

⑤ 세계 핵융합연구개발 현황 및 계획

# 세계 핵융합연구 중심, 유럽에서 아시아로

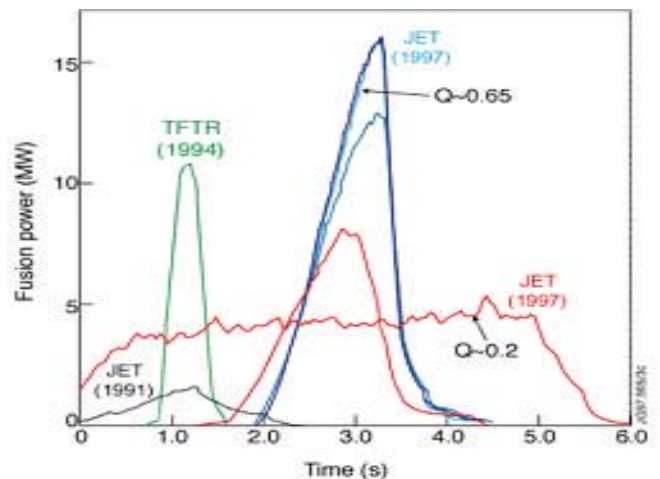
글 | 나용수 \_ 서울대학교 에너지시스템공학부/원자핵공학과 조교수 yсна@nfri.re.kr

1905년 아인슈타인이 질량결손에 의해 에너지가 발생할 수 있음을 발견해 낸 이후, 1920년대에 이르러 프랑스 에스틴과 한스 베테를 거쳐 별들의 에너지의 근원인 핵융합의 원리가 조금씩 밝혀지기 시작했다. 핵융합에너지는 연료의 풍부함, 연료의 안정성, 높은 에너지 밀도, 그리고 시설의 재활용성이라는 큰 장점으로 인하여 인류의 궁극적인 에너지원으로 대두되었다.

### 대형 '토카막' 이 세계 핵융합 연구 주도

핵융합에 대한 실험 연구는 미국, 영국, 소련을 중심으로 본격적으로 시작되었는데, 노벨 물리학상을 수상했던 조지 톰슨과 모세스 블랙만은 1946년 핵융합 발전소에 대한 특허를 출원하기도 하였다. 당시 핵융합 연구는 과학자에게뿐 아니라 정부 관계자들에게도 많은 주목을 받게 되어, 각 국가별로 비밀리에 연구가 진행되었다. 하지만 핵융합 연구가 초기의 낙관적인 예상과는 달리 난항을 겪게 되자 과학자들은 1958년 제네바의 원자력 학술회의에서 그간의 연구 결과를 발표하고, 정보를 교환함으로써 차후 핵융합 연구에서 국제적 공동 연구가 이루어질 수 있는 토대를 마련하게 되었다.

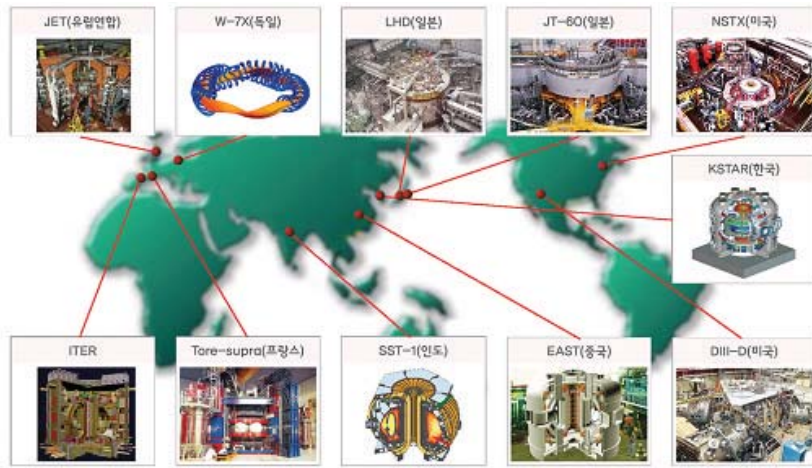
1968년에 열린 학술회의에서는 1951년 구소련의 물리학자 안드레이 사하로프와 이고르 탐이 설계한 도넛 형태의 새로운 핵융합 장치 개념인 '토카막' 이 본격적으로 등장하게 된다. 토카막은 당시 핵융합 연구가 이루어지고 있던 어떤 종류의 장치들보다 성능이 월등하다는 사실이 발표되었고, 영국의 과학자들은 레이저를 이용한 플라즈마 온도 측정 장치를 직접 모스크바로 가져가 T-3 토카막



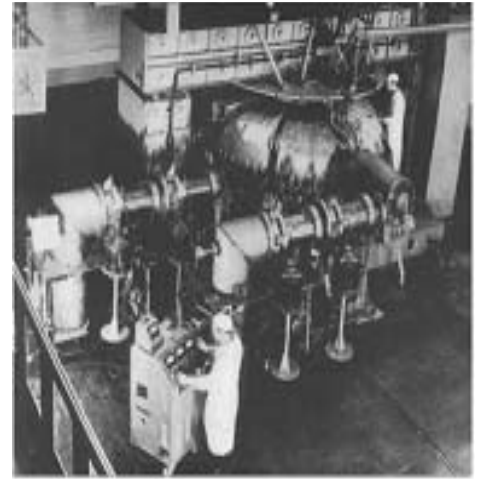
JET와 TFTR에서 중수소와 삼중수소를 이용한 핵융합 출력. Q는 전력의 입력 대 출력비

장치에서 측정된 결과, 1천만도에 이르는 전자 온도가 확인되었다. 이러한 검증 이후 토카막은 세계의 핵융합 연구를 주도하는 장치로 부상하게 된다.

1970년대에는 토카막에 플라즈마 가열 기술이 도입되어 플라즈마 온도가 핵융합 반응을 일으킬 수 있는 영역을 향하여 올라가기 시작하였고, 그에 따라 핵융합의 목표가 곧 실현될 듯이 보였다. 특히 1973년 오일 쇼크의 파동 속에서, 대체 에너지원에 대한 관심과 정치적인 지원이 뒷받침되면서 핵융합 점화를 목표로 하는 대형 핵융합장치 건설이 추진되었다. 유럽연합의 JET, 미국의 TFTR, 구



세계의 핵융합 장치들



최초로 1천만도 전자온도를 달성한 구소련의 T3 토카막장치

소련의 T-15, 그리고 일본의 JT-60가 바로 이러한 대형 토카막 장치들이다. 1982년 독일의 ASDEX 토카막 장치에서는 H-모드라는 새로운 토카막 플라즈마 운전 모드가 발견되었는데, 이를 통해 토카막 내의 플라즈마의 손실을 크게 개선할 수 있게 되었다. 1990년대는 토카막 실험에 삼중수소가 도입되어, 제1세대 핵융합발전소에 이용될 중수소-삼중수소를 이용하는 핵융합 실험이 JET와 TFTR에서 수행되었다. JET에서는 1991년 10%의 삼중수소 혼합비를 사용하여 핵융합 최대 출력을 1mw까지 올림으로써 핵융합을 제어하여 에너지를 얻을 수 있음을 확인하게 되었고, 이후 1997년에는 16mw 출력을 달성하여 세계 신기록을 달성, 마침내 핵융합의 과학적 실증이 이루어졌다.

대형 토카막 장치들을 통한 핵융합의 과학적 실증 이후 핵융합 선발국인 미국, 유럽연합, 러시아, 일본은 핵융합에너지의 실현을 위한 다음 단계로 국제공동핵융합실험로인 ITER 장치 건설을 합의하였다. 이후 중국과 한국, 그리고 인도가 새롭게 ITER 프로젝트에 가입하게 되고, 2006년 11월 프랑스 파리에서 7개 회원국이 ITER 협정에 서명, 2007년에 ITER 건설부지로 결정된 프랑스 카다라쉬에서 ITER 프로젝트 추진 임시기구가 수립되고, ITER 건설이 착공됨으로써 본격적으로 프로젝트가 가동되었다. 이제 핵융합은 과학적 실증을 넘어 공학적 실증을 위해 발을 내딛게 된 것이다.

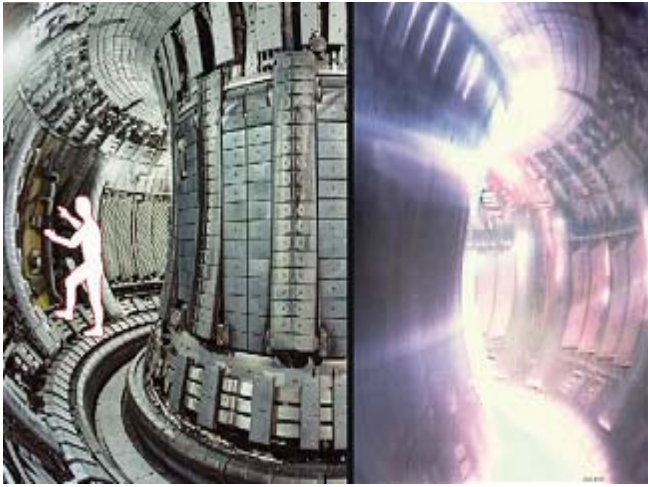
### 일본, 중국, 인도, 한국만이 초전도 토카막 보유

JET와 TFTR 등 대형 토카막 장치를 통하여 핵융합의 과학적 실

증이 이루어진 이후, 세계 핵융합 계는 핵융합의 공학적 실증과 나아가 상업용 전기 생산을 목표로 연구를 수행하게 되었다. 특히 유럽연합은 기후변화에 따르는 기상피해에 적극적으로 대처하기 위하여 2001년 기존의 50년에 걸친 핵융합에너지개발의 상용화계획을 20~30년 안에 개발한다는 소위 '지름길 계획'을 수립하고, 핵융합에너지 연구개발을 가속화하기 시작했다. 이에 자극을 받은 여타 ITER 회원국들도 유사한 핵융합에너지 상용화 계획을 수립하고 핵융합 연구를 진행하게 되었다.

동일한 맥락으로, 2007년 2월 일본 도쿄에서는 ITER 최대 투자국인 유럽연합과 일본 사이에 핵융합에너지 상용화 가속화를 위한 '폭넓은 접근' 협정이 체결되었다. 이 협정에서 유럽연합과 일본은 ITER 이후 전기 생산 실증을 위한 실증로(DEMO) 설계 및 건설을 위한 공동연구개발 조직과, 핵융합 실현을 위한 최대 관건인 핵융합 재료물질 개발을 위한 시설인 국제핵융합재료조사시설(IFMIF)의 설계 조직을 설립하는 것, 그리고 JT-60U의 업그레이드 장치인 JT-60SA를 ITER의 위성 토카막으로 건설 및 운영하는 것을 양자 합의하였다. 이로써 유럽연합과 일본은 핵융합 실증로를 위한 핵심기술인 핵융합발전소 설계 기술, 재료 기술, 그리고 노심 플라즈마 제어 기술 개발을 위한 발판을 마련하게 되었다.

한편, 지금까지 토카막 장치를 이용한 핵융합 연구개발이 주로 유럽연합, 미국을 위시한 구미 국가에서 이루어진 반면, 향후 토카막을 중심으로 하는 핵융합 연구개발은 일본, 중국, 인도, 그리고 한국을 위시한 아시아 국가로 중심점이 옮겨갈 것으로 전망되고 있



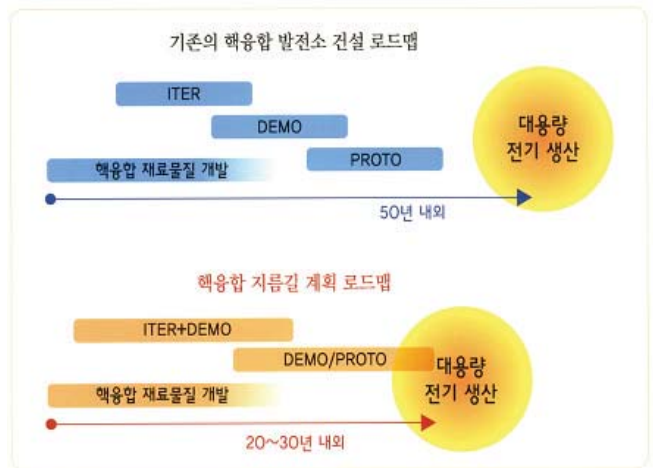
세계에서 가장 큰 유럽연합 JET토크마크 장치의 내부. 오른쪽 사진의 밝게 보이는 부분이 핵융합을 일으키고 있는 플라즈마다.

다. 일본은 앞에서 언급한 바와 같이 ‘폭넓은 접근’ 하에서 ITER 장치의 건설 완공 전에 가동하는 것을 목표로 초전도 토크마크 장치인 JT-60SA 건설을 시작하였고, 중국은 그 동안 러시아, 독일에서 가져온 토크마크 장치 운전을 통해 얻은 경험을 바탕으로, 2003년 1월 공식적으로 ITER에 가입하고, 초전도 토크마크 장치인 EAST를 건설, 2006년 9월, 최초 플라즈마를 발생시킴으로써 핵융합에너지 개발을 가속화하고 있다.

인도 역시 초전도 토크마크 장치인 SST-1을 건설 중이고, 7개 회원국 중 마지막으로 ITER 회원국으로 가입하게 됨에 따라 핵융합 에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 그리고 우리 나라는 세계 최초로 ITER 사양의 초전도 선재를 사용한 토크마크 장치인 KSTAR를 2007년 조립 완공하고, 2008년 6월 최초 플라즈마 발생에 성공함으로써 핵융합 강국으로 새롭게 부상하고 있다. 따라서 전 세계적으로 일본, 중국, 인도, 그리고 한국만이 ITER 건설 완공 전, ITER 실험과 직접적인 연관성을 가지는 핵융합 실험을 수행할 수 있는 초전도 토크마크 장치를 보유하고 되어, 향후 토크마크를 이용한 핵융합 에너지 연구 개발에 있어 아시아 네 국가들의 역할이 크게 기대되고 있다.

### 토크마크 대안 ‘스텔러레이터’ 연구개발도 활발

핵융합 실현을 위한 공학적 실증 단계인 ITER 장치가 토크마크 개념을 도입하게 됨에 따라 현재 핵융합 연구는 토크마크 장치들을 중심으로 이루어지고 있지만, 토크마크의 대안으로서 또 다른 자장 가



ITER회원국(유럽연합·일본 등)을 중심으로 수립된 핵융합에너지 개발전략 : 저비용 계획(Fast Track Plan)

동 개념인 ‘스텔러레이터’의 연구개발도 활발하게 진행되고 있다. 1999년 일본에서 작동을 시작한 초전도 스텔러레이터 장치인 LHD에서 고무적인 결과들이 발표되고 있으며, 또 다른 거대한 초전도 스텔러레이터 장치인 W-7X가 독일에서 현재 건설 중에 있다. 한편, 핵융합 에너지를 제어하는 또 다른 방법인 관성 가둠에 대한 연구도 계속 진행되고 있는데, 주로 레이저 기술과 관련하여 군사적인 목적으로 진행되고 있다. 대표적으로 미국 로렌스 리버모어 국립연구소의 국립점화시설(NIF)과 프랑스 보르도 근처에 위치한 레이저메가줄(LMJ) 시설을 들 수 있다.

아인슈타인의 질량결손에너지 발견 이후 ITER 협정에 이르기까지 핵융합 연구는 인류의 궁극적인 에너지원 개발이라는 목표를 향하여 한걸음씩 나아가고 있다. 한국도 ITER의 가입과 KSTAR의 성공적인 완공을 통해 새롭게 핵융합 선진국의 대열에 합류하고, 세계 강대국들과 더불어 핵융합에너지 개발 기간의 단축을 위해 노력을 경주하고 있다. 초기 토크마크 개발자 중 한 명이었던 구 소련의 아티시모비치 박사는 “사회가 필요로 할 때, 핵융합은 그 곳에 있게 될 것이다”라고 언급하였다. 기름값 폭등과 기후 변화에 당면한 현대 사회가 그 어느 때보다 핵융합을 필요로 하고 있는 이 때에, 핵융합의 실현을 향한 한국이 역할이 기대되고 있다.



글쓴이 서울대학교 원자핵공학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 독일 뮌헨공과대학교 물리학과에서 박사학위를 받았으며, 독일 막스 플랑크 플라즈마물리 연구소 방문 연구원, 국가핵융합연구소 선임연구원 등을 지냈다.