



Pyroprocessing 기술의 현황과 전망

유재형

한국원자력연구소 핵화학연구팀장



세계의 에너지 자원

오늘날 우리는 모두 쾌적한 환경 속에서 풍요롭고 행복한 삶을 누리기를 원한다. 아마도 이것은 인류가 이 세상에 살아남는 마지막 날까지의 바람일 것이다. 그러나 현실은 우리가 갈망하는 이 조건을 언제까지나 만족시켜 줄 수 있을까?

다가올 미래에 있어 인류의 생존을 좌우할 수 있는 요소는 여러 가지 많이 있겠지만 여기서는 에너지 문제에만 국한시켜 그 실상을 한번 살펴보고 하자.

지금 우리가 살고 있는 이 지구촌

의 환경을 한번 의미깊게 돌아보자. 약 60억명의 사람이 살고 있는 이 지구, 갖가지 공장과 건물, 수많은 자동차를 비롯한 운송 수단 등에서 설새 없이 내뿜고 있는 화석 에너지원 연소 물질들, 그로 인하여 엄청난 공해가 발생되고 있으며 그 가운데 탄산 가스는 급기야 지구의 온실효과로 이어져서 지구상의 기온이 매년 증가일로에 있지 않은가?

과학 기술과 산업의 발달로 인간의 생활은 점점 더 윤택해지고 있지만 반대로 지구는 점점 더 깊은 환경병의 수렁으로 빠져들고 있지 않은가?

지금 우리가 사용하고 있는 에너지 자원은 그 원천이 전부 태초에 생겨나 오랜 기간 동안 저장되어 있었으나 18세기 산업 혁명 이후 인구의 증가, 문명의 발달과 함께 에너지 소모량도 급격히 증가해 왔다.

오늘날 산업 발전, 경제 성장과 함께 에너지 소모량은 시간이 흐름에 따라 기하급수적으로 증가하고 있다. 우리가 지구상에 보유하고 있

는 에너지 자원은 한정되어 있는데도 말이다.

지금 지구상에 존재하고 있는 에너지 자원과 그 사용 현황을 <표 1>에서 한 번 살펴보자. 대부분의 에너지원은 앞으로 불과 100년 이내에 고갈될 위기에 있음을 말해주고 있다.

이 표를 보면 앞으로 지구상에서 벌어질 일이 가히 짐작이 가고도 남는다. 그것은 다름 아닌 국가간 에너지 쟁탈전이다. 적어도 향후 100년 이내에 이러한 상황이 벌어지리라 하는 것을 예상할 수 있다.

비록 석탄이 100년을 넘게 버티준다 하더라도 그 때는 이미 석유가 고갈된 뒤이기 때문에 석탄은 연료보다는 오히려 화학 공업의 기본 원료로써 더 중요한 물질이 될 것이다. 일상 생활에 사용되는 각가지 생필품들, 즉 합성 수지·합성 섬유·합성 고무·화학 약품 등이 석탄으로부터 만들어져야 하기 때문이다.



〈표 1〉 에너지원별 부존 현황

에너지원	추정 매장량	연간 생산량	가채년수
석유	10,529억배럴	257억배럴	41년
천연 가스	5,170조ft ³	81.6조 ft ³	63년
석탄	9,842억톤	45억톤	218년
우라늄	395만톤-U*	6.2만톤-U**	64년

출처 : Statistical Review of World Energy, British petroleum(1999)

Uranium resources, production and demand OECD/NEA-IAEA(2000)

* \$130/kg-U 이하의 비용으로 채광 가능량, ** 연간 소모량

이와 같이 심각한 미래 에너지 문제를 극복하기 위하여 과학자들은 끊임없이 그 해결책을 찾고 있지만 아직까지 그렇게 만족스러운 방법은 찾지 못하고 있다.

그래도 현재로서 가장 전망있는 방법은 원자력 기술이다. 그것도 우라늄을 한 번만 쓰고 내버리는 소위 비순환 주기(Once through cycle)에 의존하는 것이 아니라 순환 주기(Recycle)에 의존하는 방법이다.

현재 국제 현물 시장에서 거래되고 있는 우라늄 가격은 제한 가격으로 \$ 6.4/lb U₃O₈에 지나지 않으므로 앞으로 당분간은 비순환 주기가 순환 주기보다 더 경제성이 높을 것으로 추측되고 있다.

그러나 비순환 주기는 앞에서 지적한 바와 같이 우라늄을 현재의 수준대로만 사용한다 하더라도 향후 64년간 사용할 수 있는 물량 밖에는 되지 않는다.

지구상의 에너지 소모량은 매년 증가일로에 있기 때문에 앞으로 우라늄의 소모량은 더 늘어날 전망이며 그렇게 되면 지구상의 가채 우라늄은 향후 60년 분량도 채 안될 것으로 예상된다.

만약 이 기간 동안 값싼 대체 에너지의 개발이 안된다면 어떻게 할 것인가? 그것은 인류의 생존을 위협하는 참으로 큰 문제이다.

이와 같이 미래 에너지 안보 문제

에 대비하여 원자력의 재순환 주기 기술을 확보해야 하는데 기존의 습식 재순환 기술보다는 좀더 경제적인 방법을 찾아보아야 할 것이다. 적어도 비순환 주기와 경쟁이 될 수 있는 기술이라야 현실적인 기술이 될 수 있을 것이다.

지금 세계의 원자력 과학자들은 그 기대를 GEN-IV 원자로의 개발과 pyroprocessing의 실현에 두고 있다.

지금부터는 더 경제적이고 더 안전하고 더 환경 친화적인 새로운 형태의 차세대 원자로(GEN-IV) 개발과 함께 이를 뒷받침해 줄 수 있는 새로운 핵연료 주기 기술의 개발이 필요하다. Pyroprocessing은 아직 상용화되지는 않았지만 미래에 실용화로 이어질 수 있는 새로운 핵연료 주기 기술로 평가되고 있다.

이와 같은 배경을 근간으로 본고에서는 지금까지 세계 몇몇 나라에서 연구·개발되고 있는 금속 연료의 pyroprocessing 기술의 현황과 전망을 한번 살펴보고자 한다.

Pyro 기술이란?

'Pyro'란 희랍어에서 유래된 말

로 '불' 또는 '열'을 뜻한다. 우리 주변에서 쉽게 찾아 볼 수 있는 pyro 기술은 어떤 것이 있을까?

아마 용광로의 고온에서 달구어진 쇳물을 형틀에 붓고 냉각시켜 일정한 형태의 쇳덩어리를 만들어 낸다면 이것은 일종의 pyro 기술일 것이다. 또 유리 공장에서 고온의 유리액을 가지고 여러 가지 모양의 유리병을 만들어내는 과정도 pyro 기술에 해당할 것이다. 이와 같이 pyro 기술은 우선 고온을 동반한다는 것이 가장 두드러진 특징이다.

그러나 다루고자 하는 물질을 고온에서 취급하는 것은 그 장단점이 있을 것이다. 만약 물질 취급 과정에서 물리화학적 반응이 수반된다면 물질의 전달 또는 화학 반응이 촉진되어 빠른 시간 내에 생산품을 만들어 낼 수 있을 것이며, 때로는 원치 않는 반응이 일어나 오히려 문제점을 낳을 수도 있을 것이다.

제철소나 유리 공장에서는 쇳물이나 유리물을 다루어야 하기 때문에 일년 내내 화로에 불을 때야 하고 또 그에 따른 각별한 안전 관리가 요구되고 있다.

고온의 용융물은 생각되면 곧 굳어져 사람의 의도대로 무엇을 만들

기가 곤란해질 뿐만 아니라 생산 공정의 마비를 초래할지도 모르기 때문이다.

핵연료 물질 재순환을 위한 pyro 기술의 응용

Pyro 기술로 이루어진 일련의 공정을 우리는 pyroprocessing이라 부른다. 만약 이 기술을사용후 핵연료 처리에 도입한다면 어떻게 될까?

사용후 핵연료 pyroprocessing은 아직 상용화되지는 않았지만 미국·일본·러시아 등에서 기술 개발이 상당히 진전되어 있다.

그러나 습식법에 비하여 결코 쉬운 기술이라 여겨지지는 않는다. 그 이유는 고온의 액체 상태를 취급하는 것 이외에도 고방사능·고반응성·고부식성 등의 여타 문제까지도 한꺼번에 해결해야 되는 부담을 안겨주기 때문이다.

우선 고방사능 문제는 습식 공정에서도 똑같은 문제점을 나타내고 있지만 모든 공정이 차폐 시설 내에 설치되기 때문에 작업자의 방사선 피폭을 막아줄 수 있다.

지금까지 오랜 기간 동안 충분한 경험이 쌓여 있기 때문에 이 문제는 현재의 기술로도 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

다음은 용융액의 고반응성 문제이다. 이를 해결하는 것도 큰 문제

는 아니다. 소위 불활성 기체라는 것이 있어 차폐 공간의 분위기를 불활성으로 만들어 주면 이 문제도 쉽게 해결할 수 있다.

불활성 기체로는 알곤(Ar)·헬륨(He)·제논(Xe) 등이 있는데 이 중 가장 널리 사용되는 불활성 기체는 알곤이다. 차폐 공간의 공기를 뽑아내고 알곤으로 채워 고온 용융액과 산소 또는 수분과의 반응성을 제거하는 방법이다.

공기 중의 산소나 수분은 금속의 고온 용융액과 강한 반응성을 띠지만 불활성 기체와는 전혀 반응을 일으키지 않기 때문이다.

다음 고부식성 문제이다. 핵연료 물질 회수 과정에서 주로 사용되는 용융염 매질은 염화물이다. 고온의 금속 염화물은 부식성이 크며 웬만한 금속 재질은 이에 견디나지 못하고 부식을 일으킨다.

소규모 실험에는 특수한 금속 합금이나 탄탈륨과 같은 고가의 금속이 사용되고 있지만 장기적인 내구성을 보장할 수 있는 재료의 개발이 필요한 분야이다.

핵연료 물질의 재순환 과정은 처리 대상 핵연료의 종류에 따라서 그 처리 방법이 다르다. 처리 대상 핵연료의 종류는 금속 형태의 연료가 가장 많이 연구되고 있으며 그밖에 산화물 형태, 질화물 형태도 연구되고 있다.

금속 핵연료의 처리는 1980년대

미국 ANL에서 개발한 IFR(Integrated Fast Reactor) 핵연료 주기가 대표적인 방법이다. 이 기술은 금속 핵연료를 처리하여 다시 금속 핵연료를 만드는 방법이고 사용후 핵연료 처리 시설이 원자로와 같은 장소에 설치되어 있어 핵연료의 저장·운송 등의 필요성이 없어져 전체적인 핵연료 주기 비용을 저감시키는 개념으로 되어 있다.

미국에서는 1995년 20kg/batch의 실증 시험까지 수행하였으나 당시 정부의 비순환 주기 정책에 따라 본 프로젝트는 중단되고 말았지만 지금은 다시 정책의 수정을 신중히 고려하고 있다.

또 장반감기 핵종을 단반감기 핵종으로 변환시키는, 즉 소멸 처리의 목적으로 이 기술을 적용하는 소위 ATW(Accelerator Transmutation of Waste) 계획까지도 고려하고 있으며, 1999년 DOE에서 이에 관한 roadmap을 발표한 바 있다.

ATW 계획에 의하면 사용후 핵연료로부터 분리한 우라늄은 영구 처분장에 처분하고, 초우라늄(TRU)은 장수명 핵분열 생성물(예: Tc-99, I-129)과 함께 ADS(Accelerator Driven Transmutation System)에서 단수명 핵종으로 핵변환시킨다는 전략을 주요 골자로 하고 있다.

그렇게 함으로써 장수명 핵종을

다. 플루토늄을 회수할 때 Np · Am · Cm과 같은 초우라늄 독물질 (spike)이 함께 회수되기 때문에 이는 self-protection(1m 거리에서 1 Sv/hr 이상의 γ -선량을 띠는 경우)이 가능한 물질로 분류될 수 있다는 것이다.

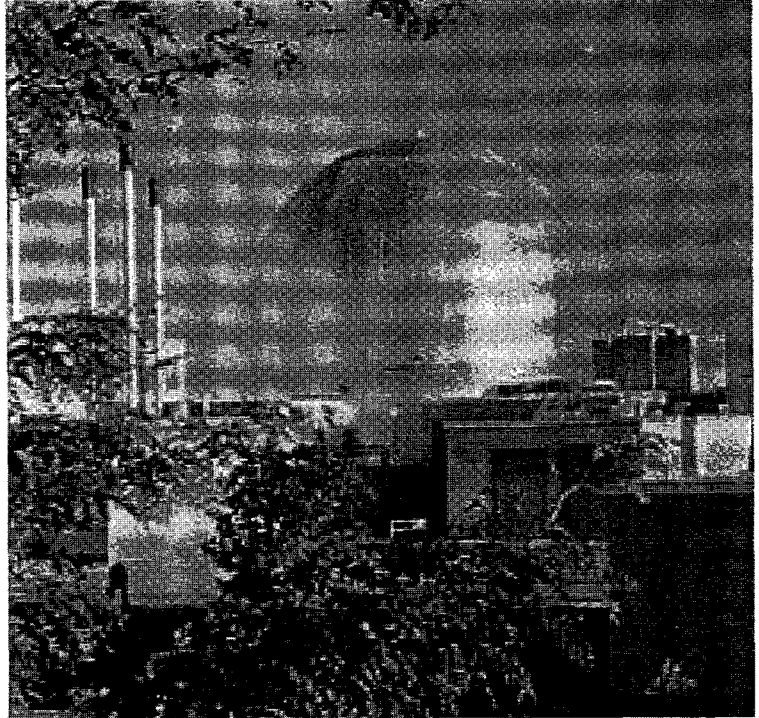
즉 그 자체가 방출하는 방사선량으로 인하여 일반인이 맨손으로 아무렇게나 취급할 수 있는 물질이 결코 아니고 적어도 차폐 공간 내에서 원격 조작으로만 취급할 수 있는 위험물이기 때문에 탈취나 도난의 가능성이 없는 물질로 분류될 수 있기 때문이다.

따라서 이 과정에서 얻는 최종 제품은 우라늄과 플루토늄+MA (Minor Actinide) 인데 이들은 핵연료 물질로 재사용할 수 있는 것들이다.

전자의 경우는 산화물로 전환시키면 기존의 원자로에서도 재사용할 수 있는 핵연료를 만들 수 있지만 후자의 경우는 사정이 좀 다르다. 즉 이들을 연료로 받아들일 수 있는 새로운 형태의 원자로가 필요한 것이다.

당초 IFR 핵연료 주기에서는 고속로가 고려되었다. 그러니까 플루토늄과 MA를 에너지원으로만 사용하는 것을 고려하였다. 그러나 이들을 재순환시키는 목적에 따라 원자로의 형태가 달라질 것이다.

예를 들면 에너지 생산이 주목적



EBR-II 원자로

이라면 초우라늄 원소의 연소율이 크도록 원자로를 설계하여야 할 것이고, 소멸 처리가 주목적이라면 원자로의 형태는 초우라늄 원소의 핵변환율을 높일 수 있도록 고안되어야 할 것이다.

이와 같이 회수물의 사용 목적에 따라 원자로의 형태는 크게 다를 수 있고 회수 공정 자체도 그 목적에 맞게 구성되어야 할 것이다.

미국에서는 1990년대에 EBR-II를 이용하여 IFR 핵연료 주기 개발을 꾀하였다. 그리고 EBR-II에는 금속 형태의 악틴족 원소 핵연료

(연소용과 증식용) 사용을 고려하였다.

금속 우라늄 연료는 산화물 연료에 비하여 핵분열성 원자의 밀도가 높아 증식률을 높이기 용이하고 열전도성도 월등히 높으며 과도 출력시 고유 안전성이 크다는 것이 그 선택 배경이었다.

IFR 주기 기술의 개요

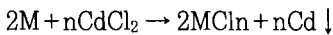
1. 금속 연료 처리 공정

금속 연료를 처리할 수 있는 개략적인 IFR 주기 공정도를 <그림 1>



에 나타내었다. 먼저 사용후 핵연료 봉을 짧은 토막으로 절단한 후 약 500℃의 용융염(LiCl-KCl-CdCl₂) 전해조의 양극 바구니에 넣고 전기 분해를 시작한다.

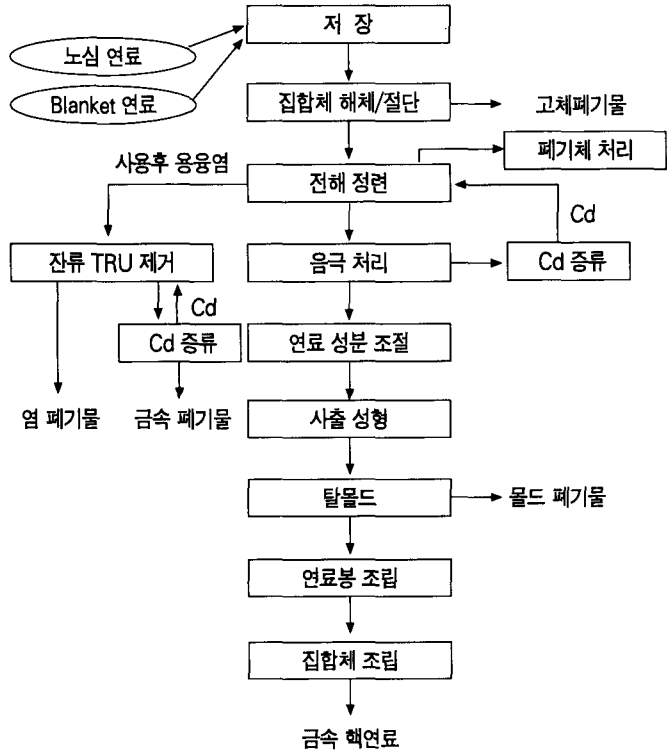
이 때 핵연료 물질 및 대부분의 핵분열 생성물은 다음과 같이 염화 카드뮴에 의하여 산화 반응을 일으켜 용융염에 용해된다. 이 반응에서 금속화된 카드뮴은 액체 상태로 전해조 바닥에 침전된다.



전기 분해 과정에서 우라늄은 고체 음극으로부터 전자를 받아 환원 반응을 일으키며 음극 표면에 석출된다. 이 때 염화물 생성 자유 에너지가 큰 물질들은 쉽게 환원되지 않으므로 용융염에 잔류하게 되고 염화물 생성 자유 에너지가 중간 정도에 해당하는 악티늄 원소들만 음극으로 이동, 석출하게 된다.

그리고 이중 음극을 사용하게 되면 악티늄 원소 가운데서도 우라늄을 일차로 고체 음극에 먼저 붙이고 이차로 나머지 악티늄 원소들을 액체 음극에 포집할 수 있다.

한편 핵분열 생성물 중 염화물 생성 자유 에너지가 아주 작은 물질들(Fe·Nb·Mo·Tc·Rh·Pd·Ru 등)은 전해질에 용해되지 않고 금속 상태로 전해조 바닥에 가라앉는다.



〈그림 1〉 IFR 금속 연료 처리 및 핵연료 가공 공정

고체 음극에 석출된 우라늄은 석출물에 함께 섞여 있는 용융염을 제거한 후 금속 우라늄 형태로 최종 제품이 얻어진다. 그리고 액체 음극으로 포집된 일부의 우라늄과 대부분의 초우라늄 원소, 그리고 일부의 란타늄 원소들은 액체 카드뮴을 증발시킴으로써 최종 제품으로 얻어진다. 이 최종 제품은 사출 성형법에 의하여 새로운 핵연료로 제조되어 IFR로 재순환된다.

각종 금속들의 염화물 생성 자유 에너지는 <표 2>에 보는 바와 같이 카드뮴을 기준으로 3등급으로 분류할 수 있다. 카드뮴보다 이온화도가 큰 알칼리 금속·알칼리토 금속·악티늄 금속들은 모두 용융염에 용해되며 이온화도가 작은 전이 금

속·백금족 금속 등은 용해되지 않고 금속 형태의 잔사로 전해조 바닥에 가라앉게 된다.

용해된 금속들은 저마다 고유의 산화 환원 포텐셜을 가지고 있기 때문에 전기 분해시 양극과 음극 사이에 걸어주는 인위적 전위(포텐셜)의 크기에 따라 그 석출도를 조절할 수 있다.

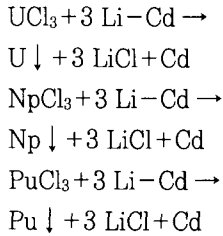
즉 산화 환원 포텐셜이 아주 큰 알칼리, 알칼리토 및 희토류의 염화물은 용융염에 잔류하는 경향이 크고 산화 환원 포텐셜이 비교적 낮은 악티늄 원소들은 음극에서 전자를 받아 환원되는 경향이 커서 음극에 우선적으로 전착되는데 이것이 금속 물질의 전해 정련 기본 원리이다.

〈표 2〉 각종 금속 염화물들의 표준 생성 자유 에너지(500℃)

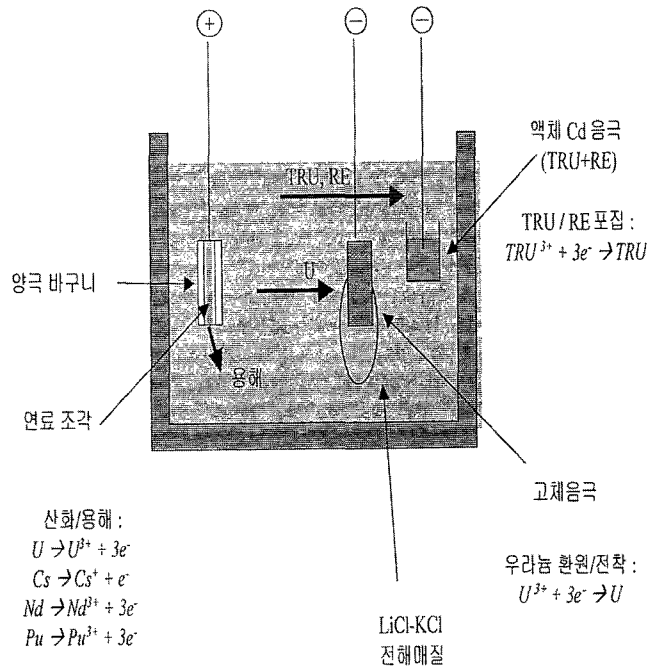
염화물	ΔG° (KJ/mol)	비고
BaCl ₂ , CsCl, RbCl, KCl, SrCl ₂ , LiCl, NaCl, CaCl ₂ , LaCl ₃ , PrCl ₃ , CeCl ₃ , NdCl ₃ , YCl ₃	-368 ~ -272	안정한 염화물
AmCl ₃ , PuCl ₃ , NpCl ₃ UCl ₃ , ZrCl ₂	-265 ~ -194	중간 염화물
CdCl ₂	-136.3	기준
FeCl ₂ , MoCl ₃ , TcCl ₂	-125 ~ -46	불안정한 염화물

전해조에서 사용하고 난 용융염은 아직도 미량의 악티늄족 금속을 함유하고 있기 때문에 이들의 분리가 필요하다. 안정한 염화물을 형성하는 Li-Cd를 첨가하면 다음과 같은 침전 반응이 일어나 악티늄족 금속들을 회수할 수가 있다.

악티늄족 금속들을 제거한 후 동일한 반응에 의하여 희토류 금속들을 제거할 수 있고 마지막에는 제올라이트 등으로 처리하여 알카리 및 알카리토 금속을 제거함으로써 용융염은 재순환 사용이 가능하다. 더 이상 재사용이 불가능한 용융염은 마지막에 고화 처리하여 고체폐기물로 처분된다.



〈그림 2〉는 개략적인 전해조의 모양과 기능을 표시한 것이다. 전해조의 크기는 우라늄이나 플루토늄의 핵심계성을 고려하여 결정되어야 하며 지금까지 전해조의 양극은 다공성의 스텐리스강 바구니, 고체음극으로는 용융염에 견디는 스텐리스판, 액체 음극으로는 카드뮴을 사용하고 있다.



〈그림 2〉 전해조의 모양과 그 기능

2. 경제성

전해정련법을 채택한 pyroprocessing 기술은 아직도 개발 도중에 있고 앞으로 기술 개선의 여지가 많을 뿐 아니라 아직 대규모 실증 시험이 이루어지지 않았기 때문에 그

경제성을 정확히 파악할 수는 없다.

다만 지금까지 외국에서 발표한 연구 결과들로부터 개략적인 분석을 해 볼 수는 있을 것이다.

우선 시설 건설 비용 측면에서 살펴볼 때 습식에 비하여 공정이 복잡



〈표 3〉 LWR 연료 처리 비용 추정

(백만불, 1999)

처리 용량	설계	건설	제염 해체	운전 및 유지 보수
210 톤SF/년 (2.2 톤TRU/년 회수)	74	664	66	\$ 268/kgU

출처 : A Roadmap for Developing ATW Technology, Sep. 1999
LA-UR-99-3022 Estimated Cost of an ATW system
ANL-99/15

하지 않기 때문에 큰 차폐 공간을 차지할 필요가 없을 것으로 판단된다.

또 방사성 폐기물 발생량을 비교해 보면 고준위 폐기물의 경우, 습식법에서는 제1용매 추출 과정에서 발생하는데 약 5ℓ /kgHM 정도의 질산 폐액이 발생하고 있음에 비해 전해정련법에서는 전해조에서 나오는 폐용염이 고준위 폐기물이며, 그 발생량은 약 0.5ℓ /kgHM로 훨씬 더 적은 양이므로 그 처리 비용의 저감이 예상된다.

한편 중저준위 폐기물의 경우도 습식법에서는 제2, 제3 용매 추출 과정, 산회수, 우라늄과 플루토늄의 정제 과정 등 더 많은 공정에서 폐기물이 발생하나 전해정련법에서는 용염 처리, 카드뮴 증류 등 제한된 공정에서만 발생하기 때문에 폐기물 발생량이 훨씬 더 적을 것으로 추정된다.

이는 1999년 미국의 DOE에서 발표한 장수명 핵종 소멸 처리 roadmap 보고서에 나와 있는 바와 같이 pyroprocessing 시설의 건설, 운영 및 해체 비용 제시(〈표 2〉 참조)가 하나의 참고 자료로 잘 말해 주고 있다.

3. 핵확산 저항성

Pyroprocessing은 과연 핵확산 저항성이 있는가? 이 문제에 대하여 지금까지 많은 논란이 있어 왔

다. 일부에서는 사용후 핵연료 처리 과정에서 다른 의도의 기술을 적용하게 되면 불법적인 핵확산이 가능하지 않겠는가라는 의문을 제시하기도 하는데, 이런 논리라면 사용후 핵연료를 보유하는 것 자체가 핵확산이라고 보아야 할 것이다. 언제든 다른 의도만 있으면 위험한 시도를 해 볼 수 있기 때문이다. 또한 그 논리는 핵물질에 대한 보장 조치를 무시하는 생각이기도 하다.

어떤 일정한 공간이 규제 공간으로 지정되면 여기에 들어오고 나가는 핵물질의 양은 현재의 기술로도 충분히 검증될 수 있기 때문이다. 즉 물질 수지의 투명성을 유지할 수가 있다. 따라서 원자력 시설의 철저한 규제가 수반되는 한, 핵확산을 우려할 필요가 없을 것이다.

그러면 PUREX 재처리 기술은 왜 문제가 되는 것일까? 그것은 사정이 좀 다르다. 왜냐하면 PUREX 공정에서는 순수한 플루토늄이 제품으로 얻어지기 때문이다. 이 순수한 플루토늄은 별도의 재가공이 필요없이 군사적 목적으로 전용될 수 있기 때문이다.

그런데 pyroprocessing은 어떠

한가? 앞에서 지금까지 설명한 바와 같이 순수한 플루토늄 제품은 얻어지지 않는다. 최종 제품은 여러 가지 초우라늄 원소의 혼합물로 얻어지고 게다가 일부의 핵분열 생성물까지 포함되어 있어서 사람이 함부로 접근할 수 없는 제품이 얻어진다. 설사 다른 의도를 가지고 재가공하려든다 치더라도 맨손으로 아무렇게나 취급할 수 있는 물건이 아니다. 특수한 시설·장비·기술이 수반되어야만 가능한 것이다.

그렇다면 최악의 경우 불순분자들이 불법으로 이것을 탈취한다 하더라도 사용후 핵연료와 다를 것이 무엇인가? 어쨌든, 편견을 가지고 본다면 핵확산의 우려가 있는 듯 싶으나 기술성과 논리적 측면에서 따져 보면 전혀 논란의 대상이 되지 않을 것이다.

우리 나라의 원자력발전소만 하더라도 상당량의 사용후 핵연료가 발생하고 또 저장되어 있지만 국제 원자력기구(IAEA)의 감시를 철저히 받고 있으며, 안전하게 그리고 투명하게 잘 관리되고 있음을 상기하면 핵확산의 우려를 불식시킬 수 있을 것이다.