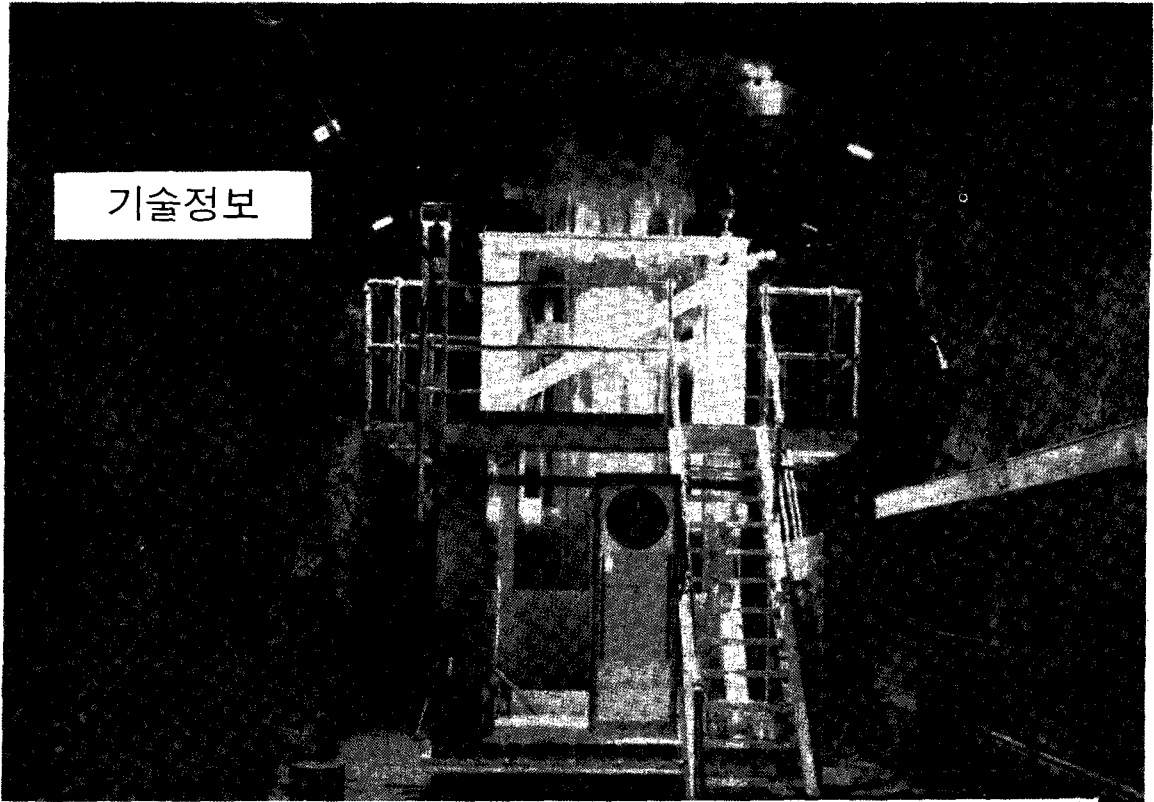


기술정보



## 放射性廢棄物의 處理·處分に 關하여

### 海外의 放射性廢棄物 處理·處分 動向

인류의 모든 활동, 특히 鑛, 工業의 분야에서 는 그 규모에 비례하는 量의 廢기물이 발생하 나 原子力分野의 경우는 일반적으로 그 대부분 이 放射性이라는 점이 문제가 되고 있다. 放射性 이라는 것은 그 영향을 無視하여도 좋을 정도의 量이더라도 되도록이면 피하고 싶다는 高度의 感情的인 要素를 포함하고 있기 때문에 다른 분 야의 廢기물과는 달리 公衆에 대한 受容성이 매 우 어렵다고 인식되어 있다.

原子力發電 및 核燃料사이클 各工程에서 發生 되는 방사성廢기물의 대체적인 흐름을 그림 1에 나타내었으며 이들 방사성廢기물을 그 含有放射 能의 특성에 따라 구분하고 그 특성에 알맞는 處分方式과 結合시키면 表 1 과 같다.

處分에는 dispersal(放出分散)과 containment (密封) 두가지 方式이 있는데 대부분의 기체 및 액체 방사성廢기물에 대해서는 前者가 적용되고 있다. 현재의 전망으로는 2000년경까지는 原子

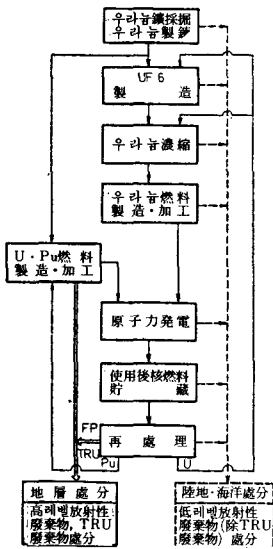


그림 1 核燃料사이클工程과  
各工程廢棄物흐름의 概要

力關係施設에서 나오는 방사성기체의 稀釋放出에 의한 큰 영향이 고려되지 않으나 그 후의 상황에 따라서는 지금과 같은 處分方式을 계속하는 것이 바람직스럽지 않은 것으로 생각되고 있다. 예를들면 크립톤 등 불활성가스를 분리·회수한다든가, 再處理工程에서는 트리튬을 되도록系内に 밀폐시켜서 大量的의 프로세스廢液中에 확산되지 않도록 하여 되풀이 使用하며 또 剩餘水로부터는 트리튬의 분리·농축을 하는 등의 技術이 장기적인 안목으로 研究, 開發되고 있다.

(1) 極低레벨放射性廢棄物과 그 處分

汚染管理區域에서 나오는 放射性 固体廢棄物(固化체를 포함)中에는 전혀 오염이 안된 것이나 극히 미량의 放射能만을 포함하고 있는 것도 있으므로 英國, 프랑스, 서독 등에서는 방사성 폐기물의 法的인 定義를 하여 그 制限值 以下の 것은 非放射性廢棄物로 處理할 수 있도록 되어 있으며 스웨덴, 스위스, 동독 등에서는 제한치에 의해 비방사성으로 구분된 폐기물의 合理的인 處分이 이미 實施되고 있다.

表 1 放射性廢棄物의 區分과 處分方式

		放 射 性 廢 棄 物					
放射能 레벨		極低	低	中	低	中	高
含有核種半減期			短	短	長	長	長
特 徵		天然物程度· 또는 極微量汚染	$\beta/\gamma$ 熱發生 量· 毒性小	$\beta/\gamma$ 熱發生 量· 毒性中	$\alpha, \beta/\gamma$ 熱發生 量· 毒性小	$\alpha, \beta/\gamma$ 熱發生 量· 毒性中	$\alpha, \beta/\gamma$ 熱發生 量· 毒性大
非放射性廢棄物과 同等한 處分		○	×	×	×	×	×
海洋 處分		○	○	△	×	×	×
陸地 處分		○	○	○	×	×	×
腐抗 또는 地下空洞 處分		濕	○	○	○	×	×
		乾	○	○	○	△	△
地層 處分		○	○	○	○	○	○

○ 適切한 處理(安定化, 固化, package)를 하고, 適切한 處分施設에서의 處分이 可能  
△ 處理, 處分의 方法이나, 環境의 狀況에 따라서는 處分可能  
× 處分不適

美國에서는 아직 法律로 정해져 있지 않으나 이와같은 폐기물을 de minimus level이라고 하여 현재 검토중에 있으며 日本에서도 核種에 알맞는 적절한 제한레벨을 제정하여 合理的 處分을 할 수 있도록 현재 그 방향의 조사가 진행중이다. 이 경우에는 단순히 處分만을 생각하는 것이 아니고 한정된 조건하에서의 再利用도 포함해서 검토가 행하여 져야한다.

(2) 低레벨放射性廢棄物의 處分

低레벨固体廢棄物의 海洋處分은 英國, 벨기에, 네덜란드, 스위스가 大西洋에 실시하였으며 1967년에는 서독, 프랑스가 試驗投棄를 실시하였고 1969년에는 이탈리아, 스웨덴도 投棄에 참가하였으나 現在는 앞의 4個國만이 실시하고 있다.

美國에서는 1946년부터 1970년까지동안의 投棄廢棄物에 대한 충분한 기록이 없어 場所도 대체적인 것만을 알 수 있을 정도로 상당히 무질서하게 海洋處分이 실시된 때가 있었으나 현재는 중지하고 있으며, 과거에 投棄한 固化體의 일부를 회수하여 부식이나 物理的 健全성을 조사

하고 있다.

그 일례로 콘크리트가健全성을 잃기까지는 약 100년을 요한다는 평가도 나왔다. 지금 美國에서는 海洋處分の再開를 고려하고 있는것 같으며 日本에서는 國內外的 合意를 얻지 못해서 아직 試驗投棄조차 못하고 있는 실정이고 歐美에서는 海洋투기에 대한 반대와 방해가 적지 않다.

그러나 앞으로 固化, package에 의한 밀폐기술이 개선되어 수백년동안의 밀폐기술이 확립되면 海洋투기에 의한 방사능오염은 거의 피할 수 있으므로 海洋처분의 安全性은 문제가 없을 것이다. 또한 深海底의 隔離機能과 방대한 海水의 稀積能力은 長壽命核種을 거의 포함하고 있지 않은 低레벨폐기물의 處分方式으로 충분히 고려의 여지가 있다.

陸地處分은 원래 低레벨폐기물중 海洋처분에 적당하지 않은 것을 대상으로 하였으나 현재 海洋투기를 중지하고 있는 美國이나 프랑스 등에서는 低레벨폐기물(高레벨폐기물, 使用後核燃料, TRU폐기물 및 우라늄製鍊廢滓 등을 제외한 폐기물과 NRC가 정한 것)을 전적으로 육지처분하고 있다.

### (3) 高레벨放射性廢棄物의 處分

高레벨放射性廢液은 현재 各國에서 모두 冷却시스템을 설비한 스테인레스鋼製탱크에 저장하고 있으나, 프랑스의 AVM 파이로트플랜트에서 이미 實証테스트가 행해지고 있는 것처럼 가까운 장래에 玻璃固化가 채택, 실시될 것 같다.

獨自의 固化方式을 開發해온 英國도 AVM 방식의 채택을 결정하였고, Synroc方式에 기대를 걸고 있는 美國에서도 현재는 玻璃固化에 주력하고 있다. 固化체는 냉각을 위해 一時 저장되는데 이 기간에 대해서는 아직 확실한 결정이 되어 있지 않으나 적어도 50년정도는 필요한 것으로 생각되고 있으며 200~300년동안의 저장에 의해 主要發熱性核種인 Sr-90이나 Cs-137을 원래 量의 1/1000정도로 감소시킴으로서 處

分時 地層環境에 주는 熱的 영향을 적게 함과 동시에 좁은 立地에 많은 固化體를 收納할 수 있는 利點을 살리자는 견해도 있다.

또 處分場에 收納한 固化體를 埋沒하기까지 美國에서와 같이 50년동안은 다시 꺼낼 수 있는 상태로 감시를 계속하여야 한다는 견해도 있으나 감시기간은 10년정도면 충분하므로 그렇게 장기간은 필요없다고도 하여 아직 확실한 결정은 없다.

그러나 현재로서는 固化體를 카니스터에 넣어 적당한 package를 한 후 深地層에 설치된 處分場에 收納處分한다는 것이 歐美諸國, 日本, 국제기구(OECD/NEA, IAEA, EC)의 거의 일치된 방향이다.

高레벨廢液의 固化處理는 현재 거의 모두 玻璃固化를 指向하고 있으며 處分에 대해서는 美國을 비롯하여 스웨덴 등에서 상당히 연구가 진행되고 있기는 하나 實固化體의 處分實施는 빨라도 15~20년 이상이 소요될 전망이다(美國에서는 최초의 처분장 운전개시를 1998년으로 목표하고 있다), 카니스터, package方法, 緩衝劑, 埋沒充填材 등에 관하여 各國에서 협력하여 여러가지의 研究·開發이 이루어지고 있다.

IAEA와 OECD/NEA에서 정리하고 있는 地層處分の 기준 또는 가이드라인은 대단히 장기간동안 處分場의 安全性, 健全성을 확보하기 위해서 地層이라는 天然barrier와 人工的인 工學 barrier를 結合시켜서 相補的 機能을 갖도록 하는 방식이 취해지고 있다. 이에 의해 근래에 와서는 地層의 종류에 구애받지 않고 기준에 적당한 지층이면 거기에 가장 합당한 工學barrier를 채택함으로써 處分시스템 全體의 安全性을 확보하려는 의도가 보인다.

處分の 安全性에 깊이 관여하는 因子의 하나인 固化體의 發熱에 대해서 처음 6년동안, far field(處分場 建設을 위한 掘削이나 處分固化體로부터의 熱的, 放射線의 등의 영향을 직접받는 地層部分을 near field라 하고 이보다 멀리 떨어져서 간접적 영향이 생길 수 있는 地層部分을 far field라 함)에서는 최고 온도가 100℃ 이상

이 되지 않게 하는 것이 좋다는 것이 대두되고 있다. 이것은 near field에서도 온도가 100~150℃를 넘지 않는 것이 바람직하다는 것을 의미하며 低温으로 유지함으로써 固化体나 package의 侵蝕, 카니스터의 부식 등 核種漏洩의 원인이 되는 化學反應이나 埋没時의 材料 및 near field 地層의 化學的, 熱的 變化를 적게하여 健全性を 확보케 하려는 생각이다.

카니스터, package 등 人工barrier의 수명은 적어도 1000년 이상이 기대되어야 하며 현재의 기술로도 수천년은 충분히 보장된다는 評價도 있으나 實證되어 있지 않다는 것이 약점이다. 이의 해결을 위해 훌륭한 耐蝕材料의 開發이 연구되고 있다. 일반적으로 장기간 동안의 健全性, 腐蝕舉動을 조사하기 위해서는 加速試驗이 행해지는데 온도를 높인다거나 농도를 진하게 하는 것이 健全性의 長期豫測에 대하여 실제로 加速이 되느냐 하는 의문도 제기되고 있어 方法論의 研究도 행해지고 있다.

장기간의 健全性 確保에 대해 아직 남아있는 문제는 微生物의 영향이다. 歐美 여러나라에서 조사가 시작되었으나 아직 데이터가 적으며 어떤 종류의 박테리아 존재는 pH를 높게 하여 카니스터의 부식에 대해 바람직스러운 것으로 생각되고 있다. 그러나 모두 通常의 無機狀態에서

의 試驗으로 열역학적 高찰에 의한 예측과는 다른 효과를 염두에 두어야 하며 단순히 그 個個의 現象 뿐만 아니라 處分시스템으로의 종합적인 평가가 필요하다.

(4) 處分場에서 環境의 長期的 變化

處分場에 處分된 固化体가 地下水에 侵蝕되어 固化体中の 有害核種이 水中에 녹아나오거나 微粒子로 地下水와 함께 移行하는 實狀을 파악하는 것이 안전성 평가에 중요하다.

固化体가 處分場에 오랜세월동안 收納되어 있으면 固化体 自体도 그 속에 포함되어 있는 核種의 發熱과 붕괴에 의해 變化가 생기며 package나 埋没材, near field의 地層 등 주위의 상황도 地下水와 접촉하게 되고 固化体로부터의 熱的, 放射線의 影響을 받아 서서히 變化한다. 이로 인해 地下水의 pH와 Eh가 變化하게 되며 侵蝕의 상황도 달라져서 含有이온의 變化가 생기게 되고 또한 박테리아 등의 影響도 받아 埋没材 및 package材와 地下水와의 反應은 복잡하게 變化하여 反應의 내용은 매우 느린 動的變化를 생기게 한다(그림 2 참조). 이와같이 매우 느린 動的變化를 고려에 넣은 시뮬레이션 開發도 중요하다.

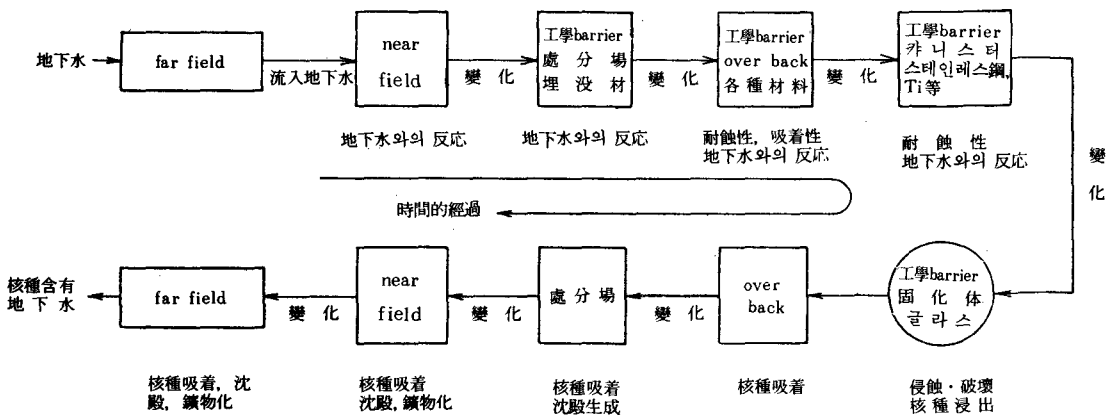


그림 2 地層處分場에서 地下水의 動的變化와 核種의 浸出

(5) 地下實驗室과 原位置試驗

現在 各國에서는 구체적인 조건, 문제의 파악을 위해서 처분후보지층(대체로 지하 600~1000 m 정도의 深部)에서의 岩石力學的, 熱水理的, 地球化學的 등의 정보를 얻고 있으며 또 人工barrier의 有効性, 實際處分場의 분위기에 가까운 상태에서 固化체와 package의 各種舉動 등을 조사, 연구하고 이들 原位置에서 얻은 각종 데이터와 地上實驗室에서의 데이터와의 相異를 파악하여 보다 實際的인 安全評價를 할 수 있도록 地下實驗室(underground research laboratory)을 建設하여 실시중이거나 建設하고 있으며 또 建設을 계획하고 있다(表 2 참조).

表 2 歐美諸國의 地下實驗室

國名	地層·岩體	建設年	狀況	摘要
미국	岩塩, 玄武岩, 花崗岩	岩塩 1984 玄武岩 1980 花崗岩 1980	運轉中	83~85에 坑道延長을豫定 1988 第1處分場運轉豫定
스웨덴	花崗岩	1977	"	Stripa Project
스위스	結晶質岩	1982	"	83부터 實驗을豫定
벨기에	粘土層	1982~83	建設中	3.5φ×25m 地下 220m
프랑스	結晶質岩	1984~85	建設豫定	
서독	岩塩	1978	實驗中	Asse-II, 길이 850m
캐나다	花崗岩	1983	建設豫定	1980부터 準備中, 基礎研究用으로 여기에 處分은 하지 않는다.

이와같은 종류의 實驗室은 앞으로 地層處分の 技術개발을 추진하는데 있어서도 또 PA의 일환으로도 대단히 중요하다.

歐美諸國에서의 低(中)레벨放射性廢棄物 處分狀況의 概要

美國

初期(1940~50年代)에는 얇은 pit에 埋沒하다가 鋼製드럼에 넣어서 海洋投棄하였으나 70년 이후부터는 海洋投棄를 중지하고 있다. 陸地處分도 行하고 있으며 初期에는 사이트상황의 검토가 불충분해서 放射性核種의 漏洩, 汚染이 발

생하였다.

現在는 60個所中 Barnwell S. C., Hanford W. A., Beatty N. V. 3個所가 運轉中이다. TRU廢棄物의 경우 1970년까지는 LLW와 갈게 취급하였으나 문제가 있어 현재는 1個所에 모아서 貯藏하고 있으며 a가 10nCi/g이하 含有量인 폐기물은 TRU폐기물로 간주하지 않는다. <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>H는 0.05μCi/g이하일 경우 非放射性으로 간주한다. LLW의 處分에 대해서는 10CFR Part61에 定해져 있다.

英國

原子力施設地의 地下地層이 LLW의 處分場으로 適當한가를 검토하고 AEA가 試掘하였으며 또 廢坑이나 地下空洞이 處分場으로 適當한가도 조사중이다.

海洋投棄는 30년 이상전부터 실시하고 있다. 1982년에 NIREX(廢棄物管理機構)를 설치하였으며 1990년까지 20~30m 깊이의 trench, 空洞 등에 中레벨廢棄物處分施設을 설치할 예정이다. 현재 LLW의 陸地處分은 Drigg 處分場에서 實施中이다.

放射性廢棄物의 定義를 정하여 여기서 벗어나는 極低레벨廢棄物(즉, 3×10<sup>-11</sup>nCi/g 이하인 U오염물 등)은 非放射性으로 간주하나 현재 貯藏중인 폐기물은 이러한 구분이 되어 있지 않아 再選別이 어려워서 LLW와 함께 處分하고 있다

프랑스

LLW는 200~700년이 지나면 문제가 되지 않을 정도로 放射能이 減衰하므로 이 기간 동안을 安정한 형태로 해서 주로 얇은 地層에 處分하여 survey할 수 있도록 하고 사람의 侵入을 防止한다.

LLW處分の 경우 多重防護의 필요는 없으나 물의 侵入은 충분히 유의한다. Centre de la Manche는 LLW陸地處分場으로 1969년부터 運轉中이다. 2000년에는 30~40ha 상당의 면적이 필

요하게 되므로 현재 제 2 처분시설의 건설을 계획하고 있으나 반대로 인해 아직 착수하지 못하고 있다. TRU는 HLW와 함께 深地層處分할 필요가 있다.

海洋處分은 현재 실시하고 있지 않으나 특수한 것(즉, H-3 含有廢棄物 등)에 한하여 채택될 가능성은 있다. 放射性廢棄物의 정의에 벗어나는 것은 非放射性廢棄物로 취급한다.

카나다

시멘트固化, 아스팔트固化 등을 행하여 陸地處分을 계획하고 있으나 현재는 아직 저장만을 하고 있다.

서독

中·低레벨廢棄物은 1978년까지 ASSE-II에서 처분하였으나 현재는 중지하고 있다.

LLW와 發電所로부터의 大型汚染物은 廢鐵鑛山(Konrad)의 舊坑에 處分할 것을 고려하여 GSF와 KFK에서 研究中이다. 極低레벨廢棄物은 非放射性廢棄物로 處分할 수 있다.

스웨덴

LLW는 얇은 地層에로의 처분을 예정하고 있으며 깊이 수~수십m의 얇은 海底(Forsmark 地区)下的 岩層中에 터널을 설치하여 1988년부터 처분할 계획이다. 시멘트固化体の 長期擧動을 研究中이다.

歐美諸國 및 國際機構에서의 高레벨 放射性廢棄物 處理·處分에 대한 思考 方式과 開發狀況의 概要

美 國

HLW가 주이나 SF의 직접처분도 검토하고 있다. 處分은 安定된 地層中の 처분시설을 가장

우선으로 하고 있으며 현재 岩鹽層, 岩鹽dome, 玄武岩, 凝灰岩, 花崗岩層을 研究의 대상으로 하고 있다. near surface test facility(Hanford)는 1980년에 運開하였으나 80년부터 81년에 걸쳐 試驗을 위하여 다른곳에도 많은 坑을 파보았다. 處分이 고려되고 있지 않는 地層中에서의 시험과 평가시설도 생각하고 있으며 이와같은 field model은 실험실에서의 연구와 컴퓨터 모델의 개발에 의해 유지되고 있다.

카나스터材料는 1000년동안의 健全성을 기대하고 있으며 스테인레스鋼외에 Ti나, 차폐도 고려하여 cast iron 등의 cover를 試驗中이다. waste form은 boronsilicate glass를 중심으로 17種 정도가 검토되고 있으며 장차는 synroc에 기대를 걸고 있다.

處分場에 搬入된 waste는 50년동안은 다시 꺼낼 수 있도록 하는 것이 고려되고 있으나 기간의 단축 가능성도 있다. 1987년 제 1 처분사이트 결정, 1998년 처분개시를 고려하고 있다.

英 國

최근 프랑스의 AVM方式에 의한 글라스固化의 채택을 결정하였는데 80년대 후반에 固化施設을 가동시킬 계획이다.

固化体는 방사능과 붕괴열을 줄이기 위해 50년 이상 地表施設에서의 저장을고려하고 있고 固化体の 蓄積量으로 보아 2040년까지는 處分場의 full가동이 필요 없으며 현재 몇몇 후보부지에서 구멍을 뚫어 시험중이나 海外에서의 성과를 참작하기 위해 그외의 것은 잠시 중지를 결정했다. 北部스코트란드의 花崗岩層에 掘削한 30m의 구멍속에서 地下水와 熱 移動의 field test가 행해지고 있다. 일부에서는 海洋底 및 海洋底下地層에로의 처분이 有利하다는 견해도 있으며 N-EA 등의 project에 상당히 협력하고 있다.

서독

BMFM이 관리와 연구개발의 책임을 맡고 있

으며 처분시설의 설계, 건설, 운전은 국립과학기술연구소(PTB)가 행한다.

前에는 대규모 처리시설과 同一한 立地에서 處分을 생각하였으나 현재는 各各 分離해서 고려하고 있으며 장소로는 北部의 岩塩層을 指向하고 있다.

ASSE坑은 地下實驗室로서의 기능도 가지며 高레벨의 열 영향, 岩體의 비틀림, 가스와 熱의 移動實驗을 行하고 있다. 代替法에서는 SF處分도 고려하고 있으며 80년대 중반에 그 가능성의 有無를 보고할 예정이다.

캐나다

현재는 저장하고 있으며 1983년까지 처분개념을 확립하여 1990년 이후에 處分實証施設을 建設・運轉할 계획이나 2000년까지는 處分을 實施할 필요가 없다. 處分地層으로는 結晶質岩(plutons)을 主對象으로 하며 花崗岩體中에 지하실험실(東部Manitoba)을 1983년중에 설치하나 여기에 處分은 하지 않는다.

프랑스

AVM으로 固化시켜 貯藏을 實証하고 있다. 實用的 AVM시설은 1986년과 1987~88년에 각각 1基씩 完結할 예정이다. ANDRA(國立管理公社)가 붕괴열이 低減될 때까지의 장기貯藏을 地上施設에서 行할 예정이다.

處分地層은 主로 結晶質岩을 對象으로 하며 地下實驗室을 1984~85년에 계획하고 있다.

스웨덴

電力公社가 處分場의 建設・運轉을 포함해서 폐기물안전관리의 책임을 맡고 있다. 1980년에 10~20個所를 조사하였는데 이중에서 2~3個所로 압축하여 2000년전에 사이트를 정하며 파이로트플랜트運轉에 대해서는 2010년에 處分場을 建設하여 2020년에 HLW와 SF의 處分을 시작

할 계획이다.

地層은 結晶質岩을 主로 하는데 片麻岩 등에도 掘削하고 있다. Stripa의 地下實驗計劃은 유명하며 SF의 貯藏(2000t)시설은 1985년에 運開예정이다.

CEC

회원국의 공동연구는 1980년에 시작되었으며 12년동안 계속될 것이다. 프랑스, 벨기에, 서독, 이탈리아, 영국 등에서 사이트연구를 지원하고 있다. 原位置에서의 加熱, 移行試驗 外에 글라스 固化體의 侵出, 核種移行試驗을 하고 있으며 캐나다와 모델개발도 각국의 지원하에 進行되고 있고 또 大陸地層, 海洋底下에로의 처분에 대해서도 각국에서 연구중이다(NEA와 협력).

OECD/NEA

세가지의 큰 project를 실시중이다.

1. 國際 Stripa project : 廢鐵鑛山의 花崗岩體 地下 350m에서 1980~1984년까지 핀란드, 일본, 스웨덴, 스위스, 미국, 캐나다, 프랑스가 참가하여 地質, 水理的試驗 外에 buffer mass test를 실시중이다.

2. ISIRS : 國際協力下에 地層處分關係의 重要 데이터수집과 活用을 行한다. 현재 進行중이다.

3. Seabed Working Group : 海洋底下의 處分에 대해 데이터를 수집하여 평가한다. 1986년까지 예정이다.

IAEA

處分을 위한 가이드와 기준을 정하며 안전 및 기술보고를 정리할 예정이다.

1983년 이후의 계획에는 지층처분장의 설계, 건설, 운전을 위한 기준가이드와 평가코오드를 포함하고 있다. 地層處分 外에 네가지의 option이 고려되고 있다.

1978년에 TRCUD를 설치하였으며 1984년에 地下處分에 관한 현재계획의 제1단계 결론과 review를 行할 예정이다.