

핵비확산 관점에서 본 CANDU원자로

경희대학교 원자로공학과 4학년

이 상 훈

I. 서 론

핵비확산조약(NPT : Non-Proliferation Treaty)은 핵의 무기화 및 핵무기 생산이 가능한 핵물질의 확산 방지를 위한 국제조약으로서 미국, 옛 소련 등 핵강대국들에 의해 1970년3월5일 발효되었고 우리나라에서는 1975년4월23일 국회의 비준을 거쳐 발효된 조약이다.

이 조약의 목적은 핵무기 확산을 막고 핵군비 축소 및 원자력의 평화적 이용을 촉진시키는 것이고 이를 위해 핵무기를 가지고 있는 나라와 가지고 있지 않은 나라의 역할을 규정하고 있다. 핵비확산조약이라는 이름에서도 알 수 있듯이 IAEA¹⁾뿐만 아니라 전

세계적으로 주목받고 있는게 바로 핵물질이다. 핵물질 중에서도 핵분열성핵종(fissile nuclides)이 중요한데 그 이유는 급격한 핵분열 연쇄반응을 일으킬 수 있는 임계질량(Critical mass)의 핵물질확보가 바로 핵무기개발과 직결된다고 볼 수 있기 때문이다[1].

그런데 이 조약의 문제는 핵무기 생산을 위한 핵물질과 평화적 이용을 위한 핵물질이 구분이 매우 어렵다는데 있다. 따라서 비핵보유국의 입장에서는 핵물질의 평화적으로 사용되고 있음을 입증해야하는 핵투명성이 강조되고 이러한 투명성이 국제적으로 인정을 받지 못할 경우에는 그 나라의

원자력기술의 자생적 발전이 매우 어렵게 된다.

현재, 우리나라에서는 원자력발전의 주종으로 가압경수로(PWR)를 그리고 보완로로 가압중수로(CANDU 원자로)를 채택하고 있다. 이러한 원자로형 중에서 CANDU 원자로를 연구대상으로 삼는 이유는 다음과 같다. 먼저, CANDU 원자로는 PWR보다 많은 양의 핵분열성핵종을 생산한다. 그림-1에서 보듯이 같은 열출력을 가진다고 하면 우라늄 1톤당 발생하는 플루토늄의 양이 CANDU원자로가 PWR에 비해 거의 2배에 이른다.²⁾ 그 이유는 감속재로 쓰이는 중수가 경수에 비해 중성자흡수단면적³⁾이 작아서 중성자의 손실이 적고, 중수의 질량이 경수에 비해 크기 때문에 중성자의 감속이 적게 일어나서 높은 에너지

1) 국제원자력기구 : International Atomic Energy Agency의 약자로 원자력의 무기화를 방지하고 평화적 사용을 위해 1957년 미국의 아이젠하워 대통령의 UN제의로 창립되었다.

2) 이 결과는 ORIGEN2 코드를 이용해서 계산한 것이다.

3) 경수의 중성자흡수단면적(σ_a) = 0.66 barns

중수의 중성자흡수단면적(σ_a) = 0.001 barns

cf. evaluated at 0.0253 eV, 2200m/sec and barns = 10^{-24}cm^2 [10]

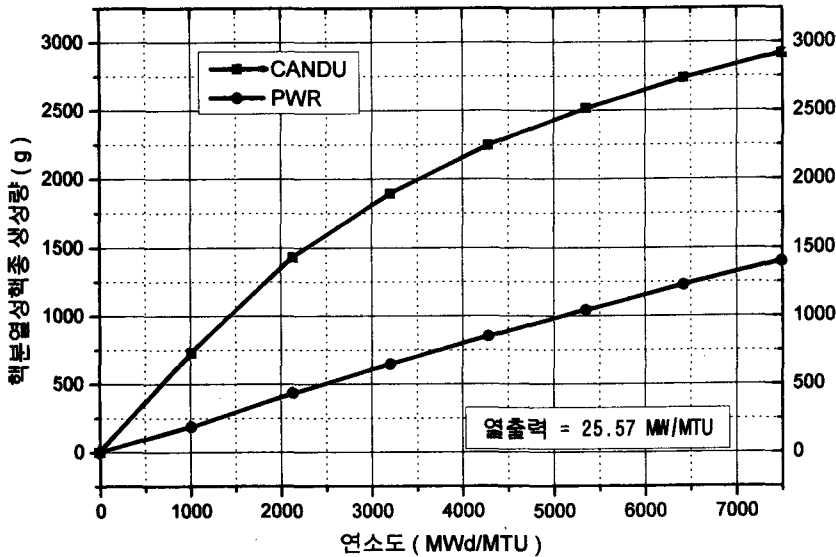


그림 1
CANDU와 PWR의
핵분열성 핵종에
대한 생산량 비교

의 중성자에 의한 U-238의 Pu-239로의 전환(Conversion)이 용이하기 때문이다. 이런 이유로 CANDU원자로는 천연우라늄을 연료로 쓸 수 있고 그래서 약 3.2%의 U-235의 농축이 필요한 PWR과는 달리 농축시설이 필요하지 않다. 또 한가지의 이유는 CANDU원자로가 연속핵연료 장전시스템(On-line continuous fueling system)을 채택하고 있기 때문에 PWR과는 다르게 원자로 정지없이 핵연료 교체가 가능하다는 것 때문이다[2, 3].

위에서 열거한 사항만 보면 CANDU원자로가 핵물질 확보에 유리하다는 것을 보이고 있다.

그러나 현재 가동되고 있는 상업용 CANDU원자로는 위와같은 조건을

적용하기 힘들다. 왜냐하면 상업용 원자로는 설계 자체가 핵비확산조약을 고려하여 만들어지므로 CANDU원자로를 가지고 핵무기를 만들기 위한 핵분열성핵종을 추출하려면 기본적으로 경제성과 안전성을 포기한 운전을 해야하기 때문이다. 즉, CANDU원자로는 원래 설계자체가 경제적인 발전과 안전성을 위주로 한 것이므로 핵분열성핵종생산에는 부적합하며 다른 용도

의 전용은 불가능하다고 할 수 있다.

그러므로 이 연구의 목적은 현재 우리나라가 보유하고 있는 CANDU원자료를 이용해서 임의의 단체 또는 임의의 기관이 임계질량의 핵물질을 가지려고 한다면 그 때 필요한 제반사항을 기술적인 그리고 정량적인 측면에서 검토하여 그런 상황하에서도 CANDU원자로가 핵비확산조약을 위배할 가능성이 적음을 보이려 한다.

II. 본 론

원자로에서 생성되는 액티나이드(actinide)계열의 핵종뿐만 아니라, 핵분열생성물(fission products)이나, 방

사화핵종(activation products)들은 매우 다양하다. 이처럼 다양한 핵물질의 거동에 대한 자료를 얻기 위해서

본 연구에서는 미국 오크리지국립연구소(Oak Ridge National Laboratory)에서 개발한 ORIGEN2 코드를 이용했다.

ORIGEN2 코드는 복잡한 원자료를 간단히 한 점으로 보고 그 부분에서 평균치를 구하는 방법으로 핵분열에 따른 핵분열성핵종 감소와 변화, 그리고 방사성동위원소의 생성 및 붕괴를 계산하는 전산코드인데 주로 핵연료주기에 관련된 계산과 연소도에 따른 핵연료 성분 및 특성 변화를 알아보는데 사용되고 있다[4]. 본 논문에서는 CANDU원자로의 열출력을 57MW/MTU로 가정하여 결과를 얻고, 임계질량을 확보하는데 요구되는 제반사항을 살펴 핵비확산조약 위배 가능성을 살펴 보려한다.

이 글에서 주로 다루어질 핵물질은 핵분열성핵종이다. 핵분열성핵종이란 함은 낮은 에너지의 중성자를 흡수하여 두 조각 혹은, 여러조각으로 나누어지면서 2~3개의 중성자와 질량결손에 의한 에너지를 방출하는 물질을 말한다. 여기서 대표적인 핵분열성핵종의 특징을 알아보자.

① 우라늄(Uranium)

우라늄은 가장 먼저 알려진 핵분열성핵종으로서 자연에 많이 존재하나, 천연우라늄의 대부분은 매우 높은 에너지의 중성자를 흡수해야만 핵분열을 일으킬 수 있는 U-238이다.

그러므로 경수형 원자로와 같이 낮은 에너지의 중성자로 핵분열을 계속 일어나도록 하기 위해서는 전체 우라늄의 0.7%에 불과한 핵분열성핵종인

U-235의 농축(enrichment)이 필요하다. 더욱이 핵무기와 같이 급속한 연쇄반응이 필요한 곳에서는 90% 이상의 중도를 갖는 U-235가 필요하므로 농축시설 및 운영에 막대한 자본이 소요된다[2].

② 플루토늄(Plutonium)

플루토늄은 원자로에서 우라늄의 중성자흡수를 통해 인공적으로 만들어진 물질로서 고속중성자로(FBR)의 연료로 쓰일 수 있으며, 특히 핵분열성핵종인 Pu-239의 농도가 높을 경우에는 핵무기 제조용으로도 쓰일 수 있다. 그런데 플루토늄을 이용하면 사용후 핵연료에서 플루토늄을 추출하는 재처리 과정이 필요한데 이 과정이 핵비확산 조약에서 주로 문제시되는 부분이다.[2, 3]

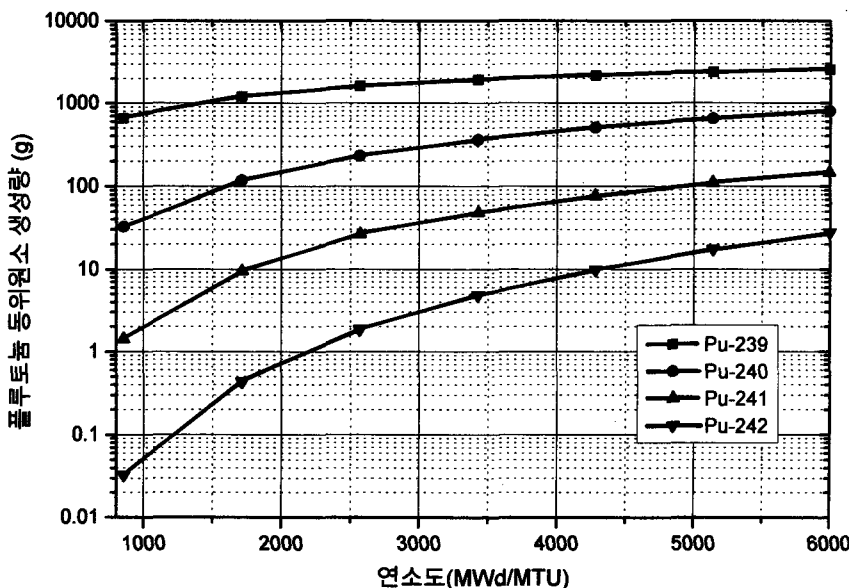


그림 2
연소도에 따른
「플루토늄」
동위원소 거동상황

< 연구 논문 >

표 1 : 플루토늄 동위원소 생성 과정[6, 8]

핵종	생성과정
Pu-238	$^{235}\text{U}(n, r)^{236}\text{U}(n, r)^{237}\text{U} \xrightarrow{6.75\text{d}} ^{237}\text{Np}(n, r)^{238}\text{Np} \xrightarrow{2.1\text{d}} ^{238}\text{Pu}$ (또는, $^{238}\text{U}(n, 2n)^{237}\text{U}$)
Pu-239	$\begin{cases} ^{238}\text{U}(n, r)^{239}\text{U} \xrightarrow{23.5\text{m}} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{2.35\text{d}} ^{239}\text{Pu} \\ ^{238}\text{Pu}(n, r)^{239}\text{Pu} \end{cases}$
Pu-240	$^{239}\text{Pu}(n, r)^{240}\text{Pu}$
Pu-241	$^{240}\text{Pu}(n, r)^{241}\text{Pu}$
Pu-242	$^{241}\text{Pu}(n, r)^{242}\text{Pu}$

이러한 핵분열핵종의 특성을 고려해볼 때, 우리나라와 같은 개발도상국이 핵무기를 만든다면 경제적 측면에서 우리나라를 농축시킬만한 시설을 갖추기에는 무리이므로 농축과정이 필요없는 플루토늄을 이용한 핵물질확보가 더 끌리는 요소가 될 것이다. 따라서 CANDU원자로를 이용해서 플루토늄을 얻는 과정을 살펴보도록 하는 것이 이 연구의 목적에 부합한다.

먼저, 원자로에서 생성되는 플루토늄 동위원소에 대해서 알아보자. 플루토늄 동위원소의 생성과정은 다음 표

와 같다(표 1).

플루토늄 동위원소 중에서 우리가 중요하게 다루어야 할 것에는 Pu-239, Pu-241 등의 핵분열성핵종인데, 이 원소들은 각각 U-238, Pu-240이 중성자를 흡수해서 생성된다(표 1).

핵연료장전 초기에는 핵연료의 대부분을 차지하는 U-238의 중성자흡수에 의해 Pu-239가 생성되어 플루토늄의 대부분을 Pu-239가 차지하게 되지만, 연소(burnup)가 계속되면 Pu-239의 핵분열 및 계속된 중

성자 흡수에 의해서 플루토늄동위원소 중의 핵분열성핵종 농도(이하 "순도"라 칭한다)가 점차 감소하게 된다. 그런 까닭에, 핵연료의 연소도가 생성된 플루토늄의 순도에 영향을 주는 것이다. 그림-2는 연소도에 따른 플루토늄 동위원소들의 거동을 나타낸 것이다. 여기에서, 연소도에 따라 비핵분열성핵종인 Pu-240이 급격히 증가함을 알 수 있다.

계속적인 핵분열 반응(임계반응)에 도달하기 위해선 우리나라를 이용하든지 플루토늄을 이용하든지 간에 각각 그에따라 요구되는 임계질량이 있는데, 그 양은 순도와 반사체의 유무에 따라 많은 변화를 갖는다. 그림-3을 보면 순도가 높거나 반사체를 사용할 때 적은 양의 핵물질로도 임계반응에 도달하는 것을 알 수 있다⁵⁾. 그 이유는 반사체로 사용된 물질이 중성자의 누출을 방지하기 때문이다⁶⁾. 예를 들어, 순도가 100%인 플루토늄의 경우에는 반사체가 없을 때 임계반응에 도달하려면 15kg이 필요한 반면, 베릴륨을 반사체로 썼을 때는 약 4분의 1인 4kg이면 임계반응에 도달할 수 있다. 따라서 가능한 적은 양으로 임계

4) 사용후 핵연료의 재처리에는 습식과 전식의 두 가지 방법이 있는데, 가장 많이 쓰이는 것은 습식 재처리법인 PUREX 법이다. PUREX법은 핵연료를 강산(보통 질산)에 녹여서 여러 가지 화학공정을 거친후 플루토늄이나 우라늄을 분리 농축한다.[2, 6, 7, 8]
 5) 이 그림자료는 참고문헌 [9]에서 인용한 것임.
 6) 베릴륨(Be⁹)을 반사체로 사용한 경우는 베릴륨의 중성자흡수단면적(0.01 barns)이 산란단면적(7.0 barns)에 비해 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 중성자의 누출 및 손실을 효과적으로 막을 수 있는 것이다[10].

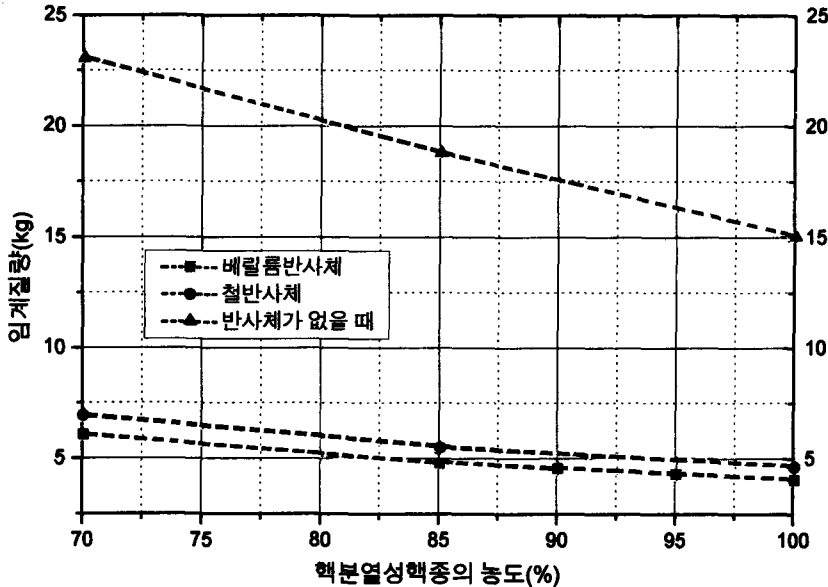


그림 3
핵분열성 핵종의
농도와 반사체
유무에 따른
임계질량

반응에 도달하려면, 베릴륨과 같은 반사체를 사용하는 동시에 순도를 높여야 한다[2, 5]. 핵물질의 순도는 핵무기 제작시에 많은 영향을 미치는 요소 중의 하나이기도 한데, 플루토늄을 사용한 핵무기에서 순도가 높아야 할 이유는 다음과 같다.

Pu-239는 Pu-240에 비해 반감기가 비교적 길기 때문에 순도가 높아질수록 열발생이 줄어든다. 반대로 순도가 낮을 경우에는 핵분열성핵종이 아닌 플루토늄 동위원소의 α -붕괴⁷⁾에 의해 열이 많이 발생하고 보다 많이 생성된 헬륨기체가 부피팽창을 일으

킬 수도 있다. 핵물질에서 발생하는 열이 중요시되는 것은 플루토늄의 경우, 상변태⁸⁾가 122°C에서 일어나기 때문이기도 하지만 생성된 헬륨기체가 뭉쳐서 부피팽창을 일으키지 않고, 격자 내에 균일하게 분포하게 하기 위해서도 핵물질에서의 열은 제거되어야만 한다.

치밀한 설계와 제작이 요구되는 핵무기에서는 이러한 변형은 임계반응도달에 매우 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 그리고 그림-3에서 보듯이 베릴륨은 반사체로서는 우수하지만 실제의 경우 알파입자와 반응하여 중성자

를 방출하는 (a, n)반응이 일어나고, 이 때 생성되는 중성자에 의한 부분적인 핵분열로 인해 핵분열성핵종이 소진될 수도 있다[11].

결과적으로, 순도가 낮아질수록 기술적으로 임계반응에 도달하는 것은 어려워진다는 것이다. 참고문헌 [2]에서는 이와 같은 이유로 인해 플루토늄의 경우, 98% 이상의 순도를 가질 때, 핵무기제조에 쓰일 수 있는 것으로 나타나 있으나, 이것은 임계반응도달 기술에 따라 변화될 수 있는 문제이므로, 본 연구에서는 약간의 여유도를 두어 95%를 핵무기제조 가능 순

7) 예를 들어, 95%의 순도를 갖는 플루토늄일 경우 5×10^{16} 개/cm³-sec의 알파입자가 방출된다.

8) α -phase에서 β -phase로의 전환이 일어나는데, 그와 함께 밀도도 19.82g/cm³에서 17.70g/cm³로 낮아져서 임계부피를 못 이룰 가능성이 있다[11].

도로 보았다. 즉, 이것보다 낮은 순도를 갖는 플루토늄은 임계반응에 도달할 수는 있지만, 확실하게 폭발해야만 하는 전술적인 무기로 사용되기에는 무리가 따른다고 할 수 있다. 따라서 믿을만한 임계반응률을 갖는 핵물질을 가지려면 순도를 높여야 하는데 그러기 위해서 연소도를 낮추어야 한다. 그 이유는 핵물질이 원자로에서 계속적인 중성자의 조사를 받으면, 핵분열성핵종이 핵분열을 일으키거나 비핵분열성핵종으로의 전환이 일어나기 때문이다.

그림-4는 그림-2를 기초로 하여 만들어진 연소도에 따른 플루토늄순도의 변화를 나타낸 것이다. 예를들어, 핵분열성핵종의 농도가 95%인 플루토늄을 얻기 위해서는 열출력이

25.57MW/MTU인 CANDU원자로에서 856.6MWd/MTU까지 연소시키면 된다. 이것은 약 한 달이라는 짧은 기간이다.

임계질량의 핵물질을 얻기 위해서는 원자로에서 중성자 조사를 받은 핵연료(이하 "조사후 핵연료"라 칭한다)를 재처리 해야하는 과정이 존재하는데, 이 때 재처리해야 하는 양은 핵물질의 순도(그림-4)와 그에 따른 임계질량(그림-3)을 이용하여 구할 수가 있다. 그림-5를 보면, 99%의 농도에서 약 128ton(Be 반사체 사용 시에 34ton)의 조사후 핵연료가 필요하나, 순도가 감소할수록 요구되는 조사후 핵연료양은 급속히 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 플루토늄의 임계질량은 순도가 낮아짐에

따라 완만히 증가하지만(그림-3), 중성자를 흡수해서 생기는 핵분열성핵종의 양은 연소도가 높아질수록 급격히 증가하기 때문이다(그림-1).

재처리에서 가장 중요한 것은 재처리시 발생하는 방사능의 양이다. 그림-6은 임계질량의 플루토늄을 얻기 위해 필요한 핵연료의 중성자 조사직후 방사능량을 나타내고 있다. 순도가 높을수록 조사직후 방사능량은 증가함을 보이는데, 그것은 순도가 높을수록 재처리해야할 조사후 핵연료의 양이 많아지기 때문이다. 연구용 시설에서는 이런 고준위 방사성 물질을 취급하기 위해서 핫셀(Hot cell)이라는 두꺼운 납유리로 만들어진 방사능 차폐 시설을 사용해야 한다. 그러므로 재처리를 위해 방사능 수치를 낮추기

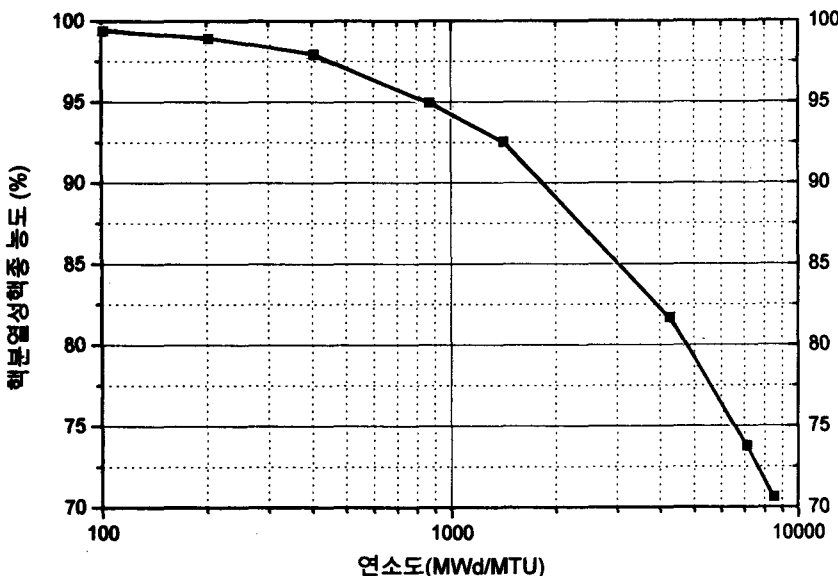


그림 4
연소도에 따른
핵분열성 핵종의
농도

<연구논문>

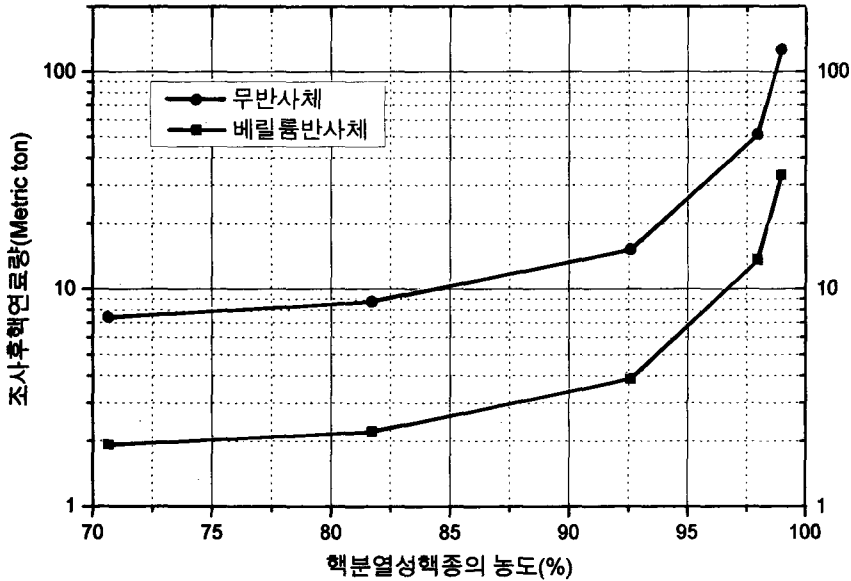


그림 5
핵분열성 핵종의
농도와
재처리량의
상관관계

위해서는 조사후 핵연료를 일정 기간 동안 사용후연료저장시설(spent fuel storage)에 보관하는 것이 요구된다[6, 8].

그림-7은 조사직후 핵연료를 사용 후 연료저장시설에 1년 동안 보관한 후 재처리할 때의 방사능량을 나타낸 그림이다. 핵분열생성물에 의해 발생된 많은 방사능량이 급속히 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 순도에 따른 방사능량은 흥미로운 상관관계를 갖는데, 조사직후의 방사능량과는 달리(그림-6 참조) 순도가 높을수록 발생하는 방사능량이 줄어든 것이다. 그 이유는 연소도가 높을수록 방사능량에 기여하는 방사성핵종중에 반감기가 긴 핵종이 차지하는 비율이 높아지기 때문이다. 예를 들면, 순도가 95%

인 경우 1년 냉각시킨 핵연료와 갖게 낸 핵연료의 방사능비는 대략 8.8×10^{-4} 정도이지만, 80%인 경우 그 비율은 3.6×10^{-3} 으로 순도가 높을 때가 낮을 때에 비해 방사능량의 감소가 크다.

이상의 결과를 표로 요약해 보았다 (표-2).

표-2에서 사용된 ()는 베릴륨 반사체를 사용했을 때 계산된 값을 나타낸다. 여기서 연소도가 높아짐에 따라 순도는 낮아짐을 알 수 있고, 재처리해야 하는 핵물질의 양은 적어지는 것을 알 수 있는데, 이것은 연소도가 낮을수록 단위질량의 핵연료당 생성된 Pu의 순도는 높은 반면 생성량은 적기 때문이다. 재처리해야 하는 핵연료량을 CANDU형 원자로의 연료다

발로 환산한 값은 핵연료 한다발당 포함된 우라늄의 질량을 16.08kg으로 보고 계산한 것이다. 플루토늄에서 발생하는 열은 연소도에 따라 증가함을 보이는데 단위무게당 열발생률은 80% 순도를 가질 때가 95% 순도에 서 보다 2배 정도 더 높다.

이제 표-2를 참조하여 핵비확산 관점에서 CANDU원자로를 현실에 근거하여 논하고자 한다. 이 표를 보면 CANDU원자로를 이용해서 핵비확산조약에서 금지하고 있는 고순도의 핵물질을 얻기 위해서는 낮은 연소도를 유지하도록 핵연료를 자주 교체해야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 우리나라에서 가동되고 있는 CANDU원자로는 순수한 발전용 원자로이므로 앞에서 구한 고순도의 핵물질을

얻기 위한 무리한 운전을 하기가 힘들다.

예를 들어 핵연료를 자주 교체하게 되면 원자로의 고유한 운전특성인 안전한 임계유지가 곤란해진다.

또한 연속되는 핵연료 교체기의 과부하로 인해 원자로의 안전성을 위협하고 게다가 원자로 수명의 단축을 가져올 수도 있으므로 그러한 운전은 허용될 수 없다.

게다가 NPT 가입국으로서 핵사찰을 받아야하는 우리나라에서 임의의 단체가 감시를 피해 400다발 이상의 조사후 핵연료를 취득하기는 쉽지 않을 것이다.

만약 조사후 핵연료를 확보했다고 하더라도 많은 비용과 고도의 기술이 필요한 재처리과정이 있어야 하므로 고방사능(高放射能) 물질의 재처리 시설이 미확보된 우리나라의 현상태에서 임의의 단체가 CANDU원자로를 전용해서 고순도의 핵물질을 생산한다는 것은 불가능하다.

Ⅲ. 결 론

지금까지 조사하고 계산한 자료에 의하면 CANDU원자로를 가지고서 임계질량의 핵분열핵종을 얻는 것이 불가능한 것을 알 수 있다. 즉, 현재 우리나라의 CANDU원자로는 핵비

확산조약을 만족하도록 설계 되어있고 또 그렇게 운전되고 있다고 할 수 있다.

그러나 국내 원전기술의 자립화가 증대되고 핵연료주기기술이 발전됨에 따라 앞으로 우리나라 내에서 취급해야 하는 핵물질이 늘어갈 것이 자명하다.

그렇기 때문에 계속해서 핵비확산 조약을 만족하려면, 우리나라가 독자적인 핵물질 통제를 성실히 그리고 적극적으로 수행하여 국제적으로 통제력을 인정받는 것이 절실히 요구된다고 하겠다.

그래서 우리나라의 핵물질 관리능력을 국제적으로 인정받게 되면 핵비확산조약의 테두리 내에서 원자력의 평화적 이용에 관련된 다양한 연구를 자체적으로 무리없이 수행할 수 있고, 이를 통해 핵연료주기기술을 포함한 우리나라의 원자력관련기술의 진정한 자립을 이룰 수가 있을 것이다.

이렇기 하기 위해서는 얼마전에 설치가 공고된 “원자력통제(原子力統制)센터”의 국제적 위상을 높여서 우리나라의 핵투명성을 국제적으로 인정받아야 할 것이다.

표-2 핵분열성 핵종의 농도에 따른 계산값

순도(%)	99	98	95	80
비교대상				
임계질량(kg)	15.3	15.5	16.3	19.7
반사체 없을때 (베릴륨반사체)	(4.05)	(4.10)	(4.25)	(5.0)
연소도(Burnup) (MWd/ MTU)	200	400	856.6	4200
재처리 해야하는 조사후핵연료량(ton)	128.1 (33.9)	52.0 (13.8)	24.9 (6.5)	8.9 (2.2)
임계질량의 플루토늄에 의해 생성되는 열(watts)	30.0 (8.0)	31.4 (8.3)	37.6 (9.8)	89.8 (22.7)
CANDU형의 핵연료다발로 환산했을 때 다발수(개)	7965 (2108)	3235 (856)	1548 (405)	552 (139)
조사직후 재처리시 방사능량(Ci)	1.91×10^{10} (5.06×10^9)	7.97×10^9 (2.11×10^9)	3.85×10^9 (1.01×10^9)	1.37×10^9 (3.47×10^8)
1년간의 냉각후 재처리시 방사능량(Ci)	4.32×10^8 (1.14×10^8)	3.45×10^8 (9.12×10^7)	3.39×10^8 (8.86×10^7)	4.95×10^8 (1.25×10^8)

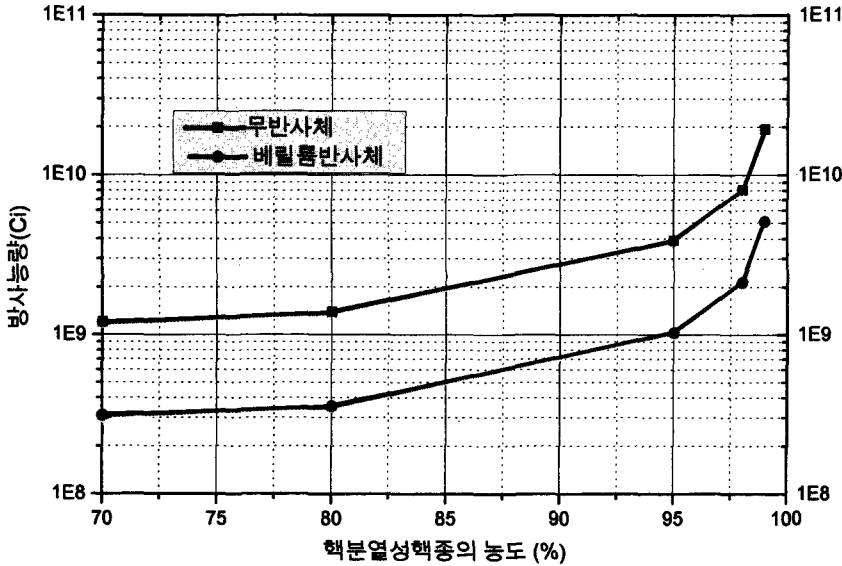


그림 6
중성자 조사
직후의 방사능량

이 논문을 끝마치며

이 논문 작성에 큰 동기가 된 것은 아무래도 최근 한창 논란이 되고 있는 북한의 핵보유 의혹이었다.

우리가 직접적으로 알고 있는 사실은 하나도 없고, 위성탄에서 흘러나오는 갖가지 신빙성이 없는 불확실한 정보들만 무성한 점이 더욱이 못마땅하기도 했다.

이러한 상황에서, 이번 연구에서 계산된 자료를 참조하여 보다 냉정하고 학술적으로 북한의 핵문제에 접근할 수 있다는 것이 이 논문이 가지는 또

하나의 의의가 될 수 있을 것으므로 생각한다.

예를 들어, 북한이 IAEA에 제출한 원자로 운영기록을 분석하면 북한이 재처리(再處理)하여 얻은 플루토늄이 고순도인지 아니면 저순도인지 알 수 있을 것이다(그림-2 또는 그림-4 참조).

또한 북한이 추출(抽出)한 플루토늄의 순도와 이번 계산에서 얻은 자료를 비교 분석하면 그들의 대외적인 신뢰도를 확인할 수 있는 기회도 될 수 있을 것이다.

그리고 방사성 동위원소는 정성적이나 정량적으로 측정하기가 용이한데, 이 논문에서 예측한 재처리시 발생할 방사능량(그림-7 참조)을 이용하여 사찰을 통해 얻은 방사능 수치와

비교 분석하면 대략적으로나마 어느 정도의 재처리가 이루어졌고, 얼마나 많은 폐기물이 발생하였는지도 알 수 있을 것이다. 물론 이 논문에서 사용된 CANDU원자로와 북한이 보유하고 있는 원자로는 그 형태(形態)가 달라 결과를 직접 비교할 수는 없지만, 적어도 대략적인 비교값을 설정해줄 수는 있을 것이다.

끝으로, ORIGEN2를 사용할 수 있도록 도와주신 경희대학교 원자로 재료실 대학원생 여러분께 고마움을 표하고자 하며 이 논문을 검토하고 조언을 아끼지 않은 박광현 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- | | | |
|--|---|--|
| <p>① “핵무기의 비확산에 관한 조약” 과학기술원 안전조치(safeguard)실무 편람 1989.1., 과학기술원 안전심사실</p> <p>② Frank J. Rann, John E. Kenton, Achilles G. Adamantiaides, Chain Broun “A Guide to Nuclear Power Technology” 1984, John Wiley & Sons, Inc.</p> <p>③ John R. Lamarsh “Introduction to Nuclear Engineering” 2nd Edition 1983, addison - Wesley</p> <p>④ Oak Ridge National Lab. “ORIGEN 2.1 Isotope Generation and Depletion Code” 1991. RSIC(Radiation Shield-</p> | <p>ing Information Center)</p> <p>⑤ Samuel Glasstone & Philip J. Dolan “The Effects of Nuclear Weapons” 3rd Edition 1979, Castle House Publications</p> <p>⑥ Manson Benedict, Thomas H. Pigford, and Hans Wolfgang Levi “Nuclear Chemical Engineering” 2nd Edition 1981, McGraw - Hill</p> <p>⑦ Joseph J. Katz, Glenn T. Seaborg, and Lester R. Morss (편) “The Chemistry of The Actinide Element” 2nd Edition</p> | <p>Volume II 1986, Chapman and Hall,</p> <p>⑧ “핵화학공학” 1989, 한국원자력학회</p> <p>⑨ G. Hildenbrand “Nuclear Energy, Nuclear Exports and the Nonproliferation of Nuclear Weapons” 1977, AIF Conference on International Commerce and Safeguards for Civil Nuclear Power</p> <p>⑩ James J. Duderstadt “Nuclear Reactor Analysis” 1976, John Wiley & Sons, Inc.</p> <p>⑪ Benjamin M. Ma “Nuclear Reactor Material and Applications” 1983, Van Nostrand Reinhold Company Inc.</p> |
|--|---|--|

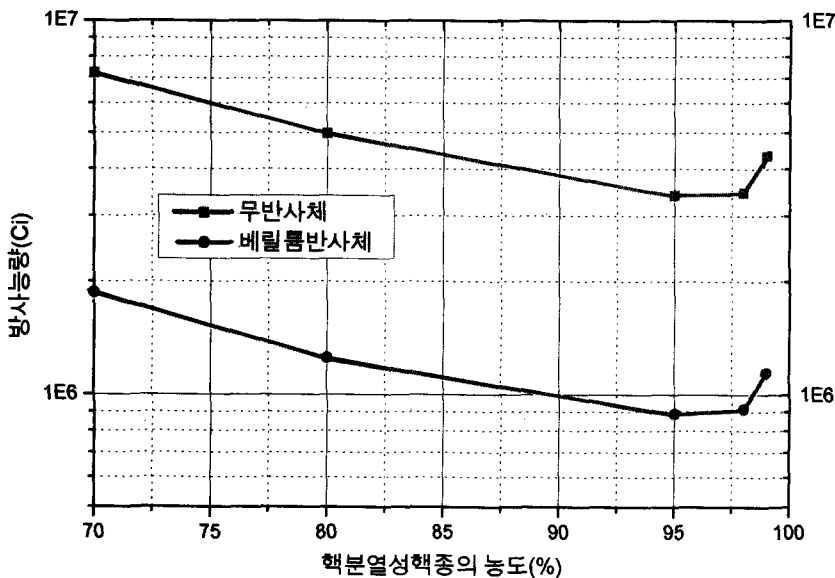


그림 7
1년간 냉각수
반사능량