

100808 富士吉田創造性育成塾中学2年生選抜講座

超伝導ものがたり

北澤 宏一

(独) 科学技術振興機構

地球は巨大な磁石



磁力線ブランケットが宇宙線(放射能)の侵入を防御
しかし、問題が発生する可能性

地球の温暖化問題

137億年前：わたしたちの宇宙誕生 銀河 銀河系
46億年前：地球誕生
40億年前：生命誕生
30億年後：膨張する太陽

45万年前から5回の氷期と間氷期
20万年前：ヒトの誕生
1万2000年前：最後の氷期の終了

←水の存在

←空気（窒素と酸素） 炭酸ガス

←太陽光

奇跡の星

奇跡の私

正義は1つ？

ひとや生き物はちがう

- 机や建物となにが違う
- 細胞や分子が入れ替わってしまうのに
どうして自分でいられるのか？
- DNAがつながっていく不思議

でも変化する
でも努力できる

地球は科学技術が悪くしたと思いますか？

- わからない
- 思わない
- 思う

理科を、科学を学ぶと

- ・ ひとの存在がいかに不思議か
- ・ 地球がいかにかけがえがないか
- ・ どうしたら地球環境を救えるのか
- ・ 健康を守り病気と闘える
- ・ 科学はいかにひとを自由にしてきたのか？

自然の脅威からひとを解放してきた

それが分かる！

今日やること

- ・ 人間だけが起こすことのできた自然現象
不思議な超伝導
- ・ 超伝導で地球環境を救うことができる

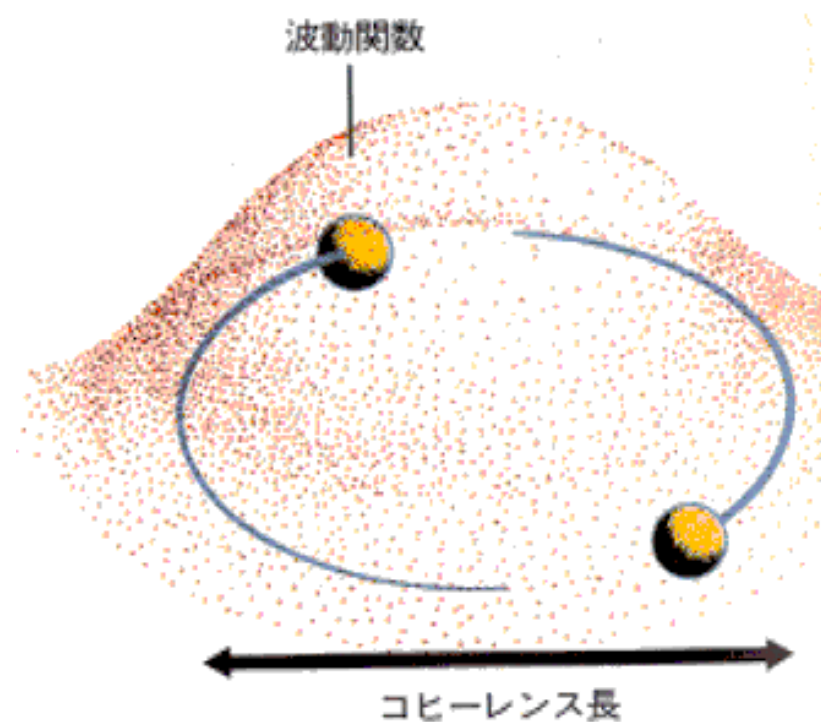
超伝導の超能力

(他に真似のできない3つの能力)

- ☆電気抵抗が完全にゼロ・永久電流が流れる
超遠距離送電、電源の要らない強力磁石
まさつの無い不思議な世界
- ☆マイスナー効果（磁力線を排除）
ピン止め効果（磁力線を捕捉）
安定磁気浮上、無摩擦回転
磁石との不思議な世界
- ☆ジョセフソン効果
超高速・超低消費電力トランジスタ
超高感度磁気・光センサー

超伝導はなぜ起きる？

電子がクーパー対を形成
いったん動き始めると止まらない



超伝導はなぜ起きる？

物理系大学生用

量子力学でしか説明できない現象：

- 「粒子は波である」・「波は粒子である」
- 「粒子にはフェルミ粒子とボーズ粒子がある」
- 「電子はフェルミ粒子（スピン半整数）である」
- 「1つの状態には2つの電子（スピン逆平行）しか入れない」

クーパ対の形成（永久電流が発生）

超伝導状態では特殊な関係にある**2つの電子がペア形成**

（特殊な関係＝運動量が反対称）

ペア形成→スピンの整数になる→クーパ対はボーズ粒子

「ボーズ粒子は1つの状態にいくつでも入れる」

多体現象→低温ではボーズ凝縮が起きる→超伝導

超伝導：理系大学3年生のほとんどの人にはまだ理解不可

大学では「量子力学」が学べる

原子や電子の振る舞い：古典力学ではまったく説明不可

古典力学の仮説：常識と合う

量子力学の仮説：常識をかなぐり捨てる必要 自然感変わる

超伝導：量子力学＋ α （ α ＝多体効果）→難しい！

メカニズム：高温超伝導は現在もcontroversial！

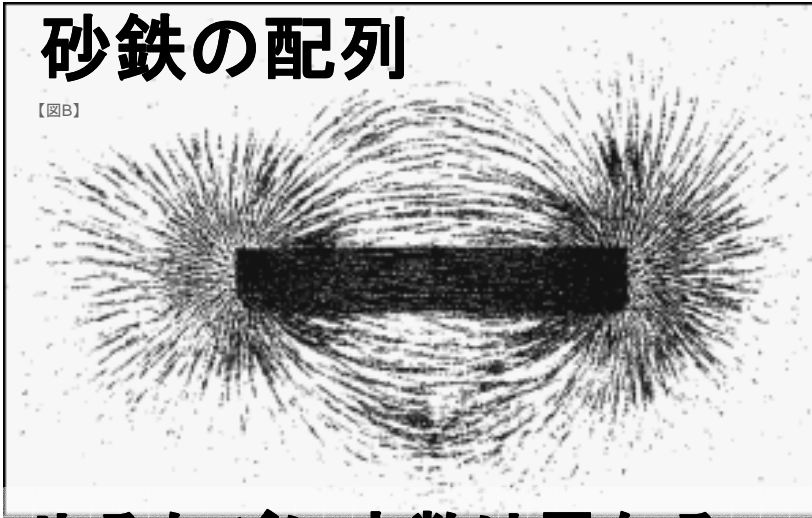
超伝導の超能力

(他に真似のできない3つの能力)

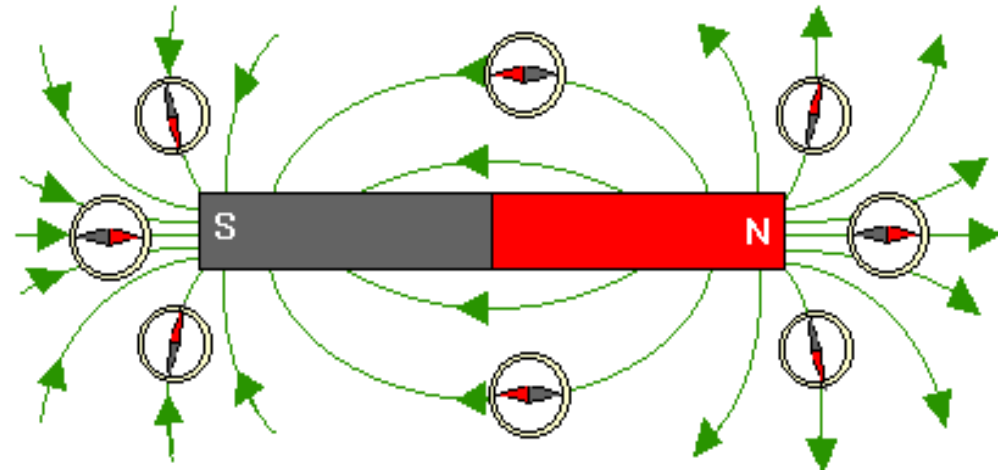
- ☆電気抵抗が完全にゼロ・永久電流が流れる
超遠距離送電、電源の要らない強力磁石
まさつの無い不思議な世界
- ☆マイスナー効果（磁力線を排除）
ピン止め効果（磁力線を捕捉）
安定磁気浮上、無摩擦回転
磁石との不思議な世界
- ☆ジョセフソン効果
超高速・超低消費電力トランジスタ
超高感度磁気・光センサー

砂鉄の配列

【図B】

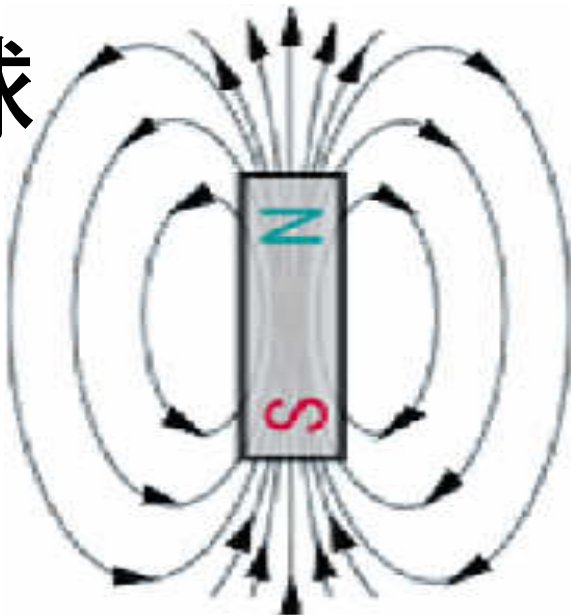


やるたびに本数は異なる
各位置の粉の方向は同じ



磁力線の方法 =
コンパス磁石の方向

地球



単位面積当たりの磁力線の
本数は磁場の強さ(磁石を
廻そうとするモーメント)に比
例

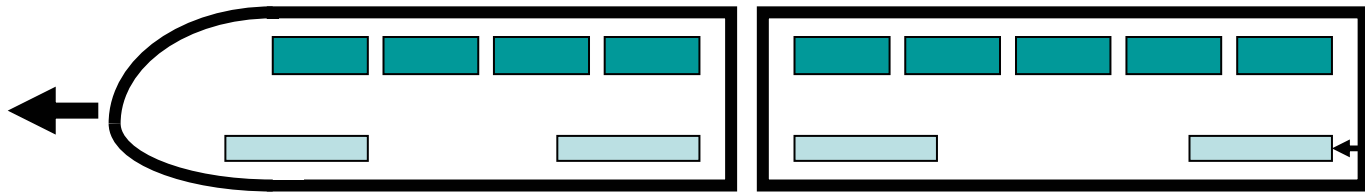
(本数は何本でも描けるが
一つの図ではどこかを決め
ると決まる)



山梨リニアモーターカー実験線
Magnetically Levitated (超伝導磁気浮上)

リニアモーターカーの浮上と走行の原理

浮上

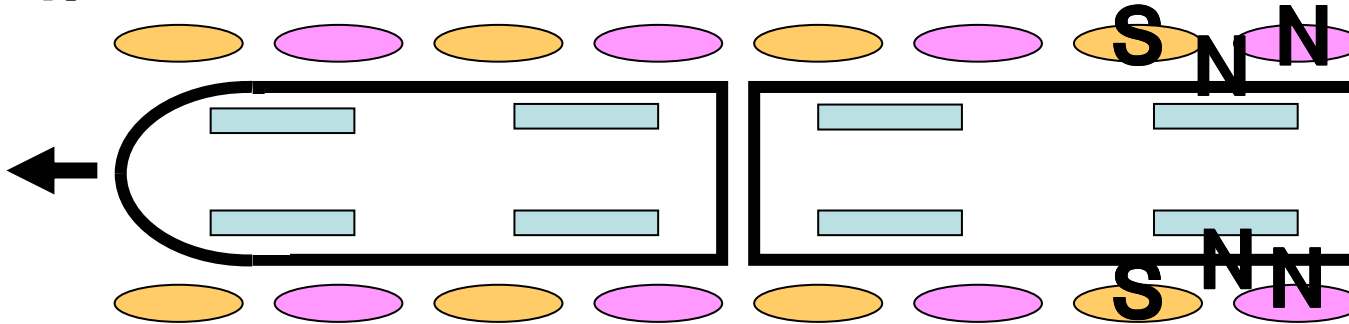


超伝導
永久電流
磁石

地上浮上案内コイル
車載磁石が地上コイルに近づくにつれ反発誘導電流→近づくると増大、遠ざかると減少

地上浮上案内コイル

推進

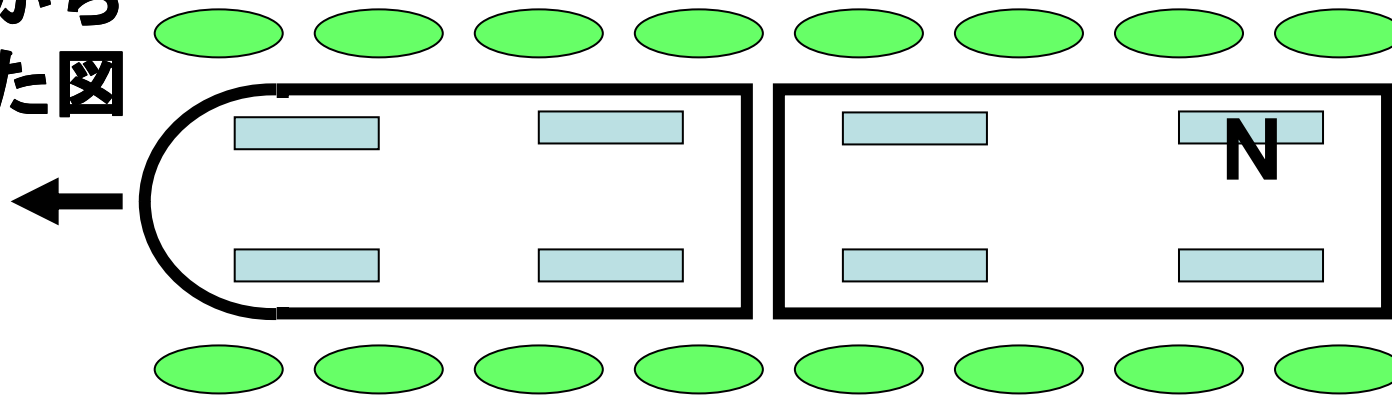


地上推進コイル

車載磁石を前に引くように次々とコイルの極性を外部から切り替えてやる

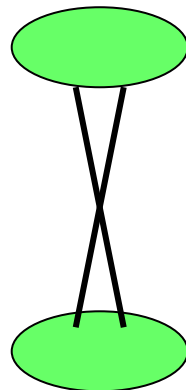
リニア-モーターカー軌道から外れない理由

真上から
見た図

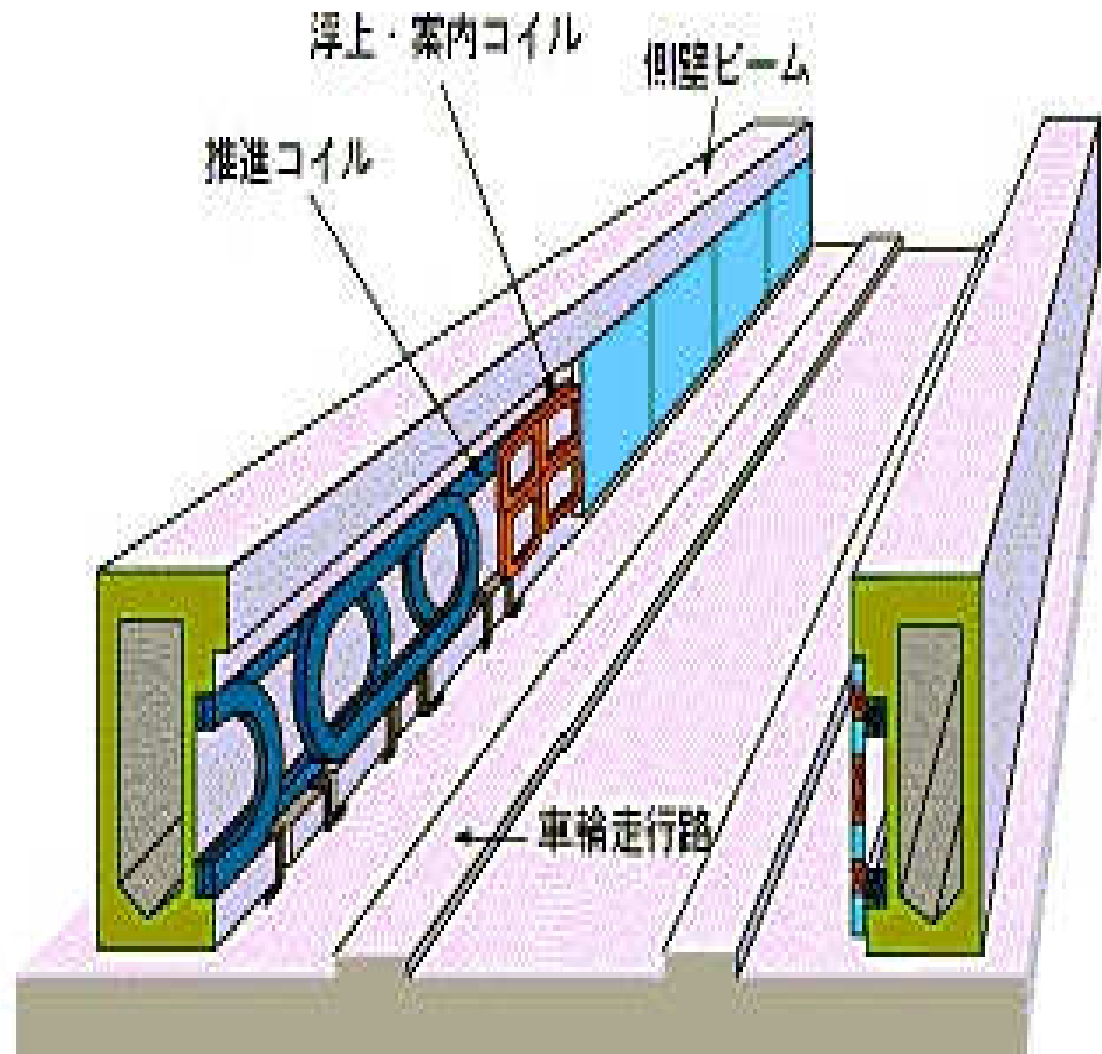


車載磁石近づいた側のコイルが反発
遠ざかった側のコイルが吸引

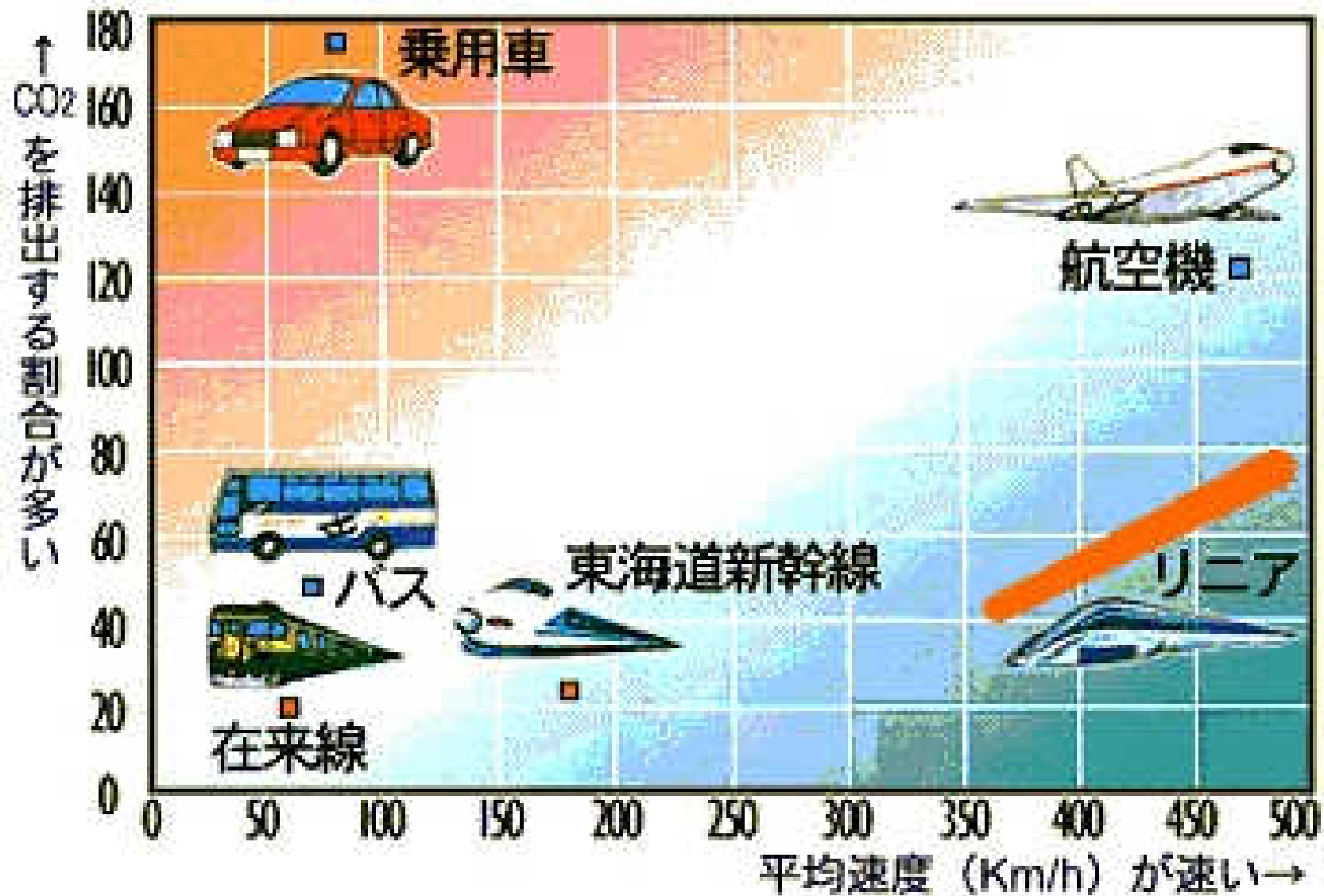
案内：軌道の中央を走る（外部電流による調節不要）



両側のコイルは逆につないである



**山梨リニア（マグレブ）の地上コイル
（推進用と浮上・案内用の2種類）**



**空気抵抗：速度とともに増大→営業速度500km/h
減圧下なら2000km/hも可 (大陸間弾道物資輸送構想も)**

リニアモーターカーの長所

☆時速2000kmも可能

地上リニア:500km/h (減圧下2000km/h)

ジェット機:1000km/h

☆廃ガスを出さない

☆自動車より静か

☆省エネルギー:国内航空機の1/3

☆安全性が鉄道よりさらに高い:

体積支持力(1点接触でない)

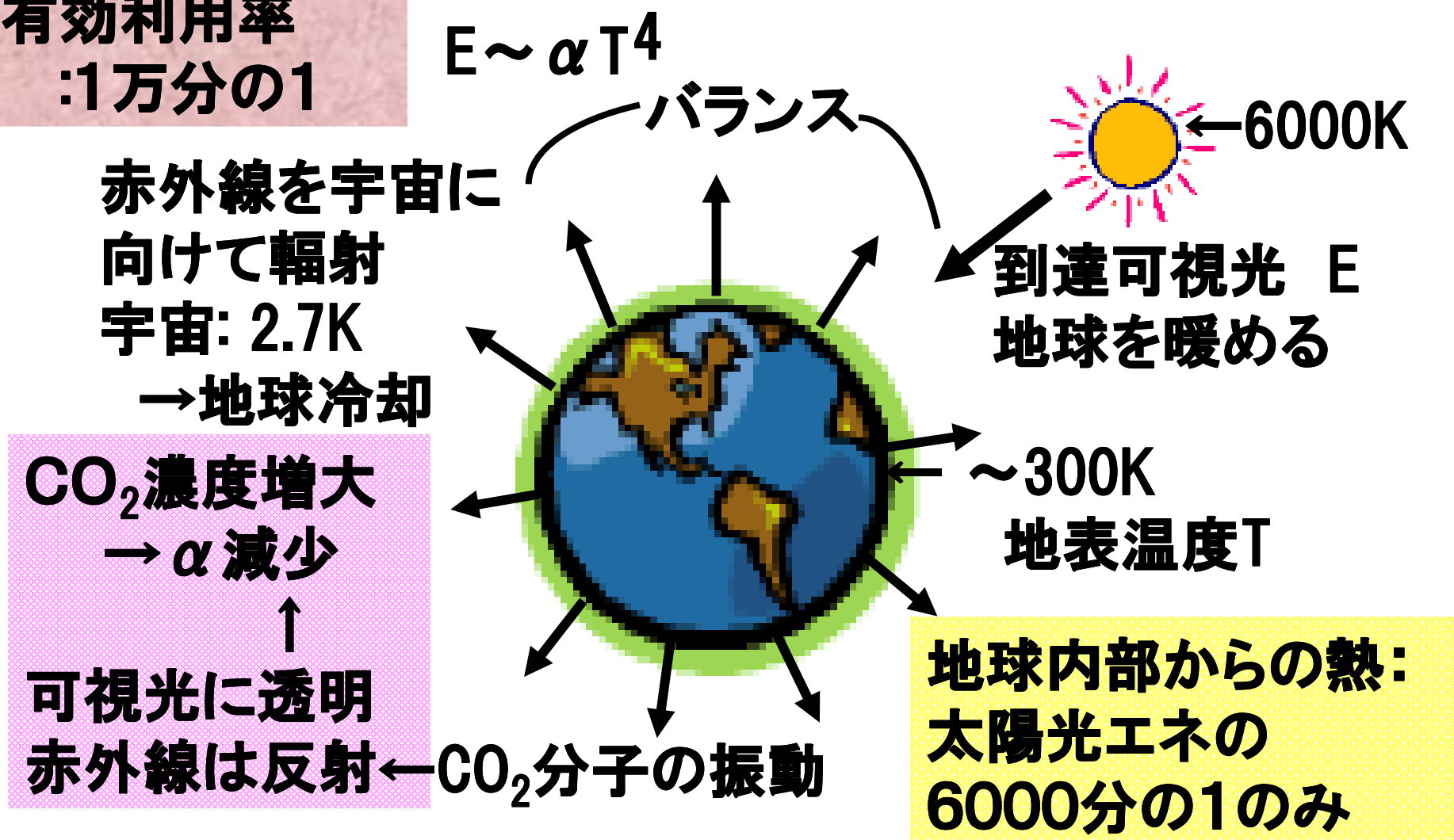
☆メンテナンスが容易:砂、地震、雪に強い

浮上走行(10cm)



Global warming: 太陽光と地表温度

太陽エネルギー
有効利用率
:1万分の1



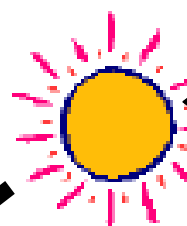
赤外線を宇宙に
向けて輻射
宇宙: 2.7K
→地球冷却

CO₂濃度増大
→ α減少

↑
可視光に透明
赤外線は反射 ← CO₂分子の振動

$$E \sim \alpha T^4$$

バランス



←6000K

到達可視光 E
地球を暖める

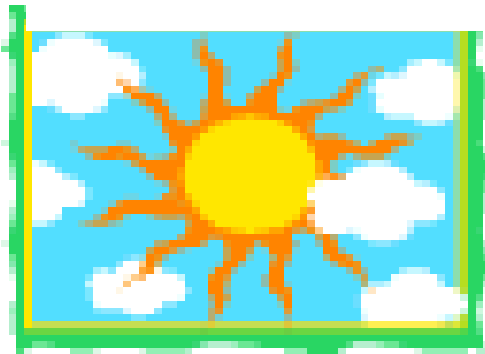
~300K
地表温度T

地球内部からの熱:
太陽光エネの
6000分の1のみ

自然エネルギー



資源開発飽和
数%止まりか



膨大・未開発

$10^{18}W$ 存在

1 kW/m^2

必要量 $10^{13}W$

既開発原発 1 基分



2003年末まで
3900万 kW
(原発数基分)

必要エネルギー：原発換算

日本 100基 世界 6000基

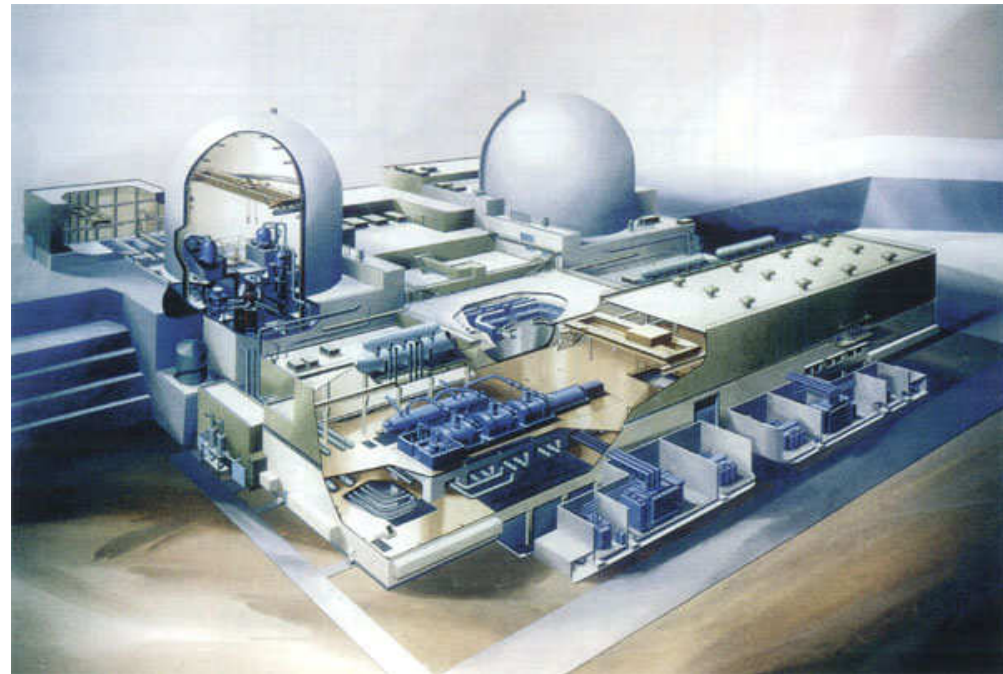


地熱

824万 kW
(原発8基分)

原子力発電

- 現在電力の3割は原子力 実績
- 低炭素 低コスト
- しかし不安とするひとも
- 一定発電得意



World Wind Energy - Total Installed Capacity (MW) and Prediction 1997-2010



風力発電
実用期に入った
大型発電所
100万kW級
10機分に到達
日本だけで100機分
世界で6000機欲しい

世界の風力発電の導入量と予測

太陽電池
値段高いが人気
大型発電所
100万kW級
1機分に到達

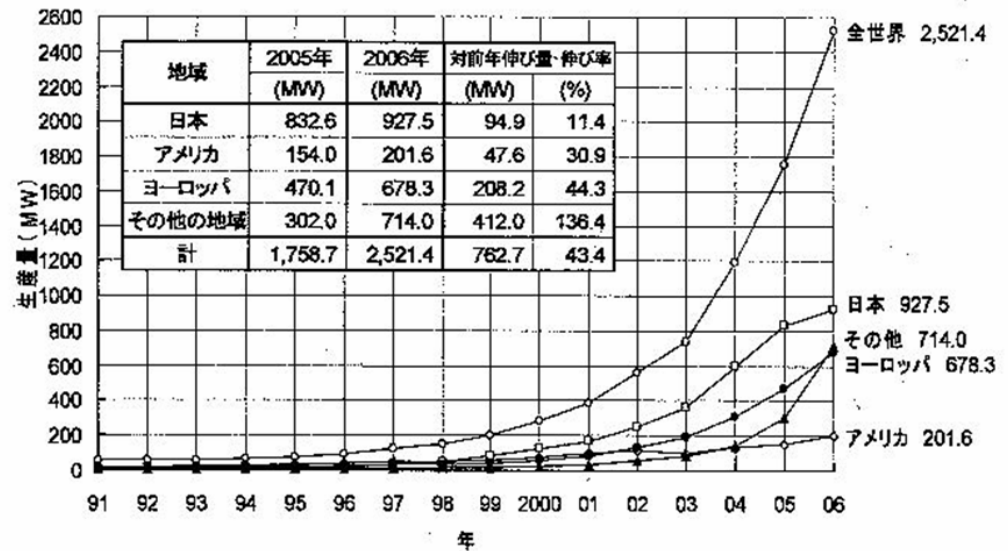


図1 世界における地域別太陽電池生産量

出典：PV News 2007年3月号、4月号を基に、樹資源総合システムが一部修正して作成

電力の長所と問題点



長所

クリーン・安全・便利→電力化率日本45%

(電力化率:

総エネルギーのうち電力に変換される比率)

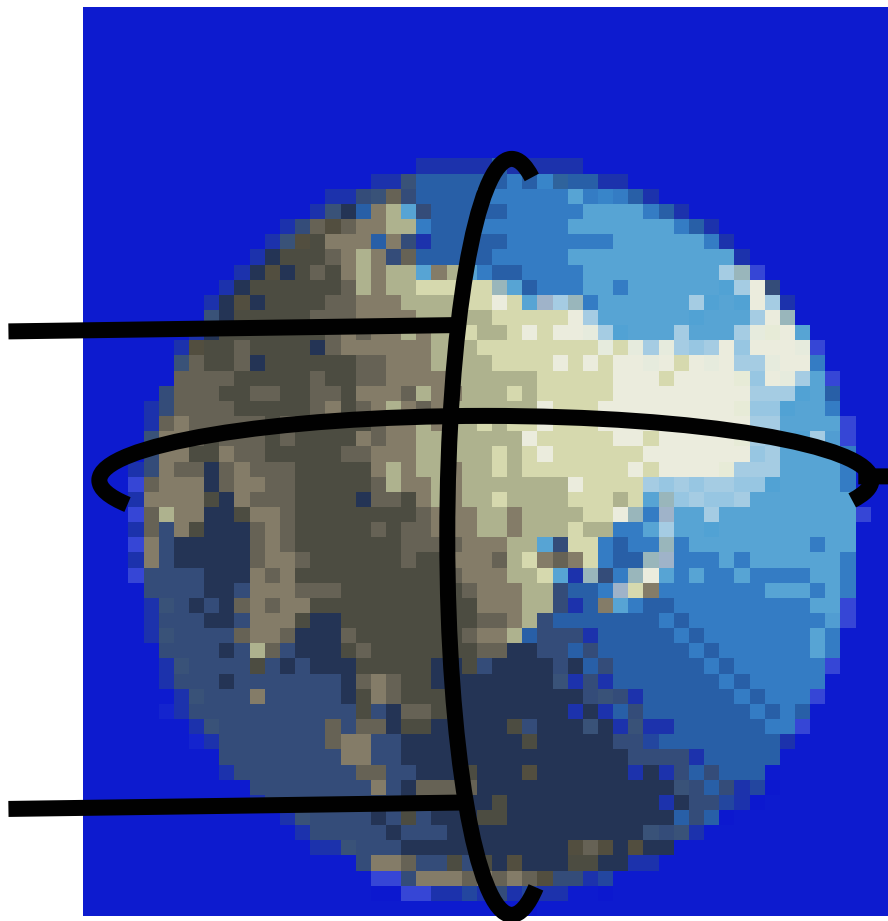
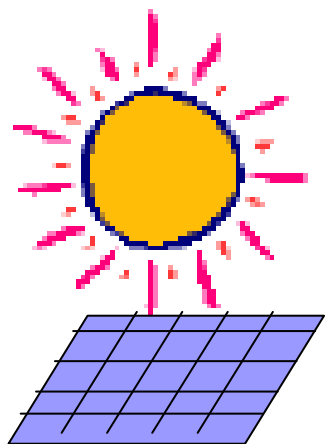
電力の問題点

貯蔵が苦手 (揚水発電: 効率7割 ダムサイト
蓄電池貯蔵: 効率5割 コスト高
遠くに運べない(現在500kmくらいまで)

←電線の抵抗、交流送電(位相のずれ)

(水素で貯蔵運搬すると: 再発電までに5割ロス)

超伝導グローバル電力ネットワーク時代 “私の夢”



すると何が
期待できる？

超伝導地球電力ネットワーク

自然エネルギーの欠点

太陽電池：太陽が照るときだけ

風力発電：風が吹くときだけ

必要な電力：昼夜夏冬で違う

しかし、需要は発電の都合に無関係

超伝導なら地球の裏まで損失なしに電力送れる！！
→地球規模で発電と需要を平均化→電力貯蔵の必要なくなる！

克服できれば：効率向上、コストダウン

1. 有利な場所で発電

2. 時間変動する自然エネを平均化（3倍のコスト有利性）

世界のどこかで照っている

風が吹く

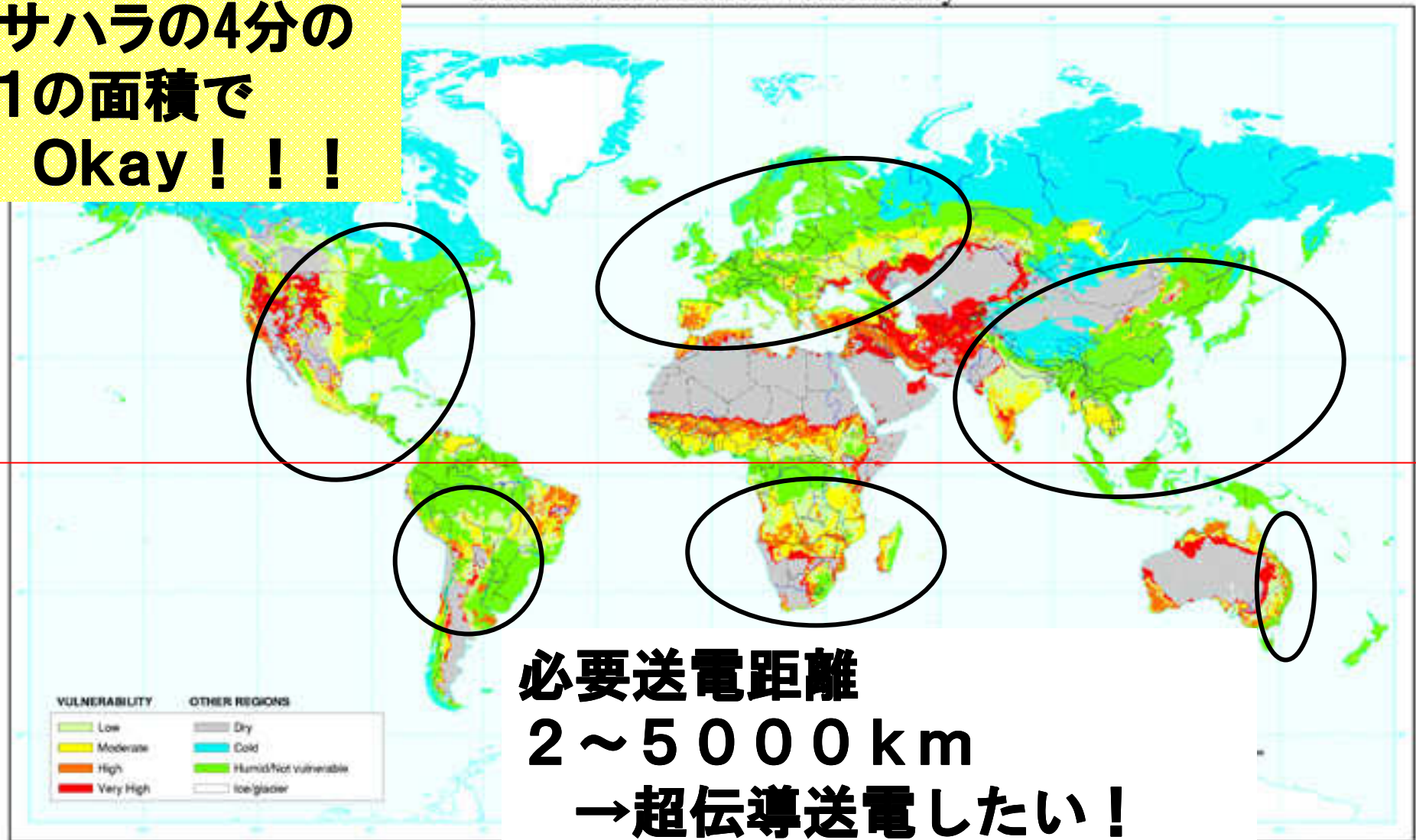
昼夜 東と西を平均化

夏冬 南と北半球を平均化

世界の砂漠とエネルギー消費地

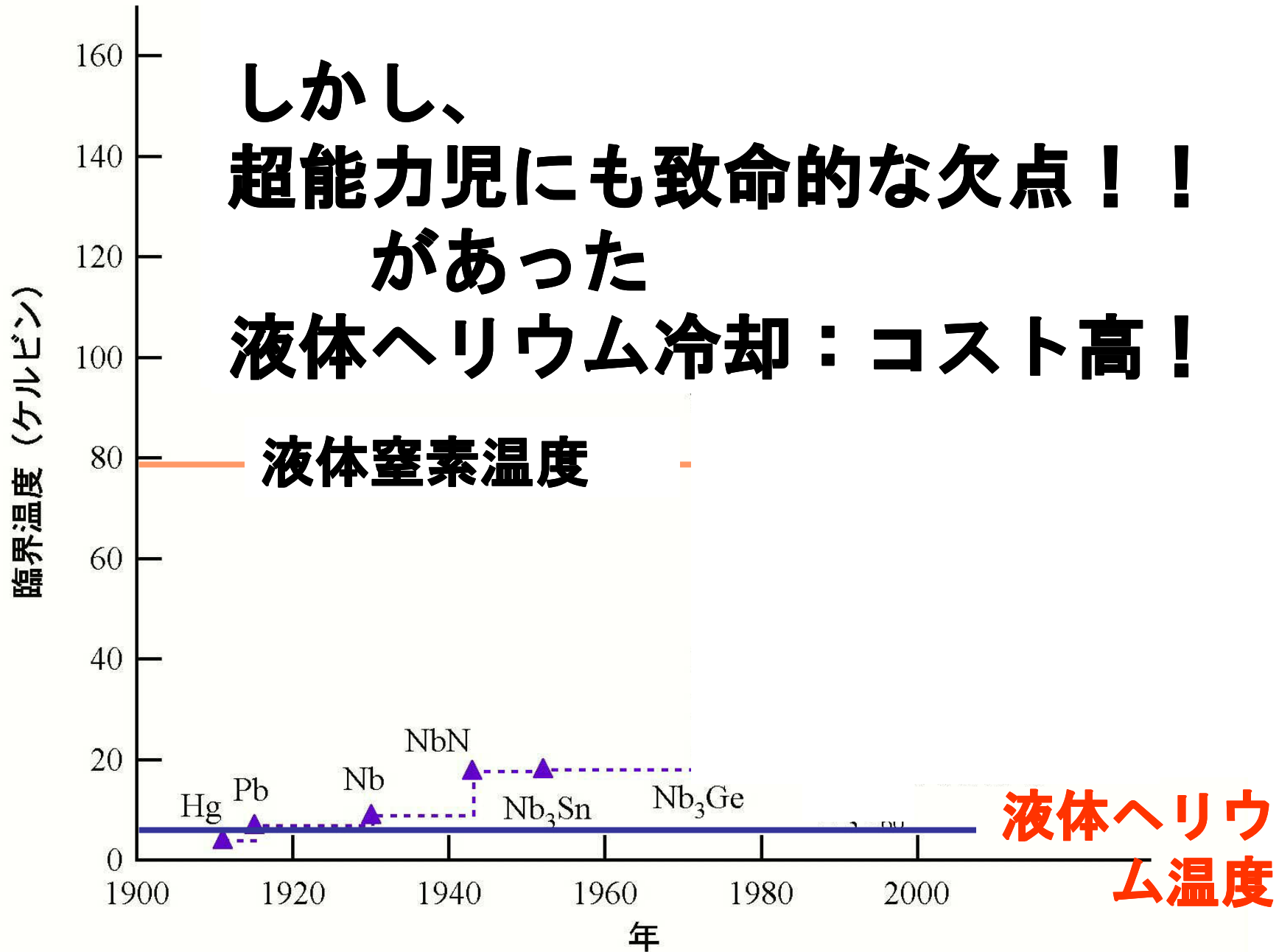
太陽光：
サハラの4分の
1の面積で
Okay!!!

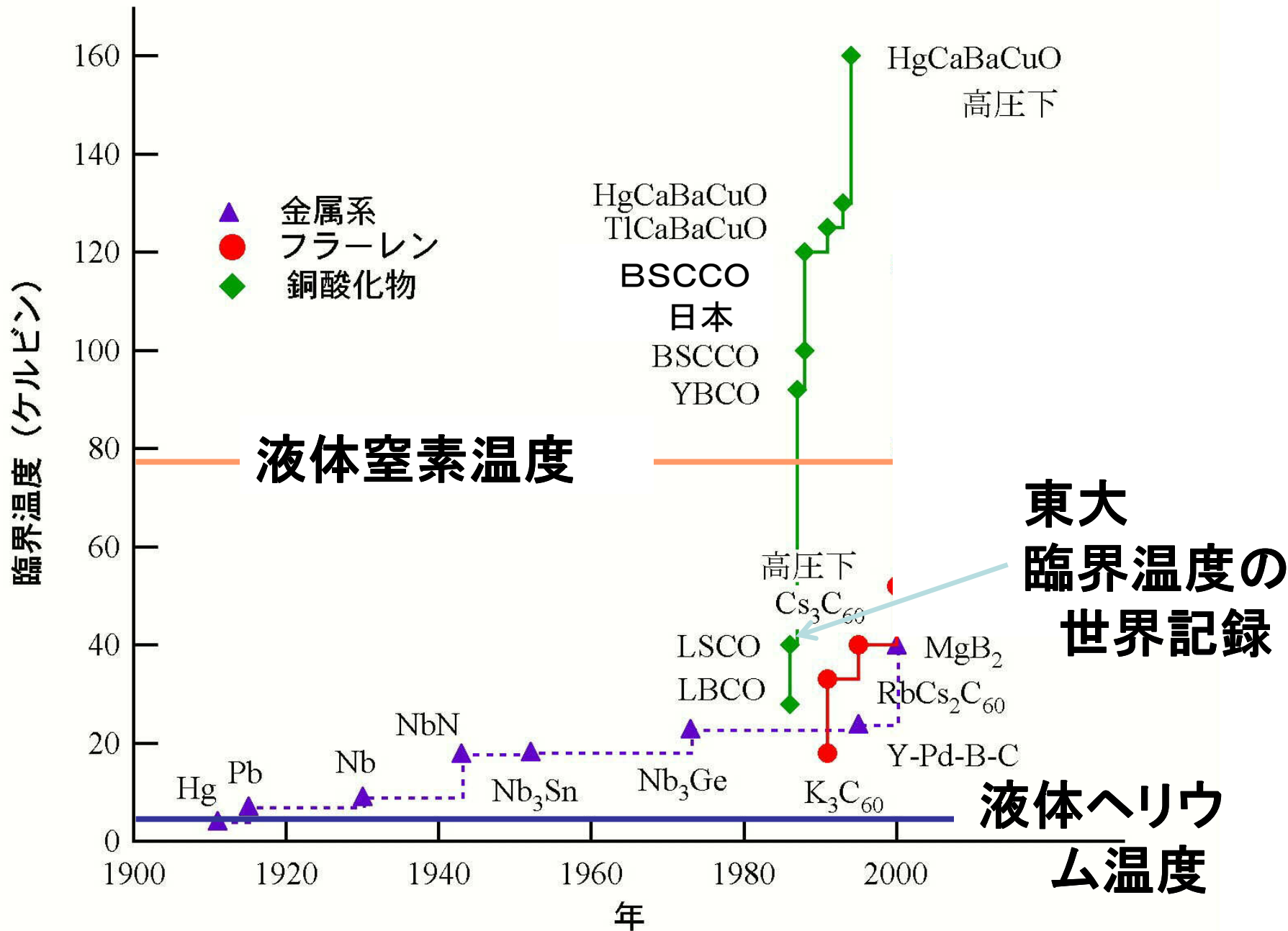
Global Desertification Vulnerability



必要送電距離
2~5000 km
→超伝導送電したい!

しかし、
超能力児にも致命的な欠点！！
があった
液体ヘリウム冷却：コスト高！





THE PATH OF NO RESISTANCE

Dec. 1986

On Friday afternoon, December 5, while snow was falling over Boston, Kitazawa told the thirty or forty scientists at the MRS meeting who were interested in superconductivity the latest news from Tokyo. He spoke slowly in strongly accented English. But the pictures, not the words, did the convincing: smudged transparencies of data only hours old. A line traced the vagaries of electrical resistance as the temperature dropped: a gentle, downhill slope until somewhere around 30 K, the tropics of low-temperature physics, where it fell abruptly to zero, as sharply as the edge of a knife. And as the scientists made their way through the snow to Logan Airport, and flew back to their labs all around the world, they began plotting their campaigns. Their old research, which had once so absorbed them, would be put aside. Funds would have to be diverted. It was a whole new ball game.

—from *The Path of No Resistance*

1987

Books published
for non-academic
community

Cover story:

本のカバーの
宣伝文

“The path of no
Resistance”

H. Schechter

Simon & Shuster

Interview with Koichi Kitazawa

Koichi Kitazawa is a Professor in the Department of Industrial Chemistry at the University of Tokyo. He earned his Ph.D. at Massachusetts Institute of Technology. At the November 1986 MRS meeting, Professor Kitazawa's announcement that he and his colleagues had confirmed the Bednorz and Müller results sparked worldwide excitement in the research community. In this wide-ranging interview, Professor Kitazawa discusses current issues and the history of oxide superconductor research in Japan.

How did you happen to study at MIT?

I began my Ph.D. studies in the Department of Industrial Chemistry at Tokyo University. I was studying zinc oxide to learn how zinc and oxygen ions move due to diffusion at high temperatures. My results were different from a theory proposed by Dr. Robert Coble at GE Schenectady laboratory, so I sent him a letter with my data. But Dr. Coble had moved to MIT, so my letter went to MIT.

Dr. Coble was on sabbatical year, sailing to Tahiti on his boat, so my letter didn't reach him. The department head, Professor Kingery, sent me an application form for the graduate school at MIT. But the application said foreigners must take a language examination and also the Graduate Record Examination, and the time for those had already passed. Besides, I was in my second year of Ph.D. studies, so I thought, "This is impossible." But anyway, I filled out the form and sent it to MIT.

Then I received a letter inviting me to enter the graduate school. I was in trouble, because in 1969 one dollar was 360 yen — right now it's 120 yen. So I wrote again and said I was sorry, but I could not attend MIT because it would be impossible to support myself and my wife as a student in the United States.

Then I got a letter saying I had been granted a scholarship. So I asked my boss, Professor Mukaibo, "What should I do?" And he said, "Why not go study at MIT?"



So I went to MIT in 1969 and studied with Professor Coble in the ceramics division of the Department of Materials Science. I finished my Ph.D. after two and a half years and stayed one more year as postdoc. I wrote my thesis on the electrical and diffusional properties of aluminum oxide and zirconium oxide at high temperatures.

I was very happy as a student there. Getting to know people in this country was the most valuable part of the experience. And I had the opportunity to look at Japan from outside — that was also important.

Who were your friends, and why were they more important than your studies?

I had already spent three and a half years as a graduate student at Tokyo University, one and a half of those as a Ph.D. student. I had

already learned most of what a Ph.D. student normally learns; the rest is just to finish his thesis. So at MIT I learned those things again.

Professor Kent Bowen of MIT was also a Ph.D. student then, one year senior to me. It was during the Vietnam War; there were many hippies, and students didn't work very hard. But Kent is an old-fashioned American — in his mind there is no success and no future without sweat. When I call him from Japan at 5:30 in the morning, he's already in the office. We can judge how he would think; he is honest, and he always attacks problems from the front. So he is someone I can ask to hold the life line for me. People like Kent are necessary in order to move things toward the correct direction.

Professor Coble, my supervisor, was also an interesting person, and my wife and I loved him very much. Whenever he went somewhere he took us with him — especially when he went skiing, because he didn't like to stay in his cottage alone. In fact, I learned later that Professor Coble had arranged for my admission to MIT because I mentioned on the application that I had worked as a ski instructor! He influenced us very deeply because of his humanity and his sense of humor.

What did you learn by looking at Japan from the outside?

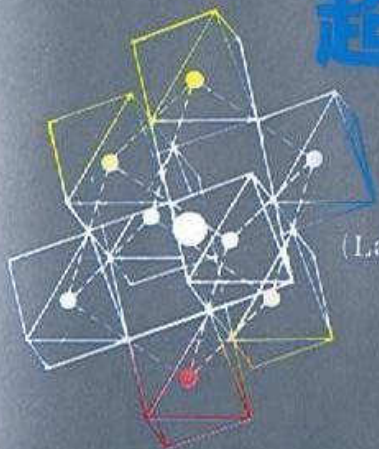
Most Japanese people think they do not have to express themselves very much to be understood. But that's not true. Japanese are often misunderstood by foreigners. Even if a Japanese person has good will,



マイスナー効果を初めて発見した金沢君
抵抗ゼロを初めて観測できた永崎君
二人とも4年生(卒論)の時 1986

*Two students who helped confirm the existence of high- T_c superconductivity:
Shoichi Kanazawa, who studied LaBaCuO for his undergraduate thesis,
and Hiroshi Eisaki, who first measured zero resistivity above 23K*

石ノ森章太郎の
超電導
講座



(La, Ba)CuO₂

石ノ森章太郎の
超電導講座

マンガ

講談社

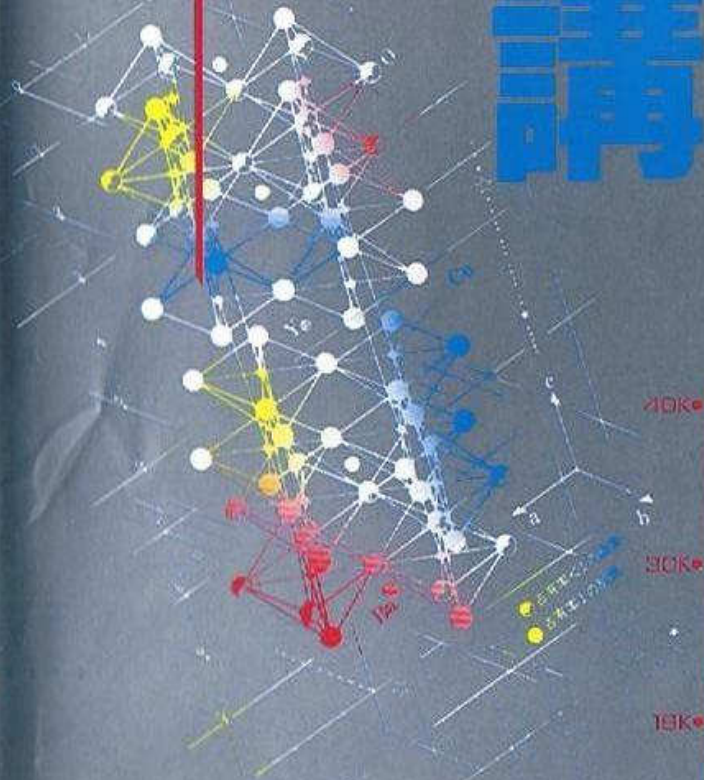
石ノ森章太郎の
マンガ
超電導
講座

マンガ

273K

125K

SUPERCONDUCTIVITY



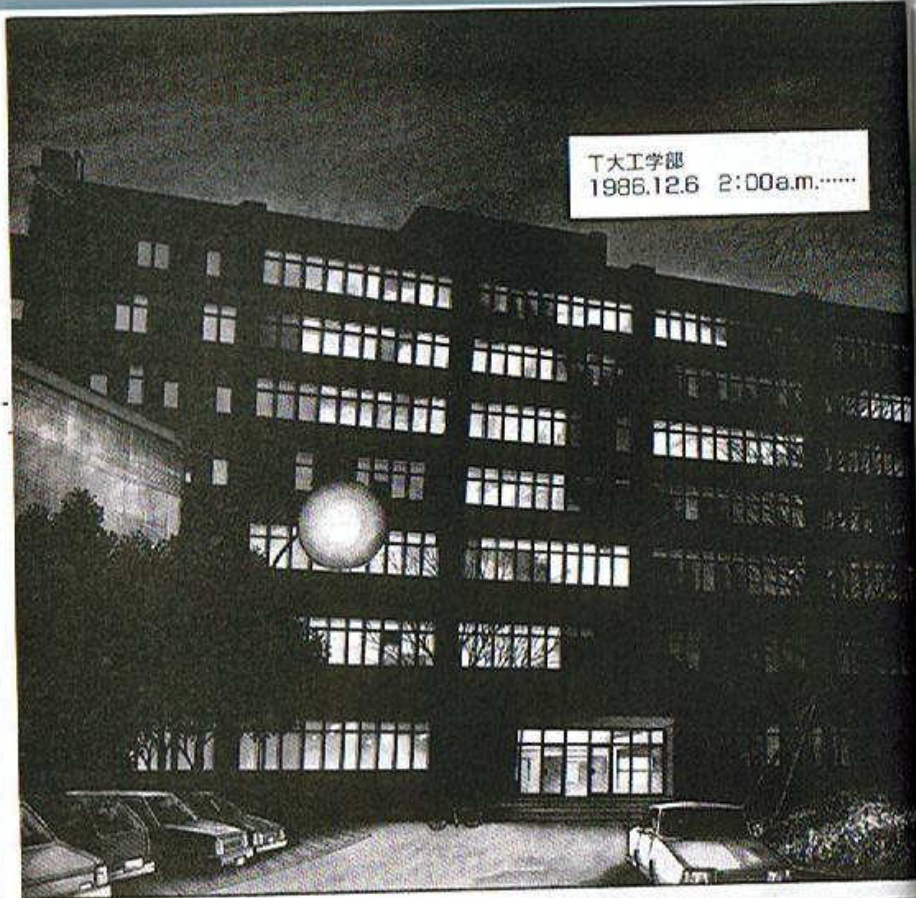
10K

30K

10K

講談社
Quark

BN4-06-177601-0 C0079 ¥1200E (0) 定価=1200円



T大工学部
1986.12.6 2:00a.m.



.....あ~あ

誕生日(12.1)までには
なんとか成果を、と
頑張ったんだが
それもダメ.....

.....おまけに
今夜はドジだ!



.....誕生日
おめでとう!

洋クン!

なにをソワソワ
しているの!?

あ、いや、その.....

ちょっと——研究室の
ことが気になって.....

今日はアナタの
誕生日なのよ!

今日一日ぐらい
研究のことを
忘れられないの!?

ごめんごデートは
みくすばしないし

アタシより研究の方が
大事みたいなんだから!

わるひ.....

超電導.....

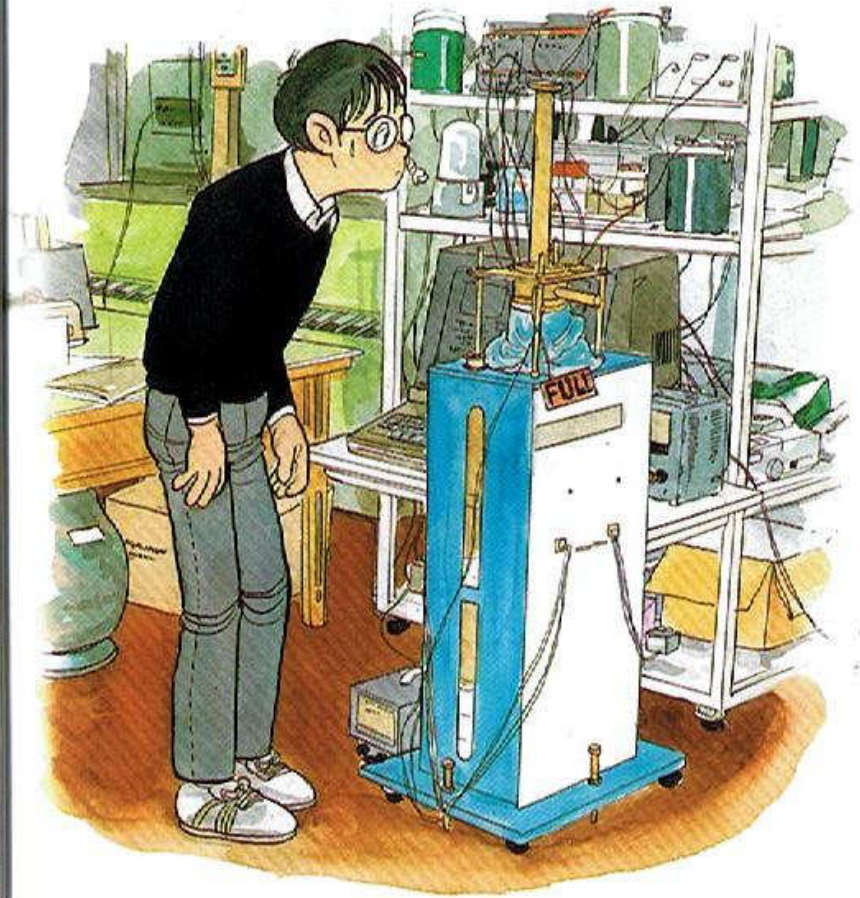
研究、研究って.....
一体なんの研究を
してるのよ!?

チョウデンドウ!?



©1995 角川書店

序章 東京発の大フィーバー



研究者たちはヒーローになった。しかし・・・技術は時間がかかる。



Cartoon books published

By Ishinomori Shoutarou

“Choudendo Kouza”

“SC lessons”

Kodansha Publ. Co. (1987)

And 20 years
have passed.
Two Problems
to be solved

高温超伝導はなぜ起きる？

現在も論争続く

20年経っても・・・むずかしい！

理論家と実験家の努力　クーパー対の存在は確認
解明できたら、ノーベル賞！

高温超伝導の課題—実用化への道

大電流が流しにくかった

材料技術の進展：技術者たちは頑張ってきた！

→日本の活躍→高電流密度超伝導線の進展

→超伝導ケーブルの実地試験

BSCCO 2223 ビスマス系線材

銀シーステープ状線材、ファインマルチ線材
繊維状酸化物超伝導線が銀に埋め込まれる



特許

断面図

3 x 0.2 mm

臨界電流

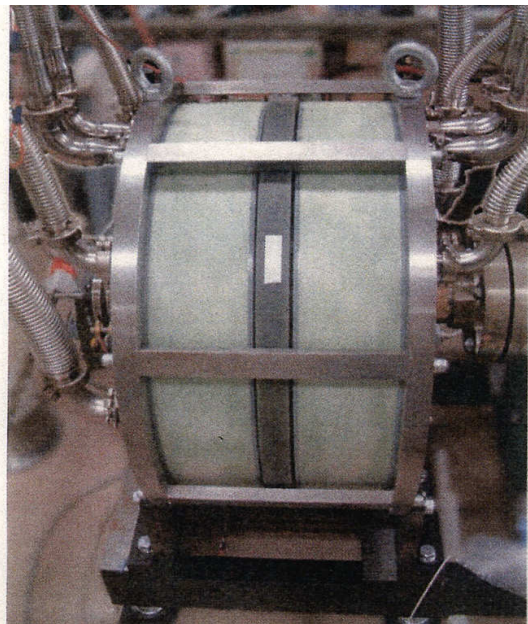
I_c : 250A に達した
(銅線なら 10A程度)

Picture from

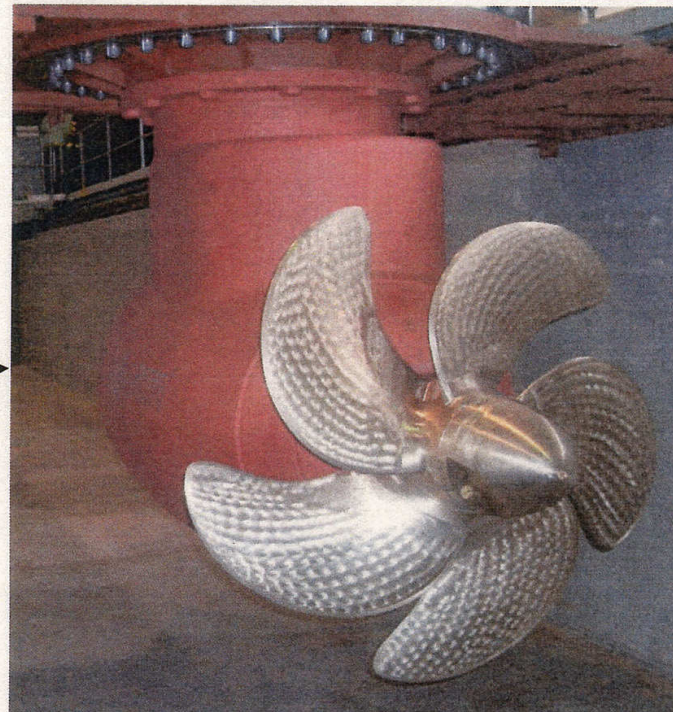
 SUMITOMO ELECTRIC



超伝導モーター・スクリュー推進船 (IHI・住友電工・福井大学)



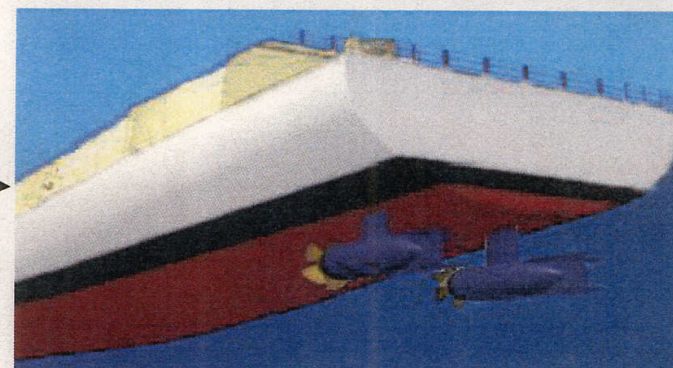
← 高温超伝導モーター
600φ × 0.6m
定格 12.5kW (過負荷 62.5kW)
× 100RPM
(液体窒素温度: 66K)



→ 超伝導モーターを内蔵した
ホット型推進装置
800φ × 2m
プロペラ径 : 1m



← 水槽での実証試験

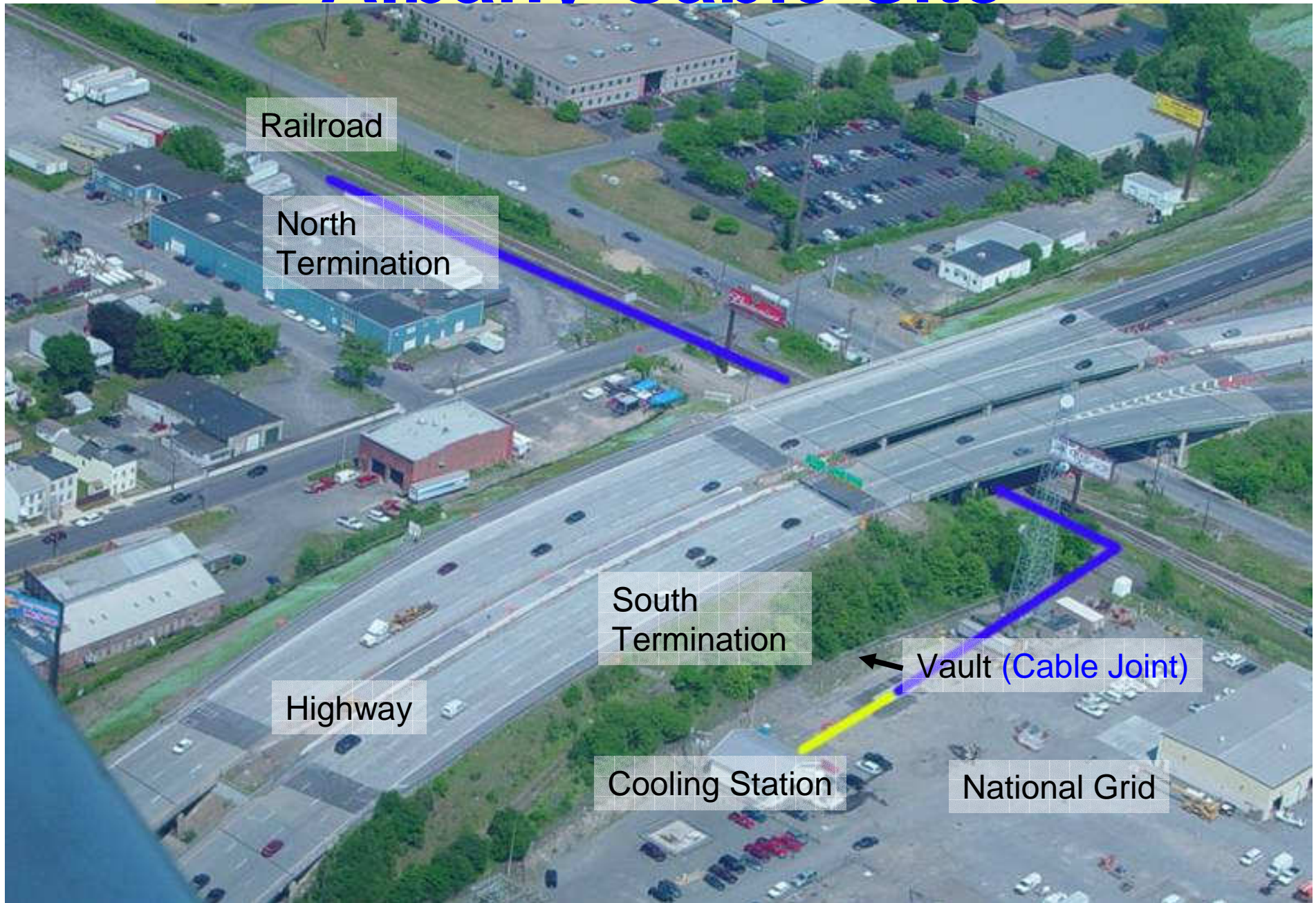


→ 超伝導モーターを実装した
船舶イメージ図



高温超伝導ケーブルの構造（住友電工）

Albany Cable Site



070501フランスパリ南郊外オルセー

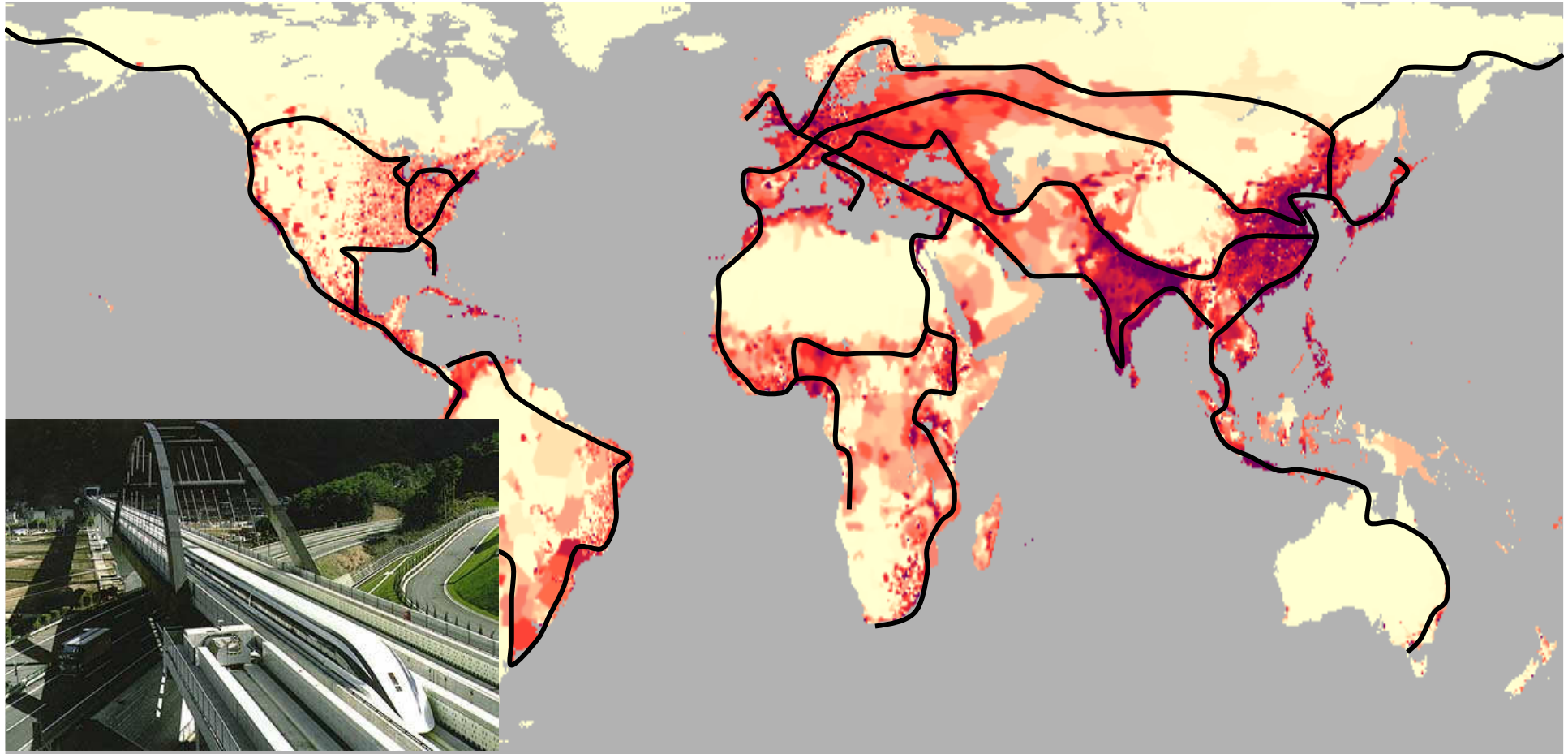


美しい空は
どこへ

超伝導ケーブル 電線地中埋設可能に



IMAGINARY MAGLEV PATHS



and Population Density Distribution

K.Kitazawa: Moscow Int. Conf. 2000, Moscow State Univ.

超伝導の活躍

“きみたちが活躍するころ”

いろいろなことを体験

まず、大学にいこう

海外も体験 2-3年が理想

学生時代でなくともいける

お金が無くともいける

大学院、ポスドク (RA制度)

研究者・技術者

好きなことを毎日できる職業

科学(サイエンス)とは

- まず自然現象をきちんと観察できること
- より深い観察(見過ごし易い！)
- それを記述できること
- 法則を作る
- 説明できる理由(メカニズム)を考える
- すべての観察を説明できるか？
- 実験
- 推理小説を書きながら読む楽しみ

実験： 超伝導体の不思議

磁石と超伝導体はどこが違う？

