



低温工学協会
九州・西日本支部
Cryogenic Association of Japan

電磁現象の解明から 超伝導線材設計の時代へ

福岡工業大学
山藤 馨

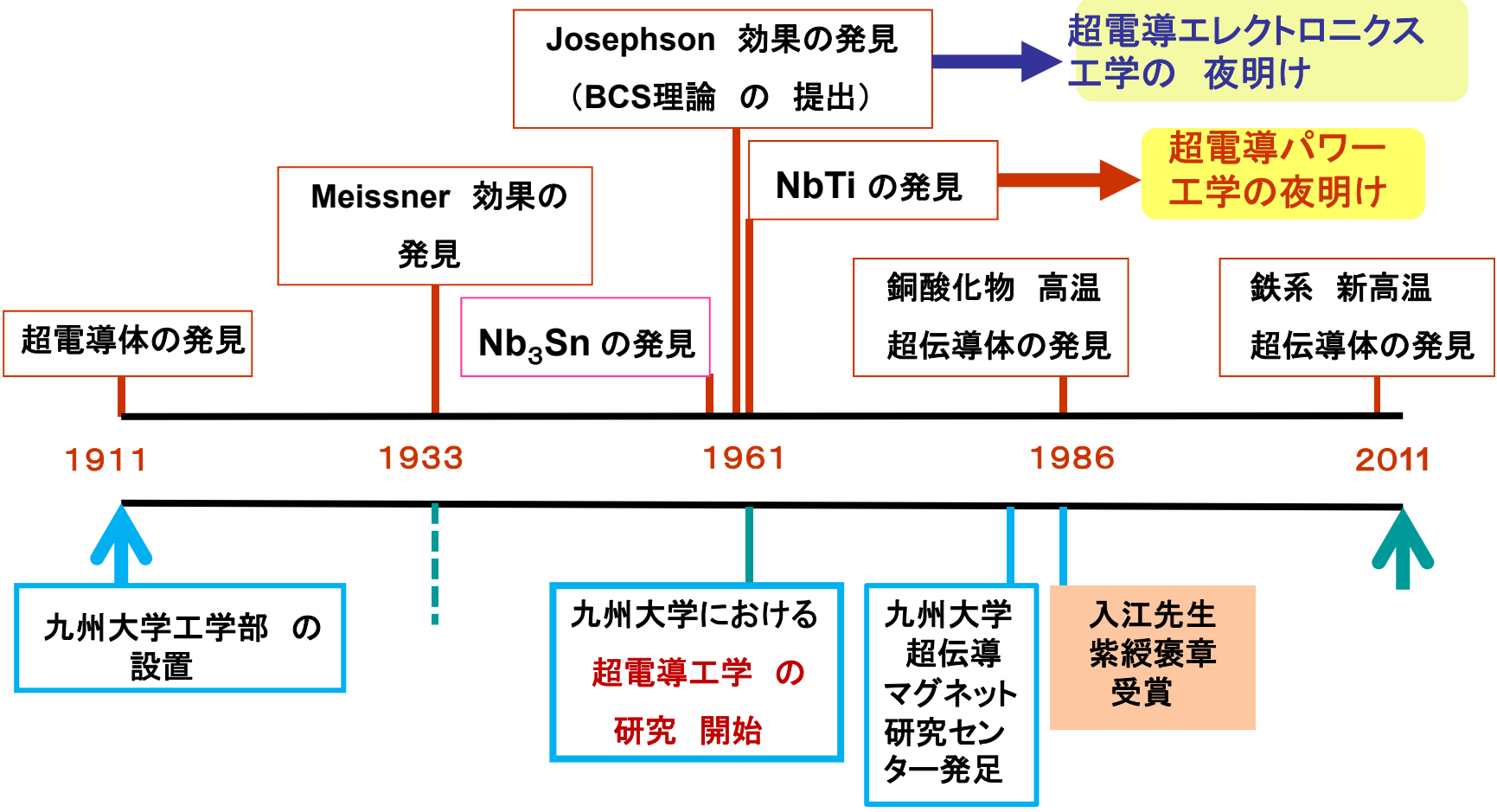
2011年4月23日
低温工学協会 九州・西日本支部設立10周年記念研究会
九州大学伊都キャンパス

概要

- 九州における 超電導工学研究の夜明け
- 超電導材料・線材の 電磁現象解明
- 超電導線材への 「人工ピン」の導入
- 超電導材料・線材・導体特性の 国際標準化
- 超電導パワー工学の概念の変遷 と 今後のあるべき姿



超電導工学の夜明け



超伝導工学 の 特徴

超伝導パワー工学
の 例

極低温 の
技術 ・ 工学
で あること !

~ $10^{-9}m$ から ~ 10^3m に 至る
膨大な 長さのスケール差 ΔL に 亘って
超伝導特性 の 強い 影響下 で
研究 ・ 開発 を 行う 必要性 !

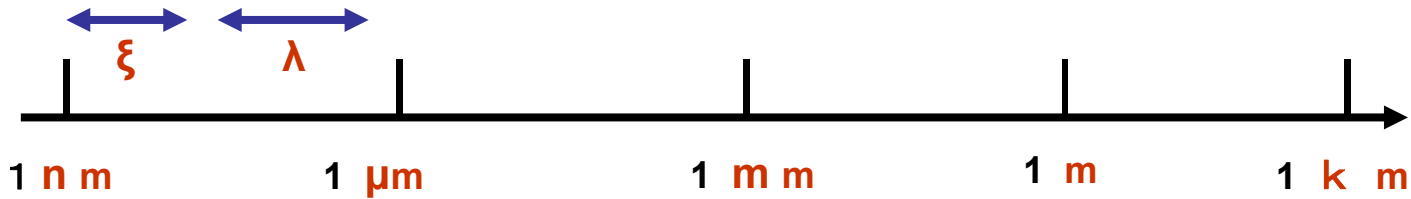
線材・導体の機械的性質の研究 ・ 冷却技術 等々

線材 の 開発 ・ 設計 ・ 製造 技術 の 研究

材料・線材 の 電磁現象 の 研究

装置 ・ システム の
開発 ・ 研究

材料・線材 の ピンニング 特性 の 研究



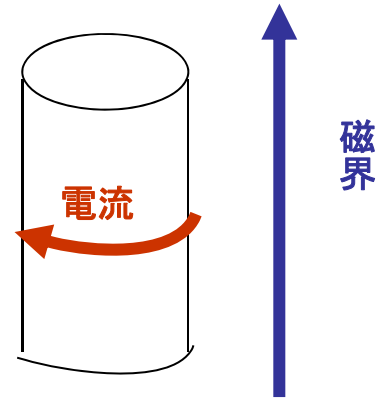
超伝導パワー工学 の 黎明期 における

基盤技術 の 主な 研究 分野

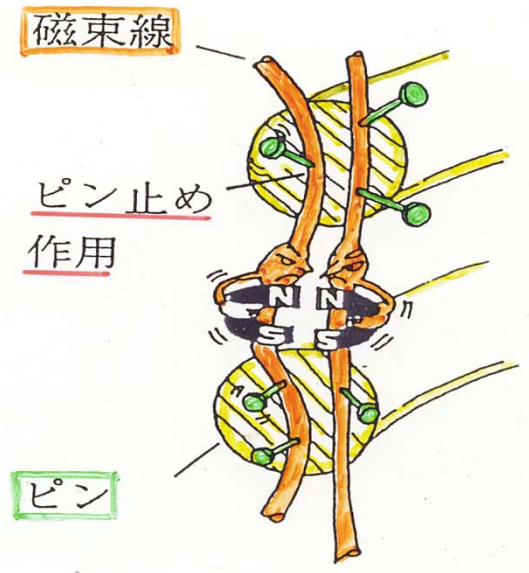
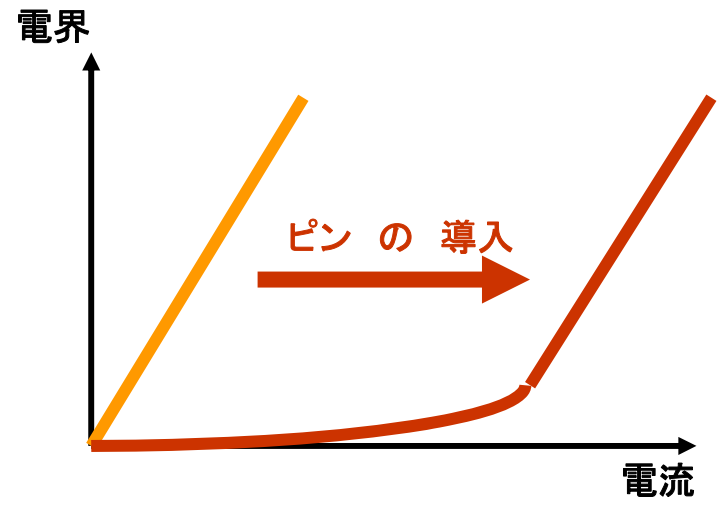
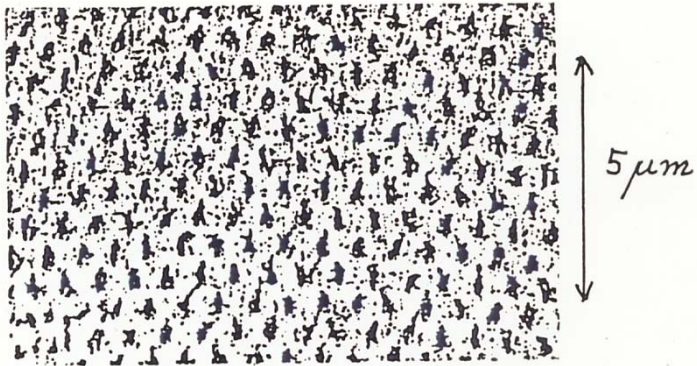
材料・線材 の 電磁特性 の 説明	<u>材料・線材の 磁束ピンニング 特性 の 説明</u> ・ 各種ピン の ピンニング機構 と ピン力評価 ・ 導入された ピン集団 における ピン力の 和	・ ○ ・ ○
	<u>ピンを含む 材料・線材 における 電磁特性の説明</u> ・ 異方的試料形状 に対する 磁束方向 の 影響 ・ 交流損失機構 の 説明 と 交流損失 の 評価 ・ 磁気不安定性 (磁束跳躍) の 機構説明 ・ . . .	・ ○ ・ ○ ・ ○
↓		
材料・線材 の 電磁特性設計 の 基礎研究	・ 臨界電流密度(J_c) の 温度・磁界スケーリング則 ・ 多芯線 の 交流損失 の 評価 と スケーリング ・ 設計し易い 高 J_c ピン(人工ピン) 導入 の 研究 ・ 線材・導体 の 安定性 と 低損失化 の 研究 ・ 線材・導体特性 の 測定法 の 国際規格化 ・ . . .	・ ○ ・ Δ ・ Δ ・ Δ ・ X

量子化磁束をピン止めする
ピンニング・センター導入の必要性

第一種超伝導体



第二種超伝導体

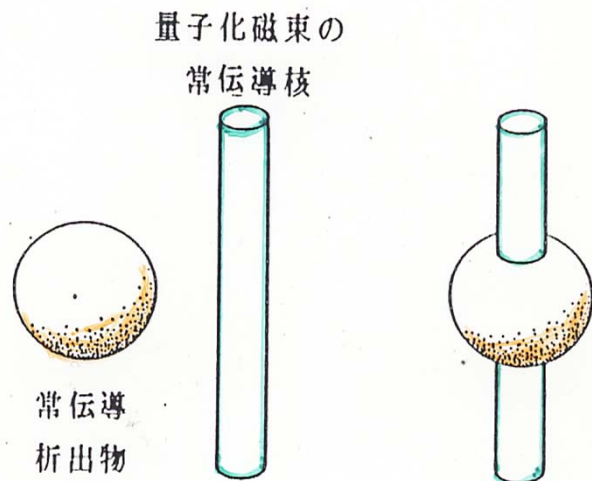


ピンニング力の 理論的 評価 問題

要素的 ピン力 f_p
の 理論的 評価

単位体積当りの ピン力 F_p
$$F_p = J_c B = \epsilon f_p N_p$$

(ϵ : **ピン止め効率**) の **加算 問題**
(N_p : **単位体積当りの ピン数**)



要素的ピンカ f_p に寄与する相互作用（低 T_c 超電導体）

変化する自由エネルギーの種類		相互作用の種類	相互作用の大きさ
凝縮エネルギー変化	核相互作用	ピン付近で超電導度が変化 (析出物等)	大
	電子散乱相互作用	ピン付近で電子自由行程が変化 (結晶粒界等)	大
	異方性エネルギー	結晶粒界の付近で B_{c2} が変化	中
弾性エネルギー変化		ピン付近で超電導体の 弾性エネルギーが変化	小
磁氣的エネルギー変化		ピン付近で B 分布が変化	High κ では小

磁束ピンニング力 加算理論 の 古典論 (~ 1978)

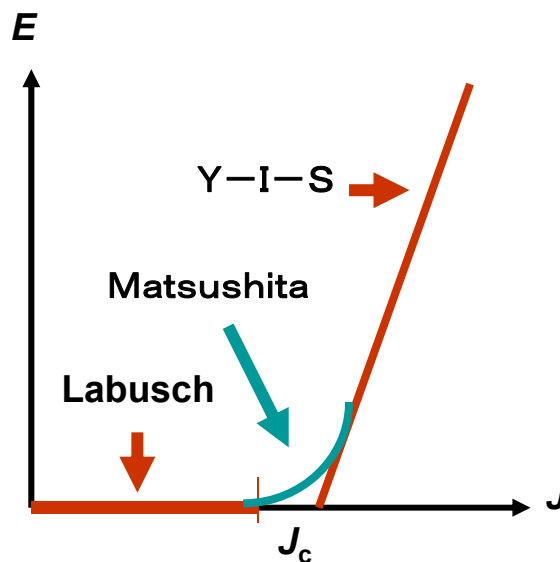
研究 対象	仮定 1	仮定 2
低 T_c 超伝導体 の 3D 磁束 の 集団	熱揺動 を 無視	量子化磁束間 の 相関距離 は ∞

成果 : 「動的理論」と「静的理論」の一致

R. Labusch
(静的理論)
と
山藤・入江
A.Schmid
(動的理論)

が 不一致 !

松下 が 解決



致命的欠点

古典理論
の 結論

十分小さい f_p
に対しては
 $F_p = 0$

実験事実 に
合わない !

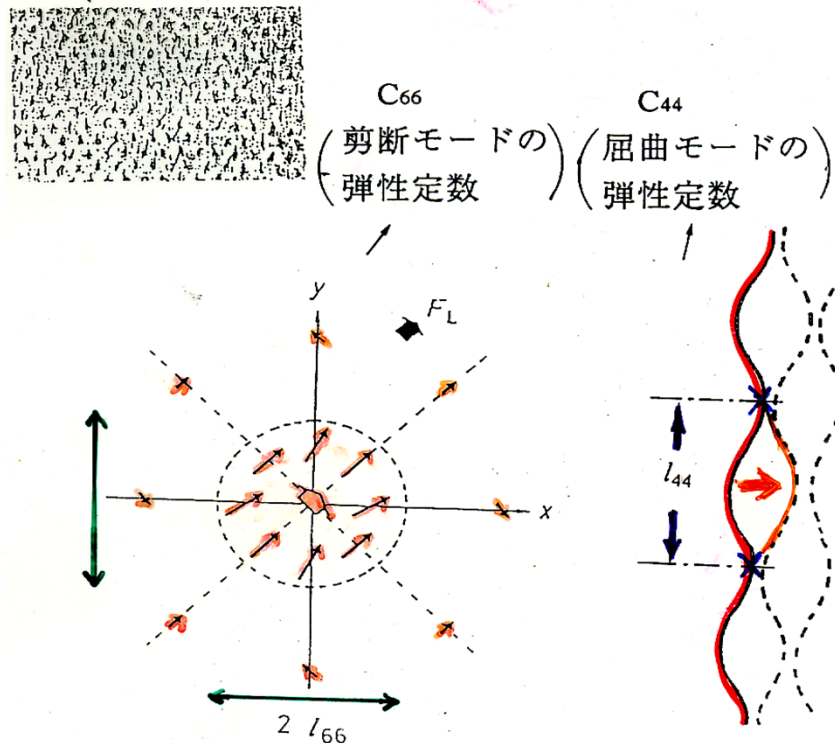
磁束ピンニングカ の 加算問題 の 近代理論 の 幕開け

Larkin-Ovchinnikov 理論
の 提出 (1978)

ピンを含む 超伝導材料 中 における
量子化磁束 間 の 相関距離 は 有限 !

この 理論 によって
古典論 の 矛盾は 解消

ピンカ の 加算 は 相関距離 で 囲まれた
「 相関体積 」 V_c 内 で 行えば よい !



$$\text{相関体積} : V_c = 2l_{44}\pi l_{66}^2$$

で 囲まれた 量子化磁束群
の部分
を
「 磁束バンドル 」 と 呼ぶ。

「 磁束バンドル 」 内 の
量子化磁束 数 が 少 ほど
強い F_p が 得られる。
(f_p の 打ち消し が
少 ない から !)

ピン力 ($F_p = \epsilon f_p N_p = J_c B$) 加算の原理

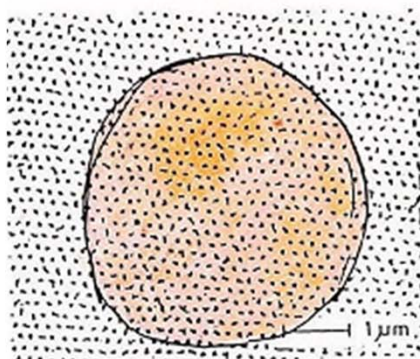
- ピン力の和はFlux Bundle内で行えばよい (Flux Bundleは同時に動くから)

弱いピン ($\epsilon \ll 1$)
Flux Bundleの体積大
(多数の磁束線を含む)

中程度のピン ($\epsilon < 1$)
Flux Bundleの体積小
(数十本程度の磁束線を含む)

強いピン ($\epsilon \sim 1$)
Flux Bundleは
1本の磁束線

Random Point Pins



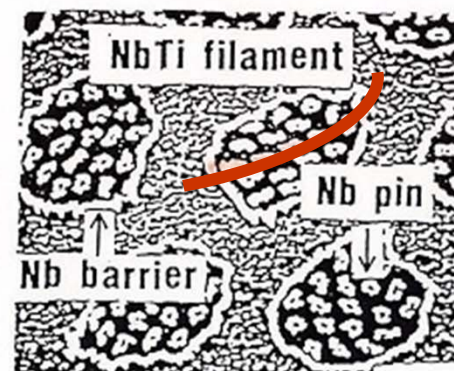
揺動和

Grain Boundaries (V_3Ga)



複雑和

Island型Nbピン

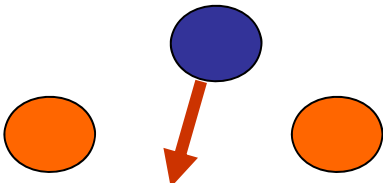
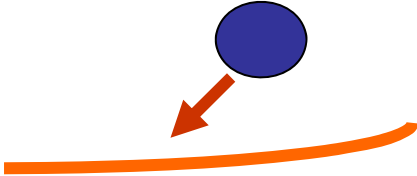
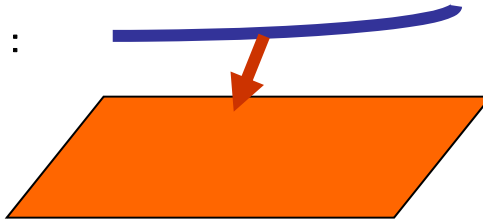


線形和

ピンの幾何学的形状によるピン止め効率（低 T_c 超伝導）



ピンと量子化磁束の衝突断面積が大ほど $F_p = J_c B$ が大

ピンの形状	ピンの次元	F_p の大きさ
粒状 ： 粒状不純物 粒状析出物 等	0 次元： 	小
線状 ： 柱状析出物 転位セル 等	1 次元： 	中
面状 ： 結晶粒界 面状析出物 等	2 次元： 	大

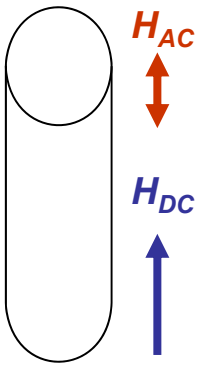
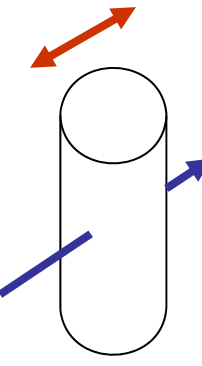
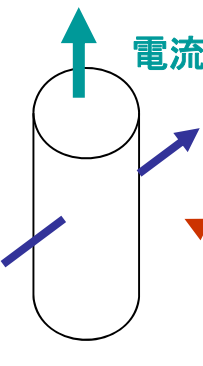
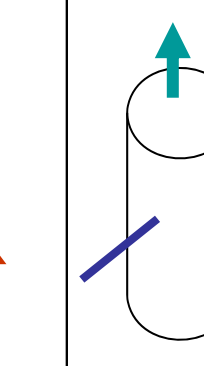
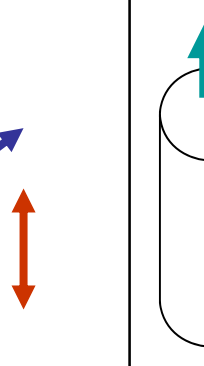
低 T_c 超伝導 フィラメント の 電磁現象

難点 1 :
 基礎方程式が
 従来 と 異なる

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$

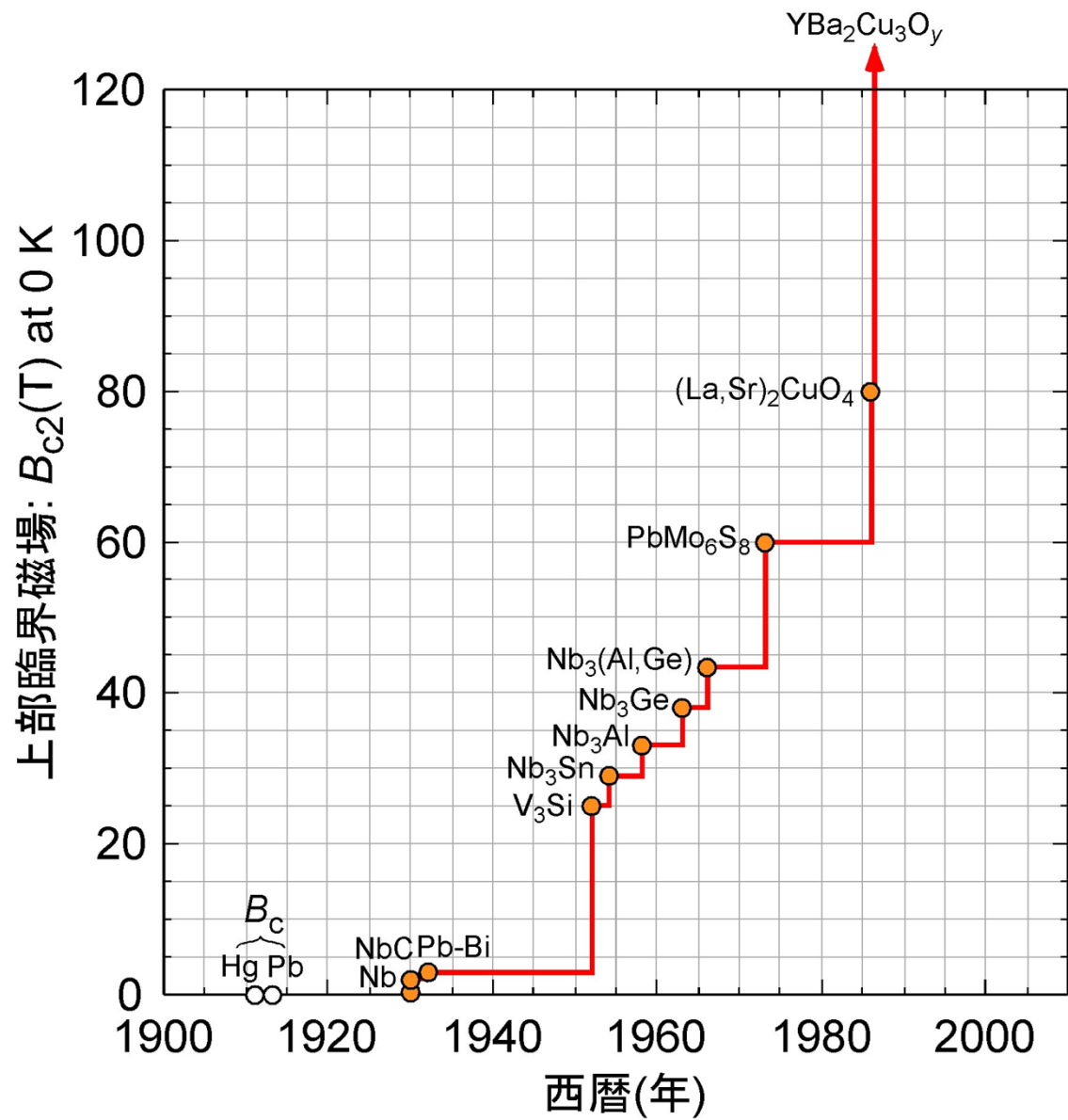
$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t$$

難点 2 :
 形状 異方性 が
 大きい

	縦 磁界 (1 次元)	横 磁界 (2 次元)	異常 横 磁界 (2 次元)	異常 横 磁界 (3 次元)	異常 縦 磁界 (3 次元)
現象					
1975	○	X	X	X	X
1985	○	○	○	○	○

超伝導 多芯線 の 電磁現象

			1975	1985	
超 電 導 線 材	多 芯 線 の 交 流 損 失	履 歴 損 失	小振幅横磁界	○	⊙
			大振幅横磁界	△	⊙
			回転磁界	△	⊙
			楕円磁界	×	⊙
			極細多芯線の特徴	×	▲
	損 失	結 損 合 失	低速パルス磁界	○	⊙
			高速パルス磁界	×	⊙
			輸送の電流影響		
	高速パルス用線材の開発		低速パルス磁界(電流一様化)	×	⊙
			高速パルス磁界(電流紋り込み)	×	⊙
			同時挿引	×	⊙
		高速パルス用NbTi線材	×	⊙	
		新製法高速パルス用Nb3Sn線材	×	⊙	
超 電 導 体	導 体 化 に 伴 う 問 題 点	安 定 性	完全安定化導体の交流損失	×	⊙
			錫拡散バリヤを持つNb3Sn導体の交流損失	×	⊙
		電流容量	1次ケーブルの交流損失	×	⊙



銅酸化物系 高温 超伝導材料 の 特徴

結晶粒界 が
ピンにならず
電流路 を遮断

低 T_c 超伝導材料

- ・ ξ が 比較的 長い
- ・ 極低温 で 使用 する

↓

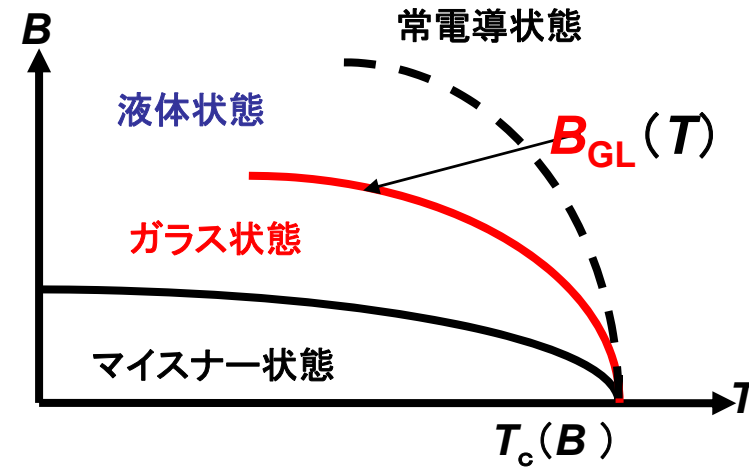
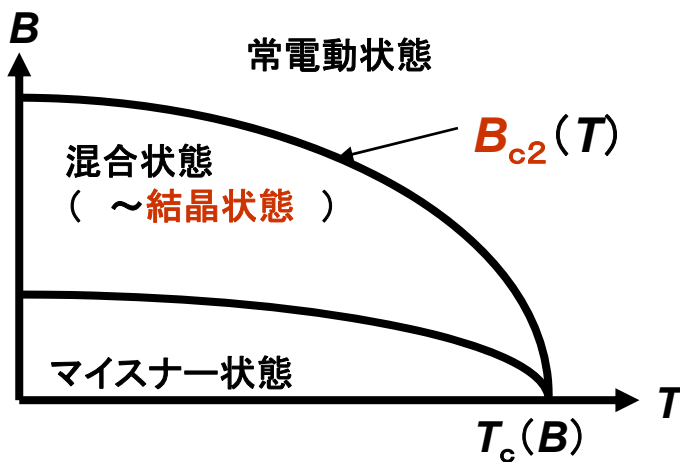
熱揺動 の 影響 が 無視 できる !

高 T_c 超伝導材料

- ・ ξ_{\perp} が 極端に 短い
- ・ 窒素温度 付近で 使用

↓

熱揺動 の 影響 が 本質的に 重要 !



線材 の 電磁特性設計 に必要な 臨界電流密度 $J_c(B, T)$ の スケーリング則

$$J_c B = \alpha B_{c2}^{\zeta} \left(\frac{B}{B_{c2}} \right)^{\gamma} \left[1 - \frac{B}{B_{c2}} \right]^{\delta}$$

$B_{c2}(T)$

$$J_c B = \alpha B_{GL}^{\zeta} \left(\frac{B}{B_{GL}} \right)^{\gamma} \left[1 - \frac{B}{B_{GL}} \right]^{\delta}$$

$B_{GL}(T)$

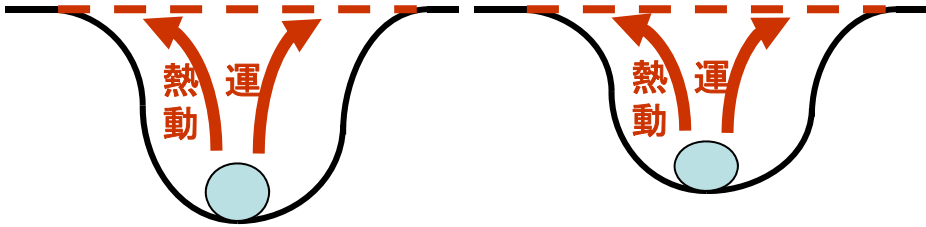
ガラス・液体遷移 (G-L遷移) の本質 と 技術への 適用

Fisher らの理論の 特徴	G-L 遷移 は 2次 相転移	G-L 遷移 は S-N 遷移 ($J \rightarrow 0$ で 電気抵抗 $\rightarrow 0$)
--------------------	--------------------	---

Fisher らの理論の 問題点 (スピン・グラス系の モード結合理論 を 適用)	この理論 からは $B_{GL}(T)$ の 表式 が 求まらない !	再検討 が 必要 ! ① Feigel'man理論 は 超長時間の現象には 適用 できない !? ② L-O 理論 と 矛盾 ! (L-O理論は J によらない)
--	---	--

山藤・木須・藤吉 理論 の 特徴	$B_{GL}(T)$ の 表式 が 導ける !	$J \rightarrow 0$ でも 電気抵抗 は 有限値 !
---------------------	--------------------------------	--------------------------------------

G-L 遷移 は 量子化磁束の 熱揺動 で ピン止め が はずれる 「デピン 遷移」 !	$B = B_{GL}(T)$ では、「或る」磁束フロー・パス に沿った 全ての ピンポテンシャル が 熱揺動 で「埋まる」。
---	--



RE-123 線材 の 臨界電流密度 $J_c(B, T)$ の
 スケーリング則 (温度 ・ 磁界 依存性)

B -dependence (scaling)

Kiss et al.

$$F_{\text{pm(pk)}}(B) = J_{\text{cm(k)}}(B)B = AB_{\text{GL(k)}}^{\zeta} \left(\frac{B}{B_{\text{GL(k)}}} \right)^{\gamma} \left(1 - \frac{B}{B_{\text{GL(k)}}} \right)^{\delta}$$

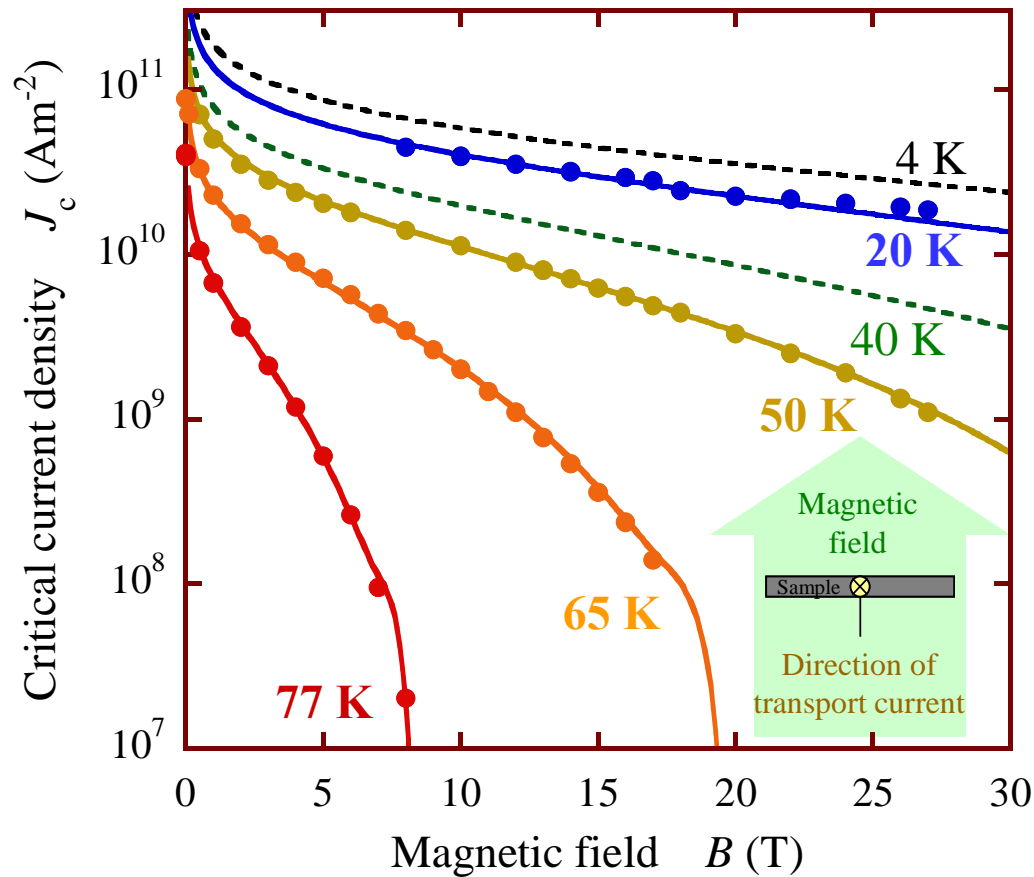
T -dependence

$$B_{\text{GL(k)}}(T) = \frac{b}{1 - \nu_p} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \left(1 - \frac{a}{1 - \frac{T}{T_c}} + \sqrt{\left(1 + \frac{a}{1 - \frac{T}{T_c}} \right)^2 - 4\nu_p \frac{a}{1 - \frac{T}{T_c}}} \right)$$

GdBCO CC線材の通電特性の定式化 (J_c - B)

IBAD-PLD GdBCO CC
($I_c \sim 350$ A @ 77 K & s.f.)

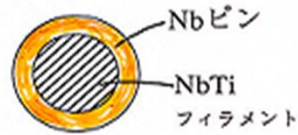
- Experimental data
- Analytical estimation for experimental condition
- ⋯ Analytical estimation beyond experimental condition



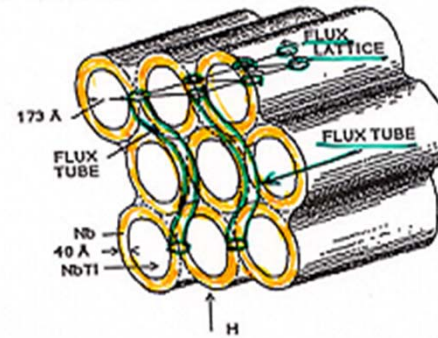
初期 の 人工ピン

NbTi 多芯線 に Nb人工ピン を 導入

(A) 被覆型Nbピン
(IGC)

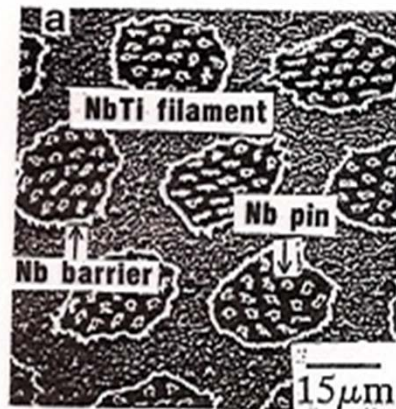


5段階にスタックして
極細多芯線にした。
→ 1st stack bundle内部が
崩れてつながってしまう。
→ AC用には向かない。



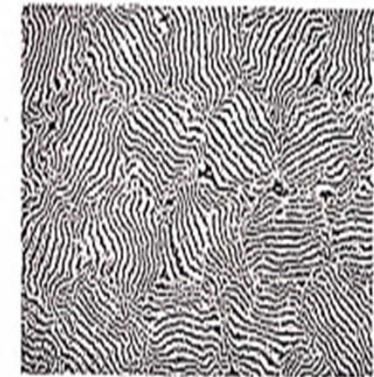
(B) Island型Nbピン
(九大-古河)

比較的崩れにくく、
AC用に使いそう。
ただし、(A)、(C)に
比して、ピン密度小。



(C) 薄いシース状Nbピン
(九大-古河)

(1本のフィラメント内部)
黒い部分：NbTi
白い部分：Nb
Nb + Ti
薄いシース状α-Tiピン
と似た形状



NbTi 多芯線 に Island 型 人工ピン を 導入

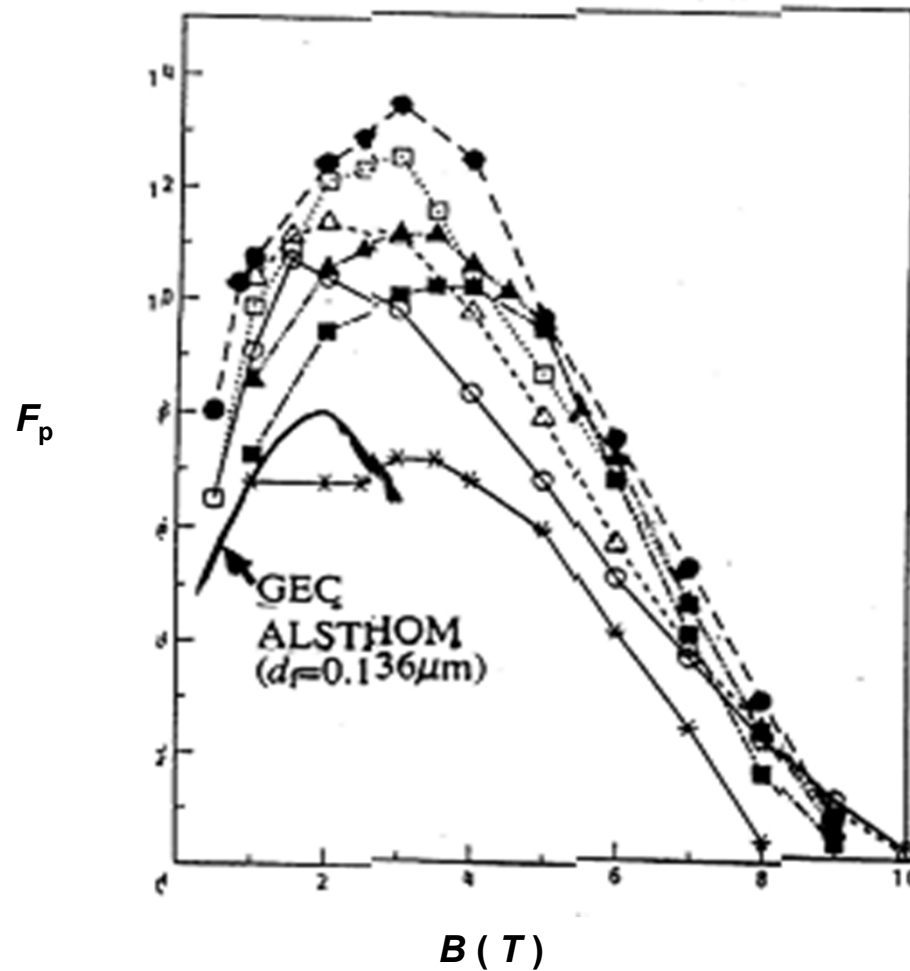
Miura et al.

成果 1 :

従来の 商用 AC
多芯線 より
 J_c が かなり 高い。

成果 2 :

F_p の ピーク の
位置を
1 ~ 4 T の
範囲で
制御 可能。

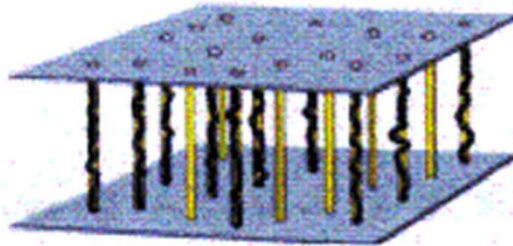


人工ピンの 概念の 整理

松本 要 : 応用物理 77[1] 19 (2008)

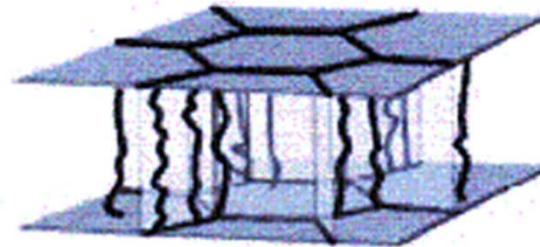
(a) 一次元人工ピン

転位 柱状欠陥 柱状微粒子



(b) 二次元人工ピン

結晶粒界 析出物界面



(c) 三次元人工ピン

ナノ粒子 異相

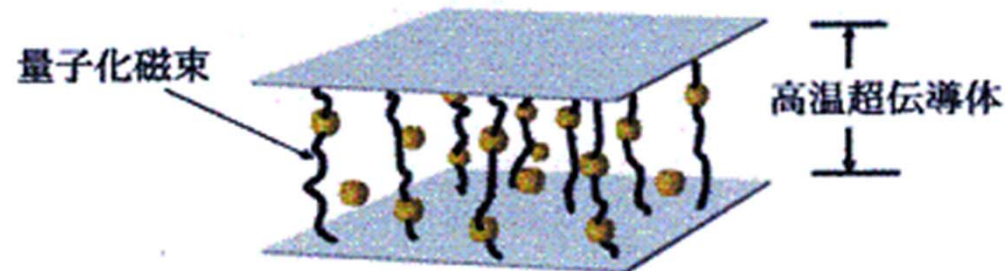
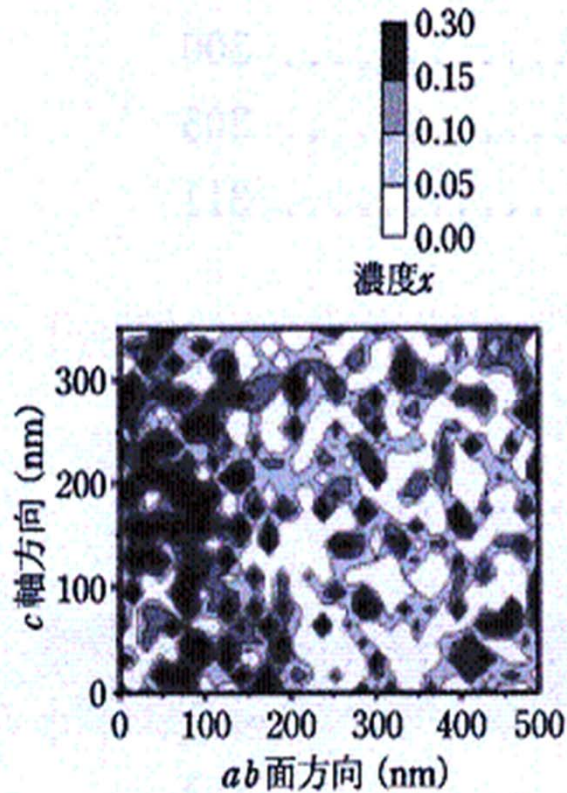


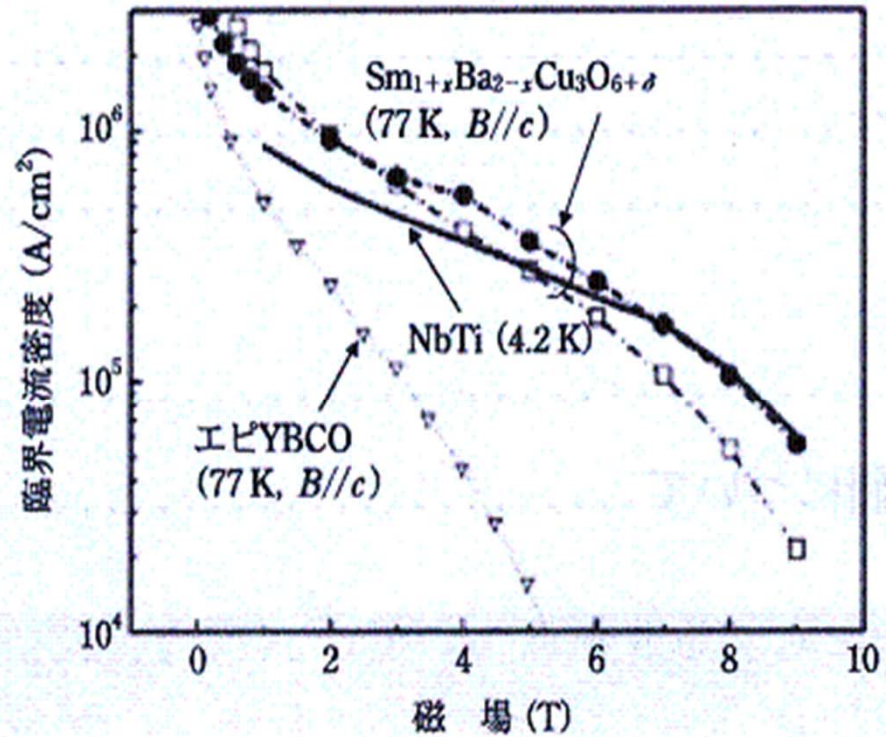
図 人工ピンとして使用される結晶欠陥の模式図。欠陥の次元性によって一～三次元が考えられる。(a)一次元人工ピン, (b)二次元人工ピン, (c)三次元人工ピン。これ以外に, 点欠陥はゼロ次元と見なせる。

銅酸化物系 高温 超伝導材料 における 最近の 成果例

77 K で 4.2 K の NbTi を 超えた ! (吉田、松本 et al.)

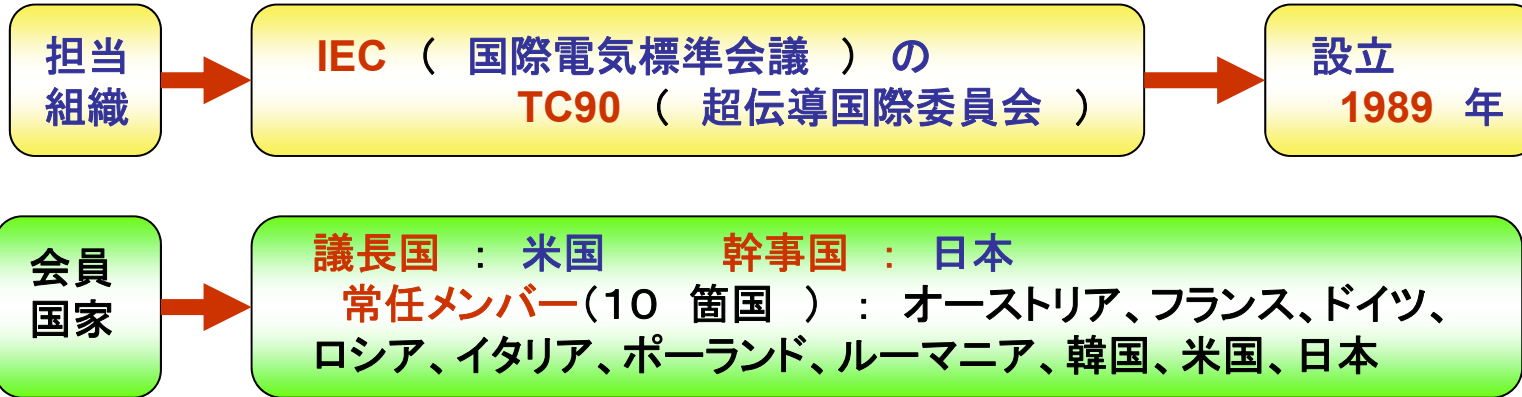


(a) Sm/Ba組成の濃度揺らぎ



(b) 77 Kにおける磁場中 J_c 特性

超伝導 材料・線材・導体 特性 の
測定技術 の 国際規格化



これまでの 成果 : IEC 規格 (14 件)、 JIS 規格 (14 件)

用語 規格	超伝導関連用語
試験 方法 規格	<ul style="list-style-type: none"> ・ I_c 試験 (NbTi 線材、Nb₃Sn 線材、Bi 系 線材) ・ 銅比 試験 (NbTi 線材、Nb₃Sn 線材) ・ RRR 試験 (NbTi 線材、Nb₃Sn 線材) ・ 室温引張り試験 (NbTi 線材) ・ M波表面抵抗試験 ・ 超伝導バルク捕捉磁束密度試験 ・ 臨界温度試験 ・ 交流損失試験 (NbTi 線材)

超伝導関連 国際標準化 の 現状の課題 と 将来の課題

<p>現状 の 課題</p>	<p>(幹事国 としての) メンテナンス 管理 と 新事業項目 提案</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5年毎の 期限延長・改正・廃棄 ・ 「不確かさ」の 概念導入 ・ 銅酸化物HTS関連規格化推進
		
<p>将来 の 課題</p>	<p>日本産業 の 国際戦略 の 視点 から</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 幹事国 として 国際規格化 を リード することは 重要 ! (経産省 : 超伝導 を 国際標準化 重要項目 の 一つ に 指定)
	<p>世界的 (地球的) 視点 から</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ HTS製品 の 国際規格 整備 2013~2015: 電力関連機器 (現在: 超伝導市場~5400億円 の 99% が LTS 製品) ・ 地球環境改善関連規格 の 整備 (CO₂ 削減、ライフサイクル、等)

初期の「超伝導パワー工学」のイメージ

初期の頃の「超伝導工学」のイメージ



「超伝導工学」

「超伝導科学」

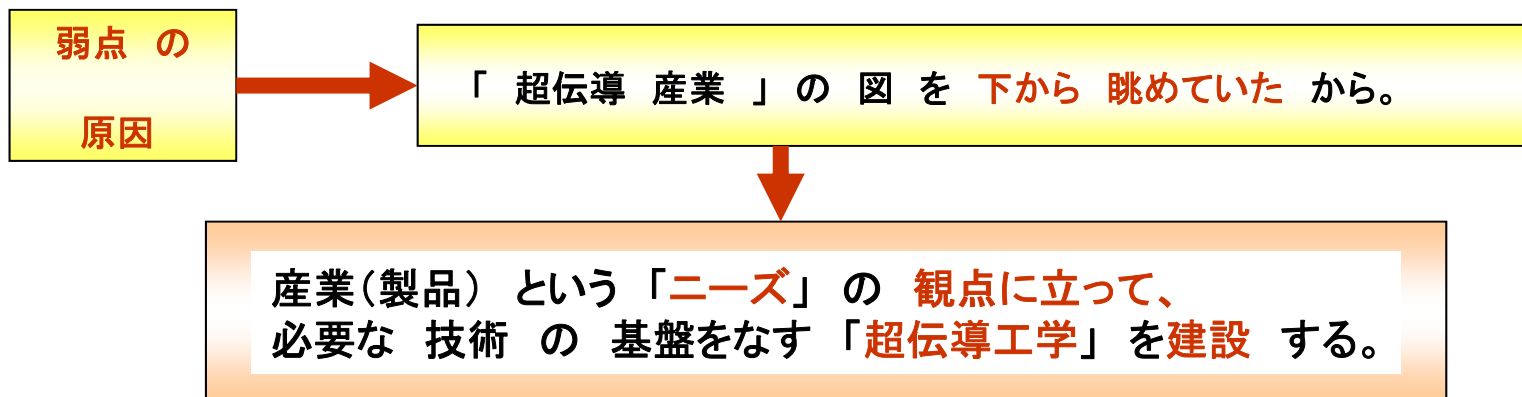
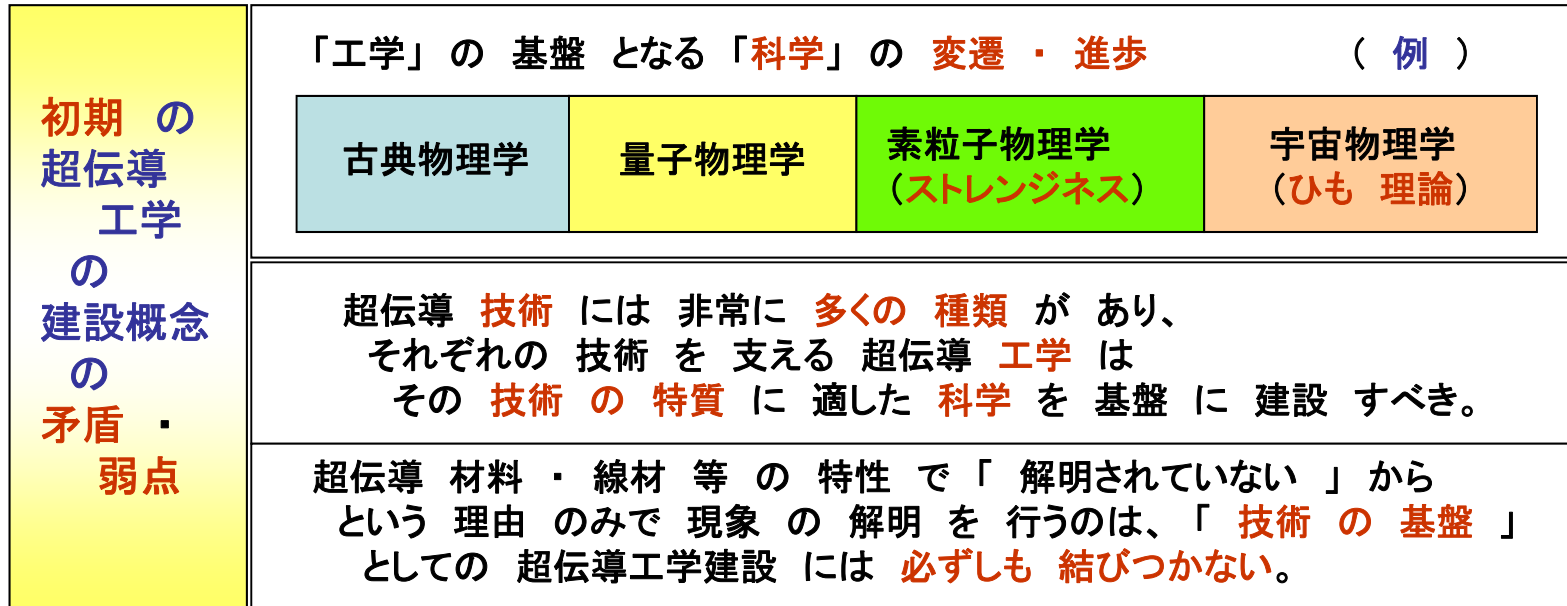
「超伝導科学」
 (BCS理論等、quasi-First Principleに基づく)
 の基盤の上に
 「超伝導工学」
 を建設。

そのような「超伝導工学」
 の基盤となるであろう

- ・ピンニング現象
- ・電磁現象等々

の絨毯爆撃的解明に
 着手。

「超伝導パワー工学」の概念の変遷



今後の「超電導工学」のあるべき姿

超電導・低温 産業

