

Review on Nuclear Energy
Strategy and Policy

제1권 제1호 2023년 창간호

원자력 전략·정책연구

ISSN 2983-1547

[연구논문]

2050년을 위한 원자력의 미래 비전: UAE 바라카 원전 수출 이후 2030년까지 10기의
원전 수출을 위한 고언 | 강기식

소형원자로 개발동향과 성공요소 | 김윤호

우리나라 원전산업 활성화 정책방향 | 박석빈

사용후핵연료 관리의 현재와 미래 | 박준우·윤종일

한국의 핵무장 추진 시 국제 규범 위반 문제와 현실적인 핵 억제력 강화 방안 | 신동익

원자력 분야의 리스크정보활용 현황과 과제 | 양준연

원전 강국을 위한 원전수출체계 개편방안 | 이종호

탄소중립 실현을 위한 원자력수소 | 장중화



서울대학교 원자력미래기술정책연구소

SNU Nuclear Research Institute for Future Technology and Policy

Review on Nuclear Energy
Strategy and Policy

제1권 제1호 2023년 창간호

원자력 전략·정책연구

차례

[연구논문]

2050년을 위한 원자력의 미래 비전:

UAE 바라카 원전 수출 이후 2030년까지 10기의 원전 수출을 위한 고언 | 강기식 1

소형원자로 개발동향과 성공요소 | 김윤호 17

우리나라 원전산업 활성화 정책방향 | 박석빈 33

사용후핵연료 관리의 현재와 미래 | 박준우·윤종일 55

한국의 핵무장 추진 시 국제 규범 위반 문제와 현실적인 핵 억제력 강화 방안 | 신동익 73

원자력 분야의 리스크정보활용 현황과 과제 | 양준언 95

원전 강국을 위한 원전수출체계 개편방안 | 이종호 107

탄소중립 실현을 위한 원자력수소 | 장종화 127

Contents

[Articles]

Nuclear Future Vision for 2050: Advice for the Export of 10 Nuclear Power Plants by 2030 after the Export of Barakah Nuclear Power Plants to the UAE Ki-Sig Kang	1
The Current Status and Success Factors of Small Reactor Development Yunho Kim	17
Proposal to the Policy on the Re-vitalization of the Korean Nuclear Industry Seokbin Park	33
The Present and Future of Used Nuclear Fuel Management in Korea Junwoo Park and Jong-Il Yun	55
Issue of Violating International Norms in Case of South Korea's Nuclear Build-Up for Military Purpose, and Realistic Ways to Strengthen Nuclear Deterrence Dong-Ik Shin	73
Current Status and Issues of Risk-informed Approach in Nuclear Area Joon-Eon Yang	95
Restructuring Nuclear Industry for the Enhancement of Nuclear Power Plant Export Competitiveness Jongho Lee	107
Nuclear Hydrogen for Realization of Net Zero Jonghwa Chang	127

2050년을 위한 원자력의 미래 비전

UAE 바라카 원전 수출 이후 2030년까지

10기의 원전 수출을 위한 고언

Nuclear Future Vision for 2050

Advice for the Export of 10 Nuclear Power Plants by 2030 after the
Export of Barakah Nuclear Power Plants to the UAE

강기식*

Ki-Sig Kang

UAE 바라카 원전의 수출 후 10년이 지났지만 최근의 이집트 El-Daba 신규원전 건설사업의 2차 계통 구조물 공사 및 기자재 공급 외에는 별다른 실적이 없는 상태이다. 체코, 폴란드의 신규원전 사업에 많은 노력을 하고 있지만 정치적인 문제로 인해 아직 전망을 분명치 않다. 특히 최근 웨스팅하우스의 지적소유권에 대한 문제 제기로 인한 불확실성 증대하고 있는 실정이고, 이러한 환경에서 한국의 원전수출전략을 어떻게 추진하여야 하는지? 지난 5년간의 탈원전으로 인한 공백이 생각보다 엄청난 결과를 가져오는 것을 느끼고 있다. 한미 간의 학계, 산업계, 그리고 정부 간의 모든 Network을 파괴되고 상실되었다. 미국은 한국 원자력산업 기술의 우수성을 이해하고 서로의 어려운 점을 보완하여 공동으로 원전의 수출을 추진하기보다는, 경쟁적인 관계로만 생각하고 있는 것 같다. 한미 간의 경쟁상태는 러시아, 중국이 신규 원전도입국의 사업을 수주할 가능성이 현저히 높을 것이다. 이러한 어려운 관계에서 우리의 경쟁국인 미국, 중국, 러시아 및 프랑스의 원전 수출 전략을 살펴보고, 한미 간의 원전 협력관계를 어떻게 정립할 것인지를 제안한다.

주제어 네트워크, EPR1200, 유럽사업자요건, AP1000, VVER-1200, 소형모듈원전

Keywords Network, European Power Reactor 1200, European Utility Requirement, AP1000, VVER-1200, SMR

투고일 2023.3.26. 수정일 2023.6.2. 게재확정일 2023.6.2.

* 한국전력 국제원자력대학원대학교 원자력산업과 특임교수(kisigkang3@gmail.com)

I. 배경

코로나19 팬데믹, 유럽의 지정학적 긴장, 군사적 갈등과 같은 최근 사건으로 인해 지역 간 에너지 흐름을 방해하며 에너지 가격의 급격한 상승을 가져왔다. 변화하는 에너지 환경에 비추어 기후변화에 대한 강력한 의지와 우크라이나 사태로 인한 에너지 공급에 대한 보안이 필요하게 되어 많은 국가는 에너지 정책을 수정하였다. 또한 미래의 에너지 공급과 가격 충격을 최소화하기 위해, 신규원전의 도입에 적극적인 고려와 함께 가동 중인 원자력발전소의 계속운전을 추진하고 있다.

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)가 10년 만에 2050년 세계 원자력 발전량의 잠재적 성장 전망치를 상향 조정하였다. 기후위기 대응과 탄소 중립을 위해 원자력 에너지를 늘려야 하는 상황을 반영한 것이다. 2050년까지의 에너지·전력 및 원자력발전 추정치 보고서(International Atomic Energy Agency, 2022a)를 통해 2050년 원전의 발전용량을 긍정적인 측면과 부정적인 측면, 두가지 측면에서 예상하였다.

- 긍정적인 경우 2050년 원전의 시설용량은 최대 873기가와트(GW)에 이를 것으로 예상했다. 이는 2021년 발전량 393GW의 두 배 수준이자 기존 전망치인 715GW보다 약 10% 증가한 것이다. IAEA가 전망치를 상향 조정한 것은 일본 후쿠시마 원전 사고 발생 이후 10년 만이다. IAEA 사무총장 라파엘 그로시는 “새로운 전망치는 원자력이 저탄소 에너지 생산에서 계속 필수적인 역할을 할 것이라는 점을 보여준다” 언급하였다.
- 부정적인 경우, 원자력 기술의 발전이 지연되고 신규 원전의 건설이 확장되지 않는 경우 등을 고려하여 보수적으로 접근한다면 2050년 원자력발전 능력은 지난해와 비슷한 404GWe가 될 것으로 내다봤다.

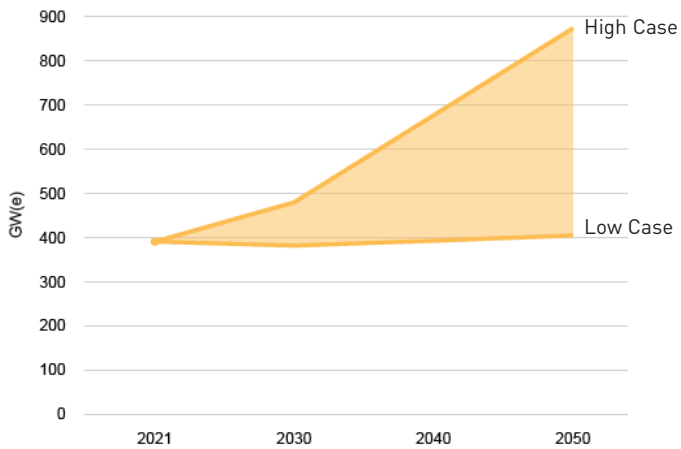
2023년 현재 440기의 원전이 가동 중이며 2050년에는 고성장인 경우 900기 이상의 원전이 가동될 것으로 예상되므로 400기 이상의 새로운 원전이 건설될 것으로 예상된다. 물론 중간 정도의 성장이라도 고려하여도 200기 이상의 신규원전이 30년 내에 발주될 것이다.

그러나 신규 원전의 실질적인 증가를 위해서는 여러 가지 필요 조건이 있다. 가장 기본적인 요구조건은 아래와 같다.

[표 1] 2050년까지 원자력발전 용량의 예측

Electric Capacity	2021	2030		2040		2050	
		Low	High	Low	High	Low	High
Total(GWe)	8208	10079	10079	12841	12841	16590	16590
Nuclear	390	381	479	392	676	404	873
원자력발전(%)	4.8	3.8	4.8	3.1	5.3	2.4	5.3

[그림 1] 2050년까지 원전 용량의 예측



출처: International Atomic Energy Agency(2022a)

- 원전을 도입하는 정부의 일관된 정책,
- 안정된 규제기반,
- 원전의 건설에 대한 자금 조달,
- 기자재의 안정된 공급망을 위한 산업화,
- 고준위 방사성 폐기물의 최종 처리 방안,
- 국민의 원전 수용성 및 이해도 증진,
- 투명하고 공정한 산업기반 체계 및
- 원자력을 활용한 수소 생산기술과 소형 원자로 기술 개발

현재 가동원전의 약 3분의 2가 30년 이상 가동되어 비록 계속운전을 하더라도 장기적으로 영구정지를 상쇄하기 위해 상당한 신규 원자력 용량이 필요함이 강조되고 있다. 특히 북미 지역에서 약 2040년 이후에 영구정지 예정인 많은 수의 원전에 관한 불확실성이 남아 있다. 가동중인 원전은 수명관리 프로그램을 통해 60년 혹은 80년 운전이 가능할 것이다.

최근 몇 년 동안 신규원전 건설, 즉 핀란드에 건설 중인 오키루트 3, 프랑스에 건설 중인 프라마펠 3, 미국에 건설 중단한 쉼머 3, 4호기 원전등 신규원전 건설 비용의 엄청난 초과 및 공기지연을 초래하였다. 신규 원전의 건설지연 및 사업에 대한 불확실성은 신규원전의 사업추진에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 그러나 한국 및 중국에서 건설 중인 신규원전은 계획된 공기대로 원전 건설을 추진하고 있으므로, 신규 원전의 건설지연은 원전자체의 문제가 아니라, 원전 건설 사업자의 사업관리 능력, 설계, 그리고 기자재 업체의 공급 능력이 문제이다.

II. 원전수출 경쟁국의 수출 전략

1. 프랑스의 수출 전략

프랑스는 프랑스, 핀란드, 영국 및 중국에 European Power Reactor(EPR)을 건설하였다. 프랑스 원전 수출은 AREVA-NP사와 EDF사가 EPC 계약으로 수입국의 실정에 전력망의 수준에 따라 1650, 1200 그리고 340 MWe 용량의 로형을 제공한다(그림 2 참조).

프랑스 EDF의 EPR1200은 체코의 전력망 사정을 고려하여 체코용 혹은 동유럽 국가를 생각해서 급조한 느낌이다. EPR1200은 EPR이 European Utility Requirement (EUR)의 인증을 받았으므로 EPR1200도 EUR을 인정받은 것으로 고려되고 있다. 체코의 협조를 구하기 위해 프랑스 대통령은 갑자기 EPR1200 6기를 프랑스에 건설하겠다고 공식적으로 발표하고 건설시 체코와 기업도 참여할 수 있을 것이라고 언급하였다.

EPR1200은 EPR의 건설경험과 EDF 운전경험을 반영한 로형으로 International Atomic Energy Agency(IAEA), Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) 및 EUR의 요구조건을 만족하였다. EPR1200의 열출력은 3300 MW로 1200 MWe의 전력을 생산하고 18개월 주기로 90% 이상의 이용율을 목표로 하고 있다. 설계

[그림 2] EDF의 가압경수로 노형 개발



출처: EDF(2021)

수명은 60년, 내진설계는 0.25g를 기준으로 설계하였으며 177기 핵연료집합체가 원자로에 장입될 예정이다. EPR1200은 부하를 급격하게 조절할 수 있는 부하추종의 기술을 가지고 있다. 부하추종 기술은 재생에너지가 충분히 공급될 경우 에너지 믹스를 위하여 원전의 출력을 급격하게 조정하여 3시간 이내에 출력을 30% 이하로 낮출 수 있는 기술을 보유하고 있다(그림 3 참조).

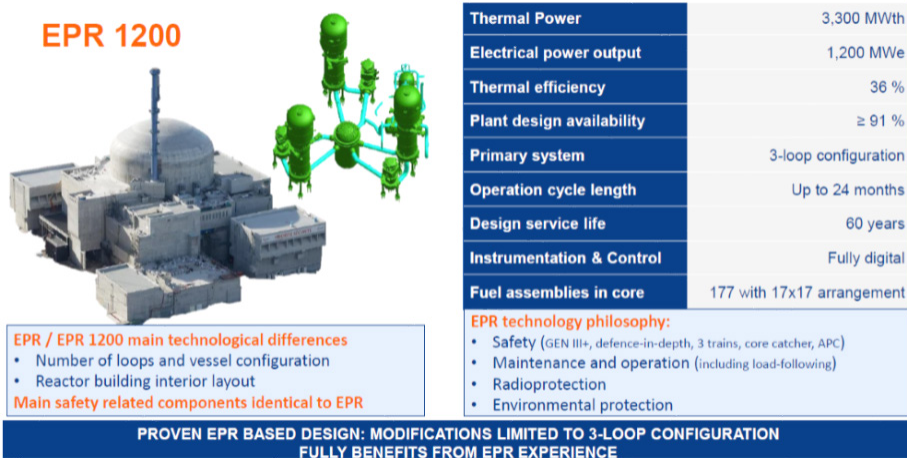
운전 모드에서 EPR1200은 분당 2.5%에서 최대 5%까지 부하 변동으로 빠른 부하 추적이 가능하다. 필요한 경우 원자로는 출력을 제로까지 줄이면서 고온 상태를 유지할 수 있다.

2. 미국의 수출 전략

미국이 제시할 수 있는 수출노형은 현재 Georgia 주에 건설 중인 Vogtle 3, 4 건설모형을 제시할 것이다. Vogtle 3, 4호기는 1,117 MWe 용량으로 Westinghouse가 개발한 3세대 원자로 AP1000(그림 4 참조)가 건설 중에 있다. 설계 수명기간은 60년이며 2개의 원자로 냉각재 루프가 있는 PWR인 Westinghouse가 개발한 노형으로 완전히 피동형 안전계통으로 설계되어 있다.

Vogtle 3, 4호기는 2012년 미국 원자력규제 위원회로부터 건설 및 운전허가를 받은 후 원자로 건설을 시작하였다. Westinghouse는 EPC 계약자로 설계, 기자재 공급, 건

[그림 3] EPR1200의 주요 기술 사양



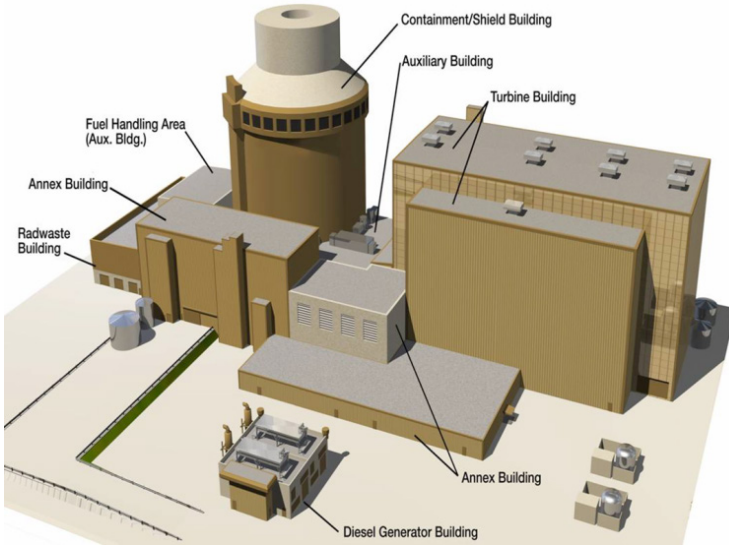
출처: EDF(2021)

설에 책임을 가지고 있으면, Bechtel사가 사업관리 및 건설을 위한 계약자로 선정되었다. 건설 중인 2017년 Westinghouse가 파산하여 공사가 중단되었다. 건설을 재개하여 Vogtle 3호기는 2023년 3월 6일, 미국 Georgia Power사는 최초 임계를 달성했다고 발표하였다, 2023년에 하반기에 상업 운전할 계획이다. 이 경우 전체 건설 기간은 계획기간의 두배인 11년 정도될 것이다.

AP1000 원자로는 각 현장에 인접한 시설에서 제작된 모듈로 건설되는 모듈형 제작방법으로 건설공기를 단축될 것으로 자랑하였다. 그러나 중국에 건설된 샤먼 원전, 해양원전 건설의 경우 계약기간 56개월의 2배가 소요된 112개월에 완성되었다. 더욱이 미국 Summer 원전은 70억 불을 소모한 후 건설 중단을 선언하고 건설을 취소한 상태이다. 미국에서 원전 건설 공사 지연의 주요 원인은 다음과 같다.

- 설계의 완성도 결여에 따른 수많은 설계변경 및 설계변경으로 인한 잦은 공사 중단
- 표준 설계 변경 승인을 위한 복잡한 프로세스
- 긴 시일에 소요되는 장비/시스템의 공급지연(디지털 제어 시스템 및 원자로 냉각재 펌프)
- 자재 조달 지연에 대한 불명확한 책임

[그림 4] 웨스팅하우스 AP1000 조감도



출처: Julie Gorgemans(2021)

- 수십년간 원전 건설공사의 부재로 현장 작업자의 기술력 부재
- 신규로 제정된 규제기관의 요건 해석 부재
- 사업관리 역량의 부재

체코나 폴란드 원전 전문가들도 미국 AP1000의 문제점이 무엇인지 분명히 알고 있다. 모듈화를 위한 현지 공장 설립은 단일 호기의 건설을 위해선 과도한 투사이므로 기술적인 측면에선 AP1000은 한국 APR1000에 상대가 되지 못함을 알고 있으나 정치적인 문제와 우크라이나 사태로 인한 미국과의 관계로 인해 고심 중인 것으로 알려지고 있다.

3. 러시아 원전 수출 전략

러시아형 원자로 Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor(VVER)는 가압경수로 형으로 표 2에서 보여주는 바와 같이, 2022년 12월 현재 총 62기가 세계 12개국(러시아, 슬로바

키아, 이란, 불가리아, 헝가리, 우크라이나, 체코, 핀란드, 아르메니아, 중국, 인도, 벨라루스)에서 가동되고 있으며 24기가 건설 중이며, 향후 40여 기가 건설을 위한 계약을 추진 중에 있다.

3세대 원자로인 VVER-1200(AES-2006)은 유럽의 안전 지침과 IAEA기준에 부합하도록 안전 설계를 강화하였으며 후쿠시마 원전사고 이후 중대사고에 대비하여 방사능 누출을 막기 위한 장치를 운영 중인 원전 및 향후 건설될 원전 설계에 반영하여 원자로의 건전성/안전성을 확보함으로써 세계 시장에서 더욱 신뢰성을 보여주고 있다. 이러한 결과로 전세계 신규원전의 60% 이상이 VVER-1200로형으로 건설이 추진되고 있다. 특히 신규 원전도입국은 UAE를 제외하고는 거의 모든 나라가 VVER-1200을 선택하고 있는 상황이다. 원전 신규도입국이 러시아 노형을 도입할 경우 최소 60년 혹은 80년 이상으로 도입국과 기술협력 관계를 맺음으로 러시아의 영향력을 높이겠다는 것이 그들의 전략이다. 한마디로 천연가스와 원유에 이어 원자력 분야까지 석권해 세계 에너지 시장을 지배할 수 있는 영향력을 가지고자 한다.

로사톰은 후쿠시마 원전 사고 이전에는 2030년까지 원전 건설 분야에서 세계를 제패한다 것을 목표로 하였다. 이 계획에 따르면 2030년까지 러시아에만 42기, 해외에 60기 등 모두 102기의 신규 원전을 건설하여 전 세계 원전 수요의 절반을 공급하겠다는 것이다. 그러나 후쿠시마 원전 사고의 영향으로 원전 신규도입국이 급격하게 감소됨에 따라 로사톰의 원전 수출 계획도 일부 변경되었다.

신규원전 건설은 대부분 러시아가 자금을 지원하는 턴키(Turn-Key)계약 형태로 현재 인도(2기), 벨라루스(2기), 방글라데시(2기), 터키(4기), 이집트(4기)에 원전을 건설 혹은 건설준비 중이며, 우즈베키스탄, 카자흐스탄, 나이지리아와 Inter-Governmental Agreement(IGA)를 맺어 가까운 미래에 아프리카에도 진출할 예정이다. 또한 현재 중국의 장수지역 및 인도 쿠담쿠람지역에 각각 2기 추가 건설을 위한 계약되어 있고, 구 동구권 국가인 헝가리에 2기가 건설될 예정이며 이란에서 부셰르 1호기 가동 후 2, 3호기 건설이 진행되고 있다(한국원전수출협회, 2019).

ROSATOM은 2030년까지 달성하여야 하는 3가지 장기 전략 목표를 설정했다 (Rosatom, 2018).

- 국제 시장 점유율 확대: 글로벌 원자력 분야의 확장을 위해 현재 전 세계 50여 개국에 진출하고 있으며, 해외 신규 원전 사업의 중 장기적인 계획 구축
- 건설공기 단축을 통한 비용 절감: 경쟁력 있는 원전 건설을 위하여 원전 건설 기

[표 2] 각국에서 운전, 건설 중인 VVER원자로(2023년 05월 기준)

국 가	VVER 원자로	운전 중	건설 중 ²
Armenia	1	1	
Bangladesh	2		2
Belarus	2	1	1
Bulgaria	2	2	
China	6	4	2
Czech republic	6	6	
Egypt	4		4
Finland	2	2	
Hungary	4	4	
India	4	2	2
Iran, Islamic republic of	2	1	1
Russia	25	21	4
Slovakia	6	4	2
Turkey	4		4
Ukraine	17	15	2
Total	86	62	24

출처: International Atomic Energy Agency(2019); International Atomic Energy Agency(2022b)

간과 평준화 비용을 줄이기 위해 추가 조치

- 신규 사업개발: 축적된 것을 기술을 이용하여 민간 부문의 원자력 프로젝트에 대한 신규 사업 확대

4. 중국 원전 수출 전략

2023년 5월 중국은 55기의 원전을 운영 중이며 설비용량은 약 53.2GWe이며 설비용량 기준으로 미국(95.8GWe), 프랑스(61.3GWe)에 이어 세계 3위 규모이며, 가동 원자로수 기

1 건설 중 원전의 정의: 원자로 건물에 최초 콘크리트를 타설한 경우를 건설 중 원전으로 분류(IAEA 정의에 의해)

준으로도 세계 3위이다. 원자력발전이 중국의 전체 발전량에서 차지하는 비중은 2023년 기준 5%이다. 21기(21.6GW)의 원전이 건설 중이며, 전 세계에서 건설 중인 원전 57기(59GW)의 거의 40%에 해당하고 있다.

중국정부는 2030년까지 전기발전량은 약 20%를 비석탄연료로 목표를 잡고 있다. 중국의 13차 5개년 에너지발전계획(2015~2020)은 2020년 원전 발전용량 58GW, 신규 건설 발전용량 30GW를 목표로 제시하였으며, 중국 국가에너지국은 매년 6~8기의 원전 건설을 목표치로 발표하였다.

세계 최초 EPR Taishan 1호기 및 AP1000 Sanmen 1, 2호기를 송전망에 연결함으로써 중국은 세계 최초로 3세대 원자로인 EPR 및 AP1000 원전을 건설, 운전단계까지 성공시킨 국가가 되었다. Taishan 1호기²의 경우 핀란드의 Olkiluoto 3호(2005년 착공), 프랑스의 Flamanville 3호(2007년 착공)보다 이후에 착공하였음에도 가장 먼저 송전망 연결에 성공하였다. Sanmen 1호는 2018년 6월 21일 최초임계에 성공함에 따라 전 세계 최초로 가동단계에 돌입한 AP1000 원전이 되었다(그림 5 참조).

중국은 원자력 전문 인재 양성을 위한 국립대학 설립을 추진하고 China National Nuclear Corporation(CNNC)는 텐진(Tianjin) 시와 원자력 특화 대학을 설립하는 전략적 협력 협약을 체결하였다. 양측이 서명한 협약서에 따르면 원자력 특화 대학은 원자력 전문가 양성, 국제 학술 교류 및 핵심 기술 연구를 목표로 하고 있다. 중국의 원자력 인재부족은 재외 중국인의 원자력 기술 분야 진출이 안보의 이유로 금지되고 있는 것이 하나의 원인으로 생각되고 있다.

가. China Advanced Power(CAP) 1400의 특징

중국 국가핵전기술공사(State Nuclear Power Investment Company, 이하 SPIC)에서 개발한 CAP-1400은 웨스팅하우스의 AP1000을 개량한 3세대 가압수형 경수로이다. 설비용량 기준 1,100MWe 규모의 AP1000을 1,500MWe 규모로 개량하였다. 모듈화 건설 방식을 도입해 기존 약 60개월에서 48개월 안에 건설이 가능하며 내부 시설 배치 개선으로 정비 및 접근이 용이하다.

CAP-1400 설계 원칙은

2 Taishan 원전은 2007년 6월 건설을 시작하여 2013년 상업 운전하도록 계획되었으나 2018년 12월 상업운전을 시작하였다.

[그림 5] 중국 삼멘 지역에 건설된 웨스팅하우스 AP1000 원전



출처: Westinghouse(2018)

- 최신 안전 규제 기준을 충족한 피동안전시스템 및 중대사고 예방 및 완화 조치 도입
- 시스템 단순화 및 주기기 인증 완료
- 디지털원자로보호시스템
- 확률론 안전성 평가
- 주요 기기의 모듈화를 통한 건설 공기 단축
- 후쿠시마 원전 중대사고 원인 분석에 따른 설계 개선

웨스팅하우스의 지원과 중국 자체 인력을 투입하여 2014년 기본설계를 완료하였다. CAP-1400의 가장 큰 특징은 후쿠시마 제1원전 사고 당시 발생했던 문제 예방책을 적용했다는 점이다. 피동형안전시스템(Passive Safety System)을 도입하여 72시간 전력의 공급이 중단되어도 원전이 안전하게 자동 정지되도록 하였다. 내부 설계를 강화하고 노내 용융물 억류 냉각(In-Vessel Retention, IVR) 기술을 도입하여 후쿠시마 원전 중대사고와 같이 압력용기가 녹아 용융된 핵연료가 확산되는 사태를 방지했다.

나. Hualong One의 특징

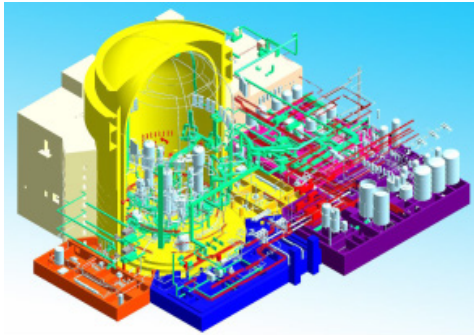
2011년 중국 국무원과 중국원자력국은 2개의 주요 원자력사업자인 China General Nuclear Corporation(CGN)과 CNNC에게 원자로 설계를 3세대 원자로 하나로 통합하도록 요구하였다. 중국은 최초로 고유 원자로인 후아룽 원(Hualong One) 원자로 설계를 완료하여 중국원자력안전국(National Nuclear Safety Administration, NNSA)에 의해서 설계인증을 통과했다(그림 6 참조).

중국원자력국(Nuclear Energy Agency), 중국원자력안전국 및 중국개발재건위원회는 현재 Hualong One 원자로가 중국 자체 지적재산권을 가진 3세대 원자로에 대한 모든 기술적 요건을 만족한다고 확인했다. 최초 실증로는 Fuqing 원전 5, 6호기에 건설 중이고, 파키스탄 카라치 발전소에 원자로가 수출되어 카라치 2, 3호기³는 2022년/2023년 6월 운영허가를 받았다.

다. 적극적 원전수출 추진

중국은 원자력산업의 해외진출을 추진하고 특히 ‘일대일로(One Belt One Road)’와 관련된 국가들과 협력을 강화하고 있다. 현재까지 파키스탄의 차시마 지역에 4기의 원자로

[그림 6] Hualong One의 설계 특성

전개도	설계 특성
	<ul style="list-style-type: none"> • Active and passive safety design: Diverse approaches to perform safety functions • Provide physical separation reducing interaction between units • Convenient for plant construction, operation and maintenance • More flexible for plant siting • Double shell containment • Large free volume • Long lifetime: 60 years • Diversity of power source

출처: CNPE(2018)

3 카라치 원전 2/3호기, 2015/2016년 5월 건설허가, 2022/2023년 6월 운영허가

를 건설하여 현재 가동 중에 있고, Hualong One이 카라치 지역에 2기 건설, 운전 중에 있다.

중국의 원전기업들은 해외진출전략에 참여하여 적극적으로 해외시장을 개척하고 있다. CNNC는 아르헨티나, 영국, 이집트 등 약 20개 국가와 협력의향서를 체결했으며, 아르헨티나 원전기업과 Atucha 3, 4호기 원전건설 계약을 체결하였다. 그러나 아르헨티나의 새로운 정권은 전임정권의 원전건설 계약을 무효화하였다.

정부의 적극적인 지원과 풍부한 내수 시장을 바탕으로 세계 1위의 원전국가로 발돋움하고 있다. 세계적으로 원전산업이 침체기를 겪는 중에 중국은 매년 6~8기 건설을 통해 세계 원전산업을 선도하고 있고, 기술력 부문에서도 Hualong One와 CAP1400 등 자국산 모델을 개발하였고, 세계 최초로 EPR와 AP1000을 완공하여 우수한 시공능력을 입증하였다.

향후 건설 계획 중인 원전의 95% 이상은 중국이 지적재산권을 갖는 노형인 CAP(China Advanced Passive) 시리즈와 Hualong One을 채택하고 있다. 건설 중인 원전 가운데 고온가스냉각로(High Temperature Gas Cold Reactor), 소듐냉각고속로(Sodium Cooled Fast Reactor), 그리고 일체형소형원자로(Small and Modular Reactor)도 있다. 신뢰성과 일관성이 보장된 국가 정책을 기반으로 세계 원전시장에 활발하게 진출하고 있다.

III. 결론: 2030년까지 10기 수출

1. 한·미 원자력협력 Network 복원

전 세계 원전시장의 러시아와 중국 편향은 핵비확산 관점에서 매우 큰 우려와 과제를 던지고 있다. 미·중 경쟁의 신 지정학 시대에 원전수출 확대를 위해 한·미 양국의 기업이 원전수주를 두고 과도히 경합할 경우에 대부분의 신규 원전은 국제표준 규정을 따르지 않는 러시아, 중국이 독점할 우려가 있다.

지난 5년간의 탈 원전 정책으로 인해 학계, 산업계 및 정부 간의 모든 Network이 완전히 파괴되었다. 각 대학 간의 공동연구, 교수 간의 상호교환, 학생의 교환 학점 인정 등 모든 연결 고리가 파괴되고, 또한 산업계도 연계가 상실되어, 모든 것을 바닥에서부터 다시 시작하여야 하는 실정이고 이러한 Network의 손상이 최근의 일련의 사태가 일

어나고 있다.

Network 복원을 위하여

- (1) 정부는 원자력 정책 및 외교분야에 국가차원의 컨트롤타워 및 세부 추진 조직을 강화하고, 미국과의 관련 부처 및 기관별 대응 조직을 잘 정립해서 보다 지속적이고 면밀한 협력을 추진하고,
- (2) 산업계은 UAE의 바라카 모델에 대해 미국 산업체가 만족치 못하고 있는 실정임으로 어떻게 개선할 것인지, 방안을 마련하여야 할 것이다.
- (3) 학계는 대학 간의 원자력 안전연구, 국제협력을 확대 및 활성화하여 대학 간의 안전 관련 협력 의제를 공동 수행하는 방안도 고려되어야 한다. 또한 대학 간의 교환 학생, 학점 동시 인정을 추진하여야 할 것이다.

2. 수출협력 모델의 개발

체코의 사업자인 CEZ가 2023년 말 체코의 두코바니 5호기 입찰서 평가의 결과를 체코 정부에 공식적으로 보고할 것이다. 현재까지 평가 결과는 한국의 기술력이 높이 평가될 것으로 예상된다. CEZ가 한수원의 AP1000가 기술적으로 우위에 있다는 것이 평가된 후, 웨스팅하우스의 기술소유권 주장에 대한 입장 차를 완화할 수 있는 한·미 간 전략적 파트너십 구축을 시작할 수 있을 것이다. 입찰서 평가가 진행되는 현단계에서는 한국이 아무리 파트너십 구축의 필요성을 웨스팅하우스에게 이야기하여도 별로 의미를 두지 않을 것이다.

현재 미국 바이든 행정부는 중동지역에 대한 핵 비확산 정책을 강화할 것으로 예상된다. 핵 비확산 문제가 있는 사우디아라비아 등의 신규 원전에 대해 집중하는 것보다 핵 비확산 측면에서 신뢰도가 높은 동유럽 국가들을 대상으로 원전수출을 도모하는 것이 한·미 간 협력의 가능성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 동유럽 국가들에게 한국만이 정해진 예산과 공기 안에 준공하는 능력이 세계 최고 수준이므로 EDF와 웨스팅하우스의 공기 지연과 예산 초과 사례와 비교해 우리의 강점을 극대화하여야 할 것이다.

로사툼은 주기기는 공급하지만, 주제어실, 보조기기, 터빈, 2차 계통은 경쟁입찰을 통하여 공급한다. 러시아가 여러 나라에서 다수의 원전을 건설함으로 자국 내에선 2차 계통에 대한 기자재 공급이 불가능할 것이다. 한국의 원전 기자재 공급업체가 이집트 엘다바 원전 건설사업의 2차계통 기자재 및 건설을 추진하는 사례와 같이 로사툼이

건설을 수행하는 VVER-1200 원전에 한국의 기자재 공급이 가능할 것이다. 원전 도입국에서 제일 중요하게 생각하는 것이 자국 산업의 발전을 위한 국산화 계획이므로, 한국의 국산화 경험과 기술을 제공하고 필요한 핵심 기자재를 한국 원전 산업계에서 조달, 수출하면 원전 생태계를 유지할 수 있을 것이다.

한국도 러시아의 정부 조직과 같은 로사톰과 같은 기관이 필요 불가결할 것이다. 현재 한전 및 한수원이 나누어 수행하고 있는 원전수출전략을 한 기관에서 통합 수행하도록 수정하고 무엇보다도 정부의 강력한 조정자 역할이 중요할 것이다. 만약 불가하다면 계약구조 즉 EPC, BOO에 따라 한전, 한수원으로 책임을 나누어야 할 것이다. 지금처럼 지역에 따라 분류하는 것은 각 사의 특징, 강점을 무시한 아무런 근거도 없는 분할이다. Team Korea 한팀으로 뭉쳐서 전력을 다하여 추진하여야 할 것이다.

원전은 단순히 기술만을 타국에 수출하는 것이 아니다. 원전의 수출을 단순히 플랜트 수출이 아닌 상대국과 거의 반세기 이상을 외교, 군사적으로 밀접한 관계를 통해 에너지 분야뿐만 아니라 다른 산업분야도 협조하고 발전시켜 나간다는 보다 장기적인 관점에서 원전의 수출이 고려되어야 할 것이다.

한·미는 금융협상 공조를 통해 금융조달 협력을 추구한다면 경쟁력 있는 금융패키지의 구성을 위한 시너지가 창출될 수 있으며, 특정 목표시장의 국가 특성과 개발모델을 기초로 상업적 협력 방식을 모색하고, 이를 뒷받침할 수 있는 금융모델과 지원조건을 도출하는 방식의 접근을 할 수 있을 것이다.

결론적으로 한·미는 공동 파트너십을 통하여 신규 원전 사업을 수주하여 러시아와 중국의 독점을 막을 수 있을 것이다. 한미의 공동 사업은 신규 원전 수입국이 높은 수준의 핵비확산, 핵안보, 원자력안전 기준을 준수하도록 현명한 신규원전 사업자를 만들 것이다. 또한 SMR의 연구개발과 SMR의 수출협력을 가속화할 수 있는 협의를 보다 강화하여야 할 것이다.

참고문헌

- 한국원전수출협회, “국가별 원전도입 및 수출동향 분석,” 한국원전수출협회, 2019, pp. 206-215.
- CNPE, “Construction Preparation and Planning of Hualong No.1 Project,” IAEA Technical Meeting, Beijing, CNPE, 2018.
- EDF, “EPR Technology for a Net Zero Carbon Future,” Nuclear Days, University of West Bohemia, Sep. 15, 2021.
- International Atomic Energy Agency, “Power Reactor Information System (PRIS),” IAEA, 2019.
- International Atomic Energy Agency, “Reference Data Series No.1,” 2022 Edition, IAEA, 2022a.
- International Atomic Energy Agency, “Nuclear Power Reactors in the World,” IAEA, 2022b.
- Julie Gorgemans, “AP1000[®] Plant Performance & Deployment,” Czech Nuclear Days, Westinghouse, 2021.
- Rosatom State Atomic Energy Corporation, “Annual report in 2018,” Rosatom, 2018, p. 30.
- Westinghouse, <<https://twitter.com/wecnuclear/status/1029721362477330432>>, 2018(검색일: 2023.3.15).

소형원자로 개발동향과 성공요소

The Current Status and Success Factors of Small Reactor Development

김윤호*

Yunho Kim

전 세계는 기후위기를 막기 위해 온실가스 감축을 위한 파리협약을 체결하였고, 우리나라도 감축목표를 설정하고 세부 이행계획을 수립 중에 있다. 온실가스 배출량이 많은 화력발전소와 공장의 화석연료를 저탄소 연료로 대체하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 대형원전 건설사업의 비용 증가와 공기 지연, 신재생에너지의 간헐성문제를 해결할 수 있는 소형원자로 개발 현황과 성공 필요 요소를 살펴본다. 시장 경쟁력을 위해 설계의 단순화, 표준화 및 주요 기기의 공장 제작을 통한 공기단축 등으로 건설비용을 낮추고 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연한 분산전원으로 개발되어야 한다. 그리고, 전 세계적으로 일관된 규제기준이 수립되어야 소형원자로가 추구하는 대량생산 경제성이 실현될 것이다.

주제어 소형원자로, 탄소중립, 분산전원

Keywords Small Reactor, Net Zero Emission, Distributed Power Generation

투고일 2023.4.21. 수정일 2023.5.26. 게재확정일 2023.5.26.

* 한국수력원자력 수석연구원(yunho.kim@khnp.co.kr)

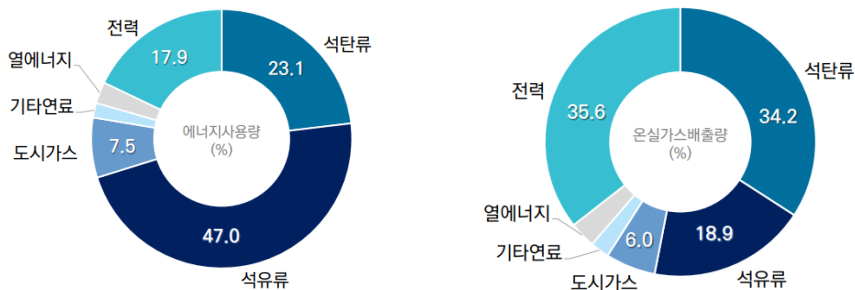
I. 기후위기와 에너지 시장의 환경변화

산업혁명 이후 에너지의 폭발적인 이용으로 인류는 의식주에서 많은 발전을 이루었다. 그러나 전 세계인구의 절반이 깨끗한 마실 물이 부족하고 대도시는 공장과 자동차에서 배출하는 미세먼지로 오염된 공기 속에서 신음하고 있다. 산업 발전이 삶의 여건 개선으로 이어지는 지속 가능한 발전(sustained development)을 이루지 못했다. 오히려 산업화로 인한 열악한 대기는 홍수와 폭서 등의 자연 재앙을 일으켜 인류의 생존을 위협하고 있다. 이러한 기후위기가 돌이킬 수 없는 상태에 도달하는 것을 막기 위해 유럽 선진국을 중심으로 지구 온도가 산업혁명 이전 대비 1.5℃ 이상으로 상승하는 것을 막기 위한 노력이 이루어지고 있고 구체적인 결과물로 파리협약이 체결(2016)되었다.

우리나라도 파리협약에 따라 ‘2030 국가온실가스감축목표’(NDC)를 설정한 바 있다. 산업통상자원부, 한국에너지공단 통계(2021)에 의하면 [그림 1]과 같이 산업부문 에너지원별 사용량은 석유, 석탄, 전력 순으로 많으며, 온실가스 배출량은 전력, 석탄, 석유 순이다.

석탄과 LNG 등의 화력발전소의 비중이 설비기준 59%, 발전량 기준으로 63%로 가장 높다. 제철, 화학 및 정유 공장에서 필요한 공정열과 난방열 생산에도 석탄, 석유의 화석연료가 많이 사용되는 것을 감안하면(한국에너지공단, 2022) 화력발전소와 산업부문에서 사용되는 화석연료를 대체하는 것이 온실가스 감축을 위한 가장 효과적인 방법이다.

[그림 1] 산업부문 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 비중



출처: 산업통상자원부, 한국에너지공단(2021)

이러한 대체 에너지원으로 최근 전 세계적으로 각광받고 있는 소형원자로의 개발 현황을 돌아보고, 상업적 성공을 위해서 극복해야 할 사항들을 검토하여 우리나라의 소형원자로 개발방향 설정에 도움이 되고자 한다.

II. 소형원자로 개발 현황

1. 소형원자로 개념 대두

가. 원자력 발전시장의 환경변화

체르노빌과 후쿠시마 원전사고는 원자력의 안전성에 대한 대중의 염려를 불러일으켜 독일을 비롯한 많은 나라들이 원자력 발전을 포기하였다. 이후 미국 및 유럽에서 일부 대형원전 건설사업이 재개되었지만 22년 말 현재 [그림 2]와 같이 건설사업의 공기 지연과 대규모 자금의 금융비용으로 건설비용이 크게 증가하였다(IEA, 2022). 대형원전 건설 리스크가 현실화되었고 투자자들도 대형원전에 대한 투자 의욕을 상실하였다.

그러나 최근의 세계 에너지 시장은 기후 위기와 에너지 안보라는 큰 화두를 제시하

[그림 2] 주요 원전 건설기간 계획 대비 실적

원전명	구분	건설기간			
		5년	10년	15년	20년
오킬루토 3호기 (핀란드)	계획	■			
	실적	■	■	■	■
플라망빌 3호기 (프랑스)	계획	■			
	실적	■	■	■	■
보글 3, 4호기 (미국)	계획	■	■		
	실적	■	■	■	
신고리 3호기 (한국)	계획	■			
	실적	■	■		

며 변하고 있다. 글로벌 기후 위기로 인해 전 세계 많은 나라들은 탄소중립 정책을 국가 아젠다로 내세우며 청정에너지 수요를 폭발적으로 증가시키고 있다. 그리고 러시아의 우크라이나 침공으로 발생한 전 세계 에너지 공급 불안정은 안정적인 에너지의 확보가 국가 안보에 중요함을 확인하게 되었고, 안정적 공급이 가능한 에너지원의 필요성을 부각시켰다.

이러한 여건에서 최근에 미국의 Nuscale사가 혁신적인 개념으로 원자로를 소형화, 모듈화하여 안전성을 대폭 향상시킨 소형원자로를 시장에 내놓았다. 주요 기기를 공장 안에서 미리 제작함으로써 건설 공기와 비용을 줄여 건설사업의 리스크를 줄이고 투자도 용이한 개념의 원자로를 개발하였다. 미국 규제기관(NRC) 표준설계 인허가를 획득(2020)하면서 소형원자로 사업성을 가시화하였다.

나. 신재생에너지의 확대

파리협약 이후 전 세계 탄소 발생량의 76%를 차지하는 70개국 이상이 탄소중립을 국가적인 아젠다로 삼아 탄소 발생을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 저탄소 발전원으로 태양광과 풍력을 이용한 발전이 가장 적합한 청정에너지원이라는 점에는 이견이 없다. 하지만 태양광과 풍력은 하루 24시간 일주일 내내 안정적으로 전력을 생산할 수 없는 간헐성의 문제가 있다. 태양광과 풍력의 설비 비중이 높아질수록 전력망의 안정성은 급격히 낮아지는 것이다.

전력망의 요구에 신속하게 대응할 수 있는 저탄소 에너지원으로 원자력 외에 수력 및 바이오에너지, CCUS(Carbon Capture Use and Storage: 탄소포집저장기술) 기능을 갖춘 화력발전, 수소터빈발전 등이 있다. 수력과 바이오에너지는 각각 적합한 부지, 지속성 측면에서 한계가 있고, 화력발전은 CCUS 비용이 비싼 한계가 있으며, 수소터빈발전은 수소전소터빈 개발 및 수소 비용이 비싼 한계가 있다. 결국 원자력이 전력망 요구에 대응할 수 있는 현실적인 저탄소 에너지이며, 신재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연한 원자로 개발이 필요하다.

다. 온실가스 감축 목표 달성

파리협약에 따라 많은 나라들이 온실가스 감축 목표량을 설정하고 이를 이행하기 위해 노력하고 있다. 현재 원전을 운전 중인 나라들은 수명연장을 이미 시작했거나 앞으로 할 예정이며, 신규 원전 건설은 더욱더 확대될 것으로 예상된다. 지금까지 신규 대형원

전 건설이 공급망 부실과 공기 지연으로 어려움을 겪고 있지만, 공급망이 회복되고 실패 경험을 발판 삼아 향후 건설은 비교적 무난할 것으로 예상된다. 따라서 앞으로 원전 시장은 대형과 소형원전이 공존할 것으로 예상되며 소형원전은 분산 전원으로서 수요가 많을 것으로 판단된다. 영국 롤스로이스(Rolls-Royce)사는 2035년까지 620조의 소형원전 시장을 예측하고 있으며, 미국 아이다호 국립연구소(INL)는 분산전원 시스템의 수요로 소형원전이 2050년까지 전체 원전시장 수요의 50% 정도까지 늘어날 것으로 예상하고 있다.

2. 소형원자로 개발 현황

가. 주요 개발 노형

미국을 비롯한 전 세계 20개국 80개 이상의 기관에서 소형원자로를 개발하고 있고 기술 개발 수준도 다양하다(이정익, 2020; OECD/NEA, 2023). EPRI 보고서(2021)에 의하면 소형원자로는 육지뿐만 아니라 1970년대 이후 많은 선례로 보아 해상의 선박 및 바지선 설치도 충분히 가능한 것으로 평가하고 있다. 노형도 경수로 기술부터 새로운 냉각재, 연료 개념의 4세대 노형 기반의 소듐냉각고속로(SFR), 고온가스로, 용융염로까지 다양하게 개발 중이다.

경수로 기술에 기반한 소형원자로는 그동안 축적된 설계 및 운전 경험으로 당장 개발이 가능하지만, 4세대 노형은 기술개발의 성숙도를 고려하면 2030년 이후에 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

경수로 기반으로 개발 중인 대표적인 노형을 소개하면 다음과 같다.

(1) Nuscale

소형원자로 중 가장 먼저 NRC 인허가를 통과한 노형이다. 현재 77MWe×4개모듈로 구성된 총 462MWe 출력의 발전소를 아이다호 국립연구소 부지에 건설하는 사업(CFPP, Carbon-Free Power Project)을 준비 중이다. 여러 차례 지연되어 현재 2024년 건설/운영 인허가를 신청하여 2029년에 첫 모듈 운전을 목표로 하고 있다.

POWER(2023.3) 월간기사에 따르면 코로나 유행 이후 최근 원자재 물가 상승으로 건설단가가 58\$/MWh에서 89\$/MWh로 올라간 점은 투자 부담으로 작용하고 있다. 새롭게 평가한 사업개발/인허가 및 건설비용은 각각 27억 불, 67억 불로 총 94억 불 정도

의 비용을 예상한다. 여기서 정부의 보조금과 인플레이션 감축법(IRA)의 혜택을 받는다 면 총 51억 불이 필요할 것으로 예상하고 있다. 국내기업으로 두산에너지빌리티, GS에너지, 삼성물산이 투자에 참여하고 있다.

(2) BWRX-300

2014년 미국에서 NRC 표준설계 인허가를 획득하였으나 건설을 하지 못했던 1500MW ESBWR 설계를 바탕으로 소형화한 노형이다. 인허가를 통과한 입증된 기술과 시스템 단순화를 통해 빠른 상업화와 가격경쟁력을 목표로 GE Hitachi Nuclear(GEH)사가 개발하고 있다. 캐나다 OPG사가 달링턴 부지에 건설을 목표로 2022년 건설인허가를 신청하였고, 최근 캐나다 VDR 2단계를 완료한 바 있다. 최근 OPG, TVA, SGE(Synthos Green Energy)사가 기술개발 협력협정을 체결하고 폴란드 건설을 준비하고 있다.

(3) NUWARD

170MWe×2개모듈로 총 340MWe 용량이다. 1차 계통 주요 기기들이 원자로용기내에 들어가는 일체형 원자로설계이다. 기본설계는 2023년에 완료할 계획이며, 2030년 착공을 목표로 하고 있다. 인허가성을 높이기 위하여 프랑스, 체코, 핀란드의 규제기관은 NUWARD을 기준으로 소형원자로 심사기준을 개발 중이다.

(4) Rolls-Royce

영국 Rolls-Royce사는 470MWe 가압경수로형을 설계 중이다. 2020년 영국 내에 16기의 소형원자로 건설을 목표로 2022년에 영국 규제기관에 인허가(Generic Design Assessment) 신청서를 제출하였다.

(5) RITM-200

쇄빙선 및 부유식 원전에서 사용되던 KLT-40 노형을 개량한 가압경수로형으로 최근 50MWe 용량의 소형원자로를 2024년에 사하공화국 육상에 건설 예정이다.

(6) ACP-100

중국국가원자력공사(CNNC)가 21년에 하이난성 창장에 실증로 건설을 시작하였고 26년에 상업운전을 목표로 하고 있다. 피동안전계통과 일차계통 주요 기기들이 원자로 용

기 내부에 들어가는 125MWe 크기의 일체형 소형원자로로 세계 최초로 실증로를 건설 중이다.

(7) AP300

웨스팅하우스사의 AP1000 피동안전 설계를 기반으로 2027년까지 설계인증 취득을 목표로 개발하고 있다. 미국 조지아주에 현재 건설 중인 AP1000의 기자재 공급망과 설계, 인허가를 활용하여 인허가 및 건설에 소요 되는 시간 및 비용을 최소화하는 전략을 취하고 있다. 전기출력 300MWe 호기당 건설비용은 10억 달러로 예상하고 있다.

4세대 노형 소형원자로는 일반적으로 500℃ 이상의 고온열을 제공할 수 있고 안전성이 높으며 저압에서 운전되므로 운전 여유도가 높은 장점이 있다. 현재 개발 중인 대표적인 노형은 다음과 같다.

(1) 소듐냉각고속로(SFR)

소듐을 냉각재로 사용하는 고속로로써 물에 비해 열전도도가 높아 열성능이 우수해 열 효율이 좋다. 금속과의 양립성도 우수해 기기 및 배관의 부식문제도 해결할 수 있는 노형이다. 다만 소듐과 물의 반응을 방지하기 위한 대처설비가 필요하다. 미국의 TerraPower사가 개발 중인 Sodium 원자로가 여기에 해당하며, 미국 Wisconsin주의 화력 발전소 대체를 목표로 하고 있다. 국내기업으로는 SK와 현대건설이 투자에 참여하고 있다.

(2) 용융염로(MSR)

핵연료를 불소 또는 염소화합물과 혼합해 만든 용융염을 냉각재로 사용한다. 대기압 운전이 가능하므로 배관과 용기의 두께를 줄일 수 있어 건설비용이 낮은 장점이 있다. 다만 용융염에 대한 기술적 완성도가 아직 낮은 상황이다. 미국의 Terrestrial Energy사와 덴마크 Seaborg사가 개발 중인 노형이 해당된다.

(3) 고온가스로(HTR)

세라믹 핵연료, 흑연감속재, 헬륨 등의 기체를 냉각재로 사용하여 950℃ 고온의 증기로 수소생산 등에 효율적으로 활용할 수 있다. 자연력만으로 원자로 냉각이 가능해 안전성

이 높다. 미국의 X-energy사가 Xe-100을 미국 정부의 지원(Advanced Reactor Demonstration Program)을 받아 개발 중이다. 국내기업으로는 두산에너지빌리티가 참여하고 있다.

나. 우리나라의 개발 현황

(1) SMART 개발

1997년 소형원자로 기술개발에 착수하여 2012년 세계 최초로 소형원자로 SMART의 국내 표준설계 인가를 취득하였다. 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등을 압력용기 내부에 설치한 일체형 설계이다. 현재 사우디 및 캐나다 등에 수출을 추진하고 있다. 그러나 현재의 소형원자로 기술개발 추이를 고려하면 향후 2030년대 수출시장에서 경쟁력 확보에 한계가 예상된다.

(2) 혁신형 SMR 개발

우리나라도 그동안 국내에서 축적한 대형원전 개발 기술력을 바탕으로 30년대 수출시장 진출을 목표로 혁신형 SMR 개발에 착수하였다. 2023년부터 개발에 착수하여 2028년 표준설계 인허가를 완료한다는 일정으로 3,992억의 정부 예타사업을 시작하였다. 세계 최고 수준의 안전성과 경제성 확보를 목표로 경수로 기반의 모듈형 원전으로 [표 1]과 같은 주요 설계요건을 만족하는 소형원자로를 개발 중이다.

[표 1] 혁신형 SMR 주요 설계요건

주요 설계요건
○ 모듈형 가압경수로
○ 80년 설계수명
○ 완전 피동형 노심/격납용기 냉각
○ 발전소 부지내 비상계획구역(EPZ)
○ 운전원 조치여유 시간 및 정전대처 시간 72시간 이상
○ 건설공기: 첫 모듈 24개월/ 전 모듈 42개월 이하
○ 모듈 공장 제작 및 육상 운송 가능 설계
○ 무봉산 운전 및 유연한 부하추종운전
○ 재장전 주기: 24개월 이상
○ 핵비확산 및 해체 고려 설계
○ 항공기 충돌 및 사이버보안 설계

출처: 과학기술정보통신부, 산업통상자원부(2021)

III. 소형원자로 성공을 위한 요소

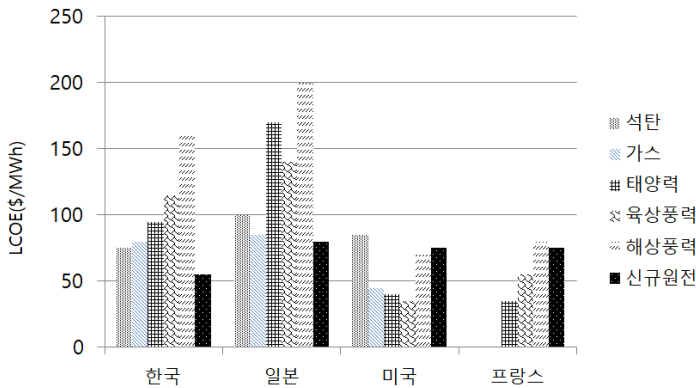
1. 시장 경쟁력 확보

가. 발전원별 건설단가

원전의 경제성은 세계 각국의 전력시장 환경에 따라 다르다. IEA and OECD-NEA (2020) 보고서의 세계 주요국의 전원별 LCOE(Levelised Cost Of Electricity: 평균발전단가) [그림 3]을 보면 우리나라와 일본에서는 원자력이 가장 경제성이 있는 전원으로 평가되지만, 미국, 프랑스 등에서는 태양광, 육상풍력의 신재생에너지뿐만 아니라 천연가스에 비해서도 경제성이 떨어진다. 태양광, 풍력 등은 기술이 발전할수록 가격도 낮아져 점유율이 확대되겠지만, 안정적인 전력공급에는 한계가 있다. 신재생에너지의 비중이 커질수록 전력 계통의 안정성 유지에 많은 비용이 들 것이며, 결국 안정적인 보조전원이 제공되어야지만 신재생에너지도 경제적 효과를 발휘할 것이다.

안정적인 전력공급을 위한 신재생에너지 보조전원 역할을 할 수 있는 저탄소 전원은 현재의 기술로 수력, 원자력 및 CCUS을 확보한 화력발전, 수소터빈발전이 될 것이다. 수력은 지리적인 제약이 있어 확대에 한계가 있고 결국 원자력과 CCUS 화력발전, 수소터빈발전이 가장 현실적인 대안이다.

[그림 3] 세계 주요국의 전원별 예측 발전단가(2025)



출처: IEA and OECD/NEA(2020)

그러면 앞으로 신규 원전 건설은 성공할 것인가? 미국 및 프랑스는 그동안의 대형 원전 건설에서 실패 경험을 바탕으로 신규 원전을 훨씬 경제적으로 건설할 수 있을 것으로 예상된다. 설계완성도를 높여 인허가 불확실도를 줄이고, 설계를 표준화하여 기자재 공급망을 잘 구성할 수 있을 것이다.

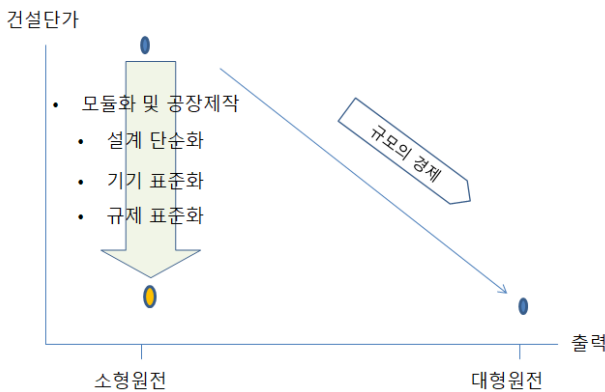
IEA(2022) 보고서에서는 향후 2025~2030년대 신규원전 건설단가를 5,000\$/kWe로 예측하고 있다. 그리고 현재 CCUS 기술이 성숙되진 않았지만 향후 CCUS을 장착한 화력발전소와 경쟁하기 위해서는 2,000~3,000\$/kWe의 건설단가와 40~80\$/MWh의 발전단가를 유지해야 한다고 한다.

따라서 앞으로 개발할 소형원자로가 성공하기 위해서는 적어도 대형원전 건설단가 수준으로 개발을 해야 하며, 일부 시장에서는 CCUS 화력발전소와도 시장경쟁을 해야 할 것으로 생각된다.

나. 비용 저감 방안

규모의 경제 측면에서 소형원자로가 대형에 비해 경제성을 확보하기가 어렵다. 하지만 NEA는 [그림 4]와 같이 소형원자로 경제성 확보방안을 제시하고 있다. 혁신적인 설계를 통하여 각종 밸브, 배관 및 계측기의 수를 줄여 설계를 단순화하고, 주요 기기를 표준화하여 공장에서 반복, 생산할 수 있게 한다. 설계를 모듈화하여 현장 부지작업 동안에

[그림 4] 대형원전 대비 소형원전의 경제성 확보방안



출처: IEA and OECD/NEA(2020)

주요 기기 및 시스템을 공장에서 사전 제작을 할 수 있을 것이다. 단기간에 주요 기기의 대량 제작을 통해서 비용을 대형원전 건설단가 수준으로 낮출 수 있을 것이다. 즉 규모의 경제(economy of scale) 방식이 아니라 대량 제작의 경제(economy of series production) 방식으로 비용을 낮추는 것이다.

그리고 제작기술 혁신을 통한 공기단축이다. 먼저 원전 주 기기 중 하나인 원자로의 공장 제작이다. 기존은 쇳물을 식혀서 망치로 두들기는 단조 방법으로 원자로를 제작하였으나 제작 기간이 1년 이상 걸렸다. 하지만 소형원자로는 철판을 구부려 EBW (Electron Beam Welding)라는 용접과 다이오드 레이저 용접(diode laser cladding) 방법을 통하여 2개월 내에 공장 제작이 가능하다. 또한 복잡한 형태의 용기는 철가루에 고온 고압의 압력을 가하여 제작하는 열간등압성형(hot isostatic pressing) 기술도 적용할 수 있다.

그리고 주요 기기와 구조물을 모듈화 설계를 하고 공장에서 제작하여 건설 현장에 바로 설치하는 기술도 있다. GEH사는 모듈화 스틸 콘크리트 구조물을 개발하여 건설 공기를 단축하는 기술을 개발하고 있다.

2. 안정적인 규제체계

가. 규제기준 수립

대형원전은 수십 년의 운전 경험으로 규제체계가 비교적 잘 정립되어있다. 하지만 소형원자로의 대형원전과는 전혀 다른 설계개념으로 기존의 대형원전 규제체계를 적용할 수 없다. 소형원자로 개발에 가장 앞서있는 미국에서는 최근에 새로운 규제기준을 만들어 Nuscale사에 인허가를 발행한 바 있다.

소형원자로 규제기준이 정립되지 않는 국내의 상황은 기술개발 사업의 불확실성을 높이고 사업에 필요한 투자를 어렵게 만들고 있다. 규제기관이 선제적으로 소형원전 규제기준을 수립하여 개발사업의 불확실성을 제거해야 한다.

나. 규제 표준화

대형원전시장에서도 원자로 개발사업자의 해외시장 진출시 국가 간에 서로 다른 규제체제로 인하여 설계변경 발생등 사업의 원활한 수행에 지장이 많다. 특히 원전운영 경험이 없는 국가는 규제체계를 정립하는 데에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 전 세계 규제기관이 동일하게 통용되는 규제기준을 만들자는 취지로

MDEP(Multinational Design Evaluation Program) 회의를 운영하고 있다. SMR 분야는 최근에 IAEA 주도로 SMR Regulator's Forum(2018, 2019, 2021)을 운영하여 주요 설계개념 및 규제기관의 역할에 대해 논의하였다.

특히 미국과 캐나다의 규제기관인 NRC와 CNSC사가 BWRX-300 노형에 대해서 규제 및 안전현안에 대해서 협력하기로 합의한 것은 그 의미가 크다고 할 것이다.

한편 유럽에서는 각국의 규제요건에 따른 설계변경을 최소화하고 설계를 표준화하기 위하여 프랑스의 ASN, 체코의 SUJB, 핀란드의 STUK 규제기관들이 프랑스의 Nuward 설계를 대상으로 합동 규제검토를하기로 합의하였다.

IAEA도 NHSI(Nuclear Harmonization and Standardisation Initiative)를 통해서 소형원자로에 대한 전 세계 각국의 규제체계를 일관되게 만들려고 노력하고 있다.

소형원자로는 대량의 반복생산으로 경제성을 확보하는 사업모델이므로 표준화된 설계와 일관된 기자재 공급망, 그리고 글로벌 수요가 존재해야 한다. 국내뿐만 아니라 해외의 여러 국가에 공통적으로 적용 가능한 규제체계가 존재해야 표준화된 대량생산의 경제적 효과를 볼 수 있을 것이다.

3. 안전성 및 주민 수용성 확보

가. 화력발전소 대체 기술개발

소형원자로의 성공적 상용화를 위해서는 안전한 원자로를 개발하여 주민의 수용성을 확보해야 한다. 소형원자로가 주민의 수용성을 확보하여 현재의 노후 화력발전소를 대체하게 되면 대량의 온실가스 감축효과 뿐만 아니라 추가적인 송전망 건설없이 전력제공이 가능하다. 미국 아이다호 국립연구소(INL, 2022) 보고서에 따르면 화력발전소 부지에 1,200MWe급 원전을 지을 경우 신규부지 건설비용보다 15~35% 저렴한 경제적 효과도 얻을 수 있다. 그리고 주변 지역 공장과 주민들에게 저렴하게 공정열과 난방열도 공급이 가능하다.

현재 상업용 대형원전은 반경 20~30km 이내에 인구 밀집지역이 없도록 방사선비상계획구역(EPZ)을 설정하여 운영하고 있다. IAEA(2021)는 소형원자로의 작은 출력과 그에 따른 적은 방사선원형, 소형원자로에 내재된 안전설계와 지난 수십 년간 개발된 PSA기술을 활용한다면 최소화된 방사선비상계획구역을 적용할 수 있을 것으로 평가하고 있다.

또한 화력발전소 부지를 원전부지로 사용하기 위한 부지 사용지침 등도 준비가 필요하다. 미국 DOE는 포트머스(Portsmouth) 부지를 대상으로 부지 특성화 데이터 등의 수집을 통해서 원전부지 사용지침 개정작업을 하고 있다.

나. 주민 수용성 확보

화력발전소를 대체하여 소형원자로를 건설하기 위해서는 방사선비상계획구역을 최소화하는 기술개발 뿐만 아니라 주민 수용성을 확보해야 한다. 소형원자로에 대한 주민의 이해와 동의를 구하는 것이 중요하다. 안전한 원전이라는 기술적 설명뿐만 아니라 소형 원전의 건설과 운영으로 현지 고용창출 등 지역경제가 활성화될 수 있도록 관련 정책을 선제적으로 개발해야 할 것이다.

4. 신재생에너지와의 공존

가. 신재생에너지의 확대와 간헐성

온실가스를 줄이기 위한 각국 정부의 노력으로 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 확대는 빠른 속도로 진행될 것이며, 결국 간헐성 문제가 기술적으로 해결되면 가장 적합한 탈탄소 전원이라고 할 수 있다. 그러나 간헐성 문제가 단기간에 기술적으로 해결되기 어려우므로 신재생에너지를 보완할 수 있는 전원으로 소형원자로가 개발되어야 할 것이다.

나. 유연성을 보유한 분산전원

신재생에너지 확대와 그로 인한 간헐성 문제 해결을 위해 소형원자로는 유연성을 보유해야 한다. NEA(2022)와 NREL(2020)에서 정의한 유연성이라고 함은 전력 수요에 따라 출력 증감발을 제어하는 전통적인 부하추종 운전능력뿐만 아니라 전출력을 유지하면서 시장 상황에 따라 전기 대신 열을 생산하여 난방, 에너지 저장 및 수소 생산 등에 활용할 수 있는 능력을 말한다. 기술혁신을 통해서 전기 혹은 열을 유연하게 생산할 수 있는 능력을 보유한 소형원전은 재생에너지와 완벽하게 공존할 수 있는 전원이 될 것이다. 또한 이러한 유연성에 대한 보상을 받을 수 있는 전력가격 정책이 개발되어야 할 것이다.

5. 설계 실증

가. 설계 실증

현재까지 전 세계 많은 소형원자로 개발이 진행 중이지만 아직 실제로 건설되어 안정적으로 운영됨을 실증한 원자로가 없다. 표준설계 인허가를 취득한 Nuscale사의 원자로도 미국 아이다호 국립연구소 부지에 건설계획이 있지만, 현재까지는 문서 상의 원자로인 것이다. 첫 원자로를 건설하게 되면 설계과정에서 검토하지 못한 다양한 문제가 예상되므로 적어도 안정적으로 운영됨을 실증해야 한다. 이러한 실증결과가 있어야 전 세계 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있을 것이다.

나. 실증로 건설

국내에서 개발 중인 혁신형 SMR도 아직 구체적인 설계가 정립되지 않은 개념설계 단계이다. 적용되는 다양한 혁신설계의 운전성을 입증해야 시장에서 경쟁력이 있을 것이다. '28년 표준설계 인허가 취득계획과 30년대 수출시장 진출을 고려하면 국내 실증로 건설을 위한 준비도 서둘러야 할 것이다. 가장 먼저 건설부지를 확보해야 하고 주민들의 동의도 구해야 할 것이다. 이 모두 상당한 준비기간이 필요한 작업이어서 지금부터라도 실증로 건설을 위한 준비가 필요한 것이다.

IV. 맺음말

소형원자로는 설계 개념상 안전성의 획기적 향상 등 많은 잇점을 제공하지만, 사업적 성공을 확신하기에는 아직 이르다. 전 세계 대부분의 소형원자로가 아직 개념개발 단계이며, 표준설계 인허가를 통과한 Nuscale사도 아직 실증로 건설을 시작하지 못했다. 하지만 저탄소 청정에너지원으로 다양한 용도로 활용이 가능한 소형원자로의 잠재성을 고려하면 대형원전시장의 단점을 극복한 새로운 소형원전 시장이 2030년대에 형성될 수 있을 것으로 판단된다.

우리나라도 SMART 개발경험을 바탕으로 2023년부터 본격적으로 소형모듈 원자로 개발사업에 뛰어들고 있다. 개념설계 기술개발을 하는 현재의 시점에서 소형원자로 개발사업이 성공하기 위해 필요한 요소가 무엇인지를 본 논문에서 검토해보았다. 성공

적인 기술개발 뿐만 아니라 법적, 행정적 제도도 차근차근 준비해서 우리나라의 해외수출 주력상품으로 발전하기를 기대한다.

참고문헌

- 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, “기획보고서: 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업,” 과학기술정보통신부, 2021.
- 산업통상자원부, 한국에너지공단, “2021 산업부문(대상년도: 2020) 에너지 사용 및 온실가스 배출량 통계,” 한국에너지공단, 2021.
- 이정익, “국내 및 해외의 소형원자로 개발동향,” 『세계원전시장인사이트』, 에너지경제연구원, 2020.
- 한국에너지공단, 국가온실가스 배출량 종합정보 시스템, 2021년 산업부문 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 통계 <<https://netis.kemco.or.kr/>>, 2022(검색일: 2023.4.10).
- EPRI, “Rethinking Deployment Scenarios for Advanced Reactors,” EPRI, 2021.
- IAEA, “Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment,” Nuclear Energy Series No. NR-T-1.18, IAEA, 2021.
- IEA, “Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From Today’s Challenges to Tomorrow’s Clean Energy Systems,” IEA Publications, 2022.
- IEA and OECD/NEA, “Projected Costs of Generating Electricity,” OECD Publishing, 2020.
- INL, “Investigating Benefits and Challenges of Converting Retiring Coal Plants into Nuclear Plants,” INL/RPT-22-67964 Revision 1, INL, 2022.
- NEA, “Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy,” NEA, 2022.
- NREL, “Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems,” NREL/TP-6A50-77088, NREL, 2020.
- OECD/NEA, “Unlocking Reduction in the Construction Costs of Nuclear,” NEA, 2020.
- OECD/NEA, “The NEA Small Modular Reactor Dashboard,” NEA Publishing, 2023.
- POWER, “Novel UAMPS-Nuscale SMR Nuclear Project Gains Participant Approval to Proceed to Next Phase,” POWER, 2023.
- SMR Regulators’Forum, “Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors,” IAEA, 2018.
- SMR Regulators’Forum, “Report on Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle: INTERIM REPORT,” IAEA, 2019.
- SMR Regulators’Forum, “Small Modular Reactors Regulators’Forum Working Group on Licensing Issues: Phase 2 REPORT,” IAEA, 2021.

우리나라 원전산업 활성화 정책방향

Proposal to the Policy on the Re-vitalization of the Korean Nuclear Industry

박석빈*

Seokbin Park

UAE로의 원전수출 경험도 축적하였지만, 지난 정부의 탈원전 정책으로 원전산업이 위축되어 있는 상황에서, 우리나라의 원전산업 활성화 정책방향에 대해 검토해 본 바, 우리나라는 현재의 원전산업 가치사슬을 유지하면서 지속적인 기술개발을 통해 경쟁력을 강화하고 최신 기술을 적용하는 노력을 지속해 나가야 하며, 이를 통해 안전하고 신뢰할 수 있는 원전체제를 구축하고 국내 원전산업의 경쟁력을 유지하는 것이 중요하다. 현재 우리나라의 원전건설의 경쟁력은 타 원전건설 국가보다 월등하다고 할 수 있기에, 이러한 원전산업 경쟁력이 지속적으로 유지될 수 있도록 해야 한다. 현재 수립된 10차 전기본의 낮은 전력수요 예측 및 신규 원전건설 부재로 인한 지속적인 원전건설을 통한 원전산업 활성화에 문제점이 제기되었으며, 문제점 해결을 위해 우선적으로 약 3년 주기의 원전건설과 함께 원전수출(현지화 포함), 최신 원전 기술의 개발 정책을 우선 추진하여 우리나라의 원전산업을 활성화하는 정책방향을 제시한다.

주제어 원전산업 활성화, 원전산업 가치사슬

Keywords Promotion of the Nuclear Power Industry, Value Chain of the Nuclear Power Industry

투고일 2023.5.3. 수정일 2023.5.23. 게재확정일 2023.5.23.

* 서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력정책센터 연구위원(h107626@snu.ac.kr)

I. 서론

원전산업은 최고 수준의 인력(OECD-NEA/IAEA, 2018), 핵심기술을 포함하는 종합기술, 그리고 100만 개 이상의 많은 기기와 부품이 필요한 거대 종합 산업이라고 한다. 특히 원전의 안전한 운영을 위해서는 숙련된 기술자 및 엄격한 품질 관리 요건에 부합하도록 신뢰성을 갖춘 원전 기기와 부품을 지속적으로 공급받을 수 있는 원전산업의 확보 및 유지가 필수적이다. 신뢰성 있는 원전산업의 확보 및 유지를 위해서는 상당 기간 동안 기술 축적, 지속적인 설비투자 및 수요선 확보 등 관련 산업 육성을 위한 장기적인 계획에 기반을 둔 인적, 물적 투자가 수반되어야 한다. 현재 우리나라는 UAE로의 원전수출 경험도 축적 하였지만, 지난 정권의 탈원전 정책으로 원전산업이 위축되어 있는 상황으로 보인다. 따라서 위축된 우리나라의 원전산업 활성화 정책방향에 대해 검토해 보고자 한다.

II. 원전산업 현황

최근 건설되고 있는 세울 3/4호기 기준으로 볼 때, 원전 2기 건설 시, 대략 2,000여 개 업체, 6만여 명이 투입된다고 하며, 원전의 성능과 안전을 위해서 이렇게 투입되는 원전 산업 가치사슬 모든 계층의 최상의 품질 확보가 필수적이라고 한다. 원전은 기본적으로 수요가 제한되어 있고, 사전 검증이 필수적이며 품질 검사 및 보증에 따른 제반 비용이 발생해, 원전건설 비용이 많이 든다. 또한 원자로설비를 비롯한 대부분의 공급기기는 고품질등급으로 엄격한 관리가 필요하다. 주기로 구분되는 원자로설비(안전등급) 및 관련 중요 기기들은 특수 설계, 주문 제작 공급이 일반적이며, 보조기로 구분되는 기타 자재들은 상용품을 검증하거나 응용하여 사용한다. 이러한 원전산업 가치사슬의 주요 특성으로는 소량 다품종으로 거의 일회성 공급, 까다로운 계약 규정 의무, 엄격한 품질 절차와 사전 검증의 필요성, 고품질 요구에 따른 비용 및 제작 기간 증가, 그리고 프로젝트마다 특성상 표준화에 대한 애로가 있어, 원전산업의 생산성과 효율성을 높이는 데 어려움을 줄 수 있다. 따라서 원전산업에서는 고품질 요구를 충족시키면서도 비용과 시간을 줄일 수 있는 기술과 방법을 개발하고 도입해야 한다. 또한, 프로젝트마다 특성이 다르므로, 이에 대한 고민과 대처 방안도 필요하다.

[표 1] 국내 원전 기기 제작사 중 원전 핵심 기술 보유업체 현황

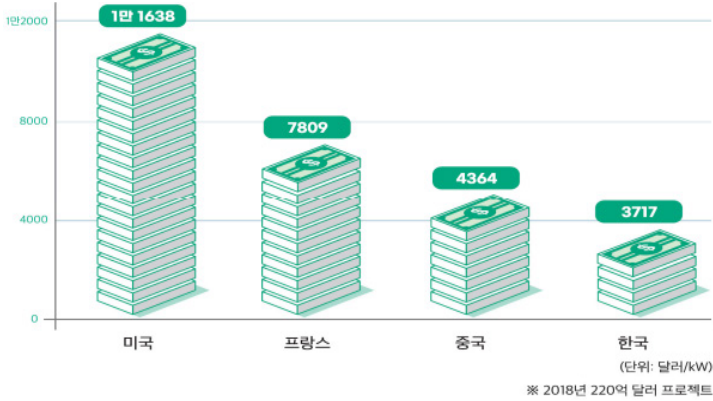
분야	핵심기술 보유업체 수	인력	매출 규모에 따른 업체의 비중(%)		
			1,000억 원 이상	100~1,000억 원	100억 원 미만
원자로설비	65	5,595	6.2	36.9	56.9
터빈/발전기	41	3,907	7.3	43.9	48.8
보조기기	68	1,100	16.7	59.1	24.2
합계	174	10,602	10.5	47.1	42.4

우리나라의 원전산업 가치사슬의 경우, 주기와 관련 설비는 두산 에너빌리티를 중심으로, 보조기기는 한국수력원자력에서 직접 관리하고 있다. 우리나라의 원전산업 가치사슬은 [표 1]에서 보여주듯이 다품종 소량생산을 특징으로 하는 핵심 기술 보유 전문업체의 성격을 가지는 가치사슬이라고 평가되며, 우수한 원전산업 가치사슬 보유 여부는 원전 품질 및 가격경쟁력 결정에 핵심적인 요소로 고려되고 있다(한국원자력학회 외, 2021).

위에서 언급한 바와 같은 원전산업 가치사슬을 구축한 우리나라는 일부 원전설비의 부품을 해외에서 구매하고 있지만, 독자적인 원전산업 가치사슬을 구축하였으며, 안전하고 신뢰할 수 있는 원전을 구축하기 위해 유 경험의 품질 인증 체제를 갖춘 적기 공급이 가능한 원전 가치사슬을 중요시하고 있다. 또한 한국의 원전산업은 자체 경쟁력 유지와 지속적인 기술개발을 통해 최신 기술의 점목 확대가 필요하다는 것을 강조하고 있고, 우리나라의 원전 핵연료 가치사슬의 완전 자립이 어려운 현실¹⁾을 고려하여, 경제성 없는 분야에 대한 원전산업 가치사슬의 완전 확보보다는 가치사슬 체제의 자체 경쟁력 유지를 목표로 하였다. 이러한 노력으로 인해 우리나라의 원전건설 사업은 경쟁력이 높은 것으로 평가되고 있으며, 사우디아라비아 원전건설 사업 입찰 당시에도 우리나라가 경쟁력이 있는 것으로 나타났다(그림 1, 표 2, 3 참조). 이는 우리나라의 원전산업 가치사슬이 경제성과 기술력 측면에서 강력한 경쟁력을 보유하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 우리나라는 현재의 원전산업 가치사슬을 유지하면서 지속적인 기술개발을 통해 경쟁력을 강화하고 최신 기술을 적용하는 노력을 지속해 나가야 하며, 이를 통해 안전하

1 우리나라는 농축 및 재처리를 하지 않겠다고 선언한 국가임.

[그림 1] 원전 건설단가 비교



출처: 핵공감 클래스 운영진(2021)

[표 2] 국가별 원전 건설단가

(단위: USD/kWe)

프랑스	일본	한국	러시아	슬로바키아	미국	중국	인도
4,013	3,963	2,157	2,271	6,920	4,250	2,500	2,778

자료: IEA/NEA(2020)

[표 3] 국가별 원전 발전단가 구성 비교

(단위: USD/MWh)

국가	투자비용	해체 및 방폐물 관리 비용	연료비용	운전유지비	LCOE
프랑스	47.46	0.05	9.33	14.26	71.10
일본	46.87	0.05	13.92	25.84	86.67
한국	25.51	0.03	9.33	18.44	53.30
러시아	26.86	0.03	4.99	10.15	42.02
슬로바키아	81.84	0.96	9.33	9.72	101.84
미국	50.26	0.05	9.33	11.60	71.25
중국	29.57	0.03	10.00	26.42	66.01
인도	32.85	0.03	9.33	23.84	66.06

자료: IEA/NEA(2020)

고 신뢰할 수 있는 원전체제를 구축하고 국내 원전산업의 경쟁력을 유지하는 것이 중요하다.

우리나라 원전건설의 경쟁력에 대해 타 국가 원전건설들과 비교 분석한 MIT는 원전건설과 관련하여 다음과 같은 의견을 제시하였다(MIT, 2018).

- (1) 검증된 프로젝트 및 건설 관리 사례를 통한 신규 원전건설의 성공 확률 증대
 - 최근 미국과 유럽의 원전건설 프로젝트에서는 예정 공사 기간 및 예산 범위 내에서 제품을 조달하는 데 있어 반복적으로 실패한 건설 관리 사례가 발생했다. 이와 관련해 몇몇 시정 조치가 시급히 요구된다.
 - ① 건설 착수 전, 세부 설계 상당 부분 완료
 - ② 입증된 공급망 및 숙련된 노동력 사용
 - ③ 초기 설계 단계부터 제작사/건설사의 설계 참여로, 제작/건설의 효율화 도모
 - ④ 다수의 독립적 협력업체 관리에 자격과 경험을 갖춘 계약 관리자 임명
 - ⑤ 프로젝트의 성공 시, 권리 보장
 - ⑥ 설계 및 건설 중 변경 사항의 적기 수용 가능한 유연한 규제 환경 조성
- (2) 복잡하고 부지 종속적인 기존의 건설방식에서 표준화된 원전건설로의 전환
 - ① 표준화된 원전의 다수 호기 건설로 경험 확보
 - ② 높은 생산성을 갖는 공장 생산 확대 - 복잡한 시스템, 구조 및 부품의 공장 제작 권장(모듈화) 제작 및 최신 생산/건설기술 활용
- (3) 고유 및 피동 안전성을 갖는 원전으로의 전환
 - 우수한 원전 재료와 외부 개입이 최소화된 고유 및 피동 안전 시스템 계통은 원전운전을 단순화하여 인적 오류의 위험성 감소

상기에서 제시된 MIT의 의견들은 우리나라 원전건설에서 대부분 적용되고 있기에 우리나라의 원전건설의 경쟁력은 타 원전건설 국가보다 월등하다고 할 수 있다. 따라서 우리나라의 원전산업 현황을 검토해 볼 때, 이러한 원전산업 경쟁력이 지속적으로 유지될 수 있도록 해야 한다는 것이 쉽게 유추된다.

III. 지속적인 원전산업 경쟁력 유지 관련 10차 전기본² 문제점

1. 전력수요 예측의 문제점

기온 및 경제 상황, 코로나19 영향 등에 따른 일시적인 전력 소비 감소(2019, 2020년)를 제외하고 지난 10년간 전력소비량은 꾸준히 증가해 왔다. 기준수요에서 수요관리를 차감한 목표 수요는 2036년까지 연평균 0.6%가 증가한 597 TWh, 최대전력은 연평균 1.5%가 증가한 118GW로 전망되었다. NDC 목표연도인 2030년의 전력수요는 573 TWh로 9차 전기본의 542 TWh와 비교해 31 TWh가 높아졌다. 그러나 비전력분야의 전기화 수요를 반영했다고 하는 10차 전기본의 전력수요 예측은 과소예측의 논란에서 벗어날 수 없다. 2036년까지의 연평균 전력수요 예측 증가율은 0.6%/년으로 9차 전기본의 평균 증가율 예측치와 같다. 9차 계획에서는 전기차 보급(2034년까지 485만대 보급, 16 TWh)과 4차 산업혁명에 따른 전력 수요영향을 반영했다고 한 언급이 있는데도(탄소 중립에 따른 전기화 수요는 반영하지 않았다고 함.) 9차와 수요증가율이 같다. 이는 의도적인 수요 증가 속도로 추정되는바 재검토가 필수적인 것으로 고려된다.

[표 4] 10차 전기본 목표 수요 전망

연도	전력소비량 (TWh)	최대전력(GW)	
		하계	동계
2022	553.1(594.4*)	96.2(실적)	94.6
2023	553.4	98.8	95.6
2030	572.8	109.3	103.3
2036	597.4	118.0	110.1
연평균 증가율	0.6%	1.5%	1.1%

주: *는 실적

2 전력수급기본계획의 약어로 매 2년마다 갱신하는 한국의 전력수급기본계획이며, 10차 전기본은 2023-1-23, 산업부에서 발표함(산업통상자원부, 2023).

2. 발전설비/발전량 계획의 문제점

설비에비율은 발전원 구성, 발전기별 특성, 전력수급 불확실성 등을 종합적으로 고려하여 22%를 적용했다. 기존 원전은 안정성 확보를 전제로 계속운전하고, 신한울 3/4호기 건설을 재개하기로 했다. 재생에너지 보급 전망을 합리적으로 조정하여 NDC안에 비해 축소하고, 가동 후 30년이 되는 석탄발전은 가스발전으로 대체 건설하는 등 석탄발전을 감축한다. 재생에너지 용량은 2023년 32.8GW에서 2036년 108.3GW로 확대된다. 가스발전용량은 2023년 43.5GW에서 2036년 62.9GW로 대폭 확대된다. 2036년 하계 최대전력이 118.0GW이고 여기에 설비에비율 22%를 고려하면 필요 설비용량은 143.9GW이다. 확정 실효용량이 142.2GW이므로 신규설비로서 1.7GW가 필요하다.

소내소비와 송배전손실을 고려한 발전량은 2030년 622 TWh, 2036년 667 TWh로 계획되었다. 원전은 계속운전 및 신규원전 반영으로 비중이 2018년 23.4%에서 2030년 32.4%, 2036년 34.6%로 증가할 전망이다. 신한울 3/4호기의 준공이 2030년 이후이므로 계속운전 대상 10기 모두가 계속운전될 때도 2030년의 최대발전량은 202 TWh가

[표 5] 2036년 하계 확정 설비용량(GW)

구분	원전	석탄	신재생	LNG	기타	계
실효용량	31.7	26.7	14.0	62.9	6.9	142.2
비중	22.3%	18.8%	9.9%	44.2%	4.8%	100%
정격용량	31.7	27.1	105.4	62.9	7.2	234.3
비중	13.5%	11.6%	45.0%	26.9%	3.0%	100%

[표 6] 전원구성 전망(연말, 정격용량, GW)

		원자력	석탄	LNG	신재생	양수	기타	계
2023	용량	26.1	40.2	43.5	32.8	4.7	1.1	148.4
	비중	17.5%	27.1%	29.3%	22.1%	3.2%	0.8%	100%
2030	용량	28.9	31.7	58.6	72.7	5.2	0.9	198.0
	비중	14.6%	16.0%	29.6%	36.7%	2.6%	0.5%	100%
2036	용량	31.7	27.1	64.6	108.3	6.5	0.8	239.0
	비중	13.2%	11.3%	27.0%	45.3%	2.7%	0.5%	100%

[표 7] 발전량 및 비중 전망(TWh)

	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	수소 암모니아	기타	계
2030년	발전량	201.7	122.5	142.4	134.1	13.0	8.1	621.8
	비중	32.4%	19.7%	22.9%	21.6%	2.1%	1.3%	100%
2036년	발전량	230.7	95.9	62.3	204.4	47.4	26.6	667.3
	비중	34.6%	14.4%	9.3%	30.6%	7.1%	4.0%	100%

주: 태양광·풍력 출력제어 적용 후 발전량

된다. 실현 가능성을 감안한 재생에너지 보급계획에 따라 출력제어 후 기준 재생에너지 발전비중은 2030년 21.6%, 2036년 30.6% 전망된다. 온실가스 감축 및 탄소중립을 위한 노후 석탄 설비의 지속적 폐지 등을 반영하여 석탄 발전량 비중은 감소할 전망이다. 석탄발전 비중은 2021년 34.3%에서 2030년 18.7%, 2036년 14.4%로 대폭 감소한다. 가스 발전은 노후 석탄의 LNG 대체가 추진되어 발전량을 유지해나갈 전망이다. 하지만 2036년에는 원자력과 재생에너지의 발전량 증가로, 그리고 수소 혼소 발전에 따라 큰 폭으로 감소한다. 10차 전기본 발전구성에서 특이점은 수소·암모니아 발전이 고려되었다는 점이다. 무탄소 발전 연료인 수소·암모니아는 실질적인 공급과 비용 등이 고려되어 발전량이 결정될 것이다. 2030년의 수소 발전량은 6.1 TWh, 암모니아 발전 6.9 TWh가 반영되었다. 연료 소요량은 수소 30만톤, 암모니아 296만톤이 소요된다.

이러한 발전설비/발전량 계획은 다음과 같은 심각한 문제점을 안고 있다.

첫째, 재생 에너지 목표 달성이 불가능해 보인다는 것이다. 2022년 8월 27.5GW(실적)인 재생에너지 용량이 2036년 108.3GW로 확대 불가능한 지는 너무 자명해 보이는 데, 재생에너지 설비용량 확대가 불가능할 경우에 대한 대책이 부재하다는 것이다.

둘째, 가장 경제적인 전력공급원에 대한 배려가 없다는 것이다. 이는 가장 경제적인 신규원전의 도입 없이 국민들에게 전기요금 인상만을 강요하겠다는 것으로 해석될 수밖에 없는 상황이다. 값비싼 재생에너지는 NDC 목표 준수를 위해 도입한다고 하지만, 값비싸고 탄소 중립에 장애가 예상되는 화석연료인 LNG를 기존 석탄발전 대신에 대폭 증가시키겠다는 계획은 국민들을 설득하기 어려울 것으로 보인다. 신규원전을 건설하기 위한 기간은 144개월(12년)이 소요되므로 2035, 2036년에는 신규원전 1/2호기의 반영이 가능하다. 해당 사례는 7차 전기본에서 입지가 확정되지 않은 신규원전 1/2호기가 반영(2028, 2029년)된 사례도 있다. 따라서 다음과 같은 요인들을 고려하여 원전

활용을 증대해야 한다.

- (1) 에너지 수급 안정성: 한국은 에너지 수입 의존도가 높아 전력수급 안정성을 위해서는 원전의 활용이 필요하며, 이를 통해 에너지 수급 안정성을 확보하고, 전력수요 증가 대응이 가능하다.
- (2) 경제성: 원전은 대량의 전기생산에 적합하며, 연료비용이 매우 저렴하다. 특히 우리나라에서는 원전에서 생산하는 전기가 가장 경제적인 것으로 확인되었다.
- (3) 기술력: 우리나라는 원전 기술력이 높아 세계적인 원전 수출국으로 성장해왔다. 따라서 지속적인 원전 활용을 통해 기술력을 확보 및 유지해야 할 것이다.
- (4) 탄소배출 저감: 원전은 기존 화석연료 사용 발전보다 탄소 배출량이 매우 적다. 전력생산 에너지원으로서 원전 활용은 탄소배출 저감에 기여할 것이다.

IV. 원전산업 가치사슬의 발전 방향

1. 지속적인 경쟁력 확보 및 유지 방안에 대한 검토

원전건설 프로젝트의 엄청난 사업 규모로 인해 예상치 못한 상황이 발생하고, 안전성을 최우선으로 하는 원전의 특수성으로 인해 발전소 부지선정에서부터 설계, 구매, 건설과 시운전 및 운영에 이르기까지 엄격한 기준으로 프로젝트 수행에 많은 제약이 따르게 된다. 이러한 엄격한 기준 적용으로 인해 원전건설 초기 단계에서부터 많은 분야에 다양한 원전산업 가치사슬 이해관계자들이 대거 참여하여, 설계 및 제작에서부터 시공에 이르기까지 분야별 가치사슬이 서로 밀접하게 연계되어 계약적 문제 및/또는 소통 문제 발생 가능성이 매우 크다. 이를 방지하기 위해서는 프로젝트의 공동목표에 대한 확고한 인식을 바탕으로 프로젝트 참여 가치사슬 간 신뢰와 협력이 매우 중요하며, 프로젝트 가치사슬 간의 효과적인 소통은 프로젝트 내 가치사슬의 협력 촉진 및 프로젝트의 성공적 수행을 위한 필수적 요건이라 할 수 있다. 따라서 원전건설 프로젝트에서 프로젝트 관리 차원의 조직으로 관리, 운영함으로써, 연구소, 원전회사, 원전설계자, 원전기기 공급자 등 다양한 가치사슬이 함께 참여하는 프로젝트 형태의 조직으로 구성하여 유기적이고 체계적인 추진을 통한 효율성이 확보되도록 하였다. 이를 통해, 원전건설/운영 경

협의 차기 프로젝트에서의 활용 증대를 도모하면서 가치사슬별 부족한 기술인력의 확보와 이의 양성도 가능하다. 이러한 방법은 지속적인 원전건설 프로젝트가 진행되어야 가능한 것인데, 다행히도 우리나라에서 원전은 대량의 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 에너지원으로 평가되어 지속적인 원전건설이 이루어져 왔다.

앞으로도 다음과 같은 요인들로 인해 지속적인 원전건설이 가능할 것으로 고려된다.

- (1) 에너지 수요증가: 전 세계적으로 에너지 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적인 전력공급을 위한 원전의 수요도 증가하고 있다. 이러한 에너지 수요증가는 원전건설 지속화의 필요성을 높이고 있다.
- (2) 재생 에너지원의 한계: 태양광이나 풍력 등의 재생 에너지원은 친환경적이지만, 에너지 생산의 안정성이 보장되지 않는 한계가 있다. 이에 반해, 원전은 친환경적이고 안정적인 전력생산이 가능한 대체 에너지원으로 평가되고 있다.
- (3) 경쟁력 강화: 원전산업은 다양한 산업 분야에서도 활용 가능한 전략적인 역할도 수행하며, 전력생산을 위한 안정적인 에너지원 생산 산업으로 평가된다. 이에 따라 원전산업을 바탕으로 국가 경쟁력을 강화하기 위한 원전건설 지속화는 필수적이다.
- (4) 기술 발전: 원전산업에서는 안전성, 경제성, 환경성을 향상하기 위한 다양한 기술개발이 이루어지고 있다. 이러한 기술개발은 원전건설의 비용 절감과 안전성 향상에 큰 역할을 할 수 있으며, 경제적이고 신뢰성 있는 원전건설 지속화를 지원한다.
- (5) 국제적 환경: 전 세계적으로 원전건설이 이루어지고 있다. 국제적인 경쟁 환경에서 확보된 경쟁력을 유지하기 위해서 원전건설은 지속적으로 추진되어야 한다.

이러한 요인들을 고려하여 원전건설 지속화가 필요하며, 안전하고 경제적이며 환경적으로 지속 가능한 원전산업을 구축해 나가는 것이 중요하다. 원전 산업은 특히 원전건설과 관련된 인프라 구축과 기술력 개발에 많은 투자가 필요하므로, 이를 위해 꾸준한 원전건설 프로젝트가 이루어져야 한다. 또한, 원전건설 프로젝트를 통해 새로운 기술과 경험을 축적하고, 생산성을 향상하며, 고객 요구에 대응하는 새로운 제품과 서비스를 개발할 수 있다. 이는 원전 산업의 경쟁력을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 따라

[표 8] APR1400 원전건설 사업추진 일정

()는 예정일

항목	세울 1/2호기	신한울 1/2호기	바라카 원전	세울 3/4호기	신한울 3/4호기
주계약 체결	2006-08-28	2009-07-31	2009-12-27	2014-08-28	2023-03-29
건설공사 계약	2007-09-13	2010-03-22	2009-12-27	2015-06-12	(2024-03-31)
최초 콘크리트 타설	2008-10-16	2012-07-10	2012-11-01	2017-04-03	(2025-08-31)
원자로 설치	2010-07-15	2014-04-30	2014-07-01	2019-11-28	(2027-03-31)
상온수압시험	2012-05-21	2016-11-01	2016-02-16	(2023-06-01)	(2027-10-01)
첫 호기 준공	2015-12-20	2022-12-24	2020-07-31	(2024-10-31)	(2033-03-31)
계약 - 원자로 설치	3.9년	4.8년	4.5년	5.3년	(4년)
최초 콘크리트 타설 - 상온수압시험	3.6년	3.4년	3.3년	(6.2년)	(3.5년)

서 원전 산업의 가치사슬 활성화 및 경쟁력 확보를 위해서는 꾸준한 원전건설 프로젝트가 필요하다. 이를 위해서는 정책적인 지원과 적극적인 투자가 이루어져야 하며, 이를 위해 관련 기업과 정부 간의 협력이 필수적인 것으로 고려된다.

이상에서 언급한 바와 같이 원전산업 가치사슬의 활성화 및 경쟁력 강화를 하려면 지속적 원전건설이 필요하다고 한다. 어떤 주기의 지속성이 요구되는가에 대해 다음과 같이 검토를 해 보았다.

우리나라가 경쟁력을 확보한 APR1400 원전은 [표 8]에 있는 프로젝트 공정으로 진행(예상 추정일 포함)되었다(전력거래소, 2017; 한국수력원자력, 2022).

상기 [표 8]에서 보여주는 바와 같이, 주기기 제작은 계약 후 약 4~5년이 소요된다는 것이 파악된다. 설계 기간이 약 1~2년 정도 사전 선행되어야 한다는 점을 고려할 때, 제작인력이 지속적으로 활용된다면, 약 3년간의 간격으로 새로운 물량이 발주되어야 한다는 것이 확인된다. 또한 건설의 경우, 최초 콘크리트 타설 후 상온수압시험 전까지가 건설의 주요 업무가 진행되는데, [표 8]에서 검토해 볼 때, 사업이 중단되었던 세울 3/4호기를 제외하고는 약 3.5년 정도의 기간이 주요 건설 업무가 진행되는 기간이라고 파악되며, 따라서 준비 기간인 건설계약 후 최초 콘크리트 타설까지 약 1년 정도 소요된다는 점을 참작하면, 건설도 약 3년 정도의 간격으로 새로운 물량이 발주되어야 함을 알 수 있다.

원전건설 사업의 일회성 공급 성격으로 인한 매년 새로운 요구사항들이 제기됨과, 국가계약법 규정과 엄격한 품질 절차의 준수라는 매우 복잡하고 난도가 높은 프로젝트

요구사항으로, 원전건설 사업은 고비용 구조인 것이다. 또한, 품질과 안전 보장을 위한 사전 검증 작업도 필수적이다. 이는 프로젝트가 추진되기 전에 철저한 검토를 거쳐 품질의 보장은 물론, 사업일정과 비용의 목표를 준수해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 원전건설 사업은 일정 주기로 발주 물량을 확보하여, 신뢰성 있는 원전산업 가치사슬을 확보 및 유지하여야 하는데, 이를 위해 위에서 언급한 대로 약 3~4년 간격으로 지속적인 발주 물량을 확보하여 신규 원전건설 프로젝트를 추진하는 것이 원전산업의 지속적인 발전과 안정적인 성장을 이루는 데 큰 역할을 할 것이다.

이에 추가하여, [표 8]에서 확인되는 다른 하나의 수치는 신한울 1/2호기 계약이 바라카 원전 계약보다 먼저 체결되었음에도 상온수압시험 및 준공일은 나중이라는 것이다. 이는 원전수출 프로젝트가 국내 원전 사업보다 더 우선하여 고려되어 진행되었다는 내용으로 향후 국내 원전건설과 원전수출 간의 업무 집중 사안의 발생시에 고려해야 할 사항으로 보인다. 즉 약 3년 간격으로 국내 원전건설 사업의 진행 속에서 원전수출의 패가 달성될 경우, 원전수출 업무 진행에 우선권을 주면서 업무 조정을 하는 것이 바람직하다는 것이다. 이는 국내 원전건설의 추진에 있어서 전력수급기본계획에의 반영 여부에 종속되지 않고 지속적인 발주를 하면서 원전수출 물량에 따라 조정을 하는 원전 정책 방향을 고려해 달라는 것을 의미한다. 이유는 우수한 원전산업 가치사슬 보유 여부는 원전 품질 및 가격경쟁력 결정에 핵심적인 요소로 고려되고, 현재 원전산업 가치사슬을 포함한 우리나라의 원전건설 경쟁력은 다른 경쟁국보다 우수한 것으로 평가되어 지속화가 핵심 사항으로 고려되기 때문이다.

2. 원전수출을 통한 원전산업 활성화 방향

한미정상회담에서 원전 협력의 주안점으로 수출 진흥과 역량개발 수단을 공동으로 사용하고, 보다 회복력 있는 원전 가치사슬을 구축하는 것과 원전산업 생태계 보호와 경쟁력 제고를 위한 원전 가치사슬 확보가 중요한 이슈로 대두되었다는 점은 원전 가치사슬 확보가 매우 중요한 국가적인 의제임을 말하고 있다(대통령실, 2022).

현재 원전수출과 관련된 경쟁국들과 우리나라의 동향은 다음과 같다.

러시아의 ROSATOM은 완전한 원전 가치사슬(우라늄 개발 및 채굴, 농축과 변환, 핵연료 생산 및 공급, 기계공학, 원전 설계 및 건설, 발전과 해체, 사용후핵연료와 방사성폐기물 관리 등)을 보유하고, 300개 이상의 기업으로 구성된 사업다각화가 완성된 기업집단으로 평가되고 있

으나, 러시아에 대한 국가 위협의 증가는 러시아의 원전수출 전망을 더욱 어둡게 하고 있다.

중국의 원전 가치사슬 확보 내용을 검토해 보면, 외국 기술 도입을 인정하되 반드시 주기기의 기술 이전이 포함되어야 하고 그렇게 해야만 중국은 기존의 연구를 이용할 수 있고 혁신과 개선 과정을 관리할 수 있는 인적 능력을 극대화해야 한 정책까지 수립하여 이행한 점과 국가가 정책을 바꾼 이유를 원전 가치사슬 확보를 위해 가장 진보된 기술이 필요하고 그래야 중국이 그 분야의 리더가 될 것이라고 한 점들은 가치 있는 정책 결정으로 평가되나, 주요 원전기술이 중국의 원전 가치사슬 확보에 활용되었지만, 완전 국산화되거나 표준화에 장시간이 소요되었고, 원전 가치사슬 확보 프로그램에 정치적 영향력을 받은 결과, 장기적으로 원전 가치사슬 확보에 해로운 영향을 받았다는 점은 지적되어야 할 내용이다. 하지만 국산화 노형을 일원화함과 동시에 수출에도 적합한 HPR1000을 개발하여 핵연료 공급 일원화 체제 구축을 포함한 새로운 원전기술 체제를 구축하여 새로운 원전 가치사슬 확보와 핵연료주기 기술을 통한 원전 상품화 추진은 돋보이는 점이다. 또한 중국은 지난 40년간 지속적인 원전건설을 통해 독자적인 원전 가치사슬을 구축하였고, 이는 자체적으로 연간 10기의 원전건설을 할 수 있는 규모로 추정되며, 2007년 이후부터 현재에 이르기까지 국산화 비율은 85% 정도로 상승하였고, 연간 10기의 기자재 공급 가능하여 거의 완성 단계의 원전 가치사슬로 고려된다. 그러나 중국 원전 가치사슬 확보 관련 일관성 있는 정책의 부재는 정부 내의 경쟁과 대립 때문으로 보이며, 원전수출을 위해 특별히 개발한 HPR1000 브랜드도 실제로는 두 개의 노형이라는 사실에서 중국이 원전수출 시장에서 선도적 역할을 하기에는 다소 어려울 것으로 평가된다.

프랑스는 가스르 및 가압경수형 원전과의 효율성 비교 검토 연구를 수행하여, PWR이 더 효율적인 기술이라고 결정한 후 PWR형 원전건설을 대폭 확대하여 1979년에 원전 발전량은 EDF의 총생산량의 8%에서 20%로 증가했다. 1983년에는 49%로 뛰어 올랐고 1990년에는 원전이 EDF 발전량의 75%를 차지하며 원전 주도국이 되었다. 결국 1970년대 후반의 부정확한 에너지 수요 예측과 에너지 완전 자립에 대한 집착은 EDF에 과잉의 원전이 건설되었으나 인접국들에게 전력수출이 가능하게 되어 원전 용량 과잉의 문제는 해결하였다. 다만 원전 가치사슬 중에서 농축 관련 기술은 외부 기술 의존이 지속되어 완전 원전 가치사슬 자립은 아닌 것으로 평가된다. 또 다른 현안은 실제 건설비용은 지속적으로 증가하였고, 프랑스의 원전 가치사슬은 국내 원전건설 1기

와 동일한 원전수출 1기라는 가정 하에 구축 기반을 확보하기로 하였는데, 2005년 핀란드에의 EPR 수출 이전에 4개 국가(벨기에, 남아프리카, 중국 및 한국)에 총 9개의 900MWe 원전만 수출한 결과, 원전 가치사슬에의 과잉투자가 프랑스 원전의 경쟁력을 저하시키는 요인으로 작용하는 문제점이 노출되었다. 프랑스 원전 가치사슬은 모든 원전에 동일한 기술을 적용함으로써 건설비용과 건설기간을 줄였고 설계의 유사성으로 인해 비상사태에 더 쉽게 대응할 수 있었기에 원전 가치사슬 확보에 있어서 성공하였다고 자평되고 있지만, 프랑스의 원전 가치사슬 중의 하나인 AREVA 자회사였던 단조업체인 Le Creusor사가 일으킨 품질 문제는 프랑스가 원전 가치사슬 확보에 성공하였다고 여겨지기 어려운 것으로 고려된다.

일본은 미국 경수로형 원전을 중심으로 하여 일본의 원전 가치사슬을 구축하였는데, 대기업들이 외국 기술을 국산화하여 원전 가치사슬을 구축하게 되었으며, 1967년 통상산업부(MITI, Ministry of International Trade and Industry) 주도로 시작되어, MHI가 Mihama 1호기의 가압기, 증기재가열계통 및 터빈계통 등 포함 약 60%를 국산화하며 본격적으로 수행하여, 1970년대 후반에 원전 가치사슬을 완성하였다. 후쿠시마 원전 사고 이후에 원전 재개와 원자력 지속성을 유지하고자 하는 일본 원전 가치사슬 확보에 대한 노력은 여러 방면에서 관찰되고 있다. 단, 일본의 원전수출은 당분간 매우 어려운 상황임이 분명하다.

미국의 WEC는 보유한 기술을 토대로 현지 자원을 이용하여 국제적, 권역별, 지역별 경쟁력을 갖춘 원전 가치사슬 구축을 추구하고 있으나, 핵심적인 원전 가치사슬 구축이 붕괴한 상황이며, 원전 가치사슬을 구축한 나라의 자원을 Sourcing하여 원전건설을 하고 있는 상황이라 미국이 아직 완벽한 원전 가치사슬을 구축하지 못하고 있다고 할 수 있다.

우리나라는 한빛 3/4호기 원전의 사업추진을 통해, 한국 원전 기술자립의 기틀을 마련하였는데, 한빛 3/4호기의 완공으로 국내 원전기술의 자립률 95%를 달성하였다. 한빛 3/4호기를 통해서도 미 기술자립한 원자로설비 분야인 설계 분야(신기술 및 인허가 추가 사항 적용 관련 설계 변경 기술 및 관련 안전해석 분야)와 제작분야(RCP, MMIS, RVI 및 CEDM, FHE, P/P&V/V)³ 이후 OPR1000 및 APR1400 그리고 미자립 핵심기술 개발을 통해 원자

3 RCP(Reactor Coolant Pump), MMIS(Man Machine Interface System), RVI(Reactor Vessel Internal), CEDM(Control Element Drive Mechanism), FHE(fuel Handling Equipment), P/P&V/V(Pump and Valve)

로설비 가치사슬을 확보하였다. 또한, 도입한 기술의 실시권을 사용할 수 있도록 정부(산업부)와 관련사(한전, 두산에너빌리티, 한기, 한전연료, 한원연)는 함께 CE와 LA를 체결하였고, 독자적인 해외 진출이 가능하도록 해외 원전과 경쟁할 수 있는 APR+도 개발하여 원자로설비의 독자적인 가치사슬의 구축이 가능해졌다. 물론 일부 원자로설비의 부품은 해외에서 구매하고 있지만, 안전한 원전은 신뢰할 수 있는 원전을 말하며, 이는 유 경험의 품질 인증 체제를 갖춘 적기 공급이 가능한 원전 가치사슬을 통해 이루어질 수 있다는 기준과 우리나라의 원전 핵연료 가치사슬의 완전 자립이 어려운 현실⁴을 고려하여, 경쟁성 없는 분야에 대한 원자로설비 가치사슬 완전 확보보다는 가치사슬 체제의 자체 경쟁력 확보가 바람직하다고 고려된다. 따라서 현재의 원자로설비 가치사슬의 지속 유지가 가장 중요한 것으로 고려되며, 그다음으로 지속적인 기술개발을 통한 최신 기술의 접목 확대가 원자로설비 가치사슬 경쟁력 확보에 핵심으로 고려된다.

UAE 바라카 원전은 2012년 7월 UAE 정부로부터 건설허가를 취득한 이후 중동의 사막 환경과 문화 차이, 다국적 인력관리, 장거리 자재운송 등 여러 불리한 사업 여건에도 불구하고 주요 공정을 적기에 수행하며, 2021년 4월에 1호기, 2022년 3월에 2호기 상업운전을 시작하였으며, 현재 건설중인 3/4호기도 각각 2023년, 2024년 상업운전을 목표로 막바지 시운전 시험을 시행 중이다. 1~4호기 모두 상업운전에 돌입할 경우, UAE 전력수요의 25%를 공급하는데 이바지할 것으로 예상된다. 한국은 2009년 UAE 바라카 원전 수주 이후 이집트 원전사업 수주 전까지 뚜렷한 원전수출 성과가 없었지만, 우리나라는 원전산업 가치사슬의 경쟁력이 높아 세계적인 원전 수출국으로 성장해왔으며, 원전수출을 통해 국내 원전산업 가치사슬의 경쟁력을 강화하고, 이익을 창출할 것이다. 추가적인 원전수출의 성공을 위해 다음과 같은 정책방향을 고려해야 할 것이다.

- (1) 국내 원전산업 가치사슬 역량 강화: 전항에서 기술한 바와 같이, 원전산업 가치사슬의 경쟁력을 강화하기 위해 지속적인 원전건설이 추진되어야 한다.
- (2) 협력체계 구축: 원전수출을 위한 협력체계를 구축하여 국가별 맞춤형 수출전략을 수립하고, 현지화 전략을 세우며, 지역사회와의 협력을 강화하는 등 다양한 수출전략을 추진해야 한다.

4 우리나라는 농축 및 재처리하지 않겠다고 선언한 국가

- (3) 신뢰성 있는 원전기술 개발: 다양한 원전기술을 개선하고 발전시켜 원전도입국들의 수요에 맞게 제공해야 한다. 이에는 안전성과 신뢰성을 강화하기 위한 지속적인 미래형 원전 기술개발도 진행되어야 한다.

3. 원전산업 가치사슬의 현지화

원전산업 가치사슬의 현지화는 원전건설/운영에 필요한 장비, 부품, 서비스 등을 현지에서 생산 및 공급하여 원가를 절감하고 현지 경제에 기여하는 전략이다. 이를 위해 다음과 같은 정책을 고려할 수 있다.

- (1) 현지화 기술개발: 원전산업 가치사슬 내에서 사용되는 장비, 부품, 서비스 등을 현지에서 생산할 수 있는 기술을 개발하여 현지화를 촉진하는 것이다. 이를 위해 수출국의 원전산업은 현지 연구기관과의 협력을 강화하고, 기술 인프라를 구축하여 기술개발 및 지원을 적극적으로 추진해야 한다.
- (2) 현지 생산설비 구축: 원전산업 가치사슬 내에서 필요한 장비, 부품 등을 현지에서 생산할 수 있는 생산설비를 구축하여 현지 생산력의 제고이다. 이를 위해 수출국의 원전산업은 현지 생산 업체와의 협력을 강화하고, 현지 생산 설비 구축을 위한 투자를 진행해야 한다.
- (3) 현지 인력 양성: 원전산업 가치사슬 내에서 필요한 기술과 노하우를 보유한 현지 인력을 양성하여 현지화를 촉진하는 것이다. 이를 위해 수출국의 원전산업은 현지 인력을 대상으로 교육 및 훈련 프로그램을 제공하고, 현지 인력을 적극적으로 고용해야 한다.
- (4) 지역사회와의 협력: 원전산업 가치사슬 내에서 현지화를 촉진하기 위해 지역사회와의 협력을 강화하는 것이다. 이를 위해 수출국의 원전산업은 지역사회와의 협력 프로그램을 구축하고, 현지화를 통해 지역사회와 상생하는 방안을 모색해야 한다.
- (5) 정책적 지원: 수출국의 원전산업의 현지화를 촉진하기 위해 수출국 정부는 현지화를 적극적으로 지원해야 한다. 이를 위해 수출국 정부는 수출국 원전산업에 대한 지원 정책을 마련하고, 현지화를 위한 투자와 인력 양성 등을 지원해야 한다.

이러한 전략을 통해 원전 공급망의 현지화를 촉진하여 원전산업 가치사슬의 경쟁력을 높일 수 있다. 이와 같은 현지화 전략을 통해 세계 최상의 기술로 인정받을 만한 우리 원전기술이 국제적으로 통하고 서로 경쟁력을 높이고 국내외 환경변화에 따라 신속 대응이 가능한 체제 구축이 필요한 것이다.

핵심은 현재 유지되고 있는 원전산업 가치사슬이 특정 지역으로 진출 시 조정이 필요할 수 있는데, 이는 해당 지역의 환경이 가치사슬의 조정을 필요로 하는 경우로 현재의 원전산업 가치사슬의 부분적인 이해관계의 해소가 핵심 정책방향으로 고려된다.

4. 미래형 원전기술 개발

미래형 원전기술은 안전성, 경제성, 환경성을 고려한 원전산업 가치사슬 발전을 위한 핵심 기술을 말하며, 다음과 같은 적극적인 개발 추진이 필요하다.

- (1) 안전성 향상: 미래형 원전기술은 원전사고의 발생 가능성을 최소화하는 안전성 향상 기술개발을 포함한다. 신형 핵연료 제조기술, 고강도 및 내식성 재료 등이 연구되고 있다. 특히 신형 핵연료 제조기술은 기존의 핵연료 기술과 비교하여 더 안전하고 경제적이며, 원자력 발전소의 운영과 유지보수를 개선하는 것으로, 신형 핵연료 제조기술 중 하나는 연료 소비 효율을 높이는 용도로 사용되는 핵연료의 개발이다. 이러한 핵연료는 특정한 방식으로 가공되어 기존의 핵연료보다 연소 시간이 더 길어지도록 만들어지며, 이를 통해 핵연료의 소비를 줄일 수 있다. 또한 이러한 신형 핵연료 제조기술은 핵폐기물의 양을 줄일 수 있으며, 핵연료 생산 과정에서의 에너지 사용량도 감소시킨다. 또 다른 신형 핵연료 제조기술은 열 확산 특성을 개선하여 핵연료의 안전성을 높이는 것이다. 이러한 기술은 핵연료가 과열되거나 파손되지 않도록 하여 핵발전소의 안정성을 향상시키고 사고 발생 가능성을 줄일 수 있다. 마지막으로, 신형 핵연료 제조기술 중 하나는 재활용이 가능한 핵연료를 개발하는 것이다. 이러한 핵연료는 기존의 핵연료보다 재활용 가능성을 높이며, 핵연료를 다시 사용함으로써 자원 절약과 핵폐기물 발생량을 감소시킬 수 있다. 이러한 신형 핵연료 제조기술은 원전의 안전성과 경제성을 개선할 것이다.
- (2) 경제성 향상: 경제성 향상 기술은 원전의 건설/운영비용을 절감하기 위한 기술

로, 경제성이 높은 GEN-IV 원전 기술이 개발되고 있다.

- (3) 환경성 개선: 미래형 원전기술은 기존 원전보다 더욱더 친환경적이며, CO2 배출량을 최소화하는 기술이 필요하다. 이를 위해 탄소중립 기술, 방사능 폐기물 처리 기술 등이 연구되고 있다.
- (4) 신뢰성 확보: 미래형 원전기술 개발에 있어서는 원전 시스템의 신뢰성 확보가 중요하다. 이를 위해 인공지능과 IoT 기술을 활용한 원전 설비 모니터링 및 관리 시스템 등이 개발되고 있다.

미래형 원전기술 개발은 원전산업의 지속 가능성을 보장하는 중요한 요소이다. 이를 위해 정부와 연구기관, 산업계 등이 적극적으로 협력하여 연구개발에 투자하고, 안전성과 경제성, 환경성 등을 모두 고려한 기술을 개발해 나가는 것이 필요하다.

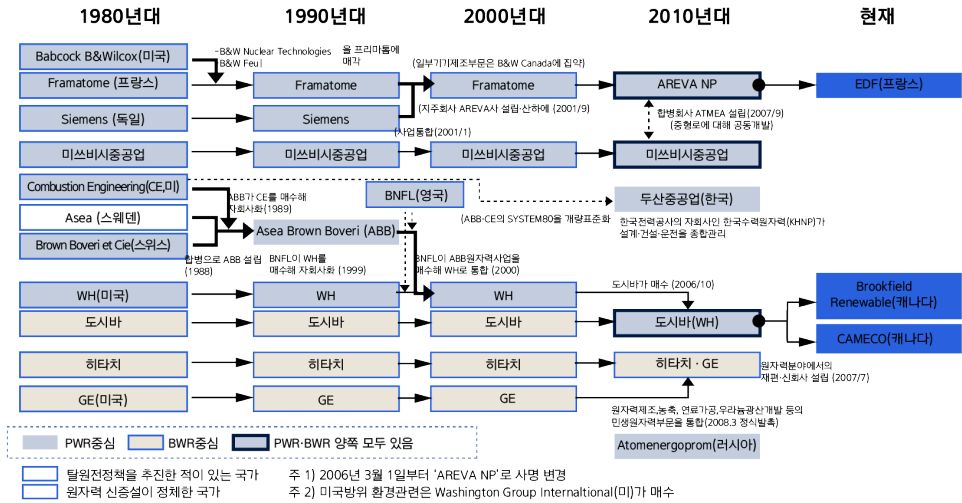
이 정책방향은 현재 최고의 경쟁력을 확보한 가치사슬이 미래 경쟁력 확보가 불확실한 경우 추진되어야 할 것으로 보이는데, 현재 원전 보유국 모두가 미래 원전기술 개발에 투자를 지속하고 있으므로 우리나라도 지속적인 투자가 필요한 것으로 보인다.

5. 원전산업 체제 구조 개편

전항까지 언급된 원전산업 가치사슬 활성화 및 경쟁력 제고 정책이 추진 환경과 부합되지 못하는 경우, 원전산업 체제 구조 개편 정책이 추진되곤 한다. 원전산업 구조 개편은 원전산업의 안전성, 경제성, 기술적 혁신, 환경 문제 해결 등 다양한 측면에서의 개선을 목표로 하게 되고, 원전산업 구조 개편은 각 국가의 에너지정책, 경제 상황, 환경 요인 등 여러 요소들이 각기 다른 방식으로 접근하게 되는 매우 복잡한 문제인데, 원전 공급 에너지가 여전히 전 세계 에너지 공급의 중요한 축 중 하나이기 때문에, 원전산업 구조 개편은 중요한 정책방향 중 하나로 고려된다.

현재까지의 세계 원전공급자 구조 개편에 대한 이력은 각 국가와 회사의 정책과 상황에 따라 [그림 2]에서 진행된 바와 같이 다양하다(에너지경제연구원, 2016a). 일부 국가에서는 원전사고를 경험한 후에 원전공급자 구조 개편이 이루어졌다. 예를 들어, 2011년 일본의 후쿠시마 원전사고 이후 일본 정부는 원전 안전 감시 위원회를 신설하고, 원전공급자인 도쿄전력과 후쿠시마 전력의 운영 및 소유 구조를 개편하였다. 또한 일본에서는 원전기술의 발전과 안전성 향상을 위한 연구개발에 대한 지원이 강화되었다. 한

[그림 2] 경쟁국 원전공급자들의 구조조정



출처: 한국원자력연구소(1994) 및 에너지경제연구원(2016b)을 기반으로 재구성.

편, 프랑스의 전력공사인 EDF는 원전을 비롯한 에너지 공급 전체에 대한 구조 개편을 시도하고 있다. EDF는 2035년까지 탄소 배출량을 0으로 줄이기 위한 에너지 전환 계획을 발표하였으며, 이에 따라 원전 비중을 줄이고 재생에너지와 수소 등 친환경 에너지에 대한 투자를 강화할 계획이다. 또한 미국에서는 원전공급자인 엑스 모빌, 제너럴 일렉트릭, 웨스팅하우스 일렉트릭 등이 경쟁적 시장에서 경쟁력을 갖기 위해 다양한 형태의 구조 개편이 이루어졌다. 이 중 하나는 경쟁업체와의 제휴를 통한 기술 공유 및 연구 개발, 그리고 새로운 혁신적인 비즈니스 모델을 도입하는 것이다. 전세계에서 원전공급자 구조 개편은 계속해서 이루어지고 있으며, 안전성과 지속 가능성을 보장하며 경쟁력을 유지할 수 있는 방향으로 진행되고 있다.

이와 같이 원전산업 체제 구조 개편은 경쟁력을 보완하기 위해 활용하는 정책 방향이며, 현재의 원전산업 체제의 문제점들이 현저할 때 시도되는 것임을 경쟁국 원전공급자들의 구조조정에서 관찰되고 있다. 이는 원전시장의 장래가 밝다고 예상하기에 구조 개편을 통해서라도 경쟁력을 확보하려는 필사적인 정책으로 고려되며, 결국 지속적인 원전건설을 위한 정책과 밀접하게 연결되어 있다고 보인다. 일부 국가에서는 과거 원전 사고를 경험하거나, 원전에 대한 우려가 커, 원전산업 구조 개편이 더 안전한 운영 및 폐

기를 위한 수단이 되기도 한다. 다른 나라에서는 전기 수요의 증가와 함께 대규모 원전 프로젝트가 계획되고 있어, 원전산업 구조 개편은 안전하고 경쟁력 있는 전기 공급을 할 수 있는 방향으로 추진되고 있다. 이는 원전산업 구조 개편이 더 안전하고 지속 가능한 에너지 생산을 통한 국가 경제 발전을 위한 전략적인 정책의 제안을 요구하게 된다는 것을 의미한다. 이를 위해 각 국가는 지속적인 연구개발과 협력을 통해 새로운 기술과 솔루션을 탐색하고, 안전하고 경쟁력 있는 원전산업 구조 개편을 추진해 나가야 할 것이며, 우리나라에서 추진 시엔 아래와 같은 분석이 필요할 것이다.

- 원전산업 참여기관들의 역할 분담 및 기능 정립 재고
- 효율적인 산업체 체제 구조조정 분석 필요
 - 민간기업체 주도 / 민간기업체 협조체제 검토 포함
 - 세계의 우수 경쟁사와 제휴 또는 협조 포함
 - 전문계열화 검토(참조 - 자동차 산업 전문계열화 인프라)
 - ※ 중소기업 전문 계열화시켜 기술력과 경쟁력 지원
- 기술적인 관점과 경제적인 관점에서, 추가 경쟁력을 확보할 수 있는 방향으로의 조정
- 해외 원전 시장진출과 관련하여 고려하여, 업무의 통폐합 및 조직 간의 이중 업무 조정

다만, 우리나라의 원전산업 체제 구조 개편은 현재 세계 최고의 원전건설 경쟁력을 보유하고 있는 현 시점에서는 시기상조로 평가되며, 우선은 전항까지 제안되는 원전산업 가치사슬 발전방향으로의 정책들을 우선 추진한 후에 경쟁력 확보 및 유지가 어렵다고 예측될 경우에 진행하는 것이 바람직하다고 고려한다.

V. 결론

우리나라의 원전산업 활성화 정책방향에 대해 검토해 본 바, 우리나라는 현재의 원전산업 가치사슬을 유지하면서 지속적인 기술개발을 통해 경쟁력을 강화하고 최신 기술을 적용하는 노력을 지속해 나가야 하며, 이를 통해 안전하고 신뢰할 수 있는 원전체제

를 구축하고 국내 원전산업의 경쟁력을 유지하는 것이 중요하다. 현재 우리나라의 원전 건설의 경쟁력은 타 원전건설 국가보다 월등하다고 할 수 있기에, 우리나라의 원전산업 현황을 검토해 볼 때, 이러한 원전산업 경쟁력이 지속적으로 유지될 수 있도록 해야 한다. 따라서 우리나라 원전산업 활성화 및 경쟁력 강화를 위해 우선 다음과 같은 정책의 신속한 시행을 건의한다.

- 원자로설비를 포함한 원전산업의 경쟁력 있는 가치사슬이 유지될 수 있도록 약 3년 주기의 지속적인 원전건설 사업이 추진되어야 하며, 이에는 적극적인 원전 수출도 포함한다.
- 경쟁력 있는 원전산업 가치사슬은 지속적인 기술개발 활동을 통한 최신 기술의 접목과 인재 양성이 함께 진행되어야 한다.
- 우리나라가 기술 및 사업 협력에 있어서 신뢰할 만한 동반자 국가를 선정하여 함께 원전산업 가치사슬 확보에 경주해야 한다.

참고문헌

- 대통령실, “한·미 정상 공동선언(2022),” 대한민국 정책브리핑, 2022.
- 산업통상자원부, “제10차 전력수급기본계획(2022~2036),” 산업통상자원부, 2023.
- 에너지경제연구원, “동향 분석 - 원전 수출 산업계의 판도 변화 - 서방의 몰락과 동방의 부상,” 에너지경제연구원, 2016a.
- 에너지경제연구원, “원전 수출 산업계의 판도 변화,” 에너지경제연구원, 2016b.
- 전력거래소, “전력거래소 국회보고자료,” 전력거래소, 2017.
- 한국수력원자력, “2022 원자력발전 백서,” 산업통상자원부, 한국수력원자력(주), 2022.
- 한국원자력연구소, “21세기 국가원자력정책 환경분석,” 한국수력원자력(주), 1994.
- 한국원자력학회 외, “탄소중립과 미래세대를 위한 국가 원자력정책 제안서,” 원자력 계, 2021.
- 핵공감 클래스 운영진, “대통령을 위한 에너지정책 길라잡이,” 핵공감 클래스, 2021.
- IEA/NEA, “Projected Costs of Generating Electricity,” IEA, 2020.
- MIT, “The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World,” Massachusetts Institute of Technology, 2018.
- OECD-NEA/IAEA, “Measuring Employment Generated by the Nuclear Power Sector,” OECD, 2018.

사용후핵연료 관리의 현재와 미래

The Present and Future of Used Nuclear Fuel Management in Korea

박준우* · 윤종일**

Junwoo Park and Jong-Il Yun

원자력은 안전하고 안정적이며 경제적인 에너지원이다. 다만, 사용후핵연료 문제해결이라는 숙제를 안고 있다. 전 세계적으로 사용후핵연료 관리 기술은 고도화되고 있고 최종처분장의 운영을 목전에 두고 있는 나라 또한 존재한다. 우리나라는 최고 수준의 원전 시공 능력을 갖춘 몇 안 되는 나라로 원전 수출까지 한 원자력 강국이다. 그럼에도 사용후핵연료 문제는 여전히 답보 상태에 있다. 우리는 지난 40년간 9차례에 걸쳐 고준위방사성폐기물 처분부지를 확보하려고 시도하였다. 번번이 실패를 거듭해오고 있다. 이는 정권이 바뀔 때마다 변하는 사용후핵연료 관리정책에 대한 국민의 신뢰와 사회적 수용성이 낮은 데에서 찾을 수 있다. 이러는 사이 원전 부지 내 사용후핵연료 저장시설의 포화가 코앞으로 성큼 다가오고 있다. 최악의 경우, 가동 중인 원전을 세워야 하는 상황에 직면할 수도 있다.

국민과 미래 세대가 사용후핵연료에 대해 걱정 없이 안전하게 살아갈 수 있는 세상을 만들어야 한다. 원자력계는 사용후핵연료 안전관리 기술을 더욱더 발전시켜 국민이 전문가를 신뢰하고 안심할 수 있게 해야 한다. 또한 정부와 국회는 고준위방사성폐기물 최종처분부지의 확보에 대전제인 사회적 수용성 증진을 위해 법제화 등 다양한 정책 방안들을 조속히 마련하여야 한다. 이 글에서는 국내외 사용후핵연료 현황을 살펴보고 사용후핵연료 관리의 미래를 조망하고자 한다.

주제어 사용후핵연료 관리, 최종처분, 사회적 수용성, 특별법

Keywords Spent Fuel Management, Final Disposal, Social Acceptability, Special Act

투고일 2023.5.3. 수정일 2023.5.26. 게재확정일 2023.5.26.

* KAIST 원자력및양자공학과 박사과정(junwoo0617@kaist.ac.kr)

** KAIST 원자력및양자공학과 교수(jiyun@kaist.ac.kr)

I. 서론

전 세계는 기후변화로 심각한 위기 상황에 직면하고 있다. 탄소중립(탄소순배출량 제로)이 글로벌 핵심 아젠다로 주목받고 있고 우리나라를 비롯한 전 세계가 탄소중립을 달성하는 다양한 방안들을 고민하고 있다. 핵심은 인류의 지속가능한 성장에 있다. 우리나라는 자원빈국으로 국가 에너지 안보를 지켜내면서 탄소중립이라는 거대한 파고를 슬기롭게 헤쳐나가야 하는 딜레마에 처해 있다. 어려운 숙제가 아닐 수 없다.

유럽연합(EU)은 2023년 1월부터 시행하고 있는 EU 탄소노미(탄소중립을 위한 녹색 산업과 녹색경제활동에 관한 체계)를 통해 인류의 지속가능한 성장과 발전을 도모하고 있다. EU 회원국들은 수많은 논의와 격론의 과정을 거치면서 사고저항성핵연료 적용 및 고준위방사성폐기물 처분시설 운영 등의 엄격한 조건을 전제로 원자력을 녹색경제활동으로 포함하였다. 우리나라도 이와 유사한 K-탄소노미를 수립하였고, 원자력을 탄소중립으로의 전환을 위한 과도기적 성격의 경제활동으로 인정하고 있다. 즉, 원자력이 완전한 녹색경제활동이라고는 볼 수 없지만, 신재생에너지의 기술발전 속도, 경제성장 등을 고려하였을 때 급격한 기후변화에 대응하기 위한 현실적이고 필수적인 산업이라고 판단한 것이다.

1978년 고리 1호기의 상업 운전이 시작된 이후, 원자력은 40년이 넘는 기간 동안 국내 주요 전력 생산을 책임져왔다. 우리나라는 원자력 기술개발을 거듭하여 한국형 원전 개발과 UAE 등에 원전을 수출하는 성과를 이룬 바 있다. 특히, 우리나라는 우수한 원전 시공 능력과 기술력을 갖춘 몇 안 되는 나라로 인정받고 있음에도 원자력의 그림자 인 사용후핵연료 문제를 해결하는 데는 여전히 제자리걸음을 하고 있다.

사용후핵연료는 원자력발전 연료로 사용되고 나온 핵연료를 말하며, 원자력안전법 제35조제4항에 따라 폐기하기로 결정한 사용후핵연료는 방사성폐기물, 그중 대부분이 고준위방사성폐기물에 해당한다. 사용후핵연료는 기본적으로 원자력발전소 부지내 저장시설(이하 부지내저장시설)과 중간저장시설에서 일정 기간 보관한 후 최종처분장으로 이송하여 영구히 처분하는 개념으로 관리가 이루어지고 있다. 우리나라는 사용후핵연료를 부지내저장시설에 임시로 저장만 한 채 그 이후 단계로 나아가지 못하고 있다.

원자력이 나아가야 할 올바른 길은 기후위기에 실효적 대응에 이바지함과 동시에 환경과 미래 세대에 부담을 전가하지 않는 것이다. 이를 위해서는 사용후핵연료의 안전하고 시의적절한 관리가 필요하다. 따라서 본 글에서는 현재까지의 국내외 사용후핵연

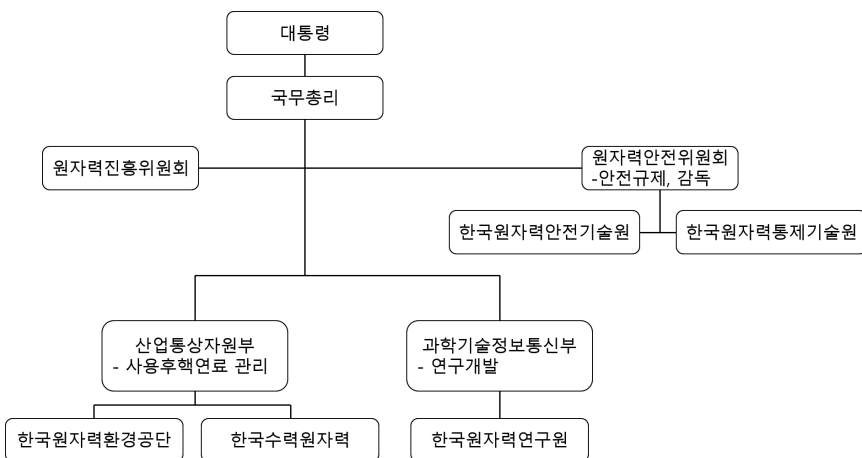
료 관리 현황 전반을 소개하고 이를 바탕으로 우리나라가 사용후핵연료 관리를 위해 나아가야 할 방향에 대해 논하고자 한다.

II. 국내 사용후핵연료 관리 현황

1. 국내 사용후핵연료 관리체계

국내 사용후핵연료 관리에 관한 정부의 행정체계는 [그림 1]과 같다. 먼저, 우리나라는 원자력 이용에 관한 주요 사항을 원자력진흥위원회에서 심의·의결하게 되어 있으며, 사용후핵연료 처리 및 처분에 관한 사항 또한 원자력진흥위원회의 심의·의결을 거치게 되어 있다. 국내 방사성폐기물 관리에 관한 행정 업무는 크게 산업통상자원부(이하 산업부), 과학기술정보통신부(이하 과기부), 원자력안전위원회(이하 원안위) 3개 정부 기관에 나누어져 있다. 산업부는 사용후핵연료의 운반, 저장 및 처분, 사용후핵연료 관리를 위한 자료 수집·조사·분석 및 관리, 사용후핵연료 관리사업을 위한 연구개발, 인력양성, 국제협력 등을 담당하고 있다. 산하 기관으로는 사용후핵연료 발생자인 한국수력원자력

[그림 1] 국내 방사성폐기물 관리 행정체계



과 방사성폐기물 관리사업자인 한국원자력환경공단이 있다. 과기부는 사용후핵연료 관리에 관한 연구개발 사업계획 수립 및 추진을 담당하고 있으며 연구개발은 주로 한국원자력연구원에서 수행하고 있다. 원안위는 사용후핵연료 안전 규제 및 감독을 담당하고 있으며 한국원자력안전기술원과 한국원자력통제기술원이 그 산하에 있다.

2. 국내 사용후핵연료 현황

서론에서 언급한 대로, 우리나라는 현재 부지내저장시설에 사용후핵연료를 임시로 저장하고 있다. 부지내저장시설은 사용후핵연료 발생자가 관리사업자에게 인도하기 전까지 원전 내에서 저장하는 것을 의미하며, 원자력안전법 제20조에 따라 관계시설로 허가 받아 운영되고 있다. 부지내저장시설은 [그림 2]와 같이 습식저장시설과 건식저장시설로 분류할 수 있다. 습식저장시설은 물로 사용후핵연료의 열과 방사선량을 낮추는 시설로써 모든 가동 원전에 설치되어 있다. 건식저장시설은 두꺼운 콘크리트 구조물로 효과적으로 방사선을 차폐하고 자연대류에 의한 공기 냉각을 통해 사용후핵연료를 안전하게 저장 관리하는 시설이다. 국내에는 월성원전본부에 1992년 완공된 사일로와 맥스터가 운영 중이다.

중간저장시설은 사용후핵연료 관리사업자가 발생자로부터 사용후핵연료를 인수하여 처리 또는 영구처분을 하기 전까지 일정 기간 안전하게 저장하는 시설을 의미한다.

[그림 2] 습식저장시설(왼쪽)과 건식저장시설(오른쪽)



이와 관련하여 원안위 고시(사용후핵연료 중간저장시설의 구조 및 설비에 관한 세부기술기준)가 2016년 1월에 최초 제정된 바 있으나, 국내에서 중간저장시설이 건설된 바는 없다. 고준위방사성폐기물 최종처분시설은 사용후핵연료를 지하 깊은 곳(500~1,000m)에 처분하여 인간의 생활권으로부터 영구 격리하는 시설이다. 국내에서는 후술할 여러 차례 처분부지를 확보하려는 시도만 있었을 뿐 실제 건설하거나 운영한 사례는 없다.

국내 사용후핵연료는 2022년 4분기까지 경수로 원전에서 21,035다발, 중수로 원전에서 497,862다발이 발생하였으며, 이 중 175,337다발이 습식저장시설에, 343,560다발이 월성 건식저장시설인 사일로와 맥스터에 저장되어 있다(한국수력원자력, 2022). 제10차 전력수급기본계획이 발표됨에 따라 국내 원전 본부별 사용후핵연료 예상 발생량은 [표 1]과 같이 2021년 12월 발표된 제2차 고준위방사성폐기물 관리 기본계획(산업통상자원부, 2021)에 기술된 제9차 전력수급기본계획에 따른 사용후핵연료 예상 발생량보다 159,000다발가량 추가 발생할 것으로 전망하고 있다.

최근 한국방사성폐기물학회는 사용후핵연료 예상 발생량이 기존 예측치보다 늘어난다는 분석 결과를 발표하였다. [표 2]에서 볼 수 있듯이 부지내저장시설의 포화시기가 기존 제2차 고준위방사성폐기물 관리 기본계획에 적시된 포화시기보다 1~2년가량 앞당겨질 예정이다. 원전 부지 내 저장시설의 포화는 원전의 가동중단으로 이어질 수밖에 없다.

[표 1] 원전 본부별 사용후핵연료 예상 발생량

(단위: 다발)

	기본계획	재산정
고리(경수로)	10,253	12,290
한빛(경수로)	10,660	13,051
한울(경수로)	18,740	27,401
새울(경수로)	15,260	15,660
신월성(경수로)	3,565	3,633
월성(중수로)	576,851	721,920
합계	635,329	793,955

출처: 산업통상자원부(2021, 2023a)

[표 2] 원전 본부별 예상 포화시점

	기본계획	재산정
고리(경수로)	2031년	2032년*
한빛(경수로)	2031년	2030년
한울(경수로)	2032년	2031년
새울(경수로)	2066년	2066년
신월성(경수로)	2044년	2042년
월성(중수로)	-	2037년

주: *고리 2호기의 습식저장시설에 추가적인 조밀저장대를 설치하지 않으면 2028년에 포화가 예상된다.

출처: 산업통상자원부(2021, 2023a)

3. 국내 사용후핵연료 관련 기술 현황

현재 산업부와 과기부를 중심으로 사용후핵연료 관리와 관련된 연구개발이 수행되어왔다. 산업부의 경우, 2009년부터 2022년까지 사용후핵연료 운반·저장 분야 등을 중심으로 연구개발을 수행하였고, 사용후핵연료 운반·저장 시스템에 대한 설계 기술 확보, 안전성시험 검증 종합시스템 구축, 국내 고유 운반저장 시스템 개발 및 상용화 등을 통해 경수로 사용후핵연료 수송저장시스템을 개발하였다. 또한 2010년부터 2014년 기간에는 우리나라의 정량적인 지질 및 심부 환경 자료를 확보하였고 사용후핵연료 처분시설 확보를 위한 한반도 지질 데이터베이스(DB)를 구축하였다.

과기부의 경우, 1992년부터 2020년까지 사용후핵연료 처분과 관련한 기초 연구를 시작으로 지하처분연구시설(KURT) 구축, 심층처분시스템(KRS) 개발, 처분시스템 성능평가모델 개발 등을 수행하였다. 이후 선진핵연료주기(파이로-소듐고속로 연계시스템)에서 발생하는 폐기물의 심층처분시스템(A-KRS)과 프로세스 기반 종합성능평가체계(APro) 설계 등 처분 전반에 관한 연구개발을 수행하였다. 위와 같이 기존에는 사용후핵연료 관리와 관련한 기술개발은 부처별로 기초 및 개념연구에 한정되어 수행되어왔다. 현재는 사용후핵연료 관리 기본계획 및 국내외 환경변화에 따른 사용후핵연료 관리정책의 적기 이행과 안전한 관리기술 확보를 위해 과기부, 산업부, 원안위 등 3개 부처가 다부처 공동 예타사업으로 2021년부터 2029년의 기간 동안 “사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발” 사업을 수행하고 있다. 부처 간 역할 분담은 [표 3]과 같

[표 3] 다부처 공동 예타사업 부처 간 역할 분담

부처	역할
과기부	안전 처분을 위한 단계별 기술 및 안전성 실증기술 개발
산업부	저장시스템 안전성 실증 및 인허가 DB 구축
원안위	심층처분 관련 규제요건 및 검증기반 확보

[표 4] 단계별 파이로프로세싱 연구수행 내용 요약

단계	목표 및 주요 연구 내용
소규모 과제 중심 기초 연구('97~'06년)	<ul style="list-style-type: none"> • 금속 전환 공정 중심의 실험실 규모 차세대 사용후핵연료 관리 및 이용 기술개발 • 장수명 핵종의 분리·회수·소멸 처리 및 폐용융염 처리 기술 개발
공학 규모 공정개발 ('07~'11년)	<ul style="list-style-type: none"> • 사용후핵연료 건식 재가공 핵심 공통 요소기술 개발 및 공학 규모(PRIDE) 파이로 공정 장치 개발/구축 수행 ※ 모의물질 검증을 위한 PRIDE 설계('07~'08년), 구축('09~'12년 6월), 운영('12년 7월 이후) • PRIDE 성능평가를 통한 파이로 실증시설 설계요건 확립 연구 수행 및 파이로 시설의 안전조치 분석기술 개발
기술 타당성 검증 (한미공동연구) ('11~'20년)	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 사용후핵연료 실험을 통해 파이로 기술의 타당성 검증 • 핵심 공정기술 국내 개발 및 기존 시설을 이용한 기술 성능 검증 • 파이로 기술의 타당성(기술성/경제성/핵비확산성) 검증에 집중하여 기술개발 수행

다.

동 기술개발 사업의 목적은 사용후핵연료 관리기술 개발단계 중 최종처분을 위해 필수적인 지하연구시설(Underground Research Laboratory)에서의 처분시스템 성능과 안전성 실증에 필요한 사용후핵연료 저장·처분 핵심 솔루션 개발 및 관리 기반 확보에 있다. 세부적으로는 실제 처분환경과 동일한 URL에 한국형 심층처분시스템의 장기안전성 실증에 필요한 모든 핵심 기술을 확보하고 URL에서의 실증방안 제시, 실규모의 공학적 방벽 제작 기술, URL에 설치 기술, URL에서 데이터 획득 기술 등을 개발하고 있다.

과기부에서는 사용후핵연료의 재활용 및 부피 저감을 위해 건식 처리 기술인 파이로프로세싱(이하 파이로)에 대한 기술 개발을 진행한 바 있다. 국가연구개발계획에 따라 1997년부터 사용후핵연료 처분 부담 경감과 재활용을 위하여 파이로와 소듐냉각고속로(SFR)에 관한 연구를 수행하였으며 단계별 수행된 주요 연구내용을 요약하면 [표 4]와 같다.

지난 10년간(2011~2020) 파이로-SFR 한미공동연구 결과를 정리한 JFCS(Joint Fuel

Cycle Study) 10년 보고서가 발간되었고 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회(이하 재검토위)의 권고에 따라 국회 협의를 거쳐 사용후핵연료 처리기술 연구개발 적정성 검토위원회(이하 적정성 검토위)를 구성하여 운영하였다. 2021년 9월부터 12월까지의 적정성 검토위는 파이로-소듐냉각고속로를 연계한 사용후핵연료 처리기술은 기술성·안전성·핵비확산성을 갖춘 사용후핵연료 관리기술로서 가능성이 있다고 판단하였다. 다만, 경제성에 대한 객관적인 평가, 처분 안전성 증대가 가능한 고화체 연구, 인허가를 위한 연구 등에 대해서는 지속적인 연구개발이 필요할 것으로 보인다.

III. 해외 사용후핵연료 관리 현황

1. 해외 사용후핵연료 관리시설 현황

현재 전 세계적으로 400기가 넘는 원전이 가동 중이며, 사용후핵연료가 지속적으로 발생되고 있다. [표 5]에서 볼 수 있듯이 약 39만 톤의 사용후핵연료가 발생하였고 재처리된 약 13만 톤을 제외하면 약 18만 톤이 습식저장시설에 보관되고 있으며, 나머지 8만 톤가량이 건식저장시설에 보관 중이다. 현재 저장 중인 사용후핵연료는 국가별 사용후핵연료 정책에 따라 [그림 3]과 같이 57% 정도가 직접처분이 될 것으로 예측된다.

전 세계적으로 원전을 운영하는 나라는 33개국이다. 이 중 24개국이 건식저장시설을 건설 및 운영 중이고, 미국, 프랑스, 중국, 스웨덴 등 12개국이 재처리시설 내 저장시

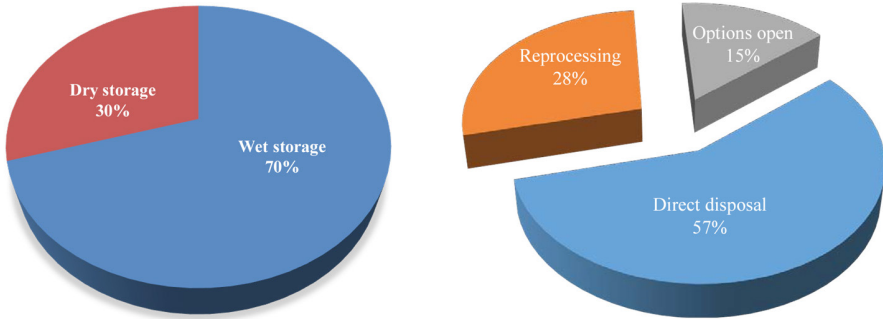
[표 5] 2016년 전 세계 사용후핵연료 재고량

(단위: t HM)

지역	습식저장	건식저장	재처리	처분	계
아프리카	950	50	-	-	1,000
아메리카	83,500	52,500	600	-	136,500
아시아	35,500	6,500	8,500	-	51,000
유럽	63,500	20,500	117,500	-	201,500
오세아니아	1	-	1	-	1
전 세계	183,500	80,000	127,000	-	390,000

출처: IAEA(2022)

[그림 3] 사용후핵연료 저장 현황(왼쪽)과 관리 전략별 비중(오른쪽)



출처: IAEA(2022)

[표 6] 주요 원전운영국 중간저장시설 및 처분시설 현황

국가	중간저장시설	처분시설	국가	중간저장시설	처분시설
한국	부지선정 전		캐나다	-	부지선정 중
미국	부지확보 후 건설허가 중 * Texas, New Mexico	부지확보 후 사업 중단	영국	Sellafield, Dounreay * 재처리시설 내 위치	부지선정 중
프랑스	La Hague * 재처리시설 내 위치	부지확보 후 건설허가 중 * Meuse, Haute-Marne	스페인	부지확보 후 건설허가 중 * Villra de Canas	부지선정 전
중국	LNFC * 재처리시설 내 위치	부지확보 * Beishan	스웨덴	CLAB	2022년 인허가 완료 * Osthamar
러시아	MCC, Pa Mayak * 재처리시설 내 위치	부지확보 * Nizhnekansky	체코	-	부지선정 중
일본	Mutsu * 2023년부터 운영 예정	부지선정 중	핀란드	-	2025년 운영예정 * Olkiluoto
독일	Gorleben 등 3개	부지선정 중	스위스	Zwilag	부지선정 중 * Nördlich Lägern 제안

출처: 산업통상자원부(2023b)

설 등을 포함한 중간저장시설을 운영 중인데 처분시설을 운영하는 나라는 아직까진 없다(산업통상자원부, 2023b). 해외 주요 원전운영국의 중간저장시설 및 처분시설 현황은 [표

6]과 같다.

2. 국가별 사용후핵연료 처분 현황

가. 핀란드

핀란드 처분사업의 관리 체계를 간략히 정리하자면(함철훈, 장윤석, 2018), 핀란드 처분사업의 주요 관리기관은 고용경제부이며, 처분사업의 시행기관은 1995년에 설립된 Posiva이다. 총체적인 처분 관련 연구의 관리는 Posiva에서 주관하나 대부분 핀란드 기술연구센터(VTT) 등의 연구기관, 대학, 컨설턴트 회사 등에 위탁하는 형태로 진행되고 있다. 안전규제의 경우 방사선·원자력안전센터(STUK)가 담당하고 있으나 고용경제부 또한 안전 규제에 관한 일부 역할이 부여되어 있다. 사용후핵연료의 최종처분이 완료된 이후 폐기물에 관한 모든 관리의 책임은 국가에게 있다고 규정하고하고 있다.

핀란드의 부지조사 및 확보 연혁은 다음과 같다(홍수연 외, 2019). 핀란드는 1983년부터 1985년까지 부지 확인 조사를 수행하였다. 선정된 예비부지 중 지자체 동의를 얻은 지역에 대해 1986년부터 1992년까지 시추조사 등의 예비부지특성조사를 시행하였고, 1993년부터 2000년까지는 예비부지특성조사를 통해 선정된 3개 부지와 원전이 위치한 로비사 부지에 대해 상세한 부지특성조사를 시행하였다. 부지평가를 통해 올킬루오토를 최종 후보 부지로 선정하여 부지 확정을 위한 원칙 결정 절차를 신청하였고, 2001년 국회 승인에 따라 올킬루오토가 최종 후보 부지로 확정되었다. 이후 2004년에 올킬루오토 부지에 ONKALO 지하연구시설 건설을 착수하였고 여러 실증 시험을 시행하였다. 그 결과를 바탕으로 2012년 처분장 건설 허가를 신청하였고 STUK의 안전성 평가 허가에 따라 정부가 2015년 11월에 건설 허가를 승인하였다. 2016년 12월 처분장 건설을 시작한 후 2019년 6월 처분용기 포장시설 건설을 착수하였고, 2021년 5월 처분터널 굴착을 착수하였으며, 2021년 12월 포장시설과 처분시설에 대한 운영 허가 신청서를 제출하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 핀란드는 2025년 처분장 운영을 목표로 하고 있다.

나. 스웨덴

스웨덴 처분사업의 관리 체계는 다음과 같다(함철훈, 장윤석, 2018). 스웨덴 처분사업의 관리기관은 환경부이며, 처분사업 주체는 스웨덴 핵연료·폐기물관리회사(SKB)이다. SKB

는 사용후핵연료의 집중식 중간저장시설(CLAB)과 원자력발전소에서 발생한 중·저준위 방사성폐기물 처분장(SFR) 또한 운영하고 있다. 규제행정기관으로는 환경부 관할의 방사선안전기관(SSM)이 있으며, 원자력 이용으로 인해 발생하는 방사성폐기물에 대해서는 독립적인 평가를 수행하는 자문조직으로 환경부 산하의 방사성폐기물평의회를 두고 있다.

SKB(SKB, 2023)와 문헌(고용권 외, 2008) 등에 따르면 스웨덴은 1970년대부터 개략적인 부지조사를 시행하여 자국의 지질 데이터베이스를 구축하였다. 1992년부터 본격적으로 고준위방사성폐기물 처분장 부지선정에 나선 스웨덴은 모든 지자체에 타당성 조사 입후보를 의뢰한 후 지자체 의회 승인을 얻은 지자체의 8개 지역에 대해 2001년까지 부지 타당성 조사를 시행하였다. 부지 타당성 조사는 지질, 토지이용, 사회적 조건 등의 문헌조사를 의미하여 이를 통해 3개 부지를 선정하여 예비부지특성조사를 시행하였다. 지자체 의회의 승인을 받은 Oskarshamn 부지와 Östhammar 부지에 대해 상세부지특성조사를 2002년부터 2007년까지 수행하였으며, 2009년 6월 Östhammar의 Forsmark를 처분부지로 선정하였고 2011년 3월에 처분장 건설에 대한 인허가를 신청하였다. 구리 처분용기의 격납 성능에 대한 학술적 논의가 수차례 이어진 후 최종적으로 2022년 1월 건설 인허가를 획득하였다.

다. 프랑스

프랑스 처분사업 관리 체계(함철훈, 장윤석, 2018)의 경우, 관리기관은 정부와 의회이며, 실제 전담기관은 1991년 제정된 방사성폐기물관리연구법(Bataille, 바타유법)으로 지정된 방사성폐기물관리기관(ANDRA)이다. 프랑스의 경우 ANDRA는 처분기술이나 안전성 평가 등에 관한 연구를 진행하고 있으며 ANDRA를 중심으로 원자력·대체에너지청(CEA), 지질·광산연구소(BRGM) 등의 국내외 연구기관과 협력하면서 연구개발을 진행 중이다. 사용후핵연료 처분과 관련된 규제행정기관은 대통령 직속 기관인 원자력안전청(ASN)이며, 국가평가위원회(CNE)와 의회에 소속된 과학기술선택위원회(OPECST)가 기술적인 검토를 수행하면서 정부와 의회의 관련 정책 결정에 기여하고 있다.

프랑스의 처분부지 선정 과정의 경우(함철훈, 장윤석, 2018; 이정환 외, 2017), 1987년에 부지선정을 위한 광역조사계획을 수립하고 부지선정을 추진하였으나 1990년 정당과 대중의 반대로 중단되었다. 이후 ‘사용후핵연료 관리기술 연구개발’을 위한 바타유법이 제정되면서 1994년 예비지질평가를 통해 3개 부지가 지하연구시설 부지로 제안되었으

며, 1999년 Meuse/Haute-Marne 지역의 Bure 부지의 점토층에 지하연구시설을 건설하는 것이 허가되었다. Bure 부지의 심도 490m에 위치한 지하연구시설은 2000년에 건설을 시작하여 처분장 설계 및 건설, 처분공 밀봉, 암반 손상대 영향, 천연방벽 격리 성능평가, 회수 기술, 운영 기술 등에 관한 연구가 진행되었다. 2009년 지하연구시설이 위치한 Bure 부지를 고준위방사성폐기물 처분을 위한 최종 후보 부지로 제안하였으며 2023년 초 최종처분장 건설을 위한 인허가 서류가 제출되었다.

라. 스위스

스위스의 사용후핵연료 처분사업 관리(함철훈, 장윤석, 2018)는 환경·운수·에너지·통신부(UVEK)와 UVEK 관할 행정기관인 연방에너지청(BFE)에서 담당하며 실제 사업 주체는 방사성폐기물 관리공동조합(NAGRA)이다. 스위스의 안전규제는 UVEK 관할의 연방 원자력안전검사국(ENSI)가 담당하고 있으며 심층처분장 전문가그룹(EGT), 원자력안전 위원회(KNS) 등이 자문기관으로 존재하고 있다.

스위스는 사용후핵연료 처분시설 부지 선정을 위한 기술적 기준을 마련하고 지질학적으로 부적합한 부지를 우선적으로 제외하였다. 1978년부터 실시한 지질조사를 통해 스위스 북부 오팔리누스(Opalinus) 점토층을 가장 적합한 지역으로 판단하였다. 후보 지역으로 스위스 북부의 너르틀리히 레게렌, 쥐라 동부, 취리히 북동부 지역이 제안되었으며 국립연구기관인 파울체러연구소(PSI)와의 긴밀한 협력으로 2곳의 지하연구시설에서 수행한 방대한 연구자료를 통해 사용후핵연료 처분시설의 성능을 검증하였다. 최종적으로 NAGRA는 2022년 최종적으로 너르틀리히 레게렌을 최종후보부지로 정부에 제안하였다.

마. 미국

미국의 사용후핵연료 처분사업 체계(함철훈, 장윤석, 2018)의 경우, 실시 주체는 연방정부의 에너지부(DOE)로 정해져 있다. 방사성폐기물정책법 제304조에 따라 DOE 내부에 설치된 민간방사성폐기물관리국(OCRWM)이 처분사업의 주체였으나, 오바마 전 정부의 유카산 계획의 중단 방침에 따라서 OCRWM이 폐지되었고 DOE 원자력국(NE)이 그 책임을 계승하였다. 관련 규제는 원자력규제위원회(NRC)와 환경보호청(EPA)가 담당하고 있으며, 방사성폐기물정책법에 의거하여 기술 측면에 대한 독립적인 평가기관으로 방사성폐기물기술심사위원회(NWTRB) 설치를 규정하고 있다.

미국은 1987년 방사성폐기물정책법의 개정을 통해 유카산(Yucca Mountain)을 사용후핵연료 처분부지로 지정하였다. 이후 부지조사 및 평가를 통해 2008년 처분장 건설허가를 신청하였으나, 2009년 오바마 정부에 의해 유카산 처분 프로젝트가 백지화되었고, 이후 블루리본위원회가 조직되어 사용후핵연료 정책에 대한 대안을 마련하였다. 블루리본위원회는 2012년 8개 주요 사항을 권고하였고, 권고안에 따라 사용후핵연료 관리에 관한 연구개발에 집중하였다. 2017년 미국 의회는 방사성폐기물정책법 개정안을 발표하여 유카산 처분사업이 가장 효율적이고 효과적인 방안임을 명시하여 2025년 집중식 중간저장시설 운영, 2026년 처분부지 선정, 2042년 처분장 설계 및 인허가 완료, 2048년 처분장 운영 등의 마일스톤을 제시하고 있다.

IV. 국내 사용후핵연료 관리 미래 전망

1. 국내 사용후핵연료 처분부지 확보 시도

국내에서는 1984년 처분장 원전 부지 외부 건설, 정부 주도 방사성폐기물 비영리기관 설치, 관리비용 발생자 부담 등이 포함된 방사성폐기물 관리대책이 수립한 이후 사용후핵연료 관리시설 부지선정 시도가 9차례 있었다(산업통상자원부, 2023a; 한국원자력환경공단, 2023). 초기에는 중저준위방사성폐기물과 사용후핵연료를 동일 부지에 처분하는 계획을 수립하여 추진하였고, 이를 바탕으로 1986년 원자력법 개정을 통한 법적 기반을 마련하여 3차례의 부지확보 시도가 진행되었다. 1986년부터 1989년까지 경북 울진, 영덕, 영일 등 3개 후보 지역이 선정되었으나 지역 내 반대로 사업이 중단되었고, 1990년부터 1991년까지는 충남 안면도에 원자력 제2연구소 설치와 함께 관리시설 건설을 추진하였으나 주민과의 사전협의 없이 비공개 진행이 알려지면서 주민의 반대로 사업이 백지화되었다. 1991년부터 1993년까지는 44개 신청지역 중 7개 후보 지역을 도출하였고 서울대에서 관련 용역을 수행하여 강원 고성·양양, 경북 울진·영일, 전남 장흥, 충남 태안 등 7개 임해지역을 추천 지역으로 선정하였으나 안면도 포함 사실이 알려지면서 반대운동이 확산되면서 사업이 철회되었다.

이에 정부는 1994년 “방사성폐기물 관리사업의 촉진 및 그 시설 주변지역 지원에 관한 법”을 발효하였고 유치지역 지원에 관한 법적 근거를 마련하여 6차례의 부지확보

시도를 진행하였으나 모두 실패하였다. 1994년 장안읍, 울진군이 유치신청서를 제출하였으나 지역주민의 반대로 무산되었고, 1994년부터 1995년 기간 동안 서울대 용역으로 10개 후보 지역 선정 후 굴업도를 단일 후보 지역으로 선정하였으나 활성단층의 발견으로 취소되었다. 1997년부터 2001까지는 영광, 강진, 진도, 고창, 보령, 완도, 울진 등 7개 지역이 유치 청원을 하였으나 자진 철회, 지방의회의 기각 등으로 최종 선정에 실패하였고, 2001년부터 2003년 기간에는 울진, 영덕, 고창, 영광 등 4개 후보 지역을 선정하였으나 지역주민들의 반발로 계획을 철회하였다. 2003년에는 부안군 위도 주민들이 유치 청원서를 제출하였으나 부안군의회에서 부결하였고, 군의회 부결에도 불구하고 부안군수와 부안군의회 의장이 유치신청서를 제출하였으나 군내 격렬한 반대로 유치에 실패하였다. 2004년에는 7개 시, 10개 군 지역에서 유치신청을 하였으나 지역 내 갈등 우려로 예비신청을 포기하였다.

부지확보 절차의 거의 모든 사례에서 지역주민의 동의를 얻지 못하는 상황이 반복되었고, 결국 2004년 중저준위방사성폐기물과 고준위방사성폐기물을 분리하여 확보하는 방향으로 정책이 변경되었다. 또한 2005년 “중저준위방사성폐기물 처분시설의 유치 지역 지원에 관한 특별법” 제정을 통해 입지 지역에 대한 지원을 명문화하여 지역주민 수용성을 높이고자 노력하였다. 이에 따라 사전부지조사 시행 후 경주, 군산, 영덕, 포항이 유치신청서를 제출하였으며, 주민투표를 시행하여 경주지역이 최종 확정되었다. 당시 주민 찬성률은 경주 89.5%, 군산 84.4%, 영덕 79.3%, 포항 67.5%이었다.

정부는 2013년 사용후핵연료 관리대책 수립을 위한 사용후핵연료 공론화위원회를 발족하여 대국민 공론화를 추진하였으며 그 결과를 바탕으로 “사용후핵연료 관리에 대한 권고(안)”(이하 권고안)을 제출하였다. 권고안의 후속 조치로 “고준위방사성폐기물 관리시설 부지선정절차 및 유치지역지원에 관한 법률(안)” 발의(2013년 11월 정부 제출)가 이루어졌으나 임기 만료로 폐기되었다. 산업부는 권고안에 따라 2016년 5월 “고준위방사성폐기물 관리 기본계획(안)”(이하 제1차 기본계획)을 발표하였다. 제1차 기본계획에서는 처분부지 URL, 중간저장시설, 영구처분시설을 하나의 부지에 단계적으로 확보하여 추진하는 정책 방향과 안전 및 경제성을 담보하는 핵심 관리기술의 적시 확보, 관리시설 운영 정보의 상시 공개와 지역주민과의 소통, 유치지역 지원내용 명시 등의 내용을 포함하였다. 이후 제1차 기본계획의 후속 조치로 “고준위방사성폐기물 관리에 관한 특별법안” 발의(2018.7, 더불어민주당 우원식 의원 대표발의)가 있었으나 이도 임기 만료로 폐기되었다.

2017년 7월 문재인 정부는 공론화를 통한 사용후핵연료 정책 재검토를 결정하고 재검토위가 발족하여 21개월간의 활동 결과 “사용후핵연료 관리정책에 대한 권고안”(이하 재검토 권고안)이 제출되었다. 후속 조치로 2020년 12월 산업부에서는 재검토 권고안에 따른 “제2차 고준위방사성폐기물 관리 기본계획(안)”(이하 제2차 기본계획)을 발표하였고, 부지선정 절차 착수 이후 관리시설 부지확보에 Y+13년, 영구처분시설 확보에 Y+37년 등의 내용을 담고 있다. 이에 따르면 2023년에 부지선정 절차가 착수된다면 2060년에 영구처분시설을 확보하게 된다. 추가 후속 조치로 사용후핵연료 관리시설에 관한 특별법안 3개(“고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법안”, 김성환 의원 대표발의, 2020.9, “고준위 방사성폐기물 관리시설 등에 관한 특별법안”, 김영식 의원 대표발의, 2022.8, “고준위 방사성폐기물 관리 및 유치지역 지원에 관한 특별법안”, 이인선 의원 대표발의, 2022.8)가 차례로 발의되었으며, 2023년 5월 기준 국회 해당 상임위 법안소위에서 관련 특별법에 대한 병합심의회가 진행되고 있다.

2. 사용후핵연료 관리시설의 사회적 수용성 확보 방안

우선, 과학기술적 관점에서 사용후핵연료 처분시설의 안전성과 처분부지의 장기 안정성을 최우선적으로 확보하여야 한다. 다만, 과거 9차례에 걸친 처분부지 선정의 실패 사례에서 볼 수 있듯이 사용후핵연료 관리시설을 확보하고 운영하기 위해서는 사회적 수용성이 무엇보다도 중요하다. 사회적 수용성 확보를 위해서는 최소 2가지 전제조건이 필요하다. 첫째, 관리시설 부지확보 및 운영 방안을 담은 특별법 제정과 둘째, 사용후핵연료 관리를 담당하는 독립적인 전담 행정기관의 설립이다.

관리시설 부지확보 및 운영 방안을 담은 특별법 제정은 정책의 일관성, 연속성, 예측 가능성을 부여하는 법적 근거이자 국가가 국민에게 안전하고 책임감 있는 사용후핵연료 관리를 약속할 수 있는 유일한 수단이다. 법 제정을 통해 유치지역에 대한 지원방안을 제시하는 것은 사용후핵연료 관리시설 운영을 위한 첫 단계이고 처분부지 선정 및 확보 과정에서 지역주민의 수용성을 확보할 수 있다는 것을 경주 중저준위방사성폐기물처분장 부지확보에서 경험한 바 있다. 나아가 특별법에 지방자치단체들의 자발적인 신청, 주민 동의를 통한 최종 결정권 등과 같이 처분장 부지확보에 성공한 핀란드, 스웨덴 등에서 적용한 부지선정 절차를 명시한다면 더욱더 투명하고 설득력 있는 부지선정 절차를 진행할 수 있을 것이다. 프랑스, 미국, 독일 등의 국가에서는 관리시설 부지확보 시점 및 운영 시점이 법안에 명시되어 있으며, 이와 같은 마일스톤을 특별법에 지정하

는 것 또한 관리사업의 원활한 진행 및 부지내저장시설의 영구화를 우려하는 원전 부근 주민들의 수용성 증진에 도움이 될 것이다.

사용후핵연료 관리는 운반, 저장, 처분 등 광범위한 분야를 아우르며, 장기적인 관점에서의 연구·사업 계획 수립 및 실행이 필요한 업무이다. 현재 국내에서는 산업부와 과기부가 관련 업무를 분산하여 수행하고 있는 상태로, 오랜 기간 일관성 및 연속성 있는 관리 체계의 마련에 독립적인 전담 행정기관의 설립이 필요하다. 독립적인 행정기관 설립 시 효율적인 업무 분장 및 협력체계 구축이 가능할 것이며, 국민적 수용성과 함께 기술적·사회적 측면을 종합할 수 있는 정책 결정 체계를 구축하여 더욱더 안전한 사용후핵연료 관리가 가능할 것이다. 이는 재검토위에서 시민참여형 조사 등을 비롯한 다양한 프로그램을 통해 도출된 재검토 권고안에서도 권고된 사안이며 산업부의 제2차 기본계획에도 포함된 사안이다. 사용후핵연료 관리를 전담하는 기관이 유명무실한 형태로 전락하지 않기 위해서는 반드시 전문성, 독립성, 책임성 및 행정력이 확보된 형태로 설립되어야 할 것이다. 장기적인 관점에서 사용후핵연료 관리만을 전담하며 안전한 관리 등 제반 사항을 총괄적으로 다루는 관리기관이 설립되어 운영된다면 지속적인 국민과의 소통을 통해 최종처분 부지선정 절차 등 사용후핵연료 관리에 대한 국민의 신뢰를 확보하는 데 기여할 수 있을 것이다.

V. 결론

원자력은 1950년대 이후 원자력의 평화적 이용이라는 가치 아래 안전하고 안정적이며 경제적인 전력 생산을 책임져왔고 과학기술 및 산업 발전뿐만 아니라 경제 성장을 통한 인류의 삶의 질 향상에 기여해왔다. 앞으로도 원자력은 국가 에너지 안보와 탄소중립을 달성하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 다만, 원자력은 사용후핵연료라는 숙제를 안고 있다. 세계 주요 원전가동국은 사용후핵연료 처분부지를 확보하고자 노력하고 있고 핀란드, 스웨덴, 프랑스 등은 처분에 적합한 부지확보를 위한 심지층 환경 조사, 지역주민 수용성 확보를 위한 일관되고 지속적인 노력을 통해 최종처분장 건설 및 운영을 눈앞에 두고 있다.

원자력 강국인 우리나라는 어떠한가? 우리나라는 꾸준한 연구개발을 통해 사용후핵연료 관리기술을 발전시키고 있음에도 과거 40년 동안 지역주민 수용성 부재로 인해

처분부지를 확보하는 데 실패를 거듭하고 있다. 사용후핵연료 문제의 해결은 여전히 요원하고 한 걸음도 나아가지 못하고 있다. 우리 정치권은 고도의 과학기술적인 사안인 사용후핵연료 문제를 안타깝게도 정치 진영 논리에 갇혀 사용후핵연료 문제를 관성적으로만 바라보고 대응하고 있다. 정치권의 정치력 부재로 제자리걸음을 하는 사이 원전 부지내 사용후핵연료 저장시설의 포화는 코앞으로 성큼 다가오고 있다. 사용후핵연료의 저장 공간을 확보하지 못하면 결국 원전 가동을 중단해야 할 상황이다.

국민과 미래 세대가 사용후핵연료에 대해 걱정 없이 안전하게 삶을 영위할 수 있도록 사용후핵연료 처분부지를 하루빨리 확보하여야 한다. 고준위방사성폐기물 관리에 관한 특별법 제정이 국민과의 소통의 시작이고 국가가 국민에게 드리는 최소한의 약속이다. 원자력의 혜택을 누리는 현세대가 미래 세대에게 사용후핵연료 문제를 떠넘기지 않기를 바란다.

참고문헌

- 고용권, 김건영, 김경수, 박경우, 배대석, 지성훈, “해외 고준위 방폐장 부지선정 현황 분석”, 한국원자력연구원, 2008.
- 산업통상자원부, “제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획”, 산업통상자원부, 2021.
- 산업통상자원부, “사용후핵연료 저장시설 포화시점 1~2년 단축 전망”, 산업통상자원부, 2023a.
- 산업통상자원부, “고준위방사성폐기물(특별법, 건식저장시설) 참고자료”, 산업통상자원부, 2023b.
- 산업통상자원부, 한국원자력환경공단, “사용후핵연료, 필수적이고 귀중한 정보집”, 산업통상자원부, 2022.
- 이정환, 윤정현, 김수진, 김승현, 성기열, 이선정, “프랑스 고준위방폐물 부지선정에서 지하연구시설의 역할”, 『한국자원공학회지』 제54권 제4호, 2017, pp. 358-366.
- 한국수력원자력, “원자력발전소별 사용후핵연료 저장현황”, 한국수력원자력, 2022.
- 한국원자력환경공단, 방폐물 관리사업 (<http://www.korad.or.kr>), 2023(검색일: 2023.4.27.)
- 함철훈, 장윤석, 『사용후핵연료론』, 화산미디어, 2018.
- 홍수연, 권새하, 민기복, 박의섭, “핀란드의 사용후핵연료 지층처분 현황 및 암반공학 관련 연구 소개”, 『터널과지하공간』 제29권 제4호, 2019, pp. 215-229.
- IAEA, “Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management,” IAEA Nuclear Energy Series, 2022.
- SKB, News (<https://www.skb.com>), 2023(검색일: 2023.4.27).

한국의 핵무장 추진 시 국제 규범 위반 문제와 현실적인 핵 억제력 강화 방안

Issue of Violating International Norms in Case of South Korea's Nuclear Build-Up for Military Purpose, and Realistic Ways to Strengthen Nuclear Deterrence

신동익*

Dong-Ik Shin

북한의 핵 위협이 점증함에 따라 한국 내 핵무장 추진 여론이 높아지고 있는 상황에서 만약 한국이 핵비확산조약(NPT)을 탈퇴하고 핵개발을 할 경우 국제사회에서 어떠한 제재를 받게 되는지와, 핵개발을 하지 않고 북한 핵에 대비하기 위해 핵보유 동맹국인 미국으로부터 어떻게 실질적인 핵억제 능력을 제공받을 수 있는지에 대해 논의해 본다. 2023년 4월 26일 워싱턴에서 개최된 한·미 정상회담에서 양국은 '워싱턴 선언'을 발표하여 '핵협의그룹(NCG)'을 통해 확장억제 능력을 강화해 나가기로 합의하고, 한국은 NPT의 무 준수를 재확인하였다. 이로써 한국의 핵개발에 대한 논란은 대외적으로 일단락된 것으로 보인다. 그러나, 미래에 한국이 핵개발을 추진하게 된다면 어떠한 상황이 발생할지는 가정해 볼 수 있다. 즉, 한국이 핵개발을 한다면 NPT 등 다양한 비확산 국제규범을 위반하게 되므로 유엔 안보리, 국제원자력기구(IAEA) 등 관련 국제기구는 물론이고 아니라 미국 등 국제사회로부터 제재를 받게 될 것이다. 이로 인해 대외 무역에 의존하고 있는 한국 경제는 파탄이 나고, 주요 에너지원인 원자력 발전 원료 수입도 영향을 받게 되어 사회 인프라도 정상적으로 가동이 되지 못할 것이다. NPT 체제하에서 북한 핵에 대응할 수 있는 현실적인 대안으로 미국의 전술핵 재배치, 확장 억제능력 강화, 핵공유, 원자력 잠수함 도입 등을 고려할 수 있다. 선택 안들의 장·단점을 검토하고 미국의 기존 핵정책을 감안해 볼 때 한·미 상호방위조약에 근거하여 미국의 전략자산을 신속히 배치토록 하는 확장억제(extended nuclear deterrence) 강화가 현실적으로 최선이 될 것이다. 결국 NPT 체제하에서 핵무기 비보유국인 한국으로서는 북한의 핵사용 조짐이 있거나 실제 공격을 받을 경우 미국이 핵으로 즉각 대응할 수 있는 체계를 갖추도록 하는 것이 핵심이다. 한국의 자체 국방력과 4.26 한미 정상회담에서 합의된 핵협의그룹(NCG)을 통해 한·미 확장억제력 능력을 강화시키는

* 前 주오스트리아 대사, 現 연세대 국제대학원 객원교수, 한국원자력안전기술원(KINS) 대외정책자문위원 (dongikshin81@gmail.com)

동시에 북한이 핵협상에 나올 수 있도록 우방국들 및 중국, 러시아와의 외교적 노력도 잊지 말아야 할 것이다.

주제어 NPT, IAEA, NSG, CTBTO, 워싱턴 선언, 핵협의그룹(NCG), 확장억제, 핵공유, 한미상호방위조약, 한미 원자력협정

Keywords Nuclear Non-Proliferation Treaty(NPT), International Atomic Energy Agency(IAEA), Nuclear Suppliers Group(NSG), Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization(CTBTO), Washington Declaration, Nuclear Consultative Group(NCG), Extended Deterrence, Nuclear Sharing, the ROK-US Mutual Defense Treaty, the ROK-US Agreement for Cooperation concerning Civil Use of Atomic Energy

투고일 2023.4.4. 수정일 2023.5.21. 게재확정일 2023.5.27.

I. 서론

1. 한국의 핵무장 필요성에 대한 여론과 현 상황

가. 한국 내 여론 및 관련 논의 동향

북한은 2017년 6차 핵 실험을 통해 핵무기 완성을 선언한 이후 각종 탄도, 순항미사일 실험을 해 왔으며, 2022년 이후에는 전술 핵무기를 남한에 대해 사용할 수 있다고 공개적으로 위협을 가하고 있다(이봉석, 2023). 2023년 3월 실시한 한·미 연합훈련에 대응하여 지상, 공중, 수중에서 순항미사일을 포함한 다양한 형태의 미사일 실험을 함으로써 한국에 핵무기 공격을 할 수 있다는 능력을 과시하고 있다(홍승욱, 2023).

이에 대해 한국의 여론은 북한의 핵위협에 대한 대응을 위해 핵 억제력을 강화하고 나아가 핵무장 문제도 심각하게 고려해야 한다는 의견이 점증하고 있다. 특히, 정치권에서도 한국을 스스로 지키기 위한 자강의 군사력 확보를 위해 핵무기 개발을 추진해야 하며, 핵비확산 조약(NPT: Nuclear Non-Proliferation Treaty) 체제하에서 핵무장이 불가능 할 경우 미국의 전술 핵무기 재배치 또는 미국과의 핵 공유 협정을 체결해야 한다는 대안을 주장하고 있다. 2023년 1월 한국의 외교안보 싱크탱크인 최중현 학술원과 여론조사전문기관 한국갤럽이 조사 한 결과에 따르면 ‘한반도 주변의 여러 상황을 고려했을 때 귀하는 한국의 독자적 핵개발이 필요하다고 생각 하십니까?’라는 질문에 응답자의

77.6%가 ‘그렇다(매우 그렇다 15.9%, 어느 정도 그렇다 60.7%)’고 답했다.¹ 이와 같은 통계에서 보듯이 현재 한국 국민들에게는 북한이 핵을 보유했으니 ‘핵에는 핵으로 대응할 수밖에 없다’는 인식하에 자체적으로 핵무기를 개발해야 한다는 주장이 확산되는 추세에 있다.

한편, 2023년 3월 16일 ‘라몬 파체코 파르도(Ramon Pacheco Pardo)’ 런던 킹스칼리지 교수 ‘포린 폴리시’ 기고문에서 한국이 핵 확산을 우려하는 미국 등 서방 국가들의 반대에도 불구하고 핵무장을 해야 할 안보적 필요성도 계속해서 증가하고 있으며, 한국이 지금 스스로에게 묻고 있는 문제는 핵무기를 만들 능력이 있느냐 여부가 아니라 그렇게 함으로써 얻는 이익이 비용보다 더 큰가 하는 것이라고 지적하였다. 파르도 교수는 NPT 가입을 거부하면서 공공연한 핵개발 의지를 표출했던 이스라엘이 실제 핵무장에 성공한 것을 언급하면서, 한국이 장기적으로 큰 여파에 직면하면서도 핵무기를 개발할 수 있다는 것을 암시하는 것은 지나친 것이 아니라고 평가했다(Pardo, 2023).

나. 윤대통령의 핵무장 가능성 언급과 미국의 반응

2023년 1월 11일 윤석열 대통령은 국방부 업무보고에서 북한의 도발 수위가 높아지면 “대한민국이 전술핵을 배치한다든지 자체 핵을 보유할 수도 있으며, 만약 그렇게 된다면 우리 과학기술로 더 이른 시일 안에 우리도 (핵무기를) 가질 수 있을 것”이라고 언급했다. 이에 대해 대통령실은 핵확산금지조약(NPT) 체제를 준수한다는 대원칙에 변함이 없고, 최악의 상황에서도 국민을 지키겠다는 각오를 나타냈던 것이라고 해명했다. 이어 윤 대통령은 1월 20일 WSJ과의 인터뷰에서 “NPT 체제를 존중하는 것이 한국의 합리적인 선택이며, 한국 국민은 북핵 위협에 대해 미국의 확장억제에 대해 상당한 신뢰를 하고 있다”라고 언급하였다(Murray, 2023). 2월 3일 한덕수 총리도 CNN과의 인터뷰에서 “최근 국내 조사에서 한국이 핵을 보유해야 한다는 의견이 있지만, 이것이 옳은 길이라고 생각하지 않으며, 국제사회와 함께 북한의 비핵화를 촉구할 것”이라고 밝혔다.

이와 관련 미국 정부는 “한반도의 완전한 비핵화를 약속했고 이는 변함이 없으며, 한국은 미국의 확장억제 안에 있다는 것을 기억하는 것이 중요하다”는 기존 입장을 강조했다. 즉, 한국이 전술핵을 포함해 핵무장은 안 된다는 것이며, 미국의 핵 능력(핵우

1 중앙일보, “독자 핵개발 필요” 77%, “북 비핵화 불가능” 78%(2023.1.31.) 또한 리얼미터가 2023.4.20-21 진행한 여론조사 결과, 한국의 핵무기 보유에 찬성하는 비율은 응답자의 56.5%, ‘반대’는 40.8%, ‘잘 모름’은 2.7%였음.

산)을 동원해 한국에 대한 확장억제 제공을 재확인한 것으로 해석할 수 있다. 이후 2023년 초부터 계속되는 북한의 탄도미사일 도발에 대해 미국은 B-1B 전략 폭격기, F-22, F-35B 스텔스 전투기와 핵잠수함 등의 전략자산을 전개하면서 실질적으로 강화된 억제력을 보여 주고 있다.

마침내 2023년 4월 23일 워싱턴에서 개최된 한미 정상회담에서 발표된 ‘워싱턴 선언(Washington Declaration)’을 통해 양국은 확장억제를 강화하고, 핵 및 전략기획을 토의하며, 비확산체제에 대한 북한의 위협을 관리하기 위해 새로운 ‘핵협의그룹(NCG: Nuclear Consultative Group)’ 설립을 선언하였다. 아울러 한국은 NPT 상 의무에 대한 공약 준수를 재확인하였다(대통령실 보도자료, 2023).

다. 핵무기 제조 능력에 대한 논란

2023년 4월 28일 윤석열 대통령은 하바드 케네디스쿨 연설 후 질의·응답 과정에서 “한국은 핵무장을 하겠다고 마음을 먹으면 이른 시일 내에 심지어 1년 이내에도 핵무장을 할 수 있는 기술 기반을 갖추고 있다.” 다만, “핵이라고 하는 것은 단순한 기술의 문제만이 아니며, 핵무기와 관련된 복잡한 정치·경제 방정식이란 게 있다”라고 답변하였다.

이에 반해 2023년 1월 서균렬 서울대 원자핵공학과 명예교수는 한국은 이미 핵보유국 수준의 재처리·농축 기술을 갖고 있다며, 결단만 하면 6개월 내 20kt(1kt=TNT 1000톤의 폭발력)급 시제품을 만들 수 있다고 언급했다. 또한, 2019년 가동 중단된 월성 원전 1호기와 현재 운용 중인 20여 기의 원전에 보관된 폐연료봉을 재처리하면 플루토늄이 나오며, 고급 기술자 500명을 하루 3교대로 투입하면 6개월 내 6kg의 플루토늄을 얻을 수 있다고 설명하였다. 더 나아가 시제품 완성 후 2~3년이면 50~60kg까지 소형화한 전술 핵을 양산해 전투기나 현무 미사일 등에 장착할 수 있다고 전망했다. 일부 전문가들도 기폭장치도 1년 내 제작이 가능할 것이며, 슈퍼컴퓨터를 이용한 시뮬레이션으로 핵실험 없이도 성능 검증이 가능하다고 주장하고 있다(윤상호, 2023).

그러나 핵개발과 관련된 주장들은 기술적이고 이론적인 측면에서 가능할 수 있을지 모르나, 윤대통령이 언급한 바와 같이 현실적으로 핵개발 프로그램을 정치·외교·경제적인 파장을 고려하면서 정부가 공개적으로 추진 할 수 있을지와 예상되는 기술적인 한계와 문제점을 극복할 수 있을지에 대한 객관적인 평가가 있어야 할 것으로 본다(유용원, 2023). 과연 평화적 목적의 원자력 발전소나 연구소 등에서 근무하고 있는 전문 원자력 과학자들을 동원해서 미국, IAEA 등의 국제적 감시를 피해 가면서 한국 정부가 핵무

기를 개발할 수 있을지 불확실한 측면이 많다. NPT를 탈퇴하면서까지 핵개발에 나설 경우 경제·외교적 손실은 물론 기술적·환경적인 제약 요인들로 인해 핵무기 프로그램을 시작하는 것조차 어렵게 만들 수도 있을 것이다.

과거 핵개발을 한 국가들 모두 비밀리에 핵 프로젝트를 추진하였고, 실제 핵무기의 성능을 확인하기 위해서는 시뮬레이션을 넘어 실제 핵실험이 필요한데 주민들의 반대로 추가 원전 폐기물 장소도 정하지 못하는 한국의 현실에서 핵 실험장(지하, 수중, 대·외기권)을 찾는 것은 불가능하다. 결론적으로 한국의 핵무장 추진에 대한 다수의 긍정적 여론에도 불구하고 자체 핵무장 카드는 현실성은 낮다는 게 중론으로 볼 수 있다.

II. 본문

1. 한국의 핵무장 추진 시 예상되는 문제들

2023년 4월 26일 워싱턴 선언으로 한국은 NPT 의무 준수를 재확인하였고, 4월 28일 윤석열 대통령은 하바드 연설 후 핵무장 질문에 대해 ‘한국이 핵을 보유할 때 포기해야 하는 다양한 가치들과 이해관계가 있다’면서, 독자 핵개발은 안하고 NPT 체제를 존중할 것이라고 밝혔다(오형주, 2023). 그러나, 한국의 안보 우려를 고려한 미국의 안보 공약(핵우산)에도 불구하고 핵무장의 길로 가게 된다면 국제사회에서 어떠한 문제가 발생하는지를 객관적으로 짚어 볼 필요가 있다. 단적으로 북한과 유사하게 NPT 탈퇴 등 국제규범을 벗어나 핵개발을 시도하는 선택을 하는 경우 한국은 동맹인 미국, 우방국인 영국, 프랑스뿐만 아니라 중국, 러시아 등 핵보유국을 포함 전 세계 국가들로부터 비난과 제재를 받는 고립된 국가가 될 수 있다. 무엇보다 G20의 위상을 가진 한국이 국가 생존에 필요한 국제사회와의 협력과 대외의존도가 높은 한국 경제 및 무역에 엄청난 타격이 올 것은 자명하다.

국제관계에 있어 질서를 유지하고 상호 신뢰를 갖기 위해 가장 중요한 요소는 양자간 또는 다자간 합의된 내용을 준수하는 것이라 할 수 있다. ‘약속은 지켜져야 한다(Pacta sunt servanda)’라는 라틴 격언이 있듯이 법은 로마 시대에서부터 사회 및 국가 관계에서 가장 기본이 되는 원칙이다. 이에 따라 미국, 유럽 등 국제사회는 ‘법에 기반 한 질서(rules-based international order)’를 중시하고 국제법 준수를 가장 높은 우선순위로 간주하

고 있다. 과거 수많은 전쟁을 겪으면서 1648년 베스트팔렌 체제 이후 유엔 창설까지 국가들 간 법적 합의로 항구적 평화를 유지하려는 공동의 목적이 있었기 때문이다.

만약 한국이 핵무장을 위해 NPT를 탈퇴한다면 국제 규범을 준수하며 ‘글로벌 중추국가’를 지향하는 우리의 국제적 신인도는 바닥에 떨어질 것이다. 다수 국가들은 별도의 양자 제재를 가함으로써 우리 경제의 버팀목이라고 볼 수 있는 무역이 치명적으로 타격 받고, 한반도 비핵화를 위해 공들여 쌓아 올린 비확산 모범국가의 명성도 물거품이 되어버릴 것이다. 대다수 국가들은 국제사회 여러 나라들과 경제·외교적으로 상호 의존적인 관계이기 때문에 국제사회와의 단절은 국가 생존에까지 타격을 줄 수 있는 일이므로, 그러한 고립 상태를 우려해서 많은 국가들은 핵개발을 하지 않으면서 NPT 체제에 남아있길 선호한다. 즉, NPT 체제 안에 남아 국제사회와 교류함으로써 얻는 여러 가지의 경제적·외교적 이득이 핵무기 보유보다 더 크다는 것이 상식적이라고 할 수 있다.

국제 규범 위반에 따른 제재와 관련해서 NPT, 국제원자력기구(IAEA), 유엔 안보리, 원자력공급국그룹(NSG), 포괄적 핵실험금지기구(CTBTO) 회의 등에서 핵비확산규범 위반국에 대해 어떤 근거에 의해 대응 조치가 취해지는지의 사례를 살펴보면 우리가 감당할 비용(cost)을 예상해 볼 수 있다. 역설적으로 1993년 북한의 NPT 탈퇴와 이후 2017년까지 핵 실험 때마다 한반도 비핵화 선언과 국제 규범 위반에 대한 유엔 등 국제사회의 대응 조치를 참고하면 우리에게 대한 가정적 상황으로 이해하는 데 도움이 될 것이다(신동익, 2023).

가. 한반도 비핵화 공동 선언

1991년 12월 남·북한은 세 차례의 〈남북 고위급회담〉을 갖고 한반도의 비핵화를 통하여 핵전쟁의 위협을 제거하기 위해 ‘한반도 비핵화 공동선언’에 합의하였다. 이 선언의 골자는 ① 핵무기의 제조·보유·저장·배비(配備)·사용을 금지하는 비핵 5원칙 선포 ② 재처리시설과 우라늄 농축시설의 보유 금지 ③ 원자력의 평화적 이용 약속 등이다.

그러나 2년 후 1993년 북한은 NPT 탈퇴선언 후 핵무기 개발을 계속함으로써 실질적으로 비핵화 선언을 파기한 결과가 되었다. 반면 한국 정부는 북한의 지속적인 핵 실험을 통해 NPT 등 국제 규범과 안보리 결의를 위반하였음에도 불구하고 북한의 비핵화를 유도하기 위해 한반도 비핵화 선언을 계속 강조하고 있다. 이러한 점에 대해 국제사회는 한국의 비핵화 노력을 높이 평가하고 있으며, 안보리 결의에 적시되어 있는 완

전하고, 검증 가능하며, 비가역적인 비핵화(CVID)를 위해서라도 동 선언이 일종의 국제 규범으로 유효한 합의 문서로 남아있어야 한다고 요구하고 있다.

앞서 이야기한 파르도 교수도 한국은 한반도 비핵화 공동선언을 계속 존중하고 있지만, 북한은 반대 방향으로 가고 있다며 북한의 위협에도 비핵화 선언 준수가 남한이 도덕적이고 법적으로 우위를 유지할 수 있도록 한다고 했다. 이러한 상황에서 한국마저 핵무장을 추진한다면 한반도 비핵화 선언은 완전히 사라지게 되는 것이며, 궁극적으로 한반도 비핵화를 통해 한반도는 물론 동북아 전체를 비핵지대화로 만든다는 국제 핵비확산 목표도 존재하지 못하게 될 것이다.

나. 핵비확산 조약(NPT)

만약 한국이 핵개발을 위해 NPT를 탈퇴한다면 ‘글로벌 중추국가’를 지향하며, 북핵 포기를 통해 한반도 비핵화를 위해 공들여 쌓아 올린 비확산 모범국가의 명성이 실추될 것이다. NPT 10조는 ‘NPT 문제에 관련되는 비상사태(extraordinary events)가 자국의 지대한 이익(supreme interests)을 위태롭게 하고 있을 경우에는 본 조약으로부터 탈퇴할 수 있고, 탈퇴할 경우 3개월 전에 모든 조약 체결국과 유엔 안보리에 통보해야 한다.’고 규정하고 있다.

북한의 경우 핵무기 개발을 목적으로 NPT 조약상 의무인 안전조치(safeguards), 즉, 사찰을 받지 않기 위해 NPT(1993년)와 IAEA(1994년)를 탈퇴하였으며, 유엔 안보리는 1993년 5월 11일 결의 825호를 통해 북한이 NPT 철회를 재고하고, IAEA와의 사찰 현안을 해결할 것을 요구하였다. 한국이 북핵 위협에 대응하여 북한처럼 NPT를 탈퇴할 경우 10조의 NPT와 관련된 비상사태로 인정될 수 있는지 논란이 될 수 있으며,² IAEA와 유엔 안보리에서 규탄 성명과 NPT 복귀 촉구 결의가 채택될 것이다. 이는 국제사회에서 한국이 북한과 유사한 불량국가 명단에 포함된다는 의미를 갖게 된다.

또한, NPT를 보완·강화시키기 위해 2017년 제정된 ‘핵무기금지 조약(TPNW: Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons)’은 핵무기의 개발, 실험, 생산, 획득, 보유, 사용 등을 금지하고 있다. 미국 등 핵보유국 및 핵우산 하에 있는 NATO, 한국, 일본 등은 동 조약

2 유엔 군축국(UNODA)에 등재된 NPT 당사국은 현재 191개국이며, 북한은 1993년 탈퇴 선언에도 불구하고 당사국 명부에는 1985년 가입국으로 남아 있다. (북한의 탈퇴에 대한 논란으로 유엔 및 국제사회의 공식적인 결론은 없는 상태)

에 가입하고 있지 않지만, 2021년 1월 발효되어 현재 92개국이 조약을 비준한 상황이다. 따라서 NPT를 뛰어넘어 핵무기의 완전한 금지를 목표로 한 TPNW 당사국들은 새로운 핵무기 국가의 출현에 대해 거세계 규탄할 것이며, 유엔과 별도로 다른 방식의 제재를 가할 수 있을 것으로 예상된다.³

다. 국제원자력기구(IAEA)

핵무기 개발을 금지한 NPT 2조와 함께 3조는 ‘핵비보유국의 영역 또는 관할하에 있는 모든 평화적 원자력 활동의 선원물질 또는 특수 핵분열성 물질에 안전조치를 적용하고, 조약의 최초 발효일 이후 기탁국은 18개월 이내에 안전조치협정을 발효시키며, 안전조치가 적용되지 않는 원료물질과 특수 분열성 물질 및 관련 장비는 핵비보유국에게 제공을 금지’하고 있다. NPT를 이행하는 별도 조약기구가 없기 때문에 NPT 비핵 당사국이 안전조치를 거부하고 핵무기용 물질 제조와 같은 조약의무를 위반할 경우 실질적인 논의는 IAEA와 유엔 안보리에서 이루어지게 된다.

사찰이 거부되는 등 NPT 불이행(non-compliance) 상황이 발생하면 IAEA 이사회는 해당국에게 불이행 사항을 시정하도록 요청하게 된다. 이후 해당국이 합리적 시간 내에 문제해결을 하지 못할 경우 이사회는 제재조치를 취할 수 있으며, 회원국의 특권 및 자격정지(헌장 19조 B), IAEA의 모든 지원 중단, IAEA 제공 또는 지원 물질 및 장비의 반환 요구(헌장 12조 A.7) 등이 될 수 있다. IAEA 이사회가 불이행 결정 시 IAEA 헌장 및 ‘IAEA-유엔 간 협정’에 따라 유엔 안보리 및 총회에 보고해야 한다.

IAEA 보고 접수 후 유엔 안보리는 별도 회의를 소집하여 동 사안이 국제평화와 안전에 대한 위협 문제 여부를 우선 결정하게 된다. 안보리는 해당국에 대해 NPT 조약에 기초하여 불이행 사안의 조속한 시정을 요구하고, 필요시 NPT 및 IAEA 안전조치협정 불이행 사유로 경제적, 외교적 방법을 통한 제재 여부를 논의할 수 있다. 현재까지 IAEA 이사회의 불이행 보고로 안보리가 동 문제를 논의한 사례는 북한, 이란, 이라크 등 3개국이다.

3 TPNW 조약은 핵무기의 인도적 재앙 위협 속에 핵무기의 포괄적 금지를 주장해온 국제 NGO인 ‘International Campaign to Abolish Nuclear Weapons(ICAN)’과 급진적 핵군축 국가 그룹인 ‘New Agenda Coalition(NAC: 뉴질랜드, 아일랜드, 스웨덴, 슬로베니아, 멕시코, 브라질, 이집트, 남아공)’의 주도로 2007년부터 10년간의 협상과정을 통해 제정되었다. 이로 인해 ICAN은 2017년 노벨 평화상을 수상하였다.

이와는 다른 사례로 IAEA에 신고되지 않은 한국의 우라늄 추출 사실이 2004년 사찰 과정에서 발견되어 IAEA 이사회에서 논의되었으나, 우리의 외교적 노력으로 극소량의 우라늄 추출은 일부 과학자들의 순수 연구용 분리 실험이라는 점을 설득하여 안보리 회부를 막은 적이 있다. 그러나 아직도 IAEA 등 국제 비확산회의에서 이를 한국의 불이행 사례로 계속 거론하는 나라들이 있으며, 한국이 핵무장을 시도한다면 자신들의 의심이 정당하였다고 강변할 것으로 보인다.

라. 원자력 공급국그룹(NSG)

1974년 인도의 핵실험 이후 핵확산 방지를 위해 1975년 런던클럽으로 불리는 주요 원자력 공급국그룹(NSG: Nuclear Suppliers Group)이 구성되었으며, 당시 NPT 비당사국인 프랑스를 포함하여 원자력 관련 수출통제 강화 방안에 합의하였다. 이후 원자력 관련 민감 품목의 수출통제와 물리적 방호에 대한 기준과 지침(guidelines)을 결정하고, IAEA와 협력하여 시행함으로써 핵비확산 체제 강화에 기여하고 있다. NSG는 농축·재처리 관련 장비 및 기술의 이전에 대해 특별한 주의를 요구하고 있으며, 이중용도(dual use)품목 수출 시 수입국이 농축·재처리를 위한 용도로 사용코자 하는지를 판단기준으로 들고 있다.⁴

The NSG Guidelines are sets of conditions of supply that are applied to nuclear transfers for peaceful purposes to help ensure that such transfers will not be diverted to unsafeguarded nuclear fuel cycle or nuclear explosive activities. Although NSG Guidelines are not legally-binding, NSG PGs commit to apply those Guidelines via their national legislation.

NSG는 현재 한국(95년 10월 가입)을 포함한 45개국으로 구성되어 있으며, 우리나라는 2003~2004년 및 2016~2017년 두 번에 걸쳐 NSG 의장국으로 활동했다. 이같이 NSG 내 핵심국인 한국이 민간 목적으로 사용해야 할 물질 등을 군사적 목적의 농축·재처리에 사용하게 된다면, 여타 회원국들은 한국으로의 모든 민간 원자력 품목에 대한

4 NSG는 원자력 관련 민감품목의 수출통제와 물리적 방호에 대한 기준(guidelines)을 결정하고, 이를 IAEA 문서인 INFCIRC/254로 발간하면서 1978년 1월 공식 설립되었다.

수출을 허가하지 않게 될 뿐만 아니라 회원국 자격도 박탈당할 수 있을 것이다. 원자력 발전소 24기를 운영하는 한국은 국내 원전에 필요한 핵연료 등의 수입은 물론이고 제3국으로의 원전 수출도 사실상 불가능하게 될 것이다.

마. 포괄적 핵실험 금지조약기구(CTBTO)와 유엔 안보리

대기권, 외기권, 수중 및 지하에서의 핵실험을 금지하기 위한 포괄적 핵실험 금지조약(CTBT: Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty)은 1996년 9월 24일 서명을 위해 개방되었으나, 미국, 중국, 이란, 이스라엘, 이집트는 비준하지 않았고 인도, 파키스탄, 북한은 아직 조약에 서명조차 하지 않고 있다.

CTBT는 아직 발효는 되지 않은 조약⁵이지만 당사국이 불이행할 경우 당사국회의는 동 국가의 조약상 권리 및 특권 행사를 제한 또는 정지시킬 수 있고, 그 불이행으로 인해 조약의 목적에 손상이 발생할 경우에는 집단적 조치(collective measures)를 취할 수 있다. 또한 당사국회의는 필요하다고 인정할 경우 조약 불이행 관련사항을 유엔 안보리에 제기할 수 있다.⁶ 조약 발효전이라 이 같은 절차가 정식으로 이행되고 있지는 않으나, 21세기 유일한 핵실험 국가인 북한의 6차례 핵실험 때마다 기술 사무국(Technical Secretariat)은 핵실험 내용을 전문적으로 탐지·분석해 왔으며, 북한의 핵실험 중단을 촉구하였다.

이 같은 CTBT 체제에서 북핵문제의 직접 당사국인 한국이 핵실험을 할 경우 CTBTO의 총회 성격인 PrepCom(준비회의)⁷에서 북한과 마찬가지로 한국의 핵실험을 규탄하고 핵실험 분석 내용을 보고하게 될 것이다. 1999년과 2019년 2회에 걸쳐 CTBTO PrepCom 의장직을 수임한 한국이 핵실험 금지 원칙을 스스로 위반한다면 국제사회의 신뢰는 회복할 수 없을 정도로 추락할 것이다.

2006년부터 2017년간 6차례의 핵실험과 지속적인 탄도미사일 실험을 감행한 북한을 대상으로 유엔 안보리는 헌장 7장에 근거하여 제재를 부과했다. 10개의 제재 결의

5 CTBT 발효를 위해서는 부속서 II 상 44개국(5대 핵보유국 및 인도, 파키스탄, 북한 등 발전용/연구용 원자로 보유국) 모두의 비준 필요(미국, 중국, 이스라엘, 이란, 이집트, 인도, 파키스탄, 북한 등 8개국이 미비준)

6 CTBT Article V.1-4 “Measures to redress a situation and to ensure compliance including sanctions”

7 CTBTO 준비위원회(Preparatory Commission for the CTBT)는 당초 기구의 정식 출범을 준비하기 위해 설립되었으나, CTBT의 조기발효가 어려운 상황에서 사실상 의사결정기구로서 기능해옴.

(1718호-2397호) 전문에는 ‘핵, 화학 및 생물무기와 그 운반수단의 확산이 국제평화 및 안전에 위협을 구성하고 있는 것을 재확인 한다’고 규정하면서, 헌장 7장의 41조(경제제재)에 근거 조치를 취한다고 적시되어 있다. 한국도 핵실험을 한다면 북한처럼 국제평화와 안전을 위협하는 국가로 제재 대상이 된다는 점을 상기시키는 내용이다. 전체 15개 이사국중 상임이사국(5개국)을 포함한 9개국 이상의 찬성으로 결정되는 제재 결의는 헌장 25조에 따라 모든 회원국을 구속하는(agreed to accept and carry out the decisions of the Security Council) 법적 효력을 갖는 것으로 해석되고 있다.

유엔 헌장 제7장: 평화에 대한 위협, 평화의 파괴 및 침략행위에 관한 조치(Action with respect to Threats to the Peace, Breaches of the Peace, and Act of Aggression)

(제39조) 안전보장이사회는 평화에 대한 위협, 평화의 파괴 또는 침략행위의 존재를 결정하고, 국제평화와 안전을 유지하거나, 이를 회복하기 위하여 권고하며, 제41조 및 제42조에 따라 어떤 조치를 취할 것인지를 결정한다.

(제41조) 안전보장이사회는 결정을 집행하기 위하여 병력의 사용을 배제한 각종 조치(measures not involving the use of armed forces)를 결정할 수 있으며, 유엔 회원국에 그러한 조치를 적용하도록 요청할 수 있다.

북한의 NPT 및 IAEA 탈퇴 이후 지속적인 핵개발 및 탄도 미사일 발사 실험은 NPT와 같은 국제규범에 대한 도전(challenge)일 뿐만 아니라 국제평화와 안전에 대한 위협(threat to the peace)으로 유엔 헌장에 따른 안보리 제재결의 대상으로 성립된다고 볼 수 있다.

2006년부터 2017년간 6차례의 핵무기 실험과 지속적인 탄도미사일 실험을 한 북한을 대상으로 유엔 안보리는 헌장 7장 41조에 근거하여 제재를 부과해 왔다. 안보리에서 북한 핵·미사일관련 결의를 채택한 것은 총 11건이나 2006년 7월 탄도미사일 발사에 대해 규탄 결의(1695호)는 제재 내용을 포함하고 있지 않아 현재까지 대북 제재 결의는 총 10개로 볼 수 있다. 즉, △1718호(2006.10.14), △1874호(2009.6.12.), △2087호(2013.1.22.), △2094호(2103.3.7.), △2270호(2916.3.2.), △2321호(2016.11.30.), △2356호(2017.6.3.), △2371호(2017.8.6.), △2375호(2017.9.12.), △2397호(2017.12.23.)가 있다.

바. 한·미 원자력 협정(123 Agreement)

다자 국제규범은 아니지만 2015년 개정된 한·미 원자력협정은 우리나라에 대해 미국이 원전연료 공급을 지원하도록 규정하는 한편, 장래에 미국산 우라늄을 이용한 20% 미만의 저농축이 필요하게 되면 한·미 간 협의를 통해 추진할 수 있도록 경로를 마련하였다. 하지만 한국이 핵무기용 물질 생산을 위한 농축·재처리를 시도할 경우, 이는 협정의 전면 위반이므로 미국은 한국에 대한 원자력 기술과 핵연료 제공 중단(호주, 캐나다산의 공급 포함) 등의 조치를 취할 수 있을 것이다.

인도나 파키스탄과 달리 한국의 원자력 산업은 전적으로 미국에 의존해왔다. 한국은 1954년 제정된 미 원자력법 123조에 의거해 미국이 이전한 핵물질, 기자재, 기술을 핵무기 개발 등 군사적으로 전용하는 일이 금지되어 있고, 이를 위반하거나 국제원자력 기구의 사찰 규정을 어길 경우 미국으로부터 지원 받은 모든 것을 미국에 반환해야 한다.⁸ Einhorn 전 미 국무부 비확산·군축 특보는 1998년 인도와 파키스탄의 핵실험 이후 제정된 ‘글렌 수정법(Glenn Amendment)’을 통해 핵개발 국가들에게 가혹한 제재가 전방위적으로 가해졌다고 하며, 한국이 핵무기를 갖기 위해 NPT를 탈퇴하고 핵실험을 한다면 ‘글렌 수정법’ 발동을 포함한 실질적 대가를 치를 것으로 예상했다(김지은, 2022).

사. 한·미 상호방위조약(Mutual Defense Treaty)

1954년 발효된 한·미 상호방위조약 3조는 “타 당사국에 대한 태평양 지역에 있어서의 무력 공격을 자국의 평화와 안전을 위태롭게 하는 것이라 인정하고 공통한 위협에 대처하기 위하여 각자의 헌법상의 수속에 따라 행동할 것(it would act to meet the common danger in accordance with its constitutional processes.)”을 규정하고 있다. 유사한 형태의 상호방위조약인 NATO(북대서양조약기구) 5조는 공동방위(collective defense)를 위해 미국의 자동개입 조항이 있으나, 한·미 상호방위조약에서는 미국의 자동개입이 분명히 규정되어 있지 못한 문제점이 있다.

따라서 만약 한국이 핵무장을 통해 자체 방위력을 증강할 경우 미국은 한·미 상호방위조약상 자동개입의 명분은 약해질 수밖에 없고, 유사시 헌법상 절차에서 미 의회의 승인을 받기가 어려울 가능성을 배제할 수 없을 것이다.

8 “Agreement for Cooperation between the Government of the Republic of Korea and the Government of the United States of America concerning Civil Use of Atomic Energy(2015)” 10조

2. 한국이 취할 수 있는 핵 억제력 강화 방안

상기와 같은 국제 규범 위반 등 제반 사정에 따라 한국이 자체 핵무장을 추진하지 않을 경우 한반도 비핵화 약속을 지키면서 북핵 위협에 대응할 수 있는 핵 억제력의 방법은 어떤 것이 최선일까 심각하게 대안을 찾아야 한다. 이러한 대안으로는 1) 미국의 전술 핵무기 재배치, 2) 미국의 핵우산(확장 억제력) 강화, 3) 핵 공유, 4) 한국의 원자력 잠수함 확보, 5) 한국의 전통적 억제력 강화 등을 생각해 볼 수 있다.

가. 전술 핵무기(Tactical Nuclear Weapon) 재배치

1950년대부터 1980년대까지는 주한 미군이 다양한 형태의 전술 핵무기를 한국에 배치 하였으나 1991년 한반도 비핵화 공동선언에 맞추어 핵무기를 철수했다. 기밀 해제된 미국무부 문건에는 1957년경 전술핵의 최초 배치 후 1991년 철수하기 전까지 최대 1,000기 가까이 배치되었다고 기술하고 있으나, 한·미 양국 정부 모두 주한미군의 전술핵 관련 사실을 공개한 바는 없다.

따라서 한국내 전술핵 재배치는 주한 미군의 전술 핵무기를 다시 들여오도록 하자는 것이나, 현실적으로 지난 30여 년간 미국이 추진해 온 한반도 비핵화 전략과 상충하기 때문에 미국이 동의할지가 미지수이다. 또한, 전술 핵무기 재배치는 NPT 체제 강화를 위해 노력하고 있는 현 상황에서 핵무기의 양도와 양수를 금지하고 있는 NPT 1, 2항 위반 문제와 함께 동북아 지역 내 핵무기 경쟁을 촉발할 수 있다는 우려도 제기될 수 있다.

전술핵 문제에 대해 미국 싱크탱크 ‘전략국제문제연구소(CSIS) 한반도위원회’는 2023년 1월 18일 아래 요지의 ‘북한정책과 확장억제에 대한 권고’ 보고서를 발표하였다.

- (1) 미국 저위력 핵무기 재배치 가능성에 대한 예비 결정적(pre-decisional) 기초 작업을 준비할 것을 권고: 기초 작업에는 전술핵 재배치에 필요한 핵무기 저장고 후보지 파악 및 저장 시설 준비와 핵무기 관련 보안 훈련, 주한미군 F-16 또는 F-35 전투기의 핵 탑재 인증 절차 등에 대한 도상계획 연습 포함
- (2) 이는 핵비확산 문턱을 넘지 않으면서 북한에 새로운 압박을 가할 수 있으며, 한반도에 핵무기를 재배치할지 결정하기 전 필요한 작업을 검토
- (3) 다만, 현 시점에서는 전술핵(재배치) 문제는 다른 모든 확장억제 강화 방안을 시행한 뒤 북한이 위협 수위를 높일 때에만 추진되어야 함

결론적으로 동 위원회는 전술핵 재배치나 자체 핵보유에 대한 한국 내 여론의 지지는 미국의 확장억제력에 대한 의구심 때문이라며, 이는 확장억제력 단점을 방지하는 정책을 통해 해결할 수 있다고 강조하였다. 즉, 확장억제가 효과가 있으려면 미국이 서울이나 도교를 구하기 위해 워싱턴이나 뉴욕이 위협하더라도 핵을 사용할 의지가 있다고 믿도록 해야 한다고 부연하였다(CSIS, 2023).

나. 핵우산(Nuclear Umbrella): 확장 억제능력(Extended Deterrence) 강화

핵우산이라는 개념은 확장 억제 전략을 비유적으로 이르는 용어이다. 핵무기를 가진 국가가 핵이 없는 동맹국의 안전을 보장하는 것이며, 북한이 한국에 핵 공격을 하면 동맹인 미국이 대응해서 핵 공격을 함으로써 핵전쟁을 억제한다는 개념으로 ‘한국은 미국의 핵우산 아래에 들어가 있다’라고 표현한다. 즉, 미국이 한국에 제공하는 핵우산은 한국이 북핵 공격을 받으면 미국이 핵무기로 북한을 완전히 파괴하겠다는 개념이다. 핵우산은 북한이 핵무기를 한국에 사용하면 몇 배로 핵 보복을 받을 것이란 공포심을 불러일으켜 핵공격 시도 자체를 단념시키려는 공포의 균형(balance of terror)라는 일종의 심리적 핵전략이다.

바이든 미국 대통령은 윤석열 대통령 취임 직후 한국을 방문하여, 2022년 5월 21일 개최된 한-미 정상회담에서 양국 정상은 고조되는 북핵 위협에 대한 확장억제력 확인과 전략자산 적시 배치 등에 합의하였다. 이후 한국과 미국은 2022년 9월 16일 4년 8개월 만에 열린 확장억제전략협의체(EDSCG: Extended Deterrence Strategy and Consultation Group) 회의에서 북한이 핵실험시 강력하고 단호한 범정부적 대응에 직면하게 될 것이라고 경고하였다.

2023년 4월 26일 발표된 ‘워싱턴 선언’에서도 미국은 한반도에 대한 모든 핵무기 사용의 경우 한국과 이를 협의하기 위한 모든 노력을 다할 것이며, 북한의 한국에 대한 모든 핵 공격은 즉각적, 압도적, 결정적 대응에 직면할 것임을 재확인하였다. 그리고 이러한 확장억제를 강화하고 북한의 위협을 관리하기 위해 새로운 ‘핵협의그룹(NCG)’ 설립에 합의하였다.

확장억제(extended deterrence)를 이야기할 때 미 전략자산(strategic U.S. military assets), 핵우산(nuclear umbrella) 같은 용어들이 함께 사용되고 있다. 미국 본토에 대한 적대국의 핵공격을 막는 것을 ‘직접 억제’라 한다면 미국의 동맹국에 대한 핵공격을 막는 것을 ‘확장 억제’라고 한다. 다시 말해 포괄적이고 정치적인 개념인 핵우산을 군사전략적 측면

에서 구체화한 개념이 확장억제이다. 핵우산은 핵무기가 없는 동맹국이 적대국의 핵공격을 받을 경우 미국이 대신 핵 보복 공격을 해준다는 개념으로 핵우산은 한국과 일본, 대만 등 미국과 동맹 관계에 있는 국가들이 핵개발을 하지 않은데 대한 보상으로 볼 수도 있다.

미국 제공하는 확장억제 전략자산(strategic assets)으로는 대륙간탄도미사일(ICBM), 전략폭격기(B1-B, B-2, B-52 등), 전략핵잠수함(SSBN) 등 핵 관련 무기와 사드, 패트리엇, SM-3(이즈함 탑재 요격미사일) 등 방어 시스템과 핵추진 항공모함, 재래식 전략폭격기, B-1B, 줌왈트급 구축함 등 다양한 무기 및 와 군사적 수단 등이 포함되어 있다.

미국이 한국에 핵우산을 제공하기로 처음 명문화한 것은 1978년이며, 이후 한미 국방장관은 연례안보협의회 공동성명(SCM)에 이 내용을 포함시키고 있다. 1978년 당시 미국은 박정희 정부의 핵무기 독자 개발을 막으려고 핵우산 제공을 명문화한 것으로도 알려져 있다. 2006년 10월 북한의 1차 핵실험 후 한국이 더욱 강력한 미국의 방위공약을 요구해 확장억제라는 용어가 등장했다. 확장억제 능력 강화의 일환으로 핵무기를 탑재한 미 항공모함나 원자력 잠수함 등을 한반도 주변 해역에 상시, 순환 배치하는 방안을 미측에 우리 정부가 요청한 전례가 있다. 2016년 9월 북한의 5차 핵실험 실시 후 박근혜 정부가 핵 항공모함 등 미국의 전략 자산을 한반도 주변에 상시 또는 순환 배치해 줄 것을 요구했다. 그러나 오바마 행정부가 미국의 전략 자산이 한반도에 묶여 버린다는 점과 국방비 부담을 이유로 양측 협의 끝에 전략자산을 수시로 투입하는 것으로 절충되었다. 참고로 미군 핵 항공모함 전단의 하루 운용비용은 약 80억 원이 넘을 것으로 추정되고 있다.

실제로 동맹국인 한국이 핵 공격을 받았을 때 과연 미국이 핵전쟁에 개입할 위협을 무릅쓰고 핵 공격을 해줄 것인지 불확실하다며 핵우산을 믿기 어렵다는 의견도 있다. 따라서 북한의 핵 공격이 임박하거나 감행됐을 때 실질적으로 미국의 핵우산이 펼쳐질 수 있도록 실행력을 높여 구멍난 핵우산이 되지 않도록 해야 한다는 것이 확장 억제능력의 핵심이다. 이러한 한국측의 우려를 해소하기 위해 최근 들어 미국은 북한의 위협 시 뿐만 아니라 정례적으로 전략자산들을 배치하는 계획을 밝혔고, 워싱턴 선언 이후 핵미사일을 탑재한 전략핵잠수함(SSBN: 오하이오급)을 한반도 주변 해역에 정례적으로 전개하기로 하였다.

다. 핵 공유(Nuclear Sharing)

핵 공유는 북대서양조약기구(나토-NATO: North Atlantic Treaty Organization)가 채택하고 있는 전략으로 평시에 미국의 전술핵을 핵비보유국에 배치해 놓았다가 전시에 전투기, 폭격기 등을 이용해서 공동으로 핵 공격을 한다는 개념이다. 현재 나토 회원국 가운데 독일, 이탈리아, 벨기에, 네덜란드, 튀르키예 등 5개국에 미국의 전술핵이 배치되어 있으며, 평시에는 나토 회원국 국방장관들로 구성된 핵기획그룹(NPG: Nuclear Planning Group)에서 핵 정책을 논의 하지만 유사시에 전술핵의 공격 목표, 시기 등을 결정하는 핵무기 사용의 최종 권한은 전적으로 미국이 보유하고 있다. 이 때문에 나토식 핵공유와 미군의 전술핵 배치에 별 차이가 없다는 주장도 가능하다.

나토의 핵공유는 구소련의 핵위협에 대응하기 위해 냉전시대인 1966년에 시작되었고, NPT 조약이 발효된 1970년 이전이었기 때문에 핵확산의 법적 의무 차원의 문제도 제기되지 않았다는 점도 인지할 필요가 있다. 나토 회원국 중에서 핵무기 보유국은 미국, 영국, 프랑스이고, 미국은 다른 나토 회원국들에게 핵공유 제도로 핵 억제력을 제공하고 있는 것이다. 캐나다는 1972년 북미항공우주방위사령부(NORAD)의 통제하에 미국 핵무기를 1984년까지 배치하였으며, 그리스는 2001년까지 미국과 핵공유를 했었다. 영국은 핵무기 보유국임에도 불구하고 1992년까지 미국 전술핵을 배치했었으나 이후 동 전술핵들은 독일로 이전하여 배치되었다.

2023년 1월 윤석열 대통령은 언론 인터뷰에서 북한 핵·미사일에 대응하기 위해 “한미가 미국의 핵전력을 ‘공동 기획(Joint Planning)과 공동 연습(Joint Exercise)’ 개념으로 운용하는 방안을 논의하고 있다”고 언급한 바 있다(최경운, 2023). 이와 관련, 4월 26일 발표된 ‘워싱턴 선언’에 대해 한국측이 미국 핵무기 운용에 관한 정보공유와 공동계획 메커니즘을 마련한 ‘실질적 핵공유’라고 언급하였으나, 미국 측은 이를 부인하면서 미국 입장에서 핵공유의 정의는 핵무기 통제에 관한 것이며 워싱턴 선언은 확장억제 공약의 확인이라고 언급하였다. 조태용 국가안보실장도 핵공유라는 표현은 불필요한 오해를 살 수 있으므로 ‘핵억제 동맹’으로 표현하는 것이 정확할 것이라고 하면서, 한국의 경우 전술핵무기가 들어오지 않기 때문에 전술핵무기가 나토식 핵공유와는 차이가 있다고 설명하였다(유설희, 2023).

라. 원자력 잠수함(Nuclear Submarine)

2023년 3월 13일 미국, 영국, 호주의 오커스(AUKUS) 3국 정상은 핵잠수함을 호주에 조

기 공급하는 계획을 발표하였다. 이에 따라 미국은 2030년대 초에 버지니아급 잠수함 3척을 호주에 판매하고, 필요하면 2척을 추가로 제공하기로 했다. 호주는 핵무기를 보유하지 않은 국가이며 핵잠수함에 쓰이는 원자로와 핵 원료 역시 군사용 핵시설과 물질이므로, NPT 규정을 엄격하게 따른다면 호주는 핵잠수함 도입은 어려운 측면도 있다.

그러나 IAEA의 ‘전면안전조치협정 모델’(INFCIRC/153)의 14항에 따르면 해군 함정 추진용으로 쓰이는 ‘비폭발성·군사용 핵물질’은 IAEA의 전면안전조치에서 예외가 될 수도 있다(IAEA, 1972). 군축 전문가들은 이 조항이 NPT의 허점이 될 수 있다고 지적해 왔다. 만에 하나 악의를 가진 국가가 이 조항을 악용한다면, 국제사회의 감시망을 무시한 채 핵무기로 활용될 수 있는 고농축 우라늄·플루토늄 등을 비핵무장 국가로 넘기는 수단이 될 수 있다는 이유에서다. 이 같은 우려를 불식하기 위해 호주는 자국 영토 내에 핵잠수함 훈련용 원자로를 배치하지 않고, 잠수함에 쓰인 사용 후 핵연료를 농축하거나 재처리하지 않고 원 수입국으로 보내겠다고 했다.

이에 대해 라파엘 그로시 IAEA 사무총장은 미국, 영국, 호주가 최상위의 비확산·안전조치 기준을 확실히 충족하려는 투명성 노력을 평가한 반면, 중국은 오키스의 호주에 대한 원자력 잠수함 제공은 이중 잣대의 표본이며 NPT의 의도를 명백하게 위반한 것이라고 강력히 비판하였다.

한국도 과거 노무현, 문재인 대통령 시절 북한에 대한 억제력을 높이기 위해 핵잠수함 보유를 검토한 바 있지만, 미국의 전문가들은 한국과 호주의 상황에 큰 차이가 있다는 점에서 핵잠수함 기술이 한국으로 이전될 가능성은 매우 낮을 것으로 전망하고 있다. 게리 세이모어 전 백악관 조정관은 한국이 핵잠수함 전력을 갖추는 것이 북한에 대한 억제에 특별한 역할을 할 것이라고 생각하지 않는다고 하며, 기존의 재래식 잠수함으로도 해안 방어 임무를 완벽하게 수행할 수 있다고 강조했다. 미 백악관도 미국이 핵잠수함 기술을 다른 나라로 확대할 의도가 없으며, 호주원자력 잠수함 건은 호주와 관련된 독특한 전략적 상황에 근거한 것이라고 설명하였다(박동정, 2021).

마. 한국의 전통적인 억제능력(Conventional Deterrence)

한국은 그간 북한의 위협에 대응하여 자체적으로 아래와 같이 3축(K) 방어 시스템(Kill Chain, KAMD, KMPR)을 구축해 왔다.

- (1) 예방적 선제타격 킬 체인(Kill Chain)
- (2) 한국형 미사일 방어체계(KAMD: Korea Air & Missile Defense)
- (3) 한국형 대량응징보복(KMPR: Korea Massive Punishment and Retaliation)

(1축) ‘킬체인’은 북한의 미사일과 이동식 발사대, 관제시설 등 위협 요소를 실시간 탐지해 표적을 식별하고, 결심한 후 효과적으로 파괴할 수 있는 선제적으로 신속히 타격하는 공격체계

(2축) ‘한국형 미사일 방어체계’는 북한이 발사한 미사일을 조기경보 레이더나 이지스함 레이더로 탐지해 분석한 후, 최적의 요격포대에서 임무를 수행하는 개념

(3축) ‘대량응징보복’으로 북한 전쟁지도부를 비롯한 지휘부를 겨냥한 응징보복능력

이러한 3축 체제는 독자적으로 북한의 핵 위협이나 공격을 막아내기에는 충분하지 않았지만 미국의 확장억제 전략자산 전개와 함께 결합하여 공동으로 운영된다면 실효성을 최대화(synergy)시킬 수 있을 것으로 보인다.

III. 결론

1. 한국의 핵능력 강화에 대한 미국의 입장

미국은 냉전 직후 1991년 7월 미소 간 체결된 ‘전략무기감축조약’(START-I)을 계기로 1991.9월 전술핵 철수를 공식화하였다. 이후 남북한은 1991년 한반도 비핵화 공동선언에 합의함에 따라 미국의 한반도 비핵화(남북한 모두의 핵보유 반대)라는 기본 입장에는 변함이 없다. 2023년 1월 골드버그 주한미국대사는 주한미군의 전술핵 재배치 문제와 관련 “무책임하고 위협하며 한반도 긴장완화에 도움이 되지 않는다”는 입장을 밝히고, NPT를 준수하면서 북한 핵무기 제거를 위한 비핵화에 초점을 맞춰야 한다고 지적하였다. 또한 미국은 핵전력을 포함한 확장억제 공약과 관련 철통같은 의지를 갖고 있다고 재 강조하였다(박민희, 2023).

결국 전술핵 재배치, 핵우산(확장 억제력) 강화, 핵 공유, 원자력 잠수함이든 핵무기 관련 옵션 추진을 위해서는 미국의 결정이 핵심이다. 미국의 전술핵을 한국에 다시 들여온다면 재배치가 되는 것이므로 전술핵은 한국이 원한다고 들어올 수 있는 것이 아니

고, 미국의 전략적 이해관계가 우선적이므로 모든 결정권은 미국이 갖고 있다고 볼 수 있다. 우리 정부가 다양한 제안을 하고 협의할 수는 있겠지만 결국 핵무기를 보유하고 있는 미국이 전략적으로 실행하게 될 것이며, 이는 북한의 지속적인 핵 위협을 넘어 중국, 러시아 등 주변 핵보유국들과 복잡하게 얽여 있는 지정학적 문제가 있기 때문이다.

또한 미국으로서는 주한미군 전술핵 재배치는 핵 확산이 될 수 있는 만큼 미국의 기본 핵 정책(NPR: Nuclear Posture Review)과도 부합되지 않고, 북한에 비핵화를 요구할 명분이 약해지는 것을 우려하고 있다. 비용 측면에서도 전술핵을 한반도에 새로 배치하려면 핵 보관 장소 구축 및 운영비용이 엄청나게 들어가는데 추가 국방비 투자에 어려움이 있을 것으로 보인다. 또한 국제 규범 차원에서 NPT 규정(1, 2조)도 비핵보유국이 핵무기를 보유하거나 보유국이 비보유국에 핵무기를 지원하는 것을 금지하고 있어, 미국이 한국에게 핵무기를 지원하는 것은 아니지만 재배치난 공유의 선택이 NPT 정신에 벗어난다는 우려와 논란도 있을 수 있다.

최근 러시아가 벨라루스에 전술핵 재배치를 추진 중인 상황에서 미국이 한국에 전술핵을 다시 배치하거나 나토식의 핵 공유를 고려한다면, 러시아에게도 핵이전 명분을 주어 NPT의 핵비확산 체제를 심각하게 손상시키는 결과를 초래할 수 있을 것이다. 바 이든 대통령이 지난 4월 26일 백악관 로즈가든에서 윤석열 대통령과 ‘워싱턴 선언’을 공동 발표하면서 “북한의 핵공격을 받아들일 수 없다”면서도 “한반도에 핵무기를 재배치하지 않을 것”이라고 언급하였다. 이로서 미국 정부는 ‘한반도 비핵화’라를 일관된 비확산 정책에 입각하여 한국에 전술핵을 재배치하거나 핵 공유를 추진하지 않겠다는 입장에 변화가 없을 것으로 보인다.

2. 현실적 대안으로 강화된 확장억제 확보

상기와 같은 한국이 취할 수 있는 핵 능력 강화를 위한 선택안 중 한국과 미국의 다수 전문가들과 정부 관리들의 비공식적 평가는 전술핵 재배치나 핵 공유가 사실상 어려운 상황이기 때문에 기존의 확장 핵억제 능력 강화 및 심화 방안 논의가 현실적이라는 데 의견을 같이하고 있다.

앞서 설명한 바와 같이 핵비확산 규범 및 체제의 공통점은 원자력의 평화적이 아닌 군사적 목적으로 전용하는 것을 방지하기 위해 당사국들 간 합의된 규범을 위반하는 국가에 대한 대응조치는 예외 없이 강력하다는 점이며, 그러한 점에서 우리가 핵개발로

감당할 비용(cost)은 혜택(benefit)보다 훨씬 크다는 것이다. 만약 한국이 핵무장을 통해 자체 방위력을 증강할 경우 한미 상호방위조약상 미국의 자동개입 명분은 약해지고, 미국의 핵우산 제공이 축소된다면 한국의 독자적인 국방비 부담액은 천문학적으로 늘어날 수밖에 없다는 것도 간과할 수 없을 것이다.

이러한 맥락에서 그간 한국과 미국은 일련의 고위급 안보 회의에서 북핵 위협에 대응, 미국의 전략자산을 ‘적시적이고 조율된 방식’으로 한반도에 전개하고, 대북 억제력 강화를 위한 새로운 조치를 강구하는데 합의하였다. 구체적인 조치로 확장억제전략협의체(EDSCG) 운영과 함께 미사일대응정책협의체(CMWG)를 신설하고, 북한의 핵사용 시나리오를 상정한 확장억제 수단운용연습(DSC TTX)을 매년 정례적으로 개최해 나가고 있다.

결론적으로 북핵 위협에 대응한 현실적으로 가장 바람직한 방안은 핵비확산 모범국인 한국이 NPT 등 기존 국제규범을 준수하면서 한·미 상호방위조약에 따라 지속적으로 미국과 확장 억제력을 강화하는 것이다. 이를 위해 4.26 한·미 간 ‘워싱턴 선언’에 따라 앞으로 ‘핵협의그룹(NCG)’을 수시로 개최하면서 북한의 핵 위협에 대응하여 실질적 핵 억제능력을 강화 시키는 것이 급선무라 할 수 있다. 향후 양국의 정치상황 변화에 따라 미국의 확장억제가 실제 상황에서 제대로 작동하지 않을 가능성도 있다는 우려가 있는 만큼 앞으로 NCG를 신속하고 효과적으로 운영해 나가는 것이 중요한 과제가 될 것이다. 이를 위해서는 한·미 간 구축된 새로운 동맹간 신뢰관계(Alliance in Action)가 더욱 강화되어야 함은 자명하다.

이와 동시에 북한의 재래식 군사적 위협에 대응한 자체 방어능력 제고와 함께 북핵문제의 근원적 해결을 위해 국제사회와의 공조를 통한 외교적 노력도 잊지 말아야 할 것이다. 또한 북한 핵문제와 관련 현재 유엔 안보리 등에서 중국과 러시아가 북한 입장을 옹호하는 현 상황에서는 한·미 동맹을 기초로 한·일관계 개선을 통한 한·미·일 3국 간 북핵 공조체제를 지속 강화해 나가는 것도 현실적인 대안이 될 수 있다.

참고문헌

- 강태화, “독자 핵개발 필요 77%, 북 비핵화 불가능 78%”, 중앙일보, 2023.1.31.
- 김지은, “아인혼, 한국에 경고 “NPT 탈퇴·핵실험시 대가 치를 것””, 뉴시스, 2022.11.28.
- 대통령실 보도자료, “워싱턴 선언” 전문(국문·영문), 2023.4.27.
- 박동경, “한국에 핵잠수함 기술 이전 가능성 낮아…북 억제 재래식 잠수함으로 충분”, VOA, 2021.9.22.
- 박민희, “확장억제 강화 계속 논의”, 한겨레, 2023.2.1.
- 신동익, “한국의 핵무장 추진시 NPT 등 국제규범 위반과 국익 손상 문제”, 외교광장(한국외교협회) XXIII-5, 2023.3.3.
- 오형주, “윤 대통령, 핵무장 1년내 가능하지만 NPT 존중 의무”, 한국경제, 2023.5.1.
- 유설희, “한·미 핵억제 동맹 업그레이드, 핵공유 논란에는 표현상 오해”, 경향신문, 2023.5.2.
- 윤상호, “韓, 핵개발 결단뎌 6개월내 시제품 가능”, 동아일보, 2023.1.13.
- 이봉석, “김정은, 남한은 명백한 적…핵탄두 기하급수적 증산”, 연합뉴스, 2023.1.7.
- 최경운, “한·미가 미국의 핵전력을 ‘공동기획-공동연습’ 개념으로 운용 방안 논의”, 조선일보, 2023.1.2.
- 홍승욱, “북한, 순항미사일 다수 발사, 한미훈련 종료 하루 전 시위”, 자유아시아방송(RFA), 2023.3.22.
- CSIS, “Recommendations on North Korea Policy and Extended Deterrence,” CSIS, 2023.1.19.
- IAEA, “The Structure and Content of Agreements between the Agency and States Required in Connection with the NPT,” IAEA, 1972.
- Matt Murray, “South Korea Leader Dials Back Comments on Developing Nuclear Weapons,” WSJ, 2023.1.19.
- Ramon Pacheco Pardo, “South Korea Could Get Away With the Nuclear Bomb,” Foreign Policy, 2023.3.16.

원자력 분야의 리스크정보활용 현황과 과제*

Current Status and Issues of Risk-informed Approach in Nuclear Area

양준언**

Joon-Eon Yang

우리는 자주 원자력발전소와 같은 산업 설비의 '안전'에 대해 이야기하지만 사실 안전은 공학적으로 측정할 수 없는 개념이다. 원전과 같은 복잡한 대형 설비의 안전성을 정량적으로 파악하기 위해서는 리스크 개념이 필요하다. 리스크평가와 관리 기술을 통하여 원전의 안전성과 성능을 가장 효과적이고, 효율적으로 향상할 수 있다는 것은 지난 몇십 년간 보여준 미국 원전의 운전 이력을 통하여 입증되고 있다. 본 논문에서는 리스크의 기본 개념과 이런 리스크 개념이 원자력 분야에 도입된 배경을 간략히 소개한다. 또한, 원자력 분야에서 사용되는 리스크 평가 방법인 확률론적안전성평가 방법과 리스크 평가 결과를 이용하여 원자력시설의 리스크를 효과적, 효율적으로 줄이고자 하는 리스크 관리 체제를 소개한다. 아울러 이런 리스크 평가 및 관리 결과를 외부와 소통할 때 유의할 점과 우리 사회가 원전의 리스크에 대해 어떻게 접근하여야 할지에 관한 내용을 기술했다.

주제어 확률론적안전성평가, 리스크정보·성능기반접근방식, 리스크평가, 리스크관리, 리스크 소통

Keywords Probabilistic Safety Assessment, Risk Information/Performance-Based Approach, Risk Assessment, Risk Management, Risk Communication

투고일 2023.4.21. 수정일 2023.5.27. 게재확정일 2023.5.28.

* 이 성과는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임(No. 20224B10200050).

** 한국원자력연구원(jeyang@kaeri.re.kr)

I. 안전과 공학적 리스크 개념의 차이

우리는 자주 원자력발전소(원전) 혹은 비행기와 같은 산업 설비의 ‘안전’에 대해 이야기한다. 하지만 사실 안전은 공학적으로 혹은 정량적으로 측정할 수 없는 개념이다. 우리가 느끼는 안전이란 어떤 산업 설비로 인한 위험에 관해 알려진 객관적 사실(Fact)보다도 그 설비에 대한 우리의 인식, 선입견 혹은 감성에 의해 좌우되는 부분이 많다. 따라서 우리는 어떤 산업 설비의 안전 수준을 정확히 파악하기 위해서 정량적으로 표현할 수 없는 ‘안전’이 아니라 그 설비로 인해 유발될 수 있는 잠재적 피해를 정량적으로 표현할 수 있는 ‘리스크(Risk, 위험도)’¹를 평가해야 한다. 이때 리스크라는 용어는 ‘어떤 요인에 의해 미래에 발생할 잠재적 손실’을 의미하며 공학적으로는 다음과 같은 식에 의해 정량적으로 정의된다(양준언, 2023a).

$$\text{리스크} = \text{어떤 사고의 발생 가능성(확률, 빈도)} \times \text{해당 사고의 영향(피해, 손실)}$$

예를 들어 국내 자동차 사고에 의한 사망 리스크는 연간 자동차 사고 발생빈도 20만 번과 자동차 사고당 사망자 수 0.015명을 곱해 3,000명/년으로 평가될 수 있다.

모든 산업 설비는 사회에 편익을 제공하는 동시에 그 사회에 피해를 가져올 수도 있다. 우리는 사회에 도입되는 산업 설비에 다양한 안전 조치를 취함으로써 해당 설비의 도입 때문에 사회에 부과되는 리스크를 줄이고자 노력한다. 그러나 우리가 아무리 다양한 안전 조치를 추가해도 어떤 산업 설비의 리스크를 완전히 없앨 수는 없다. 안전 계통을 구성하는 기계가 고장이 나기도 하고, 설비를 운전하는 사람이 실수할 수도 있다. 따라서 사회가 어떤 설비를 수용할 것인가 거부할 것인가는 그 설비가 사회에 제공하는 편익의 규모와 해당 설비의 리스크 수준에 따라 결정하는 것이 사회 전체의 안전과 편익을 최대화하는 가장 과학적인 접근 방법이라고 할 수 있다. 현재 산업 설비의 리스크 평가(Risk Assessment) 기술이 가장 발전한 분야는 원자력 분야이다. 이는 사고는 잘 발생하지 않지만, 일단 사고가 발생하면 그 영향이 클 수 있는 원전사고의 특성 때문에 원전의 종합적인 안전성은 리스크 관점에서 평가할 수밖에 없기 때문이다.

1 국내에서는 리스크를 ‘위험도’로 표현하기도 하나, 리스크 용어의 개념을 정확히 표현하기에 부족한 점이 있어 본 논문에서는 리스크라는 용어를 사용한다.

II. 원자력 분야의 리스크 개념 도입 배경

원전 개발 초기 단계부터 원전의 안전성 확보에서 가장 중요한 개념은 ‘설계기준사고’²이다(IAEA, 2009). 설계기준사고란 원전을 설계, 건설할 때 고려 되는 사고이다. 원전은 설계기준사고와 안전 계통의 단일고장이 동시에 발생해도 원전의 안전이 유지되도록 설계 및 건설되어야만 한다³(IAEA, 2009). 원전의 안전을 지키는 또 하나의 중요한 기본 원칙은 ‘심층방어’ 개념이다. 심층방어란 전쟁에서 적의 진격을 막기 위한 방어선을 하나만 만드는 것이 아니라 여러 겹으로 만드는 것처럼 원전의 안전을 지키기 위한 방어 체계를 여러 단계로 구성하는 것을 의미한다. 심층방어는 만약 원전에서 설계기준사고가 발생해도 여러 겹의 방어선을 통해 원전의 사고가 중대한 상태로 진행되는 것을 방지한다는 개념이다. 혹은 사고가 설계기준사고를 초과해 원전의 핵연료가 녹는 ‘중대사고’⁴로 진행되어도 원전의 최종 방벽인 격납건물과 주변 주민의 효과적 대피 등을 통해 방사성 물질의 누출에 따른 피해를 최소화하고자 하는 것이 심층방어 개념이다.

그러나 1979년에 발생한 미국의 TMI 원전사고 이후 설계기준사고에 대한 대비만으로 원전의 안전을 확보하는 것이 가능한가 하는 의문이 제기되었다. TMI 원전사고 이전에는 설계기준사고와 심층방어 개념을 통해 원전의 안전성을 확보할 수 있다고 원자력계는 생각했다. 앞서 기술했듯이 설계기준사고를 분석할 때는 관련 안전계통의 단일고장만을 고려하며, 여러 개의 고장이 동시에 발생하는 다중고장은 고려하지 않는다. 그러나 TMI 원전사고는 설계기준사고와 같은 큰 사고가 발생하지 않아도 계통의 고장, 운전원의 실수 등 몇 가지 사건이 겹치면 원전의 중대사고를 유발할 수 있다는 것을 보여주었다(NRC, 2016).

이에 따라 TMI 원전사고는 기존의 원전 설계 방식, 안전 확보 개념을 되돌아보는 계기가 되었다. 특히 사고 발생 4년 전인 1975년에 미국에서 발간되었던 세계 최초의

2 설계기준사고란 원설 설계·건설에서 고려하여야 하는 가상사고들을 의미한다. 원전은 원전에서 이들 가상 사고가 발생하여도 공중의 보건과 안전을 보장하는 데 필요한 구조, 계통 및 기기의 손실이 없도록 설계 및 건설되어야만 한다.

3 이를 단일고장가정(Single Failure Criteria)이라 부른다. 이는 원전의 어떤 안전계통에서 하나의 고장이 발생하여도 해당 안전계통이 본래의 기능을 수행할 수 있어야 한다는 설계 요건이다.

4 중대사고란 설계기준사고보다 훨씬 높은 수준에서 안전 계통에 문제를 일으킬 수 있는 사고 유형으로, 일반적으로 원전의 핵연료가 손상되면 중대사고가 발생한 것으로 간주한다.

원전 리스크 평가 보고서인 WASH-1400에서 1979년에 TMI 원전에서 실제 발생한 사고경위가 동일 유형의 원전에서 가장 리스크가 높은 사고경위로 이미 평가되어 있었다는 점에서 TMI 원전사고는 논란의 대상이 되었다(NRC, 1975). 이에 따라 TMI 원전사고 이후 미국 규제기관은 리스크 개념을 원자력의 안전 확보를 위한 중요 개념으로 규제에 도입했다. 이는 기존의 설계기준사고를 기반으로 하는 원전 안전 확보 체계가 원전에서 발생 가능한 다양한 사고의 영향을 모두 파악하는 데에는 한계가 있으므로 리스크 개념을 활용해 그 한계를 보완하기 위한 것이다.

III. 원자력 분야의 리스크 평가 방법

WASH-1400 이후 원자력 산업계에서 사용되는 원전의 리스크 평가 방법은 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)⁵라고 불리는 방법이다. PSA 방법은 TMI 원전사고 이후 전 세계에서 원전의 리스크 평가에 사용되고 있다. PSA는 이론적으로는 원전에서 발생 가능한 모든 사고경위를 파악하고 그 사고경위의 발생 확률과 영향을 종합함으로써 원전사고로 인해 발생할 수 있는 미래의 잠재적 손실과 피해, 즉 리스크를 종합적으로 평가하는 기술이다.

현재 원자력계에서 사용되는 PSA의 분류가 [표 1]에 나와 있다. 현재 PSA는 평가 범위에 따라 [그림 1]에 나와 있는 바와 같이 원자로 핵연료(노심)의 손상 빈도를 평가하는 ‘1단계 PSA,’ 격납건물 파손 빈도와 방사성 물질 누출량을 평가하는 ‘2단계 PSA,’ 그리고 외부로 누출된 방사성 물질이 주변 주민과 환경에 미치는 영향을 평가하는 ‘3단계 PSA’로 구분한다. 그리고 원전이 정상적인 운전 상태(100% 출력 상태)에 있을 때와 출력을 낮추었거나 정지한 상태에 대한 PSA를 구분해 ‘전(全) 출력 PSA’와 ‘정지저출력 PSA’로도 구분한다. 또한, PSA 방법은 리스크를 유발하는 원인에 따라 ‘내부사건 PSA’와 ‘외부사건 PSA’로 구분한다. 내부사건 PSA는 기계의 고장이나 운전원의 실수로 원전이 정지된 이후 핵연료 손상으로 발전할 수 있는 사고경위의 발생 가능성과 영향을 평가하는 PSA이다. ‘내부 화재 PSA’란 원전 내부에서 화재가 발생했을 때의 사고경위와 화재 영

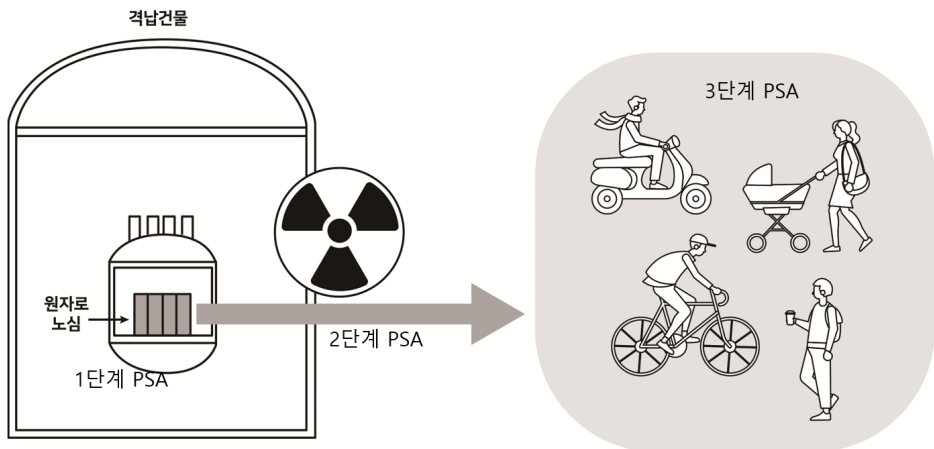
5 미국에서는 PSA라는 용어를 쓰지 않고 PRA(Probabilistic Risk Assessment)라는 용어를 사용하는데 동일한 기술을 의미한다. 대부분의 국가와 IAEA 등 국제기구는 PSA라는 용어를 사용한다.

[표 1] PSA의 분류

운전 상태	원인	단계		
		1단계	2단계	3단계
전 출력	내부 사건	내부 사건(냉각재 상실사고, 과도사건)		
		내부 침수		
		내부 화재		
	외부 사건	지진		
기타 외부 재해(외부 침수, 강풍 등)				
정지/ 저출력	내부 사건	내부 사건(냉각재 상실사고, 과도사건)		
		내부 침수		
		내부 화재		
	외부 사건	지진		
기타 외부 재해(외부 침수, 강풍 등)				

(PSA의 수행 범위는 PSA의 목적과 각국의 규제 요건에 따라 달라진다. 현재 국내는 신규원전에 대해서는 3단계 PSA까지 수행하여야 한다.)

[그림 1] 1~3단계 PSA 범위



자료: 양준언(2023a)

향을, ‘내부 침수 PSA’란 원전 내부의 배관 혹은 탱크 등이 파손되어 기계나 계통 등이 물에 잠길 때의 사고경위와 영향을 평가하는 PSA이다. ‘지진 PSA’란 지진의 발생 가능성과 지진이 발생할 때의 사고경위와 영향을 평가하는 것이다. 이 이외에도 원전이 있는 지역의 특성에 따라 토네이도 PSA 등 그 지역의 특성을 고려한 외부사건 PSA가 추가되기도 한다(양준연, 2023a).

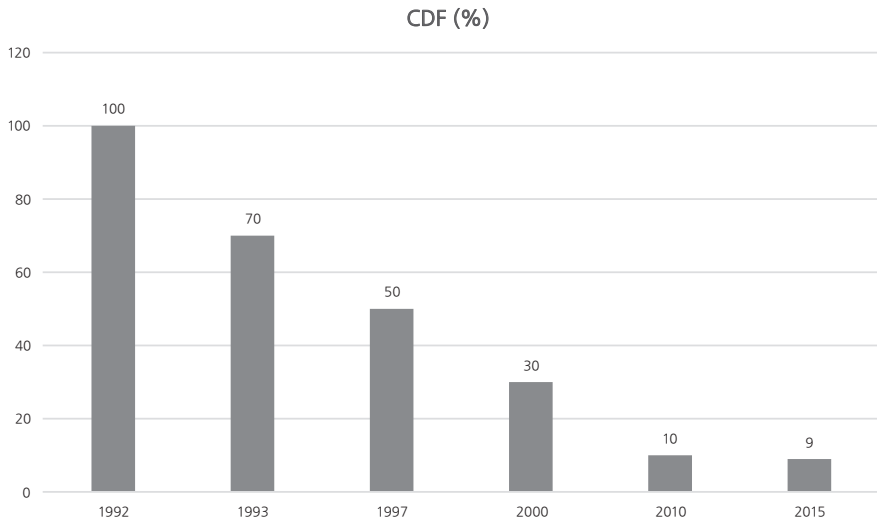
PSA는 미래의 잠재적 위험을 다루기 위해 확률을 사용한다. 따라서 리스크 평가는 확률의 본질적인 속성상 불확실성이 존재한다. 그러나 현재의 PSA 기술은 현재 우리가 사용할 수 있는 최고의 과학·공학 기술을 활용해 원전의 잠재적 위험 수준을 평가하고 있다. WASH-1400 보고서의 여러 문제점을 지적했던 루이스 보고서(NRC, 1978)에서도 PSA 기술이 적절한 신뢰도 자료와 함께 사용된다면 원전 리스크 평가를 위한 최고의 도구임을 인정하고 있다. 현재도 PSA가 원자력 분야만이 아니라 NASA 등 항공·우주 분야와 같이 복잡한 산업 설비의 리스크 평가에 활발히 사용되고 있음을 보면 이 판단은 아직까지도 유효하다고 할 수 있다(NASA, 2002).

IV. 원자력 분야의 리스크 관리 체계

우리가 PSA를 수행하는 목적은 PSA를 통해 단순히 원전의 리스크 수준을 확인하는 것이 아니다. 우리의 궁극적인 목표는 리스크 평가를 통해 해당 원전의 리스크에 크게 영향을 미치는 요인을 파악하고 이에 대한 개선 방안을 도출함으로써 원전의 리스크를 더욱 줄이고자 하는 것이다. 이와 같은 작업을 리스크 관리(Risk Management)라고 부른다. 리스크 관리는 리스크 정보를 활용해 원전의 규제와 운영을 좀 더 효과적(Effective), 효율적(Efficient)으로 개선하고자 하는 시도라고 할 수 있다.

미국은 1995년에 PRA 정책성명을 내며 원자력 규제 체제를 리스크정보활용 규제(Risk-informed Regulation) 체제로 전환할 것을 천명했다(NRC, 1995). 이후 리스크 정보를 활용해 규제 의사결정을 하고, 아울러 원전의 성능(Performance)을 감시해 의사결정의 타당성을 검증하는 리스크정보활용·성능기반방식(Risk-informed·Performance-based Approach: RIPBA)로 발전했다. RIPBA란 PSA 등을 이용한 리스크 평가 결과와 성능감시 결과를 기반으로 원자력시설의 리스크를 최소화하기 위한 리스크 관리 체제라고 할 수 있다.

[그림 2] 미국 원전의 평균 CDF 변화 추이



미국 원자력학회에서 2020년 5월에 발간한 ‘원자력 뉴스(Nuclear News)’에 RIPBA를 도입한 이후 나타난 미국 원전의 안전성과 성능 향상 결과를 보여주는 기사가 나와 있다(True and Butler, 2020). 이 기사에 따르면 RIPBA의 도입 이후 현재 미국 원전의 안전성은 [그림 2]에 나와 있듯이 미국 원전의 평균 노심손상빈도(Core Damage Frequency: CDF)⁶ 측면에서 1990년대 대비 1/10로 감소하는 정도까지 안전성 향상을 이루었다고 한다. 이는 개별 원전 PSA 결과에 따른 안전성 향상 조치, 운전 효율성 및 설비 개선 등 다양한 조치를 통하여 달성되었다. 또한, 1980년대 미국 내 원전의 불시정지⁷가 평균 연 7.8회 정도였지만 2010년대 후반에는 원전의 불시정지가 한 번도 발생하지 않은 해가 3년 연속으로 있는 등 성능 측면에서도 역사상 가장 뛰어난 성과를 보인다고 기술하고 있다. 대부분의 미국 원전이 1960~70년대에 운전을 시작하여 현재 미국 원전의 평균 운전 기

6 노심손상빈도(CDF)란 TMI 원전사고와 같이 원전 핵연료의 현저한 손상(노심손상)을 초래하는 중대사고의 연간 발생빈도에 대한 평가 결과이다.

7 불시정지란 가동 중인 원전이 기계 고장, 인간 실수 혹은 지진과 같은 자연재해로 계획하지 않았던 원자로 정지가 발생하는 사건을 의미한다.

간이 40년이 넘는 것을 고려하면 현재 미국 원전의 안전성과 성능은 놀라운 수준이라고 할 수 있다.

미국이 RIPBA를 도입한 이후 우리나라를 포함해 일본, 중국, 스페인, 멕시코 등 원전을 보유한 세계 여러 나라가 미국의 RIPBA와 같은 제도를 도입하기 위해 노력하고 있지만, 아직도 미국 수준으로 RIPBA 제도를 운영하는 나라는 없는 것으로 보인다. RIPBA가 미국을 제외한 다른 나라에서는 아직 성공적으로 정착되지 못하고 있는데에는 여러 이유가 있을 것이다. 기존에는 여러 나라에서 RIPBA를 도입하면서 주로 미국의 다양한 RIPBA 관련 제도 중 각국 상황에 맞추어 선별적으로 몇 개의 제도만을 도입하는 방식으로 추진되어왔다. 그러나 이와 같은 방식으로는 리스크정보활용 보안(Risk-informed Security) 등 계속 진화, 확장하는 미국의 RIPBA 체제의 장점을 구현하기는 쉽지 않다.

우리나라도 2000년대 RIPBA의 도입을 추진하였으나(원자력안전기술원, 2010) 2011년의 후쿠시마 원전사고 이후 이에 대한 논의가 중단되었다. 그러나 현재 다양한 사회적·기술적 요인으로 원전 운영에 어려움을 겪고 있는 우리나라의 입장에서는 미국 원전이 RIPBA를 통하여 어떻게 현재와 같은 수준의 안전성과 성능 수준을 살펴보는 것은 의미 있는 일이라고 할 수 있다. 우리나라와 같은 RIPBA 체제 관련 후발국 입장에서는 미국의 RIPBA 체제의 도입 및 발전 과정을 체계적으로 심층 검토함으로써 미국이 RIPBA 체제를 도입하며 겪은 시행착오를 회피하고 국내 고유 환경이 반영된 좀 더 효율적인 RIPBA 체제를 구축하는 것이 가능할 것으로 생각된다(양준연 외, 2016). 예를 들어 현재 한국원자력학회에서는 ‘규제 효율성 향상을 위한 국내 규제 체제 개선안 도출’ 과제를 수행 중으로, 이 과제에서는 (1) 정비규정, (2) PSA 표준 및 품질 개선, (3) 원자로 감시절차(Reactor Oversight Process: ROP) 순으로 RIPBA 제도를 도입하는 것을 제안하고 있다(양준연, 2023b).

V. 원자력 분야의 리스크 소통

우리가 원전의 리스크 평가와 관리를 훌륭히 수행한다고 해도 한가지 문제가 남는다. 즉, 리스크 평가 및 관리 관련 내용을 상위의 의사 결정자 혹은 주민 등 외부의 관련자에게 어떻게 잘 전달할 것인가 하는 문제이다. 따라서 보통 리스크 분야의 3대 중요 요소

를 (1) 리스크 평가, (2) 리스크 관리 및 (3) 리스크 소통(Risk Communication)이라고 이야기한다. 이는 리스크 평가와 관리에 관해 원자력계 내외부와 적절히 소통하는 것이 리스크 평가·관리만큼이나 중요하다는 것을 의미한다.

그러나 일반 대중은 물론 원자력 전문가라도 리스크 분야를 전공하지 않은 사람이 리스크 개념과 철학을 명확히 이해하기는 쉽지 않다. 특히 어떤 위험 요인의 리스크에 대해 일반인과 안전 전문가 사이의 인식 차이가 크다는 사실은 리스크 소통 분야에서 이미 오래전부터 알려진 문제이다. 예를 들어 똑같이 방사선이 관련된 엑스레이(X-ray)와 원전의 리스크에 대해 일반인과 전문가 사이의 인식 차이를 들 수 있다(Slovic, 1987). 전문가들은 엑스레이에 과다 노출되는 것에 따른 안전성 문제를 우려하지만, 원전의 안전성에 대해서는 그리 큰 우려를 하지 않는다. 그러나 일반인들은 일상에서 친숙해진 방사선인 엑스레이보다는 이해하기 어려운 원전의 방사선 문제에 대한 우려가 훨씬 크다.

이처럼 일반인과 전문가 사이에 리스크에 대한 인식 차이가 나타나는 것은 각자 리스크의 크고 작음을 느끼는 기준이 다르기 때문이다. 일반적으로 전문가들은 공학적 정의에 따른 리스크를 기준으로 문제를 판단한다. 반면에 일반인들의 리스크 인식은 (1) 재해의 규모, (2) 재해에 대한 이해 수준, (3) 재해에 대처하는 기관에 대한 신뢰도, (4) 재해에 대한 언론의 관심과 같은 요소의 영향을 받는다고 알려져 있다(NRC, 2004).

이와 같은 요소를 고려하면 일반 국민이 원전이 위험하다고 느끼는 것은 당연하다고 볼 수 있다. 후쿠시마 원전사고에서 보듯이 원전사고에 따른 재해의 규모는 매우 방대하다. 또한, 일반인이 눈에 보이지 않는 방사선과 그 피해를 이해하기는 쉽지 않다. 아울러 원자력에 대해 우호적이지 않은 언론 보도도 많다. 2012년도의 고리 정전 사고 은폐 사건과 같이 원자력계가 스스로 원자력 관련 기관에 대한 국민의 신뢰 저하를 자초한 면도 있다. 이와 같은 상황에서 원자력을 운영하거나 규제하는 기관에 대한 일반 대중의 신뢰도 높지 않다. 리스크 소통은 단순히 리스크 분야 전문가만의 영역이 아니라 사회·심리적인 접근이 필요한 분야이다. 원자력에 대한 국민 수용성을 높이기 위해서는 리스크 소통을 위한 종합적인 접근이 필요한 상황이다.

VI. 결론

본 논문에서는 원자력 분야의 리스크 평가 방법, 리스크 관리 체제 및 리스크 소통에 관해 간략히 소개했다. 우리가 어떤 설비에 대해 안심하고 있다고 해서 그 설비가 실제 안전한 것이 아닐 수도 있고, 반대로 어떤 설비가 실제 안전하다고 해서 일반 대중이 안심하는 것도 아니다. 1998년도에 영국에서 웨이크필드란 의사가 어린이의 자폐증이 홍역 등의 백신과 관련이 있을 수 있다는 논문⁸을 발표했고, 이는 유럽 국가에서 백신 접종 거부 운동으로 발전했다. 유럽의 홍역 발생자 수는 1990년대는 거의 무시할 수준이었으나, 2018년도에는 접종 거부 운동의 영향으로 4만 명 이상의 환자가 발생했다. 즉, 어떤 의사결정이 관련 사안에 대한 정확한 과학적 이해가 없이 이루어지는 것은 최종적으로는 사회의 리스크를 높이는 결과를 가져올 수 있다(백원필 외, 2021).

우리는 어떤 설비를 사회에 도입하면 그 설비의 도입에 따른 리스크가 부수됨을 이해해야 한다. 그리고 앞서 이야기하였듯이 사회가 어떤 설비를 수용할 것인가 거부할 것인가는 리스크 관점에서 접근하는 것이 가장 이성적인 접근 방법이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 어떤 설비에 대해 우리 사회가 용인할 수 있는 리스크 수준에 대한 사회적 합의를 이뤄야 한다.

한국은 원전의 리스크 관련 안전목표로 소위 0.1% 규칙을 사용하고 있다(원자력안전위원회, 2017). 0.1% 규칙은 1개의 새로운 원전으로 인해 추가되는 리스크가 사회 전체의 기존 리스크에 비교해 1/1000 이하일 것을 요구한다. 예를 들어 한 개의 새로운 원전이 운전됨에 따른 암 발생률의 증가분은 기존 암 발생률의 1/1000 이하여야 한다는 것이다. 현재 국내 원전의 리스크 수준은 이 안전목표를 충분히 만족하는 수준이다.

노벨 경제학상 수상자인 맨큐는 그의 저서 ‘경제학 원론(Mankiw, 2009)’에서 리스크와 관련하여 다음과 같이 조언하고 있다. ‘인생은 도박으로 가득하다. 스키를 타러 가면 넘어져 다리가 부러질 리스크가 있다. 출근길에 운전할 때는 교통사고의 리스크가 있다. 저축한 돈을 주식 시장에 투자하면 주가가 하락할 리스크가 있다. 이러한 리스크에 대한 합리적인 대응은 어떤 대가를 치르더라도 리스크를 피하는 것이 아니라 의사결정 시 이를 고려하는 것이다.’

8 웨이크필드의 논문은 전혀 과학적인 근거가 없는 논문이었고 그 논문은 결국 그 논문이 실렸던 학술지로부터 취소가 되었다.

참고문헌

- 백원필, 양준언, 김인구, 『후쿠시마 원전사고의 논란과 진실』, 동아시아, 2021.
- 양준언, 『원자력시설의 리스크 평가와 활용』, 서울대출판문화원, 2023a(출판 예정).
- 양준언, “규제 효율성 향상을 위한 국내 규제 체제 개선안 도출”, 한국원자력학회, 2023b(출판 예정).
- 양준언, 황태석, 이창주, 나장환, 김명로, “국내 원자력시설 위험평가와 관리 분야 발전방안 보고서”, 한국원자력학회 원자력 열수력 및 안전 분회, 2016.
- 원자력안전기술원, “리스크정보활용 규제(IRR)에 관한 정책보고서”, KINS/AR-911, 원자력안전기술원, 2010.
- 원자력안전위원회, “사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정”, 고시 제2017-34호, 원자력안전위원회, 2017.
- IAEA, “Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants,” IAEA, No. SSG-2, IAEA, 2009.
- IAEA, “Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements,” No. SSR-2/1 Rev.1, IAEA, 2016.
- N. Gregory Mankiw, “Principles of Economics,” South-Western Cengage Learning, 2009.
- NASA, “Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners,” NASA, 2002.
- NRC, “Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NUREG-75/014 (WASH-1400),” NRC, 1975.
- NRC, “Risk Assessment Review Group Report to the U.S. NRC,” NRC, 1978.
- NRC, “Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities: Final Policy Statement,” NRC, 1995.
- NRC, “Effective Risk Communication: The Nuclear Regulatory Commission’s Guideline for External Risk Communication,” NUREG/BR-0318, NRC, 2004.
- NRC, “WASH-1400 The Reactor Safety Study: The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactors,” NUREG/KM-0010, NRC, 2016.
- P. Slovic, “Perception Of Risk,” *Science*, Vol. 236, American Association for the Advancement of Science, 1987.
- Doug True and John Butler, “The Nexus between Safety and Operational Performance,” *Nuclear News*, ANS, 2020.

원전 강국을 위한 원전수출체계 개편방안

Restructuring Nuclear Industry for the Enhancement of Nuclear Power Plant Export Competitiveness

이종호*

Jongho Lee

지구온난화 방지를 위한 탄소중립 실현과 최근의 우크라이나 전쟁으로 인한 에너지안보는 세계적으로 원전의 역할에 대하여 다시 인식하는 계기가 되었으며 국제기구는 2050년까지 600GW의 신규원전이 건설될 것으로 예측하고 있다. 최근 예상되는 신규원전 시장을 두고 미국, 프랑스, 러시아 등 원전 수출국 간의 경쟁은 치열한 반면, 우리나라는 오히려 탈원전정책 등으로 원전산업계의 경쟁력이 약화되었으며 원전수출 산업체계도 기술자립 시 구축된 체계를 그대로 유지하고 있어 시대에 적합하게 변화한 외국기업에 비해서는 비효율적인 면이 지적되고 있다. 따라서 본 정책 논문에서는 우리나라 원전산업 발전역사와 현행 체계의 문제점을 검토하고 우리나라 전력산업체계의 틀은 유지하며 일사불란하고 효율적인 원전산업체계 개편 대안을 검토하고 가장 바람직한 방안으로 원전 중간지주회사 설립방안을 제시하였다.

주제어 원전수출체계, 원전수출체계 개편방안, 원전시장 전망, 원전개발 역사

Keywords Nuclear Industry in Korea, Reorganization of Nuclear Industry, Nuclear Power Market Outlook, History of Nuclear Power Plant Development

투고일 2023.5.9. 수정일 2023.5.29. 게재확정일 2023.5.30.

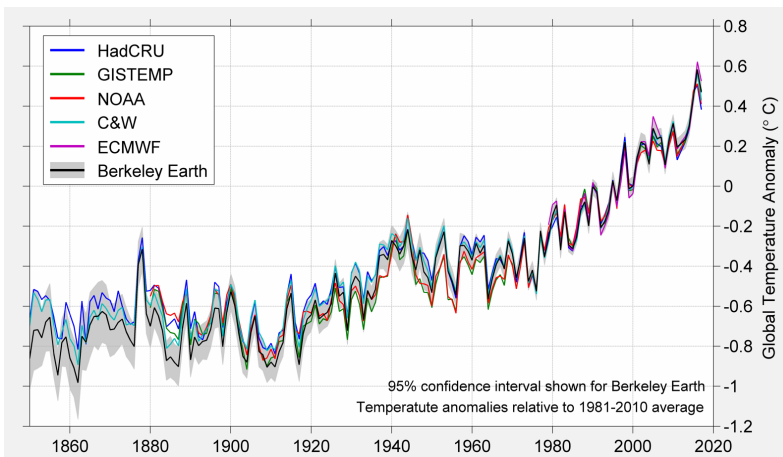
* 서울대학교 원자력미래기술정책연구소 책임연구원(jhlee6108@snu.ac.kr)

I. 탄소중립의 현실적인 대안 원자력

산업혁명 이후 지속적인 지구 온도의 상승은 화석연료 사용증가가 지구 온난화의 원인이라는 것을 이제는 더 이상 부정하기 어렵게 되었다. 세계 다양한 기관에서 독립적으로 측정 또는 추정한 지구 온도 이력을 보면 일관되게 산업혁명 이후 지구 온도는 1°C 이상 상승된 것으로 나타난다(그림 1). 그러한 현상은 최근에 더욱 가속화되어 지난 40년간 지구온도 상승은 0.75°C나 증가하였고 대기 중 이산화탄소 농도는 400ppm을 훌쩍 넘었다. 이 이산화탄소의 증가 추이는 문명의 발전에 따른 인류의 에너지 사용 증가와 합치되는 것이다. 결국 2015년 12월 프랑스 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21: Conference of the Parties 21)에서 197개 국가는 지구 온실가스 배출을 줄여 세기 내 지구 온도 상승을 2°C로 제한하면서 가능한 경우 증가율을 1.5°C로 감소하는 것을 주요 골자로 하는 ‘파리 협정(Accord de Paris)’을 채택하였다. 아울러 세계 각국은 국가온실가스감축 목표를 유엔에 제출하였고 2021년 파리협정의 본격적 이행에 앞서 2020년까지 이를 갱신하길 합의한 바 있다.

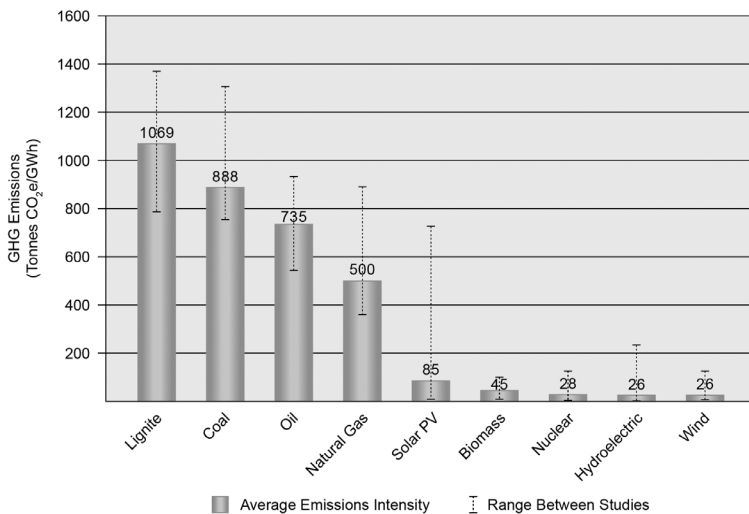
이에 우리나라는 2020년 10월, ‘2050년까지 탄소중립’을 선언하였고 2021년 10월, 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축하는 국가온실가스감축목표(NDC)를 정하여 지난

[그림 1] 산업혁명 이후 지구의 온도 변화



해 11월 제26차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP26)에서 국제사회에 발표하였다. 그러나 우리나라는 당시 정부의 탈원전정책의 영향으로 2050년 전체 발전량 중 재생에너지 비중을 60~70%로 하고 원전의 비중은 6~7%로 하는 2050년 탄소중립 방안을 제시하였다. 그러나 [그림 2]에서 보듯이 원자력이 태양광, 풍력과 더불어 대표적인 무탄소 전원임에도 불구하고 우리나라의 경우는 탈원전 정책을 기반으로 2050년 발전계획을 수립한 것이다. 이후 여러 전문가는 에너지섬처럼 독립된 전력계통인 우리나라에서 재생에너지를 60~70%로 유지하는 것은 국가의 재생에너지 부존자원과 안정적 전력계통 유지를 위해서 비현실적이며, 필요한 배터리 및 무탄소전원(예 수소터빈 발전) 등을 유지하기 위해서 수천 조원의 투자비가 필요한 비경제적 계획이라고 지적하였다. 그러나 다행히 새롭게 탄생한 정부에서는 원전을 확대하고 원자력과 재생에너지의 조화로운 전원구성을 통해 탄소중립을 달성하기로 하고 원전 10기 수출을 통해 원전 강국을 지향하는 정책을 추진하고 있다.

[그림 2] 발전원별 이산화탄소 배출량



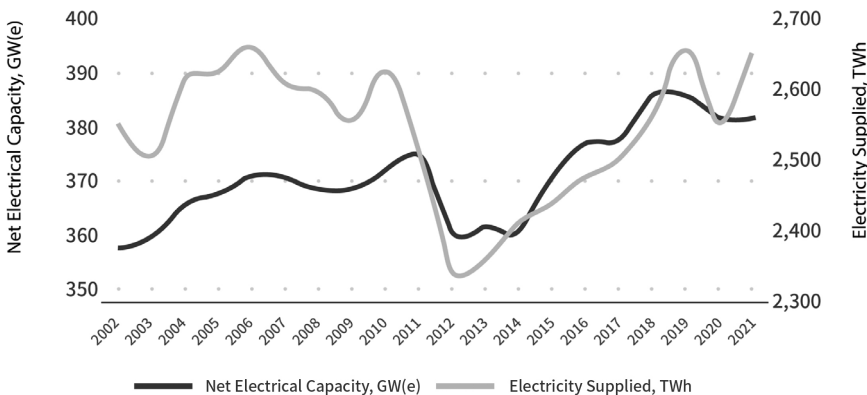
출처: WNA(2011)

II. 세계 원전 현황 및 시장 전망

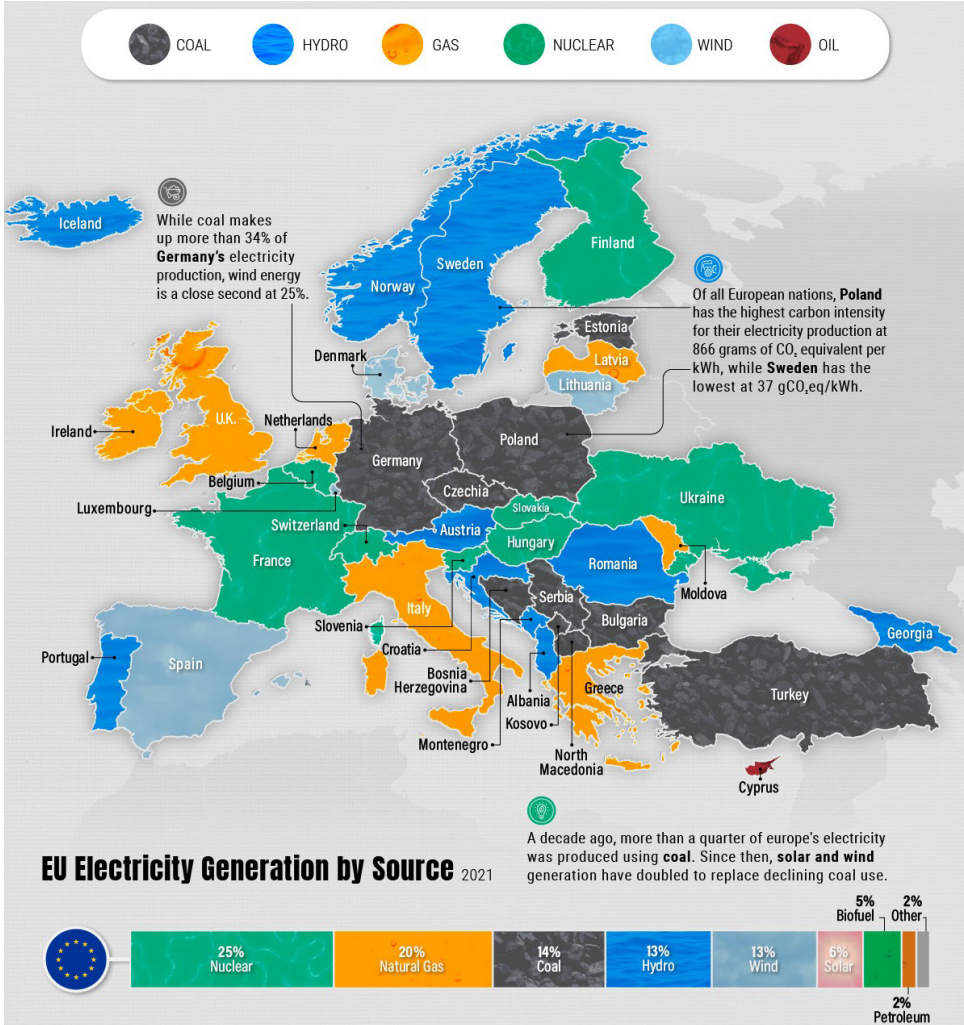
1. 세계 원전 현황

세계적인 의 원전에 의한 전력공급 비중설비량은 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 잠시 주춤하다 다시 증가 추세에 있다. 특히, 우크라이나 사태로 인해 에너지 안보의 중요성이 부각된 이후 많은 국가가 원전을 다시 건설하고자 하고 있다. 2021년 기준 세계적으로 원전에 의한 전력공급은 총 2,653TWh로 총 전력공급량의 10% 정도를 유지하고 있으며 총 431기의 원전이 운영되고 있다(IAEA, 2023). 그러나 원전을 보유하기 위해서는 그 나라의 경제적 규모뿐만 아니라 기술적 수준까지도 일정 수준이 되어야 하여 현재는 세계 32개국에서만 원전을 운영하고 있는 실정이다. 참고로 유럽의 경우를 살펴보면 2017년에서 2021년까지 공급한 전력의 전원별 구성비를 살펴 보면 원전이 가장 많은 25%를 차지하고 있고 다음이 천연가스로 20%이다. 원전은 특성상 아직 선진국에서만 이 주로 채용할 수 있다는 점을 고려할 때 재생에너지로의 전환을 서두르고 있는 유럽의 경우 원전의 중심에너지임을 알 수 있다.

[그림 3] 연도별 세계 원자력 발전 설비 및 발전량



[그림 4] 유럽의 국가별 최대 공급발전원(2017~2021)



출처: Niccolo Conte(2023)

2. 원전 시장 전망

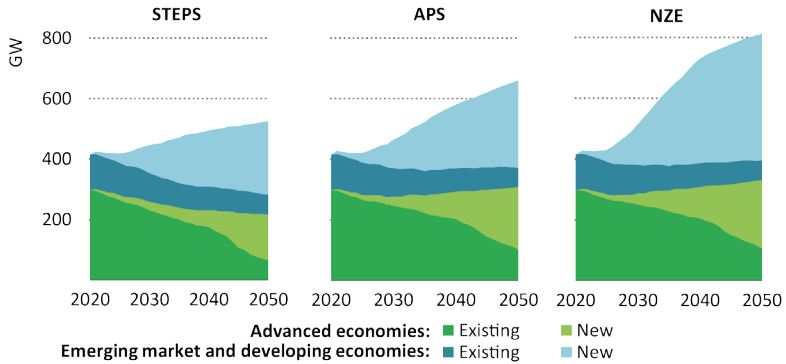
기후변화대응을 위한 탄소중립 정책과 최근 우크라이나 사태를 계기로 한 에너지 안보는 세계에너지 업계에 다시 원전의 중요성을 부각하는 계기가 되었다. 국제에너지기구

(International Energy Agency; IEA)에 따르면 2050년 탄소중립(Net Zero Emission; NZE)을 달성하는 경우 세계 원전 시장은 현재 400GW 규모에서 800GW 규모로 증가할 예정으로 신규원전 기준으로는 약 600GW의 신규원전 건설이 필요한 것으로 전망하고 있다(그림 3)(IEA, 2021). 이는 우리나라가 운영 중에 있는 1,000MW OPR1000 원전 60기 규모가 필요한 것이다. EU는 작년 환경적으로 지속가능한 경제 활동의 범위를 정하는 그린 택소노미를 초안을 마련하였고 많은 논의를 거쳐 2022년 2월에 원전과 천연가스를 포함시키는 최종 그린 택소노미 규정을 확정·발의하였다. 우리나라 경우도 2021년 12월 ‘한국형 녹색분류체계’를 발표하였으나 그 당시는 원전이 포함되지 않았다. 그러나, 새 정부 출범 이후 원전 중시 분위기를 반영하여 고준위방사성폐기물 처분을 위한 세부계획과 관련 법률 제정 등을 조건으로 원전도 ‘한국형 녹색분류체계’에 포함시켰다. 결국 활발한 신규원전 건설을 위한 정책적 여건이 갖추어졌다고 할 수 있다.

미래 원전시장을 국가별로 살펴보면 먼저 유럽의 경우, 최근 폴란드는 미국과 6기 AP1000 건설을 위한 정부간협약을 맺었으며 한국과도 2~4기의 원전 건설의향서를 체결하는 등 탄소중립을 위해 유럽국가 중에서 가장 높은 비율의 석탄화력 비중을 낮추려 노력하고 있으며, 스웨덴 경우도 논란 끝에 전기화로 인한 에너지 수요 증가와 국민의 원전 선호도 개선으로 국영기업인 바텐폴이 다시 원전건설을 재개할 계획이며 네덜란드, 벨기에 등의 유럽 국가도 신규원전 건설을 추진하거나 탈원전 폐기로 전환하였다. 영국은 탄소중립을 위해 사이즈웰-C 원전을 프랑스의 EDF가 건설하고 있으며 앞으로도 신규원전을 지속 건설하여 장기적으로 일정 비율의 원전을 유지할 계획이다. 이외에 우리나라가 계속 공을 들이고 있는 체코, 헝가리, 루마니아, 현재 전쟁 중인 우크라이나 등 많은 유럽국가가 신규원전을 추진하고 있다. 특히 유럽 국가들은 한국이 2010년경부터 유럽형 원전으로 EU-APR1400, EU-APR1000 등을 개발하며 유럽의 발전사업자와 접촉해와 우리 원전의 강점을 잘 알고 있다. 더욱이 이번 우크라이나 사태로 인하여 러시아에 대한 거부감과 중국에 대한 국가 신뢰 부족 등은 에너지 안보 차원에서 우리 원전의 진출에 호의적인 상황이 되었다.

중동지역은 추가 건설을 계획하고 있는 UAE, 와 사우디아라비아, 이집트, 카자흐스탄 등이 원전을 건설하거나 계획하고 있어 성공적인 UAE 원전사업을 경험을 바탕으로 우리의 매력적인 원전 시장이며 필리핀, 베트남 등 아시아 국가와 일부 아프리카 국가도 우리에게 원전건설을 타진하는 실정이다. 마지막으로 관심을 가져야 하는 시장은 미국의 신규원전 건설 시장이다. 미국은 원전의 인허가 기간을 60년, 80년으로 연장하며

[그림 5] 탄소중립 시나리오별 2050년 원전 설비전망



IEA. All rights reserved.

Nuclear power can help clean energy transitions through lifetime extensions for existing reactors where safe, and the acceleration of new construction where acceptable

출처: IAEA(2023)

100기에 가까운 원전을 운영하고 있으나 결국 이도 폐로할 수밖에 없어 탄소중립의 수단으로 기저전원으로 원전이 필요할 수 밖에 없다. 그러나, 자국의 원전공급사는 긴 건설 공기와 비싼 건설비로 인하여 전력회사의 요구를 만족시키지 못하는 실정으로 건설을 착수한(2013년) 지 10년이 지나 이제 겨우 완공 예정인 Vogtle 3, 4호기는 건설비가 무려 300억\$(1100MW급 2기 기준)을 훨씬 초과하는 것으로 알려져 있다. 현재 미국은 SMR 건설로 기존 원전 대체 한다고 하고 있으나 중소도시의 분산형 전원 목적으로는 가능해도 도시지역 대량의 전력 공급을 위해서는 100MW급 SMR로는 한계가 있다고 생각된다. 따라서, 앞으로 예상되는 대규모 미국의 기존 원전 대체 수요는 우리에게 큰 신규원전 시장이 될 것이다.

III. 우리나라 원전산업 현황

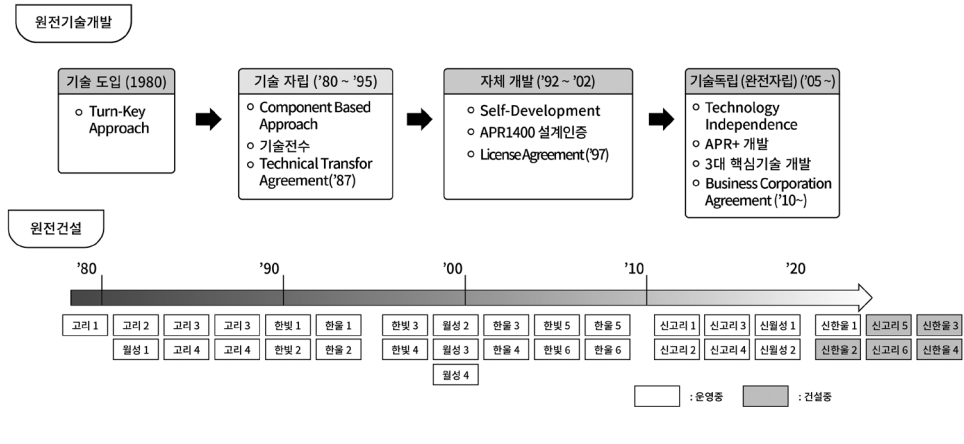
1. 우리나라 원전 개발역사

우리나라 원전 개발역사는 우리나라 경제발전이 한강의 기적이라고 불리는 것처럼 세

계적으로 보기드문 원전산업 개발의 성공사례이다. 초기에는 1978년 고리 1호기부터 고리 2호기, 월성 1호기 등 3기의 원전을 턴키(Turn-Key) 방식으로 도입하여 운영을 시작하였다. 턴키 방식은 자동차 운전 면허를 취득하고 차를 구입해 키를 받아 매뉴얼을 보고 운전하는 방식과 같은 것이다. 이렇게 원전 설계나 시공, 기기 제작 등에 대하여 전혀 기반없이 원전사업을 시작하였지만 얼마 지나지않은 '80년대 초반부터 국가적 차원에서 원전기술자립계획을 수립하여 원전 설계 및 시공 등 원전산업의 국산화를 과감히 추진하였다. 초기에는 분할발주방식으로 사업을 추진하여 설계, 엔지니어링, 연료, 기기 제작 등 각 분야의 외국회사에 국내업체가 하청기관으로 참여하여 기술을 습득하였으며(Component Base Approach) '80년대 중반부터는 국가는 '원전건설기술자립계획'을 수립하여 전 원전기술에 대하여 종합적인 기술자립계획을 추진하였다. 국내에 건설할 표준 원전의 참고노형(ABB-CE사의 System 80)을 선정하고 기술전수 계약을 체결하여 관련기술을 전부 습득하며 국내업체가 사업을 주관하고 외국업체가 참여하는 공동프로젝트 형태로 원전을 개발하여 건설하는 방식으로 추진하였다. 이렇게 개발된 원전이 한국형 원전 즉, OPR1000인데 한울 3, 4호기부터 한빛 5, 6, 한울 5, 6, 신고리 1, 2, 신월성 1, 2 등 국내에 10기의 원전이 건설되었다.

그러나, OPR1000은 TMI(Three Mile Island) 사고 이후 중대사고 등 강화된 원전의 안전기준을 충족하기에는 부족한 면이 있었으며 기술도입을 바탕으로 한 원전으로 수출 등 사업상 제약이 있었다. 이를 해소하기 위해 OPR1000 건설을 시작한 지 얼마 지나지 않은 '92년부터 우리나라는 신형원전 개발계획을 착수하게 되었다. 원전을 도입해 운영하게 된 지 15년도 지나지 않아 자체적으로 원전 개발을 착수한 것이다. 이는 이전의 기술도입에 의한 방식과는 다르게 우리가 스스로 안전설비 등 주요 계통을 개발하고 실험을 통해 개발된 기기를 검증하여 우리 고유의 원전을 개발한 것이다. 이렇게 개발된 신형원전이 APR1400이며 국내는 신고리 3, 4 등 8기가 운영 중이거나 건설 중이며 UAE에 4기를 수출하여 건설 중인 원전이다. 이 자체적인 기술 개발도 비용 및 개발 기간 등을 고려하여 외국 원전기술을 참고하여 개발하는 전략을 택하였지만 APR1400 관련 모든 설계기술은 국내가 개발하였고 일부 미자립기술에 대하여는 Nutech-2012 등 국가적 기술개발계획을 통해 지속적으로 국산화를 추진하였다. 결과최종적으로는 2015년에 원전설계전산코드, 원전제어계통(MMIS) 및 원자로냉각재펌프(RCP) 등 3대 핵심기술 자립함으로써 핵심기술을 포함한 모든 기술을 확보하게 되었다.

[그림 6] 우리나라 원전 개발의 과정 및 건설 원전

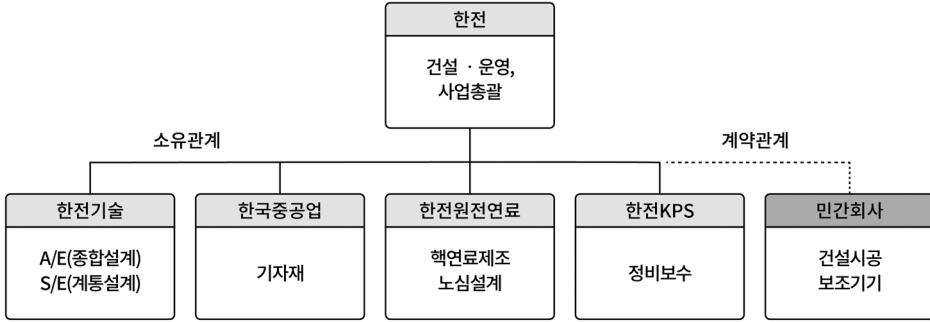


2. 원전 산업체계의 형성 및 변화

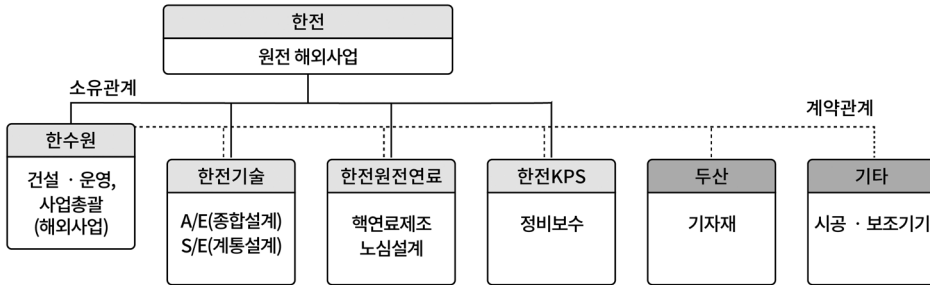
우리나라 원전산업은 원전개발의 역사와 같이 형성·발전하여 왔다. '80년대 기술자립 시기 이전에는 한전은 원전 건설과 운영, 보수를 담당하였고 핵연료 설계나 엔지니어링은 원자력연구소를 모태로 한 기관이 중심이 되었으며 기기제작과 시공은 민간이 참여하였다. 그러나 원전기술자립 단계(~'95)를 통하여 공공분야의 모든 원전 산업체는 산업부와 한전 산하로 일사불란하게 정립되었다. [그림 7]과 같이 한전은 원전 건설, 운영을 담당하고 해외사업 등 원전사업을 총괄하였고 원전 설계는 한전기술이, 원전 기기 설계·제작은 한국중공업, 핵연료 설계·제작은 원전연료, 원전 정비보수는 한전 KPS가 담당하였고 시공 및 보조기기는 민간이 참여하는 형태의 틀을 갖추었다. 정부와 한전의 리더십 아래 체계적이고 일관성 있는 산업체계를 구축하여 원전건설, 기술자립, 자체 기술개발 등 원전산업산업을 효율적이고 경쟁력 있게 발전시켜왔다.

그러나 2001년 시행된 전력산업 구조개편은 원전산업 관점에서는 경쟁력을 약화시키는 방향으로 추진되었다고 할 수 있다. 전력산업구조개편에 의해 설립된 한국수력원자력은 이전에 한전이 수행하던 원전 운영과 건설 사업을 주관하는 기관으로 설립되었으나 해외사업은 한전과 한수원으로 이원화되었다. 그 배경은 구조개편 당시 한전이 대북원전사업인 KEDO사업을 계속 수행하고 있었으나 그 사업이 중단되자 한전에 잔

[그림 7] 기술자립 시 형성된 한국의 원전산업 체계

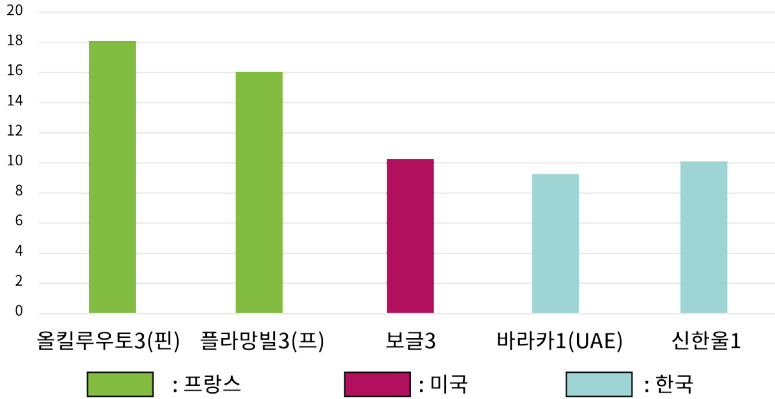


[그림 8] 전력산업구 구조개편 이후 한국의 원전산업 체계



여하였던 원전 관련 인력이 한수원으로 이관한 해외사업업무를 수행함에 따른 결과이다. 나머지 한전기술, 한전원전연료, 한전KPS 등은 이전과 업무가 동일하나 원전 건설과 운영, 종합사업관리를 하는 한국수력원자력과 동일한 한전의 자회사로 남아있게 되어 상법상 모두 한전의 관할 아래 있게 된 것이다. 또한 원전 주기기 설계·제작을 담당 하던 공기업 한국중공업은 두산중공업(현, 두산에너지빌리티)으로 민영화되었다. 즉 과거와 같이 일사불란한 사업추진이 어려운 형태가 되었다(그림 8).

[그림 9] 경쟁국 간의 원전건설 공기(년)



출처: 원자력산업회의(2020)

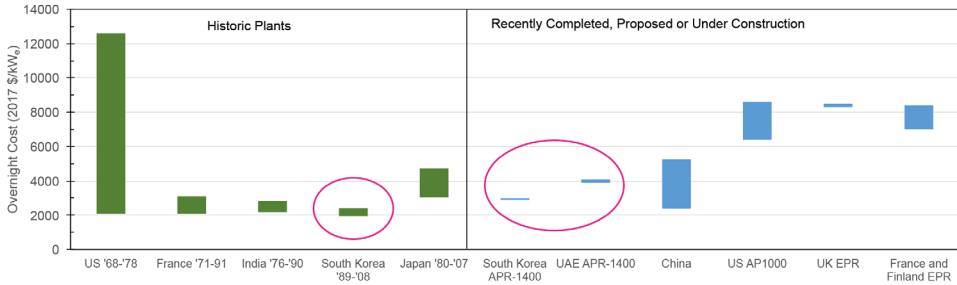
3. 원전산업의 경쟁력 및 문제점

가. 원전산업의 경쟁력

지구온난화 방지를 위한 탄소중립 실현을 위해 세계 신규 원전건설 시장을 향한 우리의 경쟁력은 어떠한가? 기술적 측면과 산업경쟁력 측면에서 살펴보면 한마디로 세계 최고의 경쟁력을 가지고 있다고 할 수 있다. 1979년 미국의 TMI(Three Mile Island)원전 2호기 사고 이후 미국과 대부분의 유럽 국가는 신규원전 건설을 중지하였다. 최근에는 프랑스는 핀란드 오킬루우토 3호기 및 자국의 플라망빌 3호기로, 미국은 Vogtle 원전 3, 4호기로 건설을 재개하였다. 반면 한국은 2000년대 초반까지 기술자립한 OPR1000(한국형 원전)을 반복 건설하였고 곧이어 신형원전인 APR1400을 자체 개발하여 신고리 3, 4호기부터 지속 건설하여왔다. 또한 APR1400 자체 개발은 물론, 이후에도 EU-APR1400, EU-APR1000 개발, 미국 규제기관 NRC 설계인증 및 핵심기술 완전 국산화 등 지속적인 기술개발을 통하여 기술력도 세계적 수준으로 올려놓았다.

원전산업의 경우도 서방 경쟁국인 미국과 프랑스는 오랫동안 신규원전을 건설하지 않아 산업 인프라가 붕괴된 반면, 한국은 지속적인 반복 건설로 원전산업 경쟁력을 유지하여 왔다. 특히, 한국기업 특유의 근면성과 효율성은 원전산업 경쟁력을 높이

그림 10. 과거 및 최근 원전건설비 현황



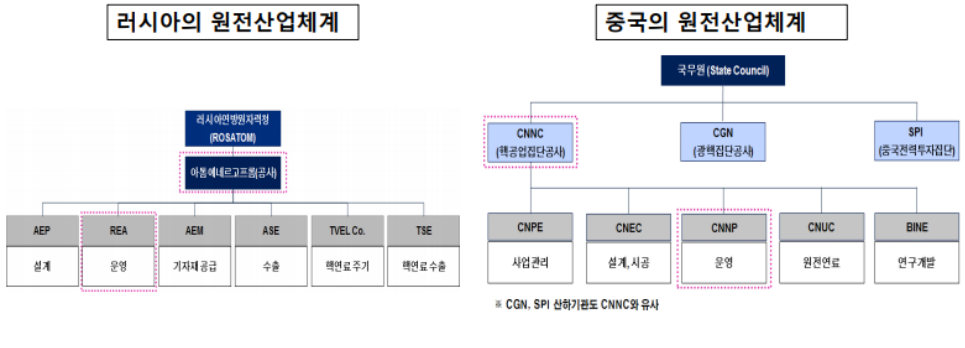
출처: MIT(2018)

는 것에도 적용되었다. 이러한 경쟁력 차이는 미국 경우 V.C. Summer 원전 건설을 중도 포기하고 바로 완공 목표인 Vogtle 3, 4호기 원전 경우, 계획된 공기의 지연과 300억 불 이상에 이르는 과도한 건설비를 초래하고 있으며, 프랑스의 경우는 핀란드에서 2005년 건설을 시작한 오킬루우토 원전과 2007년 자국에서 건설을 시작한 플라망빌 3호기 원전을 아직도 완공하지 못하고 있는 결과를 초래하고 있다. 이에 비해 한국의 경우는 UAE 원전 수출이 열악한 사막환경에 최초로 원전을 건설하는 사업임에도 불구하고 지난 2021년 4월, 22년 3월 그리고 올해 1월에 차례대로 바라카 1, 2, 3호기를 적기에 준공하였으며 4호기도 곧 준공할 예정으로 있다. 이러한 경쟁력 차이는 건설공기와 비용의 차이로 나타나며 [그림 9]는 최근 준공되었거나 준공 예정인 원전의 건설공기를 보여주고 있으며 건설비용은 여러 기관의 자료에서 한국이 미국과 프랑스의 1/2 정도임을 보여주고 있다(MIT, 2018). 또한 과거 또는 최근에 준공하였거나 건설 중 원전의 건설비의 경우도 한국의 원전 건설비가 상대적으로 아주 저렴함을 보여주고 있다(그림 10).

나. 우리나라 원전산업의 문제점

이러한 우리나라의 원전산업의 경쟁력은 지난 탈원전 정책 등으로 심각한 위협을 받게 되었다. 우리나라 원전산업의 경쟁력을 위협하는 요소를 살펴보면 첫째, 국내 신규원전 건설사업 전망이 불확실하다는 것이다. 산업의 경쟁력의 기본 요소인 일거리, 그 중 원전건설 사업이 가장 중요한데 지난 10년 동안 한 기의 신규원전건설 계획도 수립되지 않았다는 것이다. 원전 중시하는 현 정부에서 수립한 첫 수급계획인 올해의 제10차 전

[그림 11] 러시아, 중국의 원전산업체계 현황

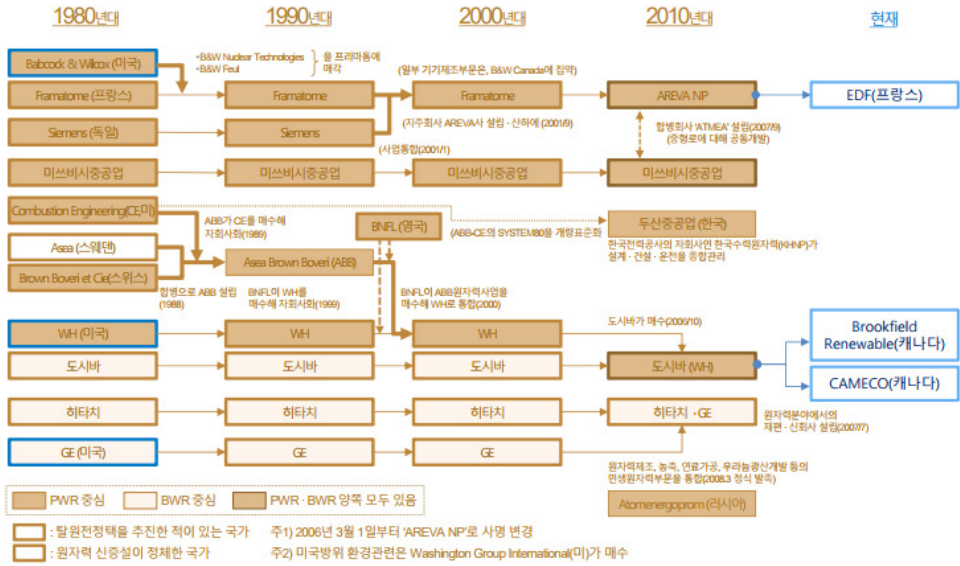


력수급기본계획(산업통상자원부, 2022)에서도 중지된 신한울 3, 4호기 건설을 재개하고 계속 운전 추진계획은 포함하였지만, 7차 전력수급기본계획(2015년)(산업통상자원부, 2015)에서 계획하고 8차 전력수급기본계획(산업통상자원부, 2017)에서 취소된 천지 1, 2호기, 대신 1, 2호기 원전에 대하여 추가건설 여부에 대한 방침은 결정하지 않은 상태이다. 즉, 하루 빨리 추가 건설계획을 수립하지 않으면 국내 원전건설에 의한 원전산업의 활성화는 기대하기 어렵게 되었다는 것이다.

두 번째는 원전산업 체계의 비효율성이다. 우선 경쟁국들의 원전산업체계를 살펴보면 원전건설이 활발한 중국과 러시아는 [그림 11]과 같이 국영기업인 원자력공사 형태의 기관을 중심으로 분야별로 역할을 분담하여 일사불란한 산업체계를 구축하고 있다. 반면 원전건설이 활발하지 않았던 미국, 프랑스, 일본은 기업간 합종연횡을 통해 원전산업체계가 재편되었으며 일본의 경우는 미국, 프랑스와 공동진출을 모색하고 방식으로 자구책을 찾으며 변화하여 왔다. 반면 우리나라의 원전산업체는 주로 공기업임에도 불구하고 오히려 [그림 8]에서와 같이 지배구조와 사업구조가 상이하며 해외사업 기능은 이원화되어 있는 등 비효율적인 원전산업체계를 전력산업구조 개편 이후 그대로 유지하고 있다.

세 번째는 원전정책 환경의 변화이다. 2011년 후쿠시마 사고, 고리1호기 정전은 폐 사건과 부품 품질위조 문제 발생 등은 국민이 원전 산업계를 불신하는 계기가 되어 외부에서 원전 산업계에 자성을 촉구하게 되었다. 그러나 이러한 변화는 원전 산업계의 투명성을 높이는 계기는 되었지만, 과도한 규제, 정책의 일관성 결여 등 산업경쟁력

그림 12. 미국, 프랑스, 일본의 원전산업체계 현황



출처: 서울대학교 원자력정책센터(2023)

유지에 큰 장애가 된 것도 사실이다. 2010년대 이후 SMR 개발, APR1400 개선 등 신형원전의 개발은 중지되었으며 글로벌 스탠다드에 적합한 운영기술 개발도 등한히 하게 되었다. 그 결과, 미국의 경우 90년대 80% 내외였던 원전의 이용률을 지난 5년 평균 92.5%까지 대폭 향상시키고 있는데 반해 우리의 경우는 2010년 이전 90%가 넘는 원전 평균이용률이 지난 10년간 70%대로 떨어지는 등 이제 더 이상 운영기술 선진국이라는 말이 무색할 정도가 되었다. 또한 과도한 규제로 인해 우리나라의 최근 원전건설(신한울 1호기)도 미국의 Vogtle 원전의 경우와 비슷한 정도인 10년이나 소요되게 되었다.

UAE 원전수출은 우리나라 원자력 산업의 큰 쾌거이다. “On Time, On Budget”으로 대표되는 우리의 수출경쟁력을 유지하기 위해서는 우리의 원전산업에서도 여러 가지 변화가 필요하다. 원전 수출은 원전건설 시의 설계, 시공 및 기기 공급과 더불어 건설 이후에도 운영부품의 공급, 엔지니어링 및 운영기술 지원 등 우리에게 고급 일자리를 지속적으로 제공할 수 있는 사업이다. UAE 원전건설사업이 거의 마무리에 이르는 상황에서 UAE가 우리의 사업 우수성을 활용하여 제3국 공동진출 등을 원하기도 하지만, 한편으론 우리 원전 산업계가 후속 운영·정비 및 엔지니어링 지원사업의 많은 부분에서

외국의 참여를 허용했다는 점은 우리에게 많은 숙제를 던지고 있다. 이제 원전 산업계는 탈원전 정책의 그늘과 과거 정책적 혼선에서 하루빨리 벗어나 원전수출 강국의 미래를 향해 하루속히 변해야 할 것이다.

IV. 원전수출체계 강화방안

1. 원전수출체계 변화 방향

앞에서 기술하였지만 2050년까지 세계 원전 시장은 600기의 원전, 적어도 3천조원 이상의 시장이 열려 있다. 최근 폴란드와 체코와의 신규원전 건설사업 수주 협상 소식은 원전 수출의 물꼬를 트는 계기가 되었지만 원전 시장을 선점하고 원전 강국이 되기 위해서는 우리의 원전산업체의 효율성을 근본적으로 개선하여 경쟁력을 높여야 할 것이다. 원전 산업의 경쟁력이란 운영, 건설, 설계, 후행주기 등 전 주기적 분야에서 경쟁력이 필요하고 그 산업을 지원하는 정부의 정책, 인력, 교육체계 등이 뒷받침되어야 하겠지만 여기서는 그의 중심이 되는 산업체계의 변화 방향에 대하여만 고찰할까 한다. 앞에서 러시아, 중국, 프랑스 등 경쟁국은 일사불란한 체계를 갖추어 원전 해외수출을 추진하고 있는 반면, 우리나라는 전력산업구조개편으로 오히려 일관성이 떨어지는 구조로 변경되어 비효율과 혼선을 초래하고 있다고 설명하였다. 특히, 이원화된 해외사업 기능은 필요 없는 이중적 사업관리 구조와 기술 및 사업정보의 혼선 등을 초래하고 있다. 이제는 우리 원전 산업계가 2030년까지 10기 이상의 원전은 수출하고 이후도 수십기의 원전을 수출할 것에 대비한 원전수출체계로의 개편이 필요하다.

원전수출체계 개편방안은 전력산업구조 개편 이후 2011년 후쿠시마 사고 발생 이전까지 정부나 산업계, 학계에서 여러 차례 논의되었다(한국개발연구원, 2010). 그러나 후쿠시마 사고 이후 원전산업이 침체되며 산업체계 개편 논의는 중단되었다. 수출추진체계 개편은 여러 관련 기관의 이해가 얽혀 있어 쉽게 컨센서스를 이루기가 어렵지만 모르지 국가 원전산업의 경쟁력 차원에서만 결정한다면 그 해답을 찾을 수 있을 것이다. 개편 방향으로는 첫째, 공공기관이 담당하는 분야는 외국 경쟁사처럼 지배구조나 의사결정 구조가 일사불란한 체계로 개편되어야 할 것이다. 지금과 같은 해외사업 이원화 체계는 반드시 일원화체제로 변화해야 할 것이다. 둘째, 공기업체계의 한계를 넘을 수

있도록 민간이 참여할 수 있는 체계로 변화해야 할 것이다. 최근 SMR에 국내의 많은 대기업이 참여하고 있는데 이들에게 미래 국내에서의 사업 기회는 아직 불확실하다. 해외 사업을 성공시키기 위해서는 비즈니스마인드가 중요하다. 공기업이 신뢰라는 장점을 제공할 수 있지만 적극성과 진취성이 떨어져 사업개발에 제약이 있을 수 있다. 해외사업에 민간방식을 도입하는 방안을 검토해야 할 것이다. 셋째 운영, 설계, 제작 등 기존 기관의 역할분담도 확대된 원전사업의 규모나 역할변화를 반영하고 업무 간의 연계를 고려하여 재검토되어야 할 것이다. 이제는 기술자립 초기의 역할분담 체계에서 국내 사업과 해외원전 수출을 동시에 추진할 수 있는 적합한 조직으로 재편되어야 할 것이다.

2. 원전수출체계 개편안

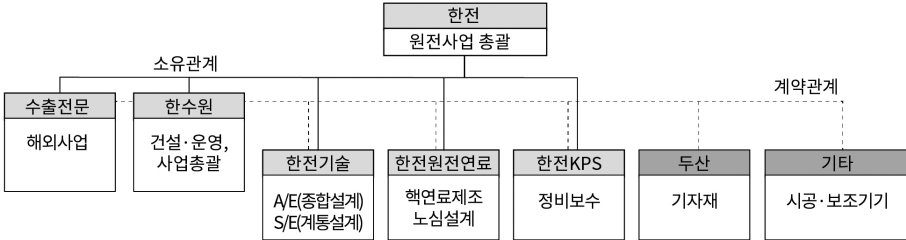
앞에서 우리나라 원전산업체계의 개편 방향을 제시하였지만 제시한 민간참여방안, 기관의 역할분담 조정 등에 대하여는 많은 검토가 필요한 사항이고 여기서 모두 다루기는 너무 방대하다. 따라서 본 기고에서는 공기업 중심으로 우리나라의 원전수출체계 개편 방안이 3가지 대안으로 제시하고 장단점을 비교하려 한다. [그림 13]과 같이 첫 째는 한전과 한수원의 원전수출 담당조직을 통합하여 한전의 원전수출 전문 자회사를 설립하는 안이고 두 번째는 한수원의 산하 조직으로 통합하여 수행하는 안이다. 세 번째는 한전 산하에 원전 지주회사를 설립하여 통합적 기능인 원전사업 총괄, 원전수출, 국내외 원전건설 사업을 수행하고 한수원은 원전지주회사의 자회사로 하여 원전 운영 기능에 집중하며, 기존의 한전기술 및 한전원전연료를 한전의 자회사에서 원전지주회사의 자회사로 변경하는 안이다. 아래에 각 안에 대한 세부 내용 및 장단점을 기술하고자 한다.

(1) 제1안: 해외사업 기능을 한전의 별도 전문자회사로 통합하는 안

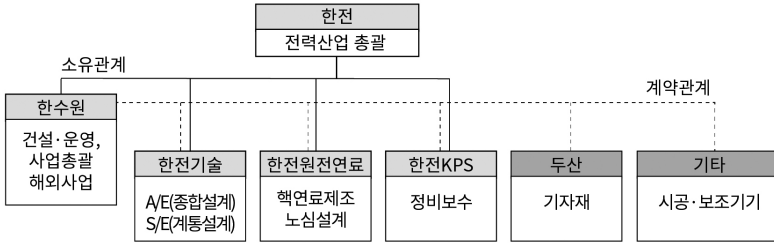
- 내용: 한전과 한수원의 해외사업 기능을 한전 산하에 원전 해외사업 전문자회사를 설립하여 통합하는 방안
- 장점
 - 해외사업을 책임지고 전문적으로 수행하는 기관설립과 인력 확보
 - 일원화에 따른 업무 일관성 유지 및 이원화에 따른 비효율 및 업무 혼선 제거
- 단점
 - 자회사로 운영됨으로 동일한 위상인 운영, 설계, 연료, 정비보수 담당 기관

[그림 13] 원전 산업체계 개편 방안

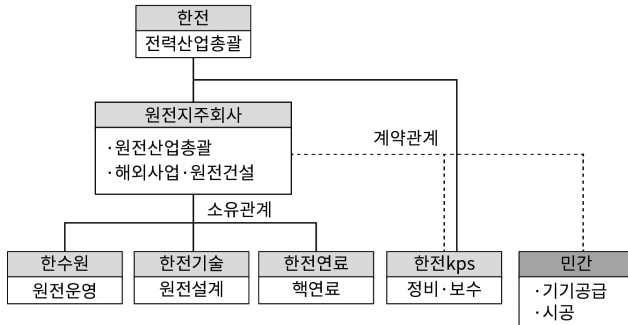
제1안: 한전에 별도 원전 해외사업 전문사회사를 설립하여 통합하는 안



제2안: 해외사업 기능을 통합하여 한수원 산하조직으로 운영하는 안



제3안: 한전 산하에 원전산업을 총괄하는 중간 지주회사를 설립하는 안



과의 업무 협조 및 지원에 어려움 예상

- 자회사 설립 시 관련 한진과 한수원 인력 이관에 어려움 예상
- 해외사업 추진 시도 관련 기관으로부터 원활한 인력 지원에 어려움

(2) 제2안: 해외사업 기능을 통합하여 한수원의 산하 조직으로 운영하는 안

- 내용: 한수원 산하의 원전 해외사업 조직을 확대하여 한전의 해외사업 기능을

통합 운영하는 방안

• 장점

- 일원화에 따른 업무 일관성 유지 및 이원화에 따른 비효율 및 업무 혼선 제거
- 대형 조직에 속해 인력의 원활한 수급 가능
- 운영 기술 및 인력 상호간의 연계 수월

• 단점

- 현재와 같이 자회사인 한수원이 수행함으로써 동일한 위상인 운영, 설계, 연료, 정비보수 담당 기관과의 업무 협조 및 지원에 어려움 존재(일사불란한 조직체계 미흡)
- 대형 조직의 한 기능으로 운영되어 관련 직원의 전문성과 적극성이 부족할 수 있음(순환근무가 가능하여 오히려 전문성과 수출 비즈니스 마인드가 부족할 수 있음)

(3) 제3안: 한전 산하에 중간지주회사를 설립하여 해외사업 등 원전사업 총괄 기능을 수행하는 방안

• 내용: 한전 산하에 원전사업을 총괄하는 중간지주회사를 설립하여 원전사업 총괄 기능을 수행하고 해외사업 개발, 국내의 원전건설 사업 관리 등을 자체 수행

• 장점

- 원전사업총괄 기능을 수행하는 중간지주회사와 담당분야 자회사간 유기적 업무 수행 가능(원전사업분야의 일사불란한 사업추진 체계구축)
- 일원화에 따른 업무 일관성 유지 및 이원화에 따른 비효율 및 업무 혼선 제거
- 한전의 인력 이관도 상대적으로 용이
- 한수원은 운영업무에 집중하여 원전의 안전성 및 경제성 제고에 용이
- 지주회사로서 자회사와의 인력 연계도 용이

• 단점

- 기존 한전, 한수원의 기관이기주의 극복 필요
- 대규모 원전산업 구조개편 작업으로 컨센서스 형성과 정부의 추진력 필요

위에서 원전수출 활성화를 위한 우리나라 원전수출체계에 대한 3가지 개편방안을 제시하였다. 각각의 방안이 장단점을 가지고 있지만, 이번에는 더 이상 과거와 같이 논의로만 그치지 말고 세계적 원전강국 실현을 위해 의견수렴 과정을 거쳐 적합한 방안을

결정하고 반드시 추진하였으면 한다. 그러기 위해서는 기관 이기주의를 떠나 국가 산업의 미래를 위해 정부, 산업계, 학계가 힘을 모아야 가능할 것이다. 이번 정부와 같이 원전산업 활성화에 힘쓰는 정부에서 변화하지 못한다면 우리에게 주어진 원전강국의 미래는 멀어질 것이다.

V. 맺음말

에너지가 얼마나 국민 경제에 중요한지는 최근 우쿠라이나 사태로 인해 절실히 느낄 수 있었다. 또한 에너지정책이 국가 근간의 흔들 수 있다는 것도 최근 한전의 사태가 잘 보여주고 있다. 무탄소 원자력에너지는 지구 환경을 보존할 수 있는 아주 현실적인 에너지이다. 우리나라 원전산업계는 세계가 부러워할 정도로 성장하였고 최근 탈원전으로 인하여 주춤하기는 하였지만 여전히 원전산업의 경쟁력은 세계 최고 수준에 있다. 그러나 미래 원전건설사업의 불확실성, 원전산업체계의 비효율성 및 원전 정책 환경의 변화 등을 극복하기 위해서는 30여 년간 변화하지 않고 유지하여온 원전산업체계의 개편이 필요하며 본 정책연구에서는 우리나라 원전산업 우리나라 원전산업 발전역사와 현행 체계의 문제점을 검토하고 우리나라 전력산업체계의 틀 내에서 원전산업체계 개편 대안을 검토하였으며 가장 바람직한 방안으로 원전 중간지주회사 설립방안을 제시하였다. 산업체계 개편이 여러 가지 이해관계가 상충되어 쉽지 않은 일이지만 이번 기회에 원전산업체계를 시대에 부합하게 개편하여 글로벌경쟁력을 확보한다면 우리의 원전산업은 에너지의 안정적 공급을 통한 국가 산업 경쟁력 제고는 물론, 세계원전시장을 선점하여 국가 미래 성장동력으로서 역할을 수행하고 전지구적 탄소중립 실현에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 산업통상자원부, “제7차 전력수급기본계획(2015~2029),” 산업통상자원부, 2015.
- 산업통상자원부, “제8차 전력수급기본계획(2017~2032),” 산업통상자원부, 2017.
- 산업통상자원부, “제10차 전력수급기본계획(2022~2036),” 산업통상자원부, 2022.
- 서울대학교 원자력정책센터, 『원전 수출을 위한 수주 경쟁력 제고 및 정부지원방안』, 서울대학교 원자력 정책센터, 2023.
- 원자력산업회의, 『2020 세계 원자력발전의 현황과 동향』, 원자력산업회의, 2020.
- 주한규, “탄소중립, 원자력의 기회,” 서울대학교 원자핵공학과, 2022.
- 한국개발연구원, 『한전/한수원 원자력산업 기능 검토』, 한국개발연구원, 2010.
- IAEA, “Power Reactor Information System (PRIS),” IAEA, 2023.
- IEA, “World Energy Outlook 2021,” IEA, 2022.
- MIT, “The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World,” MIT, 2018.
- Niccolo Conte, “Mapped: Europe’s Biggest Sources of Electricity by Country,” <<https://www.visualcapitalist.com/mapped-europes-biggest-sources-of-electricity-by-country/>>, 2023 (검색일: 2023.5.1).
- WNA, “Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources,” World Nuclear Association, 2011.

탄소중립 실현을 위한 원자력수소

Nuclear Hydrogen for Realization of Net Zero

장종화*

Jonghwa Chang

현실화되고 있는 지구온난화를 극복하기 위해 2050년까지 탄소중립을 달성해야 한다는 국제적인 합의가 이루어졌으며, 우리나라도 2023년 3월 범제화하여 국제적 합의에 동참하였다.

수소는 전력 저장의 어려움을 극복할 수 있는 에너지담체로 기후변화완화를 위한 온실가스 탄소중립의 핵심이다. 본 논문에서는 수소경제, 수소생산방법, 원자력을 이용한 수소생산을 살펴보고, 우리나라에서 고려할 요소로서 에너지자립, 에너지안보 측면에서의 원자력을 살펴본다. 재생에너지를 이용한 수소생산과 수소생산 포트폴리오 작성도 살펴본다.

주제어 탄소중립, 수소경제, 원자력수소, 수소생산 포트폴리오

Keywords Net Zero Emission, Hydrogen Economy, Nuclear Hydrogen, Hydrogen Production Portfolio

투고일 2023.4.10. 수정일 2023.5.17. 게재확정일 2023.5.23.

* USNC KOREA 최고과학자(Chief Scientist)(Jhchang@usnc.com)

I. 서론

석탄을 에너지원으로 사용하는 산업혁명이 본격화한 1850년대부터 이산화탄소 등 온실가스방출량은 급격히 증가하게 되었다. 온실가스방출은 지구표면의 평균온도를 상승시켜 빙산을 녹이고 더 많은 태양에너지를 흡수하게 된다. 지구온도는 가속적으로 상승하여 2010년 이후의 증가는 10년간 섭씨 1.06도가 증가하였다. 증가된 대기온도는 대기 에너지를 높여 폭서, 폭우, 가뭄, 잦은 태풍발생 등 기상이변으로 이어지게 되었다(IPCC AR6, 2023).

대부분의 국가는 지구평균온도 상승을 산업혁명 당시보다 섭씨 3도 이내로 낮추는 목표로 합의하고 있다. 근년에 목격되는 잦은 기상이변으로 보다 적극적으로 섭씨 1.5도 이하를 목표로 하자는 제안에 많은 선진국이 동의하고 있다(COP21, 2015.12.15: 파리협약, 2023.5.16). 이를 실현하기 위해서는 대기중으로 배출하는 이산화탄소와 해양, 삼림에서 흡수하는 이산화탄소가 평형을 이루는 상태인 탄소중립(Net Zero Emission)을 달성해야 한다. 전세계 110개 국가가 2050년까지 탄소중립을 달성하는 데 동의했으며 (중국은 2060년까지) 우리나라를 포함한 많은 국가가 법제화하였다(UN, 2023; 탄소중립기본법, 2023).

탄소중립을 실현하는 방법은 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료자원의 사용을 최소화하고, 이산화탄소방출이 없는 태양, 풍력 등 재생에너지와 원자력에너지를 적극 이용하는 것이다. 1차에너지를 가공한 에너지담체(Energy Carrier)로서 전력은 저장이 어려워므로 높은 에너지밀도로 저장성이 높은 수소를 에너지 담체로 사용하는 수소경제 실현이 중요하다. 탄소중립목표를 달성하기 위해서는 이산화탄소 방출을 최소화한 수소생산이 전제되어야 한다.

본 논문에서는 수소경제, 수소생산방식, 원자력에너지, 우리나라의 수소경제 정책 방향에 대해서 조사하였다.

II. 수소경제

1. 수소의 특성

수소는 모든 화학연료 중에서 단위 중량당 에너지밀도가 가장 크고 연료전지를 이용하

[표 1] 에너지원의 특성

분류	종류	무게당 에너지 (kWh/kg)	부피당 에너지 (kWh/L)	CO2 배출 (kg/MBtu)
에너지 자원	석탄	8	20.2	96
	석유	11.6	10.3	73
	천연가스	15	6.2 (LNG)	53
	우라늄-235	22,400,000	427,000,000 (금속)	0
	경수로연료	140,000	1,400,000 (UO2)	0
에너지 담체	전기(бат테리)	0.2	0.5 (리튬이온)	-
	수소	39	2.8 (액체수소)	-

출처: Wikipedia, US EIA

여 전력으로 전환하기 용이하여 큰 관심을 받고 있다. 사용시 온실가스나 수증기 이외의 공해물질 발생이 전혀 없기 때문에 지구온난화가 가시화되는 현대에는 더욱 중요해진다. 특히 자동차와 같이 연료중량이 주행효율에 큰 영향을 미치는 경우에는 중요한 역할을 할 수 있다.

수소는 자연에서 채굴되는 자원이 아니고, 전기와 마찬가지로 일차에너지를 투입하여 생산해야 하는 에너지 담체이다.

[표 1]은 에너지원별 에너지함량, 이산화탄소 배출계수를 보여준다.

에너지자원은 자연에서 채굴할 수 있는 자원이며, 에너지 담체는 에너지자원을 변환하여 사용하는 것을 말한다. 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료는 사용시 이산화 탄소 배출을 동반하게되고 급격한 기후변화의 원인으로 지목받고 있다. 원자력연료인 우라늄은 화석연료에 비해 백만 배 이상의 에너지 밀도를 갖고 있으며, 원자력 발전소에 사용하는 저농축우라늄도 1~10만 배 이상의 에너지밀도를 갖고 있다. 에너지 밀도가 높으면 대량을 보관할 수 있으므로 에너지공급의 안정성을 담보할 수있다.

에너지 자원을 변환한 에너지 담체는 온실가스방출의 우려 없이 일상에서 편리하게 사용할 수 있다. 전기는 가장 널리 보급된 에너지나, 저장을 위한 bat테리의 에너지밀도가 낮다. 수소는 아직 널리 보급되지는 못했으나, 전력에 비해 무게기준 80배, 부피기준 5배 이상 높은 에너지밀도를 가지고 있다. 특히 자체 중량이 중요한 수송분야에서 수소의 높은 에너지밀도는 큰 장점이다.

2. 수소경제

수소경제란 수소를 에너지담체로 이용하는 경제시스템으로 미래학자인 제러미 리프킨의 “수소경제”를 통해 대중적으로 널리 알려졌다(Rifkin, 2003).

1973년 발생한 석유위기로 원자력을 이용한 수소생산에 대한 연구가 활발하게 시작되었다. 그러나, 수소는 초기투자비용이 많고, 생산비용이 높아서 도입이 지연되었다. 석유위기가 진정되자 연구개발이 지지부진하게 되었으며 2000년대 발생한 석유고갈론과 가격폭등으로 다시 각광을 받게 되었다. 그러나 웨일오일을 채굴하기 위해 수압균열법¹이 광범위하게 도입되자 석유생산량이 증가하게 되었고 가격이 안정되었다.

2020년대 이후 지구온난화에 의한 피해가 현실화되면서 수소는 온실가스를 방출하지 않는 수단으로 재조명되고 있다. COP21에서 합의하고 COP24에서 강화한 바에 따르면 지구평균온도상승을 산업혁명 이전의 섭씨 1.5도 이하로 줄이기 위해서는 2030년까지 2010년 이산화탄소방출 대비 45% 수준으로 감축하고 2050년까지는 온실가스 순 방출량 0인 탄소중립 목표를 달성해야 한다(Hydrogen Europe, 2019). 우리나라도 2023년 법제화하였다(COP24, 2018; 탄소중립기본법, 2023). 그러나 법이나 시행령에서도 정량적인 목표제시없이 온실가스관리에 주안점을 두고 있으며, 주무부처가 대량의 온실가스 방출원인 산업체를 관장하는 부처가 아니고 환경부라는 것은 탄소중립 목표달성이 현실적으로 어려울 것으로 우려된다.

탄소중립 목표를 달성하기 위한 방법으로 수송, 산업, 건물 분야에서 수소사용이 최선의 선택으로 간주된다. 수소는 태양, 풍력 등 간헐성이 큰 재생에너지로 생산하여 장기간 보존할 수 있기 때문에 수소경제의 실현은 재생에너지 보급에도 적합하다.

3. 수소경제 실현

지금까지 대부분의 수소는 비료생산을 위한 암모니아 합성, 메탄을 합성, 정유공정에 사용하기 위해 생산하고 있다. 그러나 온실가스감축을 위해서는 에너지 사용분야로 확장하여야 한다. 이를 위해서는 전력 등 대체 수단 대비 경쟁력을 확보하여야 하며 우선

1 수압균열법, hydraulic fracturing 또는 fracking.

적으로 수소생산단가를 낮춰야 한다.

2020년 현재의 수소생산단가는 2.5~6\$/kg이나, 2030년대에는 1.8~2.5\$/kg으로 낮아질 것으로 기대하고 있다(Hydrogen Council, 2021). 이러한 비용하락은 대량생산에 의한 가격하락과 시장에 대한 불확실성 제거가 동반되어야 가능할 것이다. 시스템 전체 비용은 수소 분배, 이용의 보급과 연관되어 있다. 현재도 데이터센터용 비상전원과, 지게차, 기차, 대형트럭 등 장거리 수송 분야에서는 수소이용이 경쟁력을 확보하고 있는 것으로 판단하고 있으며 2030년대에는 대부분의 수송분야, 건물용 전력/난방, 소형발전 분야에서 가격 경쟁력을 확보할 것으로 예측하고 있다.

4. 수소소요(생산)량

전세계의 수소소요는 정유공정, 암모니아 생산, 메타놀 생산, 제철 분야(수소환원제철)에서 연간 9천만 톤(2021년 기준)이다. IEA에 따르면, 2030년 Net-zero 달성을 위해서는 수송분야와 제철분야에서의 수소사용을 확장해야 하며, 2030년대에는 1억 8천만 톤으로 증가할 것으로 예측하고 있다(IEA, 2023).

우리나라는 2030년 BAU 대비 37% 감축목표를 정하였다(산업통상자원부, 2019). 주로 연료전지를 사용하는 수송분야와 재생에너지를 이용한 그린수소생산 방향을 설정하고 있다. 2018년 기준 연간 수소생산 13만 톤을 2040년대 526만 톤으로 증가시키는 목표를 정하였다. 정책 방향은 주로 수소차, 연료전지 국산화이며, 생산분야는 추출수소(LNG 증기개질 등), 해외수입과 유류 재생에너지를 사용한 수전해 수소생산을 설정하고 있다.

우리나라의 수소정책방향은 수소생산의 주안점으로 온실가스배출을 피할 수 없는 LNG 증기개질과 온실가스 발생장소를 해외로 전환시키는 방식으로 전 지구적 탄소중립을 목표하는 기후변화 대책과는 거리가 있어 보인다.

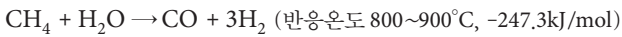
III. 수소생산방식

현재 수소는 정유공정과 비료생산에 사용되며 석탄의 코크스화에서 발생하는 부생수소와 천연가스 증기개질로 대부분 생산하고 있다. 그러나, 이 방식은 동반하는 이산화탄소 등 온실가스방출을 피할 수 없다.

물을 분해해서 수소를 생산하는 방식은 온실가스방출을 배제할 수 있으므로, 기후 변화가 현실화되고 있는 현대에는 물분해 수소생산을 적극 보급해야 한다. 물을 분해하는 방식으로는 전기에너지를 사용하는 전기분해(수전해)와 고온의 열에너지를 사용해서 화학반응을 조합한 열화학 사이클 방식이 있다.

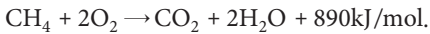
1. 천연가스 증기개질

천연가스 수증기개질의 주성분인 메탄의 증기분해 화학반응식은 다음과 같다.

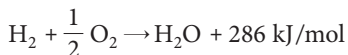


통상적으로 개질반응에 필요한 열은 천연가스 연소로 공급하므로 반응에 의해 발생하는 이산화탄소 외에도 온도유지를 위한 연소로 이산화탄소가 발생한다.

메탄의 연소반응 방정식은 다음과 같다.



수소의 연소 반응방정식은 다음과 같다.



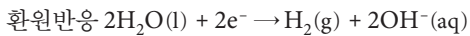
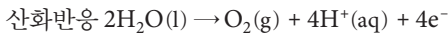
즉, 천연가스 증기개질하여 수소를 생산하더라도 같은 열량생산을 위해 발생하는 이산화탄소는 동일하다. 온실가스 발생측면에서는 증기개질 시 발생하는 이산화탄소를 분리 포집 처리하지 않는다면 net-zero에 기여하는 바는 없다고 할 수 있다.

천연가스 증기개질에 의한 수소생산은 생산단가가 약 1.3\$/kg-H₂으로 가장 경제적인 방법이다(Oni, 2022). 그러나 1kg 수소 생산에는 8~10kg의 이산화탄소가 방출되어 이산화탄소를 포집하여 제거하는 기술도 개발되고 있으며 이 경우에는 생산단가 증가가 예상된다.

2. 수전해

수전해 방식은 잘 개발되어 있으나, 필요한 전기에너지는 열에너지를 변환하는 발전 단계를 거쳐야 얻게 되므로 에너지 효율 측면에서는 열화학 사이클에 비해 불리하다. 그러나, 전력공급인프라는 잘 갖춰져 있으므로, 전체적으로는 장점이 있다.

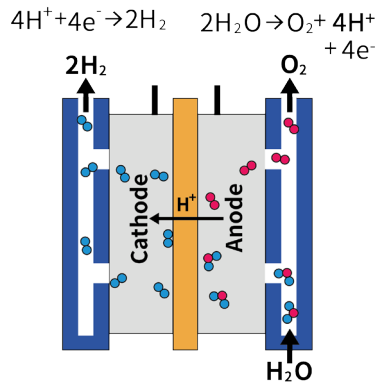
수전해 방식의 원리는 [그림 1]처럼 분리막을 중심으로 양극과 음극을 배치하여 가해진 전압으로 물분자를 이온화시켜 산화-환원반응을 일으킨 후 생성된 이온을 분리막으로 분리하는 방식이다. 이온을 분리막으로 분리하여 수소와 산소를 분리하면 음극에서 수소가스, 양극에서는 산소가스가 발생한다. 분리막을 통과시키는 이온에 따라 수전해 방식을 구분한다.



가. 알카리 수전해

전통적인 물의 전기분해 방식은 알카리수용액을 분해하는 방식이다, 분리막으로는 수산화이온(OH-)을 투과하는 석면이나 이를 대체한 Zirfon을 사용한다. 알카리 전기분해

[그림 1] PEM 전기분해



방식은 50~80도 정도의 가성칼리(KOH) 수용액에 1.8~2.4볼트전압을 가한다. 효율은 52~69% 정도로 낮은 단점이 있다. 이 방식은 전력밀도가(400mA/cm²) 낮으나, 오래 동안 잘 정립된 방식이다.

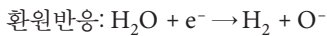
나. PEM 수전해

PEM(Polymer Electrolyte Membrane) 전기분해방식은 양성자(H⁺)을 투과하는 Nafion 등의 플라스틱소재 분리막을 사용한다. 높은 전류 밀도로 4.4W/cm²로 알카리전해방식보다 높아서 1MW 급이 알카리전해 방식으로는 20m³ 정도의 부피가 필요하나, PEM 방식에서는 0.5m³ 정도 부피를 차지한다(Carmo, 2022).

다. 고온수증기 분해

상온에서 물분자를 수소이온을 만들기 위해 필요한 이론적 전압은 1.23볼트이나, 그러나 액체인 물을 수소기체와 산소기체로 분리해야 하므로 이론적 최소전압은 2.06볼트이다(Shiva, 2019). 따라서 보다 값싼 에너지인 열로 물을 수증기 상태로 만든 후 비싼에너지인 전기로 분해하는 것이 유리하다.²

고온수증기전기분해(High Temperature Steam Electrololysis) 는 고온의 수증기에 전압을 가해 수소분자와 산소이온을 형성하고 세라믹 전해질을 통과시킨 후 산소분자로 환원한다(Yildiz, 2005). 온도가 높아질수록 Gibbs 자유에너지가 높아져 반응에 필요한 전압은 낮아진다. 산소이온(O₂⁻)을 투과하고 고온 내구성이 좋은 세라믹전해질을 사용한다.



고온수증기분해에 적합한 섭씨 650~750도에서 내구성을 보이는 전해질로는 YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) 등이 사용된다.

2 열에너지를 전기에너지로 전환하는 발전 효율은 40~50% 정도이다. 원자력발전의 경우에는 수증기 온도가 낮아서 발전효율이 낮아서 35% 정도이다.

[표 2] 전기분해방식 비교

방식	작동온도(°C)	전압(V)	전류밀도 (A/cm ²)	전력소요 (kW/kg-H/h)	기술단계
알카리 수전해	30~80	1.8~2.4	0.4	54	상용화
PEM 수전해	80~90	1.8~2.4	2~4		상용화
고온 수증기분해	650~850	~0.6	0.6	36	실증완료

라. 전기분해방식 비교

[표 2]는 전기분해방식을 비교하여 보여준다. 전류밀도가 클수록 단위면적에서 많은 수소를 생산할 수 있으므로 경제성이 높아진다. 알카리수전해, PEM 수전해는 액체상태인 물을 분해하므로 전력소요가 크다. 고온수증기분해는 이미 기체상태인 수증기를 분해하므로 에너지효율이 높다.

IV. 원자력에너지

원자력에너지는 에너지 안보와 경제성에서 우월하나, 미량의 방사능이 환경에 누출되고 사고 시 광범위한 지역에 방사능오염을 일으킨다. 또한 핵분열의 특징으로 정지 후에도 상당량의 붕괴잔열을 발생시키므로 장기간 관리하여야 한다.

1. 고온가스로

고온가스로는 삼중피복미세핵연료입자(TRISO)를 사용하는 원자로이다. TRISO 입자는 0.5밀리미터 직경의 우라늄 미세구를 삼중 세라믹피복(PyC-SiC-PyC)하여 1밀리미터 직경의 미세구로 제작한 것이다. TRISO 핵연료입자를 6센티미터 직경의 구형으로 성형하거나, 1센티미터 직경의 원통형 컴팩트로 성형하여 원자로심에 장전한다. 중성자감속재로 흑연을 사용하고 냉각재는 헬륨가스를 사용한다. 헬륨은 부식등 화학반응이 없는 불활성기체이고 흑연은 열용량이 커서 원자로사고시 발생하는 급격한 온도변화, 화재, 핵연료 용융 등의 가능성을 원천적으로 배제할 수 있다. 원자로가 세라믹 소재로 구성되어 섭씨 1,000도 이상의 고온에서도 기계적, 화학적 안전성을 담보할 수 있다. 고온의

열을 이용하기 위한 금속재료 열교환기는 섭씨 900도 이상의 온도에서 내구성이 떨어지므로, 현실적으로는 섭씨 750도 정도의 열을 발생하는 고온가스로(HTGR)과 섭씨 950도를 목표로하는 초고온가스로(VHTR)로 구분된다.

사용하는 열의 온도가 높을수록 전력생산효율이나 수소생산효율은 높다. 750도 열을 생산하는 중국의 HTR-PM의 열효율은 40% 정도이며(Zhang, 2007), 950도 초고온가스로인 GTHTTR-300의 열효율은 47% 정도이다(Sato, 2014).

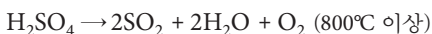
일본은 섭씨 950도를 생산할 수 있는 시험로 HTTR을 건설하여 운전 중이며 이를 이용한 수소생산을 연구 중이다.

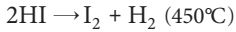
2. 원자력에 의한 수소생산

원자로는 열을 발생하는 장치이며 이 열을 이용하여 전력을 생산한다. 원자력으로 수소를 생산하기 위해서는 고온의 열과 전력을 사용해야 한다. 고온열만으로 물을 직접 분해하려면 섭씨 3,000도 이상의 열이 필요하나, 각종 화학반응을 조합하면 물을 분해할 수 있다. 다양한 열화학 사이클이 제시되어 황산분해와 요오드산 분해를 조합한 요오드-황 공정(IS Process), 구리-염소를 사용하는 Cu-Cl 사이클 등이 검토되고 연구되었다. 물을 분해하여 수소를 생산할 때는 온도가 높을수록 적은 전력이 필요하다. 전력을 생산하기 위해서는 온도가 낮아진 열을 외부에 방출해야 한다. 일반적으로는 고온의 열을 직접 사용하여 전력 소요를 줄이는 것이 전체적 효율에 이득이 된다. [그림 2]처럼 원자로의 출구온도가 높아질수록 수소생산효율도 높아진다. 고온수증기전기분해(HTSE)의 효율은 온도에 따라 완만하게 증가하여 최대 50% 가까운 효율을 보이고, 열화학 사이클인 SI(Sulfur-Iodine)은 700도 부근의 문턱온도가 존재하나, 온도에 따라 급격히 효율이 증가한다. 열화학과 전기분해의 혼합인 HyS(Hybrid Sulfur)는 중간의 효율 증가를 보인다. 열화학 사이클은 생산용량증설이 분리막에 의존하는 전기분해방식보다 유리하다.

가. IS 열화학 사이클

IS 열화학 사이클은 다음과 같은 3가지 화학반응의 조합으로, 물이 들어가서 산소와 수소가 발생되고 황(Sulfur)와 요오드(Iodine)은 재순환된다.

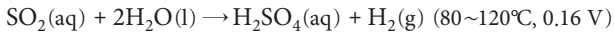




이 사이클의 장점은 수소생산효율이 50% 정도로 높다. IS 사이클이 가장 많이 연구되어 부분공정은 성공적이었으나, 화학반응의 불안정성으로 안정적인 전체 공정은 아직 실증되지 못했다. 그러나, 850도 이상의 고온이 필요하고, 황산, 요오드산의 부식성이 크다는 단점이 있다.

나. HyS 열화학 사이클

HyS(혼합 황산) 열화학 사이클은 IS 열화학 사이클에서 아황산가스를 황산으로 전환하는 과정을 전기분해를 통해 달성함으로써 순 열화학 사이클인 IS 사이클을 단순화한 것이다.

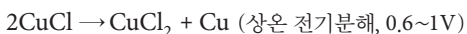
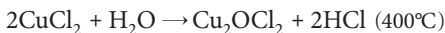


이 사이클은 웨스팅하우스에서 상당한 연구를 진행하여 WSP(Westinghouse Sulfur Process)라고도 한다.

전기분해는 PEM 수전해와 동일한 방법으로 할 수 있다(Gorensek, 2009). 혼합황산 사이클의 순 효율은 25~30%로 알려져 있다.

다. Cu-Cl 열화학 사이클

Cu-Cl 열화학 사이클은 다음과 같은 4가지 화학반응의 조합이다.



이 방식은 작동온도가 섭씨 450~500도로 상대적으로 낮다는 장점이 있으나, 반응 요소인 구리가 고체이므로 연속 공정 달성에 어려움이 발생한다. Cu-Cl 사이클은 초임

계경수로를 추진하던 캐나다에서 적극적으로 연구하고 있다.

Cu-Cl 열화학 사이클의 효율은 33~37%로 추정된다(Tin, 2020).

라. 고온수증기전기분해

고온의 수증기를 전기분해하는 방식으로 통상적으로 섭씨 900도 이상의 고온의 열을 발생시킬 수 있는 초고온가스로를 사용하는 방식이 검토되어 왔다.

고온 수증기분해는 800도 세라믹 산화막을 SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)를 사용하여 낮은 전압으로 물을 전기분해하는 방식이다(Frick, 2019).

경수로의 경우, 터빈을 돌리고 나온 수증기의 일부를 응축기(Condensor)를 거치지 않고 재가열한 후 전기분해하는 방식은 기존 경수로 시설의 일부분을 개량하여 수소를 생산할 수 있으므로, 원자력발전의 시설 용량이 많아서, 부하추중 운전이 필요한 상황에서 유용하다(Bragg-Sittion, 2020).

마. 천연가스 증기개질

고온가스로의 열에너지로 천연가스를 증기개질하는 방식으로 천연가스를 연소하여 열 에너지를 얻는 기존 천연가스증기 개질에 비해 동일 양의 수소를 생산하기 위한 천연가스 소요량과 이산화탄소 발생면에서 유리하다. 천연가스 증기개질로 1kg의 수소를 생산하려면 증기개질 과정에서 9.3kg의 이산화탄소가 발생하게 되는데 수소 1kg의 에너지와 같은 1갤런의 휘발유를 연소시키면 9.1kg의 이산화탄소가 발생하므로 증기개질에 의한 수소생산은 지구의 기후변화 방지에 큰 기여를 하지 못한다는 주장이 있다(Rapier, 2020). 증기개질에 필요한 열을 원자로에서 공급한다면, 천연가스연소에 수반되는 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다(Zhang, 2021).

일본 HTTR로 실증을 완료하였으나, 일반 천연가스 증기개질과 마찬가지로 동반하는 온실가스 배출을 완전히 줄이지 못하고 초고온가스로를 신규로 건설해야 하므로 아직 실용화되지는 못하고 있다.

바. 경수로이용 저온전기분해

경수로로는 타 발전원에 비해 온실가스 배출이 없으며, 기술이 완성되어 있고 발전단가가 낮다. 저온전기분해 기술도 이미 상용화되어 있으므로 경수로에서 생산된 전력을 이용하여 저온전기분해를 한다면, 보다 효율이 높은 기술이 개발될 때까지 대량의 수소 공

급을 할 수 있다(OCED, 2022).

원자력발전업자 측면에서는 전력시장에 공급하기 전에 수소생산을 할 수 있고 자본비가 높은 비중을 차지하는 원자력발전소를 전출력으로 가동하여 생산단가를 낮출 수 있다. 간헐성이 큰 태양, 풍력 전기의 비중이 커질수록 이러한 필요성은 증대된다.

미국 DOE는 기존발전소에 PEM 전기분해로 560kg의 수소를 생산하는 1MW급 시범시설을 실증하였다(WNN, 2023). 생산된 수소는 발전소에서 필요한 자체 수소수요를 충당하고 있다.

V. 우리나라의 수소경제 정책

1. 에너지 자립

우리나라의 연간 1차에너지 공급량은 307.6MTOE이며 국내생산량은 신재생에너지와 수력 등이 24.4MTOE로 1차에너지의 92%를 수입에 의존한다³(에너지경제연구원, 2021). 이는 열량기준으로 석탄 86.7, 석유 81.6, LNG 55.2, 우라늄 28.4MTOE에 해당한다.

에너지 수입액은 총 146M\$로 국가총수입액 535M\$의 27%를 차지하고 있다. 이중 석유 105.5M\$, 석탄 16.7M\$, 천연가스 23.2M\$, 우라늄 0.576M\$으로 구성된다. 생산한 열량당 수입에 지급한 비용은 석유 1.3, LNG 0.42, 석탄 0.2, 우라늄 0.02\$/TOE로 석유가 가장 비싼 에너지원이고, 우라늄은 가장 저렴한 에너지원이다.

수입된 석유의 47%는 수송부분에 사용되므로, 자동차 연료를 수소로 전환한다면, 에너지 수입을 위해 외국에 지불하는 비용이 크게 줄어들 것이다.

단위 수입비용이 압도적으로 적은 원자력에너지 이용은 에너지 자립도를 크게 향상시킬 것이다.

3 에너지 소비가 가장 큰 2018년을 기준으로 하였음.

2. 에너지 안보

IEA(International Energy Agency)에 의하면 에너지안보란 에너지를 적절한 가격으로 충분히 공급할 수 있는 능력이다. 에너지 안보는 경제개발에 따른 장기적 투자 측면과 일시적 수급불균형에서 발생하는 단기적 측면으로 구분된다.

우리나라는 대부분의 에너지를 수입해야하므로 단기적인 측면에서 국내 비축분이 많을 수록 에너지 안보에 유리하다. 석유, 천연가스 등은 “에너지법”에 따라 비축기지를 건설하여 비축하고 있으나 3개월 사용량 정도로 제한되고 있다. 또한 전쟁 시에는 용이한 폭격 목표가 될 수 있을 뿐만 아니라 화재 또는 불순분자에 의한 파괴 목표가 될 수 있다(통진당 사전, 2013).

원자력발전소의 연료는 에너지밀도가 높은 LNG보다 1만 배 정도 높은 에너지밀도로 보관이 용이하므로 가격변동성이 적다. 원자로에 장전후 5년 정도 사용하게 된다. 신규 연료도 3년간 국내 원자력발전소에 공급할 수 있는 물량을 국내에 확보하고 있다(정세영, 2023).

또한 연료비가 발전비용의 대부분을 차지하는 천연가스, 석탄과 달리 원자력 발전에서는 연료비가 5~10% 이내이다.

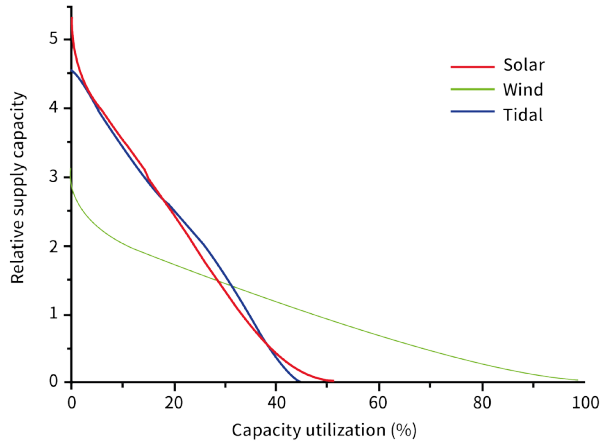
원자력에너지의 적극적 이용은 원자력연료인 우라늄을 대량 장기보관함으로써 에너지 공급가격안정과 중동과 미중관계에서 발생하는 국제 물류공급망의 불안정성에 대처할 수 있다.

3. 재생에너지

태양, 풍력, 조력 등 자연에너지는 이산화탄소 배출없이 전력을 생산할 수 있는 에너지원이다. 그러나, 기상조건에 따라 발전량 변동이 심한 간헐성의 문제가 존재한다. [그림 2]는 우리나라의 재생에너지 이용율을 보여준다. 풍력은 시설용량 이용율이 32%로 높은 편이고, 조력과 태양은 20% 정도이다. 재생에너지 발전량 중 태양광은 [그림 3]처럼 2012년 이후 증가하였고 2018년 이후에는 더 급격히 증가하였다(에너지 통계연보, 2021).

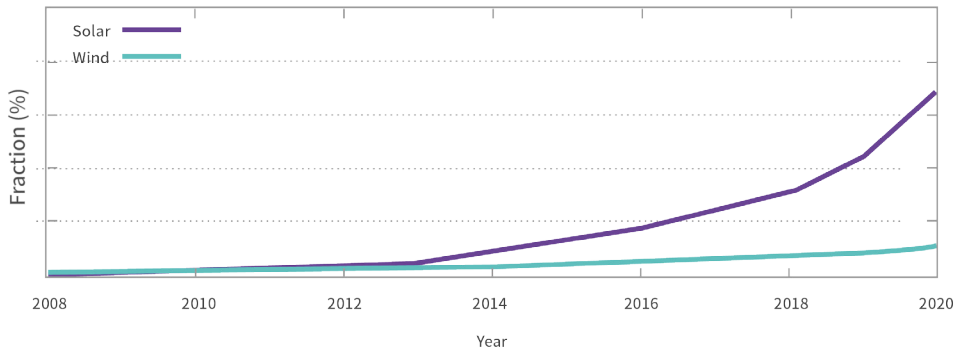
과도한 재생에너지 전력공급은 기저부하, 변동부하로 구분되는 전력망 체계를 타격하여 안정적 전력공급과 주파수유지를 방해한다. 이를 완화하기 위해서는 잉여전력을 이용한 수전해 수소생산을 활성화해야 한다(산업통상자원부, 2023).

[그림 2] 재생에너지 이용율



출처: 전력거래소, 2013년 자료 처리

[그림 3] 전력생산중 재생에너지 비율

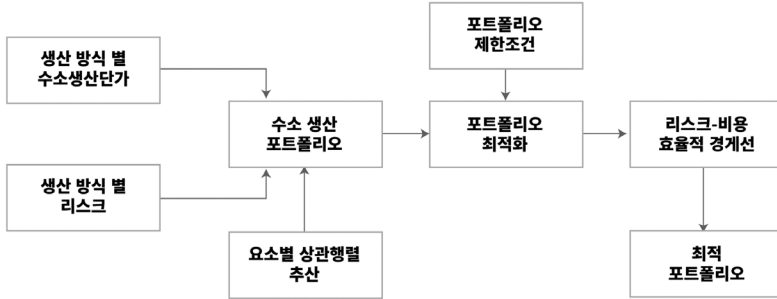


출처: 에너지 통계연보, 2021 자료 처리

4. 포트폴리오

각 에너지원별로 장단점이 있으므로 1차 에너지 선정 시 에너지안보, 경제성, 환경오염,

[그림 4] 수소생산 최적포트폴리오 결정 방법



온실가스배출량, 위험도 등의 가중치를 설정하고, 가격변동성 등의 분산을 고려한 포트폴리오를 구성해야 한다. Markowitz는 MVP(Maximum Variance Principle)방법론을 주식투자의 포트폴리오에 적용하였다(Markowitz, 1952). MVP는 각각의 요소가 불확실한 가격변동성을 가지나 서로 상관관계에 있는 경우에 적용할 수 있다. Awerbuch는 석탄, 가스, 원자력, 수력, 태양 등의 전력원을 이용한 유럽의 전력생산을 분석하였다. 이 분석에서는 불확실한 탄소세를 고려하여 비용과 리스크를 최소화할 수 있는 포트폴리오를 구하였다(Awerbuch, 2007). 유사한 분석을 원자력과 석탄, 천연가스, 전력 등의 방법으로 수소생산 포트폴리오에 적용한 실례도 있다(장중화, 2009).

최적 포트폴리오 결정을 위해서는 [그림 4]와 같은 절차가 필요하다. 다양한 수소생산에 대한 예상 수소생산단가와 수반되는 불확실도(리스크)를 결정해야 한다. 생산단가에는 건설비, 건설기간, 투자기간, 연료비, 운전비, 유지보수 비용, 탄소세가 포함되며 각 요소는 물가변동에 따른 불확실성이 존재한다.

각국마다 에너지가격, 에너지안보, 이산화탄소 감축 등의 지표가 다르므로 근년의 물가 변동을 고려한 포트폴리오 분석이 필요하다. 또한 대체 가능한 생산요소 간에는 상관관계가 존재한다. 이러한 상관관계는 과거의 물가변동을 분석하여 얻을 수 있다. 여기에 각 요소의 제한조건을 고려한 MVP 분석을 통해 리스크-비용의 효율적 경계선을 결정할 수 있으며, 최적 포트폴리오를 도출할 수 있다. 미래 기술인 경우에는 개발비용, 예상 배치물량, 도입 가능시기, 성공가능성 등을 예측하여 비용, 리스크에 추가할 수 있다.

VI. 결론

수소는 전력과 같은 에너지 담체로 단위 연료 무게당 높은 에너지밀도를 요구하는 수송 분야에서 중요성을 가진다. 수소는 현재의 배터리 기술보다 200배 정도 높은 에너지밀도를 가지고 있다. 에너지 담체는 담체 생산장소와 소비장소를 분리시켜 인구밀집지역의 공해 요소의 줄일 수 있으나, 현재 널리 사용되는 천연가스 증기개질 방식은 전지구적으로 보면 변환효율을 고려할 때 온실가스방출량은 오히려 늘어날 수도 있다. 따라서 기후변화 완화를 위한 Net-Zero 목표를 달성하기 위해서는 이산화탄소 배출이 없는 1차에너지를 사용해야 한다. 기상조건에 따라 생산량이 급변하는 태양광, 풍력을 이용한 수소생산은 적합한 방향이다. 과도한 태양광전기 생산이 간헐성으로 전력망에 부담을 주는 점을 고려하여 전력생산에 지급되는 보조금을 수소생산 부분으로 전환할 필요가 있다. 인구밀도가 높은 우리나라에서 재생에너지 생산은 한계가 있으므로 부족한 부분은 이산화탄소 배출이 없는 원자력에너지를 이용하여 수소를 생산하는 것이 현실적인 방향이다. 원자력활용은 현재 에너지자립도와 에너지안보확립에 절대적인 기여를 하고 있다.

원자력이용 수소생산방식으로 유희전력을 이용한 수전해, 경수로 배출 수증기를 재가열하는 고온수증기분해는 단기적으로 실용화할 수 있는 방향이며, 장기적으로는 보다 높은 효율을 보장하는 고온가스로를 이용한 열화학 사이클 또는 고온수증기분해를 실용화하기 위한 연구개발투자가 필요하다. 합리적인 투자배분은 MVP 방법론을 적용하여 도출할 수 있다.

참고문헌

- 산업통상자원부, “봄철 안정적 전력수급관리를 위한 선제적 조치 추진”, 산업통상자원부, 보도자료, 2023. 3.24.
- 산업통상자원부, “수소경제 활성화 로드맵”, 산업통상자원부, 보도자료, 2019.1.18.
- 에너지경제연구원, 『에너지통계연보 2021』, 에너지경제연구원, 2021.
- 장중화, “Portfolio Analysis for Nuclear Hydrogen”, 4th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Chicago USA, 2009.
- 정세영, “韓 우라늄 수급엔 문제없나…美 HALEU 공급망에 참여하거나 자급 기반 마련해야”, 전기신문, 2023.1.2.
- 탄소중립기본법, “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법”, 법률 제19308호, 2023.3.28.
- 통진당사건, “이석기 내란 선동 사건”, 나무위키, 2023(검색일: 2023.5.1).
- 파리협약, “The Katowice Climate Package: Making The Paris Agreement Work for All,” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/katowice-climate-package> (검색일: 2023.5.16).
- Awerbuch, S. and S. Yang. “Efficient Electricity Generating Portfolios For Europe: Maximising Energy Security and Climate Change Mitigation,” EIB Pap.12 (2), 2007, pp. 8-37.
- Bragg-Sittion, S.S. and R. Borardman, “Integrated Energy Systems for Hydrogen & Chemical Production,” Hydrogen and Fuel Cell Energy, Annual Merit Review, May 2020.
- Carmo, “Introdictiom to Liquid Alkaline Electrolysis,” DOE Hydrogen Energy Earthshot Expert Meeting, 2022.1.26.
- COP21, “UN Climate Change Conference,” Paris, 2015.12.15.
- COP24, “UN Climate Change Conference,” Katowice, Poland, 2018.12.12.
- Frick, K. et al., “Evaluation of Hydrogen Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest,” INL/EXT-19-55395 Rev.1, Sept. 2019.
- Gorensek, M.B. et al., “A Thermodynamic Analysis of the SO₂/H₂SO₄ System in SO₂ Depolized Electrolysis,” SRNL-STI-2009-00377, 2009.
- Hydrogen Europe, “Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition,” Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Jan. 2019.
- Hydrogen Council, “Path to Hydrogen Competitiveness: A Cose Perspective,” Hydrogen Council, 2020.1.
- IEA, “Hydrogen, International Energy Agency,” Paris <https://www.iea.org/reports/hydrogen> (검색일: 2023.5.1).
- IPCC AR6, “Synthesis Report of the IPCCV Sixth Assessment Report,” IPCC, 2023.

- Markowitz, H.M. "Portfolio Selection," *J. Finance* 7, 1952, pp. 77-91.
- OECD, "The Role of Nuclear Power in the Hydrogen Economy, Cost and Competitiveness," NEA No. 7630, OECD, 2022.
- Oni, A.O. et al., "Comparative Assessment of Blue Hydrogen from Steam Methane Reforming, Auto-thermal Reforming, and Natural Gas Decomposition Technologies for Natural Gas-producing Regions," *Ener. Conv. and Mgmt.*, 254, 115245, 2022.
- Rapier, "Estimating the Carbon Footprint of Hydrogen Production," *Forbes*, June 6, 2020.
- Rifkin, Jeremy, "The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth," *TarcherPerigee*, 2003.8.25.
- Sato, H. et al., "GTHTR300 - A Nuclear Power Plant Design with 50% Generating Efficiency," *Nucl. Eng. Design* 275, 2014, pp. 190-196.
- Tin, K.K., S. Swarup, and A. Kumar, "A Review of Nuclear Energy-based Hydrogen Production Methods," selected proc. of RAME 2020, pp. 131-142.
- UN, <https://www.un.org/en/climatechange/>, United Nations - climate action (검색일: 2023.4.30).
- WNN, "Nine Mile Points Start Supplying Hydrogen," *WNN*, 2023.3.8.
- Yildiz, B., K.J. Hohnholt, and M.S. Kazimi, "Hydrogen Production Using a Gas Reactor Operating with Supercritical CO₂ Cycles," *Nuc. Tech.* 155, 2005, pp. 1-21.
- Zhang, Y., "Thermodynamic Analysis and Optimization for Steam Methane Reforming Hydrogen Production System Using High Temperature Gas-cooled Reactor Pebble-bed Module," *J. Nuc. Sci. Tech.* 58(8), 2021, pp. 1-14.
- Zhang, Zuoyi, "Chinese HTR Program: HTR-10 Results and Work Progress on HTR-PM," *ICAPP-2007*, Nice, 2007.

“원자력전략·정책연구” 논문의 투고 요령

- 본 학술지는 원자력 전략과 정책 등과 관련된 이론 및 정책 논문을 게재한다.
- 타 학술지에 게재하였거나 투고하여 심사 중인 논문은 투고할 수 없다. 단, 연구기관 발간분석보고서 및 연구용역보고서 등을 논문 형식으로 수정·보완하여 투고한 경우, 편집위원장의 판단을 거쳐 심사를 진행하되 원문의 출처를 밝히고 수록할 수 있다.
- 본 학술지는 연 2회(6월 30일, 12월 31일) 발간하며, 논문은 연중 상시 모집한다.
- 논문을 투고할 때 초록은 핵심내용을 모두 포함한 400자 이내의 국문초록, 200단어 이내의 영문초록, 그리고 국문 및 영문 제목, 5개 이내의 국문 및 영문 주제어를 함께 기재하여 제출한다. 모든 논문은 아래아한글로 작성한다.
- 논문 투고자는 이메일을 통해 투고논문, 연구윤리규정 준수 서약, 투고논문에 대한 저작권재산권 이양 동의서를 제출한다.
- 본 학술지에 게재하는 논문에 대한 저작권재산권은 서울대학교 원자력미래기술정책연구소가 갖는다.

논문의 작성요령

- 논문은 다음 양식에 따라 작성하고, 분량은 본문, 각주, 참고문헌을 포함하여 A4용지 10매 내외로 하며 어떠한 경우라도 15매를 초과할 수 없다. 정해진 분량을 초과한 원고는 심사 전 분량에 맞게 수정을 요청한다.
- 용지: A4, 단면, 좁게, 위/아래/왼쪽/오른쪽 여백 30, 머리말 15, 꼬리말 0, 제본 0
- 문단모양: 좌/우 여백 0, 줄간격 180, 문단 시작 들여쓰기 한글 2글자, 양쪽 혼합, 낱말 간격 0
- 글자모양: 한글(휴먼명조), 본문 글자 크기 11포인트, 각주 글자 크기 9포인트, 장평 100%, 자간 0%
- 본문의 항목 구분은 절, 항, 목의 순으로 배열한다. 항목에 붙는 항번의 경우, 절은 ‘I, II, III, ...’(글자 크기 20포인트)의 순으로, 항은 ‘1, 2, 3, ...’(13포인트)의 순으로, 목은 ‘가, 나, 다, ...’(12.5포인트)의 순으로 번호를 매긴 후, 제목을 표기한다.
- 논문 첫머리의 필자 등의 소개를 위한 각주는 *, **, *** 등의 기호를 사용하고 본문에

서의 일반적인 각주는 1, 2, 3 등으로 표기한다.

- 수식의 경우 번호 매김은 절, 항의 구분 없이 우측 정렬하여(선 없음), 괄호 속의 일련 번호 ‘(1), (2), (3), …’로 표기한다.
- 간단한 인용논문의 표기는 각주로 처리하지 않고 본문 중에서 직접 처리한다. 외국저자의 경우는 국문으로 번역하지 않고 원문 표기를 원칙으로 한다. 저자가 두 명 이상인 경우는 다음 예와 같이 표기한다. “1) Duflo, Kremer, and Robinson(2011)과 최광(2003b)에서 언급한 내용을 정리하면… 2) 기존 연구(옥동석 외, 2010; 고영선, 1999)를 토대로 재정리한 결과는 다음과 같다.”
- 표나 그림에는 일련번호를 부여한다. 예) [표 1], [표 2], …, [그림 1], [그림 2], …
- 본문과 각주에서 언급된 모든 문헌의 자세한 문헌 정보는 논문 말미의 참고문헌에서 밝힌다. 본문과 각주에서 언급되지 않는 문헌은 포함시키지 않는 것을 원칙으로 한다.

참고문헌의 작성요령

- 각 문헌은 한글, 기타 동양어, 영어, 기타 서양어 문헌 순으로 배치하며, 배열의 순서는 동양 문헌은 “가나다 순”으로, 서양 문헌은 “알파벳 순”으로 한다.
- 페이지 표시는 한 면일 경우 p., 여러 면일 경우 pp.로 표시한다.
- 같은 저자의 여러 문헌은 연도순으로 나열하며 같은 해에 발행된 문헌이 둘 이상일 경우에는 글에서 언급된 순서에 따라 발행 연도 뒤에 a, b, c를 첨가하여 구분한다.
- 각각의 문헌의 구체적인 표시는 아래에 제시된 형식에 따라 작성한다. 논문(학위논문 포함), 기사, 인터넷 자료 등은 동양 문헌 및 서양 문헌 모두 큰따옴표(“ ”)로 표시한다.
- 저서 또는 번역서(그리고 편저서, 학회지, 월간지, 주간지, 일간지 등)는 동양 문헌의 경우는 낫표(『 』)로, 서양 문헌의 경우는 기호 없이 이탤릭체(*italic*)로 표기한다.
- 인터넷 자료를 인용하는 경우, 제작자, 주제명, 제작연도, 웹주소(검색일자)의 순으로 한다.

참고문헌 작성 예시

- 고경민, 정범진, “원자력의 경제성: 쟁점 검토와 해결 과제”, 『에너지경제연구』 제11권 제2호, 2012, pp. 191-219.
- 국가통계포털, 국내통계 <<http://kosis.kr>>, 2010(검색일: 2011.11.30).
- 문주현, “핵무기 감축 효과 측면에서 북한의 영변 핵시설 폐기안 평가”, 『국가전략』 제25권 제2호, 2019, pp. 67-90.
- 문주현, “탈원전 굴레 벗은 원전산업이 이룬 성과와 과제”, 에너지경제신문, 2023년 1월 8일자.
- 어근선, 『다시 생각하는 원자력』, MID 엠아이디, 2022.
- 원자력진흥위원회, 『제6차 원자력진흥종합계획』, 원자력진흥위원회, 2021.
- 이병철, “한국의 핵농축 권한에 대한 소고”, *Journal of North Korea Studies* 제6권 제2호, 2020a, pp. 5-22.
- 이병철, “한국 핵무장 담론의 새로운 방향 모색”, 『국방연구』 제63권 제2호, 2020b, pp. 27-58.
- 이지민, “소형모듈원자로 해회 기술개발 동향”, 『원자력 정책 Brife Report』 통권 64호, 한국원자력연구원, 2022.
- 이찬복, 『에너지 상식사전』, MID 엠아이디, 2019.
- 조건우, 『조건우의 방사선방호 이야기』, 집문당, 2020.
- 조규성 역, 『환경주의 생물학자가 바라본 WHY 원자력이 필요한가』(*Why We Need Nuclear Power*, Michael H. Fox), 글마당, 2000.
- 주필현, 최성열, 이종호, “Analysis of Nuclear Power Build-up Scenario for Net Zero Carbon in 2050”, 『2022 추계학술발표회』, 한국원자력학회, 2022.
- Abousahl, S., P. Carbol, B. Farrar, H. Gerbelova, R. Konings, K. Lubomirova, M. Martin Ramos, V. Matuzas, K. Nilsson, P. Peerani, M. Peinador Veira, V. Rondinella, A. Van Kalleveen, S. Van Winckel, J. Vegh, and F. Wastin, “Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the ‘Do No Significant Harm’ Criteria of Regulation (EU) 2020/852 (Taxonomy Regulation),” JRC125953, Publications Office of the European Union, 2021.
- Choi, Sungyeol, Eunju Jun, Il Soon Hwang, Anne Starz, Tom Mazour, Soon Heu-

ng Chang, and Alex R. Burkart, “Fourteen Lessons Learned from the Successful Nuclear Power Program of the Republic of Korea,” *Energy Policy*, vol. 37 no. 12, 2009, pp. 5494–5508.

- OECD/NEA, “The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle,” OECD Publishing, 2013.
- Sagan, D. Scott, “The Causes of Nuclear Weapons Proliferation,” *Annual Review of Political Science*, vol. 14, 2011, pp. 225–244.
- Man-Sung Yim, “Nuclear Waste Management: Science, Technology, and Policy,” *Lecture Notes in Energy*, Springer Nature B.V., 2022.

『원자력전략·정책연구』 편집위원회

편집위원장	문주현(단국대학교 에너지공학과)
편집위원	심형진(서울대학교 에너지시스템공학부)
	이병철(경남대학교 극동문제연구소)
	전은주(한국원자력연구원 국제사업부)
	조비연(한국국방연구원 안보전략연구센터)
	최성열(서울대학교 에너지시스템공학부)
편집간사	장재환(서울대학교 원자력미래기술정책연구소)

『원자력전략·정책연구』는 6월 30일, 12월 31일 연 2회 발행됩니다.

원자력전략·정책연구

제1권 제1호, 2023년 창간호

2023년 6월 30일 발행

발행처	서울대학교 원자력미래기술정책연구소
발행인	김근호
편 집	서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력전략·정책연구 편집위원회 (08826) 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학(32동) 313호 전화: 02-880-7231 팩스: 02-880-7386
인 쇄	서울대학교출판문화원 전화: 02-880-5220 팩스: 02-871-9473

ISSN 2983-1547

Review on Nuclear Energy Strategy and Policy

Vol. 1 No. 1 2023

Nuclear Future Vision for 2050: Advice for the Export of 10 Nuclear Power Plants by 2030 after the Export of Barakah Nuclear Power Plants to the UAE

Ki-Sig Kang

The Current Status and Success Factors of Small Reactor Development

Yunho Kim

Proposal to the Policy on the Re-vitalization of the Korean Nuclear Industry

Seokbin Park

The Present and Future of Used Nuclear Fuel Management in Korea

Junwoo Park and Jong-Il Yun

Issue of Violating International Norms in Case of South Korea's Nuclear Build-Up for Military Purpose, and Realistic Ways to Strengthen Nuclear Deterrence

Dong-Ik Shin

Current Status and Issues of Risk-informed Approach in Nuclear Area

Joon-Eon Yang

Restructuring Nuclear Industry for the Enhancement of Nuclear Power Plant Export Competitiveness

Jongho Lee

Nuclear Hydrogen for Realization of Net Zero

Jonghwa Chang