

# 핵융합로의 연구현황 및 관련 재료 연구동향

유인근, 손수정, 조승연 | 핵융합연구센터

## 1. 서론

핵융합 반응은 “수소와 같은 가벼운 원자핵들이 높은 에너지 상태에서 서로 충돌하면서 융합하는 원자물리학적 인 반응”을 말한다. 이때 핵융합반응으로 새롭게 생성된 물질의 질량이 융합하는 두 물질의 질량의 합보다 작아 그 질량결손 에너지가 열과 방사선에너지의 형태로 방출된다. 그 예가 태양이 열과 빛을 내는 반응이다. 태양의 중심부를 살펴보면 약 2000만도의 온도와 4500억 기압의 압력 속에서 수소 이온들이 핵융합을 한다. 이러한 초고온, 초고압속에서는 이온과 전자가 분리되어 플라즈마 상태로 되며, 원자핵인 수소이온들이 시속 100만 km이상의 속도로 서로 충돌하여 열핵융합 반응을 한다. 그러나 지구상에서는 태양 중심부에서와 같은 조건을 만들 수가 없다. 따라서 수소가 아닌 다른 물질(중수소 및 삼중수소)을 사용하여 다른 온도와 압력 조건에서 핵융합을 실현하여야 한다. 지상에서는 태양에서보다 온도는 더 높이고 그 대신 압력을 낮춰서 열핵융합을 시도하고 있다. 즉, 핵융합로 속에 연료를 넣고 초고온으로 유지하면 플라즈마 상태가 되고 이온들은 맹렬한 속도로 움직이면서 서로 충돌을 반복하는 사이에 핵융합 반응이 일어난다. 핵융합 과정을 쉽게 얘기하면 영원히 에너지를 발산하는 태양이나 별의 에너지원과 같은 것이다. 이 과정은 수소(또는 헬륨3)와 같은 두 개의 가벼운 핵이 헬륨과 같은 더 무거운 핵으로 변하는 것으로 설명할 수 있으며 그림 1에 핵융합 반응의 개념도를 나타내었다. 이 과정에서 수소의 질량 중 얼마가 에너지로 바뀌는데, 이 에너지가 핵융합에 의해서 나오는 것이다.

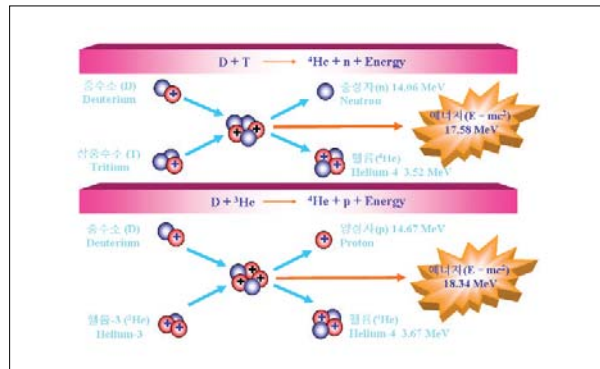


그림 1. 핵융합 반응의 개념도

상업성이 있는 에너지원으로 가장 유망한 반응은 중수소(Deuterium) - 삼중수소(Tritium) 혼합물을 쓰게 될 가능성이 크다. 왜냐하면 D-T 반응이 비교적 낮은 온도에서, 다른 반응들보다 더 많은 효율을 내기 때문이다. 바닷물은 경제적으로 추출해낼 수 있을 만큼 중수소를 많이 포함하고 있지만, 삼중수소는 자연계에 존재하지 않으며 천연 리튬의 두 동위원소들을 중성자와 충돌시켜서 만들 수 있다. 여기에 필요한 삼중수소는 원자로의 작동 중에 나오는 중성자를 흡수하도록 리튬을 넣어주어 핵융합 반응 자체로부터 만들 수 있는 것이다. 에너지가 큰 중성자에 의해 가열된 액체리튬을 원자로의 증기 발생기 사이를 순환시킴으로써 에너지를 전환시키는 데에도 사용할 수 있다. 이 증기는 화석연료나 핵분열을 사용하는 화력 및 원자력 발전소와 마찬가지로 발전기에 연결된 터빈을 돌리는데 사용된다. 그림 2에는 초전도 핵융합 발전의 개념도를 나타내었다.

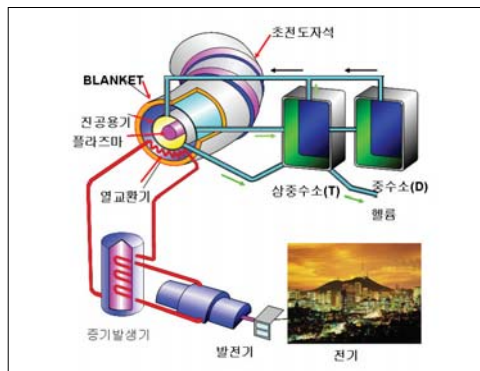


그림 2. 초전도 핵융합 발전의 개념도

## 2. 핵융합로의 연구개발 현황

1952년 수소 폭탄의 형태로 인류에게 첫 선을 보인 핵융합기술은 핵분열 기술과 같이 쉽게 상용화를 이룰 수 있을 것이라는 초기 예상과는 달리 초고온 플라즈마를 안정적으로 제어하는 기술 개발의 어려움으로 인해 큰 발전을 이루지 못했다. 그렇지만 1968년 구소련 과학자들에 의해 고온의 플라즈마를 안정적으로 밀폐시킬 수 있는 토카막 장치가 개발되었으며, 1970년대의 오일 쇼크와 함께 신 에너지원 개발에 대한 요구가 커지면서 미국, 독일, 일본 등을 중심으로 토카막을 이용한 핵융합 연구가 본격적으로 시작되게 되었다. 그 결과 1980년대에 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), 유럽연합의 JET(Joint European Torus), 일본의 JT-60(Japan Tokamak) 등이 완성되었으며 이들 장치는 1990년도 이후에 breakeven(입력에너지=출력에너지)을 달성했다(후술되는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)는 입력대비 10배의 출력값을 목표로 하고 있다). 그림 3에 년대별 플라즈마 온도와 밀도의 향상 그래프를 나타내었으며 1990년 이후에 breakeven에 도달하는 것을 알 수 있다. 현재는 유럽연합의 '유럽 공동연구 토러스(JET)', 독일의 'ASDEX-U', 미국의 'DIII-D', 일본의 'JT-60U' 등과 같은 중대형 토카막형 핵융합 실험시설을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국가별로는 일본의 일본원자력에너지기구(JAEA), 독일의 막스플랑크(Max Planck Institute), 프랑스의 Commissariat l'Energie Atomique(CEA), 미국의 Oak Ridge National Institute(ORNL) 등이 중심이 되어 핵융합 관련 연구를 진행하고 있는 상황이다.

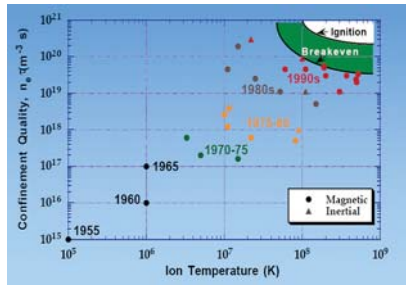


그림3. 플라즈마 온도와 밀도의 향상 그래프

1988년 유럽, 미국, 일본, 러시아 등의 핵융합 선진국들은 핵융합 발전소 건설에 필요한 물리적·기술적·경제적 문제를 극복하기 위하여 서로 협력을 기반으로 국제열핵융합실험로(ITER) 건설에 합의했다. 그 후 여러 가지 우여곡절이 있었지만 2005년 6월 유럽연합, 미국, 러시아, 일본, 한국, 중국 등 6개 참여국의 의견일치 하에 ITER 건설부지가 프랑스 까다라쉬로 결정되었다. 2005년말 인도가 추가로 ITER 건설에 참여함으로써 현재는 7개국이 참여하고 있으며 2006년 11월 참여국들의 최종 인준이 있었으며 현재는 ITER 사무국을 중심으로 건설이 진행되고 있다. 그림 4는 ITER 장치의 단면도를 나타낸 것이다. 주장치는 직경 및 높이가 각각 약 30m, 무게가 약 30,000톤에 이르는 초대형 장치로 조립기술은 KSTAR 건설의 경험을 축적한 우리나라가 많은 부분을 주도하고 지원하게 된다.

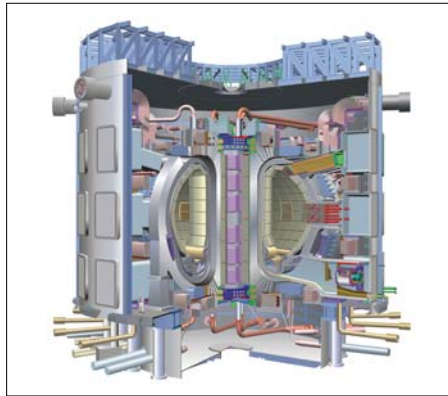


그림 4. ITER 장치의 단면도

표 1은 ITER 장치의 각 부위별 재료를 정리해서 나타낸 것이다<sup>[1]</sup>. ITER의 주장치 설계가 완료된 시점이 1990년대 중반이기 때문에 설계당시 검증된 재료를 위주로 선정되었다. 현재, 보다 특성이 향상된 재료들이 개발되고 있지만 검증절차를 마치고 적용하기에는 시간이 부족한 상황이다.

핵융합로 재료의 중성자 조사 특성평가를 위한 시험시설을 건설하기 위해 IEA(International Energy Agency) 산하의 국제 중성자조사 시험 설비(International Fusion Materials Irradiation Facility : IFMIF) 개발 조직이 있으며 2020년 장치 개발완료를 목표로 준비 중에 있다.

표 1. ITER 장치의 부위별 재료

Plasma Facing Materials	Blanket/Limiter first wall	Sintered beryllium plates or plasma spray beryllium
	Divertor target	Carbon-fiber composite (CFC) - 3D
	Other divertor areas	Pure tungsten rolled plates
High thermal conductivity layer		CuCrZr or DS Cu, pure copper as compliant layer
Structural materials		Austenitic steel 316L(N)-IG, Austenitic steel 304
In-wall shielding for the vacuum vessel		Borated steel 304B7 (for shielding) and Ferritic steel 430 (for ferromag. insert)
Blanket flexible support		Ti alloy T-6Al-4V mill annealed
Fastening Bolts	Blanket module support	Alloy 718
	Port plug flange	Alloy 718, Precip. hardened steel 660
Blanket module electrical connector		CuCrZr plates
Pads for the keys		CuCrZr or Aluminum bronze
Electrical insulation layer		Plasma-sprayed Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> or MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

### 3. 핵융합로의 개발 방향

블랭킷의 유형은 핵융합로의 특징을 결정짓는 매우 중요한 요인이며, 특히 블랭킷 구조재의 개발 정도는 핵융합로의 설계 및 활용 온도범위를 확장시킬 수 있는 핵심기술에 해당된다. 뿐만 아니라 냉각재를 고려한 구조 및 증식재료의 적절한 조합은 핵융합로의 효율성과 연속운전을 결정짓는 요인 중의 하나이다. 현재까지 한국, 유럽연합, 미국, 일본, 러시아, 중국, 인도 등이 제시한 블랭킷 유형은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 세라믹 증식재 + 페라이트/마텐사이트 강 구조재료
  - 가. 수냉각
  - 나. 헬륨 냉각
- 2) Pb-17Li + 페라이트/마텐사이트 강 구조재료
  - 가. 이중 냉각 블랭킷
  - 나. Pb-17Li 블랭킷 + 수냉각
- 3) 바나듐 합금강 구조 재료 + 리튬 자체냉각
- 4) SiC<sub>f</sub>/SiC + 액체 또는 세라믹 증식재
  - 가. SiC<sub>f</sub>/SiC + Pb-17Li
  - 나. SiC<sub>f</sub>/SiC + 세라믹 증식재
- 5) 그 외
  - 가. 텅스텐 합금 블랭킷 + 리튬 증발 냉각
  - 나. 페라이트(또는 다른 구조재료) + FLiBe

지난 수 십년 동안 핵융합 연구를 수행한 유럽연합, 미국, 일본 등의 국가들은 최근에 DEMO 핵융합로를 위한

개념설계를 수행하고 있다. 각 구성요소의 운전 조건에 따른 후보소재 선정을 추진하였고, 그 결과를 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 유럽연합, 미국 및 일본의 증식 블랑켓 개념과 재료

Country	Model	Breeder	Multiplier	Coolant	Structure
EU	HCBP	$\text{Li}_4\text{SiO}_4(\text{Li}_2\text{TiO}_3)$ (pebble bed)	Be(pebble bed)	He	FMS
	WCLL	Pb-17Li	•	$\text{H}_2\text{O}$	FMS
	DC	Pb-17Li	•	Self+He	FMS
US	ARIES-RS	Li	•	Self	V alloy +CaO Ins. Layer
	ARIES-AT	Pb-17Li	•	Self	$\text{SiC}_i/\text{SiC}$
	EVOLVE	Li	•	Li(evap.)	W alloy
JP	SSTR	$\text{Li}_2\text{O}(\text{Li}_2\text{TiO}_3)$ (pebble bed)	Be(pebble bed)	$\text{H}_2\text{O}$	FMS(F82H)
	A-SSTR2	$\text{Li}_2\text{TiO}_3$ (pebble bed)	Be(pebble bed)	He	$\text{SiC}_i/\text{SiC}$
	FFHR-2	FLiBe	Be(pebble bed)	Self	FS

표 3. 각 나라별 ITER TBM 개념 및 예상 재료

국가	TBM 개념		구조재	증식재
중 국	고체	Helium Cooled Solid Breeder	LAFM(CLAM)	$\text{Li}_4\text{SiO}_4$
	액체	Dual Cooled Lithium Lead or Quasi-Static Lithium Lead	LAFM (CLAM)	PbLi
유럽연합	고체	Helium Cooled Pebble Bed	LAFM (EUROFER)	$\text{Li}_4\text{SiO}_4(\text{Li}_2\text{TiO}_3)$
	액체	Helium Cooled Lithium Lead	LAFM (EUROFER)	Pb-17Li
일 본	고체	Water Cooled Solid Breeder Helium Cooled Solid Breeder	LAFM (F82H)	$\text{Li}_2\text{TiO}_3$
	액체	Li Self Cooled w/o Be Dual Cooled Lithium Lead Flibe Self Cooled		
러시아	고체	Ceramic Helium Cooled	FS 9CrMoVNb	$\text{Li}_4\text{SiO}_4$
	액체	Lithium Self Cooled	V-Cr-Ti	Li
미 국	고체	Helium Cooled Ceramic Breeder	LAFM(ORNL)	$\text{Li}_4\text{SiO}_4(\text{Li}_2\text{TiO}_3)$
	액체	Dual Cooled Lithium Lead	LAFM(ORNL)	Pb-17Li
인 도	고체	Helium Cooled Ceramic Breeder	LAFM	$\text{Li}_4\text{SiO}_4(\text{Li}_2\text{TiO}_3)$
	액체	Lithium Lead Cooled Ceramic Breeder	LAFM(Li-V)	Pb-17Li
한 국	고체	Helium Cooled Solid Breeder	LAFM	$\text{Li}_4\text{SiO}_4$
	액체	Helium Cooled Molten Lithium	LAFM	Li

이러한 DEMO 개념들을 토대로 ITER에 시험 블랭킷 모듈(Test Blanket Module)을 설치하고 블랭킷의 성능을 평가하려는 연구가 계획되고 있다. ITER에 참여하고 있는 7개국이 Test Blanket Working Group (TBWG)을 형성하여 각국의 관심사를 중심으로 공동연구를 수행하고 있다. TBM 연구에서는 블랭킷 유형에 따른 electro-magnetics, neutronics, tritium production, thermo-mechanics와 plant integration에 대한 특성평가를 고려하고 있으며, 이로부터 얻어진 결과가 DEMO 및 발전로의 설계와 건설을 위한 핵융합로 기술 발전에 중요한 역할을 하리라 기대하고 있다. TBM 제작을 위한 블랭킷 설계에서 대부분의 국가들이 FM 강을 구조재료로 고려하고 있다. 증식재료는  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ 나  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 와 같은 세라믹 재료와 Li 혹은 Pb-17Li과 같은 액체 금속 및 용융염을 중심으로 설계가 진행되고 있으며 표3에는 ITER에 참여하는 각 나라가 제시한 TBM 개념 및 예상 사용재료를 정리해서 나타내었다.

TBM 개념은 크게 고체형과 액체형으로 구분할 수 있으며 고체형의 경우 기술적 성숙도도 높고 삼중수소 회수도 용이하지만 액체형에 비해 삼중수소 증식비율도 낮고 증배재를 별도로 사용해야하며 중성자 조사에 따른 손상이 크고 방사선 폐기물로 남는 것이 단점이다. 액체형의 경우 현재까지는 고체형에 비해 기술적인 성숙도가 낮은 편이고 삼중수소 회수 등의 어려움이 있으며 구조재료를 쉽게 부식시키는 등의 단점이 있다. 따라서 각 나라마다 장단점을 고려해서 TBM을 선정하고 연구개발을 진행하고 있으며 2015년까지는 납품완료 되어야 한다<sup>[2]</sup>.

#### 4. 핵융합로 재료의 연구개발 동향

핵융합로 재료문제는 ITER 이후의 핵융합로 시스템 실현을 위한 핵심 기술로 고려되고 있으며, 핵융합로에서는 고에너지 중성자에 의한 영향, 플라즈마에 의한 영향 등 핵분열 에너지 시스템과 다른 새로운 운전환경에 따른 재료문제가 훨씬 크게 부각되기 때문에 각 구성요소별로 다양한 소재가 요구되고 있다. 특히, 플라즈마를 중심으로 블랭킷까지에 위치하는 구조재료는 14.1MeV의 중성자에너지와  $10\text{MW/m}^2$ 의 heat flux라는 매우 혹독한 운전 여건에서 특성을 발휘해야 한다. 따라서 적정 소재의 개발 및 신뢰성 높은 물질(성능)자료가 운전효율이 높은 핵융합로 실현을 위한 선행요소가 된다. 따라서 핵융합로 선진국이라 할 수 있는 미국, 일본, 유럽연합, 러시아에서도 주로 구조재료와 플라즈마 대면재료에 많은 연구개발을 집중하고 있다. 또한 IEA(International Energy Agency)의 fusion material 관련 공동연구 프로그램과 nuclear technology of fusion reactors 관련 공동연구 프로그램에서도 RAFM(Reduced Activation Ferritic/Martensitic) 강, ODS(oxide dispersion strengthened) 강, 바나듐 합금, SiC/SiC 복합체, Be, 절연체, 세라믹 증식재, 플라즈마 대면재와 관련된 공동연구가 미국, 일본, 유럽연합, 러시아 등이 참가한 가운데 수행되고 있다<sup>[3-4]</sup>. 그렇지만 대부분은 구조재료를 중심으로 한 연구개발 프로그램이며, 단기적으로는 ITER TBM을 대비하고 장기적으로는 DEMO 및 발전로를 대비한 재료기술 고도화 과정이라 할 수 있다.

표 4에는 ITER, DEMO 및 상용로 블랭킷 재료의 물리요구 값을 나타내었다. ITER의 블랭킷 구조재료는 중성자 조사에 의해 3dpa 정도만 견디면 된다. 그렇지만 DEMO에서는 30 dpa, 상용로에서는 100 dpa 이상의 값에서도 견딜 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 헬륨과 수소의 함유량 및 보다 고온에서 견딜 수 있는 물질이 연구 개발되어야 핵융합 발전을 실현시킬 수 있다.

표 4. ITER, DEMO 및 상용로 블랑켓 재료의 물리요구 값

Factors	ITER	DEMO	Commercial Reactor
Damage	3dpa	30dpa	>100dpa
Helium	45appm	450appm	>1500appm
Hydrogen	120appm	1200appm	>4000appm
Temperature	573K	823K	973K

그림 5는 핵융합로 구성요소별 단면도를 나타낸 것이다. 플라즈마와 접하는 제1벽과 블랑켓, 진공용기, 자석, 저온용기 등으로 구성된다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 제1벽과 블랑켓이 가장 열악한 환경에 놓여 있다는 것을 알 수 있다. 현재까지 개발된 제1벽 및 블랑켓 후보재료를 살펴보면 텅스텐, 텅스텐 합금, 베릴륨, 베릴륨 합금, 탄소 복합재료 등이 있으며 블랑켓 구조재료로는 RAFM강, ODS강, 바나듐합금, SiC/SiC 복합재료 등이 있다. 그 외에도 삼중수소 증식재료로는 Li based oxides, Liq. Li (Li, Li-Pb), FLiBe 등이 있고 증배재료로는 Be, LiPb 등이 있다. 냉각재료로는 Li, LiPb, He, Molten salt, Water 등이 고려되고 있으며 초전도 자석재료로는 Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> 및 HTS(고온초전도) 재료 등이 고려되고 있다.

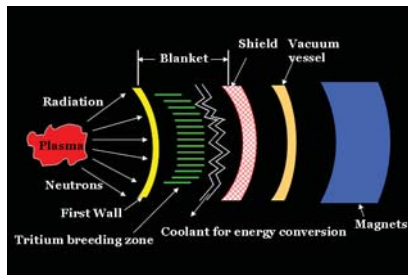


그림5. 핵융합로 구성요소별 단면도

그림 6에는 후보 구조재료들의 사용가능 온도 영역을 나타내었다. 하한영역은 조사경화와 취화를 고려한 영역이며, 상한영역은 150 MPa 크립강도와 화학적 안정성을 고려한 영역이다. 이들 후보 재료들에 대한 연구는 각 나라마다 별도의 프로그램에서 추진하고 있는 경우가 많으며 핵융합로 이외의 목적으로 개발되어지는 재료도 있다. 이들 재료 중에서 FM강, ODS, 바나듐합금, SiC/SiC 복합재료는 저방사화 구조재료로 많은 관심의 대상이 되고 있으며 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[5]</sup>.

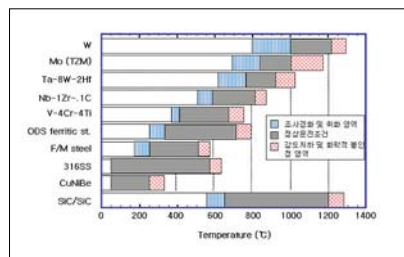


그림 6. 핵융합 발전로용 구조재료들의 작동 온도 영역



각 국에서 보다 집중적인 연구가 진행되고 있는 구조재 및 플라즈마 대면재의 연구개발 현황을 살펴보면, 개발된 대표적인 FM강의 경우 일본의 F82H, 미국의 ORNL3971 및 유럽연합의 Eurofer97 등이 있고, 핵융합로 소재로서의 저방사화 특성을 고려하여 Ni, N의 함량을 최소화한 합금이다. 일본이 IEA 프로그램을 통하여 데이터베이스를 구축하고 있는 F82H강은 Cr의 함량(7.7% 정도)의 감소로 취성을 감소시키고, Ta 등의 첨가로 크리프 파단 강도를 향상시킨 강이다. 미국에서는 9Cr강에 W과 Ta를 첨가한 자료에 대한 데이터베이스를 구축하고 있고, 유럽에서는 Eurofer를 후보재로 선정하여 물리적, 기계적 특성 및 조사특성에 대한 연구를 거의 완료한 상태이다. FM강은 조사팽윤과 He취성에 대한 저항성이 크고 물, 가스 및 액체 금속 냉각재와의 양립성이 우수하다는 장점이 있으나, 크리프 강도의 감소로 인해 사용온도가 550 정도로 제한된다는 점과 자성특성으로 인한 설계상의 어려움 등의 문제점도 가지고 있다. 현재는 유럽, 일본, 미국, 중국을 중심으로 저온조사경화, He과 수소에 의한 파괴 특성 변화, 고온 크리프 강도 감소 등의 문제점을 해결하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 표 5에는 이들 재료의 성분을 정리해서 나타내었다.

표 5. EUROFER97, F82H의 성분비(wt%)

	FMS	C	Mn	Cr	W	V	Ta	N
EU	EUROFER97	0.11	0.40	9.0	1.1	0.20	0.12	0.03
Japan	F82H	0.09	0.16	7.7	1.94	0.16	0.02	0.006
USA	ORNL3971	0.10	0.40	9.0	2.0	0.25	0.07	

ODS FM강의 경우는 분산 강화 산화물로 Yttria가 최적 물질로 알려져 있으며, 사용온도를 650°C까지 향상시킬 수 있다. 일본에서는 미소 합금 원소들의 영향 등에 대한 연구를 병행한 미세 Yttria 입자의 초미세화와 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 확인한 바 있고, ODS 합금의 접합, 양산체제 구축 등에 주력하는 한편 연구로에서의 중성자 조사시험 및 데이터 축적에 주력하고 있다. 특히 고온강도를 높이는 연구와 함께 두꺼운 부품 제작에 있어서의 새로운 제조공정도 모색 중이다. 유럽에서는 Eurofer에 Yttria를 첨가한 ODS 합금의 개발에 주력하고 있고, HFR 원자로를 이용하여 250~450°C 온도영역에서 15dpa 수준까지 중성자 조사시험을 수행한 상태이다. ODS 합금강은 FM강에 비하여 더욱 개선된 인장 특성 및 크리프 특성을 보이지만, 충격 파괴 특성 부분에서 아직 개선할 여지가 많이 남아 있고, 이와 관련하여 불순물의 조절 및 제조과정의 개선 등을 중심으로 한 연구가 진행되고 있다.

더 높은 온도에서의 내방사선 특성이 우수한 소재 개발에서의 대표적인 후보재료는 바나듐 합금과 SiC<sub>i</sub>/SiC 복합재료가 있다. 바나듐합금은 V-4Cr-4Ti이 주 후보소재로 주목받고 있으며 대부분의 연구는 이 합금에 집중되어 있다. 미국에서는 G.A. (General Atomics)사에서 잉곳(ingot)을 시험 제조하고, ANL 및 ORNL 등과의 협력을 통한 파괴인성 및 조사특성 등의 제반특성평가를 수행한 바 있다. 일본에서는 NIFS에서 100kg급 V 합금을 제조한 바 있으며, 불순물(산소) 농도가 약 180ppm 정도로 매우 낮아서 기계적 특성이나 조사특성이 더욱 우수할 것으로 기대되고 있다. 특히, V 합금은 액체 리튬과의 양립성이 타 금속소재에 비하여 우수하여 액체리튬을 블랑켓 소재로 V 합금을 구조재로 하는 블랑켓의 경우 타 블랑켓 개념들에 비하여 더 높은 온도에서 가동할 수 있고 증식재 교체가 불필요하므로 효율이 더욱 높은 블랑켓 설계가 가능하게 된다. 운전온도는 700°C까지 향상시킬 수 있다.



반면, 합금개발과 관련하여서 침입형 원자들(C, O, N)의 영향에 대한 이해가 부족한 상태이고, 기계적 특성과 관련하여서는 크리프 강도를 더욱 개선시켜야 할 필요가 있으며, 조사 특성에 대한 연구도 더욱 추가되어야 하는 실정이다.

SiC/SiC 복합재료의 개발 연구는 DEMO 및 상용로에서 요구되는 설계요건을 만족하는 재료를 개발하고 특성을 향상시키기 위한 것이다. SiC/SiC 복합재료를 블랭킷의 구조재로 고려하고 있는 핵융합로 개념으로는 미국의 ARIES-I, ARIES-IV, ARIES-AT, 일본의 DREAM, A-SSTR2, 유럽의 TAURO 등이 있다. SiC는 열적, 기계적, 화학적 안정성이 우수하며 중성자 조사에 의한 유도 방사능이 매우 낮은 재료 특성을 가지며, 특히 고온강도 특성으로 운전온도를 충분히 높일 수 있어서 45~60%에 이르는 열효율을 얻을 수 있다는 점과 낮은 전기 전도도로 액체금속을 냉각재로 사용할 때 발생할 수 있는 MHD(Magnetohydrodynamics) force를 줄일 수 있다는 특징 때문에 핵융합로의 노내 구조물 후보재료로 유력하게 고려되고 있다. 하지만 물성연구 및 제조, 접합연구 등이 아직 확립되어 있지 않아 소재개발의 여지가 많으며 고온, 조사환경에서의 성능에 대한 불충분한 자료 확보로 많은 연구개발이 요구되고 있다.

한편, 플라즈마 대면재료에서 핵융합로 내부 구성 요소 중 플라즈마에 직접 접촉하는 부분(PFC)의 온도는 500~1000°C에 이를 것으로 예상되며 기존에 개발된 내열강이나 초합금 등을 사용하기에는 무리가 있다. 또한 내벽면 소재는 핵융합로에서 발생한 열을 블랭킷 등에 효과적으로 전달해야 하므로 열전도도가 높아야 하며, 동시에 중성자 조사에 장기간 노출되어도 특성 저하가 적어야 한다. 현재 대면재료로는 텅스텐(W), 베릴륨(Be), 탄소섬유복합체(CFC) 등이 고려되고 있으며, 이들에 대한 연구는 전세계적으로 매우 활발하게 진행되고 있다.

## 5. 결론 및 토의

최근 핵융합에너지가 차세대 에너지원으로 부각되고 있다. 지금까지는 주로 유럽연합, 미국, 일본, 러시아 등이 중심이 되어 연구개발이 진행되어 오고 있지만 2006년말 ITER 건설이 인준되면서 전세계적으로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 서술된 것과 같이 핵융합에너지 시스템은 높은 중성자 fluence 및 운전온도로 인해 매우 열악한 시스템 운전조건 상태에 놓이게 된다. 따라서 이런 환경에 견딜 적정 재료의 개발은 필수 불가결의 조건이다.

국내 핵융합 연구는 1970년대 말부터 시작되었으며 SNUT79(서울대), KAIST 토카막, KT1(원자력연구소), KSTAR(핵융합연구센터)를 비롯한 여러 기반 구축에 따른 관련 연구에도 불구하고, 한국형 핵융합 발전소 건설을 위해 필수적인 핵융합로용 소재 관련 연구는 아직 해결해야 할 많은 과제를 안고 있다. 그러나 많은 후보재료가 일반 산업용 소재를 목표로 활발히 연구개발 중에 있으며, 이에 따른 경험이 핵융합로 재료 개발에 많은 도움을 주리라 판단된다. 또한 빠른 시일내 기술 선진국과의 연구교류 실현 등을 통한 부족한 연구 인프라의 극복 노력도 요구된다. 이러한 연구가 성공적으로 수행될 경우 핵융합을 통한 인류의 에너지 문제를 획기적으로 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 재료 연구와 관련된 각종 제조 및 물성평가 기술의 개발은 다양한 산업적 응용 분야를 가지고 있기 때문에 기술이전을 통한 기술적, 경제적 파급효과가 기대된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] ITER Material Properties Handbook
- [2] 핵융합연구센터 DEMO 블랑켓 및 TBM 설명자료, 2006
- [3] A. Koyama, Materials Transactions, Vol.46, 383(2005)
- [4] 한국원자력연구소, 핵융합 발전로공학 연구체계수립, 2004
- [5] A. Möslang, E. Diegele, M. Klimiankou, R. Lässer et. al. Nucl. Fusion 45, 649(2005).



유 인 근

- 핵융합연구센터 연구개발부 선임연구원
- 관심분야 : 핵융합로재료, 나노재료 및 표면기술
- E-mail : ikyu@re.kr



손 수 정

- 핵융합연구센터 연구개발부 박사후연구원
- 관심분야 : 핵융합로재료, 접합/코팅기술
- E-mail : sjson@nrc.re.kr



조 승 연

- 핵융합연구센터 연구개발부 재료연구팀장
- 관심분야 : 열 및 유체전달, 핵융합 블랑켓 설계 및 제작기술
- E-mail : sycho@nrc.re.kr