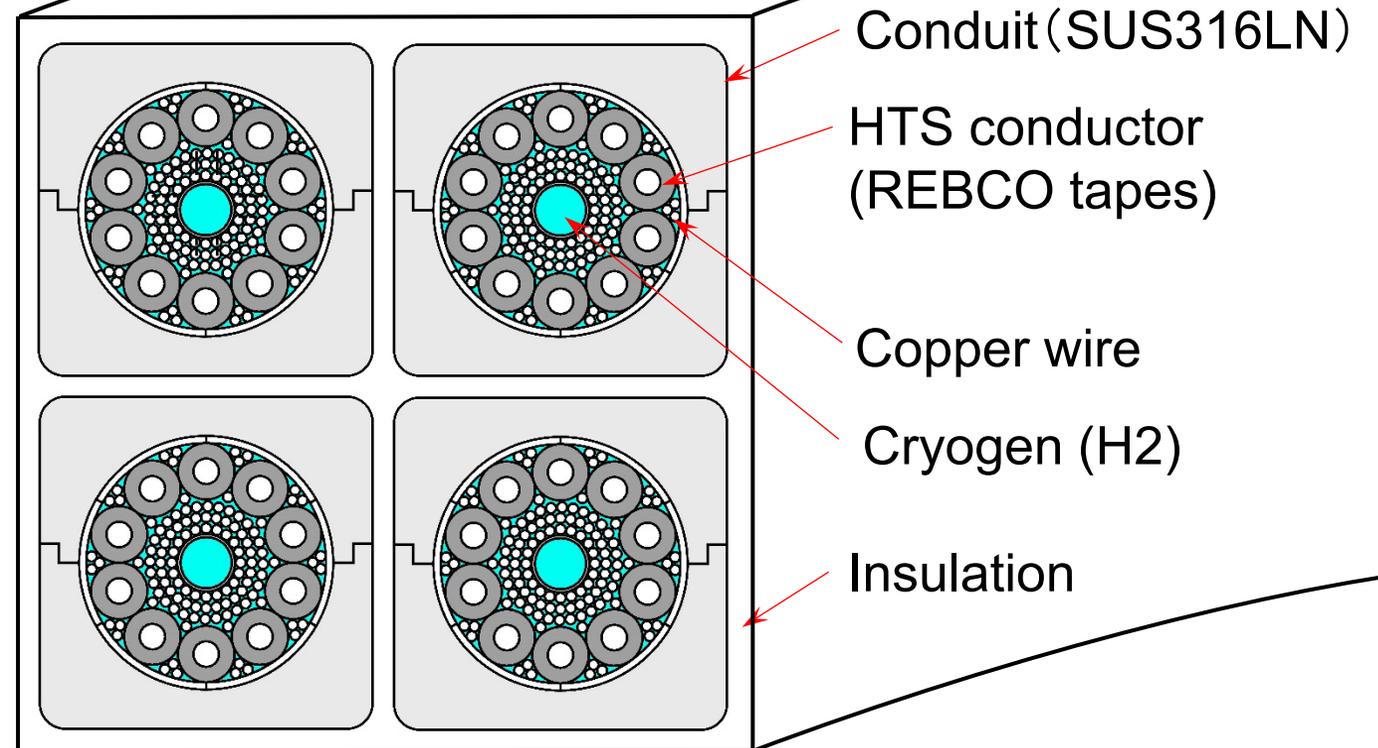


核融合マグネットの水素冷却による 冷却安定化

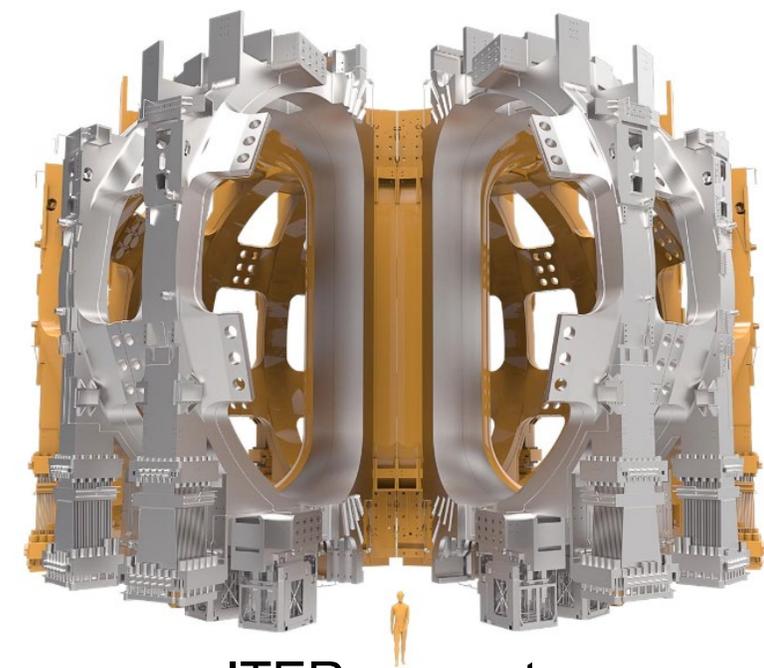
Cryostable Fusion Magnets Cooled with Hydrogen

(NIFS)今川信作, 濱口真司
(大阪大)岩本晃史
(関西学院大)大屋正義
(京都大)白井康之
(JAXA)小林弘明



研究の背景

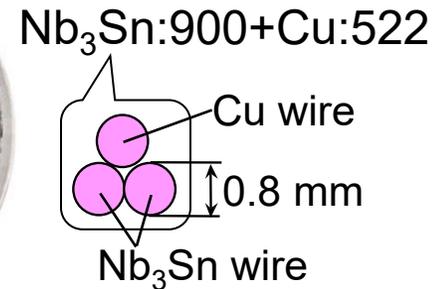
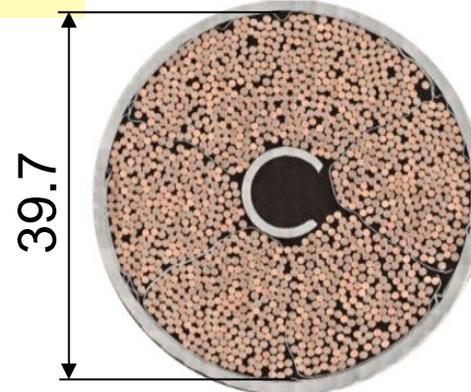
高温超伝導(HTS)マグネットを採用して運転温度を4 Kから20 Kに高めると、冷却に要する電力が1/5以下に低減され、また、ヘリウム代わりに水素を利用できるため資源上の利点も大きい。一方、大型超伝導コイルは、安定な運転が必須で交換は困難であることから、水素(H₂)の優れた冷却能力と20Kにおける銅の低抵抗率を利用し、「冷却安定な」HTSマグネットの設計基準を確立を目指す。



ITER magnets
(<https://www.iter.org/mach/magnets>)

HTSの「冷却安定」とは(提案)

- (1) 局所であれば想定値(例えば I_c が1/2)まで劣化しても熱暴走しない(発熱部が拡大しない)。
- (2) 電圧/温度が検出可能なレベルに上昇するまで熱暴走しない。(定格電流が68 kAの場合、0.1 Vの電圧発生時の発熱は6.8 kW < 核発熱)



I_{op} : 68 kA
 B_{max} : 11.8 T

核発熱: 10.9 kW

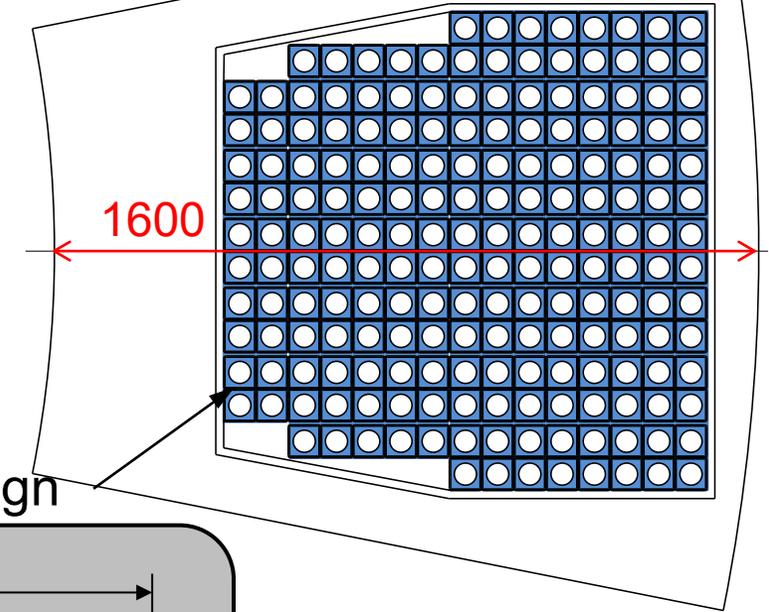
ITER-TF design $j_{Cu} = 133 \text{ A/mm}^2$

大型コイルでは遮断時電圧の制約から遮断時定数が長くなり、温度上昇の抑制のため多くの安定化銅が必要 → 冷却安定な条件成立の可能性

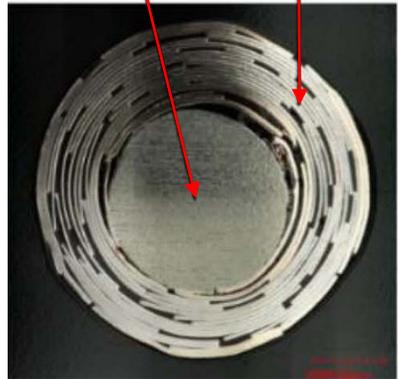
導体概念検討の目的

JA-DEMO TF coil

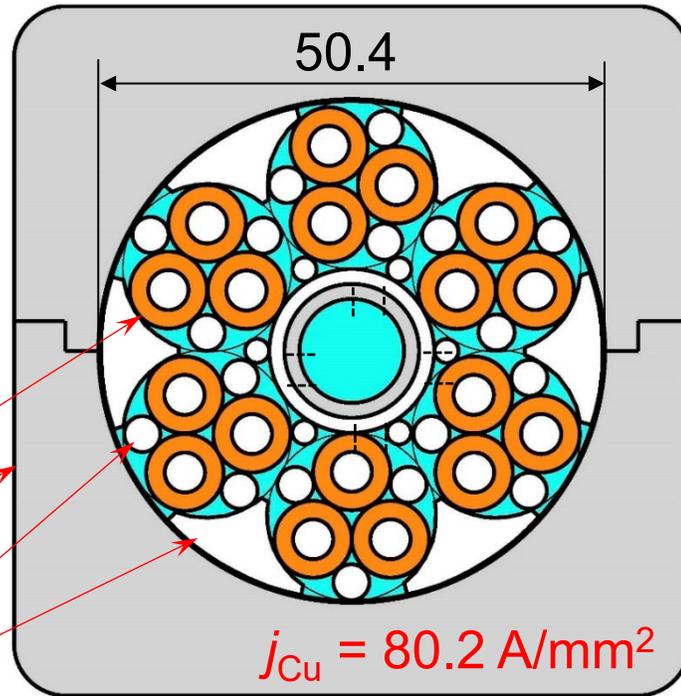
- (1) 強制冷却のTFコイルを想定し, ヘリウムと水素を比較し, 利点と欠点を明らかにする
- (2) 「冷却安定(劣化部の温度 < 分流開始温度 T_{cs})」な水素冷却の核融合マグネットの概念を提案する。



REBCO tape
Core (Cu/Al)



HTS design



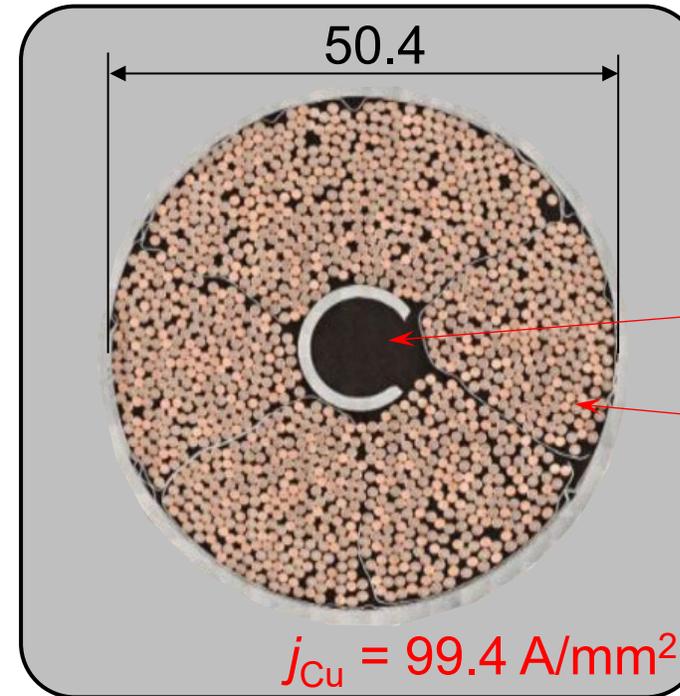
HTS strand [1]

Conduit (SS)

Cu wire ($\phi 3.6$)

Cu strip

DEMO-TF design



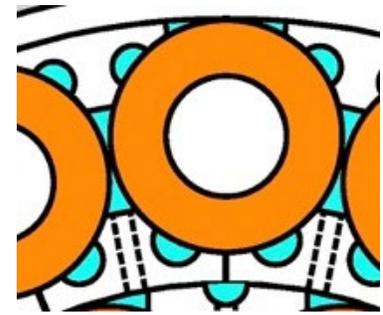
Operation current:
83 kA at 13.9 T

Central channel

Nb₃Sn wires: 1512
+ Cu wires: 906
cooled with SHe at 4.4 K

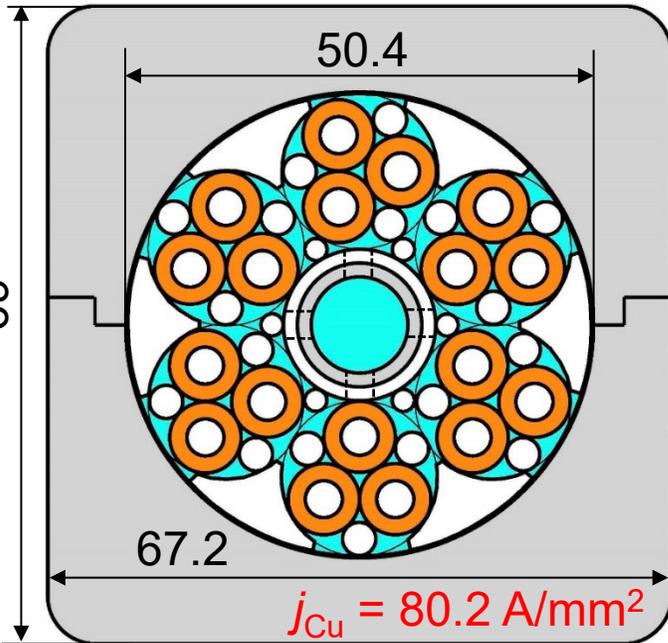
← ITER-TFより低い
(温度上昇の制約)

DEMO-TF(13.9 T, 83 kA)用HTS-CIC

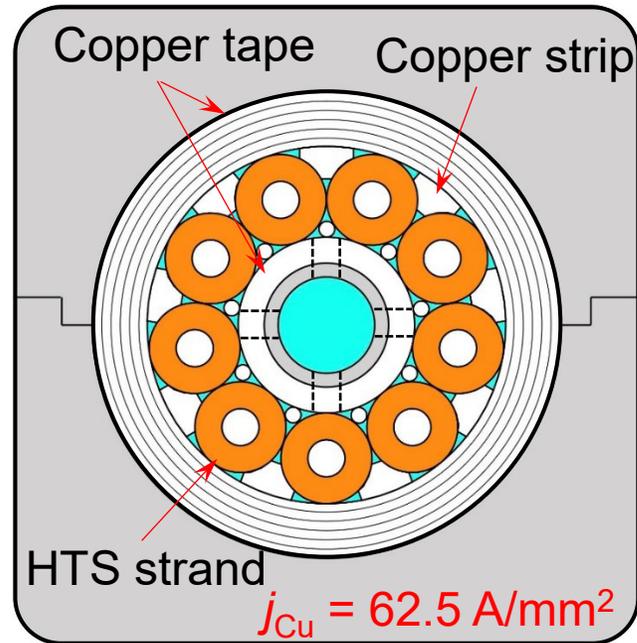


タイプ(A)のバンドル部は、2段撚りのREBCO素線、Cu線、およびCuストリップで構成。タイプ(B)は1層のまま大電流化するためREBCO素線1本あたりの層数を25層に増加。タイプ(C)は、2層のREBCO素線と、素線の濡れ面積を拡大するための溝付きCuストリップを採用。

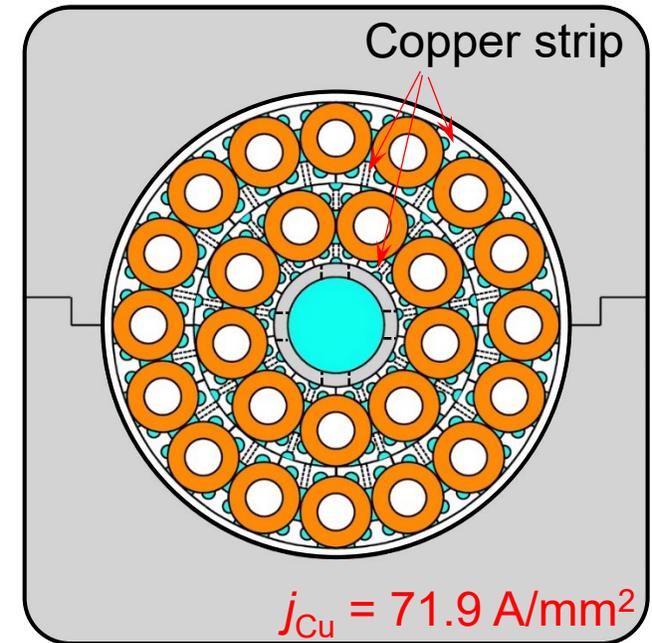
(A) 14 Layers x 18 strands
 (I_C : 108 kA, T_{CS} : 30.3 K)



(B) 25 Layers x 9
 (I_C : 111 kA, T_{CS} : 31.0 K)



(C) 11 Layers x 25
 (I_C : 118 kA, T_{CS} : 33 K)



○ Larger wetted area of HTS
 Better Flexibility

? Mechanical strength?

Lower j_{Cu} for the same conduit
 Better mechanical strength

Smaller wetted area

Larger wetted area of HTS
 Better mechanical strength

Complex manufacturing
 Flexibility?

He冷却とH₂冷却の比較 (HTS-CIC Type (B))

Conductor	Type (B) ($j_{Cu} = 62.5$ A/mm ² , $T_{cs} = 31$ K at 83 kA, 13.9 T)		
Cryogen	H ₂ at 21 K	She at 4.4 K	Gaseous He at 21 K
Heat input (nuclear heat)	10 kW	←	←
Length of a cooling path	800 m	←	←
Inlet / outlet pressure	1.5 / 1.4 MPa	1.0 / 0.9 MPa	1.5 / 1.4 MPa
Inlet / outlet temperature	21.0 / 21.84 K	4.4 / 5.83 K	21.0 / 23.21 K
Mass flow per path	5.18 g/s	8.61 g/s	3.89 g/s
Specific heat	9.45 J/g-K	3.88 J/g-K	5.6 J/g-K
Density	71.0 kg/m ³	143 kg/m ³	32.9 kg/m ³
Viscosity coefficient	12.8 μPa s	4.3 μPa s	3.7 μPa s
Thermal conductivity	0.0998 W/m-K	0.0245 W/m-K	0.0262 W/m-K
Heat transfer coe. at bundle section	870 W/m ² -K	378 W/m ² -K	329 W/m ² -K
Conductor temp. at $I_{Cu}/I = 1.0$ (*1)	31.7 K ~ T_{cs}	27.8 K < T_{cs}	Thermal runaway

(*1) All strands and Cu wires are assumed at the same temperature.

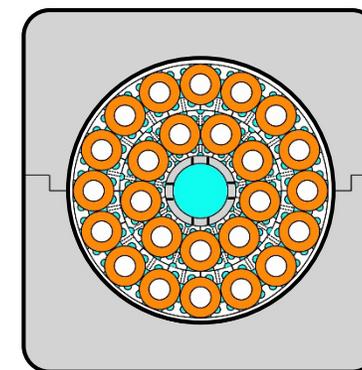
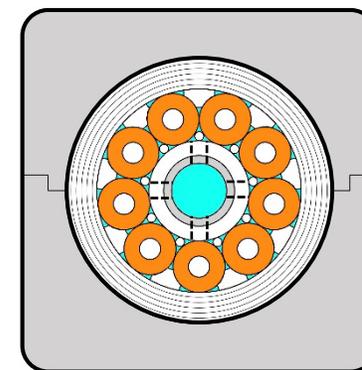
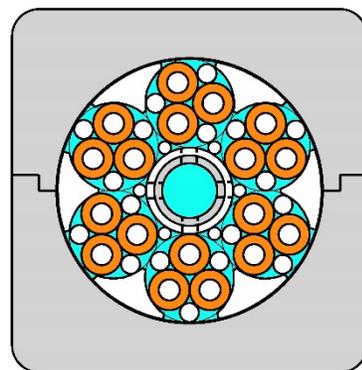
↪ $I_{sc}=0$ でも「 T_{cs} 以下」を満足

- ◆ 21 Kの超臨界圧H₂と4.4 Kの超臨界圧Heは、共に優れた冷媒であり、「冷却安定な」設計が可能。21 KのHeは密度が低いため不適。
- ◆ H₂の熱伝導率はHeの4倍であるため、21 KのH₂の熱伝達係数は4 KのHeの2倍以上。

Type (A), (B), (C)の比較

Conductor	Type (A) (14Lx18)	Type (B) (25Lx9)	Type (C) (11Lx25)
Critical current at 13.9 T	108 kA	111 kA	118 kA
Current sharing temperature, T_{cs} at 83 kA	30.3 K	31.0 K	32.7 K
Copper current density, j_{Cu}	80.2 A/mm ²	62.5 A/mm ²	71.9 A/mm ²
Perimeter of bundle section	1025 mm	648 mm	1055 mm
Heat input / Length of a cooling path	10 kW / 800 m	←	←
Inlet / outlet pressure	1.5 / 1.4 MPa	←	←
Inlet / outlet temperature	21.0 / 21.50 K	21.0 / 21.84 K	21.0 / 21.76 K
Mass flow per path	8.73 g/s	5.18 g/s	5.76 g/s
Heat transfer coe. at bundle section	756 W/m ² -K	870 W/m ² -K	815 W/m ² -K
Conductor temperature at $I_{Cu}/I = 1.0$	30.7 K (> T_{cs})	31.7 K (> T_{cs})	28.9 K (< T_{cs})
Conductor temperature at $I_{Cu}/I = 0.9$	29.7 K	30.5 K	28.1 K

- ◆ Type (C) が最も「冷却安定」
- ◆ Type (B) は構成がシンプルだが、濡れ面積が狭く、また、REBCO素線あたりの電流値が高いため、冷却は不利。



導体概念設計のまとめ

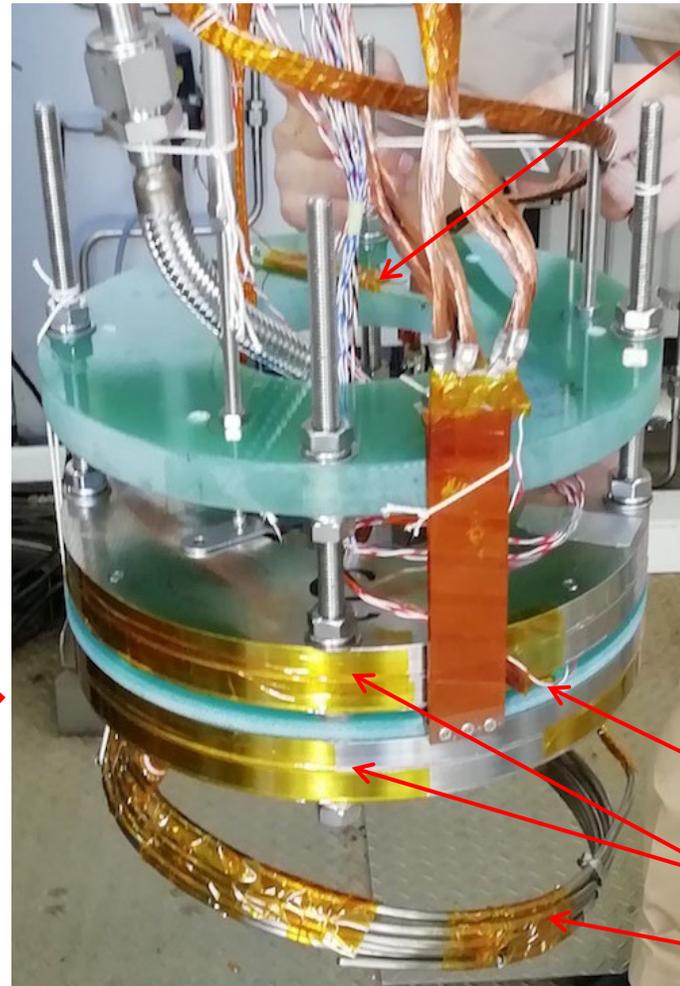
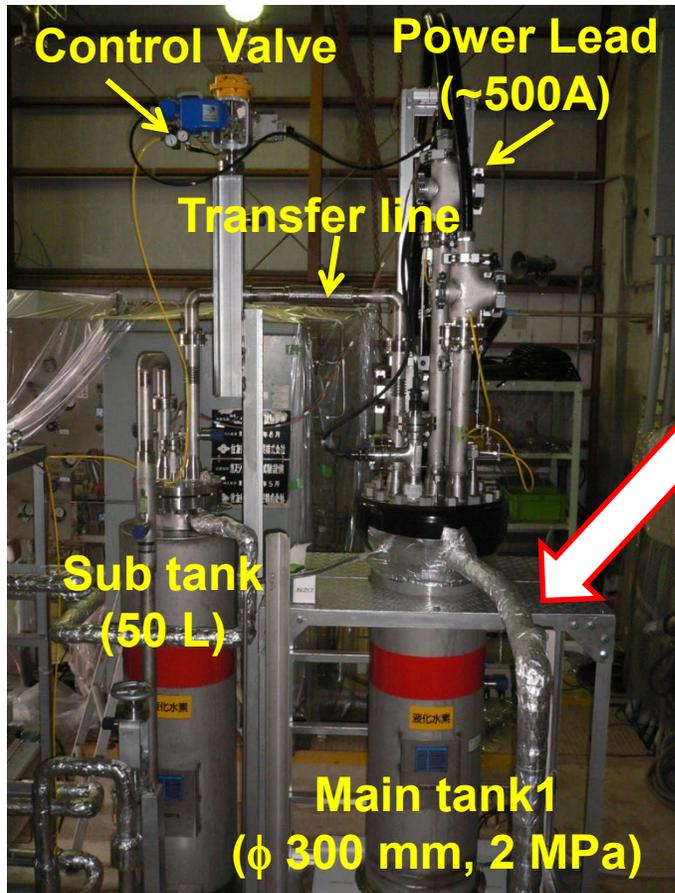
- ◆ 21 Kの超臨界圧H₂でも4.4 K超臨界圧Heでも, Nb₃Sn-CIC導体と同じケーブルサイズであれば, 全電流が安定化銅に流れる場合でも「**劣化部導体温度 < 分流開始温度**」を満足することが期待できる。
- ◆ 圧力損失0.1 MPaの条件で, 21 K, 1.5 MPaのH₂は, 4.4 K, 1.0 MPaのHeと比べて**熱伝達係数が2倍**であり, 冷却安定な導体設計に適している。
- ◆ HTS-CIC導体は, 濡れ面積が広い方が冷却安定性が高くなるが, 電磁力に対する**強度が重要課題**である。→ 実使用条件の導体試験が必要である。

より高性能・低コスト化のためには, 劣化部のHTSが分担できる電流値を明らかにすることが必要

- (1) 劣化したHTSケーブルの熱暴走メカニズムを明らかにする
- (2) HTS集合導体の性能低下を予測あるいは管理可能とする

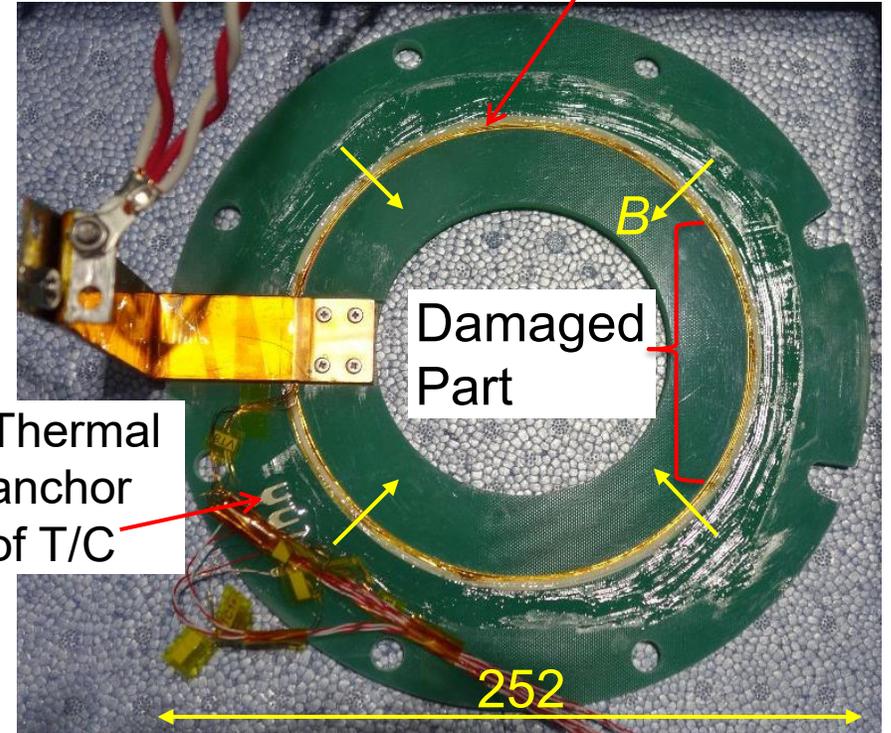
液体水素中の熱暴走実験

液水実験には、JAXA能代
ロケット実験場の試験設備
を利用



Cernox sensor

REBCO coil



Testing coil (REBCO 3 turn coil)

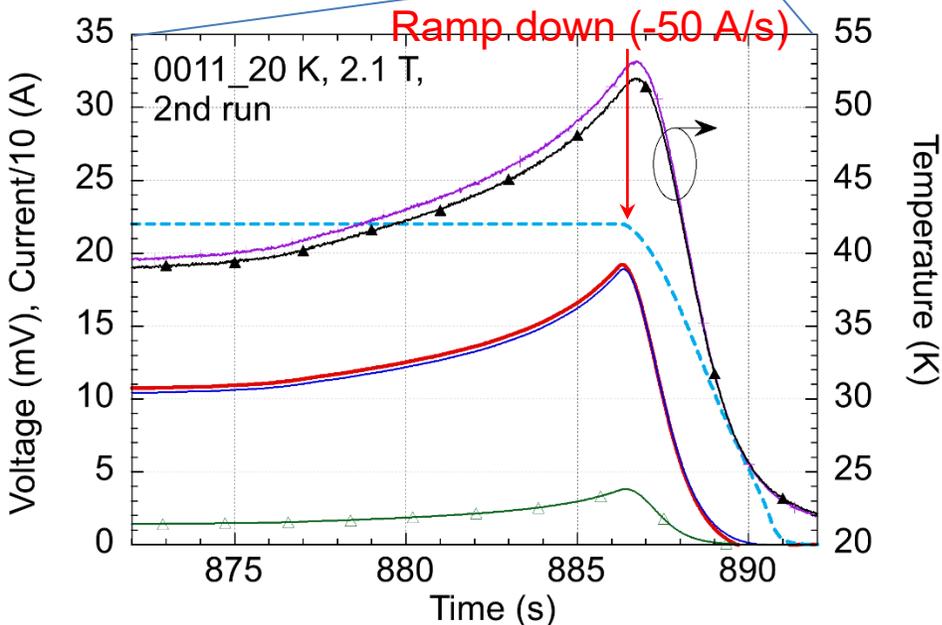
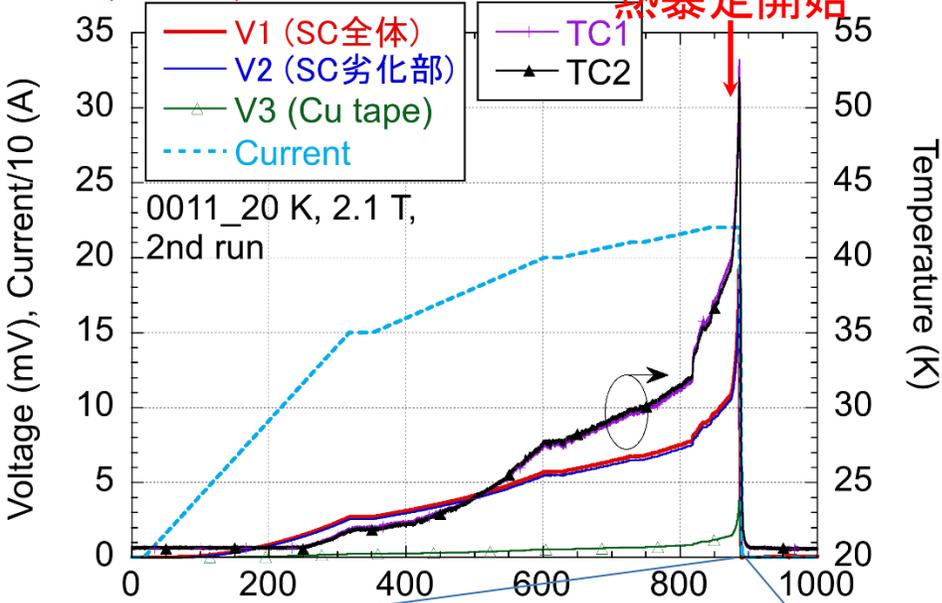
External field coils (cusp field)

Heater

これまでに(2023-2024年)3種類の3ターンコイル試験体(REBCO線のみ・カプ
トン絶縁あり, REBCO線と銅テープを共巻・カプトン絶縁ありとなし)に液体水素中
で最大400 Aまで通電して熱暴走挙動を調べた。

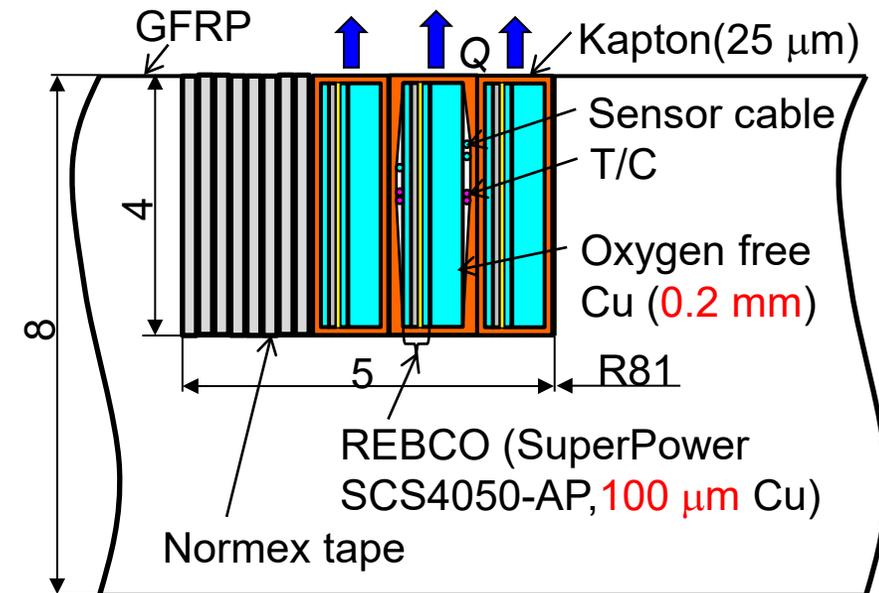
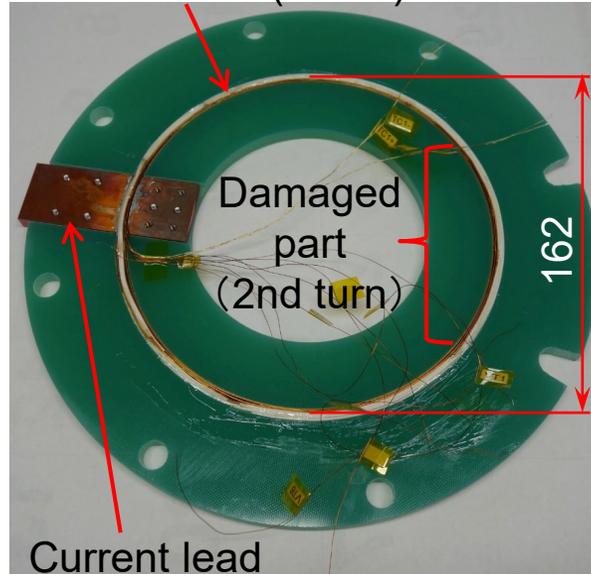
液体水素中の熱暴走実験の概要

LH2, 20 K, 2.1 T



- ◆ 冷却面にカプトン絶縁ありの場合，温度上昇により，限界熱流束の1/2程度で熱暴走 → **直接冷却が有効**
- ◆ 曲げ加工により臨界電流 I_c を1/15以下に低下させると n 値 ($E = E_0(I/I_c)^n$)が**3-6に低下**し，低下した I_c の10倍程度まで熱暴走しない。
- ◆ REBCO線に共巻した銅テープは，**接触抵抗が高い**と熱暴走開始電流の向上にあまり効果がない。

REBCO coil (3 turn)



HTSマグネットの冷却安定化研究のまとめ

- ◆ Nb₃Sn-CIC導体と同程度の電流密度であれば、局所であれば**大幅な性能低下を許容**できる設計が可能と期待できる。
- ◆ 冷却安定性を高めるためには、線材の直接冷却が必須である。超臨界圧H₂冷却の**強制冷却**が第一候補であるが、液体水素の大きな潜熱を利用する**浸漬冷却**方式も検討の余地がある。

<今後の課題>

- ◆ 合理的な導体設計のためには、HTS集合導体の劣化を予測・管理する技術が必要である。臨界電流 I_c の劣化が n 値の低下を伴うのであれば、電圧発生が緩やかになり、熱暴走が生じ難くなる。 → **体系的な研究が必要**
- ◆ 集合導体では線材間の転流や安定化材への分流が冷却安定性に影響する。また、電磁力と熱ひずみによるHTS線材の性能低下が重要課題である。 → **実規模の導体試験が必須**