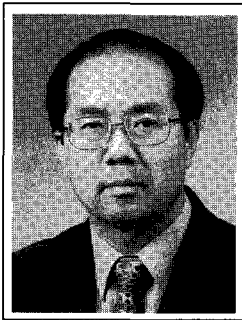




방사성 폐기물 유리화 기술 세계 최초로 상용화 착수

송명재

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
연구개발실장



유리화 기술 개발 배경

1978년 우리 나라 최초의 원자력 발전소인 고리 원자력 1호기가 운전을 시작하여 2003년 1월 현재 국내에서 가동되고 있는 원전의 수는 총 18기에 달하며 이중 14기가 가압중수로(PWR)형이고 나머지는 가압중수로형(PHWR)이다.

국내 원전의 설비 용량은 PWR이 1293.7만kW, PHWR이 277.9만kW로서 총국내 발전량의 약 40%를 담당하고 있다. 또한 현재

건설되고 있는 PWR이 2기이고 건설이 확정된 PWR이 6기에 이른다.

앞으로도 원자력 발전의 성공적인 추진을 위해서는 원전에서 발생하는 방사성 폐기물의 안전 관리가 무엇보다도 중요하다.

원자력발전소 운영 과정에서 발생하는 방사선 준위가 낮은 중·저준위 방사성 폐기물에는 작업자들이 사용한 장갑·덧신·작업복·각종 종이류 및 비닐류와 수처리 공정에서 발생하는 폐이온 교환 수지 등의 가연성 폐기물과 철재류·콘크리트·유리·전구 등의 비가연성 폐기물이 있다.

이렇게 발생된 중·저준위 방사성 폐기물은 압축 또는 건조 고화처리 후 발전소 내 임시 저장고에 저장하여 왔다. 현재 원전에서 발생되고 있는 중·저준위 방사성 폐기물(LILW)은 안전하게 처리된 후 발전소 내 임시 저장고에 저장되어

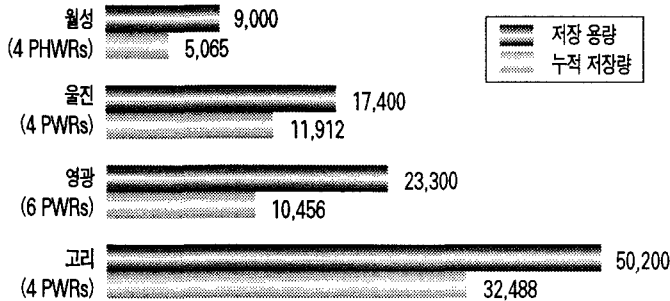
있다.

한수원(주)가 보유하고 있는 저장 능력은 200리터 드럼 기준으로 99,900드럼이며 2002년 10월 말 기준으로 저장 능력의 60%에 달하는 59,921 드럼이 발생하였다.

이러한 추세라면 2008년에는 저장 능력이 한계에 달하는 원전이 발생하게 되어 조만간 모든 원전의 저장고가 차게 될 전망이다.

계다가 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 건설이 지연됨에 따라 저장고 신축없이도 저장고 사용 기간을 연장시킬 수 있고 처분장 선정에 기여할 수 있는 방안을 수립할 필요성이 제기되었다. 이에 따라 한수원(주)는 일찍이 세계에서 가장 안전하게 방사성 폐기물을 관리하겠다는 야심찬 목표를 수립하여 추진하여 왔다.

그 동안 한수원(주)는 방사성 폐기물의 부피를 감소시킬 수 있는 기술들을 도입하여 호기당 연간 드럼



〈그림 1〉 방사성 폐기물 저장 용량 및 누적 저장량

발생량을 150드럼으로 낮추는 성과를 앞당겨 달성하였다.

한수원(주)는 가까운 장래에 환경에 관한 문제가 심화되리라 전망하고 환경 친화적인 기업을 만들어 가는 것이 매우 중요하다는 인식을 하고 있었다. 이에 따라 방사성 폐기물 처리 기술을 도입하는 것보다는 미래 지향적인 혁신 기술을 개발하는 정책을 수립하고 향후 호기당 연간 발생 드럼 수를 35드럼으로 감소시키기 위해 방사성 폐기물 처리 분야에서 꿈의 기술이라 부르는 유리화 기술 개발을 착수하게 되었다.

많은 사람들이 중·저준위 방사성 폐기물 유리화에 대해 희의를 품고 있을 때 한수원(주)는 과감하게 10년 앞을 내다보고 연구 개발을 시작하였다. 현재 한수원(주)는 1994년 「저준위 방사성 폐기물 유리화에 관한 타당성 연구」를 필두로 시작된 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술 개발을 완료하고

상용 설비 건설에 착수하였다.

그 동안 한수원(주)는 외부 연구 자금 810만불을 유치하였는가 하면 실험실에서 시작한 연구를 상용화시키는 패저를 이룩하는 등 국내 원자력 분야 연구 개발사에 신기원을 수립하였다.

본고에서는 지난 8년여 동안 여러 가지 어려운 연구 환경하에서도 세계적으로 인정받는 기술을 개발한 연구 업적을 소개하도록 하겠다.

유리화 기술이란?

유리화 기술은 용융 상태의 유리 위에 폐기물을 투입하여 폐기물이 분해되는 과정에서 폐기물 내에 함유된 방사성 물질을 유리 구조 내에 안정한 형태로 가두어 두는 기술이다.

중·저준위 방사성 폐기물 속에 들어있는 방사성 핵종들을 〈그림 2〉와 같이 유리 구조 내에 안정한

형태로 가둠으로써 방사성 폐기물 처분시 환경으로 유출되는 것을 근본적으로 방지할 수 있다.

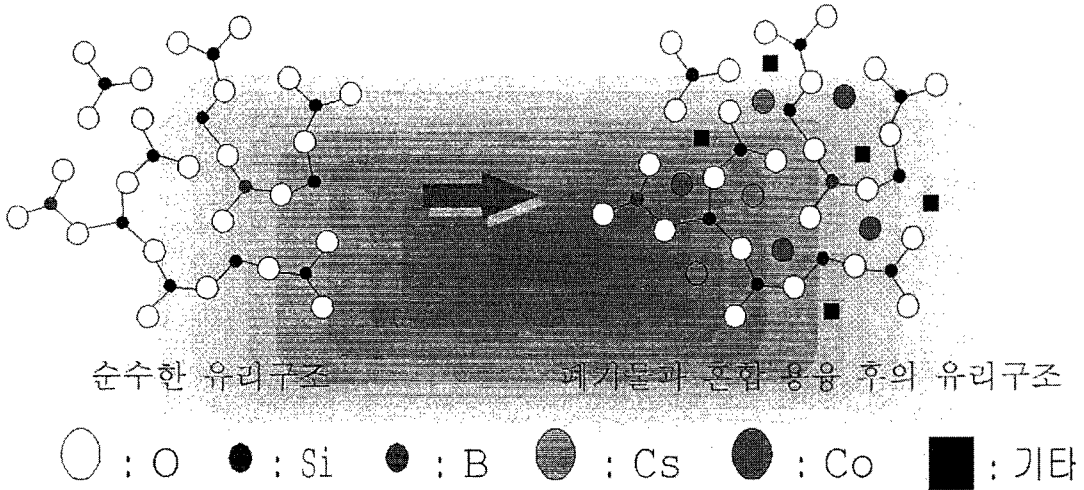
처분장에 처분된 유리 고화체는 백만년 정도 안정된 상태를 유지할 수 있다. 또한 유리 고화체가 처분장에서 설령 나쁜 조건에 노출된다 할지라도 유리 고화체 속에 갇힌 방사성 물질은 거의 환경으로 나오지 않는다. 따라서 폐기물을 유리 고화체로 만들어 처분하게 되면 세계에서 가장 안전한 처분장 운영이 가능하다.

중·저준위 방사성 폐기물을 유리화하는 것과 고준위 액체 폐기물을 유리화하는 것은 많은 점에서 차이가 난다.

고준위 액체 폐기물을 유리화할 때는 폐기물 투입이 용이하고 폐기물 내의 금속 성분의 조성을 일정하게 조절할 수 있기 때문에 용융 유리의 조성을 일정하게 유지하는 것이 비교적 쉽다. 또한 폐기물을 유리화할 때 발생하는 배기체 내에 존재하는 유해 성분이 적기 때문에 배기체 처리도 용이하다.

반면 중·저준위 방사성 폐기물은 물리 화학적으로 매우 다양하기 때문에 폐기물을 투입하기 위해 특별한 기기와 방법이 필요하고 유리 조성을 일정하게 유지하는 것이 쉽지 않다.

또한 폐기물 내에 존재하는 S·N·Cl 등의 원소들로 인해 유리화



〈그림 2〉 유리화의 원리

과정에서 SOx · NOx · HCl · 다이옥신 등의 유해 기체가 발생한다.

중·저준위 방사성 폐기물을 유리화 하는 것과 소각하는 것은 여러 가지 측면에서 차이가 있다. 우선 유리화 기술은 공정 측면에서 one step 공정이지만 소각 기술은 three step 공정이다.

다시 말하면 유리화의 경우는 폐기물을 연소/열분해 시키는 과정과 연소/열분해 후 잔류물을 유리화시키는 과정이 거의 동시에 하나의 용융로 안에서 이루어진다.

반면, 소각의 경우는 소각로에서 폐기물을 소각시키면 바닥재(bottom ash)가 소각로 바닥에 쌓이게 되며, 이 바닥재는 소각 운전이 종료되면 소각로에서 제거하여

별도의 용기에 저장하거나 시멘트·폴리머·용융 유리 등을 이용하여 고화 처리하는 안정화 단계를 거치므로 '소각-소각재 수집-소각재 처리'의 3단계를 통해 이루어진다.

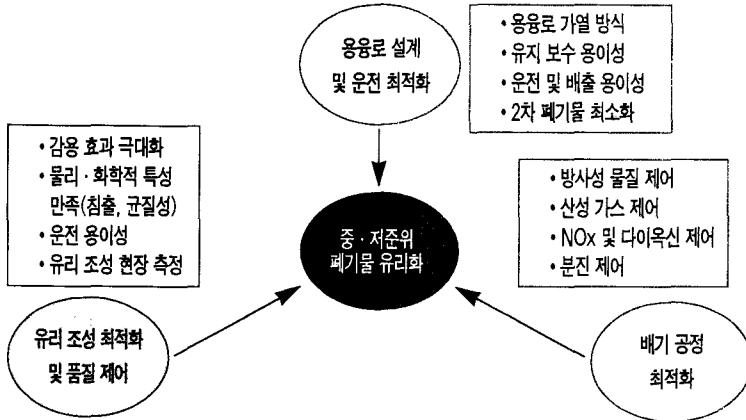
이러한 이유로 유리화 기술은 소각 기술에 비해 간편하면서도 경제적으로 폐기물을 처리할 수 있다. 이에 더하여 유리화의 경우는 소각보다 높은 온도에서 운전되기 때문에 다이옥신의 발생량이 감소하게 되고 소각로에서 처리하기 어려운 폐이온 교환 수지·비가연성 폐기물을 처리할 수 있다는 장점이 있다.

방사성 폐기물을 유리화하기 위하여 개발되어야 할 핵심 기술은 <

그림 3)과 같이 분류할 수 있다. 핵심 기술은 용융로 설계 및 운전 최적화 기술, 유리 조성 최적화 및 유리 품질 제어 기술, 배기체 처리 공정 최적화 기술로 나눌 수 있다.

용융로 설계 및 운전 최적화를 위해서는 용융로 가열을 어떠한 방법으로 할 것인지를 먼저 선정해야 한다. 가열 방법에 따라 용융로의 유지 보수 방법, 유리의 초기 용융 방법, 용융로 기동 및 정지 방법, 2차 폐기물 최소화 방법 등이 달라지게 되고 이에 따라 운전 최적화 방법도 달라지게 된다.

유리 조성 최적화 및 고화체 품질 제어 기술은 감용 효과를 극대화하면서도 용융 유리의 특성을 운전이 용이한 범주 안에 들도록 하는 기술



〈그림 3〉 방사성 폐기물 유리화의 핵심 기술

이다. 이는 폐기물 내에 함유되어 있는 무기물 및 금속 성분의 종류와 양을 고려하여 최적의 유리 조성을 결정하는 것을 기본으로 한다.

최대의 감용 효과를 얻는 데 제한 조건은 최종 유리 고화체가 침출 특성을 만족하는 등의 물리화화적인 규제 조건을 만족하도록 하는 것이다. 중·저준위 방사성 폐기물과 같이 유리화 용융로에 투입되는 폐기물의 성분을 일정하게 조절할 수 없는 경우에는 유리화가 진행되는 동안 유리의 조성 변화를 측정할 수 있는 기술을 개발하는 것이 바람직하다.

배기 공정 최적화 기술은 용융로에서 발생하는 배기체를 효과적이면서도 경제적으로 처리하는 공정을 개발하는 분야이다.

방사성 물질이 휘발되는 경우에

는 최전단에서 휘발된 방사성 물질을 포집하여 배기체 처리 공정이 오염되는 것을 최소화하는 기술이 중요하다. 이를 위해 분진을 최전단에서 포집하여 용융로로 재순환시켜 처리하는 방법이 개발되어야 한다. 그 외에 배기체 내의 유해기체들을 환경 배출 기준에 맞도록 효율적으로 처리해야 한다.

연구 개발 현황 및 주요 성과

1993년 미국 EPRI는 중·저준위 방사성 폐기물(LILW)을 유리화하는 기술을 국제 공동 연구로 추진하기 위해 한국을 포함한 몇 개국을 대상으로 유리화 기술에 대한 장점을 설명하면서 연구비 일부를 투자하도록 유도하였다.

그러나 한수원(주)의 연구진이

EPRI가 개발하고자 하는 용융로 방식에 대해 조사한 결과, 내화재를 사용함으로 인한 잦은 보수와 다량의 2차 폐기물 발생, 부식성 기체 발생으로 인한 전극의 부식 촉진 등의 측면에서 문제가 있는 것으로 파악되어 독자적인 기술 개발을 추진하기로 하였다.

한수원(주)는 1994년부터 〈그림 4〉와 같은 추진 체계대로 신기술을 개발하는 전형적인 방법에 따라 기술 개발을 추진하여 왔다.

한수원(주)는 LILW 유리화 기술을 개발하기 위한 첫 단계로 1994년에 타당성 연구를 착수하였다. 이 연구에서 실험실적으로 유리화 가능성을 확인하고 기술성 및 경제성 평가를 수행하였다.

우선 그 동안 국내 원전에서 발생된 LILW 발생 특성을 분석하여 폐기물의 발생 부피와 물리 화학적 조성을 조사하고 이 자료를 근거로 하여 유리화 가능성 확인 실험과 기술성 및 경제성 평가를 수행하였다.

유리화 가능성 확인 실험에서는 백금 도가니를 이용하여 폐수지 및 방호복 열분해 재와 건조된 부산 분말에 대한 유리화 실험을 수행하였다. 실험을 통해서 폐기물별로 유리 고화체에 함유될 수 있는 적정량을 조사하였다.

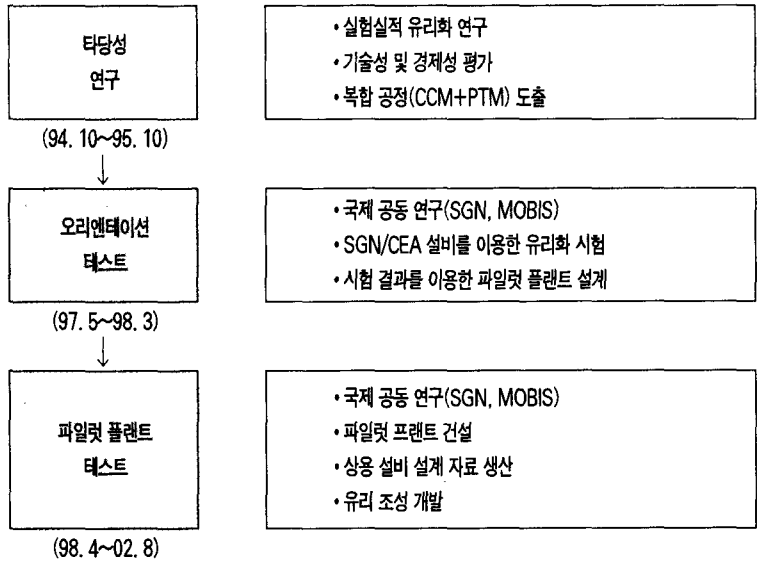
타당성 연구 결과를 바탕으로 1996년부터 프랑스 SGN 및 현대 MOBIS와 함께 오리엔테이션 테스

트를 통한 LILW 유리화 파일럿 플랜트를 개발하여 왔다.

이온 교환 수지, 가연성 잡고체, 그리고 붕산 폐액에 대한 오리엔테이션 시험을 지름 300 mm 유도 가열식 저온 용융로(CCM)를 이용하여 수행하였다. 오리엔테이션 시험은 프랑스 CEA 산하 Marcoule 연구소에서 수행하였고, 용융 유리의 온도, 잉여 산소량 등의 CCM 운전 조건에 관한 자료 생산과 CCM에서 발생하는 배기체 특성 분석에 초점을 맞추었다. 또한 60kW급 플라즈마 토치 용융로(PTM)를 이용하여 콘크리트·모래·유리·폐필터 등의 비가연성 폐기물에 대한 용융 실험을 수행하였다.

오리엔테이션 실험 결과를 반영하여 파일럿 플랜트가 설계되었고 1998년부터 기기 제작 및 건설이 진행되어 1999년 7월에 건설을 완료하였다.

파일럿 플랜트에 대해 몇 가지 성능 시험을 수행한 후 1999년 11월부터 본격적인 실증 시험에 착수하여 2002년 8월까지 상용 설비 설계 자료 생산에 필요한 시험을 수행하였다. 실증 시험은 원전에서 발생하는 폐기물을 모사하여 90여회 실시하였고 이중 3회는 100시간 이상의 장기 시험이었다. 실증 시험이 수행되는 동안 유리화 공정이 최적화되었고 몇몇 설비들이 개선되었



〈그림 4〉 한수원(주)의 유리화 기술 개발 추진 체계

으며 폐기물 종류에 따라 적합한 유리 조성을 국산화하였다. 타당성 연구에서부터 지금까지 수행된 연구의 주요 업적은 다음과 같다.

1. LILW 유리화에 관한 타당성 연구

타당성 연구의 기초 자료를 얻기 위해 원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물의 발생 특성을 조사하여 연간 발생량 및 조성 등을 파악하였다. 발생 특성은 유리화 가능성 확인 실험, LILW 유리화의 기술성 및 경제성 평가에 활용되었다.

기술성 평가를 위해서는 4종류의 용융로를 선정하였는데, 그것은 유도 가열식 저온로(CCM), 수직 전

극 가열식 저온 용융로(CCVE), 액체 금속 가열식 용융로(QCEP), 그리고 플라즈마 토치 용융로(PTM)였다.

이들 용융로에 대해 국내의 여러 환경을 감안한 몇 가지 항목을 적용하여 기술성 평가를 한 결과 CCM이 가장 우수한 용융로 나타났다. 그러나 원전에서 발생하는 가연성 및 비가연성을 모두 처리하기 위해서는 CCM과 PTM을 같이 사용하는 것이 바람직하다는 결론이 도출되었다.

여기서 CCM이란 유도 코일로 둘러 쌓인 수냉식 저온 용융로 내에 유리를 넣고 고주파 발생기(HFG)를 통하여 유도 코일에 고주파의 전



〈그림 5〉 타당성 연구시 확인된 유리화의 감용 효과

류를 흘려주게 되면 유리에 유도 전류와 함께 고온의 열이 발생되고 이때 발생한 열로 유리를 녹이고 가연성 폐기물을 연소 분해시키는 용융로를 말한다.

PTM은 CCM으로 처리하기 어려운 비가연성 폐기물을 고온의 플라즈마로 용융하는 장치이다.

LILW 유리화 가능성 확인 실험을 위해 방사성 Cs와 Co를 첨가한 모의 폐기물의 열분해에 대해 백금 도가니를 이용한 유리화 실험을 수행하였다.

폐수지 및 가연성 잡고체에 미량의 산소를 주입하면서 400 ~ 800℃에서 열분해한 재를 여러 중량비로 용융 유리와 혼합시킨 후 흑연 몰드에 부어 만든 유리 고화체 시편

에 대해 압축 강도를 측정함으로써 폐기물 혼합량을 결정하였다.

붕산 폐액의 경우는 건조 분말을 같은 방법으로 용융 유리에 섞어 유리 고화체를 만들고 압축 강도를 측정하였다.

실험 결과 시멘트 고화체에 대한 압축 강도 기준인 500psi보다 훨씬 높은 강도를 보였으며, 폐기물별 감용비는 방호복의 경우는 1/130(그림 5 참조), 비닐 시트는 1/140, 폐수지는 1/13로 각각 나타났다.

경제성 평가를 위해 폐기물 처리 계통에 추가로 유리화 설비(CCM+PTM)를 설치할 경우에 대해 비용을 평가하였다. 그 결과 유리화 설비의 감용 효과로 인해 처분 비용이 현저히 줄어들어 저준위 폐

기물의 유리화가 경제적임을 알 수 있었다.

이 경제성 평가에 사용된 자본비, 운전 유지비 및 감용비 등이 약간의 불확실성을 내포하고 있지만 처분 단가가 커질수록 경제성도 좋아지는 것으로 나타났고 향후 처분 단가는 계속 상승할 것으로 전망되기 때문에 CCM과 PTM으로 구성된 유리화 설비를 개발하여 원전에 적용하는 것이 바람직하다는 결론이 도출되었다.

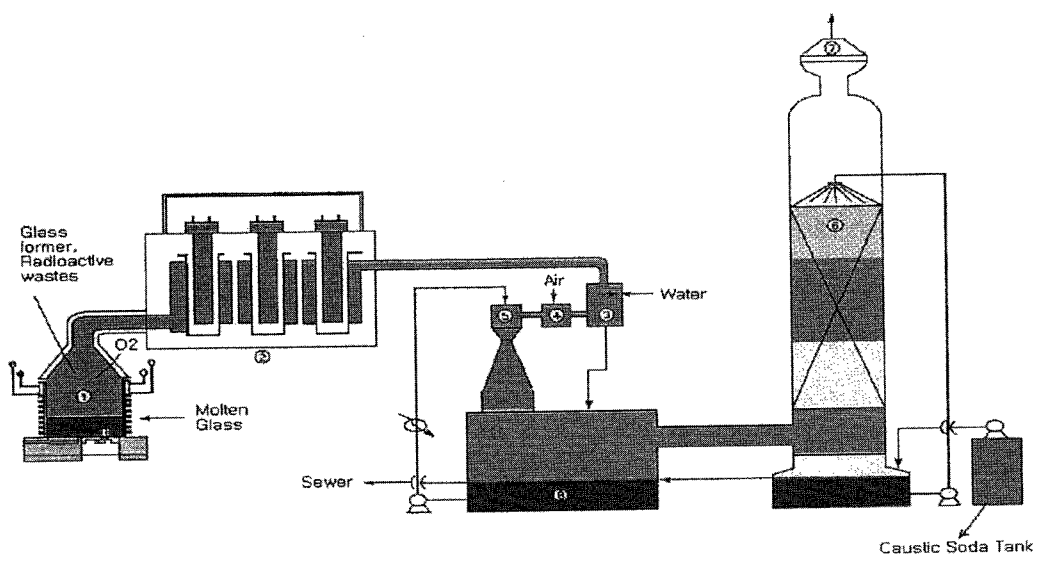
2. 오리엔테이션 테스트

가. 소규모 CCM을 이용한 가연성 폐기물 유리화 시험

본격적인 오리엔테이션 테스트를 수행하기 전에 소규모의 bell type 도가니를 이용하여 폐수지의 직접 투입 유리화 가능성 시험을 프랑스의 CEA/SGN에서 수행하였다. 이 도가니는 1,200℃까지 온도를 높일 수 있고 용융 유리를 담고 있는 알루미늄 도가니, 후단 연소기, 그리고 배기체 처리 계통으로 구성되어 있다.

이 실험 장치를 홈 후드 안에 설치하고 이온 교환 수지를 용융 유리 위에 직접 투입하면서 유리화가 진행되는 동안 연소 상태, 2차 폐기물 발생, 유리 고화체와 배기체간의 황화물 분포비 등의 자료를 분석하였다.

알루미늄 도가니를 이용한 실험



〈그림 6〉 오리엔테이션 테스트 실험 장치

을 통해 만족한 결과를 얻었기 때문에 직경 300mm의 CCM과 배기체 처리 공정을 제작하여 폐수지, 가연성 잡고체, 붕산 폐액 건조 분말에 대한 직접 투입 유리화에 대한 시험을 수행하였다. 배기체 처리 공정은 〈그림 6〉과 같이 전기로 가열되는 후단 연소기, 배기체 냉각기, 입자 및 산성 기체 분리를 위한 벤추리 및 충전탑 세정기로 구성되어 있다. 실험을 통해 유리화시 발생되는 기체 성분과 기체 입자 분포를 측정하였다.

오리엔테이션 테스트를 통해 다음과 같은 자료들이 생산되었다. 유리 고화체의 품질을 높이기 위해서는 폐기물 연소재 내에 포함된 탄소

량을 감소시켜야 하기 때문에 적정량의 잉여 산소를 공급하는 것과 휘발성 방사성 물질이 배기체로 유입되는 양을 줄이기 위해 용융 유리의 온도를 1,200℃ 이하로 낮추는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

지금 300mm CCM의 폐수지에 대한 처리 용량은 12kg/h~15kg/h이었고, 유리 고화체에 황화물(sulfate lake)을 포함하는 분리상이 나타나지 않았다.

CCM 벽에 붙어 있는 입자들은 쉽게 제거할 수 있었으며, CCM 상부의 실리카 튜브와 후단 연소기의 실리카 튜브에 끈적거리는 물질이 침적되어 있었다.

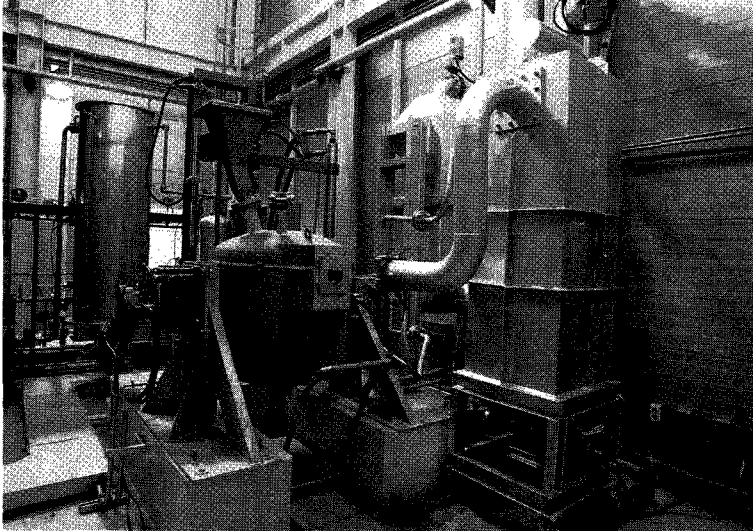
입자 발생이 많았기 때문에 입자

를 제거하는 실험을 추가로 수행하기 위하여 CCM과 후단연소기 사이에 고온 필터를 설치하였다. 고온 필터는 효율적으로 입자를 제거할 수 있음이 밝혀졌고 제거 효율은 200℃에서 99.6~99.8%로 나타났다.

가연성 잡고체에 대한 시험은 PVC 함량을 최소·중간·최대로 조절하여 수행하면서 배기체 발생 특성을 분석하였다. 분석 결과는 파일럿 플랜트 설계에 반영되었다.

나. 소규모 PTM을 이용한 비가연성 폐기물 용융 실험

콘크리트·유리·모래·폐필터와 같은 비가연성 폐기물 유리화 시험을 〈그림 7〉과 같은 60 kW 플



〈그림 7〉 60kW 플라즈마 토치 용융 시스템

라즈마 토치 용융로를 이용하여 수행하였다. 비가연성 폐기물들을 종류별로 적정 비율로 혼합하고 여기에 비방사성 Co와 Cs를 첨가하여 실험 재료를 준비하였다.

이 혼합물들을 플라즈마 토치 용융로에 넣어 용융시키고 용융물을 몰드에 따라 냉각시킨 후 고화체에 대한 특성을 분석하였다. 또한 용융 공정중 발생하는 배기체에 대한 특성도 분석하였다.

유리 고화체의 침출 특성은 TCLP법으로 분석하였고 고화체 내에 존재하는 총원소량을 분석하여 침출량을 결정하였다. 또한 실험 원료와 고화체의 비중을 측정하여 감용비를 계산하였다. 실험 결과 감용비는 2.0~2.6 정도로 나타났고,

As·Ba·Hg·Pb에 대한 침출량은 미국 환경청(EPA)이 정한 기준치보다 적게 나타났다.

3. 파일럿 플랜트 테스트

가. 세계적으로 독특한 실증 설비 개발

한수원(주)는 가연성 폐기물을 처리하는 유도 가열식 저온로(CCM)와 비가연성 폐기물을 처리하는 플라즈마 토치 용융로(PTM) 및 이들 용융로부터 발생하는 배기체를 처리하는 배기체 처리 공정(OGTS)으로 구성된 독특한 실증 설비를 프랑스 SGN사 및 현대모비스(주)와 공동으로 개발하여 1999년 7월 대덕 연구 단지 내에 건설하였다.

〈그림 8〉은 1999년 6월에 건설

이 완료된 파일럿 플랜트의 개략도이다.

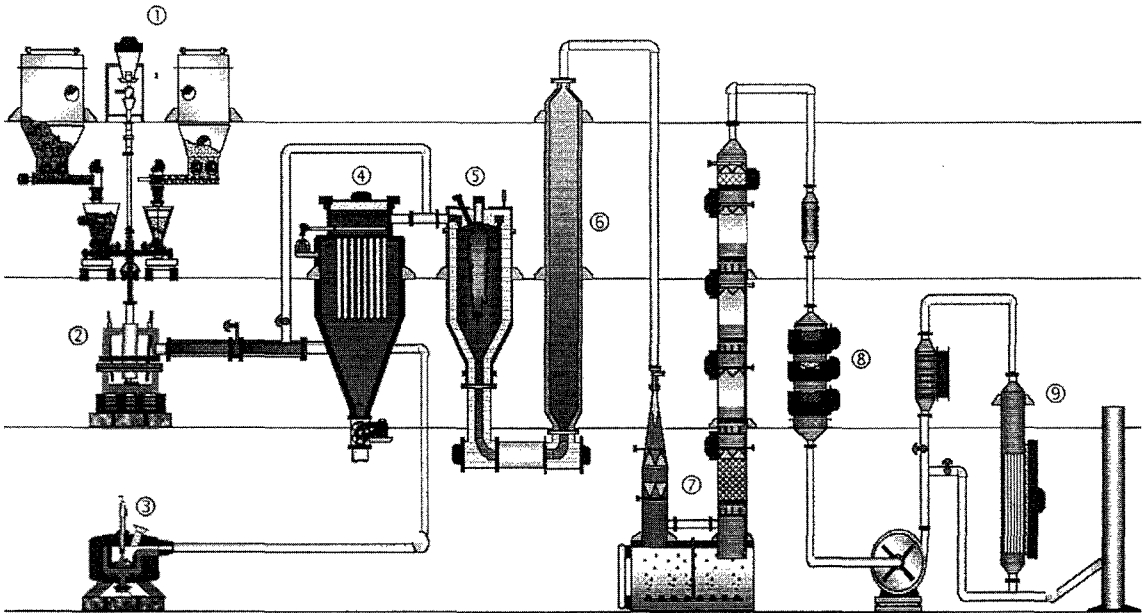
파쇄된 가연성 잡고체와 폐수지는 폐기물 투입 장치를 통해 직접 CCM으로 투입되며 이때 적절한 양의 산소가 공급된다. 산소는 용융 유리 상부와 CCM 하부로 적절히 분배되어 공급되도록 설계되어 있다. CCM 하부로 산소를 공급하는 이유는 용융 유리를 균질하게 하고 용융 유리와 방사성 핵종간에 반응성을 증진시켜 핵종이 유리 구조 내에 더 잘 갇히도록 하기 위함이다. 이렇게 함으로써 유리 고화체의 품질을 향상시킬 수 있다.

CCM의 노벽은 110℃의 냉각수로 냉각시켜 용융 유리와 접촉하는 노벽의 온도를 약 200℃로 유지한다. 이렇게 하면 고온 용융로에서 반드시 사용해야 하는 내화재의 사용을 배제할 수 있어서 내화재 사용에 의한 2차 폐기물 발생량 증가 및 내화재의 빈번한 교체에 의한 제반 문제 등을 제거할 수 있다.

CCM에 에너지를 공급하는 고주파 발생기의 최대 출력은 300kW, 최대 주파수는 300kHz이다.

PTM의 플라즈마 토치는 200kW의 전력이 소요되며 플라즈마 기체로는 NOx의 발생을 억제하기 위해 질소를 사용하도록 설계되어 있다.

배기체 처리 공정은 별도로 운전되는 CCM과 PTM에서 발생하는



① 폐기물 공급 장치 ② 유도 가열식 저온로 ③ 플라즈마 토치 용융로 ④ 고온 필터, ⑤ 후단 연소기 ⑥ 배기체 냉각기 ⑦ 세정기
⑧ 활성탄/HEPA 필터 ⑨ 선택적 촉매 환원기

〈그림 8〉 실증 설비 개략도

배기체를 처리할 수 있도록 설계되어 있다. 배기체 처리 공정 중 고온 필터는 배기체 중의 입자를 분리하여 CCM이나 PTM으로 재순환시킨다. 후단 연소기는 고온 필터를 지나온 배기체 내에 존재하는 불완전 유기물들을 완전 연소시켜 CO²와 H₂O로 전환시키고 다이옥신을 파괴시킨다. 후단 연소기는 프로판 가스를 연료로 사용하고 2초의 체류 시간을 제공한다.

세정기는 배기체 중의 미세 입자와 산성 기체를 제거하는 역할을 하며 제거 효율을 높이기 위해 알칼리 용액을 세정액에 첨가하여 pH를 약알칼리로 유지시킨다. 세정 폐액은 박막 증발기에서 처리되어 증류

수는 세정액 저장조로 재순환되고 건조된 염은 별도로 처리된다.

세정기를 지난 배기체는 가열되어 후단의 활성탄/HEPA 필터에 습분이 응축되는 것을 방지한다.

HEPA 필터를 지난 배기체는 온도가 더욱 증가된 후 NO_x 제거 설비인 선택적 촉매 환원기(SCR)로 유입된다. SCR에는 제거 효율을 높이기 위해 3원 촉매가 충전되어 있고 유입되는 NO_x 농도에 따라 암모니아가 적정량 주입되도록 설계되어 있다.

나. 세계적으로 독특한 유리화 공정 개발

그 동안 본 실증 설비를 이용하여 원자력발전소에서 발생하는 가연성

및 비가연성 모의 폐기물을 대상으로 90여회의 실증 시험을 수행하였다. 실증 시험에 사용한 폐기물은 발전소에서 발생하는 폐기물 14종을 모사하여 사용하였다.

이 중 가연성 폐기물로는 방호복·비닐 시트·방호 덧신 등의 방호 용품 및 액체 폐기물 및 1차 냉각재 처리 공정에서 발생하는 폐이온 교환 수지를 포함한 7종류를 모사하여 사용했고 비가연성 폐기물로는 토양·유리·콘크리트·폐필터를 모사하여 사용했다.

이외에 부식 생성물 및 배수조 슬러지, 봉산 폐액 건조물, 실증 설비 배기체 공정에서 발생하는 분진에 대한 유리화 실증 시험도 수행하였

다.

실증 시험을 통해서 초기 유리 점화 방법, 폐기물 투입량 및 투입 방법, 산소 공급 방법, 용융 유리 온도, 용융 유리의 버블링 방법, 용융 유리 배출 방법 등의 운전 변수가 최적화되었다. 또한 실증 시험을 통해 설비가 개선되고 세계적으로 독특한 유리화 공정이 개발되었다.

개발 초기 한수원(주)의 유리화 공정의 성공 가능성에 대해 우려를 나타내는 전문가들이 있었다. 그 이유는 일반 소각로에서 발생하는 소각재 내에 탄소 성분이 많기 때문에 이 소각재를 유리화하면 소각재가 유리와 잘 섞이지 않고 소각재 내에 포함된 탄소가 유리 속에서 분해되지 않아 유리의 품질을 저하시킨다는 견해 때문이었다. 그러나 시험 결과 이러한 우려를 말끔히 해소시킬 수 있는 결과가 나왔다.

실증 시험시 채취된 유리에 대한 탄소 함량 분석 결과 0.00(N/D)~0.29 wt% 이하로 나타났고 유리 고화체에 대한 침출 시험 및 압축 강도 시험에서도 매우 우수하게 나타났다. 이러한 결과가 나온 이유는 일반 소각로와 유리화 용융로가 구조뿐만 아니라 운전 변수도 다음처럼 다르기 때문인 것으로 판단된다.

〈그림 9〉와 〈표 1〉은 도시 폐기물 소각로로 가장 많이 사용되고 있는 Stoker형 소각로와 한수원(주)의 유리화 용융로인 CCM의 구조

및 특징을 비교한 것이다. 이들로부터 한수원(주)의 유리화 공정은 일반 소각로와 달리 폐기물 상하부에서 산소를 불어넣기 때문에 단위 폐기물당 산소 접촉 기회가 커지고 운전 온도가 높기 때문에 폐기물의 완전 연소가 촉진되게 되어 탄소 함량이 적은 재가 생성된다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 일반 소각로에서 발생하는 소각재의 경우 바닥재 및 비산재 내 탄소 함량은 각각 12와 2.9 wt%이며 이를 유리와 직접 섞어 유리화하게 되면 유리 속에 갇힌 탄소가 분해되지 않아 유리화가 잘 되지 않는다.

반면 한수원(주)의 유리화 용융로에 일반 소각로에서 발생하는 소각재를 투입한다 할지라도 소각재가 유리 속에 들어가기 전에서 용융 유리 표면에서 공급되는 충분한 산소에 의해 산화되기 때문에 좋은 유리 품질을 얻을 수 있다.

이는 유리화 실증 설비의 배기체 처리 공정에서 발생하는 분진에 인위적으로 활성탄을 첨가하여 탄소 함량을 5 wt%까지 증가시켜 유리화한 경우에도 좋은 품질의 유리를 얻은 결과로부터 예측할 수 있다.

한수원(주)는 위와 같이 우수한 용융로를 이용하여 세계적으로 독특한 유리화 공정을 개발하였다. 즉 가연성 잡고체와 수명이 다한 이온 교환 수지를 동시에 투입하는 유리

화 방법을 개발한 것이다.

이는 가연성 잡고체에 포함되어 있는 무기물의 성분과 이온 교환 수지에 포함되어 있는 무기물의 성분이 만나면 좋은 유리를 만들 수 있다는 데서 착안한 것이다.

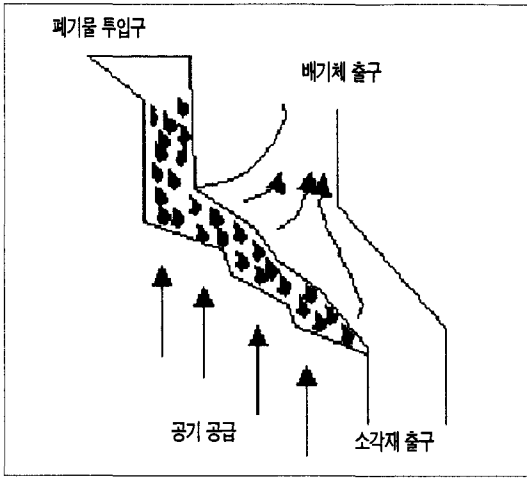
가연성 잡고체 내에 포함된 무기 성분은 유리의 강도를 높여주는 물질들로 구성되어 있고 이온 교환수지 내에 포함된 무기 성분은 유리의 점도나 전기 전도도를 높여주는 물질들로 구성되어 있어 이들이 만나면 좋은 유리를 만들어 낼 수 있다.

이러한 방법은 품질이 양호한 유리 고화체를 만들어 낼 수 있을 뿐만 아니라 같은 무게의 유리를 이용하여 더 많은 폐기물을 처리할 수 있기 때문에 폐기물의 발생 부피를 더욱 더 줄일 수 있다.

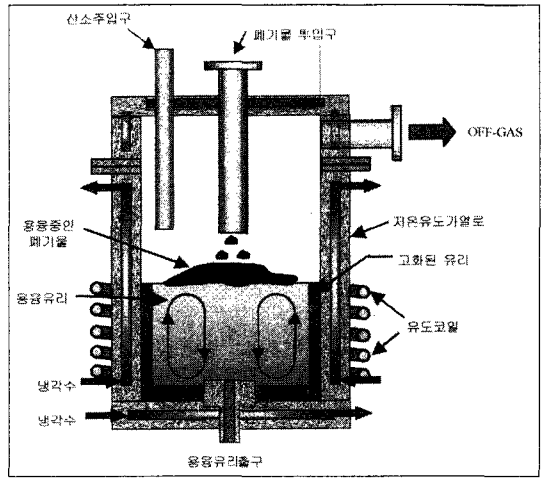
또한 수 차례의 100시간 이상 장기 시험을 통해 유리화 실증 설비의 안전성을 입증하였다.

실증 시험을 통해 배기체 처리 공정의 성능을 확인하였는데 고온 세라믹 필터는 1.0m 이상의 입자를 99.9% 이상 포집할 수 있음을 보였고 후단 연소기의 다이옥신 분해 능력도 뛰어난 연돌에서의 배출 기준인 5ng-TEQ/Nm³을 훨씬 밑도는 0.018ng-TEQ/Nm³로 배출시킬 수 있음이 입증되었다.

또한 세정기는 산성 기체인 SOx를 2,000ppm 이상에서 5ppm 이하로(배출 기준치 300ppm), 선택



일반 소각로(Stoker)



한수원 유리화 용융로

〈그림 9〉 일반 소각로와 한수원 유리화 용융로의 구조 비교

〈표〉 일반 소각로와 유리화 용융로 특징 비교

비교 항목	일반 소각로 (Stoker)	한수원 용융로	Ash 내 탄소 함량에 미치는 영향
온도	900 ℃	1,150 ℃	온도가 높을수록 완전 연소에 유리하여 감소
연소 매개체	공기	과잉 산소	산소가 완전 연소에 유리하여 감소
연소 매개체 상부 공급	없음	산소 공급	상부 산소가 폐기물 속으로 파고들어 완전 연소를 촉진시켜 감소
폐기물 접촉부	스테인리스 격자	용융유리	용융 유리의 온도가 높아 완전 연소에 유리하여 감소
폐기물 투입량	다량	소량	소량일수록 폐기물이 과잉 산소와 접촉 기회가 커 완전 연소가 가능하므로 감소

적 촉매 환원기(SCR)은 NOx를 최대 2,000ppm 에서 50ppm 이하로(배출 기준치 200ppm)으로 처리할 수 있음을 보여주었다.

플라즈마 토치 용융로(PTM)에 대한 비가연성 폐기물을 이용한 성능 시험을 통해 콘크리트·토양·유리·페펄터의 용융 특성 및 발생된 고화체의 특성이 평가되었고 투입 폐기물의 크기·투입 속도·배기체 발생 특성도 평가되었다.

PTM은 실증 시험 초기 토치 고정 및 회분식 용융로를 이용하여 성능을 평가하였고 초기 평가 자료를 바탕으로 토치 구동 및 연속 투입식 용융로로 개조되었다.

또한 용융물의 배출에 관한 설비 안전성 제고, 배출 용이성 등을 고려한 결과 기존의 배출 방식보다는 처분 겸용 용융 용기를 용융로 안에 넣어 폐기물을 용융시키고 용융이 종료되면 꺼내어 덮개를 채결한 후

저장 및 처분하는 방식이 바람직한 것으로 나타났다.

다. 국산화 유리의 우수성 입증

중·저준위 방사성 폐기물 유리화를 위해서는 폐기물 종류에 따라 적절한 조성을 갖는 유리를 선정하는 것이 매우 중요하다.

유리 조성 개발은 중·저준위 방사성 폐기물 내에 함유되어 있는 금속 및 무기 성분을 용융 유리와 안정적으로 결합시켜 품질이 우수한 유리 고화체를 만드는 분야이다.

환경기술원은 유리화 대상 폐기물들에 함유되어 있는 조성 가운데 유리를 구성하는 무기물들의 조성을 조사하여 폐기물 종류별로 안정성과 감용 효과가 우수한 최적의 유리를 개발하였으며 실증 시험을 통해 그 성능을 입증하였다.

개발된 유리는 실험실 규모 시험 및 실증 시험을 통해 그 성능을 평

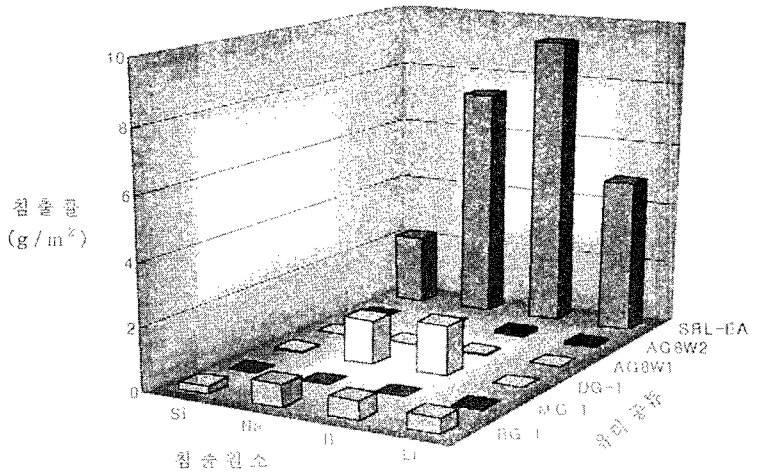
가하였다. 한수원(주)가 개발한 유리는 모두 5종류이며 저방사성 폐수지 또는 고방사성 폐수지를 단독으로 유리화할 때 사용하는 RG-1, 가연성 잡고체만을 단독으로 처리할 때 사용하는 DG-1, 고방사성 폐수지와 가연성 잡고체를 동시 투입할 때 사용하는 MG-1, 저방사성 폐수지와 가연성 잡고체를 동시 투입할 때 사용하는 AG8W1, 그리고 저방사성 및 고방사성 폐수지와 가연성 잡고체를 동시 투입할 때 사용하는 AG8W2로 이루어져 있다.

이들 유리들은 초기 점화 가능성, 점도 및 전기 전도도의 적정성, 침출 특성 등을 종합적으로 검토하고 실증 시험을 통한 검증 과정을 통해 선정되었다.

한수원(주)가 개발한 유리의 우수성을 입증하기 위해 국제적으로 공인된 침출 시험을 실시한 결과 <그림 10>과 같이 미국에서 고준위 방사성 폐기물 처리에 사용하는 유리(SRL-EA)보다 양호한 것으로 나타났다. 또한 유리 고화체에 대한 압축 강도 측정 결과 시멘트 고화체의 판정 기준인 500 psi보다 수십 배까지 높은 것으로 나타났다.

상용화 착수 및 향후 전망

한수원(주)가 개발한 유리화 기술은 이미 지난 2002년 9월 상용화를 위한 발걸음을 내딛었다. 한수원



<그림 10> 국산화 유리에 대한 침출률 평가 결과

(주)의 기술을 긍정적으로 검토한 정부가 상용화에 필요한 비용의 60%를 지원하기로 결정하여 상용화가 본격적으로 추진되게 된 것이다.

한수원(주)는 2007년에 1기의 유리화 상용 설비를 운영하는 것을 목표로 모든 원전에 확대 적용할 예정이다. 원전 부지 단위별로 유리화 상용 설비를 건설하여 각 원전 부지에서 발생하는 방사성 폐기물을 더욱더 안전하게 처리할 예정이다.

유리화 기술은 방사성 폐기물 관리의 안전성을 대폭 증가시킬 수 있기 때문에 우리나라 원자력 발전을 안정적으로 추진하는 데 반드시 필요한 방사성 폐기물 처분장 부지 선정에 많은 도움을 줄 것으로 기대한다.

또한 한수원(주)가 개발한 유리화 기술은 이미 국제적인 검증과 인증 단계를 거쳐 국제 경쟁력을 갖추었기 때문에 해외 기술 수출도 활기를

떨 것으로 전망된다.

연구가 진행되는 지난 8년여 동안 국제 전문 학술지 및 학술 대회에 수십편의 논문을 발표하여 전문가들의 검증 받았다.

또한 2001년에는 국제원자력기구(IAEA)에서 한수원(주) 유리화 기술의 우수성을 인정하여 국제 협력 프로그램(TCP)으로 선정하였다. 이 프로그램은 국제원자력기구가 연구비를 전액 부담하고 여러 나라와의 협력하에 진행되게 되며, 한수원(주) 유리화 상용 설비의 운전 편의성을 향상시킬 수 있는 기술을 개발하게 될 것이다.

이러한 측면을 고려할 때 한수원(주)의 유리화 기술은 국제 경쟁력을 충분히 갖추었다고 할 수 있다. 이미 미국을 비롯한 여러 나라에서 우리 기술을 도입하고자 하는 의향을 보내왔고 현재 검토중에 있다.

