

주요국의 원자력 미래기술 평가 비교

정 환삼, 양 맹호, 함 철훈, 김 현준, 이 동진

한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 원자력 선진국들의 원자력 미래기술의 예측 사례를 조사·분석하고, 이를 우리나라의 사례와 비교하였다. 조사된 미래 원자력 기술예측 및 수준 평가는 국외의 경우 일본, 독일 그리고 프랑스의 사례가 조사되었고 국내에서는 과학기술정책관리연구소와 한국원자력연구소의 사례를 인용하였다. 이들 사례에서 공통적으로 평가하고 있는 기술의 중요성, 실현시기 그리고 제약요인을 비교하였다.

기술평가 결과에 나타난 일반적인 특징은 우선 개별기술의 중요성 평가에서는 공통적으로 방사성폐기물처리, 원전내진설계 그리고 원전해체기술 등과 같이 이미 활용중인 기술로서 기존 시설의 안전성을 향상시킬 수 있는 기술의 중요성을 높이 평가하고 있다. 다음으로 실현시기 평가에서는 레이저빔 이용기술과 같이 인접과학 분야의 발전에 따른 시너지 효과가 기대되는 분야의 기술이 2010년 이전에 실현될 것으로 평가하고 있다. 마지막으로 기술개발의 저해요인의 평가는 조사사례 별로 정도의 차이는 있으나 기술적 제약요인이 가장 높고, 다음으로 경제적 제약 그리고 사회적 제약의 순으로 평가하고 있다.

I. 주요국의 원자력 기술개발 관련 동향

1995년말을 기준으로 각국의 원자력 발전 현황을 살펴보면, 일본의 운전중인 원전은 51기이고 건설중인 원전은 3기로 그 용량은 3,757MWe에 이르고 있고 총전력에 대한 원자력발전의 비중은 33.4%로 전체 공급전력의 1/3을 원전으로 공급하고 있다. 미래 원전의 도입계획은 1995년의 약 40GWe에서 2010년에는 약 70GWe로 전망하고 있으며, 현재 가동중인 원자로형이 PWR과 BWR이 주종을 이루고 있으며, 도입될 원자로형 전략은 핵연료 주기 정책과 연계하여 추진되고 있다.

독일의 운전중인 원전은 총 20기로, 노형별로는 이중 14기가 PWR이고 나머지 6기가 BWR이다. 독일의 경우 현재 건설중인 원전은 없으며 이러한 계획은 21세기 초엽까지 계속될 것으로 전망된다. 이는 완전한 지방자치체가 이루어지고 있는 상황에서 많은 영향력을 행사하고 있는 녹색당의 노선과 원전 도입 절차가 중앙과 지방정부로 이원화된 구조에 기인한 것으로 보인다.

프랑스의 운전중인 원전은 56기로 이들중 1,433MWe용량을 차지하는 2기의 FBR을 제외하면 모두가 PWR형으로 구성되어 있다. 가동중인 원전의 총발전량은 358.6TWh로 이는 연간 발전 총량의 76.14%를 차지하고 있어 리투아니아의 85.59%에 뒤이어 세계 2위를 기록하고 있다. 프랑스의 에너지 정책은 우리나라의 경우와 같이 에너지 부존자원이 거의 없는 관계로 대단한 의욕을 갖고 원자력을 추진하고 있으며, 그 결과 에너지 자급율의 향상과 전력요금의 인하가 가능하였다.

원전현황에 더하여 원자력관련 기술의 연구개발은 원자력 기술의 특성에 비추어 세계 공통적으로 국책연구소를 중심으로 하여 이루어져 왔고, 이는 미래기술분야로 까지 이어지고 있다. 그러나 최근 10여 년 간 계속되어온 세계 원자력산업의 침체와 지구촌 냉전체제의 종식에 따라 원자력분야 국책연구소의 기술개발 수요가 줄어들고 있으며, 이로 인해 최근에는 이들 원자력분야 국책연구기관은 그들이 보유하고 있는 기술력을 관련분야와 연계할 수 있는 분야로 확산시키고 있다.

II. 원자력 미래기술 평가 연구 조사

과학기술 분야의 연구개발 활동의 기획과정에 있어 각분야 기술의 미래 변화방향과 발전속도를 적절히 예측하고자 하는 국가별 관심은 어느 국가를 막론하고 매우 높으며 이에 따라 각국은 이러한 예측에 많은 노력을 경주하고 있다.

본 연구에서는 국가별 다양한 기술예측사례 중에서 원자력기술이 주도적으로 포함되어 있고 더욱이 비교연구의 특성상 정량화된 예측과 유사한 관점의 미래기술에 대해 평가한 예측결과를 도출하고 있는 국가별 예측 사례를 비교하였다. 이와 같은 점을 고려하여 조사된 평가는, 우선 일본의 경우 과학기술청의 위탁으로 과학기술정책연구소(NISTEP ; National Institute of Science and Technology Policy)와 미래기술연구소(IFTECH ; Institute for Future Technology)가 공동으로, 독일은 독일연방연구기술부와 Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research(ISI)가, 프랑스는 고등교육 및 연구부와 SOFRES가 그리고 우리나라는 과학기술처와 과학기술정책관리연구소(STEPI) 그리고 한국원자력연구소(KAERI)를 들 수 있다. 특히 미국의 경우는 미의회에 의해 1972년 설립된 기술평가국(OTA ; Office of Technology Assessment)이 1980년 후반경 활발한 연구를 수행한 것으로 조사되었으나 미국의 경우는 주로 원자력기술보다는 신·재생에너지를 대상으로 포괄적 예측을 행한 관계로 본 연구에서는 생략하였다.

본 연구에서 분석한 국가별 평가사례는 이들 연구가 정량적 평가를 수행하였고, 비교적 여러분야에 걸쳐 초장기 예측을 수행하고 있다는 이유에 더하여 이들 연구가 여러 기술분야의 광범위한 전문가를 통해 평가하였고, 예측국의 미래기술 개발 정책환경을 포괄적이고 객관적으로 분석하였다는 점에서 (표 1)과 같은 평가사례를 인용하였다.

III. 국가별 평가결과의 비교 수행

국가별 원자력 미래기술 평가 결과의 비교를 위해 대상기술의 도출과 평가요소의 설정을 사례별 차이점을 극복하기 위한 처리과정과 더불어 요약하면, 우선 대상기술은 국외의 평가에서 사전에

(표 1) 국가별 미래기술 평가 연구

	일 본	독 일	프랑스	한 국	
예측기관	IFTECH, NISTEP	ISI	SOFRES	STEPI	KAERI
예 측 명	2020年の 科學技術	Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik	Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi	한국의 미래기술	원자력 기술계통도를 이용한 기술개발 전략 연구
시행년도	1992	1993	1994	1994	1993
예측기간	30년	30년	30년	20년	20년
예 측 기 술	전체 기술	1,150	1,147	1,051	1,174
	인용 기술	15	15	15	30
예측기법	Delphi 법	Delphi 법	Delphi 법	Delphi 법	기술나무와 Delphi 법 혼용
특 징	1971년 이래 5회째 수행중	일본의 경우를 시험적으로 적용	독일에 비해 소규모로 수행	일본의 경우를 일부 적용	일본의 경우를 참조하여 수행

설정된 16개 분야에 걸쳐 (표 2)에 나타난 바와 같이 전체 미래기술중 우주분야의 2개 기술, 에너지분야의 9개 기술, 생산분야의 2개 기술 그리고 도시·건축·토목부문과 교통분야에서 각각 1개

(표 2) 도출된 원자력 미래기술

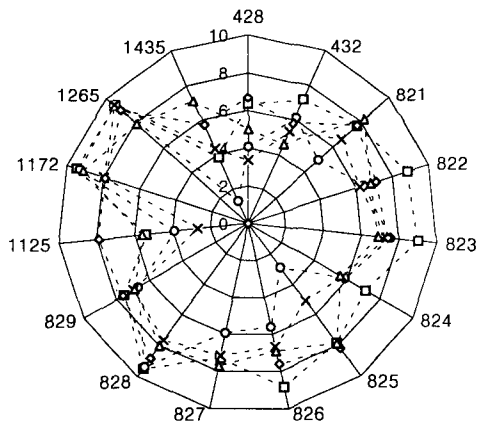
미래기술 분류		기술 code	원자력 미래기술
대분야	중분야		
4. 우주	물질,에너지 이용	0428	월면기지 원자력발전장치의 실용화
	수송	0432	원자력 추진시스템의 실용화
8. 에너지	원자력	0821	레이저법 등에 의한 우라늄 농축기술의 실용화
		0822	핵연료사이클을 포함한 FBR시스템의 실용화
		0823	핵융합발전로 개발
		0824	원자로 열이용해 수소등 2차 물질 생산플랜트 실용화
		0825	원격감시/로봇을 이용해 무인화 진전된 원자로시설 실현
		0826	군분리도 가능한 고도화 재처리시설 실용화
		0827	저준위 방사성폐기물의 재활용기술 실용화
		0828	고준위 방사성폐기물의 고화체 처리기술 실용화
11. 생산	에너지절약	1125	원자로의 소형화가 진전되어 산업용으로 응용
	인간과학	1172	원자력시설의 지진 초기단계 방진시스템이 개발, 보급
12. 도시· 건축·토목	안전성 확보	1265	상용 원전의 안전하고 합리적인 해체철거기술이 확립
14. 교통	수상,수중	1435	원자력 상선의 실용화

기술 등 모두 5개 분야에서 15개의 기술이 도출되었으며, 본 연구에서는 이들을 가공없이 평가 비교의 기준기술로 삼았다. 그러나 우리나라의 예측에서 예측된 기술의 속성을 분석하여 이들을 집산화하여 외국의 경우와 비교하였다. 이러한 과정을 통해 도출된 국내예측 원자력 미래기술은 STEPI의 경우 30개에서 20개 기술이, 그리고 KAERI의 경우는 113개에서 45개의 기술에 이른다.

다음으로 비교평가의 요소설정은 각국의 미래기술 예측에 사용된 평가요소는 STEPI의 예측을 비롯하여 일본, 독일 그리고 프랑스의 연구는 공통적으로 전문도, 중요도, 확산도, 국제협력의 필요성, 현재의 연구개발 수준 비교, 그리고 실현상 제약요인으로 설정하여 평가하였다. 이에 비해 KAERI의 예측에서 설정한 평가요소는 위의 예측과 다소 차이가 있어, 중요성, 전문성, 국제우위성, 그리고 기술개발전망들로 평가속성을 설정하였다. 이와같은 평가요소의 차이는 각사례별로 평가된 평가요소에 내포된 의미의 차이를 감안하여 중요성, 실현시기 그리고 저해요인에 대해 비교하고 측정척도의 차이는 평준화방법을 이용해 척도의 차이를 극복하여 비교하였다.

IV. 주요국 원자력 미래기술 비교평가 결과

조사된 사례별 원자력 기술예측 결과를 비교해 보면, 우선 개별기술의 중요성 평가에서 각 사례는 (그림 1)에 보이는 바와 같이 예측된 기술에 따라 거의 유사한 평가양상을 보이고 있다(범례 : □- 일본, ○- 독일, x- 프랑스, ◇- STEPI, △- KAERI). 이중 공통적으로 (828), (1172) 그리고 (1265)와 같이 이미 활용중인 기술로 기존 시설의 안전성을 향상시킬 수 있는 기술의 중요성을 높이 평가하고 있다.

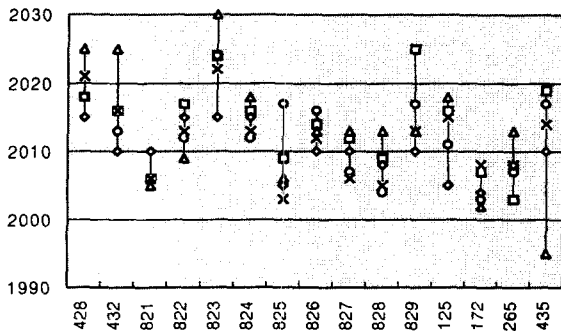


(그림 1) 예측기술의 중요성 평가 비교

로 보인다.

다음으로 예측기술의 실현시기 평가는 (그림 2)에서 보이는 바와 같이 (821)과 (1172)의 실현시기가 사례별로 공히 2010년 이전에 이루어질 것으로 평가되고 있으며 이밖에도 (825), (828) 그리고 (1265) 등을 거의 모든 국가의 평가에서 2010년 이전에 실현될 것으로 평가하고 있다.

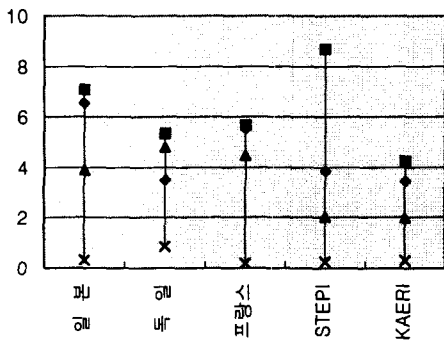
특히 일본의 평가에서는 자국의 에너지안전 확보 안정적 공급 보장을 위한 (822)와 (826) 그리고 미래 에너지 공급기술인 (823)을 여타 사례에 비해 중요한 것으로 평가하고 있다. 이에 반해 중요성을 비교적 낮게 평가하는 것으로는 (1125), (1435) 그리고 (428)과 같이 원자력의 비에너지 분야에 독립적으로 활용되는 것들이 있다. 그러나 여기에서 (1435)는 비록 일본의 경우 중요성을 낮게 평가하고 있으나 우리나라의 평가에서는 우리나라의 기술개발 능력과 지정학적 여건을 감안하여 다른 평가에 비해 두드러지게 중요성을 평가하고 있는 것



(그림 2) 예측기술의 실현시기 평가 비교

이에 반해 가장 늦게 실현될 기술은 (823)을 공통적으로 꼽고 있으며, 이밖에 (428)과 (432) 그리고 (829) 등으로 평가하고 있다. 특히 (1435)에 대한 실현시기 평가에서 KAERI의 평가는 기존에 구소련과 미국, 일본 등 국가에서 가동중인 원자력선을 이미 실용화가 실현된 것으로 평가하여 다른 사례에서는 2010년 이후에 실현될 것으로 평가하고 있는 것과 좋은 대조를 보이고 있다.

마지막으로 기술개발의 저해 혹은 제약요인의 평가는 (그림 3)에서 보이는 바와 같이 예측 사례별로 그 정도의 차이는 있으나(범례 : ■- 기술적 제약, ◆- 경제적 제약, ▲- 사회적 제약, X- 기타 제약) 기술적 제약요인이 가장 높고, 다음으로 경제적 제약 그리고 사회적 제약의 순으로 큰 것으로 평가하고 있다.



(그림 3) 제약요인 평가 비교

특히 우리나라의 두 가지 예측에서 평가된 제약은 거의 유사한 수준의 평가를 하고 있으나 기술적인 제약의 평가에는 다소 차이가 있다. 이는 우리나라의 에너지 혹은 원자력 관련분야 종사자들 사이에 우리나라가 보유하고 있는 원자력기술에 대한 이해도의 차이가 매우 크다는 사실을 반증하는 것이다.

제약요인의 평가결과 해석에서 주의할 점은 개별 기술의 기술개발 제약요인의 평가 결과를 기술간 절대치 비교로 관점을 확대시키는 오류를 범하기 쉽다는 것이다. 이는 개별 평가시 종류별 제약

요인에 대한 평가가 각 기술의 개발여건과 효율을 감안하여 기술별로 각기 독립적으로 이루어지고 있다는 것이다. 예를 들어 경제적 제약의 평가에 있어 (428)이 (823)에 비해 경제적으로 덜 제약받는 것으로 해석하기 보다는 (823)의 개발이 소요예산의 절대치 측면에서 (428)에 비해 더 소요되기는 하나 그 기술의 완성에 따르는 기대효율을 감안할 때 유인효과가 더욱 커 경제적 제약요인이 낮게 평가되고 있는 것으로 해석하여야 한다.

V. 국내 원자력 기술개발계획에의 시사점

현재 원자력의 에너지 이용과 관련된 기존의 상용기술 혹은 기술적인 유용성이 입증된 기술의

자립이나 혹은 이를 바탕으로 하는 응용기술의 개발에 집중되어 있는 우리나라의 원자력 기술개발 분야는 원자력기술의 유용성과 구공산권을 포함한 원자력 선진국의 원자력정책 동향을 감안할 때 지금과 같은 즉각적인 상업적 이용가능한 기술 중심의 개발에서 시야를 넓혀 경쟁력을 갖출 수 있는 원자력 미래기술개발에 대한 투자방안과 연구분야의 개발을 모색할 필요가 있다.

또한 기술의 평가에 있어서도 현재 「국가 원자력 연구개발 중·장기 계획」을 중심으로 추진되고 있는 원자력 기술개발 계획에서도 추진성과 분석 및 향후수행 계획 수립시 기존의 과제관리 수준을 넘어 원자력 선진국의 기술개발 동향과 기술개발 전략을 고려하는 정책적 차원을 고려하여 이루어질 필요가 있다. 이러한 점에서 본 연구에서 실현시기를 실험적으로 적용한 비교는 이후 기술의 중요성과 개발기술의 국제우위 가능성, 개발의 제약요인 분석 등 수직적으로 확대하여야 하며, 또한 원자력 선진국의 기술평가 사례의 수집을 수평적으로 확대할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 과학기술정책관리연구소, "제 1회 과학기술예측조사(1995~2015년) 한국의 미래기술," 1994. 8.
2. 과학기술정책관리연구소 역, "독일의 미래기술 예측(1993~2020년)," 독일연방연구기술성 등, 1995. 4.
3. 산업기술정보원 역, "2020년의 과학기술," 미래공학연구소, 1993. 8.
4. 정환삼 외, "우리 나라의 원자력기술 수준 평가," 대한산업공학회/ 한국경영과학회 충청지회, 추계학술발표 논문집, 1994. 11.
5. 정환삼 외, "원자력 미래기술 예측의 국제비교를 위한 국내 평가기술 도출," 한국원자력학회, 추계학술발표 논문집, 1996. 11.
6. 정환삼 외, "일본, 프랑스 그리고 독일의 원자력 미래기술 평가비교," 한국원자력학회, 춘계학술발표 논문집, 1996. 5.
7. Alexander Gerybadze, "Technology Forecasting as a Process of Organizational Intelligence", R&D Management, 1994. 2.
8. ISI, "Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik," 1993.
9. NISTEP and ISI, "Outlook for Japanese and German Future Technology -Comparing Japanese and German Technology Forecasting Surveys-", 1994. 4.
10. SOFRES, "Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi," 1994. 10.