

핵융합로 Test Blanket Module 재료기술 현황

Materials for Test Blanket Module of ITER

박지연, 김원주, 김성호, 류우석, 홍준화

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

ITER 시험 블랭킷 모듈(TBM)에 적용할 구성요소 및 재료기술을 조사하였다. TBM은 구조물, 증식재 및 냉각제로 구성되어 있다. 구조재는 저방사화 특성을 지닌 FM 강, V 합금 및 SiC_f/SiC 복합체가 고려되고 있으며, 증식재는 Li 세라믹 산화물, 액체 Li (Pb-17Li) 및 FLiBe가 고려되어 있고, 냉각재로는 물, 초임계수, 헬륨가스 및 액체 Li가 고려되고 있다. Li 세라믹 증식재를 사용하면 Be이 증식재로 사용되며, 액체 Li을 이용한 자기냉각형 블랭킷은 MHD 압력강하를 방지하기 위한 절연재가 요구되었다.

Abstract

The components and materials for the ITER Test Blanket Module(TBM) were reviewed. The TBM consisted of the structural components, the breeder and the coolant system. Ferritic-martensitic steel, vanadium alloy and SiC_f/SiC composite, which had a low activation property, have considered as a structural material. Li ceramic oxides(Li_2TiO_3 , Li_4SiO_4 , etc), liquid Li and Li molten salt (FLiBe) have considered as a breeding material. Water, supercritical water, He gas and liquid Li have considered as a coolant. Beryllium needed as a tritium multiplier in the Li ceramic breeder type blanket. The ceramic insulator was applied to mitigate the MHD effects in the self coolant type blanket.

1. 서 론

핵융합로의 블랭킷은 삼중수소 생산, 융합반응으로부터 발생된 열에너지의 회수 및 초전도 자석과 로 구조물을 방사선으로부터 차폐하는 중요한 역할을 한다. 그럼에도 불구하고 전 세계적으로 실증을 위한 자료가 부족한 현실이며, 핵융합로 노심과 부품의 성능 실증을 위하여 건설될 국제열핵융합로실험로 (ITER; International Thermonuclear Experimental Reactor)를 통하여 블랭킷 기술의 개발 및 실증 자료를 확보하여 ITER 이후의 핵융합 실증로 건설에 필요한 기초 자료를 확보하여 활용하고자 하는 노력이 시도되고 있다¹⁾. 이미 상업적으로 검증된 재료를 기준으로 설계 건설되는 ITER의 블랭킷은 Be amor, Cu 합금 heat sink 및 316 LN 스테인리스 강으로 만들어진 구조물로 구성된

차폐용이며²⁾, 핵융합 실증로나 발전로 건설을 위한 블랭킷의 실증자료를 확보하는데는 별도의 장치가 요구된다. 따라서 ITER 건설 참여 국가들은 별도의 working group을 조직하여 ITER가 운전을 시작하기 전인 2014년까지 시험용 블랭킷 모듈(TBM, test blanket module)을 제작/설치하여 전자기적 성능, neutronics, 삼중수소 생산, 재료 및 구조물의 thermomechanics 및 plant integration 등과 관련된 실증자료 생산 및 관련 기술의 개발을 추진하기로 하였고, 이를 위하여 2005~2006년까지 블랭킷 개념, 재료선정 및 제조 기술을 확정하기로 하였다.

원자력 선진국에서는 이미 핵융합 실증로를 위한 개념 설계가 상당한 부분 진행되어 있으며³⁾, ITER TBM도 자국이 확보한 개념을 검증 및 보완하는데 목적을 두고 있다¹⁾. 따라서 2003년 ITER 건설 사업 참여와 더불어 TBM working group에 참여한 한국으로선 기술적인 제약뿐만 아니라 시간적인 제약의 두 가지 어려움을 동시에 접하게 되었다. 본 고에서는 재료기술을 중심으로 ITER TBM 관련 사항을 분석하고 향후 재료기술 개발을 위한 방향을 검토해 보고자 한다.

2. ITER TBM 구성요소 및 유형

TBM의 구성요소는 크게 구조물, 증식재 및 냉각계로 구분할 수 있으며, Li 산화물을 증식재로 쓰는 경우는 multiplier를 고려하여야 하고, 액체금속을 쓰는 경우는 절연재를 고려하여야 한다³⁾. 일본에서 개발 중인 세라믹 증식재/multiplier, FM 강 구조재 및 수냉형 냉각계로 구성된 TBM의 도식적인 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 구조물로는 TBM의 구조를 유지시키는 벽체, 증식재를 담고 있는 용기 및 냉각재가 순환될 수 있는 통로가 해당된다. 구조물은 설계기준에 따라 차이가 있으나, 최저운전온도/최고운전온도가 265/550°C 인 경우부터 700/1157°C인 경우까지 다양하게 고려되고 있으며, 운전온도에 따라 적정 소재가 선정되어야 한다. 증식재는 중성자와 반응하여 삼중수소를 생산하는 기능을 지니고 있으며, Li의 산화물, 액체 Li, 및 Li의 용융염이 사용된다. 냉각계로는 액체 Li를 이용하여 증식기능과 함께 자기 냉각(self-cooling) 기능을 갖도록 하는 방식과 물, 초임계수 및 헬륨을 순환시켜 냉각시키는 방식이 있다. 냉각재의 온도에 따라 반응로의 효율이 크게 차이가 나므로 설계의 최적화 및 적정 소재의 선정이 매우 중요하다. TBM의 구성요소들을 적용소재별로 조합하여 분류하면 다음과 같다.

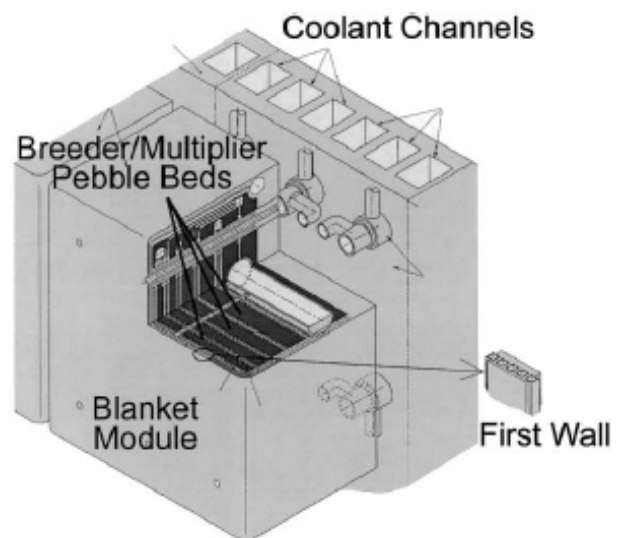


Fig. 1. Blanket structure and features of water cooled ceramic breeder blanket in Japan³⁾.

(1) Ceramic breeder+ferritic/martensitic steel structure concepts

(1)-1. Water-cooled concepts

- (1)-2. Helium-cooled concepts
- (2) Pb-17Li+ferritic/martensitic steel structure concepts
 - (2)-1. Dual-coolant blanket concept
 - (2)-2. Water-cooled Pb-17Li blanket
- (3) Self-cooled lithium-vanadium alloy structure concepts
- (4) SiC_f /SiC+liquid or ceramic breeders concepts
 - (4)-1. SiC_f /SiC+Pb-17Li concepts
 - (4)-2. SiC_f /SiC+ceramic breeder concepts
- (5) Other concepts
 - (5)-1. Blanket concept with tungsten alloy as structural material and heat extraction by lithium evaporation
 - (5)-2. FLiBe concepts with ferritic or other structural materials

ITER 건설사업에 참여하는 유럽연합, 일본, 러시아, 미국, 한국, 중국으로 구성된 TBM working group에서도 (1) He 냉각-세라믹 증식재, (2) 수냉-세라믹 증식재, (3) He 냉각-Li-Pb 증식재, (4) 자기냉각 액체금속증식(V 합금 구조재) 및 (5) Li 용융염 증식재 등 5 가지 유형의 시험 블랭킷에 대한 공동연구 추진을 위해 subworking group을 구성하고, 각국의 참여방법 및 subworking group의 운영방법, 확보된 정보/자료의 활용 방법 등에 대한 구체적인 의견을 토의하고 있는 중이다. 5개의 subworking group 중 (1) 번 유형의 TBM에는 6개의 모든 참여 국가들이 관심을 표명하였으며, (2)번 유형의 TBM에는 일본만이 참여의사를 밝혔으며, (3)번 유형은 일본의 제외한 모든 참여국들이, (4)번 유형은 유럽연합을 제외한 모든 참여국들이, (5)번 유형은 미국, 일본, 러시아가 관심을 나타내었다. 한국은 (1), (3), (4)번 유형에 참여의사를 밝혔으나, 지난 20년 이상의 연구를 통하여 핵융합 실증로의 독자적인 개념설계를 확보한 유럽연합, 일본, 러시아, 미국 등에 비하면 관련 기술이 미친한 어려움이 있다. Table 1에 원자력 선진국에서 추진 중인 핵융합 실증로 증식재 블랭킷의 구조재, 증식재, 냉각재의 최대/최저 온도, 냉각재 압력, 최대 neutron wall load, TBR, 에너지 효율과 같은 설계 변수 값을 요약하여 정리하였다.

3. ITER TBM 구성요소 재료

TBM의 구성요소는 구조물, 증식재 및 냉각계이고, 각 구성요소마다 적절한 소재의 선정은 매우 중요하다. 본 절에서는 냉각재를 제외한 구조재, 증식재 및 삼중수소 multiplier 소재에 대한 재료현황을 기술하고자 한다.

3.1. 구조재

14 MeV의 고에너지 중성자 영향 하의 550°C 이상의 온도에서 적용될 구조물 소재(구조재)는 핵융합 실증로 실현을 위한 핵심적인 역할을 한다. 구조재에 요구되는 주요한 사항은 (1) 저방사화 특성을 나타내어야 하며, (2) 150 dpa 이상의 조사손상을 견딜 수 있는 내방사선 특성을 지녀야 하고, (3) 블랭킷의 다른 구성요소인 냉각재, 증식재, multiplier와 양립성을 가지고 있어야 하며, (4) 경제적으로 대형 구조물의 제작이 용이하

Table 1. Some Design Parameters for Different Breeding Blanket Concepts³⁾.

Example concept	Structural T_{max}/T_{min} (°C)	Breeder T_{max}/T_{min} (°C)	Coolant T_{max}/T_{min} (°C)	Coolant P (MPa)	TBR	Max. Neutron wall load (MW/m ²)	Cycle (%)	Structural Material lifetime & criteria
SSTR (CB/WC)	550/~280	600~900/~300	320(520)/280(290)	15(25)	1.2	3-5	~35 (>40)	>10MW-a/m ² 100-200 dpa
HCPB (CB/HC)	550/300	890/400	500/250	8	1.11	3.5	37	15MW-a/m ² 150dpa swelling
WCLL (LB/WC)	550/265	550/285	325/265	15.5	1.1	5.5	33	15MW-a/m ² 150dpa swelling
DC (LB/SC+HC)	550/300	700/460	He:480/ He:300	14	1.1	5.0	45	15MW-a/m ² 150dpa swelling
ARIES-RS (LB+SC)	700/330	610/330	610/330	<1	1.1	5.6	46	15MW-a/m ² 200dpa swelling
ARIES-AT (LB+SC)	1000/764	1000/764	1100/764	1.1	1.1	4.8	58.5	18MW-a/m ² , assuming 3% SiC bumup
A-SSTR2 (CB+HC)	1157/700	~800/ ~700	900/600	10	~1.3	6	>50	10MW-a/m ²
EVOLVE (LC/LI-evap)	1300	1200/ 1100	1200/1100	0.035	>1	10	>55	NA
FFHR-2 (FB/SC)	550	550/450	550/450	0.5	>1	1.5	38	15MW-a/m ² 150dpa swelling

CB : ceramic breeder, LB : Liquid Li breeder, FLB : FLiBe breeder

WC : water cool, HC : He cool, SC : Self-cool

여야 한다. 특히 저방사화 특성을 나타내기 위해서는 소재 구성성분 및 양이 매우 중요하다. C, Cr, W, V, Ta, Ti, Mn, Si, B, Fe가 저방사화 특성을 나타내는 원소이며, 이를 주 구성원소로 하는 소재의 선택이 요구된다. 아울러 Mo, Ag 및 Nb는 1 wt% 이하로 양이 제한되어야 한다고 알려져 있다⁴⁾.

이 요구조건들을 고려하여 가장 유망한 후보재료로 Ferritic-Martensitic(FM) 강, Vanadium(V) 합금 및 SiC_f/SiC 복합체가 고려되고 있다. FM 강은 핵융합로용 소재 외에 초초임계 화력발전이나 액체 금속로용 구조재료로 개발되고 있으며, 최근에는 수소생산용 초고온가스냉각로의 구조소재로도 연구되고 있다. 일반적으로 500~700°C의 온도에서 우수한 특성을 나타내는 고온용 금속소재이며, 핵융합 소재로는 저방사화 특성을 고려한 미량 구성원소의 제어가 다른 분야와 차별화되어야 한다. FM 강의 적용온도가 500~700°C로 제한되는 점은 핵융합로의 효율과 관련하여 취약점이다. 핵융합로용 소재로 개발되고 있는 FM 강은 7~10 wt% Cr을 함유하며, N의 함량을 최소화한 경우가 주로 고려되고 있다. 최근에는 고온 특성 향상을 위하여 산화물을 분산시킨 산화물 분산 강화강 (ODS-steel, Oxide Dispersed Strengthened steel)이 개발되고 있으며, W를 첨가하여 기계적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. FM강은 다른 두 후보재료에 비하여 개발 경험이 많고, 제조 공정 및 노내외 특성 자료가 상대적으로 많기 때문에 TBM의 기준 소재 (reference material)가 되고 있다. 개발된 대표적인 FM 강은 유럽연합의

EUROFER, 일본의 F82H, JFL-1, 미국의 ORNL-3971 등이 있으며, 이 FM 강들에 대한 조성을 표 2에 정리하였다. 국내에서는 원자력 산업용 소재로 액체금속로와 수소생산용 초고온가스로의 구조재로 합금설계와 제조 및 노내외 특성 평가가 진행되고 있다⁵⁾.

Table 2. Chemical Composition of the Different FM Steel (wt%).

	Cr	W	Mn	N	Ta	C	V	B	Ti	Fe		
EUROFER	8.91	1.08	0.48	0.02	0.14	0.12	0.2	0.001	0.006	Bal		
F82H	7.73	2.06	0.083	0.0027	0.018	0.092	0.189	0.003	0.0104	Bal		
ORNL-3971	8.9	1.08	0.44	0.0215	0.06	0.11	0.23	<0.001	<0.01	Bal		
	Cr	W	Mn	N	Ta	C	V	Si	Al	P	S	Fe
JLF-1	9.04	1.97	0.46	0.0237	0.070	0.097	0.19	<0.1	0.003	0.0020	0.0020	Bal
JLS-1	9.19	2.50	0.99	0.0267	0.050	0.094	0.081	0.050	0.003	0.0040	0.0004	Bal

V 합금은 용융 Li 금속과 양립성이 좋고, FM 강보다 더 높은 온도에 적용이 가능하기 때문에 용융 Li 금속을 이용한 자기 냉각형 블랭킷의 구조재로 적용을 고려하고 있다. V 합금은 액체 Li와 사용할 때 발생하는 MHD 압력강하 효과가 가장 문제가 되는데 이를 극복하기 위하여 절연재로 CaO 코팅을 시도하고 있으나, 코팅 층의 균열발생 방지 등 최적화를 위한 공정개발이 필요하다. V 합금이 구조재로 적용되기 위해서는 조사에 의한 저온 파괴와 중고온 크립 변형, 대형 구조물의 제조공정 및 경제성 확보와 같은 문제점들도 함께 극복되어야 한다⁶⁾. 미국과 러시아에 주로 연구되고 있으며, 국내에서는 보고된 연구가 거의 없다.

SiC_f/SiC 복합체는 FM강이나 V 합금에 비하여 고온 특성과 냉각재와의 양립성 및 고온 화학적 안정성이 우수하여, 고효율의 핵융합로 블랭킷 구조재로 고려되고 있다. 그러나 노내외 특성자료가 앞의 두 금속소재에 비하여 부족하고, 낮은 열전도도, 조사에 따른 치수 안정성과 크립, 기밀성 등의 문제점이 극복되어야 하며 제조 공정도 개선이 요구된다. SiC_f/SiC 복합체는 블랭킷 구조재 뿐만 아니라 액체 Li를 증식재로 사용하였을 때 FM 강 구조물 블랭킷에서 발생하는 MHD 압력강하 효과를 억제하기 위한 절연재로도 적용이 고려되고 있다⁷⁾. 미국과 일본은 핵융합 공동연구 프로그램인 JUPITER-2를 이용하여 SiC_f/SiC 복합체의 제조공정 개선 및 노내외 물성평가를 수행하고 있으며, 유럽연합에서는 프랑스 CEA를 중심으로 미·일 공동연구와 유사한 연구가 진행되고 있다. 또한 미, 일, 유럽연합은 International Energy Agency (IEA)의 SiC_f/SiC subworking group meeting을 통하여 서로의 연구정보를 교환하고 개선책을 마련하고 있다. 국내에서는 열적 및 기계적 특성향상을 위하여 SiC_f/SiC 복합체 고밀화를 위한 공정개선 연구가 진행되고 있으며, 조사거동 평가를 위한 방사선 이용 모사시험이 계획되어 있다⁸⁻¹⁰⁾.

3.2 증식재

리튬은 고속중성자 에너지 분포 하에서 충분한 양의 삼중수소를 생산할 수 있는 유일한 물질이며, 가벼운 원소이므로 중성자 차폐성능이 우수하고 고속중성자와 반응하여 또 하나의 중성자를 생산할 수 있는 물질이다. Li계 화합물로는 산화물 세라믹, 액체금속,

용융 금속염 제안되고 있다³⁾. 세라믹 증식재 후보재로는 Li_2O , T-LiAlO_2 , Li_2ZrO_3 , Li_4SiO_4 , 및 Li_2TiO_3 가 있다. Li_2O 는 다른 재료에 비해 높은 리튬원자 밀도, 높은 열전도도, 낮은 삼중수소 용해도를 가지며, 삼중수소 증식율이 최고로 높기 때문에 매우 유용한 재료이지만 hydroxide/trioxide와 리튬의 증기압이 크기 때문에 블랭킷의 차가운 쪽으로 리튬원소의 이동이 쉽게 발생한다는 단점이 있다. T-LiAlO_2 는 더 높은 용점, 물에 대한 낮은 반응성으로 사용온도 범위가 넓고, 우수한 조사특성을 갖지만, 삼중수소 방출특성이 나쁘기 때문에 상대적으로 사용 가능한 최저온도가 높다는 단점이 있다. Li_4SiO_4 는 여러 가지 면으로 Li_2O 와 유사한 특성을 갖는다고 알려져 있다. 삼중수소 확산율이 좋으며 화학적 안정성이 뛰어나다. 그렇지만 열팽창 계수의 이방성 때문에 조사에 의해 쉽게 파손되어지는 단점이 있다. Li_2ZrO_3 는 안정성이 뛰어나고 삼중수소 방출특성이 뛰어나지만, 조사 후에 열이 방출될 때 지르코늄이 여기된다는 것이 중요한 문제점이다. Li_2TiO_3 는 삼중수소 방출능력이 우수하고, 다른 재료와 양립성 및 조사거동이 뛰어나다고 알려져 있다¹¹⁾. Table 3에 세라믹스 증식재의 특성을 비교 요약하였다.

Table 3. Typical Properties of Candidate Ceramic Breeder Materials.

ITEM	Li_2O	Li_4SiO_4	LiAlO_2	Li_2ZrO_3	Li_2TiO_3
Lithium density, g/cm^3	0.75	0.53	0.122	0.3	0.3
Activation	low	inter-mediate	inter-mediate	high	low
melting point, $^{\circ}\text{C}$ / phase change	1432 none	1255 655	1750 none	1616 1100	>1600 1200
irradiation stability	○	X	○	◎	◎
thermal expansion	○	○	◎	◎	◎
mechanical strength	○	○	◎	◎	◎
chemical stability	○	○	◎	◎	◎
water compatibility	X	○	◎	○	○
structural compatibility	○	○	◎	◎	◎
Be compatibility	-	○	◎	◎	◎
Li mass transfer	-	◎	◎	◎	◎
tritium solubility	○	○	○	○	○
thermal conductivity	◎	○	○	○	○

이상의 노내 성능을 고려하여 TBM working group 참여 국가들은 Li_2O , Li_4SiO_4 및 Li_2TiO_3 를 ITER TBM용 세라믹 증식재로 적용하려 하고 있다. 세라믹스 증식재는 열응력이나 조사 균열 등에 대한 문제점을 해결하기 위하여 0.1~1 mm 직경의 구형 pebble 형태로 활용되며¹²⁾, 생성된 삼중수소의 방출거동을 고려하여 약 1 μm 입자크기와 20% 정도 기공율을 지닌 소결체가 이용된다. 일본에서 JAERI를 중심으로 Li_2O , Li_4SiO_4 ,

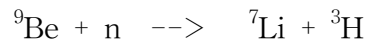
Li_2ZrO_3 및 Li_2TiO_3 증식재 pebble 제조공정 및 노내외 특성평가를 수행하고 있으며, 오사카 대학 등에서 냉각재와 양립성 거동 등의 기반연구를 수행하고 있다. 유럽에서는 Li_2TiO_3 증식재는 프랑스 CEA를 중심으로 개발하고¹²⁾, Li_4SiO_4 는 독일 Karlsruhe 연구소를 중심으로 개발하고 있으며¹³⁾, 이탈리아 ENEA에서 노외성능 거동 평가를 하고 있고, 노내성능평가는 네덜란드 NRG pettern에서 수행하고 있다. 국내에서는 증식재용 $\text{T}-\text{LiAlO}_2$, Li_2ZrO_3 및 Li_2TiO_3 산화물 분말제조 및 소결공정 개발 연구가 수행되어 향후 TBM 개발 연구시 세라믹스 증식재 개발에 활용이 기대된다^{14~16)}.

액체 Li 증식재는 삼중수소 증식 능력이 우수하고, 열전도도가 크며, 내방사선 특성 우수하고, 삼중수소의 추출이 용이하고, 장수명인 특징을 갖는다. 그리고 삼중수소 증식이 뛰어나기 때문에 multiplier가 불필요하다. 그러나, FM 강이나 V 합금을 구조재로 사용하면, MHD 압력강하 효과로 별도의 절연재가 필요한 단점이 있다. Pb-17Li 금속이 주로 사용되고 있다¹⁷⁾.

용융염 Li 증식재로는 FLiBe가 고려되고 있다. FLiBe는 LiF 와 BeF_2 의 혼합물로서 물이나 공기 중에서 안정하며, 자기냉각을 위한 MHD 압력강하 효과가 없고, 삼중수소의 용해도가 낮은 장점이 있다. 그러나 부식, 사용온도의 제한, 낮은 열전도도 특성, 유리 불소의 방출 잠재성 등의 단점이 있다¹⁸⁾.

3.3 삼중수소 multiplier 소재

Be는 아래 반응을 통하여 삼중수소를 발생할 수 있으므로 삼중수소 증식능력을 향상시킬 목적으로 세라믹 증식재를 사용하는 블랭킷의 multiplier 소재로 사용된다¹⁹⁾.



Be multiplier는 세라믹스 증식재와 마찬가지로 세라믹스 열응력이나 조사 균열 등에 대한 문제점을 해결하기 위하여 0.1~1 mm 직경의 구형 pebble 형태로 활용되며 rotating electrode 방법을 이용하여 pebble을 제조한다. 그러나 Be 만을 사용하면 용융온도가 낮고, 중성자 조사에 의한 기계적 특성의 열화, 낮은 삼중수소 방출속도 및 공기나 증기와 반응하여 열과 수소를 만드는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 Be의 합금이 고려되고 있으며, Be_{12}Ti 가 대표적으로 적용되고 있다. Be_{12}Ti 는 Be에 비하여 상대적으로 높은 융점, 물 및 증기와 낮은 반응성과 이에 따른 저팽윤 특성, 높은 삼중수소 방출 특성으로 Be의 대체소재로 적용을 적극적으로 검토하고 있다.

이상에서 핵융합 실증로 블랭킷 및 ITER test blanket module에 적용할 구성요소와 이에 필요한 재료 개발현황에 대하여 살펴보았으며, Table 4에 각 국의 핵융합 실증로 개념에서 고려하고 있는 재료를 나타내었다.

Table 4. Materials for Different Breeding Blanket Concepts

	Breeder	Multiplier	Coolant	Structure
SSTR	Li ₂ O or Li ₂ TiO ₃	Be	H ₂ O	F82H (FM강)
HCPB	Li ₄ SiO ₄ or Li ₂ TiO ₃	Be	He	FM강
WCLL	Pb-17Li	-	H ₂ O	FM강
DC	Pb-17Li	-	Self+He	FM강
ARIES-RS	Li	-	Self	V-4Cr-4Ti
ARIES-AT	Pb-17Li	-	Self	SiC _f /SiC
A-SSTR2	Li ₂ TiO ₃	Be	He	SiC _f /SiC
EVOLVE	Li	-	Li (evap.)	W alloy
FFHR-2	FLiBe	Be	Self	F 강

4. 요약

가) 블랭킷은 핵융합로의 로심을 구성하는 구조물로 그 기능상 매우 중요한 역할은 한다. 그러나 재료와 관련된 문제점들 원자력 선진국에서도 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있으며, 재료문제, 특히 고온 구조재의 개발은 ITER 이후의 실증로 및 발전로 실현을 위한 핵심요소가 되리라 판단된다.

나) TBM 구성요소 및 적용소재를 정리하면 다음과 같다.

- 구조물 : FMS (F82H, EUROFER, JFL-1), ODS-FMS, V-alloy, SiC_f/SiC
- Insulator for avoiding the MHD effect : bulk SiC_f/SiC, CaO coating layer
- Breeder : Li ceramic(Li₂O, Li₂TiO₃, Li₄SiO₄, Li₂ZrO₃), Pb-17Li, Li, FLiBe
- Multiplier : Be, Be-Ti alloy
- Coolant : water, supercritical water, He, Li based liquid metal, FLiBe

참고문헌

1. V.A.Chuyanov, Fusion Eng. & Des., 61/62, 273-281 (2002)
2. ITER Final Design Report (2001)
3. A.R.Raffray, M.Akiba, V.Chuyanov, L.Giancarli and S.Malang, J. Nucl. Mater., 307/311, 21-30 (2002)
4. A.Kimura, in Semiar at KAERI (2003).
5. S.H.Kim, W.S.Ryu, J.H.Hong., J. Nucl. Mater., accepted, (2004).
6. T.Muroga, T.Nagasaka et al., J. Nucl. Mater., 307/311, 547-554 (2002).
8. J.Y.Park, H.S.Hwang, W.J.Kim, J.Y.Son and D.J.Choi, Ceramic Trans. Vol.144, Ed by A.Kohyama, M.Singh, H.T. Lin, Y.Katoh, pp105-114 , pub. by Am. Ceram. Soc., USA 2002.

9. J.Y.Park, H.S.Hwang, W.J.Kim, J.I. Kim, J.Y.Son, B.J.Oh, and D.J.Choi, J. Nucl. Mater., 307-311, 1227-1231 (2002).
10. S.M. Kang, J.Y. Park, W.-J. Kim, S.G. Yoon, W.S, Ryu, accepted, J.Nucl. Mater., (2004)
11. J.Y.Park, S.J.Oh, Y.T.Moon, Y.S.Kim and I.H.Kuk, Bul. Korean Ceram. Soc., 11[10], 395-406(1996).
12. J.D.Lulewicz and J.P.Joulin, in The 11th Int. Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interaction, Dec. 15~17, Tokyo, Japan (2003)
13. R.Knitter, G.Piazza, J.Reimann, P.Risthaus, L.V.Boccaccini, in The 11th Int. Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interaction, Dec. 15~17, Tokyo, Japan (2003)
14. J.Y.Park, C.H.Jung, H.K.Park, S.J.Oh, and Y.S.Kim, Ceram. Trans., Vol. 85, Ed by N.P.Bansal, K.V.Logan and J.P.Singh, pp 55-66, pub. by Am. Ceram. Soc., USA 1997.
15. C.H.Jung, J.Y.Park, S.J.Oh, H.K.Park, Y.S.Kim, D.K.Kim and C.H.Kim, J. Nucl. Mater., 253, 203~212 (1998)
16. J.Y.Park, W.J.Kim, C.H.Jung, S.J.Oh, and G.W.Hong, J. Korean Ceram. Soc., 36[4], 360-365 (1999).
17. J.Reimann, L.Barlean et al., Fusion Eng. & Des., 27, 593-606 (1995).
18. A.Sagara, H.Yamanishi, et al., Fusion Eng. & Des., 49-50, 661-666 (2000)
19. A.Khomutov, V.Barabash et al., J. Nucl. Mater., 307/311, 630-637 (2002).