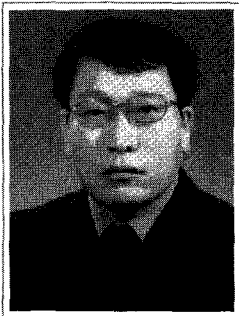


한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 유리화연구그룹

## 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술 개발

### 신상운

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원  
유리화연구그룹장



여 유리가 녹은 상태를 유지하게 한 다음 유리 표면 위로 또는 녹은 유리 속으로 폐기물을 투입하여 폐기물을 처리하는 기술을 유리화라고 한다.

또한 비가연성 폐기물 또는 가연성과 비가연성 폐기물의 혼합물을 플라즈마 토치와 같은 고온 발생 장치로 녹여서 휘발성 물질을 날려보내고 남은 무기물에 적절한 첨가제(flux)를 넣어 유리와 비슷한 물질로 전환시키는 것도 유리화에 속한다.

유리의 물질 구조를 보면 원자가 일정한 규칙에 따라 결합된 금속이나 비금속과는 달리 불규칙한 망목상으로 연결된 구조를 가지고 있다. 유리는 겉보기에는 고체이지만, 고체 특유의 결정 구조를 갖고 있지 않으며 일정한 용점도 없다. 따라서 극단적으로 말하자면 유리는 점도가 아주 높은 액체라고 할 수 있다.

유리 성분에 대해서 조금 더 상세하게 이야기하자면, 유리는 기본적으로 규소(SiO<sub>2</sub>)를 주축으로 하여 알루미늄·산화 나트륨 또는 붕소나 약간의 철·납·크롬 등의 금속 원자가 가미된 혼합물이다.

유리 분자에 들어있는 성분에 따라 유리는 소다 석회 유리·붕규산 유리 및 납유리 등으로 분류되기도 한다. 이 중 붕규산 유리는 특이한 성질을 가진다. 유리 속에 붕소가 들어가면 유리의 분자간 결합이 깨어진다. 따라서 유리의 점도가 낮아지고 깨진 결합 사이에 공극이 발생한다.

이러한 붕규산 유리의 특성을 잘 이용하면 방사성 폐기물 속에 들어있는 방사성 핵종을 유리 구조 속에 안정되게 가두어 둘 수 있다.

유리는 물리·화학적 특성이 아주 좋다. 따라서 일단 유리 구조

**폐**기물을 유리화(琉璃化)한다는 것은 용융 유리(熔融琉璃)를 이용하여 가연성 폐기물을 처리하여 유기 물질은 기체화하여 날려보내고 Cs·Co 등의 무기 원소는 <그림 1>과 같이 유리 구조 내에 가두어 고정시키는 것을 말한다.

다시 말하면 어떤 용융로에 유리 원료 물질을 넣고 여기에 열을 가하

속에 갇힌 방사성 핵종은 좀처럼 밖으로 빠져 나오지 않는다. 설령 유리가 깨져 산산조각이 나더라도 방사성 핵종은 유리에서 빠져나가지 않는 것이다.

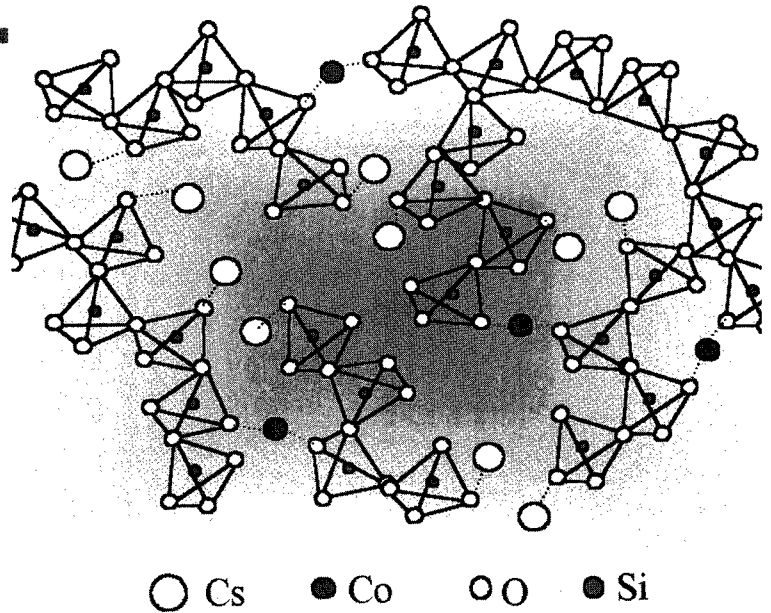
유리의 이러한 성질 때문에 미국의 환경청에서는 방사선의 세기가 아주 높은 고준위 방사성 폐기물 처리에 유리화 방법이 가장 이상적인 방법이라고 하였다. 따라서 이미 프랑스나 영국 등에서는 고준위 방사성 폐기물을 유리화하는 기술을 개발하였고 이는 상용화되어 성공리에 사용되고 있다.

유리화하는 고준위 방사성 폐기물은 주로 핵연료 재처리 후 발생되며 액체 형태로 많은 양의 핵분열 생성물을 포함하고 있다.

이 액체를 증발시켜 분말화하여 유리 재료와 섞어서 높은 온도에 구우면 유리 제품이 생성되며 이를 '고준위 방사성 폐기물의 유리화'라고 한다.

고준위 방사성 폐기물의 유리화는 방사선 준위가 높아 원격 제어 설비나 자동 제어 장치가 많이 필요한 반면 화학적으로는 폐기물의 성분이 일정하여 유리화 공정 자체는 그리 어렵지 않다.

상업적으로 유리화 기술은 현재까지는 고준위 방사성 폐기물 처리에만 적용되어 왔고 중·저준위 방사성 폐기물에는 적용되지 않고 있었다.



(그림 1) 유리 구조 내에 방사성 핵종이 이온 결합된 상태

그 이유는 과거에는 중·저 준위 방사성 폐기물을 용기에 담아 그저 처분장에 매립하는 것이 일반적인 추세였으므로 중·저 준위 방사성 폐기물 유리화 기술 개발 필요성이 대두되지 않았기 때문이다.

그러나 지금은 전세계적으로 님비(NIMBY) 현상이 두드러져 방사성 폐기물의 처분 부지를 확보하기 어렵고 또 기존 부지도 점점 고갈되는 형편이어서 방사성 폐기물의 부피를 대폭 줄이고 폐기물이 환경에 유출되지 않는 안정한 형태로 만드는 기술이 절실히 필요하게 되었다. 이러한 요구에 가장 적합한 처리 기술로서 유리화 기술이 대두되었다.

하지만 중·저준위 방사성 폐기물의 유리화는 고준위 방사성 폐기물의 유리화보다는 더 복잡한 기술이다.

고준위 방사성 폐기물은 물리적으로 단순하고 화학적 조성도 항상

일정한 데 비해, 중·저준위 방사성 폐기물은 물리적인 형태도 다양하고 또 화학적 조성도 복잡하여 배기체 처리가 상당히 어렵다.

따라서 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술을 상용화하기 위해서는 적절한 유리 조성에 대한 연구와 배기체 처리 연구가 선행되어야 한다.

중·저준위 방사성 폐기물의 유리화에 대한 연구는 미국에서 먼저 시작했다. 미국에서는 일찍부터 방사성 폐기물의 처리 처분에 소요되는 비용이 원자력 발전 비용에서 차지하는 비율이 점차 커지고 있다는 사실을 대단히 중시하였다.

예를 들어 1980년대에 방사성 폐기물 처분 비용이 입방피트당 3~5불 하던 것이 1990년대 중반에 들어와 무려 100배가 넘는 300~500불로 경증 된 것만 보아도 알 수 있다.



그리고 한정된 처분 부지 문제가 짧은 시일 내에 해결될 전망도 없어 앞으로도 폐기물 처분 비용은 불가피하게 더 커질 수밖에 없다고 미국은 판단했다.

이에 미국 전력연구소인 EPRI에서는 이 문제를 신기술로 해결하고자 하여 본격적인 타당성 조사를 시작했다.

환경 문제와 비용 문제를 동시에 해결할 수 있는 방책으로 EPRI가 최종 선정한 신기술은 중·저준위 방사성 폐기물의 유리화 기술이었다.

EPRI는 미국의 VECTRA사에 「원전 방사성 폐기물의 유리화 기술 개발」 용역을 위탁했다. 기술 개발은 1단계로 유리화 기술 개발 타당성 조사, 2단계로 유리화 실증 시설 건설, 그리고 3단계로 상용 시설 개발 단계로 추진하기로 했다.

그리고는 이내 1단계 연구를 착수하고, 그 결과가 1996년도에 나왔다. 연구 결과는 원전의 방사성 폐기물 특성 조사, 실험실에서 유리화 가능성 입증 및 유리 용융로 설계, 그리고 유리화 실증 설비 개요에 대한 것이었다.

이 사업의 추진에는 막대한 비용이 소요되었고 따라서 EPRI는 연구자금 조달을 위해 공동 연구 기관을 찾아야만 했다. 사실 EPRI는 연구 계획 단계인 1994년에 우리 한전 연구원에 찾아와 유리화 연구 계획에 대해 설명하였고 우리는 이를

긍정적으로 받아들였다.

그리하여 연구 계획을 구체적으로 검토하던 중 핵심이 되는 유리 용융 방법에 이견이 생겼다. 미국에서는 용융로 속에 전극을 집어넣어 유리를 녹이는 직접 통전 방식을 고집했고, 우리는 폐기물 연소시 발생하는 부식성 가스 때문에 전극의 손상을 우려해 전극이 없는 유도 전기로를 추천했던 것이다.

이견 차이를 좁히지 못한 우리와 미국은 서로 독자 노선을 걷기로 했다. 따라서 우리도 장기 연구 계획을 별도로 수립해야만 했다.

우리가 수립한 연구 계획은 1단계 실험실적 증명 연구, 2단계 실증 설비 개발, 3단계 유리화 기술 상용화 연구였고, 1994년 11월에 바로 1단계 연구에 들어간 것이다.

1단계 연구 결과 원전의 방사성 폐기물을 가연성과 비가연성으로 구분, 가연성을 전극을 쓰지 않는 유도 전기로를 이용하여 유리화하고 비가연성을 플라즈마를 이용 처리하며, 배기체는 건식과 습식을 조합하되 배기체 처리 계통은 유도 전기로와 플라즈마 용융로에 공용하는 것이 경비를 절감하는 것이라는 안을 내놓게 된 것이다.

이러한 안을 발표하고 2단계 연구 계획을 공표하자 프랑스에서 공동 연구를 위한 출자를 제의해 왔다. 그리고는 공동 연구 기관 선정 절차를 거쳐 프랑스의 SGN사로부터

200만불, 그리고 국내의 한국화이버사로부터 200만불의 투자를 받는 조건으로 계약이 성립되어 1996년 7월, 46개월의 기한으로 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 실증 연구를 시작한 것이다.

이는 아마 우리 나라 원자력계에서 처음으로 외국으로부터 대규모 자본을 유치하여 연구를 수행하는 첫 번째 계기가 되었을 것이다.

연구는 그간 순조롭게 진행되었으나 뜻하지 않게 IMF 위기 기간 동안에 공동 출자하기로 했던 국내 회사에서 사정상 공동 연구를 지속할 수 없게 되어 후계 기관으로 현대정공(현대 모비스로 사명 변경)이 대신 참여하게 되었다.

프랑스에서 소규모 실증 설비로 여러 가지 실험을 한 후 대규모 실증 설비 설계를 마치고 우리나라의 대덕 연구단지 내에 실증 설비 건설에 착수하였다. 1999년 6월에 드디어 실증 설비 건설이 완료되고 동년 9월에는 각종 성능 시험이 성공적으로 수행되었다.

그리고 2단계 연구 종료 시점인 2000년 5월까지 이 실증 설비를 이용해서 우리나라의 원전에서 발생하는 방사성 폐기물과 조성이 똑같은 모의 폐기물을 이용해서 유리화에 성공하였다.

3단계 연구는 2000년 7월에 착수되어 2002년 8월까지 26개월에 걸쳐 수행될 예정이다. 3단계 연구

에도 프랑스 SGN이 200만불을, 현대 모비스가 190만불을 투자하게 된다.

이 기간 중에는 실증 시험을 통해 유리화 기술의 상용화에 필요한 설계 자료 및 인허가 서류 작성에 필요한 자료를 생산하게 된다. 또한 유리화 기술의 경제성 검토가 이루어지고 인허가에 필요한 안전성 분석 시나리오가 수립될 예정이다.

지금까지 국내외 많은 분들의 관심 속에 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술 개발이 추진되었고 이제 상용화의 문턱에 있다. 그 동안 기술 개발을 위해 연구에 매진해온 연구진들의 노고에 감사드리고 유리화 기술 개발이 원활하게 진행되도록 이끌어 주신 경영진 여러분들에게 감사를 드린다.

본고에서는 그 동안 수행된 기술 개발 내용을 간략하게 언급하고 향후 전망에 대해서 기술하고자 한다.

### 유리와 기술 개발의 필요성

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 폐기

물은 5만여 드럼으로 4개 원전 부지 내에 저장되어 있으며, 현재의 소내 임시 저장 시설로 2010년대 중반까지 저장이 가능하다.

원전 이외에서 발생한 폐기물은 현재 총 16,000여 드럼이 저장되어 있다. 이 중 약 4,000드럼은 한국수력원자력(주) 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 드럼, 2040년에는 약 564,000 드럼이 누적될 전망이다.

원전 호기당 폐기물 발생량은 감소 추세이기는 하지만 원전 운영중에 발생하는 폐기물은 신규 원전의 추가 가동으로 지속적으로 증가할 것이고, 2013년경부터는 수명 종료된 원전의 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 통해 폐기물 발생량을 최소화하고 처

분 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. 앞서서도 언급한 바와 같이 이러한 요구를 충족시켜줄 수 있는 기술이 바로 유리화 기술이다.

### 기술 개발 내용

#### 1. 방사성 폐기물 유리화 복합 공정 도출

유리화 기술의 타당성을 조사하기 위하여 먼저 실험실적으로 유리화 가능성을 시험하였다. 유리화가 능성 시험은 방호복·비닐 시트·폐수지·봉산 농축 폐액에 대해 수

행하였다.

이 중 봉산 폐액을 제외한 폐기물들에 대해서는 열분해 시험과 유리화 시험을 수행했고 열분해재의 최대 혼합량을 알아보기 위해 압축 강도 시험을 수행하였다.

열분해재는 400℃에서 혼합성이 좋은 분말 형태로 생성되었고 600~1,300℃에서는 작은 입자상으로 생성되어 혼합성이 떨어졌다. 압축 강도 기준은 500psi이었으며, 시험에 사용된 모든 폐기물은 30 vol% 까지 압축 강도 기준에 맞춰 봉규산 유리에 혼합시킬 수 있었다.

열분해재의 혼합비가 증가할수록 방호복·비닐 시트 및 폐수지의 경우에는 현저하게 압축 강도가 저하하였으나 봉산 농축 폐액의 경우에는 미미한 저하를 보였다.

향후 유리화 기술 개발의 방향을 설정하기 위해 현재 개발중에 있거나 알려진 14개의 유리화 용융로 중에서 가장 유망하다고 판단되는 4개의 용융로에 대한 기술성을 분석하였다.

분석 결과 국내 실정에 맞는 유리화 시설을 개발하기 위해서는 프랑스 SGN사의 직접 유도 가열식 저온로와 플라즈마 토치 용융로를 병행하여 사용하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

이 두 개의 용융로를 이용한 3종류의 처리 개념에 대해 처분 부피 발생량을 계산하고 이를 바탕으로

처분 단가 2백만원 ~ 1천5백만원 /m<sup>3</sup>에 대해 처분비와 처리비를 계산하여 현재의 처리 개념과 경제성을 상호 비교한 결과, 유리화 설비를 이용하는 새로운 처리 개념에 의해 폐기물 처리 시설을 새로 건설할 경우에는 고려한 처분 단가 전범위에 대해 경제성이 있음을 알 수 있었고, 현처리 시설에 추가로 건설할 경우에는 처분단가가 500만원/m<sup>3</sup> 이상일 때 중·저준위 폐기물의 유리화가 경제적임을 알 수 있었다. 처분 단가는 계속 증가할 것으로 예상되므로 유리화 시설을 개발하는 것이 경제적인 것으로 나타났다.

개발할 유리화 시설은 비가연성 잡고체 폐기물과 액체 처리용 폐필터는 플라즈마 토치 용융로를 이용하여 처리하고 기타 폐기물은 직접 유도 가열식 저온로로 처리하는 복합 공정 개념을 도입하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

## 2. Glass Formulation

### 가. 방사성 폐기물 발생 특성 분석

원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화하기 위해서는 처리 대상 폐기물의 발생량 및 특성에 대한 조사가 선행되어야 한다.

가연성 잡고체는 그 종류와 성분이 다양하므로 유리화시 여러 종류의 배기체가 발생되기 때문에 유리 고화 및 배기체 처리 공정에 민감한

영향을 미칠 수 있다.

또한 폐기물이 용융로로 투입될 때 잡고체의 유기물 성분은 열분해/연소 반응에 의해 빠르게 분해되고 무기물이나 금속 성분의 재만 용융 유리에 함유되는데, 이 재의 성분과 유리 첨가제의 종류에 따라 유리 고화체의 물리적·화학적 특성이 결정된다.

따라서 유리화할 폐기물의 성분을 알고 있다면 감용비가 크면서도 침출 특성 등 물리·화학적 내구성이 큰 유리 조성을 만들 수 있다. 뿐만 아니라, 유리화시 용융로 내부에서 일어날 수 있는 화학 반응으로부터 배기체의 종류 및 양을 예측함으로써 배기체 처리 공정의 설계 기본 자료로 활용할 수 있다.

따라서 유도 가열식 저온로에서 유리화가 가능한 가연성 잡고체, 이온 교환 수지, 봉산 농축 폐액에 관해 각각의 처리 방법 및 발생량·성분 등을 고리·영광·울진 원자력 발전소를 대상으로 조사하고 특성을 분석하였다.

폐기물의 특성은 물리적 특성(밀도·점도·크기·입자 분포 등), 화학적 특성(원소 함량·화합물 함량·반응 특성 등), 발생 배기체, 변이성(수분 함량·소각재 함량·온도나 환경 조건에 따른 질량 변화 특성 등) 등으로 나눌 수 있으며 여러 가지 항목에 대해 특성 분석을 수행할 수 있다. 그러나 여기서는

분석 결과가 유리화에 이용될 수 있는 몇 가지 항목을 우선적으로 선정하여 특성 분석을 수행하였다.

수분 함량과 소각재 함량은 유리화 시 에너지 및 물질 수지를 계산하고 배기체 처리 공정의 크기를 결정하는 데 필요하다.

폐기물을 구성하고 있는 유기 원소 함량은 용융로로 폐기물을 투입할 때 발생할 수 있는 배기체의 종류와 양을 예측하기 위한 기본 자료가 된다. 또한 유기 원소의 함량으로 폐기물을 산화시키는 데 필요한 산소량을 결정할 수 있다.

폐기물에 함유된 무기/금속 원소량은 유리 조성제의 조성과 양을 정하는 데 결정적인 요소로서 폐기물의 감용비와도 밀접한 관계가 있다. 그리고 유리화 공정에서 일어날 수 있는 여러 문제점들을 이해하고 해결할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

발전에서 발생하는 비가연성 폐기물의 발생량과 종류 등도 조사하였는데 주로 콘크리트·모래·전구류·필터류 및 금속류 등으로 구성되어 있는 것으로 드러났다.

이들 폐기물을 플라즈마 토치로 용융하여 양질의 고화체를 만들기 위해서는 폐기물의 화학적 조성을 파악하고 양질의 고화체가 만들어질 수 있도록 폐기물들을 배합하거나 적절한 첨가제 또는 용제(Flux)를 첨가해야 한다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트·

모래·유리·석고·형광등의 화학적 조성과 필터류를 구성하고 있는 아연 합금판·스테인리스·유리 섬유의 화학적 조성을 조사하였다.

화학적 조성을 분석하여 용융시 가장 중요 인자인 염기도(CaO/SiO<sub>2</sub>)를 계산하였다.

#### 나. 가연성 폐기물에 대한 실험실적 유리 조성 연구

유리화 실증 시험에 대비하기 위하여 실험실에서 폐기물 종류별로 유리화 특성을 평가하였다. 이를 위하여 원자력발전소에서 발생하는 가연성 폐기물을 잡고체 폐기물과 폐수지로 분류하여 종류별로 대표 조성을 결정하였다.

가연성 폐기물은 산화 열분해시켜 열분해재에 함유되어 있는 성분(주로 무기물)을 분석한 후, 모의 산화 화합물(oxides) 또는 탄산화물(carbonates)로 대체하여 유리 고화체를 제조하였다.

중요 구성물을 정량, 혼합한 후 백금/루테늄 도가니에 넣고 용융시켜 흑연 몰드에 부어 시편을 제조하였다.

1단계로 PVC 열분해재에 포함된 무기/금속 원소 함량을 고려하여 10 여종의 유리 고화체를 제조하였으며, 이들 고화체에 대한 침출 실험 및 점도 측정을 통하여 PVC 유리화에 필요한 유리 첨가제(KEP-A)의 조성을 결정하였다.

유리 조성 선정 절차를 단순화하

기 위해서 PCT 시험법을 개선하여 침출률을 신속하게 측정할 수 있는 유리 고화체 간에 침출 시험법을 개발하였고 용융 유리의 점도를 쉽게 예측할 수 있는 측정법을 개발하였는데, 이 방법은 용융 유리를 흑연 몰드에 따르는 시간을 측정하여 용융 유리의 점도를 예측하는 것이다.

가연성 잡고체에 대해서도 대표 조성 5종에 대해 ash중의 무기/금속 원소 성분비를 계산하고 유리 첨가제 KEP-A와 혼합하여 약 13종의 유리 고화체를 제조하였고, 침출 실험 및 점도 측정을 통한 적정 유리 조성비를 결정하였다.

또한 KEP-A를 사용한 폐수지, 봉산 폐액의 유리화 가능성을 조사하였고 화력발전소에서 석탄 연소 시 부산물로 발생하는 석탄회를 유리 첨가제로 사용하는 방안도 연구하였다.

앞의 실험에서 선정된 KEP-A 유리와 산화물로 모사한 모의 폐기물 및 첨가제를 사용하여 제조한 55개의 유리 고화체의 점도 및 침출률 측정 결과를 바탕으로 최종 유리 고화체의 조성 영역을 제시하였다.

일반 유리와 Nepheline을 사용하여 점도와 침출률을 기준으로 확인 실험을 수행하였는데, 55개의 실험 결과에 의한 조성 영역과 비교적 잘 일치하였다.

또한 페이온 교환 수지와 잡고체의 혼합 폐기물에 대한 일반 유리의

적용 가능성을 평가하기 위해 폐이온 교환 수지 10 또는 20wt.%에 대해 잡고체 함량을 10~50wt.%까지 증가시키면서 유리 고화체를 제조하여 특성을 평가하였다.

위와 같은 연구 결과를 바탕으로 2단계에서 용융로 운전 특성을 고려하여 폐기물별로 후보 유리 조성을 선정하였다.

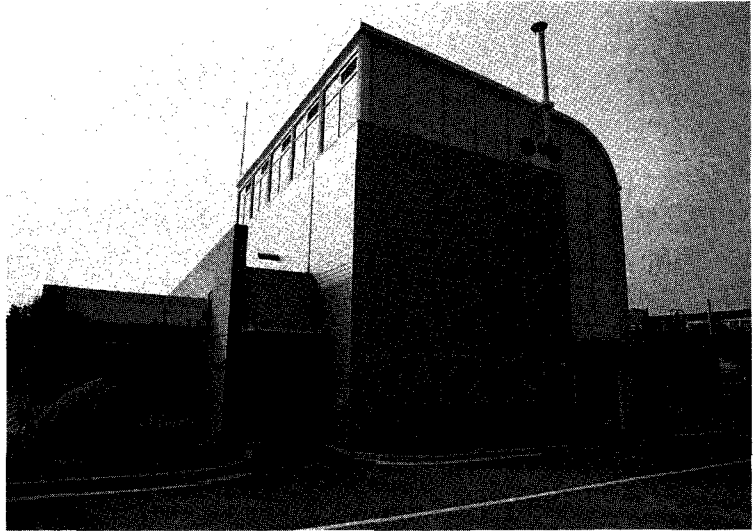
운전 특성에는 전기 전도도·점도 등이 고려되었고, 감용비·고화체 표면 선량 등도 고려하여 후보 유리 조성을 선정하였다.

선정할 때는 주로 전산 프로그램을 활용하였고 선정된 조성에 대해 실험실적인 검증은 수행하였다. 실험실적인 검증을 위해서는 7일간 침출 시험법인 PCT에 따라 침출 특성을 조사하고 표준 유리의 특성과 비교하였다.

그 외에 후보 유리 조성에 대해 액화 온도(liquidus temperature)를 측정하였다. 선정된 후보 유리는 실증 시험을 통해 특성을 확인한 후 최종 유리 조성으로 결정될 예정이다.

#### 다. 비가연성 폐기물에 대한 실험 실적 고화체 조성 연구

원자력발전소에서 발생하는 비가연성 중·저준위 방사성 폐기물을 모사하기 위해 콘크리트·유리·모래·폐필터로 구성되는 총 11종의 모의 폐기물을 제조하고, 여기에 Cs-133의 화합물인 세슘카보네이트( $CS_2CO_3$ )와 코발트 분말을 일정



유리화 실증 시험동 전경

량 첨가하였다.

플라즈마 용융 실험에서는 염기도 조절용 첨가제를 사용하지 않고 순수 폐기물만을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험실 규모 플라즈마 토치 용융 시설의 시운전을 통해 각 용융 조건별 운전 변수를 측정하고 폐기물의 종류에 따른 용융물의 온도를 조사하였다.

본 실험에 사용된 용량 80kW 플라즈마 토치는, 플라즈마 발생 기체로서 알곤과 수소 가스를 각각 18.0lpm대 2.0lpm으로 혼합하여 사용하였다.

총 11종의 모의 폐기물을 용융시켜 생성된 고화체에 대한 건전성 시험을 수행하였다. 플라즈마 용융 후 생성된 암석질 고화체의 비중과 용융 전 모의 폐기물의 비중을 측정하여 용융에 의한 감용 효과를 검토하였으며, 총합량 분석과 용융 전후의

화학적 조성 변화를 조사하였다.

또한 TCLP 침출 시험을 통해 침출 정도를 파악하고 고화체 내의 방사성 핵종 포집비를 분석하였다. 또한 암석질 고화체 내에 유해 무기물질의 함량을 분석한 결과와 고화체의 TCLP 침출 시험 결과를 이용하여 침출 지수(고화체 내 총합유량과 침출량의 비)를 산출하였다.

### 3. 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 실증 설비 건설

#### 가. Orientation Test 및 실증 설비 설계

유리화 실증 설비의 기본 설계 자료 취득을 위해 프랑스 CEA 산하 연구소의 하나인 Marcoule 연구소에서 1997년 10월부터 1998년 3월까지 직경 300mm의 유도 가열식 저온로(CCM)를 이용하여 Orientation Test를 수행하였다.

이온 교환 수지, 가연성 잡고체 및 봉산 폐액 건조물을 대상으로 실험을 하였으며, 각 폐기물의 연소 상태, 배기체 발생량, 배기체 내 입자 분포, 배기체 온도 및 유리 내 금속 산화물의 균질성, 산화 상태를 분석하였다. 이를 바탕으로 폐기물별 최대 처리 용량을 결정하였다.

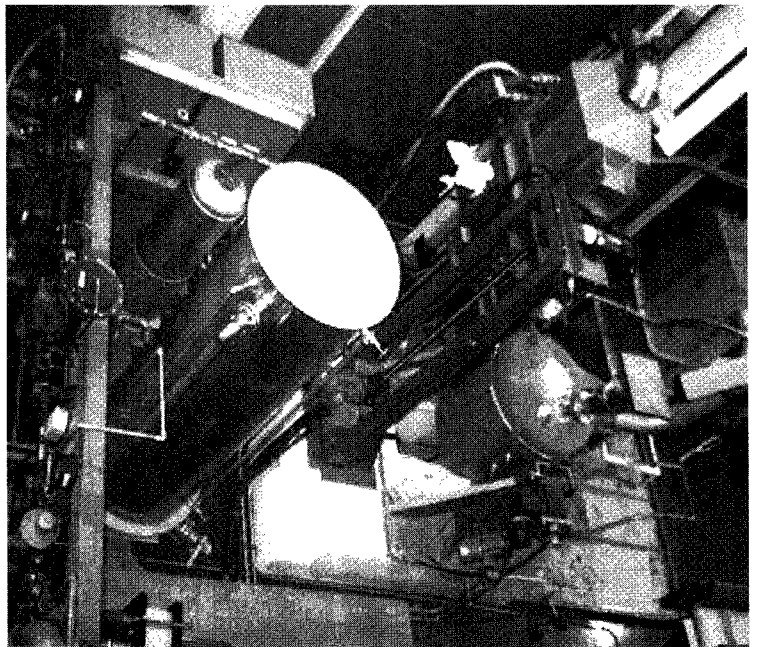
뿐만 아니라 폐기물 내 유기물의 효과적인 분해, 배기체 내 입자의 유입량 저감, 그리고 유리의 균질성 증진을 위해 실험용 CCM의 상부 챔버, 폐기물 주입기 등을 개선하였으며, 동 개선 사항은 실증 설비의 설계에 반영하였다.

또한 입자 농도가 높은 경우에 대비하여 고온 필터를 설치하고 이의 효율을 측정하는 등 실증 설비에의 적용 가능성을 확인하였다.

유리화 실증 설비 중 CCM과 고주파 발생기는 프랑스 SGN이 설계하였고, 배기체 처리 공정은 현대모비스가 설계하였다.

효과적인 폐기물의 분해를 위해 공기 대신 산소 주입식 유리화 공정을 채택하였으며, 직경 300mm CCM의 최대 처리 용량에 대한 실험 결과를 이용하여 실증 실험용 저온로의 직경을 550 mm로 결정하였다.

또한 상부 챔버·폐기물 주입기·용융 유리 배출 밸브 등 Orientation Test시 개선 사항을 실증 실험용 유도 가열식 저온로의 설계



플라즈마 용융 설비 전경

에 반영하였으며, 고주파 발생기는 진공관식이 아닌 반도체식이며 최대 출력 300kW, 최대 주파수 300kHz로 결정하였다.

실증 설비의 배기체 처리 공정은 Orientation Test에서 확인된 배기체 발생 특성을 기준으로 하되, 향후 상용화에 대비 방사선 차폐 비용 저감, 작업자 피폭 감소 및 보수 편의 측면을 고려하여 공정을 설정하였다.

또한 다이옥신 및 대기 오염 물질에 대한 환경 배출 기준을 충족할 수 있도록 재합성 억제 및 효과적인 제거에 초점을 맞춰 배기체 처리 계통을 설계하였다.

#### 나. CCM 및 부속 설비 설치/성능 시험

CCM 및 그 부속 설비인 고주파 발생기·냉각 계통·폐기물 공급 장치 및 파쇄기를 제작하여 1999년

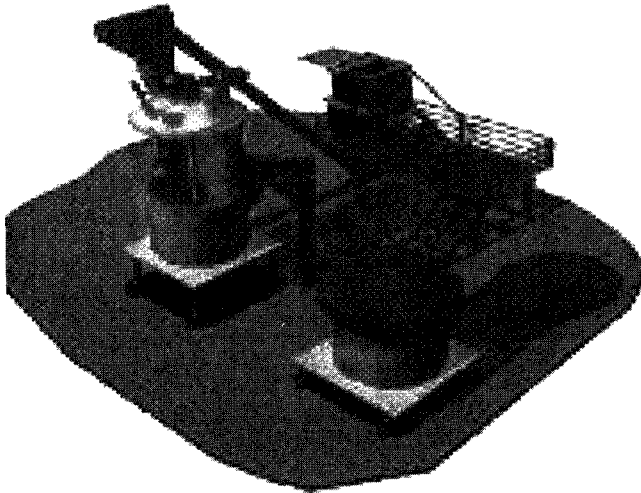
6월에 유리화 실증 시험동에 설치 완료하고 그 성능을 입증하기 위한 성능 시험을 수행하였다.

성능 시험은 단위 기기나 부품의 성능을 확인하기 위한 Shop Test와 기기 설치 후 폐기물을 주입하지 않은 상태에서 수행한 Blank Test, CCM과 배기 계통을 연결한 상태에서 전체 공정의 성능을 확인하는 Performance Test로 나누어 수행하였다.

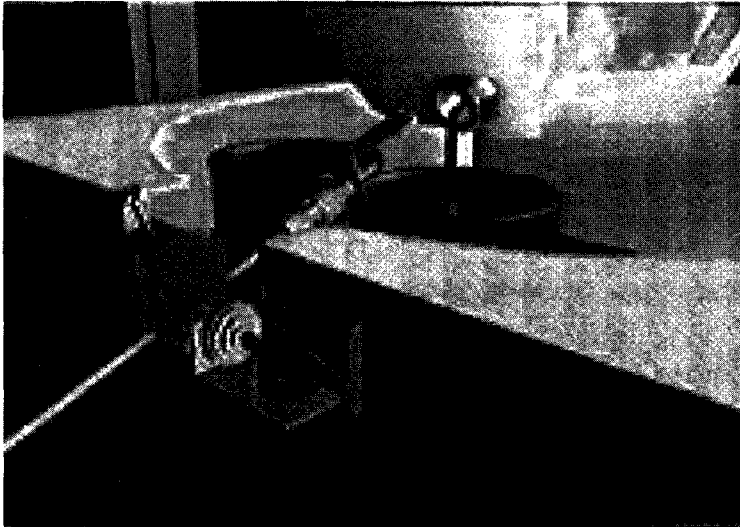
Blank Test를 통해 모든 기기의 성능이 설계 규격을 만족하고 CCM과 배기 계통을 연결한 상태에서 유리 용융 및 배출 성능, 폐기물 주입 성능, 배기체 처리성능 등이 설계 기준을 만족하고 있음을 확인한 후 최종적으로 Performance Test를 수행하였다.

다. 플라즈마 토치 용융 설비 설치 및 성능 시험





개선된 플라즈마 토치 용융로의 조감도



용융물의 슬래크 배출 방식

80kW 플라즈마 토치 용융로를 이용한 비가연성 폐기물 용융 실험을 통해 생산된 자료를 바탕으로 실증 설비 구매 사양이 결정되었다.

용융로는 배취형 용융 실험을 수행하기에 적합하도록 Cramshell

형으로 설계되었고, 플라즈마 토치는 200kW 용량의 미국 Callidus Technology사의 PT-150C 모델로, 플라즈마 기체는 질소로 선정되었다.

1999년 4월 플라즈마 토치 용융

로 실증 설비 설치가 완료됨에 따라 본 실증 설비가 설계 성능을 만족하는지 확인하기 위하여 금호엔지니어링(주)과 공동으로 성능 시험을 시행하였다.

용융로 설치 이후 수행된 시운전 및 성능 시험은 CCM 후단의 배기체 처리 설비와 연계하여 수행되었다. 플라즈마 토치를 가동함에 있어 주플라즈마의 발생이 지속적으로 안정적인지를 확인하고 플라즈마 발생 이후 토치의 건전성이 보장되는지를 시험하였다.

또한 토치 가동시에 주변 기기에 전자기 영향으로 인한 제어 신호의 오류 발생 여부를 조사하였고, 플라즈마 토치의 두 가지 작동 방식에 대하여 비가연성 폐기물의 용융 능력을 시험하였다.

#### 4. 유도 가열식 저온로(CCM)를 이용한 가연성 방사성 폐기물의 유리화

CCM을 이용한 유리화 실증 시험의 일차적 목적은 오리엔테이션 테스트에서 얻은 결과를 확인하고 상용 설비 설계에 필요한 자료를 도출하는 데 있다.

실증 시험은 이온 교환 수지, 가연성 잡고체, 봉산 건조물, 배기체 공정에서 수집된 먼지 등에 대해 수행하고 있다.

이들 시험들은 모두 비방사성 물질을 이용하여 모사한 폐기물을 사

용하여 수행하고 있으며, 시험 목적에 따라 비방사성 Cs와 Co를 흡착시키거나 흡착없이 수행한다.

특히 이온 교환 수지의 경우에는 보수적인 시험 조건을 만들기 위해 원전의 화학 및 체적 제어 계통(CVCS)에서 발생하는 이온 교환 수지를 모사하여 실험하였기 때문에 수지에 CVCS 폐수지와 비슷한 농도를 갖도록 Li·B·Ni·Fe 등을 흡착하여 사용하였다.

가연성 잡고체의 경우에는 PVC 함량이 가장 중요한 인자이기 때문에 PVC 농도를 최대 20w%까지 증가시키면서 시험을 수행하였다.

시험을 통해 각 폐기물에 대한 최대 처리 용량을 결정함과 동시에 최적 산소 공급량, CCM 내 적절한 부압(negative pressure), 산소 주입 방법(CCM 중앙 또는 주변 주입구를 개별적으로 사용하거나 둘다 사용하는 법), 용융 유리의 적정 온도, 산소 bubbling의 최적 방법 등을 결정하거나 조사한다.

이를 위해 연소 상태, 배기체 조성, 유리 고화체의 특성 등을 분석하고 있다. 이러한 시험과 분석을 통해 운전 변수가 최적화 되고 연소상태, 유리 품질 등이 향상되고 있다.

배기체 처리 공정에 대한 성능 평가는 각 폐기물에 대한 시험을 수행하는 과정에서 단위 기기 전 후단에서 시료를 채취하고 분석함으로써 수행되고 있다. 또한 각 단위 기기의

성능을 좌우하는 주요 운전 변수를 조절하면서 성능 변화를 진단하고 최적 운전 변수를 도출하고 있다.

배기체의 분석 항목은 발생량·온도·입자 분포 및 성분, CO·CO<sub>2</sub>·O<sub>2</sub>·HCl·CxHy·SOx·NOx 농도 등이며 단위 기기의 기능에 맞게 분석 항목을 조정하고 있다.

### 5. 플라즈마 토치 용융로(PTM)를 이용한 비가연성 방사성 폐기물의 유리화

용량 200kW 실증용 플라즈마 용융 설비의 실증 실험을 위하여 원전에서 발생하는 금속성 폐기물과 비금속성 폐기물을 모사하였다.

즉 콘크리트·토양·백열 전구 및 형광등·금속·필터 등을 개별 또는 혼합하여 제조한 비가연성 모의 폐기물에 대하여 용융 실험을 수행하여 용융물의 용융 상태를 육안 관찰하고 출탕의 용이성을 조사하였다.

또한 금속성 폐기물과 비금속성 폐기물을 혼합하여 제조한 비가연성 모의 폐기물을 플라즈마 용융 처리시 감용비·비중·충분리 상태를 점검하기 위하여 실증용 플라즈마 용융로 내부에 별도 제작된 점토질의 흑연 도가니를 설치하였다.

또한 토양과 콘크리트 모의 폐기물의 연속 투입 시험을 통하여 폐기물의 종류 및 투입률에 따른 토치의 가동 시간, 배기 가스 및 비산재의

발생 특성, Cs 및 Co의 휘발 특성 및 슬랙 고화체 침출 특성 등을 평가하였으며, 수립된 열전달 모델을 이용하여 운전 방법에 따른 에너지 수지를 평가하였다.

용융 시험에서 발생된 시료들에 대한 성분 분석과 TCLP에 의한 침출 시험을 수행하였고, 흑연 도가니의 내부에 비가연성 혼합 모의 폐기물을 넣고 용융 처리하여 냉각시킨 후 꺼내어 중심부를 절단함으로써 층분리 등의 용융 특성을 조사·분석하였다.

200kW 회분식 용융로의 실험 결과를 이용하여 500kW 상용 용융로의 개념 설계를 수행하였고, 이를 바탕으로 200kW 회분식 용융로를 연속 투입식 수냉식 용융로로 개선하게 되었다.

개선될 용융 시스템은 컨베이어를 통한 폐기물의 자동 투입, 토치의 360° 회전 및 수직 운동 자동 제어, 측면 하부를 통한 슬랙의 자동 배출, 내부 부압 유지, 플라즈마가스의 질소·산소·아르곤 사용, 핀홀 카메라를 이용한 실시간 모니터링 등이 가능하며 이러한 것이 컴퓨터를 통하여 자동 또는 수동으로 제어된다.

이 개선 작업은 현재 설계를 마치고 설비를 제작중에 있으며 이를 통하여 상용 용융로의 상세 설계에 필요한 자료를 생산할 계획이다.



## 6. 유리화 시설 안전성 분석 코드 및 시뮬레이션 코드 개발

### 가. 유리화 시설 안전성 분석 코드 개발

유리화 시설에서의 대기 방출에 의한 방사선 및 비방사선적 환경 영향 평가에 적합한 코드를 개발하기 위해, 환경 영향 평가 코드에 적용할 대기 분산 모델을 설정하고 대기 분산 모듈 및 시스템 입력 모듈을 개발하였다.

방출되는 배기체 내 성분들의 환경 위해성 평가를 위한 방법론을 설정하였고, 위해도 관련 자료를 바탕으로 유리화 시설의 환경영향 평가 코드를 개발하였다.

또한 유리화 시설 내의 작업자 또는 운전자가 피폭될 수 있는 작업 특성을 분석하였으며, 작업 환경에 대한 위해도 평가를 위한 코드를 개발하였다.

한편 시설의 운영에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 고준위 방사성 폐기물 처리 시설의 경우와 DOE의 정량적 위해도 평가 방법론을 참고로 설정하였다.

### 나. 용융로 해석 코드 개발

용융로 시뮬레이션 코드를 개발할 때 필요한 수치 해석 구조, 수치 해석해를 구하기 위한 격자 생성 알고리즘, 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식 등의 지배 방정식들을 정립하고 이들을 코딩하기 위한 수치화 방법을 결정하였다.

또한 공동형 토치 플라즈마의 구조와 특성 및 질량 연속 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식, 난류 보존 방정식, 전류 연속 방정식 등의 지배 방정식을 통한 수치해석 모형을 정립하였다.

CCM의 가열 원리를 고려하여 여기에서 발생하는 배기체 양을 해석하기 위해 연소 반응을 다단계 연쇄 반응으로 고려하여 그 메커니즘을 조사하였으며, 이를 코딩하기 위한 수치화 방법에 대해 조사한 후 용융로 해석 코드를 개발하였다.

### 다. 배기체 처리 공정 시뮬레이션 코드 개발

방사성 및 비방사성 배기체 각각에 대한 종류 및 발생 특성을 조사하였으며, 각국의 유리화 시설의 배기체 처리 공정과 관련 코드들을 검토하였다.

배기체 처리 공정의 성능을 시뮬레이션하기 위해서 배기체 처리 공정에 사용되는 단위 기기들의 유해물질 제거 메커니즘과 기기의 특성을 연구하고 수치 해석 모형을 정립하여 코드를 개발하였다.

개발된 코드를 이용하여 배기체 처리 기기들의 배기체 종류별 유해물질 제거 특성 및 효율, 물질 수지량 등을 계산하였고, 프랑스 SGN사에서 수행한 Orientation Test 결과 및 현대 모비스의 계산 결과와 비교하였다.

## 기술 개발 성과

중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술은 방사성 폐기물 처리 분야의 첨단 기술이고 새롭게 정립해야 할 이론 분야도 상당히 포함하고 있다.

소각과 열분해가 동시에 이루어지면서 용융 유리 표면에서 발생하는 여러 가지 현상들을 이론적으로 명쾌하게 설명할 수 없는 부분도 있다. 또한 플라즈마 용융시 발생하는 플라즈마 화학 분야도 아직은 이론 정립이 미숙한 상태이다.

그래서 유리화 기술이 학계·연구계·산업계에 미치는 파급 효과는 크다고 할 수 있다. 거의 눈앞에 다가와 있는 유리화 기술의 상용화가 이루어진다면 국내 방사성 폐기물 처리 기술은 국제적으로 상당한 경쟁력을 갖게 될 것이다.

원자력 관련 산업에서 발생하는 방사성 폐기물 중 약 90%가 중·저준위 폐기물로 이루어져 있으며, 전세계가 중·저준위 방사성 폐기물 처리 및 처분 문제로 곤란을 겪고 있기 때문에 성공적인 상용 운전이 개시되고 나면 기술 수출의 길이 열릴 것이다. 아울러 유도 가열식 저온로를 운전하는 데 필수적인 고주파 발생 장치에 대한 국내 제작 기술을 향상시키게 될 것이다.

원전에서 발생하는 모든 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화시키

면 발생하는 부피를 기준으로 볼 때 폐기물 부피를 1/14 ~ 1/32까지 줄일 수 있다.

이것은 1000 MWe PWR 12기에 서 30년 동안 발생하는 방사성 폐기물 드럼 수(208 리터 크기)가 3,700~8,300 드럼이 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 고화체보다 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 침출률을 갖는 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 드럼 수를 35드럼 수준으로 감소시킬 수 있고 환경에 방사선적 영향을 거의 미치지 않는 고화체를 만들어 낼 수 있

는 환경 친화적인 기술이기 때문에 처분장 후보 지역 주민들의 태도를 NIMBY(Not In My Back Yard)에서 PIMFY(Please In My Front Yard)로 변화시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 향후 전망

유리화 기술 개발은 이미 성공하였다. 앞으로 남은 일은 좀 더 경제적이고 운전 및 유지 보수가 손쉬운 상용 설비를 설계하고 건설하는 일이다. 이미 올진 5·6호기에 세계 최초의 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 상용 설비를 설치할 수 있는 공간을 마련중에 있다.

상용 설비의 기본 설계는 2002년 초에 착수될 계획이고 계획대로 기본 설계가 진행된다면 2003년 말쯤에는 상세 설계가 완료되어 설치 공사가 시작될 예정이다.

설치 공사는 2004년 말에 준공되고 약 1년여의 시험 운전과 운영허가 준비 과정을 거쳐 2006년 초부터는 본격적인 상용 운전에 돌입할 전망이다. 유리화 설비를 올진 5·6호기뿐만 아니라 한국 표준형 원전 및 차세대 원전에도 설치하기 위한 준비도 하고 있다.

원전 건설을 계획할 때부터 유리화 시설에 대한 별도 부지를 확보하고 한 개의 원전 부지에서 발생하는 모든 폐기물을 유리화할 수 있는 유

리화 설비를 건설할 계획이다.

또한 기존 원전 부지에도 별도의 유리화 설비 설치 공간을 확보하여 건설을 추진할 예정이다.

아울러 프랑스 SGN사와 협력하여 해외에도 유리화 설비를 수출하도록 추진하고 있는데, 이미 이탈리아·일본·캐나다 등이 관심을 보이고 있고, SGN측에서 꾸준히 판로를 개척하고 있다. 해외 수출의 길도 올진 5·6호기 상용 운전이 개시되고 나면 더욱 쉽게 열릴 것으로 예상된다.

이 유리화 기술은 일반 산업계에도 적용이 가능하다. 특히 소각로 운전시 발생하는 소각재가 발생되지 않기 때문에 소각재를 별도 처리하지 않아도 되고 환경에 안전한 유리 고화체 형태로 전환시킬 수 있기 때문에 생활 폐기물의 처리에 적용하면 경쟁력이 있을 것으로 생각된다.

또한 산업계에서 발생하는 석면 등의 유해 폐기물을 처리하는 데도 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

플라즈마 토치 용융 기술은 생활 폐기물 매립장의 유리화에 응용할 수 있으며, 유리화시 발생하는 가연성 기체를 발전용으로 사용할 수 있다.

이렇게 되면 매립장에서 발생하는 침출수 문제를 근본적으로 해결할 수 있고 매립장의 사용 연한을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 버려진 에너지 자원을 회수할 수 있어서 일석삼조의 이득을 취할 수 있다. ☞