

방사성폐기물소멸처리기술의 현황과 전망

상용 원자력 발전시에 나오는 사용후 핵연료나 이들의 재처리후 폐기처리되는 고준위 방사성폐기물내에는 반감기가 긴 초우라늄(TRU) 군인 큐리움, 넵튬, 아메리시움 및 핵분열 생성물질들(¹³⁵Cs, ¹²⁹I)이 포함되어 있다. 이러한 장반감기 원소들 때문에 심지층처분에 의한 고준위 방사성폐기물 처분시에도 수백만년 이상동안 처분부지가 다른 용도로 이용될 수 없고 그 기간동안 부지에 대한 감시가 계속되어야 하는 등의 문제가 수반된다. 이러한 점은 원자력 발전으로 이익을 본 세대가 당연히 그

소멸처리기술의 연구 및 안전성평가 필요

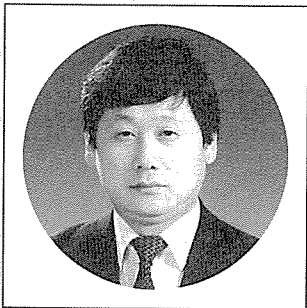
부산물인 방사성 폐기물을 처리해야 한다는 「수익자 부담원칙」에도 위배된다.

여기에서는 심지층처분에 의한 고준위 방사성폐기물 처분의 대안으로 새롭게 부각되고 있는 소멸처리(transmutation) 기술의 현황을 파악하고 소멸처리기술의 장단점과 향후 전망에 관해 기술한다.

○소멸처리 개요 및 방법

1. 개 요

소멸처리라 함은 방사성물질 자체의 직접적인 소멸을 의미하는 것이 아니라 초우라늄군과 같은 장반감기 핵종을 핵파쇄나 핵분열을 통해 단반감기 핵종으로 변환시키는 것으로서, 처분시에 야기될 수 있는 장반감기 핵종의 유출로 인한 환경피해를 저감시키는데 있다. 이를 위해선 우선 서로 다른 화학적 성질을 갖는 다량의 원소를 직접 소멸처리하는 것은 효율상으로 많은 문제가 있으므로 고준위 방사성폐기물을



李 明 燦

한국원자력연구소
안전해석실장 · 핵공학

비슷한 성질의 원소군으로 분리하는 군분리를 선행하여야 한다. 군분리의 주요 방법으로는 트루엑스와 같은 습식 군분리기술과 고온야금과 같은 건식 군분리기술 등이 있다.

군분리과정을 거쳐 나온 원소군들은 그림 1에서 보는 바와 같이 백금족, 스트론튬과 세슘, 초우라늄군, 그리고 기타 핵분열생성물 등으로 나누어진다. 이러한 각종 원소군들은 그 원소군의 상업적가치, 방사성특성 등에 의해 이용 형태가 달라진다. 백금족 등의 유용한 원소들은 상업적으로 쓰여질 수 있고, 스트론튬과 세슘은 고용해도로 인해 심지층처분시 유출위험도가 가장 높아 Till 등은 이를 방지하기 위해 충분한 시간동안 지상에서 저장시켜야 하며, 초우라늄군은 소멸처리를 통해 단반감기 핵종으로 변환시켜, 기타 핵분열생성물과 함께 심지층에 처분해야 한다고 주장하고 있다.

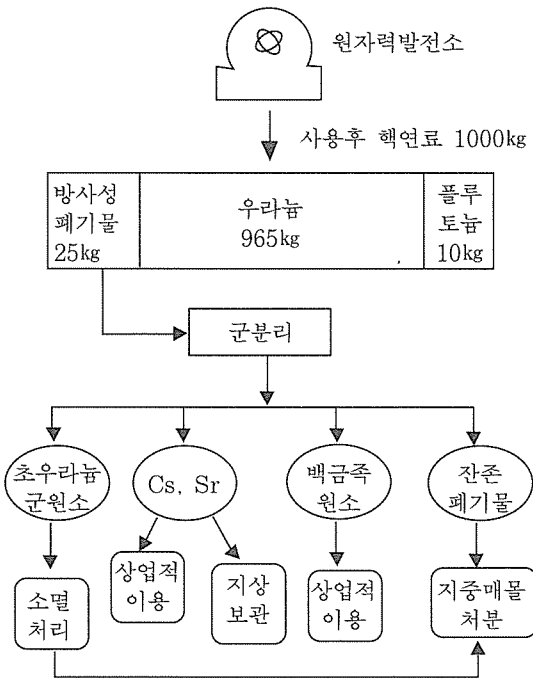


그림 1. 상용 고준위 방사성 폐기물의 군분리 개요

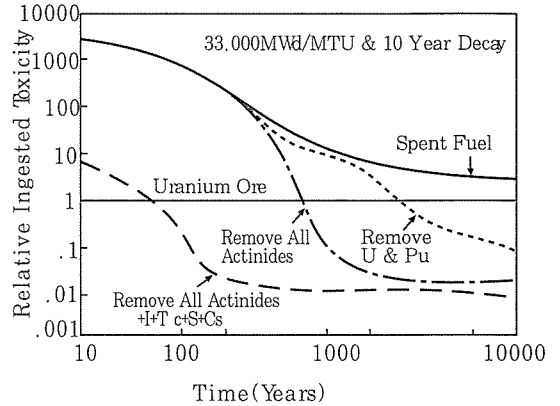


그림 1. 사용후 핵연료와 소멸처리후 방사성폐기물의 시간에 따른 독성비교

소멸처리된 후의 방사성폐기물은 궁극적으로는 심지층처분되는데, 사용후핵연료 그 자체를

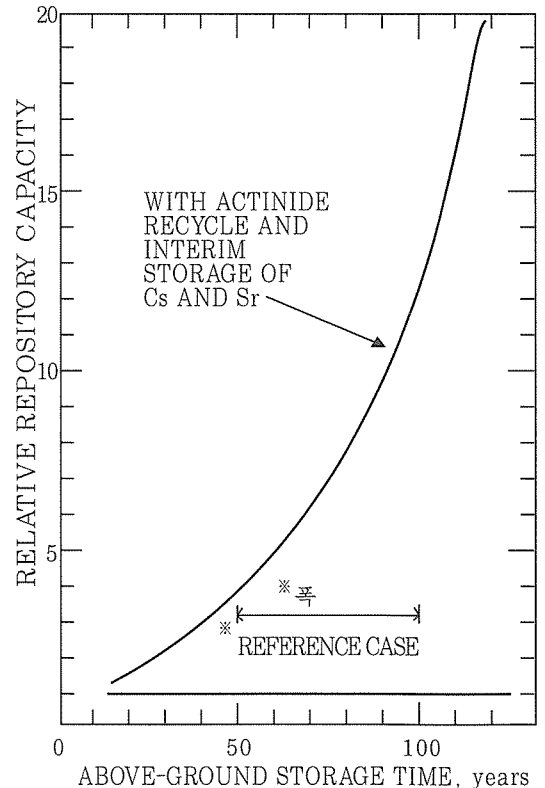


그림 3. 스트론튬 및 세슘의 군분리후의 지상보관 시간변화에 따른 지중매물 처분용량변화

심지층처분하는 것보다 그림 2에서 보는 바와 같이 독성이 현저하게 줄고, 스트론튬 및 세슘의 지상 보관시에는 그림 3에서 보는 바와 같이 심지층처분시설의 고준위 방사성폐기물 처분 수용능력이 크게 증가하는 효과가 있다.

2. 소멸처리 방법

현재 이론적으로 가능한 초우라늄 원소들에 관한 소멸처리기술은 여섯가지로 요약된다.

- 1) 고에너지 양자를 이용한 핵파쇄(spallation of nuclides) 방식
- 2) 고에너지 감마선을 조사하는 방식
- 3) 소멸처리로(Actinide-Burning Reactor)를 이용하는 방식
- 4) 기존 혹은 신형의 경수로를 이용하는 방식
- 5) 고속증식로(Fast Breeder Reactor)를 이용하는 방식

6) 핵융합로에 의한 방식

앞에서 언급한 여섯가지 소멸처리방법은 크게는 중성자의 핵분열에 의한 방법과 양자나 감마선에 의한 핵파쇄방법으로 분류할 수 있다. 중성자의 핵분열에 의한 소멸처리방법은 원자로내의 중성자에 의한 핵분열현상과 동일하다. 그러나 소멸처리의 대상이 되는 주요한 초우라늄 원소들(^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm)은 핵분열 한계에너지가 700keV 정도이고 고속중성자에너지 영역에서 핵분열단면적이 크기 때문에 소멸처리로의 중성자에너지 스펙트럼이 경(hard)해야 소멸률이 높아진다. 이런 점에서는 경수로보다는 스펙트럼이 경한 고속증식로가 유리하다. 그러나 고속증식로는 중성자 스펙트럼이 경하여 소멸효율이 높은 장점은 있지만 나트륨 보이드 반응계수와 도플러 반응계수가 양이 되어 안전상의 문제가 있다. 이런 점을 보완하기 위해 현재 개념설계중인 전소로(전용 소멸처리로)는 초우라늄 원소를 핵연료로 사용하여 고속로와 달리 증식성을 생각하지 않아도 되고 소멸처리효율도 높일 수 있다. 경수로에 의한 소멸처리는 기존의 가동

중인 원자로를 사용하기 때문에 별도의 시설투자비가 들지 않아 비용이 절감되지만 중성자 에너지 스펙트럼이 경하지 않고 소멸처리용 핵연료의 장전량이 제한되기 때문에 소멸효과가 매우 낮은 단점이 있다.

고에너지의 양자(1.5GeV)나 감마선(10-15MeV)을 이용한 핵중과쇄에 의한 소멸처리 방법은 가속된 양자나 감마선을 초우라늄 원소의 핵연료에 충돌시켜 초우라늄 원소를 파쇄하는 방법으로 핵분열반응에 비하여 장수명 핵종 생성이 매우 적어 소멸효과가 크다. 또한 핵파쇄반응에 의한 2차 방출 중성자를 이용하여 미임계 원자로인 복합로를 가동할 수 있어 소멸 효율을 증가시킬 수 있다. 그러나 대형가속기(1.5GeV, 23mA)를 건설해야 하기 때문에 전소로에 비해 비용이 많이 들고 여러 단계의 실증실험을 거쳐야 하기 때문에 가까운 장래에 상용화하기는 어려운 실정이다.

핵융합로에 의한 소멸처리는 D-T 반응에 의해 발생된 14MeV 중성자를 흑연으로 감속한 열중성자를 이용하는 방법과 복합로형의 고속중성자를 이용하는 방법이 있으나 핵융합로가 개발된 후이나 가능한 방법이다.

○각국의 소멸처리 기술현황

1. 미 국

미국은 소멸처리개념을 가장 먼저 도입한 나라로 현재도 각종 신형 원자로를 이용한 소멸처리 및 새로운 균분리기술 개발에 노력하고 있다. 미국에서 개념적인 측면에서 소멸처리가 논의된 시점은 50년대부터이며, 1976년부터 3년간 오크리지 국립연구소가 중심이 되어 심지층처분에 대한 대안으로서의 소멸처리의 타당성 조사가 행하여 졌다. 그 결과 소멸처리는 기술적으로는 가능하나 균분리 과정에서 핵분열생성물 유출 가능성이 있고 경제적으로 제반 비용이 많이 든다는 관점에서 소멸처리의 무용론이 제기되었다. 그 후 1982년 美의회에서 방사성폐기물법안(Nuclear Waste Policy

Act)이 통과되고 심지층 처분장 후보지로서 네바다주 응회암지대(tuff), 워싱턴주 현무암지대(basalt), 텍사스주 암염지대(salt) 등이 선정되어 부지특성평가가 시작되었다. 그러나 1987년말 美의회는 여러 제반문제로 네바다주 야카마운틴(Yucca mountain)의 응회암지대를 단일 후보지로 선정하였다. 그러나 네바다의 주의회와 주민들의 끊임없는 반대로 인해 야카마운틴 후보지에 대한 부지특성평가 일정이 난항을 거듭하게 되자 알곤국립연구소등 연구기관과 제네럴 일렉트릭(GE) 등 원자로 제조회사에서 새로운 소멸처리방식을 이용한 방사성폐기물 처분문제를 다시 심지층처분의 대안으로 소개하기 시작하였다.

미국 소멸처리방식의 특징은 한마디로 신형 원자로에 초우라늄군 원소를 핵연료로 사용하여 소멸시킴과 동시에 상용전기를 생산시키는 것으로 집약될 수 있으며, 이는 최근 日本 등지에서 활발하게 논의되고 있는 입자가속기 부착형태나 미입계 복합로(Hybrid type)와는 달리 상용목적으로 전력을 생산한다. 미국 소멸처리방식이 이렇게 상용전기 생산을 병행하게 된 주요 원인은 70년대말 오크리지 보고서에서 지적된 바 있는 경제성 문제를 극복하려는 데에 있다. 이렇게 상용전기를 대량으로 생산하기 위해서는 원자료가 임계를 유지하여야 하는데 초우라늄 원소들만의 반응으로는 기존 원자로에서 임계를 유지하기가 곤란하므로 이를 극복하기 위해 핵분열 단면적이 높은, 기존 경수로가 아닌 ALMR(Advanced Liquid Metal Reactor)과 같은 신형 고속로, AP 600과 같은 신형 경수로, 혹은 소멸처리로 등의 이용 계획이 활발하게 논의되고 있고 개념적인 수준에서 핵융합로도 거론되고 있으나 이의 상용화는 요원한 실정이다.

장반감기 핵종의 소멸처리의 옹호론자들은 이런 원자료들을 이용할 경우 전기도 생산할 수 있고 적은 대수의 소멸로로도 2030년경까지는 미국 전역에서 나오는 상용 고준위 방사성폐기물을 모두 처리할 수 있다고 하나 이 주

장들은 기술적인 뒷받침이 부족한 것처럼 보인다.

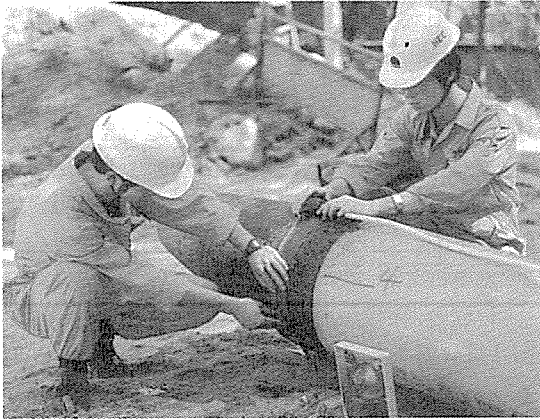
소멸처리의 전단계로서의 균분리기술로는 습식방식인 TRUEX기술이 있고 알곤연구소 등에서 개발중인 IFR(Integral Fast Reactor) pyroprocessing 방식이 있다. 현재 논의되고 있는 TRUEX기술은 현재의 PUREX 기술로는 초우라늄군 분리의 효율이 떨어지고 효율이 높지 않을시에는 폐기물에 잔존해 있는 미량의 초우라늄원소로 인한 처분안전성이 문제가 되므로, 이를 개선하기 위한 기술로 분리효율을 99.9%에서 99.999%까지 높임을 그 목표로 하고 있다. IFR pyro-processing은 금속 핵연료 및 LiCl-KCl의 공용분리법을 기본으로 하여 각 원소들간의 산화 및 환원성 차이를 이용한 것이다. 미국에서는 이런 균분리 및 소멸처리 신기술을 이용하여 지중처분의 대안으로 2030년까지 상용 고준위 방사성 폐기물 전량 처분을 위해 소멸처리 기술개발이 새롭게 논의되고 있다.

2. 소련 및 유럽

서유럽에서는 1970년대부터 이스프라연구소가 중심이 되어 소멸처리에 관한 연구가 계속되었고 1977년 및 1980년에 이에 관한 국제회의도 개최되었으며 1983년 종합보고서를 작성하여 발간하였다. 그리고 IAEA 회원국 자격으로 영국, 스웨덴 등 서유럽 각국이 IAEA 연구에 참가하여 1982년 보고서 작성에 기여하였다.

80년대 초부터 활발하게 진행된 서유럽 각국의 소멸처리에 관한 결론은 경제적으로 소멸처리 기술이 아직은 이용가치가 적다는 것이었다. 이런 결론에 따라 영국은 소멸처리연구를 국가적 입장에서 손을 뗐으며 다시 소멸처리의 유용성이 활발하게 논의되고 있는 현시점에서 국가규모의 연구에는 소극적이다.

영국과는 달리 프랑스에서는 1982년 IAEA 보고서가 발행된 이후에도 독자적인 원자력프로그램에 따라 초우라늄군의 분리를 목표로 하



는 신재처리기술연구가 진행되어 왔으며 1992년 1월 1일 공포된 방사성폐기물 관리를 위한 연구에 관한 법률에 의하면 향후 15년간 36억 프랑의 연구비를 들여 고준위 방사성폐기물 원소의 분리·변환에 관한 연구가 시행될 예정이다.

소련은 서유럽국들과는 별개인 입장에서 소멸처리기술을 꾸준히 연구하여 왔다. 소련에서 논의되고 있는 주요 방식은 고속증식로를 이용한 방법이며, 이와 함께 입자가속기를 이용하는 방식도 논의되고 있다. 최근 소련에서 논의되고 있는 입자가속기를 이용하는 방식에서의 특이점은 지금은 비록 개념적인 수준에 머무르고 있지만 스트론튬 등의 핵분열 생성물을 핵변환시킨다는 개념이다. 세시움등 일부 핵분열생성물들은 고유의 높은 용해도로 말미암아 심지층처분시 환경에 큰 영향을 미치는 핵종이다. 이런 고용해도의 핵종들이 저용해도 핵종으로 변환된다면 고준위 방사성폐기물의 처분 안전성은 크게 향상될 것이다.

3. 일 본

일본에서는 1973년 원자력산업회의가 군분리 및 소멸처리의 필요성을 지적한 이후 일본 원자력연구소 등을 중심으로 활발하게 연구가 진행되고 있다. 군분리기술로는 고준위 방사성폐기물을 3군 내지는 4군으로 분리하는 기술을 개발하여 실증시험을 하였으며, 기존 습식방식

이 아닌 고온에서의 용융소금이나 전기정제를 이용한 건식방식도 연구되고 있다.

소멸처리 기술로는 소멸로 및 발전용 원자로를 이용하는 연구가 진행되어 있다. 한편 일본 원자력연구소는 대출력 양자가속기를 이용한 소멸처리 기술개발을 목표로 1989년부터 Phoenix 프로젝트라는 국제협력프로젝트의 일환인 오메가프로젝트에 참가하여 양자가속기와 이온 구동되는 미임계로를 조합한 혼합형태(Hybrid type)의 미임계복합로를 개발하기로 하였다. 이에 쓰일 양자가속기의 성능을 1.5GeV, 23mA로 잡고 이의 전단계로 90년대 후반까지 1.5GeV, 10mA 규모의 가속기를 건설할 예정이다. 그리고 일본에서는 레이저를 이용한 소멸처리기술개발에도 관심을 기울이고 있다.

○소멸처리기술개발의 현안

현재까지 제안된 각종 소멸처리 방식들을 총체적인 입장에서 보면 다음과 같다.

- 1) 경제성이 있는가?
- 2) 사용후 핵연료를 직접 심지층처분하는 것보다 안전한가?
- 3) 실용기술은 가까운 장래에 확립될 수 있나?

우선 경제성문제에 대해 언급하면 미국에서 고려하고 있는 고속증식로 등을 이용하여 전력을 생산할 경우에는 경제성이 크게 호전될 수 있겠다. 그러나 기존의 고속증식로 사용시에는 초우라늄원소의 핵연료는 핵분열 단면적이 낮으므로 핵임계를 유지하고 궁극적으로 소멸처리의 효율을 높이기 위해서는 고속증식로 개념을 도입한 개량형 전용 소멸로의 건설이 바람직하다. 이 경우에는 초우라늄원소의 핵분열 단면적 자료등 새로운 자료 생산에만도 상당량의 연구개발비가 투입되어야 한다.

연구개발비의 원자로당 단가를 줄이고 사용후 핵연료의 심지층처분방식보다 경제성을 높이기 위해선 다수의 소멸처리로가 건설되어야

하는데, 이를 위해 많은 원자로를 지어야 할 만큼 전력수요가 급격히 증가하느냐 하는 것이 문제이다. 또한, 여기서 간과할 수 없는 것 중의 하나는 소멸처리로 건설에만 투자가 필요한 것이 아니라 균분리기술에도 막대한 연구개발비가 필요하다는 것이다. 그러나 우리나라와 같이 전력수요가 매년 급격히 증가하는 나라에서는 많은 원전 건설이 요구되므로 초우라늄 폐기물이 많이 발생되어 다량의 소멸처리로 건설이 필요로 할 수 있다. 이렇게 다량의 소멸처리로 건설함으로써 소멸처리로 대당 연구개발비를 현격히 줄일 수 있을 것이다.

현재는 국제 천연우라늄 시세가 안정되어 있으나 가격이 급등하고 사용후 핵연료의 평화적 재사용이 활발하게 진행될 경우에는 TRUEX 시설 건설에 들어가는 비용은 급등하는 우라늄 공급가에 비해 경제성이 있을 수도 있겠다. 그리고 이러한 시설을 구비함으로써 장기적으로 원자력발전에 필요한 원료의 확보 문제가 해결되므로 이는 단지 경제성 문제를 떠나서 전력의 장기적인 안정공급 측면이라는 입장에서도 바람직하다고 할 것이다.

현재로서는 소멸처리의 경제적인 이용가치는 적지만 앞으로의 신기술 개발과 전력수요의 점진적 증가, 천연 우라늄의 공급가 상승 등에 따라 달라질 수도 있다고 하겠다.

초우라늄 원소를 소멸처리한 후 고준위 방사성폐기물을 심지층처분할 경우 사용후핵연료를 직접 심지층처분한 것에 비해 안전하기에 대한 의견이 분분하다. 우선 소멸처리의 장점의 하나로 안전성 향상을 내세우는 쪽은 초우라늄 원소를 소멸처리하고 난 후 핵분열생성물중 ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr 등을 따로 지상 보관하면 이들에 의하여 주도되는 초기의 독성문제가 해결될 것으로 생각하며, 또한 장반감기 초우라늄군 핵종들이 단반감기 핵종들로 변환되어 수 만년 동안에 걸친 방사성폐기물 관리문제가 몇 년의 문제로 줄어들 수 있다고 믿는다. 그리고 스트론튬, 세슘 등의 지상 분리보관으로 잔존 방사성폐기물들의 심지층처분 장소의 면적이 훨씬 협소해질 수 있으며 초기에 많은 방사성 붕괴열을 내는 핵분열생성물들의 지상보관으로 처분용기 간격을 많이 줄일 수 있어 이 또한 처분장 공간 활용에 도움이 된다고 주장한다.

이에 대한 반론도 역시 강하다. 가장 중요한 것은 방사성폐기물 자체의 독성이 처분장의 안전성을 평가하는 척도가 아니라는 것이다. 실제로 안전성 평가에서 가장 중요한 것은 핵종별 유출률이지 고체상태로 있을 시의 독성은 아니다. 유출률을 고려할 때 가장 중요한 핵종은 초우라늄계열이 아닌 ¹³⁷Cs, ¹²⁹I 등과 같은 핵분열생성물들이다. 그러므로 아무리 초우라

표 1. 액티나이드와 핵분열생성물질들의 처분장에서의 유출에 따른 안정성 비교

Species	Half life years	M_i Relative amount in repository Ci/Mg	f_i Fractional dissolution yr ⁻¹	C_i Dose conversion (rem)(m ³)/Ci	Relative dose index $M_i f_i C_i / M_f C_{Tc}$
Fission Products					
Tc-99	1.5×10^6	1.3×10^1	6.5×10^{-3}	2.1×10^3	1
I-129	1.7×10^7	3.2×10^{-2}	6.5×10^{-4}	5.2×10^4	6.1×10^{-2}
Actinides					
Np-237	2.14×10^6	1.0	1.1×10^{-10}	2.6×10^6	1.6×10^{-5}
Pu-239	2.44×10^4	3.0×10^2	2.0×10^{-11}	3.8×10^6	1.3×10^{-3}

늄원소를 소멸처리하여도 핵분열생성물들이 존재하는 한에는 이들의 유출률이 문제시 된다. EPA 및 NRC 기준에 따른 각 핵종별 환경으로의 유출률을 표 1에 제시하였다. 이 표에서 볼 수 있듯이 초우라늄군 원소들의 유출이 환경에 미치는 영향은 미세하다. 소멸처리를 찬성하는 쪽에서는 세시움 등을 분리하여 지상에서 보관함으로써 이들의 지하수를 통한 유출을 막을 수 있다고 주장하나, 수 백년이상 이들을 지상에서 아무런 방사능 누출없이 보관할 수 있는가는 현재의 기술상태로는 의문시 된다.

소멸처리후의 문제 뿐 아니라 군분리 시에도 많은 위험이 있을 수 있다. 우선 사용후핵연료를 잘못 취급하므로써 개소상태의 방사성물질이 누출될 수 있는 가능성이 높아지며 TRUEX 공정에서도 누출 가능성이 있다. 그리고 아무리 고효율의 TRUEX 기술로 초우라늄군원소들을 분리한다 하여도 그 폐액에는 미량이나마 초우라늄군원소들이 존재하기 마련이고 이들의 폐기물을 고화시켜 심지층처분할때 긴 반감기 때문에 장시간동안 감시를 하여야 한다. 초우라늄군 원소들을 소멸시키고 나면 다시 핵분열생성물들이 생성되는데 이의 처리가 또한 문제이다. 물론 일본이나 소련에서는 입자가속기를 써서 이런 고품해도 핵분열생성물들도 핵변환시킬 수 있는 방법을 제시하고 있으나 현재 상태에선 핵분열생성물들의 낮은 핵반응 단면적때문에 효율성이 낮은 것이 문제시 된다.

안전성측면에서 소멸처리의 유용성을 따져보면 부지면적이 줄어들고 처분장주변의 온도가 낮아져 처분용기나 주위 암반층이 열로 인한 스트레스를 덜 받는다는 이점이 있는 반면에 실제적으로 현재의 처분기술로는 안전성 제고에 큰 도움이 없을 것으로 사료된다.

소멸처리에 필요한 기술들이 근시일내에 개발될 수 있는냐는 소멸처리의 상용화에 크게 영향을 미칠 것으로 보인다. 미국과 같이 2030년경으로 상용고준위 방사성폐기물처분 시한을 정한 국가에선 많은 개발시간이 요구

되는 기술의 상용화에 큰 장애요소가 될 것으로 보인다.

현재 군분리기술로 소개되고 있는 TRUEX는 아직도 개발할 분야가 많고 초우라늄군의 분리효율을 기대치까지 높이는 데에는 적지 않은 시일이 걸릴 것으로 생각된다. 그리고 TRUEX 기술의 대안으로 제시된 pyroprocessing 공정의 상용화는 TRUEX기술에 비해서도 더 많은 시일이 걸릴 것이다. 그리고 전용소멸로에 대한 구체적인 설계, 규제기관의 승인, 건설등에 의해서도 많은 시간들이 소모될 것이다. 이와같이 소멸처리기술의 상용화 여부는 위에서 열거한 단점들을 얼마만큼 빠른 시일안에 극복하느냐에 달려다고 볼 수 있다.

○ 결 론

소멸처리 방식은 현재로선 단점이 많으나 우선 처분장의 처분수용용량을 증가시킨다는 중요한 특성을 가지고 있다. 이 점은 우리나라와 같이 처분장을 구하기 힘들고 넓은 면적확보가 어려운 나라에서는 큰 매력요소가 아니라 할 수 없다. 그리고 우리나라와 같이 지속적인 전력수요 증가에 따른 다량의 原電 건설이 요구되는 국가에서는 원자로에서 발생하는 많은 초우라늄폐기물을 처리하기 위한 다량의 소멸처리로 건설이 필요하기 때문에 소멸처리에 필요한 연구비부담이 큰 장애요인으로 작용하지 않을 수도 있다. 이 글을 통해 장기적인 안목에서 국가의 원자력기술 자립을 위해 소멸처리 기술에 대한 평가와 연구의 필요성을 강조하며, 안전성평가를 위해 소멸처리후 구체적으로 각 장반감기 핵종별 유출특성과 이들 유출 핵종에 의한 생태계의 영향분석이 빠른 시일내에 필요하다는 점을 강조하고자 한다.

◇ 이 글은 한국원자력학회지 제24권 3호에서
전재한 것임 <편집자>