

「超電導機器用線材の研究開発」

(事後評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

プロジェクトの詳細説明 (公開)

サブプロジェクトリーダー

(公財)国際超電導産業技術研究センター 和泉輝郎

2013年 8月 9日

1/48

III. 研究開発成果について 2.4 超電導電力機器用線材の技術開発

公開



線材開発目標の意味

	SMES	ケーブル	変圧器	
中間目標	本プロジェクトシステム検証用線材 [安定製造技術]			機器テーマ 内で実施
	$I_c=20A/cm$ 幅 @77K&3T 100m 1GPa	$J_e=15kA/cm^2$ (2mm幅×20m)	5mm幅3分割≥100m $I_c=50A@65K&0.01T$	
	実用化技術開発(本PJ後継)用線材 [作製技術開発]			技術コスト 3円/Am
$I_c=30A/cm$ 幅 @77K&3T 50m 1GPa 20MJ-SMES仕様	$J_e=30kA/cm^2$ (2mm幅x≥50m) 大電流:6層化 高電圧:3層化	5mm幅5分割≥50m $I_c=100A@65K&0.02T$ 6MVA変圧器仕様		
最終目標	実用化技術開発用線材 [安定製造技術]			技術コスト 2円/Am
	普及導入時(2020年頃想定)線材 [作製技術開発]			
	$I_c=50A/cm$ 幅 @77K&3T 200m 1GPa 2GJ-SMES仕様	$J_e=50kA/cm^2$ (2mm幅x≥200m) 大電流:4層化 高電圧:2層化	5mm幅10分割≥100m $I_c=100A @65K&0.1T$ 20MVA変圧器仕様	

□ 主に線材メーカーが担当

線材開発目標の再編 (実施計画)

超電導電力貯蔵システム対応線材

(中間目標)
 $I_c=30A/cm-w@77K&3T-50m 1GPa$
(最終目標)
 $I_c=50A/cm-w@77K&3T \geq 200m 1GPa$

超電導電力ケーブル対応線材

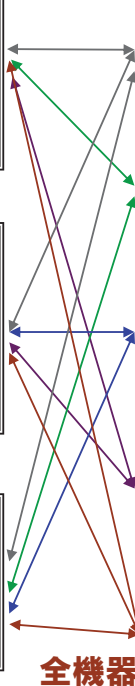
(中間目標)
 $J_e=30kA/cm^2$ (2mm幅x≥50m)
ケーブル耐久試験条件の決定
(最終目標)
 $J_e=50kA/cm^2$ (2mm幅x≥200m)

超電導変圧器対応線材

(中間目標)
5mm幅5分割≥50m 100A @65K&0.02T
(最終目標)
5mm幅10分割≥100m 100A @65K&0.1T

超電導機器用線材の研究開発

- ① 線材特性の把握
- ② 磁場中高 I_c 線材 作製技術
- ③ 低損失線材作製技術
- ④ 高強度・高 J_e 線材 作製技術
- ⑤ 低コスト・歩留向上技術



強い連携

全機器

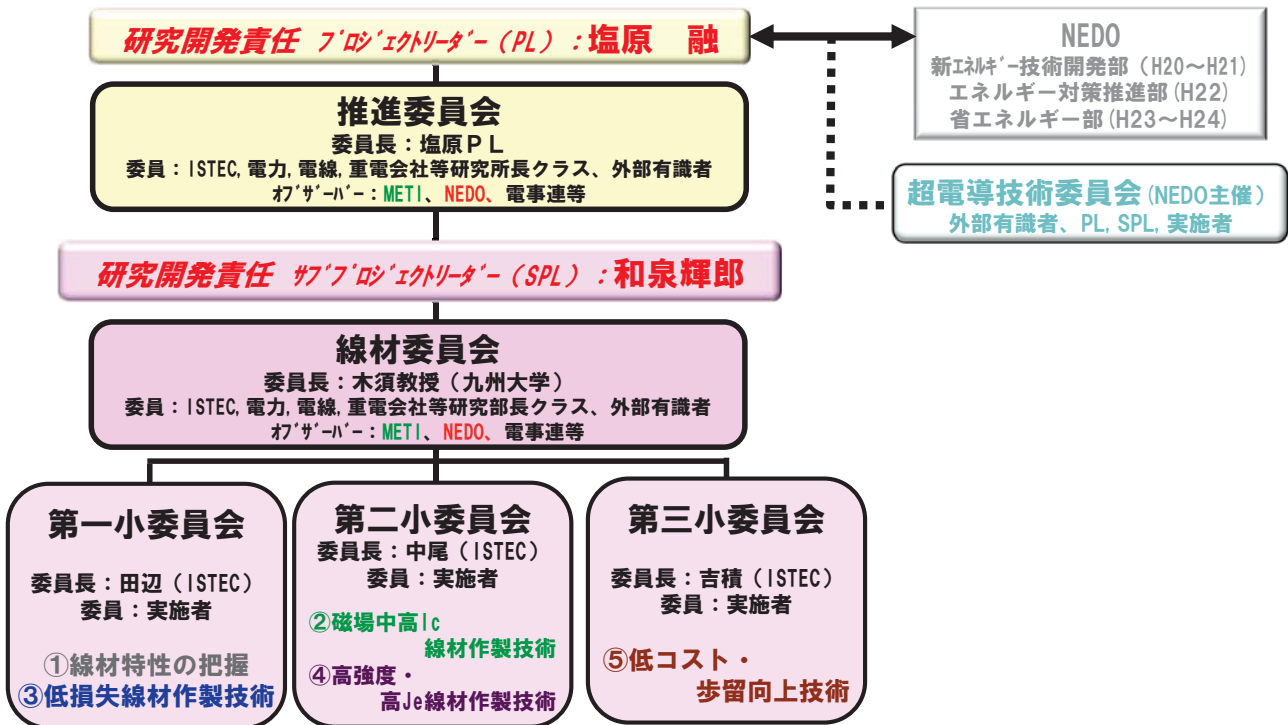
再編後の線材開発目標

テーマ名	中間目標	最終目標
①線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	■各種機器環境に対する耐久性を評価(内部目標)
②磁場中高Ic線材作製技術	・30A/cm-w @77K,3T-50m ・300A/cm-w@65K,0.02T-50m	■50A/cm-w@77K,3T-200m ■400A/cm-w@65K,0.1T-100m
③低損失線材作製技術	・2mm幅-300A/cm-w-50m ・5mm幅5分割-50m-分割無しに比べて交流損失1/5	■2~4mm幅-500A/cm-w-200m ■5mm幅10分割-100m-分割無しに比べて交流損失1/10
④高強度高Je線材製作技術	・300A/cm-w-1GPa-50m ・ $J_c = 30 \text{ kA/cm}^2 - 50 \text{ m}$	■500A/cm-w-1GPa-200m ■ $J_c = 50 \text{ kA/cm}^2 - 200 \text{ m}$
⑤低コスト・歩留向上技術	・技術コスト3円/Amの実証	■技術コスト2円/Amの実証 ■中間目標技術を安定に作製可能な技術を確立する。

参画機関

(公財)国際超電導産業技術研究センター	全テーマ (①線材特性の把握, ②磁場中高Ic線材作製技術, ③低損失線材作製技術, ④高強度・高Je線材作製技術, ⑤低コスト・歩留向上技術) IBAD+PLD法、MOD法他		
中部電力(株)	(前のみ) ② (IBAD+CVD法)	東北大学	②④ 特性評価
古河電気工業(株)	②④ (IBAD+CVD法) ⑤ ケーブル線材歩留	東京大学	(前のみ) ② 特性評価
		早稲田大学	(前のみ) ①③ 特性評価
住友電気工業(株)	①③④ (配向金属+PLD法) ⑤ ケーブル線材歩留	上智大学	(前のみ) ④ 特性評価
		東工大学	(前のみ) ② 特性評価
(株)フジクラ	③ (IBAD+PLD法) ⑤ 変圧器線材歩留	九州大学	全テーマ 電磁特性評価及び接続等
昭和電線ケーブルシステム(株)	② (IBAD+MOD法) ⑤ 極低コスト線材歩留	新潟大学	(前のみ) ② 特性評価
		京都大学	(前のみ) ③ 特性評価
(一財)JFCC	全テーマ 微細組織観察	九工大学	② 特性評価
(独)産総研	(前のみ) ③ 低損失計算	名古屋大学	②⑤ プロセス開発
ロアラモス国立研究所	(前のみ) ② 不可逆磁場評価	鹿児島大学	④ 特性評価

開発管理・推進体制（委員会構成）



事業原簿 II-2.73~81

7/48

中間・最終目標達成度

テーマ	中間目標	達成度	最終目標	主要成果(赤字は目標達成成果)	達成度
①線材特性の把握	ケーブル耐久試験 適正条件の決定	○	各種機器環境に対する 耐久性を評価	・剥離現象機構解明⇒低中強度原因除去 ・分割線材耐久性評価	◎ 新たな課題 (剥離)の解決
②磁場中 高Ic線材 作製技術	30A/cm-w @77K,3T-50m	◎	50A/cm-w @77K,3T-200m	・PLD: BHO添加 141A@77K,3T(短尺) 54A@77K,3T-200m ・MOD: YGdBCO+BZO50A@77K,3T-124m	◎ 目標値の 約2倍の 成果達成
	300A/cm-w@65K, 0.02T-50m		400A/cm-w@65K, 0.1T-100m	・PLD: 770A/cm-w@65K,0.1T-158m ・MOD: 524A/cm-w@65K,0.1T-100m	
③低損失 線材作製 技術	2mm幅 300A/cm-w-50m	○	2~4mm 500A/cm-w-200m	・PLD: 2mm幅 540A/cm-w-200m ・MOD: 4mm幅 590A/cm-w-80m ・RABiTS: 2mm幅 400A/cm-w-72m	○
	5mm幅5分割-50m -対無分割損失1/5		5mm幅10分割-100m -対無分割損失1/10	・PLD: 5mm幅-10分割 -100m-損失1/10 ・MOD: 5mm幅-10分割-100m-損失1/10	
④高強度 高Je線材 作製技術	$J_e=30\text{kA/cm}^2$ -50m	○	$J_e=50\text{kA/cm}^2$ -200m	・PLD: $J_e>52\text{kA/cm}^2$ -200m (70 μm t基板) ・RABiTS: $J_e>52\text{kA/cm}^2$ (短尺)	○
	300A/cm-w -1GPa-50m		500A/cm-w -1GPa-200m	・PLD: >500A/cm-w - 1GPa - 200m	
⑤低コスト・ 歩留向上 技術	技術コスト 3円/Am実証	◎	技術コスト 2円/Am実証	・PLD: 604A/cm幅-35m@30m/h⇒1.6円/Am ・MOD: 605A/cm幅-30m@5,10m/h⇒1.6円/Am ・RABiTS: 1600A/3cm幅@2.2m/h⇒2.7円/Am	◎ 1年前倒しの 目標達成
			中間目標技術の 安定製造技術	・全ての線材種: 線材メーカー各社が各々数km 以上の線材に対して歩留まりの評価を実施	

事業原簿 III-1.50, 51

◎: 大幅達成、○: 達成、△: 達成見込み、×: 未達成

8/48

詳細成果

①線材特性の把握

<概要>

超電導機器(SMES,ケーブル,変圧器)の応用に際して、線材が与えられた環境条件(雰囲気、温度、湿度、歪み等)に対して、**経時経年変化**に関する性質を定量化すると共に、**劣化防止策**の開発を行う。

<目標値>

中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
ケーブル耐久試験適正条件の決定	各種機器環境に対する耐久性を評価

<アプローチ>

[機器開発者]

SMES
ケーブル
変圧器

中部電力、九州電力
住友電工、古河電工

ヒアリング

情報

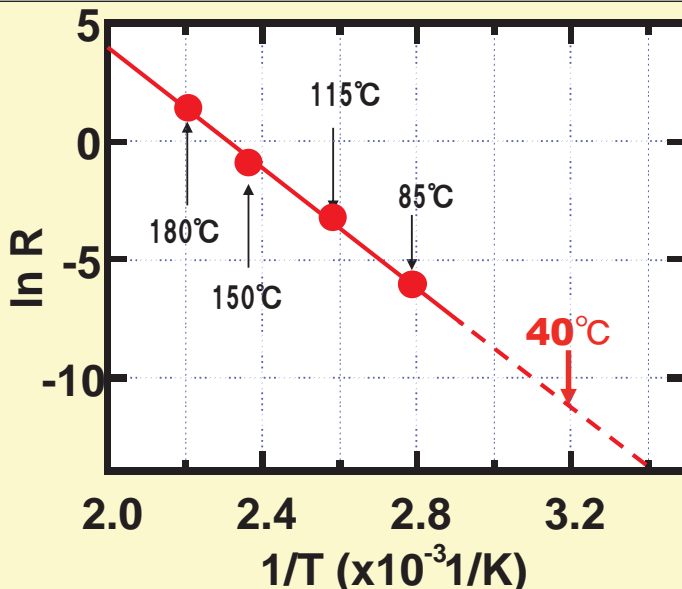
[本テーマ開発]

機器開発者からのヒアリングに基づいて環境に適応した経時変化、耐性の評価
⇒劣化機構解明⇒抑制手法開発

ISTEC、住友電工、JFCC
九大、早大

湿度劣化 (線材保管環境耐性)

対象工程	想定環境条件
工場での線材保管	常温常圧-1年間 (最大40°C-100%)



I_c 5%の劣化に要する時間
(RH100%湿度条件)

保持温度	I_c 5%劣化時間
180°C	1.2h
150°C	12h
115°C	140h
85°C	1100h

40°C-RH100%での劣化予測時間
⇒約9年間

詳細成果

①線材特性の把握

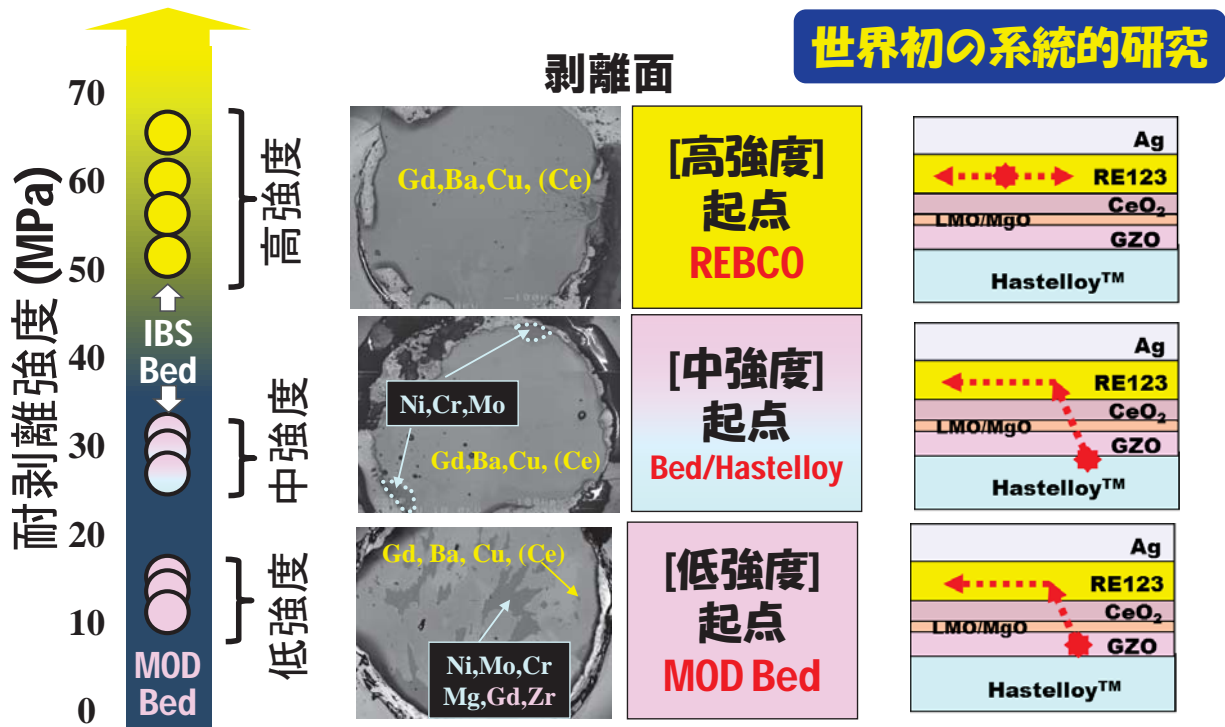
<概要>
 超電導機器(SMES,ケーブル,変圧器)の応用に際して、線材が与えられた環境条件(雰囲気、温度、湿度、歪み等)に対して、経時経年変化に関する性質を定量化すると共に、劣化防止策の開発を行う。

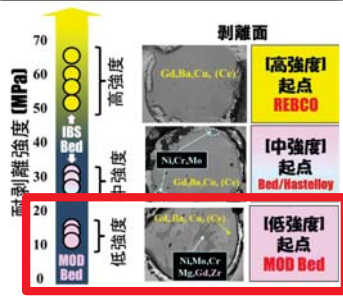
<目標値>

中間目標 (H22末) 済	最終目標 (H24末)
ケーブル耐久試験適正条件の決定	各種機器環境に対する耐久性を評価



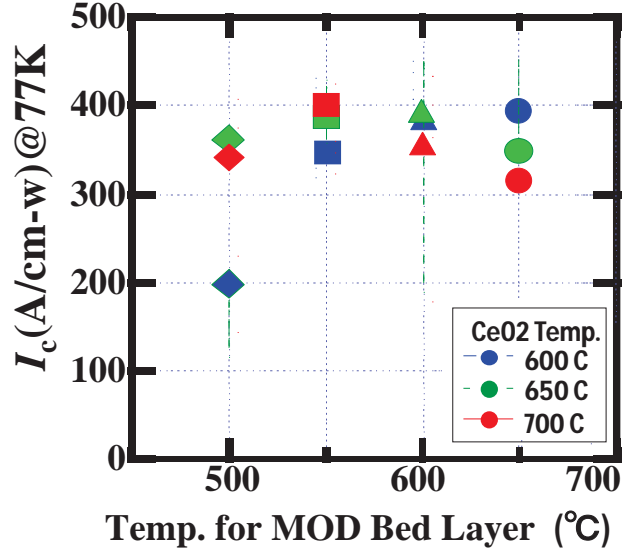
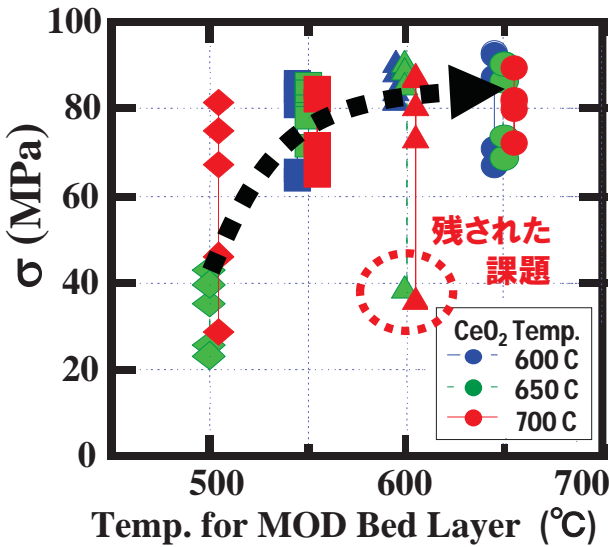
剥離現象の解析 (起点種と強度の関係)





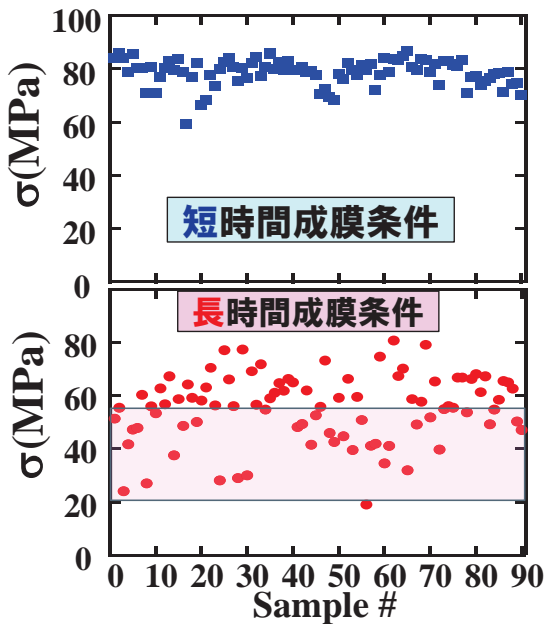
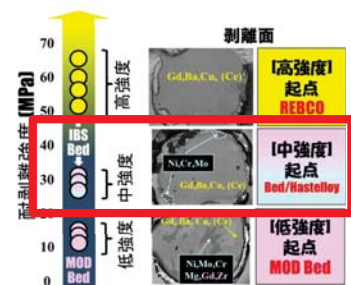
耐剥離強度改善技術

[低強度 (<20MPa) 起点除去]
MODヘッド層形成条件適正化

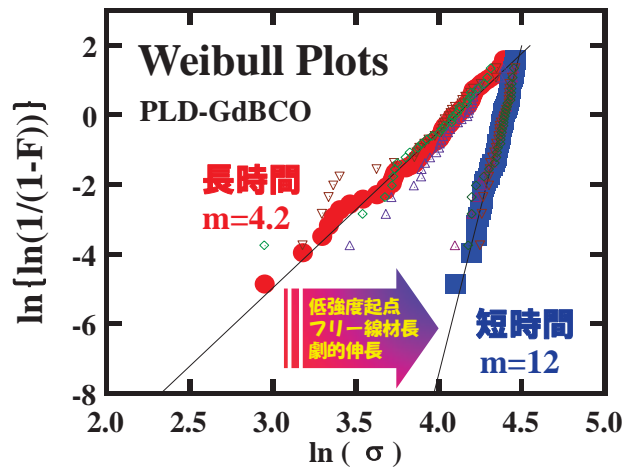


耐剥離強度改善技術

[中強度 (~40MPa) 起点除去]
超電導層形成条件適正化



$$\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right\} = m \ln \sigma - m \ln \eta$$



詳細成果

②磁場中高 I_c 線材作製技術

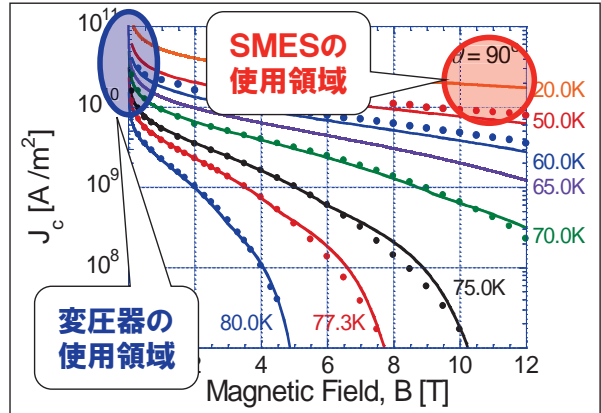
<概要>

「SMES」や「超電導変圧器」で求められる磁場中での I_c 特性の向上を目指す。

<目標値>

	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
SMES	30A/cm-w @77K,3T-50m	50A/cm-w @77K,3T-200m
変圧器	300A/cm-w @65K,0.02T-50m	400A/cm-w @65K,0.1T-100m

*極低コスト系線材で実施



<アプローチ>

(a)人工ピン止め点導入関連技術開発

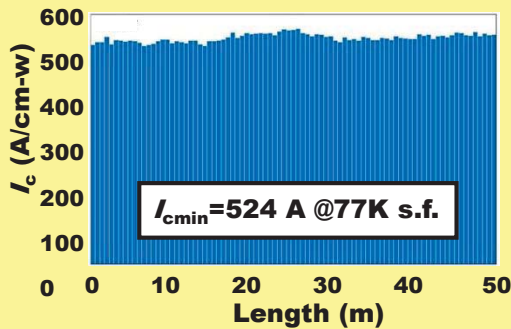
ISTEC、中部電力、昭和電線、JFCC (組織観察)、
九大、九工大東北大、新潟大、上智大

(b)高不可逆磁場材料の開発

ISTEC、JFCC
阪大、理研、LANL、東工大、東大

PLD&MOD法:磁場中高 I_c 線材作製技術 (中間評価)

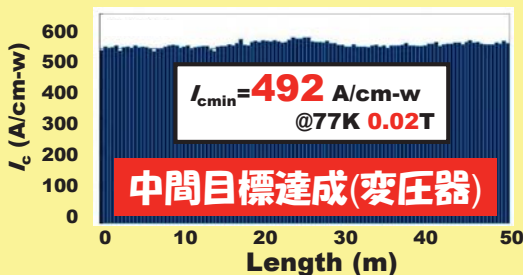
高 J_c 厚膜化⇒ I_c 向上+ピン力向上!



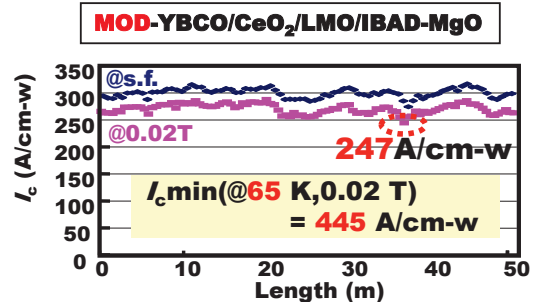
基板: Hastelloy/GZO/IBAD-MgO/LMO/CeO₂
超電導層: PLD-GdBCO (10m/h, 1.5μm, 2.9円/Am)

中間目標達成(SMES)

$$I_{cmin} = 524 \text{ A} \times 0.062 = 33 \text{ A/cm-w@3T}$$



中間目標達成(変圧器)



中間目標達成(変圧器)

詳細成果

②磁場中高 I_c 線材作製技術

<概要>
 「SMES」や「超電導変圧器」で求められる磁場中での I_c 特性の向上を目指す。

<目標値>

	中間目標 (H22末) 済	最終目標 (H24末)
SMES	30A/cm-w @77K,3T-50m	50A/cm-w @77K,3T-200m
変圧器	300A/cm-w@65K,0.02T-50m	400A/cm-w@65K,0.1T-100m

* 極低コスト系線材で実施

<H23、24実施内容>

<PLD線材>

- BHO及びBSO等の人工ピン導入
適正化+厚膜化⇒長尺化
- 極低コスト条件

<MOD線材>

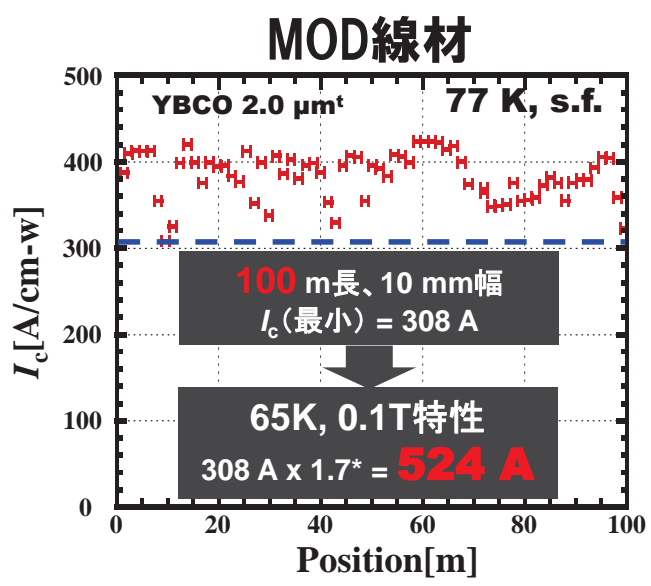
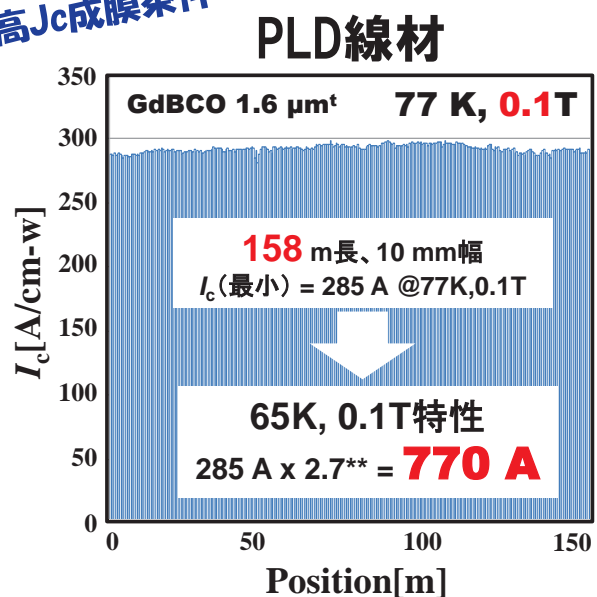
- BZO人工ピン導入
+ 中間熱処理適正化+厚膜化
- 極低コスト条件+長尺化

PLD&MOD法：磁場中高 I_c 線材作製技術（変圧器対応線材）

高配向化！
高 J_c 成膜条件！

最終目標 400A/cm-w-100m @65K, 0.1T

高 J_c 厚膜化！



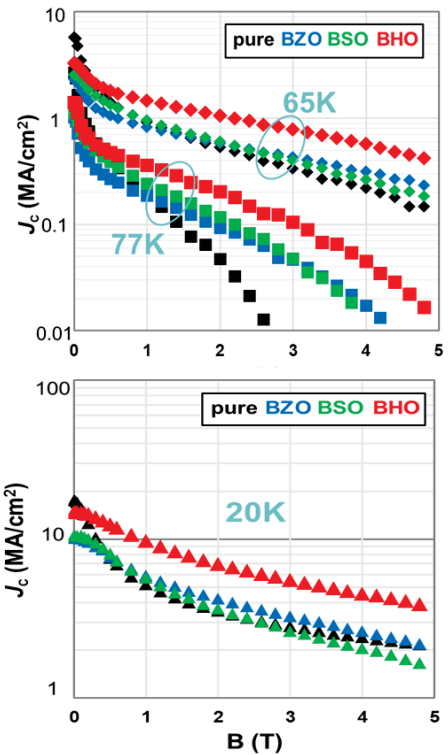
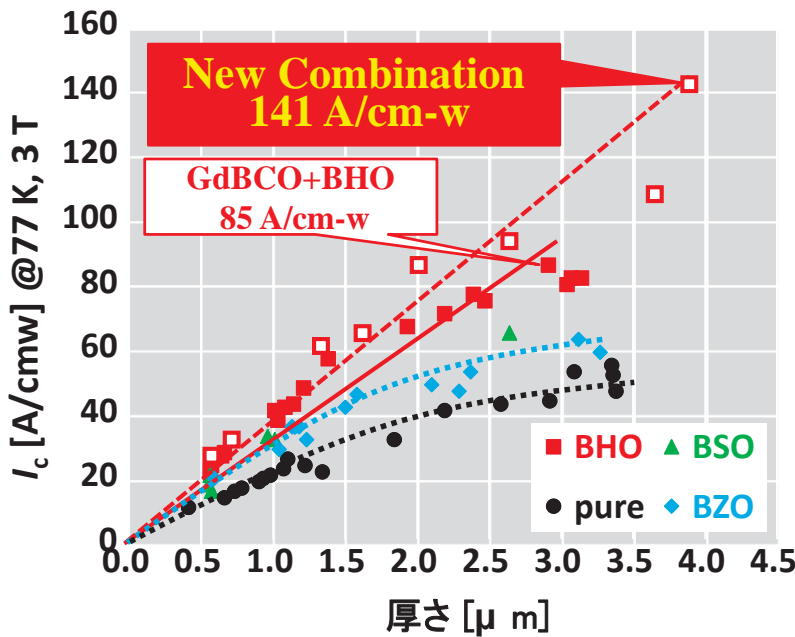
**係数 = ($I_c(65K,0.1T) / I_c(77K,0.1T)$) = 2.7

最終目標達成

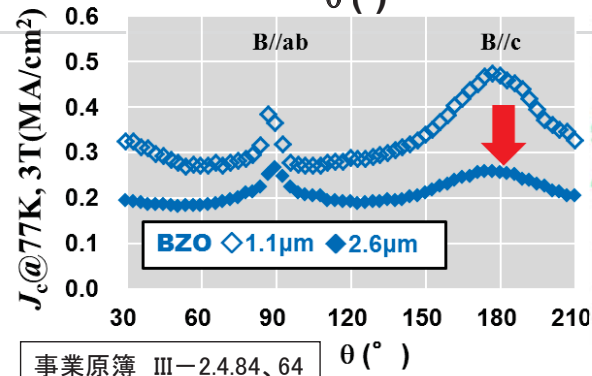
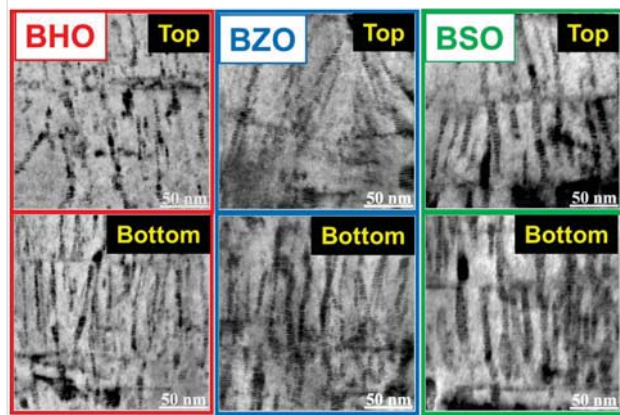
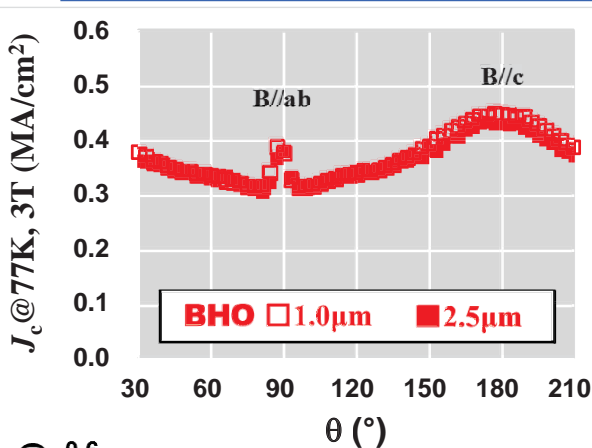
*係数 = ($I_c(65K,0.1T) / I_c(77K,s.f.)$) = 1.7

PLD法：磁場中高 J_c 線材作製技術 (SMES対応線材)

最終目標 50A/cm-w -200m @77K, 3T



PLD法：磁場中高 J_c 線材作製技術 (SMES対応線材)



BHOナノロッドの特徴
●細く短い(傾斜有)
●膜厚方向での形態変化小

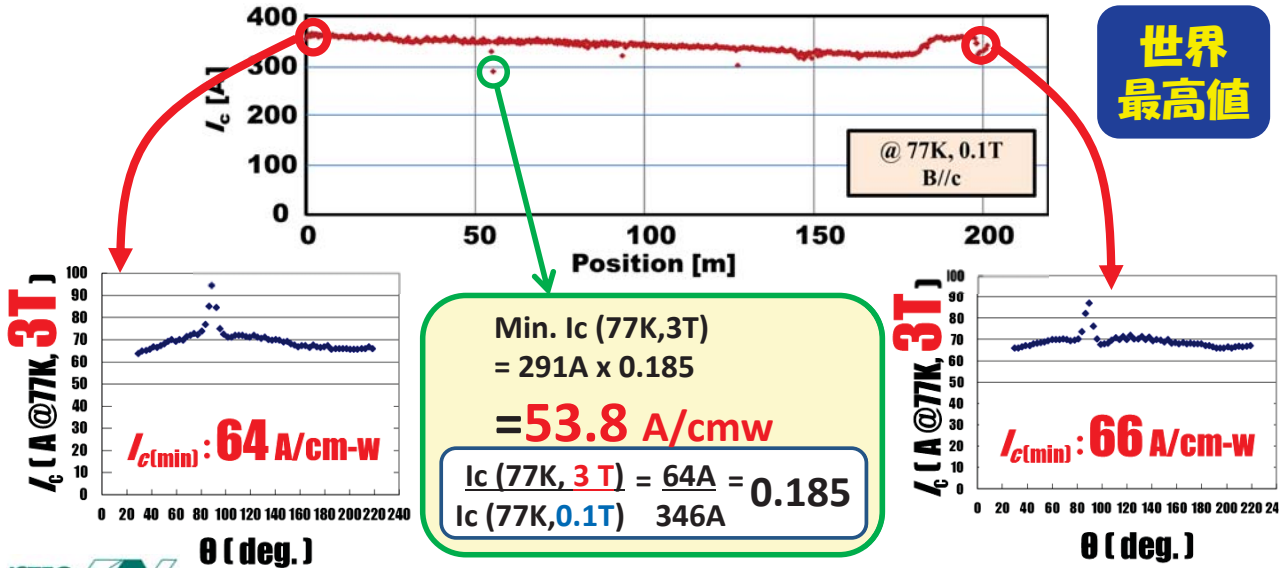
BHOで厚膜高特性

PLD法：磁場中高 I_c 線材作製技術 (SMES対応線材)

最終目標 50A/cm-w -200m @77K, 3T

構造: CeO₂/LMO/IBAD-MgO/Y₂O₃/GZO/Hatelloy™
 配向度: $\Delta\phi(\text{CeO}_2) \sim 1.8^\circ$ 長さ: 200m

成膜方法: PLD法 膜厚: 1.7 μm
 ターゲット: New Combination



事業原簿 III-2.4.40

200m-54A@77K,3T

最終目標達成

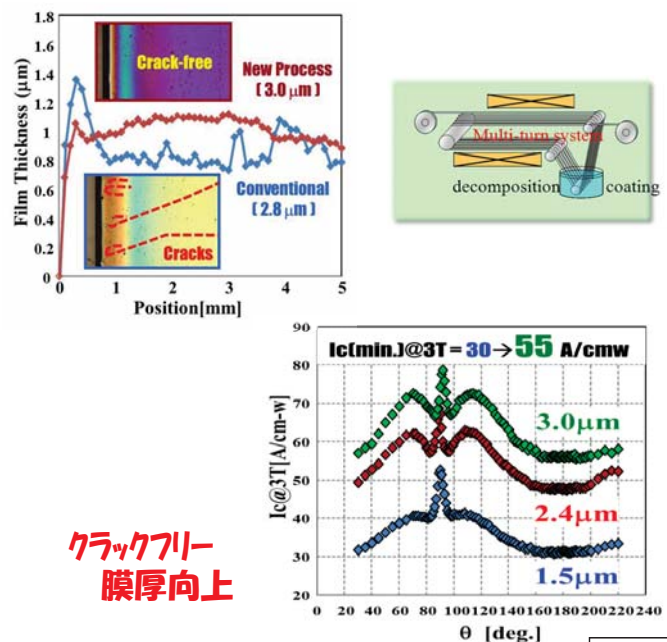
21/48

MOD法：磁場中高 I_c 線材作製技術 (SMES対応線材)

最終目標 50A/cm-w -200m @77K, 3T



厚膜化技術開発



事業原簿 III-2.4.51~53



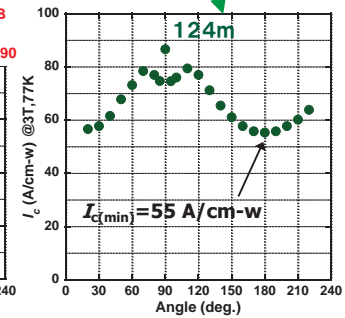
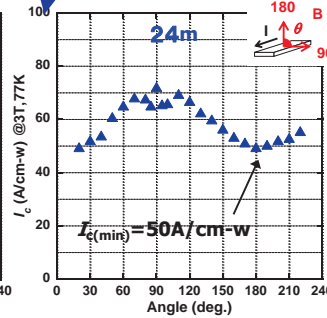
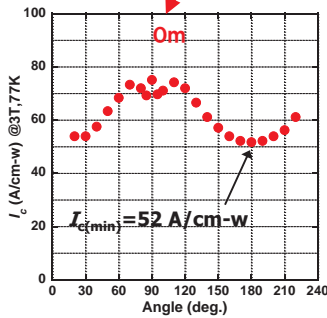
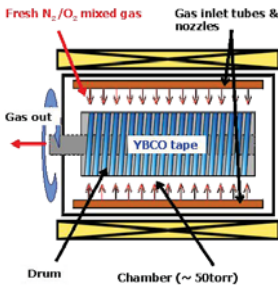
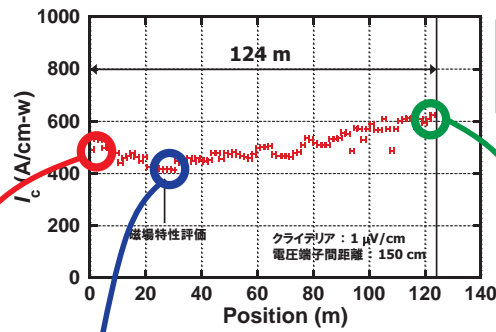
22/48

MOD法：磁場中高 I_c 線材作製技術 (SMES対応線材)

最終目標 50A/cm-w -200m @77K, 3T

長さ : ~124m
 超電導層 : YGdBCO+BZO (20mML)
 膜厚 : 2.5 μ m
 中間熱処理 : 有
 本焼成 : バッチ炉

**MOD世界
最高値**



詳細成果

③低損失線材作製技術

<概要>

「超電導ケーブル」や「超電導変圧器」で求められる交流損失低減を線材レベルで達成する技術を開発する。

<目標値>

	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
ケーブル	2mm幅-300A/cm-w -50m	2mm幅-500A/cm-w -200m
変圧器	5mm幅5分割-50m 分割無比交流損失1/5	5mm幅10分割-100m 分割無比交流損失1/10

*極低コスト系線材で実施



応用基盤PJにおけるISTEC, フジクラ, 九州電力, 九大の成果

<アプローチ>

(a) 均一線材作製技術開発

ISTEC, 住友電工, JFCC
九大, 京大

(b) 細線加工技術開発

ISTEC, 住友電工, JFCC
九大, 鹿大, 産総研

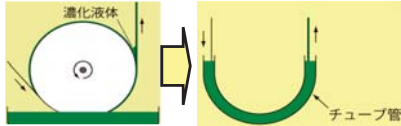
PLD&MOD法：低交流損失超電導線材プロセス開発（中間評価）

＜アプローチ：特性均一線材＞
均一基板、安定成膜条件 等

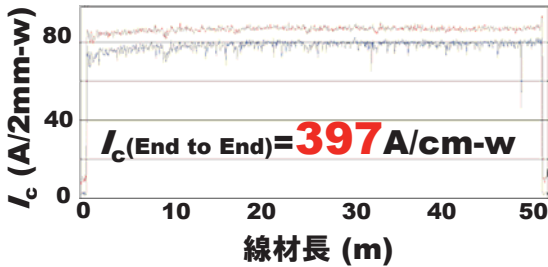
and

＜アプローチ：線材加工技術＞
加工ダメージ抑制、フィラメント間絶縁性確保 等

2mm幅線材（MOD線材）

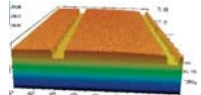


濃化液体
チューブ管
濃化液体付着部の焼損
⇒チューブ方式で解消



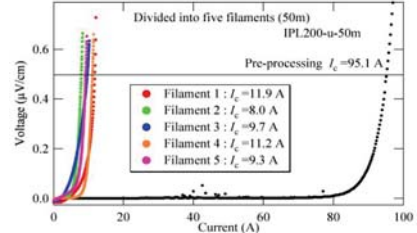
中間目標（ケーブル）達成

5mm幅5分割スクライビング加工（PLD線材）

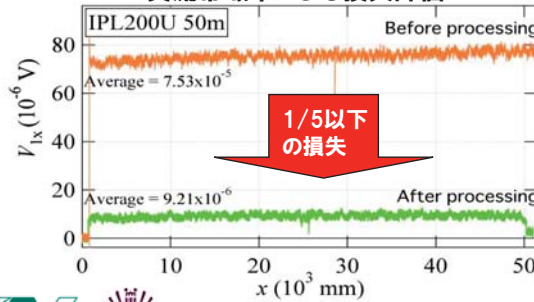


改良型レーザースクライブ加工
による溝の三次元観察像

スクライビング加工前後のIc評価（50m）



交流帯磁率による損失評価



中間目標
（変圧器）
達成



詳細成果

③低損失線材作製技術

＜概要＞

「超電導ケーブル」や「超電導変圧器」で求められる交流損失低減を線材レベルで達成する技術を開発する。

＜目標値＞

	中間目標（H22末） 済	最終目標（H24末）
ケーブル	2mm幅-300A/cm-w-50m	2~4mm幅-500A/cm-w-200m
変圧器	5mm幅5分割-50m 分割無比交流損失1/5	5mm幅10分割-100m 分割無比交流損失1/10

* 極低コスト系線材で実施

＜H23、24実施内容＞

＜均一線材作製技術＞

- ・基板中間層：欠陥低減化（洗浄等）
- ・PLD：2円/Am条件の適用
- ・MOD：均一塗布焼成条件

＜細線加工技術＞

- ・特性劣化率の低減
スクライブ：レンズの選定等
切断：レーザー条件適正化
- ・エッチングレス加工法

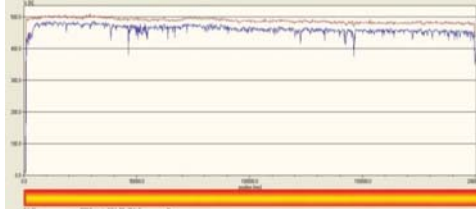
PLD&MOD法：低交流損失超電導線材（ケーブル対応線材）

最終目標 2~4mm幅 - 500A/cm幅 - 200m

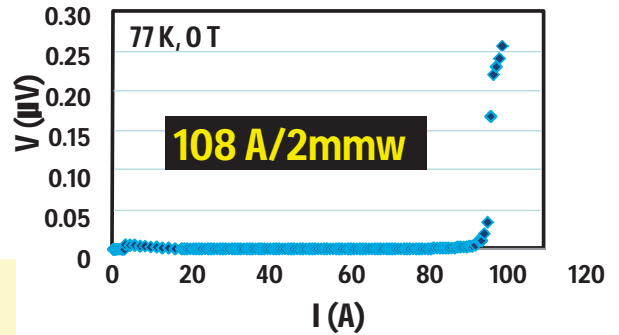
構造：CeO₂/LMO/IBAD-MgO/Y₂O₃/GZO/Hatelloy™
配向度： $\Delta\phi(\text{CeO}_2) \sim 2.3^\circ$ 長さ：200m

成膜方法：PLD法 膜厚：1.6 μm
ターゲット：GdBa_{1.8}Cu₃O_y

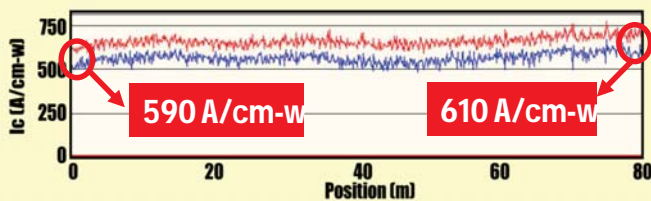
200m-10mm幅線材特性分布



レーザー切断
2mm幅



成膜方法：MOD法 膜厚：2.5 μm
線幅：4mm 長さ：80m



200m-2mm幅
540A/cm@77K,s.f.

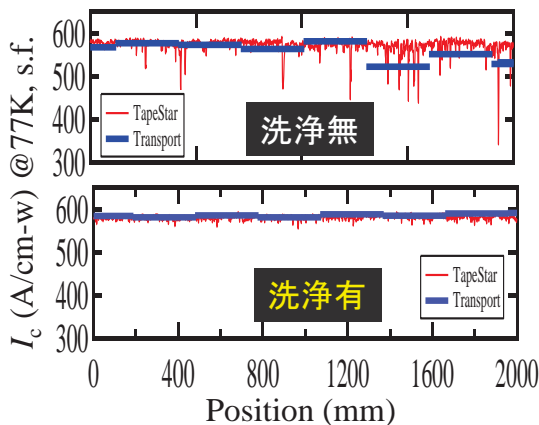
最終目標達成

中間層/加工法：低交流損失超電導線材（変圧器対応線材）

最終目標 5mm幅10分割-100m 分割無比較交流損失1/10

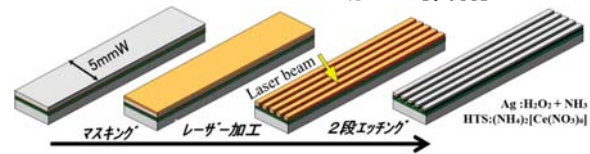
基板均一化技術開発

CeO₂成膜後洗浄有無基板上に
PLD法でGdBCO成膜

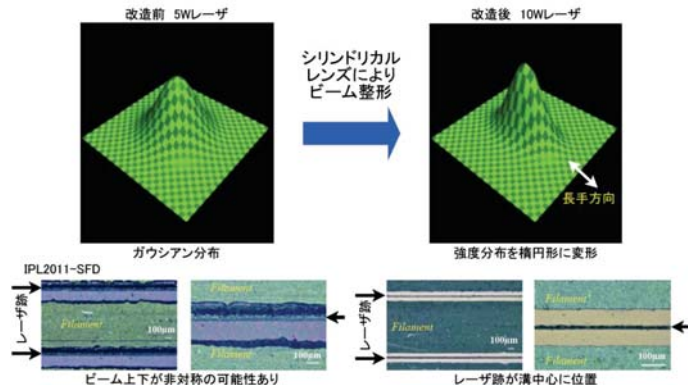


局所的な特性低下部の抑制

スクライビング加工技術



レーザービーム形状制御効果

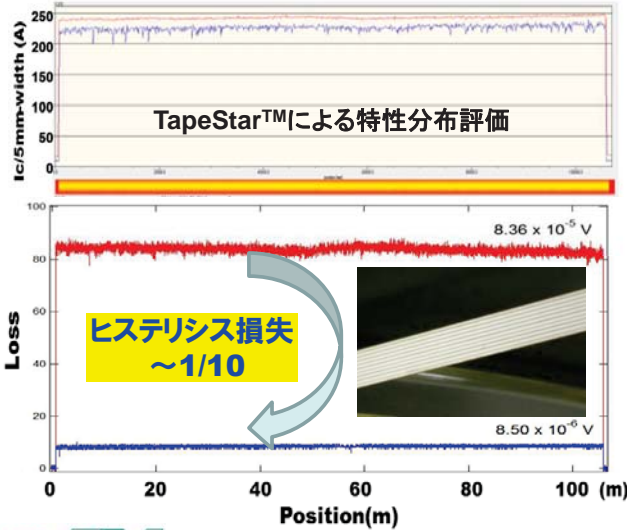


スクライビング加工精度向上

PLD&MOD法：低交流損失超電導線材（変圧器対応線材）

最終目標 5mm幅10分割-100m 分割無比較交流損失1/10

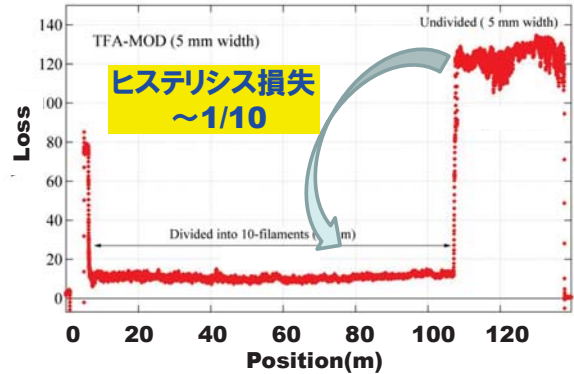
多層成膜
均一化等！PLD線材



MOD線材

5mm幅10分割
交流損失特性
100m

均一成膜技術
エッチングレス加工法



事業原簿 III-2.4.124、132、135、161~164

最終目標達成

世界最高値

29/48

詳細成果

④ 高強度・高Je線材製作技術

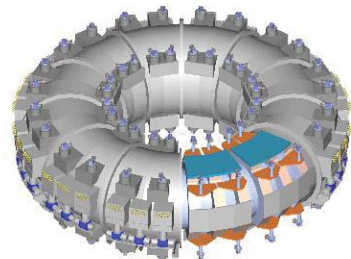
<概要>

「ケーブル導体作製工程 & 冷却時熱収縮起因応力」更には、「SMES等の高磁場応用時フープ力」に耐えるために必要な強度を有した線材作製技術と共にコンパクト機器を目指した高Je線材の作製技術を開発する。

<目標値>

	中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
SMES	300A/cm-w-1GPa -50m	500A/cm-w-1GPa -200m
ケーブル	$J_e = 30 \text{ kA/cm}^2 - 50 \text{ m}$	$J_e = 50 \text{ kA/cm}^2 - 200 \text{ m}$

* 極低コスト系線材で実施



<アプローチ>

**(a) 高強度金属基板対応線材作製
技術開発**

ISTEC、古河電工、JFCC、九大、早大

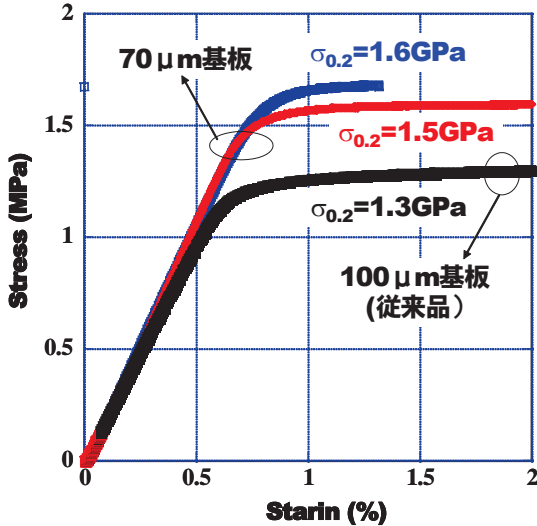
**(b) 高臨界電流(I_c)化
技術開発**

ISTEC、JFCC、九大

高強度・高 J_e 線材製作技術(中間評価)

薄肉高強度基板作製技術

強加工処理による高強度化技術

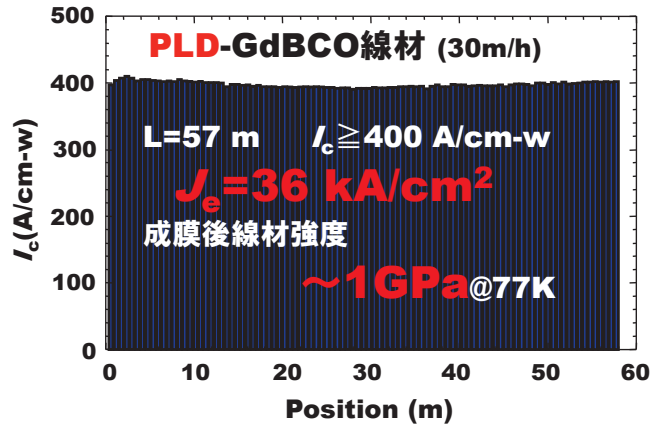


70 μ m薄肉で高強度実現

PLD線材

薄肉高強度基板対応成膜技術

適正温度制御、張力制御 等



中間目標達成

詳細成果

④ 高強度・高 J_e 線材製作技術

<概要>

「ケーブル導体作製工程 & 冷却時熱収縮起因応力」更には、「SMES等の高磁場応用時フープ力」に耐えるために必要な強度を有した線材作製技術と共にコンパクト機器を目指した高 J_e 線材の作製技術を開発する。

<目標値>

* 極低コスト系線材で実施

	中間目標 (H22末) 済	最終目標 (H24末)
SMES	300A/cm-w-1GPa-50m	500A/cm-w-1GPa-200m
ケーブル	$J_e=30\text{kA/cm}^2-50\text{m}$	$J_e=50\text{kA/cm}^2-200\text{m}$

<H23、24実施内容>

<IBAD基板線材>

・高強度金属基板開発⇒済(中間)



・高 I_c 化(高 J_e 化+厚膜化)
・長尺化 & 2円/Am条件の適用

<配向金属基板線材>

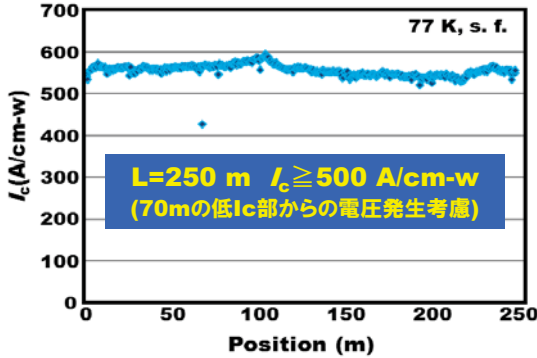
・金属基板薄肉化⇒済(中間)
・高 I_c 化(高配向化)
・長尺化
・2円/Am条件(3cm幅)

PLD線材：高強度・高 J_e 線材製作技術

最終目標 500A/cm-w-1GPa-200m ・ $J_e=50\text{kA/cm}^2\text{-200m}$

高強度線材

100 μm 高強度基板による高 I_c 化



1GPa引張試験前後の特性

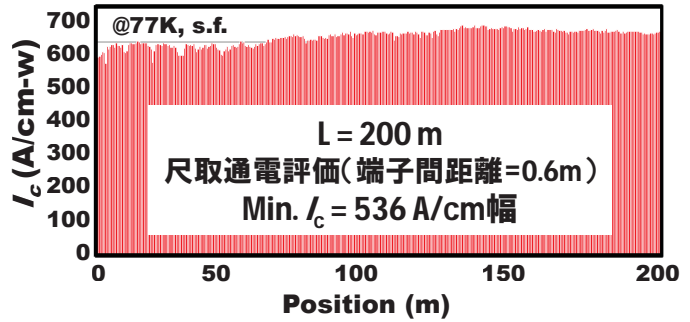
	Before I_c	After I_c
#1	537	533
#2	526	512

(A/cm-w@77K, s.f.)

**最終
目標達成**

高 J_e 線材

薄肉高強度基板対応成膜技術



$J_e \geq 52\text{kA/cm}^2$ (換算総厚: 103 μm)

最終目標達成

詳細成果

⑤ 低コスト・歩留向上技術

<概要>

全ての機器に求められる要素として、安定製造とともに、より低コストで提供できる線材開発を目指す。具体的には、「**実用化技術開発**」時及び「**導入・普及**」時に求められるコスト仕様である**3円/Am以下の製造技術**の実現とともにこれに資する**接続・補修技術**を開発する。

<目標値>

中間目標 (H22末)	最終目標 (H24末)
・ 技術コスト 3円/Amの実証 (50m)	・ 研究項目(2)~(4)中間目標技術の安定製造技術* ・ 技術コスト 3円/Am未満の実証**

(内部目標)*長さに関しては更なる長尺(例:200m以上) **1円/Am台

<アプローチ>

(b) 低コスト対応高速・高 I_c 化技術開発

ISTEC、フジクラ、JFCC、九大

(c) 接続・補修技術開発

ISTEC、JFCC、九大、名大

(a) 実用化技術開発用線材安定製造技術開発(H23~H24)

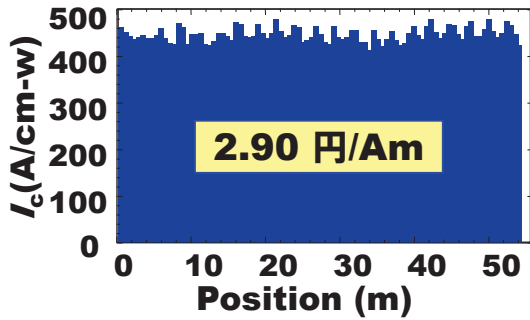
ISTEC、フジクラ、昭和電線、住友電工、中部電力、古河電工、JFCC 他

PLD&MOD法：超電導層低コストプロセス開発 (中間評価)

PLD線材

インプリーム
高速化!

基板：IBAD-MgO
原料：GdBCO
速度：15m/h(45m/hx3)
膜厚：2.2 μm
最小 I_c ：435 A/cm幅

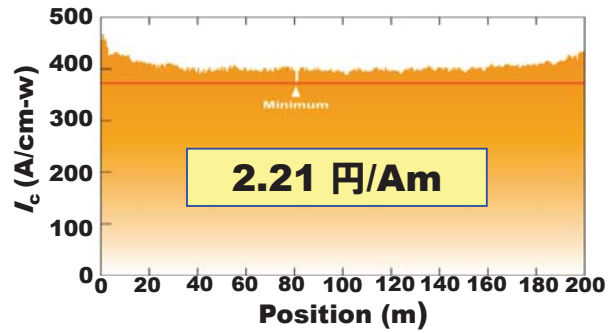


中間目標達成

MOD線材

中間熱処理
の適用!

基板：IBAD-MgO
原料：YBCO
速度：5m/h(仮)-15m/h(本)
膜厚：1.5 μm
最小 I_c ：372 A/cm幅



中間目標達成

詳細成果

⑤ 低コスト・歩留向上技術

<概要>

全ての機器に求められる要素として、安定製造とともに、より低コストで提供できる線材開発を目指す。具体的には、「実用化技術開発」時及び「導入・普及」時に求められるコスト仕様である3円/Am以下の製造技術の実現とともにこれに資する接続・補修技術を開発する。

<目標値>

中間目標 (H22末) 済	最終目標 (H24末)
・技術コスト 3円/Amの実証 (50m)	・技術コスト 2円/Amの実証 ・研究項目(2)~(4)中間目標技術の安定製造技術

<H23、24実施内容>

2円/Amの実証

- <基板・中間層線材> ・高速機械研磨+IBS高速薄膜化、 Y_2O_3 ベッド
- <PLD線材> ・高速化、厚膜高 I_c 化(高エネルギー密度化、雰囲気高圧化)
- <MOD線材> ・高 I_c 化(高 J_c 厚膜化等) ・高速化(塗布仮焼、本焼)

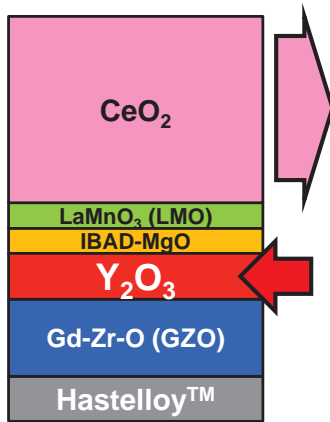
安定製造
技術開発



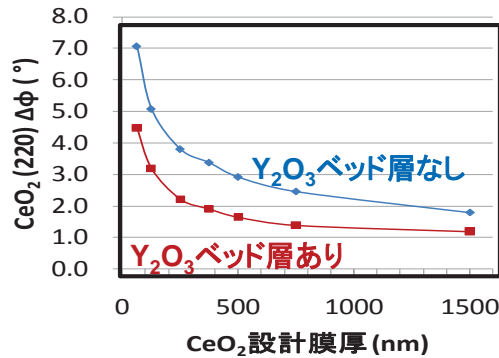
別紙参照

中間層低コストプロセス開発

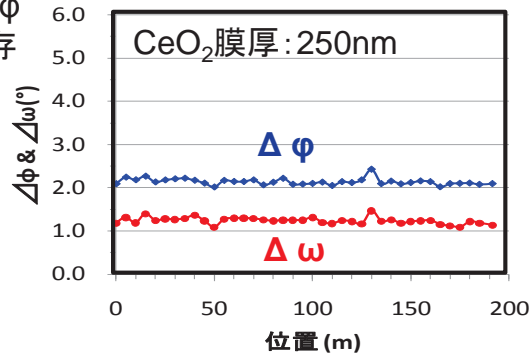
Y₂O₃ベッド層の挿入によるIBAD層の高配向化



CeO₂- $\Delta\phi$
膜厚依存性



CeO₂- $\Delta\phi$
長手依存



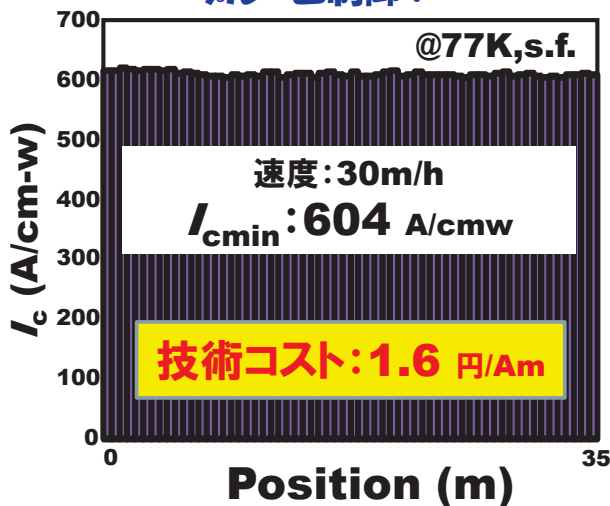
超高配向の実現
($\Delta\phi \sim 2^\circ$)
⇒ 高I_c ⇒ 低コスト

PLD&MOD法:超電導層低コストプロセス開発

最終目標 2円/Amの実証

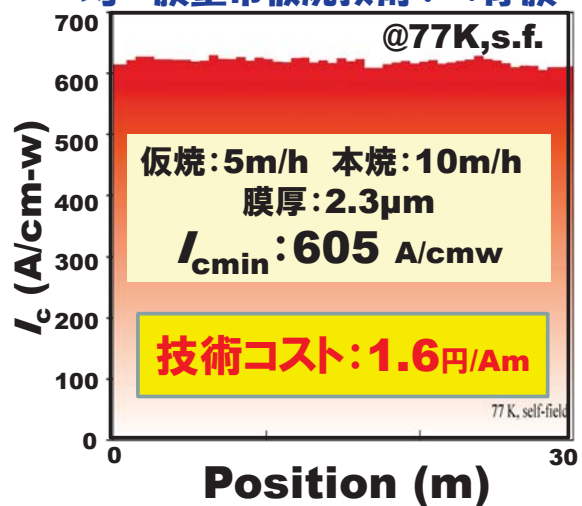
PLD線材

高エネルギー利用!
ブルーーム制御!



MOD線材

高配向中間層!
均一膜塗布仮焼技術! ⇒ 厚膜



安定製造技術開発進捗（主体：線材メーカー）

<基本計画>

本事業に引き続いて想定されている電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発及び超電導電力機器の導入普及が本格的となる2020年を見据え、その時に必要とされる低コストかつ安定なイットリウム系超電導線材の製造プロセス技術を開発する。

- ・中間目標技術を安定に作製可能な技術を確立する。

（線材長及び臨界電流等の再現性を確認）

<実施計画>

（前略）具体的には、線材メーカーにおいて再現性を確保すべく安定製造技術を開発する。ここでは、同時に将来の実用化を鑑み、長尺化の可能性を評価しつつ目標達成をめざす。最終目標（平成24年度）・（2）～（4）中間目標の安定製造技術

[具体的な目標の設定(案)]

Official: 中間目標線材（50m長他）を複数本作製実証。100m以上を実証。

追加予算: 歩留りで評価。（N数増）

$$50m \text{ 歩留り}(\%) = (50m \times \text{条件満足本数}) / \text{対象総長}$$

$$100m \text{ 歩留り}(\%) = (100m \times \text{条件満足本数}) / \text{対象総長}$$

PLD&MOD法：超電導層低コストプロセス開発

	線材仕様	Official条件 達成状況	歩留評価 (加速計画)	歩留評価 (加速対応結果)
住友電工 ケーブル対応線材	$J_e = 30 \text{ kA/cm}^2$ $I_c = 300 \text{ A/cm幅}$ 2mm幅・50m <3円/Am	50m長 ≥ 各3本 100m長 ≥ 各3本 済	50m-30本 100m-5本	50m-36本・100m-6本作製 済 50m損失歩留: 47% 100m損失歩留: 40% <small>加工時の耳&I_c幅分布、装置・プロセス改善。</small>
古河電工 ケーブル対応線材	$J_e = 30 \text{ kA/cm}^2$ $I_c = 300 \text{ A/cm幅}$ 2 mm幅・50 m <3 円/Am	$J_e \geq 30 \text{ kA/cm}^2$ 且つ 50m 4本以上 $I_c = 300 \text{ A/cm幅}$ 2mm幅 複数本 済	50m-10本 100m-5本	50m-11本・100m-5本作製 済 50m J_e 歩留: 22% 100m J_e 歩留: 36% (20 kA/cm^2 では 80%) <small>主に装置トラブルで後半(100m)で改善。</small>
フジクラ 変圧器対応線材	300 A/cm幅 @65K・0.02T 5mmw-5分割 50m	>300A/cm幅・ ≥180m@65K,0.02T 数十本の実績 5分割複数本確認 済	300m-6本 を含む 5~6km	総長: 6.4km作製 済 (含単長 ≥ 300m-10本) 50m/ I_c (B) 歩留: 88% 100m/ I_c (B) 歩留: 88% 50m5分割歩留: 23% <small>0.02T特性は高歩留。分割は線材仕様等により改善。</small>
昭和電線 極低コスト線材	3 円/Am	50m長 ≥ 10本 100m長 ≥ 3本 済	100m -10本	100m-10本作製 済 50m歩留: 64% 100m歩留: 55% <small>厚膜に対する大型バッチ炉均一焼成条件適正化で改善。</small>

機器開発との連携

機器開発	内容
ケーブル (高電圧)	「高Ic特性」成果(線材開発) ⇒ ケーブル低損失化 に貢献
ケーブル	「線材の特性把握」成果(ケーブル耐久試験適正条件の決定)(線材開発) ⇒ ケーブルモデル試作における線材評価条件へ適用
ケーブル (大電流)	低損失条件解析成果(京大)+線材切断技術(線材開発) ⇒ ケーブル低損失化に貢献(最外層2mm幅実現に貢献)
	「高Ic特性」成果(線材開発)⇒負荷率低減効果 ⇒ IBAD-PLD線材による高Ic線材ケーブル試作 (フジクラ:4mm幅x10m、ISTEC+住友:2mm幅x1m)
ケーブル & 変圧器	震災及び計画停電による機器開発への線材提供遅延(メーカ) ⇒ 線材開発を中止し、 線材提供支援 を実施 IBAD-MgO線材 の適用(基本計画ではIBAD-GZO線材)
変圧器	スクライピング技術開発成果(線材開発) ⇒ スクライピング幅低減技術適用(500 μm⇒80 μm) ⇒ 低損失変圧器及び2MVAモデル機に適用(容量増大)
変圧器 SMES	加工時の 剥離現象 ⇒ 「線材の特性把握」下期テーマに設定(線材開発) ⇒ 機構解明及び解決策提案 (線材開発)

情勢変化への対応

研究開発テーマの再編

(ケーブル開発反映、目標明確化)

@平成23年1月

③低損失線材作製技術

修正前 最終目標	2mm幅 -500A/cm-w-200m
修正後 最終目標	2~4mm幅 -500A/cm-w-200m

⑤低コスト・歩留向上技術

修正前 最終目標	技術コスト 3円/Am未満実証
修正後 最終目標	技術コスト 2円/Am実証

震災に伴う計画の修正

- 平成23年3月11日 東日本大震災
- 電力使用制限令(節電)
⇒15%節電@7-9月

線材メーカーの機器開発用提供線材の製造に支障(大型設備の稼働に制限)

線材開発よりも**機器開発用線材提供を優先**
(NEDO & PL 指示)

特性向上テーマ(2020年線材) 安定製造テーマ(実証時線材)

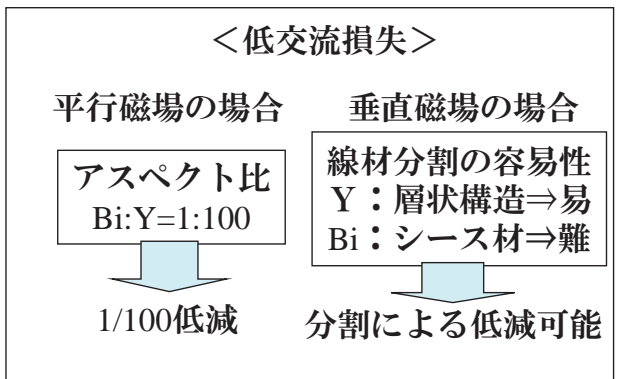
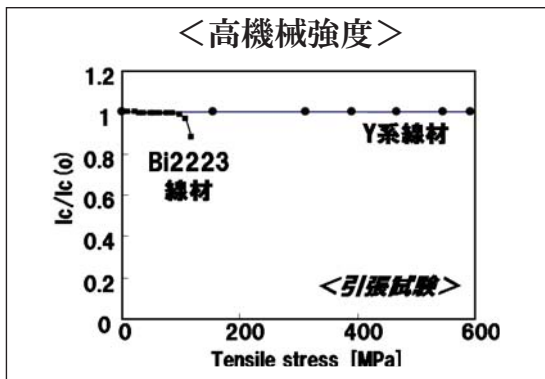
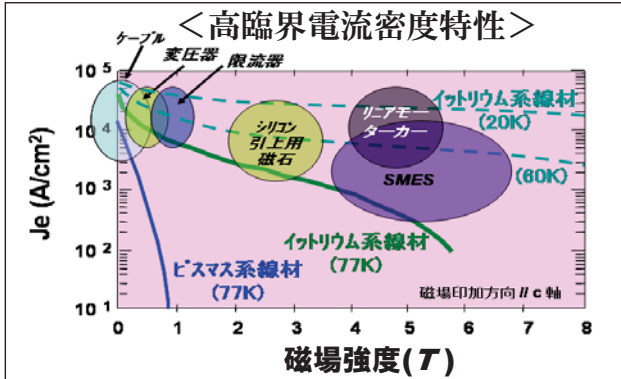
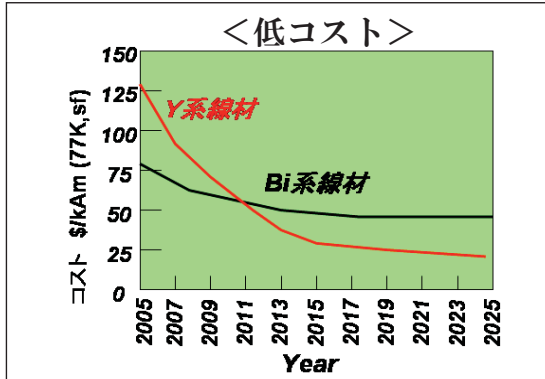
ISTEC(住電、昭和)

平成23年度は製造に専念(小片開発に限定)

線材メーカー

線材開発(安定製造等)の本格始動が遅延

成果の意義（Y系超電導線材のメリット）



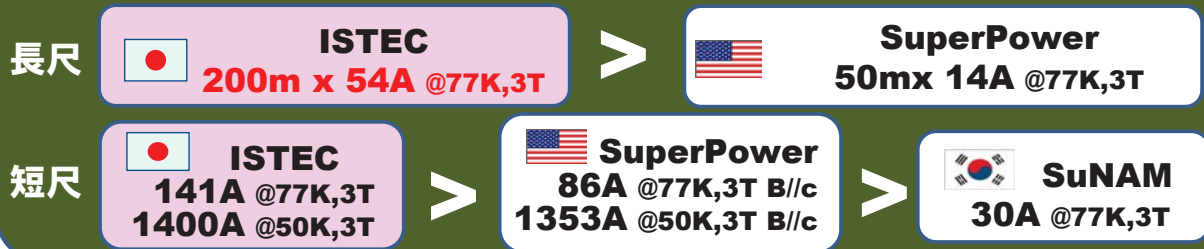
成果の意義（世界との比較等）

長尺線材作製技術(I_c × L)

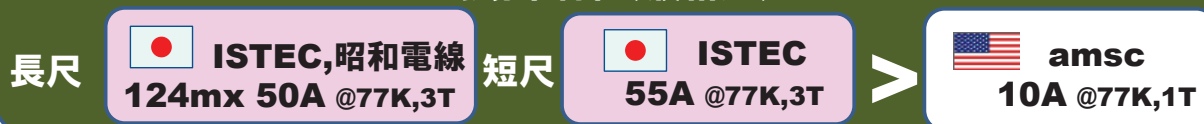


磁場中高I_c線材作製技術 最終目標 50A-200m @77K, 3T

磁場中特性(気相法)



磁場中特性(液相法)



成果の意義（世界との比較等）

低損失線材作製技術 最終目標
5mm幅10分割-100m 分割無比較交流損失1/10

低損失特性(気相法)

長尺



ISTEC
5mm幅 10分割 100m
損失1/10



SuperPower
 実績なし

短尺



ISTEC
10mm幅 20分割 損失1/20



SuperPower
12mm幅 15分割 損失1/15

低損失特性(液相法)

長尺



ISTEC
5mm幅 10分割
100m 損失1/10

短尺



ISTEC
5mm幅 10分割
損失1/10



amsc
 実績なし

特許出願状況

線材開発に関わる特許

国内出願: **52**件

海外出願: **11**件

テーマ	代表的特許
②磁場中高Ic線材 作製技術	<ul style="list-style-type: none"> ■BHO人工ピン止め点 (ISTEC、九州大学) ■MODピン制御・中間熱処理(ISTEC、昭和電線)
③低損失 線材作製技術	<ul style="list-style-type: none"> ■ダメージ抑制スクライビング溝加工技術(ISTEC、フジクラ、昭和電線)⇒PCT出願済 ■高結晶性超電導膜の低ヒステリシス損失新現象 (九州大学、ISTEC)
④高強度高Je 線材製作技術	<ul style="list-style-type: none"> ■線材の機械的強度を向上させる手法、構造 (住友電工、ISTEC)
⑤低コスト・ 歩留向上技術	<ul style="list-style-type: none"> ■MOD法によるベッド層形成手法及びその線材 (ISTEC,昭和電線) ⇒海外出願済 ■MOD均一塗布方法(ISTEC、昭和電線、古河電工)

成果の普及

<学会・論文>	国内学会（低温工学等）	214件	学術論文（Physica-C, APE, SUST, IEEE Trans等）	106件
	国際会議（ISS, ASC等）	230件		
<新聞> H21.11.2 「イットリウム系酸化物超電導線材高磁場下での超電導電流を世界で初めて実証」（ISTEC & LANL共同発表） 日経新聞(Web) 日経産業新聞 日刊工業新聞 電気新聞 H22.2.12 「Y系低磁性配向基板線材で世界初の高速化、高性能化に成功」 H22.3.30 「イットリウム系超電導線材 開発用設備を増強」 H22.5. 「超電導テープ製造用の大型レーザーCVD装置を実用」 H23.6.19 「低コスト型線材の磁場特性で世界最高性能を達成」(6社以上) ⇒				日経産業 2013.6.20
<受賞> ●日本金属学会 第18回奨励賞[材料プロセッシング部門] (H18. 9. 23) ●低温工学協会 奨励賞 (H21. 5. 14) ●電気学会優秀論文発表賞 (H22. 3. 31) ●未踏科学技術協会 超伝導科学技術賞特別賞 (H22. 4. 13) ●第59回電気科学技術奨励賞 (H23. 11. 23) ●SUST Highlight 2012 ⇒				

実用化のシナリオ及び波及効果

	住友電工	古河電工	フジクラ	昭和電線
販売開始のイメージ	・FY2013～2015開発 ・FY2016 (研究開発用,プロト用) ・FY2018 (各種用途へ)	・サンプル提供から行い、市場のニーズにあうところ（性能、量、時期）の線材供給体制を検討。	・既に小規模に販売 ・FY2013～ (生産規模を拡大)	・FY2013～FY2014 (研究開発用,プロト用) ・FY2014～ (生産規模を拡大)
販売分野	・ケーブル ・限流器 ・移動体EVモータ ・各種コイル	・送電ケーブル ・コイル等の応用機器	・送電ケーブル ・回転機 ・高磁場発生用マグネット	・送電ケーブル ・電流リード ・母線 ・回転機系機器
実用化への課題(近未来)	・長尺線材特性の局所下部の解消。 ・機器形状における機械的特性の把握。 ・市場の要請と熟成。	・更なる安定した線材特性の獲得に向けた量産技術の向上。	・信頼性の確保。 ・量産時均一性の確保。 ・製造歩留まり向上。 ・コスト低減。	・高性能線材の量産化に伴うコスト低減(原料費、歩留向上等) ・基板製造技術の確立及び装置増強。
実用化への課題(将来)	・長単長化(1km級)と品質安定化の両立。 ・量産プロセス確立した上でのコスト低減。 ・品質面の長期信頼性特性の把握。	・線材の更なる低コスト化。	・現用常電導機器、金属超電導機器に対して優位性を持つことができる線材性能やコストの低減化	・低コスト化 ・生産量増 ・更なる高性能化