며, 현재는 non-conditioned 폐기물의 임시저장시설로 운영하고 있다. 2004년에 방사성폐기물에 대한 국가정책을 결정하여 처분방안을 강구하고 있으며, 중저중위 방사성폐기물의 국가처분시설 건설에 대한 정부의 결정(2005년 예정)과 기존 Novi Han 처분시설의 폐쇄방안 및 WAC의 개발을 추진 중에 있다. 또한, 장반감기 폐기물 및 폐밀봉선원의 처분을 위해 과거 우라늄 시설이었던 Gabra 시설의 Gabra shaft(깊이 240m, 직경 4.5m)의 사용을 검토 중에 있으며, 그림 6에 시설의 전경을 나타내었다.

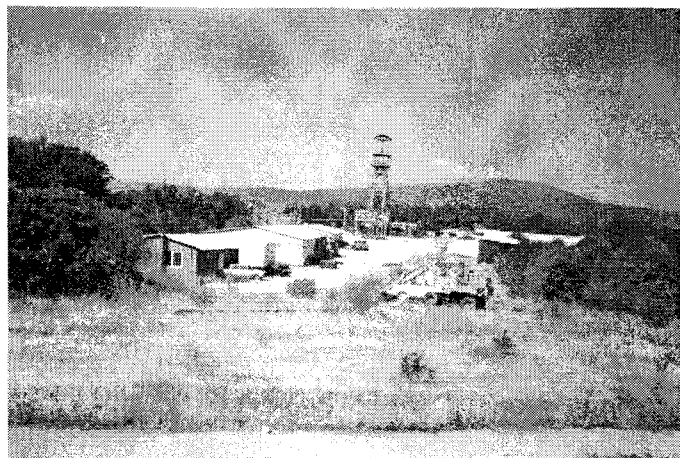


그림 6. 불가리아에서 장반감기 폐기물 처분을 위해 고려 중인 Gabra Shaft 전경

라. 체코

체코는 중저준위 방사성폐기물 25,000 드럼(총 재고량: 9.4×10^{14} Bq)이 처분되어있는 Richard 처분시설에 존재하는 장반감기폐기물들을 위한 처분방안으로 Hydraulic Cage의 개념을 도입하고 있다. Hydraulic Cage는 처분된 방사성핵종의 이동관점에서 기존 처분시설을 콘크리트 보강 후 장반감기 폐기물을 conditioning하고 재배치 후 폐쇄하여 감시하는 방법이다. 그림 7에서는 Hydraulic Cage 개념과 그림 8에서는 Hydraulic Cage 개념의 적용 전과 적용 후의 Richard 시설의 안전성평가 결과를 나타내었다.

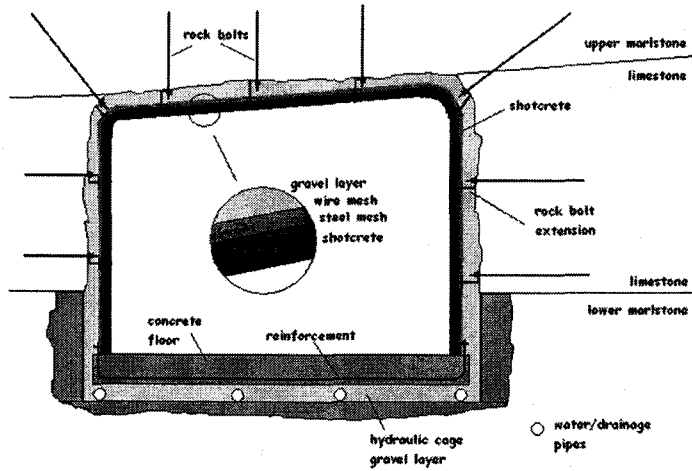


그림 7. 체코의 Hydraulic Cage 개념

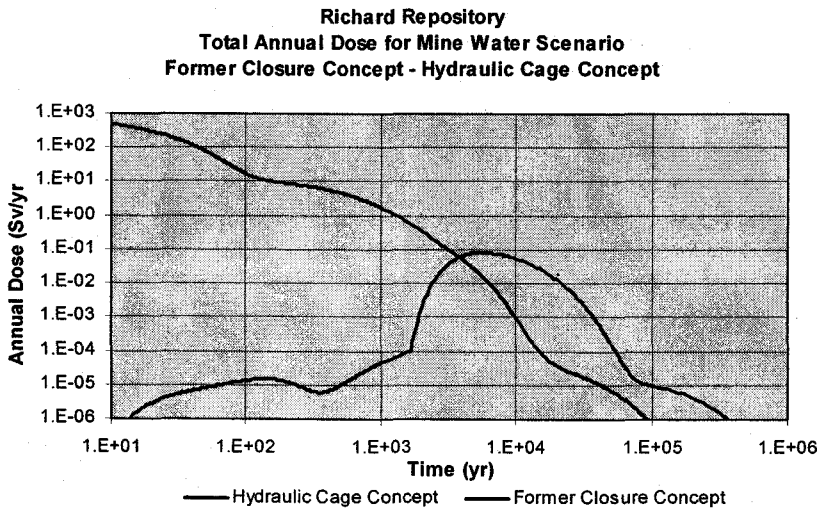


그림 8. 체코 Richard 처분시설의 Hydraulic Cage 개념의 적용에 따른 연간선량

마. 독일

독일은 방사성폐기물의 심지층처분을 원칙으로 하고 있으며 장반감기 중저준위 폐기물도 이에 해당된다. 특히, 독일에서는 기존의 동굴을 재사용하는 방안이 고려되고 있으며, 수리지질학적인 장점을 가진 것으로 조사된 KONRAD의 폐철광산을 이용한 처분시설이 2002년 non-heating 폐기

물 처분에 대한 인허가를 받아 동굴의 재건설이 추진 중이며 현재 법원의 결정을 기다리고 있다. 그림 9은 KONRAD 처분시설의 개념 및 동굴 내 처분지역을 나타내었다.

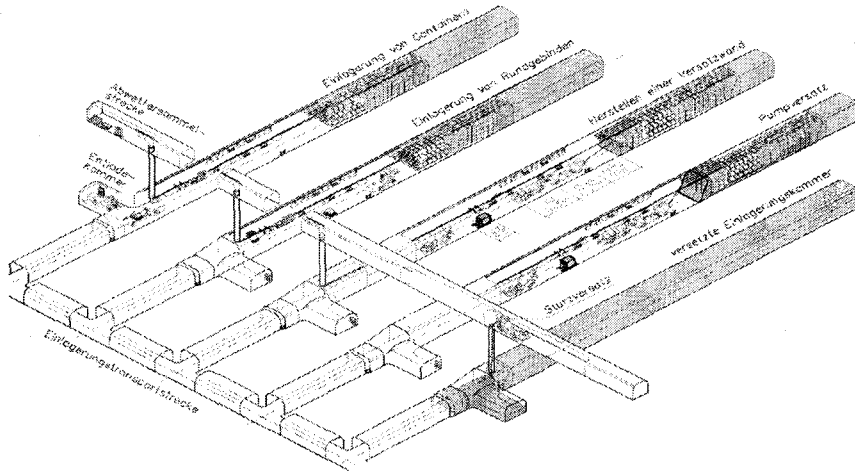


그림 9. 독일 KONRAD 처분시설의 개념 및 처분동굴

마. 남아프리카 공화국

남아공에서는 현재 Koeberg 발전소에서 발생하는 단반감기 중저준위 폐기물은 트랜치 방식의 Vaalputs 국가 처분장에 처분하고 있으며, NECSA에서 발생하는 장반감기 폐기물을 포함한 여러 중저준위 폐기물은 현재 부지 내에서 임시저장하며 국가의 정책의 승인을 기다리고 있다. 장반감기 폐기물 처분방안으로는 다양한 처분방식이 고려되고 있으며, 이 중에는 20m 심도의 인공방벽 보강 처분고 처분 또는 벙커처분 그리고 처분공 처분개념이 고려되고 있다. Koeberg 발전소에서 발생하는 사용후 핵연료의 심지층 처분이 필요할 것으로 보인다. 그림 10에서는 폐밀봉선원의 처분을 위해 연구가 진행 중인 처분공 처분의 개념을 나타내었다.

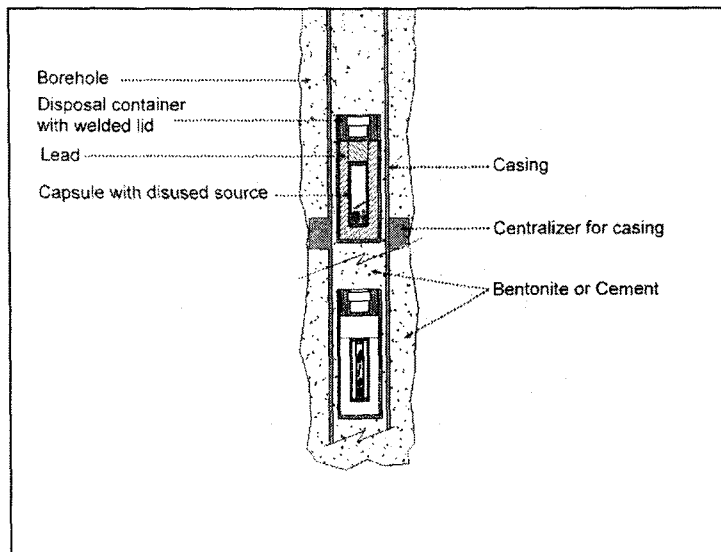


그림 10. 남아프리카 공화국의 폐밀봉선원의 처분공처분 개념

사. 우크라이나

우크라이나에서는 원자력발전소의 운영/해체와 RADON 및 우라늄 시설 그리고 과거 체르노빌 사고를 통하여 장반감기 폐기물들이 발생되어 관리되고 있다. 전체 총 중저준위 폐기물은 약 3,800,000 m³ 로 예상되며 이 중 1,400,000m³은 체르노빌 사고 시 발생한 폐기물이다. 장반감기 폐기물은 약 75,000 m³이 발생할 것으로 예상하며, 전체 장반감기 폐기물의 44%는 체르노빌 사고 시 발생한 폐기물의 부피이다. 발전소와 RADON시설에서 발생하는 장단반감기 중저준위 폐기물은 현재 시설 내에 저장되고 있다. 또한 RWDP 및 RWTSP의 중저준위 폐기물 처분시설이 존재하며 Vector 처분시설을 현재 건설하고 있다.

장반감기 폐기물을 처분방안으로는 shaft 방식과 처분공 처분 방식을 고려하고 있으며 발생폐기물의 특성과 발생부피에 따라 shaft 방식과 처분공 처분방식을 병행하여 2035년 운영을 계획하고 있다. 그림 11은 우크라이나에서 발전소 운영/해체 및 체르노빌 사고로 발생한 장반감기 폐기물을 염두하여 추진 중인 shaft 방식 처분개념을 나타내었다.

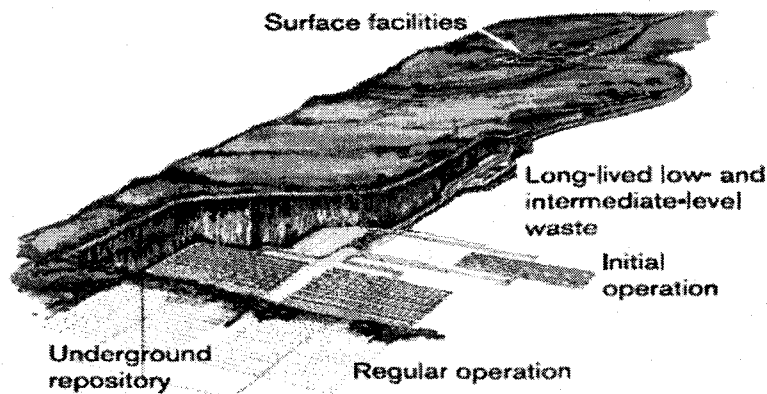


그림 11. 우크라이나의 장반감기 폐기물 처분을 위한 shaft 방식 처분개념

아. 미국

미국은 방사능 준위에 따른 분류 대신 폐기물 발생원에 따라 분류를 하고 있다. 장반감기 폐기물로 볼 수 있는 US NRC 분류체계의 저준위-GTCC는 처분방안이 정해지지 않았으며 US DOE 분류체계의 TRU 폐기물을 장반감기 폐기물로 볼 수 있다. 현재 TRU 폐기물은 심지층처분방식인 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) 처분시설에 처분하고 있으며 그림 12에 WIPP의 지상 및 지하 처분시설을 나타내었다. WIPP 시설 외에도 저준위 폐기물의 처분방법으로 심도 30m 이내의 천층 처분방식으로 5개의 처분방안이 있다.

사. 기타

이미 언급된 나라들 외에도 장반감기 폐기물의 처분을 위한 계획을 가지고 있는 나라로는 영국, 프랑스, 일본 등이 있으며, 우리나라에는 존재하지 않는 장반감기 폐기물이 존재하는 국가에서도 각국의 여건에 맞는 계획을 가지고 있었다.

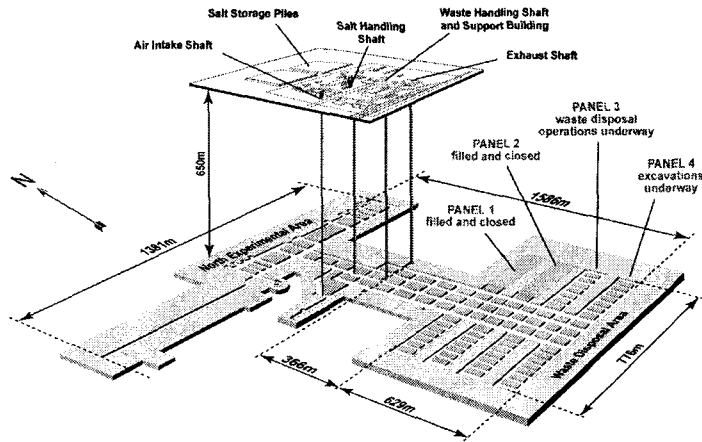


그림 12. 미국의 TRU 폐기물 처분을 위한 WIPP 처분시설의 개요

3. 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분방안

장반감기 폐기물의 처분방안을 결정할 때 고려되어야 하는 인자들에는 처분의 기본원칙에서부터 각국의 지질상태와 법률구조 및 정책 등 매우 다양한 부분들이 있게 된다. 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분방안을 도출하는데 기본적인 절차를 그림 13에 도시하였다.

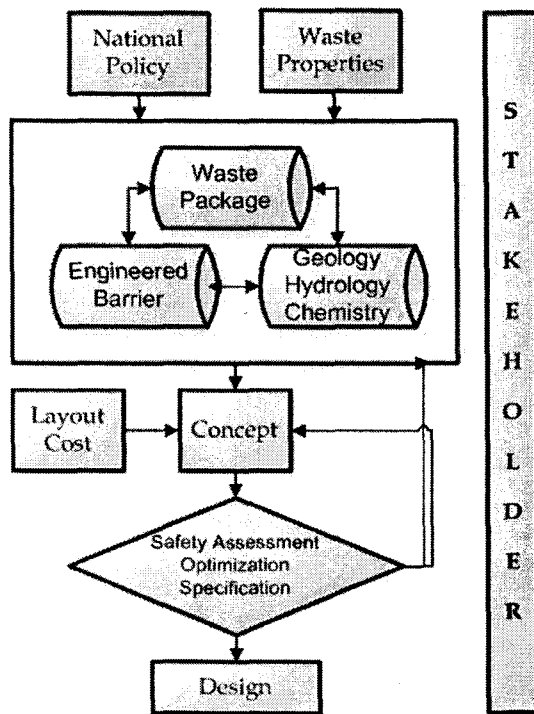


그림 13. 장반감기 폐기물 처분방안의 결정을 위한 기본적인 절차

장반감기 폐기물의 처분방안 설정은 이미 각국에서 진행하고 있는 방법을 고려하여 도출할 수 있지만, 가장 중요한 것은 처분에 대한 각국의 정책과 처분대상이 되는 장반감기 폐기물 그 자체이다. 이 두 가지 요소가 주어졌을 때 장반감기 폐기물의 전처리, 감용 및 고형화 과정을 통한 폐기물 포장물(Waste Package)과 선택된 처분부지의 수리지질학 및 화학적 조건(Geology, Hydrology, Chemistry) 그리고 마지막으로 설치할 수 있는 공학적 인공방벽(Engineered Barrier)의 3개 인자 중 어느 한가지로 인하여 처분시설의 안전성이 확보될 수 있다면, 나머지 인자들에 의한 안전성확보 기여도는 적어도 된다고 하겠다.

즉, 미국의 WIPP과 독일의 KONRAD 처분시설의 경우 선택된 암반이 처분조건에 적합하기 때문에 폐기물 포장물에 대한 안전성 기여도는 적어지며 포장용기는 최소 수송안전성 요건만을 만족하도록 하였다. 체코의 Richard 처분시설의 경우 Hydraulic Cage 개념에 의한 처분시설의 안전성확보가 가능하여 새로운 굴착을 하지 않고 기존 동굴을 사용할 수 있었다. 별도로 영국의 경우 Nirex 처분시설에서는 시멘트 버퍼에 의한 처분시설의 안전성확보가 가능하여 기존암반을 이용한 장반감기 폐기물의 처분이 가능한 경우도 있다.

처분방안의 설정에 있어 안전성평가는 의사결정이 기본적인 도구로 사용되며, 최적화와 구체화를 위한 일련의 반복적인 과정을 거치게 된다. 처분 안전성평가를 통해 처분시설의 장기안전성에 기여하는 특징과 과정들이 도출되며, 대표적인 것으로 시설의 WAC과 처분시설 구조물에 대한 명세가 있다.

4. 결론 및 제언

중저준위 방사성폐기물 중 장반감기핵종의 농도가 처분시설의 WAC를 초과하는 경우에 대비한 처분방안이 필요하다. 본 논문에서는 장반감기 중저준위폐기물의 처분을 수행하고 있거나 계획하고 있는 대표적인 국가들의 사례를 정리하였으며, 각국의 사례를 중심으로 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분방안 설정을 위한 기본절차를 도출하였다. 이러한 절차를 참고로 하여 국내에서도 장반감기 중저준위 방사성폐기물의 처분을 위한 활발한 논의가 필요하다고 하겠다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 2005년도 원자력중장기 연구개발계획사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] IAEA, Classification of Radioactive Waste, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna (1994).
- [2] U.S. NRC, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10CFR61.