

원자력 기술혁신에 대한 고찰: 4세대 원자력 에너지기술 전환 이슈를 중심으로

박시훈* · 정선양**

<목 차>

- I. 서론
- II. 문헌연구
- III. 연구방법
- IV. 4세대 원자력에너지기술 전환에
영향을 미치는 요인 도출
- V. 사례분석 및 시사점 도출
- VI. 결론

국문초록 : 본 연구는 원자력기술의 혁신특성을 심층조사 함으로써 4세대 원자력에너지기술의 전환 시 발생 가능한 이슈를 이해하고 한국의 정책현황을 분석하여 4세대 원자력에너지기술의 성공적 안착을 위한 시사점을 도출하였다. 이는 현재 세계 5강의 원자력에너지기술 강국인 한국에서 4세대 원자력에너지기술의 도래에도 지속가능한 경쟁력을 유지하기 위한 중요한 정책적인 시사점으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

정성적 문헌연구방법을 통해 원자력기술혁신에 관한 문헌들을 조사한 결과, 4세대 원자력에너지기술의 전환에 영향을 미치는 요인은 크게 4가지로 확인할 수 있었다. 이는 장기간의 안정적인 자원 할당, 혁신을 위한 이해당사자 간의 지속적인 상호작용, 완전한 시스템을 위한 기술과 노하우의 축적, 적용 및 실증을 위한 정책적인 시장이었다. 이를 한국의 4세대 원

* 건국대학교 기술경영학과 박사과정 / 한국원자력연구원 연구기획팀 선임연구원 (Shpark83@kaeri.re.kr)

** 건국대학교 기술경영학과 교수, 교신저자 (Sychung@konkuk.ac.kr)

자력에너지기술과 관련한 정책을 대상으로 적용하여 사례분석을 한 결과, 현재 4세대 기술이 기술개발의 초기단계에서 실증단계로 넘어가는 시점임을 감안하더라도 관련한 정책은 실증과 운영을 위한 전문인력의 체계적인 양성 방안, 사회적 수용성과 저항에 대한 대응, 실증에 대한 구체적인 계획 수립, 4세대 원자력시스템을 적용하기 위한 정책적인 시장을 제안하는 장기적인 노력, 이해당사자들 간의 구체적이고 지속적인 상호작용을 적극 장려하는 것이 체계적으로 필요함을 제시하였다.

주제어 : 원자력기술혁신, 원자력기술, 지속가능성, 4세대 원자력시스템

Understanding the Nuclear Technological Innovation: Focussing on the Transition Issue of 4th Generation Nuclear Energy Technology

Si-Hun Park · Sunyang Chung

Abstract : In this study, we conducted an in-depth literature review of the innovation characteristics of nuclear technology. We understood that the main issue may be a transition of fourth generation nuclear energy technology. We also analyzed a present status of Korean policy on nuclear energy technology and identified some implications for a successful settlement of the fourth generation nuclear energy technology. This study could provide some policy implications for maintaining the sustainable competitiveness of the fourth generation nuclear energy technology in Korea.

According to our study, the factors that influence on a transition of nuclear energy technology are a policy-induced market for technical application and demonstration, stable and long-term resource allocation, constant interaction among stakeholders of innovation, accumulation of skill and know-how for an entire system. In addition, we conducted a case analysis on policy for Korean fourth generation nuclear energy technology. According to this case study, it would be necessary for Korea to pursue systematic training of human resources, active response to a social acceptance and reaction, establishment of specific plan for technical demonstration, long-term policy suggestion, and active promotion of constant interaction between stakeholders.

Key Words : Nuclear technological innovation, Nuclear energy technology, Sustainable innovation, 4th Generation nuclear energy system

I. 서론

원자력기술은 제도가 기술혁신에 미치는 영향이 매우 큰 거대공공기술로서(이태준·이광석, 2002; 박시훈 외, 2016) 경수로 형태의 원자로가 2~3세대까지 약 40년 이상 사용되는 등 기술에 대한 장기간의 독점적 디자인 현상과 이에 따른 종속효과가 발생하고 있다. 한편 4세대 원자력에너지기술은 이전 세대에 비해 폐기물 배출의 극적인 감소와 경제성과 안전성을 가진 시스템이면서 동시에 핵비확산에 기여하는 안전한 사용 후 핵연료를 재처리가 가능한 혁신적인 시스템이 될 것을 예견하고 있다. 이런 기술의 개발을 위해 미국을 중심으로 창설된 ‘4세대 원자력 시스템 국제포럼(GIF)¹⁾’은 한국과 미국, 유럽연합, 중국, 일본, 러시아, 프랑스, 등 주요 원자력기술 선도국을 중심으로 4세대 6개 미래 유망 원자로에 대한 집중적인 공동연구를 수행하고 있다. 한국의 4세대 원자력 에너지기술은 현재 기술개발 초기에서 실증단계로 넘어가기 위한 단계에 있다. 이러한 상황에서 성공적인 4세대 원자력에너지기술의 안착을 위한 주요한 요인을 도출하고 현 정책사례의 적용을 통해 시사점을 도출하는 것은 향후 국내 원자력발전 수요는 물론 폐기물 저감에 대한 사회적 요구를 충족 할 뿐 아니라, 차세대 원자력시스템의 수출로 국가 발전에 기여하는 등 지속가능한 경쟁력 유지를 위한 중요한 작업으로 사료된다.

기존에 원자력기술의 혁신활동과 그 특성에 대해서는 많은 논의가 이루어지지 않았고, 기술혁신이론의 한 줄기인 산업혁신시스템이론을 기반으로 하여 일반적인 수준에서 논의가 된 경우가 대부분이었다. 하지만 이런 문헌조차 원자력기술을 실증연구의 대상으로는 구체적으로 다루지 못하였다. 이 때문에 혁신활동이 기술의 특성에 따라 다양성을 가짐에도 불구하고(Pavitt, 1984; Malerba, 2004), 관련연구의 부족으로 원자력기술만의 혁신활동에 대한 심도 깊은 이해는 쉽지 않았다. 반면 혁신과 산업진화라는 주제를 이해하는 것은 경제, 역사, 사회, 기술, 경영, 조직 등의 다양한 부분을 다루어야하고, 학문적인 접근도 공학, 자연과학, 경제학, 경영학, 사회과학 등을 아우르는 다양한 요소를 통합하는 학제적 관점이 요구된다(Malerba, 2006; 정선양, 2012). 원자력기술의 혁신활동을 이해하는 데에도 이와 같은 학제적 관점의 적용이 필요한 것으로 사료된다.

위와 같은 이유로, 본 연구는 원자력기술과 그 혁신활동을 사례로서 포함하는 다양한 이론적 시각의 반영을 통해 원자력기술혁신의 특성에 대한 심층적 이해를 하고 이를 바탕으로 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인과 대응을 위한 정책적 시사

1) GIF, Generation-IV International Forum

점을 도출하고자 한다. 구체적으로 학제적 관점에서 정성적 문헌연구방법을 적용하여 4세대 원자력에너지기술의 성공적 전환에 영향을 미치는 요인을 도출하였고, 세부적인 정책사례 분석을 할 수 있는 도구로서 활용하였다. 이를 세계 5위 수준의 리더십을 가진 한국의 원자력 정책사례에 적용함으로써, 4세대 원자력에너지기술의 도래에도 지속가능한 경쟁력 유지를 위한 정책적인 시사점을 도출하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 원자력기술과 한국에서의 의미 및 기술개발 현황에 대해 논의한 문헌들을 검토하였고, 3장에서 원자력기술혁신 특성의 고찰을 위한 정성적 문헌연구 방법과 정책분석을 위한 사례연구의 적용범위를 제안하였다. 4장에서는 정성적 문헌연구 방법을 적용하여 조사된 결과를 분석함으로써 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 5장에서는 사례로서 4세대 원자력시스템과 연관한 한국 원자력정책현황의 분석을 통해 시사점을 도출하였고, 6장에서 결론을 제시하였다.

II. 문헌연구

1. 원자력기술

원자력 공학은 원자핵을 통해 에너지를 생성하거나 방사선을 이용하여 인류에 공헌하는 전문 공학이다(Lamarsh & Baratta, 2001; 한국원전수출산업협회, 2012). 초기에 원자력기술은 세계 2차 대전의 냉전에서 무기 경쟁의 발단으로 인한 폭탄으로 사용되었다. 그러나 1953년 이후 미국의 대통령인 아이젠하우어가 공표한 ‘Atoms for Peace(평화를 위한 원자)’라는 원자력기술의 평화적인 사용에 대한 조약으로 오늘날은 세계적으로 에너지를 생산하는 것에 주로 집중하여 이용되고 있다. 원자력기술은 전력생산과 잠수함, 비행기, 쇄빙선등에 이용 가능할 뿐 아니라, 방사선의 활용을 통해서 산업분야, 의학, 농업, 생명공학분야에까지 응용된다.

원자력 공학의 거대한 도전은 안전성 및 경제성은 물론 환경보호의 측면에서 원자력의 우수성을 입증하는 것이다. 또한 이것은 단지 과학과 공학적인 부분만이 아니라, 사회적인 합의와 안전성의 유지, 사용 후 핵연료의 재처리기술의 향상, 원자력 무기의 확산을 방지하는 것을 위한 국제시스템의 유지와 원자력에너지의 사용의 확대 등을 포함해야 하므로 사회과학과 과학의 측면을 모두 다루어야만 한다(NEA, 2007; 한국원전수출

산업협회, 2012).

한편 원자력에너지기술은 경수로형이라는 원자로의 형태가 장기간의 중속효과 (Cowan, 1990)와 지배적 디자인 현상(Utterback & Suarez, 1993)의 발생으로 독점적인 시장위치를 가지고 있는 분야이다. 현재 세계적으로 널리 사용되는 상용원전의 대부분은 경수로형인데, 이것은 1940년대 후기 미 해군에 의해 사용된 이후 실행을 통한 학습과 비용에 대한 학습을 통해 그 당시 유사기술대비 뛰어난 기술이 아니었음에도 이미 상업화를 위한 준비가 되어있는 경수로기술은 그 이후로 독점적 위치를 가지게 되었다(Cowan, 1990).

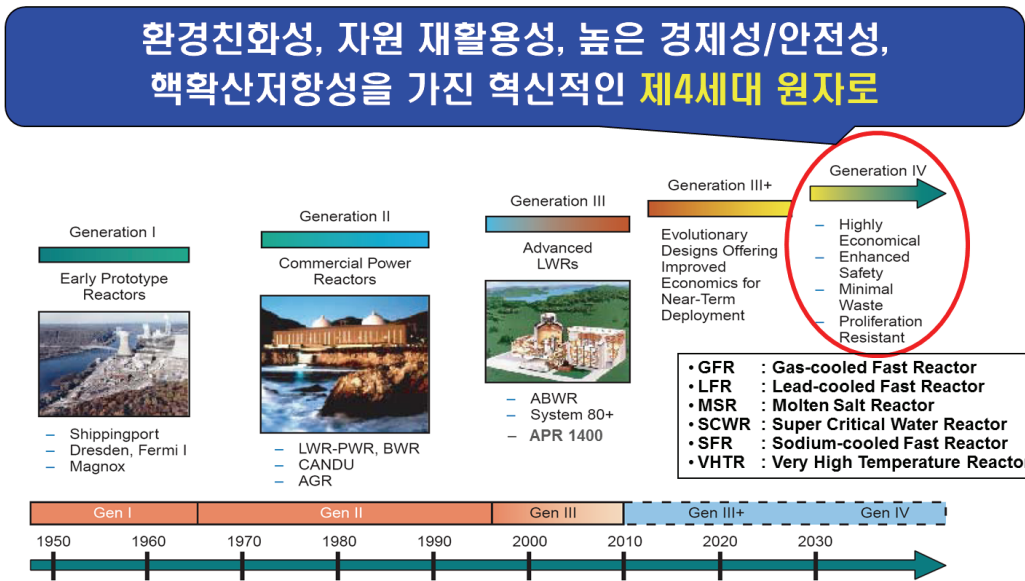
원자력기술 응용의 가장 전형적인 예인 전력생산은 전기를 얻기 위해 기계 에너지를 자기장과 컨덕터의 연관된 활동을 통해 전기에너지로 변환시키는 것으로, 원자력발전은 원자에너지를 통해 물을 데움으로서 발생하는 증기를 활용하고 이를 통해 터빈을 돌림으로서 에너지를 발생시킨다. 특히 화력발전은 보일러 내에서의 연소에 의존하는 반면 원자력발전은 원자로에서의 원자반응에 의존하는 특성을 보인다. 현재의 원자력기술은 세계적으로 적용(Cowan, 1990; Karakosta et al., 2013)되고 있으며, 원자력발전소는 꾸준한 증가 추세를 보여주고 있다.

또한 원자력기술은 탄소배출에 무관 또는 0에 가까운 이산화탄소 배출의 특성(NEA, 2002)을 장점으로 하여, 폐기물 감소, 안전 증진, 비용효율성을 달성하고자 하는 노력을 하고 있으며, 이는 기후변화의 이슈에 대한 교토 프로토콜 등을 만족(Kessides, 2009; Karakosta et al., 2013)시킬 수 있다. 그러나 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 세계적으로 원자력기술은 원자력 르네상스 시대를 지나 정체기를 경험하고 있다.

일반적으로 원자력에너지기술의 개발 단계는 크게 네 가지로 구분된다(Van Goethem et al., 2007; NEA, 2007). 각 세대별 특징을 살펴보면 1세대(Gen I)는 미국, 러시아, 프랑스와 영국에서 1950~1970년에 주로 시작되었다. 이때에는 그라파이트로 또는 중수로의 형태를 적용하고 천연우라늄을 주재료로서 사용 하였다. 2세대(GEN II)는 1970~2000년대 까지를 일컬으며, 이 시기는 화석 에너지의 위기에 따라 원자력발전소가 많이 건설되었다. 이때의 원자로는 농축우라늄과 냉각재를 주재료로 활용하였고, 경수로형태가 적용되어 현재에 이르기까지 사용되고 있다. 3세대(GEN III)는 2010년 즈음으로 기존보다 진화된 원자로를 사용하고 이 시기를 원자력 르네상스라고 부르기도 한다. 이때는 아시아 국가들도 신규로 원자력발전을 시작하였으며, 원자로의 형태는 기존보다 수동형 안전시스템을 추가한 단순화된 디자인을 가지고 있었다. 3세대에서는 에너지생산의 고효율과 발전소 설치 후 유지보수에 대한 강건성과 안전성을 가지고 있었다. 그러나 연료 주기 및 사용 비용의 최적화에 대한 잠재적인 혁신에 대한 수요를 가지고 있었다. 이런 수요에 맞

추어 4세대(GENIV)는 난방에 대한 잠재적인 시장에도 대응하면서도 핵연료 주기를 다루는 도전을 수행중이다. 4세대는 2040년까지 새로운 혁신적인 원자로형의 개발을 포함하여 기술의 급진적인 변화를 예고하고 있다. 새로운 원자로형은 단순히 수소와 에너지를 생산할 뿐 아니라 난방과 산업적인 장비들의 연료를 생산하는데 활용이 될 것이다. 또한 폐기물 배출의 극적인 감소와 경제성과 안전성을 가진 시스템이면서 핵비확산에 기여하는 안전한 사용 후 핵연료를 재처리가 가능한 시스템이 될 것을 예견하고 있다.

이런 4세대 시스템에 대해 장기간의 연구개발이 수행될 예정이며, 이에 따라 OECD 산하 NEA²⁾에서는 6개의 미래원자로시스템을 제안하고 있다, 그것은 소듐냉각고속로(SFR), 가스냉각가속기(GIF), 납냉각 고속로(LFR), 저농축음용염로(MSR), 초임계압수냉각원자로(SCWR), 초고온가스(VHTR)이다. 이런 변화는 수십 년 간 운영된 경수로형 원자력발전소의 고착화 현상을 장기적으로 탈피하게 될 것으로 예상되지만, 실질적으로 기존 시장에 대체 적용되려면 아직까지 많은 시간이 필요할 것으로 보인다.



<그림 1> 4세대 원자력에너지기술의 도래 (한국원자력연구원 내부자료 저자 일부 수정 인용)

2) Nuclear Energy Agency

2. 원자력기술과 한국

한국 과학기술의 역사를 정리한 ‘한국 과학기술 50년사’는 그간의 대표성과를 정리하며, 1962년에 완성된 우리나라 최초의 원자로 ‘TRIGA MARK-2’를 최초의 과학기술성 과로서 언급하고 있다(과학기술부, 2011). 이처럼 한국의 과학기술역사와 시작을 같이 한 원자력기술은 현재 세계 5강의 경쟁력을 가지고 있다(한국원자력산업회의, 2013; 박시훈·정선양, 2016).

과학기술혁신의 역사가 시작된 이래, 2013년 기준 한국의 과학기술혁신역량은 OECD 국가 중 8위로서, 1962년 1인당 GDP가 80달러에 불과했던 한국은 2013년에는 23,679달러를 달성하고 있다. GDP와 혁신체계의 성숙도는 강력한 통계적인 유의성을 보이는 경향이 있는 만큼(Wade, 1990; Nelson & Rosenberg, 1993; Kim, 1997; Chung, 2015), 한국은 혁신체계의 성숙정도가 커졌지만, 기존의 ‘모방을 통한 혁신’(Kim, 1997)에서 ‘리더십’으로 변화하기 위한 ‘전략적 딜레마’를 안고 있는 상황(Hobday et al., 2004)이기도 하다. 이러한 한국의 현재 상황에서도 불구하고 전략적 딜레마를 극복하고 세계 5강의 위치를 가진 대표적인 사례가 원자력기술이다(박시훈 외, 2016). 반면 한국에서 원자력기술의 도입은 두 가지 부분에서 국가발전에 큰 기여를 했다고 볼 수 있다. 첫째는 안정적인 전원공급을 통한 경제발전과 에너지자립(안보)에 대한 기여이다. 세계적으로 원자력발전 시설이 구축되게 된 가장 큰 동기는 1970년대에 에너지 위기에 따른 에너지안보 유지의 필요성 때문이었다(Kessides, 2009). 이 당시 한국에서 원자력기술은 비교적 타국대비 빠른 도입(1959년)을 통해 준비된 기술로서, 원자력발전소의 설치 및 안정적 운영으로 1980년대 중반 2000년대까지의 중공업, IT, 철강 분야의 괄목할만한 민간영역의 성장에 많은 영향을 미쳤다. 반도체, 철강 등은 고품질의 안정적인 전력공급이 핵심인 산업으로서, 특히 한국의 경우 해당 산업이 활성화된 지역은 인접한 곳에 원자력 발전소가 존재하였으며, 실제 중공업, IT가 크게 활성화된 시기에는 전체 발전량의 40%에 가까운 비율의 전력은 원자력발전소에서 생산되었음이 이를 간접적으로 뒷받침(전력통계, 2016)하고 있다. 2013년 기준 원자력발전의 비율은 최근의 후쿠시마 사고와 원전 발전소 비리와 원전 노후화에 따른 가동률 저하 등에 영향을 받았음에도 에너지자원의 수입 의존도가 높은 한국의 상황에서는 여전히 전력통계를 기준으로 2013년 28% 수준(전력통계, 2016)을 보이고 있다.

둘째는, 원자력산업 뿐 아니라 국가차원의 연쇄적인 지식네트워크의 형성 및 경제성

장을 촉진하는 역할을 수행하였다. 현재 한국의 과학기술 경쟁력은 1958년 전쟁이 종료된 직후, 당시 국가의 의지에 의해 1959년에 최초의 과학기술혁신을 위한 인프라로서 설립된 원자력연구소가 크게 기여(한국원자력연구원, 2009)하였으며, 이때에 해외로부터 유치되어 연구를 수행했던 핵심과학자들은 각 학문분야별 정부출연연구소가 1965년부터 차례로 설립됨에 따라 각 연구소의 핵심인력으로 확산되었다(과학기술부, 2011; Chung, 2013). 최초의 출연연인 한국과학기술연구원의 초대원장은 전 한국원자력연구소 소장이었던 것이 이를 간접적으로 증명한다. 이처럼 핵심과학자들은 이후 한국 과학기술의 발전에 큰 영향(Mazzoleni & Nelson, 2007)을 미치게 된다. 한편 일반적으로 공공연구기관은 지식생태계에서 주요역할을 담당했을지라도, 다양한 산업 주체 간 복잡한 네트워크 형성에 기여하지 못하는 교차구역간 전이현상(자유로운 아이디어가 이중 네트워크간에 자유롭게 이동 가능함)의 부재(Clarysee et al., 2014)를 가져오지만, 한국의 원자력연구원은 비즈니스 생태계 형성 부분에서 대표 공기업인 한국전력기술의 설립을 직접 지원하는 등 다양한 산학연 기관을 망라하는 네트워크의 중심으로서 활동하였다는 점은 주목할 만한 특징이라 할 수 있다. 이와 관련, 기술수준평가보고서(한국과학기술기획평가원, 2015)에 따르면 원자력기술의 연구주체별 기술수준³⁾은 연구계가 가장 높은 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 대기업, 학계, 중소기업 순으로 나타났다. 또한 연구주도 주체도 연구계가 산업계에 비해서 큰 폭으로 연구를 주도⁴⁾하고 있는 것으로 나타나 기술개발에서 연구계만큼 산업계와 학계의 역할도 향후 균형적으로 강화될 필요가 있는 것으로 사료된다.

3. 한국의 4세대 원자력에너지기술 개발 현황

한국의 4세대 미래원자력시스템 개발은 미래원자력시스템 개발 장기추진 계획에 따라 추진되고 있으며, 5년마다 수립되는 원자력연구개발 5개년 계획으로 실질적인 기술개발의 근거를 마련하고 있다. 한국에서의 미래원자력시스템은 크게 4세대 원자로 중 소듐냉각고속로와 초고온가스로(원자력수소생산시스템)에 집중하고 있으며, 파이로 건식처리 공정처리 기술을 포함하고 있다. 이중 소듐냉각 고속로는 2020년 소듐냉각고속로 특정설계의 승인 획득을 목표로 하고 있으며, 2028년에 원형로 건설완료를 목표로 하고 있다(미래창조과학부, 2016).

3) 연구주체별 기술수준 : 연구계 85.6%, 대기업 82.6%, 학계 80.0%, 중소기업 69.8%

4) 연구주체별 기술주도수준 : 연구계 84.1%, 산업계 15.4%

<표 1> 미래 원자력시스템의 장기 추진 일정(1회 원자력진흥위원회, 11.11.)

구분	수정 일정
소듐냉각고속로	<ul style="list-style-type: none"> · '17년 원형로 특정설계 승인 신청 · '20년 원형로 특정설계 승인 획득 · '28년 건설완료
파이로 프로세싱	<ul style="list-style-type: none"> · '11년 파이로 일관 모의실증 장치(PRIDE) 구축 · '20년 한·미 공동연구 및 PRIDE 등 기존시설 운영, 계량 · '25년 종합 파이로 건식처리 시설(KARF) 건설 * KARF 등의 실증시설 구축은 한,미 공동연구 결과에 따라 추진
초고온가스로	<ul style="list-style-type: none"> · '14년 산업체와 공동으로 사업화 계획 수립후 개념설계 착수 * 상세일정은 사업화 계획에 포함 · '16년 원자력수소핵심기술 개발 완료

또한 원자력발전이 가지는 안전성, 지속가능성, 경제성, 핵 확산 저항성이란 4가지 문제를 해결하기 위해 미국을 중심으로 창설된 '4세대 원자력 시스템 국제포럼(GIF)⁵⁾'의 창설국으로서 한국과 미국, 유럽연합, 중국, 일본, 러시아, 프랑스, 등 주요 원자력기술 선도국을 포함하는 13개 국가가 4세대 6개 미래 유망 원자로에 대한 집중적인 공동연구를 수행하고 있다. 한국은 GIF 창설국으로서 소듐냉각고속로, 초고온가스로의 시스템약정과 납냉각고속로의 업무 협력약정에 서명하여 국제공동연구에 참여 중이다(정의 외, 2003).

뿐만 아니라, 한국과 미국은 원자력 발전의 성능, 효율성, 신뢰성, 핵확산저항성 및 경제성을 제고하기 위한 새로운 원자로 및 핵연료주기 개념을 개발하고 미래 기술수요를 충족시킬 원자력 과학기술 연구기반 증진 및 유지를 목적으로, 2001년 이후 I-NERI (International Nuclear Energy Research Initiative)를 통해 공동연구프로그램을 추진하고 있으며, 여기에도 4세대 원자력에너지기술 중 소듐냉각고속로, 초고온가스로, 초임계 압수냉각원자로에 대한 연구를 지속적으로 수행해오고 있다. 이러한 신기술의 개발과 관련한 국제기구의 참여와 국제공동연구의 참여는 혁신시스템 국제화 흐름에 대응하는 중요한 활동으로 리더십 유지에 큰 영향을 미치고 있다(박시훈 외, 2016).

4. 기존연구의 한계점

기존연구를 살펴본 결과 원자력기술의 혁신활동과 그 특성에 대해서는 많은 논의가 이루어지지 않았고, 기술혁신이론의 한 줄기인 산업혁신시스템이론을 기반으로 하여 일반적인 수준에서 논의가 된 경우가 대부분이었다. 하지만 이런 문헌조차 원자력기술을 실증

5) General IV International Forum

연구의 대상으로는 구체적으로 다루지 못하였다. 이 때문에 혁신활동이 기술의 특성에 따라 다양성을 가짐에도 불구하고(Pavitt, 1984; Malerba, 2004), 관련연구의 부족으로 원자력기술만의 혁신활동에 대한 심도 깊은 이해는 쉽지 않았다. 반면 혁신과 산업진화라는 주제를 이해하는 것은 경제, 역사, 사회, 기술, 경영, 조직 등의 다양한 부분을 다루어야 하고, 학문적인 접근도 공학, 자연과학, 경제학, 경영학, 사회과학 등을 아우르는 다양한 요소를 통합하는 학제적 관점이 요구된다(Malerba, 2006; 정선양, 2012). 원자력기술의 혁신활동을 이해하는 데에도 이와 같은 학제적 관점을 적용이 필요한 것으로 사료된다.

이러한 한계점을 극복하고자 본 연구는 원자력기술에만 집중한 혁신환경을 조사하고 4세대 원자력시스템 전환 시 발생 가능한 이슈와 현재 정책방향에 대해 시사점을 제공할 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

Ⅲ. 연구방법

1. 정성적 문헌연구 방법의 적용을 통한 요인 도출

본 연구에서는 정성적 문헌연구 방법을 사용하여 수집된 문헌에 대한 분석을 수행하고 도출된 결과에 대해서는 4세대 원자력기술의 성공적 전환에 영향을 미치는 요인으로 서 포함하고자 한다. 정성적 문헌연구방법은 정성연구와 문헌연구의 성격을 모두 포함하는 연구방법이다.

먼저 정성연구는 사회상황, 사건, 역할, 집단 또는 상호작용을 이해하는 것이며, 연구대상을 대조하고 비교하며 목록을 작성하고 분류함으로써 사회적 현상을 점차로 이해하는 탐구적 과정이다(Miles & Huberman, 1984; Locke et al., 1987). 그렇기에 하나의 실체보다는 여러 개의 실체를 이해하려고 노력해야만 하고 암묵적 지식의 활용에 의존하기 때문에, 전형적인 단어의 의미나 양적인 것으로는 측정되지 않는 특징이 있다(Lincoln & Guba, 1985).

특히 정성적 문헌연구의 수행절차는 기본적으로는 4개의 핵심적인 단계를 밟게 되는데 이를 SALSA(Search, Appraisal, Synthesis, Analysis)라고 한다(Grant & Booth, 2009). 본 연구에서는 특히 SALSA의 유형 중에서도 문헌들을 카테로라이즈화 하거나 맵을 도출하는 것을 주로 목적으로 할 때 사용되는 Mapping Review/Systemic map 기법을 적용하였다. 이를 위한 SALSA 전략은 탐색(Search)은 시간이 허용하는 만큼하며, 평가

(Appraisal)는 하지 않고, 종합(Synthesis)은 그래픽 또는 표를 활용하여 표현하는 것을 권장하며, 분석(Analysis)은 핵심요인을 중심으로 문헌의 정량과 정성적인 특성을 분석하는 것을 제안하고 있다(Grant & Booth, 2009).

본 연구에서는 이와 같은 SALSAs의 단계를 따라서 먼저 탐색(Search)단계에서 문헌 연구프로세스 중에 발생 가능한 범위 추가의 문제(Saunders, 2009)⁶⁾를 방지하기 위해 원자력기술의 주 활용분야이며 관련한 문헌의 수집가능성과 대표성을 고려하여 원자력 에너지기술을 중심으로 기술, 혁신, 역사, 에너지 등으로 조합한 탐색으로 자료를 수집⁷⁾하고 검토하여 연관한 혁신 특성을 포함하는 이론들과 문헌들을 정리하였다. 다음으로 종합(Synthesis)을 위해서 표의 형태로 각 이론에서 제시한 핵심적 내용을 정리하여 혁신특성을 도출하기 위한 기본자료로 활용하였고, 분석(Analysis)단계에서 종합된 자료를 통해 여러 이론에서 논하는 원자력기술혁신의 특성들을 상호 비교하여, 4세대 원자력 에너지기술의 성공적 전환에 영향을 미치는 요인을 도출하고자 하였다.

2. 정책사례 분석 및 시사점 도출

4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인을 토대로 실제 한국의 4세대 원자력시스템 개발과 연관하는 정책은 각 요인의 내용을 어느 정도 반영하고 있으며, 신규 정책 입안 시 참고해야할 부분은 어떤 것 인지를 살펴보기 위해서 사례분석을 실시하고자 하였다. 이를 위해 4세대 원자력에너지기술과 연관한 한국의 정책현황을 조사하였고 이것은 <표 2>와 같다. 이를 대상으로 각 정책의 주요내용 및 목적을 살펴봄과 동시에 요인과의 비교분석을 통해 정책적 의의와 시사점을 도출함으로써 4세대 원자력에너지기술의 도래에도 지속가능한 경쟁력 유지를 위한 정책적 제언을 하고자 한다.

<표 2> 사례분석을 위한 4세대 원자력기술과 연관한 정책현황 (저자작성)

구 분	수립년도
미래원자력시스템 개발 장기추진 계획	2008년
미래원자력시스템 개발 장기추진 계획(수정의결)	2011년
한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획	2015년
원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획(수립중)	2015년(수립 중)
4차 원자력연구개발사업계획	2012년

6) 연구의 목적, 방향, 크기와 시간적 범위가 연구의 본래의 목적보다 확장되는 문제

7) 검색내용 : 원자력에너지기술, 원자력기술역사, 원자력기술혁신, 원자력에너지기술혁신 등.

IV. 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인 도출

1. 자료 탐색결과

SALSA 가이드라인을 준용하여 기술분야와 검색범위를 조합하여 탐색한 원자력기술 혁신특성과 연관된 이론과 문헌들은 아래와 같았다. 이러한 문헌들은 원자력기술에 집중된 실증연구는 부족하지만 각각 원자력기술 또는 원자력에너지 기술을 해당 이론에 적용 가능한 사례로서 제안하고 있었다. 그러므로 혁신특성의 조사를 통해 4세대 원자력에너지기술의 전이에서 발생 가능한 이슈와 영향을 미치는 요인들을 제시할 수 있는 것으로 판단하여 각 이론별로 혁신의 특성과 주요 시사점, 연관연구들을 정리하였다.

<표 3> 자료 탐색결과

기술분야	검색범위	탐색결과
Nuclear (핵)	Innovation (혁신)	국제기구에서 통용되는 원자력기술혁신의 특성
	History (역사)	범용기술(GPTs)로서 원자력기술
Atomic (원자)	Technology (기술)	복잡한 제품과 시스템(CoPS)으로 원자력기술
		거대기술시스템(Large technical system)으로서 원자력기술
	Energy (에너지)	에너지기술혁신시스템의 하위 혁신시스템으로서 원자력기술
		원자력기술의 지식경영
		원자력기술에 대한 사회적 수용성

2. 원자력기술혁신 특성에 대한 논의 종합

탐색결과를 활용하여 각 이론과 문헌들에서 언급하는 원자력기술혁신의 특성에 대해 구체적으로 조사하여 관련한 논의를 종합하여 기술하였다.

2.1 국제기구에서 통용되는 원자력기술혁신의 특성

기존의 원자력산업에서 기술 혁신에 대한 이해에 관련해서 가장 일반적으로 살펴볼 수 있는 것은, OECD의 산하 원자력에너지기구인 NEA(2007)에서 발간한 ‘Innovation in

Nuclear Energy Technology'를 꼽을 수 있다. 이 보고서는 원자력 에너지시스템에서의 혁신은 에너지 공급자, 시스템 또는 서비스 공급자, R&D 수행자, 정부, 지자체와 같은 혁신주체들로 구성되고 그들 간의 원자력 법적 프레임워크, 경영사례들, 혁신 인프라들, 제도적인 프레임워크 등으로 구성된다고 하였다. 원자력기술혁신의 특징은 첫째, 원자력 에너지 사용을 위한 기술과 지식이 요구되어지고, 둘째, 원자력 에너지 산업의 시장, 셋째, 금융과 경제적인 환경, 넷째, 법과 사회, 정치적인 환경이 있어야 한다는 것을 제시하였다.

2.2 범용기술(GPTs)로서 원자력기술

범용기술(General Purpose Technologies)은 경제성장에 유의적인 역할을 하는 핵심기술(Bresnahan & Trajtenberg, 1995; Freeman, 2003; Jovanovic & Rousseau, 2005) 또는 포괄적인 기술(Lipsey & Carlaw, 2006)이라고 정의한다. 새로운 범용기술의 탄생은 현존하는 경제적 사회적 구조에 커다란 변화를 주며, 전력분야, 정보통신 분야, 원자력에너지 분야 그리고 최근에는 나노기술과 바이오기술이 범용기술에 포함된다.

범용기술의 세 가지 특성은 먼저, 침투성(Bresnahan & Trajtenberg, 1995)으로서 범용기술은 대부분의 산업에 침투하여 하위산업의 인풋으로서 사용이 된다. 또한 이때에 범용기술에 기여의 효과를 명시적으로 측정하는 것은 힘들며, 주류시장에서 범용기술의 하부기술의 시장의 점유율의 증가로서 살펴봄으로서, 일부 파악할 수 있다고 하였다.

둘째, 향상성(Bresnahan & Trajtenberg, 1995; NEA, 2002; Freeman, 2003; Joskow, 2006)으로서 범용기술은 긴 시간에 걸쳐 향상되어지고 기술의 활용을 위한 사용자의 비용은 점차적으로 감소한다. 이런 상황은 비용효과성의 향상과 단위 유닛 당 품질의 향상에 기인하기 때문이다. 이와 관련, 차세대 원자력 발전소는 현존하는 원자력 발전소보다 25% 이상 전력생산 비용이 감소할 것으로 예측되고 있다.

셋째, 혁신의 산란(Bresnahan & Trajtenberg, 1995; Lipsey & Carlaw, 2006)으로 범용기술은 신기술들을 개발하는 것과 프로세스를 생성하는 것을 쉽게 만들어준다. 따라서 범용기술은 혁신을 발생시키는 동인으로 볼 수 있으며 범용기술이 진화하여 확산함에 따라 새로운 투자들과 특허들 그리고 신규 참여자가 증가하며 비용은 점차 감소된다. 그러므로 신생 또는 소규모 기업은 신규참여자로서 범용기술의 혁신과 연관된 산업에서 장점을 가질 수도 있다.

범용기술 간의 사례연구 결과(Freeman 2003; Palmberg & Nikualinen, 2007)는 범용

기술은 정부주도하의 장기간의 기술 육성을 통한 산업화가 국제적인 경쟁력을 가지게 하지만, 기술적 구조적 제도적 지원의 부재와 진화적인 성과물의 창출 실패와 사회 정치적 수용성의 이슈를 다루지 못하면 경쟁력을 확보하는 것이 어려움을 제시하였다.

2.3 복잡한 제품과 시스템(CoPS)으로서 원자력기술

원자력기술 활용의 대표적인 예로서, 원자력발전소는 완성된 제품들과 시스템적인 요소들의 융합을 통하여 운영이 된다. 이와 관련하여 복잡한 제품과 시스템 (Complex Product and Systems) 이론은 복잡한 제품과 시스템을 고객들과 생산자들을 위한 상품과 서비스들을 생산하는데 사용되는 사업대사업(Business to Business) 제품으로 정의한다. 특히 거대규모 화력 또는 원자력 발전소, 고속철도, 기름 가스 채굴 플랫폼, 도시 지하철 시스템 등이 복잡한 제품과 시스템에 포함된다(Hobday, 1998; Davies, 2003; Prencipe, 2003; Metzler & Edward, 2013).

일반적인 소비재와는 다르게 복잡한 제품과 시스템들은 장기간의 많은 상호교류와 고비용으로 만들어지게 되며, 하위시스템간의 상호보완성이 원인으로 타성에 젖기도 한다. 수작업 또는 사용자맞춤형으로 부품 또는 시스템이 체계적으로 디자인되어 만들어질 수 있고 경쟁 기업들 간 연합이 프로젝트의 수주 단계에도 발생할 수 있다. 한편, 정책적인 시장과 관료적인 관리에 의해 선택이 될 수도 있어 복잡한 제품과 시스템 시장은 주류시장에서의 거래유형과는 차별화를 가진다(Arthur, 1988; Hobday, 1998; Walker et al., 1988; Hobday & Rush, 1999; Rycroft & Kash, 2002). 또한, 복잡한 제품과 시스템은 각 요소들 간에 상호 연결이 되고 시스템엔지니어링 단계에서 예측할 수 없는 이벤트를 발생 시킨다(Boardman, 1990; Shenhar, 1994). 이 때문에 복잡한 제품과 시스템의 프로젝트는 주요 계약자들, 시스템 통합자들, 사용자들, 구입자들, 다른 공급자들, 중소기업들 뿐 아니라 때때로 정부 기관과 규제자들도 포함되며, 이런 주체들은 혁신을 위한 파트너십을 가지고 의사결정을 통해 개발을 해나가야만 한다.

2.4 거대기술시스템(Large technical system)으로서 원자력기술

거대기술시스템은 시스템 동태성을 일반적인 요소로서 표현하는 것을 위한 개념적인 프레임워크로서 이것은 복잡한 물리적 기계적 구조를 포함하는 복잡하고 이질적인 시스템이라고 정의된다(Hughes, 1987; GÓkalp, 1992; Joerges, 1998).

긴 시간과 장소를 거쳐서 거대기술시스템은 재료들의 혼합 또는 결합을 가져왔으며, 안정적인 운영을 위한 많은 수의 다양한 기술시스템의 지원을 필요로 한다(Joerges, 1998). 그래서 거대기술시스템은 물리적인 그리고 비물리적인 개념과 응용기업들, 네트워크 참여자들, 제조기업들 그리고 투자자들 등 다양한 주체들 간의 높은 상호의존성을 가진다. 또한 한번 구성요소가 제거되거나 변경되면 전체시스템에서 다른 구성요소의 특징도 변경될 수 있다(Hughes, 1987). 한편 거대기술시스템의 혁신프로세스는 높은 수준의 안정성과 타성으로 언급되며 원자력산업 등은 거대기술시스템에 속하고 기술적 또는 사회적 규범과 규칙, 조직적인 실행과 사용패턴 등 다양한 종류의 표준에 의하여 정의되어지는 특성이 있다(Berkhout 2002; Markard & Truffer, 2006).

2.5 에너지기술혁신시스템의 하위 혁신시스템으로서의 원자력기술

원자력에너지기술은 에너지산업분야의 화력발전, 수력발전, 천연가스, 수소 에너지등과 함께 일반적으로 사용되는 기술이기에, 전체 에너지시스템의 하위요소로서 에너지기술 자체에 대한 혁신패턴과 특성을 분석하는 것은 원자력 기술에서의 혁신환경을 분석하기 위한 시사점을 제공할 수 있다.

에너지기술혁신의 패턴(Grubler & Wilson, 2012)에 대해서 살펴보면 첫째, 에너지의 전환의 역사는 최종사용자 서비스의 양과 에너지의 종류의 변화에 의해 특성화 되어질 수 있다고 하였다. 둘째, 에너지 분야의 기술혁신 특성은 기술적인 불완전성과, 초기단계의 고비용과 조악한 품질(Rosenberg, 1994; Grubler & Wilson, 2012)이며, 셋째 에너지 분야에서 기술전이 후의 혁신에는 최소 10년 이상이 소요되는데 이는 느리고 점진적인 확산에 그 원인이 있다고 하였다. 넷째 에너지기술은 클러스터링과 유출효과에 의하여 다른 섹터로 이동이 될 수도 있다(Grubler, 1998; Grubler & Wilson, 2012).

또한 에너지기술들은 점진적이고 우발적으로 확산되어지고 기술적인 종속이 발생(Hughes, 1983)하고 에너지기술혁신시스템은 역사적으로 다양한 요소들 간의 상호작용을 통하여 점진적으로 변화(Cowan & Hulten, 1996; Unruh, 2000)되어 왔다는 특징이 있다.

2.6 원자력기술의 지식경영

IAEA는 원자력분야에서 지식경영을 위한 5가지 특성을 통하여 연구개발 지원기관의 기능을 기술하였으며 이는 아래와 같다(IAEA, 2012).

첫째, 거시적 미시적 측면에서 원자력 지식은 매우 높은 복잡도를 가지므로 원자력 지식의 생성과정은 물리, 화학, 방사학, 생물학적 요소는 물론 사회적, 경제적, 정치적 그리고 보안의 측면에 이르기 까지 모든 부분과의 상호작용을 할 필요성이 있다. 둘째, 높은 복잡성으로 인하여 원자력지식의 생성은 많은 비용이 들고 발전소건설과 원자력시설의 운용과 같은 거대하고 복잡한 엔지니어링 프로젝트는 전문성 있는 인력과 안전시스템이 필수적으로 있어야 한다. 셋째 시간적인 부분에서 지식의 생성과 활용사이의 평균적인 기간은 매우 길기 때문에 원자력지식경영기관은 장기간에 걸쳐 발생하는 정보의 분석 및 이해와 기관의 역량을 축적하기 위해 실행을 통한 지속적인 학습이 필요하다. 넷째로 많은 개인들 기관들 그리고 멤버국가간의 네트워킹은 원자력지식개발을 위한 참여와 기여를 위한 충분한 기회를 가지게 할 수 있다. 마지막으로 훈련과 학습의 경험은 새로운 도전 이슈들을 생성하고 접근하는 것을 가능하게 할 것임을 제안하였다. 또한 IAEA(2012)는 원자력 관련 R&D기관은 기초연구와 응용연구는 물론 R&D역량의 디자인과 원자력 R&D 시설과 비원자력 R&D 시설을 관리하는 능력과 R&D역량을 학습하고 기술적인 지원과 서비스를 해야 함을 제안하였다.

2.7. 원자력기술에 대한 사회적 수용성

기술역사학자들은 저항이 기술의 형태를 결정하는 중요한 동인임을 강조하며 이것이 재조명될 필요가 있음을 주장(Mokyr, 1992)한다. 기술에 대한 저항은 고객의 주요한 믿음과 잘 설립되어진 루틴에 급진적인 변화가 발생(Ram & Sheth, 1989)할 때 일어난다. 원자력기술에 대한 저항 역시 기술에 대한 저항과 관련된 일반적인 사례로서 다루어질 필요가 있으며 지속가능한 확산을 위해서 공공의 신뢰와 지원을 통하여 저항을 극복할 필요가 있다(Whitney, 1950; Bauer, 1995, 1997). 따라서 원자력기술은 이런 사회적 정치적 저항을 받고 있으므로 기술의 외부 환경에 대한 주기적인 측정을 통하여 기술의 미래를 보호할 필요가 있음이 일찍이 제안되었다.

원자력기술의 사례는 제품의 위험에 대한 저항과 제품이미지에 대한 저항이 발생한다고 볼 수 있다. 원자력기술은 체르노빌에서부터 최근 후쿠시마에 이르기 까지 몇 번의 사고로 인해 위험한 것이라는 이미지가 존재하지만 후쿠시마 사고 전이기는 하지만 SFOE(Paul Scherrer Institute)의 자료에 의하면 연간 테라와트의 전기를 생산한다고 하였을 때 화석에너지, 천연가스, 수소에너지는 각각 342명, 85명, 885명이 사고로 사망하는 것으로 조사되었지만 원자력의 경우는 오직 8명이라는 결과를 제시하기도 하였다.

3. 요인 분석

앞선 포괄적인 논의 내용을 종합한 것을 주요내용으로 하는 4가지의 4세대 원자력에너지 기술 전환에 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 이것은 첫째, 장기간의 안정적인 자원 할당이며 둘째 혁신을 위한 이해당사자 간의 지속적인 상호작용이다. 셋째로 완전한 시스템을 위한 기술과 노하우의 축적이고, 마지막으로 적용 및 실증을 위한 정책적인 시장이 필요함이 확인되었다. 각각의 주요내용과 연관된 이론을 정리하여 분석한 것은 아래와 같다.

<표 4> 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인 분석(저자작성)

구분	주요내용	연관이론
장기간의 안정적인 자원 할당	원자력에너지기술은 대부분의 기술보다 매우 긴 생애주기 동안 점진적으로 확산된다. 원자력에너지기술은 높은 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서 장기간의 기초연구, 개발, 실증이 필요하다. 원자력에너지기술의 개발은 이 때문에 많은 자본과 시간이 필요하며, 거대 규모의 개발과 실증이 요구된다. 또한 전체적인 운영 및 연구개발을 위한 잘 훈련되고 숙련된 전문가가 필요하다.	범용기술
		복잡한 제품 및 시스템
		거대기술시스템
		에너지기술로서 원자력기술
		지식경영
		사회적수용성
혁신을 위한 이해당사자 간의 지속적인 상호작용	원자력에너지기술은 사회, 기술적인 영향이 크고 복잡하여 저항을 발생시킨다. 혁신주체들은 혁신을 위해 국내외의 다양한 이해당사자간의 파트너십을 가지고 의사결정을 통한 개발로 기술적인 이슈를 해결함은 물론 저항을 극복함으로써 수용성을 확보하는 것이 필요하다.	범용기술
		사회적 수용성
		복잡한 제품 및 시스템
		지식경영
완전한 시스템을 위한 기술과 노하우의 축적	원자력에너지기술은 전력을 생성하기 위한 완전한 시스템으로서 많은 요소기술과 지원기술을 다루고 이에 대한 통합을 이루어야 한다. 원자력 에너지기술시스템의 구조는 각 기술 간의 높은 상호의존성을 가지고 있고 각 요소들 간의 상호교류가 필요하고 이는 기술 심화적이다. 따라서 다계층의 지식과 기술 그리고 하위시스템과 인프라는 원자력에너지기술시스템 내에서 잘 조합되어야만 한다. 때때로 원자력에너지기술 시스템은 완벽하지 못함에 따른 예측 불가능한 상황이 발생하기도 한다. 그러므로 유지보수를 위한 실행을 통한 학습을 장려함으로써, 노하우와 운영경험을 누적해야만 한다.	범용기술
		복잡한 제품 및 시스템
		거대기술시스템
		에너지기술로서 원자력기술
		지식경영
적용 및 실증을 위한 정책적인 시장	원자력에너지기술은 실행을 통한 학습과 비용에 대한 학습으로 전체 비용(연료, 건설, 운영비용, 전기생산비용) 등의 저감을 통해 확산된다. 이 때문에 적용을 위한 정책적인 시장이 필요하며, 이러한 정책적인 시장을 통해 원자력에너지 시스템은 운영될 수 있으며, 향후 이 시스템의 고객은 자국을 포함한 국가 수준 이상의 거대기관이 될 것이다.	범용기술
		복잡한제품 및 시스템
		통용되는 원자력기술 혁신특성

V. 사례분석 및 시사점 도출

1. 한국 4세대 원자력에너지기술 관련 정책사례분석

앞서 분석한 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인을 토대로 한국의 4세대 원자력시스템 개발과 연관하는 정책은 해당 내용을 얼마나 반영하고 있으며, 신규 정책 입안 시 참고해야할 부분은 어떤 것 인지를 사례로서 적용하고 시사점을 도출하였다.

현재 4세대 원자력에너지기술과 연관한 정책은 미래원자력시스템 개발 장기추진 계획, 4차 원자력연구개발사업계획, 한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획, 원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획이 있다.

먼저, 미래원자력시스템 개발 장기추진 계획은 미래원자력시스템의 개발을 위한 장기추진에 대한 최초의 계획으로서 4세대 원자력에너지기술의 기술로드맵과 거시적인 측면의 추진방향을 제시하고 사업추진 및 예산반영의 근거를 제공하는 계획이라 할 수 있다.

이에 따라 4차 원자력진흥종합계획은 4세대 원자력에너지기술과 관련한 내용을 반영하고 있으며 4차 원자력연구개발사업계획을 통해 연구개발사업계획의 세부 시행계획을 구체화 하고 있다.

한편 한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획은 소듐냉각고속로 원형로 관련 원자력시설의 인허가 기준 및 부지확보 방안 마련 필요성을 제기하고 국제공동연구 추진 일정 등을 정리한 계획이다.

그리고 원자력시스템 개발실증 추진전략 수립 계획은 4세대 원자력에너지 시스템의 실증에 대한 구체적인 계획 수립을 위해 15년 만에 발의되어 현재 추진전략을 수립하고 있는 상황으로 최근에 이르러서야 기술개발 이후 실질적인 적용을 위한 준비를 하고 있는 단계라고 볼 수 있다.

마지막으로 4세대 원자력에너지기술의 적용 및 상용화의 최종단계로 볼 수 있는 시장 적용과 연관된 최상위 계획은 국가에너지기본수급계획이 있지만 아직 4세대 원자력에너지기술이 기술개발 초기인 상태로서 관련내용은 반영되지 않고 있어 본 분석의 범위에서는 제외를 하였다. 이상과 같은 정책추진현황의 주요내용 및 목적을 세부적으로 정리한 것은 다음과 같다.

<표 5> 4세대 원자력시스템 관련 유관 정책 및 주요내용 및 목적(저자 작성)

구분	주요내용 및 목적
미래원자력시스템 개발 장기추진 계획(08년)	국제공동연구 참여를 통한 투자 리스크 분산
	미래원자력시스템 개발내용의 원자력진흥종합계획 반영 근거
	핵비확산성 확보 지향
	기초,원천 연구의 기금 및 일반회계 활용
	실증단계 진입 시에 다각적인 예산확보 방안 강구 제안
미래원자력시스템 개발 장기추진 계획(11년) (수정의결)	4세대 기술의 기술로드맵 수립
	4세대 기술의 기술로드맵 조정
한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획(15년)	소듐냉각고속로 공동설계와 핵연료주기 공동연구(원자력(연) 및 미국 ANL, INL 등) 성과 및 추진일정 등 보고
	소듐냉각고속로 원형로('28년) 관련 원자력시설의 인허가 기준 및 부지확보 방안 마련 필요성 제기
원자력시스템 개발· 실증 추진전략 수립 계획(15년-수립 중)	신 한미원자력협력협정 체결에 따른 연구개발 제약요인 일부해소에 따른 차세대 원자력시스템의 본격적인 개발, 실증을 위함
	단계별 로드맵 수립으로 사업추진 예측가능성 제고
	기술실증을 위한 부지 및 재원 확보방안 마련
	한미협력을 통한 개발기술의 국제적 신뢰성 향상
	인허가 사전준비를 통한 실증사업 불확실성 제거
사용후핵연료 관련부처 간 정책·사업 협력 강화	
4차 원자력연구개발 사업계획(12년)	미래원자력시스템 개발내용의 반영 및 국내·외 동향변화 등을 고려한 기술개발 및 재원 투입 계획수립
	미래원자력 시스템 핵심·원천기술 확보의 투자계획 (전략목표2)-예산 3,387억 (1) 소듐냉각고속로원형로 설계추진 '17년완료 (2) 원자력수소생산시스템 핵심·원천기술개발 (3) 미래원자력시스템 인허가 기반 기술개발
	환경친화적 핵연료주기 기술개발 관련 투자계획(전략목표3)-예산 2,704억 (1) 핵비확산성 핵연료주기 (Pyroprocess) 기반 기술개발

이와 같은 4세대 원자력시스템의 개발 및 실증과 관련한 정책을 앞서 도출한 전환의 영향요인과 비교분석을 하고 이에 대한 정책적 의의와 시사점을 도출한 것은 다음과 같다.

**<표 6> 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인과 유관정책과의
분석 및 시사점 도출(저자 작성)**

영향요인	유관 정책	의의 및 시사점	
장기간의 안정적인 자원 할당	미래원자력시스템 개발 장기추진 계획 (08년, 11년)	의의	구체적인 연구개발 자원 투입 계획 확보
	4차 원자력연구개발 사업계획 (12년)	시사점	인력양성 부분 강화필요
	원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획 (15년)		
혁신을 위한 이해당사자 간의 지속적인 상호작용	한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획 (15년)	의의	핵비확산성 지향 및 국제공동 연구 수행에 따른 국제사회의 신뢰성 확보
	원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획 (15년)	시사점	기술개발 초기단계로 다양한 이해당사자 보다는 연구개발 중심의 제한적 국내외 이해당사자간 상호작용 4세대 원자로에 대한 사회적 수용성 확보를 위한 장기적 노력필요
완전한 시스템을 위한 기술과 노하우의 축적	미래원자력시스템 개발 장기추진 계획 (08년, 11년)	의의	기술과 노하우를 축적하기 위한 중장기 기반 마련
	4차 원자력연구개발 사업계획 (12년)	시사점	실증 및 실용화를 위한 중장기로드맵의 구체성과 이를 위한 자원확보 필요 정부와 연구개발주체 뿐 아니라, 지자체, 사업자, 사용자 등 실용화 측면의 이해당사자 참여를 통한 기술개발 및 노하우 축적 필요
	원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획 (15년)		
적용 및 실증을 위한 정책적인 시장	원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획 (15년)	의의	원자력시스템 개발·실증 추진의 근거마련
	한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획 (15년)	시사점	국가에너지기본수급계획의 미반영 실증 및 실용화 계획 구체화와 향후 상황에 맞추어 정책적인 시장 도입 필요

2. 정책적 시사점

기술혁신의 관점에서 정부의 기본적인 역할은 국가의 혁신활동들에 영향을 미치는 규제와 법률 등을 구성하는 것이라 하였다(Porter, 1990). 정부는 정책을 통해 실질적인 혁신활동에 대한 동기를 부여할 수 있으며, 이는 혁신시스템에 속한 모든 기관(기업, 대학, 연구기관 등)에 영향을 미치기 때문에 중요한 역할을 가지고 있다. 특히 제도가 기술혁신에 미치는 영향이 큰 거대공공기술의 경우 그 영향력은 더 크다고 사료되기에 이런 기술에 대한 혁신역량의 향상은 국가, 경제, 제도, 사회적 환경 등을 종합적으로 고려하는

정책을 통한 장기간의 지속적이고 체계적인 노력이 필요하다(Samara et al., 2012). 따라서 정부와 규제자는 중장기적이고 안정적인 정책적 지원을 통해 점진적으로 해당 산업의 혁신역량을 강화시켜야 한다.

한국에서 중장기적으로 4세대 원자력에너지기술로의 성공적인 전환과 세계 5강의 지속가능한 경쟁력을 유지하기 위해서 정부의 역할과 제도의 수립은 이와 같은 관점에서 접근해야 할 것이다.

분석결과 현재 4세대 원자력에너지기술과 관련한 정책은 기술개발 초기단계의 주요 이슈 및 현안을 집중적으로 다루고 있으며, 중장기적인 4세대 원자력에너지 기술의 개발을 위한 자원과 일정 로드맵 등을 거시적으로 도출하고 있는 것으로 보인다. 이처럼 연구개발의 측면에서는 안정적이고 중장기적인 지원계획이 구체적으로 마련되어 있는 것으로 보이며, 혁신시스템 국제화 흐름에 대응하는 국제기구 및 국외 협력연구도 활성화 되어 있는 것으로 사료된다.

하지만 연구개발의 외적인 측면에서 4세대 원자력시스템의 실질적인 적용과 상업화 측면을 위한 정책적인 노력은 기술개발초기 임을 감안하더라도 향후 고려해야 할 것으로 판단된다. 특히 연관한 정책들은 실증과 운영을 위한 전문인력의 체계적인 양성 방안이나, 4세대 원자력에너지기술의 적용에 따른 사회적 수용성 또는 저항에 대한 대응에 대한 내용을 포함해야 할 것이다. 또한 실증에 대한 구체적인 계획 수립과 함께 실증이 완료된 4세대 원자력시스템을 적용하기 위한 정책적인 시장을 제안하는 장기적인 노력이 필요한 것으로 보인다. 특히 실증과 상업화를 위해서는 이해당사자들 간의 구체적이고 지속적인 상호작용이 국내외로 중요한 바, 이를 적극적으로 장려하는 것이 체계적으로 필요한 것으로 사료된다.

VI. 결론

본 연구는 원자력기술과 그 혁신활동을 사례로서 포함하는 다양한 이론적 시각의 반영을 통해 원자력기술혁신의 특성에 대한 심층적 이해를 하고 이를 바탕으로 4세대 원자력에너지기술 전환에 영향을 미치는 요인과 대응을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

이를 위해, 원자력기술혁신의 특성을 구체화하여 4세대 원자력에너지기술의 전환 시

영향을 미치는 요인을 살펴보고 한국 정책사례의 적용을 통해 4세대의 혁신적인 원자로의 성공적 안착을 위한 시사점을 도출하였다. 이는 현재 세계 5강의 원자력 강국으로서 4세대 원자력기술 도래에도 지속가능한 경쟁력 유지를 위한 정책적 제언으로 활용할 수 있을 것이다.

정성적 문헌연구방법을 통해 수집된 문헌을 분석한 결과, 4세대 원자력에너지 기술의 전환에 영향을 미치는 요인은 크게 4가지로 확인할 수 있었다. 이는 장기간의 안정적인 자원 할당, 혁신을 위한 이해당사자 간의 지속적인 상호작용, 완전한 시스템을 위한 기술과 노하우의 축적, 적용 및 실증을 위한 정책적인 시장이었다.

이를 한국의 4세대 원자력에너지기술과 연관한 정책을 대상으로 적용하여 사례분석을 한 결과, 현재 4세대 기술이 기술개발의 초기단계에서 실증단계로 넘어가는 시점임을 감안하더라도 연관한 정책은 실증과 운영을 위한 전문인력의 체계적인 양성 방안, 사회적 수용성 또는 저항에 대한 대응, 실증에 대한 구체적인 계획 수립, 4세대 원자력시스템을 적용하기 위한 정책적인 시장을 제안하는 장기적인 노력, 이해당사자들 간의 구체적이고 지속적인 상호작용을 적극 장려하는 것이 체계적으로 필요함을 제시하였다.

이처럼 본 연구는 원자력기술의 이해와 4세대 원자력시스템의 전환의 이슈를 다루어 정부차원의 유용한 정책적인 시사점을 제시하였고, 원자력기술에 대한 혁신환경에 대한 이해를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 정부 뿐 아니라, 중요한 이해당사자인 기술공급자, 기술수요자, 국제기구, 사용자 등을 위한 정책적 이슈를 모두 다루지 못한 한계점을 가지고 있었다. 이에 대한 추가적인 분석을 통해서 이해당사자별 이슈에 집중할 보다 세부적인 정책제언이 가능할 것으로 판단한다.

참고문헌

(1) 국내문헌

- 과학기술부 (2011), 『한국과학기술 50년사』, 과학기술부.
- 미래창조과학부 (2012), 『제4차 원자력연구개발 5년 계획(2012-2016)』, 미래창조과학부.
- 미래창조과학부 (2015), 『한미 원자력공동연구 추진현황 및 향후계획』, 미래창조과학부.
- 미래창조과학부 (2016), 『2016년 원자력백서』, 미래창조과학부.
- 박시훈·조형례·정선양 (2016), “혁신시스템 국제화의 촉진을 위한 프레임워크 구축 및 활용: 한국원자력산업과 우주산업을 중심으로”, 『기술혁신연구』, 24권 2호, pp. 115-141.
- 박시훈·정선양 (2016), “원자력기술혁신에 대한 이해: 학제적 관점에 기반하여”, 한국기술혁신학회 춘계학술대회, pp. 378-385.
- 이태준·이광석 (2002), “개도국의 기술개발 환경에 대한 국제 정치적 영향 요인 분석”, 『기술혁신연구』, 10권 2호, pp. 131-148.
- 정선양 (2012), 『기술과 경영』, 서울: 경문사.
- 정의·김현준·양맹호·오근배 (2003), “제4세대 원자력시스템의 기술적 특성”, 한국기술혁신학회 학술대회, pp. 359-368.
- 제255차 원자력위원회 (2008), 『미래원자력시스템 개발 장기추진 계획』, 원자력위원회.
- 제1차 원자력진흥위원회 (2011), 『미래원자력시스템 개발 장기추진 계획, 수정의결』, 원자력진흥위원회.
- 제5차 원자력진흥위원회 (2015), 『원자력시스템 개발·실증 추진전략 수립 계획』, 원자력진흥위원회.
- 한국과학기술기획평가원 (2015), 『2014년 기술수준평가』, 서울: 한국과학기술기획평가원.
- 한국원자력연구원 (2009), 『한국원자력연구원 50년사』, 한국원자력연구원 출판.
- 한국원전수출산업협회 (2012), 『알기 쉬운 원자력공학』, 한국원전수출산업협회 출판.
- 한국원자력산업회의 (2013), 『2013 원자력연감』, 한국원자력산업회의 출판.

(2) 국외문헌

- Arthur, W.B. (1988), “Competing Technologies: an Overview”, In: Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G. and Soete, L. (Eds.), *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, London, pp. 590-607.
- Bauer, M. (1995), “Resistance to New Technology and its Effects on Nuclear Technology, Information and Biotechnology”, In: Bauer, M., *The Resistance to New Technology* (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 1-45.
- Bauer, M. (1997), *Resistance to New Technology: Nuclear Power, Information Technology*

- and Biotechnology*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Berkhout, F. (2002), “Technological Regimes, Path Dependency and the Environment”, *Global Environmental Change*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-4.
- Boardman, J. (1990), *Systems Engineering: an Introduction*, Prentice Hall, New York.
- Bresnahan, T.F. and Trajtenberg, M. (1995), “General Purpose Technologies ‘Engines of growth’”, *Journal of Econometrics*, Vol. 65, pp. 83-108.
- Chung, S. (2015), “Korean Government and Science and Technology Development”, In: Hilpert, U.(Eds.), chap 13. *Routledge Handbook of Politics and Technology*, Routledge Press.
- Clarysee, B., Wright, M., Jordan, B. and Mahajan, A. (2014), “Creating Value in Ecosystem: Crossing the Chasm between Knowledge and Business Ecosystems”, *Research Policy*, Vol. 42, pp. 1164-1176.
- Cowan, R. (1990), “Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-In”, *Journal of Economic History*, Vol. 50, No. 3, pp. 541-568.
- Cowan, R. and Hulten, S. (1996), “Escaping Lock-in: The Case of the Electric Vehicle”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 53, No. 1, pp. 61-79.
- Davies, A. (2003), “Are Firms moving ‘Downstream’ into High-value Services?”, In: Tidd, J. and Hull, F.M.(Eds), *Service Innovation, Organizational Responses to Technological Opportunities & Market Imperatives*, Imperial College Press, London, pp. 21-34.
- Freeman, C. (2003), “Policies for Developing New Technologies”, *SPRU Working Paper Series*, Vol. 98, Brighton.
- Grant, M. and Booth, A. (2009), “A Typology of Reviews: an Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies”, *Health Information & Libraries Journal*, Vol. 26, pp. 91-108.
- Grubler, A. (1998), *Technology and Global Change*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Grubler, A. and Wilson, C. (2012), *Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- GÓkalp, I. (1992), “On the Analysis of Large Technical Systems”, *Science, Technology and Human Values*, Vol. 17, No. 1, pp. 57-78.
- Hobday, M. (1998), “Product Complexity, Innovation and Industrial Organization”, *Research Policy*, Vol. 26, pp. 698-710.
- Hobday, M. and Rush, H. (1999), “Technology Management in Complex Product Systems (CoPS)-Ten Questions Answered”, *International Journal of Technology Management*, Vol. 17, No. 6, pp. 618-639.

- Hobday, M., Rush, H. and Bessant, J. (2004), "Approaching the Innovation Frontier in Korea : the Transition Phase to Leadership", *Research Policy*, Vol. 33, pp. 1433-1457.
- Hughes, T.P. (1983), *Networks of Power: electrification in western society 1880-1930*, Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Hughes, T.P. (1987), "The evolution of large technical systems", In: Bijker, W.E., Hughes, T.P. and Pinch, T.(Eds.), *The Social Construction of Technological Systems*, MIT Press, London.
- IAEA(International Atomic Energy Agency) (2012), *Knowledge Management for Nuclear Industry Operating Organization*, IAEA-TECDOC-1510.
- Joerges, B. (1998), "Large Technical Systems: Concepts and Issues", In: Mayntz, R., Hughes, T.(Eds.), *The Development of Large Technical Systems*, Westview Press, Boulder, pp. 9-36.
- Joskow, P.L. (2006), *The Future of Nuclear Power in the United States: Economics and Regulatory Challenges*, 06-019, Center for Energy and Environmental Policy Research, MIT.
- Jovanovic. B. and Rousseau, P.L. (2005), "General Purpose Technologies", In: Aghion, P., Durlauf, S.(ed.), *Handbook of Economic Growth Elsevier*, chap 18, pp 1181-1224.
- Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V. and Psarras, J. (2013), "Renewable Energy and Nuclear Power towards Sustainable Development: Characteristics and Prospects", *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 22, pp. 187-197.
- Kessides, N. (2009), "Nuclear Power and Sustainable Energy Policy: Promises and Perils", *The World Bank Research Observer*, Vol. 25, No. 2, pp. 323-362.
- Kim, L. (1997), *Imitation to Innovation: the Dynamics of Korea's Technological Learning*, Harvard Business School Press, Boston, MA.
- Lamarsh R. and Baratta, J. (2001), *Introduction to Nuclear Engineering*, 3th edn, Prentice Hall Inc, New Jersey.
- Lincoln, Y.S. and Guba, E.G. (1985), *Naturalistic Inquiry*, Beverly Hills, CA : Sage.
- Lipsey, R.G. and Carlaw, K. (2006), "GPT Driven, Endogenous Growth", *The Economic Journal*, Vol. 116, pp. 155-174.
- Locke, L.F., Spirduso, W.W. and Silverman, S.J. (1987), *Proposals that Work: A Guide for Planning Dissertations and Grant Proposals*, Newbury Park, CA: Sage.
- Malerba, F. (2004), *Sectoral System of Innovation: Concept, Issues and Analyses of Six Major Sectors in Europe*, Cambridge University Press.
- Malerba, F. (2006), "Innovation and the Evolution of Industries", *Journal of Evolutionary*

- Economics*, Vol. 16, pp. 3-23.
- Markard, J. and Truffer, B. (2006), "Innovation Processes in Large Technical Systems: Market Liberalization as a Driver for Radical Change", *Research Policy*, Vol. 35, pp. 609-625.
- Mazzoleni, R. and Nelson, R. (2007), "Public Research Institutions and Economic Catch-up", *Research Policy*, Vol. 37. No. 10, pp. 1512-1528.
- Metzler, F. and Edward, S. (2013), "Sustaining Global Competitiveness in the Provision of Complex Products and Systems : The Case of Civilian Nuclear Power Technology", *MIT Political Science Department Research Paper*, No. 2013-3.
- Miles, M.B. and Huberman, A.M. (1984), *Qualitative Data Analysis: A Sourcebook of New Methods*, Beverly Hills, CA: Sage.
- Mokyr, J. (1992), "Technology Inertia in Economic History", *Journal of Economic History*, Vol. 52, pp. 325-338.
- NEA(OECD Nuclear Energy Agency) (2002), *Society and Nuclear Energy: Toward a Better Understanding*, OECD/NEA, Paris.
- NEA(OECD Nuclear Energy Agency) (2007), *Innovation in Nuclear Energy Technology*, OECD NEA, No. 6103.
- Nelson, R. and Rosenberg, N. (1993), *Technical Innovation and National System: A Comparative Analysis*, Oxford University Press.
- Palmberg, C. and Nikualinen, T. (2007), "Nanotechnology as a General Purpose Technology of the 21st Century?: an Overview with Focus on Finland", DIME Second Research Activity Line. (RAL2), *The Creation, Accumulation and Exchange of Knowledge in Networks, Sectors and Regions*, Working papers series.
- Pavitt, K. (1984), "Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory", *Research Policy*, Vol. 13, pp. 343-373.
- Porter, M. (1990), "The Competitive Advantage of Nations", *Harvard Business Review*, Vol. 68, pp. 73-93.
- Ram, S. and Sheth, N. (1989), "Consumer Resistance to Innovation: The Marketing Problem And Its Solutions", *The Journal of Consumer Marketing*, Vol. 6, No. 2, pp. 5-14.
- Rycroft, R.W. and Kash, D.E. (2002), "Path Dependence in the Innovation of Complex Technologies", *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol. 14, No. 1, pp. 21 - 25.
- Rosenberg, N. (1994), *Exploring the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Prencipe, A. (2003), "Corporate Strategy and Systems Integration Capabilities: Managing

- Networks in Complex Systems Industries”, In: A. Prencipe (ed.), *The Business of Systems Integration*, (Oxford, UK: Oxford University Press), pp. 114-132.
- Samara, E., Georgiadis, P. and Bakouros, I. (2012), “The Impact of Innovation Policies on the Performance of National Innovation Systems: A System Dynamics Analysis”, *Technovation*, Vol. 32, No. 11, pp. 624-638.
- Saunders, L. (2009), *The Policy and Organisational Context for Commissioned Research*, London: British Educational Research Association, TLRP 29.
- Shenhar, A.J. (1994), “A New Conceptual Framework for Modern Project Management”, In: Khalil, T.M., Bayraktar, B.A. (eds), *Management of Technology IV*, Institute of Industrial Engineers.
- Van Goethem, G., Hugon, M., Bhatnagar, V., Manolatos, P. and Deffrennes, M. (2007), “Euratom Innovation in Nuclear Fission: Community Research in Reactor Systems and Fuel Cycles”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 1486-1502.
- Unruh, G.C. (2000), “Understanding Carbon Lock-in”, *Energy Policy*, Vol. 28, No. 12, pp. 817-830.
- Utterback, J.M. and Suarez, F.F. (1993), “Innovation, Competition, and Industry Structure”, *Research Policy*, Vol. 22, No. 1, pp. 1 - 21.
- Wade, R. (1990), *Governing the Market: Economic Theory and the Role of Government in East Asian Industrialization*, Princeton University Press.
- Walker, W., Graham, M. and Harbor, B. (1988), “From Components to Integrated Systems: Technological Diversity and integration between the Military and Civilian Sectors”, In: Gummett, P., Reppy, J. (eds.), *The Relations between Defence and Civil Technologies*, Kluwer Academic Publishers, London.
- Whitney, V. (1950), “Resistance to Innovation : The Case of Atomic Power”, *American Journal of Sociology*, Vol. 56, No. 3, pp. 247-254.
- 전력거래소(Korea Power eXchange (2016), “Power Statistics in Korea”, Electric Power Statistics information in Korea, <https://epsis.kpx.or.kr/epsis>.

□ 투고일: 2016. 10. 05 / 수정일: 2016. 10. 31 / 게재확정일: 2016. 11. 08