

제 4 장 핵분열 생성물 특성

한국교통대학교 화공생물공학과 박병홍

핵분열 시 생기는 핵 분열 생성물에 관한 정보는 원자로의 설계와 운전에서 여러 면으로 중요하다. 사용후핵연료에 필요한 차폐와 운전정지 후 요구되는 긴급냉각은 원자로 내에 존재하는 핵분열 생성물의 방사능의 양과 성질에 의해 결정된다. 핵 분열 생성물에 의한 중독은 노제어와 연료 주기에 많은 영향을 준다. 사용후핵연료 중 핵분열 생성물의 양은 화학적 연료 회수 공장에 필요한 차폐, 처리 전 냉각기간, 연료회수공정에서의 필요한 분리도 및 공정 용액과 폐기물의 열발생 등을 결정한다. 따라서, 핵분열 생성물의 생성도와 이에 관한 자료를 수집하고 이들 자료를 이용하여 조사와 붕괴의 여러 조건하에서 핵연료 내 핵 분열 생성물의 방사능을 추정하거나, 계산하려는 노력이 있어왔다. 핵연료 주기를 효율적으로 운영하기 위해서는 핵분열 생성물의 총 양과 방사능뿐 아니라 각 핵종별 양과 방사능을 아는 것이 중요하다. 예를 들면, 차폐계산에는 고에너지 감마선의 방출체가 가장 중요하며, 중성자 독물로서 여러 원소들의 중요성은 많은 차이가 있다. 또한 예로 화학적 분리의 문제는 핵분열 생성물의 원소에 따라 자연히 다르다는 것을 들 수 있다.

4.1. 생성도

핵분열의 1차 생성물로는 300개가 넘는 서로 다른 핵 종들이 관찰된다. 핵분열 생성물이라는 용어는 일반적으로 1차 핵 분열 생성물 즉, 방사성붕괴와 중성자 흡수에 의해 생기는 핵분열 파편과 그 자핵종을 가리킨다.

원자로 내에서 분열을 겪는 핵은 거의 항상 서로 다른 질량을 가진 2개의 핵으로 나누어진다. U^{235} 의 분열에 의해 생기는 알려진 파편들은 원자번호로는 아연($Z=30$)에서 디스프로슘($Z=66$)까지, 질량수로는 72에서 161까지 분포한다. 생성도는 질량 범위가 90~100, 그리고 133~144일 때 가장 크며, 양끝과 대칭분열에 해당하는 질량범위(109~125)에서는 매우 작다. 중성자-양성자 비는 핵분열 생성물의 질량범위 내에서 안정핵보다 핵 분열성 원자핵의 경우 더 크게 나타난다. 따라서 1차 핵분열생성물은 거의 모두 핵분열 생성물의 안정 동위원소보다 무거우며, 베타 방사성이다. 간혹 반감기가 너무 짧아서 측정되지 않을 수도 있지만, 이들 1차 핵분열 생성물들은 보다 원자번호가 높은, 같은 질량수의 핵종으로 붕괴한다.

보통 각 핵분열 파편은 안정 핵이 될 때까지 일련의 붕괴를 겪게 되는데, 천연원소에서는 발견할 수 없는 알려진 베타 불안정 종들의 반감기는 1.6초(Br^{90})에서 1.7×10^7 년(I^{129})에 이르기까지 측정된다.

소수의 핵분열 생성물은 감마 방출과 경쟁하는 중성자 방출에 의한 베타 방출 이후 간혹 과잉 붕괴 에너지를 내놓게 된다. 이 중성자를 핵분열의 지체 중성자라 하며, 원자로의 제어에 매우 중요하다. 이들은 U^{235} 의 1회 핵분열당 0.0173개의 중성자 비율로 기여를 한다. U^{233} 과 Pu^{239} 의 분열에서는 지체 중성자 방출체의 생성도가 작기 때문에, 이들을 핵연료로 사용하는 노는 다소 제어하기 어렵다.

핵분열에서 발생한 각 핵분열 생성물의 양은 핵분열 생성도로 나타내는데, 100번의 핵분열당 형

성되는 원자의 수로 정의된다.

일반적으로 핵분열 생성물은 누적 생성도로 측정되는데, 이는 핵분열로부터의 직접 생성도와 모 핵종의 붕괴에 의한 생성도를 합친 것이다. 흔히 인용되는 생성도는 질량 혹은 연쇄 생성도로서 주어진 질량수의 핵분열 생성물의 안정된 붕괴 생성물이 가지는 누적 생성도를 나타낸다. 질량수에 따른 누적 생성도를 저속중성자에 의한 U^{233} , U^{235} 와 Pu^{239} 의 분열 및 고속 중성자에 의한 U^{235} , Pu^{239} , Th^{232} 와 U^{238} 의 분열에 따라 차이가 나타나며, 표 4.1에는 대표적으로 열중성자에 의한 U^{235} 분열의 결과를 정리하였으며 그림 4.1은 쌍봉형의 질량 생성도 곡선을 보여주고 있다.

표 4.1 열중성자 분열에 의한 Fission Yield

Yield (%)	Isotope	Halflife	Yield (%)	Isotope	Halflife
6.7896	Cs ¹³³	2.065 y	0.4203	Sm ¹⁵¹	90 y
6.3333	I ¹³⁵	6.57 h	0.3912	Ru ¹⁰⁶	373.6 d
6.2956	Zr ⁹³	1.53 My	0.2717	Kr ⁸⁵	10.78 y
6.1	Mo ⁹⁹	65.94 h	0.1629	Pd ¹⁰⁷	6.5 My
6.0899	Cs ¹³⁷	30.17 y	0.0508	Se ⁷⁹	327 ky
6.0507	Tc ⁹⁹	211 ky	0.0330	Eu ¹⁵⁵	4.76 y
5.7518	Sr ⁹⁰	28.9 y	0.0297	Sb ¹²⁵	2.76 y
2.8336	I ¹³¹	8.02 d	0.0236	Sn ¹²⁶	230 ky
2.2713	Pm ¹⁴⁷	2.62 y	0.0065	Gd ¹⁵⁷	Stable
1.0888	Sm ¹⁴⁹	Stable	0.0003	Cd ^{133m}	14.1 y
0.6576	I ¹²⁹	15.7 My			

소수의 경우, 안정 핵종이 1차 핵분열 생성물의 범위에서 발생한다. Kr⁸⁶과 Xe¹³⁶이 그 예인데, 이 경우 원자 번호가 하나 더 높은 원소의 차폐 핵종은 작은 생성도를 보이게 된다. 위의 예에서는 차폐 핵종을 18.6일의 반감기를 가진 Rb⁸⁶와 12.9일의 반감기를 가진 Cs¹³⁶라 할 수 있다. 차폐 핵분열 생성물의 양은 독립 생성도에 의해서만 계산할 수 있고, 연쇄 생성도에서는 불가능하다. 그런데, 대부분 이 정도의 양은 무시할 만하다.

핵분열 생성도를 구하는 일반적인 방법은 두 가지가 있다. 첫째, 방사화학적 방법인데, 화학적 분리 후 핵분열 생성물의 방사능을 측정하는 것이다. 둘째, 질량분석법으로, 장기간 냉각시킨 후 안정되거나 반감기가 긴 생성물을 질량 분광학적 방법을 써서 측정한다. 두 방법 모두 노출시간 동안의 핵분열 횟수를 결정해야 한다. 이것은 주로 비교법에 의하여 이미 생성도를 알고 있는 핵종과 타 핵종들을 비교하여 얻을 수 있다. 질량 분석법은 반감기가 짧거나 극히 낮은 생성도를 가진 핵분열 생성물에는 적합하지 않지만 질량 생성도를 보다 정확히 측정할 수 있으므로 방사화학적 방법보다 널리 쓰인다.

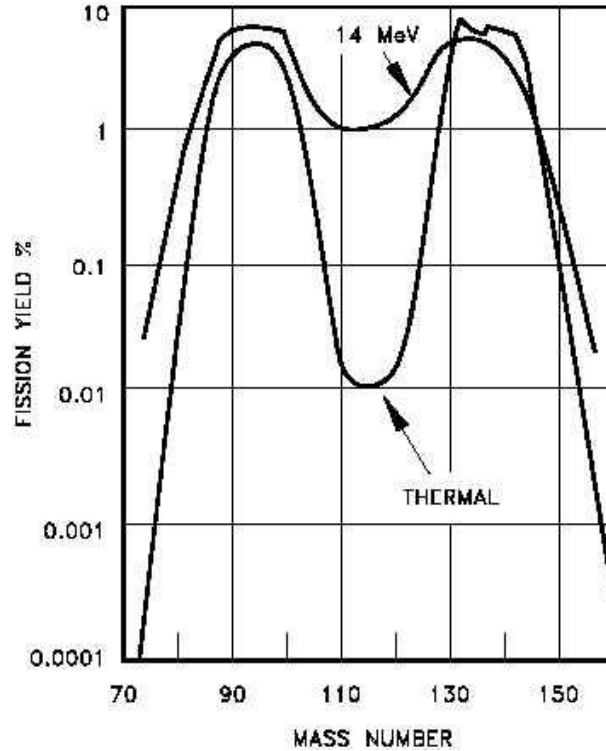


그림 4.1 열중성자 및 고속중성자 Fission Yield 분포

물론 핵분열 생성도는 U^{233} , U^{235} 및 Pu^{239} 등과 같은 핵분열성 핵종의 종류에 따라 다르다. 그러나 고생성도의 핵분열 생성물은 저생성도의 핵분열 생성물의 경우처럼, 핵분열성 핵종들 사이에서 매우 근접하게 일치한다. 생성도는 원자로에서 겪는 스펙트럼에 걸쳐 중성자 에너지에 크게 의존하지 않는다. 종종, 핵분열 질량생성도는 초기의 방사 화학적 생성도 측정에 기초하여 질량수에 대한 생성도를 로그 눈금 위에 보여주는 연속곡선으로 표현된다. 핵에 있어서 특정 개수의 (특히 50과 82) 중성자와 양성자가 강화된 안정성을 가지므로 핵분열의 특정 형태를 선호하게 된다. 동일한 질량수를 가진 1차의 핵분열 생성물에 대하여 독립 생성도를 알고 있으면, 이들은 다음의 가우스 분포를 따르게 된다.

$$P(Z) = \frac{1}{\sqrt{C\pi}} e^{-(Z-Z_p)^2/C}$$

여기서, $P(Z)$ 는 총 연쇄 생성도에 비례하는 원자번호 Z 의 독립 생성도이며, Z_p 는 분포에 있어서 첨두에 해당하는 Z 의 값이고, C 는 주어진 질량수에 대한 상수로서 일반적으로 0.9 정도의 값을 가진다.

4.2. 휘발도

전술한 이유 때문에, 주어진 기간 동안의 조사 및 냉각 후 핵연료 내에 존재하는 핵분열 생성물의 총 양, 방사능 그리고 붕괴 에너지를 아는 것이 중요하다. 이를 위하여 붕괴시간의 함수로서 혼합 핵분열 생성물의 분열당 근사 붕괴 에너지를 계산하는 반 경험적 방정식들이 쓰이고 있다. 핵분열당 붕괴에너지

$$(eV/sec) = 3.9d^{-1.2} + 11.7d^{-1.4}, d > 1$$

그리고, 핵분열당 감마에너지

$$(MeV/sec) = 1.26\tau^{-1.2}$$

여기서 d는 핵분열 후 시간을 날로, t는 초로 표현한 것이다. 위의 식은 베타선, 감마선과 중성미자의 에너지를 포함하는 총 붕괴에너지를 계산하는데, 베타와 감마 에너지는 각각 총 에너지의 1/4에 해당한다.

이들 방정식의 장점은 응용하는데 간단하고, 쉽다는 것이지만, 더 자세한 정보를 제공하는데 미흡하다는 단점이 있다.

충분한 붕괴시간 후 핵분열 생성물의 붕괴 특성에 대한 가장 정확한 정보는 핵분열 생성물의 종에 따른 생성도와 방사성의 자료에 의한 계산으로부터 얻을 수 있다. 만약 결과적인 정보가 각 화학적 원소, 원소군 혹은 감마 방사의 에너지 범위 등 특정 범주에 따라 분석될 수 있다면, 이러한 계산은 가장 유용하다. 예를 들면, 차폐 계산의 경우 사용되는 것은 총 감마에너지가 아니라 감마 에너지의 스펙트럼으로 차폐물질에 의한 흡수는 감마 에너지에 주로 의존하기 때문이다. 또한 화학 공정에 있어서는 필요로 하는 분리를 추정하기 위해 각 핵분열 생성물 원소의 방사능을 알아야 한다. 어느 핵분열 생성물 연쇄의 산출율(atoms/sec)은 단순히 질량 생성도에 핵분열율을 곱하여 얻는다.

$$P_i = Fy_i$$

여기서 핵분열율 F(단위 초당 분열횟수)는 어느 반응로의 watt로 표시한 출력의 3.1×10^{10} 배이다. 이 산출율은 정상 운전 시, 즉 일정 출력의 정상 운전 시, 일정하다. 그러나 너무 높지 않은 중성자 흡수 단면적을 가진 안정되거나 반감기가 긴 핵종을 제외하고는 각 핵분열 생성물의 집적율은 이러한 산출율과 일치하지 않는다. 붕괴나 중성자 포획에 의한 제거를 고려하고, 모핵종의 붕괴가 일어나는 동안 생성에 있어서 지체 가능성을 무시할 때, 생성도 y_i , 붕괴상수 λ_i 그리고 중성자 포획 단면적 σ_i 를 가지는 핵분열 생성물의 원자들의 집적율은 다음과 같다.

$$\frac{dN_i}{dt} = Fy_i - N_i\lambda_i - N_i\sigma_i\phi$$

여기서 ϕ 는 중성자 속이다. 만약 중성자 속과 핵분열율을 일정하다고 가정하면, 조사시간 T이 후의 핵분열 생성물 원자의 개수는,

$$N_i = \frac{Fy_i}{\lambda_i + \sigma_i\phi} [1 - e^{-(\lambda_i + \sigma_i\phi)T}]$$

중성자 속과 핵분열율이 동시에 일정하다는 가정은 정확하게 옳지는 않지만 고연소도의 경우를 제외하고는 훌륭한 근사이다. 만약 조사시간이 반감기에 비하여 길어지게 되면 핵분열 생성물의 양은 포화치에 이르러 생성과 붕괴가 같게 된다. 너에서 꺼낸 후 그 양은 방사성 붕괴의 지수 법칙에 따라 감소한다. 핵분열 생성물의 여러 반감기가 경과된 후, 다음의 포화치에 이르게 되는데,

$$N_{i(\text{sat})} = \frac{F y_i}{\lambda_i + \sigma_i \Phi}$$

위 식들의 포화치를 비교하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\text{포화율} = 1 - e^{-(\lambda_i + \sigma_i \Phi)T}$$

위의 식들에서 다소 중성자 독에 기여하는 소수의 핵분열 생성물의 경우를 제외하면 $\sigma_i \Phi$ 의 항은 생략할 수 있다. 만약 핵분열 생성물이 조사시간에 비해 짧지 않은 반감기의 모핵종을 가진다면, 그 생성율은 모핵종의 붕괴율과 동일한 변수이므로 그 집적은 위 식들로 서술할 수 없다. 많은 경우 자핵종은 모핵종에 비해 짧은 반감기를 가지며, 또한 영속 혹은 과도 평형을 이루는 것으로 볼 수 있다.

다소의 중성자 포획을 무시할 수 있는 경우, 조사 시간 T와 붕괴시간 t이후 비교적 짧은 반감기의 모핵종을 가진 핵종의 방사능은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\lambda_i N_i = F y_i (1 - e^{-\lambda_i T}) e^{-\lambda_i t}$$

핵분열 생성물과 그 붕괴 모핵종의 반감기가 조사시간에 비해 짧은 상태에 이른다. 단위 노출력당 포화 방사능은 일정하며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\lambda_i N_i}{F} = y_i e^{-\lambda_i t} (T_{1/2} \ll T)$$

한편, 포화 방사능은 단위 열출력(watt)당 Ci의 단위로 간편하게 표현할 수 있다.

$$\frac{\text{Curies}}{\text{Watt}} = y_i e^{-\lambda_i t} \left(\frac{\text{dps}}{\text{fission/s}} \right) \left(\frac{\text{fission}}{200 \text{ MeV}} \right) \times \left(\frac{\text{MeV}}{1.6 \times 10^{-13} \text{ w}\cdot\text{s}} \right) \left(\frac{\text{Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps}} \right)$$

혹은,

$$\frac{\text{Curies}}{\text{Watt}} = 0.845 y_i e^{-\lambda_i t} (T_{1/2} \ll T)$$

동력로의 연료에 대한 실제적인 조사 기간은 1~4년 정도로, 대부분의 핵분열 생성물의 핵종들이 이 기간 내에 포화에 이르게 된다. 한 예로 8.05일의 반감기를 가진 I^{131} 을 들 수 있는데, U^{235} 의 핵분열시 2.93%정도 생성되며, 포화방사능은 0.023Ci/W이다.

많은 방사성의 핵분열 생성물 핵종들이 노조사 기간에 비해 긴 반감기를 가지는데, H^3 , Kr^{85} , Sr^{90} , I^{129} 및 Cs^{137} 등이 그 대표적인 핵종들이다. 이러한 경우, 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\frac{\lambda_i N_i}{F} \cong \frac{y_i T e^{-\lambda_i t}}{T_{1/2}} (T_{1/2} \gg T)$$

혹은,

$$\frac{\text{Curies}}{\text{Watt}} = \frac{0.586 y_i \text{Te}^{-\lambda_i t}}{T_{1/2}}$$

이러한 반감기를 가진 핵종들은 핵연료에서 포화에 이르지 못하므로, 그들의 연간 산출율은 매우 중요하다. 연간 산출율은 조사 시간, T로 나누고, 냉각 시간을 영으로 주었을 때 얻을 수 있다.

$$\frac{\text{Curies}}{\text{Watt} \times \text{시간}} = \frac{0.586 y_i}{T_{1/2}}$$

다양한 조사 조건하에서 나타나는 핵분열 생성물의 양에 대한 계산은 많이 행하여져 왔다. 그러나 대부분의 경우, 위에서 제시한 단순 방정식들은 부적절하며 좀 더 자세한 계산을 요한다.

이들 핵분열 생성물의 방사능 준위는 앞에서 논의한 요점들을 예증해 주고 있다. 즉, Sr⁹⁰, Ru¹⁰⁶과 Cs¹³⁷등의 긴 반감기를 가진 핵분열 생성물들은 조사되는 동안 붕괴에 의한 손실이 거의 없으나, 노내의 총 핵분열 생성물의 방사능에는 거의 기여하지 못한다.

한편, 차폐된 동위원소 Cs¹³⁶은 짧은 반감기를 가지고 있지만, 방사능에 크게 기여하지 못한다. 단수명의 Mo⁹⁹는 조사 말기에는 포화준위에 도달하지만, 수주 동안의 붕괴 후에는 매우 낮은 준위로 떨어진다. 붕괴가 계속되면 장수명의 방사능이 더욱 중요해 진다.

4.3. 화학적 및 방사적 특성

배출된 핵연료 내 핵분열 생성물의 화학적 조성은 장수명이거나 안정된 핵종에 의해 지배된다. 대부분의 핵분열 생성물의 화학적 원소들의 양은 배출 후 수 천년 동안 거의 변하지 않는다. 긴 붕괴기간 동안 조성에 있어서 현저한 변화를 보이는 원소들로는 세슘, 수소, 니오브, 프로메튬 및 테크네튬 등이 있다.

우라늄 연료의 가압 경수로로부터 배출된 연료 중 핵분열 생성물의 원소 조성에서 알려진 핵분열 생성물의 원소들은 아연(Z=30)에서 디스프로슘(Z=66)까지 분포하며, 주기율표상 각 족의 대표적인 원소들을 포함하고 있다.

영족에는 불활성 기체의 여러 동위원소들, 크립톤 및 크세논이 속하는데, 이들 기체의 대다수 방사성 동위원소들은 단수명이며, 연료가 처리되기 전에 고체 노연료내에서 다른 원소들로 붕괴된다. 액체 연료 노에서는 기체가 연속적으로 제거되므로 크립톤과 크세논은 노로부터 이탈할 수 있으므로 그들의 붕괴 생성물들이 축적되는 것을 저지할 수 있다. 그러나 허용 수준까지 붕괴시킨 후에 대기 중으로 방출할 수 있다. 냉각된 핵연료에서 이들 원소들의 유일한 방사성 동위원소들은 1060년의 Kr⁸⁵와 5.27일의 Xe¹³³이다. Kr⁸⁵는 생성도가 낮고 반감기가 길기 때문에 무시할 만한 방사능을 가지고 있지만, 고 연소도하에서 연장조사의 경우 중요한 원소가 된다. 과도한 양의 Kr⁸⁵가 방출되는 것을 방지하기 위해서는 불활성 기체를 포착하는 처리공정이 필요하다. 9.2시간의 Xe¹³⁵는 강한 중성자 흡수성 때문에 원자로 운전시 매우 중요한 원소이다.

거의 대부분의 경우, 이들 원소들은 비반응성 단원자 기체들이며, 기체로부터 분리할 때는 저온 동결이나 흡착이 필요한 반면, 액체의 경우 용해도가 낮기 때문에 쉽사리 제거할 수 있다.

IA족은 루비듐과 세슘이 대표적인데, 18.6일의 Rb⁸⁶과 12.9일의 Cs¹³⁶은 독립 생성도가 매우 작아서 별로 중요하지 않으며, 이들과 같은 질량수의 다른 핵분열 생성물은 붕괴하여 안정된 Kr⁸⁶과

Re¹³⁶이 된다. 2×10^6 년의 Cs¹³⁵와 30년의 Cs¹³⁷은 긴 반감기 때문에 대부분 핵연료 연소 시 매우 적은 부분의 방사능에 기여하지만, Cs¹³⁷과 그 자핵종인 바륨은 오래된 핵분열 생성물의 혼합체에서 나오는 방사능의 상당부분을 차지하며, 따라서 오래된 폐기물 중 중요한 생물학적 장애이다.

안정된 Cs¹³³과 천연의 루비듐 동위원소들을 제외하고는 다른 루비듐과 세슘의 동위 원소들은 알칼리 금속이라 불리며, 물이나 일반 기체, 다른 물질들과 격렬하게 반응하는 성질이 있다. 이들의 화합물로부터 금속을 얻기 위해서는 강한 환원성 조건이 필요하다. 보통 이 원소들은 매우 안정된 상태로 존재하며 단일 하전의 양이온으로 용액 중 착물을 형성하지 않으며, 또한 그 염들은 물에는 잘 녹지만, 유기 액체에는 녹지 않는다.

IIA족, 즉 알칼리토 금속의 핵분열 생성물 중 10시간 이상의 반감기를 가진 방사성 동위원소들은 51일의 Sr⁸⁹, 28년의 Sr⁹⁰, 그리고 12.8일의 Ba¹⁴⁰뿐인데 이들은 모두 높은 생성도를 가지고 있다. Sr⁹⁰의 자핵종인 64.2 시간의 Y⁹⁰을 포함하여, 스트론튬의 동위원소들은 순수한 베타 방출제이며, 바륨의 동위원소는 감마선을 내고, 그 자핵종인 40시간의 La¹⁴⁰은 특히(γ , n) 반응을 촉진시킬 수 있는 강한 감마선을 방출한다. 알칼리토 원소의 2가 이온들은 매우 안정되어 환원시키기 어려우며, 강한 킬레이트제로만 착화시킬 수 있다. 이들 원소들의 공통염들은 유기 액체에서는 불용성이지만, 인산염, 탄산염, 황산염이나 옥살산염을 제외하고는 물에 녹는다. 염화물과 질산염은 공통 음이온을 가진 고농도의 산에서 불용성이며, 인산염, 탄산염 및 옥살산염은 강산에서 녹는다.

적당한 냉각 후에 Sr⁸⁹는 핵분열 생성물 중 주요 베타 방출체이며, 오래된 핵분열 생성물 중에는 Sr⁹⁰이 중요한 방사선 장애이다. 섭취된 스트론튬은 뼈에 농축되므로, Sr⁹⁰은 핵분열 생성물 폐기물의 처분에 있어서 주된 관심의 대상이다. 방사성 동위원소나 베타선원을 쓰기 위해, 침전이나 이온 교환 기술을 이용하여 핵분열 생성물의 용액으로부터 스트론튬을 회수한다.

란틴 자핵종에서는 강한 감마 방사선이 방출되므로, 자주 Ba¹⁴⁰에 의해 10~100일 동안 냉각된 핵연료에 대한 차폐요구를 결정하게 된다.

생물학이나 기타 다른 연구에 감마선원으로 이용하기 위해 질산염과 크롬산염의 침전을 포함한 공정으로 조사된 우라늄 용액으로부터 방사성 바륨을 분리시킬 수 있다.

IIIA족은 란탄족 원소들을 포함하므로, 이트륨과 희토류란틴에서 디스프로슘에 이르기까지 대부분의 핵분열 생성물이 이 족에 속한다. 산화-환원 거동에서의 몇 가지 차이를 제외하면, 이들 원소들은 화학적으로 매우 유사하다. 원자력 계획이 시작되기 전, 이들 원소들은 화학적으로 상호 분리할 수 있는 효율적인 방법은 거의 없었다. 실제로 수 개월 이내의 반감기를 가진 방사성 핵종들은 분리가 완료되기 전에 붕괴되어 버리기 때문이다. 양이온 교환수지에 의해 흡착되지 않는 착물의 안정성에 있어서 이들 원소간의 차이를 이용하여, 이온교환 수지관을 이용하여 희토류 이온의 혼합물을 상호 분리할 수 있다. 이들은 구연산염이나 다른 착물을 형성하는 양이온을 이용하여 원자번호가 감소하는 순서로 선택적으로 용리시킬 수 있다.

IIIA족에서 반감기와 생성도의 측면에서 볼 때 혼합된 핵분열생성물의 방사능에 중요하게 기여할 수 있는 원소들은 61일의 Y⁹¹, 32일의 Ce¹⁴¹, 290일의 Ce¹⁴⁴와 그 자핵종인 17.5분의 Pr¹⁴⁴, 11.3일의 Nd¹⁴⁷ 그리고 13.7일의 Pr¹⁴³등인데, 이 중에서 Pr¹⁴³은 감마 방사선을 내지 않는다. Y⁹⁰과 La¹⁴⁰은 장수명의 알칼리토 모핵종에 의해 유지되므로, 어떤 분리 후 수 일이 지나면 희토류보다는 알칼리토류에서 발견된다. 사마륨, 유로퓸과 가돌리늄의 여러 장수명 혹은 안정된 동위원소들은 매우 높은 중성자 흡수 단면적을 가지고 있다. 이들은 저생성도로 발생하지만, 반감기가 길기 때문에 중성자 포획에 의해서 파괴되거나 제거되지 않는 한 핵연료 내에 누적된다.

IVA족의 대표적인 원소는 지르코늄으로, 방사성 동위원소로서 1.1×10^6 년의 Zr^{93} , 63일의 Zr^{95} 및 17시간의 Zr^{97} 등이 있다. Zr^{93} 은 관심의 대상이 되기에는 너무 적은 방사능을 가지고 있으며, Zr^{90} 은 노생성물이 처리될 썩에는 보통 붕괴되어 버린다. Zr^{95} 는 고생성도와 중간 정도의 반감기를 가지고 있어서 높은 감마 에너지가 큰 관심의 대상이 되는데, 그 방사능은 자핵종인 35일의 Nb^{95} 의 성장 때문에 강화, 연장된다.

지르코늄은 거의 4가의 산화상태만을 보인다. 그 수산화물 및 염기성염의 상당수는 강한 불용성으로 다소 강산의 용액으로부터도 침전된다. 이 침전물은 과잉 알칼리에서 녹지 않으며, 차가운 용액에서 침전되지 않는 한 산에 녹이기 어렵다. 인산과 알칼리 인산염은 강한 용액으로부터 지르코늄을 $ZrO(H_2PO_4)_2$ 의 형태로 완전히 침전시킬 수 있다. 추적자 이온은 특히 낮은 산도에서 예측하기 어려운 거동과 함께 방사성 콜로이드를 형성한다. 지르코늄에 의해서 콜로이드가 형성되거나, 콜로이드입자에 지르코늄이 흡착되는 현상은 분리 공정에서 어려움을 야기시킨다. 침전공정에 있어서 특별한 주의를 기울이지 않으면, 여러상간에 나누어진 지르코늄 콜로이드가 형성되어 분리의 효율을 저하시키며, 용매추출에서는 유사한 콜로이드와 표면활성의 지르코늄 화합물이 경계면에 모이게 되어, 분리가 어려워진다. 높은 산도에서는 지르코늄은 TBP에 의해서 다소 추출된다. 지르코늄과 그 자핵종인 니오브는 실리카겔에 흡착시켜 우라늄 질산염 용액에서 제거할 수 있다. 이것은 용매 추출된 우라늄을 추가로 제염시킬 때나 조사된 우라늄으로부터 방사성 동위원소용 지르코늄을 얻고자 할 때 유용하다.

VA족은 35일의 반감기를 가진 베타- 감마 방출의 Nb^{95} 와 단수명 동위원소들이 대표적이다. 모핵종인 지르코늄처럼 Nb^{95} 는 쉽사리 가수분해되어 침전물이나 콜로이드를 형성, 분리를 어렵게 한다. 그 용액은 불화물이나 옥살산염으로 안정화시킬 수 있다. 또한 거의 5가 산화상태로만 존재하며, 5가의 불화물은 고온 플루오르 휘발법의 조건에서 기화할 수 있다. 63일의 지르코늄 모핵종은 니오브의 존재를 연장시키므로 질량수 95의 핵분열 연쇄에는 두 개의 강력하고, 느린 붕괴의 감마 방사능들이 존재한다.

VIA족은 몰리브덴이 포함되는데, 고 생성도의 핵분열 생성물 동위원소들을 갖고 있지만, 가장 장수명의 방사능도 67시간이 Mo^{99} 정도에 불과하다. 그 베타와 감마 방사능은 비교적 짧은 냉각시간 동안에 처리된 노 생성물 내에서만 문제가 된다. 주된 산화 상태는 +6이며, 보통 음이온으로 존재한다. 몰리브덴은 플루오르 휘발법에서 문제를 일으키는 6가의 기체 불화물을 형성한다. 안정된 몰리브덴은 재 순환한 핵연료 내에 누적된다.

VIIA족의 핵분열 생성물 원소는 테크네튬으로 자연에는 존재하지 않는다. 2.12×10^5 년의 Tc^{99} 를 제외한 테크네튬의 모든 핵분열 생성물의 방사능에는 실제적으로 거의 기여하지 못한다. 핵분열 생성물 내에 존재하기 때문에 이원소의 화학적 연구를 위해 거시적 표본을 얻을 수 있다. 화학적으로 테크네튬은 다른 원소보다도 레튬과 유사하다. 즉 여러 산화 상태를 가지며, 7가의 상태로 쉽게 산화되어 TcO_4^- 의 형태로 존재한다. 이 이온은 탄산수 내에서 연강에 대한 매우 효율적인 부식 방지제로 작용한다.

VIII족은 루테튬, 로듐 및 팔라듐의 3원소로 대표된다. Pd^{107} 은 7.5×10^6 년의 긴 반감기를 가지는 약한 베타 방출체로 핵분열 생성물의 방사능에 거의 기여하지 못한다. 41일의 Ru^{103} 과 1년의 Ru^{106} 은 둘 다 중요한 생성도를 가지며 핵분열 방사능의 상당 부분을 차지한다. Ru^{106} 은 감마선을 내지 않지만, 그 자핵종인 30초의 Rh^{106} 에 의해 감마선을 수반한다. 이들 원소들의 다른 방사성 동위원소들은 너무나 단수명이어서 관심의 대상이 되지 못한다.

자연상태의 루테튬, 로듐 및 팔라듐은 매우 귀중한 금속으로 회합에 있어서 매우 안정된 착물로 존재하는데, 이는 VIII족 원소에서는 공통적인 현상이다. 루테튬은 여러 산화 상태로 존재하며 때로는 한 상태에서 여러 종으로도 존재하고 상호변환 반응은 매우 느리다. 이는 루테튬이 추적자 농도로 존재할 때 그 거동을 예측하기 어렵게 만든다. 오스뮴을 제외하면 루테튬은 +8의 상태로 산화될 수 있는 유일한 원소로, 이 때 휘발성인 RuO₄의 형태로 존재한다.

산성용액에서 루테튬은 +3이나 +4의 산화 상태로 존재한다. 알칼리용액에서는 +5, +6이나 +7의 산화 상태의 음이온으로 존재할 수 있다. 양이온이나 음이온의 어느 형태에서도 루테튬을 HNO₃와 HClO₄로 연기가 발생할 때까지 가열하면, 루테튬은 RuO₄의 형태로 증류된다. 이 최종 화합물은 NaOH에 흡수되어 산화물로서 침전되고, 금속으로 전환된다. 루테튬은 높은 산화 상태에서 금속으로 쉽게 환원되어, 고체표면을 도금시킨다. 이러한 성질이나 RuO₂로의 가수분해로 말미암아 방사성 콜로이드의 거동이 문제가 된다.

또한, 루테튬과 같은 전이원소들의 착물은 느리게 형성되고 분해되므로 루테튬은 핵연료 재처리 공정에서 1차 주기에서는 루테튬으로부터 상당한 제염이 이루어지지만, 추가 주기에서는 매우 적은 제염밖에 얻을 수 없으므로, 추출 공정에 대한 개선의 상당 부분은 루테튬 제염의 개선을 위한 처리에 관한 것이다.

IB족은 은을 포함하고 있는데, 여러 동위원소들은 매우 낮은 생성도를 가지고 있다. Ag¹¹¹은 7.5일의 반감기를 가지고 있고, 감마방사선을 내지만, 핵분열 생성물의 방사능에는 기여하지 못한다. 은은 보통 +1의 산화 상태로, 많은 불용성 염과 착이온들을 형성한다.

IIB족의 원소들인 아연과 카드뮴은 낮은 생성도를 가지고, 핵분열 생성물의 분포에서 비교적 말단과 중앙 부근에서 발견된다. 5.1년의 Cd^{113m}과 43일의 Cd^{115m}이 감마 방사선을 내고는 있지만, 이들 원소들은 방사능에 기여하는 바가 적다. 이들 원소들은 +2의 산화 상태를 가지며, 유사한 양이온과 여러 착이온들의 전형적인 염 용해도를 갖는다.

IIIB족의 원소들인 가륨과 인듐은 단수명, 저생성도의 동위원소들로, 약 염기성 수산화물과 함께 주로 +3의 산화상태로 존재한다. 그 염들은 화학적으로나 물리적으로 대다수 전이금속의 염과 유사하지만, 할로겐화물의 어느 정도는 휘발성이다.

IVB족은 원소인 게르마늄과 주석 또한 저생성도를 가지며, 131일의 Sn¹²³과 9.5일의 Sn¹²⁵는 중간 정도의 반감기에도 불구하고 중요한 핵분열 생성물에 들지 못한다. 산화상태는 주석은 +2가 게르마늄은 +4가 지배적이다. 강산의 염들은 가용성이지만, 용액 중에서 강하게 가수분해된다. 그리고 수화물은 양쪽성이다. VB족도 역시 저생성도 때문에 중요치 않은 핵분열 생성물이며, 2차의 Sb¹²⁵를 제외하고는 모든 안티몬 핵분열 생성물은 단수명이다. 주된 산화태는 +3과 +5이다. 산소 화합물은 셀렌과 텔루륨의 동위원소로 산소를 포함한 산과 음이온의 형태로 4가와 6가의 상태로 주로 존재한다. 이를 원소의 할로겐화물들은 공유액체로 6가의 불화물들은 우라늄의 경우보다 더 휘발성이 강하다. 생성도와 반감기의 측면에서 볼 때 셀렌 핵분열 생성물은 별로 중요하지 않지만, 텔루륨은 주기말이나 냉각된 핵연료 내에서 중요하다.

장수명의 동위원소로는 33일의 Te^{129m}, 105일의 Te^{127m}, 58일의 Te^{126m}등이 있다. 단기간 냉각시킨 연료의 처리에서 일어나는 특별한 장애는 78시간의 Te¹³²의 존재에 의한 것이다. 그 휘발성 자핵종인 2.3시간의 I¹³²는 방사선 방출기체의 처리수단이 없는 용해기 이후의 공정류에 포함되어 버린다.

할로겐의 VIIB족은 브롬과 요오드의 핵분열 생성물을 포함하고 있다 브롬의 모든 핵분열 생성

물은 매우 수명이 짧기 때문에 고체 핵연료의 처리과정에서는 나타나지 않지만, 어떤 조건에서는 휘발도로 인하여 액체연료로서 기체 생성물과 함께 브롬을 제거할 수 있다. 요오드의 핵분열 생성물에는 안정된 I^{127} , 1.72×10^7 년의 I^{129} 와 8.05일의 I^{135} 그리고 8개의 보다 무겁고, 단수명의 동위 원소들이 있다.

동위원소 I^{131} 은 간혹 고체 연료의 처리 과정 중 감마 장애로 유리되기도 한다. 6.7시간의 I^{135} 는 중성자를 잘 흡수하는 크세논의 모핵종이어서 중요하다. 요오드는 원소와 그 화합물 중 다수가 휘발성이므로 액체 핵연료로부터 증기의 형태로 제거할 수 있다.

브롬과 요오드는 수성계에서 각각 -1에서 +5와 -1에서 +7의 산화 상태로 존재하는 전형적인 비금속이다. 영이나 양의 산화상태의 브롬과 요오드(5가와 7가)는 강력한 산화제이며 두 원소 모두 다수의 휘발성 혹은 기체의 불화물을 형성한다. 처리해야 할 핵연료 내에 방사성 요오드가 존재하면, 이것은 많은 문제가 된다.

방사성 요오드는 연료용해시 부분적으로 휘발되지만, 은이 충전된 반응기를 이용하여 방출기체로부터 제거할 수 있다. 남아있는 요오드는 유기추출 용매와 반응을 일으키는데, 반응성의 불순물이 있거나 방사선 준위가 높을 경우 더욱 그러하다. 따라서 요오드는 용매로 제거하기가 매우 어렵다. 방사성 동위원소로 쓰기 위해 조사된 우라늄의 질산용액으로부터 증류에 의해 I^{131} 을 분리시키는데, 그 의학적 이용은 광범위하다.