

붙임 4 연구테마 상세 소개자료

① 연구테마 선정(안)

- (연구테마) 초경량, 저비용 초고자기장 고온초전도 상용 자석(45 T급) 기술 개발
 - (임무) 45 T급 세계 최고 자기장의 전고온초전도 상용 자석 개발
 - (연구내용) ① 45 T 이상급 전초전도 자석 설계, 제작 및 장기 실증 운전 기술 개발, ② 신뢰성이 확보된 초고자기장 초전도 자석 퀸치 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 퀸텀점프를 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 달성을 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, 우리나라에는 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****

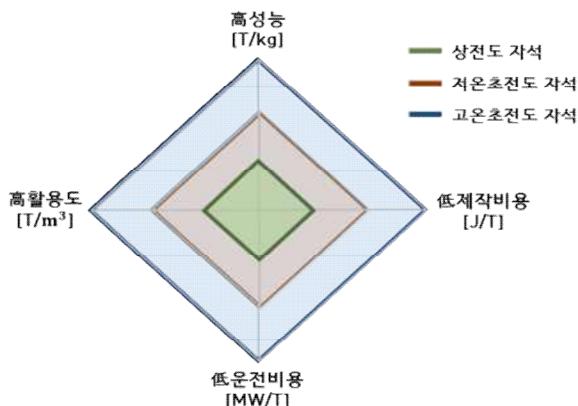
* 고온초전도체: 약 30 K 이상의 온도에서 초전도 현상을 보이는 물질

** 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 패급 예상

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

※ 최근 고온초전도 선재 가격의 하락을 통한 상용화 가능성 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 전고온초전도 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, 「고온초전도마그넷기술 개발사업」을 통해 개발된 요소기술을 기반으로 **高성능, 高활용도, 低제작비용, 低운전비용의 자석 시스템**을 위해 세계 최고·최초의 도전적인 **45 T** **초고온 초전도 상용 자석 개발 시급**

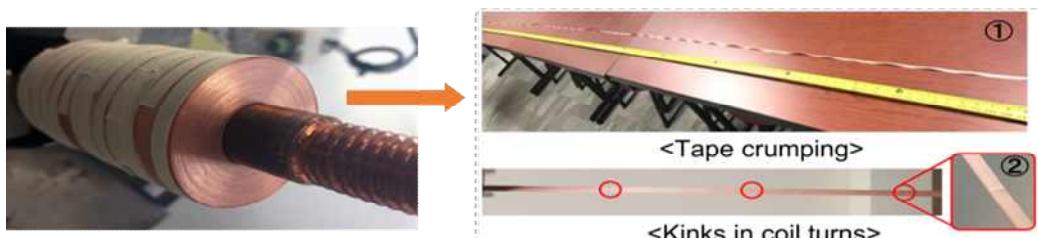
※ 「고온초전도마그넷기술개발사업」을 통한 요소기술 개발 후 이 사업을 시작하는 것은 기술 발전 속도 및 선진국의 발전 속도로 비추어 선진국에 뒤처질 가능성이 큼

□ 초고자기장 자석 개발 시 발생할 수 있는 ‘기술적 미인지 난제’

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

○ (**난제1 고응력**) 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.)

○ (**난제2 냉각**) 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

○ (**난제3 선재**) 초고자기장 환경 내 고온초전도 선재의 **층간 결합력 및 금속 기판 강도의 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

○ (**난제4 보호**) 고자기장 자석 운전 중 초전도 상태를 급격히 잃어버리는

‘퀀치’* 사고 시 비가역, 복합적인 손상 발생

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



[그림 4] 고자기장 자석의 퀸치 사고 후 발생한 손상 사례

III. 문제 해결 임무(To be)

‘고온초전도 마그넷 기술개발사업(PRISM)’ 성과*를 기반으로 45 T급 세계 최고 자기장의 **全고온초전도** 상용 자석 개발

- * 초전도 7대 핵심기술(설계, 권선, 구조, 접합, 리드, 냉각, 시험평가) 및 초고자장 고균일 솔레노이드형 자석 핵심기술 개발
- ☞ 高성능(T/kg), 低제작비용(J/T), 低운전비용(MW/T), 高활용도(T/m³)
全고온초전도 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 **全고온초전도** 자석 목표 설정의 근거 >

◇ 세계 최초로 **全고온초전도** 기술을 이용해 **45 T급**의 자기장 발생 시도

- 현재 **全초전도*** 자석의 최고 자기장 기록은 중국국립과학원이 달성한 32.35 T로, 45 T **全고온초전도** 자석 개발 시 초고자기장 기술 선도 가능
※ **全고온초전도** 자석의 최고 자기장은 서남의 26.4 T
* 저온초전도와 고온초전도를 모두 사용하는 방식
- **직류 최고자기장 세계 최고 기록 45.5 T**를 상회하는 목표 설정

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

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

구분	기준 45 T	전체 비교	기준 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 **성능**과 연관

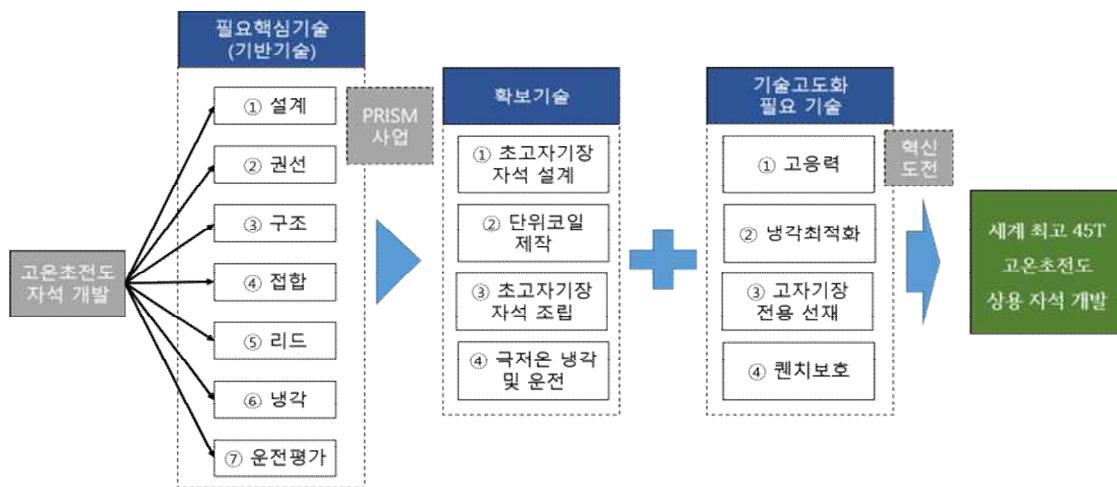
** 큰 부피로 넓은 공간이 필요한 상전도 자석 대비 전초전도 자석은 **공간활용도**가 높음

*** 저장에너지는 시스템 **제작비용**이 비례 <참고 11>

**** 전초전도 자석은 전력 소비량이 0에 가까우며, 전력소비량은 **운전비용**과 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 기획보도거나 개발 중인 원천기술들을 본 연구에 적용 <참고 12>



(1) 45 T 이상급 전고온초전도 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 충간 결합 강도 최대화를 위한 증착 조건 탐색 및 신규 증착 공정 개발

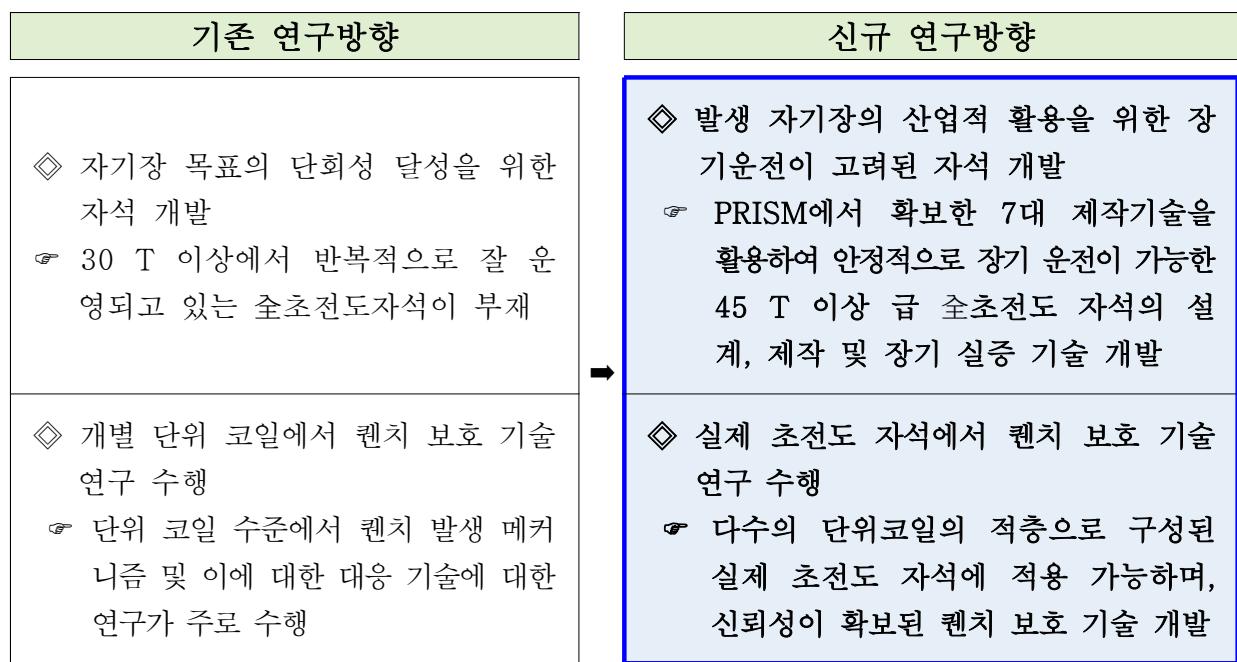
- 고자기장 자석의 ①자기장 세기, ②자기장 투과 각도 조건에 따라 통전 성능이 강화된 맞춤형 선재 개발

(2) 신뢰성이 확보된 초고자기장 초전도 자석 퀸치 보호기술 연구

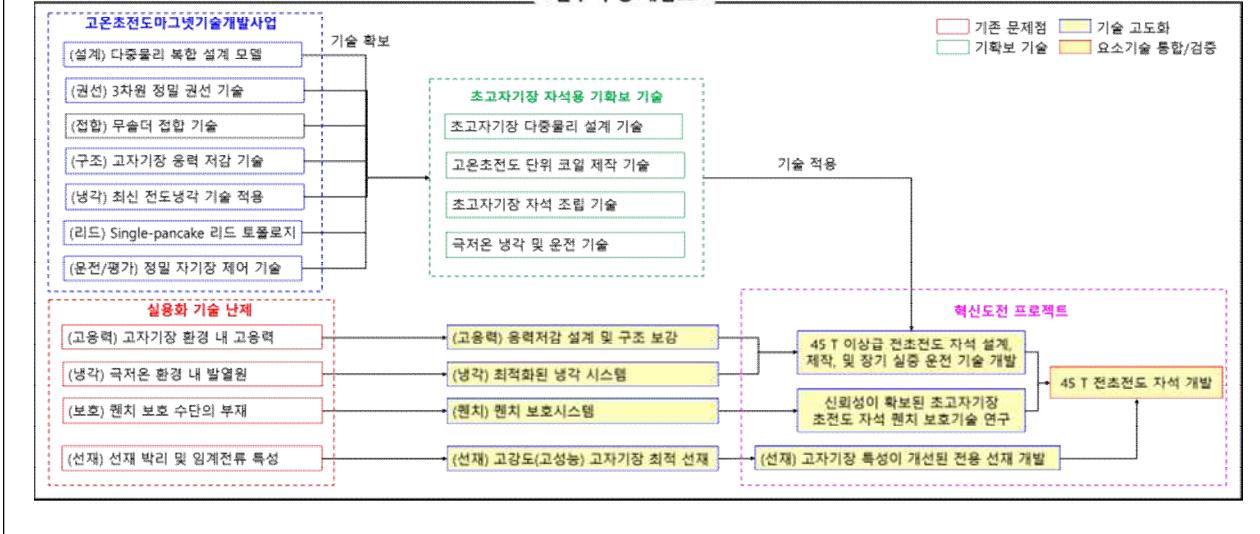
- 고자기장 자석 예방·사후적 퀸치 보호 및 통제 시스템 개발
 - 다수의 적층 코일에 적용 가능한 퀸치 보호시스템 개발

〈 예시 프로젝트 〉

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



〈연구 수행 개념도〉



□ 파급효과

- (과학·기술적) 세계 최초/세계 최고 초고자기장(45 T 이상) 전고온초전도 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 전고온초전도 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 슬레노이드 자석의 고응력 대응기술과 고속충방전기술 안정적으로 확보 가능
 - ※ (NMR) 45 T 이상의 전고온초전도 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 고온 초전도 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 전고온초전도 자석은 세계 최초로 시도되는 사례로 “기술적 미인지(Unknown Unknowns) 난제”가 존재할 것으로 예상
 - 예측하기 어려운 여러 난제가 발생할 가능성이 매우 높은 도전적 과제이나, 「고온초전도마그넷기술개발사업」을 통해 기획보이거나 개발 진행 중인 기반기술을 45 T 이상급 전고온초전도 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 퀸치 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
			1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도		
45 T 이상급 초전도 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 퀸치 보호시스템 설계							10억	데모 자석 퀸치 보호 프로토콜
		데모 자석 퀸치 보호시스템 결과 기반 45 T 자석 퀸치 보호시스템 수정 설계							10억	45 T 자석 퀸치 보호시스템 설계안
	제작	45 T 자석 퀸치 보호시스템 제작 및 운전 결과 분석							10억	45 T 자석 퀸치 보호시스템 운전 결과 분석
		45 T 자석 제작 방식 검토							5억	초고기장 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
	냉각	45 T 자석 및 냉각시스템 유지보수							35억	45 T 자석 장기 운영 결과
		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
	운전/ 평가	냉각시스템 장기운전 결과 분석							5억	냉각 시스템 장기운전 결과
		능동/수동 자기장 안정화 기술 개발							6억	초고기장 자석용 자기장 안정화 기술
		데모 장기 실증 운전 및 결과 분석							10억	데모 장기실증 운전 결과
초전도자 석용 소재 기술 개발	소재	45 T 자석 장기 실증 운전 및 결과 분석							7억	45 T 자석 장기 실증 운전 결과
		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 퀸텀점프를 견인할 핵심 기술로서, 특히 제조산업 혁신 및 과학기술 발전 한계 돌파를 가능하게 하는 기술임 ○ 본 연구테마에서는 기존 상전도 방식을 대신하여 全고온초전도 기술을 활용한 高성능, 低제작비용, 低운전비용, 高활용도의 초고자기장 상용 자석 개발을 목표로 함 ○ 최종목표는 45 T 급 全고온초전도 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 全초전도 자석의 최고 자기장 기록은 중국국립과학원이 달성한 32.35 T로, 본 테마는 세계 최초로 全고온초전도 기술을 이용해 45 T급의 자기장을 발생 시키려는 시도임 ○ 45 T 이상급 全고온초전도 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 全고온초전도 자석 개발에 국한되어 있으며, 실제 30 T 이상에서 반복적으로 잘 운영되고 있는 全초전도 자석이 부재한 상황으로, 세계 최초로 안정적으로 장기 운전이 가능한 45 T급 全고온초전도 자석 기술 개발을 제시함 ○ 세계적으로 단위 코일 수준에서의 웨치 발생 메커니즘 또는 이에 대한 대응 기술 연구에 한정되어 있으며, 본 연구에서는 다수의 단위코일의 적층으로 구성된 실제 초전도 자석에 적용가능한 웨치 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 全고온초전도 기술을 활용하여 高성능, 低제작비용, 低운전비용, 高활용도를 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 연구 테마에서는 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 全고온초전도 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

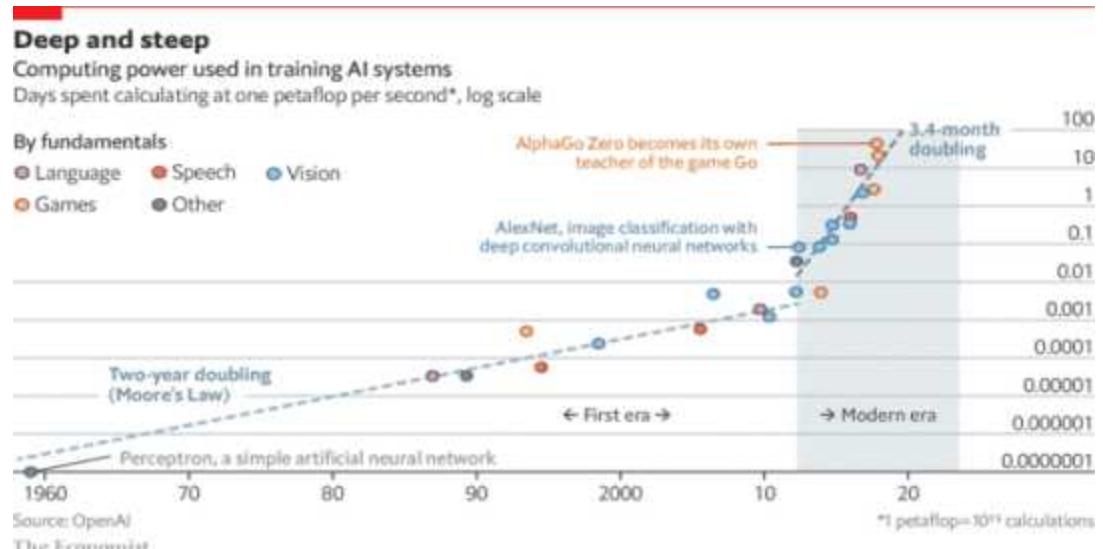


[그림] 고자기장 기술의 다양한 응용 분야: 의료/바이오, 환경/에너지, 전력 시스템, 교통/수송, 국방, 첨단 과학 등 다양한 전기기기 응용 분야로의 파급

[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

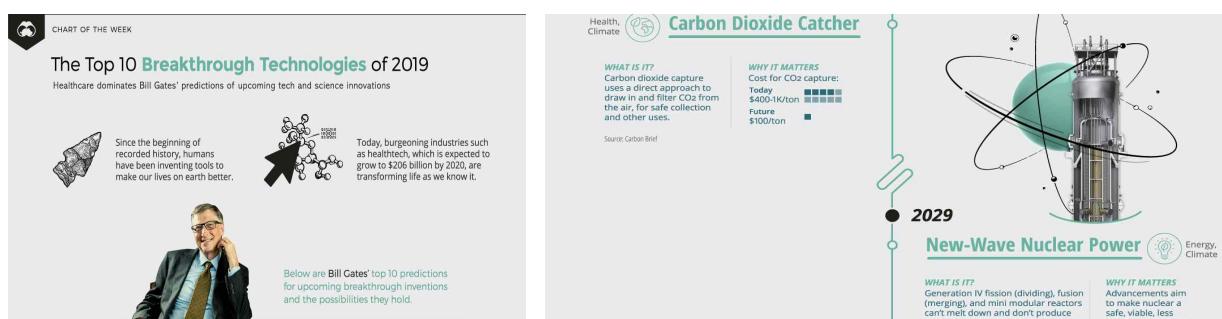


[그림] 2010년대 이후, AI 시스템에 의한 계산량의 급격한 증가(출처: *The Economist, The cost of training machines is becoming a problem, 2020*)

○ 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

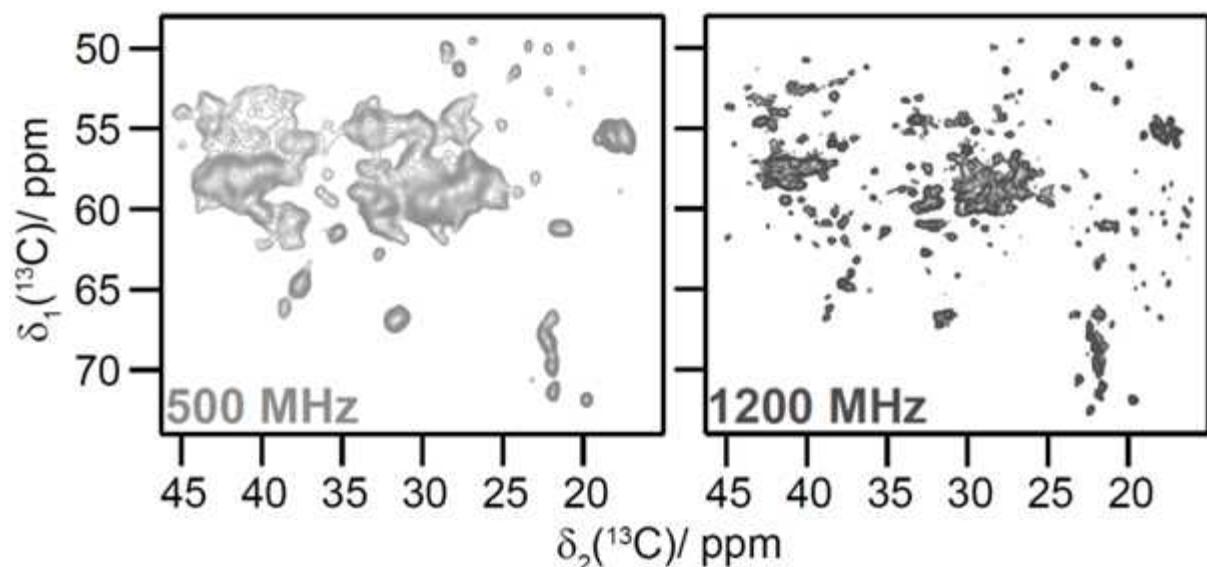
- 핵융합 실증 실험을 위한 ITER 장치(5.3 T, 주반경 6.2 m, 23,000 톤) 개발 중, 한편 미국의 Commonwealth Fusion Systems(CFS) 사는 초고자기장 기술을 기반으로 상용 핵융합 장치 상용화 개발 중 (주축자장 9.2 T, 주반경 3.3 m, 무게 7,190 톤)
 - (고안정성)플라즈마를 가두려면 강력한 자기장이 필요한데, 임계자기장*이 상대적으로 높은 고온초전도체를 사용할 경우 저온초전도체를 사용하여 높은 자기장을 내야하는 것에 비해 운전 안정성이 증대
 - * 초전도 선재가 발생시킬 수 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

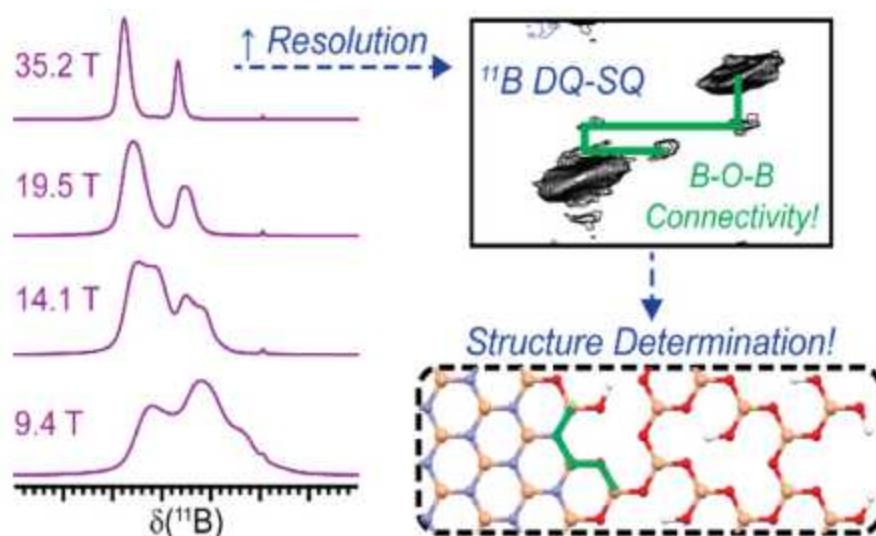
[참고자료 6] 초고자기장 이용 사례 예시

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



[그림] 11.75 T, 28 T 자기장을 활용한 단백질 분석 비교

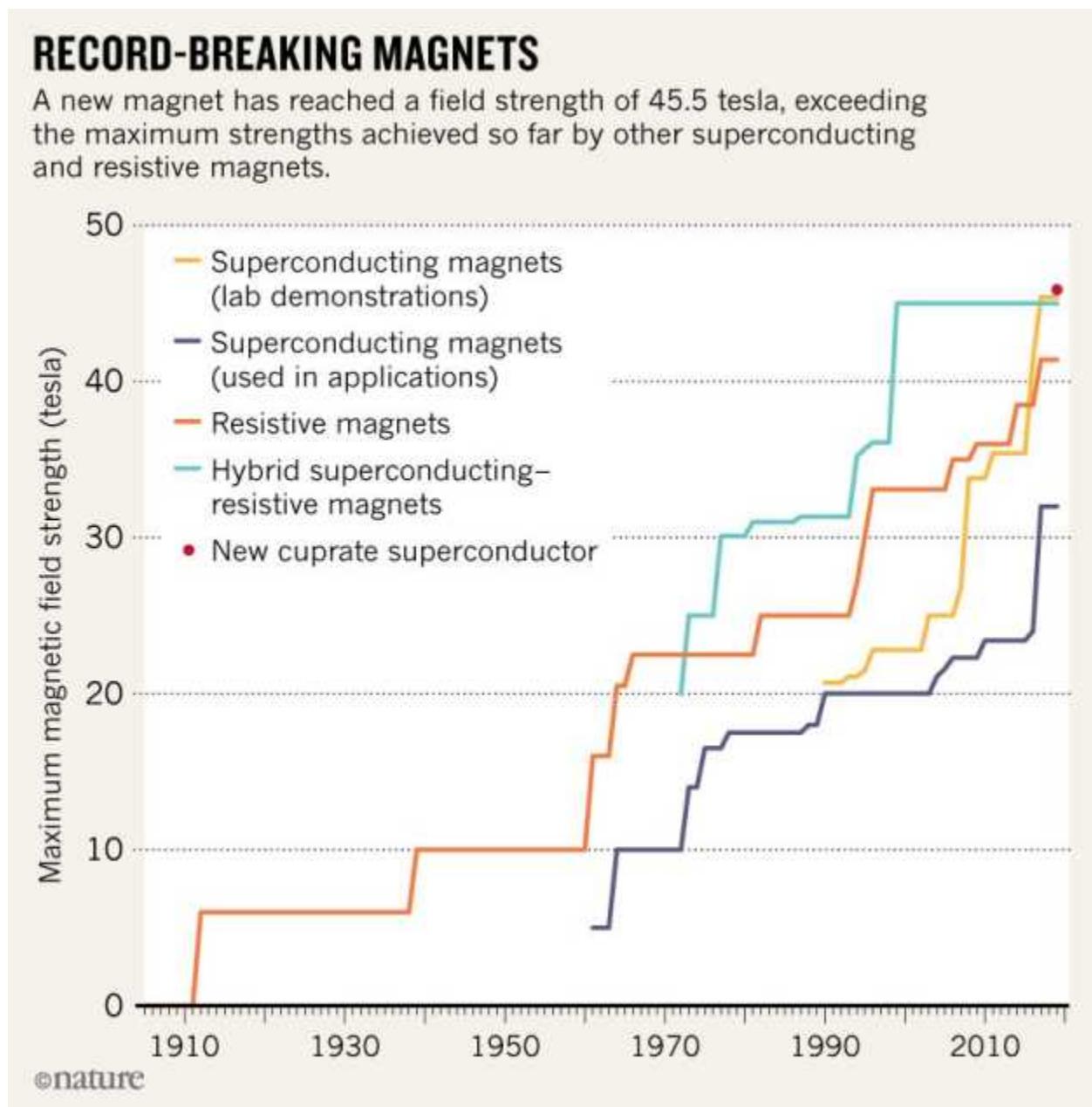
* 출처: Morgane Callon et al., bioRxiv, 2021.03.31., 437892



[그림] 고자기장을 활용한 촉매제 구조 분석 결과

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

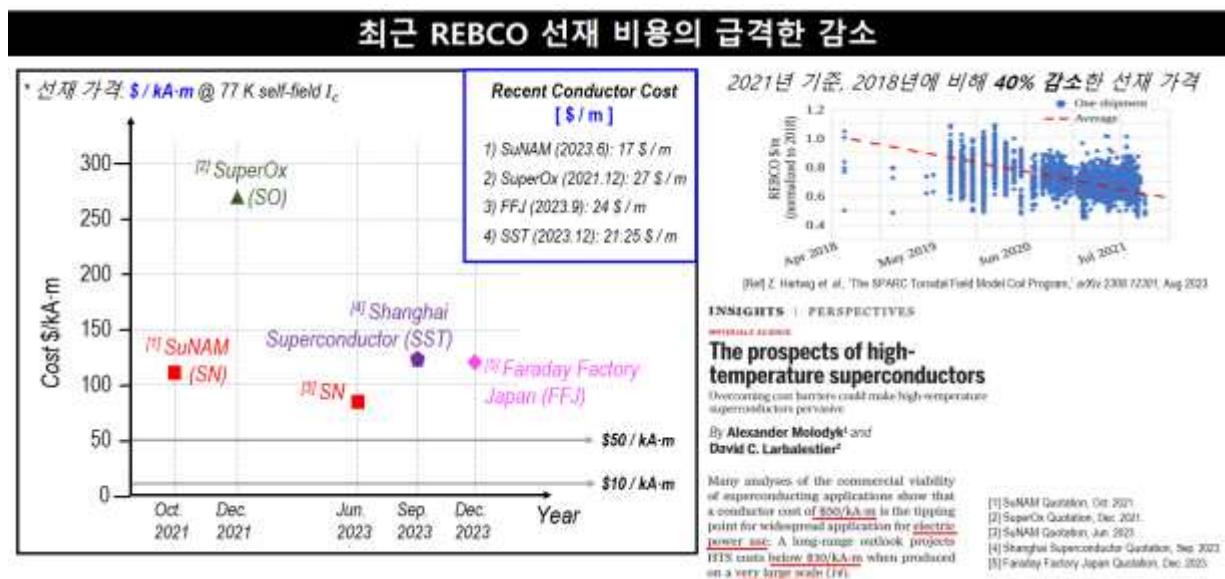
[참고자료 7] 자석 종류별 최고자기장 기록



[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

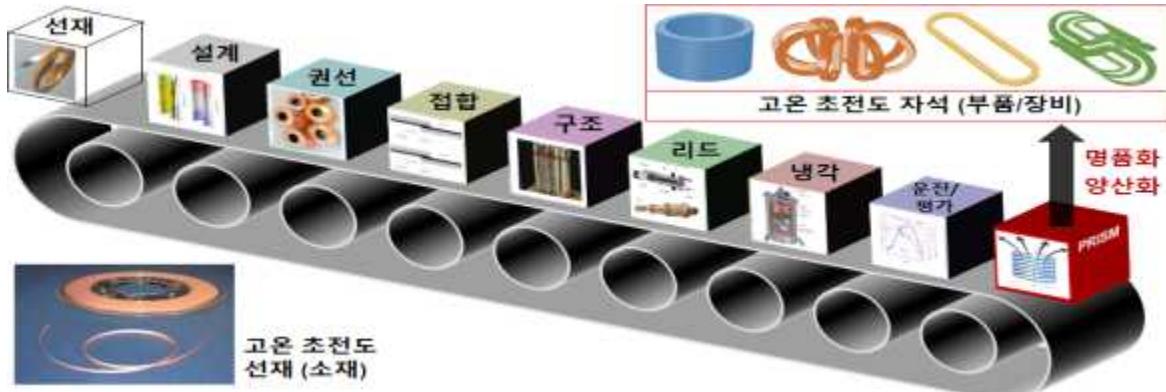
* 출처1: Z. S. Hartwig et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 34.2, 2024: 0600316,

* 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

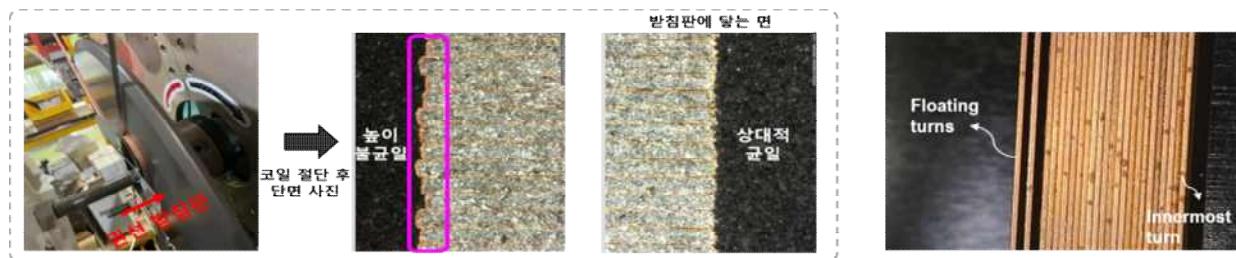
- 초전도 자석 7대 기술의 기술 난제

- (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



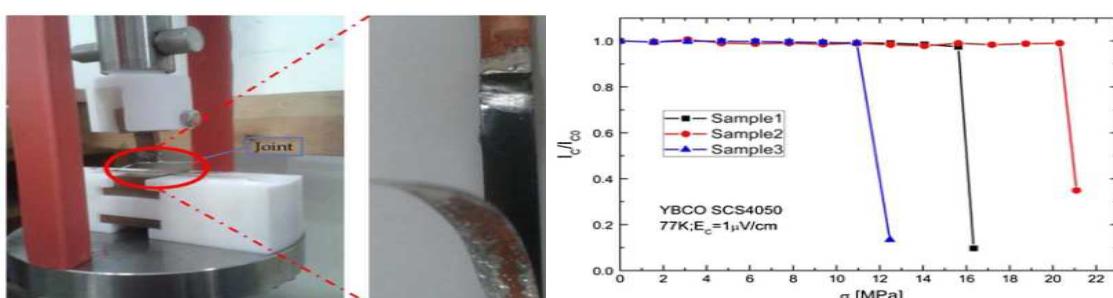
[그림] 선재 박리 테스트 사진 (Courtesy of J. Song (Grenoble))

- (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

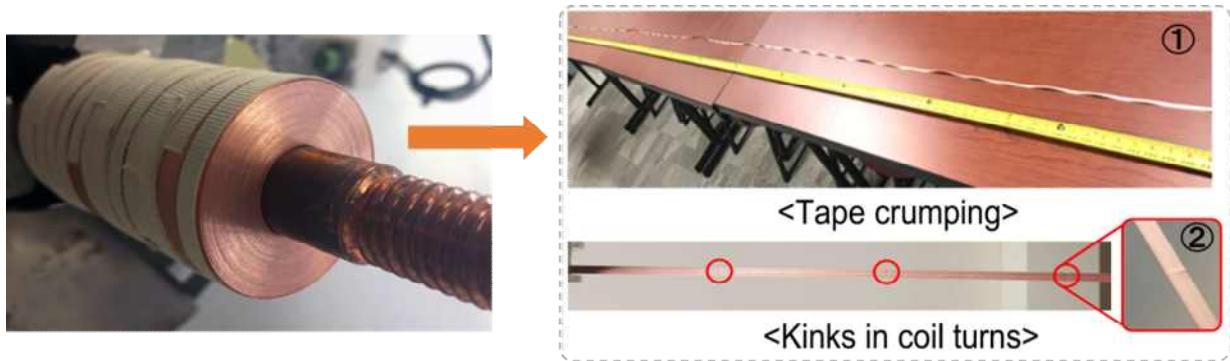
- (문제4 접합) 접합부 박리로 인한 발열량 증가
 - 박막형 선재인 REBCO*의 경우 선재와 선재, 혹은 코일과 코일을 연결하는 접합 제작 시 땜납을 이용하여 붙이는데, 강한 전자기력, 열수축 및 열팽창, 산화 등의 이유로 인해 접합부의 박리가 빈번



[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 발생하며, 이는 초고자기장 자석의 매우 짧은 자석 운전 수명으로 연결

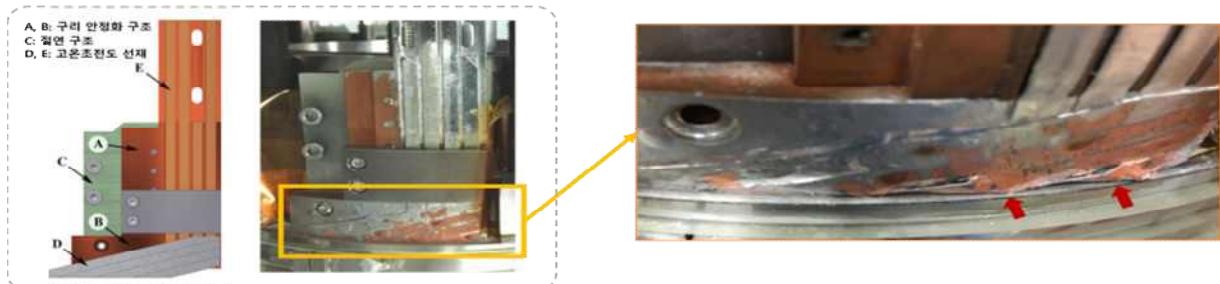
* 유인 잠수정 잠수 깊이 세계 기록인 10,927m에서의 수압은 110MPa 가량으로, 초고자기장 전자석의 경우 그 10배에 달하는 전자기력을 버텨야 하기에 기술적 난이도가 매우 높음



[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



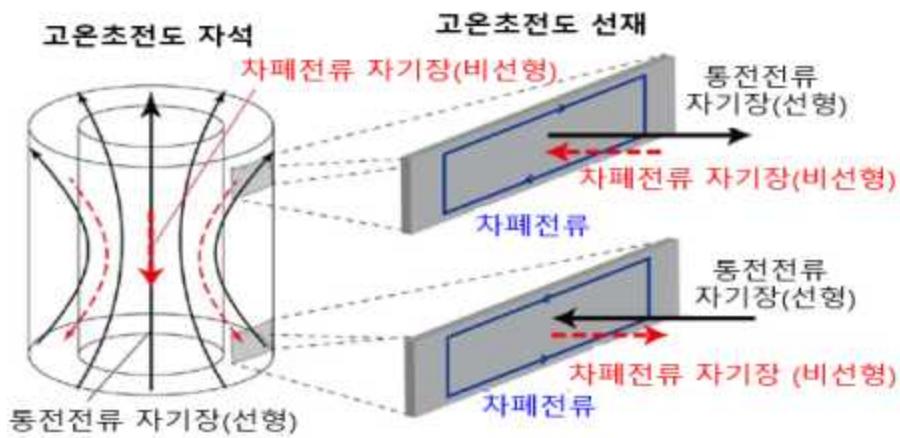
[그림] 초고자기장 고온초전도 자석 리드 파손 사례

- (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 웨치 사고로부터의 예방적·사후적 보호 및 통제 수단의 부재
 - 고온초전도 자석의 차폐전류*에 의해 자기장의 비선형성이 발생 하며, 이로 인해 자기장 정밀도 저하

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



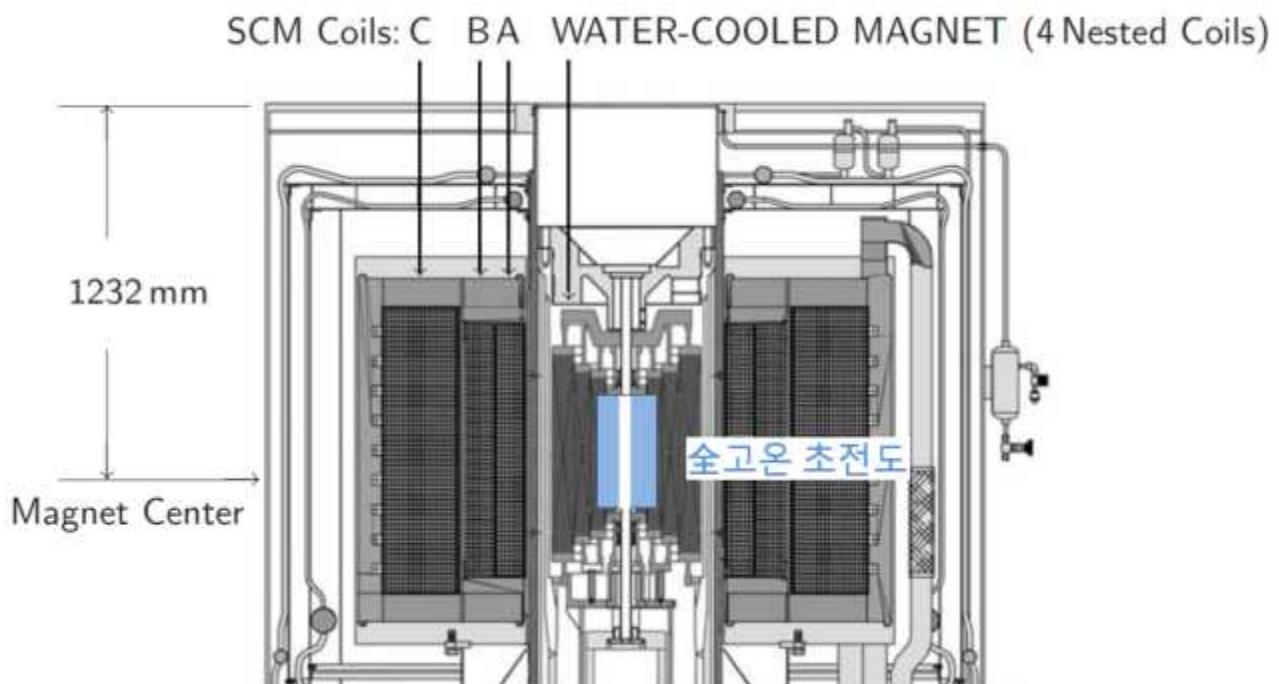
[그림] 차폐전류에 의한 자기장 왜곡

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

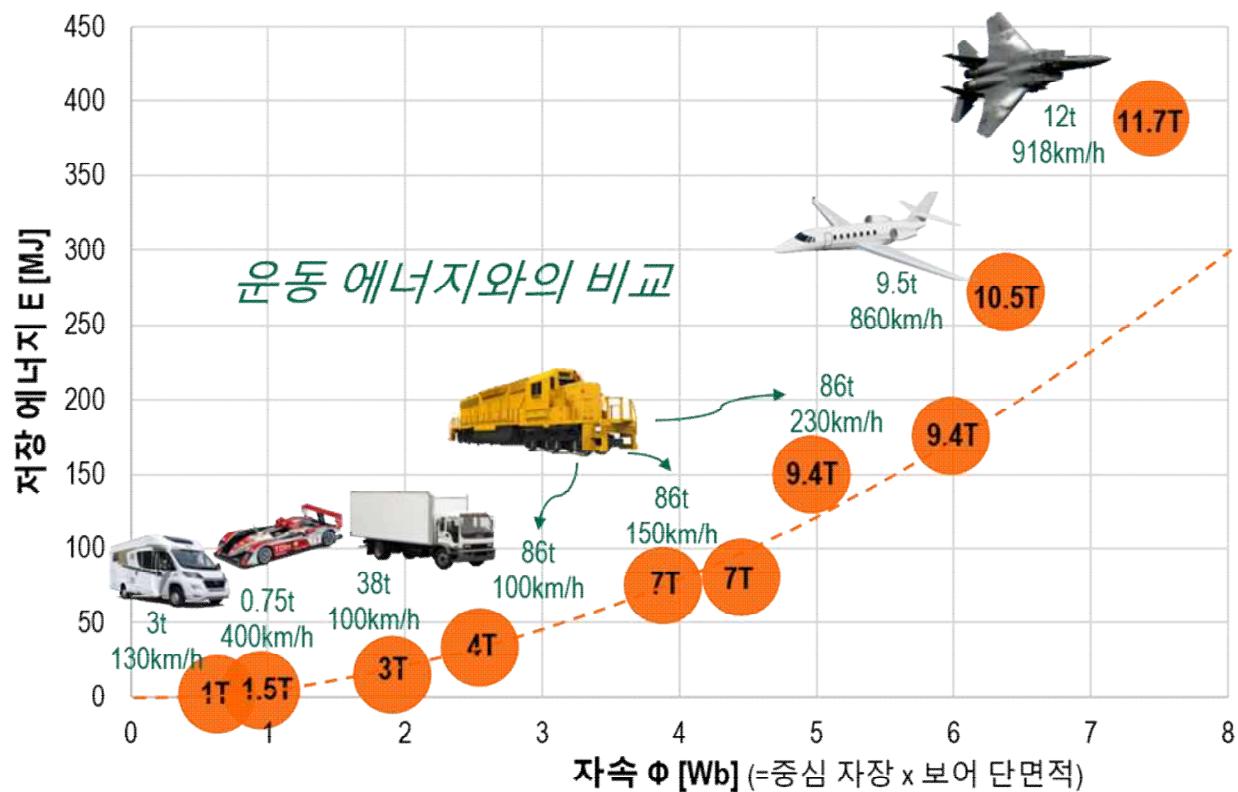


[그림] 고자기장 자석의 퀘치 사고 후 발생한 손상 사례

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



[참고자료 11] 초전도자석별 자속과 저장에너지의 연관성



[참고자료 12] 4대 형상별 초전도 자석

