

核融合研究作業部会, 2012年7月31日

超伝導コイル新線材開発

今川信作

核融合科学研究所

1. ITERと原型炉のマグネットの比較
2. 原型炉に向けた超伝導コイル開発
Nb₃Al, Nb₃Sn, 高温超伝導
3. まとめ

核融合用超伝導マグネットの開発の歴史

TRIAM-1M(日本)(1986)

中心磁場8 T, [Nb₃Snコイル](#)

LCT (Large Coil Task) (1987)

国際協力により5個のNbTiコイルと1つの[Nb₃Snコイル](#)で, 最大磁場9.2 Tと蓄積エネルギー0.94 GJを達成

Tore-Supra(フランス)(1988)

[超流動ヘリウム](#)冷却, NbTiコイルで最大磁場9 T, 中心磁場 4.5 T

LHD(日本)(1998)

NbTiヘリカルコイル, NbTiの30 kA級[CIC導体](#)をポロイダルコイルで実用化, 初の[現地巻線](#), 中心磁場 3 T, 蓄積エネルギー 0.9 GJ

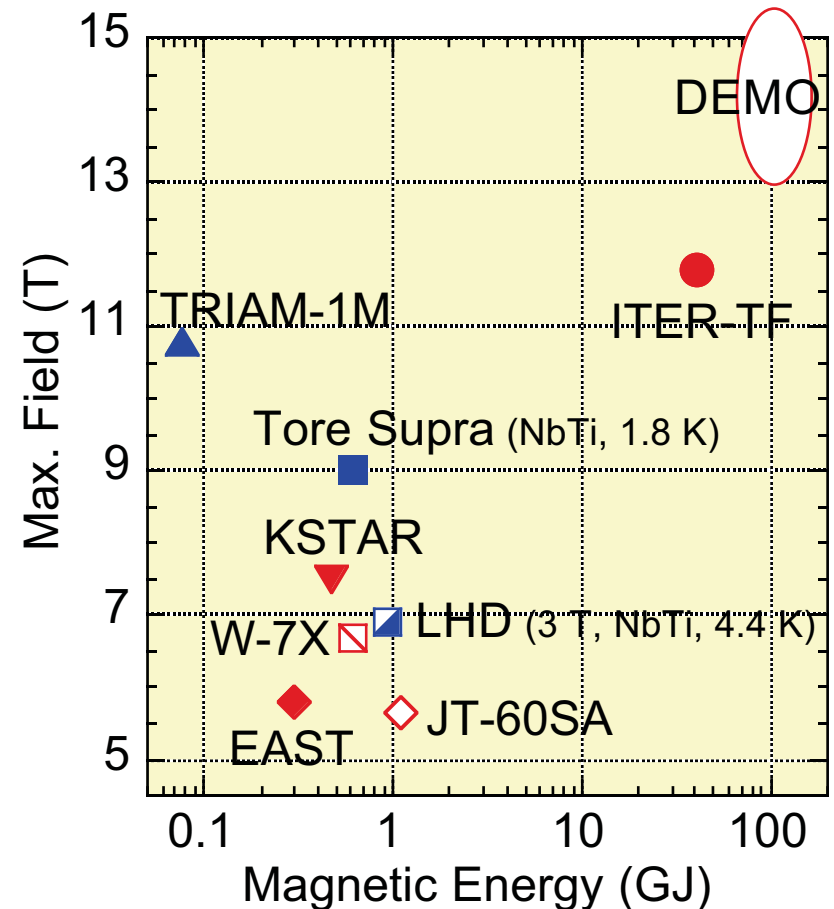
EAST(中国)(2006)

TFコイルもPFコイルもNbTiの[CIC導体](#)

KSTAR(韓国)(2008)

TFコイルとCSコイルは[Nb₃SnのCIC導体](#), PFコイルはNbTiの[CIC導体](#)

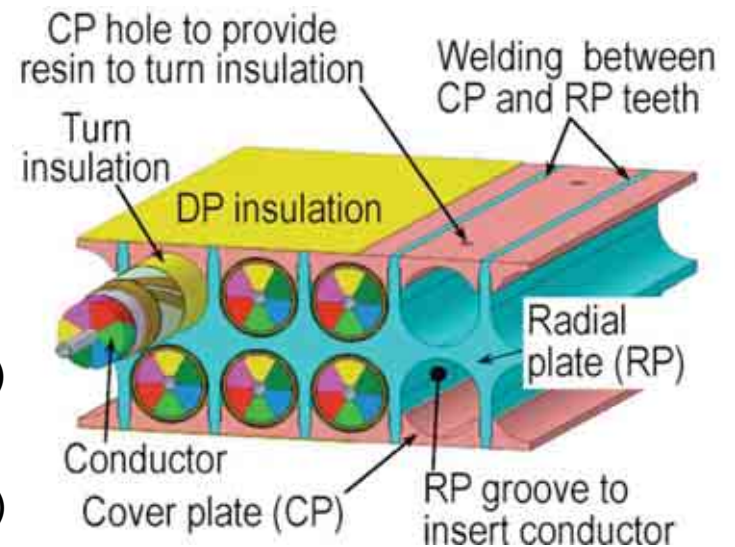
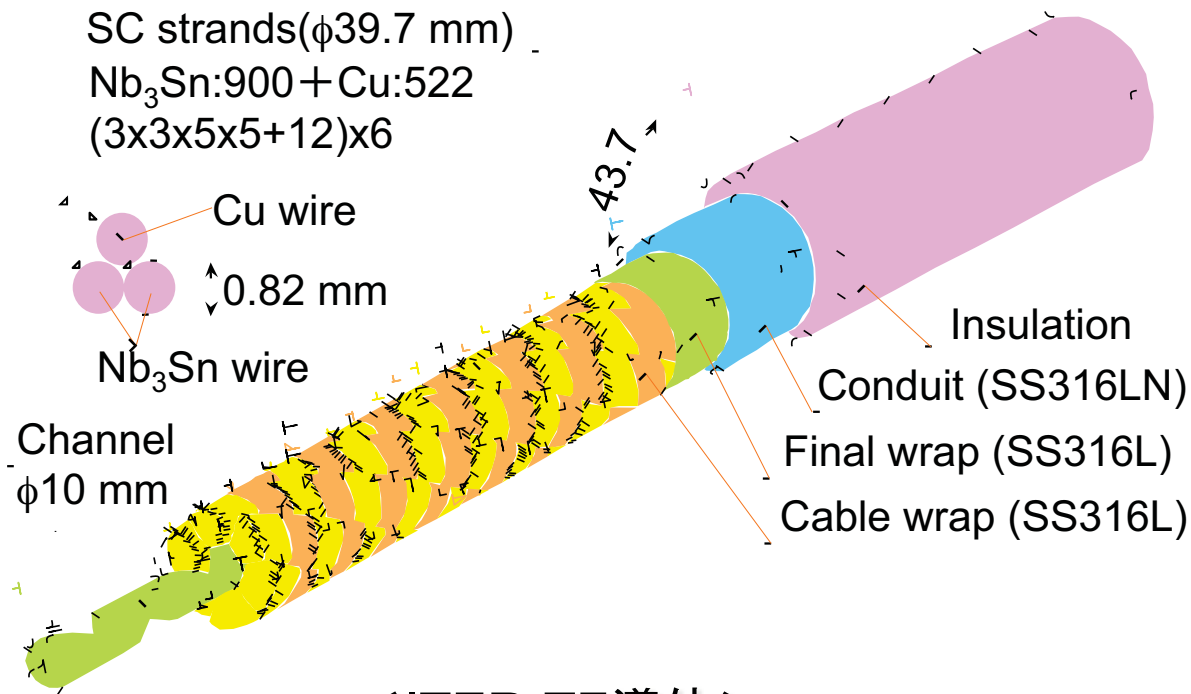
構造物重量 × 応力 ∝ 蓄積エネルギー



W-7X(ドイツ), JT-60SA(日本), ITERが建設中。全てCIC導体

CIC(Cable in Conduit)導体

- ・核融合装置用に開発された，大電流導体に適した撚り線構造
- ・交流損失が少なく，濡れ面積が広いため冷却安定性が高い。
- ・高強度コンジットに収納されており，機械強度も高い。
- ・コンジットとの熱収縮差による残留ひずみが J_c (臨界電流密度)を低下
- ・素線同士の交差部で局所的に曲げ応力が生じて J_c を低下

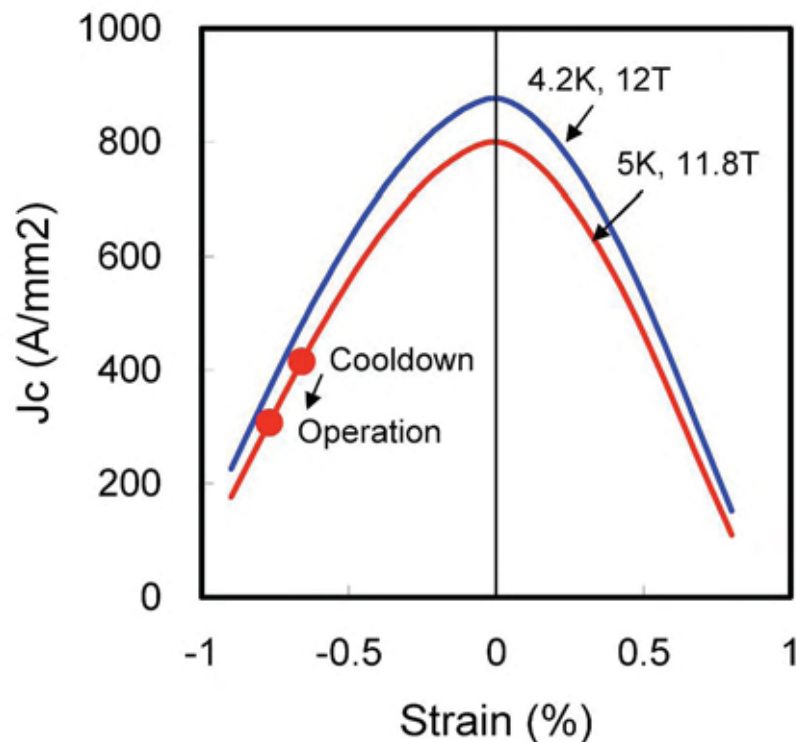


<ラジアルプレート>
絶縁物の応力低減のため，
ITERで初めて採用

CIC導体の J_c 低下要因

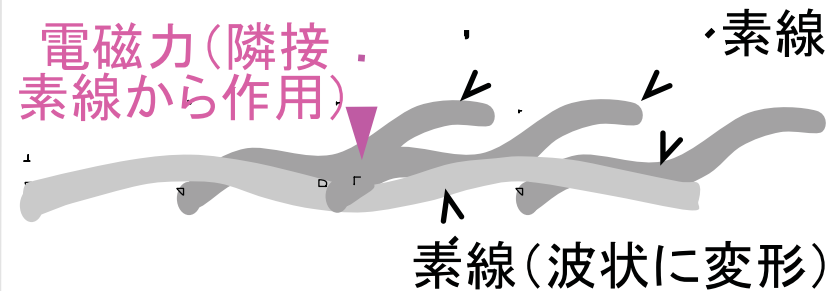
ITER TFコイルの場合

- 超伝導素線 (Nb_3Sn) の歪
 - 4Kへの冷凍後: 0.66%
 - 通電状態: 0.77%
- ピーク値の約4割の臨界電流値



Nb_3Sn CIC導体の性能劣化原因

撚線 (約1,000本の素線で構成)

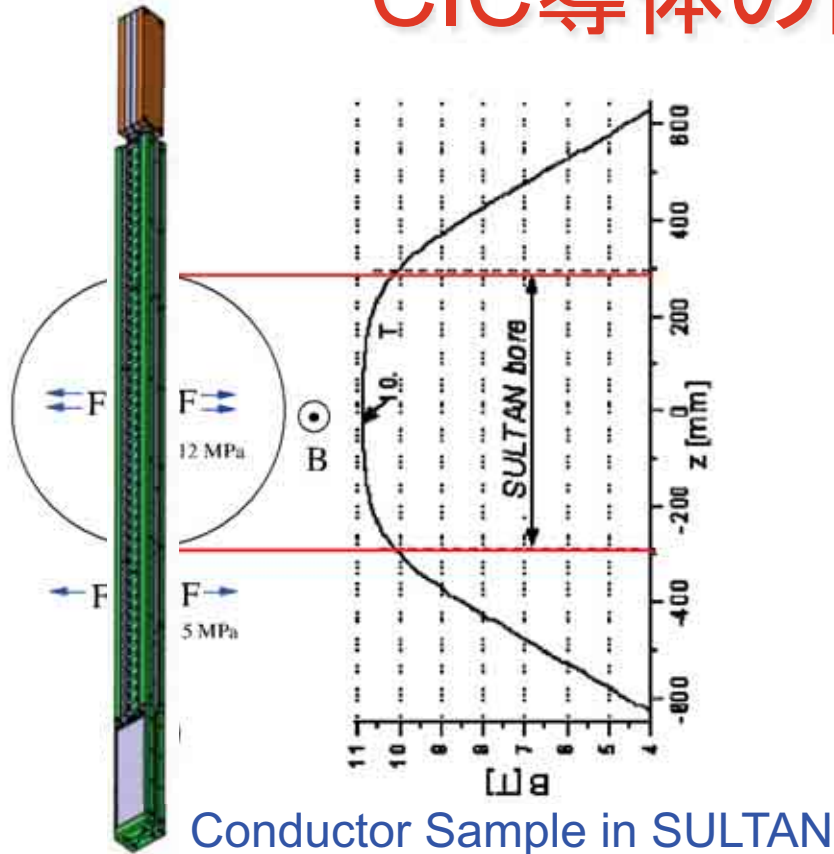


- ◆ 電磁力が加わると、隣接する素線との接触点を支点として、素線が波状に曲げ変形。

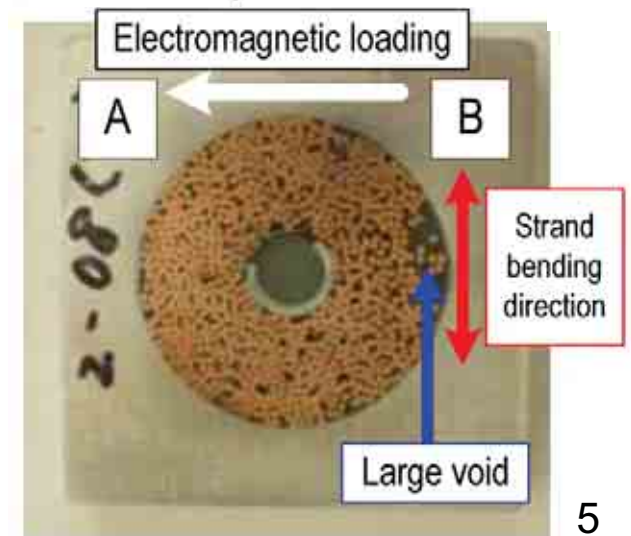
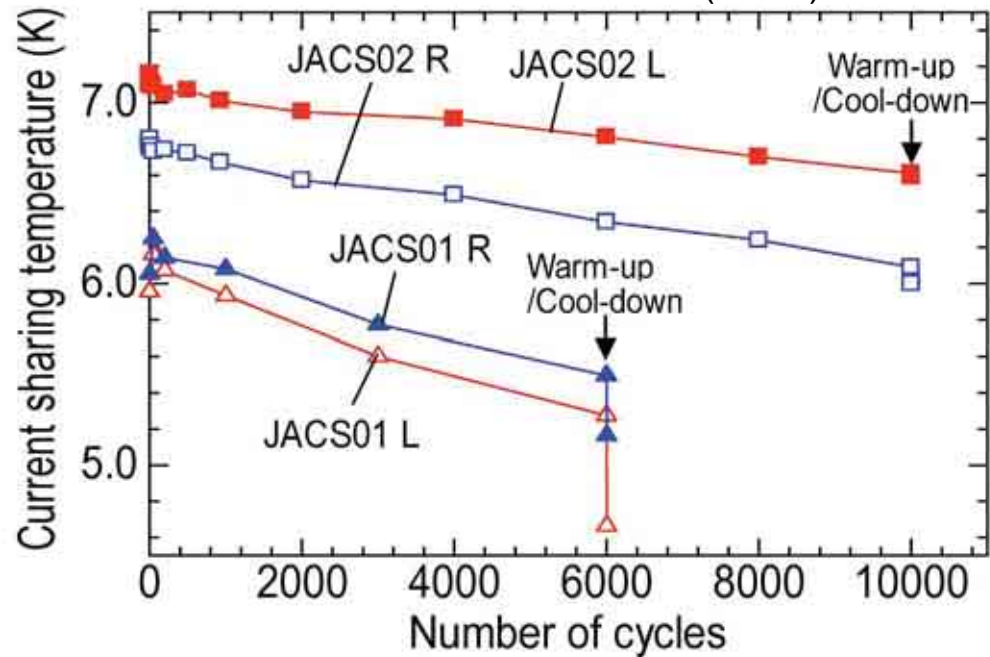


- ◆ 臨界電流性能の劣化。

CIC導体の高磁場化の課題



T. Henmi (JAEA) at MT22



- ◆ SULTAN装置での導体試験では繰り返し励磁による j_c 低下が観測されており, 銅比, 撚りピッチ, ボイド率の変更, 素線 j_c の向上などの対策が進行中
- ◆ 直状サンプル特有の問題の可能性が高く, CSインサートコイルを用いたコイル試験が計画されている
- ◆ 高磁場化では素線の電磁力対策が重要

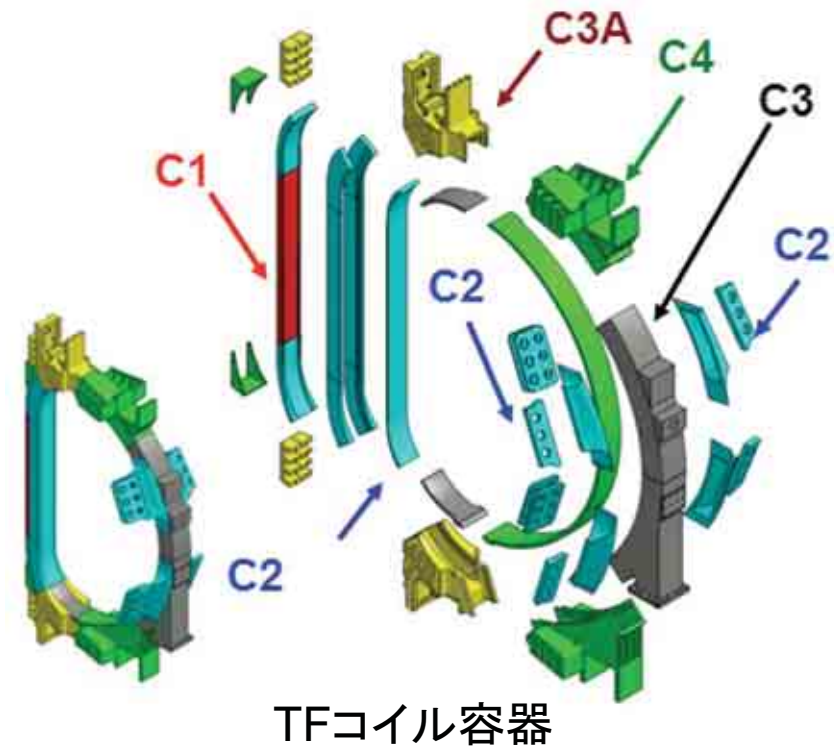
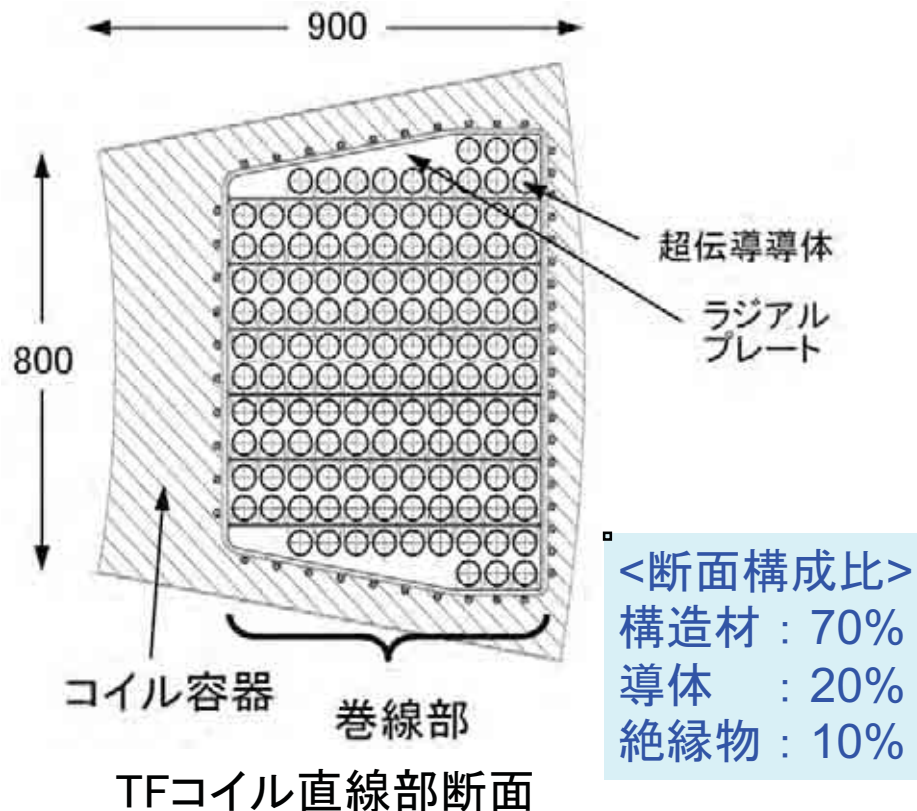
高磁場化の課題：構造材料

- ◆ ITER-TFの最大膜応力：~600 MPa
- ◆ ITER-TFコイル重量の90%は構造材
- ◆ 高磁場・大型化には構造材厚さ・強度の増大が必要。導体や絶縁材の高強度化も必要。

Class	4K耐力	Material
C1	>1000MPa	JJ1
C2	>850MPa	316LNH (C+N \geq 0.18%)
C3	>650MPa	316LNM (C+N \geq 0.13%)
C3A	& >290MPa at RT	316LNH (C+N \geq 0.18%)
C4	>550MPa	316LN (C+N \geq 0.08%)

JJ1: 0.03C-12Cr-12Ni-10Mn-5Mo-0.24N

316LN: 0.03C-18Cr-11Ni-1.5Mn-2Mo-(0.12-0.22)N



原型炉用導体に求められる特性

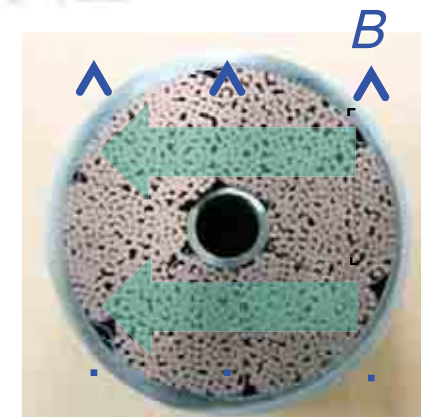
＜原型炉用導体の目標仕様（[]はITER-TF）＞

導体経験磁場：**13-16 T** [11.8 T], 電流値：**~100 kA** [68 kA]

100 kA@16 Tの場合は導体電磁力がITER-TFの **2.0倍**

＜求められる特性＞

- ・高磁場における高い J_c → 高磁場特性
- ・電磁力による J_c 低下が少ない → 耐ひずみ特性, 高剛性導体
- ・大電流導体(100 kAクラス) → CIC導体, 積層HTS導体(?)
- ・高い冷却安定性 → CIC導体, HTS導体
- ・ Nb_3Sn と同等の耐放射線性と放射化 → HTSではAgの低減
- ・長尺線材(kmクラス), 低コスト, 量産性

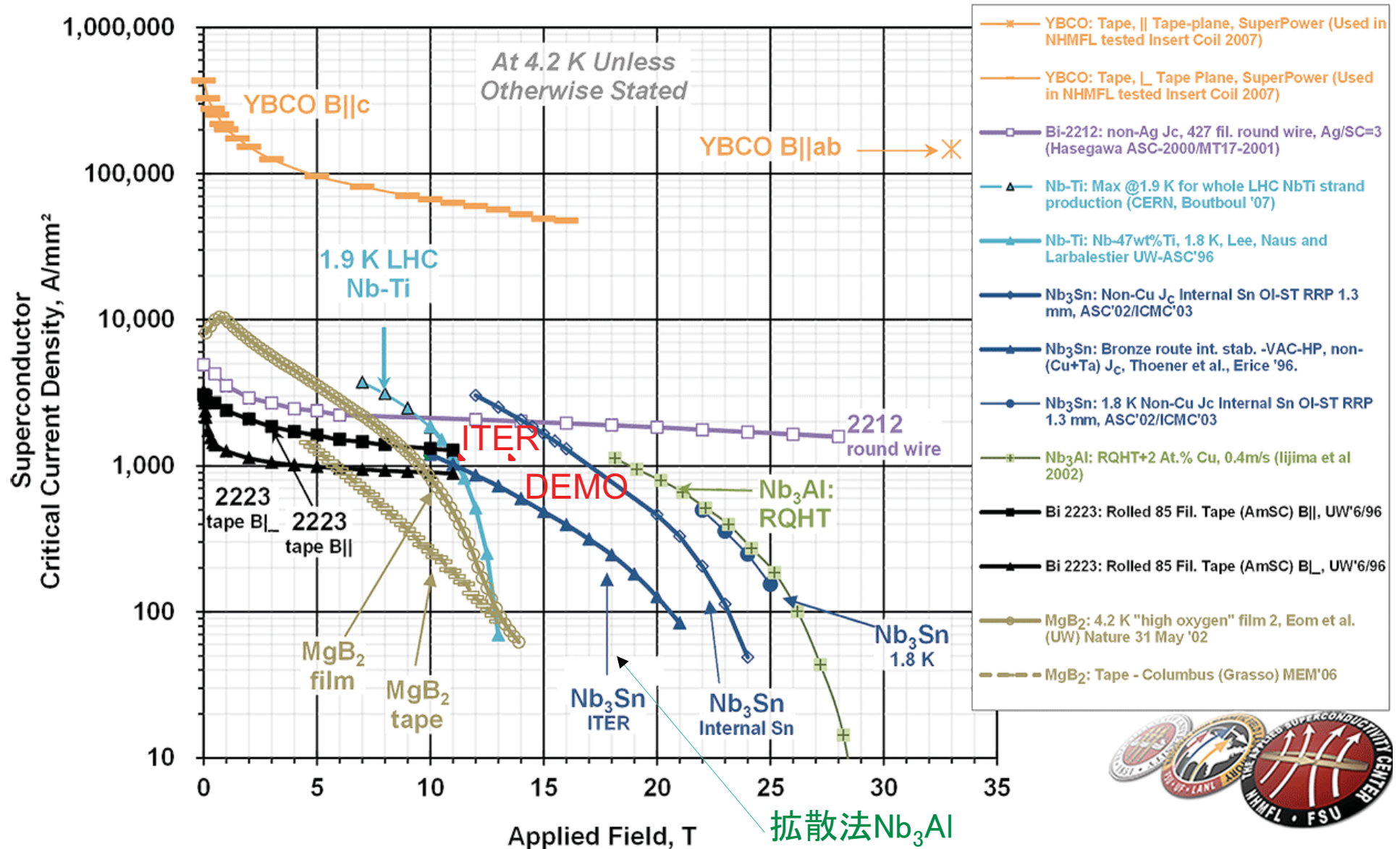


$$f = I \times B$$

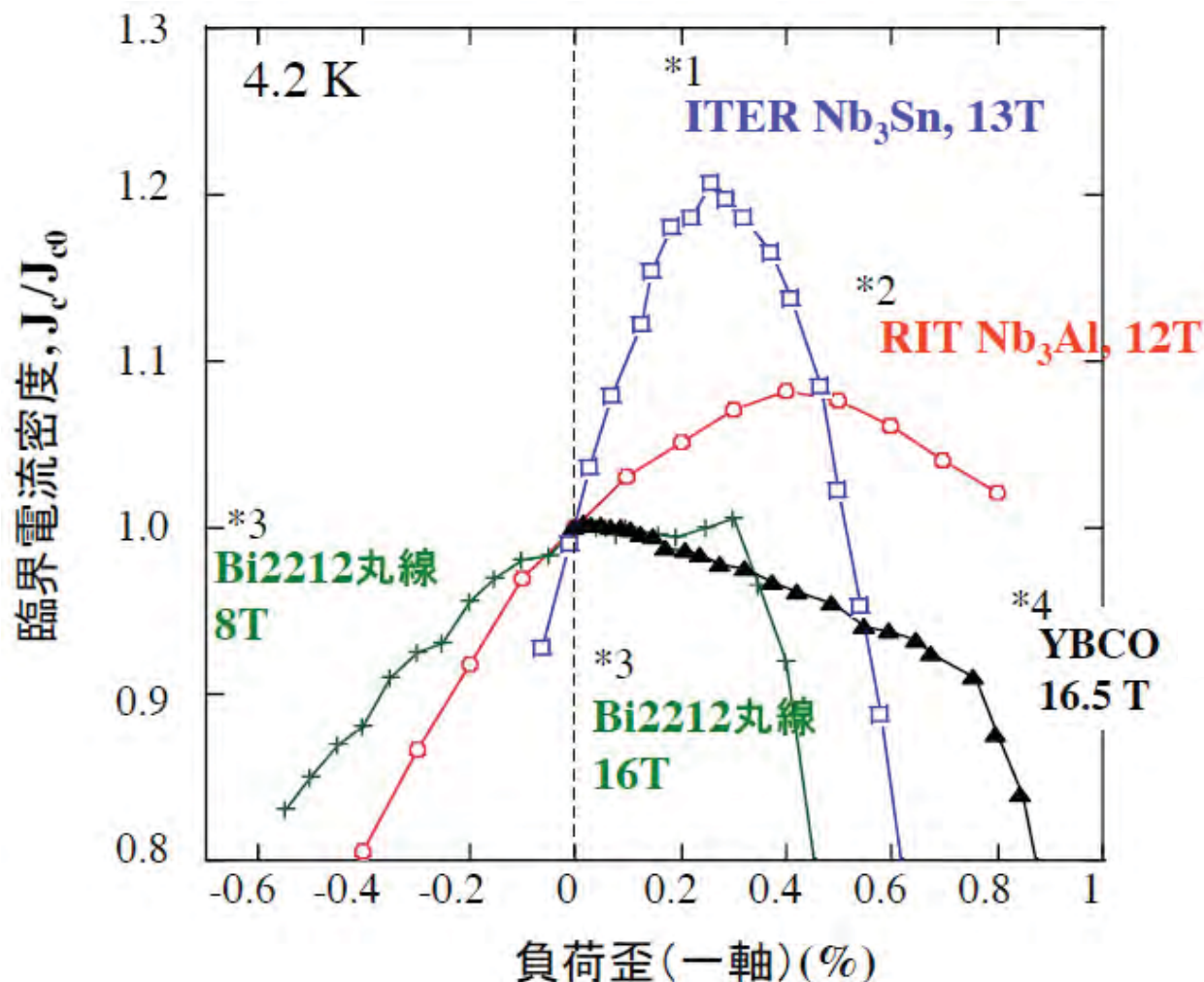
＜候補線材＞ 高磁場 (> 7 T) : 改良型 Nb_3Sn , ^{2,000°C}急熱急冷 Nb_3Al ,
ReBCOテープ線材, B2212丸線
低磁場 (< 7 T) : $NbTi$, MgB_2

＜候補導体＞ 丸線の場合, CIC導体, 成形撚線
テープの場合, 積層導体, Roebel導体, 新型

臨界電流密度の磁場依存性



超伝導線の選択(耐ひずみ特性)



*1 Uglietti et al, Supercond. Sci. Technol., 16 (2003) 1000.

*2 Takeuchi et al, Appl. Phys. Lett., 71 (1997) 122.

*3 ten Haken et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., 5 (1995) 1298.

*4 Ekin et al, Annual review (2003).

◆ 日本が開発を先導してきたNb₃Alは、耐ひずみ特性に優れており、高応力下での用途に適していることが期待される。 j_c の観点から急熱急冷Nb₃Alに期待

◆ Nb₃Snは更なる j_c 向上に加えて、断面剛性の高い(素線曲げ加重の小さい)導体設計が必要

◆ 高温超伝導(HTS)線材の潜在的性能が高い。機械的特性に優れたReBCO線材が入手可能となり、大電流導体の開発研究が本格化

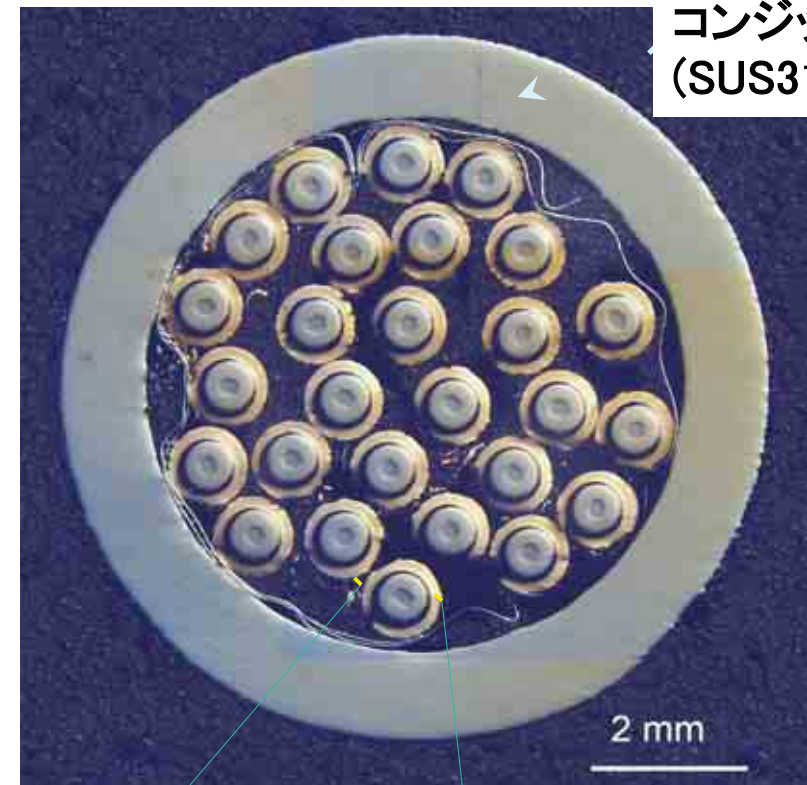
急熱急冷Nb₃Al縮小CICC (1/2)

素線	
線径 (mm)	φ1.0
JRフィラメント径 (μm)	34
JRフィラメント数 (本)	276
フィラメント間バリア材種	Ta
マトリックス比	0.8
総線材長 (m)	207, 54, 30
中心線径 (mm)	0.70
ツイスト方向	Z
ツイストピッチ (mm)	45

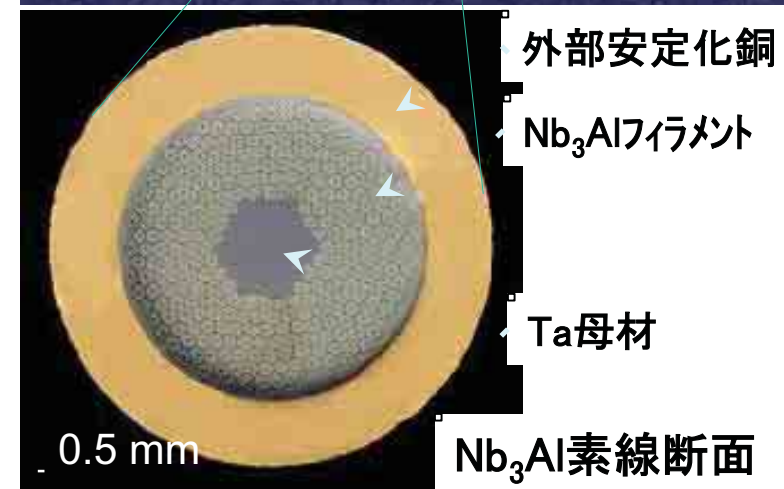
撚線	
撚線構成	3x3x3
撚線ピッチ (1次撚) (mm)	56 ± 6
撚線ピッチ (2次撚) (mm)	106 ± 6
撚線ピッチ (3次撚) (mm)	162 ± 6

導体	
ポイド率 (%)	36
コンジット材	SUS316
導体外径 (mm)	φ9.0

2000°C急熱急冷後にイオンプレーティング
+ 電解メッキにより安定化銅を付加



コンジット
(SUS316)



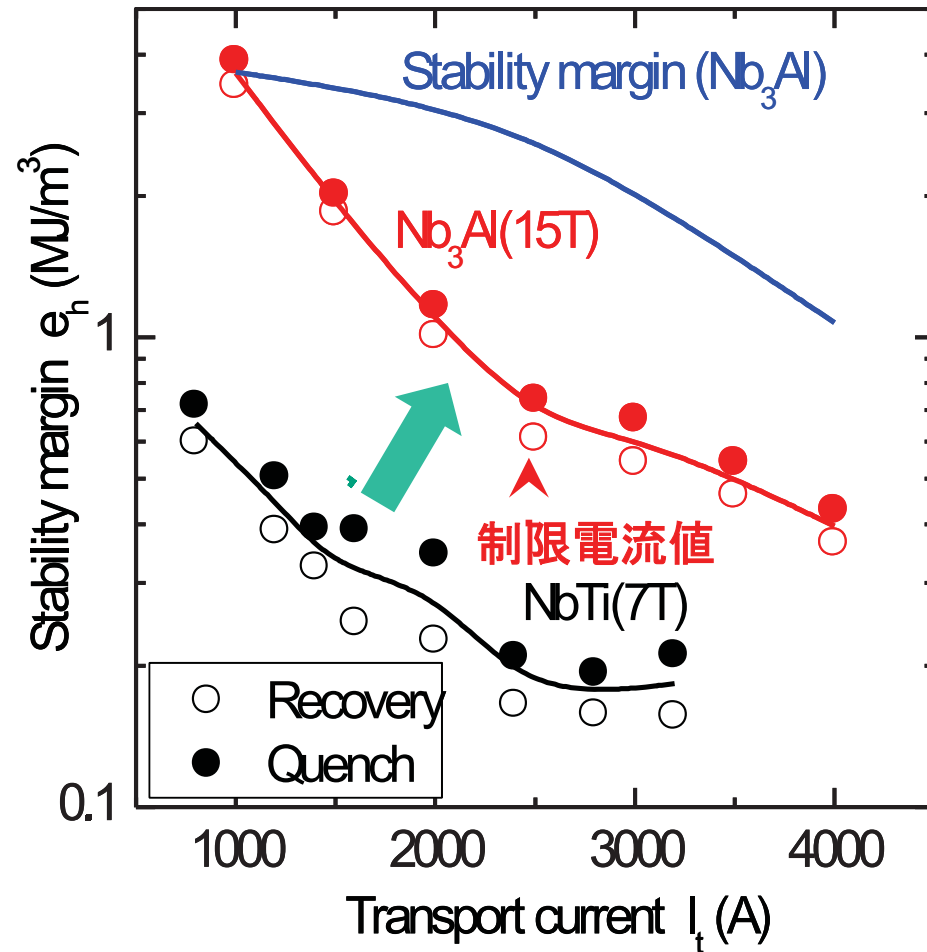
外部安定化銅

Nb₃Alフィラメント

Ta母材

Nb₃Al素線断面

急熱急冷Nb₃Al縮小CICC (2/2)

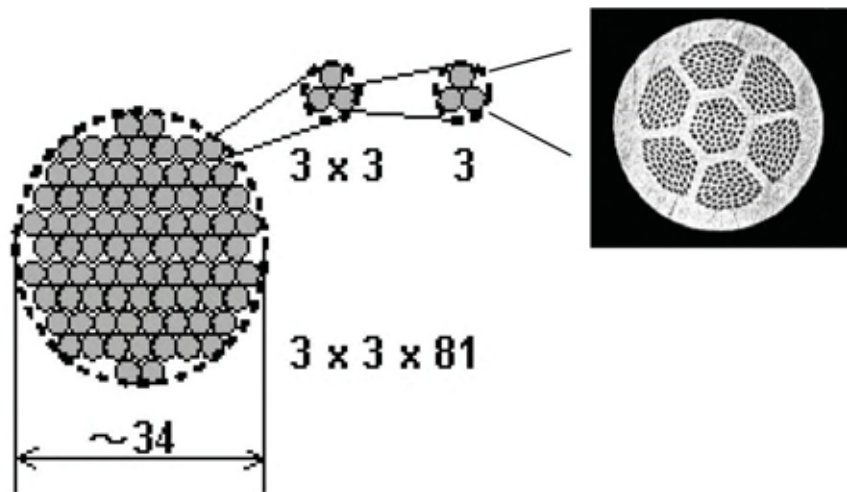


安定性試験結果

15 Tの外部磁場中で、素線性能から予測される臨界電流を達成し、十分に高い冷却安定性を実証 → 今後、実規模導体の開発、R&Dコイルの性能実証、大量生産能力の確立が必要。導体化や巻線はITER技術の適用可能

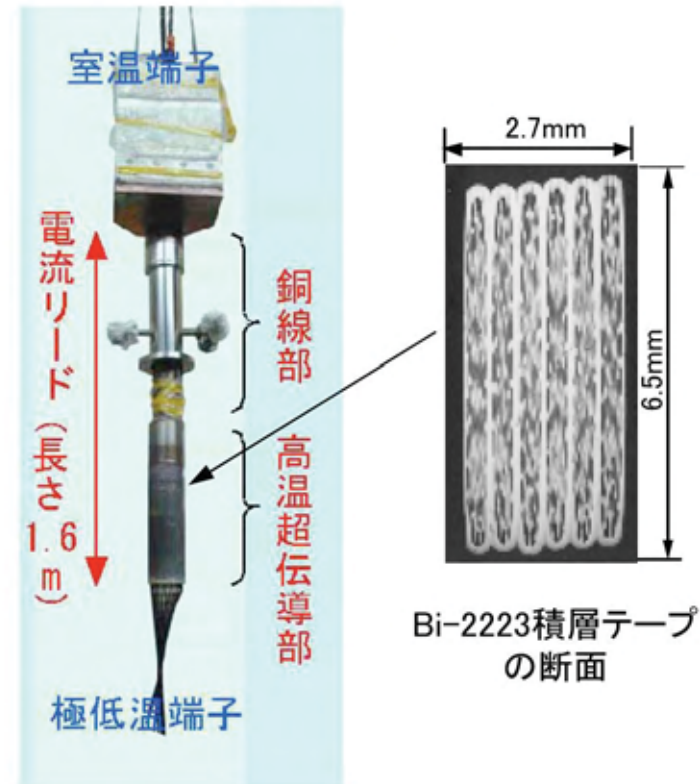
HTS大電流導体(Bi系)

①12T、10kA導体試作(Bi-2212)



JAEA提供

②60kA電流リード(Bi-2223)



- ◆ Bi-2223テープ線材は、ITER用(70 kA)を始めとして電流リードに広く採用
- ◆ Bi-2212丸線は、12 T-10 kAのCIC導体(JAEA, 2003年), 10 kA成形撚線(中部電力, 2005年)が開発済みだが、機械強度が低いことが課題。Y(Re)BCO線材の進展に伴い、停滞。

HTS大電流導体 (ReBCO)

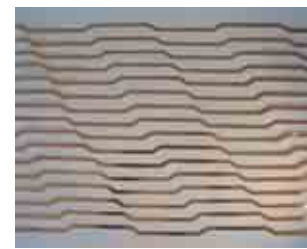


ReBCO tape ~ 300 A/cm



Copper
YBCO tape

(1) Simple stacks N. Yanagi (NIFS)



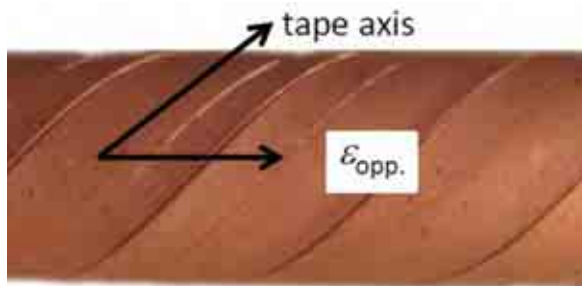
Punching



Roebel strands

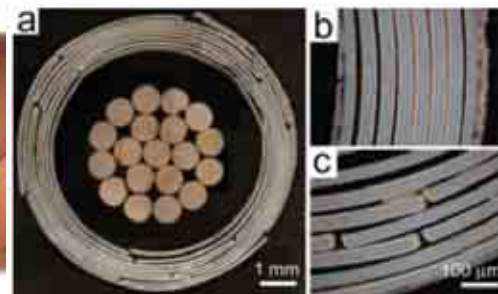


(3) Rutherford cable (KIT)



(2) Helical cables (>3.5 kA at 77 K)

D.C. van der Laan (University of Colorado)



(4) Twisted stacks

M. Takayasu
(MIT)

◆ ReBCO線材の入手が容易となり, 大電流導体の開発が本格化

原型炉用超伝導コイルの開発課題

	Nb ₃ Sn (改良CIC,新型)	Nb ₃ Al (CIC導体)	ReBCO
線材	j_c の向上 機械強度の向上	j_c の向上 機械強度の向上 長尺化 低コスト化	I_c の向上 剥離強度の向上 長尺化 低コスト化 Agの低減
導体	CIC導体の改良, 新型 導体の開発 改良型, 新型の冷却 安定性・交流損失	大電流化	大電流化・撚線構造 機械的補強 冷却方式 クエンチ保護 交流損失低減
コイル化	高強度化 冷却構造(新型導体)	高強度化	高強度化 冷却構造 巻線・接続技術

- ◆ 既存の大型試験装置は12-13 Tが上限なので, 大型高磁場試験設備が必要
- ◆ 電磁力による性能低下を正しく評価する導体試験法の確立も重要課題。

研究開発体制

1. Nb₃Sn 導体

◇ ITER-TF 導体の製造に8社(日本から2社)が参加。加速器用マグネットも含め、世界の主要な研究機関や大学が高性能化研究を精力的に推進

□ 技術伝承のため開発計画を速やかに具体化することが肝要。それにより、大学、研究機関、企業の積極的な参加と国際的な競合・協力が期待できる。

2. Nb₃Al 導体

◇ 急熱急冷Nb₃Alは物材機構の独自技術。CIC 導体はJAEAとの共同研究、加速器用マグネットはKEKとの共同研究。現状の線材メーカーは日立電線1社

□ 複数メーカーが参加できる規模の開発計画が必要。開発計画を具体化して、全日本での取り組みが期待される。

3. ReBCO 導体

◇ 線材は世界10社程度(日本6社、米国2社)が性能向上、長尺化、低コスト化を競合。モータなどの電力機器に加え、強磁場マグネットの研究が進行

□ 大電流導体は核融合特有のため、核融合研究の中での開発計画の位置づけと具体的な研究計画の策定が必要。全日本での取り組みが期待される。

4. 試験設備

□ 現状の大型導体試験装置は12 T(CSインサートは13 T)が最大のため、15 T 級の大型設備が必須。電磁力影響を評価する導体試験法の確立も重要

まとめ

1. ITERマグネットは、これまでの装置の数十倍の大きさであり、その製造技術は原型炉用マグネットの基盤となる。
2. 原型炉マグネットに向けて特に重要な開発課題として
 - (1) 導体の高磁場化・高 J_c 化
Nb₃Sn導体の機械特性の向上, 高性能Nb₃Al導体の開発,
長期的な視点での高温超伝導線材の開発
 - (2) 巻線構造・冷却構造・支持構造の高強度化
ラジアルプレート方式の高強度化や新構造の研究
構造材料や絶縁材料の強度向上が挙げられる。高磁場・大型超伝導試験設備の整備を含め、人材育成や技術の伝承・発展に考慮した具体的な開発計画を速やかに策定し、着実に実施していく必要がある。