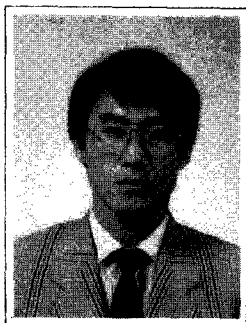


토륨 핵연료 주기와 가속기 구동 원자로 - 기술 동향 분석 -

노태완

홍익대학교 기초과학과 교수



과 거 토륨(thorium)은 우라늄과 같이 핵연료 증식이 가능하며, 우라늄보다 풍부한 자원으로서의 활용을 목적으로 연구의 대상이 되었다가, 70년대에 들어와 이에 관한 연구가 거의 중단되었다.

그러나 토륨 주기는 최근에 다시 핵사찰 용이성, 핵확산 저항성 증가, 장주기 핵폐기물량 감소 등의 특성이 부각되기 시작하였고, 가속기를 이용한 외부 중성자원을 사용할 경우에는 U-233 증식에 의한 자체 운전이 가능(self-sustainability)해지며, 미입

계 운전(subcritical operation)으로 인한 원자로 안전성 제고에도 역할이 기대되어, 실제로 가속기 구동형 미입계 원자로를 이용한 토륨 핵연료 주기에 관한 연구가 미국·유럽 및 일본에서 활발히 추진되고 있다.

이 글에서는 토륨 핵연료 주기의 장단점을 분석하여 과거 20여년간 토륨에 관한 연구가 활발하였다가 70년대에 들어와 그 연구가 급격히 중단되었던 배경, 최근 가속기 구동형 원자로를 이용한 토륨 연구가 다시 활발히 진행되고 있는 이유 등을 분석하고자 한다.

핵연료 증식 주기

자연계에 존재하는 핵분열 물질(fissile material)은 U-235이지만 이는 전체 우라늄의 0.7w/o에 지나지 않는다.

하지만 자연계에는 직접 핵분열을 일으키지는 않으나, 중성자를 흡수하여 여러 단계의 방사 붕괴를 거쳐 핵

분열 물질을 생산할 수 있는 물질이 있는데, 이를 핵원료 물질(fertile material)이라 한다.

핵원료 물질에서 핵분열 물질을 생성하는 과정을 증식(breeding)이라 하는데, 증식이 가능한 핵연료 주기에는 U-238에서 Pu-239를 생산하는 우라늄 주기(uranium cycle)와 Th-232로부터 U-233을 생산하는 토륨 주기(thorium cycle)가 있다.

핵연료 증식에 사용되는 원소인 우라늄과 토륨, D-T 핵융합 반응의 삼중수소의 원료가 되는 리튬의 매장량과 에너지 보유량, 사용 가능 시간을 <표 1>에 나타내었다.

토륨은 우라늄에 비하여 매장량, 에너지 보유량이 약 3배이다.

1 우라늄 증식 주기

우라늄 증식 주기는 <그림 1>과 같이 핵원료성 물질인 U-238이 원자로 내부에서 중성자를 흡수하고, 일련의 β-붕괴를 거쳐 인공 핵분열 물질인 Pu-239를 생성하는 과정이다.

우라늄에 포함된 U-235의 핵분열에 의하여 증식에 필요한 중성자를 자체적으로 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다.

농축 또는 천연 우라늄을 사용하는 기존의 가압 경수로나 가압 중수로의 사용후 핵연료를 재처리하여 Pu-239를 생산할 수도 있으나(plutonium recycle), 재처리 공정은 국제적으로 엄격히 규제되고 있다.

U와 Pu-239를 함께 장전하여 Pu-239의 핵분열을 이용하는 동시에 U-238의 Pu-239로의 변환을 경수로(LWR : Light Water Reator)나 고속증식로(FBR : Fast Breeder Reactor)에 이용하는 것이 대표적인 우라늄 증식 주기를 이용한 노형이라 할 수 있는데, 아직 상용화되지는 않고 있다.

우라늄 증식 주기를 이용하는 경우 한정적인 자원인 U-235와 사용후 핵연료의 양을 줄일 수 있다는 측면에서는 매우 긍정적이기는 하나, 부가적으로 생성되는 Pu-239의 핵무기 전용 가능성, 수반되는 장주기 핵종 발생, 임계 운전에서 야기되는 사고 가능성 등에 대한 근본적인 해결책은 되지 못한다.

2. 토륨 증식 주기

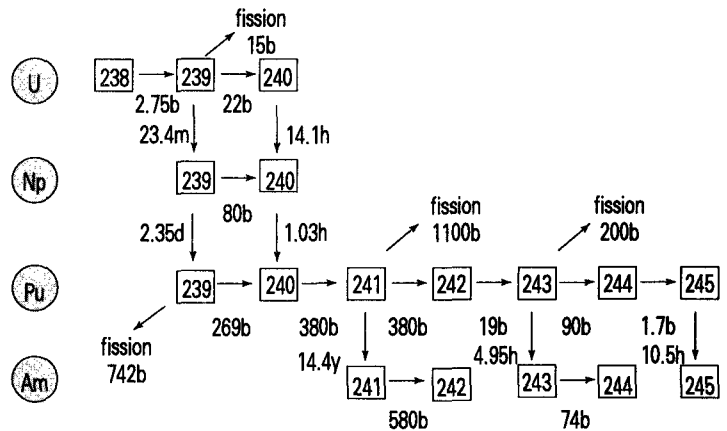
토륨은 1828년 Berzelius에 의하여 발견된 이후, 특수 유리 제작, 합금 재료 등 매우 제한적인 용도로 사용되어 왔으며, 매년 수 백톤 정도만

(표 1) 지하에 있는 핵연료의 에너지 함유량¹⁾

동위원소	존재량 (g/ton)	양 (g)	에너지 함유량 (J)	에너지 수명 ²⁾ (year)
Th	12	3.7×10^{16}	2.1×10^{27}	3.7×10^6
U	4	1.2×10^{16}	0.7×10^{27}	1.2×10^6
Li6	4.9	1.9×10^{16}	4.0×10^{27}	5.2×10^6

주 1) Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press(54th edition, 1973-74)

주 2) Based on an estimated world requirement for nuclear fission or fusion energy 100 times the rate generated in the United States today.



(그림 1) 우라늄 증식 주기

생산되어 왔다.

70년대에는 토륨 자원을 핵연료로 사용하기 위한 연구의 영향으로 연간 천톤 정도의 생산을 보이기도 하였으나, 이후로 토륨 연구의 중단으로 생산량 또한 감소하였다.

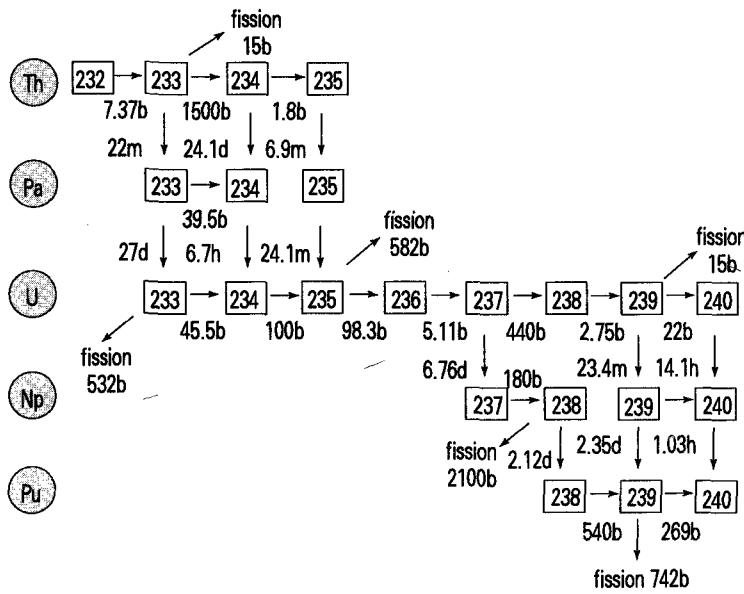
토륨은 자연계에서 유일한 동위원소인 Th-232로 존재하며, 반감기는 1.4×10^{10} 년으로 우라늄의 대부분을 차지하는 U-238의 4.5×10^9 년에 비하여 약 3배 길고, 매장량도 우라늄에 비하여 약 3배 많은 것으로 알려

져 있다.

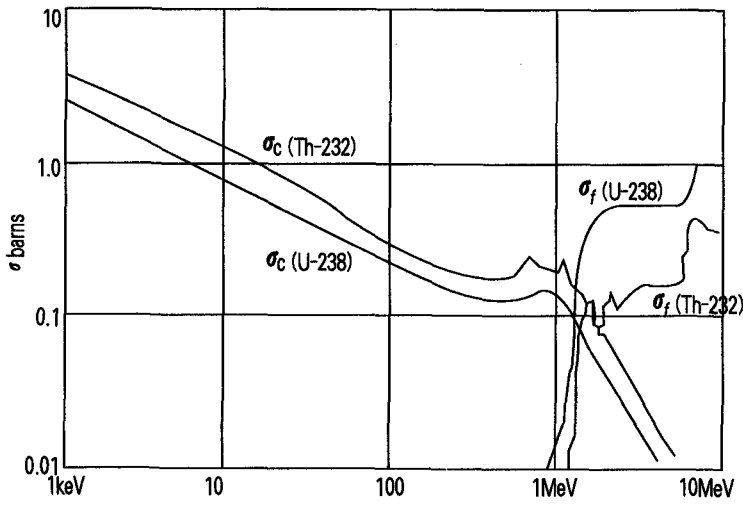
풍부한 토륨 자원을 확보하고 있는 국가로는 인도·캐나다·미국·러시아·중국·브라질·터키 등이 있다.

우라늄과 같은 또다른 핵연료 자원으로 토륨에 관한 연구는 원자력 초기 개발 단계인 50년대부터 우라늄에 관한 연구와 함께 시작되었고, 그간의 연구로 토륨을 핵연료로 사용하기 위한 충분한 기술이 개발되기도 하였다.

하지만 70년대 중반 이후로는 토



(그림 2) 토륨 증식 주기



(그림 3) Th-232와 U-238의 중성자 흡수 및 핵분열 단면적 비교

는 (n,γ)와 (n,2n)이 있는데 (n,γ) 반응을 하게 되면 Th-233이 되고 이는 β붕괴를 거쳐 Pa-233으로 변환한다.

Pa-233이 중성자 흡수 반응을 일으키지 않고 다시 β붕괴를 하게 되면 U-233을 얻을 수 있다.

3. 토륨 핵연료 주기의 특성

토륨 증식 주기는 전체적으로 우라늄 증식 주기와 비슷하지만 몇 가지 차이점은 다음과 같다.

가. 외부 중성자원 필요

토륨은 우라늄과는 달리 자연계에 단일 동위원소인 Th-232로 존재하며, 따라서 핵분열 물질을 전혀 포함하지 않는다.

(그림 3)에 의하면 Th-232가 전 영역의 중성자 에너지에 대하여 U-238에 비하여 중성자 흡수 단면적이 큼을 알 수 있다.

따라서 Th-232는 U-238에 비하여 열증식(thermal breeding)의 가능성이 크다.

한편 Th-232는 1.4MeV 이상에서 핵분열을 일으킬 수는 있지만, 고속의 경우에도 1MeV 이상의 에너지를 갖는 중성자는 약 10~15%에 지나지 않으므로, 실제로 Th-232의 핵분열은 열중성자로에서도 중요성을 갖지 않는다.

반면에 U-238의 핵분열 단면적은 약 1MeV에서부터 급격히 증가하므로, U-238의 고속 핵분열(fast

로 핵연료 재처리의 어려움과 여러 정치적 이유로 이에 관한 연구가 거의 중단되었다

일련의 핵반응을 거쳐 Th-232로부터 주요 인공 핵분열 물질인 U-233을 생성하는 과정이다.

토륨 증식 주기는 (그림 2)와 같은

Th-232의 중성자와의 반응 형태

fission)은 고속로뿐 아니라 열중성자로에서도 어느 정도 중요성을 갖게 된다.

다시 말하면, Th-232는 U-238에 비하여 흡수 단면적이 커 증식에는 유리하지만, 자체 핵분열이 적어 다른 핵분열 물질을 첨가하지 않는 경우 중성자 보유량(neutron inventory)이 매우 적게 된다.

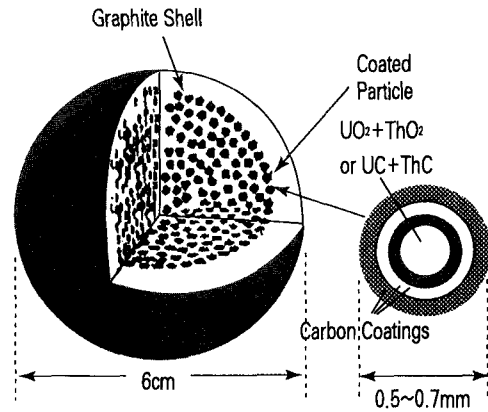
더욱이 우라늄 증식의 경우에는 U-235의 핵분열에 의하여 중성자를 얻을 수 있으나, 토륨의 경우는 그렇지 못하므로 다른 핵분열 물질을 첨가하여 증식에 필요한 중성자를 별도로 공급하여야 한다.

이러한 특징 때문에 토륨을 사용한 과거의 노형도 대부분 U-235나 Pu-239를 핵분열 물질로 하고 그 주변에 토륨을 분포시켜 증식을 유도하는 U-235/Th-232 또는 Pu-239/Th-232의 seed/blanket 개념으로 발전되어 왔다.

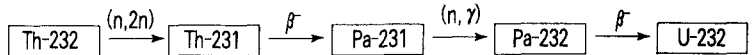
〈그림 4〉는 독일에서 건조되었던 pebble-bed 원자로에 사용된 핵연료를 보여 주는데, pebble이라 불리우는 구형 graphite matrix 내에 pyrocarbon coted powder를 포함한다.

핵연료 물질인 powder 내에는 U-235와 토륨을 함께 섞어 핵분열과 동시에 U-233을 증식한다.

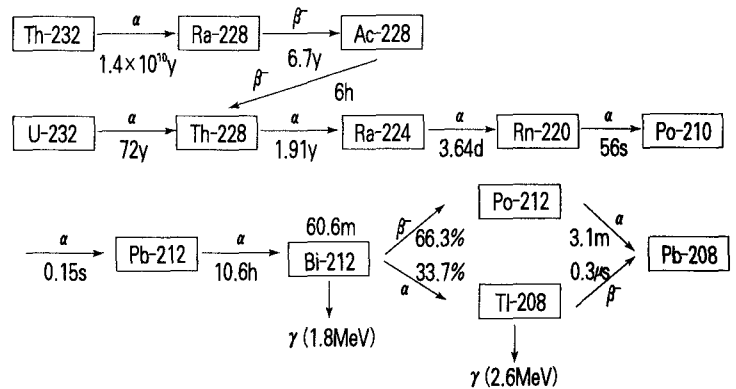
최근에 연구되고 있는 가속기 구동 원자로의 경우는 가속기를 이용하여 양자와 같은 하전 입자를 원자로 내의 중금속 표적재(target material)



〈그림 4〉 Pebble-shaped 핵연료 요소



〈그림 5〉 원자로 속에서의 U-232의 형성 과정



〈그림 6〉 Th-232의 붕괴 계열(Thorium(4n) series)

에 충돌시켜 neutron spallation을 일으켜 핵분열 및 증식에 필요한 중성자를 공급한다.

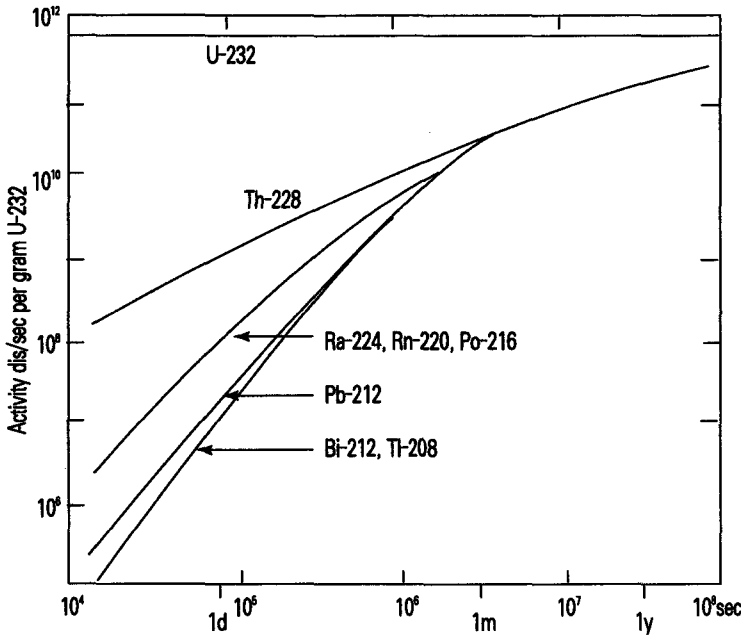
나. 중간 물질의 고방사성

Th-232의 중성자와의 반응 형태는 (n,γ)와 (n, 2n)이 있는데, (n, 2n) 반응의 경우 〈그림 5〉와 같은 변

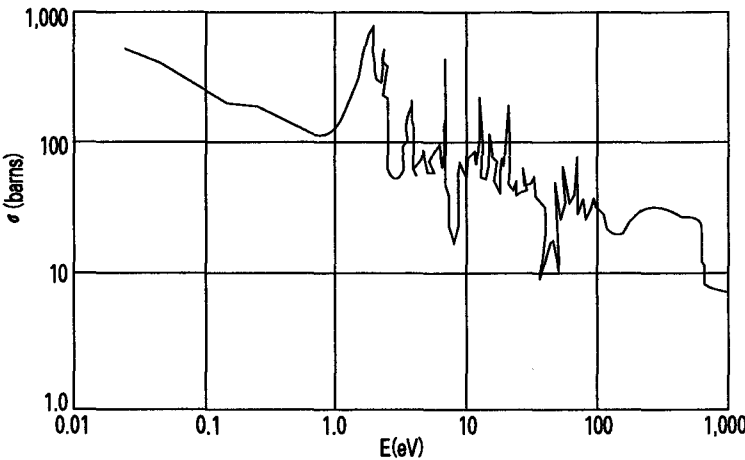
환 과정을 거쳐 U-232를 생산하게 된다.

생성된 U-232는 Th-232의 방사 붕괴 계열의 중간 물질이 되어 〈그림 6〉과 같은 [4n-계열]의 붕괴 과정을 따르게 된다.

[4n-계열] 붕괴의 시작 핵종인



(그림 7) U-232의 붕괴와 자핵종의 Build-up



(그림 8) U-233의 핵분열 단면적(E < 1keV)

Th-232는 반감기가 1.4×10^{10} 년으로 매우 길어 자연계에서는 고방사성을 띠지 않으나, 앞에서 설명한 바와 같이 일단 U-232가 생성되면 Bi-

212나 Tl-208과 같은 원소가 생성되는데, Bi-212는 1.8MeV, Tl-208은 2.6MeV의 매우 강한 γ 선을 방출하는 핵종이다.

(그림 7)은 U-232 1g이 방사 붕괴하여 자핵종이 방출하는 방사능을 시간에 대하여 보여준다.

따라서 사용후 토륨 핵연료의 THOREX라 불리는 습식 재처리나 핵연료 가공 과정에 강한 독성이 수반되게 되고, 따라서 차폐에 의한 원격 조정이 필수적이다.

이러한 단점이 토륨 주기가 실제로 상용화되는 데 가장 큰 걸림들이 되어 왔다.

하지만 이러한 단점은 재처리를 금지하고 핵사찰을 중시하는 현재 상황에서는 핵확산 저항성이 증대되며, 강한 독성에 의한 감지의 용이성 (easy detectability) 등으로 오히려 장점화되는 경향이 있다.

다. 양호한 핵 특성

토륨에 의하여 증식되는 주요 핵분열 물질인 U-233은 매우 훌륭한 핵적 특성을 갖는다.

(그림 8)은 U-233의 1keV까지의 핵분열 단면적을, (그림 9)는 그 이상의 에너지에 대한 핵분열 단면적을 보인다.

전체적으로 U-233의 핵분열 단면적이 다른 두 핵종에 비하여 크다는 것을 알 수 있다.

(그림 10)은 U-233, U-235, Pu-239의 중성자 흡수당 방출수를 나타내는 η 값을 보여 준다.

고속 중성자 에너지를 제외한 모든 영역에서 U-233의 η 값이 가장 크며 고속로 환경에서는 Pu-239의 η 값이

가장 큼을 알 수 있다.

따라서 열중성자 영역에서는 토륨 중식이, 고속 중성자 영역에서는 우라늄 중식 주기가 유리하다.

라. 고연소의 필요성

〈그림 11〉은 blanket 영역에 여러 가지 중식 물질을 넣고 seed로부터 blanket에 조사되는 중성자량에 대한 에너지 생산량을 표시한다.

천연 토륨의 경우 천연 우라늄 또는 희수 우라늄(depleted uranium)에 비하여 초기에는 매우 적은 에너지를 생산한다.

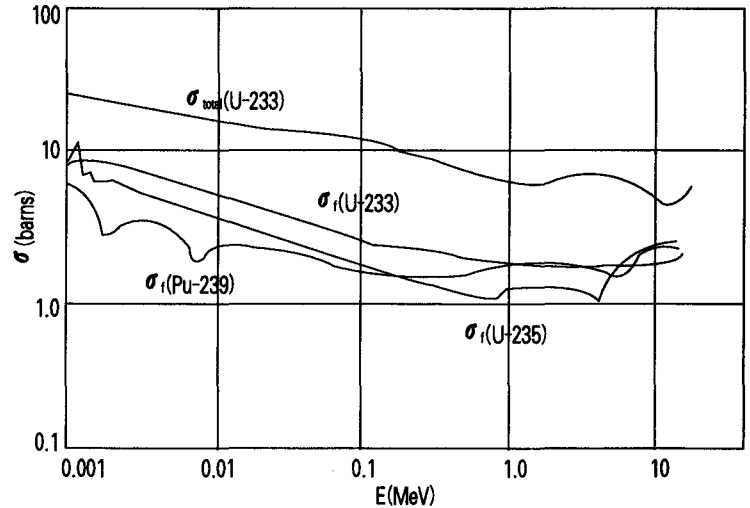
이러한 결과는 U-238의 고속 핵분열 효과가 Th-232에 비하여 크고, 고속 중성자에 대하여 Th-232의 (n, 2n) 반응이 증가하며, U-233의 핵분열 생성 물질이 U-235의 핵분열 생성 물질에 비하여 중성자 흡수가 작아지는 점 등 모든 가능한 핵반응을 고려하여 계산한 결과이다.

토륨에 U-235를 소량 첨가한 경우(spiked thorium) 초기 에너지 방출량이 증가한다.

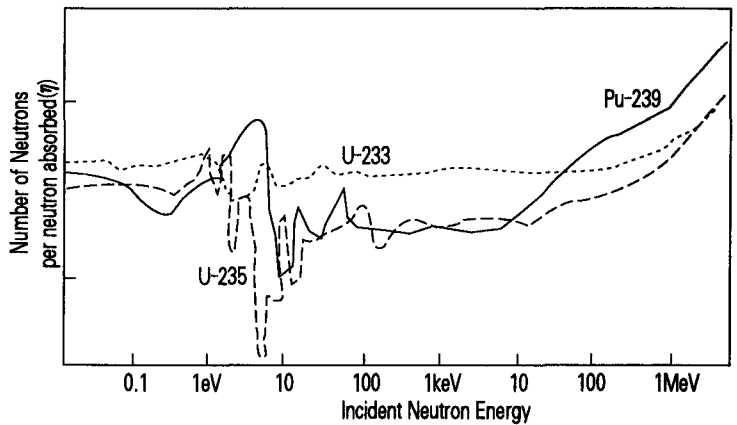
하지만 양자 모두의 경우 고연소의 경우에만 우라늄보다 에너지 발생이 많아지게 된다.

즉 토륨 핵연료의 경우 연소도를 증가시켜야만 하는데 다행히 thorium oxide가 uranium oxide에 비해 오랜 중성자 조사에 견딜 수 있는 재료 특성을 갖는다(more irradiation resistant).

핵연료 용융점의 경우도 thorium



〈그림 9〉 U-233, U-235, Pu-239의 핵분열 단면적(E>1keV)



〈그림 10〉 U-233, U-235, Pu-239의 중성자 흡수당 생성비(η)

oxide가 3,300°C로 uranium oxide의 2,860°C에 비하여 높다.

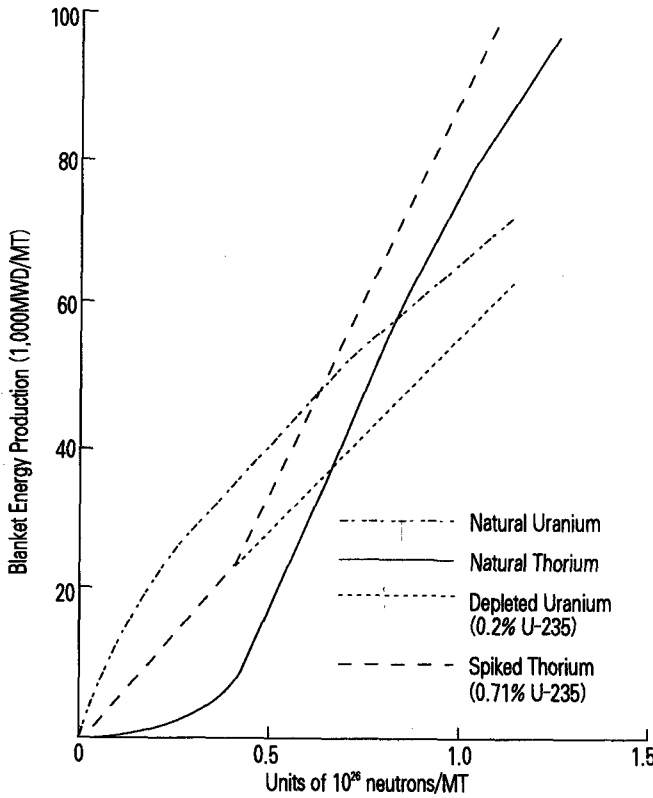
이러한 특성에 의하여 토륨에 의한 에너지 생산을 효율적으로 성취하기 위해서는 토륨 핵연료의 조사 시간을 늘릴 수 있는 핵설계가 필수적이다.

다. 장주기 액티나이드 발생 감소 (Reduced Long-lived Actinides)

PWR 사용후 핵연료는 사용전 핵

연료 성분의 95% 이상을 그대로 유지하며, 약 3%의 핵분열 생성물과 0.1~0.3%의 장주기 액티나이드를 추가로 포함하는 것으로 알려져 있다.

핵분열 물질이 핵분열하여 생기는 핵분열 생성물은 비교적 반감기가 작은 반면에, 핵분열 물질이 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키지 않고 방사 붕괴하는 과정에서 발생하는 actinide 계열 원소들은 긴 반감기로



〈그림 11〉 증성자 조사량에 대한 에너지 생산

인하여 폐기물 처분에 중요한 장애가 되고 있다.

장주기 액티나이드로 분류되는 원소는 〈표 2〉와 같다.

현재 대부분의 사용후 핵연료의 처분은 핵분열 생성물과 장주기 액티나이드를 구별하지 않고 함께 지하 처분하는 것으로 되어 있지만, 액티나이드를 따로 분류하여 고속로·핵융합로·가속기를 이용하여 반감기가 짧은 타핵종으로 변환시키는 연구가 진행되고 있다.

토륨은 우라늄에 비하여 원자 번호

가 2 적으므로, 토륨 핵연료 증식 주기는 우라늄 증식 주기에 비하여 액티나이드 생성이 자연적으로 감소한다(동일한 액티나이드 핵종으로 변환하기 위해서는 연속적으로 2회의 증성자 흡수가 더 필요함).

물론 Pu의 경우는 더 많은 양의 액티나이드를 생산하게 된다.

〈표 3〉은 1,300MWe PWR에 대하여 우라늄과 토륨의 여러 형태의 핵연료에 대한 액티나이드 생성을 계산한 결과이다.

연소도가 증가함에 따라 액티나이

드 생성도 증가하는 것을 볼 수 있고, 핵연료 물질의 원자 번호가 작을수록 액티나이드 생성이 현저히 감소하여 U-233/Th-232의 경우가 가장 작은 값을 보인다.

이러한 특성은 U-233/Th-232 핵연료 주기의 커다란 장점이 되는데, 이러한 장점이 실제로 얼마의 경제적 이득을 줄 수 있는지의 문제는 더욱 검토되어야 할 것이다.

〈그림 12〉와 〈그림 13〉은 각각 U-235/U-238 핵연료와 U-233/Th-232 핵연료의 중원소(heavy nuclide) 변화를 증성자 조사 시간 2,000일, 냉각 기간 150일에 대하여 계산한 결과를 보여준다.

이 역시 토륨 핵연료가 액티나이드의 생성을 줄임을 보여주고 있다.

본 계산을 위하여 〈그림 1〉과 〈그림 2〉의 우라늄과 토륨 핵연료 주기에 관련된 모든 핵반응 사슬을 프로그래밍하여 수행하였다.

바. 핵확산 저항성

앞에서 설명하였듯이 Th-232로 증식될 수 있는 U-233은 매우 훌륭한 핵분열 물질이다.

특히 자발 핵분열 효과가 Pu-239에 비하여 작아 핵무기 제조에도 적합하다.

순수한 토륨에 대하여 10^{14} 증성자속으로 3년간 조사한 경우의 생성되는 우라늄의 동위원소별 조성을 〈표 4〉에 수록하였다.

토륨 주기에 있어서 주된 핵분열

물질은 U-233이다.

즉 핵무기 제조 수준의 U-233을 추출하기 위해서는 화학적 분리(chemical separation)뿐만 아니라 고도의 동위원소 분리(isotopic separation) 노력이 요구된다.

플루토늄 동위원소 또한 생성되지만 생성과 동시에 소각되어 초기 토륨 양에 대하여 Pu-238(0.0197%), Pu-239(0.0103%), Pu-240(0.0069%), Pu-242(0.0088%)와 같이 미량이 생산된다.

우라늄 혼합물의 핵분열 단면적과 흡수 단면적은 핵분열 중성자 스펙트럼(fission neutron spectrum)에 대하여 $f=2.0b$, $c=0.74b$ 으로 순수 U-235의 $f=2.6b$, $c=0.73b$ 과 비슷한 값을 갖는다.

하지만 이러한 혼합물의 특성은 초기에 소량의 U-238($f=negligible$, $c=1.14b$)을 첨가함으로써 쉽게 희석될 수 있다.

U-238의 중성자 흡수 단면적은 토륨의 1/3에 지나지 않으므로, 초기에 첨가된 U-238은 핵연료 전주기에 걸쳐 살아남게 되고, 우라늄의 화학적 분리 공정도 무사히 통과하게 된다.

이러한 혼합물을 이용했을 때의 임계 질량은 핵무기 제조가 가능한 실체적인 범위를 훨씬 벗어나게 된다.

실사 U-238을 첨가하지 않더라도 앞에서 언급한 바와 같이 사용후 토륨 핵연료에서 발생하는 고준위 방사선과 상당량의 붕괴열로 핵무기 제조

(표 2) 장주기 액티나이드와 반감기

Isotopes	⁹¹ Pa ²³¹	⁹³ Np ²³⁷	⁹⁴ Pu ²³⁸	⁹⁴ Pu ²⁴⁰	⁹⁵ Am ²⁴¹	⁹⁵ Am ²⁴³	⁹⁸ Cm ²⁴⁸
t _{1/2} (year)	3.2×10 ⁴	2.1×10 ⁶	24,000	6,600	458	7,900	9,000

(표 3) 여러 주기에서의 Minor Actinides 생성 비교(IAEA, 1990)

Actinides	Burnup (GWD/t)	Fuel Types			
		U-235+U-238* (g/t of HM)	U-235+Th-232 (% of *)	U-233+U-238 (% of *)	U-233+Th-232 (% of *)
⁹³ Np ²³⁷	30	0.036	92	20	1
	60	0.090	107	13	3
⁹⁵ Am (241 to 243)	30	0.016	0.04	106	6.3×10 ⁵
	60	0.047	0.28	117	1.8×10 ³
⁹⁸ Cm (243 to 246)	30	0.36	0.01	111	1.7×10 ⁵
	60	0.022	0.14	132	6.4×10 ⁴

공정에 막대한 어려움을 초래한다.

과거의 토륨 연구 경험

토륨을 이용한 증식에 관한 연구는 50년대부터 U-235나 Pu-239를 시발 물질(seed material)로 하고 Th-232를 주변 물질(blanket material)로 하여 핵분열 및 증식을 유도하는 연구가 비교적 활발히 진행되었다.

과거에 토륨을 핵연료로 사용하는 원자로로는 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 주관하여 기존의 LWR을 이용한 새로운 증식

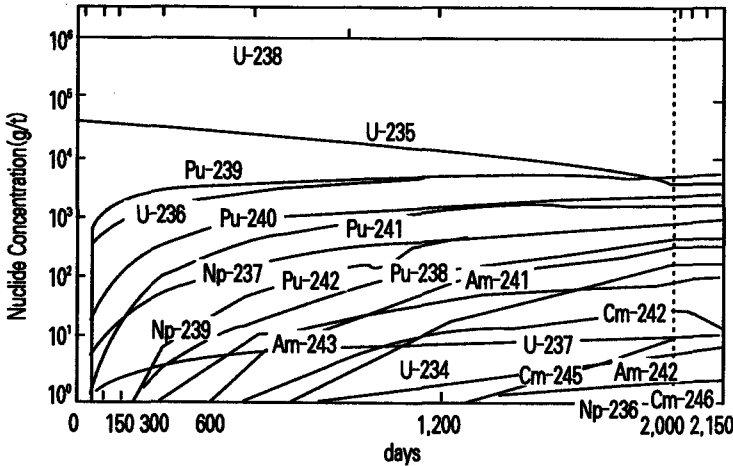
로 개발의 필요성에서 비롯되었다.

이 원자로로는 Th/U-233, fertile/fissile 체계를 가지는데, 이는 U-238/Pu-239 체계와 달리 열중성자 영역에서 증식이 가능하여 고속로에서 요구되는 고난도 기술 개발 없이 기존의 LWR을 증식로로 개조하려는 의도에서 시작되었다.

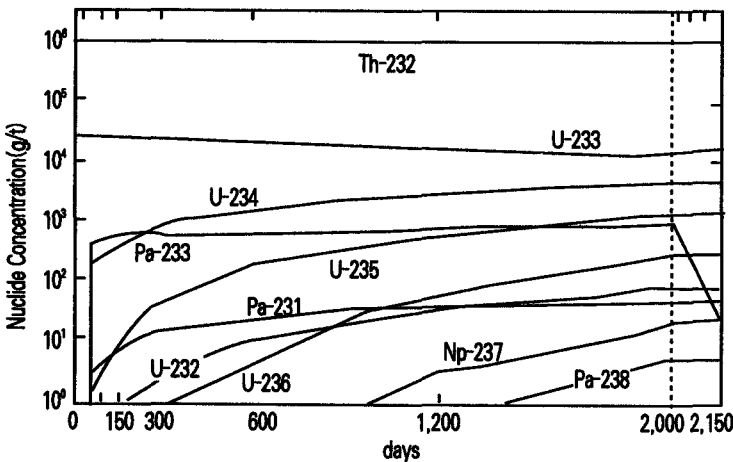
하지만 최선의 증식을 위한 핵연료 재배치 및 제어봉 등에 의한 중성자 흡수를 막기 위한 핵연료의 자체 이동에 의한 제어 방식 등의 문제점 등으로 기존 PWR의 전면적인 개조가 불가피하여 경제성이 없는 것으로 나타났다.

미국 GA(General Atomic)에서 개발한 HTGR의 경우도 Th/U-233, fertile/fissile 체계를 이용하였다.

그러나 운전 초기에 U-235를 장전해야 함은 물론 운전중에도 임계



(그림 12) U-235/U-238 핵연료의 중성자 조사에 따른 핵종 변화



(그림 13) U-233/Th-232 핵연료의 중성자 조사에 따른 핵종 변화

유지를 위하여 정기적으로 U-235를 보충하여야 한다.

MSBR은 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 실험적으로 제작하여 2년 반 운전하였는데, 이 또한 Th-233/U-233 핵연료 주기를 사용하므로 LWBR이나 HTGR과 원리가 비슷하다.

차이점은 액체 상태의 핵연료가 냉각계의 역할도 수행하여 graphite 감속재 사이를 유동한다.

임계 유지를 위하여 중성자 흡수 효과가 큰 핵분열 생성물을 온라인상태에서 연속적으로 제거하여야 하며, 이는 고방사성 핵연료 물질이 원자로의 부를 순회하는 문제점을 가진다.

그 외에도 여러 국가에서 토륨 사용 원자로 및 연료 주기에 관련된 연구가 있었는데 이를 <표 5>에 정리하였다.

열거한 노형은 모두 Th-233/U-233 핵연료 주기의 non self-sufficient neutron inventory 특성 때문에 기술적인 어려움을 가지고 있으므로, 장수명 핵종과 플루토늄을 생산이 감소되는 Th-233/U-233 핵연료 주기의 장점을 살리기 위해서는 기술적으로 안정된 extra neutron source를 갖춘 신형로 개발이 필요하다는 결론을 얻게 된다.

토륨 핵연료에 관한 이제까지의 연구 경험으로 얻은 결론은 다음과 같다.

- U-233의 증식을 위하여 다른 핵분열 물질에 의한 중성자 공급 필요
- U-235 또는 Pu-239/Th 핵연료를 사용한 자체 운전 가능
- 충분한 U-233 증식
- Th/U 핵연료의 재처리 U/Pu 재처리에 비하여 경제성이 떨어짐
- 원격 U-233 핵연료 가공에 의한 추가 비용

그렇다면 기술적으로 충분한 타당성을 갖는 토륨 주기에 관한 연구가 70년대 중반에 들어와 급격히 감소한 이유는 무엇일까?

이에 대한 답으로는 다음과 같은 경제적·정치적 이유가 더 크게 작용한 것으로 생각된다.

- 핵확산을 우려하여 미국 내 재처

리가 금지됨

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

가속기 구동 원자로

70년대 중반에 대부분 중단되었던 토륨에 관한 연구가 최근에 다시 가속기 구동 원자로(Accelerator-driven Reactor)의 형태로 시작되고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 토륨을 핵연료로 사용하기 위해서는 천연 토륨이 우라늄과 같이 U-235와 같은 핵분열 물질을 포함하지 않고 단일 핵종인 Th-232로 존재하기 때문에 증식 초기에 외부 중성자원이 필요하였고, Th-232로부터 증식된 U-233을 분리하기 위한 재처리 또한 필수적이었다.

이러한 외부 중성자원의 'pre-breeder' 또는 'seed' 역할을 위해 과거에는 U-235와 같은 핵분열 물질을 Th-232와 혼합하는 seed/blanket 개념을 사용하였다면, 최근 가속기 구동 원자로에서는 입자 가속기를 사용하여 중성자를 공급한다.

가속기를 이용하여 중성자를 발생시키면, 외부 중성자원에 의한 미입계 평형(subcritical equilibrium)

(표 4) 순수 토륨의 3년간 증성자 조사시 우라늄 동위원소 함량비

Uranium	U-233	U-234	U-235	U-236	U-238
Fraction(%)	43.7	30	4	22.1	0.068

(표 5) 각국의 토륨 핵연료 연구

국 가	원 자 로
미 국	Peach Bottom(1966~1974) : HTGR, 30MW _e , U-235/Th compacts coted by spherical element in graphite matrix
	Fort St. Vrain(1976~1989) : HTGR, 330MW _e
	ERR(Elk River Reactor, 1963~1968) : BWR, 24MW _e
	Indian Point(1962) : PWR, 285MW _e , UO ₂ /ThO ₂
	Shipping Port(1957~1974) : LWBR, U-235/Th remodeled from old 100MW _e PWR in 1960's.
	MSRE(Molten Salt Reactor Experiment, ~1976) : prototype MSBR, 8MW _{th} , ORNL
영 국	DRAGON(1966~1973) : HTGR, 20MW _{th} , OECD/NEA-EURATOM
독 일	AVR(1967~1988) : HTGR, Pebble-Bed, 13MW _e
	THTR(1985~1989) : HTGR, Pebble-Bed, 300MW _e
이탈리아	PCUT : prototype reprocessing and fuel fabrication plant
일본	HTTR(High Temp. Test Rx.) : 30MW _{th} , under const., JAERI
중국	HTR-10 : Pebble-Bed, 10MW _{th} , under const.
브라질	practical research on thorium fuels for PWRs(1979~1988)
인도	PURNIMA2 : critical facility, uranyl(U-233) nitrate solution
	PURNIMA3 : critical facility, U-233/Al alloy
	KAMINI : test reactor, 30kW, U-233/Al alloy, under const.
	AHWR(Advanced Heavy Water Reactor) : 750MW _{th} , MOX(U/Pu)/ThO ₂ as seed/blanket
	(1) All heavy water moderated.
	(2) Fuel fabrication and reprocessing techniques for Th/U fuels

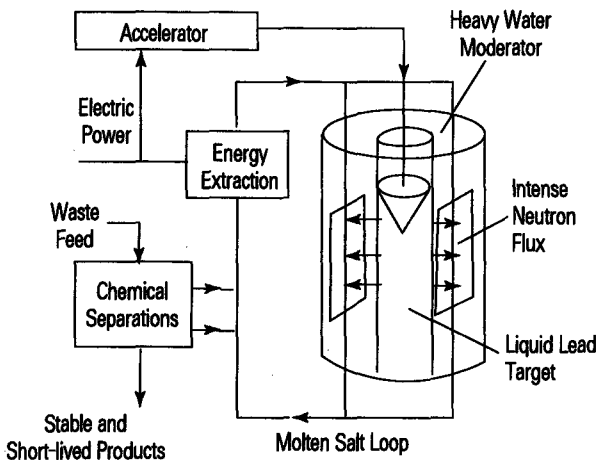
운전이 가능하여 초입계에 의한 출력 확산(power excursion)이 근본적으로 불가능하다.

중성자 생성 개념은 high energy physics 분야에서 광범위하게 사용되는데 calorimeter의 원리에 기인한다.

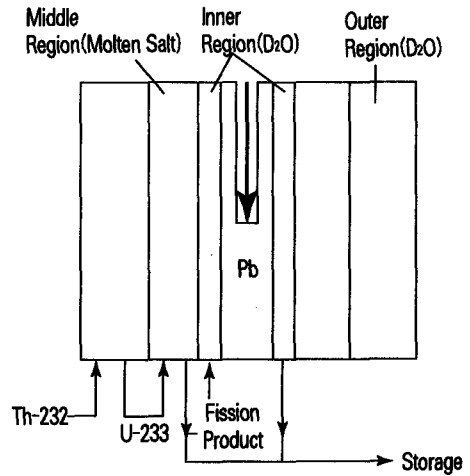
무거운 원소와 scintillator의 혼합 물질로 이루어져 있는 calorimeter는

가속기에 의하여 입사되는 hadron(protons, heavy nuclei) beam과 target nuclei와의 충돌로 인한 breakup 현상에서 발생하는 에너지를 측정하는 장치이다.

이러한 장치에 핵분열 물질을 첨가하여 핵분열에 의한 에너지 증폭을 유도하여 가속기에 소요되는 이상의



(그림 14) ATW 개념도



(그림 15) Target-Blanket System

에너지를 생산한다.

토륨을 연료로 사용하는 가속기 구동형 원자로에는 미국 Los Alamos National Lab.을 중심으로 연구되고 있는 Accelerator Based Conversion and High Level Waste Transmutation(ABC and ATW) 원자로와 유럽의 CERN을 중심으로 연구되고 있는 Energy Amplifier(EA)의 두 종류가 있다.

1. Accelerator Based Conversion and High Level Waste Transmutation (ABC and ATW)

미국 Los Alamos National Lab.의 C.D. Bowman을 중심으로 연구되고 있다.

토륨이나 우라늄을 핵연료로 사용할 수 있고, 에너지 생산용 원자로이

지만 높은 중성자 속에서 장주기 액티나이드의 핵분열을 이용하여 반감기가 짧은 다른 핵종으로 변환(transmutation)시킬 수 있다는 의미에서 소각로, 즉 burner나 incinerator라는 명칭으로 더욱 알려져 있다.

원자로의 형태는 (그림 14·15)와 같이 기존의 MSBR(Molten Salt Breeder Reactor)과 흡사하다.

중앙에 중성자 생성 장치가 있고, 주변은 중수 감속재로 blanket을 형성한다.

blanket은 내부(inner), 중간(middle), 외부(outer)의 세 영역으로 분리된다.

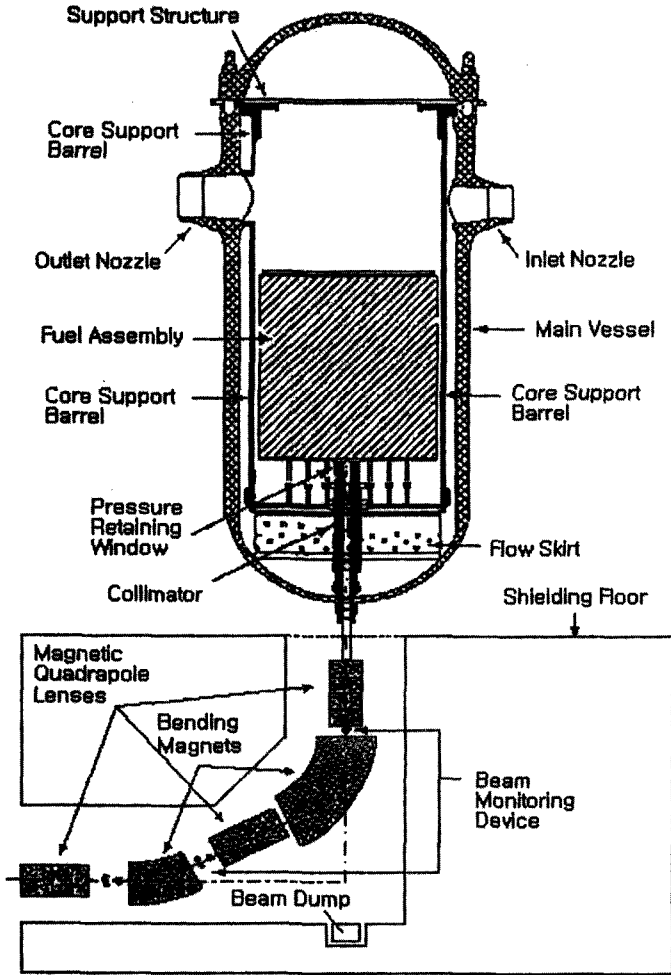
입자 가속기에서 발생된 proton beam이 원자로 중앙의 liquid lead target에 입사되어 spallation에 의하여 다량의 중성자를 발생시키며,

발생된 중성자는 주변을 싸고 있는 중수에 의하여 감속된다.

핵연료가 용해되어 있는 molten salt(fluoride salt)는 감속제 사이를 통과하면서 핵분열을 일으키게 되고, 발생된 열은 원자로 외부에서 제거되어 일부는 입자 가속기의 동력으로 사용된다.

좀더 자세히 설명하면, Th-232가 외부 영역($\sim 10^{14}n/cm^2 \cdot sec$)으로 유입되어 Pa-233으로 변환되고 Pa-233은 중성자 흡수 반응을 일으키기 전에 원자로 외부로 방출되어 U-233으로 변환된다.

변환된 U-233은 원자로 중간 영역으로 들어가 핵분열을 일으키고, 다시 원자로 외부에서 화학적으로 분리된 후 액티나이드는 중성자속이 가장 높은 내부 영역($\sim 10^{16}n/cm^2 \cdot sec$)으로 주입되어 핵변환을 유도한



(그림 16) Accelerator-driven PWR 개념도

다.

ATW에서의 중성자 증배는 U-233의 핵분열 외에도 Pu·Np·Am·Cm 등의 액티나이드의 핵분열에 의해서도 얻어진다.

ATW에서의 핵연료 순환 이동은 원자로 외부에 위치하는 화학적 분리 장치를 통과시키기 위해서도 필요하지만, 액티나이드의 핵분열을 유도하기 위한 중성자속인 $10^{16}n/cm^2 \cdot sec$ 조건에서는 증식되는 U-233 또는

Pu-239와 같은 핵분열 물질의 원자로 내 잔류 시간이 수 일에 불과하게 되므로 기존과 같은 원자로 내에 핵연료를 고정시킬 수 없기 때문이다.

ATW에서는 10^{16} 의 고중성자속을 발생시키기 위하여 1~2GeV and 100mA 이상의 고성능 입자 가속기를 사용해야 하며, 핵연료 자체 이동에 의한 제어 기술 개발, 원자로에 인접한 화학 분리 장치, 방사성 물질의 순환, 현재 상용로의 중성자속인 10^{13}

의 1,000배인 10^{16} 의 고중성자속에서의 노재료 문제 등이 대두된다.

2. Energy Amplifier

최근 CERN의 노벨 물리학상 수상자인 Carlo Rubia를 중심으로 연구되는 노형이다.

가속기에 원자로를 결합하여 가속기에 소요되는 이상의 에너지를 생산한다는 의미에서 Energy Amplifier라 불린다.

노형은 여러 가지가 제안되고 있으나 그중에서 기존의 PWR에 입자 가속기와 중성자 생성 장치를 혼합한 개념도가 (그림 16)이다.

토륨 주기의 단점으로 지적되는 증식 초기의 중성자 부족 현상은 가속기에 의한 extra source로 공급되어 Th/U-233 변환이 실질적으로 가능하고, 이 원리는 기본적으로 U-238/Pu-239 변환에도 적용될 수 있다.

Energy Amplifier에 사용되는 100MeV~1GeV급의 가속기는 입자 물리 분야에서 광범위하게 사용되는 것으로 별다른 기술 개발 없이 그대로 사용할 수 있다.

뿐만 아니라 Energy Amplifier의 중성자속의 영역이 약 $10^{14} neutrons/cm^2 \cdot sec$ 인데, 이는 기존 상용로의 중성자속과 거의 일치하므로 원자로 재료 문제 등에 있어 이제까지 기존 상용로에서 연구 개발된 기술을 그대로 사용할 수 있다.

ATW에 비하여 낮은 중성자속에서 운전되므로 액티나이드 소멸 작용은 없으나 토륨 핵연료 주기 특성상 기존 우라늄 사용 노형에 비하여 장주기 핵폐기물의 양이 대폭 감소된다.

3. 가속기 구동 원자로 의견

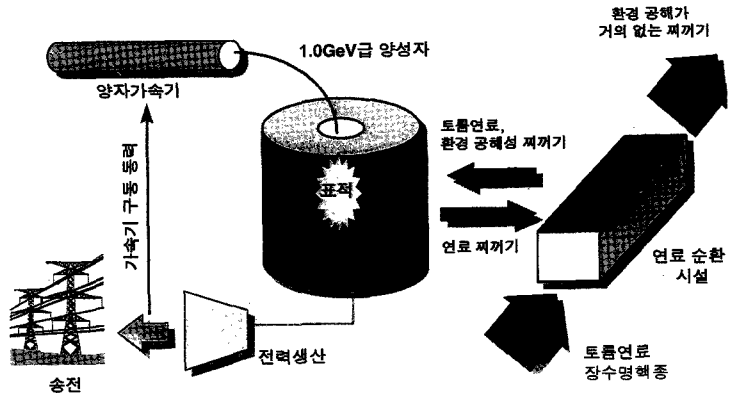
가속기 구동 원자로에서는 가속기 중단시에도 생성된 Pa-233의 β 붕괴에 의하여 U-233이 계속 생산되므로 이에 대한 적절한 제어가 보장되어야 한다.

가속기 구동 원자로는 미입계 운전으로 TMI, Chernobyl과 같은 초임계 사고를 근본적으로 막을 수 있어 원자로의 안전성이 높아지며, 토륨을 핵연료로 사용하므로 생기는 자원 활용, 핵확산 저항성 증가, 장주기 핵종 감소 등의 장점을 살릴 수 있다.

하지만 기존의 원자력 기술이 이미 안정화 단계에 있고, 현재의 원자력 산업이 기술성의 취약으로 인하여 위축되는 것이 아닌 만큼, 기존의 원자로와 입자 가속기라는 색다른 장치의 결합으로 생기는 총비용 및 새로 대두되는 기술적 문제를 심각히 고려하지 않을 수 없다.

맺는말

과거 토륨 핵연료에 관한 연구가 자원 활용 측면에서 진행되었다면, 최근의 연구는 가속기 구동 원자로 형태로 장주기 핵폐기물 감소, 핵저



가속기 미입계 시스템인 HYPER(Hybrid Power Extraction Reactor) 개념

항성 증가, 원자로 안전성 향상 측면에서 수행되고 있다.

국내에서도 높은 중성자속을 이용한 장주기 핵종 소멸 처리에 대한 연구가 국가 원자력 중장기 계획에 의하여 추진되고 있다.

하지만 이와 같은 새로운 노형에 대한 연구는 원자력 사업이 극도로 위축된 미국에서 '발전로'보다는 '소각로'의 기능을 홍보하며, 원자력 사업 부활 목적으로 추진되는 면이 강하다.

심지어 Yucca Mountain 프로젝트(핵폐기물 영구 처분)와 상반된 개념으로 받아들여지게 될 경우, 극심한 반대 로비가 생길 것을 우려하여 서로 협력자라는 앞뒤가 맞지 않는 슬로건을 내세우고도 있다.

실제로 순환 핵연료 개념을 적용하

고 있는 ATW의 경제성은 매우 불투명하며, 아직 노형에 대한 심각한 문제를 가지고 있지 않은 우리의 상황으로 ATW에 대한 대규모 투자는 바람직하지 못하다.

대규모의 연구를 추진하기에 앞서 관련문헌을 바탕으로 간단한 분석 도구를 개발하여 국제적인 기술 동향을 유지하는 것이 옳다고 생각한다.

그리고 낮은 중성자속에서 운전이 가능하고 비교적 간단한 기술로 개발이 가능하다고 주장되는 Energy Amplifier가 오히려 국내 상황에 적합할 수 있으므로 이에 대한 기초 연구도 수행될 수 있을 것이다.

* 본 연구의 일부는 1996년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의함.