

차세대 원자로의 기술 동향과 정책 과제

2025년 2월

김용희 교수

원자력 및 양자공학과

KAIST

(Korea Advanced Institute of Science & Technology)

목 차

1. 서론 및 개요
2. 4세대 원자로 연구개발 동향 및 전망
3. 한국 4세대 원자로 산업 발전 방안
4. 요약 및 제언
5. 참고문헌

1. 서론 및 개요

1.1 원전의 진화 및 4세대 원전

본 보고서는 현재 주요 원자력 선진국을 중심으로 활발히 연구/개발되고 있는 소위 제4세대 원자로 시스템 관련 주요국에서의 연구 및 개발 동향 및 핵심적인 정책에 대한 설명과 기술이다. 특히 ‘차세대원자로’에 해당하는 4세대 원자로에 대한 국내 기술개발 현황 그리고 관련 산업 전망과 정부 정책 및 기술적, 정책적 제언도 여기에 담겨 있다.

4세대 원자로 개념은 2000년 초에 미국 에너지부(DOE) 및 9개 국가 전문가가 주축이 되어 중심으로 결성된 GIF (Generation-IV International Forum)에 의해서 정의되고 제안되었다. 첫 GIF 헌장(Charter)에 2001년 9개국이 서명하였으며, GIF는 현재 14개국이 참여하고 있으며 4세대 원자로 개발 및 활용을 위한 국제협력의 중추적인 역할을 하고 있다. 참여하는 14개국은 다음과 같다: 아르헨티나, 오스트리아, 브라질, 캐나다, Euratom, 프랑스, 일본, 중국, 한국, 남아공, 러시아, 스위스, 영국, 미국. 여기서 Euratom은 유럽연합 (European Union)을 대표하며, 아르헨티나와 브라질을 제외한 12개국은 GIF ‘Framework Agreement’에 서명하고 4세대 원자로 관련 국제협력에 활발히 참여하고 있다.

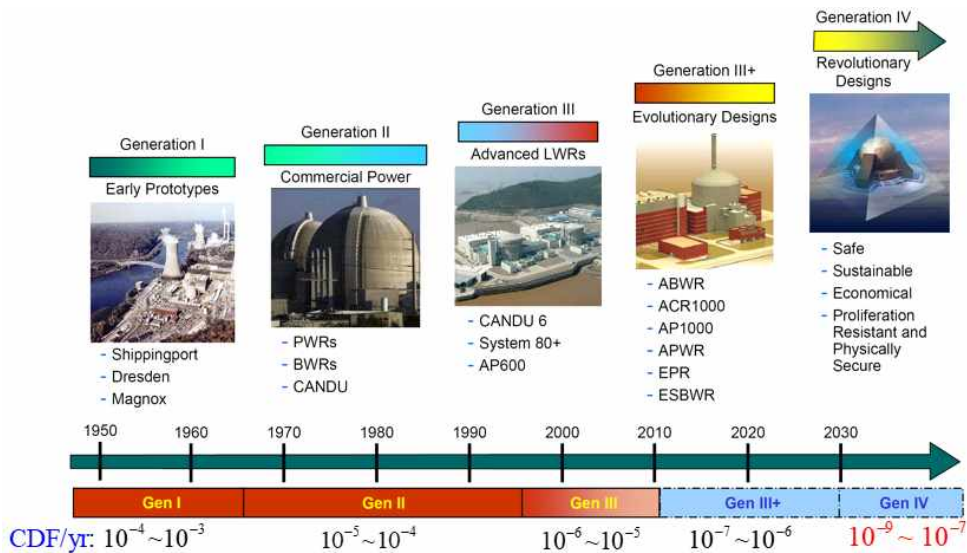


그림 1-1 원자력 발전 기술의 진화 개념도

그림 1-1은 원자력 발전소 진화를 보여주며 4세대 원자로 시스템의 주요 개발 목표를 담고 있다. 일반적으로 원전의 세대는 그림에서와 같이 개발 시점으로 구분되지만, 실제 각 세대의 주요한 차이는 안전성이라고 할 수 있

다. 4세대 원자로로는 기본적으로 이전 원자로 시스템에 비하여 ‘보다 안전하고’ ‘보다 지속가능하고 (sustainable)’ ‘보다 경제적이고’ ‘보다 높은 핵확산 저항성’을 개발목표로 하고 있다. 그림에 제시했듯이, 연간 중대사고 빈도 (CDF, Core Damage Frequency) 관점에서 각 세대는 분명한 차이를 가지고, 4세대 원자로의 경우 극도로 낮은 CDF를 목표로 한다. 즉, 4세대 원자로에서 중대사고가 날 확률은 최대 10^{-7} 정도로서 천만년에 1회 정도라고 할 수 있다. 직경 약 5km 소행성이 지구와 부딪쳐 인류가 멸망할 확률이 약 5×10^{-8} 정도임을 고려할 때 4세대 원자로의 안전성을 짐작할 수 있다.

1.2 무탄소 원자력 특징

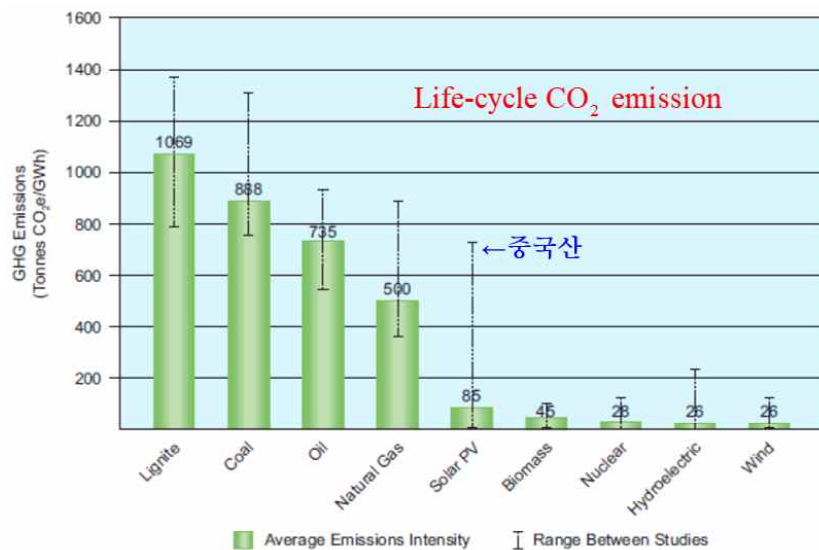
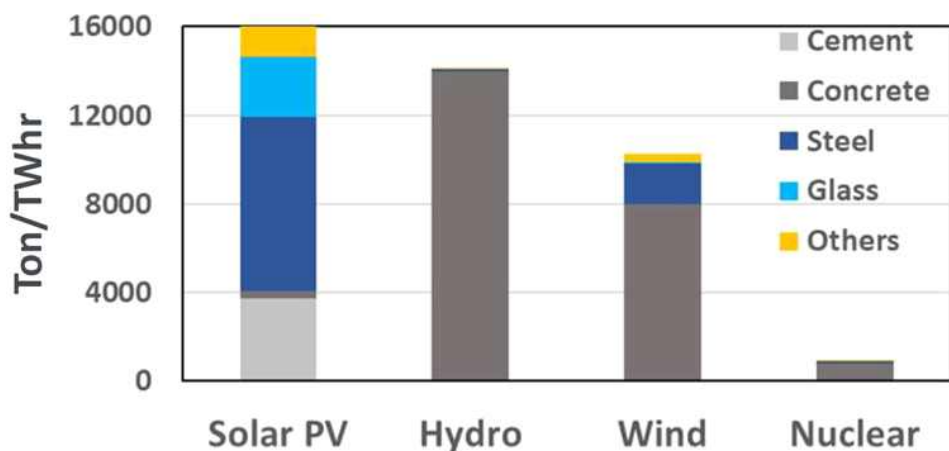


그림 1-2 에너지원에 따른 생애주기 이산화탄소 배출량

화석연료 오남용으로 인한 기후변화는 이제 인류의 생존을 위협할 정도로 심각하고 문제가 부상하고 있다. 이와 관련 UN의 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 대한 정부 간 협의체)는 원자력의 확대 활용을 권고하고 있으며, 국제에너지 기구(IEA) 또한 2050년까지 원자력이 두 배 확대될 것으로 예상하고 있다. 한편, 2023년 12월 UAE 두바이에서 열린 기후변화협약 당사국 총회인 COP28에서 주요 국가들은 탄소중립을 위해서 2050년까지 원자력 활용을 3배 확대할 것을 선언하기로 했다. 이산화탄소 및 천연가스(메탄)와 같은 온실가스 배출을 줄여 기후변화를 막고자 하는 이러한 노력은, 그림 1-2에서 보듯이, 원자력의 온실가스 배출이 재생에너지와 유사하거나 더 적기 때문이다.

원자력의 이산화탄소 배출량은 극히 낮아서 풍력과 유사하고 태양광에 비하여 거의 1/3 수준임을 그림 1-2는 보여준다. 특히, 태양광의 경우 편차가 매우 큼을 알 수 있는데, 태양광 설비를 생산하는 과정에서 ‘석탄’과 같은 에너지가 여전히 중국과 같은 국가에서 많이 사용되기 때문이다. 한편, UN의 IPCC(Intergovernmental Panel for Climate Change) 보고서에선 원자력의 이산화탄소 배출량은 $\sim 12\text{gCO}_2/\text{kWh}$ 로 인용하는데 이는 그림 1-2의 1/2 수준이다. 원자력 발전 시 극도로 낮은 온실가스 배출량이 태양광에 비하여 현저히 낮은 이유는 그림 1-3에서 확인할 수 있는 에너지 생산당 요구되는 원재료 요구량에 의해서 설명될 수 있다. 그림 1-3에서 보듯이, 태양광의 경우 동일 에너지 생산에 요구되는 원자재량이 원자력에 비하여 수십 배 많음을 알 수 있으며, 풍력에 비해서도 현저하게 많다는 것도 확인할 수 있다.



How much stuff does it take to build and run a power plant? That depends on the type of plant. Nuclear is the most efficient, using much less material per unit of electricity generated than other sources do. (U.S. Department of Energy)

그림 1-3 에너지원에 따른 에너지 생산에 따른 원자재 사용량

그림 1-2의 원자력 관련 통계는 기존 2~3세대 원자력 발전에 기초하고 있는데, 4세대 원자력 시스템의 경우 이산화탄소 배출은 두 가지 이유로 더욱 낮아질 것으로 예상된다. 일반적으로 경수로의 경우 전기를 생산하는 열효율이 약 35% 정도인데, 모든 4세대 원전의 경우 높은 냉각재 운전 온도로 인하여 적어도 40% 정도 열효율이 예상되어 단위 에너지당 온실가스 배출은 더욱 낮아진다. 원자력 발전의 이산화탄소 배출량의 상당 부분은 천연우라늄 채굴 및 농축 과정에서 발생한다. 만약 4세대 원전의 주를 이루는 고속로가 사용되어 핵연료 재활용 기술이 현실화된다면 천연우라늄 의존도가

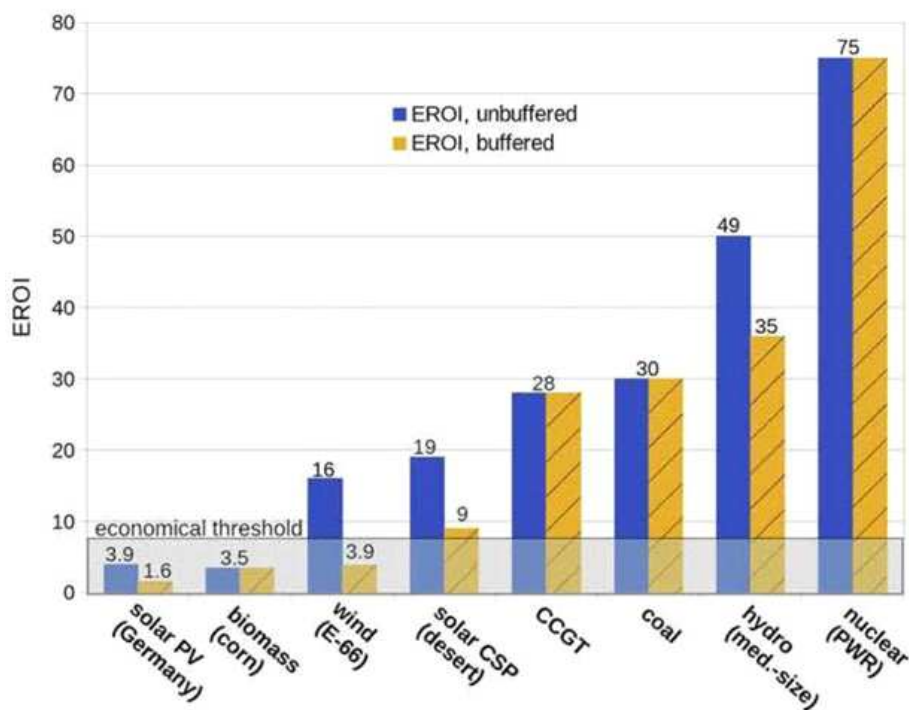
극적으로 낮아지고 사용후연료 발생이 극소화되어 원자력의 온실가스 배출은 타 에너지원 대비 무시될 정도로 더욱 낮아질 수도 있다. 이런 4세대 원자력 시스템의 특징은 3절에 보다 구체적으로 기술되어 있다.

다양한 에너지원의 속성과 장점 및 단점을 비교하고 평가할 때, EROI (Energy Returned On Invested)라는 지수 또한 중요할 수 있다. 어떤 에너지 생산 시스템의 EROI는 $EROI = E_R / E_I$ 와 같이 정의되는데 여기서 E_R 및 E_I 는 아래와 같다.

E_R = 시스템의 전 수명 기간 생산된 가용한 총에너지

E_I = 시스템을 전 수명 기간 운영하기 위해서 투입된 총에너지

즉, EROI는 해당 시스템의 ‘에너지 생산 효율성’을 나타낸다고 할 수 있다.



D. Weissbach, et al. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213000492>

그림 1-4 에너지원의 EROI 비교

그림 1-4는 주요 에너지원의 두 가지 조건에서 평가된 EROI를 비교해서 보여준다. 재생에너지 가장 큰 속성은 ‘간헐성’이며 이는 재생에너지의 효과적인 활용을 크게 제약하며, 재생에너지를 규모 있게 안정적으로 사용하기 위해서 배터리 등을 이용한 충분한 정도 ‘에너지 저장’이 필수적으로 요구된다. 이 경우 당연히 EROI는 크게 감소하며, 그림 1-4에서 ‘buffered’ 경우는 재생에너지의 경우 10일 동안 사용할 수 있는 에너지를 저장하는 조건을

고려하여 평가한 결과이다. 위 그림에서 보듯이, 태양광 및 바이오매스의 EROI는 ‘경제성’ 확보를 위해서 필요한 최소 EROI인 ‘10’보다 훨씬 적다. 풍력의 경우도 현실적인 조건에서 매우 낮은 EROI를 가진다. 한편, 기존 가압경수로 기반 원자력의 EROI는 약 75 정도로 매우 크다. 한편, 본 보고서에서 기술하는 4세대 원자로 시스템은 기존 가압경수로에 비하여 훨씬 높은 에너지 생산효율을 가지기 때문에 4세대 원자력의 EROI는 더욱 높다고 할 수 있다. 어떤 에너지원의 정확한 EROI 평가는 쉽지 않은 것으로 알려져 있으며, 연구자에 따라서 재생에너지의 EROI 값들은 그림 1-4에 제시된 값보다 꽤 크다고 주장되기도 한다.

1.3 소형모듈형원자로(SMR, Small Modular Reactor)

최근 세계 원자력계의 가장 큰 변화는 거의 모든 나라에서 소위 SMR 연구개발을 추진하고 있다는 사실이다. 당초 국제원자력기구(IAEA)는 SMR을 ‘소형 및 중형 원자로 (Small and Medium Reactor)’라고 나타내기 위해서 사용하였지만, 현재는 소형이면서 모듈화된 원자로를 지칭하는 것으로 통용되고 있다. 즉, SMR은 주요 기기를 모듈화하여 공장에서 제작 후 현장에서 빠르게 조립할 수 있도록 설계한 최대 출력 300 MWe 이하의 원자로를 지칭한다. 현재 70종 이상의 다양한 SMR이 주요국에서 경쟁적으로 개발되고 있는 것으로 알려져 있다.

SMR의 필요조건이면서 가장 큰 특징은 원자로 출력이 낮아서 붕괴열이 냉각재나 공기의 자연순환과 같은 극도로 높은 신뢰도를 갖은 피동적인(passive) 방식으로 제거될 수 있도록 설계되어 일본 후쿠시마 원전 사고와 같은 중대사고 가능성이 극도로 낮다는 점이다. 이처럼 피동적인 방식으로 확보될 수 있는 안전성을 소위 피동안전성(passive safety)이라 부르며, 이는 바로 SMR의 설계 목표라고 할 수 있다. 결과적으로 피동안전성을 위해서 SMR의 출력은 제한되어야 하는데, 통상 전기출력이 300 MWe 이하에서 피동안전성 확보가, 원자로 형식에 따라서 다르지만, 가능한 것으로 알려져 있다. 결과적으로 SMR의 경우 ‘규모의 경제’ 효과를 기대하기 어려우며, 경제성 극대화를 위해서 고도의 모듈화를 통한 공장 생산 및 현장에서의 빠른 조립 및 설치를 지향하고 있다.

대표적인 SMR 기업인 미국의 Nuscale사는 물의 자연순환만으로 냉각되는 가압경수로 형식의 VOYGR라 불리는 전기출력 50-77 MWe SMR을 2000년경부터 개발하고 있다. VOYGR는 매우 낮은 출력으로 거의 무한한 피동냉각이 가능하여 극히 높은 피동안전성을 확보한 것으로 평가된다. 하지

만 매우 낮은 출력으로 인하여 경제성 확보가 어려운 상황이다. 이러한 점을 고려하여 많은 SMR이 보다 큰 출력을 목표로 개발되고 있으며, 한국의 i-SMR은 하나의 모듈당 170 MWe 전기출력을 목표로 한다. 한편, 미국의 웨스팅하우스(사)는 경제성 극대화를 위해서 330 MWe 출력을 가진 AP300 이란 시스템을 개발하고 있고 GE & Hitachi사 또한 전기출력 300 MWe 비등수형(BWR) SMR을 개발하고 있다. 영국의 Rolls Royce사 또한 전기출력이 430 MWe인 SMR을 개발한다. 이처럼 출력이 높아지면 해당 SMR의 피동안전성은 저하될 수밖에 없는데, 경제성 향상을 위해 많은 SMR 기업이 완전한 피동안전성을 포기하는 설계를 추구하는 상황이다.

위에서 기술한 바와 같이 4세대 원자로의 연구개발 목표 자체가 기존 원자로 보다 안전한 원전의 개발이다. 결과적으로 4세대 원자로 개발 방향 또한 피동안전성 확보를 지향하고 있다. 한편, 4세대 원자로의 경우 경수로에 비하여 본질적으로 고유 안전성이 높기 때문에 상대적으로 높은 출력에서도 극도로 높은 피동안전성이 확보될 수 있다. 예를 들어, 미국 TerraPower사가 개발하는 Sodium이라는 소듐냉각고속로의 출력은 345 MWe이고 궁극적으로 보다 큰 출력을 가진 시스템으로 개발되고 있다. 이러한 연유로 영국은 4세대 원자로에 AMR(Advanced Modular Reactor) 개발을 천명하고 있다. 즉, 피동안전성을 확보하면서 출력을 극대화하면서 시스템 모듈화를 통해서 경제성을 향상시키는 개념을 추구한다. 따라서 4세대원자로에 기반한 AMR은 안전성, 경제성 관점에서 기존 경수로보다 우월할 수밖에 없으며 거기에 더하여 지속성 또한 극대화될 수 있다고 할 수 있다. 결과적으로 현재 개발되고 있는 다양한 3세대 SMR은 일종의 과도기적 원자로 형태가 될 것으로 예상되고 궁극적으로 4세대 원자로에 기반한 AMR이 도입될 가능성이 높다고 할 수 있다.

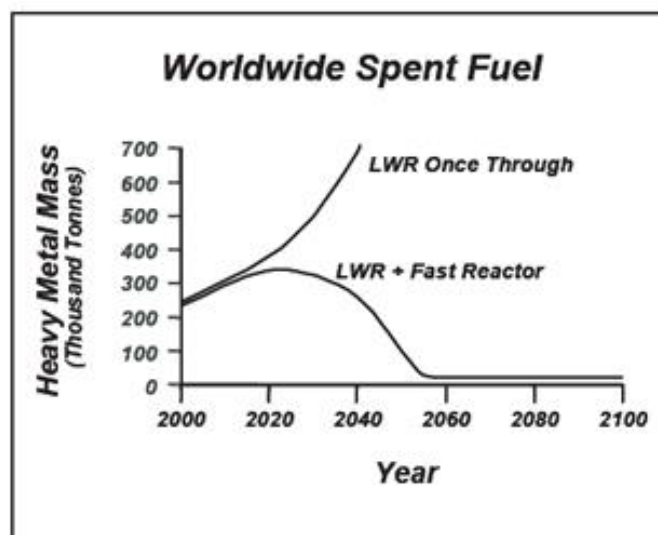
2. 4세대 원자로의 동향 및 전망

2.1 주요 노형의 기술적 특징과 개발 현황

1절에서 기술한 4세대 원전의 주요 개발목표를 달성하는 원자로 시스템 개념을 도출하기 위해서 2000년대 초 GIF는 전 세계 전문가의 의견을 취합하여 매우 다양한 후보 원자로 개념들을 모았으며, 아래와 같이 6개 원자로 개념이 4세대 원자로 시스템 후보로 결정되었다.

- 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)
- 납냉각고속로(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)
- 가스냉각고속로(Gas-cooled Fast Reactor, GFR)
- 용융염로(Molten Salt Reactor, MSR)
- 초임계압수냉각로(Super-Critical Water-cooled Reactor, SCWR)
- 초고온가스로(Very High Temperature Reactor, VHTR)

위에서 보듯이 6개 4세대 노형 중 3개는 고속로 형식으로서 고속로가 주를 이루고 있음을 알 수 있다. 한편, 용융염원자로는 전통적으로 열중성자로 활용되었지만, 고속로 개념으로도 얼마든지 효과적인 설계가 가능한 특징을 갖고 있다. 초임계압수냉각로는 본질적으로 열중성자로 특성을 가진다고 할 수 있는데 이 개념 또한 노심설계에 따라서 ‘유사’ 고속로 설계가 가능하다. 결과적으로 위 6개 4세대 원자로 개념에서 초고온가스로를 제외한 다른 개념은 모두 고속로라고 할 수 있다.



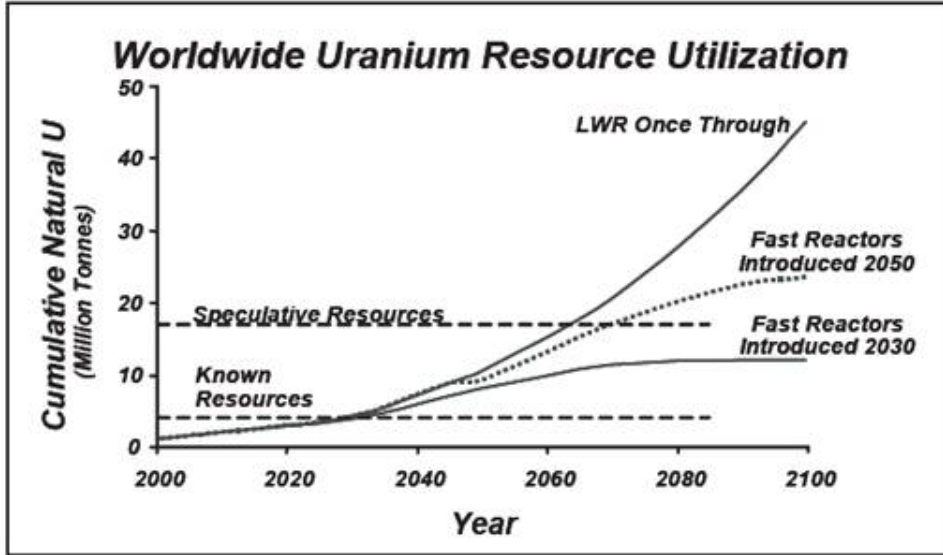


그림 2-1 닫힌핵연료주기에 따른 사용후연료 누적량 및 천연우라늄 요구량

이처럼 4세대 원자로 개념이 고속로에 방점을 두는 이유는 앞에서 언급한 기술개발 목표 때문인데, 특히 ‘지속가능한’ 원자로 시스템을 고려하면 사용후연료 문제를 해결하면서 제한된 우라늄 자원 문제 또한 해결해야 하고, 이를 위해선 본질적으로 ‘닫힌 핵연료 주기’ (Closed Fuel Cycle)를 달성할 수 있어야 하는데 이러한 원자로 시스템을 위해선 고속로가 필요하기 때문이다. 중성자속 스펙트럼이 매우 경한 고속로에선 우라늄을 비롯하여 플루토늄을 포함한 모든 초우라늄 원소가 핵연료로 사용될 수 있다. 즉, 기존 경수로에서 방출된 사용후연료를 효과적으로 고속로에서 재활용할 수 있다는 뜻이다. 또한 이러한 경우 고속로 내부에서 자체적으로 핵분열성(fissile) 핵연료가 효과적으로 증식될 수 있기 때문에 천연우라늄을 채굴할 필요성이 극도로 감소하여 원자력이 장기적으로 ‘지속가능한’ 에너지원이 될 수 있다. 아래 그림 2-1은 경수로와 고속로(여기선 SFR)를 혼용하여 사용하는 경우 사용후연료의 감소 효과 및 천연우라늄 필요량 감소를 극명하게 보여준다. 사용후연료의 재활용 개념은 최근 강조되는 소위 ‘순환경제’ 개념에서와 같이 자원의 재활용에 초점이 맞춰져 있다.

2.1.1 소듐냉각고속로(SFR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-2는 소듐냉각고속로의 전형적인 개념도이다. 그림에서 보듯이, 표준적인 소듐냉각고속로는 대형 소듐 풀(Pool)에 담겨 있으며, 안전성 확보를 위해서 원자로와 증기발생기 사이에 중간열전달 계통이 있음을 알 수 있다.

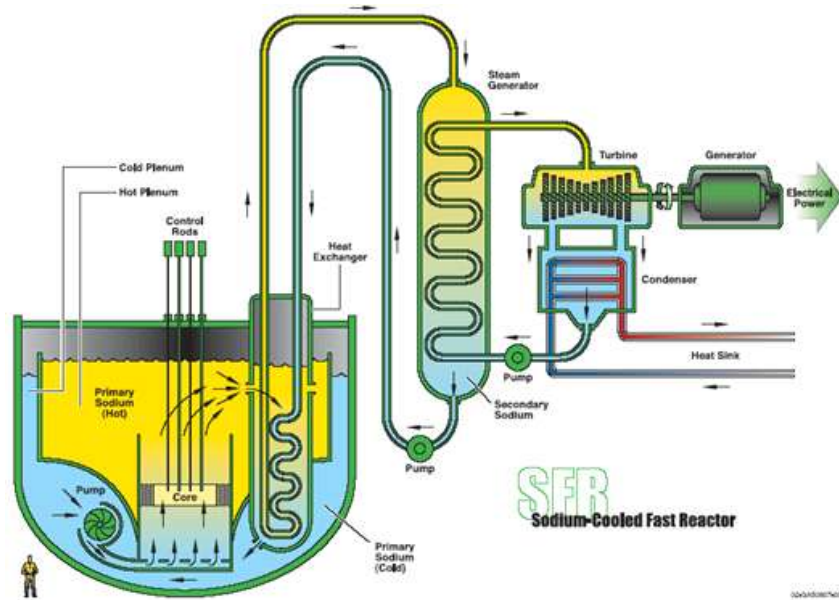


그림 2-2 소듐냉각고속로 개념도

소듐냉각고속로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 가장 높은 기술적 성숙도 - 소듐의 효과적인 열제거 능력으로 높은 출력밀도 - 높은 핵연료 전환비 가능 - 금속연료의 경우 높은 고유안전성 - 피동안전성 (중소형) - 냉각재 출구 온도 530~550도 결과적으로 높은 전기생산 효율 	<ul style="list-style-type: none"> - 소듐의 높은 화학적 활성도 - 증기발생기에서의 물과 소듐 반응 - 노심의 양의 기화 반응도 - 노심의 기화반응도 영향으로 대형 노 설계 어려움 - 비교적 낮은 대중 수용성

아래는 국가별 4세대 소듐냉각고속로 관련 최근 연구개발 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
미국	o 테라파워사의 금속연료 Sodium 시스템 (정규출력 345 MWe) ARDP 일환으로 GE-Hitachi와 공동으로

	<p>개발, 조만간 인허가 신청 계획, Wyoming주 폐석탄발전소 부지에 건설, 증가발생기 제거되고 용융염 이용 열저장 개념</p> <ul style="list-style-type: none"> o ARC사의 장수명 (20년) 금속연료 ARC-100 개념 연구 o Oklo사의 초소형 금속연료 소듐냉각고속로 개념 연구 o 모두 HALEU 연료 사용
중국	<ul style="list-style-type: none"> o 실험로 CEFR 계측제어설비 개선 완료 o 실증로 CFR-600 1호기 건설후 테스트 진행중 o 실증로 CFR-600 2호기 건설중
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> o 안전성이 강화된 원자로 개발 시작
인도	<ul style="list-style-type: none"> o 실증로 PFBR 건설중 (계획대비 많이 지체됨)
한국	<ul style="list-style-type: none"> o 장수명(20년 이상) HALEU 금속연료 SALUS-100 개념 설계, 한국원자력연구원과 현대건설(주) 민관공동 개발, 2028년 SALUS-100 기본설계 완성 목표
일본	<ul style="list-style-type: none"> o 미츠비시중공업의 안전성 강화된 풀타입 원자로 개념 설계 초기 단계 o 실험로 JOYO 설비개선 진행중
러시아	<ul style="list-style-type: none"> o 소듐냉각 다목적 연구로 MBIR 건설성 진행중 o BN-350, BN-600, BN-800 상용 운전

2.1.2 납냉각고속로(LFR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-3은 납의 자연순환으로 냉각되는 납냉각고속로 개념도를 보여주는데, 납은 극히 높은 밀도로 인하여 소형 열출력을 전제하고 있다.

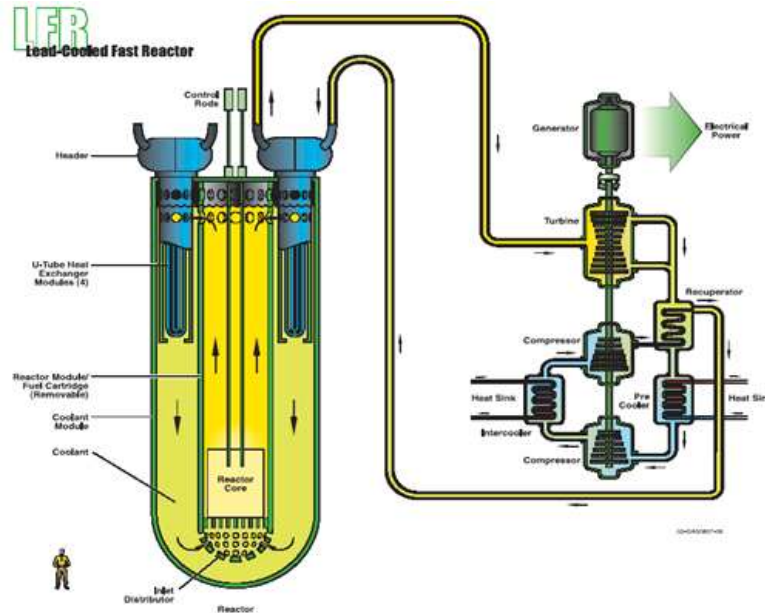


그림 2-3 납냉각고속로 개념도

납냉각고속로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 화학적으로 안전된 냉각재 - 550~800도 출구온도 --> 높은 열효율 - 피동안전성 가능 (중소형) 	<ul style="list-style-type: none"> - 납의 높은 부식성 - 질화물과 같은 새로운 핵연료 필요 - 내진 설계 어려움으로 중소형 원자로 개발 - Po-210 발생

아래는 국가별 4세대 납냉각고속로 관련 최근 연구개발 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
미국	<ul style="list-style-type: none"> o 웨스팅하우스 납냉각고속로 개념 개발 추진중 o 대학단위 소규모 연구 진행
중국	<ul style="list-style-type: none"> o CGNPG (China General Nuclear Power Group) 실증

	개념 제안 o China National Nuclear Corporation 및 시안교통대 중심으로 비교적 소규모 연구 진행중 o State power Investment Corporation BLESS-D 개념 개발
Euratom	o 이탈리아 벤처기업 Nucleo 중심으로 소형 납냉각고속로 개념 개발중 o 스웨덴 벤처기업 SEALER 개발중 o 유럽 표준 ELFR 공동연구 진행중
한국	o 울산 유니스트 중심으로 소형 납냉각고속로에 대한 연구 추진
러시아	o 실증로 BREST-300 건설 2021년 6월 시작하여 진행중 이고 질화물 (UN) 연료 개발중 o 소형 SVBR-100 개발중
일본	o TIT(Tokyo Institute of Technology) 중심으로 소규모 연구 진행

2.1.3 가스냉각고속로(GFR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-4는 헬륨 가스가 냉각재로 사용되고 가스터빈을 직접 구동하는 가스냉각고속로 개념도이다.

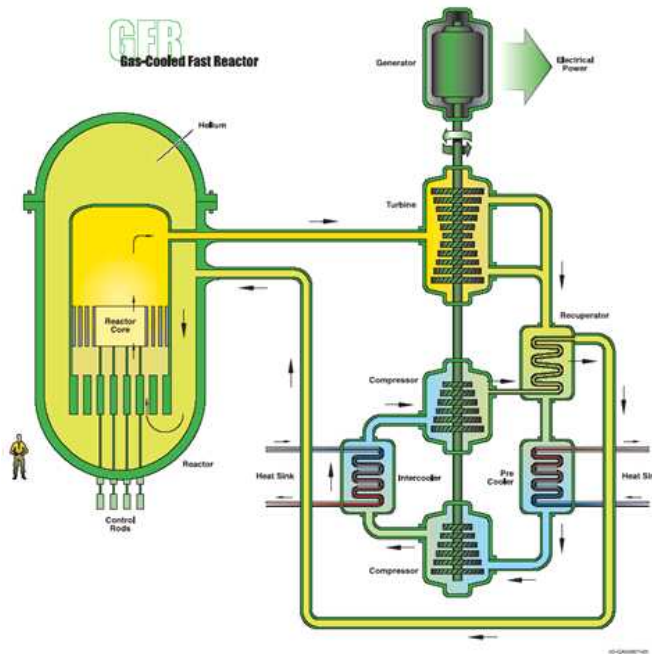


그림 2-4 가스냉각고속로 개념도

가스냉각고속로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 냉각재 방사화 없음 - 최대 800도 출구온도 <li style="padding-left: 20px;">--> 높은 열효율 - 높은 핵연료 전환비 	<ul style="list-style-type: none"> - 냉각재 상실사고 가능성 - 피동안전성 확보 곤란 - 새로운 핵연료 필요 - 검증된 바 없음

아래는 국가별 4세대 가스냉각고속로 관련 최근 연구개발 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
Euratom	<ul style="list-style-type: none"> o ALLEGRO라 불리는 2,400MWth 기준 원자로 개념에 대한 국제협력 진행중 o 개념 실증을 위한 75MWth 실증로 추진중 o ALLEGRO 건설을 위한 체코, 폴란드, 헝가리, 슬로바키아 4개국 관련 기관들 V4G4 결성.

2.1.4 용융염로(MSR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-5는 미국 오크리지국립연구소(ORNL)에서 1960년대 실증된 흑연감속재를 사용하는 액체연료 용융염원자로 개념도이다.

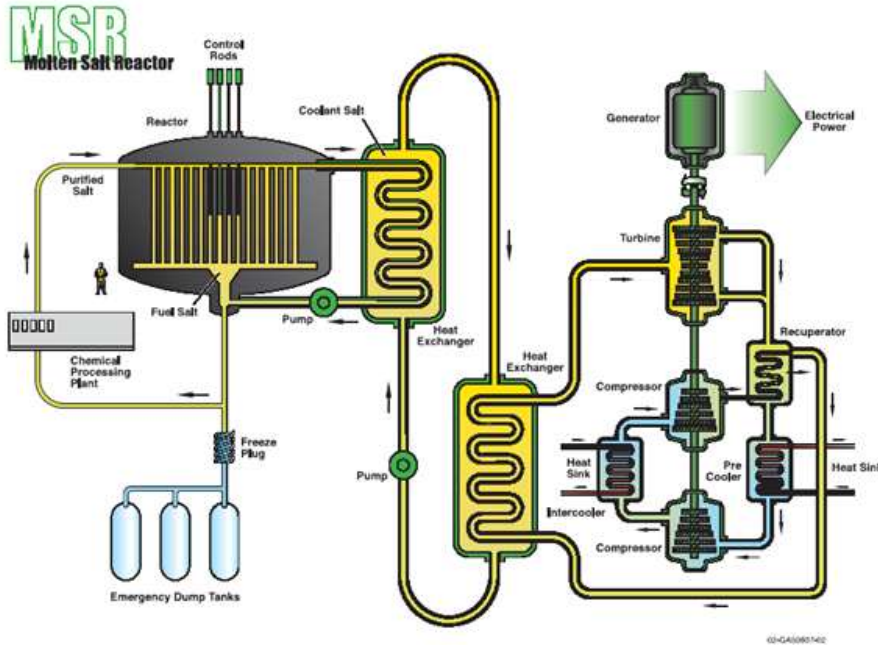


그림 2-5 용융염원자로 개념도

용융염원자로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 높은 출구온도, 700~800도 --> 높은 열효율 - 높은 중성자 경제성 - 극히 높은 고유안전성 - 매우 높은 피동안전성 (중대형) - 사용후연료 축적 없음 - 온라인 연료 처리 및 조절 	<ul style="list-style-type: none"> - 용융염의 높은 부식성 - 불소염 (Fluoride)의 낮은 악티나이드 용해성 - 용융염 물성 정보 확보 필요 - 용융염의 화학적 제어 어려움 - 온라인 용융염 처리에 따른 핵확산저항성 관련 우려

아래는 국가별 4세대 용융염원자로 관련 최근 연구개발 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
미국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 테라파워사, Southern Company 등 미국 INL에 MCRC (Molten Salt Reactor Experiment) 실험로 건설중 ○ 테라파워사의 용융염 종합실증설비 건설 및 운용 ○ Abilene Christian University 연구용 용융염원자로 건설 추진중이며, NRC 인허가 획득 ○ Kairos Power사의 용융염냉각 고온원자로인 Hermes 비전력 원자로에 대한 건설허가 취득했으며, 저출력 시험로 Hermes-2에 대한 건설허가 신청 ○ Terrestrial Energy사 IMSR(Integral Molten Salt Reactor) 개발 진행 ○ 다수 벤처기업 용융염원자로 개발 진행
중국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 토륨기반 용융염원자로 TMSR 건설을 완공하고 시험운전하는 것으로 알려져 있지만 관련 내용 공개하지 않음.
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국립과학연구센터(CNRS)와 CEA 중심으로 용융염원자로 관련 연구개발 지속 추진 ○ Orano, CEA, EDF 등 '프랑스 2030' 프로그램 지원으로 사용후연료 처리를 위한 고속스펙트럼 용융염원자로 개념 연구 ○ 벤처기업 Naarea 및 Stellaria 고속스펙트럼 소형 용융염원자로 개발
한국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2023년 시작된 용융염 원천기술 개발 국가 과제 한국원자력연구원 주도록 민간기업 참여하여 진행중 ○ 덴마크 벤처기업 Seaborg Technologies사 삼성중공업, BEES(주) 등과 용융염원자로 CMSR 개발 진행
일본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 업저버로서 용융염원자로 관련 국제협력에 참여
러시아	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국영기업 로사토크은 Zheleznogorsk 부지에서 용융염 정화장치와 결합된 균질 노심을 갖춘 10 MWth 용융염원자로 설계 개발 장치의 예비 시험 지원
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ○ 벤처기업 Moltex사 용융염원자로 개념 개발 및 사용후연료 재활용을 위한 전기화학적 처리방법 연구 추진
스위스	<ul style="list-style-type: none"> ○ PSI에서 용융염원자로 노물리 등 연구 지속 추진
덴마크	<ul style="list-style-type: none"> ○ 벤처기업 Seaborg Technologies 및 Copenhagen Atomics 고유한 용융염원자로 개발 진행
EU	<ul style="list-style-type: none"> ○ Horizon 2020 및 Horizon Europe 대형 프로젝트 진행

2.1.5 초임계압수냉각로(SFR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-6은 초임계압수로 냉각되는 원자로 개념도이며, 초임계압수가 노심에서 직접 증기화되어 터빈을 구동하는 방식이다.

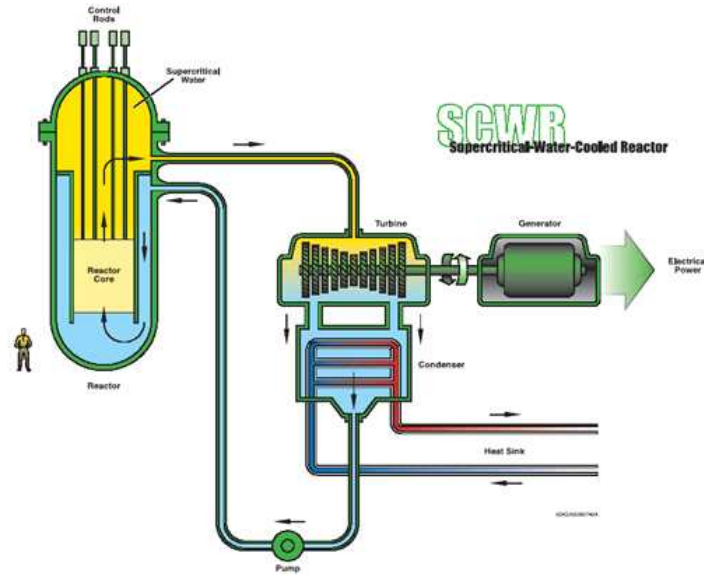


그림 2-6 초임계압수냉각로 개념도

초임계압수냉각로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 출구온도 450~510도 --> 높은 열효율 - 단순한 시스템 설계 - 검증된 기술 - 열중성자로 및 고속로 설계 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 냉각재 불안정성 가능성 - 극히 높은 시스템 압력 (~250기압) - 냉각재 상실사고 개연성 및 피동 안전성 확보 어려움 - 재료 부식성 - 냉각재의 방사성 해리 및 관련 화학적 제어

아래는 국가별 4세대 초임계압수원자로 관련 최근 연구개발 주요 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
Euratom	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대학 중심 열수력 관련 실험 및 이론 연구 진행 <ul style="list-style-type: none"> - 폴란드 Budapest 대학 초임계압수 열수력 관련 연구 - 체코 CVR에 열수력 실험장치 구축 및 운영 - 스웨덴 대학 KTH 열수력 실험 연구 진행
중국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시안교통대 중심 열수력 실험연구 진행 ○ 초임계압수 열수력 관련 국제 표준문제 제안
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초임계압수 관련 열수력 관련 실험연구 진행중

2.1.6 초고온가스로(VHTR) 기술 특성 및 개발 현황

그림 2-7은 헬륨가스로 냉각되고 흑연으로 감속되는 소위 ‘블록형’ 초고온가스로의 개념도를 보여주는데, 1,000도에 가까운 초고온 열을 이용하여 물의 화학적 분해를 통하여 수소를 생산하는 공정이 연결되어있는 개념이다.

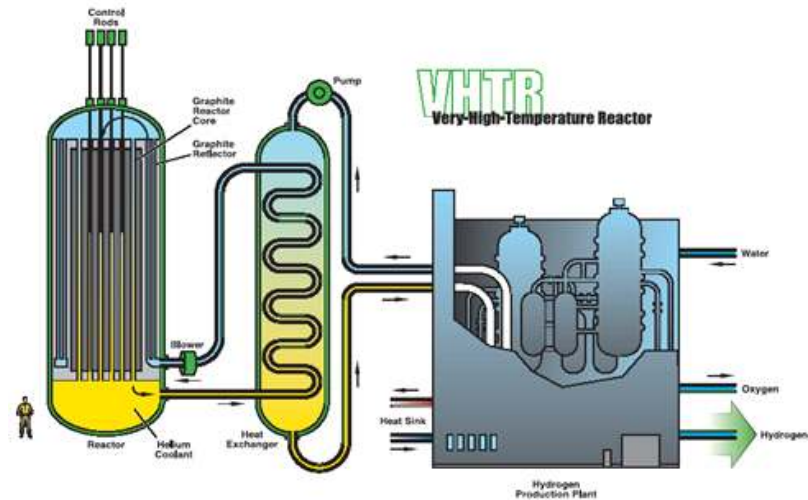


그림 2-7 초고온가스로 개념도

초고온가스로의 주요 장점 및 기술적 현안을 아래와 같이 요약할 수 있다.

장점	기술적 현안
<ul style="list-style-type: none"> - 출구온도 900~1,000도 초고온 --> 높은 열효율 전기생산 및 수소생산 가능성 - 피동안전성 확보 (소형) 	<ul style="list-style-type: none"> - 초고온 재료 확보 어려움 - 소형으로 경제성 확보 어려움 - 흑연을 포함한 방사성 폐기물 다량 발생

- TRISO 연료 기반 높은 연소도	- 노심설계 불확도 상대적으로 높음
----------------------	---------------------

아래는 국가별 4세대 초고온가스로 관련 최근 연구개발 활동을 보여준다.

국가	연구개발 활동
미국	<ul style="list-style-type: none"> o X-energy사의 페블베드형 고온가스로 Xe-100 설계 실증 ARDP 일환으로 추진중, TRISO 제조 설비 개념설계 완료, 훈련용 시뮬레이터 완성, 텍사스주의 Dow 부지에 Xe-100 건설 협의중 o 블록형 고온가스로 개발사 USNC 파산신청 o 웨스팅하우스 TRISO 연료기반 초소형원자로 eVinc 개념설계 진행 (열전도관 냉각)
중국	<ul style="list-style-type: none"> o 실증로 HTR-PM 22년 12월 전출력 달성 및 상업운전 시작, 23년 8월 냉각재상실사고시 피동안전성 성공적 데모 o HTR-PM600 건설 계획 (6개 모듈과 1개 터빈 연결)
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> o SMR 개발 지원 목적의 2030 투자 계획에서 8개 프로젝트 중 2개 고온가스로 프로젝트 선정 <ul style="list-style-type: none"> - Jimmy energy - Blue Capsule - CEA
영국	<ul style="list-style-type: none"> o 미국 USNC사와 초소형원자로(MMR) 개발 o NNL 일본 JAEA와 협력하여 고온가스로 개발 계획
한국	<ul style="list-style-type: none"> o 민관합작 90MWth 산업공정열 고온가스로 개발 진행
일본	<ul style="list-style-type: none"> o 실험로 HTTR 2021년 재가동 되고 있으며 2024년 냉각재 상실사고후 피동안전성 테스트 계획됨. o 미츠비시중공업이 차세대 고온가스로 개발자로 선정되어 기본 연구 시작되었으며, 고온가스로 이용 수소생산 실증 계획 또한 추진중
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> o Global Fisrt Power사는 미국 USNC와 협력하여 마이크로 원자로 개발 추진
폴란드	<ul style="list-style-type: none"> o 국립원자력연구센터(NCBJ) 일본 JAEA와 협력하여 새로운 고온연구용원자로 POLA 개념 설계 발표

2.2 주요국 4세대 원자로 관련 정책

표 2-1은 GIF에 참여하는 14개의 국제협력 프로그램 참여 현황을 보여

준다. 소위 non-active 국가로 분류되는 아르헨티나와 브라질을 제외하고 각 12개 참여국은 소위 ‘Framework 약정(Agreement)’에 서명하고 6개 노형에 따라서 선택적인 국제협력에 참여하고 있음을 알 수 있다.

표 2-1 국가별 GIF 프로그램 참여 현황

국가	Framework 약정	시스템 약정				MOU 협정	
		GFR	SCWR	SFR	VHTR	LFR	MSR
아르헨티나							
호주	o				o		o
브라질							
캐나다	o		o	o	o		o
Euratom	o	o	o	o	o	o	o
프랑스	o	o		o	o		o
일본	o	o	o	o	o	o	
중국	o		o	o	o	o	
한국	o			o	o	o	
남아프리카공화국	o						
러시아	o		o	o		o	o
스위스	o				o		o
영국	o			o	o		
미국	o			o	o	o	o

위 표에서 ‘시스템 약정’은 각 노형의 비교적 구체적인 시스템 개발 목표를 갖고 참여국이 국제협력을 하는 형태를 의미하고, 소듐냉각고속로, 가스냉각고속로, 초임계압수냉각로, 초고온가스로 등 4개 노형에 대해서 관련 국제협력이 진행되고 있다. 납냉각고속로 및 용융염원자로 두 노형의 경우 구체적인 시스템 개발 목표를 공유하지 않고 상대적으로 낮은 수준의 국제협력이 ‘MOU (Memorandum of Understanding) 협정을 맺고 진행되고 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 소듐냉각고속로와 초고온가스로에 가장 많은 국가가 국제협력에 참여함을 알 수 있고, Euratom, 프랑스, 일본만이 참여하는 가스냉각고속로에 대한 관심이 가장 낮은 수준임을 확인할 수 있다. 또한 초임계압수냉각로에 대한 관심도 상대적으로 낮음을 표 2-1을 통해서 확인할 수 있다. 유럽을 대표하는 Euratom은 6개 노형 모두에 참여하는 반면, 프랑스는 초임계압수냉각로 및 납냉각고속로에 관심이 없음을 알 수 있다. 아래

는 주요국의 4세대 원자로 관련 정책을 간략하게 정리하였다.

2.2.1 미국 정책 요약

탄소중립 달성 및 에너지 안보 강화를 위해 미국 정부는 원자력 활용을 적극적으로 추진하고 있으며 차세대 원자로 관련 기술 선도국 위치를 유지하기 위해서 다양한 정책을 적극적으로 펼치고 있는데, 과거와 달리 미국의 민주당 및 공화당 모두 원자력 진흥 정책을 지원하는 상황이다.

미국은 민간기업의 성공적인 차세대원자로 기술개발 지원을 위해서 소위 ‘첨단원자로실증프로그램’(ARDP, Advanced Reactor Demonstration Program)을 진행하고 있는데, 선정된 개념에 대해서 실증까지 약 50% 예산 지원을 하는 파격적인 원자력 진흥 정책이다. 현재 테라파워사의 Natrium이라 불리는 소듐냉각고속로와 X-energy사의 Xe-100이라는 고온가스로 개념이 선정되어 관련 연구개발이 진행되고 있다.

이 뿐만 아니라 일부 민간기업의 차세대 원자로 개념의 경우 소위 ‘Risk Reduction for Future Demonstration Pathway’라는 정책을 통해서 보다 효과적인 연구개발이 진행될 수 있도록 지원하고 있다. 본 정책의 혜택을 받고 있는 차세대 원자로 개념은 다음과 같다: KAIROS Power사의 Hermes 원자로, 웨스팅하우스의 eVinch 초소형원자로, BWXT Advanced Reactor Technologies사의 TRISO 입자연료 기반 고온가스로, 테라파워사의 용융염 실험로 MCRE(Molten Chloride Reactor Experiment).

미국 에너지부(DOE)는 또한 NRIC(National Reactor Innovation Center)를 설립하여 다양한 첨단 초소형원자로 연구개발을 지원한다. 이를 위해서 DOME (Demonstration and Operation of Micro-reactor Experiment) 시험 및 테스트 설비의 건설을 시작하였다.

차세대 원자로를 위해서 반드시 필요한 HALEU 연료의 안정적인 공급망을 구축하기 위해서 미국 정부는 미국의 CENTRUS와 같은 민간기업을 통한 HALEU 생산을 위해서 다양한 지원 정책을 펴고 있다. 또한 원자력 전기를 이용한 물의 전기분해를 통한 수소 생산을 적극적으로 지원하는 정책을 시행하고 있다.

미국 정부는 성공적인 차세대원자로 시스템 개발을 위해서 반드시 필요하다고 요구되는 규제 시스템 혁신 및 정비를 강하게 추진하고 있다. 예를 들어, 미국 규제기관 NRC는 2027년까지 차세대원자로 시스템에 대해 인허가할 수 있도록 준비해야 함을 법에 따라서 강제하고 있다. 특히 최근에는 보다 단순하고 효율적인 인허가 과정이 가능하게 하는 법 또한 제정하여 시

행하고 있다. 2024년 7월에는 원자력산업 활성화, 청정에너지 촉진, 에너지 안보 강화, 글로벌 원자력 시장 우위 선점을 위한 전방위적 조치를 하나의 패키지로 제공하는 ADVANCE(Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy) 법안이 공식 제정되어 미국 원자력 산업 경쟁력 강화 및 국제사회에서 기술 리더십 회복을 위한 노력의 법적 근간이 마련되었다. ADVANCE 법은 새로운 원자력 기술에 대한 원자력규제 위원회(NRC)의 인허가 절차를 간소화하고 산업계에 인허가 부담을 줄여주며, NRC에 더 많은 자원을 제공하고 역량을 강화하여 선진원자로의 배치를 가속하는 것을 목표로 하고 있다.

2.2.2 일본 정책 요약

일본은 용융염원자로를 제외한 모든 GIF 국제협력에 모두 참여하고 있는데, 용융염원자로의 경우 ‘옵저버’로서 참여하고 있으며 일본 내 용융염원자로에 대한 비교적 소규모 연구개발이 과거부터 지속되고 있는 상황이다.

오랫동안 소듐냉각고속로와 고온가스로 상용화 및 소듐냉각고속로 등을 이용한 사용후연료 재순환 등을 추진한 일본은 2011년 발생한 후쿠시마 발전소 사고 이후 ‘탈원자력’ 분위기에서 4세대 원자로 시스템에 대한 연구 및 관련 활동은 많이 약화되었다.

2022년 기시다 총리는 소위 ‘녹색전환(Green Transformation)’을 위 재생에너지 확대 정책을 발표하면서 안전성이 강화된 차세대 원자로 개발 및 건설 관련 정책 추진 필요성도 언급하였다 2023년 일본 정부는 녹색전환 관련 기본 정책을 확정하였고 차세대원자로 개발 및 건설 또한 포함하였다. 미츠비시중공업이 2040년대 상용화를 목표로 차세대 소듐냉각고속로 개발자로 선정되었는데, 해당 소듐냉각고속로는 일본에서 전통적으로 개발한 loop-type이 아니라 pool-type 소듐냉각고속로 개념이다. 미츠비시중공업은 2024년부터 2028년까지 개념설계 등을 포함한 관련 연구를 수행하며, 2028년에 해당 소듐냉각고속로의 추가 연구 및 건설 관련 결정을 하기로 되어 있다. 일본 정부는 차세대 초고온가스로 및 수소생산 연구개발 또한 추진하고 있으며, 관련 개발자로 미츠비시중공업을 선택하여 지원하고 있다.

2.2.3 영국 정책 요약

기본적으로 영국은 GIF 주도 4세대 원자로 관련 연구개발 협력에 소극적인 반면 기존 경수로 기반 SMR 개발을 적극 추진하고 있다. 한편, 2023년

GBN (Great British Nuclear)은 고온가스로 개념에 기반한 AMR (Advanced Modular Reactor) 개발을 발표하고 2030년대 상용화를 목표로 함을 알렸다. 영국은 2020년 11월 「녹색산업혁명 추진을 위한 10대 중점 계획(The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution)」을 발표하여 2030년까지 탄소중립 달성 가속화에 대한 구체적인 정책과 예산에 대한 계획을 밝힌 바 있다. 원자력 연구개발은 10대 중점계획 중 하나로 제시되어, 원자력 발전을 확대하고, 3억 8,500만 파운드 규모의 ‘차세대 원자력 펀드(Advanced Nuclear Fund)’를 조성하여 소형·차세대 원자로 연구개발에 투자할 계획을 발표하였다. 이후 「에너지백서 2020」(’20.11)과 「넷 제로 전략(Net Zero Strategy)」(’21.10)을 통해 원자력 부문에서 대형 원전 건설, SMR 설계 및 첨단모듈원자로(AMR, Advanced Modular Reactors) 실증로 구축, 핵융합 프로젝트 및 투자 시행에 대해 계획한 바 있다. 또한, 2022년에 원전에너지자금조달법(Nuclear Energy Financing Act)를 도입하여 규제자산기반모델(RAB, Regulated Asset Base Model) 적용을 위한 근거를 마련하였다.

최근 에너지안보탄소중립부(DESNZ, Department for Energy Security and Net Zero)는 2024년 1월 「민간 원자력 2050 로드맵(Civil nuclear roadmap to 2050)」을 발표하였는데 탄소중립 및 에너지 안보 강화 목표 달성을 위해 원자력의 중요성이 제고됨에 따라 2050년까지 최대 24GW의 원자력 보급을 목표로 부지, 자금 조달, 규제 등의 세부 계획을 로드맵에 제시하였다.

2.2.4 프랑스 정책 요약

전통적인 원자력 강국이자 사용후연료 재활용을 위한 소듐냉각고속로를 매우 적극적으로 연구-개발한 프랑스의 경우 최근 마크롱 대통령 ‘원자력 혁신’이란 기치 아래 고위 원자력 정책 그룹을 새롭게 구성하고 원자력 확대 및 차세대 원자로 개발 정책을 발표하고 추진하고 있다.

프랑스는 Phenix, Super-Phenix 개발 및 건설을 통하여 과거 소듐냉각고속로 개발을 주도했지만 결국 상용화에 성공하지 못하고 최근 소듐냉각고속로에 대한 개발이 주춤한 상황인데, 프랑스 정부는 2023년 11월 6개 민간 ‘혁신원자로’ 연구개발 지원 계획을 발표한 바 있는데 소듐냉각고속로, 고온가스로가 포함된다. 흥미로운 점은 프랑스 또한 관련 연구개발에서 민간 기업을 적극 지원하여 원자력 기술혁신을 꾀한다는 점이다.

최근 프랑스의 국가 주도 고속로 개발은 크게 두 가지 방향으로 추진되

고 있다. 첫 번째 방향은 기술개발 수준이 가장 높다고 할 수 있는 소듐냉각고속로 개념이고 다른 하나는 용융염고속로 형식이다. 소듐냉각고속로는 CEA가 주도적으로 추진하며, 용융염고속로의 경우 CEA, Orano, EDF 등이 협력하여 추진하는 정책이다. 프랑스는 이미 오래전부터 가압경수로 사용후 연료를 기존 습식 방식으로 재처리하여 회수된 플루토늄을 기존 상용 가압경수로에서 제한적으로 재활용하고 있다. 이런 상황에서 프랑스 고속로 연구개발은 주로 재처리에서 회수된 플루토늄과 같은 초우라늄원소의 핵변환에 초점이 맞춰져 있다.

2.2.5 한국 정책 요약

전통적으로 한국에선 소듐냉각고속로를 이용한 가압경수로 사용후연료 재활용 관련 연구개발이 진행되었으며 GIF 가입 후 초고온가스로에 대한 연구개발이 활발하게 진행된 바 있으며 납냉각고속로에 대한 연구도 소규모로 대학을 중심으로 진행되었다. 그러나 지난 정부의 5년에 걸친 탈원전 정책으로 4세대 원자로 관련 연구개발은 취소되거나 대폭 축소된 바 있다. 그러나 현 정부는 2022년 지난 정부의 탈원전 정책을 완전히 폐기하고 에너지 안보와 탄소중립을 위해서 원자력을 적극 활용하기로 결정하고 대형 원전의 건설을 선언하면서 동시에 경수로 기반 SMR뿐만 아니라 4세대 원자로 연구개발에 대한 지원 또한 확대할 계획을 추진하고 있다.

현 정부 4세대 원자로 관련 정책의 가장 큰 특징은 민간기업이 적극적으로 참여하는 민관합작 연구개발 형태를 취하고 최종적으로 민간기업이 상용화를 추구하도록 지원하는 것이라고 할 수 있다. 이는 미국의 ARDP 정신 및 형식과 매우 유사하다. 2023년 정부는 한국형 ARDP라 할 수 있는 ‘New Clear 프로젝트’ 추진을 선언하였다. 해당 프로젝트는 민관이 협력하여 소듐냉각고속로, 고온가스로, 용융염원자로를 개발하고 실증하여 상용화할 수 있도록 하는 것으로서 거대한 예산지원이 요구된다. 본 보고서의 3절에서 상사하게 기술하고 있듯이, 현재 용융염원자로 실증을 위한 상세 기획이 진행되고 있다.

2.2.6 러시아 정책 요약

GIF 국제협력에서 소듐냉각고속로와 납냉각고속로 그리고 용융염원자로 적극적인 러시아는 사실 자체적인 ‘BN 시리즈’ 소듐냉각고속로 오래전부터 개발하여 이미 상용으로 사용하고 있는 유일한 나라이다. 현재 BN-600,

BN-800 소듐냉각고속로가 상용으로 운영되고 있다. 또한 러시아는 납합금으로 냉각되는 고속로를 최초로 개발한 나라로서 납냉각고속로 관련 매우 풍부한 경험과 기술력을 갖고 있다.

러시아는 기존 소듐냉각고속로를 개선하는 연구개발을 적극 지원하면서 납냉각고속로의 건설을 추진하는 정책을 펴고 있다. 또한 용융염원자로에 대한 기초적인 연구개발 및 핵심기술 개발을 지원하는 정책도 실시하고 있다. 한편 러시아는 고속로와 연계하여 사용후연료 재활용 정책을 꾸준히 추진하고 있다.

2.2.7 중국 정책 요약

전략적으로 원자력 발전을 매우 빠르게 확대하여 현재 55개 대형 경수로를 운영하고 있는 중국은 다양한 SMR뿐만 아니라 4세대 원자로에 대한 연구개발 또한 매우 적극적으로 추진하고 있다.

중국의 4세대 원자로 연구개발 정책은 사실 가스냉각고속로를 제외하고 다른 5개 노형 모두에 걸쳐 추진되고 있는데, 소듐냉각고속로와 고온가스로 연구개발이 적극적으로 지원받고 있으며 용융염원자로 대한 실증로를 완성한 것으로 알려져 있다. 납냉각고속로 및 초임계압수냉각로에 대한 지원 정책은 상대적으로 저조한 편이다. 고온가스로의 경우 HTR-PM이라하여 일종의 실증로를 완공하여 2023년 전출력 운전을 달성하고 상용운전을 시작하였다. 한편 CFR-600이라는 소듐냉각고속로 실증로 건설을 진행하고 있으며 2030년대 상용화를 추진하고 있다.

2.3 4세대 원자로의 안전성

원자로 시스템의 안전성은 노심 개념 및 설계에 따라서 크게 달라지기 때문에 단순한 비교는 불가능하다. 예를 들어, 요즘 유행하는 소형모듈형원자로(SMR)에서와 같이 원자로 출력을 크게 제한하면 기존 경수로에서도 얼마든지 소위 ‘피동안전성(Passive Safety)’를 달성할 수 있다. 그러나 4세대 원자로 시스템은 기본적으로 기존 경수로에 비하여 한 단계 높은 안전성을 목표로 하여 설정된 노심 개념이기 때문에 기본적으로 경수로에 비하여 훨씬 높은 안전성을 확보할 수 있는 가능성이 있지만 실제적인 안전성은 노심 개념에 따라서 크게 다르다.

2.3.1 상업 액체냉각 시스템의 높은 안전성

기존 경수로 시스템의 안전성 관련 주요한 우려의 하나는 약 155기압에 달하는 냉각재 압력이다. 기본적으로 압력은 단위 부피당 저장된 에너지를 의미하기 때문에 높은 압력 자체는 시스템이 비정상적으로 작동하는 상황이 되면 많은 문제를 야기할 수 있다. 예를 들어, 경수로에선 고압 냉각 시스템의 갑작스러운 감압은 노심을 냉각할 수 없는 상황을 빠르게 초래하기 때문에 방사성 붕괴에 따른 잔열 제거를 어렵게 만들어 심각한 중대사고로 이어질 가능성이 매우 높다.

한편, 4세대 원자로 개념에서 소듐냉각고속로, 납냉각고속로, 그리고 용융염원자로는 액체를 냉각재로 사용하면서 시스템의 가압을 하지 않고 상압에서 운전되기 때문에 본질적으로 시스템 내부에 저장된 에너지가 기존 경수로 대비 훨씬 낮다고 볼 수 있으며, 결과적으로 냉각재 상실의 가능성이 극도로 낮아진다. 따라서 이러한 상압 액체냉각 4세대 원자로의 안전성은 기존 경수에 비하여 월등히 높게 설계될 수 있다.

그러나 나머지 세 유형의 경우엔 가압된 가스 혹은 매우 높은 압력의 물이 냉각재로 사용되기 때문에 경우에 따라서 안전성에 대한 우려가 매우 높을 수도 있다.

2.3.2 노형별 안전성 요약

<소듐냉각고속로 안전성>

소듐냉각고속로는 상압 액체 소듐으로 냉각되는 고속로 개념으로 매우 높은 안전성을 확보할 수 있는 노심개념으로 잘 알려져 있다. 특히, 1986년 미국의 EBR-II라는 실험로에서 진행된 ‘피동안전성’ 데모는 해당 고속로 시스템의 고유안전성을 극적으로 증명했다고 할 수 있다. 이처럼 소듐냉각고속로에서 매우 높은 안전성을 확보할 수 있는 것으로 잘 알려졌지만, 그렇다고 모든 소듐냉각고속로가 동일한 안정성을 가진다고 할 수 없다. 기본적으로 소듐냉각고속로가 높은 고유안전성 및 피동안전성을 갖기 위해선 아래와 같은 조건이 만족하여야 한다.

- 소듐냉각재 기포 반응도가 매우 적거나 음수
: 이를 위해선 노심의 크기 혹은 출력이 많이 제한되어야 하며, 열출력은 대략 1,000 MWth 이하여야 한다. 또한 노심 높이가 1미터 내외로 낮아야 한다.
- 핵연료 온도계수가 약하게 음수

- : 이를 위해선 미국 및 한국에서와 같이 U-Pu-Zr과 같은 금속연료가 사용되는 것이 바람직하다. 한편, 프랑스, 일본, 러시아, 중국, 인도 등에선 UO₂-PuO₂와 같은 산화물 연료가 사용되어 노심의 고유 안전성이 상대적으로 약하다.
- 소듐 냉각재는 물과 격렬하게 반응하고 공기와도 반응하여 화재가 발생 가능성은 극도로 낮게 유지되어야 한다.

미국의 EBR-II 운영 및 러시아 소듐냉각고속로 장기 운영 경험을 토대로 소듐 냉각재의 높은 화학적 활성도는 설계를 통하여 기술적인 해결이 가능한 상황이다. 그럼에도 불구하고 소듐냉각재의 높은 화학적 활성도는 일반인의 소듐냉각고속로에 대한 수용성을 저해하고 있는 것도 사실이다. 이러한 연유로 미국 테라파워사는 Natrium이라는 소듐냉각고속로 설계에서 증기발생기를 제거하고 용융염을 이용하여 열에너지를 저장하는 방식으로 시스템 설계를 크게 변경하여 소듐과 물의 반응 가능성 자체를 제거하였는데, 이러한 설계는 비공산권 국가에서 소듐냉각고속로의 상용화를 위해서 일종의 필요조건이 되어야 할 것으로 판단된다.

<납냉각고속로 안전성>

납냉각고속로는 아직 구현된 바 없지만, 일부 조건을 만족하면 매우 높은 안전성이 확보될 수 있을 것으로 예상된다. 먼저 납 냉각재는 소듐과 달리 물리나 공기와 극히 예외적인 상황을 제외하면 반응하지 않기 때문에 냉각재 자체에 대한 안전성 우려는 매우 적다고 할 수 있다. 또한 매우 무거운 원소이기 때문에 중성자 감속 효과가 소듐에 비하여 무시할 정도로 낮아서 냉각재 기포 반응도 관련 우려가 거의 없도록 설계가 용이하여 노심의 고유 안전성은 매우 높게 설계될 수 있는 장점을 가진다.

한편, 매우 무거운 납 냉각재가 사용되는 경우 노심출력이 중소형으로 제한되는 특징이 있는데 이 또한 납냉각고속로의 고유 및 피동안전성을 향상시키는 요인이라고 할 수 있다.

그러나 납 냉각재의 높은 재료 부식 특징은 납냉각고속로의 구현을 어렵게 하고 있으며 결과적으로 안전성 확보도 저해한다고 할 수 있다. 또한 납 냉각 고속로의 경우 소듐냉각고속로와 달리 냉각재와 핵연료 사이 적합성을 충분히 확보하기 위해선 UN과 같은 질화물 연료의 개발이 필요한 상황이다.

납을 냉각재로 사용하는 경우 한 가지 독특한 우려는 납과 중성자의 핵반응으로 생성되는 Po-210이라는 방사성 독성이 매우 높은 핵종의 생성이

다. 비록 많은 양이 발생하진 않지만, 납냉각고속로의 성공적인 구현을 위해서 Po-210을 적절히 처리/처분할 수 있어야 한다.

<용융염원자로 안전성>

액체 용융염이 연료 및 냉각재로 사용되면서 상압에서 운전되는 매우 독특한 설계 특성을 갖는 용융염원자로는 타 4세대 원자로 시스템과 크게 구분되는 설계를 가질 뿐만 아니라 안전성 관점에서도 완전히 다른 특성을 가진다. 먼저 용융염원자로의 가장 큰 안전성 관련 장점은 액체연료를 미리 준비된 영역으로 드레인하여 방사성붕괴에 따른 잔열을 매우 효과적으로 제거할 수 있도록 설계한다면, 기존 모든 고체 연료를 사용하는 원자로에서 발생할 수 있는 소위 중대사고 가능성 자체를 제거할 수 있다는 점이다. 이뿐만 아니라 노심출력에 상관없이 붕괴잔열을 제거할 수 있기 때문에 피동안전성이 대형 노심출력에서도 확보될 수 있다는 점이 타 고체 연료형 4세대 원자로에 비하여 매우 중요한 장점의 하나라고 할 수 있다.

동시에 용융염원자로의 경우 핵연료가 포함된 용융염 연료가 1차 시스템을 계속 순환하기 때문에 1차 시스템 경계에 문제가 발생하면 핵연료가 바로 외부로 누설될 수 있다는 문제점을 안고 있다. 하지만 용융염원자로의 또 다른 매우 중요한 안전성 관련 장점은 세슘, 요오드와 같은 방사성 독성이 매우 높은 핵분열생성물 대부분이 용융염에 매우 잘 용해되기 때문에 용융염연료가 외부로 누설되더라도 세슘 및 요오드 등의 공기 중 누설이 극히 제한적이라는 점이다.

용융염 연료의 또 다른 장점의 하나는 연료의 용점이 400-550도 정도로 꽤 높다는 점이다. 즉, 매우 높은 용융염의 용점으로 인하여 연료가 공기 중으로 누설되더라도 빠르게 고화가 진행되어 방사성 핵분열생성물의 공기 중 누설을 극히 어렵게 만든다는 것이다. 즉, 최악의 사고가 나더라도 방사성 핵분열생성물의 환경으로의 누설이 고체 연료에 비하면 무시될 정도로 적다는 점이다.

<가스냉각고속로 안전성>

가스냉각고속로는 고압의 헬륨가스로 (혹은 초임계이산화탄소) 냉각되는 노형으로서 앞에서 언급한 바와 같이 냉각재 상실사고의 개연성이 항상 존재하기 때문에 타 4세대 원자로에 비하여 피동안전성이 상대적으로 낮다고 평가되는 경향이 있다. 높은 수준의 안전성을 확보하기 위해선 냉각상실 사

고 가능성을 극도로 감소시켜야 하지만, 경제성 등을 저해하지 않으면서 피동안전성을 획기적으로 제고할 방법은 없는 상황이다.

물론 가스냉각고속로의 소위 고유안전성은 소듐냉각고속로 및 납냉각 고속로와 유사한 수준이라고 할 수 있다. 특히, 낮은 밀도 가스가 냉각재로 사용되기 때문에 냉각재 밀도 변화에 따른 노심의 물리적 고유안전성 변화는 거의 일어나지 않는다.

<초임계압수냉각로 안전성>

300기압 이상의 극히 높은 압력 조건에서 운전되는 초임계압수냉각로의 경우도 앞에서 얘기한 바와 같이 냉각재 상실 사고 개연성이 상대적으로 높다고 할 수 있으며 이는 안전성 관점에서 매우 큰 우려는 제기한다. 또한 초임계압수 상태에서 나타날 수 있는 노심의 불안전성에 대한 우려 또한 존재하여 4세대 원자로 중에서 상대적으로 낮은 안전성을 가진다고 할 수 있다.

<초고온가스로 안전성>

70기압 정도로 고압의 헬륨가스로 생각되는 흑연냉각 초고온가스로 또한 냉각재 상실사고의 가능성은 항상 존재하지만, 고유한 설계 특성으로 4세대 원자로 중에서 매우 높은 피동안전성을 가진다고 평가되고 있다. 초고온가스로의 높은 피동안전성을 위해선 아래와 같은 설계조건이 필요하다.

- 흑연 감속재 환경에서 TRISO라 불리는 입자연료 사용
 - : TRISO 입자연료는 최대 온도 1,200도까지 문제없이 사용될 수 있으며 사고가 나더라도 1,600도까지 큰 문제 없이 사용될 수 있는 것으로 평가된다.
- 매우 낮은 출력밀도
 - : 초고온가스로의 예외적으로 높은 피동안전성은 가압경수로 대비 약 1/6에 해당하는 매우 낮은 출력밀도에 기인하는데, 이로 인해서 냉각재 상실과 같은 사고 시 잔열 제거가 용이하다.
- 충분한 부피의 흑연 감속재 및 반사체 부피
 - : 흑연은 상대적으로 높은 비열을 가진 물질로, 결과적으로 사고 시 잔열을 매우 효과적으로 흡수하여 초기 잔열에 따른 핵연료 상승을 억제하여 피동안전성 확보에 크게 기여한다.

이러한 초고온가스로의 설계 특징으로 인하여 피동안전성을 갖는 초고온

가스로는 출력은 소형이지만 노심이 매우 크다는 특징을 가지면 이는 해당 시스템의 단점으로 작용한다고 할 수 있다.

2.4 4세대 원자로 사용후연료 관련 특성

사실 4세대 원자로 시스템의 주요한 연구개발 동기의 하나는 이전 세대 원자력 발전에서 발생한 사용후연료 문제를 해결하여 보다 지속가능한 원자력을 가능케 하는 것이다. 이런 연유로 앞에서 설명한 바와 같이 4세대 원자로의 대부분은 고속로 개념이다. 즉, 고속로 설계가 가능한 4세대 원자로를 이용하면 가압경수로 사용후연료를 적절한 처리를 거쳐서 재활용이 가능하다. 예를 들어, 한국과 미국이 공동으로 개발하고 있는 파이로프로세싱(pyro-processing)과 같은 과정을 거치면 기존 경수로 사용후연료를 모든 고속로에서 재활용할 수 있다. 물론, 초고온가스로는 열중성자를 이용하는 개념이기 때문에 이러한 사용후연료의 재활용 관점에서 많이 제한된다. 유사하게 초임계압수냉각로의 경우도 고속로 활용이 쉽지 않아 사용후연료 재활용 관점에서 타 고속로 개념에 비하여 상대적으로 열등하다 할 수 있다.

여기서는 각 4세대 원자로 노형에 따른 사용후연료 방출량 관련 특성을 정리하고 비교하고자 한다. 기본적으로 원자로의 사용후연료 방출량은 소위 연소도(Burnup)라는 성능인자로 결정된다. 기존 경수로의 경우 약 4.5% 우라늄 농축도를 이용하여 평균적으로 약 50,000 MWD/MTU라는 연소도를 달성한다고 할 수 있다. 이는 1톤의 우라늄에서 50,000 MWD에 해당하는 에너지를 생산했다는 뜻이다. 한편, 50,000 MWD/MTU는 대략적으로 초기 핵연료의 약 5%가 핵분열을 통하여 사용되었다는 의미이다.

고체 핵연료의 방출연소도는 기본적으로 핵연료 자체 설계에 따라서 결정되는데, 고속로 (소듐냉각고속로, 가스냉각고속로, 납냉각고속로) 개념에선 앞에서 설명하였듯이, 금속연료 및 산화물연료가 성공적으로 개발되었으며 관련 핵연료의 최대 방출연소도는 대략 15-20 a/o 정도인데, 이는 초기 핵연료의 15-20%가 핵분열하였다는 의미다. 즉, 기존 경수로의 약 5 a/o 연소도에 비하여 매우 높은 핵연료 이용률을 나타낼 수 있다. 이처럼 경수로에 비하여 4배 정도 높은 고속로의 핵연료 연소도는 그만큼 사용후연료 방출량이 감소함을 뜻하며 이는 4세대 원자로 시스템의 큰 장점이다.

한편, 액체연료를 사용하는 용융염원자로는 타 원자로와 비교할 수 없을 정도로 높은 핵연료 이용율을 달성할 수 있는 고유한 특징이 있는데, 이는 운전중에 필요한 핵연료를 보충하고 핵분열 반응으로 만들어진 핵분열생성물을 제거할 수 있기 때문이다. 즉, 액체연료 용융염원자로의 경우 핵연료를

미리 제작하여 이용하지 않기 때문에 사용후연료의 축적이 발생하지 않도록 원자료가 이용될 수 있으며, 이는 매우 중요한 장점이다. 결과적으로 핵연료의 이용률 관점에서 용융염원자료가 다른 4세대 원자로에 비하여 분명한 장점을 가진다고 할 수 있다.

초고온가스로의 경우 TRISO 입자연료 자체는 20% 이상의 핵연료 연소도를 달성할 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 사용되는 HALEU (High Assay Low Enriched Uranium) 핵연료를 사용하는 초고온가스로의 핵연료 방출연소도는 최대 10~15a/o 정도이다. 따라서 초고온가스로의 경우도 사용후연료 자체의 생성은 경수로에 비하여 크게 저감될 수 있는 장점이 있다. 그러나 초고온가스로의 사용후연료는 매우 큰 부피의 방사화된 흑연 감속재와 함께 방출되어야 하는데, 방사화된 흑연의 처리 및 처분은 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 이는 초고온가스로의 또 다른 현안의 하나이다.

초임계압수원자로의 핵연료 방출연소도에 대한 검증된 자료는 매우 제한적이다. 다만, 이론적인 평가에 따르면, 최대 방출연소도 약 10~15a/o 달성이 가능할 것으로 예상된다.

3. 한국 4세대 원자로 산업 발전 방안

3.1 한국에서의 4세대 차세대 원자로 필요성

한국의 에너지 안보 및 탄소중립을 위해서 안전하고 경제적인 무탄소 원자력은 재생에너지와 함께 한국경제의 지속적인 발전을 위해서 앞으로도 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 한국의 원자력 산업은 대형 가압경수로 관련 세계 최고 수준 기술력 및 경쟁력을 가진 것으로 평가되고 있다. 그러나 이러한 한국 원자력 산업은 중대한 기로에 서 있으며 지속적인 발전을 위해서 무엇보다도 현재 발전소 부지 내에 보관되고 있는 사용후연료를 효과적으로 처리/처분할 수 있어야 할 것이며 동시에 안전성을 획기적으로 개선해야 한다.

표 3-1은 국내 사용후연료 누적량 및 각 발전소 내부 저장소 포화시점을 보여준다. 관련 통계에 따르면 가압경수로 사용후연료 누적량은 대략 10,000톤이고 중수로에서 발생한 사용후연료는 약 9,500톤이다. 그리고 표에서 보듯이, 대부분 저장소 포화시점이 얼마 남지 않았다는 점이다. 따라서 기존 원전의 지속적인 활용을 위해서 사용후연료 저장 자체가 국내에선 현안인 상황이다. 현재와 같이 가압경수로만을 사용하면 이러한 사용후연료는 계속 쌓일 수밖에 없으며, 사용후연료를 이렇게 단순히 지하 심지층 처분장에 처분하면 기술적·경제적·사회적 문제로 비화할 수도 있다.

표 3-1. 국내 사용후연료 누적량 현황

 사용후 핵연료 누적 발생량·저장소 포화시점		
원전명	사용후 핵연료 누적 발생량 예측치	저장소 포화시점
고리	1만2290다발	2032년
한빛	1만3051다발	2030년
한울	2만7401다발	2031년
새울	1만5660다발	2066년
신월성	3633다발	2042년
월성	72만1920다발	2037년

(자료: 산업통상자원부)

기존 가압경수로 사용후연료를 4세대 첨단 고속로에서 재활용하는 것은 ‘축적된 사용후연료 처리’와 ‘우라늄 자원의 수급’을 동시에 해결할 유력한 방안이 될 수도 있다. 이 경우 원자력 발전의 부산물인 방사성 폐기물은 상

대적으로 소량이면서 비교적 짧은 기간 관리만을 요구하여 매우 작은 규모의 심지층 처분장(Geological Repository) 만을 요구하여 국내 건설도 용이하다.

원리적으로 사용후연료 내에 대부분을 차지하는 우라늄과 미량의 초우라늄원소(TRU라 불림)는 고속로에서 효율적인 연료로 사용될 수 있다. 위에서 언급한 국내 약 20,000톤 사용후연료를 모두 에너지로 변환하면 우리나라 전체가 1년에 사용하는 에너지 약 533 TWh의 약 350배 정도이다. 즉, 국내 사용후연료가 담고 있는 에너지는 원자력 전기만으로 대한민국 전체가 약 350년 동안 사용할 수 있는 어마어마한 양이다. 이처럼 사용후연료를 고속로에서 사용할 수 있다면 장기간 천연우라늄을 전혀 채굴하지 않고도 원자력을 지속적으로 사용할 수 있게 된다. 이미 설명한 바와 같이 4세대 원자로 개념에서 SFR, LFR, GFR 등은 고속로인데, 용융염원자로(MSR) 또한 고속로 방식으로 이용될 수 있다. 기본적으로 4세대 원자로는 기존 경수로에 비하여 한 단계 높은 안전성을 제공한다는 점을 상기하면, 4세대 고속로를 이용하여 사용후연료 문제를 해결하고 장기적으로 지속가능한 원자력을 가능케 할 수 있다는 관점에서 그 필요성이 크다 할 수 있다.

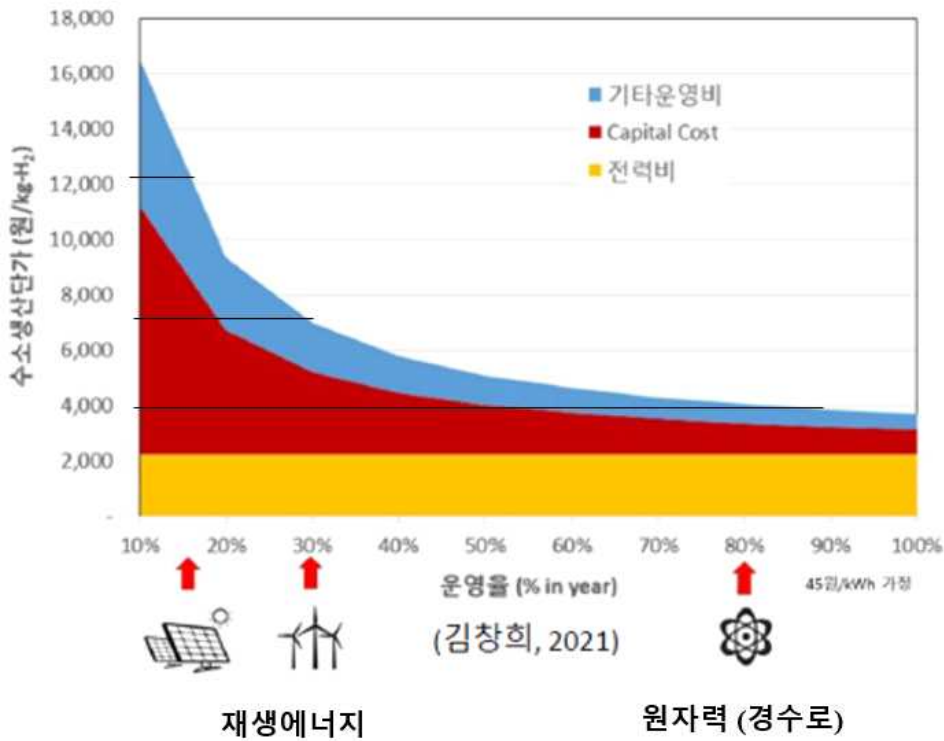


그림 3-1 재생에너지와 원자력 기반 수소생산 단가 비교

글로벌 탄소중립을 위한 무탄소 원자력의 필요성은 관련 기관 및 대부분의 전문가들에 의해서 이구동성으로 강조되고 있다. 2023년에 열린 UN COP28에서 주요국들이 탄소중립을 위해서 2025년까지 원자력을 3배 확대하기로 선언한 바 있다. 한편, 무탄소 원자력 및 재생에너지 등으로 전력 생산이 완전히 무탄소화 되더라도 이는 전체 CO2 배출의 약 40% 만이 무탄소화 되었음을 의미하며, CO2 배출의 대부분을 차지하는 비전력 분야 탄소중립을 위해서 수소(H₂) 가스의 대규모 활용이 필요한 것으로 알려져 있다. 한편, 그림 3-1은 기존 가압경수로 전력을 사용한 수소 생산 단가와 태양광 및 풍력으로 대변되는 재생에너지 기반 수소 생산 단가를 비교하여 보여주는데, 현 가압경수로 기반 원자력을 이용하는 경우에도 재생에너지 대비 1/3-1/2 정도 가격으로 수소를 생산할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 4세대 원자로를 기본적으로 경수로에 비하여 훨씬 높은 열효율로 전력을 생산할 수 있을 뿐만 아니라 고온의 열도 제공할 수 있기 때문에 4세대 원자로를 이용하는 경우 수소 생산은 더욱 높은 효율을 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 초고온가스로의 경우 냉각재 출구온도가 900도 이상으로서, 물의 전기분해 효율을 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 화학적인 물 분해 또한 가능하게 하여 수소생산 효율을 극대화할 수 있을 것으로 예상된다. 이와 같은 4세대 원자로 특성 때문에 대부분 4세대 원자로 개발자들은 전력 뿐만 아니라 수소 가스와 고온 공정열 생산 및 공급도 동시에 가능한 시스템을 개발하고 있다.

3.2 한국형 차세대원자로 기술개발 및 실증 프로그램 (K-ARDP)

차세대 원자로 개발을 위한 글로벌 경쟁에서 뒤처지지 않기 위해서 현 정부는 최근 미국의 ARDP 프로젝트와 유사한 '한국형 차세대원자로 기술개발 및 실증 프로그램(K-ARDP)'을 지원하는 정책을 올 6월 4일 발표하였다. 총 2조 4,810억 원이 투입되는 K-ARDP 프로젝트는 차세대 원자로 설계역량을 보유한 민간기업을 육성하는 대형 프로젝트로서 신속한 상용화를 위해 민관 합동의 기술개발과 실증을 지원한다. 과학기술정보통신부는 2024년 6월 4일 국가과학기술자문회의 제8회 심의 회의에서 이 같은 내용을 담은 '차세대 원자력 확보를 위한 기술 개발 및 실증 추진 방안'이 심의의결됐다고 밝혔다. 현재 K-ARDP의 공식 명칭은 **New-Clear 프로젝트**이다.

해당 K-ARDP 프로그램은 2026년부터 2034년까지 국비 1조 6,490억 원, 민간 8,320억 원 등 총 2조 4,810억 원을 투입하는 사업이다. 2030년대 차세대 원자로 설계 전문기업을 2개 육성하는 것을 목표로 한다. K-ARDP

는 현재 기술 수준에 따른 실증 시기를 고려해 '단기 실증 유형'과 '중장기 전략 유형'으로 추진된다. 단기 유형에서는 약 4~5년 이내 실증로 건설 허가를 신청할 수 있는 노형을 중심으로 하고, 중장기 유형에서는 핵심 기술 확보에 6~9년이 소요되는 노형 개발에 집중한다. 단기·중장기 유형에 공통으로 적용되는 기술 개발 및 성능 시험·검증 등 '실증 신속화 지원'을 추진할 예정이다. 추진 방안에는 2024년 내 차세대 원자력 기술 개발·실증 로드맵을 수립한다는 내용도 담겼다. 로드맵에는 경쟁력 및 파급성, 상용화 가능성 등을 종합해 지원할 노형을 선정하고 민관 역할 분담, 인허가 대응 방안 등을 포함할 예정이다.

당초 정부는 K-ARDP의 단기 실증 유형으로 소듐냉각고속로(SFR) 및 고온가스로(HTGR)를 추진하고 '중장기 전략 유형'으로 용융염원자로를 고려한 것으로 알려져 있다. 그러나 소듐냉각고속로 및 고온가스로의 경우 현재 진행되고 있는 대형 예비 타당성 조사 프로젝트가 존재하여 K-ARDP 사업과 겹치는 기간이 많고, 3개 노형을 동시에 추구하려면 예산이 부족한 상황이다. 이에 기획 준비도 관점에서 높게 평가받은 용융염원자로에 대한 K-ARDP를 먼저 추진하는 것으로 최근 결정되었다.

결과적으로 현재 차세대 용융염원자로 개발 및 실증 프로그램을 위한 기획이 한국원자력연구원 중심으로 진행되고 있다. 해당 기획은 2025년 예비 타당성 검토를 거쳐 2026년부터 시작되어 9년 동안 진행될 예정이며 총 약 9,000억 원의 예산 투입이 계획되어 있다. 특히, 민간 기업으로 '현대건설(주)'가 본 사업에 적극적으로 참여할 계획이며, 덴마크의 벤처기업인 'Seaborg Technologies'사와 CMSR (Compact Molten Salt Reactor)이라 불리는 소형 용융염원자로 개발을 협력하고 있는 '삼성중공업(주)'과 같은 타 민간기업의 참여도 예상된다.

국내에서 차세대원자로를 개발함에 있어 마주하는 난관 중 하나는 '규제 기관이 혁신형 차세대원자로에 대한 경험이 일천하며, 관련 준비도 제대로 되어있지 않다는 사실'이다. 원자로 개발의 특성상 차세대원자로에 대한 규제 기술 개발 및 적기 적용은 K-ARDP 성공을 위해서 극히 중요한 요소라고 할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 정부는 새로운 차세대원자로 기술 개발과 함께 차세대원자로 안전 규제 체계 마련에도 나설 계획이다. 일차적으로 현재 설계가 진행되고 있는 경수로 기반 i-SMR에 적용되는 혁신 기술의 안전성 확인을 위해 2028년 계획된 표준설계 인가 신청 전까지 i-SMR 규제 체계를 마련하는 한편, 비경수형 차세대원자로에 대해서도 2030년대 초까지 규제 기준·기술 등 안전 규제 기반을 단계적으로 구축할 예정이다.

K-ARDP와 관련, 이종호 과기부 장관은 "정부가 체계적인 차세대 원자력 정책과 안정적 재원으로 뒤에서 밀고, 민간이 앞에서 당길 수 있도록 구체적인 로드맵 수립, 대형 프로젝트(K-ARDP) 도입, 규제 체계 적기 마련을 추진하겠다"고 밝혔다.

3.3 한국의 4세대 원자로 산업 전망

현대 생활과 산업의 전기화 및 안정적인 에너지 확보 그리고 정부의 탈탄소 정책으로 국내 기업의 원자력에 대한 관심과 투자는 지속적으로 확대될 것으로 예상된다. 특히, 현 정부의 New Clear 프로젝트 정책으로 민간기업의 용융염원자로, 소듐냉각고속로, 고온가스로 등 4세대 원자로 연구개발 참여가 크게 활성화되고 기업에 따라서 전략적인 투자와 연구개발 및 상용화를 추진할 것으로 예상된다. 고압 조건에서 운영되는 가압경수로의 특별한 원자로 용기가 요구되기 때문에 두산에너지빌리티와 같이 특수한 기술을 가진 기업만이 제작에 참여할 수 있다. 그러나 상압에서 운전되는 소듐냉각고속로 및 용융염원자로의 경우 국내 다른 중소기업도 빠르게 필요한 기술을 개발하여 제작에 참여할 수 있을 것으로 예상된다.

3.3.1 소듐냉각고속로

지금까지 국가 주도로 연구개발이 진행된 소듐냉각고속로 기술은 향후 민간기업의 적극적인 참여와 함께 상용화 노력이 진행될 것으로 예상된다. 앞에서 기술한 바와 같이 한국원자력연구원은 지난 4~5년 노심 수명이 20년 이상인 SALUS라 불리는 소듐냉각고속로에 기초한 SMR 시스템 핵심 기술을 개발하고 있는데, 관련 기술개발이 2025년부터 Public-Private Partnership 프로젝트 형식으로 전환되어 민간기업 참여로 SALUS 기술 검증 및 상용화 노력이 본격적으로 진행될 것으로 예상된다.

현대건설(주)은 2024년 6월 한국원자력연구원과 SALUS 연구개발을 위한 '민관합작 소듐냉각고속로(SFR) 개발사업'을 위한 양해각서를 체결하였다. 해당 민관협력 연구에서 현대건설은 연구개발비의 50%를 지원하는 것으로 계획되어 있으며, 2025년 시작되어 2028년까지 4년 동안 진행되며, 주요한 연구 목표는 아래와 같다.

- SALUS 시스템 기본설계 및 관련 설계 검증
- 1호기(FOAK) PSAR(Preliminary Safety Analysis Report) 작성

한국원자력연구원의 SALUS 시스템은 기본적으로 수출 중심으로 개발되

고 있으며, 위 4년의 민관협력 연구개발이 끝나고 ‘New Clear’ 프로젝트의 일환으로 상세설계 및 건설 및 실증 등을 위한 연구개발이 진행될 계획이다. 즉, 국내 소듐냉각고속로 실증 프로그램은 2029년경에 시작하여 민간 주도로 추진될 예정이고 2034년 실증을 위한 건설을 시작하고 운영 허가(Operation Permit)을 신청할 계획으로 알려져 있다.

소듐냉각고속로 국내 실증 프로젝트는 기본적으로 2025~2028년 민관협력이 성공적으로 진행되는 것으로 전제로 하고 있으며, 성공적인 진행을 위해서 몇 가지 주요한 현안에 대처해야 한다. 먼저, SALUS에 비하여 약간 먼저 건설이 추진되는 미국 테라파워사의 Natrium 소듐냉각고속로 시스템의 기술개발 및 건설 프로젝트의 영향일 것이다. 만약 Natrium 시스템이 계획대로 진행된다면 한국의 SALUS 프로젝트 또한 탄력을 받을 가능성이 높다. 그러나 Natrium 프로젝트가 지체된다면 한국의 소듐냉각고속로 연구개발 또한 추진이 어렵거나 지연될 것으로 예상된다. 한국의 SALUS 및 미국의 Natrium 모두 HALEU 연료를 사용하는데, 미국 등 협력국과 공조하여 HALEU 생산 및 공급망이 형성되지 않으면 이들 소듐냉각고속로의 성공적인 추진은 어려울 것이다. 다행히 현재 미국에선 2030년대 초 자체적인 HALEU 생산 능력 구축을 강력하게 추진하고 있으며, 미국의 HALEU를 한국이 이용할 가능성이 높지만 이를 위해선 한국 정부의 적극적인 지원이 필요할 것으로 예상된다. 한편 SALUS의 국내 실증을 위해선 해당 시스템의 대중의 수용성이 크게 향상될 필요가 있는데, 특히 증기발생기를 제거하고 Natrium에서와 같이 열저장 시스템의 도입이 필요할 것이다. 그렇지 않다면 국내외에서 SALUS 시스템의 수용성은 높지 않을 것이다.

SK(주)는 최근 미국의 테라파워 Natrium 개발사업 참여를 위해서 3억 달러를 투자한 바 있다. 이는 테라파워사의 혁신적인 소듐냉각고속로에 대한 장기 비전에 대한 투자로 이해된다. Natrium 시스템이 미국에서 성공적으로 구현되는 것을 전제로 SK(주)는 다양한 비즈니스 모델을 고민하는 것으로 예상된다. 그러나 SK(주)가 직접 소듐냉각고속로를 개발하는 사업을 추진하지는 않을 것으로 예상된다. 한편, 2024년 공기업인 한수원(주) 또한 테라파워사에 일정액을 투자하기로 약속한 것으로 보도되었는데, 이는 기존 SK(주)의 지분 일부를 확보하는 방식으로 이뤄진 것으로 알려져 있다. 이는 SK(주)의 에너지 부문 투자와 관련한 위기관리 차원에서 진행된 것으로 보인다.

한수원(주)은 소듐냉각고속로의 고유안전성 및 사용후핵연료 재활용 특징 등을 고려하여 장기적인 관점에서 관련 기술의 획득을 고민하고 있으며, 테라파워사에 대한 투자 및 관련 해외 벤처기업에 대한 투자를 통한 기술력

확보 및 비즈니스 모델 개발을 전략적으로 고려하는 상황이다. 현재 사용후연료 재활용 관련 정부의 정책은 다소 모호한 상황이다. 국내 사용후연료 관련 정책이 분명하게 결정되면 한수원의 소듐냉각고속로 관련 정책 또한 분명한 방향성을 가질 것으로 예상된다.

민간 주도의 소듐냉각고속로 개발은 그 성패가 HALEU 연료의 수급에 달려 있다. 소듐냉각고속로에서 요구되는 우라늄의 농축도는 최대 약 13~14% 정도로서 상당하다. 또한 이와 같이 HALEU 기반 소듐냉각고속로의 핵연료 이용율 혹은 연소도는 최대 약 15a/o 정도로 비교적 낮다. 결과적으로 이와 같은 HALEU 기반 소듐냉각고속로 운영을 위해선 천연우라늄 요구량이 여전히 상당하고 농축 비용도 시스템의 경제성에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이처럼 사용후연료를 재순환하지 않는 소듐냉각고속로의 사용후연료 누적량 또한 처리 및 처분 관점에서 상당한 부담으로 작용할 것이다. 따라서 장기적인 경쟁력 관점에서 현재와 같이 HALEU 기반 소듐냉각고속로의 경쟁력 확보가 담보될 수 없는 상황이라고 할 수 있다.

3.3.2 용융염원자로 (용융염고속로)

용융염원자로에 대한 국내 연구는 최근까지도 극히 제한적인 소규모 연구가 대학을 중심으로 수행되었으며, 국가 주도 연구개발은 지난 정부에서 KARPA(Korea Advanced Research Project Agency)가 지원하는 ‘도전-혁신 연구 프로젝트’의 하나로 기획되어 2023년에야 본격적으로 시작되었다. 한국원자력연구원이 주도하는 해당 연구 사업은 ‘용융염원자로 원천기술 개발 사업’이며 2026년 12월에 종료될 예정이다. 용융염원자로 관련 KARPA 프로젝트 기획 시 ‘혁신적인 기술개발 가능성’이 강조되었으며, 미국이나 중국에서 개발하였거나 개발하고 있는 기존 ‘열중성자’ 기반 전형적인 용융염원자로 대신 가압경수로 사용후연료 재순환 등을 가능케 하는 ‘용융염고속로’ 기술을 개발하는 것으로 결정된 바 있다. KARPA 과제에서 개발하는 용융염고속로 개념은 미국의 테라파워사가 개발하는 개념과 유사하며, 장기적으로 극히 높은 활용 가치 및 경쟁력을 가진 것으로 평가되고 있다.

위 KARPA 용융염원자로 원천기술 개발 사업은 지난 정부에서 기획된 연유로 용융염원자로의 육지에서의 활용보다는 대형 선박 추진을 위한 해양 활용에 초점이 맞춰져 있으며 기본적으로 민관 협조로 진행되고 있다. 참여 기업엔 현대건설, 삼성중공업, 미래와도전(FNC), 센츄리, HD한국조선해양 등이 포함된다. 현대건설은 비교적 장기 비전을 갖고 용융염원자로 원천기술 개발 과제에 참여하며, 선박추진뿐만 아니라 육지에서의 전력 및 수송생산을

위해서 용융염원자로 원천 및 핵심기술 개발을 전략적으로 추구하는 것으로 알려져 있다.

한편, 삼성중공업은 덴마크의 벤처기업 시보그(Seaborg Technologies)사 협력하여 CMSR(Compact Molten Salt Reactor)라는 용융염원자로 진행하고 있다. 시보그사의 CMSR 시스템은 부유식 발전소 개념으로서 다양한 모듈 방식으로 개발되고 있으며, 삼성중공업의 조선소에서 제작되어 바다를 통하여 수요지에 전달되는 방식이다. 당초 시보그사의 CMFR 설계는 우라늄 농축도가 약 13% HALEU를 기반으로 설계되었으며 2028년경 첫 모듈 제작을 목표로 추진되었다. 그러나 HALEU 연료 수급의 문제로 농축도 5% 이하 저농축 우라늄 노심으로 설계 변경이 추진되고 있으며 상용화 시점은 불투명한 상황이다. 시보그사는 CMSR을 한국의 규제기관인 원안위를 통해서 인허가를 받고 한국에서 제작을 목표로 하고 있으며, 관련 시스템의 인허가 관련하여 비즈(주)라는 벤처기업이 시보그를 지원하고 있다. 국내 인허가 기관은 용융염원자로에 대한 인허가 관련 경험이 전무하기 때문에 CMSR의 인허가는 상당한 기간이 소요될 가능성이 높으며, 이는 용융염원자로의 상용화에 상당한 부담으로 작용할 것으로 예상된다. 2024년 4월 삼성중공업은 한국수력원자력 및 시보그와 CMSR을 활용한 부유식 원자력 발전 설비 개발 및 사업화를 위한 컨소시엄을 체결한 바도 있다.

HD한국조선해양은 최근 미국 테라파워사의 용융염원자로 부분에 일정액을 투자하고 테라파워사가 개발하는 MCFR(Molten Chloride Salt Reactor)라 불리는 용융염고속로 기술개발에 참여하고 있는데 미국 현지에 직원을 파견하여 관련 협력을 진행하고 있다. HD한국조선해양은 테라파워사의 용융염원자로 설계 자체에 참여하지는 않으며 주로 MCFR 시스템의 해양 응용을 목표 협력을 진행하고 있다. 한편 영국의 벤처기업 Core Power사는 테라파워의 용융염원자로를 이용한 선박추진 기술을 개발하고 있는데 HD한국조선해양도 관련하여 참여하는 것으로도 알려져 있다.

HD한국조선해양은 2024년 초 ‘해양 원자력 에너지 협의기구’(NEMO, Nuclear Energy Maritime Organization)를 글로벌 원자력 선도 기업 등과 공동 설립했다. NEMO에는 미국의 테라파워, 웨스팅하우스, 영국의 로이드 선급(LR), 덴마크 시보그 등 글로벌 전문 기업과 보험사, 선사, 선급, 에너지 기업, 로펌 등이 참여하고 있으며, 한국선급(KR)도 정회원으로 가입했다.

이미 기술한 바와 같이, New Clear 프로젝트에 따라서 혁신형 용융염원자로의 실증 프로젝트가 현재 기획되고 있으며 2025년 예비타당성 검토를 거쳐 2026년에 시작되어 총 약 9,000억 원의 예산으로 9년 동안 진행될 계

획이다. 본 용융염원자로 실증 프로젝트에는 민간기업으로 현대건설(주)이 본 사업에 적극적으로 참여할 계획이며, 시보그사와 협력하고 있는 삼성중공업(주)와 같은 타 민간기업의 참여도 예상된다. 과거 경험이 전무한 용융염고속로의 실증은 여러 예상치 못한 난관을 극복해야 하는 과정이다. 따라서 미국의 테라파워사와 같은 선도하는 기관이나 기업과 적극적인 국제협력을 기반으로 추진되어야 할 것이다. 다행히 최근 한국에서 열린 ‘용융염원자로 포럼’을 통하여 해외 선진 용융염원자로 연구 및 개발 그룹과 국내 용융염원자로 연구자들 사이 네트워크 형성되어 다양한 국제협력 및 교류가 진행되고 있으며 이는 계획되고 있는 용융염고속로 실증에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

만약 한국의 용융염원자로 실증 프로젝트가 2030년대 중반 성공적으로 마무리된다면 이는 아마도 세계 최초 용융염고속로 실증이 될 가능성이 높다. 미국의 경우 MCRE(Molten Chloride Reactor Experiment)라 하여 용융염고속로 실험로가 아이다호국립연구소(INL)에 건설이 추진되고 있지만, 이는 단순히 원자로 시스템 자체의 원리 및 특성을 파악하기 위한 임계시설 혹은 실험로 단계에 불과하여 실증로에 해당하지 않는다. 용융염고속로의 국내 실증은 아마도 경주 문무대왕연구소에서 진행될 가능성이 높다. 용융염고속로는 대부분 MSR 기업이 추구하는 열중성자 기반 용융염원자로 및 타 4세대 원자로에 비하여 월등한 장점을 가지면서 극히 높은 피동안전성을 확보할 수 있기 때문에 그 파급효과는 매우 클 것으로 예상된다. 특히, 용융염원자로의 피동안전성은 대형 출력에서도 담보될 수 있어서 경제성 확보에 특히 유리하다고 할 수 있다. 그뿐만 아니라 용융염고속로는 사용후연료 재활용 관점에서 타의 추종을 불허할 정도의 특징을 가지기 때문에 해당 기술을 확보한 국내 기업들은 다양한 방식으로 용융염고속로를 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 개발된 용융염고속로의 수출 또한 가능할 것이다.

현 국내 용융염원자로 또한 모두 HALEU 연료를 기반으로 개발되고 있다. 따라서 소듐냉각고속로에서와 같이 HALEU 연료의 수급 상황에 따라서 용융염원자로 연구개발 및 실증이 크게 영향을 받을 수밖에 없다. 미국이나 유럽에서 HALEU 연료를 수입해야 하는 한국의 경우 HALEU 연료 수급 여건이 용융염원자로 실증 및 상용화 과정에서 매우 중요한 요인으로 작용할 것이다.

용융염고속로는 그 특성상 사용후연료 처리 관점에서 타 고속로에 비하여 월등한 장점을 가지는데 그 이유는 다음과 같다. 먼저 용융염고속로의 경우 1GWe급 전기 출력 대형에서도 고유안전성 및 피동안전성을 확보할 수

있는 설계가 용이하여 안전성 및 경제성 극대화 관점에서 매우 유리하다. 또한 액체연료를 사용하기 때문에 연료 이용률이 소듐냉각고속로와 같이 고체연료를 사용하는 경우에 비하여 훨씬 높다. 그리고 고체연료의 경우 제한적인 연료 이용률로 인하여 사용후연료가 항상 발생하지만, 액체연료를 사용하는 용융염고속로에선 본질적으로 사용후연료가 발생하지 않는다는 매우 큰 장점이 존재한다. 게다가 가압경수로 사용후연료를 국내에서 개발한 파이로프로세싱(pyro-processing)을 통하여 재처리하면 매우 효율적으로 용융염고속로에서 활용할 수 있어 천연우라늄에 의존하지 않고 장기간 지속가능한 무탄소 원자력을 국내에서 사용할 수 있다. 하지만, 가압경수로 사용후연료의 파이로프로세싱을 위해서는 미국의 동의를 필요하며 이를 위해선 정부의 일관되고 장기적인 외교 정책이 필요하다. 한편, 사용후연료 문제는 이제 미국에서도 매우 심각한 문제로 인식되고 있고 재활용을 위한 논의가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 국내에서 혁신적인 용융염고속로 기술로 가압경수로 사용후연료 문제를 핵확산저항성이 분명한 안전하고 경제적인 방식으로 해결할 수 있는 기술이 개발된다면 미국 정부 또한 해당 기술을 활용할 가능성이 매우 높다. 이를 용융염원자로 기술개발 초기 단계부터 미국과 밀접하게 협력하면서 기술혁신을 추구해야 할 것이며, 민간 기업들의 적극적인 기술혁신을 위한 노력이 요구된다. 이런 관점에서 현대건설, 삼성중공업, 그리고 HD한국조선해양 등의 용융염고속로에 대한 적극적인 기술개발 의지와 노력은 매우 중요하다고 할 수 있다.

3.3.3 초고온가스로

앞에서 설명한 바와 같이, 냉각재 출구 온도가 1,000도 정도인 초고온가스로의 개발은 재료의 문제로 인해서 쉽지 않아 보이며, 대신 출구 온도 700도 내외 소위 고온가스로 개발이 단기적인 연구개발 목표라고 할 수 있다. 국내의 경우 2024년 7월부터 민관합작 차세대 고온가스로 연구가 시작되어 2027년 12까지 진행될 계획이며, 관련 연구과제명은 ‘산업 공정열 공급용 고온가스로 설계’다. 해당 고온가스로 과제에선 90 MWth 열출력을 가진 소위 ‘블록형’ 고온가스로 설계를 도출하고 핵심기술을 확보하는 것이 주요한 연구 목표이다.

위 민관합동 4세대 고온가스로 시스템 연구개발 과제에선 ‘포스코이엔씨’가 대표 민간기업으로 참여하면서 한국원자력연구원과 공동연구를 진행한다. 포스코이엔씨 외 대우건설, SK에코플랜트, 롯데케미칼, 스마트파워 등이 민간기업으로 참여하고 있다.

한편, 고온가스로 이용에 관심이 있는 국내 다양한 민간 기업들은 ‘원자력열이용 협의체’를 구성하여 고온가스로 공정열 이용에 대한 정보를 공유하고 협력하는 논의를 하고 있으며, 다음 기업이나 단체가 협의체로 참여하고 있다: 한국원자력연구원, 경북도청, 현대엔지니어링, 현대건설, SK에코플랜트, 삼성엔지니어링, SK인천 석유화학, 포스코홀딩스, 포스코이앤씨, GS건설, 롯데케미칼, 어프로티움, 롯데건설, DL이앤씨, DL케미칼.

초고온가스로의 실증을 위한 New Clear 프로젝트 또한 위 민관합동 프로젝트가 마무리되는 2028년에 시작하여 2030년 중반에 실증하는 계획이 현재 계획되고 있는데, 해당 실증 프로젝트는 현 민관합작 고온가스로 연구개발 프로젝트의 결과에 많은 영향을 받을 것으로 예상된다.

현대엔지니어링은 약 10년 전부터 미국의 USNC(Ultra Safe Nuclear Corporate)라는 초고온가스로 기업과 협력해서 소위 MMR(Micro Modular Reactor)라 불리는 블록형 고온가스로 개발에 참여하고 있으며 400억 원 가까운 투자도 한 상황이다. 그러나 최근 USNC가 경영난에 빠지면서 해당 연구개발이 추진이 불투명한 상황이다. 한편, 최근 한수원(주) 또한 USNC와 협의를 진행 중인 것으로 알려져 있다.

고온가스로 또한 HALEU 연료가 필요한 상황이며, 위 소듐냉각고속로에서 기술한 바와 같이, HALEU 연료의 공급이 전제되어야 관련 기술개발이 계획대로 진행될 수 있을 것이다. 한편, 고온가스로는 기본적으로 열중성자 시스템이기 때문에 최대 농축도 10%인 소위 LEU+ 연료를 이용할 수 있어 HALEU에 대한 의존성은 고속로에 비하여 상대적으로 덜하다고 할 수 있다. 그러나 고온가스로의 경우, 사용후연료와 함께 다량의 방사화된 흑연 폐기물이 방출된다는 점이 실증 과정에서의 도전과제로 지목된다. 또한, 고온가스로는 출력밀도가 비교적 낮아 노심출력이 최대 300 MWth 정도로 크게 제한되어 충분한 경제성 확보에 대한 우려가 존재한다.

3.3.4 원자력 수소 생산

전술한 바와 같이, 국내에서 기존 가압경수로 전력을 이용한 저온 전기분해를 이용한 수소 생산은 태양광 및 풍력을 이용한 경우에 비하여 월등하게 저렴하다. 한편, 4세대 원자로 시스템은 가압경수로보다 전력 생산 효율이 높을 뿐만 아니라 높은 온도의 열에너지를 제공함과 동시에 보다 높은 경제성을 제공할 수 있기 때문에 4세대 원자로를 이용한 수소 생산은 더욱 매력적일 수 있다.

우리나라는 수소경제 진입의

정책의지를 일관되게 보여 주고 있음

- 수소경제 활성화 로드맵 (2019.1)
- 수소기술개발 로드맵 (2019. 10)
- 수소경제육성 및 수소안전관리법 (2020. 2)
- 한국형그린뉴딜 (2020. 7)
- 2050 탄소중립 선언 (2020. 10)
- 2050 탄소중립 시나리오(안) (2021.8)
- 탄소중립 기본법 (2021. 9)

수소수요 10%를 수전해 공급시 신규발전 소요			
	2030년	2040년	2050년
수전해수소소요(톤)	19만톤	53만톤	260만톤
태양광(GW)*	7.2	20.2	98.9
원자력(GW)**	1.0	2.8	14.0

우리나라 청정수소의 실현성과 경쟁력 ???

*) 태양광 이용률 15%, 수전해효율 50kWh/kg-H₂
 **) 원자력 이용률 85%, 수전해효율 40kWh/kg-H₂

	2018년	2022년	2030년	2040년
공급량 (=수요량)	13만톤/부	47만톤/부	194만톤/부	526만톤/부 이상
공급방식	①부생수소(1%) ②추출수소(99%)	①부생수소 ②추출수소 ③수전해	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+②+③ : 50% ④ : 50%	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+②+③ : 70% ④ : 30%
수소가격	- (정책가격)	6,000원/kg (시장화 초기가격)	4,000원/kg	3,000원/kg

부 문	2018년	2050년		
		1만	2만	3만
합계	-	29.2	27.7	27.5
① 해외 수입 수소	-	23.9 (82.4%)	22.5 (81.5%)	22.0 (80.0%)
② 수전해 수소	-	2.6 (8.9%)	2.6 (9.3%)	5.5 (20.0%)
③ 추출 수소 + CCUS	-	1.5 (5.2%)	1.5 (5.5%)	0
④ 부생 수소	-	1.0 (3.5%)	1.0 (3.7%)	0

비고 : 1. 수전해에 필요한 전력 소비량은 43kWh/kgH₂(시스템 효율)로 전망하여 산정

그림 3-2 국내 탄소중립을 위한 수소 수요량 (지난 정부)

그림 3-2는 지난 정부에서 강력하게 추진한 재생에너지 기반 2050 탄소 중립을 위한 연구 결과의 일부로서 연간 요구되는 수소 가스량 및 관련 정보를 보여준다. 그림에서 보듯이, 2050년 이후 매년 526만 톤의 수소 가스가 필요하고, 필요한 수소의 10% 만을 국내서 원자력 전기를 이용하여 생산하는 경우 대형 원자력 발전소 14기가 필요함을 알 수 있다. 이는 상당한 양의 수소가 한국의 탄소중립을 위해서 필요함을 의미한다. 당시 연구에서 국내에서 필요한 수소 생산안 불가능하다고 판단하였으며, 아래에서 보듯이 대부분의 수소를 생산 단가가 매우 저렴할 것으로 예상되는 중동 지역에서 수입하는 것을 권고하고 있다.

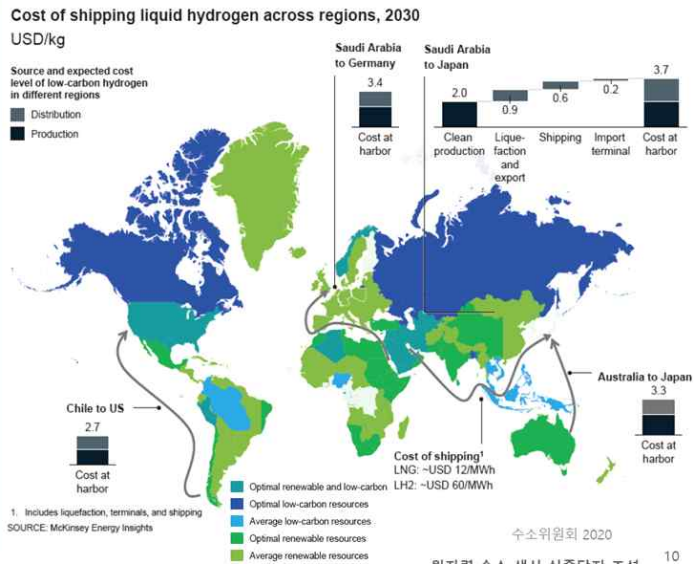


그림 3-3 해외 수입 수소 가스 예상 단가 (지난 정부)

위와 같이 대규모 수소 가스가 탄소중립을 위해서 필요하기 때문에 국내에서 수소 생산을 경제적으로 할 수 있다면 많은 민간기업을 해당 기술을 개발할 것으로 예상된다. 한편, 지난 정부 ‘수소위원회’는 탄소중립을 위해서 사우디아라비아와 같은 태양광이 풍부한 나라에서 생산된 수소를 수입하는 경우 국내에서의 수소 예상 단가를 고찰하였으며 그림 3-3은 그 결과를 요약한 것이다. 중동 현지에서의 수소 생산 단가는 약 1.5달러/kgH₂로서 매우 저렴하게 가정하였는데, 운송 방식에 따라서 국내에서 수소 가격을 최소 3.2달러에서 최대 4.8 달러 정도로 상당히 증가함을 알 수 있다. 이러한 수입 수소 가격은 그림 3-1의 현 저온 전기분해 원자력 수소 단가(약 3.3달러/kgH₂)와 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 4세대 원자로 시스템을 사용하면 훨씬 저렴한 원자력 수소 생산이 가능할 것으로 기대되며 이는 민간기업들이 원자력 수소 생산에 관심을 가지는 주요한 동기라고 할 수 있으며, 용융염고속로 및 초고온가스로 등을 이용한 수소 생산이 구현될 가능성이 매우 높다.

3.3.5 납냉각 고속로

국내 실증 대상 4세대 원자로 시스템에 포함되지 않은 납냉각고속로의 기술개발은 유니스트 황일순 교수가 거의 전적으로 울산을 중심으로 소규모 연구진과 함께 관련 연구를 추진하고 있는 상황이다. 납냉각고속로에 대한 한국의 GIF 활동은 매우 저조한 상황이며 관련하여 관심을 가진 기업도 매

우 소수인 상황이다. 특히, 황일순 교수가 추진하는 납냉각고속로는 납과 비스무스(Bi)가 약 1:1로 섞인 소위 LBE (Lead Bismuth Eutectic)이라는 공융합금이 냉각재로 사용되는데, 이 경우 방사성 독성이 매우 강한 Po-210이 다량 발생하고 구조재의 부식이 순수한 납에 비하여 더욱 심한 현안이 존재한다. 납냉각고속로의 실증 및 상용화를 위해서 구조재의 부식 문제가 해결되어야 하는데 결코 쉽지 않다. 또한 국내에서 소듐냉각고속로, 용융염 원자로, 초고온가스로 등의 구현 및 상용화에 정책의 우선순위가 있는 상황이며, 이는 납냉각고속로 기술개발 및 상용화에 국내 민간기업의 적극적인 참여가 어려울 것을 의미한다.

3.4 4세대 원자로 발전을 위한 정책 과제

3.4.1 원자력-재생에너지 상생 정책

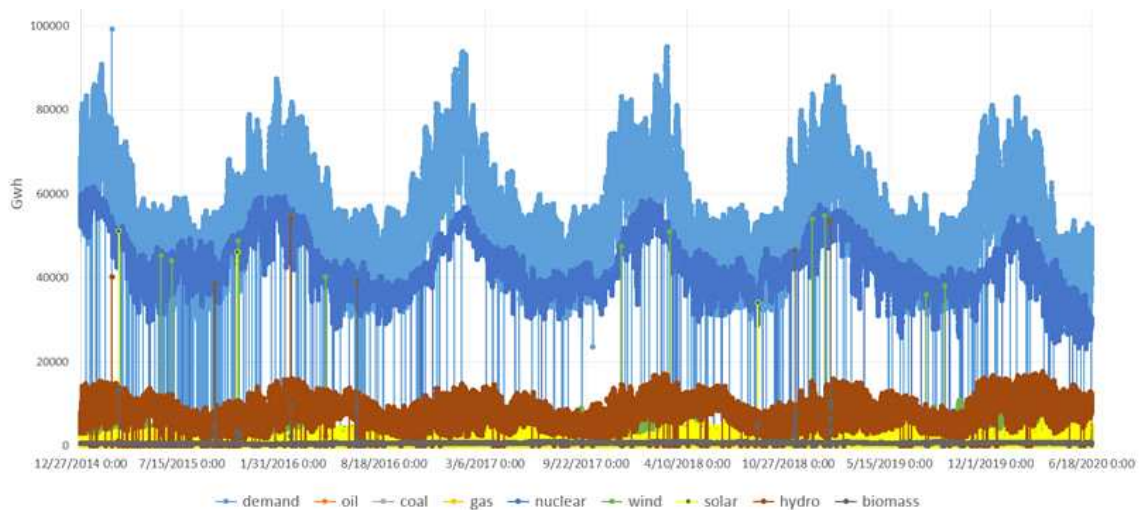
한국에서 첨단 4세대 원자로 시스템의 성공적인 연구개발 및 상용화를 위해 무엇보다 우선 필요한 정책은 ‘정치 중립적인’ 정부의 원자력 정책의 확립이라고 할 수 있다. 한국의 원자력 산업은 1980년대 및 1990년대 원자력 기술 자립 및 고도화를 거치면서 빠르게 성장하여 2009년엔 UAE에 한국형 가압경수로 원전 APR1400 4기를 수출할 정도로 높은 수출 경쟁력을 확보한 바 있다. 또한 한국원자력연구원은 2000년대부터 SMART라고 불리는 소위 소형모듈형원자로(SMR) 연구개발을 시작하여 제일 먼저 2010년대 표준설계 인허가를 획득하여 SMR 연구개발의 선두 주자로 평가받았다. 이 뿐만 아니라 소듐냉각고속로 및 초고온가스로와 같은 4세대 원자로에 대한 연구개발 또한 꾸준히 진행하여 2010년대 후반 실증로 건설을 추진할 정도로 핵심기술을 확보하였다. 그러나 이처럼 우수한 한국의 원자력 산업 및 연구개발 역량은 ‘탈원자력’을 외친 지난 정부 5년 동안 크게 훼손되었는데, 특히 관련된 많은 중소기업이 도산할 정도로 심각한 피해를 본 것으로 알려져 있다. 또한 정부의 탈원자력 정책이 5년 동안 진행되면서 많은 연구 인력이 해외로 이주하였으며, 대학의 원자력 관련 학과는 학생들 진입이 거의 없을 정도로 큰 타격을 입었다. 탈원전 정책 이전에 세계적으로 SMR 연구개발을 선도하던 한국은 이제 SMR 개발 및 상황에서 미국을 비롯한 주요국에 뒤쳐진 상황이다.

한편 현 정부는 이제 ‘탈탈원전’을 주장하면서 원자력에 지원을 약속하고 다양한 방식의 장려 정책을 펴고 있다. 특히 차세대원자로 시스템 연구개발에 적극적으로 정책을 개발하고 연구개발을 주문하고 있다. 정부의 지원 정

책으로 지난 정부에서 크게 타격을 입은 원자력 산업이 서서히 복구되고 있고 원자력의 대중 수용성이 꾸준히 개선되는 상황이다. 그럼에도 불구하고 유능한 인재의 원자력 진입은 여전히 저조한 상황인데 이는 향후 정권이 바뀔 상황에서 또다시 탈원전과 같이 현 정부와 반대되는 원자력 정책의 추진에 대한 우려가 주요한 원인으로 이해된다.

4세대 원자로 시스템 연구개발에 소요되는 비교적 긴 기간을 고려하면 성공적인 차세대원자로 연구개발을 위해서는 정치에 흔들리지 않는 정치 중립적인 원자력 정책이 분명히 필요하다. 전통적인 양당제 국가인 미국에서 현재 양당이 에너지 안보 및 탄소중립 달성을 위해서 원자력 진흥정책에 공조하고 있는 상황이 아주 좋은 예라고 할 수 있을 것이다. 물론, 미국에서도 재생에너지에 대한 정책과 원자력 진행 관련 정책이 서로 충돌하기도 하지만 전체적으로 재생에너지와 원자력을 두 축으로 국가 에너지 정책 방향이 확립되어 추진됨을 볼 수 있다.

지난 우리 정부에서 탈원전 정책의 저변에는 ‘재생에너지 우선’ 정책이 자리하고 있음은 잘 알려져 있다. 지난 정부에선 무조건적인 재생에너지 우선 정책이 추진되었으며, 이로 인하여 우리나라 재생에너지의 특성을 전혀 고려하지 않은 불합리하고 무리한 정책이 많이 추진되었다. 가장 아쉬운 부분의 하나는 에너지 생산을 재생에너지와 비재생에너지로 이분하여 원자력을 포함한 비재생에너지 분야를 아예 고사시키는 정책을 펴면서 두 기술 분야 간 협력 및 상생 가능성을 전혀 고려하지 않았다는 점이다.



프랑스 전기 생산 (2019)

그림 3-4 프랑스 원자력 발전소의 부하추종운전

기술적으로 재생에너지 하나만을 이용해서 한국의 산업 및 경제의 경쟁력을 유지하면서 탄소중립을 달성하는 것은 불가능에 가깝다는 것으로 거의 모든 전문가는 인지하고 있다. 따라서 앞으로 한국에서 차세대원자력 기술개발을 위해서 필요한 정책의 하나는 원자력과 재생에너지의 상생을 도모하는 방향이어야 한다. 매우 아쉽게도 재생에너지를 주장하는 극소수 전문가는 간헐적인 속성을 지닌 재생에너지는 부하추종운전을 하지 못하는 원자력과 같이 상생할 수 없다고 잘못된 주장을 여전히 고수하고 있다. 한국의 원전이 부하추종운전을 하지 않는 이유는 기본적으로 그 필요성이 없었기 때문이다. 이는 석탄 및 가스 발전소가 부하추종운전을 더 잘 할 수 있었으며, 국내 원전의 전력생산 비율이 최대 30% 정도인 상황에서 굳이 발전단가가 매우 저렴한 원전을 이용하여 부하추종운전을 할 필요성이 크기 않았기 때문이다. 그러나 최근 간헐성이 매우 높은 재생에너지 전력 비율이 빠르게 상승하면서 원전의 부하추종운전 필요성이 강조되는 상황이다.

그림 3-4는 원자력의 전기 생산 비율이 70%를 넘어서는 프랑스에서 원자력 발전의 부하추종운전을 극명하게 보여준다. 프랑스 원전은 하루 단위로 원자로 출력에 크게 변하는 소위 일일 부하추종운전(daily load follow operation) 뿐만 아니라 매우 빠르게 부하가 변하는 소위 주파수제어(frequency control) 또한 매우 성공적으로 실시하고 있다. 사실 한국의 가압경수로 또한 약간의 설계 및 설비 개선을 통하여 프랑스 원전과 유사하거나 개선된 부하추종운전 능력을 확보할 수 있으며, 재생에너지의 간헐성을 크게 보완할 수 있는 능력을 갖출 수 있다.

결과적으로 원자력의 부하추종운전을 실시함으로써 한국에서의 재생에너지 보급을 확대할 수 있는 조건을 제공할 수도 있다는 점이다. 특히 4세대 원자로 시스템의 경우 부하추종운전 능력은 기존 가압경수로보다 훨씬 뛰어나기 때문에 재생에너지와 더욱 효율적인 상생이 가능하다.

3.4.2 민간기업 기술 역량 장기 육성 방안

진정 혁신적인 4세대 원자력 시스템의 개발을 위해서는 민간기업이 더 적극적으로 관련 기술개발을 추진할 수 있도록 장기적인 지원 정책이 필요하다. 가장 좋은 예가 미국의 ARDP로서 연구개발부터 시작하여 실증로 건설까지 장기적이면서 전폭적인 지원을 하는 것이다. 다행히 현 정부는 New Clear 프로젝트를 통하여 한국형 ARDP 추진을 선언하고 정부와 민간이 협력하여 4세대 원자로 시스템을 연구개발하고 실증할 수 있도록 장기적으로 지원하는 정책을 추진하고 있다. 이러한 New Clear 프로젝트의 성공을 위

해서 해당 정책이 정치에 흔들리지 않고 당초 계획대로 추진될 수 있어야 하는데, 관련하여 정책의 보완이 필요해 보인다. 특히 현 New Clear 프로젝트에 민간기업이 큰 투자를 하면서 참여하기 때문에 정치적 상황이나 정권에 흔들리지 않고 추진될 수 있도록 해야 할 것이다.

민간기업의 4세대 원자력 관련 기술 역량 육성을 위해선 공기기업이나 국가연구소가 보유한 시설이나 핵심기술을 기업이 원활하게 활용할 수 있도록 지원하는 정책도 필요하다. 원자력 관련 기술은 원자로 및 핵연료와 같은 민감한 기술이 언젠가 동반되기 때문에 국가연구소 설비 및 시설을 반드시 활용해야 하는 경우가 매우 흔하다.

현 정부의 4세대 원자력 관련 육성 방향은 대부분 민간 대기업이 국가연구소가 기획하고 주도하는 기술개발에 민간이 투자하고 참여하는 방식의 협력에 초점이 맞춰져 있다. 이런 경우 민간 주도 혁신 기술의 개발은 기대하기 어려울 것이다. 특히, 이런 환경에서 파괴적 혁신을 목표로 하는 민간 벤처기업의 탄생은 기대할 수 없다. 진정으로 글로벌 혁신을 주도할 수 있는 기술개발을 위해선 민간이 주도하는 파괴적 혁신적 연구에 국가연구소가 참여하고 정부가 지원하는 정책이 필요할 수 있다. 아쉽게도 국내에서 혁신적인 원자로 시스템 기술개발을 추구하는 벤처기업은 'BEES(주)' 하나인 상황이며 현재와 같은 정부 정책에선 혁신적인 원자로 개발을 추구하는 벤처기업의 등장은 기대하기 어려울 것이다.

3.4.3 원자로 실증부지 지원

아무리 좋은 4세대 원자로 관련 기술이 개발되어도 이를 실증하지 못하면 국내 상용화 및 수출은 불가능하다. 따라서 K-ARDP와 같은 프로젝트에선 반드시 국내에서 4세대 원자로를 실증할 수 있도록 지원하는 것이 매우 중요하며, 이는 민간 주도 4세대 원자로 개발에서 특히 필수적이다.

특히, 현재 우리나라에서 연구·개발하는 용융염고속로의 경우 아직 그 어느 나라도 실험적으로 실증을 하지 않은 원자로 개념으로서 실험로 및 실증로의 건설이 특히 중요하다. 다행히 현재 경상북도 경주에 조성되고 있는 문무대왕연구소 부지에 용융염고속로와 같은 혁신적 4세대 원자로 실험로 건설 및 운영이 가능하며 이를 적극적으로 추진해야 한다. 한편, 용융염고속로와 같이 세계적으로 유일한 원자로 시스템의 실험로를 국내에 건설할 경우 전 세계 다양한 국가 및 기업이 참여할 수 있도록 유도하여 해당 시설의 활용도 및 가치를 극대화하는 정책도 필요하다.

한편, 반드시 국내 실증만을 추구할 필요는 없는 경우도 가능하며, 국내

선 개발된 4세대 원자로를 해외에서 실증하고 수출할 수 있도록 하는 정부의 지원 정책도 추진할 수 있을 것이다. 나라에 따라서 실험로 및 실증로를 자국에 건설하여 운영하면서 해당 기술을 국산화하고 전문 인력을 교육하고 육성하는 전략을 취할 수도 있다.

3.4.4 사용후연료 재활용 정책

앞에서 언급한 바와 같이, 소듐냉각고속로 및 용융염고속로 등과 같은 4세대 원자로 시스템의 최적 활용은 안전하고 효율적인 사용후연료 재처리 기술에 기반한 재순환 핵연료주기를 구현하는 것이다. 그러나 현 한미 원자력협정에 따르면 국내에서 사용후연료 재처리 활동은 매우 제한적으로만 가능한 상황이다. 즉, 그동안 한미가 공동으로 개발한 소위 파이로프로세싱(pyroprocessing)에 기반하여 기존 가압경수로 산화물 형태의 사용후연료를 환원하여 금속 형태로 전환하는 공정만 가능하다. 하지만 이미 기술한 바와 같이 사용후연료 문제를 해결하고 지속가능한 원자력 기술 확립을 위해선 파이로프로세싱을 이용하여 우라늄과 핵분열생성물이 많이 혼합된 초우라늄 원소(TRU)를 추출하여 사용하는 것이다. 이는 기술적으로 이미 상용화할 수 있는 수준에 도달해 있지만, 미국의 정치적인 결정에 따라서 한국에서 아직 구현하지 못하는 상황이다. 최근 미국에서도 사용후연료 재순환 필요성이 제기되고 있으며 파이로프로세싱과 같은 재처리 방식에 대한 논의가 활발하게 진행되고 있다. 국내에서 사용후연료의 차세대 원자로 재순환을 위해서는 위에서 언급한 바와 같이 10년 이상 한미가 공동으로 개발한 TRU 추출 기술을 한국에서 적용할 수 있도록 한미 원자력협정이 개정될 필요가 있다. 사용후연료의 파이로프로세싱과 같은 민감한 원자력 기술의 국내 이용 및 상용화를 위해서 정부가 장기적이고 일관된 정책으로 미국과 논의를 진행해야 할 것이다.

3.4.5 HALEU 확보 전략 및 정책

위에서 언급한 파이로프로세싱을 이용한 사용후연료 재순환이 구현되지 못하면 4세대 원자로 시스템에선 우라늄 농축도가 10~20% 정도로 비교적 높은 소위 HALEU 연료가 필요하다. 전통적으로 HALEU 연료는 러시아가 대부분을 공급하였는데, 우크라이나-러시아 전쟁 이후 미국 정부의 러시아산 HALEU 수입규제로 미국 및 주요국의 HALEU 수급은 극히 어려운 상황이다. 미국은 농축 우라늄의 러시아 의존성을 벗어나기 위해서 자체적인

HALEU 생산을 적극 추진하고 있지만 미국내에서 본격적인 HALEU 생산은 2030년도 초에나 가능할 것이다.

현 미국의 HALEU 대부분은 기존 무기급 고농축우라늄(HEU)에 저농축우라늄을 혼합하여 농축도를 감소시키는 방식으로 얻어지고 있으며, 일부는 과거 EBR-II와 같은 고속로에 사용되었던 높은 농축도 우라늄 연료를 재처리하여 생산되고 있다. 따라서 이들 HALEU 연료는 미국 내 주요한 연구개발을 위해서도 충분하지 않은 상황이다. 미국 정부는 CENTRUS라는 농축기업이 HALEU 농축 기술을 확보하고 실증할 수 있도록 2022년 1.5억 달러를 투자한 바 있으며, 이는 연간 약 900 kg 정도 HALEU 생산을 목표로 하였다. 미국 내 HALEU 생산을 가속하기 위해서 미국 정부는 2024년 27억 달러를 투자하기로 하였다. 이러한 미국 정부의 지원에 따라서 CENTRUS는 앞으로 단계적인 시설 확장을 계획하고 있으며 약 4년 후 연간 약 6톤 생산 능력을 갖출 것으로 예상되며, 지속된 설비 투자를 통하여 HALEU 생산 능력을 크게 확장하는 것으로 목표로 하고 있다. 한편 영국 또한 최근 자체적인 HALEU 생산을 위해서 1.96억 파운드를 농축기업인 URENCO에 투자하기로 결정한 바 있다.

현재 러시아는 전 세계 농축 우라늄 시장의 약 40%를 공급하고 있는 것으로 알려져 있다. 서방 국가에서 비교적 저렴한 러시아산 농축 핵연료를 앞으로 사용하기 어려운 상황이며, 국내에서 HALEU 연료 자체적인 농축은 정치-외교적으로 비현실적이고 기술성 및 경제성 또한 담보할 수 없을 것으로 예상된다. 만약 국내에서 사용후연료 재순환 정책을 현실화하기 어렵다면 해외에서 HALEU를 수입해야 하는 상황이지만 미국을 포함한 서방 국가에서 HALEU 생산이 매우 제한되어 있어 상당 기간 HALEU 수급이 매우 어려울 것으로 예상된다. 따라서 국내 차세대원자로 연구개발을 성공적으로 추진하기 위해서 HALEU 확보를 위해서 정부의 지원 정책이 절실히 필요할 것이다. 향후 국내에서 필요한 HALEU 확보를 위한 가장 현실적인 방안은 미국이나 영국의 HALEU 생산기업에 한국기업이 투자하는 방식이지만 현시점에서 한국기업의 투자 자체가 쉽지 않은 상황이며 이를 위한 정부의 외교적 노력 필요한 상황이다.

3.4.6 기타 정책

국내서 개발된 4세대 원자로 및 관련 시스템의 수출을 위한 금융 지원은 국내 관련 산업의 발전 및 국가 경쟁력 제고 관점에서도 필요할 것으로 전망된다. 에너지 안보 및 탄소중립 관점에서 원자력의 필요성 및 전 세계적인

원자력 개발 계획을 고려할 때, 높은 경쟁력을 가진 4세대 원자력 시스템의 해외 시장은 매우 크고 다양한 상황이다.

원자력 및 4세대 원자력 시스템의 특징을 고려할 때, 국내 민간 기업으로서는 해외 국가연구소와 협력이 중요할 수 있으며, 이를 위해 정부를 통한 지원이 필요할 것이다. 예를 들어, 미국이나 프랑스 등의 국가연구소와 국내 민간기업의 기술협력이 성공적으로 성사되려면 정부의 조력이 매우 효율적일 수 있다.

또한 국내 초중고 교육에서 원자력에 대한 객관적인 정보를 학생들에게 제공하고 편향되지 않은 교육이 진행되도록 하는 정책도 필요하다.

4. 요약 및 제언

무탄소 원자력의 주요한 특징을 소개하고 6개 4세대 원자로 시스템의 기술적 특징 및 개발 현황을 요약하였다. 또한 주요국의 4세대 원자로 관련 기술개발 정책을 소개하였으며 한국에서의 4세대 원자로 시스템 필요성 및 전망 및 과제를 기술하였다.

GIF(4세대 원자로 국제 포럼)에 참여하는 국가들은 제안된 4세대 원자로 중에서 소듐냉각고속로와 초고온가스로가 가장 많은 관심을 보이는 것으로 파악되며, 초임계압수원자로는 캐나다 일본 등 극히 일부 국가에서만 소규모 연구가 진행되는 것으로 파악된다. 또한 가스냉각고속로의 경우 냉각재 상실 사고시 피동안전성을 확보하기 곤란할 것으로 판단되며 일부 국가만이 핵심 기술 연구만을 진행하는 것으로 파악된다. 납냉각고속로의 경우 유럽 및 러시아 등에서 상대적으로 소규모 기술개발이 진행되고 있으며, 용융염원자로에 대한 관심이 최근 크게 높아진 것으로 파악된다.

미국은 ARDP 프로그램을 통하여 벤처기업 테라파워의 소듐냉각고속로 실증을 지원하고 있으며, 고온가스로 및 용융염원자로 등에 대한 기술개발 또한 적극적으로 지원하는 정책을 펴고 있다. 미국에서의 4세대 원자로 기술개발은 대부분이 테라파워와 같은 민간기업이 주도하고 있으며 국가연구소가 민간기업과 공동연구를 진행하는 방식이다.

일본의 경우 자체적인 소듐냉각고속로 개발 프로그램의 실패 및 후쿠시마 사고 여파로 4세대 원자로에 대한 연구가 활발하지 않지만, 최근 미국과 협력하여 첨단 소듐냉각고속로 기술개발 정책을 추진하고 있다. 전통적으로 소듐냉각고속로를 주도했던 프랑스는 최근 해당 원자로 시스템에 대한 안전성 현안 및 비교적 낮은 대중 수용성으로 인해서 새로운 정책을 추구하고면서, 용융염고속로를 이용한 혁신적인 사용후연료 핵변환 관련 연구 정책을 추진하고 있다. 이탈리아는 오랜 탈원전 정책에 대한 재검토를 진행하면서 납냉각고속로에 대한 연구개발을 지원하는 정책을 펴고 있다.

중국과 러시아 등은 러시아의 소듐냉각고속로 기술을 공유하면서 안전성 및 경제성이 개선된 소듐냉각고속로 개발을 진행하고 있다. 인도 또한 자체적인 소듐냉각고속로 개발을 오랫동안 추진하고 있지만 기술개발은 더디게 진행되는 것으로 파악된다.

한국의 경우 전통적으로 소듐냉각고속로와 초고온가스로 기술개발에 집중하였는데 최근 용융염원자로 대한 핵심 원천 기술개발이 추진되고 있다. 특히 현 정부는 미국의 ARDP와 유사한 소위 New Clear 프로젝트를 통하여 4세대 원자로 시스템의 국내 실증을 추진하고 있는데, 현재 용융염원자로

실증을 위한 기획이 진행되고 있다. 이후 소듐냉각고속로 및 초고온가스로에 대한 실증 프로젝트 또한 진행될 예정이다. 한국의 New Clear 프로젝트는 기본적으로 민관합작으로 추진되고, 또 민간기업이 주도적으로 참여하여 상용화하는 것을 목표로 하고 있다.

4세대 원자로 시스템 연구개발 동향을 살펴보면, 용융염원자로에 대한 관심이 매우 높는데, 이는 용융염원자로의 월등히 우수한 안전성과 상대적으로 매우 높은 핵연료 이용률 등의 장점이 있기 때문일 것으로 파악된다. 많은 벤처기업이 2030년대 상용화를 목표로 용융염원자로를 개발하고 있으며 한국의 주요 기업 또한 관련 연구개발에 적극 참여하고 있다.

4세대 원자로 시스템의 성공적인 실증 및 상용화를 위해서 HALEU 연료의 안정적인 공급이 무엇보다 중요하다. 하지만 러시아가 배제된 상황에서 HALEU 공급망은 극히 제한적이며 지속 가능하지 않다. 따라서 4세대 원자로 시스템의 성공적인 개발을 위해서 정부는 관련 핵연료 주기 정책을 적극적으로 추진할 필요가 있다. 특히 이를 위해서 정부는 미국과 긴밀하게 협력할 필요가 있다.

또한 4세대 원자력 시스템의 궁극적인 활용은 가압경수로 사용후연료를 용융염고속로 및 소듐냉각로와 같은 고속로를 이용하여 재활용하는 것이다. 특히 이 관점에서 용융염고속로는 소듐냉각고속로에 비하여 안전성 및 경제성 그리고 핵확산저항성 관점에 많은 장점을 가진 것으로 파악되며, 관련 기술의 개발이 필요한 상황이다. 그러나 이를 위해서 한미 원자력협정의 개정이 필요하며 결과적으로 정부의 적극적인 역할이 요구된다.

탄소중립 및 에너지 안보 관점에서 원자력은 많은 나라에서 부활하고 있는데, 특히 수소 생산을 위해서 4세대 원자로 시스템 역할이 중요할 것이다. 국내 원자력 수소는 재생에너지 대비 월등하게 경제성이 높으며, 4세대 원자로를 이용하면 원자력 수소 생산 단가는 더욱 낮아질 수 있다.

국내에서 4세대 원자로 시스템의 실증 및 상용화에 가장 큰 장애물은 아마도 규제기관으로부터 인허가를 획득하는 과정일 것이다. 특히 국내 규제기관은 4세대 원자로에 대한 경험이 일천하고 규제 시스템이 준비되어 있지 않다. 따라서 4세대 원자로 시스템의 실증 사업은 규제 시스템 개선 및 개혁과 함께 반드시 추진되어야 그 의미가 있을 것이다. 예를 들어, 규제 샌드박스 등을 도입하여 규제 시스템 개선 방향 등을 도출하고 혁신적인 4세대 원자로 시스템이 안전하고 효과적으로 도입될 수 있도록 해야 한다. 원자력 시스템의 개발 및 인허가 과정의 어려움을 고려할 때, 4세대 원자력 시스템의 구현을 위해서 정치 중립적인 정책의 일관된 추진이 무엇보다 중요하다.

5. 참고문헌

- [1] M. Paine, The frequency and consequences of cosmic impacts since the demise of the dinosaurs (2002)
- [2] N. Bostrom, Existential risk: analyzing human extinction scenarios and related hazard (2002)
- [3] Bill Gates, “How to avoid a climate disaster?” (2023)
- [4] 김용희, “카이스트 궁극의 안전성 확보 ‘자율운전 소형원자로’ 핵심 기술 개발”, 동아일보, 2020년 7월 31일
- [5] Technical assessment of nuclear energy with respects to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020.
- [6] <https://www.korad.or.kr/resources/homepage/korad/pdf/info2.pdf>
- [7] GIF annual report-2023, 2022, 2021.
- [8] 김용희, “원전 부하추종운전 History & Challenges,” 2022년 10월 19일, 한국원자력학회 워크샵
- [9] 김용희, “재생에너지와 원자력, 얼마든지 함께 갈 수 있다” 중앙일보 오피니언 시론, 2017년 10월 12일.
<https://www.joongang.co.kr/article/22003423>