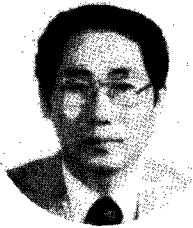


海外의 放射性廢棄物 處理·處分 動向

Current Status of Technologies for the Treatment and Disposal of Radioactive Wastes in Foreign Countries



徐 引 錫

〈韓國에너지研究所 核化工研究部長〉

1. 序 論

우리나라는 1978년 古里1號機의 가동을 계기로 원자력발전시대에 접어든 이래 2000년까지는 총 11기의 원자력발전소가 가동될 예정이다. 그러나 이러한 원자력발전에는 부수적으로 放射性廢棄物의 발생이 수반되며, 원자력발전계획의 적극적인 추진에 따라 그 累積量은 해마다 증가하고 있다.

따라서 이러한 방사성폐기물을 적절하게 處理·處分하여, 방사성폐기물에 의한 放射線障害로부터 일반대중 및 자연환경을 보호하는 것이 원자력발전의 制約을 극복하는 중요과제라 할 수 있으며, 원자력에 대한 國民의 受容意識 (Public Acceptance)을 높이는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

本稿에서는 우리나라와 自然的, 社會的 與件이 유사한 유럽國家 및 日本의 放射性廢棄物 處理·處分技術 開發動向을 살펴봄으로써, 우리나라의 處理·處分方向을 수립하는데 참고하고자 한다.

2. 海外의 處理·處分動向

가. 프랑스^(1~5)

1) 處 理

현재 프랑스에서 原子力發電所廢棄物의 처리

에 사용되고 있는 공정의 개요를 表1에 나타내었다.

프랑스電力廳(EDF)에서는 최근 방사성폐기물의 발생량을 더욱 감소시키고, 最終生成物의 안전성을 높이는 방향으로 處理工程을 개선해 나가고 있다. 예를 들면, 전력청은 液體廢棄物 處理系統의 보다 많은 부분을 이온交換에서 蒸發處理工程으로 대체하려 하고 있으며, 이 새로운 처리방법의 도입으로 방사성폐기물의 최종 발생량은 거의 반으로 감소시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다.

放射性廢棄物의 固化를 위한 시멘트 및 아스팔트의 사용은 일찍부터 CEA研究所에 의하여 개발되어 왔다. 현재 거의 모든 원자력연구소와 원자력발전소에서 시멘트固化處理를 사용하고 있으나, 일부 원자력연구소와 核週期施設에서는 中·低準位廢棄物 및 α 核種含有廢棄物의 고화처리에 아스팔트를 사용하고 있다. CEA는 약 20년간 中·저준위폐기물의 아스팔트고화처리 개발에 관한 연구를 수행하여 왔으며, 이를 바탕으로 SGN社는 商用 아스팔트固化工程을 제안한 바 있다. 그러나 현재 프랑스에서 원자력 발전소에 아스팔트고화공정을 사용하는 例는 重水爐原型爐인 Brittany E1-4가 있을 뿐이다.

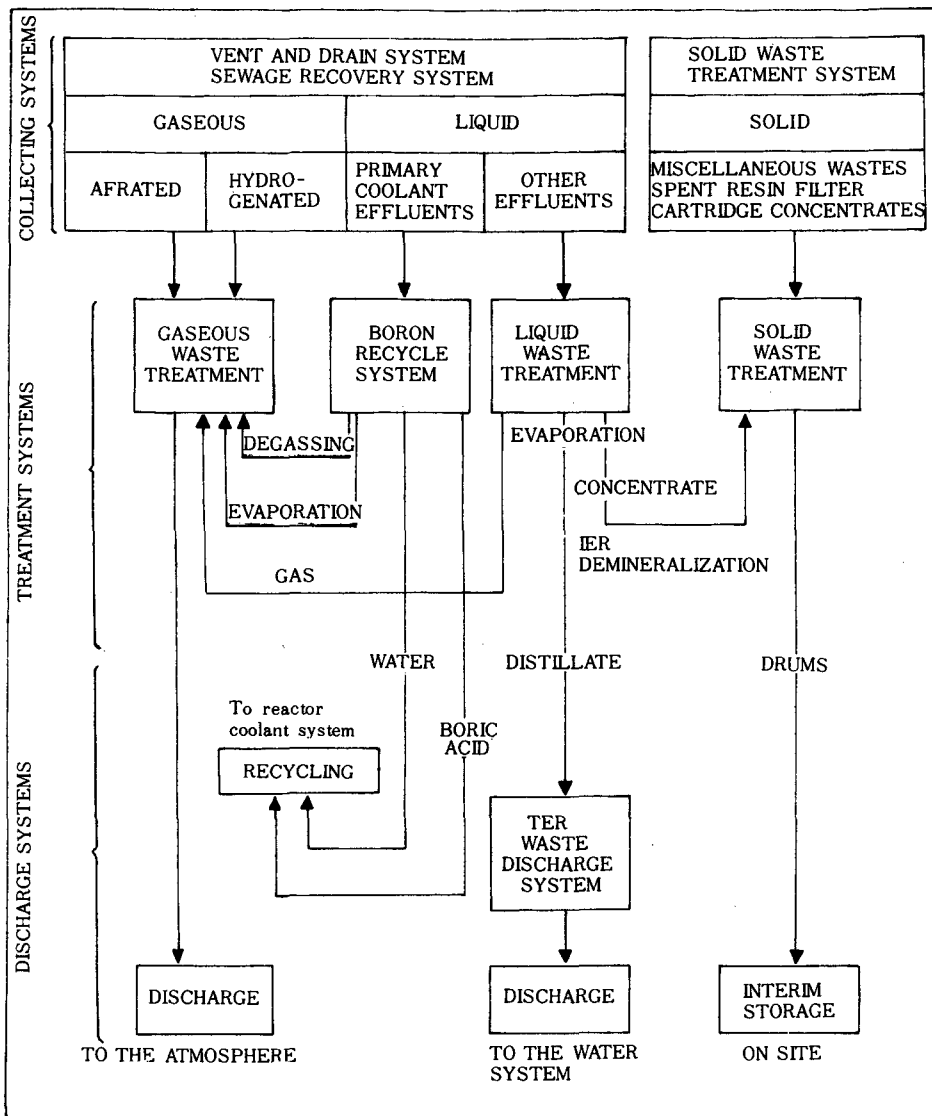
이외에 Chooz PWR 發電所에서는 1981년 부

터 廢이온交換樹脂, 蒸發器濃縮物, 필터카트리지를 처리하는데 열경화성수지(Thermo Setting resin)를 이용하고 있다. 이 새로운 固化法은 Grenoble CEA연구소에서 12년간에 걸쳐 개발한 공정으로서 현재 Technicatome에 의해 商用化되어 있다. 열경화성수지는 다수의 중·저준위폐기물, 즉 원자력연구소의 모든 증발기 농축물, PWR 원자로의 붕소함유 증발기 농축물, BWR 원자로의 황화물함유 증발기농축물,

粒子 혹은 粉末形 이온교환수지, 核施設의 운영 및 해체시 발생되는 固體廢棄物의 처리에 이용될 수 있다. 프랑스電力廳(EDF)은 현재 발전소에서 사용되고 있는 시멘트고화공정을 열경화성수지처리법으로 대체할 것을 검토중에 있다(表2).

可燃性廢棄物의 燒却處理는 研究所와 再處理施設에서 오래전부터 행하여져 왔으며, 저준위 고체폐기물에서 우라늄·플루토늄폐기물에 이르

〈表 1〉 프랑스 PWR의 방사성폐기물처리공정



기까지 다양한 가연성폐기물의 소각시설이 설치되어 있다. 특히, 階段狀火格子燒却爐 및 高溫 필터를 이용한 소각시설은 외국에 수출되어 현재 세계에 6機가 운전중에 있다. 그러나 원자력발전소에서는 소각처리가 실시되지 않고 있다. 한편, 非可燃性固體廢棄物의 처리는 주로 壓縮 및 絶斷處理法이 사용되고 있다.

2) 處分

프랑스에서는 방사성고체폐기물의 처분은 淺層處分과 海洋投棄를 병행하여 왔으며, 1982년 해양투기가 잠정중지된 이래 천층처분만을 실시하고 있다. 프랑스에서는 1969년 La Hague 지역에 La Manché處分場을 건설하여 원자력 관련산업에서 발생된 폐기물을 처분하고 있다. La Manché處分場의 면적은 12ha로서 CEA 소속 연구시설, EDF 산하 원자력발전소, 재처리 공장 등에서 부터 長壽命核種의 함량이 적은 중·저준위고체폐기물을 수집하여 처분하고 있다.

La Manché處分場에서는 방사성폐기물을 1000 (MPC)w값을 기준으로 구분하여 처분하고 있다. 방사성핵종의 함량이 $10^3 \sim 10^7$ (MPC)w이거나, α 核種을 함유한 폐기물은 콘크리트 트랜치내에 처분한다. 콘크리트 트랜치는 地表面에 트랜치를 파고, 바닥과 벽을 콘크리트로 보강한 후, 트랜치 내부를 콘크리트벽으로 분리시켜 다수의 格子를 만든다. 廢棄物包裝物은 크레인에 의해 格子내로 충전되며, 충전이 끝나면 콘크리트를 주입시켜 완전히 monolith를 만들고, 다시 이 monolith끼리 연결시켜 거대한 monolith를 만든다.

表 2) 프랑스의 방사성 폐기물 固化概念

FILTERS	POLYMER RESINS
ION EXCHANGE RESINS	
EVAPORATOR CONCENTRATES	BITUMEN
TECHNOLOGICAL WASTES	CEMENT

반면, 방사성핵종의 함량이 10^3 MPC 이하인 폐기물은 地表面 혹은 앞에서 말한 콘크리트 monolith 위에 4단(약6m)으로 쌓고, 작은 암석으로 사이를 채운 후 그 위를 두께 3m의 粘土層으로 덮어 古墳形態의 構造物속에 처분한다. 이와 같이 地上에 폐기물을 처분하고 흙으로 덮는 처분방식을 tumulus라 한다. tumulus형성시 3~5톤의 대형 콘크리트 방사성폐기물용기를 주위에 쌓아 골격을 형성하고, 폐기물드럼은 그 사이에 넣는다.

이 La Manché 처분장의 처분용량은 400,000 m³로서 현재 22,000m³의 폐기물이 처분되어 있으며, 지금까지의 추세로 보아 1987~1988년에는 처분용량의 포화가 예상되며, 2000년까지는 총 800,000m³의 처분용량이 필요할 것이다. 그러나 현 처분부지의 확장은 무리이므로 새로운 처분부지가 필요하여 부지조사를 행하여 왔으며, 최근 Vienne와 Indre를 새로운 천층처분장 후보지역으로 선정하였다.

나. 獨逸(5~8)

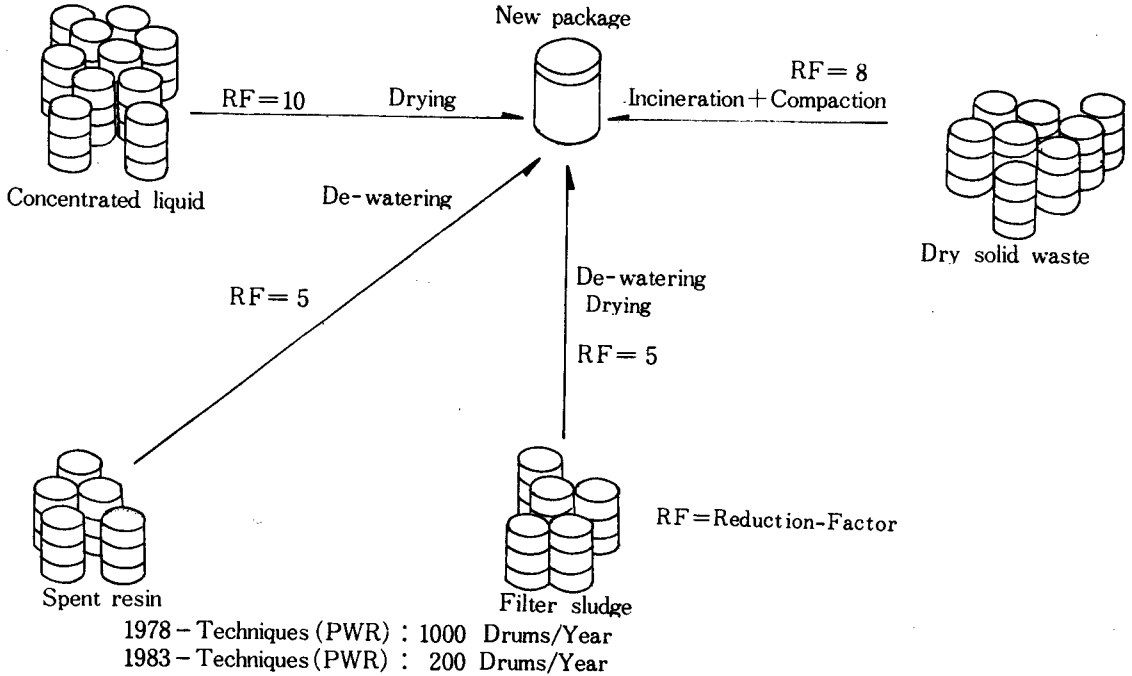
1) 處理

독일에서는 1978년 Asse II 岩鹽鑛내의 폐기물처분이 중지됨에 따라 폐기물처리의 개념이 크게 변화였다.

1978년 이전에는 발전소 폐기물의 처리에 있어 蒸發器濃縮廢液 및 필터슬러지는 이동처리 시설에서 콘크리트로 고화시켜 처리하고, 고체 폐기물은 발전소내에 설치된 壓縮機를 이용하여 약 20톤의 압력으로 압축시켜 처리하였으며, 이때 얻어지는 감용비는 약 2~3이었다. 非壓縮性廢棄物은 200ℓ 드럼내에 움직이지 않도록 포장하며, 이온교환수지는 이동처리시설에서 S-tyrene과 촉매를 혼합하여 폴리머固化處理를 하였다.

BWR의 증발기농축물은 드럼내 건조(in-drum drying) 및 Rasidue Filter Drying방법에 의해 처리하였다. 放射線單位가 높은 폐기물은 방사

〈그림 1〉 독일의 방사성폐기물 減容處理 概念



선방호조건을 만족시키기 위해 400 l 드럼에 再包裝하고, 200 l 드럼과 400 l 드럼 사이는 콘크리트로 충전시켰으며, 방사선준위가 더욱 높은 폐기물은 대형 콘크리트용기로 차폐시켰다.

그러나 Asse II 오염광내에 폐기물처분이 중지됨에 따라 所內廢棄物貯藏容量부족에 직면하게 되어 현재는 보다 큰 減容效果를 얻을 수 있는 처리방법의 개발에 노력하고 있다. 行政的 조치로는 종래의 종이수건의 사용을 高温空氣乾燥器로 대체하고, 재사용이 가능한 내구성 피복 및 재이용, 제염이 가능한 充填材가 도입되었다. 기술적으로는 새로운 기술을 도입하여 폐기물의 감용효과를 증대시켰다. 輕水型發電所 폐기물의 감용에 적용가능한 기술을 그림 1에 개략적으로 나타내었다. 이와 같은 노력의 결과로 전형적인 PWR의 방사성폐기물 연간발생량이 1978년의 1,000드럼에서 1983년 200드럼으로 대폭 감소되었다.

액체폐기물 농축액처리는 탈수, 응축 및 건조

처리에 의해 감용효과를 크게 증대시켰으며, 처리결과 얻어진 폐기물은 기존방법으로 고화시키거나, 새로 개발된 차폐용기내에 그대로 포장한다.

고체폐기물의 처리에는 압축 및 소각의 두가지 방식이 사용되고 있다. 최근에 개발된 移動式壓縮施設은 1,000톤 이상의 압력을 사용하며, 재래식 20톤 압축기에 비해 월등한 減容效果를 얻을 수 있다. 고체폐기물중 可燃性廢棄物은 燒却處理하기도 한다. Kalsruhe 원자력연구소 및 Jürich 원자력연구소에서 독자적으로 폐기물소각로를 개발하여 왔으며, 각각 1970년대 전반과 후반에 실용화되었다. 그러나 원자력발전소에서는 아직 소각처리법이 사용되지 않고 있으며, 일부 가연성폐기물은 원자력연구소 소각시설로 수송하여 소각처리하고 있다.

2) 處分

독일은 일찍부터 북부지방에 널리 분포되어 있는 오염층내에 방사성폐기물을 처분하여 왔다.

즉, 니더작센州의 Asse II 岩塩廢鑛에 1967년부터 1978년까지 125,000드럼의 저준위폐기물(表面線量 200mR/hr 이하)을 처분하였으며, 1972년부터 1978년까지 1,300드럼의 중준위폐기물(表面線量 1R/hr 이하)을 처분하였다.

이 Asse II 처분장은 지하 200~3,000m 사이에 위치한 암염광으로서 경제적 이유로 폐쇄된 것을 獨逸聯邦技術廳(PTB)이 매입하여 연구용 방사성폐기물처분장으로 개조한 것이다. 그러나 이 Asse II 처분장은 1978년에 인가기간이 만료되어 방사성폐기물의 처분이 중지되었으며, 현재는 앞으로의 高準位廢棄物 琉璃固化體의 岩塩層處분에 대비하여 암염층의 地質學的, 水文學的 研究, Salt-Dome의 構造力學, 安全性 研究 등의 非放射能狀態 연구개발만 수행되고 있다.

이러한 Asse II 처분장 폐쇄에 따라 中·低準位廢棄物處分場의 신규개설이 필요하게 되었으며, 이에 따라 1975년부터 Konrad廢鐵鑛에 저준위 폐기물과 원자로폐기물을 처분하기 위한 타당성 조사가 수행되어 왔으며, 현재 인허가수속중에 있다. 이 처분장은 1988년에 개설될 예정이다. 또한 高準位廢棄物, 使用後核燃料 및 中·低準位廢棄物을 함께 처리할 수 있는 처분장의 후보지로서 Goleben 지역이 선정된 후 1979년부터 이 지역의 암염층에 대한 조사가 진행되고 있다. 이 Goleben 처분장은 1998년에 운영개시를 목표로 하고 있다.

다. 스웨덴(7, 9~11)

1) 處 理

스웨덴에서는 원자력발전소 운전시 발생하는 中·低準位廢棄物의 관리를 위해 다양한 처리기술이 사용되고 있다. 예를 들면, 발전소 1차냉각계통에서 발생하는 이온교환수지, 필터 및 슬러지 등을 固化處理하는데 시멘트고화법과 아스팔트고화법이 병용되고 있다. Oskarshamn 및 Ringhals 원자력발전소에서는 1.2m×1.2m×1.2m의 정육면체 콘크리트용기내에 폐기물과 첨가

제를 넣은 후 시멘트를 첨가하여 혼합, 양생시키는 일종의 In-Drum混合方式의 시멘트고화법을 사용하고 있다. 고화가 끝난 후 容器의 상부를 콘크리트뚜껑으로 밀폐시킨다.

이에 반해 Barsebäck 및 Forsmark 발전소에서는 이온교환수지와 슬러지의 대부분을 아스팔트고화처리하고 있다. Barsebäck 발전소에서는 1975년부터 프랑스 SGN社의 LUWA型 薄膜蒸發器를 사용하고 있으며, 粒子形樹脂를 분쇄시켜 분말로 만든 후 증발기로 고화하여 아스팔트고화처리 하고 있다. 이때 폐기물/아스팔트의 무게비는 약 30/70이다. Forsmark 1호기 및 2호기에서는 폐기물을 회전드럼건조기에서 미리 건조시킨 후 혼합탱크에서 아스팔트와 혼합시켜 固化處理하는 방식을 사용하고 있다.

이외에 발전소에서 발생하는 고체폐기물은 대부분 부피가 크고 放射能準位가 낮은 피복류, 금속조각 및 소형부품 등이다. 고체폐기물은 可燃性廢棄物과 非可燃性廢棄物로 분류하여 플라스틱백에 포장되며, 방사능이 허용한계치 이하이고 금속조각이 함유되지 않은 가연성폐기물은 Studsvik으로 보내어져 이곳에서 過剩空氣燒却爐에 의해 燒却處理된다. 조각에서 나온 재는 100ℓ 드럼에 수집하여, 콘크리트 차폐된 200ℓ 드럼에 포장한다. 燒却灰를 콘크리트로 固化시키는 기술이 현재 개발중에 있다.

소각에 적합하지 않은 비가연성폐기물중 壓縮性廢棄物은 보통 200ℓ 금속드럼에 압축시켜, 포장하며, 금속조각 및 오염된 부품은 처리하지 않고 금속용기내에 포장한다.

2) 處 分

스웨덴에서는 2010년까지 원자력계획에서 발생하는 中·低準位廢棄物의 총량은 약 90,000m³에 이를 것으로 추정된다. 현재 이러한 폐기물은 발전소내에 임시저장하고 있으나, 저장시설의 용량이 1980년대 말에 포화되기 때문에 그 때까지 SFR이라 불리우는 발전소폐기물의 최

중처분을 위한·洞窟處分場의 건설을 완료할 예정이다.

동굴처분장은 스웨덴 동해안의 Forsmark 발전소 근처에 세워지고 있으며, 地下洞窟은 海面에서 부터 60m 아래에 건설된다. SFR은 두단계로 나누어 건설되고 있으며 1단계는 1988년에, 2단계는 2000년에 운영개시될 것으로 예상된다.

SFR에는 폐기물의 종류에 따라 두가지 형태의 처분시설이 사용되고 있다. 즉, 이온교환수지 등 비교적 방사능이 높은 폐기물은 사일로(Silo)에 처분되며, 이 사일로는 SFR에 처분되는 총방사능의 95%를 함유하게 되므로 특별한 工學的 防壁의 설치가 필요하다. 콘크리트 사일로는 높이 50m, 직경 25m의 圓筒形構造物로서 内部는 壁에 의해 한변이 2.5m인 정사각형 格子로 나누어져 있다. 사일로는 모래와 벤토나이트의 혼합물(90/10)위에 건설되며, 벽과 암반사이의 공간은 순수한 벤토나이트로 충전된다. 폐기물은 차폐용기 속에 포장되어 특수차량으로 사일로로 운반되며, 이곳에서 원격조작에 의해 사일로내 격자로 옮겨져 처분된다. 처분장 건설 1단계에서는 2개의 사일로가 건설되며, 장차 폐기물의 발생량에 따라 10~15년 후 1~2개의 사일로가 추가로 건설될 예정이다.

방사능준위가 낮은 폐기물의 처분에는 岩盤洞窟(rock cavern)이 사용되며, 암반동굴의 설계는 廢棄物包裝의 형태와 表面線量에 좌우된다. 취급 및 처분작업중 차폐가 필요한 중준위폐기물은 콘크리트 벽으로 된 대형상자로 나뉘어져 있는 중준위폐기물처분용 동굴에 처분되며, Over-head crane에 의해서 상자내로 이동된다.

라. 日 本^(12~15)

1) 處 理

일본에서는 ALARA개념에 의해 환경으로 방출시키는 방사능을 감소시키기 위해 氣體 및 液體廢棄物處理系統의 성능개선에 관심을 기울여 왔으며, 그 결과 기체폐기물의 방출을 감소시키

기 위해 각종시설, 즉

○活性炭 不活性氣體 hold up施設(BWR)

○터빈 gland seal을 위한 clean steam supply (BWR)

○no leak type valve(bellows seal valve)(BWR 및 PWR)

등이 새로 도입되었으며, 液體廢棄物의 방출을 감소시키기 위해

○蒸發器에 의한 바닥排水 處理(BWR)

○蒸發器에 의한 洗濯排水 處理(PWR)

○混床 이온교환수지에 의한 plant surplus water 處理(BWR)

등 여러가지 공정개선이 이루어졌다.

현재 일본에 累積된 저준위폐기물의 양은 1985년 현재 약400,000드럼으로서 敷地内에 저장되어 있으나, 廢棄物의 最終處分 또는 AFR貯藏이 실시되기까지는 상당기간이 소요될 것으로 예상되므로 고체폐기물의 부피감소가 중요한 과제이다. 따라서 이와 같은 목적을 달성하기 위해 다음 분야에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

○裝置排水系統에 새로운 필터의 도입

○可燃性固體廢棄物의 燒却

○아스팔트固化, 플라스틱固化 및 펠렛화

이중에서 가연성폐기물의 소각은 폐기물의 減容效果가 크고, 最終生成物을 화학적으로 안정한 형태로 전환시킬 수 있다는 점에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 일본에서는 1966년 일본원자력연구소 동해연구소에 최초의 實用燒却爐를 건설하여, 低準位 β-γ廢棄物의 소각처리를 실시한 이래 다수의 소각설비가 건설되었다. 현재 원자력발전소에 도입되었거나, 도입예정인 가연성폐기물 소각시설은 모두 12機에 이른다.

2) 處 分

일본에서는 低準位廢棄物의 처분을 위해 海洋投棄와 陸地處分이 모두 고려되고 있다. 일본은 저준위폐기물을 태평양에 투기하기 위해 對

象海域에 대한 海圖를 작성하고, 해양투기에 관한 실험과 연구를 계속하여 왔으며, 이 결과에 따라 1976년에 해양투기의 환경안전성평가를 수행하였다. 또 일본은 1980년 런던조약에 가입하여 해양투기체제를 정비하고, 1981년 OECD/NEA내에 설립된 多國間協議監視機構(MCSM)에 가입하였다. 일본은 일부 유럽국가들이 실시한 것과 유사한 방법으로 해양투기를 행할 수 있기를 기대하고 있으며, 이를 위해 관련국가들의 이해를 구하려고 노력하고 있으나, 당사국의 반대로 진전이 없는 실정이다.

따라서 이의 代案으로 陸地處分이 고려되고 있으며, 일본원자력연구소(JAERI)와 방사성폐기물관리센터(RWMC)가 육지처분 안전성평가 방법의 확립을 위한 연구와 실험활동을 주도하고 있다. 또 저준위폐기물의 육지처분이 실시될 때까지 잠정조치로서 廢棄物의 所外集中貯藏(AFR)方式이 채택되었다. 일본원자력위원회(A-EC)는 1982년 6월 低準位廢棄物의 所外集中貯藏方式을 결정하였으며, 이에 따라 Amori地方에 貯藏所를 건설하기 위한 준비가 진행중에 있

3. 結 論

앞에서 기술한 各國의 放射性廢棄物 處理·處分動向으로 부터 알 수 있는 바와 같이 處理技術은 방사성폐기물의 발생량을 감소시키고, 最終生成物의 安全性을 향상시키는 방향으로 연구 개발을 수행하고 있으며, 이를 위해 다양한 처리공정의 개선이 제안되고 있다. 또 處理技術은 각국이 처한 여건에 따라 상이한 처분방식을 취하고 있어 어떤 방식이 最適處分方式이라고 말할 수 없으나, 모두 自國의 環境을 고려하여 長期間 폐기물을 인간환경 및 생태계로 부터 격리시키는 것을 보장하고 있다는 점에서 일치하고 있다.

따라서 우리나라도 이러한 추세에 따라 處理技術은 減容效果를 높이고 最終生成物의 안전

성을 향상시킬 수 있는 방향으로, 處分技術은 우리나라 실정을 고려하여 處分安全性을 극대화할 수 있는 방향으로 개발해 나가야 할 것이다.

《參 考 文 獻》

1. J. Lefevre and J. M. Lavie, Nucl. Europe, 1983. 9, pp17-21
2. M. A. Barthoux, "Disposal of Low Level Waste," French Industrial Experience in Radioactive Waste Management and Spent Fuel Storage, pp 172-190
3. Nucl. Engineering Int'l 1985. 12 pp. 23-24
4. "佛 中低 レバル廢棄物處分の現狀," 日本原子力産業新聞
5. 刈田陽一, 日本原子力學會誌 vol 26, No 4 pp 277-286(1984)
6. E. Passig et al., Radioactive Waste Management, vol 2, pp 129-138, IAEA(1984)
7. 日本原子力産業會議, 世界の放射性廢棄物管理の現狀, 1983. 7
8. B. Reuse, Radioactive Waste Management, vol 1, pp 149-158, IAEA(1984)
9. S. Petterson and T. Hedman, Nucl. Eng. International, 1985. 12. pp 38-40
10. Tommy Hedman and Hans Forsström, Nucl. Europe, 1983. 9. pp 13-16
11. L. B. Nilsson and C. Thegerstrom, Radioactive Waste Management and the Nucl. Fuel Cycle, vol 4. No 3, pp 221-234(1984)
12. Hisashi Kaneda, "Final Storage/Land Disposal Project for Low Level Radioactive Wastes from Nuclear Power Stations in Japan," The 7th KAIF-JAIF Seminar on Nuclear Industry October 29-30, 1985 Seoul Korea.
13. 池田要, 原子力工業, vol 30, No 11 (1985)
14. Y. Okui, Radioactive Waste Management vol 1, pp 159-165(1984)
15. 한필순 외, 第16次 日本原産 年次大會 參加報告書, 1985. 4. 9-4. 11 東京