

---

# Superconducting Magnets Design

---

Donghwan Kim



**김동환**

서울대학교 에너지자원공학과 3학년  
(전기정보공학부 복수전공)

ENTJ



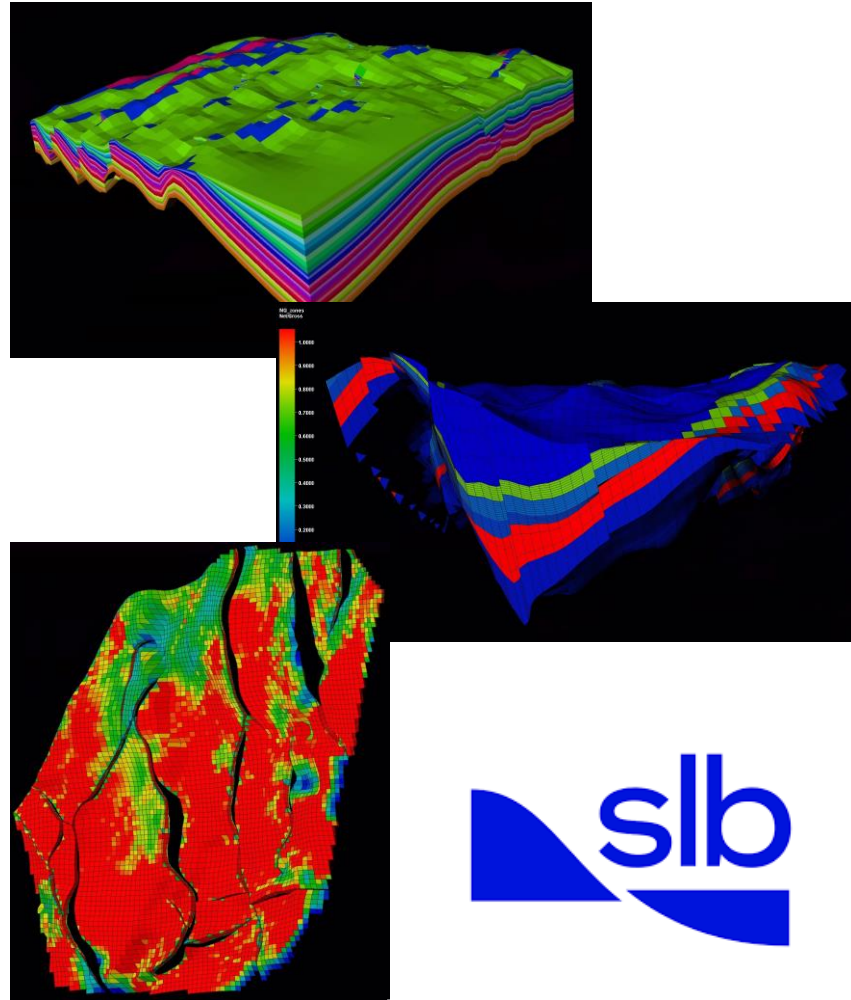
My home and Goldy



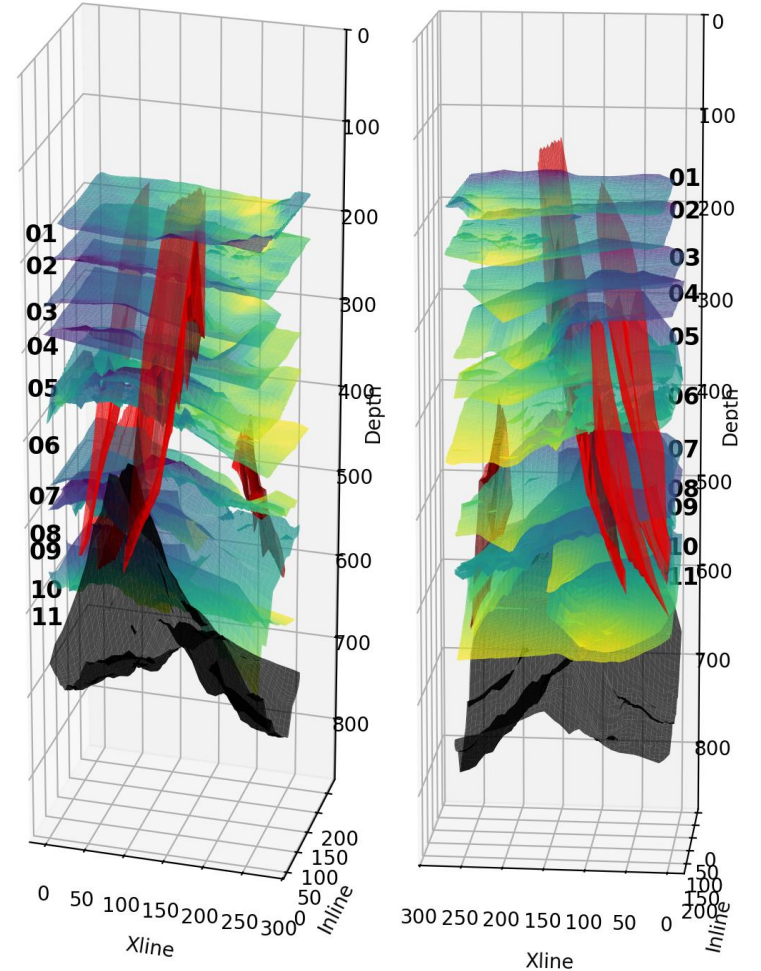
**김동환**

서울대학교 에너지자원공학과 3학년  
(전기정보공학부 복수전공)

ENTJ



SLB(Schlumberger) Japan  
CCS Storage Assessment / Seismic Analysis  
(2024)



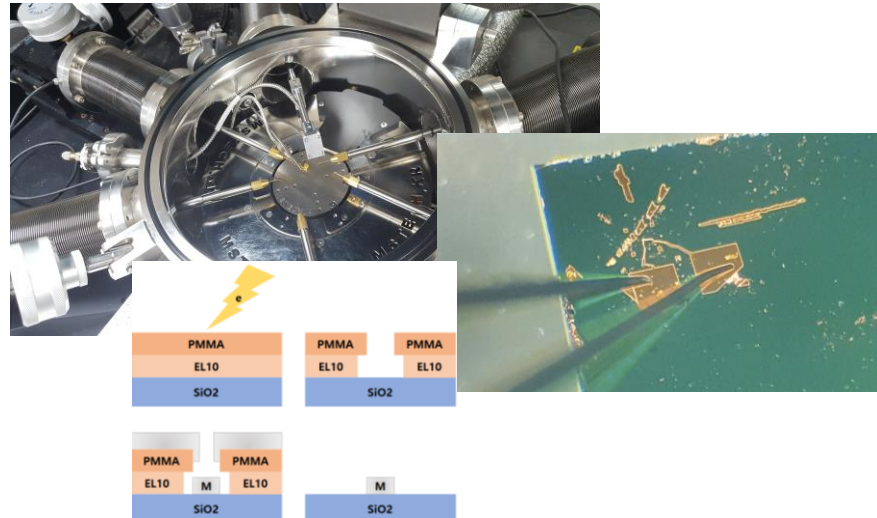
Seismic Project  
Petroleum Engineering / Payzone  
(2024)



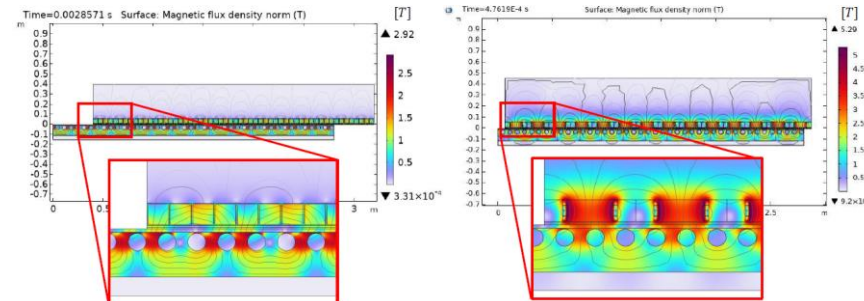
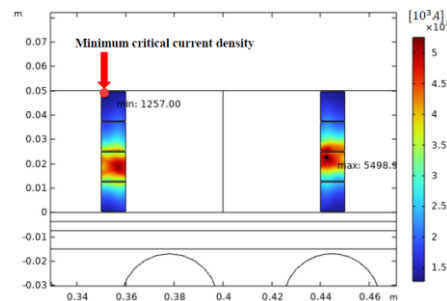
**김동환**

서울대학교 에너지자원공학과 3학년  
(전기정보공학부 복수전공)

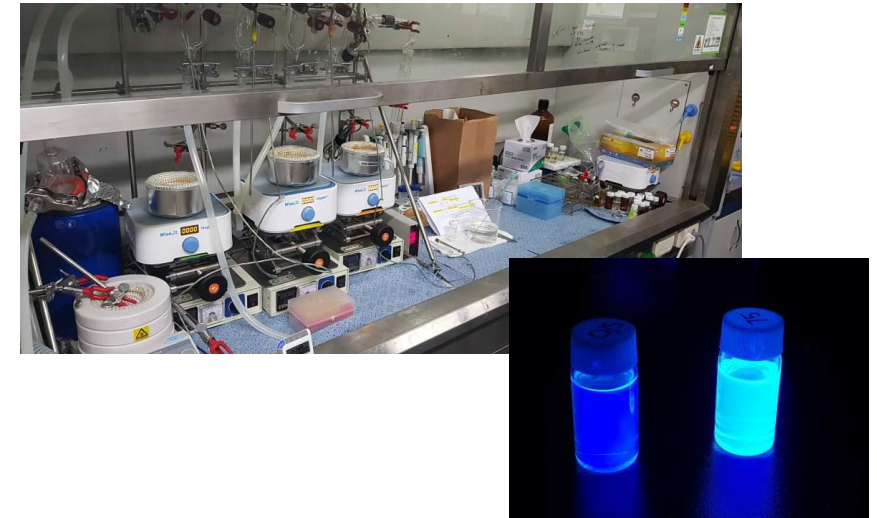
ENTJ



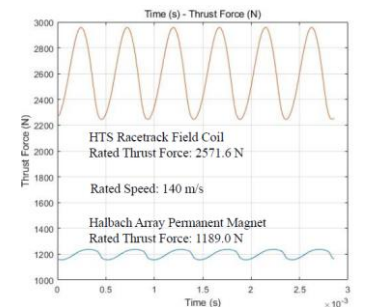
MoS2 Crystal / HfO2 / e-beam lithography /  
Raman spectroscopy / I-V curve  
(2017)



Superconducting Rotating Machine Design  
HTS Critical Current density, Temperature, Magnetic field / COMSOL Multiphysics / FEM  
(2023~)

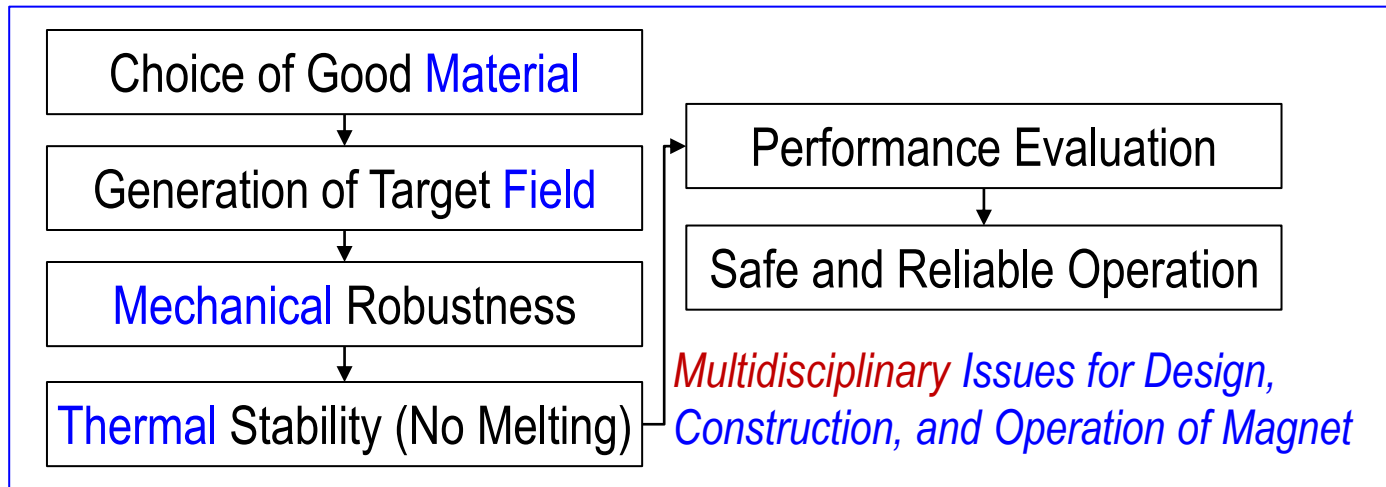
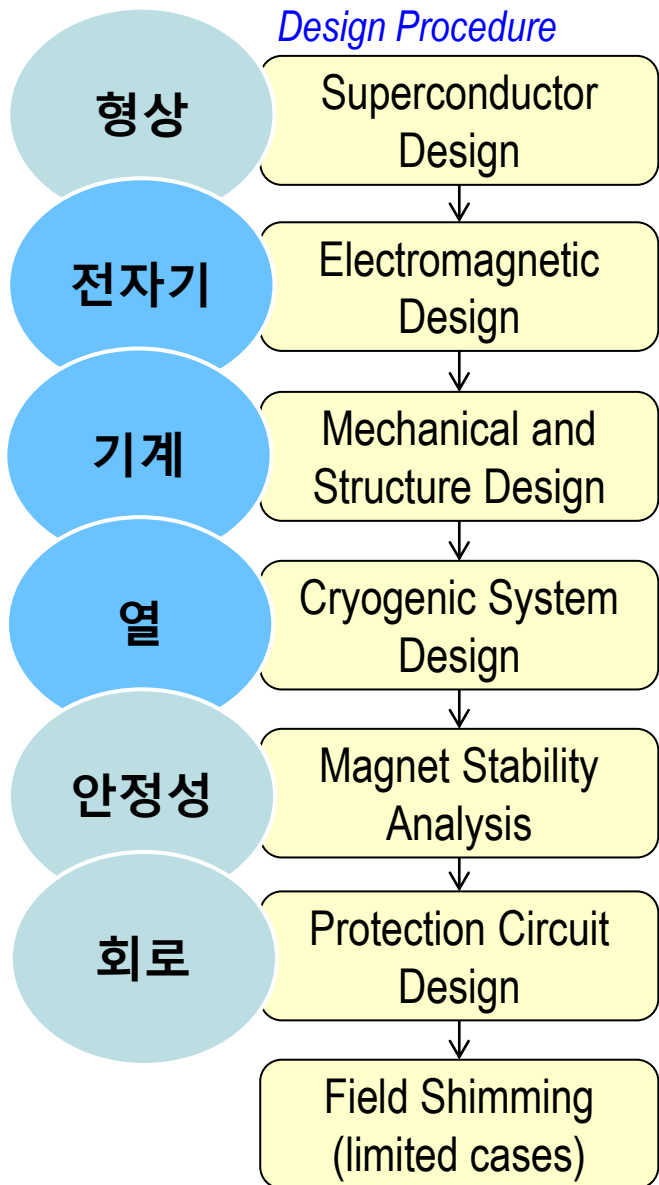


Synthesis of Perovskite Nanocrystals (CsPb(Br/Cl)3)  
Surface Engineering / PLQE, FWHM  
(2020~2021)

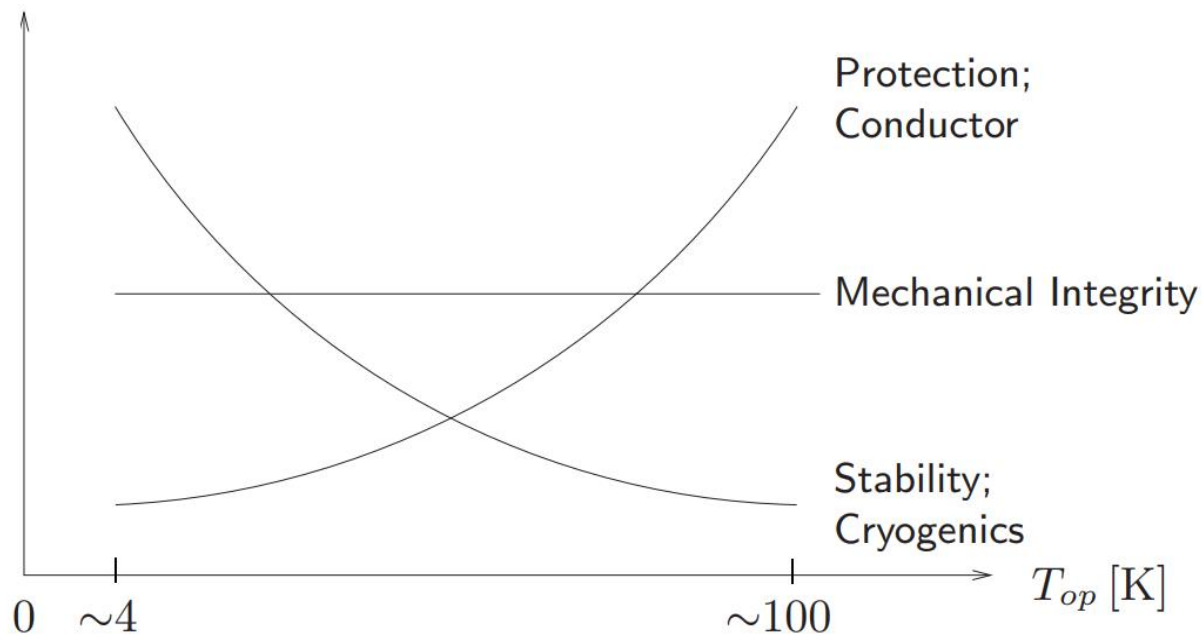


# Common Procedure of Superconductor Magnet Design

Superconductor Magnet Design Procedure

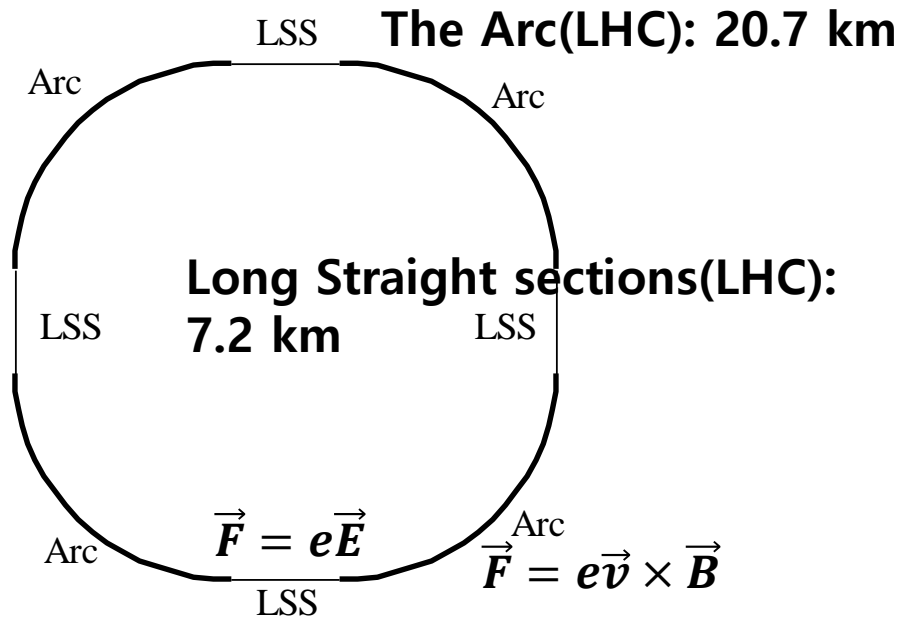


Difficulty or Cost

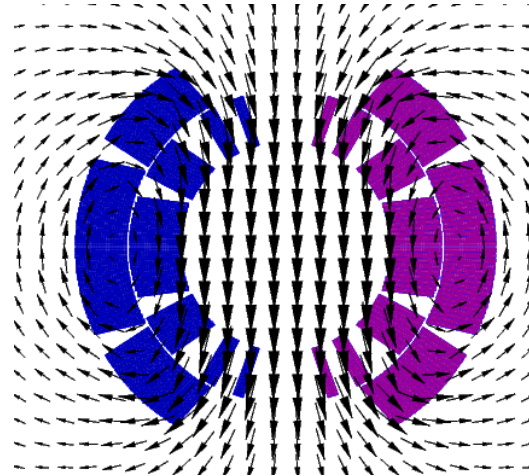


# Part 1 입자가속기에 필요한 자석 형상

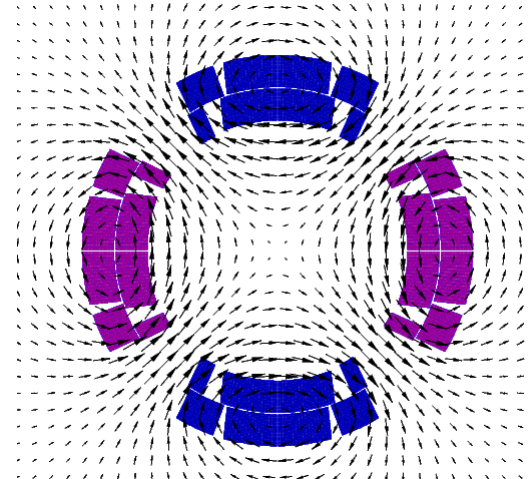
## Particle accelerator에서 Magnet의 역할



- Particle이 가속되면 에너지가 증가
- 곡률을 가지고 회전하려면 자기장이 필요



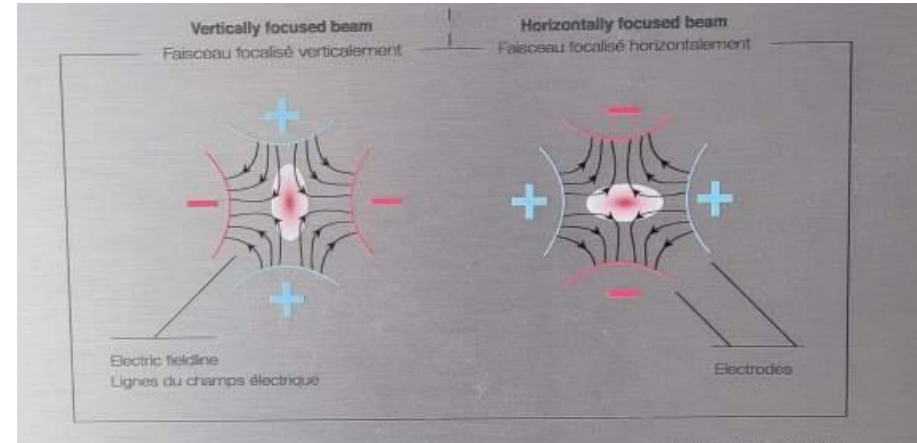
$$B_y = B_1, \quad B_x = 0$$



$$B_y = Gx, \quad B_x = Gy$$

## Dipole Magnets

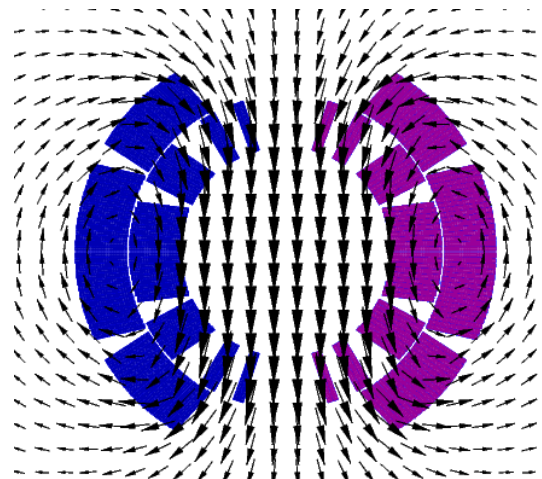
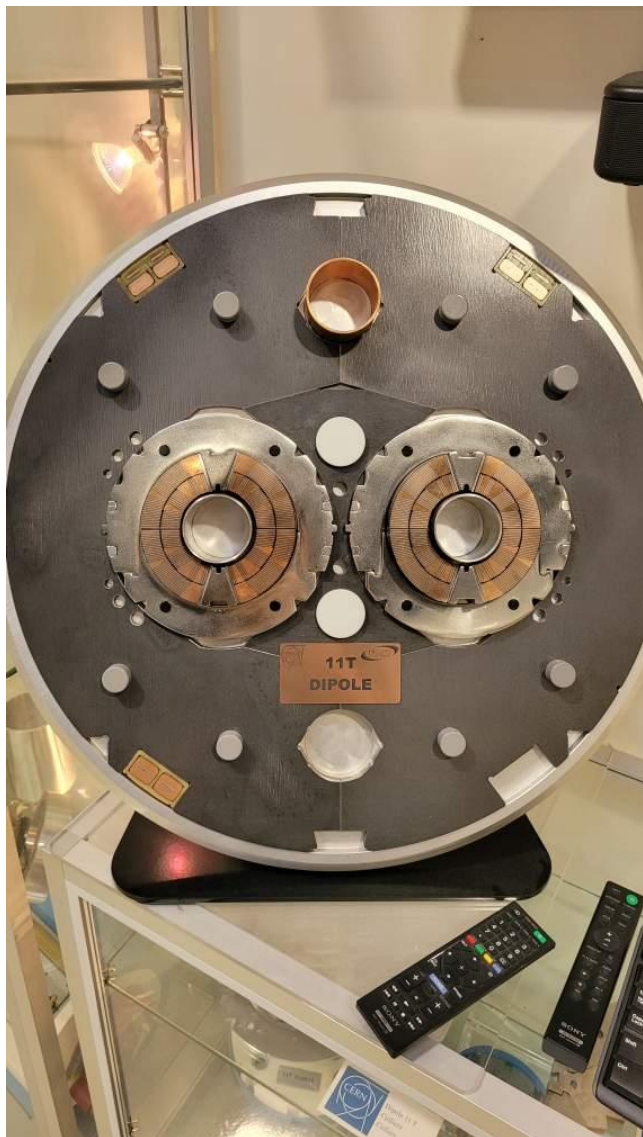
- 일정한 장을 주면서 원형 궤도를 만들



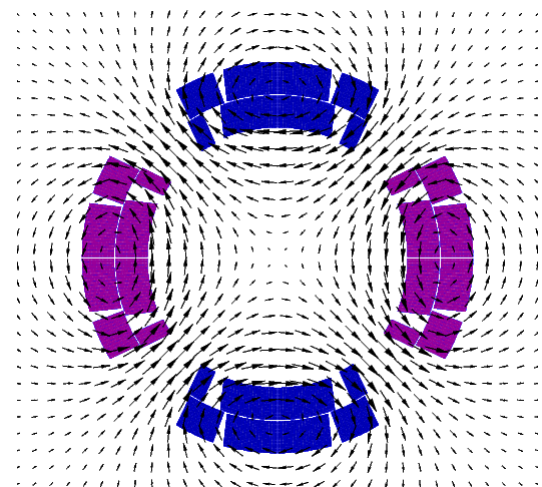
## Quadrupole Magnets

- Particles가 궤도에 집중하게 함
- 지속적으로 Focusing이 일어나게 함
- 중력장에 의해 떨어지는 것도 잡아줌 (최소 60 ms마다 잡아줘야 함)

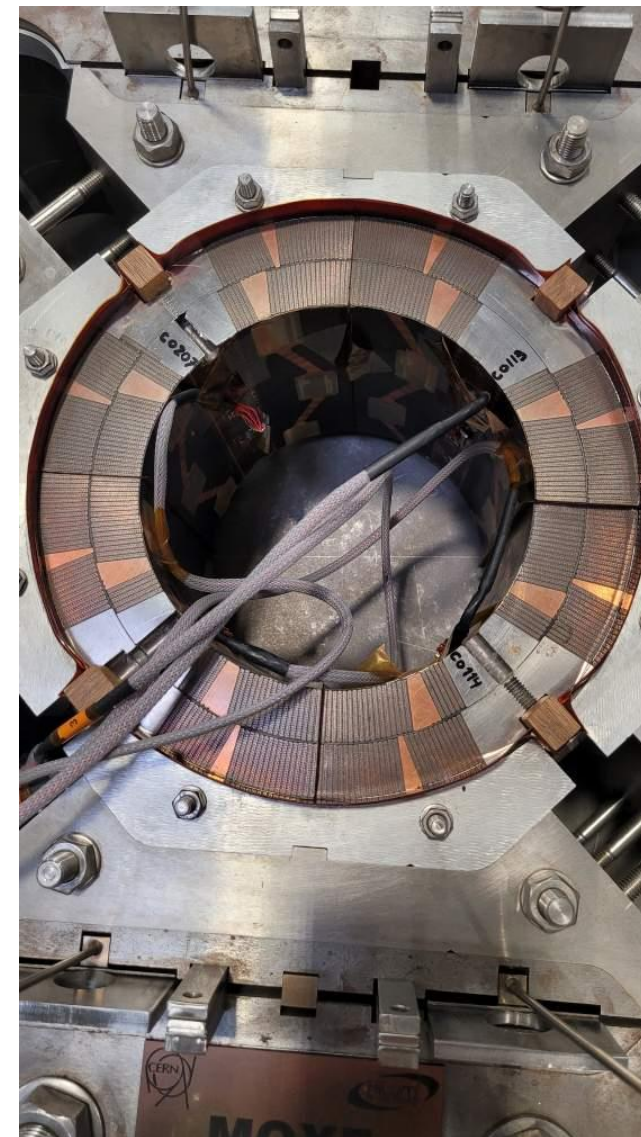
Part 1 입자가속기에 필요한 자석 형상



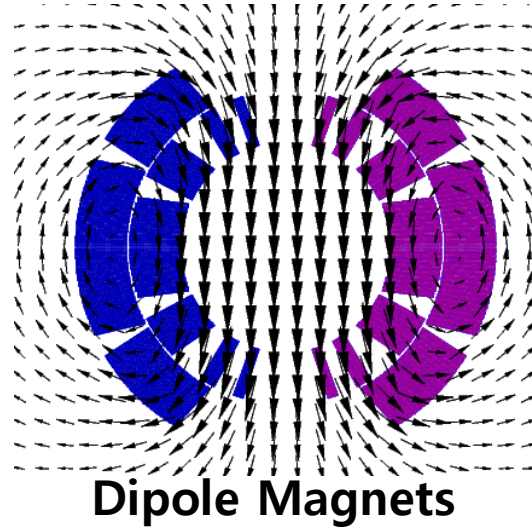
Dipole Magnets



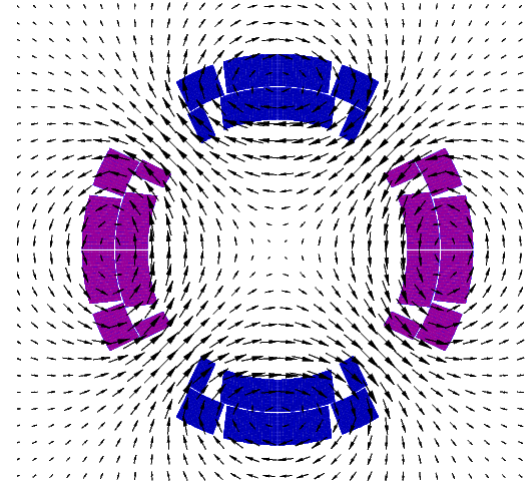
Quadrupole Magnets



Part 1 입자가속기에 필요한 자석 형상

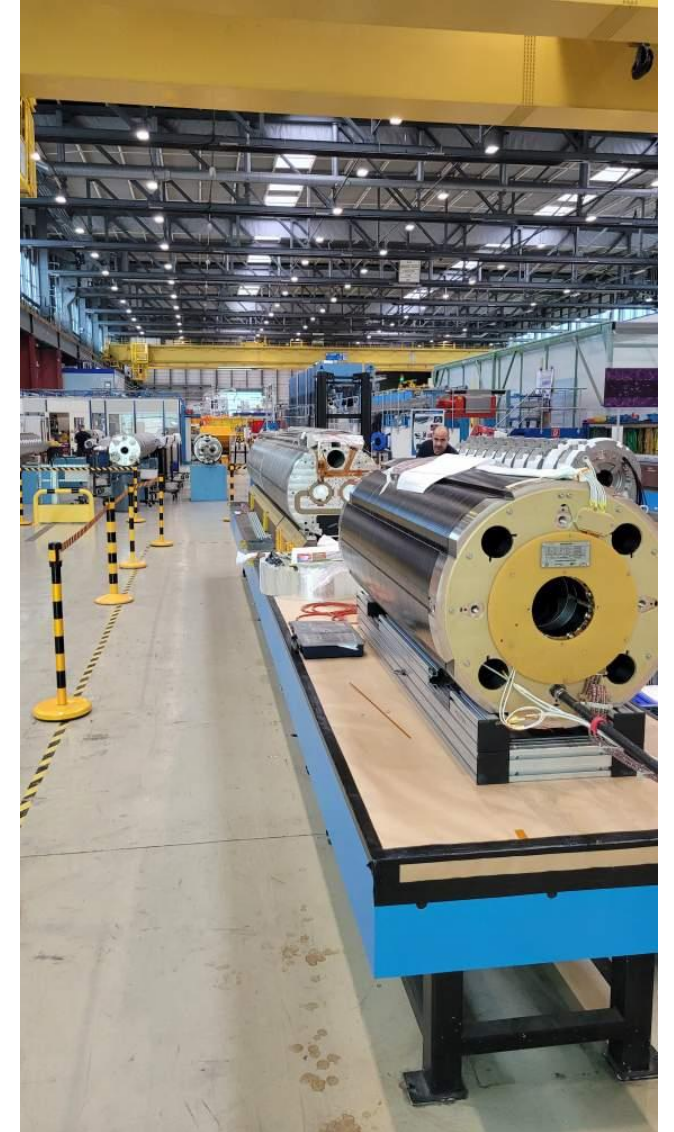


Dipole Magnets



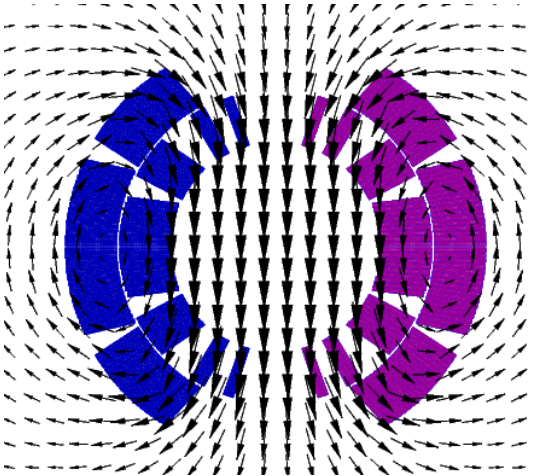
Quadrupole Magnets

2가지 반복 / 9 mm per 15 m





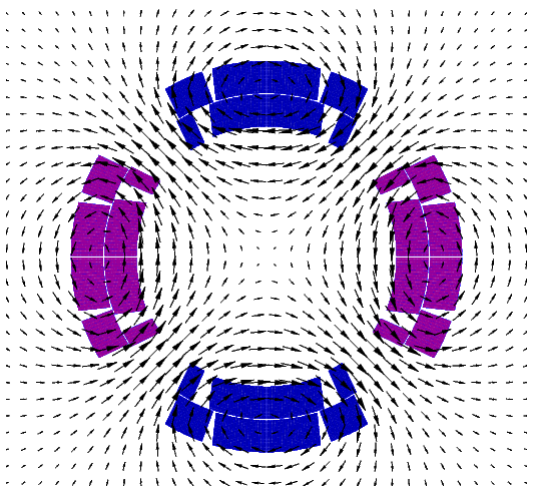
# 자기장 세기 향상에서의 초전도체의 역할



## Dipole Magnets

- 일정한 장을 주면서 원형 궤도를 만듦
- **B가 커질수록 허용 에너지가 커짐**

$$B_y = -\frac{\mu_0 J_0}{2} w, \quad B_x = 0$$



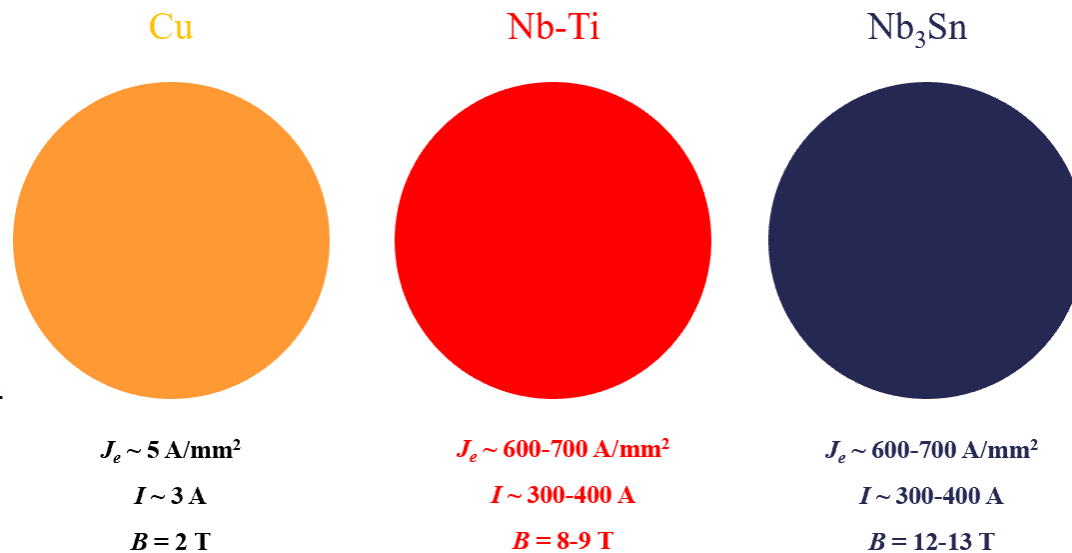
## Quadrupole Magnets

- Particles가 궤도에 집중하게 함
- 지속적으로 Focusing이 일어나게 함
- 중력장에 의해 떨어지는 것도 잡아줌 (최소 60 ms마다 잡아줘야 함)
- **B가 커질수록 Focusing이 잘 됨**

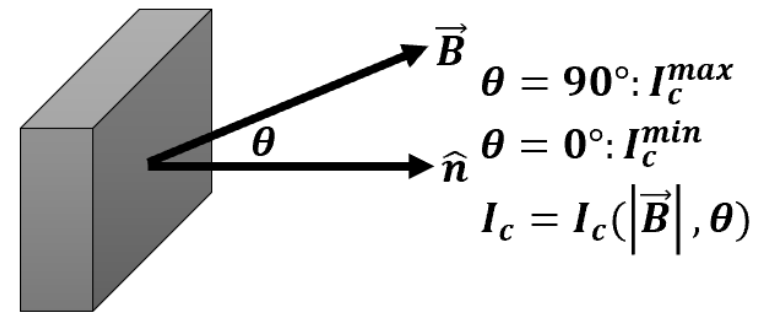
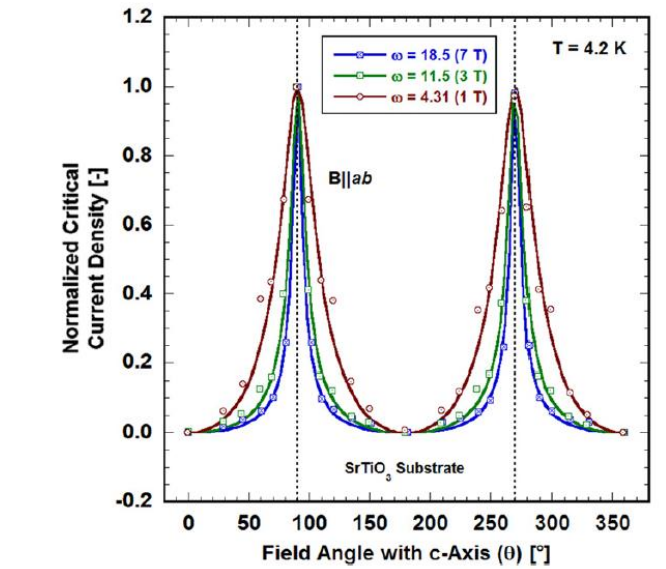
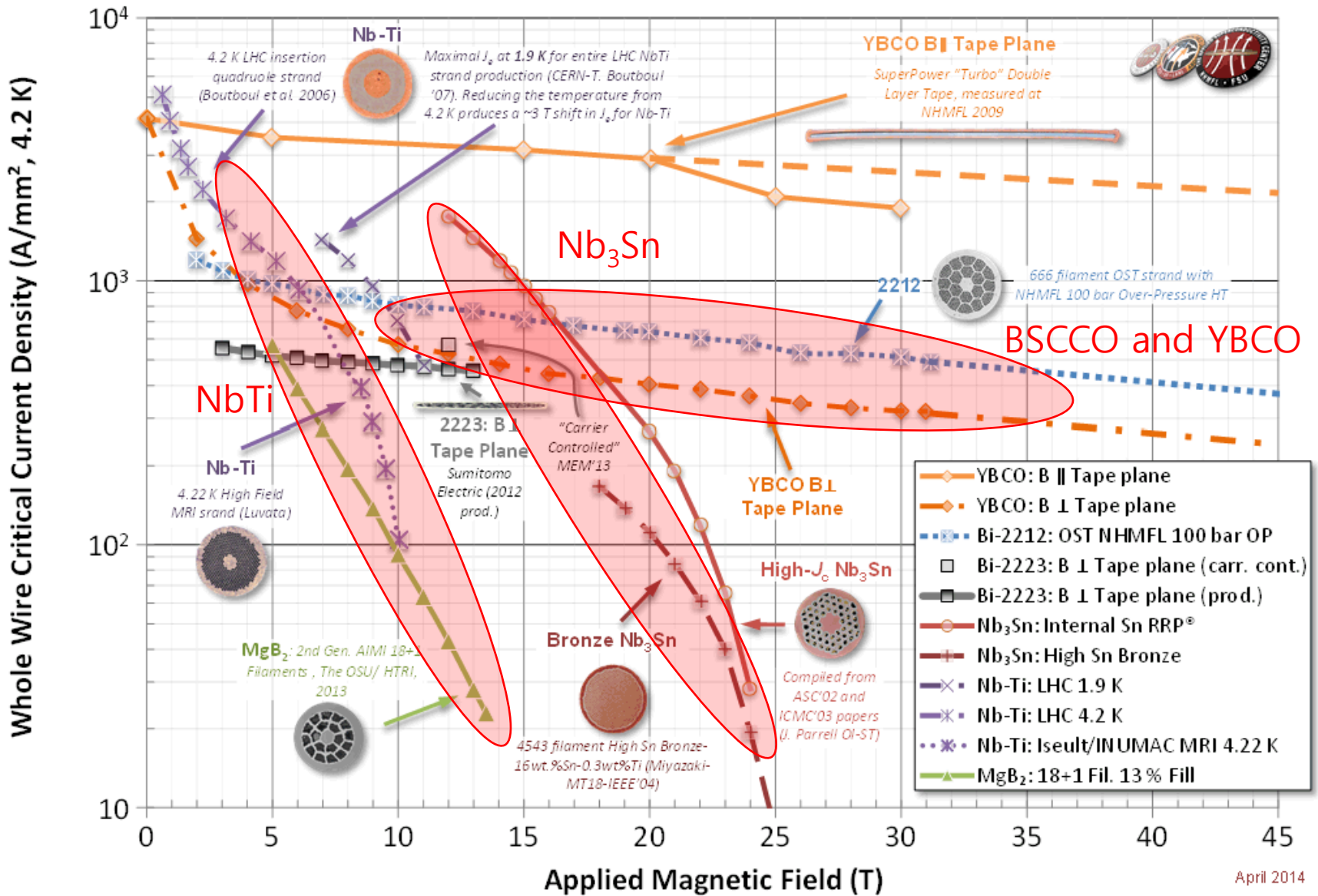
$$B_y = Gx, \quad B_x = Gy, \quad G = -\frac{\mu_0 J_0}{2} \ln \frac{r_{out}}{r_{in}}$$

일반적으로 B가 커질수록 좋음  
→ J가 높아질 수록 B를 높일 수 있음

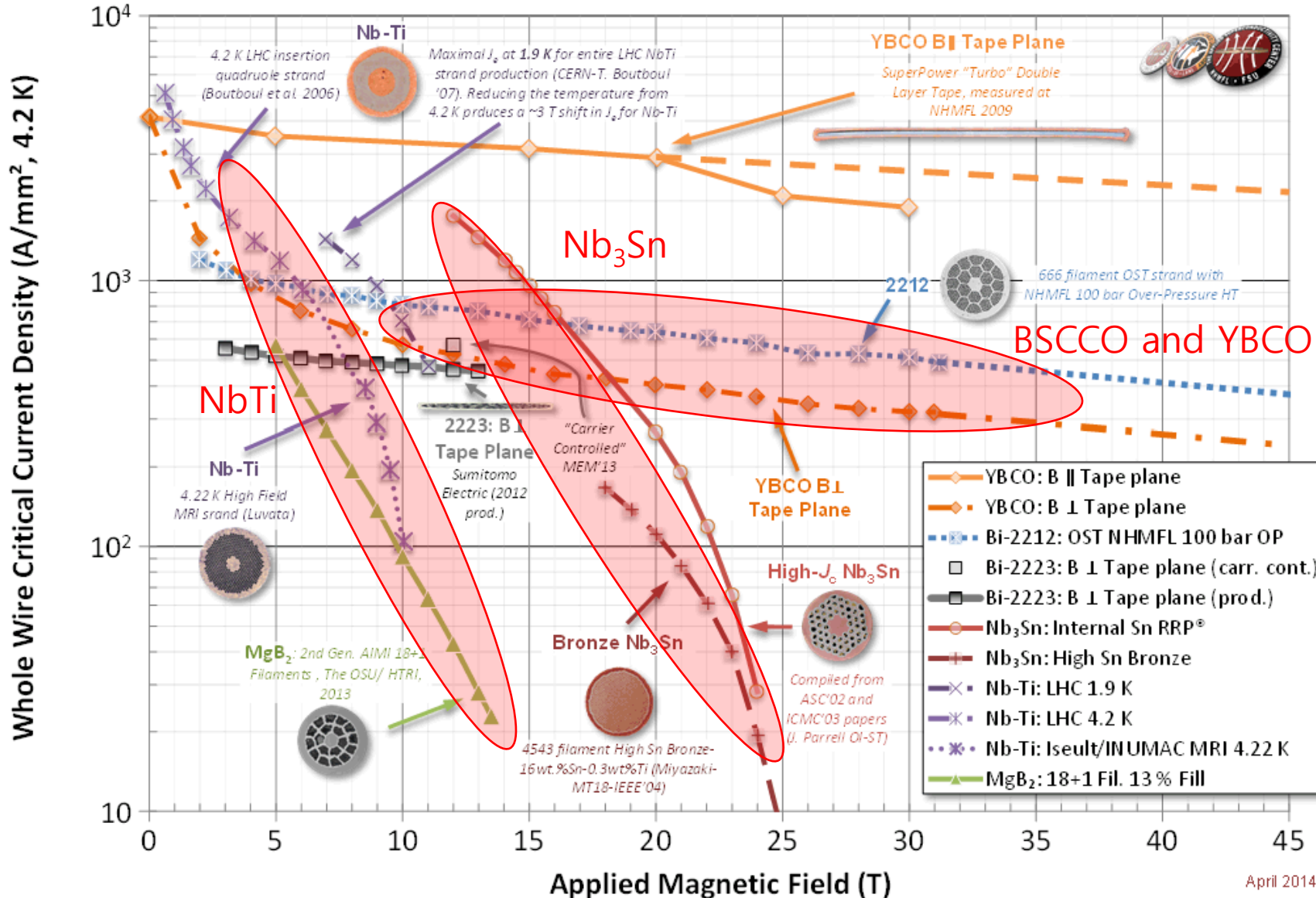
0.85 mm 직경 Strand 기준 전류밀도



# HTS and LTS



# HTS and LTS



April 2014

## HTS (BSSCO & YBCO)

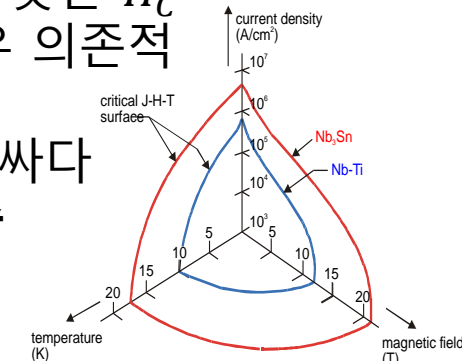
- 100 K 정도의 높은  $T_C$
- 150 T 정도의 높은  $H_C$
- $J$ 가  $H$ 에 거의 불변 (Flat)

- 매우 비싸다 (NbTi의 10배)
- 원하는 형태로 가공하기 어렵고, 온도/압력 조건이 까다로운 편이다.

## LTS (NbTi & Nb<sub>3</sub>Sn)

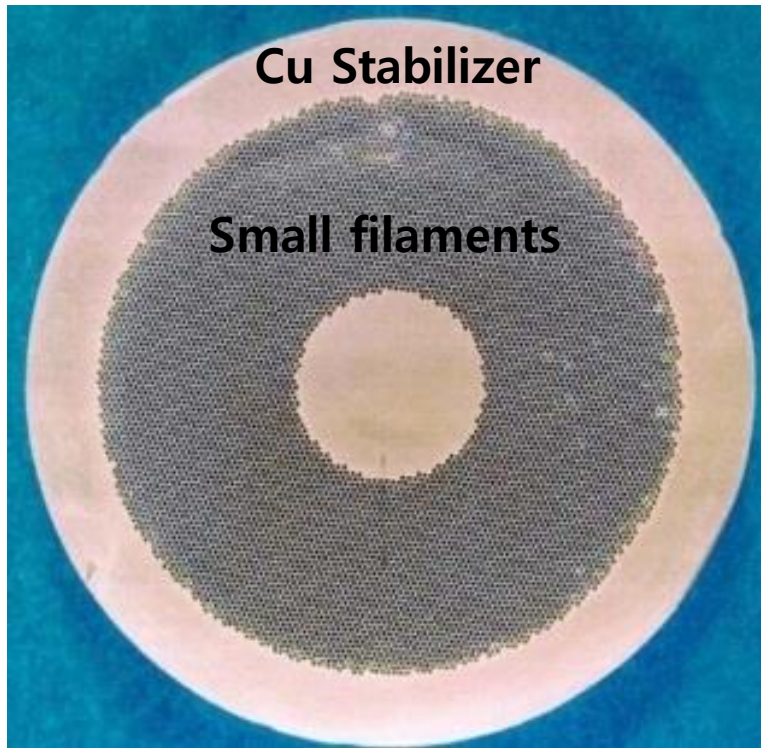
- 18 K 정도로 낮은  $T_C$
- 28 T 정도의 낮은  $H_C$
- $J$ 가  $H$ 에 매우 의존적

- HTS 보다는 싸다
- 현재 사용 중



### 1. Strand

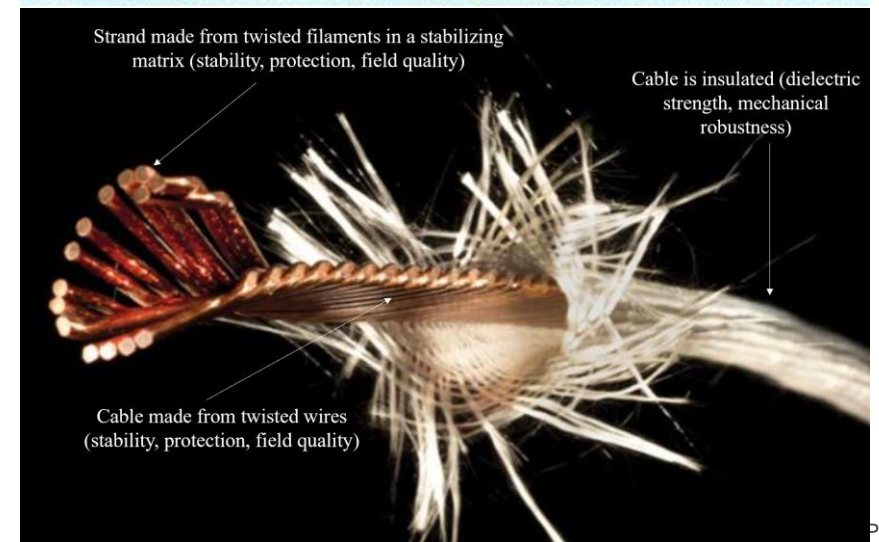
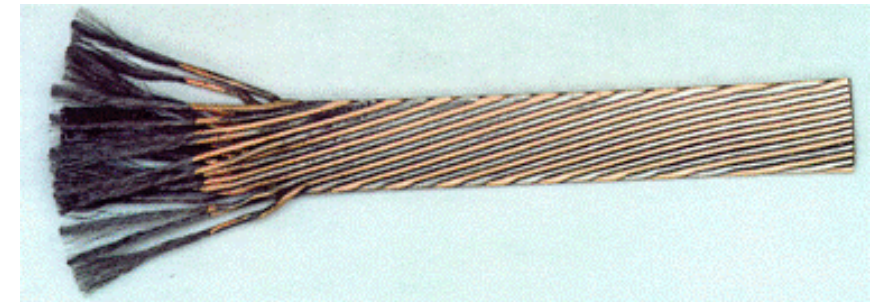
- 초전도 선재는 **Small filaments**와 그것을 둘러싸는 **Cu Stabilizer**로 구분된다.
- 이를 "Multi-filament wire" 내지는 "Strand"라고 한다.



NbTi

### 2. Cable

- 입자가속기에는 주로, 앞에서 말한 Strand들을 여러 개 꼬아서 "Multi-strand cable" 내지는 "Rutherford cable"이라고 한다.



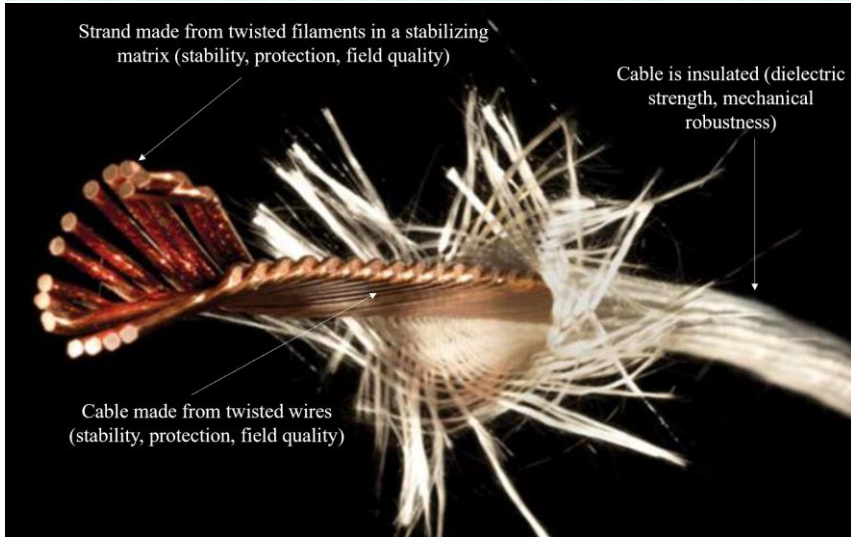
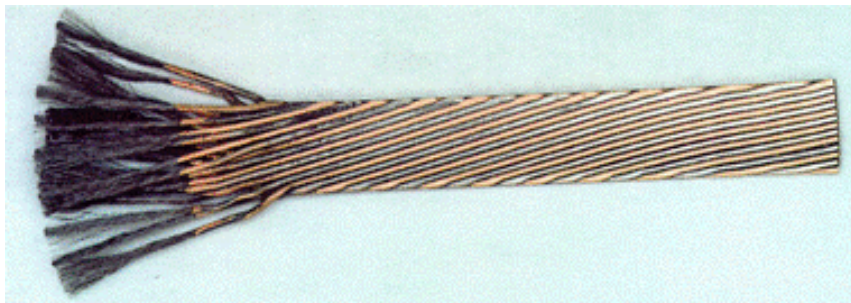
### 3. Cable insulation

- Polyimide나 Fiber glass로 한 번 더 감아준다.

# 초전도 자석 구조: Strand and Cable

## 2. Cable

- 입자가속기에는 주로, 앞에서 말한 Strand들을 여러 개 꼬아서 "Multi-strand cable" 내지는 "Rutherford cable"이라고 한다.



**LHC superconducting cables**

Cable/Wire	Material	Dimensions	No. of strands	Strand diameter	Current	Usage
SC cable 1	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.65	15.1 x 1.9 [mm]	28	1.065 mm	13 kA	Used in magnet: MB (main dipole)
SC cable 2	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.95	15.1 x 1.48 [mm]	36	0.825 mm	13 kA	Used in magnet: MB (main dipole)
SC cable 4	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.75	8.8 x 0.84 [mm]	36	0.48 mm	6 kA	Used in magnet: MQMC, MQMC
SC cable 5	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.75	8.3 x 0.845 [mm]	34	0.48 mm	4 kA	Used in magnet: MQY
SC cable 6	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.25	8.3 x 1.275 [mm]	22	0.74 mm	4 kA	Used in magnet: MQY
SC cable Nb47%Ti	Nb47%Ti, Cu/Sc = 5	φ = 1.6 mm	17	117 μm	600 A	Used for production of superconducting cables
SC cable Nb47%Ti	Nb47%Ti, Cu/Sc = 10	2.37 x 1.49 [mm]	17	117 μm	1	Used for dipole corrector magnets bus-bars
SC wire 4	Nb47%Ti, Cu/Sc = 1.55	0.97 x 1.65 [mm]	-	-	1200 A	Used in corrector magnet: MC8X
SC wire 3	Nb47%Ti, Cu/Sc > 1.6 - 1.8	0.73 x 1.25 [mm]	-	-	600 A	Used in MCS corrector magnets: MCS MSMS, MQT-S, MQTL, MQSX
SC wire 2	Nb47%Ti, Cu/Sc > 4.0 - 4.8	0.38 x 0.73 [mm]	-	-	120 A	Used in: MQBC, MQBY, MQC, MQSX, MQTX, MQCX, MQSX, MQSX
SC wire 1	Nb47%Ti, Cu/Sc > 4.0 - 4.8	0.435 [mm]	-	-	60 A	Used in corrector magnet: MQB
SC 42 wires cable	Nb47%Ti	outside φ = 17.5 mm	17	117 μm	42 x 600 A	Used for auxiliary Line-N
SC cable 3 x 6 kA	Nb47%Ti, 13 Sc wires, 7 Cu wires	-	-	-	3 x 6 kA	Used for powering SC magnets in DS zone

## 1. Strand에는 왜 Stabilizer를 두는가?

- **Flux jumps:** 국소적인 열적 변동이 임계 전류 밀도를 살짝 바꾸고, 이게 자속을 이동시키면서 전력 소비. 따라서 자속을 이동하지 못하게 하는 역할.
- **Quench protection:** 초전도체는 초전도성을 잃으면 큰 저항이 나타나면서 타버리는 현상 발생. 그래서 Copper Matrix로 잘 빠져나가게...
- **Persistent Current:** 외부 자기장이 변할 때 Filament 일부가 자기장이 차폐되면서, 외부 자기장이 일정하게 유지되면 감소 않고 지속... 열/전류/응력 개선
- **Inter-filament Coupling:** 시변 자기장에 filament가 놓이면 AC loss가 발생하면서 Flux가 서로 coupling 되는, Flux jump 발생. 꼬아서 해결.

## 2. Cable은 왜 Twisted된 모양인가?

- **Inter-strand coupling current 감소**
- **기계적 안정성 증가**
- **전류 재분배:** 하나의 strand에서 defect가 발생한다면, 다른 strands로 전류가 흐르게 한다.
- **Turns수 감소:** Winding이 편리하고 Inductance를 줄일 수 있다.
- **전체 길이 감소**

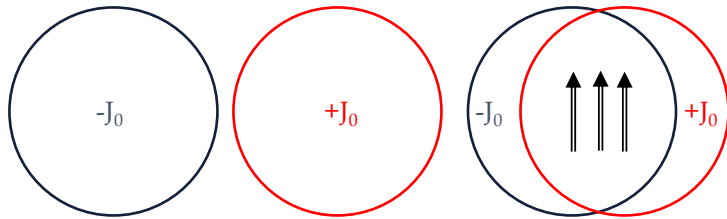
## 3. Cable insulation을 해서 무엇을 얻을 수 있나?

- **전기적 특성 향상:** Quench 발생 후 turn-to-turn Voltage에 더 잘 저항할 수 있다.
- **기계적 특성 향상:** 고압 환경을 잘 버틸 수 있다.
- **공극률 향상:** 액체 헬륨 순환을 더 잘 할 수 있다.
- **방사능 저항 증가**

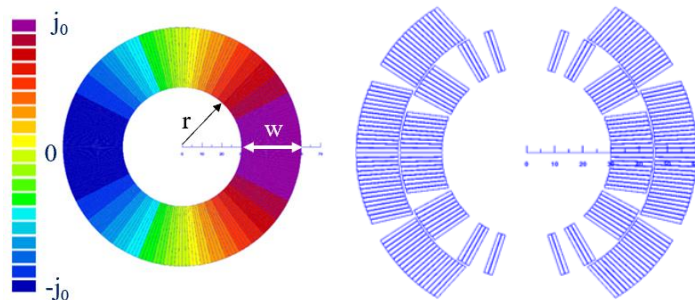
# 초전도 자석으로 원하는 자기장을 만드는 방법

## Dipole Field 만들기

- **Perfect Dipole**을 만들고 싶다면, **Circle/Ellipse**를 **Intercept**시키면 된다. 한 방향만 남게 된다.
- 다만, **Flat cable**에서 **적용하기 어렵고**, Aperture가 Circular하지 않기 때문에 바로 적용하기 어렵다.

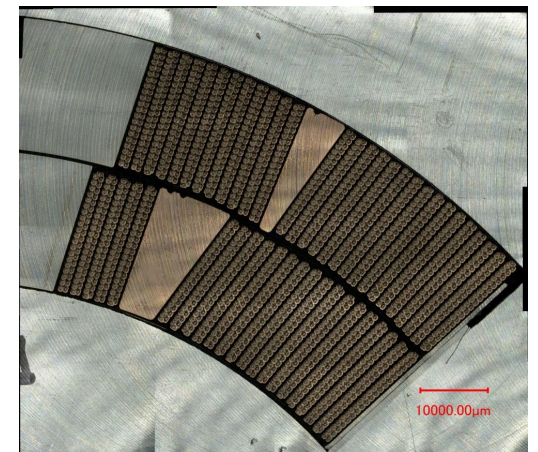
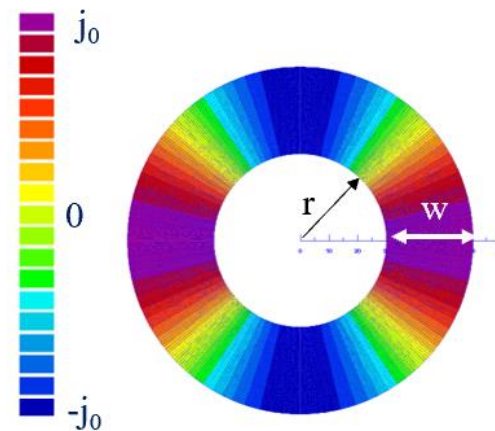


- 따라서, **적당히  $\cos \theta$ 에 따라 전류 분포를 주면서 flat cable**로 구현 가능하도록 근사한다. 이러면 **Perfect dipole**은 아니지만 **원하는 모양을 만들 수 있다**.



## 2-n Pole Field 만들기

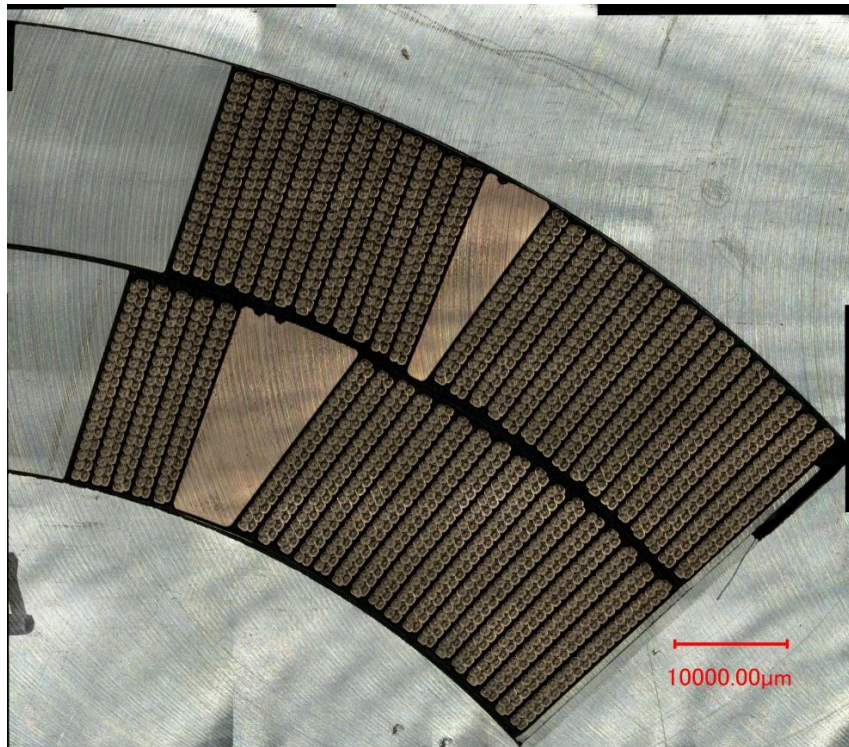
- 앞에서 했던 것과 같이,  **$n$ 개의 intersecting ellipse**를 가지도록,  **$\cos n\theta$ 에 따라** 같은 논리로 적용한다.
- $n$ 이 2라면, Quadrupole에 해당한다.
- Approximation은 SINC function을 이용하면 어느 정도 가능하다는 것이 알려져 있다.



# Part 1 초전도 자석 구조: Coil and Iron yoke

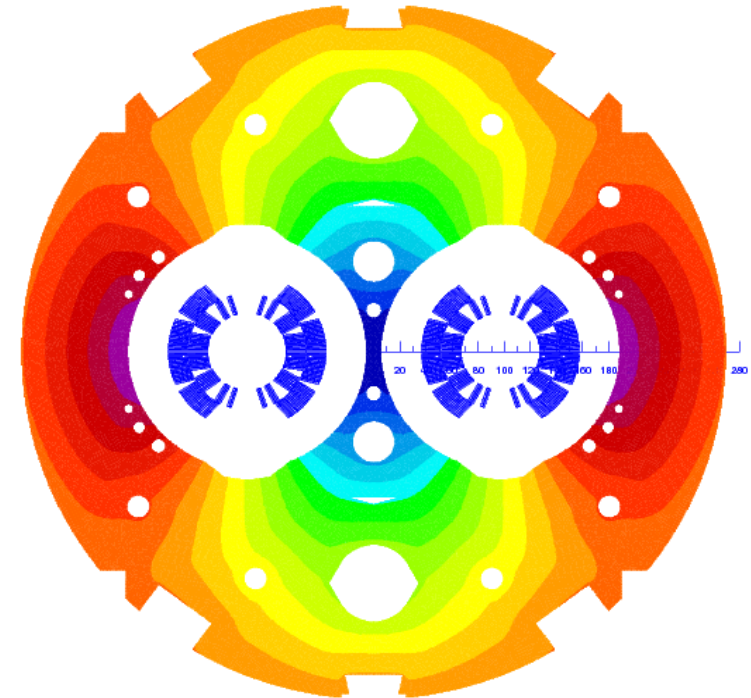
## The Coil

- 단면 정밀도를 micro 미터 단위로 맞추는 것이 중요
- 가공 방식과 재료에 따라, Coil 자체의 기계적 특성이 변화할 수 있음.
  - : Nb3Sn의 경우, Brittle하게 뽑히는 특성



## The Iron yoke

- **Fringe Field 방지**: Coil 밖에서 Magnetic flux를 붙잡아서 회귀, **Field 세기 향상**
- **기계적 안정성 도모**

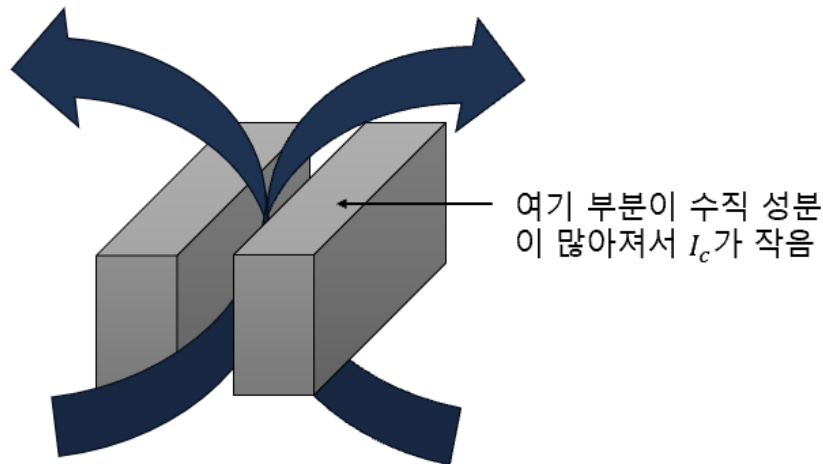
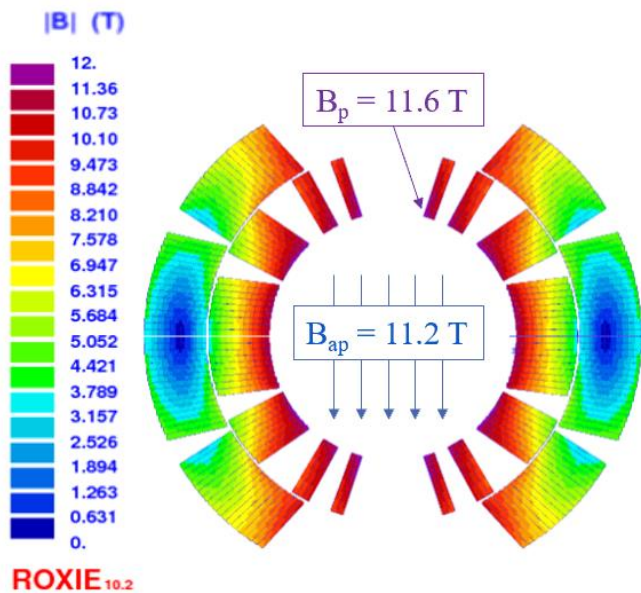




# 초전도 자석 설계 상의 주의점

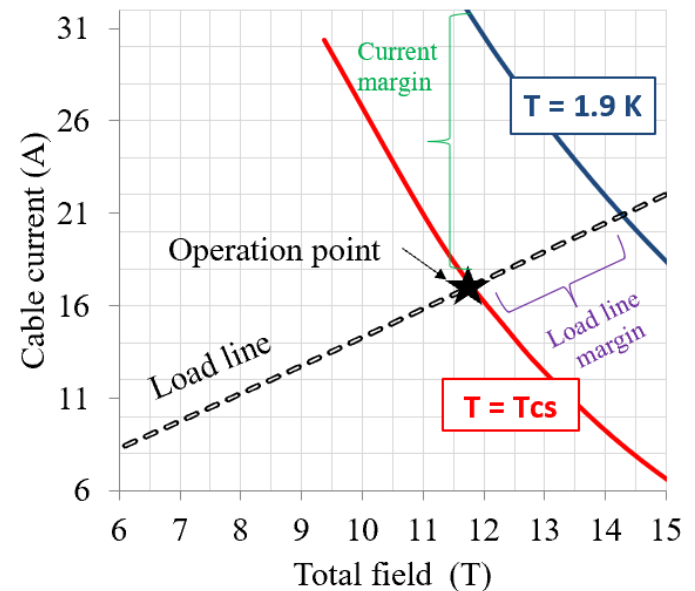
## Field 조건 관련

- 자석 설계는 전체 형상에서 **Weakest point**에 해당하는 부분, 즉 **Peak Field**인 지점을 찾는 것이 중요
- Aperture Field는 설계적 문제에는 관련 없고, 자석을 지나는 **Peak Field**만 중요하다.
- 해당 Peak Field를 기준으로 Operating Margin



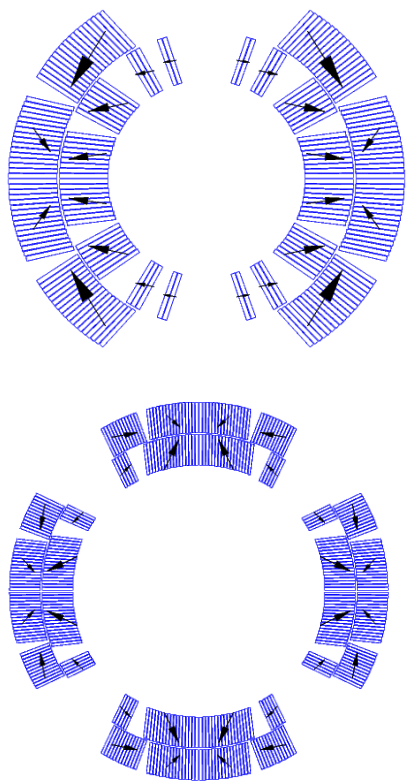
## Current density 조건 관련

- **Load Line margin:** Operating current와 Critical current가 같아지는 line을 Load Line Current라고 한다.
- LHC에서는 Operating current를 Load line current의 80%로 잡는다.



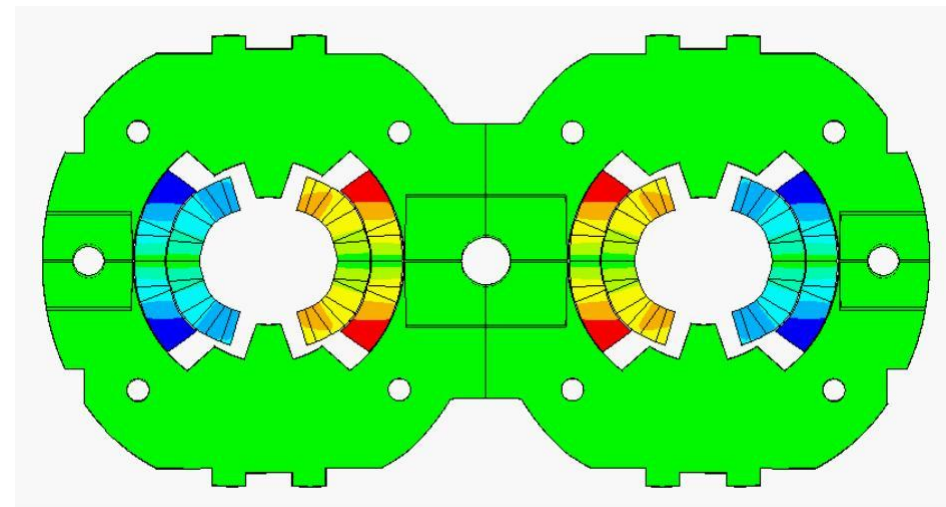
## 고자기장 / 로렌츠 힘 증가 / 응력 파괴 발생

- 보통 Azimuthal하게는 Mid-plane으로, Radial하게는 Outward하게 응력이 발생하는 경향이 있음
  - Coil End에서는 Longitudinal direction으로 미는 경향이 있음
  - 일반적으로 발생하는 응력은 자기장 제공에 비례하고, Bore radius에 대해 Radial하게는 비례하고 Axial하게는 제공에 비례한다.



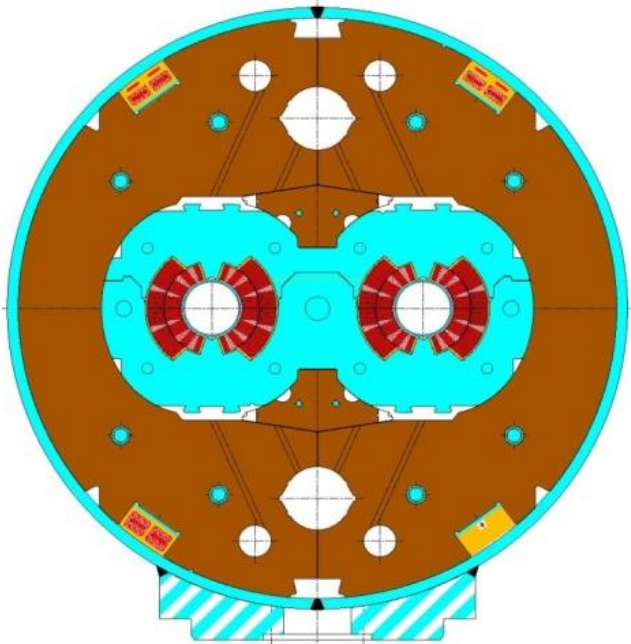
## 로렌츠 힘에 의한 영향

- **Coil 형상 변화:** Field Quality 저하, 가속 주파수 불균형
  - **Displacement 발생:** 마찰 응력 축적
  - **(NbTi) Insulation에 Damage 발생**
  - **(Nb3Sn) Conductance 저하**
- 따라서, **Stress limit** 조건도 지켜야 함



## Coil Stress의 종류

- **Collaring:** Coil 2개를 서로 걸면서 발생하는 응력
- **Yoking:** Coil과 그 주변 Yoke 간에 발생하는 응력
- **Shell welding:** Yoke를 싸는 Shell로부터 오는 응력
- **Cool-down:** 서로 다른 열수축에 따른 열 응력
- **Excitation:** 극 방향으로 갈 수록 응력 차이 발생



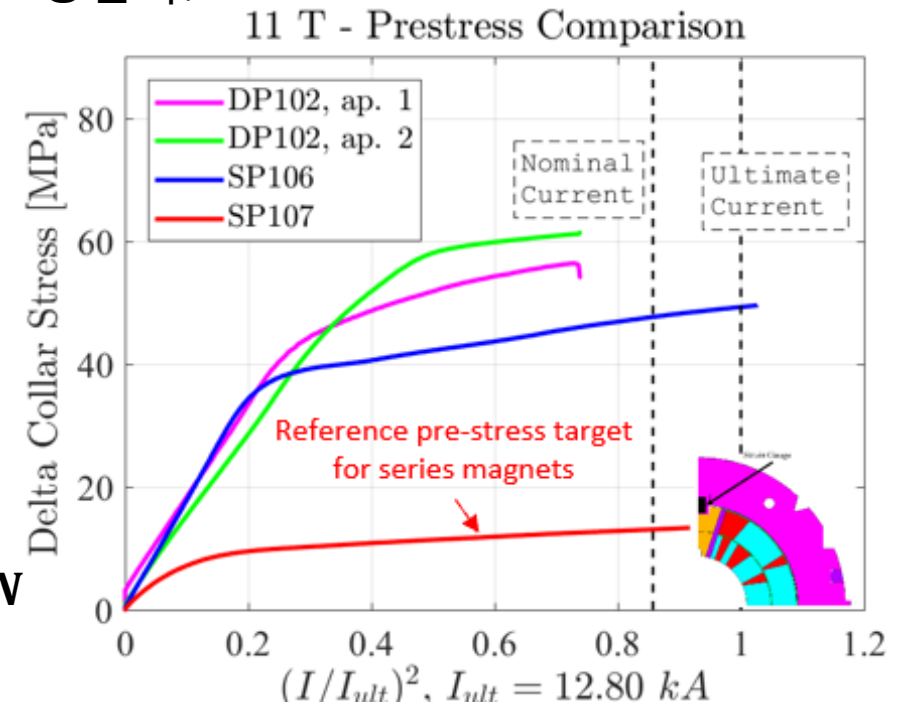
이러한 **Stress**를 막기 위한 주 목적은,

- **Coil motion**의 최소화
- **Cost** 최소화,  
그것을 위한 **Dimension** 최소화
- 소성 변형 전까지의 최대 응력 제한

LHC의 경우,  $F_x = 1.7 \text{ MN/m}$ ,  $F_z = 265 \text{ kN}$

## 해결 방법

- **Pre-stress:** 자기장에 의한 변형이 발생하더라도 탄성 변형에 의해 Stress를 받쳐줄 수 있도록, 고 의적으로 Stress를 가하면서 결합시킨다.
- **Axial support:** Longitudinal 방향으로 생기는 응력을 보상한다.



**Quench:** 비가역적으로 초전도성을 상실하는 현상  
일반적으로 Heat generation이 Cooling보다 크면 발생

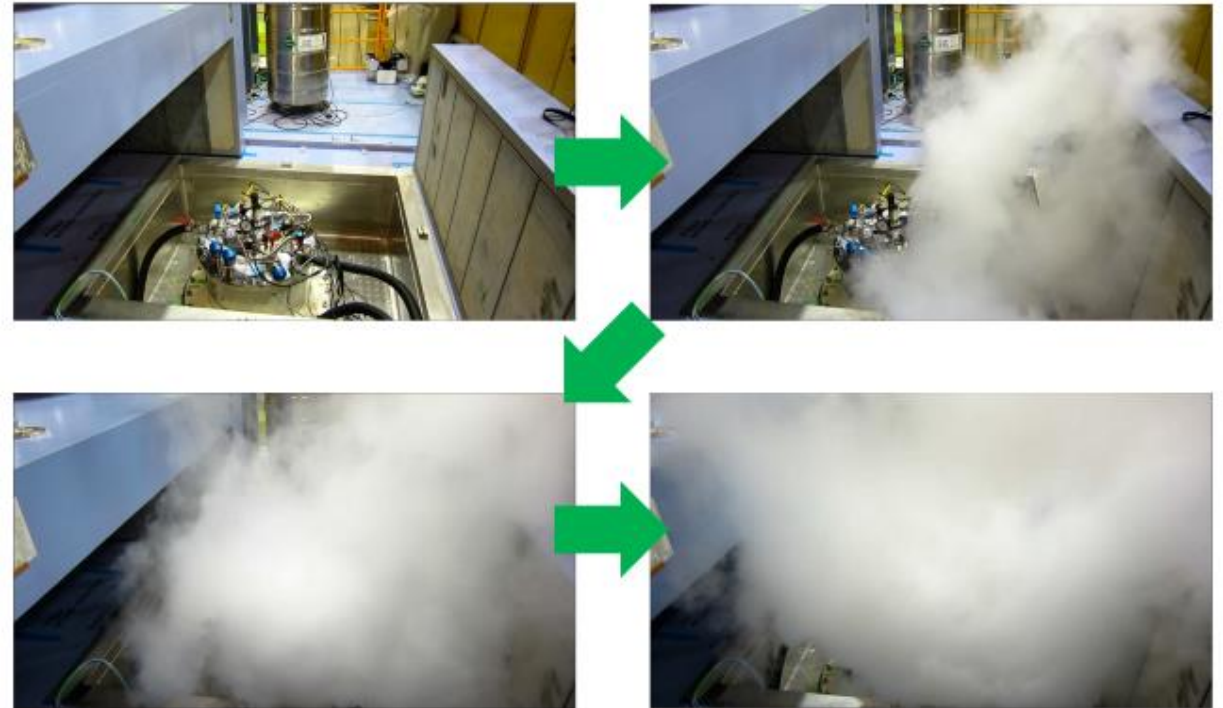
- **Mechanical events:** 마찰변형, Shell 파괴
- **Electromagnetic events:** Flux jumping, AC loss
- **Thermal events:** Cooling 실패
- **Nuclear events:** Particle shower

Quench가 발생하면 Magnetic Energy가 모두 Thermal Energy로 치환되면서, **Joule Heating**이 발생, 타버린다.

단 한 곳에서도 Limit을 만족하지 않는다면, Quench!



Quench situation



**Quench:** 비가역적으로 초전도성을 상실하는 현상  
일반적으로 Heat generation이 Cooling보다 크면 발생

- **Mechanical events:** 마찰변형, Shell 파괴
- **Electromagnetic events:** Flux jumping, AC loss
- **Thermal events:** Cooling 실패
- **Nuclear events:** Particle shower

Quench가 발생하면 Magnetic Energy가 모두 Thermal Energy로 치환되면서, **Joule Heating**이 발생, 타버린다.

단 한 곳에서도 Limit을 만족하지 않는다면, Quench!



## Quench Protection

- **External-dump:** Quench가 발생하면 Magnet 외부에  $R_{quench}$ 보다 **아주 큰  $R_{dump}$** 를 뒤편, Magnet에서 타지 않고  $R_{dump}$ 에서 **에너지를 쓰도록** 만든다.
- **Self-dump:** Quench가 발생하면 short circuit을 만들어서 internal resistance가 0이 되도록 만든다. 최대한 **Voltage를 유지하면서 Current를 유지**하는 방식. (LHC에서 주로 사용하는 방법)

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{L}R(t)} \approx I_0 e^{-\frac{tR_d}{L}}$$

보통 Quench 발생 후 5 ms 후에 발생을 알아차리고, Current 감소까지 40 ms 정도 걸리는데, 이 안에 350 K 이하의 온도 조건으로 회복시켜야 한다.

## Adiabatic heat balance

Quench는 어떤 특정한 장소(hot-spot)에 단열적으로 발생하는 현상에 해당한다.

$$\bar{C} \frac{\partial T_{cond}}{\partial t} = \eta_{Cu} J^2$$

( $\bar{C}$ : average heat capacity,  $\eta_{Cu}$ : Resistivity of Cu)

$$\int_{T_{op}}^{T_{max}} \frac{\bar{C}}{\eta_{Cu}} dT = \int_0^{\infty} J^2 dt$$

왼쪽은 Cable이 Current를 버틸 수 있는 역량  
: **Quench Capital ( $\Gamma$ )**

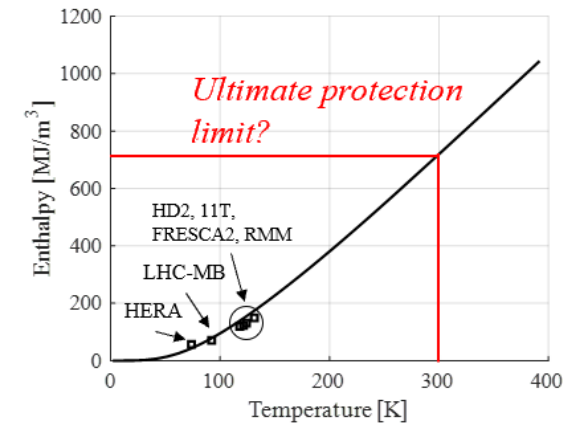
오른쪽은 Decay하는 Current를 적분한 Load  
: **Quench tax**

이로서 Quench 시의 Hot-spot Temperature 계산가능

## Protection Limit

이상적이라면, Quench가 시작되자마자 모든 자석이 전부 Quench 상태에 돌입해야 한다.

실제로는, Quench가 되었다는 것을 Detect하기까지의 시간이 필요하므로 **Delay가 존재한다!**



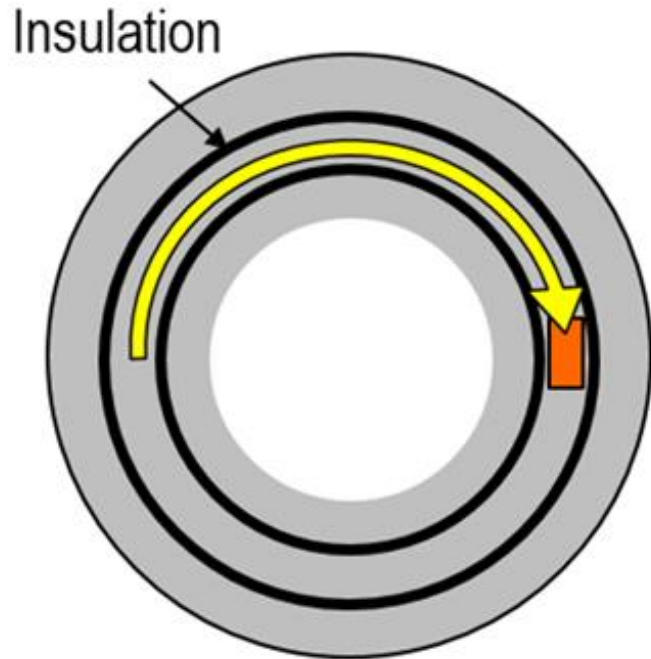
Enthalpy of the strand volume (neglecting the insulation)

Detecting은,

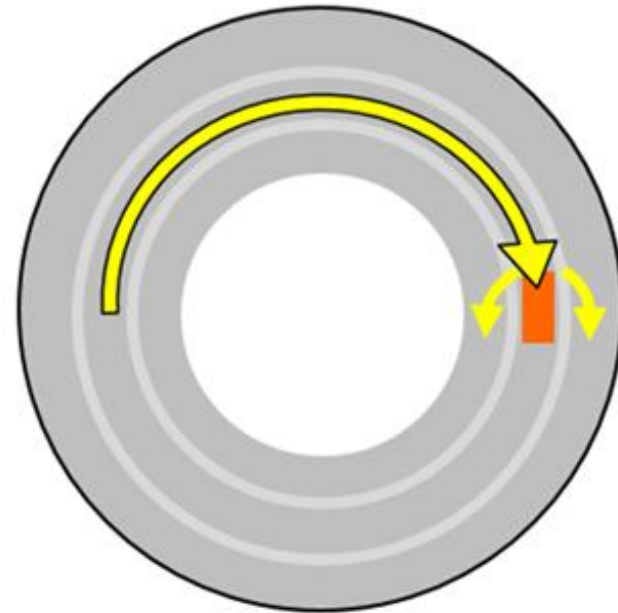
- Voltage level이 Noise를 넘는 수준인가? 3~5 ms
  - Validation time(Voltage spike를 억제 실패)? 10 ms
- 을 통해 일어난다.

# NI (No-insulation) High Temperature Supercon. Winding

2011년 MIT



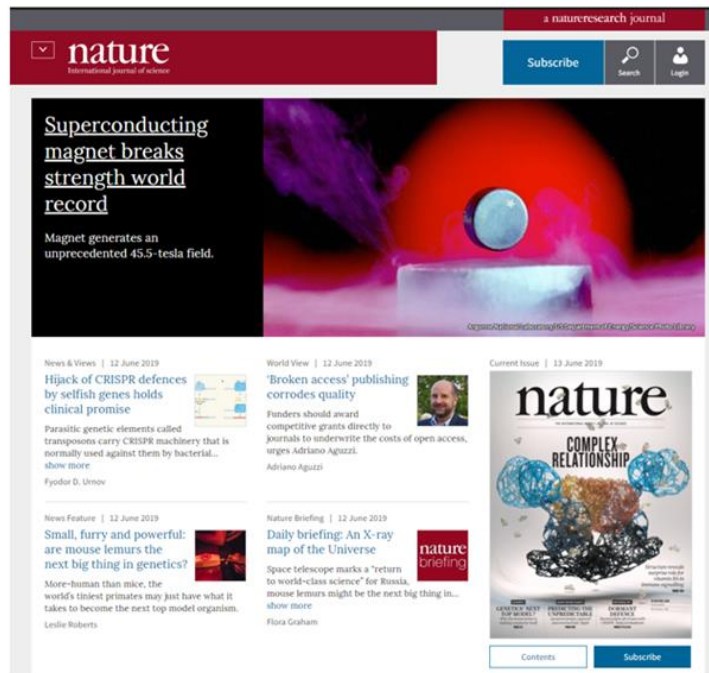
Insulation Coil



No-Insulation Coil

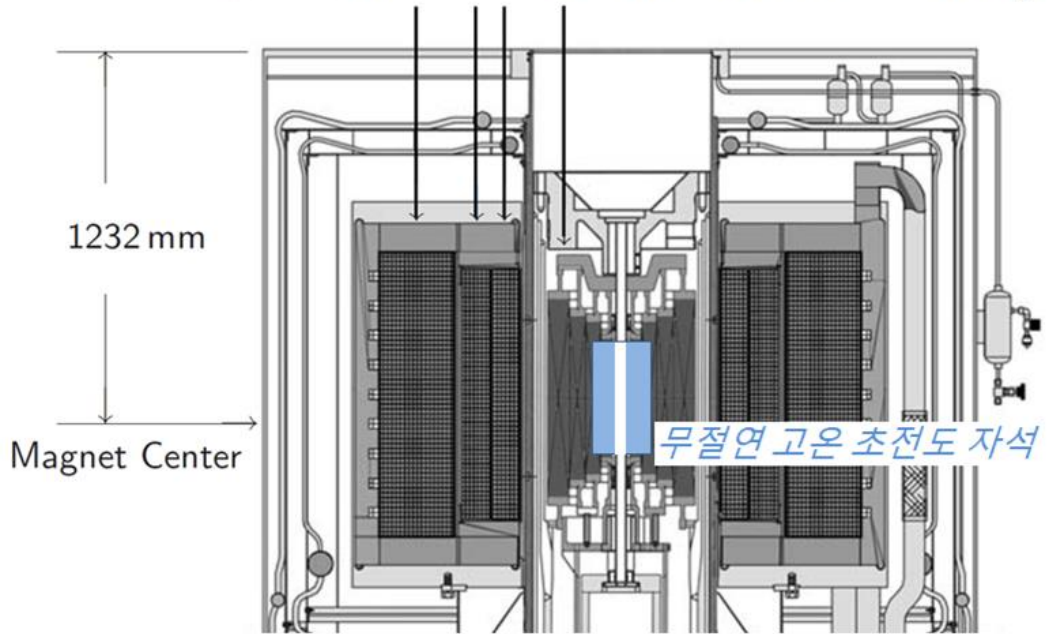
# 45.5 Tesla Coil

2019년 MIT



2019년 6월 Nature 게재

SCM Coils: C BA WATER-COOLED MAGNET (4 Nested Coils)



미국 고자기장 연구소

2000년 44.8 Telsa 자석 대비 Size 1/100배

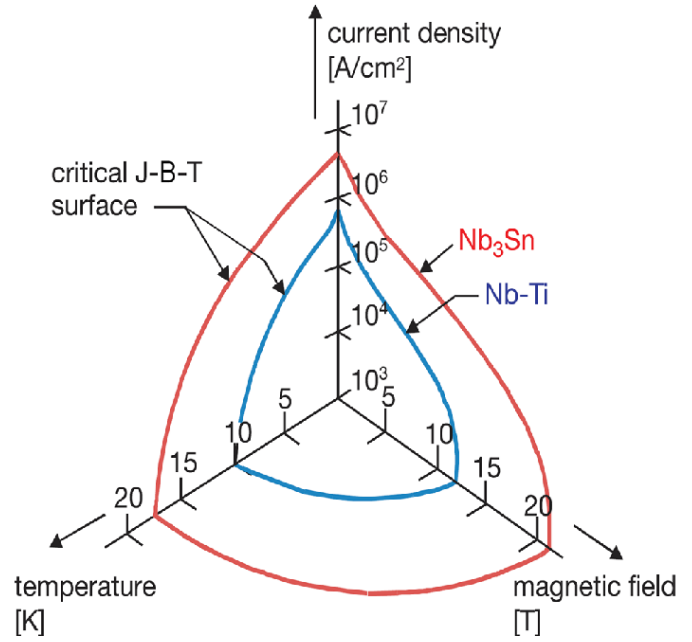
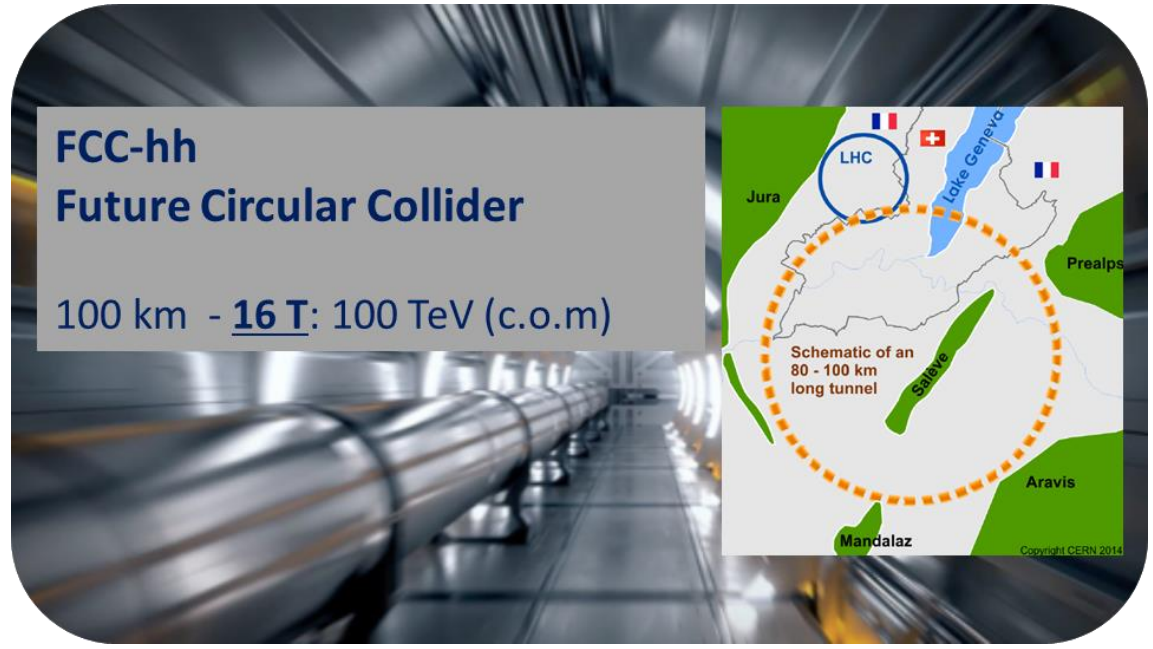


# Future Outlook

## FCC (Future Circular Collider)

Magnet의 관점에서는...  
 LTS인 Nb<sub>3</sub>Sn의 설계를 개선하는 식과  
 HTS 재료를 새롭게 개발해서 도입할 예정

목표는 20 Tesla 정도인데...



**LTS**  
 Nb<sub>3</sub>Sn이 16 T에 이르면 **Current density**를 거의 주지 못하는 상황이 된다.

**HTS**  
 LTS는 원리가 어느 정도 확립되어서 Homogeneous 한 자기장을 생성하지만, HTS는 자기장의 균질성을 보장하기 어렵고 Quench가 생길 곳을 알기 어렵다.

## FCC (Future Circular Collider)

Magnet의 관점에서는...

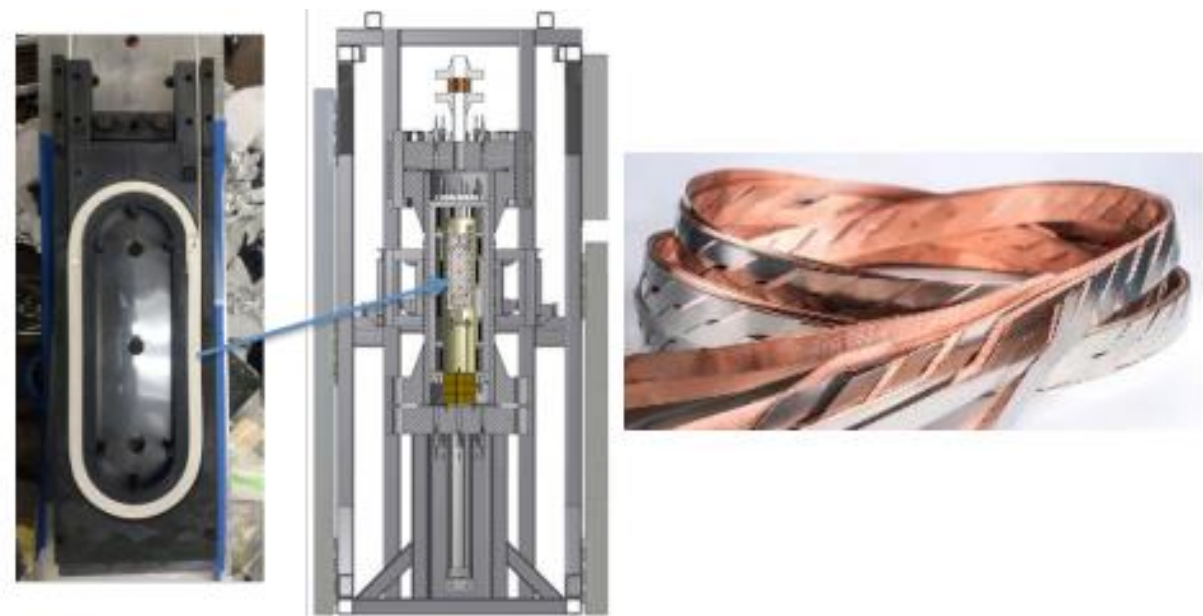
LTS인 Nb<sub>3</sub>Sn의 설계를 개선하는 식과  
HTS 재료를 새롭게 개발해서 도입할 예정

목표는 20 Tesla 정도인데...

- LTS를 이용해서 16 Tesla 도달 목표
- HTS를 이용해서 5 Tesla 이상 도달 목표
- 총합 20 Tesla 이상 안정적 도달 목표

Large scale manufacturing과 Cost optimizing이 중요

만약 16 Tesla 이상이 필요하다면 무조건 HTS를 써야  
따라서, HTS를 LTS안에 삽입하는 식으로 제작



---

Thank you.

---