

最新物理・数理講義

DEPARTMENT OF PHYSICS AND MATHEMATICS
物理・数理学科

超伝導とは何だろう

— 期待される21世紀の新技術 —

青山学院大学工学部物理・数理
学科 教授

秋光 純

超伝導とはなんだろう

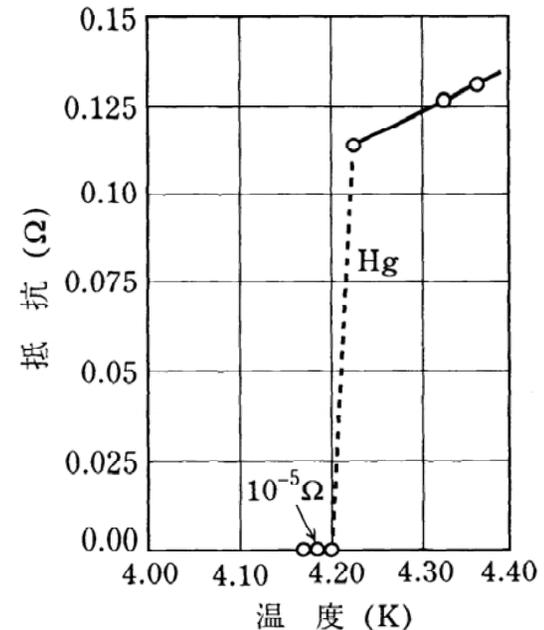
① 電気抵抗 = 0 (E=0)

永久電流の存在

$10^5 \text{ year} \sim 10^{10} \text{ year}$



1911年オランダの物理学者
Heike Kamerlingh-Onnes
は水銀が4.2Kで超伝導を
示すことを発見。

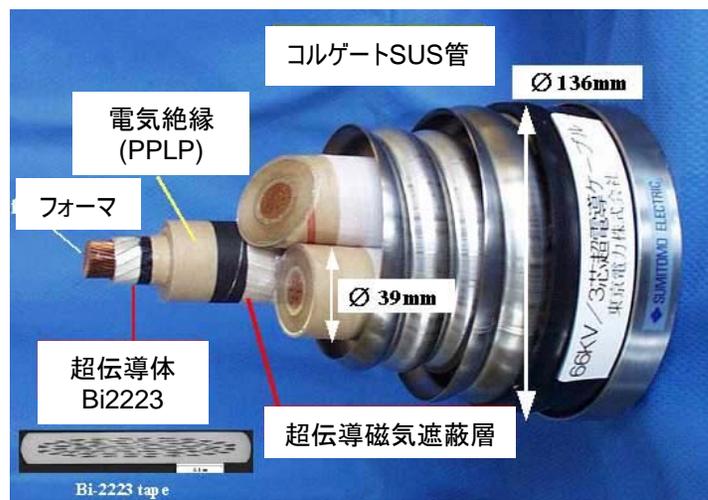


水銀の電気抵抗



超伝導の応用例 (電気抵抗=0)

- ◆ 超伝導磁石
- ◆ 超伝導送電
- ◆ 超伝導電力貯蔵

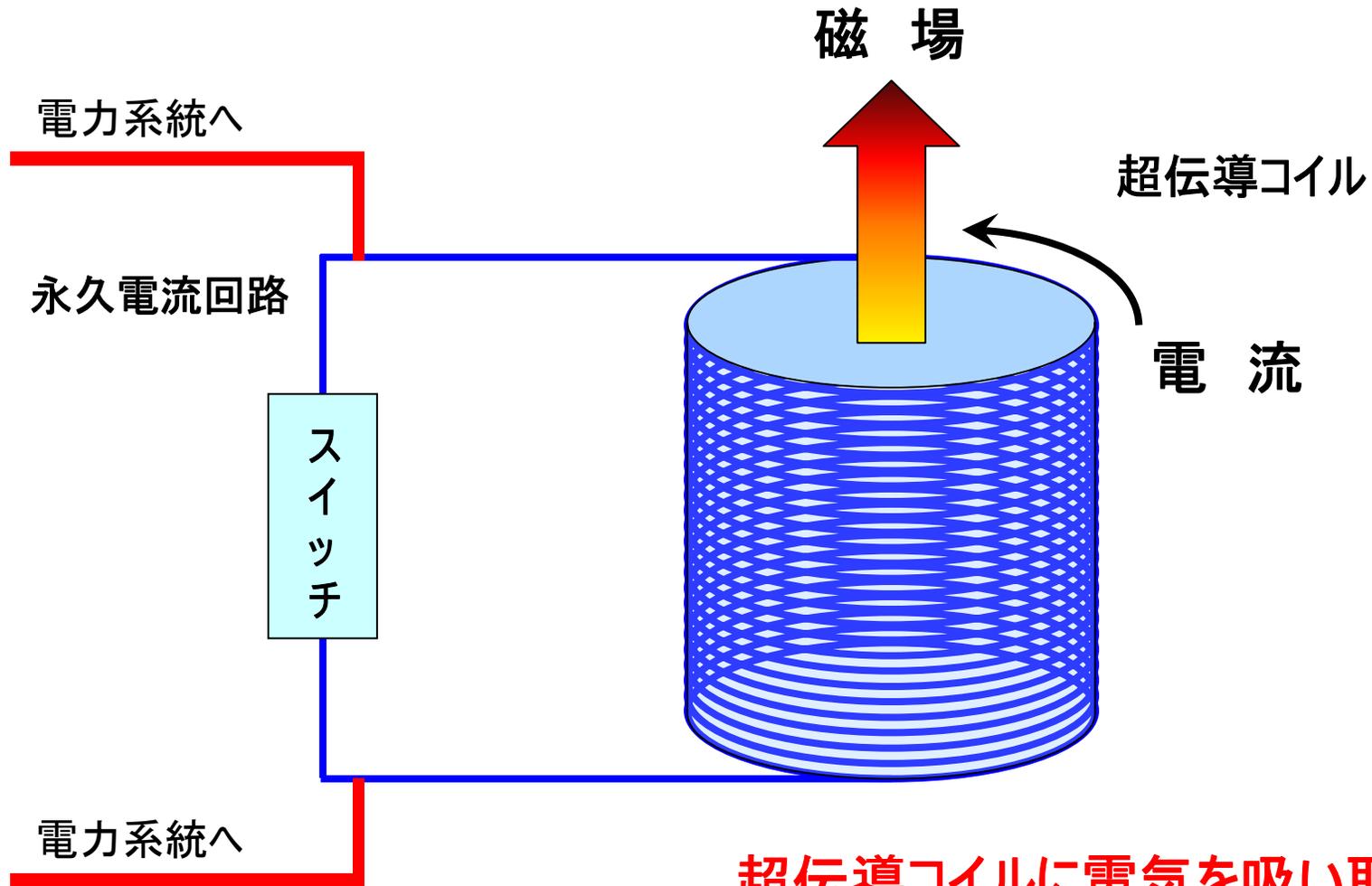


超伝導送電ケーブル



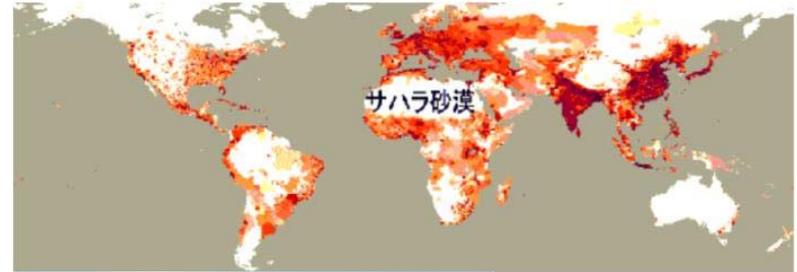
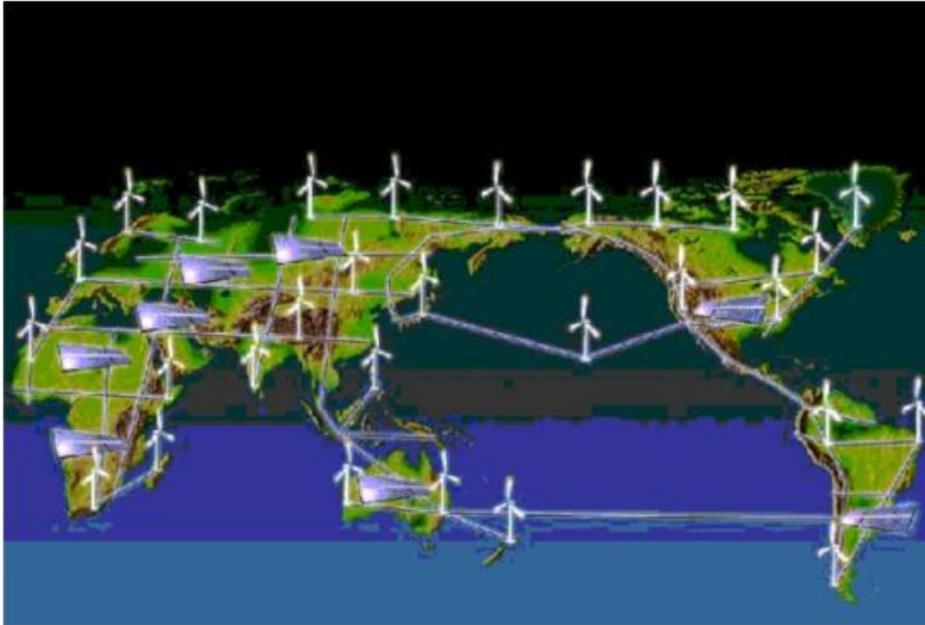
超伝導マグネット

超伝導電力貯蔵



超伝導コイルに電気を吸い取り、
永久電流状態で蓄える。

世界規模の超伝導送電



高温超伝導ケーブルを地下に埋め、地球のあちこちをつないでいきます。そして、風力発電や太陽電池の発電所をサハラ砂漠やシベリア、海岸近くの浅い海などに作っていきます。いずれは自然エネルギーで世界のエネルギーのすべてをまかさないです。これを可能にするのが「**超伝導地球電力ネットワーク**」です。

<雑誌「ニュートン」2001年1月号より>

超伝導の特徴

② マイスナー効果 (完全反磁性)

超伝導体内部には
磁束は存在しない

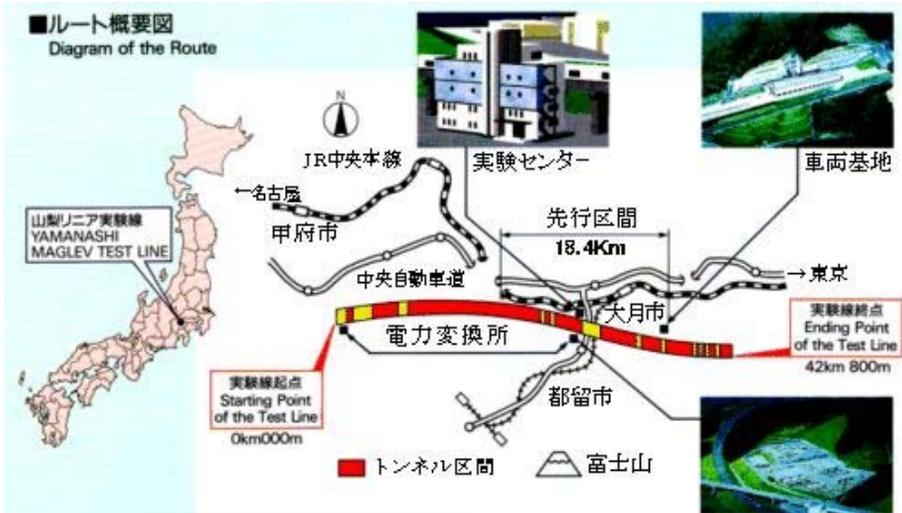
$$(\mathbf{B} = 0)$$

実験の様子



1933年に W. Meissner と R. Ochsenfeld によって
完全反磁性が確認された。

超伝導の応用(磁気浮上)

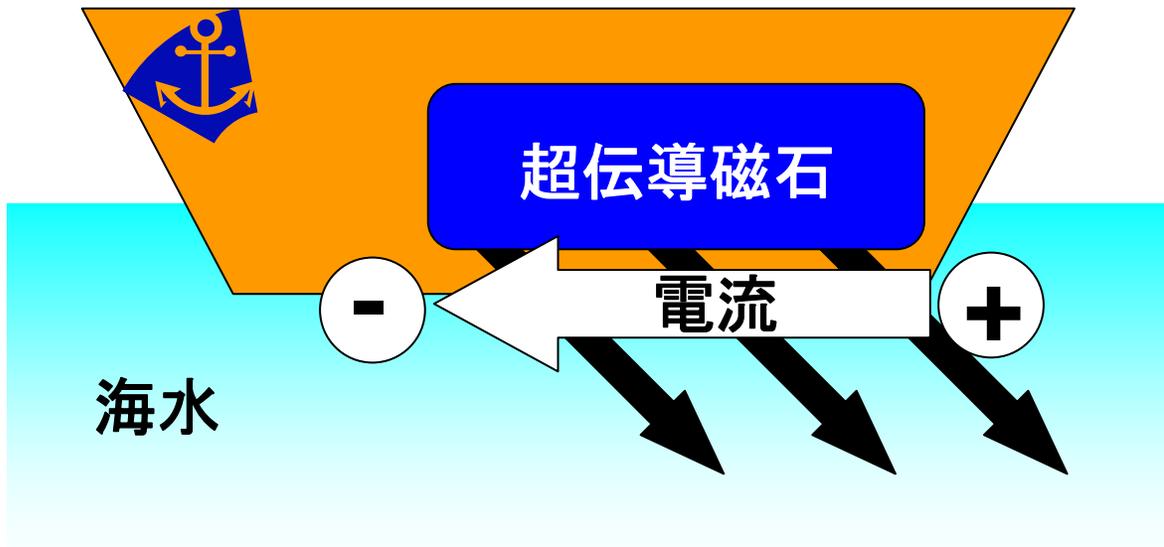


リニアモーターカー
時速581kmを達成!

2003年12月2日

超伝導電磁推進船

電流と垂直の向きに推進力が加わる。



磁場が強ければ強いほど、より多くの電流が流れ、速くすすむ。



超伝導電磁推進船「やまと」
@神戸ポートアイランド

超伝導の特徴

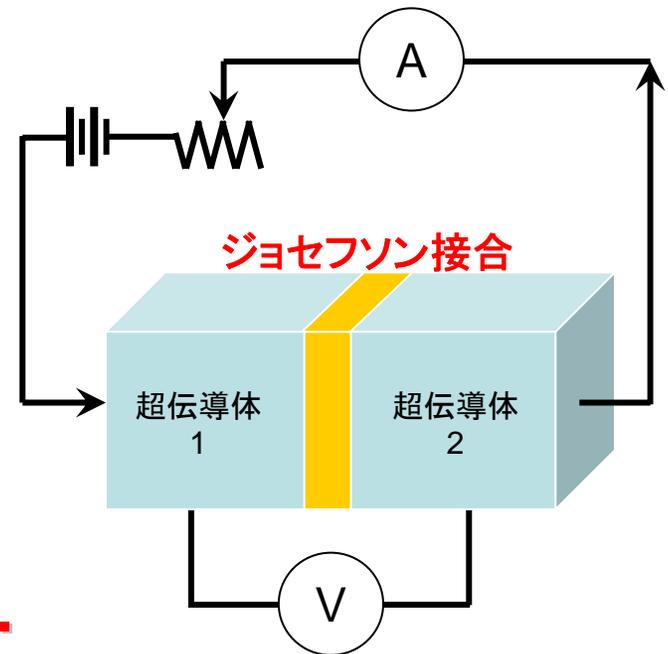
③ ジョセフソン効果

電圧をかけなくても、薄い障壁で隔てられた二つの超伝導体の間で超伝導電子が飛び移る。

➡ 巨視的に量子力学が実現。

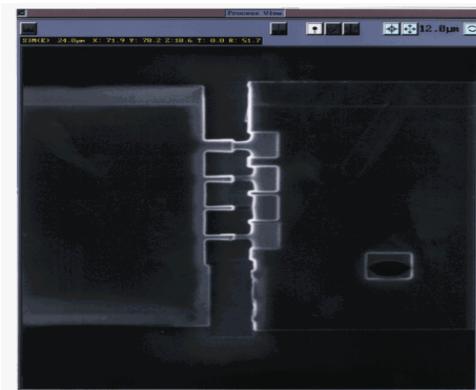


1962年、当時、ケンブリッジ大学の大学院生であった Brian David Josephson は11年後、ノーベル賞を受賞する。



超伝導の応用（ジョセフソン効果）

- ・電圧標準
- ・SQUID:磁場センサ、心磁計、MRI
- ・超高速コンピュータ

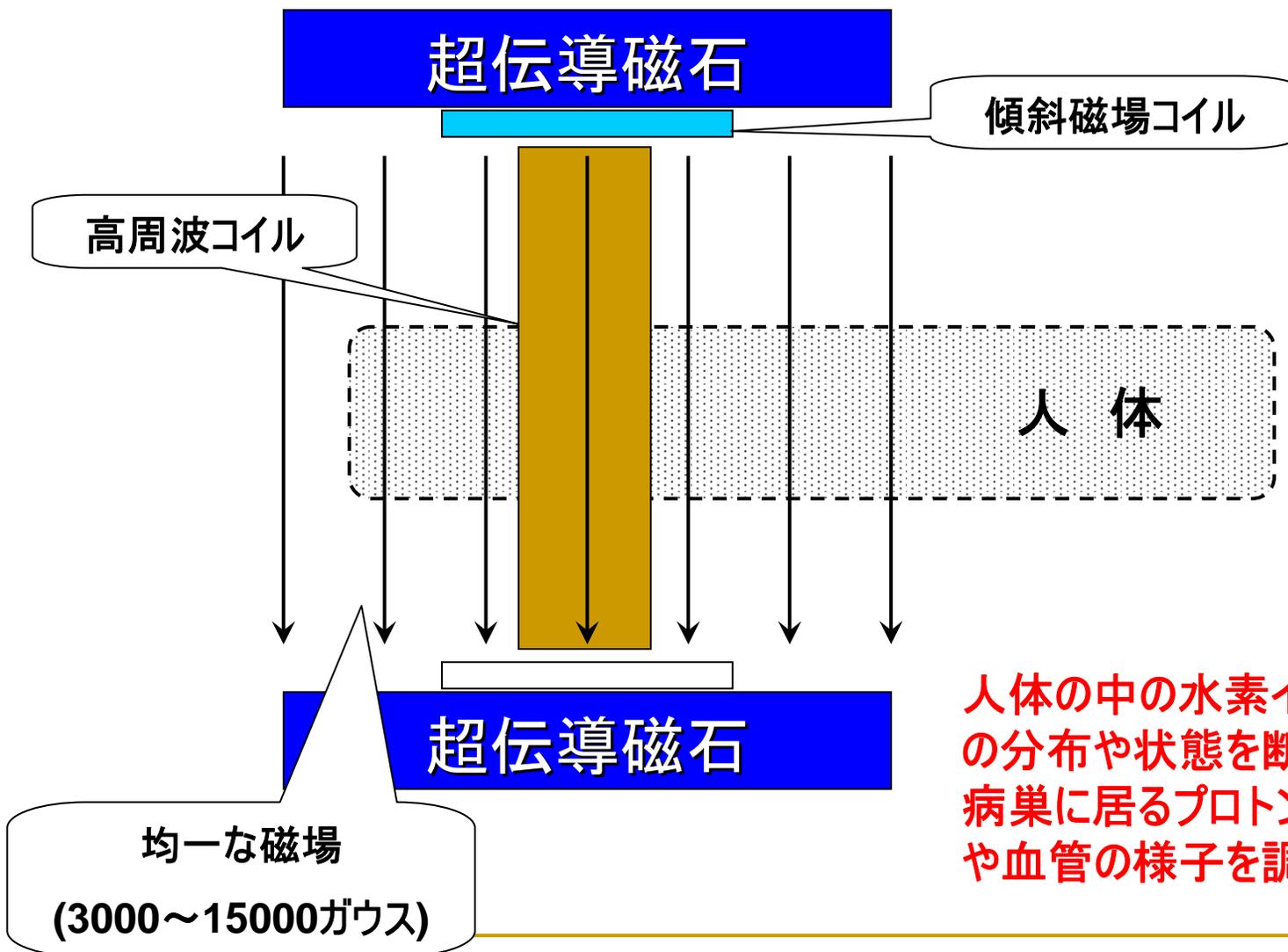


高温超伝導体を用いたジョセフソン素子
(東北大学未来科学技術共同研究センター山下努教授)



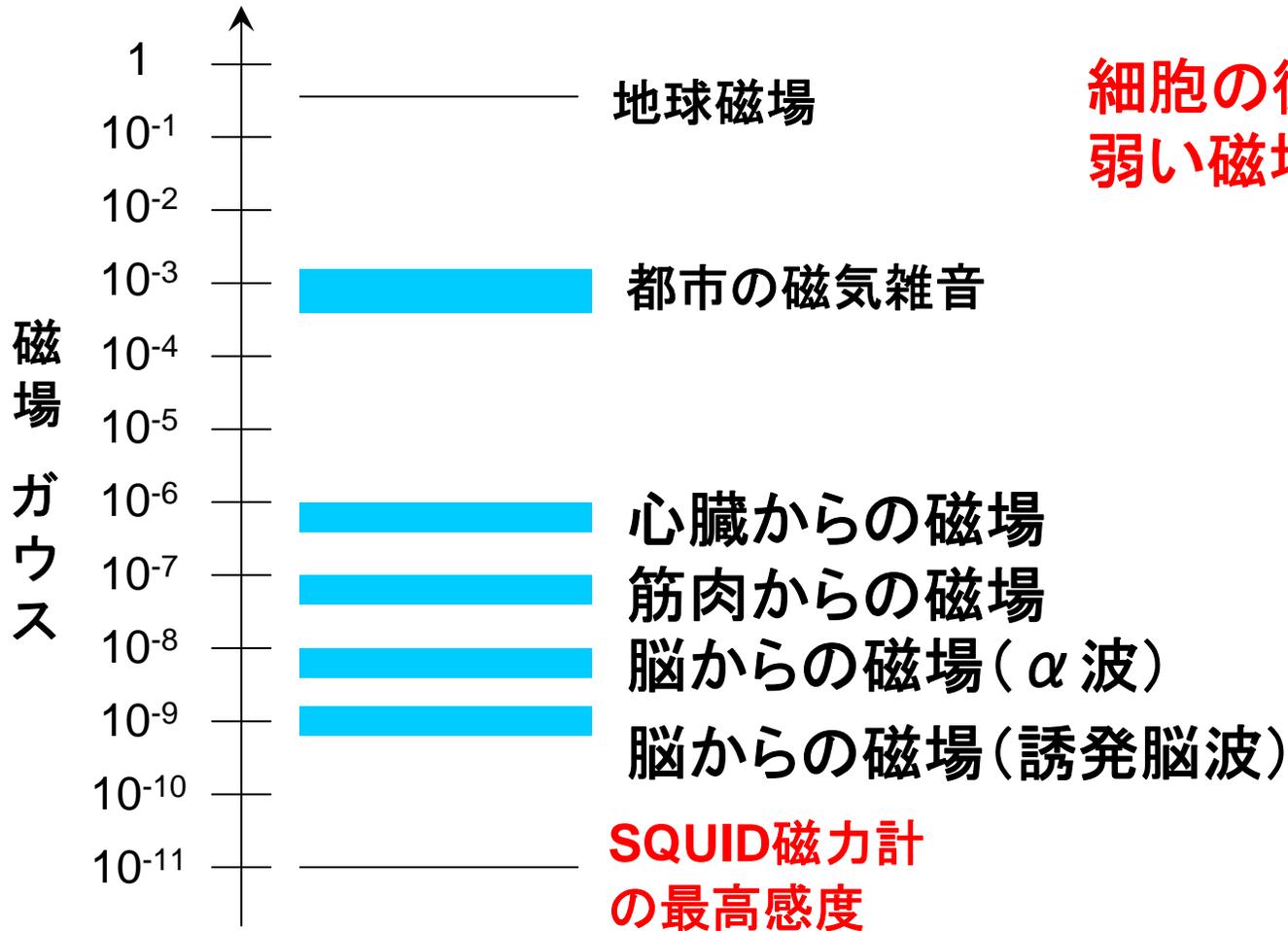
MRI

磁気共鳴診断装置(MRI)の例



人体の中の水素イオン(プロトン)の分布や状態を断層像で調べ、病巣に居るプロトンの異常な挙動や血管の様子を調べる。

脳や心臓からの微弱な磁気を計測



細胞の微弱な電流が作る
弱い磁場を検出

超高速コンピュータ

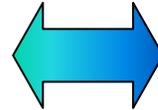
パルス電流

電流

超伝導ループ

“1”

磁束量子



電流

“0”

電流

ジョセフソン接合

電流

超伝導ループ内の磁束量子の有無で“1”、“0”を見分ける単一磁束量子素子



青山学院大学

Aoyama-Gakuin University

超伝導素子の高速性と省エネルギー性

超伝導素子 (SFQ: 単一磁束量子素子)

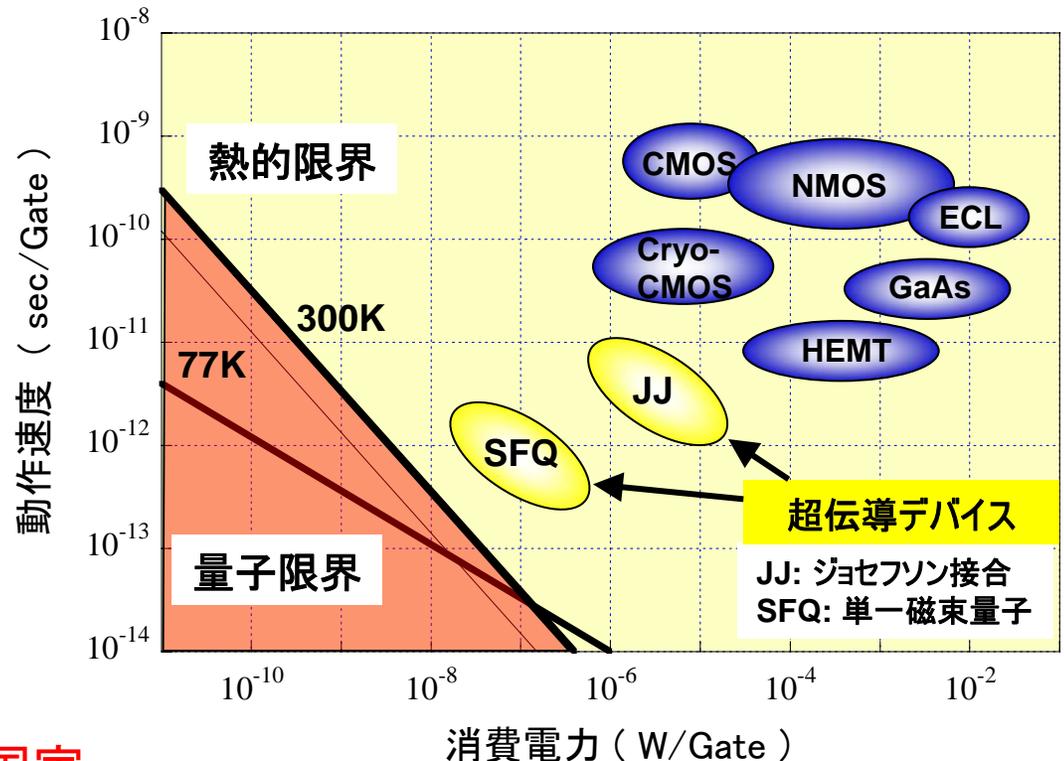
速度: 2桁速い

電力: 3桁の省電力

集積化: 10^5 ゲート (金属系)

10^3 ゲート (酸化物系)

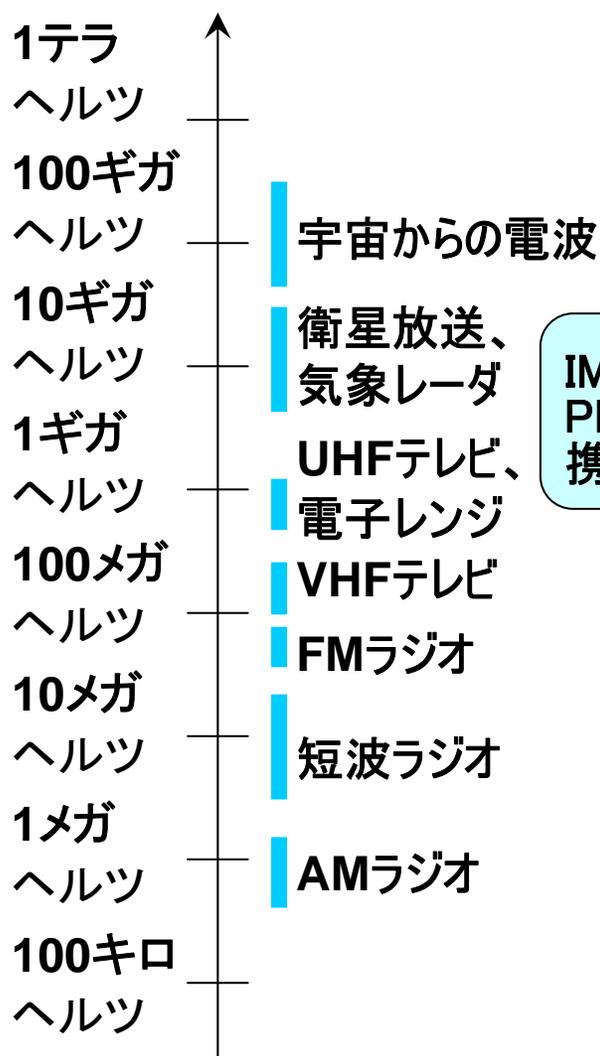
(1999年時点)



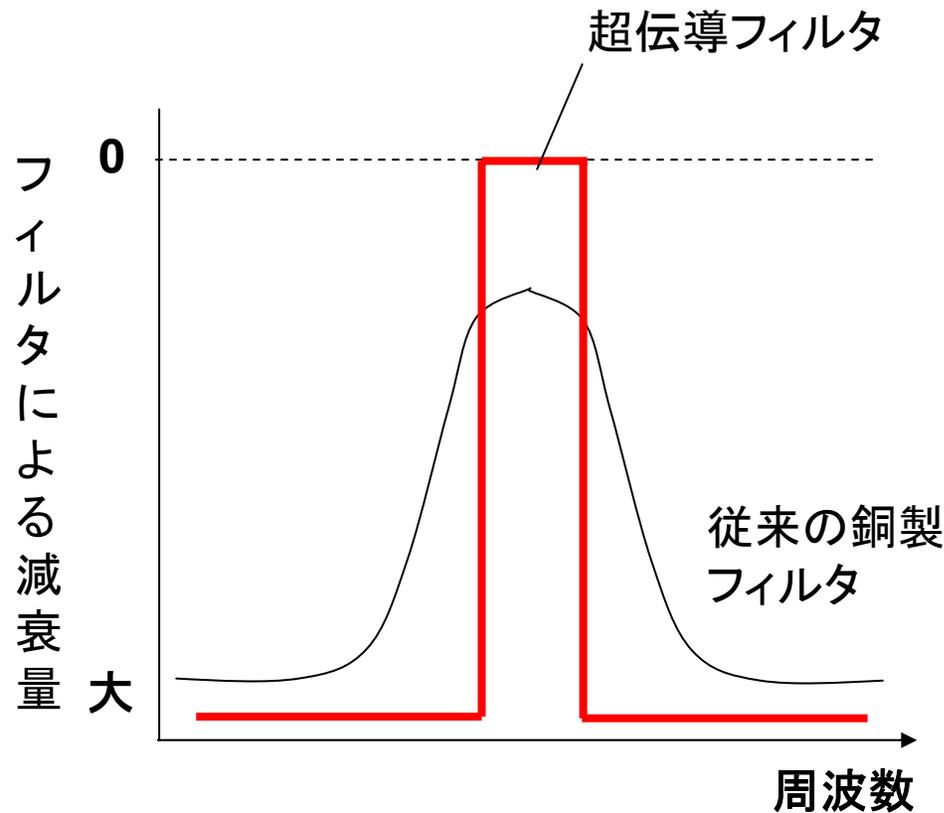
超伝導SFQ集積回路開発の国家プロジェクトが2002年より開始

北澤宏一『超伝導技術の将来展望』より

携帯電話社会を支える超伝導フィルタ



IMT2000
PHS
携帯電話



目的の周波数の電波だけを弱めずに通す。

アメリカでは、1000箇所以上の基地局で使用

広がる超伝導応用の分野

先進医療技術

MRI

心磁図・脳波図測定

磁気シールド

新交通システム

リニアモーターカー

電磁推進船

電気自動車

高度情報社会

超伝導量子干渉素子

超伝導エレクトロニクス素子

機械

モータ

産業用マグネット

磁気ベアリング

先端科学

大型加速器

宇宙科学

高分解能NMR

エネルギー

超伝導電力貯蔵

核融合装置

電流リード

医療・環境

機械

高エネルギー
物理・バイオ

運輸

エレクトロ
ニクス

電力

超伝導技術



青山学院大学

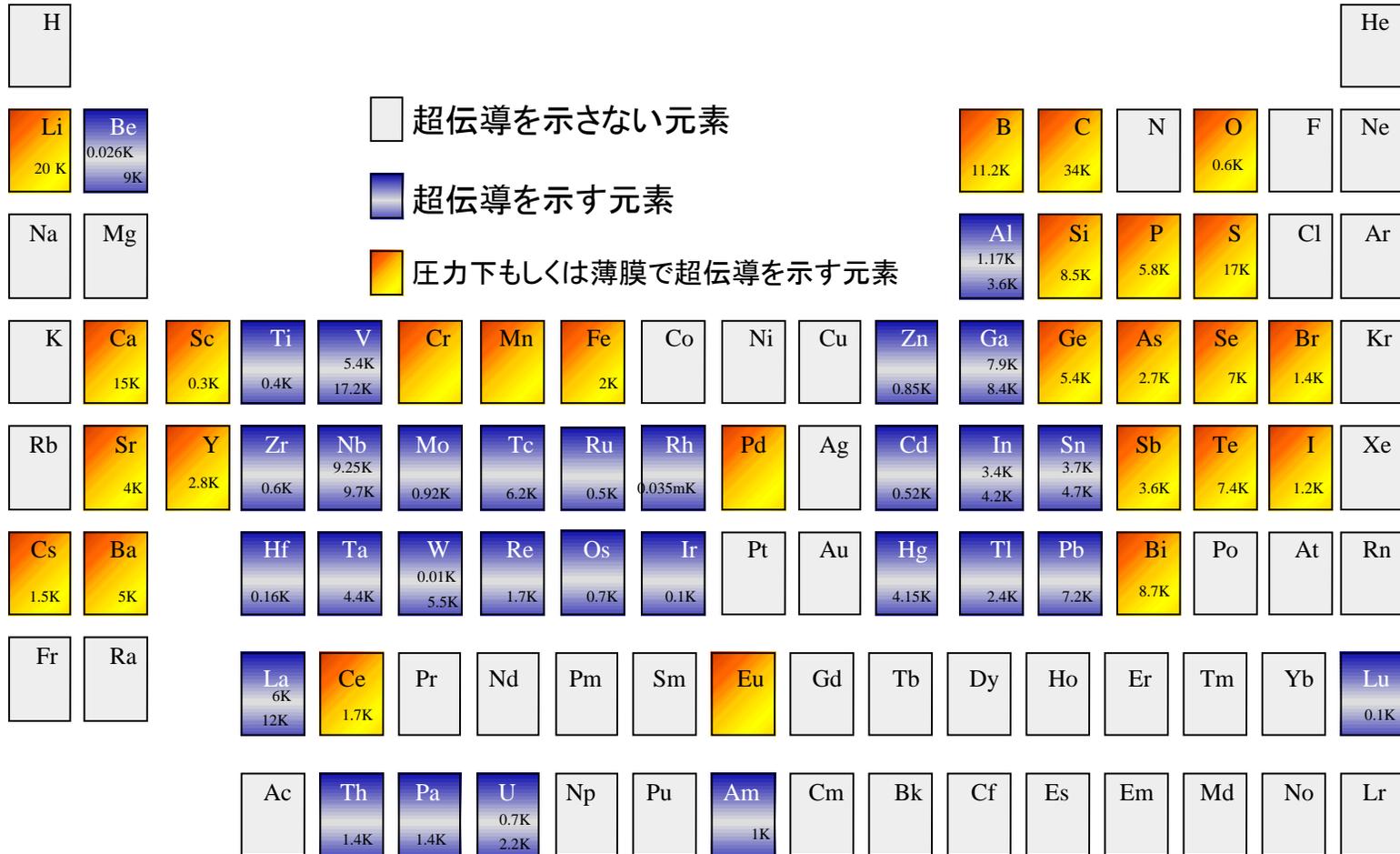
Aoyama-Gakuin University

21世紀は超伝導の時代 -超伝導の応用-

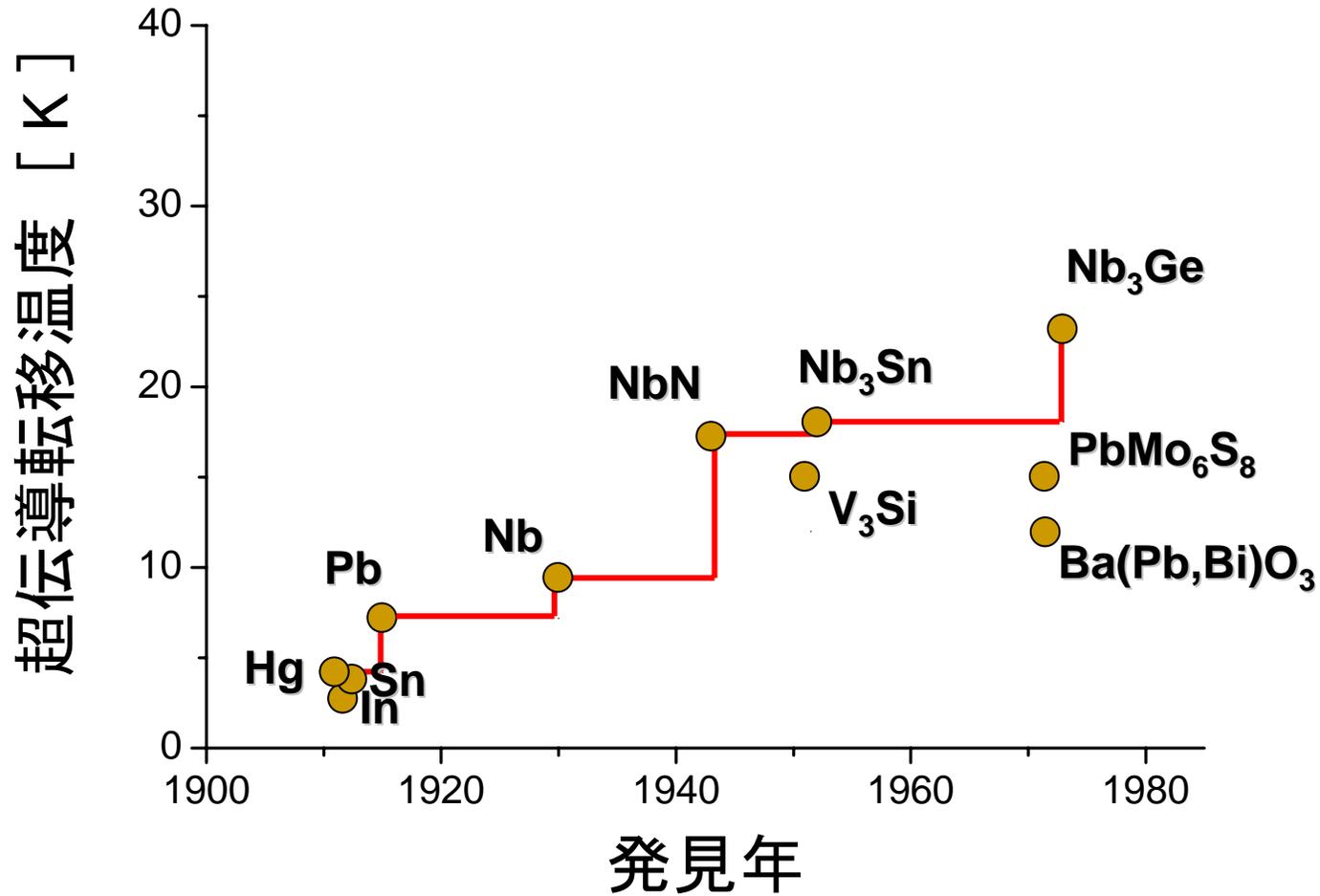
特性	応用分野
完全導電性 電気抵抗=0 低交流損失 永久電流 高臨界磁場	超伝導送電 高周波空洞、交流マグネット、交流送電 超伝導電力貯蔵 超伝導磁石： 核融合、MHD発電、発電機、磁気浮上列車、電磁推進船舶、 磁気選別、磁場中製鉄、医療用NMR、 π 中間子治療、カテーテル案内、 高エネルギー物理(加速器、泡箱)、シンクロトロン放射、分析用NMR、 電子顕微鏡、科学実験用高磁界
完全反磁性	磁気シールド、磁気浮上、ジャイロ、磁気ベアリング、重力測定器
磁束量子化	フラクソデバイス、SQUID
ジョセフソン効果	電圧標準、放射線センサ、電磁波センサ、ミキサ、発信器、 SQUID: 磁場センサ、心磁計、磁気脳波計 スイッチング素子: 超高速コンピュータ
エネルギーギャップ	超伝導体・半導体ハイブリット素子、各種3端子素子、 クイトロン(準粒子注入トンネル素子)、赤外線センサ



どんな元素が超伝導になるのだろうか？



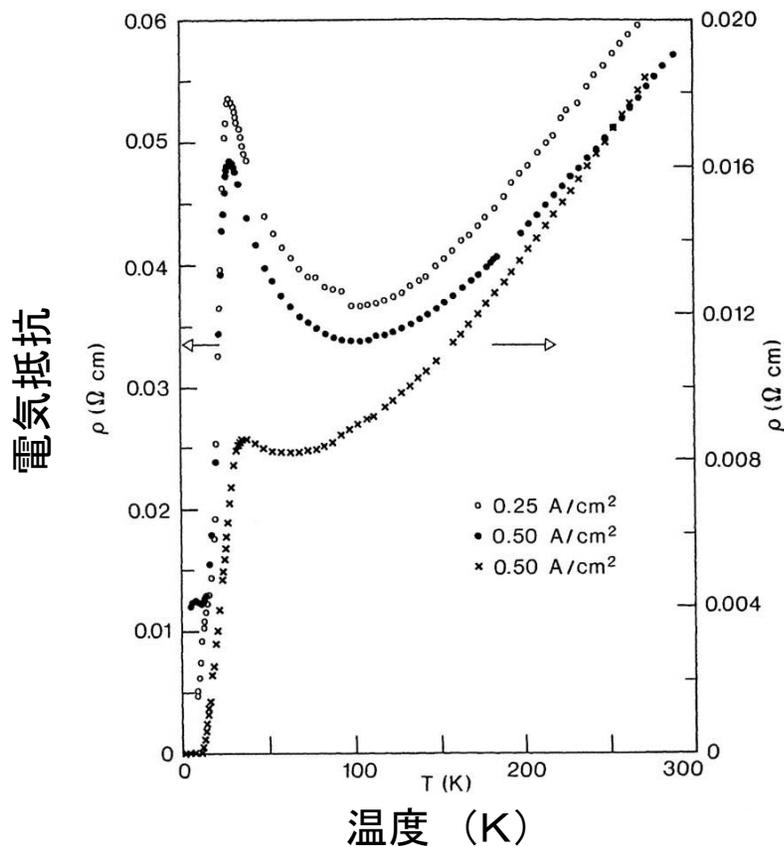
超伝導転移温度の歴史 (1985年以前)



銅酸化物高温超伝導

Serendipity ?

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



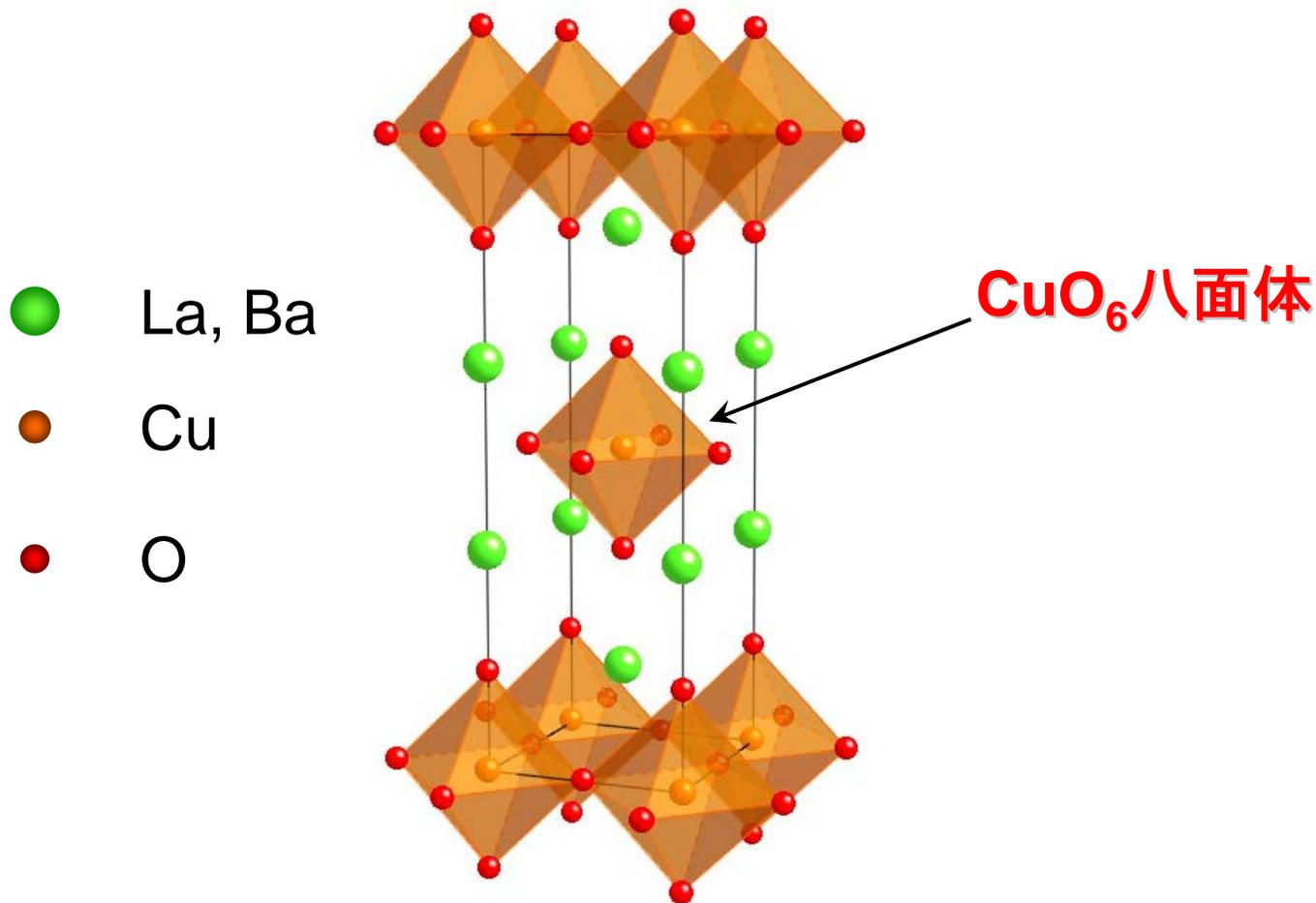
Muller

(1987 ノーベル物理学賞)



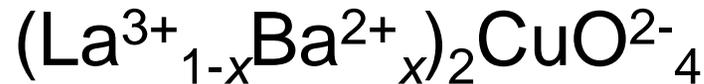
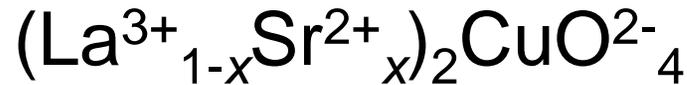
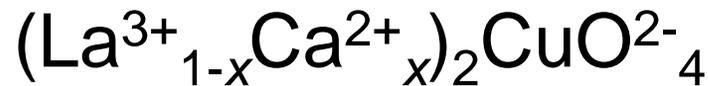
Bednorz

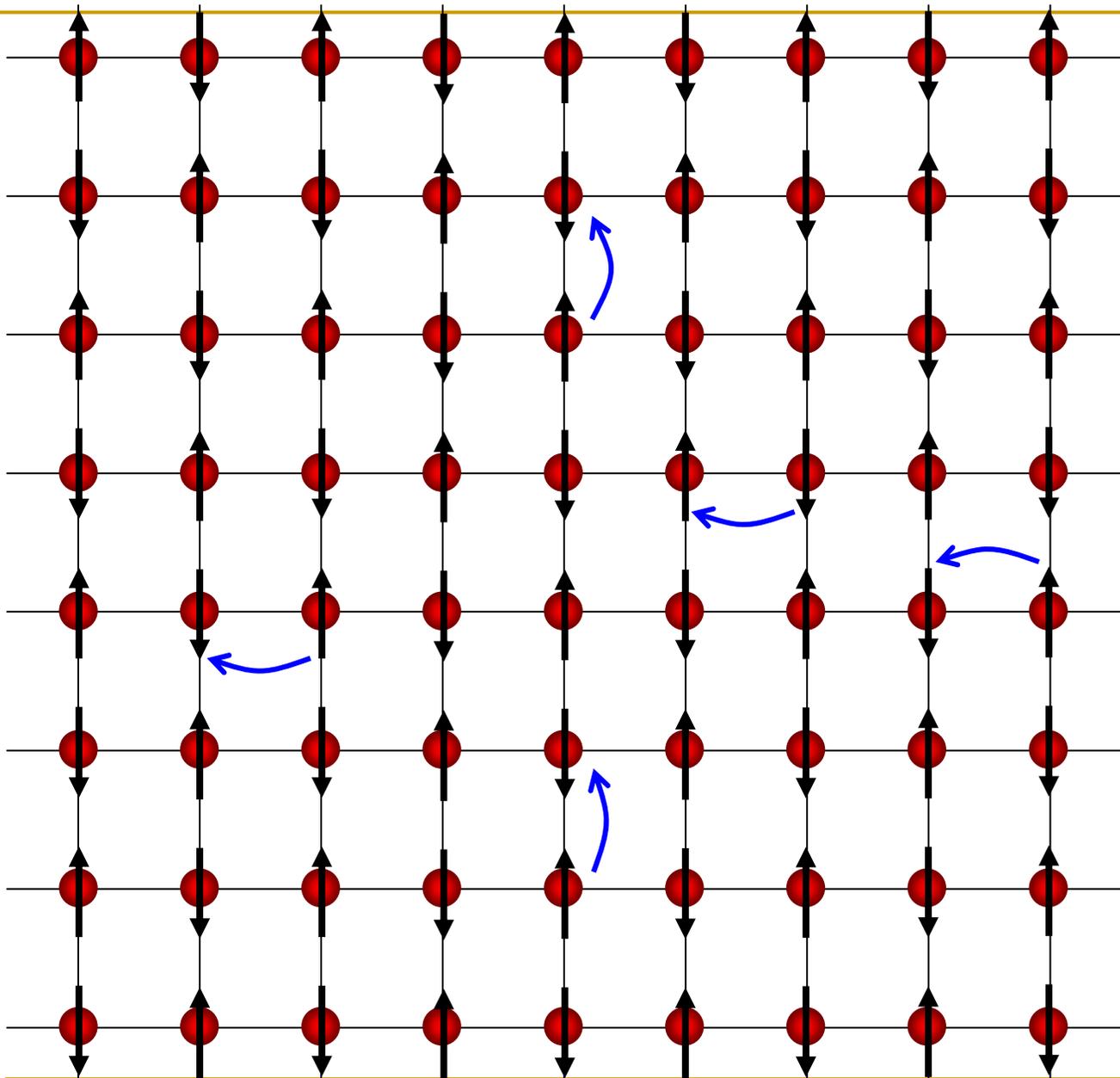
$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ の結晶構造



銅酸化物超伝導体とは？

~簡単にまとめると~





2次元格子にスピ
ンが配列



スピ
ンが部分的に
取り除かれ、ホー
ルが生まれる

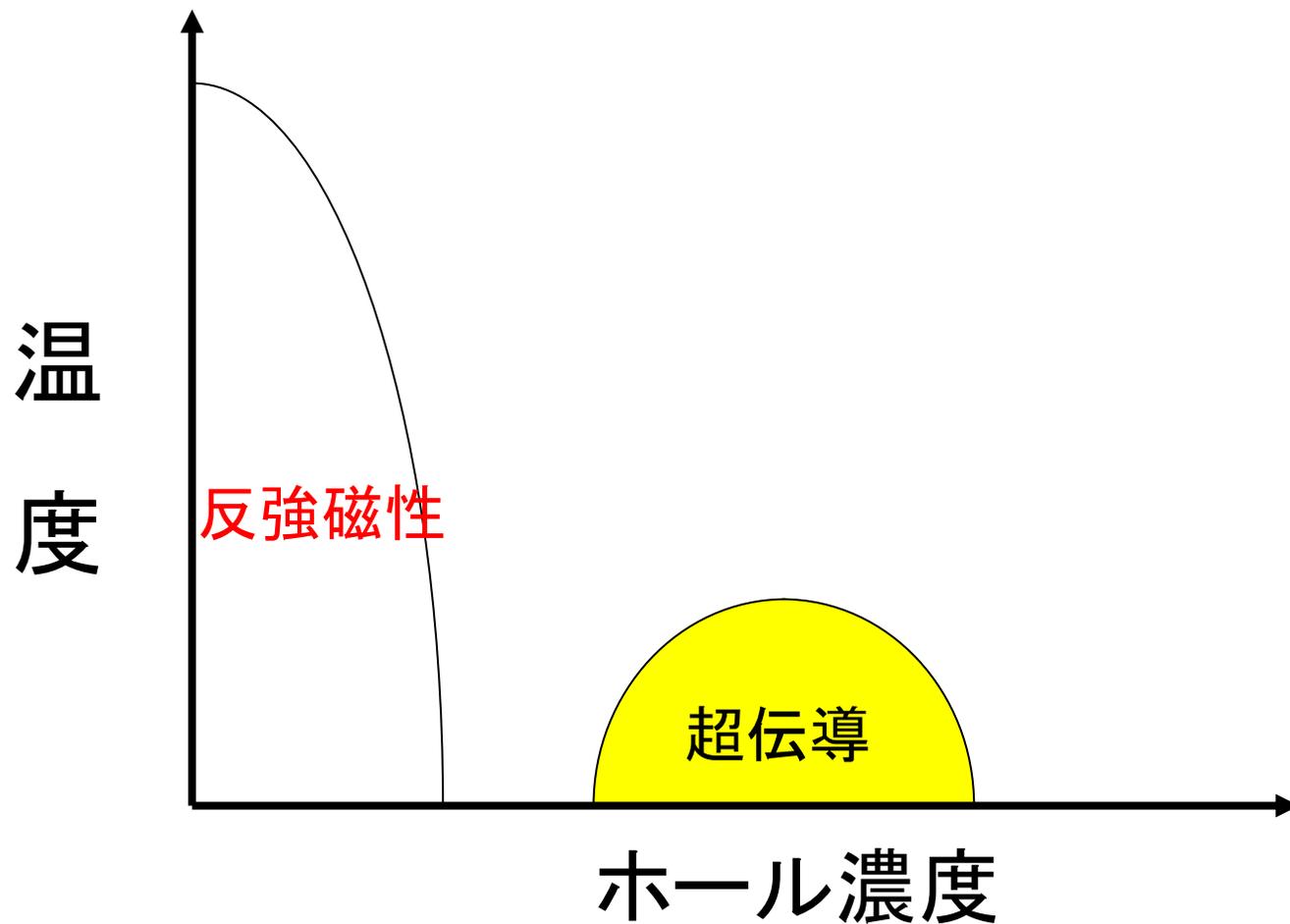


ホールの隣のスピ
ンが移動してくる

ホールが移動して、
電気が流れる

CuO₂ 2次元平面で何が起きているか?

銅酸化物超伝導体の相図



電子には3種類ある

1) 「気まま電子」(バンド電子)

現在の半導体技術の発展はこの電子の性質を利用している。

2) 「とじこもり電子」(局在電子)

他には影響を与えない。

3) 「煩惱電子」(強相関電子)

「煩惱電子」は「気まま電子」ほど、自由に動けない。

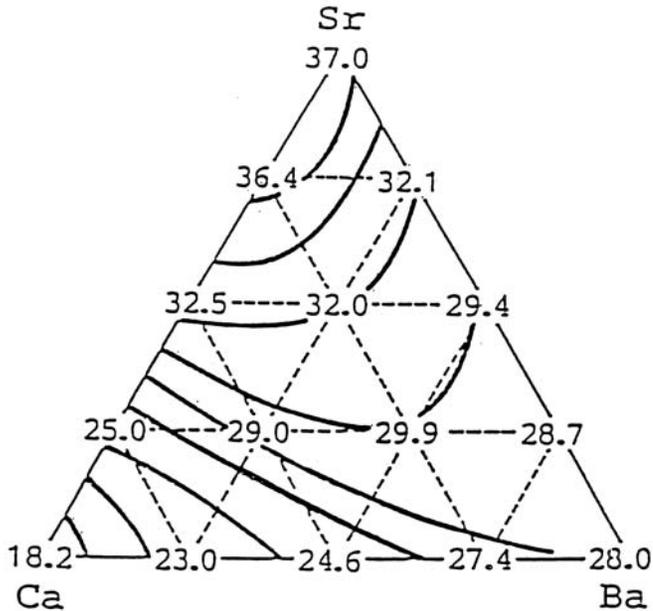
強相関物理学の出現

「**煩惱電子**」は、あるパラメータ
(温度、圧力、磁場、電子の数等)
を変化させることによって
「**金属-絶縁体転移**」を起こす。

「高温超伝導」その他の興味深い現象は、
ほとんど「**金属-絶縁体転移近傍**」
で発現する。

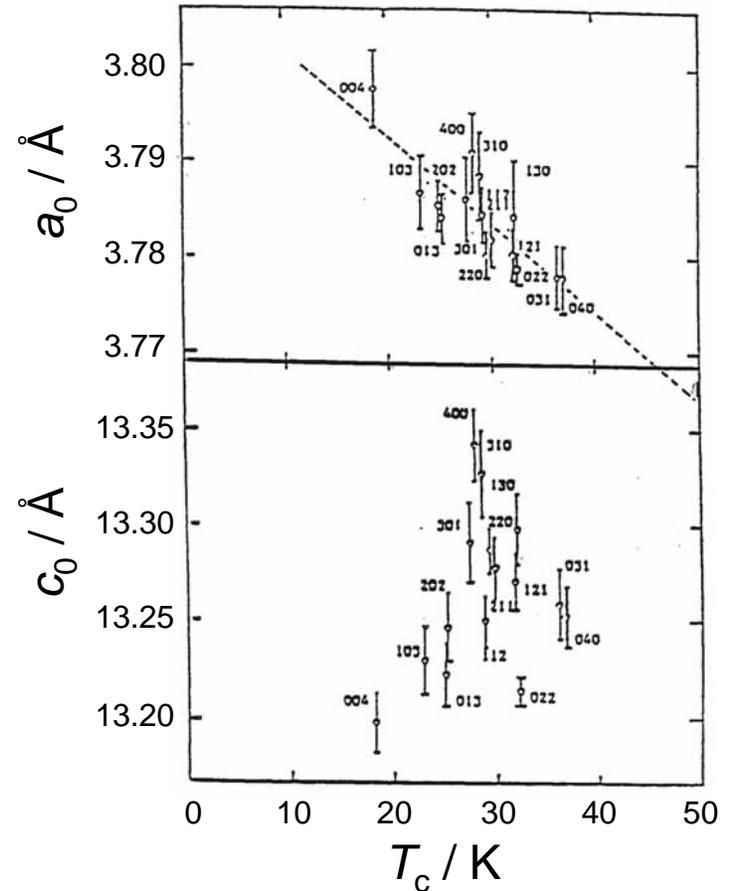


$\text{La}_{2-x}\text{A}_x\text{CuO}_4$ (A: Ca, Sr, Ba)



a 軸が短いほど T_c が高い

La (1.08 Å) → Y (0.91 Å)

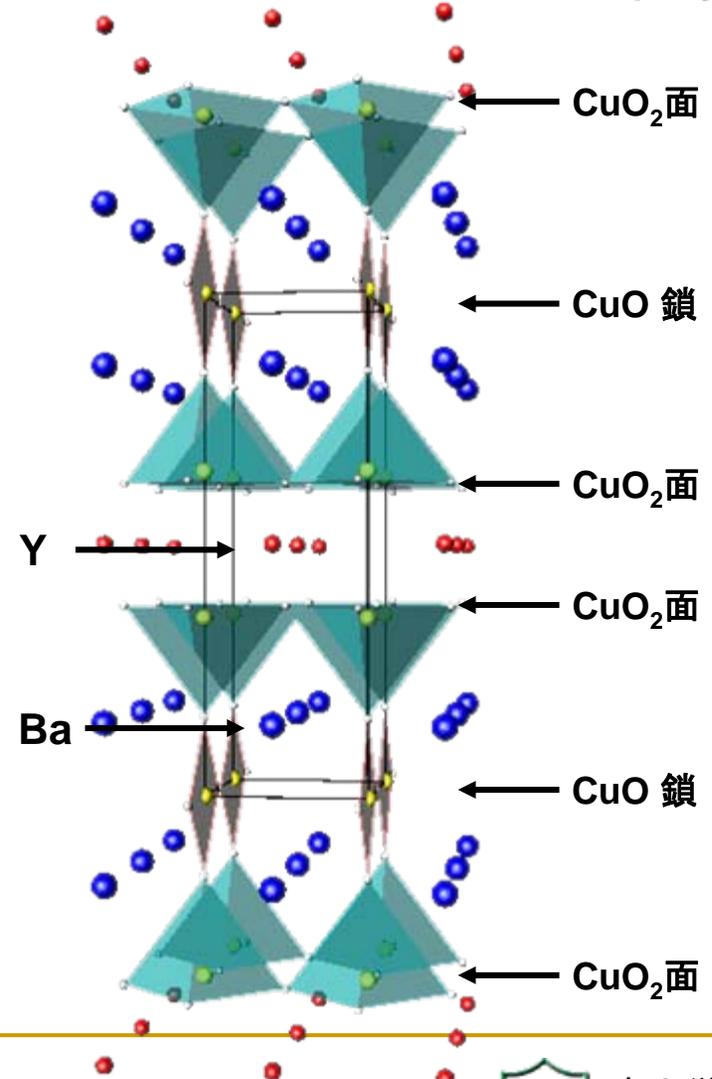
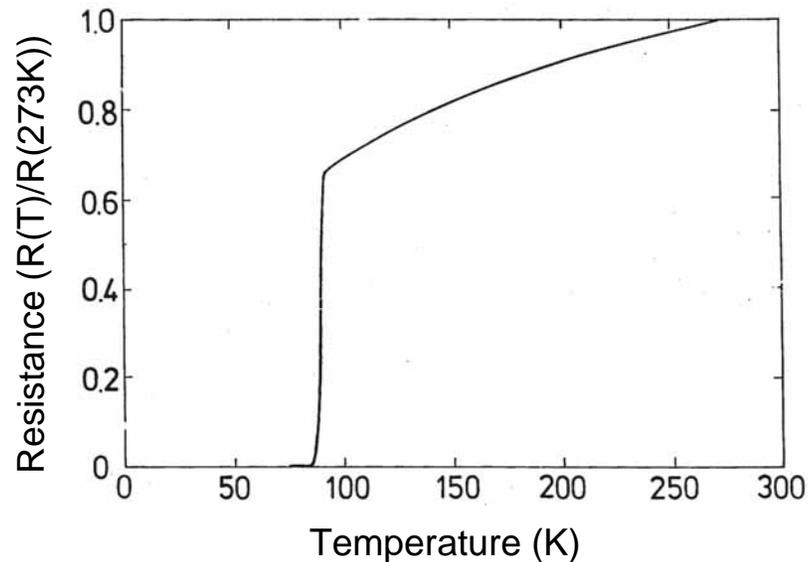


笛木グループによる



新しい超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の結晶構造

Serendipity ?



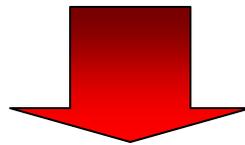
「苦闘の歴史」

次にどうしたらよいだらろう？

Ca²⁺ 1.02 Å

Sr²⁺ 1.18 Å Y³⁺ 0.91 Å

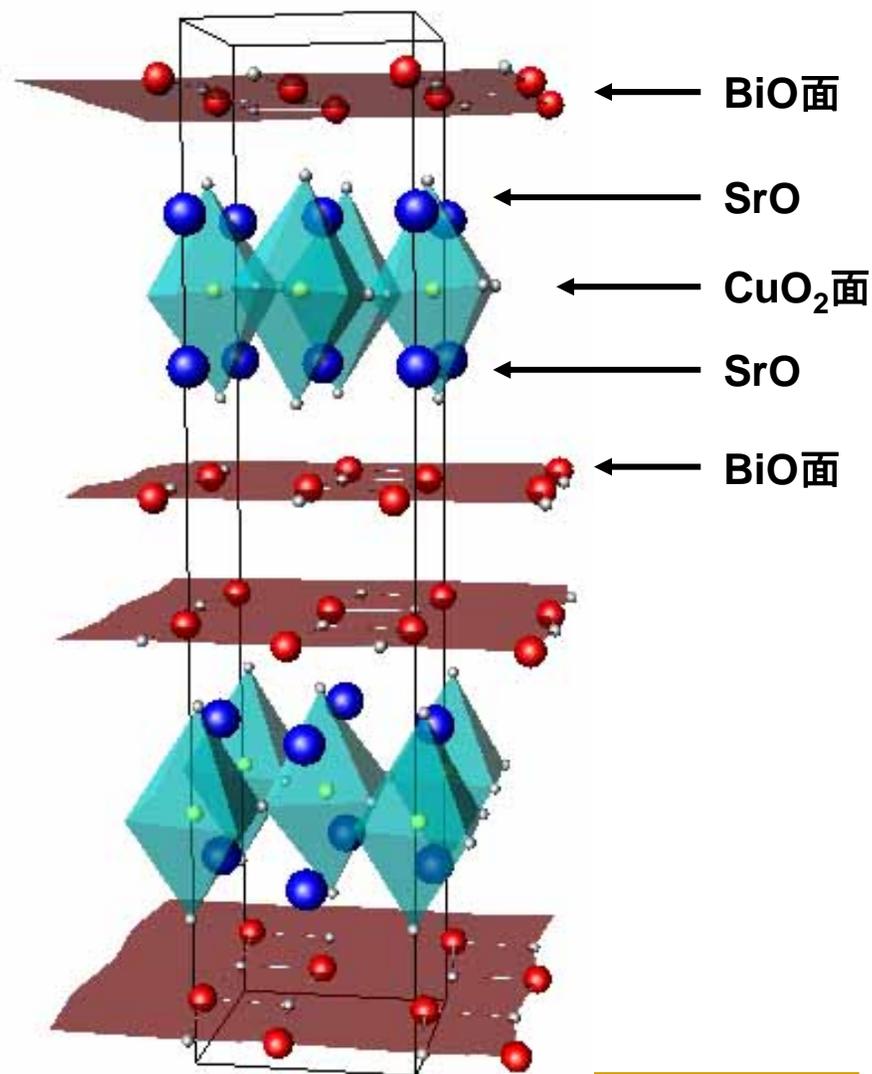
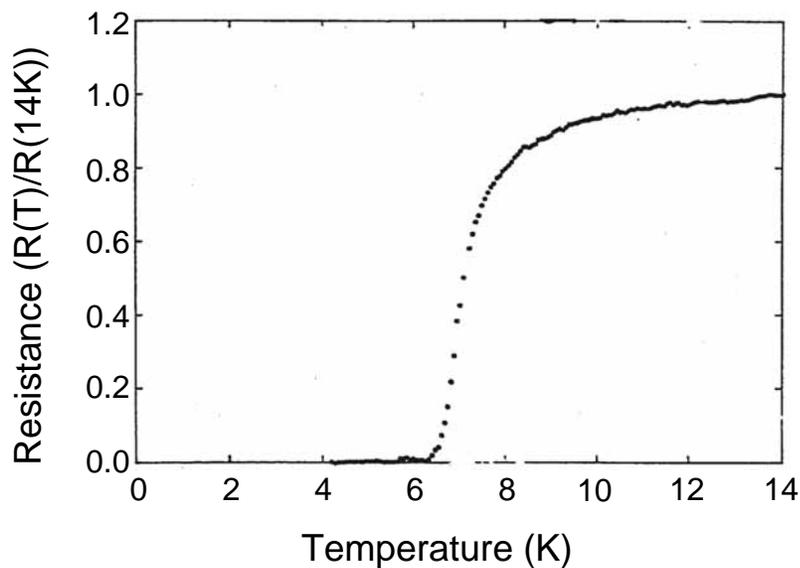
Ba²⁺ 1.38 Å La³⁺ 1.08 Å



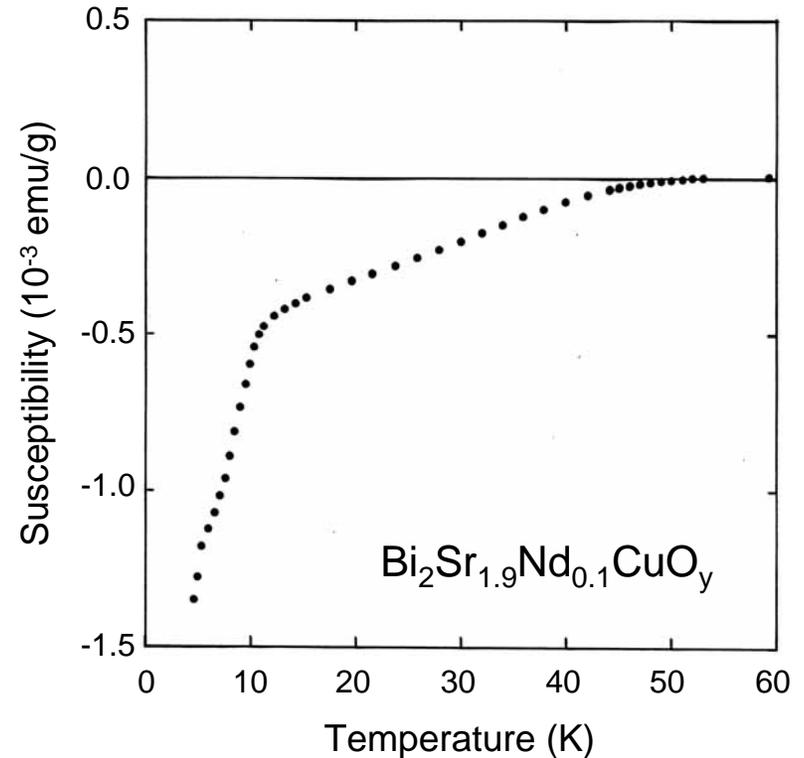
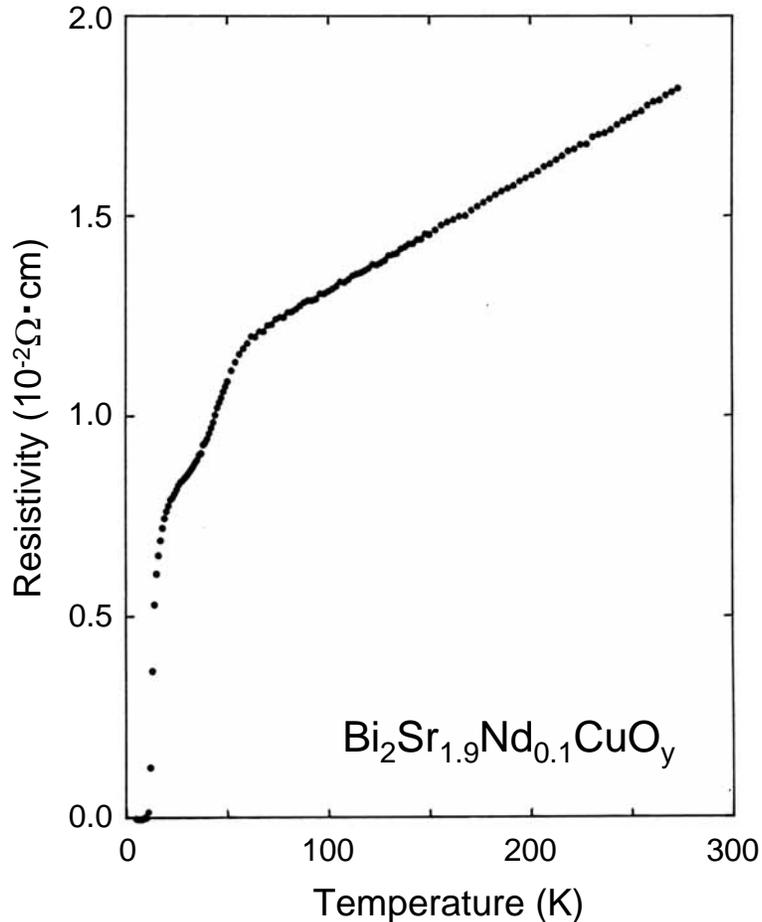
Bi³⁺ 1.04 Å Hg²⁺ 1.04 Å

Tl³⁺ 1.08 Å Cd²⁺ 0.97 Å

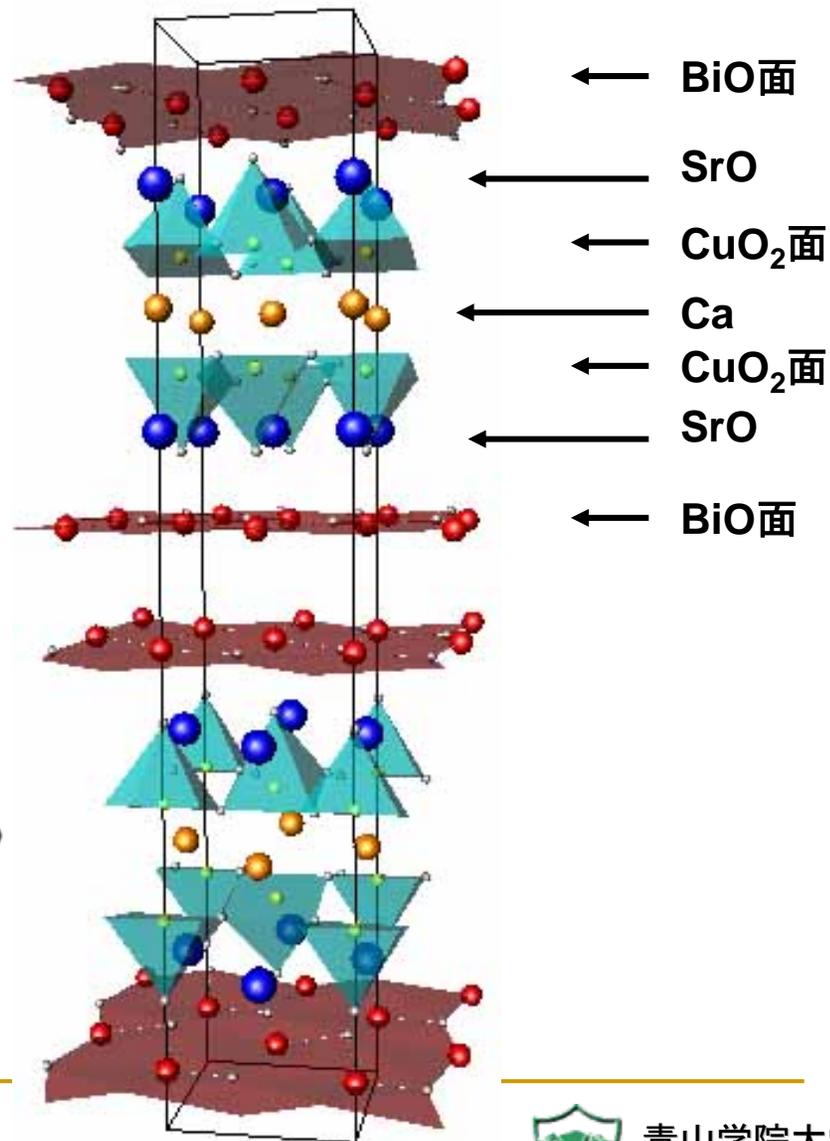
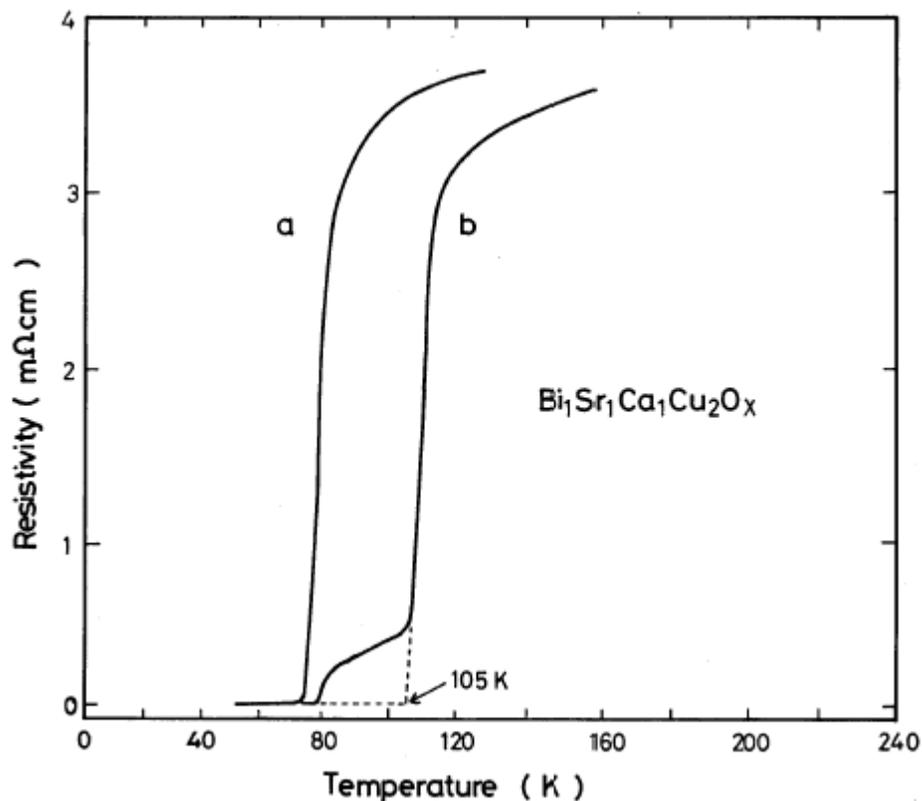
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ の超伝導



より高い転移温度を持つ超伝導の可能性！！



前田氏によるBi-Sr-Ca-Cu-Oの発見

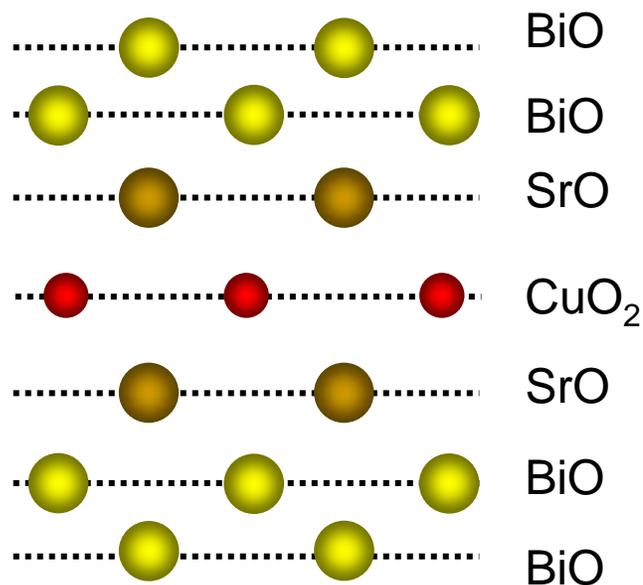


- 周期律表 -

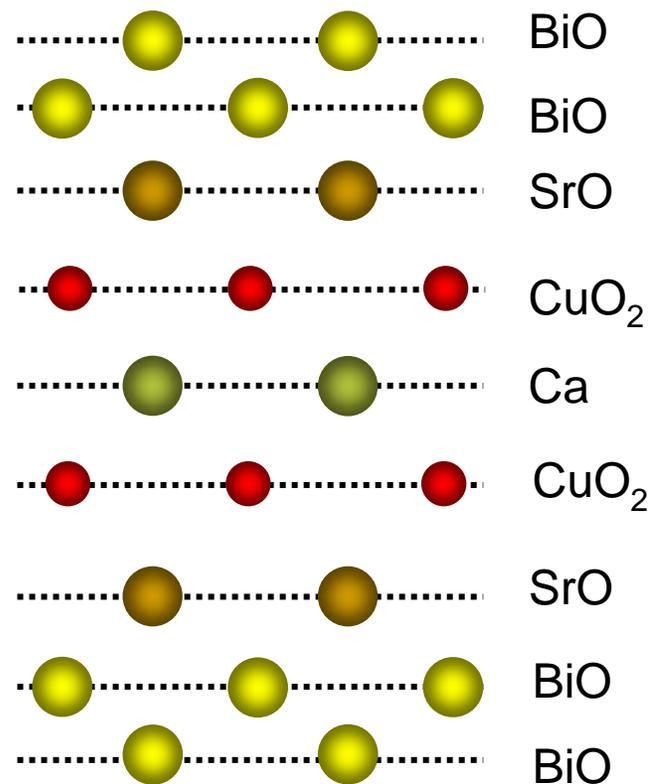
縦の列は、同じような化学的性質をもつ

4
Be ベリリウム
12
Mg マグネシウム
20
Ca カルシウム
38
Sr ストロンチウム
56
Ba バリウム

Bi系の結晶構造

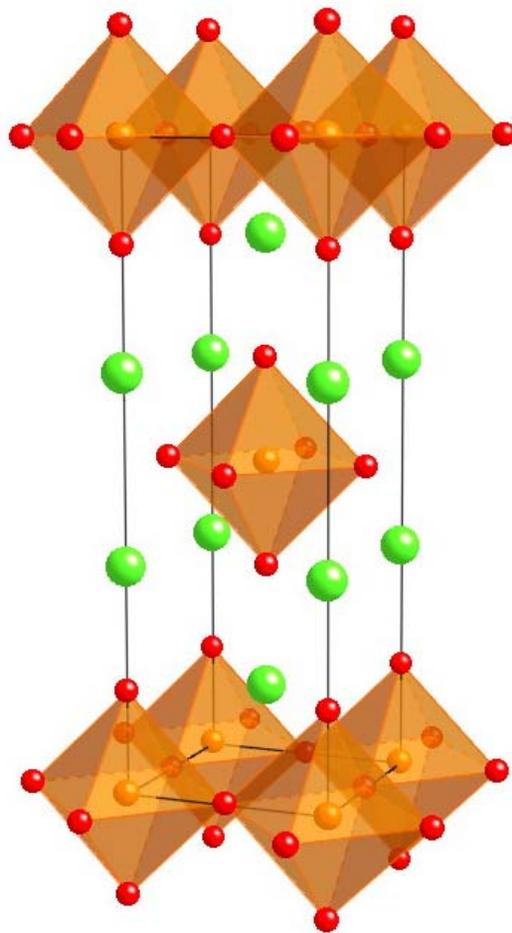


Bi-Sr-Cu-O

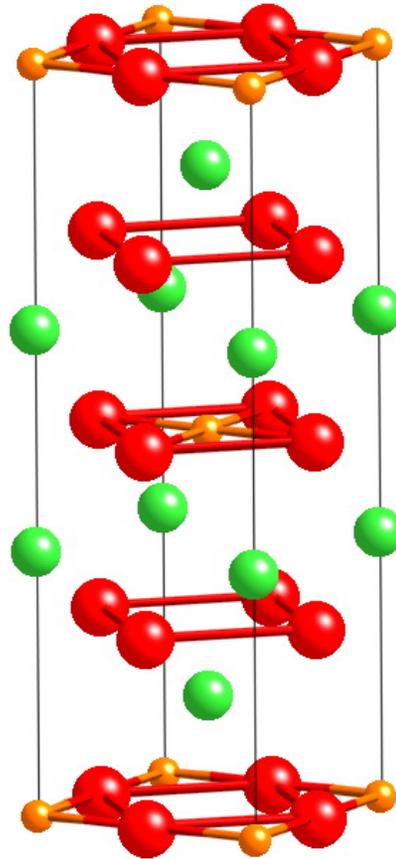


Bi-Sr-Ca-Cu-O

次へのチャレンジ



$(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)_2\text{CuO}_4$ T構造

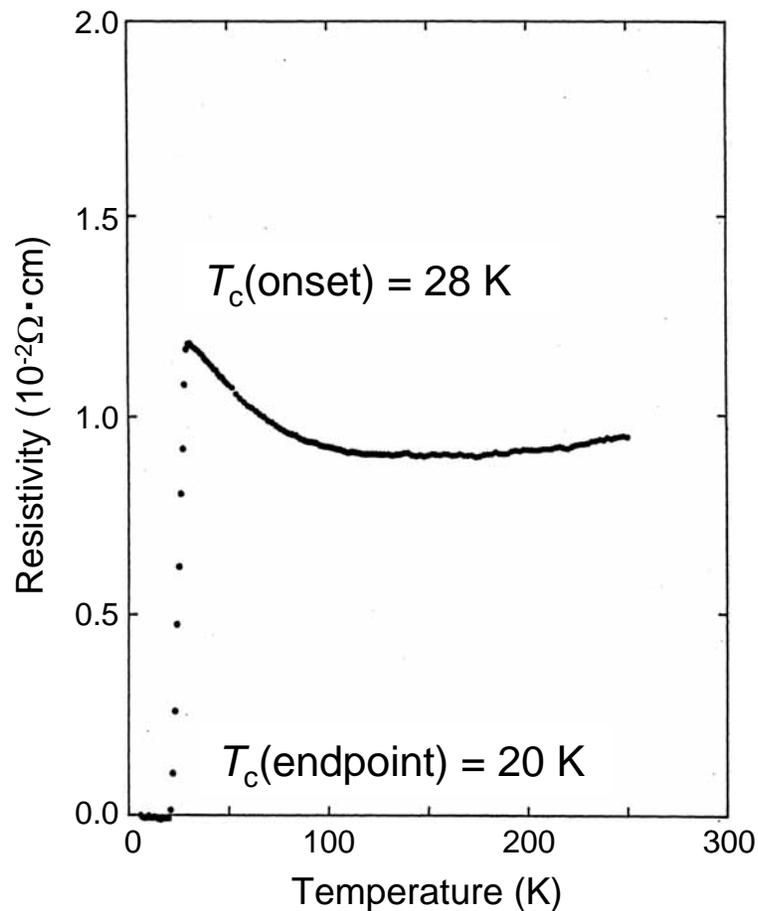


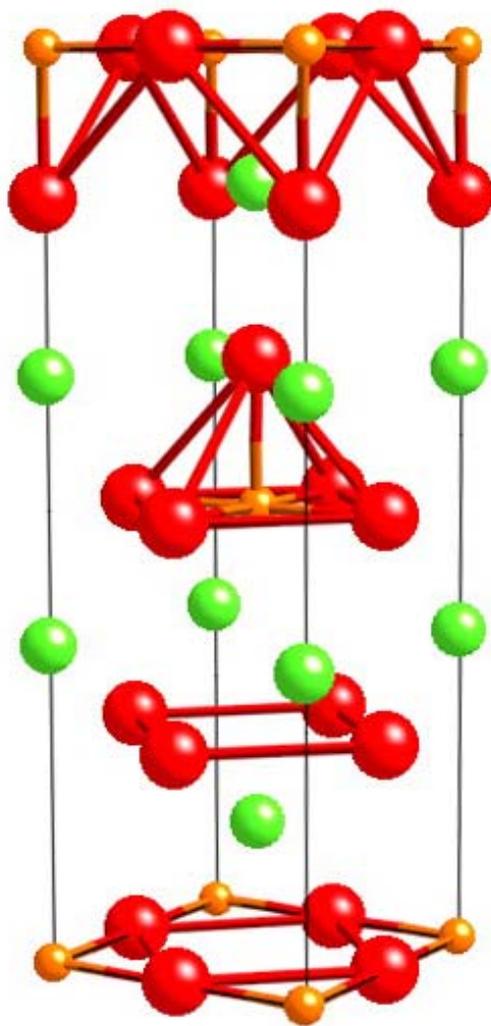
$(\text{Nd}_{1-x}\text{Ce}_x)_2\text{CuO}_4$ T' 構造

銅の上下に酸素が無い構造

それではCeとSrを一緒に混ぜると...

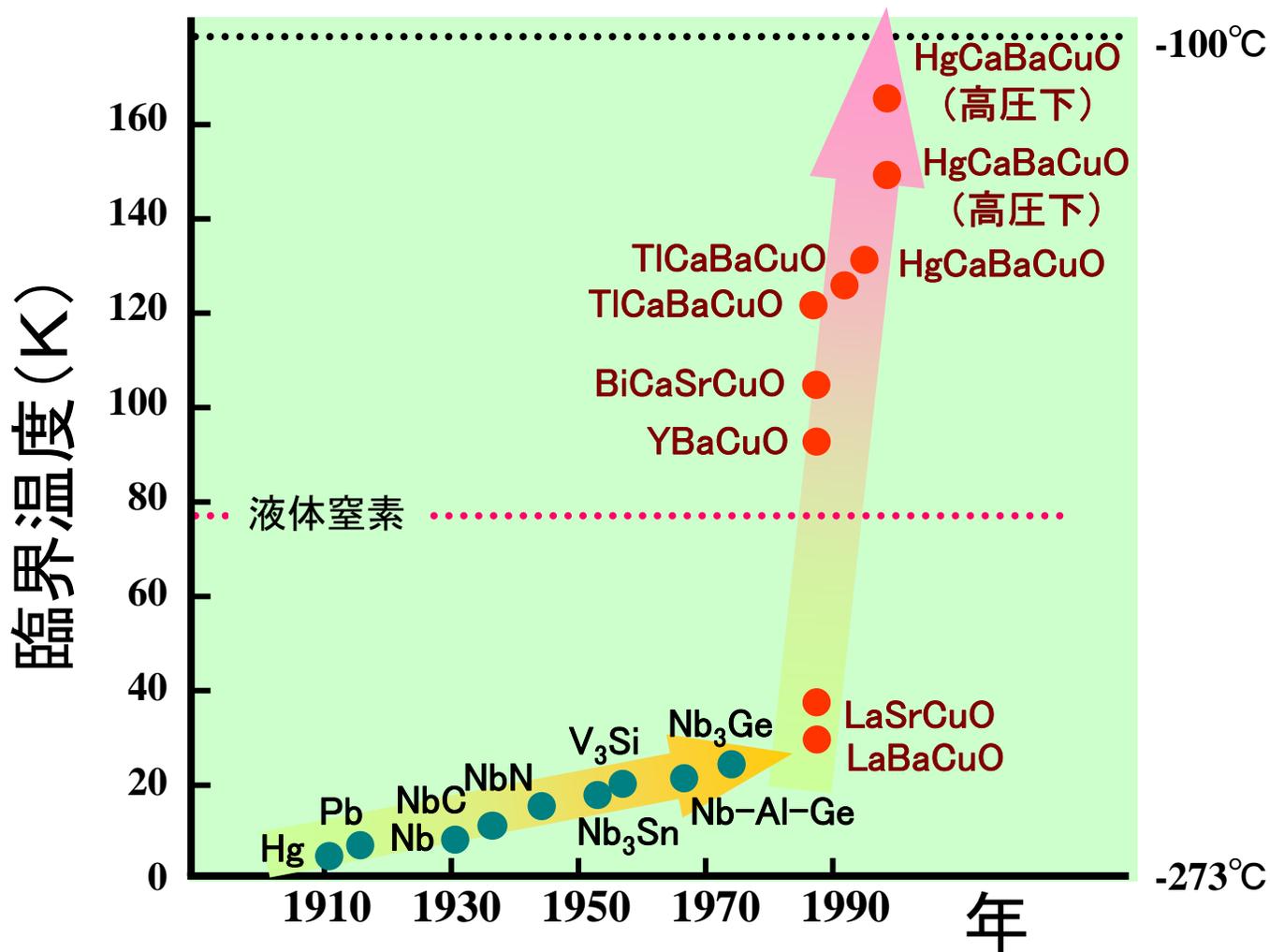
新しい超伝導体の発見





T*構造

臨界温度の変遷



秋光研究室超伝導発見の歴史

1984 (Nb,Ta)Se ₃	6K
1987 Bi-Sr-Cu-O	8K
1988 Nd-Ce-Sr-Cu-O	28K
1989 (Eu,Ce)-(Ba,Ln)-Cu-O Ln=La,Eu	25K
1992 (Y,Ca)-Sr-Cu(CO ₃)-O	63K
1992 (Bi,Pb)-Sr-Cu-(CO ₃)-O	41K, 54K
1993 Sr-Ca-Cu-(CO ₃)-(BO ₃)-O	33K, 55K, 105K, 115K
1993 Tl-(Ba,Sr)-Cu-(CO ₃)-O	70K
1993 Hg-Ba-Sr-Cu-(CO ₃)-O	66K
1994 Ba-Ca-Cu-(CO ₃)-(BO ₃)-O	120K
1994 (Ca,Na)-Ca-Cu-O-Cl	49K
1995 (Ca,A)-Cu-O-Br A=Na,K	23K
1996 Ba-Ca-Cu-O-F	38K, 106K, 108K
1996 Sr-Ca-Cu-O*	12K
1998 Cu-Sr-(Y,Ce)-Cu-O	43K
1999 Ru-Sr-Y-Cu-O	40K
2001 MgB₂	39K
2003 Y₂C₃	18K
2003 Re-B	5K
2005 (W,Mo)-Re-(B,C)	7-8K

*従来の銅酸化物超伝導体におけるCuO₂面を持たない銅酸化物で、
世界ではじめて超伝導化に成功した。

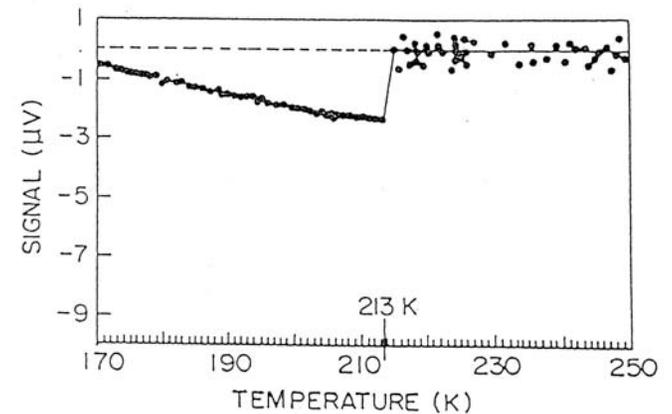
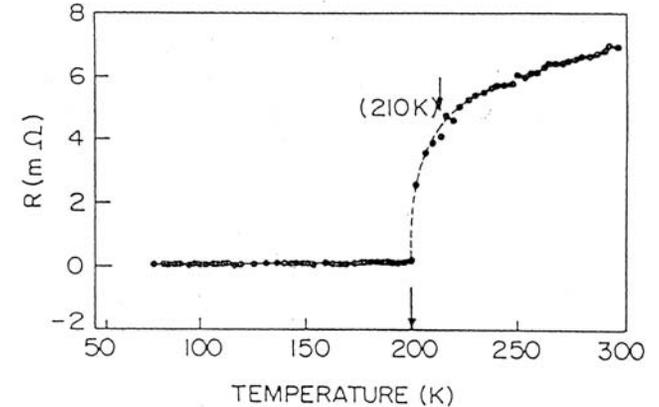
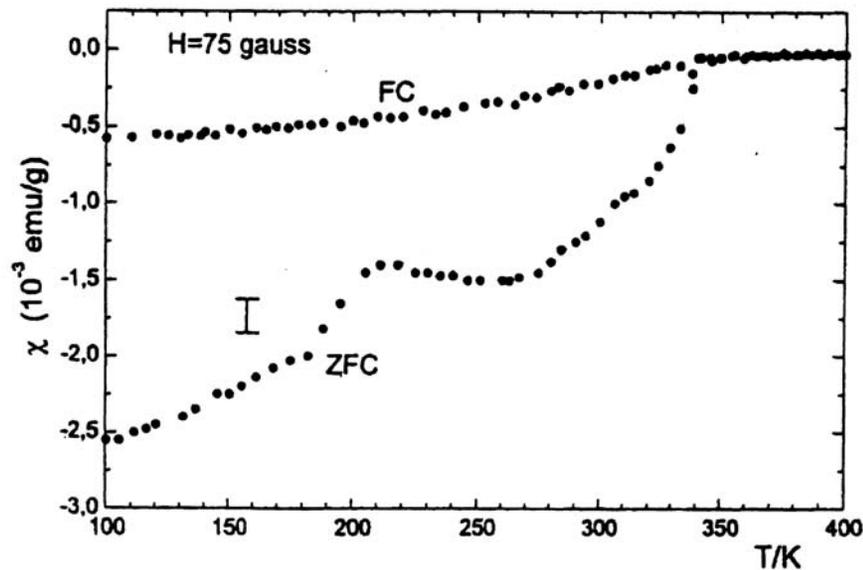


より高い T_c を持つ超伝導体は存在するか？

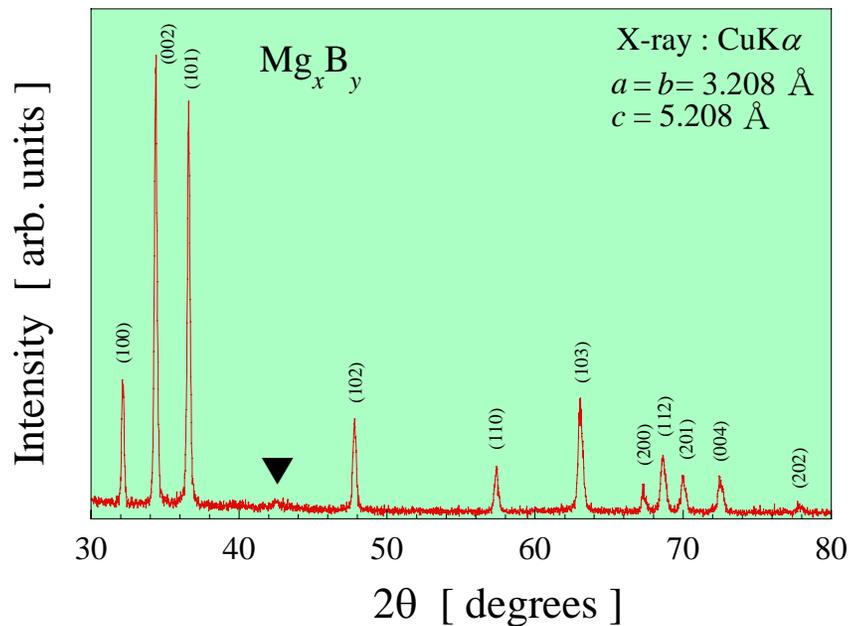
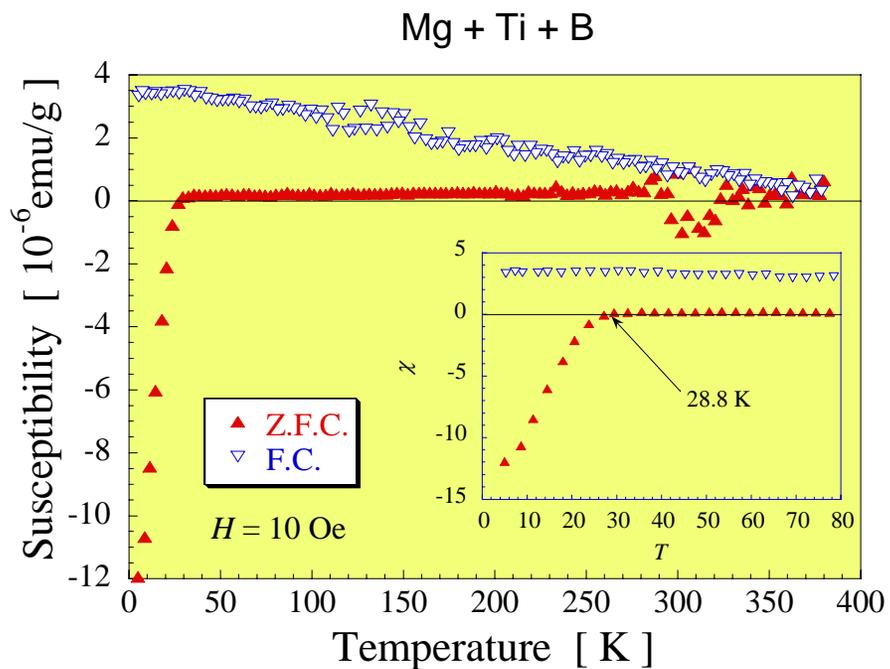
Unidentified

Superconducting

Object 未確認超伝導物質



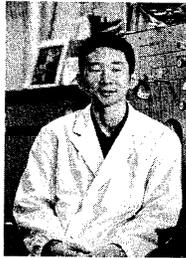
MgB₂発見の始まりはこのデータから...



ごくわずかなシグナルをも見逃さない

「確認時は興奮」 発見者 永松 純 君のコメント

インタビューに答える永松純さん



超電導とは、一定温度以下で電気抵抗がゼロになる現象。今回発見された物質は、マンガンとホウ素を主体とする化合物で、超電導現象は絶対温度三九度（七氏零下三四度）と、ウ化マングニウムが超電導金属での従来の最高記の現象を起すことが分かるといふ。永松さんは、

電気抵抗がゼロに

「金属間化合物超電導」を発見

「確認時は興奮」

「超電導は、報告までと云われていた通り、空振りの連続でした。一度は超電導のサンプルが出たのですが、追跡する出なく、なり、幻だったのか、あるいは、たまたま成功して、別のイメージを擦さなければ、室温（七氏零下）までくまで、集めていまま。超電導現象の発見は、発見した時の様子を見つかる、世界のエネルギー事情は、変化する。大気があつて、何よりも永松 発見したのは、実 半導体（シリコン）は、まだ

英科学誌ネイチャーで反響

「超電導は、報告までと云われていた通り、空振りの連続でした。一度は超電導のサンプルが出たのですが、追跡する出なく、なり、幻だったのか、あるいは、たまたま成功して、別のイメージを擦さなければ、室温（七氏零下）までくまで、集めていまま。超電導現象の発見は、発見した時の様子を見つかる、世界のエネルギー事情は、変化する。大気があつて、何よりも永松 発見したのは、実 半導体（シリコン）は、まだ

青山学院大・永松純さん大分市出身にインタビュー

電気抵抗がゼロになる「金属間化合物超電導」を、青山学院大学理工学部大学院生の永松純さん（26）が発見した。永松さんは大分市の出身で、大分上野丘高校から同大学理工学部物理学科に進学。発見当時（昨年十月）は四年生だった。医療機器などの利用が期待される高温超電導研究に新たなベールを開く発見で、このほど權威ある英科学誌ネイチャーに論文が掲載され、反響を呼んだ。今年四月から大学院に進学、秋光研究室（秋純教授）の固体物理学で研究を続ける永松さんにインタビューした。（聞き手・平井貞行東京社編纂部長）

「超電導は、報告までと云われていた通り、空振りの連続でした。一度は超電導のサンプルが出たのですが、追跡する出なく、なり、幻だったのか、あるいは、たまたま成功して、別のイメージを擦さなければ、室温（七氏零下）までくまで、集めていまま。超電導現象の発見は、発見した時の様子を見つかる、世界のエネルギー事情は、変化する。大気があつて、何よりも永松 発見したのは、実 半導体（シリコン）は、まだ

「超電導は、報告までと云われていた通り、空振りの連続でした。一度は超電導のサンプルが出たのですが、追跡する出なく、なり、幻だったのか、あるいは、たまたま成功して、別のイメージを擦さなければ、室温（七氏零下）までくまで、集めていまま。超電導現象の発見は、発見した時の様子を見つかる、世界のエネルギー事情は、変化する。大気があつて、何よりも永松 発見したのは、実 半導体（シリコン）は、まだ

永松 純 君の受賞歴

- ◆ 超伝導科学技術賞
- ◆ ミレニアム・サイエンス・フォーラム 特別賞
- ◆ 秋光賞



朝日新聞

夕刊
発行部数 710万部
印刷部数 710万部
朝日新聞東京本社
〒100-8205 東京都千代田区千代田1-3-1
朝日新聞東京本社 2001

石が育てたハムがある！
梅本卓
大谷石河定 **天然熟成**
ハムのメタリスト
タキザリハム
TEL: 0120-124-10514

超伝導の新材料発見

絶対温度39度 金属では最高温 27年ぶりに更新



秋光純教授

青学大教授ら論文

【東京24日朝日新聞】超伝導材料の発見は、科学界の大きなニュースだ。超伝導材料は、電気を完全に失わずに流すことができる。これまで、超伝導材料は絶対零度（マイナス273度）でしか実現できなかったが、今回発見された材料は、絶対温度39度（マイナス234度）で超伝導を示した。これは、金属では最高温で超伝導を示す材料であり、27年ぶりに更新された。発見したのは、青山学院大学の秋光純教授らによる。論文は、24日朝日新聞に掲載された。

安価、実用面

【東京24日朝日新聞】超伝導材料の発見は、科学界の大きなニュースだ。超伝導材料は、電気を完全に失わずに流すことができる。これまで、超伝導材料は絶対零度（マイナス273度）でしか実現できなかったが、今回発見された材料は、絶対温度39度（マイナス234度）で超伝導を示した。これは、金属では最高温で超伝導を示す材料であり、27年ぶりに更新された。発見したのは、青山学院大学の秋光純教授らによる。論文は、24日朝日新聞に掲載された。

【東京24日朝日新聞】超伝導材料の発見は、科学界の大きなニュースだ。超伝導材料は、電気を完全に失わずに流すことができる。これまで、超伝導材料は絶対零度（マイナス273度）でしか実現できなかったが、今回発見された材料は、絶対温度39度（マイナス234度）で超伝導を示した。これは、金属では最高温で超伝導を示す材料であり、27年ぶりに更新された。発見したのは、青山学院大学の秋光純教授らによる。論文は、24日朝日新聞に掲載された。

超伝導の新

絶対温度39度

金属では最高温 27年ぶりに更新

青学大教授ら論文

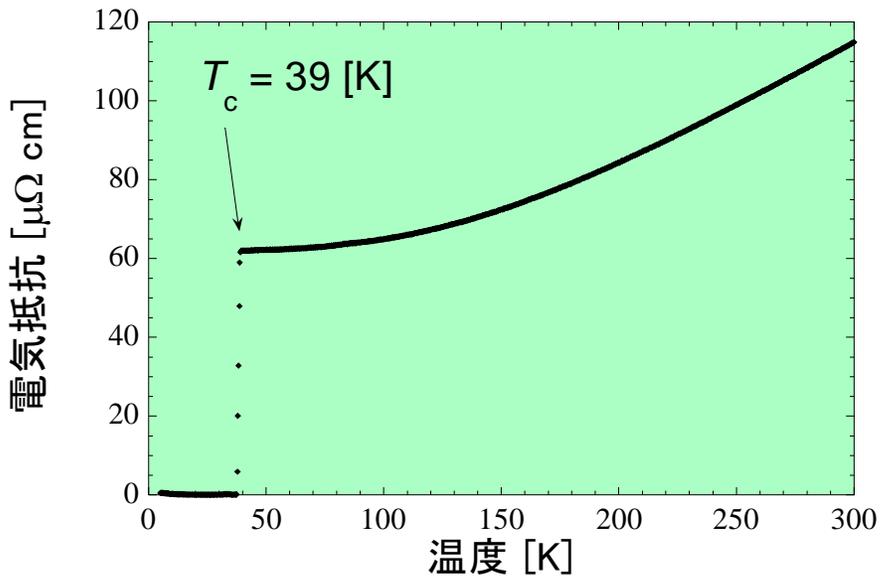


秋光純教授

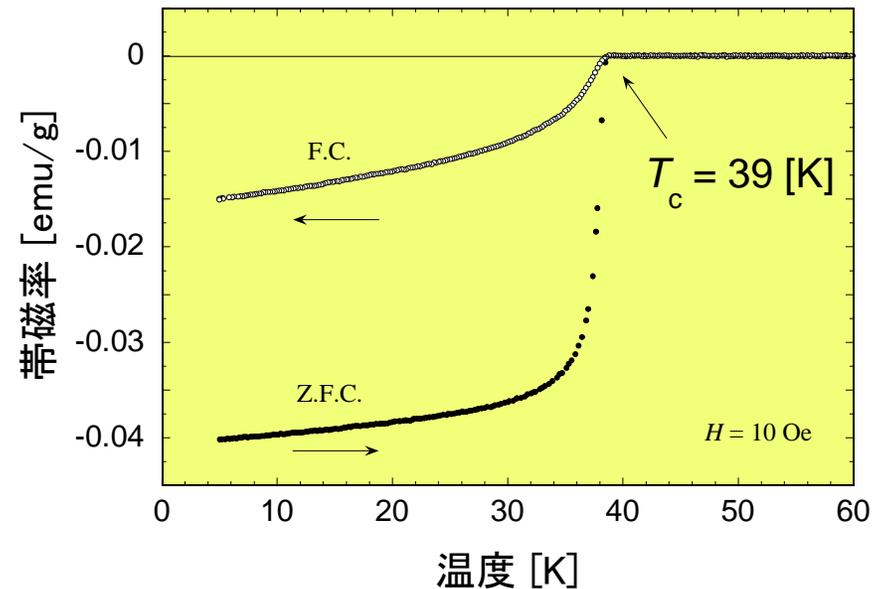
【東京24日朝日新聞】超伝導材料の発見は、科学界の大きなニュースだ。超伝導材料は、電気を完全に失わずに流すことができる。これまで、超伝導材料は絶対零度（マイナス273度）でしか実現できなかったが、今回発見された材料は、絶対温度39度（マイナス234度）で超伝導を示した。これは、金属では最高温で超伝導を示す材料であり、27年ぶりに更新された。発見したのは、青山学院大学の秋光純教授らによる。論文は、24日朝日新聞に掲載された。

MgB₂の超伝導特性

絶対温度39K(ケルビン)(マイナス234°C)で超伝導現象を観測



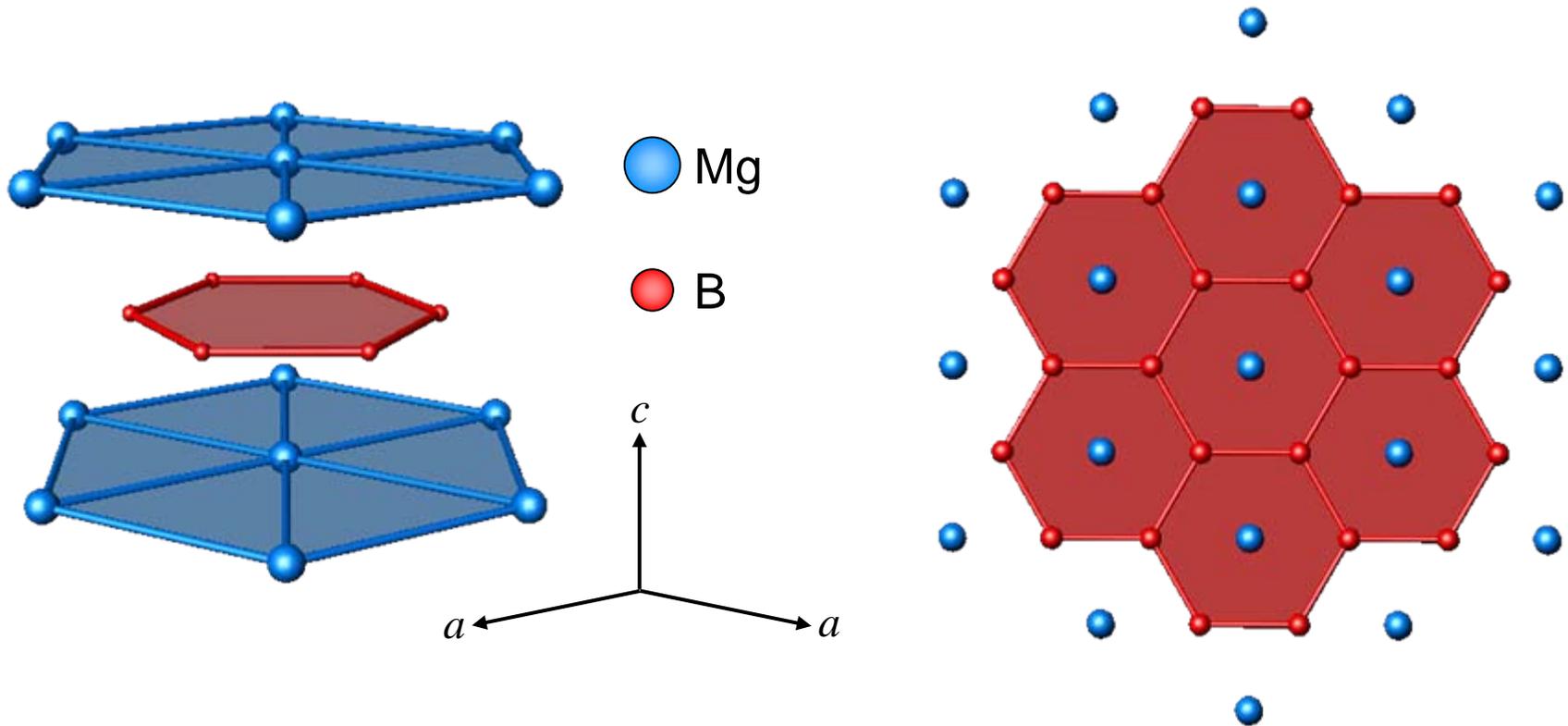
電気抵抗 = 0



マイスナー効果

MgB₂の結晶構造

特徴的な二次元的構造(蜂の巣型の格子)



「瓶の中に魔人が」

news and views

Genie in a bottle

Robert J. Cava

An overlooked compound has a surprise in store for physicists. It becomes superconducting at a much higher temperature than any other stable metallic compound.

The field of superconductivity has been rocked by a startling announcement. For fifteen years, researchers have been delving into the mysterious and complex world of high-temperature superconducting materials. In virtually ignoring simple metallic compounds because they superconduct at very low temperatures. But now Akimitsu and colleagues have discovered superconductivity at an amazing 39 degrees above absolute zero in the simple compound magnesium boride (MgB_2). They report their discovery on page 45 of this issue¹, in what must be one of the shortest communications published in Nature in recent memory.

Superconductors are materials that lose their resistance to electrical current flow below a certain critical temperature (T_c). In the ideal case, this zero-resistance state is absolute. No electrons flowing in a continuous loop of superconducting wire below T_c could theoretically flow for the age of the Universe and never lose any energy. But in the real world there are losses from microscopic inhomogeneities, for example, and the ideal is never truly obtained.

Nonetheless, devices made with superconducting materials have resistances that are orders of magnitude lower than those of devices made with the best conventional conductors. This low resistance to current flow means that large currents (on the order of 10^6 amperes per square centimetre of wire cross-section) can be passed without significant heating. The magnets in magnetic resonance imaging instruments now in common use, for example, are made from metal-alloy superconducting wires. These magnets are cooled below the T_c of the metal alloy by immersion in liquid helium at 4.2 K. One can sometimes see trucks delivering helium to hospital loading docks for that purpose.

Almost exactly 15 years ago, physicists were stunned by the announcement that a ceramic composed of barium, yttrium, copper and oxygen could become superconducting at temperatures above that of liquid nitrogen (77 K)². This discovery, based on a modification of a formula first announced by Bednorz and Müller³ who later won the Nobel Prize for physics, sparked an explosion in condensed-matter physics and materials-science research, and the echo can still be heard. It is difficult to describe the feeling



Figure 1 | The newly discovered superconductor magnesium boride has been available in large quantities from suppliers of inorganic chemicals for many years, but physicists have finally bubbled the champagne and found that magnesium boride superconducts at an amazing 39 K (ref. 1).

that we had for the infinite possibilities promised by that discovery. Imagine a world with perpetual engines, trains that magnetically float above the tracks and ultrafast computers. For the people in the thick of it, it was almost impossible to keep for years afterwards. In every minute spent sleeping was another minute missed in trying to figure out the implications of a whole new way of thinking about the world. Some of the promises of those early days have been fulfilled, and the legacy of the discovery of high-temperature superconductivity has been to change forever the culture of multidisciplinary research in the physical sciences.

Akimitsu apparently announced the discovery of superconductivity in MgB_2 (ref. 1) at a conference in Sendai, Japan, in early January. The story came to my attention a few weeks later, through what must have been a convoluted path of e-mails and word of mouth. The whole process is hauntingly reminiscent of the way such stories came to light in the early days of high-temperature superconductivity. In the guise of a narrative seemingly too fantastic to be true, and yet at the same time, too fantastic to be entirely false.

The story I heard was that Akimitsu and his group were attempting to make a chemical analogue of CaB_6 , a semiconducting material that surprisingly becomes ferromagnetic (like iron) when doped with a small amount of electrons⁴. They tried to

replace calcium with magnesium, which is directly above it in the periodic table. One of their starting materials was the simple compound MgB_2 , which has been known since 1953 and is available in kilogram-size bottles from suppliers of inorganic chemicals (Fig. 1). MgB_2 is one of the common reagents used in metathesis reactions (in which compounds exchange partners)⁵, and magnesium borides are used in some commercial preparations of elemental boron. Apparently, the stuff they got out of the bottle became superconducting at 39 K, 16 K higher than any other simple metallic compound. That must have been quite a shock.

But why the excitement? After all, critical temperatures for the high-temperature copper oxides have risen to 140 K over the years, four times the value for MgB_2 . There are two reasons for the fuss. First, early indications⁶ are that this material appears to become superconducting by what is known as the BCS mechanism (named after its discoverers, Bardeen, Cooper and Schrieffer)⁷, in which the interactions between the electrons that give rise to superconductivity are mediated by thermal vibrations of the atoms in the underlying crystal lattice. So, unlike the high-temperature copper oxide superconductors, MgB_2 is likely to be a conventional superconductor. In the rules of physics do not need to be bent for superconductivity to occur, MgB_2 has the highest T_c known for a chemically stable, bulk compound of this kind. This holds tremendous promise for

MgB₂は市販されている 粉末であった!!



Genie in a bottle (Artist: Christina Aguilera)

Oh...

I feel like I've been locked up tight
For a century of lonely nights
Waiting for someone
To release me

You're licking your lips and blowing kisses my way
But that don't mean I'm gonna give it away
Baby, baby, baby
(baby, baby, baby)

Oh whoa...

My body's saying let's go

Oh whoa...

But my heart is saying no (no)

If you wanna be with me, baby

There's a price you pay

I'm a genie in a bottle

You gotta rub me the right way

If you wanna be with me

I can make your wish come true

You gotta make a big impression

I gotta like what you do

I'm a genie in a bottle, baby

Gotta rub me the right way, honey

I'm a genie in a bottle, baby

Come, come, come and let me out

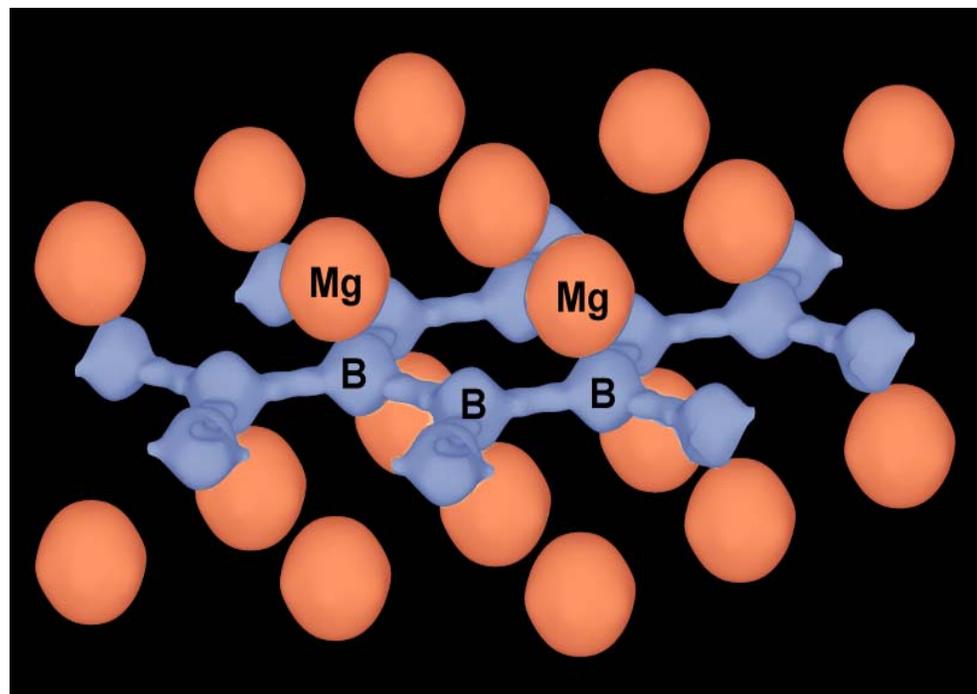
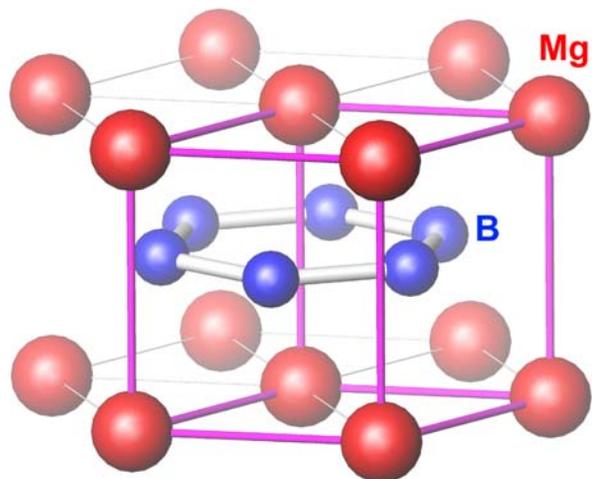
The music's playing and the lights' down low

One more dance and then we're good to go

Waiting for someone

Who needs me

MgB₂の電子密度分布



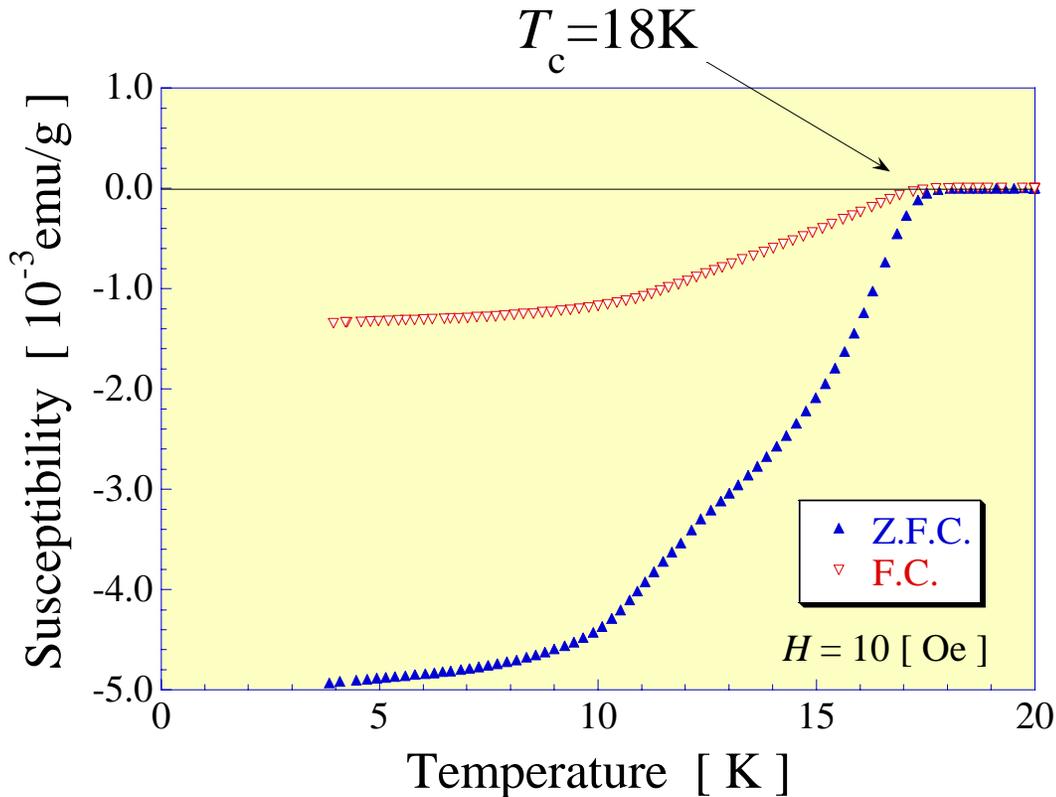
ボロン(B)元素が2次元的なネットワークを形成



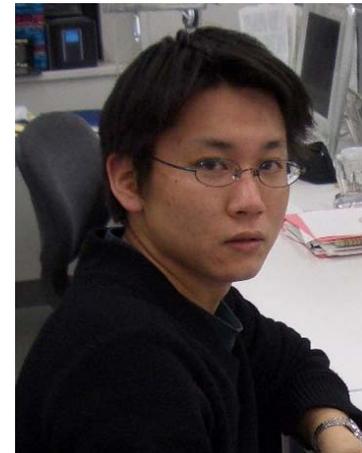
実験: SPring-8(播磨)

新超伝導探索の現状

Y-C系における超伝導



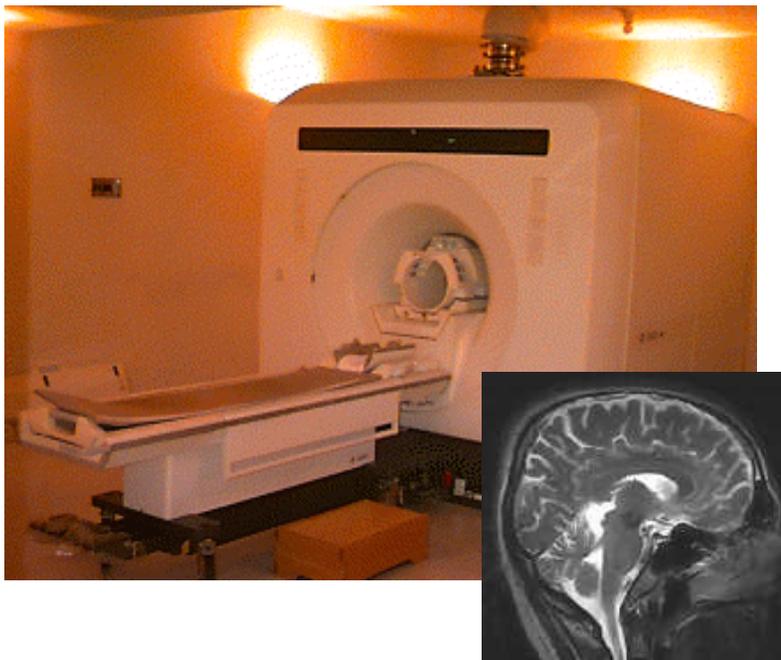
Maximum T_c
phase



芥川 智思 (青学大)

秋光研究室超伝導発見の歴史

1984 (Nb,Ta)Se ₃	6K
1987 Bi-Sr-Cu-O	8K
1988 Nd-Ce-Sr-Cu-O	28K
1989 (Eu,Ce)-(Ba,Ln)-Cu-O Ln=La,Eu	25K
1992 (Y,Ca)-Sr-Cu(CO ₃)-O	63K
1992 (Bi,Pb)-Sr-Cu-(CO ₃)-O	41K, 54K
1993 Sr-Ca-Cu-(CO ₃)-(BO ₃)-O	33K, 55K, 105K, 115K
1993 Tl-(Ba,Sr)-Cu-(CO ₃)-O	70K
1993 Hg-Ba-Sr-Cu-(CO ₃)-O	66K
1994 Ba-Ca-Cu-(CO ₃)-(BO ₃)-O	120K
1994 (Ca,Na)-Ca-Cu-O-Cl	49K
1995 (Ca,A)-Cu-O-Br A=Na,K	23K
1996 Ba-Ca-Cu-O-F	38K,106K,108K
1996 Sr-Ca-Cu-O	12K
1998 Cu-Sr-(Y,Ce)-Cu-O	43K
1999 Ru-Sr-Y-Cu-O	40K
2001 MgB₂	39K
2003 Y₂C₃	18K
2003 Re-B	5K
2005 (W,Mo)-Re-(B,C)	7-8K
2006 (Mo,W) ₅ Si ₃	4K



MRI (Magnetic Resonance Imaging)

Kumakura's Group

Superconducting Material Center
National Institute for Materials Science



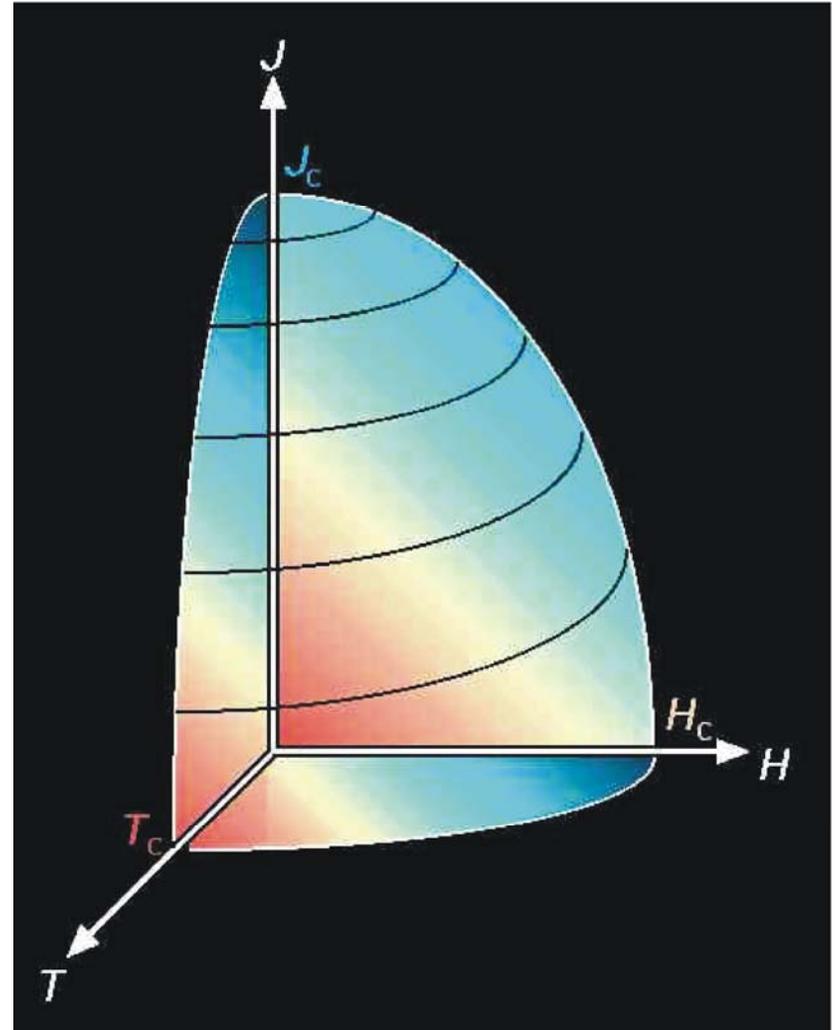
LINEAR EXPRESS

Okada's Group

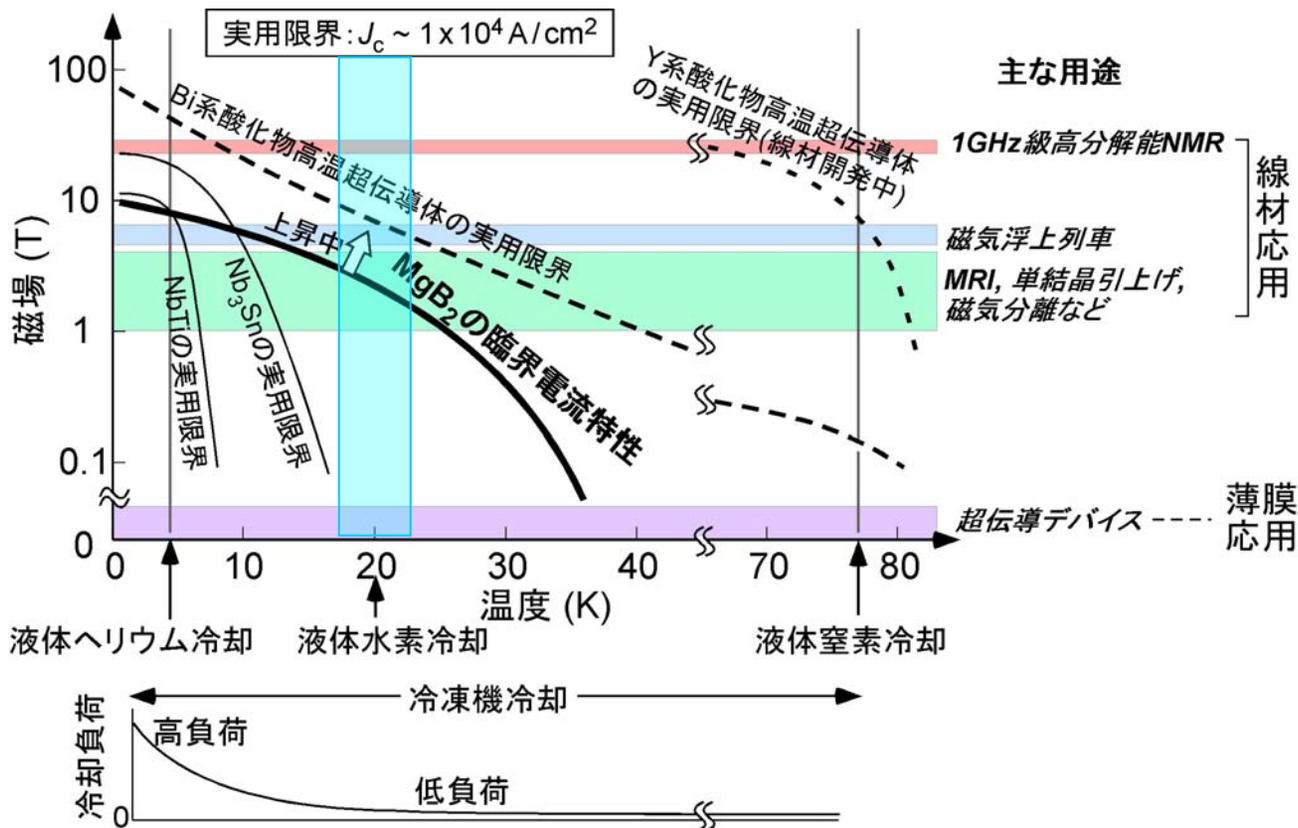
Hitachi Research Laboratory
Hitachi, Ltd.

超伝導の特性

T_c , H_c , J_c で囲まれた領域
で超伝導を示す.



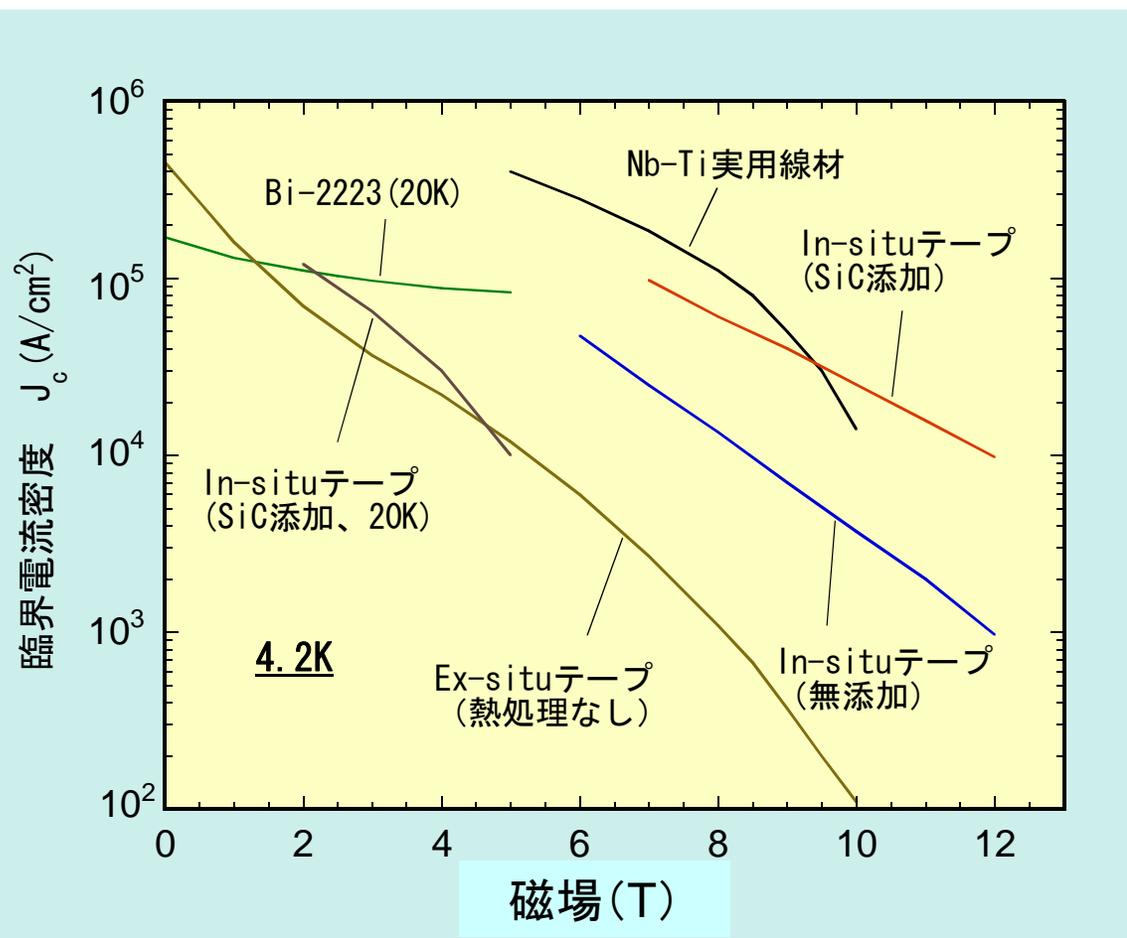
MgB₂の材料応用が期待されている領域



材料開発のターゲット

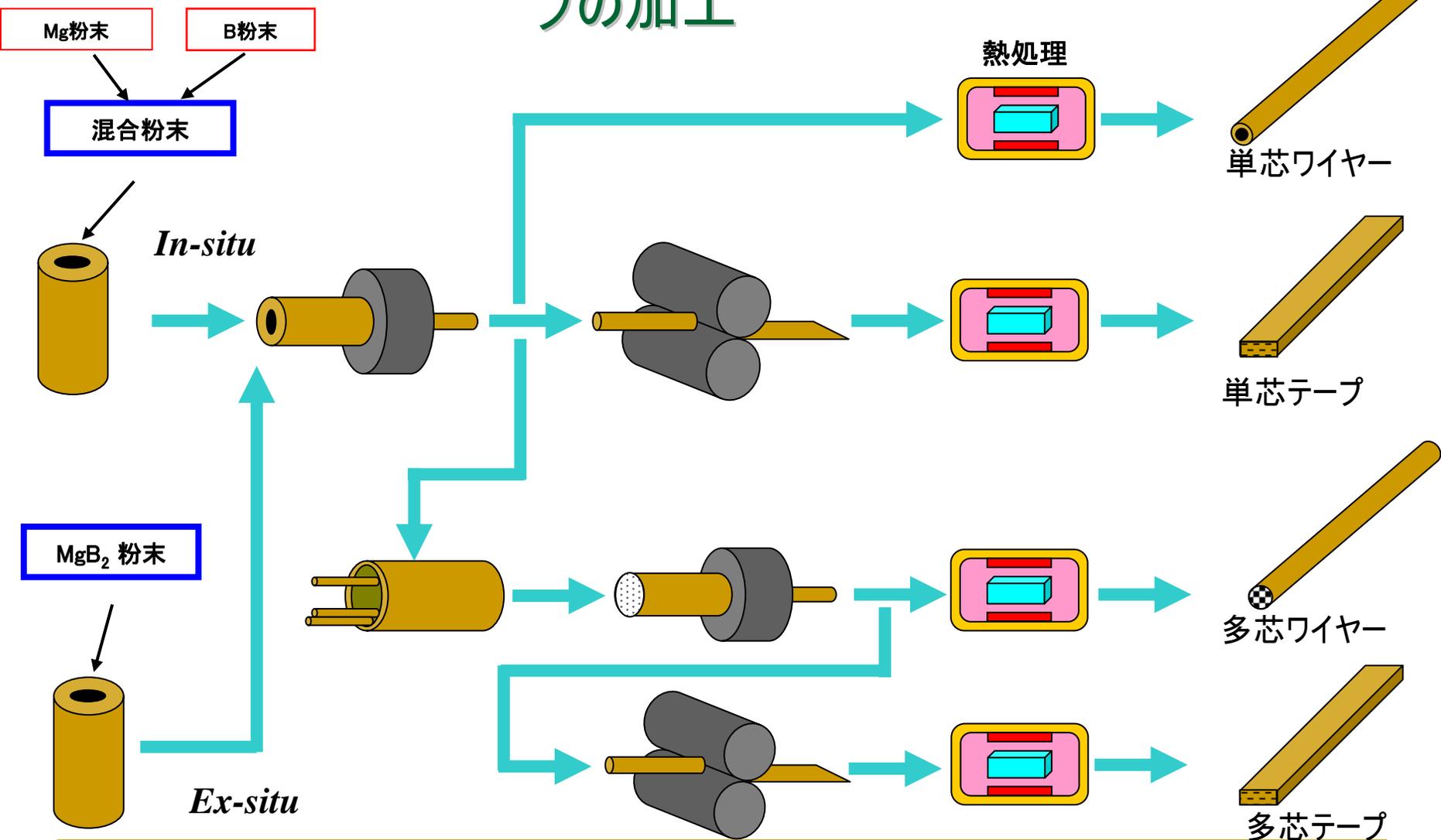
冷凍機冷却による~20KでのMRI, 磁気浮上列車用磁石、各種デバイス
 液体ヘリウム冷却下での従来材料(Nb-Ti, Nb₃Sn)の代替

MgB₂線材と他の線材との比較



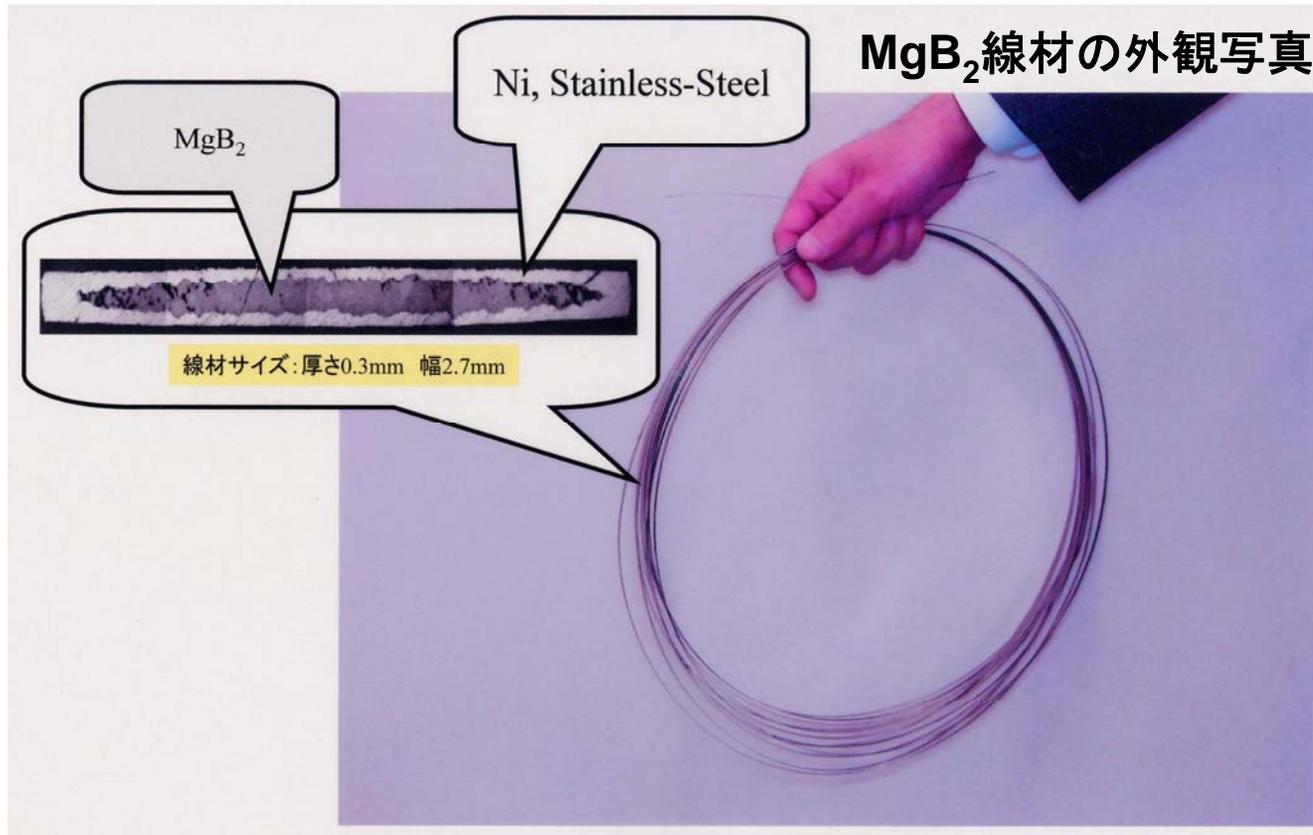
4.2K, 10Tで $2.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$,
20K, 5Tで $1.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$
MgB₂線材としては世界最高
レベルの臨界電流密度(J_c)
を達成

PIT (Powder-In-Tube)法による MgB_2 ワイヤーとテープの加工



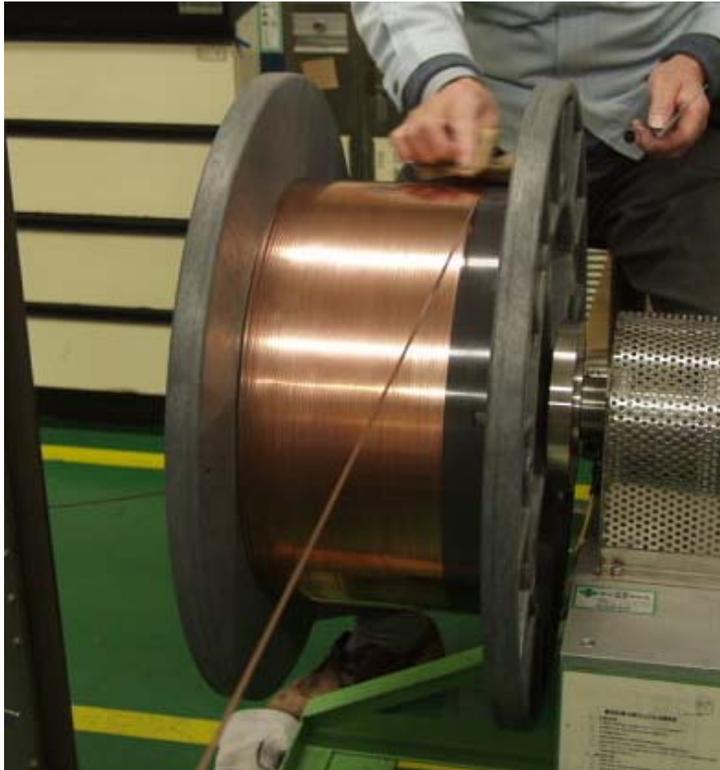
10m級のMgB₂ワイヤー

世界で初めて、MgB₂のコイル化に成功！

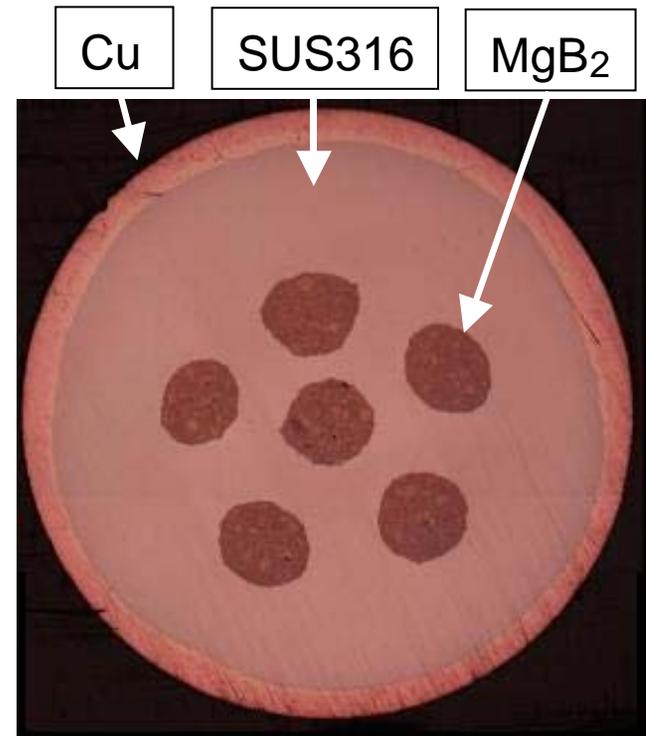


さらに長いワイヤーへの加工プロセスの確立は間近

100m級のMgB₂ワイヤー



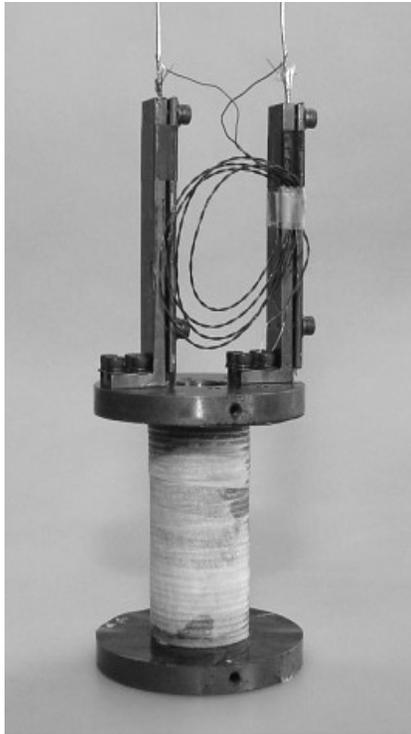
100m long class wire



6-filament wire

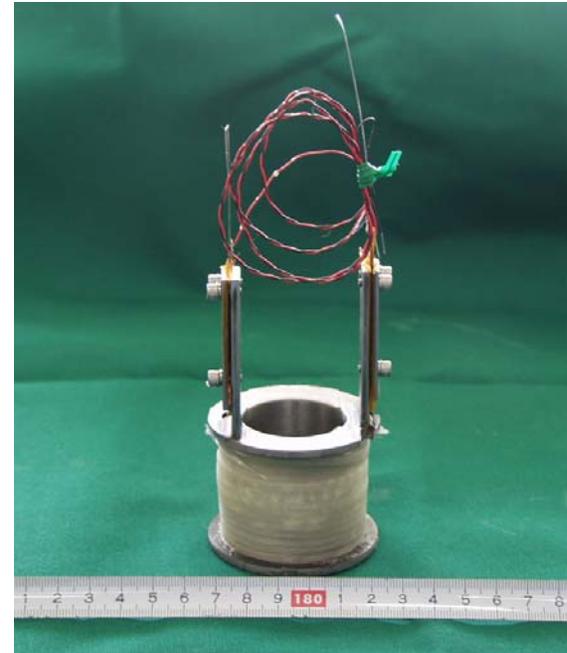
MgB₂小型マグネットの試作

一号機



外径: 43mm
発生磁場: 0.13T(4.2K,0T)

二号機



外径: 48mm
発生磁場: 0.5T(4.2K, 0T)

世界初のMgB₂マグネットの試作、励磁試験に成功

MgB₂マグネットの実用化に向けて

MRI低価格化へ一歩

高温超伝導で電磁石

日立など
開発

日本人研究者が見つけた、従来より高い温度で電気抵抗がなくなる超伝導材料を使い、実用的な性能の電磁石を作ることになったと、日立製作所と物質・材料研究機構が15日発表した。超伝導電磁石が使われている医療用MRI（磁気共鳴断層撮影装置）などの小型・軽量化や低コスト化につながりそうだ。

この材料は、二ホウ化マグネシウム。秋光純・青山学院大教授らが見つけた。01年に発表した。加工しやすい金属系材料としては、従来よりずっと高い絶対温度39度（セ氏零下23.4度）で超伝導となる。

日立製作所などは、これを電線状に加工してコイルを作製。電源などとなぐ部分の構造を工夫し、MRIに必要な1.5テスラの強い磁場を長時間安定して発生させることに成功した。

現在、超伝導電磁石に広く使われているニオブチタン合金は、絶対温度約4度の液体ヘリウムによる大がかりな冷却設備が必要だ。二ホウ化マグネシウムは安価で、冷凍機による冷却で済むため、コスト、重さとも3〜4割の削減が見込めるという。ほかに絶対温度100度以上で超伝導となる酸化物系材料もあるが、長時間安定した電磁石はまだできていない。

秋光教授は、新しい高温超伝導材料を発見した業績で01年度朝日賞を受けた。

秋光教授の話 1.5テスラの磁場を安定して出すことができたのは大きな成果。酸化物系材料は発見から20年近くたつ。それと比べると、非常なスピードで実用化に近づいている。

実用化へ加速

ASC2004で報告された線材とコイル比較

ASC (Applied Superconductivity Conference) 2004年10月

線材開発状況比較

研究機関	線材長
日立	130 m
Hyper Tec. (米)	1 km
INFM (伊)	200 m

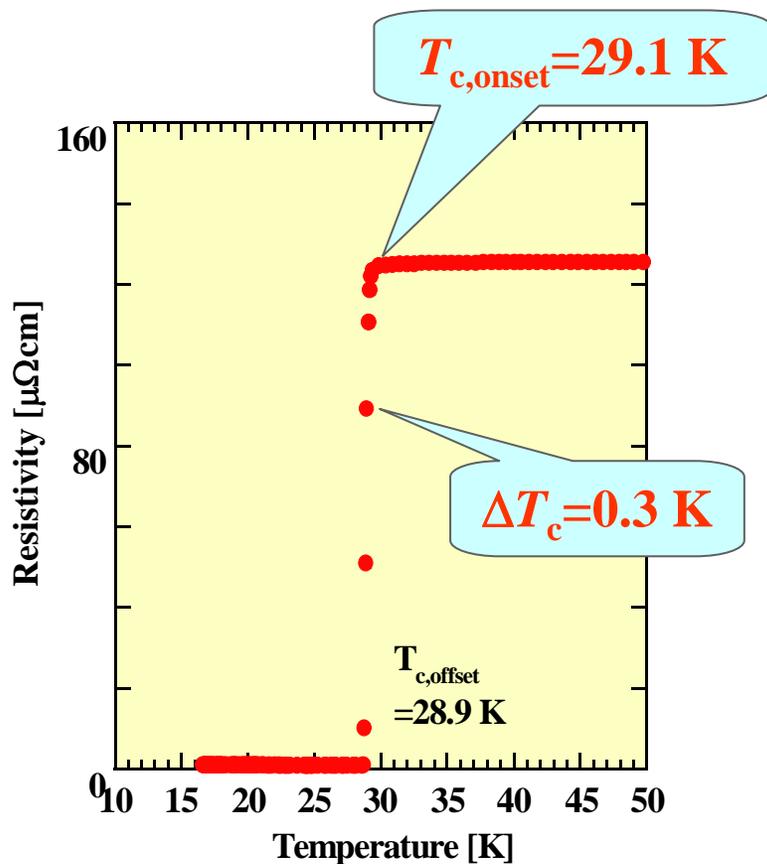
コイル開発状況比較

研究機関	コイル発生磁場 (温度、外部磁場)
日立	1.8T(4.2K, 1.25T)、1T(20K, 1.5T)
Los Alamos (米)	1.6T(4.2K, 1.25T)、1T(25K, 0T)
Hyper Tec. (米)	1T(4.2K, 0T)、0.3T(20K, 0T)
INFM (伊)	1.4T(4.2K, 0T)、1T(17.4K, 0T)

日、米、欧での開発競争

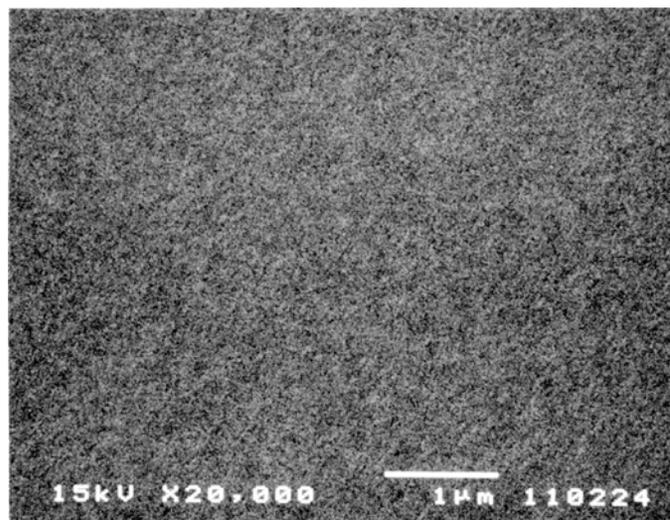


研究成果 - MgB_2 の薄膜 -



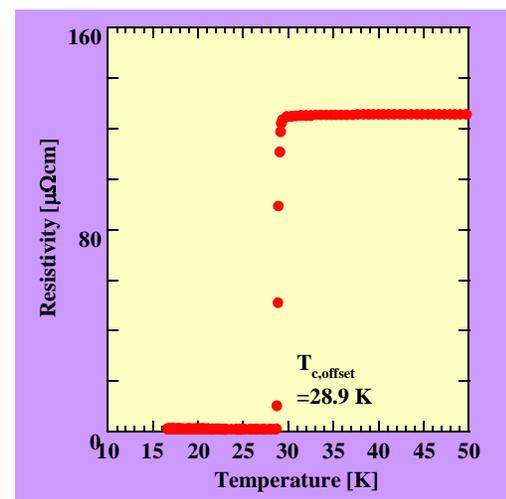
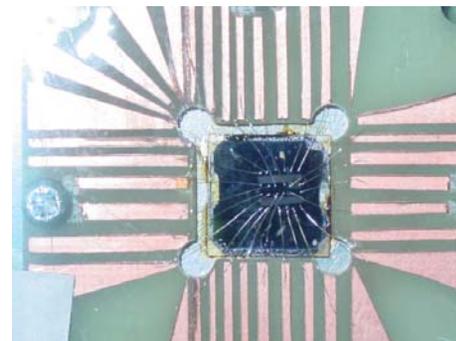
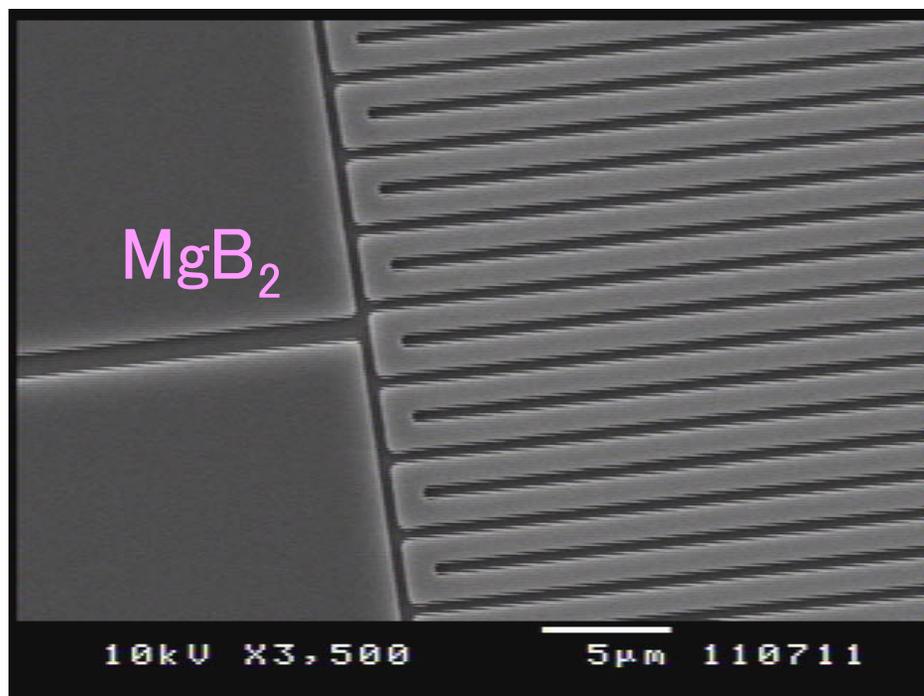
超伝導転移特性

基板: サファイア(0001)
基板温度: 250°C



薄膜表面のSEM写真

MgB₂のナノ微細加工



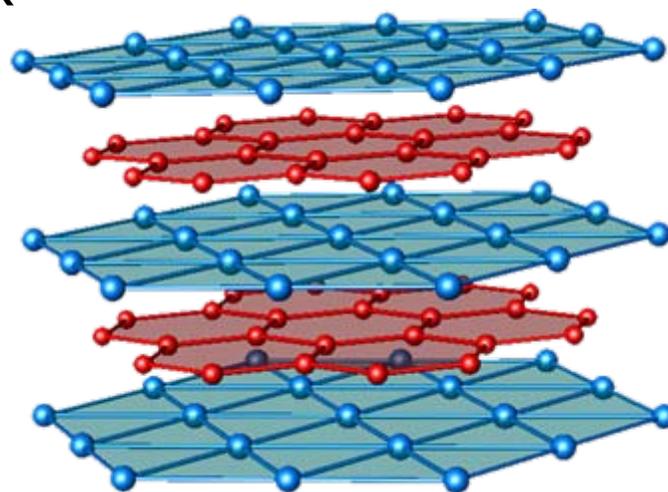
中性子検出器に向けた開発へ

提供: 大阪府立大 石田武和 教授

超伝導体MgB₂の応用

- 金属系化合物では最も高い温度 $T_c = 39 \text{ K}$ で超伝導を示す。

青丸:Mg 赤丸:B



- 応用上の利点
 - 軽量、安価な原料
 - 結晶粒間の弱結合が存在しない
 - 安価なシース材が使用可能
 - 熱処理が不要、または低温短時間の処理が可能
 - 曲げ特性に優れる

高いコストパフォーマンス

MgB₂の応用例(リニア)

■ 高性能コイルを大型化 リニアへの応用期待 液体ヘリウム使わず超電導機能 JR東海

- JR東海は二十日、日立製作所と共同で、高性能の線材を使った超電導コイルを従来の十七倍に大型化し、液体ヘリウムを使わずに冷却する方法で、超電導磁石として機能させる試験に成功したと発表した。高性能線材で冷却媒体を使わない方法は世界で初めて。将来的には都留一大月市間で実験中のリニアモーターカーへの応用も期待されている。

高性能線材は、金属系の超電導物質であるニホウ化マグネシウムを特殊加工したもの。二〇〇四年にこの線材を使った世界最高の磁界エネルギーを発生させる直径三センチのコイルを作製したが、今回は直径五十センチのコイル(線材の長さ百五十メートル)の開発に成功した。

ニホウ化マグネシウム線材を使ったコイルは、液体ヘリウムなどの冷却媒体に浸して冷却していたが、JR東海の小牧研究施設(愛知県)での試験で、冷凍機を使って周囲の温度を下げることによる伝導冷却に成功した。「液体使用時と比べ温度を自由に設定できるほか、コスト削減も見込める」(同社)という。

MgB₂の応用例(MRI)

- **ASG, Columbus, Paramedが無冷媒式MgB₂-MRIマグネットを製作**
- ASG超伝導社、Columbus超伝導社及びParamed医学システム社は、MgB₂材を用いた無冷媒式全身型MRIマグネットを開発した。“MR オープン”と呼ばれる本システムは、閉所恐怖症を防ぎ、多数の患者の撮影診断を容易に出来るようU形の形状を持っている。(Superconductor Week vol.21, No.15) 本機は、イタリアの工業グループMalacalzaとの共同で設計された。Paramed社はシステムを設計し、ASG超伝導会社はマグネットを開発し、Columbus超伝導会社はMgB₂技術を開発した。当マグネットは、無冷媒式で設置が容易であり、維持管理も液体窒素やヘリウムを用いる通常の超伝導マグネットよりはるかに安価である。

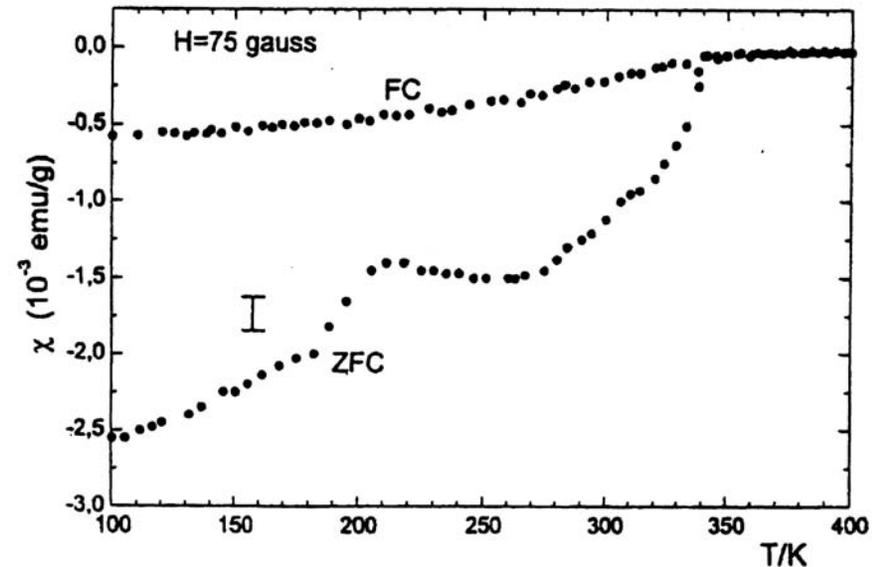


室温超伝導への挑戦

Unidentified

Superconducting

Object 未確認超伝導物質

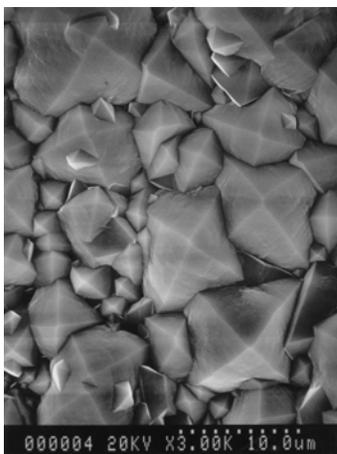


超伝導探索の将来の発展方向

- 1) 従来の銅酸化物で室温超伝導は可能か？
- 2) **軽い元素を含む金属系超伝導体を探す。**

ダイヤモンドが超伝導に！

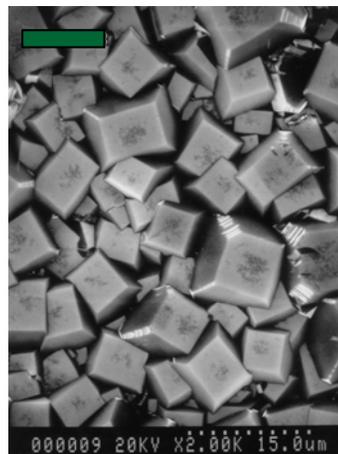
多結晶膜



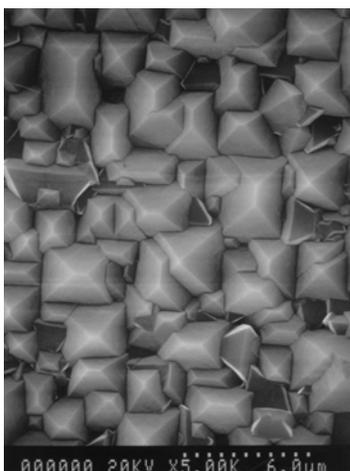
B-doping
B/C=2000 ppm



30 h



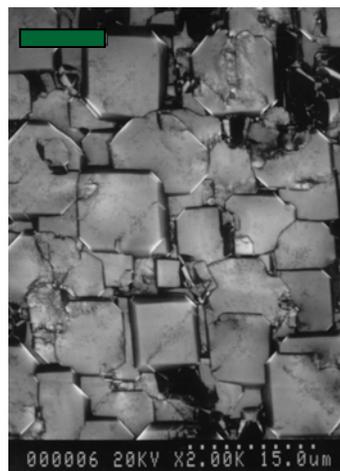
高配向膜



B-doping
B/C=2000 ppm

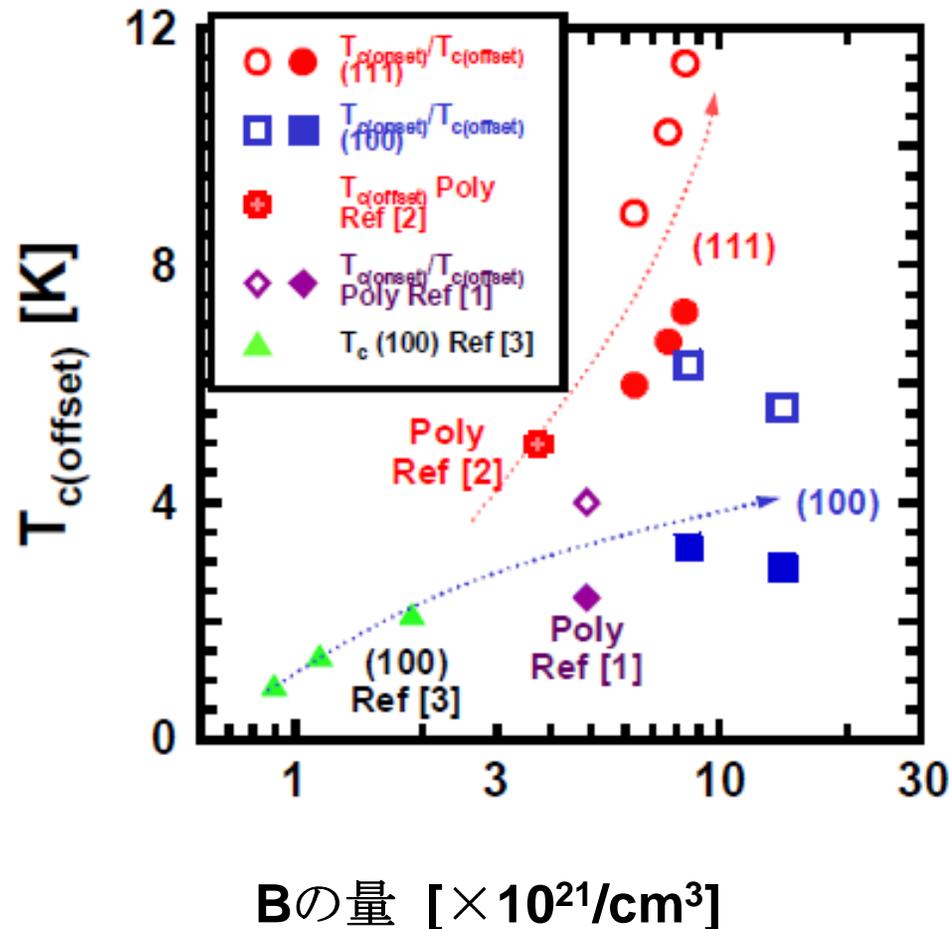


30 h



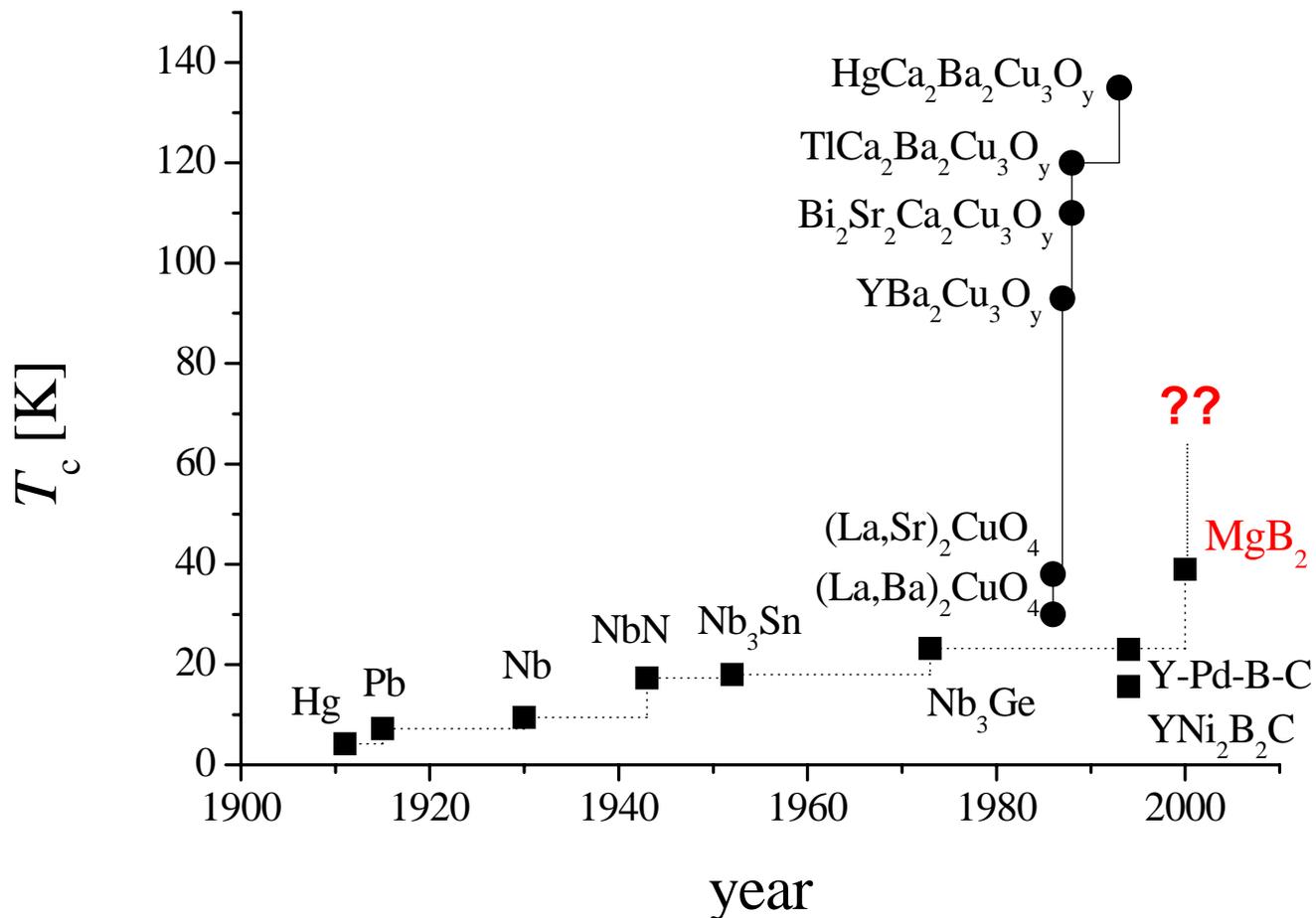
Bドーピングによって(100)面が現れる。

ダイヤモンドでどこまで T_c が上がるか



次なる挑戦

「より高い T_c を示す超伝導体は存在するのか？」



それでは最後に

超伝導転移温度は何によって決まるか？

$$T_c = (\text{運}) \times (\text{根性}) \times (\text{アイデア}) \\ + \text{環境(伝統)} + \text{理解者}$$

どれか一つでも欠けてしまうと、
新しい超伝導体は発見できない！

