

한국의 핵융합장치용 대형초전도자석 기술현황 및 계획

추 용, 박갑래, 오영국
국가핵융합연구소

1. 서 론

장기적인 에너지 부족 문제를 해결할 수 있는 근본적인 해결책은 새로운 에너지를 찾는 것이다. 국내에서는 현재 3% 이내의 신재생에너지 비중을 2030년도 10%까지 늘릴 계획을 세우고 있다. 이와 별도로 신재생에너지의 비중 한계를 채워줄 수 있는 미래 대용량 에너지원 중 대표적인 하나로써 핵융합에너지의 개발이 진행되고 있다. 바닷물에서 추출하는 중수소와 흔한 자원인 리튬을 통해 얻을 수 있는 삼중수소를 원료로 하는 핵융합발전은 신재생에너지보다 훨씬 고밀도 대용량의 전력 생산이 가능하다. 핵융합 반응이 일어나기 위해선 원자핵이 충분히 높은 운동에너지를 가진 상태에서 일정시간 이상 구속이 되는 조건이 만족돼야 한다. 구속 방식에 따른 대표적인 방식 중 하나인 자기핵융합은 플라즈마 내의 하전입자(이온과 전자)가 자기력선을 중심으로 회전하며 구속되는 특성을 이용하는 것이다. 그 중 현재까지 연구의 주류를 이루 어온 것이 토카막 방식이다. 토카막 방식은 도넛 모양의 진공용기 길이 방향과 평행하게 인가된 외부 자기장과 진공용기 내부에서 생성된 플라즈마 전류에 의해 용기 단면적의 둘레 방향으로 인가되는 자기장이 벡터 합에 의하여 나선형으로 꼬인 형태로 나타나는 자기장을 이용하는 방식이다. 지난 반세기 동안의 선진국 주도의 자기핵융합 장치는 구리를 소재로 사용함에 따라 성능은 어느 정도 도달해 왔지만, 고자기장 발생에 따른 고비용 문제 발생 및 플라즈마의 유지시간이 십 여초 정도로 제한되어 연속적인 전력 생산을 필요로 하는 발전소가 되기 위해서는 한계가 있어왔다. 이에 따라 플라즈마를 고자장하에서 강한 구속력과 장시간 유지할 수 있는 기술로서 기존의 구리 자석대신 초전도 자석을 사용한 초전도 토카막이 한국의 KSTAR와 중국의 EAST 장치를 중심으로 건설이 되어 현재 활발하게 운

전 연구 중에 있다. 이 장치를 통해 확보된 운전기술과 연구결과는 현재 건설 중인 ITER 장치와 각국에서 설계 중인 DEMO 실증로 건설의 핵심 기반기술로 이어질 것으로 전망된다. 이 글에서는 KSTAR 초전도자석 기술 현황 및 향후 핵융합 초전도자석의 개발 계획에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

2. KSTAR 현황

2.1 KSTAR 초전도자석의 개요

그림1은 KSTAR 초전도자석 형상을 보여 주고 있다. KSTAR 장치는 높이 약 10미터 직경 약 10미터 규모의 중형크기의 토카막 핵융합 연구장치이다. KSTAR 내의 플라즈마는 주반경 1.8m, 부반경 0.5m, 플라즈마 전류 2MA, 중심 자기장 3.5테슬라, 최대 동작시간 300초의 준-정상상태 운전을 목표로 하고 있다. KSTAR 주장치는 약 1억도의 초고온 플라즈마를 가둬두는 도넛형 진공용기와 8 테슬라급의 고자장 망을 형성하는 30개의 대형 초전도자석으로 구성되어 있다. 그 밖에도 KSTAR 운전을 위한 부대장치와 설비로는 초전도자석의 극저온 냉각을 위한 9kW급의 극저온 헬륨공급장치, 100 MVA급의 154 kV 전력설비와 PF 전원 구동을 위한 200 MVA, 2 GJ급의 Motor - Generator (MG), 플라즈마 가열장치, 진단 장치 및 중앙제어 시스템 등이 있다.

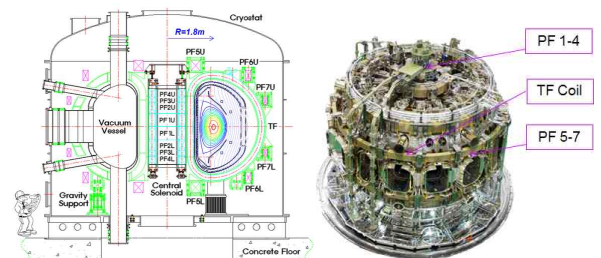


그림 1. KSTAR 초전도자석.

KSTAR 초전도자석은 크게 토러스형의 중심자장을 발생하여 플라즈마를 진공용기 내부에 가두기 위한 토로이달 자장 발생 자석(TF 자석)과 플라즈마 내에 대전류를 발생시키고 플라즈마의 형상을 제어하기 위한 펄스코일인 폴로이달 자장 발생 자석(PF 자석)으로 구분된다. TF 코일과 PF1-5 코일은 Nb₃Sn 초전도체가 사용되었으며 상대적으로 낮은 자장에 노출되어 있는 PF6-7 코일과 버스라인은 NbTi 초전도체가 사용되었다. KSTAR와 같은 핵융합장치에 사용하고 있는 초전도자석은 수십 kA의 대전류와 십 테슬라 규모의 고자기장 하에서 운전됨에 따라 수 천톤 규모의 전자기력이 도체에 인가될 뿐만 아니라, 수십 kV 정도의 고전압 하에서의 절연 특성을 가져야 한다. 더불어 플라즈마 발생을 위해 초전도자석의 자기장을 빠른 속도로 변경해 주어야 한다. 이 전자기력을 지지하기 위해서는 침적냉각 방식 (pool-boiling)을 사용하는 가속기나 의료용 MRI 등에 사용되는 초전도자석과는 달리 구조적 강성이 높은 재료를 사용한 관(Conduit 또는 Jacket) 내부에 초전도 집합연선을 삽입한 Cable-In-Conduit (CICC) 형태가 사용된다. CICC의 냉각은 관내로 냉매인 초임계헬륨을 강제 순환하는 방식이 사용된다.

EAST, KSTAR, ITER 등 현재 토카막 초전도자석 대부분이 Nb₃Sn 혹은 NbTi CICC를 사용하고 있다. 최근 들어 KIT, MIT, NIFS 등 해외기관에서 핵융합용 대전류 통전용 초전도체를 고온초전도체를 응용하고자 하는 연구가 진행되고 있으나 경제적·기술적으로 해결해야 할 이슈가 산재해있기 때문에 아직까지 초전도체의 First-cut 설계 정도의 성과 정도가 도출되었을 것으로 판단된다. KSTAR 초전도 자석에 사용된 초전도 선재와 도체의 제작사양은 표1, 2에 나타내었다.

2.2 KSTAR 초전도자석 운전

KSTAR 극저온 냉각대상물은 총 300 톤 규모의 냉각질량으로 초전도자석, 자석구조물, 열차폐체, 전류입장치로 구성되어 있다. Helium Refrigerator System (HRS) Cold Box의 총 냉각성능은 설계치 기준 4.5 K에서 에너지 동등 9 kW이며, KSTAR 장치를 상온에서부터 4.5K까지 냉각시키는데 대략 20일이 소요된다. 운전 기간 동안

Current Lead 냉각을 위해 초당 17g의 LHe를 공급하며, TF, PF 코일 및 버스라인의 냉각을 위해 Cryogenic Circulator를 통해 4.5K, 600 g/s의 초임계 헬륨이 공급된다(그림 2).

표 1. KSTAR 초전도 선재의 기본 사양.

Parameter	Units	TF & PF1-5	PF6-7
Superconductor type		Nb ₃ Sn	NbTi
Strand diameter, unreacted, after coating	mm	0.78±0.02	0.78±0.02
Critical Current Density (Jc@12 T, 4.2 K)	A/mm ²	> 750	
Critical Current Density (Jc@5 T, 4.2 K)			> 2,800
n-value		> 20	> 20
AC Loss (per ±3 T cycle)	mJ/cc	< 250	< 150
Residual Resistivity Ratio(RRR)		> 100	> 100
Cu/Non-Cu Ratio		1.5±0.15:1	2.8±0.15:1
Coating material		Cr	Cr
Coating thickness	µm	1±0.5	1±0.5
Twist Pitch	mm	13±1	9±1
Deff	µm	12.5	10

표 2. KSTAR 도체(CICC)의 제작 사양.

구분	규격	TF	PF1 ~ 5	PF6 ~ 7
CICC 규격	CICC Cross Section			
	CICC 폭	25.65 mm	22.3 mm	22.3 mm
	Jacket 두께	2.86 mm	2.41 mm	2.41 mm
초전도 cable	초전도체 재료	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	NbTi
	Jacket 재료	Incoloy908	Incoloy908	SUS316LN
	Cable 외경	23.0 ± 0.3 mm	20.7 ± 0.3 mm	20.7 ± 0.3 mm
	Pattern	3x3x3x3x6	3x4x5x6	3x4x5x6
	Void Fraction	32.5 %	33.5 %	35 %
운전 조건	최대운전전류	35 kA	25 kA	20 kA
	최대인가자장	7.2 T	7.8 T	5.4 T

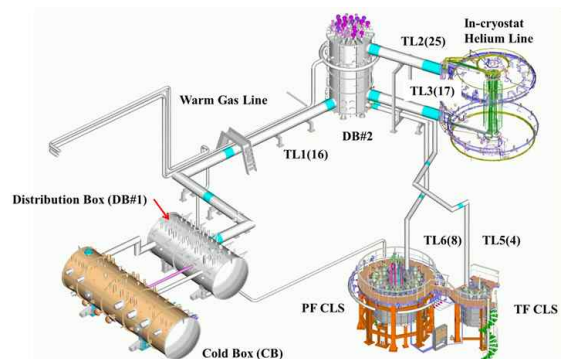


그림 2. KSTAR 초전도자석의 냉각시스템.

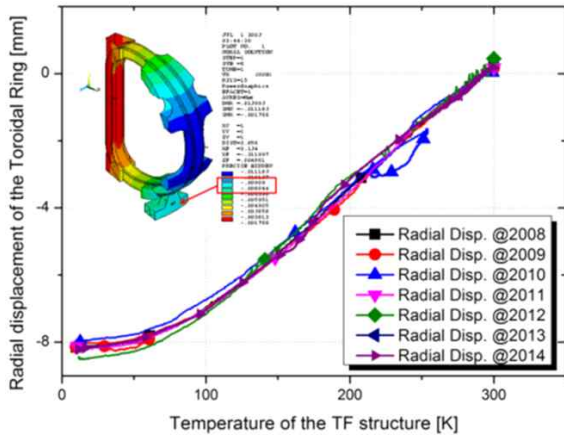


그림 3. KSTAR 초전도자석의 운전 조건

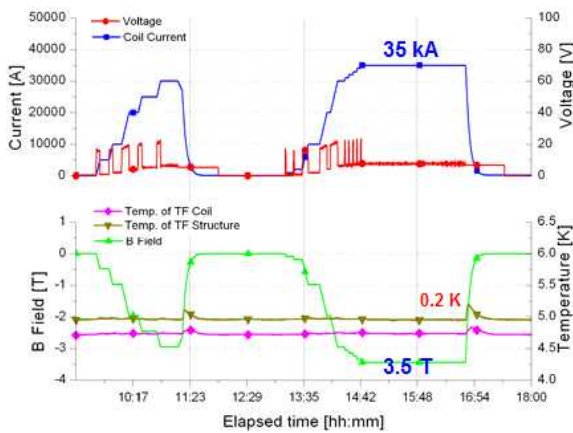


그림 4. KSTAR TF 초전도자석의 운전.

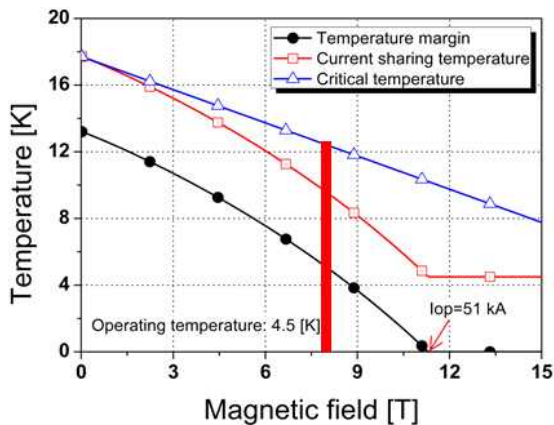


그림 5. KSTAR TF 초전도자석의 온도 마진 (초전도선재 strain=0.3%).

그림 3은 상온부터 냉각시 초전도 자석의 토카막 중심 방향으로 열수축 경향을 보여주고 있다. 매 캠페인 마다 대략 8 mm 정도의 변위를 보여주고 있으며 편차는 최대 0.23

mm 이내로 구조적으로 안정된 상태로 운전이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 TF 코일 정격전류인 35 kA 운전에서 주반경 (R=1.8m)에서 3.5 T의 자장이 측정된 결과를 보여주고 있으며, 자석 운전 중 온도변화는 0.2 K 증가의 안정된 상태로 있음을 알 수 있다. 이때 측정되는 스트레인은 대략 700 $\mu\epsilon$ 로써 SUS의 항복응력에 대응하는 변형률인 3600 $\mu\epsilon$ 의 20% 정도인 탄성영역에서 운전된다. 그림 5의 Load line을 통해 보듯 KSTAR TF 초전도자석의 온도마진은 35 kA, 7 T 운전에서 대략 4 K이다. 이와는 달리 펄스로 운전되는 PF 자석은 교류손실에 의해 TF 코일에 비해 온도 상승폭이 상대적으로 매우 크다. 따라서 장시간 AC 운전과 급격한 전류 변화가 중첩되면 코일의 안정적인 운전의 수행이 어렵게 된다. 그림 6은 PF 코일 중 가장 높은 자기장에 위치한 PF1 코일에 교류전류를 인가한 후, 열량법을 이용한 교류손실 분석 결과를 보여준다. PF 1 코일을 15 kA 까지 1 kA/s 로 충전 후에 전류방전율을 0.5 ~ 6 kA/s 범위에서 조정하여 온도증가를 관측함과 동시에 열량법을 통해 교류손실을 분석하였다. 결론적으로 자기 결합시정수($n\tau$)가 150 ~ 250 ms 로 측정되었으며, 이를 토대로 각 PF 코일의 전류 변화율의 적정 운전 범위를 설정하였다. 일례로 온도마진을 2 K 이상 유지하기 위해 PF1 코일의 경우 플라즈마 착수 시점을 제외한 영역에서 최대 전류 변화율이 5 kA/s 이내로 운영하였다.

2014년 PF 정격운전 (PF1-5: 25 kA, PF6-7: 20 kA)을 수행키 위하여 200 MVA 용량의 MG (Motor - Generator)의 제작이 완료되어 시운전 되었다. 기본사양 및 형상을 그림 7과 표 3에 나타내었다.

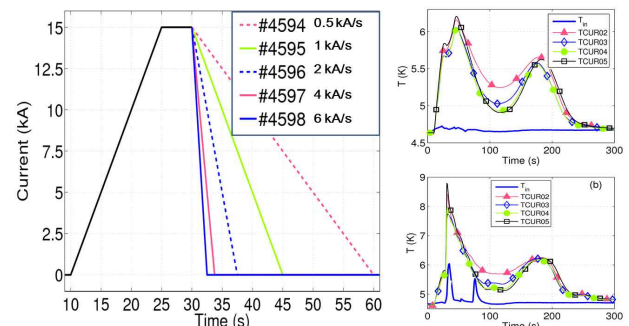


그림 6. KSTAR PF1 초전도자석의 전류변화에 따른 초임계헬륨 입·출구 온도 변화.

그림 8은 TF 코일을 20 kA로 충전 시킨 상태에서 500 kA, Long-pulse (47초) 플라즈마 전류를 발생시킨 결과이다. MG 초기 시운전에서는 120 MVA 전력만을 투입하여 플라즈마 시운전을 수행하였다.

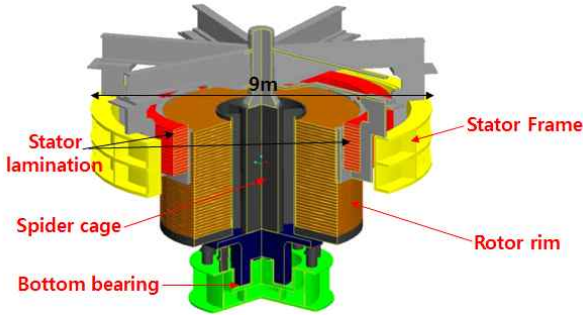


그림 7. MG 의 단면도.

표 3. 200 MVA MG 사양.

Parameter	Units	Specification
Type		Vertical type
Number of poles	EA	14
Max. Capacity	MVA	200
Duty voltage and speed	kV Hz	22.9 64~56
Pulse length	sec	300
Reactive power	MVA _r	Peak 160 Ave. 140
Active power	MW	Peak 38 Ave. 3.3

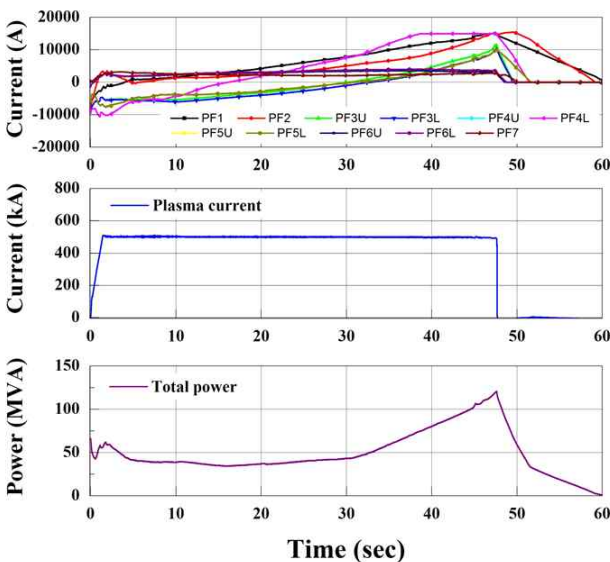


그림 8. KSTAR 플라즈마 전류 발생 및 그에 따른 PF 전류 및 MG 전력 순시치.



그림 9. 국가핵융합 연구소 전경.

3. 핵융합 초전도자석 개발 현황

국가핵융합 연구소는 KSTAR, ITER DA, K-DEMO에 이르는 미래 핵융합 에너지 개발을 선도하는 연구기관이다. KSTAR 운영과 ITER 조달 및 비조달 사업을 통한 핵융합 핵심 기술을 확보함과 동시에 상용 핵융합로 건설을 선도하기 위한 K-DEMO 연구가 착수되고 있다. 그림 9은 국가핵융합 연구소의 전경이다.

3.1 ITER용 초전도체 개발

핵융합의 실용화 가능성을 기술적, 공학적으로 입증하기 위해 'ITER'라 불리는 핵융합 실험로 건설이 프랑스의 남부에서 활발히 진행 중이다. 이 장치는 핵융합 반응을 통하여 500MW급의 열출력(일반 원전발전의 1/6)을 발생하는 장치로서, 전기생산 가능성을 실증하기 위한 국제핵융합실험로이다.

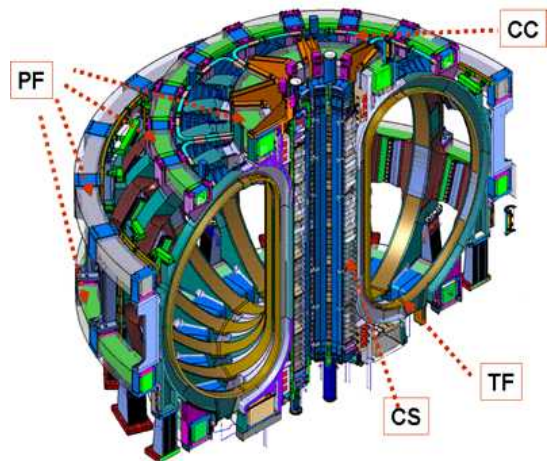


그림 10. ITER 초전도자석 시스템 구조.

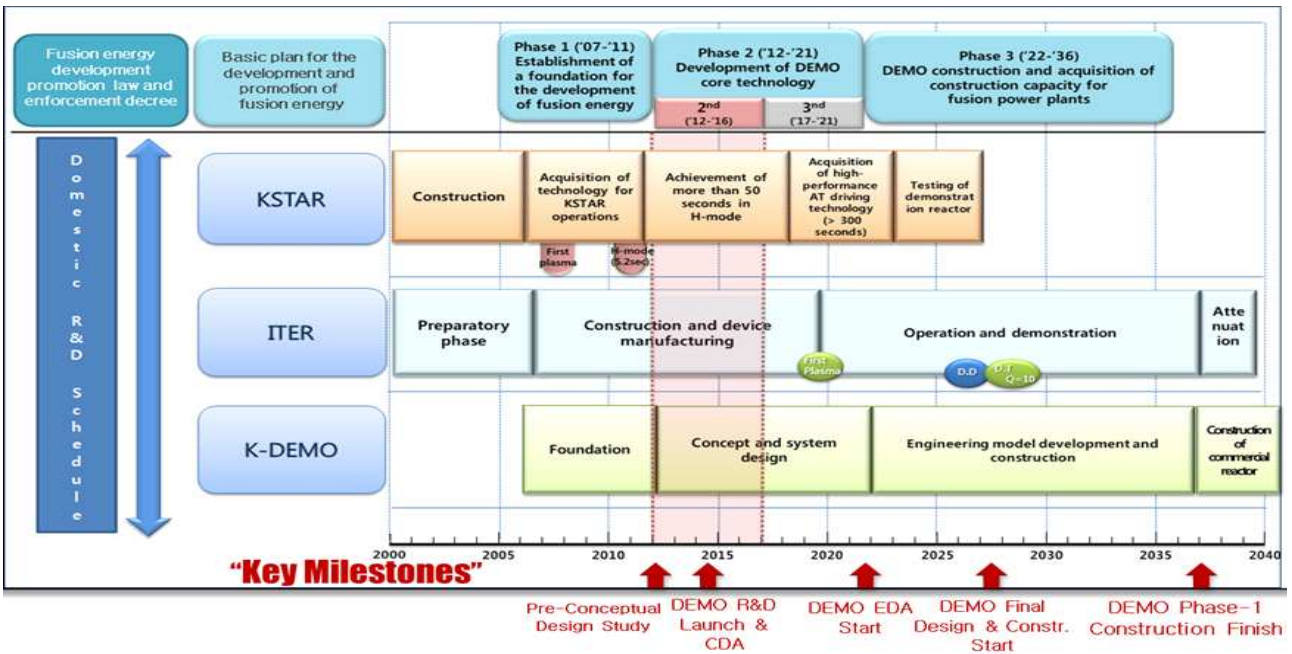


그림 11. K-DEMO 개발 Roadmap.

표 4. K-DEMO 장치의 사양.

Basic Parameter	Option 1	Option 2	Option 3
Major Radius	6.0 m	6.8 m	7.3 m
Minor Radius	1.8 m	2.1 m	2.2 m
Elongation (k)		2.0	
Magnetic Field@R ₀		7.4 Tesla	
Peak Field		~ 16 Tesla	
Divertor Type		Double Null	
Plasma Current	> 10 MA	> 12 MA	> 13 MA
Fusion Power (MW)	1500~2000	2200~3000	2700~3500
Net Elec. Power (MWe)	130~200	400~700	550~900

자석은 KSTAR 초전도자석과 같은 종류로써 TF와 CS 코일에 Nb₃Sn, PF와 CC에 NbTi를 사용하기 때문에 초전도자석에 관련된 물리적, 기술적 이슈들, 예를 들어 퀘칭검출, 초전도체 접합 연구 등에 대해 상호 활발한 교류를 통한 기술 축적이 가능한 환경이 조성되었다.

ITER 초전도 자석과 자석구조물의 무게는 10,150톤, 자기장 에너지는 51 GJ 에 달한다. 이 중에서 국내에서는 KSTAR 초전도자석의 개발에 참여하였던 기술을 발전시켜 ITER TF 자석용 초전도체 의 약 20% 분량을 제작하여 납품을 완료하였다.

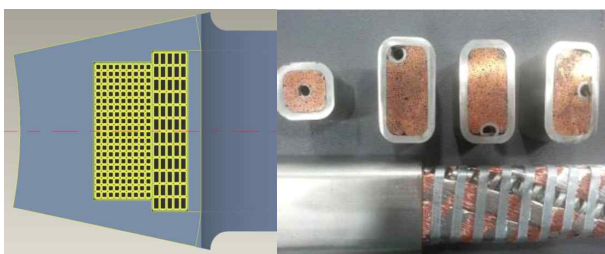


그림 12. TF 자석 및 구조물, 자장에 따라 소형 및 대형 TF CICC의 형상.

ITER 장치는 주반경이 6.2 m로써 1.8m 인 KSTAR 장치보다 월등이 크지만 초전도

3. 2 K-DEMO용 초전도체 개발

한국은 상용 핵융합로인 K-DEMO를 2037년에 완공하고자하는 로드맵을 제시하였다. 현재 개념설계 수행을 위한 전단계가 진행되고 있으며 KSTAR, ITER를 통해 얻은 기술 개발 결과와 접목하여 연구가 진행되고 있다. K-DEMO는 표 4에서 보이는 바와 같이 대략 ITER 장치 정도의 크기이며, 현재 초전도체 개발 기술을 토대로 CICC 초전도체와 초전도자석의 사양 및 형상이 제안되었다. K-DEMO용 TF CICC (그림 12)는 운전전류 65.5 kA, 최대 16 T에서 운전되며 온도마진은 1 K 이상을 확보할 수 있는 사양

이다.

참고문헌

- [1]G. S. LEE, M. Kwon, C. J. Doh, B. G. Hong, et al., "Design and Construction of the KSTAR Tokamak", Nuclear Fusion 41, p1515, 2001.
- [2]K. Kim, H. K. Park K. Park, B. S. Lim, et al., "Status of the KSTAR superconducting magnet system development," Nuclear Fusion vol. 45, p783, 2005.
- [3]B. S. Lim, S. I. Lee, K. Kim, J. Y. Choi, et al., "Fabrication of the KSTAR superconducting CICC," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 12, p591, 2002.
- [4]K. Kim et al., "Preliminary conceptual design study for Korean fusion DEMO reactor," Fusion Engineering and Design, vol. 88, p488-491, 2013.
- [5] M. Kwon et al., "Strategic plan of Korea for developing fusion energy beyond ITER", Fusion Engineering and Design, vol. 83, p838-888, 2008.
- [6]ITER Web, <http://www.iter.org/>.
- [7]Mitchell et al., "Summary, assessment and implications of the ITER model coil test results". Vol. 66-68, pp.971-993, Fusion Engineering and Design, 2003

저자이력



추 용(秋 龍)

1993년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003년-현재 국가핵융합연구소 책임연구원.



박갑래(朴甲來)

2004년 한밭대학교 전기공학과 공학석사, 현재 국가핵융합연구소 책임기술원 및 토카막운전기술후장.



오영국(吳永國)

1989년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1999년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(공학박사), 1995년- 현재까지 국가핵융합연구소 책임연구원 및 KSTAR 연구센터 부센터장.