

# 低温科学A

理学研究科 物理学第一教室  
石田 憲二 (内線:3752)  
kishida@scphys.kyoto-u.ac.jp

## 最近の超伝導研究

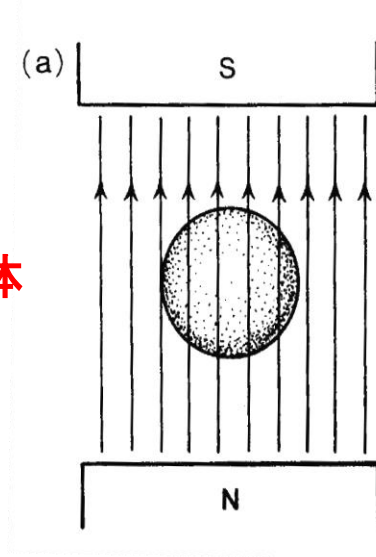
1. 超伝導の復習 (現象と理論的解釈)
2. 奇妙な超伝導(非従来型超伝導)の発見
3. 非従来型超伝導の特徴
4. 最近の超伝導発見 (トピックス)
5. 超伝導の応用
6. DVD (超伝導を研究している海外の大学の研究室)

# 1. 超伝導の復習

## 超伝導の特徴

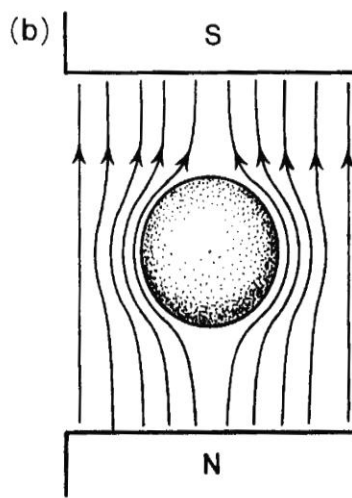
1. 電気抵抗  $\rho$  がゼロ 超伝導転移温度  $T_c$
2. 超伝導内部の磁束密度  $B$  がゼロ (マイスナー効果)

常伝導体

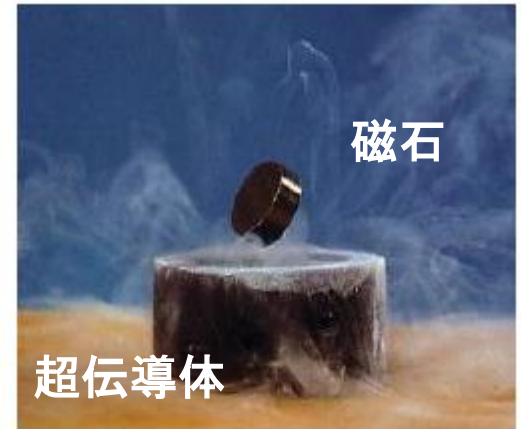


$T > T_c$ : 常伝導

超伝導体



$T < T_c$ : 超伝導



超伝導は磁束を排除する性質をもつ

$$B = H + 4\pi M = 0 \rightarrow M = - (1/4\pi)H \text{ (完全反磁性)}$$

# 超伝導の動画

<https://www.youtube.com/watch?v=LZBW3RAHFqs>

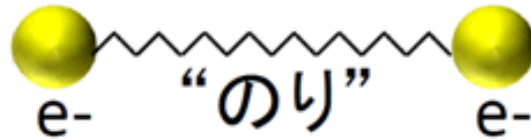
<https://www.youtube.com/watch?v=ZBq8hxPFGP4>

# 超伝導状態のイメージ

フェルミオンである電子は、結晶中のフォノン(“のり”)を介して対状態(ボゾン)を形成する。

⇒ 電子対(クーパー対)の形成

電子対

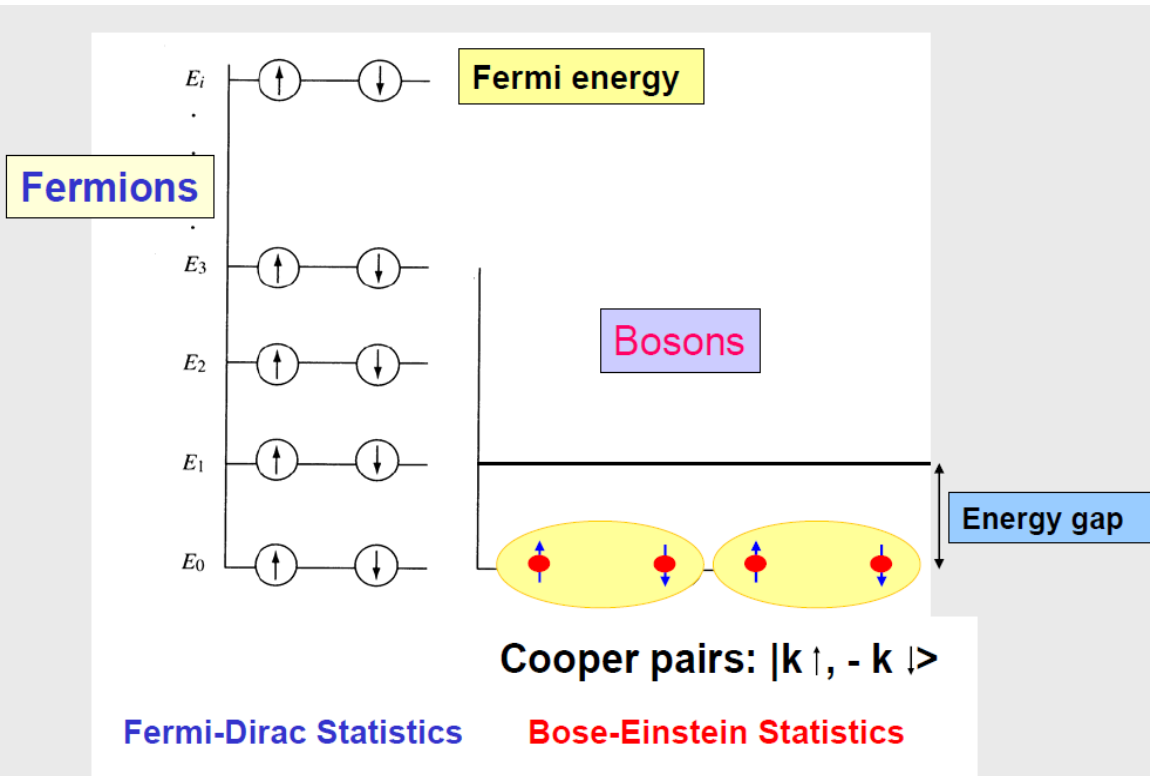


クーパー対は位相のそろった波として結晶中を伝播する。

⇒ 量子状態 電気抵抗ゼロ

# 超伝導(BCS理論)の概念

Bardeen, Cooper, Schrieffer 1957年



## 常伝導状態

電子は基底状態からフェルミ統計に従い状態を占めていく

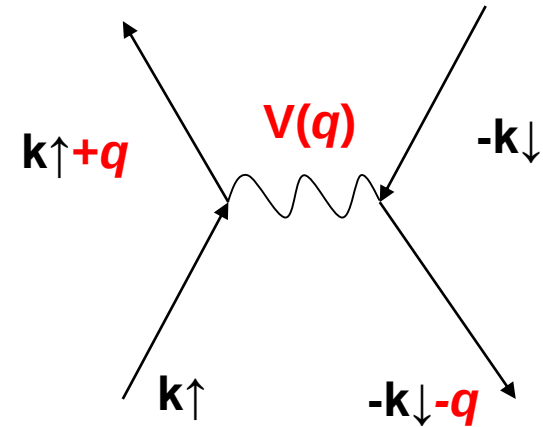
## 超伝導状態

$k \uparrow$ と $-k \downarrow$ がボーズ粒子と見なせる対を組み基底状態に落ち込む

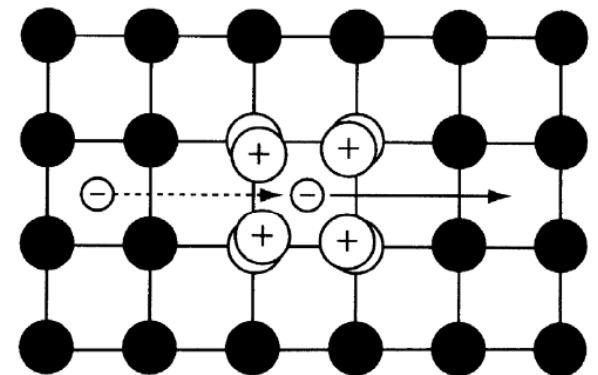
Key Exp.) **同位体効果の実験** ('50)

E. Maxwell & C. Reynolds *et al.*

2電子  $|k \uparrow, -k \downarrow\rangle$  間の  
引力



## 2電子間に働く引力の概念図



量子化された格子振動(フォノン)

## BCS理論の成功

・超伝導転移温度  $T_c$  の表式  $k_B T_c = 1.14 \hbar \omega \exp \left[ -\frac{1}{N(E_F) V} \right]$

$\omega$ : フォノンの周波数      $N(E_F)$ : フェルミエネルギーでの状態密度

$V$ : 電子間の引力相互作用

同位体効果の実験結果:  $T_c M^{1/2} = \text{一定}$

$M$ : 同位体の質量      $\omega \propto M^{-1/2}$

## ・超伝導ギャップ

$k$ 空間に対して等方的なギャップ

超伝導状態での物理量は  
指数関数的な振る舞い

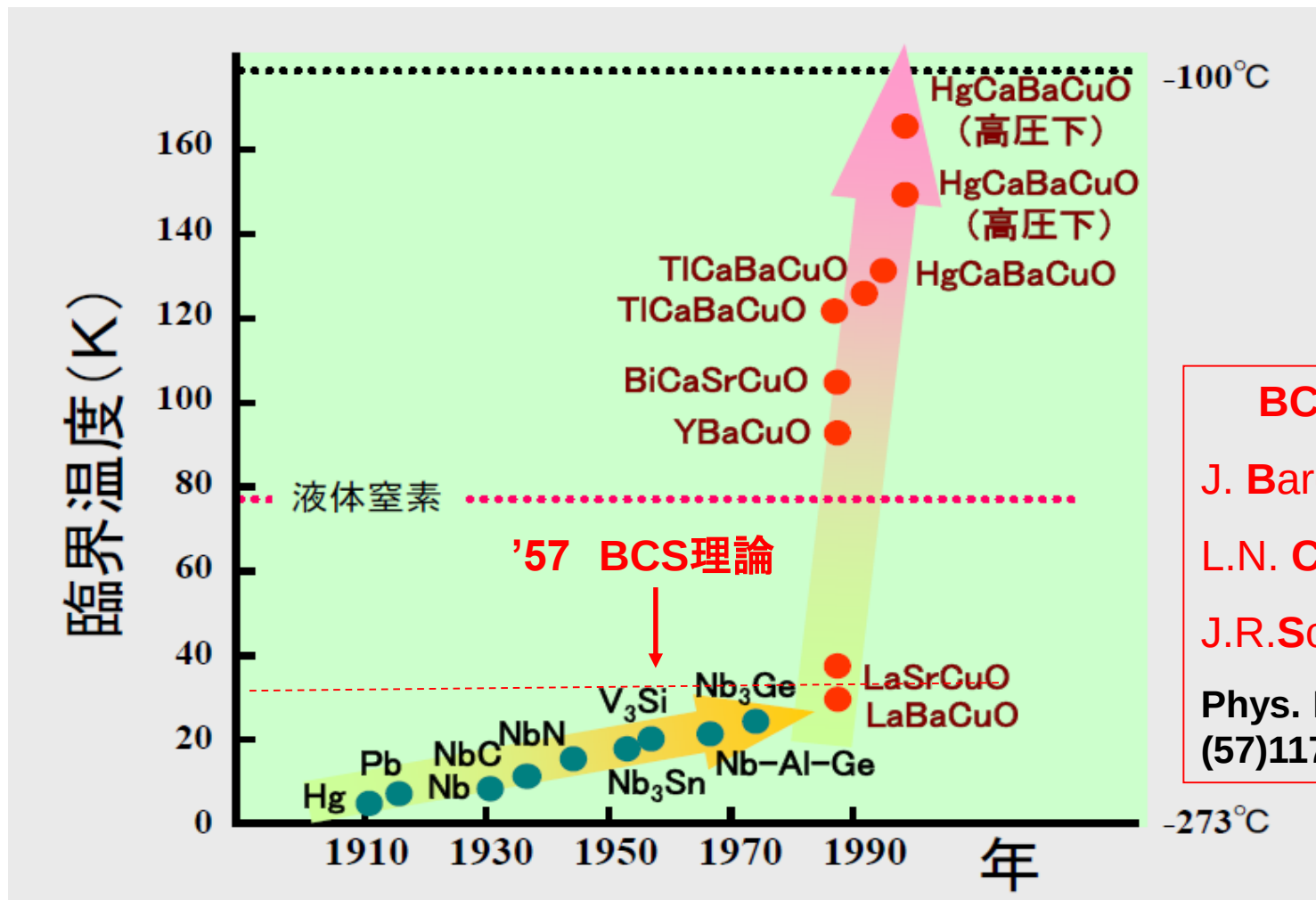
$T = 0$ での大きさ:  $2\Delta(0)/k_B T_c = 3.5$

温度依存性 :  $\Delta(T) \sim \Delta(0) [1 - (T/T_c)]^{1/2}$      ( $T \sim T_c$ )

それまで報告のあったほぼすべての実験結果の説明に成功 !!

「超伝導転移温度は30Kを超えない! ?」      $\text{Nb}_3\text{Ge}: T_c \sim 23.4 \text{ K}$

ところが...



BCS理論

J. Bardeen,

L.N. Cooper

J.R. Schrieffer

Phys. Rev. 108  
(57)1175

1911年 Hgの超伝導発見

1957年 BCS 理論

1972年 <sup>3</sup>Heの超流動

1979年 CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の超伝導

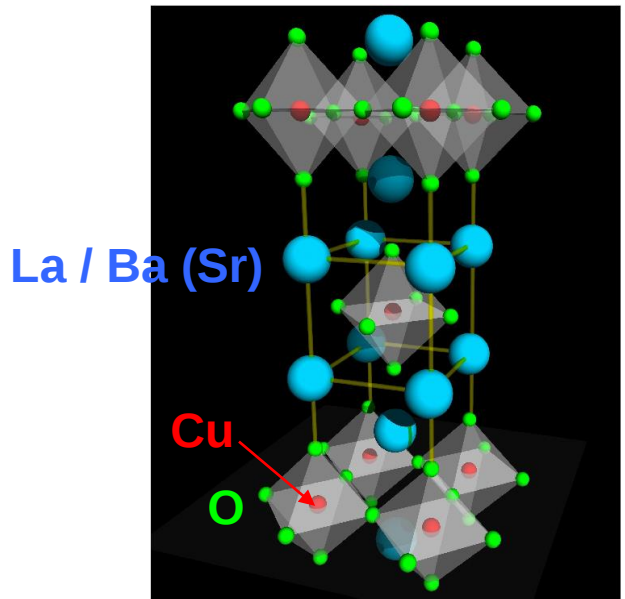
1986年 銅酸化物高温超伝導 . .

赤: ノーベル賞受賞

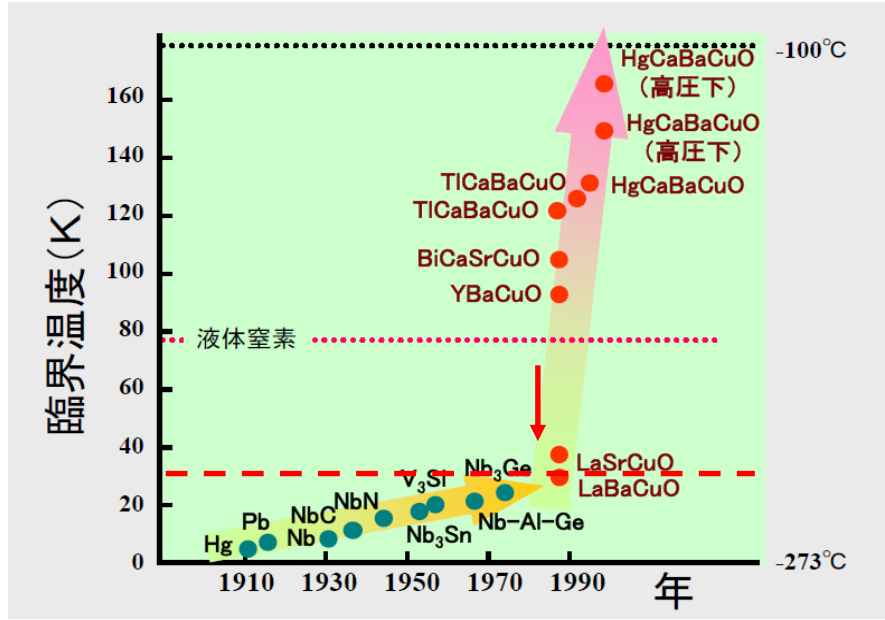
# 2. Break Through (非従来型超伝導の発見)

## 銅酸化物高温超伝導体の出現

1986年 J.G. BednorzとK. A. Müllerによる銅酸化物による超伝導の発見

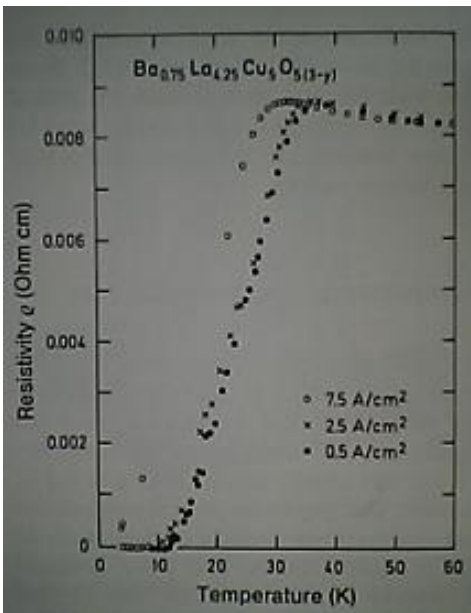


銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}(\text{Sr})_x\text{CuO}_4$ の結晶構造



## 酸化物超伝導の 最初の報告

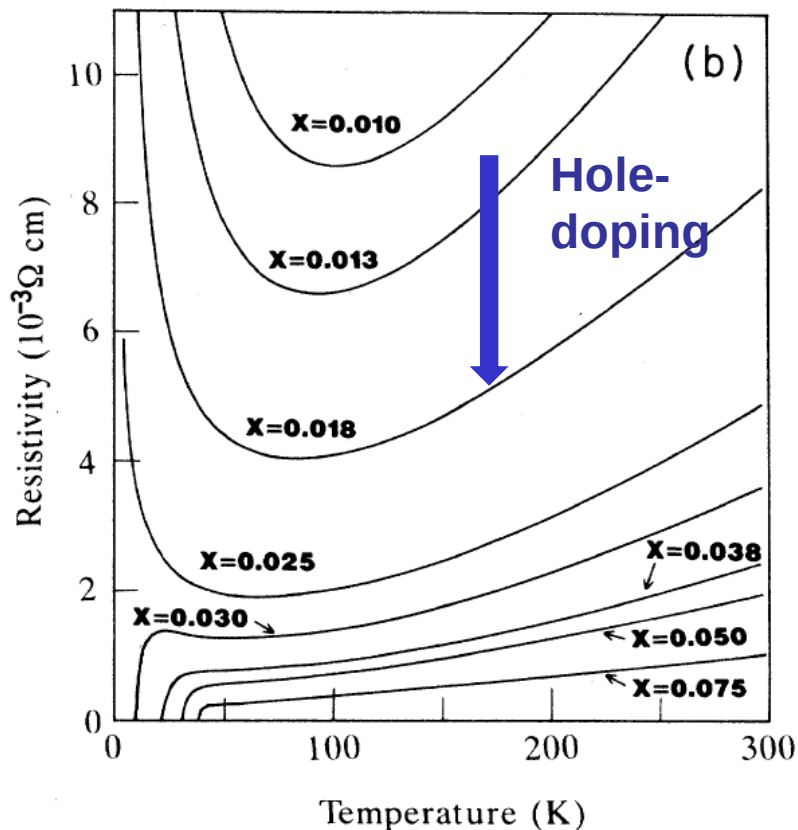
J. G. Bednorz and K. A. Müller; Z. Physik B 64, 189 (1986)



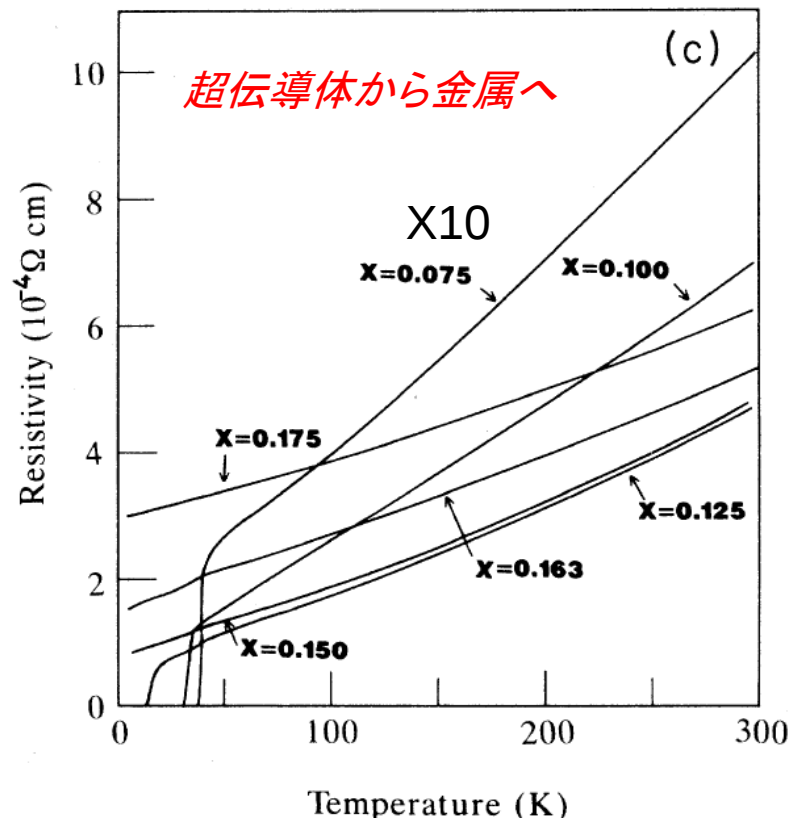
# 高温超伝導体 $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{CuO}_4$ の電気抵抗

母物質  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  : Mott絶縁体

低ドーピング領域



高ドーピング領域



キャリアー (ホール、電子)ドーピングにより、反強磁性絶縁体から、超伝導、通常金属状態に変化する。

H. Takagi *et al.*  
Phys. Rev. B **40**,  
2254 (1989)

# 銅酸化物高温超伝導体が教えてくれたこと

母物質:  $\text{La}^{3+}_2\text{Cu}^{2+}\text{O}^{2-}_4$   
 $\text{Nd}^{3+}_2\text{Cu}^{2+}\text{O}^{2-}_4 : \text{Cu}^{2+} (3d^9)$

cf. Cu metal:  $(3d^{10})(4s^1)$

$\text{Cu}_2\text{O} : \text{Cu}^{1+} (3d^{10})$  バンド絶縁体

$\text{CuO} : \text{Cu}^{2+} (3d^9)$  AFI, **モット絶縁体**

ホールドーピング系:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

電子ドーピング系:  $\text{Nd}^{3+}_{2-x}\text{Ce}^{4+}_x\text{CuO}_4$

銅酸化物超伝導体の相図 (概念図)

磁性体が超伝導体に!!

金属状態

超伝導

反強磁性

0.84

AFM

AFM

1

PG

Strange Metal

SC

1.16

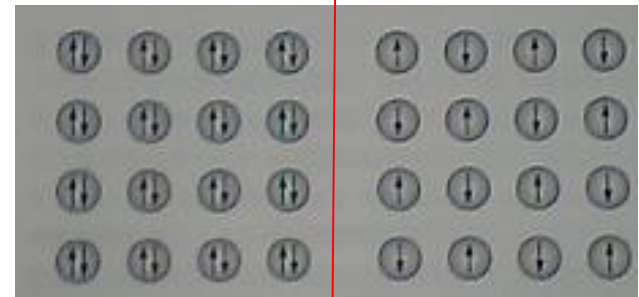
超伝導

金属状態

バンド絶縁体とモット絶縁体の違い

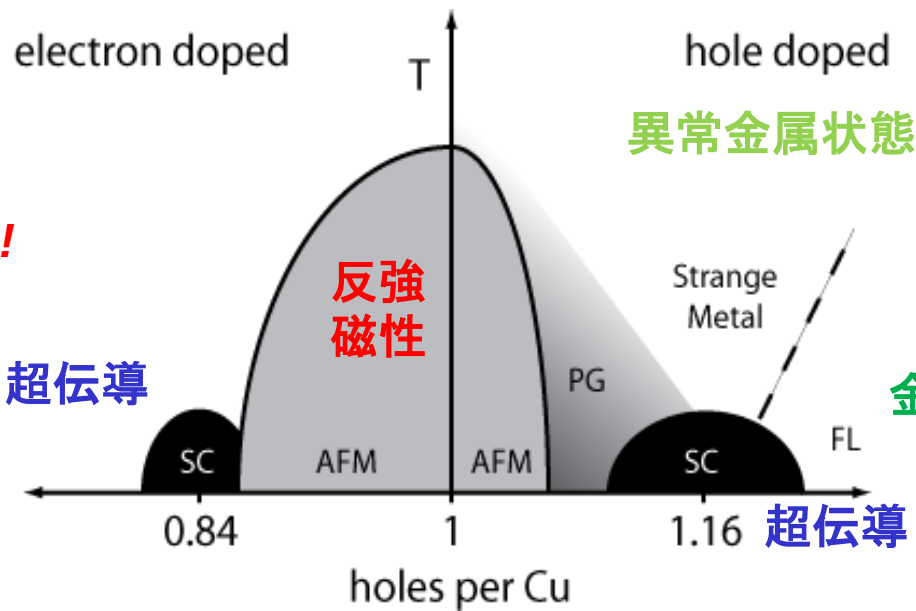
バンド絶縁体

モット絶縁体



バンドが満たされる

$U > t$   
のため電子が局在



# 最初の非従来型超伝導 ( $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ ) 1979年



F. Steglich

Phys. Rev. Lett.  
43, 1892 (79)

電気抵抗

## Superconductivity in the Presence of Strong Pauli Paramagnetism: $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$

F. Steglich

*Institut für Festkörperphysik, Technische Hochschule Darmstadt, D-6100 Darmstadt, West Germany*

and

J. Aarts, C. D. Bredl, W. Lieke, D. Meschede, and W. Franz

*II. Physikalisches Institut, Universität zu Köln, D-5000 Köln 41, West Germany*

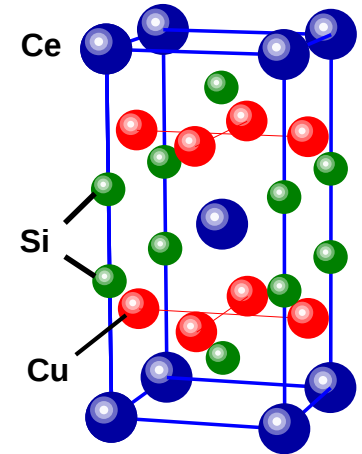
and

H. Schäfer

*Eduard-Zintl-Institut, Technische Hochschule Darmstadt, D-6100 Darmstadt, West Germany*

(Received 10 August 1979; revised manuscript received 7 November 1979)

A comparison was made between four low-temperature properties of  $\text{LaCu}_2\text{Si}_2$  and  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ . Whereas  $\text{LaCu}_2\text{Si}_2$  behaves like a normal metal,  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  shows (i) low-temperature anomalies typical of "unstable 4f shell" behavior and (ii) a transition into a superconducting state at  $T_c \approx 0.5$  K. Our experiments demonstrate for the first time that superconductivity can exist in a metal in which many-body interactions, probably magnetic in origin, have strongly renormalized the properties of the conduction-electron gas.



比熱

$T_c$ で比熱に大きなとび

⇒ 重い電子の超伝導

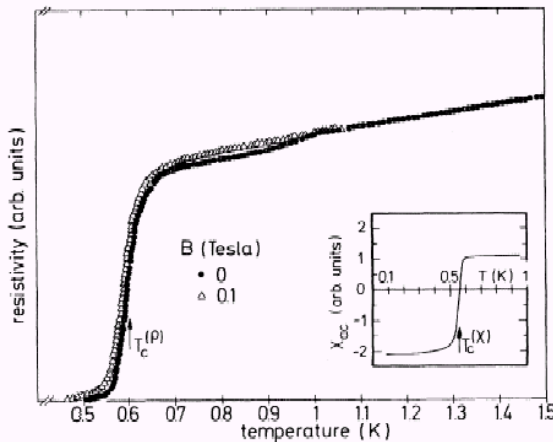


FIG. 1. Resistivity (main part) and low-field ac susceptibility (inset) of  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  as function of temperature. Arrows give transition temperatures  $T_c^{(p)} = 0.60 \pm 0.03$  K and  $T_c^{(s)} = 0.54 \pm 0.03$  K. Transition widths are taken between 10% and 90% points of the transition curves.

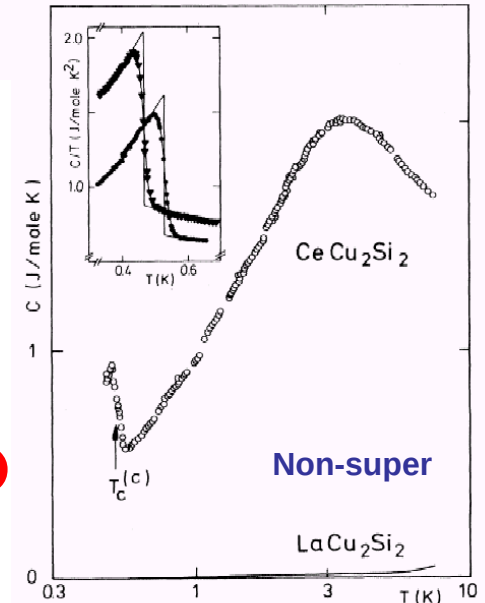
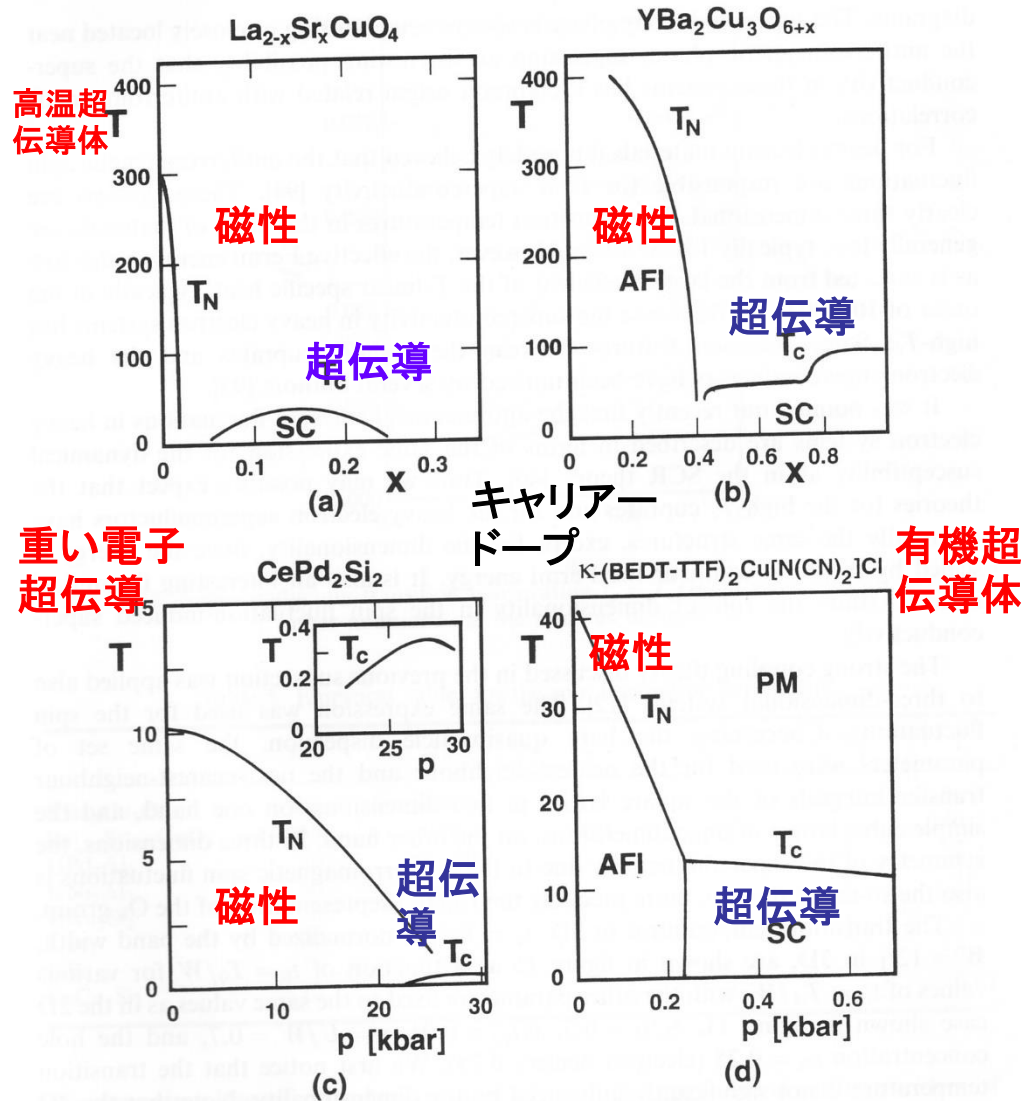


FIG. 2. Molar specific heat of  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  at  $B = 0$  as function of temperature on logarithmic scale. Arrow marks transition temperature  $T_c^{(c)} = 0.51 \pm 0.04$  K. Transition width determined as in Fig. 1. Inset shows in a  $C/T$  vs  $T$  plot the specific-heat jumps of two other  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  samples.

# 3. 非従来型超伝導(強相関電子系超伝導)の特徴



- 異方的超伝導体である。  
超伝導対の対称性(性質)が従来のBCS超伝導体と性質を異にする
- 磁気相と超伝導が競合(共存)している。  
磁性と超伝導が密接に関係
- cf. 従来(金属)の超伝導体では磁気相互作用は超伝導を破壊すると思われていた。

Figure 14. Phase diagrams of high- $T_c$  cuprates, (a)  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and (b)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ , (c) a heavy electron superconductor  $\text{CePd}_2\text{Si}_2$  under pressure  $p$  and (d) an organic superconductor  $\text{K}-(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$  under pressure.  $T_N$ : Néel temperature, AFI: antiferromagnetic insulator, SC: superconductor, PM: paramagnetic metal.

# 超伝導対の波動関数

P.W. Anderson and P. Morel, *PR* 123  
1911('61) "Generalized BCS State..."

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \sigma_1; \mathbf{r}_2, \sigma_2) = \chi(\sigma_1, \sigma_2) \cdot \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$$

Spin part      Orbital part

**Spin part**:  $S = 0$  スピン一重項       $\chi^{S=0} = (1/\sqrt{2})(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$

$S = 1$  三重項       $\chi^{S=1} = |\uparrow\uparrow\rangle, (1/\sqrt{2})(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle), |\downarrow\downarrow\rangle$

**スピン三重項超伝導**

**Orbital part**:  $\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$      $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$      $\psi(\mathbf{r})$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi(\mathbf{r}) = E \psi(\mathbf{r})$$

$V(r)$  が異方的な場合、超伝導対の波動関数も異方的になる

$$\psi(r) \propto \underline{Y_l^m(\theta, \varphi)}$$

**球面調和関数**

$$l = 0, \quad l = 1, \quad l = 2, \quad l = 3, \dots\dots$$

$s$ -波,     $p$ -波,     $d$ -波,     $f$ -波

$$\Delta_l(k) = \Delta_0 \sum_{m=-l}^l \lambda_{lm} Y_l^m(\theta, \varphi)$$

**異方的な超伝導ギャップ**

# 異方的超伝導対

原点に振幅を持たない

強相関電子系  
の特徴

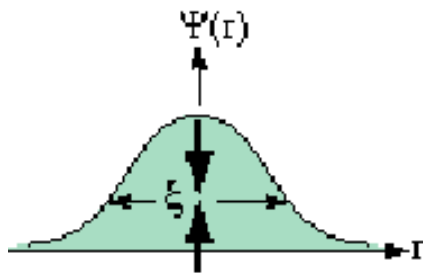
スピン状態

一重項

軌道状態

s 波

スピン  
状態

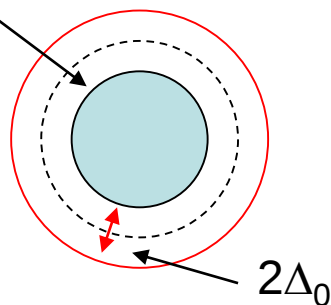


波動関数の  
広がり



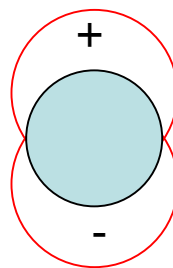
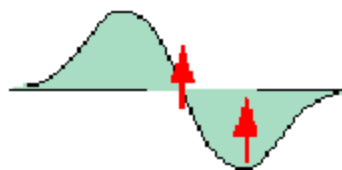
フェルミ面

ギャップ  
関数



三重項

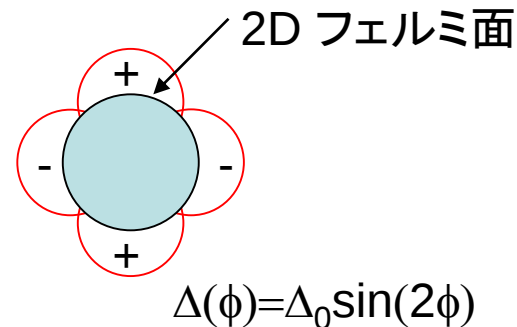
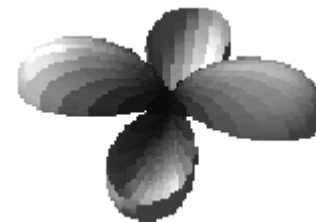
p 波



$$\Delta(\theta) = \Delta_0 \cos \theta$$

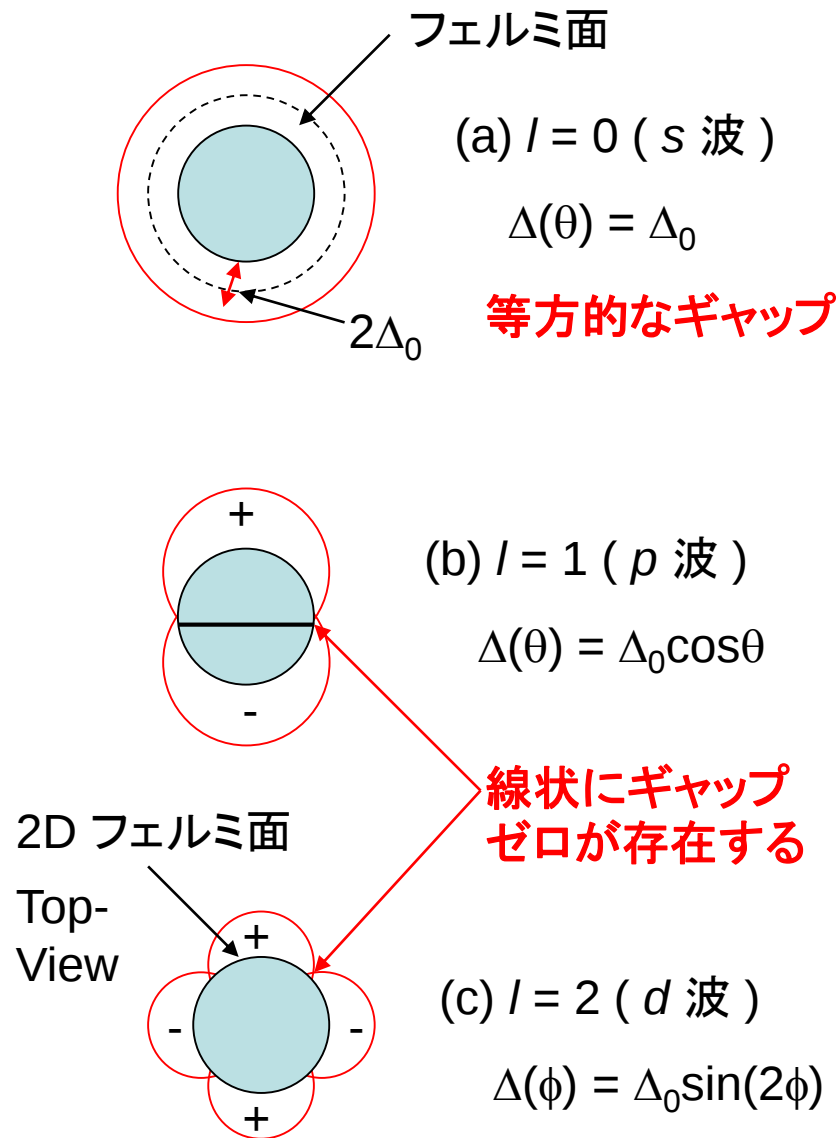
一重項

d 波

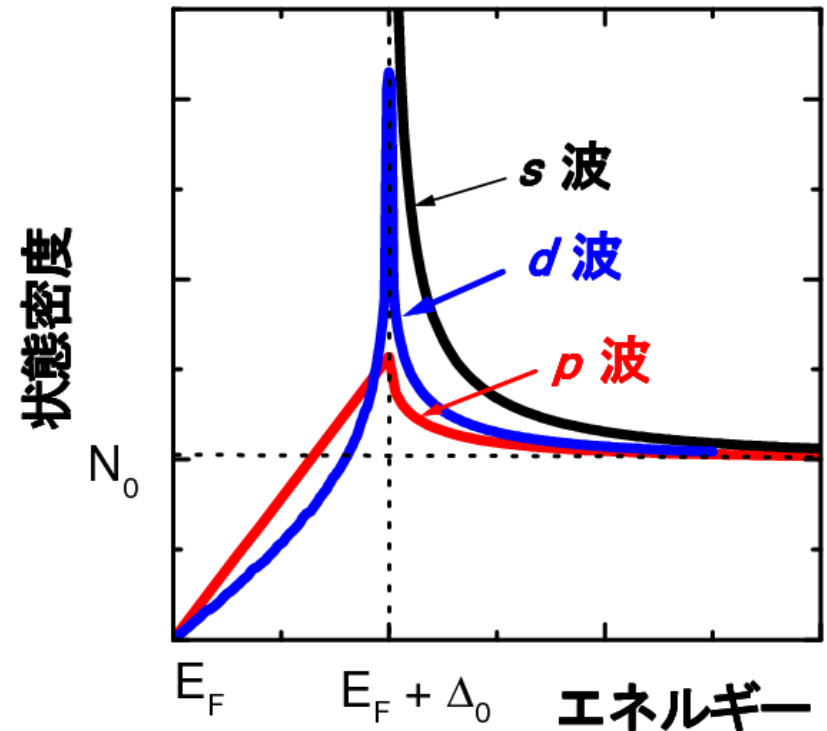


$$\Delta(\phi) = \Delta_0 \sin(2\phi)$$

# 異方的超伝導ギャップ



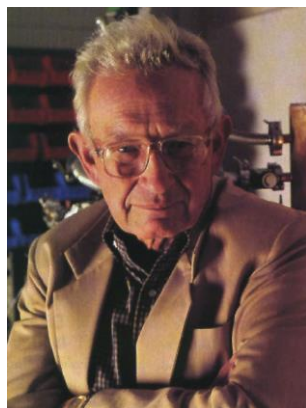
## 超伝導状態状態の状態密度



## 異方的超伝導ギャップの特徴

超伝導ギャップ内に連続的に状態を持つ  $N(E) \propto E$

➡ 超伝導状態の物理量が温度のベキ乗となる。



P. W. Anderson

# Generalized Bardeen-Cooper-Schrieffer States and the Proposed Low-Temperature Phase of Liquid He<sup>3</sup>

P. W. ANDERSON

*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*

AND

P. MOREL

*French Embassy, New York, New York*

(Received May 15, 1961)

Particle interactions in a Fermi gas may be such as to attract pairs near the Fermi surface more strongly in  $l=1, 2, 3$  or higher states than in the simple spherically symmetrical  $s$  state. In that case the Bardeen-Cooper-Schrieffer condensed state must be generalized, and the resulting state is an anisotropic superfluid. We have studied the properties of this type of state in considerable detail, especially for  $l=1$  and  $2$ . We have derived expressions for the energy, the moment of inertia, the magnetic susceptibility and the specific heat. We also derive the density correlation function and the density-current density correlation; in some cases

the latter implies that the liquid has net surface currents and a net orbital angular momentum. The ground state for  $l=2$  is different from those previously considered, and has cubic symmetry and no net angular momentum. A general method for replacing the possibly rather complicated potential by a simple scattering matrix is given. A brief discussion of possible collective effects is included. We apply our results to liquid He<sup>3</sup>; after correction for scattering by a method due to Suhl, it is found that the predicted transition should take place below 0.02°K. Other possible applications are suggested.

## Quasiparticle DOS

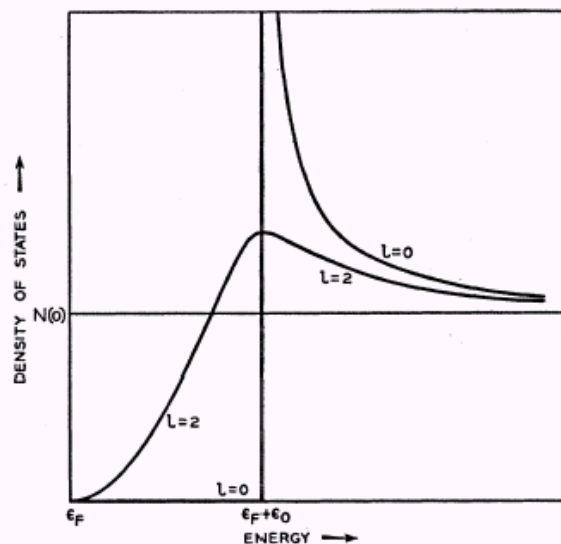


FIG. 2. Comparison of the individual-particle excitation energy spectra for normal fluid (constant density of states equal to  $N_0$ ), an  $s$ -type condensed fluid ( $l=0$ ) and a  $d$ -type condensed fluid ( $l=2$ ).

## Spin Susceptibility

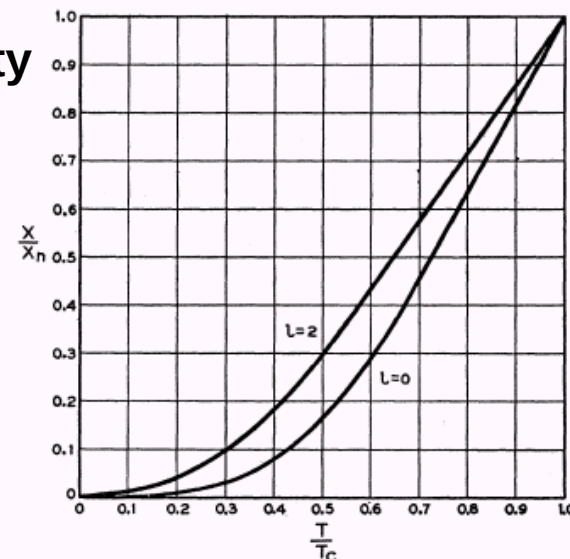
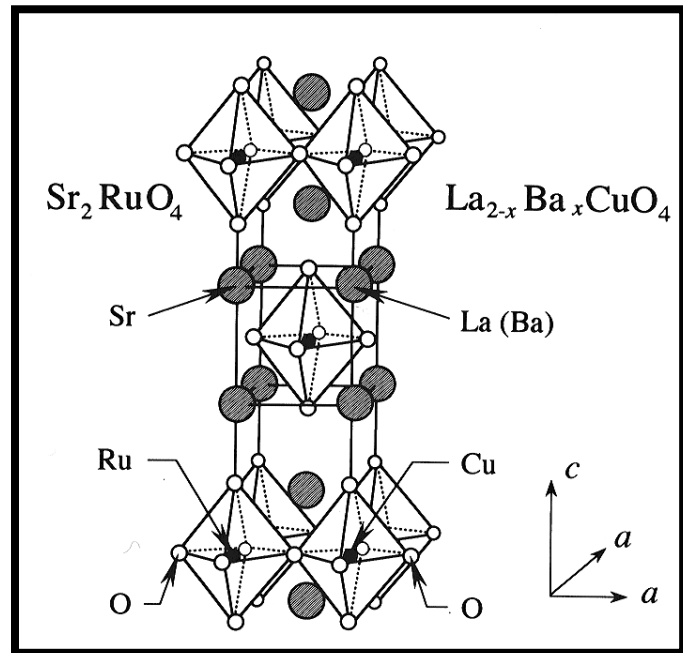


FIG. 3. Comparison of the variation of the paramagnetic susceptibility versus temperature for an  $s$ -type condensed fluid ( $l=0$ ) and a  $d$ -type condensed fluid ( $l=2$ ).

# スピン三重項超伝導 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ (前野 *et al.* '94)



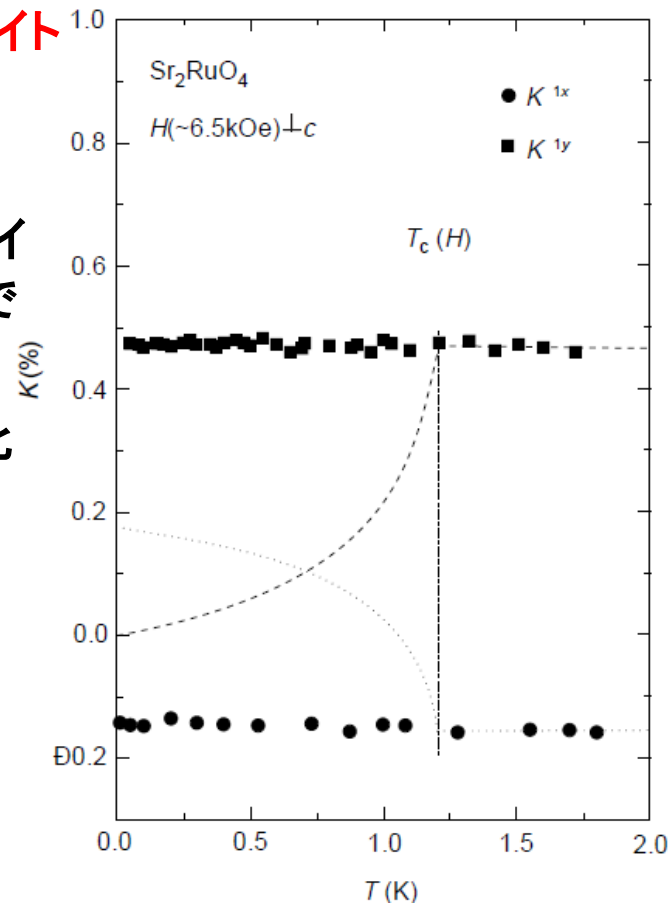
## 超伝導状態におけるスピン帯磁率の測定

Y. Maeno *et al.*  
Nature 372, 532  
(’94)

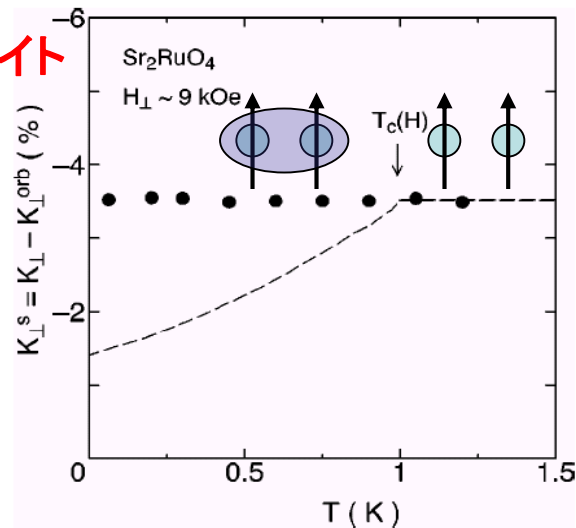
酸素  
サイト

RuとOの両サイトのナイト  
シフトは超伝導状態で  
変化が見られない

超伝導状態で弱い磁化



Ruサイト



スピン三重項  
超伝導体

K. Ishida *et al.*  
PRB(00)

K. Ishida *et al.* Nature  
396, 658 (’98)

FIG. 6. Temperature dependence of  $^{99}\text{K}_{\perp}^s$ . The dotted curve is the calculation based on the spin-singlet  $d$ -wave ( $d_{x^2-y^2}$ ) model with a line node (see text).

# 4. トピックス I $\text{MgB}_2$ ( $T_c = 39 \text{ K}$ )



J. Nagamatsu *et al.*,  
Nature **410**, 63 (2001)

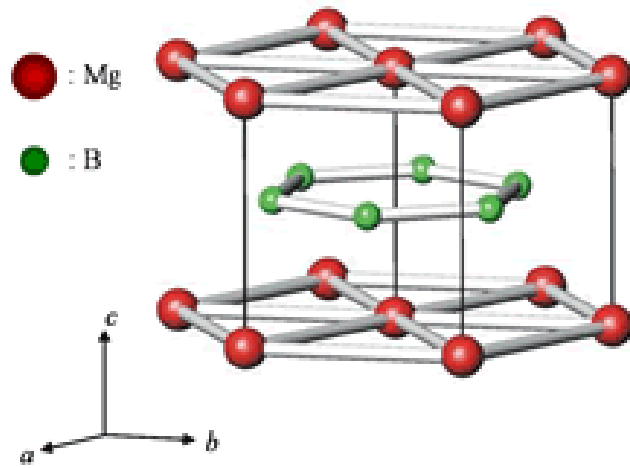


Fig.11  $\text{MgB}_2$ の結晶構造

超伝導転移温度  $T_c$  [ K ]

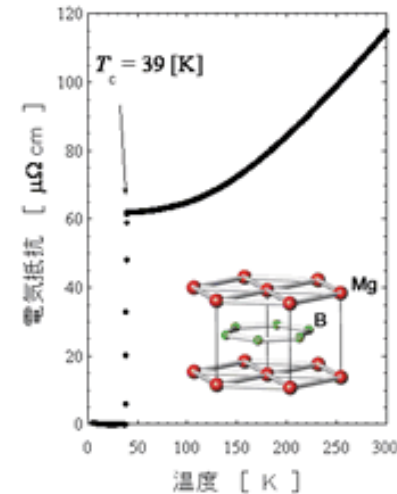
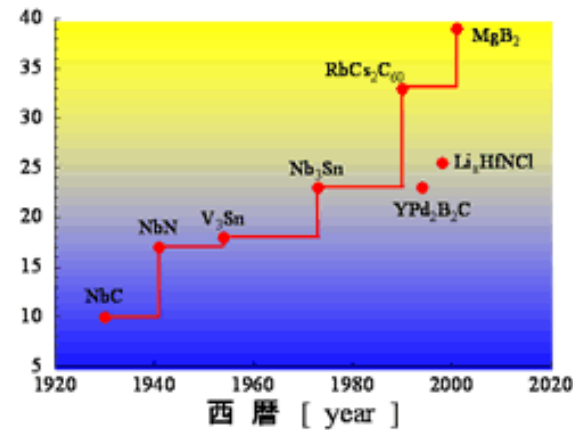


Fig.1 金属間化合物における  $T_c$  の推移

Fig.2  $\text{MgB}_2$ における電気抵抗の温度依存性

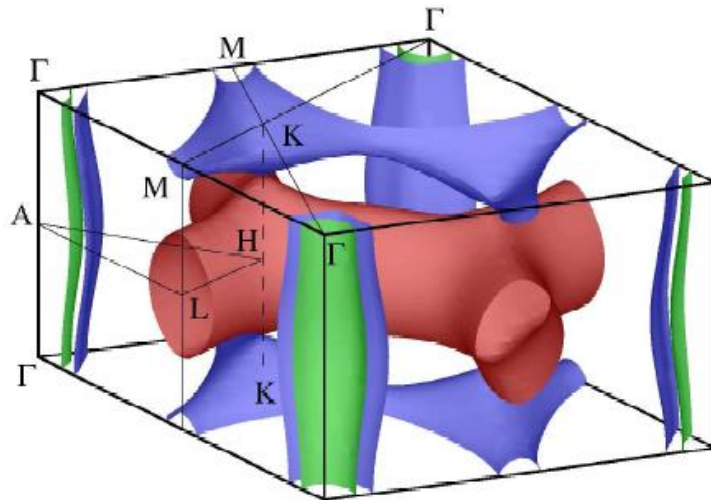
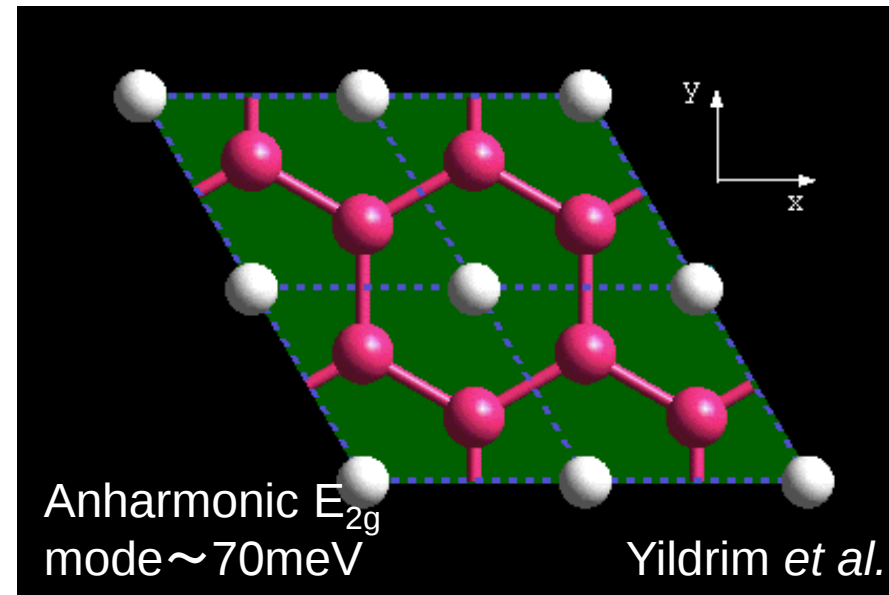


FIG. 1. Fermi surface of  $\text{MgB}_2$ . The figure is taken from Ref. [5]. Holes in the  $\sigma$ -band form cylinders around the  $\Gamma A$ -line. The  $\pi$ -band has electron and hole pockets located near the  $H$ - and  $K$ -points, respectively.



# トピックスII

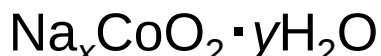
# 水和物コバルト酸化物の超伝導



H. Sakurai

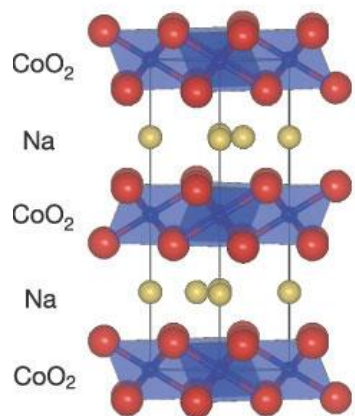
2003年に発見

Bilayered Hydrate -

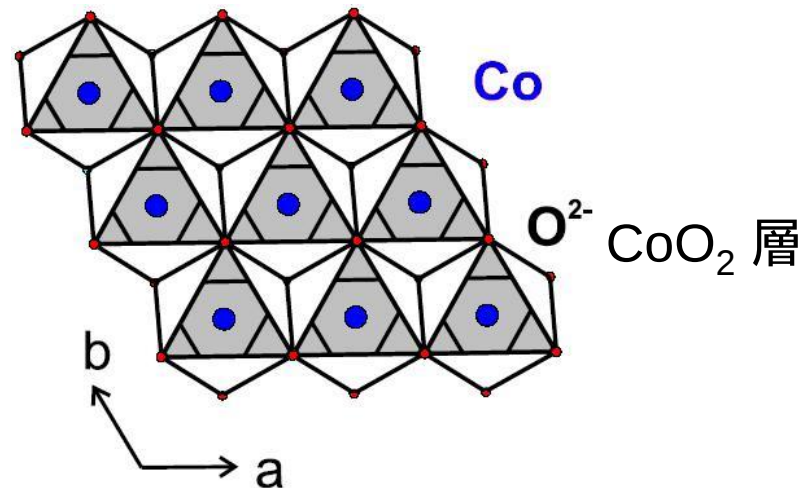
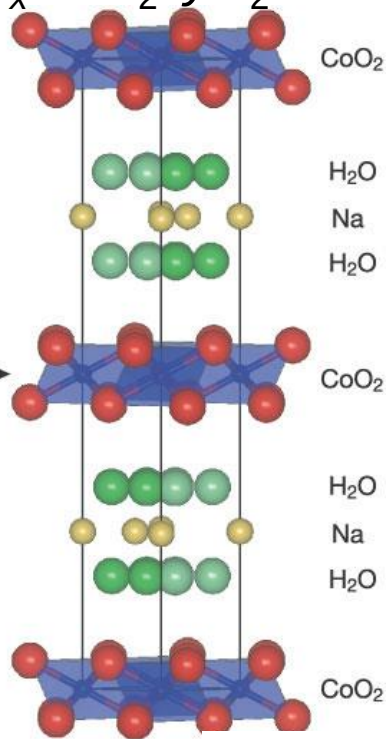


2次元層状構造  $\text{CoO}_2$  層

母物質  
 $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  ( $x \sim 0.7$ )



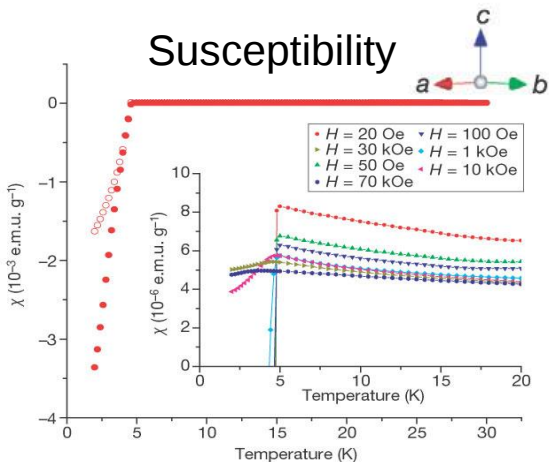
Oxidation  
Process



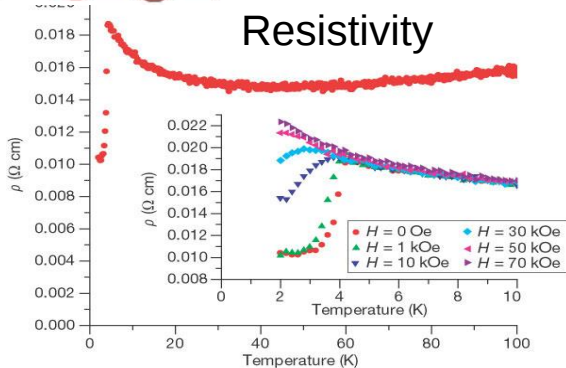
Co イオンは三角格子を形成している

銅、ルテニウム酸化物  
超伝導体の $\text{Cu}(\text{Ru})\text{O}_2$   
面は正方格子を形成

Susceptibility



Resistivity



# ~1985: Ionic Mobility of Li, Na → batteries

## リチウム電池の原理

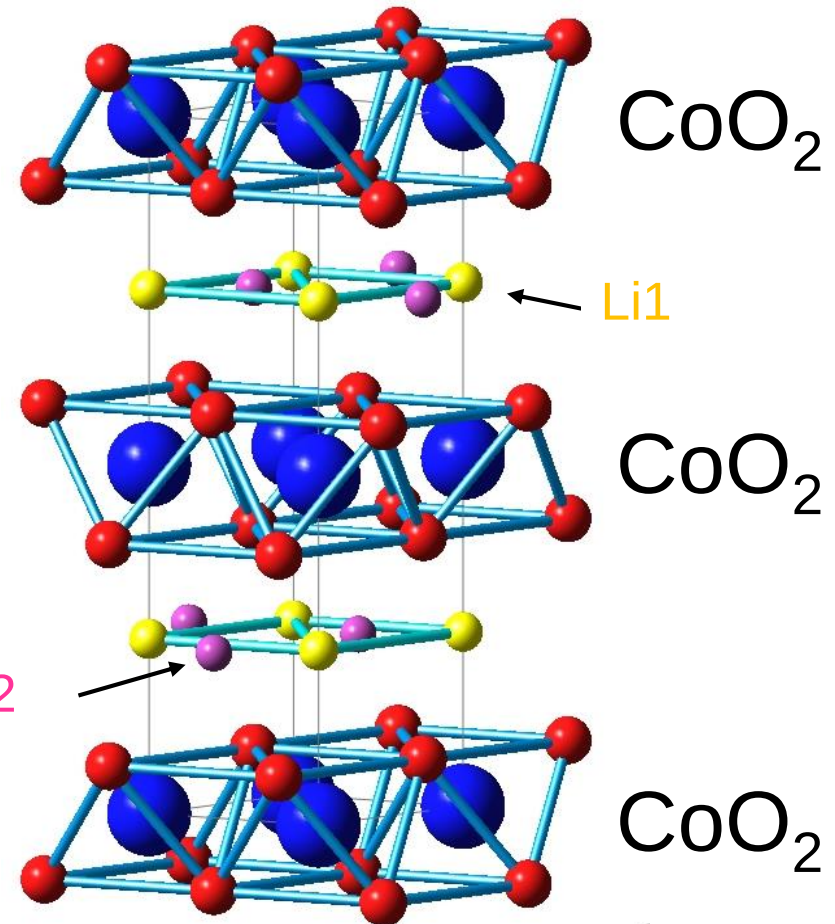
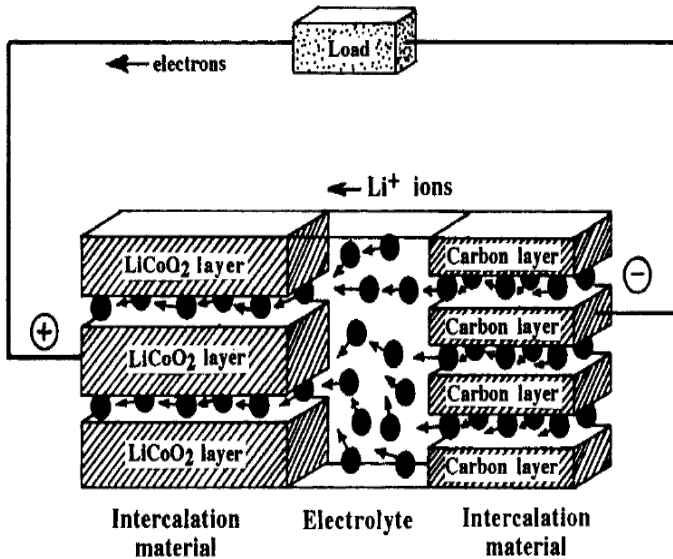
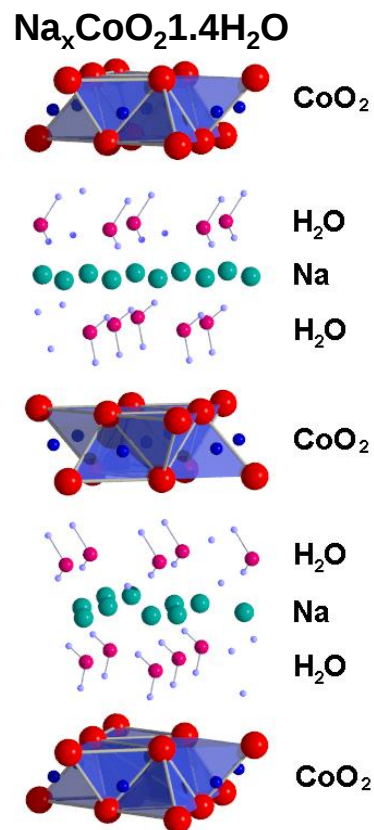
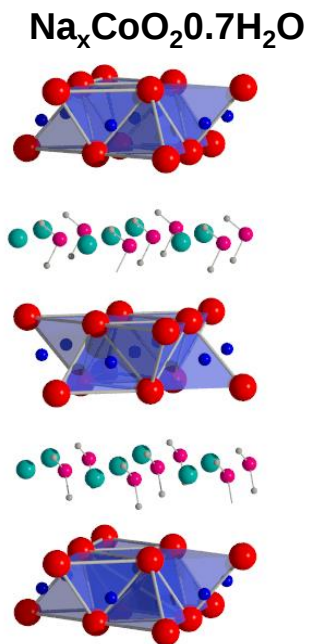
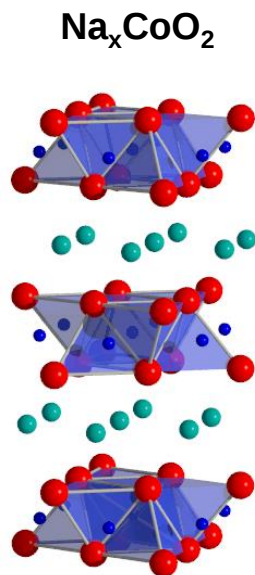


FIGURE 11.11. Schematic representation of a metal-free lithium battery (or rocking-chair battery) during the discharge. The Li<sup>+</sup> ions rock between the two intercalation materials: LiCoO<sub>2</sub> and Li<sub>x</sub>C<sub>6</sub> electrodes. The immediate advantages expected for such a battery are the high energy density and the safety behavior. (From Julien, C. and Nazri, G.A., *Solid State Batteries: Materials Design and Optimization*, Kluwer, Boston, 1994. With permission.)



非超伝導

超伝導

$\text{Na}_x\text{CoO}_2$ の単結晶



Naの濃度の調節と、水を挿入するため単結晶を水溶液中に数時間浸す。

保存も湿度70%の環境で放置



# トピックスIII

## 鉄ヒ素超伝導体の発見 (2008年)

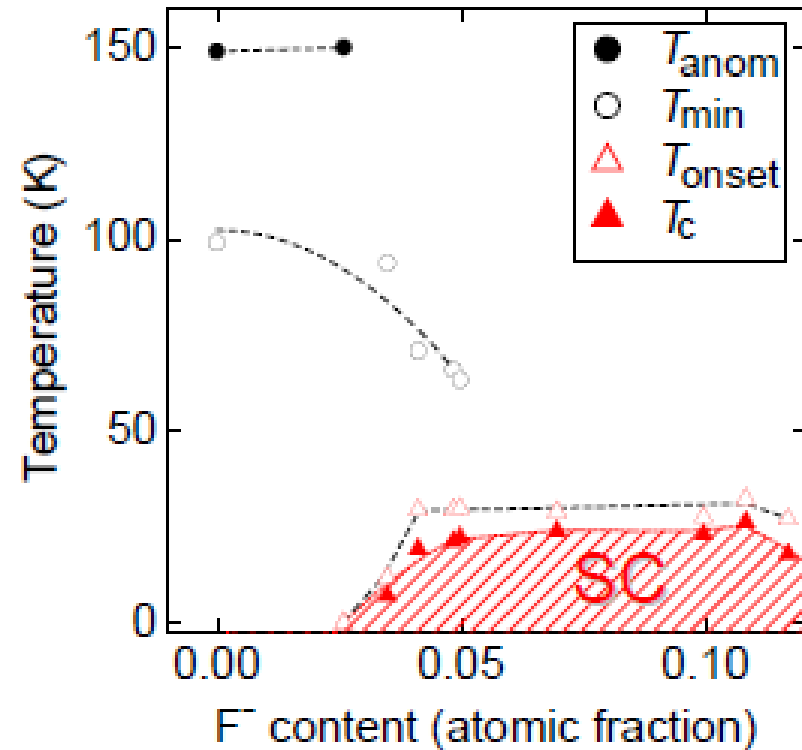
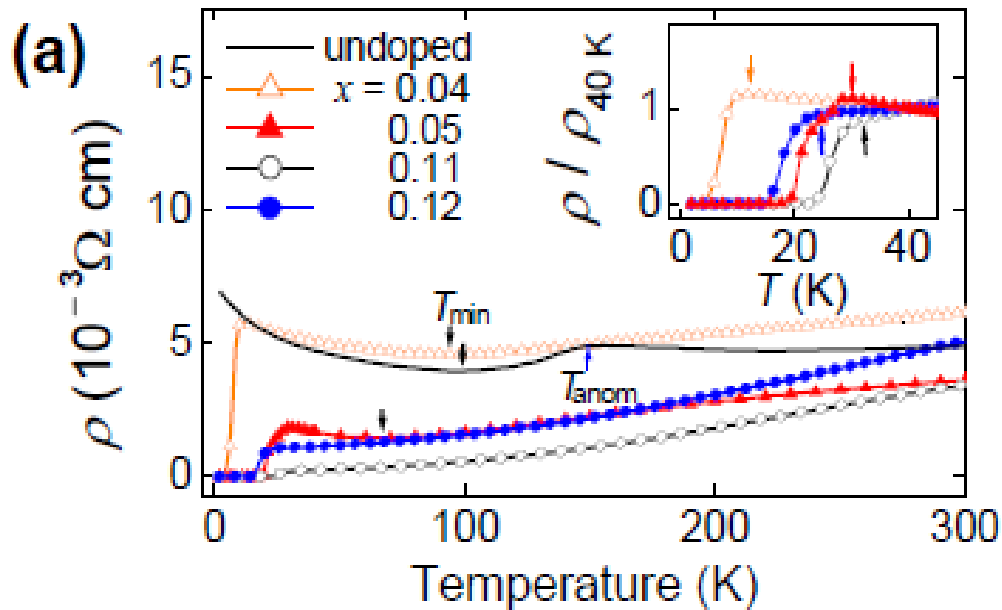


Iron-Based Layered Superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x = 0.05-0.12$ )  
with  $T_c = 26 \text{ K}$

Yoichi Kamihara,<sup>\*,†</sup> Takumi Watanabe,<sup>‡</sup> Masahiro Hirano,<sup>†,§</sup> and Hideo Hosono<sup>†,‡,§</sup>

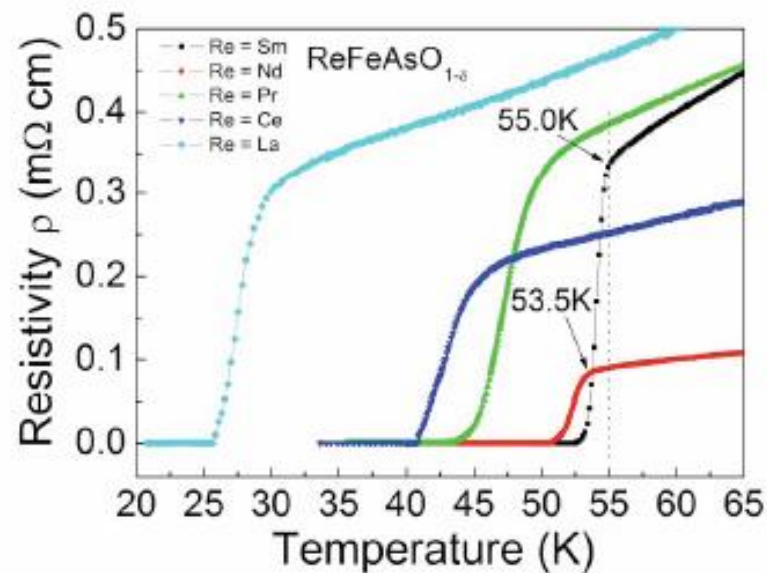
**Kamihara *et al*, JACS,  
130, 3296 (2008).**

細野秀雄 教授    神原陽一(東工大)



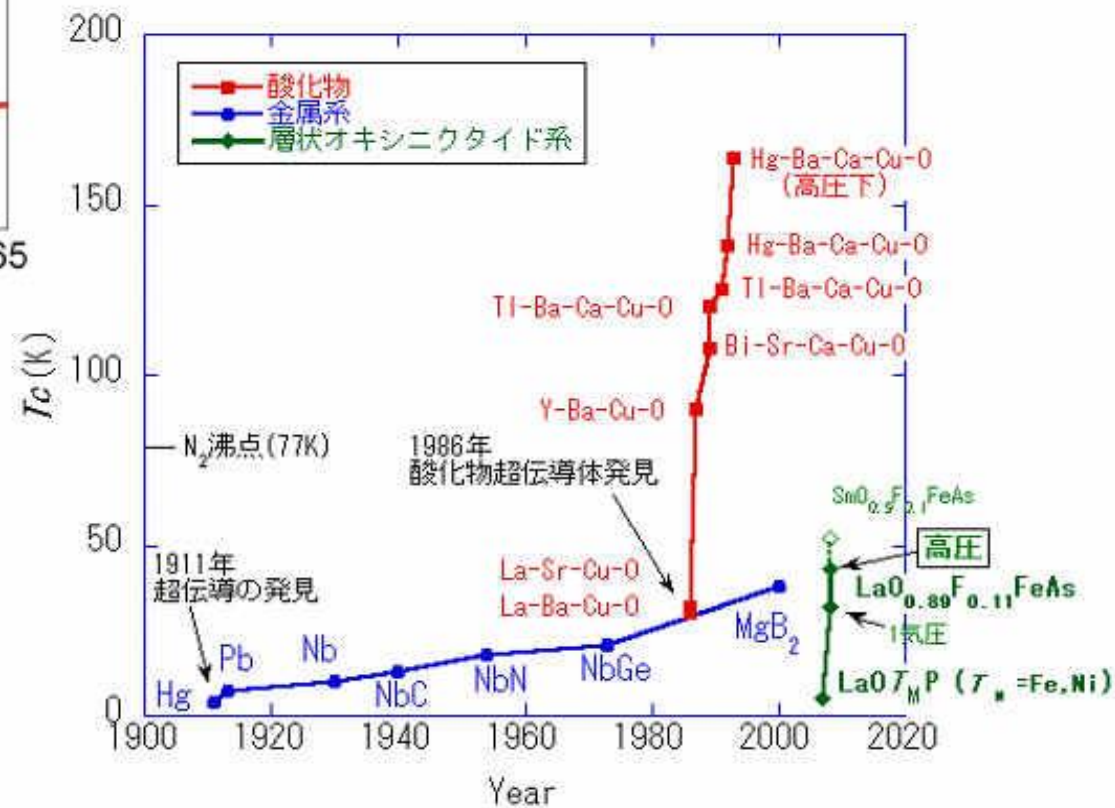
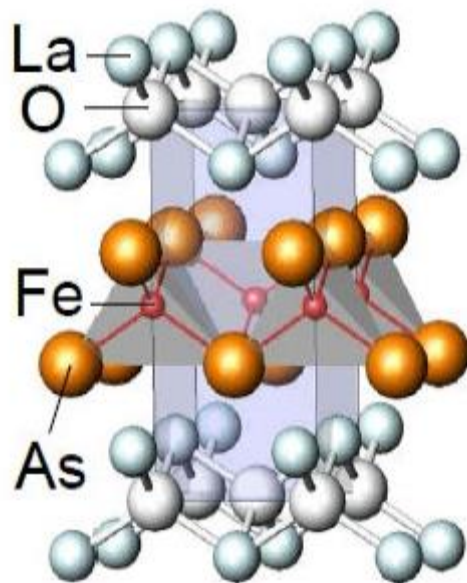
◆ 通常磁性を示すFe元素が超伝導に重要な役割をしている。

# Fe系超伝導体の超伝導転移温度の上昇



LaサイトをSm、Ndに置換  
すると $T_c = 55\text{K}$  まで上昇

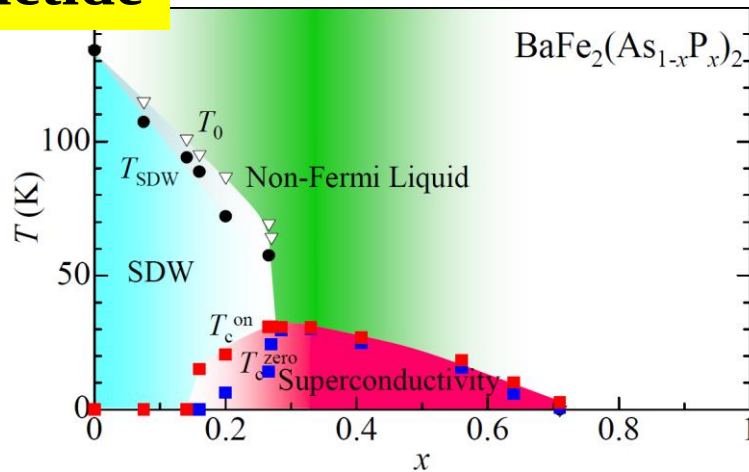
結晶構造



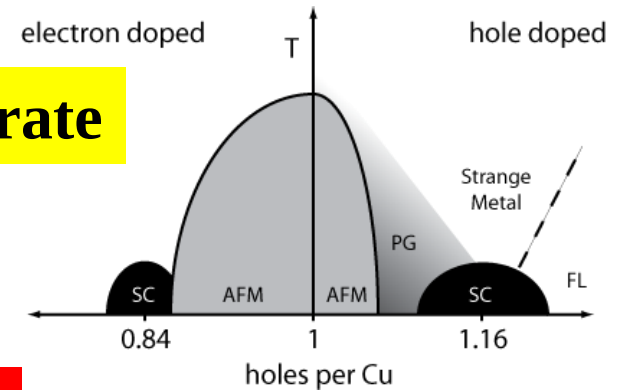
超伝導転移温度の年度推移  
東工大 細野研究室HP より

# Universality of Phase Diagram

## Pnictide

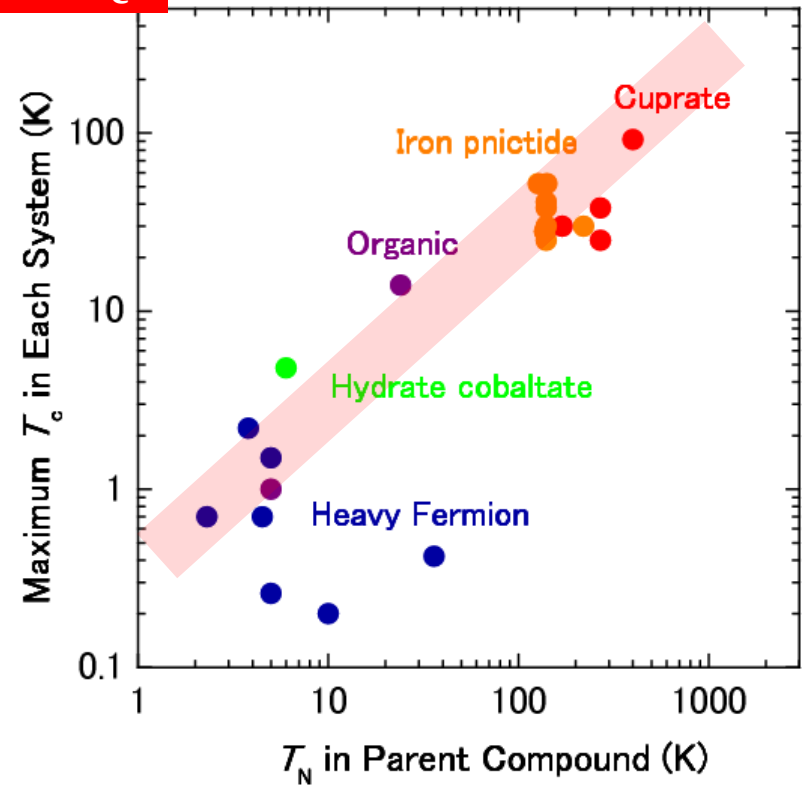
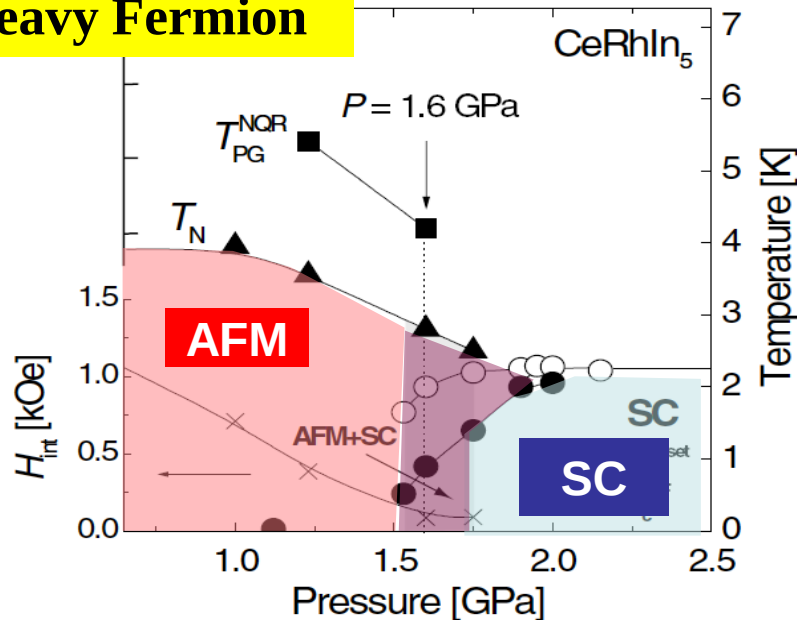


## Cuprate



## $T_N$ & $T_c$

## Heavy Fermion



# 磁石にくっつく超伝導体

## 強磁性と超伝導の微視的な共存

石田憲二, 佐藤憲昭

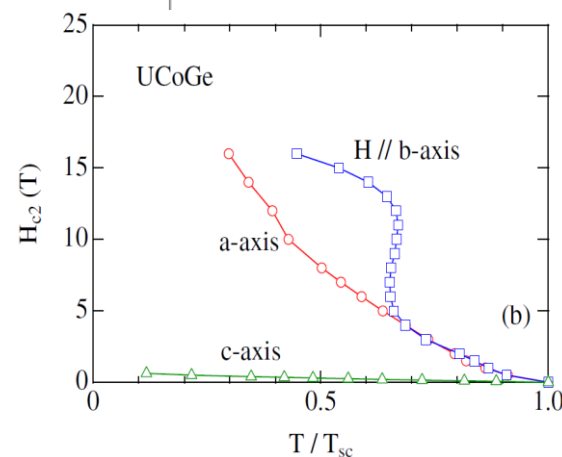
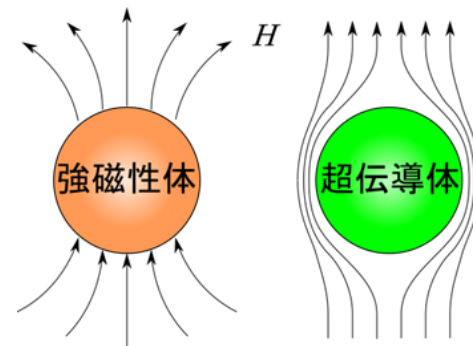
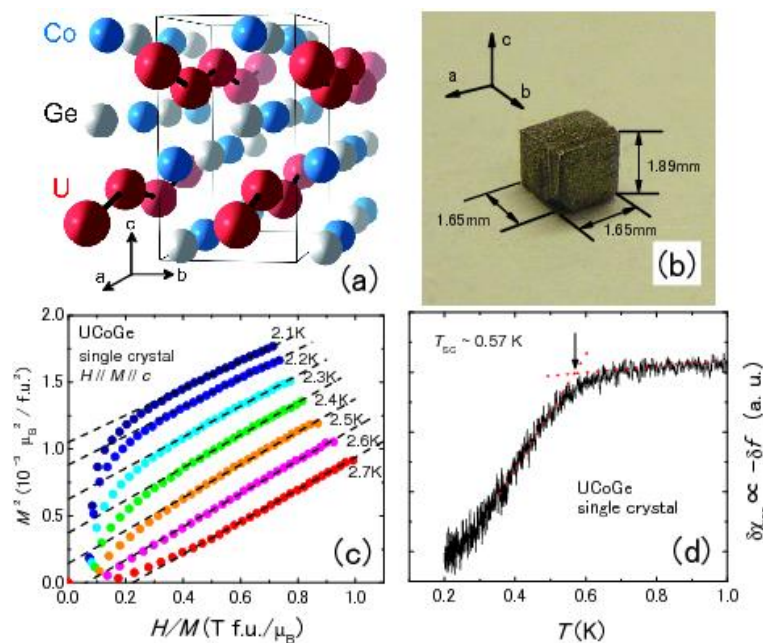
### はじめに

「強磁性と超伝導は共存できるのか？」  
という長年の問題が超伝導研究にはあ

る。 (超伝導転移温度  $T_{\text{Super}} \approx 30 \text{ K}$ )  
では、強磁性は  $\text{RuO}_2$  層で、超伝導  
は  $\text{CuO}_2$  層で起こることが知られてい  
た<sup>5)</sup>。

現在までの精力的な研究によ  
 $\text{UIr}$ <sup>7)</sup>,  $\text{URhGe}$ <sup>8)</sup>,  $\text{UCoGe}$ <sup>9)</sup> が強  
磁性超伝導体として見いだされてい  
る。なかでも  $\text{URhGe}$  と  $\text{UCoGe}$  は、 $T_{\text{sc}}$

### UCoGe



超伝導は磁場下で安定する?!

# 強磁性超伝導体 UCoGeの研究

2012年 2月  
京大HPより

Kyoto University

京都大学

検索

イベントカレンダー

刊行物・資料請求

お問合せ

アクセス・マップ

サイトマップ

リンク

現在の場所: ホーム > 研究 >> お知らせ

ホーム

＊ 概要

◎ 教育

◆ 研究

研究支援体制

白眉プロジェクト

若手研究者支援

女性研究者支援

シニア・コア研究者支援

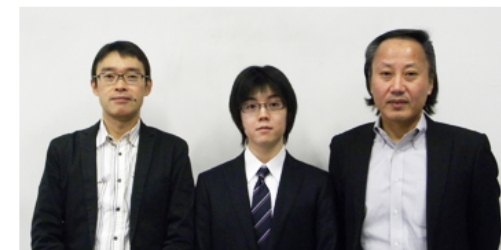
研究成果

研究最前線からのメッセージ

## 磁石でありながら超伝導にもなる物質の超伝導発現の新しい仕組みを解明 - 磁石が生み出す超伝導 -

2012年2月7日

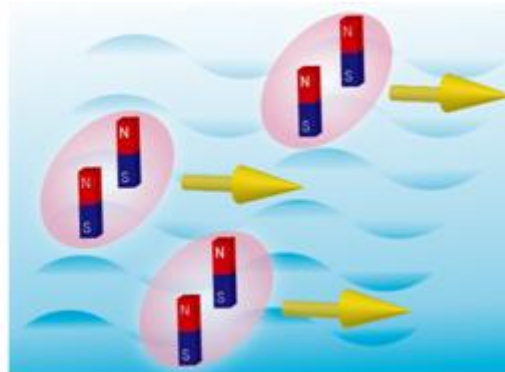
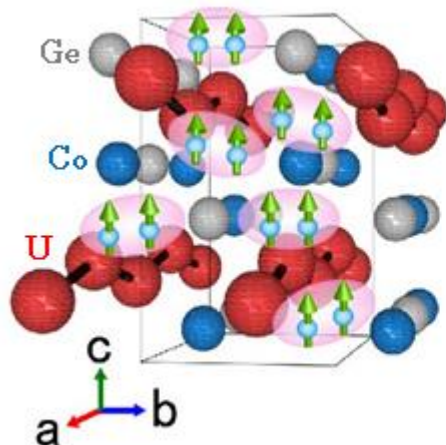
服部泰佑 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻大学院生、石田憲二 同教授、多田靖啓 元同大学院生（現 物性研究所助教）、藤本聡 同准教授らの研究グループは、佐藤憲昭 名古屋大学理学研究科教授、佐藤伊佐務 東北大学金属材料研究所准教授らのグループと共同で、磁石であると同時に超伝導にもなる珍しいウラン化合物が、磁石の性質を利用して超伝導になっていることを明らかにしました。これは今まで知られている超伝導の発現の仕組みとは全く異なる新しいものであり、磁場に対して頑丈なより実用的な超伝導物質を探索する上で重要な指針を与えるものです。さらにこの物質では、「小さな磁石」の集まりが「磁石」の向きを揃えながら超伝導状態になっており、磁石の性質を持つ超「磁石」伝導とも言える新しい量子状態であることが明らかになりました。



左から藤本准教授、服部氏、石田教授

本研究成果は、米国科学誌「Physical Review Letters」に2012年2月6日掲載予定です。本論文はEditors' suggestion（注目論文）に選定されました。

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news\\_data/h/h1/news6/2011/120207\\_1.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2011/120207_1.htm)



京都新聞  
H240207  
3面

### 磁石なのに超伝導

通電はあり得ない磁石でありながら超伝導状態になるメカニズムを、京都大学理学研究科の石田憲二教授や藤本聡准教授、大学院生の服部泰佑さんたちのグループが解明した。新たな超伝導物質の開発につながる成果で、米科学誌「Physical Review Letters」に2012年2月6日発表された。

超伝導は、電流が抵抗なく流れる状態。磁場を内部に入れない磁石は、超伝導と相反する性質があるが、2007年に磁石でありながら極低温で超伝導状態になるウラン化合物が発見された。そのメカニズムが注目を集めていた。

### 京大グループが原理解明

超伝導は、2個の電子がペアを組むことで実現するグルーピング。これまで知られていたように結晶構造の微小な振動によって電子が結びつくのではなく、内部の磁場のゆらぎによって結びつくことが、磁場の観測で実証された。超伝導は外部からの磁場で壊れやすいが、磁場のゆらぎによる超伝導は比較的強い磁場でも保たれ、実用性が高いという。

石田教授は「ウラン化合物以外でも磁石でありながら超伝導状態になる可能性があり、新たな超伝導物質を探す指針になる」と話している。（松尾浩通）

### 実用性高い物質探し手掛かり

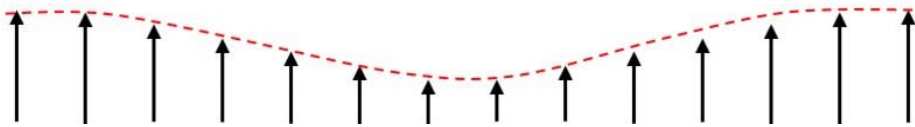
# Spin-wave excitations in the Ferromagnetic ordered state

## Conventional spin-wave



fluctuations in the xy plane

## Spin wave in UCoGe



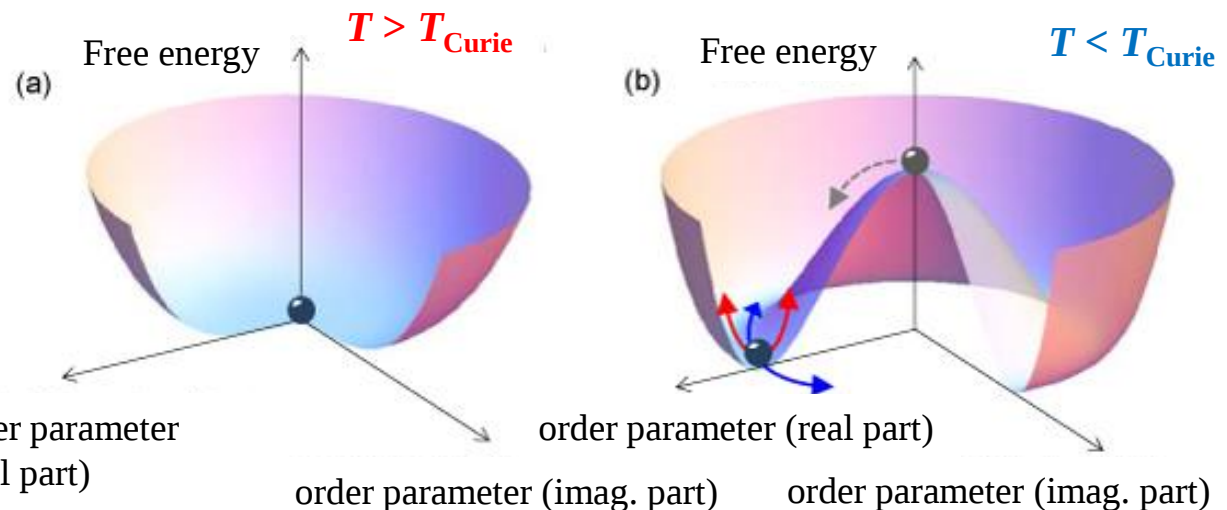
longitudinal fluctuations along the ordered moments

## FM ordered state

order parameter is a magnitude of FM moments



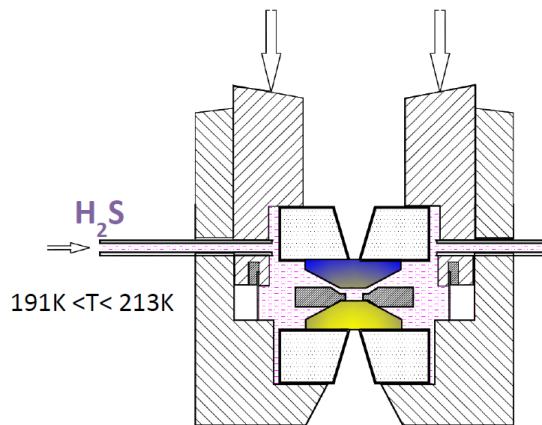
Amplitude fluctuations  
**Higgs mode**



# 硫化水素超伝導 ( $\text{H}_3\text{S}$ )

最高の超伝導転移温度 203 K

A. P. Drozdov, M. I. Erements, *et al.* (2016)



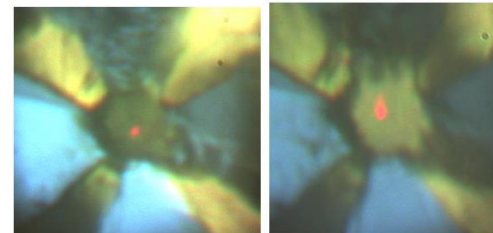
硫化水素の閉じ込め



9 GPa

11 GPa

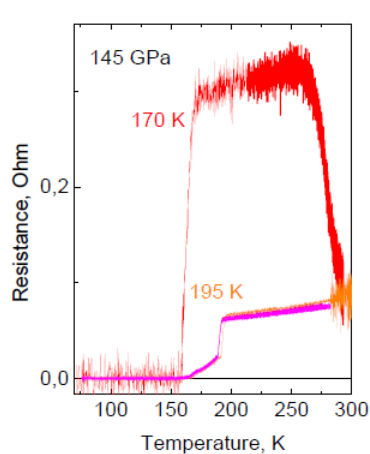
79 GPa



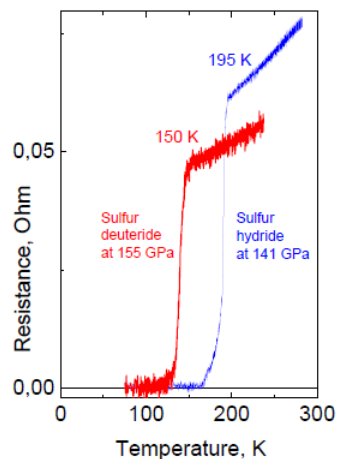
92 GPa

154 GPa

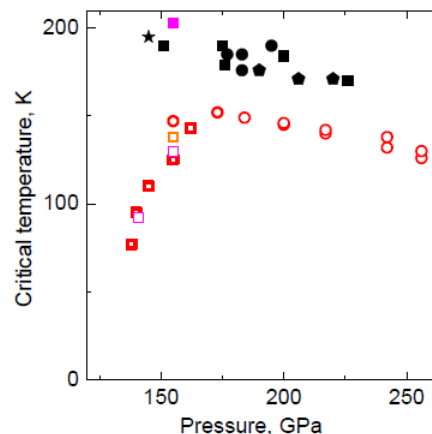
硫化水素の加圧による金属化



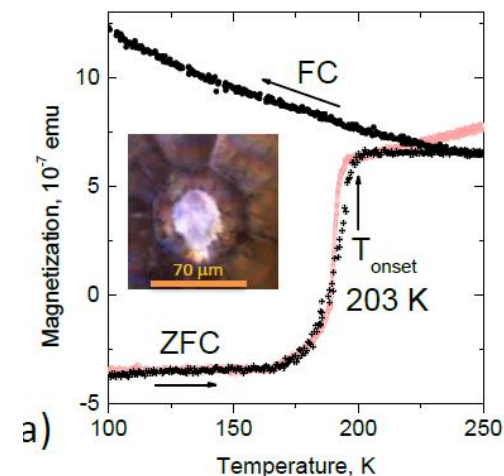
(a)



(b)



(c)



電気抵抗による超伝導転移の様子

マイスナー信号

# 新奇的な超伝導(物質)は

予想外のところから発見されている！

## 創発現象

超伝導の専門家以外、学部学生も見つけている

実験を試みることが一番重要

様々な相互作用が超伝導の発現機構になりうる

磁氣的相互作用、クーロン相互作用、電荷ゆらぎ、  
軌道ゆらぎ etc

現在、超伝導の研究の中で、歴史的な発見  
がなされようとしている。

# 5. 超伝(電)導の応用

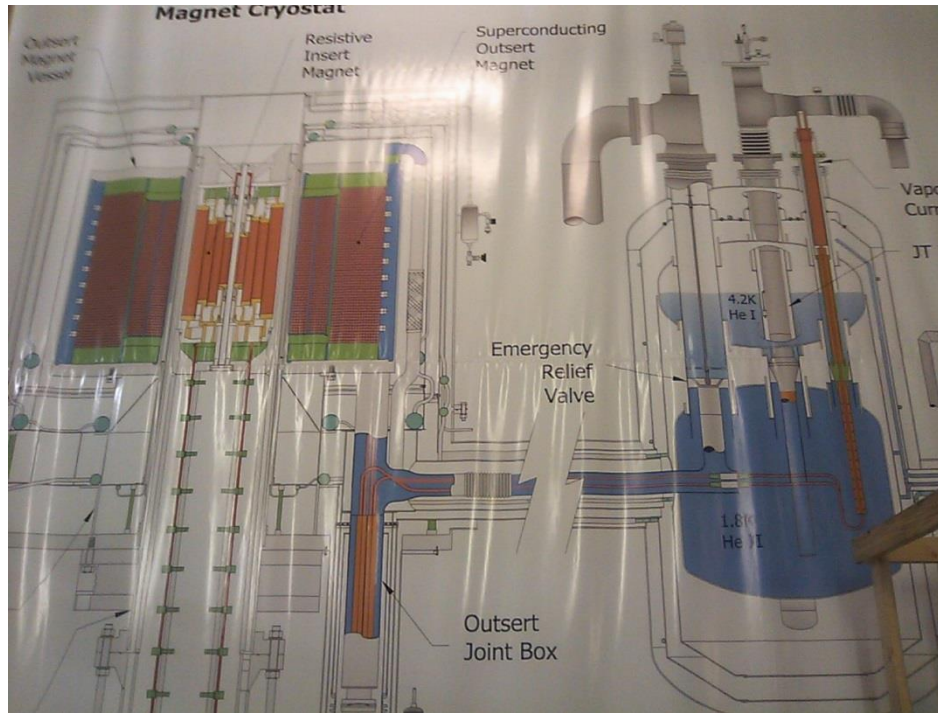
巨大超伝導磁石 (MRI, リニア新幹線)



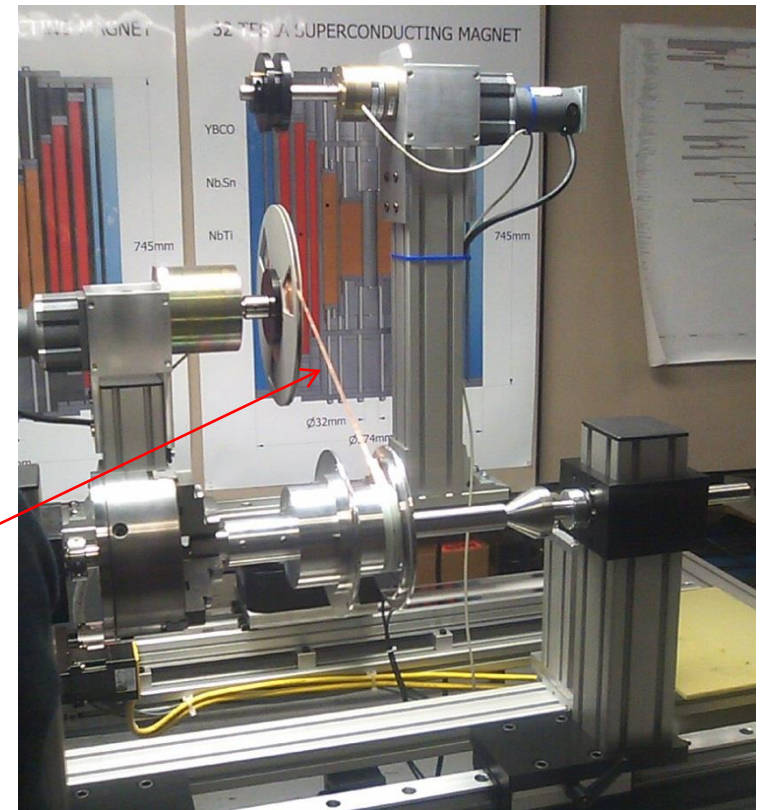
**JR式マグレブ**  
**JR東海**

つくばの  
NIMS(国の研  
究所)にある  
NMR用超伝導  
磁石(21.6T)

# 世界最強の磁場(45T) @ 強磁場研究施設 フロリダUSA)



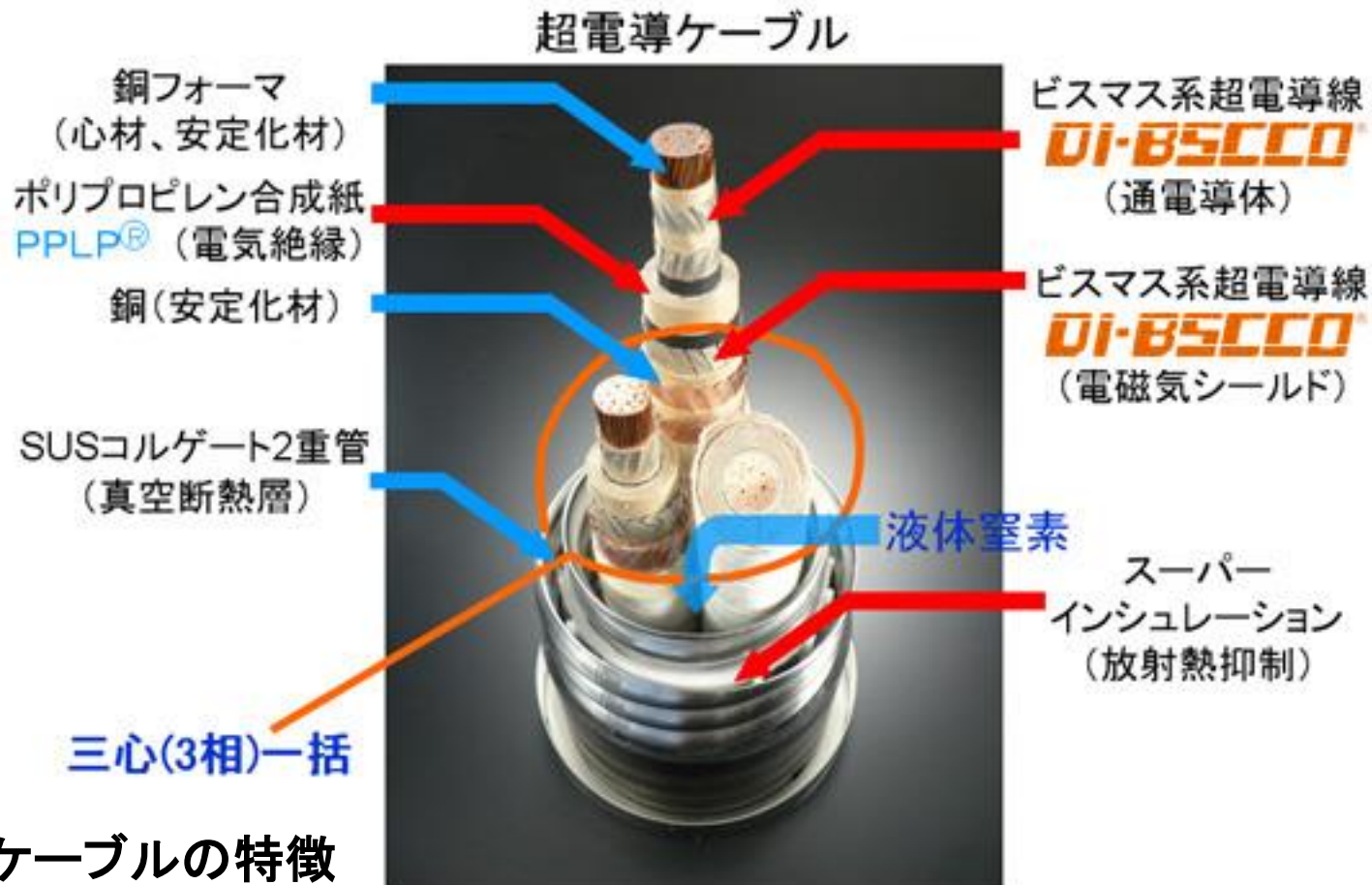
次世代超電導磁石 32T



YBCOを使った線材が  
実用化されている !!

# 超伝導の応用：送電線

住友電工 のwebpageより



超電導ケーブルの特徴

環境にやさしい

経済性

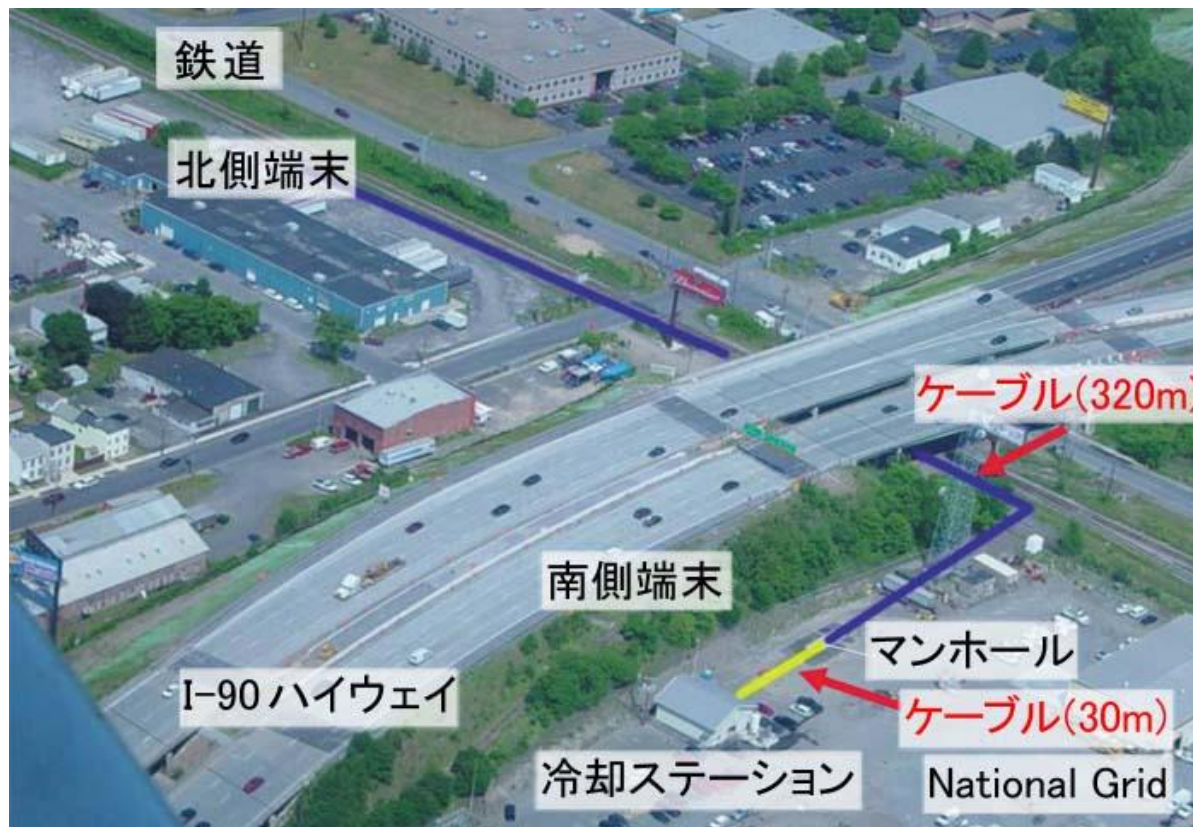
省スペース

(注) 安定化材：事故時の電流分担

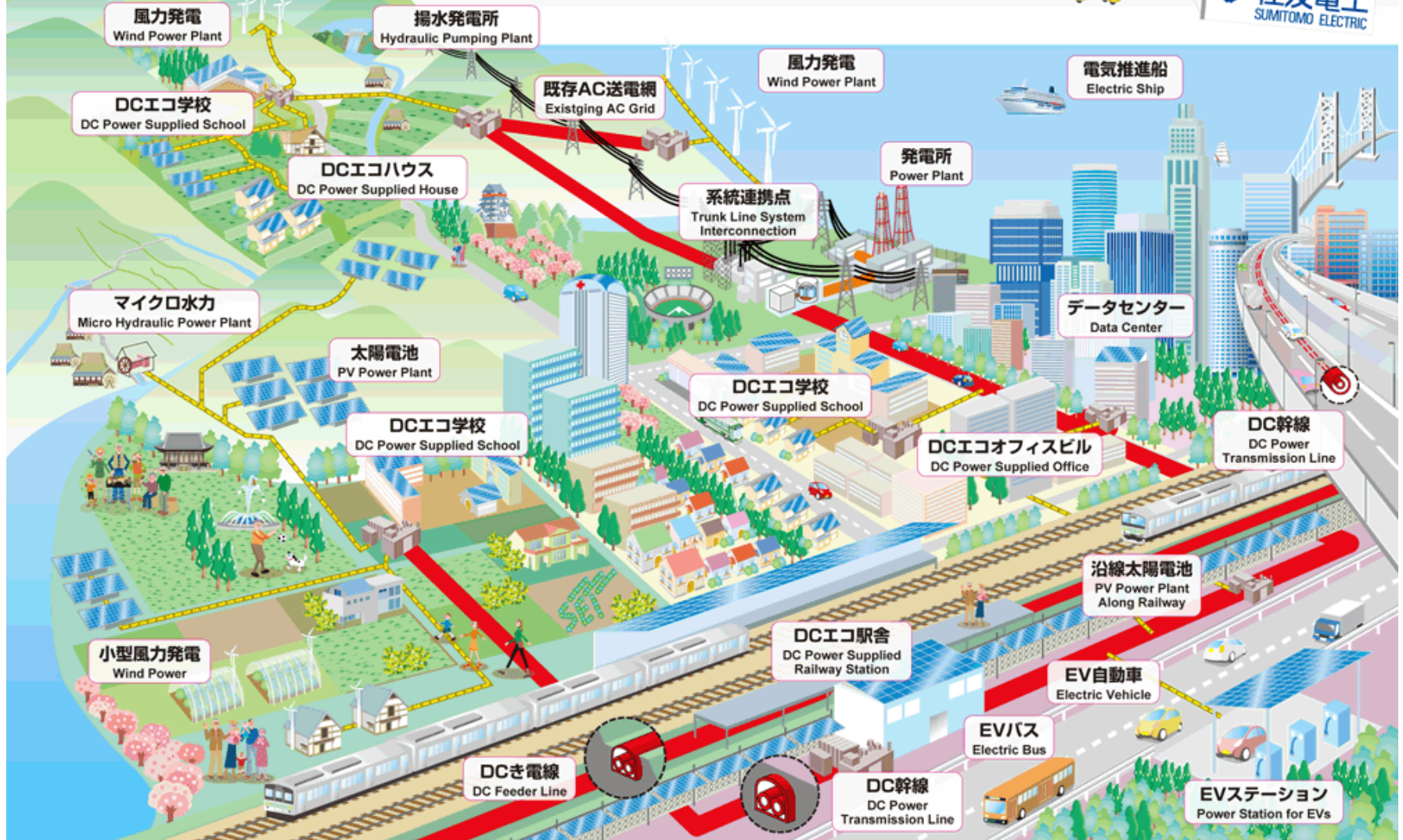
# 超伝導の応用：送電線

❖ 住友電工 のwebpageより

**Albany プロジェクト**：2005年からNY州のAlbany市で実施する超電導ケーブルの実証試験プロジェクト。



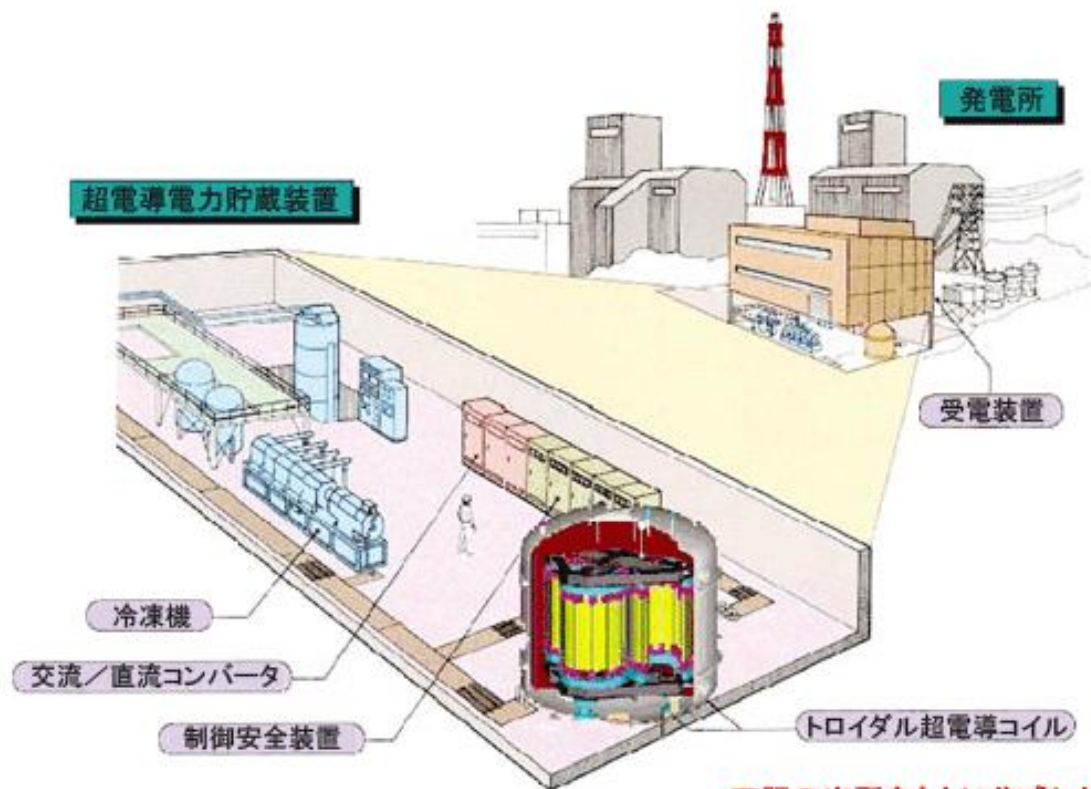
# 再生可能エネルギー社会での直流送電システム DC Power System for Renewable Society



|                                                      |                       |                                                         |                                          |
|------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <span style="color: red;">—</span> 赤色 : 超電導DCケーブル    | Red : HTS DC Cable    | <span style="color: yellow;">—</span> 黄色 : 非超電導DCケーブル   | Yellow : non-HTS (conventional) DC Cable |
| <span style="color: orange;">—</span> 橙色 : 超電導ACケーブル | Orange : HTS AC Cable | <span style="color: black;">—</span> 黒色 : 非超電導(既存)AC送電網 | Black : non-HTS (existing) AC grid       |

# 超電導の応用：超電導電力貯蔵システム「SMES」

電気エネルギーを磁気エネルギーに変換することで、エネルギーロスを発生させずに「貯蔵」できる。特性として大電流を瞬時に出力できるため、「瞬停」のときに役立つ



下記の出所をもとに作成した

図2 超電導電力貯蔵装置(SMES)システムの概念図

[出所](独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：超電導電力ネットワーク制御技術開発、  
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p04017.html>

# シャープ亀山工場に導入されたSMES

10MWの電力を貯蔵

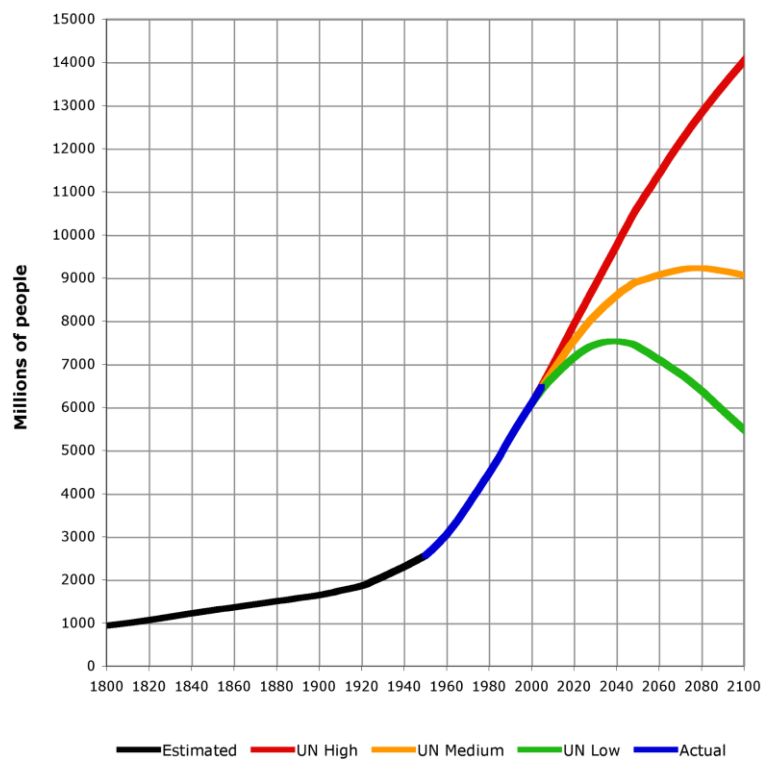
落雷などによる瞬時の電圧低下時に活躍  
世界最大(注4)の超電導電力貯蔵装置



(注4)2006年9月19日現在、当社調べ

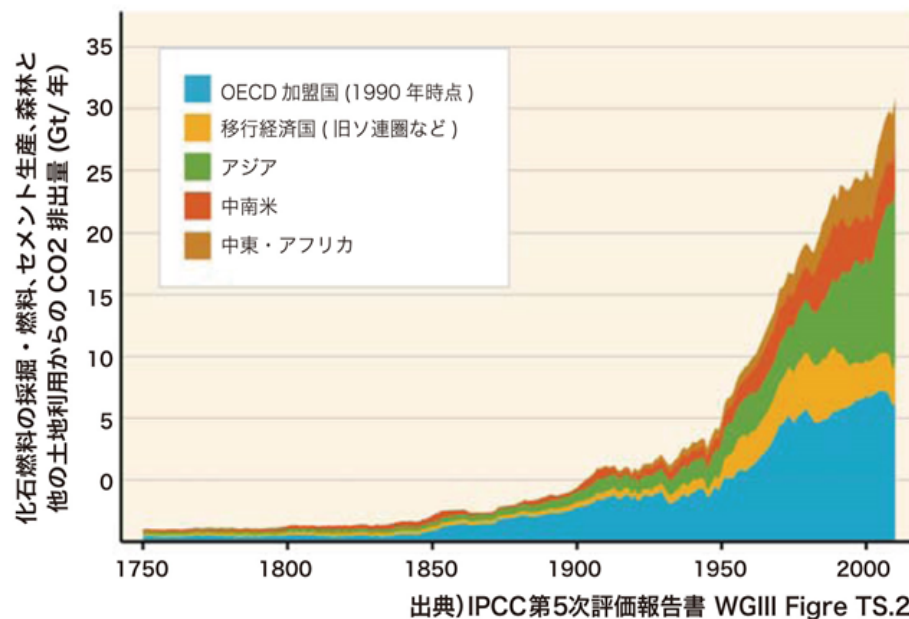
# 世界の環境問題

## 世界の人口

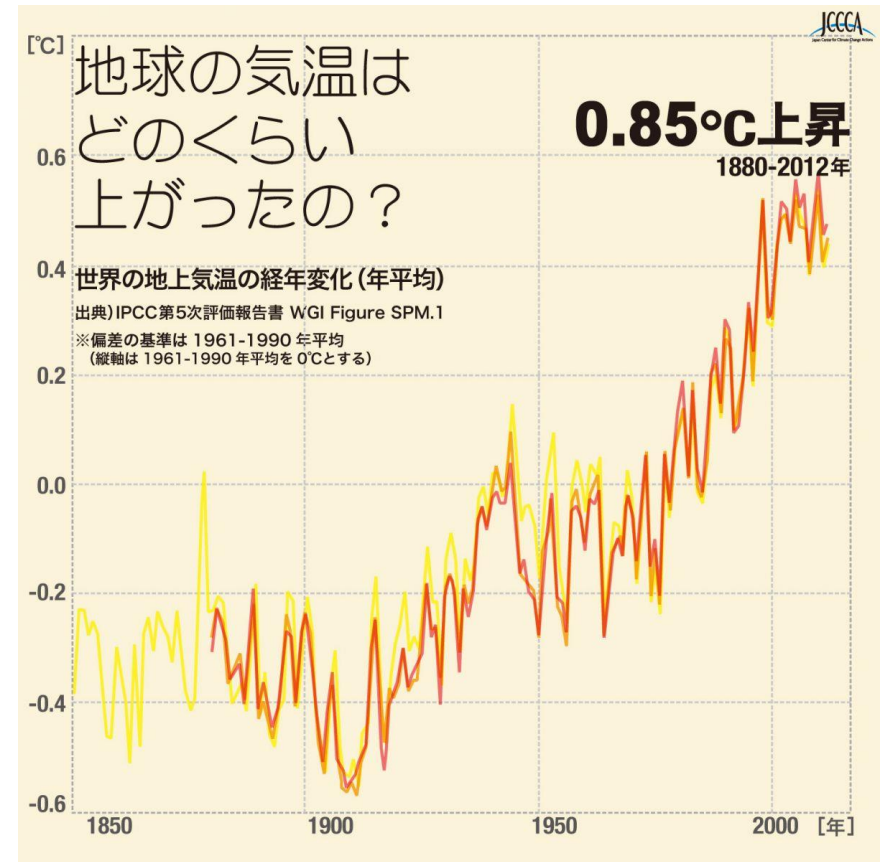
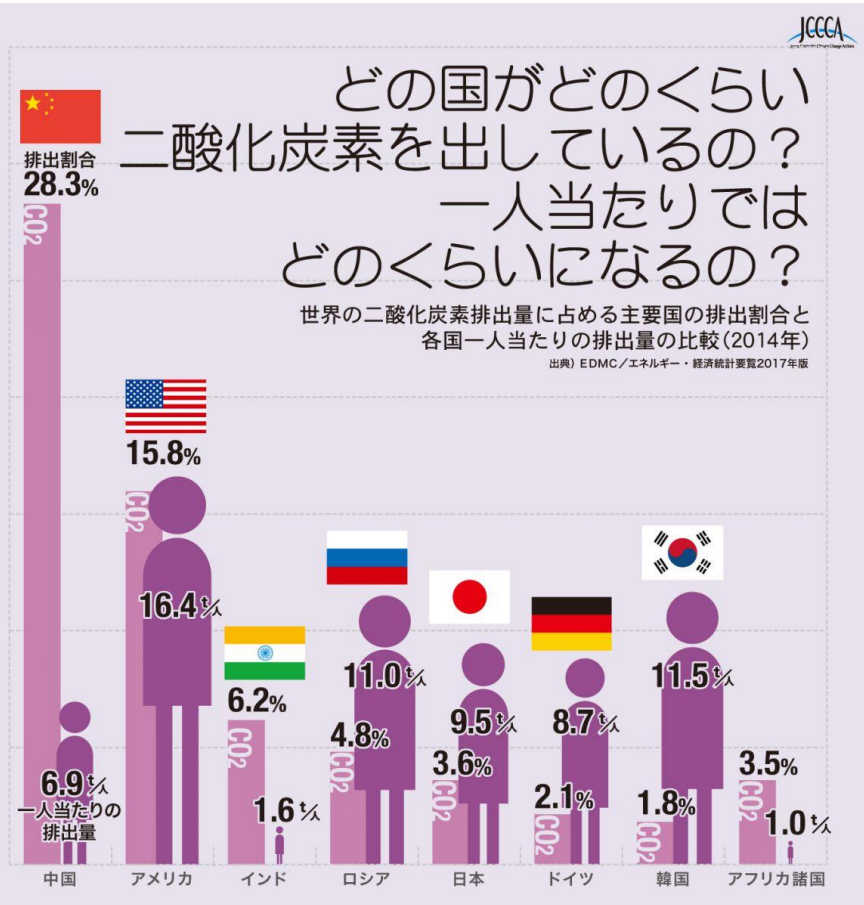


World population from 1800 to 2100, based on UN 2004 projections and US Census Bureau historical estimates

## 世界の CO<sub>2</sub>排出量 (燃料、セメント、フレアおよび林業・土地利用起源)



# 世界のCO<sub>2</sub>の排出量と気温変化



【1】 次のテーマの中から1つ選び、図等も使いA4用紙2枚程度で説明しなさい。  
選んだテーマについて広く網羅する必要はなく、何かひとつの側面を選んで詳しく記述を行ってもよい。

1. フェルミ粒子とボーズ粒子
2. エントロピーと温度
3. 金属中の電子
4. ボース・アインシュタイン凝縮
5. 超伝導の発現機構
6. 超伝導の応用
7. その他超伝導に関する内容

(注) レポート作成に際し、参考書やインターネット等の情報を参考にしても良いが、それらの情報を自分なりに理解し、最後は自分の言葉で書くこと。また参考文献も表記すること

(レポートは、上記の内容を知らない、友達に説明するつもりで書いてください。)

【2】 上記に加え講義、低温デモ実験に対する感想を書いてください。  
改善を要する点についても書いてください。

提出時 : 2018年5月21日 (月) の16:30まで、理学部6号館教務窓口まで  
質問先 : kishida@scphys.kyoto-u.ac.jp