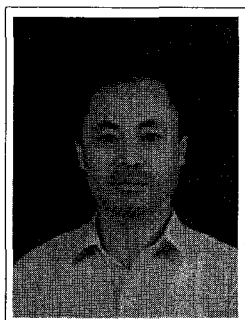




장수명 핵종 분리 기술

유 재 형

한국원자력연구소 핵화학연구팀장



사 용후 핵연료 또는 고준위 폐기물은 그 처분 안전성을 유지하기 위하여 심지층의 압반 내에 처분하는 것으로 되어 있다.

그러나 이들이 갖고 있는 장수명 핵종들의 방사능 수명을 고려한다면 방사성 물질이 생활 환경으로 누출될 수 있는 가능성(risk)은 오랜 기간 동안 확률적으로 존재하고 있음이 사실이다.

따라서 이 장수명 핵종들을 제거할 수 있다면 방사성 폐기물의 처분 안전

성은 훨씬 높아질 것으로 전망된다.

그러므로 사용후 핵연료나 고준위 폐기물의 처분에 있어 이러한 이점의 보장은 장수명 핵종의 소멸 처리 여부에 달려 있다.

사용후 핵연료 또는 재처리 폐기물로부터 장수명 핵종을 소멸 처리하는 기술은 지금 여러 나라에서 연구 개발을 추진하고 있으며, 소위 군분리/소멸 처리 기술이 그것이다.

장수명 핵종의 소멸 처리, 즉 핵종 변환을 위해서는 양성자 가속기와 미입계로의 복합 시스템이 이 분야의 과학자들 사이에 유망한 수단으로 고려되고 있으며, 세계적으로 우리 나라를 포함하여 많은 나라에서 기술 분석 또는 연구 개발이 진행되고 있다.

핵종 변환을 위해서는 우선 장수명 핵종을 화학적 또는 방사선적 성질이 비슷한 것끼리 묶어 군(group)별로 분리하는 기술이 필요한데 이것을 군분리 기술이라 부른다.

소멸 처리 대상이 되는 물질로는 대부분 장수명 핵종으로 구성된 초우

라늄 원소군이 있고 핵분열 생성물 가운데 반감기가 긴 핵종, 즉 I-129·Tc-99 등이 있다.

군분리 방법은 크게 습식 군분리와 건식 군분리로 구분되는데, 전자는 용매 추출법을 위시하여 침전, 탈질산, 이온 교환, 전기 화학적 산화 환원 등 수용액을 취급하는 분리 방법이고, 후자는 용융염 또는 용융 금속 상태에서 전기 분해, 염 이동, 환원 추출 등의 단위 공정으로 구성된 분리 방법이다. 이들 중 상용화된 기술은 아직 없으며 여러 나라에서 각기 독자적인 기술 개발이 추진되고 있다.

이 글에서는 군분리와 관련한 기술 개발의 배경, 군분리 기술의 기초, 국내의 기술 개발 동향 등을 고찰해본다.

군분리·핵변환 주기

1. 군분리·핵변환 주기란?

군분리에서 분리한 장수명 핵종들은 핵연료 또는 조사용 표적으로 제



조되어 핵변환 시스템으로 보내진다.

현재 연구되고 있는 핵변환 개념 가운데 대부분은 Pu·Np·Am·Cm으로 구성된 초우라늄 원소군을 핵변환 시스템의 핵연료로 사용하는 것을 고려하고 있다.

따라서 핵변환 시스템은 두 가지 역할, 즉 전력 생산과 장수명 핵종 소멸 처리를 동시에 수행할 수 있도록 구상되고 있다.

초우라늄 원소들은 핵변환로 내에서 여러 가지 핵반응 가운데 핵분열을 통하여 소멸시켜야 되는데, 이 때의 핵반응은 기존 원자로에서 일어나는 핵반응과는 그 양상이 달라져야 한다.

즉 장수명 핵종의 소멸률이 장수명 핵종의 생성률보다 더 커져야 하는데, 이와 같은 요건을 만족시킬 수 있는 핵종 변환 시스템의 개발이 요구되고 있다.

이러한 요건은 고속 중성자에 의한 핵분열을 피함으로써 가능하리라는 여러 연구 결과가 나와 있기 때문에 초우라늄 원소의 연소는 고속 중성자 시스템의 선택으로 그 방향이 정해지고 있다.

그러나 I-129나 Tc-99와 같은 핵분열 생성 물질은 고속 중성자 영역에서도 핵분열 단면적이 낮기 때문에 오히려 중성자 포획에 의한 핵종 변환이 바람직하다.

그런데 I-129나 Tc-99의 중성자 포획은 고속 중성자보다 열중성자 영

역에서 더 큰 수율을 나타내므로 고속 중성자 시스템을 선택하더라도 시스템 내에 부분적인 감속 영역을 만들고 이 감속 영역 내에 조사용 표적을 배치함으로써 핵종 변환율이 증가할 수 있도록 구상하고 있다.

이와 같은 여러 가지 특성을 만족시키더라도 핵종 변환 시스템에서 장수명 핵종의 연소율은 기존의 원자로에서와 마찬가지로 100%를 기대할 수는 없다.

핵연료 또는 표적 내의 장수명 핵종들이 연소되지만 다른 여러 가지 핵반응에 의하여 또 새로운 장수명 핵종들이 생겨나기 때문이다.

그러므로 핵종 변환로의 연료는 새로운 균분리/재순환이 필요하며 이것을 소위 균분리·핵변환 주기라 한다.

다시 정리하면 균분리 과정에서 회수된 장수명 핵종은 핵변환 시스템으로 재순환시키고 나머지는 폐기물로 이송, 영구 처분된다.

2. 균분리·핵변환 주기의 요건

핵변환 시스템 내에서는 기존의 원자로와 마찬가지로 각종 핵반응이 일어날 것이다. 기존의 원자로에서 우라늄이 중성자 포획에 의하여 초우라늄 원소로 변환되듯이 이 반응은 핵변환 시스템 내에서도 일어날 것이다.

따라서 핵변환 시스템 내에 우라늄을 핵연료로 사용하는 것은 바람직하지 않으며 오히려 초우라늄 원소의 양을 더 증가시킬지도 모른다.

그러므로 핵변환 시스템에 사용되는 핵연료는 우라늄을 배제한 초우라늄 원소로만 구성하는 것이 소멸 처리 관점에서 필수적인 요건이라 하겠다.

또 핵변환 시스템에 들어간 장수명 핵종 가운데 핵종 변환되지 않고 남아있는 것들, 또는 새로이 생성된 장수명 핵종은 다시 분리하여 재순환시켜야 하고, 단수명 핵종으로 바뀐 것들은 영구 처분되어야 한다.

소멸 처리에서 또 하나의 중요한 기술적 요건은 초우라늄 원소를 분리함에 있어서 핵확산 저항성이 큰 균분리 기술을 개발하자는 것이다.

기존의 PUREX 재처리법은 Pu을 단독으로 분리할 수 있는 기술인데 이와는 다른 기술, 즉 초우라늄 원소를 혼합물 상태로 분리하고 이 혼합물을 핵연료로 사용할 수 있다면 핵비확산성 기술로 간주할 수 있을 것이다.

이 요건은 건식 분리 기술에 의하여 충족될 수 있을 것으로 보이지만 아직 상용화된 기술은 아니고 기술 개발 단계에 있다.

다시 한번 정리하면 균분리·핵변환 주기에서 요구되는 기술 요건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 우라늄 사용의 배제
- ② 핵확산 저항성 균분리의 실현
- ③ 장수명 핵종의 재순환

이와 같은 기술 요건을 만족시키기 위해서는 많은 비용이 들 것으로 예상된다.

즉 우라늄의 제거, 장수명 핵종 분리, 재순환 및 반복적 핵변환에 필요한 비용이 요구되며, 이는 군분리 핵변환 주기의 경제성을 음의 방향으로 이끄는 주요 요인이다.

그러나 경제성을 다시 양의 방향으로 회복시킬 수 있는 요인도 있다. 그것은 바로 핵변환 시스템에서 생산되는 전력 에너지와 영구 처분에 드는 비용의 절감분이다.

구체적인 경제성 분석은 보다 정밀한 분석이 따라야겠지만 지구 환경 보존의 가치를 비용으로 따지기는 쉽지 않을 것 같다.

군분리 기술 현황

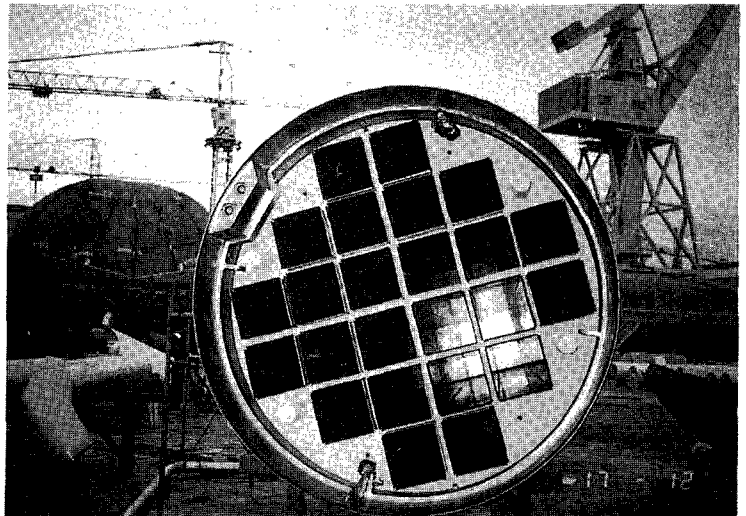
1. 악티늄족 원소 분리 기술의 기초

군분리 대상 물질인 초우라늄 원소(TRU)는 전부 악티늄족 원소(An)에 속하기 때문에 악티늄족 원소 분리법의 기초가 되는 화학적 성질, 열역학적 성질 등을 살펴볼 필요가 있다.

대부분의 습식 분리법은 용액 중에서 악티늄족 이온의 산화·환원 성질에 근거하고 있는데, 원자기에 따른 이온의 크기·전하·전하 밀도 등은 착물 형성시 그 결합력을 결정하는 주요 변수이다.

가. 악티늄족 원소의 산화·환원

Np·Pu·Am 등 비교적 가벼운 TRU 원소들은 3가에서 7가까지의 다양한 산화수를 갖는 반면, Cf 이상의 중악티늄족 원소들은 란타늄족 원소들



사용후 연료 저장 용기. 사용후 핵연료 또는 재처리 폐기물로부터 장수명 핵종을 소멸 처리하는 기술은 지금 여러 나라에서 연구 개발을 추진하고 있으며, 소위 군분리/소멸 처리 기술이 그것이다. 장수명 핵종의 소멸 처리, 즉 핵종 변환을 위해서는 양성자 가속기와 미입계로의 복합 시스템이 이 분야의 과학자들 사이에 유망한 수단으로 고려되고 있으며, 세계적으로 우리 나라를 포함하여 많은 나라에서 기술 분석 또는 연구 개발이 진행되고 있다.

과 같이 3가의 안정한 산화수를 가지고 있다.

3가에서 6가까지의 악티늄족 원소 이온들은 ①An³⁺ ②An⁴⁺ ③AnO₂⁺ ④AnO₂²⁺의 형태로 존재한다.

특히 5가(③)와 6가(④)의 이온은 dioxo-cation으로 존재하는데, 이들이 3가(①) 또는 4가(②)의 단일 원자 이온으로 환원되는 것은 An 원자와 산소 원자간의 결합 에너지 때문에 ①↔② 또는 ③↔④간의 산화/환원보다 훨씬 더 어렵다.

군분리의 대상인 넵투늄·아메리슘·퀴륨의 산화 상태를 살펴보면 다음과 같다.

넵투늄은 수용액에서 주로 Np⁵⁺로 존재하지만 Np⁶⁺로의 산화와 Np⁴⁺로의 환원이 매우 쉽다.

때로는 이들 모두가 평형 상태에서 공존하는 경우도 있는데 용액의 산도에 따라서 불균등화 반응(disproportionation)에 의하여 그 구성비가 달라지게 된다.

특별한 경우에는 Np³⁺와 Np⁷⁺도 각각 산 용액과 알칼리 용액에서 만들 수 있다. 아메리슘의 경우는 3가 상태가 가장 안정하며 때에 따라서 Am⁴⁺·Am⁵⁺·Am⁶⁺도 만들 수 있다. 그러나 퀴륨의 경우는 Cm³⁺만이 안정 상태로 존재한다.

이와 같이 악티늄족 원소의 산화 상태를 분리 과정에 이용할 경우에는 그 산화 상태의 안정성이 대단히 중요하다.

왜냐하면 불안정한 상태는 오래 지속되지 못하고 그 산화 상태가 안정



한 쪽으로 바뀌게 되며 착물이나 가수 분해물의 형성도 그 산화 상태에 따라 크게 변하기 때문이다.

나. 가수 분해

수화된 악틴족 이온은 이온 전하량이 커짐에 따라 쉽게 양성자를 방출하여 가수 분해 생성물을 형성한다.

그러나 형식적인 이온 전하량이 1가인 AnO_2^+ 의 경우 중심 금속 이온의 실질적인 이온 전하량은 1가보다 훨씬 작아서 수화 물질로부터 양성자를 방출하는 경향이 매우 약하다.

악틴족 원소의 경우 4가 및 6가 상태에서는 쉽게 가수 분해를 일으킨다.

그러나 3가와 5가는 각각 중성 및 염기성에서만 가수 분해를 일으킨다.

이것은 곧 해당 용액의 pH에 따라 콜로이드 또는 침전 형성으로 이어지며 이 특성을 악틴족 원소 분리 과정에 적용할 때도 있다.

다. 리간드와의 착물 형성

리간드와 악틴족 계열 이온들의 착물 형성은 아래에 기술한 바와 같이 악틴족 원소의 분리 과정에 중요한 역할을 수행하고 있다.

일반적으로 착물의 안정도는 $AnO_2^+ < An^{3+} \approx AnO_2^{2+} < An^{4+}$ 의 순으로 증가한다.

동일한 이온 전하량을 갖는 경우, 이온 반경이 감소함에 따라 착물의 안정도는 증가하며 특히 경악틴족 계열의 이온에서 이러한 경향이 관찰된다.

금속 이온의 전하 밀도(전하량을 이온 반경으로 나눈 값)가 증가함에

따라 착물의 안정도가 증가하는 것은 일반적인 경향이며, 착물의 안정도는 반응 엔탈피보다는 반응 엔트로피의 변화에 의하여 결정된다.

일반적인 용매 추출에 있어서 금속 이온은 추출제와 중성의 착물을 형성한 후 용매에 의하여 용매화(solvation)되어야만 쉽게 추출될 수 있다.

어떤 경우에는 금속 이온이 용액에 함유된 음이온과 음전하를 띤 착물을 형성한 후 추출제에 의하여 용매 추출되기도 한다.

예를 들면, 4가 또는 6가의 악틴족 이온, 즉 An^{4+} 나 AnO_2^{2+} 은 NO_3^- 와 음이온 착물을 만든 후 TTA(Thenoyltrifluoroacetone), TBP(Tributylphosphate)와 같은 유기 추출제에 의하여 추출된다.

이와 같이 금속 이온을 추출하는데 사용되는 추출제는 크게 산성·염기성, 또는 중성의 추출제로 분류할 수 있다.

알킬인산·카아복실산 등과 같은 산성 추출제와 착물을 형성하는 것이 이온쌍을 형성하는 경우보다 용매 추출에 유리하다. 왜냐하면 다양한 금속 이온에 대하여 많은 종류의 착화제를 추출제로 선택할 수 있으며, 이온쌍을 형성하는 것보다 훨씬 선택성이 크기 때문이다.

산성 용액에 함유되어 있는 음이온의 착물을 추출하기 위해서는 분자량이 큰 1차·2차·3차의 아민이 염기성 추출제로 사용된다.

액체 양이온 교환체로 알려진 알킬인산과 마찬가지로 분자량이 큰 아민은 액체 음이온 교환체와 같은 화학적 특성을 갖는다.

정전기적인 인력이 작용하는 이온쌍을 형성하여 추출되기 때문에 이온의 크기와 전하량에 따라 추출되는 정도도 크게 달라진다.

TOPO(Tri-Octyl Phosphine Oxide)와 같은 중성 추출제는 금속 이온의 착물 중 전하를 띠고 있지 않은 중성의 착물과 첨가 생성물을 만들어 유기용매상으로 추출된다.

라. 비수용성 매질

전기 화학적 고온 용융염 정제법은 비수용성 매질을 통한 군분리 방법이다.

일반적으로 전기 분해 반응을 수행하는 장치는 전해조, 전극(양극과 음극), 전해질, 격막의 4가지 요소로 구성되어 있다. 이 가운데 격막은 양극 생성물과 음극 생성물을 분리할 때 사용하며 항상 필요한 것은 아니다.

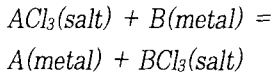
전해 공정의 일반적인 특징은 여러 가지가 있지만 몇 가지 중요한 것만 밝혀해보면 다음과 같다.

전해조에 공급되는 전기 에너지는 열 에너지만으로는 진행되지 않는 화학 반응을 일으키며 전압을 조절할 수 있기 때문에 부반응의 제어가 가능하다. 또 생성물의 양은 파라데이의 법칙에 따라 공급된 전기량에 비례한다.

군분리에서는 주로 KCl-LiCl의 공

용염을 전해욕으로 사용하는데, 표준 단극 전위차를 이용하여 여러 가지 원소를 선택적으로 양극 용해시키기도 하고 음극 석출시키기도 할 수 있다.

용해시 금속과 금속 염화물 사이의 치환 반응은 다음과 같이 일어난다.



이 때 평형 상수 K는 아래와 같이 표시된다.

$$K = \frac{[aA][aB\text{Cl}_3]}{[aA\text{Cl}_3][aB]} = \exp(-\Delta G^\circ/RT)$$

여기서 a는 해당 화합물의 활동도, ΔG° 는 Gibbs 에너지, R은 기체 상수, 그리고 T는 절대 온도를 나타내고 있다.

따라서 이 과정을 모델화하기 위해서는 ① 악틴족 염화물의 생성 에너지 (3·4가 상태) ② 용융염 중에서 악틴족 염화물의 활동도, ③ 용융 금속(예 ; 카드뮴·비스무스·아연) 중에서 악틴족 금속의 활동도와 같은 데이터들을 필요로 한다.

넵투늄·아메리슘·퀴륨에 대한 열역학적 데이터는 실험상의 어려움과 이론적 기반의 취약성 때문에 대부분 계산치로 대체되고 있으며 아직도 불확실성이 많다.

2. 외국의 기술 개발 동향

가. TRUEX 공정

TRUEX(Transuranium Extraction)공정은 중성의 유기 인산계 2-

〈표〉 TRUEX 공정에서 주요 성분의 분포

Element	Raffinate	Am, Cm, RE stream	Np, Pu stream	U stream	Used CMPO
FP	99	<2	-	<2	-
Tc	5~90	10~100	-	-	-
Np	-	-	99	<1	-
U	-	-	-	90	<10
Pu	-	0.23	99.8	<1	-
Am	-	98.9	0.12	-	-
Cm	-	100	-	-	-

배위 추출제인 CMPO(n-octyl phenyl-di-isobutyl-carbamoylmethyl-phosphin-oxide)를 사용한 용매 추출법에 근거한 것으로, 80년대 미국 ANL의 Horwitz 등에 의하여 개발되었다.

당시는 Hanford·Idaho 등에 축적된 군사용 폐기물을 대상으로 방사성 폐액으로부터 Pu과 Am을 분리할 목적으로 개발하였다.

그 후 일본(JNC)·이탈리아·인도 등에서도 상용 고준위 폐기물을 처리할 목적으로 연구를 시작하였다.

이 용매 추출 과정에서는 제3상 형성을 방지하기 위하여 비교적 고농도의 TBP(1~1.4 M)를 추출 용매에 혼합하여 사용한다.

CMPO-TBP 혼합물은 Np^{5+} 를 제외한 주요 악틴족 원소를 모두 추출하기 때문에 넓은 농도 범위의 질산 용액 (0.7~5 M HNO_3)으로부터 고준위 폐액의 탈질산 과정 없이 바로 용매 추출법을 적용할 수 있다는 장점이 있다.

당초 ANL에서 개발한 공정은 0.25 M CMPO와 0.75 M TBP의 혼합 용매에 의한 TRU·Tc·RE의 공추출, 0.25 M HNO_3 에 의한 세정, 유기상으로 추출된 Am·Cm·RE·Tc 등을 수용상으로 역추출시키는 1차 역추출(역추출제 : 0.05 M HNO_3), Np과 Pu을 역추출시키는 2차 역추출(역추출제 : 0.05 M HNO_3 + 0.05 M HF), 마지막으로 5% Na_2CO_3 에 의한 용매 재생 공정으로 구성되어 있다.

그리고 Zr·Mo의 추출을 방지하기 위하여 주입 폐액에 옥살산을 첨가하거나 세정액으로 질산과 옥살산의 혼합액을 사용하였다.

〈표〉는 ANL에서 모의 용액을 가지고 실험한 결과를 나타내고 있는데, 주입액의 농도를 100으로 기준하였을 때 배출액 각각에 분포되는 농도를 표시한 것이다.

이 결과에 의하면 공추출 단계에서 99% 이상의 U·Am·Pu이 RE나 미량의 Fe과 함께 유기상으로 추출



되는데, Fe은 세정 과정에서 제거될 수 있다고 하였다.

그러나 모든 RE도 CMPO에 의하여 추출되기 때문에 (Am,Cm)/RE의 상호 분리 과정, 또는 필요시 Am/Cm 상호 분리 과정이 추가로 연결되어야 할 것이다.

이 공정의 단점은 방사선에 의한 용매의 열화가 일어나서 열화 생성물이 An와 Ln의 역추출을 방해하기도 하며, 용매 추출 과정에서 결코 적지 않은 2차 폐기물이 발생한다는 것이다.

또 CMPO는 An와의 친화성이 커서 이들의 완전 역추출을 어렵게 하므로 용매 재생에 큰 부담을 주기도 한다는 것이다.

즉 불산·diphosphonic acid와 같은 강한 결합제를 용매 세정제로 사용하여야 하는데, 이는 2차 폐기물의 발생량 증가를 초래한다.

그래서 PNC에서는 HAN(hydroxyl amine nitrate)과 같은 무염성 약품을 용매 세정제로 도입하는 방법을 개발하고 있다.

또 An/Ln 상호 분리에 DTPA(diethylene tri-amine penta-acetic acid)를 적용하는 공정 개선안을 제시하고 있는데, 이는 DTPA-NaNO₃ 용액을 Am·Cm 및 Ln의 선택적 역추출제로 사용하는 방법이다.

나. 일본원자력연구소의 4군분리 시험 시설

① 시설 개요

일본원자력연구소(JAERI)의 군분

리 시험 시설은 NUCEF (Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility)의 일부로 94년 완공된 이래, 지금까지 비방사성 시험과 방사성 시험을 수행해오고 있다.

「BECKY (Back-End Cycle Key Element Research Facility)」라 명명된 이 시설은 대형의 α-γ셀, Glove box 27기, Hood 21기 및 각종 시험 설비로 구성되어 있다.

α-γ셀은 길이 20m, 폭 3m, 높이 5m의 크기이고 두께 1.1~1.4m의 중콘크리트/일반 콘크리트 벽으로 되어 있다.

셀 내부는 수납·공정·화학 등 3가지의 셀로 구분되어 있고 공정셀 내부에는 재처리와 군분리 시험 설비가 설치되어 있으며, 연소도 45,000 MWD/ton의 사용후 핵연료를 연간 3kg, 고준위 폐액을 5,000Ci까지 취급할 수 있다.

TRU 화학 연구에 사용되는 화학 셀은 연소도 72,000 MWD/ton의 사용후 핵연료를 연간 50g 사용할 수 있다.

Glove box에는 TRU 폐기물 고화 시험 장치(세라믹 고화), 고화체 침출 시험 장치, 차폐벽 성능 시험 장치, 재처리 시험 장치, 군분리 시험 장치, TRU 화학 시험 장치 등이 설치되어 있다.

이들 Glove box에서는 그램(g) 단위의 TRU, mCi 단위의 사용후 핵연료, 고준위 폐액 등을 취급할 수 있

다.

또 실물 크기(200l)의 폐기물 고화체 중의 α-방사선량 및 중성자법과 CT(Computed Tomography) 기술을 조합한 비파괴법에 의한 TRU의 계측 실험 설비가 설치되어 있다.

② 연구 내용

- 폐기물 발생량을 줄일 수 있는 재처리 공정 연구
- 군분리 연구(실패액 취급)
- 공정상의 안전성 향상 연구
- TRU 핵종의 지하 이동, 고정화 거동에 관한 연구
- TRU 폐기물 고화체 중 α방사선량의 비파괴 측정
- 고화체의 품질 검사 연구
- TRU 폐기물의 신세라믹 고화에 관한 연구
- 사용후 핵연료의 용해 특성, 연소 거동 등 기초 자료 축적
- TRU 핵종의 정제에 관한 기초 연구
- TRU 연료에 관한 기초연구

③ 군분리 연구

고준위 폐액으로부터 초우라늄 원소(²³⁷Np·²⁴¹Am·²³⁹Pu등) 및 핵분열 생성물인 ⁹⁰Sr·¹³⁷Cs·⁹⁹Tc, 백금족 원소 등을 분리하는 기술 개발의 일환으로 지금까지는 실험실 규모의 폐액을 사용한 비방사성 시험과 방사성 시험을 수행해왔다.

앞으로는 개량 군분리 공정에 대해서 실패액을 사용한 시험을 실시하고 그 유효성을 확인하는 동시에 공정상

의 문제점을 찾아 해결하는 연구를 수행할 계획이며, 이 시험 결과를 토대로 공정의 최적화를 이룩할 계획을 세우고 있다.

㉠ 개량 균분리 공정 실패액 시험

초우라늄 원소군의 분리에는 DIDPA(di-iso decyl phosphoric acid) 용매를 사용한 추출 분리 시험과 옥살산염 침전법에 의한 침전 분리 시험을 행한다.

Tc과 백금족 원소군의 분리에는 개미산에 의한 탈질산 과정에서의 침전 분리 시험, 활성탄에 의한 흡착 분리 시험을 행한다.

Sr·Cs 군의 분리에는 초우라늄 원소군, Tc-백금족 원소군을 분리한 후의 폐액으로부터 무기 이온 교환체를 사용한 흡착 분리 시험을 행한다.

㉡ 실패액의 특성 파악

실패액의 조성, 원소의 존재 상태에 관한 분석을 실시한다.

㉢ 균분리 공정의 최적화 시험

각종 분리 시험 결과를 토대로 4군 분리 공정으로서의 최적화를 꾀하고 이를 확인하는 실험을 실시한다.

다. 용융염 전해법

용융염 전해법을 이용한 금속 연료 재순환 기술은 이미 미국의 ANL에서 IFR(Integrated Fast Reactor) 개발의 일환으로 많은 연구가 수행되었으나, 지금은 IFR 개발의 중단으로 금속 연료 재순환 기술 개발도 중단되어 있다.

그러나 일본·러시아·유럽에서는

악티늄족 원소 재순환 기술 개발을 계속하고 있으며 금속 → 금속 재순환 뿐만 아니라 산화물 → 금속 또는 산화물 → 산화물 재순환까지 연구 범위를 확대해 나가고 있다.

이는 두 가지 목적하에서 추진되고 있는데, U·Pu·MA(Minor Actinide) 등의 악티늄족 원소들을 회수하여 핵연료로 재사용하는 기술은 에너지 안보와 핵비확산 주기 기술의 확보를 동시에 꾀할 수 있는 수단이며, 또 한 가지는 장반감기 핵종으로 구성된 TRU를 소멸 처리함으로써 폐기물의 처분으로 인한 환경에 미치는 부담을 극소화하는 것이다.

일본의 전력중앙연구소에서는 재처리에서 발생하는 고준위 폐액으로부터 TRU를 회수하는 건식 분리 기

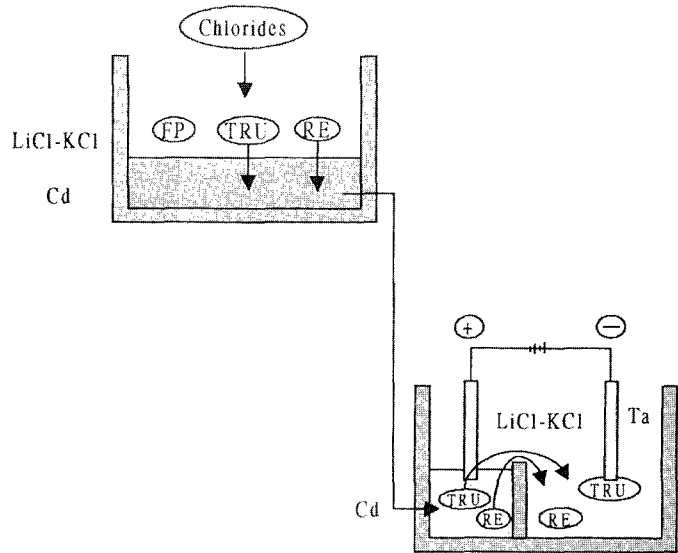
술을 개발하고 있다.

이 기술은 고온 야금 기술과 전해 정제 기술을 혼합한 것이며, <그림 1>에 보는 바와 같이 비교적 간단한 공정으로 구성되어 있다.

고준위 폐액 중의 여러 원소는 LiCl-KCl 공융염 중에서 염화물로 바뀌면서 공융염 중에 용해된다.

그 중 염화물 생성 자유 에너지가 비교적 낮은 TRU와 RE는 용융염과 접촉하고 있는 카드뮴상으로 환원 추출된다.

그 다음에는 TRU를 RE로부터 분리해야 되는데 이는 카드뮴상을 양극으로 하고 LiCl-KCl 공융염, 즉 새로운 전해질에 고체 음극을 꽂아 카드뮴상의 TRU가 전해질을 거쳐 고체 음극에 선택적으로 석출되는 방법을



<그림 1> 일본 전력중앙연구소의 건식 균분리 공정 개념



이용하고 있다.

이 때 Np보다 Am이 더 RE와 분리하기 어려우며 Am의 회수율을 높일수록 더 많은 RE가 TRU 회수에 동반되는 실험 결과가 나와 있다.

3. 국내 기술 개발 현황

국내에서는 앞에서 언급한 균분리 핵변환 주기의 기술적 요건을 바탕으로 하여 한국원자력연구소를 위시하여 몇몇 대학 등에서 기초 연구를 수행하고 있다.

기초 연구의 초점은 고온 용융염의 열역학적 데이터 베이스 확보에 두고 있으며, 이는 초우라늄 원소를 포함한 금속 연료 또는 용융염 연료 등 핵변환로 연료 개발에 필수적 자료로 쓸 수 있을 것이다.

불화물 또는 염화물로 구성된 용융염 중에 양극과 음극을 넣고 전기장을 만들어 주면 용융염에 포함된 각 금속 성분은 그 고유의 산화 환원 전위가 각기 다르므로 적절한 희생 전극을 양극으로 선택함으로써 용융염 중에 존재하는 우라늄을 용융액으로부터 음극으로 석출시킬 수 있을 것이다.

다음에 희생 전극의 재질을 다른 것으로 바꾸어주면 이번에는 Np·Am 등의 초우라늄 원소들을 음극에 석출시킬 수 있을 것으로 예상하는데, 이는 아직 실험으로 증명된 것은 아니고 이론적인 논리에 의해서만 예측하고 있다.

또 초우라늄 원소에 대한 리튬의



〈그림 2〉 불화물 제조 장치

환원성과 추출성을 이용하여 환원 추출 방법을 채택하면 초우라늄 원소 중에 불순물로 함유된 RE 원소들을 배제하고 초우라늄 원소만을 선택적으로 리튬상으로 추출할 수 있으므로 연료 제조의 한 단계로 사용할 수 있을 것이다.

〈그림 2〉는 불화물 제조 장치를 보여주고 있는데 여기서 만들어진 금속 불화물은 다음 단계에서 용융염에 용해된다.

이러한 기술을 개발해내기 위해서는 용융염의 물리 화학적 성질에 기초한 여러 가지 열역학적 데이터가 필요하며 용융염 중에서의 화학 반응, 핵종 이동 속도 등에 관한 현상들의 규명이 필요하고 관련 데이터의 수집과 해석이 필요하다.

따라서 이 분야의 연구는 이와 같은 기초 자료의 확보와 현상 규명에 중점을 두어 한 단계, 한 단계 발전시켜 나갈 계획이다. ☞