



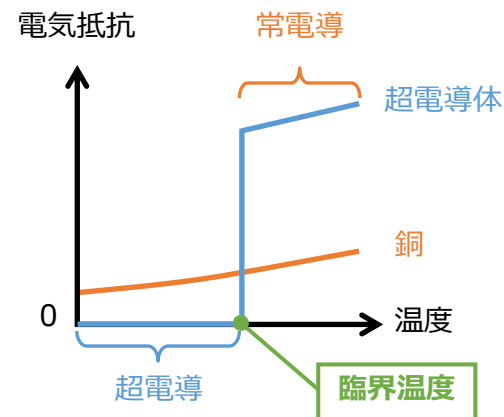
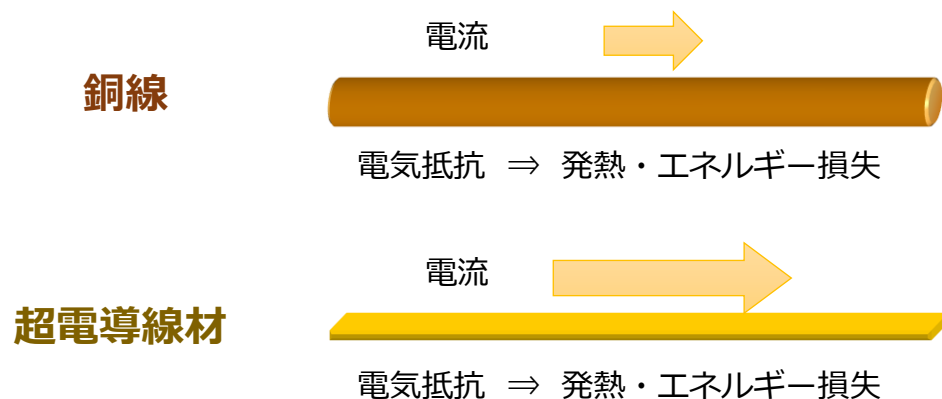
レアアース系 高温超電導線材のご紹介

株式会社フジクラ
超電導事業推進室



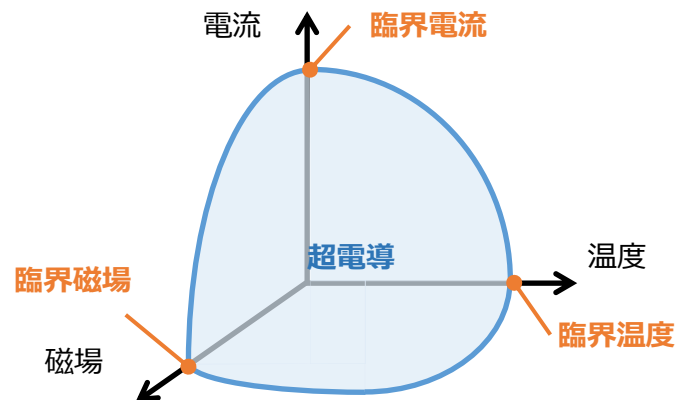
■ 超電導とは？

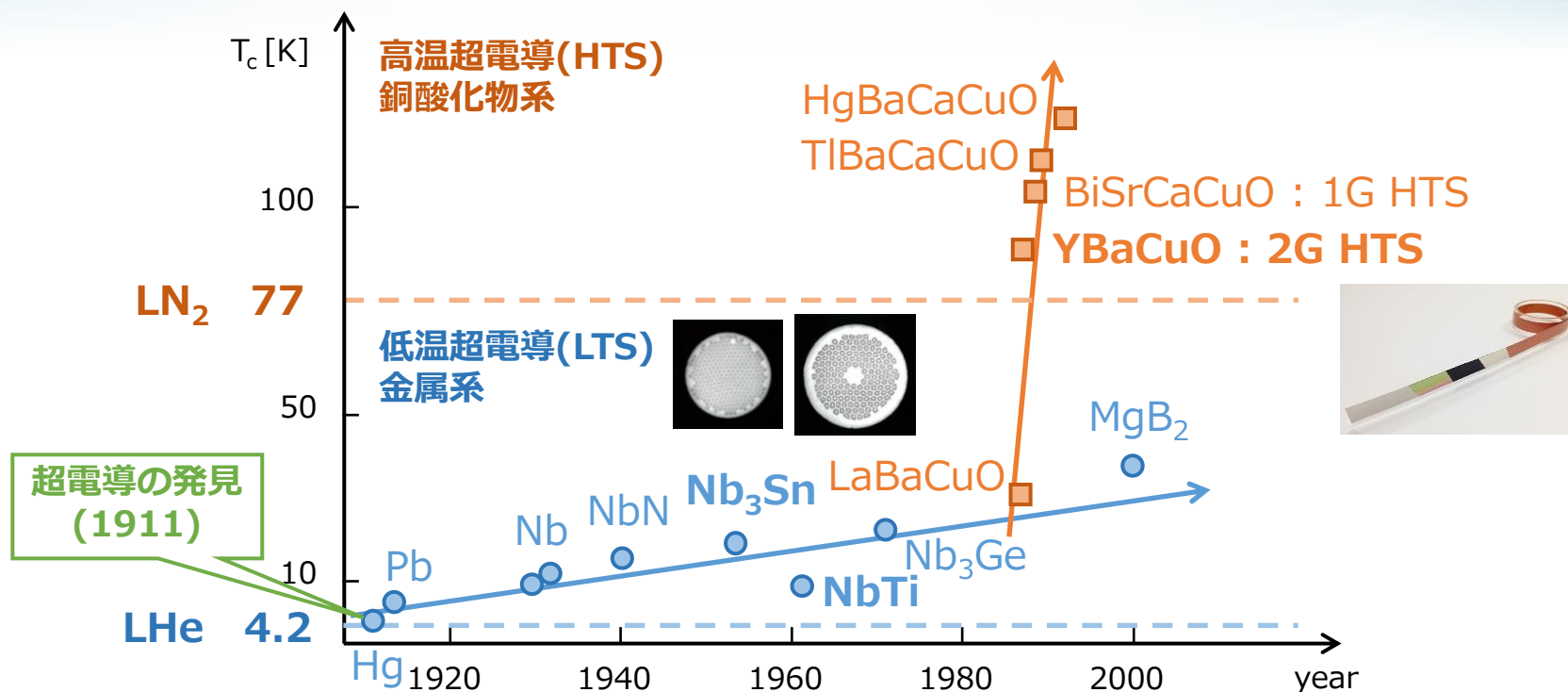
低温のある温度以下で物質の電気抵抗がゼロになる現象
⇒“超電導”現象



■ 超電導の3つの臨界点

- 臨界電流：超電導状態で流せる電流の上限
- 臨界温度：超電導状態を示す温度の上限
- 臨界磁場：超電導状態が壊れない磁場の上限





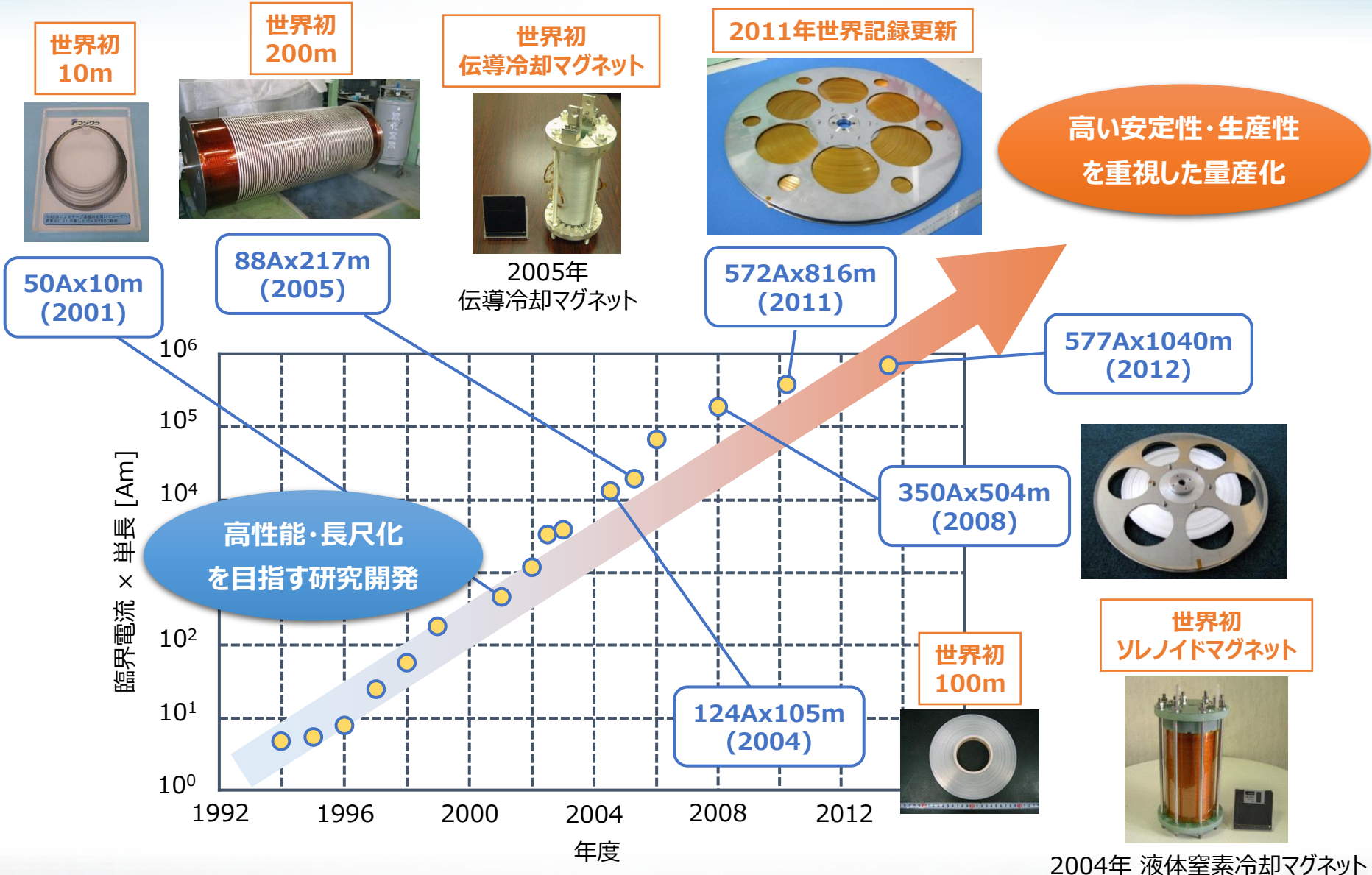
低温超電導 (金属系)

- 液体ヘリウム温度 (4.2K/-269℃) まで冷却が必要
- 従来の超電導応用機器で既に実用化

高温超電導 (銅酸化物系)

- 液体窒素温度 (77K/-196℃) 以上でも超電導を示す
 - 実用化に向けた実証検証段階
- ビスマス (Bi) : 第1世代 (1G)
- イットリウム (Y) ・レアアース (Rare-Earth:RE) : 第2世代 (2G)

フジクラにおける高温超電導線材の開発



■ 製品ラインナップ

Products	Width [mm]	Thickness [mm]	Substrate [μm]	Stabilizer [μm] *5	AP Option	Critical Current [A]	
						77K, S.F.	20K, 5T *4
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	Non-AP *2	≥ 165	368
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	Non-AP *2	≥ 550	1,104
FYSC-S12 *1	12	0.08	75	–	Non-AP *2	≥ 550	–
FESC-SCH02	2	0.11	50	20	AP *3	≥ 30	320
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	AP *3	≥ 63	480
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	AP *3	≥ 85	640
FESC-SCH04(05)	4	0.07	50	5	AP *3	≥ 85	640
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	AP *3	≥ 250	1,920
FESC-S12 *1	12	0.06	50	–	AP *3	≥ 250	–

*1 銅安定化層なし、銀保護層のみ仕様は12mm幅のみ提供可、電流リード、低熱伝導アプリケーション向けでのご使用を推奨しております。

*2 人工ピンなし仕様は高温における導体、その他一般用途向けでのご使用を想定しております。

*3 人工ピンあり仕様は低温・高磁場におけるマグネットアプリケーション用途でのご使用を推奨しております。

*4 $I_c@20K, 5T$ は参考値であり、実際の性能を保証するものではありません。

*5 銅厚さをカスタマイズする対応も可能ですので、ご要望ございましたらご相談下さい。(5μm、10μm、40μm等)

<線材構造模式図>

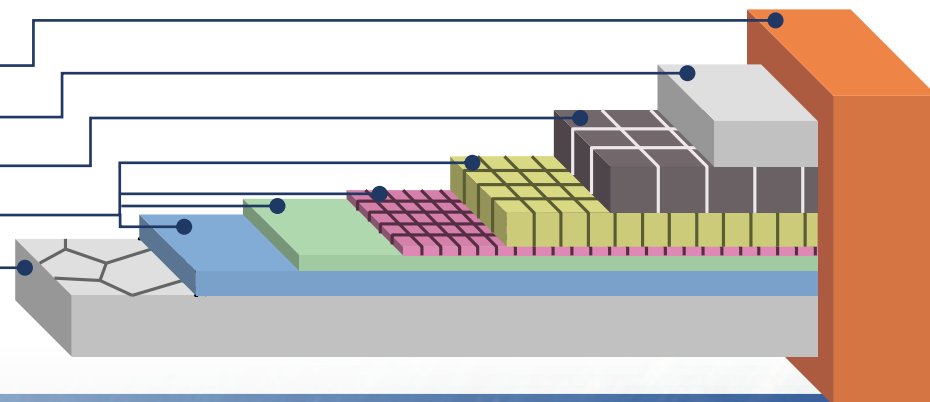
安定化層 [銅めっき] 片側20μm

保護層 [Ag] 2μm

超電導層 [GdBCO] 2 μm / [EuBCO+BHO] 2.5 μm

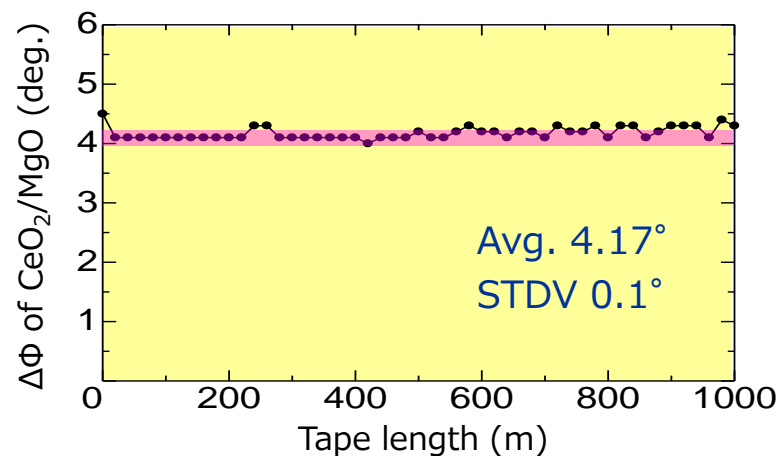
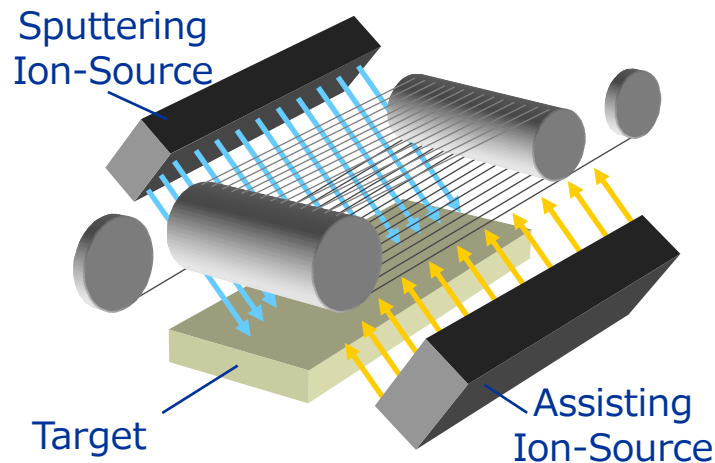
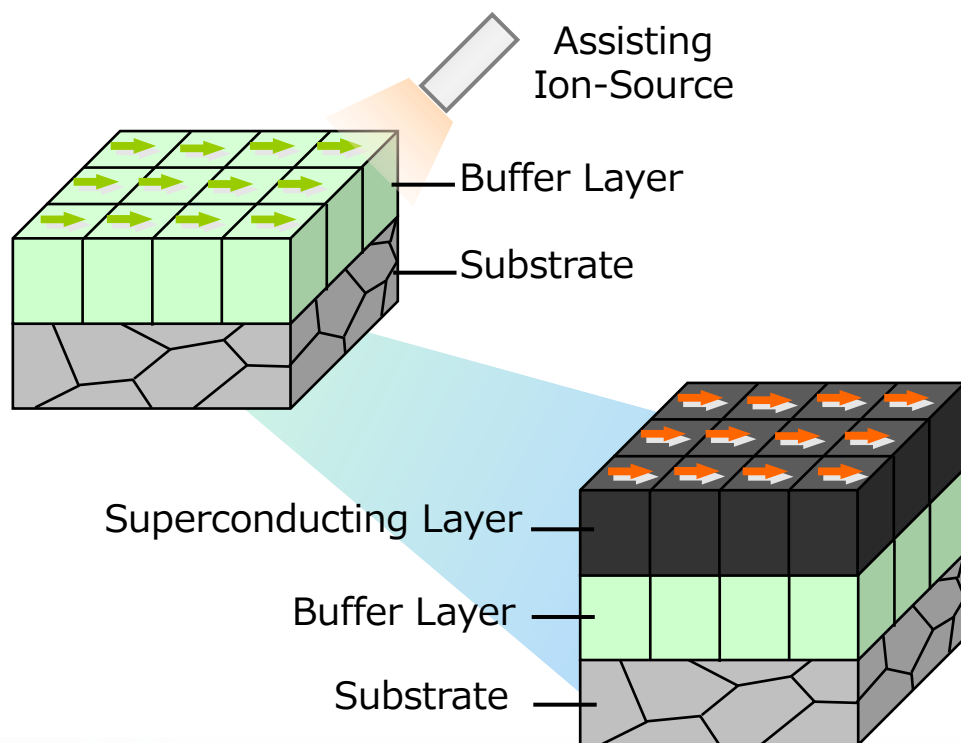
中間層 [MgO, etc.] ~0.7μm

金属基板 [ハステロイ®] 75μm / 50 μm



■ IBAD法 (Ion Beam Assisted Deposition)

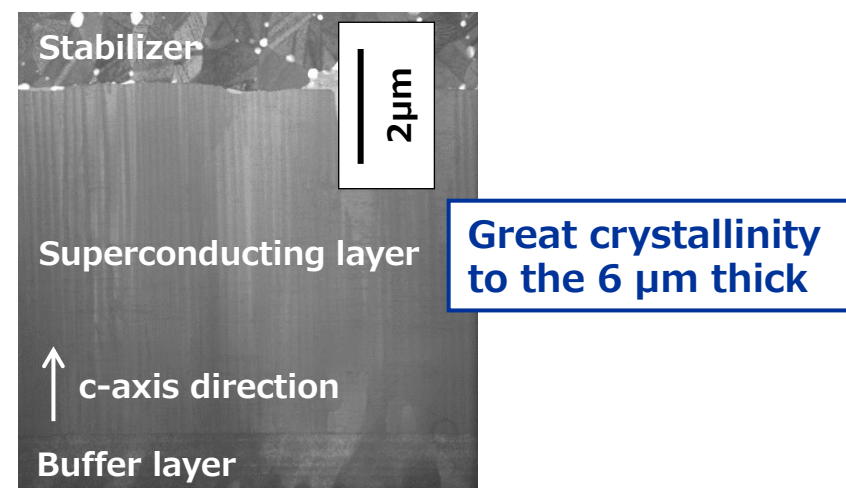
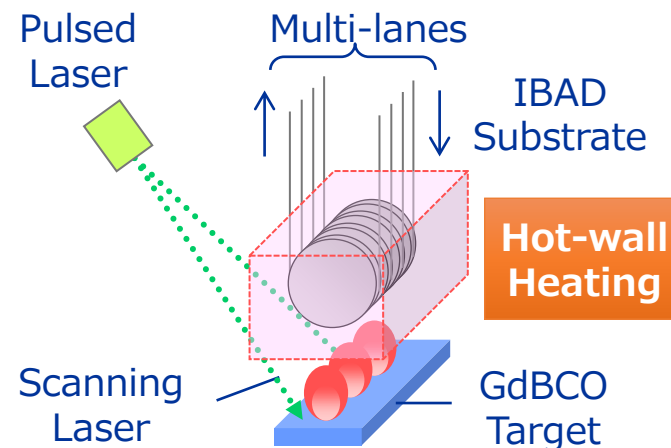
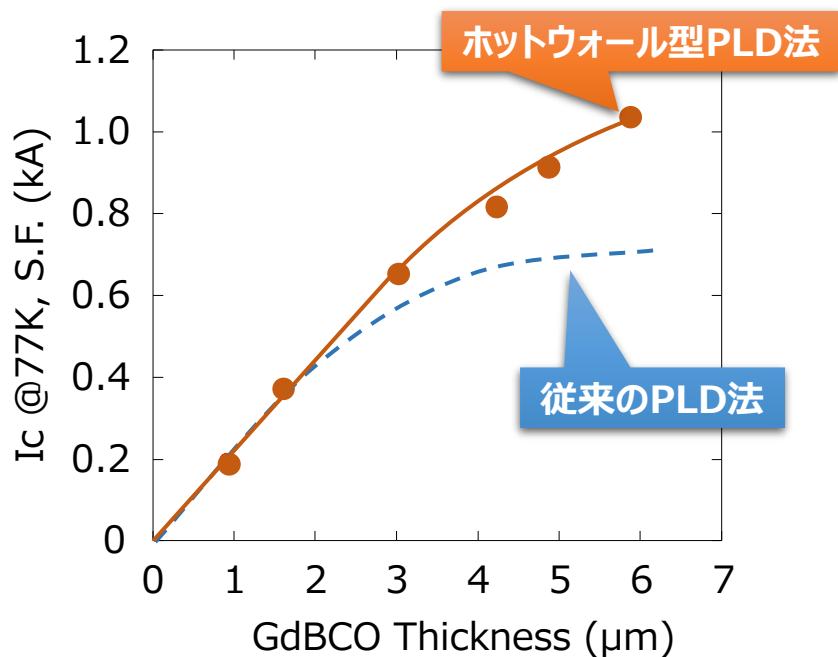
- 中間層の製造方法
- フジクラ独自技術 (1991年開発)
- 結晶方位の揃った薄膜形成が可能



1km-length PLD- CeO_2 /IBAD-MgO Substrate

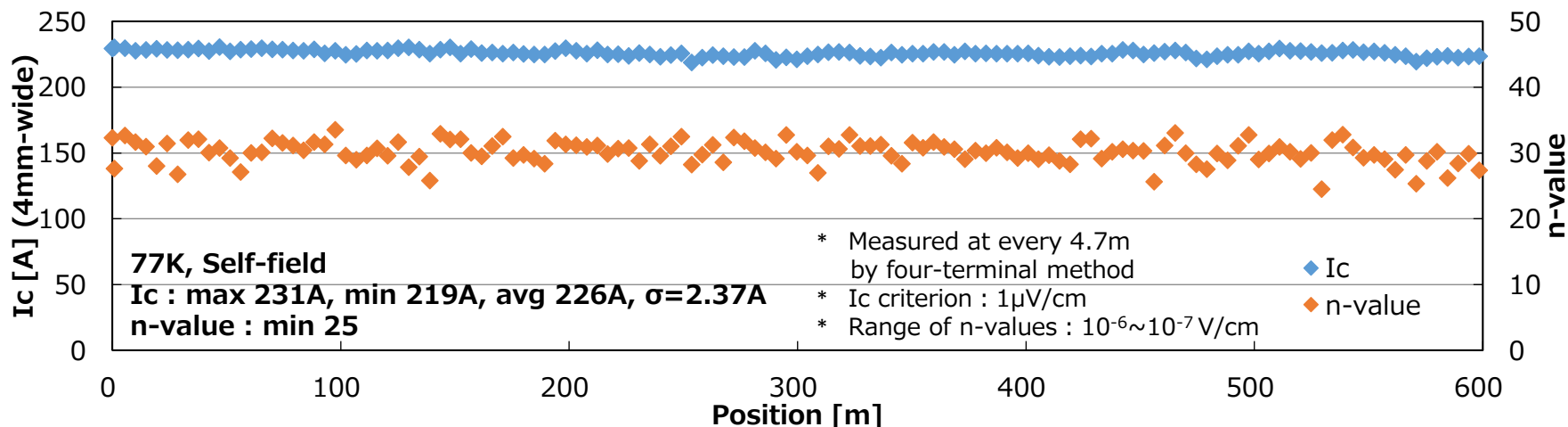
■ PLD法 (Pulsed Laser Deposition)

- 超電導層の製造方法
- ホットウォール型PLD法はフジクラ独自開発
- 成膜温度が極めて安定するため従来にない高品質な超電導層の形成が可能

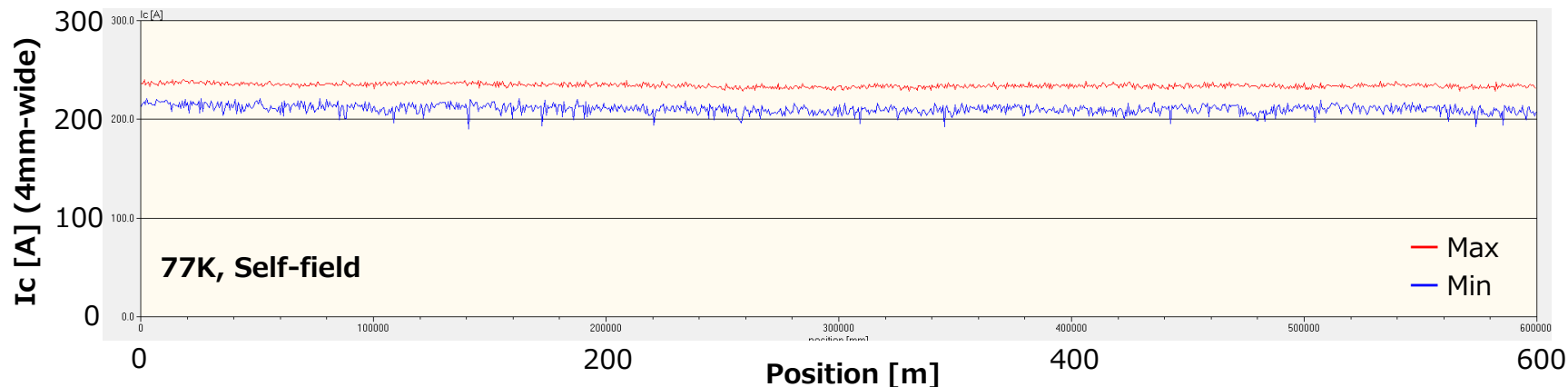


Cross Sectional TEM Image

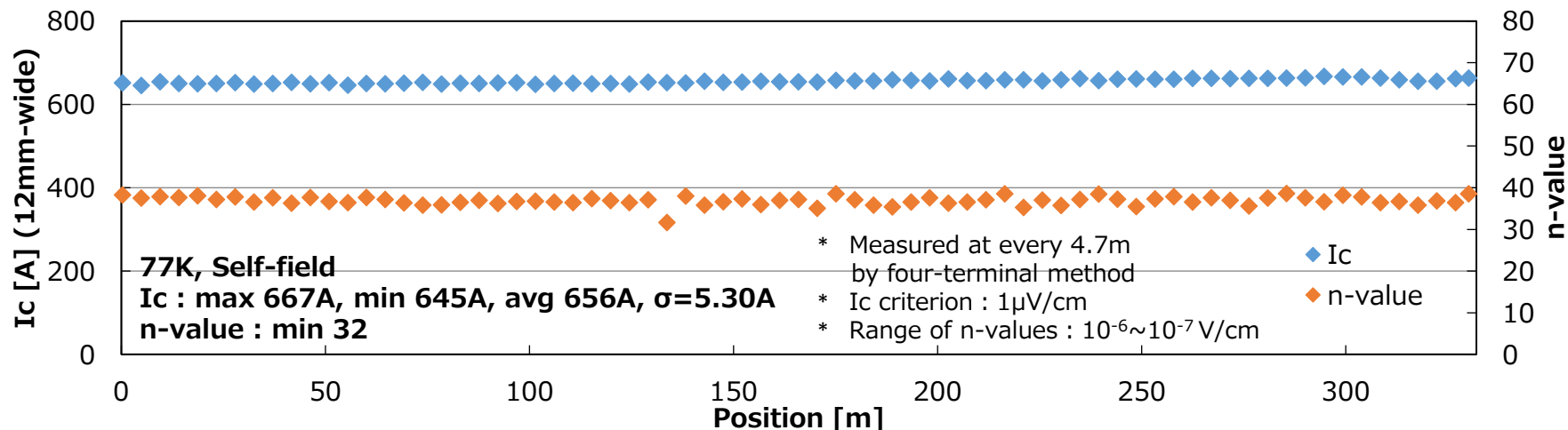
■ 連続通電測定 - 4mm幅 (FYSC-SCH04)



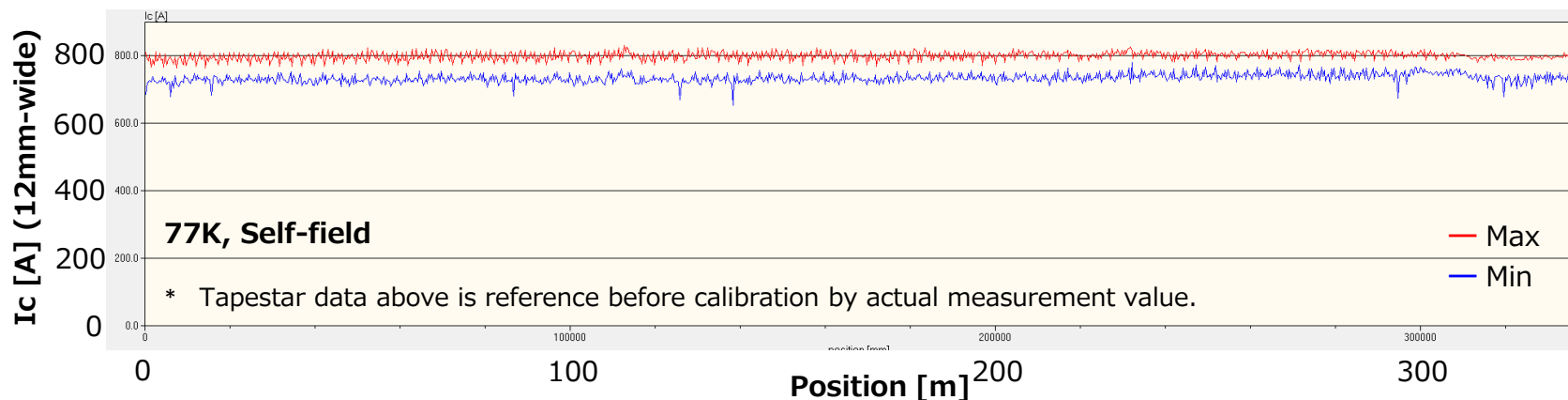
■ 磁化測定 @TapestarTM - 4mm幅 (FYSC-SCH04)



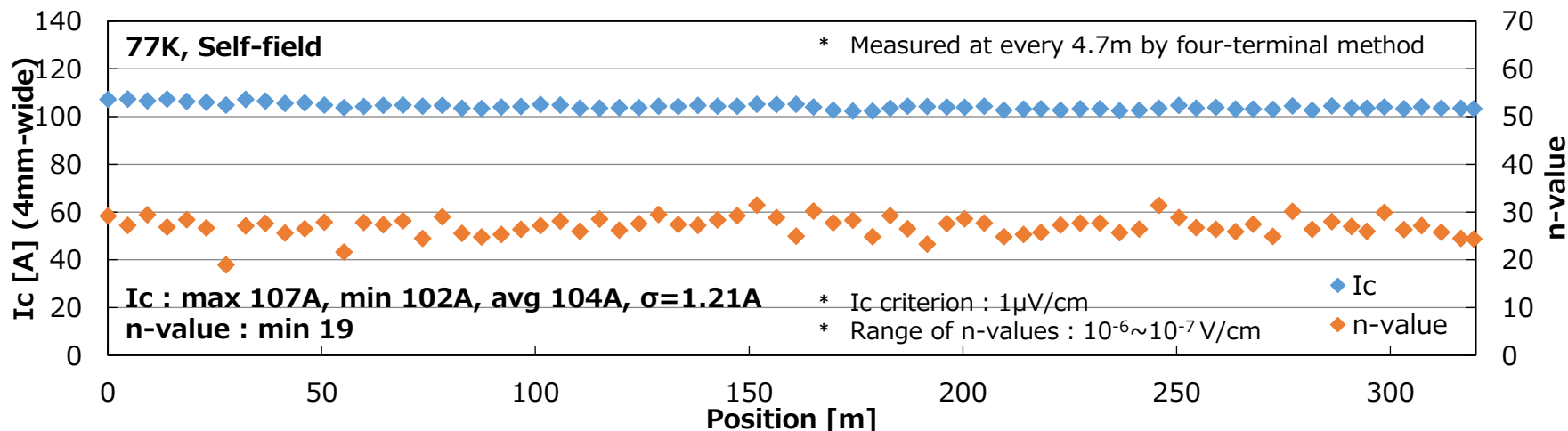
■ 連続通電測定 - 12mm幅 (FYSC-SCH12)



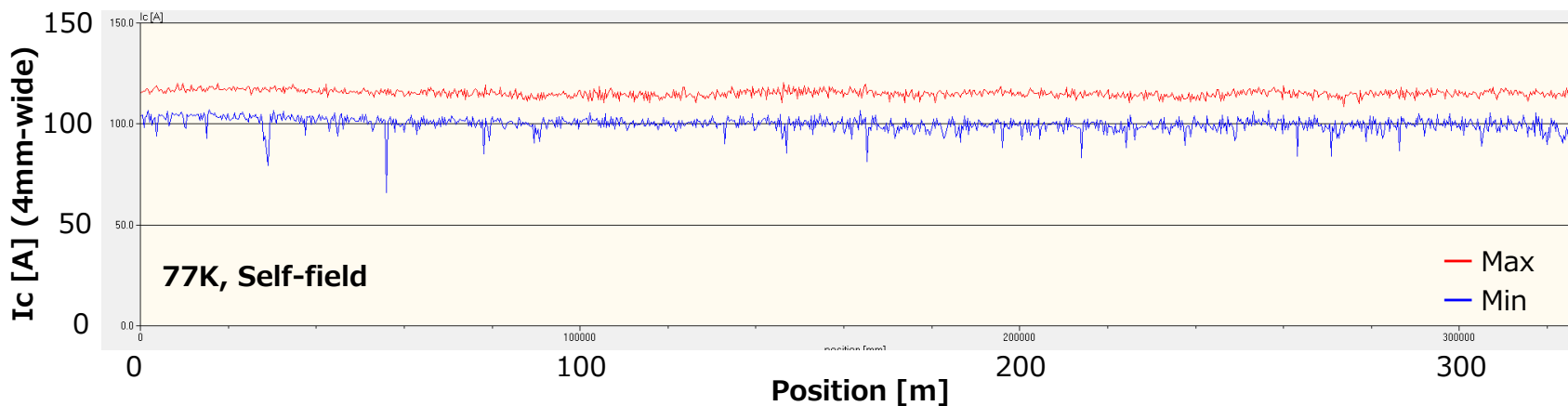
■ 磁化測定 @Tapestar™ - 12mm幅 (FYSC-SCH12)



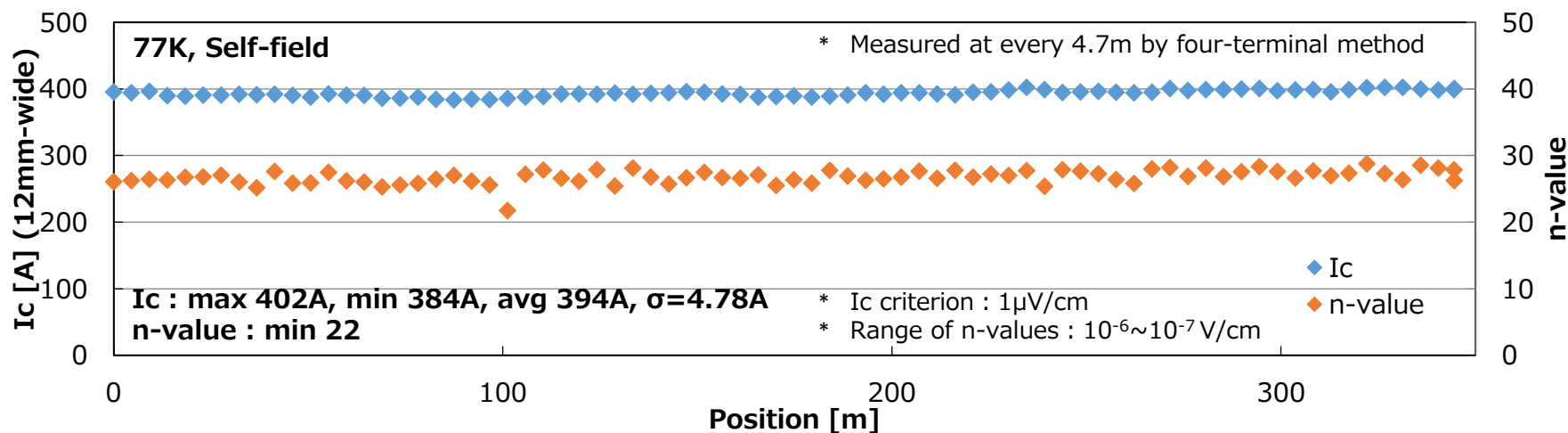
■ 連続通電測定 - 4mm幅・人工ピン (FESC-SCH04)



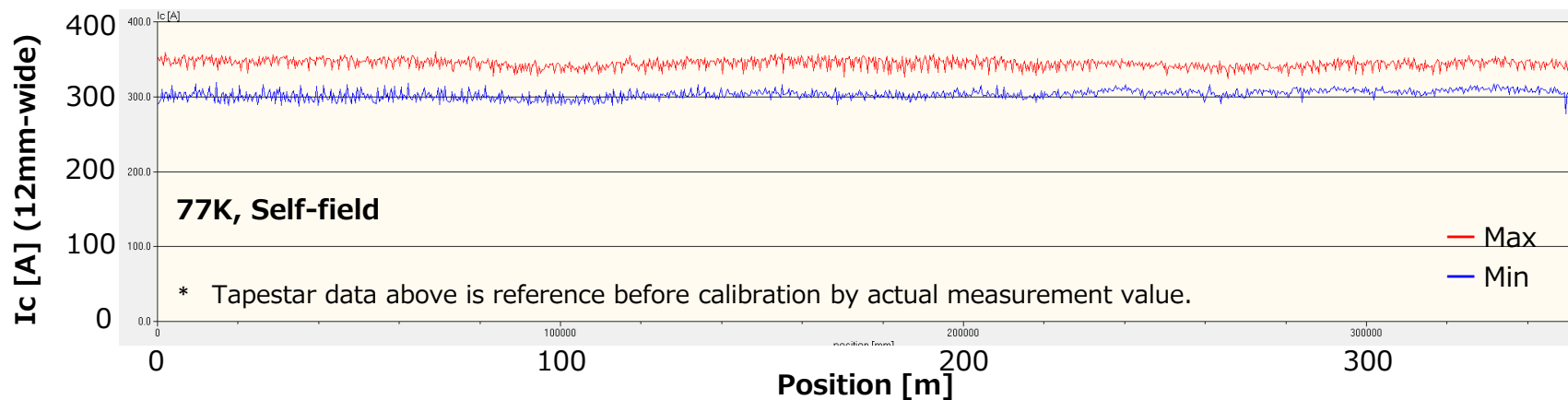
■ 磁化測定 @Tapestar™ - 4mm幅・人工ピン (FESC-SCH04)



■ 連続通電測定 - 12mm幅・人工ピン (FESC-SCH12)



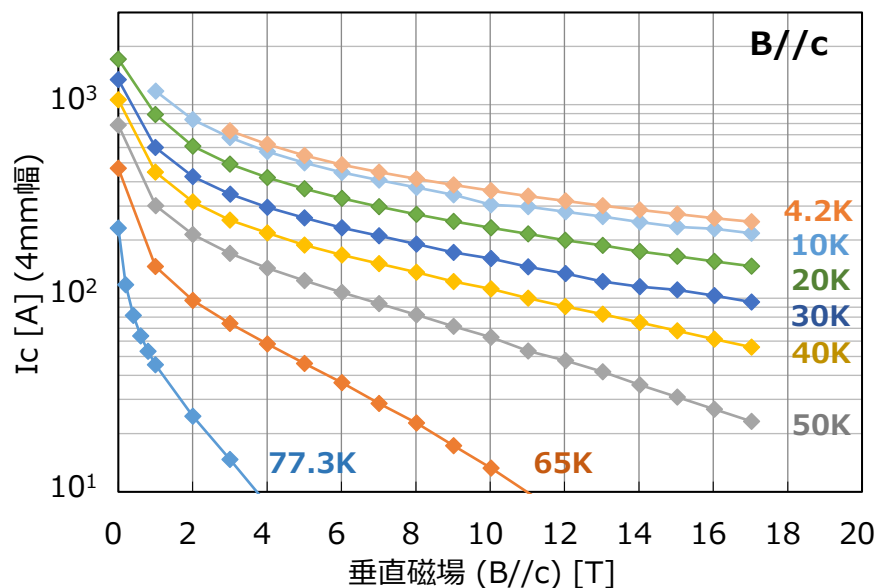
■ 磁化測定 @Tapestar™ - 12mm幅・人工ピン (FESC-SCH12)



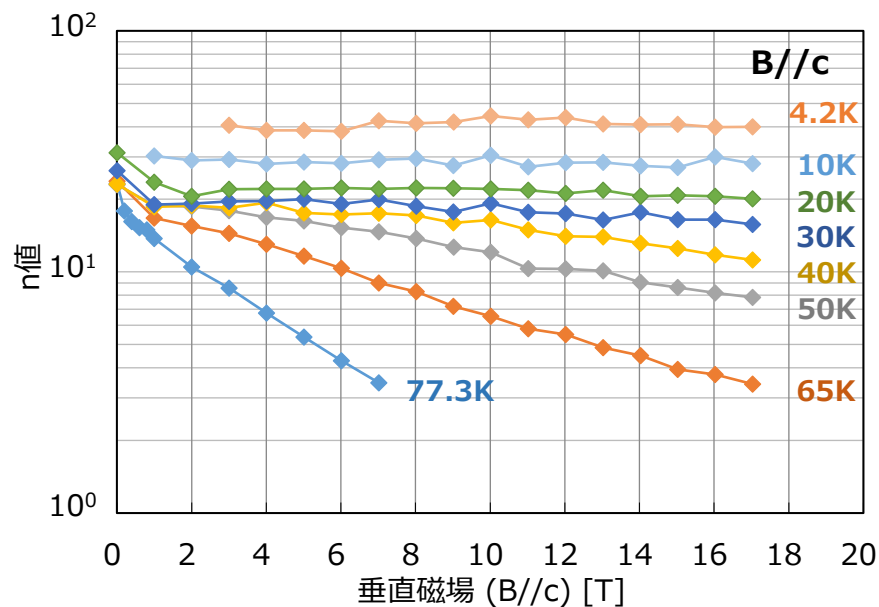
■ 垂直磁場方向（B//c）における磁場中Ic特性（FYSC）（参考データ）

サンプル：Ic = 230A@77K, Self-field（4mm幅）（超電導層厚さ：1.9μm）

Ic - B - T 特性



n値 - B - T 特性

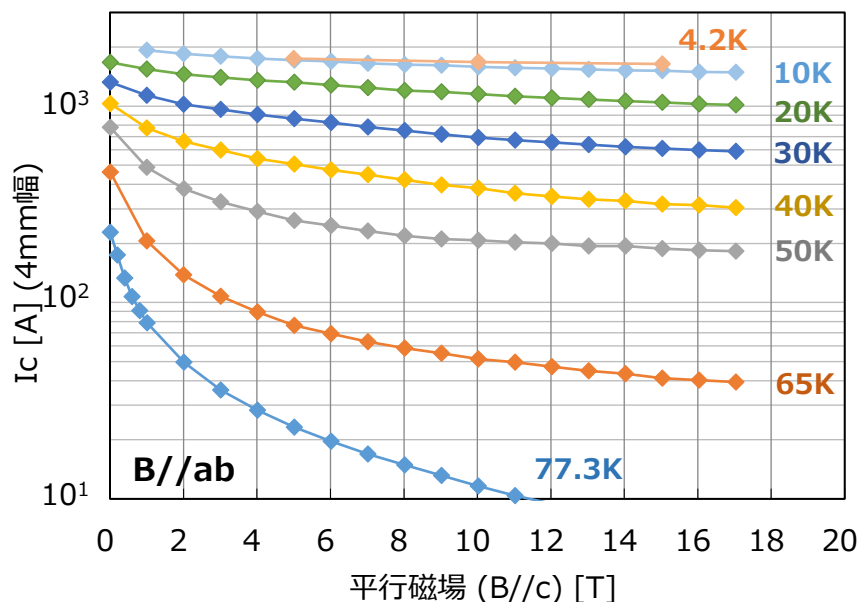


* 本測定データには東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターで測定されたデータが含まれます。

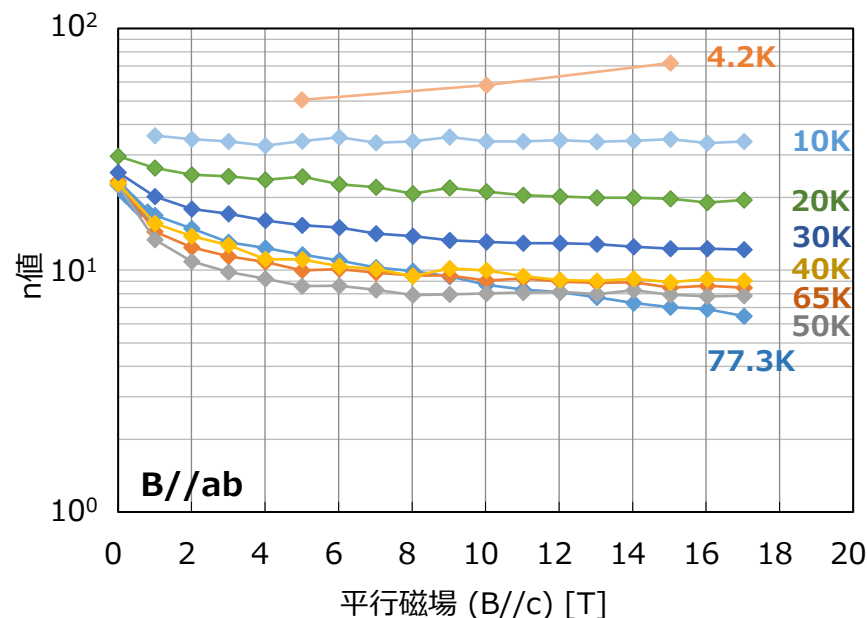
■ 平行磁場方向（B//ab）における磁場中Ic特性（FYSC）（参考データ）

サンプル：Ic = 230A@77K, Self-field（4mm幅）（超電導層厚さ：1.9μm）

Ic - B - T 特性



n値 - B - T 特性

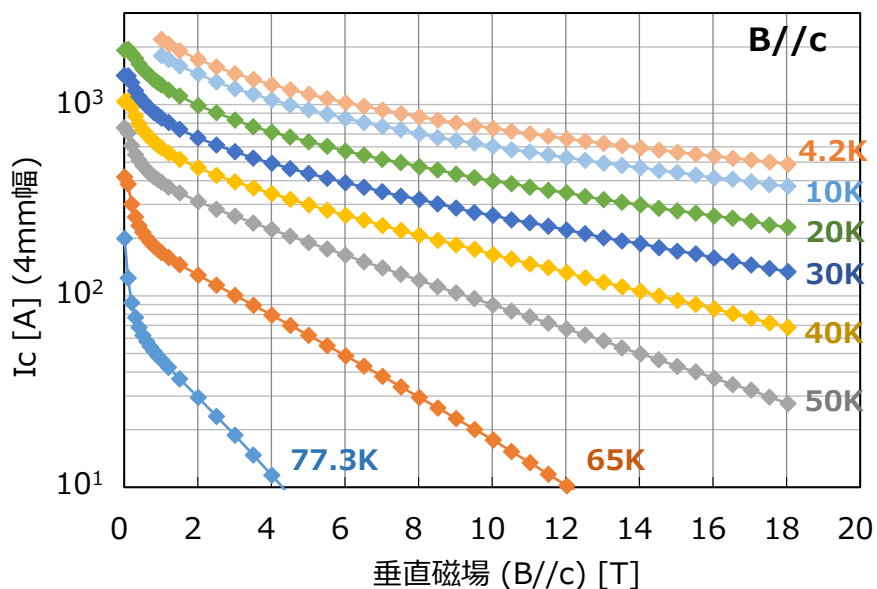


* 本測定データには東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターで測定されたデータが含まれます。

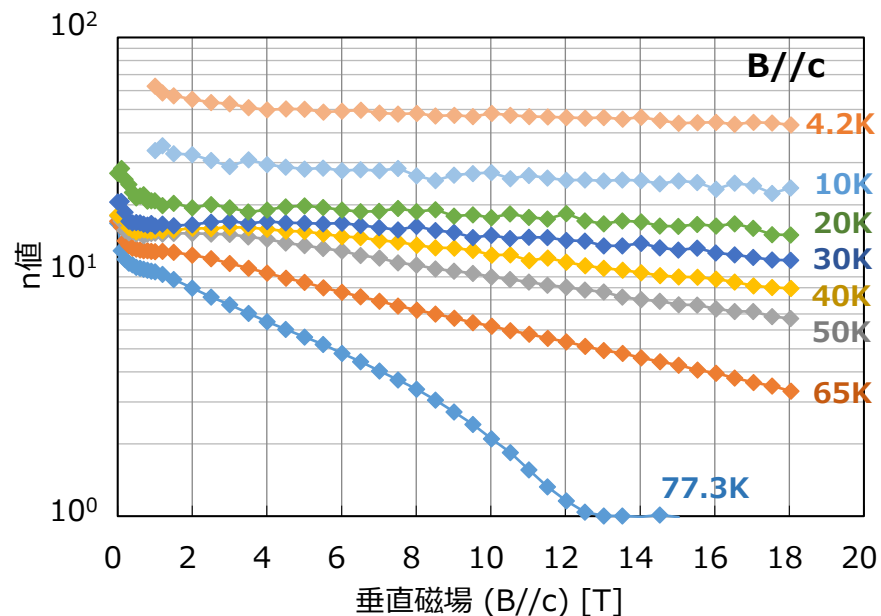
■ 垂直磁場方向 (B//c) における磁場中Ic特性 (FESC) (参考データ)

サンプル : Ic = 200A@77K, Self-field (4mm幅) (超電導層厚さ : 2.4 μ m)

Ic - B - T 特性



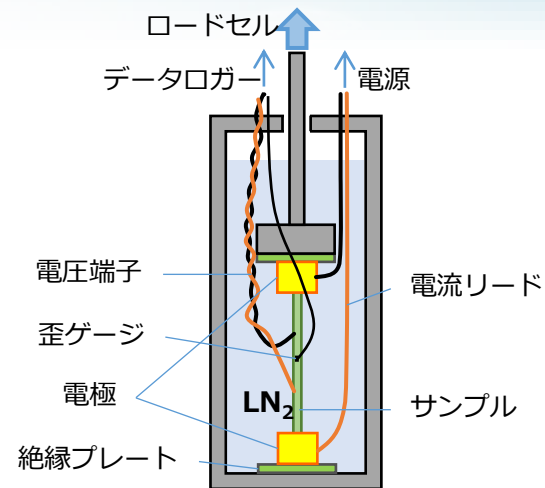
n値 - B - T 特性



* 本測定データには東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターで測定されたデータが含まれます。

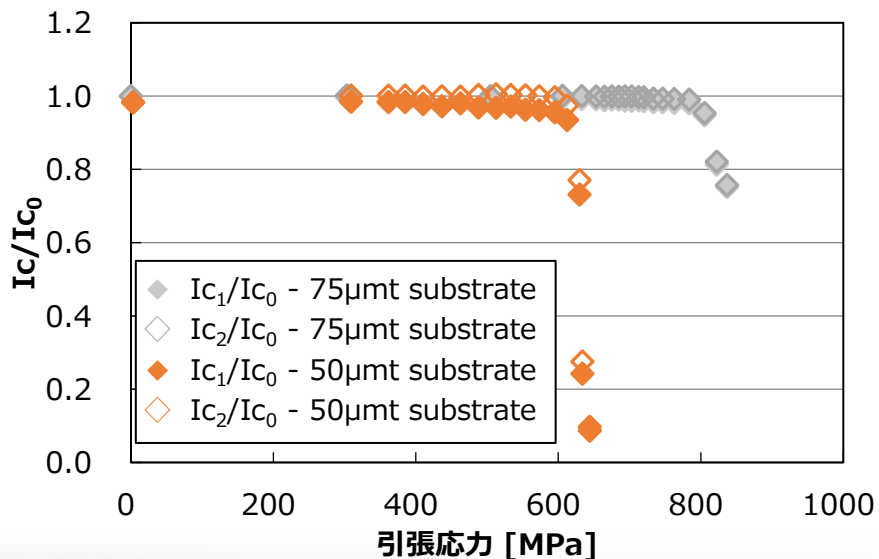
■ 引張試験 (LN₂中)

- サンプル :
 - 4mm幅・75μm厚基板+20μm厚銅めっき (FYSC-SCH04)
 - 4mm幅・50μm厚基板+20μm厚銅めっき (FESC-SCH04)
- 測定方法 :
 1. LN₂中、無負荷でI_c測定 (I_{c0})
 2. LN₂中で引張歪みを印加しながらI_c測定 (I_{c1})
 3. LN₂中で引張歪み解放後I_c測定 (I_{c2})

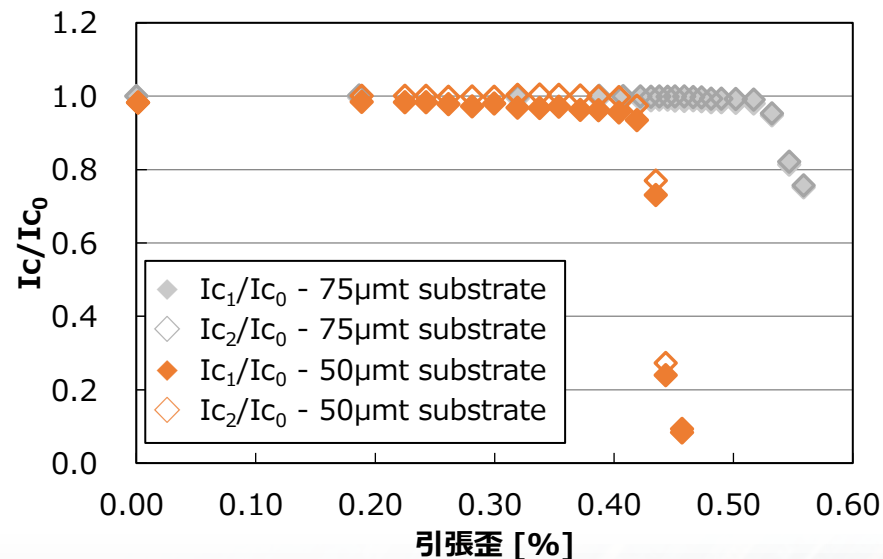


引張試験模式図

引張応力に対するI_c変化

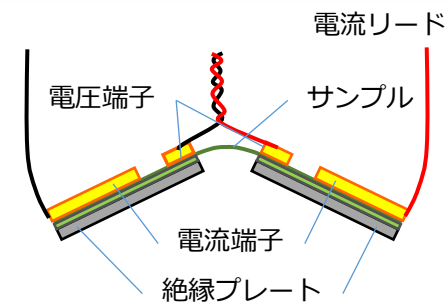


引張歪みに対するI_c変化



■ 曲げ試験 (LN₂中、Goldacker方式)

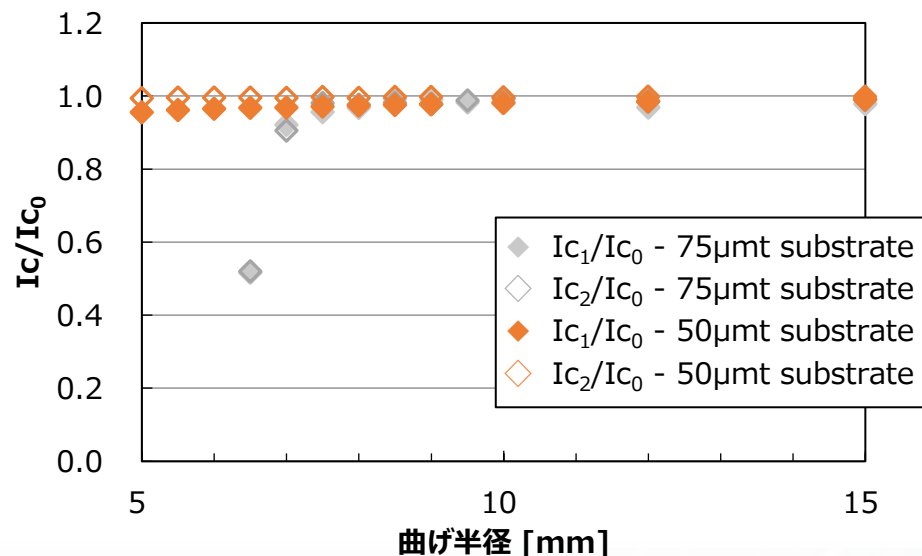
- サンプル :
 - 4mm幅・75μm厚基板+20μm厚銅めっき (FYSC-SCH04)
 - 4mm幅・50μm厚基板+20μm厚銅めっき (FESC-SCH04)
- 測定方法 :
 1. LN₂中、直線状でI_c測定 (I_{c0})
 2. LN₂中で曲げ歪みを印加しながらI_c測定 (I_{c1})
 - ※曲げ方向は引張方向 (超電導層が外側になるように曲げ試験を実施)
 3. LN₂中で曲げ歪み解放後I_c測定 (I_{c2})



曲げ試験模式図

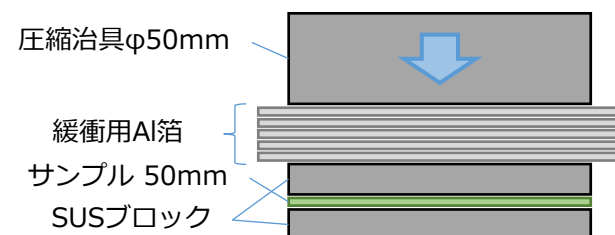
曲げ半径に対するI_c変化

50μm厚基板線材では
測定限界の5mm以下
でもI_c低下確認されず



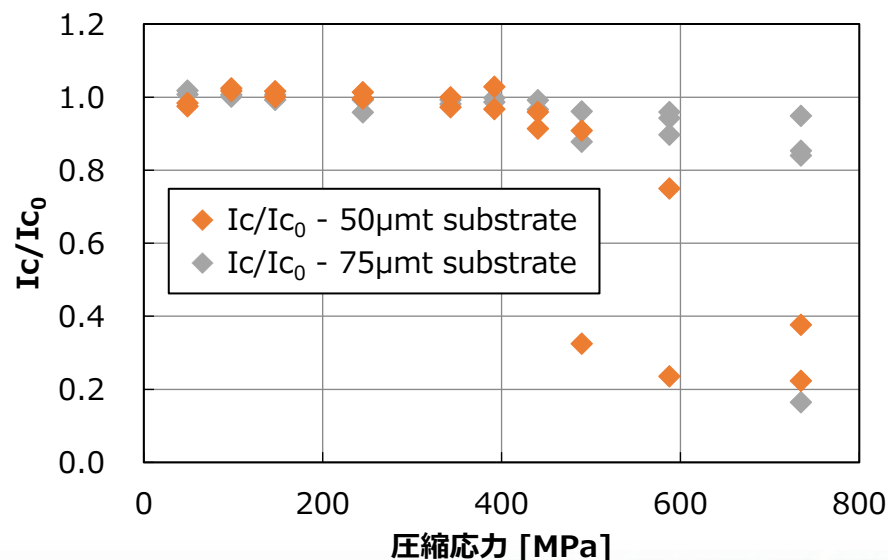
■ 圧縮試験（室温・面垂直方向・参考データ）

- サンプル：
 - 4mm幅・75 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき（FYSC-SCH04）
 - 4mm幅・50 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき（FESC-SCH04）
- 測定方法：
 - LN₂中、無負荷でI_c測定（I_{c0}）
 - 室温で厚さ方向に圧縮負荷を印加
 - 圧縮負荷印加後、室温でI_c測定（I_c）



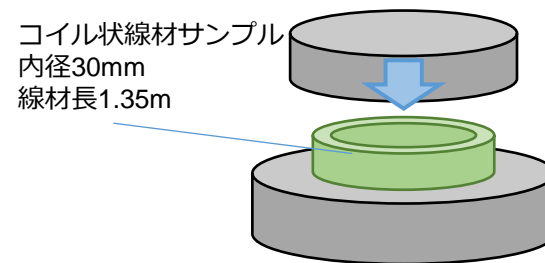
圧縮応力に対するI_c変化

400MPaの厚さ方向
圧縮応力まではI_c特性
低下確認されず



■ 圧縮試験（室温・面垂直方向・参考データ）

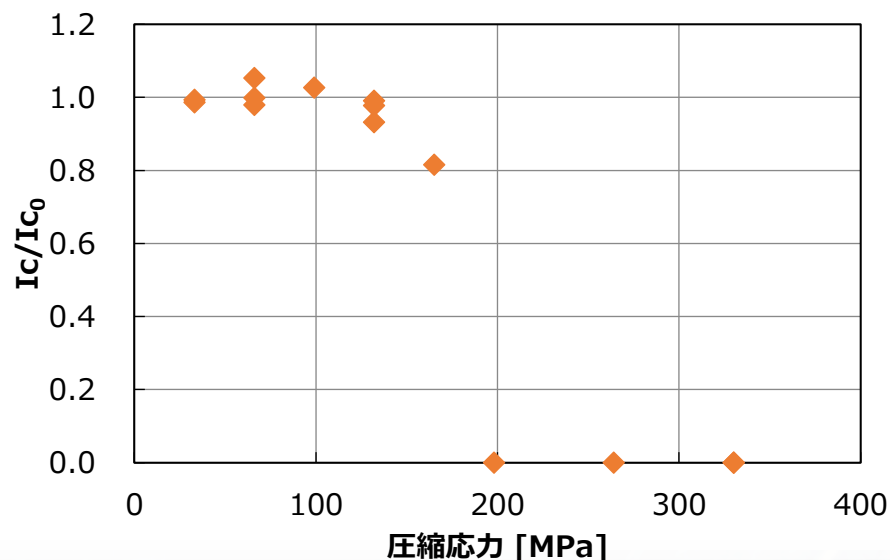
- サンプル：
4mm幅・50 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき（FESC-SCH04）
- 測定方法：
 - LN₂中、無負荷でIc測定（Ic₀）
 - 室温でコイル状に巻いたサンプルの幅方向に圧縮負荷を印加
 - 圧縮負荷印加後、室温でIc測定（Ic）



幅方向圧縮試験模式図

圧縮応力に対するIc変化

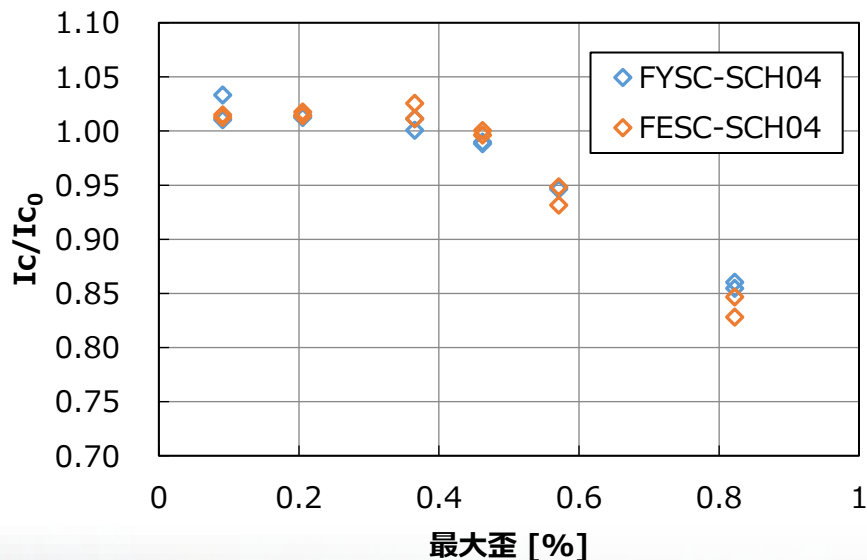
100MPaの幅方向圧縮
応力まではIc特性低下
確認されず



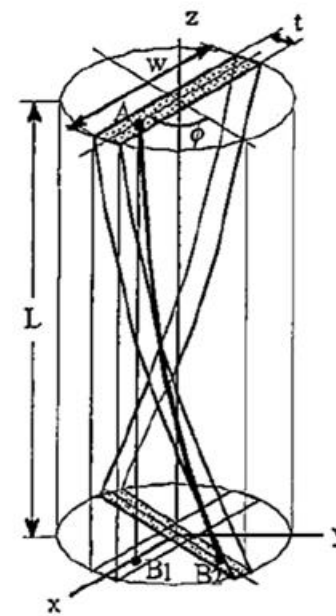
■ 捻回試験（室温・参考データ）

- サンプル：
 - 4mm幅・75 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき（FYSC-SCH04）
 - 4mm幅・50 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき（FESC-SCH04）
- 測定方法：
 1. LN₂中、直線状でI_c測定（I_{c0}）
 2. 室温でサンプルの片側にねじり負荷を印加（捻回ピッチ=240mm、引張荷重=2kgf）
 3. LN₂中でねじり負荷解放後I_c測定（I_c）

捻回歪に対するI_c変化



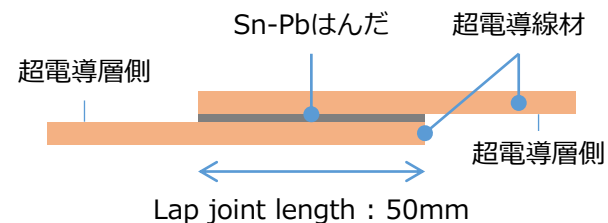
$$\varepsilon = \frac{\phi^2}{2L^2} \left(x^2 - \frac{w^2}{12} \right)$$



M. Takayasu, et al., AIP Conf Proc 1219, 337 (2010)

■ ラップ接続抵抗（参考データ）

- サンプル：
 - 4mm幅・50 μ m厚基板+20 μ m厚銅めっき
(FESC-SCH04)
 - 接続長50mm、Sn-Pbはんだ、超電導層側同士を接続
- 測定方法：
 - LN₂中で接続抵抗を測定（DC 100A）
 - 接続抵抗率を算出



接続サンプル模式図

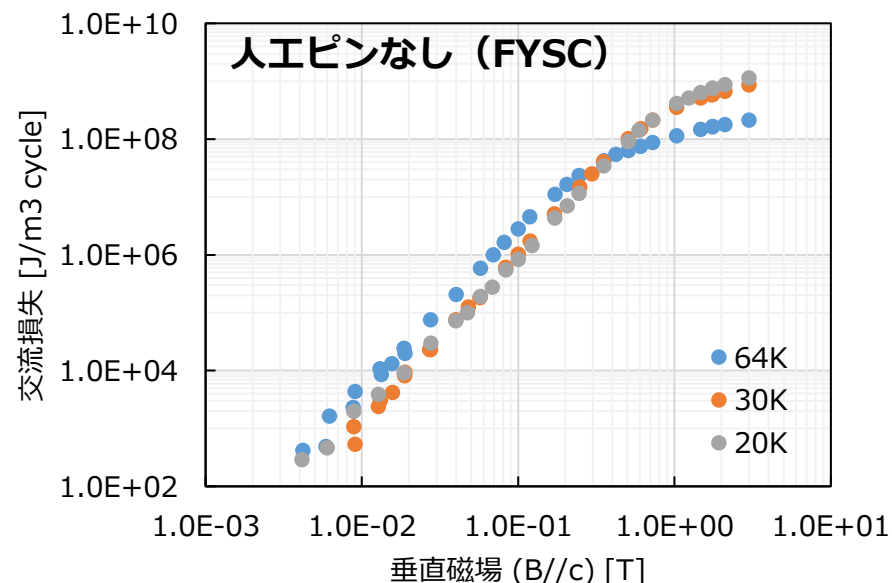
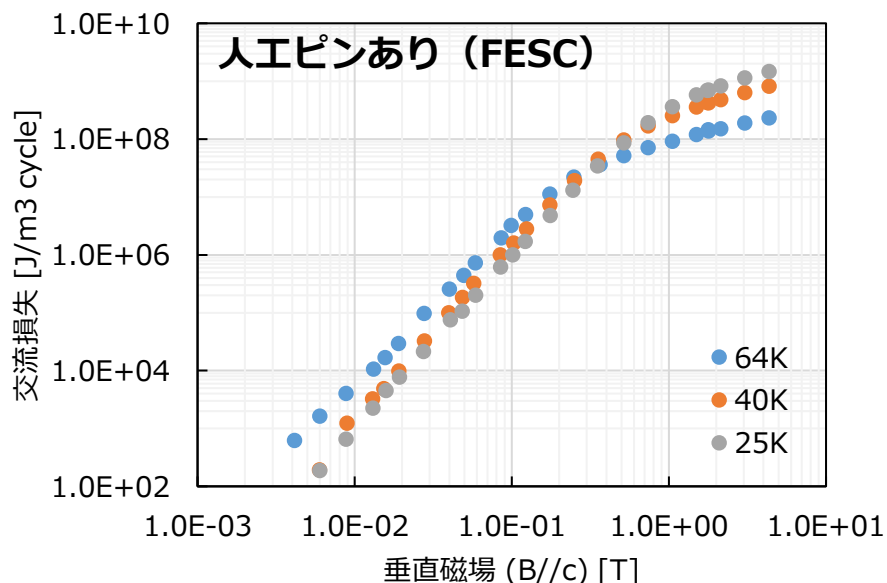
接続抵抗測定結果例（FESC-SCH04）

サンプル (n=6)	接続抵抗（77K） （接続長50mm） [n Ω]	接続抵抗率（77K） [n Ω cm ²]
Avg	27.3	54.5
Max	33.6	67.2
Min	21.4	42.8

■ 測定条件

サンプル	<ul style="list-style-type: none"> 人工ピンあり (FESC) 、4mm幅・50μm厚基板+20μm厚銅めっき 人工ピンなし (FYSC) 、4mm幅・75μm厚基板+20μm厚銅張り合わせ (旧品種)
測定温度	20 - 64 K
印加磁場 (B//c)	0.04 - 4.3 T
印加磁場周波数	0.01 - 0.2 Hz

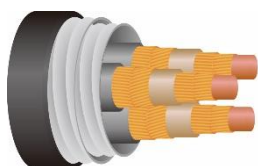
■ 測定結果



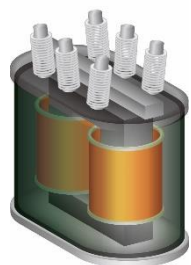
* 本測定データには九州大学 超伝導システム科学研究センターで測定されたデータが含まれます。

レアアース(RE)系 高温超電導線材

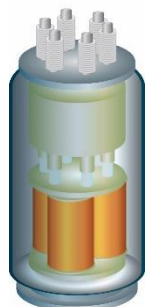
- 強磁場における高い臨界電流（強磁場での適用可）
- 運転温度の高温化（ヘリウムフリー）
- 従来の超電導機器（金属系）の小型・軽量化



電力ケーブル

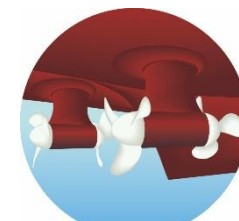
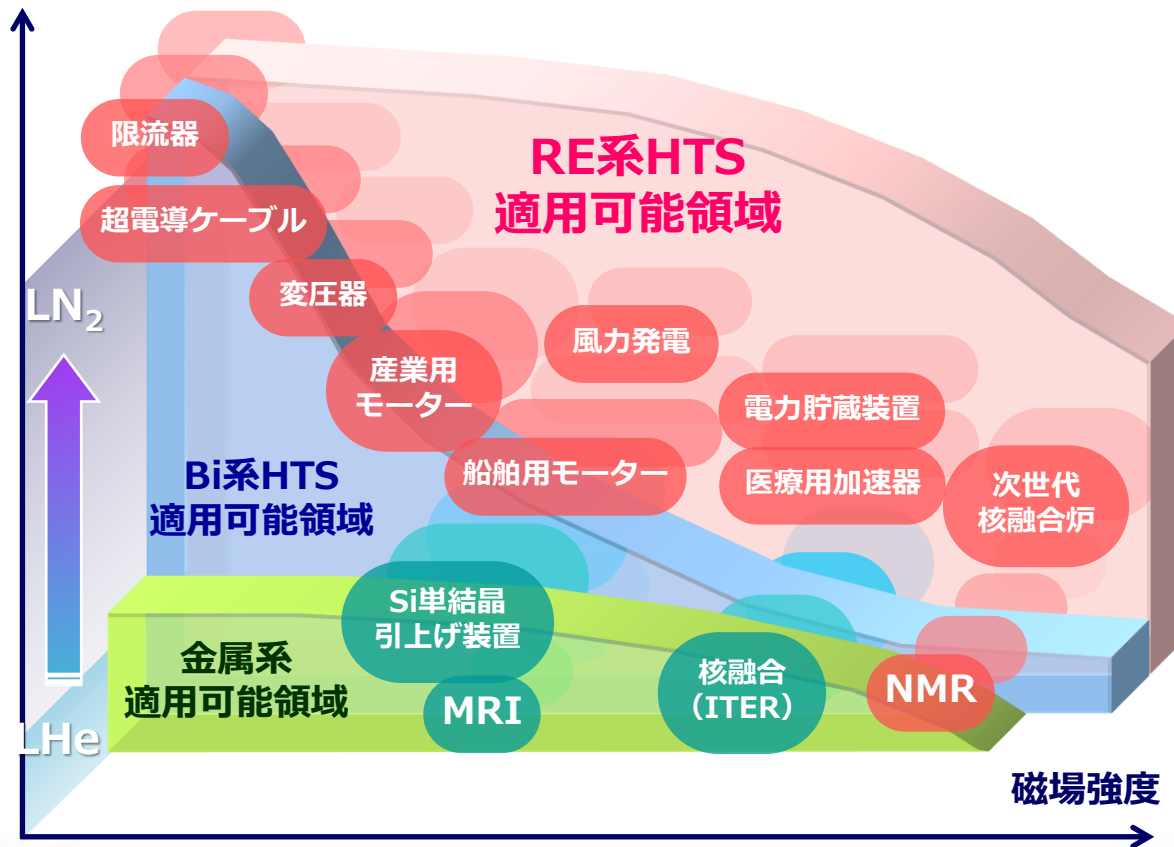


変圧器

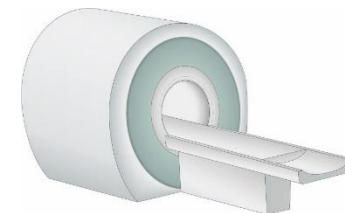


限流器

運転温度



船舶用モーター



MRI

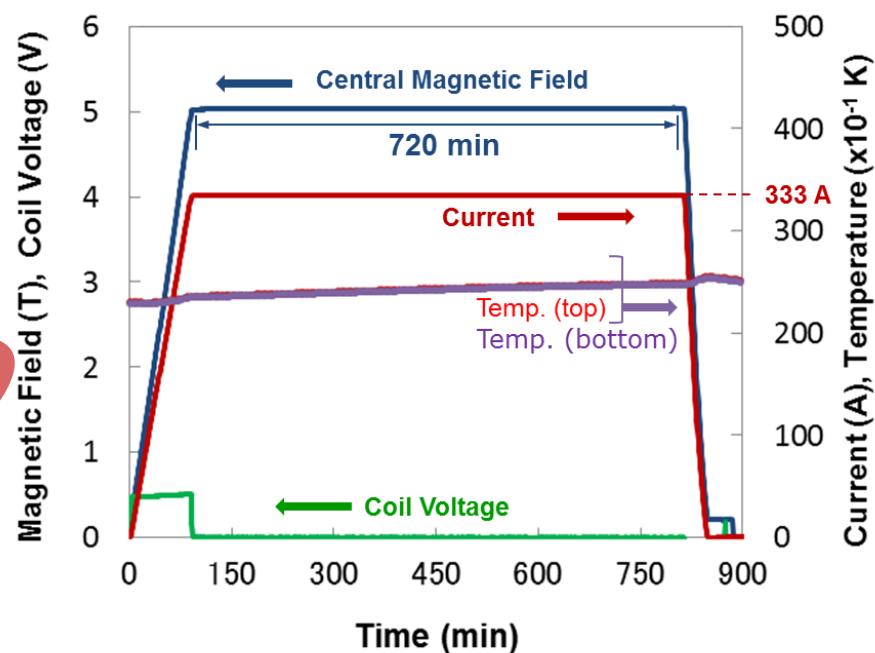


NMR

世界最大級Y系 5 T 高温超電導マグネット

- フジクラ製超電導線材を使用
- 使用線材長：7200 m
- 蓄積エネルギー：426 kJ

- コイル構成：300m×24層
- ターン数：5775ターン
- 運転温度：24 K



5 T 2G HTS 伝導冷却
マグネットの開発に成功 (2012年)

マグネット作製後～現在まで
5 Tの励磁性能維持

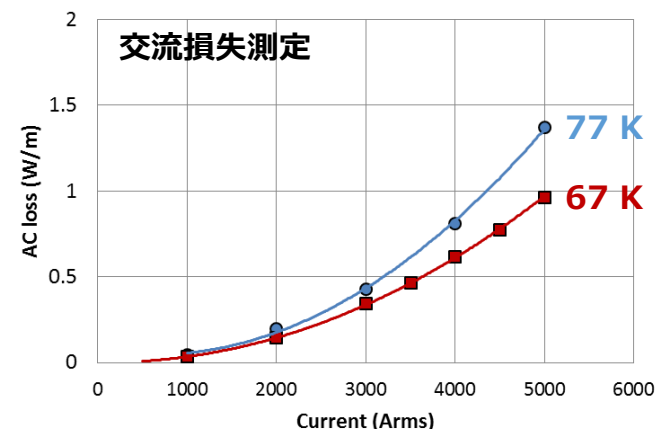
■ 500A級Y系線材を用いた高温超電導ケーブル開発

- 高Ic線材による交流損失低減を検証
- 66kV-5kA級単心ケーブルシステム (10m)
- 長期荷電試験：20 cycles (1 cycle = 8h ON / 16h OFF)
- 目標交流損失 < 2 W/m @5kA
実測交流損失：1.4W/m@77K, 0.95W/m@67K



<ケーブル設計・仕様>

項目	仕様
フォーマー	銅撚り線 (140 mm ²)、20 mmφ
HTS線材 (Ic=14 kA)	4mm幅線材、4層 Ic = 240 A/4 mm-w
絶縁	クラフト紙 (6mm厚)
HTSシールド (Ic=12.7 kA)	4mm幅線材、2層 Ic = 240 A/4mm-w
銅シールド	銅テープ (100mm ²)、44mm
ケーブル保護	不織布、45mmφ
冷却管 外層シース	ステンレス2重コルゲート管、 PEシース、114mmφ



5kA級超電導ケーブル開発に成功

1.37W/mの低交流損失を達成 (2013)

現用の電力ケーブル (代表的な154kV 600MVA級) と比較、冷却効率を考慮した上で、1/4以下の送電損失

NEDOプロジェクト (2013) : フジクラ

http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100196.html

■ はんだ種類と加熱温度

- 通常、融点200℃以下の低温はんだにて数分以内の加熱が推奨されます。はんだが溶けにくい場合、加熱条件（温度・時間）に十分に注意頂いた上で200℃以上に加熱頂くことも可能です。
- 鉛フリーはんだも加熱条件に十分に注意頂いた上でご使用頂けます。用途や環境規制に応じて他のはんだをご使用頂くこともできます。
- 銀保護層のみの線材（FYSC-SまたはFESC-S）ではSn-Bi系はんだ、より好ましくはSn-Bi-Ag系はんだの使用が推奨されます。（銀保護層に対しては特に銀入りはんだの方がはんだ性が良好）

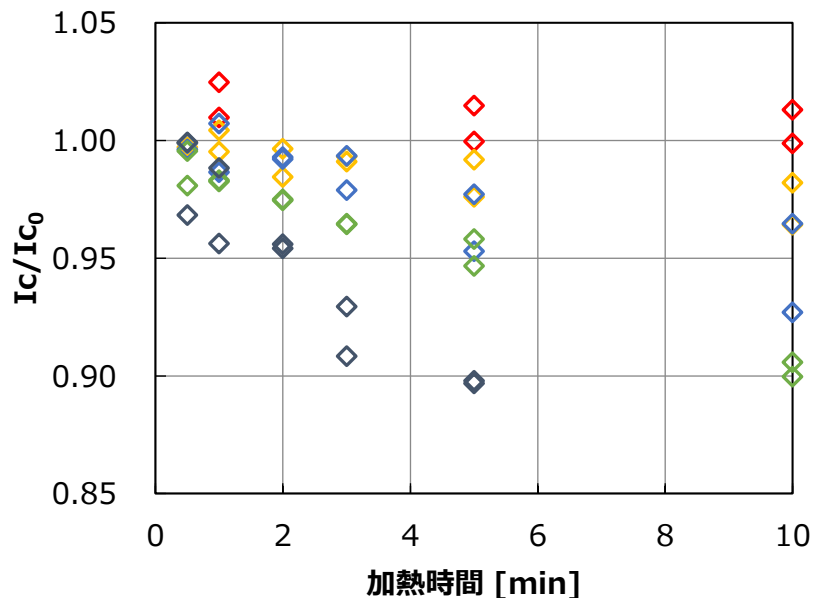
■ 各種はんだの物性値（参考）

はんだ	Sn-Pb	Sn-Bi	Sn-Ag-Cu	Sn-In	Sn	In	
組成 [wt%]	Sn63-Pb37	Sn42-Bi58	Sn96.5-Ag3-Cu0.5	Sn48-In52	Sn (4N)	In (4N)	
融点 [℃]	183.0	138	217	118	231.9	156.6	
電気抵抗率 [nΩm]	297K	167.3	510.6	154.0	168.1	123.1	90.3
	77K	34.6	178.8	19.4	90.3	23.0	17.5

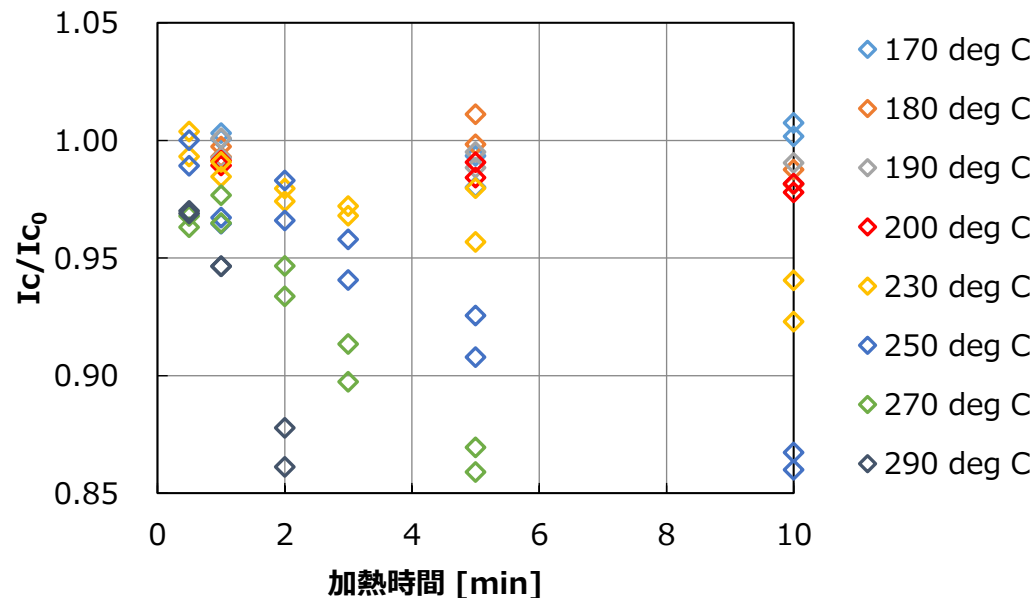
* 電気抵抗率は当社測定

■ 加熱時間に対するIc特性低下

人工ピンなし (FYSC)



人工ピンあり (FESC)



- * 通常は200℃以下、数分以内の加熱が推奨されます。
- * 200℃以上の加熱も可能ですが、加熱時間には十分に注意頂けますようお願い致します。
- * 銀保護層のみの線材でははんだ付けの際に銀くわれが生じるため、加熱条件はこの限りではありません。

■ 取り扱い

- 線材を折り曲げないでください。
- 線材を許容曲げ直径以下に曲げないでください。
- 線材を許容引張り応力以上で引っ張らないでください。
- 線材に水分が付着した状態で放置しないでください。
- 線材を巻き取る際には線材が捻れないようにしてください。
- 線材を切断する際には、線材を固定してから切断してください。絶縁テープを巻いている場合は固定せずに切断すると、絶縁テープがほどけてしまう場合があります。

■ 保管方法

- 高温・多湿を避け、室温、乾燥した雰囲気でご保管してください。
- 水が掛からない状態で保管してください。
- 結露しない環境で保管してください。
- 腐食性雰囲気にさらさないでください。
- 線材やリールの上に重いものを載せないでください。
- リールが変形しないように保管してください。

■ 環境規制

- 超電導線材および出荷時の梱包資材は全てRoHS規制に準拠しています。

■ 輸出管理

- フジクラ製超電導線材は輸出規制貨物に該当します。

日本・その他 地域

株式会社フジクラ 超電導事業推進室

千葉県佐倉市六崎1440
電話：043-484-3048
E-mail：ask-sc@jp.fujikura.com
www.fujikura.co.jp

ヨーロッパ

Fujikura Europe Ltd.

C51 Barwell Business Park, Leatherhead Road
Chessington, Surrey, KT9 2NY, UK
Phone: +44-20-8240-2000
E-mail: superconductor@fujikura.co.uk
www.fujikura.co.uk

アメリカ

Fujikura America, Inc.

2560 N. 1st Street, Suite 100, San Jose, CA 95131, US
Phone: +1-408-988-7423
E-mail: HTS@fujikura.com



www.linkedin.com/company/fujikura-superconductor