

제 8 장 PUREX 공정 II

한국교통대학교 화공생물공학과 박병홍

8.1. 우라늄 최종 제염공정

2D 및 2E탑들로 구성된 최종 우라늄 제염공정에서 앞서 행한 추출 및 역추출 조건과 유사한 상태로 우라늄을 한번 더 제염시킨다. 2D탑에서 우라늄은 HA탑과 동일한 조건하에서 추출되지만 우라늄과 함께 미량 존재하는 플루토늄은 Ferrous Sulfamate를 첨가시켜 3가 상태로 계속 유지시키면서 수용상에 잔존하게 된다.

또한 2D탑에서 행해지는 최종 우라늄 세정은 순수물을 이용하는데 이는 유기상 내의 산도를 낮추어 2E탑에서 역추출되어 나오는 우라늄 수용상 용액의 산도를 낮게 하는데 그 목적이 있다. 만약 2D탑에서 배출되는 유기상 내의 산도가 높을 경우 2EU증발농축 과정에서 농축조의 부식을 야기시켜 최종 생산물인 우라늄 용액이 금속성 불순물로 이를테면 Fe, Cr, Ni 등에 의해 오염되는 결과를 초래할 수 있다. 2E탑은 HC탑의 기능과 마찬가지로 우라늄을 수용상으로 역추출시킨다.

8.2. 플루토늄 재산화

우라늄, 플루토늄 상호분리 공정에서 배출되는 플루토늄 담지 수용상은 플루토늄의 최종 제염을 위해 플루토늄 재산화 단계를 거쳐야 한다. 실제 IBP유체내의 플루토늄들은 비추출성을 갖는 3가의 산화상태로 유지되기 때문에 이의 최종제염을 위해서는 추출성이 좋은 플루토늄 4가로 재산화시켜야 한다.

여기에서 플루토늄의 산화제로는 NaNO_2 의 첨가에 의해 생성되는 아질산이 사용되며 때에 따라서는 NO_2 도 사용된다. 이에 의한 산화 속도는 상온에서 2-3분 이내에 99%이상 산화된다. 플루토늄 재산화는 연속 공정으로 이룩되며 그 산화속도는 온도의 상승에 따라 증가되지만 이 온도상승이 IBP유체 내에 잔존하는 유기상을 열화시켜 플루토늄의 손실을 야기시키거나 플루토늄 최종 제염공정에 악영향을 끼치는 결과를 초래할 수도 있다. IBP유체내의 Fe(II)이온은 본 재산화 공정에 의해 Fe(III)이온으로 된다.

이 밖의 산화제로서 오존, 과산화수소, Potassium Permanganate, Sodium Dichromate 등이 사용될 경우 플루토늄의 과도한 산화에 의해 플루토늄 6가로 되어 플루토늄의 추출성을 나쁘게 하는 단점을 지닌다.

8.3. 플루토늄의 최종 제염공정

플루토늄의 최종 제염공정에서 플루토늄은 2A탑에서 유기상으로 추출되고 2B탑에서 수용상으로 역추출된다. 플루토늄과 함께 주입되는 많은 양의 핵분열 생성물질들은 2A탑에서 배출되는 수용상 폐기물에 남게 된다.

8.3.1. 2A탑

HA탑, IA탑, 2D탑과 마찬가지로 2A탑 또한 두 가지 목적을 부여하는 추출탑으로서 2AF주입단

하부에서는 추출기능을 갖고 그 상부에서는 세정기능을 갖는다.

2A탑의 추출영역(수용상 내 질산농도: 5.5M)에서 플루토늄 4가의 분배 계수는 약 30이고 플루토늄 6가는 5인 반면 플루토늄 3가는 0.05정도이다. 2A탑에서는 TBP에 대한 우라늄의 경쟁추출이 없기 때문에 유기 추출제의 유량을 낮게 해도 충분하다. 2AX(유기용매)의 유량은 수용상 유량보다 4.5배 작은 값이다. 요구되는 유기용매의 유량은 탑의 액-액 접촉효율에 달려있다. 2A탑에서 사용되는 세정용액이 비교적 낮은 산도를 유지할 때(0.5M HNO₃) 세정영역으로부터 2AF용액 주입단까지 플루토늄의 순환량이 증가되고 이러한 현상은 2AF주입단에서의 플루토늄 4가 농도는 주입용액 내 플루토늄 4가 농도와 비교했을 때 약 2배 정도 높은 결과를 나타내고 플루토늄 6가의 경우는 이보다 몇 배 높게 나타난다.

플루토늄 4가의 분배 계수는 수용상 내 질산농도가 4-6M인 경우 큰 변화가 없으나 4M에서 2M로 떨어지면 플루토늄의 분배계수는 25에서 8로 급격히 떨어진다. 2A탑을 통한 핵분열 생성물질의 제염계수는 25-50정도를 나타내며 주제염 대상물질로는 루테늄, 지르코늄, 니오븀이다. 앞에서 언급한 바와 같이 루테늄의 제염은 고질산 농도에서 수월하게 달성되고 지르코늄과 니오븀은 저질산농도에서 쉽게 달성된다는 것을 기억한다면 본 2A탑에서는 2AF의 주입용액 질산 농도가 높기 때문에 루테늄의 제염효과가 상당할 것으로 예측된다.

이를테면 수용상 내의 질산농도를 2M에서 4-6M까지 증가시켰을 때 루테늄의 분배계수는 0.03에서 0.006-0.002로 떨어지고 지르테늄은 0.04에서 0.2-0.7로 증가하며 니오븀의 경우는 0.01에서 0.03-0.1까지 증가한다. 또한 플루토늄의 UX1으로부터 제염은 그 크기에 있어서 분명치는 않지만 2A탑을 통하여 달성될 수 있다.

8.3.2. 2B탑

2B탑에서 플루토늄은 HC탑에서와 마찬가지로 유기상으로부터 수용상으로 역추출된다. 물론 본 탑의 고유기능은 제염이 목적이 아니지만 이 탑을 통과한 용액의 제염계수는 약 2정도 나타난다. 본 탑으로 주입되는 수용상 대 유기상의 유량비 즉 2BX:2BF는 1:2로서 플루토늄 4가의 분배계수를 근간으로 하여 계산된 최소 유량비보다 8배 큰 값이다. 물론 2BX의 유량은 유기상과 수용상의 접촉 효율에 따라 달라지기도 하기 때문에 이보다 낮은 유량비를 운전조건으로 택할 수도 있다.

8.4. 흡착에 의한 추가제염

최종적으로 정제된 우라늄과 플루토늄을 추가 제염시키기 위해서 정제된 우라늄을 실리카겔이 충전된 충전탑을 통과시켜 우라늄에 잔존하는 핵분열 생성물질들을 흡착, 제거시키고 플루토늄의 경우는 Dowex 50 이온교환 수지가 충전된 충전탑을 통과시켜 플루토늄을 Dowex 50 이온교환 수지에 흡착시켜 용리액에 의한 선택적 용리를 시켜 플루토늄 용액에 잔존하는 우라늄과 핵분열 생성물질을 제거시킨다.

8.4.1. 우라늄의 추가제염을 위한 실리카겔 흡착

2EU증발 농축조에서 농축된 우라늄 용액을 적절한 운전조건으로 실리카겔 충전탑을 통과시키면 지르코늄과 니오븀이 분리되고 이때 얻어지는 제염계수는 3-20정도이고 우라늄과 플루토늄, 루테늄, 희토류들은 흡수되지 않고 그냥 통과한다. 여기에 사용되는 실리카겔은 끓는 물과 1M HNO₃, 냉수에 의해 차례대로 세척된 다음 사용되며 이 과정에서 미세 분말형 실리카겔과 용해성

실리카가 제거된다. 실리카겔의 크기는 약 80mesh정도이고 이 경우 처리 속도는 100gal/hr·ft²이다. 우라늄용액 내 질산농도는 0.6-1.0M일 때 최대 제염효과를 얻을 수 있다. 실리카겔에 의한 지르코늄과 니오븀의 흡착능은 비교적 높으며 지르코늄의 경우 실리카겔 1g당 5mg이 흡착된다. 사용된 실리카겔의 재생은 방사능 손상 때문에 그 횟수에 한계가 많으며 재생방법으로는 Oxalic Acid에 의한 재생법이 있다.

즉 85°C에서 충전탑 부피의 1.25배만큼의 0.4M Oxalic Acid 용액으로 실리카겔 충전탑을 5번 세척하면 99%이상 방사능이 제거된다.

8.4.2. 플루토늄 추가제염을 위한 이온교환

선택적 용리현상을 이용한 Dowex 50에 대한 플루토늄 흡착은 우라늄, 핵분열 생성물질, 비방사성 불순물 등으로부터 추가제염을 가능케 할 뿐만 아니라 최종 플루토늄 생산물의 부피를 약 250배만큼 줄여주는 역할도 한다. Dowex 50은 양이온 교환수지(Sulfonated Styrene type)로서 ONAL연구에 의하면 50-100mesh 크기의 수지에 의해 좋은 결과를 얻었으며 0.15M HNO₃분위기 하에서 수지 1ml당 0.18g의 플루토늄을 4가 상태에서 3가 상태로 환원시켜주어야 하는데 이는 4가 상태로 흡착시켰을 때 그 흡착강도가 강하여 용리를 수월하게 시키지 못하는 단점이 있기 때문이다. 용리되는 순서를 보면 흡착강도와 반대 경향을 갖게 되는데 우선 흡착강도가 가장 약한 우라늄이 용리되어 나오고 두 번째가 플루토늄이 용리되며 Zr, Nb, Fe 기타 불순물들은 수지에 흡착된 채로 그냥 존재한다. 이 경우 우라늄에 대해서는 약 100 이상의 분리계수를 얻고 지르코늄에 대해서는 약 30, 니오븀에 대해서는 10-20정도가 성취된다. 그러나 루테튬의 경우는 이보다 훨씬 낮아서 2-3정도의 제염계수만이 얻어지면 철에 대해서는 약 5정도 나타난다. 플루토늄의 흡착은 0.15M 질산농도 분위기에서 최대를 나타내며 질산농도가 0.15-0.5M 사이에서는 그 흡착정도가 그다지 크게 변화하지 않는다.

우라늄의 용리용액으로는 0.5M H₂SO₄, 0.05M Hydroxylamine Sulfate가 사용되며 플루토늄은 5.7M HNO₃와 0.3M Sulfamic acid로 용리한다. 이때 고산도의 용리용액으로 플루토늄을 용리시키면 고산도의 플루토늄 용액이 배출되는데 이를 테면 3.2M HNO₃용액을 사용했을 경우 29g Pu/ℓ 용액이 얻어지고 6M HNO₃용액을 사용했을 경우에는 52g Pu/ℓ 용액이 얻어진다. 용액을 흡착탑에 주입했을 경우 플루토늄은 탑상부에서 흡착되고 우라늄은 탑하부에서 흡착된다. 따라서 용리를 시킬 때는 우라늄의 경우 용리용액을 상부에서 하부로 흐르게 하고 플루토늄의 경우는 그 반대로 한다.

상기한 공정에서 발생하는 플루토늄의 손실은 0.01%이하로 보고되고 있으며 이때 용액의 공탑 속도는 100gal/(hr)(ft₂), 우라늄 용리용액의 공탑속도는 30, 플루토늄 용리용액의 공탑속도는 3으로 하는 것이 좋은 것으로 발표되었다. 플루토늄의 용리가 끝나면 흡착탑의 재생을 요하는데 탑 부피의 2-3배 정도의 0.1M HNO₃, 0.1M NH₂SO₄H용액을 탑하부에서 상부로 흐르게 하여 재생시킨다. 또한 0.5M Oxalic Acid를 사용하여 지르코늄과 니오븀을 제염시키고 최종적으로 0.1M HNO₃용액으로 재사용이 가능하도록 탑의 상태를 조절한다.

8.5. 우라늄, 플루토늄 용액 농축

8.5.1. 우라늄 용액의 농축

우라늄 용액의 농축은 Purex 용매 추출공정의 최적 운전을 위해서 필요하다. 이를테면 중간 공

정에서 배출되는 우라늄 수용액, HCP 및 ICU의 우라늄 농도는 이 증발 농축기들에서 1.6M까지 농축되고 2EU의 우라늄 수용액은 다음공정인 배소공정의 조업조건에 맞추기 위해서 2.0M까지 농축된다.

(1) 용액의 특성과 조성

물리적 특성과 조성

HCP, ICU, 2EU수용액의 농축 전후에 대한 물리적 특성과 화학조성은 다음 표와 같으며 이들의 값은 유량비, 농도, 운전온도 등에 따라 변할 수 있으며 그 변화폭은 30%범주이다.

표 8.1 농축전후 특성

유 체 물질혹은물성	HCP	HPC	ICU	IUC	2EU	2UC
UNH, M	0.199	1.58	0.199	1.64	0.199	1.92
HNO3, M	0.027	0.17	0.05	0.34	0.027	0.26
Fe, g/g·u ^a		<1.4 x 10 ⁻⁴		<1.4 x 10 ⁻⁴		<1.4 x 10 ⁻⁴
Cr, g/g·u ^a		<0.3 x 10 ⁻⁴		<0.3 x 10 ⁻⁴		<0.3 x 10 ⁻⁴
Ni, g/g·u ^a		<0.2 x 10 ⁻⁴		<0.2 x 10 ⁻⁴		<0.2 x 10 ⁻⁴
Na, g/g·u ^a		<0.1 x 10 ⁻⁴		<0.1 x 10 ⁻⁴		<0.1 x 10 ⁻⁴
점도(25°C) cp	1.0	2.3	1.0	2.4	1.0	2.9
비중(25°C)	1.07	1.52	1.06	1.53	1.07	1.62
유량, g/min	35.1	4.41	35.1	4.25	35.1	3.63

TBP 가수분해

TBP는 질산용액의 끓는점에서 천천히 가수분해되어 DBP, MBP, Orthophosphoric acid의 순으로 분해되는데 그 율속단계는 DBP생성과정이 된다. TBP가수분해 생성물들은 우라늄 혹은 플루토늄과 함께 강한 착물을 형성하며 높은 분배계수를 나타낸다. 또한 이렇게 형성된 착물들은 역추출 단계에서 수용상으로 역추출이 되지 않아 과대한 우라늄과 플루토늄의 손실을 초래할 뿐만 아니라 유기용매에서의 손실도 초래한다.

용매추출 공정 운전에서 MBP와 우라늄 혹은 플루토늄의 착물을 수용상 혹은 유기상에 대해서 비교적 그 용해성이 낮아 용매추출탑에 에멀전 현상을 초래하거나 제 3상을 형성한다. 또 우라늄 용액의 배소에 의한 삼산화 우라늄 제조 시 농축된 우라늄 용액 내에 TBP와 DBP가 존재하면 배소반응 과정에서 거품을 형성하며 삼산화 우라늄의 품위에 악영향을 끼치므로 배소공정으로 주입되는 농축된 우라늄 용액 내에는 반드시 5-10ppm 이하의 TBP 및 DBP농도가 유지되어야 한다.

“붉은 기름” 형성

소위 “붉은 기름”으로 불리어지는 제 3상의 형성은 질산 우라늄 수용액과 유기상의 화학반응에 의해 생성되며 이들에 대한 특성이 완전히 파악되지는 않았지만 그 비중이 1.1-1.6정도이며 TBP 가수분해물 혹은 용매 희석제와 질산 우라늄 수용액의 반응에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. “붉은 기름”은 증발농축기에서 질산과 유기용매의 급속 반응에 의해서도 생성되는데 이들의 영향은 다음의 TBP와 질산과의 급속반응 현상에서 설명될 것이다.

TBP와 질산이온의 급속반응

질산우라늄 수용액과 TBP 혼합물은 증발 농축 과정에서 농축기의 온도가 135°C에 도달하면 매우 급속한 반응을 일으키며 때에 따라서는 폭발도 야기된다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 증발농축기의 조업온도는 어떠한 경우라도 135°C를 넘지 않게 설계 및 운전이 되어야 하며 증발 농축기의 상부에는 농축 용액 내 TBP의 농도를 최소화시키기 위해서 우라늄 수용액 증기세척탑을 부착한다.

(2) 우라늄 농축기

Purex 공정에는 3개의 우라늄 농축기가 있는데 2개는 중간공정 농축을 위한 것이고 1개는 최종 우라늄 정제물의 우라늄 용액 농축을 위한 것이다.

HCP농축기와 ICU농축기는 9% UNH용액을 52% UNH용액까지 농축시키고 2EU농축기는 9% UNH용액을 60% UNH용액으로 우라늄용액을 농축시킨다. 각 농축기는 수직관을 갖는 스팀가열 방식의 농축기로서 농축기 상부에 부착된 우라늄 용액 증기세척기는 우라늄수용액 내에 잔존하는 유기상을 스팀에 의해 제거시키는데 그 목적이 있다.

UNH용액은 증기세척기를 경유하여 증발기, 재비기로 흐르게 되며 증발기와 재비기 사이에서 요구되는 우라늄 증발 농축도를 가질 때까지 재순환된 후 우라늄 농도가 요구치에 도달하면 증발기로부터 배출된다. 아래 표(표 8.2)는 Purex 공정의 증발농축기에서 나타난 열부하에 따른 그 처리량을 나타낸 것으로 이에 관계되는 증발농축기의 열전달계수와 증기압력을 동시에 보여주고 있다.

표 8.2 증발농축기 열부하 및 처리량

열 부 하 BTU/(Hr)(ft ²)	처 리 량 Tons-U/day	열전달계수 BTU/(Hr)(ft ²)(°F)	증 기 압 력 P S I G
4000	6	170	12
8000	12	280	14
16000	24	440	18
24000	36	480	27
25400	38	480	30

8.5.2. 플루토늄 용액의 농축

플루토늄 용액의 농축시설은 플루토늄 증기세척기, 제 1플루토늄 농축기, 제 2플루토늄 농축기로 구성되어 있다. 플루토늄 증기세척기의 기능은 플루토늄의 농축에 앞서 용액 내에 잔존하는 유기상을 제거하는데 있으며 이 과정에서 증발 농축도 부분적으로 일어난다. 한편 제 1증발농축기는 플루토늄 최종 제염공정의 역추출탑에서 배출되는 저농도 플루토늄 수용액을 15배 정도 농축시키는 기능을 가지고 있으며 제 2플루토늄 농축기는 제 1플루토늄 농축기에서 배출되는 응축수를 재증발 농축시켜 비말동반 현상에 의해 딸려나가는 응축순애의 플루토늄을 회수하고 때에 따라서는 제 1플루토늄 농축기의 고장 시에 대비한 예비 증발농축기의 기능도 가지고 있다.

8.6. 임계안전성

연쇄 반응에 의해 임계사고의 위험은 재처리시설에서 충분히 고려되어야 할 사항이다. 임계사고는 시설에 기계적 손상을 줄만큼 많은 에너지를 방출할 것으로는 생각되지 않지만 많은 양의 중성자와 γ 선을 방출할 것이므로 조업자에게 치명적일 수 있고 시설 밖으로 방사성 물질을 방출하게 된다. 여기에서 임계사고를 방지할 수 있는 방법을 대략 살펴보기로 한다.

8.6.1. 임계안전성에 영향을 주는 인자들

임계안전성을 검토할 때 주로 고려 되어야 할 사항들은 다음과 같다.

- (1) 핵분열 물질(U^{235} , U^{233} , Pu^{239})
- (2) 핵분열 물질을 희석하면서 핵분열 물질로 변화될 수 있는 물질(U^{238} , Th^{232} , Pu^{240})
- (3) 핵분열 물질의 질량
- (4) 핵분열 물질을 저장하고 있는 용기의 기하학적 형태
- (5) 용기의 부피
- (6) 핵분열 물질의 농도
- (7) 감속제의 성질과 농도
- (8) 핵분열 물질을 둘러싸고 있는 반사체의 성질과 두께
- (9) 질산이온이나 질산가도리움이온과 같은 중성자 취급제의 성질과 농도
- (10) 핵분열 물질, 감속재, 중성자취급제의 균일성 또는 불균일성
- (11) 두 개 이상의 핵분열 물질을 저장하고 있는 영역간의 상호작용

주어진 연료에 대해서는 (1)과 (2)항은 고정되므로 간단하지만 임계제어 방법은 (3), (4), (5) 또는 (6)항을 조절하는 것이다. 이와 같은 단일변수제어방법은 임계점에 도달할 수 없는 최대의 질량, 크기, 부피 및 농도를 결정하여 준다. 그러나 이 방법을 사용한 결과는 장치나 양이 적어 사용에 불편하고 대규모의 처리에는 적합하지 못하므로 이 변수 제어방법을 사용한다. 예를 들면 수용액 중의 플루토늄의 농도를 20g/l로 제한하면 허용될 수 있는 원통용기의 최대직경은 단일변수 제어의 15.7cm에서 25cm로 증가한다. 이와 같이 이변수 제어에서는 각각의 변수의 한계가 동시에 만족되어야 한다. 감속제의 농도를 제한하거나 반사체의 존재에 따라 임계에 도달하지 못하는 크기나 농도의 더욱 증가될 수 있다. 보론, 카드미움 또는 가도리움 같은 중성자 취급제가 존재하면 역시 농도나 크기의 상한이 증가될 수 있다. 반면에 균열성이 결여되면 상한성은 감소한다.

8.6.2. 단일변수 한계

표 8.3 및 8.4에 주어진 한계 값들은 다음에 기술된 조건들이 만족되면 핵분열 물질의 취급에 적용될 수 있다. 일반적으로 한계 값들은 반사체와 인근 핵분열 물질의 영향이 무한량의 물에 의한 반사효과보다 크지 않을 때 적용된다. 그러나 U^{235} 및 Pu^{239} 혼합물에는 적용되지 않는다. 공정 설계에 이용할 때에는 공정변수들의 불확실성과 한계 값들의 초과 가능성에 대하여 여유를 두어야 한다.

균일한 수용액 중의 Pu^{239} 에 관한 표 8.3의 값은 한 개의 플루토늄 이온에 대하여 네 개 이상의 질산이온이 존재할 때 적용될 수 있으며 이 때에는 Pu^{240} 의 농도가 Pu^{241} 의 농도보다 높아야 하고 Pu^{241} 는 농도와 질량을 계산할 때에는 Pu^{239} 로 간주되어야 한다.

균일한 슬러리에 표 8.3을 적용할 때에는 한 개의 플루토늄 이온에 대하여 네 개 이상의 질산 이온이 존재하여야 하고 부피와 크기에 대하여는 수소와 핵분열 물질의 비가 같은 농도의 핵분열 물질이 포함된 수용액에서의 값보다 크지 않아야 한다. 1.0%농축된 우라늄의 한계 값은 표면적 대 부피의 비가 80cm^{-1} 이상인 입자로 구성된 슬러리에 대하여 유효하다. 불균일 슬러리의 실린더 직경과 슬랩의 두께에 관한 표 8.3의 한계 값을 적용하고자 할 때에는 다음 조건이 만족되어야 한다.

- (1) 한 개의 플루토늄 이온에 대하여 네 개의 질산이온이 결합되어 있어야 한다.
- (2) 수소와 핵분열 물질의 비에 대한 균일 슬러리에에서의 제한조건이 어디에서나 충족되어야 한다.
- (3) 원주에 대하여는 농도구배가 축방향으로만 존재하여야 한다.
- (4) 스텝에 대하여는 농도구배가 면과 평행으로만 존재하여야 한다.

질산이온이 없을 때의 Pu^{239} 에 대해서는 위의 조건 (2), (3), (4)가 적용되고 국부적으로 Pu^{239} 의 농도가 0.25g/cm 을 초과하지 않으면 원주직경 15.1cm 와 슬랩두께 5.4cm 를 한계치로 사용할 수 있다.

표 8.3에 주어진 면적밀도는 이 값이 균일하다면 불균일 슬러리에도 적용된다. U^{235} , U^{233} 및 Pu^{239} 의 불균일 슬러리상태의 한계질량의 0.70 , 0.52 및 0.45kg 이고 질산이온이 존재하여야 할 필요는 없다.

금속에 대한 한계 값들의 표 8.4에 표시되어 있다. 농축한계 및 질량한계는 오목한 표면이 없는 단일 물체에 적용된다.

U^{235} 및 U^{233} 의 한계치는 이들 동위원소중의 하나와 U^{234} , U^{236} , 및 U^{238} 의 혼합물에 대하여 적용할 수 있다. 이때에 U^{238} 를 제외한 다른 동위원소들은 U^{235} , U^{238} 로 간주하여 질량을 계산한다. Pu^{239} 의 한계는 Pu^{240} 의 농도가 Pu^{241} 의 농도보다 크면 플루토늄 동위원소들의 혼합물에 대하여 적용된다. 이때에는 모든 동위원소들을 Pu^{239} 로 간주하여 질량을 계산한다. 또한 Pu^{238} 는 1%이상 존재할 수 없다.

표 8.3 핵분열 물질을 함유하는 균일수용액의 단일변수 제어한계

Parameter	Subcritical limit		
	U^{235}	U^{233}	Pu^{239} Provided $\text{N:Pu} \geq 4$
Mass of fissile nuclide, kg	0.76	0.55	0.51
Solution cylinder diameter, cm	13.9	11.5	15.7
Solution slab thickness, cm	4.6	3.0	5.8
Solution volume, liters	5.8	3.5	7.7
Concentration of fissile nuclide, g/liter	11.5	10.8	7.0
Real density of fissile nuclide, g/cm^2	0.40	0.35	0.25
Uranium enrichment, wt % U^{235}	1.00	-	-
Uranium enrichment presence of two nitrates ions per uranium atom, wt % U^{235}	2.07	-	-

표 8.4 금속의 단일변수제어한계

Parameter	Subcritical limit for		
	U ²³⁵	U ²³³	Pu ²³⁹
Mass of fissile nuclide, kg	20.1	6.7	4.9
Cylinder diameter, cm	7.3	4.6	4.4
Slab thickness, cm	1.3	0.54	0.65
Uranium enrichment, wt % U ²³⁵	5.0	-	-