A Study on the Conceptual Development for a Deep Geological Disposal of the Radioactive Waste from Pyro-processing

파이로공정 발생 방사성폐기물 심지층 처분을 위한 개념설정 연구

Jong-Youl LEE¹⁾, Min-Soo LEE, Heui-Joo CHOI, Dae-Seok BAE and Kyeong-Soo Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-Daero, Yuseong-Gu, Daejeon

이종열¹⁾, 이민수, 최희주, 배대석, 김경수

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received August 10, 2012 / Revised September 13, 2012 / Approved September 14, 2012)

Abstract

A long-term R&D program for HLW disposal technology development was launched in 1997 in Korea and Korea Reference disposal System(KRS) for spent fuels had been developed. After then, a recycling process for PWR spent fuels to get the reusable material such as uranium or TRU and to reduce the volume of radioactive waste, called Pyro-process, is being developed. This Pyro-process produces several kinds of wastes including metal waste and ceramic waste. In this study, the characteristics of the waste from Pyro-process and the concepts of a disposal container for the wastes were described. Based on these concepts, thermal analyses were carried out to determine a layout of the disposal area of the ceramic wastes which was classified as a high level waste and to develop the disposal system called A-KRS. The location of the final repository for A-KRS is not determined yet, thus to review the potential repository domains, the possible layout in the geological characteristics of KURT facility site was proposed. These results will be used in developing a repository system design and in performing the safety assessment.

Key words : Spent fuel, Pyro-process, Ceramic waste, Metal waste, Deep geological disposal system

요 약

우리나라에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구는 1997년부터 시작하였으며, 국내에서 발생하는 경수로 사용후핵연료와 중수로 사용후핵연료를 처분대상으로 하여 2006년도에는 한국형 사용후핵연료 기준 처분시스템(KRS) 개발을 완료하였다. 이후, 경수로 사용후핵연료로부터 재활용 가능물질을 회수하는 재순환주기를 고려하여 재활용을 위한 파이로공정 연구를 수행하고 있어, 이 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물에 대한 처분연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 심지층 처분시스템 개념설정에 중요한 인자인 파이로공정으로부터 발생하는 처분대상 폐기물인 세라믹고화 폐기물과 금속폐기물에 대한 특성분석 결과와 폐기물별로 특성에 적합한 처분용기 개념을 기술하였다. 이를 바탕으로 처분대상 폐기물에서 발생하는 붕괴열의 특성을 고려한 열해석을 통하여 지하처분시설에서의 처분용기 간격과 처분동굴 간격을 결정하고, 이를 반영하여 심지층 처분 시스템(A-KRS) 개념을 도출하였다. 이렇게 도출된 처분시스템 입

1) Corresponding Author. E-mail : njylee@kaeri.re.kr

지를 검토하기 위하여 KURT 시설 부지를 대상으로 가상부지로 설정하고, 가상 부지에 대한 지질 및 수리 특성을 이용하여 최적의 배치(안)을 제시하였다. 본 연구의 결과는 추후 실제 부지특성자료와 연계하여 처분장 설계 및 처분안전성 평가에 입력자료로 활용될 것이다.

중심단어 : 사용후핵연료, 파이로 공정, 세라믹 폐기물, 금속폐기물, 심지층 처분시스템

I. 서 론

원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 방출되는 사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 처분은 인간 및 자연 환경을 보호하고 원자력에너지를 지속적인 동력원으로 사용하기 위하여 필수적으로 해결하여야 하는 과제로서, 세계 각국에서 이에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 고준위폐기물은 재순환핵연료 주기의 경우 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생하는 악티나이드/핵분열 생성물 등을 함유하는 폐기물로서 주로 유리 고화체 형태이며, 직접 처분주기의 경우는 사용후핵연료 자체가 처분대상 고준위폐기물이 된다. 이러한 고준위폐기물을 가장 안전하게 처분하는 방법으로는 일반적으로 지하 수 백 미터의 견전한 암반에 매립하는 방법이 고려되고 있다. 이는 방사성물질에 의한 인간의 피폭을 가능한 한 최소한으로 낮출 수 있도록 일정 기간 동안 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리시키고, 누출된 방사성물질이 인간환경으로 도달하는 것을 최대한 지연시키는 방법이다.

현재까지 우리나라는 사용후핵연료의 재활용이나 직접처분에 대한 정책결정이 없는 상태이지만, 우리나라에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구는 1997년부터 시작하였다. 국내에서 발생하는 경수로 사용후핵연료와 중수로 사용후핵연료를 처분대상으로 하여 2006년도에는 한국형 사용후핵연료 기준 처분시스템(KRS : Korea Reference spent fuels disposal System) 개발을 완료하였다[1]. 이후, 경수로 사용후핵연료로부터 재활용 가능물질을 회수하는 재순환주기를 고려하여 재활용을 위한 파이로공정 연구와 함께 이 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물에 대한 처분연구를 수행하고 있다[2].

본 논문에서는 심지층 처분시스템 개념설정에 중요한 인자인 파이로공정으로부터 발생하는 처분대상 폐기물인 세라믹고화 폐기물과 금속폐기물에 대한 특성분석 결과와 폐기물별로 특성에 적합한 처분용기 개념을 기술하였다. 이를 바탕으로 처분대상 폐기물에서 발생하는 붕괴열의 특성을 고려한 열해석을 통하여 지하처분시설에서의 처분용기 간격과 처분동굴 간격을 결정

하고, 이를 반영하여 심지층 처분 시스템(A-KRS : Advanced Korean Reference disposal System) 개념을 설정하였다. 이렇게 도출된 처분시스템 입지를 검토하기 위하여 KURT 시설 부지를 대상으로 가상 부지에 대한 지질 및 수리특성을 이용하여 최적의 배치(안)을 검토하였다. 이들 연구결과는 향후 실제 처분부지 특성조사 결과자료와 연계하여 처분장 설계 및 처분안전성 평가에 입력자료로 활용될 것이다.

II. 선진핵주기 폐기물 처분시스템(A-KRS) 개념

가. 파이로공정 발생 폐기물

사용후핵연료를 재활용하기 위한 방안으로서 연구를 수행하고 있는 파이로공정으로부터 그림 1에서 보이는 바와 같이 다양한 방사성폐기물이 발생될 것으로 예상되며, 최종적으로 산출된 방사성폐기물의 주요특성을 표 1에 정리하였다. 이들 방사성폐기물은 크게 장반감기 폐기물과 고방열 폐기물로 분류할 수 있다. 장반감기 폐기물은 TRU를 함유하고 있는 것으로서 금속 폐기물과 LiCl-KCl 공융용염에서 나온 Monazite(세라믹고화 폐기물)가 이에 해당되며, 지층 처분대상이 되는 방사성폐기물이다. 또한, 단순 고방열 폐기물은 Off-gas에서 나온 Cs 고화체와 LiCl 용융염에서 나온 SAP과 Fly ash가 이에 해당된다. 이들 폐기물은 발열량이 높다는 단점이 있지만, 핵종의 반감기가 짧아서 수십 년에서 수백 년의 냉각기를 거치면 중저준위 처분장으로 보낼 수 있다는 장점이 있다. 이 밖에도 Off-gas에서 나온 (I, Tc) 고화체가 있지만, 핵종변환으로 소멸 처리하는 것을 목표로 하고 있다.

Table 1. Classification of the wastes from Pyro-process.

Items	Metal	Long-Lived Waste		Interim decay Waste	
		Monazite LiCl + KCl	Filter Off-Gas	SAP LiCl	Fly ash Off-Gas
Major Nuclides	U, TRU	RE, TRU	I, Tc	Sr, Cs	Cs
Mass (kg)	3,136.4	664.9	455.5	2,845.7	318.7
Heat (W) 40 years after disposal	-	297	0.06	2,597	3,253
Density (g/cm ³)	6.71	3.57	1.65	2.37	2.74
Volume (L)	467.4	186.2	276.0	1,200.7	116.3
Heat density (W/L)	-	1.59	0.0002	2.16	27.97
Management strategy	200 m disposal	500 m disposal	Transmutation	Long-term Storage	Long-term Storage
Classification	①	②	③	④	⑤

Fig. 1. Wastes generated from Pyro-process.

본 논문에서는 파이로공정으로부터 발생하는 다양한 폐기물 중 지층처분대상 폐기물인 금속폐기물과 세라믹고화폐기물에 대한 처분용기 개념을 기술하고 이를 바탕으로 하는 처분시스템 개념을 설정하였다.

나. 세라믹고화 고준위폐기물 처분개념

① 세라믹고화폐기물 처분을 위한 저장용기 및 처분용기

경수로 사용후핵연료는 파이로 공정을 거쳐 LiCl-KCl 공용 용염으로부터 고준위폐기물로서 세라믹고화폐기물인 Monazite 폐기물이 발생하게 되며, 이 폐기물은 아래 그림 2에 나타낸 바와 같이 발열량 및 취급을 고려하여 설계한 스테인레스강 재질의 저장캔에 2개의 고화체가 적재된다.

세라믹 고화 폐기물 처분용기는 저장캔을 적재하여 심지층에 처분하기 위한 용기로, 폐기물로부터 발생하는 열과 심부 지층 처분환경에서의 압력조건 등을 고려하여 설계하였다.

Fig. 2. A concept of a storage can and a disposal canister for ceramic waste.

그림 2의 처분용기에서 보는 바와 같이, 세라믹 폐기물 저장용기 7개를 2단으로 적재하도록 하여 적재용량은 처분용기 1개당 14개의 저장용기를 수용하도록 하였으며, 이에 대한 제원 및 특성은 표 2에 나타낸 바와 같다.

② 세라믹고화폐기물 처분시스템 열해석

세라믹고화폐기물 처분시스템은 수평터널 처분방식(Horizontal Disposal)과 수직공 처분방식(Vertival Disposal) 2가지를 대상으로 설계하였다. 수평 처분터널(그림 3)의 경우 수평터널에 처분용기를 수평방향으로 안치시키며, 처분용기와 처분터널 벽면사이 공간은 완충재로 채운다. 처분시스템 성능저하 방지를 위해 필요한 온도요건인 완충재 온도를 100 ℃ 이하로 유지[3]시키기 위한 처분용기 사이 간격과 터널 사이의 간격은 열해석을 통해 결정하였다. 이때, 처분터널 간격으로서 25 미터와 40 미터를 기준으로 하여 처분용기 사이 간격을 검토하였다. 수직공 처분(그림 4)의 경우 터널 바닥에

Fig. 3. A concept of the horizontal disposal system for the ceramic waste.

Table 2. Dimension of the disposal canister for ceramic waste.

Outer Diameter × Height	103.1 × 172.5	cm
Inner diameter	82.1	cm
Copper thickness	1.0	cm
Iron thickness	9.5	cm
Heat per disposal canister	593.6	W
Number of storage can in a disposal canister	14	EA
Number of disposal canisters (Based on 20,000 tU of PWR SF)	1,007	EA

수직 처분공을 굴착하여 처분용기를 수직방향으로 안치시키며, 처분 시스템 온도요건에 만족하는 시스템 설계를 위하여 처분터널 간격 40 미터를 기준으로 하여 처분공에 처분용기 2개 혹은 4개를 넣는 경우에 대해 평가하였다.

열 해석을 위해서는 처분시스템에 대한 초기 및 경계조건과 함께 열원(heat source)이 결정되어야 한다. 열원은 A-SOURCE 프로그램과 ORIGEN-ARP 프로그램을 이용하여 구하였으며[4], 10 MtU PWR 사용후핵연료를 파이로 공정 처리하였을 경우 발생하는 세라믹폐기물로부터 방출되는 붕괴열을 그림 5에 나타내었다[5].

심지층 처분장 주변에 대한 열 해석의 보수적 계산을 위하여, 지하수 흐름에 의한 열전달은 무시하고 전도(conduction)에 의한 열전달만을 고려하였다. 열해석을 위한 입력 모델은 처분시스템의 대칭성을 반영하여 그림 6에 나타난 바와 같이 1/4 혹은 1/2개의 모듈을 대상으로 수행하였으며, 4개의 수직

Fig. 4. A concept of the vertical disposal system for the ceramic waste.

Fig. 5. Decay heat of Major nuclides in the ceramic waste.

면으로의 열전달은 대칭성을 고려하여 무시하였다[6]. 처분 시스템으로부터 지하 500 미터까지를 해석 대상으로 하였으며, 처분용기, 완충재, 뒤채움재, 암반 등을 3차원 유한 요소법 기반의 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석하였다[7]. 그림 5에 주어진 열원과 표 3에 주어진 열전달 관련 물성을 바탕으로 처분 후 100년 정도 기간 동안을 대상으로 해석하였다. 암반의 열전달 특성은 KURT 주변 화강암을 대상으로 측정한 값이며, 완충재의 열전도도는 보수적 계산을 위하

Fig. 6. Thermal analyses models of disposal concepts for ABAQUS.

Table 3. Thermal properties of materials in the proposed disposal system.

Material	Properties	Values
Nodular cast insert	Density (kg/m ³)	7,200
	Thermal conductivity (W/m °C)	52
	Specific heat (J/kg °C)	504
Copper outer shell	Density (kg/m ³)	8,900
	Thermal conductivity (W/m °C)	386
	Specific heat (J/kg °C)	383
Ca-bentonite buffer	Density (kg/m ³)	1,970
	Thermal conductivity (W/m °C)	0.8
	Specific heat (J/kg °C)	1,380
Backfill	Density (kg/m ³)	2,270
	Thermal conductivity (W/m °C)	2.0
	Specific heat (J/kg °C)	1,190
Rock	Density (kg/m ³)	2,600
	Thermal conductivity (W/m °C)	3.0
	Specific heat (J/kg °C)	900

여 불포화 상태 완충재의 값이다. 또한, 지하 암반에서의 지열구배는 KURT 부지로부터 측정된 값인 3℃/100m를 적용하였다[8].

③ 세라믹 고화폐기물 처분모듈 설계

열 해석 결과를 통해 완충재 내의 최고 온도를 구하고, 최고 온도가 100℃가 넘지 않도록 처분모듈 사이의 간격을 결정하였다. 그림 7에는 처분터널 25 미터와 40 미터 간격의 수평 처분터널에 대한 열 해석 결과와 처분터널 40 미터일 경우 수직 처분공 1개에 처분용기를 2개 혹은 4개 넣을 경우에 대한 열 해석 결과를 나타내었다. 수평 처분터널의 경우 처분터널 간격이 40 미터일 경우는 처분용기 사이의 간격이 1 미터, 처분터널 간격이 25 미터일 경우는 처분용기 사이의 간격이 2 미터가 필요하였다. 또한, 수직공 처분의 경우 처분공에 처분용기를 2개 넣을 경우 처분공 사이의 간격은 4 미터, 처분용기를 4개 넣을 경우는 처분공 사이의 간격은 8 미터가 필요하였다.

열 해석 결과를 바탕으로 수평 처분터널 방식의 경우 터널 간격 25미터를, 수직공 처분방식의 경우 처분공당 4개의 처분용기를 넣는 방식을 선정하였다. 선정된 처분시스템의 특성을 표 4에 나타내었으며, 각각의 시스템에 대한 개념도를 그림 8에 나타내었다. 열 해석 결과 2가지 처분방식 모두 소요되는 처분면적은 크게 다르지 않았으며, 표 4에 기술한 바와 같이 직접 처분방식[1]과 비교할 경우 대략 1/50 정도의 면적이 필요하였다.

Fig. 7. The results of the thermal analyses for ceramic disposal system.

Fig. 8. Ceramic disposal system modules.

다. 금속폐기물 처분개념

① 금속폐기물 처분을 위한 저장칸 및 처분용기

파이로공정을 위한 전처리로서 사용후핵연료 집합체 해체 과정에서 발생하는 금속폐기물은 탈피복 hull, end cap 등 금속 구조물이 주성분이며, 이들 폐기물은 DISC 모양으로 초고압 압축 처리한다. 압축된 금속폐기물의 크기는 압축시설의 용량과 취급시의 하중을 고려하여 40 - 50 kg 내외로 하고, 저장칸에는 이렇게 압축된 금속폐기물 7개를 적재할 수 있도록 하였다. 이 저장칸을 처분하기 위한 금속폐기물 처분용기는 철근 콘크리트 재질 또는 방사성폐기물 HIC(High Integrity Container) 용기인 폴리머 콘크리트 재질로 9개 저장칸을 수용할 수 있는 용기로 설계하였다.

표 5는 금속폐기물 및 이를 적재하는 저장칸의 제원 등 특성을 나타내고 있으며, 그림 9에는 저장칸 및 금속폐기물 처분용기에 대한 개념을 나타내고 있다.

② 금속폐기물 처분 동굴 개념

파이로공정으로부터 발생하는 금속폐기물은 중준위폐기물로서 처분용기에 포장된 후 지하 200 m 정도의 깊이에 굴착된 처분터널에 처분하게 된다. 지하처분터널에서의 금속폐기물 처분용기 취급은 원격으로 조작되는 작업장비(Fork Lift)로

Table 4. Summary of the ceramic waste disposal system.

Items	20,000 MtU	Remarks
Number of waste blocks	28,200	Around 14 blocks from 10 MtU of spent fuels
Storage canister	14,100	2 waste blocks in a storage canister
Disposal canister	1,007	14 storage canisters in a disposal canister
Vertical deposition: 4 disposal canisters		
- Number of deposition holes	252	4 disposal canisters in a borehole
- Number of disposal tunnels	8	32 deposition holes in a tunnel
- Deposition hole spacing	8 m	
- Length of a tunnel	280 m	Roughly, 31×8×1.05+20
- Tunnel spacing	40 m	
- Disposal area	78,400 m ²	280×40×7
- Comparison with direct disposal	~1/50	Area for direct disposal of PWR spent fuels: 4.1 km ²
Horizontal deposition: 25 m tunnel spacing		
- Number of disposal tunnels	16	64 disposal canisters in a tunnel
- Length of a tunnel	200 m	Roughly, 5.45×31×1.05+20
- Tunnel spacing	25 m	
- Disposal area	75,000 m ²	200×25×15
- Comparison with direct disposal	~1/55	Area for direct disposal of PWR spent fuels: 4.1 km ²

Table 5. Dimension of the treated metal waste and storage can.

Item	Metal waste	Storage can
Outer Diameter (mm)	300	318
Height (mm)	100	758
Weight (kg)	40.3	33.4
Weight with waste (kg)	-	315.5
Numbers (Based on 20,000 tU of PWR SF)	155,600	22,200

수행하며, 심부지하에 처분하기 위한 금속폐기물 처분터널 설계 인자 및 그에 따른 처분터널 설계 개념은 아래에 기술한 바와 같다.

처분터널 규모 설정 인자로서 처분터널 단면은 작업장비의 제원 및 작업범위를 고려하여 금속폐기물 처분용기의 적재 높이를 3단으로 하고 폭을 3열로 적재하는 것으로 하여 설정하였다.

또한, 금속 폐기물의 처분공정은 처분터널 굴착 후 구조물 바닥과 측벽을 설치하고, 터널 안쪽부터 처분용기-측면 완충재 블록-상부 완충재 블록-상부 구조물 순으로 순차적 설치한 후 터널 내부구조물과 외벽사이를 뒷채움하여 완료한다. 그림 10은 금속폐기물 처분터널과 처분터널 내에서의 처분용기 적재개념을 나타내고 있다.

라. 선진핵주기 폐기물 지하 처분시스템

선진핵연료주기에서 발생하는 세라믹폐기물과 금속폐기물은 특성에 따른 각각의 처분용기 및 처분개념을 바탕으로 처분심도를 달리하여 처분하는 시스템을 도출하였다. 고준위폐기물인 세라믹고화폐기물의 경우 처분안전성을 고려하여 처분심도를 500 m로 하고 가상부지의 입력자료를 바탕으로 한 열 해석 결과를 통해 완충재 내의 최고 온도가 100℃가 넘지 않도록 처분용기 간격과 처분터널 간격을 결정하였다. 금속폐기물은 열발생이 없고 중준위폐기물로 분류되므로 처분심도 200 m로 결정하여 처분터널을 설계하였다. 그림 11은 Pyro-process로부터 발생하는 처분대상 폐기물인 세라믹 고화폐기물과 금속폐기물에 대한 심지층 처분시스템

Fig. 9. A concept of storage can and disposal container.

Fig. 10. A concept of metal wastes disposal tunnel.

Fig. 11. A concept of A-KRS.

인 A-KRS의 개념을 보여주고 있다.

III. 선진핵연료주기 처분시스템 배치

우리나라에서의 사용후핵연료 관리 정책은 국민적 공감대 형성을 위한 공론화 준비단계에 있어 아직 구체적으로 결정된 바 없다. 본 연구에서는 사용후핵연료 관리를 위한 기초연구단계로서 고준위폐기물 처분시스템을 개발 중에 있으며, 이의 일환으로 설정된 처분시스템 개념을 가상부지에 배치하는 것을 검토하였다. 가상의 처분장 부지는 KURT(KAERI Underground Research Tunnel) 부지로서, 이 시설은 실제 처분장과 비슷한 지하 심부의 지질 조건에서 천연 방벽의 지연/회석 기능과 공학적 다중방벽의 격리 성능을 실험적으로 검증하기 위한 순수 지하연구시설로서 국민이해 증진을 위한 교육홍보와 전문가 양성을 목적으로 2006년부터 운영하고 있는 국내 유일의 지하처분연구시설이다[9]. 따라서 이 시설 주변에서 연구목적으로 수행한 다양한 지질 및 수리 조사 자료를 이용하여 처분시스템을 배치하고자 하였다.

가. 가상부지 지질/수리 특성

① 가상부지의 지질구조 모델

단열대는 길이 및 폭을 기준으로 광역 규모의 단열과 국지 규모의 단열로 나눌 수 있는데, 단열대에 대한 분류는 표 6에 나타난 바와 같이 SKB의 분류체계가 일반적이다[10]. 가상부지 주변 지역의 시추공에서 확인되는 단열의 통계 분석 결과, 도출된 단열대에 대해 지표 지구물리탐사 결과와 선상구조 분석 결과를 비교하였으며, 최종적으로 총 9개의 단열대를 도출하였다. 도출된 단열대에 대하여는 시추코어 조사 결과를 이용하여 fracture zone core와 damage zone에 대한 자세한 특성을 기재하여 표 7에 제시된 체계와 같이 분류하였으며, 이를 도시하면 그림 12와 같다. 분류된 단열대 명칭은 FZ(order)(분류결과)-No.의 순서와 형식으로 정하였다.

Table 6. Classification criteria for a fracture zone at the KURT site.

Class (SKB)	Sub-class (KURT)	Width	Safety Distance	Order (SKB)
Regional fracture zone		>100 m	100 m to Facility	Order 1
Local major fracture zone	Class S	50-100 m	50 m to Disposal tunnel	Order 2
	Class A	10-50 m		
	Class B	5-10 m		
Local fracture zone	Class C	0.1-5 m	5 m to Deposition hole	Order 3
Background Fracture		<0.1 m	-	Order 4

② 가상부지 수리지질 모델

수리지질모델은 지하에 존재하는 지하수가 대상 매질의 지질모델 요소에 대해 어떠한 유동 양상을 나타내는지에 대해 수리지질학적 요소를 적용하여 구성한 모델로 정의할 수 있다. 따라서 수리지질모델은 해당 영역의 지질모델을 근거로 구축되어야 하며, 가상부지에 대해서는 지질모델에서 기술한 바와 같이 주변 지역의 지표 지질조사 및 시추공 지질조사를 통해 상부 토양층 및 풍화대, 저경사 단열대, 단열대, 기반암의 4개의 지질모델에 대한 요소를 분류하였다. 이에 대한 수리지질학적 특성이 일반적으로 고려되는 성질을 갖는다고 가정하여 각 지질모델의 요소에 대한 수리지질모델의 요소를 구성하였다.

일반적으로 수리지질모델의 요소는 수리토양대(Hydraulic soil domain, HSD), 수리투수대(Hydraulic conductor domain, HCD), 수리암반대(Hydraulic rock domain, HRD)로 구성된다. 그러나 가상부지 주변 지역의 지질모델에서 저경사 단열대가 추가되었으므로 저경사 단열대(Low angle fractured domain)의 요소를 수리지질모델에 추가하여 기본 개념 모델을 구성하였다. 즉, 구성된 수리지질 개념 모델에서 HSD는 지질모델의 상부토양층 및 풍화대에 해당되며, HCD는 가상부지 주변지역에 존재하는 7개의 단열대, HRD는 단열대 사이의 기반암에 해당되며, LAFD는 저경사

Fig. 12. Fracture zones at the KURT site.

Table 7. Classified local major and minor fracture zones at the KURT site.

No	Name	Width (m)	Order	Class
1	FZ2A-1	14	2	Class A
2	FZ2A-2	17.3	2	Class A
3	FZ2A-3	18.5	2	Class A
4	FZ2A-4	11-20	2	Class A
5	FZ2S-1	65.9	2	Class S
6	FZ2A-5	12.5	2	Class A
7	FZ2A-6	14.0+	2	Class A
8	FZ2A-7	17.32	2	Class A
9	FZ2B-1	5.6	2	Class B

단열대에 해당된다. 수리지질 개념 모델의 요소에 대한 각각의 특성은 표 8과 같다.

가상부지의 수리지질 모델은 상부의 토양층과 풍화대로 구성되는 Hydraulic Soil Domain, 배경단열이 분포하는 Hydraulic Rock Domain, 저경사 단열대를 포함하는 Hydraulic Conductor Domain으로 구성된다(그림 13). 수리지질 개념모델 구성 요소의 수리전도도는 표 9와 같다.

나. 가상부지내 처분시스템 배치

① 검토방법

지질구조 모델과 수리지질 모델 해석에서 언급된 국지 규모와 부지 규모에서의 단열대를 처분시설이 위치할 것으로

Fig. 13. Hydrogeological model of the KURT site.

Table 8. Definition of the components of the hydrogeological conceptual model.

hydrogeological models	Hydrogeologic characteristics
HSD	- isotropic permeability - spatially homogeneous or heterogeneous permeable distribution
LAHD	- anisotropic permeability - spatially heterogeneous permeable distribution
HRD	- isotropic permeability - spatially homogeneous or heterogeneous permeable distribution
HCD	- anisotropic permeability - permeability to be different at each fracture zone

Table 9. Hydraulic conductivity of the hydrogeologic units.

Geological model	Hydrogeological model	Hydraulic conductivity
Upper soil and weathered zone	HSD	1.5E-07 m/sec
Low-Angle Fracture zone	LAHD	1.05E-07 m/sec
Fracture zone	HCD	FZ2S-1 3.17E-07 m/sec
		FZ2A-1 2.57E-09 m/sec
		FZ2A-2 1.69E-09 m/sec
		FZ2A-3 5.49E-09 m/sec
		FZ2A-4 6.31E-07 m/sec
		FZ2A-5 4.57E-07 m/sec
		FZ2A-6 1.32E-06 m/sec
		FZ2A-7 8.78E-06 m/sec
		FZ2B-1 7.95E-6 m/sec
Host rock zone	HRD	4.3E-10 m/sec

예상하는 표고 -500 m까지 투영하였다. 국지 규모의 단열대 분포도는 그림 14와 같다. 여기에서는 선구조선을 포함한 결과이다. 주로 E-W 방향 계열과 N-S 방향 계열의 단열대가 우세하다. 국지영역 내 단열대의 빈도는 중앙부에서 다소 미약하게 분포하는데, 이는 도심지가 위치하는 지역으로 위성영상에서 선구조선을 확인하기 어렵기 때문이다. 북동단 쪽에 위치하는 KAERI 부지를 포함하는 KURT 시설부지 지역은 비교적 상세한 연구와 조사를 통하여 다수의 단열대를 확인하였다.

② 처분시스템 입지 후보영역 및 배치

KURT 부지를 중심으로 하는 부지규모의 영역에서 지하 500 m 심도에서 처분시설을 입지할 수 있는 가능 영역은 평면적으로는 그림 15와 같이 도출된다. 부지규모의 영역에서는 부지조사를 통하여 확인된 단열대만 반영하였으며, 불확실성이 큰 선구조선은 제외하였다. 후보영역은 주로 산지에 해당하며 비교적 규모가 큰 산체로 이루어져 있다. 후보영역은 부지의 좌측에서 단열대를 교차하지 않는 충분한 영역을 확보할 수 있으며, 우상단 지역에서도 가능 지역을 고려할 수 있다.

수직적으로 처분시설이 입지 가능한 영역은 N-S와 E-W 단면에서 단열대의 발달 방향을 검토하여 도출하였다(그림 15). 실제 처분장의 심도는 광역적인 지각운동, 지하수의 화학적 특성, 지하수의 유속과 배출지역까지의 유동거리, 지질구조적 특성 등을 종합하여 결정해야 할 설계 인자이다. 그림 15의 단면에서는 E-W 방향의 단면에서 남북방향의 주향으로 다수 분포하는 단열대의 서측 영역에서 충분한 규모의 처분장 영역을 확보할 수 있다. 폐기물의 종류에 따라서

Fig. 14. Fracture zones at the -500 m level in the local-scale area.

심도를 달리 할 수 있을 정도의 균질한 암반 영역이 존재할 것으로 판단된다. N-S 방향의 단면에서는 단열대의 대부분의 경사 방향이 동쪽이므로 가능한 한 서 동쪽보다는 서쪽 영역에서 균질한 암반 영역을 기대할 수 있다. 전반적으로 KURT 시설 부지에서 심지층 처분시설 입지 후보 영역은 본 지역의 중앙부에서 우세하게 분포하는 남북 방향의 주향을 갖는 단열대의 서쪽 영역의 -200 m 이하 심도에서 충분한 영역을 확보할 수 있다.

일반적으로 고준위폐기물 심지층 처분을 위하여 수직공 처분방식과 수평터널 처분방식 모두를 처분방식으로 고려하며, 최종 방식 선정은 부지확보 후 상세 부지특성 조사 결과에 따라 결정하게 된다. 본 논문에서는 기 개발된 사용후 핵연료 직접 처분을 위한 심지층 처분방식이 수직공 처분방식(KRS)을 기본 방식으로 하고 있어[1], 상호 비교/분석을 위하여 선진핵주기 처분시스템을 가상부지에 배치하는 개념은 수직공 처분방식으로 배치하였으며, 이에 대한 개념도는 그림 16에서 보여주고 있다.

IV. 결 론

고준위폐기물을 가장 안전하게 처분하는 방법으로서

Fig. 15. Potential repository area of the KURT site-scale area.

Fig. 16. A layout concept of A-KRS in the KURT area.

방사성물질에 의한 인간의 피폭을 가능한 한 최소한으로 낮출 수 있도록 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리시키고, 누출된 방사성물질이 인간환경으로 도달하는 것을 최대한 지연시키는 방법인 지하 수 백 미터의 건전한 암반에 매립하는 방법이 고려되고 있다. 본 논문에서는 경수로 사용후핵연료로 재활용을 위하여 연구를 수행 중인 파이로공정으로부터 발생하는 방사성폐기물 중 처분개념 설정에 중요한 인자인 세라믹고화 폐기물과 금속폐기물에 대한 특성 분석결과 및 폐기물별 특성에 적합한 처분용기 개념을 기술하였다. 이를 바탕으로 처분대상 폐기물에서 발생하는 붕괴열의 특성을 고려한 열해석을 통하여 지하처분시설에서의 처분용기 간격과 처분동굴 간격을 결정하고, 이를 반영하여 심지층 처분 시스템 개념을 설정하였다. 또한, 선진핵주기 처분시스템의 입지를 검토하기 위하여 KURT 주변 부지를 가상부지로 하여, 이 시설 주변에서 연구목적으로 수행한 다양한 지질 및 수리 조사 자료를 이용하여 처분시스템을 배치 가능영역과 배치(안)을 도출하였다.

본 연구에서 설정한 처분시스템 개념은 IAEA에서 선정한 처분 전문가들로부터 기술 검토 (WATRP : Waste Management Assessment & Technical Review Program)를 받았으며, WATRP는 아래에 기술하는 사항을 권고하였다 [11].

- 심부 지하 시설 설계시 암반의 굴착 손상대와 모암의 교란을 최소화하도록 암반에 있어서의 응력장에 대한 상세한 분석이 필요함.
- 세라믹 고화폐기물 처분시스템과 금속폐기물 처분시스템을 동일부지에 위치시킬 경우 안전성평가 결과에 근거하여 상호 미치는 영향에 대한 연구도 수행할 필요가

있음.

- 수평처분과 수직처분에 대하여 보다 심도있는 연구를 지속적으로 수행할 것을 권고함.

본 연구의 결과는 가상 처분부지 특성조사 결과 자료와 연계하여 처분안전성 평가의 입력자료로 활용될 것이며, 추후 실제 처분장 부지가 결정되면 광역적 지각운동, 지하수 특성 및 지질구조적 특성을 종합적으로 분석하여 최적의 처분심도 및 배치에 대한 결정과 그에 따른 처분시스템 보완이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

References

- [1] J. Y. Lee, D. Cho, H. Choi, J. Choi, "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels," JNST, Vol. 44, No. 12, 2007.
- [2] H. J. Choi, J. Y. LEE, M. S. LEE, D. G. Cho, D. H. Kook, J. W. Choi, "Development of a Geological Disposal System," Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-3100/2009, 2010.
- [3] Svensk Karnbranslehantering AB, "Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can," TR-06-18, SKB 2006.
- [4] J. W. Choi, H. J. Choi, J. Y. Lee, M. S. Lee, Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Nuclear Fuel in Korea, KAERI/TR-4525/2011, 2011.
- [5] Choi, Heui-Joo, Minsoo Lee, Jong Youl Lee, Preliminary conceptual design of a geological disposal system for high-level wastes from the pyroprocessing of PWR spent nuclear fuels, Nuclear Engineering and Design, Vol.241, 2011.
- [6] J. Y. Lee, Y. Lee, H. J. Choi, J. W. Choi, Analysis of the Disposal Tunnel and Disposal Pit Spacing for the Spent Fuel Repository Layout, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 4(4), 2006.
- [7] Dassault systems, "Abaqus/CAE 6.10 User's manual," Dassault systems simulia corp., 2010.
- [8] K. S. Kim, D. S. Bae, Y. K. Ko, J. W. Choi, Real-time Monitoring on the Tunnel Wall Movement and Temperature Variation of KURT Facility, KAERI, KAERI/TR-4050/2010, 2010.
- [9] W. J. Cho, S. G. Kwon, J. H. Park, J. W. Choi, KAERI Underground research Tunnel(KURT), J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 5(3), 2007.
- [10] Black, J. W. et al., Review of SKB framework for the geoscientific characterization of sites for deep repositories with emphasis on the testing & numerical representation of fractured crystalline rock, PR44-94-001, 1994.
- [11] International Atomic Energy Agency, Peer Review of the Deep Geological Disposal of High Level Radioactive Waste from Pyro-processing in Korea, IAEA Peer Review Report, 2012.