

## 미국 Yucca Mountain Project 현황

황용수<sup>1)</sup> · 황주호<sup>2)</sup> · 김상국<sup>2)</sup> · 박진백<sup>1)</sup> · 강철형<sup>1)</sup>

### Current Status of the YMP in the United States

Yongsoo Hwang, Jooho Whang, Sang K Kim, Jin-Baek Park, Chul-Hyung Kang

**초 록.** 본 기술보고에서는 미국의 고준위 방사성폐기물 발생 현황 및 최근 에너지성 장관의 최종 추천을 받는 등 활발하게 진행되고 있는 미국 유카산 고준위 방사성폐기물 처분장 후보 부지 선정 과정 및 조사 연구 현황을 요약하였다. 본 기술보고에 요약한 바와 같이 유카산 프로젝트의 자연 환경은 우리 나라와는 매우 상이하다. 그러나 세계 원자력 계에서의 미국의 영향력을 고려할 때 유카산 프로젝트의 성공은 2001년 핀란드 올킬루오토(Olkiluoto) 처분 부지 확보와 함께 원자력 계의 오랜 숙원이었던 고준위 방사성폐기물 처분을 실현시킴으로써 향후 원자력 에너지 사용의 증대와 함께 심부 지질에 대한 이해를 증진시키는데 크게 기여할 것이다.

**핵심어 :** Yucca Mountain, 고준위 방사성 폐기물, 사용후핵연료, Nuclear Waste Policy Act, 고준위 방사성폐기물 처분

#### 1. 미국의 고준위 방사성폐기물 발생 현황

현재 미국은 104기의 원자력 발전소를 운영하여 미국 전체 전력의 약 20%를 생산하고 있으며 총 해군 함정의 40%를 원자력 추진체로 구성하는 등, 민군 양 분야에 걸친 활발한 원자력 이용으로 세계 최대 규모의 고준위 방사성폐기물을 발생하고 있다. 미국은 70년대 말 TMI (Three Mile Island) 사고 이후 신규 원전 건설은 중단하고 있으며, 현재 14기의 원자로를 해체하였으며 총 77기의 원자로 부지에 사용후핵연료를 저장 중이다. 이밖에 도 핸프드(Hanford) 등 다섯 군데의 에너지성(Department of Energy) 부지에도 고준위 방사성폐기물을 저장하는 등 Fig. 1에 도시된 바와 같이 총 50개의 주중 33개의 주 내의 131개 부지에서 사용후핵연료, 고준위 방사성폐기물과 잉여 플루토늄을 저장하고 있다.<sup>1)</sup> 테네시 주, 콜로라도 주, 남 캐롤라이나 주, 뉴 멕시코 주, 뉴욕 주, 와싱턴 주, 아이다호 주 등에 약 1억 갤론의 액체 폐기물 및 2,500톤의 고체 폐기물 등 군사용 고준위 방사성폐기물이 저장되어 있고, 액체 폐기물 저장 탱크의 부식 문제 등이 발생하여 안전에 위협을 주는 경우도 있다.

미국 국민 중 약 1억 6천만 명이 이러한 시설로부터 반경 75 km 이내 지역에 거주하고 있으므로 이러한 폐

기물의 안전한 관리는 미국 국방 안보 및 에너지 공급 측면 뿐 아니라 전체 미국 국민들의 보건에도 중요한 문제이다. 현재 미국에는 2,000년도 말을 기준으로 약 40,000톤의 사용후핵연료가 발생되었는데 2,035년도에는 누적량이 105,000톤으로 증가할 것으로 예측된다. Table 1은 미국 내 고준위 방사성폐기물 발생량을 예측한 내용이다.

미국에서는 고준위 방사성폐기물을 임시 보관하기 위하여 습식 및 건식 중간 저장 방식을 모두 적용하고 있다. 건식 방식에서는 일정 기간 동안 원전 풀에서 방사성 붕괴가 진행된 사용후핵연료를 콘크리트 패드 위에 수직으로 건설된 캐스크에 넣어 보관하거나, 콘크리트 벙커 내 금속 저장 용기에 수평으로 저장하여 보관한다. 한편 에너지성 시설에서는 고준위 방사성폐기물이 액상으로 용기에 저장된다.

이러한 고준위 방사성폐기물을 최종 처분장에 인도하기 위해서는 1983년 제정된 10 CFR Part 961<sup>2)</sup> 규정에 의해 에너지성이 상용 원자력 발전 사업자들과 인수 협상을 수행하여야 하는데, 국방성, 해군, 에너지성이 소유한 고준위 방사성폐기물 인수를 위해서는 에너지성이 별도의 조치를 취할 예정이다.

#### 2. 미국의 고준위 방사성폐기물 처분 부지 확보 과정

고준위 방사성폐기물을 영구 처분하기 위한 미국의 기본 정책은 심지층 처분(Deep Geological Disposal)이

<sup>1)</sup>한국원자력연구소

<sup>2)</sup>경희대학교

접수일 : 2002년 2월 25일

심사 완료일 : 2002년 3월 10일

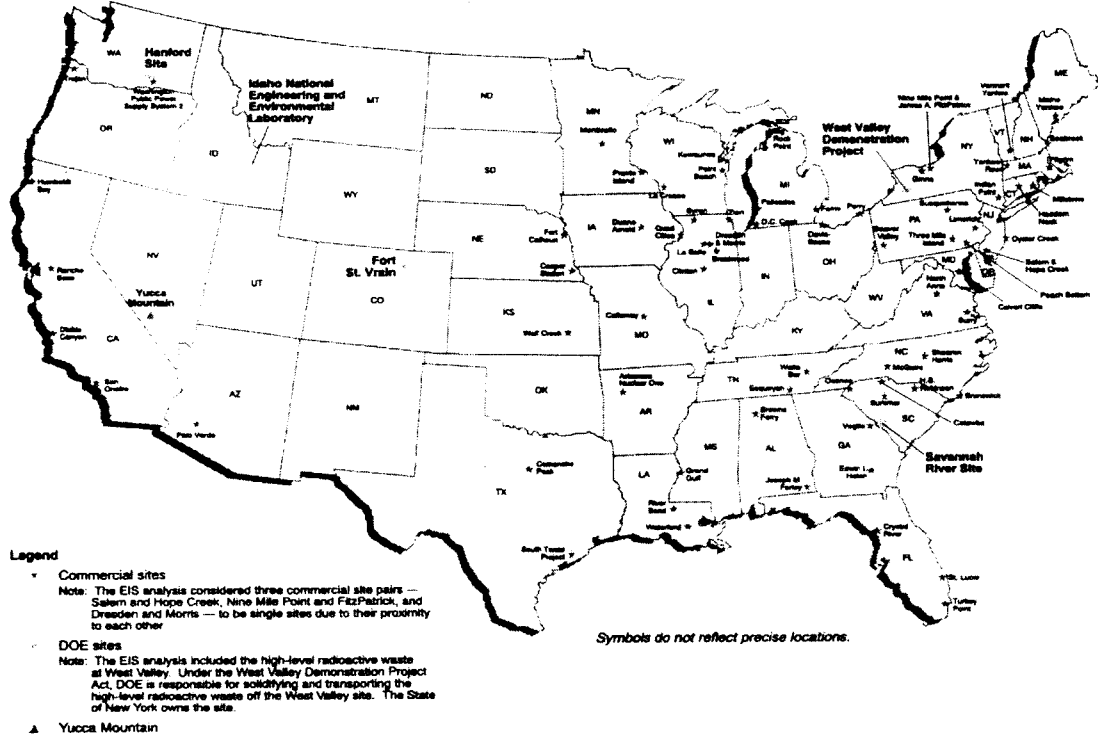


Fig. 1. 미국 내 고준위 방사성폐기물 발생 및 저장 장소.

Table 1. 2035년까지 미국에서 발생할 고준위 방사성폐기물량.

| 발생원                           | 발생량<br>[Metric Ton] |
|-------------------------------|---------------------|
| 상용 사용후핵연료                     | 105,000             |
| 총 발생량                         | 2,500               |
| 에너지성<br>사용후<br>핵연료            |                     |
| 해군 원자로 발생 사용후핵연료              | 65                  |
| 해외에 대여한 핵연료로부터 발생<br>한 사용후핵연료 | 16                  |
| 잉여 플루토늄                       | 50                  |
| 유리 고화된 고준위 방사성폐기물             | 22,000              |

다. 미국의 심지층 처분에 대한 신뢰도는 1957년부터 수행된 심지층 처분 연구 결과에 의해 잘 뒷받침되고 있는데 특히 1980년 에너지성이 발간한 상용 방사성 폐기물 관리에 대한 최종 환경 영향 평가서<sup>3)</sup>와 1983년 미국 국가 연구 위원회(National Research Council) 폐기물 격리 시스템 패널(Waste Isolation System Panel)에서 발간한 보고서<sup>4)</sup> 등에서 잘 나타나 있다.

고준위 방사성폐기물을 심지층 처분하기 위해 1982년 미국 연방 의회는 방사성폐기물 정책법(Nuclear Waste Policy Act: NWPA)<sup>5)</sup>를 입안하여 미국 에너지

성이 처분장 부지 확보, 설계, 건설, 운영, 그리고 폐쇄에 이르는 전 과정을 담당하도록 하였다. 특히 이 법에서는 수혜자 부담 원칙에 따라 현재 값싼 원전 발전 전기 혜택을 본 세대들이 고준위 방사성폐기물 영구 처분에 들어가는 비용을 부담할 것을 명기하였으며 고준위 방사성폐기물 영구 처분을 위한 일반 대중과 주 정부의 개입을 명시하였다.

실질적인 처분장 건설을 위해 이 법안에서는 에너지성 장관이 부지 선정에 관해 대통령이 결정을 하도록 요구하고 이를 의회가 승인하는 제도를 채택하였으며 부지의 인허가는 미국 원자력 규제 위원회(Nuclear Regulatory Commission)에서 담당하며 미국 환경청(Environmental Protection Agency)이 규제 기술 기준을 제정하도록 제도를 도입하였다. 이에 의거하여 10 CFR 60<sup>6)</sup>과 유카산(Yucca Mountain)에 특별 적용할 10 CFR 63<sup>7)</sup>등의 일련의 규제안이 작성되었다.

미국 정부는 1950년대 말부터 사용후핵연료의 영구 처분을 위한 노력을 경주해 왔으며 1982년 NWPA가 통과된 후 에너지성은 6개 주의 9군데 부지에 대한 타당성 연구를 수행하였다. 1983년 당시 레이건 대통령은 국립 과학학술원(National Academy of Science)의 권고를 받

아들여 워싱턴 주의 현무암(basalt)을 기반으로 하는 헨포드(Hanford) 부지, 텍사스의 암염(bedded salt)을 기반으로 하는 데프 스미스(Deaf Smith County) 부지, 그리고 Fig. 2에 도시된 라스베가스로부터 동북방으로 약 160 km 떨어진 네바다 핵실험 부지(test site) 내 응회암(welded tuff)에 기반을 둔 유카산 부지들을 후보 부지로 선정하였다. 한편 군사용 중저준위 방사성폐기물 처분을 위해 뉴 멕시코 주 내 칼스바드(Carlsbad) 시 지하 700 m 암염층(Bedded Salt)에 건설된 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) 시설이 1999년부터 운영 개시되고 있다.

이러한 3군데 처분 부지 동시 추진에 따른 효율성과 비용 등이 문제가 되어 1987년 12월 미국 연방 의회는 연방 정부가 소유하고 있는 네바다 테스트 사이트(Nevada Test Site) 내 유카산을 단일 후보 부지로 선정하였으며 1998년까지 연방 정부가 상용 원자력 시설에서 발생하는 사용후핵연료를 발전 사업자들로부터 인수하도록 하였다.<sup>13)</sup>

### 3. 유카산 프로젝트 관련 기관들과 인허가 절차

현재 미국 내에서는 처분 사업자인 에너지성에 OCRWM (Office of Civilian Radioactive Waste Management)이 설립되어 그 산하 국립연구소인 로렌스 버클리(Lawrence Berkeley: LBL), 샌디아(Sandia: SNL), 로스 알라모스(Los Alamos: LANL), 그리고 로렌스 리버모어(Lawrence Livermore: LLNL) 등이 참여하고 있다.<sup>3)</sup> OCRWM은 실장(Office Director)를 중심으로 부실장(Office Deputy Director)과 Chief Operating Officer 등이 업무를 총괄하고 있으며 Fig. 3에 도시된 바와 같이 유카산 부지 평가국 등 산하 3국과 별도의 품질보증국 체제로 운영하고 있다.<sup>10)</sup> 미국에서는 에너지성 산하 OCRWM을 주축으로 고준위 방사성폐기물 처분 사업을 국가 주도로 수행하고 있다.

에너지성 산하 국립 연구소들 중 LBL은 지하수 유동과 관련된 모델링 및 실측 연구를, SNL은 종합 성능 평가(Total System Performance Assessment: TSPA), 그리고 LLNL은 처분 용기와 지화학 등 처분장 주변(Near Field) 관련 현상 연구를 수행하고 있다. 또한 관련 자치정부인 네바다 주 Nye 카운티(County), 네바다 내 관련 대학인 UNR(University of Nevada Reno)와 UNLV(University of Nevada Las Vegas) 등에서 독자적인 연구를 수행하고 있다. 또한 대부분의 지질 조사는 미국 지질 학회(U.S. Geological Survey)에서 담당하고 있다.

미 의회는 미국 과학학술원에 의뢰하여 처분 전문가

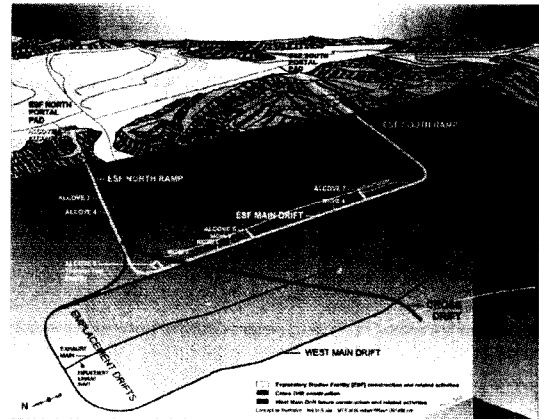


Fig. 2. 미국 DOE가 선정한 유카산 폐기물 처분장 개요도.

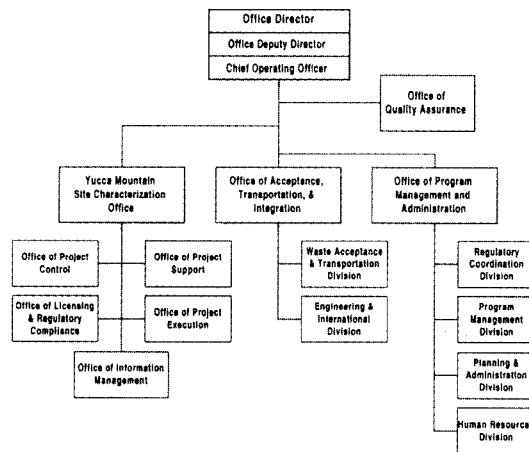


Fig. 3. OCRWM 조직도.

로 구성된 방사성폐기물 기술 분석 위원회(Nuclear Waste Technical Review Board: NWTRB)를 구성하였다. NWTRB는 일년에 두 차례 회합을 갖고 미 연방 의회와 에너지성에 주요 현안에 관해서 건의를 한다. 이밖에 미국 NRC는 처분장과 수송 용기 관련 인허가 관련 업무를 수행하고 있으며, EPA는 규제 제정, 수송성(Department of Transportation)은 고준위 방사성폐기물 운반 경로 관련 업무를, 네바다 주와 유카산 프로젝트로 영향을 받는 지방 자치 단체 모임(Affected Units of Local Government)은 프로젝트 전반에 관한 견해 표명을, 미 회계청(General Accounting Office)은 연방 의회의 요청에 의해 유카산 프로젝트와 관련된 미 에너지성의 활동을 감독하고 특별 보고서를 작성하는 임무를 수행하고 있다.

NWPA 114조에 의하면 에너지성 장관이 연방 대통령에게 유카산 부지를 추천하면 대통령은 이에 의거하여 의회에 유카산을 부지로 결의해 주도록 규정되어 있다. 의회의 결의에 대해 네바다 주는 공식적으로 이의를 제기할 수 있고 이와 같은 이의에 대해 미 의회는 적절한 조치를 취할 권한을 가지고 있다.

유카산의 인허가를 위해서는 EPA의 환경 규제 기준을 만족해야 한다. EPA의 환경 기준을 실제로 적용하기 위해 1981년 미국 NRC는 10 CFR 60을 제정하였으며 이후 수 차례에 걸쳐 이를 개정하였다. 실제 이 규정은 EPA의 기준이 설정되기 전에 처분 연구사업자들에게 처분장 폐쇄 후 환경 평가를 위한 지침을 주기 위해 설정된 것이었다. 이후 1985년 9월 EPA는 고준위 방사성 폐기물 처분장에 대한 규정<sup>11)</sup>을 공포하였고 1987년 EPA의 40 CFR 191에 대한 법원의 논란이 있은 후 미국에서는 처분장 관련 기술 기준에 대한 논란과 관련 기준 수정 작업이 수행되었다.

1992년 미국 의회는 40 CFR 191이 유카산 처분장에 맞지 않으므로 미 국립 과학학술원과 국가 연구 위원회(National Research Council)의 권고에 맞추어 유카산에만 적용할 새로운 기준인 40 CFR 197<sup>12)</sup>을 제정할 것과 이를 구체적으로 적용하기 위해 미국 NRC가 유카산에만 적용되는 새로운 기술 기준인 10 CFR 63을 제정할 것을 법제화하였다.

EPA의 새로운 법령인 40 CFR 197이 제정되기 전인 1999년 2월 22일 NRC는 새로운 기술 기준인 10 CFR 63 초안을 제안하고 일정 기간 동안 청문 후 제정 공포하였다. 현재 제안된 10 CFR 63은 기존의 10 CFR 60과는 달리 용기의 수명이나, 공학적 방벽으로부터의 유출 분율(Fractional Release Rate)에 관한 구체적인 제한이 없이 다중 방벽(Multiple Barrier)에 의한 처분 안전성 평가가 수행되도록 규정하고 있다.

미국 NRC는 유카산 처분장 인허가를 위해 아래와 같은 3 가지 체제를 도입하고 있다. 첫째가 10 CFR 60과 10 CFR 63과 같은 기술 기준들로 이는 EPA의 40 CFR 197에 명시된 각종 환경 보호 법령에 의거한 세부 지침을 설정한 것이다. 두 번째가 권고(Guidance)인데 현재로서는 NUREG-1563(Branch Technical Position on the Use of Expert Elicitation in the High-Level Waste Program) 하나 뿐이며 사업 진행에 따라 향후 이해 당사자들을 위해 일련의 권고를 발표할 예정이다. NRC가 인허가를 위해 사용하는 세 번째 방법론은 이해 당사자들과의 대화를 통한 방법인데 여기에는 서신 교환, 불레틴(Bulletin) 발간, 정보 고지와 규제 기관이 발간하는 각종 요약 자료들이 포함된다. 현재로서는 아직 인허가

절차를 밟고 있지 않기 때문에 미국 NRC에서는 세 번째 방법론을 적용하고 있지 않다.

1999년 8월 27일 EPA는 의회의 결의에 따라 기존에 WIPP 처분장에 적용하였던 40 CFR 191을 개정하여 새로운 환경법인 40 CFR 197을 제안하고 청문 기간 후에 최종 공포하였다. 이와 같은 새로운 EPA 법령은 여러 가지 면에서 기존의 법령과 다르다. 우선 용기 수명에 관련하여 10 만여 톤의 사용후핵연료를 처분할 때 처분 후 평가 기간인 만 년동안 1,000건 이하의 치명적인 암이 시설의 영향으로 발생하면 인허가가 취득되도록 규정하였는데, 이를 연간 개인 선량(Annual Individual Dose)로 전환하면 연간 15 mrem으로 40 CFR 191의 기준치와 동일하고 국내 기준치에 비해서는 7.5배 가량 높다. 한편 40 CFR 197에서는 40 CFR 191과는 달리 용기 수명 관련 규정을 두지 않았다. 그리고 국립 과학학술원의 건의를 받아들여 처분장 방사선적 안전성 평가에서 중요한 인간 침입 시나리오에 대해 체계적인 지침을 규정하였다.

#### 4. 유카산 프로젝트 현황

Fig. 4에 도시된 바와 같이 1982년부터 장기간에 걸쳐 수행되어 오던 유카산 프로젝트는 1987년 연방 의회에 의해 단일 후보 부지로 결정된 이후에도 주 정부의 고유 권한을 둘러싼 주 정부와 연방 정부와의 갈등, 반핵 단체 등의 반대, 인허가를 위한 기술 기준을 둘러싼 논쟁 등으로 인하여 순연되어 오다가 1993년부터 시작되어 1997년 완공된 Fig. 5에 도시된 부지 특성 조사 시설인 ESF(Exploratory Studies Facility) 굴착을 통해 본격적인 진기를 마련하였다. ESF는 기본적으로 처분장이 위치할 지역은 천연 상태로 보존한 채 처분장과 바로 인접한 지역에 TBM(Tunnel Boring Machine)을 이용하여 총 연장 직경 7.6 m의 터널을 굴착하면서 처분장 주변 지역의 지질 탐사와 핵종 이동 평가 모델 실증 연구에 활용되어 왔다. 1998년 10월 ESF 북쪽 입구 부근에서 시작하여 처분장 지대를 관통하는 2.7 km 길이의 추가 터널인 ECRB(Enhanced Characterization of the Repository Block)를 완공하여 처분장의 지질 안정성 및 지하수에 관한 직접적인 실측을 수행하고 있다. 이와같이 ESF는 약 28 헥타르의 지상 면적을 가진 종합 실증 시험 시설로 처분장 특성 연구 및 성능 평가 실증 연구에 활용되고 있다.<sup>13)</sup>

1996년 에너지성은 유카산에 대한 타당성 조사 평가 업무를 착수하여 1998년 12월 18일 이를 발간하였다.<sup>14)</sup> 이 보고서는 총 5권으로 구성되었는데 (1) 부지 현황,

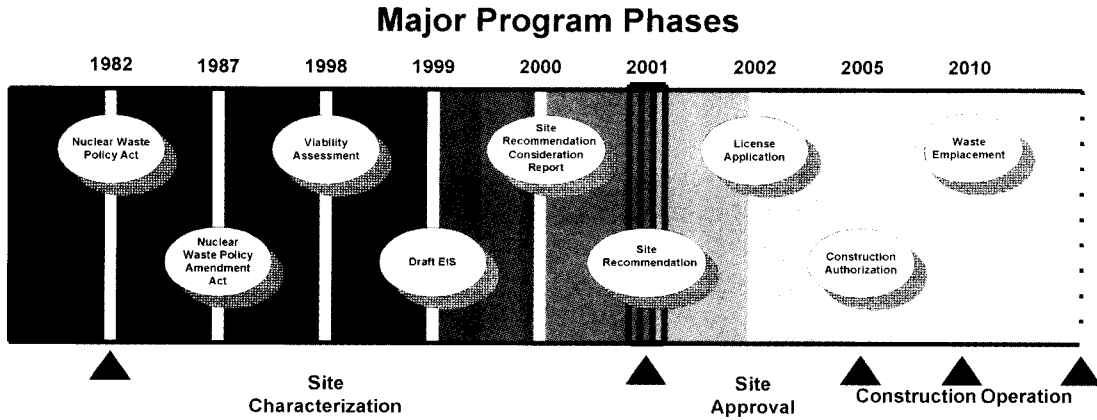


Fig. 4. 유카산 프로젝트 주요 단계.

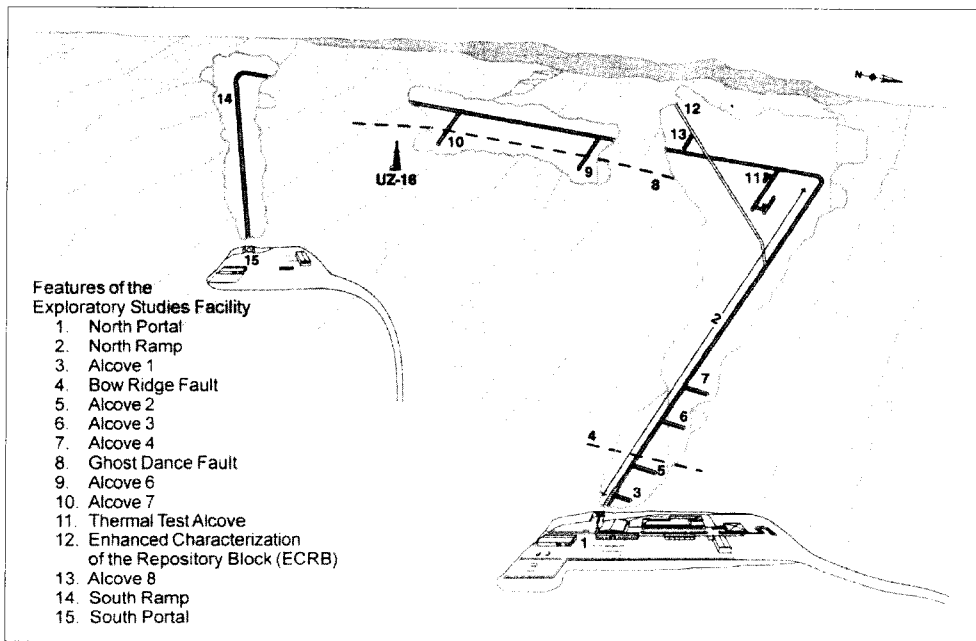


Fig. 5. 유카산 ESF 전경.

(2) 처분장 및 용기에 대한 기준 설계, (3) 1991, 1993, 1995년에 수행한 연구를 종합한 종합 성능 평가, (4) 향후 인허가까지 소요되는 비용 평가 및 (5) 기준 설계안에 따른 건설, 운영, 부지 감시 및 폐쇄 비용 산정 등을 다루고 있다. 미국의 방사성 폐기물 정책법(Nuclear Waste Policy Act)에 따르면 미국 에너지성은 유카산에 사용후핵연료 처분장을 건설, 운영, 감시, 그리고 폐쇄하기 위해서는 유카산 부지가 EPA가 공시한대로 처분장 폐쇄 후 10,000년 동안 방사선 기준치를 넘지 않음을

증명하는 환경영향평가보고서(Environmental Impact Statement)를 제출해야 한다.

미국 EPA가 정한 일 만년 평가 기간(Cut-off Time)은 근래 인류의 역사를 근거로 만년 기간 동안은 특정 사건이 문서, 구전 등으로 비교적 잘 보존되고, 이 기간 동안의 지구 환경의 변화는 현재에서도 잘 관측되므로 이 기간 동안의 안전성 평가 결과는 모두 예측 가능한 자연 및 인간 행태로 볼 때 신뢰할 수 있으나, 이 기간이 경과한 후 지질 및 인간 행태의 변화 예측에 많은 불확실성

이 내재하여 정량적인 평가가 어려우므로 평가 기간을 10,000년으로 제한한다는 개념이다.<sup>15,16)</sup> 그러나 이와 같이 인위적으로 평가 기간을 제한하는데 대해서는 미국 내 뿐 아니라 세계적으로도 많은 논란이 있어 왔고, 스웨덴이나 우리 나라에서는 미국과는 다른 개념을 적용하고 있다.

환경영향평가 보고서에는 단순한 처분장 운영 등에 관한 사항만이 아닌 수송에 따른 영향 평가 및 유카산에 처분장을 건설하지 않았을 때 영향 평가 및 상용 원전 및 에너지성 부지에 사용후핵연료를 포함한 고준위 방사성폐기물을 계속 보관할 경우에 대한 환경 영향 평가를 다루어야만 한다. 1999년 9월 미국 에너지성은 유카산에 관한 예비(Draft) 환경영향평가서를 발간하고 외부의 조언을 구하였다. 동시에 1999년 9월부터 2000년 2월까지 에너지성은 총 21차례의 청문회(Public Hearing)를 개최하여 환경영향평가에 관한 일반 대중들의 질의 등에 관해 응답하였다.<sup>17)</sup>

이와 같은 절차를 거쳐 미 에너지성 장관은 2002년 2월 유카산을 사용후핵연료 63,000톤 및 미 정부 보유 7,000톤의 고준위 방사성폐기물(이하 편의상 이들 모두를 사용후핵연료라 통칭함)을 영구 처분하기 위한 부지로 대통령에게 추천<sup>18)</sup>하였으며 미 대통령은 이에 대한 검토 후 2002년 2월 15일 미 의회에 유카산을 최종 부지로 결정해 주도록 추천하였다.<sup>19)</sup>

유카산에 처분될 방사성폐기물의 안전성을 보장하기 위해 미국이 채택하고 있는 개념은 "defense in depth"이다. 즉 침투한 지하수에 용해되는 방사성 물질량을 저감하기 위해서 모든 폐기물은 우선 모두 금속, 세라믹, 유리 형태로 고화된다. 고화된 폐기물은 처분 용기(Waste Container)에 저장되는데 이때 처분 용기 당 수용되는 방사성폐기물의 종류는 가압경수로(Pressurized Water Reactor)에서 발생한 사용후핵연료 다발(Assembly)들, 비등형경수로(Boil Water Reactor)에서 발생한 사용후핵연료 다발들, 다섯 개의 고준위 방사성폐기물 용기와 하나의 에너지성 소유의 사용후핵연료 다발이 함께 하는 형태 등으로 분류된다. 처분 터널은 TBM 공법으로 굴착된 후 벽면은 샷크리트와 철제 빔 등에 의해 보강되며 하단은 처분 터널 안에서 기차 운영을 위해 크레인 레일(Crane Rail)이 설치된다. 처분 용기는 Fig. 6과 같이 처분 터널에 수평으로 거치되는데 상부에는 지하수가 침투하여 용기에 접촉하는 것을 최소화하기 위해 덩개(Drip Shield)로 보호한다.<sup>9)</sup>

유카산 처분장은 산 정상으로부터 약 300 m 지하에, 대수대는 약 700 m에 위치하는 전형적인 불포화대에 위치한다. 처분장으로부터 유출된 방사성 물질들은 유

카산에 발달해 있는 균열망(Fracture Network)를 따라 불포화 혹은 포화 상태의 암반을 이동하게 된다. 특히 우리 나라나 스웨덴과 같은 포화 암반대에서는 중요하지 않는 C-14과 같이 사용후핵연료에 포함된 기체 방사성폐기물의 유출이 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 기체 및 액체 상태의 방사성 핵종 이동 현상을 이해하기 위해서 총 450여개의 시추공을 설치하여 75,000 피트의 코어를 회수 분석하였으며, 18,000점의 지질 샘플을 채취 분석하였다. 또한 부식 과정을 이해하기 위해 총 13,000여점의 공학적 방벽 샘플에 대한 부식 실험이 수행되었다. 시추공에서 코어들은 평균 길이 3 m, 직경 6 cm의 크기로 전량 회수되어 섭씨 4℃의 항온 시설이 갖추어진 약 51,000 m의 코어를 보관할 수 있는 보관소에 저장된 후 샘플들은 전문가들에 분석된다.<sup>20)</sup>

처분장 폐쇄 후 유카산과 관련된 방사선적 안전성 평가에서 주요 인자는 열 문제이다. 우리 나라와는 달리 유카산은 사막에 위치하고 있어 연 평균 강우량이 약 7 인치로 매우 적은 전형적인 불포화 지역이며 현재 가장 가까운 거주지로부터 12 마일 이상 떨어진 격리된 지역에 위치하고 있다. 처분장에 사용후핵연료를 거치하면 사용후핵연료에서 발생하는 방사성 붕괴열로 인해 처분 터널 주변의 온도가 약 200℃까지 상승하게 되어 암반 내 존재하던 수분이 빠른 속도로 기화(Evaporization)하게 된다. 그러나 방사성 붕괴열이 시간에 따라 감소하게 되면 외부로 이동한 수분들이 다시 응축(Condensation)되어 처분장 주변으로 회귀한다. 이와 같은 수분의 회귀는 처분 용기의 부식을 촉진한다. 또한 방사성 붕괴열로 인해 주변 암반에서의 응력이 증가해 소성 변화가 발생하여 구조적 안정성을 저감할 수 있다.

따라서 처분장의 안전성을 확보하기 위해서 처분 용기 당 열 부하(thermal loading)를 저감시키는 것이 중

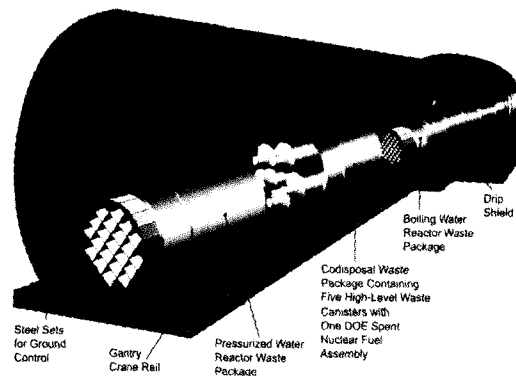


Fig. 6. 유카산 처분 용기 주변의 공학적 방벽.

요하다. 최고 온도를 비등점 이하인 섭씨 96℃ 이하로 낮추기 위해서는 보다 오랜 기간 동안 사용후핵연료를 중간 저장시키거나, 처분 동굴 내 환기를 통하여 처분 용기 주변의 온도를 낮추거나, 처분 터널의 간격을 조정하는 방법 등이 고려되고 있다.

현재 이와 같은 처분 용기 주변의 방사성 붕괴열을 고려한 안전성 실증을 위해 Fig. 7에 나타난 바와 같이 유카산 내 ESF의 Alcove 5에서는 히터 시험이 수행 중인데 수년간의 히터 가동 상태에서 모의 처분 용기 주변 암반 내 열응력, 온도 및 수분 함량 변화를 관측하였고, 2002년 1월 하순부터는 히터를 가동 중단시킨 상태에서 4년 동안 히터 가동 후(처분장 조건으로 보면 상당 기간 방사성 붕괴가 진행된 후) 처분장 주변의 열응력 및 수분 변화 등을 관측해서 방사성 붕괴열이 실제 처분장 구조적 안정성 및 방사선적 안전성에 영향을 미치지 않는다는 것을 실증할 예정이다.

유카산 처분장과 관련하여 미국 NRC는 총 9건의 핵심 기술 현안을 정리해서 2000년에 처분 사업자인 에너지성과 협의를 수행하였으며 이외에도 2000년 5월 네바다 주 Las Vegas와 Pahrump 두 곳에서 인허가 절차와 관련된 두 차례 지역 주민과의 만남을 수행하였다. Table 2는 미 NRC가 도출한 유카산 처분장과 관련된 9가지 기술적 현황과 현재 해결 상황을 요약 정리한 것이다.

## 5. 향후 전망

2001년 회계 연도 이후 수행될 주요 현안<sup>10)</sup>들은 아래와 같다.

(1) 환경영향평가서(Environmental Impact Statement) 최종 발간 : 2001 회계연도 중 1999 회계 연도 기간 중 발간된 환경영향평가서에 대한 각종 평가들을 고려한 최종 환경영향평가보고서가 금명간 발간될 예정이다.

(2) 부지 추천 : 2001 회계연도 중 미국 에너지성 산하 사용 OCRWM은 유카산 부지 선정에 위한 일련의 공청회와 함께 "Yucca Mountain Site Recommendation Consideration" 보고서를 발간하여 부지 추천에 대한 기술적 검토를 수록하였다. 이를 근거로 2002년 2월 14일 미 에너지성은 연방 대통령에게 유카산을 처분장으로 추천하였으며 이를 검토한 대통령은 의회에 유카산을 최종 부지로 선정해 달라는 추천을 2002년 2월 15일 하였다.

(3) 인허가 신청 : 2002 회계연도 중 의회가 승인할 경우 에너지성은 2002 회계연도 중에 미국 NRC에 건설 인허가를 신청할 예정이다.

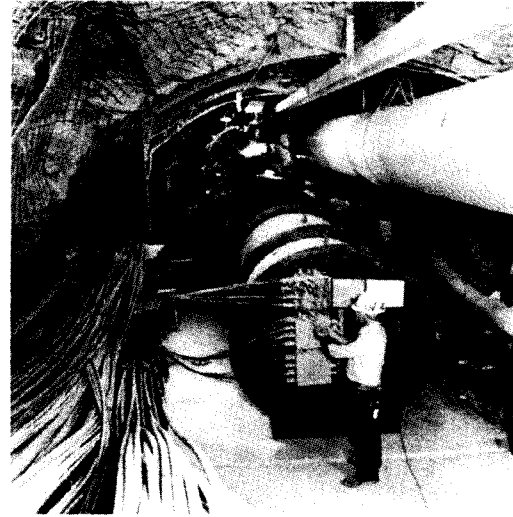


Fig. 7. ESF Alcove 5에서의 히터 시험.

(4) NRC의 건설 인허가 취득: 가장 이상적인 경우 2005년경 미국 NRC는 건설 인허가를 교부할 수 있다.

(5) 대규모 방사성폐기물 수송 준비 : 2002 회계연도 중 에너지성은 민간 기관들을 폐기물 수송 등에 참여시키기 위한 준비 작업을 위해 PWPA법 137조 규정에 의거하여 사전 조사를 위한 RFP(Request for Proposal)를 발주할 예정이며 2005년부터는 본격적 수송에 필요한 장비 조달에 착수할 예정이다.

(6) 폐기물 인수를 위한 인허가 신청 : 2008 회계연도 이후 에너지성은 2008년까지 수집된 최신 정보들을 근거로 인허가 신청서를 수정하여 사용후핵연료를 유카산에 인수하는데 필요한 인허가를 NRC에 신청할 예정이다.

(7) 폐기물 인수 개시 및 처분 시작 : 예정대로 2005년 처분장 건설이 시작되면 2010년에는 처분장 운영이 개시되어 2116년까지 운영될 예정이다.

Fig. 8은 이와 같은 유카산 프로젝트의 향후 주요 일정을 요약한 것이다.

미국 정부는 사용후핵연료의 영구 처분을 위해 원자력 전력 발전으로부터 1 Kh 당 1 Mil의 비용을 징수하고 있다. 에너지성의 조사에 의하면 이러한 징수액은 국방성 폐기물 관리 기금과 함께 향후 처분 사업 수행에 충분한 자금을 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 사업비 조달 내역을 보면 2001년 동안 폐기물 기금(Nuclear Waste Fund)에서 190.7백만 달러, 국방성 폐기물 처분 예산에서 400.4백만 달러가 투입되었고, 2002년에는 폐기물 기금에서 135백만 달러, 국방성 폐기물 처분 예산

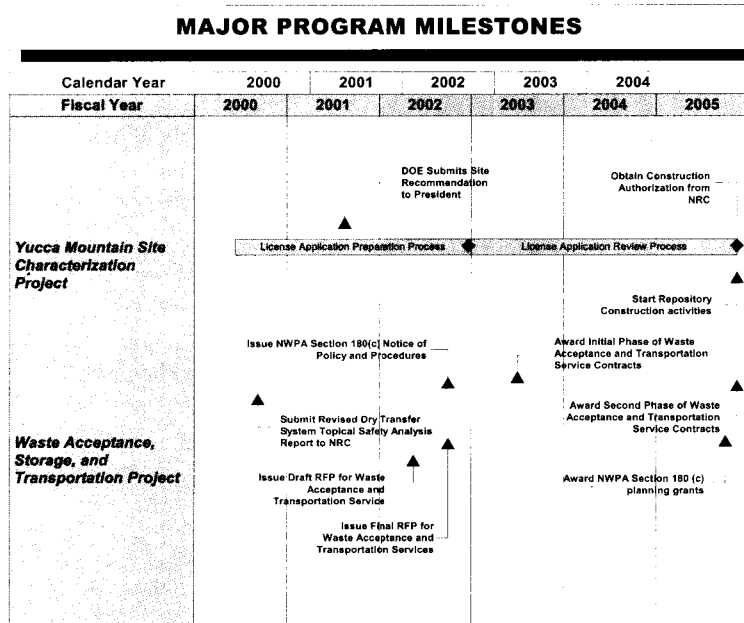
**Table 2.** 미국 NRC가 제기한 아홉 가지 핵심 기술 현안.

| 기술 현안                     | 내 용                                 | 현 황                            |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 화산 활동                     | 화산 활동 가능성과 영향                       | 미국 NRC와 에너지성 두 기관 사이 기술적 현안 해소 |
| 지층 변화 및 지진                | 지진 및 단층 활동 평가                       | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 처분장 주변 지역에서의 지하화 환경 변화    | 장기간에 걸친 처분 용기 관련 환경 변화              | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 용기 수명 및 선원향               | 용기 수명 예측 및 손상된 용기로부터 유출될 방사능량 평가    | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 유동에 관한 방사성 붕괴열 영향         | 처분장 주변 수분의 이동에 대한 방사성 붕괴열의 영향 이해    | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 처분장 설계 및 열-역학적 영향         | 방사성 붕괴열이 처분장 설계의 역학적 인자들에 미치는 영향 분석 | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 붕괴열 영향이 없을 때 불포화/포화 상태 유동 | 처분장 주변 지하수 유동 특성 평가                 | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 핵종 이동                     | 유카산의 핵종 이동에 영향을 미치는 주요 지하학적 인자 도출   | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |
| 종합 성능 평가                  | 종합 성능 평가 능력 함양                      | 두 기관 사이 기술적 현안 해소              |

에서 310백만 달러가 각각 투입될 예정이다.<sup>21,22)</sup> 유카산의 처분 부지 특성 조사를 위해 이미 지난 20년간 40억 달러 이상의 연구비가 투입되었다. 인허가를 취득하기 위해서는 향후 2005년까지 매년 약 10억 달러 가량이 소요될 것으로 예상된다. Table 3은 2001년 5월 4일 발간된 자료를 근간으로 2005년까지 지출될 유카산 사

업비 지출 항목들을 요약한 것이며 Table 4에서 6은 이를 상세 분석한 것이다.

처분 부지 인허가를 위하여 Table 7에 요약된 바와 같이 미 에너지성은 2000년에 아래와 같은 중기 목표를 설정하였다.<sup>9)</sup> 우선 세 가지 전략적 목표로서 (1) 2010년까지 시설 준공을 위한 부지 평가 및 준공, (2) 프로그램



**Fig. 8.** 유카산 프로젝트의 향후 주요 마일스톤.



의 원활한 진행을 위한 이해 당사자들과의 건설적인 협력 체계 구축 그리고 (3) 프로그램 효율성 증진을 위한 인간 자원 관리 및 최적 프로그램 관리 체계 구축을 제시하였고 각 전략적 목표 달성을 위한 주요 목표 및 실행 세부 전략 계획을 수립 실행하고 있다.

**6. 결 론**

1950년대 말부터 추진된 미국의 고준위 방사성폐기물 연구 처분 정책은 최근 부시 행정부의 적극적인 추진으로 부지 선정을 위한 최종 단계로 들어서고 있다. 물론 유카산 프로젝트에 반대하는 네바다 주 정부의 제소

및 이를 둘러싼 공청회와 법률적인 공방으로 현재의 프로젝트가 어느 정도 순연될 것으로 예상되지만 고준위 방사성폐기물을 처분하기 위한 큰 틀은 최근의 일련의 노력으로 설정되었다고 할 수 있다. 유카산 프로젝트는 지하 암반에 대한 연구로는 스웨덴 HRL(Hard Rock Laboratory), 캐나다의 URL(Underground Research laboratory) 등과 함께 최대 규모를 자랑하며 특히 불포화 암반 대에서의 지질 특성을 이해하는데 많은 공헌을 해 왔다. 향후 본격적인 건설 단계까지 추가적인 부지 조사 등을 통하여 유카산 균열대를 통한 핵종 이동에 따른 환경 영향 평가가 정량적으로 규명되어 순조롭게 미국 NRC의 인허가를 취득할 것으로 예상된다.

**Table 3.** 에너지성의 연간 처분 연구 사업 비용 실적 및 전망치. [단위: 천 달러]

| 항목                       | 1999(실적) | 2000(실적) | 2001(제안/실제)                | 2002(추정)                       | 2003(추정) | 2004(추정) | 2005(추정)  |
|--------------------------|----------|----------|----------------------------|--------------------------------|----------|----------|-----------|
| 부지 평가                    | 281,879  | 281,175  | 358,306<br>(323,500)       | 357,917<br>(355,500)           | 577,115  | 627,515  | 1,030,415 |
| 폐기물 인수, 저장, 수송           | 1,850    | 1,795    | 3,800<br>(2,600)           | 6,118<br>(5,900)               | 222,050  | 234,550  | 184,550   |
| 핵변환 연구                   | 4,000    | 0        | 0                          | 0                              | 0        | 0        | 0         |
| 처분 프로그램 관리               | 69,736   | 68,205   | 75,394<br>(74,900)         | 73,465<br>(836,000)            | 71,835   | 72,935   | 74,035    |
| 연간 에너지성 산하 OCRWM 이 지출 비용 | 357,465  | 351,175  | 437,500<br>(최종적으로 400,400) | 437,500<br>(최근 445,000로 수정 제안) | 871,000  | 935,000  | 1,289,000 |

**Table 4.** 유카산 부지 평가에 필요한 연간 연구 사업 비용 실적 및 전망치. [단위: 천 달러]

| 항목          | 1999(실적) | 2000(실적) | 2001(예산) | 2002(추정) | 2003(추정) | 2004(추정) | 2005(추정)  |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 운영/건설       | 34,203   | 30,000   | 32,967   | 29,658   | 172,500  | 227,721  | 추후확정      |
| 주요 연구       | 74,832   | 70,624   | 69,432   | 44,634   | 32,000   | 26,000   | 추후확정      |
| 설계 엔지니어링    | 77,859   | 66,275   | 111,234  | 140,914  | 89,024   | 91,000   | 추후확정      |
| 인허가         | 53,130   | 61,407   | 84,985   | 85,232   | 26,691   | 24,300   | 추후확정      |
| 환경정책법 관련    | 1,962    | 1,320    | 1,600    | 0        | 0        | 0        | 추후확정      |
| 프로젝트 관리     | 28,234   | 35,177   | 36,253   | 34,404   | 32,000   | 32,194   | 추후확정      |
| 외부 평가, 세금 등 | 11,659   | 16,372   | 21,835   | 23,075   | 24,900   | 26,300   | 추후확정      |
| 네바다 주 철도 사용 | 0        | 0        | 0        | 0        | 200,000  | 200,000  | 추후확정      |
| 연간 총 지출 비용  | 281,879  | 281,175  | 358,306  | 357,917  | 577,115  | 627,515  | 1,030,415 |

**Table 5.** 유카산 프로젝트 폐기물 연간 인수, 저장, 수송 비용 실적 및 전망치. [단위: 천 달러]

| 항목        | 1999(실적) | 2000(실적) | 2001(예산) | 2002(추정) | 2003(추정) | 2004(추정) | 2005(추정) |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 사용후핵연료 저장 | 320      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 추후확정     |
| 수송        | 0        | 0        | 1,750    | 4,376    | 219,311  | 230,258  | 추후확정     |
| 인수        | 916      | 1,268    | 1,523    | 1,302    | 1,399    | 2,192    | 추후확정     |
| 프로그램 관리   | 614      | 527      | 527      | 440      | 1,340    | 2,100    | 추후확정     |
| 비용        | 1,850    | 1,795    | 3,800    | 6,118    | 222,050  | 234,550  | 184,550  |

Table 6. 유카산 프로젝트 관리를 위한 연간 비용 실적 및 전망치.

[단위: 천 달러]

| 항목              | 1999(실적) | 2000(실적) | 2001(예산) | 2002(추정) | 2003(추정) | 2004(추정) | 2005(추정) |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 프로그램 총괄         | 3,143    | 2,266    | 2,600    | 3,265    | 3,265    | 3,265    | 추후확정     |
| 인허가 관련          | 763      | 593      | 862      | 730      | 730      | 730      | 추후확정     |
| 프로젝트 계획         | 1,127    | 712      | 1,179    | 1,208    | 1,208    | 1,208    | 추후확정     |
| 국제 폐기물 관리       | 313      | 627      | 627      | 627      | 309      | 309      | 추후확정     |
| 프로그램 관리         | 663      | 563      | 653      | 558      | 878      | 878      | 추후확정     |
| 품질 보증 등 각종 행정비용 | 58,486   | 59,584   | 63,628   | 61,384   | 59,884   | 60,984   | 추후확정     |
| 인력 개발           | 89       | 20       | 25       | 30       | 30       | 30       | 추후확정     |
| 감사, 보고서 발간 등    | 1,149    | 1,190    | 1,247    | 1,217    | 1,217    | 1,217    | 추후확정     |
| 정보 관리           | 4,003    | 2,650    | 4,573    | 4,446    | 4,314    | 4,314    | 추후확정     |
| 연간 총 지출 비용      | 69,736   | 68,205   | 75,394   | 73,465   | 71,835   | 72,935   | 74,035   |

Table 7. 미 에너지성의 향후 유카산 프로젝트 접근 방법론.

| 전략적 목표                      | 주요 목표                                    | 세부 전략                                     | 회계년도                 |
|-----------------------------|--|---|----------------------|
| 부지 평가 및 준공                  | 부지 권고안 준비 제출                             | 부지 권고안 및 인허가를 위한 기준 설계안 도출                | 2000                 |
|                             |  | 부지 권고안 및 인허가를 위한 기준 천연 방벽 시스템 모델 설정       | 2000                 |
|                             |  | YMSRC 보고서 완료                              | 2001                 |
|                             |  | 공청회                                       | 2001                 |
|                             |  | 환경영향평가서 최종본 발간                            | 2001                 |
|                             | 국방 및 연구 폐기물 처분 계획 수립                     | 에너지성 장관의 대통령에게의 권고                        | 2001                 |
|                             |  | 국방성 소유 폐기물에 대한 안전성 평가                     | 2002                 |
|                             |  | 해군 소유 폐기물에 대한 안전성 평가                      | 2002                 |
|                             |  | 잉여 플루토늄 폐기물에 대한 안전성 평가                    | 2002                 |
|                             |  | 인허가 설계를 위한 추가 평가 실험 완료                    | 2002                 |
| 수송                          | NRC에 건설 인허가 신청                           | 인허가 설계안 완성                                | 2002                 |
|                             |  | 건설 인허가 신청                                 | 2002                 |
|                             | 처분장 운영                                   | 인허가 신청 청문회                                | 2003-2005            |
|                             |  | NRC에 건설 저장 관련 수정 안전성 보고서(TSAR) 제출         | 2000                 |
|                             |  | 수정된 NWPA 180(C)조 초안 발표                    | 2002                 |
|                             |  | 부지 선정후 폐기물 인수 및 수송 서비스 관련 최종 RFP 발주       | 2002                 |
|                             |  | 수정된 NWPA 180(C)조 확정 공고                    | 2002                 |
|                             |  | 최초의 인수, 수송 관련 용역 발주                       | 2003                 |
|                             |  | NWPA 180(C)조에 의거 수송 서비스 관련 자금 집행          | 2005                 |
|                             |  | 폐기물 인수를 위한 인허가 신청                         | 2008                 |
| 처분장 운영 개시                   | 2010                                     |   |                      |
| 이해 당사자들과의 건설적인 협력 체계 구축     | 폐기물 발생자들과 이해 당사자들과의 유대 관계 구축             | 최소한 분기별 1회씩의 관련자 회의 소집                    |                      |
|                             |  | 이해 당사자들에게 정책과 프로젝트 집행안 고지                 |                      |
|                             |  | OCRWM 웹 사이트를 이용한 적기 정보 제공                 |                      |
| 전략적 목표                      | 주요 목표                                    | 세부 전략                                     |                      |
|                             |  | 결과 관리를 위해 비즈니스 관리 모델 적용                   | 2001년 이후 결과 평가 방안 도입 |
| 인간 자원 관리 및 최적 프로그램 관리 체계 구축 | 품질 보증 적용 재무 및 관리 프로그램 강화 및 인력 개발 프로그램 수행 | 매년 용역자들로부터 집행 잔여액 회수                      |                      |
|                             |  | 일정과 예산 관련 계획 대 집행비가 최소 95%가 되도록 노력        |                      |
|                             |  | 최소한 OCRWM의 관리 추적 프로그램을 이용 분기별 실적 평가 수행    |                      |
|                             |  | 프로그램 관리 효율화를 위해 표본 프로젝트 등에 관해 매년 결과 평가 실시 |                      |
|                             |  | 주요 시간 대에 최소한 98% 이상의 지역적 광역적 웹 서비스 가능     |                      |
|                             |  | 인재 양성을 위한 프로그램 수행                         |                      |

미국의 유카산 프로젝트의 성공은 침체되어 있는 세계 원자력계에 활력을 불어넣어 신규 원전 건설 및 새로운 세대의 원자로 연구에도 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 추진되었습니다.

### 참고문헌

1. U.S. Office of the Press Secretary, 2002, Yucca Mountain Statement, February, 15.
2. U.S. N.R.C., 1983, Title 10 Code of Federal Regulations Part 961 (10 CFR 961), Standard Contract for Disposal of Spent Nuclear Fuel and/or High-Level Radioactive Waste.
3. U.S. Department of Energy, 1980, Final Environmental Impact Statement for the Management of Commercially Generated Radioactive Waste.
4. Waste Isolation System Panel, U.S. National Research Council, 1983, A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste, National Academy Press.
5. U.S. Federal Congress, 1982, Nuclear Waste Policy Act.
6. U.S. N.R.C., Title 10 Code of Federal Regulations Part 60 (10 CFR 60), Disposal of High-Level radioactive Wastes in Geologic Repositories, 25 February 1981.
7. U.S. N.R.C., Title 10 Code of Federal Regulations Part 63 (10 CFR 63), Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geological Repository at Yucca Mountain, Nevada, February 1999.
8. U.S. Federal Congress, Amended Nuclear Waste Policy Act, December 1987.
9. U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, Yucca Mountain Project, a Briefing, October 2001.
10. U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, Yucca Mountain Project Program Revision 3, DOE/RW-0520, February 2000.
11. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes, 40 CFR Part 191, 1985.
12. U.S. Environmental Protection Agency, Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, NEVADA, Draft, 40 CFR Part 197, 1999.
13. Yucca Mountain Site Characterization Project, Office of Civilian Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, The Exploratory Studies Facility, June 2000.
14. Yucca Mountain Site Characterization Project, Office of Civilian Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, Vols. 1-5, December 1998.
15. P.W. Eslinger et al., Preliminary Total-System Analysis of a Potential High-Level Nuclear Waste Repository at Yucca Mountain, PNL-8444, UC-814, January 1993.
16. R. Rechar et al., Performance Assessment of the Direct Disposal in Unsaturated Tuff of Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste Owned by U.S. Department of Energy, Volume 1 : Executive Summary, SAND94-2563/1, UC-900, March 1995.
17. U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, The OCRWM Enterprise, July 2001.
18. U.S. Secretary of Department of Energy, Letter to Mr. President, February 14, 2002.
19. U.S. President, Presidential Letter to Congress, February 15, 2002.
20. Yucca Mountain Site Characterization Project, Office of Civilian Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, How the Sample Management Facility Works, September 2000.
21. U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, Analysis of the Total System Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program, May 2001.
22. U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, Nuclear Waste Fund Fee Adequacy: An Assessment, May 2001.

**황 용 수**

1983년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사  
 1985년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사  
 1992년 캘리포니아 대학교 대학원 원자핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-2034  
 E-mail: yshwang@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구소 책임연구원

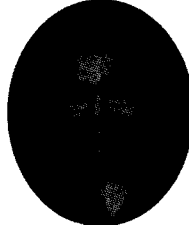
**황 주 호**

1982년 서울대학교 원자핵공학과 핵공학 학사  
 1984년 Georgia Institute of Technology School of Nuclear Engineering 보건의물리학 석사  
 1986년 Georgia Institute of Technology School of Nuclear Engineering 핵공학 박사  
 Tel: 031-201-2573  
 E-mail: realsh@hanmail.net  
 현재 경희대학교 원자력공학과 정교수

**김 상 국**

1979년 서울대학교 경제학과 학사  
 1984년 위스콘신대 경영정보학 석사  
 1989년 위스콘신대 경영정보학 박사

Tel: 031-201-2555  
 E-mail: Sangkkim@nms.kyunghee.ac.kr  
 현재 경희대학교 산업공학과 정교수

**박 진 백**

2001년 한국과학기술원(KAIST) 원자력공학과 박사

Tel: 042-870-0363  
 E-mail: jinbeakpark@hanmail.net  
 현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 위촉연구원

**강 철 형**

1977년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 공학사  
 1983년 워싱턴 대학교 대학원 원자핵공학과 공학석사  
 1989년 캘리포니아대학교 대학원 원자핵 공학과 공학박사

Tel: 042-868-8914  
 E-mail: chkang@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구소 책임연구원