

# 유리화된 방사성 폐기물의 영구 처분

박 중 길

한전 원자력환경기술원 유리화분석팀장

### 세계의 방사성 폐기물 처분 현황



블투수층 토양 지반에 일정 깊이의 트랜치(trench)를 파고 방사성 폐기물을 매립한 후 그 위에 토양을 덮는 방식으로써, 미국의 Barnwell 처분장과 남아프리카 공화국의 Vaalputs 처분장이 전형적인 예라고 할 수 있다.

각 국가가 채택하고 있는 처분 방식은 조금씩 차이가 있으며 처분 대상 폐기물의 특성, 지질 조건 및 경제성을 고려하여 결정된다.

이 처분장들은 모두 저투수성의 점토층 위에 위치하며 처분장이 위치하고 있는 지역의 강우량은 매우 적은 편이다. 다른 처분 방식에 비해서 건설 및 운영 작업이 용이하지만 폐기물이 지하수 및 지표수와 쉽게 접촉한다는 단점이 있다.

처분 방식은 크게 천층 처분과 심지층 처분 방식으로 분류할 수 있으며 중·저준위 방사성 폐기물에 대한 천층 처분 방식은 단순 천층 처분(Simple near-surface facilities), 공학적 천층 처분(Engineered near-surface disposal facilities), 그리고 동굴 처분(Mined cavities)으로 구분된다.

뿐만 아니라 풍화 침식 등의 자연 현상으로 폐기물 자체가 노출될 수 있으며, 미래에 처분장 부지에 거주하게 될 사람들이 매립된 폐기물과 직접 접촉할 수 있다는 단점이 있다.

그러나 일부 국가에서는 중·저준위 폐기물도 심지층 처분(Deep geological repositories) 방식으로 처분하기도 한다. 각 처분 방식별 특징을 요약하면 다음과 같다.

**방**사성 폐기물 처분장은 1944년 미국 Tennessee 주 Oak Ridge에 건설된 이후로 지속적인 건설과 개선이 이루어져왔다. 현재 약 30여 나라에서 70여 개 이상의 중·저준위 방사성 폐기물 처분장을 운영하고 있으며, 20여 개의 처분장은 운영을 종료하고 폐쇄 과정에 있거나 폐쇄되었다. 그리고 다수의 국가에서는 처분장 부지 선정이나 인허가 과정에 있다.

**1. 단순 천층 처분 (Simple near-surface facilities)**  
이 처분 방식은 점토(clay) 등의

**2. 공학적 천층 처분 (Engineered near-surface disposal facilities)**  
이 처분 방식은 단순 천층 처분



프랑스의 'Aube 방사성 폐기물 처분장'

방식에 비해서 폐기물을 콘크리트 용기로 재포장하거나 콘크리트 처분고(Vault)를 설치하여 핵종 누출을 최소화시킨다. 그리고 콘크리트 처분고의 경우, 용기 사이의 빈틈은 점토재나 시멘트 모르타르로 채운다.

이 처분 방식의 대표적인 예라고 할 수 있는 프랑스의 La Manche와 l'Aube 처분장에서는 트렌치 상부에 다중의 처분 덮개를 설치하여 처분고로 강우가 유입되는 것을 최소화하며 폐기물 정치 작업을 자동화하여 작업자의 피폭을 최소화하는 시스템을 적용하였다.

### 3. 동굴 처분(Mined cavities)

이 방식은 지하 50 ~ 100m 범위에서 암반 내 동굴을 굴착하거나 폐광을 재굴착하여 폐기물을 처분

하는 개념이다. 대상 부지는 방사성 핵종의 인간 환경권으로의 도달을 최대한 억제할 수 있는 투수성이 낮고 균질한 암반체가 존재하는 곳이면 가능하다.

이러한 동굴 처분 방식은 천층 처분 방식에 비해서 자연적 혹은 인위적인 사고로부터 폐기물을 격리·방호할 수 있는 효과가 크다는 장점이 있다.

체코에서는 Richard II 광산의 일부를 사용하여 지표면 하부 70 ~ 80m 심도에 대부분 단반감기 핵종의 폐기물을 처분하였다.

그리고 잘 알려진 바와 같이 스웨덴의 SFR(Swedish Final Repository)은 육지로부터 굴착하여 해수 바다면의 하부 60m의 결정질 암반에 건설되었다.

핀란드의 Olkiluoto 처분장은

SFR과 거의 유사한 개념으로 저준위 사일로(Silo)와 중준위 사일로(Silo)로 구성된다.

### 4. 심지층 동굴 처분

#### (Deep geological repositories)

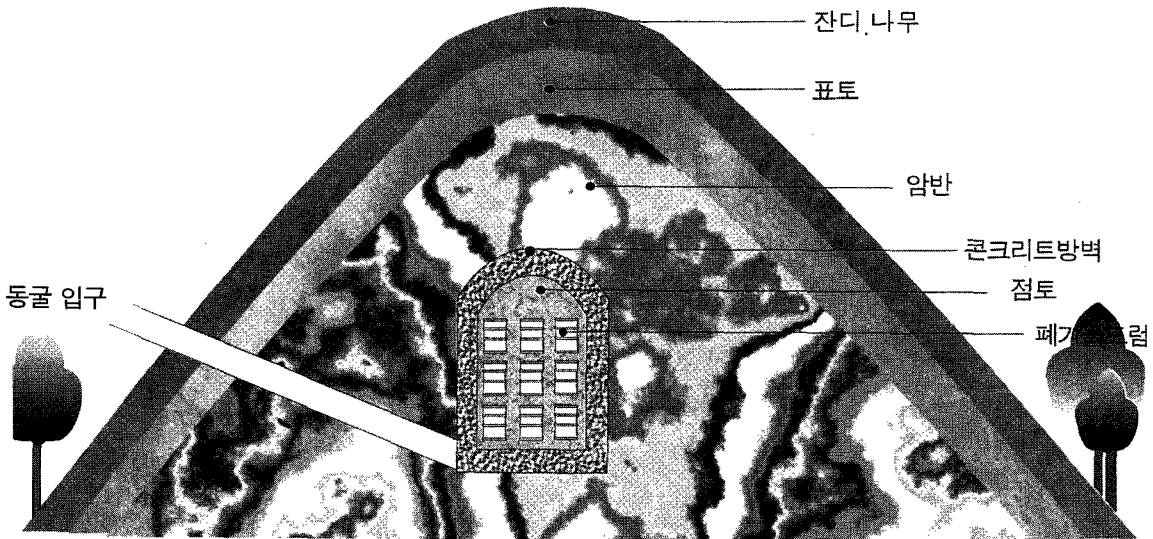
지표면으로부터 수 백미터 이하의 심도를 가지는 처분 방식으로 독일의 Morsleben과 Konrad 처분장, 그리고 영국에서 계획하고 있는 Nirex 처분장이 심지층 동굴 처분 방식의 대표적인 예이다.

Morsleben 처분장은 심도 500m의 매우 건조하며 안정된 암염 광산 부지에 위치하며 약 40,000m<sup>3</sup>의 폐기물을 처분할 수 있다. Konrad 처분장도 매우 건조한 철광산으로 지하 800m에 위치하며 상부에 약 400m 두께의 점토층을 가진다.

#### 방사성 폐기물 처분시 문제점

방사성 폐기물을 처분하게 되면 시간이 경과함에 따라 어떠한 형태로든지 폐기물 또는 폐기물 고화체를 담고 있는 용기가 부식하게 되고 결국 폐기물/고화체가 지하수 또는 강수와 접촉하게 된다.

이로 인해 폐기물/고화체 내에 존재하는 핵종의 일부가 지하수로 녹아 나오게 되고 여러 경로를 통해 인간이 거주하는 환경권으로 유출될 가능성이 있다.



〈그림 1〉 전형적인 동굴 처분장 개념도

그래서 처분장을 건설하기 전에 여러 발생 가능한 상황들을 가정하여 처분장에 대한 안전성을 평가하고 폐기물 내 방사성 핵종이 환경으로 유출되는 것을 최대한 억제하기 위하여 여러 가지 대책을 강구하고 있는 것이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 방사성 폐기물을 보유하고 있는 각 국가들도 이러한 원칙에 따라 나름대로의 정책을 수립하고 각자의 환경 및 여건에 알맞은 처분 방식을 선택하고 있다.

원전에서 발생되는 중·저준위 방사성 폐기물에는 농축 폐액을 시멘트·아스팔트·파라핀 등으로 고화 처리한 농축 폐액 고화 드럼이

있다.

이 고화체들은 대부분 철제 드럼에 담겨져 발전소에 임시로 보관되었다가 처분장에 보내지기 전 폐기물 인수 기준 만족 여부를 점검하고 필요에 따라 재포장되거나 재처리된 후 처분장에 보내지게 된다.

시멘트는 장기간에 걸쳐 경화 반응이 진행되고 건전성이 유지되는 기간도 매우 긴 편이다. 따라서 중·저준위 방사성 폐기물 관리 기간으로 예정되고 있는 300년 동안 건전성을 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 다공성 물질이기 때문에 시멘트 고화체가 물과 접촉하게 되면 고화체 내의 방사성 핵종의 일부

가 녹아 나올 수밖에 없다. 따라서 될 수 있는대로 물과 접촉 가능성이 적은 곳에 처분장을 만들거나 물과 접촉하더라도 방사성 핵종이 잘 녹아 나오지 않는 시멘트 고화체를 개발하는 노력을 기울인다.

또한 녹아 나온 핵종이 더 이상 밖으로 확산되지 않도록 벤토나이트·점토 등을 드럼 주위에 채워 두거나 저투수성 콘크리트 방벽을 설치하기도 한다.

아스팔트 고화체는 시멘트 고화체에 비해 물과 접촉시 방사성 핵종이 녹아나올 가능성이 적은 편이다. 그러나 발생할 가능성은 거의 없지만 처분장에서 화재가 발생하면 고화체가 용융되기 쉽고 아스팔트가

열분해 되면 폭발성 기체가 발생될 가능성이 있다. 파라핀 고화체 역시 열에 약하고 방사성 핵종이 녹아 나올 가능성이 다른 고화체에 비해 크다는 단점이 있다.

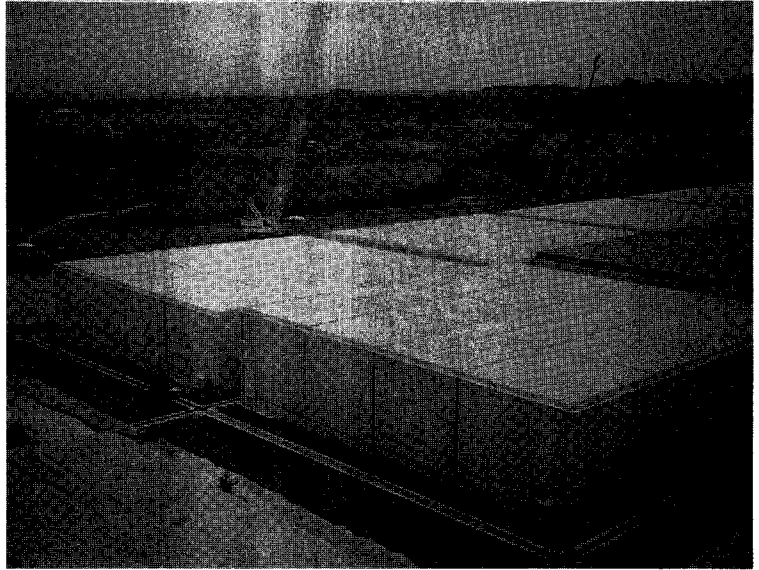
따라서 이러한 고화체들을 처분할 때는 다른 고화체의 경우보다 인공적으로 안전성을 강화하게 되는데, 고화체를 수 백년간 견딜 수 있는 고건전성 용기(HIC)에 저장하는 것이 대표적인 예라 할 수 있다.

원전에서 발생하는 폐기물 중에 이온 교환 수지는 스타이렌과 디베닐벤젠으로 합성된 유기물이다. 이 이온 교환 수지는 액체 폐기물 내에 존재하는 다양한 방사성 및 비방사성 이온들을 제거하는 데 활용되고 있다.

종래에 수명이 다한 이온 교환 수지들(폐수지)은 시멘트로 고화 처리하여 철제 드럼에 저장하여 왔다. 그러나 폐수지가 지니고 있는 특징 때문에 시멘트에 함유되는 양이 조금만 증가하면 양질의 고화체를 만들어 낼 수 없게 되어 처분 드럼 수가 증가하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 현재는 폐수지 발생량을 줄일 수 있는 선택성 이온 교환 수지를 사용하고 있으며, 발생된 폐수지를 고화 처리하지 않고 건조기로 건조시킨 후 HIC에 저장하고 있다.

만약 폐수지를 담고 있는 HIC가 처분되고 인간이 실수로 처분장에



일본의 로카쇼무라 방사성 폐기물 처분장

서 천공 작업을 하다가 HIC가 손상된다면 폐수지가 유출되게 되며 이러한 가능성을 고려하여 처분장을 설계하게 되면 안전 시설이 강화될 수밖에 없다.

가연성 및 비가연성 잡고체는 주로 원전에서 유지 보수시에 발생되며 다양한 성분의 물질들로 구성되어 있고 원전에서 발생되고 있는 폐기물 양의 대부분을 차지하고 있다.

이 중 가연성 잡고체는 별다른 처리없이 철제 드럼에 넣고 부피를 줄이기 위해 압축 저장하거나 소각로에서 소각시킨 후 소각재를 고화 처리하고 있다.

압축된 가연성 잡고체 드럼을 그대로 처분하게 되면 처분 부피가 크기 때문에 처분장 수명을 단축시키

게 되며, 처분장에서 기체를 발생시키거나 콜로이드 물질을 생성시키는 원인 물질로 작용하게 된다.

이 중 콜로이드에 흡착된 방사성 핵종은 흡착되지 않은 핵종에 비해 암반 또는 토양에서 이동하는 속도가 증가되는 것으로 알려져 있다.

소각재는 그동안 시멘트나 고분자 물질로 고화 처리하였는데 최근에는 고화 처리의 어려움 때문에 HIC에 넣어 처분하는 나라도 있다. 그러나 이들 고화체 또는 HIC 처분역시 앞에서 언급한 문제들이 발생할 개연성이 있다.

비가연성 폐기물들은 대부분 방사능 세기가 작기 때문에 별다른 처리없이 철제 드럼에 넣어 보관했다가 처분하게 된다. 이 경우에도 역



시 드림이 부식되었을 때 폐기물이 그대로 물과 접촉하게 되고 비가연성 폐기물 중의 하나인 금속 폐기물들이 폐기됨으로써 자원 재활용 측면에서 바람직하지 못하다.

이상에서 살펴본 바와 같이 방사성 폐기물을 안전하게 처리하고 처분하기 위해 여러 가지 발생 가능한 상황들을 예측하고 이에 대처할 수 있는 모든 방안들을 마련하고 있지만 때때로 예측하지 못한 현상들이 발생할 수 있다.

예를 들면 독일은 방사성 폐기물을 암염광에 처분하였는데, 이는 암염광에는 지하 수맥이 전혀 연결되어 있지 않기 때문이다. 그러나 최근 암염광 처분장에 지하수가 스며 들고 있음을 알게 되었다.

따라서 처분장에서 안전성을 확보하기 위해서는 모든 방사성 폐기물에 존재하는 핵종을 매우 진정성이 뛰어나고 지하수와 접촉했을 때 방사성 핵종이 녹아나지 않는 고화체에 가두는 것이다.

현재 이러한 기술로 가장 유망한 기술이 유리화(vitrification) 기술인 것으로 알려져 있고 이 기술을 중·저준위 방사성 폐기물 처리에 적용하려는 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다.

**세계의 고온 용융(유리화) 연구 현황**

유리를 이용하여 폐기물을 처리

하는 것을 폐기물의 유리화(vitrification)라고 하는데 이의 정의는 '용융 유리위에 폐기물을 투입하여 폐기물의 분해와 고화 처리를 동시에 수행하는 공정'이라고 할 수 있다.

중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술 개발의 초점은 안전하고 운전이 용이한 용융로를 개발하는 것과 최대한의 감용비를 달성할 수 있을 뿐만 아니라 양질의 유리 고화체를 만들어 낼 수 있는 유리 조성을 개발하는 것과 경제적이고 안전하게 배기체를 처리할 수 있도록 배기체 처리 공정을 최적화하는 것이다.

현재 중·저준위 방사성 폐기물 유리화에 적용하기 위해 연구되고 있는 유리화 방식은 수직 전극 가열식, 유도 전류 가열식, 플라즈마 가열식 유리화이다.

중·저준위 폐기물은 고준위 폐기물에 비해 폐기물의 종류·발생량·화학적 조성 등이 다르기 때문에 고준위 폐기물 유리화에 적용하는 기술을 그대로 중·저준위 폐기물 유리화에 적용할 수 없다.

고준위 폐기물은 대부분 액체 폐기물이지만 중·저준위 폐기물은 액체와 가연성 및 비가연성 폐기물로 구성되어 있어서 중·저준위 방사성 폐기물을 처리하는 용융로와 배기체 처리 공정은 고준위 폐기물 처리용과 달라야 한다.

현재 상용 운전되는 중·저준위

폐기물 처리용 유리화 상용 설비는 존재하지 않지만 기존의 고준위 폐기물 처리에 사용해 온 용융로를 개조하여 적용하려는 연구가 다음과 같이 활발히 진행되고 있다.

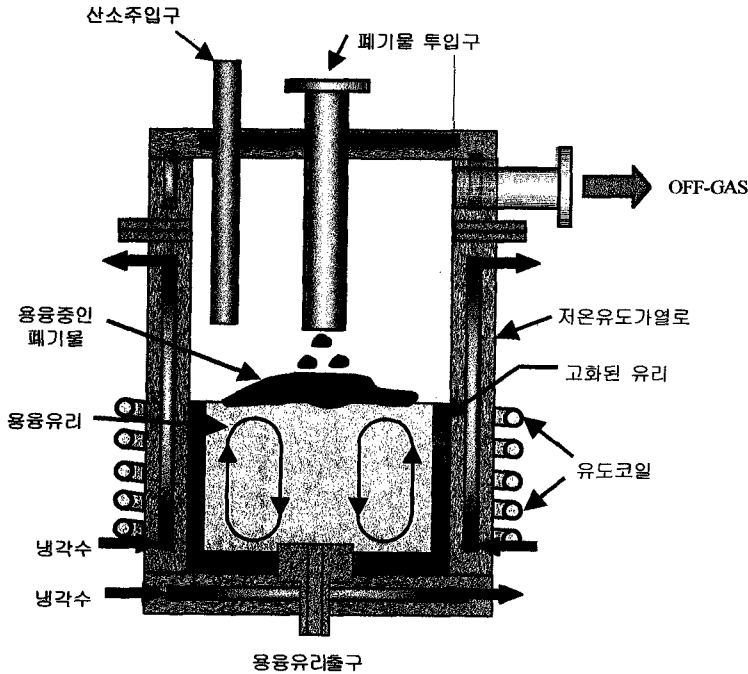
**1. 유도 전류 가열식 유리화**

유도 전류 가열식 유리화에 적용하기 위해 연구되고 있는 저온로(CCM)는 프랑스 CEA에서 고준위 폐기물 처리를 위해 최초로 개발한 유도 전류 가열식 고온로(HCM)를 개조한 용융로로서 이를 중·저준위 방사물 유리화에 적용하기 위한 연구가 한전 원자력환경기술원 주도하에 프랑스 CEA/SGN사와 공동으로 추진중에 있다.

HCM은 용융로 주위의 유도 전류자(Inductor)에 의해 가열되는데, 유도 전류는 용융로 벽 주위에서 줄(Joule) 열을 발생시키며, 발생된 열은 전도에 의해 유리로 전달된다.

저온로 또한 유도 전류자의 코일에 의해 둘러 쌓여지지만 전자기장의 상대적인 투과성을 확보하기 위해 스테인리스강으로 만들어진 직사각형 판을 여러 개 연결하여 원통형으로 만들고 판 사이에는 운모 절연체를 삽입한다. 각각의 직사각형 판에는 <그림 2>와 같이 냉각수의 유입구와 유출구가 있어 금속벽을 냉각시키게 된다.

용융로 벽의 온도는 200℃ 이하



〈그림 2〉 유도 가열식 유리화 용융로

로 유지되므로 용융로 벽과 접촉하는 용융 유리가 고화되어 얇은 층을 형성하게 되어 금속 용융로의 밀봉성을 확보한다.

저온로 하부에는 용융 유리 배출관과 기체 주입 노즐이 수개 설치되는데, 이 노즐을 통하여 주입된 기체는 용융 유리를 혼합시켜 열적·화학적 균일성을 도모하고 용융로 내부의 산화-환원 상태를 조절한다.

한전은 과잉 산소를 주입하여 폐기물을 용융 유리 위에서 완전 연소시키는 방식을 채택하였으며 지름 550mm CCM과 배기체 처리 공정

으로 구성된 실증 설비 개발을 1999년 9월에 완료하고 상용 설비 설계 자료를 도출하기 위한 실증 시험을 수행하고 있다.

전세계적으로 볼 때 원전에서 발생하는 방사성 폐기물과 폐수지를 포함해서 모든 가연성 잡고체 폐기물을 유리화하기 위한 연구 개발은 한전이 최초로 추진하고 있다.

현재 유리화가 가장 어렵다고 알려진 폐수지에 대한 1차 실증 시험을 성공적으로 마치고 잡고체에 대한 실증 시험을 수행하고 있다.

이러한 실증 시험과 함께 유리화시 발생하는 배기체를 안전하게 처

리하기 위한 연구와 유리 고화체의 품질을 향상시키기 위한 glass formulation 연구를 병행하고 있다. 이에 대한 연구 방향 및 동향을 살펴보기로 하겠다.

### 가. 배기체 처리 연구

유리화 시설에서 발생하는 배기체의 조성은 폐기물의 종류 및 투입 방법에 따라 달라지겠지만, 저준위 방사성 폐기물을 유리화할 때 발생 가능한 배기체 성분으로는, 세슘 같은 휘발성 방사성 핵종 및 중금속, 휘발성 유기물, 코발트 등의 방사성 콜로이드가 혼합되어 있는 입자, 수증기, HCl, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> 등을 들 수 있다.

방산 폐액과 폐수지를 처리할 때나 유리 형성제로 붕규산 유리를 사용할 때는 붕소가 휘발되게 되며, 잡고체를 유리화할 때는 잡고체 내에 존재하는 염소 성분 때문에 최근 문제가 되고 있는 다이옥신도 발생할 수 있다.

일반적으로 배기체의 처리 원칙은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 배기체 내의 유해 물질 농도를 최대한 줄이는 것이고 다른 하나는 발생된 배기체 내 유해 물질을 환경 유출 기준을 충족시킬 수 있도록 처리하는 것이다.

유리화 시설에서 배기체 내 유해 물질 농도를 줄일 수 있는 방법으로 다음과 같은 것들을 고려해 볼 수 있다.



첫째는, 폐기물 투입 방법을 변형시키는 것인데, 예를 들어 가연성 폐기물 또는 이들의 열분해재를 용융 유리 속으로 투입하면 세습 등이 용융 유리와 반응하여 배기체 내 세습량이 훨씬 감소될 수 있다. 그러나 완전 연소되지 않은 탄소가 유리 고화체의 품질을 저하시킬 가능성도 존재한다.

또다른 투입 방법은 유리 용융 온도를 낮추는 유리 변형재를 폐기물과 함께 투입하여 입자나 휘발성 물질의 발생을 감소시키는 것인데, 이때도 용융로의 운전 특성 등의 변화에 주의해야 한다.

또한 용융 유리 위에 폐기물이 쌓이게 하여 cold cap을 형성시켜서 발생하는 휘발성 물질을 일차적으로 여과시키는 방법이 있으며, 용융로 후단에 후단 연소기를 설치하여 일산화탄소 등의 불완전 연소된 유기물을 완전 연소시킴으로써 처리가 까다로운 유해 물질이 배기체 공정으로 유입되는 양을 줄이는 방법과 후단 연소기와 용융로 중간에 SiC 필터 같은 고온 세라믹 필터를 설치하여 입자·방사성 세습 등을 포집한 후 용융로로 재순환시키는 방법이 있다.

일단 배기체 처리 공정으로 유입된 배기체는 환경 규제에 맞게 처리하여 방출해야 한다.

배기체 처리 공정의 선택은 환경 규제, 배기체 발생 특성 등에 따라

달라진다.

고준위 방사성 폐기물 유리화 시설의 배기체 처리 공정은 일반적으로 HEPA 필터·냉각기·제진기·정압·제습기 및 재가열기·배출팬으로 구성된다.

하지만 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 시설의 경우에는 다이옥신의 재합성을 억제할 수 있는 급냉기, NOx와 다이옥신 배출 농도를 제어할 수 있는 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등의 추가 설비가 필요할 수 있다.

방사성 폐기물 유리화 시설의 배기체 처리 설비는 비방사성 폐기물 처리 설비에 비해 훨씬 엄격하게 선정되고 관리되어야 한다.

#### 나. Glass Formulation 연구

현재 전세계적으로 고준위 폐기물 유리화에 가장 널리 사용하고 있는 유리는 붕규산 유리이다.

붕규산 유리는 함유된 붕소 원소에 의해 실리카 망상 구조가 느슨해지거나 일부 절단됨으로써 폐기물 내 유해 중금속 등이 망상 구조 내에 포획되거나 망상 구조와 결합할 수 있는 공간이 많이 존재한다는 특성을 가지고 있다.

유리 고화체의 조성비 결정에 영향을 주는 요인으로는 유리 형성제의 종류, 고화체 건전성 평가 기준, 폐기물 내 중금속 또는 산화물의 종류 및 농도, 용융로의 운전 용이성 등을 들 수 있다.

유리 형성제를 붕규산 유리로 사용할 때 유리에 혼입되는 원소와 산화물들은 그 종류에 따라 용해도가 다르고 용융로 운전 및 고화체에 미치는 영향이 달라진다.

이러한 용해도와 영향들을 고려하여 폐기물 내에 존재하는 금속 원소들이 최대로 유리 고화체에 혼합되도록 하면서 유리 고화체의 건전성을 확보하고, 용융 유리의 배출·혼합·용융로 마모 감소 등을 고려하여 설정된 적정 점도(20~100 poise)와 전기 전도도(0.1 ~ 0.5 s/cm (1,100 ℃))를 유지할 수 있도록 유리 고화체의 조성비를 결정하는 것이 glass formulation의 주목적이다.

glass formulation에 있어서 고려해야 할 다른 주요 인자는 규제 기관에 의해 설정된 건전성 기준을 충족시키는 것이다.

보통 유리 고화체의 건전성을 확인하기 위해서는 고화체의 침출률과 압축 강도를 측정한다. 유리 고화체의 침출률과 압축 강도는 시멘트 고화체에 비해 월등히 높으나 시료의 제조 방법에 따라 변동폭이 크다는 특징이 있다.

예를 들면 시멘트 고화체를 천층 처분할 때 전세계적으로 적용되는 기준 중 가장 엄격한 기준은 침출률이 10 g/m<sup>2</sup>/d 이하이고 압축 강도는 15 MPa 이상인 반면 고준위 폐기물 유리 고화체의 침출률은 10-

4 ~ 0.4 g/m<sup>2</sup>/d, 압축 강도는 500 ~ 1,000MPa의 범위에 있다.

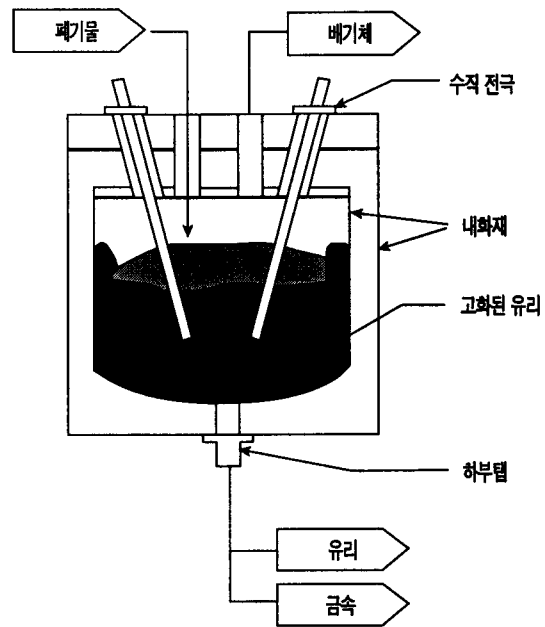
현재 중·저준위 폐기물의 유리화 고화체에 대한 기준은 설정돼 있지 않으나 고화체의 처분 방식, 국가별 규제 기준 등에 따라 달라질 것이다. 이 기준들은 감용비에도 영향을 미치기 때문에 유리화 공정의 경제성을 좌우한다.

## 2. 전극 가열식 유리화

EPRI는 VECTRA사와 공동으로 미국에서 국방 폐기물 처리에 이용되고 있는 LFCM(Liquid Fed Ceramic Melter)의 용융로를 개선하여 중·저준위 방사성 폐기물 유리화를 위한 수직 전극 가열식(Joule-heated) 저온 용융로 개발을 위한 1단계 연구를 종료하였다. 또한 미국의 Duratek은 수평 전극 가열식 용융로를 이용하여 이온 교환 수지를 유리화하는 기술을 개발하였다.

전극 가열식 용융로에서는 유리를 용융로 안에 넣고 초기에는 가스 버너로 유리를 녹인다. 유리가 녹아 전기 전도성이 확보되면 그 때부터는 전극 사이에 흐르는 전류에 의해 발생하는 줄을 열에 의해 용융 상태가 유지된다.

VECTRA사는 용융로의 내화재 수명을 연장시키기 위해 수냉각식 저온 용융로를 채택하였다. <그림 3>에서와 같이 VECTRA사가 개발



<그림 3> 전극 가열식 유리화 용융로

을 시도했던 용융로의 윗부분은 기체화 구역으로서 이 곳에서 고체 및 액체 유기 폐기물을 휘발성의 저분자 기체로 기체화시키는 데 산소를 이용한 완전 연소를 사용하지 않고 증기/CO<sub>2</sub> 개질법(reforming)과 열분해법을 이용하는 연구를 수행하였다.

그러나 이 공정은 폭발성 기체가 발생되는 등의 문제가 있는 것으로 드러나 중단하고 완전 연소 방식으로 전환하여 연구를 수행하고 있다. 현재 이 연구는 ATG(Allied Technology Group)에서 인수받아 수행 중에 있다.

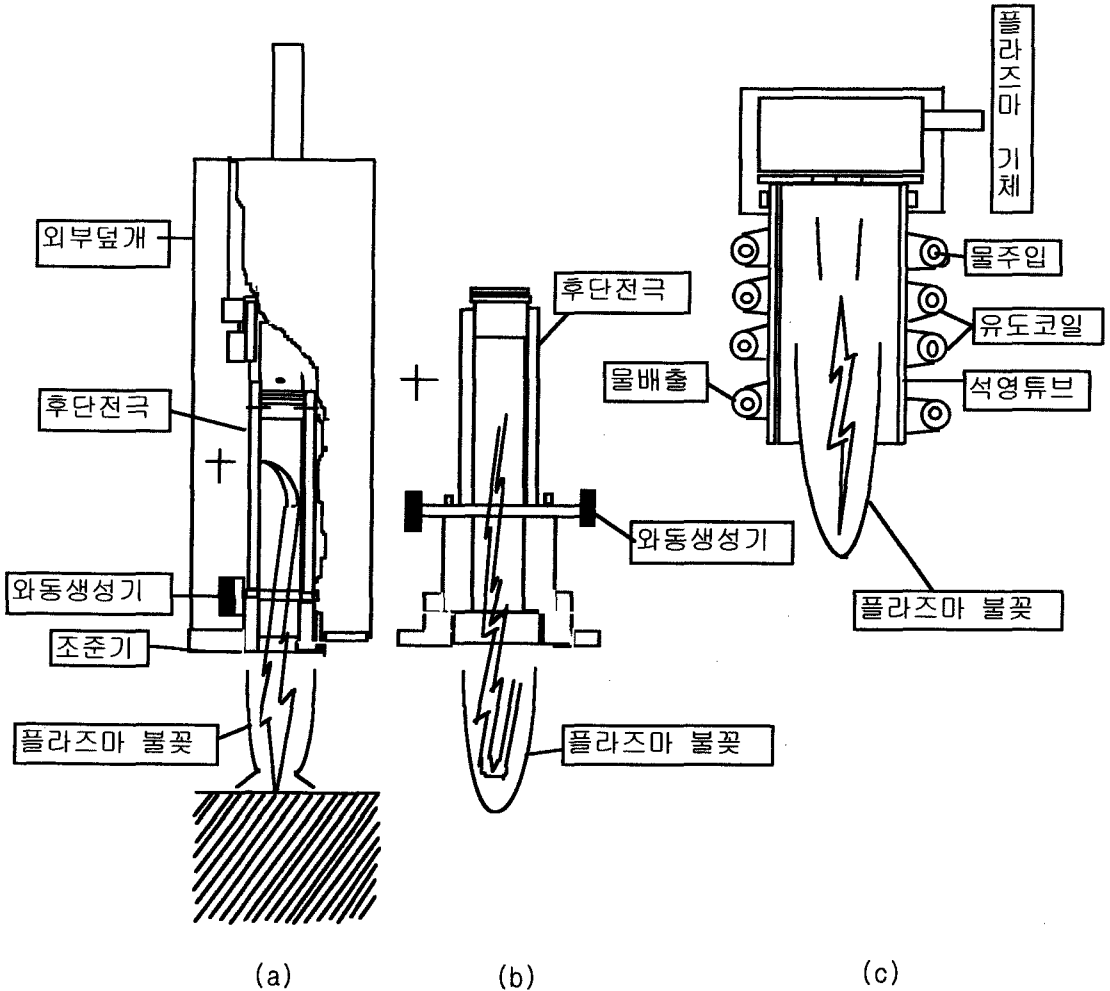
미국의 Duratek은 Catholic 대학과 공동으로 폐수지 유리화 기술을 개발하였는데, 처리 용량이 10

kg/day인 소규모 용융로로부터 출발하여 처리 용량이 300kg/day인 상용 규모 용융로를 개발하여 Fermi 원자력발전소(BWR)에 설치하였다.

중점적으로 개발한 내용은 붕규산 유리를 이용하여 음이온 교환수지나 양이온 교환수지를 단독으로 유리화할 때와 이들을 혼합한 수지를 유리화할 때 최적의 유리 고화체를 만들어 낼 수 있는 운전 조건을 찾는 것이었다. 배기체 처리 공정은 새롭게 개발한 것은 없고 상용화된 장치들을 선정하여 사용하였다.

특이한 것은 용융로에서 기체가 유출되는 부분에서 NO<sub>x</sub>를 제거하기 위해서 이 곳에 가열 장치를 두





〈그림 4〉 플라즈마 토치의 종류  
 (a) Transferred 토치 (b) Non-transferred 토치 (c) 유도(Induction) 토치

고 요소 등의 환원제를 주입하는 것이다. 그 다음에는 세정기·Baghouse 필터·HEPA 필터의 순으로 설치한 매우 간단한 배기체 공정을 채택하고 있다.

### 3. 플라즈마 가열식 유리화

플라즈마 토치/아크 용융 기술은 1950년 이래로 발전하였으며 처음에는 강철 산업에 사용되었으나 지금은 전세계적으로 폐기물 처리에

적용하려는 연구가 진행되고 있다. 미국·프랑스 등에서는 병원 폐기물·석면 폐기물·생활 폐기물 조각재의 용융 처리에 응용하고 있으나, 방사성 폐기물 처리 기술은 개

발 단계에 있다.

플라즈마 토치는 전극의 종류에 따라 이행형(transferred) 토치와 비이행형(non-transferred) 토치로 구분된다.

비이행형(non-transferred) 토치는 아크 단자점으로 토치 전단과 후단을 전극으로 사용한다. 이행형(transferred) 토치는 전단 전극으로는 토치 자체를, 후단 전극으로는 외부 단자점인 용융 슬랙 풀을 사용한다.

가장 널리 사용하는 아크 플라즈마 토치를 <그림 4>의 (a)와 (b)에 나타내었다.

플라즈마 토치에 사용하는 플라즈마 기체는 처리 대상 폐기물·경제성 등에 따라 달라지며, 질소·아르곤·공기·헬륨·증기 등이 사용되는데 증기를 사용하는 플라즈마 토치를 스팀 플라즈마라고 한다.

그 외에 플라즈마 기체를 사용하지 않고 전극봉 사이에 발생하는 전기 아크를 이용하는 플라즈마 아크 용융로가 있다.

플라즈마 토치나 아크를 이용하는 폐기물 처리용 용융로는 처리하고자 하는 폐기물, 연구 기관 등에 따라 매우 다양하다.

고정식 플라즈마 토치 용융로(Fixed Plasma Hearth)는 1992년 SAIC에서 설계·제작 및 시험을 하였으며 현재 록히드마틴사와 합병한 Retech에서 실증 시설을

건설하였다. DOE에서는 이 공정을 파일럿 크기로 테스트하여 일반 폐기물 및 방사성 폐기물에 적용할 예정이다.

플라즈마 회전 용융로(Plasma Centrifugal Furnace)는 Retech에서 개발한 공정으로 열효율을 높이기 위해 용융로를 회전시킨다. 이 용융로에서는 이동식 플라즈마 토치를 사용하는데 토치의 수직 및 수평 방향 조정이 가능하다.

플라즈마 토치를 폐기물 처리에 적용하려는 연구는 미국을 위시해서 캐나다·프랑스·스위스·일본 등지에서 활발하게 진행되고 있다. 반면 미국의 INEEL·MIT·PNL 등 소수 기관들이 플라즈마 아크를 이용한 폐기물 처리 연구를 수행하고 있다.

플라즈마 아크 용융 공정은 용융로에 투입되는 폐기물의 크기가 제한되어 있어서 폐기물을 파쇄해야 하지만 플라즈마 토치 용융 공정은 전처리 없이 매우 다양한 폐기물을 처리할 수 있으며, 폐기물 드럼을 그대로 투입할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 중·저준위 방사성 폐기물 중에서 비교적 방사능 준위가 높은 폐수지를 처리하는 데 여러 가지 문제 발생 가능성이 잠재되어 있다. 즉 수지 내에 잠혀있는 핵종 중에 Cs과 같이 휘발점이 낮은 핵종들이 대부분 배기체 공정으로 유입되어 배기체 공정의 방사능 준위가 높아

지게 되고 결국 차폐 비용 및 세정 폐액 발생량이 증가하게 될 것이다.

또 다른 단점은 공기를 플라즈마 기체로 사용할 경우 고온의 운전 조건으로 인해 공기중 질소와 산소가 반응하여 상당량의 NO<sub>x</sub>가 생성되므로 배기체 처리 공정의 복잡성과 세정 폐액 발생량을 증가시킬 것이다.

이러한 이유로 원자력환경기술원은 원전에서 발생하는 폐기물 중에서 방사능이 적고 발생량이 적은 콘크리트·전구·금속 등의 폐기물만을 플라즈마 토치로 용융 처리할 계획을 세우고 있다.

현재 실증 설비로 200kW 플라즈마 토치를 장착한 회분식 용융로가 설치되어 있어 폐기물별로 최적의 용융 조건을 찾는 시험을 수행하고 있다. 여기에 장착된 플라즈마 토치는 이행형과 비이행형 운전을 모두 할 수 있는 토치이며 비전도체인 무기성 폐기물들을 처리하는 데 유용하다.

#### 우리 나라의 처분장과 유리화 효과

중·저준위 방사성 폐기물은 원전 운영에 따라 발생하는 폐기물(원전 운영 폐기물)이 대부분을 차지하고 있으며, 그 외에 원전 운영 외 폐기물로서 방사성 동위원소(RI) 이용 기관과 한국원자력연구소 및 한전원자력연료(주)에서 발생되고



있다.

현재 원전 운영으로 발생한 폐기물은 5만여 드림으로 4개 원전 부지 내에 저장되어 있으며 현재의 소내 임시 저장 시설로 2010년대 중반까지 저장이 가능하다.

원전 이외에서 발생한 폐기물은 현재 총 16,000여 드림이 저장되어 있다. 이 중 약 4,000드림은 한전 원자력환경기술원에 인도되어 집중 관리되고 있으며, 나머지 폐기물은 한국원자력연구소, 한전원자력연료(주) 등 연구 기관 및 산업체에서 자체 저장중이다.

향후 중·저준위 방사성 폐기물의 발생량을 중장기적으로 살펴보면 발생량은 지속적으로 증가하여 2010년에 약 146,000 드림, 2040년에는 약 564,000 드림이 누적될 전망이다.

원전 운영중에 발생하는 폐기물은 신규 원전의 추가 가동으로 지속적으로 증가할 것이고(원전 호기당 폐기물 발생량은 감소), 2013년경부터는 수명 종료된 원전의 해체로 해체 폐기물이 발생될 것이다.

원전 이외에서 발생하는 폐기물은 연구용 원자로 시설의 폐지와 방사성 동위원소 이용 확대 등으로 크게 증가할 것으로 전망된다.

중·저준위 방사성 폐기물 중 원전 발생 폐기물은 각 원전 부지 내에서 저장 관리하며 설비 개선, 운영 최적화, 감용 기술 개발 등을 통

해 폐기물 발생량을 최소화하고 처분 시설이 운영될 경우 단계적으로 이송하여 영구 처분한다.

그 동안 우리 나라는 1986년 이래 처분장 부지를 확보하기 위하여 노력하여 왔으나 아직 별다른 진전이 없는 상태이다. 현재는 처분 시설이 2008년까지 준공되도록 계획된 방침에 따라 적기에 처분장 부지를 확보하기 위해 다방면의 노력을 경주하고 있다. 처분장 부지가 확보되면 입지 여건에 따라 처분 방식·처분 용량 등을 결정한다.

전세계적으로 환경에 대한 관심이 매우 고조되어 있고 시민 단체들의 활동이 활발해져서 새로운 방사성 폐기물 처분장을 건설하는 것은 매우 어렵게 되었다. 따라서 건설된 처분장을 될 수 있는 한 오래 사용하고 근본적으로 처분장 안전성을 향상시킬 수 있는 기술 개발이 필연적이다.

이러한 요구를 충족시켜줄 수 있는 기술이 바로 유리화 기술임을 앞에서도 언급했다. 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화시키면 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다.

원전에서 발생하는 모든 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화시키면 발생하는 부피를 기준으로 볼 때 1/14 ~ 1/32로 부피를 줄일 수 있다. 이것은 1000MWe PWR 12기에서 30년 동안 발생하는 방사성 폐기물 드림 수(208 리터 크기)가

3,700~8,300이 될 것이라는 의미이다. 따라서 처분장 사용 연한을 대폭 연장시킬 수 있다.

방사능 재고량 기준으로 처분장 폐쇄 시점을 결정하면 처분장 수명 연장이 의미가 없다는 의견도 있으나 방사능 재고량은 방사성 핵종의 유출 가능성 등을 평가하여 결정되기 때문에 유리 고화체의 침출률이 기존의 고화체 보다 훨씬 적으면 방사능 재고량이 증가될 것이다.

실제 유리 고화체는 처분 환경에서 지하수와 접촉했을 때도 방사성 핵종이 거의 유출되지 않기 때문에 시멘트 고화체보다 1/10 정도의 유리 고화체를 만드는 것은 쉬운 일이다.

또한 폐기물 내에 모든 유기물이 제거되었기 때문에 기체 발생 가능성 및 콜로이드 생성 가능성도 없다. 따라서 근본적으로 방사성 폐기물 처분 안전성을 향상시킬 수 있다. 다시 말하면, 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술은 원전 호기당 연간 발생하는 폐기물 드림 수를 35드림 수준으로 감소시킬 수 있고 환경에 방사선적 영향을 거의 미치지 않는 고화체를 만들어 낼 수 있는 환경 친화적인 기술이기 때문에 처분장 후보 지역 주민들의 태도를 NIMBY에서 PIMFY(Please In My Front Yard)로 변화시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. ☉