

'96 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

일본, 프랑스 그리고 독일의 원자력 미래기술 평가 비교

정 환삼, 이 동진  
한국원자력연구소

요 약

우리나라 원자력기술 수준은 정부와 원자력위원회의 적극적인 개발정책 제시와 관련기관들의 헌신적인 노력에 힘입어 영광 원전 3,4호기의 준공으로 95%를 상회하는 것으로 평가되고 있다. 하지만 이는 상업용 원자력 발전소의 개발·이용 능력이며 비발전 분야를 포함하는 원자력 미래기술의 개발능력 수준은 아직 이에 못미치고 있다.

이러한 국내 원자력기술 개발·이용의 상황을 고려하여, 본 연구는 원자력기술 선진국이라 할 수 있는 일본, 독일 그리고 프랑스 등에서 수행한 과학기술 미래기술 평가 사례를 조사하고 여기에서 나타난 원자력 미래기술의 종류와 각 기술에 대한 예측, 평가 결과를 조사하고 국가별 평가 결과의 비교를 수행한다.

이 연구는 기존의 원자력기술에서 시야를 넓혀 과학기술의 범주에서 원자력 미래기술을 조명하고, 또한 원자력 선진국의 원자력 미래기술 평가를 통해 중대 전환기의 우리나라 원자력 개발·이용 발전방향의 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단 된다

I. 비교연구 배경

우리나라의 원자력기술 개발·이용노력은 1959년 당시 원자력원의 산하기관으로 원자력연구소(AERI)의 설립과 더불어 태동되었다. 그 후 본격적인 원자력기술 개발·이용 계획은 1978년 4월 우리나라 최초의 원자력발전소인 고리 1호기가 상업운전을 개시된 후 원전의 유용성을 실감하고 본격적으로 추진되었다. 이후 연이어 10여기의 원자력발전소가 상업운전되거나 건설중에 있어 최근에는 세계 10위권 내외의 원전 이용국의 위치에 까지 이르게 되었다. 이와 같이 활발한 원전 개발·이용 계획의 결과 1970년대 초기에 건설된 원전이 외국 기업의 주도 방식으로 추진된데 비해 그동안의 지속적인 우리의 노력으로 최근에는 계약에서부터 설계, 기자재 제작 까지 원전 건설의

모든 분야에서 국내기업이 주도하여 한국경 표준 경수로를 완성하였고, 현재 기술자립수준이 95%를 상회하게 되었다.

이와 같이 성공적인 기술자립 사례는 세계적으로도 그 유래가 흔치 않은 것으로, 그 배경으로는 정부의 원전에 대한 강력한 기술자립과 에너지 자립 의지, 관련기관의 기술습득에 대한 집중력과 헌신적 노력에 기인하였다. 그 결과 완성된 한국형 표준원전은 정부가 선정한 네가지 중간진입 전략의 성공사례에 DRAM 반도체와 더불어 하나로 자리하게 되었다.

최근 국내의 원자력기술 개발·이용 체제는 중대한 전환기를 맞고 있다. 이 전환기란 기존의 한국원자력연구소에서 개발된 상용원자력발전소의 건설, 운전과 관련된 완성기술을 관련 산업체로 이관한다는 것이다. 이러한 정책은 기존 완성기술과 자원을 산업체로 이관하여 이용도를 보다 증대하고, 연구개발 기능을 담당했던 기관은 원자력 선진국의 기술개발 활동 침체에 편승하여 다시 한 번 보다 발전된 원자력 미래기술의 중간진입을 달성할 호기로 삼는 것으로 연계될 때 보다 시의 적절하고 세련된 정책으로 승화 될 수 있을 것으로 보인다.

이러한 국내 원자력기술 개발·이용 환경의 변화를 고려하여, 본 연구는 원자력기술 선진국이라 할 수 있는 일본, 독일 그리고 프랑스 등에서 수행한 과학기술 미래기술 평가 사례중 도출된 원자력 미래기술의 종류와 각 기술에 대한 예측, 평가 결과를 조사하고 국가별 평가 결과의 비교를 수행한다. 이 조사, 비교의 결과는 전환기의 우리나라 원자력 개발·이용 정책 발전방향 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단 된다.

## II. 원자력 미래기술 평가를 위한 국가별 평가 사례

국가별 원자력 미래기술 평가 사례의 수집은 원자력기술이 주도적으로 포함되어 있고 더욱이 비교 가능하도록 정량화된 예측과 유사한 관점의 미래기술에 대해 평가한 예측결과를 도출하고 있는 것만을 대상으로 하였다. 이와 같은 점을 고려하여 비교 조사된 대표적인 정부기관 및 연구기관은 일본의 과학기술청과 미래공학연구소, 독일의 독일연방연구기술부와 *Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research* 연구소(ISI), 프랑스의 고등교육 및 연구부와 SOFRES 등을 들 수 있다. 특히 미국의 경우는 의회에 의해 1972년 설립된 기술평가국 (OTA : Office of Technology Assessment(OTA)가 1980년 후반 활발한 연구를 수행하였으나, 이 연구는 평가관점을 원자력기술보다는 신·재생에너지를 주대상으로 하여 평가한 관계로 본 비교연구에서는 생략하였다. 이밖에도 우리나라에서 행한 유사한 관점의 평가는 주로 과학기술처와, 통상산업부를 중심으로 수행되어온 많은 사례를 찾을 수 있다. 그러나 이들 평가들은 주로 산업정책의 수립에 직접 사용될 목적을 갖고 수행되어 왔기 때문에 정성적인 예측이 많은 부분을 차지하고 예측대상기술도 거의 상용화 단계에 도달한 기술로 미래기술을 평가하지는 못하였다. 본 연구의 의도와 유사한 연구로는 과학기술정책관리연구소(STEPI)의 평가를 들 수 있다.

STEPI의 평가는 일본의 사례를 참조하여 기획되었으며 예측기간은 향후 20년간의 초장기간에 대해 1994년 [제 1회 과학기술예측조사(1995~2015년) 한국의 미래기술]로 발간되었고 역시

조사의 형태로 진행되었으며 조사방법은 전문가를 중심으로 하여 직관적기법인 Delphi기법을 사용하였고 조사 분야와 평가항목도 일본의 경우와 유사하게 설정되었다.

이밖에도 원자력기술만을 평가한 것으로 본 비교연구의 성격과 유사한 평가로 한국원자력연구소(KAERI)의 연구를 들 수 있다. 이 평가는 한국원자력연구소가 국가원자력 중·장기 연구개발 계획 수립시 기초자료를 작성하기 위해 1993년 「원자력기술계통도를 이용한 기술개발전략 연구」로 작성되어 독자적으로 기획하고 수행된 것이다. 예측은 원자력기술을 대상으로 Delphi법에 의한 전문가 조사의 형태로 수행되었으며 특히 미래기술도출과 예측평가의 두 부분으로 나누어 수행되었다.

그러나 이상의 우리나라 연구 사례에 있어 STEPI의 연구는 평가대상 도출이 기술자체 보다는 기술의 규격이나 특성과 기술이 나타내는 현상을 중심으로 되어 있고 KAERI의 평가에서는 대상기술의 구분이 목표지향적으로 되어 있어 외국의 사례에 비해 이질감이 있고 평가항목도 독자적으로 설계된 관계로 많은 가공후 직접 비교가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 미국의 사례도 제외하고 일본, 독일 그리고 프랑스의 원자력 미래기술 평가에 국한하여 조사하였다.

원자력기술을 포함한 미래과학기술 평가에 있어 일본의 미래기술 평가는 경제사회의 발전에 있어서 과학기술의 발전이 극히 중요하다는 인식을 바탕으로 이를 위해 국가의 과학기술 발전방향을 장기적인 관점에서 파악하고 모색하는 것에 예측 목적을 두고 있다. 이와 같은 예측은 일본의 과학기술청의 과학기술정책국이 주관하여 미래공학연구소가 수행하며 조사의 형태로 이루어지고 있다. 이와 같은 조사는 1971년 최초로 수행되어 매 5년마다 반복적으로 이루어지고 있으며 각 회의 수행에는 조사시점의 내외정세 변화를 감안한 조사과제를 추가 혹은 정정하여 이루어진다. 기술예측 조사 기법은 비전문가를 포함하기도 하나 전문가를 중심으로 Delphi법에 의하여 실시하고 있다.

본 비교연구에서 이용한 일본의 미래기술 예측은 1992년 수행된 제 5회 과학기술예측 조사 결과인 「2020년의 과학기술」로 평가기간은 조사시점인 1991년으로 부터 2020년 까지 30년에 걸친 기술예측조사를 실시한 것이다. 조사는 과학기술청 과학기술정책국 산하에 과학기술예측위원회를 설치하고 기술예측조사의 실행방침 등을 검토한 후 과제의 설정, 조사대상자의 선정, 앙케이트 조사, 조사결과의 분석, 기술발전에 따른 사회적 환경요인의 검토 등을 수행하였다.

독일의 미래기술 평가는 연방연구기술부와 일본의 과학기술정책연구소(NISTEP) 사이의 긴밀한 협력하에 독일의 ISI에 의해 수행된 것으로 삼았다. 이 연구는 「Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik」로 1993년 독일의 연방연구기술부와 ISI에 의해 발표되었다.

이 연구에서 독일은 일본의 경험을 토대로 국내의 평가 수행시 16개의 조사대상 분야에서 2020년까지 향후 30년간 독일 전문가들의 의견을 종합하여 미래 기술발전 전망에 대해 평가하였다. 기술예측 조사 기법은 일본의 경우 적합한 것으로 판명되어온 Delphi 기법이 독일에서 처음으로 사용되었다. 따라서 평가의 수행방법에서 일본과 상이한 사회·문화적 배경으로 인해 동일하지는 않았으나 전체의 구성과 예측 과정은 일본의 경우와 매우 유사하게 전개되었다.

프랑스의 미래기술 예측은 독일의 예측과 동일한 취지에서 고등교육 및 연구부에 의해

SOFRES연구소가 주관하여 수행되었다. 프랑스의 비교연구 사례는 [Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi]로 1994년 10월 역시 SOFRES에 의해 발표되었다. 이 연구의 수행에 있어 프랑스는 각 기술의 평가항목과 조사대상 기술선정 그리고 예측 방법에 있어서도 모두 독일의 사례를 원용하였다.

이상 일본, 독일 그리고 프랑스의 미래기술 평가시 미래기술의 도출은 아래와 같이 16개 분야

- |           |           |            |               |
|-----------|-----------|------------|---------------|
| 1. 재료·공정, | 2. 정보·전자, | 3. 생명과학,   | 4. 우주,        |
| 5. 소립자,   | 6. 해양·지구, | 7. 광물·수자원, | 8. 에너지,       |
| 9. 환경,    | 10. 농림수산, | 11. 생산,    | 12. 도시·건축·토목, |
| 13. 통신,   | 14. 교통,   | 15. 보건·의료, | 16. 사회생활      |

에 걸쳐 수행되었고 이중 원자력 미래기술은, 우주, 에너지, 생산, 도시·건축·토목 그리고 교통분야 등에서 고루 평가되었다.

### III. 미래기술로서의 원자력기술 평가 및 비교

국가별 미래기술 평가에 사용된 각국의 평가는 비교적 원자력 미래기술에 대해 광범위하고 정량적 예측을 행한 연구로 더욱이 유사한 관점에서 예측항목이 설정되고 예측을 수행한 것으로 일본의 [2020년의 과학기술], 독일의 [Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik] 그리고 프랑스의 [Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi]를 들 수 있다.

이들 조사된 국가별 예측은 일본의 예측 경험을 바탕으로 수행되었으며 따라서 독일과 프랑스의 평가에서는 일본에서 조사된 미래기술과 평가항목 그리고 조사방법을 시험적으로 적용하기 위해 그대로 도입하고 다만 평가만은 자국의 전문가를 활용하고 있다. 이러한 이유로 독일과 프랑스의 평가는 자국의 개발환경이 고려된 미래기술의 도출은 불가능하였으나 예측결과는 자국의 상황을 고려하여 독립적인 결과를 도출하였다. 각국의 미래기술 평가에 있어 도출된 원자력 관련 기술은, 총 16개 분야의 1,147개의 도출된 미래기술중 수송부문의 원자력선 개발을 포함하여 (표 III-1)에서 보이는 바와 같이 15건의 원자력 미래기술이 도출되었다.

조사된 기술은 전문도, 중요성, 기술실현시기, 국제협력의 필요성, 현재의 연구개발 수준 그리고 실현상 제약요인등으로 평가하였다. 개별 기술에 대한 평가에서 전문도는 설문응답자의 전문성을, 중요도는 해당기술의 중요성을, 실현예측시기는 해당기술의 실현이 예상되는 연도를, 확신도는 실현예측시기 추정의 확신정도를, 현재의 연구개발수준은 예측국가와 해외 기술수준의 상대비교를 그리고 마지막으로 실현의 제약요인을 각각 평가하였다.

각국의 평가 결과에서 우선, 일본은 (표 III-1)에 수록된 기술code를 기준으로 분석하면 응답자의 전문도는 0822와 0823기술에서 높게 나타났고 1125와 1172기술이 낮았으며, 기술의 중요성은 폐기물 처리와 안전성 그리고 FBR등의 기술을 중요도가 높은 것으로 평가하였다. 현재의 연구개발 수준은 원격제어와 로봇기술(0825)등에서 높은 것으로 평가하여 국제우위가 있는 것으로 평가하고

있다.

(표 III-1) 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	균분리도 가능한 고도화 재처리시설 실용화
		0827	고준위 방사성폐기물의 재활용기술 실용화
		0828	고준위 방사성폐기물의 고화체 처리기술 실용화
		0829	고에너지 소립자에 의한 방폐 소멸처리기술 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

독일은 평가에 있어 응답자의 전문도는 0428과 0432기술의 우주분야에서 높게 나타났고 0829와 1172기술이 낮았으며, 기술의 중요성은 일본의 경우와 마찬가지로 폐기물 처리와 안전성 그리고 FBR등의 기술을 중요도가 높은 것으로 평가하고 있다. 특히 현재 연구개발수준에서는 1172와 1265기술등 원전의 안전성 관련기술이 비교적 높은 것으로 평가하고 있다.

프랑스의 경우 평가 결과에서는 응답자의 전문도는 비교적 고르게 나타나 두드러진 기술이 없었으며 기술의 중요성은 일본, 독일과 같이 폐기물 처리와 안전성 그리고 FBR등의 기술을 중요도가 높은 것으로 평가하였다. 특히 현재의 연구개발수준에서는 자국에서 운영중인 실증용 FBR의 가동에 대한 확신을 반영하여 FBR(0822)기술이 특히 높은 우위를 갖는 것으로 평가하고 있다.

원자력 미래기술 평가결과의 국가간 비교에 있어서는, 원자력 미래기술의 실현시기는 국가별로 거의 유사하게 평가하고 있다. 각국의 실현시기 평가결과와 두 나라 이상에서 동일한 기간에 기술이 실현될 것으로 예측한 기술 즉 유사평가기술을 요약하면 (표 III-2)와 같다.

(표 III-2) 각국의 원자력 미래기술 실현시기 평가 결과

실현시기(년)	일 본	독 일	프랑스	유사평가기술
~ 2005	1265	0828, 1172,	0825, 0828,	0828
2006 ~ 2010	0821, 0825, 0828, 1172	0821, 0827, 1265,	0821, 0827, 1172, 1265,	0821*,0827, 1265
2011 ~ 2015	0826, 0827	0822, 0824, 1125, 0432,	0822, 0824, 0826, 0829, 1125, 1435	0822, 0824, 0826
2016 ~ 2020	0822, 0824, 1125, 0428, 0432, 1435	0825, 0826, 0829, 0428, 1435	0432,	0428, 0432, 1435
2021 ~	0823, 0829	0823,	0823, 0428,	0823*,

주) 인접실현기술중 (\*)표시 기술은 각국이 공히 동일한 기간으로 표시한 경우.

이 밖에도 기술의 중요성 평가는 각국이 공통적으로 원전의 내진설계(1172)와 원전의 해지, 철거(1265) 기술등 기존 원전의 유지와 관련된 기술의 중요성을 높게, 이와 반대로 원자로의 소형화(1125)와 원자력 상선(1435)기술이 낮은 중요성을 갖는 것으로 평가하고 있다. 그리고 현재 자국의 연구개발 우위성은 각기 자국의 원자력 환경을 반영한 결과를 도출하였다. 즉 프랑스의 경우는 자국이 추진하고 있는 후행핵연료주기 정책과 실증용 고속증식로 Superphenix의 가동을 반영하여 FBR기술의 우위를, 독일의 경우는 최근의 연구·개발 노력이 원자력의 미래기술 개발보다는 원자력시설의 폐지와 안전성 그리고 폐기물 처리 등에 치중되고 있는 상황에 비추어 내진설계와 원전 해체기술을, 그리고 일본의 경우는 원자력 전문인력의 부족과 세계 최고의 전자기술과 로봇 보유국임을 반영한 원격제어와 로봇을 이용한 무인화 원전을 각각 연구개발의 자국우위가 있는 것으로 평가하고 있다.

마지막으로 기술개발의 제약요인으로는 현재 상용기술의 평가에서는 경제적요인과 사회적제약요인이 큰 것으로 나타나는 것이 보통이나, 미래기술의 경우는 개별기술에 따라 다소 차이가 있기는 하나 각국이 공히 기술적요인이 가장 큰 제약요인으로 평가하여 차이점을 볼 수 있었다.

#### IV. 맺 음 말

본 연구는 원자력 개발·이용이 활발하게 이루어 지고 있는 일본, 독일 그리고 프랑스의 국가별 과학기술의 미래기술 평가 사례를 조사하고 여기서 언급된 원자력 미래기술을 발췌하여 그 기술에 대한 각국의 평가결과를 분석, 비교하는데 목적이 있다.

대상국의 원자력 미래기술 평가는 공히 일본의 경우를 근간으로 삼았기 때문에 각국에서 도출한 평가 대상기술과 평가요소는 동일하게 구성되었으나, 개별기술의 평가는 자국의 전문가로 구성

하여 각국의 환경을 반영한 평가를 수행하였다. 그 결과 각국의 평가 결과는 정도의 차이는 있으나 자국의 원자력 개발·이용 환경을 고려할 때 비교적 일관된 평가결과를 도출하였다고 볼 수 있다.

그러나 국가별 비교시에는 개별기술의 중요도 평균지수가 일본, 독일 그리고 프랑스가 각각 7.7, 6.0 그리고 6.2로 많은 편차를 보이고 있듯이 대상국은 각국이 보유한 원자력 정책의 차이와 사회·문화적 환경이 상이하기 때문에 평가결과에 많은 차이가 있다. 따라서 개별 국가의 평가와는 달리 국가간 가공된 각종 지수의 직접 비교는 곤란하였고, 따라서 국가내 상대적 평가결과의 순위를 국가간으로 비교하는 방법을 취하였다. 그 결과 원자력 미래기술중 중요성이 높은 기술과 제약요인의 평가에서 각국 전문가들의 공통된 평가를 접할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. ISI, "Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik", 1993
2. SOFRE, "Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi", 1994. 10.
3. 과학기술정책관리연구소, "제 1회 과학기술예측조사(1995~2015년) 한국의 미래기술", 1994.8
4. 과학기술정책관리연구소 역, "독일의 미래기술 예측(1993~2020년)", 독일연방연구기술성 등, 1995.4
5. 과학기술정책관리연구소, "한국, 일본, 독일의 중장기 기술예측 결과 비교 분석 연구", 1994.12
6. 산업기술정보원 역, "2020년의 과학기술", 미래공학연구소, 1993. 8
7. 정환삼 외, "우리나라의 원자력기술 수준 평가", 대한산업공학회/한국경영과학회 총칭지회, 1994.11
8. 한국원자력연구소, "원자력기술계통도를 이용한 기술개발 전략 연구", 1993