

토륨핵연료 이용 연구개발 현황

R&D Status of Thorium Fuel Utilization

2014.9.



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

머릿 글

토륨은 우라늄과 함께 천연자원으로 존재하는 단 두 가지의 핵물질이다. 따라서 토륨의 활용을 위한 연구는 원자력에너지 활용 초기부터 있어 왔으나, 연쇄핵분열이 가능한 우라늄-235와는 달리 토륨은 중성자를 포획한 후에야 핵분열이 가능한 물질로 전환된다. 이는 천연우라늄의 99.28%를 차지하는 우라늄-238과 마찬가지로이다.

우라늄-238을 활용하기 위한 고속로 연구와 함께 단일 핵종으로 구성된 토륨을 이용하기 위한 연구가 경수로, 중수로, 고온가스로, 용융염로, 고속로 등 다양한 냉각재를 사용하는 원자로를 대상으로 진행되어 왔다. 이와 함께 대용량 양성자가속기 또는 핵융합에서 발생하는 고속중성자를 이용하여 토륨을 핵분열물질로 전환하는 개념도 연구되어 왔다.

아직 우라늄자원이 풍부하여 낮은 가격에 공급되고 있고, 전환된 토륨을 재처리해야 하는 데 따른 핵무기전용가능성, 경제성, 안전성에 대한 우려 때문에 우리나라에서는 토륨에 대한 본격적인 연구개발이 진행되고 있지 못하다.

그러나 인도는 토륨증식을 위한 중수로 건설을 진행 중이며, 벨기에는 가속기구동 미임계시스템 건설을 추진하고 있고, 중국은 가속기구동 미임계시스템과 토륨을 위한 용융염원자로 건설을 추진하고 있어 토륨에 대한 국내외적인 관심이 커지고 있다.

본 보고서에는 향후 관련 연구를 진행할 때 참고할 수 있도록 학술지와 공개된 보고서를 중심으로 토륨 관련 연구개발의 현황을 조사하여 수록하였다. 그러나 한정된 기간 때문에 저술의 심도가 고르지 못하고, 조사가 불충분하여 누락된 부분이 있다.

본 책자의 제1장 입문은 장중화가 각 저자의 입력을 참고하여 작성하고, 제2장 핵연료는 이영우, 제3장 미임계를 위한 가속기는 최병호, 제4장 열중성자로는 김명현(경수로), 정창준(중수로), 구정의(고온가스로), 제5장 고속로는 홍서기, 제6장 용융염로는 오세기 박사들이 수고하셨으며, 류건중 박사가 종합감수하였다. 부록 A 핵자료는 길충섭, 부록 B 비핵확산성은 장홍래 박사들이 작성하였다.

끝으로 본 책자는 한국원자력연구원의 자체과제 “토륨주기 연구현황 조사 분석”의 재원으로 발간한 것임을 밝혀둔다.

2014년 9월 장중화

요 약

토륨은 우라늄과 더불어 자연에 존재하는 원자력에너지생산에 활용할 수 있는 물질이다. 그러나, 연쇄핵분열반응을 일으킬 수 있는 핵연료물질인 우라늄-235와 달리, 중성자를 포획하여 핵연료물질로 전환하여야 하는 핵원료물질이다.

토륨을 전환하거나, 연쇄핵분열을 지속하기 위해서는 원자로가 필요하며, 그 구조는 우라늄핵연료를 사용하는 원자로와 크게 다르지 않다. 그러나 토륨의 핵특성이 우라늄이나 플루토늄과 다르므로 연소특성, 운전특성, 안전특성 등이 달라진다. 토륨 주기에서 원자로는 핵연료물질 전환율을 최대화하거나, 주어진 토륨으로 최대의 에너지를 생산하는 목표를 달성할 수 있도록 설계할 수 있다.

원자로의 임계상태를 유지하고 토륨전환에 필요한 중성자를 공급하기 위해서는 농축우라늄, 플루토늄, 전환된 우라늄-233 등을 사용해야 한다. 열중성자 에너지 영역에서 토륨의 전환율이 크므로 효과적인 전환을 위해서 seed-blanket 개념을 이용하여 핵연료물질과 핵원료물질을 배치한다. 경수로나 중수로에서는 중성자 확산 거리가 짧으므로 핵연료집합체 내에서 연료봉단위로 배치하며, 고온가스로, 용융염로, 고속로에서는 중성자에너지가 낮아지는 노심 외곽 쪽으로 토륨을 배치하게 된다.

토륨에서 전환된 핵연료물질인 우라늄-233을 효과적으로 이용하기 위해서는 잔존한 토륨과 분리해야 하므로 사용후핵연료의 재처리가 필요하다.

우라늄-233의 연소는 장수명 초우란원소의 발생량을 현저히 줄이므로 수십만 년의 사용후핵연료 관리 부담을 줄일 수 있다. 고에너지 중성자를 발생하는 가속기구동 미임계로에서는 초우란원소의 발생량과 장수명 핵분열생성물을 효과적으로 소멸 처리할 수 있다.

가속기구동 미임계로는 임계사고의 우려를 배제할 수 있는 장점이 있다. 그러나 붕괴잔열제거 실패에 따른 노심손상우려는 상존한다. 제논, 프로트악티늄 등의 붕괴에 따른 재임계가능성을 고려하면 열중성자로의 임계도를 0.92 이하로 설계해야 하나 고속로로는 0.98이하로 설계하면 됨으로 고속미임계로에서 가속기의 부담이 적어진다. 이런 관점으로는 평균중성자에너지 가장 높은 납냉각원자로가 가속기구동 미임계로에 적합할 것으로 평가된다.

현재의 시장상황으로는 폐쇄형 토륨핵주기의 경제성이 통상적인 개방형 우라늄핵주기보다 나쁜 것으로 평가되나, 우라늄원광가격이 상승하고, 토륨의 재처리비용이 낮

아지며, 사용후 핵연료 영구처분 비용이 높아지면 토륨핵주기의 비교 경제성은 향상될 것으로 기대된다.

토륨에서 전환된 우라늄-233의 임계질량이 적고, 즉발중성자원이 적기 때문에 핵무기에 전용될 가능성이 있으나, 불순물로 생성되는 강한 감마 방사선 때문에 실용 핵무기로서의 가치는 낮을 것으로 판단된다.

토륨관련 쟁점이 되는 몇 가지 주장에 대한 해설을 QA 형식으로 다음 쪽에 수록하였다.

본 보고서의 제 1장에서는 토륨주기와 관련된 핵연료주기, 자원 부존량, 초우란핵종, 독성, 지속가능성을 위한 노형평가지표, 토륨 관련 협회 등에 대한 전반적인 소개를 하였다. 제 2장에서는 토륨핵연료의 제조, 물성, 노내 거동, 사용후토륨핵연료의 재처리, 폐기물처리에 대해 살펴보았다. 제 3장에서는 가속기구동 미임계로를 가속기 및 중성자발생 표적 등 미임계로구성을 설명하였다. 제 4장에는 열중성자로인 경수로, 중수로, 고온가스로에서 토륨사용에 대해 설명하였다. 고온가스로를 가속기구동 시스템에 연계하는 연구도 소개하고 있다. 제 5장에서는 고속중성자로의 핵특성과 개발현황을 소개하고, 우라늄주기와 토륨주기의 핵특성을 고속로관점에서 검토하고 납냉각로, 소듐냉각로, 미임계고속로를 소개하였다. 제 6장에서는 액체핵연료를 사용하는 용융염원자로에 대해 소개하였다. 용융염원자로는 열중성자로와 고속중성자로로 구성할 수 있어 토륨과 관련하여 활발히 연구되고 있다. 가속기구동 시스템에 연계하는 연구도 소개하고 있다. 부록 A에는 토륨관련 반응단면적과 핵분열특성을 소개하고, 임계질량, 방사능 독성, 붕괴열 등의 계산 결과, 가속기구동 시스템의 핵파쇄 중성자 발생 결과를 보여준다. 부록 B에는 국제기구에서 정의된 핵비확산성과 다양한 평가방법, 평가인자를 수록하였다.

토륨 Q&A

1. 토륨원료로 핵무기를 만들 수 없나 ?

원자폭탄의 원료는 천연우라늄을 농축한 우라늄-235, 우라늄-238을 증식한 플루토늄-239, 토륨을 증식한 우라늄-233이다. 우라늄-233의 임계질량은 우라늄-235보다 작고 플루토늄-239보다 약간 크다. 네바다 핵무기 시험장에서 Teapot 작전으로 1955년 4월 실시한 MET 시험은 우라늄-233을 사용하였다. 그러나 토륨전환과정에서 동반 생성되는 우라늄-232의 붕괴생성물인 탈륨-208의 강한 감마선으로 핵무기관리가 어렵기 때문에 전술핵무기로 보급되지는 않았다.

2. 토륨은 우라늄보다 더 많은 에너지를 생산하는가 ?

토륨과 우라늄은 자연에 존재하는 핵원료물질로 중성자조사를 통해 핵분열성물질로 전환될 수 있으며, 단위 질량당 발생하는 핵분열에너지는 거의 같다.

3. 토륨은 방사성폐기물이 발생하지 않는가 ?

핵분열에서 핵분열생성물과 초우란원소가 주된 방사성폐기물로 발생한다. 자연수준으로 감쇄기간이 300년 정도인 핵분열생성물은 모든 핵분열에서 거의 비슷한 양이 발생하나, 토륨원료에서는 감쇄기간이 30만년 정도인 초우란원소는 거의 발생하지 않는다.

4. 토륨원자로는 안전한가 ?

원자로에서 대량 방사능유출사고의 원인은 임계도 제어 실패에 따른 출력폭주와 붕괴잔열제거 실패에 따른 핵연료 용융이다. 이 두 가지 가능성은 연쇄 핵분열반응을 이용하는 원자로에서는 피할 수 없으며, 공학설계로 줄이게 된다. 안전하게 설계된 원자로에서 우라늄과 토륨연료의 안전성은 유사할 것으로 예상된다.

5. ADS는 사고 시 안전한가 ?

ADS는 가속기를 정지시켜 미임계 상태를 빠르게 만들 수 있으므로 임계사고의 발생가능성을 줄일 수 있다. 그러나 토륨전환 시 중간 생성물인 Pa-233의 반감기가 27일로 길어서 원자로중단 이후 재임계가 될 우려가 있다. 일반 원자로도 제어봉은 다중성을 확보하여 신뢰성 높게 작동하므로 임계사고가 발생한 경우는 거의 없다. TMI, Fukushima 사고는 붕괴잔열을 효과적으로 제거하지 못해서 발생한 것이며, ADS에서도 대부분의 에너지가 핵분열에서 발생하므로 붕괴잔열제거 문제는 상존한다.

6. 토륨원자로는 경제적인가 ?

상용 토륨원자로가 건설·운영된 적이 없으므로 알 수는 없지만, 필요한 운전·안전설비가 우라늄원자로와 크게 다르지 않을 것으로 예상되므로 원자로의 건설비용은 비슷할 것으로 예상된다. 가속기구동 미임계로에서는 가속기의 건설비용과 전력비용이 추가된다.

7. 토륨자원은 풍부한가 ?

지구표면에 존재하는 토륨은 우라늄보다 3~4배 많다. 그러나 자원으로서의 토륨은 우라늄보다 적다. 이는 아직 충분한 조사가 이루어 지지 못했기 때문이다.

8. 우리나라에는 토륨이 풍부한가 ?

우리나라는 충남 사곡에서 토륨자원 지질조사가 있었으나, 품질이 나빠 자원으로서의 경제적 가치가 없는 것으로 판단되었고, 우리나라에 토륨자원이 풍부하다는 근거는 없다.

9. 토륨은 값이 싸는가 ?

현재 조사된 토륨자원은 대부분 희토류와 함께 존재하기 때문에 토륨을 정제하기 위해서는 상당한 공정과 에너지가 필요할 것으로 판단되어 우라늄보다 싼 값에 공급할 수 있을 지는 의문이다. 그러나 산업에 필요한 희토류금속 채광과정에서 부산물로 생산되므로 미래의 토륨가격은 예측하기 어렵다.

10. 토륨은 재처리가 필요없는가 ?

토륨은 중성자를 흡수하는 물질이며, 일반적인 원자로조건에서 전환이 느리다. 따라서 균일한 노심에서는 임계유지가 어렵다. 효과적인 이용을 위해서는 중성자에 의해 조사된 토륨에서 재처리를 통해 전환된 U-233을 분리하여 seed 영역에 배치하고, 토륨은 낮은 에너지영역에 배치하는 seed-blanket 배치를 해야 한다.

재처리를 하지 않고 토륨을 노심 내에 장기간 장전해 됨으로써 전환된 U-233이 노심 내에서 핵분열 하도록 할 수 있으나, 피복관의 성능저하를 극복해야 하며, 연쇄반응 지속을 위한 임계도 유지조건 때문에 외부에서 U-235 또는 Pu-239를 공급해야 하므로 토륨을 충분히 활용할 수 없는 문제가 발생한다.

11. ADS는 납냉각로만 사용하나 ?

ADS의 중성자 발생 표적으로는 질량수가 큰 우라늄, 텅스텐, 납 등이 적합하며, 이중 납은 물리적 특성이 표적으로 적합한 것으로 판단된다. 따라서 미임계로도 납냉각방식을 채택하면 공학적 문제해결에 유리하다.

토륨은 열중성자에서 전환율이 높으므로 미임계로 또는 임계로로 용융염로, 고온가스로, 중수로를 사용하는 방법도 연구되고 있다.

12. ADS의 가속기는 ?

많은 중성자를 얻기 위해서는 약 1 GeV의 양성자를 이용한 핵과쇄 중성자선원이 유리하다. 또한 대전류(10 mA이상)가 필요하므로 대전류 가속에 유리한 선형 양성자가속기를 주로 고려하고 있다. 반복적 가속을 이용하여 경제성에서 유리한 사이클로트론도 검토되었으나, 고에너지 대전류를 얻기는 어려울 것으로 판단하고 있다.

전력발생시설로서 이용하기 위해서는 고장률이 낮아야 하나, 현재 수준의 가속기는 100 ~ 1,000 시간의 무고장시간(MTBF; Mean Time Between Failure)로 산업시설로 필요한 10,000 시간 이상의 MTBF와는 거리가 크다.