

## 핵융합로 개발을 위한 핵심 기술 요소 Technology Issues for Fusion Reactor

홍봉근  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

안전하고, 환경친화적인 그리고 경제적인 미래의 에너지원인 핵융합 에너지의 개발에 필요한 핵심 기술들의 개발 현황에 대해 조사하였다. 국제핵융합실험로(ITER)를 건조·운영하기 위한 재료와 관련 기술들은 현재 충분히 개발되어 있고, 산업적으로도 제작 능력이 충분하다고 판단된다. 그러나 발전로 개발을 위해서는 여러 기술 분야에서 현재 기술을 뛰어넘는 연구·개발 노력이 필요하고, 특히 블랭킷, 제1벽, 연료주기, 핵융합로 구조/재료, 안전해석 및 환경영향 평가 등과 관련한 기술개발이 필수적이다.

### Abstract

We reviewed the present status of technology development to realize fusion energy as a safe, clean and economically attractive option for future energy source. The materials and technologies for the construction and the operation of ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) are available now and industries can fabricate its components. For power reactor, R & D efforts are necessary in various technological areas, such as blanket, plasma facing components, materials and system environment & safety.

### 1. 서 론

1950년대에 시작된 핵융합에너지의 개발 노력은, 1990년대에 EU의 JET, 미국의 TFTR 등의 토카막 연구장치에서 중수소-삼중수소 연료로 핵융합 출력 달성 성공 등 과학적 분기점에 도달하였고, 1970년대에 시작한 핵융합로의 개념정립 연구에는 최근 들어, 실용화를 향한 상용 발전로 지향의 공학적 요구조건들이 현실적으로 설계에 반영되어 왔다. 그리고, EU, 일본, 미국 등의 핵융합 선진국들은 2035년경 핵융합 발전 실증로

(demonstration fusion power plant)의 운전에 의한 전기 생산과 2040년경 상용화를 목표로 구체적인 계획을 작성하여 추진에 박차를 가하고 있다.

우리나라는 지난 5월 21일 국가과학기술위원회에서 ITER 참여계획을 의결하고, 6월 참여국의 지위를 획득하여 협상에 참여해 오고 있다. ITER는 선진국들이 대부분 참여하는 대형 국제공동연구사업으로 추진중에 있어, 참여로 인해 핵융합로의 상용화시 핵융합에너지 기술보유국의 위치를 확보하여 미래 에너지 및 환경 문제를 근본적으로 해결할 수 있고, 기 참여국들에 의한 한국의 ITER 참여 승인은 국가 기술력과 국제적 위상을 격상시킬 수 있는 좋은 기회이다.

따라서, ITER의 참여를 계기로 핵융합로의 세계적인 기술개발 현황을 조사하고 분석하여, 우리나라의 핵융합로 기술 개발 추진을 위한 방안에 대하여 생각해 보고자 한다.

## 2. 국제핵융합실험로(ITER)

표. 1 ITER 설계 사양

Total fusion power	500 MW (700MW)
Q = fusion power/auxiliary heating power	$\geq 10$
Average neutron wall loading	0.57 MW/m <sup>2</sup> (0.8 MW/m <sup>2</sup> )
Plasma inductive burn time	$\geq 400$ s
Plasma major radius	6.2 m
Plasma minor radius	2.0 m
Plasma current (I <sub>p</sub> )	15 MA (17 MA)
Elongation @95% flux surface/separatrix	1.70/1.85
Triangularity @95% flux surface/separatrix	0.33/0.49
Safety factor @95% flux surface	3.0
Toroidal field @ 6.2 m radius	5.3 T
Plasma volume	837 m <sup>3</sup>
Plasma surface	678 m <sup>2</sup>
Installed auxiliary heating/current drive power	73 MW (100 MW)

ITER는 1988년 4월 미국, 러시아, 유럽, 일본이 국제공동으로 개념설계를 시작하였고, 1992년 공학설계에 착수하여, 2001년 공학설계를 완료하였다. 현재의 참여국은 유럽, 일본, 러시아, 캐나다, 미국, 중국, 한국 이고, 유치국가와 건설부지 결정, 참여국간 분담금

결정, Director-General 선정 등을 협상을 2003년내에 종결하여 2004년중 UN의 산하 기구로 발족될 계획이다. (ITER 유치 희망국은 캐나다(Clarlington), 프랑스(Cadarache), 스페인(Vadellos), 일본(Rokkasho)임) ITER는 10년에 걸쳐 건조되고, 20년 동안의 운영기간 동안 핵융합로의 부품 시험과 공학적인 기술을 실증할 예정으로 건조비용은 약 50억\$로 추산된 바 있다.

표. 2 ITER 구성 분야별 요구 기술

분야	ITER, 핵융합로 요구기술
Nb3Sn, NbYi Conductor PF/CS/CC TF coil & structure	전자기해석 기술 구조해석 기술
Vacuum Vessel	진공, 용접 기술 전자기해석 기술 중성자 차폐기술
Cryostat & Thermal shield	구조해석 기술
Diagnostics system	중성자 차폐기술
Heating system	고주파, 대용량 전원 기술 중성자 차폐기술
Pulsed power supply	대용량 전원 기술
Tritium plant	삼중수소 회수,공급
Divertor	열수력, 구조, 재료(고온,핵) 기술
Blanket	핵/열수력, 구조, 재료(고온,핵) 기술

ITER는 핵융합 열출력 500-700 MW, 핵융합증배계수(출력/입력에너지)  $Q > 10$ , 핵융합반응유지시간  $> 400$  초 등으로 설계되어, 물리적으로는, 발전로 영역의, 높은 플라즈마 압력이 비유도성 전류구동 장치들의 작용으로 준 연속적으로 유지되는 상황하에서  $\alpha$  가 열에 의해 플라즈마가 가열되는 물리적인 현상을 규명할 수 있고, 공학적으로는 대형의 고자장 초전도 자석, 제1벽, 가열/연료공급 등의 연속운전 기술과, 삼중수소 증식용 블랭킷 모듈의 시험이 가능하다. 표. 1에는 ITER의 설계사양을 나타내었다.

ITER의 건조 및 운영에 필요한 기술들은(표. 2 참조), 현재 세계적으로 충분히 개발되어

있고, 산업체에서도 설계를 바탕으로 제작 능력이 충분히 갖추어져 있다. 우리나라는 핵융합관련 연구 역사는 미미하지만, 1995년부터 시작된 국가핵융합연구개발사업으로 추진 중인 차세대 초전도 핵융합 연구장치 KSTAR의 건조사업으로, 기술력이 축적된 상태이고, 원자력 기술자립으로 구축된 원자력 산업계의 기술 수준은 ITER 장치의 구성부품을 충분히 제작할 수 있다고 판단된다. 즉, 초전도 도체, 전자석 및 지지구조, 진공용기, 저온용기와 열 차폐체, 가열/진단장치, 전원, 삼중수소 공급장치, Divertor, 블랭킷 등 ITER 장치를 구성하는 부품들에 대하여 제작을 담당할 기술 수준이 갖추어져 있고, 국내 기업과 인력이 참여하여 첨단 기술의 국내이전과 산업화에 크게 기여할 수 있다.

### 3. 핵융합로 공학기술

ITER 장치의 핵심 장치공학 기술 개발외에, 핵융합로 상용화를 대비하여, 핵융합 공학기술(fusion engineering)의 개발이 병행되어야 한다는 데에 ITER 참여의 진정한 의미가 있다. 핵융합로의 개념과 노심기술은 지난 20년 동안 적절한 설계, 재료의 선택, 제1벽과 원자력 부품들의 성능에 따라 크게 발전되어 왔다. ITER가 핵융합로 부품들을 충분히 시험하기에 부족하다는 사실을 고려하면, 경쟁력있는 에너지원으로서의 핵융합로 실현을 위해서는 노심과 관련된 기술들의 획기적인 개발이 필요하다.

안전성과 환경친화적인 측면이 핵융합 에너지를 타 에너지원과 차별화하는 주요 요인이고, 폐기물 발생과 중대사고가 일어나지 않도록 핵융합로를 설계함이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 그러나 시장경제하에서, 경제성이 입증되지 않으면 에너지원으로서 선택될 수 없다. 경제성을 좌우하는 요인은 자본투자비, 이용율, 열효율, 그리고 전력밀도 등을 들 수 있고, 이러한 요인들을 개선하기 위하여 여러 가지 기술 분야에서 혁신적인 개발이 요구된다.

먼저, 안전성과 폐기물 측면에서 저방사화 재료들의 개발이 중요하고, ferritic steel이 우선적으로 연구되어 왔는데, 열전도도와 고온에서의 기계적인 특성이 핵융합로의 재료로서의 선택을 제한하는 문제점이 있다. 이점에 관하여는 바나듐 합금이 좋은 특성을 가지고 있어 미국을 중심으로 연구되어 왔고, 장기적인 대안으로서 SiC 복합체에 대해서 계속 연구가 진행되고 있다. 핵융합로의 재료로서의 선택은 핵융합 중성자 환경에서의 시험을 거쳐야 하는데 IEA하의 국제협력으로 진행중인 IFMIF(International Fusion Material Irradiation Facility)를 통해 조사시험을 추진중이다.

핵융합반응시 나오는 중성자의 에너지를 열에너지로 변환시키는 기능을 하는 블랭킷은 ITER의 초기 10년 운영기간동안은 제열, 차폐의 기능만을 갖는 Shielding 블랭킷이 설치되고, 후반의 10년 운영기간동안, 핵융합반응에 필요한 연료인 삼중수소 증식을 위한 Breeding 블랭킷이 설치되어 ITER의 참여국이 발전로용으로 개발한 모듈들을 실증하는 계획으로 되어 있다. 현재 개발되고 있는 블랭킷들은, 열효율 40% 이상과 삼중수소 증식율을 높이는 방향으로, 냉각재와 증식재의 선택에 따라 여러 모델들에 대해 설계 연구가

진행중이고, 냉각재로서 He과 액체금속을 사용하는 것이, 증식재로서 Li ceramic과 액체금속을 사용하는 것이 바람직하다고 알려져 있다. 이러한 점에서 경수로, 액체금속로, 고온가스로 등 차세대 원자로 연구에서 이미 개발된 혹은 개발중인 핵심 기술들(핵재료, 냉각재, 감속재 등)을 참조하고 있다. 따라서, 블랭킷 설계연구는 원자력 기술과 핵융합 노심 기술이 접목되는 핵융합 공학기술의 요체이다.

제1벽은 핵융합로에서, 리미터, 디버터, 고주파 안테나 등과 같이 고온의 플라즈마와 접하게 되어, 재료와 공학적 설계가 매우 중요하다. 제1벽 재료의 부식, 수명 문제는 플라즈마 성능에 지대한 영향을 미치게 된다. 부식 문제 외에도 높은 열부하 및 중성자 부하, 전자기적 부하 등에 대하여 충분히 고려되어야 한다. ITER에서는 W, CFC 등을 채택하고 있고, 이 재료들의 열부하에 대한 시험여건(10-20 MW/m<sup>2</sup>)을 제공하리라 생각된다.

#### 4. 요약

- 토카막 장치공학:** 초전도전자석, 고진공, 전원, 가열/진단, 초고온 재료, Remote handling, 열수력
- 블랭킷:** Neutronics, 삼중수소, 열수력, 핵/구조재료, 액체금속
- 연료주기:** Neutronics, 삼중수소, 열수력, 핵/구조재료, 안전성해석
- 핵융합로 시스템:** NSSS기술, 안전성해석, 방사선차폐, 폐기물/폐로

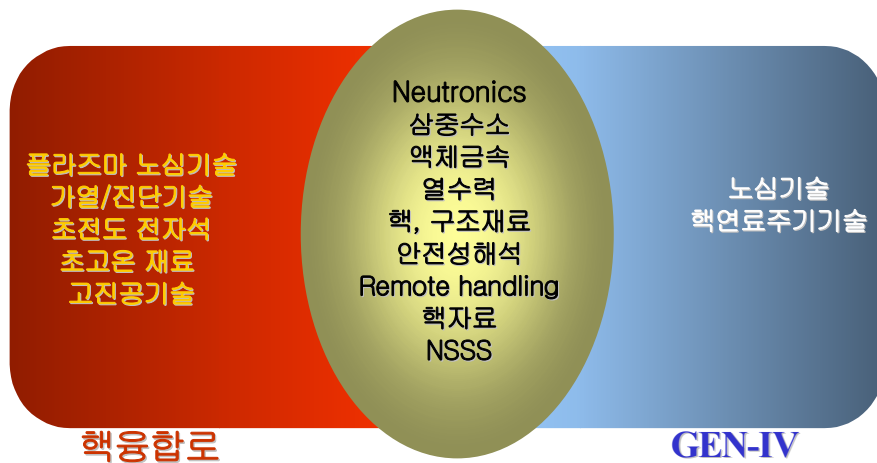


그림 1 핵융합로와 원자력기술

우리나라는 지난 십수년간의 노력의 결과로 G-5 수준의 원자력기술이 이미 확보되어 있고, 발전로 지향적인 핵융합연구를 할 수 있는 좋은 위치에 있다. (그림 1 참조) 따라서 ITER 참여와 동시에 발전로 핵심기술들, 블랭킷, 연료주기, 핵융합로 구조/재료, 시스템 기술 등의 단계적인 개발을 착수하여야 할 시점이다. 장기적으로는 ITER 진행,

DEMO/PROTO 추진 등의 국제적 동향을 감안하여, 핵융합로 부품시험 또는 삼중수소 공급을 목적으로 하는 발전시험로의 개발을 추진하여 독자적인 한국형 표준 핵융합로의 모델을 개발하여, 경.중수로 - GEN IV - 핵융합로 로 이어지는 계통적 공학기술 측면에서 원자력발전로 개발체계를 확립하여야 할 것이다.

ITER 참여와 그에 따른 핵융합로 기술개발을 위해서는, 물리학자들외에도, 재료, 기계 및 핵공학 등 여러 분야의 공학기술자들의 많은 참여를 필요로 하여, 인력 확보와 효율적인 활용에 대해 고려해야 하고, 전기생산으로 이어지기 위해서는 장기적인 기반연구와 그에 따른 투자가 병행되어야 한다.