

Nb系超伝導線材における高機能化の進展

- 高強度化と極細線材化 -

＜ユニットとして取り組む研究項目＞ ※NIFSホームページより抜粋

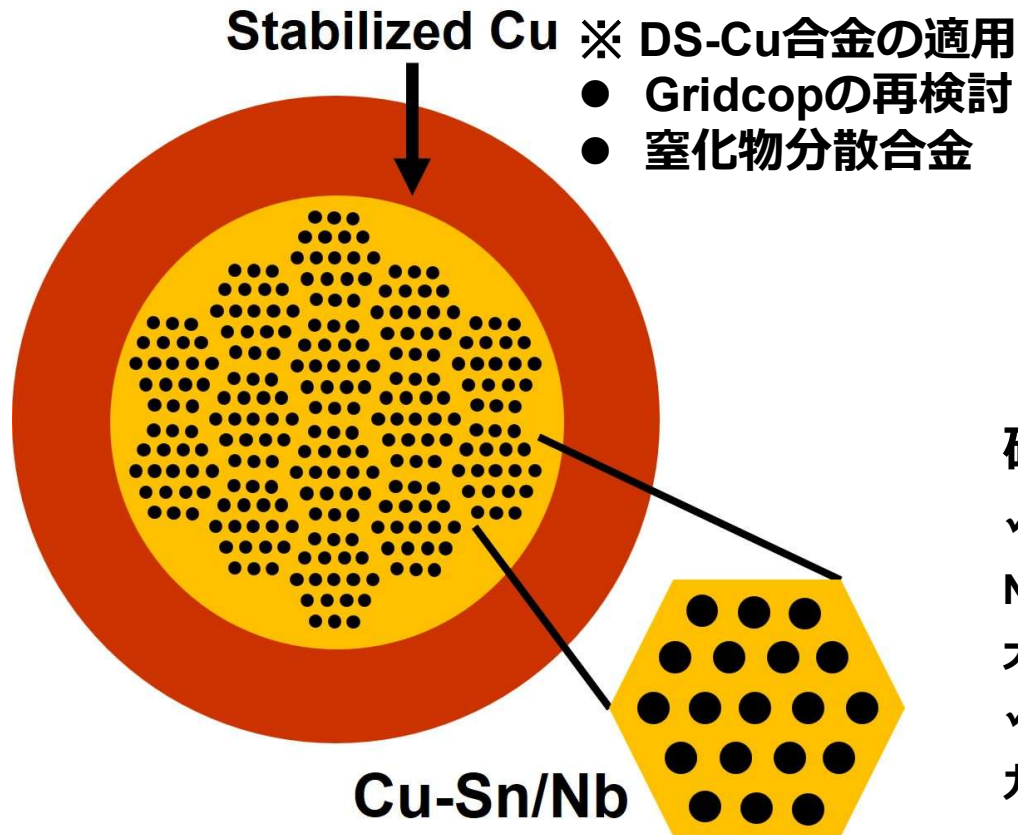
- ・ 大電流高温超伝導導体・コイル研究
- ・ 液体水素利用による超伝導応用研究
- ・ 液体水素の低温物性評価
- ・ **先進超伝導線材研究（高強度化・超極細線材加工）**
- ・ 超伝導線材、導体の高信頼性検査手法研究
- ・ AIによる液化機予防保全技術開発研究

超伝導・低温工学ユニット 菱沼 良光

2025年5月29日

Nb系超伝導線材における高機能化研究の協力体制

Nb₃Sn超伝導線材の高強度化に向けて.....



※ 内部マトリックス補強法の適用

- 固溶強化機構の解明
- HIP処理の適用

※ 極細線材（フレキシブル線材）適用の検討

核融合開発の着実な進展には、技術的成熟度の高いNb系超伝導導体における高機能化研究も重要である。

- ✓ 高臨界電流密度 (J_c) 化
- ✓ ITER調達活動にて明らかとなった低い機械特性（高い脆性）
- ✓ 低コスト化（React&Windへ）

研究協力体制・予算※

✓ 内部マトリックス補強法の開発

NIMS・東北大金研（強磁場）・東海大・富山大・大同大・（株）OAW・（財）応用科研

✓ 安定化銅部材の高強度化

九大・東北大金研（新素材・大洗）・北大・秋田県立大

✓ 極細線材化（フレキシブル線材化）

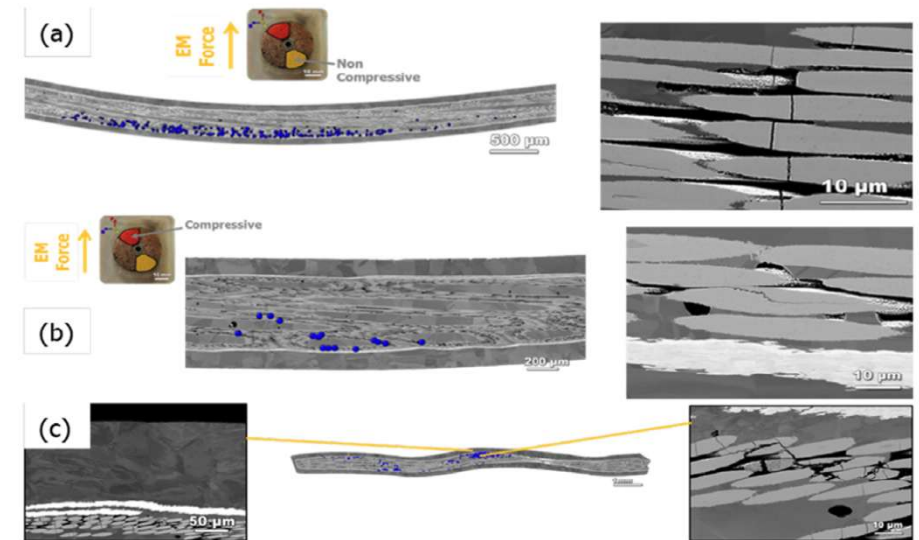
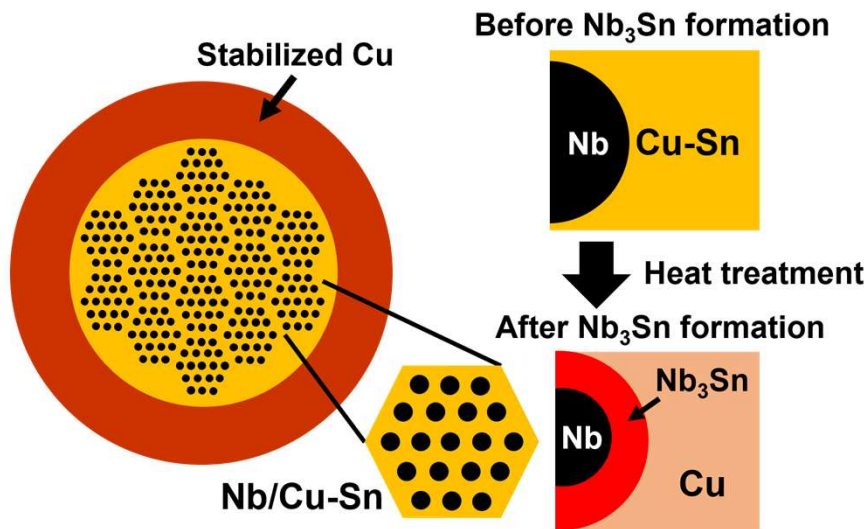
NIMS・JSA（株）

※ NIFS運営費，科研費（代表・分担），東北大金研国際共同利用・共同研究拠点（GIMRT），九大応力研共同研究，NIFS一般共同研究，文科省マテリアルリサーチインフラ事業（ARIM）

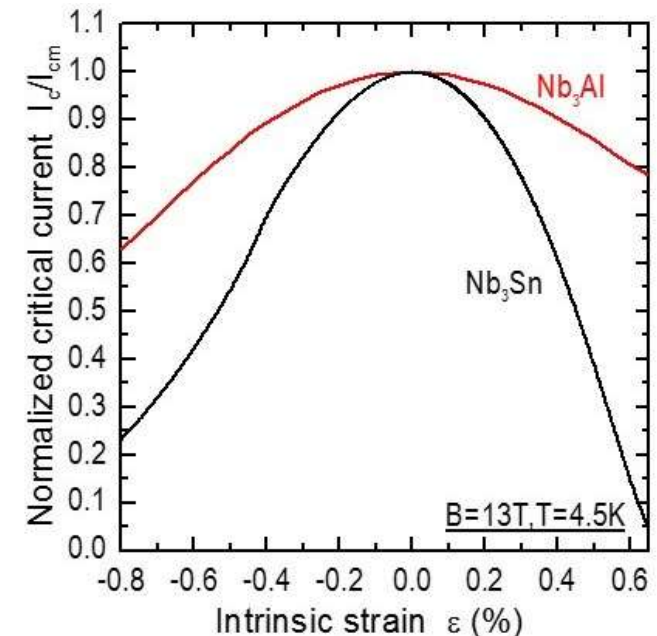
Nb₃Sn線材における高強度化の必要性

Conventional bronze processed Nb₃Sn wire

A. Devred et.al, SuST, 27, 2014, 044001

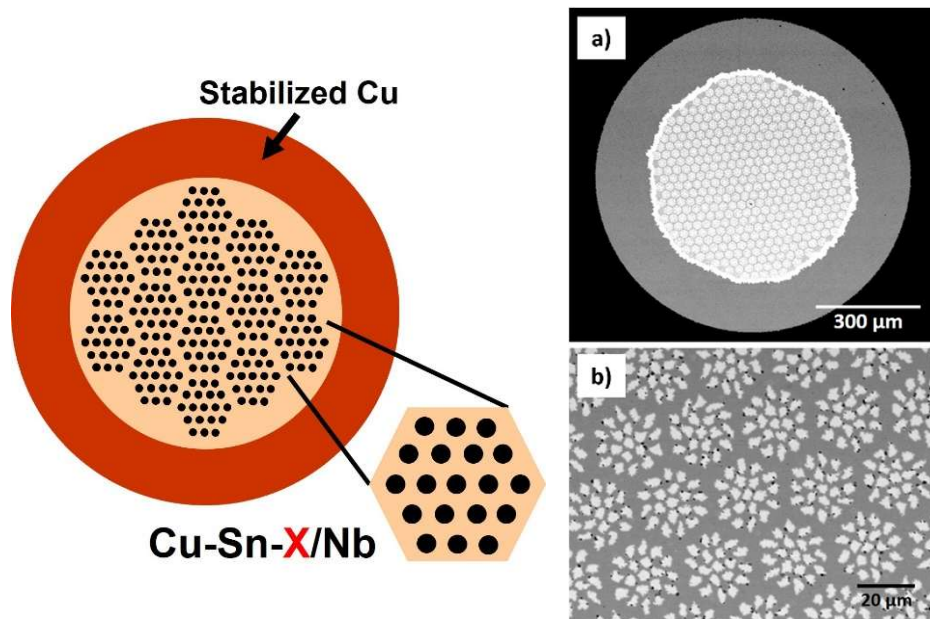


- ✓ Nb₃Sn線材は主にブロンズ法にて製造される。
- ✓ 線材加工後の熱処理にて超伝導相を生成する。
(構成部材の相変態やVoidの生成)
- ✓ Nb₃Sn超伝導相は硬くて脆い特性を有し、応力やひずみに対して弱い。(本質的な特性)
- ✓ 巨大な電磁力印加にてNb₃Sn相が破壊され、導体性能が大きく劣化する。



高磁場特性に優れるNb系超伝導線材の高強度化は必須な状況

内部マトリックス補強高強度Nb₃Sn線材



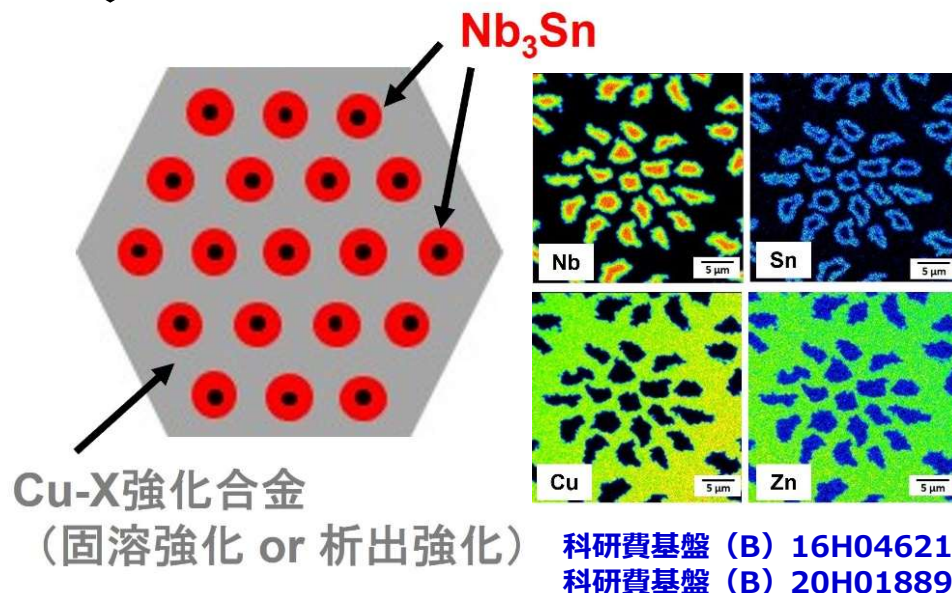
確立されたブロンズ法を踏襲しながら、
簡素で低コストな高強度化は可能か??

✓ 線材母材（マトリックス）に注目

✓ 内部補強という新しい概念

Cu-Snマトリックスを多元系にすることで
生成するNb₃Sn相を覆うように固溶強化
されたマトリックスが残存してNb₃Sn相
の直接的な保護材として作用する。

↓ Nb₃Sn生成熱処理



✓ 金属物理学に基づいた強化機構。

✓ 補強合金が不要。

✓ 多元化による添加元素効果 (J_c特性)

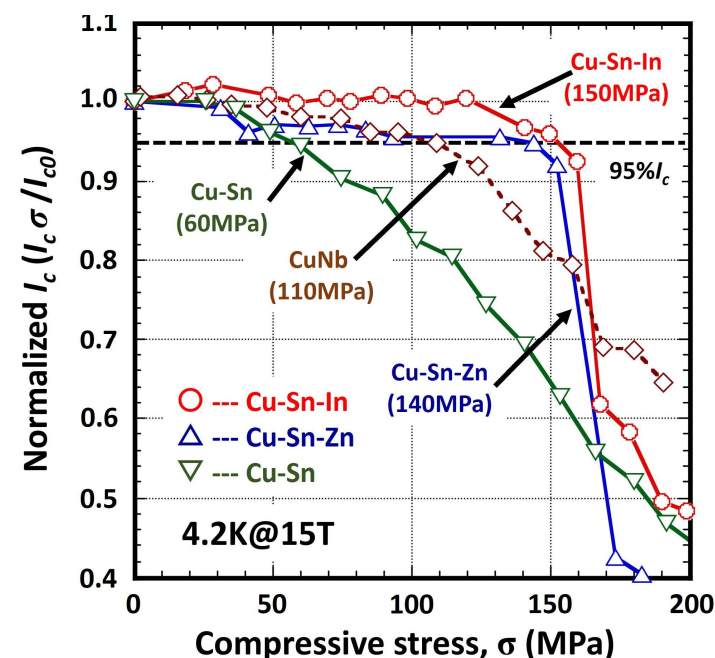
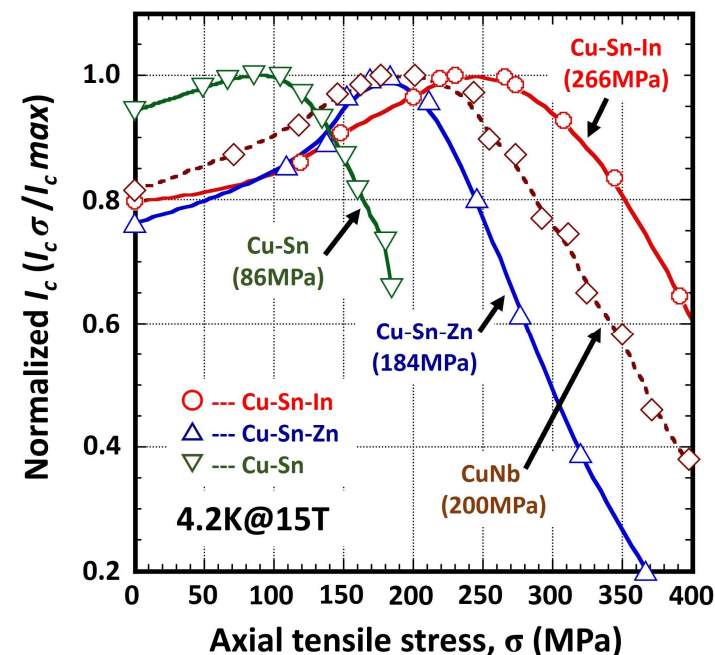
✓ 大幅な製造工程や加工機器の変更が
なく、設備投資の削減 (低コスト化)
が期待できる。

内部マトリックス補強高強度Nb₃Sn線材の機械特性

- ✓ 三元系ブロンズ母材による長尺線材化は容易であることが明らかとなった。
- ✓ Zn及びIn元素を溶質因子とした固溶強化機構による内部補強において、In元素が効果的であった。（3倍の機械特性）
- ✓ Cu-Sn-In合金母材にて、CuNb合金補強と比較して同等あるいはそれ以上の機械特性が得られた。

更なる高強度化に向けた2024年度取り組み

- ✓ 固溶強化機構の解析 科研費基盤 (B) 16H04621
科研費基盤 (B) 20H01889
 - Nb₃Sn相拡散生成機構・固溶体形成機構
 - Cu-Sn-In合金組成の最適化
- ✓ HIP処理工程の追加 科研費基盤 (B) 20H01889
東北大金研GIMRT (強磁場)
 - 応力・ひずみ印加下での臨界電流特性評価
 - 微細組織解析によるHIP処理効果の検討
- ✓ 安定化銅部材の高強度化 科研費基盤 (C) 20K03899 (分担)
東北大金研GIMRT (新素材)
 - ガスアトマイズによる窒化物分散銅合金粒子の合成
 - Glidcop (Cu-Al₂O₃)の強度・導電性評価

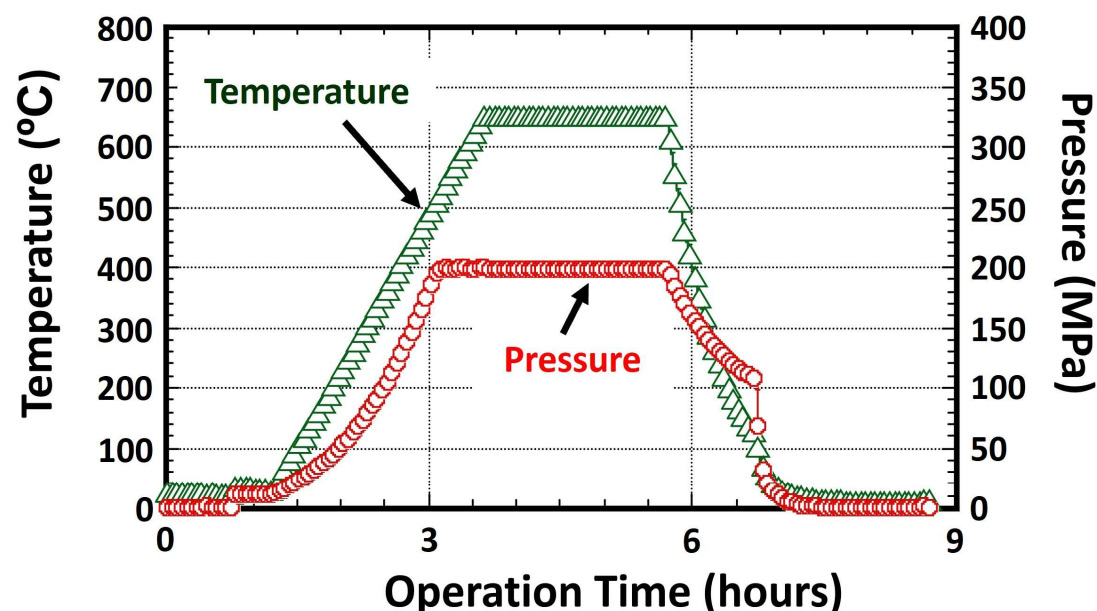


内部マトリックス補強Nb₃Sn線材のHIP処理



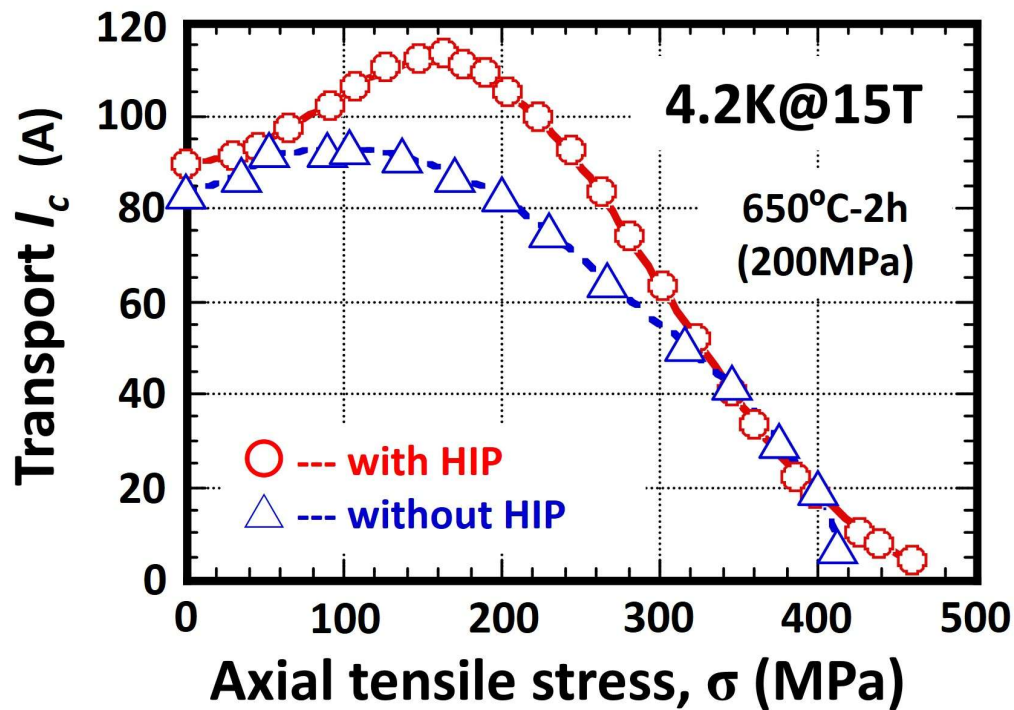
本研究における供試線材

Sample Code	Matrix (mass%)
2.0In	Cu-14.0Sn-2.0In-0.3Ti
5.0In	Cu-10.0Sn-5.0In-0.3Ti



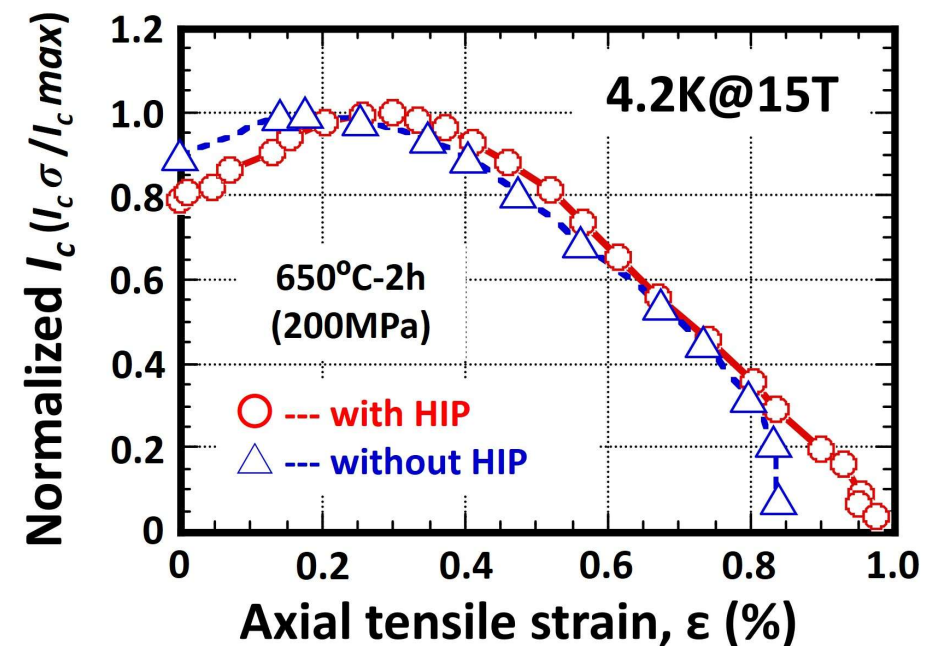
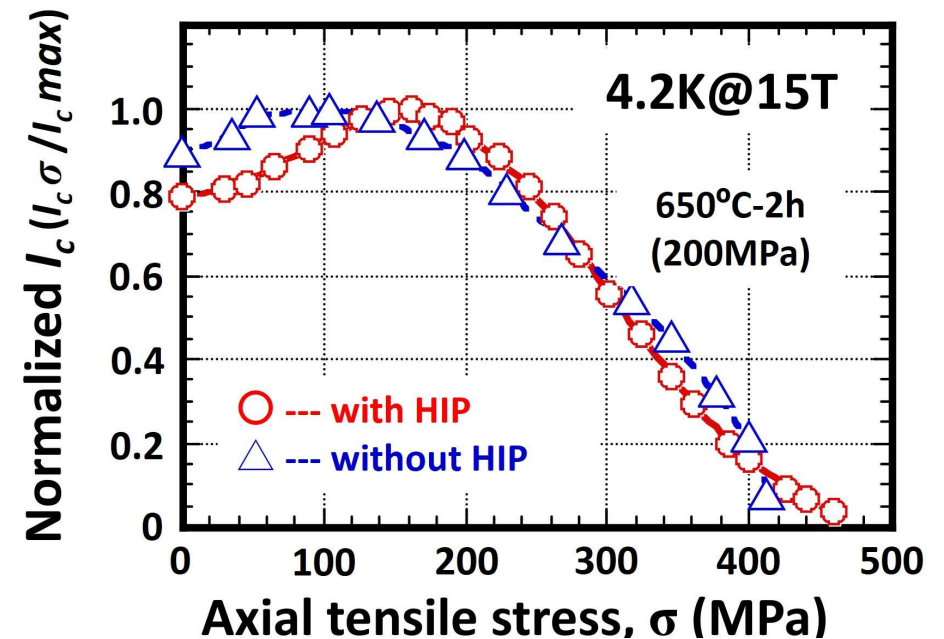
- NIFSに設置されたHIP装置は、2014年3月に共同利用設備として導入された。
- Arガス圧縮機にて昇圧される。装置仕様は、**直径100mm-高さ240mm**の処理空間を有し、**最高温度:2000°C、最高圧力:200MPa**である。
- 試料は**Cu-Sn-In合金母材としたNb₃Sn線材**とし、Ar雰囲気中でのNb₃Sn相生成熟処理 (550°C×100h+650°C×100h) の後に、昇圧先行のHIP処理 (**650°C×2h-200MPa**)を実施した。

2.0In試料におけるHIP処理前後の引張変形下の I_c 特性



- 線材の破断応力及び破断ひずみがHIP処理にて増加した。
- 最大 I_c 特性で規格化した引張応力及び引張ひずみ依存性に変化は見られなかった。
- 最大 I_c 特性を示すピーク応力及びピークひずみともに増加した。

HIP処理による機械特性改善が示唆された。



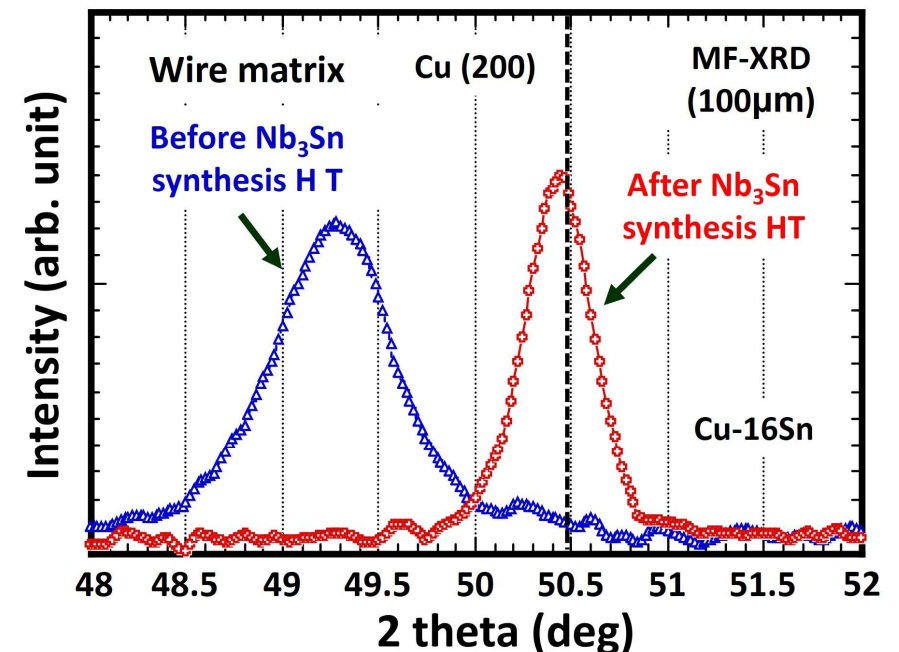
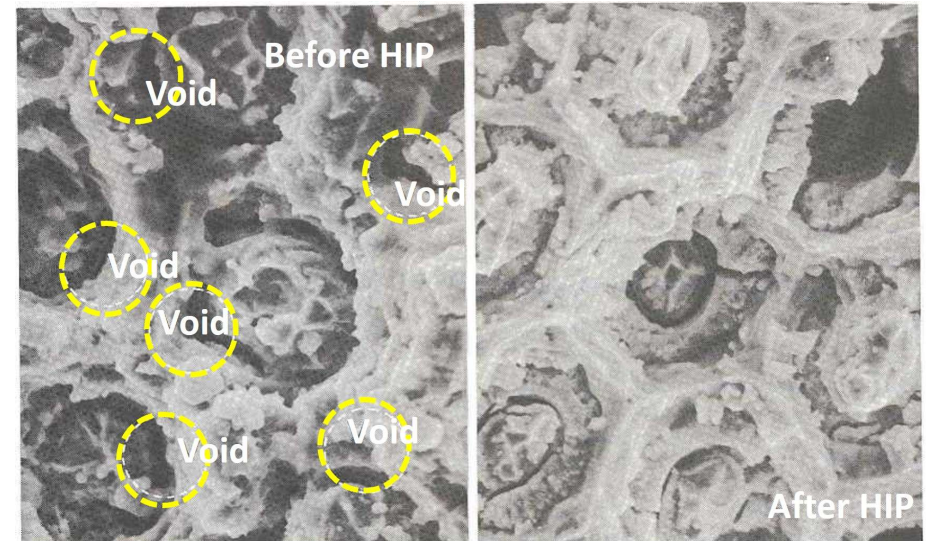
2.0Inと5.0In試料におけるHIP処理効果の比較

※ 650°C -2h(200MPa)

2.0In Sample	Without HIP	With HIP※	Increment (%)
Peak I_c (A)	93.33	113.33	+ 21.42
Peak stress (MPa)	104.30	162.79	+ 56.08
Peak strain (%)	0.1760	0.2986	+ 69.66
Fracture stress (MPa)	401.35	474.24	+ 18.16
Fracture strain (%)	0.6481	0.9626	+ 48.53

5.0In Sample	Without HIP	With HIP※	Increment (%)
Peak I_c (A)	64.60	63.19	- 2.17
Peak stress (MPa)	265.89	308.29	+ 15.95
Peak strain (%)	0.3052	0.3600	+ 17.96
Fracture stress (MPa)	510.69	578.83	+ 11.77
Fracture strain (%)	1.0182	1.1668	+ 14.59

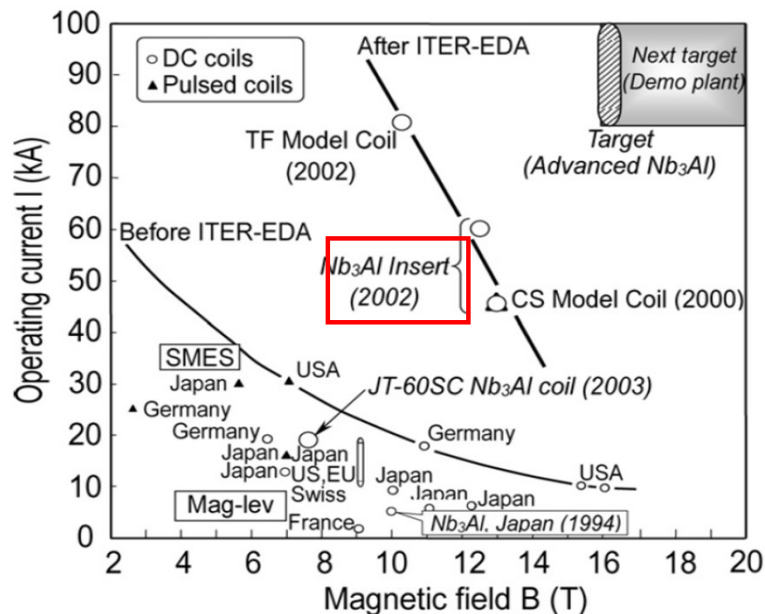
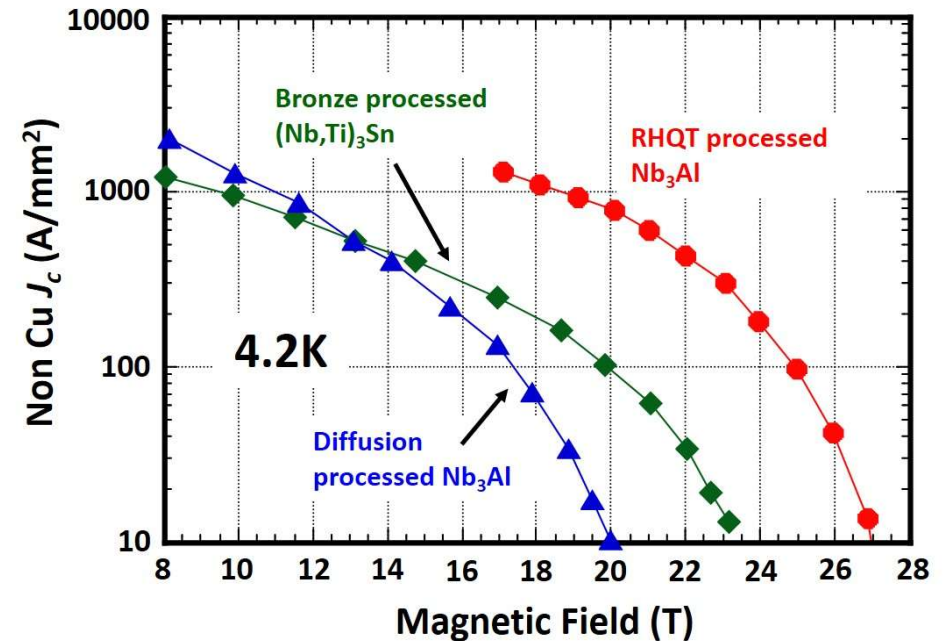
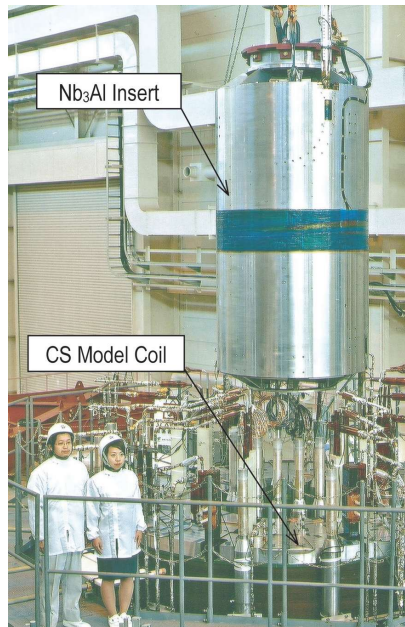
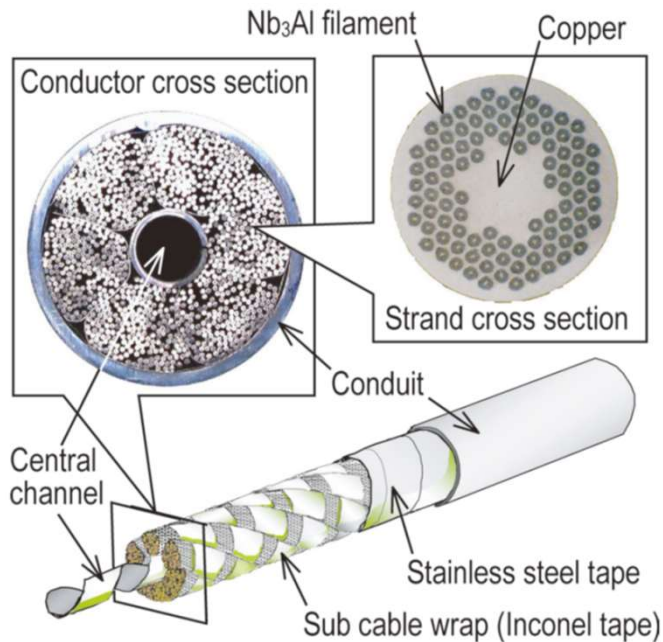
T. Fukutake et al., Advances in Cryogenic Engineering, vol.30, (1984), 891-898



- 5.0In線材及び2.0In線材ともに、HIP処理によって機械特性が改善された。
- Cu-Sn-In三元系ブロンズ合金の組成によって機械特性におけるHIP処理効果に違いがある。
- マトリックスの相変態に伴う体積減少によって生成した空孔がHIP処理にて減少したと考えられる。

核融合応用におけるNb₃Al線材の進展

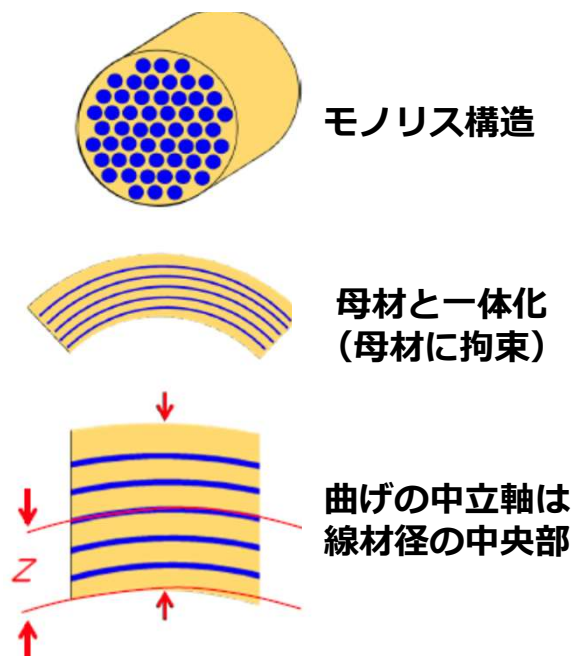
N. Koizumi et al, Nucl.Fusion, 45, (2005), 431



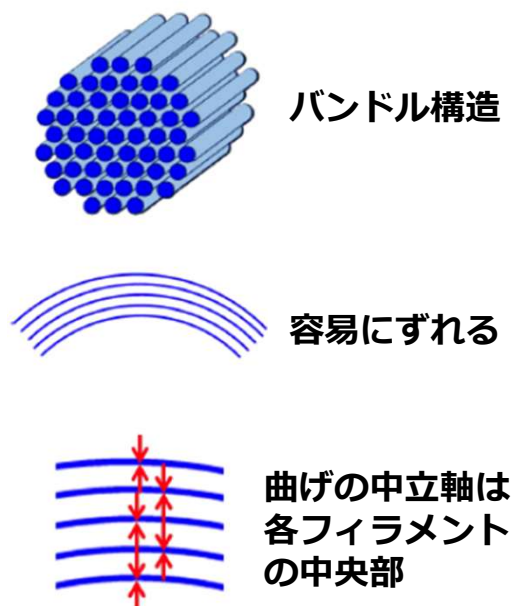
- ✓ そもそもNb₃Sn線材よりも高強度である。
- ✓ “拡散法”Nb₃Al素線を用いたCIC導体が試作されて、ITER-CSインサートに用いられた実績がある。
- ✓ 急熱急冷変態法の開発によって、“拡散法”よりも格段に高磁場特性の良好なNb₃Al素線が開発されている。
- ✓ 扱い易い極細線材化（フレキシブル化）を検討

極細超伝導線による核融合集合導体のイメージ

従来の極細多芯線



超極細線（新概念）



線径を極細化し超伝導フィラメントにかかる曲げモーメントを極小化し、ひずみ感受性を鈍化させる。



極細線化による脆性材料
における可撓性の出現
例) ガラスファイバー



- ✓ 可撓性を利用した超高次撚線
(交流損失の低減)への期待。
⇒ (交流応用への拡がり)
- ✓ 将来的にReact & Wind法への期待。
- ✓ 均一な電流分布への期待。

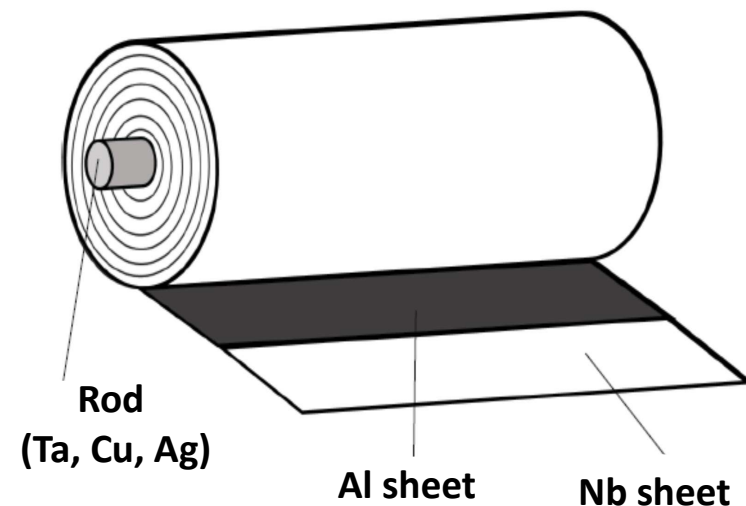


核融合用導体として高機能化

Nb₃Al極細超伝導前駆体線の断面写真

Confidential

線径0.05mmのNb₃Al極細超伝導線材
による撚線試料も準備。



Jelly-roll法の概要

- ✓ NIMSで構築された極細線材化技術を利用して、自然科学研究機構ミッション実現戦略事業の支援にて試作した。
- ✓ 前駆体線材は、Jelly-roll法で作製した。
- ✓ 人毛よりも細い線径0.05mmの極細単芯線を得た。
- ✓ 線径0.05mmまで異常変形が無い。
- ✓ 良好な量産性

Nb₃Al極細超伝導前駆体撚線の断面写真

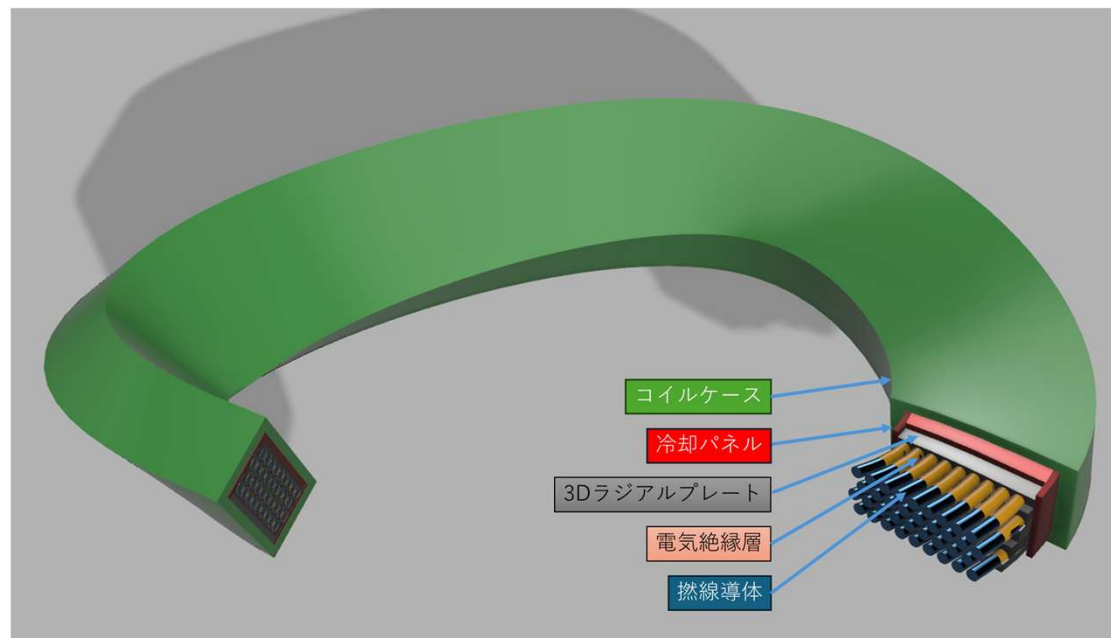
Confidential

- ✓ 撚線加工に問題なし。
- ✓ 2025年度科学研究費補助金事業 基盤研究（B）研究代表（新規）に採択された。
- ✓ 種々の撚線を熱処理し、超伝導特性評価・微細組織解析を共同研究にて実施する。

超伝導極細線による核融合用磁石化ビジョン



“柳に風”のイメージ

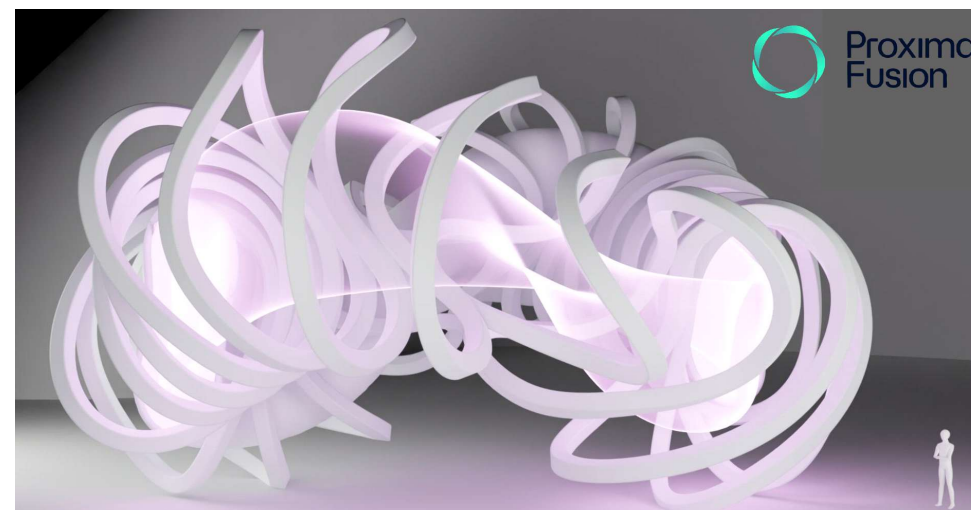


3次元巻線 FLoWマグネットのイメージ図

- ✓ 極細線の特徴を活かしたフレキシブル性に富む集合導体を“柳に風”のイメージとした **F**lexible **L**ike a Will**ow** (**FLoW**) 導体とし、FLoWマグネットの開発を目指したい。

※ Flow (フロー, 流れ): 柔軟性や適応性を強調しつつ、流れるようなスムーズな動きを連想

- ✓ 最終的に、3D巻線を活かしたモジュラーステラレータ型要素コイル等が目標。
- ✓ 経済安全保障重要技術育成プログラム (K-Program) に申請中。



<https://www.proximafusion.com/>

- ✓ 核融合開発の着実な進展に向けて、技術的成熟度の高いNb系超伝導体における高機能化研究（高強度化・極細線材化）を進めている。
- ✓ NIFSで開発した内部マトリックス補強プロセスの最適化に向けて、HIP処理の追加を検討した結果、HIP処理による引張強度等の機械特性の改善が示唆された。
- ✓ Nb₃Al超伝導極細線材による核融合用集合導体化への検討を開始し、撚線加工を経た各種極細撚線試料の超伝導特性や微細組織について調査する予定である。