



核融合炉の実現と展開を加速する 高温超伝導マグネットの高性能化研究

核融合科学研究所
装置工学・応用物理研究系

柳 長門

超伝導(マグネット)工学

- 磁場閉じ込め核融合には、大型超伝導マグネットが必須
- 超伝導(マグネット)工学 **C** 応用超伝導(学) (Applied Superconductivity)
- 核融合炉用マグネット = (超)大型マグネット
 - 巨大なサイズ、巨大な磁気エネルギー、強大な電磁力、巨額のコスト
 - 高安定性・高信頼性の要求

核融合炉の早期実現と展開のために高温超伝導マグネットの開発研究を推進

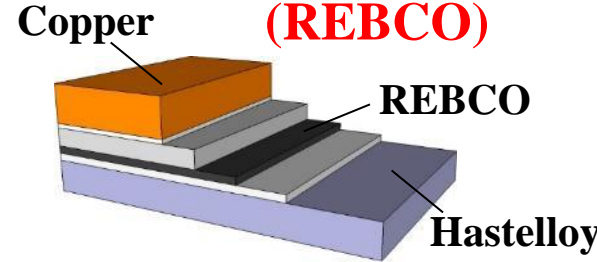
- 学術研究 → 超伝導マグネット設計指針の確立(応用超伝導としての一般化)
- 応用研究 → 様々なアプリケーションへの適用とフィードバック

Motivation for using High-Temperature Superconductor

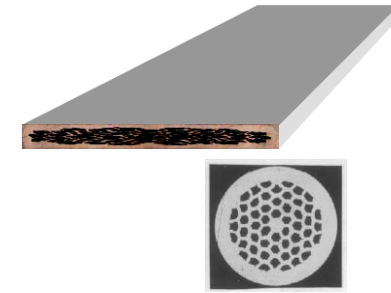
(0) Saving helium resources

- (1) High field
- (2) High cryogenic stability
- (3) High efficiency
- (4) High mechanical rigidity
- (5) Industrial production of tapes

Rare-Earth Barium
Copper Oxide
(REBCO)



Bismuth-based HTS



Stability Margin

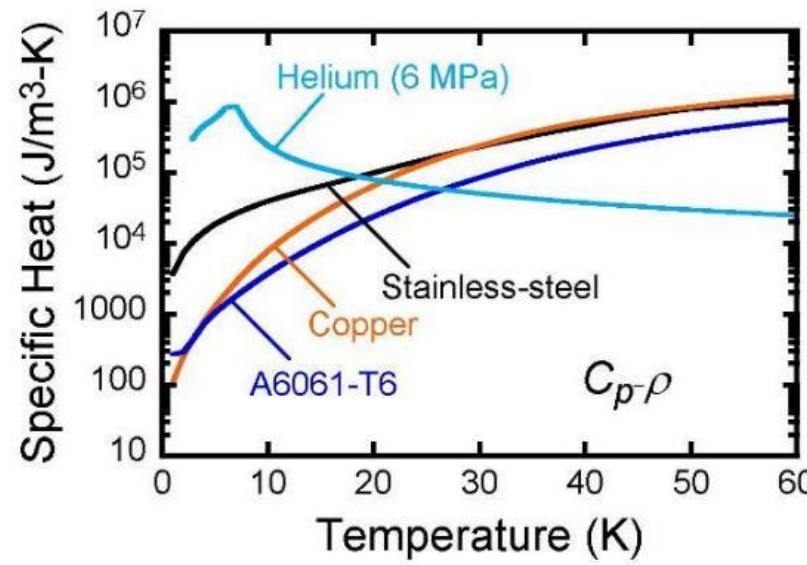
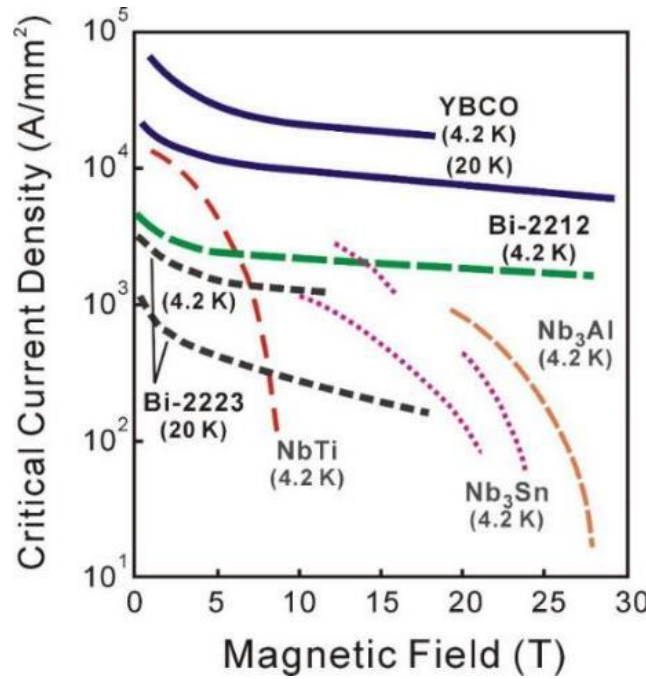
$$\Delta Q < C_p \rho \Delta T$$

$$C_p \rho \Delta T \approx 2 \times 10^5 \text{ (J/m}^3\text{K)} \times 10 \text{ (K)}$$

$$\approx 2 \text{ (J/cc)}$$

Higher than CIC conductor

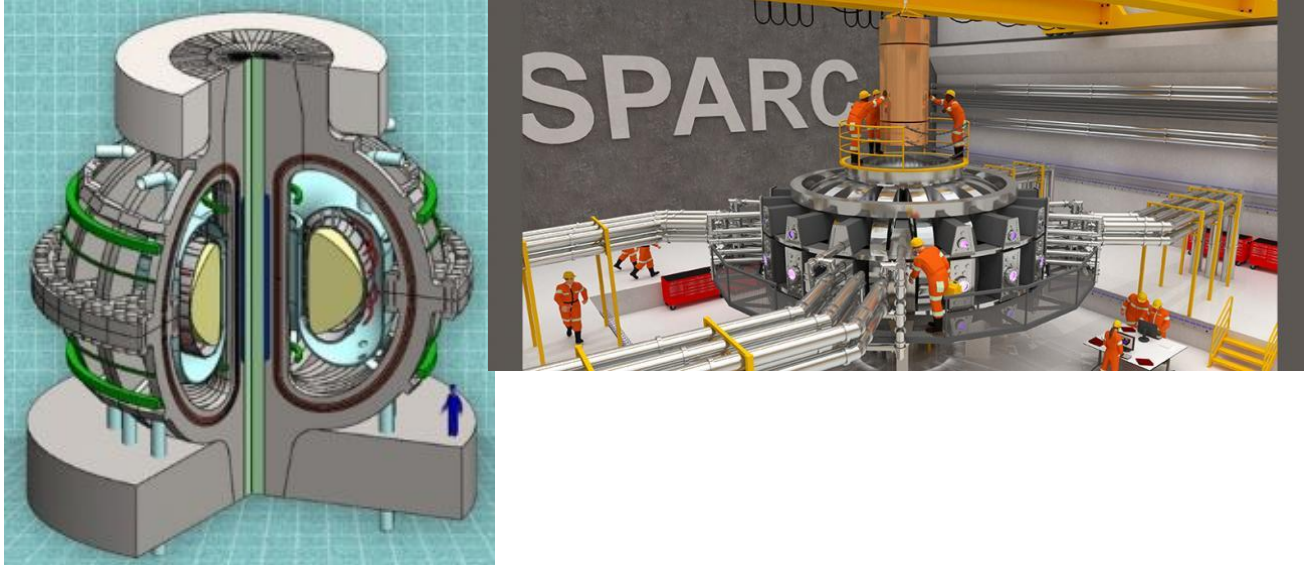
→ Low quench risk!



N. Yanagi, S. Ito, et al.,
Plasma and Fusion Research
9 (2014) 1405013

HTS Magnet Concepts for Fusion in the World

ARC & SPARC (MIT/CFS)

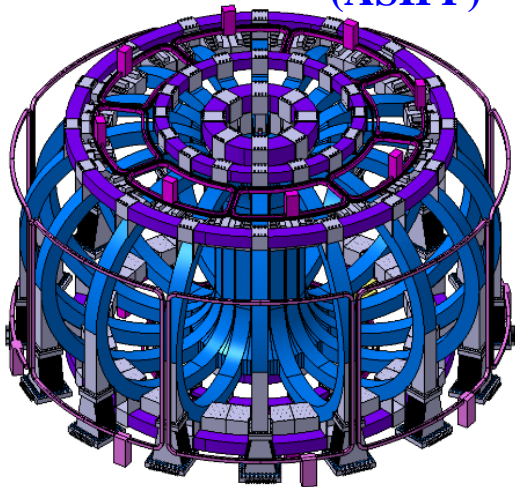


$B_t = 9-12\text{ T}$
 $B_{max} = 21-23\text{ T}$

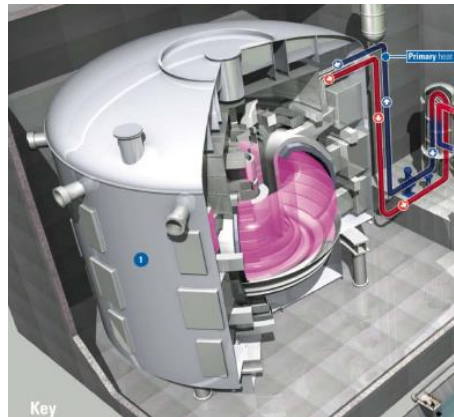
Tokamak Energy



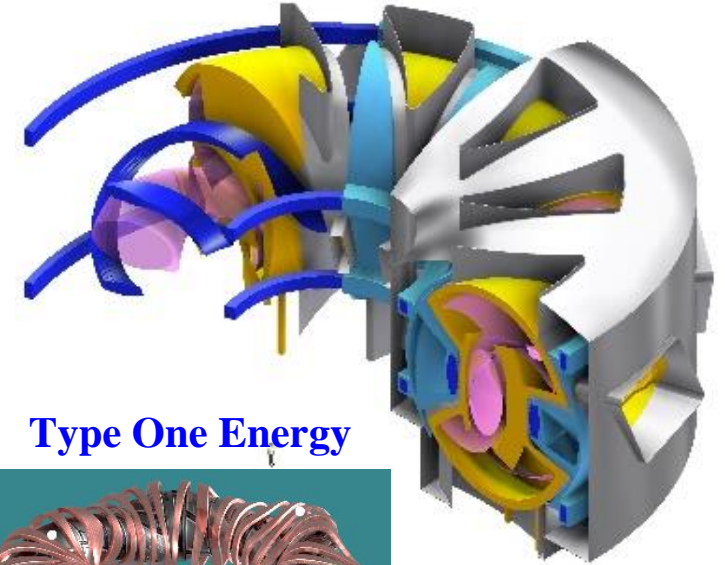
CFETR (ASIPP)



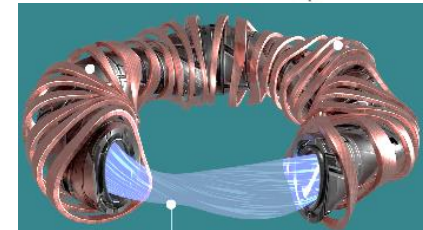
EU DEMO HTS option (EUROfusion)



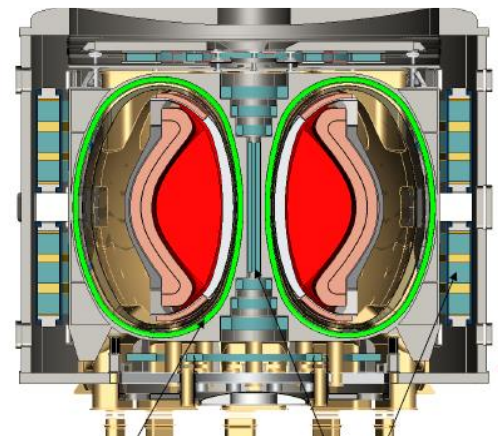
FFHR-d1 (NIFS)



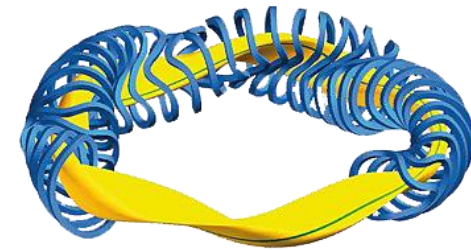
Type One Energy



FNSF-ST (PPPL)



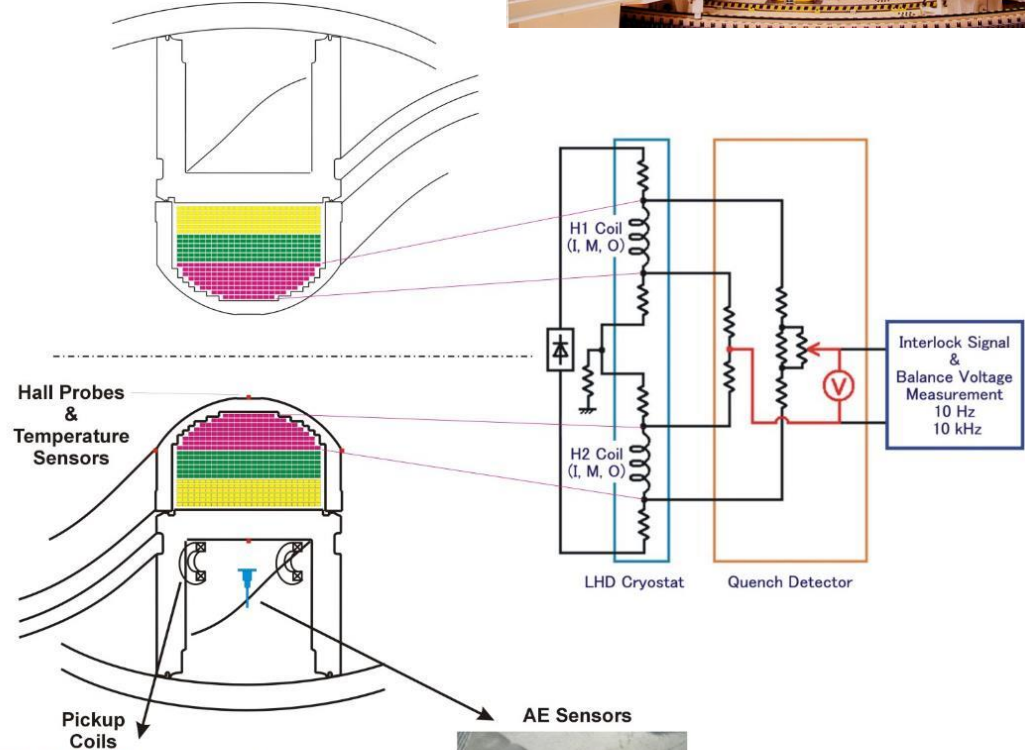
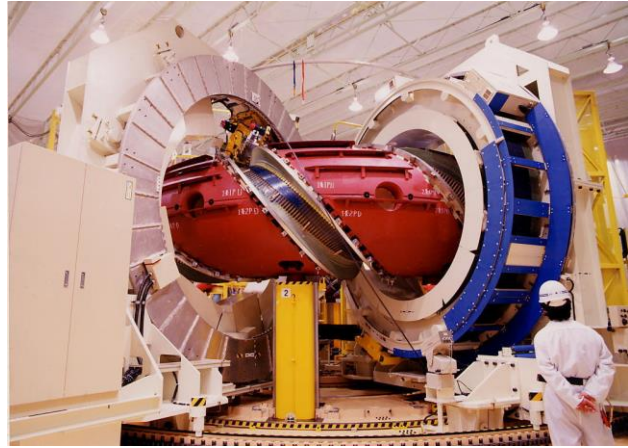
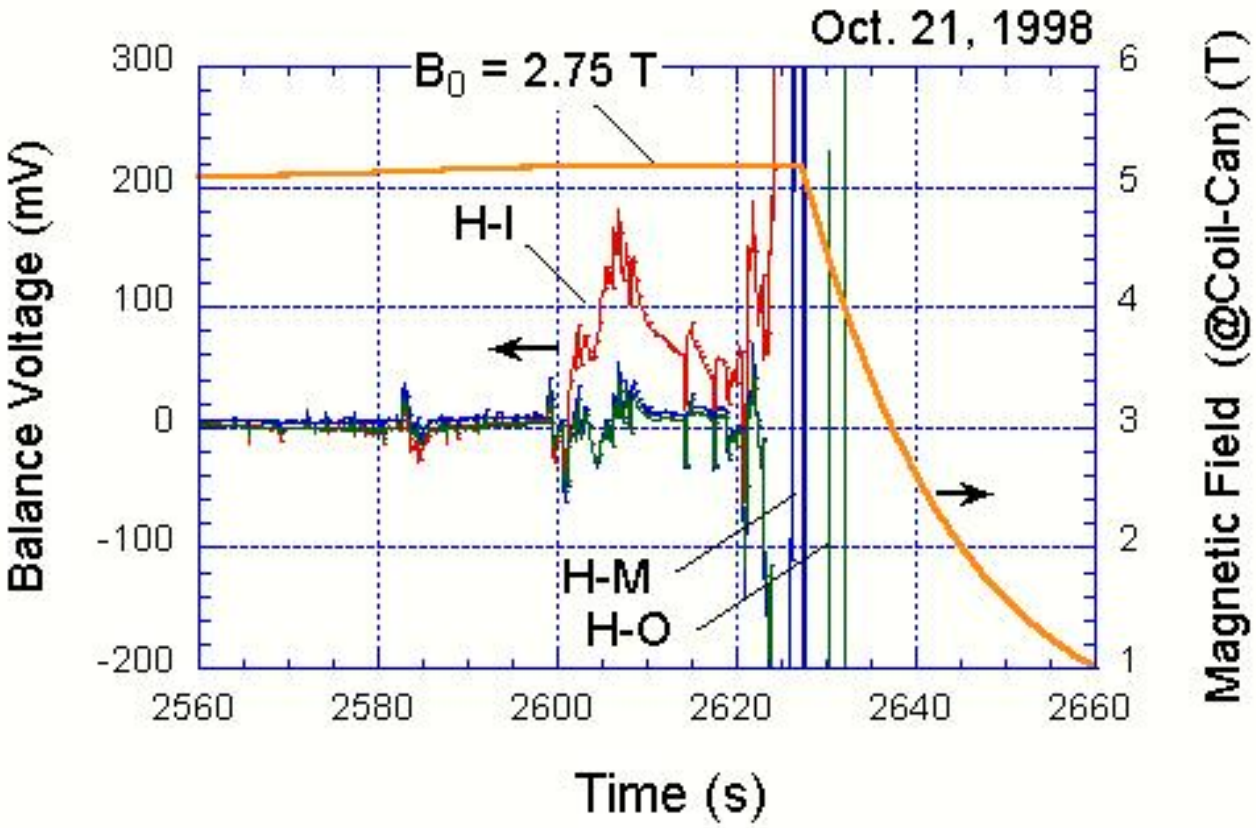
Renaissance Fusion



Quench of LHD Helical Coil

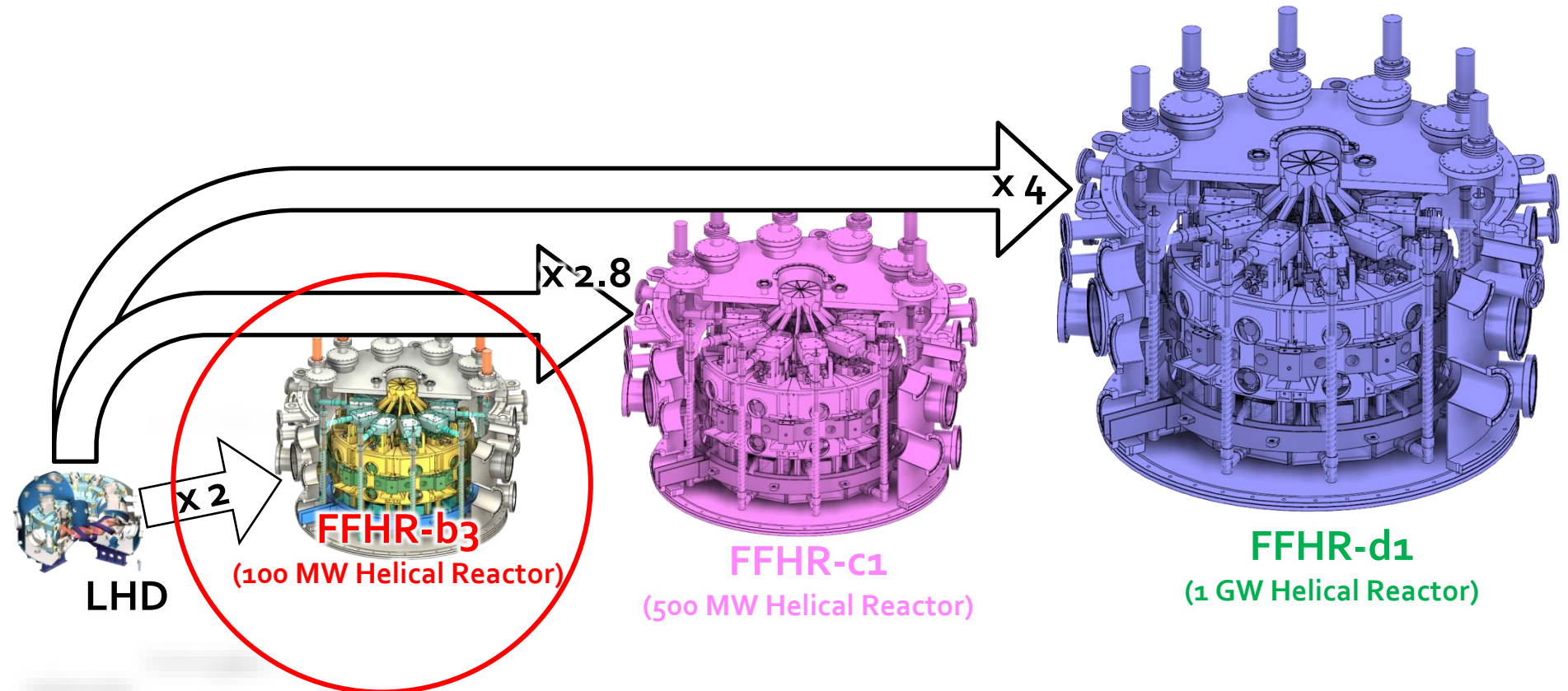
October 21, 1998

Quench Detection
(200 mV, 3 seconds)



N. Yanagi, S. Imagawa, et al.,
IEEE TAS 10 (2000) 610

New Strategy for Early Realization of Helical Reactor



Configuration optimization / Innovation of reactor engineering

→ Early realization of helical reactor with

- Double size of LHD ($R = 7.8$ m)
- 100 MW net electricity production

HTS Magnet

- High-current density
- Low circulation power

Large-current HTS conductors developed for fusion magnets

Twisted and Transposed REBCO Conductors

Roebel (KIT)

Roebel (CERN)

FAIR (NIFS)

TSTC (MIT)

VIPER (CFS/MIT)

RSCCCT (SPC)

Slotted Core (ENEA)

CroCo (KIT)

CSRC (ASIPP)

CORC (ACT)

CORC (CERN)

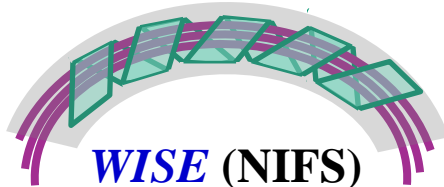
QI (NCEPU)

Labels in the diagrams include: Jacket, wrapping, cooling central channel, tape stack, Al or Cu spacer (or wires), Cu or Al sheath, HTS core, insulation, Arc with Al.

Simply-Stacked REBCO Conductors

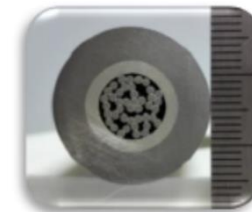


STARS (NIFS)



WISE (NIFS)

Bi-2212 CIC Conductors



Bi-2212 (ASIPP)

次世代核融合炉に向けた高温超伝導の開発

STARS



FAIR



WISE



小型導体試験装置
(-200°C (液体窒素)、
磁場なし)



短尺導体
1 m 試験

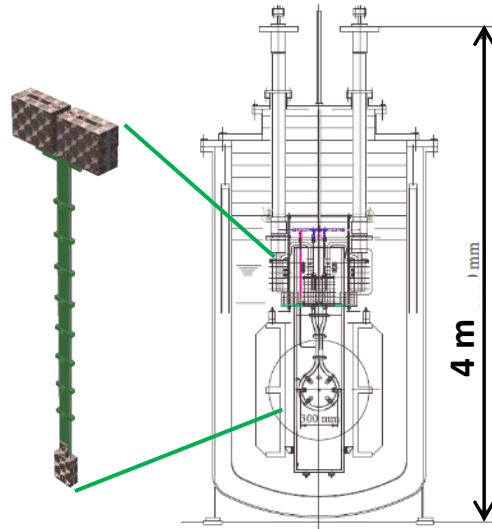


短尺導体 (3 m)
試験



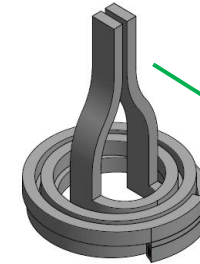
3 m

大型超伝導導体試験装置
(-250°C 、磁場 9 テスラ)

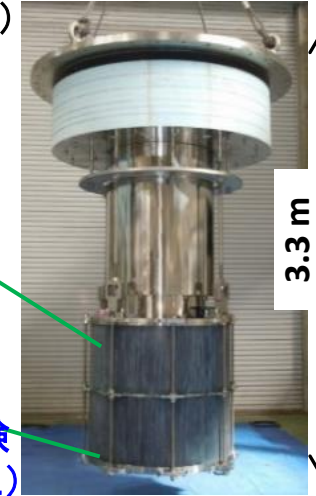


短尺導体 (2~3 m) 試験

大口径高磁場導体試験装置
(-250°C 、磁場 13 テスラ)



短尺導体 (3~10 m) 試験
(電磁力印加 1000 回以上)



高温超伝導を用いた
核融合炉マグネットの
基盤技術の確立!

2019年度

2020年度

2021年度

短尺導体製作 (1 m)

短尺導体製作 (3 m)

短尺導体試験
液体窒素中

短尺導体試験 (液体ヘリウム中)
磁場 9 テスラ 13 テスラ

長尺導体 (> 5 m) 試作、コイル要素製作

大型高温超伝導マグネット
製作技術の構築と実証

大型高温超伝導マグネット設計指針の確立 → 応用超伝導学としての一般化

大電流大型 HTS 導体の最適構造

電流密度 vs. 電流値 $80 \text{ A/mm}^2 @ 20 \text{ kA} \gg 40 \text{ A/mm}^2 @ 13 \text{ kA}$ for LHD
テープ線材の撚り、転位（電流分流、交流損失）→ HTS 導体としての整合性
検査法（遮蔽電流法）

現在は多種多様な導体構成 → 低温 CIC 導体のように1種類に収斂していくのか？

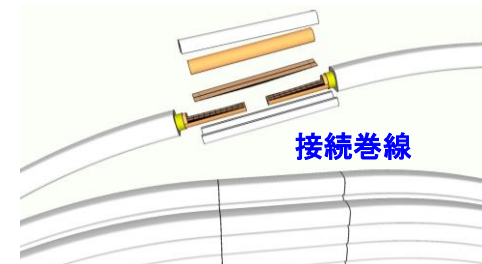


巻線技術（連続巻線、接続巻き線）

接続技術（機械式、半田付け）

クエンチ保護（外部抵抗遮断、内部ダンプ併用、無絶縁）

電磁力支持構造（トポロジー最適化）



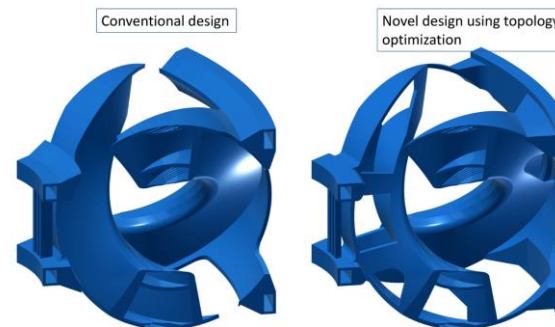
冷却技術：ヘリウムガス冷却、液体水素冷却（直接・間接）

HTS 線材基本特性のさらなる向上（共同研究）

大規模 R&D コイルによる実証試験が必要

（LCT プロジェクト、LHD の R&D コイル群、ITER TF/CS model coils）

→ 小・中規模 R&D コイル、および、数値実験・大規模コイル？



大型高温超伝導
試験コイル
（イメージ）

今後10年以内に、核融合炉に適用可能な大型高温超伝導マグネットの工学設計指針を完成させる

LHD の常伝導運転の検討

● < 80 K 冷却による **0.5 T 運転**

➤ 10秒間フラットトップ、一日に > 30ショットのプラズマ実験

➤ < 50 K 冷却にできれば、

➤ **高温超伝導コイルを付加 (RMP コイル、サブヘリカルコイル、モジュラーコイル)**

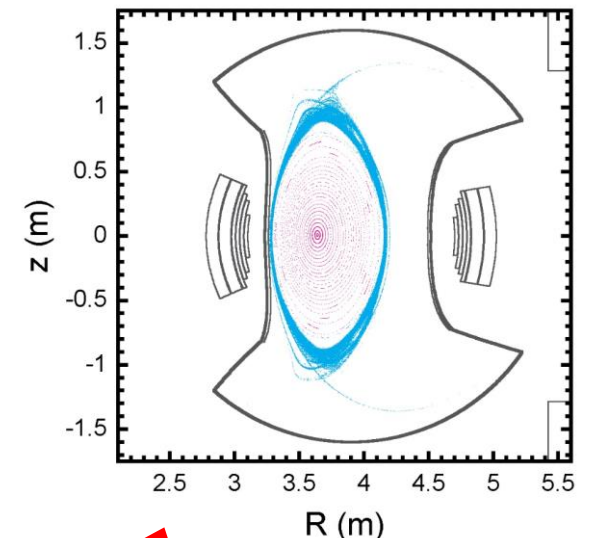
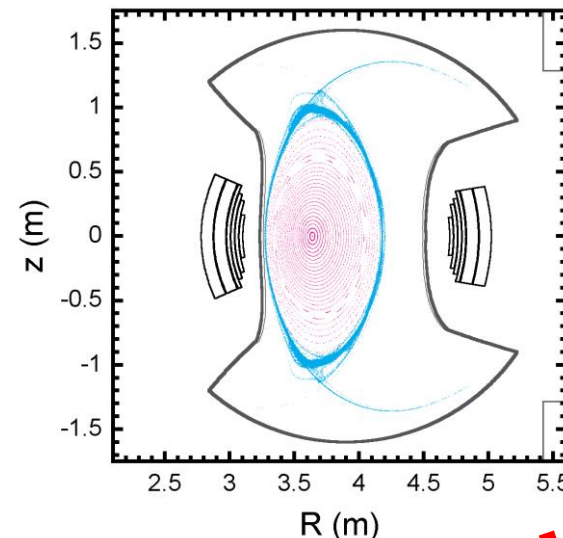
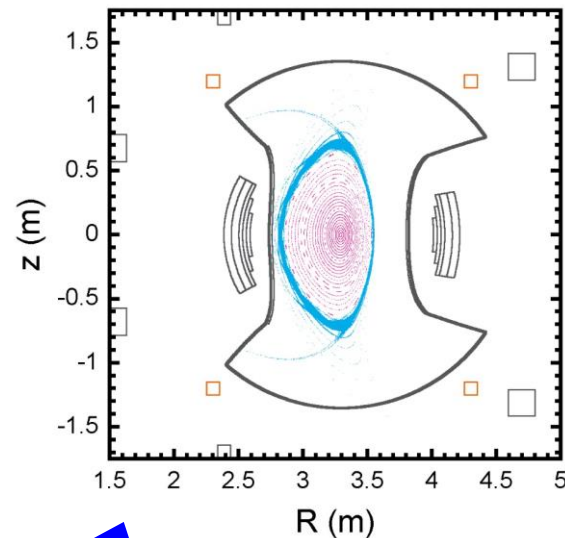
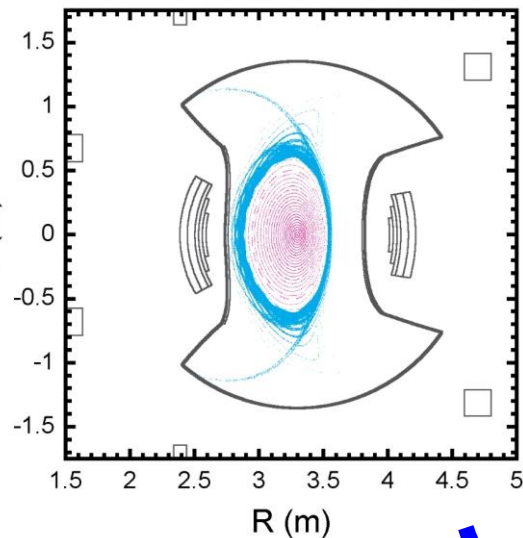
➔ **磁気面調整、磁場配位調整**

(a) $\phi = 0^\circ$

(a) $\phi = 0^\circ$

(a) $\phi = 0^\circ$

(a) $\phi = 0^\circ$



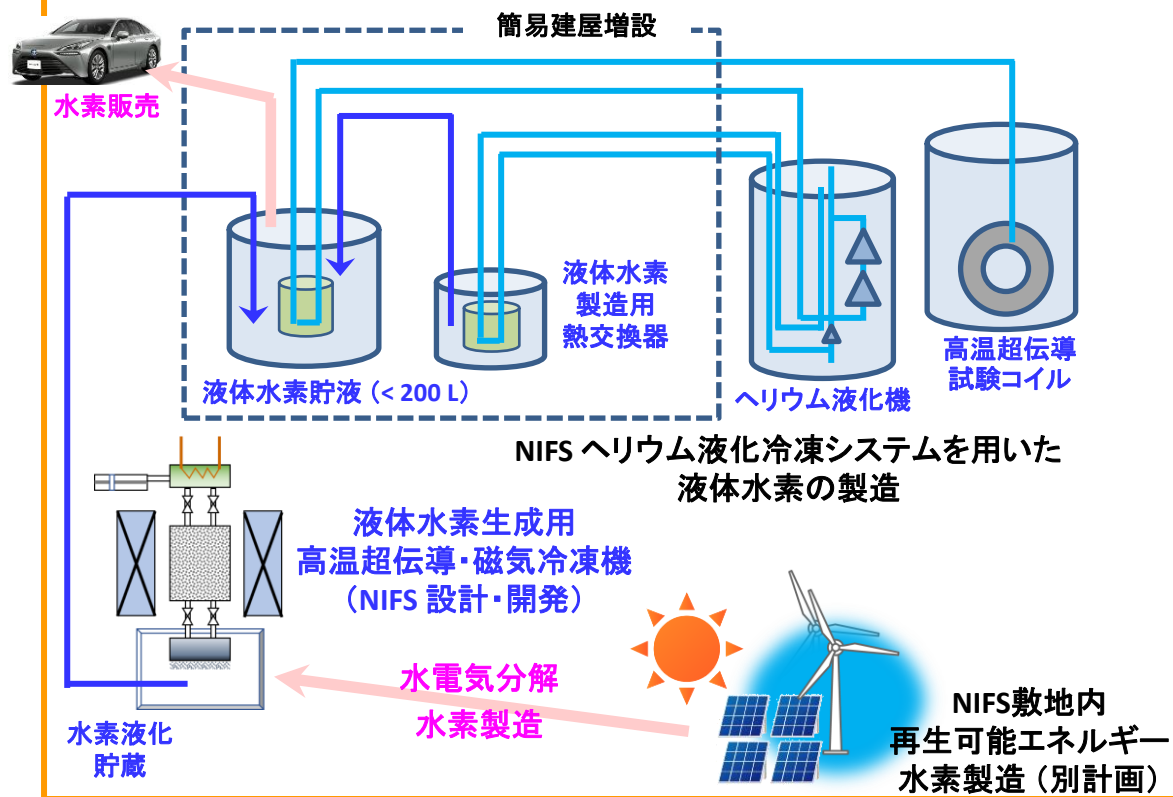
高温超伝導 RMP コイルを用いた磁気面調整の例

RMPコイル ($m = 2, n = 10$) を用いた
磁気軸外側シフト配位におけるエルゴディック層低減

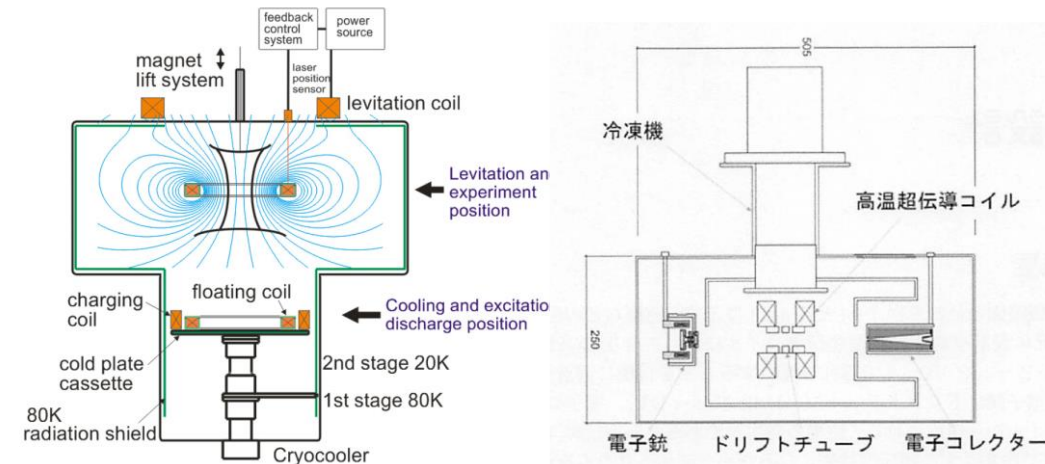
RMP コイル ($m = 4, n = 5$) を用いた
磁気軸内側シフト配位におけるエルゴディック層増大

水素エネルギー社会の実装加速

- 高温超伝導・磁気冷凍機の開発による効率的な水素液化技術
- 再生可能エネルギー安定化のための水素利用技術
- ヘリウム液化冷凍機を用いた大規模水素液化技術



小規模 HTS マグネットの適用支援



電子・陽電子ペアプラズマ閉じ込め

EBIT

かつてない大空間に磁場環境を提供

- NIFS が開発した大電流高温超伝導導体を用いることで、大型・3次元・後付けのマグネット製作が可能
- 例: 周長数百 m の任意形状コイル

→ 新しい産業応用や学術創成

適用対象

- 将来の月面基地、火星基地、惑星間宇宙船の放射線シールド
- 製鉄、燃焼制御への適用
- 水電気分解水素製造の効率向上
- 地磁気キャンセル大規模空間の提供
- 生物に対する磁場影響の調査研究



超伝導コイルによる放射線シールドを装備した宇宙船