

한국형 핵융합 실증 플랜트 초전도 자석 시스템

김현욱, 오상준
 국가핵융합연구소 초전도자석연구팀

1. 서론

2007년 핵융합 에너지 개발진흥법이 시행된 이래로 2012년부터 국가핵융합연구소에서는 한국형 핵융합 실증 플랜트(Korean fusion demonstration reactor, K-DEMO)의 설계개념 연구가 진행되고 있다. K-DEMO의 개발 계획은 두 단계로 나누어져 있는데 첫 번째 단계에서는 핵융합을 통한 전기 생산(Qeng>1)과 삼중수소 자급(TBR>1.05)을 실증하고 두 번째 단계에는 진공 용기 내부의 블랑켓 및 디버터의 업그레이드를 진행하며 약 500MWe 순 전력 생산과 핵융합 발전의 경제성을 확인하는 과정이 계획되어 있다.

K-DEMO는 주 반경 6.8m, 부반경 2.1m의 대형 토카막(Tokamak)으로 계획되었다. 토카막의 플라즈마 전류와 밀도의 한계는 토로이달 자기장(B_T)의 세기에 비례하고 핵융합 에너지 출력은 B_T^4 비례하기 때문에 실증로의 성능과 경제성을 위하여 높은 자기장이 고려되었다. 또한, 수직 방향으로 진공 용기 내부 부품의 유지 보수 포트가 배치되어 이를 포함할 수 있는 크기의 토로이달 필드 코일과 넓은 간격의 폴로이달 필드 코일 배치가 필요하다. 따라서 K-DEMO에는 높은 자기장을 형성할 수 있는 대형 자석 시스템이 필수적이다.

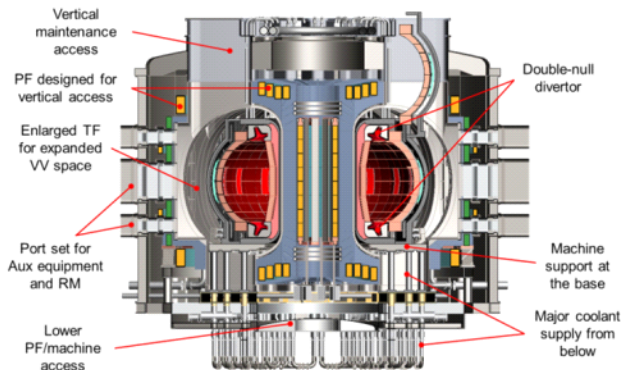


그림 1. 한국형 핵융합 실증로 구성 개요.

2. K-DEMO 자석 시스템 개요

K-DEMO의 초전도 자석 시스템은 16개의 토로이달 필드 코일(Toroidal Field coil, TF), 8개의 중심 솔레노이드(Central Solenoid, CS) 그리고 12개의 폴로이달 필드 코일(Poloidal Field coil, PF)로 구성되어 있으며 모든 코일은 도체 내부로 냉매를 전달하는 케이블 도관 도체(Cable-In-Conduit Conductor, CICC)를 사용한다.

TF 코일은 두 종류의 CICC를 사용하여 저자장 영역 TF코일(Low Field TF, LFTF)과 고자장 영역 TF 코일(High Field TF, HFTF)을 각각 구성하여 초전도 선재 사용량을 줄이고 TF코일 지지 구조물의 공간을 확보하였다. TF 코일은 고임계전류 Nb_3Sn 선재를 사용하여 중심부 자장 7.4T, 최고 자장 16T의 토로이달 방향 자기장을 제공하여 높은 플라즈마 전류와 밀도를 얻을 수 있도록 설계되었다. CS 코일은 총 8개의 동일한 CS 코일 모듈이 쌓여서 배치되고 TF 코일의 내측 안쪽에 위치한다. 초기 플라즈마 형성에서 옴릭 가열(ohmic heating)에 활용되며 약 82 Wb의 자속 스윙(반스윙)이 가능하다. CS 코일에는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)의 초전도 자석을 위해 개발된 Nb_3Sn 선재를 적용할 예정이다. PF 코일은 TF 코일 주변에 배치하여 토로이달 자기장과 함께 플라즈마가 나선형 궤적을 형성하도록 돕는 폴로이달 자기장을 형성한다. 앞서 설명한 대로 수직 방향 유지 보수 포트가 PF 4번과 PF 5번 코일 사이에 위치하여 PF 1-4번 코일은 TF 코일의 내측 상/하단부에 각각 쌍으로 위치하고 PF 5번은 TF 외측 상/하단부에 PF 6번은 TF 코일 반경 바깥쪽에 상/하로 위치한다. PF 1-4번은 CS 코일과 동일한 ITER 타입의 Nb_3Sn 선재가 적용되고 PF 5, 6번 코일은 $NbTi$ 선재가 사용될 예정이다.

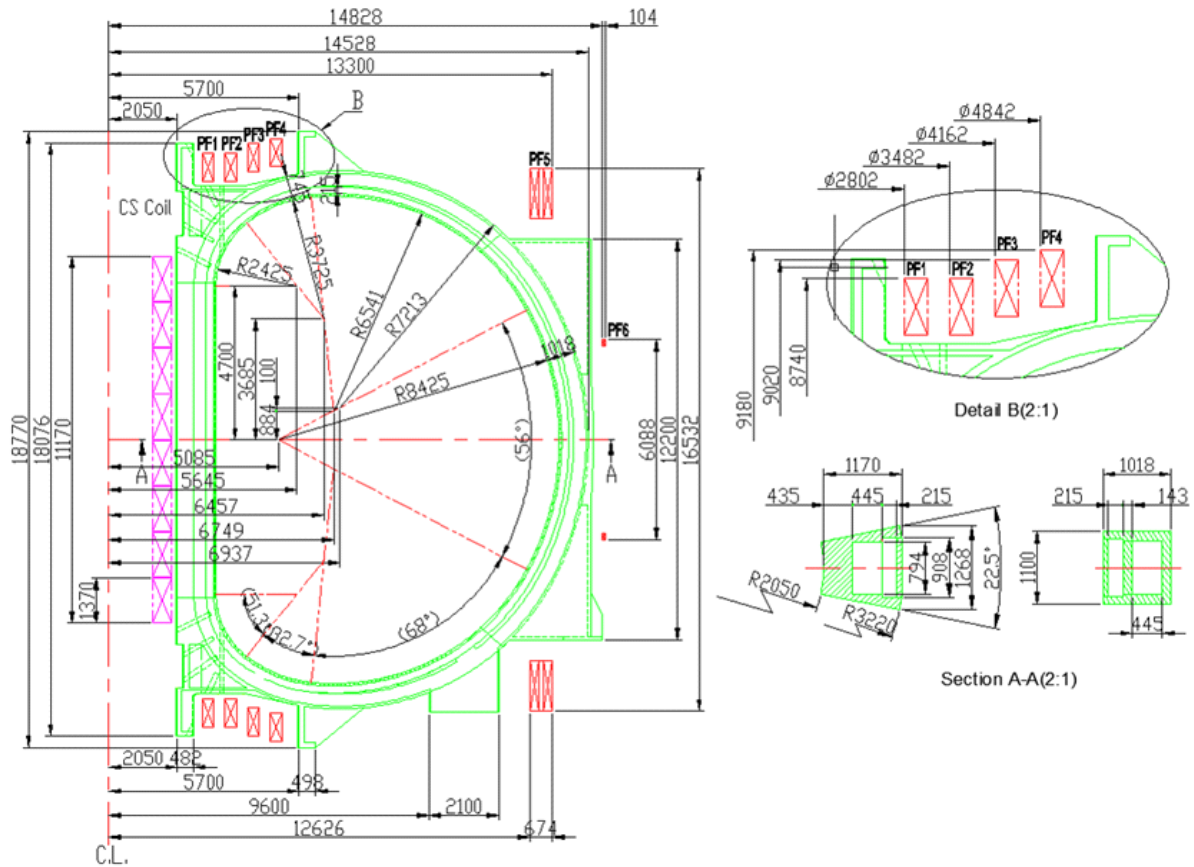


그림 2. K-DEMO 전자석 시스템 단면 배치도.(CS: 분홍, TF: 초록, PF: 빨강)

3. K-DEMO 초전도 도체

K-DEMO 초전도 도체는 초기 연구단계 이후 진행될 공학 설계 단계에서 발생 가능한 쟁점들을 해결하는 방향으로 지속적인 보완이 이루어지고 있다. TF 도체에서는 TF 내측 지지 구조물의 구조적 보강을 위하여 LFTF CICC의 채킷 두께를 증가시키고 CICC 조관 과정에서 찌그러짐의 문제가 발생하는 HF TF의 냉각 나선(cooling spiral)의 개수를 두 개로 늘려 제작 가능성을 향상하였다. 초기 연구에서 내부 냉각 나선이 존재하지 않았던 CS CICC는 중앙부에 냉각 나선을 도입하며 정사각형 형태로 변경하였고 그 결과 헬륨 냉각 채널 길이를 증가시켜 피드 스루(feed-through)의 개수를 줄임으로써 제작의 복잡성을 완화하였다. PF CICC는 단면의 코너 반경을 증가시켜 조관 과정의 편의성을 높이는 방향으로 보완하였다. 각 CICC는 모두 시험 제작하여 각 특성을 확인하였다.

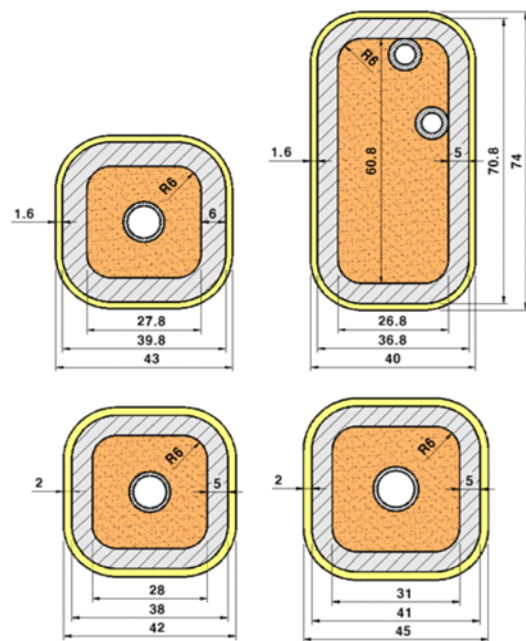


그림 3. K-DEMO CICC 단면도 (LFTF: 왼쪽상단, HF TF: 오른쪽상단, PF: 왼쪽하단, CS: 오른쪽 하단, mm 단위)

표 1. K-DEMO CICC 설계 파라미터.

Parameter	TF HF	TF LF	CS	PF 1-4	PF 5-6
• Cable pattern	(3SC)×4×5×6×5 +2 Helical Spirals	((2SC + 2Cu) ×5) ×6+7Cu) ×6 + Central Spiral	(2SC + 1Cu) ×3×4×4×6 + Central Spiral	(2SC+1Cu)×3×4×4×5 +Central Spiral	
No. of SC strand	1800	360	576	480	
No. of copper strand	-	432	288	240	
Spiral dimension (mm)	ID 5 / OD 8	ID 5 / OD 8	ID 9 / OD 11	ID 8 / OD 10	
Void fraction (%)	29.68	27.58	35.85	33.86	
• Strand type	High Jc (> 2600 A/mm ²) Nb3Sn Strand 0.82 mm diameter (~510 ton + ~320 ton)		ITER type (Jc ~ 1000 A/mm ²) Nb3Sn Strand 0.82 mm diameter (~160 ton + ~180 ton)		NbTi Strand 0.82 mm diameter (~180 ton)
• Cu/non-Cu ratio	1.0				
• Insulation	1.6 mm (including Voltage Tap) (0.1 mm Kapton 400% + 0.3 mm S glass 400%)		2.0 mm (including Voltage Tap) (0.1 mm Kapton 400% + 0.4 mm S glass 400%)		
• Jacket thickness (mm)	5.0	6.0	5.0	5.0	5.0
• Twist pitch (mm)					
1st stage	80 ± 5	80 ± 5	27 ± 5	35 ± 5	35 ± 5
2nd stage	140 ± 10	140 ± 10	45 ± 10	75 ± 10	75 ± 10
3rd stage	190 ± 10	190 ± 10	85 ± 10	135 ± 10	135 ± 10
4th stage	245 ± 15	300 ± 15	150 ± 15	285 ± 15	285 ± 15
5th stage	415 ± 20	-	420 ± 20	410 ± 20	410 ± 20
• Wrapping Tape					
Sub-cable wrap width	0.08 mm, 40% coverage				
Cable wrap thickness	15 mm				
Cable wrap thickness	0.4 mm, 50% coverage				
Final wrap width	7 mm				

4. K-DEMO TF 자석

상술한 대로 K-DEMO TF 자석은 두 종류의 CICC를 활용하여 저자장 영역과 고자장 영역에 각자 다른 CICC 권선을 적용하여 초전도 선재의 사용량을 약 1200톤 이상 감소시키고 TF 지지 구조물의 공간을 확보하는데 설계의 특징이 있다. 두 권선중 LFTF 코일은 길이가 약 1030m인 단위 CICC 9개가 더블팬케이크 권선으로 감겨있으며 총 10턴-18레이어로 이루어져 있다. HFTF 코일은 길이가 약 1010m인 단위 CICC 3개가 쿼드러플팬케이크 권선으로 감겨있으며 총 5턴-12레이어로 이루어져 있다. 각 권선에 사용될 초전도체의 양은 LFTF가 약 320톤, HFTF가 약 510톤이다. TF 코일의 외측에 존재하는 두 권선 사이의 공간은 초전도 접합, 턴-레이어 전이, 전류도입선, 헬륨 피드스루 등을 위한 공간으로 준비되었다. 모든 TF 코일은 직렬연결되며 동작 전류는 65kA로 플라즈마 중심부에서 약 7.4T의 자기장을 형성하며 최대 자기장은 HFTF에서 16T, LFTF에서 12.1T 다. TF 코일 1개에 저장되는 에너지는 약 9GJ로 16개의 TF 코일에는 총 144GJ이 저장될 것으로 예상된다.

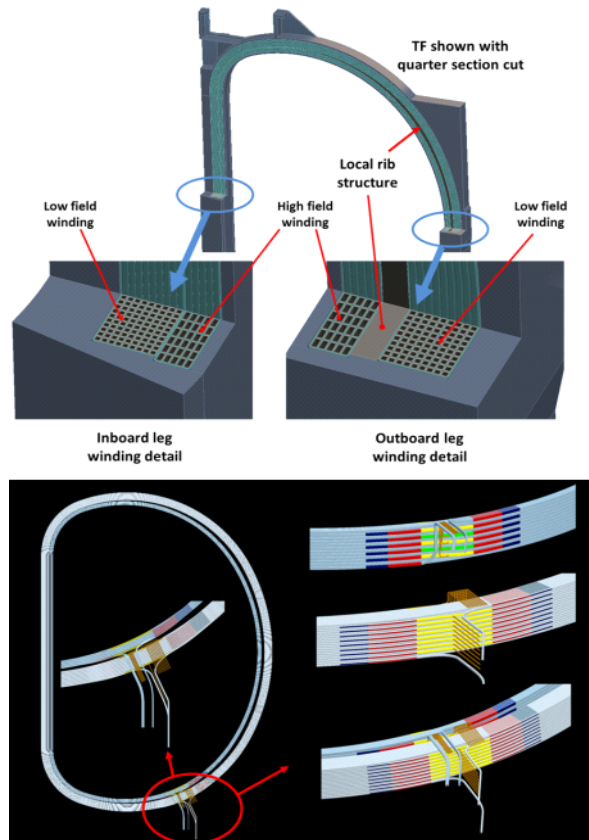


그림 5. K-DEMO TF 코일 1/4 단면도(위), LFTF와 HFTF 사이 공간 활용(아래).

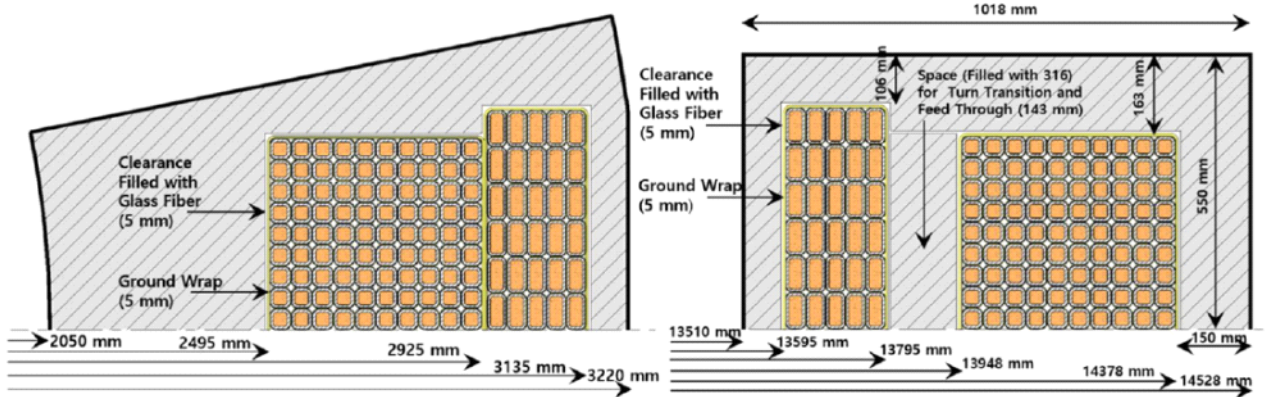


그림 5. K-DEMO TF 자석의 권선 단면도.

5. K-DEMO CS, PF 자석

K-DEMO TF 자석 내측 구조물 안쪽에 위치한 CS 자석은 총 8개의 솔레노이드 모듈이 수직으로 쌓여있는 구조로 하나의 CS 모듈은 은 길이가 약 740m인 단위 CICC 6개가 총 12턴-30레이어로 이루어져 있다. 초전도 선재는 ITER 타입의 Nb₃Sn 선재가 약 160톤 사용될 예정이다. CS CICC에 도입된 중앙 냉각 나선의 영향으로 CS 자석에 필요한 헬륨 피드 스루의 개수는 41개로 도입 이전과 비교하면 약 1/3로 감소하였다. CS 자석의 동작 전류는 43kA로 중심부 자기장은 약 13.3T 이고 최대 자기장은 약 13.6T를 형성한다 이때 반스윙 자속은 최대 82Wb를 제공한다.

K-DEMO PF 자석은 총 6쌍의 솔레노이드로 TF 구조물의 상/하부 및 외측에 위치하며 PF 1-4번 자석은 길이가 각각 620, 755, 890, 1030m인 단위 CICC가 각 8턴-20레이어로 이루어져 있다. CS와 같은 ITER 타입 Nb₃Sn 선재가 약 180톤 사용될 예정이다. PF 5번 자석은 수직 방향 유지 보수 포트의 영향으로 PF 4번과 약 7m 떨어져 위치하며 단위 CICC 길이의 제한으로 두 개의 모듈로 나누어져 있다. 길이가 각각 980, 1030m인 단위 CICC가 각 6턴-36레이어로 구성된다. PF 6번 자석은 TF 구조물 외측에 위치하며 길이가 770m인 단위 CICC가 2턴-4레이어로 감겨있다. PF 5, 6번 자석은 다른 자석들과 달리 NbTi 초전도 선재가 사용될 예정이며 약 180톤의 초전도체가 필요하다. 모든 CS, PF 자석은 더블팬케이크 권선

으로 감겨있으며 플라즈마 시나리오에 따라 교류전류로 동작한다.

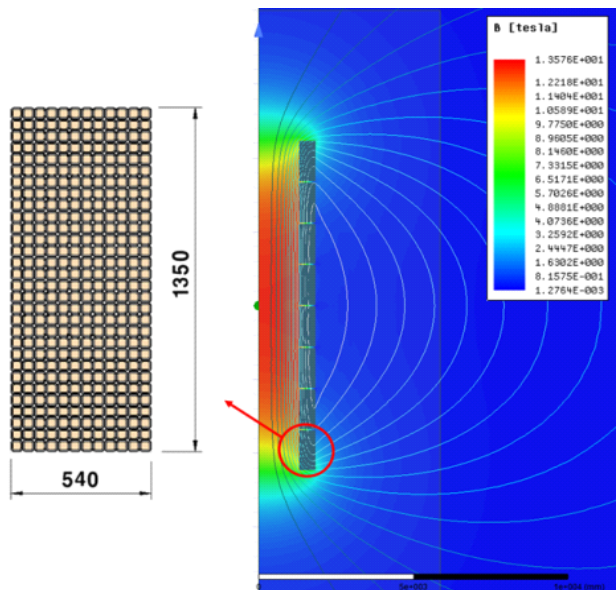


그림 6. K-DEMO CS 자석의 2차원 자기장 해석 모델.

6. K-DEMO CICC MQE

K-DEMO CICC의 Minimum Quench Energy(MQE)를 1차원 퀀치 해석 코드인 GANDALF를 활용하여 확인하였다. 정사각 펄스 형태의 열원이 10ms 동안 도체 중심부 2m에 가해졌을 때 각 CICC의 동작 전류에 따라 변화하는 MQE를 계산하였다. 초전도 선재의 특성은 ITER 선재의 특성을 활용하였고 배경 자기장은 상술한 각 자석의 자기장 값을 적용하였다. 입력 경계조건은 압력

0.6MPa, 온도 4.5K, 유량 8g/s를 적용하였다. 모든 CICC에서 설계 조건인 500mJ/cc를 만족하였으나 HFTF의 경우 두 냉각 나선이 실물에는 이중 나선으로 형성되어 있는 점은 추가로 고려해야 할 사항이다.

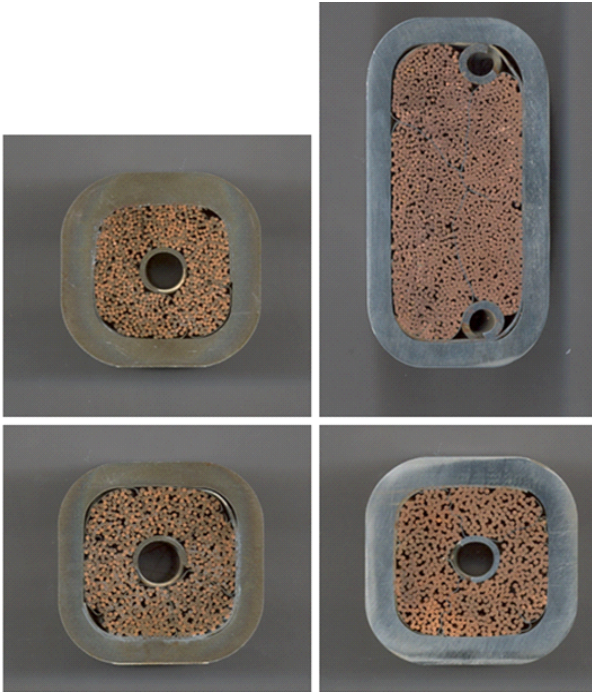


그림 7. 시험 제작된 K-DEMO CICC, LFTF:왼쪽상단, HFTF:오른쪽상단, PF:왼쪽하단, CS:오른쪽 하단).

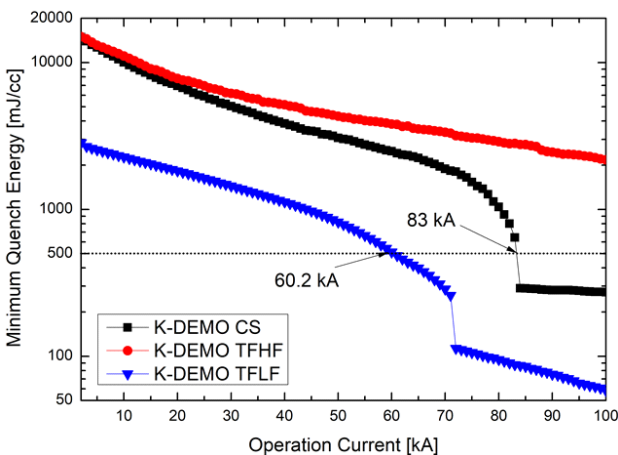


그림 8. K-DEMO CS, LFTF, HFTF CICC의 MQE 해석 결과(Pin=6.0bar, Tin=4.5K, mass flow rate=8.0g/s).

7. K-DEMO의 연구 전망

2012년 한국형 핵융합 실증 플랜트 설계개념 연구가 시작된 이래로 K-DEMO의 매개변수와 운영 능력을 탐색하고, 관련 분야의 핵심 연구 및 연구 개발 방향을 정립하는 활동을 지원하기 위한 기반 마련 및 핵융합 실증 플랜트 프로그램의 비전을 제시하기 위한 연구 활동이 활발히 진행되고 있다. 그러나 먼저 핵융합 실증로 설계개념 연구에 뛰어들어 EU, 중국, 일본 등에 따르면 디버터 시스템, 삼중수소 증식 블랑켓, 초전도 자석 시스템 등으로 대표되는 핵융합 실증로 시스템의 많은 구성 요소들에 대하여 현재 기술과 실증에 필요한 기술 사이에 큰 격차가 있음이 밝혀졌다. 그에 따라 많은 핵융합 연구 시설, 예를 들어 구성 요소 시험 시설(Component Test Facility, CTF), 핵융합 핵공학 시설(Fusion Nuclear Science Facility, FNFS), 시험 플랜트(Pilot Plant) 등의 연구 시설이 현재의 기술 격차를 줄이기 위하여 실증 플랜트 설계 및 구축에 앞서 제안되었다. 이러한 상황은 K-DEMO 자석 시스템의 연구 개발 과정에서도 유사하게 적용된다. 현재 국내에는 K-DEMO HFTF의 최대 자기장인 16T 이상의 자기장에서 중/대형 초전도 도체 샘플을 시험 할 수 있는 설비가 없는 상황으로 실제 K-DEMO 초전도 자석의 개념/공학 설계가 진행된다면 핵융합 CTF 구축의 일환으로 20T급의 도체 시험 시설(Magnet Test Facility)의 건설이 필요한 상황이다.

한국형 핵융합 실증 플랜트 설계개념 연구 이후로 다양한 연구시험 시설과 플랜트 구축을 통한 필요 기술의 개발이 선결된다면 핵융합 발전의 상용화를 위한 본격적인 한국형 핵융합 실증로 건설은 더욱 안정적으로 진행될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Keeman Kim et al., "A preliminary conceptual design study for Korean fusion DEMO reactor", Fusion Eng. Des., 88 pp 488-491 (2013)
- [2] C. E. KESSEL et al., "Systems Analysis Exploration of Operating

저자이력

Points for the Korean Demo Program", SOFE 2013, San Francisco, June 10-14 (2013)

[3] Keeman Kim et al., "A Conceptual design study of the K-DEMO magnet system", Fusion Eng. Des., 96 pp 281-285 (2015)

[4] Tom Brown et al., "Results of availability imposed configuration details developed for the K-DEMO", Fusion Eng. Des., 109 - 111 (Part B) pp 1091-1095 (2016)

[5] A. Godeke et al., "A review of conductor performance for the LARP high-gradient quadrupole magnets". Supercond. Sci. Technol. 26(9) 095015 (2013) .

[6] AC. Marinucci et al., "Stability analysis of the ITER TF and CS conductors using the code Gandalf", IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 612 (1999)

[7] HyunWook Kim, et al., "Design updates of magnet system for Korean fusion demonstration reactor, K-DEMO", Fusion Eng. Des. 146 pp 1086 - 1090 (2019)

[8] National Fusion Research Institute, "Conceptual Study Report of Korean Fusion Demonstration Tokamak Reactor(K-DEMO)", Internal report (2019)



김현욱(金賢旭)
2005-2012년 성균관대학교 전자전기공학과, 2013-2015년 한국원자력의학원, 2016-2017년 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory (Post Doc.)
현재 국가핵융합연구소 선임연구원



오상준(吳尙峻)
1987-1991년 한국과학기술원 물리학과, 1991-1993년 한국과학기술원 물리학과, 1993-1998년 한국과학기술원 물리학과, 현재 국가핵융합연구소 책임연구원