

## 원자력 미래기술 예측의 국제 비교를 위한 국내 평가기술 도출

정 환삼, 양 맹호, 김 현준, 이 태준, 이 병운  
한국원자력연구소

### 요 약

상용 원자력발전 기술의 자립목표를 성공적으로 달성하고, 2010년대 세계 3위의 원전기술 보유국으로 부상하려고 노력하고 있는 우리나라가 미래의 기술개발 목표를 성공적으로 달성하기 위해서는 원자력 선진국들의 기술개발 동향에 주의를 기울여야 한다. 본 연구는 선진국의 원자력 미래기술에 대한 기술예측 결과를 우리의 예측경험과 비교하여 우리의 기술개발 목표의 효율적인 달성을 지원하고자한다. 이러한 비교에 있어 필요한 평가대상인 미래기술의 도출, 평가요소의 설정, 그리고 평가척도의 단일화 단계에서 우선 국가별로 다르게 도출되어 있는 원자력관련 미래기술을 비교에 용이하도록 그 속성을 이용하여 비교 가능한 형태로 가공하였다.

### I. 비교연구의 필요성

우리나라의 원전은 그 규모 면에서 세계 10위권의 수준을 기록하고 있으며, 영광 원전 3,4호기의 준공과 더불어 상용 원자력발전 기술의 자립목표를 성공적으로 달성하고 2007년을 겨냥한 차세대 원자로의 개발도 추진중이다.

여기에 더하여 최근 정부는 1996년 5월 우리나라의 기술개발과 관련 오는 2010년까지 우리나라 원자력 기술수준을 세계 3위권으로 도약시키겠다는 계획을 발표하였다. 그 일환으로 그간 수행되어온 [원자력 연구개발 중·장기 계획]의 시행성과를 평가하여 2006년까지 10년간 추진할 원자력진흥종합계획(안)을 마련하여 10월경 시행할 계획에 있다.

이러한 원자력의 야심찬 계획을 시행착오를 줄이고 성공적으로 이끌기 위해서는 원자력기술 선진국들의 원자력관련 미래기술 예측 활동에 지속적으로 관심을 기울이고, 이들의 평가를 우리의 상황과 비교하려는 노력이 경주되어야 한다.

### II. 각국의 원자력 기술 평가 사례 조사

과학기술 분야 미래기술의 변화와 발전방향을 적절히 예측하기 위한 국가별 관심과 노력은 어느

국가를 막론하고 매우 지대하고 따라서 많은 국가의 여러 기관에서 각 기관의 두드러진 분야에 대한 예측 결과를 생산하고 있다.

이중 본 연구에서는 원자력기술이 주도적으로 포함되어 있고, 미래기술을 평가하니 만치 예측기간도 향후 10년 정도의 장기예측보다는 20~30년 정도의 초장기 예측을 수행하였고, 더욱이 용이하고 객관적인 비교연구를 수행하기 위해 정량적 예측을 수행한 국가별 예측 사례를 분석 대상으로 하였다.

## II-1 우리나라의 원자력 기술 평가

우리나라의 미래과학기술 평가 혹은 예측은 주로 과거처와, 통상산업부를 중심으로 수행되어 왔다. 그러나 대부분의 이들 예측은 주로 산업정책의 수립에 직접 사용될 목적을 갖고 수행되어 왔기 때문에 무엇보다도 정성적인 예측이 많은 부분을 차지하고, 평가 대상기술도 거의 실증된 기술이며, 예측기간도 20년 이상의 기간이 아닌 실현성 있는 정도의 장기예측이 대부분이다. 본 비교연구의 의도에 맞는 대표적인 연구로는 과학기술정책관리연구소(STEPI)와 원자력분야에 국한하여 연구된 한국원자력연구소(KAERI)의 연구를 들 수 있다.

먼저 STEPI 연구의 경우는 우리나라 과학기술의 장기적인 발전방향 모색을 통해 과학기술정책 및 기술개발계획 수립에 이바지하고 민간 부분의 연구개발 방향 설정과 계획 수립에 토대가 되는 기초정보를 제공하기 위해 수행되었다. 평가결과는 향후 20년간의 기간에 대해 1994년 제 1회 과학기술예측조사(1995~2015년) 「한국의 미래기술」로 발간되었다.

구체적인 평가는 미래의 과학기술을 대상으로 조사의 형태로 진행되었으며, 조사방법은 전문가를 중심으로 Delphi기법을 적용하였다. 또한 조사의 진행은 총 15개 분야로 나누어져 조사되었고 각 분야는 다음과 같다.

- |              |            |           |           |            |
|--------------|------------|-----------|-----------|------------|
| 1. 정보·전자·통신  | 2. 기계·생산가공 | 3. 소재     | 4. 정밀화학   | 5. 생명공학    |
| 6. 농림수산      | 7. 의료·보건   | 8. 에너지    | 9. 환경·안전  | 10. 광물·수자원 |
| 11. 도시·건축·토목 | 12. 교통     | 13. 해양·지구 | 14. 천문·우주 | 15. 극한기술   |

다음으로 KAERI의 연구는 원자력과 그 응용기술을 중심으로 분석한 것으로, 이 연구는 KAERI가 국가원자력 중·장기 연구개발계획 수립의 기초자료를 작성하기 위해 1993년 「원자력기술계통도를 이용한 기술개발전략 연구」로 작성되어 독자적으로 기획, 평가한 것이다.

구체적인 평가는 연구의 목적이 따라 원자력과 그 관련기술에 국한하여 전문가 조사의 형태로 수행되었고, 분석 대상기술 도출과 예측수행의 두 부분으로 나누어 평가되었다. 평가에 이용된 기법은 원자력 미래기술 도출에는 관련수목(Relevance Tree)법이 적용되었고, 대상기술 평가에는 STEPI 연구의 경우와 같이 Delphi법을 이용하였다.

이상의 두 가지 평가의 경우, STEPI의 연구에서는 위에서 언급한 15개 분야에서 도출된 총 1,174개의 미래기술중 원자력 관련기술은 에너지 분야에서 21개 그리고 교통, 건축 등의 분야에서 9개 기술이 조사되어 모두 30가지의 원자력관련기술이 도출되었고 KAERI의 연구에서는 물론 원자력기술만을 예측 대상으로 한 관계로 이상의 연구보다 많아 113개의 원자력 기술이 도출, 평가되었다.

## II-2 외국의 원자력 미래기술 평가

외국의 원자력 미래기술 평가 사례로 조사된 국가의 대표적인 정부기관 및 연구기관은 일본의 과학기술청과 미래공학연구소, 독일의 독일연방연구기술부와 Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, 그리고 프랑스의 고등교육 및 연구부와 SOFRES를 들 수 있다. 이밖에도 영국과 미국의 사례가 조사되었으나, 영국의 경우는 HMSO의 원문입수 지연으로 본 연구에 소개될 수 없었고, 미국의 평가 사례는 미의회와 의회에 의해 1972년 설립된 Office of Technology Assessment(OTA)가 1980년 후반 활발한 연구를 수행한 것으로 조사되었으나 이 조사 보고서는 원자력기술보다는 신·재생에너지를 대상으로 포괄적 예측을 행한 관계로 본 비교연구에서는 생략하였다.

일본의 미래기술 예측은 경제사회의 발전에 있어서 과학기술의 발전이 매우 중요하다고 보고 이를 위해 국가의 과학기술 발전방향을 장기적인 관점에서 파악하고 모색하는 것에 예측 목적을 두고 있다. 이와 같은 예측은 과학기술청의 과학기술정책국이 주관하고 미래공학연구소가 수행하며 조사의 형태로 이루어지고 있다. 이와 같은 조사는 1971년 최초로 수행되어 매 5년마다 반복적으로 이루어지고 있으며, 각 수행시 마다 조사시점의 내외정세 변화를 감안한 조사과제를 추가 혹은 정정하여 이루어진다. 기술예측 방법은 비전문가를 포함하기도 하나 전문가를 중심으로 Delphi법에 의하여 실시하고 있다. 특히 일본의 연구는 본 연구에서 비교하려고 하는 대부분 국가별 사례의 원형이 되고 있다.

본 비교연구에서 인용한 일본의 미래기술 예측은 1992년 수행된 제 5회 과학기술예측 조사 결과인 [2020년의 과학기술]로 이 연구의 평가기간은 조사시점인 1991년으로부터 2020년까지 30년에 걸친 기술예측을 실시한 것이다. 예측은 과학기술청 과학기술정책국 산하에 과학기술예측위원회를 설치하고 기술예측조사의 실행방침 등을 검토한 후 기술의 설정, 조사대상자의 선정, 앙케트 조사, 조사결과 분석, 기술발전에 따른 사회적 환경요인의 검토 등을 수행하였다.

일본의 미래기술 조사대상 분야는 제 5회 기술예측 조사에서는 소립자 분야를 새로이 추가하여 다음과 같이 16개 분야로 하였다.

- |           |           |            |               |
|-----------|-----------|------------|---------------|
| 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      |

독일의 미래기술 예측은 독일이 장차 선진국으로 계속 존립하기 위해 필요한 과학기술적 지식과 민간기업이나 국가의 연구개발에 있어 중점적인 연구개발 과제를 도출하고 새로 등장하는 복합기술의 확보를 위해 수행되고 있다.

미래 기술 예측은 연방연구기술부를 중심으로 수행되고 있으며, 1993년 4월에 [21세기초의 기술(Technologie am Beginn des 21. Jahrhunderts)]에 대한 예측을 보고서로 발표하는 등 과학기술 분야에서 뒤진 분야의 기술개발을 촉진시키기 위한 연구개발 지원에 많은 관심을 기울이고 있다. 본 연구에서 이용한 독일의 미래기술 예측 사례는 연방연구기술부와 일본의 과학기술정책연구소(NISTEP) 간의 협력 하에 독일의 Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI) 연구

소에 의해 수행된 것으로 삼았다. 이 연구는 [Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik]로 1993년 8월 독일의 연방연구기술부에 의해 발표되었고 그후 1995년 우리나라의 STEPI에 의해 [독일의 미래기술 예측(1993-2020)]으로 번역 출간되었다.

이 연구에서 독일은 일본의 경험을 토대로 16개의 조사대상 분야에서 2020년까지 향후 30년의 기간을 대상으로 독일 전문가들의 의견을 종합하여 미래 기술발전 전망에 대한 예측을 수행한 것이다. 기술예측 조사 방법은 일본의 경우 적합한 것으로 판명되어온 Delphi 기법을 독일에서 처음으로 적용하였다. 따라서 대상기술의 도출에 있어서는 사회/문화적 배경의 차이를 반영하기는 어려웠으나 실제 예측의 수행은 자국의 특성을 반영한 결과를 도출하였다.

프랑스의 미래기술 예측은 장차 선진국으로 계속 존립하기 위해 필요한 과학 기술적 지식과 민간기업이나 국가의 연구개발에 있어 중점적인 연구개발 과제를 도출하고 새로 등장하는 복합기술의 확보를 위해 독일과 마찬가지로 세계적으로 기술선도력을 유지하기 위한 과학 기술적 지식과 정부, 산업체의 중점 연구개발 분야를 도출하고 신기술 확보의 용이성을 위해 고등교육 및 연구부에 의해 SOFRES가 주관하여 수행되었다. 프랑스의 예측 연구는 [Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi]로 1994년 10월 SOFRES에 의해 발표되었다. 이 연구의 수행에서 프랑스는 미래기술 조사, 도출된 각 기술의 평가 요소, 그리고 이들에 대한 예측 등은 거의 독일의 사례를 원용하였다. 그러나 기술평가에 있어서는 비록 독일에 비해 적은 규모로 진행되었으나 프랑스의 전문가를 활용하여 자국의 실정을 감안한 예측을 수행하였다.

### II-3 각국의 원자력 미래기술 평가 비교

이상에 조사된 국가별 예측에서 우리나라의 예측을 포함하여 독일과 프랑스의 예측은 정도의 차이가 있기는 하나 가장 오랜 경험을 갖고 있는 일본의 예측 경험을 이용해 수행되었다. 특히 우리나라의 연구중 STEPI의 예측은 기본 골격은 일본의 경우를 유지한 채 미래기술의 도출과정에서부터 우리나라의 독자적인 분석을 시도하였다. 이에 비해 독일과 프랑스의 예측은 일본에서 도출된 미래기술과 이들에 대한 평가요소의 설정 그리고 예측방법을 거의 그대로 도입하고 다만 각 기술의 예측은 자국의 전문가를 활용하였다.

각국의 미래기술 평가에 있어 도출된 원자력 관련 기술은, 일본, 독일 그리고 프랑스의 사례에서는 총 1,147개의 도출된 미래기술중 원자력부문의 9개 기술과 수송부문의 원자력선 개발기술과 같은 다른 분야의 기술을 포함하여 모두 15건의 원자력관련기술이 도출되었다. 그리고 우리나라의 경우는 STEPI 연구에서는 총 1,174개의 도출된 미래기술중 원자력관련 기술은 원자력부문의 21개 기술과 토목부문의 원자력시설 내진 설계 기술과 같은 다른 분야의 기술을 포함하여 모두 30건이, 그리고 KAERI의 연구에서는 기술계통도를 이용한 다단계 분류중 113개의 기술로 분류된 단계(level)를 평가대상으로 설정되었다.

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. 이들 요소는 개별 기술에 대한 평가시 전문도는

설문응답자의 전문성을, 중요도는 해당기술의 중요성을, 실현예측시기는 해당기술의 실현이 예상되는 연도를, 확신도는 실현예측시기를 답할 때 확신정도를, 국제협력의 필요성은 예측국가가 기술을 확보하고자 할 때 국제협력의 필요정도를, 현재의 연구개발수준 비교는 예측국가와 해외 기술수준의 상대비교를, 그리고 마지막으로 실현의 제약요인들을 평가하였다.

이에 비해 KAERI의 예측에서 설정한 평가요소는 위의 예측과 다소 차이가 있어, 중요성, 전문성, 국제우위성, 그리고 기술개발전망들로 평가속성을 설정하였다. 각 평가요소에서 중요성은 대상기술의 여타기술 관련성과 기반성을 평가하고, 전문성은 대상기술이 처한 기술적, 경제적 제약 등의 현실적 제약을 해결하기 위해 요구되는 기술의 전문성을 평가하였고, 국제우위성은 우리나라가 해당 기술을 완전히 확보할 시점에서 다른 해외의 원자력기술 선진국에 비해 갖는 기술의 품질, 가격 등 경쟁력을 평가하였다. 마지막으로 기술개발 전망은 연대별 기술수준전망과 기술달성에 예상되는 경제적, 기술적, 사회적 요인 등 여러 제약요인에 대해 평가하였다.

### III. 국제 비교를 위한 국내기술 도출

조사의 형태로 각기 예측된 사례를 직접 비교하기 위해서는 약간의 가공질차가 필요하게 된다. 이는 비록 과학분야의 초창기 미래기술을 대상으로 국한하여 예측을 수행한다 하더라도 각 예측의 수행목적과 정책등 장,단기적으로 변하는 외부의 환경에 따라 예측대상과 결과에 차이가 있을 수 있기 때문인 것이다.

전 절에서 본 바와 같이, 외국의 예측에서는 독일과 프랑스가 모두 일본의 예측을 자국 예측의 원형으로 삼았기 때문에 예측결과의 비교에 그다지 어려움이 없다. 그러나 우리나라의 예측결과는 외국의 예측과 직접 비교하기에는 예측된 대상기술과 각 기술의 평가요소 뿐만 아니라, 점수 혹은 백분율과 같은 평가척도 등에서 많은 차이가 있어 다소 어려움이 따른다. 특히 예측별 평가요소의 차이는 동일한 평가의도를 갖는 요소간 비교를 통해 가능하나, 대상기술과 평가척도의 차이는 집산화(aggregate) 혹은 평준화(normalize)와 같은 방법을 사용하여 동일한 비교척도로 변환하여야 한다.

본 연구에서는 국가별 원자력 미래기술 예측의 비교를 위해 객관적 검증이 필요한 평가척도의 변환작업은 언급은 다음으로 미루고, 다만 궁극적으로 각국의 사례를 비교하기 위한 첫 단계로 비교 평가대상 기술을 도출하는데 역점을 두었다. 이를 위해 일본, 독일, 그리고 프랑스의 예측에 사용된 원자력 미래기술을 기준으로 하여 우리나라의 STEPI와 KAERI의 예측에서 평가된 기술의 가공을 통해 비교하였다. 이는 외국의 기술이 대부분 규모가 크고 독립된 기술을 단위로 하고 있는데 비해 우리나라 특히 KAERI의 예측은 이들 기술을 구성하고 있는 상세단위를 평가대상하고 있기 때문에, 이들 상세 단위 기술들의 집합을 통하여 비교하였다. 즉 조사된 각 기술의 상, 하위 개념을 이용하여 개별기술들을 도출하는 것이다. 이러한 과정을 통해 도출된 국가별 원자력 미래기술은 (표 III-1)에서 보이는 바와 같이 STEPI의 경우 30개 원자력 관련기술중 20개 기술이, 그리고 KAERI의 경우는 113개의 원자력기술 평가 결과중 45개의 기술에 이른다.

(표 III-1) 각국의 원자력 미래기술

STEPI	Code	일본, 독일, 그리고 프랑스	KAERI	Code
우주발전소	S1417	월면기지 원자력발전장치의 실용화(0428)	지역난방로	K5
극저동 특수소재	S1516		우주동력로	K8
원자력상선	S1250	원자력 추진시스템의 실용화(0432)	우주동력로	K8
극저동 특수소재	S1516		우라늄농축	K26
레이저 기술을 활용한	S29	레이저법 등에 의한 우라늄 농축기술의 실용화(0821)	레이저용융	K41
			LMR 기술	K3
기존 경수로 대비	S22	핵연료사이클을 포함한 FBR시스템의 실용화(0822)	LMR용 핵연료	K22
경수로 및 LMR용	S24		원자로재료	K47
핵융합로 개발에 필요한	S26	핵융합발전로 개발(0823)	금속연료재료	K52
			노심기술개발	K11
주반경 1.2m	S27	핵융합발전로 개발(0823)	노벽기술개발	K12
			계통공학 확보	K13
—	—	원자로 열이용해 수소등 2차 물질 생산플랜트 실용화(0824)	핵융합로개발 기술	K83
			고온초전도체 기술	K61
원전운영자동화	S28	원자로 열이용해 수소등 2차 물질 생산플랜트 실용화(0824)	지역난방로	K5
			공정열 이용로	K6
원전운영 정보	S31	원격감시/로봇을 이용해 무인화 진전된 원자로시설 실현(0825)	원전운전 기술	K14
			원전보수, 검사	K15
방폐처리에서	S39	군분리도 가능한 고도화 재처리시설 실용화(0826)	원전환경관리	K16
			원자력안전성	K17
—	—	저준위 방사성폐기물의 재활용 기술 실용화(0827)	방사성 환경안전	K18
			원자력 안전규제	K19
고준위 방폐	S35	고준위 방사성폐기물의 고화재 처리기술 실용화(0828)	지능형 극한작업	K42
			원격점검, 보수작업	K43
사용후핵연료 저장	S36	고준위 방사성폐기물의 고화재 처리기술 실용화(0828)	계측, 제어	K56
유용한 방폐고화	S956		계측, 제어 설계	K57
방폐처리에서	S29	고에너지 소립자에 의한 방폐 소멸처리기술 실용화(0829)	원자구조 해석	K44
			분광기술	K45
계통별 모듈설계	S30	원자로의 소형화가 진전되어 산업용으로 응용(1125)	분광분석기술	K46
			장수명핵종	K80
지진동 내환경	S40	원자력시설의 지진 초기단계 방진시스템이 개발, 보급(1172)	방폐관리 기반	K34
지반진동 영향 평가	S969		방사능제염	K113
원전구조물 내진설계	S1119	상용 원전의 안전하고 합리적인 해체철거기술이 확립(1265)	화학분석	K75
방진, 구조재료	S1143		방폐 수송	K31
원전수명후	S37	상용 원전의 안전하고 합리적인 해체철거기술이 확립(1265)	방폐 처분	K32
			방사능 제염	K113
원자력상선	S1250	원자력 상선의 실용화(1435)	사용후핵연료 기반	K33
			선박용 동력로	K7

## 참 고 문 헌

1. ISI, "Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik", 1993
2. J. P. Martino, "Technological Forecasting for Decision Making", 1983
3. SOFRE, "Enquête sur les Technologies D'avenir par la Methode Delphi", 1994. 10.
4. 과학기술정책관리연구소, "제 1회 과학기술예측조사(1995~2015년) 한국의 미래기술", 1994.8
5. 과학기술정책관리연구소 역, "독일의 미래기술 예측(1993~2020년)", 독일연방연구기술성 등, 1995.4
6. 과학기술정책관리연구소, "한국, 일본, 독일의 중장기 기술예측 결과 비교 분석 연구", 1994.12
7. 산업기술정보원 역, "2020년의 과학기술", 미래공학연구소, 1993. 8
8. 정환삼 외, "우리나라의 원자력기술 수준 평가", 대한산업공학회/한국경영과학회 충청지회, 추계 학술발표 논문집, 1994.11
9. 정환삼 외, "일본, 프랑스 그리고 독일의 원자력 미래기술 평가 비교", 한국원자력학회, 춘계학술 발표 논문집, 1996. 5
10. 한국원자력연구소, "원자력기술계통도를 이용한 기술개발 전략 연구", 1993