

초전도 선재의 개발과 생산, ITER와 FCC 참여로 본 준회원국 가입의 필요성

한국고에너지물리학회 2024년 봄 학술대회

2024년 5월 24일

K.A.T (주)



KAT(주)
Kiswire Advanced Technology

목 차

- 1 회사 소개
- 2 초전도 선재 개발과 생산
 - 1) ITER 선재 개발 및 실적
 - 2) FCC 선재 개발 및 실적
- 3 CERN 준회원국 가입의 필요성
 - 1) High Jc Nb₃Sn 선재
 - 2) 초전도 가속관

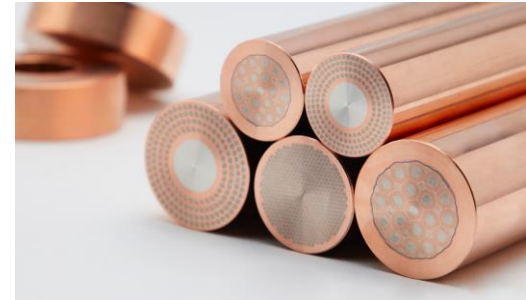
1. 회사 소개

KAT(주)는 고려제강이 100% 출자하여 2004년 설립된 **글로벌 초전도 선재 기업** 중 하나이며, 핵융합과 가속기 등에 사용되는 **고성능 Nb₃Sn 초전도 선재**를 개발하여 공급하고 있습니다.

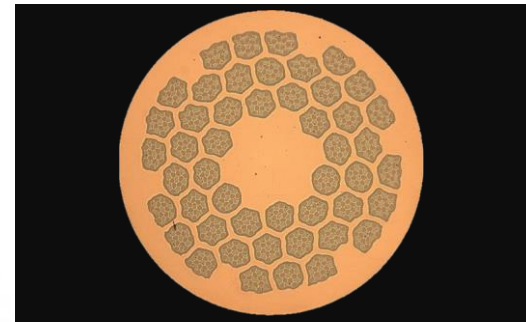
2006년 K-STAR를 필두로 2009년 세계적인 핵융합 프로젝트인 ITER에 **147톤 (1,236억원)**, 2019년 이탈리아 ENEA 연구소 DTT 프로젝트에 **55톤(450억원)**을 공급하였으며, 2023년 한국핵융합에너지 연구원 SUCCEX 프로젝트에 **9.8톤(82억원)**의 Nb₃Sn 선재를 수주하여 2025년내 공급 예정입니다.

2017년부터 FCC 프로젝트 참여를 위해 유럽의 CERN과 고임계전류밀도(이하 High Jc) 초전도 선재 개발 1차 계약 (12.5 억원)을 체결하여 2021년에 완료하였으며, 현재 후속 2차 R&D 계약을 추진 중입니다.

또한, 사업 품목 확장을 위해 2021년부터 FCC 등 글로벌 연구용 가속기 시장 진출을 목표로 초전도 가속관을 자체 개발 중이며, PAL, 고려대와 MOU 체결, 일본 KEK, 중국 IHEP과 긴밀히 기술교류 중 입니다.



ITER Nb₃Sn 초전도 선재



FCC High Jc Nb₃Sn 초전도 선재



초전도 가속관

<회사개요 >

상호	케이.에이.티.(주)	대표자	유 성 택
소재지	대전 유성구 테크노2로 223	설립일	2004년 3월 9일
매출액	('21년) 206.9 억원 ('22년) 105.7 억원 ('23년) 3.3 억원	직원수	35명 (연구인력 17명)

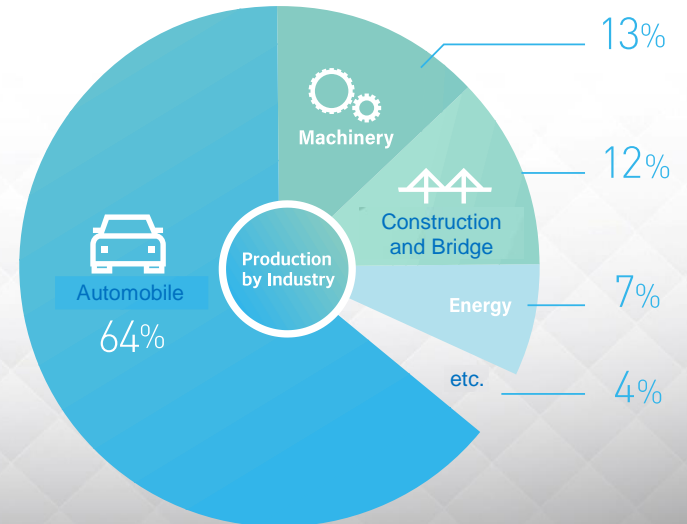
KISWIRE (고려제강)



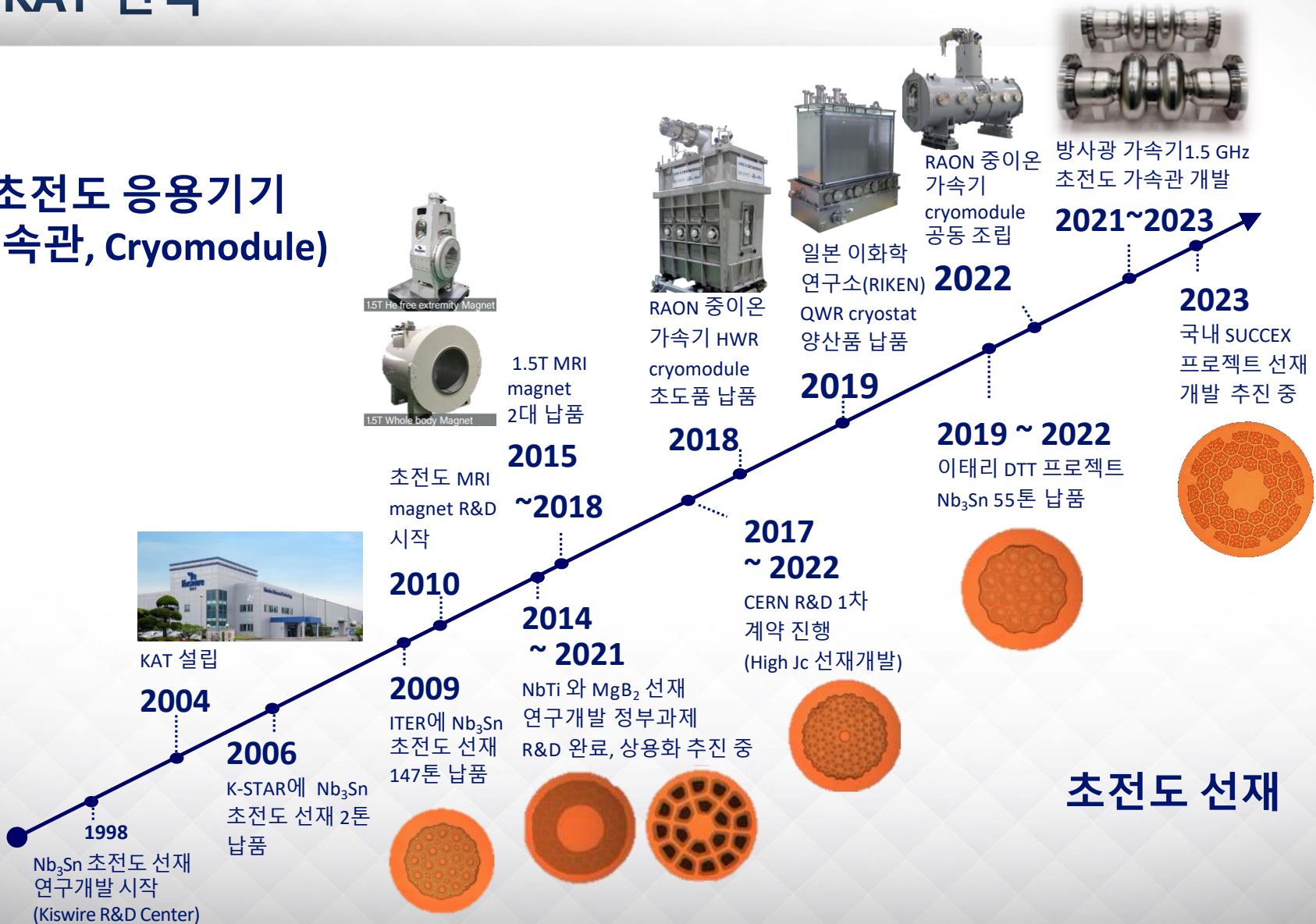
세계적인 특수선재기업

1945년 설립된 고려제강은 자동차, 교량, 에너지, 건축, 전기·전자, 초전도 등 다양한 산업분야에 중요한 소재로 사용되는 특수선재 제품을 생산하여 세계 80여 개국에 수출하고 있는 세계적인 글로벌 기업입니다.

설립일	1945	본사	대한민국 부산
수출국	80	연간 총 생산량	1,200,000 톤
전세계 직원	6,000	연간 매출액	2.25 조원 2023년 기준



초전도 응용기기 (가속관, Cryomodule)



초전도 선재

목 차

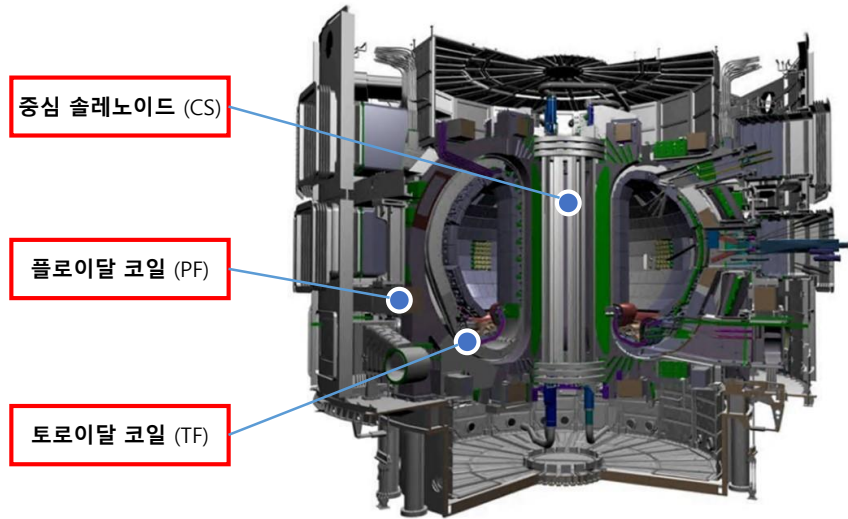
- 1 회사 소개
- 2 초전도 선재 개발과 생산
 - 1) ITER 선재 개발 및 실적
 - 2) FCC 선재 개발 및 실적
- 3 CERN 준회원국 가입의 필요성
 - 1) High Jc Nb₃Sn 선재
 - 2) 초전도 가속관

초전도 선재의 응용분야

핵융합로 적용

초전도 자석용 코일

- **TF coil** : 플라즈마를 구속하여 물리적 접촉 차단
- **CS coil** : 플라즈마 전류 생성 및 온도 제어
- **PF coil** : 플라즈마 형상 및 위치 제어

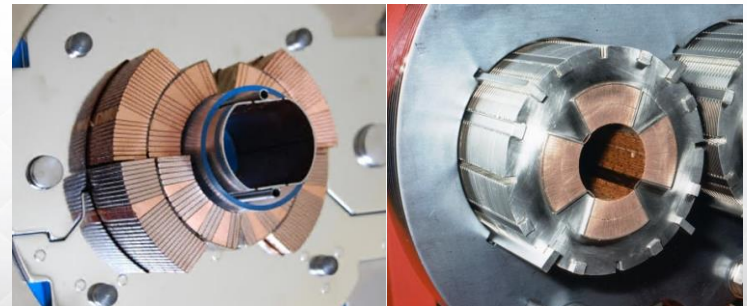


< ITER 장치의 구성 >

가속기

초전도 자석 종류

- **2극 자석** : 빔의 방향 변경
- **4극 자석** : 빔을 집중(focusing)
- **기타 다극 자석** : 빔의 안정성 향상 및 빔의 집중 개선



< 가속기용 2극 및 4극 자석, CERN LHC >

2. 초전도 선재 개발과 생산

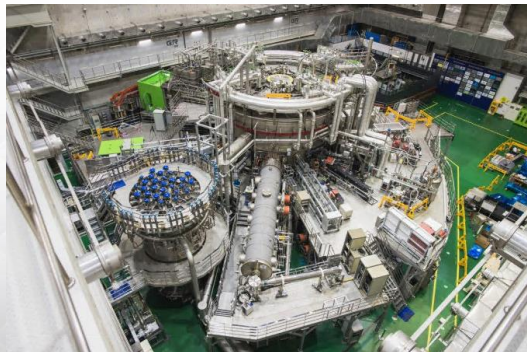
1) ITER 선재 개발 및 실적 - K-STAR 프로젝트

(1) 공급 선재 사양

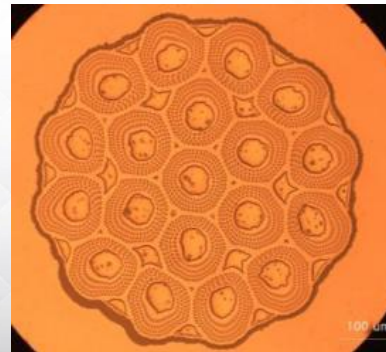
선경 (mm)	Cu/nonCu	Cr 도금 두께 (μm)	임계전류 ($\text{A}@12\text{T}$)	Qh (mJ/cc)	잔류저항비 (RRR)
0.78 ± 0.01	1.5 ± 0.15	1.0 ~ 1.5	≥ 145	≤ 250	≥ 100

(2) 공급 물량 및 금액

공급기간	프로젝트	Item	납품처	국가	선재량 (톤)	금액 (억원)
2006	KSTAR	Nb ₃ Sn SC wire	KBSI	한국	2.0	8.6
		Cr coated wire			11.8	4.8
합계					13.8	13.4



< K-STAR >



< K-STAR납품 Nb₃Sn 선재 >

2. 초전도 선재 개발과 생산

1) ITER 선재 개발 및 실적 - ITER 프로젝트

(1) 공급 선재 사양

선경 (mm)	Cu/nonCu	Cr 도금 두께 (μm)	임계전류 (A@12T)	Qh (mJ/cc)	잔류저항비 (RRR)
R)0.82 \pm 0.005	1.0 \pm 0.1	1.0 ~ 2.0	\geq 250	\leq 600 (TF) \leq 500 (CS)	\geq 100

(2) 공급 물량 및 금액

공급기간	프로젝트	납품처	국가	선재량 (톤)	금액 (억원)
2009~2013	ITER TF 도체용 Nb ₃ Sn 초전도 선재	KFE	한국	93.1	921
2014	ITER TF Nb ₃ Sn Conductor 760m	Toshiba	일본	4.0	33
2014~2017	ITER CS1U & CS2U Nb ₃ Sn Cable	e-Energy (QST)	일본	44.7	241
2018~2019	ITER TF Nb ₃ Sn Conductor 881m	e-Energy (QST)	일본	4.7	41
합계				146.5	1,236

- ITER 회원국 (EU, 일본, 미국, 러시아, 중국, 한국) 중 Nb₃Sn 초전도 선재 최초로 SULTAN 시험 합격
- ITER 회원국 중 가장 빨리 Nb₃Sn 초전도 선재 납품 완료 (93톤)
- 일본(QST)에 할당된 CS용 초전도 선재 국제입찰 수주 및 납품 완료 (총 49.4톤)

2. 초전도 선재 개발과 생산

1) ITER 선재 개발 및 실적 – DTT(Divertor Tokamak Test Facility) 프로젝트

(1) 공급 선재 사양

선경 (mm)	Cu/nonCu	Cr 도금 두께 (μm)	임계전류 (A@12T)	Qh (mJ/cc)	잔류저항비 (RRR)
0.82 \pm 0.005	1.0 \pm 0.1	1.0 ~ 2.0	\geq 320	\leq 1,000	\geq 100

(2) 공급 물량 및 금액

공급기간	프로젝트	납품처	국가	선재량 (톤)	금액 (억원)
2019~2022	DTT TF 도체용 Nb3Sn 초전도 선재	ENEA	이탈리아	55.0	450

- ITER 선재 대비 임계전류 (Ic)가 25% 향상된 초전도 선재 개발 후 납품 완료
- 코로나-19 팬데믹 기간 중임에도 납기 준수 : ENEA로부터 감사패 수령
- 발주처에서 DTT CS 선재 입찰 참여 요청함 (선재 22톤, 2024년 하반기 입찰 예정)



< ENEA 감사패 >

2. 초전도 선재 개발과 생산

1) ITER 선재 개발 및 실적 – SUCCEX(SUperConducting Conductor EXperiment facility) 프로젝트

(1) 개요

발주자	한국핵융합에너지연구원 (KFE)
계약 금액	82억원 /부가세 별도
계약 기간	2023년 12월 20일 ~ 2025년 12월 20일 (24개월)

- FCC, DEMO 등에 사용될 High Jc Nb₃Sn 도체의 성능을 검증하기 위한 16 T급 초전도 도체 시험 설비
- 스위스 SPC의 SULTAN 시험 장비는 최대 12 T까지만 평가 가능

(2) 공급 선재 사양

구분	선재량	단위 길이 (m)	선경 (mm)	임계전류 (A)	잔류저항비 (RRR)
High Jc Nb ₃ Sn 선재	1.7 톤	1,000	0.90 ± 0.005	≥ 288 @16T	≥ 100 (열처리 후)
Nb ₃ Sn 선재	5.9 톤	2,000	0.82 ± 0.005	≥ 230 @12T	

- 현재 생산 중으로 2025년 12월 최종 공급 예정

2. 초전도 선재 개발과 생산

2) FCC 선재 개발 및 실적 – BEST 및 CFETR 프로젝트 (진행 중)

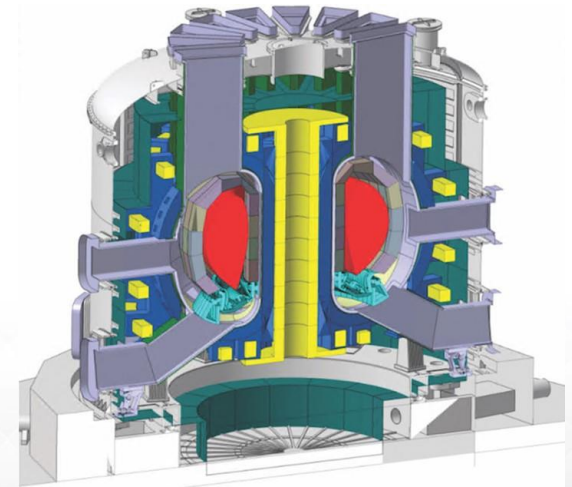
- BEST 및 CFETR 프로젝트 입찰 자격 획득을 위한 샘플 검증 시험 (SULTAN 시험) 진행 중
- High Jc Nb₃Sn 선재 사양 : $I_c \geq 585 \text{ A @12T, 4.2K}$, 선경 0.82 mm

BEST (Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak)

- CFETR 프로젝트 전 단계 R&D 용 핵융합 실험로
- 입찰 예상 시기 : 2024년 말
- 물량 및 금액 : High Jc Nb₃Sn 초전도 선재 14 톤 예상
- 발주처 : ASIPP (Chinese Academy of Science Institute of Plasma Physics)

CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor)

- 중국에서 건설 추진 중인 핵융합 실증로
- 건설 기간 : 2028 ~ 2034년 예상
- 선재 소요량 : High Jc Nb₃Sn 초전도 선재 410 톤 예상



< CFETR Design >

2. 초전도 선재 개발과 생산

2) FCC 선재 개발 및 실적 - DEMO 프로젝트

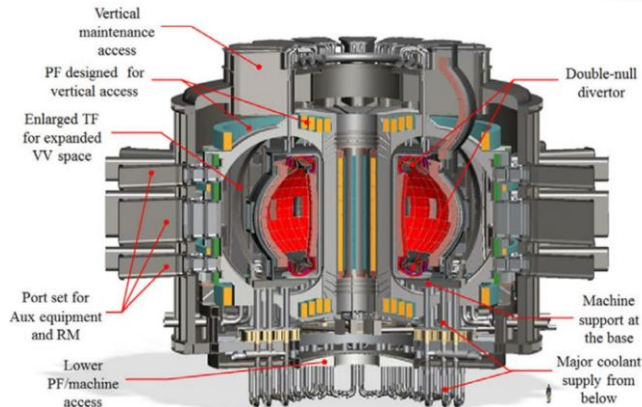
K-DEMO (KFE)

□ 구축 일정

- 2038년 건설 착수
- 2047년 완공 (2050년 전력 생산 예정)

□ High Jc 선재 소요량 : 830 톤 예상

출처 : 제2회 핵융합 실증로 전문가 포럼 회의자료 (2021년)



< K-DEMO 장치 디자인 >

J-DEMO (QST)

□ 구축 일정

- 2035년 DEMO 건설 시작
- 2050년대 운영시작 목표

□ High Jc 선재 소요량 : 1,015 톤 예상

출처 : 1) Conceptual design of Japan's fusion DEMO reactor (JA DEMO) and superconducting coil issues (2019년)
2) 일본 일간공업신문 기사 (일본 문부과학성, 2022년)

EU-DEMO (EUROfusion)

□ 구축 일정

- 2040년대 DEMO 건설 및 2050년대 실증 목표
- ITER D-T 실험 일정 반영 후 2038년에 DEMO 건설 여부 최종 결정 예정

□ High Jc 선재 소요량 : 1,000 톤 예상

출처 : European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, EUROfusion (2018년)

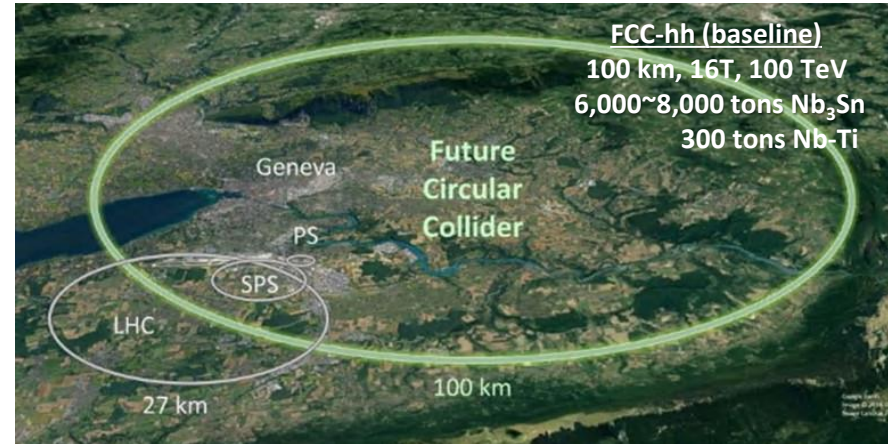
2. 초전도 선재 개발과 생산

2) FCC 선재 개발 및 실적 – CERN FCC 프로젝트

FCC 규모 및 비용

FCC 프로젝트 내 구성항목		금액 (MCHF)
Stage 1	Civil Engineering	5,400
	Technical Infrastructure	2,200
	FCC-ee Machine and Injector Complex	4,000
Stage 2	Civil Engineering complement	600
	Technical Infrastructure adaptation	2,800
	FCC-hh Machine and Injector complex	13,600
합 계		28,600

출처 : Future Circular Collider - European Strategy Update Documents, Benedikt, Michael (CERN) et al. (2019)



- FCC 건설비용 약 43조원, 2028년(Stage 1)부터 건설 예정
- Dipole magnet 4,700개 (9,400 MCHF, 약 14조원 예상)
- High Jc Nb₃Sn 선재 소요량 예상 : 약 6,000 톤 이상

FCC용 선재 최종 목표 사양

선경 (mm)	Cu/nonCu	단위 길이 (m)	임계전류밀도 (A/mm ² @16T)	잔류저항비 (RRR)
≤ 1.0	1.0 ± 0.1	≥ 5,000	≥ 1,200	≥ 150

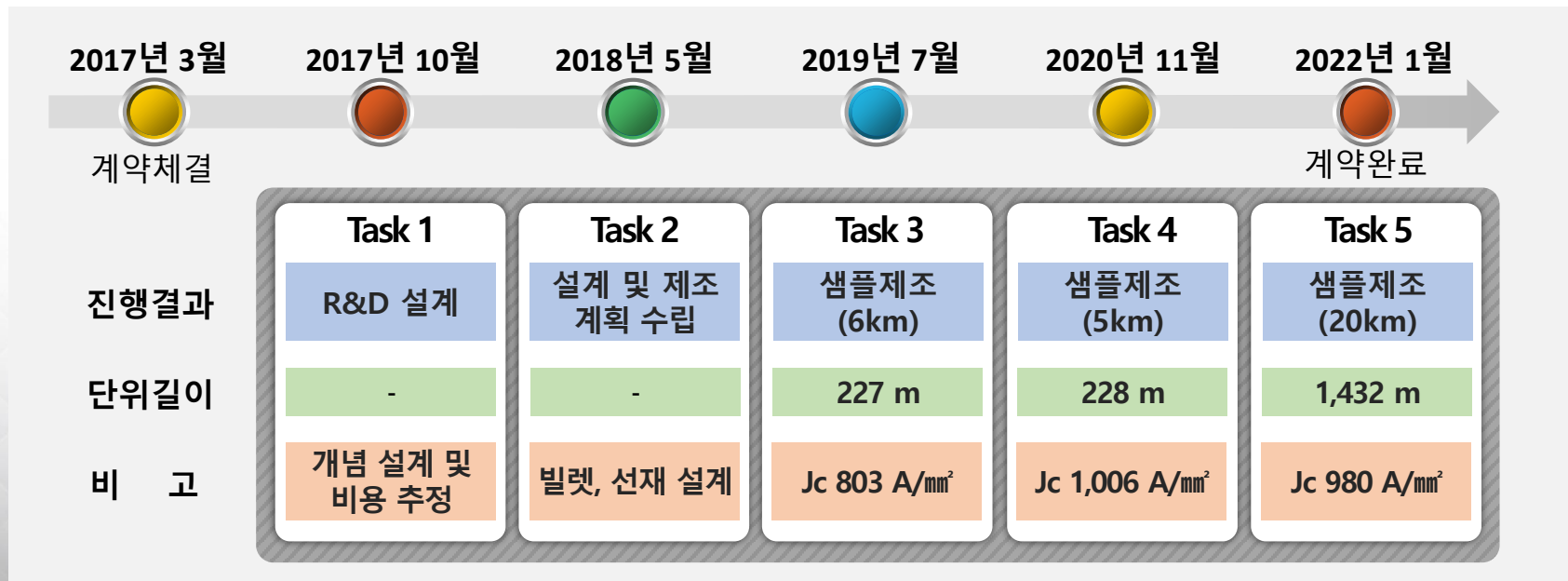
- FCC용 초전도 선재 최종 목표 사양 달성을 위해 CERN과 공동 연구 추진 중

2. 초전도 선재 개발과 생산

2) FCC 선재 개발 및 실적 – CERN FCC 프로젝트

CERN-KAT 간 R&D 계약 (1차)

- 연구 주제 : High Jc Nb₃Sn 초전도 선재 개발
- 계약 기간 : 2017년 3월 ~ 2022년 1월
- 총 과제비 : CHF 850,000 (약 12.5 억원)
- KAT는 1차 R&D 계약기간 중 High Jc Nb₃Sn 샘플 31 km를 CERN에 공급 완료



목 차

- 1 회사 소개
- 2 초전도 선재 개발과 생산
 - 1) ITER 선재 개발 및 실적
 - 2) FCC 선재 개발 및 실적
- 3 **CERN 준회원국 가입의 필요성**
 - 1) High Jc Nb₃Sn 선재
 - 2) 초전도 가속관

3. 준회원국 가입의 필요성

1) High Jc Nb3Sn 선재

CERN-KAT 간 R&D 계약 (2차)

연구 주제	High Jc Nb3Sn 선재의 안정성 향상 (가제)			
과제 수행 기간	계약 시점으로부터 48개월			
과제비	협의 중 (CHF 1,000,000 이상)			
목표 특성	Jc @16T, 4.2K	Jc ~1,200 A/mm ²	선경	0.7 ~ 1.0 mm

- 2023년초 CERN에서 비회원국과는 지속적인 R&D 계약이 어렵다고 하여 현재 2차 계약은 보류 중임.
 - * CERN의 옵저버국인 미국과 일본의 초전도 선재 업체들(Bruker-OST/미, JASTEC/일 등)은 현재 CERN과 공동 연구 중
 - * KAT는 한국핵융합에너지연구원과 CERN 간의 R&D 자금 Matching Fund를 조성하여 연구하는 방안 검토 중
- FCC 초전도 선재 공급에 참여하기 위해서는 CERN과 사전 공동 R&D 수행이 필수적임.

2) 초전도 가속관

- FCC-ee에서 사용될 초전도 가속관 수량은 1,364대가 예상되며 (FCC-hh는 미정), 가속관도 초전도 선재와 마찬가지로 CERN과 사전 공동 R&D를 통해 미래 참여에 대비할 필요가 있음.
- KAT에서는 FCC 참여 이전에 1.5 GHz Elliptical Type 가속관을 자체 개발 완료 하였고, 포항가속기연구소(PAL), 고려대(가속기과학과)와 MOU 체결, 일본 KEK 연구소 및 중국 IHEP 연구소와 기술교류를 통해 기술 역량을 확보 중

» Superconducting The Future

