

ITER用超伝導ニオブズズ線の 性能向上の取組みと軌跡

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)
齊藤 一功



- ジャパンスーパーコンダクタテクノロジーの紹介
- ITER計画における超伝導マグネットの貢献
- ITER計画におけるニオブスズ線材の軌跡
- 今後の展望

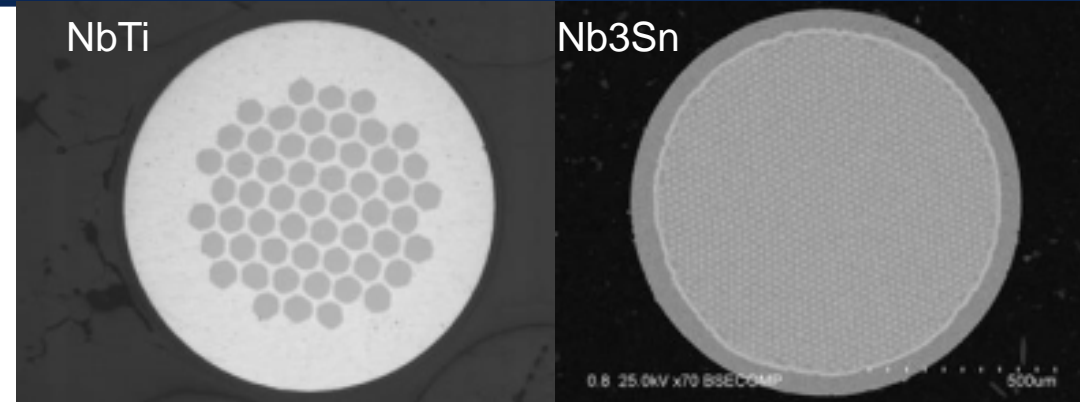
ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー（株）について

- 神戸製鋼所(鉄鋼メーカー)の基礎研究所が源流
- 2002年度設立
- 超伝導線材と超伝導マグネットの製品ラインアップ
- 超磁場を発生する超伝導マグネット、およびその材料である超伝導線材の製造販売

JASTECの製品ラインアップ

超伝導線材

- ✓ ニオブチタン(NbTi)⇒低磁場
- ✓ ニオブスズ(Nb₃Sn)⇒高磁場



超伝導マグネット

- ✓ バイオ/化学分析用：NMR
- ✓ 医療用画像診断用：MRI
- ✓ シリコン単結晶製造用：MCZ
- ✓ ジャイロトロン用⇒マイクロ波発生



ITER計画での役割 -超伝導マグネット-

冷凍機冷却型超伝導マグネット



超伝導線材評価用マグネット

最大発生磁場 15T (150000ガウス)

磁場発生部口径 170mm

2005年3月QST殿納入、4台の小型冷凍機を搭載。

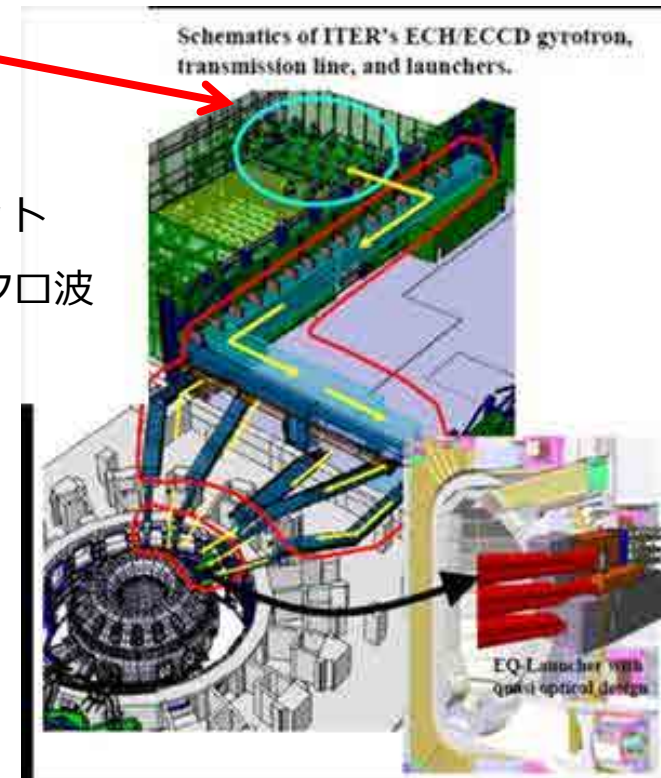
液体ヘリウムを用いずに15Tの高磁場が発生可能。



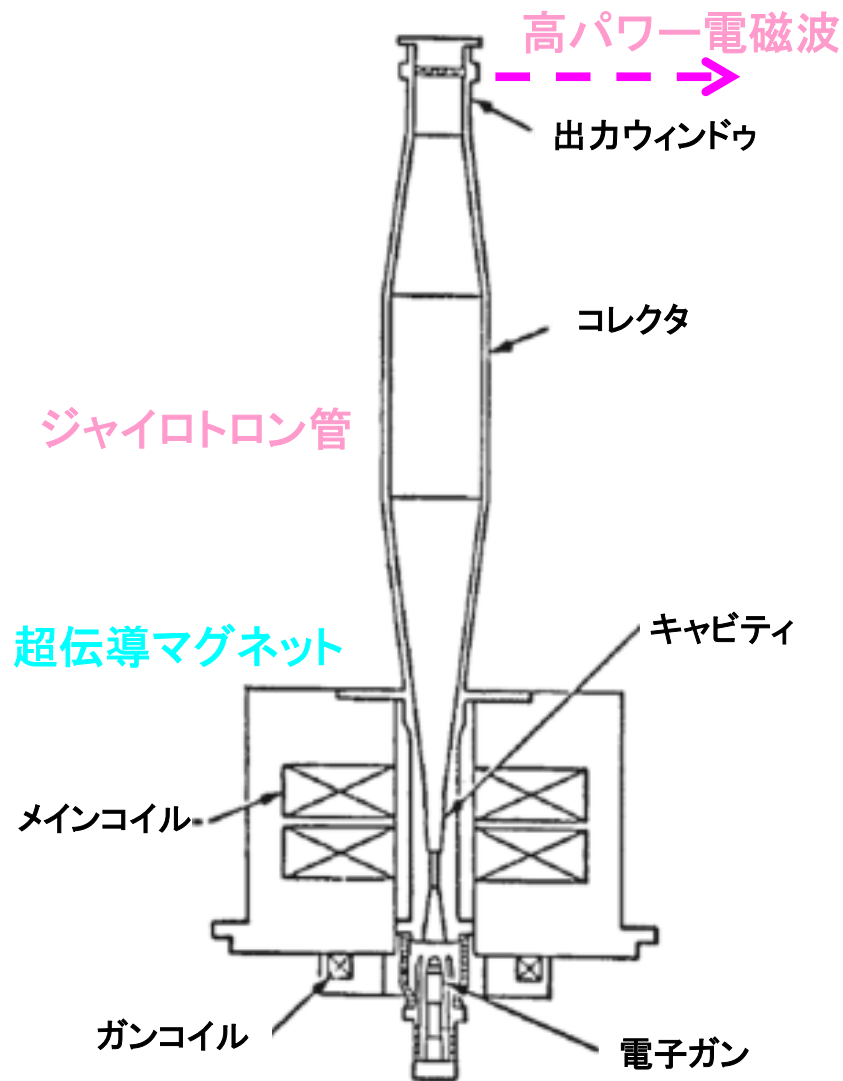
ジャイロトロン用マグネット

ITERプラズマ加熱用のマイクロ波発生装置に組み込まれる。

発生磁場は6T-7T



ジャイロトロンとは（超伝導マグネットの役割）



ジャイロトロンのも式図

ジャイロトロンとは、

- 電子を飛ばし、光速に近い速度で回転させ、この時のエネルギーを高パワー電磁波して取り出す装置。この時、電磁波を回転させるために、高磁場が必要となる。
- 高パワー電磁波によって、核融合プラズマ中の電子加熱及び電流駆動の制御を行うことができる。

超伝導マグネットの役割

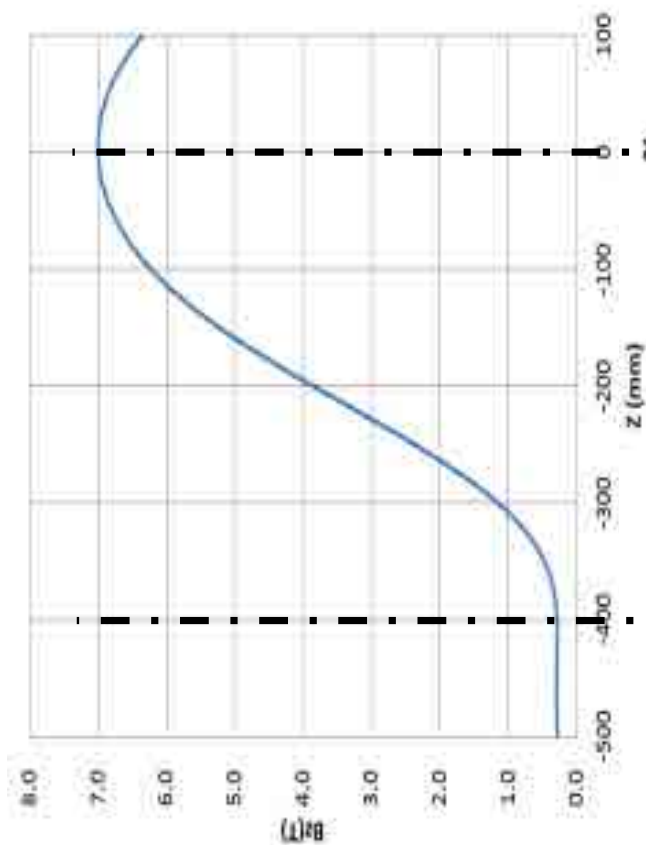
- 電子を回転させるための高磁場を発生させる。
- ジャイロトロン管に適した磁場分布を提供する。（キャビティ部では高磁場に、コレクタ部では低磁場に。）

ジャイロトロン用7T240超伝導マグネット 開発の歴史

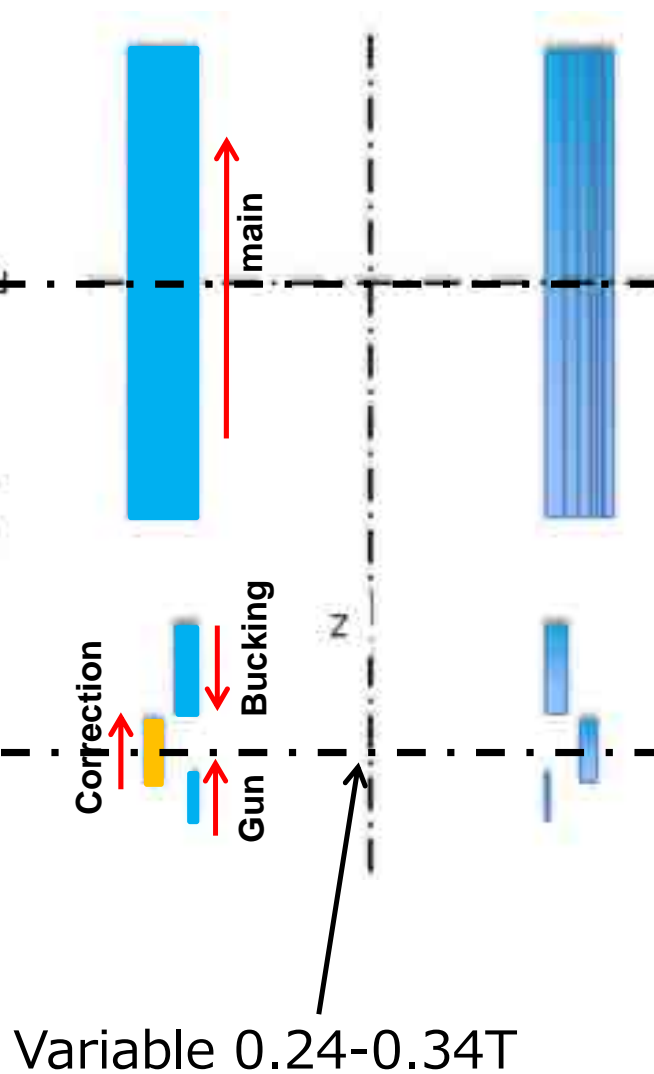
- 2006年 **初期型** 納入。
ガンコイルも超伝導化。
スイープコイルを付加し、高速で磁場分布を変える試み。
国際学会MT-20@Philadelphiaで発表。
- 2011年 **Ⅱ型** 納入（韓国KSTARに設置）。
補正コイル×2系統を別駆動することによって、磁場分布を調整可能に。
国際学会MT-22@Marseilleで発表。
- 2011年、2013年 同型機×2台をJT-60SA用として納入。
- 2011年、2014年 **派生機種** 6.5T260×2台をNIFS（筑波大）に納入。
- 2013年 **派生機種** 8T240 納入。
中心磁場をグレードアップし、ITER仕様を超える周波数が実現可能に。
- 2015年～2017年 ITER用Ⅲ型×8台 納入。
補正コイル×1系統、冷凍機を2台→1台、内製電源の適用にてコストダウン。
これまでの製造実績から設計指標を見出し、クエンチ回数を減らした。

ITER用7T240超伝導マグネット

発生磁場の分布

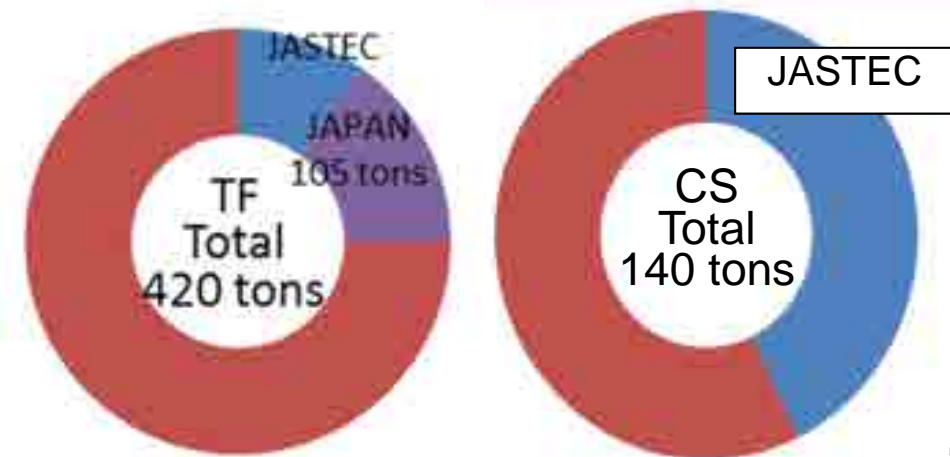


コイル断面図

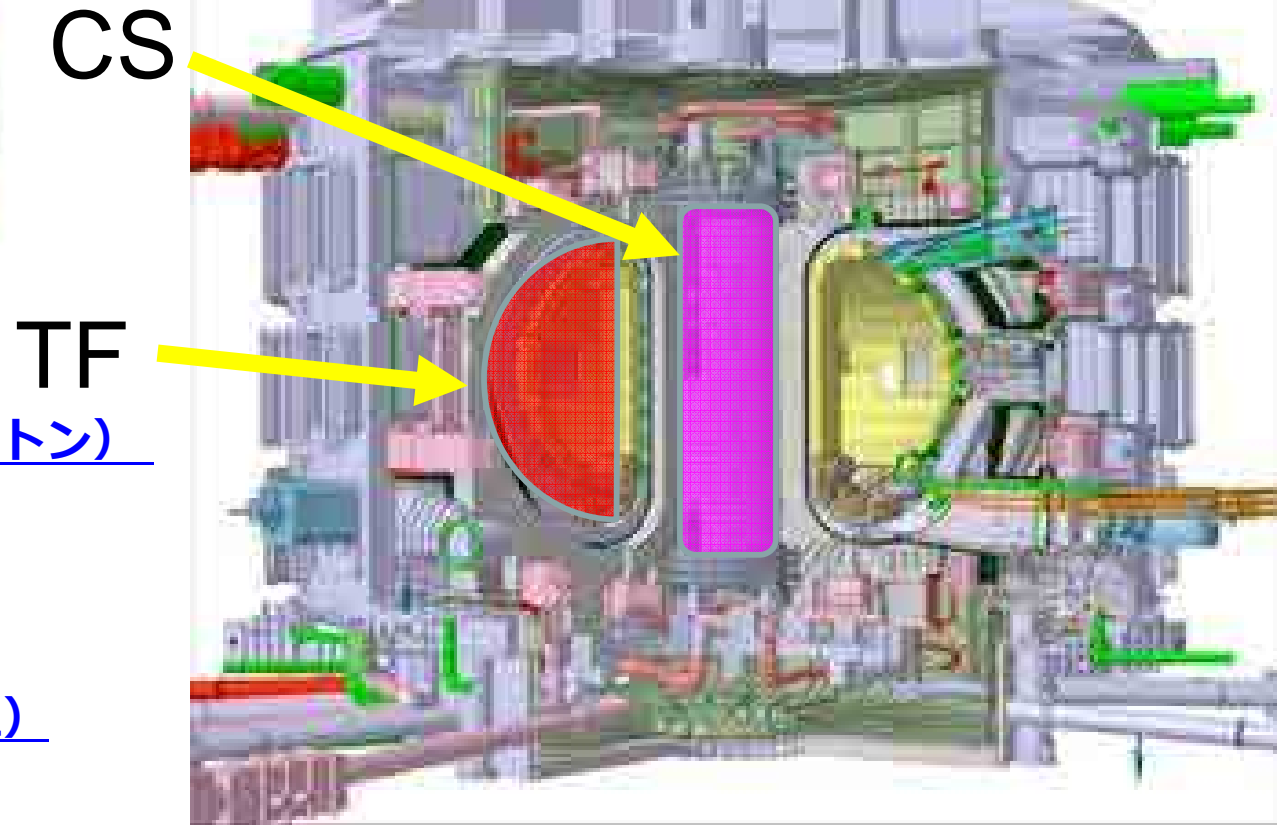


7T240 SCM installed in QST

ITER計画での役割 -超伝導線材-

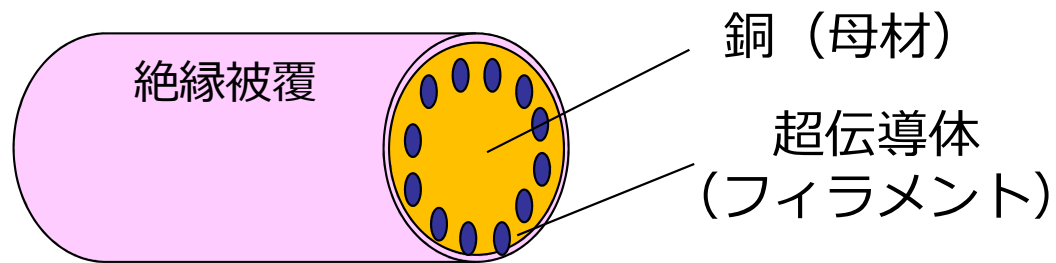


- TF コイル : 420 トン (日本分担 105 トン)
(トカマクプラズマの閉じ込め)
線材調達 : 2009~2012年
#2,3: JASTEC #1,4,5:日立電線
- CS コイル : 140 トン (全量、日本分担)
(トカマクプラズマ電流の誘導)
導体調達 : 2012~2016年
#1,2,6: JASTEC
#3,7:古河電工 #4,5:KAT (韓国)

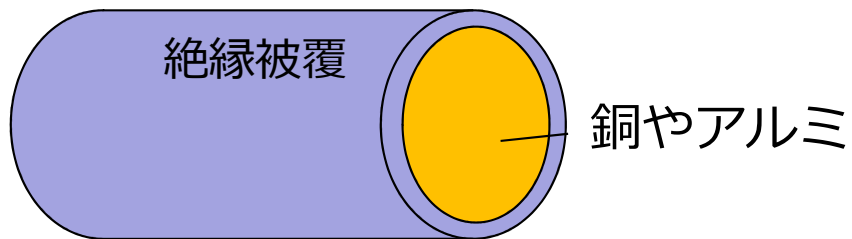
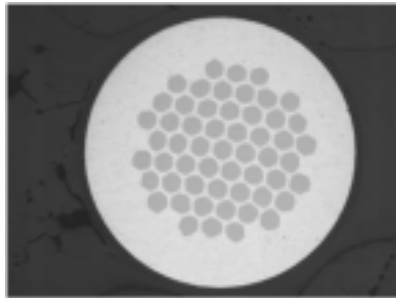


JASTEC は日本の40%を製造
ITERニオブスズ線材では世界No.1の供給量

超伝導線の特徴



超伝導線



電線

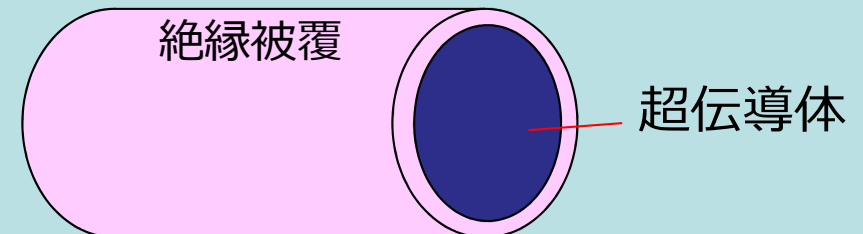


超伝導線とは

銅母材の中に超伝導フィラメントが埋め込まれた構造

電流はフィラメントのみを流れ、母材には流れない。超伝導線を使って実用的な電流を流すには、「極細多芯線構造」が必要である。

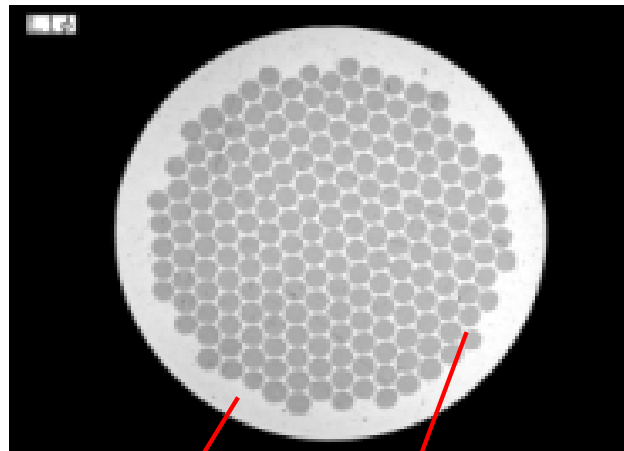
超伝導の発見直後に下図のような線材でコイルを作ったが、わずかな電流しか流れなかった。



超伝導線の開発初期

超伝導線材の構造

ニオブチタン線の例



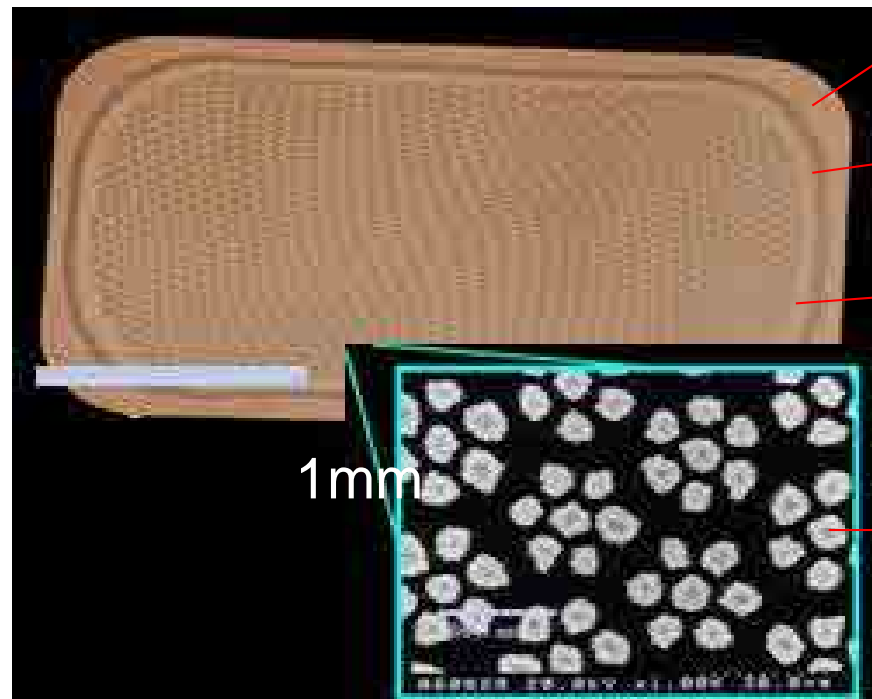
銅 ニオブチタン

母材；無酸素銅のなかに
NbTi合金のフィラメントが
埋め込まれている。

フィラメント数 30~200本

フィラメント径 数十 μm

ニオブスズ線の例



銅

バリア
(ニオブ/タンタル)

銅-スズ合金
(ブロンズ)

ニオブフィラメント
(ニオブスズ)

1mm

銅-スズ合金内にニオブフィラメントが埋め込まれている
その外周をバリア（ニオブ）が囲み、全体が銅母材で包まれる。
熱処理後にニオブフィラメントがスズと反応しニオブスズが生成する。

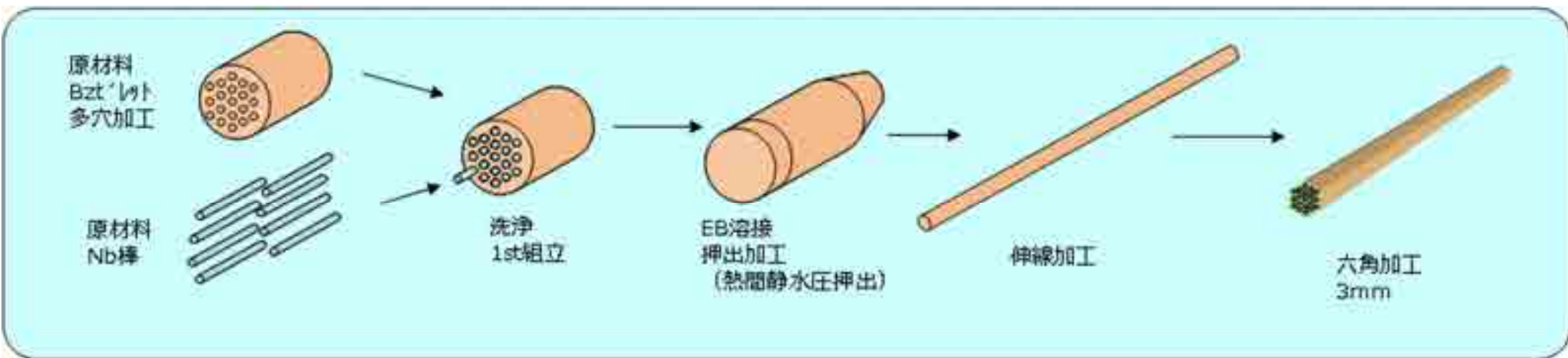
フィラメント数 数万本

フィラメント径 数 μm

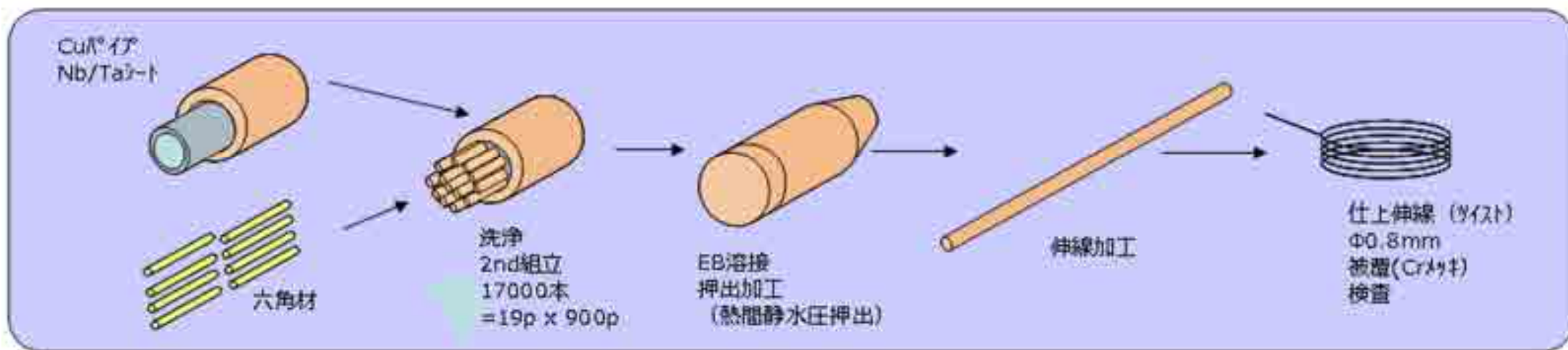
—————> 髪の毛の1/10

ニオブスズ超伝導線材の製造プロセス

一次多芯プロセス



二次多芯プロセス



製造工場の風景



製造の難しさ 断線とその対策

超伝導線材 = 複雑な断面構成をもった、複合金属材料

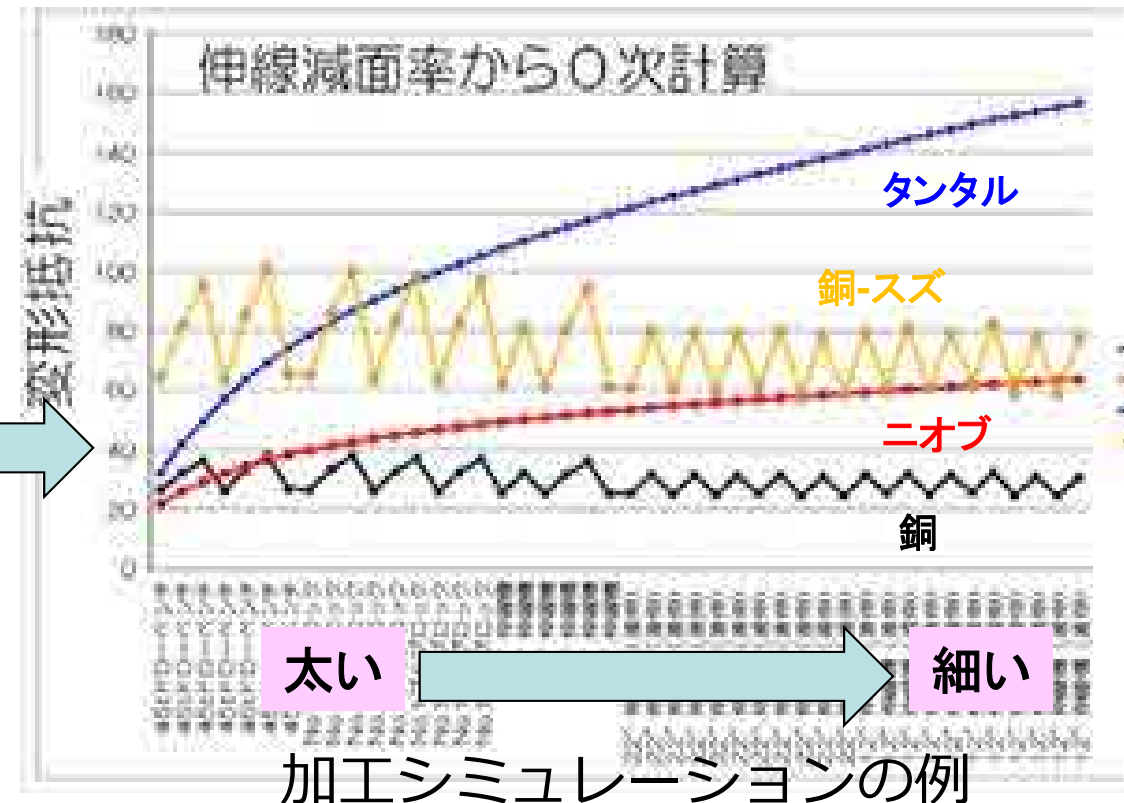
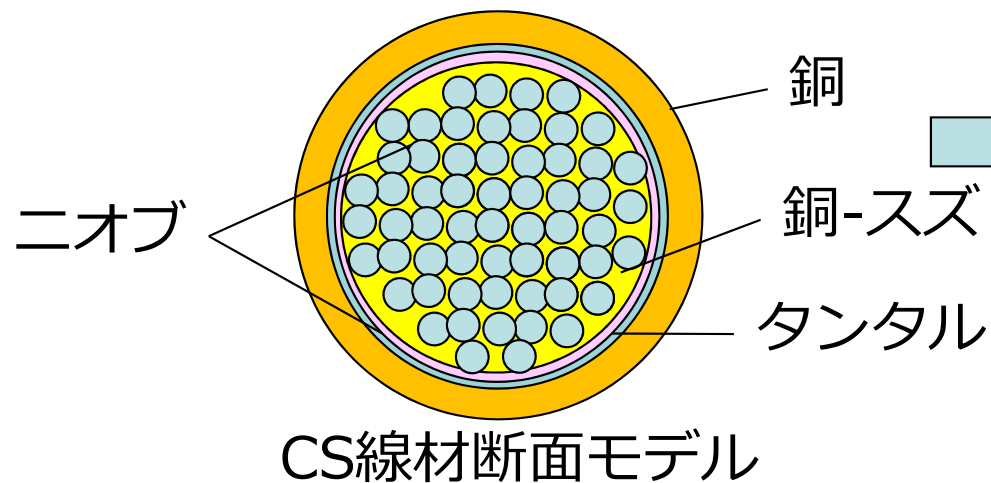
ポイント： 硬さの異なる材料を均一に伸線加工すること

直径150mmが0.8mmへ1/200に、面積比では1/40000

柔らかい金属は伸びやすいが、硬い金属は伸びにくい

⇒一体化することで強度の“平均化”をはかる必要あり

均等に变形しなければ**断線**する



断線への対応

CS用のニオブスズ線材製造
開始直後は断線が多発



改善前の歩留分布

良いものもあれば悪いものもある

大きなバラツキが問題に

出荷製品の不足に直面！

全社をあげてのプロジェクト体制へ

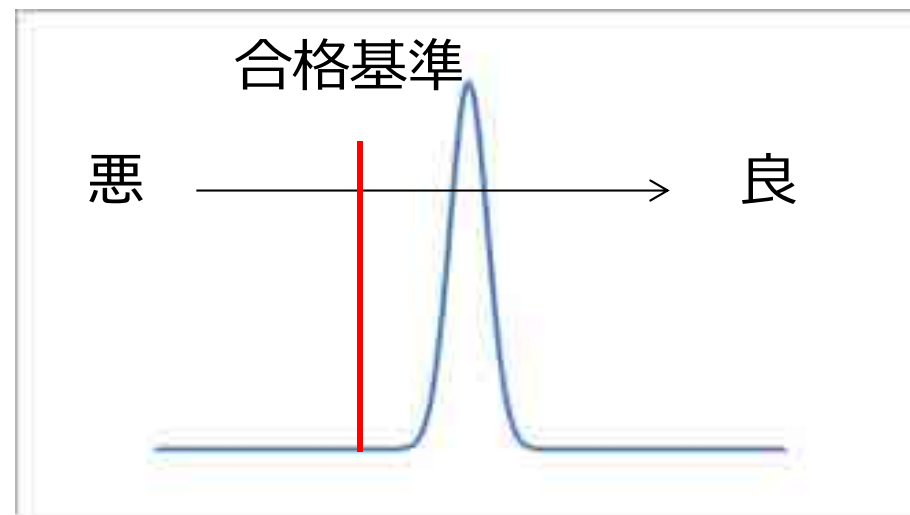
設計：断面構成と部材寸法

材料：各原材料の機械特性

プロセス：環境管理、加工条件

平均値が20%アップ

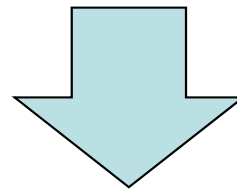
バラツキも1/20に



改善後の歩留分布

おわりに

- JASTECは超伝導線材と超伝導マグネットの両面でITER計画に貢献
- 特にニオブスズ線材では主要な供給者として100トンを超える高特性線材を製造、納入
- ITERプロジェクトで培った技術でさらに次世代ニオブスズ線材や超伝導マグネットを今後とも世界に供給していく



核融合、産業応用（磁気分離、半導体製造）

高エネルギー加速器、MRI NMR etc.

ご清聴ありがとうございました