

※ 본 자료는 「(가칭)핵융합에너지 가속화 핵심기술 개발 및 인프라 구축사업」 기획연구
기술수요조사의 세부기술에 대한 이해도 제고를 위해 제공하는 과거 기획연구
참고자료로, 현재 기술 현황과 다소 차이가 있으며, 아래 작성된 사항은 확정된
내용이 아님을 양지 부탁드립니다.

초전도 자석 기술 설명자료

2024. 02.

목 차

I . 개요	1
II . 국내외 현황	3
III . 세부기술 현황	13
가. 초전도 선재	13
나. 초전도 도체	16
다. 초전도 자석	19
라. 초전도 자석기반 시스템	22
마. 초전도 자석 관련 연구시설	24

□ 기술정의

- 실증로 플라즈마의 안정적 가둠을 위한 고자장 초전도 자석 기술

※ 고온의 플라즈마를 가두는데 필요한 높은 중심 자기장(실증로급 6.5-7.0T)을 발생시키는 노심을 감싸는 거대한 초전도 자석 개발

□ 필요성

- 핵융합 플라즈마 반응 유지에 반드시 필요한 기술로, 플라즈마 제어를 위한 기본요건임
 - 초전도 자석을 이용해 핵융합 반응(고성능 플라즈마) 이후 불안정한 플라즈마를 안정적으로 가두어야만 장시간 운전 조건이 형성되며, 토카막 내벽 장치 안전을 위해 필수
- 초전도 자석은 실증로 주요 부품 중 제작 소요기간 및 비용이 가장 많이 필요한 기술로 제작 및 성능 효율화는 경제성 확보에 매우 중요
 - 고성능 초전도 선재의 경우, 자체 개발이 아닌 경우에는 전체적인 비용 상승은 물론 제작 일정에도 중요변수로 작용할 가능성이 매우 높아, 완성품 구입에 상당한 비용이 발생

□ 파급성

- 초전도 자석기술은 의료용 MRI 장치에 활용되며, 서울대병원, 세브란스병원 등 국내 병원에서도 도입 중인 의료용중입자가속기 초전도 자석 등에도 활용 가능
- 최근 많이 보고되고 있는 고온초전도 자석을 활용한 초고자장 토카막 등에 활용 가능

□ 세부기술

- 강력한 자기장 발생을 위해 저항이 없는 초전도 선재^①로 50kA 이상의 높은 전류가 흐르는 초전도 도체를 제작^②하고 도체를 활용하여 최종적으로 거대한 초전도 자석을 제작^③하고 운전하는 시스템^④ 개발

< 초전도 자석 세부기술 분류 >

① 초전도 선재

- 실증로급 초전도 자석용 고자장 고성능 초전도 선재 개발 및 선재 개발
 - 핵융합 실증로 초전도 자석 적용을 위한 ITER 2배 이상 성능의 고자장 특성 향상 초전도 선재 개발
 - 도체 성능 검증 결과를 반영한 고성능 저온 초전도 선재 사양 정의 및 특성평가 기술 개발 (QA/QC 프로세스 확립)
 - 핵융합로에 적용 가능한 고온초전도 선재 사양 설정 및 특성 평가 기술

② 초전도 도체

- 저온 및 고온초전도 도체 설계, 케이블링 조관 등 제작, 특성평가 기술
 - 16T 급의 초전도자석용 50 kA 이상 저온초전도 도체 설계기술, 도체 케이블링, 조관 및 제작기술 개발
 - 초전도 자석의 안정적 운전을 위한 도체 시험검증 기술 개발
 - 초전도 도체 성능 검증 결과를 반영한 실증로급 초전도 도체 설계 및 제작 (QA/QC 프로세스 확립)
 - 핵융합로에 적용 가능한 고온초전도 도체 설계, 제작기술 연구

③ 초전도 자석

- 실증로용 토로이달 필드 코일 등 초전도 자석 설계 및 제작 기술
 - 16T 급 핵융합 실증로용 저온초전도 자석 설계, 고자장을 견딜 수 있는 구조 설계 및 절연, 접합 기술을 포함한 제작기술 확립
 - 실증로 초전도 자석 시험용 코일 제작 및 평가 수행
 - 시험용 코일 제작 시험 결과에 따른 실증로용 저온초전도 자석 설계 및 제작 기법, QA/QC 프로세스 확립
 - 핵융합로에 적용 가능한 20T급 고온초전도 자석 설계, 제작 및 운전 기술개발, 시험용 코일 설계, 제작 및 평가 수행

④ 초전도 자석기반 시스템

- 초전도 자석 냉각, 전원 등 기반 시스템 및 자석 켄치 보호, 운전 해석 기술
 - 초전도 자석 냉각 및 전원 공급 등 제반 사항을 포함한 기반시스템 설계, 제작 및 운영 기술 확보
 - 실증로용 초전도 자석 켄치 보호 및 운전해석 기술 개발
-

II

국내외 현황

가

기술 동향

- ▶ 해외는 실증로급 초전도 자석의 개발을 위해 꾸준한 기술개발과 시설구축을 추진 중이나, 한국은 KSTAR, ITER 조달 이후 초전도자석 개발이 간헐적으로 수행

□ 국외

- (주요국) 실증로급 초전도자석 개발을 위해 지속적인 연구개발 및 시험평가 시설을 구축 하였으며, 최근 민간기업 중심 고온초전도체 개발도 병행 중

<표. 국외 초전도 자석 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
초전도 선재	<p>▶ 산업체를 중심으로 저온초전도체의 선재 제조 기법이 개발되었으며, 최근 성능이 개선된 고온초전도체 개발 추진 중(US, JP)</p> <p>▶ 선재파괴기술(US), 선재 성능분석(EU) 등 선도적인 초전도 선재 성능평가 기술 개발 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 저온초전도체의 제조 및 성능평가 기술의 선도적인 연구 수행 중</p>
초전도 도체	<p>▶ 실증로급 저온초전도 자석 개념을 발전시키고 이에 필요한 도체 설계·제작기술을 경쟁적으로 연구 중(EU)</p> <p>▶ 저온 및 고온 초전도 도체의 평가가 가능한 시험시설(HFMVTF)를 구축하고 운영 착수(US, EU)</p> <p>▶ ITER 초전도 도체 시험시설을 보유하고 있으며, HFMVTF와 동일 사양의 시험 시설(EDIPO2)을 추가적으로 건설 중(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 초전도 도체 개발을 지속적으로 수행중이며, 고성능 선재의 실증로 운전에 따른 평가를 위해 연구시설을 구축 중</p> <p>▶ 민간기업(CFS)가 고온초전도 도체기술을 선도 중(US)</p>
초전도 자석	<p>▶ ITER 초전도 자석 설계·제작을 주도하고 있으며, DTT 초전도 자석 설계·제작으로 지속적인 연구 수행 중(EU)</p> <p>▶ ITER TF 시험용 코일 특성평가(EU), ITER CS 시험용 코일 특성평가(JP) 경험 보유</p> <p>⇒ (주요이슈) 초전도 자석의 설계·제작·특성평가의 연구개발이 꾸준히 지속</p>
초전도 자석 기반시스템	<p>▶ 세계 최대 규모의 초전도자석 부대 시스템이 ITER를 통해 구축되고 있으며, 핵심기기(저온냉동기) 제작 가능한 산업체를 보유하는 등 산업계 역량도 세계 최고 수준(EU)</p>

○ **(ITER)** 실증로급의 13T급 자석 제작에 필요한 제반 기술 확보

- 도체 내 냉매 공급을 위한 central spiral을 포함하는 도체 설계/제작 기술, 저온 구조물 탄생 한계치에 해당하는 힘을 견디는 전체적인 자석 설계/제작 기술 등

○ **(인프라 현황)** 초전도 도체, 자석의 특성평가를 위한 시험시설을 구축

< 표. 핵융합 소재 연구시설 현황 >

국가	시설명	분야	목표 및 내용	비고
EU	SULTAN	초전도자석	• 스위스 12T급 초전도도체 시험시설	• ITER 도체 평가수행
	EDIPO2	초전도자석	• SULTAN에 설치된 16T 장비명	• 파손으로 사용불가
미국	HFMVF	초전도자석	• 미국에 설치된 15T급 도체시험시설	• 2022부터 운영시작
	CFS	초전도자석	• 고온초전도자석 시험시설 구축하고 20T급 시험용 코일 제작 및 평가 성공	• 고온초전도 핵융합 용 가능성을 최초로 시연

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
초전도 도체 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • EU에서는 스위스 SPC의 SULTAN 시설 및 CERN의 FRESKA 등의 시설을 운영 중이며 특히 SULTAN 시설은 ITER 도체 시험 평가에 중요한 역할 수행 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) FRESKA 시설은 핵융합로용 도체 시험에는 부적절하고 SULTAN 시설은 자장이 12 T 이하인 시험만 가능 • (한계) SULTAN 시설은 자장의 한계 외에도 사용 시간 예약이 어려운 상황
	<ul style="list-style-type: none"> • 최근 페르미 랩 (FNAL) 및 로렌스 버클리 랩 (LBNL)에서는 EU와의 협력으로 고온초전도 도체 평가도 가능한 15 T, 100 kA급 시험시설, HFMVF (High Field Vertical Magnet Test Facility)을 공동으로 구축하고 운영 돌입 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) HFMVF 시설은 핵융합로용 도체가 아닌 가속기용 도체로 제작이 되었으며 현재 초기 운영 중으로 운영 상황을 지속적으로 확인 필요
초전도 자석 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 CFS (Commonwealth Fusion Systems)에서는 고온초전도 자석 시험시설을 구축하고 2021년 SPARC 사양의 20 T급 시험용 코일의 제작 및 평가에 성공 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 초전도 자석 시험시설은 자석 제작과 관련된 여러 기밀 사항으로 해당 기관에서 독점적으로 사용하기에 사용이 불가

□ 국내

○ **(주요성과)** KSTAR, ITER 조달의 경험을 축적하여, 저온 초전도 자석 분야 기술 선도

- KSTAR 초전도 자석 제작 운영 및 ITER 초전도 자석 조달 완료
- 실증로 CSR 초전도 자석 설계 및 KSTAR 초전도 자석 해석 코드 개발
- ITER급 초전도 선재개발 및 조달 완료(KAT), 고온초전도 선재활용 송전 케이블 상용화 (주서남)

<표. 국내 초전도자석 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
초전도 선재	<ul style="list-style-type: none"> ▶(주)KAT에서 ITER 사양을 증가하는 저온초전도 선재를 개발하고 DTT(이탈리아) 납품, CFETR(중국) 시험용 코일 선재 수주 성공 ▶(주)서남, (주)삼동에서 고온초전도 선재를 세계시장에 공급하고 있으며, 성능개선 연구 및 양산, 표준화 연구도 진행 중 ▶KSTAR, ITER를 통해 기초적인 선재 성능평가 기법은 확보하였으나, 고자장 고성능 초전도 선재 사양에 맞는 평가 기법 개발 필요 <p>⇒ (주요이슈) 국내에서 고자장(16T) 저온초전도 선재 개발에 성공하였으나, 실증로급 운전에 따른 성능평가영향 연구 필요</p>
초전도 도체	<ul style="list-style-type: none"> ▶KSTAR, ITER를 기반으로 초전도 도체 기초설계 능력을 확보하였으나, ITER 조달 종료후 해당 산업체의 사업종료로 제작 업체 발굴 필요 <p>⇒ (주요이슈) 실증로급 초전도 도체 제작을 위한 산업체 발굴 및 연구개발 참여 요구</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶HFVMTF 이상 규모의 초전도 도체 시험설비 구축에 착수('27년 완공) <p>⇒ (주요이슈) 시험시설 구축을 통해 평가기술 분야의 기술수준 향상이 예상되나, 전반적인 경험을 보유한 선진국과의 협력 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 최근 고온초전도 도체 개발을 위한 사업 착수
초전도 자석	<ul style="list-style-type: none"> ▶KSTAR 초전도자석 설계·제작 경험을 보유하고 있으나, 실증로급 초전도자석 설계는 간헐적으로 지속 <p>⇒ (주요이슈) KSTAR 초전도 자석 제작 이후 대형 초전도 자석 제작 경험이 없고, 해당 경험을 보유한 인력의 은퇴로 기술공백 우려</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 최근 고온초전도 도체 연구가 착수되었으며, 고온초전도 자석은 시험용 코일 개념연구 수준
초전도 자석 기반시스템	<ul style="list-style-type: none"> ▶KSTAR 건설시 부대시설 구축 경험을 보유하고 있고, 이를 바탕으로 초전도 도체 시험설비 구축사업에 활용 <p>⇒ (주요이슈) 실증로급 초전도자석 운전해석기술 및 쉐치보호 기술 등 개발 요구</p>

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구 기관	핵융합(연)	<ul style="list-style-type: none"> • KSTAR 초전도 자석 제작 ('06), 운영 및 ITER 초전도 자석 조달 완료 ('14) • 핵융합(연)에서 KDEMOCR 초전도 자석 설계 ('19) 및 KSTAR 초전도 자석 해석 코드 개발 ('21) 	08명
대학	서울대	<ul style="list-style-type: none"> • 무절연 고온초전도 자석 활용 45.5 T 세계 최고 자기장 달성 ('19) • 초전도 도체 시험설비 구축 진행 ('22부터) 	11명
	한전공대	<ul style="list-style-type: none"> • 초전도 도체 시험설비 구축 진행 ('22부터) 	07명
산업체	KAT	<ul style="list-style-type: none"> • ITER급 초전도 선재 개발, 조달 완료 ('14) 	-
	서남	<ul style="list-style-type: none"> • 고온초전도 선재 활용 송전 케이블 상용화 성공 ('19) 	-

○ (인프라 현황) 2008년 KSTAR 시운전 이후 현재까지 안정적으로 운영 중

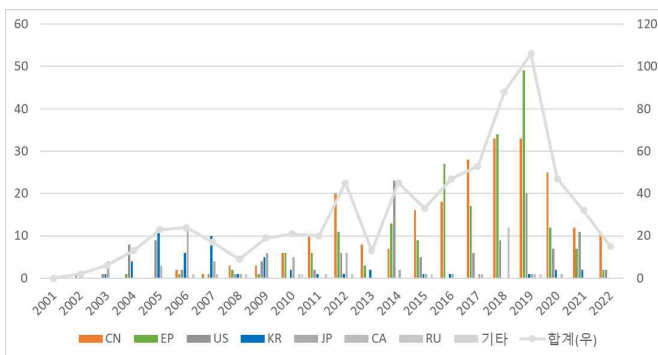
※ 최근 JT60SA 초전도 자석 사례와 같이 대형 초전도 자석의 경우 첫 회에 시운전에 성공하고 지속적·안정적 운전은 중요한 기술적인 성과임

세부시설	국내 보유 장치명	활용가능 여부 및 사유
초전도 도체 시험시설	• 현재 초전도 도체 시험시설 구축 사업이 진행 중	• (가능) 구축 시 많은 도체 시험이 수행 예정
초전도 자석 시험시설	• KSTAR 건설 중에 일시적으로 운영되기도 했으나 현재는 없음	-

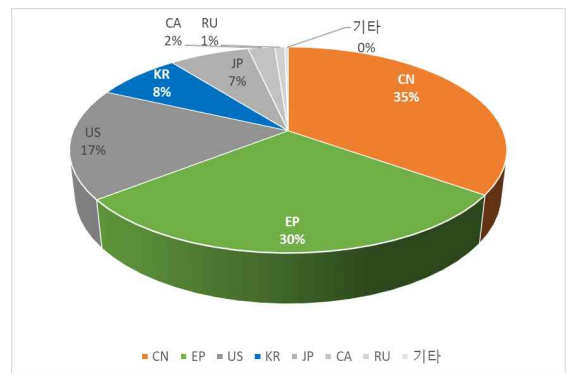
- ▶ (특허분석) 중국과 유럽을 중심으로 꾸준한 특허 출원 성장을 보여주고 있으며, 최근 Tokamak Energy를 중심으로 특허(고온초전도체) 출원이 크게 증가한 분야
- ▶ (논문분석) 미국, 스위스를 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국의 논문은 피인용도가 평균 이상이나 게재건수가 낮은 상황

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 678건의 특허가 출원되었으며, 중국, 유럽을 중심으로 최근까지 특허 출원이 꾸준히 증가하고 있는 분야
- (국가별 비중) 중국이 가장 많은 236건(35%)의 특허를 출원하였으며, 유럽 201건(30%), 미국 118건(17%), 한국 51건(8%) 순으로 특허 출원 진행



< 그림. 연도별 출원 건수 >



< 그림. 국가별 비중 >

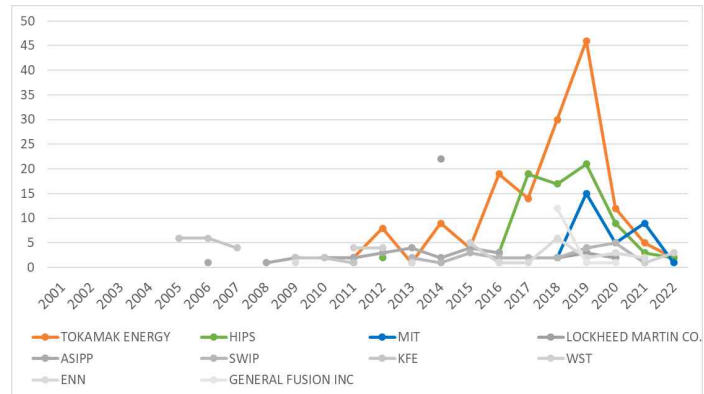
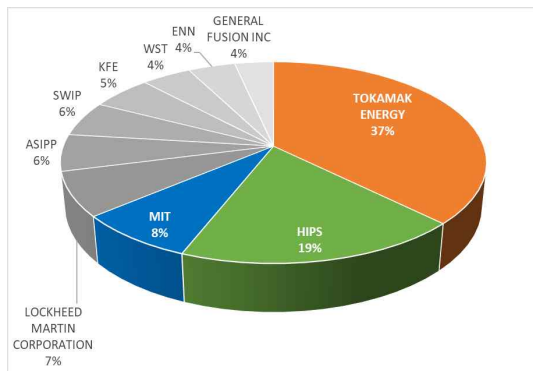
- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 러시아의 경우 자국 특허청 위주의 특허출원을 진행 중이며, 유럽, 미국, 일본의 경우 세계 주요 특허청에 출원 진행 중

< 표. 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	92%	0%	0%	0%	1%	3%	3%	0%	100%
EP	10%	16%	8%	10%	2%	18%	14%	21%	100%
US	7%	13%	8%	13%	1%	39%	16%	3%	100%
KR	2%	0%	2%	86%	0%	4%	6%	0%	100%
JP	10%	13%	29%	10%	0%	21%	15%	2%	100%
CA	13%	13%	0%	13%	13%	19%	13%	19%	100%
RU	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%
기타	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	50%	100%

○ (주요 출원인 Top 10) Tokamak Energy(영)이 가장 많은 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS(중), MIT(미) 순으로 특허를 출원하였으며, 공통적으로 최근 특허출원 집중

- Tokamak Energy(영)은 최근 고온 초전도 자석 관련 특허를 전 세계에 출원 중인 것으로 파악되고 있으며, HIPS(중)의 경우에도 최근 고온 초전도 자석 관련 특허 출원 진행 중

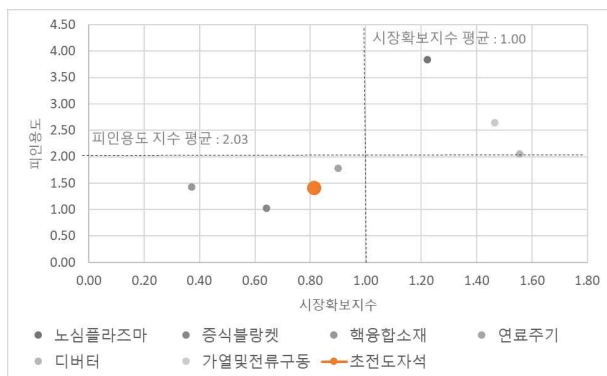


< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

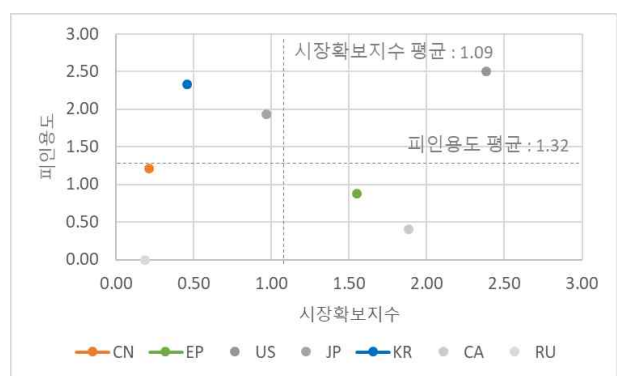
< 그림. 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 초전도 자석 분야는 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야(3사분면)이나, 최근 특허가 집중되고 있는 만큼 향후 피인용도 증가 가능성도 존재

- 국가별로 미국의 출원 특허가 경쟁력인 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국은 핵심기술 중 유일하게 초전도자석 특허의 피인용도 주요국 평균 이상인 것으로 분석

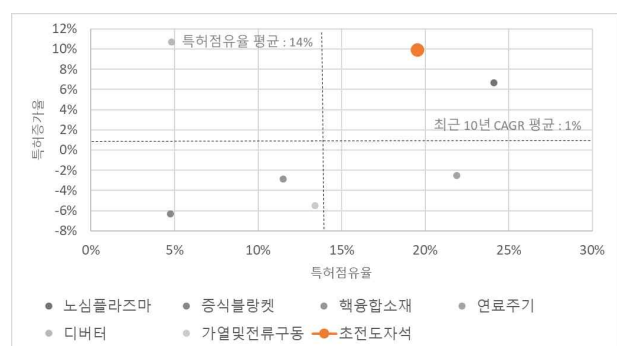


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

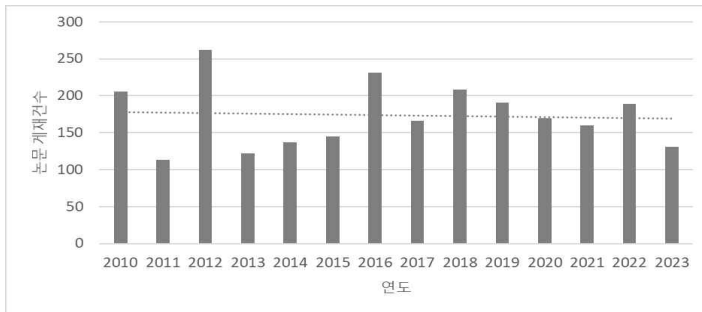
○ (특허유망성) 초전도 자석 분야는 특허 점유율과 최근 10년간 특허 성장률이 높은 분야(핵심기술 중 1위)로 1사분면에 위치하고 있으며, 최근 활발한 특허 활동이 진행되고 있는 분야로 파악



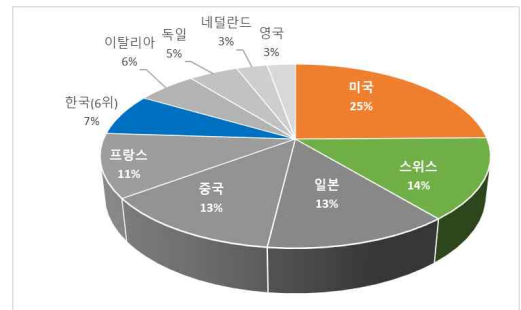
< 그림. 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 초전도자석 분야는 지난 14년간 총 2,431건의 논문이 게재되었으며, 논문게재가 감소하다가 최근 다시 상승하고 있는 분야(연평균 성장률 -0.7%)

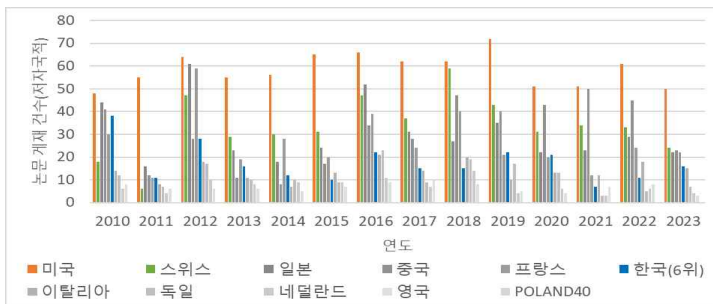


< 그림. 연도별 게재 건수 >

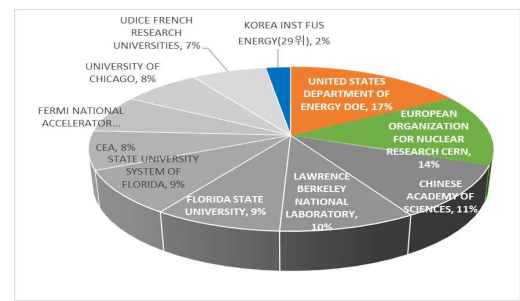


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 미국(818건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 미국이 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 한국은 게재 건수 6위(244건)

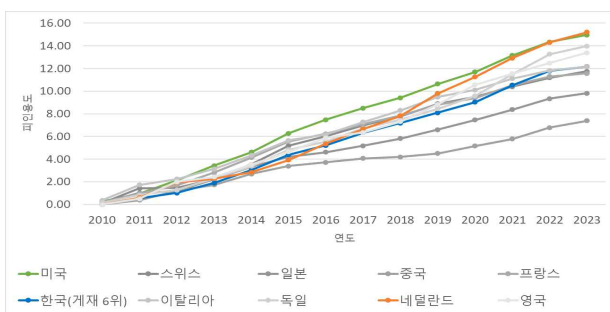


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

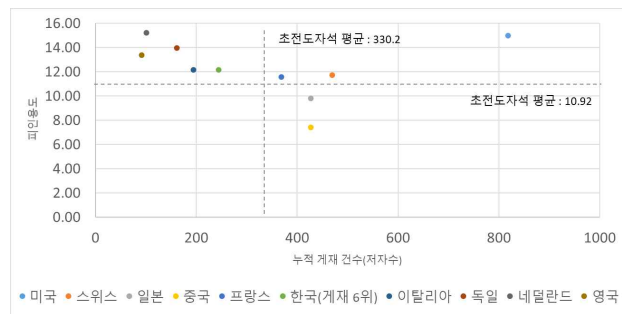


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 DOE(미국)에서 가장 많은 417건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 CERN(스위스, 355건), CAS(중국, 268건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 29위(59건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 네덜란드이며, 미국, 프랑스, 스위스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >

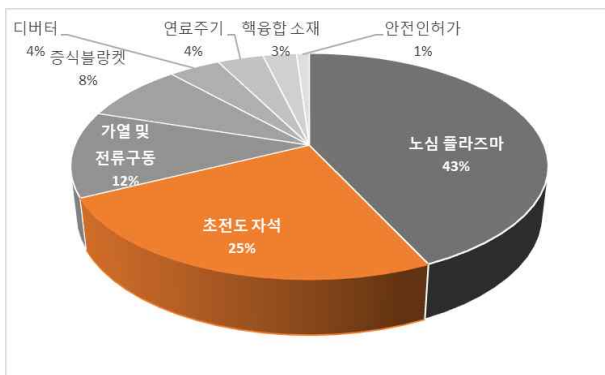


< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

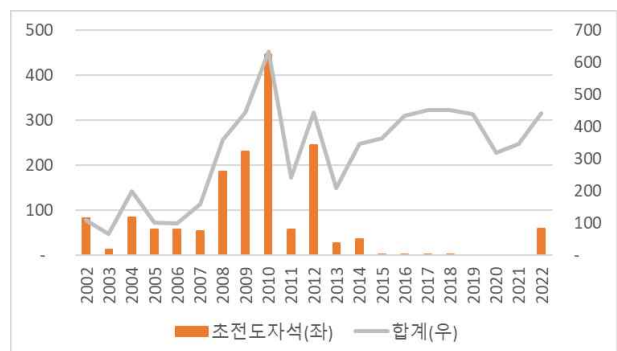
- ▶ 초전도 자석 연구는 1,669억원이 투입(8대 핵심기술 전체 금액 중 25%, 2위)되었으며, ITER 초전도 도체 개발 이후 연구개발 투입이 미미하였으나, 최근 초전도 도체 시험 설비 구축 사업 착수됨에 따라 연구개발비 증가

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 초전도 자석분야는 1,669억원(25%, 8대 핵심기술 중 2위)가 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 2000년대를 중심으로 연구개발 투자가 진행되었으며, 2010년 ITER 초전도 도체 개발을 위해 크게 성장
 - 2000년대 초반 KSTAR 초전도 자석 개발에 연구개발비가 투입되었으며, ITER 조달 품목인 초전도 도체 개발을 위해 2008년부터 큰 규모의 연구개발비가 투입. ITER 초전도 도체 조달 이후 연구개발비가 크게 감소

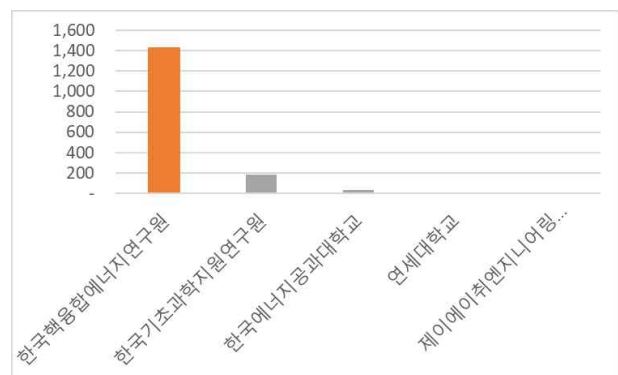


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) ITER 초전도 도체 조달을 주관하였던 핵융합에너지연구원이 초전도자석 분야 연구개발을 주도(87%)
 - 한국기초과학지원연구원이 2000년대 초반 KSTAR 초전도자석 개발을 주도하였으며, 한국에너지공과대학교는 최근 2022년 초전도 도체 시험설비 구축 사업에 착수



< 그림. 주요 연구기관 >

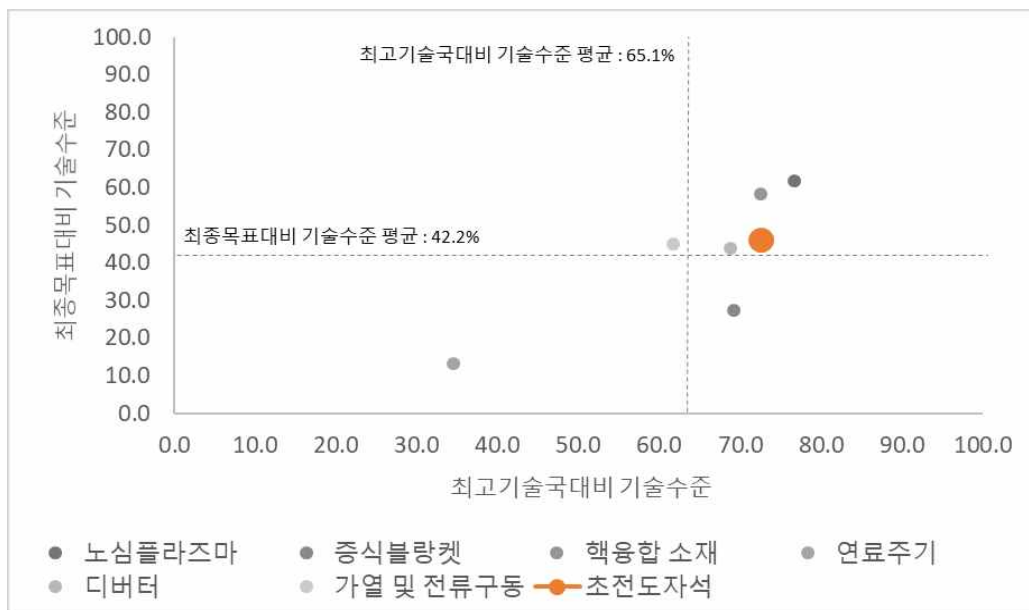
라

기술수준

- ▶ 초전도 자석 분야의 경우 KSTAR, ITER 조달을 통해 기술수준을 향상시켰으나, 실증로급 초전도 자석 개발을 위해서는 기술수준 향상 필요한 분야

□ 실증로 대비 기술수준

- 핵심기술 중 최고기술국(EU), 대비 기술수준과 최종목표(실증로) 대비 기술수준이 모두 높은 분야
 - 초전도 자석 분야는 최고 기술국 대비 기술수준이 72.5%이며, 최종 목표대비 기술수준은 46.3%로 분석



< 그림. 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

□ 세부기술 기술수준

- 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 초전도 선재가 기술수준이 가장 높은 것으로 파악되었으며, 초전도 자석 분야의 기술수준이 낮은 상황
 - 초전도 선재는 해외 수출(DTT, 이탈리아) 등 세계 최고 수준의 특성에 근접하였으나, 초전도 도체의 경우 기존 산업체의 사업철수로 새로운 제작업체가 필요한 상황
 - 초전도 자석, 초전도 자석 기반시스템 분야의 경우 실증로급 초전도 자석 연구가 미진함에 따라 점차 격차가 발생하고 있는 것으로 파악

< 표. 초전도 자석 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
초전도 선재	EU	66.7	60.0	90.0
초전도 도체	EU	71.4	50.0	70.0
초전도 자석	EU	50.0	30.0	60.0
초전도 자석 기반시스템	EU	64.3	45.0	70.0
초전도 자석	EU	63.1	46.3	72.5

※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) 실증로 건설이 가능한 크기의 13T급 자석 제작에 필요한 제반 기술 확보
- (실증로 기술대비 한계점) ITER 초전도 자석은 당시에 확보 가능한 선재를 활용한 기술 한계치에 해당하는 자석 기술임
 - 현재 그보다 나은 성능의 선재가 개발되고 있으며, 2) EU의 경우처럼 조금만 자석의 크기를 키우거나 혹은 우리나라의 경우처럼 자장을 높이고자 할 경우에는 전체적인 재설계가 불가피
 - ITER 초전도 자석 시에 발생한 여러 문제, 대표적으로 구형 단면의 도체 설계로 인한 로렌츠 힘 쏠림에 의한 심각한 선재손상 등을 ITER 보다 가혹한 실증로에서 구현하기 위한 기술 개발이 반드시 필요

< 표. ITER 사업을 통해 확보되는 초전도 자석 기술 및 한계점 >

세부기술	ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
초전도 선재	• 선재간 접촉저항 감소를 위한 크롬 코팅을 포함하는 선재 사양 설정 및 QA/QC 기법	• 실증로에 적용 가능한 ITER 사양 이상의 초전도 선재가 개발되고 있음
초전도 도체	• 도체 내 냉매 공급을 위한 central spiral을 포함하는 도체 설계/제작 기술	• 자석의 크기를 키우거나 혹은 자장을 높이고자 할 경우에는 전체적인 재설계가 불가피함
초전도 자석	• 저온 구조물 탄성 한계치에 해당하는 힘을 견디는 전체적인 자석 설계/제작 기술	• ITER 초전도 자석 시에 발생한 여러 문제를 해결하고 ITER 보다 가혹한 실증로에서 구현하기 위한 기술 개발이 반드시 필요함
초전도 자석 기반시스템	• 초전도 자석 운영관련 사항은 추후 확보 예정	• 최근 빠르게 개발이 진행되고 있는 고온초전도 자석에 관한 대비도 필요함

Ⅲ

세부기술 현황

가

초전도 선재

□ 정의

- 실증로급 초전도 자석용 고자장 고성능 초전도 선재 개발 및 선재 사양 설정

세부기술	기술개요
고성능 선재 개발 및 장산화	• 저온초전도 선재 내부의 수천가닥의 필라멘트의 크기를 더 작게 하거나 낱알경계면 등의 핀닝 특성 등을 향상하는 방법으로 고자장 임계전류밀도를 향상시키면서 동시에 수 km 장선 제작이 가능하고 교류손실 등 그 외 필요한 성능을 만족시키는 고성능 선재개발 기술
성능평가 QA/QC 기법 사양 설정	• 실제와 유사한 고자장, 고변이 등의 상황에서 임계전류 밀도 저감 특성 등 분석기술 (이는 선재 개발 과정에 피드백을 제공함과 동시에 자석 설계 기본 변수로 활용) • 자석 혹은 도체의 설계에 따라 교류손실 등 필요한 사양을 정의하고 이에 따른 선재 제작 요건을 제시하는 기술 및 설계 수명을 견딜 수 있는 선재 QA/QC 프로세스 정립 기술 • 장산화, 선재 형상 최적화, 선재 절연 및 표면처리, 균일 임계전류, 임계전류 조절, 중성자 내구성 등 실증로급 고온초전도 자석에 필요한 선재 사양 설정 및 제작 공정 개발

□ 기술개발 필요성

- (초전도 자석 개발의 핵심) 초전도 선재는 초전도 케이블의 핵심소재로, ITER 13T급 이상의 초전도 자석 제작에 가장 큰 난제로 꼽히며, 현재의 부분적인 실험실급 개발 수준이 아닌 장선화된 양산기술 개발이 필요
- (글로벌 선도 기반 마련) 초전도 자석의 글로벌 시장 선점을 위해서는, 실증로용 선재 양산을 위한 품질 보증 및 통제(QA/AC)* 절차 정립이 필수

* 고자장 성능 외에 교류손실, 변이에 따른 임계전류 밀도 변화 등 주요 성능 특성 평가 등. ITER를 통해 일정 수준으로 평준화된 기술이나, 고자장 고성능 선재의 특수성을 고려한 기법 개발은 국가별로 추진할 전망

□ 국내외 동향

① 고성능 선재개발 및 장산화

- (국외) 미국과 일본은 민간기업 중심으로 저온 및 고온 초전도 분야 고성능 선재

개발을 진행 중

- 미국은 민간기업과 대학 중심으로 연구개발이 활발하게 진행 중
 - (주)Bruker를 중심으로 RRP (Rod-Resstack Process) 방식의 독특한 고성능 Nb₃Sn 저온초전도 선재 제조 기법이 개발되어 선도적인 연구가 수행되고 있으며 이미 여러 고자장 자석에 활용되기도 함
 - (주)Luvata의 경우도, 현재 16T급 Nb₃Sn 선재를 개발 중에 있으며, 상용화를 위해 노력하고 있음
 - (주)SuperPower는 최근 고자장 성능이 획기적으로 개선된 REBCO 고온초전도 선재를 개발하였고 Houston 대학과 함께 관련 연구를 선도
 - (주)HyperTECH은 MgB₂ 소재를 기반으로 교류 손실이 적은 다심 고온초전도 선재를 개발 중
- 일본은 민간기업을 중심으로 저온 및 고온 초전도 선재 개발 추진 중
 - (주)JASTEC을 중심으로 DT (Distributed Tin) 방식의 고성능 Nb₃Sn 저온초전도 선재 제조 기법이 개발되어 RRP 방식에 근접하는 성능의 선재 개발 연구 수행
 - (주)Faraday Factory는 신생 기업으로서, 민간에서 투자가 활발한 고온초전도 Tokamak 자석에 필요한 REBCO 고온초전도 선재의 물량에 대응하기 위한 최근 양산화 계획을 발표
- (국내) KSTAR용 초전도 자석 개발 참여 산업체를 중심으로 지속적인 연구개발 추진 중
 - KSTAR 및 ITER용 초전도 선재를 납품한 바 있는 (주)KAT에서는 그 후에도 초전도 선재개발을 지속하여 (주)JASTEC과는 다른 DT (Distributed Tin) 방식의 고성능 Nb₃Sn 저온초전도 선재 제조 기법에 성공, 실증로급 사양에는 미치지 못하지만 ITER 사양을 능가하는 선재를 이태리의 DTT (Divertor Test Tokamak)에 납품한 바 있고 최근 중국 CFETR 시험용 코일제작용 선재 수주에 성공
 - (주)KAT에서는 향후 KENTECH에 건설되는 16T급 초전도 도체 시험설비에 필요한, 향후에 사용될 선재 개발을 목표로, 16T급 Nb₃Sn 선재 개발에 성공하였고, 현재 양산 체제를 위한 시험단계를 진행 중으로, 가까운 시일 내에 상용화가 가능할 것으로 예상
 - (주)서남을 중심으로 REBCO 고온초전도 선재 및 (주)삼동을 중심으로 MgB₂ 고온초전도 선재를 세계 시장에 공급하고 있음. 또한 2022년 시작된 고온초전도 자석 원천기술 개발사업의 일환으로 고온초전도 선재의 성능 개선 뿐만 아니라 양산화 및 표준화 등의 연구도 진행 중

② 성능평가, QA/QC 기법, 사양 설정 기술

- (국외) 미국은 선재 파괴 분석기술에 대해 선도적이며, EU는 선재의 변이 의존성 성능 분석에서 선도중임
 - 미국은 성능평가 기술 중 선재 파괴 분석기술에 대하여 선도적으로 수행 중이며, 특히 사양 설정 기술은 최근 핵융합로용 고온초전도 자석 개발과 관련하여 고온 초전도 선재 사양에 관한 여러 기술 분석이 수행 중
 - EU는 선재의 변이 의존성 등에 관한 성능 분석 등 전통적인 평가기술을 주도적으로 수행하고 있으며, 최근 DTT(Divertor Test Tokamak) 등의 개발로 인해 새로운 선재 사양을 정의하고 이에 대한 QA/QC 기법을 도입하기로 결정
- (국내) 기초적인 선재 성능평가 기법은 KSTAR 및 ITER 개발 과정에서 도입되었으나 고자장 고성능 초전도 선재 사양에 맞는 기법 개선이 시급한 상황. 최근 도체 시험 시설 구축에 따라 이에 필요한 초전도 자석의 개발 과정에서 선재 사양 설정에 관한 연구가 병행되어 진행 중

□ 정의

- 저온 및 고온초전도 도체 설계, 케이블링 조관 등 제작, 특성평가 기술

세부기술	기술개요
실증로 저온 초전도 도체 제작	•케이블 패턴 트위스트 피치 등에 따른 기계적 안정성 공극률 안정화동 비율 등에 따른 열적인 안정성 퀀치 안정성 등을 고려한 도체 설계기술 및 설계에 따른 단계별 케이블링 기법 고자장 하에서 강한 기계적인 힘을 견딜 수 있는 두께의 조관 기술 등 도체 제작기술 개발
초전도 도체 특성평가 QA/QC 개발	•도체 시험시설 측정용 자석 혹은 시험용 코일의 자장 환경 하에서 도체의 임계전류, 혹은 외부 열원 인가에 따른 안정성 분석 등의 초전도 도체 특성 평가 분석 기술 및 자석 권선을 위한 수 km 길이의 균일한 초전도 도체 제작을 위한 케이블링 조관 품질 등 QA/QC 기법 개발
고온 초전도 도체 제작	•고자장 임계전류 특성이 더 우수한 고온초전도 선재의 테이프 형태를 고려한 도체 형상, 교류 손실 및 자기장 특성을 고려한 도체 개발 비교적 큰 온도마진을 고려한 냉각 방법 스크리닝 전류를 포함하는 기계적 힘에 대한 고려 등을 반영한 설계 및 시험 평가 제작 기술 개발

□ 기술개발 필요성

- (우수한 산업기반 유지·발전) KSTAR 건설과정에 참여한 국내 기업들이 ITER 초전도 도체의 성공적 제작·조달 완료 등 국제적으로 인정받은 우수한 기술력의 지속적인 유지 발전 필요
 - 실험로와 달리 실증로용 초거대 고성능 초전도 도체는 고차원의 기술력이 필요한 만큼 실증로급 저온초전도 도체 설계, 제작 기술 확보 필요
 - ※ ITER 도체 평가과정에서 제기된 케이블 모양에 따른 힘의 쏠림, 트위스트 피치에 따른 승온/냉각 과정의 안정성 등의 문제점 및 실증로용 도체 평가과정에서 발견될 문제점을 반영
- (기술적 한계 극복) 고자장 저온초전도 선재를 사용함으로써 발생할 수 있는 실제 운전 환경 하에서의 여러 문제에 대한 도체 평가 및 균일한 제작 기술개발 필요
 - ※ 고자장 저온초전도 선재는 선재 내의 수천 가닥의 필라멘트의 크기가 마이크로미터급으로 극단적으로 줄어든 형태로 기계적인 강도에 취약점이 우려됨. ITER의 경우 이를 극복하고자 케이블링 시 트위스트 피치등을 조절하여 이러한 취약점을 극복
- (신기술 선도) 고온초전도 도체는 현재 전 세계적으로 개발이 진행되고 있는 상황으로 핵융합에 최적화된 설계 제작 방법이 아직 정립되지는 않았지만 급격한 발전이 기대되고 있으며 또한 동시에 기술적인 선점이 가능한 분야임
 - * 고온초전도 선재의 고자장 특성을 잘 활용하면서 동시에 REBCO 선재를 활용한 도체의 교류손실 저감 기법 및 비교적 낮은 교류손실 특성을 보이는 BSCCO, MgB₂ 등 적용처에 따른 다양한 도체 연구 개발이 필요

□ 국내외 동향

① 실증로 저온 초전도 도체 설계 및 제작

- (국외) 미국은 저온 초전도 설계기술에서 선도적이며, EU는 저온 초전도 도체 설계 및 제작에 세계 최고 수준의 기술력 보유
 - 미국은 ITER 이후에 대규모의 저온초전도 도체 관련 연구는 수행되고 있지 않은 상황이지만 특히 설계에 있어서는 선도적인 기술을 보유하고 있음
 - EU는 ITER보다 큰 실증로 저온초전도 자석 개념을 발전시키고 있으며 이에 필요한 도체의 설계 및 제작은 프랑스의 CEA (The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission), 스위스의 SPC (Swiss Plasma Center) 및 이탈리아의 ENEA (Energia Nucleare ed Energie Alternative) 등의 연구진이 경쟁적으로 연구를 수행하고 있음. 저온초전도 도체 설계 및 제작 기술 모두 세계 최고 수준으로 평가됨
- (국내) 국내에서는 KSTAR 제작 및 ITER 참여, 그리고 실증로 CSR (Conceptual Study Report) 연구 등을 통해 기초 설계 능력 확보
 - 제작 관련으로는 ITER 조달이 종료된 후 기존 국내 산업체가 초전도 도체 케이블링 사업을 종료하여 지속적인 연구에 어려움이 있으며 실증로급 도체 두께의 국내 조관이 가능하지 않은 등 여러 이슈가 있는 상황임

② 초전도 도체 특성평가 및 QA/QC 기법

- (국외) 미국과 EU는 고온초전도 도체 평가도 가능한 15 T, 100 kA급 초전도 도체 시험시설을 공동 구축하여 운영 중
 - 미국은 최근 페르미 랩 (Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL) 및 로렌스 버클리 랩 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)에서는 EU와의 협력으로 특히 고온초전도 도체 평가도 가능한 15 T, 100 kA급 시험시설, HFVMTF (High Field Vertical Magnet Test Facility)을 공동으로 구축하고 운영에 들어감
 - EU는 이미 SPC의 SULTAN 시설 및 CERN (the European Organization for Nuclear Research)의 FRESCA 등의 시설을 운영 중이며 특히 SULTAN 시설의 EDIPO 시험시설 사고 이후에 미국 로렌스 버클리 랩과 공동연구로 HFVMTF와 같은 사양의 EDIPO2 시험시설 제작이 진행되고 있는 상황임
- (국내) 국내는 2027년 완공을 목표로 HFVMTF 이상의 16 T, 100 kA급 도체 시험 시설 구축이 진행 중

③ 고온 초전도 도체 제작

- (국외) 미국은 실증로급 고온초전도 도체 기술을 선도 중이며, EU는 다양한 형태의 도체 개념을 연구하며 많은 평가를 수행 중
 - 미국은 사실상 현재 실증로급 고온초전도 도체 기술을 선도하고 있다고 볼 수 있으며 특히 민간 기업인 CFS (Commonwealth Fusion Systems)가 주도하고 있음. 교류손실 효과를 비교적 덜 고려해도 되는 토로이달 필드 (TF) 자석의 경우에는 NINT (No-Insulation Non-Transposed) 케이블이 그리고 중앙 솔레노이드 (CS) 자석에 대해서는 VIPER (Vacuum pressure Impregnated, insulated, Partially transposed, Extruded, and Roll-formed) 케이블 형태가 주로 연구되고 있음
 - 일본은 초기에는 STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 케이블 등 연구가 수행되기도 했으나 최근에는 미국, EU에 비해 연구가 덜 활발한 편임
 - EU는 독일의 칼스루에 공과대학 및 스위스의 SPC에서 최초로 주도적인 연구가 수행되었으나 현재는 ENEA에서 많은 연구가 진행 중임. 다양한 형태의 도체 개념이 연구되고 있으며 많은 평가가 수행되고 있음
- (국내) 국내는 '고온초전도 마그네티스 기술 개발사업' 과제를 통해 막 연구가 시작된 상태로 일차적으로 12 T, 30 kA급 고온초전도 도체 개발을 목표로 함

다

초전도 자석

□ 정의

- 실증로용 토로이달 필드 코일 등 초전도 자석 설계 및 제작 기술

세부기술	기술개요
실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작	• KSTAR 및 ITER의 저온 초전도 자석 설계 기술을 기반으로, 기계적인 강도 한계에 근접하리라 예상되는 토로이달 필드(TF) 코일 교류손실에 의한 심한 열적요동을 견디어야 하는 중앙 솔레노이드(CS) 코일 등의 40여년 운전기간 안정성을 고려한 설계 및 권선, 진공함침, 접합 등 자석 제작, 자석 전체를 지지하는 구조물 설계/제작 기술 확립
시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법	• 실증로용 초전도 자석 제작을 위한 저온 초전도체 기반의 초전도 자석의 열적 안정성 등에 대한 설계 검증 및 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 시험용 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작, 성능 평가 및 일관된 권선 기법, 접합방법, 접합저항의 적절성, 특히 전류리드 부분의 내전압 특성 등 자석 전체의 QA/QC 기법 개발
고온 초전도 시험용 코일 개발	• 실증로용 고온초전도 자석은 도체를 활용한 혹은 활용하지 않는 혹은 핵융합로 내부 부품 교체를 위한 분리 가능한 형태 등 다양한 기술이 가능하기에 이중 적절한 시험용 코일에 대해 정의하고 이에 대한 설계, 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 코일 개발 및 평가 수행

□ 기술개발 필요성

- (기술 역량 제고) 기본적인 설계 및 제작 방법론 외에 실증로급 초전도 자석의 기계적인 내구성, 승온 냉각 등 열적 안정성 등 40여 년의 운전 기간 안정성에 대한 기술 정립 필요

※ 특히 토로이달 필드 코일의 기계적인 강도에 관한 문제는 예비개념설계 연구 (CSR, Conceptual Study Report)에서도 논의된 바 있으며 탄성한계를 넘는 매우 강한 힘을 견디는 구조적인 방법에 대해 여러 논의가 진행되고 있는 상황

- (신기술 검증) 고온초전도 자석은 기술적 가능성을 확인하고 핵융합 에너지 확보를 위한 고온초전도 원천기술 확보 차원에서 반드시 시험용 코일 설계, 제작, 평가를 통한 검증이 필요

※ 저온초전도 자석 대비 높은 운전 안전성으로 인한 낮은 쿨링 가능성, 높은 고자기장 특성으로 인한 자석의 소형화, 무헬륨 운전에 기반한 낮은 운전 비용, 무절연 혹은 금속절연으로 인한 절연 내구도 개선 등의 장점이 있으나, 연구개발 단계임

□ 국내외 동향

① 실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작

- (국외) EU는 ITER 초전도 자석 설계 제작을 통해 기술확보 중이며, 일본은 JT-60SA 초전도 자석 개발 통해 관련 기술 확보 중
 - 미국은 ITER CS 초전도자석 제작·조달 경험이 있으나, 이후에 대규모 저온초전도 자석 관련 연구는 수행되지 않고 있음. 설계에 있어서는 선도적인 기술을 보유
 - 일본은 최근 EU와 협력으로 JT-60SA 초전도자석 개발을 통해 자석 설계 및 제작 기술이 진일보 단계임. JT-60SA 건설 과정에서 신진 연구인력이 설계 및 제작기술 경험을 바탕으로 연구를 주도
 - EU는 ITER 초전도자석 설계 및 제작은 사실상 EU 주도로 진행되었으며, 제작은 Ansaldo 등 이태리 중공업 부분의 기여가 두드러짐. 설계부분은 기존에 프랑스의 CEA가 기술을 주도했다면 최근 ENEA를 필두로 하는 이태리 연구진의 연구가 두드러짐. DTT 초전도자석 설계 및 제작으로 연구가 지속적으로 수행되고 있음
- (국내) KSTAR 초전도자석 설계 제작 경험을 바탕으로, 실증로 KDEMO CSR 연구를 통해 초전도자석 설계연구는 간헐적으로 지속되고 있으나 제작 부분은 기존 개발 경험이 전수되지 못하고 사장될 위기. 최근 '초전도도체 시험설비 구축사업'에 필요한 초전도 자석 제작이 추진

② 시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법

- (국외) EU와 일본은 각각 ITER TF 코일과 CS 코일 특성평가를 통해 경험 축적 중
 - 일본은 EU와 협력을 통해 ITER CS 시험용 코일 특성평가 경험이 있으며, 특히 CS 시험용 코일은 insert 코일 평가에 활용되는 등 특성평가 연구수행 경험이 풍부
 - EU는 ITER TF 시험용 코일의 특성평가가 독일에서 수행. ITER TF 시험용 코일의 특성평가를 통해 설계상의 문제점을 발견하게 된 중요한 계기였으며 이에 대해 수년에 걸쳐 문제가 된 부분의 파괴검사 등을 통해 정확하게 문제를 규명하고 이를 반영한 설계변경 경험을 축적
- (국내) KSTAR 개발 시에 TF 및 CS 초전도자석 시험용 코일에 대한 특성평가가 수행되기도 하였으며, KSTAR는 시험용 코일이 본제품의 선행제품으로 제작되어 실제 자석의 기술검증이 동시에 수행된 사례가 있음

③ 고온 초전도 시험용 코일 개발

- (국외) 미국 CFS사의 20 T 초전도자석 시험 평가가 세계적으로 유일

- 미국은 현재 고온초전도 시험용 코일 개발 및 평가는 사실상 CFS의 20 T 초전도자석 시험 평가가 세계적으로 유일하며, EU의 Tokamak Energy 등도 조만간 시험용 코일 제작 및 평가를 계획하고 있으나 경과를 지켜볼 상황
- (국내) 최근 고온초전도 도체에 대한 연구가 시작되었으며, 고온초전도 시험용 코일에 관한 개념연구 완료

□ 정의

- 초전도 자석 냉각, 전원 등 기반 시스템 및 자석 켄치 보호, 운전 해석 기술

세부기술	기술개요
초전도자석 기반 시스템	· 실증로급 초전도 자석의 열부하, 40여 년의 운전수명 등을 고려한 냉각, 전원 등 기반 시스템 사양 설정 및 급작스러운 초전도-상전도 전이에 대한 켄치 보호 기술, 자석 운전 시의 특성에 대한 운전해석 기술 등 자석의 안정적인 운영에 필수적인 제반 기술개발

□ 기술개발 필요성

- (실증로 특수성 반영) 냉각 및 전원 시스템 등 기반 시스템은 ITER 등의 대형 장치의 건설로 많은 부분이 확보된 기술이지만 실증로급 초전도 자석의 특수성에 관한 연구필요
 - ※ 토로이달 필드 코일의 기계적 안정성을 위한 두 개의 병렬 전원 설비 혹은 고온초전도 자석의 상대적으로 높은 운전 온도를 고려한 냉각시스템 구성 등이 논의되고 있음
- (장치 안정성 확보) 켄치 보호 기술 및 운전해석 기술 역시 어느 정도의 기반 기술이 확보된 상태이지만 운전수명을 고려한 추가적인 연구가 필요한 상황
 - ※ 켄치 해석 기술은 병렬 전원이 쓰이거나 할 경우에 혹은 고온초전도 자석에 관한 연구 등이 필요하며 운전해석 기술은 특히 ITER 초전도 자석 운전을 통해 확립되어 나갈 것으로 기대되지만 KSTAR 초전도 자석의 실험 결과에 대한 분석도 매우 중요
- (신기술 확보) 고온초전도 자석에서의 켄치 특성은 저온 초전도와 상이하여 개별적인 켄치 탐지기술 및 보호기술이 요구됨
 - ※ 최근 무절연 고온초전도 자석의 높은 운전 안전성이 다양한 응용 분야에서 보고 되고 있으나, 핵융합 수준의 크기 및 에너지 밀도를 갖는 규모에서 검증되지 못함. 특히, 켄치 사고시 발생 가능한 다양한 전기적, 기계적, 열적 문제점에 대응하기 위한 켄치 보호 기술 개발이 요구

□ 국내외 동향

- (국외) EU는 ITER 초전도 자석 부대시스템 구축을 통해, 일본은 JT60SA운전을 통해 관련 기술 축적 중
- 미국은 최근 CFS 시험용 코일 시험 과정에서도 부대시설 시스템 구축은 중요한 문제의 하나였으며 기간을 최소화하기 위해 기존 시설을 활용하여 성공적으로 시험평가를 수행하는 등 기술력을 입증한 바 있음

- 일본은 최근 JT60SA 운영을 위해 관련 시스템을 전반적으로 재정비하는 등 관련 기술에 대한 연구가 진행 중
- EU는 현재 세계 최대규모의 초전도자석 부대 시스템이 ITER에 구축 중이며, 특히 저온 냉동기 제작이 가능한 Air Liquid, Linde 모두 EU에 있는 등 관련 산업계의 역량도 세계 최고 수준. 초전도자석 운전해석과 관련된 코드 개발 역시 세계적으로 가장 진보된 기술을 보유하고 있으며 현재도 다양한 연구 수행 중
- (국내) KSTAR 초전도자석 건설 시에 부대시설 구축 경험이 있으며, 현재 진행되고 있는 '초전도도체 시험설비 구축사업'에 필요한 시설 구축에도 활용. 초전도자석 운전해석 부분은 KSTAR 운전해석으로 적용 가능하며, 추가적인 연구수행으로 기술 확립과 꾸준한 개발이 필요한 상황

마

초전도 자석 관련 연구시설

□ 정의

- 실증로용 저온 초전도 자석의 안정성 및 적절성 등을 검증하고, 시험용 토로이달 필드(TF) 코일, 시험용 중앙 솔레노이드(CS) 코일 제작 및 성능 평가 시험 시설

세부시설	시설 개요	필요성
초전도 자석 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 저온 및 고온 초전도 권선, 열처리, 진공함침 및 접합 등 제작에 필요한 일체의 설비 및 자석 냉각시험이 가능한 열차폐체가 포함된 Cryostat, 전원, 냉각, 측정계측 시스템 등의 평가를 위한 시설 - 저온초전도 KSTAR 크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 및 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작 및 평가 가능 - 고온초전도 KSTAR 1/4크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 제작 및 평가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 초전도 자석의 설계 및 제작성 검증을 위한 인프라 필요 • 핵융합로용 고온초전도 자석 연구를 위한 기반 시설 확보

□ 국내외 시설구축 사례

- (해외) 미국은 민간기업이 고온초전도자석 시험시설 구축 운영 중

세부시설	국외	활용가능 여부 및 사유
초전도 자석 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 CFS(Commonwealth Fusion Systems)에서는 고온초전도 자석 시험시설을 구축하고 2021년 SPARC 사양의 20T급 시험용 코일의 제작 및 평가에 성공 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 초전도 자석 시험시설은 자석 제작과 관련되 여러 기밀 사항과 관련되어 있어 해당 기관에서 독점적으로 사용하기에 사용이 불가

- (국내) 초전도 도체 시험시설이 건설 중으로 일부 활용 가능하나, 초전도 자석 시험시설은 없음

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
초전도 자석 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 초전도 도체 시험시설 건설 중 (27년 완공 예정) 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) 전원 및 냉각장치 등 일부 설비는 공동 활용이 가능할 것으로 판단하나, 초전도 자석 시험시설은 없음