

한국의 핵융합 기초과학 연구성과의 사업화 전략에 관한 연구

송환빈* · 최원재** · 장한수***

I. 연구의 배경 및 필요성

2011년 3월 일본의 후쿠시마 원전사고 이후 원자력의 안전성 문제가 불거지면서 각국에서는 미래 대체 에너지에 대한 투자를 가속화 하고 있다. 핵융합은 청정하고, 안전하며, 무한한 에너지라는 측면에서 미래 궁극의 에너지로서 인정받고 있으며, 우리나라를 비롯한 핵융합 기술 선진국에서는 2030년대 말에서 2040년대 초에 핵융합발전 상용화를 목표로 연구개발에 박차를 가하고 있다.

우리나라의 경우 선진국보다 40~50년 늦게 핵융합 기술 개발에 뛰어들어, 1995년 12월 국가핵융합연구개발기본계획이 확정되고, 1996년 2월 한국기초과학지원연구원 내에 핵융합연구개발 사업단이 출범하면서 공식적으로 핵융합에너지에 대한 연구개발이 시작되었다. 한국형 핵융합발전소 건설을 목표로 1995년부터 2011년까지 약 1조 원을 투자하였고, 향후 5년간 제2차 핵융합에너지개발 진흥 기본계획에 따라 2012년부터 2016년까지 약 1조 원의 투자 소요가 예상되고 있다(교육과학기술부, 2012). 또한, 국제핵융합실험로 공동개발 사업에는 2007년부터 2019년까지 건설기간 동안 총 1조 1,750억 원이 투자될 계획 이다(국가핵융합위원회, 2010). 이와 같이 핵융합에너지 개발 사업은 대형 장치를 이용하는 대표적인 기초 과학분야 대형 연구개발사업으로서 사업 결과의 불확실성이 존재하는 것도 사실이지만, 사업의 과정 중에 발생하는 원천기술과 파생기술을 산업화한다면 그 파급효과도 막대할 것으로 기대된다.

Goldston(2007)에 따르면 핵융합에너지 상용화 시점(2050년경)에서 핵융합으로 얻어지는 경제적 이익의 현재 가치는 약 11조~120조 달러에 이를 것으로 전망하였으며, 황석원(2010) 등은 우리나라의 10대 S&T 챔피언 글로벌 산업화 전략으로 핵융합을 선정하였으며, 경제적 파급력이 막대한 반면 상용화 시점이 늦기 때문에 장기적 관점으로 접근해야 하며, 지속적 지원과 인내가 필요하다고 주장하였다.

본 연구에서는 이러한 핵융합 기술이 갖는 대형·장기적 특성에 따른 연구 성과에 대한 전략적 접근을 위해 최근 과학기술계에서 이슈가 되고 있는 기존의 기술사업화와 차별화된 과학사업화의 개념을 정리해보고, 국가핵융합연구소(이하 핵융합(연))에서 추진하고 있는 핵융합 과학사업화 전략에 대해 알아보고자 한다. 그리고 핵융합(연)을 중심으로 우리나라가 2020년대 중반까지 계획하고 있는 KSTAR 운영사업, 2010년대 건설단계를 거쳐 2030년대 중반까지 운영될 ITER 사업, 그리고 KSTAR 운영사업 이후에 진행될 한국형 핵융합 실증로(DEMO1) 및 핵융합상용로 개발사업 과정에서 확보되었거나 발생될 것으로 예상되는 과학기반 원천기술과 파생 기술 관련 성과물을 알아보고, 이들 성과물의 사업화 성공 사례 및 유형별 추진 현황 분석을 통한 정책시사점을 도출하고자 한다.

본 연구의 분석은 그동안 국가핵융합연구소에서 수행하였던 핵융합 기술의 과학사업화 전략 보고서에 바탕을 두고 있으며, 실증적 분석은 KSTAR 및 ITER에 참여하였던 산업체를 대상으로 인터뷰 및 설문조사를 기반으로 하였다. 그 밖에도 연구소에서 생성된 많은 보고서 및 통계자료 등의 2차 자료도 활용하였다.

* 송환빈, 한국해양연구원 연구전략실장, 031-400-6595, hbsong@kordi.re.kr

** 최원재, 국가핵융합연구소, 042-879-5082, cwj147@nfri.kr

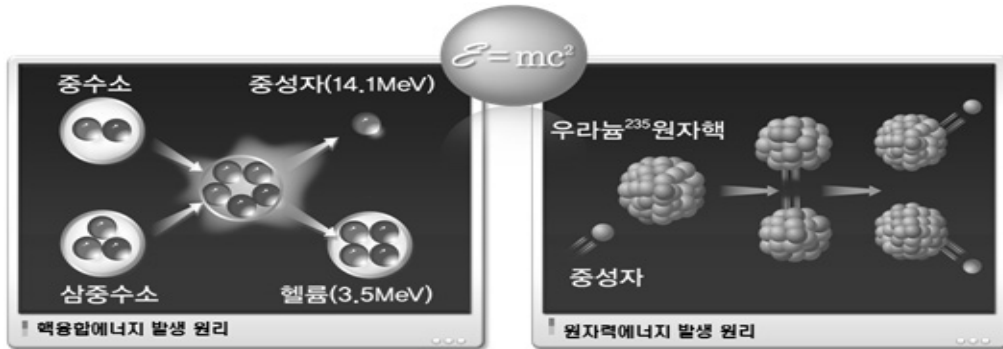
*** 장한수, 국가핵융합연구소, 042-879-6110, jjang@nfri.kr

1) Demonstration Power Plant의 약자로 "K-DEMO"라고도 함

II. 핵융합의 개요 및 국내외 추진현황

1. 핵융합의 개요

핵융합은 태양과 같은 별에 에너지를 공급하는 과정으로서 그 원리는 다음의 (그림 1)에 나타난 바와 같이 원자력에너지의 발생 원리인 핵분열의 역반응이며, 지구에 환경 친화적인 에너지를 거의 무한하게 공급할 수 있다. 그러나 지구에서 핵융합을 일으켜 에너지를 얻는 것은 과학적으로나 기술적으로 매우 어려운 도전이다.



(그림 1) 핵융합 및 원자력에너지 발생 원리

핵융합 연구는 1950년대에 영국과 미국, 소련 등에서 비밀리에 추진되었지만, 1958년에 기밀에서 해제된 뒤에는 세계의 기술 선진국 대부분에서도 시작되었다. 우리나라에서는 1995년 12월 국가핵융합연구개발기본 계획이 확정되면서 핵융합 연구가 공식적으로 시작되었다. 이듬해인 1996년 1월에 한국기초과학지원연구원 내에 핵융합연구개발사업단이 출범하였으며, 2003년 6월에는 핵융합 연구 선진국이 공동으로 참여하는 국제핵융합실험로 (ITER ; International Thermonuclear Experimental Reactor)²⁾ 프로젝트에 공식 가입하였다. 2007년 9월에는 11년 8개월의 공사 끝에 세계적인 핵융합 연구 장치인 차세대초전도핵융합연구장치(KSTAR ; Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)³⁾를 완공하였고, 이듬해인 2008년 7월에는 세계에서는 유례가 없었던 단 한번 만에 최초 플라즈마 발생에 성공함으로써 장치의 우수성을 입증하였다. 또한 2010년도에는 초전도 핵융합 장치에서 H-mode⁴⁾ 플라즈마를 조기에 달성하였으며, D형⁵⁾ 플라즈마를 구현하였고, 2011년도에는 핵융합 난제인 H-mode시 발생하는 고유의 플라즈마 불안정성(ELM)현상을 공명자기섭동(RMP)

2) 열출력 500MW, 에너지 증폭율(Q) 10 이상인 국제핵융합실험로(ITER)의 국제공동 건설·운전을 통해 핵융합에너지의 실용화를 위한 최종 공학적 실증을 목표로 하는 국제공동사업으로서, 한국, EU, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도 등 7개국(2006.11.21 협정 서명)이 참여하며, 총 사업기간은 2006~2040년(건설, 운영, 방사능감쇄, 해체 등 4단계)으로서 건설단계는 2007~2019년이며, 총 사업비용은 112.3억 유로 (약 14조 원), 건설단계 비용은 억 유로(4,584.7 kIUA)임. 건설비는 총건설비 71.1억 유로 중 EU가 45.46%, 그 외 6개 각 참여국이 9.09%씩 분담. 자원분담은 현물분담이 78%(장치제작 및 ITER 기구 직원과건 등), 현금분담이 22%(직접비, ITER 기구 운영비, 직접고용직원 인건비 등)이며, 건설은 참여국에 할당된 조달품목을 제작 납품 후, 현장에서 조립 완성하는 방식. ※ kIUA : kilo ITER Unit of Accounts (ITER 화폐단위), 1 kIUA = 1.552 백만 유로 (2010년 6월 불변가 기준)(국가핵융합연구소, 2011a)

3) TOKAMAK은 1951년 구 소련의 물리학자 안드레이 사하로프와 이고르탐이 설계한 핵융합실험장치로 도넛모양의 형태를 빗대어 이름이 지어진 러시아어. 현재 상업성을 고려해서 추진되고 있는 핵융합에너지 발생장치는 모두 토카막 형태의 장치. 이 외에도 고출력 레이저를 사용하는 관성핵융합에너지(Inertial Confinement Fusion) 발생장치 등도 있음.

4) 토카막형 핵융합장치의 운전에서 특정 조건하에서 플라즈마 밀폐성능이 약 2배로 증가하는 현상으로, 초전도 핵융합장치에서의 H모드 달성은 이번이 최초 사례임.

5) 고성능 플라즈마를 발생·유지시킬 수 있는 조건으로 H-모드 운전을 위해 필요한 플라즈마 형태임.

을 이용하여 세계최초 완벽 제어 성공하는 등 ITER의 선행연구장치로서의 위상도 강화하였다.

2. 국외 현황 및 계획

미국, EU, 일본, 러시아 등은 1950년대부터 핵융합 연구를 착수하였으며, 2040년대 핵융합전기 생산 실증과 2050년대 상용화를 목표로 하는 지름길계획(Fast Track Approach)을 수립하고, DEMO 개발에 자원을 집중한다는 전략을 추진 중에 있다. 핵융합 선진국별 현황 및 계획은 다음과 같다.

EU는 핵융합을 미래 주요 에너지 기술로 평가하며 지속적 투자 확대 의지를 밝히고 있다. 2007년 기준 FP7(Framework Program 7)에서 수소연료전지는 6.2억 유로, 핵융합은 5.2억 유로, 태양광은 4.7억 유로, 원자력은 4.6억 유로의 투자를 계획하였다. 그러나 최근 EU 주요 국가의 경제위기로 인하여, 핵융합을 비롯한 과학기술에 투자하기로 한 예산 지급이 계속 줄어들고 있는 상황이다. EU의 주요 연구장치로는 JET⁶⁾(EU), ASDEX-Upgrade(독일)⁷⁾ 등이 있으며, 각각 43MW, 30MW의 가열능력⁸⁾을 확보하고 있으며, ITER 운전을 대비한 선행 연구장치로서 신기술 연구를 추진 중에 있다. 또한 유럽원자력공동체(EURATOM)의 주도 하에 ITER 사업에 참여 중이며, 2011년 기준 ITER 조달약정 중 총 64%를 달성하였다. DEMO 개발과 관련하여 EU는 제8차 Framework Program('12~'16)에 사전연구('11~'13), 개념연구('14~'19), 엔지니어링('20~)의 3단계 로드맵 포함을 추진하고 있으며, DEMO 연구개발을 강화하기 위하여 2011년 상반기에 EFDA(European Fusion Development Agreement)에 PPP&T(Power Plant Physics and Technology) 사업단을 설치하였다(국가과학기술위원회, 2012). 주요 연구기관으로는 영국의 Culham 연구소, 독일의 막스플랑크 플라즈마물리연구소, 프랑스의 원자력청(CEA ; French Atomic Energy Commission) 등이 있다.

일본은 지난 2011년 3월 발생한 동일본 대지진에 따른 후쿠시마 원전사고의 영향으로 기존 원자력 정책에 대한 재검토를 진행 중에 있으며, 아직까지 핵융합 연구개발에 대한 특별한 정책변화는 없다. 2011년 기준 ITER, BA 및 LHD 등에 약 159억엔(추정)을 투자하였다⁹⁾. 현재 ITER 및 DEMO의 선행 연구장치로서 JT-60SA 장치 업그레이드를 추진 중에 있으며, ITER 원격실험 및 핵융합에너지 조기 상용화 R&D를 위한 국제핵융합에너지연구센터(IFERC)를 2010년 3월에 로카쇼뮤라에 설치하였다. 또한 DEMO 개발과 관련하여 국제핵융합재료조사시설(IFMIF/EVEDA) 및 DEMO 공학 설계 및 R&D 건물 등도 완성하고, 본격 연구개발에 들어갔다. 주요 연구기관으로는 국립핵융합과학연구소(NIFS ; National Institute for Fusion Science), 원자력연구기구(JAEA ; Japan Atomic Energy Agency) 등이 있다.

미국은 2030년대 후반 DEMO에 의한 상업 시범송전 구현을 목표로 DIII-D¹⁰⁾, NSTX¹¹⁾와 같은 장치운영을 통해 핵융합 기반기술 개발을 수행 중에 있다. 또한 세계적으로 가장 많은 핵융합 연구개발비를 투입('12년 기준 8.7억불)하고 있으며, 주요 연구장치로는 GA(General Atomic)사의 DIII-D가 있으며, 현재 31MW의 가열능력을 확보하였고, AT-mode¹²⁾ 운전 연구가 활발하다. 또한

6) 영국 Culham연구소에 위치해 있으며, 세계 최대의 토카막 연구 장치.

7) 독일의 가장 큰 핵융합 실험연구장치이며, 막스플랑크 플라즈마 물리연구소에 위치해 있음.

8) 가열능력은 핵융합 연구장치의 고성능 플라즈마 운전 실험을 위한 가장 중요한 요소이며, 보통 1MW 가열 성능향상을 위해 100억원이 소요되고 있다. KSTAR의 현재 가열능력은 4MW인데 반해, 대다수 선진국의 핵융합 연구장치의 가열능력은 30~40MW 수준.

9) 위 예산은 일본 원자력연구개발기구(JAEA / 핵융합 부분) 및 국립핵융합과학연구소(NIFS)의 내부사업, 기관운영비 및 오사카 대학의 관성핵융합 예산 제외 금액.

10) 샌디에고에 있는 GA사에서 미국 DOE(Department of Energy)의 위탁을 받아 운영하는 토카막장치.

11) 미국 프린스턴에 있는 원형토카막장치.

12) AT(Advance Tokamak) : 기존의 토카막에 비하여 단열효과가 우수하고 플라즈마 전류 유지 성능이 향상된 고성능 토카막.

주요 7개국이 공동개발하고 있는 ITER 사업 참여를 통해 총 22억 달러 규모의 투자를 계획하고 있다. 프린스턴 플라즈마물리연구소(PPPL), General Atomic, MIT 등에서 활발한 연구를 수행하고 있다.

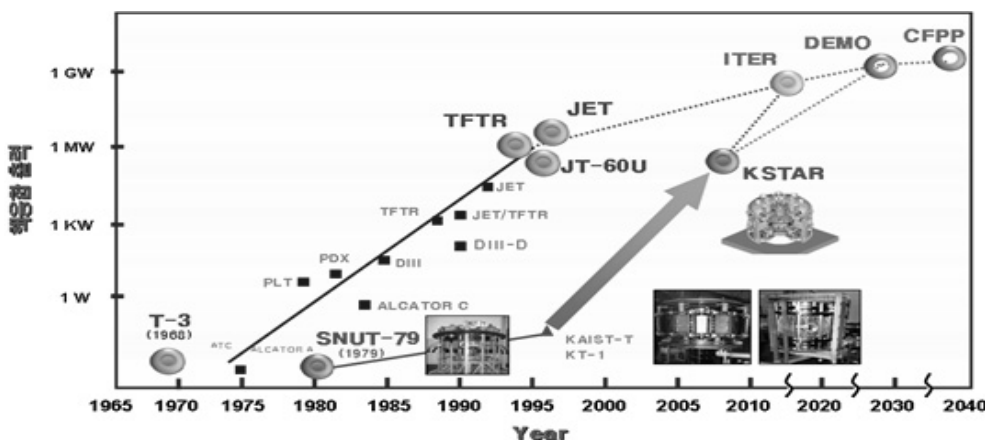
중국은 폭발적 에너지 수요의 대안으로 핵융합 에너지 개발을 적극 추진 중에 있다. 향후 10년간 ITER 건설 및 자국 내 ITER관련 실험 및 재료개발 등에 10억 달러를 투자할 예정이며 향후 10년간 약 2,000명의 핵융합 인력양성을 천명하였다. 최근 들어 후진타오 전 주석('08) 및 시진핑 주석('11) 등이 핵융합연구소(ASIPP)를 방문하는 등 핵융합에너지 개발에 대한 적극적 관심과 개발의지를 표명하기도 하였다. 중국은 현재 ITER 선행연구 수행을 위해 EAST¹³⁾ 부대장치 확충 등 대규모 재원 투입을 통한 장치성능 및 연구능력 극대화를 추진 중이다. 또한 현재 7.5MW 가열 능력을 '15년까지 36MW 확보를 추진하고 있으며, 이는 현재 KSTAR와 비교했을 때 매우 높은 수준이다. 상용화 계획과 관련하여서는 '20년대 혼성원자로¹⁴⁾(Fusion-Fission Hybrid Reactor: FFHR)를 개발하고, '30년대 DEMO 건설 등 공격적 상용화 목표를 제시하고 있다.

러시아는 토카막을 발명한 전통적 핵융합 강국으로, 원자력공사(ROSATOM) 산하의 쿠르차토프(Kurchatov) 연구소를 중심으로 핵융합 연구가 진행 중이다. 상용핵융합로 건설을 위한 첫 번째 단계('09~'15) 동안 총 11.7억 달러를 인력양성 분야에 투자하기로 하였다. 현재 T-15 장치의 업그레이드를 통한 핵융합 중성자원 개발의 프로토타입 개발을 추진 중에 있다.

3. 국내 현황 및 계획

우리나라는 (그림 2)에서 보는 바와 같이 핵융합 선진국에 비해 매우 늦은 1970, 80년대에 서울대의 SNUT-79, 원자력(연)의 KT-1, KAIST의 KAIST-T, 기초과학지원(연)의 한빛 등 소형 토카막 장치를 운영하면서 기초과학 수준의 연구를 수행하였고 이를 통해 핵융합 연구인력을 양성하였다.

1995년에는 핵융합에너지 개발을 위한 중간진입전략이라는 국가의 정책적 결정에 따라 핵융합(연)은 대형 초전도 토카막 건설과 운영을 통한 핵융합 선진국 추격, ITER 사업 참여를 통한 동등, 한국형 핵융합실증로 건설과 운영을 통한 추월 전략을 수립하였다. 같은 해에 정부에서는 대형 초전도 토카막을 건설하기로 결정하고, 2007년까지 장치 건설에 3,090억 원, 시설 건설에 1,092억 원을 투입하여 KSTAR를 완공하였다.



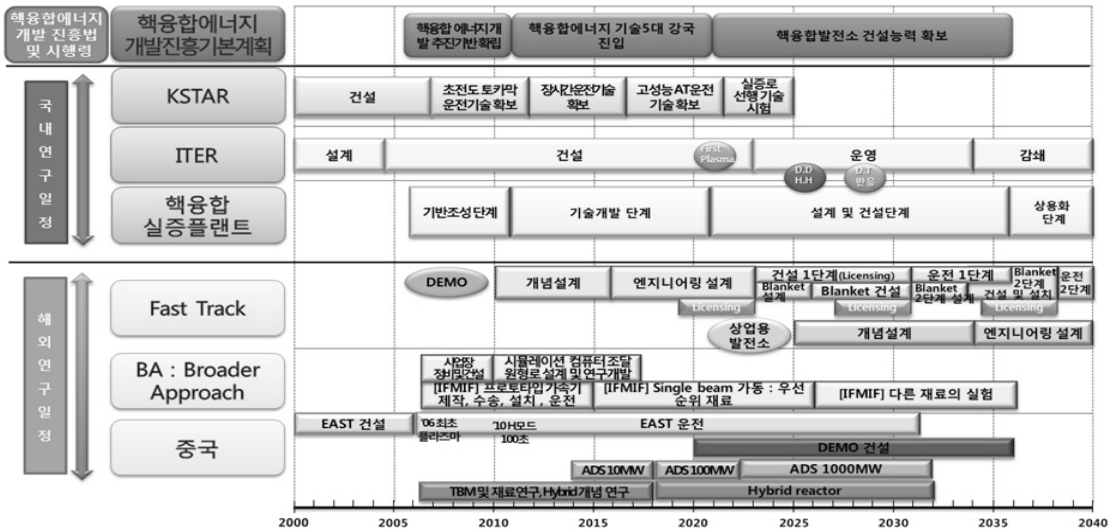
(그림 2) 한국 및 세계 핵융합 실험장치 비교 및 우리나라 중간진입 전략(과학기술부, 2007)

13) 중국의 초전도 핵융합연구장치로 2006년 완공되었고, 2007년 first plasma 달성.

14) 혼성원자로는 핵분열에 따라 사용된 연료를 핵융합으로 발생한 중성자를 이용해 재처리하는 원자로를 말함.

2003년에 ITER 사업 공식 참여 결정으로 국제 핵융합 기술개발 주도국에 진입하였으며, 2008년 6월에는 KSTAR 종합 시운전을 마치고 최초 플라즈마에 성공함으로써 대형 토카막 보유국으로 자리매김하였다. 이는 KSTAR 건설 경험을 통하여 축적된 핵융합 과학기술력을 국제적으로 인정 받는 계기가 되었다. 2009년에는 KSTAR를 본격 가동하여 운전목표를 성공리에 달성 하였다.

핵융합(연)에서 2009년 수립한 장기발전계획에 따르면, 다음의 (그림 3)에 나타난 바와 같이, 2030년대 핵융합에너지 상용화를 목표로 다음과 같은 시나리오를 구성하였다.



(그림 3) 국가핵융합연구소의 중장기 사업 및 연구개발 계획(교육과학기술부, 2012)

첫째, 현재부터 2014년까지 가장 중요한 일은 일본의 JT-60SA나 ITER가 완공되는 시기 이전에 KSTAR를 이용하여 고성능 플라즈마를 장시간 운전하는 기술을 확보하여 운영 능력에서도 세계 최고 위치를 확보한다는 것이다. 이는 KSTAR 건설을 통하여 핵융합로 건설 능력을 확보하였으므로, 운전능력 확보가 향후 핵융합에너지 개발 선도 여부를 결정짓는 요소라고 인식하고 있음을 보여주고 있다.

둘째, 2014년 이후의 일은 DEMO 건설 및 운전을 위한 사전 연구 및 필요 인프라 구축이며, 이에 필요한 시간을 고려하여 시나리오로 구성하였는데, 2015~2020년까지 가장 중요한 일은 DEMO 건설을 위한 사전 연구를 시작하여 본계획에 안착시키는 것이 우선이며, DEMO 관련 연구가 순조로이 진행된다면 건설을 위한 연구개발을 수행하는 것이 두 번째로 필요한 일로서 이를 위하여 DEMO 부지와 연결한 R&D 캠퍼스 건설도 2010년대 초반에 준비할 필요가 있다는 것이다. 또한, EU와 일본 주도의 Broader Approach를 고려할 때 KSTAR, ITER 외에 재료연구와 같이 상용화에 적용될 기술을 위한 연구개발도 중요함을 강조하고 있다.

한편, 우리나라의 핵융합 연구는 핵융합(연) 외에도 관련 대학과 출연(연)에서 KSTAR를 활용하여 학·연 공동연구가 활발히 진행되고 있다. 국내 산·학·연 간의 핵융합 연구 역량을 결집하고, 핵융합에너지 기술 자립 기반 마련과 고급 전문인력 양성 지원을 위한 유기적 협조 체제 구축이 필요하다는 인식 하에, 2009년도부터 서울대 등 5개 기관에 KSTAR 거점 센터를 설치하여 KSTAR를 활용한 공동 실험 진행 및 KSTAR 운영 계획과 연계한 가열·진단장치 등 부대 장치 성능 향상을 위한 공동연구를 수행하고 있다(국가핵융합연구소, 2012a).

Ⅲ. 한국의 핵융합 기초과학 연구성과 사업화

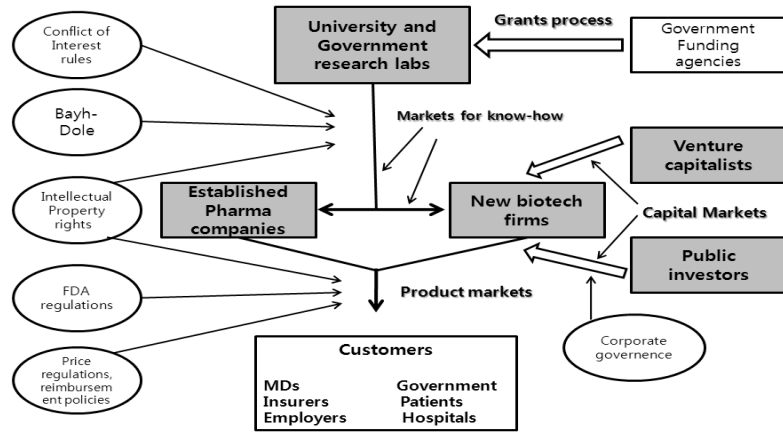
1. 사업화 개념

사업화는 연구의 성과물을 산업 내에 적용하는 일련의 프로세스로, 전통적 관점에서는 기초연구, 응용연구, 개발연구 다음 단계로서 실용화로 이어지는 선형적 패러다임 하에서 기술사업화를 지칭하였지만, 최근에 와서는 선형적 틀에서 벗어나 기초연구, 응용연구, 개발연구, 실용화 활동 간의 상호작용이 중요해지면서, 기초과학 연구성과를 직접적으로 산업에 활용하기 위한 일련의 활동 과정인 과학사업화가 이슈가 되고 있다(기초기술연구회, 2009). 그러나 과학사업화에 대해서는 국내외로 많은 연구가 이루어진 편은 아니며, 특히 국내에서는 거의 연구가 이루어지지 않았다(조형래 외, 2011). 이는 이론적으로 과학사업화와 기술사업화를 구분하는데 있어 어려움과 아직까지 국내외에 과학사업화의 성공사례가 거의 없기 때문일 것이다. 일반적으로, 기술사업화란 보유기술의 잠재적 가치를 실현하기 위해 기술을 이전하거나 생산과정에 적용함으로써 제품 및 서비스를 생산·판매하는 절차(process)를 의미한다고 볼 수 있다(손수정 외, 2009). 이에 반해 과학사업화는 기초연구 결과물의 활용 방식의 변화, 기초연구성과의 가치 극대화 관점에서 논의되고 있다. 즉, 과학사업화의 정의는 너무 포괄적인 내용을 담고 있지만, 협의의 개념으로는 기초과학 연구성과를 직접적으로 산업에 활용하기 위한 일련의 활동으로 정의할 수 있다(국가핵융합연구소, 2010). 기존 연구(양혜영, 2006)에 따르면, 기초연구 결과물을 활용하는 방법으로는 결과물을 바탕으로 응용연구나 개발연구에 활용되는 경우는 45%인데 비해 결과물로부터 착상을 얻어 새로운 연구개발을 수행하는 경우가 53%로 높은 비중을 차지하고 있다. 즉 기초연구 결과물이 직접적으로 응용연구나 개발연구로 이어져 가시적인 성과물로 연결되기도 하지만, 새로운 연구개발의 시발점 역할을 하는 경우가 매우 많은 것으로 해석할 수 있다. 이는 기초연구 결과물이 학문 분야 간에 전달된다는 사실과 더불어 기초연구 결과물의 수평적 전달과정을 뒷받침하는 근거가 될 수 있음을 말한다.

기초연구(기초과학)는 지식의 전달과 활용이 다양한 학문·산업분야에 걸쳐 장기간 동안 이루어지고, 지식 자체의 전달뿐 아니라 방법론, 장비 등을 통한 전달이 많은 특징을 지니고 있다(Pavitt, K., 1991). 또한, 기초연구 결과물 중에는 계획되지 않은 부가적 결과물의 파급효과가 매우 큰 경우가 존재하는데 이는 선형모델의 기초→응용→개발연구로 이어지는 수직적 전달·활용과정뿐만 아니라 학문간, 연구자간 수평적 전달·활용과정도 중요함을 의미한다. 따라서, 기초연구 효과의 복잡성과 함께 기술수명주기의 단축 및 개방형 혁신(Open Innovation)의 가속화 추세를 고려할 때 기초연구(기초과학)의 실용화 및 사업화 촉진 관점에서 과학사업화의 중요성이 강조 되고 있다(국가핵융합연구소, 2010)

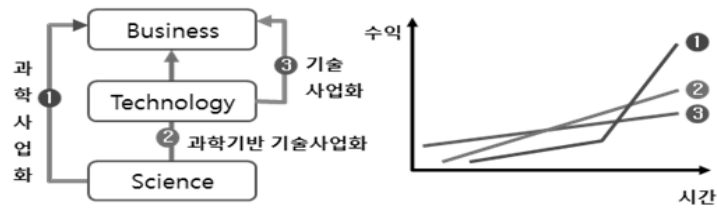
과학사업화의 기본개념은 기초연구와 산업의 연계성을 강화시키는 데서 출발하였다. 지식기반 경제에서 과학은 과거에 비해 혁신이 더 중요하고 직접적인 영향을 미치며, 과학-산업관계(ISRs ; Industry-Science Relationships)의 강도와 질이 경쟁력, 성장, 직업창출, 삶의 질 등과 같은 투자 수익을 결정 하는데 있어서 역할의 중요성이 더 커지고 있다(OECD, 2002). 즉, 산업 내에서의 혁신적인 기회 창출을 위해서 기초과학지식을 산업혁신에 직접적으로 활용하기 위한 과학과 산업간 연계성의 체계적인 기획 및 관리가 중요 하다는 것을 의미한다.

Pisano(2006)는 과학과 비즈니스의 연계 및 과학사업화의 해결책을 제시하기 위해 해부학적 구조(Anatomy Framework)를 제시하고 있다. 여기서 말하는 해부학적 구조는 참여자들(신생기업, 기존 기업, 비영리 연구실, 대학, 투자자, 고객들)과 그 참여자들을 연결시켜주는 제도상의 장치들(자본시장, 지적 자산, 그리고 제품), 그리고 제도적 장치들의 운영을 관리하고 영향을 미치는 규정들(규제조치, 지배구조, 지적재산권)로 나누었다. 특히 이 해부학적 구조 속에서 조직적 제도적 장치들의 공진화를 통한 혁신이 필요하다는 것이다(그림 4).



(그림 4) 바이오사업의 해부학적 구조(Pisano, 2006)

이상의 내용을 종합해 볼 때, 과학사업화는 다음의 (그림 5)에 나타난 바와 같이 과학의 직접적 사업화와 과학기반기술사업화로 나눌 수 있다. 과학의 직접적 사업화는 기초과학 연구성과를 사업화 주체에게 이전하여 사업화 기획, 사업화 착수 단계를 거쳐 제품을 생산하는 과정이며, 과학기반기술사업화는 기초과학 연구개발 과정에서 창출된 과학기반 원천기술과 융복합기술을 연계하여 제품을 생산하는 과정으로 정의할 수 있다.



(그림 5) 과학사업화 개념 및 수익 창출 모델

과학사업화는 기존 제품의 혁신 또는 미래 신산업 창출과 관련되는 분야를 주 대상으로 하기 때문에 성공의 불확실성과 위험도가 높지만 성과의 파급 효과는 막대하다.(국가핵융합연구소, 2010). 따라서 미래 시장의 선점을 위해서는 응용·개발기술에 치중하였던 과거의 연구개발 투자전략에서 혁신의 원천을 창출할 수 있는 과학사업화를 목표로 하는 기초연구에 자원을 집중하는 전략으로의 전환이 필요한 시점이다.

우리나라가 세계 선두를 달리고 있는 반도체의 경우 기존 실리콘 반도체의 집적 수준이 이론의 한계에 도달했음을 알고 이를 극복하기 위해 전 세계 연구진은 탄소나노튜브 등 신소재 분야의 기초연구에 집중적으로 투자를 하고 있으며, 인간게놈 프로젝트의 경우 10년 이상이라는 연구기간을 거쳐서 인간 유전자에 대한 근본적인 이해를 가능하게 하여 바이오 분야를 거대 산업화 하는 것 등이 과학사업화의 사례로 볼 수 있다(기초기술연구회 2009).

2. 국가핵융합연구소 사업화 추진 전략

핵융합(연)은 국가 핵융합에너지 개발의 세계선도 연구기관으로 한국형 핵융합로 건설 및 핵융합 에너지 상용화 기술 개발을 목적으로 2005년 10월에 설립된 정부출연연구기관이다. KSTAR 운영을 통한 세계 수준의 핵융합 연구능력 확보, ITER 국내 전담기구(DA) 역할 수행과 기술 이전, 핵융합 연구인력 양성 및 핵융합로 건설 첨단·원천기술 연구, 핵융합 관련 요소기술을 활용한 첨단 신산업 창출 기여 등을 기관의 주요 임무로 삼고 있다.

핵융합(연)은 핵융합에너지개발진흥법에 명시된 목적인 핵융합에너지 생산 및 평화적 이용, 핵융합에너지 관련 과학기술과 산업 진흥을 통하여 국가 경제 발전에 이바지하기 위한 연구사업을 추진 중에 있으며, 주요 연구 분야는 ① KSTAR 운영기술 개발 및 장치성능 향상, ② ITER 조달품목 개발·제작 및 핵심기술 개발, ③ 핵융합실증로(DEMO) 기술 개발, ④ 핵융합 및 플라즈마 파생 기술 상용화 등 4개 분야이다.

KSTAR 운영기술 개발 및 장치성능 향상 연구는 최초 플라즈마 달성 이후 장치운전 기술 향상을 위해 3테슬라급 고자기장 구현 및 플라즈마 운전 제어 최적화와 KSTAR 부대장치의 성능 향상 및 대용량 전력 저장·공급설비 구축을 주요 내용으로 하고 있으며, ② ITER 조달품목 개발·제작 및 핵심기술 개발 연구에서는 ITER 건설을 위해 할당된 10개 현물조달품목을 ITER 기구 품질보증 요건에 따라 적기 납품 및 조달 가치의 획득과 테스트블랑켓모듈(TBM) 개발 및 비조달 핵심품목 원천기술 확보를 주요 내용으로 하고 있다. ③ 핵융합실증로(DEMO) 기술 개발 연구분야에서는 한국형 DEMO 자립 건설을 위한 추진전략 개발, 한국형 DEMO 건설을 주도하기 위한 설계기술 및 장치기술 개발 기반 구축, 한국형 DEMO 개발 효율화를 위한 정보 네트워크 구축 및 활용 활성화를 연구내용으로 하고 있다. 마지막으로 ④ 핵융합 및 플라즈마 파생기술 상용화 연구는 미래 산업 및 고용 창출에 큰 영향을 끼치는 환경보존을 위한 신재생에너지 개발과 기후변화 대응 기술 개발 및 대표적 융합기술(Convergence Technology)인 응용 플라즈마 기술연구를 통한 창의적 실용기술 개발, 융·복합기술 개발을 위한 응용 플라즈마 기술 기반을 구축하고 산업체의 경쟁력 강화를 위한 수요지향적인 인재양성 교육과 산학연 네트워크의 구축, 핵융합(연)이 보유한 원천 신기술의 실용화 활용 및 선도 기술 실현, 핵융합에너지 파생응용기술의 실용화와 산업화를 통한 사회경제적 효과 증대를 주요 연구내용으로 하고 있으며, 동 연구 수행을 위해 핵융합(연)은 2012년 1차 완공을 목표로 군산에 소재한 군장국가산업단지 내에 융복합 플라즈마 연구센터를 건설 중에 있다. 이들 4개 연구분야의 해당기술을 다음의 <표 1>에서 정리하였다.

<표 1> 국가핵융합연구소의 연구분야별 해당기술

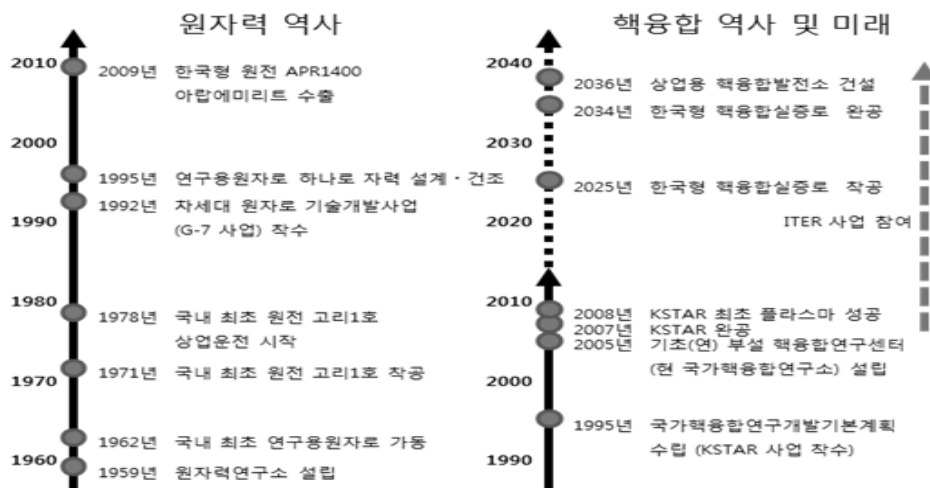
연구분야		해당기술
KSTAR 운영기술 개발 및 장치성능 향상	개방형 핵융합 연구 구심체 역할 수행	<ul style="list-style-type: none"> • 핵융합 플라즈마 발생, 제어, 분석기술 • 초전도장치 안정적 운전기술 • 국내외 공동 실험 연구장치 운영
	KSTAR 장시간 운전기술 개발 및 성능 향상	<ul style="list-style-type: none"> • 장시간 고출력용 가열장치 기술 • 플라즈마 대향장치 기술 • 대전류 전원 및 전력설비 기술
ITER 조달품목 개발·제작 및 핵심기술 개발	ITER 조달품목 개발·제작	<ul style="list-style-type: none"> • ITER 토카막 주장치 조달품목 개발 및 제작 • ITER 부대장치 시스템 조달품목 개발 및 제작 착수
	ITER 핵심기술 개발 및 기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 테스트 블랑켓 모듈(TBM) 핵심기술 개발 • 비조달 핵심기술 개발 • ITER 운전기술 개발
핵융합실증로 (DEMO) 기술 개발	실증로 설계 기술 개발 및 건설기반 조성	<ul style="list-style-type: none"> • 범 국가적 실증로 기술 개발 추진체계 구축 • 실증로 설계 및 해석기술 개발 • 실증로 장치기술 및 소재 기술개발 • 실증로 개방형 혁신 연구환경 구축 및 운영 • 실증로 통합 지식 및 정보관리 시스템 개발 및 운영
	핵융합 시뮬레이션 및 대규모 슈퍼컴퓨팅 융합기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 핵융합 플라즈마 시뮬레이션 기술 • 핵융합 재료 시뮬레이션 기술 • 핵융합 환경 대용량 슈퍼컴퓨팅 기술
핵융합 및 플라즈마 파생기술 상용화	플라즈마 응용기술 상용화 기획 및 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • 중성입자 빔발생원 및 응용 기술 개발 • 대기압 플라즈마를 이용한 환경기술 • 마이크로파 플라즈마 응용기술 • 플라즈마 기초연구사업
	핵융합 파생기술 상용화 기획 및 기술개발 기반구축	<ul style="list-style-type: none"> • 초전도자석 설계, 제작 기술 • SiC 나노분말 제조 등 재료기술 • 저온, 전력 등 기타 응용기술

한편, 우리나라의 원자력 발전이 걸어온 길은 앞으로 핵융합 발전 상용화를 궁극적 목표로 하고 있는 핵융합(연)의 사업화 전략 수립에 많은 시사점을 제공하고 있다. 1958년 원자력법이 제정·공포되었고, 1959년에 설립된 원자력연구소(현 한국원자력연구원)가 같은 해에 미국으로부터 국내 최초로 100kW급 연구용원자로 트리가 마크 2(TRIGA MARK-II)를 들여와 1962년에 가동을 시작하면서 본격적으로 원자력 연구가 수행되었다. 1971년에는 고리에 59만kW급 발전 능력을 가진 한국 최초의 원자력 발전소인 고리 1호기가 착공되어 1978년에 상업 운전을 시작하면서 세계에서 21번째 원전 보유국이 되었다(과학기술부, 2008).

그리고 원자력 연구가 시작된 지 50여 년 만에, 최초의 상업 발전을 시작한 지 30여 년 만인 2009년에 한국형 원전 APR1400을 아랍에미리트연합에 처음으로 수출하게 되었다. APR1400은 원전 선진국 진입을 목표로 지난 1992년 시작한 '차세대 원자로 기술개발사업(G-7 사업)'을 통해 만들어졌다. 기존 한국형 원전인 1천MW급 OPR1000보다 안전성과 경제성을 10배 강화한 1천400MW급 신형경수로 원전으로, 1999년 기본 설계를 완료하고 2002년 국내 표준설계 인가를 받았으며, 국내에서는 지난 2008년 신고리 3,4호기에 처음으로 적용되어 착공한 바 있다(이은철, 2010).

원자력 선진국인 수주 경쟁국인 미국, 프랑스, 러시아를 제치고 원전 수주에 성공할 수 있었던 것은 지난 30여 년 동안의 무사고 운전을 통한 안전성 입증, 세계 최고 수준의 중공업 및 건설기술을 보유함에 따른 공기 단축과 건설 단가 등이 큰 역할을 한 것으로 알려져 있다. 그러나 30여 년 동안의 상업 운전에도 불구하고 그 동안 원전 수출을 하지 못했던 것은 원전설계핵심코드, 냉각제 펌프(RCP), 원전 계측제어시스템(MMIS) 등 핵심 기술을 보유하지 못하였기 때문이며, 정부는 2012년까지 이들 미자립 핵심 기술을 개발, 토종 신형 원전인 APR+를 조기 완성해 신규 건설되는 신울진 1,2호기에 시범 적용할 계획이다.

이와 같은 우리나라 원자력의 역사는 핵융합(연)이 2040년대를 전후해서 세계 최초로 핵융합 상용로를 수출하겠다는 목표 달성을 위해서는 한국형 핵융합실증로의 조기 건설과 운전을 통하여 반드시 경쟁국보다 먼저 원천 핵심기술을 보유해야 하고, 범국가적인 차원에서 구체적이고 철저한 상용화 전략을 수립하여 진행시켜 나가야 한다는 점을 시사하고 있다. 다음의 (그림 5)에서는 우리나라 원자력과 핵융합의 역사를 비교해 보았다.



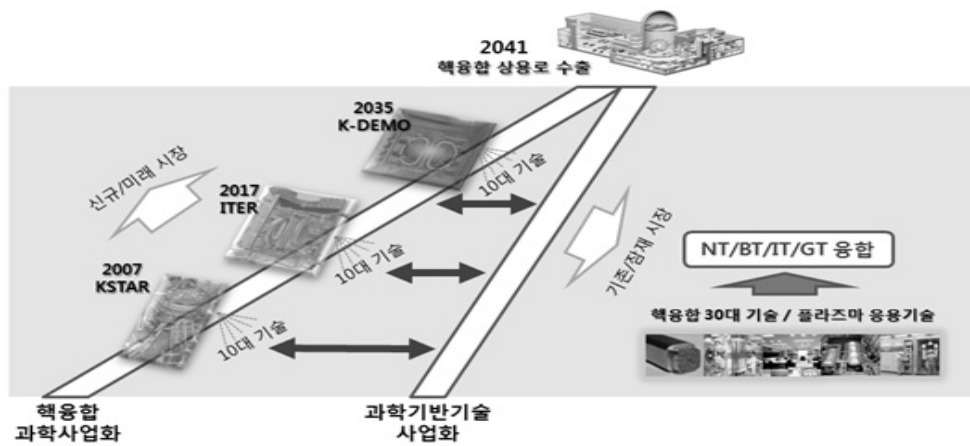
(그림 6) 우리나라 원자력 및 핵융합 역사

핵융합(연)은 다음의 (그림 6)에 나타낸 바와 같이, 4개의 주요 연구 분야의 연구개발을 바탕으로 핵융합기술 개발에 소요되는 예산을 능가 하는 국부창출 극대화를 위한 Dual Ladder Strategy 라는 개념의 과학사업화 추진 전략을 제시하고 있다(국가핵융합연구소, 2011b)

하나의 Ladder는 순차적 과학사업화 전략으로서, ① KSTAR 운영기술 개발 및 장치성능 향상

연구를 통하여 창출되었거나 창출될 초전도, 극저온 등 극한 10대 기술, ② ITER 조달품목 개발·제작 및 핵심기술 개발 연구를 통해 창출될 10대 기술, 그리고 ③ 핵융합실증로(K-DEMO) 기술 개발을 통해 창출될 10대 원천기술을 신규 또는 미래시장을 대상으로 사업화 하는 것이며, 이러한 성과를 바탕으로 궁극적으로는 2030년대 후반에서 2040년대 초반에 핵융합 상용로를 세계 최초로 수출하여 기술 도입에 의한 원자력발전소 수출보다 더 막대한 국부를 창출한다는 것이다.

다른 하나의 Ladder는 과학기반 기술사업화 전략으로서, ④ 핵융합 및 플라즈마 파생기술 상용화 연구를 통해 창출된 성과를 WCI(World Class Institute) 시뮬레이션 기법과 IT기술 연계, NT 기술과 SiC 나노분말 기술융합, MRI 초전도 자석기술과 BT기술과의 연계 등을 통하여 기존 또는 잠재시장을 대상으로 사업화 효과를 극대화 하여 핵융합에 대한 투자비용을 회수한다는 것이다.



(그림 7) 국가핵융합연구소의 과학사업화 전략(Dual Ladder Strategy)(국가핵융합연구소, 2011b)

핵융합(연)의 이러한 사업화 전략은 핵융합연구를 통해 얻어진 다양한 기술을 시장의 수요에 맞추어 확산시키기 위한 사업화 활동을 기본 개념으로 하고 있다. 핵융합연구를 통해 이미 획득하였거나 앞으로 획득할 첨단 기술에는 초고진공기술, 초고온·극저온기술, 고자장기술과 같은 극한 기술과 초전도자석, 초고온신소재 등의 첨단소재기술 그리고 대규모 데이터 처리기술과 같은 다양한 기술들이 있다. 이들 기술은 현재의 상업화 기술들의 한계를 극복하는 기초원천기술로서 향후 산업에서의 파급효과는 막대할 것으로 판단됨에 따라 핵융합(연)에서는 대형 연구장비의 공동개발 및 활용을 통한 연구개발 서비스업, 기초연구의 사업화 지원, 산·학·연 협력 강화 및 활성화에 노력해야 할 것이다. 지금까지 논의한 핵융합(연)의 사업화 추진 포트폴리오를 다음의 (그림 7)에서 정리하였다.



(그림 8) 국가핵융합연구소의 과학사업화 추진 포트폴리오

또한 핵융합(연)에서는 30여 년의 장기간 동안 추진될 사업화에 부정적 요인으로 작용할 낮은 사업화 성공률, CTO가 CEO를 같이 수행함으로써 발생할 수 있는 문제, 신규 또는 미래시장의 불확실성에 대한 문제 등에 대처하기 위해 마케팅, 재정전략, 경영기법, 지적재산권 전략 등 성공요인을 강화하는 전략도 고려하고 있다. 구체적으로는 Procter & Gamble의 Connect & Development 전략 활용, USCD의 Connect 개념 도입, 대덕특구 관련 프로그램(High up Program 등)과 연계하는 Research & Development가 아닌 Connect & Development 전략 등을 추진하겠다고 밝히고 있다(국가핵융합연구소 2011).

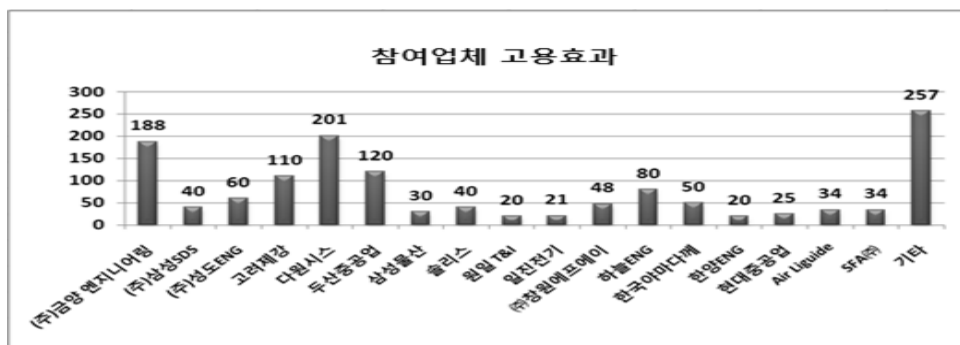
한편 핵융합(연)에서는 국부 창출 극대화를 위한 과학사업화 개념 및 방법론 정립을 통한 유관기관 성공 사례 전파, 국제과학비즈니스 벨트와 연계 가능한 모델을 확립하여 과학사업화의 성공적 추진 모델을 정립하고, 핵융합에너지 개발에 소요되는 예산보다 큰 국부를 창출하여 실질적인 국부 창출을 통한 국격 향상과 국민 생활 향상에 기여할 것을 기대하면서 핵융합 과학사업화 추진 로드맵을 다음의 <표 2>와 같이 제시하였다.

<표 2> 국가핵융합연구소의 과학사업화 추진 로드맵(2009b)

구분	관련기술	'08	'09	'10	'11	'12-'14	'15 - '20
핵융합 파생기술 개발 연구 및 기반 구축	초전도자석	저온 물성평가 기법 연구	타당성 분석 (산업체와 컨소시엄 구성)	엔지니어링 시작품 개발		1단계 상용화 제품 개발	2단계 상용화 제품
	내열재료	SiC 나노분말제조장치 설계 및 제작	타당성 분석 착수 (산업체와 컨소시엄 구성)	SiC 나노 분말 합성 조건 실험	시작품 제조 및 기술이전	상용화 제품 개발	기타 재료기술 상용화
	극저온/전력기술 등			보유기술 및 상용화 확립	타당성 분석 추진 전략	KSTAR 10대 기술 과학사업화	
상용화 후보기술 발굴 및 상용화 추진체계 확립			과학사업화 개념에 따른 핵융합 상용화 전략 및 추진체계 구축			ITER 10대 기술 정의 기술별 상용화/사업화 모델 정립	

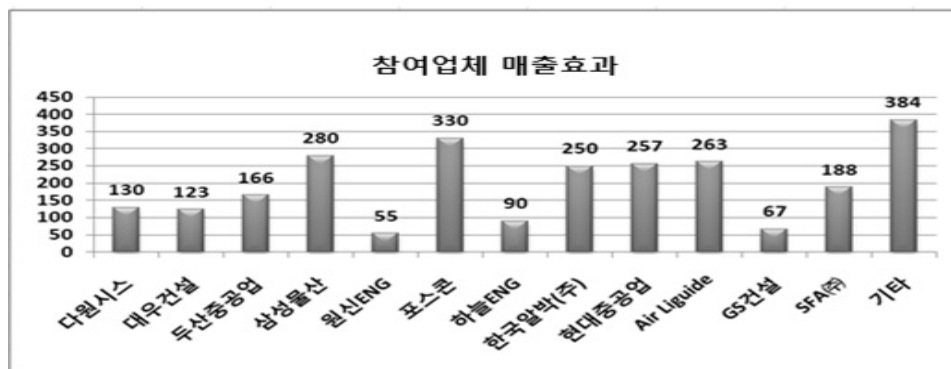
3. KSTAR 건설 및 운영을 통한 사업화 성과분석

핵융합(연)에서는 KSTAR가 완공되어갈 시점에 69개 참여업체를 대상으로 설문조사를 통하여 고용효과와 매출효과를 파악하였다. 핵융합(연)에서는 참여업체와의 전화 설문조사를 통한 조사결과에 따른 추정수치임을 전제로, 69개 참여업체의 총 고용효과는 1,378명으로 다음의 (그림 8)에 나타낸 바와 같이 20명 이상의 고용효과를 창출한 업체는 17개 업체로 파악되었다고 밝히고 있다.



(그림 9) KSTAR 건설 참여업체의 고용효과

참고로, KSTAR 건설에는 '1995년 12월부터 2007년 8월까지 총 11년 8개월이 소요되었으며, 핵융합(연) 633명, 산업계 252명, 대학·출연(연) 625명 등 총 1,510M/Y의 인력이 투입되었고, 총 69개의 산업체가 참여하였다. 참여 69개 업체의 총 매출효과는 2,586억 원으로서 다음의 (그림 9)에 열거한 바와 같이 포스콘, 삼성물산 등 5개 업체가 200억 원 이상의 매출을 올렸고, 이들을 포함한 12개 업체가 총 매출액의 85% 이상을 차지하였다.



(그림 10) KSTAR 건설 참여업체의 매출효과

핵융합(연)에 따르면 2007년에 완공된 KSTAR 장치 건설을 통해 10여 개의 첨단기술을 확보하였으며, 이들 기술성과를 세계 최고기술 확보, 핵심기술 개발 및 국산화, 시장 선점 응용기술 확보 등 3개 그룹으로 구분 하고 획득 기술과 구체적 성과를 다음의 <표 3>와 같이 제시하였다. 이들 기술 중에서 초전도 선재 기술 등은 이미 사업화 되었고, 나머지 기술들은 사업화가 추진 중에 있다.

<표 3> KSTAR 장치 건설을 통해 확보된 기술성과

구분	획득 기술	성과
세계 최고기술 확보	세계 최고 성능 초전도 선재 국산화 성공	ITER 초전도 선재의 20%를 국산품으로 공급
	초전도 전류전송장치 설계 및 제작	100억 원 규모의 수입대체 효과
	대형 초고진공 정밀진공용기 및 단열차폐기술 개발	ITER 진공용기 20%, 포트 76%, 열차폐체 전량 국산품 공급
핵심기술 개발 및 국산화	토카막 정밀 조립기술	ITER 조립기술 총괄 및 조립장비류 전체 국산품 공급 (450억 원 규모)
	대형 초전도 자석 설계-제작기술 국산화 성공	ITER 초전도 자석 및 자석구조물 시장 경쟁력 확보 (5,000억원 규모)
	초전도 자석 극저온 실험 기술	대형 초전도 자석의 극저온 냉각 시험과 고자장 발생 시험 성공
시장 선점 응용 기술 확보	진단 및 장치 제어기술 확보	플라즈마 자기 진단센서 개발 및 운전 제어기술
	전원공급장치 제작기술	폐기물 처리 및 방사선 이용 산업분야에 응용
	초고온 플라즈마 가열장치 극저온 헬륨 설비 설계 및 운영	ITER 운전시 시험기술력 선점 ITER 장치와 가속기 등 첨단분야 응용

KSTAR 건설에 참여한 기업은 보유 기술을 통해 ITER 조달 사업에도 적극 참여하고 있으며, 2011년 3월 현재 이들 기업의 매출효과는 <표 4>에서 보는 것처럼 3,150억원에 달한다. 이는 KSTAR 건설 비용 3,090억원을 상회하고 있으며, 2019년까지 ITER 조달계약 체결이 아직도 많이 남아있는 것을 고려할 때 더 늘어날 전망이다. 또한 ITER 국제기구 및 타 회원국을 통한 국내 수

주도 2011년말 현재 433억원에 달하였으며, 최근 동일본 지진 및 후쿠시마 원전하사고로 타격을 입은 일본의 수천억원 규모의 ITER 조달 품목을 대거 수주할 가능성도 높아지고 있다.

<표 4> ITER 조달품목 제작 관련 참여기업 현황

(단위 : 백만원)

구분	기업명	KSTAR 참여내용	참여기간		매출효과
			시작년도	종료연도	
1	KAT	·ITER 초전도 선재 1차분(28톤)	2009	-	28,700
2	KAT	·ITER 초전도 선재 2차분(30톤)	2010	-	30,500
3	KAT	·ITER 초전도 선재 3차분(35톤)	2011	-	32,900
4	넥상스 코리아	·ITER 초전도 도체 케이블링	2009	-	9,100
5	포스코 특수강	·ITER 초전도 도체 조관용 튜브제작	2009	-	1,900
6	현대중공업	·ITER 진공용기 본체제작 ·ITER 진공용기 포트제작	2010	-	143,400
7	에스에프에이	·ITER 조립장비 1차분 설계 및 제작	2010	-	17,300
8	(주) 원일	·ITER 조립장비 2차분 설계 및 제작	2010	-	7,300
9	대봉아크로텍	·ITER 열차폐체 설계 및 제작	2010	-	43,900

※ 출처 : 국가핵융합연구소(2012b)

이밖에도 KSTAR 참여업체들의 기술응용 및 참여효과는 항공우주분야, 반도체 공정기기분야 등에서 활용되고 있으며, 대표적 사례는 다음<표5>와 같다.

<표 5> KSTAR 참여업체들의 기술응용 및 참여효과

기업명	습득기술의 응용현황	KSTAR 참여의 효과
현대중공업	·항공우주분야 ·ITER 진공용기 및 포트 한국조달물량 공급	·매출증대 ·우수인력 유인효과 ·국제적인 기업 인지도 상승 ·기술확보
(주)다원시스	·강판 도금용 정류기 ·전기분해용 정류기 ·플라즈마 토치 전원장치	·별도의 연구부서 설치 ·우수인력유인효과 ·기업이미지 제고 및 이에 따른 용이한 사업계약 위치 확보 ·수출증대
(주)고려제강(KAT)	·ITER 초전도 선재의 한국 조달물량 공급	·매출증대 ·우수인력 유인효과 ·국제적인 기업인지도 확보 ·차세대 초전도선재 개발을 위한 기술공유
두산중공업	·Stainless 재질의 용접구조물 제작 경험으로 타 구조물 제작에 적용	·우수 인력 유인 ·회사이미지향상 ·매출증대
(주)하늘엔지니어링	·KSTAR 운영단계에서의 고진공장치, 극저온 장치 공급 ·ITER 조달품목 일부공급 ·인공위성 시험장치 제작 ·대구경천체망원경 등의 광학장비 개발에 적용	·매출증대 및 기업 확장 ·우수인력 유인효과 ·ITER 사업참여 관련 기획 확보 ·기업 이미지 및 인지도 급상승 ·유사 계약 건 관련 실적 확보
(주)에스에프에이	·항공우주분야 ·고진공 용기제작 및 반도체 공정기기 분야 ·ITER 조립장비 공급 ·ITER 현장조립 공학 설계 ·KSTAR의 가열장치 개발 참여	·항공우주분야 ·고진공 용기제작 및 반도체 ·공정기기 분야 ·ITER 조립장비 공급 및 현장조립 공학설계 ·KSTAR 가열장치 개발 참여

※ 출처 : ITER한국사업단(2010)

이외에도 핵융합(연)에서 밝히고 있는 유형별 사업화 추진현황은 핵융합 원천과학기술기반기술 사업화 유형에서 초전도자석 설계·제작 및 초전도 전류전송장치 기술과 핵융합 재료 기술(SiC 나노분

말 제작 기술) 등 2개 기술, 플라즈마 응용기술 사업화 유형에서 복합가스화기 기술과 중성입자빔 이용 반도체·디스플레이 제조장비 기술 등 2개 기술로서 구체적인 현황은 다음의 <표 6>와 같다.

<표 6> 국가핵융합연구소 핵융합 사업화 추진 현황

사업화 유형	기술명	추진 현황
핵융합 원천기술 사업화	초전도자석 설계·제작 및 초전도 전류전송 장치 기술	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 초전도 선재회사 및 MRI 제작업체와 타당성 분석 완료('09) · KSTAR 기술을 활용한 MRI 초전도 자석 기술혁신 방안 확립 · 영상 기법, 임상 검증 및 뇌과학 활용 등 부가가치 극대화를 위한 네트워크 구축 · 첨단융복합연구센터와 BT 기술 (의료기기)로 연계
	핵융합 재료 기술(SiC 나노분말 제작 기술)	<ul style="list-style-type: none"> · SiC 나노분말 : 내열재료로 항공우주 및 반도체에 활용 · 대덕특구 내 분말제조업체와 타당성 분석 완료('09) · 시장성이 큰 반도체 기판 적용 개발 등에 관한MOU 체결('09) · 첨단융복합연구센터와 NT 기술로 연계
플라즈마 응용기술 사업화	복합가스화기 기술	<ul style="list-style-type: none"> · 플라즈마 활용 혁신적 석탄가스화 복합발전 기술 : '09 기초 기술연구회 NAP 선정 · 시작단계부터 인도 현지 상용화 전략을 추진하여 현지의 전력 및 물 공급문제 해결을 위하여 분산형 전원 전략으로 2~3 MWe급 플랜트 건설 계획 · 27대 중점녹색기술인 IGCC, CCS등 GT기술로 연계
	중성입자빔 이용 반도체·디스플레이 제조장비 기술	<ul style="list-style-type: none"> · 중성입자빔 활용 반도체 Hard Mask 제조기술 개발 (㈜아토와 공동기술 개발) · 선행기술 검증, 상용화 검증 및 상용화 단계별 개발 진행 · 27대 중점녹색기술인 LED 기술 등 GT기술로 연계

IV. 결론 및 제언

우리나라에서의 핵융합 연구개발은 미국, 영국 등 선진국보다 40~50년이 뒤진 1995년에 중간진입전략으로 뒤늦게 시작되었지만, 세계적인 핵융합 연구장치인 KSTAR를 완공하여 운전을 시작함으로써 선진국 수준에 근접 하고 있다. 핵융합 연구개발의 궁극적인 목적은 에너지·기후변화 시대에 인류에게 화석에너지를 대체할 수 있고 원자력에너지보다 안전하고 무한한 청정에너지를 공급할 수 있는 핵융합에너지를 상용화하는 것이다.

그러나 핵융합 상용화를 위해서는 수억도 이상의 초고온, -269℃의 극저온, 3x10⁻⁸mbar의 초고진공 등 핵융합 극한 환경에서도 신뢰할 수 있는 극한 재료기술, 지속적인 핵융합 반응을 위한 고성능 플라즈마 유지 기술, 그리고 경제성 확보를 위한 에너지 증폭률(Q)을 50 이상으로 높이는 과학기술적 과제들을 해결해야만 가능하다. 따라서 세계의 많은 과학기술자들이 이러한 난제들을 해결하기 위해 노력하고 있으며, 과제들을 하나하나씩 풀어나가는 과정에서 과학기술적 성과들이 창출되고 산업체에 이전되어 사업화되고 있으나, 아직까지 우리나라는 물론 선진국에서도 이러한 핵융합 원천기술이나 파생기술의 사업화 성과는 미미한 실정이다.

그러나 핵융합 상용화가 성공할 경우 그 파급효과는 원자력을 훨씬 능가하게 될 것이고, 플라즈마 등 핵융합 파생기술의 사업화도 잠재시장 및 미래시장 규모를 감안하면 막대한 것이다. 따라서 핵융합(연)은 향후 진행될 30여 년 동안의 연구개발 과정에서 사업화에 필요한 제반 인프라와 노하우를 축적하여 고유의 사업화 모델을 확립해 나가야 할 것이다. KSTAR, ITER, 한국형 핵융합 실증로 개발 및 운영 단계를 거치는 핵융합 연구개발 과정에서 창출되는 유망한 원천기술, 파생기술들을 사업화함으로써 독자적인 사업화 체계를 확립해 나가야 한다. 또한 장기적인 핵융합 연구에 직·간접적인 응용기술들을 산업 내에 상용화하여 연구기관과 산업계의 상호보완적 관계를 형성해 나가야 한다. 핵융합 연구는 장기적인 연구기간과 막대한 자금을 필요로 하기 때문에 사업화를 통해 요소기술을 산업계에 지원해 수익을 창출함으로써 상호 보완적으로 관계를 유지할 수 있는 기반을 만들어 가는 것이 중요하다.

본 연구에서는 핵융합의 기초과학 연구 성과를 핵융합(연)의 과학사업화 전략인 Dual Ladder

Strategy에 따라 분석 및 향후 추진방향을 제시했다는 측면에서 의의를 가질 수 있겠다. 그러나, 그 이론적 배경이 부족하고, 아직 성공적인 과학사업화 사례가 부족하다는 점에서 보다 심도 있는 이론 연구 및 핵융합 기술을 활용한 과학사업화 성공사례 발굴 등의 후속 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- 교육과학기술부 (2012), 「제2차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립에 관한 연구」.
- 국가과학기술위원회 (2012), 「2011 과학기술연감」.
- 국가핵융합연구소 (2009), 「장기발전계획(2009-2018)」.
- 국가핵융합연구소 (2010), 「기술이전 활성화를 위한 현황 진단 및 전략 수립」.
- 국가핵융합위원회 (2011a), 「ITER 국내건설사업비 재산정 결과보고(안)」, 제4회 국가핵융합위원회 안건 3호.
- 국가핵융합연구소 (2011b), 「핵융합(연) 과학 사업화 전략의 Grand Design 기초연구」.
- 국가핵융합연구소 (2012a), 「2011년도 성과보고서」.
- 국가핵융합연구소 (2012b), 「핵융합 기술백서」.
- 국회예산정책처 (2009), 「대형연구개발사업 평가 : 핵융합에너지개발사업을 중심으로」.
- 과학기술부 (2007), 「핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립을 위한 연구」.
- 과학기술부 (2008), 「머리에서 캐는 에너지 원자력 50년 부흥 50년」.
- 기초기술연구회 (2009) 「출연(연)의 과학산업화 촉진을 위한 제도 및 정책방안 연구」.
- 손수정 외 (2009), 「「기술사업화 촉진을 위한 기술시장 메커니즘 활성화 방안」, 서울 : 과학기술정책연구원.
- 양혜영 (2006), 「기초연구 결과물의 활용과정 분석 및 평가방식 개선에 관한 제언」, 서울 : 한국과학기술기획평가원.
- 유창모 외 (2007), 「핵융합-우주의 에너지」, (주)북스힐, 서울.
- 이은철 (2010), 「원자력 해외 진출의 의의와 전망」, 「저널 물 정책 경제」, 기획특집: 18-27.
- ITER한국사업단(2010), 「ITER 사업의 과학기술 및 사회경제적 영향과 파급효과 분석」.
- 조형례 외 (2011), 「과학사업화의 전략적 경영방안에 대한 연구」 「기술경영경제학회 제39회 동계학술대회 발표논문집」.
- 황석원 외 (2010), 「거대-공공 S&T 챔피언 발굴 및 글로벌 산업화 전략」, 과학기술정책연구원.
- OECD (2002), 「Benchmarking Industry-Science Relationships」.
- Pavitt, K., (1991), 「What Makes Basic Research Economically Useful」, *Research Policy*, 20, 109-119.
- Pisano, G. (2006). 「Can Science be a Business? Lessons from Biotech」, *Harvard Business Review*, October, 114-125.
- Goldston.R.J. (2007), 「Is Fusion Research Worth It?」, *International Atomic Energy Agency*.