



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2014년 2월

석사학위논문

신분류기준을 적용한 국내
방사성폐기물의 처분방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김영국

신분류기준을 적용한 국내
방사성폐기물의 처분방안 연구

A study on Applying the new classification
of Domestic radioactive waste disposal options

2014년 02월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김영국

신분류기준을 적용한 국내
방사성폐기물의 처분 방안 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김영국

김영국의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교 수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교 수 김 진 원 (인)

2013년 11월

조선대학교 대학원

목차

요약	iv~vi
제1장 서론	1
제2장 방사성폐기물 분류기준	2
제1절 국내 및 IAEA 방사성폐기물 분류기준	2
제2절 방사성폐기물 분류기준별 처분방식	4
제3절 세계 각국의 방사성폐기물 처분 연구 현황	5
1. 스웨덴	5
2. 캐나다	13
3. 독일	21
제3장 방사성폐기물 발생량 예비평가	27
제4장 신분류기준 VLLW 처분방식 적용	31
제1절 VLLW의 안전관리 국제동향(AEAE)	31
제2절 해외 각국의 신분류기준 VLLW 처분방식 적용 현황	32
제3절 국내 적용 방안	33
제5장 결론 및 제안	34
참고문헌	35

그림 목차

그림 1. 국내 방사성폐기물 분류기준	2
그림 2. IAEA의 방사성폐기물 신분류체계	3
그림 3. 방사성폐기물 분류기준별 처분방식	4
그림 4. 스웨덴의 방사성폐기물 처분 개념	9
그림 5. 스웨덴의 방사성폐기물 관리 체계	10
그림 6. SKB의 기구표	11
그림 7. 캐나다의 심지층처분 개념	16
그림 8. 방사성폐기물 처분관련 기관	24
그림 9. Bfs 의 조직표	25
그림 10. 프랑스의 “방사선적 폐기물처분 영향인자”	28
그림 11. 방사성폐기물 분류체계 개정 방향 및 처분 방식 연계	33

표 목차

표 1.1 스웨덴에서 2010년 까지 발생 예상되는 방사성 폐기물	6
표 1.2 스웨덴에서 1995년 말까지 발생된 방사성 폐기물	6
표 3.1 IAEA의 해체폐기물 발생량 예측	27
표 3.2 국내원전 운영 폐기물 구분기준	28
표 3.3 일본 PWR 용량별 해체폐기물 예측 발생량	29
표 3.4 국내원전 발생량(드럼) 산정량	29
표 3.5 IAEA 분류기준에 따른 국내 방사성 폐기물 분류	30
표 4.1 해외 각국의 신분류기준 VLLW처분방식 적용	32
표 4.2 IAEA 신분류기준 국내 적용방안	33

ABSTRACT

A study on Applying the new classification of Domestic radioactive waste disposal options

Kim Young-Gook

Advisor : Song Jong-Soon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

There are 23 plants are operating from the [commercial operation](#) on Kori Nuclear Power Plant Unit 1 in 1978 up to now (2013). According to [life extension](#) of existing plants and additional operating of new plants, growing waste in plants are increasing, so that we try to do preliminary research regarding management plan of waste comparing and analyzing [radioactive waste](#) management applying new classification standard of IAEA and foreign advanced countries' cases when the waste considering [decontamination](#), disposal or simple disposal needs to be managed before disposing the dismantlement waste which will generate later when plants that are no longer use are destroyed in this paper. Classification of radioactive waste following current nuclear safety act is classified as high level radioactive waste and intermediate and low level radioactive waste. According to IAEA new classification standard on radioactive waste that revised in 2010, radioactive waste is separated into high level waste, intermediate level waste, low level waste, very low level waste, very short lived waste and exempt waste by [half-value period](#) and radioactivity content. Moreover, typical disposal way per each classification is showed as well.

Canada nuclear power plant has adopted the policy managing the waste directly on account of having CANDU type nuclear reactor using natural uranium for fuel without reprocessing used nuclear fuel. In addition, there is no facility for managing intermediate and low level waste generating during

operation procedures of nuclear power plant permanently yet, it is managed and stored temporarily on the Bruce nuclear power plant sites in Kincardine.

In the US, low level waste generating during operation procedures of nuclear power plant is operated unilaterally per states or composed and managed the compact by joining many states. Now, private low level waste disposal sites that are operating in the US are in Richland, Barnwell and Cleave etc. and new waste disposal site is being constructed in Texas.

In Sweden, SFR, the intermediate and low level waste permanent disposal site has been operated. SFR is in Forsmark, the Baltic Sea where is 150Km away from Stockholm, the capital of Sweden and Nuclear Power Plant Unit 3 has been operating in Forsmark.

In Finland, intermediate and low level waste generating during operation procedures of nuclear power plant is managed separately by the disposal sites in Olkiluoto and Loviisa nuclear power plant sites.

In France, radioactive waste is divided into long lived and short lived waste depend on the [half-value period primarily](#), and it divided into very low level waste, low level waste, intermediate level waste and high level waste depend on radioactivity level secondarily. The methods of management are different according to these classification standards.

In Germany, it is defined by law that federal government is in charge of final management of radioactive waste generating during operation procedures of nuclear power plant. In case of disposing radioactive waste, radioactive waste is distinguished to [pyrogenic](#) radioactive waste and [pyrogenic](#) radioactive waste based on [heating value](#) that should be considered.

In Japan, [national nuclear waste management policy act](#) is divided into 4 parts. First policy is the responsibility on safety management of [radioactive waste](#) generator, second one is minimizing of [radioactive waste](#) generation rate, third one is reasonable management and disposal of radioactive waste and the last one is business promotion under the understanding of the people. The low level waste disposal site is located in Rokashomura, Amori and it has been operated since Dec. 1992 The facility such as spent resin etc. for disposing the waste that is comparatively high in radioactivity level is building now.

In this study, we investigate and analyze about analysis and application method concerning classification system on new classification standard and radioactive waste management trend of foreign major nuclear energy advanced countries including Canada, USA. The preliminary assessment on radioactive waste quantity in Korea should be made for applying IAEA new classification standard and also the classification standard per half-value period and level of generated waste needs to be set for application of classified new classification standard. By looking at the preliminary analysis of foreign major countries on radioactive waste quantity applying IAEA new classification standard, very low level waste quantity is going to take the largest part of total radioactive waste amount. Besides, what Korea needs to adopt through radioactive waste management trend of world major countries is that it should spur to prepare classification standard revision of Korea that brought IAEA new classification standard and disposal method per revised classification and new disposal site.

제1장 서론

- 연구 배경

1978년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 현재 2013년까지 우리나라에서는 총 23기의 원전이 운영 중에 있다. 이렇게 기존 원전의 수명 연장과 신규원전의 추가 가동 및 연구로나 제염해체 연구시설 등의 운전에 따라 각종 원자력 시설에서 발생하고 있는 방사성폐기물은 꾸준히 증가하고 있고 국내 원자력발전소중 수명이 다된 원전의 해체 시에 발생할 해체 폐기물을 처리하게 앞서 본 논문에서는 제염, 처리 또는 단순 처분을 고려한 폐기물의 처분 시에 IAEA 신분류기준을 적용한 방사성폐기물의 관리방안과 해외 선진국 사례를 비교분석한 폐기물의 처분 방안을 예비 연구해 보고자 한다.

처분 방안의 예비 연구를 위해서 IAEA 신분류체계를 기본으로 원자력 주요국의 적용 사례 및 처분 방안 현황을 분석하고 준위별 분류 기준과 폐기물 발생량 예비평가를 분석하여 국내 방사성폐기물의 발생량을 예측하고 국내 특성에 맞는 분류기준의 적용 방안을 모색하여 IAEA 신분류체계의 국내 적용에 가장 합리적인 적용방안을 도출하고자 한다.

- 연구 목표

국내 방사성 폐기물 분류 기준 중 중·저준위 방사성폐기물의 IAEA 신분류기준의 적용을 통한 분류기준의 세분화 및 대상 폐기물의 확정을 통해 적절한 처분 방안 마련과 효율적인 처분 계획을 마련하고자 한다.

최종적으로는 국내의 효율적인 중·저준위 방사성폐기물 관리 기반을 확립하기 위해 중·저준위 방사성폐기물 처분사업과 방사성폐기물 관리제도 및 개선에 IAEA의 신분류 기준을 적용하는 방안을 고려하고자 한다.

제2장 방사성폐기물 분류기준

제1절 국내 및 IAEA 방사성폐기물 분류기준

- 국내 방사성폐기물 분류기준

원자력안전법 시행령 제2조 제2호에 따라, 반감기가 20년 이상의 알파선 방출 핵종 농도가 g당 4000Bq이하이고 열발생율이 2KW/m^3 이하일 경우 중·저준위폐기물로 분류하고 두 기준 이상인 경우를 고준위폐기물로 분류하고 있다. 또한 고준위폐기물에는 사용후핵연료를 포함하고 있다.

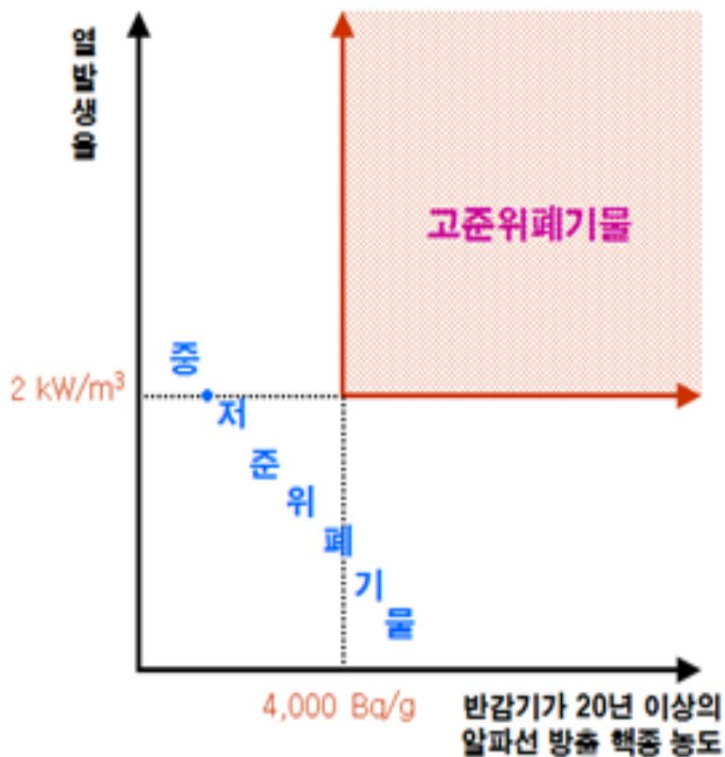


그림 1. 국내 방사성폐기물 분류기준

- IAEA 방사성폐기물 신분류기준

IAEA의 방사성폐기물 신분류체계를 살펴보면 국내 방사성폐기물 분류 기준 중에서 중·저준위 방사성폐기물에 해당하는 부분의 세분화를 통해 반감기별, 준위별로 나누어 분류를 제시하였다. 그리하여 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위, 극단반감기, 규제면제 폐기물로 총 6가지로 구분하고 각 분류별 처분방식 또한 제시하고 있다.

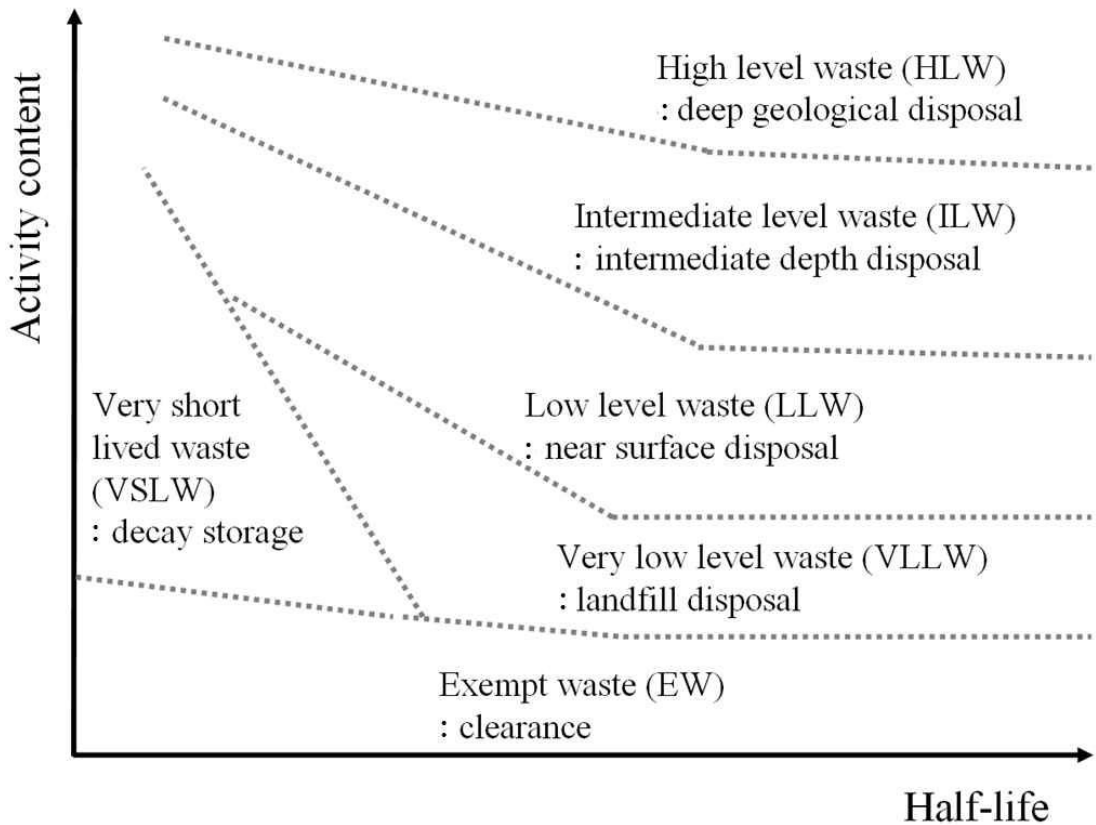


그림 2. IAEA의 방사성폐기물 신분류체계 [5]

제2절 방사성폐기물 분류기준별 처분방식

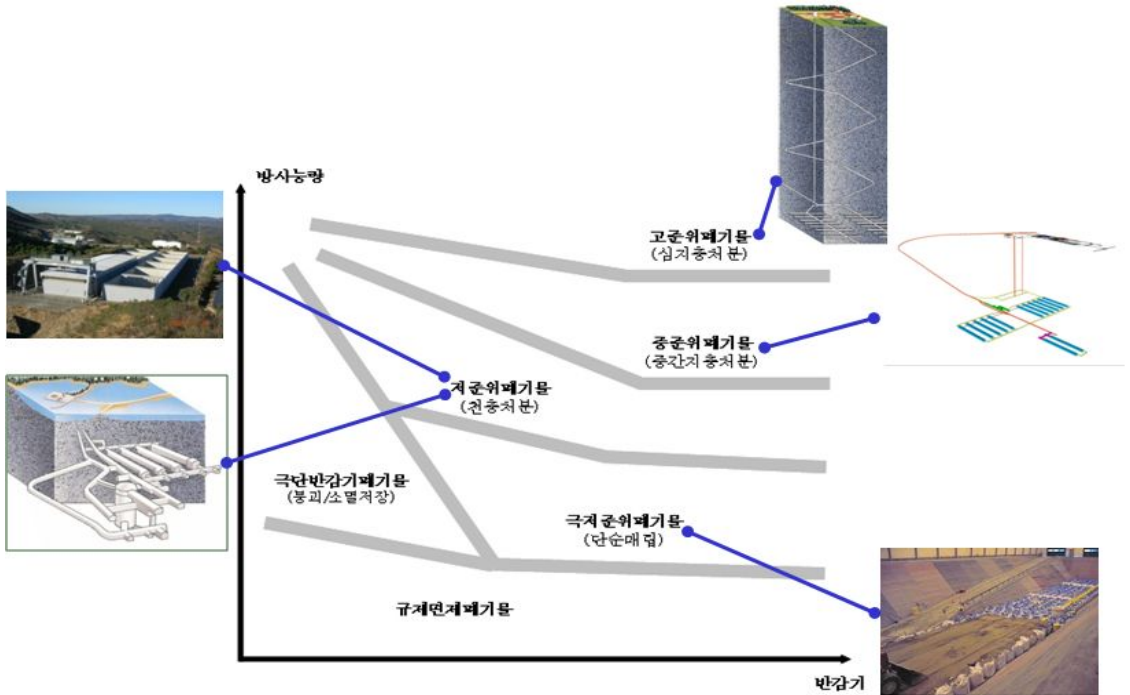


그림 3. 방사성폐기물 분류기준별 처분방식

고준위폐기물은 지하 500~1000미터의 암반에 처분시설을 만들어 수거물을 처분하는 심지층처분방식을 기본개념으로 하여 현재 미국, 프랑스 등을 중심으로 지하시험시설을 만들어 기술개발 중에 있다.

중준위폐기물은 지하 100~300미터의 적절한 지층에 처분장을 설치하여 폐기물을 처분하는 것으로 지질학적으로 안정한 암염층, 현무암층, 화강암층, 점토질암층 등이 검토되고 있다.

저준위폐기물은 지하 약 30미터 이내의 깊이에 천연방벽 또는 인공방벽을 이용하여 처분하는 방식으로 안전성 확보를 위해 인공방벽을 이용한 처분이 널리 이용되고 있다.

그 외에 극단반감기폐기물은 저장시설에서 붕괴 및 소멸될 때까지 저장한 후 처분하고 극저준위폐기물은 단순매립을 통해 처분하고 규제면제폐기물은 재활용가능한 부분만 재활용하고 일반 산업 폐기물 처리 방법을 택하고 있다.

제3절 세계 각국의 방사성폐기물 발생 및 처분 연구 현황

1. 스웨덴

가. 원자력 현황

1972년부터 원자력 발전소의 상업 운영을 시작한 스웨덴에서는 1994년 말 현재 총 12기의 원자로에서 약 10,00 MWe 의 전력을 생산하여 총 발전량의 42 % 을 점하고 있다.

원자력 발전소에서는 사용하는 핵연료는 매년 250 톤으로 1969년 이후 스웨덴 원자력 발전소에서 사용된 우라늄은 주로 캐나다와 오스트레일리아에서 수입되었다. 핵연료의 제조는 ABB Atom AB 에서 제작되거나 프랑스, 독일, 스페인, 미국에서 제조된 핵연료를 수입하고 있다.

1980년 국민투표에서는 2010년 이후에는 기 운영 중인 원자력 발전소의 수명에 관계없이 원자력 발전을 전면 중단하도록 하였다. 그 기간 동안 원자력 발전과 동등한 환경 / 고용효과 / 경제성 등을 갖는 대체 에너지 개발을 조건으로 하였으나 대체 에너지의 개발이 여의치 않자 1992년 국외에서 1980년 국민투표 결과의 시행을 보류하기로 결정하였다.

원자력산업을 통해 발생하는 중·저준위 폐기물은 해저 동굴 처분을 하고 사용후핵연료의 경우 해외 위탁 재처리를 하여왔으나 1980년 대 중반 심지층 직접처분으로 결정하였다.

나. 방사성폐기물 종류 및 발생현황

원자력발전소 해체 시 발생하는 장반감기 저준위폐기물과 중준위 폐기물, 발전기 탱크의 내부 그리고 많은 양의 저준위 폐기물이 콘크리트와 쇠의 형태로 발생한다. 표 1.1 은 2010년 원자력 발전을 통해 스웨덴에 누적되는 방사성폐기물의 종류와 양을 보여주고 있다.

2010년 까지 12개의 원자로가 모두 운영된다면 원자력발전소 해체 폐기물을 포함 총 200,000 m³의 방사성폐기물이 발생할 것이다. 이 중 10,000 m³은 고준위 사용후핵연료이고 10,000 m³은 장반감기 방사성폐기물이다. 만약 지금 모든 원자력발전소 (Nuclear Power Plant, NPP) 를 폐쇄한다면 처분해야 할 폐기물은 150,000 m³정도이다. 표 1.2 는 1995년 말 까지 누적되는 폐기물과 연간 발생량을 폐기물 종류에 따라 보여주고 있다.

표 1.1 스웨덴에서 2010년 까지 발생 예상되는 방사성폐기물

폐기물 종류	폐기물 분류	발생량
사용후핵연료	장반감기, 고준위	4500 처분용기 (7800톤)
Studsvik에서 발생하는 알파폐기물	장반감기, 중·저준위	약 2,000 m ³
원자로 내부	일부 장반감기 포함 중·저준위	약 10,000 m ³
원자로 폐기물	단반감기, 중·저준위	약 90,000 m ³
해체폐기물	단반감기, 중·저준위	약 150,000 m ³

표 1.2 스웨덴에서 1995년 말까지 발생한 방사성폐기물

폐기물 종류	연간 발생량	누적발생량 (1995년 말까지)
VLLW (지표 저장시설에 저장)	*	9,000 m ³
중저준위 폐기물 (SFR 에 저장)	2,960 m ³	18,442 m ³
고준위 폐기물 (CLAB 에 저장)	196 톤	2,395 톤

다. 방사성폐기물 관리 프로그램

스웨덴은 재처리를 하지 않고 사용후핵연료를 직접 처분하는 것을 기본 정책으로 하고 있다. 스웨덴 법은 NPP에서 전기를 생산하는 회사(Vattenfal AB Ringhals, Barseback Kraft AB, OKG Aktiebolag, Forsmarks kraftgrupp AB)에 폐기물의 관리와 처분에 대해 책임을 지우고 있으며 이들 회사들이 공동으로 SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Mangement Company)를 설립하였으며 SKB 는 NPP 에서 발생하는 방사성폐기물과 사용후핵연료, 그리고 해체폐기물의 관리와 처분에 책임을 지고 있다. SKB 는 스웨덴 폐기물 관리시설들을 소유하고 운영하며 광범위한 연구 프로그램을 수행한다.

1970년대 중반이후 SKB는 방사성폐기물의 최종처리를 위한 연구를 수행하고 있다. 연구는 대학, 산업체, 연구소뿐 아니라 국내외 전문가들과 공동으로 추진되고 있다. 최근의 작업은 연구결과를 요약하고 심지층 처분설계를 위한 기법의 검증에 초점을 맞추고 있다. 이러한 연구결과는 SKB 보고서를 통해 보고되는데 매 3년 마다 R&D 프로그램의 결과는 요약되어 정부에 제출된다. 이 프로그램은 정부책임자와 다양한 분야의 기구들에 의해 검토된다.

스웨덴 내 모든 NPP 에서 발생하는 사용후핵연료는 약 1년 동안 (적어도 9개월 이상)의 냉각기간을 거친 후 SKB 가 소유하고 있는 중앙집중식 중간저장시설인 CLAB 에 운반 저장된다. CLAB 부근에 사용후핵연료를 구리용기에 밀봉하는 밀봉공장(Encapsulation Plant)가 SKB 에 의해 건설될 계획으로 있다. 밀봉공장은 1990년대 후반에 시작하여 2007년에 완공할 계획으로 있다.

처분용기는 5 cm 두께의 구리용기로 내부에는 스테인레스 스틸에 사용후핵연료가 위치한다. 처분용기의 외벽을 구리로 하는 것은 구리가 부식 강한 특성을 이용하고자 하는 것이다. 고온 고압에서 예상되는 용기의 시간 존적 변형 (creep)을 막기 위해 구리에 소량의 인을 첨가한다. 구리의 연성을 보강하기 위해 내부는 주철강을 채워 외압을 견딜 수 있도록 하고 있다. 처분용기의 길이는 약 5 m 이고 직경은 약 1 m 정도이며 사용후핵연료를 거치하고 나서의 총무게는 25-27 톤 정도이다.

가압경수로 (PWR) 과 비등수경수로 (BWR) 사용후핵연료의 처분을 위해서는 두 종류의 처분용기가 필요하다. 스웨덴에서는 외부 구리용기는 동일한 것을 사용하고 내부

의 주철강의 형태를 변경함으로써 두 종류의 사용후핵연료를 처분할 수 있도록 하고 있다. 지난 수년간 스웨덴에서는 14개의 구리용기가 다양한 방법으로 제작되었으며 9개의 내부 주철강이 제작되었다. 이들 용기는 500 m 심도의 결정질 암반 내 수직 처분공에 각각 처분된다.

최종 처분장 부지는 아직 결정되지 않았으며 부지 선정 프로그램은 계속 진행 중이다. SKB 의 계획에 따르면 심지층 처분장은 사용후핵연료 중 10% (처분용기 400개)를 일단계로 처분하여 처분기술의 타당성을 검증한 후 나머지 사용후핵연료를 이단계에서 처분하게 된다. 일단계 처분은 약 20년 정도 소요될 것이다. 일단계 처분의 평가를 통해 만약 처분기술에 문제가 발견되거나 더 나은 방법이 개발된 경우에는 처분용기는 회수된다. 일단계 처분의 평가가 긍정적이면 운영허가를 얻어 나머지 3600 개의 처분용기를 20-30년 간의 운영기간 동안 처분하게 된다.

원자력 산업에서는 사용후핵연료, 고준위폐기물과 함께 중,저준위 폐기물이 발생된다. 중·저준위 폐기물은 처리 후 최종처분장인 SFR 에 운반되어 저장된다. VLLW 는 처분이나 다른 용도로의 사용을 위해 지표 저장시설에 매 2-3년 주기로 저장된다. 1995년 말 현재 약 9,000 m³ 의 폐기물을 거치하였다. 그리고 고준위 폐기물은 발전소의 중간저장시설이나 CLAB 에 저장된다.

CLAB 와 SFR-1 은 1980년대에 완공되었고 향후 약 7,900 통에 달하는 SF 밀봉시설 및 영구처분장과 장반감기 중준위 방사성폐기물 영구처분장, 그리고 약 111,700 m³ 에 달하는 해체폐기물 영구처분장이 2000년대 초반 차례로 건설될 예정이다. 그림 4 는 스웨덴의 방사성폐기물 처분의 흐름을 보여주고 있다. [3]

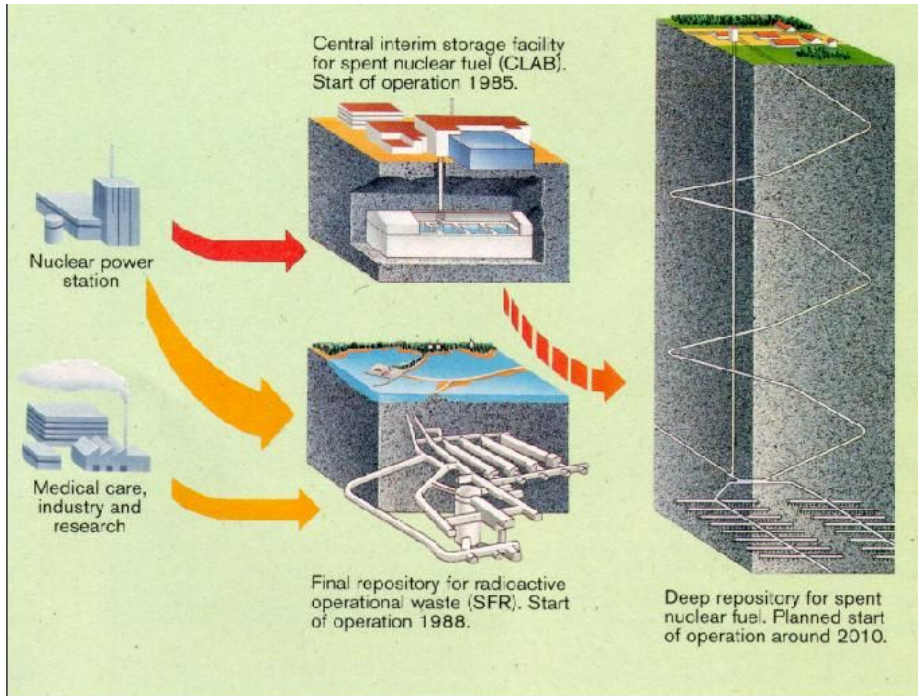


그림 4. 스웨덴의 방사성폐기물 처분 개념

라. 방사성폐기물 관리 체제 및 기관

핵기술에 관한 인허가를 가지고 있는 기업은 NPP의 안전한 운영과 방사성폐기물의 안전한 처분에 책임을 진다. 스웨덴에서는 방사성폐기물 영구처분을 위하여 4개 원자력 발전 회사의 공동 출자로 SKB 가 설립되어 각종 연구개발 및 처분사업을 수행하고 있다. SKB 는 Vattenfal AB Ringhals 가 36 %, Barseback Kraft AB 가 12 %, OKG Aktiebolag 가 22%, 그리고 Forsmarks kraftgrupp AB 가 36 % 의 지분을 가지고 있다. Vattenfal AB Ringhals 는 Forsmarks kraftgrupp AB 와의 이해관계로 실제 53 % 의 지분을 소유하고 있다.

인허가 심사를 위해 SKI 가 활동하고 있다. SKI 에서도 독자적인 연구개발을 수행하고 있는데 그 대표적인 연구개발 결과가 Project-90 이다. 또한 SKI 는 Deconvalex, BIOMOVS-II 등의 국제 공동 연구를 주도하고 있다.

스웨덴에서는 SKB, SKI 이외에 Ministry of Environment and Natural Resources 산

하기관으로 1985년 설립된 KASAM 및 SSI 가 안전규제에 관여하고 있다.

KASAM 은 독립적인 전문가 위원회로서 정부와 각 각료들에게 방사성폐기물 관리에 관한 조언을 제공한다. 관련법률로는 인허가 기준 및 연구개발을 규정하는 Act of Nuclear Activities, 비용문제를 규정하는 Financing Act 가 있으며 그 외에 Radiation Protection Act 가 있다.

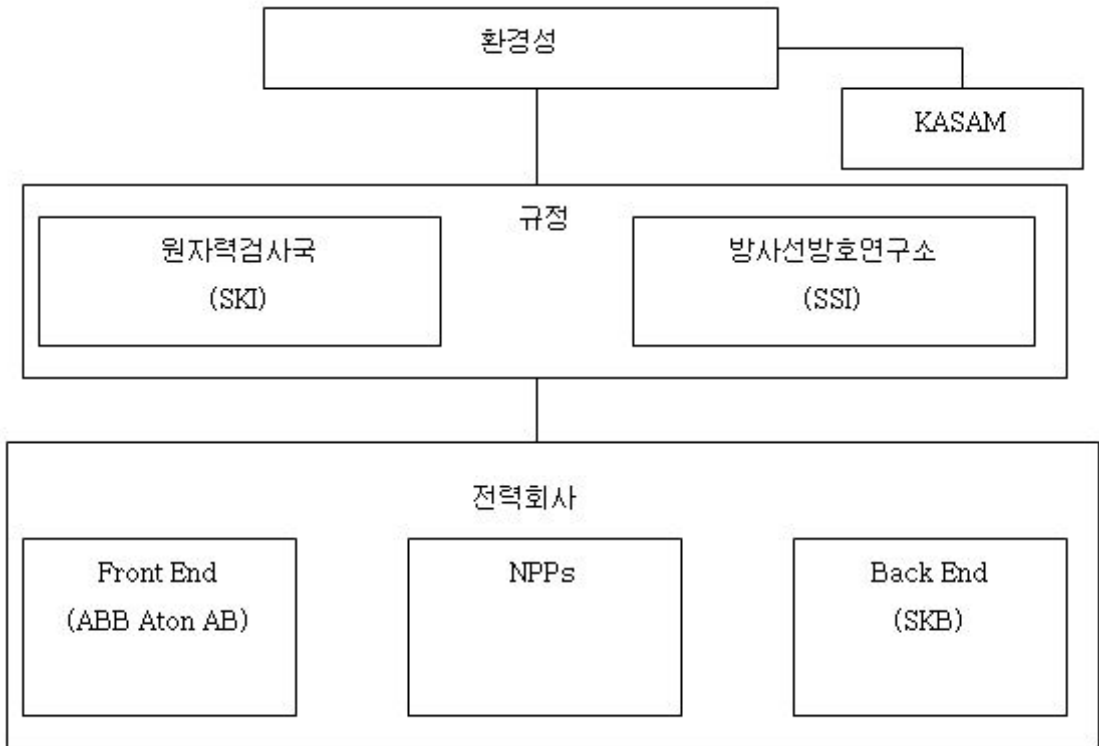


그림 5. 스웨덴의 방사성폐기물 관리 체계

SKI 와 SSI 는 의사결정자와 민간에 정보를 제공함으로써 인허가 과정에 간여한다. 이들 기관의 권장에 따라 정부는 모든 방사성폐기물 처분시설의 인허가를 결정한다. 지표저장시설의 경우 SSI 가 인허가를 관장한다.

SKB 는 4개 전력회사의 공동 출자로 1972년 설립된 회사로서 중저준위 방사성폐기물 처분시설의 건설 및 운영, 사용후핵연료 중간저장시설 건설 및 운영, 사용후핵연료

및 HLW 처분시설 건설 및 운영과 관련 연구개발의 책임을 맡고 있다. 1998년 현재 SKB 에는 116 명 (남자 65명, 여자 51명) 이 근무하며 이중 90명이 스톡홀름의 본사 에 있고 Oskarshamn 에 있는 처분용기 연구소와 에스페 실증시설에 25명 이 근무하 고 있고 feasibility study 중인 지역에 몇 명이 있다. 외부 계약인력을 포함하면 약 700 명이 SKB를 위해 일하고 있다. SKB 의 기구표는 그림 6 에 나타나 있다. [4]

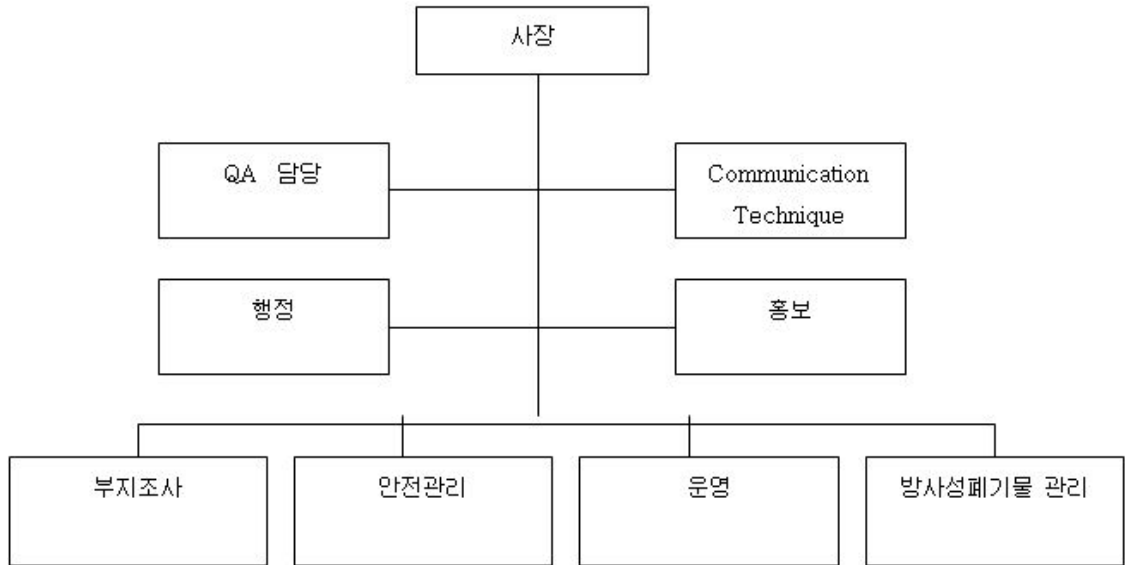


그림 6. SKB의 기구표

마. 방사성폐기물 자원관리

스웨덴에서는 NPP 회사가 사용후핵연료, 해체폐기물 등 방사성폐기물의 관리와 처분에 관련된 비용을 책임진다. 1981년에 입법된 Financing Act 에 따라 SKI 주관 하에 장래의 고준위폐기물과 해체폐기물의 처리비용을 충당하기 위한 재정시스템이 발효되었으며 이에 따라 1982 년부터 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 관리, 원자력 발전소 해체, 처분장의 운영과 감시를 위한 기금이 징수되고 있다.

SKI가 제시하고 매년 정부가 결정하는 폐기물 기금은 단위 전력 kwh 기준으로 NPP 에 부과된다. 이렇게 모인 요금은 방사성폐기물 기금 (Nuclear Waste Fund)으로

National Debt Office 에 넣어져 이자를 축적하게 된다. 중·저준위 방사성폐기물과 사용후핵연료의 임시저장 및 영구처분을 위해 0.02 SEK/kw 를 방사성폐기물 관리기금으로 징수하고 있다.

기금요율은 12기의 원자로가 25년 동안 운영된다는 가정 하에 계산된 것으로 기금의 액수는 원자력 발전소들이 얼마동안 운영되었는가에 따라 달라진다. 매년 800 million SEK 의 기금이 징수되며 이전에 모인 기금에서 매년 약 1,500 million SEK 의 이자가 발생한다. 이렇게 모인 기금은 1998년 총 22 billion SEK 이며 모든 원자력발전소가 25년 동안 가동된다고 가정하면 44 billion SEK 의 기금이 모이게 된다. 이 기금 중 일부는 폐기물 취급과 연구를 위해 쓰이게 된다. 이 기금과 함께 핵발전 회사는 예상하지 못한 사태에 의해 기금이 비용 보다 부족해지는 경우에 대해서도 책임도 진다. 예를 들어 원자력발전소들이 예상 운영기간인 25년을 채우지 못하고 폐쇄되는 경우를 생각할 수 있다. 방사성폐기물의 처리처분을 위해 예상되는 총 비용은 47 billion SEK 로서 약 70년 동안에 걸쳐 각 분야에 지출된다.

체계적이고 장기적인 비용징수 기반을 마련하기 위해 SKB 에서는 1992년부터 plan project 를 시작하여 종합사업 및 관련 비용 예측 보고서를 발간함으로써 정확한 비용 계산 및 이에 대한 관련기관 및 대국민 신뢰성 증진에 노력하고 있다. Plan 92와 Plan 93 에서는 장기적으로 스웨덴에서 필요한 영구처분 시설들을 도출하였다. 즉 현재의 수송시스템인 MS/SIGYN 의 노후화에 따른 대체 비용, SFR 의 확장비용, 원자력발전소 해체폐기물 처분을 위한 비용, 사용후핵연료 영구처분을 위한 Encapsulation Plant 및 영구처분장 건설, 운영, 폐쇄를 위한 비용들이 폐기물 발생량에 따라 결정되었다.

각 원전 운영 시나리오 별 방사성폐기물의 연간 발생량을 예측한 다음 이를 영구처분 및 처리할 시설의 용량과 건설 및 운영기간이 결정되고 이에 따라 개념설계를 실시하여 자세한 비용분석을 수행하였다.

Plan 94 에서는 Plan 92 에서 설정된 개념과 Plan 93 에서 추정된 비용을 근거로 보다 자세한 비용을 산정하였다. 현재 스웨덴 의회에서 결의한 대로 2010년까지 모든 원자로들을 폐쇄해야 할 경우 총 소요비용을 계산하였고 아울러 원자력 발전소들이 2010년에 폐쇄되지 않고 기존 수명인 25년 동안 모두 가동될 경우와 보다 경제적인 관점에서 발전소 수명 연장안이 채택되어 원자력 발전소의 수명이 40년으로 늘어날

경우 등의 경우에 대하여 총 비용을 분석하여 기존의 스웨덴 방사성폐기물 관리 기금 법 상에서 확보된 기금으로 이러한 종합관리 사업을 적절하게 수행할 수 있는가를 검토하였다.

심지층 처분을 위한 총 투자는 13 billion 스웨덴 크로나 정도로 심지층 처분장은 두 단계로 나누어 건설될 계획이다. 일 단계에는 2010년 중반에 시작되며 약 150명의 고용창출 효과가 있고 그 후 10년 후에 시작될 본격적인 2단계 운영을 위해 70명의 일자리가 만들어 진다.

SKB 는 CLAB부근에 밀봉공장을 건설할 계획으로 있는데 그럼으로써 건설, 운송, 운영에 있어 여러가지 이득을 볼 수 있다. 이와 함께 밀봉공장을 심지층처분장 부근에 건설하는 것에 대해서도 검토되고 있다. 밀봉공장은 운영비를 포함 약 3 billion 크로나의 투자를 필요로 하며 운영에는 40명의 인원이 필요하다. 처용기의 제조공장의 경우 약 30명의 인원이 필요하다.

2. 캐나다

가. 원자력 현황

캐나다는 1953년 CANDU형 원자로 연구에 착수하여 1962년 Rolphton NPD의 상업 운전에 들어간 이래로 97년말 14기의 CANDU 원자로에서 10,915MWe의 전력을 생산하고 있다.

북미 최대의 원자력전력업체였던 온타리오 하이드로사는 한때 19기의 원전을 가동하였으나 90년대 들어 운영상태가 악화되고 원전의 성능도 악화되어 전체적인 개선작업이 필요하였다. 98년 1월과 3월 온타리오 하이드로사의 7기 원전이 운영능력향상을 위한 조치를 위해 가동 중지되었으며 이들의 재가동 혹은 영구폐쇄는 향후 이사회에서 결정된다.

이와 더불어 온타리오 주 정부는 전력시장의 민영화를 위해 90여년간 독점체제를 유지해온 온타리오 하이드로사를 99년 4월, 5개의 독립적인 운영회사로 분할하였다. 이를 계기로 값싼 수력발전을 가지고 있는 하이드로 퀘벡사, 미국 최대의 전기사업자인

서던 컴퍼니사 등의 시장참여는 가동 중지된 원전의 운전 재개를 불투명하게 하고 있다. 그러나 온타리오 하이드로에서 전체발전설비를 넘겨받은 Ontario 발전사(Ontario Power Generation Inc.)는 설비의 개선작업을 통하여 꾸준히 성능향상을 이루어가고 있다.

나. 방사성폐기물 종류 및 발생현황

캐나다에서 발생하는 방사성폐기물의 종류와 양은 다음과 같다.

■ 사용후핵연료

Ontario Power Generation사는 운전중지된 7기와 가동중인 12기의 원전을 보유하고 있으며 New Brunswick Power사와 Hydro Quebec사가 각각 1기의 원전을 운전중에 있다. 이들 전력회사에서 연간 85,000개의 사용후 핵연료 다발이 발생하고 있는데 1996년 말 약 120만 다발(29,400MT)의 CANDU 핵연료 다발이 발전소 부지에 저장되어 있다.

새로운 원자력발전소가 건설되지 않는다면 2033년까지 360만 다발이, 신규 원전이 건설되어 93년의 원자력발전량이 그대로 지속된다면 2073년까지 1,000만 다발이 발생하리라 예상된다. 또한 AECL의 연구로와 방사성 동위원소 생산시설, 대학의 연구로에서 배출되는 핵연료가 소량 존재한다.

■ 저준위 방사성 폐기물

캐나다는 관리목적상 저준위 폐기물을 원전 운영 폐기물과 Historic Waste로 구분하고 있다. 원전 운영 폐기물은 매년 5,000 - 7,000 m³ 정도 발생하고 있으며 1995년말 180,000m³에 이르고 있다. 원전 운영 폐기물로 분류되는 것은 캐나다의 원자로, 핵연료 제조 공장, 의료 혹은 산업체로부터 발생하는 방사성폐기물이다.

Historic Waste는 관리에 대한 책임 혹은 관리비용을 지불할 소유주가 존재하지 않거나 불명확한 방사성 폐기물을 일컫는 것으로 연방정부가 Low-Level Radioactive Waste Management Office (LLRWMO)를 통해 관리하고 있다. 약 100만 평방미터 정도의 양이며 공정폐기물과 오염된 토양이 대부분을 차지하는데 저준위 방사성 폐기물

양의 약 90%를 차지한다. 대부분은 온타리오주의 Port Hope 부지에 저장되어 있다.

■ 우라늄 광산 및 정련폐석

캐나다는 세계 우라늄 생산의 1/3을 담당하는 우라늄 생산국으로 우라늄 광산과 우라늄 정련에 의한 폐광석의 관리문제를 안고 있다. 폐광석은 주로 광산 주변의 지역에 저장되어 있다. 캐나다의 우라늄 광산 및 정련폐석 양은 2억 2천 5백만톤에 달한다.

다. 방사성폐기물 관리 프로그램

1996년 7월 10일 천연자원성(Natural Resources Canada) 장관은 사용후핵연료, 저준위 폐기물, 우라늄 광산 및 정련폐석의 처분 방침인 Policy Framework for Radioactive Waste을 발표하였다. Framework에는 안전, 환경, 비용을 포괄적으로 고려하기 위한 체제 정비 및 재정문제와 관련된 기본방침과 이행단계를 기술하고 있다.

■ 사용후핵연료

사용후핵연료의 관리 및 처분에 대한 책임은 발생자 및 소유자가 지고 있다. 현재 Ontario Power Generation사가 90%, Hydro-Quebec사가 5%, New Brunswick Power사가 5%, AECL 및 연방정부가 1% 미만의 사용후핵연료를 각기 자신의 원전부지에 습식 혹은 건식으로 저장하고 있다.

캐나다는 핵연료 처분의 시급성이 많지 않았음에도 영구처분을 위한 노력을 오랫동안 진행하여 왔다. 1977년 Kenneth Hare 박사가 주도한 태스크 팀은 캐나다인 쉴드의 화성암반에 사용후핵연료를 처분할 것을 권고하였다. 1978년 연방정부와 온타리오 주 정부는 Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program하에서 AECL은 심지층처분의 개념에 대한 연구를 하였고, Ontario Hydro사는 중간저장과 수송에 대한 연구를 진행하게 하였다. 그림 7 은 캐나다의 심지층처분개념을 보여주고 있다.

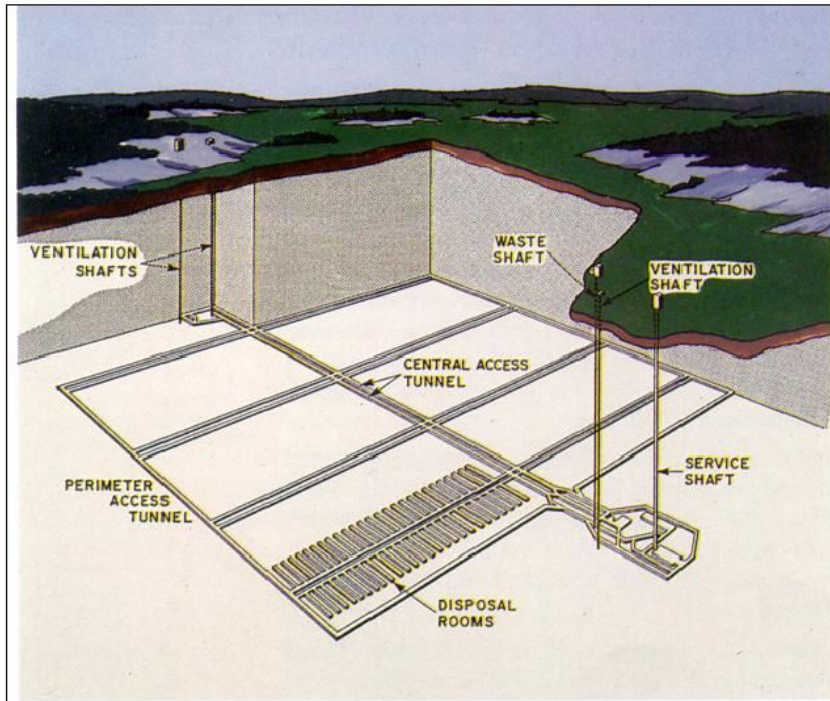


그림 7. 캐나다의 심지층처분 개념

1989년 10월 천연자원성은 Federal Environmental Assessment and Review Process Guidelines Order에 따라 환경성에 AECL의 심지층처분 개념 연구결과에 대한 공개 검토를 요구하였다. 이를 위해 환경성 장관은 검토작업을 위한 독립적인 패널인 Nuclear Fuel Waste Disposal Concept Environmental Assessment Panel을 구성하였다. 1994년 AECL은 패널의 요구로 심지층처분 개념의 환경영향평가서를 패널에 제출하였으며 1996년과 1997년에 일련의 public hearing이 16개 지역에서 진행되었다.

1998년 3월 패널은 검토결과 보고서를 천연자원성 및 환경성에 제출하였는데 주요 내용은 기술적 관점에서 AECL의 개념은 적절하지만 사회적 관점(국민수용성 관점)에서는 AECL의 개념이 그대로 적용되기에는 부족하다는 것이다. 패널은 즉시 새로운 폐기물 관리 전담기구(Nuclear Fuel Waste Management Agency)를 만들 것을 제안하고 폐기물 관리 방법에 대한 사회적 수용이 이루어질 때까지 처분장 부지조사를 미루

어야 한다고 권고하였다.

1998년 12월 캐나다 정부는 패널의 보고서에 대한 답장에서 일부를 제외하고는 패널의 권고를 수용하였으며 새로운 기구의 설립에 찬성하였다. 다음은 새로운 기구의 설립에 대한 캐나다 정부의 주요 입장이다.

- 핵연료 폐기물의 발생자와 소유자, 특히 온타리오사, 하이드로 퀘벡사, 뉴브런스윅 발전사는 폐기물 관리를 위한 독립 법인 기구를 구성하고 기금을 제공해야 한다.
- 기구는 사용후핵연료와 관련된 모든 활동 (처분 포함)을 관리하고 조정할 권한을 지닌다.
- 기구는 연방 정부에 정기적으로 폐기물 활동과 관련된 보고를 해야 한다.
- 기금에 대한 감독을 행할 정부 차원의 점검 및 승인 구조가 확립되어야 한다. 현재는 이 기구의 설립에 대한 광범위한 컨설팅 작업이 이루어지고 있다.

■ 저준위 폐기물

저준위 폐기물의 주요 발생자는 OPG사(45%), AECL(30%), Cameco사(5%)이며 Hydro-Quebec, New Brunswick Power, General Electric Canada, Zircotec Precision사 등이 전체의 3%를 발생하고 방사성동위원소의 이용 등에서 17%가 발생하고 있다. 현재 캐나다의 저준위 폐기물은 각 사이트에 저장되어 있으며 AECL은 소규모 폐기물 발생자를 위한저장시설을 제공하고 있다. 지속적으로 발생하는 저준위 폐기물의 처분을 위해서는 하나 혹은 몇 개의 처분장이 필요하리라 예상된다.

OPG사의 전신인 Ontario Hydro사는 자체 처분시설을 건설하는 계획과 다른 산업체의 산업폐기물을 공동으로 처분하는 Multi-user 처분시설 계획을 고려하고 있으며 AECL은 콘크리트 방벽을 가진 천층처분장 개념인 IRUS(intrusion-resistant underground structure)의 건설을 추진 중에 있다. Chalk River 연구소에 설치될 IRUS는 단반감기 폐기물을 저장하게 될 것이다.

■ Historic 폐기물

80년대 후반 천연자원성은 2개의 부지조사팀(Siting Task Force : STF)을 조직하고 온타리오주와 브리티시 컬럼비아주의 Surrey에서 그 주에서 발생한 Historic 폐기물 처분을 위한 부지를 자발적, 지역동의 과정을 통해 선정하도록 하였다. 온타리오주의 조

사에서는 1995년 11월 Deep River 지역이 Port Hope 지역에 저장중인 Historic 폐기물을 받아들일 용의가 있는 것으로 보고되었다.

Deep River는 STF와 맺은 Community Agreement in Principle (CAP)에 기초하여 폐기물을 받아들이기로 하였으며 이를 지역투표에 부쳐 72%의 찬성을 얻었다. 1996년 7월 천연자원성은 CAP에 기초하여 법률 조항 작성을 위한 협상을 시작하였으나 협상에서 의견 차이를 좁히지 못하여 아직까지 별다른 진전이 없는 상황이다.

Surrey에서의 활동한 부지조사팀은 소규모의 처분을 위한 몇 개 지역을 확인하여 이 지역에 대한 평가 작업을 진행하고 있다. Surrey 부지조사팀은 1996년 약 4000m³의 모래, 자갈, 광재는 Alberta에 있는 상업적 산업폐기물 시설에 처분하고 55m³ 정도의 저준위 폐기물은 AECL의 Chalk River 연구소에 저장하는 안을 제안한 바 있다.

우라늄 정련시설의 최종 해체는 방사성폐기물의 처분과 유사하며 광산 회사가 그 책임을 지고 있으며 AECB가 규제업무를 담당하고 있다. [8]

라. 방사성 폐기물 관리 체제 및 기관

■ 폐기물 발생자

캐나다에는 핵연료주기 전반에 걸쳐 원자력 산업체가 존재한다. 핵연료주기와 관련된 산업체는 우라늄 채광·정련 회사인 Cameco Corporation, Cogema Resources Inc., Uranerz 등이며 Cameco Co.는 변환 역무도 함께 서비스하고 있다. General Electric Canada와 Zircatec Precision은 핵연료 성형가공 회사이다.

천연자원성 산하의 AECL은 원자력의 기초 및 응용연구, CANDU 원자로의 설계 및 마케팅 등을 담당하고 있다. 캐나다의 모든 전력회사는 정부 소유인데 원자력발전을 가진 전력회사로 Ontario Hydro, Hydro Quebec, New Brunswick Power가 있다. 이 중 Ontario Hydro 사는 5개의 독립 운영 기관으로 분리되었다. 전력회사는 각 주의 전력설비를 건설, 운전, 유지보수하는 책임을 지고 있다.

■ 규제 및 인허가

캐나다의 원자력 시설 규제 및 인허가에서 중요한 기능을 담당하는 기관은 1946년 Atomic Energy Control Act에 의해 설립된 천연자원성 산하의 AECB이다. 몇몇 연방

정부 및 주정부 기관이 규제업무와 관련되어 있지만 AECB가 우선적인 규제 및 인허가 기능을 담당하고 있다. 1996년 3월 연방정부는 새로운 원자력법인 Nuclear Safety and Control Act (NSCA)를 도입하기로 하고 1997년 3월 의회의 비준을 얻었다. NSCA는 원자력시설의 공중 및 작업자 안전과 환경보호에 대한 특별한 관심을 반영하고 있으며 규제기관의 위상 약화에 대한 조치이기도 하다. 이 법에 근거한 새로운 규제업무가 작성되고 있으며 완전한 규제업무가 작성되어 승인되면 1999년 여름경에 공포되어 시행될 예정이다. 현재는 승인작업이 거의 마무리단계에 있다고 전해진다.

NSCA에 따라 AECB는 Canadian Nuclear Safety Commission으로 바뀌게 되며, 폐기물 발생자에 대한 업무개선 명령 권한이 강화되고, 인허가 조건을 통해 폐기물 처분 비용이 확보될 수 있게 규제하게 된다.

AECB에서 중요한 규제수단 중의 하나는 인허가를 통한 규제이다. 원자력사업자는 원자력 물질을 소유하거나, 사용하거나, 수출입할 때 혹은 원자력시설을 운전할 때 사전에 인허가를 얻어야 한다. 또한 안전기준을 설정하고 이행여부를 감시감독하는 것도 중요한 규제수단이다. [4]

마. 방사성 폐기물 자원관리

방사성폐기물 관리의 체제 및 재원에 관한 사항은 1996년에 발표된 Policy Framework for Radioactive Waste에 명시되어 있다. 주요 사항을 살펴보면

- 연방정부는 방사성폐기물의 처분이 안전하고, 환경에 위해를 주지 않고, 포괄적이고, 비용면에서 효과적이며 종합적인 방식으로 이루어지도록 할 것이다.
- 연방정부는 폐기물 소유자 혹은 발생자가, 승인된 폐기물 처분 계획에 따라, 법적 요건을 충실히 이행하고 있는지, 폐기물 처분 재원을 확보하고 있는지, 운영책임을 준수하고 있는지를 확인하기 위하여 정책수단을 개발하고 감시·감독할 책임을 지닌다.
- 폐기물 소유자와 발생자는 발생자부담(polluter pays) 원칙에 따라 폐기물 처분을 위한 재원확보, 조직 형성, 처분시설의 운영 및 관리의 책임을 지고 있다. 이는 사용후핵연료, 저준위폐기물, 우라늄 광산 및 정련폐석에 대해 차별적 접근을 의미

한다.

이러한 원칙하에 원자력발전을 가진 전력회사는 전기요금에 이를 위한 비용을 첨가하고 있다. 예를 들어 가장 많은 원자력발전소를 가진 온타리오사는 해체비용으로 1996년 1,465 million dollar를 1997년 1,578 million dollar를 계상하였으며 사용후핵연료 처분 비용으로 1996년 1,136 million dollar, 1997년 1,264 million dollar를 계상하였다. 이들 비용 추정치는 매년 새로운 가정을 통해 추정되어 계상되는 것으로 기술적 진보, 경제여건 등을 감안하여 변하게 된다. 그러나 전력회사들은 이렇게 계상된 비용을 회사 자금과 분리하여 독립적으로 적립하는 기금을 가지고 있지 않다. 지금까지 계상된 비용은 다시 전력설비에 재투자 되어 왔다. 미래에도 전력판매가 계속 되리라는 가정하에 미래의 처분비용을 전력설비에 재투자하여 미래의 전력 판매를 통해 처분비용을 마련하겠다는 생각이다. 전력회사뿐만 아니라 여타 원자력시설을 가진 회사도 유사한 방식으로 처분비용을 재투자하고 있는 실정이다.

새로운 원자력법인 NSCA는 Canadian Nuclear Safety Commission을 통해 폐기물 발생자에게 인허가 요건을 부과할 때 재원확보를 요구할 계획이다. 이에 따라 원자력시설의 해체 및 폐기물 처분 비용은 일반국민이 아닌 폐기물 발생자가 부담한다는 원칙이 확실히 이루어질 것이다. 또한 사용후핵연료의 처분과 관련해서는 앞서 살펴본 Nuclear Fuel Waste Disposal Concept Environmental Assessment Panel이 행한 권고에 따라 새로운 폐기물관리 전담기구를 설립하고 재원마련은 전력회사가 책임지도록 할 계획이다.

바. 연구개발

캐나다에서의 처분연구는 처분시설 건설 및 운영책임기관이 결정되지 않은 상태로 진행중이며, 부지확보 및 부지특성 조사와는 별도로 연구기관인 AECL에 의해서 처분개념연구가 일어지고 있다. 고준위폐기물 처분관련 연구는 AECL 산하의 Whiteshell 연구소와 Manitoba주의 URL(Underground Research Laboratory)에서 수행되고 있으며 field study는 캐나다인 쉴드 지역의 여러 연구지점에서 실시되었다.

3. 독일

가. 원자력현황

독일에서는 1961년 6월 최초로 VAK Kahl 원자력 발전소에서 전기를 생산하는 등 1960년대 에 이미 원자력 발전을 상용화하였다. 구동독에서는 1966년부터 NPP 에서 전력생산을 하였는데 1989년에는 5개의 NPP 에서 1800 MWe 의 전력을 생산하였다.

1995년 현재 19개 (13개의 PWR 과 6개의 BWR) 의 발전소가 운영되고 있으며 RWE AG, Veba, Viag 및 Energie Baden-Wuerttemberg를 포함하는 원전 회사들은 총 22,063 MWe 의 전력을 생산 하여 총 전력의 33.8 % 를 담당하고 있다.

독일의 원자력 시설은 주정부 규제기관의 규제를 받으며, 주정부 규제기관은 연방환경성 (BMU: The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety) 의 감독을 받도록 되어 있다. 연방환경성은 원자로 안전위원회 (RSK), 방사선 방호위원회 (SSK) 등 독립적 위치에 있는 각종 전문위원회로부터 기술 지원을 받는다. 원자력관련 연구는 연방연구 기술성 (Federal Ministry for Research and Technology: BMFT) 산하의 연구소 (KfK) 와 Julich 연구소 (KFA) 에서 수행된다.

독일의 현 집권 사민-녹색당 연립정권이 1998년 선거 공약으로 내걸었던 19기 모든 원전의 폐쇄 방안은 원전 유틸리티의 반발과 막대한 보상 및 실직 문제 등으로 현재 독일 정부가 안고 있는 가장 큰 현안 문제로 대두되고 있으며 폐쇄 일정에 대한 사민당과 녹색당의 의견 차이는 연립 정부의 기반마저 흔들고 있는 상황이다.

녹색당은 사민당이 제안하는 2024년까지의 폐쇄 안은 너무 느리다고 주장하는 반면 전력 산업계는 19기 원자로가 운전 수명을 다할 때까지는 폐쇄시점을 늦추어야 한다는 입장으로 대립하고 있어 아직 명확한 폐쇄 일정은 설정하지 못하고 있다. 또한 독일의 원전 폐쇄와 관련하여 향후 원전 폐기물 재처리에 대한 협약을 이미 체결한 바 있는 영국과 프랑스는 국제 계약 파기에 대한 거액의 손해 배상을 청구할 움직임을 보이고 있다.

나. 방사성폐기물 종류 및 발생현황

연방방사성방호 위원회 (Federal Office for Radiation Protection) BfS 는 독일에서 발생하는 각종 방사성폐기물의 발생량을 매년 조사 발표하고 있다. 독일에서는 폐기물의 종류에 따라 compaction, immobilisation, incineration, solidification 의 방법으로 폐기물을 처리하고 있는데 이렇게 처리된 방사성폐기물은 2080 년 말에 열발생이 없는 폐기물 412,000 m³과 열발생 폐기물 51,300 m³ 이 될 것으로 예상되고 있다. 즉 열발생이 없는 폐기물 이 전체의 90 % 를 차지하고 있다.

다. 방사성폐기물 관리 프로그램

독일의 방사성폐기물 처분계획은 1950년대부터 시행되고 있다. 독일은 당초 사용후 핵연료의 재활용정책을 채택하여 재처리 시설의 건설을 추진하였으나 반대로 부딪혀 1989년에 사업추진을 중단하였으며 영국과 프랑스에 위탁재처리를 하고 있다. 1994년에 개정된 원자력법에는 기존의 재처리 우선정책을 변경하여 재처리 또는 직접처분 모두를 가능하도록 규정함으로 사실상 재처리 정책을 포기하였다.

독일에서의 방사성폐기물 취급과 방사성폐기물의 처분은 원자력법에 의해 통제된다. 이에 따르면 연방정부가 방사성폐기물의 처분시설의 책임을 지는 것으로 하고 있다. 정부는 이 책임을 연방환경성 (BMU) 하에서 권한을 부여 받는 BfS 에 이전하였다. 1979년에 처분장의 건설과 운영을 위해 DBE 가 설립되었다. 발전소, 연구기관, 재처리 시설, 의료기관, 대학에서 발생하는 방사성폐기물은 폐기물의 종류에 맞춰 처리된 후 발전소, 연구기관, 연료 재조시설등에 속하는 부지 내 임시저장시설에 저장된다.

방사성폐기물 폐기물 처분장의 건설을 위한 부지조사는 1976년 -1982년 사이에 실시되었다. 1983 년 정부는 환경, 자연보호, 원자력 안전에 관한 자문을 담당하는 RSK (Reactor Safety Commission) 의 권고에 따라 암반에 방사성폐기물 처분장을 건설하기 위한 safety criteria 를 만들었다. 이 criteria 에 맞추어 Goleben 에서 지표 및 지하 조사를 포함하는 프로그램이 만들어 졌다. 지표조사는 1985년에 종료되었는데 다음과 같은 조사를 포함한다.

수리지질 조사

물리탐사

지진파 측정

암염층 시추

암염동의 심부시추

수직터널의 predrilling

지표조사에서 얻은 일반적인 지식과 장기 안정성 계산을 토대로 북부 독일에 200개 이상 존재하는 암염동이 방사성폐기물 처분에 적합한 암반으로 결론짓고 지하에 대한 조사를 시작하였다.[8]

라. 중간저장시설

재처리하지 않는 사용후핵연료는 중간저장 후 직접 처분할 계획이다. 사용후핵연료의 중간저장을 위해 Ahaus 와 Gorleben 의 2개의 소외집중저장시설을 운영 중에 있다. 중간저장시설은 Metal Cask 방식으로 각각 1,500 톤의 저장용량을 가진다.

Goleben 중간저장시설의 경우 법률논쟁 때문에 완성 후 수년간 기능을 하지 못하다가 1995년 5월 대규모 시위와 경찰의 보호속에 최초의 저장이 실시되었다.

독일에서는 열발생 폐기물과 중·저준위의 열을 발생하지 않는 폐기물로 분리하여 처분하는 방법으로 모든 종류의 방사성폐기물을 심지층 처분장에 처분하는 것을 기본 정책으로 하고 있다.

마. 인허가

원자력에너지법은 처분장의 건설과 운영에 대한 인허가 과정을 명시하고 있다. BfS 가 인허가를 신청하면 지방관청이 인허가 여부를 결정한다. 현재 연구 및 인허가 과정 중에 있는 Goleben 과 Konrad 프로젝트의 인허가 책임은 NMU (Lower Saxony 환경성) 이 맡고 있다. 인허가 과정에서 민간의 참여는 중요하게 여겨지며 이들의 반대가 있을 경우 인허가 신청자, 인허가 담당기관, 반대자와 이들 각각의 전문가들이 참여하는 비공개 청문회를 통해 토의를 하게 된다. 또한 채굴전문 기관이 모든 채굴 관련 업

무를 인정해야 한다. 사용후핵연료의 경우 BfS 처분용기, 운송작업, 중간저장시설의 인허가 책임을 맡고 있다. 운송작업과 중간저장시설의 운영은 적합한 지방관청이 이를 감시한다. 연방정부의 뜻에 반해 Lower Saxony 지방정부가 인허가를 거부하여 1992년 9월에서 1993년 3월까지 독일 역사상 가장 긴 공개 청문회가 있었다.

바. 방사성폐기물 관리 체제 및 기관

독일에서의 방사성폐기물은 국가가 관리하게 되어 있어 정부로부터 이를 위임받은 연방방사성방호 위원회 (Federal Office for Radiation Protection) BfS 에서 연구사업을 총괄하고 있으며 통독으로 인하여 구 동독의 ERAM 사업도 모두 BfS 로 이관되었다. BMU 는 BMBF (연방과학성) 과 함께 방사성 폐기물의 최종 처분을 위한 연구를 수행하고 있다. BGR 은 지구과학과 관련된 문제해결에 책임을 지고 있다. 그 외에 대학, 연구소, 산업체에서 방사성폐기물 처분에 관한 문제해결을 위해 협조하고 있다.

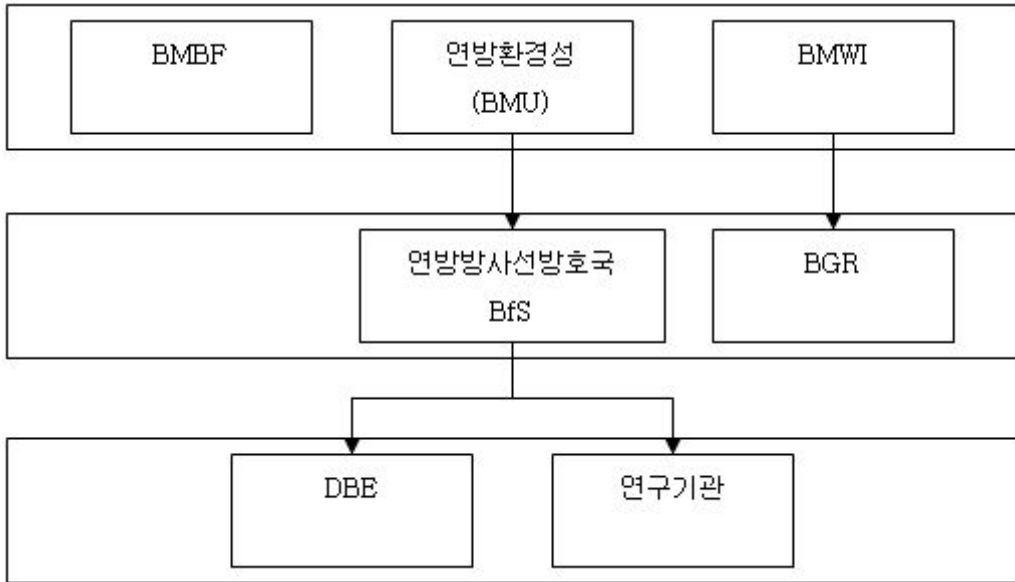


그림 8. 방사성폐기물 처분관련 기관

BfS 는 1989년 설립된 BMU 산하의 공공기관으로서 방사성폐기물 처분장의 건설 및 운영, 처분관련 연구개발, 민간소유의 중간 저장시설과 핵연료 수송의 인허가를 담당

하고 있다. 처분장의 건설 및 운영의 경우 1979년 설립된 DBE 에 위탁하여 수행하며 처분관련 연구개발은 전문 연구기관에 위탁하여 수행하고 있다. 그림 9 는 Bfs 의 조직표를 보여주고 있다. [4]

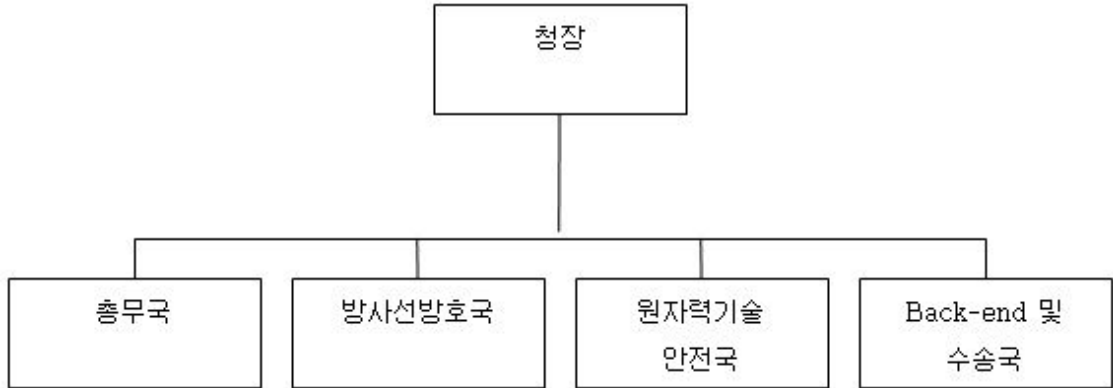


그림 9. Bfs 의 조직표

사. 방사성폐기물 자원관리

처분장 자원관련 규정에 따르면 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물의 처리, 중간저장, 원자력 발전소 및 재처리 시설에서 발생하는 방사성폐기물의 최종 처분을 위한 비용은 폐기물 발생자, 즉 전력기관들이 부담한다. 또한 이들 기관들은 독일 처분장의 준비와 운영에 대한 비용을 담당하는 것으로 되어 있으며 Konrad 와 Goleben 처분장의 준비에 필요한 비용의 93 % 를 담당하고 있다. 나머지 7 % 중 4 % 는 연방정부가, 그리고 3 % 는 원자력 산업체와 연구기관이 부담하게 된다.

독일에서는 방사성폐기물 처분을 위한 연구를 두 종류로 구분하여 서로 다른 재원으로 연구를 하고 있다. 먼저, 처분장의 건설을 위해 필요한 연구와 처분장 준비작업과 독립적으로 인허가 관련하여 인간과 자연의 방호를 개선할 목적으로 수행되는 연구로서 Bfs 에 의해 수행되며 이에 따른 비용은 폐기물 발생자가 지급한다. 이와는 달리 다음과 같은 연구는 BMBF의 책임 하에 수행되며 BMBF의 에너지 연구 프로그램에서 재정을 지원받는다.

암염내 처분장의 장기적 안전성 평가

암염 이외의 암반에 대한 고준위폐기물 처분장으로서의 적합성 평가

핵연료 주기의 back-end 를 위한 국내 계획

핵분열 물질의 모니터링을 위한 개념, 측정기법 및 데이터의 기록

두 종류의 연구 모두 GRS (발전소 안전을 담당하는 회사), BGR (지반 및 자원 담당 연방기구), DBE (처분장의 건설과 운영을 담당하는 회사) 와 대학들에서 주로 수행된다. 1999년 8월 독일의 재정부 장관은 원전 회사들이 원전 폐쇄를 위해 적립해 두었던 기금에 약 167억 마르크(미화 91억 8,000만 달러) 의 세금을 부과 하였다.

제3장 방사성폐기물 발생량 예비평가

다음 표 3.1은 IAEA에서 예측하는 900~1,300MWe 규모의 가압경수로 원전 1기 해체시 발생하는 해체폐기물 발생량이다.

표 3.1 IAEA의 해체폐기물 발생량 예측

종류	발생량 (ton)	비고 (점유율)
방사화 금속	650	10.48%
방사화 콘크리트	300	4.84%
오염 금속	3,500	56.45%
오염 콘크리트	600	9.68%
오염된 마감재(금속판)	150	2.42%
해체 잡고체	1,000	16.13%
계	6,200	100.00%

- 해외 원전 폐기물 발생량 산정

프랑스의 “방사선적 폐기물처분 영향인자”(IRAS)를 이용하여 극저준위 방사성폐기물을 구분하며 국내 분류기준 수립시 참고하였다.

$$IRAS = \sum(Am_i / 10^{class i})$$

핵종	H-3	C-14	Co-60	Ni-63	Sr-90	Cs-137	U	Pu, Am
등급	3	3	1	3	3	1	2	1

그림 10. 프랑스의 “방사선적 폐기물처분 영향인자”

1 등급: 평균 비방사능이 배치당 10Bq/g을 넘지 않거나, 단일 폐기물 용기 당 최대 100Bq/g을 넘지 않은 핵종그룹에 속한다.

국내 척도인자의 보수성을 고려하여 Co-60이 100 Bq/g 포함되어 있다고 가정하여 이에 상응하는 표면선량 계산(200리터 드럼 잡고체 밀도 : 0.8 g/cm³)하였다.

이에 상응하는 표면선량은 0.0313 mSv/hr이고, 따라서 0.03 mSv/hr 이하의 폐기물에 속한다.

표 3.2 국내원전 운영폐기물 구분기준

저준위 방사성폐기물	극저준위 방사성폐기물 보다 비방사능이 큰 폐기물이나, 중준위 방사성폐기물 기준 이하의 폐기물
중준위 방사성폐기물	열발생량은 무시할 수 있으나, 반감기가 20년 이상인 알파 핵종의 비방사능이 4,000 bq/g 이상인 폐기물
고준위 방사성폐기물	열발생량이 2 kW/m ³ 이상이며, 반감기가 20년 이상인 알파 핵종의 비방사능이 4,000 bq/g 이상인 폐기물

스웨덴 SKB, 웨스팅하우스 900MWe 해체 폐기물 발생량 : 14,500 드럼(200리터 기준)을 기준으로 하였다.

표 3.3 일본 PWR 용량별 해체폐기물 예측 발생량

폐기물 구분	1,100MW급	800MW급	500MW급	평균
중준위방사성폐기물	200 톤	190 톤	120 톤	170 톤
저준위방사성폐기물	1,720 톤	1,230 톤	710 톤	1,220 톤
극저준위방사성폐기물	4,040 톤	2,570 톤	1,860 톤	2,823 톤
계	5,960 톤	3,990 톤	2,690 톤	4,213 톤

- 국내 원전 폐기물 발생량

일본 PWR 용량별 해체폐기물 예측 발생량을 평균하여 준위별 발생비율을 적용하여 준위별 발생량을 구하여 보았다.

따라서 1호기 해체폐기물 발생량 14,500드럼을 상기 비율을 적용해 산정해본 결과 표 3.3와 같은 산정량을 구할 수 있었다.

표 3.4 국내원전 발생량(드럼) 산정량

폐기물 구분	일본 원전 평균발생량	비율(%)	국내원전 발생량(드럼)
중준위방사성폐기물	170 톤	4.193	608
저준위방사성폐기물	1,220 톤	28.693	4,160
극저준위방사성폐기물	2,823 톤	67.114	9,732
계	4,213 톤	100.000	14,500

국내 원전 폐기물 발생량을 IAEA 분류기준에 따라 중준위, 저준위, 극저준위 폐기물로 구분하고 운영폐기물과 해체폐기물 발생량을 이용하여 중·저준위 방사성폐기물을

세분화한 분류별 비율은 표 3.4과 같다.

표 3.5 IAEA 분류기준에 따른 국내 방사성폐기물 분류

분류기준	운영 폐기물 (드럼)	해체폐기물 (드럼)	계 (%)
중준위방사성폐기물	110	16,294	16,404 (2.04%)
저준위방사성폐기물	319,913	111,501	431,414 (53.57%)
극저준위방사성폐기물	96,693	260,805	357,498 (44.39%)
계	416,716 (51.75%)	388,600 (48.25%)	805,316 (100%)

제4장 신분류기준 VLLW 처분방식 적용

제1절 VLLW의 안전관리 국제동향(IAEA)

2010년 IAEA는 방사성폐기물 분류에 관한 안전지침 개정본을 발간하였다. 개정된 안전지침에서 IAEA는 방사성폐기물을 반감기와 방사능 함유량에 따라 고준위폐기물(High Level Waste, HLW), 중준위폐기물(Intermediate Level Waste, ILW), 저준위폐기물(Low Level Waste, LLW), 극저준위폐기물(Very Low Level Waste, VLLW), 극단수명폐기물(Very Short-Lived Waste, VSLW) 및 규제해제폐기물(Exempt Waste, EW)의 6가지 범주로 분류하고있고 각각의 폐기물에 대한 전형적인 처분방식을 함께 제시하였다.

개정된 안전지침에서 특이할 만한 사항은 방사성폐기물 분류를 위한 방사능 준위를 정량적으로 제시하지 않고 개별 처분장의 안전성평가 결과에 근거하여 구체화하도록 권고하고 있다는 점, 방사성폐기물의 처분관점에서 방사성핵종을 “단수명”으로 분류하는 기준을 반감기 30년으로 제안하고 일반적으로 “저장붕괴”의 대상이 되는 “극단수명”을 반감기 수백일 이하로 제안하고 있다.

VLLW의 경우 공학적 표층매립형 처분시설(Engineered surface landfill type facilities)에 처분하는 것으로 적절한 수준의 안전성을 확보할 수 있다는 입장을 밝히고 있다는 점이다. 이번에 개정된 표준 분류체계는 기존의 분류체계에 비하여, 잠재적인 위험도와 적절한 최종 관리방안(처분)에 근거하여 방사성폐기물을 세분화하는 등 리스크 차등접근법에 충실한 것으로 평가할 수 있다. [6]

한편, IAEA는 2004년 VLLW의 규제해제에 관한 안전기준을 안전지침으로 발간한 바 있다. 이 안전지침에서는 대량 물질의 규제해제를 위한 방사선량기준으로 개인의 연간 유효선량 0.01 mSv/y를 적용하고, 이에 근거하여 인공방사성핵종의 규제해제준위를 핵종별 방사능 농도단위(Bq/g)로 유도하여 제시하였다.

천연방사성핵종의 경우에는 규제배제(Exclusion) 개념에 따라 국제연합 과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)가 제시한 전세계 토양 내의 방사능농도 분포 상한치에 근거하여 규제해제준위를 ^{40}K 에 대해서 10 Bq/g, 기타 천연방사성핵종에 대해서 1 Bq/g으로 제시하였

다. [3]

제2절 해외 각국의 신분류기준 VLLW 처분방식 적용현황

표 4.1 해외 각국의 신분류기준 VLLW처분방식 적용

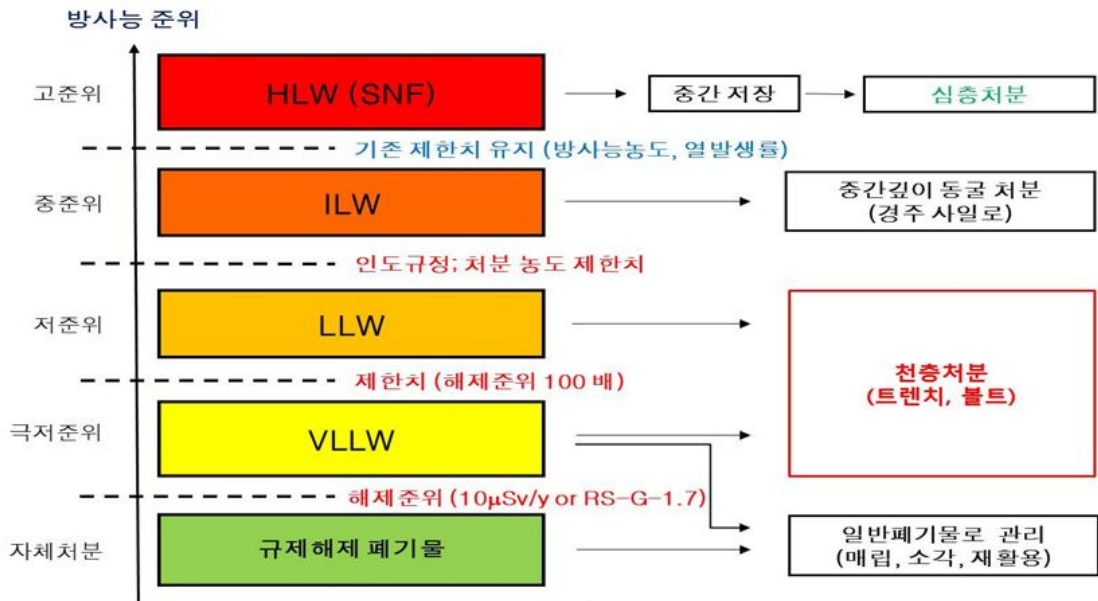
스웨덴	법적 최대 처분 방사능 10TBq 이하(α 핵종의 경우 10GBq이하) 실제 운영중인 시설에서 허가된 처분 방사능은 100~1,100GBq 초기 허가조건은 반감기 5년 이상의 핵종의 총 방사능 농도 300Bq/g이하 최근 허가가 갱신된 시설에서는 방사성핵종별 허용농도 적용
프랑스	저준위폐기물 처분시설 인근에 마련된 VLLW 전용 처분시설(CSTFA)에서의 인수기준은 핵종별 방사능농도 최대 및 평균값과 처분 총방사능을 제한
스페인	중·저준위 폐기물 처분장 내에 마련된 VLLW 전용 처분셀에 처분될 수 있는 방사능은 중·저준위 폐기물 처분 부지 전체에 처분될 수 있는 방사 능 량의 1% 이하로 제한
핀란드	규제 해제 대상 VLLW를 생활폐기물 매립장 등에 매립할 수 있도록 제한 적으로 허용
일 본	인수기준은 핵종별 방사능농도 최대값과 처분 총 방사능을 제한, 제도적 관리기간은 약 30년
미 국	A등급 LLW방사능 제한치의 작은 분율에 상당하는 법은 10CFR20.2002에 따라 대체 처분방법이 허용, 주로 자원보존·복원법에 따라 허가된 유해폐 기물 또는 지역 고체폐기물 매립장에 처분하는 것이 일반적, 원자력시설 부지내 매립장 또는 부지 외에 위치한 사유토지에서의 처분에도 허용
영 국	소량의 VLLW는 생활쓰레기나 산업폐기물과 함께 불특정 장소에 처분할 수 있도록 허용, 대량의 VLLW는 특정한 매립장 부지에 처분할 수 있도 록 허용

제3절 국내 적용 방안

표 4.2 IAEA 신분류기준 국내 적용방안

방사학적 분류	방사능 농도	대상	처분
고준위 ^{주1)} (HLW)	<ul style="list-style-type: none"> 알파핵종농도 4,000 Bq/g 이상 열발생량 2 kW/m³ 이상 	사용후핵연료, 재처리폐기물	심지층 처분
중준위 (ILW)	<ul style="list-style-type: none"> 알파핵종 폐기물 포함 수십 혹은 수백미터 지하의 중간지층 처분 		중간지층처분 동굴처분
저준위 (LLW)	<ul style="list-style-type: none"> 방사능은 높지만 반감기가 짧은 핵종 방사능이 낮은 장반감기 핵종 		공학적 천층처분 동굴처분
극저준위 (VLLW)	<ul style="list-style-type: none"> EW 이상 폐기물 장반감기 핵종의 농도는 일반적으로 극히 미미 		단순매립(Landfill)
극반감기 (VSLW)	<ul style="list-style-type: none"> 수년의 붕괴 기간 뒤 방사선 관리 불필요 연구소나 병원에서 사용하는 극단 반감기 핵종 		규제면제 폐기물
규제면제 ^{주2),3)} (EW)	Clearance, Exemption요건을 만족하는 폐기물		일반재활용/산업 폐기물처리

그림 11. 방사성폐기물 분류체계 개정 방향 및 처분 방식 연계



제5장 결론 및 제안

방사성폐기물 발생량에 관한 현황을 분석해본 결과 스페인, 일본, 프랑스 모두 총 해체폐기물 중 대부분이 저준위 또는 극저준위 방사성폐기물에 해당할 것으로 예상하고 있다.

일본 PWR 용량별 해체 폐기물 발생량을 평균하여 준위별 발생 비율을 적용한 후 준위별 발생량을 산정해 보았다. 그 결과 중준위 방사성폐기물은 일본의 경우 평균발생량이 170톤으로 비율은 4.193%가 되었고 국내원전발생량(드럼)으로는 608드럼이 나왔다. 이와 동등한 방법으로 저준위 방사성폐기물은 4,160드럼, 극저준위 방사성폐기물은 9,732드럼으로 총 14,500드럼이 1호기 해체 시 발생량으로 산정되었다.

이렇게 예상되는 14,500드럼의 폐기물 중 중준위 방사성폐기물과 저준위 방사성폐기물은 기술개발중인 제염기술이나 Decay&Delay를 통해 준위를 낮추어 IAEA 신분류기준을 적용한 세부적인 분류에 따라 처분하게 되면 보다 안전하고 경제적이게 방사성폐기물을 처리할 수 있다.

국내 기준은 중·저준위와 고준위로 나뉘는데 이중 중·저준위 폐기물을 IAEA 신분류기준을 적용하여 ILW, LLW, VLLW, VSLW, EW 로 세분화 한다면 총 폐기물 발생량 중 가장 큰 부분을 차지하는 저준위 및 극저준위 방사성폐기물과 규제면제 폐기물 97.96%를 포함하여 많은 양의 폐기물을 효과적으로 처분 할 수 있게 된다.

신분류기준을 적용하여 해체 대상 폐기물의 처분량을 줄일 수 있지만, 경제성 이외에도 안전성이나 주민수용성을 고려하여 최종 판단할 필요가 있다.

또한 해체 대상 폐기물의 확정과 각 분류별 해체 폐기물 처분부지에서의 핵종별 허용 농도 기준의 확립, 규제면제 폐기물의 처분 방안을 위한 제도 마련, 극저준위폐기물의 Decay를 위한 저장부지 확보, 고준위 폐기물 처분 계획 수립 등에 관한 연구가 필요할 것이다.

추후 신분류기준을 적용한 제염해체 폐기물의 발생량 분석 연구와 더불어 처분 수용성 향상을 위한 원천기반 기술의 개발을 위한 연구를 진행할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 이상인, “세계 주요국의 중·저준위 폐기물 관리 및 정책 동향”, 동향 중·저준위 방사성폐기물, 2010.
- [2] Li Tingjun, “Very Low Level Radioactive Solid Waste Management in CHINA”, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.9(2), pp. 87-92, June 2011.
- [3] Jae Hak Cheong, “Analysis on the International Trends in Safe Management of Very Low Level Waste Based upon Graded Approach and Their Implications”, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.9(1), pp. 49-62, Mar. 2011.
- [4] 권은하, 고원일, 이호희, 박병홍, 최병일, 이재학, 김기진, “해외 주요국의 방사성 폐기물관리 점담기관 운영현황”, 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집, 2010.
- [5] IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, “Disposal of Radioactive Waste”, Specific Safety Requirements No. SSR-5.
- [6] 한국방사성폐기물관리공단, “IAEA 방사성폐기물 신분류기준의 국내적용방안 분석”, 한국방사성폐기물학회 KRS / RR - 12 -01.
- [7] 장인순, “세계의 중·저준위 방사성폐기물 천층처분기술”, 원자력산업 , 1997.12.
- [8] Hans Forsstrom, “Recent Developments in SKBs Nuclear Waste Management Programme”, 세계의 방사성폐기물 관리 프로그램 , 원자력산업, 2011.11·12

감사의 글

조선대학교 대학원에 입학했을 때가 엇그제 같은데 벌써 2년이라는 시간이 흘렀습니다. 부족한 저에게 논문을 쓸 수 있게 해준 사람들에게 이 자리를 빌려 감사의 마음을 전하려 합니다.

먼저 저에게 지속적인 가르침과 많은 조언을 해 주신 송종순 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해주신 나만균 교수님, 김진원 교수님께 감사를 드립니다.

석사생활을 즐겁게 할 수 있게 해준 핵주기공학 실험실 사람들에게 깊은 감사를 드립니다. 학부 시절부터 대학원진학까지 함께해온 순호형 그리고 같은 실험실에 대학원 동기로 진학한 영원한 막내 현민이 항상 고맙고 먼저 졸업해서 현장에 뛰어든 사용이까지 우리 모두 잘돼서 인연 이어가기로 했던 약속 꼭 지킬 수 있게 되면 좋겠습니다.

그 외에도 항상 함께 하고 있다고 생각하는 선동이형, 인석이형, 진현이형 다들 취직하고 결혼해서 가정을 이루고 나서도 항상 만나서 웃고 떠들고 즐길 수 있게끔 연락 끊기지 않게 할게요. 늘 부족한 후배 이쁘게 봐주셔서 감사합니다.

핵주기공학 실험실 1회 졸업생인 강일이형, 상헌이형 늘 후배들을 위해 아낌없는 투자(??)와 조언 및 가르침 잊지 않겠습니다. 이미 현장에 뛰어들어 취업 전선에 관한 세세한 조언과 관심 가져주셔서 늘 고마운 진행이형, 동수형, 심원이형 하루빨리 가까운 곳에서 일할 수 있게 되었으면 좋겠습니다.

박사 진학을 통해 앞으로도 교수님의 보좌를 맡을 우리 영원한 정실장, 친구이자 후배이자 막내 역할 잘해준 태빈이 앞으로 대학원에 진학할 선일이 다들 맡은 자리에서 최선을 다해주길 바라고 태빈이랑 선일이는 열심히 해서 별거 아니지만, 선배들을 뛰어넘는 우리보다 보다 더욱 나은 전문가가 되길 바랍니다.

마지막으로 대학원 진학까지 학생이란 이유로 아낌없는 지원을 해주신 부모님, 먼저 석사 과정을 겪어보고 많은 조언과 도움을 준 우리 누나 고맙고 사랑합니다.