

## 토륨 핵연료 주기 기술동향

노태완

홍익대학교 기초과학과

(2016년 4월 21일 접수, 2016년 6월 2일 수정, 2016년 6월 16일 채택)

### Technical Review on Thorium Breeding Cycle

Taewan Noh

Department of Basic Science, Hongik University, Seoul, Korea

(Received 21 April 2016, Revised 2 June 2016, Accepted 16 June 2016)

#### 요 약

토륨은 우라늄에 비해 풍부한 자원으로서의 가치와 핵분열 물질인 U233을 증식하고, 장주기 액티나이드 핵종 발생이 감소하는 특성으로 인해 원자력 연구개발 초기부터 우라늄 주기와 함께 주요 연구대상이었다. 하지만 토륨은 자체적으로 핵분열이 불가능하므로 에너지원으로 활용하기 위해서는 별도의 외부 중성자원이 필요하고, 토륨 주기 과정에서 고방사성 물질이 발생하며, 효과적인 증식을 위해서는 긴 시간의 중성자 조사가 필요했다. 이에 따른 기술적 어려움과 연구개발 필요성의 감소로 1970년대 중반 이후 토륨 관련 연구가 거의 중단되었다. 하지만 1990-2000년대에 에너지 자원에 대한 사회적 시각 변화와 외부 중성자 공급원으로 이용하는 가속기 구동 원자로의 출현으로 과거 토륨주기의 단점으로 지목되었던 성질들이 오히려 핵확산 저항성과 감시성을 높이고, 가속기 구동 원자로의 미임계 운전 특성에 의한 원자력 안전성 증대라는 장점으로 부각되어 토륨에 관한 연구가 세계적으로 활발히 추진되고 있다. 본 연구에서는 토륨주기의 장단점을 우라늄주기와 비교, 분석하고 가속기 구동형 원자로를 이용한 토륨 연구의 기술 현황을 분석한다.

**주요어 :** 핵연료주기, 토륨주기, 우라늄주기, 가속기 구동 원자로, 미임계원자로

**Abstract -** The production of nuclear energy from thorium which is non-fissile material was a main issue until the middle of 1970's, because of the thorium's abundance as energy resources, its capability of breeding fissile material U233, and the reduction of long-lived actinides. However, to use thorium as nuclear fuel, some obstacles such as the necessities of external neutron source and long-term neutron irradiation for effective breeding, and the production of high radioactive isotopes in the course of thorium breeding cycle should be overcome. The difficulties to resolve these cons of thorium cycle became the reason of interruption of the related researches in the middle of 1970's. But in the 21st century, the change of societal perspective regarding nuclear energy and the appearance of accelerator-driven nuclear reactor shift those cons into pros and rehabilitate the study of thorium. The high activity of thorium cycle turned out to be a good option as higher resistance and easier detectibility of nuclear proliferation and the employment of subcritical accelerator-driven reactor as external neutron sources is considered to enhance the nuclear safety. In this study we compare the thorium cycle with the currently-used uranium cycle and analyze the technical status and perspective of thorium researches which use accelerator-driven reactors.

**Key words :** Nuclear Fuel, Thorium Cycle, Uranium Cycle, Accelerator-driven Reactor, Subcritical Reactor

---

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Basic Science, Hongik University,  
Wowsan-Ro 94, Mapo-Gu, Seoul, Korea  
Tel : +82-2-320-1628 E-mail : twnoh@hongik.ac.kr

### 1. 서론

자연계에 존재하는 핵분열 물질은 U235이며 현재의 상용 원자로는 핵분열이 가능한 U235를 주요 핵연료로 사용하고 있다. 하지만 U235는 전체 우라늄의 0.7 w/o에 지나지 않으므로 자원의 한계성을 갖는다. 자연계에는 직접 핵분열을 일으키지는 않으나, 중성자를 흡수하여 여러 단계의 방사붕괴를 거쳐 핵분열 물질을 생산할 수 있는 물질이 있는데 이를 핵연료 물질이라 한다. 핵연료 물질에서 핵분열 물질을 생성하는 과정을 증식이라 하는데, 증식이 가능한 핵연료주기에는 U238에서 핵분열 물질인 Pu239를 생산하는 우라늄주기(uranium cycle)와 Th232에서 핵분열 물질인 U233을 생산하는 토륨주기(thorium cycle)가 있다. 우라늄주기는 주로 고속증식로의 핵연료로 사용하기 위해 지금까지도 지속적으로 연구되고 있으며, 토륨 주기는 원자력 연구개발 초기단계인 1950년대부터 1970년대 이전까지는 우라늄 주기와 더불어 여러 국가에서 납냉각로, 용융염로, 중수로, 고온가스로 등의 핵연료 물질로 활발히 연구되었다. 하지만 자연계에서 유일한 동위원소로 존재하는 Th232가 핵분열 물질이 아니라는 기본적인 한계성 때문에 토륨 관련 연구는 대부분 중단되었고 1990-2000년대에 접어들며 가

속기와 결합된 미임계로(subcritical reactor)의 형태로 다시 연구가 시작되었다. 본 연구에서는 우라늄 주기와 비교하여 토륨주기의 장단점을 주로 노물리 관점에서 분석한다. 이를 바탕으로 과거 토륨 연구가 활발히 진행되다가 중단되었고, 근래에 다시 연구가 시작된 기술적, 사회적 배경을 요약하여 설명하고 이를 바탕으로 국내 토륨 관련 연구의 방향을 제시하는데 기여하고자 한다.

### 2. 핵연료 증식주기

#### 2.1 우라늄 주기

우라늄 주기는 Figure 1과 같이 핵연료 물질인 U238이 원자로 내부에서 중성자를 흡수하고, 일련의 베타붕괴를 거쳐 인공 핵분열 물질인 Pu239를 생성하는 과정으로, 이는 우라늄에 포함된 U235 핵분열에 의해 증식에 필요한 중성자를 자체적으로 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 농축 또는 천연 우라늄을 사용하는 가압경수로(PWR : Pressurized Water Reactor)나 중수로(HWR : Heavy Water Reactor)의 사용후 핵연료를 재처리하여 Pu239를 생산할 수도 있으나, 이러한 재처리 공정은 국제적으로 엄격히 규제되고 있다. 우라늄과 Pu239를 함께 장전하여 Pu239의 핵분열을 이용하는 동시에 U238의

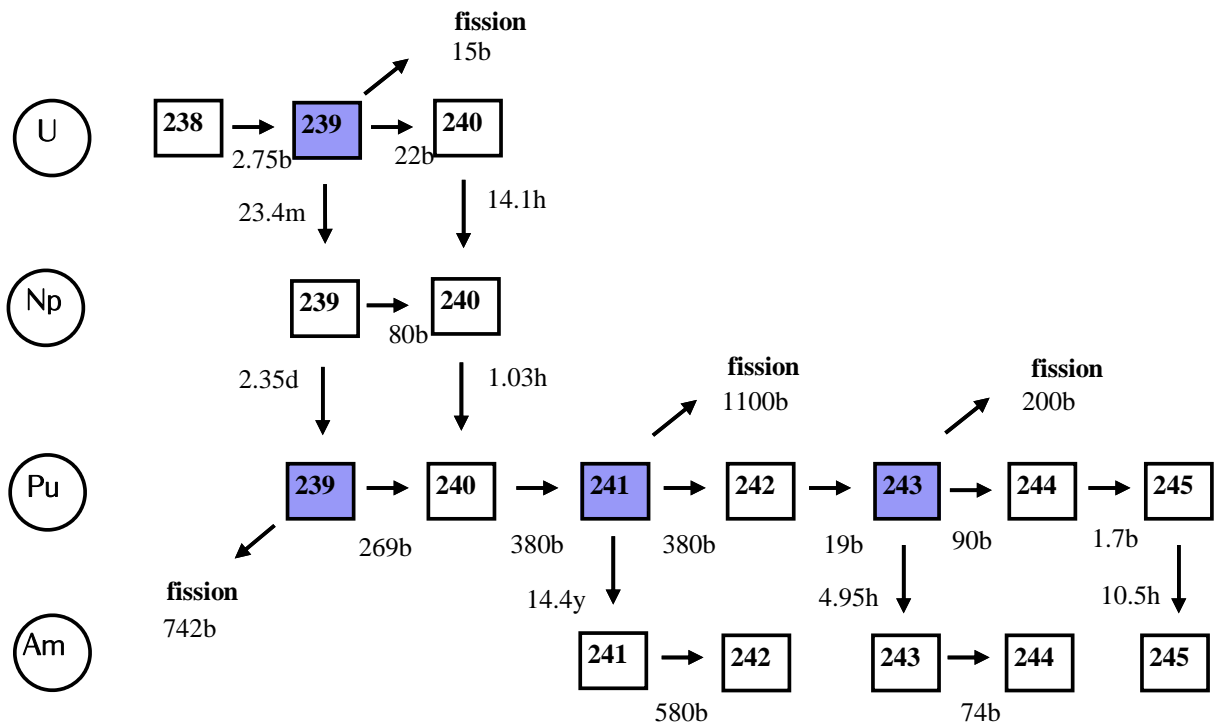


Figure 1. Uranium breeding cycle.

Pu239로의 변환을 유도하는 경수로(LWR : Light Water Reactor)나 고속증식로 (FBR: Fast Breeder Reactor)에 대한 연구가 진행되었지만 아직 상용화되지는 않았다. 우라늄 주기를 이용하는 경우 한정적인 자원인 U235와 사용후 핵연료의 양을 줄일 수 있다는 측면에서는 긍정적이지만 Figure 1에서 보듯이 부가적으로 생성되는 Pu239의 핵무기 전용 가능성, 수반되는 장주기 핵종 발생, 임계운전에서 야기되는 사고 가능성 등에 대한 근본적인 해결책은 되지 못한다.

### 2.2 토륨 주기

핵연료 자원으로서 토륨에 관한 연구는 원자력 초기 개발단계인 1950년대부터 우라늄에 관한 연구와 함께 시작되어 토륨을 핵연료로 사용하기 위한 기본적인 기술이 개발되었다. 하지만 1970년대 중반 이후로는 토륨 핵연료 재처리의 어려움과 뒤에서 설명될 사회적, 정치적

이유로 이에 관한 연구가 거의 중단되었다

토륨 주기는 Figure 2와 같은 일련의 핵반응을 거쳐 Th232로부터 인공 핵분열 물질인 U233을 생성하는 과정이다. Th232와 중성자의 반응은 (n,γ)와 (n, 2n)이 있는데 (n,γ) 반응으로 Th233이 되고 이는 β<sup>-</sup> 붕괴를 거쳐 Pa233으로 변환한다. Pa233이 중성자 흡수반응을 일으키지 않고 다시 β<sup>-</sup> 붕괴를 하면 U233이 생성된다.(Graves [1], Cochran [2], Kazimi [3])

### 2.3 토륨 주기의 특징

#### (1) 자원의 풍부성

토륨은 1828년 Berzelius에 의하여 발견된 이후, 특수 유리 제작, 합금 재료 등 매우 제한적인 용도로 사용되어 왔으며, 희토류 채광의 부산물로 매년 수 백톤 정도만 생산되었다. 1970년대에는 토륨을 핵연료로 사용하는 연

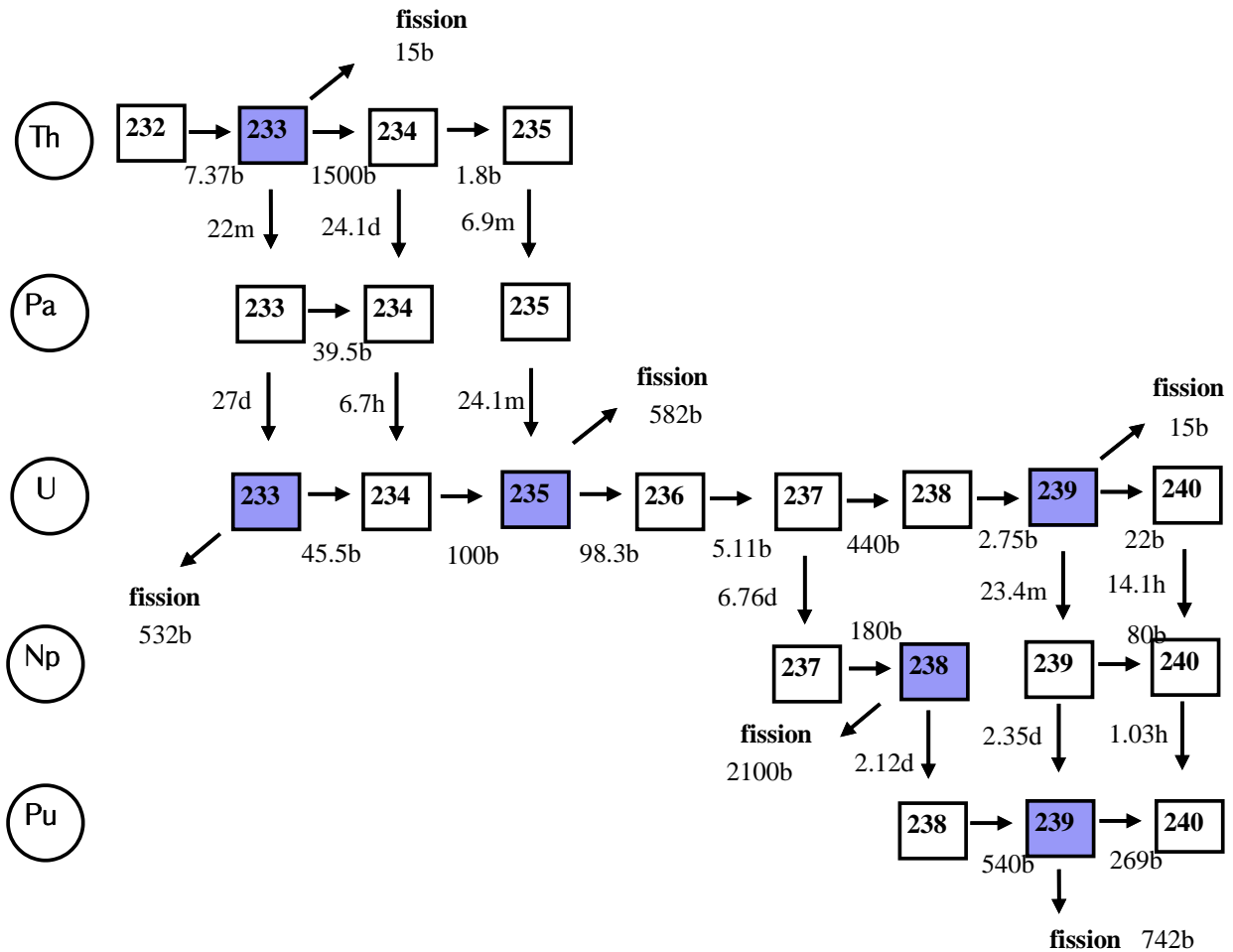


Figure 2. Thorium breeding cycle.

구의 영향으로 연간 천톤 정도의 생산을 보이기도 했으나, 이후 토륨 연구의 중단으로 생산량도 감소하였다. 토륨은 자연계에서 유일한 동위원소인 Th232로 존재하며 반감기는  $1.4 \times 10^{10}$ 년으로 우라늄의 대부분을 차지하는 U238의  $4.5 \times 10^9$ 년에 비하여 약 3배 길고 따라서 매장량도 우라늄에 비해 약 3배 많다. 지각에 존재하는 토륨은 6,000 ppb(parts per billion), 우라늄은 1,800 ppb이다.(Web Elements [4]) OECD/NEA 2011년 자료[5]에 의하면 \$80/kg 이하의 가채 매장량은 우라늄이 370만톤인 반면에 토륨은 220만톤에 불과하다. 우라늄에 비해 토륨이 지각에 더 많이 존재하지만 확인된 가채 매장량은 우라늄에 비해 적는데 이는 우라늄이 핵연료 자원으로 활발히 거래되는 점에 비해 토륨은 자원의 활용도가 낮아 아직 에너지원으로서의 토륨 시장이 형성되지 않았기 때문이다. 향후 토륨이 핵연료로 사용되면 가채 매장량은 급격히 증가할 것으로 판단된다. 조사시기와 조사기관에 따라 차이가 크지만 조사된 토륨의 추정 매장량은 120만톤~280만톤 정도이며 1999년과 2011년에 발표된 국가별 추정량은 Table 1과 같다.(USGS, [6]) 한국의 토륨 매장량은 약 4,000톤으로 보고되었다.(광물자원공사[7])

(2) 외부 중성자원의 필요성

천연 토륨은 우라늄과 달리 단일 동위원소인 Th232로 존재하여 핵분열 물질을 전혀 포함하지 않는다. Figure 3에 의하면 Th232는 전 영역의 중성자 에너지에 대해 U238에 비해 중성자 흡수단면적이 크다. 따라서 Th232는 U238에 비해 저에너지 중성자에 의한 열증식의 가능

성도 크다. 한편 Th232는 1.4MeV 이상에서 핵분열을 일으킬 수는 있지만, 고속로의 경우에도 1MeV 이상의 에너지를 갖는 중성자는 약 10-15%에 지나지 않으므로 실제로 Th232의 핵분열은 중요성을 갖지 않는다. 반면에 U238의 핵분열 단면적은 약 1MeV에서부터 급격히 증가하므로, U238의 고속 핵분열은 고속로 뿐 아니라 열중성자로에서도 중요성을 갖는다. 다시 말하면, Th232는 U238에 비해 흡수단면적이 커서 증식에는 유리하지만 자체 핵분열이 적어 다른 핵분열 물질을 첨가하지 않는 경우 중성자 보유량이 현저하게 작다.(Walter [8])

더욱이 우라늄의 경우에는 U235의 핵분열에 의해 중성자를 얻을 수 있으나 토륨의 경우는 그렇지 않으므로 다른 핵분열 물질을 첨가하여 증식에 필요한 중성자를 별도로 공급해야 한다. 이러한 특징 때문에 토륨을 사용한 과거의 노형도 대부분 U235나 Pu239를 핵분열 물질

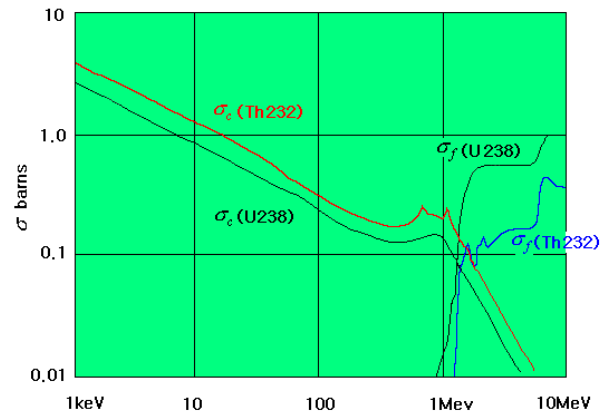


Figure 3. Absorption and fission cross-sections of Th232 and U238.

Table 1. World Thorium Estimated Reserves

Thorium Estimates in tonnes (1999)		Thorium Estimates in tonnes (2011)	
Country	Reserves	Country	Reserves
Australia	300,000	India	963,000
India	290,000	United States	440,000
Norway	170,000	Australia	300,000
United States	160,000	Canada	100,000
Canada	100,000	South Africa	35,000
South Africa	35,000	Brazil	16,000
Brazil	16,000	Malaysia	4,500
Other Countries	95,000	Other Countries	90,000
World Total	1,200,000	World Total	1,913,000

로 하고 그 주변에 토륨을 분포시켜 증식을 유도하는 U235/Th232 또는 Pu239/Th232의 seed/blanket 개념으로 발전하였다.(Ding [9]) 한 예로 Figure 4는 1960년대 독일에서 건조한 pebble-bed 원자로에 사용된 핵연료를

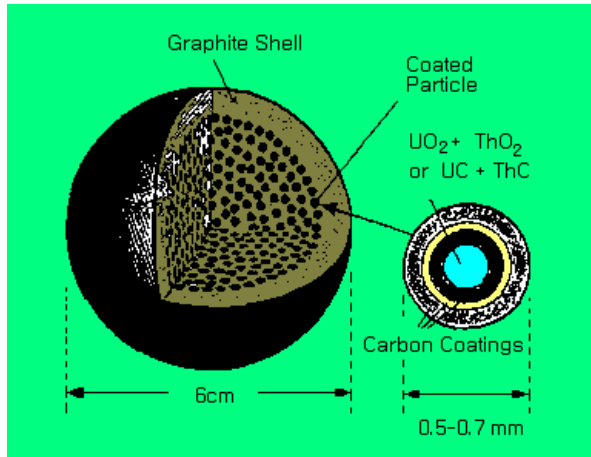


Figure 4. Pebble-Shaped Fuel Element

보이는데 pebble이라 불리는 구형 graphite matrix 내에 pyro-carbon coated powder를 포함한다. 핵연료 물질 안에는 U235와 토륨을 함께 섞어 U235의 핵분열에 의해 토륨으로부터 U233을 증식한다. (구정의 [10])

뒤에서 설명하겠지만 토륨을 연료로 사용하는 가속기 구동 원자로는 입자 가속기를 이용하여 양자와 같은 하전입자를 원자로 내의 중금속 표적재에 충돌시키는 핵파쇄(spallation)를 통해 핵분열 및 증식에 필요한 중성자를 공급한다.

(3) 중간물질의 고방사성

Th232와 중성자의 반응은  $(n, \gamma)$ 와  $(n, 2n)$ 이 있는데,  $(n, 2n)$  반응의 경우 Figure 5와 같은 변환과정을 거쳐 U232를 생산한다. (IAEA [11])

생성된 U232는 Th232의 방사붕괴 계열의 중간물질이 되어 Figure 6과 같은  $[4n-계열]$  붕괴과정을 따른다.

$4n-계열$  붕괴의 시작 핵종인 Th232는 반감기가  $1.4 \times 10^{10}$ 년으로 매우 길어 자연계에서는 고방사성을 띠

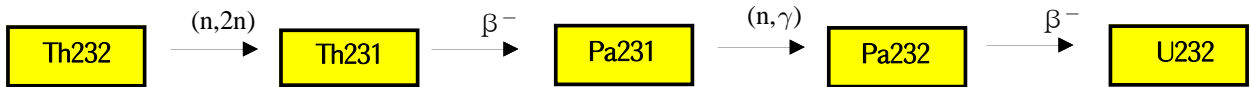


Figure 5. Formation of U232

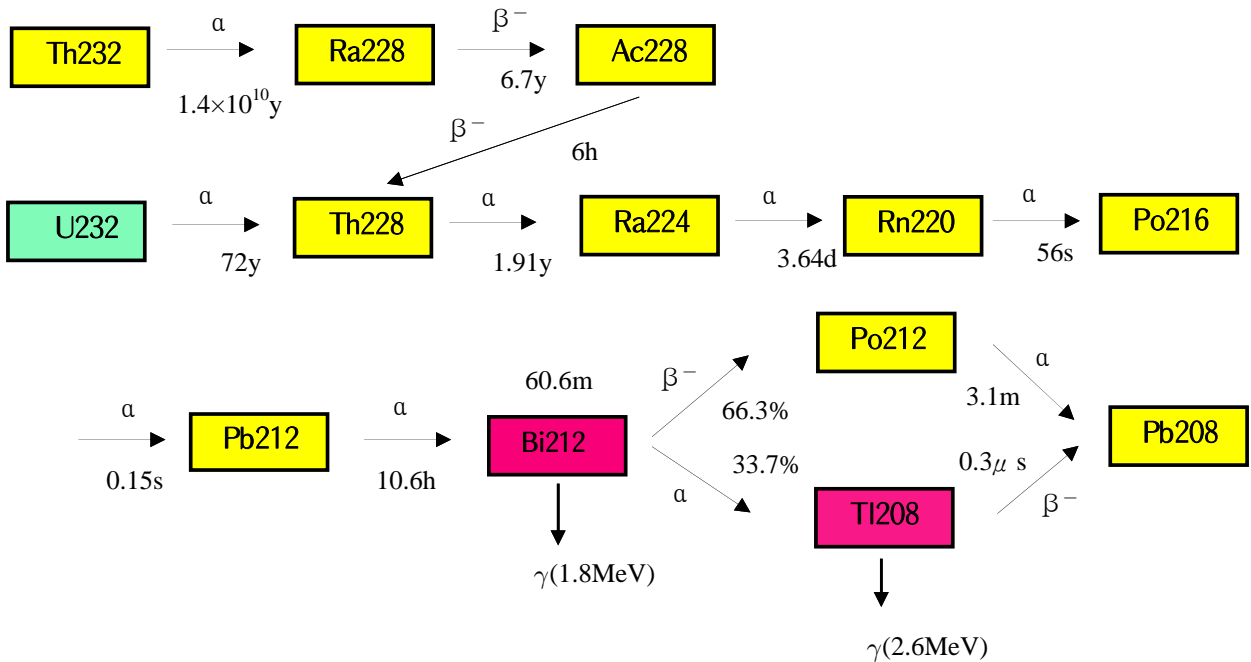


Figure 6. Th232 decay chain.

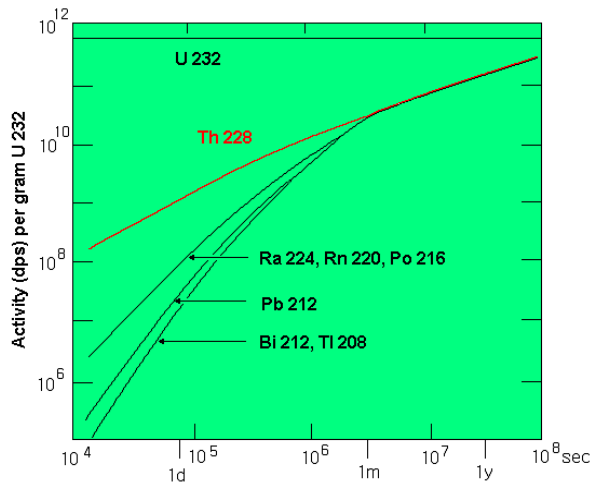


Figure 7. Decay of U232 and build-up of daughter nuclides.

지 않는다. 앞에서 설명한 바와 같이 일단 U232가 생성되면 Bi212나 Tl208과 같은 원소가 생성되는데, Bi212는 1.8MeV, Tl208은 2.6MeV의 매우 강한  $\gamma$ -선을 방출하는 핵종이다. Figure 7은 U232 1g이 붕괴하여 딸핵종이 방출하는 방사능을 보여준다.

따라서 사용후 토륨 핵연료의 습식 재처리(THOREX)나 핵연료 가공과정에서 강한 독성이 수반되므로 차폐에 의한 원격조정이 필수적이다. 이러한 단점이 토륨 주기가 실제로 상용화되는데 가장 큰 걸림돌이 되었다. 하지만 이러한 단점은 재처리를 금지하고 핵사찰을 중시하는 현재 상황에서는 핵확산 저항성이 증가하며, 강한 독성에 의한 감지 용이성 등으로 오히려 장점화 되는 경향이 있다.(Greneche [12])

(4) 양호한 핵 특성

토륨에 의해 증식되는 핵분열 물질인 U233은 매우 훌륭한 핵특성을 갖는다. Figure 8은 U233의 1KeV까지의 핵분열 단면적을, Figure 9는 그 이상의 에너지에 대한 U233, U235, Pu239의 핵분열 단면적을 보인다. 전체적으로 U233의 핵분열 단면적이 다른 두 핵종에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. Figure 10은 U233, U235, Pu239의 중성자 흡수 당 중성자 방출수를 나타내는  $\eta$  값을 보여 준다. 고속 중성자 에너지를 제외한 모든 영역에서 U233의  $\eta$  값이 가장 크며 고속로 환경에서는 Pu239의  $\eta$  값이 가장 크다. 따라서 열중성자 영역에서는 토륨증식이, 고속 중성자 영역에서는 우라늄증식이 유리하다. (Lung [13])

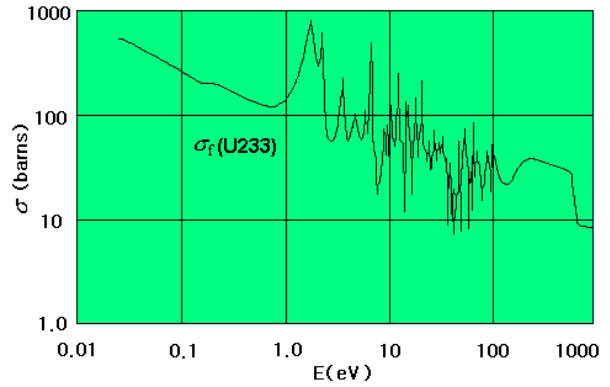


Figure 8. Fission cross-section of U233 (E < 1 KeV)

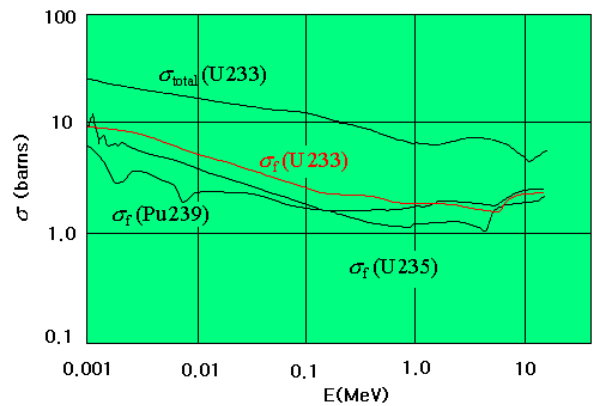


Figure 9. Fission Cross-sections of U233, U235 and Pu239 (E > 1KeV).

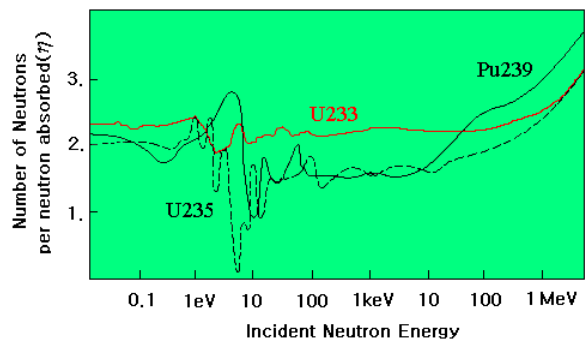


Figure 10.  $\eta$ -value of U233, U235 and Pu239.

(5) 고연소의 필요성

Figure 11은 blanket 영역에 증식물질을 넣고 seed로부터 blanket에 조사되는 중성자량에 대한 에너지 생산량을 표시한다. 천연 토륨의 경우 천연 우라늄 또는 회수 우라늄(depleted uranium)에 비해 초기에는 매우 적은 에너지를 생산한다. 이러한 결과는 U238의 고속 핵분열

효과가 Th232에 비해 크고, 고속 중성자에 대해 Th232의 (n, 2n) 반응이 증가하며, U233의 핵분열 생성물질이 U235의 핵분열 생성물질에 비해 중성자 흡수가 작아지는 점 등, 모든 가능한 핵반응을 고려하여 계산한 결과이다. 토륨에 U235를 소량 첨가한 경우(spiked thorium) 초기 에너지 방출량이 증가한다. 하지만 양자 모두 고연소의

경우에만 우라늄 보다 에너지 발생이 커진다. 즉 토륨 핵연료의 경우 연소도를 증가시켜야만 하는데 다행히 thorium oxide가 uranium oxide에 비해 중성자 조사에 대한 내구성이 크다. 핵연료 용융점의 경우도 thorium oxide가 3,300℃로 uranium oxide의 2,860℃에 비해 높다. 이러한 재료 특성에 의해 토륨에 의한 에너지 생산을 효율적으로 성취하기 위해서는 토륨 핵연료의 조사시간을 늘릴 수 있는 핵설계가 필수적이다.

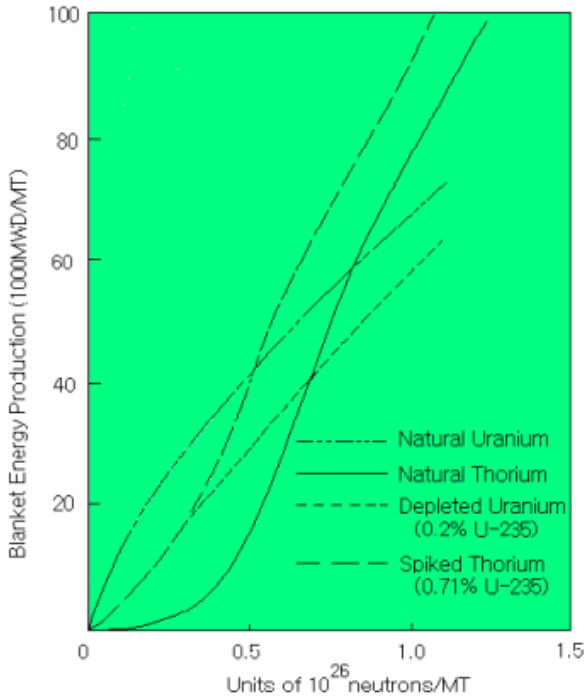


Figure 11. Energy production by neutron irradiation

(6) 장주기 액티나이드 발생 감소

가압경수로 사용후 핵연료는 사용전 핵연료 성분의 95% 이상을 그대로 유지하며, 약 3%의 핵분열 생성물과 0.1-0.3%의 장주기 액티나이드를 추가로 포함하는 것으로 알려져 있다. 핵분열 물질이 분열하여 생기는 핵분열 생성물은 비교적 반감기가 작은 반면에 핵분열 물질이 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키지 않고 방사붕괴 과정에서 발생하는 액티나이드 계열 원소들은 긴 반감기로 인해 폐기물 처분에 중요한 장애가 되고 있다. 장주기 액티나이드로 분류되는 원소를 Table 2에 정리하였다.(Hejzlar [14])

현재 미국이나 한국의 폐기물 정책에 의하면 사용후 핵연료는 핵분열 생성물과 장주기 액티나이드를 구별하지 않고 함께 지하 처분하지만, 액티나이드를 따로 분류하여 고속로, 핵융합로, 또는 가속기를 이용하여 반감기가 짧은 타 핵종으로 변환시키는 연구가 진행되고 있다.

Table 2. Long-lived actinides and their half-lives

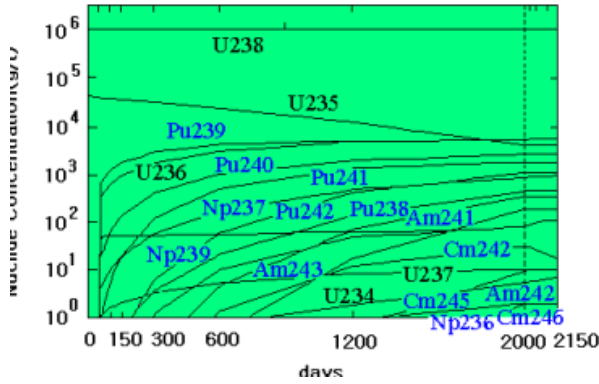
Isotopes	<sup>91</sup> Pa <sup>231</sup>	<sup>93</sup> Np <sup>237</sup>	<sup>94</sup> Pu <sup>239</sup>	<sup>94</sup> Pu <sup>240</sup>	<sup>95</sup> Am <sup>241</sup>	<sup>95</sup> Am <sup>243</sup>	<sup>96</sup> Cm <sup>245</sup>
t <sub>1/2</sub> (year)	3.2×10 <sup>4</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>	24,000	6,600	458	7,900	9,000

Table 3. Relative production of minor actinides in diverse cycles

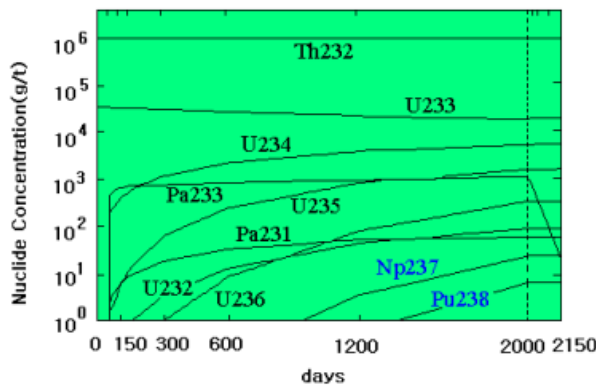
Actinides	Burnup (GWD/t)	Fuel Types			
		U235+U238* (g/t of HM)	U235+Th232 (% of *)	U233+U238 (% of *)	U233+Th232 (% of *)
<sup>93</sup> Np <sup>237</sup>	30	0.036	92	20	1
	60	0.090	107	13	3
<sup>95</sup> Am (241 to 243)	30	0.016	0.04	106	6.3×10 <sup>-5</sup>
	60	0.047	0.28	117	1.8×10 <sup>-3</sup>
<sup>96</sup> Cm (243 to 246)	30	0.36	0.01	111	1.7×10 <sup>-5</sup>
	60	0.022	0.14	132	6.4×10 <sup>-4</sup>

**Table 4.** Uranium produced by 3 year neutron irradiation on pure thorium.

Uranium	U233	U234	U235	U236	U238
Fraction(%)	43.7	30	4	22.1	0.068



**Figure 12.** Nuclides production by U235/U238



**Figure 13.** Nuclides production by U233/Th232

토륨은 우라늄에 비해 원자번호가 2 적으므로, 토륨주기는 우라늄주기에 비해 액티나이드 생성이 자연적으로 감소한다. 동일한 액티나이드 핵종으로 변환하기 위해 토륨은 추가적으로 2회의 중성자 흡수가 더 필요하기 때문이다. 물론 플루토늄은 더 많은 액티나이드를 생산한다. Table 3은 1300MWe PWR에 대해 우라늄과 토륨의 핵연료에 대한 액티나이드 생성을 계산한 결과이다. 연소도가 증가함에 따라 액티나이드 생성도 증가하는 것을 볼 수 있고, 핵연료 물질의 원자번호가 작을수록 액티나이드 생성이 현저히 감소하여 U233/Th232의 경우 가장 작은 값을 보인다. 이러한 특성은 U233/Th232 핵연료 주기의 장점 중 하나이다.

Figure 12, 13은 각각 U235/U238 핵연료와 U233/Th232 핵연료의 중원소(heavy nuclide) 변화를 중성자

조사시간 2000일, 냉각기간 150일에 대하여 계산한 결과이다. 이 역시 토륨 핵연료가 액티나이드의 생성을 감소시킴을 보인다. 이 계산을 위하여 Figure 1과 Figure 2의 우라늄과 토륨 주기에 관련된 모든 핵반응 사슬을 프로그램화하여 수행하였는데 이에 관한 자세한 설명은 참고 문헌(노태완 [15])으로 돌린다.

**(7) 핵확산 저항성**

Th232로 증식될 수 있는 U233은 매우 훌륭한 핵분열 물질이다. 특히 자발 핵분열 효과가 Pu239에 비하여 작아 핵무기 제조에도 적합하다. 순수한 토륨에 대하여  $10^{14}$  중성자속으로 3년간 조사한 경우에 생성되는 우라늄의 동위원소별 조성을 Table 4에 수록하였다.

토륨 증식주기에서 주된 핵분열 물질은 U233이다. 즉 핵무기 제조 수준의 U233을 추출하기 위해서는 화학적 분리 뿐 아니라 고도의 동위원소 분리가 요구된다. 플루토늄 동위원소도 생성되지만 생성과 동시에 소각되어 초기 토륨 양에 대해 Pu238(0.0197%), Pu239(0.0103%), Pu240(0.0069%), Pu242(0.0088%)와 같이 미량 생산된다. 우라늄 혼합물의 핵분열 단면적과 흡수 단면적은 핵분열 중성자 스펙트럼에 대해  $f=2.0b, c=0.74b$  으로 순수 U235의  $f=2.6b, c=0.73b$  과 비슷한 값을 갖는다. 하지만 이러한 혼합물의 특성은 초기에 소량의 U238 ( $f=\text{negligible}, c=1.14b$ )을 첨가함으로써 쉽게 희석시킬 수 있다. U238의 중성자 흡수단면적은 토륨의 1/3에 지나지 않으므로, 초기에 첨가된 U238은 핵연료 전 주기에 걸쳐 살아남게 되고, 우라늄의 화학적 분리 공정도 통과한다. 이러한 혼합물을 이용했을 때의 임계질량은 핵무기 제조가 가능한 실제적인 범위를 훨씬 벗어난다. 설사 U238을 첨가하지 않더라도 앞에서 언급한 바와 같이 사용후 토륨 핵연료에서 발생하는 고준위 방사선과 상당량의 붕괴열로 핵무기 제조 공정에 막대한 어려움을 초래한다.

**3. 과거 토륨 연구**

1950년대에서 1970년대까지(일부 국가는 1980년대) 토륨 증식에 관한 연구는 U235나 Pu239를 시발물질



(seed material)로 하고 Th232를 주변물질(blanket material)로 하여 핵분열 및 증식을 유도하는 방향으로 활발히 진행되었다.(IThEO[16], Alexander [17]) 토륨을 핵연료로 사용하는 원자로는 주로 LWBR(Light Water Breeder Reactor), HTGR(High Temperature Gas-cooled Reactor), MSBR(Molten Salt Breeder Reactor) 등이었다. LWBR은 미국의 고속증식로 연구가 침체된 상황에서 ERDA 주관 하에 기존의 LWR을 이용한 새로운 증식로 개발의 필요성에서 비롯되었다. 이 원자로는 Th/U233 체계를 가지는데, 이는 U238/Pu239 체계와 달리 열중성자 영역에서 증식이 가능하여 고속로에서 요구되는 고난도 기술개발 없이 기존의 LWR을 증식로로 개조하려는 의도에서 시작되었다. 하지만 최선의 증식을 위한 핵연료 재배치, 제어봉에 의한 중성자 흡수를 막기 위한 핵연료 자체 이동에 의한 제어 방식 등의 문제점 등으로 기존 PWR의 전면적인 개조가 불가피하여 경제성이 없는 것으로 판명되었다. 미국 GA(General Atomic)에서 개발한 HTGR의 경우도 Th/U233 체계를 이용하였다. 그러

나 운전 초기에 U235를 장전해야 함은 물론 운전 중에도 임계유지를 위해 정기적으로 U235를 보충해야 한다. MSBR은 ORNL에서 실험적으로 제작하여 2년 반 운전하였는데 이 또한 Th233/U233 핵연료 주기를 사용하므로 LWBR이나 HTGR과 원리가 비슷하다. 차이점은 액체상태의 핵연료가 냉각재의 역할도 수행하여 그라파이트 감속재 사이를 유동한다. 임계유지를 위하여 중성자 흡수효과가 큰 핵분열 생성물을 온라인에서 연속적으로 제거해야 하며 이는 고방사성 핵연료 물질이 원자로 외부로 순회하는 문제점을 가진다. 그 외에도 여러 국가에서 토륨 사용 원자로 및 연료 주기에 관련된 연구가 있었는데 이를 Table 5에 정리하였다. (IAEA [18])

과거 토륨주기에 관한 연구의 결과를 개괄적으로 정리하면 다음과 같다.

- U233의 증식을 위해 다른 핵분열 물질에 의한 중성자 공급 필요.

**Table 5.** Studies on Thorium Fueled Reactors

Country	Reactors
USA	Peach Bottom(1966-1974): HTGR, 30MWe, U-235/Th compacts coated by spherical element in graphite matrix Fort St. Vrain(1976-1989): HTGR, 330MWe ERR(Elk River Reactor,1963-1968): BWR, 24MWe Indian Point(1962): PWR, 285MWe, UO <sub>2</sub> /ThO <sub>2</sub> , Shipping Port(1957-1974): LWBR, U235/Th remodeled from old 100MWe PWR in 1960's. MSRE(Molten Salt Reactor Experiment, -1976): prototype MSBR, 8MWth, ORNL
UK	DRAGON(1966-1973): HTGR, 20MWth, OECD/NEA-EURATOM
Germany	AVR(1967-1988): HTGR. Pebble-Bed, 13MWe THTR(1985-1989): HTGR. Pebble-Bed, 300MWe
Italy	PCUT: prototype reprocessing and fuel fabrication plant
Japan	HTTR(High Temp. Test Rx.): 30MWth, JAERI
China	HTR-10: Pebble-Bed, 10MWth
Brazil	practical research on thorium fuels for PWRs(1979-1988)
India	PURNIMA2: critical facility, uranyl(U233) nitrate solution PURNIMA3: critical facility, U233/Al alloy KAMINI: test reactor, 30KW, U233/Al alloy AHWR(Advanced Heavy Water Reactor): 750MWth, MOX(U/Pu)/ThO <sub>2</sub> as seed/blanket (1) All heavy water moderated. (2) Fuel fabrication and reprocessing techniques for Th/U fuels

- U235 또는 Pu239/Th 핵연료를 사용한 자체운전 가능.
- 충분한 U233 증식.
- Th/U 핵연료의 재처리 는 U/Pu 재처리에 비하여 경제성이 떨어짐.
- 원격 U233 핵연료 가공에 의한 추가 비용.

기술적으로 충분한 타당성을 갖는 토륨 주기에 관한 연구가 1970-80년대에 급격히 감소한 이유는 다음과 같은 경제적, 정치적, 사회적 이유가 크게 작용한 것으로 판단된다.

- 핵확산을 우려한 미국의 재처리 금지
- 아직까지는 우라늄 자원이 가장 저렴한 전력 에너지원임.
- 기 생산된 플루토늄의 소모가 더욱 시급함.
- 전체적인 원자력 사업의 침체로 토륨 주기의 장점이 크게 부각되지 않음

#### 4. 가속기 구동 원자로 (Accelerator-driven Reactor)

1970년대 중반에 대부분 중단되었던 토륨 관련 연구가 1990~2000년대에 다시 가속기 구동 원자로의 형태로 시작되었다. 앞에서 언급한 대로 토륨을 핵연료로 사용하기 위해서는 증식 초기에 외부 중성자원이 필요하고, Th232로부터 증식된 U233을 분리하기 위한 재처리도 필수적이다. 이러한 외부 중성자원으로 과거에는 U235와 같은 핵분열 물질을 Th232와 혼합하는 seed/blanket 개념을 사용하였다면, 가속기 구동 원자로에서는 입자 가속기를 사용하여 중성자를 공급한다. 가속기를 이용하여

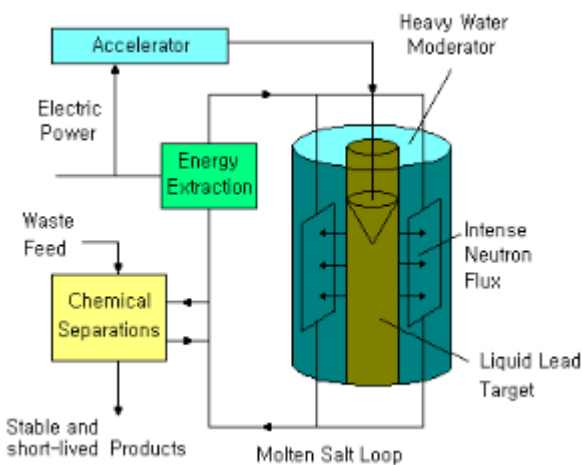


Figure 14. ATW reactor concept

중성자를 발생시키면, 외부 중성자원에 의한 미임계 평형(subcritical equilibrium) 운전이 가능하여 초임계에 의한 출력확산이 근본적으로 불가능하다. 중성자 생성은 고에너지 물리 분야에서 광범위하게 사용되는 칼로리미터(calorimeter)의 원리에 기인한다. 칼로리미터는 중원소와 발광체(scintillator)로 이루어져 있어 가속기에서 입사되는 중입자빔과 표적재와의 충돌로 발생하는 에너지를 측정하는 장치이다. 이러한 장치에 핵분열 물질을 첨가하여 핵분열에 의한 에너지 증폭을 유도하여 가속기에 소요되는 이상의 에너지를 생산한다.

토륨을 연료로 사용하는 가속기 구동형 원자로에는 미국 LANL을 중심으로 연구되고 있는 ABC(Accelerator Based Conversion)와 ATW(Accelerator Treatment of Waste), 유럽의 CERN을 중심으로 연구되고 있는 Energy Amplifier가 있다.

#### 4.1 ABC (ATW)

토륨이나 우라늄을 핵연료로 사용할 수 있고, 에너지 생산용 원자로이지만 높은 중성자속에서 장주기 액티나이드의 핵분열을 이용하여 반감기가 짧은 다른 핵종으로 변환(transmutation)시킬 수 있다는 의미에서 소각로(burner, incinerator)라는 명칭으로도 알려져 있다.

원자로의 형태는 Figure 14-15와 같이 기존의 MSBR과 흡사하다. 중앙에 중성자 생성장치가 있고, 주변은 중수 감속재로 둘러싸인다. 입자 가속기에서 발생된 양자빔이 원자로 중앙의 납표적재에 입사되어 핵파쇄에 의해

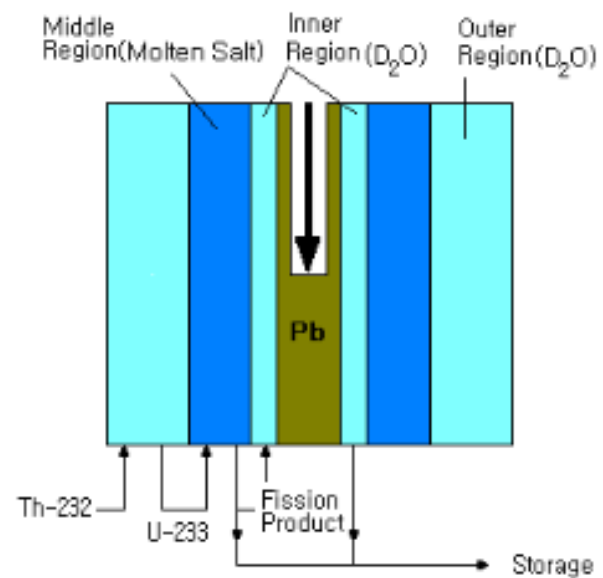


Figure 15. Target-blanket system

여 다량의 중성자를 발생시키며, 발생된 중성자는 주변을 싸고 있는 중수에 의해 감속된다. 핵연료가 용해되어 있는 molten salt(fluoride salt)는 감속재 사이를 통과하면서 핵분열을 일으키고, 발생된 열은 원자로 외부에서 제거되어 일부는 입자 가속기의 동력으로 사용된다. 좀더 자세히 설명하면, Th232가 외부 영역( $\sim 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·sec)으로 유입되어 Pa233으로 변환되고 Pa233은 중성자 흡수반응을 일으키기 전에 원자로 외부로 방출되어 U233으로 변환된다. 변환된 U233은 원자로 중간 영역으로 들어가 핵분열을 일으키고, 다시 원자로 외부에서 화학적으로 분리된 후 액티나이드는 중성자속이 가장 높은 내부 영역( $\sim 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>·sec)으로 주입되어 핵변환을 유도한다. ATW에서의 중성자 증배는 U233의 핵분열 외에도 Pu, Np, Am, Cm 등의 액티나이드의 핵분열에 의해서도 얻어진다.(Bowman [19])

ATW에서 핵연료의 순환이동은 원자로 외부에 위치하는 화학적 분리장치를 통과시키기 위해서도 필요하지만, 액티나이드의 핵분열을 유도하기 위한 중성자속인  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>·sec 조건에서는 증식되는 U233 또는 Pu239와 같은 핵분열 물질의 원자로 내 잔류시간이 수 일에 불과하므로 기존과 같은 원자로 내에 핵연료를 고정시킬 수 없기 때문이다. ATW에서는  $10^{16}$ 의 고중성자속을 발생시키기 위해 1-2Gev, 100mA 이상의 고성능 입자 가속기를 사용해야 한다. 핵연료가 자체적으로 이동하고 가속기 중단 시에도 Pa233의  $\beta^-$  붕괴에 의해 U233이 생산되므로 이에 대한 적절한 제어기술이 보장되어야 한다. 그 외에도 원자로에 인접한 화학분리장치, 방사성 물질의 순환, 상용로의 중성자속인  $10^{13}$ 의 1000배인  $10^{16}$ 의 고중성자속 환경에서 노재료 문제 등이 해결되어야 한다.

## 4.2 Energy Amplifier

CERN의 노벨 물리학상 수상자인 Carlo Rubia를 중심으로 연구되는 노형이다. 가속기에 원자료를 결합하여 가속기에 소요되는 이상의 에너지를 생산한다는 의미에서 Energy Amplifier라 불린다. 노형은 여러 가지가 제안되고 있으나 그 중에서 기존의 PWR에 입자 가속기와 중성자 생성장치를 혼합한 개념도가 Figure 16이다. 토륨 주기의 단점으로 지목되는 증식 초기의 중성자 부족현상은 가속기에 의한 외부 중성자원에 의해 공급되어 Th/U233 변환이 실질적으로 가능하고, 이 원리는 기본적으로 U238/Pu239 변환에도 적용할 수 있다. Energy Amplifier에 사용되는 100Mev-1Gev급의 가속기는 입자물리 분야에서 광범위하게 사용되므로 별도의 기술개

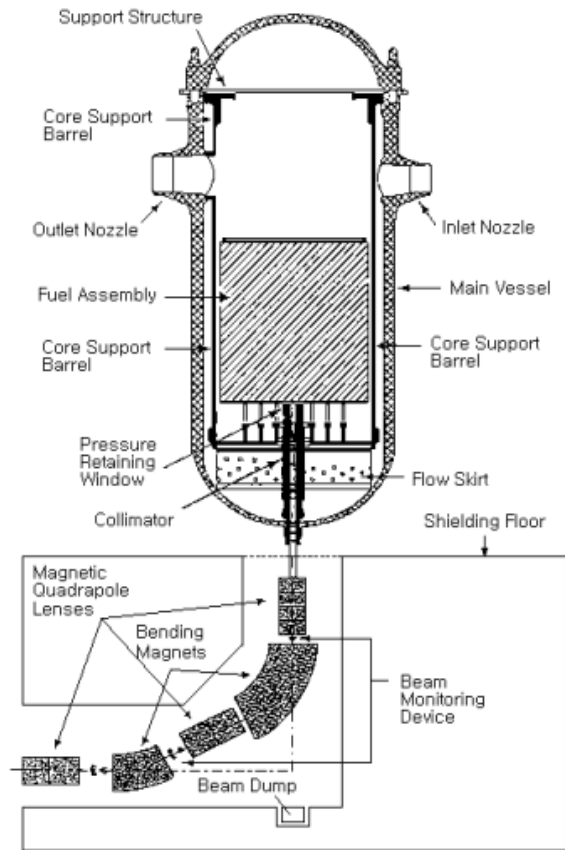


Figure 16. Energy Amplifier

발 없이 사용할 수 있다. 뿐만 아니라 Energy Amplifier의 중성자속 영역이 약  $10^{14}$  neutrons/cm<sup>2</sup>·sec인데 이는 기존 상용로의 중성자속과 거의 일치하므로 원자로 재료 문제도 크게 부각되지 않는다. ATW에 비해 낮은 중성자속에서 운전되므로 액티나이드 소멸작용은 없으나 토륨 주기 특성상 기존 우라늄 사용 노형에 비해 장주기 폐기물의 양은 감소한다.(Rubia [20])

## 4.3 가속기 구동 원자로 관련 국내 연구

국내에서도 1990년대 초부터 당시 세계적인 대용량 양자가속기와 ADS 개발 추세에 맞추어 원자력연구소(KAERI)를 중심으로 연구가 시작되었다. 1995년 미국 LANL의 ADDT(Accelerator Driven Transmutation Technology) 그룹으로부터 용융염 미임계 원자로와 ATW에 관한 기술을 전수받아 ADS 관련 협력연구를 시작하였다. 1997년에 KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex) 즉, 한국형 선형 양자가속기 개발 프로젝트가 시작되었고 토륨 주기를 이용한 미임계 핵변환로인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)의

개념도 설정하였다. 이후 국가경제위기(IMF)를 맞아 원자력분야 예산 축소에 따른 구조조정으로 가속기와 핵변환 과제가 분리 추진되어 2000년대 중반 미임계핵변환 요소기술이 정립되었고(박원석[21], 송태영[22]), 2010년대 초반에 100Mev 양자가속기도 건조되었다.(조용섭 [23])

### 5. 결론 및 논의

1970-80년대 이전 토륨 핵연료에 관한 연구가 자원 활용 측면에서 수행되었다면, 2000년대 이후의 연구는 가속기 구동 원자로 형태로 장주기 핵폐기물 감소, 핵저항성 증가, 미임계 운전에 의한 원자로 안전성 향상 측면에서 수행된다. 하지만 미국에서 연구되는 ATW의 경우 ‘발전로’ 임에도 불구하고 장주기 핵종 처리 능력을 갖는 ‘소각로’의 기능을 홍보하여 민간수용성을 높이고 있으며, 한편으로는 Yucca Mountain 프로젝트(방사성폐기물 영구처분)와 상반된 개념으로 받아들여지게 되어 ATW의 반대 로비가 생길 것을 우려하여 ‘처분과 함께 간다’는 슬로건을 내세우고 있다. ATW나 Energy Amplifier는 여러 가지 특성으로 매력적인 노형임에는 틀림없다. 하지만 기존의 원자력 기술이 이미 안정화 단계에 있고, 현재의 원자력 산업이 기술 취약성으로 인해 위축되는 것이 아닌 만큼 원자로와 입자 가속기라는 색다른 장치의 결합으로 생기는 총비용 및 새로 대두되는 기술적 문제를 심각하게 고려하지 않을 수 없다. 우리나라의 반원자력 감정이 미국이나 유럽과 같이 심각한 정도는 아니고, 이 또한 특수한 노형에 의해 비롯되는 것은 아니다. 따라서 단순히 혁신적인 노형이란 이유로 이러한 원자로에 대한 연구개발을 서두르기보다는 국제적인 기술동향을 유지하는 가운데, 국내 여건을 신중히 고려하여 앞으로의 연구방향을 결정해야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되었음.

### References

[1] Graves, H. Jr., “Nuclear Fuel Management”, John Wiley & Sons, 1979

[2] Cochran, R. G., et al., The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, ANS, 1990  
 [3] Kazimi, M. et al., The Future of Nuclear Fuel Cycle, MIT, 2011  
 [4] Web Elements, <http://www.webelements.com>, accessed 2016  
 [5] OECD/NEA Report, A Preliminary Assessment of Raw Material Inputs, OECD/NEA Paris, NEA/NDC-15 (2011)  
 [6] USGS, Minerals Year Book - Materials and Minerals, 2014  
 [7] 광물자원공사, 광물자원매장량현황, 2013  
 [8] Walter, A.E. et al., Fast Breeder Reactor, Pergamon Press, 1981  
 [9] Ding Ming, et al., Thorium Utilization in a small long-life HTR: Seed-and-Blanket fuel blocks, Nucl. Eng. & Design, 2014  
 [10] 구정의 외, Pebble-bed HTR 기술개발 현황, 원자력 학회지 별책 제18권 제2호, 한국에너지연구소, 1986  
 [11] IAEA-TECDOC - 1450, Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges, IAEA, Vienna, 2005  
 [12] Greneche, D., et al., Rethinking the Thorium Fuel Cycle: An Industrial Point of View, ICAPP 2007. Nice, France, 2007  
 [13] Lung, M., A present Review of the thorium nuclear fuel cycle, Nucl. Sci. and Tech. European Commission, EUR17771, 1997  
 [14] Hejzlar, P., et al., Actinide Burning in a Lead-Bismuth-Cooled Critical Fast Reactors, 7<sup>th</sup> Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Jeju, Korea, 2002  
 [15] 노태완, “CERN이 제안한 미임계 평형 원자로에 대한 소고”, ‘97 한국원자력학회 춘계학술발표논문집, 제1권, 96-101, 조선대학교, 1997  
 [16] IThEO(International Thorium Energy Organization), <http://www.itheo.org>  
 [17] Alexander, L.G., et al., Molten-salt Fast Reactor, Proc. of Breeding Large Fast Reactors, ANL-6792, 1963  
 [18] IAEA-TECDOC - 412, Thorium based Nuclear

- Fuel: Current Status and Perspectives, IAEA, Vienna, 1987
- [19] Bowman, C.D., et. al., Accelerator-driven System for Nuclear Waste Transmutation, Annual Review of Nuclear and Particle Science, vol 48, 1998
- [20] Rubia, C., The Energy Amplifier: a description for the non-specialists, CERN/ET/Internal Notes, 1996
- [21] 박원석 외, 고준위폐기물 처리전환기술개발: 핵종 변환기술개발, KAERI/RR-2117, 2000
- [22] 송태영 외, 장수명핵종 처리기술개발/핵종변환 기반기술개발, KAERI/RR-2434, 2004
- [23] 조용섭 외, 고에너지 가속장치개발, KAERI/RR-2896, 2007