

# Rock Cavern Storage of Spent Fuel

## 사용후핵연료 동굴저장

Won-Jin Cho<sup>1\*</sup>, Sangki Kwon<sup>2</sup>, and Kyung-Soo Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2</sup> Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon, Republic of Korea

조원진<sup>1\*</sup>, 권상기<sup>2</sup>, 김경수<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

<sup>2</sup> 인하대학교, 인천광역시 남구 용현동 253

(Received August 17, 2015 / Revised September 30, 2015 / Approved November 2, 2015)

The rock cavern storage for spent fuel has been assessed to apply in Korea with reviewing the state of the art of the technologies for surface storage and rock cavern storage of spent fuel. The technical feasibility and economic aspects of the rock cavern storage of spent fuel were also analyzed. A considerable area of flat land isolated from the exterior are needed to meet the requirement for the site of the surface storage facilities. It may, however, not be easy to secure such areas in the mountainous region of Korea. Instead, the spent fuel storage facilities constructed in the rock cavern moderate their demands for the suitable site. As a result, the rock cavern storage is a promising alternative for the storage of spent fuel in the aspect of natural and social environments. The rock cavern storage of spent fuel has several advantages compared with the surface storage, and there is no significant difference on the viewpoint of economy between the two alternatives. In addition, no great technical difficulties are present to apply the rock cavern storage technologies to the storage of domestic spent fuel.

Keywords: Spent fuel, Interim storage, Dry storage, Rock cavern storage, Feasibility analysis

\*Corresponding Author.

Won-Jin Cho, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: [wjcho@kaeri.re.kr](mailto:wjcho@kaeri.re.kr), Tel: +82-42-868-2852

### ORCID

Won-Jin Cho <http://orcid.org/0000-0003-3603-9334>

Sangki Kwon <http://orcid.org/0000-0003-3287-2015>

Kyung-Soo Kim <http://orcid.org/0000-0002-0399-2653>

사용후핵연료 건식저장을 위한 지상저장 기술 및 동굴저장 기술의 현황을 살펴보고, 동굴저장 기술을 이용한 사용후핵연료 건식저장의 국내 적용 가능성을 분석하였다. 사용후핵연료 건식저장을 위한 동굴저장 기술의 타당성, 경제성 및 기술적 측면을 검토하였다. 지상 건식저장시설을 건설하기 위해서는 외부로부터 격리되어 있는 상당한 면적의 평탄한 부지가 필요하나, 산악지형이 주를 이루는 우리나라의 실정에서, 이러한 부지를 확보하는 것이 쉽지 않을 수도 있다. 만일 산지의 동굴 내에 사용후핵연료 저장시설을 건설한다면, 이러한 부지 문제를 보다 쉽게 해결할 수 있다. 따라서 동굴저장 방식은 자연 및 사회적 환경을 고려할 때, 우리나라의 사용후핵연료 건식저장을 위한 유력한 대안이 될 수 있다. 사용후핵연료 동굴저장 방식은 지상 건식저장 기술에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있으며, 경제성 측면에서도 큰 차이가 없다. 또 동굴저장 방식을 국내의 사용후핵연료 건식저장에 적용하는 데 큰 기술적인 장벽은 없다.

중심단어: 사용후핵연료, 건식저장, 중간저장, 동굴저장, 타당성 분석

## 1. 서론

원자력발전 과정에서 발생하는 사용후핵연료는 그 속에 함유된 방사성물질의 붕괴로 인해, 원자로에서 인출된 후에도 장기간 동안 다량의 열과 방사선을 방출하는 고준위폐기물이다. 그러나 사용후핵연료는 재활용이 가능한 에너지 자원의 특성도 지니고 있으므로, 환경에 해를 끼치지 않도록, 적절한 열적, 화학적, 방사선적 방호 및 감시 설비가 갖추어진 시설에서 회수 가능한 상태로 저장된다.

사용후핵연료의 저장방식 중, 가장 익숙한 기술은 습식 저장(wet storage)이다. 습식저장은 사용후핵연료를 스테인레스 강 또는 에폭시로 라이닝된 콘크리트 저장조 내의 물속에 저장하는 방식이다. 이 저장 방식은 사용후핵연료의 냉각 효과가 우수하며 수십 년 이상의 운영 경험이 있고, 저장 중인 사용후핵연료의 거동 감시가 용이하다는 장점이 있으나, 저장조의 물을 지속적으로 냉각 및 정화시켜야 하기 때문에 운영비가 많이 들고 장기 저장에 불리하며, 다량의 이차 방사성폐기물이 발생한다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 사용후핵연료의 중간저장 방식으로 습식저장 대신, 운영이 용이하고, 이차 폐기물이 거의 발생되지 않으며, 저장 용량의 확장이 용이할 뿐 아니라 경제성 측면에서도 유리한 건식저장(dry storage)이 주로 고려되고 있다.

현재 우리나라에서는 사용후핵연료가 발생된 원자력발전소 내의 사용후핵연료 취급건물에 있는 저장수조(storage water pool) 내에서 저장되어 있다. 그러나 상업운전이 개시된 후 오랜 시간이 경과된 원자력발전소에서는 사용후핵연

Table 1. Spent Fuel Facility Capacity and Storage (as of the end of 2013) [1]  
(unit : bundles)

Plant	Capacity <sup>1)</sup>	Storage
Kori	6,494	5,154
Hanbit	7,912	5,141
Hanul	7,066	4,385
Wolsong	PWR	523
	HWR	499,632
		64
		378,040

<sup>1)</sup> Excluding the portion of the emergency reactor core

료의 누적량이 증가함에 따라 수조의 저장 용량이 부족하게 되는 문제가 발생되고 있다. 따라서 부족한 사용후핵연료 저장 용량을 확대하기 위해 고리 3, 4 호기, 한울 1, 2, 3, 4, 5, 6 호기 및 한빛 1, 3, 4, 5, 6 호기에 조밀저장대를 설치하였으며, 한빛 2 호기의 조밀저장대를 교체할 예정이다[1]. 월성원자력발전소에도 2010년 2월 조밀건식저장시설 건설을 완료하였다. 2013년 12월 말 현재 각 발전소의 사용후핵연료 저장 관리 현황은 Table 1과 같다[1]. 그러나 이러한 조밀저장대의 도입에도 불구하고, 2024년 경에는 각 발전소의 저장수조가 사용후핵연료로 포화되기 시작할 것으로 예상되므로, 후행핵연료주기에 관한 국가 정책이 확정될 때까지 발전소의 저장수조로부터 사용후핵연료를 인출하여 중간저장하기 위한 건식저장시설의 건설이 시급한 문제로 대두되고 있다.

건식저장(dry storage)은 사용후핵연료의 붕괴열을 공기의 대류에 의해 냉각시키는 사용후핵연료 저장 방식이다. 사용후핵연료를 건식저장하기 위해서는 원자로에서 배출된

사용후핵연료를 상당기간 동안 원자력발전소 내의 습식 저장조에서 냉각시켜 붕괴열을 감소시킨 후, 저장 전용용기 또는 저장/수송 겸용용기에 넣고 핵연료 산화를 막기 위해 불활성기체로 채운 후, 밀봉하여 건식저장 시설로 이송한다. 건식저장 시설에서는 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열이 저장용기 주위를 흐르는 공기에 의해 냉각되며, 냉각에는 자연대류 냉각방식이 주로 사용되나, 냉각 효율을 높이기 위해 강제대류 냉각도 고려될 수 있다.

본 연구에서는 국내외 사용후핵연료 건식저장기술 현황을 파악하고, 그 중에서 동굴저장 방식을 이용한 사용후핵연료 건식저장 기술의 국내 적용 가능성을 분석해 보고자 한다.

## 2. 사용후핵연료 건식저장 적용 기술기준

사용후핵연료 건식저장에 적용되는 기술 기준은 명시적으로 규정되어 있지 않으나, IAEA에서는 임계상태 이하로 유지, 잔열(residual heat)의 제거, 방사성 차폐 및 저장시설 수명 기간 중의 격납(containment) 유지를 사용후핵연료 저장의 기본적인 안전 목표로 제시하였다[2-4]. 또 건식 저장 중에 사용후핵연료 피복관의 건전성을 유지하기 위하여, 피복관의 온도가 재료의 손상이 일어나는 온도 이하로 안전 여유를 두어 유지되어야 한다. 건식저장에서 핵연료 피복관의 인가 온도는 경수로 핵연료의 경우 330 ~ 410℃ 이며, 중수로 핵연료의 경우 160℃ 이하이다[5].

사용후핵연료 건식저장을 위한 콘크리트 구조물은 사용후핵연료 저장에 따른 열부하로 재질의 강도가 변하거나, 피로 또는 균열이 발생하지 않도록 온도 기준을 충족시켜야 한다. Fillmore [6]은 콘크리트의 노화에 대한 온도의 영향을 조사하여, 콘크리트의 열화가 일어나는 문턱온도(threshold temperature)가 일반적으로 95℃라고 보고하였다. ASME 코드[7]와 ACI 코드[8]에 규정된 원자력시설에 사용되는 콘크리트 구조물의 온도 제한은 다음과 같다.

- 정상 운전 시 또는 장시간의 노출 시에는 콘크리트 구조물의 온도가 65℃를 초과해서는 안 되며, 침투 지점 주위와 같은 국부적 면적의 경우에는 온도가 95℃까지 상승하는 것을 허용한다.
- 사고 시 또는 단기간 동안에 콘크리트 구조물 내부 표면에서 온도가 175℃를 초과해서는 안 된다. 그러나 배관

의 파단 시에 제트류 또는 증기에 의해 특정 부위의 온도가 345℃까지 도달되는 것을 허용한다.

- 상기 온도 기준을 초과할 경우에는 콘크리트의 강도 감소가 수용할 만한 수준이고, 또 파괴가 일어나지 않는다는 것을 입증하는 시험 데이터가 제시되어야 한다.

사용후핵연료 동굴저장시설의 암반에 적용되는 온도 기준은 아직 설정되어 있지 않으나, 사용후핵연료 처분장에 설정된 온도 기준을 원용할 수 있다. 응회암(tuff) 내에 건설된 저장터널(drift)에 완충재나 뒷채움재를 설치하지 않고, 사용후핵연료를 처분하는 미국 Yucca Mountain 처분장에서는 터널 벽면의 최고온도가 200℃를 초과하지 않도록 규정하고 있다[9]. 또 심지층처분장에 대한 열 영향 평가에서, 화강암은 건조가열(dry heating) 하에서는 적어도 300℃까지는 안정하다고 보고되었다[10]. 이러한 온도 기준들은 수 만년의 장기간 동안 성능이 유지되어야 하는 사용후핵연료 처분장의 특성을 고려한 것이어서, 상대적으로 운영기간이 짧은 사용후핵연료 동굴저장시설에 적용한다면 상당한 보수적 기준이 될 것이다. 따라서 암반 동굴은 최고온도 제한 조건 측면에서 보면 콘크리트 구조물보다 훨씬 안전하다고 볼 수 있다.

## 3. 사용후핵연료 건식저장 기술 현황

### 3.1 지상저장 기술

현재 제안되고 있는 지상 건식저장 방식은 그 특성에 따라 볼트(vault) 방식, 콘크리트 모듈(module) 방식, 저장용기(cask) 방식으로 구분할 수 있으며, 저장용기 방식은 용기의 재질에 따라 다시 콘크리트 용기와 금속용기로 구분된다. 일반적으로 다량의 사용후핵연료를 장기 저장하기 위해서는 볼트 저장방식이 적합하며, 관리의 유연성을 중시하는 경우에는 용기 저장방식이나 콘크리트 모듈 저장방식이 유리하다.

#### 3.1.1 볼트 방식

볼트 방식은 대형 콘크리트 건물 내에 사용후핵연료를 저장하는 방식으로 외부 구조물은 방사선 차폐 역할을 하고, 건물 내에는 사용후핵연료 저장을 위한 콘크리트 구조물이 설치되어 있어, 이 콘크리트 구조물에 설치된 금속 저장 실린더에

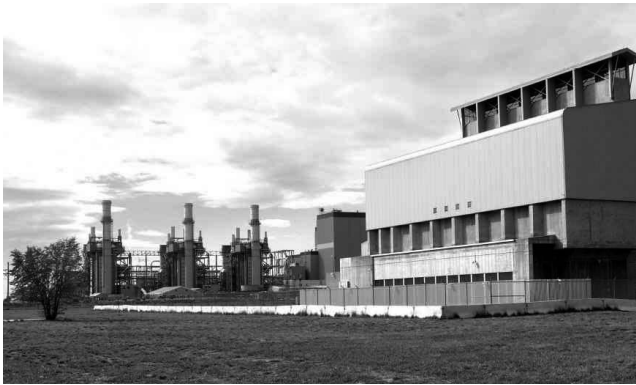


Fig. 1. Vault dry storage building in Fort St Vrain nuclear plant site [11].

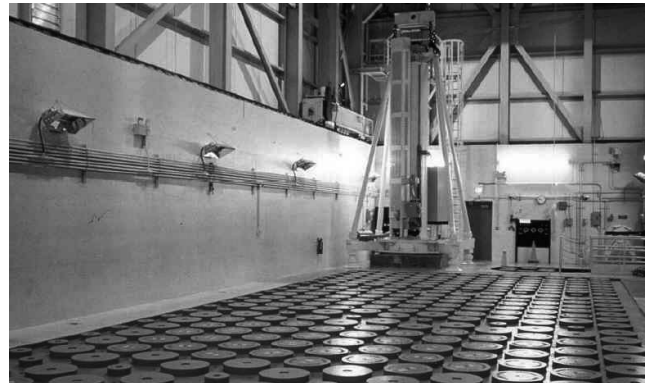


Fig. 2. Inside of the vault dry storage building in Fort St Vrain nuclear plant site [11].

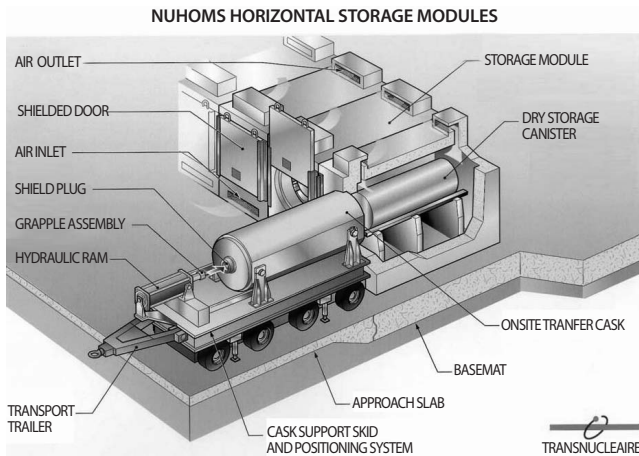


Fig. 3. Concept of NUHOMS horizontal concrete module [17].



Fig. 4. Horizontal concrete module storage facility in Calvert Cliffs site [17].

사용후핵연료를 넣고, 사용후핵연료의 산화를 막고 열전달을 향상시키기 위해 실린더 내를 불활성 기체를 채운 후 밀봉한다. 사용후핵연료에서 발생하는 열은 저장 실린더 외부 표면을 흐르는 공기의 자연대류에 의해 제거되며, 열 제거 효율을 높이기 위해 부분적으로 강제대류 방식을 사용하기도 한다. 볼트 저장방식 중에 가장 많이 사용되는 모듈형 볼트 저장방식(MVDS, Modular Vault Dry Storage)은 사용후핵연료 저장용기를 콘크리트 구조물 내에서 수직으로 저장하는 방식으로, 미국의 Fort St Vrain 원전 부지에 설치된 모듈형 볼트 저장 시설의 내 외부를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다[11]. 이 방식은 현재 미국의 Fort St. Vrain 저장시설, 영국의 Wylfa 저장시설, 프랑스의 CASCAD 저장시설, 네덜란드의 HABOG 저장시설, 헝가리의 Paks 저장시설 등에서 MAGNOX, HTGR 및 VVER 사용후핵연료를 저장하는데

사용하고 있다[12-16].

### 3.1.2 콘크리트 모듈 방식

콘크리트 모듈방식은 사용후핵연료를 넣은 차폐 금속 저장용기를 콘크리트로 된 모듈 내에 저장하는 방식으로, 모듈 내에 저장용기를 넣는 방향에 따라 수평 콘크리트 모듈 방식과 수직 콘크리트 모듈 방식으로 나눌 수 있다.

수평 콘크리트 모듈 방식은 저장용기를 콘크리트 모듈에 수평으로 넣어 저장하는 방식으로, 저장용기로부터 발생하는 사용후핵연료 붕괴열은 저장용기와 콘크리트 모듈 사이의 환형 공간을 흐르는 공기의 자연대류에 의해 냉각된다. 이때, 사용후핵연료 저장용기는 방사성 물질의 유출을 방지하고, 사용후핵연료를 보호하는 격납 기능을 하며, 콘크리트 모듈이 구조물 및 차폐재의 역할을 한다. 수평 콘크리트 모듈의





Fig. 5. Vertical concrete silo in Wolsong power plant site.



Fig. 6. MACSTOR-400 vertical concrete module in Wolsong power plant site [1].



Fig. 7. Concrete cask storage facility in Connecticut Yankee power plant site [19].

대표적인 예는 미국에서 사용 중인 NUHOMS(Fig. 3) 방식으로, 이 방식을 이용한 미국 Calvert Cliffs 저장시설을 Fig. 4에 나타내었다[17].

수직 콘크리트 모듈 방식의 대표적인 예는 캔두 사용후핵연료 저장시설로서, 캔두 사용후핵연료를 넣은 저장 바스켓을 콘크리트 모듈 내에 수직으로 저장한다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열은 콘크리트 모듈 하부에서 유입되어 상부로 배출되는 공기의 자연대류에 의해 냉각된다[18]. 월성원자력발전소에서 초기에는 사일로 형태의 콘크리트 모듈을 사용하였으나(Fig. 5), 저장 용량을 증가시키기 위해 2010년부터 직육면체 형태의 MACSTOR/KN-400를 도입하여 운영 중에 있다(Fig. 6) [1].

### 3.1.3 용기 방식

사용후핵연료를 저장용기에 넣어 저장하는 방식으로,

저장용기의 재질에 따라 콘크리트 용기 방식과 금속 용기 방식으로 나눌 수 있다. 콘크리트 용기는 주로 저장 전용용기인데 반해, 금속 용기는 초기에는 저장 전용용기로 제작되었으나, 최근에는 수송/저장 겸용용기가 개발되고 있다. 사용후핵연료를 넣은 금속제 바스켓을 콘크리트 또는 금속 저장용기에 넣어 저장하며, 이 때 바스켓은 방사성물질의 누출을 막는 격납 기능을 하고, 콘크리트 또는 금속 저장용기가 차폐 역할을 한다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열은 저장용기 벽을 통해 열전도에 의해 냉각되거나, 콘크리트 용기 하단의 흡기구로 유입되어, 상단의 배기구로 배출되는 공기의 자연대류에 의해서 냉각된다.

콘크리트 용기 방식에 사용되는 저장용기는 수직 원통형 구조로 앞 절에서 기술한 콘크리트 사일로와는 달리 이동이 가능하다(Fig. 7). 따라서 사용후핵연료를 넣은 바스켓을 발전소 내에서 콘크리트 저장용기에 넣은 후, 용기를 저장부지로 운반하여 콘크리트 패드 위에 적재한다. 발전소 부지 밖에 사용후핵연료 저장시설이 있는 경우에는 사용후핵연료 바스켓을 별도의 수송용기에 넣어 저장 부지로 운반한 후, 수송용기에서 꺼내어 부지에 있는 콘크리트 저장용기에 밀봉 저장한다. 대표적인 콘크리트 저장용기에는 VSC-24, HI-STORM 100, NAC-UMS 등이 있다[12,19].

금속 용기 저장 방식은 사용후핵연료를 금속제 용기에 넣어 저장부지의 콘크리트 패드 위에 적재하는 간단한 개념이다. 금속 용기는 일반적으로 단조강으로 제작되며, 외부 저장용기와 사용후핵연료 바스켓으로 구성된다. 저장 용기 내에 사용후핵연료 바스켓을 넣은 후, 덮개를 볼트로 고정하거나,



Fig. 8. Metal cask storage facility for spent fuel [20].

용접을 하여 밀폐시킨다. 저장 용기의 냉각 효율을 높이기 위해 용기 바깥 표면에 여러 종류의 냉각핀을 부착하기도 한다. 금속 용기는 초기에는 사용후핵연료 저장용으로 개발되었으나, 최근에는 수송/저장 겸용 용기를 개발하는 추세이다. 금속 저장용기의 종류는 HI-STAR 100, NAC-STC, TN-24P, CASTOR V/21 및 MC-10 등이 있다[12,19-21]. 금속 용기 방식으로 건설된 사용후핵연료 저장시설을 Fig. 8에 나타내었다. 일본에서는 아오모리현 Mutsu 시에 저장 용량 3000 톤의 금속 수송 및 저장 겸용용기를 저장하기 위한 콘크리트구조의 중앙 집중 저장시설을 건설하고 있다(Fig. 9) [22].

### 3.2 동굴저장 기술

사용후핵연료 동굴저장 방식은 저장 부지의 지형적 특성상, 지상 건축저장을 위한 평탄하고 넓은 부지를 확보하기 어렵거나, 테러나 외부의 공격 또는 자연 재해에 대한 저장시설의 방호 능력을 향상시켜, 사용후핵연료 저장시설의 건설에 대한 주민의 수용성을 높이기 위해 제안되었다.

#### 3.2.1 독일 Neckarwestheim 터널 저장 시설

독일에서는 2002년 4월에 개정된 원자력법에 따라 2005년 7월부터 사용후핵연료를 재처리시설이나 Ahaus 및 Gorleben에 있는 중간저장시설로 반출하는 것을 금지되었기 때문에, 사용후핵연료의 영구처분이 개시될 때까지 사용후핵연료를 발전소 부지 내에서 장기저장 할 수밖에 없게 되었다. 이에 따라 사용후핵연료 저장구조의 포화 문제를 해결하기 위해 수조에서 인출한 사용후핵연료를 금속제 저장용기(CASTOR 형)에 넣은 후 독립된 저장 건물 내에 저장하는 것이



Fig. 9. Mutsu centralized spent fuel storage facility under construction [22].

일반적이며, 저장 건물의 설계 개념에는 STEAG와 WTI 두 종류가 있다[23].

그러나 Neckarwestheim 발전소의 경우에는 부지가 전에 채석장이었던 곳에 위치하고 있을 뿐 아니라 지형의 폭이 좁기 때문에 사용후핵연료 용기 저장건물을 건설하기에 적합한 평탄한 부지를 찾기 어려웠다. 따라서 이러한 발전소 부지의 지형적 특성을 고려하여, 2006년에 사용후핵연료 터널 저장시설이 건설되었다[24]. 발전소 후면 산지의 경사면에 갱구를 조성하고, 수평으로 각각 길이 84 m, 폭 14 m 및 길이 90 m, 폭 17.4 m 인 두 개의 평행한 원형 터널을 뚫어 심부 암반 내에 저장시설을 건설하였다. 두 개의 터널은 막장에서 연결 터널로 이어져 있고 터널의 벽은 콘크리트로 라이닝되어 있으며, 수직 환기갱과 대피로가 설치되어 있다. 터널의 갱구 전면의 지상에는 사용후핵연료 수납건물이 설치되어 있다. 이 사용후핵연료 저장방식은 저장시설이 암반 내에 건설되므로, 외부 공격으로부터 안전을 보장할 수 있고, 방사선 차폐효과도 우수하다. 저장터널 막장 부분에서 산 정상부로 연결되는 수직 환기갱(ventilation shaft)을 굴착하여, 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열은 갱구에서 유입된 공기가 저장터널을 통해 환기갱으로 흐르는 자연대류에 의해 냉각되도록 하였다(Fig. 10). 이 저장 터널은 CASTOR V/19 수송/저장 겸용용기를 151개 저장할 수 있는 용량을 가지고 있다[24].

#### 3.2.2 캐나다 NWMO 동굴저장 개념

캐나다의 NWMO(Nuclear Waste Management Organization)은 캐나다에서 발생한 사용후핵연료의 장기관리방안을 위해 Nuclear Fuel Waste Act (NWFA)에 규정된 사용후핵연료의 직접처분, 부지 내 저장 및 중앙집중식 저장 등



Fig. 10. Exterior and inside of the rock cavern storage facility in Neckarwestheim nuclear plant site [24].

세 가지 방안에 대해 평가해 왔다. 이 중 사용후핵연료 중앙 집중식 저장방식의 하나로 사용후핵연료 저장용기를 지하의 암반 공동 내에 저장하는 방안이 제안되었다(Fig. 11) [25].

지하저장시설은 두 개의 경사 진입로, 11 개의 저장동굴, 연결통로, 환기통로 및 3 개의 배기 수직갱으로 구성된다. 저장동굴은 지표에서 50 m 정도 깊이의 모암에 건설되며, 지표에 있는 수납 건물과 경사 진입로에 의해 연결된다. 저장동굴은 견고한 암반 내에 건설되어 외부 공격에 대한 방호와 격납이 최대가 되도록 설계되며, 지하 50 m는 고도의 물리적 방호와 안정성을 제공해 줄 수 있는 심도이다.

저장시설 수납 건물로 수송되어 온 사용후핵연료를 수송용기에서 인출하여 저장용기 내에 넣어 밀봉한다. 밀봉된 저장용기는 저장용기 운반차량을 이용하여 저장동굴의 하역장

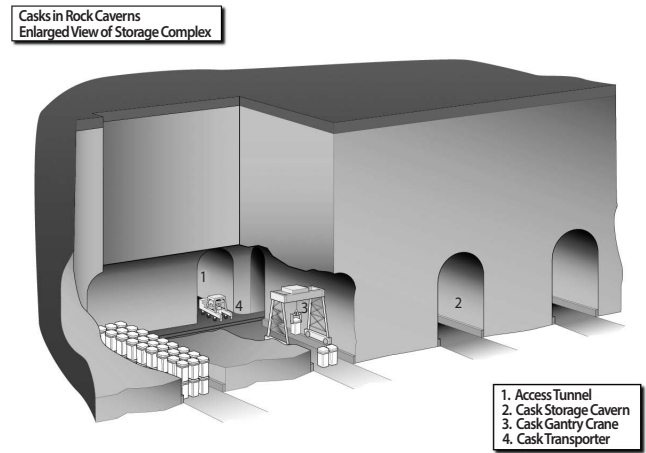


Fig. 11. Design concept of the NWMO rock cavern spent fuel storage facility [25].

까지 운반되며, 하역장으로부터 저장 위치까지는 크레인(overhead gantry crane)으로 운반되어 적재된다. 저장시설의 연간 최대 사용후핵연료 저장 용량은 117,066 번들이며, 1 일 저장 작업량은 1.32 저장용기로서, 한 개의 저장용기에는 384개의 핵연료 번들이 포장된다. 저장동굴의 용기 총 저장 용량은 3,557,451 사용후핵연료 번들이다. 저장용기는 2 단으로 적재되며, 한 줄에 3 개의 2 단 적재 용기(총 6 개 용기)가 저장되어, 각 저장 동굴은 총 948 개의 저장용기를 저장할 수 있다. 저장동굴 마다 80 톤 용량의 overhead gantry crane이 설치되며, 크레인의 폭은 저장용기 3 줄과 작업통로 폭을 합한 길이(약 14 m)이다. 지상 수납건물과 지하 저장시설은 하향 경사 7%인 두 개의 경사 진입로에 의해 연결되며, 경사로의 총 길이는 714 m, 폭은 8 m, 높이는 6 m 이다. 경사로는 입구에서 80 m 정도까지는 콘크리트로 라이닝한다. 터널의 천정은 아치 형태로 하고, 경사 진입로에 신선한 공기를 유입시키기 위해 환기 수직갱을 설치한다.

지하 저장시설에 저장된 저장용기의 냉각 및 환기를 위해 강제환기 방식이 사용한다. 진입 및 수송 통로는 저장용기의 수송과 신선한 공기의 공급 통로로 사용되며, 배기 통로는 배기 용도로 사용된다. 환기 시스템에는 배기 덕트의 지표 지점에 extract 팬이 설치되어 있다. 저장터널이 진입통로와 환기통로 쪽으로 하향경사를 가지고 있기 때문에, 지하저장 시설로 유입되는 지하수는 진입 및 환기 통로에 있는 집수정에서 수집되어 지상으로 배수된다.



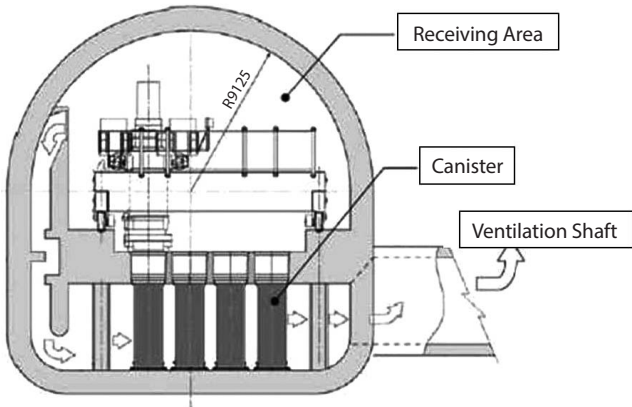


Fig. 12. Cross section of the CRIEPI rock cavern spent fuel storage facility [26].

### 3.2.3 일본 CRIEPI 동굴저장 개념

일본의 전력중앙연구소(CRIEPI)는 산지 경사면에 수평으로 굴착한 터널 내에 사용후핵연료 저장시설을 건설하는 방안을 연구하였다[26]. 이 연구에서는 사용후핵연료를 금속제 용기인 캐니스터에 넣어 저장하는 것으로 가정하였다. 사용후핵연료를 캐니스터에 넣은 후 덮개를 덮고, 용접하여 밀봉시킨 다음 수송용기에 넣어 동굴 저장시설로 수송한다. 캐니스터는 외경 1,607 m, 길이 4.84 m, 두께 1.6 cm인 스텐레스 강 원통형 용기로서, 21 개의 PWR 핵연료집합체를 포장할 수 있다. 핵연료를 포장했을 때 캐니스터의 총 중량은 약 33 톤이며, 캐니스터의 개당 발열량은 최대 22 kW 이다.

사용후핵연료 저장터널은 터널의 높이의 중간 지점에 타설된 슬라브에 의해 구분된 이중 구조를 가지며, 슬라브 상부가 사용후핵연료 캐니스터를 수송하는 운반 구역이고, 하부는 운반된 사용후핵연료를 정지시켜 저장하는 저장 구역이다. 저장터널의 입면도를 Fig. 12에 나타내었다. 동굴 저장 시설은 저장터널 외에도 사용후핵연료 운반터널, 급기 갱도 및 수직 배기 갱도로 구성된다. 사용후핵연료 운반터널도 공기 유입에 사용되기도 하나, 공기 공급의 안전성을 위해 별도의 급기 갱도를 설치하며, 배기 갱도도 복수로 설치된다.

운반터널과 저장터널의 사이에는 수직 벽을 설치하며, 사용후핵연료는 슬라브 상부에서 크레인에 의해 운반되어, 슬라브 바닥의 구멍을 통해 슬라브 하부 구역에 설치된 저장대에 놓여진다. 저장터널의 폭은 20 m 정도이며, 1 개의 저장터널에 200 개의 캐니스터를 저장한다.

운반터널 측면벽에 차폐 벽을 설치하여, 터널 벽과 차폐 벽

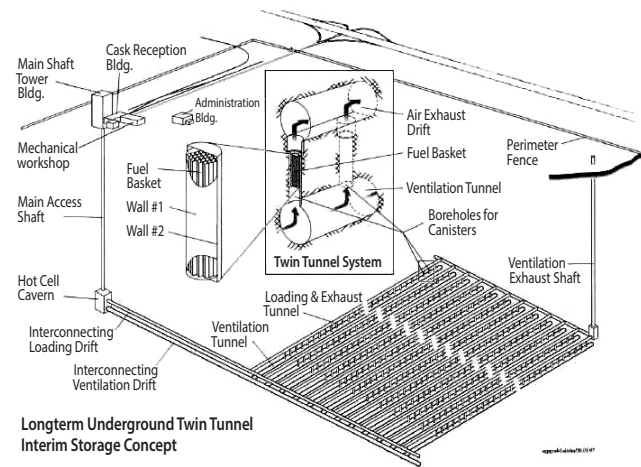


Fig. 13. Design concept of the Colenco Power Engineering international rock cavern spent fuel storage facility [27].

사이로 통로가 급기 갱도 기능을 하게하며, 공기는 차폐 벽 상부의 개방된 부분을 통해 슬라브 하부의 저장구역으로 유입되어 저장된 사용후핵연료 캐니스터 측면을 흘러 지나가면서 붕괴열을 제거한 후, 수직 배기 갱도를 통해 동굴 저장 시설 외부로 배출된다. 이 때 냉각과 공기의 공급은 자연대류에 의해 이루어진다. 동굴 저장시설은 암반 내에 건설되므로, 방사선차폐 측면에서 우수하다.

### 3.2.4 Colenco Power Engineering 동굴저장 개념

Colenco Power Engineering은 사용후핵연료 국제 장기 저장을 위해 결정질 모암의 적당한 심도에 위치하는 동굴저장 개념을 제안하였다(Fig. 13) [27].

저장시설의 지표면에는 원자력시설이 없으며, 지하에 있는 핫셀에서 원자력발전소로부터 반입된 수송용기로부터 사용후핵연료를 꺼내어 얇은 이중벽의 캐니스터에 포장한다. 캐니스터가 채워지면 용접으로 밀봉된 후, 저장구역으로 이동된다. 저장구역은 일련의 상하 이 층인 쌍둥이 터널로 구성되며, 각 쌍둥이 터널 사이에 사용후핵연료를 저장하기 위한 수직 시추공이 굴착되어 있다. 쌍둥이 터널의 기능은 사용후핵연료의 수송과 환기이다. 하부에 위치한 터널은 환기에 필요한 찬 공기를 각 수직 시추공에 공급하며, 이 공기는 시추공 벽과 캐니스터 사이의 환형 공간을 자연대류에 의해 통과하면서 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열을 제거한다. 가열된 공기는 상부 터널로 빠져나가 수직 환기 갱도를 통해 지상으로 배출된다. 이 자연 대류에 의한 냉각방식은 고유의



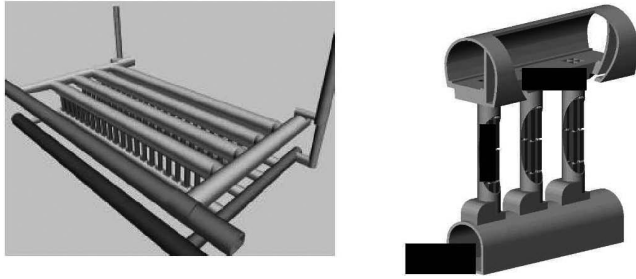


Fig. 14. Concept of CEA rock cavern spent fuel storage facility [28].

안전성을 가지고 있으며, 사용후핵연료 저장기간 동안 보수 유지가 필요 없게 해 준다. 상부의 수평 터널은 사용후핵연료의 적재 및 회수 시 수송터널로 이용되며, 저장 중에는 가열된 공기가 모이는 환기터널로 사용된다. 저장시설은 하부 터널이 지하 150 m 깊이, 상부 터널은 하부 터널 20 m 위에 위치하며, 각 터널은 직경 6 m, 길이 350 m이다. 각 터널 쌍 사이의 간격은 21 m 이고, 터널 쌍 20 개가 각각 직경이 6.5 m 인 흡기갱과 배기갱에 연결되어 있으며, 수직 사용후핵연료 저장 시추공 사이의 간격은 3.5 m이다.

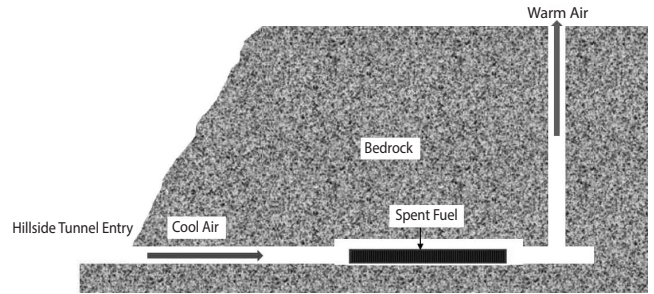
### 3.2.5 CEA 사용후핵연료 동굴저장 개념

Moitrier 등 [28]은 사용후핵연료 중앙집중식 저장대안의 하나로, 산지의 경사면에서 수평 터널을 통해 진입하는 경압층에 건설된 저장동굴 개념을 제안하였다. 이 저장 개념에서 모암은 적절한 물리적 방호를 제공하여, 외부 충격으로부터 사용후핵연료 저장용기를 보호해 준다. 사용후핵연료는 수직공 내에 저장하며, 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열은 자연대류에 의해 제거된다. 공기는 하부의 흡입갱으로 유입되어 수직공 벽과 사용후핵연료 저장용기 사이의 환형 공간을 통과하면서 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열을 제거한 다음, 상부 터널로 빠져나가 수직 환기 갱도를 통해 지상으로 배출된다 (Fig. 14). 그러나 이 개념에 대한 구체적 내용 및 후속 연구 수행 여부는 보고되지 않았다.

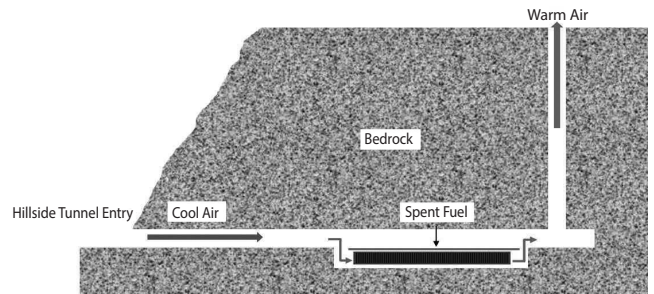
## 4. 국내 사용후핵연료 동굴저장 가능성 분석

### 4.1 건설적 측면

사용후핵연료를 지상에 건설저장하기 위해서는 앞에서



(a)



(b)

Fig. 15. An example of the design concept for the storage of domestic spent fuel in the rock cavern.

기술한 볼트 방식, 콘크리트 모듈 방식, 저장용기 방식 중 하나를 택하여야 한다. 저장용기 방식을 택한 경우에도 외부의 공격이나, 예기치 않은 자연 재해로부터 사용후핵연료를 보호하기 독일이나 일본에서 채택한 것과 같은 강화 콘크리트 건물 내에 저장하는 것이 바람직하다. 이러한 지상 저장 시설을 건설하기 위해서는 시설 부지로 상당한 면적의 평탄한 지형의 토지가 필요하다. 그러나 산악지형이 주를 이루는 우리나라의 실정에서는 이런 조건을 충족하고, 외부로부터 격리되어 있는 평탄한 부지를 확보하는 것이 쉽지 않을 수도 있다. 이에 비해 사용후핵연료의 건식저장을 위한 저장 시설을 산지의 동굴 내에 건설한다면 부지 확보가 보다 용이해질 수 있다.

국내 적용 가능한 사용후핵연료 동굴저장시설 설계개념의 예로는 산지 경사면에서 수평으로 굴착된 터널 형태의 저장시설을 생각해 볼 수 있다. 진입터널과 저장동굴은 전체적으로 약간의 상향 경사(+2%)를 갖도록 하여, 저장시설 내로 유입되는 지하수가 시설 외부로 자연배수 되도록 유도함으로써 저장시설 관리의 부담을 경감시킨다. 저장동굴 내에 사용후핵연료 수송 및 저장 겸용용기를 그대로 저장할

경우에는 동굴 바닥에 콘크리트 패드를 설치하고, 그 위에 수송 및 저장 겸용 용기를 정치시키는 방식을 채택할 수 있다 (Fig. 15(a)). 만일 사용후핵연료를 수송용기에서 꺼내 별도의 저장용기에 넣어 저장하는 경우에는 저장동굴을 콘크리트 슬라브에 의해 분리된 지하층을 가진 이중 구조로 만들고, 콘크리트 슬라브 바닥에 굴착된 저장공을 통해 사용후핵연료 저장용기를 지하층에 저장하도록 하는 CRIEPI 동굴저장 개념과 유사한 방식을 생각해 볼 수 있다 (Fig. 15(b)). 저장시설 내의 환기는 자연대류를 이용하는 것을 원칙으로 하고, 필요 시 냉각 능력을 향상시키기 위해 강제대류를 할 수 있는 시설을 갖추도록 한다. 즉 수평 진입터널을 흡기 통로로 사용하고, 저장동굴 막장 부근에 수직 배기 갱도를 설치하여 흡기통로로 유입된 공기가 사용후핵연료에서 발생되는 붕괴열을 냉각시킨 후, 자연대류에 의해 배기 갱도를 통해 배출되도록 한다.

사용후핵연료를 지상 건식저장시설에서 저장하면 부지 경계에서의 방사선 피폭선량을 기준치 이하로 유지하기 위해서는 상당한 방사선 차폐설비가 필요하나, 지하동굴 형태의 저장시설에 저장한다면 암반이 방사선 차폐 기능을 함으로써 별도의 차폐 설비가 필요 없게 되는 장점도 있다. 배기구를 통한 방사성 물질의 유출 감시는 지상 건식저장시설과 동굴저장시설에 모두 동일하게 요구된다. 만일 사용후핵연료 건식저장시설을 집중식이 아닌 발전소 별로 설치하는 경우에는 이러한 장점들이 더욱 두드러진다. 즉 우리나라 원자력발전소의 대부분이 해안가에 위치하고 있으며, 발전소 부지는 전면이 바다에 접하고, 후면은 산지로 되어 있는 전형적인 “배산임수(背山臨水)”의 지형이다. 더구나 부지의 폭이 좁고, 한 부지에 다수의 원자력발전소가 건설되어 있기 때문에 사용후핵연료 건식저장을 위한 충분한 면적의 평탄한 부지를 확보하는 것이 쉽지 않을 수도 있다. 또 동굴저장시설은 테러나 외부 공격에 대한 안전성이 탁월하며, 저장시설 입구 부분이 산 중턱에 위치하므로 해일이나, 태풍, 쓰나미 등 자연재해의 영향도 거의 받지 않는다[29]. 이외에도 저장시설의 존재를 외부에서 식별하기 어려워 주위 경관 측면이나 주민 수용성 차원에서 유리하다고 할 수 있다. 따라서 우리나라 특유의 자연 및 인문사회 환경을 고려할 때, 동굴저장 방식은 국내 사용후핵연료 건식저장을 위한 유력한 대안으로 고려될 수 있다.

Table 2. Comparison of Costs for Surface and Rock Cavern Dry Storage Facilities [26]

(unit : 2006 10<sup>6</sup>Yen)

Description	Surface Dry Storage	Rock Cavern Dry Storage	
		secondary lining RC t=1.0 m	secondary lining RC t=0.4 m
Canister	100.0	100.0	100.0
mechanical and electrical utilities	44.0	40.7	40.7
construction works	92.2	27.5	27.5
civil engineering works	19.4	83.1	78.1
total	255.6	251.4	246.4

### 4.2 경제성 측면

일본 전력중앙연구소(CRIEPI)는 사용후핵연료 동굴저장 시설과 지상 볼트 건식저장시설의 경제성을 비교, 분석하였다. 저장용량은 2,000 tU을 기준으로 하였으며, 두 방식의 소요 비용을 캐니스터 비용, 기전설비비, 건축공사비 및 토목공사비로 구분하여 산정하였다[26]. 사용후핵연료 동굴저장 시설의 경우, 저장터널의 이차 복공 두께를 내진 설계를 고려하여 1 m로 하는 경우와, 터널표준시방서에 따라 0.4 m로 하는 두 가지 경우에 대하여 각각 산정하였다. 두 방식의 경제성 분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 동굴저장시설과 지상 볼트저장시설은 소요 비용의 차이가 거의 없다.

캐나다의 CTECH는 캔두형 원자로의 사용후핵연료 3,600,000 다발(bundle)을 장기저장 하기 위한 4 가지 설계개념에 대해, 경제성 분석을 수행하였다[30]. 고려된 저장개념은 빌딩 방식(CVSB, Casks and Vaults in Storage Buildings), 볼트 방식(SMV, Surface Modular Vaults), 수평 콘크리트 모듈 방식(CVST, Casks and Vaults in Shallow Trenches) 및 암반동굴 방식(CRC, Casks in Rock Caverns)이다. 여기서는 이 4 가지 개념 중에서, 가장 단순하나 안전성 측면에서 불리한 빌딩 방식을 제외한 볼트 방식(SMV), 수평 콘크리트 모듈 방식(CVST) 및 암반동굴 방식 (CRC) 등 3 가지 설계 개념을 대상으로 경제성을 검토하였다. 볼트 방식은 바스켓이나,

Table 3. Costs for Dry Storage Facilities [30]

Development Phases	Cost (unit : 2002 K\$)		
	SMV	CVST	CRC
Siting	293,944	280,275	334,760
Construction	627,190	675,790	583,754
Operation			
Initial Fuel Receipt	2,413,863	1,999,539	1,664,791
Extended Monitoring	4,520,197	4,830,088	4,230,961
Facility Repeats/Repackaging	8,722,684	7,839,022	7,263,479
Total Cost	16,577,878	15,624,714	14,077,906

NB.

Initial Fuel Receipt spans Y18-47.

Extended Monitoring spans Y48-347.

Facility repeats and repackaging events occur periodically (typically 30 year durations), within the extended monitoring duration

용기에 넣은 사용후핵연료 다발을 저장건물 내에 설치된 공학적 볼트에 일렬로 배치된 수직 저장관(storage tube) 속에 저장하는 방식이다. 수평 콘크리트 모듈 방식은 차폐용기 또는 콘크리트 용기에 넣은 핵연료를 콘크리트로 된 일련의 수평 모듈형 챔버 속에 저장하는 방식이다. 이 챔버는 얇은 트랜치 내에 건설되며, 챔버 상부를 흙으로 덮어 기후 변화에 대비하고, 물리적 방호를 제공한다. 암반동굴 방식은 차폐 저장용기 내에 넣은 사용후핵연료를 지하 50 m 깊이의 암반층에 굴착된 동굴 내에 저장하는 방식이다. 이 세 가지 저장 방식에 모두 동일한 저장건물 및 설비가 설치된다고 가정하였다. 각 방식에 소요되는 총 비용을 비교하기 위해, 전 주기 비용은 부지, 초기 건설 및 운영, 두 번의 대대적 개수 및 한번의 핵연료 재포장 작업을 고려하여 산출하였으며, 저장시설로의 사용후핵연료 수송비는 비용 추산에 포함되지 않았다. 각 방식에서 저장시설의 확보, 사용후핵연료 수납 및 장기 저장, 저장 용기에 대한 감시 등에 소요되는 누적 시간을 347년으로 통일하였다. 각 저장 방식에 대한 총 소요 비용 및 세부 항목별 비용은 Table 3과 같다. 이 표에서 암반동굴 저장 방식이 다른 저장 방식에 비해 다소 유리하게 나타났으나, 비용 추정에 포함되어 있는 불확실성을 고려하면, 각 저장 방식 별 소요 비용의 차이는 거의 없다고 할 수 있다.

이상과 같은 두 비용 분석은 자연 조건과 인문/사회적

환경이 크게 다른 국가에서 독립적으로 수행된 것이며, 분석에 사용된 저장용량 기준에도 상당한 차이가 있음에도 불구하고 동굴저장 방식과 지상 건식저장 방식 사이의 경제성이 유사한 것으로 나타났다. 따라서 사용후핵연료 동굴저장 방식과 지상 건식저장 방식은 경제성 측면에서는 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 이 경제성 분석들이 우리나라와는 자연적 및 사회적 환경이 다른 국가들에서 수행된 것이고, 수행 시기도 모두 2000년 대 초이어서, 현재와는 시기적으로 10 년 이상의 차이가 있다. 따라서 이 결과를 경제성 비교에 직접 적용하는 것은 무리가 있으며, 이들 분석 결과는 단지 두 방식의 상대적 경제성을 보여주는 사례에 불과할 뿐이다. 이들 경제성 분석시점 이후의 지하공간 굴착 기술의 진보를 고려하면, 현 시점에서는 동굴저장 방식의 경제성이 보다 향상되었을 가능성도 배제할 수 없다.

### 4.3 기술적 측면

사용후핵연료 동굴저장 방식을 실제 국내의 사용후핵연료 건식저장에 적용하기 위해서는 다양한 분야의 요소 기술이 확보되어야 하며, 이를 유기적으로 잘 조합시키는 것이 중요하다. 동굴저장에 필요한 요소 기술은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 부지 특성 규명 기술
- 지하공동 건설 기술
- 지하공동의 열-수리-역학적 특성 해석 기술
- 저장동굴 환기 기술
- 방사선적 안전성해석 기술
- 방사선 관리 기술
- 위험도 분석 기술
- 사용후핵연료 취급 기술

다행히 이러한 기술 중의 상당 부분은 유사 분야에서 이미 개발되어 있거나, 개발 중에 있는 기술을 활용하여 해결할 수 있다. 즉 부지 특성 규명 기술 및 지하공동의 열-수리-역학적 특성 해석 기술, 방사선적 안전성해석 기술 및 위험도 분석 기술은 고준위폐기물 심지층처분 분야에서 개발된 유사 기술을 활용할 수 있으며, 지하공동 건설이나, 저장동굴 환기 기술은 지하공간 활용 분야에서 개발된 기술들을 이용할 수 있다. 또 방사선 관리 기술 및 사용후핵연료 취급 기술은 사용후핵연료 수송 및 저장 분야에서 개발된 기술의 활용이

가능하다. 따라서 이러한 관련 연구 분야의 인력과 기술들을 적절히 활용한다면, 사용후핵연료 동굴저장에 필요한 요소 기술을 단시간 내에 확보할 수 있다.

따라서 필요한 요소 기술들을 유기적으로 조합하여 최적화시키는 작업이 선행된다면, 사용후핵연료 동굴저장 기술을 국내의 사용후핵연료 건식저장에 적용하는데 기술적인 장벽은 없을 것이다.

## 5. 결론

우리나라 원자력발전소에서는 사용후핵연료의 저장량이 증가됨에 따라 저장수조의 용량 부족 문제가 발생되고 있으며, 조밀저장대의 도입을 통한 저장용량 확대에도 한계가 있으므로 사용후핵연료를 중간저장하기 위한 건식저장시설의 건설이 시급한 문제로 대두되고 있다.

사용후핵연료 건식저장 기술로는 현재 지상저장기술이 주로 사용되고 있으나, 동굴저장 방식을 이용한 건식저장기술은 지상저장기술에 비해 다양한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 동굴저장 방식을 이용한 사용후핵연료 건식저장기술의 국내 적용 가능성을 분석하였다. 산악지형이 주를 이루는 우리나라의 실정에서 외부로부터 격리된 충분한 면적의 평탄한 부지를 확보하는 것이 쉽지 않으므로, 사용후핵연료의 건식저장시설을 산지에 건설된 동굴 내에 설치하는 동굴저장 방식이 유용한 대안이 될 수 있다. 동굴저장 방식은 테러나 외부 공격에 대한 안전성이 탁월하며 해일이나, 태풍, 쓰나미 등 자연재해의 영향도 거의 받지 않고, 주민 수용성 차원에서도 유리한 장점이 있다. 경제성 측면에서도 사용후핵연료 동굴저장 방식은 지상 건식저장 방식과 큰 차이가 없다. 사용후핵연료 동굴저장 방식을 국내에 적용하기 위해 위해서는 부지 특성 규명 및 지하공동 건설 관련 기술과 사용후핵연료 취급기술 등이 필요한데, 이러한 기술 중의 상당 부분은 관련 분야에서 이미 개발되어 있거나 개발 중에 있으므로, 이를 유기적으로 조합하여 최적화한다면 동굴저장 방식을 실제 국내에 적용시키는 데 큰 기술적인 장벽은 없다고 할 수 있다.

그러나 이 논문에서 이루어진 분석은 주로 문헌에 보고된 외국 현황 및 연구 결과를 토대로 한 것이며, 경제성 분석은 현재의 국내 여건과 상이할 수도 있다는 점에서 한계점을

지니고 있다. 따라서 여기서 도출된 결론은 최종적인 것이 아니며, 사용후핵연료 동굴저장기술의 국내 적용 가능성을 상세분석하기 연구가 추후에 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

## REFERENCES

- [1] Korea Hydro & Nuclear Power Co., 2014 White Paper on Nuclear Power Generation, Seoul (2014).
- [2] International Atomic Energy Agency, Design of Spent Fuel Storage Facilities, Safety Series No. 116, IAEA, Vienna (1994).
- [3] International Atomic Energy Agency, Operation of Spent Fuel Storage Facilities, Safety Series No. 117, IAEA, Vienna (1994).
- [4] International Atomic Energy Agency, Safety Assessment for Spent Fuel Storage Facilities, Safety Series No. 118, IAEA, Vienna (1994).
- [5] International Atomic Energy Agency, International Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).
- [6] D.L. Fillmore. Literature Review of the Effects of Radiation and Temperature on the Aging of Concrete, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/EXT-04-023193 (2004).
- [7] American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, III Division 2, Code for Concrete Containment, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, ASME (2010).
- [8] American Concrete Institute, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, ACI 349-01 (2010).



- [9] Department of Energy, Yucca Mountain Science and Engineering Report, Revision 1, Department of Energy, DOE/RW-539-1 (2002).
- [10] International Atomic Energy Agency. Effects of Heat from High-level Waste on the Performance of Deep Geological Repository Component, IAEA, IAEA-TECDOC-319 (1984).
- [11] Fort St. Vrain Independent Spent Nuclear Storage Facility (ISFSI) (2012).
- [12] Y.S. Hwang. Analysis on Storage of Spent Nuclear Fuel, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-3784/2009 (2009).
- [13] Department of Energy, Idaho Site Spent Nuclear Fuel Management, Nuclear Waste Technical Review Board (2010).
- [14] J. Morris, P. Richardson, S. Wickham, C. Rhodes, and M. Newland, "Contingency Options for the Dry Storage of Magnox Spent Fuel in the UK", ICEM'09/DECOM'09, Liverpool (2009).
- [15] Ministry of Economic Affairs and Agriculture and Innovation Ministry of Foreign Affairs. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, National Report of the Kingdom of the Netherlands, Fourth Review Conference (2012).
- [16] T. Berki, "General Information on Regulatory Organization and Recent Developments", 14th Annual NERS Meeting, Cape Town (2011).
- [17] P.B. Cowan, "Calvert Cliffs ISFSI License Renewal", NRC Regulatory Information Conference (2015).
- [18] International Atomic Energy Agency. Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/Containers, IAEA, IAEA-TECDOC-1532, Vienna (2007).
- [19] T.W. Hicks, T.D. Baldwin, I. Hill, S. Watson, and M.J. White. The Feasibility of Using Multipurpose Containers for the Geological Disposal of Spent Fuel and High Level Radioactive Waste, (2011).
- [20] H. Völzke, "Dry Spent Fuel Storage in Dual Purpose Casks - Aging Management Issues", INMM Spent Fuel Management Seminar XXVIII, Arlington, VA (2013).
- [21] AREVA, "Innovation in the Design of the Used Fuel Storage System", ISSF 2010, CRIEPI Tokyo (2010).
- [22] T. Takamatsu, "Metaal Cask Storage Schedule of Recyclable Fuel Storage Center in Mutsu", Recyclable-Fuel Storage Company (2010).
- [23] B. Thomauske, "Realization of the German Concept for Interim Storage of Spent Nuclear Fuel – Current Situation and Prospects", Waste Management '03 Conference, Tucson, AZ (2003).
- [24] Neckarwestheim Interim Storage Facility, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/80828/>
- [25] CTECH. Conceptual Designs for Four Centralized Extended Storage Facility Alternatives for Used Nuclear Fuel, CTECH Radioactive Materials Management (2003).
- [26] K. Shin, T. Saegusa, T. Koga, M. Teramura, Y. Kagaya, E. Yoshimura, K. Shirahama, K. Takeuchi, and S. Sato. Feasibility Study on Underground Vault Storage of Spent Nuclear Fuel, Central Research Institute of Electric Power Industry, N07015 (2007).
- [27] P. Leister, "International Underground Interim Storage for Spent Fuel: An Answer to Various Demands", Proc. of Annual Meeting on Nuclear Technology, Munich (1998).
- [28] C. Moitrier, I. Tirel, and C. Villard, "Long-term Storage Concepts with Conditioning Strategies ensuring Compatibility with Subsequent Disposal or Reprocessing", Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) (2000).
- [29] J. Choi, "Managing Spent Nuclear Fuel from Non-proliferation; Security and Environmental Perspectives", Nucl. Eng. and Tech., 42, 231-236 (2010).
- [30] CTECH. Cost Estimates for Four Centralized Extended Storage Facility Alternatives for Used Nuclear Fuel, CTECH Radioactive Materials Management (2003).