중·저준위 방사성 폐기물의 유리고화 연구

-우리 나라의 연구 실적과 앞으로의 계획-

송 명 재
한전 전력연구원 방사선안전그룹 그룹장

대만은 일찍부터 원자력 발전을 시작하여 현재 경수로(PWR) 2기와 비등수로(BWR) 4기를 운전하고 있다.

이 원자력발전소들은 그간 대만의 수용가들에게 많은 양의 전기를 공급하였다.

대만의 국민들은 원자력 발전의 혜택을 톡톡히 보고 있다.

하지만 그 많은 양의 전기를 생산하는 동안 생성된 방사성 폐기물의 양도 만만치 않다.

방사성 폐기물 처리·처분 문제를 일찍부터 예견한 대만전력 당국에서는 대책을 수립하였다.

그러나 땅 덩어리가 좁은 섬나라에서 방사성 폐기물의 영구 처분장을 마련하기는 쉽지 않았다.

대만의 방사성 폐기물

대만 당국은 동남쪽의 조그만 섬인 난유도에 방사성 폐기물 저장 시설을 마련하였다.

하지만 이 시설은 방사성 폐기물의 영구 처분에는 적합하지 않았다.

난유도의 방사성 폐기물 저장 시설은 현재 약 12만드럼 정도의 중·저준위 방사성 폐기물을 수용하고 있는데, 이 시설은 이미 저장 한계에 도달하였다〈표 1〉.

난유도의 방사성 폐기물 저장 시설에는 수용 능력의 한계성 말고 또 다른 문제가 있다.

대부분의 방사성 폐기물은 우리 나라와 마찬가지로 200리터 철제 드럼에 담겨져서 보관되고 있다.

이 드럼이 오랜 기간 저장되는 중에 바다에서 불어오는 습한 공기 중의 염분 때문에 부식이 된 것이다.

비가 오면 드럼의 부식된 틈새로 빗물이 스며 들어 드럼 내의 방사성 핵종이 침출되어 밖으로 새어 나와 저장고 주변 환경을 오염시킨다.

대만은 난유도의 방사성 폐기물을 처리할 수 있는 여러 가지 대책을 궁리하였다.

가장 바람직한 것은 대만의 어딘가에 방사성 폐기물의 영구 처분장을 건설하여 그곳에 안전하게 처분하는 것이다.

그러나 주민들의 강력한 반대로 어디에도 방사성 폐기물의 처분장을 건설할 수는 없었다.

대만전력공사는 생각다 못해 북한에 방사성 폐기물을 수출하기로 한 것이다.

대만은 지난 1월 북한과 중·저준위 방사성 폐기물 이전 계약을 맺었다.

우선 6만드럼의 방사성 폐기물을 북한에 운반하고 7,500만달러를 제공하기로 한 것이다.

그리고 추후에 추가로 14만드럼의 폐기물을 북한에 보내는 조건으로 모두 1억5천만달러를 더 지불한다는 것이다.

북한은 우선 달러가 탐이 나서 선뜻 계약에 임한 것 같다. 원자력발전소의 중·저준위 방사성 폐기물을 처리·처분해 본 경험이 전혀 없는 북한은, 평산 탄광 지역의 한 폐광에 방사성 폐기물 처분장을 건설해서 대만의 폐기물을 처분하겠다고 한다.

기술 수준도 문제이거니와 안전에 대한 개념이 전혀 없는 북한에서 과연 대만의 방사성 폐기물을 폐광에 안전하게 처리할 수 있을까 하고 많은 사람들이 걱정하고 있다.

우리 나라의 방사성 폐기물

78년에 고리 원자력 1호기가 운전을 시작한 이래 96년 말 현재 총 4만8천드럼의 중·저준위 방사성 폐기물이 발생되어 원자력발전소의 저장 시설에 보관되고 있다〈표 2〉.

원자력 발전의 규모로 보면 우리 나라의 원자력발전소가 대만보다 훨씬 더 크지만 방사성 폐기물의 양은 대만이 더 많다.

그 이유는 대만에는 4기의 비등수로가 있기 때문이다. 비등수로는 경수로보다 더 많은 양의 방사성 폐기물을 발생시키고 있다.

그리고 또 한가지, 최근 들어 우리 나라 원자력발전소의 방사성 폐기물 처리 기술이 놀라운 발전을 거듭한 결과, 우리 나라의 원전 1기에서 1년에 발생하는 방사성 폐기물의 양이 250드럼 이하로 되어 발생량이 대단히 줄어 들었다는 사실이 또 다른 이유가 된다.

〈표 1〉 대만의 원자력 발전 규모 및 방사성 폐기물 발생량

	가동중 원전	설비 규모
원자력발전소	가압수형 원자로 2기 비등수형 원자로 4기	총 514만kWe
	연간 발생량	난유도 저장량(95년말)
방사성 폐기물	약 600드럼/호기 (추정)	누계 123,643드럼 (저장 시설 포화)

〈표 2〉 우리 나라 원자력발전소의 방사성 폐기물 관리 현황

(단위 : 드럼)

원자력발전소	방사성 폐기물 저장 능력	96년 저장량	연간 발생량	예상 포화 연도
고 리	50,200	28,895	1,000	2014
영 광	23,300	8,883	1,000	2014
울 진	17,400	7,622	500	2010
월 성	9,000	2,632	150	2018
합 계	99,900	48,032	2,650	-

그러나 우리 나라도 대만과 마찬가지로 방사성 폐기물의 영구 처분장이 확보되어 있지 못하다.

여러 가지 여건이 대만과 비슷한 우리 나라는 그간 방사성 폐기물의 처분장을 확보하려고 많은 노력을 하였다.

그러나 전문가들이 적정한 후보 부지를 물색하면 그때마다 주변 주민들의 강력한 반대에 부딪히게 되었다.

심지어 육지에서 떨어진 안면도나 굴업도 같은 도서 지역의 후보지를 구해도 결과는 마찬가지였다.

이에 정부는 방사성 폐기물 처분장 확보 계획을 전면 수정하여 사업 주체를 정부 기관에서 한국전력공사로 이관시켰다.

따라서 한국전력공사는 방사성 폐기물의 발생자이면서 동시에 폐기물의 처리·처분 주체가 된 셈이다.

우리 나라의 방사성 폐기물 처리 대책

한국전력공사는 방사성 폐기물의 처분 문제와 관련해서 머지 않아 현재의 대만전력공사와 비슷한 입장에 놓일 전망이다.

다시 말해 발전소의 저장고 저장 능력이 한계에 이를 것이라는 것이다.

하지만 한국전력공사에서는 일찍부터 방사성 폐기물의 영구 처분장이 계

한국전력공사는 유리고화 기술을 개발하여 방사능 폐기물 문제를 준영구적으로 해결하자는 방침을 세워놓고 있다. 사진은 대만의 방사성 폐기물 북한 반입 규탄 시위 모습

획대로 확보되지 못할 경우를 대비해서 여러 가지 대책을 마련하였다.

첫번째가 발전소 내 임시 저장고의 용량을 넉넉히 잡은 것이고, 두번째는 신기술을 도입해서 방사성 폐기물의 발생량을 대폭 줄인 것이다.

그 결과 우리 나라는 앞으로 10년 이내에는 대만처럼 방사성 폐기물의 영구 처분장을 못 구해 폐기물을 자국 내에서 처분하지 못하고 외국에 보내는, 국제 윤리를 무시하는 그런 행위는 하지 않아도 된다.

그렇다고 해서 안심할 것은 못된다. 〈표 2〉에서 보는 것처럼 앞으로 십여 년 후에는 우리 나라 원자력발전소의 저장고에도 방사성 폐기물이 꽉 들어찰 전망이다.

그때까지 다행히도 방사성 폐기물의 영구 처분장을 국내에 건설한다면 모를까, 그렇지 않으면 우리도 대만과 비슷한 결정을 내려야 할 지도 모른다.

하지만 한국전력공사에서는 대만과 같이 자국의 방사성 폐기물을 외국에 보내는 그러한 방법은 전혀 생각지도 않고 있다.

대만과 달리 한국은 이 문제를 신기술로 해결하려는 노력을 해왔다.

한국전력공사 전력연구원에서는 4년 전부터 방사성 폐기물의 혁신적인 처리 기술을 모색해 왔다.

여러 가지 기술에 대한 평가를 하던 중, 당시 미국에서 고준위 방사성 폐기물의 처리에 사용되던 유리화 기술을 중·저준위 방사성 폐기물의 처리에 적용하려는 움직임이 있다는 사실을 알게 되었다.

그 전에도 소규모로 몇몇 연구진들이 중·저준위 폐기물의 유리화 가능성을 실험한 적은 있었으나, 이번에는 대규모로 적극적인 연구 활동을 전개해 나가려는 움직임이 엿보였던 것이다.

전력연구원에서는 중·저준위 방사성 폐기물의 유리화 가능성에 대한 조사를 본격적으로 시작하였다.

왜냐하면 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화하면 폐기물의 부피를 혁신적으로 줄일 수 있기 때문이다.

먼저 유리화 기술의 배경을 살펴보고 그 기반 기술의 현실성을 검토한 후 국내 적용에 대한 타당성을 살펴보았다.

그 결과 유리화 기술을 개발하여 방사성 폐기물 문제를 준 영구적으로 해결하자는 방침을 세웠다.

그리하면 앞으로 십여년 후에 비록 방사성 폐기물 영구 처분장이 확보되지 못한다하더라도, 대만처럼 방사성 폐기물을 외국으로 보내려하는 그런 생각을 하지 않아도 국내에서 충분히 저장할 수 있는 것이다.

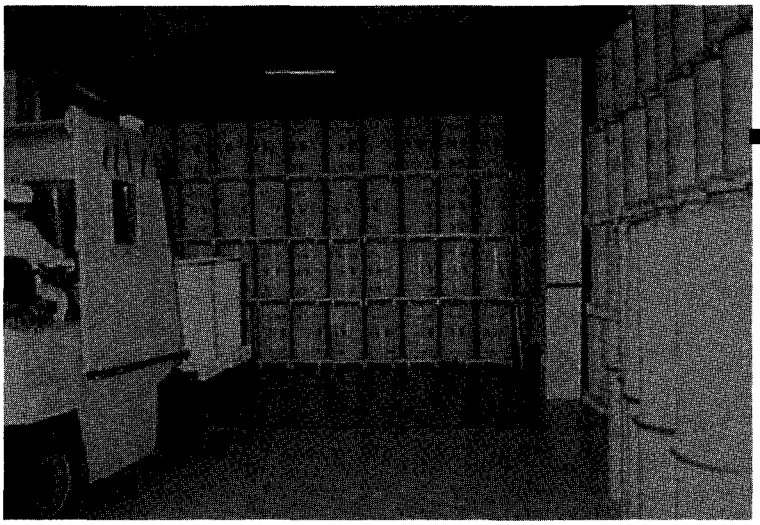
전력연구원 고유의 아이디어

일단 중·저준위 방사성 폐기물의 유리화 방침이 굳어지자 연구진들은 1단계로 중·저준위 방사물 유리화 타당성 조사 연구를 시작하였다.

비슷한 무렵 미국도 전력연구소(EPRI Electric Power Research Institute) 주관으로 유리화 타당성 조사에 들어갔다.

당시 미국에서는 방사성 폐기물의 처분 단가가 천정 부지로 치솟아 방사성 폐기물의 부피를 줄이기 위한 모든 노력을 경주하고 있었다.

미국의 방사성 폐기물 처분 단가는,



방사성 폐기물을 유리화하면 방사성 핵종이 유리 구조안에 갇히기 때문에 설령 지하수가 침투한다 할지라도 방사능이 유출되지 않는다. 중·저준위 방사능 폐기물 임시 저장고의 내부 모습

80년초 1.0큐빅피트(Cuft)당 3~5달러 정도하던 것이 90년대 중반을 넘어서자 약 100배로 올라 300~500달러 정도가 되었던 것이다.

우리 나라 돈으로 환산하면 방사성 폐기물 한 드럼을 처분하는 데 무려 200만원 내지 350만원 정도가 드는 것이다.

게다가 이 비용은 폐기물의 운반비나 저장비가 전혀 포함되지 않은 가격이다.

처분 비용이 이렇게 비싸지게 되자 방사성 폐기물 발생자들은 폐기물의 부피를 줄이기 위해 모든 노력을 하였다.

한동안 경제성이 없을 것으로 간주되었던 유리화 기술이, 처분 단가가 높아지는 바람에 이제는 충분히 경제성을 갖게 되어 그 기술 개발에 착수할 수 있게 된 것이다.

게다가 미국의 환경청(EPA)에서는 중·저준위 방사성 폐기물은 유리화하여 처분하는 것이 가장 바람직하다는 견해를 표명하였다.

폐기물을 영구 처분할 때 제일 문제가 되는 것이 환경 영향이다. 폐기물 속의 방사성 핵종이 누출되어 주변 환경을 오염시킬 수 있다는 우려 때문이다.

그러나 방사성 폐기물을 유리화하면 그런 문제가 없어진다. 방사성 핵종이 유리 구조 안에 갇히기 때문에 설령 지하수가 침투한다 할지라도 방사능의 유출은 되지 않는다.

따라서 방사성 폐기물을 유리화하면, 규제자 측에서는 환경 오염 문제가 없어서 좋고, 발생자 측에서는 부피가 혁신적으로 줄어 들기 때문에 처분 비용을 적게 들이는 등 경제적이어서 좋다.

하지만 신기술 개발은 만만치 않다. 유리화 기술이 핵연료의 재처리 공장 등지에서 고준위 방사성 폐기물에 적용된 예는 많지만, 고준위 방사성 폐기물과 중·저준위 방사성 폐기물은 크게 차이가 난다.

고준위 방사성 폐기물은 대체로 그 조성이 일정하지만, 중·저준위 방사성 폐기물은 쓰레기에서 필터·수지·농축 폐액 및 금속 조각에 이르기까지 그 성분이 매우 다양하다.

따라서 폐기물이 용융되는 온도가 다르고, 또 유리화 성분의 화학적 조성에 큰 차이가 난다.

현재 미국이나 일부 유럽 국가에서는 이처럼 다양한 조성을 가진 중·저준위 방사성 폐기물을 한꺼번에 처리하는 유리화 기술 설비의 개발을 모색하고 있다.

그 설비는 전기로 가열하는 노나 플라즈마로 가열하는 노 등 여러 가지가 있다.

이러한 가열로는 제각기 그 특성이 다르다.

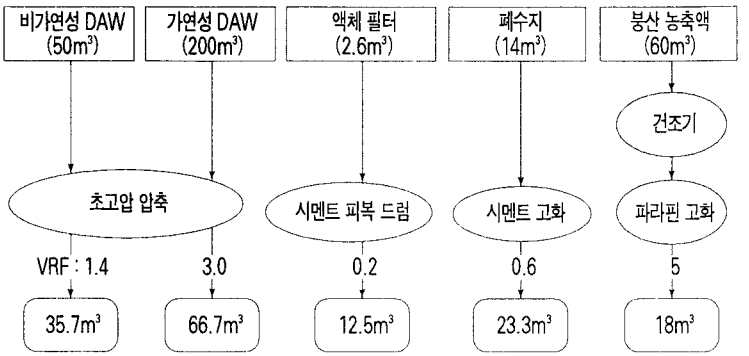
선택되는 가열로와 폐기물의 조성에 따라 유리 고화체의 특성이 달라지고 또 고화 공정이 달라지는 것이다.

따라서 한 개의 가열로를 이용하여 금속 성분이 많은 폐기물과 적은 폐기물을 동시에 처리하자면 기술 개발 과정이 상당히 복잡해지는 것이다.

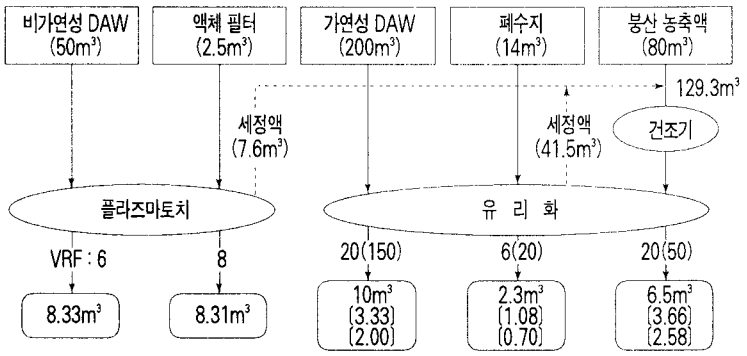
전력연구원에서는 이 점에 착안하여 방사성 폐기물을 주로 유기 물질인 가연성 폐기물과 금속 성분이 많은 비가연성 폐기물로 구분하고, 각기 폐기물의 특성에 맞는 설비를 개발하기로 방침을 세웠다.

유기 물질은 주로 산화성 분위기 속에서 쉽게 유리화되는 유도 전기 가열로를 이용하여 처리하고, 비가연성 폐기물은 환원성 분위기 속에서 좋은 고화체를 형성시키는 플라즈마로를 이용하기로 한 것이다.

물론 두 개의 노를 이용하면 설비가 약간 복잡해지고 경제성이 조금 떨어지겠지만, 방사성 폐기물의 감용에서 얻는 이득이 두 개의 가열로로 인한



〈그림 1〉 현재 우리 나라 원전의 방사성 폐기물 처리 방법



〈그림 2〉 유리고화 설비에 의한 방사성 폐기물 처리 방법

설비 투자비보다 훨씬 더 크기 때문에 경제성은 전혀 문제가 되지 않았다.

게다가 배기체 처리 설비를 유도 전기 가열로와 플라즈마로에 공동으로 사용 가능케 함으로써, 설비를 간소화하고 투자비를 줄일 수 있다는 결론이 나왔다.

전력연구원의 이러한 아이디어는 유리화 기술 개발을 용이하게 할 수 있을 뿐더러, 최종 생성되는 유리 고화체의 특성이 미국이나 유럽에서 추진하고 있는 방법으로 만들어지는 유리 고화체보다 훨씬 더 좋을 수 있는 것이다.

전력연구원에서 개발하고 있는 유리화 설비는 미국이 연구중인 것과 또 다른 점이 있다.

미국이나 유럽에서는 가연성 방사성 폐기물을 먼저 소각로를 이용하여 재로 만든 다음에 나오는 재를 유리화하는 설비이다.

그렇게 되면 배기 가스 방출의 위험이 있는 소각로를 별도로 건설해야 하는 것이다.

우리 나라에 가연성 방사성 폐기물 소각로를 설치한다는 것은 대단히 어려운 일이다.

따라서 가연성 방사성 폐기물을 소각하지 않고 열분해하여 유리화하자는 아이디어를 생각해 낸 것이다.

국내의 유리고화 타당성 조사

전력연구원에서는 고유의 아이디어가 과연 실현 가능한가에 대한 타당성 조사 연구를 94년도에 약 1년간의 연구 기간을 거쳐 시행하였다.

타당성 조사는 유리화를 위한 기초 자료 조사와 실험실에서의 실증 연구로 나뉘어졌다.

먼저 전세계의 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 연구 동향이 조사되었고, 또 국내에서 방사성 폐기물 유리화의 경제성 검토도 수행되었다.

먼저 원자력발전소 4기에서 발생되는 방사성 폐기물을 처리할 수 있는 처리 용량 200kg/h의 전기 용융로와 금속을 처리하기 위한 50kg/h 용량의 플라즈마로로 구성된 설비의 투자비 및 유지 보수비를 추정하였다.

설비의 감가 상각 기간은 15년으로 가정하였다.

그리고 현재 우리 나라의 원자력발전소에서 처리하고 있는 방사성 폐기물 처리 개념〈그림 1〉과 유리화 설비의 처리 개념〈그림 2〉을 비교하였다.

타당성 조사 결과, 신규로 건설되는 원자력발전소에 유리화 설비를 도입

하면 현재의 방사성 폐기물 처리 방식보다 항상 경제적이었다.

그리고 기존 방사성 폐기물 처리 설비가 이미 확보된 원자력발전소에 추가로 유리화 설비를 건설할 경우, 방사성 폐기물의 처분 단가가 드럼당 약 100만원이 넘을 경우에는 경제성이 좋았다.

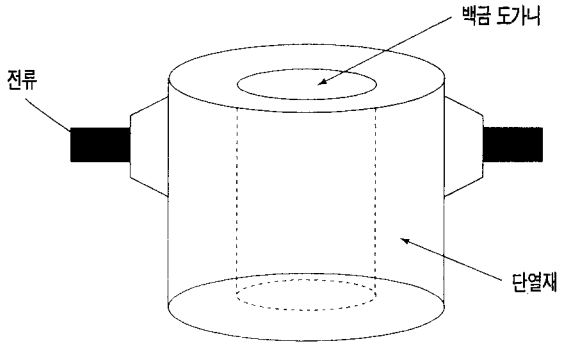
현재 미국의 경우 방사성 폐기물의 처분 단가가 이미 드럼당 200만원 내지 350만원 정도하고 있음을 감안하면, 우리 나라에서도 유리화 시설이 충분히 경제성이 있음을 알 수 있을 것이다.

타당성 조사 연구에서 가장 중요하게 취급한 것은 유리화 기술의 실증이었다.

우선 〈그림 3〉과 같은 백금 도가니를 가지고 가연성 폐기물을 유리 재료와 함께 1,300℃ 정도에서 열분해를 시켜 유리 고화체를 형성하였다.

생성된 유리 고화체에 대한 여러 가지 물성 시험도 하였다.

그 다음에는 파일럿 규모의 전기 가열식 유리 용융로를 이용하여 유리화 실험을 하였다.



〈그림 3〉 유리고화 시험용 백금 도가니

방호복을 열분해 처리로 유리 고화한 모습

유리고화 기술 개발 계획

상기 타당성 조사를 통해서 전력연구원에서는 원자력발전소 4기에서 생성되는 중·저준위 방사성 폐기물을 처리할 수 있는 총용량 250kg/h(유리 용융로 : 200kg/h, 플라즈마로 : 50kg/h)의 유리화 시설 개념도를 고안해 냈다〈그림 4〉.

유리 용융로 속에는 휴지·방호복·목재 등 방사능에 오염된 가연성 잡고체가 투여된다.

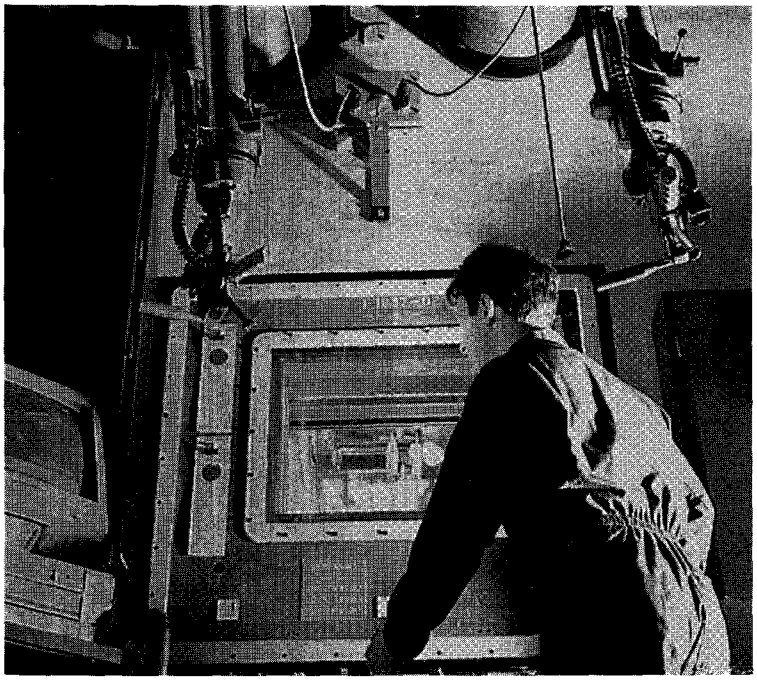
그리고 플라즈마로 속에는 쇠 파이프, 공기 필터와 같은 비가연성 폐기물이 투입된다.

유리 용융로와 플라즈마로는 동시에 운전하지 않으며, 배기 가스 처리 계통을 공유하게 된다.

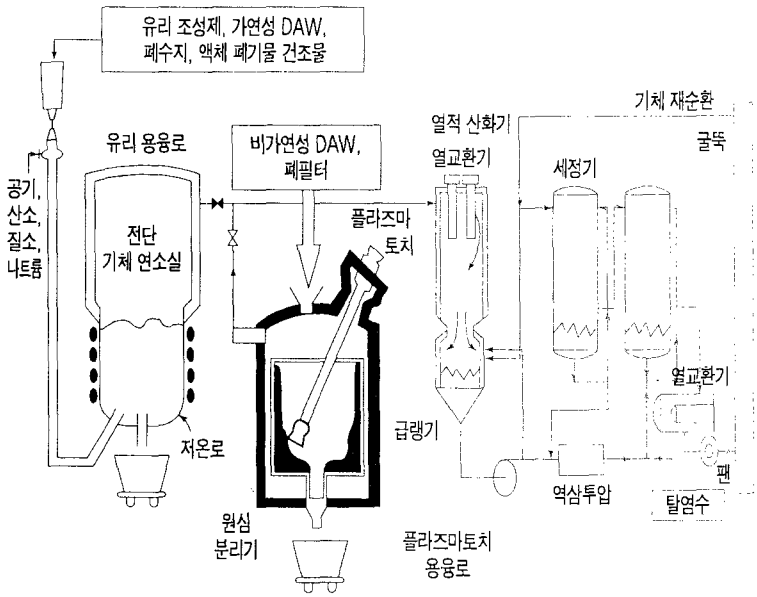
이러한 설비의 실증을 위해서 전력연구원에서는 지난해인 96년 7월에 본격적인 기술 개발 단계에 들어갔다.

최적의 유리화 공정을 도출하고 배기 가스의 안전한 처리를 위한 설비를 개발하는 것이다.

용량 50kg/h와 10kg/h의 유리 용



영국 Sellafield 유리화 공장의 작업 모습



〈그림 4〉 중·저준위 방사성 폐기물 유리고화 시설 개념도

융로 및 플라즈마로로 구성된 파일럿 플랜트를 건설하여 최적의 공정을 도출해낸다.

개발되는 공정을 토대로 하여 상용 시설 규모의 유리화 시설에 대한 개념 설계까지를 목표로 하는 본 연구는 99년 중에는 끝날 전망이다.

본 연구가 성공적으로 끝나면 곧 바로 상용 규모의 유리화 시설 건설이 시작되어, 늦어도 2003년까지는 설비를 만들어 원자력발전소의 중·저준위 방사성 폐기물을 유리화할 수 있을 것이다.

이 설비가 완성이 되면 원자력발전소에서 생성되는 중·저준위 방사성 폐기물의 양을 약 20~30분의 1 정도로 감소시킬 수 있게 된다.

그렇게 되면 원자력발전소 12기에서 30년간 발생되는 방사성 폐기물의 양이 약 13,000드럼 정도 밖에 되지 않는다.

대만의 원전 6기에서 20년도 안되는 기간 내에 12만드럼의 방사성 폐기물이 발생된 것에 비하면 유리화된 방사성 폐기물의 양은 지극히 적음을 알 수 있다.

게다가 유리화된 방사성 폐기물은 안전성이 뛰어나 환경에 미치는 영향이 대단히 적다.

전력연구원의 연구진은 이처럼 우수한 기술을 국제 공동 연구를 통해 전세계의 전문가들을 최대한 활용하여 꼭 성공시키기 위한 노력을 경주하고 있다.