

TRL과 AHP를 적용한 핵융합 실증로 핵심기술 도출

장한수* · 김유빈** · 최원재*** · 도현수****

<목 차>

- I. 서론
- II. 핵융합에너지의 원리와 연구개발 동향
- III. 선행연구 분석
- IV. 실증분석
- V. 결론

국문초록 : 미래의 궁극에너지로 인식되고 있는 핵융합에너지 개발을 위해서는 DEMO라는 최종 실증 단계를 거쳐야만 한다. 특히 중국, EU, 일본 등의 주요 국가는 DEMO 건설에 대한 구체적 계획을 수립하고 이를 실행 중에 있다. 한국도 1995년부터 KSTAR 사업을 시작으로 핵융합 연구개발에 착수한 점을 감안하면, 핵융합에너지 상용화라는 최종 목표달성 뿐만 아니라, 주요 국가와 DEMO 경쟁 상황에서 주도권을 확보하기 위한 본격적 연구개발이 필요하다. 이에 본 논문에서는 DEMO 개발을 위한 핵심기술을 파악하기 위하여 준정량적 방법론을 적용, 해당 분야의 핵심기술을 도출함으로써 우선적으로 연구개발이 필요한 기술을 식별하여 향후 연구개발 추진시 기술별 우선순위를 제안하고자 한다.

이를 위한 핵융합 에너지 개발과 관련하여 핵융합의 과학적 원리, 주요국가의 DEMO 개발 동향 등을 파악한다. 다음으로 핵융합 실증로와 관련된 기술분류 체계를 검토하여 분석할 기술분류 체계를 선정한다. 선정된 기술체계에 준정량적 방법론으로 기술수준(TRL)을 파악

* 국가핵융합연구소 미래전략실 (jjang@nfri.re.kr)

** 국가핵융합연구소 미래전략실장 / 한양대학교 과학기술정책학과 박사과정 (ybkim@nfri.re.kr)

*** 국가핵융합연구소 미래전략실 (cwj147@nfri.re.kr)

**** 국가핵융합연구소 미래전략실, 교신저자 (ths5001@nfri.re.kr)

하고 이를 보완하기 위하여 분석적 계층화 과정(AHP)을 적용한다. TRL과 AHP의 결과를 종합하여 우선적으로 확보해야 할 핵융합 실증로의 핵심기술은 실증로용 연소 플라즈마 기술, 대면재료기술, 구조재기술, 고주파 가열장치 기술, 중성입자빔 장치기술, 안전기술, 연소 플라즈마 진단장치기술, 핵융합로 시뮬레이터기술 등으로 나타났다.

주제어 : 핵융합, TRL, AHP, 에너지, 준정량 방법론

Core Technologies Derivation of Fusion DEMO Reactor Applying TRL and AHP

Hansoo CHANG · Youbean KIM · Wonjae CHOI · Hyunsoo THO

Abstract : Nuclear fusion is one of the most promising options for generating large amounts of carbon-free energy in the future. Major countries such as China, EU, and Japan have established a national plan for DEMO construction and they are implementing it.

Korea has started a nuclear fusion research and development by the KSTAR project started in 1995. There are matured needs for a full-scale research and development initiatives to ensure competition with the major countries for DEMO as well as achieve the final goal to commercialize fusion energy.

In this paper, we apply the TRL and AHP methods in order to identify the key technologies to conduct DEMO R&D. We propose the priorities of future R&D on DEMO by deriving a core technology in the field.

At first, we review the scientific theory of fusion and trend of progress of DEMO activities in major countries. For previous studies, we review TRL and AHP methods to examine the technology classification system of DEMO and identify key technologies.

We apply TRL method to identify readiness level of DEMO technologies and AHP to compensate shortcoming of TRL.

The key technologies of DEMO to be secured from a synthesis result of the TRL and AHP are burning plasma, plasma facing material, structural material, high frequency heating, neutral particle beam, safety, plasma diagnostic, and simulation technologies.

Key Words : Fusion, TRL, AHP, Energy, Quasi-quantitative method

I. 서론

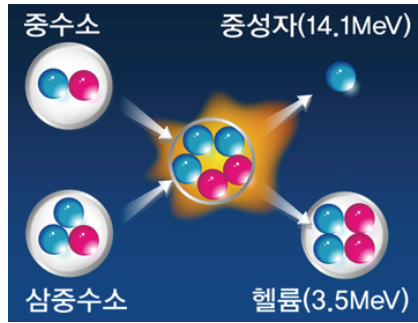
핵융합에너지는 궁극의 에너지로 인식되어 해외에서는 1920년대부터 학문적 연구가 태동하였으며 한국은 1995년 KSTAR 건설을 시작으로 본격적 국가연구개발 사업으로 수행되었다. 핵융합에너지와 관련된 연구는 핵융합에너지개발진흥법과 시행령에 따라 진행되고 있다. 법에 의거하여 핵융합에너지개발진흥기본계획이 5년마다 수립되며, 2012년부터 2016년은 제2차 기간으로 “DEMO 기반기술개발”이라는 정책 목표 하에 진행 중이다. 이에 따라 핵융합 실증로 기반 기술과 관련된 연구개발 착수의 필요성이 높아지고 있다.

본 논문에서는 정성적 방법론과 준정량적 방법론을 조합하여 DEMO 관련 핵심기술을 도출함으로써 우선적으로 연구개발이 필요한 기술을 식별하고자 한다. 이를 위하여, 먼저 핵융합 에너지 개발과 관련하여 핵융합의 과학적 원리, 연구개발 동향 등을 파악한다. 선행연구 분석은 핵융합 실증로와 관련된 기술분류 체계에 대한 검토와 준정량적 방법론으로 기술수준(TRLs; Technology Readiness Levels) 조사의 적용과 한계점 등을 파악한다. TRL의 한계점을 보완하고자, 분석적 계층화 과정(AHP; Analytical Hierarchy Process)과 결합하여 실증사례를 검토한다. 실증분석은 핵융합 실증로의 주요 핵심기술에 대한 TRL 조사, AHP를 각각 수행하고 그 결과를 조합한다. 최종적으로 두 가지 방법론을 조합하여 우선적으로 연구개발이 요구되는 핵심기술군을 제안한다.

II. 핵융합에너지의 원리와 연구개발 동향

1. 핵융합의 원리

핵융합에너지는 플라즈마 상태에서 일어나는 중수소와 삼중수소 간의 핵융합 반응을 활용하여 생산된다. 즉, <그림 1>과 같이 중수소와 삼중수소가 플라즈마 상태에서 핵융합반응을 일으키게 되면 헬륨이 생성되면서 질량 보존의 법칙에 의하여 하나의 중성자가 남게 되고 이 중성자에 의하여 에너지를 지속적으로 생산할 수 있다는 과학적 원리를 이용한 것이다.



<그림 1> 핵융합의 원리

2. 핵융합에너지 개발 과정

1995년 KSTAR 사업을 시작으로 핵융합에너지 개발을 본격적으로 시작한(과학기술처, 1995) 한국은 2000년대에 들어서면서 KSTAR의 기술력을 인정받아 2004년 ITER 사업에 착수하여 핵융합 선진국에 다가갈 수 있는 기반을 확보하게 된다. 또한 KSTAR 건설을 계기로 1988년 시작되어 1994년 종료된 포항방사광가속기 건설 과정에서 확보된 거대과학 분야의 기술역량이 유지 발전되기도 하였다(최원재 외, 2013). 이러한 성과에 힘입어 핵융합 연구개발에 대한 법적 근거가 되는 핵융합에너지개발진흥법 및 시행령의 제정과 관련 국가계획의 수립 및 시행으로 연결되었다(국가핵융합위원회, 2007).

한편, 제2차 핵융합에너지개발진흥기본계획에는 2012-2016년의 기간 안에 최종 상용 운전의 전단계인 핵융합 에너지 실증을 위한 기반 연구를 착수하도록 계획이 수립되어 이에 대한 준비가 필요한 상황이다(국가핵융합위원회, 2011).

3. 핵융합 실증로 연구개발 동향

핵융합 실증로(또는 DEMO)와 관련된 연구개발은 중국, EU, 일본이 최근 들어 두드러진 활동을 보이고 있으므로 이들 국가를 중심으로 살펴보고자 한다.

중국 과학기술부는 2011년 ITER 설계 기술 확보, 핵융합로 설계를 위한 연구 및 인력 양성을 목적으로 하는 국가통합 설계그룹 결성을 지시하였다. 이에 따라 해당 설계 그룹이 조직되고 중장기 계획(2012-2030)을 수립하였다. 주요한 내용은 ① 2012-2014년 동안 두 가지의 CFETR¹⁾ 설계사양 제공, ② 2016년 시작되는 국가 5개년 계획에 CFETR 건설 및 핵심기반기술 연구를 위한 제안서 접수를 2015년까지 완료한다는 것이다. 또한,

동설계 그룹은 2015년 CFETR 건설을 위한 정부승인을 얻고, 2030년까지 에너지 증폭률을 일정 수준 이상 끌어올리도록 목표를 수립하였다(Wan, 2013).

EU는 원자력 및 핵융합 연구를 전담하는 EURATOM 산하에 EFDA²⁾ 및 F4E³⁾를 두고 핵융합 연구개발을 통합·조정해 왔다. 그러나 중국의 약진에 자극 받아 DEMO 연구개발 강화를 위해 EFDA에 PPP&T⁴⁾ 사업단을 설치하고, 2012년 11월에 DEMO 개발 로드맵을 발표하기에 이른다(EFDA, 2012).

또한, EU는 2013년 12월에 EFDA를 EUROFUSION Consortium으로 개편하였다. 이를 통하여 개별국가 차원의 핵융합 연구를 DEMO 건설이라는 최종목표 달성을 위한 연구로 통합 조정하고 2050년대까지 DEMO를 통한 전기 생산을 실증하기 위한 주요 마일스톤을 설정하였다. 그 주요 내용은 2020년 이후 DEMO 공학설계 주력, 2030년대 초 DEMO 건설, 2040년대 초기 운전을 개시하는 것이다(EFDA, 2012).

일본은 2008년 6월 DEMO 관련된 계획을 이미 발표하여 선제적 입지를 점하였으나 제반 여건의 미성숙으로 최근까지 괄목할 만한 진전은 없는 상태였다. 그러나 중국과 EU의 결단에 자극 받은 문부과학성은 2013년 7월 DEMO 기획 연구를 위한 산학연 Joint Core Team⁵⁾을 구성하고 2014년부터 개념설계, 2022년부터 공학설계, 2035년부터 건설단계로 구분하였다. 시기적으로는 EU와 유사하게 2040년대 초반에 운전을 시작하도록 계획하였다(Horiike, 2013).

한국도 위에서 살펴본 국제적 추세에 발맞추어 2016년부터 2023년까지 3+3+2년의 3단계로 구분하여 DEMO 건설 경쟁에 대비하기 위한 계획을 산학연 중심으로 수립하였다. 그러나 국가연구개발사업으로 수행을 위한 정부 승인이 필요하기 때문에 향후 실행을 위한 정책 결정이 필요한 상태이다. 이상의 국내외 흐름을 연도별 로드맵으로 정리하면 <그림 2>와 같다.

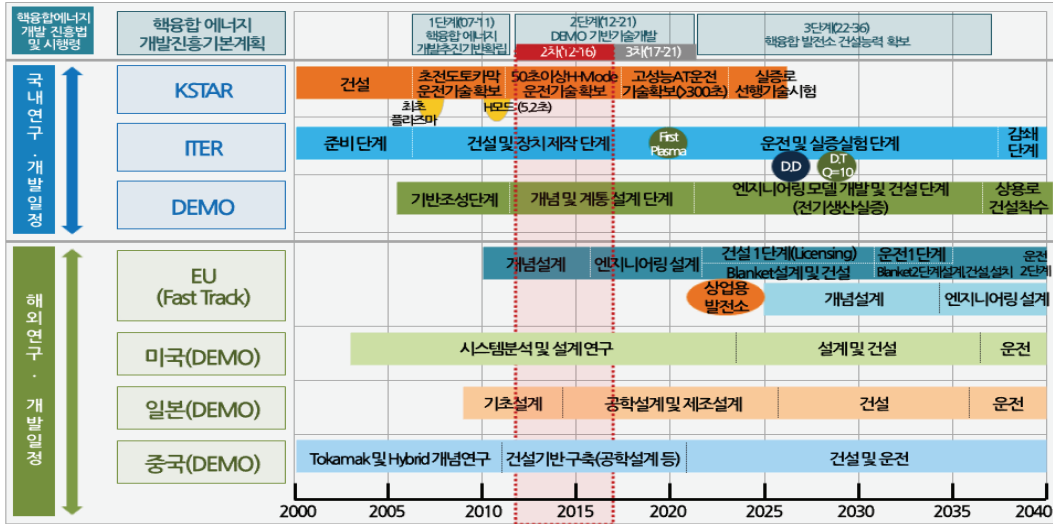
1) Chinese Fusion Engineering Testing Reactor

2) European Fusion Development Agreement(유럽핵융합연구개발협약)

3) Fusion for Energy(EU의 ITER 전담기구)

4) Power Plant Physics and Technology

5) DEMO 전략 및 로드맵 수립을 위하여 핵융합 연구기관인 JAEA 및 NIFS, 관련 대학, 산업체가 연합하여 team을 구성하고 2014년 7월에 최종보고서 발간을 목적으로 활동 중



<그림 1> 핵융합에너지 연구개발 로드맵(국가핵융합연구소, 2014)

III. 선행연구 분석

본 장에서는 위에서 파악된 DEMO 관련 국내의 현황을 바탕으로 기술분류 관련 기존의 연구에 대하여 검토한다. 또한 연구방법론인 정성적 방법론으로써 TRL의 장단점을 검토하고 이를 보완하기 위하여 AHP 기법이 활용된 사례를 살펴보고자 한다.

1. 핵융합 실증로 기술분류 체계

DEMO의 기술분류 체계의 정립은 관련 연구개발을 시작하기 위한 첫 단계로써 핵융합 연구의 최종 목표를 전력 생산으로 보고 있는 국가에서는 대부분 DEMO의 기술체계에 대한 논의가 진행되었다.

미국은 정부 주도로 기술 분류를 정리하였다(DOE, 2009). 유럽은 DEMO와 관련된 논의 본격적으로 시작되기 이전에 한 차례 기술분류 체계를 정리하였으며(EC, 2008) 최근 기존 내용을 더욱 구체화하고 세부적으로 정리한 내용을 발표하여 명확한 DEMO 개발에 대한 의지를 표명하였다(EFDA, 2012). 미국은 재료와 동력계통에 초점을 둔 기술분류체계를 정리한 바 있다(FESAC, 2007). 한국도 국가과학기술표준분류체계 상에

핵융합에 대한 개략적 기술분류가 되어 있으나 핵융합 분야 전문가의 검토를 거친 내용은 도현수 외(2014)가 가장 최근이다. 세부적인 기술체계의 내용은 <표 1>과 같다.

2. TRL

TRL은 1989년 미국 NASA에서 기술의 성숙 정도를 평가하기 위한 방법론으로 고안되어 널리 사용되고 있으며 최초 7단계였던 성숙도를 1995년 9단계로 확정하여 현재까지 활용하고 있다. TRL의 가장 우수한 점은 비교적 일관된 기준으로 특정 분야 또는 이질적인 기술간의 수준을 비교할 수 있다는 점이다(황형원 외 2012; Liu et al., 2012).

TRL은 특정 기술의 기술수준 평가 또는, 사업 진행에 대한 진척도 평가의 목적으로 주로 적용되었다. 즉, 새로운 시스템 또는 기술의 확보를 목적으로 현재의 기술 수준 평가를 통하여 향후 연구개발에 필요한 자원의 소요를 가늠하는 방법으로 활용되었다. 그러한 사례로 핵연료 주기 관련 기술의 연구개발(Ikeda et al, 2014), 중소형 원자로 기술 획득에 필요한 활동(Liu and Fan, 2014), 스마트 그리드 개발에 필요한 자원(Liu et al., 2012), 무기 체계 획득을 위한 기존 기술 평가(Chen et al., 2012), 핵융합 실증로 관련 기술 확보를 위한 기술평가(도현수 외, 2014) 등을 들 수 있다.

다른 측면으로는 사업 진행 과정에 대한 진척도 평가로 TRL을 활용한 경우도 있으며(우순 외, 2014), 연구개발이나 기술 획득 과정 이후의 사후 평가 방법론으로 적용된 사례(김남균 외, 2012; 황형원 외, 2012)도 있다.

이상에서 적용된 선행연구에서 공통적으로 파악된 점은 기술의 성숙 정도를 평가하는데에 일정한 기준을 제공하고 해당 기술의 성숙 수준을 평가하는데 활용한다는 점이다. 여기서 TRL의 단점은 달성하고자 하는 수준과 현재 수준의 격차가 클 경우 이에 대한 투자를 더욱 확대할 것인지, 전략적으로 포기할 것인지를 의사결정 기준을 제공하지 않는다는 점이다. 반대로 격차가 작을 경우도 투자 필요성이 적은 것인지, 완성도를 높이거나 해당기술을 선도하기 위하여 투자를 증가시켜야 하는지에 대한 기준 역시 제공하지 못한다는 점이다. 이러한 의사결정은 전문가의 통찰에 의존할 수 밖에 없으나 개인별 견해나 인식 수준의 차이로 인하여 수렴 과정에 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 논문에서는 이처럼 TRL 방법론만으로 의사결정을 위한 정보를 제공하는데 부족한 점을 극복하기 위하여 AHP로 보완한다.

다음에서는 TRL의 단점을 보완하기 위하여 적용된 AHP와 조합에 대한 선행 연구사

례를 검토하고 TRL 방법론 보완에 대한 가능성을 검토한다.

3. 정성적 방법론 보완을 위한 AHP 적용

AHP는 대안 간의 선택의 상황에서 그 선호 정도를 계량적으로 나타내는 동시에, 해당 의사결정 체계의 일관성 정도도 계량적으로 파악 가능한 방법론이기 때문에 다양한 분야의 문제 해결에 유용하게 적용되었다. 따라서 본 논문에서는 AHP 방법론 자체에 대한 검토는 논의의 범위에서 제외하고 TRL 외에 다른 정성적 방법론을 보완하기 위한 방법론으로 AHP가 적용된 사례를 살펴보고 그 유용성에 대하여 살펴보고자 한다.

TRL과 AHP를 같이 적용한 사례는 TRL의 평가 요소를 측정하는 데에 AHP를 활용하여 TRL 평가 과정을 준정량적으로 유지한 사례(Gao et al., 2011)가 있다. 즉, TRL의 평가기준을 최초부터 다양한 측면에서 고려하고 이를 바탕으로 각 기술을 평가하는 데는 AHP를 적용한 것이다. 이러한 시도는 TRL 평가 과정 자체를 준정량적으로 유지한다는 측면에서 높이 평가할 만하나, 그 과정의 복잡성 측면에서 본다면 평가의 난이도가 과도하게 높아지는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 TRL은 기존의 과정을 유지하되, 성숙도가 낮은 기술 모두를 채택할 것인지, 성숙도가 높더라도 전략적으로 취해야 할 기술이 있다면 이는 어떤 방법으로 식별해야 하는지의 차원에서 AHP를 적용하고자 한다.

그 외에 정성적 방법론을 AHP로 보강하여 중 다양한 실증 연구가 수행된 사례가 SWOT⁶⁾과 AHP를 조합한 경우이다. SWOT-AHP를 결합한 선행연구는 해양(백인흠, 2009; 손용정, 2011; Arsla and Turan, 2009; Kong et al., 2012), 안전 보건(손일문, 2012), 스포츠 경영(송만석(2007), 제약(송만석 외, 2010), 기술전략 수립(장한수 외, 2012) 산림(Kurttila et al., 2000; Margles et al., 2012), 지리 정보(Taleai et al., 2009) 등 다방면에서 국내외의 전략 수립 분야에서 적용되었음을 확인할 수 있었으며 실용성과 더불어 학술적으로도 정립되는 과정이라고 볼 수 있다.

방법론상의 구체적 내용을 살펴보면 도출된 SWOT에 대하여 강점, 약점, 기회, 위협이라는 네 가지 요인간의 우선순위를 도출하고, 강점, 약점, 기회, 위협 요인 각각의 내부 요소간 비교를 한다. 이를 종합하여 SWOT 세부 요인간의 우선순위를 제공하여 전략 수립시 우선적으로 고려할 요인을 제시한다.

6) SWOT(Strength, Weakness, Opportunity, Threat) : 전략 수립 시 내외부 상황 중 핵심적인 내용을 정리하여 내부 요인으로 강점, 약점, 외부 요인으로 기회, 위협으로 분류하고 각 조합에 대한 대안을 도출하는 방법론

이상에서 확인할 수 있는 바와 같이 TRL, SWOT 등 정성적 방법론의 단점을 AHP에서 도출된 준정량적 기준을 활용하여 보완할 수 있다. 본 논문에서는 기술 선택 과정에서 TRL을 파악한 후 의사결정의 전략성을 강화하는 측면에서 AHP를 활용하여 DEMO 개발을 위한 핵심기술을 제안한다

IV. 실증 분석

실증분석은 도현수 외(2014)에서 제안된 기술트리를 바탕으로 각 기술에 대한 TRL 평가를 수행한다. 또한 AHP는 기술에 대한 의사결정 체계를 수립하고 이에 따라 기술트리 내부의 기술간 상대적 중요도를 평가한다. 최종적으로 TRL과 AHP를 통합한 결과를 바탕으로 한국의 DEMO 기술 중 전략적으로 중요한 기술을 식별한다.

1. TRL 평가 결과

TRL 평가는 제안된 기술트리(도현수 외, 2014)를 바탕으로 수행하였다. 기술수준 평가는 128명⁷⁾의 전문가를 기술분과별로 구성하여 각 기술의 현재수준을 파악하였다. TRL의 정의는 기존의 정의를 준용하였으며 최종 9단계인 상용 발전소⁸⁾ 달성과 현재의 수준이 얼마나 차이가 나는지를 조사하였다.

7) 산업계 40명, 학계 63명, 연구계 25명으로 구성된 산학연 전문가

8) PP(Power Plant)

<표 1> DEMO 기술 트리의 기술군 및 세부기술별 TRL 평가결과

기술군	세부 기술	TRL								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
핵융합로 노심 기술	1. 실증로용 연소 플라즈마 기술			✓						PP
	2. 핵융합로 시뮬레이터 기술		✓							PP
	3. 운전 제어 계통 기술				✓					PP
핵융합로 시스템 통합 기술	4. 핵융합로 통합설계 기반 기술			✓						PP
	5. 핵융합로 조립 기술					✓				PP
	6. 핵융합로 유지·보수 기술			✓						PP
	7. 진공용기 및 용기 내부계통 기술					✓				PP
	8. 연료주입계통 기술			✓						PP
	9. 데이터 수집 및 처리 계통					✓				PP
	10. 극저온 공급계통 기술					✓				PP
	11. 프로젝트 관리 기술					✓				PP
	12. 핵융합로 건물 및 시설 기술					✓				PP
	안전 및 인허가 기술	13. 핵융합 안전 기술		✓						
14. 핵융합 인허가 기반 기술			✓							PP
핵융합 재료 기술	15. 핵융합로 구조재 기술		✓							PP
	16. 핵융합로 대면재료 기술		✓							PP
	17. 핵융합로 기능소재 기술		✓							PP
	18. 중성자 조사평가 기술		✓							PP
	19. 냉각재 재료 기술				✓					PP
초전도 자석 기술	20. 초전도 자석 설계 및 제작 기술				✓					PP
	21. 초전도 선재 기술				✓					PP
	22. 진류인입계통 기술				✓					PP
	23. 자석구조물 및 지지구조물 기술					✓				PP
	24. 초전도자석 보호계통 기술				✓					PP
	25. 초전도 계통 열차폐체 기술				✓					PP
가열 및 진단 장치 기술	26. 중성입자빔 장치 기술			✓						PP
	27. 고주파 가열 장치 기술			✓						PP
	28. 연소 플라즈마 진단 장치 기술			✓						PP
	29. 오믹 가열 기술				✓					PP
	30. 고출력 고주파 차폐 기술				✓					PP
동력계통 공학 기술	31. 증식 블랑켓 기술		✓							PP
	32. 디버터 기술		✓							PP
	33. 동력변환 계통 기술			✓						PP
	34. 중성자 차폐 계통 기술				✓					PP
	35. 열에너지 제거 계통 기술				✓					PP
	36. 발전 계통 기술				✓					PP
연료주기 기술	37. 블랑켓 삼중수소회수 시스템 기술		✓							PP
	38. 진공배기 시스템 기술				✓					PP
	39. 연료정제 기술		✓							PP
	40. 동위원소 분리 기술		✓							PP
	41. 연료저장 시스템 기술			✓						PP
	42. 연료공급 시스템 기술			✓						PP

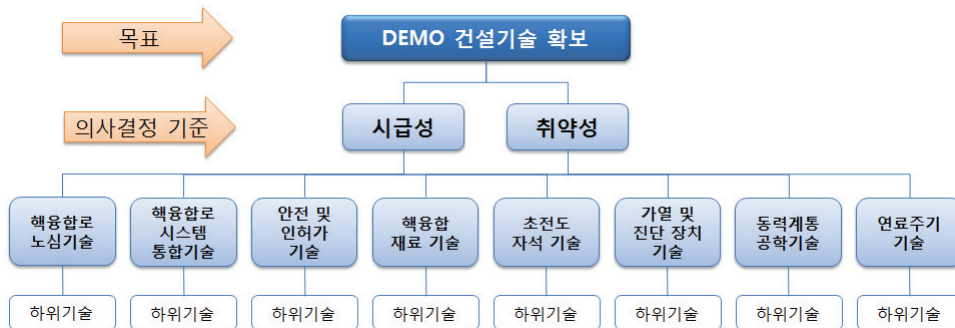
평가결과, 재료, 연료주기, 안전 및 인허가와 같은 KSTAR, ITER 건설 과정에서 습득할 수 없는 기술군의 수준이 낮은 것으로 평가되었다. 반대로 KSTAR, ITER 건설 과정에서 한국이 확보한 초전도 기술, 시스템 통합기술에 대한 수준은 높은 것으로 평가되었다.

한편, 가열 및 진단 기술이나 동력계통 기술 등은 핵융합연구개발이나 원자력 분야의 기술로 일정부분 활용이 가능하지만, 실증로 건설을 목표로 할 경우 현재의 기술 수준과 목표 수준의 격차는 비교적 큰 것으로 평가되었다.

이처럼 TRL 평가는 해당 기술의 현재 수준 파악이 가능하지만, 향후 연구개발이 더 필요한 것인지, 현 수준으로는 충분한 것인지에 대한 추가적 의사결정을 위한 정보가 부족한 측면이 있다.

2. AHP 분석 결과

TRL 보완을 위한 DEMO 기술에 대한 의사결정 체계와 우선순위 평가는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> DEMO 관련 의사결정 체계와 기술군 및 하위기술 우선순위 평가

DEMO 건설기술 확보라는 목표를 달성하기 위한 의사결정 기준으로 기술확보의 시급성과 현재 시급하지는 않으나 목표 달성 과정에서 결정적 장애요인(bottleneck)으로 작용할 가능성을 의미하는 취약성 두 가지를 제시하여 기술군의 우선순위를 평가하도록 하였다. 하위기술은 각 기술군 내부에서만 우선순위를 평가한다. AHP 설문 대상은 TRL을 평가한 전문가 중 20명⁹⁾을 대상으로 실시하였다.

먼저 DEMO 건설기술 확보를 위한 의사결정 기준에 대한 우선순위 평가는 <표 2>와 같이 시급성 차원의 의사결정 기준이 중요한 것으로 나타났다. 중장기 기술이지만 현재의 계획된 관련 사업의 기술확보 기간은 2016년부터 2023년이기 때문에 해당 기간에 우선적으로 확보할 기술을 우선적으로 고려한 관점이 반영되었다고 판단된다.

<표 2> 목표 달성을 위한 의사결정기준에 대한 가중치

평가기준	가중치
시급성	0.662
취약성	0.338

8대 기술군에 대한 시급성 및 취약성 측면의 상대적 중요도와 이를 종합한 최종 우선순위 결과는 <표 3>과 같다. 시급성 측면에서는 핵융합로 노심기술이 가장 우선순위가 높았으나 취약성 측면에서는 핵융합 재료기술, 가열 및 진단장치 기술의 순서로 나타났다. 최종적으로는 핵융합 노심 기술, 핵융합 재료 기술, 가열 및 진단장치 기술 순서로 우선순위가 높은 것으로 나타났다.

<표 3> 기술군에 대한 의사결정 기준별 가중치 결과

기술 분류명	가중치		
	시급성 측면	취약성 측면	최종
핵융합로 노심 기술	0.248	0.178	0.224
핵융합로 시스템 통합 기술	0.086	0.072	0.081
안전 및 인허가 기술	0.051	0.067	0.057
핵융합 재료 기술	0.200	0.217	0.205
초전도 자석 기술	0.074	0.066	0.071
가열 및 진단장치 기술	0.178	0.182	0.179
동력계통 공학 기술	0.077	0.092	0.082
연료주기 기술	0.086	0.127	0.100
일관성 비율(CR)	0.006	0.004	

시급성 측면에서 핵융합로 노심 기술이 가장 높게 나타난 결과는 향후 ITER 운영에 대비하여 우선적으로 필요한 기술은 핵융합로 내부의 플라즈마의 거동을 이해하는 노심 기술이 중요하다는 점을 반영하여 나타난 것으로 파악된다.

9) 전문가는 대학에서 11명, 연구기관에서 9명으로 구성하여 설문 실시

한편, 취약성 측면에서는 중기적 관점에서 재료 관련 이슈로 핵융합 연구에 문제가 발생하지는 않으나 상용화 단계까지 고려한 장기적 측면에서는 초고온을 견디는 재료기술은 반드시 확보해야 할 기술이라는 핵융합 연구계의 인식이 반영된 것으로 해석할 수 있다.

<표 4> 세부기술에 대한 내부 우선순위와 기준별 가중치 결과

기술군	세부기술	가중치			
		내부	시급성	취약성	최종
핵융합로 노심 기술	1. 실증로용 연소 플라즈마 기술	0.526	0.130	0.094	0.118
	2. 핵융합로 시뮬레이터 기술	0.193	0.048	0.034	0.043
	3. 운전 제어 계통 기술	0.281	0.070	0.050	0.063
핵융합로 시스템 통합 기술	4. 핵융합로 통합설계 기반 기술	0.281	0.024	0.020	0.023
	5. 핵융합로 조립 기술	0.11	0.009	0.008	0.009
	6. 핵융합로 유지·보수 기술	0.146	0.013	0.011	0.012
	7. 진공용기 및 용기 내부계통 기술	0.115	0.010	0.008	0.009
	8. 연료주입계통 기술	0.114	0.010	0.008	0.009
	9. 데이터 수집 및 처리 계통	0.091	0.008	0.007	0.007
	10. 극저온 공급계통 기술	0.097	0.008	0.007	0.008
	11. 프로젝트 관리 기술	0.047	0.004	0.003	0.004
안전 및 인허가 기술	12. 핵융합로 건물 및 시설 기술	0	0.000	0.000	0.000
	13. 핵융합 안전 기술	0.69	0.035	0.046	0.039
핵융합 재료 기술	14. 핵융합 인허가 기반 기술	0.31	0.016	0.021	0.018
	15. 핵융합로 구조재 기술	0.262	0.052	0.057	0.054
	16. 핵융합로 대면재료 기술	0.342	0.068	0.074	0.070
	17. 핵융합로 기능소재 기술	0.135	0.027	0.029	0.028
	18. 중성자 조사평가 기술	0.157	0.031	0.034	0.032
초전도 자석 기술	19. 냉각재 재료 기술	0.104	0.021	0.023	0.021
	20. 초전도 자석 설계 및 제작 기술	0.265	0.020	0.017	0.019
	21. 초전도 선재 기술	0.224	0.017	0.015	0.016
	22. 전류인입계통 기술	0.15	0.011	0.010	0.011
	23. 자석구조물 및 지지구조물 기술	0.101	0.007	0.007	0.007
	24. 초전도자석 보호계통 기술	0.138	0.010	0.009	0.010
가열 및 진단 장치 기술	25. 초전도 계통 열차폐체 기술	0.124	0.009	0.008	0.009
	26. 중성입자법 장치 기술	0.282	0.050	0.051	0.050
	27. 고주파 가열 장치 기술	0.282	0.050	0.051	0.050
	28. 연소 플라즈마 진단 장치 기술	0.232	0.041	0.042	0.042
	29. 오믹 가열 기술	0.12	0.021	0.022	0.021
30. 고효율 고주파 차폐 기술	0.085	0.015	0.015	0.015	

동력계통 공학 기술	31. 증식 블랑켓 기술	0.309	0.024	0.028	0.025
	32. 디버터 기술	0.309	0.024	0.028	0.025
	33. 동력변환 계통 기술	0.093	0.007	0.009	0.008
	34. 중성자 차폐 계통 기술	0.112	0.009	0.010	0.009
	35. 열에너지 제거 계통 기술	0.112	0.009	0.010	0.009
	36. 발전 계통 기술	0.065	0.005	0.006	0.005
연료주기 기술	37. 블랑켓 삼중수소회수 시스템 기술	0.301	0.026	0.038	0.030
	38. 진공배기 시스템 기술	0.091	0.008	0.012	0.009
	39. 연료정제 기술	0.165	0.014	0.021	0.017
	40. 동위원소 분리 기술	0.169	0.015	0.021	0.017
	41. 연료저장 시스템 기술	0.167	0.014	0.021	0.017
	42. 연료공급 시스템 기술	0.108	0.009	0.014	0.011

이상을 종합하여 고려하면, 핵융합로 노심, 핵융합 재료, 가열 및 진단장치 기술이 특히 중요한 기술로 나타난다.

8대 기술 분류의 42개 하위 기술에 대한 시급성, 취약성 측면의 우선순위와 최종 우선 순위는 <표 4>와 같다.

실증로용 연소 플라즈마 기술은 시급성 측면, 취약성 측면, 최종 모두에서 가장 높은 우선순위를 나타내어 그 중요성이 높은 것으로 평가되었다. 운전 제어 계통 기술은 시급성 측면에서는 두 번째로 우선순위가 높았으나, 취약성, 최종 우선순위는 각각 6위, 3위로 나타났다. 핵융합 대면재료 기술은 시급성, 취약성, 최종 우선순위가 각각 3위, 2위, 2위로 나타났다.

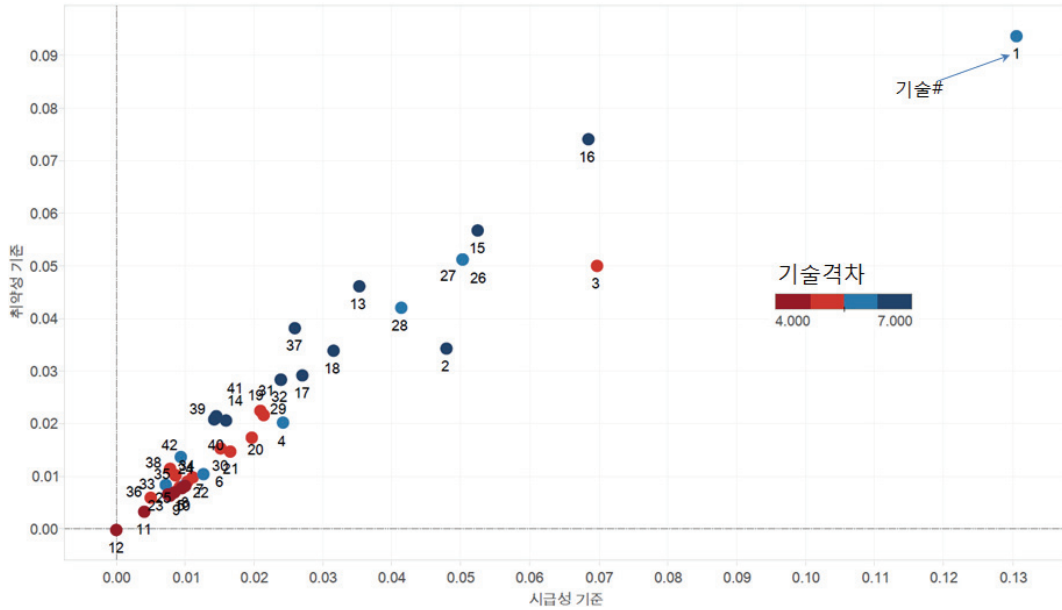
3. TRL-AHP 종합 결과

<그림 4, 5>는 TRL 평가결과와 AHP 분석 결과를 종합하여 나타낸 것이다¹⁰⁾. 시급성 축과 취약성 축을 기준으로 세부기술별 우선순위를 나타내고 현재의 기술수준과 9단계와 격차를 표시하면 우선순위가 높은 기술 중에서도 최종단계와 격차가 큰 기술과 그렇지 않은 기술이 식별된다.

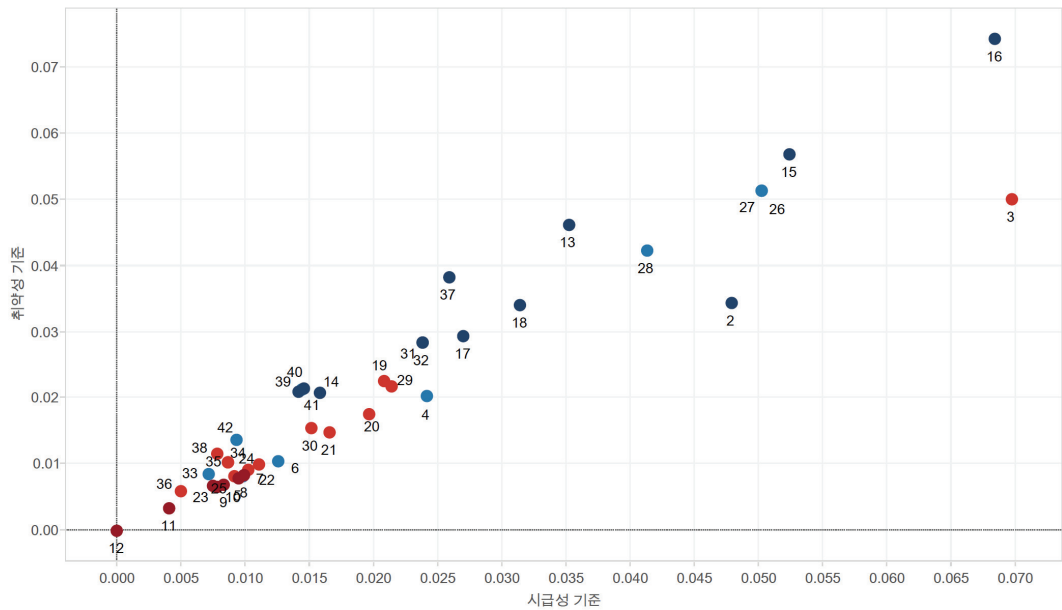
TRL 평가결과 비교적 기술격차가 큰 것으로 나타나는 실증로용 연소 플라즈마 기술(1), 대면재료기술(16), 구조재기술(15), 고주파 가열장치 기술(27), 중성입자빔 장치기술(26), 안전기술(13), 연소플라즈마 진단장치기술(28), 핵융합로 시뮬레이터기술(2) 등은

10) <그림 5>는 1번 기술을 제외한 다른 기술의 결과를 자세히 나타냄

시급성, 취약성 측면에서도 비교적 우선순위가 높은 것으로 나타나 실증로 연구개발의 사결정시 우선적으로 고려할 기술로 나타났다.



<그림 4> TRL 평가 결과와 AHP 분석 결과의 통합



<그림 5> TRL 평가 결과와 AHP 분석 결과의 통합(기술1 제외)

TRL 평가에서 기술격차가 비교적 크지 않은 운전 제어 계통기술(3번)은 반대로 AHP 분석결과 우선순위가 높은 것으로 나타나 전략적 선택이 필요한 것으로 파악되었다. 또한 현재 기술격차가 크게 나타나는 연료주기 기술군(37, 39, 40, 41, 42)은 시급성, 취약성 차원의 우선순위는 비교적 높지 않은 것으로 파악되어 TRL 평가에서 파악할 수 없었던 의사결정 요인을 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다.

IV. 결론

미래의 궁극에너지로 인식되고 있는 핵융합에너지(박영숙 외, 2010) 개발을 위해서는 DEMO라는 최종 실증 단계를 거쳐야만 한다. 특히 중국, EU, 일본 등의 주요 국가는 DEMO 건설에 대한 구체적 계획을 수립하고 이를 실행 중에 있다. 한국도 1995년부터 KSTAR 사업을 시작으로 핵융합 연구개발에 착수한 점을 감안하면, 핵융합에너지 상용화라는 최종 목표달성 뿐만 아니라, 주요 국가와 경쟁 상황에서 주도권을 확보하기 위하여 관련된 계획 수립이 필요하다.

본 논문은 이러한 구체적인 계획 수립에 필수적 첫 단계인 DEMO를 위해 확보해야할 기술의 수준을 식별하고 어떤 기준으로 전략적 투자를 할 것인가의 문제 해결을 위하여 TRL과 AHP 분석결과를 종합적으로 검토하여 우선 투자 대상기술을 도출하였다.

TRL과 AHP 분석결과 실증로용 연소 플라즈마 기술(1), 대면재료기술(16), 구조재기술(15), 고주파 가열장치 기술(27), 중성입자빔 장치기술(26), 안전기술(13), 연소플라즈마 진단장치기술(28), 핵융합로 시뮬레이터기술(2)은 우선적으로 확보해야할 기술로 파악되었다.

반대로 운전 제어 계통기술(3번), 연료주기 기술군(37, 39, 40, 41, 42)은 TRL 평가결과 기술격차는 높지 않으나, AHP에서는 전략적으로 중요한 것으로 다소 상반되게 나타나 기술확보 의사결정시 전략적 고려가 필요한 것으로 나타났다.

참고문헌

(1) 국내문헌

- 교육과학기술부(2009), 『국가과학기술표준분류체계』, 고시 제2009-34호.
- 국가핵융합연구소(2014), “각국의 DEMO 추진동향 및 시사점 분석”, 『Fusion Trend』s, 11호.
- 국가핵융합위원회(2007), 『제1차 핵융합에너지개발 진흥기본계획』.
- 국가핵융합위원회(2011), 『제2차 핵융합에너지개발 진흥기본계획』.
- 과학기술처(1995), 『국가 핵융합 연구개발 기본계획』.
- 김남균·안병호·이현석(2012), “국가 건설교통 R&D 사업의 실용화 향상을 위한 기술성숙도평가 기반 R&D 평가모델 수립에 관한 연구”, 『한국건설관리학회논문집』, 13권, 4호, pp.110-119
- 도현수·박진우·양지원·김유빈·김상준·황용석·최원재·장한수·이경수(2014), “핵융합에너지 상용화를 위한 기술트리 선정과 핵심기술 도출에 관한 연구”, 기술경영경제학회 2014 동계학술대회.
- 미래창조과학부(2013), 『핵융합실증로 핵심 기반기술개발사업 기획연구』.
- 박영숙·제롬 글렌·테드 고든·엘리자베스 플로레스큐(2010), 『유엔미래보고서 2040』, pp.26-27.
- 백인흠(2009), “SWOT/AHP를 이용한 울산항의 전략적 발전방향에 관한 연구”, 『수산해양교육연구』, 제21권, 제2호, pp.325-334.
- 손용정(2011), “SWOT/AHP 분석을 이용한 광양항의 발전 전략에 관한 연구”, 『한국항만경제학회지』, 27권, 1호, pp.247-262.
- 손일문(2012), “SWOT/AHP 분석기법을 이용한 안전보건 경영시스템의 활성화 전략에 관한 연구”, 『한국산학기술학회논문지』, 13권, 7호, pp.2895-2902.
- 송만석(2007), “프로야구 경기 직접관람 동기요인에 따른 지역연고 구단의 SWOT-AHP 평가”, 『한국스포츠산업경영학회지』, 제12권, 제4호, pp.161-177.
- 송만석·설상철·박종환(2010), “SWOT-AHP기법을 활용한 다국적 제약기업과 국내 제약기업의 경쟁력 평가”, 『경영경제연구』, 32권, 2호, pp.103-125.
- 이동엽·안태호·황용수(2002), “AHP를 이용한 과학기술 부문별 국가연구개발 투자우선순위 선정”, 『기술혁신연구』, 10권, 1호, pp.83-97.
- 우순·이종호·임재성(2014), “국방연구개발 사례 연구를 통한 통합성숙도평가 절차 연구”, 『품질경영학회지』, 42권, 1호, pp.111-127.
- 장한수·최원재·도현수(2012), “PEST-SWOT-AHP 방법론을 적용한 국가 과학기술 전략 수립에 관한 연구: 핵융합 연구개발 사례를 중심으로”, 『기술혁신학회지』, 15권, 4호, pp.766-782.
- 최원재·김유빈·도현수·장한수(2013), “거대과학 산업생태계 활성화 전략의 우선순위 결정에 관한 연구: 핵융합과 가속기 장치를 중심으로”, 『기술혁신학회지』, 16권, 4호, pp.1163-1186.

한봉윤 · 원준호(2012), “방산수출을 고려한 R&D 소요기획 지원전략 연구: 무기체계 시장성 평가 모델 연구를 중심으로”, 『기술혁신연구』, 20권, 3호, pp.93-128.

황형원 · 김홍래 · 장영근(2012), “항공우주개발 프로젝트에서 개발기간과 비용에 대한 TRL의 영향 분석”, 『한국항공우주학회지』, 40권, 3호, pp.264-272.

(2) 국외문헌

Arslan, O. and Turan, O.(2009), “Analytical investigation of marine casualties at the Strait of Istanbul with SWOT - AHP method”, *Maritime Policy & Management*, Vol. 36, Iss. 2, pp.131-145.

Chen, W. Jin, S. and Zhang, M.(2012), “Technology readiness assessment and application in the engineering development phase”, *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, 2012 International Conference, pp.1493-1496

DOE(2009), “Research Needs for Magnetic Fusion Energy Sciences”.

EC(2008), “R&D Needs and Required Facilities for the Development of Fusion as an Energy Source”.

EFDA(2012), “Fusion Electricity : A roadmap to the realisation of fusion energy”.

FESAC(2007), “Priorities, Gaps and Opportunities: Towards A Long-Range Strategic Plan For Magnetic Fusion Energy”.

Gao, Z., Huang, J., and Zhang, K.(2011), “Evaluation system of product maturity level for the third generation semiconductor microwave device based on Web”, *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*, 2011 IEEE 2nd International Conference, Vol. 2, pp.243-246.

Horiike, H.(2013), “Activities and Strategy in Japan on Fusion Technology for DEMO”, *Fusion Power Associates 34th Meeting*.

Huang, J., Gao, Z. and Zhang, K.(2011), “Research on evaluation method of electronic product maturity”, *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*, 2011 IEEE 2nd International Conference, Vol. 2, pp.118-121.

Ikeda, K., Koyama S. and Kurata M.(2014), “Technology readiness assessment of partitioning and transmutation in Japan and issues toward closed fuel cycle”, *Progress in nuclear energy*, Vol. 74, pp.242-263.

Kong, H., Xue, X.Z. and Zhang, X.Y.(2012), “Applying SWOT-AHP Analysis in Sustainable Marine Development Plan: Case Study in Shantou Municipality”, *Advanced materials research*, Vol. 524/527, No. 4, pp.3741-3745.

Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J. and Kajanus, M.(2000), “Utilizing the analytic hierarchy

- process (AHP) in SWOT analysis—a hybrid method and its application to a forest-certification case”, *Forest Policy and Economics*, Vol. 1, Iss. 1, pp.41-52.
- Liu, Y. et al.(2012), “A Decision-making Model on Stage Financing for Smart Transmission Grid Investment Based on Technology Readiness”, *Energy procedia*, Vol. 14, pp.681-688.
- Liu, Z. and Fan, J.(2014), “Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs”, *Progress in nuclear energy*, Vol. 70, pp.20-28.
- Margles, S.W., Masozera, M. and Rugyerinyange, L.(2012), “Participatory Planning: Using SWOT-AHP Analysis in Buffer Zone Management Planning”, *Conservation and the agricultural frontier : integrating forests and agriculture in the tropic*, pp.613-637.
- Taleai, M., Mansourian A. and Sharifi, A.(2009), “Surveying general prospects and challenges of GIS implementation in developing countries: a SWOT - AHP approach”, *Journal of Geographical Systems*, Vol. 11, No. 3, pp.291-310.
- Wan, Y.(2013), “Road Map of Chinese Fusion Research and the First Chinese Fusion Reactor-CFETR”, *531st Wilhelm and Else Heraeus Seminar on 3D versus 2D in Hot Plasmas*.

□ 투고일: 2014. 07. 22 / 수정일: 2014. 10. 13 / 게재확정일: 2014. 10. 30