

平成24年11月10日 低温工学・超電導学会主催 盛岡市民公開講演会 於:アイーナ



「超電導物質の世界」

東京大学 大学院工学系研究科 准教授
下山 淳一



概要

- 超電導とはどんな現象か、何がすごいのか
 - 超電導体は珍しいもの？
 - 超電導物質や材料のつくりは？
- 超電導材料はどのように使われているか
 - 超電導は未来に欠かせない技術
(長寿、快適、省エネの未来へ)
- 今日の超電導展示の仕組みは

超電導現象の発見

1911年 (今から101年前)
オランダ、ライデン大学で発見

カメリン・オンネス教授
1913年ノーベル賞

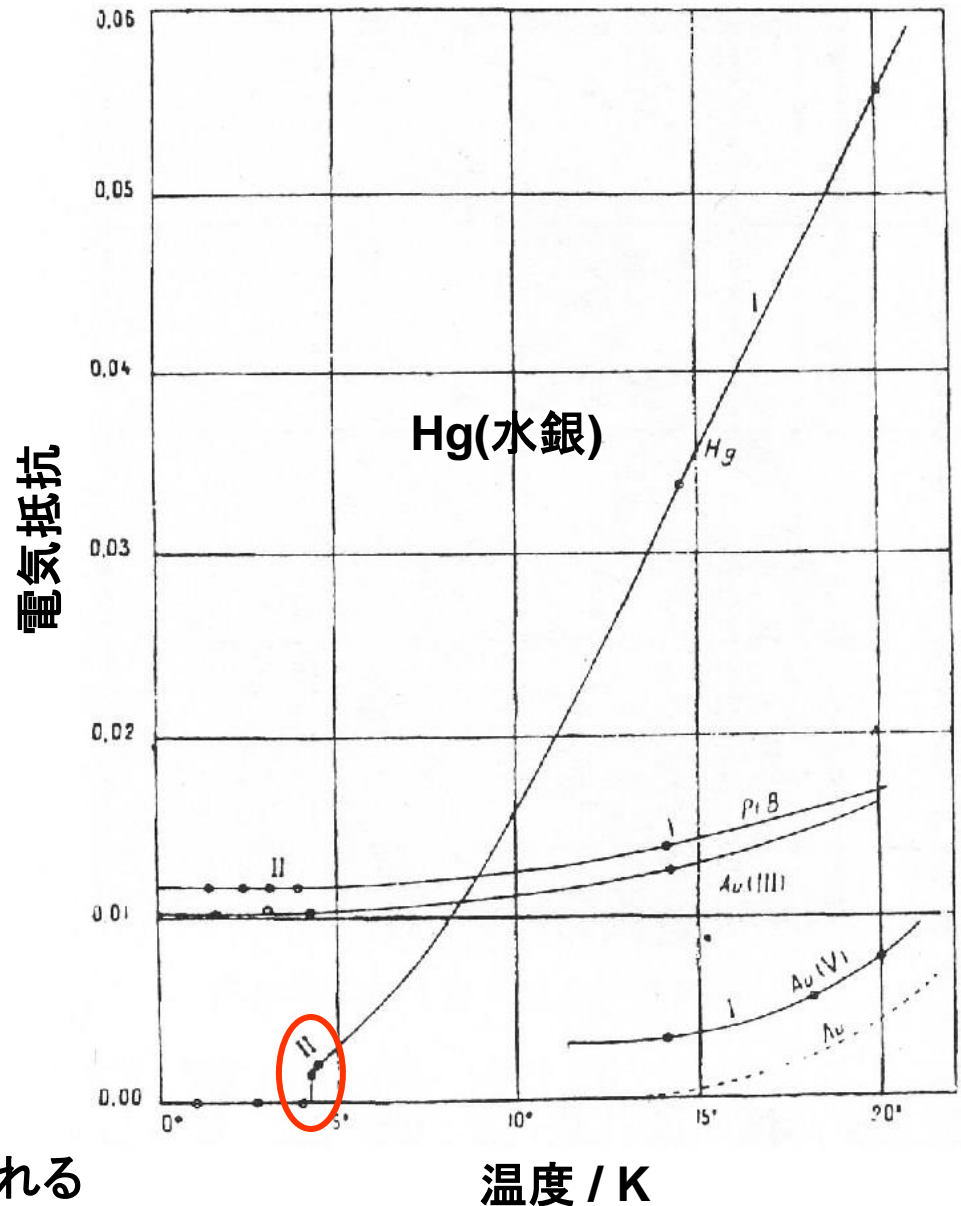
金属の電気抵抗は、絶対温度
ゼロ度に近付くとどうなるか？

→ 不純物をできるだけ
減らした金属で実験
(金、白金、水銀など)

水銀の電気抵抗が4.15 K
(-269°C)で突然ゼロに
(1910年)

この現象を“超伝導”と命名

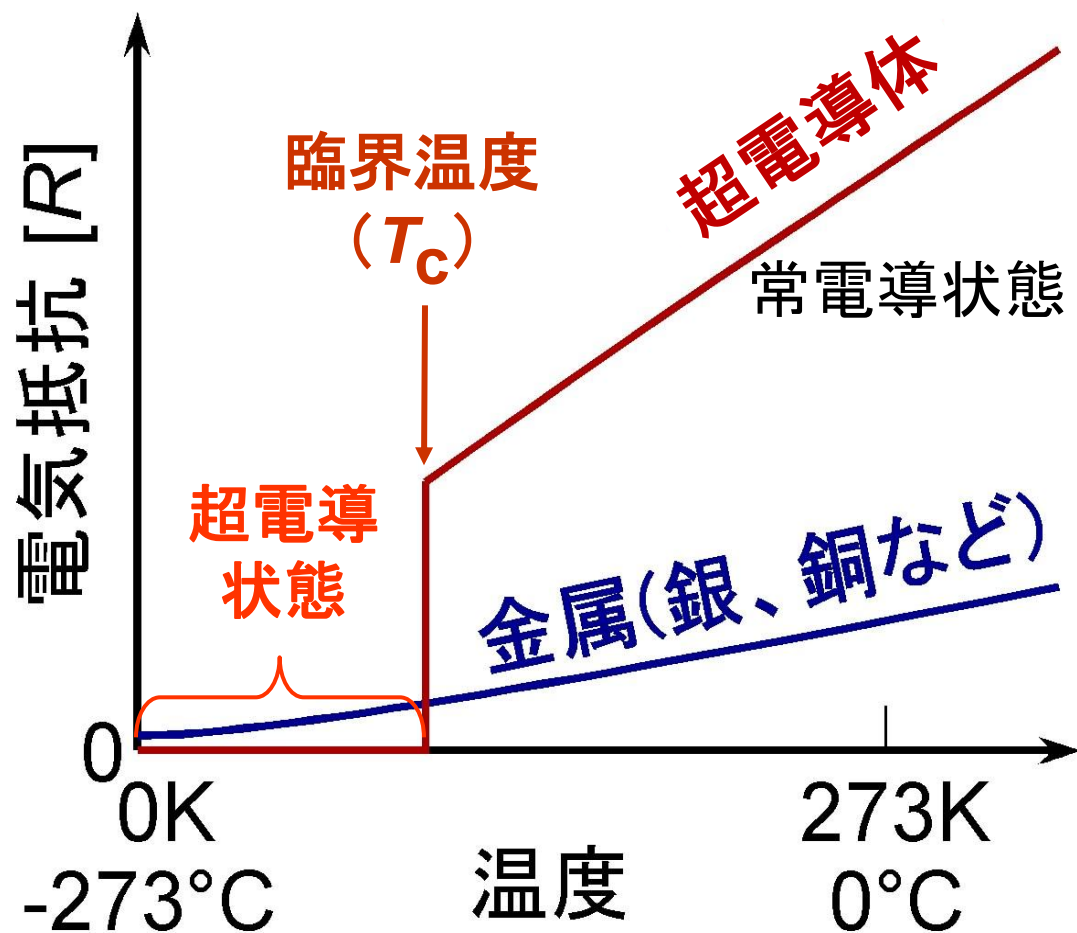
漢字表記: 超伝導、超電導どちらも用いられる



超電導現象の特徴

臨界温度(T_c)以下で直流電流に対して電気抵抗がゼロ

T_c : critical temperature



銅の電気抵抗率
1.7 $\mu\Omega\text{cm}$

確かに低い値だが
ゼロではない！

電気抵抗がある銅線と電気抵抗がゼロの超電導体を比較する

$$R > 0$$

$$R = 0$$

$$V(\text{電圧}) = I(\text{電流}) \times R(\text{電気抵抗}) \quad [\text{オームの法則}]$$

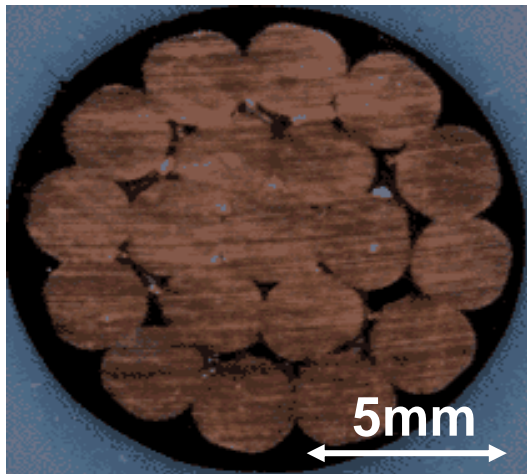
$$P(\text{電力}) = IV = I^2 R$$

$$Q(\text{発熱量}) = IVt(\text{時間}) = I^2 R t \quad [\text{ジュールの法則}]$$

$$R > 0 \text{ のとき、} Q > 0$$

$$R = 0 \text{ のとき、} Q = 0$$

$Q =$ 電気エネルギーのロス



銅線ケーブルの電流密度は
100 A/cm²程度

超電導線の電流密度は
その200倍以上

Q1: 今、この瞬間に送電による発熱によって失われている
電力はどれくらい(日本、世界)?

電気抵抗ゼロの性質に基づく超電導体の特長

- ・ 電気エネルギーのロスがない

長い線でも細い線でもゼロ抵抗

長距離の
ケーブル

細かな電子
デバイス

- ・ 発熱がない

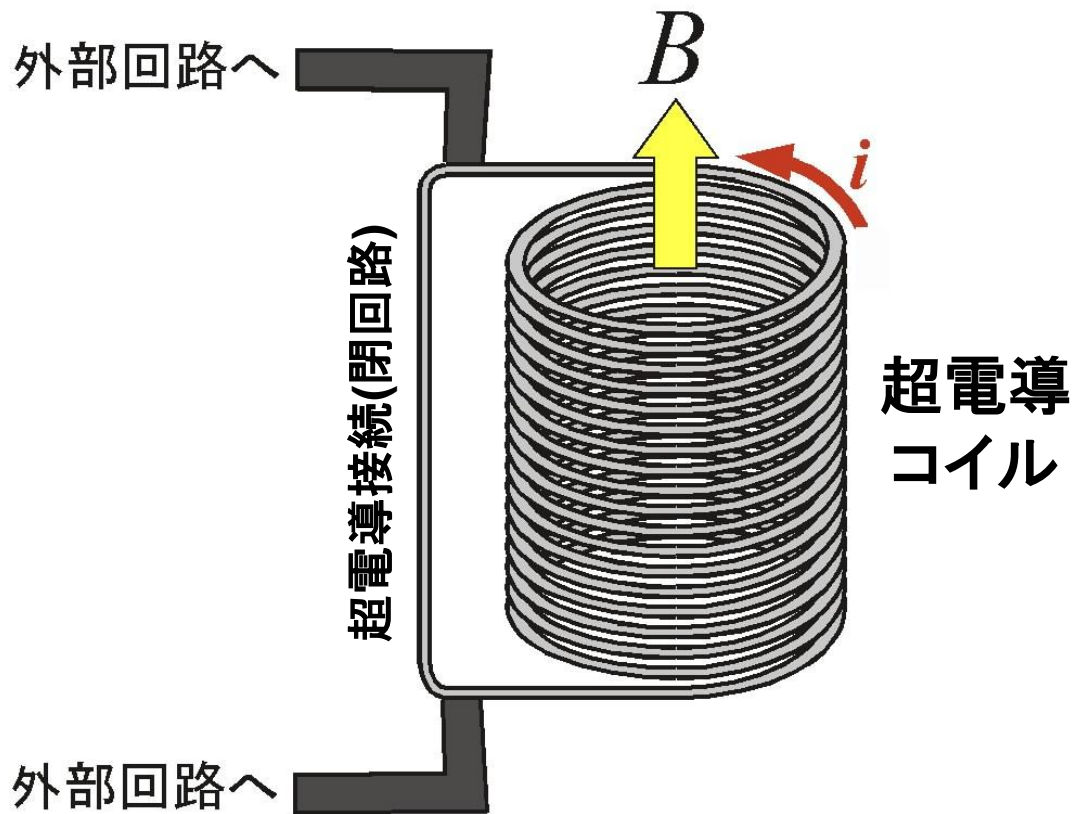
高い電流密度(J)で電気が流せる

細い線でも大きな電流が流せる

強力な電磁石ができる

- ・ 永久電流回路ができる

永久電流回路



コイルを含む閉じた回路の電流減衰の時定数
 L (コイルの自己インダクタンス) / $R = \infty$

このときコイルには電気が蓄えられていて、同時に安定な磁場が発生している。

みんな超電導体を持っている

超電導体は珍しくない。

超電導体は2000種以上

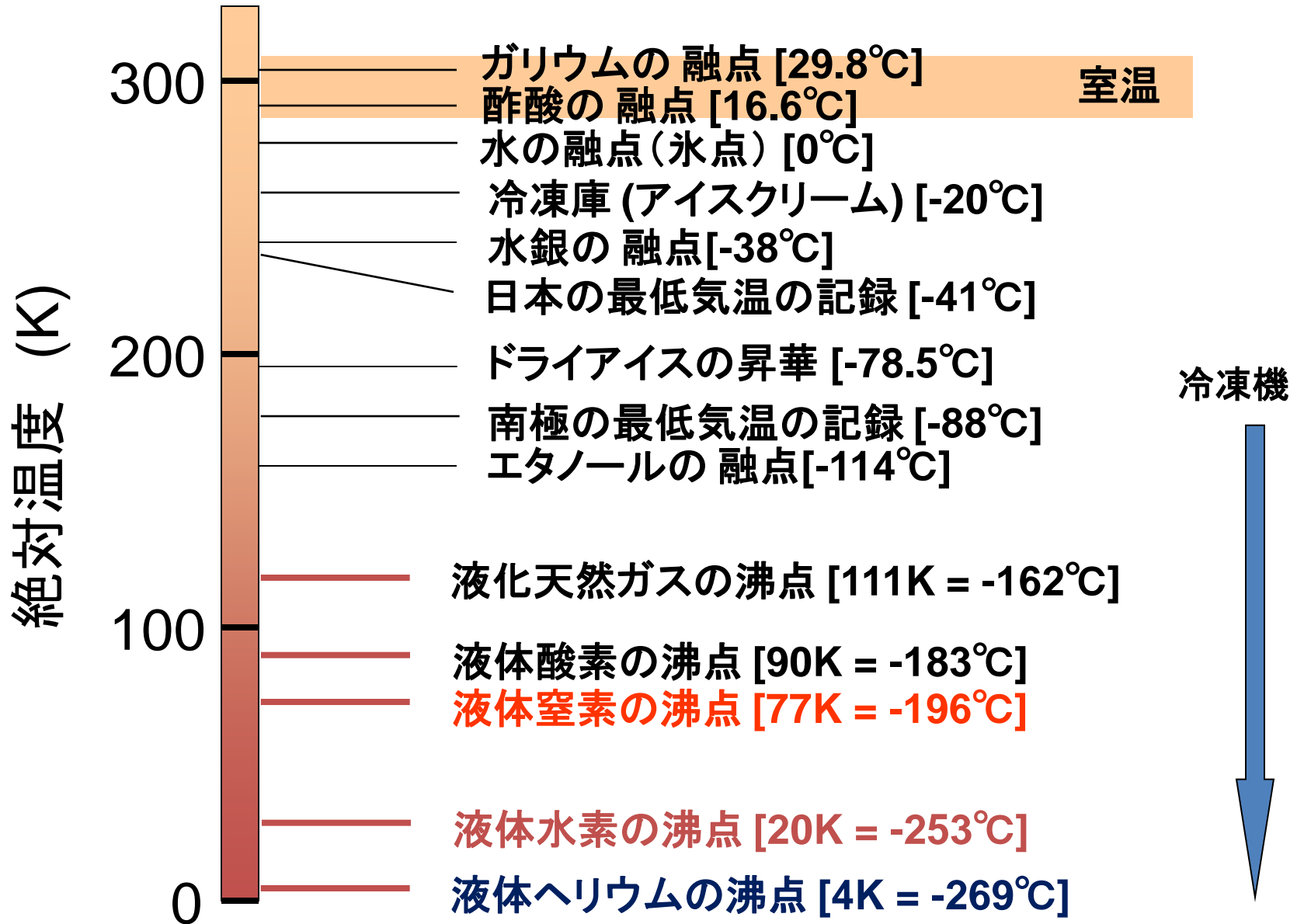
超伝導体

超伝導物質の臨界温度と臨界磁場

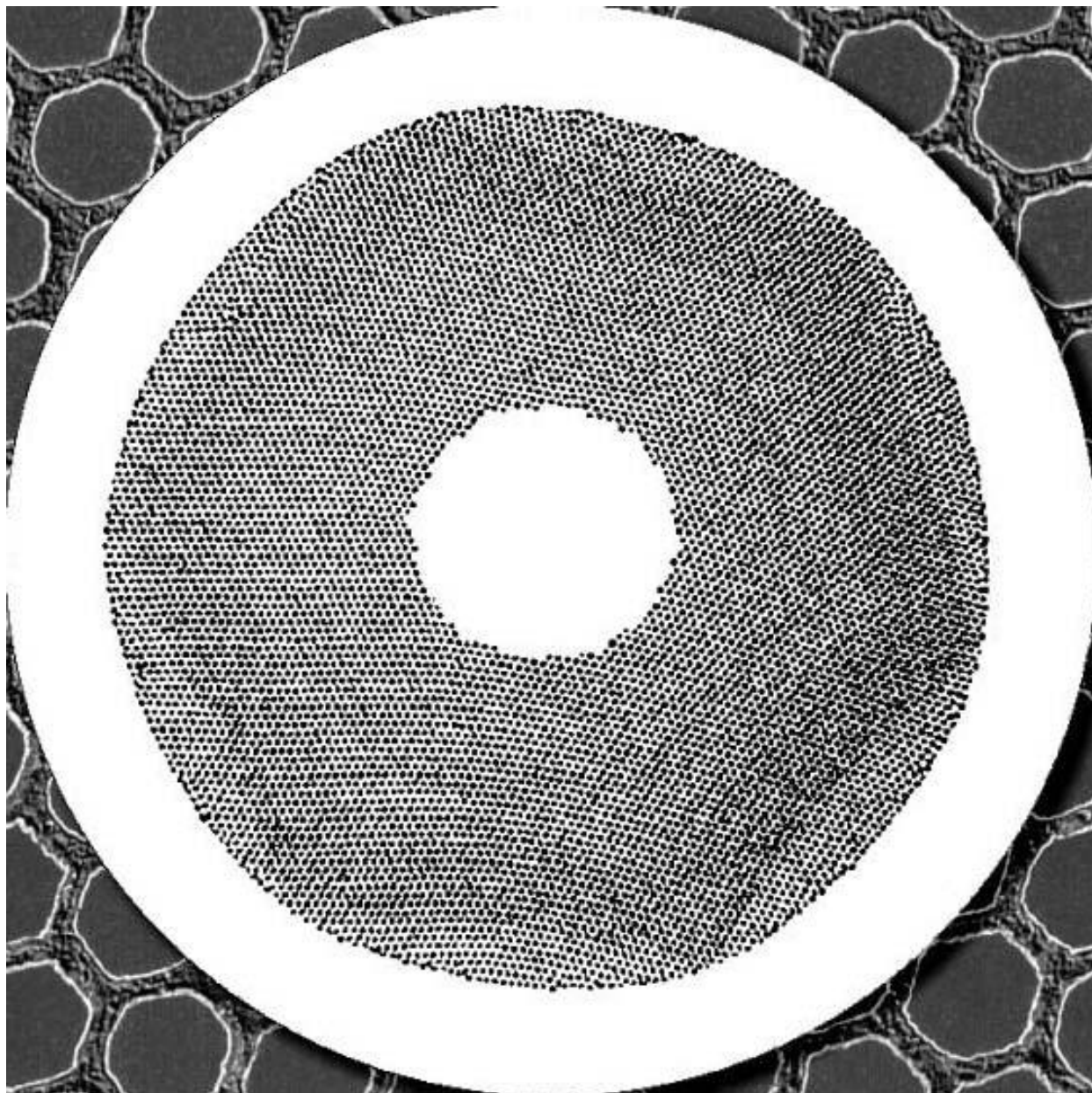
物質	臨界温度 T_c/K	臨界磁場 ¹⁾ H_0/Oe	物質	臨界温度 T_c/K	臨界磁場 ²⁾ $H_{c2}(O)/Oe$	物質	臨界温度 T_c/K	臨界磁場 ²⁾ $H_{c2}(O)/Oe$
単体			化合物			酸化物		
Al	1.196	99	MgB ₂	39		(La _{1-x} (Sr, Ba, Ca) _x) ₂	38 ^{*1}	*2
Cd	0.56	30	Nb ₃ Al	18.8	3.20×10^5 (4.2 K)	CuO _x ($x \approx 0.075$)		
Ga	1.091	51	Nb ₃ Au	11.5		RBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	90~95 ^{*1}	*2
Ga(β)	6.2	—	Nb ₃ Ge	~18		R=Y, La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb		
Ga(γ)	7.62	—	Nb ₃ Sn	18.3	2.45×10^5	Bi ₂ (Sr, Ca) ₄	110 ^{*1}	*2
Hf	0.165	—	Nb _{0.78} (Al _{0.73} Ge _{0.27}) _{0.21}	21.05	4.2×10^5 (4.2 K)	Cu ₃ O _x ^{*3}		
Hg(α)	4.154	411	V ₃ Ga	16.5	2.08×10^5	HgBa ₂ Ca ₂	160 (高圧下)	
Hg(β)	3.949	339	V ₃ Si	17.1	2.35×10^5	Cu ₃ O _x	8	*2
In	3.4035	293	NbTC ₃	10.5		Li _{1.5} Sr ₂ CuO ₂		
Ir	0.140	19	Tc ₆ Zr	9.7		Br ₂ ^{*4}		
La(α)	4.9	—	HfN	6.2		Sr ₂ RuO ₄ ^{*5}	1.5	1.5×10^4
La(β)	6.06	1600	NbC	6.0		有機化合物		
Mo	0.92	98	NbN _{0.91}	15.72	1.8×10^5	(TMTSF) ₂	1.4 ⁺¹	2.1×10^4 (0.5 K) ⁺²
Nb	9.23	1980	NbN _{0.72}	17.9		ClO ₄		8.1×10^3 (0.6 K) ⁺²
Os	0.655	65	C _{0.28}			β -(BEDT- TTF) ₂ I ₃ ⁺³	1.5 ⁺¹	1.0×10^5 (1.5 K) ⁺²
Pa	1.4	—	NbB	8.25			8.1 ⁺¹	1.0×10^5 (1.5 K) ⁺²
Pb	7.193	803	BiNi	4.25		x -(BEDT- TTF) ₂ Cu (NCS) ₂ ⁺⁴	10.4 ⁺¹	$\sim 2.0 \times 10^5$ (2 K) ⁺²
Re	1.699	198	CoSi ₂	1.22		x -(BEDSe) ₂ Cu [N(CN) ₂]Br	7.5 (1.5 kbar)	
Ru	0.49	66	PbTe ₂	1.53		(DMET) ₂ ⁺⁵	1.9 ⁺¹	2.7×10^4 (0.5) ⁺²
Sn	3.722	305.5	YOs ₂	4.7		AuBr ₂ ⁺³	1.0 (1.5 kbar) ⁺¹	
Ta	4.39	780	ZrV ₂	8.8			4	
Tc	7.92	1410	Hf _{0.5} Zr _{0.5}	10.1	2.1×10^5 (4.2 K)	(DTEDT) ₃		
Th	1.368	162	V ₂			Au(CN) ₂	3.5 ⁺¹	
Ti	0.39	100	FeU ₆	3.86		(MDT-TTF) ₂		
Tl(α)	2.39	171	InLa ₃	10.40		AuI ₂	6	
U(α)	0.68	~300	MoN	12.0		(TTF)(Pd dmit) ₂	(19 kbar) ⁺¹	
V	5.3	1020	合金³⁾			その他		
W	0.012	1.07	Pb _x I _y	3.39-7.26		GeTe	0.30 ($n=1.5 \times 10^{21}$) ⁴⁾	
Zn	0.852	53	Nb _{0.75} Zr _{0.25}	10.8	$\sim 9.1 \times 10^4$	SnTe	0.21 ($n=2 \times 10^{21}$) ⁴⁾	
Zr	0.546	47	Nb _{0.40} Ti _{0.60}	9.3	$\sim 1.2 \times 10^5$ (4.2 K)	SrTiO ₃	0.38 ($n=1 \times 10^{20}$) ⁴⁾	
Li	20 (48 GPa)		Nb _{0.70} Ta _{0.30}	6.9	9.5×10^3	Gd _{0.99} La _{0.01} Os ₂	~6 (強磁性)	
Ba	5 (高圧)		Ta _{0.53} Ti _{0.47}	8.1	8.8×10^4 (4.2 K)	Ce _{0.98} Gd _{0.02} Ru _{1.2}	3.1 (強磁性)	
Bi	3.93, 7.25 (高圧)		Ti _{0.50} V _{0.50}	7.4	$\sim 1.2 \times 10^5$	C ₈ K	0.39	
Cs	1.5 (高圧)		Nb _{0.36} Ti _{0.60}	9.9	1.24×10^5 (4.2 K)	C ₆₀ K ₃	19.3	2.6×10^5
La	12 (高圧)		Rh _{0-0.15}	9.8~12.2		C ₆₀ Rb ₃	29	
Bi	6 (薄膜)		Zr _{1-0.85}			C ₆₀ RbCs ₂	33	
			Mo _{0.3} Tc _{0.7}	12.0		C ₆₀ NbCs(CH ₃) ₄	29.6	
			PuCoGa ₅	18.5	7.40×10^5	La(O _{1-x} F _x)FeAs		
						$x=0.11$	32	

1Oe は $(1000/4\pi) \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ に相当する。

低温の世界によろこそ



最もよく使われているNb-Ti線材の断面



極細多芯線

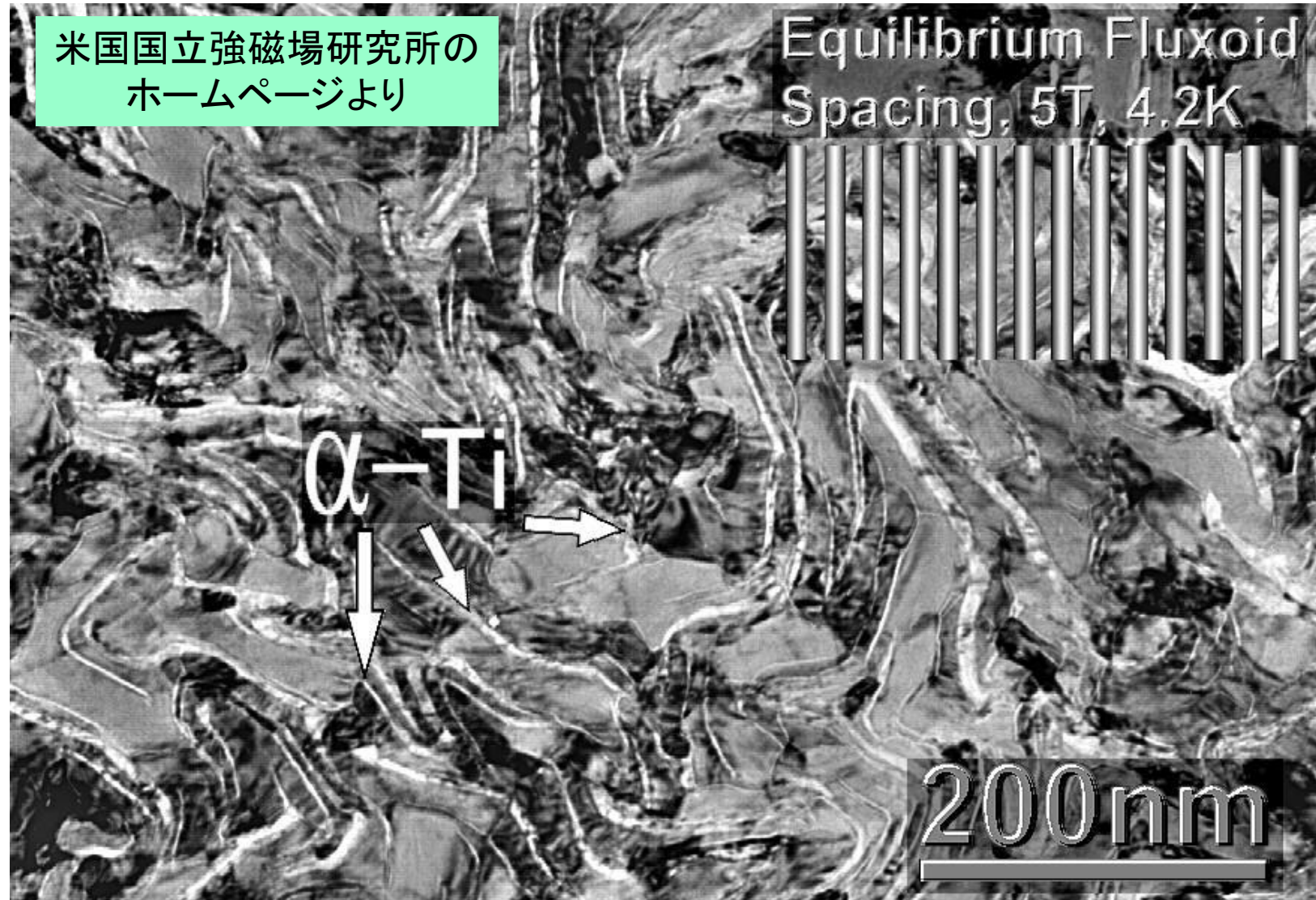
直径: 1~2 mm

**白く見える部分は
銅。(熱的、電氣的
機械的安定化)**

黒い部分がNb-Ti

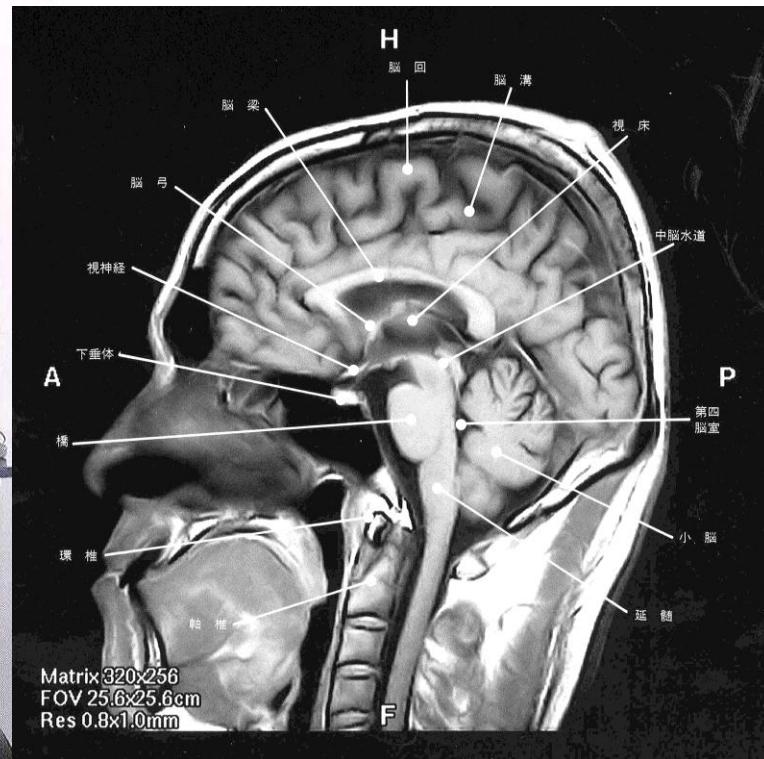
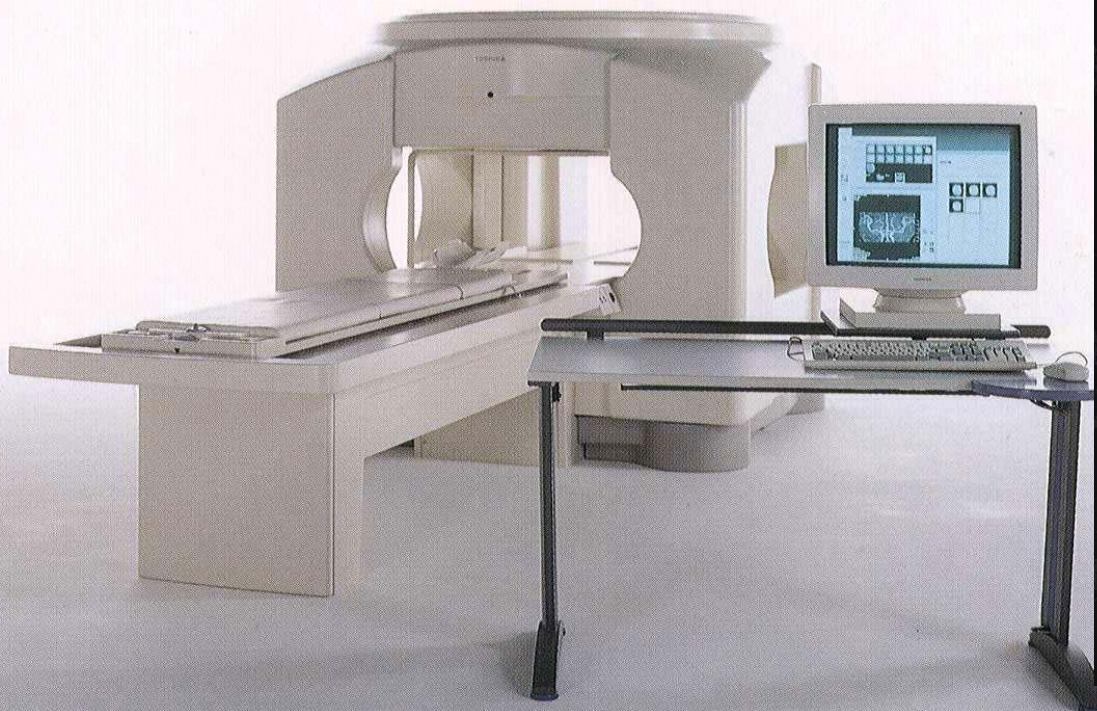
**100万芯を超える
線材もある**

最もよく使われているNb-Ti線材の微細組織



超電導材料業界では40年以上前からナノテクが常識だった！

医療用MRI(磁気共鳴イメージング装置)には 超電導磁石が使われている！



磁場が高く、安定なほど精密な像が得られる

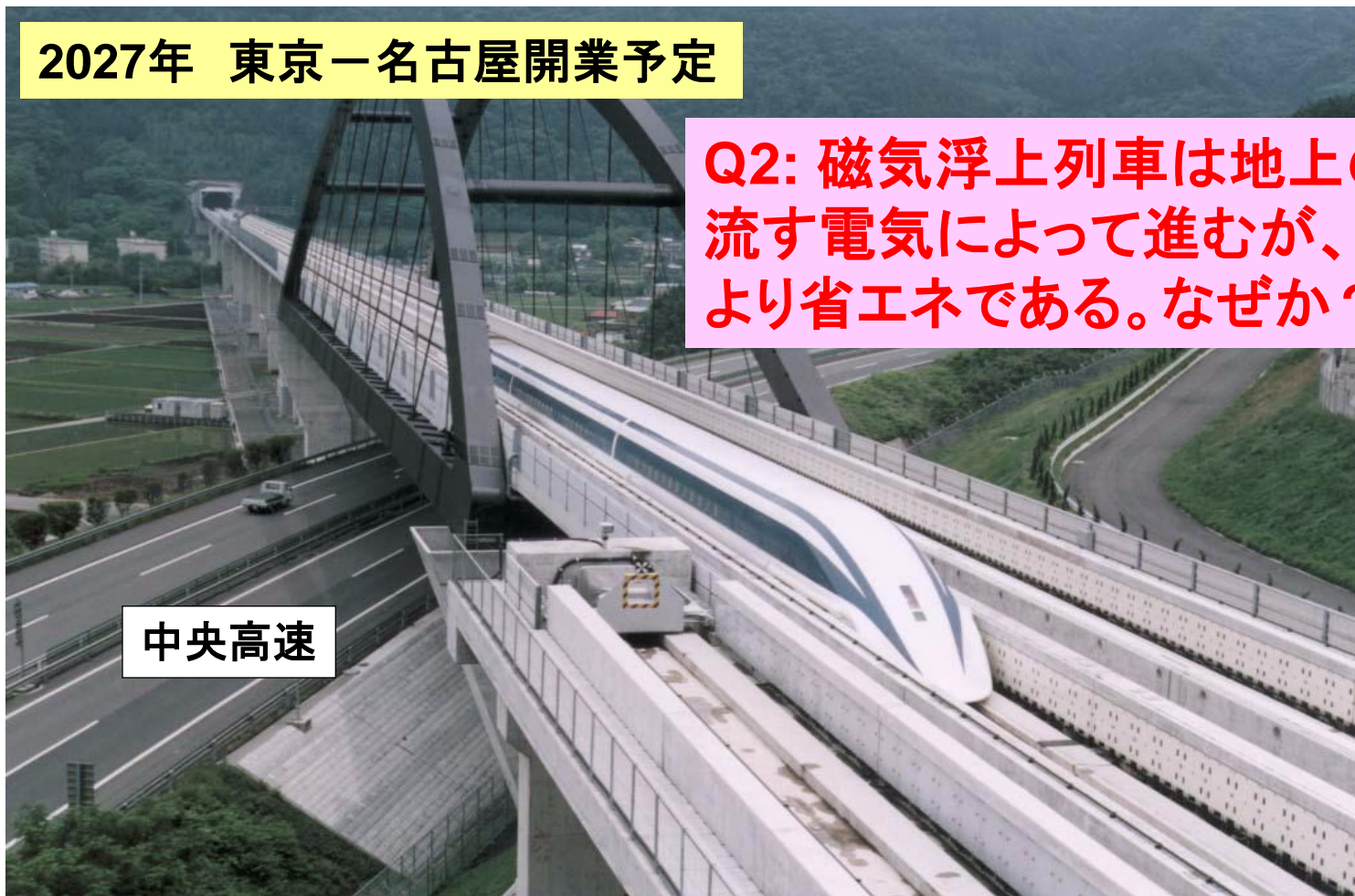
的確な診断、負担の少ない治療 --- 人類の長寿命化に貢献

夢の超特急 MAGLEV TRAIN (磁気浮上列車)

2027年 東京一名古屋開業予定

Q2: 磁気浮上列車は地上のコイルに流す電気によって進むが、新幹線より省エネである。なぜか？

中央高速



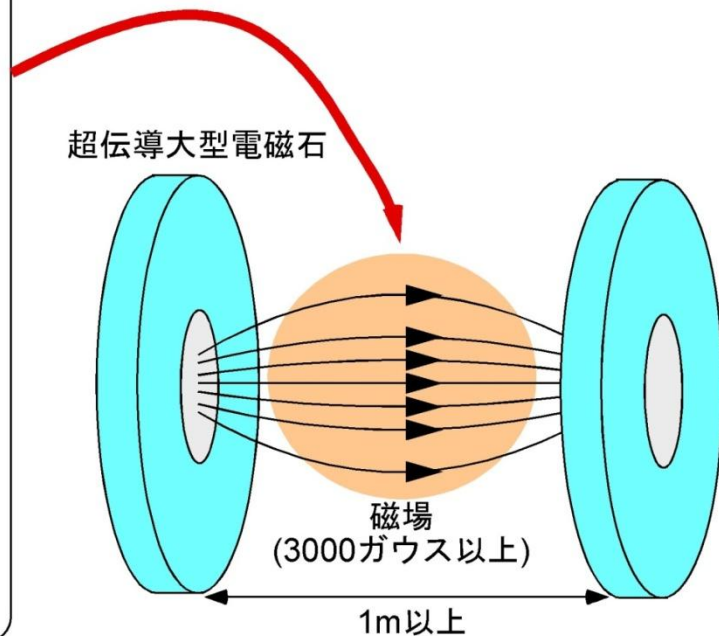
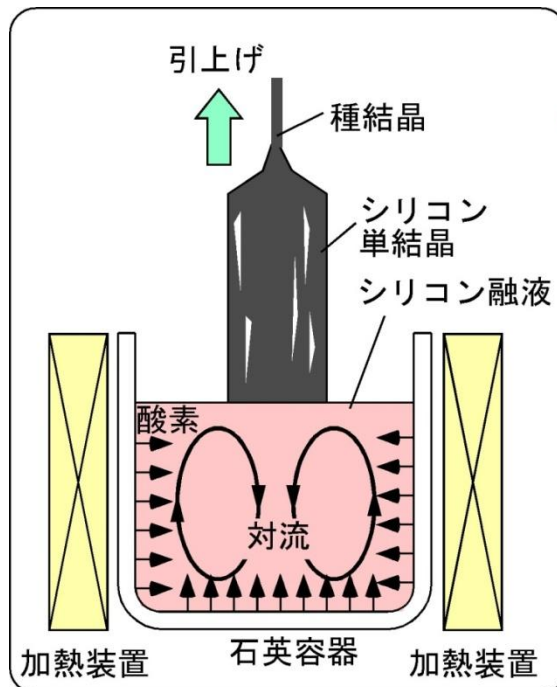
強力磁石の高速走行⇒地上コイルの電磁誘導⇒磁氣的反発⇒浮上⇒省エネルギー

Nb-Ti製超電導磁石、液体ヘリウムとその液化機を搭載

大型シリコン(Si)単結晶の育成 [半導体産業の礎]



SUMCO HPより



強い磁場で対流を制御し、加工しやすい適度な濃度の酸素をSi結晶に入れる！



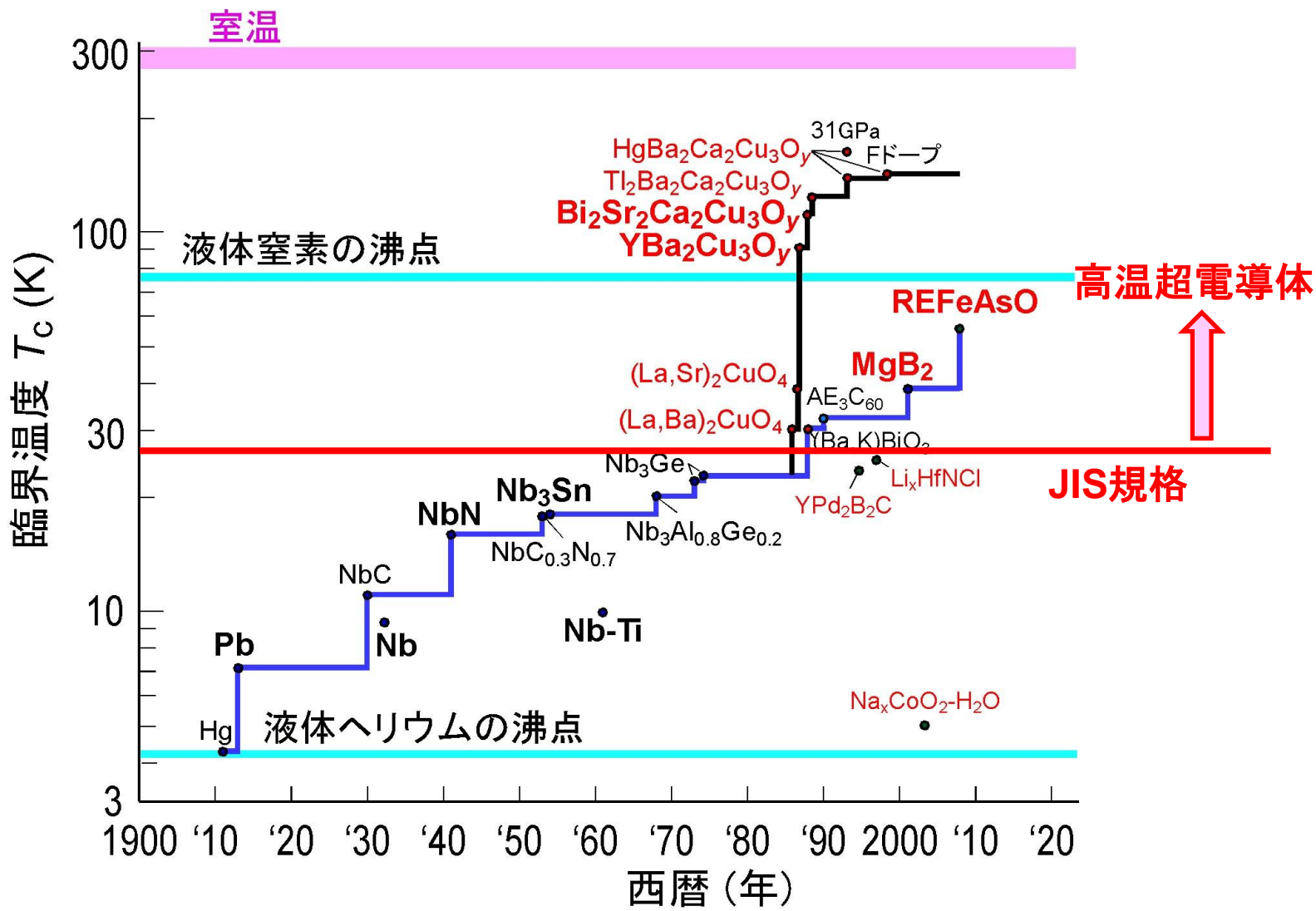
**ビスマス系高温超電導線材を使った
Si単結晶育成用の大型電磁石
使用線材全長 = 140 km**

(住友電工—信越半導体—東芝)

酸化物の高温超電導体が登場

—超電導応用の歴史が変わった—

超伝導体の臨界温度上昇の足跡



液体窒素冷却で超電導体が使えると、どんな良いことがあるだろうか？

従来の超電導体は液体ヘリウムで冷却しなければ超伝導状態にならなかった！

液体ヘリウムの問題

資源が稀少 ---- 一部の天然ガス田からのみ生産

高価格

蒸発熱が小さい

液体窒素冷却の良さ

資源が豊富

低価格

蒸発熱が大きい

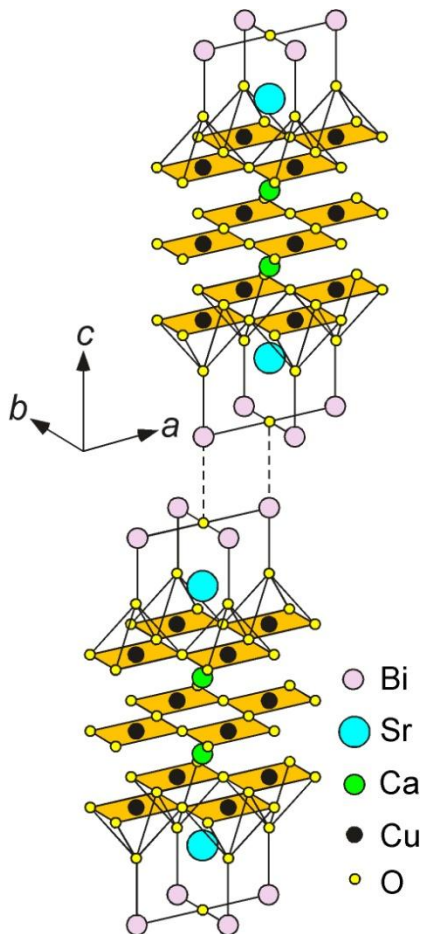


使いやすい超電導材料・機器

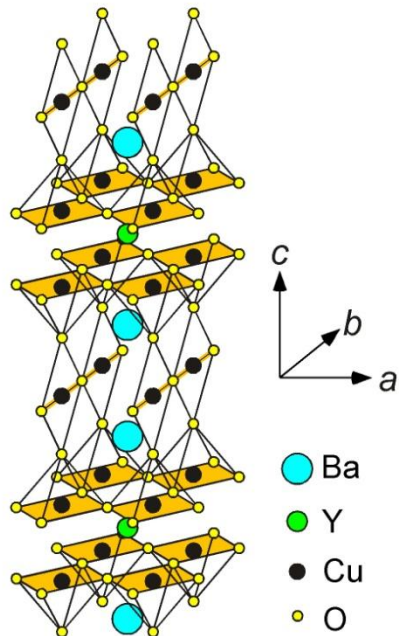
代表的な高温超電導体の結晶構造

層状構造

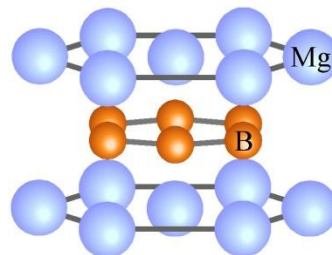
超伝導層と非超伝導層の積層 --- 異方性



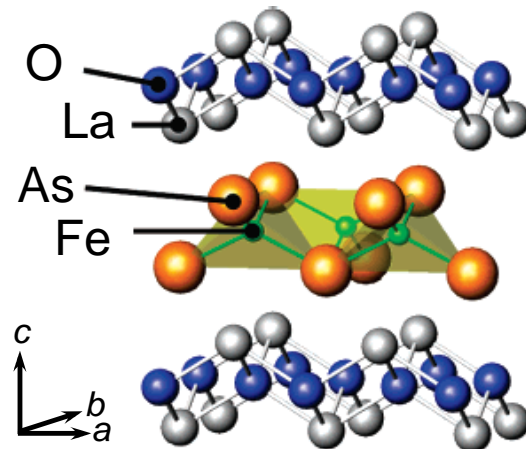
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$
Bi系超電導体



$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$
RE123系超電導体
(REは3価希土類)



MgB_2

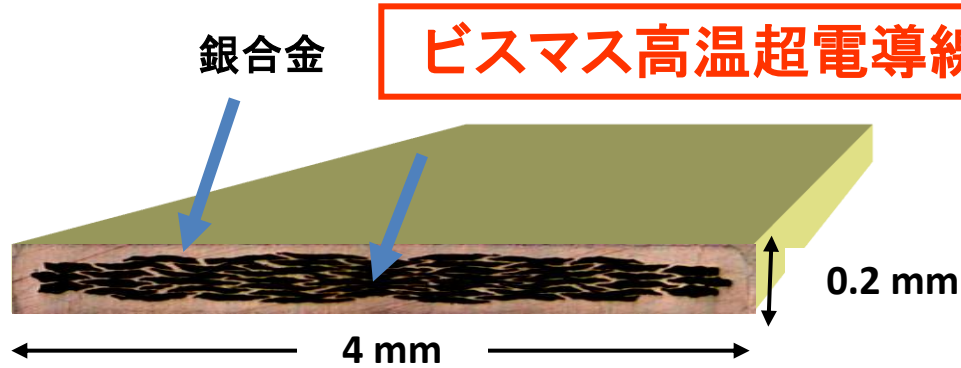


LaFeAsO

鉄ニクタイド系超電導体

実際の高温超電導線材 (住友電工製)

高温超電導体 = セラミックス --- 硬い、脆い、変形しにくいのだが、、



1500 m長の線材

ビスマス系高温超伝導線材の応用展開

Bi(Pb)2223線材



生産能力 1000 km/年 以上 (2005)

山梨リニア浮上磁石 (2005)



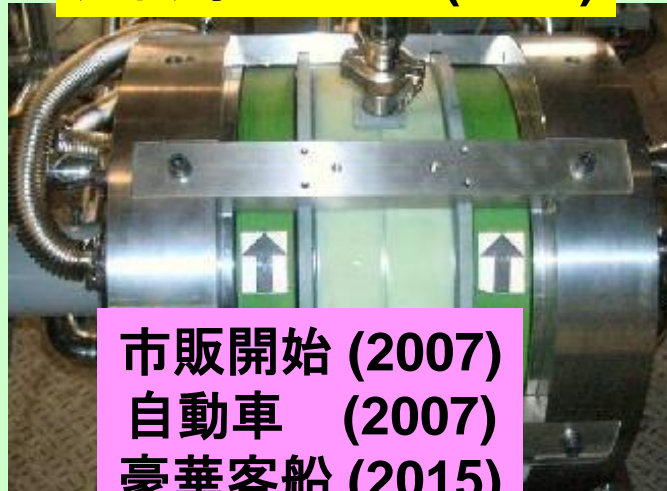
東京-名古屋
(2027開業予定)

超伝導ケーブル (2002)



首都圏ケーブル布設
(東電-SEI:2007-2012)

超伝導モーター (2005)



市販開始 (2007)
自動車 (2007)
豪華客船 (2015)

新幹線変圧器
(開発中)



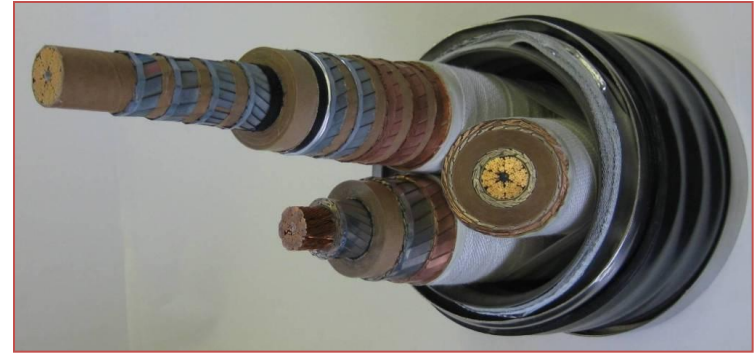
液体窒素冷却!

2012年10月29日、東京電力旭変電所に超電導ケーブルがデビュー



高温超電導ケーブル実証プロジェクト

2012年10月29日、東京電力旭変電所に超電導ケーブルがデビュー



写真提供 住友電工

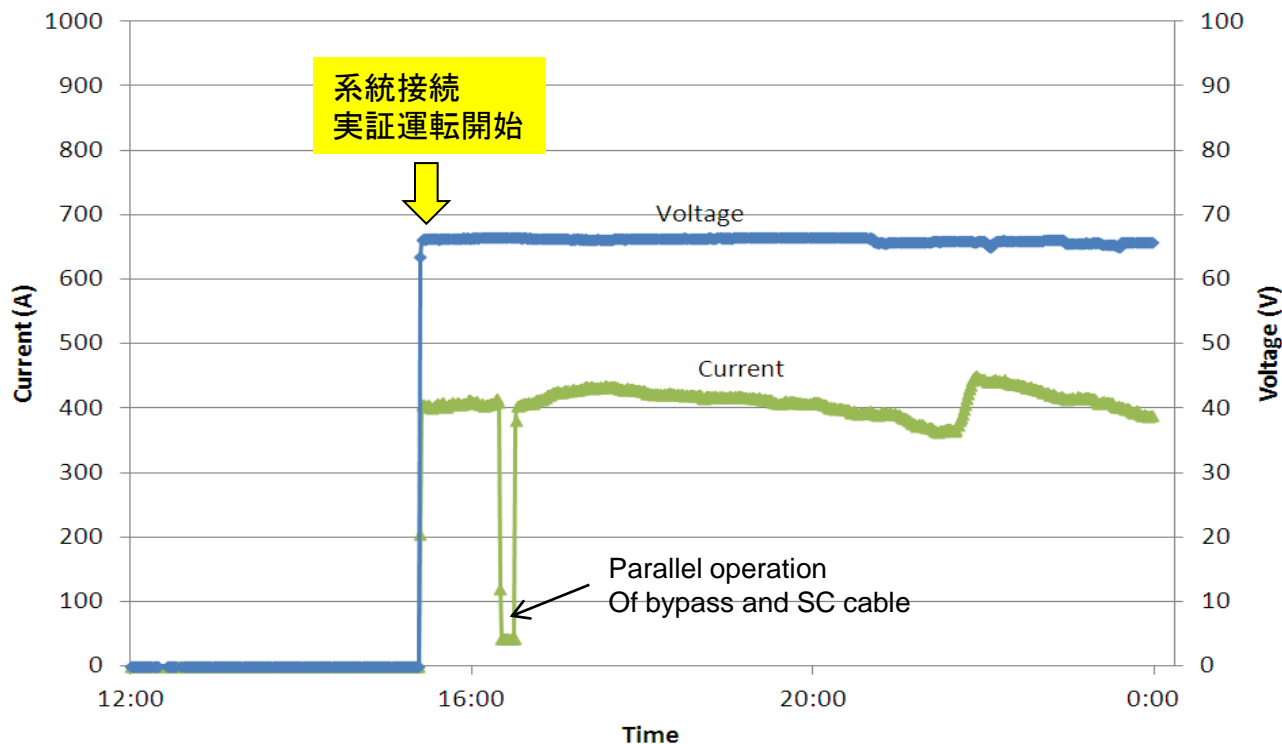
高温超電導ケーブル開通式と運転状況

運転状況がHPで公開されています。

<http://www.sei.co.jp/super/cable/jissho.html#3>



10月29日、接続運転開始時の記録

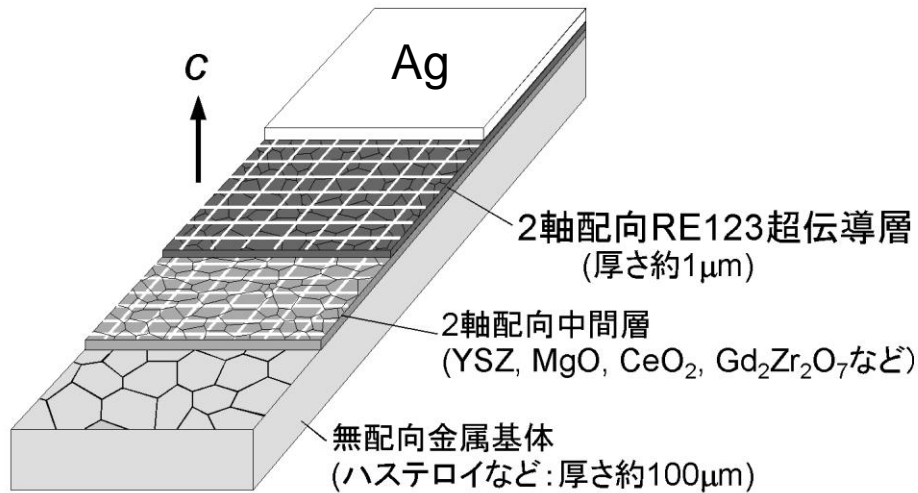


Photograph of Ceremony

写真提供 住友電工

高温超電導線材 第2弾：希土類系123線材

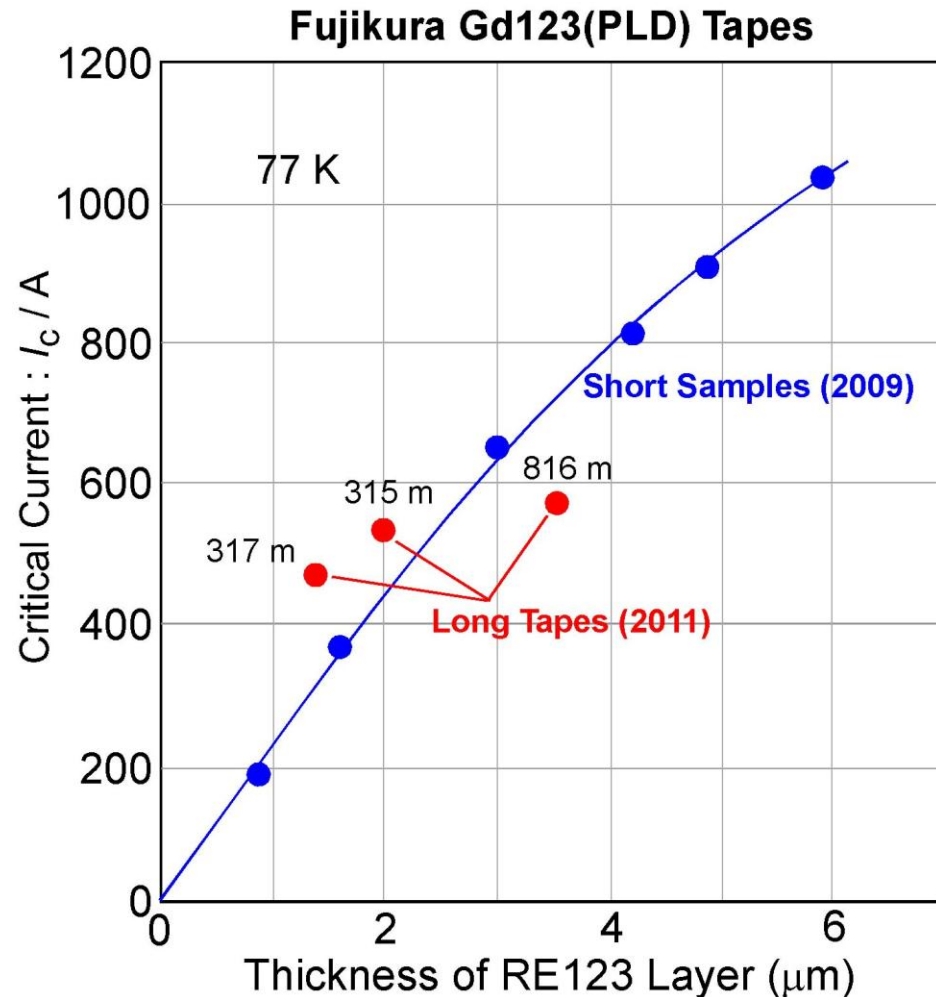
希土類123線材 (Coated Conductor)



$J_c \sim 2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ at 77 K

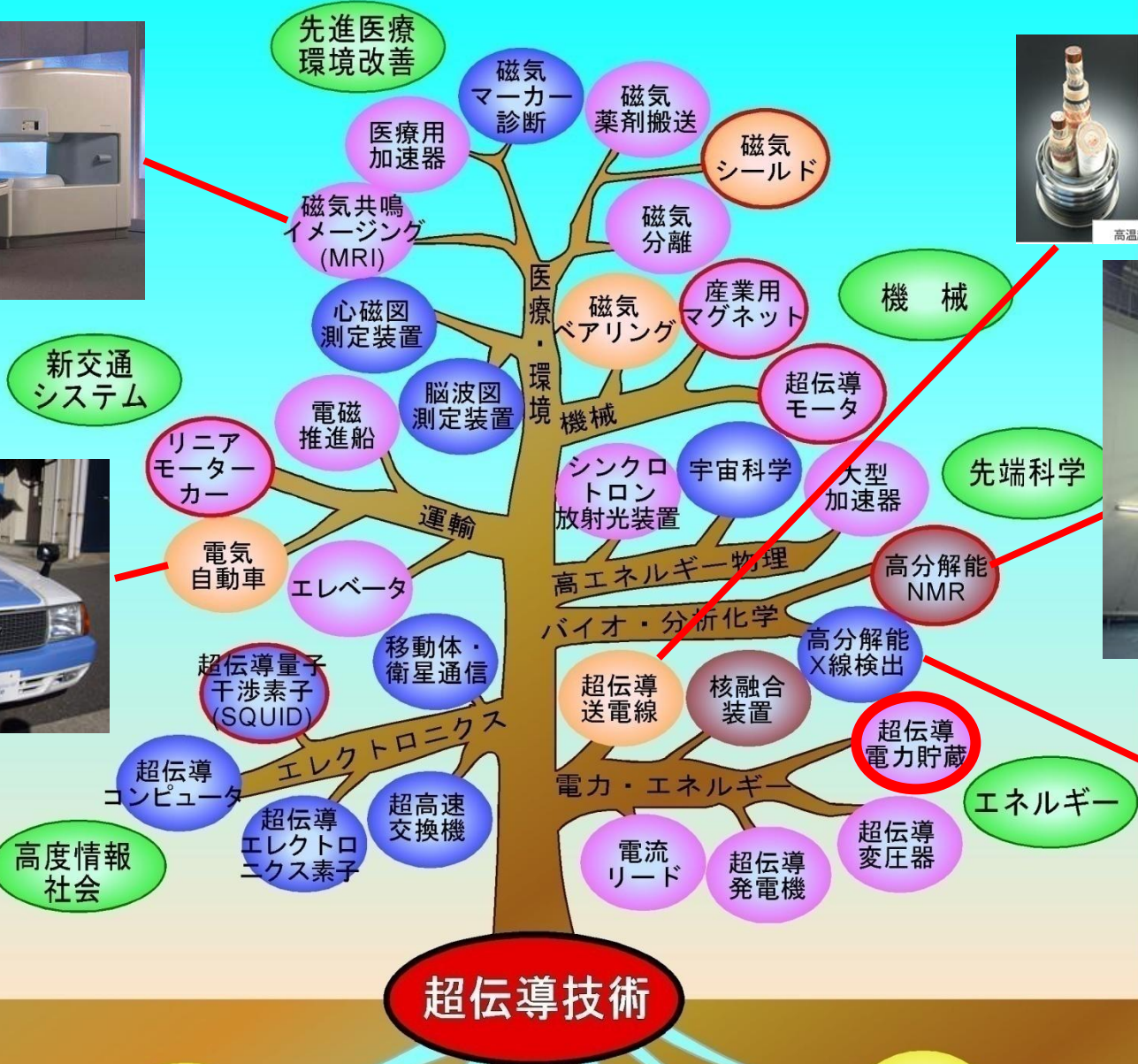
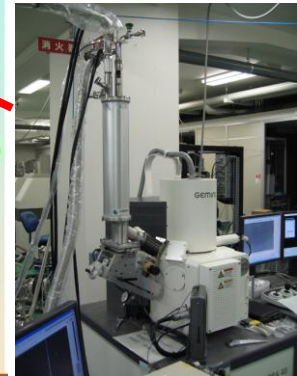
単層の薄い超電導層 (1~2 μ m)

RE123 層の割合 : 1~3%



サンプルを回しますので触ってみてください

Q3: どうしてセラミックスの超電導線材が曲げられるのでしょうか？



新交通システム



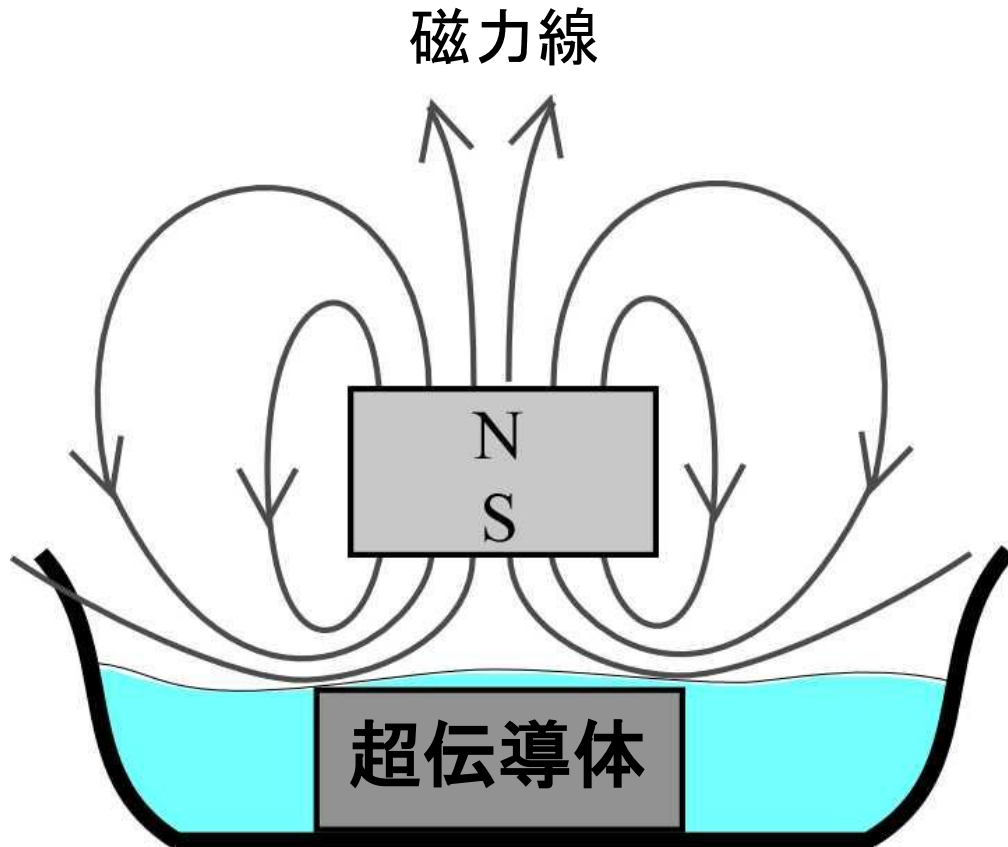
高度情報社会



今日の超電導展示の仕組みは

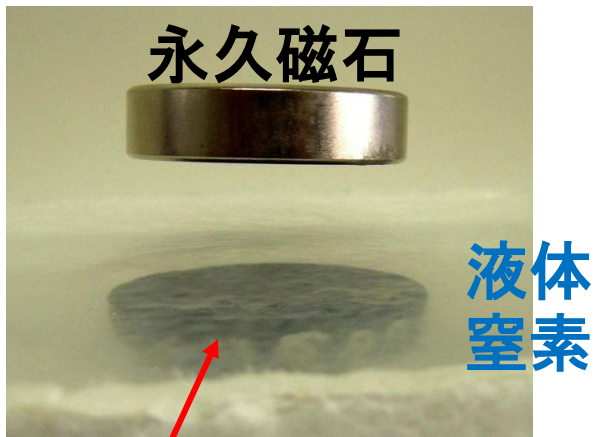
超電導体の性質 --- 磁場をはじく！

完全反磁性 (マイスナー効果) --- 超電導体だけが示す現象

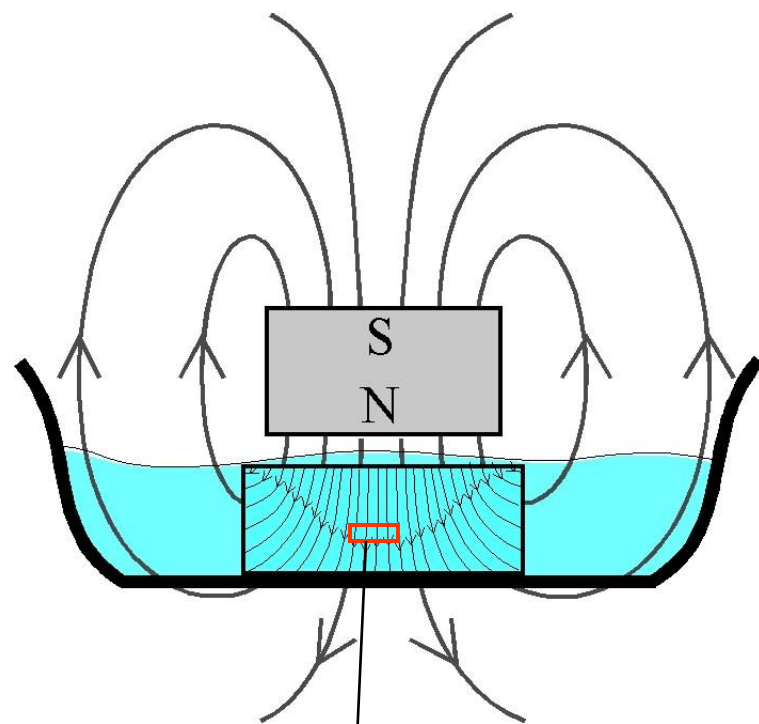


Q4. どのようにして磁場が入ってくるのを防いでいるのでしょうか？

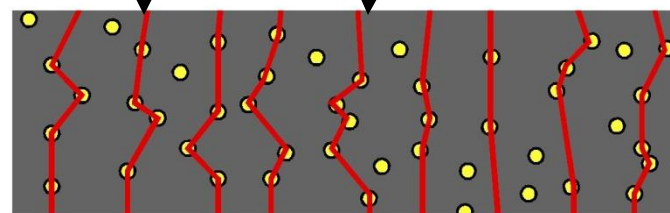
磁場中で冷やしたら超電導体内に磁場が入った！



超電導体(希土類123系バルク体)
 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.93}$



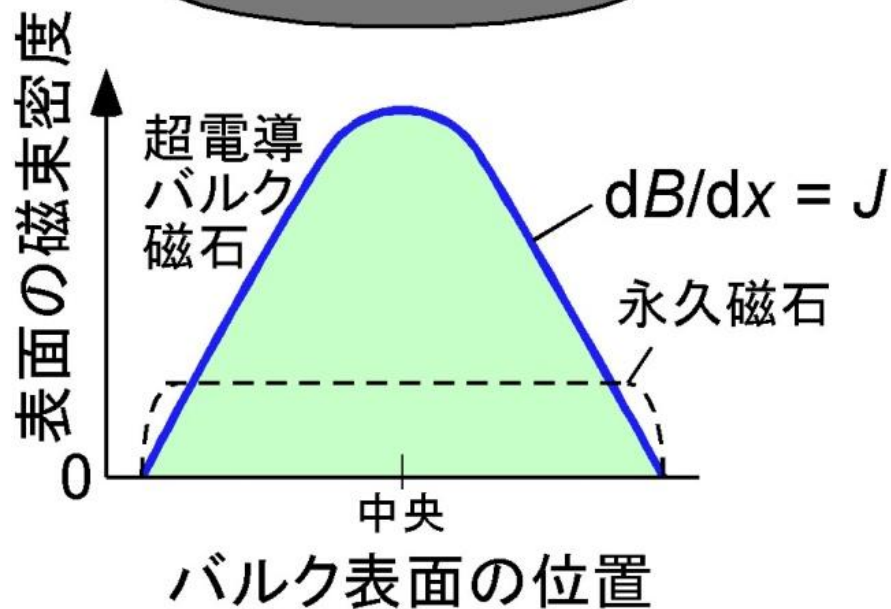
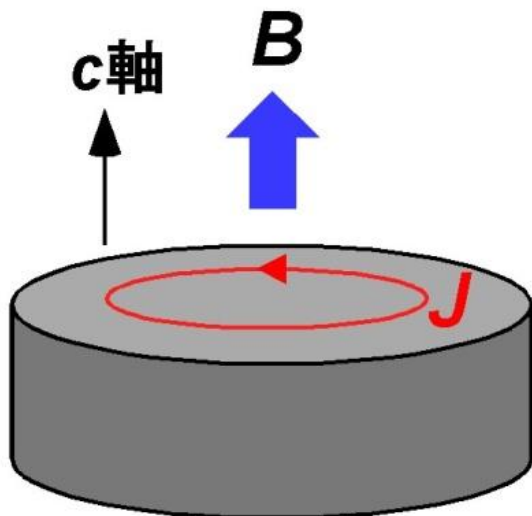
量子化磁束



量子化磁束はピン止めされていて、
超電導になったときの磁場分布を記憶



磁場が入った超電導体には “永久電流”が流れている！



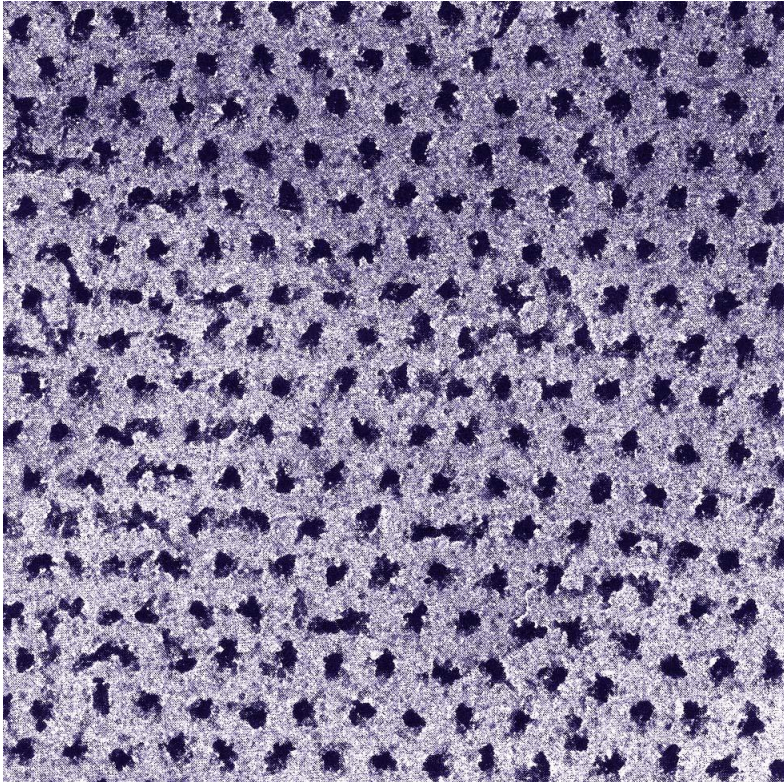
捕捉磁場の記録

17 T (29 K)

3 T (77 K)

ネオジム磁石の
表面磁場は 0.4 T

磁場下の超電導体内の磁束の様子



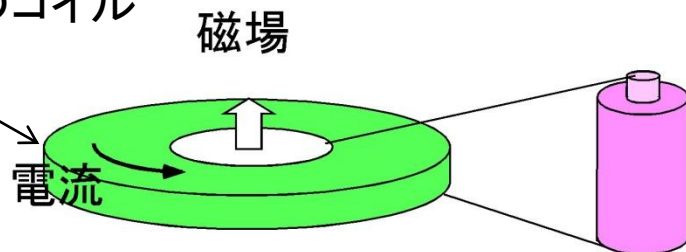
黒い部分が量子化磁束

1ガウスの磁場
= 超電導体1 cm²に500万本の量子化磁束

1000ガウスだと50億本/cm²の密度の
量子化磁束が存在！

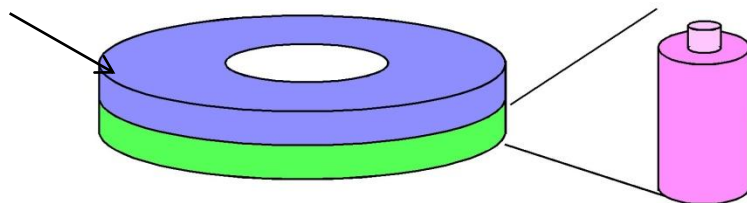
電磁誘導による磁気浮上

Bi系超電導体のコイル
 $T_c = 110 \text{ K}$



このコイルの両端は
短絡されている。

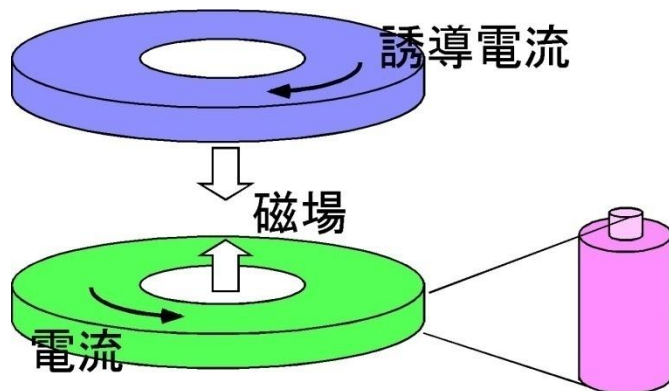
コイルに電流を流すと
磁場が発生します。



電流を流さない場合、
コイルを重ねて置くことが
できる。



電磁誘導による磁気浮上



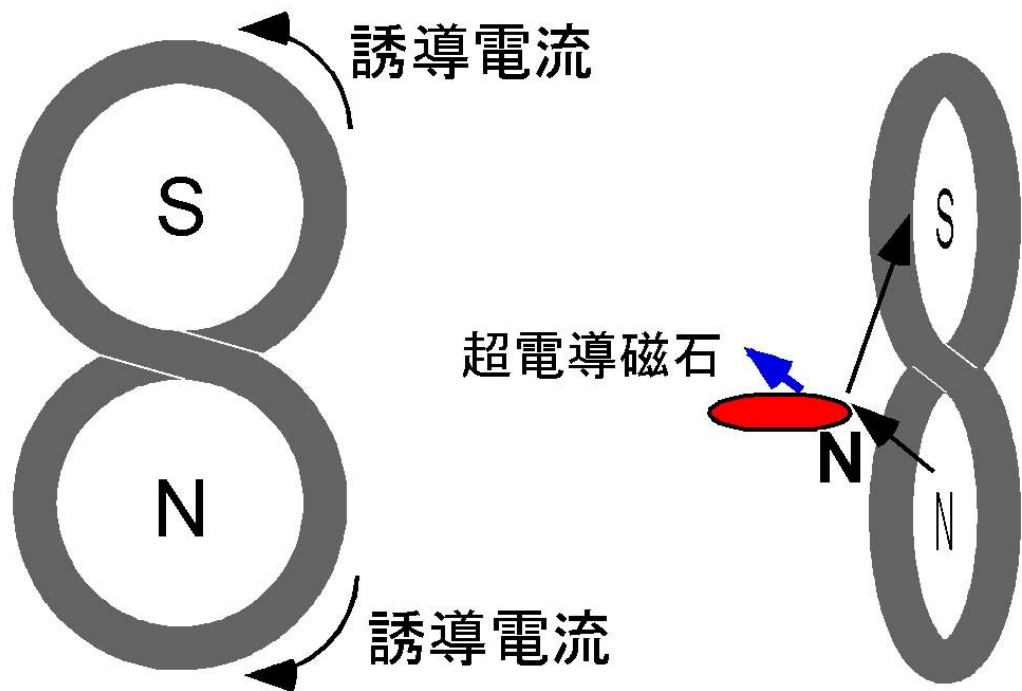
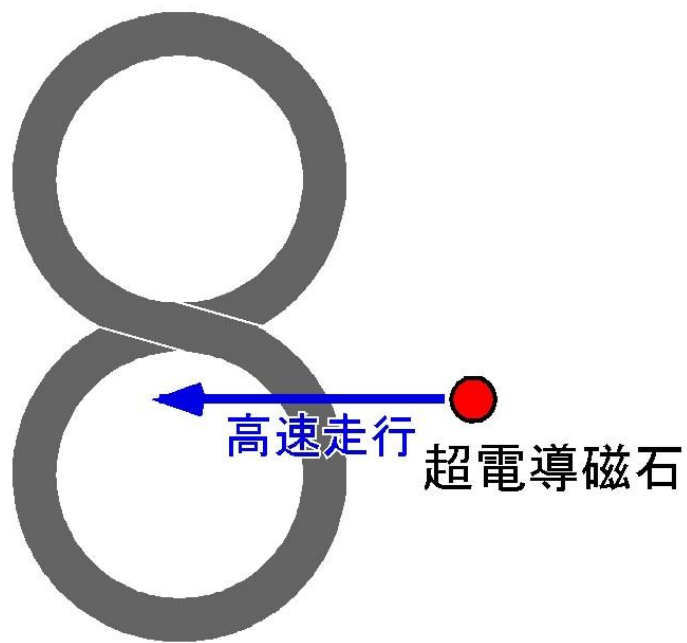
下のコイルに電流を流すと
上のコイルには磁場を打ち消す
向きの電流が流れる。つまり
逆方向の磁場が発生し、
反発力のために浮上が起こる。



超電導リニアの 浮上原理



8の字型金属コイル



おわりに

超電導は1911年に発表された現象。先端科学と呼ばれるものとしては非常に長い歴史を持つ。

思うように大電流が流せず、材料になるまでに約50年かかった。

量子化磁束の動きを止めるピン止めが実現されて、高電流密度の超電導材料が現われた。(ナノスケールの“きたなさ”を導入)

超電導臨界温度(T_c)は、高温超電導体の発見以後、液体窒素温度(77 K)を超え、最高は138 Kで室温までの半分に達している。

- 液体窒素冷却での超電導応用が可能になり、送電ケーブルの実用が始まっている。日本では先週の月曜日にスタート！
- 液体窒素を用いた展示により、多くの方々が超電導を体験できるようになった。

超電導物質の発見、超電導材料の開発、冷却技術開発は日本が世界を牽引！

2011年度 科学技術週間 一家に1枚シリーズ (文部科学省)

低温工学・超電導学会が監修

一家に1枚 磁場と超伝導 MAGNETIC FIELD & SUPERCONDUCTIVITY

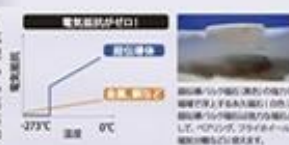
磁場って何?

温度や湿度や圧力などと違い、磁場は感じる事ができません。しかし、磁場は、コンパイルの針を動かしたり、砂鉄を集めたりといった、不思議な力を持っています。また、その強さは、中性子星の巨大な磁場から人体が発する非常に弱い磁場まで、20桁以上という非常に広い範囲にわたっています。じつは、この見えない磁場に人間も社会も変えられているのです。



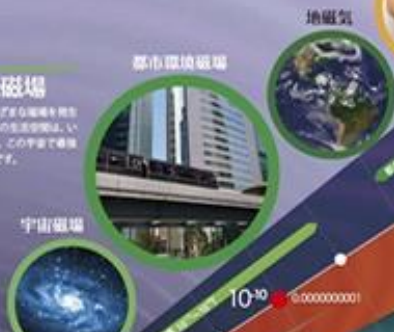
超伝導って何?

今からちょうど100年前の1911年に、オランダのオンネスは、水銀の電気抵抗が-269℃以下でゼロになる「超伝導現象」を見つけました。この現象を生じるものを超伝導体といい、電流を流しても発熱せず省エネルギーです。また、高密度の電流を流せるので強力な電磁石になります。液体窒素(-196℃)の冷却で使える高温超伝導体も発見され、その実用化も進んでいます。



環境に広がるさまざまな磁場

地球も、太陽も、銀河も、自然にあるものばかりではありません。また、人工的な磁場も発生し、私たちの生活空間に、いろいろなものが発生する磁場におおわれています。この宇宙で最大の磁場発生しているのは中性子星で、約1億倍です。



磁場の極限を遡る

光ポンピング原子磁気センサー
最も弱い磁場を測ることができると言われています。

超伝導量子干渉素子(SQUID)は高感度の磁気センサーで、磁場を極小単位の単位で測ります。磁場素子は磁場の最小単位で、 $2 \times 10^{-16} \text{ T}$ [ウェーバー/1m²]です。脳や心臓などは、非常に弱い磁場を出していますが、このセンサーを用いれば、真実の磁場や、それが生じている場所などを知ることができます。

わずかな磁場をとらえるSQUID磁気センサー

SQUID(超伝導量子干渉素子)は高感度の磁気センサーで、磁場を極小単位の単位で測ります。磁場素子は磁場の最小単位で、 $2 \times 10^{-16} \text{ T}$ [ウェーバー/1m²]です。脳や心臓などは、非常に弱い磁場を出していますが、このセンサーを用いれば、真実の磁場や、それが生じている場所などを知ることができます。

電磁石は技術の要

鉄線などをコイルにして電流を流すと、電磁石になります。モーターをはじめいろいろな工業製品に使われています。超強力磁石は強い磁場を長い時間発生でき、最高磁場は45Tです。また、165Aを超えると冷却時に発生する強い磁場を発生し100Tに達するほか、磁場の強い空間を確保によって記録する方法では2500Tを発生します。

超強力磁石



暮らしを支える永久磁石

フライト磁石、アルニコ磁石、ネオジム磁石など、ネオジムが最も強く、最高1.4T。用途はさまざまで、磁気カードは永久磁石で情報を記録し、スピーカーは永久磁石とコイルで電気信号を変換。モーターにも永久磁石や電磁石が使われ、ハイブリッド車のモーターにはネオジムなどのレアース磁石が使われます。

1.4T 40T モーター



スピーカー



教材用磁石



磁気カード

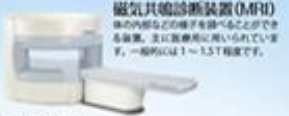


磁場が支える私たちの世界

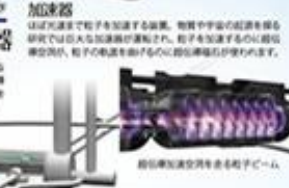
超伝導が切り拓く未来

超伝導磁石が創りだす先端機器

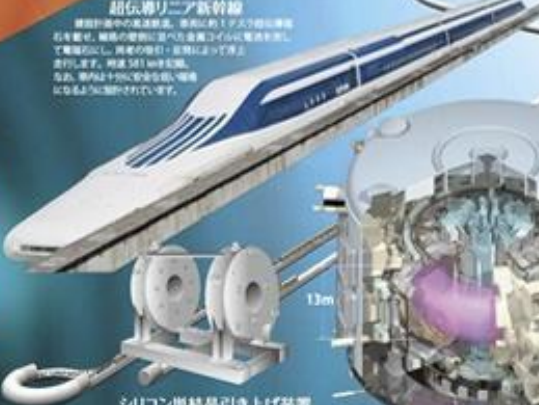
超伝導体からできた超伝導コイルに電流を流すと、非常に強力な磁石になり、強い磁場を発生させられます。また、コイルの電流を制御することで、電流が流れる方向や強さを自由に調整できます。その他、電流を流さなくても磁場を発生させる超伝導体も開発されています。



磁気共鳴診断装置(MRI)
体内の臓器の様子を撮ることが出来る装置。主に医療用に使われています。一般的に0.1~1.5T程度です。



加速器
粒子を加速する装置。物質や宇宙の起源を解明するために大きな加速器が建設され、粒子を加速するのにも超伝導コイルが、粒子の軌道を曲げるのに超伝導磁石が使われます。



超伝導リニア新幹線

超伝導リニア新幹線
超伝導コイルに電流を流すと、非常に強力な磁石になり、強い磁場を発生させられます。また、コイルの電流を制御することで、電流が流れる方向や強さを自由に調整できます。その他、電流を流さなくても磁場を発生させる超伝導体も開発されています。

核磁気共鳴(NMR)

核磁気共鳴(NMR)
物質の構造や状態を調べる装置で、タンパク質の構造などを明らかにします。最新の装置では23.5Tを発生(伝真は21.0T)の装置。



核融合

核融合
核融合炉は超伝導コイルに電流を流すと、非常に強力な磁石になり、強い磁場を発生させられます。また、コイルの電流を制御することで、電流が流れる方向や強さを自由に調整できます。その他、電流を流さなくても磁場を発生させる超伝導体も開発されています。



シリコン単結晶引き上げ装置

シリコン単結晶引き上げ装置
シリコン単結晶引き上げ装置は、シリコン単結晶を成長させるために超伝導磁石に電流を流して磁場を発生させます。

拙著もあります(ご参考)

漢文版



2003年



2007年

ご清聴、ありがとうございました。