

미국 핵연료 주기 평가보고서 분석을 통한 한국 GEN IV 핵연료 주기의 타당성

임근수*, 이재민

경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동)

*etetet2005@khu.ac.kr

1. 서론

세계에서 가장 많이 사용 중인 경수로로는 현재 많은 한계가 드러나고 있다. 한국을 포함한 13개국은 GIF(Generation IV International Forum)를 설립하고, 이를 통해 미래형 원자로인 4세대 원자로(GEN IV)를 개발하기 위해 많은 연구비를 투자해 개발하고 있다. GEN IV는 노형에 따라 각기 상이한 핵연료 주기를 가지고 있다.

2014년 U.S.Department of Energy(이하 DOE)에서 다양한 핵연료 주기를 여러 그룹으로 나누어 평가한 바가 있다. 본 논문에서는 DOE 보고서를 바탕으로, 2011년 기준의 한국형 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로(VHTR), 초임계압수냉각로(SCWR)의 핵연료 주기를 평가해보고자 한다.

2. 본론

2.1 DOE의 핵연료 주기 분류

Table 1. Criteria and Sort of nuclear fuel cycle

기준	구분	
중성자 공급 방식	임계로, 미임계로(EDS)	
중성자 에너지	Thermal, Fast	
핵연료 방식	U, Th, Th/U	
농축 여부	Enriched, Natural	
재처리 횟수	0 회	8 그룹
	수 회	10 그룹
	U/TRU 추출	7 그룹
	지속 U/Pu 추출	7 그룹
	²³³ U/Th 추출	8 그룹

DOE에서는 약 4천 가지의 핵연료 주기를 Table 1의 기준에 따라 5가지 기준으로 핵연료 주기를 그룹화 하였다. 그 핵연료 주기 그룹은 40가지이며 각 그룹은 EG01에서 EG40까지 명명되었다. 예컨대 EG01은 미국의 현행 핵연료 주기인 농축우라늄을 열중성자로에서 1회 연소 후 처분하는 것이다.

2.2 2011년 한국의 GEN IV

2000년대 초중반의 원자력 르네상스는 많은 핵

연료 주기와 원자로형 등의 개발을 촉진했고, 이 시기에 국제적으로 GIF 설립, 핵연료 물질 가격 안정화 등 원자력 시장 성장이 이루어졌다. 그러나 북한의 핵실험과 2011년 3월의 후쿠시마 제1원전 사고는 원자력계에 갑작스런 침체를 불러왔다. 그렇기에 2011년 당시에 많은 지장이 있었을 것으로 보이는 한국의 GEN IV 개발현황, 특히 재처리로 인해 민감한 핵연료 주기에 대해 알아보려고 했다.

한국에서는 GIF를 통해서 SFR(Sodium-cooled Fast Reactor), VHTR(Very-High-Temperature Reactor) 개발에 참여하고 있다. 특히 SFR에 대해서 2006년에 고유 개념설계를 완수하였고, 이를 GIF에서도 인정받은 바 있다.

SCWR(Super-Critical Water-cooled Reactor)에 대해서는 재정지원 등으로 간접참여 중이며, GFR(Gas-cooled Fast Reactor), MSR(Molten Salt Reactor), LFR(Lead-cooled Fast Reactor) 또한 관심을 갖고 있다.

한국은 이러한 GEN IV 중 2011년 당시 개념설계 단계에 도달한 핵연료주기는 아래의 Table 2와 같이 정리될 수 있다.

Table 2. Fuel cycle of Korean GEN IV

노형	개념설계명	핵연료 주기
SFR	KALIMER (KAERI)	지속 재처리(금속 연료)
		U/TRU추출+감손우라늄
VHTR	PYCASSO	지속 재처리(TRISO 연료)
		U/TRU추출+천연우라늄
SCWR	SPHINX	1회 사용
		저농축 U + 매우 높은 연소도

우선 KAERI(한국원자력연구원)에서 설계한 SFR의 개념설계인 KALIMER의 핵연료 주기는, 사용후 핵연료를 재처리를 한 후 Zr과 감손우라늄을 첨가하여 만든 U-TRU-Zr 금속 연료를 고속로에서 연소시키는 방식이다.

VHTR의 개념설계인 PYCASSO의 핵연료 주기는 재처리를 통해 얻은 U/TRU에 천연우라늄을 첨가한 후, TRISO¹⁾ 형태로 가공하여 고속로에서 연소시키는 방식이다.

SCWR의 개념설계인 SPHINX의 핵연료 주기는 저농축 우라늄을 매우 높은 연소도로 고속로에서 1회 연소하는 방식이다.

2.3 한국 GEN IV 핵연료주기와 DOE의 핵연료주기 그룹 비교

EG01이 한국의 현행 핵연료 주기와도 유사하다. 이를 고려하여 현행 핵연료주기와 한국 GEN IV의 핵연료주기를 비교하면 다음과 같다.

KALIMER와 PYCASSO의 핵연료 주기는 EG24와 유사하다. EG24는 사용후 핵연료에서 재처리를 통해 추출한 U/TRU에 천연 우라늄을 혼합하여 지속적으로 핵연료 재사용을 하는 방식이다. EG24는 EG01에 비해 고준위 방사성폐기물을 적게는 7배에서 많게는 26배까지 줄일 수 있고, CO₂ 배출량이 적어 환경에 미치는 영향이 적으며, 지속적으로 소비되는 천연우라늄의 양이 1/40 가까이 줄어 자원 효율성이 좋은 등의 장점이 존재한다. 단점으로는 발전단가의 증가, 재처리 시설의 개발 및 운영에 의한 정치적 압박 발생가능성 등을 들 수 있다.

KALIMER는 EG24의 여러 옵션과 다르게 감손 우라늄을 사용하는데, 이에 따라 발생 가능한 경제성, 연소도 등의 차이점에 대한 검토가 필요하다. PYCASSO는 EG24와 다르게 TRISO 형태의 핵연료를 사용하는 만큼, 핵연료 가공과정에서 발생하는 비용, 방사성 핵연료폐기물(재처리를 위해 벗겨낸 탄소 코팅)의 비용 등이 필요하다.

SCWR의 개념설계 SPHINX의 경우는 EG04와 유사하다. EG04는 천연우라늄 연료를 고속로에 매우 높은 연소도로 1회 사용하는 방식이다. EG01에 비해 천연우라늄 소모량은 57배 감소하여 자원 효율성이 증진되고, CO₂ 배출량이 적은 점 등의 장점이 존재한다. 그러나 아직까지 개념설계가 완성되지 않은 만큼, 연구와 검토, 특히 초임계수 사용에 따른 원자로 소재들의 개발 또한 필요적일 것이라고 판단된다.

3. 결론

DOE에서는 다양한 핵연료 주기를 40 가지 그룹으로 분류한 후, 여러 시나리오로 평가했다. 본 논문에서는 이러한 분류와 평가를 바탕으로, 2011년 한국에서 연구 중인 GEN IV의 핵연료 주기를 살펴보았다. 그 결과 당시보다는 진보했을 것이라고

생각되지만, 한국 GEN IV의 핵연료 주기는 현행 핵연료 주기보다 장점이 크지만, 극복해야할 문제점 또한 존재했다는 것이 확인되었다.

조사 결과에 따르면 2011년 당시 한국 GEN IV에 도입될 핵연료 주기는 한국의 에너지 안보, 급성장하는 에너지 수요를 고려하면 현행 핵연료 주기보다 상당히 매력적인 점이 많다. 그러나 이러한 핵연료 주기를 실현하기 위해서 투입되어야 하는 자원과 연구시간, 극복해야 할 법적, 외교적 문제 등은 예측하기 어렵다는 점은 부인하기 어려울 것이다. 따라서 GEN IV에 상응하는 핵연료 주기를 개발하기 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것이라고 생각한다. 특히 DOE에서는 EG24뿐만 아니라 EG23, EG30 등 미래 유망한 핵연료 주기를 10종 선정할 만큼 한국에서도 기존에 연구 중인 핵연료 주기 외에도 다양한 유형의 핵연료 주기에 대해서 연구와 검토 또한 필요할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] R.Wigeland *et al.*, "Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening-Final Report", 2014. U.S.Department of Energy.
- [2] 김영인 등 6인, "제4세대 소듐냉각 고속로 고유개념 설정", 33, 36, 41, 2010. 한국원자력연구원.
- [3] "Proliferation Resistance and Physical Protection of the Six Generation IV Nuclear Energy System", 2011. Generation IV International Forum.
- [4] Hyungrae Kim *et al.*, "Design and Progress of the SPHINX in KAERI", 2005. KAERI.
- [5] T.Schulenberg *et al.*, "Supercritical Water-Cooled Reactor Development through GIF Collaboration", 2011. Generation IV International Forum.

1) 구형으로 가공한 핵연료물질을 탄소 등으로 코팅한 작은 구슬모양의 핵연료 생산방식을 칭함.