

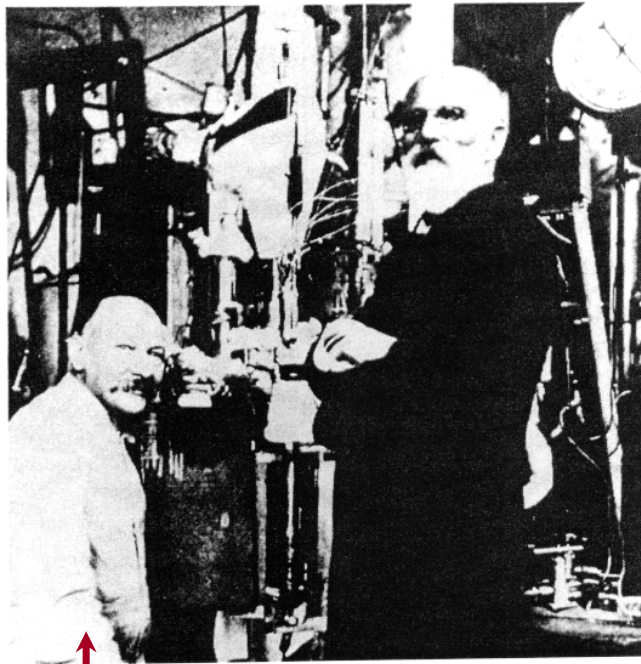
高温超伝導 ～夢の実現～

田島 節子
大阪大学名誉教授

- 目次
1. 超伝導とは
 2. 高温超伝導発見を目指して
 3. 銅酸化物高温超伝導体の性質の特徴
 4. 超伝導体の実用化

1. 超伝導とは

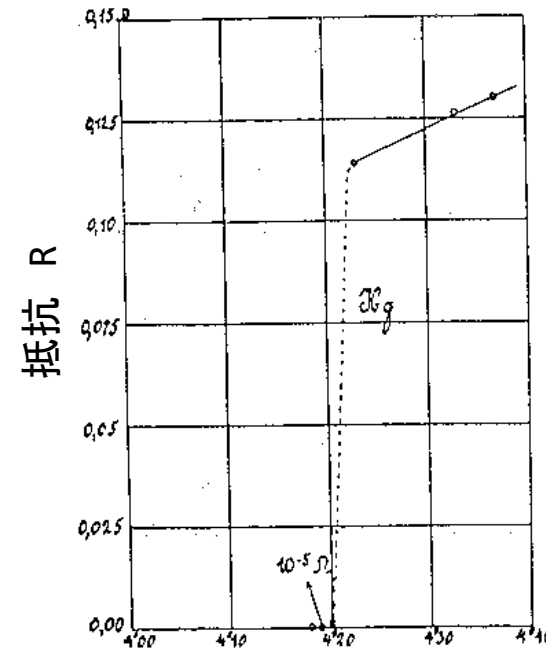
Kamerlingh Onnesによる発見 (1911年)



ライデン大学の低温物理学研究所（当時）で気体の熱力学的な状態を研究したファン・デル・ワールス（右）とカメリン＝オンネス（左） カメリン＝オンネス研究所提供

この人 1909年 Heの液化に成功

水銀の電気抵抗が4.2K付近で突然低下



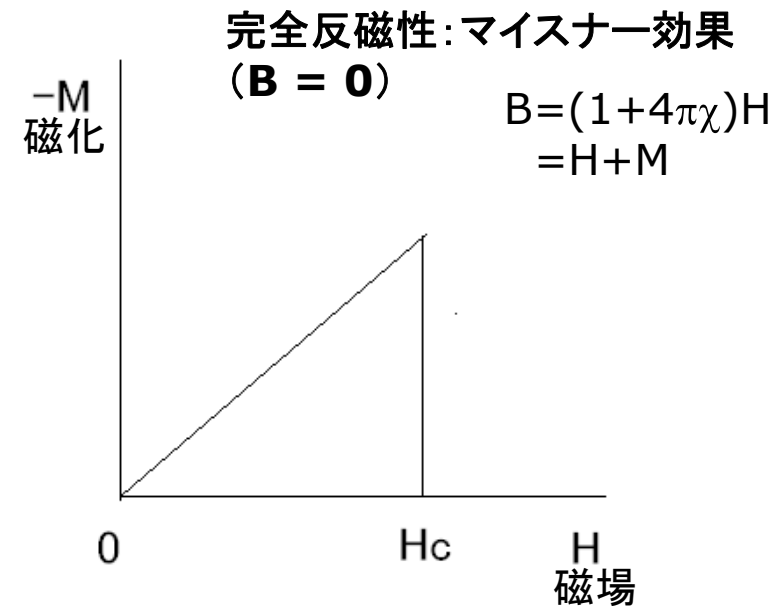
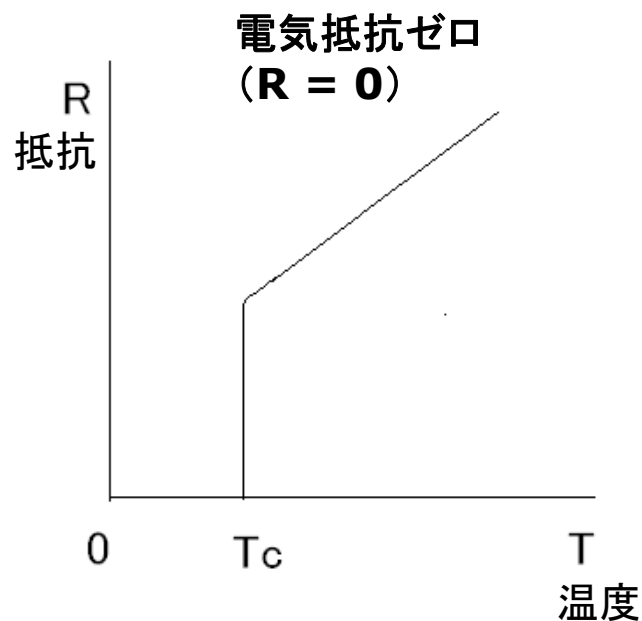
絶対温度

絶対温度273K ~ 0°C
4.2K ~ -269°C

超伝導とは・・・

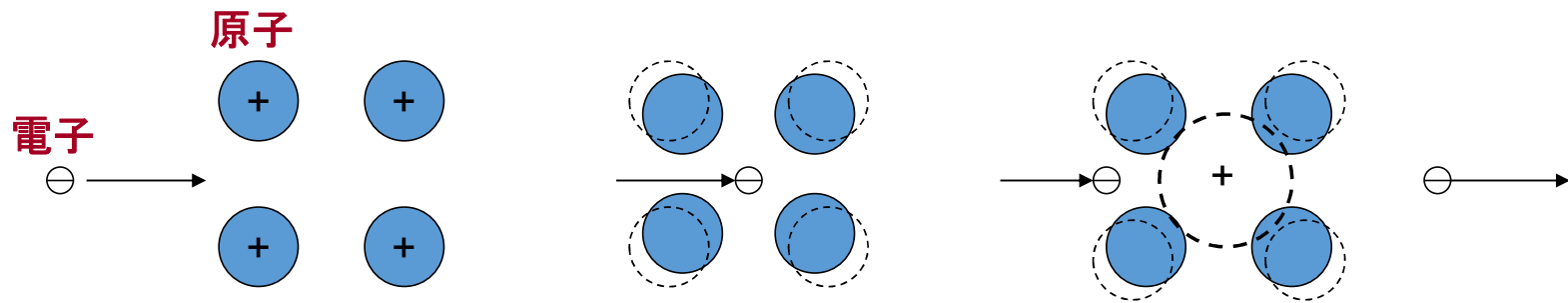
~~$V = I \cdot R$ オームの法則~~

- オームの法則が成立しない極低温の現象
- 温度を下げると相転移によって超伝導になる。
- 金属の性質の一つ
- 電子が対になって(位相をそろえて)運動する。



→ 熱を発生せずに電気が流れる。エネルギー損失がない。 → エネルギー革命！

電子間に引力が働く仕組み



正に帯電した原子の配列したところに負の電荷を持つ電子がやってくる。

電子が原子をひきつけ、原子が平衡位置からずれる。

電子の速度が原子の動きよりずっと速いため、電子が通りすぎた後も原子の位置はずれたままになっている。それによってできた正に帯電した領域に次の電子が引き寄せられる。

軽い元素ほど
 T_c が高い。

Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS)のモデル
1957年

BCS理論による転移温度 T_c の記述

$$T_c \sim \hbar \omega_D e^{-1/N(0)V}$$

同位体効果によって検証

$$\omega_D^2 \sim 1/m$$

(重い原子はゆっくり振動する)

超伝導体発見の歴史

単一元素の金属から金属間化合物へ

液体酸素 90K
液体窒素 77K



Nb₃Ge ($T_c=23K$)で頭打ち

新しいメカニズムによる超伝導
の理論的予言

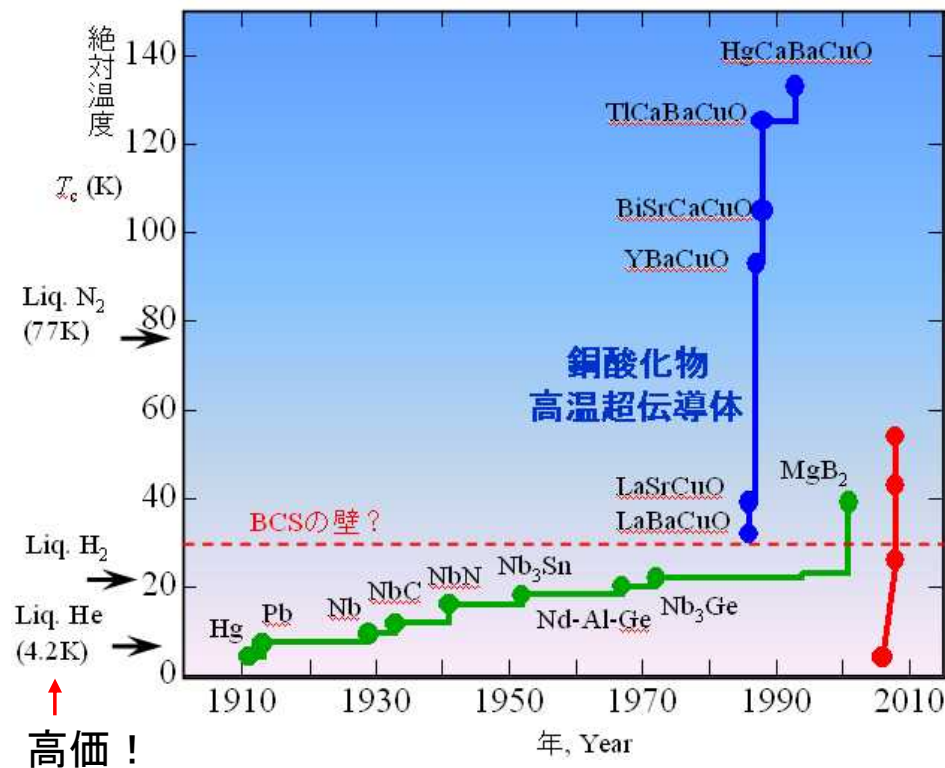
→ Non-BCS超伝導体への夢

USO (Unidentified Superconducting Object)の出現

2. 高温超伝導発見を目指して

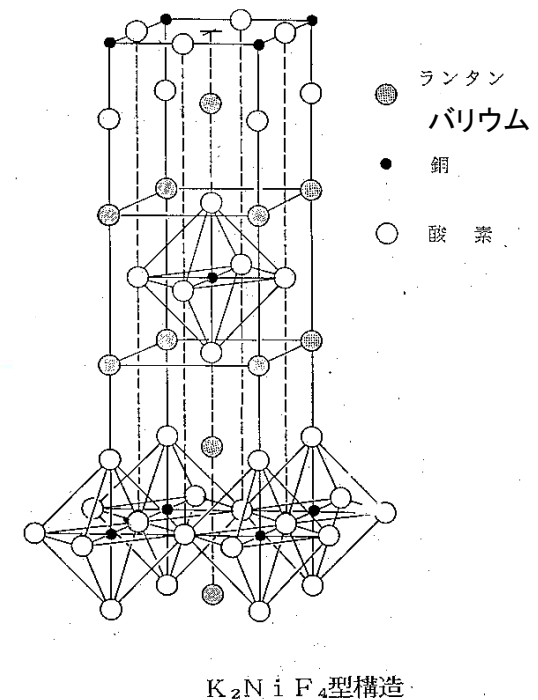
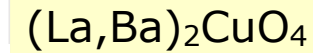
高温超伝導発見(1986年)

液体窒素
温度を越
えた！



BCS理論は破れた！？

セラミックスが金属、しかも超伝導



“高温超伝導の可能性”という論文

Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller
IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

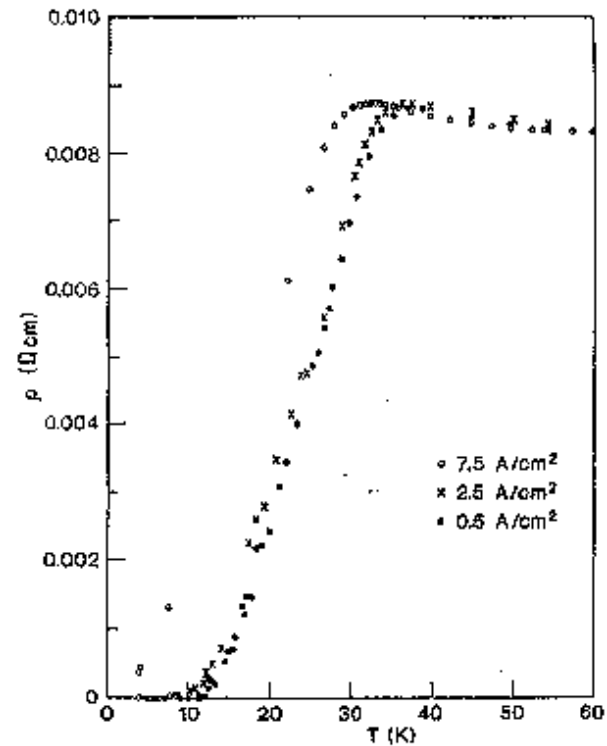


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with $x(\text{Ba})=0$ recorded for different current densities

日本では
大学4年生が卒業研究
で超伝導であること確認

超伝導フィーバー

中国科学技術院の発見
1986年12月26日

中科院發現新型超導材料
轉變溫度之高為前所未見

新華社北京十二月二十六日電（記者張繼民、通訊員黃興堂）中國科學院物理研究所科技人員最近在實驗時，突然發現了一種在絕對溫度七十度時具有超導電性的多相性金屬氧化物，這是迄今國際上發現的溫度最高的新型超導材料。

超導電性是指物體在非常冷狀態下，電阻完全消失的特性。物體從有電阻開始成為無電阻時的溫度稱為超導轉變溫度，這個溫度在科學上用絕對溫度來表示，它的零度相當於零下二百七十三攝氏度。一般來說，超導體的轉變溫度越高，它的實用價值越大。早在一九一一，荷蘭科學家首次發現水銀超導轉變溫度為四度以來，到現在工業生產及科研中應用的超導材料如鎳三錳，它的超導轉變溫度僅為十八度。對比國外新近發現的超導轉變溫度為三十七度的新材料，我國科研人員的這一發現，顯然處於國際領先水平。

有關研究人員介紹說，這種多相性金屬氧化物，由銀、銦、銻等元素組成。他們推測，這種材料的超導電性機制，可能起源於某些固體的滲流特性。據悉，低溫超導材料研究是當今世界上一門新興科學技術，各國科學家都在競相研製。因為他們知道若獲得超導轉變溫度高的材料，將會大大促進尖端科學技術的發展。

周期表での探索

周期表

電子遷移元素																		He				
原子番号																		元素記号				
1H																	2He					
1s																	1s ²					
3Li	4Be															5B	6C	7N	8O	9F	10Ne	
2s	2s ²															2s ² 2p	2s ² 2p	2s ² 2p ²	2s ² 2p ³	2s ² 2p ⁴	2s ² 2p ⁵	2s ² 2p ⁶
11Na	12Mg															13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar	
3s	3s ²															3s ² 3p	3s ² 3p ²	3s ² 3p ³	3s ² 3p ⁴	3s ² 3p ⁵	3s ² 3p ⁶	
中性原子の外殻電子配置																						
19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr					
4s	3s ²	3d	3d ²	3d ³	3d ⁴	3d ⁵	3d ⁶	3d ⁷	3d ⁸	3d ⁹	3d ¹⁰	4s ¹	4s ²	4s ² 4p	4s ² 4p ²	4s ² 4p ³	4s ² 4p ⁴	4s ² 4p ⁵	4s ² 4p ⁶			
37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe					
5s	5s ²	4d	4d ²	4d ³	4d ⁴	4d ⁵	4d ⁶	4d ⁷	4d ⁸	4d ⁹	4d ¹⁰	5s ¹	5s ²	5s ² 5p	5s ² 5p ²	5s ² 5p ³	5s ² 5p ⁴	5s ² 5p ⁵	5s ² 5p ⁶			
55Cs	56Ba	57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu						
6s	6s ²	5d	5d ²	5d ³	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶	5d ⁷	5d ⁸	5d ⁹	5d ¹⁰	6s ¹	6s ²	6s ² 6p	6s ² 6p ²	6s ² 6p ³	6s ² 6p ⁴	6s ² 6p ⁵	6s ² 6p ⁶			
87Fr	88Ra	89Ac																				
7s	7s ²	6d	7s ²																			
f 電子遷移元素			90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lr						
			7s ² 5f ²	7s ² 5f ³	7s ² 5f ⁴	7s ² 5f ⁵	7s ² 5f ⁶	7s ² 5f ⁷	7s ² 5f ⁸	7s ² 5f ⁹	7s ² 5f ¹⁰	7s ² 5f ¹¹	7s ² 5f ¹²	7s ² 5f ¹³	7s ² 5f ¹⁴	7s ² 5f ¹⁴	7s ² 5f ¹⁴					

$T_c = 30K \rightarrow 40K \rightarrow 90K \rightarrow \dots$
 $(La, Ba)_2CuO_4$ $YBa_2Cu_3O_7$

漢字元素周期表

¹ H																	² He
氢																	氦
³ Li	⁴ Be											⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne
锂	铍											硼	碳	氮	氧	氟	氖
¹¹ Na	¹² Mg											¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar
钠	镁											铝	硅	磷	硫	氯	氩
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
钾	钙	钪	钛	钒	铬	锰	铁	钴	镍	铜	锌	镓	锗	砷	硒	溴	氪
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
铷	锶	钇	锆	铌	钼	锝	钌	铑	钯	银	镉	铟	锡	锑	碲	碘	氙
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	lanthanoid	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
铯	钡		铪	钽	钨	铼	锇	铱	铂	金	汞	铊	铅	铋	钋	砹	氡
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	actinoid	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Uun	¹¹¹ Uuu	¹¹² Uub	¹¹⁴ Uuq		¹¹⁶ Uuh			
钫	镭		钅	𠬞	𠬟	𠬠	𠬡	𠬢	𠬣	—	—	—	—		—		

lanthanoid	⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
	镧	铈	镨	钕	钷	钐	铕	钆	铽	镱	铥	铒	铥	镱	镱
actinoid	⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr
	锕	钍	镤	铀	镎	钚	镅	锔	锿	镄	锫	锿	镄	镄	镄

フィーバーのフィナーレ

1987年

発見からわずか1年後に

Bednorz & Müller ノーベル賞授賞

最速記録！

日本では、財団法人国際超電導産業
技術研究センター設立(1988年)

物性物理学の苦難の始まり・・・

なぜこのような高温で超伝導に
なるのか？？



*セラミックス：高温で焼いて作った非金属の無機質固体材料をいう。昔からの原料は粘土、ケイ石、長石で、ガラス、陶磁器、セメントなどがセラミックスの例であった。現在では導電性のある金属のようなものなど新しいものが次々と開発されている。

新しいタイプの超伝導体が続々発見

日本人の“得意分野”

新物質 続々...

C_{60} (サッカーボール超伝導体) $T_c = 30K$

超伝導ダイヤモンド

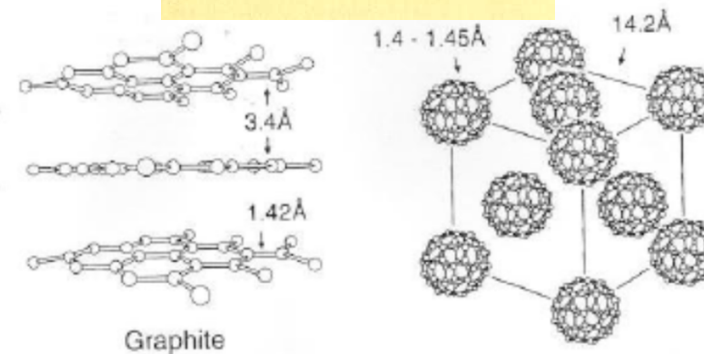
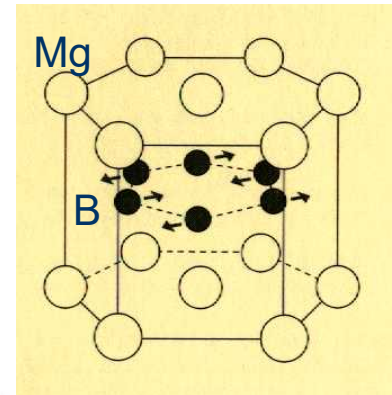
水を吸わせたコバルト酸化物

有機超伝導体

鉄の超伝導、LiやCaの超伝導 (高圧下)

MgB_2 $T_c = 39K$

大学4年生の発見



2008年2月 東京工業大学細野グループによる

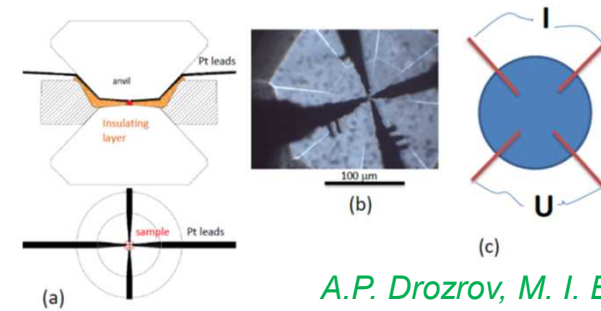
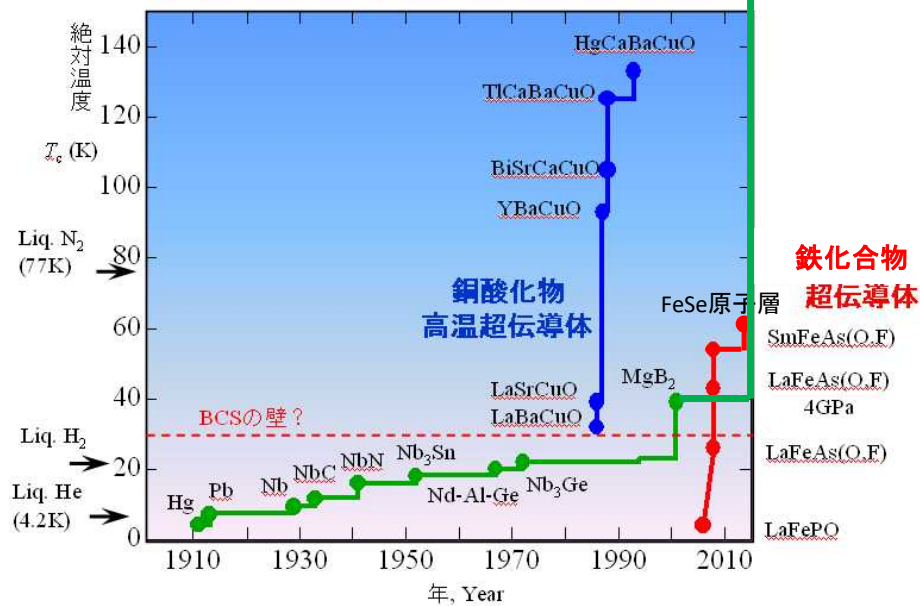
$LaFeAs(O,F)$ 超伝導体の発見 (published in JACS)

2008年の全世界で出版された科学論文の中で引用件数 No.1 !

水素化合物の250K超伝導！

★ LaH_{10} ($T_c=250\text{K}$, $P=150\text{GPa}$)

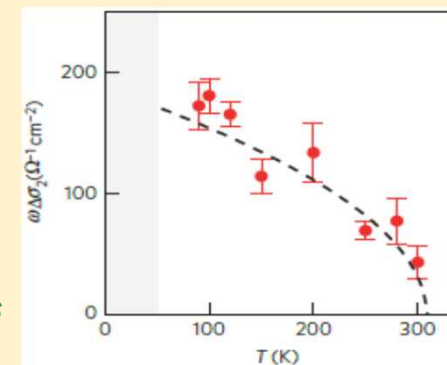
★ H_3S ($T_c=190\text{K}$, $P=170\text{GPa}$)



*A.P. Drozrov, M. I. Erements et al.,
Max-Planck Institute, Mainz, 2015.*

テラヘルツ波のパルス
照射で瞬間超伝導？

*W. Hu et al., Nature Materials
13, 705 (2014).*



その他の新超伝導体

Ni酸化物超伝導体

$(\text{Nd,Sr})\text{NiO}_2$ $T_c=15\text{K}$ *D. Li et al., Nature 572, 624 (2019).*

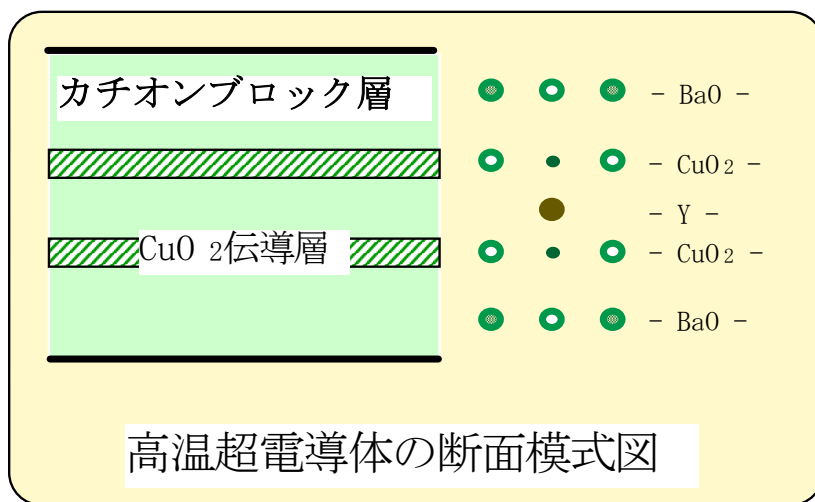
- $3d^9$ の状態にホールドープで超伝導に
- $d_{x^2-y^2}$ 軌道が中心 $\rightarrow d$ 波超伝導
- Ndの5d軌道との混成軌道もフェルミ面を作る \rightarrow 母物質が金属(モット絶縁体ではない)
- 酸素2p軌道との混成が、銅酸化物より弱い (Ni dエネルギー準位と酸素2pとの差が大きい)

$\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ $T_c \sim 80\text{K}$ (@14GPa) *H. Sun et al., Nature 621, 493 (2023).*

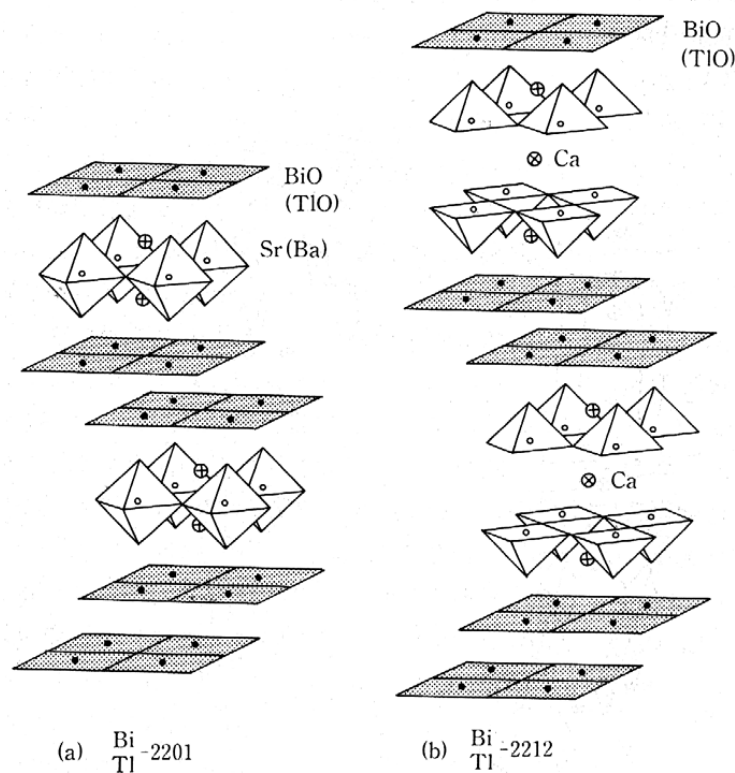
3. 銅酸化物高温超伝導の性質

銅酸化物高温超伝導体の結晶構造

層状ペロブスカイト構造

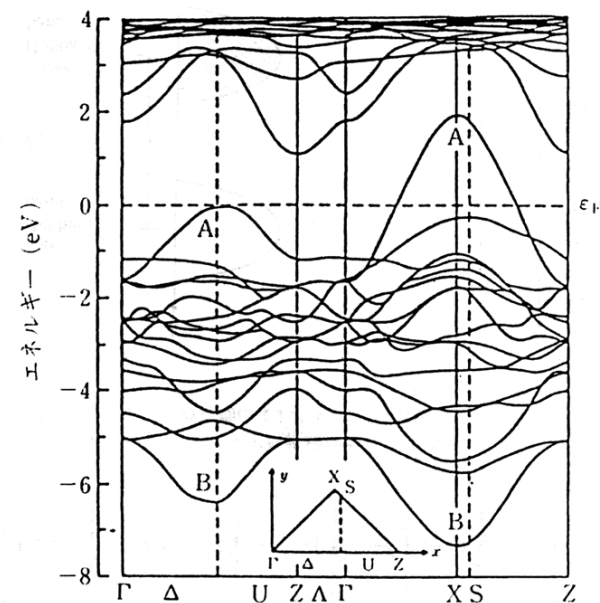
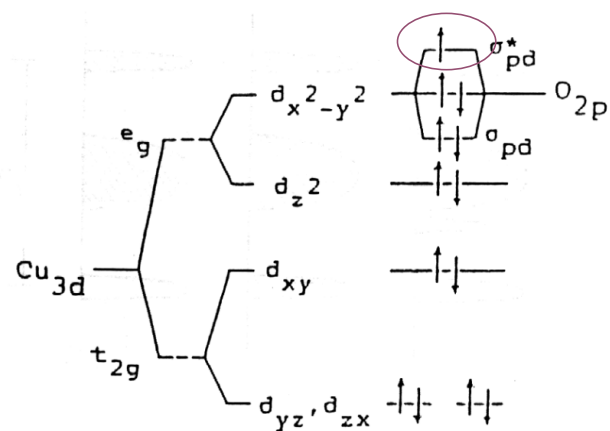
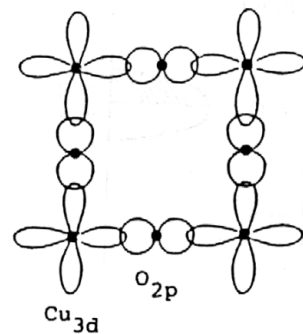


- CuO₂平面とカチオンブロック層が交互に積み重なっている。
- キャリアは、ブロック層から供給され、層間はイオン結合的。
- 構造によって $T_c(\text{max}) = 20\text{K} \sim 135\text{K}!$



電子状態の概要 — 電子構造

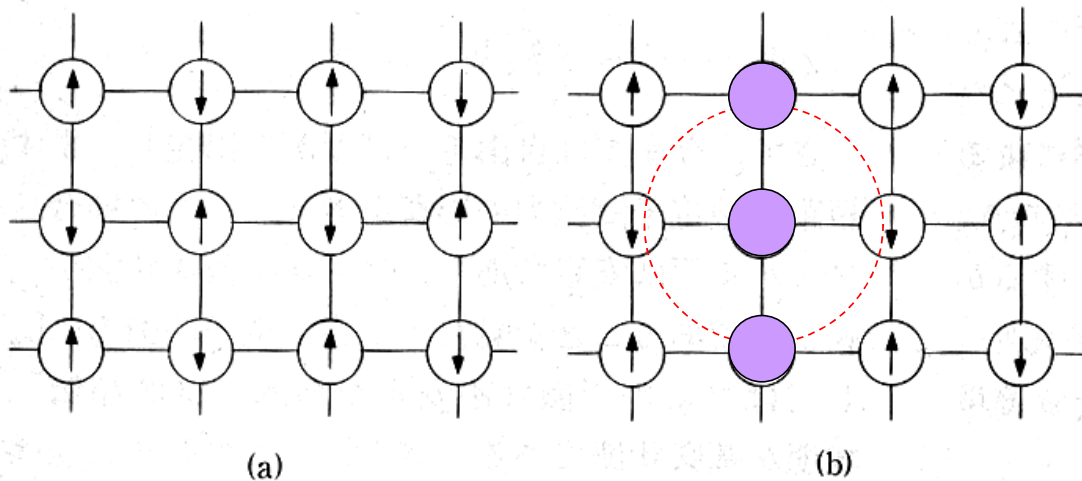
Cu $3d_{x^2-y^2}$ 軌道とO $2p_{xy}$ 軌道が伝導の中心



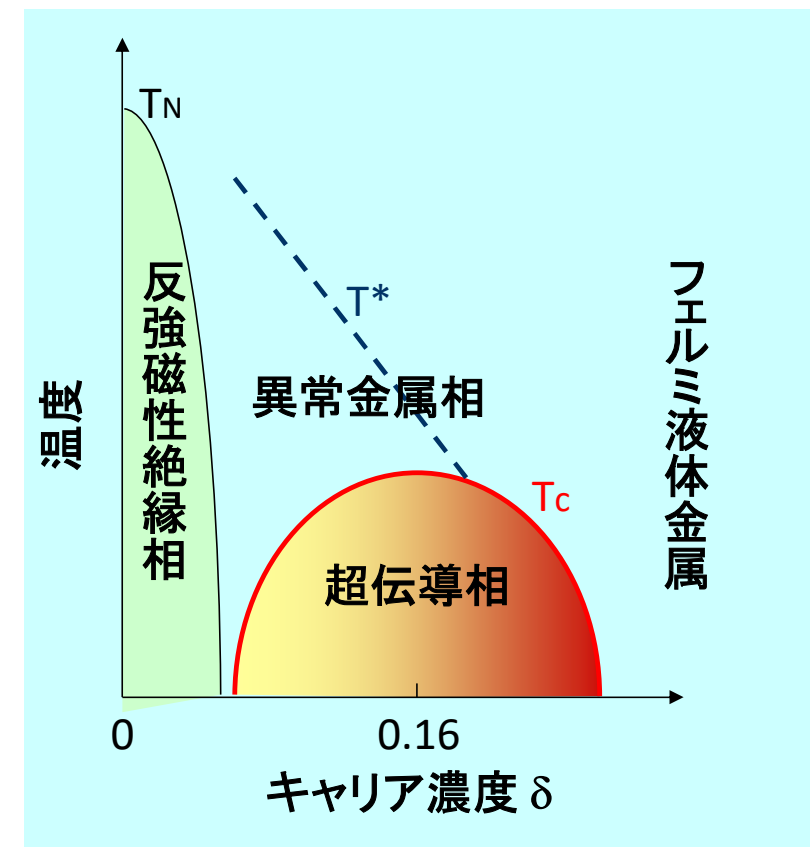
La₂CuO₄ のバンド

常伝導電子状態及び電子相図

出発物質は、モット絶縁体

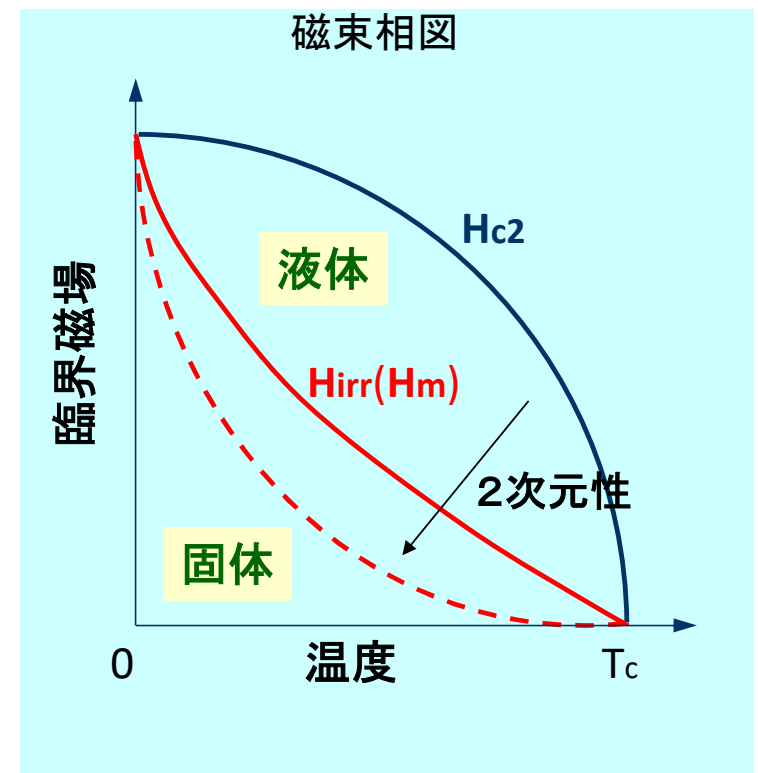
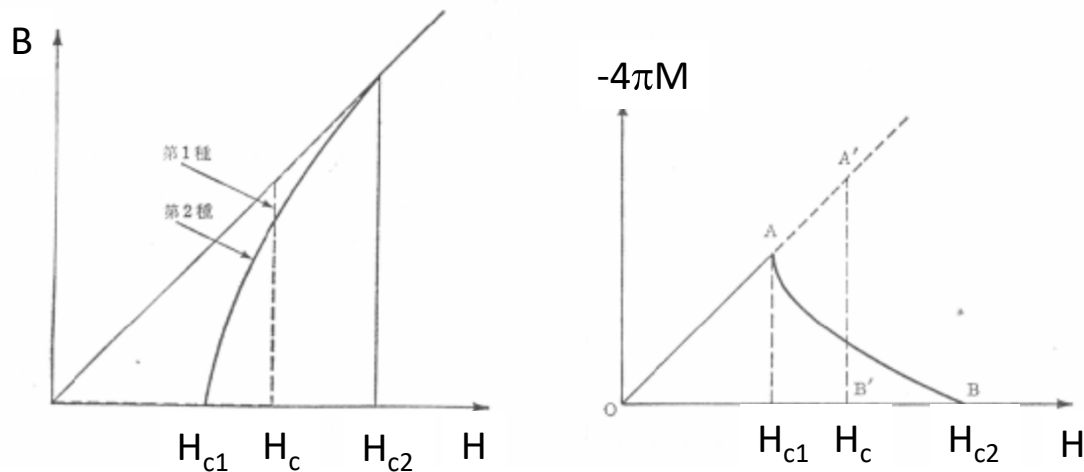


- 強相関電子系
- 擬ギャップ(絶縁性と金属性のせめぎあい)
- 電荷密度波、電荷とスピンの縞状秩序...



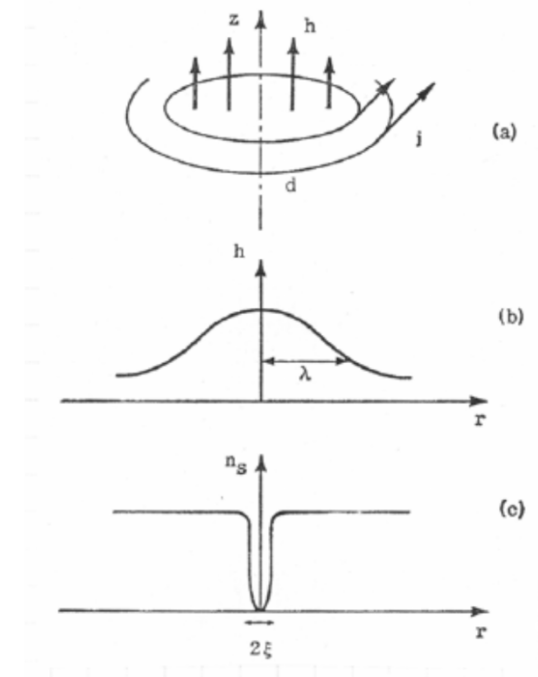
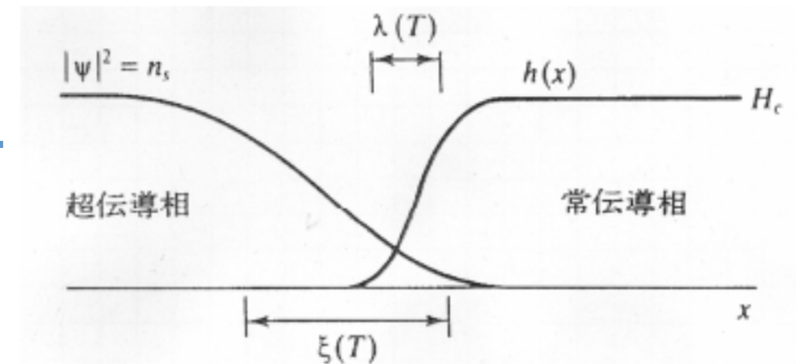
超伝導体を利用する観点からの いくつかの重要な物理量

- 臨界温度 T_c
- 臨界磁場 H_c (熱力学的臨界磁場)
第2種超伝導体: H_{c1} , $H_{c2}(\sim 1/\xi)$, H_{irr}
- 臨界電流 J_c



いくつかの重要な物理量

- 超伝導エネルギーギャップ $\Delta (\sim T_c)$
- 磁場侵入長 λ_L ($\lambda_L^{-2} \sim \omega_{ps}^2 \sim n_s$)
- 超伝導相関長 ξ ($\sim v_F/\Delta$) **磁束線の半径**
- 第1種超伝導体 $\lambda_L \ll \xi$
- 第2種超伝導体 $\lambda_L \gg \xi$
- $H_{c2} \sim 1/\xi$



ケタ違いに大きい臨界磁場

第二臨界磁場は実験で決められないくらい大きい。

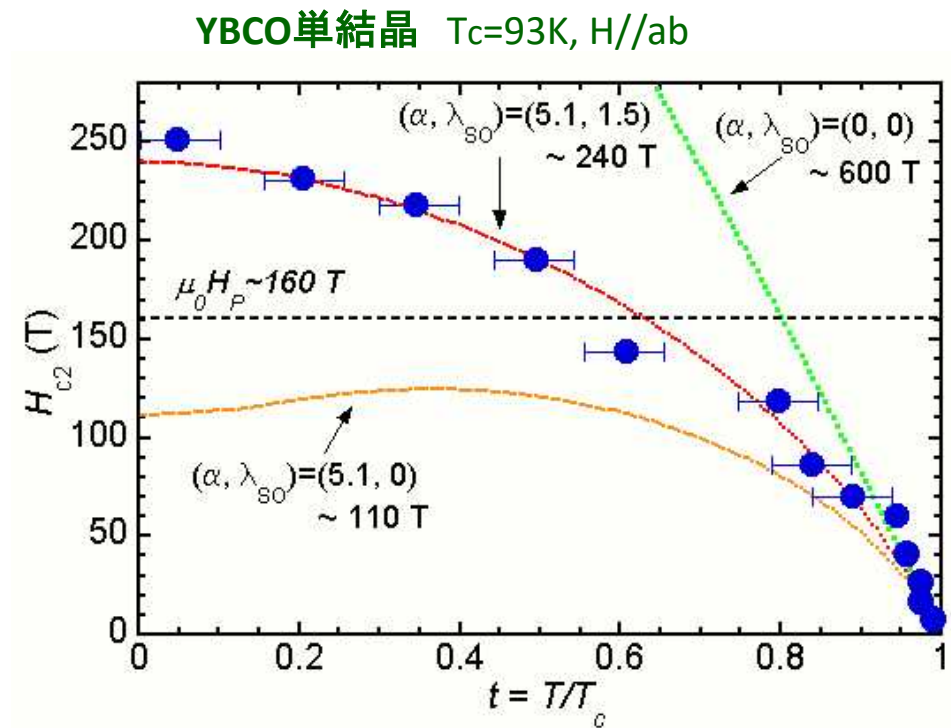
T_c が高ければ H_{c2} も大きい。

$$H_{c2} \sim \xi^{-1}$$
$$\xi^{-1} \sim \Delta \sim T_c$$

最適ドーピングYBCOの場合

H//c の時 120T @0K

H//ab の時 240T @0K

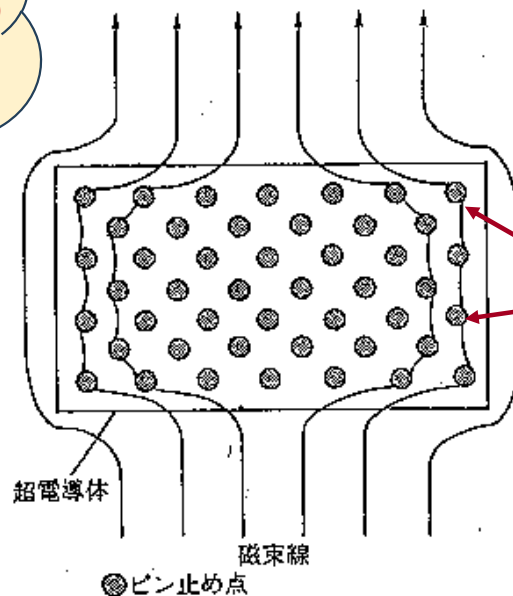


T. Sekitani et al./ figure 3

磁束ピンニング現象（臨界電流を高めるには必須）

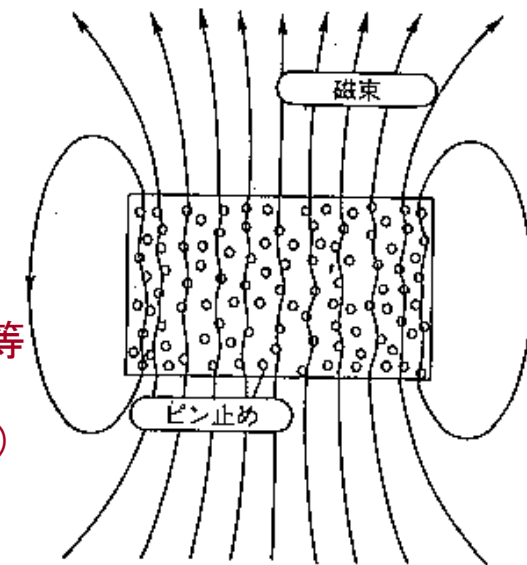
- 第二種超伝導体中には一部に磁場が取り込まれる。
- 量子化磁束となる。
- 磁場の侵入を許して超伝導状態の安定化を図る。

磁場下で大電流を流すためには、たくさんの磁束線をピン止めする必要あり



欠陥や不純物等
非超伝導部分
(磁束ピン止め)

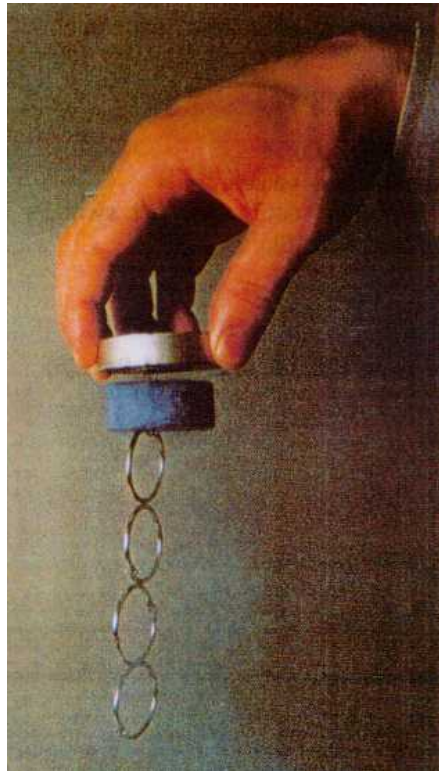
ナノスケールの非超伝導体を埋め込むことで、ピン止め力向上
→ 磁場に強い超伝導体



磁場をかけた状態で温度を下げる

浮上実験

フィッシング効果



銅酸化物超伝導体の特徴（従来超伝導体との違い）

応用の視点で考慮すべき重要な性質

1. 高い2次元性
2. d波対称性
3. キャリア濃度敏感性
4. 短い超伝導相関長
5. 多元素系材料



物質の選択、キャリア濃度の制御、配向性の制御、
非超伝導相導入のための組成制御

高い転移温度



高い臨界磁場



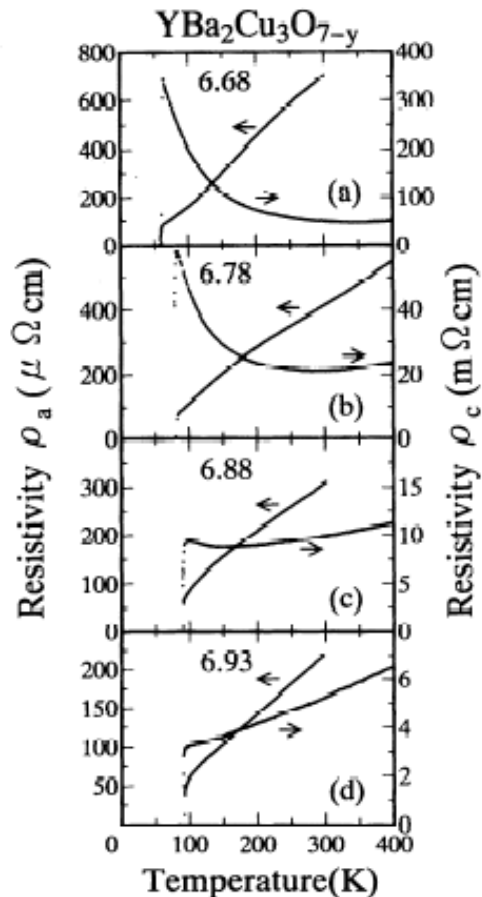
高い臨界電流のハズ

しかし、 $high J_c$ は容易ではなかった！

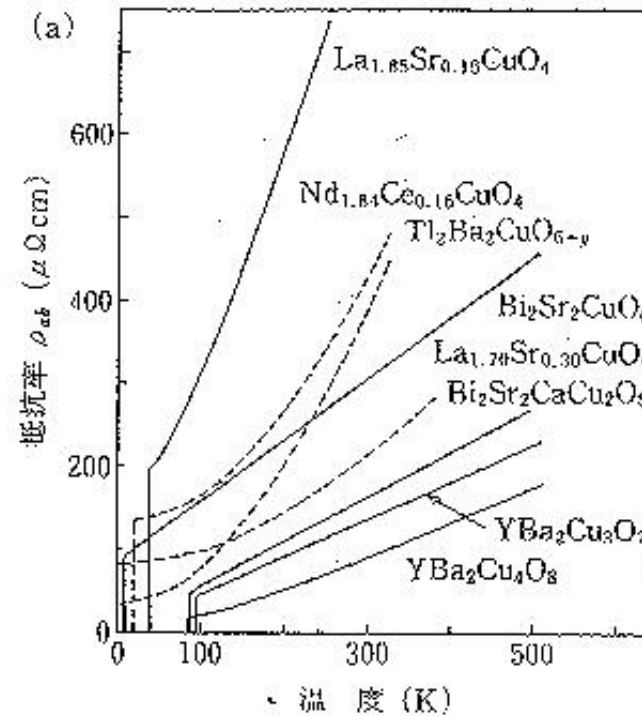
電気抵抗率

2次元性

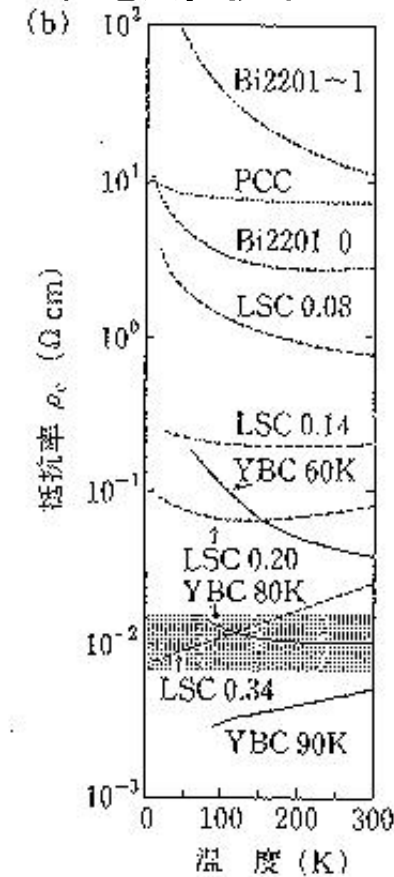
種々の高温超伝導体の
c軸電気抵抗率



K.Takenaka et al.,
Phys. Rev. B 50,
6534 (1994).



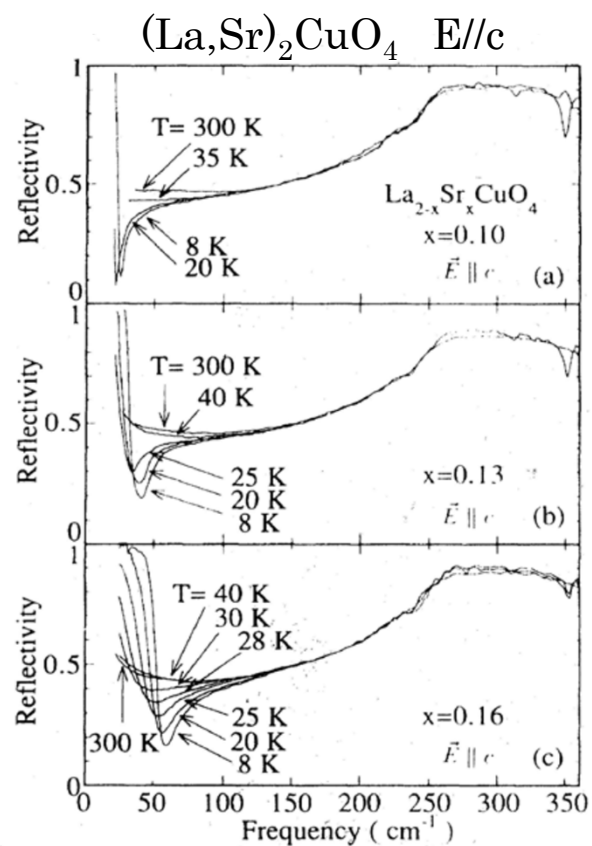
- 抵抗率の値が面内と面間で大きく異なる。
- 面間方向は半導体的な温度依存性



T.Ito et al., Nature
350, 596 (1991).

- ブロッキング層の違い
- キャリアドーパ量の違い

ジョセフソンプラズマモード



$T > T_c$ 電気伝導は、非コヒーレント

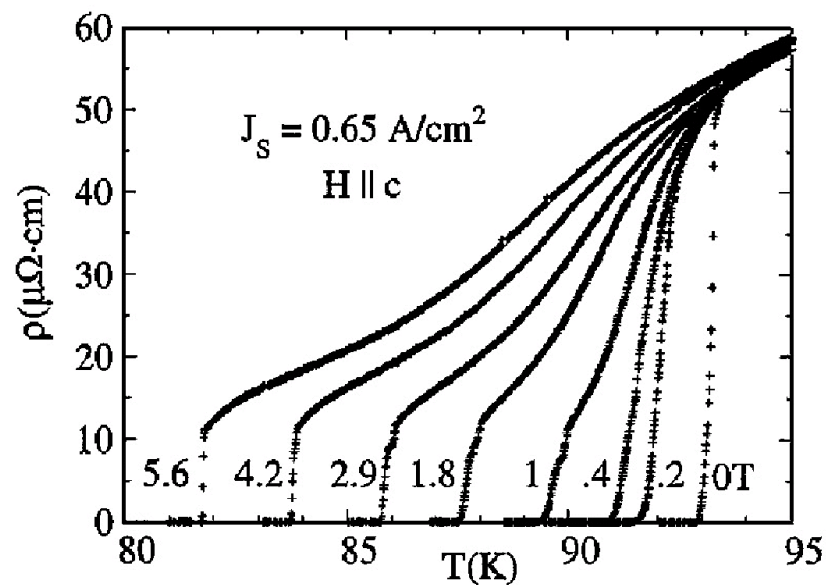
$T < T_c$ 超伝導電流は、ジョセフソン電流
(絶縁層をトンネル)

絶縁体的な反射スペクトルから
突然金属スペクトルになる。

T. Tamasaku, Y. Nakamura and S. Uchida, Phys. Rev. Lett. 69, 1455 (1992).

超伝導転移幅の広がり

YBCO単結晶のresistive broadening



磁場印加により

- ? 超伝導転移温度の低下
- 転移幅の増大

H//cの場合のみ顕著な
“巨大超伝導ゆらぎ”

強い2次元性による磁束液体状態

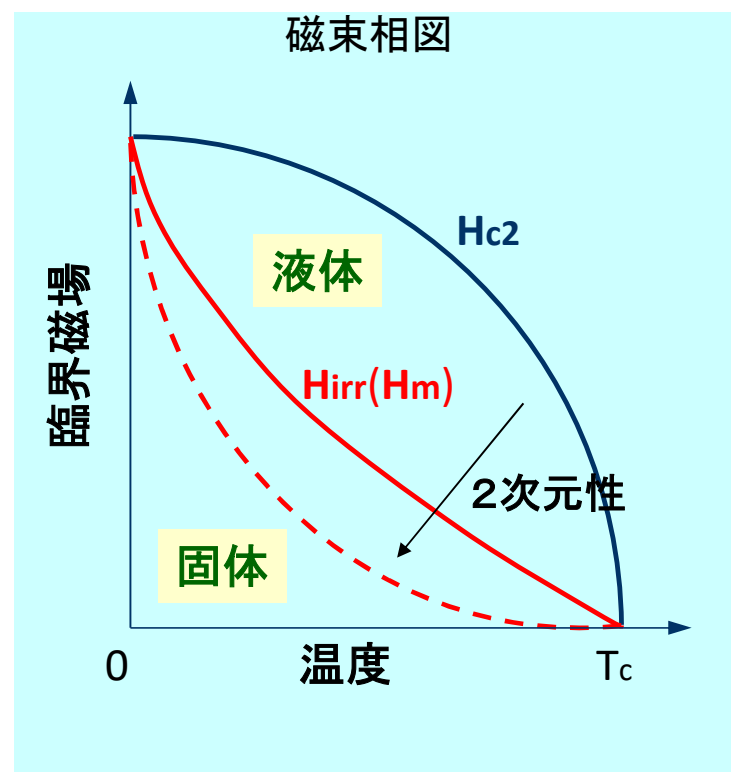
- 上部臨界磁場以下で、すぐアブリコソフ格子を組むわけではない。

磁束液体: $H_{irr}(H_m) < H < H_{c2}$
→ 磁束固体: $H < H_{irr}(H_m)$
の相変化がある。

- 液体状態では磁束ピンングなし、即ち、 $J_c = 0$
- 2次元性の強い系ほど液体相が広い。



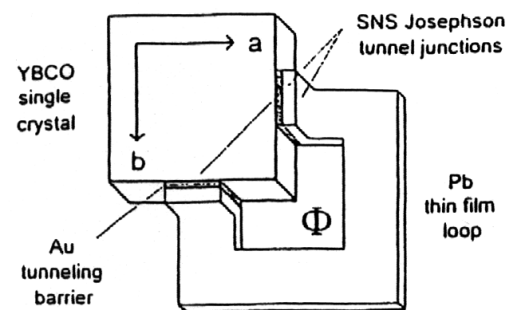
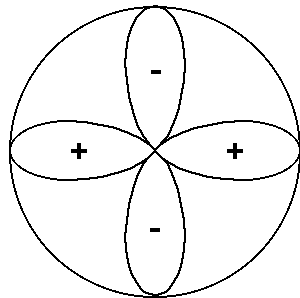
- 物質の選択 ex.YBCO
- 次元性制御の必要性
(キャリアドーピング・Bi系へのPb添加)
- c軸配向の必要性 (Bi2212は容易)



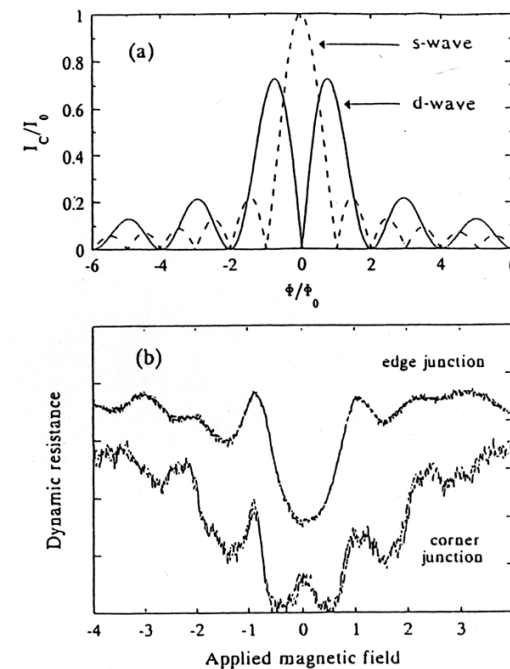
超伝導ギャップ関数

d波超伝導のギャップ関数

$$\Delta(\mathbf{k}) = \Delta(\cos k_x a - \cos k_y a)$$



d波超伝導を示す実験



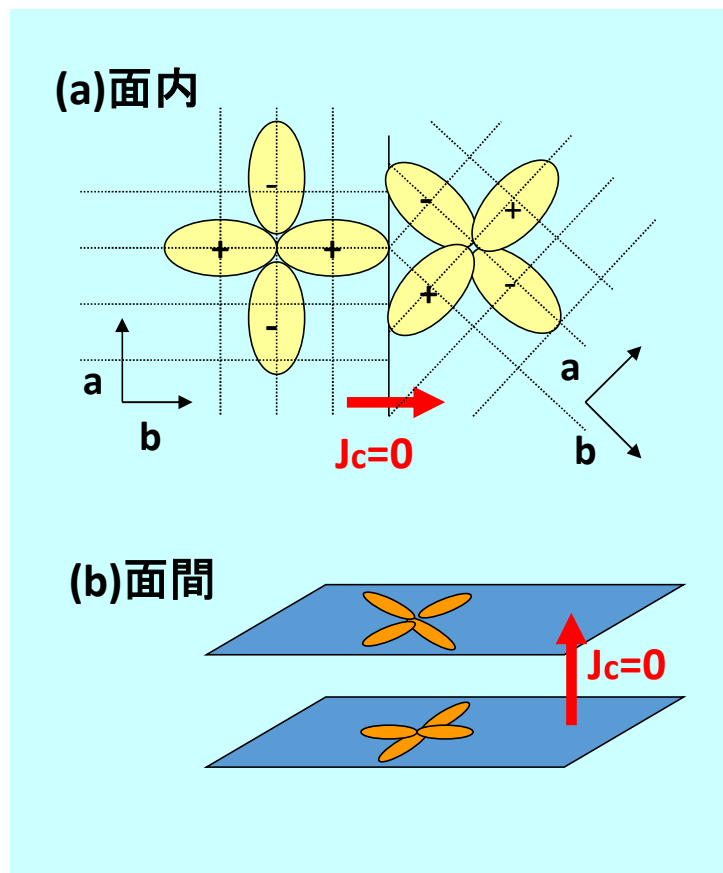
D.A. Wollma et al., Phys. Rev. Lett. 71, 2134 (1993).

d波対称性による結晶粒配向の要請

結晶粒界面での角度が45度
になると臨界電流激減。(面
内でも、面間でも)



ほとんど単結晶のような薄膜、
線材でなければならない。

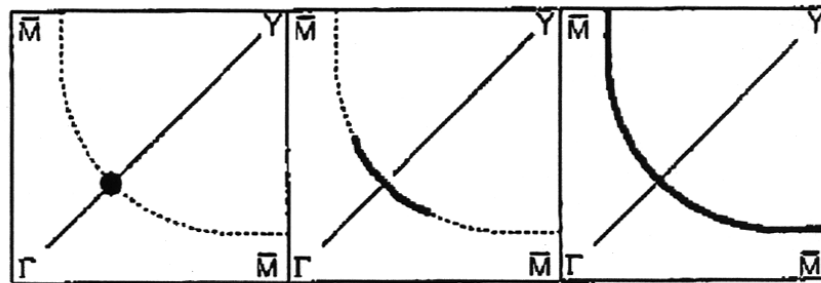


d波ギャップのその他の影響

- 有限の周波数では伝導度が有限。(電荷励起がある。)
→ 交流応用への問題
- 磁性不純物以外でもポテンシャル散乱中心となるものは、
対破壊を起こす。
→ 不純物に対する注意が必要

擬ギャップ(常伝導ギャップ)

角度分解光電子分光(ARPES)による
フェルミ面の温度依存性・キャリア濃度依存性



M.Norman et al., Nature 392, 157 (1998).

低温 ← 高温
低ドーピング ← 高ドーピング

温度低下と共にフェルミ面の面積減少
あたかも絶縁体ギャップが開いてくるよう。

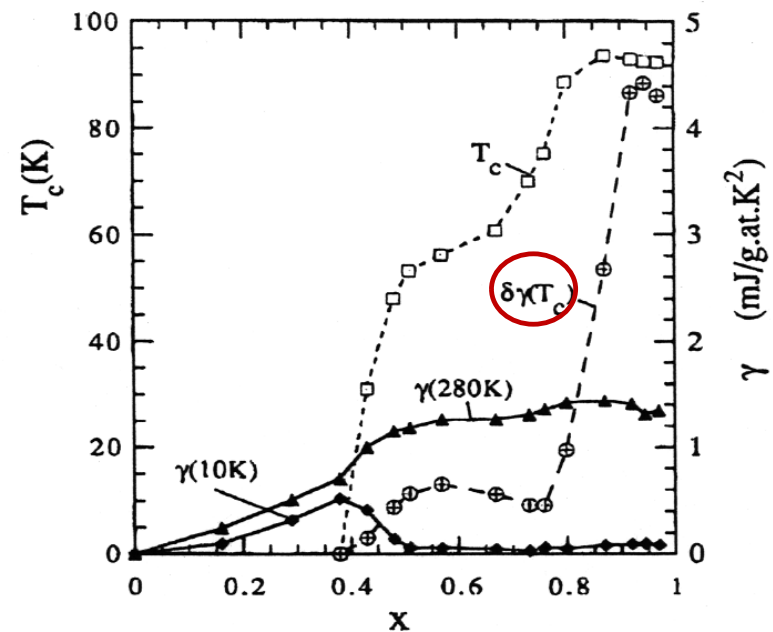
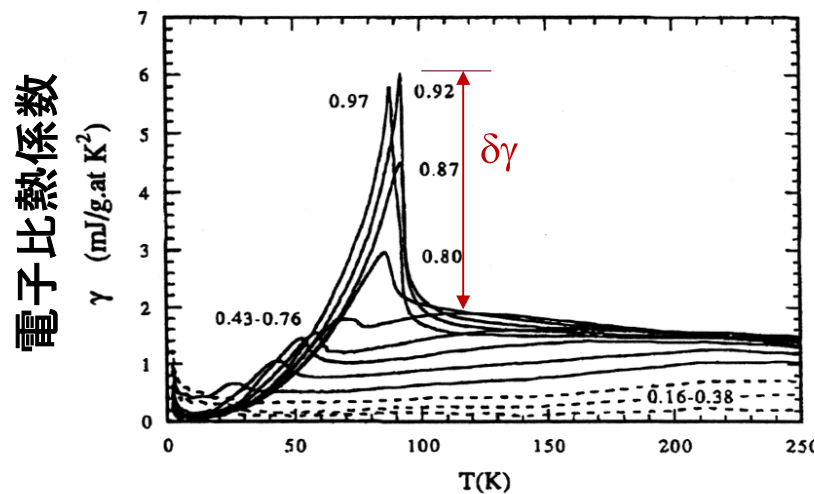
cf. Hall係数の温度低下に伴う増加
c軸抵抗率の半導体的温度依存性

FSが欠けた状態で超伝導転移

擬ギャップの効果

キャリア濃度敏感性

例：擬ギャップが与える影響



J. Loram et al., Physica C 235-240, 1821 (1994).

擬ギャップ状態では超伝導凝縮エネルギーが小さく

磁束ピンニング力は激減する。

→ 過剰ドーピングの勧め

短い超伝導相関長の効果

超伝導相関長

$\xi \sim v_F/\Delta$ (T_c が高いと ξ が短い。)

典型的な相関長

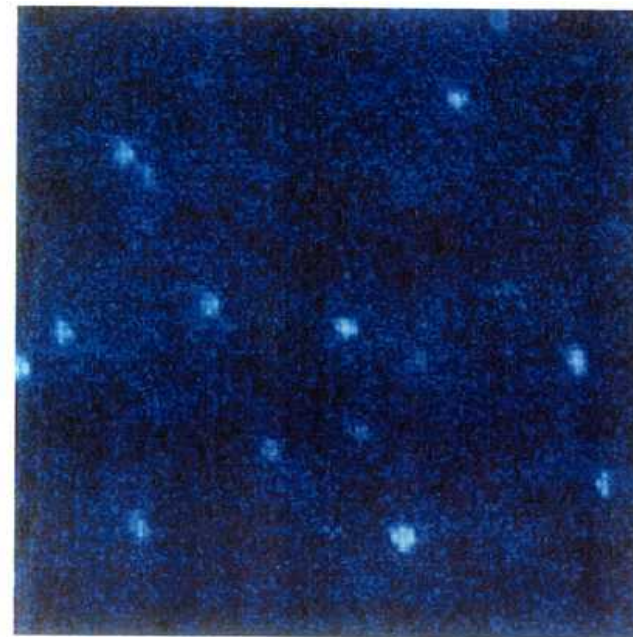
$\xi_{ab} \sim 2-3 \text{ nm}$

→不純物による局所的対破壊

$\xi_c < 0.2 \text{ nm}$

→各 CuO_2 面はジョセフソン結合
(各面で独立に位相が決まっている)

ナノスケールの非超伝導領域を多数
分散させることが磁束ピンングに有効



Zn置換Bi2212結晶のSTM像

S.H. Pan et al. (Nature 2000)

4. 高温超伝導の実用化

液体ヘリウムを使った 従来超伝導体(Nb系材料)の応用

- 強磁場発生のマグネット(電磁コイル)
実験用電磁石、核磁気共鳴装置(NMR)、大型加速器...
- 核磁気共鳴を用いた医療診断(MRI)
- 高感度磁気センサー(SQUID)
- 磁気浮上列車(リニアモーターカー)

問題点

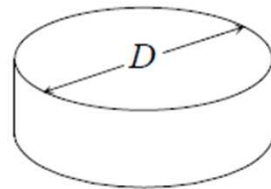
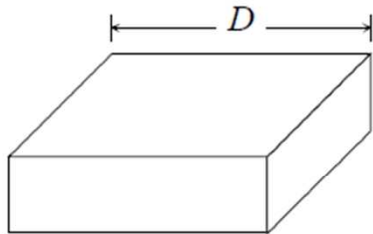
- (1) 高価な液体ヘリウムが必要
- (2) 装置が大型化



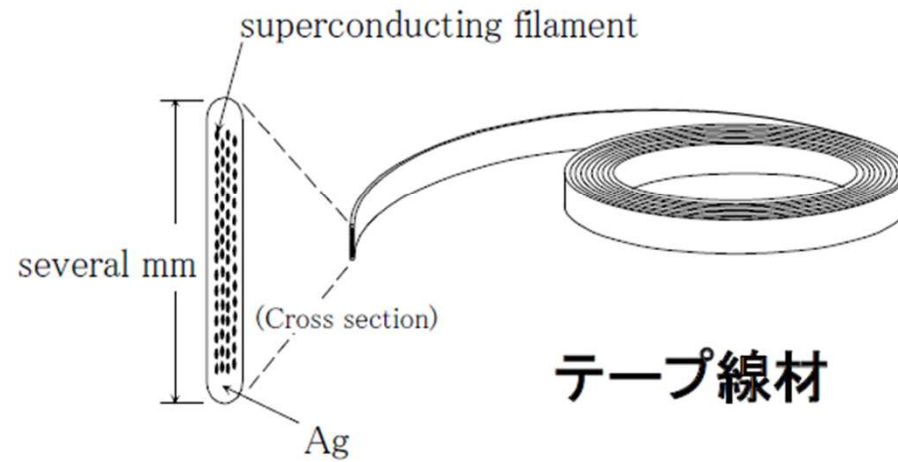
高温超伝導体を使えば

- (1) 冷凍機或いは液体窒素で冷却可能
- (2) 装置を小型化できる

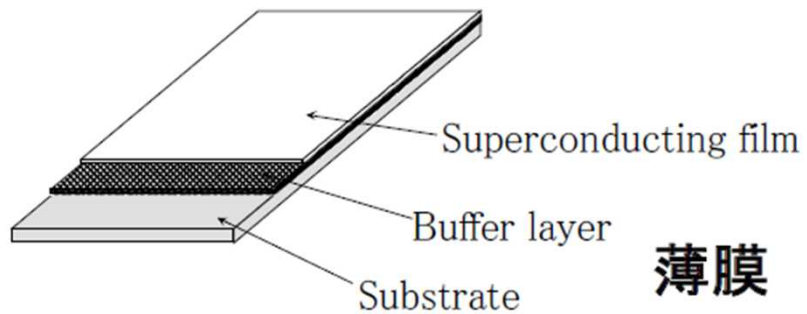
高温超電導体



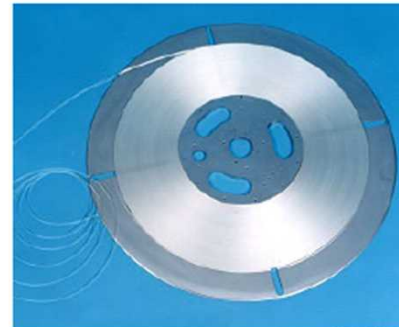
バルク



テープ線材

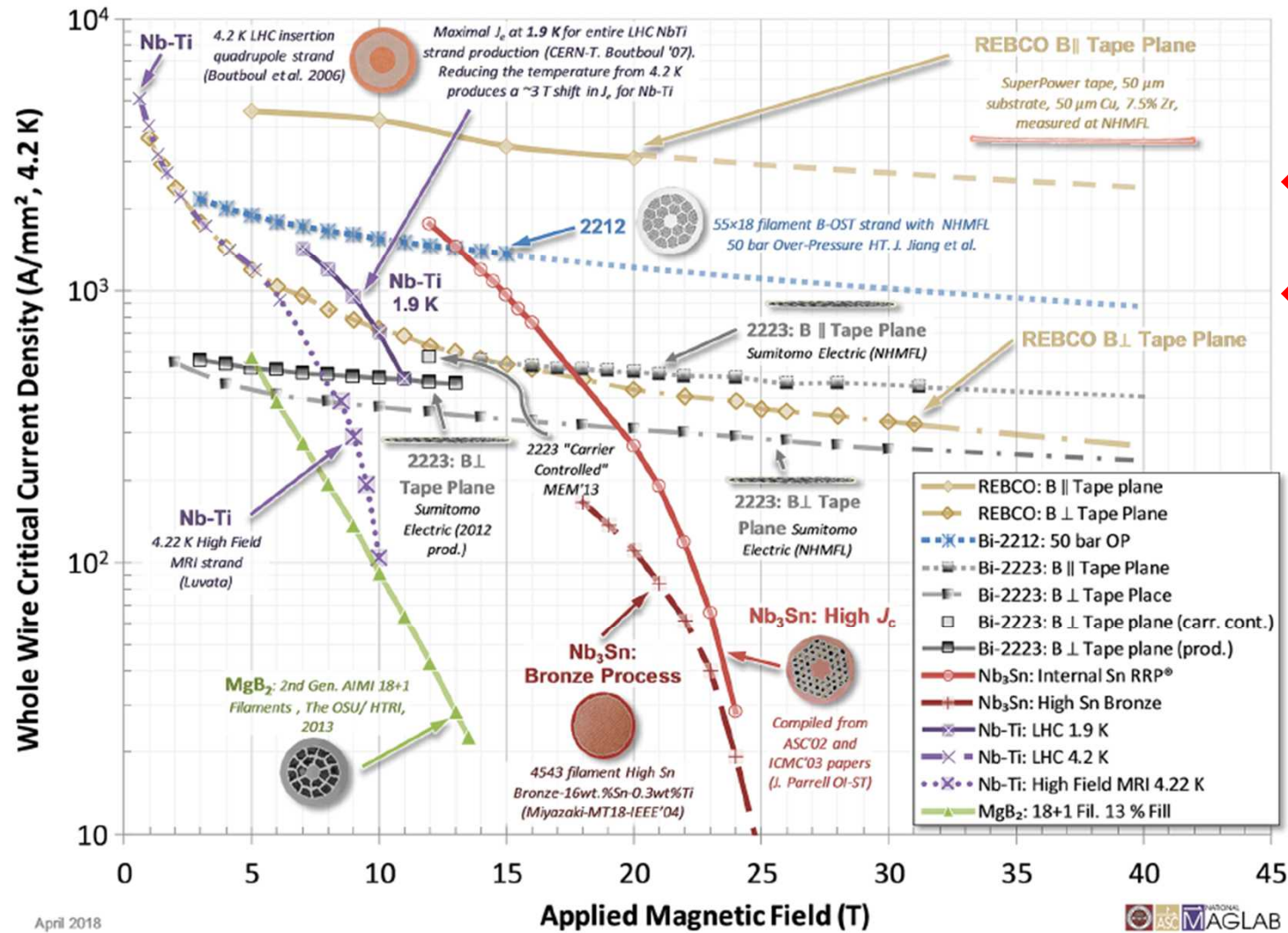


薄膜



東京大学工学部
大崎博之先生の
講義ノートより

様々な超電導線材の臨界電流密度の磁場依存性 @4.2K



← Y系

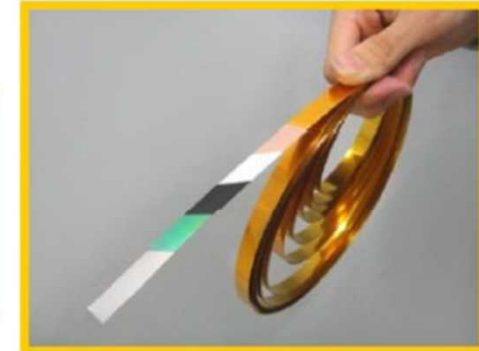
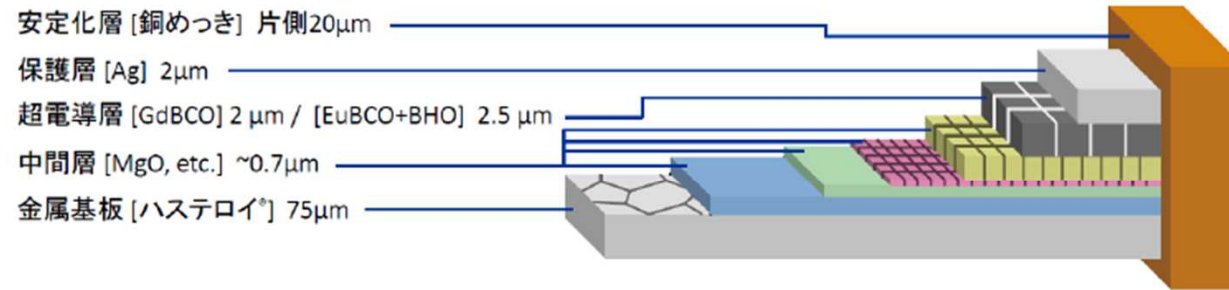
← Bi系

東京大学工学部
大崎博之先生の
講義ノートより

April 2018

<https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center>

(RE)BaCaO高温超電導線材



(RE)BaCaO高温超電導テープ線材の基本構造

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [μm]	安定化層 [μm]	臨界電流 [A](@77K, S.F.)	備考
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	≥ 165	人エピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	≥ 550	人エピンなし
FYSC-S12 ^{*1}	12	0.08	75	-	≥ 550	銀保護層のみ
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 85	人エピン ^{*3}
FESC-SCH12 ^{*2}	12	0.11	50	20	TBD	人エピン ^{*3}

*1 銅安定化層なし、銀保護層のみ線材は12mm幅のみ提供可

*2 人エピン導入線材(12mm幅)の仕様は別途後報

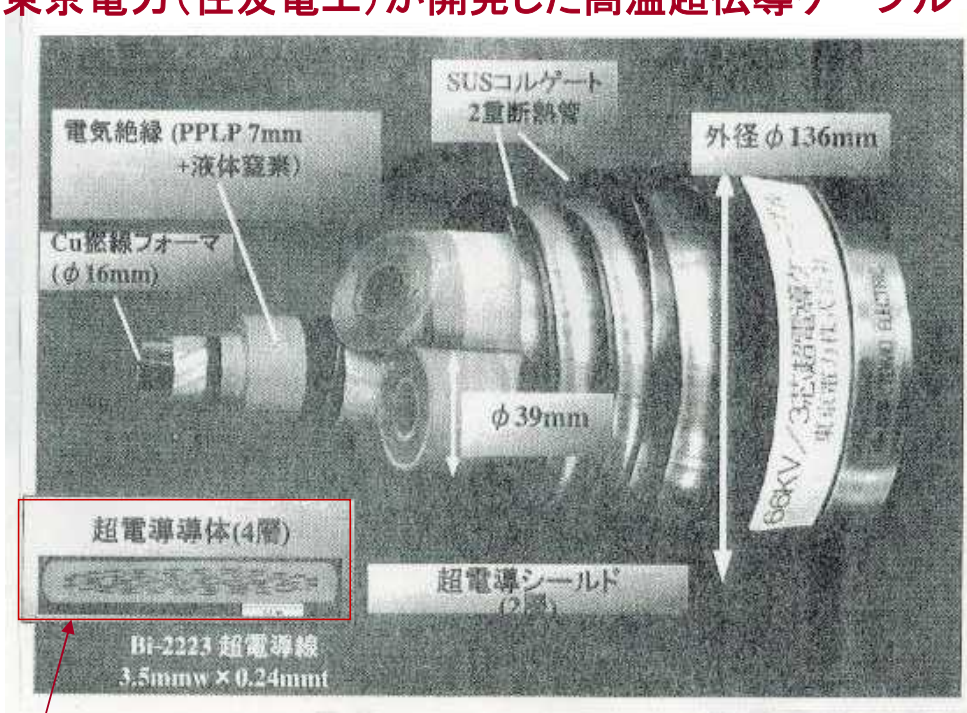
*3 人エピン導入線材は低温、高磁場の用途向け

<https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf>

東京大学工学部
大崎博之先生の
講義ノートより

超伝導電線

東京電力(住友電工)が開発した高温超伝導ケーブル



ニューヨークでは送電線に使用された。

銀の中に埋め込まれたBi系高温超伝導体

実用化近づく超電導送電、強みは？

2022/1/13 7:00 | 日本経済新聞 電子版

2022年1月13日の日本経済新聞朝刊1面に「送電損失ゼロ、実用へ」という記事がありました。JR系の研究機関はコストを大幅に削減した送電線を開発し、送電時のロスがほぼない技術「超電導送電」の実用段階に入りました。まず鉄道会社向けを想定する新技術はどのような点が強みなのでしょうか。

1月13日 朝刊1面のポイント

送電ロスなくし脱炭素貢献

コスト削減した送電線開発

再生エネ分野に応用も

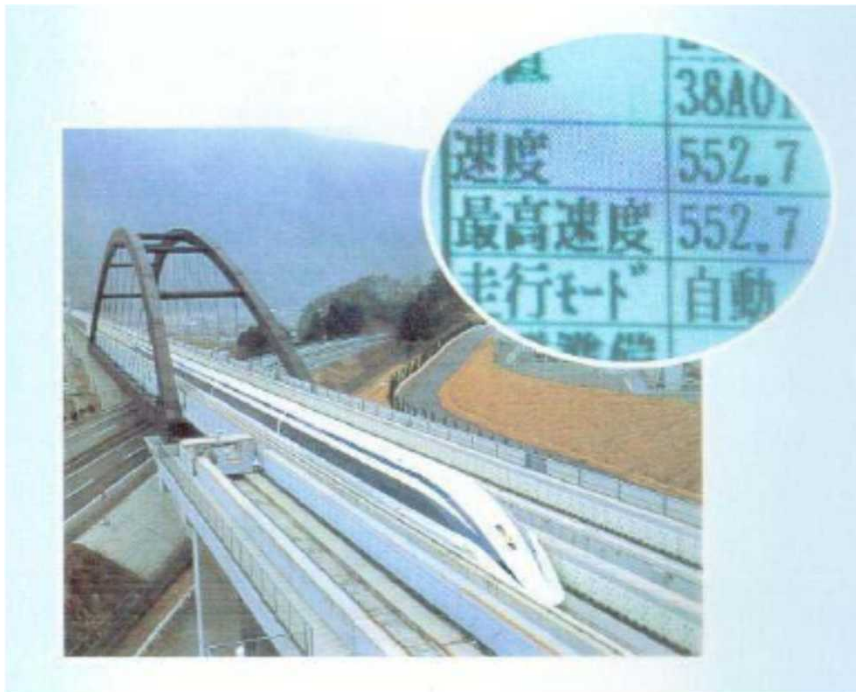
2022年1月13日
日経新聞朝刊1面

- JRが鉄道き電線として応用
変電所(現在数キロm毎)を減らせる



マグレブ(リニアモーターカー)

JR東海が、東京・名古屋間の敷設決定。~~2025年営業開始~~
(名古屋・大阪間の完成は、2045年?)



- 世界で唯一の技術
- 原理的速度制限はない
- 飛行機よりエコ

3つのコイル

- 1) 車両搭載超電導コイル(liq.He搭載)
- 2) ガイドウェイの8字コイル(浮上用)
- 3) ガイドウェイの駆動用コイル

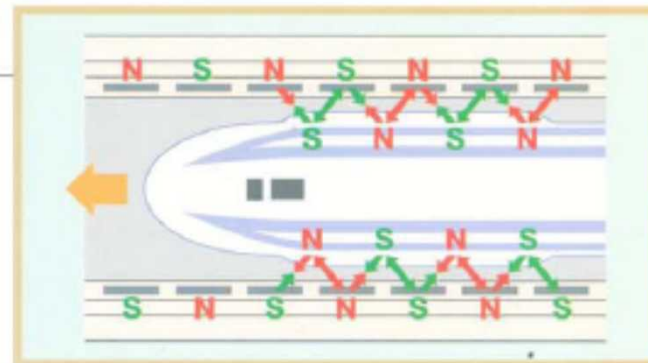
出典: JR東海パンフレット

リニアモーターカー

超電導リニアモーターカーの原理

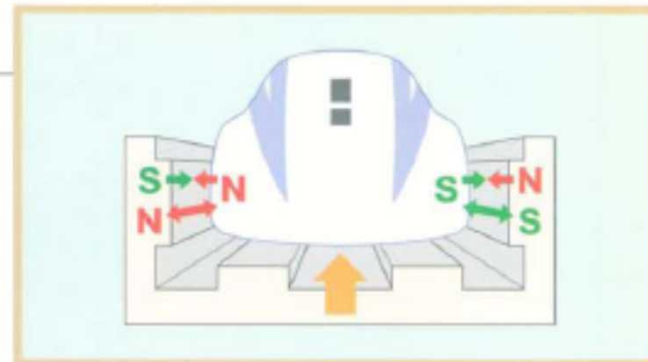
推進の原理

地上の推進コイルに電流を流すことにより磁界(N極・S極)が発生し、車両の超電導磁石(N極・S極を交互に配置)との間で、引き合う力と反発する力が発生します。これを利用して車両(超電導磁石)が前進します。



浮上の原理

地上ガイドウェイ(軌道)の側壁両側に8の字の形をした浮上案内コイルが設置されており、車両の超電導磁石が高速で通過すると両側の浮上案内コイルに電流が流れて電磁石(8の字の上の輪が超電導磁石と反対極に、下の輪が同一極)となり、車両(超電導磁石)を押し上げる力(反発力)と引き上げる力(吸引力)が発生します。



出典：
JR東海パンフレット

超伝導モーター

ニュースリリース

東芝 2022/6/23

モビリティ向け軽量・小型で大出力の超電導モーター試作機を開発

～産業・運輸でのカーボンニュートラルの実現に貢献～

ニュースリリース

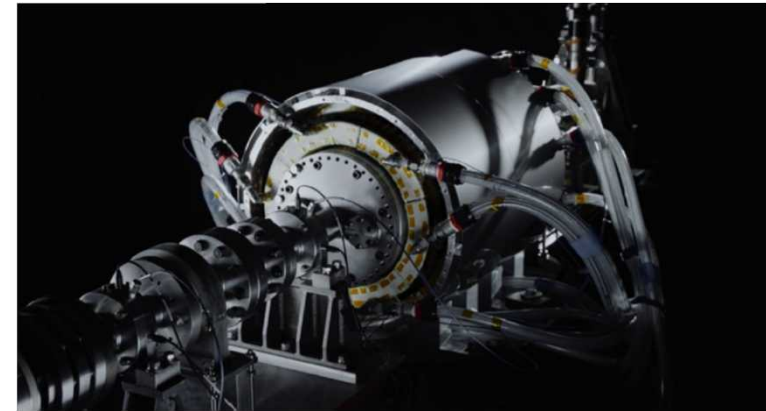
新技術

研究開発・技術

原子力

2022年06月23日

東芝エネルギーシステムズ株式会社



世界初の液体窒素冷却全超電導モータが完成 ～8月から販売開始、5年後には300億円事業に～

石川島播磨重工 2005/4/14

-2005年04月14日- プレスリリース

石川島播磨重工（IHI）を取りまとめる産学グループ（**A）は、世界で初めての液体窒素冷却全超電導モータ（IFCSモータ）（*1）を完成させました。

（注）同グループは、本年1月に、世界で初めて液体窒素冷却超電導同期モータを開発し、本モータを内蔵したポッド型（*2）推進装置を完成させたことは、既にご案内のとおりです。

地球温暖化の進展と異常気象の問題が取り沙汰される中、京都議定書が2月16日に発効されました。日本は温室効果ガスを2008年から2012年に基準年比（1990年）で6%削減す

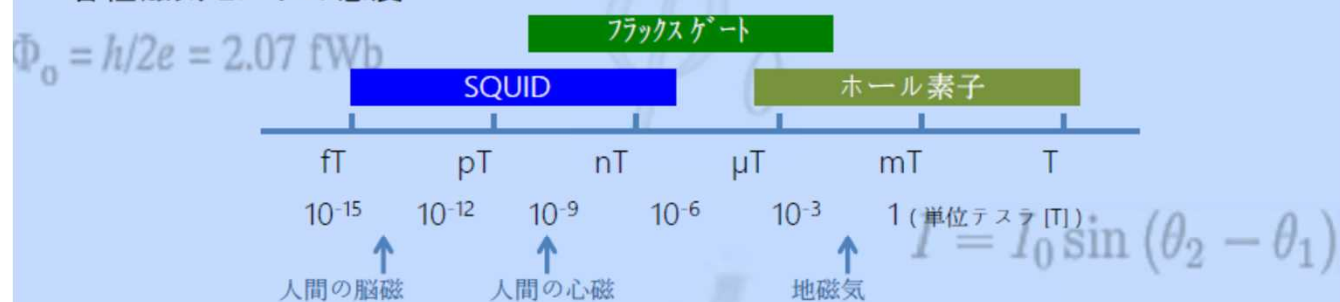
自動車、飛行機、船舶等で、コンパクトかつ高トルク、省エネのモーターが利用される。

超伝導磁気センサー(SQUID)

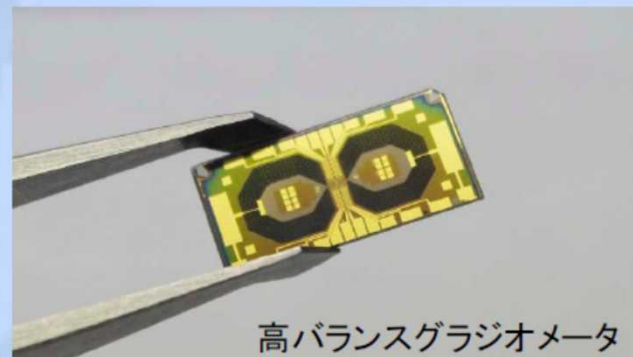
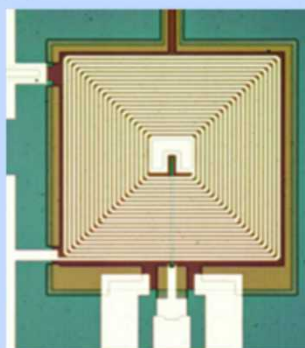
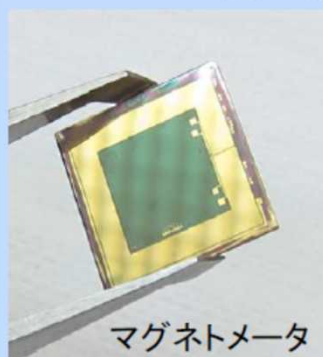
技術

当社は独自に開発した野外使用に適した超伝導磁気センサ(SQUID: Superconducting QUantum Interference Device)チップ作製技術とシステム化技術を保有しています。

各種磁気センサの感度



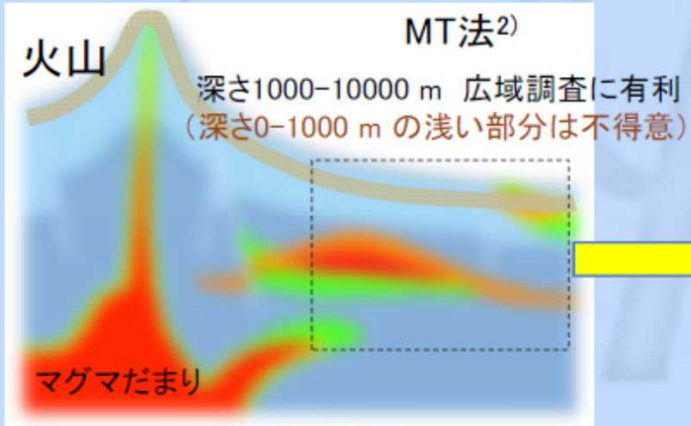
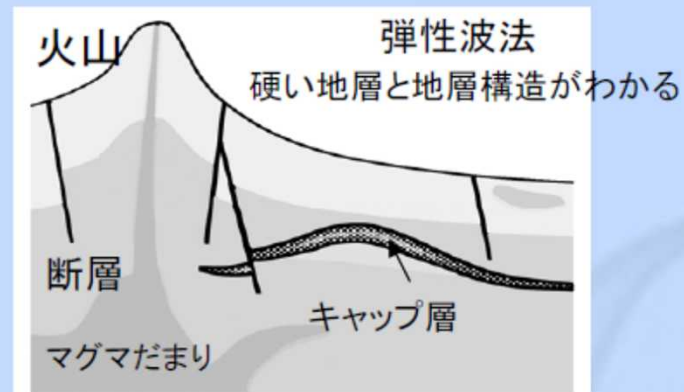
1 センサ製造技術



出典:
SUSTECパンフレット

- 適用例: ① 地熱発電用熱水貯留層探査
② 既存油田の有効活用
③ 二酸化炭素地下貯留(CCS)のモニタリング

地熱探査の応用例と他の探査法との比較



2) MT: Magnetotelluric (自然電磁波を利用した探査法)

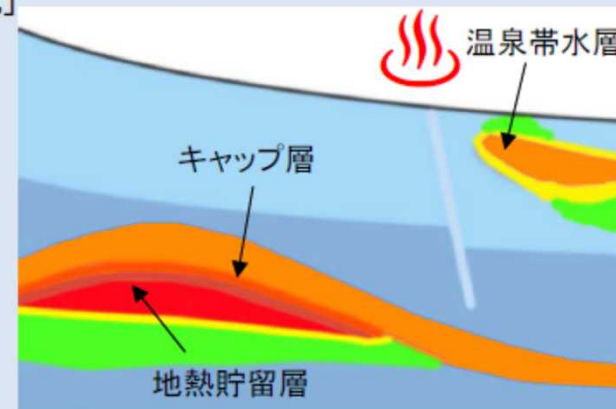
当社が提供する探査技術

TEM法¹⁾(超電導磁気センサ使用)

- ・環境ノイズの影響小
- ・キャップ層内部までの比抵抗構造把握
- ・地表から深度 3000mの探査実現
- ・高空間分解能
- ・優れたコストパフォーマンス

[比抵抗]

高
低



1) TEM: Time-Domain Electromagnetic (説明はP.4)

出典:
SUSTECパンフレット

磁気共鳴の応用(原子核が持つ磁氣的性質を検出)

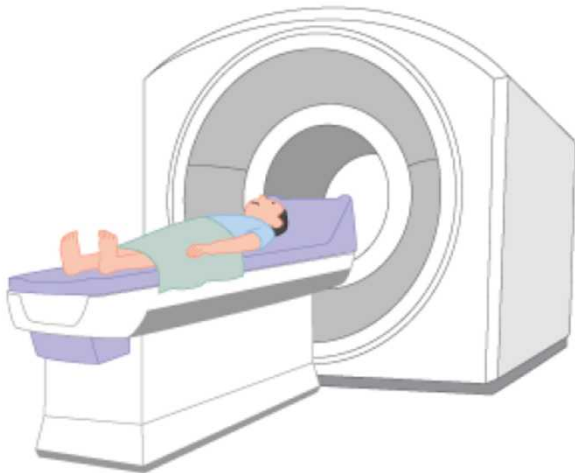
NMR(Nuclear Magnetic Resonance)



平成27年7月1日
物質・材料研究機構 (NIMS)
理化学研究所 (理研)
株式会社神戸製鋼所 (神戸製鋼)
日本電子株式会社 (JEOL)
科学技術振興機構 (JST)

世界最高磁場※のNMR装置 (1020MHz) の開発に成功
～高温超伝導体の応用が決め手 新薬創製・新物質開発の高速化にむけて大きな前進～

※ 世界最高磁場：1020MHz (24.0テスラ) 2015年4月17日時点



MRI (Magnetic Resonance Imaging)



→ 1.2GHzのNMRを現在開発中

まとめにかえて

- 室温超伝導は存在することがわかった。(常圧で実現させるのが今後の課題)
- 非BCS超伝導(エキゾチック超伝導)の物理は、まだまだ実験・理論ともに道半ば。
- 銅酸化物高温超伝導体は、転移温度が高いだけでなく、強い2次元性やd波対称性などの特徴があり、実用化を困難にする原因となっている。30年の歳月をかけて、これらの課題を克服しつつある。
- 地球温暖化問題の顕在化などによって、コスト問題を乗り越えられる環境が整いつつある。「21世紀は超伝導の世紀」となるか？

ご清聴ありがとうございました。