

미래 원자력기술 혁신방향에 대한 고찰

Consideration for Innovation of Future Nuclear R&D

이영준*, 김수은**, 윤미래***, 임채영****, 문기환*****, 이태준*****

목 차

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| I. 서론 | IV. 미래 원자력 기술의 기술혁신 방향 |
| II. 우리나라의 원자력 기술의 기술혁신 과정 | V. 맺음말 |
| III. 경수로 기술의 혁신 한계 | |

논문 요약

1950~60 대에 다양한 원자력 발전시스템 개념들이 제안된 후 경수로 시스템을 중심으로 기술이 성숙해오다, 2000년대부터 기술적 한계(고유안전성, 폐기물 발생 등)로 인해 기술진보의 장벽에 부딪혔다.

기술적 쇠퇴기를 극복하기 위해 크게 3가지 방안을 제시할 수 있다. 첫번째는 기존 경수로의 기술적 한계를 극복한 고유안전성을 지니고, 폐기물 발생을 최소화 하거나 폐기물을 소멸처리할 수 있는 혁신 원자력 시스템 기술을 개발하는 것이다. 이 경우 기술이 상용화되기 위해서는 기존 경수로 시스템보다 경제적이어야 할 것이다.

두 번째는 타 기술 분야와 접목하여 기존 시스템의 안전성과 성능을 획기적으로 향상시키는 것이다. 최근 이슈가 되고 있는 4차 산업혁명 기술로 대표되는 IT 기술이 기존 원자력 기술에 접목되는 방안인데, 인허가 문제를 극복해야한다는 문제점이 있다.

세 번째는 미래 기술에 원자력 기술을 접목하는 방안이다. 우주, 해양, 국방 등 거대 과학 분야 등 원자력 외 분야에 접목할 경우 인허가 등 기존체계에서 자유로울 수 있기 때문에 새로운 기술 혁신을 이룰 수 있다.

Keyword : 원자력시스템, 혁신 원자로, 4차 산업혁명 기술, 거대과학 융합, 미래 원자력

* 한국원자력연구원 선임연구원, joon96@kaeri.re.kr, 042-868-8327
** 한국원자력연구원 선임연구원, sekim@kaeri.re.kr, 042-866-6086
*** 한국원자력연구원 연구원, future@kaeri.re.kr, 042-868-8184
**** 한국원자력연구원 책임연구원, limcy@kaeri.re.kr, 042-868-8231
***** 한국원자력연구원 책임연구원, mkh@kaeri.re.kr, 042-868-2141
***** 한국원자력연구원 책임연구원, tjlee@kaeri.re.kr, 042-868-2149

I. 서론

1. 추격형 기술혁신 패턴

우리나라의 기술 혁신은 대부분 역행적 엔지니어링(reverse engineering)이라는 방식을 통해 진행되어 왔다. 선진국에서 개발된 성숙 기술을 이전받아 우리 역량을 바탕으로 습득하여 우리나라 환경에 맞게 개선하는 방식이다. 이는 일반적인 기술 추격형 방식으로 반도체, 조선 등 우리나라 대부분의 기술 개발이 이뤄진 것과 유사하다. 그러나 이 기술의 경우 어느 정도 기술 수준이 높아지게 되면 최고 기술을 개발해야 하고, 선진국이나 선진 기업으로부터 해당 기술을 이전받기 어려운 상황에 직면하게 된다. 또한 최근의 대부분의 제조업 기술처럼 경쟁국이 더 싼 임금과 가격으로 우리의 기술을 추격해온다면 넷 크래커 상태에 빠지기 쉬운 단점이 있다.

그에 반해 선진국의 기술혁신은 유동기에 제품혁신이 발생하여 신제품이 창출되고, 공정 혁신 과정을 거치며 제품의 품질이 향상됨과 동시에 원가가 절감되는 과정을 거친다. 과도기를 거치며 제품 간 경쟁 과정에서 소수의 제품이 살아남게 되고, 이 제품들이 결국 시장을 지배하게 된다.

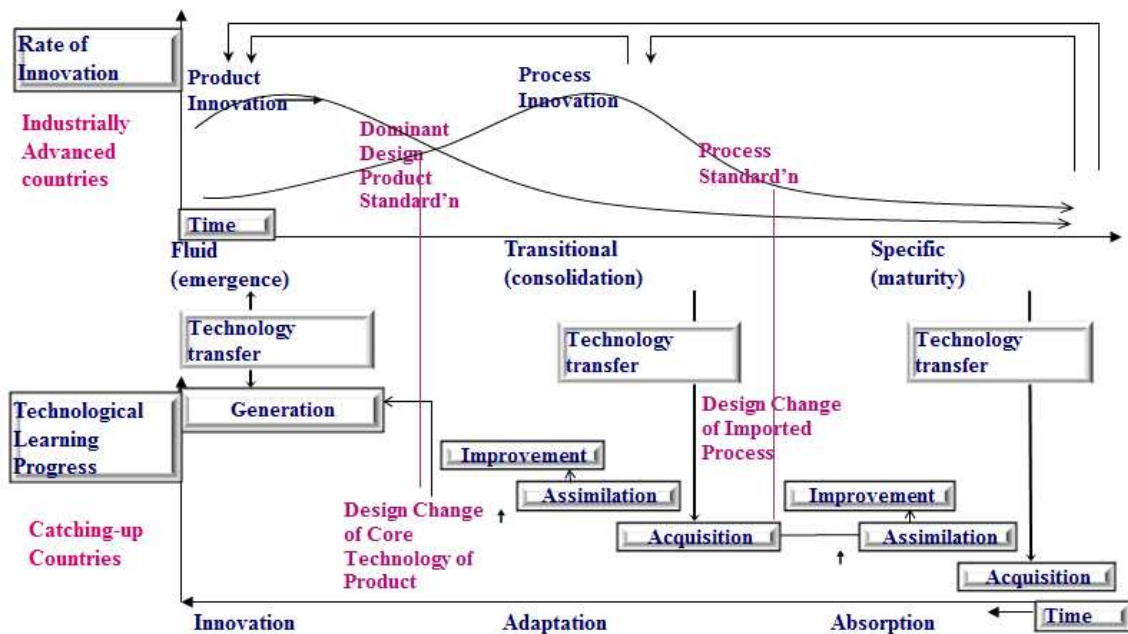


그림 1 선도형 및 추격형 기술혁신 모델

2. 원자력 기술의 혁신 패턴

세계 원자력 기술의 유동기는 1950년대라고 볼 수 있다. 이 시기에는 핵분열 원리가 발견된 후 다양한 방식의 원자력발전 기술이 제안되었다. 기술력이 가장 앞선 미국에서는 많은 원자로 기술들이 경쟁을 거쳐 경수로*와 고속로, 용융염원자로로 경쟁 관계가 압축되었다. 고속로는 핵연료 증식 관점에서 용융염원자로와의 경쟁에서 승리하였고, 경수로는 고속로와 경제성에서 우위를 점해 지배상품이 된다.

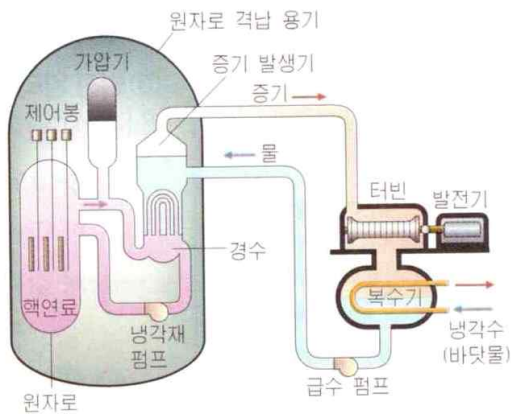


그림 2 가압경수로

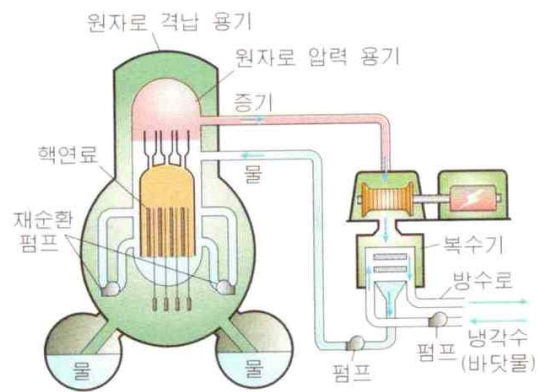


그림 3 비등경수로

경수로 기술은 안전장치를 개량하고 용량을 키우면서 경제성을 확보하는 방식으로 점진적인 기술 혁신을 이뤄왔다. 1950~60년대 개발된 1세대 경수로는 경수로의 상업 운전 가능성을 확인하는 수준이었으나 1960~70년대의 2세대 경수로는 본격적인 상용원자로라 볼 수 있다. 1980년대 이후 원자로는 표준화가 되어 1000MW 이상의 대형 발전이 가능한 표준화를 이룬 제3세대라고 볼 수 있다. 그러나 기술 혁신 속도는 적용되는 기술들이 고도화되어가며 느려져가고 있다. 현재에는 경수로의 기술적 한계를 극복할 수 있는 급진적 혁신 기술이 적용된 제4세대 원자로 시스템이 개발중이다.

* 경수로는 PWR(가압경수로), BWR(비등경수로), PHWR(가압중수로), VVER(러시아형 경수로) 등으로 구분될 수 있으나, 모두 물을 냉각재로 사용하여 원자로에서 발생한 열을 증기로 변환시켜 발전하는 방식을 총칭한다.

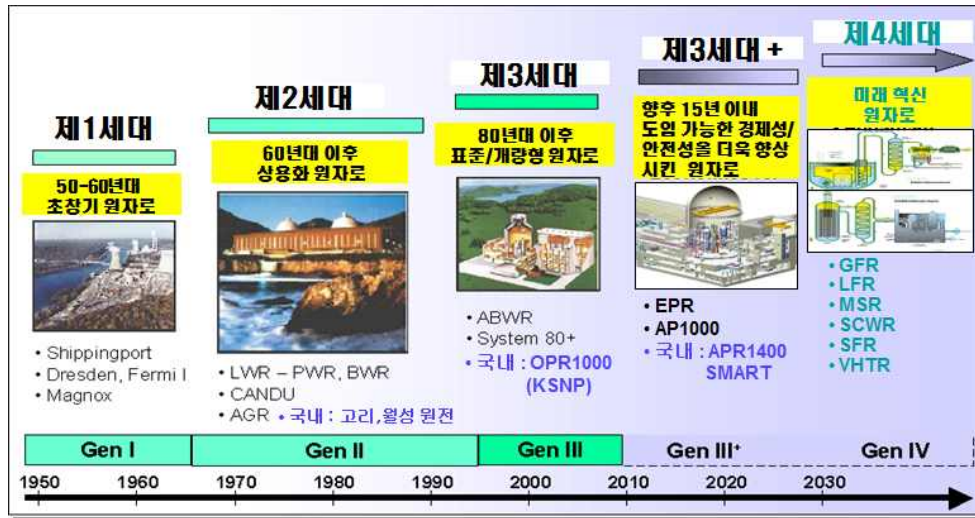


그림 4 원자로 시스템의 기술 진보

II. 우리나라의 원자력 기술의 기술혁신 과정

1. 원자력 기술 국산화

1) 우리나라의 원자력 기술 역량 확보 전략

우리나라는 원자력 기술 확보를 위해 일반적인 역행적 엔지니어링 방식을 적용하였다. 1970년 대에 이미 상용화된 2세대 원자로 시스템을 일괄도입 방식으로 건설하면서 기술 개발 시동을 건 것이다. 그러나 거대 공학기술의 집약체인 원자로 시스템 기술을 일괄 도입하는 것은 당시 우리 기술력으로는 어려웠다. 특히 기술 공급국이 기술 이전을 하지 않은 상태에서 단지 건설하는 것만으로 자체 기술력을 높이는 것은 불가능에 가까웠다. 우리나라는 이러한 단점을 극복하기 위해 여러 공급사로부터 분할하여 기술들을 도입하는 방식으로 경수로 기술을 흡수하여 자체 기술화하기 시작한다. 이를 위해 고리 3, 4호기부터는 다양한 회사들의 노형을 건설하게 되는데, 다양한 노형을 건설하면서 각 호기별 공급사로부터 기술이전 혹은 공동 설계 방식으로 선진국의 기술을 도입하였다. 도입한 기술을 바탕으로 최초의 한국표준형 원자력발전소인 울진 3호기를 건설하면서 기술자립의 신호탄을 쏘아올렸고, 신고리 3호기부터는 순수 우리기술로 최신 3세대 원자로 시스템을 건설할 수 있게 되었다. 2009년 아랍에미리트에 수출한 APR1400이 이 모델이다.



그림 5 우리나라가 원자로 기술 개발 이력

2) 분야별 기술 개발 과정

기술의 분할 도입은 기술별로 구분할 수 있다. 가장 먼저 도입된 기술은 핵연료 기술이다. 핵연료 기술 개발을 위해 1976년에 전문 연구기관인 한국 핵연료 개발 공단을 설립하고 1980년에 핵연료 국산화 기본계획을 수립한다. 이 계획을 근거로 1981년에 중수로 핵연료를 국산할 결정을 하고, 1986년에 중수로 핵연료 설계, 제조 기술의 본산인 캐나다의 AECL과 기술협력 협정을 체결한다. 이후 캐나다의 기술을 빠르게 흡수한 우리나라는 1988년에 상용시설을 완성하고 국산화에 성공한다.

경수로용 핵연료 국산화 결정은 중수로보다 4년 늦게 결정되었지만 개발 방식은 중수로와 유사하였다. 기술 이전에 우호적인 독일의 KWU와 공동설계 및 공동연구를 수행하여 1989년에 국산 핵연료 공급 기술을 확보한 것이다.

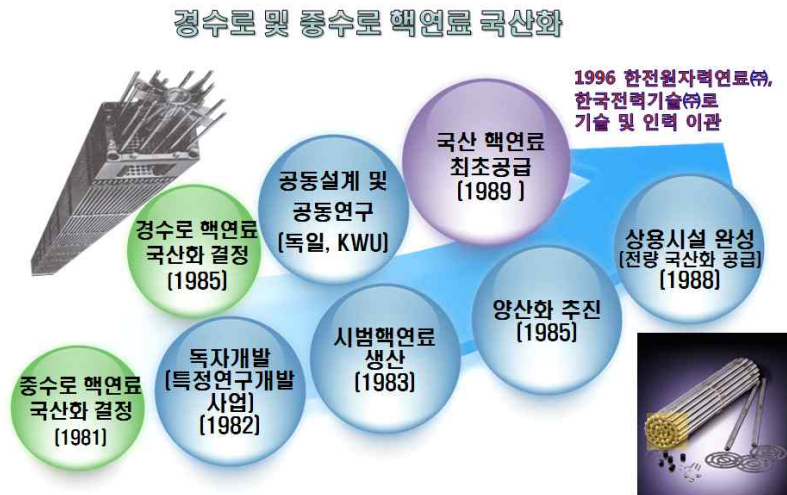


그림 6 핵연료 기술 국산화 과정

핵연료에 이어 원자로 계통(NSSS)의 설계 기술 자립이 수행되었다. 계통 설계 기술은 핵연료에 비해 규모가 크고 복잡하였기 때문에 기술 자립에 필요한 시간은 길었으나, 기술 역량 확보 방식은 유사하였다. 기술 이전 협력을 ABB-CE사와 맺고

영광 3, 4호기를 공동설계하면서 기술 역량을 키워갔다. 이때 키운 기술력을 바탕으로 설계를 개량하고 표준화하여 1998년에 울진 3, 4호기를 설계함으로써 국산화의 기틀을 마련했다고 볼 수 있다.

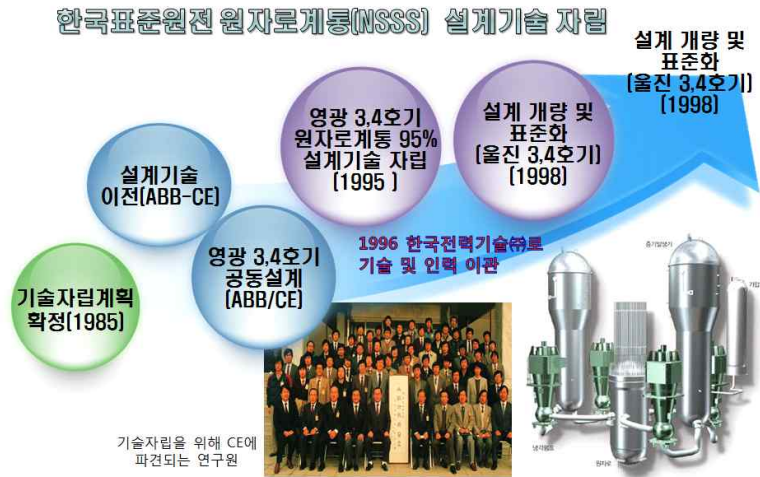


그림 7 원자로 계통 설계 기술 국산화 과정

3) 자체 역량을 통한 기술 확보

핵연료와 계통 설계는 기술이전과 공동설계라는 추격형 방식으로 개발되었으나, 핵심 원천기술의 기술 이전은 공급사의 거부로 이뤄지지 않았다. 이 기술들을 확보하지 못할 경우 수출을 추진할 때 원천기술을 보유한 해외업체를 동반해야 하며, 원천기술 부재로 수출에 상당한 제약요인으로 작용하게 된다. 당시 원전 기술 개발 부처인 지식경제산업부는 2012년까지 핵심설계코드 국산화, 핵심기자재 설계 및 제작기술 확보할 것을 목표로 그간 투자해온 기술 인프라를 바탕으로 미자립 기술 개발을 결정하였다.

기술 개발 분야는 다음의 3개 분야이다.

- 원전설계 핵심코드 (안전설계 및 노심설계 등 제3자 제한 코드)
- 원자로계측제어설비(I&C; Instrumentation and Control) 및 제어봉집합체
- 원자로냉각재펌프(RCP; Reactor Collant Pump)

원전설계 핵심코드는 완전한 원천소유권을 주장할 수 있도록 가압경수로형 안전 해석/노심설계 코드 개발 및 인허가 획득을 목표로 추진되었다. 기술 개발을 위해 산·학·연 공동으로 국내 개발가능 인력을 집중하여 개발하였다.

원자로계측제어설비는 산·학·연의 전문가 그룹의 지식과 정보를 공유하여 국내 주도로 제작기술, 고유모델 개발 및 업체 발굴 수행하는 방식으로 개발되었다. 국내 기술 기반이 부족한 경우 해외 전문업체와 기술협력 방안을 모색하였다. 계측 제어 설비 기술 국산화 과정에서 국내 중소 전문회사와의 협력과 국내 성능 인증기관 협력 및 기개발 검증설비 상호 과정을 거치면서 자체 생태계를 구축하는 효과도 얻을

수 있었다.

원자로냉각재펌프(RCP) 기술은 수력학적인 상사성을 고려하여 축소모델 펌프로 APR1400 원전에 적합한 원형 RCP 성능예측 및 고유모델 설계시방서를 개발하고 계통적합성 및 계통 연계사항을 평가하여 원형 RCP 상세설계 추진하는 방식으로 추진되었다. 실제 프로젝트와 연계하여 원형 RCP 제작 및 RCP 성능검증과 운전 신뢰성 시험을 수행하여 실 프로젝트에 적용하기 위한 펌프의 신뢰성을 확보하여 RCP 국산화를 달성할 수 있었다.

제어봉 집합체는 핵연료 제조 기술개발 경험과 양산 시스템을 운영하면서 누적한 기술력을 바탕으로 순수 국내 전문업체를 활용하여 자체 개발하였다.



그림 8 3개 미자립 핵심기술 국산화 방안

2. 국산화에 따른 조직 및 제도 변화

1) 관련법

원자력기술 개발을 위해 원자력의 연구·개발·이용과 관리에 관한 기본사항을 규정한 원자력법을 제정하였다. 이 법에 의거하여 기술개발에 관련된 행정조직과 연구조직, 재원 등을 마련하고 있다. 1958년 3월 11일 법률 제483호로 제정된 원자력법은 당시에는 원자력 관련 기본법 형태이었으며, ‘원자력위원회(’59)’, ‘원자력원(’59)’, ‘원자력연구소(’59)’의 설립 근거를 담고 있었다.

원자력 기술을 도입하는 시기인 1960년 후반부터는 원자력 분야의 업무분담(원전행정은 상공부의 한진, 허가 및 규제행정은 과학기술처)에 따라 원자력발전 사업에 관한 관계법령을 정비하였다. 원자력발전소의 건설의 본격적인 추진에 따른 손해배상 관련법인 ‘원자력손해배상법(’69)’과 보상계약에 필요한 사항을 규정한 ‘원자력손해배상보상계약에 관한 법률(’75)’이 제정되었으며 1978년에 ‘전원개발촉진법’이 제정되었다.

원자력기술 자립이 어느 정도 이뤄진 1980년~90년대에는 발전소의 주변지역에 대한 지원 사업을 효율적으로 추진하여 전원개발을 촉진함을 목적으로 ‘발전소주변지역에 지원에 관한 법률’이 제정되어 과기처 주도(한국원자력연구소)로 수행되던 방사성폐기물사업이 통상산업부(산업체)로 이관되었다. 또한 TMI사고(’79년) 및 체르노빌 원전사고(’86년)로 인해 국민들의 원자력 안전에 대한 관심이 커짐에 따라 안전규제강화와 원자력안전규제 전문기관 설립을 위해 ‘한국원자력안전기술원법’이 1989년 제정되었다.

원전 기술이 고도화된 2000년 이후에는 원자력산업의 성장과 다변화, 국제 환경에 따른 안전 및 방호 문제의 중요성 대두 등으로 원자력법의 단일 체제에서 해당 분야를 보안 및 개선한 관련법들이 제정되었다. 특히 2011년 일본 후쿠시마 원전사고를 계기로 국내외적인 원자력 안전성 강화 요청에 따라 ‘원자력법’을 ‘원자력진흥법’, ‘원자력안전법’, ‘원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률’로 보완하였다.

2) 행정 조직

우리나라 원자력 관련 조직은 국가적 정책·계획의 수립 및 이행을 총괄하는 정부기관과 정부가 출연한 공공기관 등이 있으며 이러한 기관들은 업무의 역할에 따라 진흥·이용관련조직, 규제·통제 관련 조직으로 구분할 수 있다.

진흥·이용 관련 조직의 정부기관에는 원자력진흥위원회, 원자력이용개발전문위원회, 교육과학기술부, 지식경제부 등이 있다. 이중 기술개발에 가장 밀접한 관련이 있는 ‘원자력진흥위원회’는 국가 원자력 이용에 관한 중요 사항을 심의·의결하는 기구로서 1959년 발족한 ‘원자력위원회’에서 출발하여 2011년 7월 25일 전면 개정된 「원자력진흥법(법률 제10909호)」 제3조에 의거 국무총리 소속의 심의/의결 기구로 재발족되었다.

정부조직으로는 부처 이름은 변경되어왔으나, 2017년 현재 기준으로 볼 때 원자력 이용·개발에 관한 기본시책 및 중장기종합계획을 담당하고 있는 과학기술정보통신부와 원자력발전 산업과 방사성폐기물 관리에 관한 조정을 담당하는 산업통상자원부, 규제와 통제 업무를 맡고 있는 원자력안전위원회가 있다. 원자력안전위원회는 2011년 원자력안전법 분리와 함께 과학기술정보통신부로부터 독립된 조직이다.

주요 변천과정을 살펴보면, 1950~60년대에는 원자력발전소나 핵연료주기시설의 본격적 개발 및 도입 이전이므로 원자력행정체제는 과학기술처로 일원화된 상태에서 기반을 다지던 시기였다.

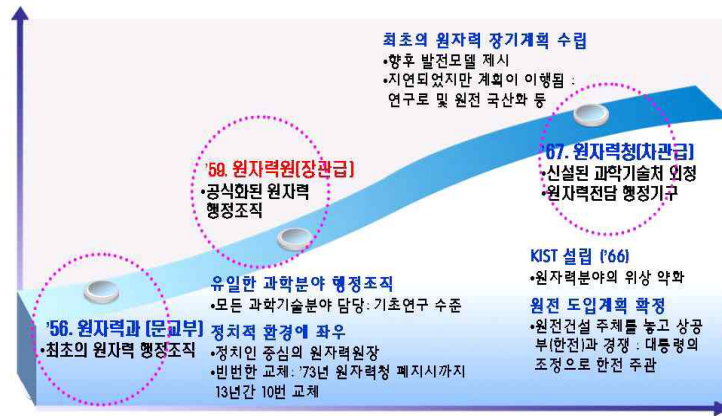


그림 9 1950~60년대 원자력 행정조직

1960년에 들어서 이전까지의 원자력기술개발 성과를 토대로 원자력의 상업적 이용을 위한 본격적인 원전 도입 및 건설 사업이 추진됨에 따라 국내 유일의 전력 회사인 한국전력이 자연스럽게 원전 건설 및 운영을 담당하게 되어 이원 행정체계가 시작되었다.

1980년대 원전 기술이 자립기에 들어서자 원자력안전에 대한 관심이 증대되어 원자력국을 “원자력개발국”과 “원자력안전국”으로 분리 개편되고, 기술개발과 산업 담당부처가 확대 혹은 축소되는 변화를 겪는다.

3) 관련 중장기 계획

원자력 분야에만 관련된 법적인 최상위 계획은 원자력진흥종합계획이다. 이 계획은 원자력법 제8조의 2에 의거하여 1997년부터 매 5년마다 교과부에서 원자력진흥종합계획을 수립하여 원자력위원회에서 심의·의결하도록 되어있으며, ‘방사선및방사성동위원소이용진흥법’ 등 여타 원자력관련법률에 의거하여 수립된 계획 등을 포함하고 있다.

원자력연구개발 5개년 계획은 원자력법 제9조(원자력연구개발사업의 추진)에 근거하여 원자력진흥종합계획의 부문별 시행계획이다. 원자력이용개발전문위원회의 심의·의결을 거쳐 국가계획으로 확정된다.

원전기술 발전방안(Nu-Tech 2012)은 2009년 수립된 Nu-Tech 2015의 계획을 수정하여 원전수출 산업화 기반을 조기에 마련하기 위해 기술개발 목표시한을 2015년에서 2012년으로 수정한 부처 자체계획이다. 이 계획과 함께 Nu-Tech 2012의 완료 후 글로벌 경쟁시장에서 대등 또는 우위선점을 위한 2030년까지의 중장기 계획인 원전기술 국가로드맵(Nu-Tech 2030)이 있다.

미래원자력시스템 개발 장기추진계획은 미래의 원자력 주도권 확보를 위해 제4세대 원자력시스템(Gen-IV)을 개발하기 위해 2008년 원자력위원회에서 가결된 장기계획이다.

원자력안전종합계획은 제29차 원자력안전위원회(‘05.1)에서 5년 단위의 “원자력

안전규제 중장기 종합계획”을 수립·추진하기로 결정한 후 부처 계획으로 이행되다가, 원자력안전법이 분리된 후 법정계획으로 격상되었다.

3. 우리나라 원자력 기술 자립과 기술혁신 이론과의 관계

우리나라의 원자기술 혁신은 역행적 엔지니어링 이론을 충실하게 따라왔다고 볼 수 있다. 기술 도입 당시 기술 전문가와 원천기술이 없었던 우리나라는 기술선진국이었던 미국, 캐나다, 독일, 프랑스에 공동연구 형식으로 전문가를 파견하여 기술을 습득하였고, 턴키 방식에서 부분 기술 개발 형태로 원천기술을 도입함으로써 기술 기반을 확보할 수 있었다. 1970년대부터는 확보된 기술을 바탕으로 핵연료, 원자로 계통 순으로 국산화를 달성함으로써 기술자립에 성공하였고, 선진국으로부터 도입하지 못한 3개의 핵심기술은 자체 개발함으로써 원자로 기술 자립에 마침표를 찍을 수 있었다. 기술 자립과정에서 필요한 재원과 법, 행정 조직은 환경 변화에 따라 이뤄졌다. 기술 도입기에는 기술개발 부처가 확대되었으며, 산업화가 이뤄진 후 산업 관련 부처와 제도가 확충되었다.

원자로 기술 자립은 경수로와 중수로 원전 산업 생태계 형성에도 큰 기여를 했다. 핵연료 기술은 한전원자력연료 주식회사로 이관되어 국내에서 운영되는 원전의 핵연료를 자체 공급할 수 있도록 하였으며, 계통 설계 기술은 한국수력원자력, 한국전력기술 등에 이관되어 한국형 원전 설계에 사용되고 있다. 원자로 냉각재펌프, 원자로계측제어설비 기술도 두산중공업에 기술 이전되어 우리 기술로 생산 가능한 상태이다. 즉 이태준 박사가 제기한 기술 혁신이론에 따르면 선진기술을 도입하여 응용연구 단계에 중간 진입한 후 사업화를 통해 공정과 비용 혁신을 이루었다고 볼 수 있다. 이러한 상태로 보면 우리나라의 원자력 기술은 혁신기와 과도기를 지나 성숙기에 돌입하였다고 판단된다.

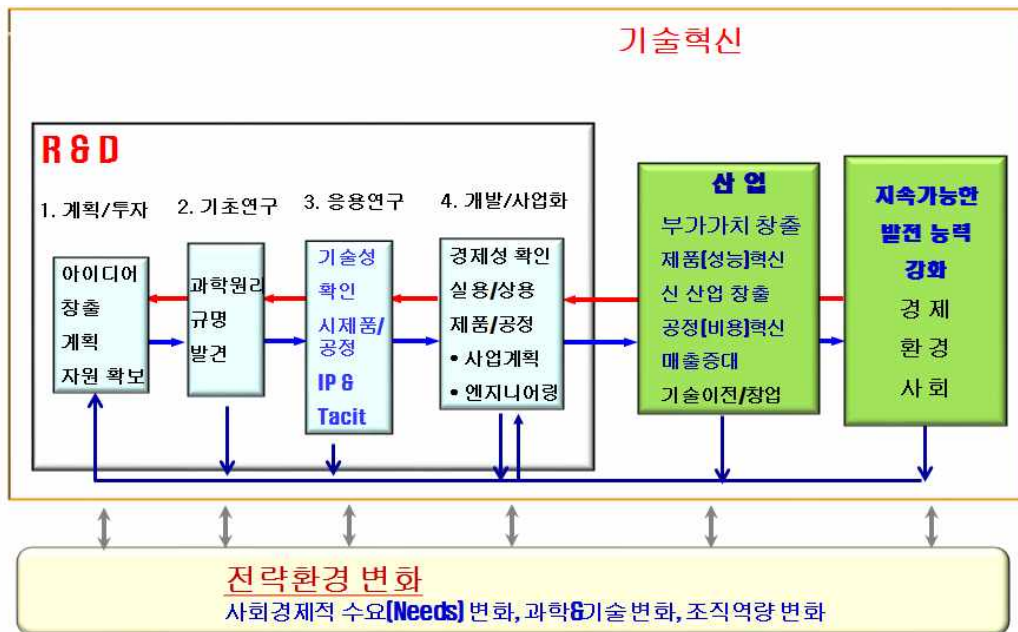


그림 10 R&D를 통한 기술혁신 과정 (이태준 저)

III. 경수로 기술의 혁신 한계

성숙기에 들어선 기술은 자체 기술을 점진적으로 진화시키면서 안전성과 경제성을 향상시키고 있다. 그러나 성숙기 기술은 기술의 복잡성으로 인해 혁신속도가 느려질 수밖에 없다. 이제는 우리 기술이 선진국으로 인정받고 있으므로, 다른 선진국 가들이 더 이상 신기술을 이전도 쉽지 않기 때문에 자체 역량만으로 기술 혁신을 이뤄야 하는 상태이다. 또한 중국 등 추격국들은 우리가 해왔던 역행적 엔지니어링 방식으로 빠르게 기술 습득을 하며 기술 넷 크래커 현상이 발생하고 있다.

더욱이 원자력 기술은 정부 주도적으로 개발된 기술 특성상 정치와 대중 수용성에 민감하게 반응함에 따라 다음과 같은 문제점들이 기술혁신 과정에 발생되고 있다.

1. 대중이 인식하는 안전과 기술적 안전성의 괴리

원자력 발전 기술은 체르노빌 사고와 TMI 사고 이후 중대사고 예방에 집중되어 왔다. 그 결과 안전성 면에서 획기적인 진보가 있어왔으나, 2011년 후쿠시마 원전 사고로 인해 대중의 불안은 다시 높아졌다. 그 결과 확률론적 안전에 의존한 안전 기술 개발 방향과 지진과 인적 오류에 집중했던 중대사고 예방 기술 방향이 복합재난에 대한 대응으로 이동하게 되었다.

하지만 대중들은 기술적인 안전성 진보에 비해 체감하는 안전성 향상은 낮은편이다. 산업계는 대중 수요를 만족시키기 위해 원전의 효율 향상없이 안전설비를 추가할 수밖에 없고, 이는 경제성 저하로 이어질 수밖에 없었다. 또한 대중 수용성 저하는 신규 원전 건설 과정에서 규제가 까다로워지고, 지역 주민 합의 과정이 어려워져 공기 지연으로 이어지고 있다.

2. 경제성 저하

대중 수용성 저하는 신규 건설되는 원전에 규제를 까다롭게 하여 안전설비 확충 비용이 발생되며, 지역 주민 합의 과정이 어려워져 공기 지연 등으로 건설비가 급증하게 된다. 원전은 초기 투자비가 발전원가에서 차지하는 비중이 70% 이상으로 건설 공기 급증은 원가 상승으로 이어질 수밖에 없는 구조이다. 게다가 사고위험 불안감이 높아져 사고 보험비 증가 등 사회적 비용이 늘어나 원가 상승 압박에 직면해 있는 상태이다.

3. 사용후핵연료 발생 및 관리 방안

원자력 발전시장에서 지배상품으로 자리잡은 경수로 및 중수로의 핵연료를 한번 쓰고 다시 사용하지 못하는 특징으로 고독성의 사용후핵연료가 발생되고 누적되는 구조적 한계가 있다. 사용후핵연료는 현재에는 발전소 내의 임시저장소에 보관되어 있으나, 최대 30만년 가량 지나야 방사능이 자연계 수준으로 낮아지므로 최종 관리 방안이 별도로 수립되어야 한다.

현재까지는 다음의 세 가지 관리 방안이 제시되어 있다. 첫 번째로는 사용후핵연료를 재활용하지 않고 지하 500m 깊이에 묻는 방식이다. 이 경우 여유 면적을 포함하여 대략 10km² 넓이의 처분 부지가 필요하여 인구 밀도가 높고 유휴부지가 적은 우리나라에는 적합하지 않은 한계가 있다.

두 번째 방식은 중간저장 시설을 건설하여 사용후핵연료에서 발생하는 열과 방사선이 줄어들 때까지 장기간 저장하는 것이다. 장기 저장 이후 처분을 하면 처분면적을 크게 줄일 수 있다. 하지만 장기저장에 대한 기술이 부족하고 최종적으로 처분할 부지를 확보하지 못한 상황에서 우선 중간저장시설을 건설하게 되면 저장기간 장기화되는 것에 대한 지역의 반발이 우려된다.

세 번째 방식은 원자로에 다시 재사용함으로써 방사성독성과 폐기물 부피를 줄인 후 처분하는 것이다. 이 방식을 적용하면 처분되는 사용후핵연료 규모를 가장 많이 줄일 수 있지만 아직은 기술적 불확실성이 높은 것이 단점이다.

IV. 미래 원자력 기술의 기술혁신 방향

원자력 기술은 이제 역행적 엔지니어링 방식으로는 더 이상의 급진적 기술혁신을 이룰 수 없다. 역행적 엔지니어링 방식의 한계를 벗어나 새로운 기술 혁신 방법으로 다음의 세 가지 방식을 제안할 수 있다.

1. 기존의 단점이 해결된 혁신 원자로 시스템 개발

경수로형 원자로는 안전에 대한 대중 인식과 사용후핵연료 발생 문제에 근본적인 문제를 지니고 있다. 혁신 원자로는 기존의 경수로형 원자로가 지니고 있는 경제적 발전원이라는 장점을 승계하면서 고유안전성을 확보하여 어느 경우에도 중대사고가 일어나지 않아 대중들이 받아들일 수 있어야 할 것이다. 또한 사용후핵연료가 적게 발생하거나 재사용을 통해 독성과 부피를 최소화할 수 있어 지속가능성이 확보되어야 할 것이다.

현재 제4세대 원자로시스템의 개발 목표는 이러한 부분을 고려하여 설정되었으며, 현재 경합중인 기술은 소듐냉각고속로와 초고온가스냉각로가 있다. 이와 함께 사용후핵연료 재사용을 위한 파이로컨식처리 기술이 개발되고, 경수로와 비슷한 수준의 경제성만 갖춰진다면 원자력발전 분야의 새로운 지배 상품으로 등장할 수 있을 것으로 보인다.

그 외에도 지속가능성 측면에서는 용융염원자로를 들 수 있다. 용융염원자로의 경우 지속가능성 측면에서 가장 우수한 성능을 보이나, 기술의 복잡성으로 인해 기술혁신 속도가 가장 느린 편이다. 다만 현재 우리나라에서 혁신 시스템으로 집중 개발 중인 소듐냉각고속로가 외부적 환경에 의해 개발이 지연된다면 대안 기술로 개발될 수 있을 것이다.

2. 원자력기술 중심으로 혁신 기술과 접목

최근 4차산업 혁명 기술이 사회적 이슈가 되고 있다. 급성성장하고 있는 ICT 기술이 다른 기술과 접목하여 새로운 형태의 제품으로 거듭나는 것이 그 특징이다. 4차 산업 기술이 접목될 경우 대중 수용성이 높아지는 부수적 효과도 기대할 수 있다. 이러한 특징을 활용하여 수용성이 낮은 기존 원자력발전 기술에 4차 산업 기술을 접목할 경우 수용성 한계를 극복할 가능성이 있다.

구체적인 기술 접목 방식으로는 인공지능 기술과 접목된 자율운전 원전, IoT 기술과 결합한 원전 사고 자동 감시시스템, VR을 활용한 작업자 등의 원자로 시스템

과 운전 교육 시스템, 3D 프린터를 이용한 다품종 소량생산 원전 부품 생산, 원전 사고 지역과 같은 극한환경에서 작동하는 로봇 등이 있다. 다만 원자력 기술은 입증된 기술만 인허가를 받을 수 있기 때문에 4차 산업 기술이 접목되기 위해서는 신기술에 대한 인허가를 획득하는 과정이 필요하나, 그 기간이 길어 시기를 놓칠 수 있는 문제가 있다.

3. 원자력 기술을 타 과학기술에 결합

원전 기술은 양자물리 뿐 아니라 기계, 전자, 화공 등 다양한 학문과 공학기술이 접목된 분야이다. 이와 유사한 분야는 우주, 국방, 조선이 있다. 이들 부분은 장기간의 기술개발과 대규모의 투자가 있어야 가능한 분야로 우리나라는 추격형 방식으로 기술을 확보했다는 공통점도 있다. 그러므로 우주, 국방, 조선이 일정 수준 이상 기술력을 확보한다면 원전 기술과 같이 선도형 기술개발 전략을 취해야만 할 것이다. 이 과정에서 원자력기술은 해당 기술과 결합함으로써 급진적 기술혁신을 이룰 수 있을 것으로 보인다.

우주기술의 경우 현재에는 발사체 개발 단계에 있으나, 선진국들은 이미 화성기지 건설과 같은 우주시대에 대비하고 있다. 우리나라가 우주기술의 선진국으로 진입하기 위해서는 추격형 기술개발과정을 벗어나자마자 급진적인 기술 혁신이 이뤄져야 하며, 이 경우 원자력에너지를 이용한 추진체 개발, 우주인 생활 검증을 위한 우주방사선 모의환경 조성, 유인 우주기지 에너지 공급원 등이 우주 기술에 접목되어 빠른 시간안에 선도국으로 발돋움 할 수 있을 것으로 보인다.

조선업은 컨테이너선 등 전통제조기술 분야는 선진국 반열에 올라있다. 하지만 중국의 거센 추격과 기술개발 속도의 둔화로 원자력기술과 마찬가지로 넷 크랫키 상태로 보인다. 조선업은 위기를 극복하기 위해 해양플랜트 분야에 진출했으나, 경제위기로 인한 시장 축소, 선진 기술 확보 실패로 기술혁신에 실패한 사례가 있다. 기존의 실패를 학습삼아 해양플랜트와 원자력에너지의 결합이나, 잠수함 및 선박용 원자력 추진체 개발 등을 통해 신기술을 선보이는 것이 기존 선진국 기술과 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 방안이라고 판단된다.

국방 기술은 대표적인 국가 전략기술로 국가간 기술 이전이 매우 제한적인 분야이다. 국방과학연구소를 중심으로 전차 등 전통기술은 상당 수준 확보했으나, 첨단 국방 기술은 선진국에 비해 뒤쳐져 있는 상태이다. 첨단 국방 기술 중 레이저 무기 등은 원자력 분야의 동위원소를 활용하여 고효율의 레이저 발생장치를 마련할 수 있으며, 매우 정교한 국방 무기의 품질 유지를 위해 고해상도의 비파괴 검사장치 등도 국방기술력 유지에 도움이 될 수 있다.

V. 맺음말 및 추후 연구방향

경수로 원전 기술은 과거 선진국에서 다른 원전기술에 비해 가격경쟁력을 갖출 수 있어 경쟁을 이기고 지배상품이 되었다. 우리나라는 경수로 원전 기술을 추격형 기술혁신 방법(역행적 엔지니어링)을 통해 성공적으로 기술 자립화하였다. 그러나 사용후핵연료 문제 등 경수로 원전의 근본적인 문제에 직면해있고, 기술진보에 의한 경제성 향상보다는 비용 증가가 빠른 추세이다. 이는 기술 성숙기에 흔히 나타나는 현상으로 새로운 기술의 도입에 의한 근본적인 기술 혁신이 없다면 원자력 기술은 쇠퇴할 것이다.

본 연구에서는 새로운 원자력 발전 시스템 개발, 기존 원자력 시스템과 신기술과의 접목을 통한 개량, 타 기술에 원자력기술의 제공 방식으로 기술 혁신 방안을 제안하였다.

향후에는 각각의 기술혁신에 따른 정량적인 성과 예측과 함께 세부적인 기술 방안에 대해 조사해보고자 한다.

참 고 문 헌

(1) 단행본(각종 정부간행물 및 연구보고서 포함)

원자력50년 부흥50년, 과학기술부/한국원자력연구원, 2008, p.49.

한국원자력창업사: 1955-1980, 박익수, 도서출판 경림, 2002, p.229.

한국원자력연구원, 국가 원자력 정책자료 조사 분석 및 체계화 연구, 2011

(2) 학위 논문 및 학술 논문(단행본에 포함된 개인 저술 포함)

조만형 외 (2009). 세계 원자력환경변화에 대응한 원자력행정체계의 발전방안, 서울행정학회

한국원자력연구소 (1990). 원자력기술의 전략적개발을 위한 심층조사연구, p.61

전기수(2010). 한국 원자력행정체제 실태분석에 관한 연구, 한양대학교 행정&자치대학원.

Utterback, J.M. and Suarez, F.F. (1993) 'Innovation, competition and industry structure', Research Policy, 22, 1-21

Lee, T. J. (2004), 'Technological Learning by National R&D: the case of Korea in CANDU-type nuclear fuel', Technovation, 24(4), 287-297

(3) 법령

원자력진흥법

원자력안전법

(4) 온라인 자료 :

대통령 기록포털시스템(www.pa.go.kr)

조선 빅3 키운 해양플랜트 이젠 찬밥, 2016.10.31. 서울경제신문

중국쇼크 - 넷크래커에 낀 메이드 인 코리아, 2014.08.13, 연합뉴스