

## 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술의 실증

신 상 운

한전 원자력환경기술원 처리연구그룹장



SGN, 현대정공이 공동으로 직경 550mm, 최대 예상 처리 용량 50kg/hr의 유리화 실증 설비를 원자력환경기술원에 지난 1999년 6월 건설하였으며, 동 설비를 이용하여 원전에서 주로 발생되고 있는 중·저준위 방사성 폐기물인 잡고체와 수지의 유리화에 성공하였다.

### 유리화 실증 설비의 목적

비록 실험실 규모의 유리화에 성공하였다고 하더라도 유리화 기술을 원전에서 발생하는 방사성 폐기물 처리에 직접 적용하기 위해서는 유리화 상용 설비에서 채택될 모든 공정들을 통합하여 유리화 기술을 입증하여야 한다.

이를 위해서는 우선 소규모 실험 설비에서 얻어진 결과들을 상용 설비 규모의 통합 시스템에도 적용할 수 있을 것인지를 확인하여야 하며, 처리하고자 하는 모든 종류의 모의 폐기물들을 대상으로 시스템 운전

변수 및 공정을 최적화시켜야 한다.

또 실제 방사성 폐기물을 처리하는 과정에서 발생될 수 있는 모든 운전 조건하에서도 유리화 설비를 안전하게 제어할 수 있음을 입증하여야 한다.

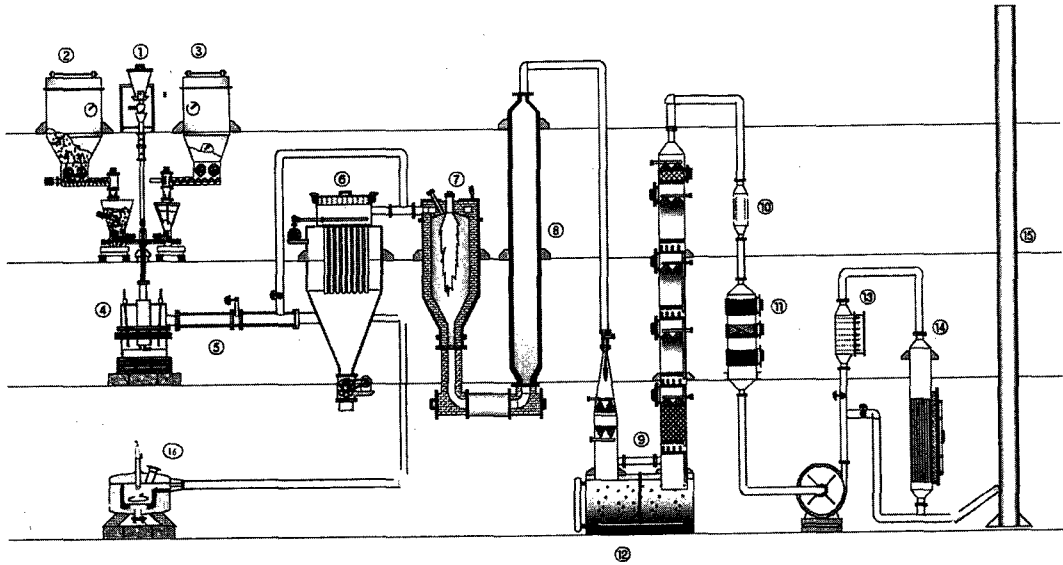
이러한 목적을 달성하기 위하여 상용 설비 규모의 유리화 실증 설비를 건설하였으며, 일차적으로 프랑스 Marcoule에서 수행한 Orientation Test 시험 결과를 확인하기 위하여 잡고체와 폐수지를 대상으로 실증 시험을 수행하면서 운전 조건에 따른 유리 고화체의 특성과 배기체 발생 특성, 최대 처리 용량 등을 평가하였다.

이러한 시험 결과를 토대로 유리화 상용 설비의 개념 설계를 완료하였으며, 앞으로 수행될 공정 최적화 시험과 안전성 평가 시험 등을 통해 유리화 상용 설비의 상세 설계 및 인허가에 필요한 자료를 생산할 예정으로 있다.

**잡** 고체나 수지와 같은 가연성 폐기물을 유리화하기 위해서는 폐기물이 연소되어 유리와 혼합되는 용융로와 유리를 용융시키는 데 필요한 전기 에너지 공급 계통, 배기체 처리 설비 및 기타 안전 계통을 갖추어야 한다.

한국전력공사 원자력환경기술원은 SGN사와 공동으로 프랑스 Marcoule에서 직경 300mm의 소규모 유도 가열식 저온로를 이용한 Orientation Test를 수행하였다.

그 결과를 바탕으로 한전과



- ① Glass Frit Feeder
- ② DAW Feeder
- ③ Resin Feeder
- ④ Cold Crucible Melter
- ⑤ Pipe Cooler

- ⑥ High Temperature Filter
- ⑦ Post Combustion Chamber
- ⑧ Off-gas Cooler
- ⑨ Scrubber
- ⑩ Reheater

- ⑪ Activated Carbon / HEPA Filter
- ⑫ Extraction Fan
- ⑬ Reheater
- ⑭ DeNOx System
- ⑮ Stack
- ⑯ Plasma Torch Melter k

〈그림 1〉 유리화 실증 설비 개략도

**유리화 실증 설비의 개요 및 건설**

원자력환경기술원에서는 1996년 부터 오리엔테이션 결과를 바탕으로 유도 가열식 저온로(CCM)와 플라즈마 토치 용융로(PTM), 배기체 처리 공정(OGTS)으로 구성된 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 실증 설비를 개발하여 왔다.

〈그림 1〉은 1999년 6월에 건설이 완료된 유리화 실증 설비의 개략도를 보여주는데, 여기서는 CCM을 이용한 가연성 폐기물 처리 계통

에 대해서만 기술하였다.

**1. 유도 가열식 저온로 시스템**

유도 가열식 저온로 시스템은 용융로 본체와 용융로 냉각 계통, 산소(압축 공기) 공급 계통 및 고주파 발생기로 이루어져 있다.

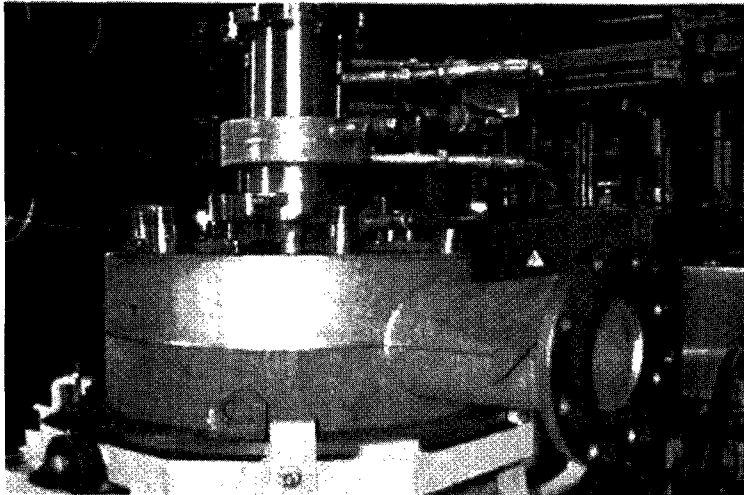
**가. 용융로 본체**

용융로는 상부 챔버(Upper Chamber)와 하부 챔버(Lower Chamber) 및 용융로 하부로 구성되어 있다.

상부 챔버는 폐기물·유리를 유

입하는 통로를 제공하고, 가연성 폐기물을 연소시키기 위해 필요한 산소 및 질소 등을 공급할 수 있는 폐기물 주입 배관, 그리고 가연성 폐기물의 분해시 발생하는 가스를 배기체 처리 계통으로 뽑아내는 배기구, 내부를 관찰하거나 초기 기동을 위해 필요한 티타늄 고리를 넣을 수 있는 관찰창으로 구성되어 있다(그림 2).

상부 챔버는 기밀성을 높이기 위하여 스테인리스 스틸로 제작되었으며, 내부를 수냉각하도록 하였



〈그림 2〉 유도 가열식 저온로의 상부 챔버

다. 특히 유입되는 냉각수의 온도를 낮게 유지함으로써 HCl 등 산성 가스가 용융로 표면에 응축됨으로 인한 부식을 방지하도록 하였다.

하부 챔버의 기능은 고주파를 효과적으로 내부로 통과시켜 유리를 용융시킬 수 있도록 함은 물론, 챔버 내벽을 냉각시킴으로써 내벽 표면의 온도를 낮추고 따라서 고체화된 얇은 유리막을 형성함으로써 유리화 발생될 수 있는 부식성 금속 등으로부터 용융로 내벽의 부식을 방지하는 것으로, 유도가열식 저온로 핵심 부분의 하나이다.

하부 챔버는 여러 개의 스테인리스 통으로 연결된 원통형인데, 통과 통 사이에는 절연체가 설치되어 있어 전기적으로 서로 분리되어 있다.

용융로 하부는 하부 챔버를 지지

하며, 내부의 용융 유리 및 폐기물을 외부와 밀봉시키는 역할을 함은 물론, 용융 유리의 바닥을 냉각시켜 고체화된 유리막을 형성시킨다.

용융로 하부는 내화 시멘트로 되어있으며 내부에는 스테인리스 스틸 통과 유리 배출 밸브(Pouring Valve)가 고정되어있다.

#### 나. 용융로 냉각 계통

하부 챔버와 용융로 하부판의 표면에 고체화된 유리막을 형성하고 유리 배출 밸브에 유리 마개를 형성할 수 있도록 용융로 냉각 계통이 갖추어져 있다.

용융로 냉각 계통은 하나의 순환 폐회로(1차 냉각 계통)로 구성되어 있으며, 이 냉각 회로는 냉각탑에서 냉각된 2차 폐회로와 열 교환에 의해 일정한 온도를 유지하도록 설계

되었다.

또한 유도 가열식 저온로 관련 냉각 계통의 파열이나 누설, 냉각수 펌프 등의 고장 등 이상 상태 발생 시 유도 가열식 저온로 및 관련 계통이 손상되는 것을 방지할 수 있도록 사고를 조기에 발견하고 완화시킬 수 있는 비상 냉각 시스템을 갖추고 있다.

#### 다. 산소(압축 공기) 공급 계통

폐기물의 분해와 용융 유리의 균질한 혼합을 위해 용융로 내부로 산소와 압축 공기를 실험 목적에 따라 선택적으로 공급할 수 있도록 밸브를 설치하였으며, 공급 헤더를 통해 산소(공기)를 공급한다.

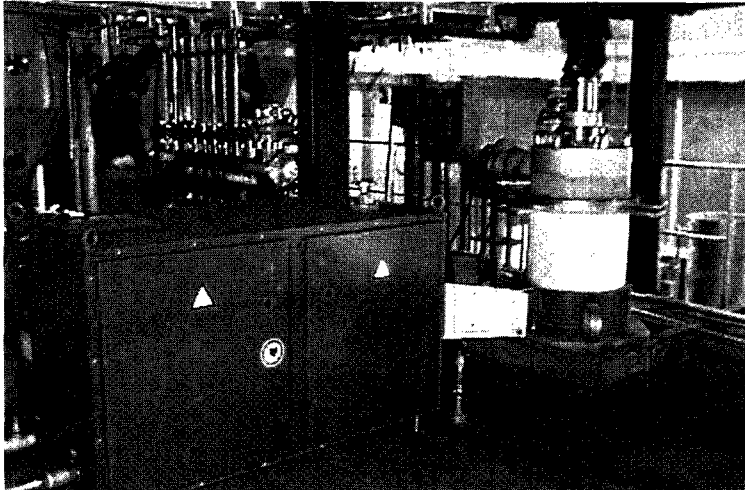
상부 공급 헤더에서는 중앙 산소 공급 배관과 주변 산소 공급관으로 산소를 공급하며, 하부 공급 헤더에서는 CCM 하부에 설치된 공기 주입기로 산소를 공급한다.

#### 라. 고주파 발생기

고주파 발생기 계통은 전력 공급 장치와 CATI300 고주파 발생기, 임피던스 조절함(Impedance Matchong Unit), 인덕터 및 냉각 계통으로 구성되어 있다.

고주파 발생기 계통에는 380V AC와 220V AC 전원이 공급되는데 380V AC 전원은 냉각수 순환 펌프에 공급되는 380V AC 전원(UPS 전원)과 고주파 발생기 자체의 전원으로 구분된다.

고주파 발생기는 유도 가열식 저



〈그림 3〉 임피던스 조절함과 CCM에 설치된 인덕터 전경

온도에 250 ~ 300KHz의 고주파 전류를 흘릴수 있는 장치로서 최대 용량은 300kW 이며 기동 시간은 250ms 이다.

CATI 300에는 입력 전압 변압 기로부터 330V AC의 전압을 받아 고주파로 변환하는 전력 전자 회로와 제어 회로가 금속함 내에 내장되어 있다.

임피던스 조절함은 티타늄 고리를 사용하는 기동시와 폐기물 유입 정도 등 유리 용융 상태에 따라 임피던스의 변화를 보상하는 회로로서 필요시 인덕턴스를 수동으로 조절할 수 있도록 핸들이 노출되어 있다.

인덕터는 고주파가 흐르는 코일로서 용융로 외부에 설치되어 있어 용융로 내부로 유도 전류를 흐르게 하는데 적정 인덕턴스를 얻기 위해

여러 개의 코일로 구성하였다. 인덕터의 재질은 구리이며 제작시 은용접을 하여 열 및 전기 전도성을 높였다.

〈그림 3〉은 임피던스 조절함과 CCM에 설치된 인덕터의 전경을 보여준다.

## 2. 배기체 처리 계통

방사성 폐기물을 유리화하면 방사성 핵종이나 중금속이 유리 매트릭스 속에 고정화되어 처분시 환경으로의 침출이 거의 없는 고화체가 생성된다.

그러나 폐기물을 분해하는 과정에서 방사성 핵종이나 산성 가스, 다이옥신류와 같은 유해 물질이 배기체로 발생될 수 있으므로 이들을 인체와 환경에 무해한 수준으로 충

분히 제거한 후 방출해야 된다.

따라서 유리화 기술이 상용화되기 위해서는 효과적이고 환경 친화적인 배기체 처리 공정의 개발이 무엇보다도 중요하다.

배기체 처리 공정의 기기 배치 등 기본 개념은 1998년도에 관련 공동 연구 기관인 프랑스 SGN 및 현대정공과의 협의를 거쳐 확정하였는데, 배기체로 발생된 입자 성분을 가장 먼저 제거함으로써 상용화시 방사성 입자의 오염 확산을 최소화하여 기기 차폐 비용, 운전 및 보수 편의성을 추구할 수 있도록 하였다.

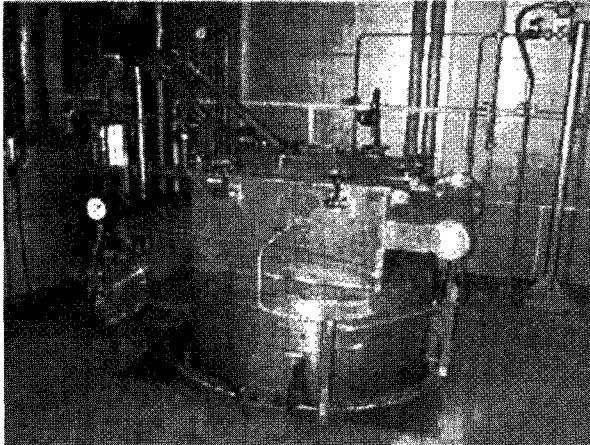
또한 후단 연소기는 상용 경험이 많은 가스 버너를 채택하였으며 그 중에서도 NOx 및 배기체 발생량이 적은 순산소 버너를 선정하였다. 뿐만 아니라 질소 산화물 제거 및 다이옥신 제거를 위해 특별히 선택적 촉매를 사용하도록 설계하였다.

### 가. 고온 필터

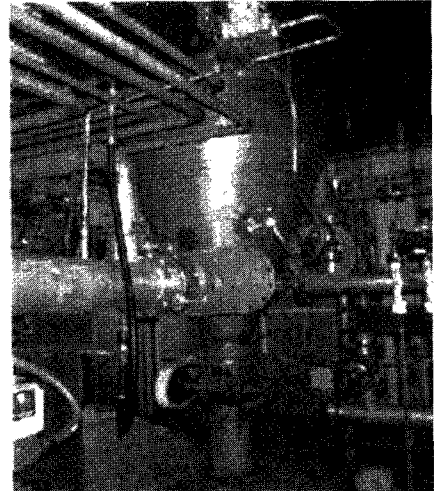
#### (High Temperature Filter)

예상되는 운전 조건하에서 효율적인 입자 제거를 위하여 세라믹 필터를 재질로 채택하였다. 필터 표면에 축적된 분진은 압축 공기를 순간적으로 필터 내부로 역주입함으로써 탈진(declogging)시키는데, 탈진 장치는 여러 조의 필터로 구성되어 있으며, 탈진은 한 열씩 순차적으로 수행된다.

습기 및 산성 가스의 응축으로 인한 세라믹 필터의 손상을 방지하기



〈그림 4〉 고온 여과기 상부 및 탈진 장치



〈그림 5〉 고온 여과기 하부

위해 하우징 표면에 전기 열선을 설치하여 필터 하우징 내부를 항상 150℃~200℃로 유지할 수 있도록 하였다. 제거된 분진은 고온 필터 외함의 하부에 설치되어 있는 회전형 밸브를 통해 드럼 속으로 모아져 시험 분석 등에 활용된다.

〈그림 4〉 〈그림 5〉는 실증 시험 중에 설치된 고온 여과기의 상부 및 하부 모습이다.

#### 나. 후단 연소기

##### (Post Combustion Chamber)

후단 연소기는 유도 가열식 저온로에서 발생된 가스 중 미연소된 성분을 고온 산화 분위기에서 완전 연소시킨다. 후단 연소기는 전기식·가스 버너식 등 여러 종류가 있으나 상용 시설에서 사용 경험이 많은 후자의 방식을 택하였다.

그러나 일반 가스 버너의 경우 연

료 연소를 위해 공기를 사용하므로 NO<sub>x</sub>가 많이 발생되고 배기 가스 발생량도 많아 순산소 버너를 설치하였다. 후단연소기벽을 냉각하기 위한 펌프는 2개가 있으며, 1개는 예비용으로 주운전 펌프가 정지되었을 때 자동적으로 기동하게 되어 있다.

#### 다. 배기 가스 냉각기

##### (Off-gas Cooler)

후단 연소기에서 나오는 가스는 1,100℃의 온도를 유지하고 있기 때문에 세정기로 유입되기 전에 냉각시켜 줄 필요가 있다. 이렇게 하면 후단 설비를 고온으로부터 보호할 뿐만 아니라 가스의 체적이 줄어들어 후단 설비를 더 작게 설계할 수 있어 유리하다.

배기 가스 냉각기는 수냉 자켓으로 되어 있으며, 출구에서의 배기체

온도가 500℃를 유지하도록 설계하였다. 또 배기체 중에 포함되어 있을 수 있는 산 성분의 응축을 방지할 수 있도록 냉각수의 자켓 출구 온도를 제어하여야 한다.

#### 라. 세정기

##### (Jet Scrubber & Packed Scrubber)

세정기는 배기 가스를 급속히 냉각시키고, SO<sub>x</sub>·HCl 등 산성 가스 제거를 제거하는데, NO<sub>x</sub>도 일부는 세정기에서 제거된다. 또한 분사형 세정기에서는 가스 내 분진도 일부 제거된다.

배기 가스 냉각기에서 냉각된 가스는 분사형 세정기와 충전형 세정기에서 50℃까지 냉각된다. 분사형 세정기는 HCl·SO<sub>x</sub> 등과 같은 산에 내구성이 있는 재질로 제작되었다. 분사형 세정기로부터 나온 가스는 다시 충전형 세정기로 유입되며



HCl과 SO<sub>x</sub>가 주로 이 공정에서 제거된다.

충진형 세정기는 분무 노즐의 단으로 구성되어 있으며, 각 단에서는 테트라이트 형의 충전물이 충전되어 있다. 충진형 세정기 출구에는 습분 제거기(Demister)가 설치되어 있어 분무화로 인해 발생될 수 있는 수분을 제거하여 다음 공정에서 수분이 유입되는 것을 방지한다.

#### 마. HEPA 필터/활성탄

이 계통은 3단으로 이루어져 있으며 1단과 3단에는 HEPA 필터가 2단에는 활성탄이 설치되어 있다. 활성탄은 흡착 성질을 이용하여 다이옥신·퓨란 등과 일부 질소 산화물들을 제거한다.

HEPA 필터는 반도체, 원자력발전소 배기체 처리 공정 등에서 많이 이용되는 재료로 0.3 $\mu$ m 이상의 입자들을 99.97% 이상 제거할 수 있는 여과 능력을 갖고 있다.

#### 바. 배기팬 (Extraction Fan)

배기팬은 공정 내에서 생성된 가스를 연돌까지 안전하게 유인하는 역할을 한다. 즉 공정상의 각 설비를 부압으로 유지시키고 동시에 발생된 유해 가스가 각 설비를 통과하여 순차적으로 처리될 수 있도록 도와준다. 따라서 배기팬은 공정 운전 및 안전 측면에서 매우 중요하다.

배기팬은 배기체 처리 계통의 예상되는 압력 손실을 고려하여 설계하였다. 또한 갑작스런 사고로 인한

팬의 정지 및 압력 손실의 증가를 대비할 수 있도록 같은 성능의 배기팬 1대를 추가로 설치하였다.

#### 사. 질소 산화물 제거 계통

질소 산화물 제거 계통은 암모니아 주입관, 암모니아와 배기 가스를 혼합할 수 있는 Line mixer, 그리고 촉매로 구성되어 있다.

암모니아는 연돌에 위치한 NO<sub>x</sub> 측정기의 농도에 따라 비례 제어 방식에 따라 주입된다. 단, 암모니아는 촉매를 보호하기 위해 우회되고 있는 동안이나 촉매 온도가 너무 낮은 경우에는 주입되지 않도록 프로그램하였다.

Line mixer는 분사된 암모니아와 흘러가고 있는 가스가 잘 혼합될 수 있도록 덕트 중간에 난류가 형성되도록 하였다.

질소 산화물 환원 촉매는 주로 TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, WO<sub>3</sub>의 세 가지 성분이 벌집형의 세라믹 모재에 함유되어 있는 것을 이용하였다.

#### 아. 연돌(Stack)

연돌은 처리된 유해 가스가 최종적으로 대기중으로 방출될 수 있도록 유인해주는 설비이다. 이 연돌에는 SO<sub>x</sub>·NO<sub>x</sub>·HCl·CO<sub>2</sub>·CO·O<sub>2</sub> 농도를 연속적으로 측정할 수 있는 가스 분석기가 설치되어 있다.

### 3. 폐기물 공급 계통

폐기물 공급 계통은 가연성 잡고

체를 분쇄하기 위한 절단기와 이를 통해 파쇄된 잡고체, 이온 교환수지, 그리고 용융 재료인 유리 조성제를 유도 가열식 저온 용융로에 투입하기 위한 폐기물 주입기로 구성되어 있다.

#### 가. 폐기물 절단기

폐기물 절단기는 원자력발전소에서 사용한 방호복·제염지·플라스틱백·장갑·신발 등의 가연성 잡고체를 잡고체 공급기가 원활히 CCM에 공급할 수 있도록 파쇄하는 장치이다. 이 장치는 크게 투입 탱크와 1차 절단기, 2차 절단기, 파쇄물 수집함의 네 부분으로 구성되어 있다.

잡고체는 1차 및 2차 절단기에 의해 연속적으로 절단되어 최종적으로 파쇄된 크기는 평균 5×5mm, 최대 15mm 이하가 되도록 한다.

#### 나. 폐기물 공급 장치

폐기물 공급 장치는 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물을 유도 가열식 저온 용융로(CCM)의 내부로 일정 속도로 공급하기 위한 장치이다.

투입하는 물질에 따라 유리 주입기·잡고체 주입기·이온 교환수지 주입기의 세 종류로 구성되어 있다.

유리 주입기는 배치식 주입 방식이며, 수지 및 잡고체 주입기는 스크루를 이용한 연속 주입 방식으로

설계되어 있다. 각 주입기는 실험 목적에 따라 각각 또는 동시에 운전 될 수 있다.

유리 주입기는 유리를 저장하는 저장 탱크, 유리를 계량컵으로 이동하는 진동대, 배치당 무게를 측정하는 계량컵 및 밀봉 밸브(glass frit air lock)로 구성되어 있다. 유리 조성제 공급은 속도 조절이 가능한 진동 주입 방식을 사용하여 배치식으로 이루어진다.

이온 교환 수지 주입기는 원전에서 사용하고 있는 사양의 수지를 유도 가열식 저온로 내부로 연속 정량 주입하기 위한 장치로, 저장 탱크와 이송 스크루, 계량 탱크, 계량 스크루로 구성되어 있다.

저장 탱크는 700ℓ 용량으로 약 500kg의 수지를 저장할 수 있으며, 저장 탱크에 설치된 교반기와 이송 스크루에 의해 계량 탱크로 수지가 운송된다. 계량 탱크에는 load cell이 부착되어 있어 계량 탱크 내 폐기물의 중량을 측정하며 스크루의 회전 속도를 제어함으로써 정량 공급이 이루어진다.

잡고체 주입기의 기본적인 구조와 운전 원리는 수지 주입기와 유사하나 여러 차래의 실험을 거쳐 각 폐기물의 특성을 반영하여 세부적인 설계 사항을 결정하였다.

잡고체 주입기는 저장 탱크와 계량 탱크에 잡고체를 공급하기 위한 이송 스크루, 계량 탱크 및 계량 스

크루로 구성되어 있다.

분쇄 잡고체는 밀도가 수지에 비해 매우 낮으므로 저장 탱크와 계량 탱크는 수지 주입기보다 용량을 크게 설계하였다.

각 유리 및 폐기물 주입기에서 주입된 물질은 수직 스크루로 운반되며 수직 스크루는 이를 유도 가열식 저온 용융로 상부로 투입하는 역할을 한다.

수직 스크루는 유리·수지 및 잡고체의 투입이 모두 원활하게 이루어질 수 있도록 나선 형태이며 모터에 의해 일정 속도로 작동한다.

한편 용융로 내부의 기체 및 연소 불꽃이 수직 스크루 내부로 역류되는 것을 방지하기 위하여 질소를 수직 스크루로 주입하도록 하였다.

#### 4. 기타 계통

##### 가. 전력 공급 계통

실증 시험동의 전력 설비는 22.9kV, 950kW 용량의 수전 설비, 안전 계통 부하를 담당하는 380VAC, 150/165kW(연속/비상) 용량의 디젤 발전기와 380VAC, 220V의 무정전 전원 공급 장치로 구분된다.

수전 설비로부터 공급받은 22.9kV는 380V(750kW), 380V(200kW) 변압기 2대로 나누어져 부하를 담당하게 된다.

부하는 일반 부하와 안전 계통 부하로 구분된다. 안전 계통 부하는

두 종류로 나뉘는데, 디젤 발전기에만 연결되어 주전원 차단시 디젤 발전기가 정격 출력을 낼 때까지(약 13초) 일시적으로 전력 공급이 중단되어도 가능한 부하와 전력 공급 중단을 허용하지 않는 부하로서 이 부하는 무정전 전원 공급 장치가 담당한다. 급냉기, 배기팬 등은 380V 디젤 발전기가, 공정 제어 계통(PLC), 컴퓨터 등에는 무정전 전원 공급 장치가 전력을 공급하도록 되어 있다.

일반 부하는 전원의 공급이 정지되더라도 운전원이나 기기의 안전에 영향을 크게 미치지 않는 기기의 부하이다.

##### 나. 공정 제어 계통

유리화 실증 설비의 공정 제어는 운전원이 운전 상황 및 공정 변수의 감시 및 제어를 용이하게 할 수 있도록 PLC를 채택하고 있으며, 전체 공정을 담당하는 PLC(AB 1771-P7), 고주파발전기의 제어를 담당하는 PLC(CAPI 300), 폐기물 주입 계통의 제어기(AB SLC 5/04)를 구분하였다.

PLC의 논리 회로는 Rockwell사의 Rslogic을 채택하였다. PLC는 기기와 기기간의 통신을 통해 공정을 감시하고 제어하므로 운전원이 공정 변수를 확인하고 조정할 수 있도록 Rockwell사의 Man Machine Interface 프로그램인 Rsvew와 2대의 PC(Pentium II, 233MHz, 6

GB)를 설치하였다.

따라서 공정 변수 변화를 파일로 저장할 수도 있고 그래픽으로 즉시 출력할 수 있기 때문에 실증 시험중이나 시험 후에도 매우 유용하게 활용될 수 있다.

### 5. 실증 설비 설치 공정

유리화 실증 설비는 1999년 3월 초 실증 시험동 내 철골 구조물(4층) 설치를 시작으로 배기체 처리 계통 및 유도 가열식 저온로를 1999년 6월 말까지 설치 완료하였다.

유도 가열식 저온로 비상 냉각 계통을 위한 상수도 공급(30m<sup>3</sup>/h)이 용이하지 않아 비상 냉각 탱크로 구성된 방식으로 설계를 변경하여 1999년 7월 말 설치하였다. 기기 제작 및 설치시의 품질 관리는 KS, JIS 규격을 준용하였다.

#### 실증 설비 운전 현황 및 결과

유리화 실증 설비를 설치한 후 각 구성 기기가 실증 시험을 수행하기에 적합하도록 설계 규격에 따라 제작·설치되었는지를 확인하기 위하여 약 4개월 동안에 걸쳐 성능시험을 수행하였다.

성능 시험을 성공적으로 마친 후 폐수지와 잡고체 유리화 시험과 분진 재순환 시험을 수행하였는데, 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

### 1. Performance Test

실증 시설의 설치를 완료한 후 폐기물을 직접 용융하면서 전체 공정을 운전하지 않더라도 그 성능을 입증할 수 있는 시험 항목들은 blank test를 통해 그 성능을 확인하였다.

1999년 6월 실증 시설의 설치를 완료한 후, 유리 용융 시험의 안전성을 확보하기 위하여 약 1개월 동안에 걸쳐 CCM 비상 냉각 계통의 설비를 보완하였으며 7월 최초로 CCM과 배기 계통을 분리한 상태에서 Nepheline 유리 용융 시험을 실시하였다.

동 시험을 통해 CCM의 ignition metallothermy를 확인하고 cooling skid 냉각수 온도를 자동으로 조절할 수 있음을 확인하였다.

그 후 전체 유리화 실증 설비 계통에 대한 cold test와 HFG/cooling skid 가열 시험, 고온 필터 blank test, 후단 연소기(PCC) blank test를 완료한 후 배기 계통과 CCM을 연결한 상태에서 유리 용융 시험을 성공적으로 수행하였다.

blank test를 통해 모든 기기의 성능이 설계 규격을 만족하고 CCM과 배기 계통을 연결한 상태에서 유리 용융 성능과 유리 배출 성능, 폐기물 주입 성능, 배기체 처리 성능 등이 설계 기준을 만족하고 있음을 확인한 후, 유리화 실증 시설의 performance test를 수행하였다.

performance test는 1999년 10월 12일부터 13일까지 2일 동안에 걸쳐 수행되었는데, 폐기물은 양이온 교환 수지와 음이온 교환 수지를 혼합한 후 수지의 수분 함량을 조정하여 사용하였다.

고주파 발생기의 출력을 높여 유리 용융이 시작되자 총 공기 주입량을 조정하고 CCM 내부 압력을 감소시켰으며 HFG 출력을 증가시키면서 유리 용융 상태를 제어하였다.

유리 용융이 시작된 후 약 2시간이 경과되었을 때 유리 용탕의 bubbling을 시작하였으며, 유리가 완전히 용융됨을 확인하기 위하여 일부 배출하였다.

유리 배출을 종료한 후 산소를 공급하기 시작하였으며 산소 주입 후 수지를 주입하면서 performance test를 수행하였다. 수지가 연소하기 시작하면서 유리 온도가 증가되었으며 HFG 출력을 조절함으로써 유리 온도를 제어하였다.

고온 필터의 declogging은 유리 용융이 시작된 10분 후부터 시작하여 유리 용융 과정에서 발생될 수 있는 미립자로 인한 고온 필터의 clogging을 방지하였다.

수지 주입 후 약 1시간 30분이 경과되었을 때 수지 주입을 종료하였으며, 수지 공급을 중지한 후 유리 용탕 상부에 쌓인 잔여 수지를 연소시키기 위하여 출력을 상승시켜 잔여 수지의 연소가 종료됨을 확



인하고 유리를 배출하는 데 성공하였다.

유리화 실증 설비의 성능 시험을 통해 단위 기기 및 전체 공정의 성능을 입증하였으며, 유리화 실증 설비의 배출 가스 농도를 규제 기준치 이하로 유지할 수 있음을 입증하였다.

**2. 이온 교환 수지 유리화 실증 시험**

원자력발전소에서 폐수지가 발생하는 곳은 화학 및 체적 제어 계통(CVCS), 사용 후 원전 연료 저장조 정화 계통(SFP), 붕소회수 계통(BRS), 폐기물 처리 계통(WPS), 붕소열 재생 계통(BTRS)이다.

이 중 CVCS·SFP·BTRS에서 발생하는 폐수지는 1차측에 설치되어 있는 동일한 폐수지 저장 탱크에 수집되어 일정 기간 저장된 후 폐기물 처리 계통으로 이송되어 처리되고 BRS와 WPS에서 발생하는 폐수지는 폐기물 처리 계통에 설치되어 있는 폐수지 저장 탱크에 저장되었다가 처리된다.

본 시험에서는 1차측 폐수지 저장 탱크에 수집되는 폐수지를 모사하여 실시하였는데, 그 이유는 이 폐수지들의 방사능 세기가 높고 원전에서 발생하는 폐수지의 70wt% 정도를 점유하고 있기 때문이다.

폐수지 유리화 실증 시험을 통해 CCM 내부 압력과 잉여 산소량, 산소 및 폐기물 주입 방법, 수지 습윤

도, 유리/폐기물 공급비에 따른 영향을 평가하였으며, 유리화 실증 설비의 최대 수지 처리 용량을 평가하였다.

**가. CCM 내부 압력 변화 시험**

유리화 설비는 유독 기체나 방사성 물질이 외부로 유출되는 것을 방지하기 위하여 부압으로 운전된다. 그러나 부압으로 운전되면 기기 내로 공기가 유입되고 배기체로 유입되는 분진의 양이 증가될 수 있기 때문에 배기체 처리 계통의 규모가 커지고 처리 또한 복잡해진다.

또한 배기체 처리 공정에서 측정되는 분석 자료들이 유입되는 공기의 양에 의해 희석되기 때문에 부압의 변화에 따라 유입되는 공기량을 먼저 측정하여야만 모든 분석 자료들을 표준화하여 객관적인 자료 비교가 가능하다.

본 시험에서는 CCM 내부 압력을 다양하게 변화시키면서 공기 유입량과 배기체 조성을 분석하였다. 시험에 사용하는 수지는 Puorlite사에서 제조한 H<sup>+</sup>형 양이온 교환 수지(NRW-100)와 OH<sup>-</sup>형 음이온 교환 수지(NRW-600)를 1:1로 혼합하여 이온을 흡착시키지 않고 사용하였다. 이들 수지는 발전소에서 사용하고 있는 수지와 같은 nuclear grade로서 함유하고 있는 불순물의 농도는 유사하다.

시험 결과 연소 상태나 수지 유리 고화체의 상태는 매우 양호하였지

만 배기체 중의 분진 농도는 시험 시간의 함수로서 운전 시간이 증가함에 따라 유리 용탕 상부에 형성되는 Cold Cap의 영향을 받아 점차 감소하는 경향을 보였다.

**나. 잉여 산소량 영향 평가**

이 시험은 잉여 산소 공급량의 변화에 따라 수지의 연소 효율과 배기체 발생 특성을 분석하기 위한 시험이다. 또한 산소 분압이 달라짐으로 인한 산화 환원 조건 변화가 유리 고화체에 미치는 영향을 예비적으로 분석하였다.

본 실험에서는 잉여 산소량을 변화시키면서 각각의 조건에 대해 약 1시간 정도 시험을 수행하였다.

이온 교환 수지는 CCM 내부 압력 변화 시험에서와 동일한 수지를 사용하였으며, 시험 수행 과정에서 평가된 최적의 잉여 산소량 조건하에서 폐기물 투입 속도를 증가시켜 실증 시험을 수행하였다.

시험 결과 CCM 연소 상태는 양호하였으며 배기체 조성으로부터 최적 산소량을 결정할 수 있었다.

**다. 최대 처리 용량 결정**

유리화 실증 설비의 이온 교환 수지 최대 처리 용량을 결정하기 위하여 수지 투입량을 점차 증가시키면서 각각의 조건에 대해 연소 특성, 배기체 발생 특성 등을 분석하였다. 그 결과 최대 설계 용량인 50kg/h까지 처리할 수 있음을 확인하였다.

**라. 산소 주입 및 폐기물 투입 방법 비교**

본 실험은 두 가지 측면에서 실시되었다. 한 가지는 산소 및 폐기물 투입구와 용융 유리 표면과의 간격을 변화시키면서 배기체 발생 특성을 분석하는 것이고, 다른 하나는 산소를 주입하는 위치를 변화시키면서 배기체 발생 특성을 분석하는 것이다.

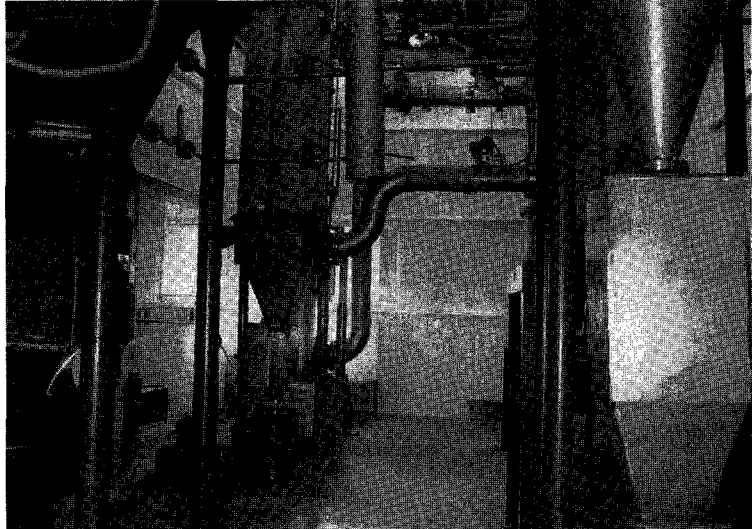
실증 시설에 설치되어 있는 CCM에 산소를 주입하는 방법은 여러 가지 조합이 가능하다.

즉 CCM 중앙에 위치한 폐기물 투입구와 CCM 벽쪽의 원주 방향으로 설치된 주입구, CCM 바닥에 설치된 주입구를 통해서 산소를 주입할 수 있다.

여러 가지 조합이 가능하나 CCM 중앙에 위치하는 주입구만을 사용하는 것과 중앙 주입구와 벽쪽의 주입구를 동시에 사용하는 것과의 차이를 비교함으로써 적절한 산소 주입 조건과 폐기물 투입구 위치를 평가하였다.

**마. 수지 습윤도의 영향**

새 수지는 보통 50wt%의 습윤도를 가지며, 폐수지는 이보다 높은 습윤도를 갖는다. 수지의 습윤도가 높으면 일반적으로 처리 용량이 감소하지만 배기체 발생 특성이 양호해질 수 있다. 본 실험에서는 이온을 흡착시키기 위하여 물과 접촉했던 수지를 계획된 시간 동안 자연



방사성 폐기물 소각 처리 시설. 원전에서 발생하는 폐기물 중에서 가연성 잡고체가 차지하는 비율은 대략 40~50wt% 정도이고 이들 가연성 잡고체는 원전의 운영 및 유지·보수중에 발생하는 방호복·비닐 시트·제염지·목재 등 다양한 성분들로 이루어져 있다.

건조시켜서 습윤도를 측정하고 이를 바탕으로 시험에 사용된 수지의 습윤도를 평가하였다.

**바. 유리/폐기물 공급비**

이 시험의 목적은 폐기물을 투입할 때 소량의 유리 조각을 함께 투입하는 것이 배기체 특성에 어떤 영향을 미치는가를 조사하는 것이다.

일반적으로 유리 조각을 폐기물과 함께 투입시키면 처리 용량은 감소되겠지만 유리가 폐기물과 함께 용융되면서 용융 유리와 폐기물 내 Cs 및 Co 등과 반응할 가능성이 증가하여 휘발성 금속이 배기체로 투입되는 양이 줄어들 것으로 예상된다.

또한 폐기물과 함께 투입된 유리

가 폐기물을 눌러주고 cold cap을 형성하는 데도 유리할 것으로 생각되므로 배기체 발생 특성이 양호해질 수 있다.

따라서 폐기물과 유리 공급비를 변화시키면서 배기체 발생 특성을 분석하였으며 그 결과를 토대로 최적 유리/폐기물 공급비를 결정하였다.

**2. 가연성 잡고체 유리화 실증 시험**

원전에서 발생하는 폐기물 중에서 가연성 잡고체가 차지하는 비율은 대략 40~50wt% 정도이고 이들 가연성 잡고체는 원전의 운영 및 유지·보수중에 발생하는 방호복·비닐 시트·제염지·목재 등 다양

한 성분들로 이루어져 있다.

본 실증 시험에서는 이러한 가연성 잡고체 중에서 가장 발열량이 높은 폴리에틸렌을 대상으로 최적 연소 조건을 평가하였으며, 그 결과를 토대로 발열량이 낮은 셀룰로스 유리화 실증 시험을 성공적으로 수행하였다.

폐기물 종류별 유리화 시험을 성공적으로 수행한 후 평균 조성의 가연성 잡고체를 대상으로 최적 산소량 조건과 최대 처리 용량 평가 시험을 수행하였다.

### 3. 분진 재순환 시험

중·저준위 방사성 폐기물의 유리화 기술 상용화를 위해서는 공정에서 발생하는 폐기물의 처리가 가능하여야 한다. 특히 폐기물 연소 과정에서 발생하는 분진을 회수하여 처리할 수 있는 공정을 개발할 필요가 있는데, 이를 위하여 그 동안 고온 필터에서 수집되었던 분진을 모아 분진 재순환 시험을 수행하였다.

시험 결과 분진의 연소 상태는 양호한 것으로 평가되었으나, 유리 용탕의 산화 환원 상태를 조정할 필요가 있는 것으로 확인되었다.

### 4. 재용융 시험

유리화 상용 설비에서는 용융로 내부에서 유리가 굳어졌을 경우 재용융 수단이 강구되어야 한다.

따라서 용융로 내부의 유리를 그대로 냉각시킨 다음 재용융 시험을 수행하였는데, Nephline을 사용하였을 경우 재용융이 가능함을 입증하였다.

### 5. 장기 내구성 시험

이 시험은 앞에서 결정된 변수들을 사용하여 최대 수지 공급량에서 100시간 정도의 장기 시험을 수행하는 것이다.

이를 통해 전계통의 장기간 연속 운전 가능성을 평가할 수 있으며, 아울러 일정 간격으로 용융 유리의 시료를 채취하여 유리 고화체의 특성을 분석함으로써 감용비를 계산하는 근거로 사용할 수 있다.

현재 장기 내구성 시험을 준비중에 있으며, 본 시험을 마침으로써 유리화 실증 설비의 실증 시험을 종료할 예정이다.

### 6. 종합 결론

유리화 실증 설비를 건설한 후 수행하였던 일련의 성능 시험과 실증 시험을 통해 원자력발전소에서 발생하는 다양한 종류의 가연성 폐기물들을 성공적으로 유리화하였으며, 굳어진 유리의 재용융 시험과 분진의 재순환 시험을 성공리에 수행함으로써 유도 가열식 저온로를 이용한 유리화 기술의 상용화 가능성을 확인하였다.

### 유리화 기술의 상용화

지금까지 수행한 유리화 실증 시험을 통해 중·저준위 방사성 폐기물의 유리화 가능성을 입증하였다. 그러나 유리화 상용 시설을 건설하기 위해서는 유리화 실증 설비를 이용하여 유리화 공정을 최적화시키고 방사성 물질 취급에 따른 안전성을 입증할 필요가 있다.

따라서 원자력환경기술원에서는 2000년 5월까지 유리화 실증 설비의 실증 시험을 완료하고 2000년 6월부터 26개월에 걸쳐 유리화 상용 설비 설계 자료 생산을 위한 제2단계 연구에 착수할 예정이다.

제2단계 연구에서는 유도 가열식 저온로의 유리 배출 계통과 연소 공정의 최적화와 배기 계통 각 구성기기의 최적 경계 조건 결정에 주력할 예정이며, 실증 설비의 일부 개조를 통해 상용 설비에 적용하게 될 최종 공정을 결정할 예정이다.

또한 인허가 지원을 위하여 예상되는 모든 운전 조건에서 유리화 상용 설비의 안전성을 입증하거나 안전성을 입증할 수 있도록 일부 설비를 개선하여 성능을 입증할 예정이며, 환경 영향 평가에 필요한 기본적인 사고 시나리오 분석 작업과 유리화 상용 시설의 운전으로 인한 방사성 물질의 환경 방출량 평가 작업을 수행할 예정이다. ☞