「고온초전도마그넷기술개발」 사업 개요

(정보·융합기술단, 2022.1.18)

1. 추진 배경 및 필요성

□ 추진 배경

○ 극한기술 기반 기술혁신*으로 신성장산업** 육성과 기존 제조업의 혁신이 가능하도록 **무절연 고온초전도마그넷 원천기술 확보**

* 영하 200도에서 작동하는 고온초전도 전기기기는 기존의 구리로 만든 상전도 전기기기 대비 100배 이상의 에너지 밀도로 운전되어 **월등한 성능향상** 혹은 성능 대비 **기기의 소형화** 가능

** 플라잉카, 자기부상열차, 고해상도 MRI/NMR, 소형입자치료기, 비화학 에너지저장장치 등

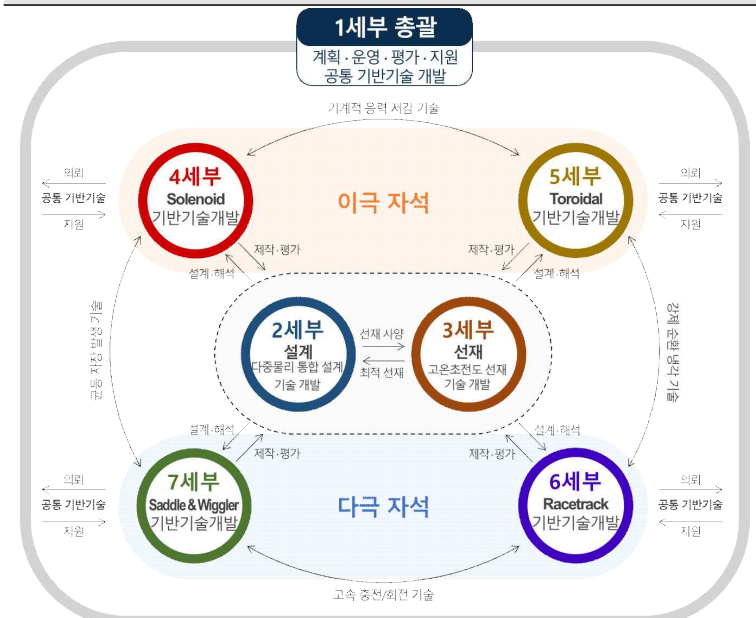
□ 지원 필요성

○ '무절연 고온 초전도 마그넷 기술'은 초전도 마그넷 **상용화 최대 난제였던 운전 안전성 개선**과 **전기기기 성능혁신**을 가능하게 하는 기술

- **의료, 국방, 전력, 에너지, 교통 등 다양한 산업의 Game changer**로, 미래 신시장 선점을 위한 **정부의 선제적 지원** 필요

2. 사업 내용

◇ 마그넷 형태별 **핵심기술**과 선재·설계 등 **기반기술**로 구분해 전략적 연구개발 추진



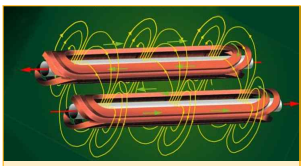
○ **총괄과제 : 과제 간 유기적 연계**(설계 → 제작 → 시험평가) 및 **공통기반기술**(자석 냉각, 운전, 보호기술 등) **개발 등 총괄**

○ 고온초전도 자석 **설계**(2세부)와 **선재**(3세부)를 바탕으로 **4개 형상 마그넷**(4~7세부) 기술개발 추진

1 (**핵심기술 개발**) 무절연 고온 초전도를 다양한 응용 분야에 활용하기 위한 플랫폼(표준모델)으로서 4개 대표 형태의 마그넷 핵심기술 개발

- ㅇ (Solenoid) 高 균일도·안정도의 20 Tesla 이상 초고자기장 마그넷 시스템 설계·제작 및 운전·제어기술 등 개발
- ㅇ (Toroidal) 초고자기장을 구현할 수 있는 20 kA급 고온초전도 도체 설계·제작 등 고에너지밀도 D-shape 마그넷 개발
- ㅇ (Racetrack) **15kW/kg 고출력 밀도** 전기추진 모터용(교통·수송·에너지 분야 적용) 액체수소 냉각 고온초전도 **마그넷 개발**
- ㅇ (Saddle) 국내 최초, 세계 2번째 고온초전도 새들 마그넷 기술 확보 및 **1 Tesla/sec 이상 초고속 충방전** 달성

< 초전도 마그넷 주요 기술 >

			
Solenoid	D-Shape Toroid	Racetrack	Saddle
원형 혹은 원기둥 형태 코일	알파벳 D 형태 코일을 도넛 형태로 배치	트랙 형태 코일을 직선과 원형으로 구성	말 안장 형태 코일
의료·바이오, 첨단과학	환경·에너지, 전력 시스템	교통·수송, 전력 시스템	의료·바이오, 첨단과학

2 (**기반기술 개발**) 무절연 고온초전도마그넷을 부품·장비로 활용하기 위한 소재 및 냉각, 통합 설계·제작 등

- ㅇ (**선재기술**) 초전도 전기기기 분야에서 의존도가 높은 **2세대 초전도 선재**의 **선재 전류밀도, 균일성** 및 **기계적 강도 개선** 원천기술 확보

※ 국내업체가 전력전송선 선재분야에서 세계 최고 수준의 2세대 초전도 선재 기술을 보유하고 있으며, 마그넷용 선재의 원천기술 및 생산공정 확보추진

- ㅇ (**설계기술**) 무절연 초전도 마그넷의 **극한 운전환경** 및 **특성 해석**을 포함한 **다중물리 해석** 및 **설계 기술개발** 추진

※ 무절연 고온 초전도 마그넷 다중물리 정밀 해석 및 응용분야별 다양한 마그넷 형태의 냉각시스템 통합설계 프로그램 개발

3. 사업 추진체계 및 투자계획

□ 추진체계

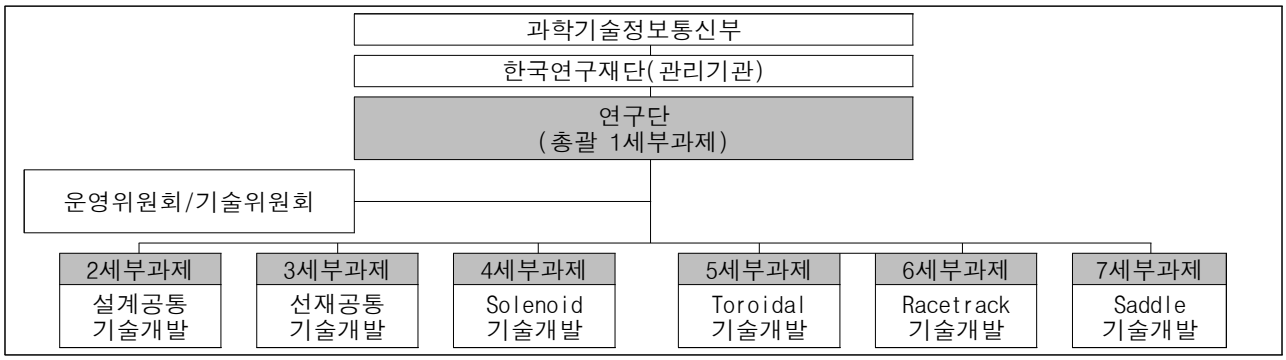
○ **4개 형상별 마그넷 핵심기술** 및 **설계/선재의 공통기술과제로** 구성하되 과제 간의 상호 연계성을 유지할 수 있도록 연구단* 형태로 추진

- 연구단은 **7개 세부과제*로 구성된 컨소시엄(산·학·연 등)** 형태로 추진하며, 사업관리를 위한 **운영위원회** 및 기술교류, 성과관리를 위한 **기술위원회** 운영**

* 총괄과제 및 기술별 세부과제로 구성

** (운영위원회) 위원장(연구단장), 세부과제책임자, 외부 전문가 등으로 구성하며 **사업목표 점검, 예산심의편성**, 연차보고서 총괄 등

(기술위원회) 위원장, 세부과제책임자 등으로 구성되며 **기술교류회 주관, 과제 기술목표 점검**, 기술보고서 작성 등



□ 투자계획

○ '22년~'26년 간 464억원 투자(국고 100%)

<연차별 투자계획(안)>

단위: 억원

내역사업	과제구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합계
기반기술	총괄과제	15.7	33.2	35.3	24.7	22.0	130.9
	2세부과제	5.0	9.1	9.4	8.1	8.1	39.7
	3세부과제	4.0	18.5	20.0	15.4	15.8	73.7
핵심기술	4세부과제	3.4	18.9	14.5	11.0	8.3	56.1
	5세부과제	4.2	12.7	15.8	16.3	9.9	58.9
	6세부과제	4.9	18.7	16.7	13.2	8.0	61.5
	7세부과제	2.9	13.1	12.5	9.0	6.1	43.6
	합계	40.1	124.2	124.2	97.7	78.2	464.4

□ 추진 일정(안)

○ 사업공고 및 과제접수(~2월)→선정평가 및 지원과제 확정(추진위 심의, ~3월) → 과제 협약체결 및 연구개시(4월)

「고온초전도마그넷기술개발」 사업 신규과제 RFP 사전공고

(정보·융합기술단, 2022.1.18)

□ 신규과제

연번	PM 분야	RFP명	예산	선정 과제 수
1	정보·융합기술	고온초전도 자석의 공통 기반기술 개발	각 과제당 연간 755.5백만원 (2022년도는 9개월분 지급)	1개 연구단 선정
2		고온초전도 자석 다중물리 통합 설계 기반기술 개발		
3		고성능 고온초전도 자석용 선재의 기반기술 개발		
4		초고자기장 고균일 솔레노이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발	각 과제당 연간 767.6백만원 (2022년도는 9개월분 지급)	
5		대전류 토로이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발		
6		고성능 고온초전도 레이스트랙 코일 핵심기술 개발		
7		고속 충방전 새들/위글러형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발		

○ 담당 PM(정보·융합기술단장)과 RFP 기획위원은 해당 과제 신청 및 참여가 제한됨

○ 사전공고는 RFP에 관한 연구자 의견수렴을 위한 것으로 **과제 지원 대상이 아님**, 과제 지원 대상인 사업공고는 향후 RFP 확정시 공고 예정(2022년 1월 중)

□ 사전공고 기간 : 2022.1.18(화) ~ 24(월)

□ 사전공고 의견수렴 참여 방법

① 한국연구재단 “기획마루(https://plan.nrf.re.kr)” 홈페이지 접속 → 로그인* → 참여마당 → 사전공고 의견수렴 → ’22년 「범용양자컴퓨터개발」 사전공고 및 의견수렴 게시물 확인(제목 클릭) → 의견수렴 작성 클릭

* 로그인 방법 www.kri.go.kr 등록시 아이디와 비밀번호를 사용하고 현재 KRI 미등록자는 신규등록을 하여야 함

② 기획마루에서 개인정보 수집 등 동의하고 진행 → 기획마루 상의 의견수렴 양식에 맞춰 제안자의 의견 작성 → 기획마루에 파일 첨부 가능

※ 웹으로 입력/저장 중 에러가 발생할 수 있으니 입력 내용을 다른 파일에 먼저 저장하신 후 복사 및 붙여넣기로 입력

※ 문의처 : 한국연구재단 정보·융합기술단 김시내, snkim@nrf.re.kr

RFP번호	2022-고온초전도-01	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목・분야공모형
세부사업명	나노・소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 기반기술개발		
RFP명	고온초전도 자석의 공통 기반기술 개발		
PM분야	정보・융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

○ 탄소 중립을 위해 에너지, 모빌리티 분야에서 사용되는 전기 기기의 고효율화 필요성 대두
- 탄소 중립을 위한 신재생 에너지 확대를 위해 고온초전도 기반의 초대형 풍력발전기 개발이 추진 중에 있음(미국 DOE, 일본 NEDO).
- 국내 핵융합의 경우 한국 핵융합에너지연구원의 KSTAR를 발판으로 핵융합 기술을 세계적으로 선도하고 있으나, 고온초전도 기반의 차세대 핵융합로의 연구가 국내에 전반적으로 미진함.
- NASA를 포함하는 선진국의 다양한 기관에서 글로벌 환경규제에 대응하기 위해 친환경 전기추진 항공기 및 선박 개발에 고온초전도 자석의 도입이 추진되고 있음.

○ 의료용 전기기기 장비(MRI, 암 치료 등), 첨단 과학 장비(NMR, 입자검출기 등)의 고성능화 필요성 대두
- 노령화 사회의 높은 의료 수요에 대응하기 위한, 차세대 진단 및 치료 장비의 필요성이 높아지고 있음.
- 그러나 의료 장비의 경우 주요 품목들이 수입에 의존하고 있어 국산화의 필요성이 높지만, 보수적인 의료 시장의 진입 장벽과 국내 기술의 낮은 안정성에 의해 국산화가 쉽지 않은 상황임.
- 낮은 기술 안정성을 높이기 위해서는 기술의 원천부터 갈고 닦음으로써 기술 안정성을 높이기 위한 연구개발이 필요함.

○ 차세대 전기기기의 고효율화/고성능화를 위한 기반기술 개발 사업: 연구단 구성의 필요성
- 고온초전도 자석은 분야별로 다양한 크기와 성능이 요구되지만, 기술적으로는 몇 가지 주요 기반기술로 분류할 수 있으며 이러한 기반기술 개발을 통해 전 분야에 막대한 파급력을 끼칠 수 있음.
- 고온초전도 자석은 다양한 성능과 더불어 전자기학, 구조역학, 열역학 등 다양한 기술적 배경지식이 통합적으로 필요한 분야이기 때문에, 소규모의 기관들이 참여하는 연구가 아닌 국내 각 분야를 선도하는 기관들을 컨소시엄화 하여 추진되어야 함.
- 고온초전도 자석을 형상별로 솔레노이드, 토로이드, 레이스트랙, 새들/위글러로 분류가 가능하며, 형상과 무관한 공통 기반기술과 형상과 관련된 형상별 기반기술로 분류할 수 있음.
- 고온초전도 자석의 핵심인 설계 및 소재 분야와 더불어, 형상별 기반기술은 초전도 코일의 형태에 따라 4개로 구분되어 진행되어야 하며, 이러한 세부 분야를 총괄하고 공통 기반기술 개발을 주도할 총괄 분야를 아우르는 연구단의 출범이 필요함.

2. 연구개발목표

○ 최종 목표 : 고온초전도 자석의 공통 기반기술 개발

1. 고온초전도 자석의 공통 기반기술 개발
2. 고온초전도 코일에 대한 평가 및 검증 시스템 구성
3. 주요 기반기술 개발을 위한 연구단 내의 유기적인 운영체제 구축

단계	목표
1단계 ('22～'24)	○ 주요 기반기술 개발을 위한 연구단 내의 유기적인 운영체제 구축 ▶ 연구단 운영을 위한 규정 마련 ▶ 세부 과제의 연구 방향/목표 및 진도 점검 ▶ 연구단 내의 기술 및 특허 관리 ○ 고온초전도 자석의 공통 기술 개발: 요소 기술 ▶ 고온초전도 선재의 접합 및 전류리드 기술 개발 ▶ 고온초전도 자석의 응력 저감 구조 및 냉각 기술 개발 ○ 세부 과제의 연구 성과 검증 및 정량적 평가 ▶ 세부 과제의 정량적 평가 기준 구축
2단계 ('25～'26)	○ 고온초전도 자석의 공통 기반기술 개발: 운전 및 보호 기술 ▶ 고온초전도 자석의 범용적 운전 기법 개발 ▶ 고온초전도 자석의 보호 기술 개발 ○ 세부 과제의 연구 성과 검증 및 정량적 평가 ▶ 세부 과제의 각 단계 성과와 최종 성과의 검증 ▶ 세부 과제의 정량적 평가 수행 ▶ 고온초전도 자석의 표준화 기틀 마련

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발 사업의 구성과 추진체계

- 고온초전도 자석의 설계(2세부)와 선재(3세부)를 바탕으로 4개의 형상(4~7세부)에 따른 기반기술 개발을 추진하며, 각 과제의 유기적인 역할 분담 및 공통 기반기술 개발을 담당하기 위한 총괄(1세부) 과제로 구성 (그림 1 참조)
- 설계→제작→시험평가를 통해 개별 기술이 아닌 유기적 연구 결과 도출 (그림 2 참조)
- 강한 결합을 갖는 사업단 형태의 연구단 지향→1세부의 총괄 주관기관에 사무국 운영
- 세부 과제 간 인적 교환을 통해 연구단 전체의 화학적 결합을 유도

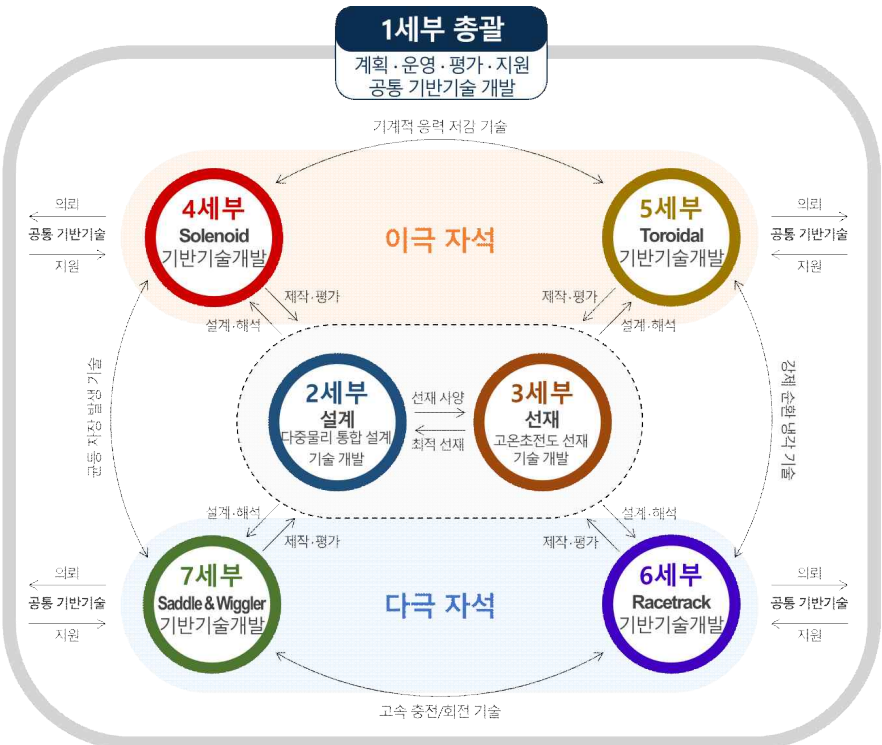


그림 1. 연구과제의 유기성

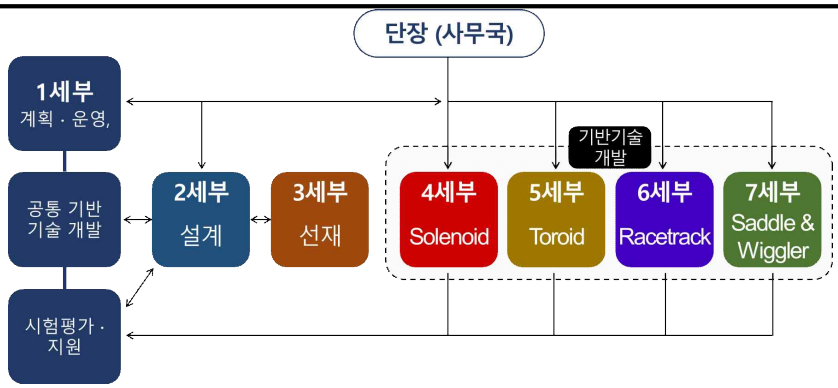


그림 2. 연구개발 사업의 추진체계

□ 1세부의 연구개발 내용

○ 1단계 (‘22~‘24)

▸ 공통 기반기술 개발: 요소 기술
- 고온초전도 선재 간의 접합 기술 및 극저온용 전류리드 기술 개발
- 고온초전도 자석의 응력 저감 구조 기술 및 최적 냉각 기술 개발

▸ 시험평가
- 시험평가의 주요 파라미터 도출 및 평가 기준 마련
- 1단계 시험평가를 위한 시스템 구축 지원과 각 과제의 기술 개발 결과 평가
- 객관적인 최종 시험평가를 위한 해외기관과의 협업체계 구축

▸ 연구단 운영
- 연구단 운영을 위한 사무국 개설 및 규정 마련
- 연구단 내의 장비 구매를 위한 장비구매심의위원회 구성 및 운영
- 공통 기반기술 개발 및 세부 과제 간 소통강화를 위한 기술개발팀 구성
- 시험평가 기법 개발 및 각 세부 과제의 평가를 위한 시험평가팀 구성
- 각 세부 과제에서 추가로 필요한 인적/물적 자원의 지원 및 효율적 관리

○ 2단계 (‘25~‘26)

▸ 공통 기반기술 개발: 운전, 보호 및 평가 기술
- 고온초전도 자석의 특성 파라미터 도출을 위한 운전 결과 분석기법 개발
- 고온초전도 자석의 응급 상황 대처 매뉴얼 및 능동/수동 보호 기술 개발

▸ 시험평가
- 최종 시험평가를 위한 시스템 개선 지원 및 기준 마련
- 과제 종료 전, 각 과제의 최종 기술개발 결과 평가
- 해외 전문기관을 통한 평가시스템 자문 및 개선 추진

▸ 연구단 운영
- 1단계에서 개발된 공통 기반기술의 세부 과제별 기술 지원

□ 성과목표

단계		목표
1단계 (‘22~‘24)	정량	○ 공통 기반기술 개발: 요소기술 ▸ 초전도 선재 간의 접합 장치 개발: 100 nΩ 이하, 1시간 이상 연속운전, 10,000회 이상의 반복운전 ▸ 극저온용 전류리드 기술 개발: 500 A 이상, 1 시간 이상 연속운전, 10,000회 이상의 반복 운전 ○ 연구단 전체 SCI(E) 논문 64편 이상, 특허 40건
	정성	○ 공통 기반기술 개발: 요소기술 ▸ 응력 저감 구조 기술 개발 ▸ 고온초전도 자석의 최적 냉각 기술 개발 ○ 시험평가

		▸ 각 과제의 단계평가 기준 마련 및 평가 수행 ○ 연구단 운영 ▸ 각 세부 과제 간 유기적인 운영 체계 구축
2단계 ('25~'26)	정량	○ 공통 기반기술 개발: 운전, 보호 및 평가 기술 ▸ 능동 제어 운전 기술: 고온초전도 자석의 시변자장 균일도 0.1 %/hr 이하 ▸ 능동/수동 보호 기술: 퀜치 사고시 온도 상승 300 K 이하 ○ 연구단 전체 SCI(E) 논문 46편 이상, 특허 27건
	정성	○ 공통 기반기술 개발: 운전, 보호 및 평가 기술 ▸ 고온초전도 자석의 퀜치 사고 시 대처 매뉴얼 개발 ▸ 고온초전도 자석 평가의 표준화 기틀 마련 ○ 연구단 운영 ▸ 개발된 공통 기반기술의 세부 과제별 지원

4. 특기사항

○ **주요 고가 장비 및 소재의 총괄 구매**

- 연구단 내의 주요 고가 장비 및 고온초전도 선재의 구매는 1세부에서 진행
- 이는 고가 장비와 선재를 공동 구매함으로써, 각 세부 과제의 유기적 결합을 바탕으로 장비 및 선재의 활용을 유연하게 하기 위함임
- 주요 고가 장비의 경우 연구단 내에서 장비구매심의위원회를 통해 구매 타당성을 검증하기 위함임

○ **기타 사항**

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 1세부 총괄 과제임
- 기반기술 개발 연구내용은 다른 세부 과제들과 연계됨
- 1차년도 연구 기간은 9개월임
- 총괄 과제책임자는 1세부 과제책임자와 연구단장 겸임 필수

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

○ **과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)**

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

○ **'22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원**

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-02	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목・분야공모형
세부사업명	나노・소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 기반기술개발		
RFP명	고온초전도 자석 다중물리 통합 설계 기반기술 개발		
PM분야	정보・융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

○ **(시의성)** 최근 고온초전도 자석 기술의 발달로 기존 상전도 및 저온 초전도 기반 전기기기 시스템의 패러다임 전환의 가능성이 논의됨에 따라, 주요 기술 선진국(미국, 일본, 유럽, 중국)에서 국가적 차원의 프로젝트를 통해 기술개발이 이뤄지고 있음.

○ **(파급력)** 고온초전도 자석 기술의 적용을 통해 기존 응용기기의 고에너지밀도 및 초고자기장 달성이 가능하며, 이를 통하여 획기적 성능 개선이 가능할 것으로 판단됨.
- **[Life] 의료/바이오 분야**: MRI, 암 치료용 가속기 등
- **[Material] 신소재/신약 분야**: NMR, 초고자기장 자석 등
- **[Energy] 에너지 분야**: 핵융합, 초전도 ESS, 초전도 전기추진 등

○ **(원천성)** 고온초전도 자석은 극한 운전환경(극저온, 저진동, 고진공 등)을 요구하며, 이에 따라 고온초전도 자석 설계 시 다중물리 현상을 고려한 정밀 설계 기술이 요구됨. 본 과제에서 세계 최초 다중물리 해석 및 설계 통합 프로그램을 개발하여 설계 기술을 정립함으로써, 세계 최고 수준의 고온초전도 자석 설계 기술을 확보하고자 함.

2. 연구개발목표

ㅇ 최종 목표 : 고온초전도 자석 통합 해석 및 설계 프로그램 개발
- 유형별 고온초전도 케이블 통합 해석 및 설계 기술 개발
- 형상별 고온초전도 자석 통합 해석 및 설계 기술 개발

ㅇ 단계별 목표

단계	목표
1단계 ('22~'24)	**ㅇ 유형별 고온초전도 케이블의 다중물리 통합 해석·설계 기술 개발** ▸ 관내도체형, 전위도체형 케이블의 개별 해석·설계 모델 개발 **ㅇ 형상별* 고온초전도 자석의 다중물리 통합 해석·설계 기술 개발** * 형상별: 솔레노이드형, 토로이드형, 레이스트랙형, 새들형 포함. **ㅇ 형상별 고온초전도 자석 및 냉각 시스템의 요구 성능 및 특성에 따른 설계 (치수·성능·운전) 파라미터 도출** ▸ 고균등 고자기장 솔레노이드형 자석 및 냉각 시스템 ▸ 고속회전 고출력밀도 레이스트랙형 자석 및 냉각 시스템 ▸ 대전류 통전 토로이드형 자석 및 냉각 시스템 ▸ 고속충방전 새들형 자석 및 냉각 시스템
2단계 ('25~'26)	**ㅇ 형상별 고온초전도 자석 및 냉각 시스템의 요구 성능 및 특성에 따른 설계 (치수·성능·운전) 파라미터 도출** ▸ 고토크밀도 레이스트랙형 자석 및 냉각 시스템 ▸ 다주기 배열 위글러형 자석 및 냉각 시스템 **ㅇ 다양한 형상에 적용 가능한 다중물리 통합 해석·설계 프로그램 개발** ▸ 전자기, 열전달, 구조역학, 정상운전, 퀜치 사고 특성해석 포함

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발내용

○ 1단계 (‘22~‘24)

■ 고온초전도 케이블 설계 기술

▸ 고온초전도 케이블 전자기 해석 모델 개발

- 부분요소 등가회로 해석 기술을 활용한 도체 내 전류 구배 특성 해석 모델 개발
- 형상과 치수에 따른 운전온도/외부자기장 하에서의 임계전류 특성 해석 모델 개발

▸ 고온초전도 케이블 구조 해석 모델 개발

- 케이블 권선에 따른 도체 내 잔류 응력 해석 모델 개발

▸ 고온초전도 케이블 열 해석 모델 개발

- 케이블의 교류손실 해석 모델 개발: (1) 자기이력 손실; (2) 전자기결합 손실

■ 4대 형상 고온초전도 자석 해석 및 설계 기술

▸ 고온초전도 자석 전자기 해석 모델 개발

- 형상별 전자기 설계 모델 개발: (1) 2차원/3차원; (2) 공심/철심; (3) 선형/비선형 전류
- 고온초전도 선재의 온도 및 자기장 변화에 따른 임계전류 예측 모델 개발
- 복합 고온초전도 선재의 조성비 및 온도에 따른 기계적 특성 예측 모델 개발
- 접촉저항 예측 및 정상/사고 운전 분포정수 해석 모델 개발

▸ 고온초전도 자석 구조 해석 모델 개발

- 전자기, 권선, 굽힘, 열수축, 비틀림, 버클링 응력 해석 모델 개발
- 차폐전류 유도 비선형 전자기 응력 해석 모델 개발
- 마찰력이 고려된 응력 해석 모델 개발
- 퀜치 시 코일간 유도전류에 의해 발생하는 전자기 응력 해석 모델 개발
- 자석 시스템 구조의 고유 진동 모드 해석 모델 개발

▸ 고온초전도 자석 열 해석 모델 개발

- 전도, 대류, 복사에 의한 구조적 발열량 도출 및 필요 냉각특성 해석 모델 개발
- 퀜치 시 국소부의 최대 상승 온도 해석 모델 개발

■ 형상별 고온초전도 자석의 설계 지원

▸ (4세부) 솔레노이드형 자석

- 20 T 이상급 고균등 고자기장 솔레노이드형 고온초전도 자석 상세 설계안 도출

▸ (5세부) 토로이드형 자석

- 대형 토로이드 자석용 적층도체형 혹은 관내도체형 대전류 케이블 상세 설계안 도출
- 대전류 케이블을 적용한 12 T 이상급 토로이드형 고온초전도 자석 상세 설계안 도출

▸ (6세부) 레이스트랙형 자석

- 2000 rmp에서 10 kW/kg 이상급의 회전기에 적용 가능한 레이스트랙 고온초전도 자석 상세 설계안 도출

▸ (7세부) 새들, 위글러형 자석

- 1 T/s 이상급 고속 충방전이 가능한 새들형 고온초전도 자석 상세 설계안 도출

○ 2단계 (‘25~‘26)

■ 고온초전도 케이블 설계 기술

▸ 고온초전도 케이블 다중물리 통합 설계 기술 개발

- 대전류 케이블의 전자기/응력/냉각 특성 통합 해석 모델 개발

- 대전류 케이블 간 및 케이블 내 소선 간의 고온초전도 선재의 접촉저항에 따른 전자기/응력/냉각 통합 설계 기술 개발

■ **4대 형상 고온초전도 자석 해석 및 설계 기술**

▸ 고온초전도 자석 다중물리 통합 해석·설계 기술 개발

- 전자기/기계/열전달 통합 해석·설계 프로그램 개발
- 고온초전도 자석 퀜치 시 다중물리 통합 해석 모델 개발

■ **형상별 고온초전도 자석의 설계 지원**

▸ (7세부) 새들/위글러 형 자석

- 반복 자기장 4 T 이상급 다주기 위글러형 고온초전도 자석 상세 설계안 도출

□ **성과목표**

단계		목표
1단계 ('22~'24)	정량	ㅇ **고온초전도 케이블·자석 설계안** ▸ >20T 급 고균등 고자기장 솔레노이드형 고온초전도 자석 상세 설계안 도출 ▸ (@20 K, 12 T) 30 kA 급 관내도체형, 10 kA 급 적층도체형 대전류 케이블 상세 설계안 도출 ▸ 다중물리 통합 설계법 기반 케이블을 사용한 12 T 이상급의 토로이드 mock-up 자석 설계안 도출 ▸ 2000 rmp에서 10 kW/kg 이상급의 회전기에 적용 가능한 레이스트랙 고온초전도 자석 상세 설계안 도출 ▸ 중심 자기장 2 T, 충방전 속도 1 T/s, 유효길이 30 cm 이상인 고속충방전 새들 자석 상세 설계안 도출 ㅇ **SCI(E) 논문 20편, 핵심특허: 5건 출원**
	정성	ㅇ **고온초전도 케이블·자석 해석·설계 개별 프로그램** ▸ 다양한 형상의 고온초전도 케이블·자석 해석·설계 개별 프로그램: (1) 전자기; (2) 구조; (3) 열/냉각
2단계 ('25~'26)	정량	ㅇ **고온초전도 케이블·자석 상세 설계안** ▸ 반복 자기장 4 T 이상, 반복 자기장 5 주기 이상, 주기 길이 6 cm 이하의 위글러 자석 상세 설계안 도출 ㅇ **SCI(E) 논문 15편, 핵심특허: 3건 출원**
	정성	ㅇ **고온초전도 케이블·자석 다중물리 통합 프로그램** ▸ 고온초전도 케이블 전자기·구조·열 통합 해석·설계 프로그램 ▸ 다양한 형상의 고온초전도 자석 전자기·구조·열 통합 해석·설계 프로그램 개발

4. 특기사항

ㅇ **기타 사항**

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 2세부 설계 과제임
- 형상별 고온초전도 자석의 설계 지원은 4세부, 5세부, 6세부 및 7세부 과제와 연계됨
- 단계별 도출 성과물의 형태 및 목표 달성 검증 방법에 대한 구체적 기술 요망
- 1차년도 연구 기간은 9개월임

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ **과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)**

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ **'22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원**

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-03	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목·분야공모형
세부사업명	나노·소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 기반기술개발		
RFP명	고성능 고온초전도 자석용 선재의 기반기술 개발		
PM분야	정보·융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

□ **과제 추진 배경 및 필요성**

- ㅇ 무절연 고온초전도 기술을 활용한 초전도 응용기기의 성능은 사용되는 2세대 고온초전도 선재의 특성에 크게 의존
- ㅇ 응용기기 개발이 급진전함으로써 우수한 성능의 2세대 고온초전도 선재 요구가 급증
- ㅇ 2세대 고온초전도 선재의 성능향상을 통해 응용기기의 소형화 및 제조원가 저감을 통한 적용 분야 조기 확대

□ **과제 분야 이슈**

- ㅇ 2세대 고온초전도 선재의 제조기술은 반도체나 디스플레이 등과 달리 아직 최적의 생산 공정 확립 미흡
- ㅇ 무절연 고온초전도 자석 적용이 가능한 우수한 고자기장하 선재 전류밀도, 길이 방향 균일성 및 높은 기계적 강도를 갖는 2세대 고온초전도 선재 개발 필요
  2세대 고온초전도 선재의 응용기기 적용 확대를 위한 대량생산 핵심기술 개발 필요

□ **기대효과**

- ㅇ 무절연 고온초전도 코일 기술을 이용한 다양한 응용기기(초고자장 NMR/MRI, 핵융합, UAM 및 항공기용 초전도 모터, 풍력발전기, 의료기기용 코일 응용) 개발에 즉시 활용
- ㅇ 무절연 고온초전도 코일의 적용을 통한 최적의 고온초전도 선재 제조 공정 개발 및 상용화 원천기술 확보
- ㅇ 고온초전도 응용기기의 핵심 소재인 초전도 선재의 고성능화를 통해 국내 초전도 응용기기 산업의 경쟁력 제고에 기여
  다양한 온도와 자장 영역에서 활용성이 높은(높은 임계전류를 갖는) 선재의 생산능력 확보로 기존의 관점에서 벗어난 새로운 응용처 창출 가능
- ㅇ 4차 산업혁명을 주도할 무절연 고온초전도 코일 응용기기의 상용화를 촉진하므로 서 국민들의 의료, 교통, 산업 분야의 획기적인 기술 향상을 통한 국민복지 증진 가능

2. 연구개발목표

□ **연구목표**

ㅇ **최종 목표 : 고성능 초전도자석용 고온초전도 선재 핵심기술 개발**

- 길이 및 폭 방향 초전도 특성 및 형상이 균일한 2세대 고온초전도 선재 제조 원천기술 개발
- 고자기장 특성 및 임계전류밀도가 우수한 2세대 고온초전도 선재 제조 원천기술 개발
- 저가 초전도선재 제조를 위한 광폭 기판 전해연마 기초기술 개발
- 코일용 고성능(극박/고자장) 초전도 선재의 전기-기계적 특성 평가 및 신뢰성 향상 기술 개발
- 경량 고성능 다심 MgB_2 초전도 선재 제조 및 대전류 통전용 집합 도체 개발

ㅇ **단계별 목표**

단계	목표
1단계 ('22~'24)	• 선재 길이 방향 균일성 향상 기술 개발 - Lot-to-lot /c 균일화 기술 개발 - 두께 균일화 증착 및 가공기술 개발 - 두께 정밀 측정 장치 개발 - 레이저 정밀 슬리팅 기술 개발

	• 고자장 특성이 우수한 2세대 고온초전도 선재 개발 - PLD 시스템 구축 및 연속 공정개발 - 자속 고정점 도입 자기장 특성 향상 증착기술 개발 - 기판의 두께에 따른 초전도층 증착기술 개발 • 초전도 선재용 기판 제조 핵심기술 개발 - 두께 맞춤 기판(50 um ~ 150 um) 제조기술 개발 - 광폭 기판(40 mm-w.) 제조 및 전해연마 공정기술 개발 • 전기-기계적 특성평가 기술 개발 - 코일용 고성능(극박/고자장) 초전도선재의 전기-기계적 특성 평가 플랫폼 구축 및 신뢰성 향상 기술 개발 • 경량 초전도선재 개발 - 탄소 도핑 공정이 적용된 2 km급 MgB_2 선재 제조 기술 개발 - 브레이딩 집합 도체 제조 장비 개발
2단계 ('25~'26)	• 선재 길이 방향 균일성 향상 기술 개발 - 단위 공정별 데이터베이스 작성 및 통합 품질관리 기술 개발 - 두께-폭 정밀 가공 공정 동시 적용 장선 제조기술 개발 - 두께 및 너비 정밀 조절 공정기술 개발 - 초전도 선재 edge crack free 슬리팅 기술 개발 • 고자장 특성이 우수한 2세대 고온초전도 선재 개발 - 자장 특성이 향상된 두께 40 um 급 선재 양산기술 개발 - 자장 특성이 향상된 선재의 고속 생산 기반기술 개발 • 초전도 선재용 기판 제조 핵심기술 개발 - 두께 맞춤 기판(40 um ~ 200 um) 제조기술 개발 - 광폭 기판(100 mm-w.) 제조 및 전해연마 공정기술 개발 • 코일설계용 전기-기계적 특성 평가기술 개발 - 코일용 고성능 선재의 폭 방향 굽힘 특성 및 횡 방향 박리 특성 평가기술 개발 • 경량 초전도선재 개발 - 탄소 도핑 공정 및 고강도 시스가 적용된 3 km MgB_2 선재 제조 기술 개발 - 50 m 급 MgB_2 집합 도체 제조 및 특성 평가 기술 개발

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ **연구개발내용**

ㅇ **선재 길이 방향 균일성 향상 기술 개발**

- **(I_c 균일화 기술)** 균일 공정을 위한 안정적인 E-gun 구조 개발, 단위 공정별 머신러닝을 활용한 실시간 품질관리 기술 개발, 통합 품질관리 데이터베이스 제작 및 적용.
- **(두께 및 폭 균일화 기술)** 정밀 두께가공(구리코팅, 표면연마) 기술, 정밀 레이저 슬리팅 기술 개발, 정밀 가공 장선 제조기술, 두께 정밀 측정 기술

ㅇ **고자장 특성이 우수한 2세대 고온초전도 선재 개발**

- **(PLD 공정)** PLD 공정의 핵심 기술인 광학계, Heater, Target moving 기술을 최적화, PLD 공정의 자장 향상 mechanism 연구, 저온 고자장에서 자장 특성이 우수한 40 um 급 두께(기판)의 초전도 선재 양산기술
- **(RCE-DR 공정)** 2차상 생성 및 피닝 물질 도핑 기술, 특정 온도-자장 특화 초전도 선재 제조 원천기술 개발, PLD 및 RCE-DR 공정을 결합한 최적 초전도 선재 제조기술

ㅇ **초전도 선재용 기판 제조 핵심기술 개발**

- **(두께 맞춤 기판 제조)** 초전도자석 종류에 따른 두께 맞춤 기판(극박 혹은 두꺼운 기판) 제조 핵심기술(강도 향상, 전해 연마) 개발
- **(광폭 기판 전해 연마공정)** 생산성 향상을 통한 저가 초전도 선재 제조를 위한 광폭(40 ~ 100 mm-w.) 기판 전해 연마 기초 기술

ㅇ **전기-기계적 특성평가 기술 개발**

- **(전기-기계적 특성평가 기술)** 코일용 고성능(극박/고자장) REBCO 선재의 전기-기계적 특성 평가 플랫폼 구축 및 신뢰성 확보

- **(코일 설계용 데이터)** 폭 방향 굽힘 특성 및 횡 방향 박리 특성 평가

ㅇ 경량 초전도 선재 개발

- **(선재 제조)** 필라멘트 적층 방법에 따른 선재 균일도 평가, 장척 선재 열처리 공정 및 절연 기술, 탄소 도핑 공정 및 고강도 시스가 적용된 MgB_2 초전도선재 제조
- **(대전류 통전용 집합 도체)** 브레이딩 집합도체 제조기술(피치, 소선수, 열처리 최적화)

□ 정량적 성과목표

목표	평가 항목 (주요성능 spec)		1단계	2단계	현재 기술수준
길이방향균일화	I_c균일화	I_c 편차	• Lot-to-lot 평균 I_C ±15% @ 100m, 77K, s.f.	• Lot-to-lot 평균 I_C ±10% @ 100m, 77K, s.f.	•Lot-to-lot평균I_C차이 :±20%이상@77K, s.f.
	선재 폭 오차		• ±15 ㎛ @100 m	• ±10 ㎛ @100 m	• ±20 ㎛ @100 m
	선재 두께 균일도	두께 오차	• ±10 ㎛ @100 m	• ±5 ㎛ @100 m	• ±20 ㎛ @100 m
		lot별 선재 평균오차	• ±10 ㎛ @100 m * 10 ea	• ±5 ㎛ @100 m * 10 ea	• ±10 ㎛ @100 m * 10 ea
자장특성	자장 하 공학적 전류밀도		• J_e : 700 A/mm^{2}이상 (기판두께 40 um이하)	• J_e : 1 kA/mm^{2}이상 (기판두께 40 um 이하)	• J_e : 500 A/mm^{2}이하 (기판두께 60 um이상)
	자장 하 임계전류		• I_C : 600 A이상 (@20K, 10 T, 12 mm-w.)	• I_C : 1,000 A이상 (@20K, 10 T, 12 mm-w.)	• I_C : 600 A이하 (@20K, 10 T,12 mm-w.)
광폭공정	두께 맞춤 기판 제조	극박 기판	• 50 um 이하 • RMS roughness 3 nm 이하	• 40 um 이하 • RMS roughness 3 nm 이하	• 60 um 이상 • RMS roughness 3 nm 이하
		두꺼운 기판	• 100~150 um • RMS roughness 3 nm이하	• 150~200 um • RMS roughness 3 nm 이하	• 100 um 이하 • RMS roughness 3 nm 이하
	광폭 기판 전해 연마		• 기판 폭 : 40 mm 이상	• 기판 폭 : 100 mm 이상	• 기판 폭 : 12 mm
특성평가	전기-기계적 특성 평가	가역 변형률/응력	• ≥0.3% / ≥500 MPa @77K (95% I_{c0} 기준)	• ≥0.4% / ≥600 MPa @77K (95% I_{c0} 기준)	• 0.3% 이하 / 500~600 MPa @77K
		가역 허용 굽힘 직경	• 20 mm 이하 (이중 굽힘, 95% I_{c0} 기준)	• 15 mm 이하 (이중 굽힘, 95% I_{c0} 기준)	• 25 mm 이하 (단일 굽힘 후)
경량선재	선재 제작		• 탄소 도핑 MgB_2 제조 ・선재 길이: 2 km ・J_c: 500 A/mm^2 @ 20K, 3 T	• 탄소 도핑/고강도시스 MgB_2 ・선재 길이: 3 km ・I_c편차: ±7% @ 3 km ・변형률(ε_{irr}) ≥0.30% ・인장강도(σ_{irr})≥500 MPa	• 시스: 모넬(Cu-Ni) ・길이 : 2 km, ・J_c≥300 A/mm^2 @ 20K, 3 T ・변형률(ε_{irr}): 0.25% ・인장강도(σ_{irr}): 480 MPa
	대전류 통전용 집합도체 개발		• 집합도체공정변수연구 ・가닥수: 7(6MgB_2 + 1Cu) ・필라멘트 수: 18심	• 50 m급 집합도체제조 ・I_C: ≥250 A @ 20K, 3 T	• 가닥수: 7 - 37 • 필라멘트 수: 1~30심
논문			6	2	- SCI(E)
특허			12	7	- 국내외 출원 건수

4. 특기사항

ㅇ 기타 사항

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 3세부 선재 과제임
- 1차년도 연구 기간은 9개월임

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ 과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ '22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-04	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목・분야공모형
사업명	나노・소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 핵심기술개발		
RFP명	**초고자기장 고균일 솔레노이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발**		
PM분야	정보・융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

○ 미국, 일본, 유럽등 주요 경쟁국에서 의료・바이오, 친환경 에너지 저장, 고에너지물리 분야 등에 적용 가능한 초고자기장 초전도자석 기술 개발이 진행되고 있음

- 초고해상도 의료영상 기술 확보를 위해 초고자기장 초전도자석이 개발되고 있음 (Siemens, General Electric, Philips Healthcare 등)
- 단백질 분석 기술 확보를 위해 핵자기공명(NMR) 분광기용 초고자기장 초전도자석이 개발되고 있음 (미국 MIT, 일본 RIKEN, 독일 Bruker 등)
- 고에너지밀도 친환경 에너지 저장 시스템 구축 및 지능형 전력망 실증을 위한 수단으로서 자기에너지 저장 기술이 개발되고 있음 (미국, 유럽, 일본, 중국 등)
- 초고자기장을 활용한 우주입자 검출용 장치로서 초고자기장 초전도자석이 개발되고 있음 (IBS 등)

○ 차세대 초고해상도 단백질 분석기술 선점을 위해서는 공통 핵심 기술인 핵자기공명 분광기의 핵심 부품인 초고자기장 고균일 초전도자석 기술의 조기 확보가 필요

- NMR의 신호감도는 자기장세기의 제곱에 비례하여 증가하므로 초고자기장 생성이 가능한 고온초전도 자석기술 개발 필요
- 질환 관련 거대단백질 구조의 고해상도 분석이 가능한 900 MHz 이상급 NMR 장비가 필요하며, 20 T 이상급 초고자기장 초전도자석 기술 개발 필요
- 기존 저온초전도 자석기술로는 800-900 MHz 구간에서부터 제작비용이 급격히 증가하는 문제가 있어서, 이의 해결을 위해 고온초전도 자석기술 개발 필요

○ 20 T 이상급의 초고자기장을 초소형 및 초경량형으로 구현 가능한 고온초전도 솔레노이드 개발 필요

2. 연구개발목표

○ 최종 목표

- 초고자기장 고균일도 초전도 자석 개발을 위한 고온초전도 솔레노이드 자석 기반기술 개발
- 기반기술 검증용 초고자기장(20 T 이상급), 고균일도(300 ppm @ 10 mm DSV), 상온보어(50 mm 이상)를 가지는 고온초전도 프로토타입 자석 개발

○ 단계별 목표

단계	목표
1단계 ('22~'24)	○ 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석 개발을 위한 기반기술 및 응용기술 개발

	▸ 권선, 접합, 리드, 구조, 운전 기법의 기반기술 개발 ▸ 초고자기장 고균일도 자석의 자기장 균일도 평가 기법 및 향상 기법 연구 ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▸ 20 T 이상급의 프로토타입 자석의 설계 검증 ▸ 20 T 이상급의 프로토타입 자석의 권선 ▸ 권선이 완료된 단위코일의 적층과 접합 ▸ 20 T 이상급의 고온초전도 솔레노이드 자석의 냉각 시스템 설계 및 제작
2단계 ('25~'26)	ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▸ 20 T 이상급의 고온초전도 솔레노이드 자석과 냉각 시스템 통합 ▸ 20 T 이상급의 고온초전도 솔레노이드 자석의 중심 자기장 및 공간 균일도 평가 ▸ 20 T 이상급의 고온초전도 솔레노이드 자석의 운전 및 성능평가 ▸ 프로토타입 자석의 최종 성능 목표: (1) 중심 자기장 20 T 이상; (2) 자기장 균일도 300 ppm 이하 (@ 10 mm DSV); (3) 50 mm 이상의 상온보어

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발 내용

ㅇ 1단계 ('22~'24)

▸ 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석 개발을 위한 기반기술 개발

- 초고자기장 고강성 솔레노이드 자석을 위한 권선 기법 개발
- 권선된 단위 코일의 성능 평가 기법 개발
- 단위 코일 간의 접합 기술 개발
- 고온초전도 솔레노이드 자석용 구조 안정성 개선 기술/장치 및 적용기법 개발 (1세부 총괄 과제 연계)
- 초고자기장 고온초전도 자석의 자기장 균일도 평가 기법 및 향상 기법 개발
- 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석용 저진동 전도냉각 시스템 설계

▸ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발

- 2세부의 기반기술 검증용 20 T 이상급 고온초전도 자석의 상세 설계안 검증 (2세부 설계 과제 연계)
- 권선 기반기술을 활용한 검증용 20 T 이상급 고온초전도 단위 코일의 제작
- 전류인입용 SP 리드 설계/제작 (1세부 총괄 과제 연계)
- 권선된 단위 코일의 성능 평가를 바탕으로 자석 적층 기법 및 성능 예측 기술 개발
- 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석용 저진동 전도냉각 시스템 제작

ㅇ 2단계 ('25~'26)

▸ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발

- 개발된 구조 안정성 개선 기술 및 장치를 프로토타입 고온초전도 자석에 적용 (1세부 총괄 과제 연계)
- 조립 완료된 고온초전도 자석과 냉각 시스템의 통합
- 차폐전류에 의한 자기장의 저감을 위한 운전 기법 개발
- 자기장 균일도 향상 기반기술을 활용한 프로토타입 자석의 균일도 향상
- 고온초전도 자석의 냉각시스템 냉각성능 및 진동 평가
- 고온초전도 솔레노이드 자석의 중심 자기장 및 공간 균일도 평가

□ 성과목표

단계		목표
1단계 ('22~'24)	정량	ㅇ 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석 개발을 위한 기반기술 개발 ▶ 500 m 이상급의 고온초전도 선재의 단일 코일 권선 기법 개발 ▶ 20 T 이상의 자기장에서 균일도를 향상하기 위한 기법 개발 ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▶ 상온 보어 50 mm 이상의 솔레노이드 프로토타입 자석의 설계안 검증 ▶ 프로토타입 자석의 코일 간의 접합: 평균 200 nΩ 이하 ㅇ SCI(E) 논문 8편, 특허 5편 출원
	정성	ㅇ 초고자기장 고균일도 고온초전도 솔레노이드 자석 개발을 위한 기반기술 개발 ▶ 단위코일 평가, 접합 기반기술 개발 ▶ 자기장 균일도 평가 기법 개발 ▶ 공통 기반기술 중 구조안정성 기술의 초고자기장 솔레노이드형 자석 적용 기법 개발 ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▶ 권선 기반기술을 활용한 프로토타입 단위코일 권선/접합/적층 ▶ 초고자기장 고균일 솔레노이드 자석을 위한 냉각시스템 설계/제작
2단계 ('25~'26)	정량	ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▶ 프로토타입 자석과 냉각 시스템 통합: (非운전) 최저 온도 15 K 이하, (정상운전) 최저 온도 20 K 이하 ▶ 정상 운전시 중심 자기장 20 T 이상 ▶ 정상 운전시 목표공간(10 mm DSV) 내 자기장 균일도 300 ppm 이하 ㅇ SCI(E) 논문 6편, 특허 4편 출원
	정성	ㅇ 기반기술 검증용 고온초전도 프로토타입 자석 개발 ▶ 고온초전도 자석과 냉각시스템 통합 ▶ 고온초전도 자석의 냉각시스템 냉각성능 및 진동 평가 ▶ 차폐전류 저감을 위한 운전 기법 개발 ▶ 프로토타입 자석의 정상 운전에서의 자기장 균일도 품질 평가 및 향상 기법 적용

4. 특기사항

ㅇ 기타 사항

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 4세부 솔레노이드 과제임
- 공통 기반기술의 본 과제 적용 기법 개발은 1세부 총괄 과제와 연계됨
- 설계 검증 연구내용의 일부는 2세부 설계 과제와 연계됨
- 4세부 과제의 성과목표 중 1~3세부 과제와의 연계성 및 차별성과 검증 방법에 대해 기술 요망
- 1차년도 연구 기간은 9개월임

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ 과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ '22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-05	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목・분야공모형
세부사업명	나노・소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 핵심기술개발		
RFP명	**대전류 토로이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발**		
PM분야	정보・융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

ㅇ 에너지 분야 기술혁신을 위한 토로이드형 고온초전도 자석 기술 필요성 증가

- 특히 핵융합에너지 상용화를 위한 혁신적인 기술로서 토로이드형 고온초전도 자석을 활용한 상용화 연구가 본격화되고 있음
- 토로이드형 고온초전도 자석은 기존의 저온초전도 자석에 비해 두 배 이상의 고자장을 발생시킬 수 있어 자장의 4승에 비례하는 핵융합에너지의 고자장・고효율 기술혁신이 가능할 것으로 평가받고 있음.
- 미국의 CFS (Commonwealth Fusion Systems), 영국의 Tokamak Energy 등의 혁신 기업은 이미 토로이드형 고온초전도 자석 기술 개발을 추진하고 있으며, 특히 미국의 CFS에서는 최근 20T급의 시험용 자석 제작에 성공한 바 있음
- 또한 최근 탄소중립과 재생에너지 확대에 의한 에너지 패러다임의 변화가 일어나고 있고 이에 따른 재생에너지의 변동성에 대응할 에너지저장장치의 도입이 필수인 가운데, 토로이드형 고온초전도자석을 사용하는 대용량 에너지저장시스템은 유력한 기술적인 방안으로 평가받고 있음.

ㅇ 국내 강점 기술의 융합으로 기초·기반 기술 확보를 통한 국가경쟁력 제고 필요

- 국내에서는 KSTAR를 필두로 하는 핵융합에너지 연구개발 분야에서 선도적인 역할을 수행하고 있으며 특히 KSTAR는 최초로 주요 자석을 모두 저온초전도 자석을 사용하는 등 토로이드형 초전도자석 분야에 강점이 있음
- 무절연 고온초전도 자석 기술은 국내 연구진이 개발한 기술로 미국 CFS의 최근 20T급의 시험용 자석 제작에 국내 연구진이 개발한 특허 기술을 활용함
- 따라서 국내 강점 기술의 융합을 통해 관련 기초·기반 기술을 확보하게 되면 미래 에너지 분야에서 혁신적인 국가경쟁력 확보가 기대됨

2. 연구개발목표

ㅇ 최종 목표 : 핵융합에너지 및 에너지저장장치 제조 기술혁신을 위한 대전류 토로이드형 고온초전도 자석의 기반 기술 개발

- 토로이드 고온초전도 자석용 대전류 케이블의 기반기술 개발
- 토로이드 시험용 고온초전도 자석의 제작 및 성능평가

ㅇ 단계별 목표

단계	목표
1단계 ('22~'24)	**ㅇ 토로이드 고온초전도 자석용 대전류 케이블의 기반기술 개발** **▸ 응용분야별 최적 케이블 형상 및 크기 선정** **▸ 관내도체형/적층도체형 대전류 케이블 제작 기술 개발** **▸ 관내도체형/적층도체형 케이블의 접속부 개발**

	▸ 대전류 케이블용 전류리드 개발 ▸ 대전류 케이블 성능평가 장치 설계 및 제작 ㅇ 토로이드 시험용 고온초전도 자석 개발 ▸ 토로이드 시험용 자석의 설계 검증
2단계 ('25~'26)	ㅇ 토로이드 고온초전도 자석용 대전류 케이블의 기반기술 개발 ▸ 대전류 케이블 성능평가 장치 제작 ㅇ 토로이드 시험용 고온초전도 자석 개발 ▸ 토로이드 시험용 고온초전도 자석의 제작 / 냉각기술 / 성능평가

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발내용

ㅇ 1단계 ('22~'24)

▸ 토로이드 고온초전도 자석용 대전류 케이블의 기반기술 개발

- 관내도체형/적층도체형 대전류 케이블의 형상에 따른 성능지표 분석 및 토로이드 자석의 응용 분야별 최적 케이블 형상 및 크기 선정
- 대전류 케이블의 전자기 임계전류 해석 모델 및 응력 해석 모델 검증 (2세부과제 연계)
- 10 kA 이상급의 적층도체형 대전류 케이블 상세 설계안의 검증 (2세부과제 연계)
- 30 kA 이상급의 관내도체형 대전류 케이블 상세 설계안의 검증 (2세부과제 연계)
- 대전류 케이블의 전류 구배, 교류 손실 및 냉각 해석 모델 검증 (2세부과제 연계)
- 적층도체형 대전류 케이블 제작 장치 개발 및 케이블 제작 기술 개발
- 관내도체형 대전류 케이블 제작 장치 개발 및 케이블 제작 기술 개발
- 대전류 케이블 간 1 mΩ 이하의 접속부 기술 개발
- 대전류 케이블 - 금속 간 1 mΩ 이하의 접합 기술 개발
- 10 kA 이상급의 대전류용 극저온 전류 리드 개발 및 성능시험 (1세부과제 연계)
- 대전류 케이블 시험용 냉각장치 설계 및 개발

▸ 토로이드 시험용 고온초전도 자석 개발

- 12 T 이상급의 대전류 토로이드형 시험용 자석 설계 검증 (2세부과제 연계)
- 토로이드형 코일 권선, 코일 간 접합 기술 개발
- 12 T 이상급의 대전류 토로이드형 시험용 자석과 전류 리드 연결 기술 개발

ㅇ 2단계 ('25~'26)

▸ 토로이드 고온초전도 자석용 대전류 케이블의 기반기술 개발

- 대전류 케이블의 평가 기술 개발 및 성능 평가 (1,000회 이상 충방전 시험, 10회 이상의 냉각/승온 시험)
- 1세부과제와의 협력을 통한 대전류 케이블 성능 평가 (1세부과제 연계)

▸ 토로이드 시험용 고온초전도 자석 개발

- 구조 안정성 기술의 초고자기장 토로이드형 자석 적용 기법 개발 (1세부과제 연계)
- 토로이드형 시험용 자석용 냉각시스템 설계 및 제작
- 토로이드형 시험용 자석과 냉각 시스템의 통합
- 토로이드형 시험용 자석의 운전 성능 평가

□ 성과목표

단계	목표

1단계 ('22~'24)	정량	ㅇ 30 kA급 @ 20 K, 12 T 관내도체형 대전류 케이블 개발 ㅇ 10 kA급 @ 20 K, 12 T 적층도체형 대전류 케이블 개발 ㅇ 1 mΩ @ 20 K 이하 성능을 가지는 케이블 간 접속부 개발 ㅇ 1 mΩ @ 20 K 이하 성능을 가지는 케이블-금속 간 접속부 개발 ㅇ 10 kA 이상의 전류용량을 가지는 극저온 전류 리드 개발 ㅇ SCI(E) 논문 10편, 특허 6건 출원
	정성	ㅇ 대전류 케이블 설계 및 제작 핵심 기반기술 개발
2단계 ('25~'26)	정량	ㅇ 20 K 이하의 온도에서 운전하는 최대 자장 12 T 이상을 가지는 토로이드형 mock-up 자석 개발 ㅇ 토로이드형 mock-up 자석의 동일 자기장 24시간 이상 지속 ㅇ 대전류용 케이블의 1000회 이상 충방전 및 10회 이상 냉각 승온 평가 ㅇ SCI(E) 논문 7편, 특허 4건 출원
	정성	ㅇ 고온초전도 대전류 케이블의 적정 평가기법 개발 ㅇ 1세부과제와 협력을 통한 대전류 케이블 평가 및 검증

4. 특기사항

ㅇ 기타 사항

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 5세부 토로이드 과제임.
- 극저온 리드, 구조 안정성 및 케이블 성능평가 연구내용의 일부는 1세부과제와 연동됨.
- 설계 검증 연구내용의 일부는 2세부 설계 과제와 연동됨.
- 5세부 과제의 성과목표 중 1~3세부 과제와의 연계성 및 차별성과 검증 방법에 대해 기술 요망
- 1차년도 연구 기간은 9개월임.

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ 과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ '22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-06	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목·분야공모형
세부사업명	나노·소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 핵심기술개발		
RFP명	고성능 고온초전도 레이스트랙 코일 핵심기술 개발		
PM분야	정보·융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

○ 미국, 일본, 유럽 등 주요 경쟁국에서 에너지, 교통·수송 분야에 적용 가능한 초전도 전기추진 기술 개발이 진행되고 있음

- 글로벌 환경규제에 대응하기 위해 친환경 전기추진 항공기 및 전기추진 선박이 개발되고 있음(미국 NASA, 일본 NEDO, 유럽 EADS)
- 초연결 사회를 가능하게 하는 초고속 교통수단으로서 초고속 자기부상열차 기술이 개발되고 있음(미국 Hyper-loop)
- 신재생 에너지원 확대를 위해 10MW~15MW급에 이르는 초대형 풍력발전기 개발이 추진 중에 있음(미국 DOE, 일본 NEDO)

○ 차세대 모빌리티(mobility) 기술선점을 위해서 공통핵심기술인 레이스트랙 형태의 고온초전도 계자 코일 기술의 조기 확보가 필요

- 우리나라는 세계적 수준의 무절연 고온초전도 자석 기술을 보유하고 있으며, 이를 활용하여 소형 고자기장 및 중저자기장 자석 응용 분야에서 강점 보유
- 기 보유한 무절연 고온초전도 자석 기술을 기반으로 높은 출력밀도 및 높은 운전 신뢰성을 갖는 고온초전도 계자 코일 기술 개발이 필요함
- 차세대 대용량 초전도 풍력발전기, 전기추진 선박용 동기전동기에 적합한 고 출력밀도 및 고신뢰성을 갖는 고온초전도 계자 코일 회전기 응용 기술 필요
- 초전도 모빌리티 기술 적용의 걸림돌인 냉각시스템 경량화를 위해, 액체수소의 냉열을 이용하는 초경량 극저온 냉각시스템 개발이 필요함

2. 연구개발목표

○ 최종 목표 : 고성능 고온초전도 레이스트랙 코일 핵심기술 개발

○ 단계별 목표

단계	목표
1단계	○ 고속회전 고출력밀도 고온초전도 레이스트랙 코일설계·제작 기반 기술 개발
2단계	○ 고온초전도 레이스트랙 코일의 성능평가 및 신뢰성 향상 기술 개발

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발내용

○ (1단계) 고속회전 고출력밀도 고온초전도 레이스트랙 코일설계·제작 기반 기술

개발

- 극한환경 다중물리 해석기술 기반의 고온 초전도 레이스트랙 코일의 전자기·열·구조해석 기술개발 (2세부 설계과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일 적용 고출력밀도 회전기 시스템의 최적 토폴로지 도출 (내전형, 외전형, 복합형, 전초전도 등)
- 코일 및 냉각 핵심부품 설계·제작·성능예측 기술 개발
  - ▸고신뢰성 전류리드 (1세부 총괄과제 연계)
  - ▸보빈 및 회전형 냉매 커플링
  - ▸저저항 고신뢰성 접합 (1세부 총괄과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 통합설계기술 개발 (2세부 설계과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 제작 기반 기술 개발
- 액체 수소 냉열 이용 냉각시스템의 설계 및 최적 운용 기술 개발
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 전자기·열·구조 성능평가 기법 수립 (1세부 총괄과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일 및 핵심 부품의 단위 특성 평가 및 설계 검증
- 레이스트랙 코일용 경량 구조 소재 및 자기 코어 소재 기술 개발
- 회전형 모델기를 이용한 고온초전도 레이스트랙 코일의 요소특성평가 및 설계검증

○ (2단계) 고온초전도 레이스트랙 코일의 성능평가 및 신뢰성 향상 기술 개발

- 냉각 및 구조 핵심 부품들이 연계된 고온초전도 레이스트랙 코일 시스템 제작
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 강성 확보 및 구조적 안정성 향상 기술 개발 (1세부 총괄 과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 전자기 및 열적 성능평가 시스템 개발
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 강성 평가 시스템 개발 (1세부 총괄과제 연계)
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 전자기·열·구조·신뢰성 평가 및 성능평가를 통한 설계 및 제작기술의 종합적 검증 (1세부 총괄과제 연계)
- 성능평가 결과를 반영한 고온초전도 레이스트랙 코일의 운전 신뢰성 향상 기술 개발
- 실적용을 고려한 액체수소 냉열 이용 냉각시스템의 성능향상 및 최적운용기술 개발
- 고온초전도 레이스트랙 코일의 회전기 적용성 평가 및 개선 방향 도출
- 실험데이터 기반의 고온초전도 레이스트랙 코일 및 핵심부품의 성능예측 기술 개발

□ 성과목표

단계		목표
1단계 ('22~'24)	정량	▸ 고출력밀도 회전기 대응 고온초전도 레이스트랙 코일 개발 (대상 회전기 출력밀도 목표: 2000 rpm에서 10 kW/kg 이상) ▸ 고속회전기용 냉각 시스템개발: (1) 회전속도 2000 rpm 이상 ; (2) 운전온도 20K~80K (대상냉매: 액체수소, 액체네온, 액체질소 등); (3) 냉각용량 100 W급 ▸ SCI(E) 논문 10편, 특허 6건 출원

	정성	▸ 고온초전도 레이스트랙 코일 적용 고출력밀도 회전기 시스템의 최적 토폴로지 도출 (내전형, 외전형, 복합형, 전초전도 등) ▸ 초전도 모빌리티 적용을 위한 고출력밀도 고온초전도 레이스트랙 코일 및 관련 핵심부품 설계/제작기술 확보 ▸ 초전도 모빌리티의 냉각시스템 경량화를 위한 액체수소 냉열이용 냉각시스템 설계/제작/운용기술 확보
2단계 ('25~'26)	정량	▸ 코일 및 냉각 시스템 최적 토폴로지가 적용된 고온초전도 레이스트랙 코일 평가 시스템 구축 및 성능평가: (1) 운전온도 20 - 80 K; (2) 회전속도 2000 rpm 이상; (3) 장기 신뢰성 평가 ▸ 고온초전도 레이스트랙 코일 강성 평가 시스템 구축 및 기계적 성능평가: (1) 고온초전도 선재 최대 변형율 0.2 % 이상; (2) 10,000회 이상 반복 시험 ▸ SCI(E) 논문 10편, 특허 6건 출원
	정성	▸ 고온초전도 레이스트랙 코일의 성능평가 기술확보 ▸ 성능평가 결과를 반영한 고온초전도 레이스트랙 코일의 고성능화 및 신뢰성 향상 기술 확보 ▸ 초전도 모빌리티 관련 응용기기 개발을 위한 고신뢰성의 핵심 중계기술의 확보

4. 특기사항

ㅇ 기타 사항

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 6세부 레이스트랙 과제임
- 공통 기반기술의 본 과제 적용 기법 개발은 1세부 총괄 과제와 연계됨
- 설계 검증 연구내용의 일부는 2세부 설계 과제와 연계됨
- 6세부 과제의 성과목표 중 1~3세부 과제와의 연계성 및 차별성과 검증 방법에 대해 기술 요망
- 1차년도 연구 기간은 9개월임

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ 과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ '22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음

RFP번호	2022-고온초전도-07	공모유형	■ 지정공모형 / □ 품목·분야공모형
사업명	나노·소재기술개발 - 고온초전도마그넷기술개발 - 핵심기술개발		
RFP명	**고속 충방전 새들/위글러형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발**		
PM분야	정보·융합	보안과제 여부	일반

1. 추진 배경

○ 새들/위글러형 초전도 자석은 입자가속기의 입자 거동을 제어하는 목적에 최적화 된 형태로 솔레노이드, 레이스트랙 등 일반적인 형태와는 매우 상이한 형상과 운전기법이 필요하여 설계 및 제작에 많은 노하우를 필요로 함

○ 최근 세계 주요 입자가속기 과학계에서는 기존의 저온초전도 기반의 새들/위글러는 크기 및 운전방식의 한계에 봉착하였고, 무절연 초전도자석 기술이 촉매가 되어 기존 기술을 단번에 뛰어 넘으려는 시도가 계획되고 있음

- 2045년을 목표로 한 차세대 LHC(거대 강입자 충돌기) 적용을 위한 5 T 급 새들형 고온초전도자석 개발 EuCARD2 프로젝트 (유럽연합)
- 2028년까지 초소형 중입자 암치료기 핵심소자인 1 T/s 고속 충방전형 고온초전도 자석 개발 NIMMS 프로젝트(유럽연합)
- 2028년 첨단 입자선 중입자 치료기의 초소형화를 위한 고속 충방전 방식의 고온초전도 자석 Quantum Scalpel 프로젝트 (일본)
- 기존 방사광가속기에 삽입하여 경엑스선 방사광 세기를 극대화 하기 위한 고온초전도 위글러 자석 기초기술 개발 (독일 KIT 및 미국 ANL)

○ 또한, 가속하는 빔의 출력이 커짐에 따라 발생하는 방사선량도 증가하는데, 방사선에 취약한 에폭시를 사용하지 않는 무절연(금속절연 포함) 고온초전도 전자석 활용에 대한 관심과 요구가 커지고 있음

○ **(원천성)** 초전도 새들/위글러 자석은 국내 개발경험이 전무하지만, 기 보유한 무절연 고온초전도자석 기술을 새들/위글러에 선제적으로 적용하여 높은 수준의 원천기술을 확보하고 폭 넓은 기반기술을 선점할 필요가 있음

○ **(시의성)** 국제적으로도 무절연 고온초전도자석 기술의 새들/위글러 형태로의 적용연구가 시도됨에 따라 기술추격이 예상되어 본 제조 원천기술의 개발이 매우 시급함

○ **(파급력)** 특히 고온 초전도 새들/위글러의 개발은 차세대 의료기술(암 치료 장비), 첨단 거대과학 장치(LHC, 방사광가속기 등) 등에 높은 확장성이 예상되며 높은 과학적 경제적 파급효과가 예상됨

2. 연구개발목표

ㅇ 최종 목표 : 고속 충방전형 새들/위글러 제조 기반 기술 개발

- 고온초전도 새들/위글러 자석의 설계, 권선, 접합, 전류리드, 구조 안정화, 냉각 기술 등의 기반 기술 개발
- 개발한 기반기술을 이용한 고속충방전 새들/다주기배열 위글러 Mock-up 자석 개발

○ 단계별 목표

단계	목표
1단계	○ 새들/위글러 고온초전도 자석 설계 검증 ▸ 새들/위글러 자석 전자기, 기계, 열 해석 모델 개발 ○ 새들/위글러 고온초전도 기반 기술 개발 ▸ 권선, 접합, 전류리드, 구조 안정화, 냉각 기술 개발
2단계	○ 새들/위글러 고온초전도 자석 운전 및 평가기술 개발 ○ 개발된 기반기술을 이용하여 새들/위글러 mock-up 자석 개발 ▸ 고속충방전 고온초전도 새들 자석 제작 및 평가 ▸ 다주기배열 위글러 자석 제작 및 평가

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발 내용

○ 1단계 ('22~'24)

1) 새들/위글러 고온초전도 자석의 해석 및 설계 검증 (2세부 설계 과제 연계)

- ▸ 새들/위글러 자석 요구 성능 및 운전 특성에 따른 설계 주요 파라미터 검증
- ▸ 빔 인입부 자기장의 다극성분 최소화를 위한 코일 배치 및 자석 비율 설계
- ▸ 고속 충방전 시변자장 공간 균일도를 고려한 새들 자석 전자기 해석 모델 검증
- ▸ 다주기 배열의 반복되는 형상을 고려한 위글러 자석 전자기 해석 모델 검증
- ▸ 새들/위글러 자석의 전자기, 열수축, 굽힘, 권선 응력해석 모델 개발 및 기계변형 억제구조 검증
- ▸ 전도, 대류, 복사에 의한 구조적 발열량 도출 및 필요 냉각특성 해석 모델 검증

2) 새들/위글러 고온초전도 기반기술 개발

- ▸ 공통 기반기술의 새들/위글러 자석 적용 기법 개발 (1세부 총괄 과제 연계)
  - 고온초전도 자석의 전류리드의 새들/위글러 자석 적용 기법 개발
  - 응력 최소화를 위한 오버밴딩 및 프리로드 구조 개발
  - 고속 충방전 운전에 적용이 가능한 새들 자석용 최적 냉각 시스템 도출
  - 새들/위글러 자석용 냉각 시스템 상세 설계/제작/테스트
- ▸ 새들/위글러 자석 권선 기법 개발
  - 3차원 다축 권선기 개발
  - 등주회 권선기법을 적용한 새들 형상의 권선 기법 개발
  - 최대 자속 밀도 달성을 위한 위글러 형상의 권선 기법 개발
- ▸ 새들/위글러 고온초전도 자석의 코일간 접합 기술 개발
- ▸ 새들/위글러 고온초전도 자석의 구조 안정화 기술 개발
  - 새들 자석 안정성 및 높은 냉각 효율의 보빈 재질/구조 개발
  - 위글러 반복 자기장에 의한 기계적 변형 최소화 및 높은 냉각 효율의 보빈 재질/구조 개발
  - 다단 코일간 전자기력 안정성 확보 기술 개발

○ 2단계 ('25~'26)

3) 새들/위글러 고온초전도 자석의 운전 및 평가기법 개발

- ▸ 단위 코일 특성 평가 기법 개발
- ▸ 목표 자기장에 따른 운전 전류 최적 제어 기법 개발

- 입자 빔 에미턴스 증분을 고려한 고속충방전 운전 프로토콜 정립 및 성능평가 기술 개발
- 반복 충방전에 따른 주요 파라미터 측정 및 평가
- 공간 및 시변 자기장 정밀 측정 기법 및 장치 개발

4) 확보된 기반기술을 바탕으로 Tesla급 mock-up 자석의 개발

- 새들 시험용 자석 개발: (1) 중심 자기장 2 T 이상; (2) 충/방전 속도 1 T/s 이상 [*고온 초전도 세계 최초 사양]; (3) 공간 자기장 균일도 오차율 1 % 이하; (4) 다극 성분비 최대 1/1000 이하; (5) Integral Field Quality 편차 최대 5/1000 미만
- 위글러 시험용 자석 개발 [*고온 초전도 세계 최초 사양]: (1) 중심 자기장 4 T 이상; (2) 반복 자기장 5 주기 이상; (3) 주기 길이 6 cm 이하

□ 성과목표

단계		목표
1단계 ('22~'24)	정량	ㅇ 고온초전도 새들 코일 제작 기반기술 개발: ▶ 무절연 대비 1,000 배 이상의 접촉저항 ▶ 새들 코일 권선 2세트 이상 ㅇ 고온초전도 위글러 모듈 코일 제작 기반기술 개발: ▶ 주기길이 6 cm 이하 위글러 개발 및 최대 자속밀도 달성을 위한 고온초전도 위글러 코일 권선기법 개발 ▶ 위글러 단주기 코일 권선 2세트 이상 ㅇ SCI(E) 논문 10편, 특허 6건 출원
	정성	ㅇ 새들 단위 코일 시스템의 설계/제작/성능평가 기술 개발 ㅇ 위글러 단위 코일 시스템의 설계/제작/성능평가 기술 개발 ㅇ 새들/위글러 코일 냉각 시스템 설계/제작/운용기술 개발
2단계 ('25~'26)	정량	ㅇ 고속충방전 새들 시험용 자석 제작 및 평가 (1) 중심 자기장 2 T 이상; (2) 충방전 속도 1 T/s 이상 (기존 기술 : 0.3 T/s x 6 초); (3) 공간 자기장 균일도 오차율 1 % 이하; (4) 다극 성분비 최대 1/1000 이하; (5) Integral Field Quality 편차 최대 5/1000 미만 달성 ㅇ 다주기 배열 위글러 시험용 자석 제작 및 평가 (1) 중심 자기장 4 T 이상; (2) 반복 자기장 5 주기 이상; (3) 주기길이 6 cm 이하 ㅇ SCI(E) 논문 6편, 특허 3건 출원
	정성	ㅇ 고온초전도 새들 시험용 자석의 고속 충방전 성능평가 기술 개발 ㅇ 다주기배열 위글러 시험용 자석의 성능평가 기술 개발 ㅇ 고온초전도 새들/위글러 자석용 시변 및 공간자기장 정밀 측정 기법 및 장치 개발* *정밀 3축 공간자기장 스캐너, 다극 성분 측정/분석기, 고속 Integrated Field Quality 측정기, 시변 자장 분석 및 평가 ㅇ 고온초전도 새들/위글러 자석 운전 제어 프로토콜 개발

4. 특기사항

ㅇ 기타 사항

- 본 연구개발 사업은 총 7개의 과제로 구성되며, 본 RFP는 7세부 새들 & 위글러 과제임
- 공통 기반기술의 본 과제 적용 기법 개발은 1세부 총괄 과제와 연계됨
- 설계 검증 연구내용의 일부는 2세부 설계 과제와 연계됨
- 7세부 과제의 성과목표 중 1~3세부 과제와의 연계성 및 차별성과 검증 방법에 대해 기술 요망
- 1차년도 연구 기간은 9개월임

5. 연구개발 기간 및 연구개발비

ㅇ 과제 수행 기간 : 5년 (3+2, 57개월)

- 과제 수행 기간은 '22년~'24년 (1단계, 3년), '25년~'26년 (2단계, 2년)으로 단계 구분

※ 1단계 수행 후 단계평가를 시행하여 2단계 진입 여부 결정

ㅇ '22년 선정과제 규모 : 총 40.03억 원

- 기반기술개발(1~3세부과제) : 1,700백만원(3개 과제×755.5백만원×9/12개월)
- 핵심기술개발(4~7세부과제) : 2,303백만원(4개 과제×767.6백만원×9/12개월)

※ 사업 기간 및 연구비는 조정 가능하며 예산사정 등에 따라 변경될 수 있음