

붙임 4 연구테마 상세 소개자료

① 연구테마 선정(안)

- (연구테마) 초경량, 저비용 초고자기장 고온초전도 상용 자석(45 T 급) 기술 개발
 - (임무) 45 T급 세계 최고 자기장의 초고온초전도 상용 자석 개발
 - (연구내용) ① 45 T 이상급 초초전도 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전 기술 개발, ② 신뢰성이 확보된 초고자기장 초전도 자석 켄치 보호기술 연구 등
 - (주관부처) 과기정통부
 - (사업유형) 탐색형*

* 실패할 가능성이 있지만 과감히 도전할 수 있도록 개념검증 단계까지 4년 내외 지원하여 가능성에 대한 검증 후 후속 연구개발 지원 필요 시 추가 기획

② 향후 추진 일정(안)

구분	추진주체 및 일정
연구테마 확정	혁신도전 프로젝트 추진위원회, '24.7
사업기획 공모	KARPA, '24.8
사업기획 기간	KARPA/주관부처 '24.9 ~ '24.12
사업기획 결과 보고	혁신도전 프로젝트 추진위원회, '24.12
사업 예산심의	주관부처/KARPA, '25.4~12
사업 착수	주관부처, '26.1~

※ 필요시 혁신본부 승인을 통해 혁신도전프로젝트 사업기간을 '25.3월까지 연장하여 충분한 신규사업 기획기간 확보

연구테마명 : 초경량 저비용 초고자기장 고온초전도 상용 자석⁴⁵ T급 기술 개발

I. 테마 관련 사회적 난제

□ 핵융합발전, 미래모빌리티 구현 및 과학기술 인프라의 퀀텀점프를 견인할 핵심기술, “고자기장 기술”

○ 극한기술 기반의 기술혁신을 위해 고자기장 기술이 필수, 특히 제조산업 혁신 및 과학기술 발전의 한계 돌파 가능 <참고 3>

- (전력/에너지) 인공지능 발전과 데이터센터 수요 증가에 따른 전력 및 에너지 수요 급증으로 에너지 자립 및 탄소중립 필요성 대두 <참고 4>

※ 초고자기장 기술 활용 시, 동일 핵융합 출력(500 MW 급) 기준 핵융합 발전 장치의 무게 1/3, 부피는 1/8 배 감소할 것으로 예상 <참고 5>

- (전기추진) 전기추진 항공, UAM, 하이퍼루프 등 미래형 모빌리티 전기추진 시스템의 소형화, 경량화를 통한 고출력밀도 달성의 중요성 대두

※ 고출력밀도 항공기(20 kW/kg), 수 MW급의 유인 여객기, 하이퍼루프 자기부상 열차 등에 초전도 전기추진 적용 추진 중

- (과학기술 인프라) 초고자기장 시설은 한계돌파 연구 및 신물질 개발, 전자 기기 성능혁신 등 혁신선도형 연구에 필요한 핵심 연구시설 <참고 6>

※ 해외 주요 선진국은 고자기장 연구시설(미국 NHMFL 등)을 구축하여 국가 핵심연구 인프라로 활용하고 있으나, 우리나라는 부재한 상황

□ 기존 고자기장 생성 시스템의 한계점 및 고온초전도 자석의 잠재성

○ (상전도*) 고자기장 응용 시 낮은 전류밀도 및 높은 발열로 인한 高제작비용, 高운전비용, 低활용도

※ 전기저항에 의해 생긴 발열로 인한 온도상승을 억제하기 위해 필요한 추가 냉각 시스템으로 시스템 크기 증가, 공간 활용도 감소 및 제작비용 상승으로 직결

※ 상전도 41.5T 자석 운전 시 60 MW 운전 및 냉각전력 소모(약 56,000 가구 전력 수준)

* 상전도: 구리 등 전기저항이 있는 도체

○ (저온초전도*) 20 T 수준이 실질적 자기장 발생 한계이고, 고가의 액체 헬륨 소모로 高운전비용, 低활용도

※ 저온초전도 선재들은(NbTi, Nb₃Sn) 20 T 이상 고자기장에서 임계 전류밀도가 100 A/mm² 이하로 감소하여 사실상 활용 불가

* 저온초전도: 약 4 K 부근 극저온에서 전기저항이 0이 되는 물질

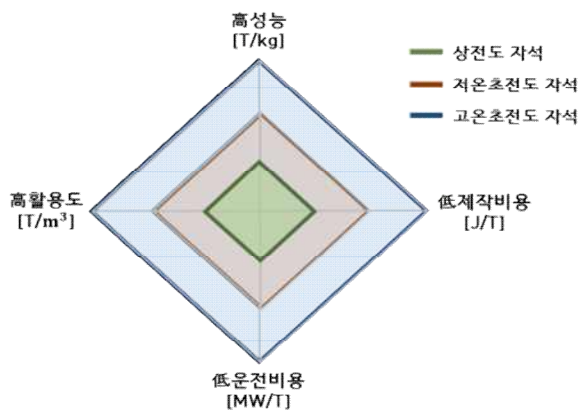
- (고온초전도*) 고전류를 저전력으로 발열 없이 흘릴 수 있어, 高전류밀도**, 경량·소형화***로 低비용 가능, 45 T 이상 초고자기장 발생 가능성은 실험적으로 증명****

* 고온초전도체: 약 30 K 이상의 온도에서 초전도 현상을 보이는 물질

** 고온초전도체는 20 T에서 저온초전도체 대비 최대허용밀도가 100~1,000배 이상, 45 T에서 상전도체 대비 3배 밀도의 전류를 흘릴 수 있음

*** 핵융합로, 가속기 등은 기존 시설보다 1/10로 소형화하여 구축비용 절감 가능

**** 국내 연구진은 고온초전도 자석을 이용해 세계 최고 기록 직류 자기장 45.5 T 달성 (Nature 게재(18), Physics World의 'Top 10 Breakthrough for 2019' 선정)



[그림 1]

성능, 제작비용, 운전비용, 활용도
관점에서 상전도, 저온초전도,
고온초전도 자석 비교

< 45 T 상용 고온초전도 자석 기술 개발 필요성 >

- ◇ 세계적으로 30 T급 초전도 자석의 개발 시도, 현재 Hybrid(상전도+저온초전도) 자석을 활용한 45 T가 세계 최고 상용 자기장* 임을 고려하면 고온초전도 45 T 이상 달성은 극한기술을 의미

* 1999년 이래로 25년째 상용 직류 세계 최고 자기장 기록 유지 중 <참고 7>

- ◇ 45 T 이상 극한기술 활용을 통해 전방위 제조산업 파급 예상

- 45 T 이상의 초고자기장 자석기술은 적용분야 기기의 초경량소형, 저비용을 가능하게 해 국내 제조산업 경쟁력을 획기적으로 제고

※ 최근 고온초전도 선재 가격의 하락을 통한 상용화 가능성이 대두 <참고 8>

- ◇ 물성연구 활용*으로 신소재 개발 등 글로벌 과학기술 선도

* NHMFL(미)은 45 T급 Hybrid 자석 활용 Nature 자매지 등 총 68건의 SCI급 논문 출판(23년, NHMFL Annual Report)하였으며, 이 장비를 활용하기 위한 전세계 연구자의 제안을 바탕으로 효율적으로 첨단 연구동향 파악 가능

세계 최고 초고자기장 쏠고온초전도 자석* 개발로 광범위한 제조산업에 국가 경쟁력 제고 및 다학제 분야에서 첨단 과학기술 선도 필요

* 상전도 자석이 사용되지 않고, 자기장을 형성하는 모든 자석 시스템이 초전도체로만 이루어진 자석

II. 문제 발굴(As is)

□ 국가별 초고자기장 기술 경쟁이 심화

- 미국, EU, 일본 등 주요 선진국은 극한환경 신물질 발견 연구, 국가 기반산업(전기모터/발전기, MRI, NMR, 핵융합 등) 분야의 혁신을 위해 고온초전도 초고자기장 자석기술 개발* 중

※ 세계 최고 상용 직류 자기장 기록은 Hybrid 방식의 45 T(미, NHMFL)로, **대형화와 고전력(33 MW), 고냉각 비용(4백만 갤런의 탈이온 처리 냉각수)** 등 단점 존재

< (참고) 해외 연구동향 >

- 신물질 연구용 고온초전도 초고자장 자석 동향: (미국) 32 T 목표 개발, 28 T 운전, (EU) 32 T 1차 검증, (일본) 32 T 1차 검증, (중국) 32 T 1차 검증, (독일) 28 T NMR 자석 상용화
- 중국은 고온초전도 HH70 토카막을 이용하여 세계 최초 플라즈마 생성 성공('24.6.)

- 현재 우리나라는 초전도 자석 관련 기초연구와 요소기술 개발을 위한 「고온초전도마그넷기술개발사업(PRISM 연구단)」이 진행 중이나, 실용화 기술 개발은 부재

※ 국내 연구진(서울대)은 고온초전도 자석을 활용한 45.5 T(서울대)로 연구용 세계 최고 정상(定常) 자기장을 달성하였으나, **작은 내부보어 크기, 운전 안정성 부족** 등이 한계

- PRISM 연구단은 초전도 자석의 7대 기술체계 정립을 통해 명품화·양산화를 지향하는 초전도 자석 연구개발 추진 중
- 기존 고온초전도 자석 제작 실패 사례* 답습을 탈피하기 위한 초전도 선재 및 7대 기술별 문제를 정의하고 대응 중이나<참고 9>, 초고자기장 자석 개발 시 ‘기술적 미인지 난제’**의 존재가 예상

* 성과목표 달성을 위한 맹목적 기술 개발로 원천기술 미확보, 한정된 기한 내 정량적 목표 달성을 위한 파편화된 연구

** 세계 최고자기장 45.5 T 고온초전도 자석 개발 시, 차폐전류에 의한 기계적 응력이라는 미인지 난제를 발견

⇒ 국가별 초고자기장 기술 경쟁이 심화됨에 따라, 「고온초전도마그네티스 기술 개발사업」을 통해 개발된 요소기술을 기반으로 **高性能, 高 활용도, 低 제작비용, 低 운전비용의 자석 시스템**을 위해 **세계 최고·최초의 도전적인 45 T 초고온 초전도 상용 자석 개발 시급**

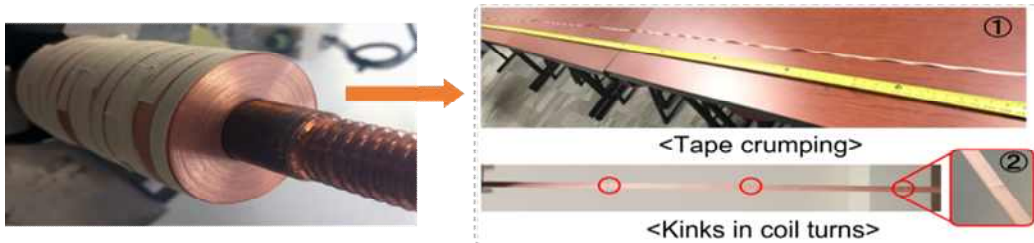
※ 「고온초전도마그네티스 기술개발사업」을 통한 요소기술 개발 후 이 사업을 시작하는 것은 기술 발전 속도 및 선진국의 발전 속도로 비추어 선진국에 뒤처질 가능성이 큼

□ 초고자기장 자석 개발 시 발생할 수 있는 ‘기술적 미인지 난제’

(1) 45 T 이상급 초초전도 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전

○ (난제¹고응력) 고응력 환경에서 발견되고 있는 새로운 기계적 현상

※ 최근 초고자기장 고응력 환경에서 초전도 자석의 **좌굴(buckling)**, **차폐전류 유도 기계적 응력** 등 기존에 확인되지 않은 기계적 문제들이 발견되는 중



[그림 2] 40 T 이상의 고자기장 발생을 목적으로 제작된 고온 초전도 코일 사후 분석에서 발견된 초전도 선재의 좌굴 (buckling) 등의 영구적 손상(출처: Hu, Xinbo, et al., Supercond. Sci. Technol., 33.9, 2020: 095012.)

○ (난제²냉각) 미지의 발열원으로 인한 극저온 온도 유지의 어려움

※ 세계 최고 자기장 달성 45.5 T 고온초전도 자석의 경우 초기 상태 대비 전류 충전 시 자석 내부 온도가 4.2 K에서 10 K 이상으로 상승된 것으로 추정됨

○ (난제³선재) 초고자기장 환경 내 고온초전도 선재의 **층간 결합력** 및 **금속 기판 강도**의 불확실성

※ 층간 결합력 보완을 통한 박리* 가능성 차단 및 금속 기판 고강도화가 필요

* 박리: 선재의 층간 결합이 분리되는 현상으로, 통전 성능을 상실하게 되는 원인



[그림 3] 선재 박리 테스트 사진(출처: Song, Jungbin et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 34.5, 2024: 6600205.)

(2) 초고자기장 초전도 자석 보호 기술

○ (난제⁴보호) 고자기장 자석 운전 중 초전도 상태를 급격히 잃어버리는

‘퀵치’* 사고 시 비가역, 복합적인 손상 발생

- * 자석 퀵치(Magnet Quench): 초전도 상태가 유지되기 위한 물리적 조건에서 갑자기 벗어나 초전도성이 사라지는 현상



[그림 4] 고자기장 자석의 퀵치 사고 후 발생한 손상 사례

III. 문제 해결 임무(To be)

'고온초전도 마그넷 기술개발사업(PRISM)' 성과*를 기반으로 45 T급 세계 최고 자기장의 쏠고온초전도 상용 자석 개발

* 초전도 7대 핵심기술(설계, 권선, 구조, 접합, 리드, 냉각, 시험평가) 및 초고자장 고균일 슬레노이드형 자석 핵심기술 개발

- ☞ 高性能(T/kg), 低제작비용(J/T), 低운전비용(MW/T), 高활용도(T/m³)
쏠고온초전도 초고자기장 상용 자석
- ☞ 목표 자기장: 중심 자기장 45 T 이상
- ☞ 자기장 가변 속도: 이용 수요 대응 가능 수준
- ☞ 기술검증방식: (1) 반복충방전, (2) 정밀교정된 자기장 측정 장치 활용

< 45 T 급 자기장 쏠고온초전도 자석 목표 설정의 근거 >

◇ 세계 최초로 쏠고온초전도 기술을 이용해 45 T급의 자기장 발생 시도

- 현재 쏠초전도* 자석의 최고 자기장 기록은 중국국립과학원이 달성한 32.35 T로, 45 T 쏠고온초전도 자석 개발 시 초고자기장 기술 선도 가능

※ 쏠고온초전도 자석의 최고 자기장은 서남의 26.4 T

* 저온초전도와 고온초전도를 모두 사용하는 방식

- 직류 최고자기장 세계 최고 기록 45.5 T를 상회하는 목표 설정

◇ 쏠고온초전도 기술을 이용해 초고자기장 자석 시스템 성능(T/kg), 제작비용 (T/J), 소비전력(MW/T), 활용도(T/m³) 획기적 개선

[기존 세계 최고 자기장 상용자석 대비 45 T 급 쏠고온초전도 자석 비교 <참고 10>]

구분	기존 45 T		쏠초전도 45 T
단위 무게당 발생 자기장 세기(성능*)	0.15 T/kg	→ (30배 증가)	5 T/kg
단위 부피당 발생 자기장 세기(활용도**)	6.5 T/m ³	→ (7,000배 증가)	45,000 T/m ³
발생 자기장당 저장에너지(제작비용***)	7,000 J/T	→ (1/14 절감)	500 J/T
발생 자기장 세기당 전력소비량(운전비용****)	1.4 MW/T	→ (운전비용 '0')	0 MW/T

* 시스템 무게당 발생하는 자기장의 세기로, 자석 시스템의 성능과 연관

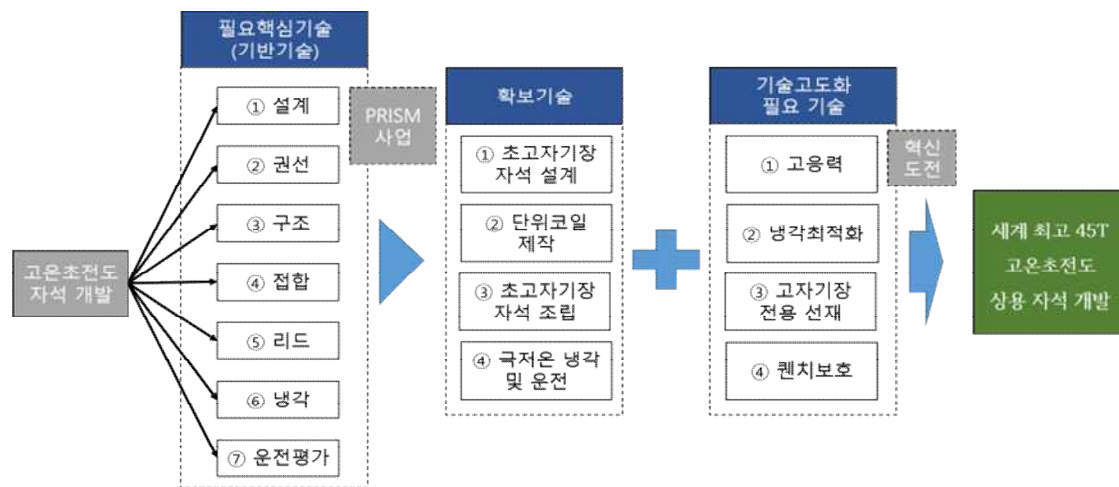
** 큰 부피로 넓은 공간이 필요한 상전도 자석 대비 전초전도 자석은 공간활용도가 높음

*** 저장에너지는 시스템 제작비용이 비례 <참고 11>

**** 전초전도 자석은 전력 소비량이 0에 가까우며, 전력소비량은 운전비용과 직결

□ (해결방향) PRISM 성과를 기반으로 상용 자석 개발 난제 해결을 위한 기술고도화

- 세계 최초, 세계 최고 수준의 상용자석 개발을 위해 PRISM 연구단의 솔레노이드형 ‘마스터코일’ 개발 성과와 연계 추진
 - PRISM 연구단에서는 4대 형상(솔레노이드, 토로이드, 레이스트랙, 새들)*별 마스터코일 제작을 통해 원천기술들을 집약 중
 - * 모든 초전도자석은 4대 형상 안에 포함됨
 - 기술적 완성도가 높은 솔레노이드형 마스터코일을 통해 기확보되거나 개발 중인 원천기술들을 본 연구에 적용 <참고 12>



(1) 45 T 이상급 초고온초전도 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전 기술 개발

- 초고자기장 자석의 응력 저감 설계 및 보강 구조 적용
 - 설계 단계에서 자석의 응력 분포 예측 및 응력 저감 구조 모색
 - 자석 내 응력 저감을 위한 획기적 보강 구조* 적용
 - * (예) 물질 간 상이한 열팽창 계수를 활용하여 자석의 변형을 억제하는 방향으로의 예압(pre-load) 인가
- 최신 냉각 시스템 적용
 - 정밀 열부하 예측 기술이 적용된 무헬륨 전도 냉각 시스템 등 활용
- ①응력·박리 강도 증강, ②고자기장 하에서 최적화된 고자기장 전용 선재 개발
 - 초전도 선재의 응력 강도 및 층간 결합 강도 최대화를 위한 증착 조건 탐색 및 신규 증착 공정 개발

- 고자기장 자석의 ①자기장 세기, ②자기장 투과 각도 조건에 따라 통전 성능이 강화된 맞춤형 선재 개발

(2) 신뢰성이 확보된 초고자기장 초전도 자석 켄치 보호기술 연구

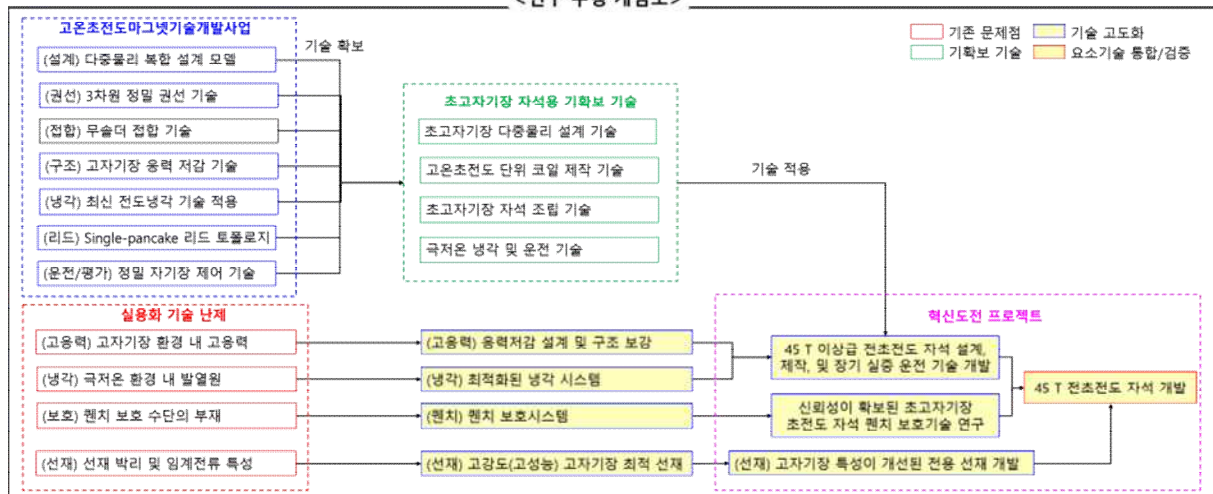
- o 고자기장 자석 예방·사후적 켄치 보호 및 통제 시스템 개발
 - 다수의 적층 코일에 적용 가능한 켄치 보호시스템 개발

< 예시 프로젝트 >

- ① 45 T 이상급 초초전도 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전 기술 개발
- ② 신뢰성이 확보된 초고자기장 초전도 자석 켄치 보호기술 연구

기존 연구방향	신규 연구방향
<ul style="list-style-type: none"> ◇ 자기장 목표의 단회성 달성을 위한 자석 개발 <ul style="list-style-type: none"> ☞ 30 T 이상에서 반복적으로 잘 운영되고 있는 초초전도자석이 부재 ◇ 개별 단위 코일에서 켄치 보호 기술 연구 수행 <ul style="list-style-type: none"> ☞ 단위 코일 수준에서 켄치 발생 메커니즘 및 이에 대한 대응 기술에 대한 연구가 주로 수행 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 발생 자기장의 산업적 활용을 위한 장기 운전이 고려된 자석 개발 <ul style="list-style-type: none"> ☞ PRISM에서 확보한 7대 제작기술을 활용하여 안정적으로 장기 운전이 가능한 45 T 이상 급 초초전도 자석의 설계, 제작 및 장기 실증 기술 개발 ◇ 실제 초전도 자석에서 켄치 보호 기술 연구 수행 <ul style="list-style-type: none"> ☞ 다수의 단위코일의 적층으로 구성된 실제 초전도 자석에 적용 가능하며, 신뢰성이 확보된 켄치 보호 기술 개발

<연구 수행 개념도>



□ 파급효과

- (과학·기술적) 세계 최초/세계 최고 초고자기장(45 T 이상) 초고온초전도 자석 기술개발을 통한 핵심기술 확보
 - 초고자기장 발생기술을 바이오/의료(MRI, NMR, 암치료가속기), 전기추진(UAM, 하이퍼루프), 에너지(핵융합), 전력(ESS, 풍력발전), 국방(MHD, EMP) 등 타 분야에 활용하여 글로벌 경쟁력 제고
 - ※ (핵융합) 45 T 이상의 초고온초전도 자석개발을 통해 확보한 기반기술 활용하여 고안정성 확보 및 비용 감소(액체 헬륨 대체 가능), 적은 양의 선재 사용을 통한 소형화·경량화가 가능하며, 특히 토카막에 사용되는 솔레노이드 자석의 고응력 대응기술과 고속충방전기술 안정적으로 확보 가능
 - ※ (NMR) 45 T 이상의 초고온초전도 자석 개발로 현재 상용 NMR의 세계 최고 자기장인 1.2 GHz(28 T)를 1.9 GHz(45 T)까지 혁신할 수 있는 기반기술 확보
 - ※ (모터) 모터 기술은 한계 없이 무한경쟁이 이루어지는 분야로, 현재 최첨단 고온초전도 모터의 경우 7~8 T로 설계되고 있으나, 45 T 자석을 완성할 경우 10 T 이상의 모터 개발 기술 확보 가능
 - 선진국들이 이미 확보하고 있는 고자기장 인프라 대신 국내 인프라 활용을 통한 국내 초고자기장 관련 과학기술 분야 경쟁력 제고
 - ※ 현재 국내에 초고자기장 자석은 전무하여 초고자기장 특성 연구를 수행하는 국내 연구진들은 시간과 예산을 소모하여 해외기관에서 연구를 수행 중임
- (경제·산업적) 성장하는 초전도 산업에 발맞춰 소재 생산부터 응용기기 제작까지의 전 과정의 밸류체인 국내 구축 가능
 - 글로벌 핵심기술 선점을 바탕으로 초전도산업을 국가브랜드화 하여 국내 제조산업 활성화 및 일자리 창출
 - ※ 초고자기장 발생기술은 초전도자석이 사용되는 다른 분야(전력, 에너지, 국방, 교통, 의료 등)에 활용되는 핵심기술로 국내 제조산업의 한 축으로 성장 가능
 - 45 T 초전도 자석 구축을 통해 물리, 신소재, 바이오 등 다양한 분야의 핵심원천기술 확보를 지원하여 국내 전반적인 산업계의 활성화 가능
- (환경·사회적) 의료/바이오, 에너지/환경, 국방, 교통 등 초전도 자석 관련 다양한 분야의 기술고도화로 국민의 삶의 질 향상
 - (의료/바이오) 암치료용 가속기, MRI, NMR을 구축하여 노령사회를 대비한 저렴한 의료기술 확보하여 국민의 삶의 질 향상

- (에너지/환경) 핵융합 실용화와 고효율 초전도 전력기기를 통한 탄소 중립의 큰 축을 담당
- (국방) 저소음추진체(MHD), 소해함, 디가우싱, 레일건 등 국방 미래기술 선점에 따른 자주국방 달성
- (교통) UAM, 전기비행기, 자기부상열차, 친환경 선박 등 교통산업 전반에 활용되는 친환경적인 고효율 모터개발

IV. 위험요인(Risk)

- 45 T 이상급 초고온초전도 자석은 세계 최초로 시도되는 사례로 “기술적 미인지(Unknown Unknowns) 난제”가 존재할 것으로 예상
 - 예측하기 어려운 여러 난제가 발생할 가능성이 매우 높은 도전적 과제이나, 「고온초전도마그네티기술개발사업」을 통해 기 확보되거나 개발 진행 중인 기반기술을 45 T 이상급 초고온초전도 자석에 적용하여 극복 가능
 - 45 T 자기장 발생기술은 국가 과학/산업 인프라에서 핵심적인 기술로 파급효과가 매우 크고, 세계적으로 성장하는 초전도 산업계에서 국내 기술이 세계적 선도를 주도할 수 있는 기회를 제공할 것으로 기대
- 현재 세계적으로 실제 고온초전도 자석에 적용 가능한 신뢰성 높은 퀀치 보호 기술의 부재
 - 소형 코일에서 개발되고 있는 보호기술을 대형 자석에 적용하는 방안에 대해 불확실한 점이 존재하나, 성공 시 핵융합, 고효율 모터, 암치료 가속기, MRI 등 다른 대형자석에 적용함에 따라 세계 고온초전도 관련 사업에서 주도권 확보 가능

[참고자료 1] 사업추진 일정/소요예산(안)

□ 사업기간 : 6년

□ 사업규모 : 469억원

□ 연차별 세부 추진일정 및 소요예산(안)

연차별 세부 추진 일정 및 소요예산										
추진내용			연구기간						소요 예산	연구 결과물
			1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차년 도		
45 T 이상급 초고온 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전 기술 개발	설계	45 T 자석 개념 설계 및 검증용 데모 자석 설계							8억	45 T 자석 개념 설계안, 데모 자석 최종 설계안
		데모 자석 결과 기반 45 T 자석 설계 고도화 및 조립 수정 설계							8억	45 T 자석 설계 최종 설계안
		45 T 요소기술 검증 및 분석							4억	요소기술 검증
		데모 자석 켄치 보호시스템 설계							10억	데모 자석 켄치 보호 프로토콜
		데모 자석 켄치 보호시스템 결과 기반 45 T 자석 켄치 보호시스템 수정 설계							10억	45 T 자석 켄치 보호시스템 설계안
		45 T 자석 켄치 보호시스템 제작 및 운전 결과 분석							10억	45 T 자석 켄치 보호시스템 운전 결과 분석
	제작	45 T 자석 제작 방식 검토							5억	초고자기장 자석용 7대 기술 초안
		데모 자석 제작 및 유지보수							90억	데모 자석
		45 T 자석 상세 제작안 도출							5억	45 T 자석 도면
		45 T 자석 제작							150억	45 T 자석
		45 T 자석 및 냉각시스템 유지보수							35억	45 T 자석 장기 운영 결과
	냉각	데모 자석용 냉각시스템 제작							22억	데모 자석용 냉각시스템
		데모 자석 냉각시스템 결과 기반 최적화된 45 T 자석 냉각시스템 설계 및 제작							45억	최적화된 45 T 자석용 냉각시스템
		냉각시스템 장기운전 결과 분석							5억	냉각 시스템 장기운전 결과
	운전/ 평가	능동/수동 자기장 안정화 기술 개발							6억	초고자기장 자석용 자기장 안정화 기술
		데모 장기 실증 운전 및 결과 분석							10억	데모 장기실증 운전 결과
		45 T 자석 장기 실증 운전 및 결과 분석							7억	45 T 자석 장기 실증 운전 결과
초전도자 석용 소재 기술 개발	소재	고강도 도체 개발							12억	45 T 자석 권선용 도체 제작 방식
		고온초전도선재 문제점 발굴 및 특성 개선							15억	고온초전도 선재 특성 개선
		보빈 및 구조보강용 극저온 소재 개발							12억	고온초전도 자석용 극저온 소재

[참고자료 2] 연구테마 선정 세부기준 검토 결과

검토 항목	검토 내용
목표의 명확성	<ul style="list-style-type: none"> 고자기장 기술은 핵융합 발전, 미래모빌리티 구현 및 과학기술 인프라의 퀀텀점프를 견인할 핵심 기술로서, 특히 제조산업 혁신 및 과학기술 발전 한계 돌파를 가능하게 하는 기술임 본 연구테마에서는 기존 상전도 방식을 대신하여 초고온초전도 기술을 활용한 고성능, 저제작비용, 저운전비용, 고효율도의 초고자기장 상용 자석 개발을 목표로 함 최종목표는 45 T 급 초고온초전도 상용 자석을 개발하는 것으로 그 목표가 명확하며, 반복충방전 시험 및 정밀 교정된 자기장센서를 활용한 자기장 세기 측정이라는 검증 방식을 명확하게 제안함
도전성	<ul style="list-style-type: none"> 현재 초초전도 자석의 최고 자기장 기록은 중국국립과학원이 달성한 32.35 T로, 본 테마는 세계 최초로 초고온초전도 기술을 이용해 45 T급의 자기장을 발생 시키려는 시도임 45 T 이상급 초고온초전도 자석은 세계 최초로 시도되는 사례로, “고응력, 냉각, 선재, 보호” 기술 방면에서 예상되는 “기술적 미인지(Unknown Unknowns) 난제” 해결에 도전함
혁신성	<ul style="list-style-type: none"> 세계적으로 자기장 목표의 단회성 달성을 위한 초고온초전도 자석 개발에 국한되어 있으며, 실제 30 T 이상에서 반복적으로 잘 운영되고 있는 초초전도 자석이 부재한 상황으로, 세계 최초로 안정적으로 장기 운전이 가능한 45 T급 초고온초전도 자석 기술 개발을 제시함 세계적으로 단위 코일 수준에서의 퀀치 발생 메커니즘 또는 이에 대한 대응 기술 연구에 한정되어 있으며, 본 연구에서는 다수의 단위코일의 적층으로 구성된 실제 초전도 자석에 적용가능한 퀀치 보호기술 개발을 제시함
차별성	<ul style="list-style-type: none"> 세계 최고 상용 직류 자기장 기록은 Hybrid 방식의 45 T(미, NHMFL)로, 대형화와 고전력(33 MW), 고냉각 비용(4백만 갤런의 탈이온 처리 냉각수) 등 단점이 존재하나, 본 연구에서는 초고온초전도 기술을 활용하여 고성능, 저제작비용, 저운전비용, 고효율도를 갖는 상용 초고자기장 자석 개발을 수행함 국내 PRISM 연구단은 기존 고온초전도 자석 제작 실패 사례 답습을 탈피하기 위한 초전도 선재 및 7대 기술별 문제를 정의하여 대응 중이며, 본 연구테마에서는 PRISM 연구단의 ‘마스터코일’ 개발 성과와 연계를 추진함
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> 45 T 이상의 초고자기장 자석기술은 적용 분야 기기의 초경량·소형, 저비용을 가능하게 해 의료/바이오, 에너지/환경, 국방, 교통 등 전방위 제조산업을 획기적으로 발전시킬 것으로 예상됨. 특히 최근 고온초전도 선재 가격의 하락이 진행 중이며, 이를 통한 고온초전도 자석 상용화 가속이 예상됨 45 T 급 초고온초전도 자석은 물성연구 활용을 통한 신소재 개발 등 혁신 선도형 연구에 꼭 필요한 핵심 연구시설로서, 과학기술 발전 한계 돌파에 기여함

[참고자료 3] 고자기장 기술의 다양한 응용 분야

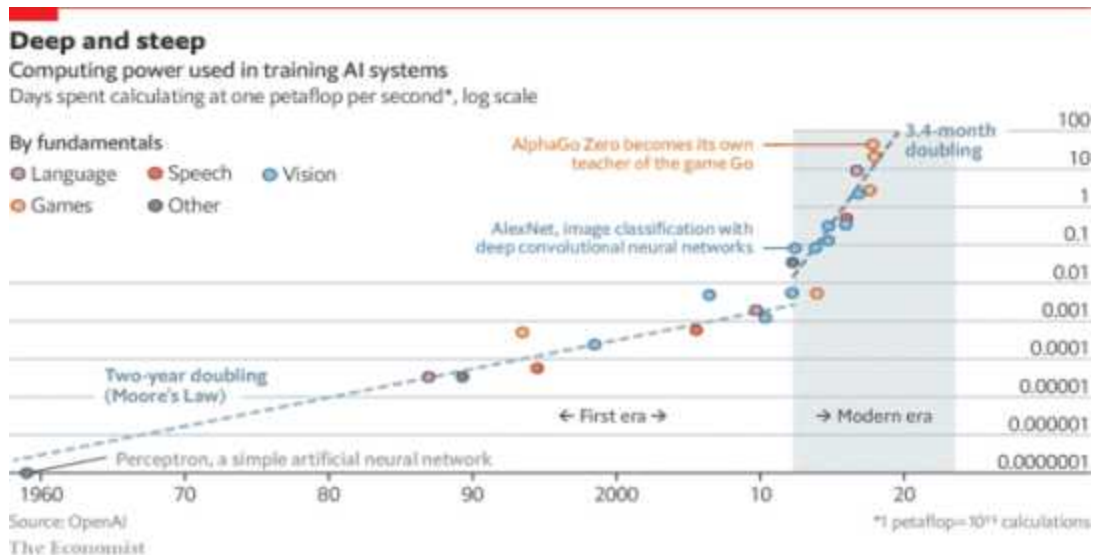


[그림] 고자기장 기술의 다양한 응용 분야: 의료/바이오, 환경/에너지, 전력 시스템, 교통/수송, 국방, 첨단 과학 등 다양한 전기기기 응용 분야로의 파급

[참고자료 4] 전력/에너지 분야 초고자기장 필요성 보충 자료

□ 2010년대 이후 인공지능 사용 전력량이 급격히 증가*하고 있음

※ ChatGPT의 1일 전력 소비량의 경우 하루 50만 kWh의 전력량 사용, 이는 대한민국 국민 1인당 1일 전력 소비량(1.5 kWh)의 약 44,000배에 해당

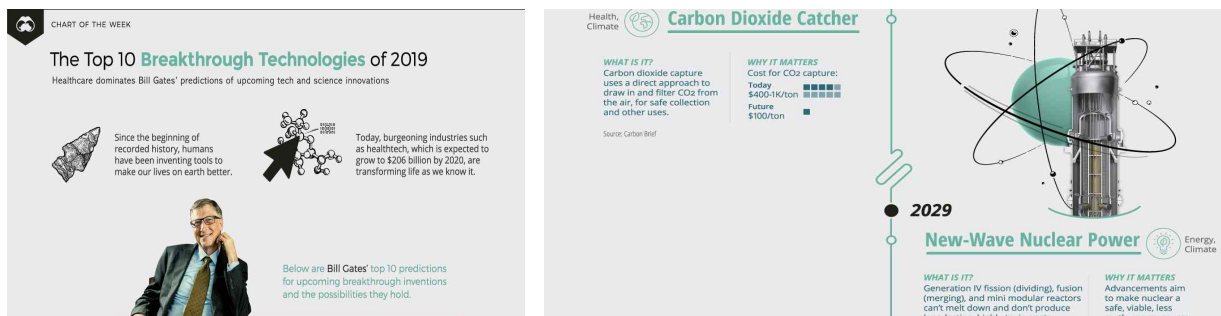


[그림] 2010년대 이후, AI 시스템에 의한 계산량의 급격한 증가(출처: *The Economist*, The cost of training machines is becoming a problem, 2020)

○ 핵융합 발전 성공 시 막대한 전력 생산이 가능해질 것으로 예측되며, 고온초전도 자석을 이용한 고자기장 기술이 핵융합 발전의 핵심기술

※ 빌 게이츠는 'Top 10 Breakthrough Technologies of 2019' 중 하나로 고온초전도 자석 기반 소형 핵융합기술을 선정

※ '18년, Commonwealth Fusion Systems(CFS)는 무절연 고온초전도 자석 기술을 기반으로 핵융합로 상용화 로드맵을 제시함. 2021년 20 T 자석의 성공 이후, 미 하원의 과학·우주 기술위원회의 청문회를 통해 1.8B\$(한화 2.5조) 규모의 추가적인 정책적 지원을 확보



[그림] The Top 10 Breakthrough Technologies of 2019 by Bill Gates

[참고자료 5] 핵융합 장치 개발 현황

□ 초고자기장 기술을 활용한 초경량, 저비용 핵융합로 개발 현황

○ 핵융합 실증 실험을 위한 ITER 장치(5.3 T, 주반경 6.2 m, 23,000 톤) 개발 중, 한편 미국의 Commonwealth Fusion Systems(CFS) 사는 초고자기장 기술을 기반으로 상용 핵융합 장치 상용화 개발 중 (주축자장 9.2 T, 주반경 3.3 m, 무게 7,190 톤)

- (고안정성)플라즈마를 가두려면 강력한 자기장이 필요한데, 임계자기장* 이 상대적으로 높은 고온초전도체를 사용할 경우 저온초전도체를 사용하여 높은 자기장을 내야하는 것에 비해 운전 안정성이 증대

* 초전도 선재가 발생시킬 수 있는 한계 자기장

- (저비용) 전량 액체헬륨을 사용하여 운전하고 있는 저온 초전도 기반의 핵융합 장치를 극저온 냉각기술(무냉매 전도냉각기술)을 사용한 전고온초전도자석을 활용할 경우 운전에 필요한 액체 헬륨에 사용되는 비용을 감소

- (소형·경량화) 임계전류*가 높은 고온초전도자석을 활용할 경우 적은 양의 선재를 활용할 수 있어 소형·경량화 가능

* 초전도를 유지할 수 있는 한계 전류, 전류의 세기는 자기장의 세기와 비례함

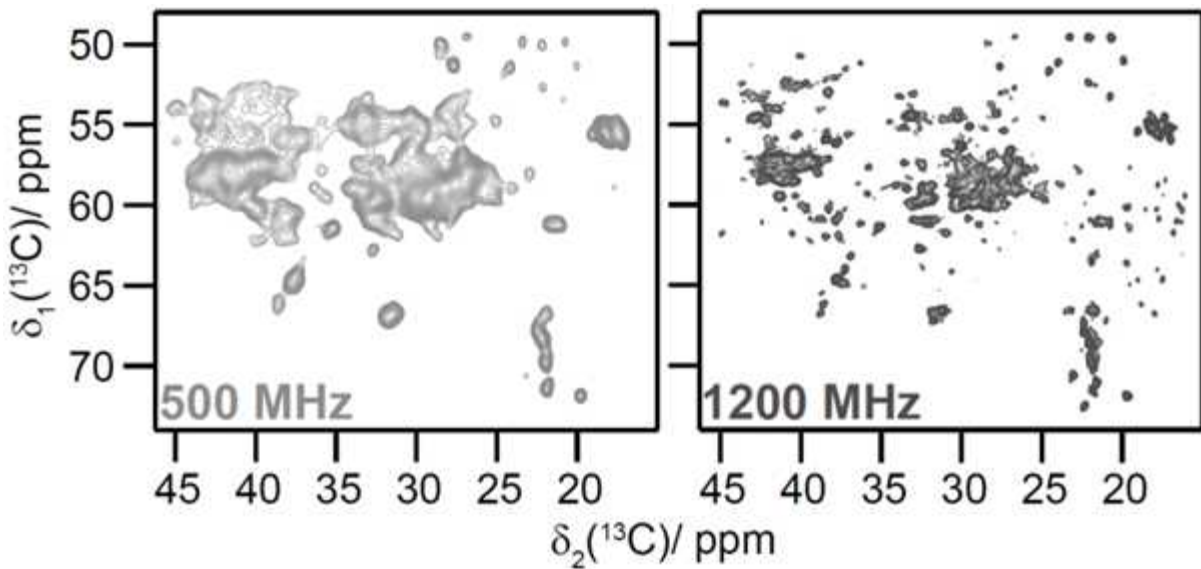


[그림] 현재 개발 중인 핵융합 장치 크기 비교

출처: https://www.youtube.com/watch?v=MYeCaEy_XPU

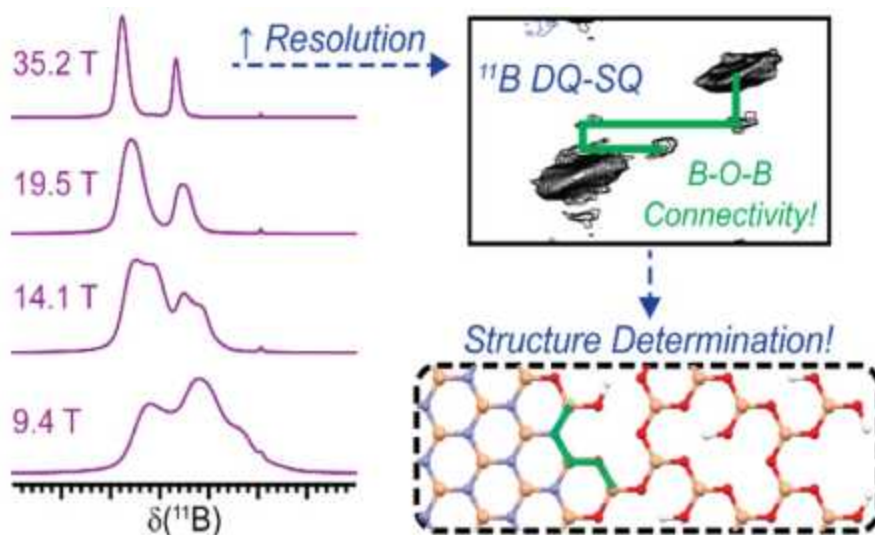
[참고자료 6] 초고자기장 이용 사례 예시

- NMR의 자기장이 높아질수록 해상도와 성능이 크게 개선되어 다양한 물리/화학 실험이 가능해짐



[그림] 11.75 T, 28 T 자기장을 활용한 단백질 분석 비교

* 출처: Morgane Callon et al., bioRxiv, 2021.03.31., 437892



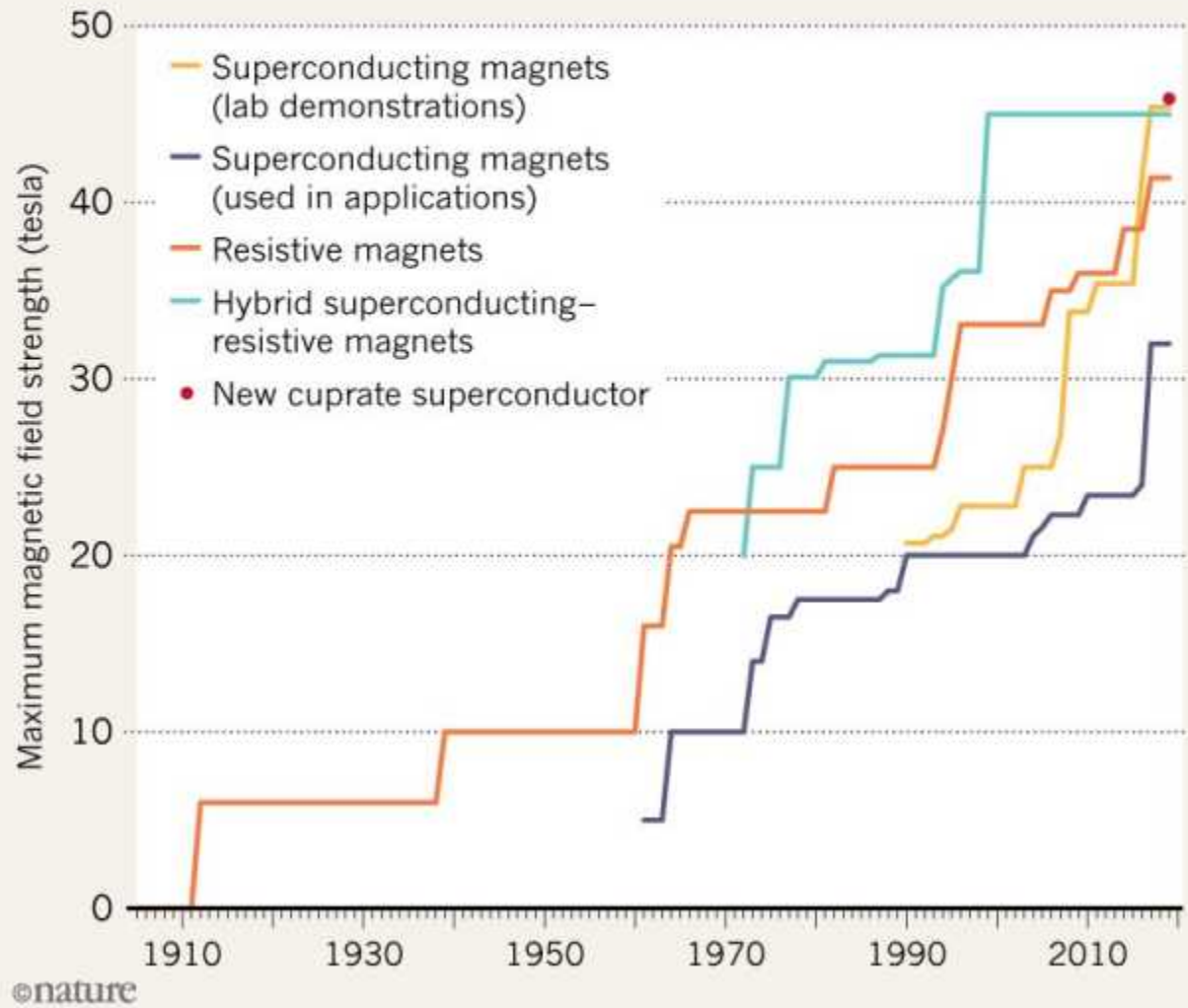
[그림] 고자기장을 활용한 촉매제 구조 분석 결과

* 출처: NHMFL, "Structure of Boron-Based Catalysts from ^{11}B Solid-State NMR at 35.2 T

[참고자료 7] 자석 종류별 최고자기장 기록

RECORD-BREAKING MAGNETS

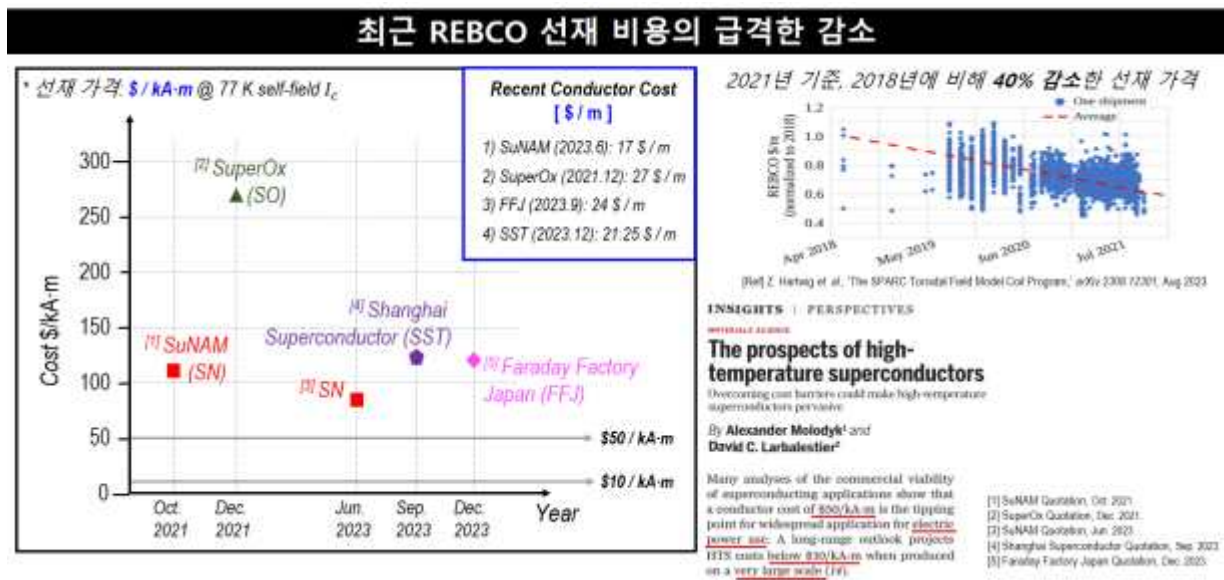
A new magnet has reached a field strength of 45.5 tesla, exceeding the maximum strengths achieved so far by other superconducting and resistive magnets.



[참고자료 8] 고온초전도 선재 가격 하락 추세

□ 고온초전도 선재 가격의 하락을 통한 상용화 가능성 대두

- 최근 핵융합 분야의 폭발적인 수요를 필두로 고온초전도 선재의 대량 생산을 통한 가격 하락('21년 기준, '18년 대비 선재 가격 40% 감소)이 진행 중이며, 충분한 생산량 확보 시 1/20 이하로 대폭 감소할 수 있을 것으로 기대



[그림] 고온초전도 선재의 가격 하락 추세. 2018년 대비 2021년에 가격이 40% 하락하였으며, 1/20이하로 대폭 감소할 수 있다는 내용이 Science지에 게재

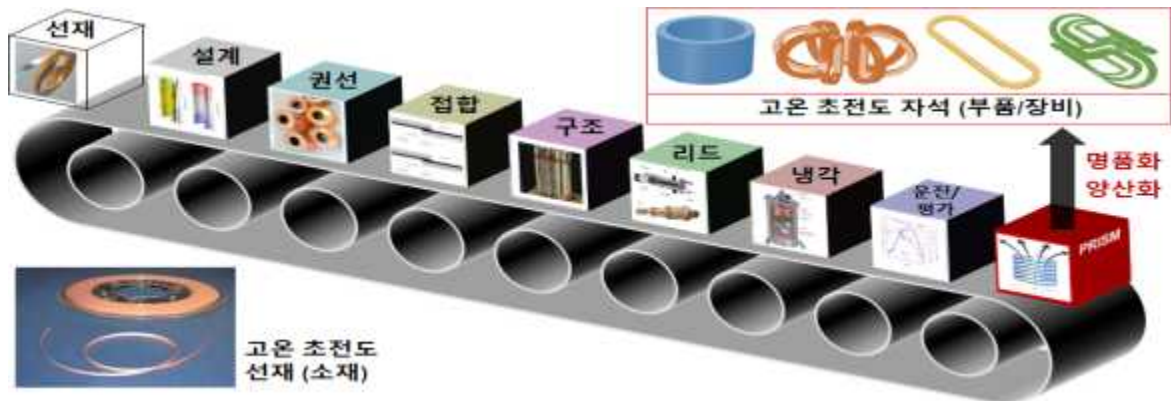
* 출처1: Z. S. Hartwig et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 34.2, 2024: 0600316,

* 출처2: A. Molodyk and D. C. Larbalestier, *Science*, 380. 6651, 2023: 1220-1222.

[참고자료 9] 7대 제작 기술 문제 정의

- 초전도 자석은 초전도 선재가 선택된 후에 (1) 설계, (2) 권선, (3) 접합, (4) 구조, (5) 리드, (6) 냉각, (7) 운전/평가의 7대 기술로 완성됨

※ 7대 기술 분류는 현재 과학기술정보통신부 사업으로 진행 중인 “고온초전도마그넷 기술개발사업”을 추진하고 있는 PRISM 연구단의 연구 추진 체계



[그림] 고온초전도 자석의 제작 과정 모식도로 선재의 입고부터, (1)설계, (2)권선, (3)접합, (4)구조, (5)리드, (6)냉각, (7)운전/평가를 거쳐 최종 고온초전도 자석이 제작됨

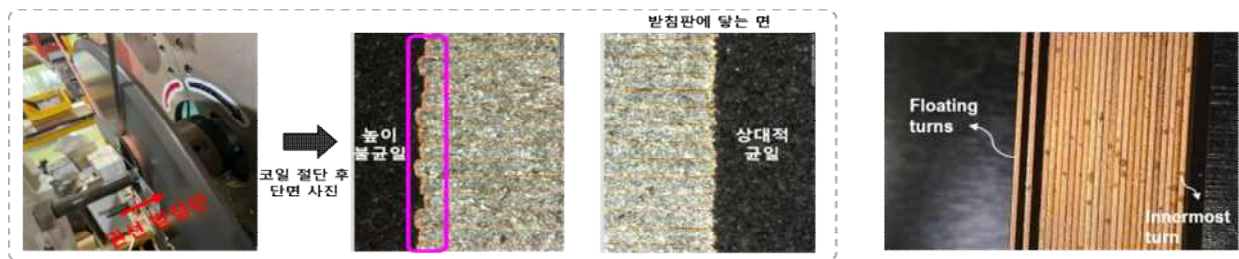
□ 초전도 자석 7대 기술의 기술 난제

- (문제¹ 선재) 낮은 박리 저항력으로 인한 선재 박리* 발생
 - 다층 박막형 선재로 대표되는 고온초전도 선재 REBCO**는 층간 결합력이 약하기에 박리 가능성을 지님
 - * 선재 내 초전도층의 층간 결합이 분리되는 현상으로, 일반적으로 초전도 선재의 통전 성능을 완전히 상실하게 되는 원인
 - ** Rare-earth Barium Copper Oxide(희토류 바륨 구리 산화물): 고온초전도체
 - 특히, 선재 간 접합 부분에서 고자기장의 환경과 통전 전류로 인해 발생하는 기계적 응력을 받아 박리가 일어나기 쉬움
 - ※ 최근 초전도 선재의 임계 전류를 올리는 과정에서 박리 특성에 부정적으로 영향을 주어 박리 저항성이 저하되는 보고 증가



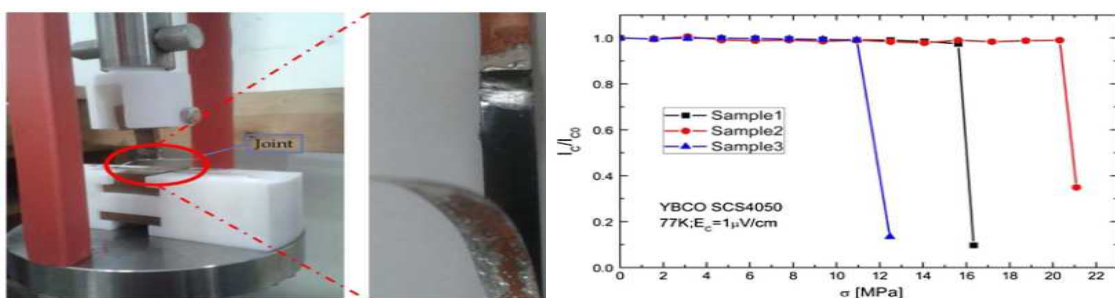
[그림] 선재 박리 테스트 사진 (Courtesy of J. Song (Grenoble))

- (문제² 설계) 전자기, 기계, 열 특성에 대한 **복합 설계 모델** 개발 필요
 - 초전도 자석의 성능 및 운전 안정성은 전자기적, 기계적, 열적 특성을 모두 고려하여 결정됨에 따라 초고자기장 초전도 자석의 복합 물리 특성을 고려한 설계가 필요
- (문제³ 권선) 낮은 권선 정밀도로 인한 자석의 기계적 강성 저하
 - 초전도 자석이 선재 표면의 거칠기, 불순물, 제조 오차 등 여러 가지 요인이 합쳐져 불균일하게 권선되면 들뜨거나 불균일 발생
 - 고자기장 환경을 기계적으로 견뎌내기 위해서는 정밀하게 계산된 경로와 각도를 따라 균일하게 권선된 초전도 자석이 필요



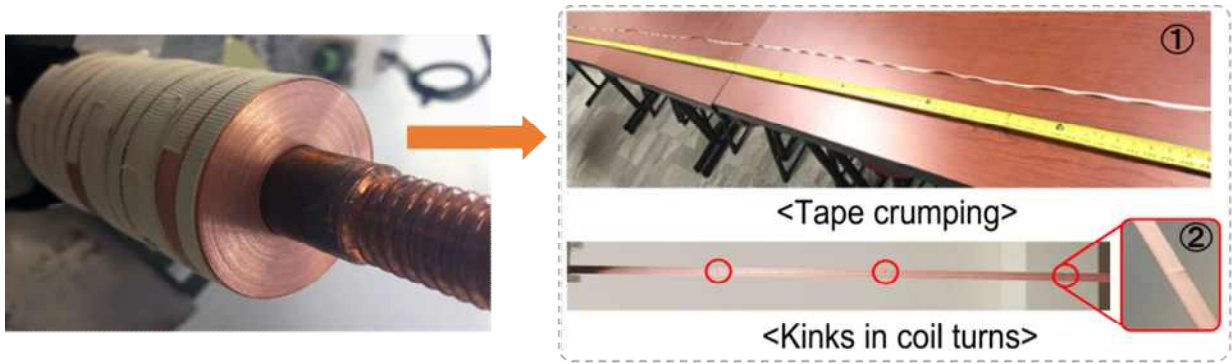
[그림] (좌) 고온초전도 선재 불균일 권선 단면, (우) 권선 후 턴간 들뜸 현상

- (문제⁴ 접합) 접합부 박리로 인한 발열량 증가
 - 박막형 선재인 REBCO*의 경우 선재와 선재, 혹은 코일과 코일을 연결하는 접합 제작 시 땀납을 이용하여 붙이는데, 강한 전자기력, 열수축 및 열팽창, 산화 등의 이유로 인해 접합부의 박리가 빈번



[그림] (좌) 접합부의 박리 테스트 (우) 박리의 발생 정도에 따른 임계전류 저하

- (문제⁵ 구조) 전자기력에 대한 코일 기계적 보강 구조 기술 부재
 - 20T 이상의 고자기장 자석 내에 발생하는 1GPa 수준의 응력에 의해 초전도 선재는 작동 불능 수준의 영구적 손상 발행하며, 이는 초고자기장 자석의 매우 짧은 자석 운전 수명으로 연결
- ※ 유인 잠수정 잠수 깊이 세계 기록인 10,927m에서의 수압은 110MPa 가량으로, 초고자기장 전자석의 경우 그 10배에 달하는 전자기력을 버텨야 하기에 기술적 난이도가 매우 높음

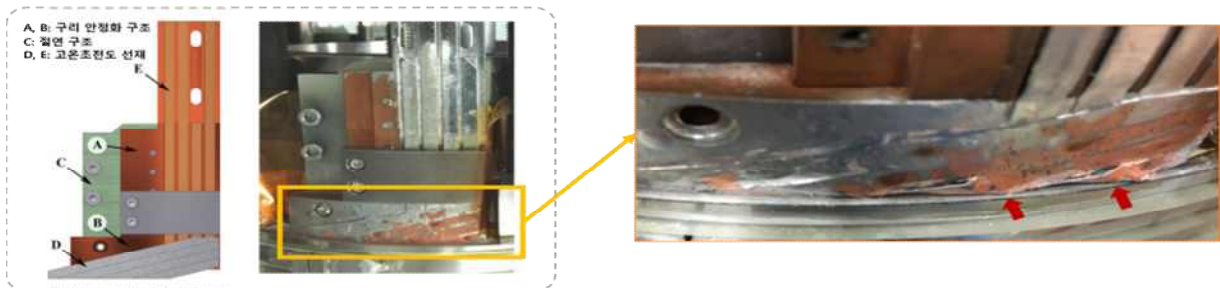


[그림] (좌) 40 T 이상의 고자기장 발생을 목적으로 제작된 고온 초전도 코일 (우) 사후 분석을 위한 코일 해체 과정에서 발견된 초전도 선재의 좌굴 (buckling) 등의 영구적 손상

○ (문제6 리드) 초고자기장의 높은 전자기력으로 인한 리드 변형

- 초고자기장 생성 과정에서 발생하는 강한 기계적 응력으로 인해 초전도자석의 전기적 연결을 담당하는 리드 구조 파손이 가능하여, 자석 충방전에 따라 반복적으로 겪는 강한 전자기력을 견뎌내는 리드 구조가 필요

※ 미국국립고자기장연구소에서 개발한 32T 고온초전도 자석은 시험 후 리드 부분에서 기계적 변형이 관찰됨에 따라 초기 운전 시 기능에는 문제가 없었음에도 불구하고, 리드 수명에 대한 의문이 제기됨



[그림] 초고자기장 고온초전도 자석 리드 파손 사례

○ (문제7 냉각) 극저온 환경 내 발열원으로 인한 온도 유지 곤란

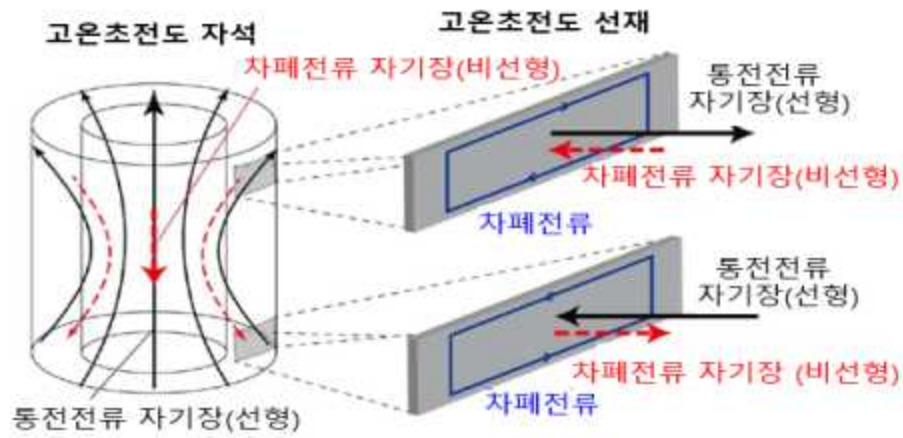
- 주변 환경으로부터의 열 유입을 최소화하고, 효율적으로 냉각할 수 있는 기술이 필요

※ 세계 최고 자기장 달성 45.5T 고온초전도 자석의 경우 초기 냉각상태 대비 전류 충전 시 자석 내부 온도가 4.2K에서 10K 이상으로 상승한 것으로 추정됨

○ (문제8 운전/평가) 비선형 전류에 의한 ①자기장 정밀도 저하, ②자석 켄치 사고로부터의 예방적·사후적 보호 및 통제 수단의 부재

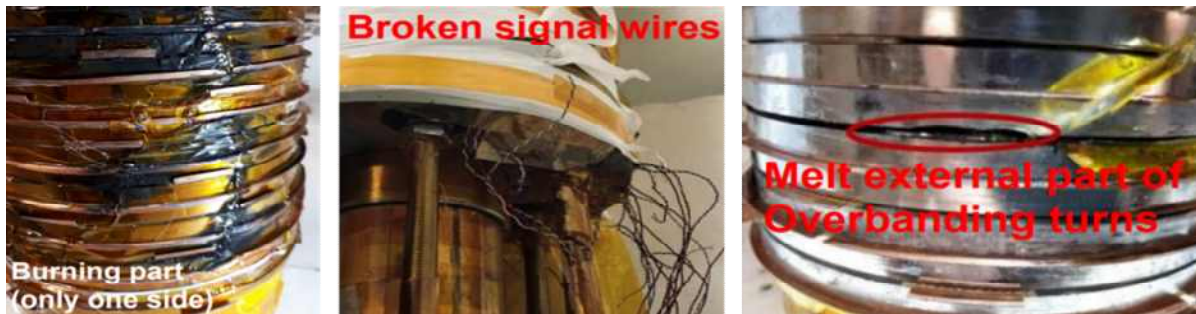
- 고온초전도 자석의 차폐전류*에 의해 자기장의 비선형성이 발생하며, 이로 인해 자기장 정밀도 저하

* 차폐전류: 초전도 내부에서 외부 자기장 차폐를 위해 자발적으로 형성되는 전류



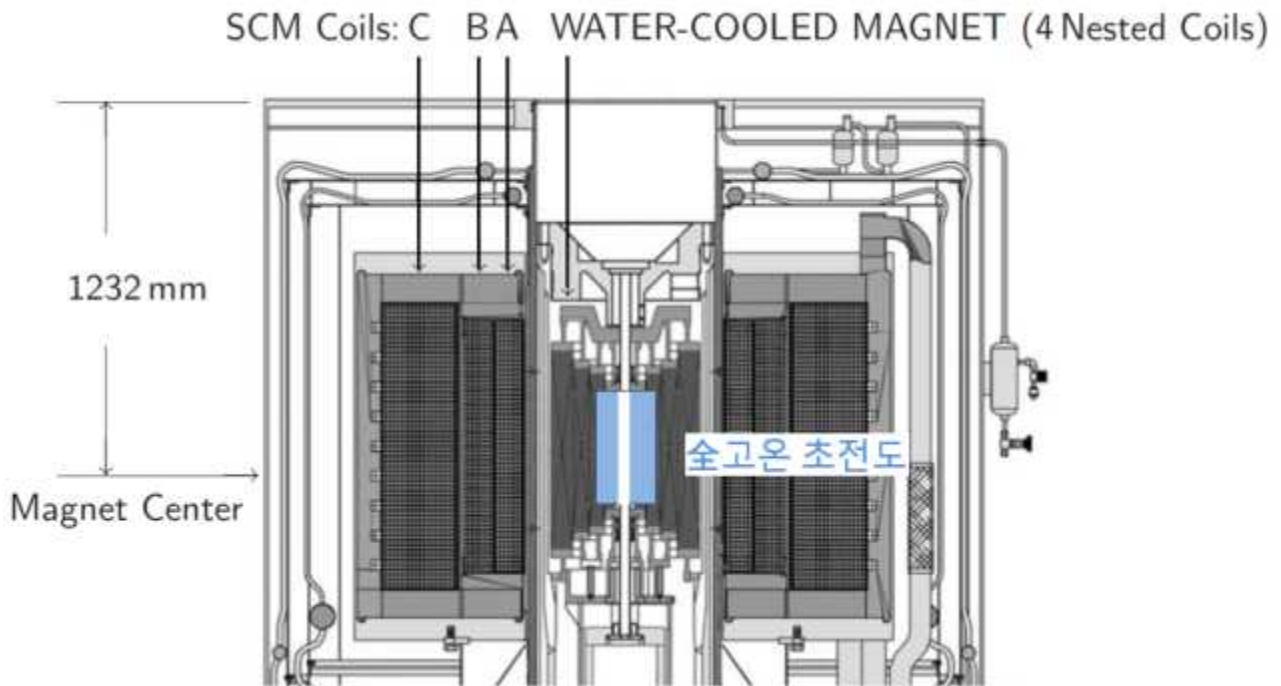
[그림] 차폐전류에 의한 자기장 왜곡

- 고자기장 자석 운전 중 초전도 상태를 급격히 잃어버리는 “퀵치” 사고 시 비가역적이고 복합적인 손상 발생 및 보호 수단의 부재

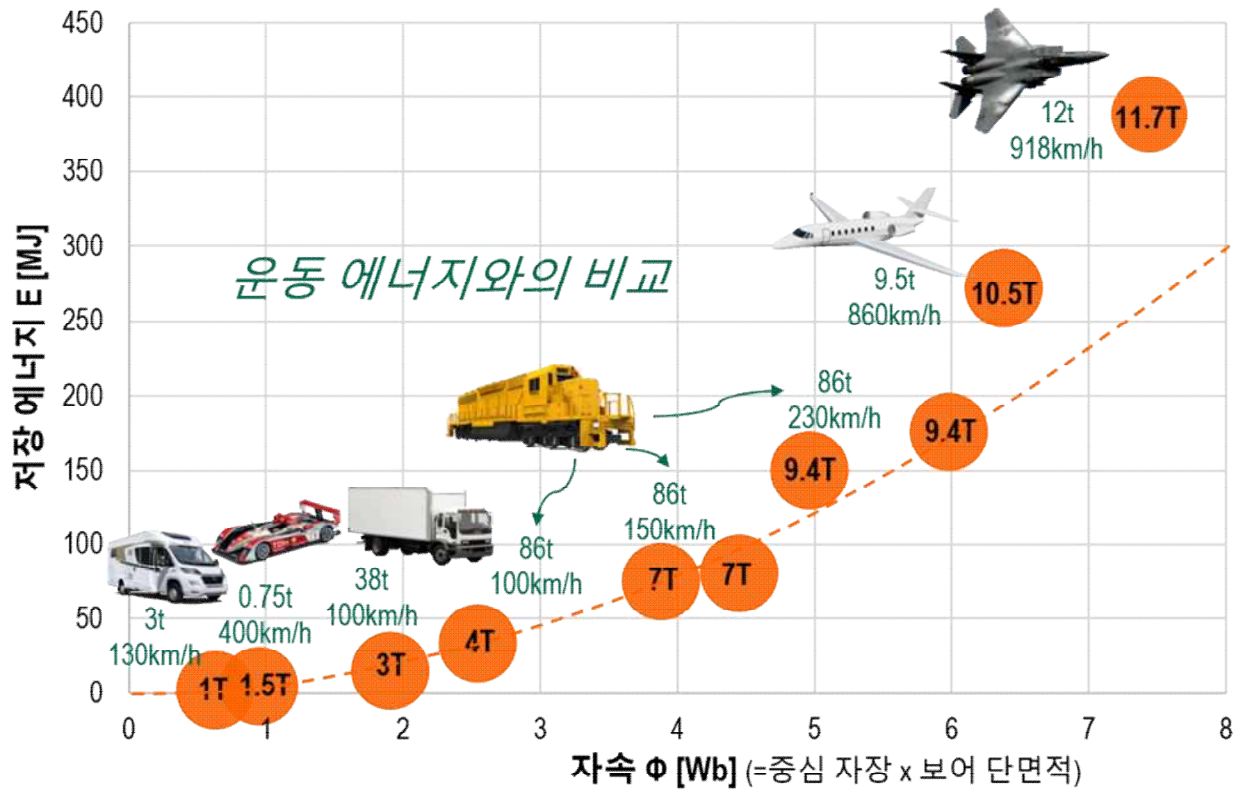


[그림] 고자기장 자석의 퀵치 사고 후 발생한 손상 사례

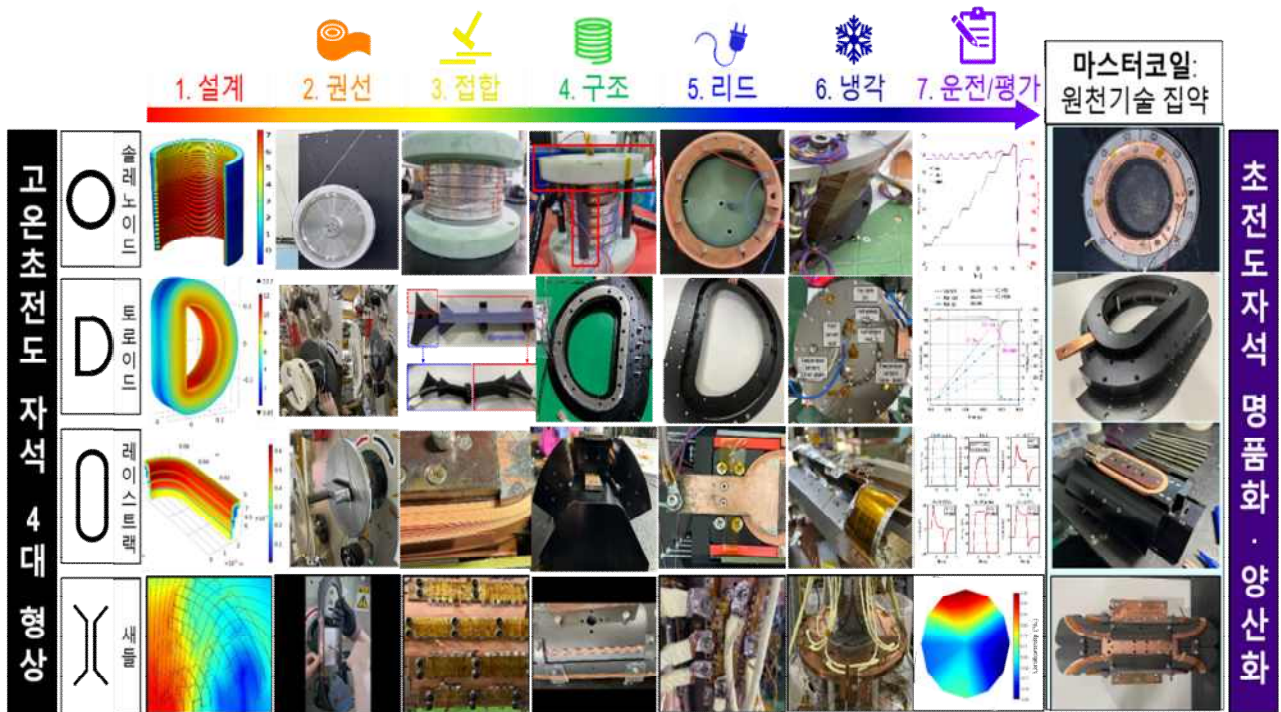
[참고자료 10] 45 T 초전도 자석 비교: 기존 대비 全초전도 자석



[참고자료 11] 초전도자석별 자속과 저장에너지의 연관성



[참고자료 12] 4대 형상별 초전도 자석



초전도 자석 명품화 · 양산화