

GEN IV형 원자로의 국내 도입으로 인한 환경 영향에 관한 연구

Effect on Introduction of GEN IV Nuclear Reactor on Environmental Friendliness in Korea

김용한, 오원진, 임채영, *이건재
한국원자력연구소, *한국과학기술원

요 약

최근 선진국들 주도로 국제 공동연구로 GEN IV 원자로에 대한 연구가 활발히 진행중이다. GEN IV에서 고려하고 있는 원자로형중 고속로(FR)와 소멸로(ADS)를 도입한 핵연료 주기를 고려한다면 고준위 폐기물의 감소 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 이를 핵연료주기상에서의 물질 흐름 관점에서 연구하였으며, 환경 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 도구를 제작하여 여러 가지 시나리오를 수립하고, 열중성자로만을 이용한 경우와 비교 분석하였다. 열중성자로만을 이용한 경우에 비해 GEN IV형 발전소의 도입이 환경에 긍정적인 영향을 준다는 사실을 정량적으로 확인하였다.

Abstract

Nowadays GEN IV - international project for future type(Generation IV) nuclear reactor - is studied actively. Introduction of Fast Reactor and Acceleration Driven System which are GEN IV type reactors can reduce High Level Waste through the nuclear fuel cycle including them. In this study, some fuel cycle schemes including these types of reactors are to be analyzed in a view of material flow by new made calculation tool compared to scheme by only thermal reactors. In view of the results so far achieved in this study, the introduction of Gen IV type reactors gives an advantage over another cases.

1. 서론

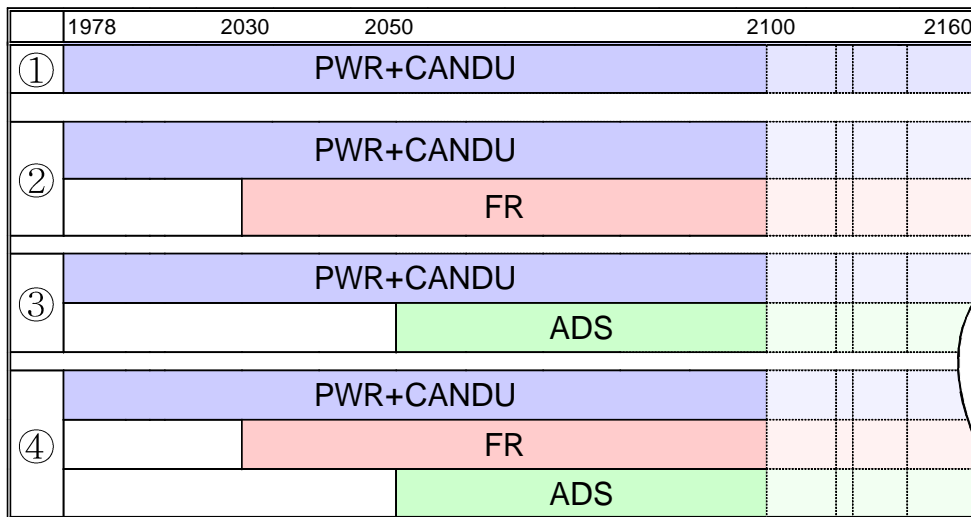
미국을 중심으로 하여 국제적인 공동 연구로 진행되고 있는 미래형(GEN IV) 원자로 개발과 관련하여 GEN IV 원자로형, 도입 시점 및 방법론에 따른 국내 장기 핵연료주기 와 사용후 핵연료 및 고준위 폐기물 등 방사성 폐기물 관리에의 영향을 환경친화성 측면에서 살펴보았다.

GEN IV 원자로형은 고속로(FR¹⁾)와 소멸로(ADS²⁾)로 선정하였고 도입시점은 FR은 2030년, ADS는 2050년 이후로 하였으며, 2160년까지의 우라늄 소요량, 사용후 핵연료 발생량, 고준위 폐기물중 몇가지의 특별한 핵종들을 여러 가지 핵연료주기 시나리오 비교를 통해 FR과 ADS의 도입이 환경영향에 긍정적인 결과를 가져옴을 정량적으로 평가해보았다.

2. 미래형 원자로 도입을 위한 가정 및 시나리오

본 연구에서 고려한 시나리오는 다음 네가지이다.

- (1) 열중성자로만으로 이루어진 직접처분 주기,
- (2) 열중성자로와 FR의 연계 주기,
- (3) 열중성자로와 ADS의 연계 주기,
- (4) 열중성자로와 FR, ADS의 연계 주기



[그림 1] 노형 도입 시나리오

열중성자로만으로 이루어진 직접처분 주기에는 PWR과 CANDU를 고려하는데, CANDU의 경우는 현재 운전중인 월성의 4기만을 고려하며 더 이상 건설하지 않는 것으로

1) FR : Fast Reactor

2) ADS : Accelerator Driven System

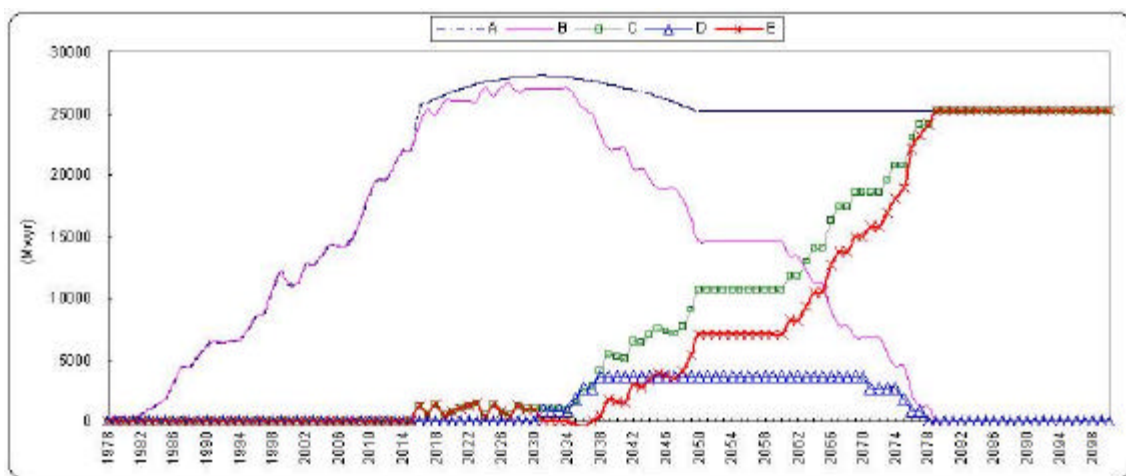
로 가정하였다. CANDU의 경우 전력량에는 고려가 되었으나 폐기물량을 비교하는데에는 모든 경우 동일한 역할을 하므로 상대적인 비교에서 큰 의미가 없어 결과적인 폐기물량 계산에는 고려하지 않았다. PWR은 2000년도까지는 연소도나 발전소 수명, 농축도 등 모두 실질 데이터를 이용하였고, 이후에는 [표 1] 와 같이 가정하였다. FR은 상용로로 가정하여 1,000 MWe로, ADS는 400 MWe로 가정하였고, 수명은 모두 60년으로 설정하였다. 이들을 이용하여 노형전략은 1978년부터 2100년까지 수립하고, 그 시기의 발전소 수명이 60년이므로 물량 흐름은 2160년까지 관찰하였다. 2000년까지는 모든 상황을 실제 상황과 동일하게 적용하였고, 2001년부터 2015년에 대한 전략은 산자부에서 발표한 제 5차 장기 전력 수급 계획에 따른 발전소 건설 계획을 그대로 적용하였다. 이후 2050년까지는 정부에서 발표한 인구추계에 근거하여 선진국 및 개발도상국들의 사례를 적절히 고려하여 전력 소요량을 추정, 이에 맞추어 전체 전력 소요량의 40%가 원자력으로 충당된다는 가정하에 각 해의 발전소 신규 건립용량을 가정하였고, 2050년 이전에 전력량 증가가 둔화되어 2050년의 전력량에서 더 이상 증가하지 않는 것으로 보고 전력 수요량에 맞추어 노형 전략을 세웠다. 이때, FR은 2030년 이후에, ADS는 2050년 이후에 도입되도록 하였다. FR과 ADS에 필요한 초기 Pu 수요와 FR, ADS에서 나오는 사용후 핵연료 재처리하는 국내 현황에 맞도록 건식 재처리를 가정하였고, 경수로의 경우 수명연장은 고려하지 않았다.

[표 1] 노형별 도입을 위한 기본 가정

Parameter	PWR	CANDU	FR	ADS
Plant capacity [MW(electric)]	KSNP : 1,000 APR1400 : 1,400	Real Data	1000	400
Plant load factor	Real data : ~2000 80% : 2001 ~	Real Data		
Lifetime	KSNP : 40yr APR1400 : 60yr	40yr	60yr	60yr
Fuel discharge Burn-up [MWd/TU]	33,000 (1978-1984) 40,000 (1985-1996) 43,000 (1997-2000) 45,000 (2001-2010) 55,000 (2010-)	7,500 (U fuel)		
Fuel Enrichment	3.3 % (1978-1984) 3.8 % (1985-1996) 4.0 % (1997-)	0.71 %		

시나리오를 수립하기 위해 본 연구에서는 다음 몇가지 원칙을 기본으로 하였다. 먼저, 전력 수요량중 원자력 설비 수요량(총 전력수요의 40%)에 맞추어 원자료를 도입한다.

노형전략을 세우기 위해 고려할 수 있는 변수는 매우 다양하지만 여기서는 일정한 전력 수요에 대해 각각 다른 노형을 적용시킨 후 그 결과를 보고자 함이다. 또, FR과 ADS를 고려하는 시나리오에서는 가능한 한 많은 수의 FR이나 ADS를 적용하는 것을 원칙으로 한다. 결과에서도 고찰하겠지만, FR과 ADS의 도입에는 상당한 양의 Pu 재고량이 소요되며, MA(Minor Actinide)의 양도 관계가 있다. 따라서 Pu와 MA의 재고량이 FR과 ADS의 도입을 결정하는 중요한 변수가 된다. 자원 재활용이나 폐기물 감량의 관점에서 본다면 기존의 PWR의 해체에 맞추어 FR이나 ADS로 대체되어 설립, 운영될 수 있다면 매우 바람직할 것이다. 만일, 2030년까지 열중성자로만 운영하다가 해체되는 설비용량에 대해 FR로 대체한다고 가정해보자.



[그림 2] 설비용량

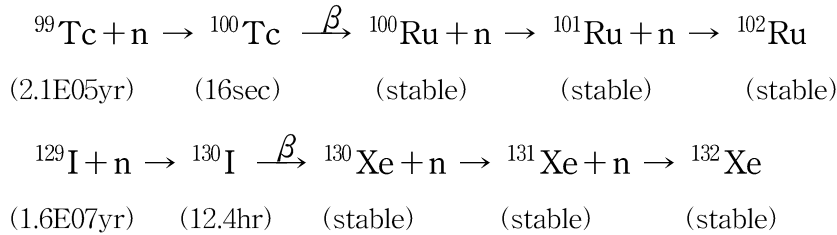
위 그림에서 A는 전력 수요량, B는 전력 수요량에 따라 2030년까지 신규 열중성자로를 건설할 경우 전력 생산량을 나타낸다. C는 열중성자로 해체에 따른 미래형 원자로 운전 요구량, D는 2030년까지 운전한 열중성자로에 의한 Pu 재고량으로 운전 가능한 FR의 설비용량, 그리고, E는 FR로 충족시키지 못한 미래형 원자로 운전 요구량이 된다. 여기서 볼 수 있듯이 열중성자로의 해체로 인한 수요를 최대한 FR(혹은 ADS)로 충족시킬 수 있는 양은 현실적으로 많이 제한되고, 본 연구에서 시나리오를 설정하는데 있어 어려움을 준 근본적인 이유가 된다. 실제로 본 연구에서는 위 원칙에 따라 Pu와 MA의 재고량을 고려한 노형 전략을 수립하여 결과를 도출해보았다.

3. 핵종 소멸과 물질흐름

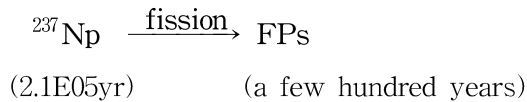
3.1. 핵종소멸(Transmutation)

고준위 폐기물의 처리 및 처분, 관리에 있어서 어려운 점은 핵종들중 상당수가 매우 반감기가 긴 핵종들이라는 점이다. 이를 그냥 처분한다면 인류가 존재하는 한 영원히 관리

해야 할 지도 모를 상황이다. 다행히도 핵종 변환을 통해 장반감기 핵종들이 보다 짧은 반감기를 갖는 핵종들로 변환될 수 있으며, 핵분열 생성물중 ^{99}Tc 와 ^{129}I 가, 그리고 악티나이드 핵종들이 그 대상이 된다. 핵분열 생성물은 주로 열중성자 스펙트럼에서 중성자 포획 및 β 붕괴를 통해 안정된 핵종으로 변환된다. ^{99}Tc 와 ^{129}I 핵종의 소멸 원리는 아래와 같다.



악티나이드 핵종은 상대적으로 매우 무거운 핵종이므로 고속 중성자로 인한 핵분열을 통해 다른 핵분열 생성물로 바뀐다. 이중 우라늄과 플루토늄은 국가에 따라 차이가 있지만 보통 잠재적인 자원으로 여겨지고 있으며, MA(Minor Actinide)의 경우는 소멸을 고려하지 않았을 때에는 매우 처리 곤란한 폐기물이지만 소멸을 고려한다면 분열시 발생하는 에너지로 인해 폐기 대상이면서 동시에 자원으로 볼 수 있다.

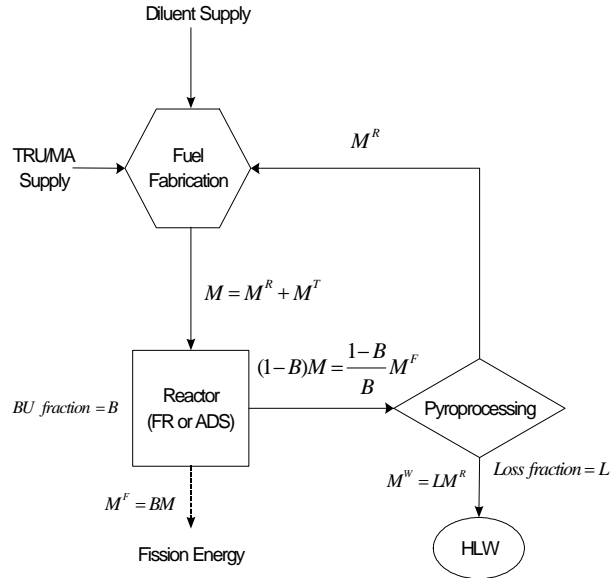


2.2. 핵연료 주기와 물질흐름

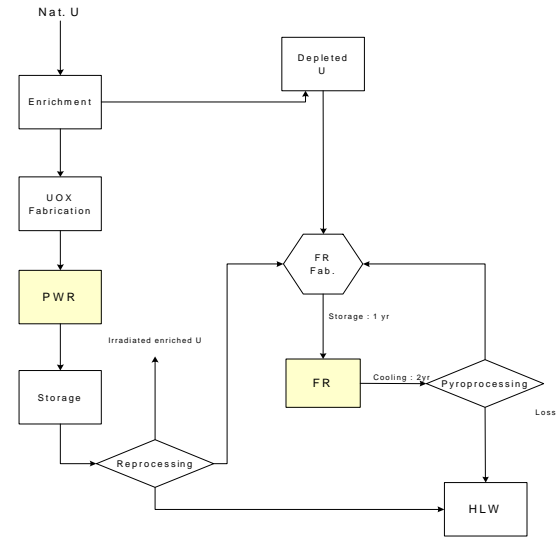
FR과 ADS를 도입한 핵연료주기로는 그 성격에 따라 매우 다양한 형태를 갖는데, FR은 Pu burner와 TRU³⁾ burner, Critical TRU burner, Fast Reactor 등을, ADS는 Accelerator-driven TRU burner, Accelerator-driven MA burner 등을 생각해 볼 수 있다. Pu burner는 EPR식의 MOX 연료를 사용하며, Critical TRU burner는 전환률이 0.5인 ALMR식의 악티나이드 소멸로이다. Fast Reactor도 역시 ALMR식의 악티나이드 소멸로로 전환률이 1이다. Accelerator-driven TRU burner는 ANL의 설계에 기초한 Pb-Bi 냉각재를 사용하는 미임계 TRU burner이고, 이와 유사한 Accelerator-driven MA는 연료에 질소 성분이 포함되며 일본에서 제시하는 방식과 유사한 형태이다. 본 연구에서는 이들중 현실적으로 국내 도입이 가능하리라고 보이는 TRU burner와 Accelerator-driven TRU burner를 고려하여, 위의 네가지 시나리오로 나누어 그 영향을 평가해보았다. 이들의 기본적인 개념과 물질 흐름은 [그림 3]과 같고, 이는 앞으로 고려

3) TRU : TRans Uranium

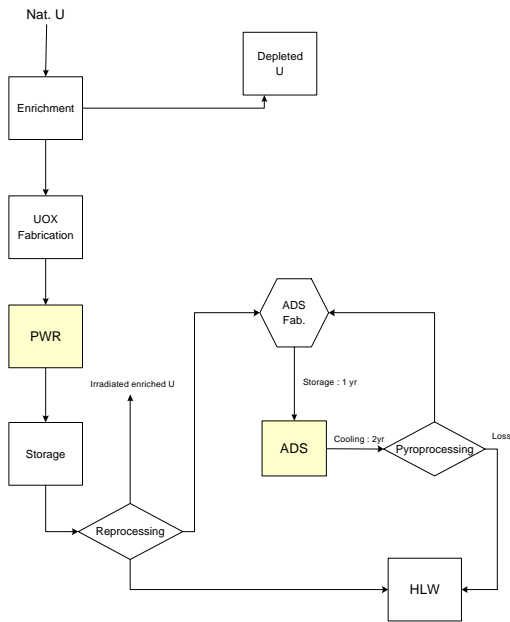
할 핵연료 주기에서 FR과 ADS를 중심으로한 MA와 Pu의 흐름을 나타낸다. 본 연구에서 고려할 각각의 핵연료주기를 [그림 4] ~ [그림 6] 에 나타내었다.



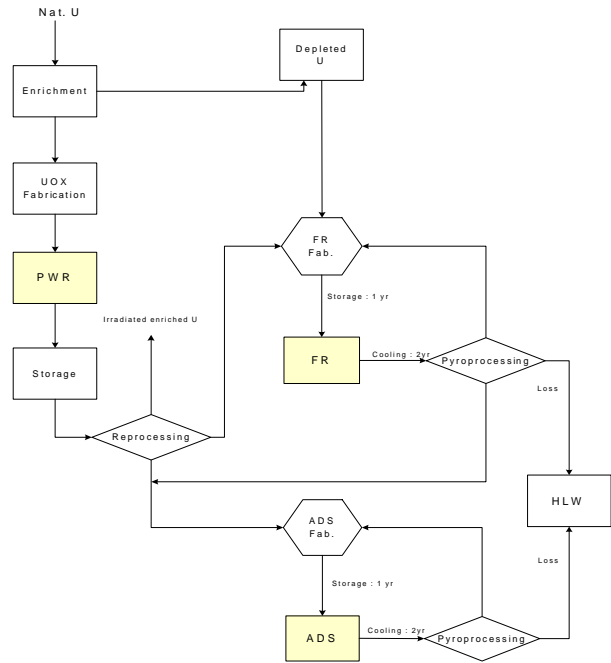
[그림 3] 악티나이드 및 Pu의 물질흐름



[그림 4] 열중성자로-FR 핵연료주기



[그림 5] 열중성자로-ADS 핵연료주기



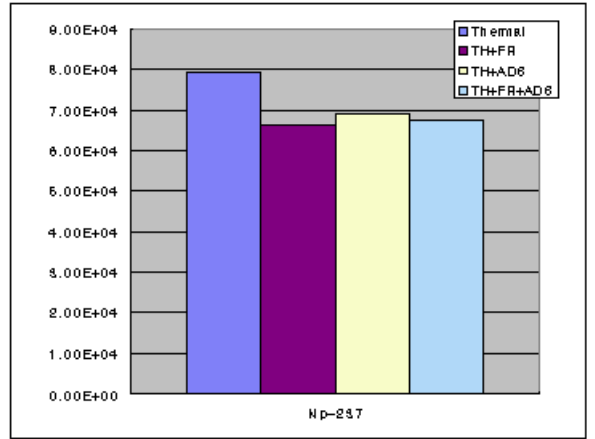
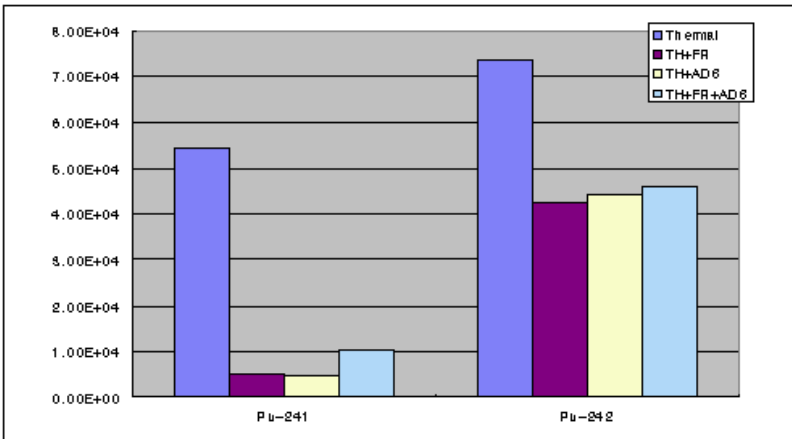
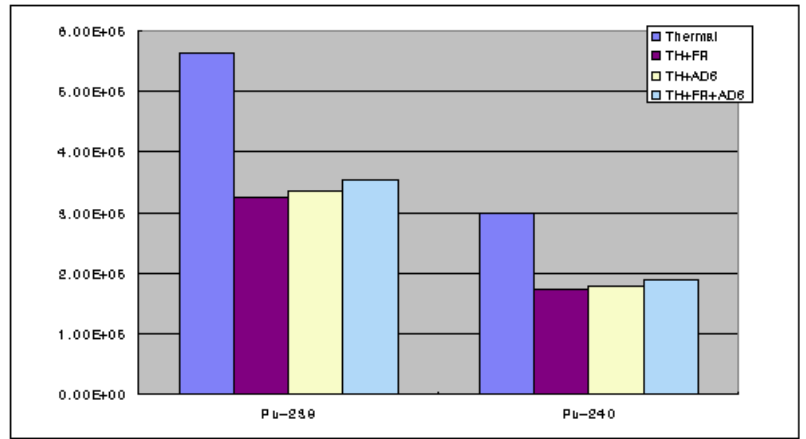
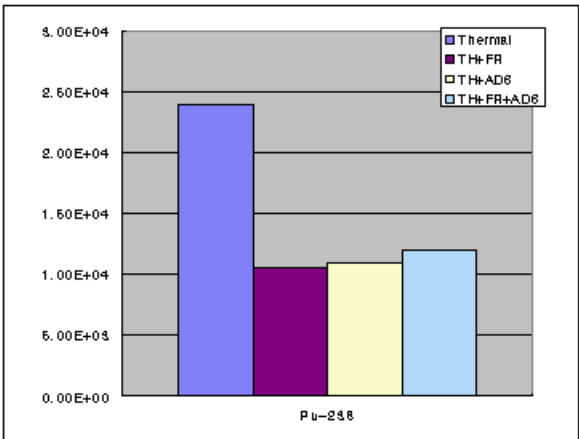
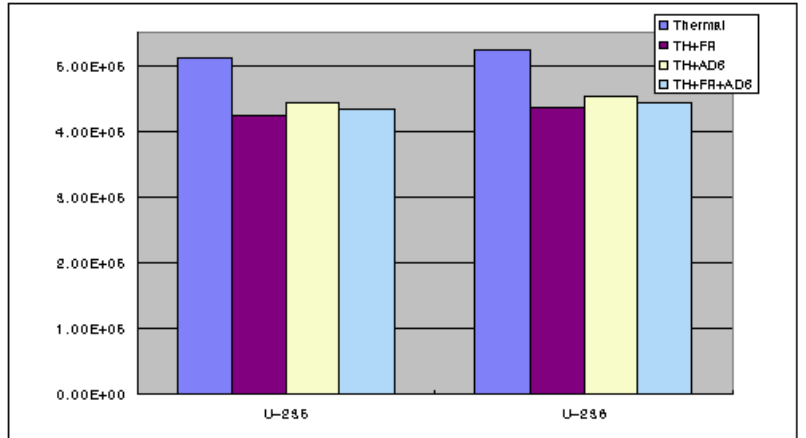
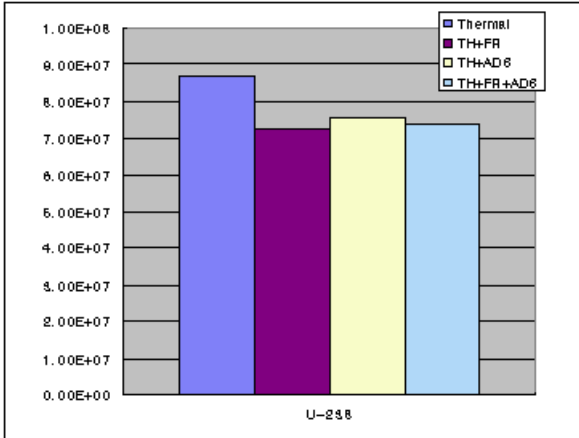
[그림 6] 열중성자로-FR-ADS 핵연료주기

4. 결과

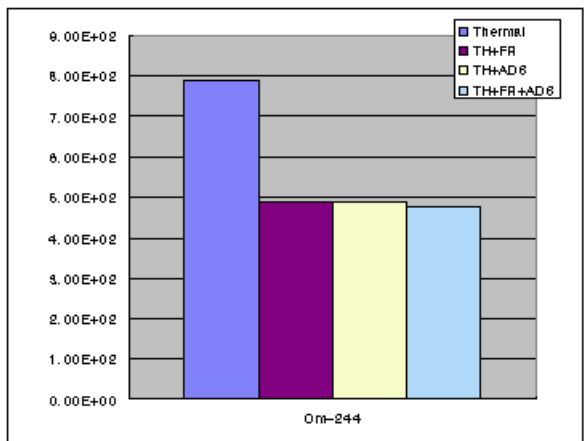
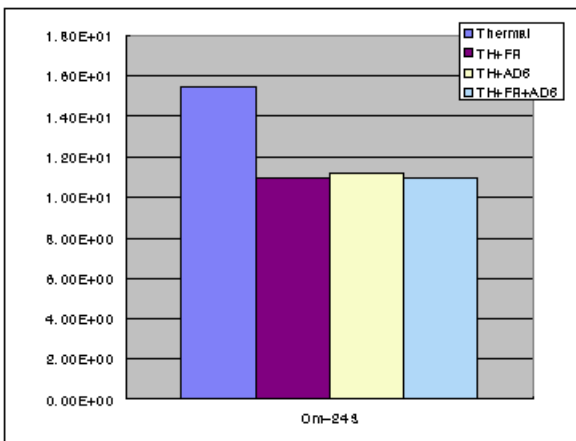
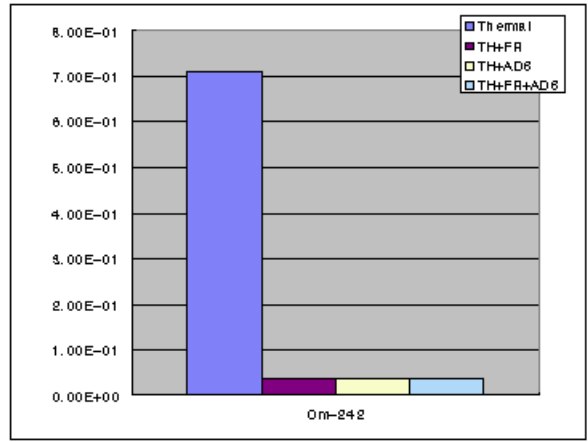
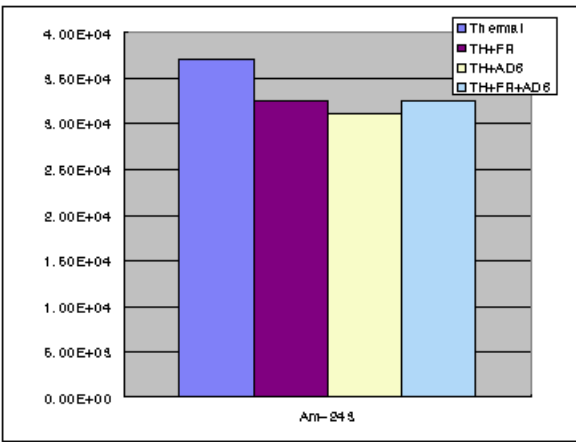
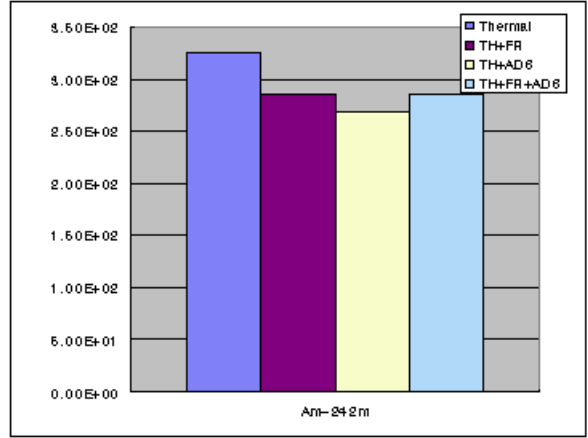
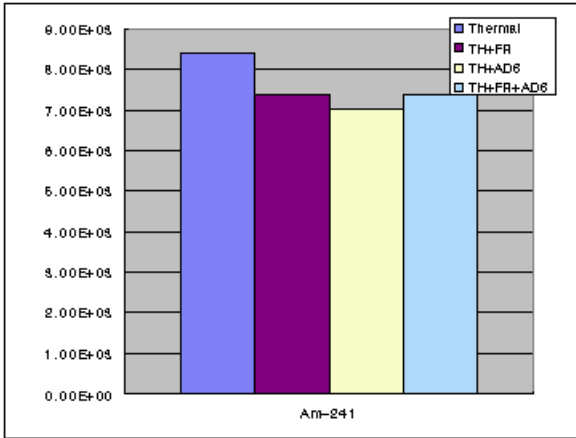
첫 번째 시나리오에서는 PWR 62기, CANDU 4기가 적용되었고, 두 번째 시나리오에서는 PWR 57기, CANDU 4기, FR 10기, 세 번째 시나리오에서는 PWR 59기, CANDU 4기, ADS 8기, 마지막 네 번째 시나리오에서는 PWR 58기, CANDU 4기, FR 4기, ADS 2기가 고려되었다. 환경친화성 평가를 위해서 본 연구에서는 미래형 핵연료주기를 통해 발생하는 고준위 폐기물에서 주요 핵종들의 발생량을 계산하는 도구를 제작하여 계산에 사용하였다. 주요 고려 핵종으로는 U, Pu, Np, Cm, Am 이렇게 다섯가지 원소의 동위원소들이다. 결과적으로 각 시나리오를 통해 발생하는 사용후 핵연료를 각 핵종별로 나누어 비교해 보면 [그림 7]와 같다. 전반적으로 열중성자로만 사용하는 시나리오에서 모든 종류의 핵종의 발생량이 가장 많았고, FR과 ADS, 또는 둘 다 사용하는 시나리오에서는 열중성자만 적용한 시나리오에 비해 적은 양이 발생하였다. 특히 Pu의 경우 그 차이가 두드러지게 나타났으며, TRU 전체적인 발생량을 보더라도 FR이나 ADS를 사용한 시나리오의 결과가 열중성자로만 사용한 경우의 절반을 약간 넘는 정도로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 핵종별로는 Pu의 감소가 두드러졌고, 전체적인 폐기물의 양의 가장 큰 부분을 차지하는 Pu-239의 감소가 매우 크므로 전체적인 감소도 크게 나타난 것으로 볼 수 있다. 연도별로 원자로형을 적용시킬 때 FR과 ADS는 Pu와 MA의 재고가 이들을 운전할 수 있을만큼 충분해야 가능하다. 즉, Pu나 MA의 재고 부족시에는 FR이나 ADS를 적용시킬 수 없는데 이러한 이유로 각 시나리오에서 FR과 ADS가 그리 많이 적용되지 못했으며, 특히 분석 결과 MA보다는 Pu의 양에 크게 의존하므로 Pu의 재고는 많이 줄어드나 MA의 재고는 그렇게 크게 줄어들지 않은 것으로 나타났다.

5. 결론 및 고찰

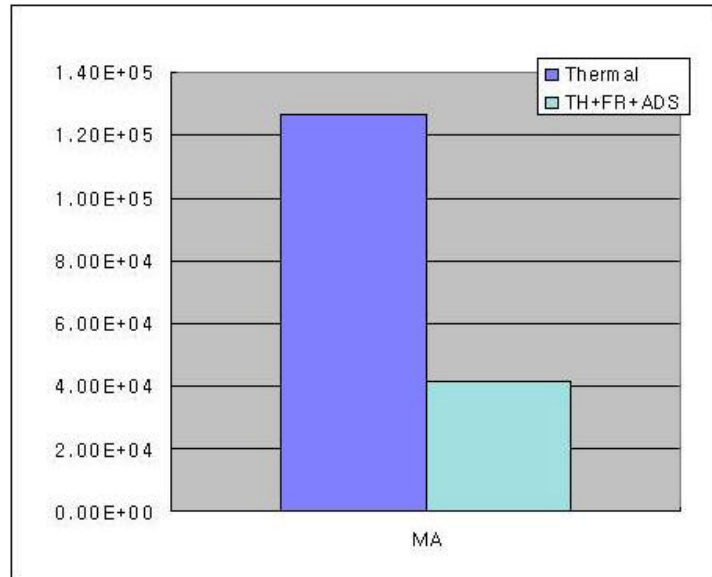
열중성자로만 운전하는 핵연료주기에 비해 분명히 FR과 ADS를 이용한 핵연료주기에서 고준위폐기물의 양을 줄여주는 역할을 하는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 문제는 충분한 FR이나 ADS를 적용시키지 못함으로 인해 사용후 핵연료중 고준위 폐기물이 감소하는 효과가 그리 크게 나타나질 않는다는 것이다. 이는 앞서 언급했듯이 Pu 재고량의 부족으로 인한 것인데, 만일 해외에서 Pu의 반입이 가능한 상황이나 우라늄을 FR이나 ADS의 연료로 Pu 대신 사용할 수 있다고 한다면 상당히 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. [그림 8]은 이와 같이 외부에서 Pu 부족량을 공급받을 수 있다는 전제 하에(즉 Pu 부족량에 관계 없이 FR과 ADS를 건설할 수 있다고 가정) 2100년까지 신규설립한 후 2160년까지 운전하여 발생된 MA의 양을 열중성자로만 이용한 직접처분 시나리오의 경우와 비교한 그림이다. 본 연구에서는 열중성자로만 이용할 때에 비해 MA가 1/3정도로 감소하는 것을 볼 수 있다.



[그림 7] 핵종별 발생량(kg)



[그림 7] 핵종별 발생량(kg)(continued)



[그림 8] Pu이 충분히 공급될 경우 HLW중 MA의 발생량

FR과 ADS가 현재까지 상용화되지 못한 관계로 데이터가 충분치 못했고, 이러한 데이터의 한계로 인하여 다양한 시나리오를 전개하지 못했다. 또, FR이나 ADS의 경우 본 연구에서는 TRU burner만을 고려했는데, 좀더 많은 데이터가 제공되어 다른 많은 경우를 고려할 수 있다면 좀더 실질적으로 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 핵비확산성 후행핵연료주기 환경친화성 평가 과제중 과학기술부의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Accelerator-driven Systems(ADS) and Fast Reactor(FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD/NEA, 2002, p39-p79
2. Trends in the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, 2001
3. 국내 핵연료주기의 경제성 평가(Evaluation on the Economics of the Korean Nuclear Fuel Cycle) -평가모형 개발을 중심으로-, 한국원자력연구소
4. 박원석, 송태영, 핵변환 시스템의 핵변환능력 평가, 한국원자력연구소, 1996
5. 장수영, 후행핵연료주기의 환경친화성 및 경제성 평가, 2002
6. <http://www.iaea.org/inis/aws/fnss/>